# 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ中間報告

- 燃料サイクルシステム技術検討書 -

(研究報告)

## 2004年6月

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49 核燃料サイクル開発機構 技術展開部 技術協力課 電話:029-282-1122(代表) ファックス:029-282-7980 電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical Cooperation Section, Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute 4.49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

 $(\mathbb{S})$ 

#### 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ 中間報告 燃料サイクルシステム技術検討書

佐藤 浩司<sup>1)</sup> 天本 一平<sup>1)</sup> 井上 明<sup>1)\*</sup> 北島 庄一<sup>1)\*</sup> 駒 義和<sup>1)</sup> 米澤 重晃<sup>1)</sup> 高田 岳<sup>1)</sup> 藤井 敬治<sup>1)\*</sup> 中林 弘樹<sup>1)</sup> 矢野 公彦<sup>1)</sup> 藤岡 綱昭<sup>1)</sup> 樋口 達也<sup>1)</sup> 戸澤 克弘<sup>2)</sup> 吉氏 崇浩<sup>3)</sup> 丹羽 元<sup>4)</sup> 栗坂 健一<sup>4)</sup> 滑川 卓志<sup>5)</sup> 田中 健哉<sup>6)</sup> 鈴木 嘉浩<sup>5)</sup> 川口 浩一<sup>5)</sup> 小池 和宏<sup>5)</sup> 紫牟田 拓志<sup>5)\*</sup> 伊崎 誠<sup>7)</sup> 小宮山 和真<sup>8)</sup>

#### 要 旨

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ として、燃料サイクル システム(再処理と燃料製造の組み合わせ)について、革新技術等を導入して 経済性向上を図るとともに、各技術の特長を活用し低除染超ウラン元素(TRU) リサイクルによる環境負荷低減、資源の有効利用、核拡散抵抗性向上等を図っ たプラント概念を構築した。中間とりまとめとしての主要な成果は以下の通り である。

酸化物燃料について、晶析法、簡素化溶媒抽出法およびマイナーアクチニド (MA)回収技術として抽出クロマトグラフィー法を採用した先進湿式法再処理 と、粉末混合工程等を合理化した簡素化ペレット法燃料製造を組み合わせたシ ステムは、これまでの豊富な実績があり基本プロセスの技術的成立性も高い。 本システムは、抽出クロマトグラフィーの制御技術開発、低除染 TRU 燃料の製 造技術開発等の課題はあるものの、比較的早期に実用化が可能と期待される。 超臨界直接抽出法再処理は、先進湿式法の更なる経済性の向上が図れる可能性 があるが、今後更に基礎データの充足が必要である。先進湿式法再処理とゲル 化法スフェアパック燃料製造を組み合わせたシステムは、燃料製造を溶液およ び顆粒で取り扱うため微粉の飛散が少ない等の利点があるが、多量の工程廃液 を処理するため試薬回収設備や廃液処理設備の建設費が増大する。一方、酸化 物電解法再処理と振動充填法燃料製造を組み合わせたシステムは、再処理で回 収した顆粒をそのまま振動充填燃料として使える等工程の簡素化による経済性 向上が図れる可能性はあるが、MA 回収技術などの技術的成立性を左右する基礎 的な課題が多い。

金属燃料の金属電解法再処理と射出成型法燃料製造を組み合わせたシステム は、使用済燃料を用いた TRU 回収技術などの実証が必要であるが、比較的小規 模までの経済性が期待できる。導入初期に備えて、前処理技術(酸化物の金属 燃料への還元技術)も開発していく必要がある。

窒化物燃料は、基本的に先進湿式法や金属電解法が適用可能であるが、その ベースとなる窒化物燃料特有の<sup>15</sup>N 同位体濃縮・回収リサイクル、窒化転換等

i

の枢要技術開発が必要である。また、被覆粒子燃料は、その製造、集合体組立・ 解体、脱被覆等の技術開発が更に必要となる。

経済性については、大型施設として暫定的に設定した 200tHM/y 処理規模の 場合では、いずれの組み合わせケースにおいてもフェーズの燃料サイクル費 (再処理費と燃料製造費の合計)の要求値である 0.8 円/kWh を満足した。一方、 小型施設として暫定的に設定した 50tHM/y 処理規模の場合、資源重視型炉心で 要求値を概ね満足するのは金属燃料サイクルのみであったが、経済重視型炉心 では、径方向ブランケット燃料削除による平均燃焼度の向上が燃料サイクル費 の低減に寄与し概ね要求値を満足した。

- 2) 現在、富士電機システムズ(株) 発電プラント本部 原子力統括部 設計部
- (株)NESI(再処理システムグループ駐在)
- 4) 大洗工学センター システム技術開発部 FBR サイクル安全設計グループ
- 5) 大洗工学センター システム技術開発部 燃料製造システムグループ
- 6) 現在、大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室
- 7) 現在、川崎重工業(株)プラント・環境・鉄鋼カンパニー プラントビジネスセンター 原子力部
- 8) (株)ペスコ(燃料製造システムグループ駐在)
- \* 日本原子力発電(株)からの派遣者

本報告書には、電力会社9社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社による電力 共通研究の成果の一部、「核燃料サイクル開発機構と財団法人電力中央研究所との原子力の研 究開発に関する研究協力協定」に基づく共同研究の成果および電力中央研究所からの開示技術 情報、並びに、「核燃料サイクル開発機構と日本原子力研究所との間の高速増殖炉サイクルの 実用化戦略調査研究に関する研究協力取決め」に基づく共同研究の成果および日本原子力研究 所からの開示技術情報を含む。

<sup>1)</sup> 大洗工学センター システム技術開発部 再処理システムグループ

#### Feasibility Study on Commercialization of Fast Breeder Reactor Cycle Systems Interim Report of Phase

#### - Technical Study Report for Nuclear Fuel Cycle Systems -

Koji Sato<sup>1</sup>), Ippei Amamoto<sup>1</sup>), Akira Inoue<sup>1</sup>)\*, Shoichi Kitajima<sup>1</sup>)\*, Yoshikazu Koma<sup>1</sup>), Shigeaki Yonezawa<sup>1</sup>), Takeshi Takata<sup>1</sup>), Keiji Fujii<sup>1</sup>)\*, Hiroki Nakabayashi<sup>1</sup>), Kimihiko Yano<sup>1</sup>), Tsunaaki Fujioka<sup>1</sup>), Tatsuya Higuchi<sup>1</sup>), Katsuhiro Tozawa<sup>2</sup>), Takahiro Yoshiuji<sup>3</sup>), Hajime Niwa<sup>4</sup>), Kenichi Kurisaka<sup>4</sup>), Takashi Namekawa<sup>5</sup>), Kenya Tanaka<sup>6</sup>), Yoshihiro Suzuki<sup>5</sup>), Koichi Kawaguchi<sup>5</sup>), Kazuhiro Koike<sup>5</sup>), Hiroshi Shimuta<sup>5</sup>)\*, Makoto Izaki<sup>7</sup>), Kazumasa Komiyama<sup>8</sup>)

#### Abstract

As a part of the feasibility study on commercialization of fast breeder reactor cycle systems, the plant concept concerning the fuel cycle systems (combination of the reprocessing and the fuel fabrication )has been constructed to reduce their total cost by the introduction of various innovative techniques and to apply their utmost superior efficiency from such standpoints of a decrease in the environmental burden, better resource utilization and proliferation resistance improvement by the low decontamination transuranium element (TRU) recycle. This interim report of Phase describes the results of an on-going study which will cover a five-year period.

For oxide fuels, the system which combines the use of the advanced aqueous reprocessing using three main methods such as the crystallization method, the simplified solvent extraction method, and the extraction chromatography method for minor actinide (MA) recovery, as well as the simplified pelletizing fuel fabrication which rationalized a powder mixing process etc., has abundant current results and a high technical feasibility for the basic process. Though this system faces difficulties in the technical development of control technology of the extraction chromatography and the fabrication technology of low decontamination TRU fuel etc., its expected practical use is possible at an early stage. As for the super-critical direct extraction reprocessing, it is necessary to fulfill more basic data although further economical improvement of an advanced aqueous reprocessing is expected. The system which combines the advanced aqueous reprocessing and the gelation sphere packing fuel fabrication has the advantage of lesser dispersion of the fine powder due to the use of solution and granule in the fuel fabrication process. However, this system will shoulder additional cost for the reagent recovery process and the waste liquid treatment process due to need to dispose of a large bulk of process waste liquid. The system which combines the oxide electrowinning reprocessing and the vibropacking fuel fabrication process has the possibility of economical improvement if simplification of the process can be achieved. However this system has several primary problems which affect the technical feasibility of the MA recovery process etc.

In the system which combines the metal electrorefining reprocessing and the metal casting fuel fabrication process for metal fuels, high economical efficiency is generally expected of small-scale facilities, although verification of the TRU recovery process by spent fuel is required. The development of the head-end

process (reduction technology of oxide to metal ) is required for introducing the metal fuel cycle.

As for nitride fuels, specific technical developments of N-15 enrichment, recycling, and nitride conversion to the nitride fuel, etc. are reqired as the main technology, although the advanced aqueous reprocessing or the metal electrorefining reprocessing can be applied fundamentally. Besides technical developments of the fuel fabrication, assembly setting, dismantling, and decladding, etc. are required for coated particle fuels.

For economical efficiency, less than 0.8 yen/kWh which is the demand value (total of the reprocessing expense and the fuel fabrication expense) of the fuel cycle expense of phase satisfied each combination case at 200tHM/y scale provisionally set for large-scale facilities. On the other hand, only the metal fuel cycle almost satisfied the demand value in the combination case with a high breeder reactor core at 50tHM/y scale provisionally set for small-scale facilities. The combination case with a low breeder reactor core has satisfied the demand value, with improvement of the average burnup by the radial direction blanket fuel deletion contributing to the decrease of the fuel cycle expense.

<sup>1)</sup> Reprocessing System Engineering Group , System Engineering Technology Division (OEC)

<sup>2)</sup> Presently, Fuji Electric Systems Co., Ltd.

<sup>3)</sup> Nuclear Energy System Inc. (Attached to Reprocessing System Engineering Group)

<sup>4)</sup> FBR Cycle Safety Engineering Group, System Engineering Technology Division (OEC)

<sup>5)</sup> Fuel Fabrication System Engineering Group, System Engineering Technology Division (OEC)

<sup>6)</sup> Presently, Alpha-Gamma Section, Fuels and Materials Division (OEC)

<sup>7)</sup> Presently, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

<sup>8)</sup> Pesco Co., Ltd. (Attached to Fuel Fabrication System Engineering Group)

<sup>\* :</sup> attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in accordance with "the agreement about the development of a commercial fast breeder reactor cycle system".

This report includes the outcome of collaborative study between JNC and Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) in accordance with "the agreement of collaboration about the research and development of atomic energy" and the technical information offered by CRIEPI, and also the outcome of collaborative study between JNC and Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) in accordance with "the agreement of collaboration about the development of a commercial fast breeder reactor cycle system" and the technical information offered by JAERI.

### 燃料サイクルシステム技術検討書 全体構成

はじめに	• 1
------	-----

- 1. フェーズ 検討の展開と検討対象技術
- 2. 設計要求とその対応方針
- 3. 技術評価の視点および評価方法
- 4. ペレット法
- 5. 振動充填法
- 6. 射出成型法
- 7. 被覆粒子法
- 8. MA/LLFP リサイクル
- 9. 燃料製造システムの技術的総括
- 10. フェーズ の今後の進め方

第2編 再処理システム ·······420

フェーズ 検討の展開と検討対象技術
 設計要求とその対応方針

3. 再処理システム(燃料サイクルシステムを含む)の技術評価の視点

- 4. 湿式再処理法
- 5. 酸化物電解法
- 6. 金属電解法
- 7. フッ化物揮発法
- 8. ハイブリッド再処理システム
- 9. LINEX法
- 10. 燃料サイクル (燃料製造+再処理)システムの技術評価
- 11. 再処理システムの技術的総括
- 12. フェーズ の今後の進め方
- 付録1. 多面的評価向け炉心・燃料仕様

### <執筆者一覧>

第1編 燃料製造システム

滑川	卓志
田中	健哉
鈴木	嘉浩
川口	浩一
小池	和宏
紫牟田	3拓志
伊崎	_ 誠
小宮山	」  和真

第2編 再処理システム

佐藤	浩司
天木	一亚
井上北島	明 庄一
覧	五
駒	義和
米澤	重晃
高田	岳
藤井	敬治
中林	弘樹
矢野	公彦
藤岡	綱昭 達也
尸澤	克弘 崇浩
丹羽	元
栗坂	健一

## 第1編目次

1.フェーズ 検討の展開と検討対象技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1.1 フェーズ 検討の展開・・・・・	3
1.2 検討対象技術 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3
2.設計要求とその対応方針 ······	6
2.1 基本方針・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
2.2 設計要求事項・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
2.3 概念設計の進め方と設計条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
2.3.1 概念設計の進め方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
2.3.2 設計検討の着眼点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
2.3.3 設計条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
2.4 施設設計の基本的考え方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
	17
<ul> <li>3.投附計画の税点及び計画力法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	17
3.1 投例評価の税点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
3.2 計1四方法·····	18
	18
3.2.2 境境貝何評恤力法·····	19
4 ペレット法	24
<b>4.1</b> MOX 燃料に対する簡素化ペレット製造システムの検討	24
	2 <del>4</del> 25
	25
4.1.1.7 旭辺城心海来 (1)	20 50
4.1.1.2 12m計画(金字ノス)ム)···································	50
4.1.2 ジ線な燃行 イブルング ジオ (の)小心 ····································	55
4.1.2.1 Na 冷却大型が 200 C 焼俣 負添重税型が 心対応システム	55
4.1.2.2 Na 次却入空炉 200 C 焼候 経済住重税空炉心対応システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
4.1.2.3 Na /マロ 50 L 沈侯 貞塚里祝空が心対心システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
4.1.2.4 Na (24)*30 L 焼候* 経済性単税空炉心対応システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	00
4.1.2.3 PD-DI 冷却中空か 200 L 祝侯 員家里祝空か心別心システム・・・・・・・	60
	61
4.1.2.7 水冷却大型炉・200 t 規模・BWR 型炉心対応システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	63
	64
<b>4.2</b> 至117初燃料に対9るヘレット戦症ン人テムの検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	126
4.2.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	126
4.2.1.1 施設概念構築 ····································	126
4.2.1.2 技術評価 ······	129

5.振動充填法	19
5.1 ゲル化・スフェアパック燃料製造システムの検討・・・・・・・・・・・・・・・ 14	19
5.1.1 基準システム設計・・・・・ 14	19
<b>5.1.1.1</b> 施設概念構築 ······ 14	19
<b>5.1.1.2</b> 技術評価 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	6
5.1.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17	'2
5.1.3 技術開発項目・・・・・ 17	'5
5.2 酸化物電解顆粒振動充填燃料製造 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	)0
5.2.1 基準システム設計・・・・・ 20	)0
<b>5.2.1.1</b> 施設概念構築 ······ 20	)0
<b>5.2.1.2</b> 技術評価 ······ 21	3
<b>5.2.2</b> 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21	6
<b>5.2.3</b> 技術開発項目······21	8
5.3 金属電解プロセスを利用した MOX 顆粒振動充填燃料製造・・・・・・・・・・ 24	13
5.3.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・24	13
5.3.1.1 資源重視型システム概念構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
<b>5.3.1.2</b> 経済性重視型システム概念構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25	55
<b>5.3.2</b> 技術開発項目······25	59
6.射出成型法	7
6.1 基準システム設計・・・・・ 27	'8
6.1.1 施設概念構築・・・・・ 27	'8
<b>6.1.2</b> 技術評価・・・・・・	)3
<b>6.2</b> 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30	)9
<b>6.3</b> 技術開発項目・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
7. 被覆粒子法	15
7.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・34	15
7.1.1 施設概念構築・・・・・・ 34	15
<b>7.1.2</b> 技術評価・・・・・・ 35	55
<b>7.2</b> 技術開発項目・・・・・・	57
8 . MA/FP リサイクル ····· 38	34
<b>8.1</b> MA リサイクルに伴う燃料製造システムへの影響検討 ・・・・・・・・・・・・ 38	34
<b>8.2</b> FP リサイクルシステムの検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38	39
<b>8.2.1</b> FP ターゲット集合体製造施設構想の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38	39
8.2.2 炉心燃料集合体製造施設構想の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39	)3
<b>9</b> .燃料製造システムの技術的総括······40	)7
9.1 湿式法の技術見通し(簡素化ペレット、スフェアパック)・・・・・・・・・・ 40	)7

9.2	乾式法の	技術見通し(バ	イパック(酸	化物電解法、	金属電解法)、	射出成型) · · ·	409
10.	フェーズ	の今後の進め	方				418

## **第2編目次**

1. フェーズ 検討の展開と検討対象技術 420
1.1 フェーズ I における主要な成果
1.2 フェーズ II における設計検討の展開422
2. 設計要求とその対応方針
2.1 基本方針
2.2 設計要求事項429
2.2.1 全般
2.2.2 安全性
2.2.3 経済性
2.2.4 環境負荷低減性
2.2.5 資源有効利用性
2.2.6 核拡散抵抗性
2.2.7 運転・保守補修性
2.2.8 技術的成立性
2.3 設計条件と進め方
2.3.1 設計検討の着眼点と進め方434
2.3.2 設計条件
2.4 設計要求への対応
2.4.1 全般
2.4.2 安全性
2.4.3 経済性
2.4.4 環境負荷低減性456
2.4.5 資源有効利用性456
2.4.6 核拡散抵抗性457
2.4.7 運転・保守補修性
2.4.8 技術的成立性457
3. 再処理システム (燃料サイクルシステムを含む)の技術評価の視点460
3.1 評価項目
4. 湿式再処理法
4.1 湿式再処理法の概要
4.2 超臨界直接抽出法
4.2.1 施設概念構築
4.2.2 設計の評価・・・・・・485
4.3 Am および Cm 回収技術のプロセス設計 506
4.3.1 SETFICS 法 506
4.3.2 抽出クロマトグラフィー
4.3.3 アミン抽出法・・・・・・510

	4.4 代替技術の評価	519
	4.4.1 先進湿式法における Am および Cm 回収工程	519
	4.4.2 先進湿式法の代替技術である超臨界直接抽出法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	521
	4.5 リファレンスシステムの設計(酸化物燃料対応)	526
	4.5.1 施設概念構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	526
	4.5.2 技術評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	539
	4.6 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	586
	4.6.1 増殖比の効果	586
	4.6.2 燃料組成変動時の影響	588
	4.6.3 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方	589
	4.6.4 水冷却炉検討	591
	4.6.5 FP の回収工程に関する検討	593
	4.6.6 Cm 遅延サイクルシステム技術	596
	4.6.7 Sr、Cs 分離後遅延処分に対する影響評価	598
	4.7 窒化物燃料への適用(被覆粒子燃料、ペレット燃料対応)	624
	4.7.1 検討の要点	624
	4.7.2 先進湿式リファレンスプロセスの適用	625
	4.7.3 経済性評価	630
	4.7.4 廃棄物発生評価	630
	4.7.5 開発課題	631
	4.7.6 技術的成立性評価	634
	4.8 技術開発項目	641
	4.8.1 先進湿式法 ( NEXT 法 )	641
	4.8.2 代替補完技術	643
5.	. 酸化物電解法	647
	5.1 酸化物電解法の概要	647
	5.2 リファレンスシステムの設計(酸化物燃料対応)	648
	5.2.1 施設概念構築	648
	5.2.2 技術評価	665
	5.3 多様な燃料サイクルシナリオへの対応	709
	5.3.1 増殖比の効果	709
	5.3.2 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方	710
	5.3.3 FP 回収の検討 ····································	710
	5.3.4 MA 回収代替技術の検討 ····································	712
	5.3.5 多面的評価回け炉心・燃料仕様における再処理システムの評価	713
<b>c</b>	5.4 技術開発坦目 ····································	720
6.	. 金属電解法	723
	<b>6.1</b> 金属電解法の概要 ····································	723
	<b>6.2</b> リファレンスシステムの設計(金属燃料対応)····································	728
	6.2.1 施設概念構築	728

6.2.2 技術評価
6.3 酸化物燃料への適用802
6.3.1 施設概念構築
6.3.2 技術評価
6.4 窒化物燃料への適用(ペレット燃料対応)845
6.4.1 施設概念構築
6.4.2 技術評価
6.5 多様なサイクルシナリオへの対応
6.5.1 増殖比の効果
6.5.2 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方875
6.5.3 FP 回収の検討877
6.5.4 多面的評価向炉心・燃料仕様における再処理システム評価878
6.6 技術開発項目
7. フッ化物揮発法
7.1 フッ化物揮発法の検討経緯
7.2 フェーズ におけるフッ化物揮発法のシステム設計研究の概要 902
7.3 課題への対応
7.3.1 これまでの対応状況909
7.3.2 フェーズ フッ化法と Fluorex 法との比較
7.4 本年度の実施内容および結果
7.4.1 実施内容
7.4.2 検討結果
7.5 まとめと今後の課題
8. ハイブリッド再処理システム
8.1 国内外の動向とハイブリッド再処理システムの検討933
9. LINEX 法
9.1 施設概念構築
9.1.1 プロセス概念936
9.1.2 機器の検討
9.2 技術評価
10. 燃料サイクル (燃料製造 + 再処理) システムの技術評価945
10.1 FBR サイクル候補概念の多面的評価945
10.1.1 目的
10.1.2 多面的評価のためのデータ
10.1.3 算定方法
10.1.4 算定結果
10.2 再処理システムの処理規模と経済性959
10.2.1 湿式再処理システムの検討
10.2.2 酸化物電解法再処理システムの検討
10.2.3 処理規模と経済性の評価

10.3 燃料サイクルシステムの経済性評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9	<b>)65</b>
10.4 燃料サイクルシステムの資源有効利用性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	<b>}70</b>
10.4.1 先進湿式法+ペレット法(酸化物燃料対応)9	<b>}70</b>
10.4.2 先進湿式法 + 振動充填法(酸化物燃料対応)9	<b>}70</b>
10.4.3 酸化物電解法 + 振動充填法(酸化物燃料対応)9	<b>}70</b>
10.4.4 金属電解法 + 射出成型法(金属燃料対応)9	971
10.4.5 金属電解法 + 振動充填法 ( 酸化物燃料対応 )9	<b>)</b> 71
11. 再処理システムの技術的総括	<b>)72</b>
11.1 評価結果の概要	<b>)72</b>
11.2 湿式法の技術見通し・・・・・9	<b>)80</b>
11.2.1 NEXT 法(先進湿式法)9	<b>)80</b>
11.2.2 超臨界直接抽出法	<b>)8</b> 1
11.2.3 NEXT 法(先進湿式法)( 窒化物燃料対応)9	<b>)82</b>
11.3 乾式法の技術見通し9	<b>)8</b> 3
11.3.1 酸化物電解法(酸化物燃料対応)	<b>)8</b> 3
11.3.2 金属電解法(金属燃料対応)	<b>)8</b> 3
11.3.3 金属電解法(酸化物燃料対応)	<b>)84</b>
11.3.4 金属電解法(窒化物燃料対応)9	<b>)84</b>
11.3.5 フッ化物揮発法(酸化物燃料対応および窒化物燃料対応)9	<b>)84</b>
11.3.6 LINEX 法(窒化物燃料対応)	<b>)85</b>
11.4 その他再処理技術	<b>)86</b>
11.4.1 ハイブリッド再処理技術9	<b>)86</b>
12. フェーズ の今後の進め方	<b>)</b> 87
付録 1. 多面的評価向け炉心・燃料仕様	<del>)</del> 88

### 第1編 表目次

表1.1.1	フェーズ の燃料製造システム設計・評価で対象とする燃料形態と種類 ・・・・	5
表2.3.1	炉心の基本仕様(燃料製造システム検討における基準炉心) ・・・・・・・・・	12
表2.3.2	酸化物燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
表2.3.3	窒化物燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
表2.3.4	金属燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
表2.3.5	窒化物被覆粒子燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 ・・・・・・・・・・・	16
表3.2.1	燃料製造単価の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
表3.2.2	燃料製造単価評価条件一覧 ·····	22
表 3.2.3	建設費区分表 ······	23
表 4.1.1	燃料重量組成(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
表 4.1.2	燃料の基本仕様(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
表 4.1.3	臨界安全評価結果 ······	69
表 4.1.4	崩壊熱による温度計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
表 4.1.5	設備必要台数(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
表 4.1.6	分析項目表 ·····	72
表 4.1.7	分析方法一覧表 ·····	73
表 4.1.8	ライン構成検討結果(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
表 4.1.9	保守頻度設定根拠 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	75
表 4.1.10	主工程設備台数 ·····	76
表 4.1.11	建設費 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	77
表 4.1.12	操業費 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	77
表4.1.13	燃料製造単価 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	78
表4.1.14	通常運転時の固体廃棄物発生量(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・	79
表4.1.15	廃止措置時の固体廃棄物発生量(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・	79
表4.1.16	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却大型炉・200 t 規模・資源重視型炉心)	
		80
表 4.1.17	ライン構成検討結果(処理規模 200t・資源重視型炉心)・・・・・・・・・・・	81
表 4.1.18	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却大型炉・200 t 規模・経済性重視型炉心	)
		82
表 4.1.19	ライン構成検討結果(処理規模 200t・経済性重視型炉心)・・・・・・・・・・	83
表 4.1.20	通常運転時の固体廃棄物発生量(Na 冷却大型炉・200 t 規模・経済性重視型炉	心)
		84
表 4.1.21	廃止措置時の固体廃棄物発生量(Na 冷却大型炉・200 t 規模・経済性重視型炉	心)
		84
表 4.1.22	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却大型炉・50t 規模・資源重視型炉心)	85
表 4.1.23	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却中型炉・50t 規模・資源重視型炉心)	86
表 4.1.24	ライン構成検討結果(処理規模 50t・資源重視型炉心)・・・・・・・・・・・	87

表 4.1.25	通常運転時の固体廃棄物発生量	
	(Na 冷却大型炉/中型炉・50t規模・資源重視型炉心) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
表 4.1.26	廃止措置時の固体廃棄物発生量	
	(Na 冷却大型炉/中型炉・50t規模・資源重視型炉心) ・・・・・・・・・・・	88
表4.1.27	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却大型炉・50t 規模・経済性重視型炉心)	
		89
表4.1.28	燃料の基本仕様と必要生産量(Na 冷却中型炉・50t 規模・経済性重視型炉心)	
		90
表4.1.29	ライン構成検討結果(処理規模 50t・経済性重視型炉心)・・・・・・・・・・	91
表 4.1.30	通常運転時の固体廃棄物発生量	
	(Na 冷却大型炉/中型炉・50t規模・経済性重視型炉心) ・・・・・・・・・・	92
表 4.1.31	廃止措置時の固体廃棄物発生量	
	(Na 冷却大型炉/中型炉・50t規模・経済性重視型炉心) ・・・・・・・・・・	92
表 4.1.32	燃料の基本仕様と必要生産量 ( Pb-Bi 冷却中型炉・200t 規模・資源重視型炉心	)
		93
表 4.1.33	ライン構成検討結果(Pb-Bi 冷却・資源重視型炉心)・・・・・・・・・・・・・・・・・	94
表 4.1.34	通常運転時の固体廃棄物発生量 ( Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・資源重視型炉	心)
		95
表 4.1.35	廃止措置時の固体廃棄物発生量 ( Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・資源重視型炉	心)
		95
表 4.1.36	燃料の基本仕様と必要生産量(Pb-Bi 冷却中型炉・200t 規模・経済性重視型炉	心)
		96
表 4.1.37	ライン構成検討結果(Pb-Bi 冷却・経済性重視型炉心)・・・・・・・・・・・・	97
表 4.1.38	通常運転時の固体廃棄物発生量	
	(Pb-Bi 冷却中型炉・200t規模・経済性重視型炉心) ・・・・・・・・・・・・	98
表 4.1.39	廃止措置時の固体廃棄物発生量	
	(Pb - Bi 冷却中型炉・200t 規模・経済性重視型炉心)・・・・・・・・・・・・・	98
表 4.1.40	炉心主要諸元と炉心特性(水冷却炉)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
表 4.1.41	燃料の基本仕様と必要生産量(水冷却大型炉・200 t 規模・BWR 炉心)・・・・ 1	00
表 4.1.42	ライン構成検討結果(処理規模 200t・水冷却炉心)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	01
表 4.1.43	通常運転時の固体廃棄物発生量(水冷却大型炉・200t規模・BWR 炉心)・・・1	02
表 4.1.44	廃止措置時の固体廃棄物発生量(水冷却大型炉・200t規模・BWR 炉心)・・・1	02
表 4.1.45	技術開発項目	03
表 4.2.1	燃料の基本仕様と必要生産量(Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・資源重視型炉心)	)
	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	36
表 4.2.2	燃料の基本仕様と必要生産量(Pb-Bi 冷却中型炉・200t 規模・経済性重視型炉心	ር v
	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	37
表 4.2.3	ライン構成検討結果(窒化物燃料) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1	38
表 4.2.4	主工程設備台数 1	39
表4.2.5	建設費 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	40

141
00t 規模・資源重視型炉心)
142
0t 規模・経済性重視型炉心)
142
200 t 規模・資源重視型炉心 )
143
0 t 規模・経済性重視型炉心 )
143
144
178
179
180
181
182
183
184
184
数設定 ・・・・・ 185
186
187
220
221
222
223
224
225
225
226
226
227
261
262
262
263
263

表 6.1.3	必要機器数(基準システム)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	315
表 6.1.4	分析項目リスト ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	316
表 6.1.5	保守方式選択における基本的考え方 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	317
表 6.1.6	主工程設備台数 ······	318
表 6.1.7	建設費内訳 ·····	319
表 6.1.8	操業費内訳 ·····	319
表 6.1.9	燃料製造単価および発電単価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	319
表 6.1.10	通常運転時の固体廃棄物発生量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	320
表 6.1.11	廃止措置時の固体廃棄物発生量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	320
表 6.2.1	炉心設計の相違点(燃料製造システムに関係する項目) ・・・・・・・・・・	321
表 6.2.2	燃料設計の相違点(燃料製造システムに関係する項目) ・・・・・・・・・・	321
表 6.2.3(2	1) 基準燃料と資源重視型燃料および経済性重視型燃料の諸元の比較	
	(射出成型体・スラグ仕様)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	322
表 6.2.3(2	2) 基準燃料と資源重視型燃料および経済性重視型燃料の諸元の比較	
	(成分調整・射出成型工程に係る仕様)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	322
表 6.2.4	年間燃料製造量(資源重視型システム: 50tHM/y プラント) ·····	323
表 6.2.5	必要機器数 ( 資源重視型システム: 50tHM/y プラント ) ・・・・・・・・・・・	323
表 6.2.6	年間燃料製造量(経済性重視型システム: 50tHM/y プラント) ·····	324
表 6.2.7	必要機器数(経済性重視型システム: 50tHM/y プラント)	324
表 6.3.1	技術開発項目	325
表7.1.1	燃料製造システム設計データ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	359
表7.1.2	安全設計に係る基本的考え方	360
表7.1.3	臨界安全上の機器制限寸法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	361
表7.1.4	機器寸法比較 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	362
表 7.1.5	被覆層生成反応計算(1日当り)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	363
表7.1.6	ユーティリティ供給量および排出物発生量まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・	364
表7.1.7	必要機器数の検討	365
表7.1.8	窒化物被覆粒子燃料製造に必要な技術開発項目 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	368
表 7.1.9	建設費内訳 ·····	369
表 7.1.10	操業費内訳 ······	369
表 7.1.11	燃料製造単価および発電単価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	369
表 7.1.12	保守・補修に伴う発生固体廃棄物量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	370
表 7.1.13	燃料製造時の検査に伴う発生廃棄物量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	371
表 7.1.14	廃止措置時発生固体廃棄物量 ······	372
表 7.1.15	技術開発項目 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	373
表8.1.1	MOX 燃料および金属燃料集合体の炉心燃料集合体仕様(基準システム)···	386
表8.2.1	FP 核変換炉心の主要炉心特性(Na 冷却 MOX 大型炉心) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	396
表8.2.2	Na 冷却 MOX 大型炉における FP ターゲット集合体仕様 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	397
表8.2.3	FP ターゲット集合体の諸元 ・・・・・	398
表 8.2.4	年間製造量(FP ターゲット集合体製造施設) ・・・・・・・・・・・・・・・・・	399

表 8.2.5(1) Tc ターゲット集合体製造必要機器数 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	399
表 8.2.5(2) Cul ターゲット集合体製造必要機器数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	399
表 8.2.6 建設費内訳(FP ターゲット集合体製造施設) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	400
表 8.2.7 操業費内訳(FP ターゲット集合体製造施設) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	400
表 8.2.8 集合体製造単価 (FP ターゲット集合体製造施設 ) ・・・・・・・・・・・・・・・	400
表8.2.9 通常運転時の固体廃棄物発生量(FP ターゲット集合体製造施設) ·······	401
表 8.2.10 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (FP ターゲット集合体製造施設) ・・・・・・	401
表8.2.11 燃料の基本仕様と必要生産量	
(フェーズ II 中間時設定・Na 冷却大型炉・200t規模・FP 核変換炉心	
燃料製造施設) • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	402
表8.2.12 ライン構成検討結果(処理規模200t・FP核変換炉心燃料製造施設) ····	403
表 8.2.13 主工程設備台数 (FP 核変換炉心燃料製造施設 ) ······	404
表 8.2.14 建設費内訳 (FP 核変換炉心燃料製造施設) ······	405
表 8.2.15 操業費内訳 (FP 核変換炉心燃料製造施設) ······	405
表 8.2.16 燃料製造単価 (FP 核変換炉心燃料製造施設 ) ······	405
表8.2.17 通常運転時の固体廃棄物発生量(FP核変換炉心燃料製造施設) ·······	406
表8.2.18 廃止措置時の固体廃棄物発生量(FP核変換炉心燃料製造施設) ·······	406
<b>表 9.1</b> フェーズ 中間取りまとめにおける燃料製造システム概念設計結果のまとめ	
(簡素化ペレット、スフェアパック) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	413
表9.2 フェーズ 中間取りまとめにおける乾式燃料製造システム概念設計結果のまとめ	
(バイパック、射出成型)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	416

### 第2編 表目次

1.2.1	フェーズ における燃料形態と再処理システムの検討対象425
2.2.1	燃料サイクルシステムの設計要求に基づく設計目標433
2.3.1	燃料の種類と処理技術
2.3.2	炉心の基本仕様
2.3.3	主な炉心特性
2.3.4	集合体および燃料要素の仕様
2.3.5	領域平均燃焼度 (MWd/t)
2.3.6	集合体最大燃焼度 (MWd/t)
2.3.7	使用済燃料の組成(新燃料 1t 当たり)
2.3.8	再処理製品の仕様と回収率
2.3.9	内包する放射能による廃棄物分類(FS評価上の暫定値)446
2.3.10	発生の由来による廃棄物分類
2.3.11	わが国における放射性廃棄物の分類と処分方策との対比447
2.3.12	施設設計の条件
2.3.13	区域の区分
2.3.14	窒化物 TiN 被覆粒子燃料の仕様
2.3.15	使用済燃料組成(増殖比 1.05、新燃料 1t 当たり)450
2.3.16	LWR 使用済燃料組成451
2.4.1	法令・指針類
3.1.1	再処理単価算出に用いる諸数値(設定値)475
4.2.1	超臨界直接抽出法を用いた再処理プラントの回収率491
4.2.2	廃棄物発生量の比較(50tHM/y) ······491
4.2.3	主要な塔の設計条件
4.2.4	各設備の主要機器と槽容量の比較
4.2.5	超臨界直接抽出法の技術的成立性
4.2.6	超臨界直接抽出法の AT 事象候補
4.2.7	超臨界直接抽出法の BAT 事象候補495
4.2.8	温度上昇計算前提条件
4.3.1	検討の対象とした Am および Cm 回収プロセス
4.3.2	SETFICS および TRUEX 工程の概要
4.4.1	分離技術の選択における比較評価の方法
4.4.2	Am および Cm 回収プロセスで発生する廃棄物量の見積もり
	(200tHM/y 規模の施設の場合)
4.4.3	Am および Cm 回収プロセスの設備費用の見積もり(相対値、
	200tHM/y 規模の施設の場合 )
4.4.4	Am および Cm 回収技術の選択における比較評価の結果 525
4.5.1	各元素の製品・環境放出・廃棄物への移行率
4.5.2	先進湿式リファレンスプロセスの回収率(200tHM/y)559
	1.2.1 2.2.1 2.3.1 2.3.2 2.3.3 2.3.4 2.3.5 2.3.6 2.3.7 2.3.8 2.3.9 2.3.10 2.3.11 2.3.12 2.3.13 2.3.14 2.3.12 2.3.13 2.3.14 2.3.15 2.3.16 2.4.1 3.1.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 4.2.6 4.2.7 4.2.8 4.3.1 4.3.2 4.4.1 4.4.2 4.4.3 4.4.4 4.5.1 4.5.2

表	4.5.3	廃棄物への移行率
表	4.5.4	廃棄物発生量(200tHM/y)
表	4.5.5	主な試薬・ユーティリティの使用量
表	4.5.6	各建屋のセルおよびセル相当室一覧
表	4.5.7	主建屋のセル体積および建屋の全体規模
表	4.5.8	平常時被ばく評価において想定した主要な核種の大気放出放射能…563
表	4.5.9	液体状の放射性物質を扱う工程での異常事象
表	4.5.10	非密封の固体状の放射性物質を扱う工程での異常事象564
表	4.5.11	先進湿式法再処理プラントの建設費の見積もり(200tHM/y の
		規模の施設)
表	4.5.12	先進湿式法再処理プラントの運転経費の見積もり(200tHM/y の
		規模の施設)
表	4.5.13	湿式プラントの運転要員構成
表	4.5.14	六ヶ所再処理施設における推定年間放出量565
表	4.5.15	解体一次廃棄物発生量
表	4.5.16	NEXT プロセスの技術的成立性
表	4.6.1	各処理モードにおける母液の組成と Pu 富化度 607
表	4.6.2	各処理モードで運転した場合の U 晶析物と U-Pu 溶液の年間回収量 607
表	4.6.3	軽水炉燃料受入れ時の化学処理設備への影響評価608
表	4.6.4	前処理設備変更による再処理単価への影響608
表	4.6.5	前処理工程の2系列化および晶析収率上昇による再処理単価への
		影響
表	4.6.6	水冷却炉の主要緒元と炉心特性609
表	4.6.7	水冷却炉燃料の組成
表	4.6.8	分離回収の対象とする元素610
表	4.6.9	Am(III) の酸化を利用した Cm との分離技術の例610
表	4.6.10	再処理工程の移行率設定
表	4.6.11	MA 分離工程の移行率設定
表	4.6.12	Sr、Cs 分離工程の移行率設定611
表	4.6.13	シナリオ1の各ガラス固化体制限因子におけるガラス固化体本数の
_		評価結果
表	4.6.14	Sr、Cs 分離施設の建設費および年間運転経費の概算結果 612
表	4.6.15	Sr、Cs 廃液貯蔵施設の建設費および年間運転経費の概算結果612
表	4.6.16	ガラス固化体中間貯蔵施設の建設費および年間運転経費の概算結果
+		
表	4.6.17	合ンテリオにおける経済性評価結果
表	4.6.18	
表	4.7.1	至化物 彼 復 粒 子 燃料 再処 埋 の 技 術 的 成 立 性 評価
表	4.8.1	湿式再処埋システムにおける技術課題の整理 ········646
表	5.2.1	谷丄桂の移行率設定(1/2)

表	5.2.2	各工程の移行率設定(2/2)
表	5.2.3	物質収支評価結果(1日当たりの平均収支) 682
表	5.2.4	物質収支から評価した各製品への HM 回収率 683
表	5.2.5	物質収支から評価した各製品への FP 混入率 683
表	5.2.6	処分廃棄体発生量(プロセス廃棄物)
表	5.2.7	セル内機器交換品
表	5.2.8	主な機器の概略仕様
表	5.2.9	主要機器台数
表	5.2.10	セル容積評価結果
表	5.2.11	主な試薬・ユーティリティ686
表	5.2.12	建屋容積評価結果686
表	5.2.13	核的制限値の評価
表	5.2.14	酸化物電解法再処理システムで想定される異常事象と設計対応(1/2)
表	5.2.15	酸化物電解法再処理システムで想定される異常事象と設計対応(2/2)
表	5.2.16	被ばく評価のための共通データ
表	5.2.17	「電解装置内溶融塩の漏洩」事象の概算被ばく評価691
表	5.2.18	「絞り電解回収物中 TRU 金属の火災」事象の概算被ばく評価 691
表	5.2.19	運転に関わる人員
表	5.2.20	解体一次廃棄物発生量
表	5.2.21	酸化物電解法に関する技術的成立性評価(1/2)694
表	5.2.22	酸化物電解法に関する技術的成立性評価(2/2)695
表	5.3.1	MOX 軽水炉燃料対応酸化物電解法システムの物質収支評価
		(1日当たりの平均収支)
表	5.3.2	多面的評価向経済炉心対応酸化物電解法システムの物質収支評価
		(1 日当たりの平均収支)
表	5.3.3	多面的評価向経済炉心対応酸化物電解法システムに必要な主要機器台数
表	5.4.1	酸化物電解法における技術開発項目
表	6.2.1	金属電解法の元素挙動(炉心燃料処理時)
表	6.2.2	金属電解法の各元素の製品・環境放出・廃棄物への移行率 764
表	6.2.3	金属燃料の金属電解法による再処理製品と U, TRU 回収率(38tHM/年)
表	6.2.4	金属燃料リサイクルプラント(38tHM/年)の主な核種の 放射性
		廃棄物発生量/放出量と六ヶ所再処理施設の放出量
表	6.2.5	金属燃料リサイクルプラントの主な廃棄物量
表	6.2.6	主要な機器の概略仕様( 金属燃料リサイクルプラントの規模 38 t HM/年 )
表	6.2.7	38tHM/年規模の金属燃料リサイクルプラントのセル容積769

表	6.2.8	主な供給試薬、ユーティリティの使用量
表	6.2.9	38tHM/年規模の金属燃料リサイクルプラントの各建屋容積770
表	6.2.10	金属電解法再処理システムの電解精製槽・陰極処理装置で想定される
		異常事象と設計対応
表	6.2.11	大型 8 極電解精製槽の臨界解析評価例
表	6.2.12	平常時被ばく評価において想定した主要な核種の大気放出放射能…773
表	6.2.13	工程内における物質の出入り、エネルギーの出入りおよび位置の
		変化に関する変動項目
表	6.2.14	物質、エネルギー等の変動に直接関係する異常事象発生項目 774
表	6.2.15	事象の進展シナリオの一覧(1/2)
表	6.2.16	事象の進展シナリオの一覧(2/2)
表	6.2.17	運転に関わる人員
表	6.2.18	解体一次廃棄物発生量
表	6.2.19	主要な設備の技術的成立性の評価
表	6.3.1	使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量824
表	6.3.2	再処理製品の年間製造量
表	6.3.3	セル内機器交換品
表	6.3.4	酸化物燃料金属電解法の主要機器
表	6.3.5	主要機器のデータ表
表	6.3.6	貯蔵バッファ容量の評価結果
表	6.3.7	セル容積の比較
表	6.3.8	ユーティリティ使用量
表	6.3.9	施設体積の比較
表	6.3.10	運転に関わる人員
表	6.3.11	解体一次廃棄物発生量
表	6.3.12	酸化物燃料の金属電解法の技術的成立性の評価832
表	6.4.1	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の主要な廃棄物量859
表	6.4.2	窒化物燃料金属電解法の 50tHM/y プラントの主要機器仕様859
表	6.4.3	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)主要セル、建屋の容積
表	6.4.4	窒化物燃料リサイクルプラントの経済性概略評価 ·······860
表	6.4.5	主要な設備の技術的成立性の評価
表	6.5.1	PWR 高燃焼度 MOX 燃料仕様884
表	6.5.2	使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量 884
表	6.5.3	軽水炉 MOX 燃料を再処理したときの再処理製品の年間製造量 885
表	6.5.4	軽水炉 MOX 燃料を再処理したときのプロセス廃棄物量885
表	6.5.5	現行の再処理システム(酸化物燃料の金属電解法)による
		I,Cs,Tc,Sr の移行率
表	6.5.6	使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量 886
表	6.5.7	再処理製品の年間製造量

表	6.5.8	多面的評価向炉心からの使用済燃料を再処理したときのプロセス
		廃棄物量
表	6.5.9	現行の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および FP
		含有量(38t/y) ······888
表	6.5.10	資源重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および
		FP 含有量(50t/y)888
表	6.5.11	経済重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および
		FP 含有量(38t/y) ······888
表	6.5.12	再処理製品中の HM および FP 含有量(資源重視型)889
表	6.5.13	人工鉱物固化体発生量の比較
表	6.5.14	再処理製品中の HM および FP 含有量(経済重視型)889
表	6.6.1	金属燃料金属電解法の技術開発項目
表	7.3.1	フェーズ フッ化法と Fluorex 法の装置等比較 913
表	9.1.1	LINEX 法基本プロセス(日本原子力研究所開発オリジナル)938
表	9.1.2	改良 LINEX 法基本プロセス(抽出器、ゼオライトカラム利用)…939
表	9.1.3	LINEX 法システムと金属電解法利用システムとの主要機器の
		物量比較 (プラント規模 50tHM/年ベース)940
表	10.1.1	多面的評価対象の FBR サイクル候補概念954
表	10.1.2	各ケースにおける修繕費率および消耗品費率955
表	10.1.3	各候補概念の主要データ比較(大規模プラント)956
表	10.1.4	各候補概念の主要データ比較(小規模プラント)957
表	10.2.1	積算対象機器の分類
表	10.2.2	再処理単価を算出したシステムの概要963
表	10.2.3	各処理規模において評価したユニット(セル)数963
表	10.3.1	燃料サイクルシステムの評価ケース(リファレンスシステム仕様)
表	10.3.2	燃料サイクルシステムの評価ケース(多面的評価向仕様)966
表	10.3.3	燃料サイクルシステムの経済性(リファレンスシステム仕様)967
表	10.3.4	燃料サイクルシステムの経済性(多面的評価向仕様)・・・・・・・・・967
表	11.1.1	再処理システム / 設計要求に対する技術評価のまとめ 973
表	11.1.2	湿式再処理システムの技術評価 (1/3)
表	11.1.3	湿式再処理システムの技術評価 (2/3)
表	11.1.4	湿式再処理システムの技術評価 (3/3)
表	11.1.5	乾式再処理システムの技術評価 (1/3)
表	11.1.6	乾式再処理システムの技術評価 (2/3)
表	11.1.7	乾式再処理システムの技術評価 (3/3)

### 第2编 付録表目次

付表	1.1	評価対象ケースと炉心・燃料仕様
付表	1.2	炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース1~11 除3:Na
		大型 MOX )
付表	1.3	主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 1~11 除 3 ) 990
付表	1.4	集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 1~11 除 3 )
付表	1.5	領域平均燃焼度(MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース1~11 除3)
付表	1.6	炉心概念の主要な諸元と炉心特性(多面的評価向仕様/ケース3:LLFP)
付表	1.7	集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース3) 993
付表	1.8	炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 12、13:Na 大型金属)
付表	1.9	主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 12、13)
付表	1.10	集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 12、13)
付表	1.11	領域平均燃焼度(MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 12、13)
15 20		996
付表	1.12	炉心の基本什様(多面的評価向什様/ケース 14、15:Na 中型 MOX)
13.60		
付表	1.13	
付表	1 1 4	
13.65		
付表	1 15	領域平均燃焼度(MW/d/t) (多面的評価向仕様/ケース 14 15)
1320	1.10	
付表	1 16	
1112	1.10	
仕主	1 17	
门衣	1.17	土な $r$ 心行住(夕面的計画问仕 $k/7$ 一入10、17)1000 集合体な上び燃料再表の仕様(夕面的評価向仕様/ $r_{-}$ フ16、17)
11] 77	1.10	朱山体のよび燃料安系の江依(多面的評価内江稼/グース10、17)
/+≠	1 10	
11] 衣	1.19	領域平均燃焼度(MWd/t) (多面的評1個向仕様/クース 16、17)
<u>и</u> +	1 0 0	
忉衣	1.20	アルの基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 18、19:Pb-Bi 中型 MOX)
<i>ب</i> →	4.64	
何表	1.21	
付表	1.22	集台体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース18、19)

付表 1.23 炸	然料平均燃焼度(MWd/t)	(多面的評価向仕様/ケース 18	5、19)
付表 1.24 り	ゆ心の基本仕様(多面的評価の	与仕様/ケース 20、21:He 大型	······ 1005 型窒化物)
			1006
付表 1.25 音	主な炉心特性(多面的評価向f 集合体お上び燃料要素の仕様	±禄/ケース 20、21) ( 名面的評価向仕样/ケース 20	······ 1006 21 )
1948 1.20 5			、 21) 1007
付表 1.27 🔮	領域平均燃焼度(MWd/t)	(多面的評価向仕様/ケース 20	21)
付丰 1 98 /	いいかい しんしょう しんしょ しんしょ		······ 1008
194X 1.20 ) 7	水冷却炉)	┑៲ᡄ(シᠠᢂᠠ᠈ᠷ᠇ᢂ᠋᠐᠋ᡅᡃᢢᡃ╯᠆᠈	~ ~~ . 1009

#### 第1編 図目次

図 4.1.1	現行プロセスと簡素化プロセスの概略フロー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	105
図 4.1.2	概略プロセスフローと要素技術開発課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	106
図 4.1.3	脱硝・転換設備鳥瞰図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
図 4.1.4	ターンテーブル式脱硝・転換 試験設備 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
図 4.1.5	マスフローと必要生産量(基準システム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	109
図 4.1.6	成型設備鳥瞰図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	110
図 4.1.7	焼結設備鳥瞰図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	111
図 4.1.8	研削設備鳥瞰図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	111
図 4.1.9	ペレット検査設備鳥瞰図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	112
図 4.1.10	スタック調整設備鳥瞰図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	112
図 4.1.11	燃料要素組立設備鳥瞰図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	113
図 4.1.12	超音波検査装置鳥瞰図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	113
図 4.1.13	燃料集合体組立設備鳥瞰図 ·····	114
図 4.1.14	燃料集合体検査設備鳥瞰図 ·····	115
図 4.1.15	保守・補修方法関連図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	116
図 4.1.16	保守・補修手順概念図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117
図 4.1.17	燃料製造/再処理一体化プラント概念図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118
図 4.1.18	燃料製造施設物流概念図 ·····	119
図 4.1.19	燃料製造施設2F配置図(脱硝・転換工程) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	120
図 4.1.20	燃料製造施設1F配置図(ペレット製造工程) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	121
図 4.1.21	燃料製造施設B1F配置図(燃料要素組立・集合体組立工程) ・・・・・・・・	122
図 4.1.22	新燃料貯蔵建屋配置概念図(1F) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	123
図 4.1.23	システム稼働率計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	124
図 4.1.24	水冷却炉の燃料集合体 MOX 部の Pu 富化度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	125
図 4.2.1	酸化物燃料製造工程フロー図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	146
図 4.2.2	窒化物燃料製造工程フロー図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	146
図 4.2.3	オフガス処理系のマスフローバランス ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	147
図 4.2.4	炭素熱還元装置外形図 ······	148
図 5.1.1	プロセスフロー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	189
図 5.1.2	マスフロー及び必要生産量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	190
図 5.1.3	滴下・熟成槽 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	191
図 5.1.4	洗浄槽 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	191
図 5.1.5	乾燥装置 ······	192
図 5.1.6	焙焼炉・還元炉 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	192
図 5.1.7	焼結炉 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	193
図 5.1.8	ピンマガジン ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	193
図 5.1.9	振動充填設備 ······	194
図 5.1.10	燃料供給装置 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	195

図 5.1.11	振動充填装置 ······	195
🕅 5.1.12	ハンドリング装置及びスペーサ挿入装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	196
🕅 5.1.13	端栓溶接装置 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	196
図 5.1.14	密度分布検査装置 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	197
🕅 5.1.15	試薬回収フロー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	198
🕅 5.1.16	設備配置図 ·····	199
図 5.2.1	プロセスブロックフロー ・・・・・	229
図 5.2.2	燃料製造プロセス成立の前提となる項目 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	230
図 5.2.3	酸化物電解法燃料製造工程物質収支 ······	231
図 5.2.4	分級設備 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	232
図 5.2.5	顆粒混合設備 ······	233
図 5.2.6	振動充填・端栓溶接設備 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	234
図 5.2.7	燃料ピン検査設備	235
図 5.2.8	集合体組立設備 ······	236
図 5.2.9	建屋内の設備配置設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	237
図 5.2.10	酸化物電解法で得られた顆粒と表面分析結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	238
図 5.2.11	原料顆粒調整工程[粒度分布調整/Pu 富化度調整/品質管理](例) ・・・・・・	238
図 5.2.12	平均 Pu 富化度変動要因 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	239
図 5.2.13	Pu 富化度変動要因の設定 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	239
図 5.2.14	平均 Pu 富化度の管理目標設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	239
図 5.2.15	顆粒の Pu 含有率モデル(分布幅) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	240
図 5.2.16	顆粒の Pu 含有率モデル(分布形)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	240
図 5.2.17	Pu 含有率への誤差伝播 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	241
図 5.2.18	サンプリング誤差/分析誤差/秤量誤差を考慮した Pu 富化度分布 ・・・・・・・	241
図 5.2.19	サンプル顆粒数と変動幅 2σの関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	242
図 5.3.1	顆粒製造フロー	267
図 5.3.2	要素技術課題 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	268
図 5.3.3	50tHM/yの顆粒燃料製造工程物質収支	269
図 5.3.4	顆粒燃料製造工程フロー ·····	270
図 5.3.5	転動造粒設備 ·····	274
図 5.3.6	分級設備 ·····	274
図 5.3.7	焼結炉 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	275
🖄 5.3.8	顆粒製造設備配置 ····································	276
図 6.1.1	製造歩留まり	328
図 6.1.2	プロセスフロー ・・・・・	329
図 6.1.3	射出成型装置 ······	331
図 6.1.4	モールド除去装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	332
図 6.1.5	スラグ検査装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	333
図 6.1.6	燃料要素組立装置 ······	334
図 6.1.7	リーク検査装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	335

図 6.1.8 表面除染装置 ······	336
図 6.1.9 Na ボンディング装置 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	337
図 6.1.10 ワイヤラッピング装置 ・・・・・	338
<b>図</b> 6.1.11 燃料要素検査装置 ····································	339
<b>図 6.1.12</b> 集合体組立装置 ······	340
図 6.1.13 集合体検査装置 ······	341
図 6.1.14 金属燃料再処理/燃料製造施設の全体構成図 ・・・・・・・・・	342
図 6.1.15 主工程設備の配置設計 ・・・・・	343
図 6.1.16 射出成型装置における質量管理法の適用例 ・・・・・・・・・	344
図 7.1.1 プロセスフロー	376
図7.1.2(1) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図(資源重	視型) ・・・・・ 377
図 7.1.2(2) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図	
(外側炉心燃料ライン縦断面)( 資源重視型) ・・・・・・・・・	378
図 7.1.2(3) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図(鳥瞰図	)(資源重視型)
	379
図 7.1.2(4) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図 (3F)(i	資源重視型)・
	380
図7.1.2(5) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図(2F)(	資源重視型)・
	381
図 7.1.2(6) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図 (1F)(i	資源重視型)・
	382
図7.1.2(7) He ガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図(B1F)	〔資源重視型)
	383
<b>図8.1.1</b> 原料発熱率と焼結皿ペレットの中心温度 ······	387
図8.1.2 原料発熱率と燃料集合体中心温度(ピット貯蔵)	387
図8.1.3 燃料集合体のバンドル/ラッパ温度差とギャップ幅 ・・・・・・	
図8.1.4 燃料集合体の発熱量とバンドル / ダクト温度差 ・・・・・・	388

### 第2編 図目次

义	1.2.1	フェーズ における設計検討の展開 /湿式法426
义	1.2.2	フェーズ における設計検討の展開 / 乾式法427
义	2.3.1	酸化物燃料炉心の概要
义	2.3.2	金属燃料炉心の概要
义	2.3.3	ヘリウムガス冷却炉燃料コンパートメントの構造454
义	3.1.1	遠隔保守対象機器保守フローの一例476
义	4.1.1	先進湿式法 (NEXT 法) のブロックフロー480
义	4.2.1	超臨界直接抽出法 (Super-DIREX 法)のブロックフロー497
义	4.2.2	超臨界直接抽出法の工程概要図(PFD)497
义	4.2.3	超臨界直接抽出法物質収支図(50tHM/y)498
义	4.2.4	回収率算出フロー
义	4.2.5	直接抽出塔の概念図
义	4.2.6	超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置
		(地下2階)
义	4.2.7	超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置
		(地下1階)
义	4.2.8	超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置
		(地上2階および屋上)
义	4.2.9	抽出塔接続配管破損時セル圧力評価のモデル
义	4.2.10	配管破断時のセル負圧の経時変化
义	4.2.11	直接抽出塔の計算モデル
义	4.2.12	二酸化炭素供給停止時の温度上昇(加圧下)
义	4.2.13	二酸化炭素供給停止時の温度上昇(常圧下)505
义	4.2.14	NEXT プロセスとの経済性の比較
义	4.3.1	SETFICS 工程のプロセスフロー
义	4.3.2	SETFICS 工程機器の配置例 (200tHM/y 規模の施設)
义	4.3.3	抽出クロマトグラフィー工程のプロセスフロー
义	4.3.4	抽出クロマトグラフィー工程機器の配置例(200tHM/y 規模の
		施設)
义	4.3.5	アミン抽出工程のプロセスフロー
义	4.3.6	アミン抽出工程機器の配置例(200tHM/y 規模の施設)518
义	4.5.1	簡素化溶媒抽出法の概略フローシート
义	4.5.2	先進湿式法 (リファレンスシステム)の全体工程図569
义	4.5.3	先進湿式法リファレンスシステム主要工程の概要図(PFD)570
义	4.5.4	先進湿式法(リファレンスシステム)の物質収支(200tHM/y) …571
义	4.5.5	先進湿式法(リファレンスシステム)の回収率計算フロー572
义	4.5.6	連続溶解槽の外観
义	4.5.7	晶析装置の概念図

义	4.5.8	遠心抽出器の外観
义	4.5.9	再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(地下2階)574
义	4.5.10	再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(地下1階)574
义	4.5.11	再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(1階)575
义	4.5.12	再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(2階)575
义	4.5.13	再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(3階)576
义	4.5.14	使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(地下1階)577
义	4.5.15	使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(1 階)
义	4.5.16	使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(2階)
义	4.5.17	先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地下2階)579
义	4.5.18	先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地下1階)579
义	4.5.19	先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地上1階~屋上)
义	4.5.20	先進湿式法リサイクルプラント全体建屋イメージ図580
义	4.5.21	施設の MBA および KMP 案
义	4.5.22	平常時における実効線量の核種による内訳
义	4.5.23	主な分離工程における分離不良に起因する臨界事故の防止概念図…582
义	4.5.24	安全冷却系の系統構成の基本概念図
义	4.5.25	放射性物質同伴の可燃性有機溶媒の セル内漏洩、火災の想定
		および防止概念
义	4.5.26	一般公衆の年間致死ガン発生確率の推定結果 異常事象による内訳 584
义	4.5.27	年間致死ガン発生確率のプロファイル (異常事象の年間発生
		頻度と1事象当たりの公衆の致死ガン発生確率の関係)585
义	4.6.1	単独処理時の燃料溶液の組成変動
义	4.6.2	NEXT 法(処理能力 200 t HM/y)の前処理設備配置図615
义	4.6.3	軽水炉燃料受入に対応した前処理設備配置図615
义	4.6.4	LWR 燃料処理時の物質収支図 (NEXT 法、200tHM/y)616
义	4.6.5	Pu サーマル燃料処理時の物質収支図(NEXT 法、200tHM/y)617
义	4.6.6	水冷却炉の炉心構成(高転換比 BWR 型炉)618
义	4.6.7	燃料集合体と制御棒概略図
义	4.6.8	DCC 法による Cs および Sr 分離回収工程のフローシート619
义	4.6.9	Tc と I の核変換に係わる分離回収工程の全体構成620
义	4.6.10	各シナリオの概念図
义	4.6.11	Sr、Cs 廃液の貯蔵期間と崩壊熱の関係621
义	4.6.12	Sr、Cs 分離施設のプラント概念図622
义	4.6.13	各シナリオにおけるガラス固化体の中間貯蔵期間と発熱量の関係…623
义	4.6.14	各シナリオにおけるガラス固化体中の FP 元素組成623
义	4.7.1	窒化物燃料再処理の概略フロー
义	4.7.2	酸化装置概念図
义	4.7.3	窒化物燃料湿式再処理オフガス処理概略フロー639

义	4.7.4	フッ化物揮発法を用いた脱被覆プロセスフロー640
_ 叉	5.2.1	酸化物電解法のプロセスフロー概念図
义	5.2.2	酸化物電解法の概略プロセスブロックフロー
义	5.2.3	プロセス廃棄物処理フロー
义	5.2.4	タイムチャート結果(運転開始から7日目まで)
义	5.2.5	集合体解体装置の機器概念図
义	5.2.6	電解装置の機器概念図
义	5.2.7	ガラス固化溶融炉の機器概念図
义	5.2.8	MBA 計画図 ·······699
义	5.2.9	酸化物電解法リサイクルプラント全体建屋イメージ図
义	5.2.10	<b>リサイクル建屋の概略平面図(1/4) - B1F</b> 701
义	5.2.11	リサイクル建屋の概略平面図(2/4) - 1F
义	5.2.12	リサイクル建屋の概略平面図(3/4) - 2F
义	5.2.13	リサイクル建屋の概略平面図(4/4) - 3F
义	5.2.14	リサイクル建屋の概略立面図
义	5.2.15	燃料貯蔵建屋の概略平面図
义	5.2.16	燃料貯蔵建屋の概略立面図
义	5.2.17	廃棄物処理建屋の概略平面図(1/3) - B1F
义	5.2.18	廃棄物処理建屋の概略平面図(2/3) - 1F
义	5.2.19	廃棄物処理建屋の概略平面図(3/3) - 2F
义	5.2.20	廃棄物処理建屋の概略立面図
义	5.2.21	廃棄物貯蔵建屋の概略平面図
义	5.2.22	廃棄物貯蔵建屋の概略立面図
义	5.2.23	建設費の内訳
义	5.2.24	年間運転経費の内訳
义	6.2.1	金属燃料の金属電解法プロセスフロー概念図(ANL 開発プロセス
		との比較)
义	6.2.2	金属燃料リサイクルプラントの再処理プロセスブロックフロー780
义	6.2.3	金属電解法の電解時(500) 標準酸化還元電位
义	6.2.4	金属燃料リサイクルプラントの概略物質収支図
义	6.2.5	環境放出に関する廃棄物処理フロー図(気体関係)783
义	6.2.6	環境放出に関する廃棄物処理フロー図(液体関係)783
义	6.2.7	主要な廃棄物処理フローと廃棄物量
义	6.2.8	高レベル放射性廃棄物処理フロー
义	6.2.9	電解精製槽の概略外形図
义	6.2.10	電解精製槽内の陽極バスケットと陰極の配置と電気回路786
义	6.2.11	陰極処理装置の概略外形図 (固体陰極処理装置)
义	6.2.12	陰極処理装置の外形図(Cd 陰極処理装置)
义	6.2.13	TRU 還元抽出器の概略外形図
义	6.2.14	金属燃料リサイクルプラントの物質収支区域(MBA)789

义	6.2.15	再処理設備セル内の主要機器配置図
义	6.2.16	主要機器間の仮置架台、一時保管庫庫等の容量設定の考え方790
义	6.2.17	金属燃料リサイクルプラント(38tHM/y)の全体配置イメージ図791
义	6.2.18	金属燃料リサイクルプラント(38tHM/y)の全体建屋イメージ図
		(主建屋(再処理、燃料製造、廃棄物処理貯蔵、ユーティリティ
		等)、燃料貯蔵建屋)
义	6.2.19	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(地下1階)
义	6.2.20	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(地上1階)
义	6.2.21	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(地上2階)
义	6.2.22	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(地上3階)
义	6.2.23	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(地上4階)
义	6.2.24	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図
		(屋上)
义	6.2.25	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の立面配置図
		(A-A 面) ······795
义	6.2.26	金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の立面配置図
		(B-B面) ······796
义	6.2.27	電解精製槽の臨界管理手法としての化学形態管理
义	6.2.28	電解精製槽の臨界安全性評価モデル
义	6.2.29	平常時における実効線量に寄与する核種による内訳799
义	6.2.30	一般公衆の年間致死ガン発生確率の推定結果の異常事象による内訳
义	6.2.31	年間致死ガン発生確率のプロファイル (異常事象の年間発生
		頻度と1事象当たりの公衆の致死ガン発生確率の関係)800
义	6.2.32	建設費の内訳
义	6.2.33	年間運転経費の内訳
义	6.3.1	酸化物燃料金属電解法のプロセスフロー概念図833
义	6.3.2	HM および FP に関する物質収支計算結果の概要( 操業開始から
		5 年経過時)834
义	6.3.3	プロセス廃棄物の処理フローと廃棄物量
义	6.3.4	廃液処理フローの概略図836
义	6.3.5	Li 還元槽の機器概念設計図 (H4000mm×Φ1400mm)836
义	6.3.6	Li 電解槽の機器概念設計図 (H4300mm×Φ1600mm)837
义	6.3.7	ろ過槽の機器概念設計図(H4200mm×3800mm)837
义	6.3.8	Ar セル (電解精製セル)内の機器配置図(1F)838

义	6.3.9	(左)前処理セル内の機器配置図(2F)、(右)酸化転換工程
		<b>セル内の機器配置図</b> (B1F)838
义	6.3.10	酸化物燃料金属電解法リサイクルプラントの全体建屋イメージ図…839
义	6.3.11	再処理顆粒燃料製造建屋 B2Fの施設配置図840
义	6.3.12	再処理顆粒燃料製造建屋 B1Fの施設配置図(95×94×9m)840
义	6.3.13	再処理顆粒燃料製造建屋 1Fの施設配置図(95×94×6.5m)841
义	6.3.14	再処理顆粒燃料製造建屋 2Fの施設配置図(95×94×6.5m)841
义	6.3.15	再処理顆粒燃料製造建屋 3Fの施設配置図(95×94×7.5m)842
义	6.3.16	再処理顆粒燃料製造建屋 4Fの施設配置図(95×94×6.5m)842
义	6.3.17	廃棄物処理貯蔵建屋の施設断面図843
义	6.3.18	建設費の内訳
义	6.3.19	年間運転経費の内訳844
义	6.4.1	窒化物燃料リサイクルプラントの再処理プロセスフロー概念図862
义	6.4.2	窒化物燃料リサイクルプラントの再処理プロセスブロックフロー…863
义	6.4.3	<b>窒化物燃料リサイクルプラント</b> (50tHM/年)の概略物質収支図864
义	6.4.4	窒化物燃料リサイクルプラントの廃棄物処理フロー図865
义	6.4.5	電解精製槽(3電極対/基)の概略外形図
义	6.4.6	室化装置の概略外形図
义	6.4.7	気相吸着法 (PSA) による窒素回収の原理フロー図867
义	6.4.8	窒素回収装置の概略外形図
义	6.4.9	乾式燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の窒素バランス868
义	6.4.10	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の全体配置イメージ図
义	6.4.11	窒化物燃料リサイクルプラント ( 50tHM/年 ) の建屋配置図(地下 1 階)
义	6.4.12	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(1階)
义	6.4.13	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(2階)
义	6.4.14	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(3階)
义	6.4.15	窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(屋上)
义	6.5.1	軽水炉 MOX 使用済燃料を再処理した際の、HM および FP に
		関する物質収支計算結果の概要(操業開始から5年経過時)890
义	6.5.2	資源重視型高速炉 MOX 使用済燃料を再処理した際の、HM および
	-	FP に関する物質収支計算結果の概要(操業開始から5年経過時) · 891
义	6.5.3	資源重視型高速炉金属使用済燃料を再処理した際の、HM および
		FP に関する 物質収支計算結果の概要 ····································

义	6.5.4	経済重視型高速炉金属使用済燃料を再処理した際の、HM および
		FP に関する 物質収支計算結果の概要 ······893
义	7.1.1	乾式再処理の再処理費(フェーズ の結果)
义	7.2.1	フッ化物揮発法の開発経緯
义	7.2.2	フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー (従来法)907
义	7.2.3	フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー(フェーズ フッ化法)
义	7.3.1	フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー(Fluorex 法)914
义	7.4.1	ウランおよびプルトニウムフッ化物の標準生成自由エネルギー926
义	7.4.2	PuF <sub>6</sub> 転換に及ぼすフッ素濃度の影響
义	7.4.3	PuF <sub>6</sub> 転換に及ぼす温度の影響
义	7.4.4	PuF <sub>6</sub> 転換に及ぼす圧力の影響(at 973K)
义	7.4.5	FP フッ化物の蒸気圧
义	7.4.6	TRU 等フッ化物の蒸気圧
义	7.4.7	ウラン転換プロセス概要図
义	9.1.1	改良 LINEX 法の原理図
义	9.1.2	室化物燃料の LINEX 法再処理概略フロー図
义	10.1.1	各候補概念の建設費・高レベル廃棄物発生量比較(大規模プラント)
义	10.1.2	各候補概念の建設費・高レベル廃棄物発生量比較(小規模プラント)
义	10.2.1	再処理単価の処理規模に対する依存性
义	10.3.1	燃料サイクルシステムの経済性(リファレンスシステム仕様)968
义	10.3.2	燃料サイクルシステムの経済性(多面的評価向仕様)969
		/0
--------	--	------------------
略語	英文表記	説 明
AB	axial blanket	軸方向ブランケット
ADU	ammonium diuranate	重ウラン酸アンモニウム
AGV	auto guided vehicles	自走搬送台車
ANL	Argonne National Laboratory	アルゴンヌ国立研究所(アメリカ)
BNFL	British Nuclear Fuels plc	英国原子燃料会社(イギリス)
BSM	biservo manipulator	両腕型マニプレータ
CS	clean scrap	クリーンスクラップ
COGEMA	Compagnie Générale des Matières Nuclé	フランス核燃料公社
СТ	computed tomography	コンピュータトモグラフィ
DS	dirty scrap	ダーティスクラップ
FCCI	fuel clading chemical interaction	燃料・被覆管の化学的相互作用
FP	fission products	核分裂生成物
GB	glove box	グローブボックス
HEPA	high efficiency particulate air (filter)	高性能エアフィルター
HM	hevy metal	重金属
IC	inner core	内側炉心
ICC	incell crane	セル内クレーン
IPA	isopropyl alcohol	イソプロピルアルコール
ITV	industrial television	工業用テレビジョン
LLFP	long-lived fission product	長寿命核分裂生成物
MA	minor actinide	マイナーアクチニド
MBA	material balance area	物質収支区域
MOX	mixed oxide	混合酸化物
MSM	master slave manipulator	マスタースレーブマニプレータ
MTTR	mean time to repair	平均復旧時間
OC	outer core	外側炉心
ODS	oxide dispersion strengthened ferritic steel	酸化物分散強化型フェライト鋼
PM	power manipulator	パワーマニプレータ
PRW	pressurized resistance welding	加圧抵抗溶接
PVA	polyvinyl alcohol	ポリビニルアルコール
PSI	Paul Scherrer Institut	ポール・シェラー研究所(スイス)
RB	radial blanket	径方向ブランケット
RE	rare earth (element)	希土類元素
RIAR	Research Institute of Atomic Reactors	原子炉研究所(ロシア)
THFA	tetrahydrofurfuryl alcohol	テトラヒドロフルフリルアルコール
TRU	transuranium element	超ウラン元素

第1編 略語一覧

略語	英文表記	説明
AB	Axial Blanket	軸方向ブランケット(燃料)
ALE	Alkaline Earth metal	アルカリ土類金属類
ALM	Alkaline Metal	アルカリ金属類
An(III)	Trivalent Actinides	三価アクチニドを総称して記す。
ANL	Argonne National Laboratory	米国アルゴンヌ国立研究所
ATRENO	Atmospheric Transport of Radioactive	原子力施設の平常運転時を対象
	Effluents Released in Normal Operations	とした放射性物質の大気拡散挙
2020		動を解析するコード
BOEC	Beginning of Equilibrium Cycle	(炉心)半衡サイクル初期
BSM	<u>B</u> ilateral <u>S</u> ervo <u>M</u> anipulater	X腕型マーヒュレーター 2010年1月11日第二日
CCIM	<u>Cold Crucible Induction Melting</u>	るノは冷却式高周波誘導加熱
ChCoDic	<u>Ch</u> lorinated- <u>Co</u> balt- <u>Dic</u> arbollyde	
СМРО	Octyl(phenyl)-N,	有機リン抽出剤の一種。
	N-di-isobutylcarbamoylmethylphoshin	
	oxide	<b>库</b> 杰生术地
СР	<u>C</u> orrosion <u>P</u> roduct	
Cyanex301	Bis (2,4,4,-trimethylpentyl)dithiophosphinic	有機リノ拙击剤の一種。 
201	Acid	<u> </u>
DOA	<u>D</u> i- <u>O</u> ctyl- <u>A</u> mine	シオクテルアミノ
DOE	Department of Energy	木国エイルキー自
DOG	<u>D</u> issolution <u>Off G</u> ass	溶解オノカム
DTPA	<u>D</u> iethylene- <u>t</u> riamine- <u>p</u> entaacetic <u>A</u> cid	シエナレントリアミン五酢酸
FBR	Fast Breeding Reactor	局速增殖炉
FCF	<u>Fuel Cycle Facility (Fuel Conditioning</u>	ANL内にある乾式処埋試験施設
	Facility)	
FP	<u>F</u> ission <u>P</u> roduct	核分裂生成物
Fluorex	Hybrid Process of <u>Fluor</u> ide Volatility and	ノッ化物揮発法と浴燥抽出法の    ハイブリッド再処理シュテム
	Solvent <u>Ex</u> traction	
HAN	<u>Hydroxyl-amine Nitrate</u>	明酸こトロキンルアミノ
HLW (HAW)	High Activity Liquid Waste	同成別住廃液(同成別住廃業初)
HEPA フィルタ	High Efficiency Particular <u>Air Filter</u>	同性能松士ノイルク
HIP	<u>H</u> ot <u>I</u> sostatic <u>P</u> ressing	款间 <b>带小</b> 上风形 王本曾新
HM	<u>H</u> eavy <u>M</u> etal	
HRGRS	High <u>Resolution Gamma-Ray Spectrometry</u>	局分解 線スヘクトル分析計 「日本の店 スカ地間
IAEA	<u>International Atomic Energy Agency</u>	当际原于 <b>刀</b> 機関
	<u>Inner Core</u>	内部炉心(燃料)
	<u>I</u> n-cell <u>C</u> rane	
iOcOH	iso-Octyl alcohol	イソオクチルアルコール
INVS	<u>Inventory Sample Coincidence Counter</u>	
JNC	<u>Japan N</u> uclear <u>C</u> ycle Development Institute	核燃料サイクル開発機構
KMP	<u>K</u> ey <u>M</u> easuring <u>P</u> oint	王安計測点
LINEX	-	Li₃N によって窒化物を分離抽出 する乾式再処理技術
LWR	Light Water Reactor	軽水炉
MA	<u>M</u> inor <u>A</u> ctinide	マイナーアクチニド
		ここでは Np、Am、Cm を総称   して MA と記す
MBA	Material Balance Area	
MNRTF	Mata-Nitro-Banzo-Tri-Fluorida	メタニトロメンゾトリフルオラ
TATT ATD T.T.		イド   イド
MOX	Mixed Oxide	混合酸化物

第2编 略語一覧

略語	英文表記	説明
MSM	<u>M</u> aster <u>S</u> lave <u>M</u> anipulator	
MUF	<u>Material Unaccounted For</u>	不明物質量
nDD	<u>n</u> ormal <u>D</u> o- <u>D</u> ecane	ノルマルドデカン
NEXT	New Extraction System for TRU Recovery	先進湿式再処理法
NM	Noble Metal	貴金属類
NRTA	<u>N</u> ear- <u>R</u> eal- <u>T</u> ime <u>A</u> ccountancy	近リアルタイム計量
OC	Outer Core	外側炉心(燃料)
ORNL	<u>O</u> rk <u>R</u> idge <u>N</u> ational <u>L</u> abolatory	米国オークリッジ国立研究所
PFD	<u>P</u> rocess <u>F</u> low <u>D</u> iagram	
PEG	<u>P</u> oly- <u>E</u> thylene <u>G</u> lycol	ポリエチレングリコール
P/M (PM)	<u>P</u> ower <u>M</u> anipulator	
PSA	Pressure Swing Adsorption	圧力スイング法
PUREX	Plutonium Uranium Reduction Extraction	ピューレックス法
PW	<u>P</u> hosphorous <u>W</u> olframate	リンタングステン酸
RB	<u>R</u> adial <u>B</u> lanket	径方向ブランケット(燃料)
RE	<u>R</u> are <u>E</u> arth Element	希土類
RIAR	<u>R</u> esearch <u>I</u> nstitute of <u>A</u> tomic <u>R</u> eactors	原子炉科学研究所(ロシア)
SDB	<u>S</u> tyrene- <u>D</u> ivinyl- <u>B</u> enzene	スチレンジビニルベンゼン
SETFICS	<u>Solvent Extraction for Trivalent-f-elements</u>	AmとCmを分離回収する湿式
	Intra-group separation in <u>C</u> MPO	浴煤抽出法。
	complexant <u>S</u> ystem	
sf-CO <sub>2</sub>	Supercritical fluid Carbon Dioxide	超臨界状態の CO <sub>2</sub>
SOG	<u>Searing Off Gass</u>	せん断オフガス
S/RD	<u>Shipper / Reciever Difference</u>	受払間差異
SREX	<u>Strontium Extraction</u>	
Super-DIREX	Supercritical Fluid Direct Extraction	超臨界直接抽出法
TBP	<u>T</u> ri- <u>B</u> utyl- <u>P</u> hosphate	リン酸トリプチル
TERFOC	Terrestrial food-chain model in normal	ATRENOコードと組み合わせて
	operations	伊田9 る他設向辺公家の彼はく   線量を計算するコード
ТОА	Tri-Octyl-Amine	トリオクチルアミン
TRPO	Tri-Alkyl-Phosphine Oxide	有機リン抽出剤の一種。
TRU	Trans-Uranium Element	超ウラン元素
TRUEX	Trans-Uranium Extraction	Am と Cm を分離回収する溶媒
		抽出法。
TVF	<u>T</u> okai <u>V</u> itrification <u>F</u> acility	ガラス固化試験施設
	Uranyl Nitrata Havahydrata	<u>  (JINC 宋) // (JINC */ (JINC *</u>
VOC	Vessel Off Cass	<u>▶13日ネッシールハス1919</u>   塔槽類オフガス
v u u	<u>vcssci Uii Uass</u>	

### はじめに

核燃料サイクル開発機構(以下「サイクル機構」という)では、電力等と協力して、1999年7月より、軽水炉サイクルおよびその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得る、将来の高速増殖炉サイクルシステム実用化概念の構築と、 実用化に向けた研究開発シナリオの策定を目的とした、FBRサイクルの実用化 戦略調査研究を開始した。

実用化戦略調査研究においては、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有 効利用性および核拡散抵抗性などの開発目標を設計要求として設定し、フェー ズIとしては1999~2000年度の2年間で、概略の設計検討および経済性評価等を 実施し、実用化候補概念の抽出を行った。

フェーズ としての2001~2005年度の5年間では、燃料サイクルシステム(再 処理と燃料製造の組み合わせ)については、炉システムとの整合性に配慮しつ つ、革新技術等を導入して経済性向上を図り、各技術の特長を活用し低除染超 ウラン元素(TRU)リサイクルによる環境負荷低減、資源の有効利用、核拡散 抵抗性向上等を図ったプラント概念の検討を行うとともに、技術的成立性につ いてシステム設計の前提となる枢要要素技術に関する検討評価を行う。これら の検討に基づき、湿式システムおよび乾式システムに対して再処理システムお よび燃料製造システムとしてそれぞれ有望な実用化候補概念の構築を行う。

本報告書は、フェーズの前期(2001~2003年度)において実施した燃料サイクルシステムの設計検討および技術評価の成果を、中間評価結果として燃料 製造および再処理システムについて第1編および第2編にそれぞれ取りまとめた ものである。なお、燃料製造と再処理を合わせた燃料サイクルシステムとして の技術評価については、第2編10章に記載する。

### 1.フェーズ 検討の展開と検討対象技術

### 1.1 フェーズ 検討の展開

将来の FBR サイクルシステム開発では安全性を前提とした経済性向上、環境 負荷低減等の多様な要求がある。燃料サイクル(燃料製造、再処理)システム としては再処理コストの大幅低減が期待できる低除染燃料サイクル及び高レベ ル廃棄物へ TRU 核種の移行を極力抑える TRU 燃料サイクルを実現することが 必要となる。このため燃料製造システムでは多成分/高不純物含有の燃料製造プ ロセス開発が重要となる。また、放射線強度が高く、かつ高発熱率の原料を取 扱うこととなり、ホットセル構造による遮蔽及び核物質の包蔵性を確保した遠 隔製造システムが求められる。フェーズIではサイクルシステムの経済性に関す る潜在能力を検討し、湿式及び乾式酸化物燃料サイクル、金属燃料サイクル等 のサイクルシステムに対応する主要燃料製造プロセスとして簡素化ペレット法、 振動充填法及び鋳造法を候補として選定した。燃料の形態と種類は、原子炉型 や再処理方法との整合が重要である。フェーズIの炉システム評価結果である原 子炉型及び燃料の形態の主要な組合せを表 1.1.1 に示す。<sup>1)</sup>

フェーズ II では、低除染 TRU 燃料製造システム各候補のプロセスの条件設 定と要素技術開発状況の関係を明確にし、基本プロセスの成立性を検討する。 また、各種設計要求に配慮した量産機器設備、周辺設備及び配置に関する概念 設計を行い、物流機構(マテリアルハンドリング) 遠隔保守等を考慮し、ホッ トセル内での安定した製造可能性を検討する。これらの、基本プロセスの成立 性及びセル内での安定操業の見通しに関する検討を行う。また、主工程設備、 周辺設備等の設計結果に基づく製造コスト評価及び廃棄物発生量評価を行いサ イクルシステムスクリーニングのための評価データを整備する。

### 1.2 検討対象技術

Na 冷却炉に適合する酸化物燃料及び金属燃料、重金属冷却炉に適合する金属 燃料及び窒化物燃料、ガス冷却炉に適合する窒化物燃料の各組み合わせに対す るサイクルシステムの構築が必要となる。

酸化物燃料製造システムの検討概念は、先進湿式再処理からの原料溶液を出 発物質とする、簡素化ペレット製造プロセス及びゲル化・球状粒子振動充填燃 料(以下、「スフェアパック」という。)製造プロセスを基本とする酸化物燃料 製造システムの概念設計を行う。また、酸化物電解再処理からの酸化物顆粒及 び金属電解再処理プロセスからのプルトニウム、ウランを酸化処理し出発物質 とする振動充填燃料製造システムの概念設計を行う。

金属燃料製造システムの概念検討は、金属電解再処理からの合金原料を受け 入れ、射出成型法により合金スラグを製造する金属燃料製造システムの概念設 計を行う。フェーズ I の検討において、遠心鋳造法による合金スラグ製造は、設備コストが射出成型法に比べて高くなるものの、発生廃棄物の低減の可能性があることが示されている。フェーズ II の中間段階では、射出成型プロセスにおける経済性及び発生廃棄物量を検討し、他のシステムとの比較評価を行う。その結果に基づき、フェーズ II の最終まとめにおいて、遠心鋳造法システムとの比較評価を行う。

窒化物燃料製造システムの概念検討では、ガス冷却炉に適合する被覆粒子燃料としてスフェアパック製造プロセスのける酸化物粒子製造プロセスを参考に 経済性等の概略評価を行う。また、重金属冷却炉に適合するペレット製造プロ セスに対しては、酸化物燃料のペレット製造プロセスを参考に経済性等の概略 評価を行う。

参考文献

1) 河野,他;"燃料製造システムの技術検討書 - 実用化戦略調査研究フェーズ I成果報告-",サイクル機構報告書,JNC TY9400 2001-023(2001.7) 表1.1.1 フェーズⅡの燃料製造システム設計・評価で対象とする燃料形態と種類

	被覆粒子	×	$\bigcirc$	×
	射出成型	×	×	0
<b>夏</b> 管型燃料棒	振動充填	0	×	×
被視	ر بر از از از از از	0	0	X
燃料形態	種類	酸化物 (Na炉)	窒化物(ガス炉、鉛炉)	金属(Na炉)

### 2.設計要求とその対応方針

### 2.1 基本方針

フェーズ II のシステム設計にあたっては、システムの技術成立性、即ち安定 的に仕様を満足する製品を供給出来ることを定量的または半定量的に示すこと が重要課題であり、このため、製品収率の見通し及び基本プロセス条件の成立 性を要素技術開発成果に基づき検討する。また、製品収率に基づくマスフロー 及びプロセス条件を考慮した工程機器の概念設計及び配置設計ならびに再処理 との一体化設計を通して、ホットセル内での製造技術(遠隔保守補修)を基本 とする量産プラント概念を提示する。

### 2.2 設計要求事項

FBR サイクル実用化戦略調査研究における各種燃料製造施設の概念設計における設計要求を以下に示す。

(1) 安全性

セル空間における核物質の取り扱い設備(主工程、搬送等)の異常に配慮した臨界安全を確保すると共に、各種可燃性ガス、試薬等の取り扱いに伴う火災 爆発を防止する設計を行う。

(2) 経済性

FBR サイクルの発電コストを将来の軽水炉サイクルと同等以下とするために、 目標サイクルコスト(燃料製造及び再処理)を0.8円/kWh以下に設定する。こ の目標は炉心設計(取出し燃料の平均燃焼度)に依存するものであり、燃料製 造システムのみで目標達成に対する評価を行えるものはない。従ってサイクル コスト目標を満たすに十分と考えられる16万円/kgHMを製造コストの目安と して概念設計を行う。

(3) 環境負荷低減性/資源有効利用性

燃料製造システムからの TRU 核種の廃棄物への移行量及び固体廃棄物の発 生量の低減に配慮した設備概念設計を行う。また、液体及び気体廃棄物を低減 するため工程内で使用する試薬等の回収、リサイクル設備の概念設計を行う。U、 TRU の回収率の目標を 99%以上として設計検討を行う。

(4) 核拡散抵抗性

製造工程中に純粋な Pu が単独で存在しないプロセス設計を行う。また、核物 質管理の透明性の観点から、施設内のホールドアップ対策を考慮した設計を行 う。

(5) 技術的成立性(運転・保守補修性を含む)

基本プロセス条件(例えば、ペレットの焼結時間、振動充填時間等)は、関連する要素技術開発状況等に基づき設定することを基本とするが、根拠となる

実験データが不備の場合には開発目標(期待値)として設定する。これにより、 プロセス条件設定の背景を明確にし、システム概念設計の不確かさを明らかに する。また、ホットセル内で所定の生産能力を発揮できる主要機器/マテリアル ハンドリング機器概念、さらにこれらの遠隔保守補修概念の設計を行う。

### 2.3 概念設計の進め方と設計条件

### 2.3.1 概念設計の進め方

マスフロー設定、機器/設備設計、周辺設備設計、配置設計等の施設全体に対 する一連の概念設計を行う基準ケースは、簡素化 MOX ペレット、スフェアパッ ク、酸化物電解再処理対応の振動充填及び射出成型(金属燃料製造)の各プロ セスの製造プラントとする。なお、窒化物製造プラントに関しては、簡素化 MOX ペレット及びスフェアパックの基準プラントの検討結果を参考に概略プラント 検討を行う。システム設計条件としては、フェーズIの炉心検討結果から代表的 な製品燃料仕様を設定する。基準製造プラントでの生産ライン構成は、資源有 効利用サイクル、すなわち高増殖の資源重視型炉心構成に対応する内側炉心燃 料(軸方向ブランケット含む)、外側炉心燃料(軸方向ブランケット含む)及び 径方向ブランケット燃料の3種類の燃料集合体の製造を行うものとする。

実用化戦略調査研究においては、多様なサイクルシナリオに対応する製造シ ステムの経済性等の評価を実施することとしている。特にサイクルの経済性向 上のため、径方向ブランケット燃料を削除し、取出し燃料の平均燃焼度を高め た経済重視型炉心構成に対応した燃料製造システムの経済性等の評価を行う必 要がある。また、高速炉サイクルの導入時期においては小さな生産規模の製造 プラントが求められる可能性があり、このシステムに対する経済性等の評価が 必要となる。このため、基準燃料製造システム設計結果の機器設計、製造ライ ン構成等をベースに、評価対象プラントの生産規模、製品燃料の種類等に対応 する機器基数、セル容積、建屋容積等を概算し、小規模の燃料製造システムに 対する経済性等の評価を行う。

#### **2.3.2** 設計検討の着眼点

ペレット燃料製造システムについては、現行のペレット燃料製造プロセスの 混合、造粒工程を大幅に削減したショートプロセス法適用の検討を行う。また、 セル内での遠隔ペレット燃料製造における不確かさ(異常時の復旧等)を考慮 しても所定の生産能力を発揮できることの見通しを検討する。

振動充填燃料製造システムについては、現行のペレット燃料製造プロセスに 比べて工程を簡素化できるという特徴を有しており、湿式、乾式再処理に適合 した燃料製造システムの検討を行う。また、湿式ゲル化システムのゲル化工程 で大きな課題である廃硝酸アンモニウム、洗浄液等の回収、リサイクル設備概 念設計検討を行う。

金属燃料製造システムについては、射出成型鋳造プロセスを基本とし、乾式 システムの特徴である小バッチの多数の繰り返し製造に伴う品質管理(分析) 負荷が主工程に及ぼす影響を考慮したシステム検討を行う。

被覆粒子燃料製造システムについては、この製造システムの経済性ポテンシャルを被覆プロセス条件の仮定のもとゲル化プロセスの検討結果を参考に概略 検討を行う。

2.3.3 設計条件

(1)再処理との取り合い、設計範囲

再処理施設との取り合いの境界条件:再処理製品(原料)のPu 富化度調整以降、新燃料の払い出しまでを燃料製造施設とする。原料貯蔵施設等のバッファ を設ける場合は対象とする。

設計範囲:再処理製品貯蔵施設、製造された新燃料の保管施設、放射性廃棄物処理・保管施設(TRU廃棄物、低レベル等)を含める。

(2) 基準プラントの燃料製造能力、運転条件等

湿式再処理の製品を用いて低除染 MA-MOX 燃料集合体を生産するプラント、 すなわち簡素化ペレット燃料及びスフェアパック燃料の製造システムの生産規 模を 200tHM/年とする。乾式再処理の製品を用いて低除染(MA-MOX 及び MA-金属)燃料集合体を生産するプラント、すなわちバイパック燃料及び金属燃料 の製造システムの生産規模をそれぞれ 50tHM/年及び 38tHM/年とする。

フェーズIの検討結果で、サイクルシステムでは 200tHM/年規模で経済性目 標達成の可能性を示している。フェーズ II では技術的成立性等の検討をベース に施設全体(周辺設備等含む)の概念設計を行い、経済性目標が達成可能なプ ラント構成を明らかにすることが重要である。小規模のサイクルシステムで経 済性が成立することが高速炉サイクル導入に有利であるとの考えがある。そこ で 200tHM/年規模プラントの設備構成を基準として、機器設備/配置設計の合理 化検討を行い 50tHM/年規模の燃料製造システムの製造コスト低減を検討する ことが妥当と考える。乾式サイクルシステムでは、フェーズの結果として 50tHM/年の生産規模で経済性目標達成の可能性を示しており、基準プラントと して 50tHM/年の生産規模で技術的成立性等の検討を深め、経済性に関する検討 の信頼性を高めることが妥当と考える。

運転条件として年間 200 日のフル操業(24 時間連続運転)とし、この運転条件で所定の生産量が達成できる機器設備能力を検討する。この運転条件は、定

期検査等の計画停止期間を除く年間運転可能日数 250 日に対し、設備不良等の 復旧期間を 50 日と想定し、フル操業期間 200 日と設定したものである。(施設 稼働率 80%)

(3)受け入れ原料の仕様(再処理製品)

再処理の負荷低減及び高レベル廃棄物の毒性低減を目的とし、原料中の不純物仕様及び MA 含有量を設定した。

MAの混入率: 5wt%/HM 以下

MAの混入率は、FBR サイクルの平衡値である約 1.2wt%の他に、LWR からの MA を FBR 燃料に添加し消費することを想定し、5wt%に設定した。

FP の混入率: 1.2wt%/HM 以下

対象とする再処理法の中で、一番除染率の悪い希土類に対して除染係数(DF) を5と設定し、FBRの平衡サイクルでの燃料中のFP混入率が1.2wt%程度の値 となる。なお、不純物量について別途実施した炉心設計において、炉心性能へ の影響が小さいことを評価している。

(4)燃料製品の仕様

- ()燃料の種類:酸化物、金属燃料、窒化物
- ()燃料の形態:酸化物については振動充填、ペレット燃料。
  - 金属燃料については射出成型

窒化物燃料については被覆粒子燃料、ペレット燃料。

- ()ペレット燃料(酸化物及び窒化物燃料)
  - ・炉心の基本仕様 (表 2.3.1)
  - ・燃料集合体及び燃料要素の基本仕様(表 2.3.2、表 2.3.3)
  - ・スミア密度:酸化物 82%TD、窒化物 80%TD、公差 ± 2~ ± 5%以内
  - ・Pu 富化度:(別途設定) 公差±3~±5%以内
  - ・FP 混入率: 1.2wt%/HM 以下
- ()振動充填燃料(酸化物)
  - ・炉心の基本仕様(表 2.3.1)
  - ・燃料集合体及び燃料要素の基本仕様(表2.3.2)
  - ・スミア密度:80%TD 程度、公差±5%以内
  - ·Pu 富化度:(別途設定)、公差±5%以内
  - ・FP 混入率: 1.2wt%/HM 程度以下
- ()射出成型(金属燃料)
  - ・炉心の基本仕様(表 2.3.1)
  - ・燃料集合体及び燃料要素の基本仕様(表2.3.4)

- ・スミア密度: 75~80%TD 程度、公差±5%以内
- ・燃料スラグ直径公差:±3%以内
- ·Pu 富化度:(別途設定)、公差±5%以内
- ・FP 混入率: 1.2wt%/HM 以下
- () ) 被覆粒子燃料
  - ・炉心の基本仕様(表 2.3.1)
  - ・燃料集合体及び燃料要素の基本仕様(表2.3.5)
  - ・スミア密度:26%TD 程度
  - ·Pu 富化度:(別途設定)
  - ・FP 混入率: 1.2wt%/HM 以下
- (5)製品貯蔵施設、放射性廃棄物処理施設等

年間生産量相当の貯蔵容量を持つ新燃料保管施設を設置する。また、年間発 生量相当の放射性廃棄物(低レベル、TRU 廃棄物等)を処理及び保管できる容 量を持つ放射性廃棄物処理・保管施設を設置する。

### 2.4 施設設計の基本的考え方

(1) 安全設計

安全設計においては火災・爆発防止,臨界,耐震及び被曝について検討を行う。火災・爆発防止については物質取扱量を明らかにしてリスク評価用データをまとめる。臨界については物質の移動の手順を明確にして核物質の異常な集積を排除できることを明らかにする。耐震については現状の耐震区分が明確でないので機器の要求する耐震区分を明らかにする。被曝については放射能のレベルに応じ保守補修の手順を明らかにし、作業に関わる従事者の被曝低減を図る。

- ( )システム共通
  - ・MAによる発熱による機器への影響を考慮した設計。
  - ・臨界上の制限から、一度に取扱う核分裂性物質の量を制限する設計。
  - ・臨界制限は形状管理を原則とする。質量管理とせざるを得ない工程に関し ては、物流システム上、核物質が異常に集積する恐れが無い設計。
  - ・核分裂性物質を含む機器の開放操作が必要なことから飛散微粉の集塵を考慮。
- () 湿式法(ペレット法、スフェアパック法)
  - ・配管で接続されたシステムを考慮し、配管を介して通常の経路外の場所に

核分裂性物質が集中する恐れの無い設計。

- ・可燃性または爆発性の物質(試薬等)の取扱いにおいては加熱源、同じセル内に着火源が存在しない設計とする。自己反応性物質が生成する可能性を排除する設計。
- ・水溶液系での放射線分解で水素が発生するため、水素排気を設計上考慮。
- ()乾式法(振動充填法、金属燃料)
  - ・金属燃料は溶融金属を取扱うことに対応した安全システムの検討。
  - ・小バッチ(ロット)の多数繰り返しによる製造システムに対応した安全システムの検討。
  - ・取り扱い物質の特性(化学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度など)を踏まえた安全対策の検討。
- (2) 遠隔製造施設の主要検討項目

燃料製造システムの技術的成立性は「セル内での安定操業の確保」であり、 安定操業の確保のため以下の設計対応を検討する。

- ・セル内製造適合システム、即ち機器設備の高い信頼性(低故障率)及び機器の保守補修を短期間で実施できる遠隔メンテナンスを目指した設計。
- ・プラントの燃料生産能力の基本となるプロセス毎の機器設備能力は、運転 手順及び操作時間の検討に基づき設定。
- ・MA 含有 MOX 燃料製造等に係る製造試験、物性研究等の要素技術開発の 成果に基づく燃料製品収率の設定。
- ・各プロセスの製品の特徴(均質性、製造ロットサイズ等)に応じた合理的 品質管理システムの検討。
- ・各プロセスの核物質の性状(微粉原料、溶液、金属等)に応じたホールド アップ対策の検討。
- ・運転・保守補修に対する考え方を明確にするため、運転手順・保守手順を 定め、故障モードに応じた補修方法の検討。保守補修方式はマスタースレ ーブマニピュレータ(MSM)を用いて軽度の保守補修は現場で行い、現場 で対応できない重度の補修は保守セルに機器を移動し、保守セル及びグロ ーブボックス内で行う設計。

表2.3.1 炉心の基本仕様 (燃料製造システム検討における基準炉心)

項目	酸化物燃料炉心	金属物燃料炉心	窒化物ペル州燃料炉心	窒化物被覆粒子燃料炉心
電気出力	1,500MWe	1,500MWe	750MWe	1,1240MWe
熱出力	3,570MWth	3,900MWth	1,875MWth	2,400MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心	2領域均質炉心	4領域均質炉心
運転サイクル長さ	17ヶ月	20ヶ月	18ヶ月	20ヶ月
炉心取出平均燃焼度(目標値)	15万MWd/t	15万MWd/t	15万MWd/t	12万MWd/t
増殖比(目標値)	1.2	1.2	1.2	1.2
集合体数				
内側炉心燃料	316(本	276体	288体	303(本
外側炉心燃料	266(本	138体	2461本	2401本
径方向ブランケット燃料	198(本	78体	*0	186体
主炉停止系	40(本	30体	18体	27体
後備炉停止系	15体	7体	6(本	7休
集合体配列ピッチ	179.7mm	197.7mm	177.5mm	222.3mm
炉心高さ	80cm	85cm	70cm	180cm
炉心等価直径	480cm	440cm	440cm	564cm
燃料交換/シチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4/4	4/4	-/L	8/8
サイクルあたりの燃料交換体数 (内側炉心/外側炉心/径ブランケット)	糸579/66/50	約69/35/20	+/35//1米	希匀38/30/23
TRU組成	*1	*2	*1	*1
U組成 (U235/U236/U238)	0.3/-/99.7wt%	0.01/0.03/99.9wt%	0.3/-/99.7wt%	0.3/-/99.7wt%

\*1酸化物燃料による高速増殖炉多重リサイクルTRU組成 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0 wt%

\*2金属燃料Iこよる高速増殖炉多重リサイクルTRU組成 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242 = 1.0/ 68.0/ 26.0/ 2.5/ 2.5 wt% Np237/Am241/Am242m/Am243/Cm243/Cm244/Cm245 = 13.0/ 52.5/ 1.5/ 18.0/ 0.2/ 12.0/ 2.8 wt%

### 表2.3.2 酸化物燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 (燃料製造システム検討における基準仕様)

西日	炉心燃料	斗集合体	径ブランケッ	<b>卜燃料集合体</b>
	ペレット	振動充填	ペレット	振動充填
集合体				
燃料要素本数	27	本	12	7本
燃料要素配列ピッチ	10.03	3mm	14.5	6mm
全長	4,370	Omm	4,37	0mm
ラッパ管				
材質	PNC-	-FMS	PNC <sup>-</sup>	-FMS
内対面幅	167.	9mm	167.	9mm
外対面幅	176.	7mm	176.	7mm
肉厚	4.4	mm	4.4	mm
スペーサ				
形式	ワイ	(ヤ	ワ-	(ヤ
材質	0[	DS	01	DS
ワイヤ径	1.48	hmm	1.50	Imm
ワイヤ巻付ピッチ	200	mm	200mm	
構造材 概略物量/概略長さ				
ハンドリングヘッド	15kg /	220mm	15kg /	220mm
上部遮蔽体	70kg /	710mm	70kg / 710mm 81kg / 3.665mm	
ラッパ管	81kg / 3	3,665mm	81kg / 3	3,665mm
被覆管、ワイヤ、端栓	97kg / 2	2,905mm	34kg / 2	2,905mm
下部遮蔽体、エントランスノズル	40kg /	535mm	40kg /	535mm
	303kg / -	4,370mm	240kg /	4,370mm
燃料要素	2.005			
全長	2,90	5mm	2,90	5mm
スタック長	1,500mm 800mm		1,50	0mm
炉心燃料	800	mm	1,50	0mm
軸方向ブランケット燃料(上/下)*	350mm /	′ 350mm	-	-
ガスプレナム位置と長さ	下部、1	020mm	下部、1	020mm
ボンド材	Н	e	He ——休密封刑	
型式	一体容	密封型	一体智	密封型
炉心燃料部				
型式	中空ペレット	顆粒	中実ペレット	顆粒
材質	U,TRU混合酸化物	U,TRU混合酸化物	U酸化物	U酸化物
	82%TD	80%TD	90%TD	90%TD
軸方向フランケット部				
型式	中実ペレット	顆粒		
			—	
スミア密度	90%TD	90%TD	-	-
		20 20	01	79
<u></u>	8.5	mm	13.0	imm
	/.5	mm	11.9	mm.
	0.5	mm	0.55	omm

\*中央部の37ピンは削除。(0mm)

### 表 2.3.3 窒化物燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様 (燃料製造システム検討における基準仕様)

	тар	4	台	上様
	境内	4	炉心	軸方向ブランケット
	燃料形態		Pu•U 混合窒化物	∪窒化物
	被覆管材料		OD	S 鋼
	被覆管外径 (mm)		7	′.3
	被覆管内径 (mm)		6	. 46
燃	被覆管肉厚 (mm)		0	. 42
1 <sup>4</sup> 要	燃料要素全長 (mm)		2'	190
素	燃料スタック長 (mr	n)	700	0 / 350 (上部/下部)
	ガスプレナム長さ(.	上/下) (mm)	410	/730
	ボンド材		ł	He
	燃料スミア密度(%)	ſD)	80	95
	集合体全長 (mm)		34	465
	燃料ピン本数 (本)	(合計)	3	31
	燃料ピン配列ピッチ	- (mm)	8	5.9
	燃料ピン配列ピッチ	-/ピン径比 (P/D)	1	.22
	ラッパ管材料		PNC-	FMS 鋼
	ラッパ管外対面間距	ē離 (mm)	17	3.0
集	ラッパ管内対面間距	ē離 (mm)	16	3.0
体	ラッパ管肉厚 (mm)		5	5.0
	ラッパ管間ギャッフ	f (mm)	4	.5
	集合体配列ピッチ	(mm)	17	7.5
	スペーサ形式		グリッ	ド支持
		燃料 (実効)	39.76 (31.81)	(37.77)
	体積比 (%)	構造材	21.68	
		冷却材	38.56	

項目	炉心燃料集合体	ブランケット集合体
1.燃料集合体		
燃料要素本数	331本	127本
燃料要素配列ピッチ	9.95mm	16.02mm
全長	4600mm	4600mm
ラッパ管		
材質	PNC-FMS	PNC-FMS
内対面幅	183.7mm	183.7mm
外対面幅	191.7mm	191.7mm
肉厚	4.0mm	4.0mm
スペーサ		
型式	ワイヤ	ワイヤ
材質	PNC-FMS	PNC-FMS
ワイヤ径	1.39mm	1.21mm
ワイヤ巻付ピッチ	約250mm	約250mm
構造材 概略物量/長さ		
ハンドリングヘッド	15kg/220mm	15kg/220mm
上部遮蔽体	41.5kg/250mm	41.5kg/250mm
ラッパ管	55.4kg/2730mm	55.4kg/2730mm
被覆管、ワイヤ、端栓	104.9kg/2670mm	72.6kg/2670mm
下部遮蔽体、エントランスノズル	167.7kg/1380mm	167.7kg/1380mm
合計	384.5kg/4600mm	352.2kg/4600mm
2.燃料要素		
	2670mm	2670mm
スタック長	1150mm	1150mm
炉心燃料	850mm	1150mm
<u> 軸方向ブランケット燃料(上/下)</u>	150/150mm	-
ガスプレナム位置と長さ	上部、1450mm	上部、1450mm
ホンド材と重量	Na、13.3g	Na、27.9g
型式	一 一体密封型	一 一体密封型
炉心燃料部		
	中実スラク	中実スラク
	U-TRU-10wt%Zr合金	U-10wt%Zr合金
スミア密度	75%TD	85%TD
<u> 軸方向フランケット部</u>		
	中実スラク	-
	U-10wt%Zr合金	-
	75%TD	-
<u> </u>		
材質	PNC-ODS	PNC-ODS
<u>外径</u>	8.5mm	14.8mm
	7.5mm	13.8mm
肉厚	0.5mm	0.5mm

## 表2.3.4 金属燃料の燃料集合体・燃料要素の基本仕様

### 表2.3.5 窒化物被覆粒子燃料の燃料集合体・燃料要素の 基本仕様(燃料製造システム検討における基準仕様)

		炉心燃料	斗集合体	径方向ブランケット
	<b>坦日</b>	炉心	軸方向ブランケット	燃料集合体
集合体				
全長 (mm)		48	30	4830
コンパート	メント			
形態		内管・外管フ <sup>」</sup> 二重円 両フリットを固	リットからなる ⑤構造+ 定する支持柱	内管・外管フリットからなる 二重円筒構造+ 両フリットを固定する支持 柱
材質		SiC/SiC	複合材料	SiC/SiC複合材料
フリット内	管(内径/外径/厚さ) (mm)	84/9	92/4	58/66/4
フリット外	管(内径/外径/厚さ)(mm)	201/2	209/4	206/214/4
ポロシティ	∩(内管/外管)(%TD)	5.0/40	(上部)4.0/60 (下部)4.0/40	5.0/40
支持柱密	·度 (%TD)	10	00	100
燃料要素				
全長 (mm)		25	00	2500
スタック長	(mm)	1800	(上部)350 (下部)350	2500
被覆粒子				
形態		燃料核を および強度	<u>:</u> ハ`ッファ層 を層で被覆	燃料核をバッファ層 および強度層で被覆
材質		燃料核 : (U,TRU)N バッファ層 : 低密度TiN 強度層 : 高密度TiN	燃料核 : UN バッファ層 : 低密度TiN 強度層 : 高密度TiN	燃料核 : UN バッファ層 : 低密度TiN 強度層 : 高密度TiN
燃料核外	·径 (mm)	1.50	1.70	1.70
バッファ層(	外径/肉厚)(mm)	1.74/0.012	1.82/0.006	1.82/0.006
強度層(タ	∧径/肉厚)(mm)	1.94/0.010	1.98/0.008	1.98/0.008
密度(燃料	斗核∕バッファ層∕強度層)(%TD)	95/50/100	95/50/100	95/50/100
被覆粒子	·充填率(%)	60	60	60
	燃料(実効)	16.3(15.4)	22.3(21.1)	26.6(25.3)
体積比(%)	構造材	27.5	21.5	23.4
	冷却材	56.2	56.2	50.0

### 3.技術評価の視点及び評価方法

### 3.1 技術評価の視点

(1) 技術的成立性

基本プロセス条件設定及び量産対応の主要機器/マテリアルハンドリング機器概念 設計における、要素技術開発・設計検討の状況を整理し開発課題を明確にする。

### (2)安全性

燃料製造施設に関する現行の安全審査指針として、MOX 加工施設安全審査指針と 再処理施設安全審査指針を参考に、臨界、遮へい、火災・爆発の防止を考慮したプロ セス、設備・機器、施設検討を行う

### (3) 経済性

基準システムの概念設計の結果から次項 3.2.1 に述べる手法により建設費、操業費 及び部材費を算出評価し、各燃料製造システムにおける燃料製造単価を求める。また、 多様なリサイクルシナリオに対応する製造システム(生産規模、径方向ブランケット 燃料製造の有無等)に対する燃料製造コストを基準システム設計結果に基づき見積も る。目標値を達成するための今後の課題を抽出する。

(4) 環境負荷低減性

基準燃料製造プラントの概念検討の結果から次項 3.2.2 に述べる手法により燃料製造システムからの低レベル廃棄物(地層処分並)低レベル廃棄物(余裕深度処分並)等の発生量の概略評価を行う。

(5) 資源の有効利用性

簡素化ペレット製造システムを基準にダスト状の核物質取り扱い工程の大小よりシ ステムの特徴を定性的に評価する。

(6) 核拡散抵抗性

核物質の性状(均質、非均質等)に起因する工程毎の核物質量の確定に対する確か らしさ及びホールドアップ対策の有効性に基づき、システム間で保障措置の適応性に 対し定性的な比較検討を行う。

(7)運転・保守補修性

セル内での燃料製造を実現するためには遠隔製造技術(遠隔保守補修)はシステムの成立性の重要な評価項目の一つであり、技術的成立性の評価に含める。

3.2 評価方法

3.2.1 **経済性評価方法**<sup>1)</sup>

以下の共通した考え方・手法を用いて燃料製造プラントの経済性を評価する。 (1)燃料製造単価の構成

燃料製造単価は、資本費と操業費と部材費で構成される。その内訳を表 3.2.1 に示 す。燃料製造単価は、これらの費用を計算し、その合計として算出する。各費用の計 算に用いる設定値を表 3.2.2<sup>1</sup>に示す。

以下に、資本費、操業費、部材費について述べる。

(2)資本費

資本費を構成する減価償却費、事業報酬、固定資産税、廃止措置費は、いずれも建 設費から上述の設定値を用いて計算される。建設費の算出方法について示す。

(i)建設費の算定範囲

施設建設費は、燃料製造と再処理の一体化プラントとし、燃料製造固有の設備であ る燃料製造主工程設備・新燃料一時貯蔵払出設備、燃料製造と再処理の共通設備であ る廃棄物処理・一時貯蔵設備、分析設備・ユーティリティ設備、保守設備、計装制御 設備、建屋・電気・換気設備(躯体、受変電・非常用発電、建屋換気・排気筒、放射 線管理・核物質防護等)を算定範囲とした。

燃料製造主工程設備は、経済性評価上の区分としては、湿式再処理製品として Pu 富化度調整済み硝酸溶液、酸化物電解再処理製品として MOX 及び UO<sub>2</sub> 顆粒、金属電 解再処理製品として Pu-U-MA 合金インゴットおよび U-Zr 合金インゴット等を原料 として受け入る工程から開始するものとした。

燃料製造/再処理の共通設備は次項(ii)の方法で按分して、燃料製造施設の建設費の 概略評価を行った。表 3.2.3 に建設費区分表を示す。

なお、用地取得費、敷地造成費、R&D 費、コンティンジェンシーは建設費の評価から除外した。

(ii) 燃料製造と再処理との共通設備の建設費の按分

共通設備の建設費の按分の方法は以下のとおりとした。

・廃棄物処理/貯蔵設備	:廃棄物発生量比
・分析 / サンプリング設備	: サンプリング点数比
・ユーティリティ設備	: ユーティリティ使用量比
・保守設備	:機器台数比
・計測制御設備	: 計測点数比
・建屋 / 電気 / 換気 / その他設備	: セル容積比

(3)操業費

操業費は、人件費、修繕費、消耗品等諸費、業務分担費、事業税から構成される。 このうち業務分担費および事業税は、人件費、修繕費、消耗品等諸費から前述の設定 値を用いて計算される。以下に人件費、修繕費、消耗品等諸費の算出方法について述 べる。

(i)人員および人件費

燃料製造設備に関係する人員を、高除染ペレット製造プラント運転に伴う人員配置 を参考にして、5班3交替制を前提として算定した。主工程は運転自動化を考慮する と工程の監視、品質検査業務等が主体となり、また主工程以外の人員配置もほぼ同じ と考えると、人員合計は各システム間でほぼ同一となった。このため、各システムで 同一の人員に設定するものとし、50tHM/y プラントで150人、200tHM/y プラントで 300人とした。この人員に人件費単価900万円/人・年を掛けて、人件費を50tHM/y(金 属燃料の場合38tHM/y)プラントで13.5億円/年、200tHM/y プラントで27億円/年と した。

(ii)修繕費

修繕費は、実績等から機器交換比率を設定し機器交換費を見積もった。定期検査費 は定検に必要な資機材等の経費のみとし、業務分担費については別途考慮されている ため不要とした。

機器交換比率は、各システムの燃料ミート加工と充填工程についてはその稼動環境、 機械的駆動の複雑さ等を考慮して5年で30%とし、燃料ピン検査工程以降とその他の 周辺設備については5年で10%とした。

(iii)消耗品等諸費

消耗品等諸費は定期交換部品費、補充ウラン費、ユーティリティ費等を含むもので あるが、定期交換部品費、ユーティリティ費はプロセスの違いとしてシステムごとに 算定し、これに保障措置費、工場管理費(工場でのOA機器等)は実績を参考として 考慮した。

(4)部材費

燃料部材費は、部材単価として燃料製造単価に加算される。その値は現状の実態に 基づき部材仕様の合理化及び大量生産により部材費低減を図り、5万円/kgHM を目標 とした。

### 3.2.2 環境負荷評価方法

(1)通常運転時の廃棄物

燃料製造システムの環境負荷低減性の指標として、廃棄物発生量及び核種の環境への移行率を評価する。

燃料製造システムでは、燃料の取り扱い形態に応じて、燃料を非密封で扱うピン加 工までの工程からの廃棄物を低レベル廃棄物(地層処分並) 密封で扱う燃料ピン検査 工程以降からの廃棄物をクリアランス廃棄物とする。なお、ブランケット燃料を非密 封で取り扱うセルからの廃棄物は、除染によって低レベル廃棄物(余裕深度並)にで きるものとする。廃棄物発生量は、マテリアルフロー基づき定常的に発生する工程廃 棄物と、保守補修に伴って発生する二次廃棄物とに大別し、それぞれ評価する。工程 廃棄物のうち主工程からの廃棄物発生量は、物質収支、運転手順等に基づいて評価す る。各システムに特徴的な工程廃棄物として、簡素化ペレット燃料製造システムから の脱硝オフガス凝縮水、ゲル化スフェアパック燃料製造システムからの反応廃液及び 洗浄廃液、金属燃料製造システムからの黒鉛るつぼ及び廃モールドがある。

二次廃棄物は保守補修に伴い交換廃棄される部品から成る。機器設計の深さに応じ て、部品に展開できるシステムでは、交換対象となる部品の重量及び故障率の推定に 基づく交換頻度から廃棄物発生量を評価する。そのような評価ができないシステムで は、機器の寿命を設定し、毎年一定の割合で交換廃棄されるものとして廃棄物発生量 を評価する。

廃棄物は生廃棄物としての発生量(重量)に加え、低レベル廃棄物(地層処分並) および低レベル廃棄物(余裕深度並)については廃棄体(2001ドラム缶)本数を示 す。廃棄物重量のドラム缶本数への換算係数は100kg/本とする。

(2)廃止措置時の廃棄物

廃止措置時の廃棄物として、セル内機器及び建屋躯体について評価する。放射性廃 棄物としては、セル内機器、非密封セルのライナおよび建屋躯体(密封セルの内表面 コンクリート含む)が発生する。放射能レベルの区分は以下の通りとする。

低レベル廃棄物(地層処分並)

炉心燃料を非密封で取り扱うセルのセル内機器およびセルライナ。

低レベル廃棄物(余裕深度並)

ブランケット燃料のみを非密封で取り扱うセルのセル内機器およびセルライナ。 クリアランス廃棄物

燃料を密封でのみ取り扱うセルのセル内機器、セル外の機器および建屋躯体。 施設全体の機器総重量は床面積 1m<sup>2</sup> 当り 200kg とする。このうちセル内主要機器 など機器リストで重量の明らかなものはその重量を採用する。機器総重量から主要機 器類の重量を引いた残りの重量を周辺機器など重量の明らかでないものの総重量とし、 放射能レベルによる廃棄物区分別の発生量は、対象となる発生元の床面積比で分配す る。

セルライナは厚さ 5mm、比重 8.0 として重量を算出する。 建屋躯体はコンクリート比重 2.2 として重量を算出する。

参考文献

1) 篠田佳彦他、「総合評価技術検討書 - 実用化調査戦略研究(フェーズI)報告書 - J JNC TN 9400 2001-061 (2001)

		減価償却	<b>弗</b> 貝
	資本費	事業報酬	
		固定資産	税
		廃止措置	
燃料製造単価		直接費	人件費
			修繕費
	操業費		消耗品等諸費
		関連費	業務分担費
			事業税
	部材費	集合体部	材費

表 3.2.1 燃料製造単価の構成

		評価条件の項目		設定	備考
		割引率		3%	通產省総合エネルギー調査会原子力部会評価 <sup>1)</sup> (以下、MIT199 評価)と同様
		プラント規模		* tHM/年	設計による
	減価償却費	建設費	建屋、建物、構築物	* 億円	設計による
			設備、機器、ユーティリティー	* 億円	設計による
			土地代	I	既存事業所内設置につき考慮しない
			建設期間	* 年	設計による
			建中利率	3%	割引率同様
			建中利子計上法	期末払い	
		運転期間(コストを)	均等化する期間)	40年	WIT199 評価同様
		償却期間	建屋、建物、構築物	40年	日本 이 기관 정말 2 도시도 가 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다
資			設備、機器、ユーティリティー	9年	□氏同門氏牛致衣」とこの没以設備しより推定
₩		設備更新		1	更新費用は年額換算により修繕費に算入
截		償却方法		定率法	一般的に使用されている
		残存価額割合		10%	一般的な設定
<u> </u>	固定資産税	固定資産税率		1.4%	法定值
	廃止措置費	解体、処理処分費		* 億日	設計による(建設費の 20%程度を目安とする)
		積立方法		減債基金法	定額積立
		積立期間		40年	運転期間と同様
		積立利率		3%	割引率同様
* -	事業報酬	事業報酬率		4.4%	MIT199 評価同様(償却中金利、利益準備金、配当金、社債発行費用等)
	人件費	人件費単価		900 万円/人·年	労働省発表の電気、ガス事業の全年齢平均賃金に福利厚生などの諸経費 (約2割)を加えて設定
操	袋	要員数		<b>∀</b> *	設計による(委託業務人件費は含めない)
業	費修繕費	修繕費率	<ul><li>(×建中利子込み建設費)</li></ul>	* %/年	設計による(年額に換算された設備更新費用を含む)
櫢	消耗品等諸費	消耗品等費率	<ul><li>(×建中利子込み建設費)</li></ul>	* %/年	設計による(消耗品費、委託費、等)
·	関 業務分担費	業務分担費率	(×直接費)	15%/年	
	費 │ 事業税	税率	(×全経費)	1.5%/年	法定值
部材臺		燃料部材費		* 万円/kgHM	設計による

┛ 覧
条件
同年(田
三単価
製造
然悉
3.2.2
表

\* :プラントの設計により得られるデータ 1)通産省総合エネルギー調査会原子力部会、第 70 回、資料 3(1999.12)

# 表 3.2.3 建設費区分表

区分	設備内容
燃料製造主工程設備	再処理製品受入
	脱硝転換設備
	ペレット製造、顆粒調整、射出成型
	燃料ピン加工
	燃料ピン検査
	集合体組立・検査
	集合体払出
廃棄物処理貯蔵設備・	試薬回収設備
ユーティリティ・他	固体廃棄物処理設備
	固体廃棄物貯蔵設備
	ユーティリティ設備
	冷水系、冷却水系、用水系、蒸気系、圧空系、
	ガス供給系、
	真空系
	分析・サンプリング設備
	保守・補修設備
	計装制御設備
建屋・電気・換気設備	建屋躯体(新燃料一時貯蔵建屋を含む)
	受変電 / 電気設備
	非常用発電設備
	換気空調設備
	排気筒
	放射線管理設備
	核物質防護施設
新燃料一時貯蔵設備	内装設備

4.ペレット法

### 4.1 MOX 燃料に対する簡素化ペレット製造システムの検討

本システムは、湿式再処理製品である MA 含有の低除染 Pu 富化度調整済み溶液を 出発物質に、脱硝・転換により MA 含有低除染 MOX 粉末に転換し、ペレットに成型 した後、被覆管に充填し燃料集合体に組上げる燃料製造システムである。以下にシス テムの特徴と課題およびこれを踏まえた検討の着眼点を示す。

### (1) 簡素化プロセスの採用

現行の高除染 MOX ペレット燃料製造プロセス(以下、現行プロセスという)では、 UとPuの1対1混合硝酸溶液をマイクロ波脱硝転換により MOX 粉末とし、製品仕 様のPu富化度となるようにUO<sub>2</sub>粉末および回収粉末と混合した後、添加剤混合・造 粒、添加剤混合・成型、予備焼結、焼結、研削、検査等の各工程を経て製品ペレットと している。これに対し本システムにおける簡素化プロセス(ショートプロセス)は、 MA 添加およびPu富化度調整を硝酸溶液段階で行ない、マイクロ波脱硝転換により 均質性の良いMA含有低除染 MOX 粉末に転換した後、添加剤を混合することなくペ レットに成型し、焼結、研削、検査工程を経て製品ペレットとする新たなプロセスで ある。現行プロセスおよび本システムにおける簡素化プロセスの概略フローを図 4.1.1 に示す。

簡素化プロセスの成立性は要素技術開発課題ではあるが、本プロセスを採用するこ とで図 4.1.1 に示すとおり粉末混合工程、添加剤混合工程等が削除でき、大幅なプロ セス合理化が図れ、現行プロセスに対して経済性向上や廃棄物量低減が期待できる。

(2) MA 含有低除染 MOX ペレットの製造

プロセス設計や設備設計等、システム検討を行う上で重要な MA 含有低除染 MOX ペレットの製造に係わるプロセス条件、品質管理仕様、製品歩留まり等に関する知見 が少ない。このため、要素技術開発において、製品として製造可能な仕様範囲、燃料 物性、照射特性等を明らかにし、得られた成果から製造仕様を定め、システム検討に 反映することが重要となる。

また、高放射能・高発熱の燃料を量産するため、ペレット製造はセル内での遠隔自 動製造システムを基本とする。システム設計に当たっては、臨界安全等の安全性はも とより、セル内での遠隔自動製造、遠隔保守、高放射能・高発熱に対応したペレット 製造機器設計を行うことが重要となる。

(3) セル内でのペレット製造

経済性を追求した量産システムであり、セル内で所定生産量を安定的に製造できる ことが重要となる。特に、ペレットは小さて軽く不安定な形状が故に転倒や脱落など の搬送不良を起こし易く、設備稼働率を低下させる要因となることが予想される。こ のような不確定要因や設備故障に伴うシステム運転停止期間を考慮しても、所定操業 期間内で所定生産量が安定的に生産できることの見通し(以下、セル内での安定操業 性という)を明らかにすることが重要となる。

(4) 粉末の取扱い(ホールドアップ対策)

簡素化プロセスを採用することで粉末取扱工程の多くを削減しているものの、脱 硝・転換工程、成型工程および研削工程では粉末を取り扱うため、保障措置上、あるい は被ばく防止、保守性の観点から、粉末取扱い工程のホールドアップ対策を十分に講 じることが重要となる。

(5) 高除染 MOX ペレットの製造実績

高除染 MOX ペレットの製造実績、知見を有しており、他の燃料製造法に比べ、技術的成立性を見通すための課題は少ないと考えられる。

以上の特徴・課題および検討の着眼点を踏まえ、フェーズ では、簡素化プロセス は成立するとの前提で、かつ、MA 含有低除染 MOX ペレット製造仕様については、 MA および不純物の含有率を除き暫定的に高除染 MOX ペレットと同等の製品を製造 するものとして、主要プロセスの設備概念を明らかにし、燃料製造/再処理一体化プラ ントの配置検討を行い、経済性に関する潜在能力を検討した。

フェーズ では、簡素化プロセス成立性および MA 含有低除染 MOX ペレット製造 仕様を要素技術開発により確認中であることから、この成果およびシステム検討進捗 を踏まえ、基本プロセスの成立性について見通しを検討する。また、基本プロセス成 立性の検討結果を踏まえ、臨界安全、核拡散抵抗性(ホールドアップ)、技術的成立性 (遠隔保守・補修性)等の設計要求に配慮した主工程設備の概念設計を行なうとともに、 主工程設備に付随する保守・補修設備等の周辺設備の概念検討を行う。さらに、物流合 理性や相互汚染防止等に配慮した主工程設備のライン構成および建屋内配置検討を行 い、得られた検討結果からセル内での安定操業性の見通しを概略検討する。最後にこ れら検討結果を踏まえ、燃料製造コストおよび廃棄物発生量等を評価し、サイクルシ ステムスクリーニングに資する評価データを整備する。

### 4.1.1 基準システム設計

基準となる燃料製造施設は、フェーズ 開始時点で設定した Na 冷却大型炉・MOX 燃料炉心に燃料集合体を供給する施設とし、生産規模は 200tHM/y とする。

### 4.1.1.1 施設概念構築

以下に示す設計検討手順に従い基準システムの施設概念構築を行う。 基本方針と前提条件の整理(建屋構成、操業条件、製品仕様等) 設計制約条件の検討(核的制限、熱的制限等) プロセスの設計検討(要素技術開発成果の整理、プロセス成立性検討) マスフローおよび必要生産量の検討

主工程設備の概念設計(安全性、遠隔保守性等を考慮した構造検討) 周辺設備の概念検討(保守・補修設備を除く周辺設備概念の検討) 保守・補修方法の検討(保守・補修方法、手順および設備概念の検討) ライン構成の検討(物流合理性、相互汚染防止等考慮) 燃料製造/再処理一体化プラントの配置検討(セル内および建屋内配置検討) セル内での安定操業性の概略検討(システム稼働率の推定)

(1) 設計検討の基本方針と前提条件

システム設計検討にあたり、基本方針と前提条件を整理する。

() 施設・設備の設計および配置方針

燃料製造施設は、再処理施設との一体化プラントとし、主工程設備と周辺設備を配置する主建屋、使用済燃料貯蔵建屋、新燃料集合体貯蔵建屋および管理棟の4建屋で 構成されるものとする。

周辺設備については主工程設備に付随する保守・補修設備を除き、基本的に燃料製造/再処理共用設備として設計検討を行うものとする。

主工程設備における再処理との取り合いは、MA 添加・Pu 富化度調整までを再処理 とし、調整済み溶液を受入れ処理する脱硝・転換工程から燃料製造の範疇とする。ただ し、Pu 富化度調整技術は簡素化プロセス成立性に係わる重要な要素技術開発課題で あり、燃料製造システム側で言及するものとする。

なお、燃料製造において、燃料を直接取り扱う設備は原則としてセル内に収納し、 遮蔽機能は原則セル壁で担保するものとする。

- ()保守方針
- (a) 完全遠隔保守セル

設備および設備保守・補修用遠隔操作機器の保守・補修は共に遠隔で行い、作業員が セル内に進入することを想定しないセルである。保守・補修方法は、遠隔保守性の確保 およびシステム稼働率の向上(停止期間短縮)のため、設備をモジュール構造とし、 インセルクレーン(ICC)パワーマニピュレータ(PM)等により故障モジュールと 保守済みモジュールを交換するモジュール交換方式を採用するものとする。故障モジ ュールは設備運転中に保守エリアで保守し保管する。

本検討プラントにおいては、放射性物質を非密封で取り扱う脱硝・転換工程から燃 料要素組立工程までの設備を設置するセルを完全遠隔保守セルとする。

(b) 直接保守セル

核燃料の撤去を遠隔で行い、さらに必要に応じて除染を行った後、セル内に作業員 が立ち入り設備の直接保守を行うセルである。

本検討プラントにおいては、燃料要素検査工程以降の放射性物質を密封で取り扱う 設備を配置するセル、エアロックセル、ICC/PM 保守セル等を直接保守セルとする。 () 操業条件

年次保守点検、核物質在庫調査、月例査察、年末年始等の期間を 115 日と想定し、 この間は運転を停止するものとして残りの 250 日を運転日数とする。運転日数 250 日 のうち故障等による設備停止期間を 50 日と想定し、実稼動日数は 200 日とする。 操業形態は、5 班 3 交代による 24 時間連続運転を基本とする。

() 製品燃料条件

製品燃料仕様の前提となる炉心は、フェーズ 開始時点で設定したNa冷却大型 炉・酸化物(MOX)燃料炉心とする。炉心、燃料集合体および燃料要素の基本仕様を 表2.3.1 および表2.3.2 に示す。電気出力は1,500MWe、運転サイクル長は17ヶ月、 燃料交換バッチ数は炉心燃料および径方向ブランケット燃料集合体とも4バッチ、燃 料集合体体数は内側炉心燃料が316体、外側炉心燃料が266体、径方向ブランケット 燃料が198体である。Pu富化度については、外側炉心燃料が24.9wt%、内側炉心燃 料が21.1wt%である。

原料(再処理製品)は、上記の炉心から炉心平均燃焼度15万 MWd/t で取り出した 使用済み燃料を4年間冷却し、先進湿式法(晶析併用簡素化 PUREX 法 +SETFICS/TRUEX法)で再処理したものとする。再処理製品の重量組成を表4.1.1 に示す。MA 含有率は外側炉心燃料が1.2wt%、内側炉心燃料が1.0wt%である。

以上の仕様を踏まえ設定される製品燃料の基本仕様を表 4.1.2 に示す。燃料要素の スタック重量は、内側および外側炉心燃料要素がともに 552gHM、径方向ブランケッ ト燃料要素が 1,451gHM となる。

() 製造歩留り

本検討では、フェーズ と同様に 90%(成型工程 0.2%回収、研削工程 1.8%回収、 ペレット検査工程 6%不良、燃料要素組立・検査工程 2%不良)とする。

() スクラップの処理

本プラントから発生するクリーンスクラップ(CS)およびダーティスクラップ(DS) は、燃料製造施設で湿式回収方式により処理し、処理済み溶液を再処理施設へ送液す るものとする。

() 製品検査

本プラントの検査設備としては、溶液・粉末検査設備、粉末特性試験設備、ペレット検査設備、燃料要素検査設備および集合体検査設備を考慮する。

(2) 安全設計に係わる検討

臨界安全、火災・爆発防止、耐震、崩壊熱による制限について検討を行い、システム設計に当たっての制約条件を明らかにする。

() 臨界安全

臨界安全の評価条件と結果を表 4.1.3 に示す。

本検討システムは、年間生産量 200tHM、24 時間連続運転を前提とした量産システ ムなので、単一ユニットの臨界管理方法は連続運転に適した形状管理を原則とする。 ただし、以下の設備については形状管理が困難なため、質量管理、または本数管理を 適用するものとする。なお、MOX 粉末、MOX ペレット、燃料要素(燃料集合体)の 臨界計算では水没を考慮していないため、当該設備設置セルの消化設備はスプリンク ラー方式ではなく、窒素ガスなどによる窒息消火方式を採用する。

(a) 成型設備

流動性の観点で MOX 粉末が成型プレス上で凝集状になる可能性が想定され、形状 管理を適用することが困難になることも考えられる。粉末の核的制限値は 184kg(U +Pu)と大きいことから、現段階では成型設備については質量管理を適用する。

(b) 燃料要素検查設備、燃料集合体組立設備、燃料集合体検查設備

当該設備では燃料要素または集合体を立体的に搬送するため、形状管理を適用する ことは困難と考えられることから、燃料要素の本数管理を適用する。

(c) ペレット貯蔵庫、燃料要素貯蔵庫、燃料集合体貯蔵庫

当該設備では燃料を立体的に搬送し、かつ貯蔵数が多いことから、形状管理、質量 管理、数(個数、本数、体数)管理のいずれか単独での管理は困難と考えられることか ら、数と形状寸法の組合せによる管理を適用する。

() 火災・爆発防止

燃料製造で使用する火災・爆発に係わる物質は、脱硝・転換設備および焼結設備で 使用する水素ガスのみである。水素ガスは、空気中に漏えいしても爆発の恐れの無い よう不活性ガスで 5%に希釈したものを使用する。万一の漏えいに備え、設備への供 給前に濃度異常を検知し、希釈水素ガスの供給を停止するインターロックの設置を考 慮する。U/Pu 硝酸溶液を長時間貯留する槽については、放射線分解により水素ガス が発生するが、濃度が爆発限界を下回るよう定常的にバブリングを行い、水素ガスを 掃気するものとする。

() 耐震

「再処理施設安全審査指針」および「MOX 加工施設安全審査指針」を参考に、以下のように耐震クラスを分類する。

(a)耐震クラスA

核燃料物質を含有する溶液を包蔵する主工程設備および配管 主工程セルから直接液を受け入れる廃液貯槽 核燃料物質を非密封で取り扱うセル

の閉じ込め性能の維持に必要な設備

の非常用電源

(b) 耐震クラス B

核燃料物質を取り扱う設備類で、クラスA以外のもの 廃液貯槽でクラスA以外のもの 核燃料を密封で取り扱うセル

閉じ込め性能の維持に必要な設備

の非常用電源

### (c) 耐震クラス C

耐震クラスAまたはBに該当しない機器

以上の分類に従い、主工程設備のうち原料受入設備、脱硝・転換設備、CS・DS 処理 設備および廃液処理設備は耐震クラスA、その他の設備は耐震クラスBとする。

MA 等の崩壊熱による制限

フェーズ において、崩壊熱による主要機器の表面温度および中心温度を検討して いる<sup>1)</sup>。このときの崩壊熱は、軽水炉からの MA を受入れ MA 含有率を5 wt%に調整 した燃料組成で計算しており 18.14W/kgHM としている。本検討システムでは原料燃 料組成の変更等により MA5 wt%含有の場合でも 13.5W/kgHM と小さくなる。そこ で、熱的制約条件がどの程度緩和されるか見極めるため、フェーズ の結果から外挿 法により各温度を算出する。結果は表 4.1.4 に示す通りであり、フェーズ と同様に 以下の対応を取る必要がある。

(a) 粉末受入ホッパ、成型ホッパ

自然対流熱伝達では、表面温度および中心温度とも 130 を超え、MOX 粉末の再酸化防止制限温度(約 100 と想定)を上回る。したがって、容器内を窒素封入する、あるいは容器周囲に水冷ジャケットを装着し強制冷却を施す等の対策が必要となる。 (b) 焼結皿ペレット

中心温度は焼結皿3段積みの場合、再酸化温度を超えることとなり、焼結炉等では2段積み以下で検討する必要がある。

(c) 燃料集合体

燃料集合体は一般に横置き状態で組立てることから、横置き状態での温度評価を行 い、集合体中心温度は約 630 になるとの結果を得た。燃料集合体中心部の燃料要素 温度は集合体中心温度と同程度と考えられ、燃料要素部材である ODS 鋼は表面酸化 防止の観点からは 300 程度に抑える必要があると考えられるので、燃料集合体を横 置きで組み立てる場合には品質管理の観点から強制冷却を考慮する必要がある。

(3) プロセス設計

簡素化プロセスの成立性およびMA含有低除染MOXペレットの製造仕様に関する主要な要素技術開発課題と現時点での要素技術開発成果を概略プロセスフローに併記し図 4.1.2 に示す。要素技術開発成果を踏まえ該当プロセスは以下の通りとする。なお、 簡素化プロセス成立性に関する要素技術開発試験では高除染MOX粉末を用いている。 () Pu 富化度調整(簡素化プロセス成立性)

U/Pu 硝酸溶液、U 硝酸溶液および MA 硝酸溶液を混合し、Pu 富化度を外側炉心燃料では 24.9±0.5wt%に、内側炉心燃料では 21.1±0.5wt%以内に調整するプロセス である。

簡素化プロセスでは、前述の通り Pu 富化度を硝酸溶液段階で高精度に調整する必要がある。このため、要素技術開発試験において、エアリフトポンプ式送液装置のモックアップ装置を製作し、U/Pu 硝酸溶液と U 硝酸溶液を用いた Pu 富化度調整試験を行い、得られたデータを基に調整精度を評価している。この結果、燃料仕様を満足する Pu 富化度調整が可能な見通しを得ている<sup>2)</sup>。

この成果を踏まえ、Pu 富化度調整プロセスには、保守性に優れ、ロット間での汚 染が無いと考えられるエアリフトポンプ式送液装置を暫定的に採用し設備概念設計を 行うこととする。なお、溶液段階での Pu 富化度調整は可能であるとの見通しが得ら れたことから、溶液の高均質性を活かし、量産化に伴う品質管理の負荷増加を抑制す るために、燃料製造プロセスのロット単位は再処理製品 7 日分相当とする。

() マイクロ波脱硝、焙焼・還元(簡素化プロセス成立性)

(a) プロセス設計

Pu 富化度調整済みの MA 含有低除染 U/Pu 硝酸溶液について、マイクロ波脱硝、 粗砕、焙焼、還元を順次行い MA 含有低除染 MOX 粉末に転換するプロセスである。 簡素化プロセスでは、現行の脱硝プロセス(UとPuの1対1混合硝酸溶液を脱硝す る)とは異なり、燃料仕様に合わせた Pu 富化度溶液を脱硝することとしている。こ の脱硝特性および脱硝後粉末特性は不明なため、要素技術開発として Pu 富化度 30% 溶液の脱硝試験を行ない、脱硝処理時間および熱的特性は現行溶液と同等であること、 転換した MOX 粉末は均質であり、Pu スポットのような偏析は見られないことを確認 している<sup>3)</sup>。

また、簡素化プロセスは、粉末混合工程の削減および粉末の大規模ロット取扱いに よる管理簡素化により経済性向上が期待できるが、さらに造粒工程を削減し経済性を 高めるため、流動性の悪い粉末でも成型プレスのダイスへ高充填および充填密度均一 化が期待できる充填方式の一つにエアータップ方式があり、この適用性について要素 技術開発を実施中にある。併行して、設備負荷の小さい転動造粒法に関する要素技術 開発が進められており、転動造粒を行うことにより流動性指数および焼結密度とも目 標値をともに満足できる見通しがあることを確認している<sup>4)</sup>。今後、要素技術開発の 進捗を踏まえて総合評価を行い、エアータップ方式および転動造粒方式の選択を行な うこととするが、本検討では、経済性を重視し、暫定的にエアータップ方式を採用し た設備設計を行なうものとする。

以上の成果、現行プロセス仕様等を踏まえ、本検討での脱硝・転換プロセス仕様は 次の通りとする。

脱硝プロセスでは、約 350 で1時間マイクロ波脱硝を行い MA 含有低除染 U/Pu

硝酸溶液を MA 含有低除染 PuO<sub>2</sub>・UO<sub>3</sub> とする。焙焼・還元プロセスでは、これを約 750 の空気雰囲気中で焙焼した後、約750 の5%H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>ガス雰囲気中で還元を行い MA 含有低除染 PuO<sub>2</sub>・UO<sub>2</sub> とする。還元後の粉末は粗砕し再酸化を防ぐため冷却ま たは窒素ガスでカバーした後、成型プロセスへ払出す。脱硝時のオフガスは、凝縮器 により水分と硝酸分を凝縮液として回収した後、オフガス処理プロセスに移送する。 焙焼・還元時のオフガスは固気分離器およびへパフィルタにより微粉を回収・捕集し、 固気分離器での回収粉は CS・DS 処理プロセスに、オフガスはオフガス処理プロセス に送る。

(b) 脱硝·転換設備の技術的成立性確認

脱硝・転換設備は、量産化対応、核燃料物質のダスト等廃棄物への移行低減、高信 頼性(低故障率)および自動化・遠隔保守対応を狙い、図 4.1.3 の構造概念に示すよ うに、臨界制限を考慮した大型脱硝容器の採用、同一容器内での一連処理(脱硝/粗粉 砕/焙焼/還元)、ターンテーブルと昇降機能の複合による合理的な脱硝容器移送方式の 採用、装置のモジュール化と遠隔着脱構造の採用等、新概念を採用した構造としてい る(構造説明は(4)項 主工程設備の概念設計を参照)。

これら新概念の技術的成立性の見通しを確認するため、ターンテーブル式脱硝・転換装置のスケールダウン試験装置(取扱量は実機の約1/88)を製作し、ウラン溶液を用いて脱硝・転換処理を行い、主に、繰り返し試験によるセラミック製脱硝容器の健全性および排出バルブからの溶液リークの有無を確認した。試験装置の外観を図4.1.4に示す。試験回数は予備試験も含め約20回行ったが、セラミック製脱硝容器に異常は認められず、排出バルブからの溶液リークも認められなかった。なお、還元中に脱硝容器内が微負圧になり雰囲気である空気が容器内へ流入した模様で、一部U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>またはU<sub>4</sub>O<sub>7</sub>が生成された。実機設計に当たっては、脱硝容器内を微正圧とする、雰囲気を不活性ガスにする、雰囲気が流入しないよう完全シール構造とする等の対策が必要ではあるが大きな問題では無く、懸念していたセラミック製脱硝容器および排出バルブの健全性については問題無いことを確認できたことから、ターンテーブル式脱硝・転換装置の構造に係わる技術的成立の可能性を確認できた。

()ペレット成型(簡素化プロセス成立性)

脱硝・転換後の MA 含有低除染  $PuO_2$ ・ $UO_2$ 粉末を成型プレスにより中空ペレットに 成型するプロセスである。

簡素化プロセスでは、成型プレスのダイス表面に潤滑剤を噴霧し成型するダイ潤滑 成型法を適用することで、原料粉末と潤滑剤の混合工程および潤滑剤を除去する予備 焼結工程の削減による工程簡素化を図っている。この見通しを確認するため、要素技 術開発試験において、Pu 富化度 30wt%の MOX 粉末を用い、手作業でダイスに潤滑 剤を塗布した成型プレス試験(模擬ダイ潤滑成型試験)を行っており、現行プロセス (潤滑剤混合法)と同等以上の外観、密度および強度を有する成型ペレットが製造で きる見通しを得ている<sup>4)</sup>。さらに、当該ペレットを現行焼結法で熱処理し得られたペ レットの外観、Pu 均一性および微細構造は、現行プロセスで得たペレットと同等で あり、密度については目標値 95%TD 以上を達成できる見通しを得ている 4)。これら 結果を受け、下部噴霧式ダイ潤滑装置を試作し成型機に組み込み、モリブデン粉を用 いたダイ潤滑成型試験を行っており、現行プロセス(潤滑剤混合法)と同等以上の外 観、密度および強度を有する成型ペレットが、約7.5ペレット/分・パンチの成型速度 で製造できる見通しを得ている。

以上の成果を踏まえ、成型プレスにはダイ潤滑成型法を採用し、成型速度は 7.5 ペレット / 分・パンチとして設備概念設計を行うこととする。なお、ダイスへの粉末充填方式には()項で述べたエアータップ方式を採用する。

( ) 焼 結(MA 含有低除染 MOX ペレット製造仕様)

成型ペレットを還元ガス雰囲気中で焼結するプロセスであり、フェーズ 初期の設計値は、焼結温度約 1700 、昇温/降温速度 400 /h、焼結時間 3 ~ 5 時間、焼結雰囲気は 5%H<sub>2</sub>-Ar としている。

これらのプロセス条件は要素技術開発試験において確認中であり、試料(Np0.02 Am0.02 Pu0.3 U0.66)O2±Xと(Np0.02 Am0.02 模擬 FP0.02 Pu0.3 U0.64)O2±Xを用いたペレット調製試験では、熱処理時の温度と雰囲気中の酸素分圧を制御することで燃料仕様 O/M = 1.95 のペレットを調整できる見通しを得ている <sup>5) 6)</sup>。一方、試料(Np0.02 Am0.02 模擬 FP0.02 Pu0.3 U0.64)O2±Xと(Np0.018 Am0.018 Nd0.010 Pu0.297 U0.657)O2 のペレットで は、条件により Pu-Am-FP 元素系化合物の析出が認められたものの、焼結温度及び焼 結雰囲気の酸素分圧により析出状況を制御できる可能性を得ている <sup>6) 7)</sup>。なお、本試 験における模擬 FP 混入量は、乾式再処理から得られる原料中の推定 FP 量相当とし ているが、中間評価段階での先進湿式再処理ではその 1/10 程度と推定されているので、 均質性を得るためのプロセス条件は本試験結果より緩和される可能性がある。

一方、セル小規模試験設備での遠隔手動製造により、Pu 富化度 30%の 3%および 5%Am 含有 MOX ペレットを作製する試験を行っており、焼結雰囲気を 5%H<sub>2</sub>-Ar 加 湿ガスにすることで外観、均質性、密度の良好なペレットが作製できる見通しを得て いる <sup>8) 9)</sup>。

設備概念設計におけるプロセス条件は暫定的に焼結温度 1700 ×3~4h、雰囲気 5%H<sub>2</sub>-Ar 加湿ガスに設定する。今後、焼結プロセス条件の最適化が重要な開発課題となる。

() 端栓溶接部検査

燃料要素の端栓溶接部を検査するプロセスである。

燃料要素の被覆管材質は ODS 鋼であり、端栓溶接には抵抗溶接法を採用する必要 があるが、従来の X 線による溶接部検査では欠陥の識別が難しい課題がある。このた め要素技術開発として、X 線よりも欠陥分解能の高い超音波による溶接部欠陥検査方 法を開発し、超音波探傷法の有効性を確認している<sup>10)</sup>。この成果を踏まえ、燃料要素 の端栓溶接部欠陥検査方法には、超音波探傷法を採用し、設備概念設計を行うこととする。

以上の小規模・要素技術開発試験から、簡素化プロセスによる MOX ペレット製造 の見通し、並びに現行プロセスによる MA 含有低除染 MOX ペレット製造の可能性を 確認することができた。これら成果から、簡素化プロセスによる MA 含有低除染 MOX ペレット製造について、その基本プロセス成立の可能性が示されたものと考える。

今後の課題は、両試験とも小規模試験であり、試験個数は少数(セル内製造試験の 場合 50 個程度)であること、また Cm や実 FP 混入燃料では無いことから、原料の 放射線および発熱に伴うプロセス条件への影響、マスフロー設定の際に重要な製造歩 留まりに関する要素技術開発が挙げられる。個別課題として簡素化プロセス成立性に ついては、造粒条件の最適化を図るとともに、さらに造粒工程を削減し経済性を高め るためのエアータップ充填法についての要素技術開発を行ない、造粒方式およびエア ータップ方式の選択を行なうことである。MA 含有低除染 MOX ペレット製造性につ いては、システム設計用熱処理プロセス条件の最適化を図ること、および照射試験を 行い照射後試験結果の評価により、リサイクル技術の成立性を明らかにすることであ る。さらに、MA 添加低除染燃料からの放射線(特に 線)および崩壊熱に耐性を有 する高信頼性機器の開発が重要である。

- (4) 主工程設備の設計
- () 必要生産量の検討

年間生産量、製品燃料条件および製造歩留りからマスフローを設定し、必要生産量 を求めた結果を図 4.1.5 に示す。燃料集合体の年間必要生産体数は、内側炉心燃料 512 体、外側炉心燃料 431 体、径方向ブランケット 321 体となる。また、燃料要素の日間 必要生産量は内側炉心燃料 709 本、外側炉心燃料 597 本、径方向ブランケット 208 本となり、ペレットの場合では内側炉心燃料が約 7.0 万個(217kgHM)、外側炉心燃 料が約 5.9 万個(183kgHM)、軸方向ブランケットが約 9.5 万個(381kgHM)、径方 向ブランケットが約 2.5 万個/日(327kgHM)となる。

() 設備・機器概念

要素技術開発成果および必要生産量の検討結果に基づき、安全性(臨界、火災・爆発防止)核拡散抵抗性(ホールドアップ低減)遠隔保守・補修性等の設計要求を満た す設備概念を検討し、概略構造、遠隔保守・補修方法、安全対策、ホールドアップ対策、 設備台数等を明示する。

(a) 原料受入設備

Pu 富化度調整済みの MA 含有低除染 U/Pu 硝酸溶液または低除染 U 硝酸溶液を受入れ、それぞれ一時貯留し組成を確定した後、脱硝・転換工程へ送液する設備である。 再処理施設より受け入れた Pu 富化度調整済みの MA 含有低除染 U/Pu 混合溶液 Pu
富化度 21.1wt%および 24.9wt%)は、それぞれの富化度毎の U/Pu 溶液供給槽に、また低除染 U 溶液については U 溶液供給槽に貯留する。U/Pu 溶液供給槽および U 溶液供給槽の貯留容量は、量産化に伴う品質管理の負荷増加の抑制と、再処理施設側の不具合事象発生時の復旧時間を 7 日と想定し、7 日分とする。貯留されたそれぞれの溶液は圧縮空気による攪拌、U、Pu 濃度等の分析を行い、組成を確定する。次に、計量ポットにて所定量計量し、脱硝・転換設備へ送液する。

安全対策として、U/Pu 溶液供給槽は円環槽とし、液厚形状管理(85mm 未満)に より臨界安全を担保するとともに、放射線分解により発生する水素は、濃度が爆発限 界を下回るよう定常的にバブリングを行い、水素ガスを掃気する。

設備必要台数を表 4.1.5 に示す。原料受入設備は、再処理施設からの溶液受入と組 成確定済み溶液の脱硝・転換設備への送液を併行して行うことから、富化度の異なる外 側炉心燃料用と内側炉心燃料用、並びにブランケット燃料用ごとにそれぞれ2系統と する。

なお、U/Pu 溶液供給槽において組成を確定した 7 日分の U/Pu 溶液は同一ロット として、Pu 富化度等の組成に対する品質管理を行なう。

(b) 脱硝·転換設備

原料受入工程から受入れた MA 含有低除染 U/Pu 硝酸溶液(または低除染U硝酸溶液)を MA 含有低除染 PuO<sub>2</sub>・UO<sub>2</sub>粉末(または低除染 UO<sub>2</sub>粉末)に転換し、成型工 程へ払出す設備である。設備の概略構造を図 4.1.3 に示す。

MA 含有低除染 U/Pu 硝酸溶液(または低除染 U 硝酸溶液)を、原料受入設備の計 量ポットよりマイクロ波脱硝装置内にセットされた脱硝容器に受入れ、マイクロ波脱 硝装置で脱硝する。脱硝体(MA 含有低除染 PuO<sub>2</sub>・UO<sub>3</sub>)は脱硝容器ごとターンテ ーブル動作の下降、旋回、上昇動作により次の粗砕装置へ搬送・セットし、粗砕装置 により粗砕される。以下、同様に脱硝容器を焙焼装置および還元装置へ順次搬送・セ ットし、焙焼および還元処理を行う。最後に粉末払出装置へ搬送・セットし、脱硝容 器下部バルブを開けることで、還元粉末(MA 含有低除染 PuO<sub>2</sub>・UO<sub>2</sub>)を重力落下 により成型設備へ払出す。この後、空になった脱硝容器は再びマイクロ波脱硝装置へ 搬送・セットされ、繰り返し使用される。

遠隔自動運転および遠隔保守・補修対応として、前述の脱硝、粉砕、焙焼、還元、 払出、ターンテーブル昇降・旋回部等の遠隔保守対象機器はモジュール構造とし、PM および ICC により遠隔着脱可能な構造とする。なお、これ以降の設備についても、遠 隔保守対象機器はモジュール構造とし、PM および ICC で遠隔着脱可能な構造として いる。

安全対策として臨界安全については、MA 含有低除染の U/Pu 混合溶液、PuO<sub>2</sub>・ UO<sub>3</sub>および PuO<sub>2</sub>・UO<sub>2</sub>粉末を包蔵する脱硝容器は円筒容器とし、円筒形状管理によ り臨界安全を担保する。火災・爆発防止対策については、還元プロセスで使用する水 素ガスを不活性ガスで 5%に希釈し爆発限界濃度以下として扱うとともに、万一の漏 えいに備え、設備への供給前に濃度異常を検知し、希釈水素ガスの供給を停止するイ ンターロックを設置するものとする。なお、脱硝・還元設備の設置セル内雰囲気は空気 とするが、今後の要素技術開発成果や設計進捗により、還元処理後の冷却に長時間を 要し要求処理能力を満足できない場合や、MAの崩壊熱による還元粉の再酸化が懸念 される場合には不活性ガス雰囲気とする等の対策を講じる。

ホールドアップ対策としては、前述の通り核物質を容器内に包蔵したまま移し変え を行うことなく一連の処理を行うシステムを採用することで、飛散要因を最小に抑え、 廃棄物への移行を抑制する。なお、現状のプロセスでは、焙焼および還元反応を促進 させるため脱硝後に粗砕を行っているが、ホールドアップ低減の観点からは還元後に 粗砕を行うことが有効であり、今後この可能性について要素技術開発により確認する。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力は1バッチ当たりの処理 量×処理バッチ数で求まる。処理量は内側炉心および外側炉心燃料の場合、臨界安全 制約から 4.3kgHM、軸方向および径方向ブランケット燃料の場合にはマイクロ波発 生装置の容量制約から 8.5kgHM に設定した。処理バッチ数(処理時間)は現行転換 設備および再処理工場の機器設計を踏まえ24バッチ/日(1時間/バッチ)に設定した。 この結果、内側炉心燃料用に3基、外側炉心燃料用に2基、軸方向および径方向ブラ ンケット燃料用にそれぞれ2基ずつ必要となる。

(c) 成型設備

脱硝・転換設備から還元粉末(MA 含有低除染 PuO2・UO2または低除染 UO2)を受 入れ、グリーンペレットに成型した後、焼結皿に整列・移載して自走搬送台車(以下、 AGV とする)へ払出す設備である。設備の概略構造を図 4.1.6 に示す。

脱硝・転換設備から排出された還元粉末は、成型プレス上方に設置された粉末受入 ホッパに一時貯留し、重量を確定した後、成型ホッパへ重力流にて移送する。成型ホ ッパからは定量供給機により成型プレス内のエアータップ充填機に送り、ダイスへ定 量充填した後、炉心燃料は中空ペレットに、軸方向および径方向ブランケット燃料は 中実ペレットに打錠・成型する。成型ペレットはコンベアによりペレット整列機へ送り、 ペレット積込み装置により焼結皿上に整列・移載する。ペレットが満載となった焼結皿 はボートに移載し、移載枚数が所定枚数に達したならボートごと焼結皿の秤量を行い、 AGV へ払出す。この後、AGV により焼結皿は焼結設備へ搬送される。

還元粉末の成分分析用サンプリングは、粉末受入ホッパと成型プレス間の重力流配 管中に設けるサンプリング装置にて行う。また、成型ペレットの高さおよび密度を抜 取り検査するためのペレット検査装置は、ペレット整列装置内に設けている。

成型プレスは、フェーズ では処理量の観点からロータリー方式としたが、その後、 海外の施設の実績等を調査した結果、14連程度のレシプロ方式のマルチパンチプレス 機があること、また、エアータップ充填機の採用によりパンチ間の充填密度のばらつ きを抑えた高速充填が達成できる可能性があることから、ロータリープレスに比べ駆 動部が少なく、動きも上下のみの単一運動で製造中の調整が比較的簡単であり、ペレ ット内の密度分布差がロータリー方式に比べ小さいとされているレシプロ方式を採用 することとした。これにより、焼結後の鼓形状が緩和されることが期待でき、ペレッ トの直径公差次第では将来的には研削工程を省略できる可能性がある。

本設計では、前述の通りダイスへの粉末充填性を向上させるため、エアータップ方 式の粉末充填機を採用したが、要素技術開発の結果で造粒が必須となった場合には、 脱硝・転換設備に造粒機能を持たせるなどの対応を取る。潤滑方式については、潤滑剤 混合工程および予備焼結工程の削減による工程簡素化と、崩壊熱による貯留粉末温度 上昇で潤滑剤が昇華することを懸念し、現行手法の潤滑剤混合法は採用せず、ダイス に潤滑剤を直接噴霧するダイ潤滑方式を採用する。

安全対策として、臨界安全については、流動性の観点で MOX 粉末が成型プレス上 で凝集状になる可能性が想定され、形状管理を適用することが困難になることも考え られることから、MOX 粉末の核的制限値が 184kg (U+Pu)と大きいことを踏まえ、 現段階では質量管理を適用する。さらに、地震時のペレットの散乱やそれに伴う臨界 防止のため、ペレット整列装置やボートには散乱防止用の囲いや蓋を設置する。なお、 このような地震時のペレット散乱対策は焼結工程以降の各工程においても、適切に設 置するものとする。AGV については、臨界安全はペレットを焼結皿に積載し取り扱う ため、平板厚さ形状管理により担保する。地震対策は、軌道への爪設置によるAGV の転倒防止や、焼結皿固定爪による跳ね上がり防止を考慮する。MA の崩壊熱による 再酸化防止としては、粉末受入ホッパは窒素ガス雰囲気とし、成型ホッパについては 水冷ジャケット方式による除熱を考慮する。

ホールドアップ対策として、成型プレスの成型部は局所カバーで覆い、集塵装置に よりカバー内飛散微粉末を吸引・回収するシステムを設ける。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力は成型プレス能力に左右 され、成型サイクル数×パンチ数で求まる。成型サイクル数は要素技術開発試験結果 から 7.5 回、パンチ数は 12 パンチと設定し、90 個 / 分・基とした。この結果、内側炉 心燃料、外側炉心燃料、軸方向ブランケット燃料および径方向ブランケット燃料用に それぞれ 1 基必要となる。

(d) 焼結設備

成型設備から AGV を介して成型ペレットが積載された焼結皿を受入れ、5%H<sub>2</sub>-Ar 雰囲気中で焼結処理を行い焼結ペレットとした後、焼結皿ごと AGV へ払出す設備で ある。設備の概略構造を図 4.1.7 に示す。

成型設備から AGV により移送された焼結皿移載ボート(実ボート)は入口部チャンバー内に投入され雰囲気置換後、押込み機のプッシャーにより炉内に押し込まれる。 焼結皿上の成型ペレットは 5%H<sub>2</sub>-Ar 雰囲気中で焼結等熱処理され所定の密度の焼結体となり、出口部チャンバーにて空気雰囲気置換後、引出し機により引き出される。 焼結されたペレットは実ボートごと AGV に移載し、研削工程に移送される。

焼結炉は昇温 / 焼結 / 冷却一体の連続炉とする。O/M 調製のための熱処理ゾーンに ついては、熱処理プロセス条件が確定した時点で設計に反映するものとする。 遠隔自動運転および遠隔保守・保守対応としては、炉本体は上下 2 分割・長手方向 3 分割構造とする。 安全対策として、臨界安全については炉心燃料に関し炉内に投入する焼結皿段数を 2 段以下とし、平板厚さ形状管理により臨界安全を担保する。炉内にはある高さを有 する空間があり、平板厚さ形状管理寸法を担保するため炉内にはボートを抑えるガイ ドを設け、ジャミングなどによるボートの上昇を防ぐ対策を取る。火災・爆発防止対 策については焼結プロセスで使用する水素ガスを不活性ガスで 5%に希釈し爆発限界 濃度以下として扱うとともに、万一の漏えいに備え、設備への供給前に濃度異常を検 知し、希釈水素ガスの供給を停止するインターロックを設置するものする。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力は(焼結皿上ペレット積 載数)×(ボート上焼結皿段数)×(ボート送り速度)×(ペレット質量)から求ま る。ペレット積載数は炉心燃料および軸方向ブランケット燃料で約676個/枚、径方 向ブランケット燃料の場合で約256個/枚に設定した。ボート上焼結皿段数について は、炉心燃料は臨界安全制約から2段、ブランケット燃料は必要処理能力から4段と し、ボート送り速度は1ボート/30分とした。この結果、内側炉心燃料に2基、外側 炉心燃料、軸方向ブランケット燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ1基 必要となる。

(e) 研削設備

焼結設備から AGV を介して焼結ペレットが積載された焼結皿を受入れ、ペレットの外周を研削することで外径を仕様寸法に仕上げた後、波形トレイ上に移載し、AGV へ払出す設備である。設備の概略構造を図 4.1.8 に示す。

焼結皿上のペレットをペレット空け替え装置によりパーツフィーダに空け、フィー ダによりセンタレスグラインダに送り、ダイヤモンド砥石で外周を研削する。研削直 後のペレットは直径をレーザ等で全数測定し、結果をセンタレスグラインダへフィー ドバックすることで直径をコントロールする。研削済みペレットはペレット移載装置 により波形トレイ上に約 1,000 個単位で並べ、AGV へ払出す。払出された研削済みペ レットは AGV によりペレット検査工程に移送される。研削屑は局所集塵システムに より吸引回収する。

安全対策として、臨界安全についてはペレットを1個単位で1列ずつ同一平面にて 扱うことから、平板形状管理により臨界安全を担保する。ホールドアップ対策として、 センタレスグラインダの研削部を局所カバーで覆い、集塵装置により研削粉を吸引・ 回収するシステムを設ける。また、研削直後にペレット付着粉を除去・回収するシス テムを設ける。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。設備処理能力を律束するのはセン タレスグラインダ能力であり、ウラン燃料およびMOX燃料製造機器能力を参考に120 個/分と設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心燃料、軸方向ブランケット燃料 および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ1基必要となる。

(f) ペレット検査設備

研削設備から AGV を介して研削済みペレットが積載された波形トレイを受入れ、 ペレットの外観、寸法形状および密度の検査を行った後、仕様を満足するペレットを 波形トレイに移載し、AGV へ払出す設備である。設備の概略構造を図 4.1.9 に示す。 波形トレイ上のペレットをペレット移載装置によりトレイ 1 行単位(24 個)で検査ラ インへ切り出し、外観検査装置へ移送する。外観検査装置ではペレット個々の両端面 および円筒面をカメラによる撮影映像を基に全数検査し、不良ペレットは自動的に排 除する。寸法・密度検査については、軽水炉燃料と同等の不良発生があるものと想定 し、抜取り検査を行う。抜取り対象は外観検査で良品と判定されたペレットとし、ペ レット抜取装置によりランダムに抜取り寸法密度測定装置に搬送する。寸法密度測定 装置ではペレットの外径、高さおよび重量を測定して演算により密度を算出する。仕 様を満足するペレットは波形トレイに約 1,000 個単位で移載し、20 棚のラックに収納 した後、AGV によりペレット貯蔵庫に移送され、一時貯蔵される。外観検査および寸 法密度抜取り検査で不良と判断されたペレットは、回収しクリーンスクラップ(CS) としてリサイクルする。

安全対策として、臨界安全についてはペレットを1個単位で1列ずつ同一平面にて 扱うことから、平板形状管理により臨界安全を担保する。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。設備処理能力を律束するのは外観 検査能力であり、ウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 120 個/分に設定 した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心燃料、軸方向ブランケット燃料および径方 向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(g) スタック調整設備

ペレット貯蔵庫からAGVを介して製品ペレットが積載された波形トレイを受入れ、 スタックを調整し秤量を行った後、波形トレイに移載し AGV へ払出す設備である。 設備の概略構造を図 4.1.10 に示す。

炉心燃料用の燃料要素は、軸方向上下にブランケットペレットを挿入するため、被 覆管への充填前にあらかじめ燃料要素1本分のスタックを形成するとともに、スタッ ク重量も秤量する。フェーズ では燃料要素1本単位で作製することとしていたが、 時間がかかると同時に複数の系列が必要であることから、フェーズ では24本単位 でスタックを形成することとする。スタックは4枚の実トレイで構成され、1枚目が 片側軸方向ブランケット分、2枚目および3枚目が炉心燃料分、4枚目がもう一方の 軸方向ブランケット分であり、波形トレイを24列にすることで、1枚目から4枚目ま でのペレットを順番に被覆管へ収納させるという方法を採用する。

本設備では、トレイ引込装置により AGV から波形トレイを設備内に引き込み、測 長・縁切・乗移り装置によりトレイ上に並んだペレットを所定の長さのペレットに区切 リスタック長を調整後、予め用意した波形トレイにスタック調整済みのペレットを移 載する。この動作を繰り返して行い、上記のとおり4枚のトレイを1セットとしたス タックを形成する。ラックは20トレイを収納する設計としているため、5セット分の スタック調整済みトレイが収納される、すなわち5セット×24本/セット=120 燃料 要素分に相当する。スタック調整を終えたラックはAGV により燃料要素組立工程ま たはペレット貯蔵庫に移送される。 安全対策として、臨界安全についてはペレットを1列ずつ同一平面で扱うことから、 平板形状管理により臨界安全を担保する。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 1728 本/日に設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉 心燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(h) 燃料要素組立設備

ペレット貯蔵庫またはスタック調整設備から AGV を介してスタック調整済みペレ ットが積載された波型トレイを受入れ、被覆管にペレットおよびプレナムスプリング を充填し、端栓溶接 / 外径研削 / 除染 / 汚染検査を経て燃料要素に組み上げた後、完 成した燃料要素を燃料要素トレイに積載する設備である。設備の概略構造を図 4.1.11 に示す。

上記(g)スタック調整設備にて述べたとおり、フェーズ では燃料要素1本単位で作 製することとしていたが、合理化を行い燃料要素24本単位で充填する。

燃料被覆管は、非管理区域にてあらかじめ下部端栓溶接および下部プレナムスプリ ングが装着された状態で燃料要素組立工程に搬送され、ペレットを挿入爪により充填 後、上部プレナムスプリングを挿入し、抵抗溶接により上部端栓を溶接する。抵抗溶 接部はアプセットによる外径増加が想定されるため、溶接部の形状測定とともに外径 研削を行う。外径研削後は、払拭により燃料要素全体の除染および汚染確認を行い、 24 本単位で燃料要素トレイに積載し、燃料要素搬送用 AGV により端栓溶接部熱処理 工程へ搬送する。

安全対策として、臨界安全については、ペレットは1列ずつ同一平面上で扱うこと、 燃料要素については1本ずつ同一平面上で扱うことから、平板形状管理により臨界安 全を担保する。なお、燃料要素の移動に傾斜あるいはピックアップを採用しており、 厳密には同一平面上での扱いではないため、今後、臨界計算による評価が必要になる ことも考えられる。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 750本/日に設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心 燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ1基必要となる。

(i) 端栓溶接部熱処理設備

燃料要素組立設備から燃料要素を受入れ、熱処理を行った後、燃料要素検査工程へ 払出す設備である。

燃料要素 24 本を積載した燃料要素トレイを燃料要素搬送用 AGV 上から ICC によ り受取り、位置決めした後、燃料要素移載装置により要素燃料要素のみを 24 本まと めて端栓溶接部熱処理位置へ搬送する。続いて燃料要素押込み装置にて、燃料要素の 端栓溶接部を 24 同時に赤外線反射式加熱炉内にセットし、炉内をヘリウム雰囲気に 置換した後、端栓溶接部の残留応力除去のため焼鈍する。その後、燃料要素トレイに 戻し、コンベアにより燃料要素検査設備へ移送する。

安全対策として、臨界安全については燃料要素を立体的に搬送するため形状管理の

適用が困難と考えられることから、本数管理を適用する。管理対象となるセル内に配置され、同時に燃料要素を取扱う装置は、本設備の他にヘリウムリーク検査装置、超音波検査装置、X線検査装置、ワイヤ巻付装置、総合検査装置および燃料要素搬送用AGVであり、セル内同時取扱い燃料要素本数は最大で336本(24本×7工程×2種類燃料)である。これは核的制限値983本の半分以下なので、ダブルバッチによる臨界安全管理が可能となる。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 768本/日に設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心 燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(j) 燃料要素検査設備

端栓溶接部熱処理設備から燃料要素を受入れ、ヘリウムリーク検査装置による貫通 欠陥検査、超音波検査装置による端栓溶接部の欠陥検査、X線検査装置による燃料部 とブランケット部の識別検査を行った後、合格となった燃料要素をワイヤ巻付・総合検 査工程へ払出す設備である。超音波検査装置の概略構造を図4.1.12に示す。

ヘリウムリーク検査装置では、燃料要素トレイに積載された燃料要素 24 本をコン ベア搬送により検査用チャンバーに収容し真空吸引の後、検査用チャンバー内の雰囲 気をヘリウムリークディテクタに導入することで、貫通欠陥によるリークの有無を検 知する。リークが検出された場合は、検査用チャンバー内への投入本数を半減し再検 査を行い、この運転を繰り返すことでリークしている燃料要素を特定する。健全な燃 料要素はコンベア搬送により超音波検査装置へ移送する。

超音波検査装置では、燃料要素移載装置により燃料要素トレイ上の燃料要素を1本 把持し検査位置へ移送後、超音波検査部に引込んで溶接欠陥の有無を検査する。健全 な燃料要素はコンベア搬送によりX線検査装置へ移送する。なお、フェーズ では端 栓溶接部検査にX線検査方式を採用していたが、フェーズ では要素技術開発成果を 反映し、超音波検査方式に変更している。

X線検査装置では、燃料要素トレイから燃料要素 24 本全てを取出し、まとめてX 線検査部に送り込み、異種 Pu 富化度ペレットの混在有無、異物混入の有無等の検査 を行う。健全な燃料要素はコンベア搬送によりワイヤ巻付・総合検査設備へ移送する。 なお、フェーズ では スキャン方式としていたが、MA 含有低除染燃料を扱うこと でバックグランドが上昇し、検査困難となる可能性が高いことから、X線検査方式に 変更し、X線検査を可能とするためペレットは予め Pu 富化度毎に形状を違えること とする(チャンファ有無等)。

以上の各検査工程で不良となった燃料要素は、PM により不良品燃料要素仮置台に 搬送し一時保管する。その後、PM および ICC にて CS・DS 処理設備へ搬送され、処 理された後、再処理施設へリサイクルされる。

安全対策として、臨界安全については端栓溶接部熱処理設備で述べたとおり、本数 管理を適用する。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX

燃料製造機器能力を参考に 750本/日に設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心 燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ1基必要となる。

(k) ワイヤ巻付・総合検査設備

燃料要素検査設備から検査に合格した燃料要素を受入れ、燃料要素外周にワイヤを 巻付けた後、総合検査を行い、燃料要素を完成体に仕上げる設備である。

ワイヤの巻付けについては、燃料要素トレイから燃料要素1本を取出し、ワイヤ挿 入穴位置の方位を合わせた後、ワイヤ巻付機構にセットする。ワイヤ巻付機構では燃 料要素の下部端栓のワイヤ挿入穴にワイヤを通し、レーザ溶接機にて玉止め溶接を行 った後、燃料要素は固定したままワイヤ巻付けドラムを回転させることで燃料要素に 定ピッチでワイヤを巻きつけていく。巻付けが完了したらワイヤを上部端栓の溝に曲 げ入れカシメを行い、ワイヤを切断した後、レーザ溶接機にてワイヤ端の玉止め溶接 を行う。ワイヤ巻付後の燃料要素は燃料要素移載装置により燃料要素総合検査装置へ 移載される。

総合検査装置では、燃料要素1本ごとに全長、質量、ワイヤ巻付ピッチ、外観、真 直度等の検査を行う。健全な燃料要素は燃料要素トレイに積載し、コンベア搬送によ り燃料要素搬送用AGV に移送され、燃料要素貯蔵庫に一時保管される。

安全対策として、臨界安全については端栓溶接部熱処理設備で述べたとおり、本数 管理を適用する。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 750本/日に設定した。この結果、内側炉心燃料、外側炉心 燃料および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(1) 燃料集合体組立設備

燃料要素貯蔵庫から燃料要素搬送用 AGV を介して燃料要素が積載された燃料要素 トレイを受入れ、燃料要素を取出し束ね、エントランスノズル等の部品を用いて燃料 集合体に組み上げる設備である。設備の概略構造を図 4.1.13 に示す。

燃料要素は、燃料要素トレイに積載された状態で燃料要素搬送用 AGV によりトレ イ移送コンベアへ供給され、コンベアにより所定位置まで搬送・位置決めされる。そ の後、燃料要素1本を燃料要素移載装置等にて把持し、回転方向の位置決めを行い、 燃料要素整列部へ移載する。この動作を繰り返し行ない、移載本数が所定の本数に達 したなら、燃料要素移載挿入装置にて燃料要素束をエントランスノズル固定台側へ搬 送し、非管理区域からあらかじめ搬入したエントランスノズルに取り付けられている 支持グリッドに燃料要素下部端栓部のフックを引っ掛けることで、燃料要素束と支持 グリッドを固定する。この動作を繰り返し行い、燃料要素束を所定の段数(19段、271 本)とした後、非管理区域からあらかじめ搬入したラッパ管をラッパ管固定台の移動 により燃料要素束に被せる。最後に、燃料集合体を起立させ垂直に維持したままレー ザ溶接機にてラッパ管とエントランスノズルを溶接し、集合体に組み上げる。完成し た集合体はICCにより集合体検査装置へ移送する。

安全対策として、臨界安全については燃料要素および集合体を立体的に搬送するた

め形状管理の適用が困難と考えられることから、本数管理を適用する。管理対象となるセル内に配置され、同時に燃料要素を取扱う装置には本設備の他に燃料集合体検査設備があり、セル内同時取扱い燃料要素本数は542本(271本×2工程)である。これは核的制限値983本以下を満足する。MA等の崩壊熱による燃料要素被覆管の酸化防止および熱膨張による組立精度不良を防止する目的で、燃料要素横置き状態の時は強制冷却を行う。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 6 体/日に設定した。この結果、炉心燃料用および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(m) 燃料集合体検査設備

燃料集合体組立設備から ICC により燃料集合体を受入れ、燃料集合体の検査を行う 設備である。設備の概略構造を図 4.1.14 に示す。

燃料集合体は下部支持台で固定した後、レーザセンサ等により全長、固定パッド部の曲がり、ねじれおよび六角対面幅の測定を行うとともに、CCDカメラ等により外観 検査を行う。検査後の集合体はICCにより燃料集合体貯蔵庫に搬送し一時保管される。

安全対策として、臨界安全については燃料集合体組立設備で述べたとおり、本数管 理を適用する。MA 等の崩壊熱による集合体の熱膨張が検査精度へ影響を及ぼさない ように、燃料集合体の下方から強制冷却を行う。または、熱膨張を考慮した判定基準 を検討し設定するものとする。

設備処理能力および必要台数を表 4.1.5 に示す。処理能力はウラン燃料および MOX 燃料製造機器能力を参考に 6 体/日に設定した。この結果、炉心燃料用および径方向ブランケット燃料用にそれぞれ 1 基必要となる。

(n) 貯蔵設備

本検討では原料受入設備として原料溶液を7日分、ペレット貯蔵庫として製品燃料 ペレットおよびスクラップペレットを1ヶ月分、燃料要素貯蔵庫として2週間分、燃 料集合体貯蔵庫として1年分、固体廃棄物貯蔵庫として1年分を設定する。

(o) CS・DS 処理設備(リワーク設備)

成型設備および研削設備で発生するダーティスクラップ(DS)の粉体は、それぞれ 気送によって本設備に受入れ、溶解槽にて濃硝酸により溶解し溶解液とした後、フィ ルタによって不溶解残渣をろ過する。溶解液は溶解液受槽を経由し、濃度調整槽にて U・Pu濃度を調整後、沈殿槽に移送する。この溶解液は沈殿槽にて過酸化水素と反応 させ、ウランとプルトニウムの沈殿を生成させてスラリ状とするとともに不純物イオ ンを除去する。スラリは沈殿槽下方のろ過再溶解槽に移送し、濃硝酸にて再溶解され た後、リワーク溶液受入槽に移送、貯留する。溶解液は、圧縮空気による攪拌、Pu、 U濃度等の分析を行い、再処理施設へ払出す。

ペレット検査設備、燃料要素検査設備および燃料要素総合検査装置で発生するクリ ーンスクラップ(CS)ペレットは、粉砕し粉末とした後、それぞれ気送によって本設 備に受入れる。この CS 粉末は溶解槽にて硝酸により溶解した後、DS 再溶解液と同 様にリワーク溶液受入槽に移送、貯留する。

リワーク溶液受入槽のバッファ容量は1日分、基数については受入用および払出用 として計2基設置する。

(5) 周辺設備の設計

周辺設備の設備概念を明らかにする。なお、保守・補修設備については、次項(6)に 示す。

() 分析設備

本設備では溶液、粉末およびペレットの分析を行う。設備毎の分析項目と必要試料 量を表 4.1.6 に、また試料形態に対応する分析方法および必要試料量を表 4.1.7 に示す。

## () 廃棄物処理設備

(a) 廃液処理設備

廃液処理設備は、脱硝工程から発生するオフガス中の水分と硝酸分を凝縮器により 凝縮液として回収し、廃液槽に貯留した後、分析し結果を確認して再処理施設の酸回 収設備へ送液する設備である。廃液槽は1基当たり1日分の発生量を受け入れるだけ の容量とし、受入と送液を併行して行なうことから2基設ける。凝縮器を通過したオ フガスについては、再処理施設のオフガス処理設備へ送り処理する。

(b) オフガス処理設備

オフガス処理設備は、廃液処理設備および焙焼・還元工程から発生するオフガスを 洗浄塔で洗浄した後、凝縮器で冷却を行い、デミスタでのろ過、予熱器での加熱・乾 燥、HEPA フィルタでのろ過およびヨウ素吸着塔でのヨウ素除去を行い、HEPA フィ ルタでろ過後、冷却器にて冷却し排風機により排気筒から放出する設備である。

(c) 固体廃棄物処理設備

本プラントの固体廃棄物処理は、減容等の処理を行ってから容器に収納して貯蔵す る。プラント内に1年分の固体廃棄物貯蔵庫を設置する。

( ) ユーティリティ設備

ユーティリティ設備に関しては、一般設備と安全上重要な設備とがあり、後者は常 用系統および非常用系統の2系統を設けている。安全上重要な設備としては、冷却水 設備、冷水設備、圧縮空気設備が挙げられる。

(a) 冷却水設備

冷却水設備は、冷却塔、常用冷却水ポンプ、非常用冷却水ポンプ、膨張槽、防食剤 タンクおよび防食剤注入ポンプからなる。冷却水は、冷水設備における冷凍機用およ び空気圧縮機出口の圧縮空気の冷却用に使用される。

停電等の非常時は、非常用電源によって、非常用冷却水ポンプが起動し、冷却水は 非常用冷凍機および圧縮空気設備(非常用)出口の圧縮空気の冷却用に送られる。 (b) 冷水設備

冷水設備は、常用冷凍機、非常用冷凍機、常用冷水ポンプ、非常用冷水ポンプ、補 給水タンクおよび薬注タンクからなる。冷水は、プロセス設備(脱硝装置排気冷却器、 崩壊熱除去用他)および換気空調設備に使用される。停電等の非常時は、非常用電源 によって、非常用冷水ポンプが起動し、冷水はプロセス設備(崩壊熱除去用他)の冷 却用に送られる。

(c) 圧縮空気設備

常用の圧縮空気設備は、2基の常用圧縮機、2基の常用圧空冷却器、1基の常用空 気貯槽および2基の常用圧空除湿装置からなる。常用圧縮空気は、焙焼ガス用、燃料 要素乾燥用およびエアリフトの駆動用に使用される。停電時等の非常時は、運転停止 となる。

一方、非常用の圧縮空気設備は、2基の非常用空気圧縮機、2基の非常用圧空冷却器、1基の非常用空気貯槽および2基の非常用圧空除湿装置からなる。非常用圧縮空気は、水素掃気用・撹拌用およびPu系成形ホッパ除熱用に使用される。停電時等の非常時は、非常用電源によって運転が継続され、それぞれの設備に送られる。

(d) 加湿設備

加湿設備は、1基の純水槽、1基の純水ポンプおよび1基の加湿槽からなる。加湿 設備では、常用圧縮空気を加湿して、水素掃気用・撹拌用およびエアリフトの駆動用 に送られる。

(e) ガス製造設備

ガス製造設備は、1基の液体窒素貯槽、1基の気化器、1基の N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> ガス中間槽、 水素ボンベ、Ar ボンベ、1基の Ar ガス中間槽および酸素ボンベからなる。水素ガス は、窒素と混合調整(5%水素)した後、還元ガスとして焙焼・還元工程へ送られる。 また、Ar ガスは、水素と混合調整(5%水素)した後、焼結工程へ送られる。酸素ガ スは、DS 処理用に使用された過酸化水素の分解用として使用される。

(f) 試薬供給設備

試薬供給設備は、1基の13N 硝酸タンク、2基の13N 硝酸ポンプ、1基の10N 硝 酸タンク、2基の10N 硝酸ポンプ、1基の除染用硝酸タンク、2基の除染用硝酸ポン プ、1基の過酸化水素水タンクおよび2基の過酸化水素水ポンプからなる。13N およ び10N 硝酸は、DS および CS の処理用に使用される。除染用硝酸は、除染用および オフガス処理設備の補給用として使用される。過酸化水素水は、DS の処理用に使用 される。

( ) 電気設備

特高変電所より 6.6kV 2 回線を受電し所内電源設備に給電する。並列 2 系統構成と することで、各系統が単独で本プラントを運転可能な送 / 受電容量を持たせる。また、 本設備は安全上重要な設備であるため、常用系統の他に非常用系統を 2 系統設ける。 (a) 所内電源設備

高圧系統(非常用2系統、常用2系統) 480V/210V 低圧系統(非常用2系統、常 用2系統)より成る。高圧系統は母線毎に閉鎖配電盤(メタルクラッドスイッチギア) で構成し、高圧負荷および動力用変圧器を通して低圧系統に給電する。低圧系統は母 線毎に動力配電盤(パワーセンタ)で構成し、大容量低圧負荷およびモータコントロ ールセンタに給電する。モータコントロールセンタは一般低圧負荷に給電する。非常 用 6.9kV 高圧系統母線には、系統あたり各1基、計2基の非常用ディーゼル発電機を 接続する。各非常用ディーゼル発電機は1基で安全上重要な負荷に対して 100%の容 量を持ち、7日間連続運転できる燃料貯蔵設備を持つ。直流電源設備は非常用2系統、 常用2系統で構成し、各系統それぞれ対応する 480V 低圧系統母線に接続された充電 器と蓄電池により給電する。非常用直流電源設備は、短時間の交流電源全喪失に際し ても、監視制御機能を維持可能とする。

(b) 計装用交流電源設備

非常用2系統、常用1系統で構成し、各系統は通常計測用母線と、直流電源設備に 接続された無停電電源設備でバックアップされる無停電交流母線を持つ。

(c) 安全上重要な設備の電気負荷

安全上重要な設備は、非常用電源系統の負荷、それ以外は常用電源系統の負荷とす る。安全上重要な設備で互いに冗長関係にある負荷は、各々異なる非常用電源系統か ら給電されるものとする。また各電源設備には適切な保護継電器設備、および故障時 対応および運用の自由度を確保するための系統間相互バックアップを可能とするタイ ラインおよび切り替え装置を適切に設ける。

電源設備以外の安全上重要な設備を以下に示す。

冷却水設備(非常用)

冷水設備(非常用)

**圧縮空気設備(非常用、計装用)** 

換気空調設備(セル、制御室、非常用ディーゼル発電機、非常用電気室、燃料 貯蔵設備)

() 建屋換気空調設備

建屋換気空調設備は、プラント内の負圧維持および各部屋に設置される機器または 居室の温湿度環境を維持するために設置される、安全上重要な設備である。本換気空 調設備は大別して3つの系統から構成される。

(a) 非管理区域(ホワイト部屋)系

本系統は非管理区域(ホワイト部屋)用の系統であり、外気処理装置(バグフィル タ、給気加熱コイル内蔵) 給気ファン、空調ユニット(加熱コイル、冷却コイル、加 湿装置を内蔵) 排風機およびダクト等から構成される。外気処理装置から取り入れら れた外気は、空調ユニットにより夏期は冷却、冬期は加熱・加湿され各部屋に送風さ れる。各部屋からの排気は排気ファンから直接屋外に放出される。 (b) 管理区域 (グリーン / アンバー部屋、レッド系)系

本系統は管理区域(グリーン/アンバー、レッド系)用の系統であり、外気処理装置(バグフィルタ、HEPA フィルタ、給気加熱コイル内蔵) 給気ファン、空調ユニット(加熱コイル、冷却コイル、加湿装置を内蔵) グリーン/アンバー部屋系排風機、レッド系排風機およびダクト等から構成される。外気処理処置から取り入れられた外気は、空調ユニットにより夏期は冷却、冬期は加熱・加湿されグリーン/アンバー各部屋に送風される。レッド系への給気はアンバー系部屋からのトランスファにより行う。グリーン/アンバー部屋およびレッド系の排気は HEPA フィルタでろ過した後、それぞれ専用の排気ファンによりスタックへ放出する。また、各部屋からの放射性物質の漏洩を抑えるために常時各部屋は負圧に維持する。

(c) 非常用 D/G (ディーゼル / ジェネレータ)系

本系統は非常用 D/G が設置される部屋の専用の系統であり、非常用 D/G 起動とと もに本系統も運転を行う。本系統は、外気処理装置(バグフィルタ内蔵) 給気ファン およびダクト等から構成される。外気処理装置から取り入れられた外気は、送風機に より D/G 設置室へ給気され、部屋から直接屋外に放出される。

()) 放射線管理設備

(a) 出入管理設備

管理区域への人員、物品の出入は、原則として出入管理設備を設けた出入管理室を 経由する。管理区域出入に伴う放射性物質汚染拡散の管理を目的として、更衣室、シャワー / 手洗い、退出モニタ、サーベイメータおよび除染用機材を備える。

(b) 分析設備

放射性廃棄物の放出管理の目的で採取された試料の放射能測定、分析を行う機器および作業環境等より放射線管理の目的で採取された試料中の、放射性物質濃度等を測定するための測定機器を備える。

(c) 放射線監視設備

放射線監視設備は屋内モニタリング、屋外モニタリング、放射線サーベイ機器の各 設備より構成される。モニタリング設備は中央制御室にて集中監視、記録、警報を行 う。

屋内モニタリング

エリアモニタによりプラント内主要箇所の作業環境 線および中性子線線量当 量率を、またダストモニタにより同じく空気中 線および ・ 線放射性物質濃度 を監視する。また臨界管理が必要な区域には臨界警報装置を設ける。

屋外モニタリング

管理区域換気系に排気モニタリング設備を設け、連続監視およびサンプリングに より採取された試料の定期測定監視を行う。また屋外モニタリングポストにより、 外部線量率の測定を行う。 放射線サーベイ機器

線用サーベイメータ、 ・ 線用サーベイメータ、中性子線用サーベイメータ、 ダストサンプラ等を備える。

その他

計器保守、校正用設備、放射線防護具、個人用モニタリング機器等を備える。

(6) 保守・補修方法の検討

保守・補修作業の関連図を図 4.1.15 に示す。本図に示すとおり保守・補修作業は、作 業区分(運転時作業/保守時作業)保守グレード(軽保守/中保守/重保守)交換 方法(モジュール交換/直接交換)保守場所(工程セル/保守セル/保守 GB)保 守方法(直接/遠隔)に階層化され関連付けられる。このうち、最も多くの保守・補修 設備対応を必要とする流れは図中の太線で示される流れであり、一方、最も保守・補修 が容易でないと考えられる完全遠隔保守セル内設備の保守・補修作業も、その殆どが図 中の太線で示される流れとなる。そこで、図中太線に対応する完全遠隔保守セル内設 備の保守・補修手順と設備対応について検討した。なお、図中の最も左側のフローは、 ペレット製造設備特有のペレット転倒あるいは脱落等のペレット搬送不良に対する復 旧作業を示しており、設備対応として該当する箇所にはマスタースレーブマニピュレ ータ(MSM)を設け、運転時に遠隔で直接ペレットを立て起こすなどの復旧作業が 行えるようにする。

完全遠隔保守セル内での保守については、保守方針に従い、保守対象部品をモジュ ール構造とし、ICC および PM により故障モジュールと保守済みモジュールを交換す る方式とする。故障モジュールは保守エリアへ搬送し、必要に応じて除染を行なった 後、直接保守を行ない、保守済みモジュールとして保管する。これにより、設備停止 期間を短縮し設備稼働率の向上を図る。この一例として、脱硝・転換設備における保守・ 補修手順の概念図を図 4.1.16 に示す。保守・補修手順の概要は以下の通りであり、他 の完全遠隔保守セル内設備についても同様の手順で保守・補修を行う。

保守対象設備が設置された工程セルのシャッタを開ける。

ICC/PM を載せたトラバーサが工程セル位置に移動。

トラバーサ上の ICC/PM が工程セル内に移動。

PM でインパクトレンチを把持し、交換対象モジュールの遠隔ボルトを緩める。 引き続き、PM にてモジュールに結合されているコネクションブロック(配管)お よび遠隔コネクタ(配線)を取外す。

ICC/PM にて、モジュール吊上げ用の吊金具を ICC のフックに取付け、モジュールを吊上げる。

モジュールを吊った状態で ICC/PM がトラバーサ上に移動。

トラバーサが床ハッチ開口部上に移動。

ICC にてモジュールを階下に待機中の搬送台車に吊降ろす。

搬送台車によりモジュールを除染設備内に搬送し、必要に応じて除染後、重遮へ

いGBへ搬送、GB内でモジュールを直接保守する。

保守済みモジュールは逆のルートを通り、工程セル内等の予備品保管エリアに搬送し保管する。

(7) ライン構成の検討

主工程設備および保守・補修設備の設計検討結果を踏まえ、物流合理性、核物質の 異常集積防止、遠隔保守・補修性、相互汚染防止、クリーンアップ負荷軽減の観点か ら最適ライン構成の検討を行った。結果を表 4.1.8 に示す。内側炉心燃料のラインに おいて、成型設備台数は処理能力からは 1 基で良いが、脱硝・転換設備との物流合理 性(重力搬送時の取合い制約)により2基とした。研削設備およびペレット検査設備 についても、物流合理性(マテリアルハンドリングの煩雑化を避ける)から2基とし た。スタック調整設備に関しては、物流合理性(マテリアルハンドリングの煩雑化を 避ける)および相互汚染防止(Pu 富化度が異なる非密封状態の燃料を同一設備では 扱わない)の観点から、各燃料用に1基ずつ設けることとした。燃料集合体組立設備 および燃料集合体検査設備については、密封状態の燃料を扱うため相互汚染の心配が ないことと、処理能力に余裕があることから、内側および外側炉心燃料を1基で処理 することとした。

- (8) 配置検討
- () 配置設計検討の方針

全体の配置設計検討にあたり、以下の設計方針のもとに検討を行った。

燃料製造設備の各工程の物流と放射能レベルを考慮し、被ばく安全上適切な構成 とゾーニングを行う。

主要プロセスの動線は設備配置が合理的になるように最短ルートとする。

放射性廃液等の各種廃液回収用貯槽は、地下階に配置し、各工程からの廃液は極 力重力流で回収する。

施設運転は、連続運転と常時監視を必要とする工程は、中央制御室主体で運転操 作を行い、特に中央で常時監視と制御を行う必要のない工程は現場主体の操作とす る。

セルは、遮蔽窓や ITV を通し、PM、ICC 等により遠隔操作可能な設計とする。 セルの形状は、MSM での操作性を考慮し、セル幅を抑えた長尺セルとする。

セル内には必要に応じて保守用 ICC と PM を設置し、遮蔽壁には必要箇所に MSM を設置し、保守する。

保守については、プラント稼働率向上、作業員の被ばく低減を目的とし、定期保 守、機器交換、補修等の頻度が高く、または除染困難な機器を有し、直接保守が容 易でないセルを遠隔保守セルとする。具体的には、ペレット工程等の燃料を密封し ない状態で扱う工程、すなわち燃料要素への密封が完了し燃料要素表面の汚染が無 いことを確認するまでの工程を完全遠隔保守セルとする。また、原則として各セル には上階または中2階にインセルクレーン保守セルを設けるとともに、隣接してセル内機器用の保守セルを設け、セルとの取り合いは、セル間に遮蔽扉を設け、台車 またはインセルクレーンで実施する。

燃料の密封完了後の燃料要素検査工程以降の工程は、保守時は線源となる燃料要 素または集合体を隔離遮蔽できるようにしてセル内に人が立ち入れる設計とする。

() 配置設計結果

燃料製造/再処理一体化プラントの配置概念図を図 4.1.17 に示す。その概要は以下 のとおりである。

建屋は、主工程設備と周辺設備を配置する主建屋、設計統一条件により独立させた 使用済燃料貯蔵建屋と新燃料貯蔵建屋、および管理棟の4建屋構成とした。

主建屋は、地上3階、地下2階建てとし、セル天井高さは 7m(遮蔽天井厚さ2m を除く)を原則とした。主建屋から新燃料貯蔵建屋への新燃料の払い出しは、主建屋 の集合体一時保管庫から新燃料貯蔵建屋の貯蔵ピットへ、地下1階の移送ルートを通 じて台車により行うこととした。燃料製造施設は主建屋内の地上2階から地下1階に かけて配置した。地上2階以上にはユーティリティ設備、電気盤室、建屋換気空調設 備を配置し、中央制御室と出入管理室は3階に配置した。

建屋容積は、主建屋が約68.0万m<sup>3</sup>となり、これに使用済燃料貯蔵建屋と新燃料貯 蔵建屋(いずれもピット貯蔵方式)の各約18.7万m<sup>3</sup>を合わせ、合計で約105.4万 m<sup>3</sup>である。なお、建屋寸法および建屋容積は外壁間寸法を基準として外壁は柱芯から 1m張り出すものとし、セル容積はセル壁厚の内寸法を基準として算出した。

(a) 主建屋内配置

主建屋の燃料製造施設における、燃料の流れを図 4.1.18 に、また設備配置図を図 4.1.19~21 に示す。燃料製造施設のセル容積は、主工程セル約 3.0 万 m<sup>3</sup>、付属セル (保守セル、分析セル)約 0.9 万 m<sup>3</sup>、合計は約 3.9 万 m<sup>3</sup>となった。

主建屋寸法は、約 143m×146m×高さ 36m である。

(b) 新燃料貯蔵建屋内配置

新燃料貯蔵建屋の配置概念図を図 4.1.22 に示す。建屋寸法は、地下 2 階、地上 3 階 建て、約 48.5m×109m×高さ 34m である。

(9) セル内での安定操業性の検討

主工程設備、保守・補修設備およびライン構成の検討結果を踏まえ、セル内での安 定操業性の見通しについて、概略的な検討を行う。本検討では、年間運転日数 250 日 のうち実稼動日数 200 日で年間 200tHM の生産量が確保できるよう、主工程設備の 処理能力、必要台数およびライン構成を決定している。つまり、システム全体の稼働 率としては 80%(200 日/250 日)以上あれば、セル内での安定操業性の見通しがある と言える。そこで、以下の手順に従いシステム全体の稼働率を求めた。なお、製造対 象であるペレットは小さく不安定な形状なので、転倒、詰まり、脱落等により設備を 停止させることも想定される。この不確かさを考慮するため、ペレットを取り扱う成型設備、研削設備およびペレット検査設備については、ペレット搬送不良に伴う設備 停止率を20%と想定し、これも加味してシステム稼働率を算出することとした。さらに、この影響による大幅な稼働率低下が懸念されるため、当該設備の前段にはペレットを貯蔵するバッファを設け、設備停止の影響が直ちに前後の設備の運転に支障を与えないよう考慮し、バッファ容量をパラメータとしてシステム稼働率を算出した。

主工程設備の保守・補修対象モジュールを洗い出し、実績および工学的知見から 各モジュールの保守頻度(平均故障間隔)と保守による運転停止期間(平均修理時 間)を設定する。設定の考え方を表 4.1.9 に示す。

平均故障間隔および平均修理時間からモジュール稼働率を算出する。必要に応じ て設備を構成する全モジュールの稼働率から設備単位での稼働率を求める。

ライン構成検討結果に基づき、設備を並列または直列に配するとともに、成型設備、研削設備およびペレット検査設備の前段にはバッファを追設したシュミレータ モデルを組む。なお、ペレット搬送不良に伴う設備停止率は20%と仮定する。

パラメータを設定する。パラメータはバッファ容量とし、バッファ容量は1時間 当たりの生産量の3倍~24倍(最大で1日相当)とする。稼働率計算に用いる設 備単体処理能力は表4.1.5に示す値とする。

システム稼働率が 80%以上となるために必要なバッファ容量を求める。これに より、セル内での安定操業性の見通しを評価する。

システム稼働率計算結果を図 4.1.23 に示す。本図より、システム稼働率 80%以上、 すなわちセル内での安定操業性の見通しを得るためには、バッファ容量は1時間当た りの生産量の6倍相当とする必要があることがわかる。本検討ケースにおいては、成 型設備、研削設備およびペレット検査設備の前段に設けるペレット一時保管用棚の容 量は、これに余裕を見た12時間相当とすれば良いことになる。

4.1.1.2 技術評価(基準システム)

(1) 技術的成立性

基本プロセス成立性および量産性(セル内での安定操業性)について評価する。

() 基本プロセス成立性

要素技術開発より、簡素化プロセスによる MOX ペレット製造の可能性と、現行プロセスによる MA 含有低除染 MOX ペレット製造の可能性を確認することができた。 これらから、簡素化プロセスによる MA 含有低除染 MOX ペレット製造について、基本プロセス成立の可能性が示されたものと考える。

今後は、粉末造粒条件の最適化を図るとともに、さらに造粒工程を削減し経済性を 高めるためのエアータップ充填法についての要素技術開発を進め、造粒方式とエアー タップ充填方式についての技術評価を行い、採否を判断することが重要である。また、 均質性の良いペレットを得るための焼結プロセス条件を把握し、照射試験による再分 布挙動、組織変化、FCCI 特性等を評価するとともに、燃料製造可能な仕様範囲の確認およびシステム設計用焼結・熱処理プロセス条件の最適化を図り、燃料仕様に対応する燃料製造条件を明らかにすることが重要である。

()量産性(セル内での安定操業性)

簡易シミュレータを用いて、年間運転日数 250 日のうち実稼動日数 200 日で年間 200tHMの生産量が確保できる可能性を示せたことから、量産性の可能性はあると考える。

今後は、上記計算の前提とした製造歩留り、設備処理能力、機器信頼性の見通しを 確認することが重要である。特に、基本プロセス成立性に関わる要素技術開発試験は 小規模試験であり、試験個数は少数(セル内製造試験の場合 50 個程度)であること から、マスフロー設定の際に重要な製造歩留まりに関する要素技術開発が重要となる。 また、焙焼・還元設備における大型脱硝容器での脱硝性能(スケールアップの影響確認)、 成型工程における多数ペレット同時成型時のペレット品質と処理速度の関係把握、超 音波検査、X線検査およびピン総合検査工程での検査精度と処理能力の関係を要素技 術開発により確認することが重要である。また、MA 添加低除染燃料を扱うことによ る放射線(特に 線)および崩壊熱に対する高機器信頼性機器の開発が重要である。

()安全性

(a) 臨界安全

単ーユニットにおける臨界評価を行い、成型設備については質量管理、燃料要素検 査設備、燃料集合体組立設備および燃料集合体検査設備については本数管理(質量管 理)ペレット貯蔵庫、燃料要素貯蔵庫および燃料集合体貯蔵庫については数(個数、 本数、体数)と形状寸法の組合せ管理、その他の設備については形状管理にて臨界安 全が確保されている。

複数ユニットでの臨界安全評価は詳細には行っておらず、今後、設備の基本設計を 行なう時点で評価する必要はあるものの、単一ユニット間の距離を確保する、あるい は臨界隔離壁を設置する等の配慮は行っており、評価結果のシステム設計への影響は 少ないものと考える。

なお、燃料要素組立設備は形状管理としているが、燃料要素の移動に傾斜あるいは ピックアップを採用しており、厳密には同一平面上での扱いではないため、今後、臨 界計算による評価が必要になることも考えられる。

(b) 火災・爆発防止

燃料製造で使用する火災・爆発に係わる物質は、脱硝・転換設備および焼結設備で 使用する水素ガスであり、不活性ガスで 5%に希釈したものを使用するため、空気中 に漏えいしても爆発の恐れは無い。万一の漏えいに備え、設備への供給前に濃度異常 を検知し、希釈水素ガスの供給を停止するインターロックの設置を考慮している。

U/Pu 硝酸溶液を長時間貯留する槽については、放射線分解により発生する水素ガスの濃度が爆発限界を下回るよう、安全圧縮空気系により定常的にバブリングを行い、

水素ガスを掃気するものとする。以上の通り、火災・防爆対策は施されている。 (c) 耐 震

セル、セル換気系、およびその電源設備(非常系を含む)と、核燃料物質を含む溶液を包蔵する槽類は、再処理施設安全審査指針および MOX 加工施設安全審査基準を 参考に耐震クラスAとし、その他の設備については、耐震クラスBとしており、上記 の指針に準じた耐震性を有するものと考える。

なお、本設計では、耐震クラスに対応した設備の構造設計は行なっておらず、今後、 設備の基本設計を行なう時点で考慮する必要がある。

(d) MA による熱的検討

崩壊熱による発影響対策として、MOX 粉末およびペレットの再酸化防止のため該 当する機器は窒素雰囲気または水冷ジャケットによる強制冷却を考慮している。また、 燃料要素被覆管の表面酸化による外観不良、熱膨張による燃料集合体の組立不良およ び燃料集合体検査装置の検査誤差拡大を防止するため、強制冷却を考慮したシステム 概念としている。

冷却手段として一部に水冷方式を用いているが、完全水没まで想定した臨界管理が 必要となる可能性もある。この場合には取扱うことのできる核物質量が大幅に減り、 量産化に適さないため、ガスやペルチェ素子等による冷却を検討する必要がある。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費
  - 主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 の Na 冷却大型炉・200t・基準システムの欄に示す。なお、原料受入設備は再処理施 設側として評価するため含まれていない(以降、同様に評価する)。

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 の Na 冷却大型炉・200t・基準システムの欄に示す。 主工程設備費は上記の台数に基づく。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 の Na 冷却大型炉・200t・基準システムの欄に示す。人員および単価は 3.2.1 節で設定した 300 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の評価方法に従って算出した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 の Na 冷却大型炉・200t・ 基準システムの欄に示す。

燃料製造単価の目標値は 16 万円/kgHM であり、これを満足する見通しが得られた。 炉心とブランケットを合わせた平均燃焼度(以下、平均燃焼度と略す)は 63.1GWd/t であり、燃料製造単価を発電単価に換算すると 0.22 円/kWh となる。 (3) 環境負荷低減性

3.1.2 節で述べた廃棄物区分に基づき、積み上げ方式により通常運転時および廃止措 置時の固体廃棄物発生量を求めた。また、通常運転時の環境への放出放射能量、U・ TRU の放射性廃棄物への移行率を評価した。

() 廃棄物発生量

(a) 通常運転時の廃棄物発生量

主工程設備および保守・補修設備から発生する不燃性の固体廃棄物発生量と、環境 への放出放射能量について検討した。環境への放出形態には放射性廃液の海洋放出と 気体廃棄物の大気放出があり、燃料製造プロセスから発生する放射性廃液については、 濃度が再処理側廃液の 1/1000 程度と推定され、全量再処理へ送液後に処理されるこ とから、ここでは評価対象外とした。一方、燃料製造では粉末を取り扱うプロセスが あり、この影響を確認するため気体廃棄物の大気放出放射能量について評価した。

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.14 に示す。主要固体廃棄物は、保守・補修に 伴い発生する交換部品、脱硝容器、フィルタエレメント、HEPA フィルタ、ヒータ、 耐火レンガ等であり、年間発生量は低レベル廃棄物(地層処分並)で約 8.9t(2001 ドラム缶約 89本) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 5.8t(同約 59本) ク リアランス以下で 3.8tとなった。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、燃料放射能濃度に工程から廃棄系への 移行率とフィルタ透過率をかけ合せることで求まり、年間で 2×10<sup>7</sup>Bq 程度が放出さ れる<sup>11)</sup>。

(b) 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.15 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約 1,360 t、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3,510 t、クリアラ ンス以下(コンクリート以外)で 3.4 万 t、クリアランス以下(コンクリート)で 34 万 t となった。

() 環境への移行率

複雑な原料粉末調整工程を有する現行 MOX 燃料製造プラントにおいて、Pu 等の廃 棄物への移行率は 0.1%程度とされている。本プラントでは原料粉末調整工程を大幅 に削減しており、U および TRU の廃棄物への移行率は 0.1%以下に抑えることが可能 と考える。

(4) 資源有効利用性

本システムでは、仏) MELOX の MOX 燃料製造プラントにおける実績に基づき、 核物質の廃棄物への移行率を取り扱い原料の 0.1%以下に抑えることにより、U およ び Pu の回収率 99%以上は確保できるものと考える <sup>12)</sup>。 (5) 核拡散抵抗性

単体 Pu の存在の有無、ホールドアップ、計量管理および物流管理の観点から評価 する。

() 単体 Pu の存在の有無

再処理施設から受入れる原料は、Pu 富化度を 21.1 wt%ないしは 24.9wt%に調製 した硝酸溶液であり、また、燃料製造施設内では Pu を単離する工程は存在しない。 したがって、Pu が単独で存在することはない。なお、本システムは、MA 含有低除染 燃料を取り扱うことが可能で、かつセル内での取り扱いとなることから、現行システ ムに比べ核物質防護の観点から有利である。

() ホールドアップ

簡素化プロセスを採用することで粉末取扱工程の多くを削減しており、現行プロセ スに比べてホールドアップ低減が期待できる。ホールドアップ低減のため、工程・設 備にはバイブレータやノッカの設置、吸引やブロー等のシステムを設置することによ り、適切に回収するものとしている。特に、セル内への粉末飛散があると回収が極め て困難になるため、成型プレス、研削装置など粉末飛散の可能性がある装置について は、カバーを行うと同時に集塵システムを設け、局所排気を行うことで、適切に回収 するものとしている。ただし、その効果を含めた最適化について、モックアップ試験 等による事前確認試験が必要と考える。

) 計量管理

本システムは、再処理施設側から移送される溶液を受け入れた後、目的となる燃料 集合体の組成に溶液の段階で調整・ロット形成を行い、マイクロ波脱硝以降はロット 単位で燃料集合体を製造するプロセスシステムで構築している(ペレット成型前に他 ロットの粉末同士を混合しない)。したがって、ペレット成型前に粉末を一時保管する 設備がなく、溶液から燃料集合体まで連続的に処理されるため、サンプルによる成分 分析値と秤量値から Pu 量の把握は可能と考える。ただし、保障措置の精度との関係 で、機器ごとの核物質量の直接測定を求められた場合には、新たなる計量技術開発が 必要になる。

(6) 運転・保守補修性

本項については、(1)技術的成立性で言及しているため、省略する。

### 4.1.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

ここでは、基準システム用炉心の改良炉心の他、冷却材(Na / Pb-Bi / 水)、炉形式(大型炉 / 中型炉)、処理規模(200 t / 50 t)、増殖比(高増殖 = 資源重視 / 低増殖 = 経済性 重視)をパラメータに設定された各炉心に対し燃料集合体を供給する各燃料製造シス テムについて、その経済性および環境負荷低減性を概略評価する。評価方法は、基準 システムの検討結果をベースにシステム概念について概略的な検討を行い、検討結果 から概略的に評価を行う。なお、基準システムとの比較のため、基準システムの値を ()内に併記した。

#### 4.1.2.1 Na 冷却大型炉・200 t 規模・資源重視型炉心対応システム

Na 冷却大型炉・200 t 規模・資源重視型炉心は、フェーズ 開始時点に設定された基準システム用炉心の改良炉心であり、フェーズ 中間時点までの設計進捗を反映し設定されたものである。なお、本炉が分冊 1「炉システム技術検討書」のリファレンス炉心である。

炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩留りを考慮した必要生 産量を表 4.1.16 にまとめて示す。燃料集合体の年間必要生産体数は、内側炉心燃料 500 体(512 体)、外側炉心燃料 440 体(431 体)、径方向ブランケット燃料 313 体(321 体)となり、基準システムでの体数とほぼ同数である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 4.1.17 に 示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成検討条件(相互汚染防止、物 流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 および表 4.1.8 参照)。検討の結 果、製造ライン構成は基準システム設計と同等となったことから、Na 冷却大型炉・ 200 t 規模・資源重視型炉心に対応した燃料製造システムの施設概念は基準システム 設計と同等と言え、経済性(建設費、燃料製造 HM 単価)および環境負荷低減性は基 準システムと同等と評価する(4.1.1.2(3)、(4)参照)。燃料製造発電単価については、平 均燃焼度が 63.0GWd/t なので 0.22 円/kWh となった。

#### 4.1.2.2 Na 冷却大型炉・200 t 規模・経済性重視型炉心対応システム

本炉心は、上記の基準システム改良炉心に対し、経済性を重視した低増殖比の炉心 である。

(1) 主工程設備等の検討

炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩留りを考慮した必要生 産量を表 4.1.18 にまとめて示す。燃料集合体の年間必要生産体数は、内側炉心燃料 708 体(512 体)、外側炉心燃料 591 体(431 体)、総数 1,299 体(1,264 体)となり、 炉心燃料では基準システムの約 1.4 倍増、全燃料ではほぼ同数となる。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 4.1.19 に 示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成検討条件(相互汚染防止、物 流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 および表 4.1.8 参照)。検討の結 果、主工程設備台数は基準システムに対して、脱硝・転換設備が 9 基から 10 基に、ま た、スタック調整設備が 3 基から 2 基に変更となったが、総数は同数であった。

周辺設備および建屋・電気・換気設備の設備概念は、主工程設備の構成が基準システムと殆ど同じで、かつ総台数は同数であることから、基準システム設計と同等と評価する。新燃料貯蔵建屋については、燃料集合体の生産体数が基準システムとほぼ同数

なので、基準システム設計と同等と評価する。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費

主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保 守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費は、主工程設備の構成が基準 システムと殆ど同じで、かつ総台数は同数であることから、基準システムの費用と 同額と評価した。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依存するとみなし、基準システ ムの費用と同額と評価した。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 300 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 評価方法に従って算出した。消耗品等諸費は生産規模および主工程設備総数が基準シ ステムと同等なので、基準システム費用と同額と評価した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造単価は基準システムの場合と同じ 15.3 万円/kgHM であり、目標値 16 万円 /kgHM を満足する。平均燃焼度は 110GWd/t であり、燃料製造単価を発電単価に換 算すると 0.13 円/kWh となる。これは、基準システム(0.22 円/kWh)の約 6 割に相 当し、経済的には優れた結果となった。

(3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.20 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地 層処分並)で約 12.4 t (8.9 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 2.5 t (5.8 t)とな った。2001 ドラム缶換算ではそれぞれ約 124 本(89 本)および約 26 本(59 本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見なし基準システムに同じ2×107Bq/y程度と評価した。

() 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.21 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約1,440t(1,360t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約3,350t(3,510 t)、クリアランス以下(コンクリート以外)で3.4万t(3.4万t)、クリアランス以下(コ ンクリート)で34万t(34万t)となった。

### 4.1.2.3 Na 冷却・50 t 規模・資源重視型炉心対応システム

Na 冷却大型炉・50 t 規模・資源重視型炉心(以下、大型炉とする)および Na 冷却 中型炉・50 t 規模・資源重視型炉心(以下、中型炉とする)に対応するシステム概念を 検討し、経済性および環境負荷低減性を概略評価する。

(1) 主工程設備等の検討

大型炉および中型炉の炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩 留りを考慮した必要生産量をそれぞれ表 4.1.22 および表 4.1.23 に示す。燃料集合体 の年間必要生産量は、大型炉用では内側炉心燃料 125 体(512 体) 外側炉心燃料 110 体(431 体) 径方向ブランケット燃料 78 体(321 体)である。中型炉では内側炉心 燃料 121 体(512 体) 外側炉心燃料 119 体(431 体) 径方向ブランケット燃料 115 (321 体)体であり、いずれも基準システム炉心用の約 1/3~1/4 に相当する生産体数 である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を大型炉およ び中型炉まとめて表 4.1.24 に示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成 検討条件(相互汚染防止、物流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 お よび表 4.1.8 参照)。検討の結果、大型炉と中型炉の製造ライン構成は同等となったこ とから、両システムの経済性(建設費、燃料製造 HM 単価)および環境負荷低減性は 同等と評価し、次項の評価結果では代表して大型炉の値を記載する(中型炉も同じ値)。 なお、設備基数が基準システムとの生産量比である 1/4 より多く、3/5~1/2 相当とな った理由は、設備単機当たりの処理能力が高い 200 t 生産システム用設備でライン構 成を検討していること、および相互汚染防止の観点から非密封状態の外側炉心燃料、 内側炉心燃料、ブランケット燃料を同一設備で取り扱わないようにしたことによる。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費

主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保 守・補修設備費および共通設備費については、分析設備費のみ基準システムと同額 と評価し、それ以外は主工程設備台数に依存するとみなして、基準システムの (43/65)倍とした。建屋・電気・換気設備費は、概略配置検討を行い求めた燃料製造分 建屋容積に容積単価を乗じ算出した。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依存すると みなし、基準システムの(50/200)<sup>0.6</sup>倍とした。 (b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 150 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 評価方法に従って算出した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造単価は 31.2 万円/kgHM であり、目標値 16 万円/kgHM を満足できなかった。燃料製造単価を発電単価に換算すると大型炉の場合は平均燃焼度が 63.0GWd/t なので 0.46 円/kWh、中型炉の場合は平均燃焼度が 53.7GWd/t なので 0.54 円/kWh となった。

() コストダウンの方向性

燃料製造施設のコスト削減方策としては、ピン径太径化によるペレット個数、燃料 ピン本数の低減およびブランケット燃料の外部購入が建設費、操業費、燃料部材費の いずれの削減にも有効である。また、運転自動化の徹底、メンテナンスフリー機器の 開発と採用、保守の効率化等による運転・保守人員の低減が操業費の削減に有効であ る。さらに、メンテナンスフリー機器の開発と採用や保守の効率化は稼働率の向上、 操業日数の増加、燃料製造量の増加に繋がり、燃料製造単価の低減に寄与する。

(3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.25 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地 層処分並)で約 5.0 t (8.9 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3.2 t (5.8 t)と なった。2001 ドラム缶換算ではそれぞれ約 51 本(89 本)および約 31 本(59 本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見なし、基準システムの 1/4 相当の 5×10<sup>6</sup>Bq/y 程度が放出されると考えられる。

() 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.26 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約 795 t (1,360 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 2,820 t (3,510 t)、クリアランス以下(コンクリート以外)で 2.6 万 t (3.4 万 t)、クリアランス以 下(コンクリート)で 27 万 t (34 万 t)となった。

4.1.2.4 Na 冷却・50 t 規模・経済性重視型炉心対応システム

Na 冷却大型炉・50 t 規模・経済性重視型炉心(以下、大型炉とする)および Na 冷 却中型炉・50 t 規模・経済性重視型炉心(以下、小型炉とする)に対応するシステム概 念を検討し、経済性および環境負荷低減性を概略評価する。

(1) 主工程設備の設計

大型炉および中型炉の炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩

留りを考慮した必要生産量をそれぞれ表 4.1.27 および表 4.1.28 に示す。燃料集合体の年間必要生産量は、大型炉用では内側炉心燃料 177 体(512 体) 外側炉心燃料 148 体(431 体) 総数 325 体(1,264 体)である。中型炉では内側炉心燃料 162 体(512 体) 外側炉心燃料 133 体(431 体) 総数 295 体(1,264 体)である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を大型炉およ び中型炉まとめて表 4.1.29 に示す。この際、主工程設備の処理能力は基準システム(表 4.1.5 参照)に準じたが、ライン構成検討条件(相互汚染防止、物流合理性考慮等)に ついては、経済性重視の観点から Pu 富化度の異なる内側炉心燃料、外側炉心燃料、 さらには軸方向ブランケット燃料を同一ラインで交互に製造できるものと仮定し検討 した。検討の結果、大型炉と中型炉の製造ライン構成は同等となったことから、両シ ステムの経済性(建設費、燃料製造 HM 単価)および環境負荷低減性は同等と評価し、 次項の評価結果では、代表して大型炉の値を記載する(中型炉も同じ値)。なお、ライ ン数や設備基数は、基準システムに対して、脱硝・転換設備は 9 基から 3 基、ペレッ ト工程は 5 から 1 ライン、ピン工程は 3 から 1 ライン、集合体工程は 2 から 1 ライン となり、生産量比である 1/4 前後となった。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費
  - 主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す(原料受入設備は再処理施設側として評価する)。

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保 守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費は、分析設備費のみ基準シス テムと同額と評価し、それ以外は主工程設備台数に依存するとみなして基準システ ムの(30/65)倍とした。新燃料貯蔵建屋設備費は、生産量依存とみなし基準システム の(50/200)<sup>0.6</sup>倍とした。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 150 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 要領にしたがい主工程設備費から求めた。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造 HM 単価は 25.5 万円/kgHM であり、目標値 16 万円/kgHM を満足できな かった。燃料製造単価を発電単価に換算すると大型炉の場合は平均燃焼度が 110 GWd/t なので 0.21 円/kWh、中型炉の場合は平均燃焼度が 101GWd/t なので 0.24 円 /kWh となり、ともに基準システム (0.22 円/kWh) と同程度となった。 (3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.30 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地 層処分並)で約 4.3 t (8.9 t) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 0.6 t (5.8 t)となった。2001ドラム缶換算ではそれぞれ約 43本(89本)および約 6本(59本) となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見直し、基準システムの 1/4 相当の 5×10<sup>6</sup>Bq/y 程度が放出されると考えられる。

## () 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.31 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約745t(1,360t)低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約2,300t(3,510 t) クリアランス以下(コンクリート以外)で2.4万t(3.4万t) クリアランス 以下(コンクリート)で24万t(34万t)となった。

## 4.1.2.5 Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・資源重視型炉心対応システム

Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・資源重視型炉心に対応するシステム概念を検討し、 経済性および環境負荷低減性を概略評価する。

(1) 主工程設備等の検討

炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩留りを考慮した必要生 産量をそれぞれ表 4.1.32 に示す。燃料集合体の年間必要生産量は、内側炉心燃料 611 体(512 体)、外側炉心燃料 521 体(431 体)、径方向ブランケット燃料 394 体(321 体)であり、基準システム炉心用の約 1.2 倍に相当する生産体数である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 4.1.33 に 示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成検討条件(相互汚染防止、物 流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 および表 4.1.8 参照)。検討の結 果、主工程設備台数は基準システムに対して、脱硝・転換設備が9基から10基に、ペ レット工程が5から6ラインに、ピン工程が3から5ラインに、集合体工程が2から 3ラインに増えた。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費
  - 主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。 主工程設備費は上記の台数に基づく。 保

守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費は、分析設備費のみ基準シス テムと同額と評価し、それ以外は主工程設備台数に依存するとみなして、基準シス テムの費用の(82/65)倍とした。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依存するとみなし、 基準システムの費用と同額と評価した。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 150 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 評価方法に従って算出した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造単価は 17.0 万円/kgHM であり、目標値 16 万円/kgHM を満足できなかった。燃料製造単価を発電単価に換算すると平均燃焼度が 61GWd/t なので 0.27 円/kWh となった。

() コストダウンの方向性

4.1.2.3(2)()の記載に同じである。

(3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.34 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)で約 13.1 t (8.9 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 6.3 t (5.8 t) となった。2001ドラム缶換算ではそれぞれ約131本(89本)および約63本(59本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見なし基準システムに同じ2×107Bq/y程度と評価した。

() 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.35 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約 1,670 t (1,360 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3,630 t (3,510 t)、クリアランス以下(コンクリート以外)で 3.5 万 t (3.4 万 t)、クリアランス以 下(コンクリート)で 35 万 t (34 万 t)となった。

## 4.1.2.6 Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・経済性重視型炉心対応システム

Pb-Bi 冷却中型炉・200 t 規模・経済性重視型炉心に対応するシステム概念を検討し、 経済性および環境負荷低減性を概略評価する。

(1) 主工程設備等の検討

炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩留りを考慮した必要生 産量をそれぞれ表 4.1.36 に示す。燃料集合体の年間必要生産量は、内側炉心燃料 829 体(512 体)、外側炉心燃料 708 体(431 体)、径方向ブランケット燃料 259 体(321 体)であり、基準システム炉心用の約1.4倍に相当する生産体数である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 4.1.37 に 示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成検討条件(相互汚染防止、物 流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 および表 4.1.8 参照)。検討の結 果、主工程設備台数は基準システムに対して、脱硝・転換設備が9基から11基に、ペ レット工程が5から6ラインに、ピン工程が3から5ラインに、集合体工程が2から 3ラインに増えた。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費
  - 主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す

建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保 守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費は、分析設備費のみ基準シス テムと同額と評価し、それ以外は主工程設備台数に依存するとみなして、基準シス テムの費用の(83/65)倍とした。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依存するとみなし、 基準システムの費用と同額と評価した。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を以表 4.1.12 に示す。人 員および単価は 3.2.1 節で設定した 150 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節 の評価方法に従って算出した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造単価は 17.1 万円/kgHM であり、目標値 16 万円/kgHM を満足できなかった。燃料製造単価を発電単価に換算すると平均燃焼度が 87GWd/t なので 0.19 円/kWh となった。

() コストダウンの方向性

4.1.2.3(2)()の記載に同じである。

(3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.38 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地 層処分並)で約 13.5 t (8.9 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 6.3 t (5.8 t) となった。2001ドラム缶換算ではそれぞれ約135本(89本)および約63本(59本)となる。 気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見なし基準システムに同 じ2×107Bq/y程度と評価した。

#### () 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.39 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約 1,690 t (1,360 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3,640 t (3,510 t)、クリアランス以下(コンクリート以外)で 3.5 万 t (3.4 万 t)、クリアランス以 下(コンクリート)で 35 万 t (34 万 t)となった。

## 4.1.2.7 水冷却大型炉・200t規模・BWR 型炉心対応システム

本炉は、日本原子力研究所が主体となり検討中の扁平二重炉心構成の BWR 型水冷 却高速炉(以下、水冷却炉とする)である。本炉に燃料集合体を供給する燃料製造シ ステム概念を概略検討し、経済性および環境負荷低減性を概略評価する。

(1) 主工程設備の設計

炉心の主要諸元を表 4.1.40 に、燃料集合体 MOX 部の Pu 富化度分布を図 4.1.24 に 示す。本炉は軸方向 5 領域の非均質炉であり、燃料集合体装荷体数は 900 体である。 各燃料集合体は、MOX 燃料領域の Pu 富化度が異なる 5 種類(Pu 富化度 23.1、26.2、 27.4、30.4、33.5wt%)の燃料要素が配置され、合計 271 本の燃料要素で構成される。 このため、燃料製造工程では Pu 富化度が異なる 5 種類の MOX 燃料と、軸方向ブラ ンケット燃料を取り扱う必要がある。

製造歩留りを考慮した必要生産量を表 4.1.41 に示す。燃料集合体の年間必要生産量 は約 807 体である。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 4.1.42 に 示す。この際、主工程設備の処理能力は基準システム(表 4.1.5 参照)に準じたが、 ライン構成検討条件(相互汚染防止、物流合理性考慮等)については、経済性向上を 目的に、Pu 富化度の異なる4種類の MOX 燃料(Pu 富化度 23.1、26.2、27.4、30.4wt%) を同ーラインで交互に製造できると仮定し検討した。検討の結果、主工程設備台数は 基準システムに対して、原料受入設備が6基から12基に、脱硝・転換設備が9基から 10基に、ピン工程が3から2ラインに変更となった。また、ワイヤ巻付設備が無くな り、Pu 富化度の異なる5種類の燃料要素をトレイに整列する燃料要素整列設備が追 加となる。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費

主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.1.10 に示す。 建設費

設備費および建屋費を表 4.1.11 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保 守・補修設備費は、保守対象設備台数の減少を考慮し評価した。共通設備費および 建屋・電気・換気設備費は、主工程設備総数が基準システムの値とほぼ同数であるこ とから、基準システムと同額と評価した。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依存す るとみなし、基準システムの費用と同額と評価した。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.1.12 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 300 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 要領にしたがい主工程設備費から求めた。消耗品等諸費は生産量依存とみなし基準シ ステムと同額と評価した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.1.13 に示す。

燃料製造 HM 単価は 15.0 万円/kgHM であり、目標値 16 万円/kgHM を満足できた。 燃料製造単価を発電単価に換算する平均燃焼度が 45.0GWd/t なので 0.37 円/kWh と なり、基準システム(0.22 円/kWh)より若干高額となった。

(3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.43 に示す。年間発生量は、低レベル廃棄物(地 層処分並)で約 8.8 t (8.9 t) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 1.4 t (5.8 t)となった。2001ドラム缶換算ではそれぞれ約 88本(89本)および約 15本(59 本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、基準システム相当の 2×10<sup>7</sup>Bq/y 程度 が放出されると考えられる。

() 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.1.44 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層 処分並)で約 1,290t(1,360t) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3,410t (3,510t) クリアランス以下(コンクリート以外)で 3.4 万t(3.4 万t) クリア ランス以下(コンクリート)で 34 万t(34 万t)となった。

### 4.1.3 技術開発項目

開発課題を表 4.1.45 に示す。また、概要を以下に示す。

- (1) 技術成立性に係わる項目
- () 粉末の流動性改善/高充填技術開発
   小規模試験にて、ペレット成型および焼結に適した粉末造粒方式(転動造粒方式、

流動層造粒方式)を確認・選定し、選定方式における造粒条件と造粒粉末特性の関係 を把握するとともに、成型性および焼結性に係わるデータを取得する。一方、小規模 試験にて、エアータップ充填法による未造粒粉の充填特性を把握し、成型性および焼 結性に係わるデータを取得する。

これら要素技術開発成果を踏まえ、造粒方式(流動性改善技術)とエアータップ充 填方式(高充填技術)について技術評価を行い、粉末搬送方法やホールドアップ低減 性も踏まえ、採否を判断する。

() 焼結プロセス条件の最適化 / MA・FP の製造プロセスへの影響確認

小規模試験にて、Pu-Am-Ln 系酸化物の結晶構造や析出条件を調査するとともに、 均質性の良いペレットを得るための焼結プロセス条件を把握する。さらに、均質ペレ ットを用い照射試験による再分布挙動、組織変化、FCCI 特性等を評価する。 これら成果を踏まえ、小規模試験にて、燃料製造可能な仕様範囲、および量産システ ムに適した合理的な焼結・熱処理プロセス条件を確認し、燃料仕様に対応する燃料製 造条件を把握する。

() 製造歩留まり確認/大型脱硝容器での脱硝性能確認

基準システムで検討している燃料組成を用い、一連の小規模試験および工学規模試 験にて、マスフロー設定の際に重要な製造歩留まりに関する要素技術開発を行なう。 この際に大型脱硝容器での脱硝性能、O/M ドリフト防止効果、および MA や実 FP 混 入による、原料の放射線および発熱に伴うプロセス条件への影響等を確認する。

() 遠隔保守・補修性を考慮した機器開発

セル内での遠隔保守・補修性については、安全性を維持しつつ、ICC、PM、MSM のアクセス性、モジュールの着脱・位置決め・復元作業の容易性、遮へい窓やITV カメ ラからの作業視認性、ケーブル・配管類の取回し性、搬送時のバランス維持・干渉防止、 除染性に配慮した構造など、配慮すべき条件が多岐に渡り、これら制約条件を十二分 に反映した設備とするため、モックアップによる確認試験を行う。特に複雑な動作を 行い構成部品の多い成型設備、ペレット検査設備、燃料要素組立設備などを重点的に 行う。これは経済性、運転保守・保守性に係わる課題でもある。

() 集合体組立・検査工程での除熱方式

崩壊熱による影響対策として、燃料要素被覆管の表面酸化による外観不良、熱膨張 による燃料集合体の組立不良および燃料要素検査装置の検査誤差拡大を防止するため、 強制冷却を考慮したシステム概念としている。この見通しについては、モックアップ 試験等により機能・性能を確認する。 高信頼性機器の開発

MA 含有低除染燃料からの放射線/崩壊熱に対し、遮へいや距離/冷却等による効 果的な対策が施せない機器がある場合には、耐放射線性/耐熱性を有する当該機器の 開発を行う。特に付着粉末からの線によるダメージは大きいと予想され、密閉構造、 正圧構造等の採用により粉末が入り込まない電子機器を開発する。これは経済性、運 転保守・保守性に係わる課題でもある。

- (2) 経済性に係わる項目
- () 小規模プラントでの最適設計

システム設計において、生産規模 50tにおけるプラント概念を検討する。この際、 特に処理能力に応じた合理的な設備仕様および設備構成を検討し、経済性の向上を図 る。

() 集合体構成部材の低価格化

被覆管、ラッパ管、エントランスノズル等の集合体構成部材の安価な加工方法を開 発する。

(3) 核拡散抵抗性に係わる項目

() ホ-ルドアップ低減技術の開発

セル内への粉末飛散があると回収が極めて困難になるため、成型プレス、研削装置 など粉末飛散の可能性がある装置については、カバーを行うと同時に集塵システムを 設け、局所排気を行うことでホールドアップ低減を図ることとしているが、その効果 を含めた最適化については、モックアップによる確認試験を行う。これは、安全性(作 業員の被ばく低減)環境負荷低減性、運転・保守補修性にも係わる課題である。

() 計量管理技術の高度化

成分分析値と秤量値を用いて、計算により工程内の Pu 量の把握・管理を行う手法 について、その高度化を図り、現在用いられている工程内の核燃料物質量を直接測定 する手法と同等の信頼性を有する技術にまで高める。これは、技術的成立性、運転・ 保守補修性にも係わる課題である。

なお、上記技術の代替技術として、直接計測による機器内の Pu 重量の評価手法を 検討しておく必要がある。

	外側炉	ı Ľ	内側炉	تان	ブランケ	゙ット
	kg/tHM	%	kg/tHM	%	kg/tHM	%
U	7.39E+02	73.6%	7.79E+02	77.6%	9.99E+02	99.8%
Pu	2.49E+02	24.9%	2.11E+02	21.0%	1.13E+00	0.1%
Np	8.70E-01	0.1%	7.37E-01	0.1%	3.94E-03	0.0%
Am	8.36E+00	0.8%	7.09E+00	0.7%	3.80E-02	0.0%
Cm	2.46E+00	0.2%	2.09E+00	0.2%	1.12E-02	0.0%
HM合計	1.00E+03	99.6%	1.00E+03	99.7%	1.00E+03	99.9%
FP	3.81E+00	0.4%	3.33E+00	0.3%	6.53E-01	0.1%
(Np+Am+Cm)	1.17E+01	1.2%	9.92E+00	1.0%	5.31E-02	0.0%

# 表4.1.1 燃料重量組成 (燃料重金属1t当たり,基準システム)

		表4.1.2	燃料の基	本仕様(	基準シス	(テム)	
有心	い仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体		
画	瓦出力	MWe		1,500			
熱	出力	MWth		3,570			
運転サ、	イクル長さ	ケ月		17			
運	殖比	I		1.17			
集合体	記列ピッチ	mm		179.7			
然料交换	奥バッチ数	バッチ	4	4	4		
集合	合体数	体	316	266	198		
						_	
(本)(本)	今休井楼	守規	内侧炉心燃	燃料集合体	外侧炉心隙	<b>然料集合体</b>	径方向ブ
派十条	口体14%	<b>五</b> 井	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	()48mm)()10000000000000000000000000000000000	集
∢н	岷	mm	4,3	70	4,3	10	
燃料要	素の本数	本/体	271	0	271	0	
	炉心燃料		76	.6	76	7.0	
₩ ₩	ブランケット燃料	kg-HM/体	72	6	72	6.0	
	合計		149	9.5	14	9.6	
			内側后心候到	内側后小峡北	を上面に行い、数学に	と言うと考え	経方向ブ

書が有	公井井楼		内侧炉心	燃料集合体	外側炉心燃料集合体		径方向ブランケット
派牛派	<b>2</b> 译 1 4 %	<u>⊐</u> _+	IC+AB	ICのみ(AB無し)	0C+AB 0C03+(A	B 第 し)	集合体
₩	単	шш	4,	370	4,370		4,370
燃料要	素の本数	本/体	271	0	271	0	127
	炉心燃料		2	6.6	76.7		
町	フ・ランケット燃料	kg-HM/体	2	2.9	72.9		184.2
	令		1	49.5	149.6		184.2

燃料要	<b>ξ素仕様</b>	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(00のみ)	径方向ブランケット 燃料要素
¢H	単	шш	2,905	2,905	2,905	2,905	2,905
<b>オ</b>	は、ころをは、ころをもうで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころで、ころ	200	008	800	800	800	0
κ υ	ファランケット燃料		上350/下350	0	上350/下350	0	1,500
る「言言」	は、して、「「「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、	国	16	91	91	91	0
ストレーヨダ	ブランケット燃料	■/ <b>千</b>	29	0	67	0	123
	は、うちょうが		283	283	283	283	0
町	フ・ランケット燃料	g-HM/本	569	0	269	0	1,451
	合計		222	283	552	283	1,451

んつシト仕様	東位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	<b>外側炉心燃料</b> ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	шш	7.50	7.50	7.50	11.9
ペレット外径	шш	7.34	7.34	7.34	11.5
と高トットの	шш	8.81	8.81	10.40	13.8
Pu富化度	%	21.1	24.9	0.1	O
ペレット理論密度	g/cc	11.07	11.08	10.96	10.9
スミア密度	OL%	82.0	82.0	90.00	06
「キャンシン	B_XOM <sup>−g</sup>	3.53	3.54	4.53	15.1
声王ノノノン	g-HM/個	3.11	3.12	4.00	13.3

₩ ₩
田堂
青千
<b>€</b>
衷
后 男
ĤĦ
1.3
表4
1.17.

-1/

計画項	頁目	評価結果 (核的制限値)	備考
PuNH一UNH溶液*1	無限環状形槽	8.5cm	濃度400g(U+Pu)/1、30cm水全反射、Cd付き
	無限円筒直径	22.7cm	濃度300g(U+Pu)/1、30cm水全反射
MOX粉末*1	無限円筒直径	29.7cm	密度4.0g/cc、含水率5.0%、30cm水全反射
	質量	184kg(U+Pu)	球形状、30cm水全反射
MOXペレット*1	無限平板厚さ	4.3cm	密度11.1g/cc、含水率5.0%、30cm水全反射
燃料要素*2	燃料要素本数	983本	密度10.4g/cc、空間水密度 6E-4g/cm3(湿度100%)
燃料集合体*2	燃料要素本数	983本 (燃料集合体約3.6体)	密度10.4g/cc、空間水密度 6E-4g/cm3(湿度100%)

1.原料組成

\*1 U/Pu = 70/30, 239Pu/240Pu/241Pu = 60/20/20\*2 U/Pu = 73/27, 239Pu/240Pu/241Pu = 65/20/15

2.U濃縮度

\*1、\*2とも0.3wt% 3.評価結果

\*1 中性子の実効増倍率が0.95となる値
\*2 臨界本数に安全係数0.7を積算した値
	<b>谦</b> 考				外挿値				外挿値
	集合体 (ピット貯蔵)	384	437	629	497	95	98	105	100
	集合体 (横置き)	474	547	802	626	211	239	328	266
( <b>D</b> <sub>o</sub> )	燃料要素	38	40	47		37	39	46	
温度	焼結 ペレット (3段)	118	136	187	151	96	107	145	119
	焼 よしシト (1段)	54	59	75	64	52	56	70	60
	粉末受入 ホッパ、成型 ホッパ	405	474	726	223	110	122	166	136
	外側炉心燃料 の発熱量 (W/kg-HM)	9.55	11.39	18.14	13.5	9.55	11.39	18.14	13.5
	MA含有率	1.2%	2.0%	5.0%	5.0%	1.2%	2.0%	5.0%	5.0%
	フェーズ		フェーズ I		フェーズ II		フェーズ I		フェーズ II
	解析部位		世界が中	下し言承			<b>丰丽</b> 泊	衣回画皮	

表4.1.4 崩壊熱による温度計算結果

注記: 上記以外の計算条件は以下による。 吉村, 他:「低除染/ペレット燃料製造プラント技術調査(2)」, JNC ZJ9420 2001–001

(ステム)
(基準)
<b>少要</b> 台数
設備必
表4.1.5

	敥		1.7	).3	).6	).2	).2	).1	).3	).3	).3	).3	).3	).3	
こを業	必要台 (基)	*2		0	0	0	0 (		0		0	0	0	-	
コランケッ	処理能力 (/基)	*2	204	06	34.1	120	120	1,728	750	768	750	750	6.0	6.0	
ヨンヨ	必要 処理量	*2	328	19.3	19.3	19.3	19.3	208	208	208	208	208	1.6	1.6	
. <i>Fix</i> 41	必要台数 (基)	*3 2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.7								
	処理能力 (/基)	12,500	204	06	90.1	120	120					$\overline{}$			\$
	必要 処理量	12,411	382	66.2	66.2	66.2	66.2					$\swarrow$		$\swarrow$	
<i>(</i> 0 <i>)</i>	必要台数 (基)	*3 2.0	1.9	0.6	1.0	0.5	0.5	0.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	
<b>11比度24.9</b> 0	処理能力 (/基)	4,200	103	06	45.1	120	120	1,728	750	768	750	750	6.0	6.0	
(Pu 译	必要 処理量	4,109	184	40.8	40.8	40.8	40.8	597	597	597	597	597	2.2	2.2	
<b>(</b> 0)	必要台数 (基)	*3 2.0	2.2	0.7	1.1	0.5	0.5	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	
化度21.19	□理能力 (/基)	4,900	103	06	45.1	120	120	1,728	750	768	750	750	6.0	6.0	
(Pu富	必要 処理量	4,788	218	48.5	48.5	48.5	48.5	709	709	709	709	709	2.6	2.6	4
単位	ž ₽	Jットル/7日	<sup>4g−</sup> HM/B	個/分	個/分	個/分	個/分	パ 一	プン日	し し し し	パン/日	パン/日	体/日	体/日	
田7 土乃 开2 首臣	4X 1/X 175 255	资 该	· 校资	参した い かし た	ペレット	ペレット	ペレット	ペレット	燃料要素	燃料要素	燃料要素	燃料要素	集合体	集合体	+ 2 Volt
闵元 按魳率*1	1 ★ (%)	95	95	75	95	75	75	95	95	95	95	95	95	95	@ + 2 4 V
十五十样	上交上休	炉心燃料用: 円環槽 (溶液厚さ85mm未満) ブランケット用: 円筒槽	脱硝:マイクロ波脱硝、350℃×1h、40kW 焙焼/還元:電気炉、750℃×1h、空気/5%H2-N2 粗砕:オーガ回転式、1h 処理能力:炉心4.3kg-HM/バッチ、ブランケット8.5kg-HM/バッチ	レンプロ式プレス 道添: ダイ潤添式 光道: ニアータシゴ式 処理能力:12/2/ナオパ5個/分	ブッシャー式連続炉 焼結:1700℃×3~4h、5h42-Ar、加湿 処理能力:炉心20℃、33~4h、5542-Ar、加湿 処理能力:炉心20~30分、軸ブラ4段(2.704個)/30分、 径ブラ4段(1,024個)/30分、軸ブラ4段(2.704個)/30分、	乾 式 センタワスグレインダ 研削 代 自動フィードバック方 式 処理能 力 : 120値 / 分	外観:全数検査、画像処理および目視方式 密度 - 寸法形状:抜取検査、自動検査方式 処理能力:120個 / 分	自動スタック調整方式 24本同時充填対応 処理能力:1728本/日	ペレッ計挿入:24本同時押込み方式 端栓溶接:抵抗溶接式、溶接後外径研削 全長除染/汚染度検査:払拭除染/シンチレーンョン式 処理能力:750本/日	He雰囲気赤外線反射式加熱炉 24本同時処理方式 処理能力:768本/日	文陥検査:ヘリウムリーク方式 埴栓浴楼部検査:超音波探傷法方式 識別検査:X線検査方式(自動送りVTR記録) 処理能方:750本/日	ワイヤ巻付け:自動巻付け方式 総合検査:ゲージ、秤量、ITV確認方式 処理能力:750本/日	機置さ組立・ラッパ管挿入方式 強制冷却 処理能力:6体/日	自走検査方式 処理能力:6体/日	"并不是不可能。""是是是是一个,我们就是是一个人的。"
十十田記様々	工一在政调力	原料受入設備	脱硝•転換設備	成型設備	焼結設備	研削設備	ペレジト検査設備	スタック調整設備	燃料要素組立設備	端栓溶接熱処理設備	燃料要素検査設備	ワイヤ巻付・総合検査設備	燃料集合体組立設備	燃料集合体検査設備	

備考	7日はU溶液供給槽 A/Bそれぞれのバッ ファ容量	7日はU/Pu溶液供給 槽A/Bそれぞれの バッファ容量	7日はU/Pu溶液供給 槽C/Dそれぞれの バッファ容量	脱硝凝縮廃液、オフ ガ ス洗浄廃液	7日は溶液供給槽の バッファ容量						1日はリワーク溶液受 入槽のバッファ容量	
分析頻度	1回/7日•槽	1回/7日•槽	1回/7日•槽	1回/7日•槽	1回/7日-4系 列	1回/7日·3系 列	1回/7日・2系 列	1回/7日·1基	1回/7日·1基	1回/7日·1基	1回/1日•2槽	1回/1日•2槽
サンプル量	約10cc/1サン プル	約10cc/1サン プル	約10cc/1サン プル	約10cc/1サン プル	約100g/1サンプ ル	約100g/1サンプ ル	約100g/1サンプ ル	約ペレット20個 /1サンプル	約ペレット20個 /1サンプル	約ペレット20個 /1サンプル	約10cc/1サン プル	約10ce/1サン プル
分析項目(定常)	U濃度、U同位体組成	(Pu、U、Am)濃度、H+、(Pu、U)同位体組成	(Pu、U、Am)濃度、H+、(Pu、U)同位体組成	(Pu、U、Am)濃度、H+、不純物	比表面積、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、 0/M、不純物、水分	比表面積、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、 0/M、不純物、水分	比表面積、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、 0/M、不純物、水分	U同位体組成、(N、Am)濃度、 O/M、不純物、全水素量、金相(結晶粒度、ポ ア分布)、ペレット溶解性	(Pu、U)同位体組成、(Pu、U、Am)濃度、 0/M、不純物、全水素量、金相(結晶粒度、ポ ア分布)、Puスポット、ペレット溶解性	(Pu、U)同位体組成、(Pu、U、Am)濃度、 O/M、不純物、全水素量、金相(結晶粒度、ポ ア分布)、Puスポット、ペレット溶解性	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等
流体名称	硝酸U溶液	硝酸U/Pu混 合溶液	硝酸U/Pu混 合溶液	硝酸U/Pu混 合溶液/硝酸U 溶液等	還元粉末	還元粉末	還元粉末	ペレット	ペレット	ペレット	硝酸U/Pu混合 合溶液	硝酸U/Pu混 合 该该
サンプリング箇所	U溶液供給槽A/B	U/Pu溶液供給槽 A/B	U/Pu溶液供給槽 C/D	廃液槽	脱硝容器(A系列~D 系列)	脱硝容器(E系列~G 系列)	脱硝容器(H系列~I 系列)	寸法•密度検査装置 A/B	寸法•密度検査装置 C/D	寸法•密度検査装置 E	リワーク溶液受入槽 A/B	リワーク溶液受入槽 C/D
	原料受入設備(U100%)	原料受入設備(Pu21.1%)	原料受入設備(Pu24.9%)	廃液処理設備	U/Pu脱硝設備(U100%)	U/Pu脱硝設備 (Pu21.1%)	U/Pu脱硝設備 (Pu24.9%)	ペレット検査設備(U100%)	ペレット検査設備 (Pu21.1%)	ペレット検査設備 (Pu24.9%)	CS•DS処理設備 (U100%)	CS•DS処理備 (Pu21.1、24.9%)

表 4.1.6 分析項目表

対象	分析項目	分析方法	必要試料量	備考
	Pu濃度	電位差滴定	約1cc	
	U濃度	電位差滴定	約1cc	
	Am	γ線スペクトル分析	約1cc	
次法	Cm	α線スペクトル分析	約1cc	
浴仪	H+	電位差滴定	約1cc	
	Pu同位体組成	質量分析	約1cc	
	U同位体組成	質量分析	約1cc	
	Pu富化度	計算法	_	
	比表面積	低温物理吸着法	約2~3g	
	嵩密度	容器充てん法	約50g	
	タップ密度	容器充てん法	約50g	
粉末	平均粒径	空気透過性	約2g	
	0/М	酸化還元重量法	約1g	
	不純物	発光分光	約1g	
	水分	水分吸着法	約2~3g	
	0/М	酸化還元重量法	約5g	
	不純物	発光分光、吸光光度分析、ガスクロマ トグラフ分析、赤外線吸収等	約50g	
	全水素量	ガスクロマトグラフ分析	約5g	
	Pu富化度	計算法	_	
	Puスポット	αオートラジオグラフィー	約5g	液-液混合であることを考慮する と必要のない可能性あり
al web	金相	金相試験法	約5g	結晶粒度、ポア分布
	Am	質量分析	約5g	
	ペレット溶解性	硝酸等溶解法	約5g	
	(U、Pu)含有率	酸化重量法	約5g	
	Pu含有率	水分吸着法	約5g	
	Pu同位体組成	質量分析	約5g	
	U同位体組成	質量分析	約5g	

### 表4.1.7 分析方法一覧表

		記備設置台	約(必要分数)		
主工程設備名	内側炉心蒸料 (43.6t-HM/y、 Pu富化度21.1%)	外側炉心燃料 (36.7t-HM/y、 Pu富化度24.9%)	マ(10.3t-HM/y)	径方向 ブランケット燃料 (65.6t-HM/y)	設置台数の根拠
原料受入設備	2 (2)	2 (2)	2(;	2)	ブランケット燃料は同一組成なので、まとめて製造することとした
说硝·転換設備	3 (2.2)	2 (1.9)	2 (2.0)	2 (1.7)	
<b>成型設備</b>	2 (0.7)	1 (0.6)	1 (1.0)	1 (0.3)	物流合理性の観点から、内側炉心燃料用は2基とした
<b></b>	2 (1.1)	1 (1.0)	1 (0.8)	1 ( 0.6 )	
<b>汧削</b> 設備	2 (0.5)	1 (0.5)	1 (0.7)	1 (0.2)	物流合理性の観点から、内側炉心燃料用は2基とした
ペレット検査設備	2 (0.5)	1 (0.5)	1 (0.7)	1 (0.2)	物流合理性の観点から、内側炉心燃料用は2基とした
スタック調整設備	1 (0.4)	1 (0.4)		1 ( 0.1 )	処理能力には余裕があるが、物流合理性およびクロスコンタミ防止の観点から、各燃料用に1基づつ設けるものとした
<b>然料要素組立設備</b>	1 (1.0)	1 (0.8)		1 (0.3)	
端栓溶接熱処理設備	1 (1.0)	1 (0.8)		1 (0.3)	
<b>然料要素検査設備</b>	1 (1.0)	1 (0.8)		1 (0.3)	
フイヤ巻付·総合検査設備	1 (1.0)	1 (0.8)		1 (0.3)	
然料集合体組立設備	1(0	.(9)		1 (0.3)	炉心燃料集合体は密封状態で取り扱うのでクロスコンタミの心配 え曲ノ む声加田纶カドはを抜えす 2 のが キュンター ご言むが
然料集合体検査設備	1(0	.(9)		1 (0.3)	が赤い、皮脯や生能ノリニは赤袷がめるので、オヤノバーノ連転で 製造するものとして1基とした。

表4.1.8 ライン構成検討結果(基準システム)

注)()内数値は、表4.1.5に示す設備必要台数を示す。

保守頻度	保守による 運転停止期間	設定根拠	代表的なもの
1回/2500日 (1回/10年)	Н Н	モータ単体が主たる装置または静的な装置	プレスモータ、プッシャ、移載コンベア、グラインダ、パーツフィーダ、冷却装置など
1回/1250日 (1回/5年)	1	ヒータブロックが主たる装置	焼結炉など
1回/500日 (1回/2年)	Н Н	複数のモジュールで構成されている装置	プレスモジュール、ペレット測定装置、寸法密度自動測定装置、ペレット 挿入装置、AGVなど
1回/30日 (1回/1ヶ月)	1	定期検査があるもの	クレーンなど
1回/4日※	Η Η	MSMにより定常的な保守を行うもの	ペレットの搬送不良などによる停止など
※:5日に1日 その停止期	亭止する(設備停止 引間の合計が1日分)	率20%)としているが、実際の運転では5日間0 であるとした。	の運転期間の中で数多くのペレット搬送不良停止があり、

表4.1.9 保守頻度設定根拠

	表 4.1.	10	主工程設	没備台数				
				設備台	·数(基)			
北日の	Z	la 冷却大型炉	П	Na 冷却大型	<b>⊎炉/中型炉</b>	Fb-Pi 冷	却中型炉	水冷却炉
設傭孡杺		200t		5(	Dt	20	Ot	200t
	基準システム	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	Ι
脱硝・転換設備	6	6	10	8	8	10	11	10
成型設備、研削設備、ペレット検査設備	各 5	各 5	各 5	各3	各 1	各 6	各 6	各 5
焼結設備	5	5	2	8	2	9	9	5
スタック調整設備	3	3	2	2	μ	3	8	2
燃料要素組立設備	3	3	8	2	1	5	5	2
端栓溶接熱処理設備	3	3	8	2	μ	5	5	2
燃料要素検査設備	3	3	8	2	μ	5	5	2
ワイヤ巻付設備	3	3	3	2	Ţ.	I	I	I
グリッド設備	I	I	-	Ι	Ι	5	2	2
燃料要素総合検査設備	3	3	8	1	1	5	9	2
燃料要素整列設備	I	I	Ι	Ι	Ι	I	Ι	1
燃料集合体組立設備	2	2	2	1	1	3	3	2
燃料集合体検査設備	2	2	2	1	1	3	3	2
合計台数(リワーク設備、保管庫類等含む)	65	65	65	43	30	82	83	67

	表	4.1.11	建設	顜				
				費 用	(億円)			
日 毕	Z	la 冷却大型炉	П	Na 冷却大型	⊎炉/中型炉	Fb-Pi 冷	却中型炉	水冷却炉
山口		200t		2(	Dt	20	Ot	200t
	基準システム	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	I
主工程設備費	508	508	510	275	198	575	658	468
保守·補修設備費、共通設備費	458	458	458	313	230	517	577	429
建屋·電気·換気設備費	708	708	708	536	331	806	904	708
新燃料貯蔵建屋設備費	129	129	129	99	99	129	129	129
建設費合計	1,803	1,803	1,805	1180	815	2,028	2,268	1,735
	表	4.1.12	操業	惠				
				費用	(億円)			
E E	Z	la 冷却大型炉	IT	Na 冷却大劲	⊍炉/中型炉	[代 iq-d	却中型炉	水冷却炉
п		200t		5(	Dt	20	Ot	200t
	基準システム	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	Ι
人件費(人員 300 人/年)	27.0	27.0	27.0	13.5	13.5	27.0	27.0	27.0
修繕費(機器交換費、定検材料費)	31.6	31.6	31.8	18.2	12.6	39.0	39.6	30.0
消耗品等諸費(補充 U、ユーティリティ等を含む)	28.0	28.0	28.0	22.0	22.0	28.0	28.0	28.0
業務分担費	13.0	13.0	13.0	8.1	7.2	14.2	14.2	12.8

4.4

114

114

5.2

5.0

1.9 57

2.4 64

4.6 104

4.6

4.6 104

104

操業費合計

事業税

### JNC TN9400 2004-036

### JNC TN9400 2004-036

表 4.1.13 燃料製造単価

				単価(万	円/kgHM)			
Ŕ	Z	a 冷却大型炉	15	Na 冷却大型	1년/中型炉	FbPi 冷∄	印中型炉	水冷却炉
月 日		200t		50	)t	20	Ot	200t
	基準システム	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	資源重視	経済重視	Ι
燃料製造単価	15.3	15.3	15.3	31.2	25.5	17.0	17.1	15.0
資本費	5.1	5.1	5.1	13.3	9.0	6.3	6.4	4.9
操業費	5.2	5.2	5.2	12.8	11.4	5.7	5.7	5.1
部材費	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

-78-

	例	「炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	- 燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等	
	ドラム缶 (本/y)		68		20		147
٥¥	~ () ^	771	1.11	117		7.6	
発生量	容 (m3/	13.5	4.2	8.8	2.9	7.6	37.0
	重量 (t/y)	6.8	2.1	4.4	1.4	3.8	18.5
	分類	金属	セラミック	金属	セラミック	金属	
	廃棄物区分	「「シー肉華都」は同時に、	もしていままる、もにでしょう	14.1、1-反雄者(今次認年的人生)	<b>ゆレンン尻米約(水柏水反巡刀业)</b>	クリアランス以下	合 計

表4.1.14 通常運転時の固体廃棄物発生量(基準システム)

# 表4.1.15 廃止措置時の固体廃棄物発生量(基準システム)

		向しく	レ廃棄物	角レベビ	、廃棄物		シリアラ	ランス以下		
	対象廃棄物	(地層)	<b>厄分並</b> )	(余裕深月	<b>ま処分並)</b>	コンクリー		コンク	4-1-	備考
		重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	
ı #	主工程設備(保守・補修設備含む)	570	1,140	220	440	430	860	I	1	
	<b>司辺設備(保守・補修設備除&lt;)</b>	10	20	3,000	6,000	2,600	5,200	I	1	
事事者	セルライニング	780	1,560	290	580	Ι	1	Ι	1	ライニング厚2mmと想定
見た	書屋躯体(上記を除く)	Ι		Ι	1	31,000	62,000	340,000	680,000	
	合計	1,360	2,720	3,510	7,020	34,030	68,060	340,000	680,000	

### 表4.1.16 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズ II 中間時設定・Na冷却大型炉・200t規模・資源重視型炉心)

1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体
電気出力	MWe		1,500	
熱出力	MWth		3,570	
運転サイクル長さ	ヶ月		18	
増殖比(目標値)	-		1.16	
集合体配列ピッチ	mm		183.2	
燃料交換バッチ数	バッチ	4	4	4
集合体数	体	316	278	198

能料集合比	4 堆	半位	内側炉心炸	燃料集合体	外側炉心炉	然料集合体	径方向ブランケット
※~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	LL 1¥	1 1 1	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	0Cのみ(AB無し)	集合体
全 長	Ξ.	mm	4,3	370	4,3	370	4,370
燃料要素のス	本数	本/体	234	37	234	37	127
	炉心燃料		82	2.0	8	2.1	0
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	6	7.4	6	7.4	189.8
	合 計		14	9.4	14	9.5	189.8

燃料要素仕	:様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素
全長		mm	2,905	2,905	2,905	2,905	2,905
E +	炉心燃料		800	800	800	800	0
大 C	ブランケット燃料	mm	上300/下400	0	上300/下400	0	1,500
ペレット個数	炉心燃料	個/木	87.7	87.7	87.7	87.7	0
マレット回数	ブランケット燃料	1回/平	67.3	0	67.3	0	104.9
	炉心燃料		303	303	303	303	0
重量	ブランケット燃料	g-HM/本	288	0	288	0	1,495
	合 計		591	303	591	303	1,495

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	mm	7.76	7.76	7.76	12.08
ペレット外径	mm	7.60	7.60	7.60	11.92
ペレット高さ	mm	9.12	9.12	10.40	14.30
Pu富化度*	%	21.5	24.1	0.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.07	11.08	10.96	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0	0.0
ペレット密度	%TD	91.8	91.8	93.8	92.4
ペレット声号	g-MOX/個	3.91	3.92	4.85	16.17
マレット生生	g-HM/個	3.45	3.45	4.28	14.25

燃料集合	*	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	上产生	体∕y	500	440	313	1,254
生産量	注度观候 200+	体/d	2.5	2.2	1.6	6.3
	2001 HM/ y	t-HM/y	74.7	65.8	59.5	200.0

燃料要素		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	十十十十	本/y	119,643	18,918	105,256	16,643	40,687	301,146
生産量	生産規模	本/d	598	95	526	83	203	1,506
	200t-HWI/ y	t-HM/v	70 7	57	62.2	5.0	60.8	204 4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	13,184,952	11,599,420	16,420,790	4,628,387	45,833,550
<b>/</b> · 在 号	生産規模	個/d	65,925	57,997	82,104	23,142	229,168
工作里	200t-HM/y	t−HM/y	45.5	40.1	70.2	66.0	221.8
		kg−HM/d	227	200	351	330	1,109

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
<b></b>	生産規模	t−HM/y	45.6	40.2	70.4	66.1	222.2
土佐里	200t-HM/y	kg−HM/d	228	201	352	331	1,111

表4.1.17 ライン構成検討結果(処理規模200t・資源重視型炉心)

	合計	222.3	6	6	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	2	2	57	
侍設定 00t規模 □心	径ブラ	66.1	Ļ	2	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	14	り 回
五中間8 - 型炉-2 重視型炉	軸ブラ ※	70.4	2	2	-	-	-	-									8	ステムに
<ul> <li>□ エーズ</li> <li>□ = 二×</li> <li>□ = □</li> <li>□ = □<th>外側</th><th>40.2</th><th>2</th><th>2</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>-</th><th>—</th><th>-</th><th>Ţ</th><th>Ţ</th><th>14</th><th>か す が</th></li></ul>	外側	40.2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	—	-	Ţ	Ţ	14	か す が
Ż	内側	45.6	2	e	2	2	2	2	-	-	-	1		-	1		21	
	合計	222.2	9	6	5	5	5	5	e	e	с	£	33	с	2	2	57	
時設定 対応炉心	径ブラ	65.6	↓	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	( <del>አ</del> -
ベロ開始 大型行う	軸ブラ	76.3	2	2	-	-	-	-					$\square$				8	準シスゴ
て て で で で で で し て し て し し し し し し し し し	外側	36.7	2	2			-					1	-		Ţ	Ţ	14	資
_	内側	43.6	2	S	2	2	2	2	-	-	-	1	-	-	1	-	21	
ケース	燃料種別	処理量t/y						mt	ШĻ	備	設備	備		査設備	設備	設備		
設			原料受入設備	脱硝·転換設備	成型設備	<b>焼</b> 結設備	研削設備	ペレット検査設備	スタック調整設備	燃料要素組立設	端栓溶接熱処理	燃料要素検査設	ワイヤ巻付設備	燃料要素総合検	燃料集合体組立	燃料集合体検査	습 計	ステムとの相違
王 王			나는 구 하는 바람 가 같다.	加加明节的关于		日 十 二 ペ	くノントー体			レノミナキ		プンあ木上田	「ノ快運」」在		年么よて記	来口译上住		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

### 表4.1.18 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズ II 中間時設定・Na冷却大型炉・200t規模・経済性重視型炉心)

1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体
電気出力	MWe		1,500	
熱出力	MWth		3,570	
運転サイクル長さ	ヶ月		26.5	
増殖比(目標値)	-		1.04	
集合体配列ピッチ	mm		185.7	
燃料交換バッチ数	バッチ	4	4	0
集合体数	体	384	321	0

能料集合体	4 推	畄位	内側炉心炉	然料集合体	外側炉心炸	然料集合体
제 아파 이 아파	LL 17#K		IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	OCのみ(AB無し)
소 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Ξ.	mm	4,3	370	4,3	370
燃料要素のス	本数	本/体	180	37	180	37
	炉心燃料		10	4.3	10	4.5
重量	軸ブランケット燃料	kg-HM/体	4	9.6	49	9.6
	스 計	1	15	2.0	15	10

燃料要素付	t様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm	2,480	2,480	2,480	2,480
	炉心燃料		950	950	950	950
жс	長 さ 軸ブランケット燃料		上200/下300	0	上200/下300	0
<sup>ペ</sup> L wit 佣粉	炉心燃料	/田 /士	89.8	89.8	89.8	89.8
マレット回数	軸ブランケット燃料	1回/平	47.2	0	47.2	0
	炉心燃料		481	481	481	481
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	275	0	275	0
	合 計		756	481	757	481

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	8.98	8.98	8.98
ペレット外径	mm	8.82	8.82	8.82
ペレット高さ	mm	10.58	10.58	10.58
Pu富化度*	%	19.0	21.5	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.06	11.07	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	89.6	89.6	93.3
ペレット声号	g-MOX/個	6.08	6.08	6.61
ハレット里里	g−HM/個	5.36	5.36	5.83

燃料集合	*	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	<b>步</b> 五 扫 拼	体∕y	708	591	0	1,299
生産量	生 座 規 候 200+	体/d	3.5	3.0	0.0	6.5
	2001 HM/ y	t−HM/y	108.9	91.1	0.0	200.0

燃料要素	ł	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	上支扫描	本/y	130,194	26,762	108,834	22,371	0	288,161
生産量	生性况候 200+	本/d	651	134	544	112	0	1,441
		t−HM/y	98.4	12.9	82.4	10.8	0.0	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	15,282,491	12,775,207	12,249,298	0	40,306,996
生产量	生産規模	個/d	76,412	63,876	61,246	0	201,535
工度里	200t-HM/y	t−HM/y	81.9	68.5	71.4	0.0	221.8
		kg−HM/d	409	343	357	0	1,109

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
生产量	生産規模	t−HM/y	82.0	68.7	71.5	0.0	222.2
工作里	200t-HM/y	kg−HM/d	410	343	358	0	1,111

	₽ \ - \ - \	「エく」、ペイ	K			K 1 0	Į	T L	1 ₩	< H	þ
王 王	設備	ケース	2	ロ モ の で 一 で 一 て し て し て し て し こ し こ し こ し こ の に し ろ ち の ち の ち の の の の の の の の の の の の の の	く 開始 大型分・2	時設定 200t規模 ·ム)	imit	N S S F S S S S S S S S S S S S S S S S	ーズ 地大社 「社社」	中間時設 炉・200t 視型炉 ((	に思う
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	뺩	内側	外側	軸ブラ	心計
		処理量t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	82.0	68.7	71.5	222.2
197 고상 #2 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	原料受入設備		2	2	2		9	2	2	2	9
加加明军囚役工作	脱硝·転換設備		с	2	2	7	6	4	4	2	10
	成型設備		2	1	-	-	5	2	2	-	5
м	焼結設備		2	1	-	-	5	2	2	-	5
、フット上住	研削設備		2	1	-	-	5	2	2	-	5
	ペレット検査設備	um	2	1	-	-	5	2	2	-	5
日十五、~	スタック調整設備	-um	-	1		-	3	-	1		0
ロノルトト作	燃料要素組立設	備	1	1		-	3	2	1		S
	端栓溶接熱処理	設備	-	1		-	3	2	1		S
がまた	燃料要素検査設	備	1	1		1	3	2	1		S
ロノ快旦上住	ワイヤ巻付設備		-	1		-	3	2	1		S
	燃料要素総合検	查設備	-	1		1	3	2	1		S
<b>佳心休</b> 丁 把	燃料集合体組立	設備	-			-	2	-	-		2
来口译上在	燃料集合体検査	設備	-			-	2	-	1		2
	습 計		21	14	8	14	57	27	22	8	57
~ 東	ステムとの相違			<b>(査</b> )	準システ	(P		* * スタジ	・転換設	ℓ備∶9 設備∶3	10基 2基

表4.1.19 ライン構成検討結果(処理規模2001・経済性重視型炉心)

	_
ŦH	ই
彩	Ē
NN R	뻸
長	涀
퉂	删
廃	₩
厌	诙
म्न	経
	±mł/
ц С	懇
照	現
暫	8
颲	2
驰	匠
	斯
<sup>7</sup>	К
0	ත
2	疕
4	Na
長	$\smile$
11/7	

		ゆ等		ын	
炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィル	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等	
101	121	ar	07	Ι	149
L 10	24.7	т Ц		7.6	
19.0	5.7	3.7	1.4	7.6	37.4
9.5	2.9	1.8	0.7	3.8	18.7
	5		ちん		
金属	セラミッ	金属	七ラミン	金属	
	9.2 19.0 3.1 10.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0	9.5         19.0         24.7         7.4         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集庫機フィルタ等           2.9         5.7         24.7         124         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	9.5         19.0         24.7         124         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集塵機フィルタ等           2.9         5.7         24.7         124         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           1.8         3.7         5,1          ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ドヒータ、集塵機フィルタ等	9.5         19.0         24.7         124         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集塵機フィルタ等           2.9         5.7         24.7         124         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           1.8         3.7         5.1         26         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           0.7         1.4         5.1         26         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	9.5         19.0         24.7         124         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉耐火レンガ等           2.9         5.7         24.7         124         炉心燃料製造用の成硝容器、焼結炉耐火レンガ等           1.8         3.7         5.1         26         ブランケット燃料製造用の成硝容器、焼結炉耐火レンガ等           0.7         1.4         5.1         26         ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉耐火レンガ等           3.8         7.6         7.6         一 燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等

# 表4.1.21 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Na冷却大型炉・200t規模・経済性重視型炉心)

### 表4.1.22 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズII中間時設定・Na冷却大型炉・50t規模・資源重視型炉心)

1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体		
電気出力	MWe		1,500			
熱出力	MWth	3,570				
運転サイクル長さ	ヶ月	18				
増殖比(目標値)	-	1.16				
集合体配列ピッチ	mm	183.2				
燃料交換バッチ数	バッチ	4 4				
集合体数	体	316	278	198		

総料集合法	计样	甾位	内側炉心炉	然料集合体	外側炉心炸	然料集合体	径方向ブランケット
※ 사람 두 더 나는 1	LL 13K	1 1	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	OCのみ(AB無し)	集合体
술 문	Ē,	mm	4,3	370	4,3	370	4,370
燃料要素の本数		本/体	234	37	234 37		127
	炉心燃料		82	2.0	82	2.1	0
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	6	7.4	67	7.4	189.8
	合 計		14	9.4	14	9.5	189.8

燃料要素仕様		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素
全長		mm	2,905	2,905	2,905	2,905	2,905
E +	炉心燃料	mm	800	800	800	800	0
ж с	ブランケット燃料		上300/下400	0	上300/下400	0	1,500
ペーット個数	炉心燃料	/田 / ★	87.7	87.7	87.7	87.7	0
いしりに回数	ブランケット燃料	1回/平	67.3	0	67.3	0	104.9
	炉心燃料		303	303	303	303	0
重量	ブランケット燃料	g-HM/本	288	0	288	0	1,495
	合 計		591	303	591	303	1,495

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	mm	7.76	7.76	7.76	12.08
ペレット外径	mm	7.60	7.60	7.60	11.92
ペレット高さ	mm	9.12	9.12	10.40	14.30
Pu富化度*	%	21.7	24.4	0.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.07	11.08	10.96	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0	0.0
ペレット密度	%TD	91.8	91.8	93.8	92.4
ペL wik 声号	g-MOX/個	3.91	3.92	4.85	16.17
マレット重重	g-HM/個	3.45	3.46	4.28	14.25

燃料集合	*	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	十五日井	体∕y	125	110	78	313
生産量	生産規模 50t−HM/y	体/d	0.6	0.6	0.4	1.6
		t−HM/y	18.7	16.4	14.9	50.0

燃料要素		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
生産量	生産規模 50t-HM/y	本/y	29,909	4,729	26,313	4,161	10,171	75,283
		本/d	150	24	132	21	51	376.4
		t−HM/v	17.7	1.4	15.5	1.3	15.2	51.1

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
生産量	生産規模 50t-HM/y	個/y	3,296,095	2,899,729	4,105,019	1,157,047	11,457,889
		個/d	16,480	14,499	20,525	5,785	57,289
		t−HM/y	11.4	10.0	17.6	16.5	55.4
		kg−HM/d	56.9	50.1	87.8	82.5	277.2

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
生在号	生産規模	t−HM/y	11.4	10.0	17.6	16.5	55.6
工度里	50t−HM/y	kg−HM/d	57.0	50.2	88.0	82.6	277.8

### 表4.1.23 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズII中間時設定・Na冷却中型炉・50t規模・資源重視型炉心)

1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体			
電気出力	MWe	750					
熱出力	MWth	1,785					
運転サイクル長さ	ヶ月	18					
増殖比(目標値)	-		1.15				
集合体配列ピッチ	mm	178.0					
燃料交換バッチ数	バッチ	4 4					
集合体数	体	158 156					

能到有个什么		肖位	内側炉心炉	燃料集合体	外側炉心炸	<b>然料集合体</b>	径方向ブランケット
222 개2 개국 더 1주1	11 <b>7</b> 8	中世	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	OCのみ(AB無し)	集合体
全長		mm	4,4	00	4,4	4,400	
燃料要素の本数		本/体	234	37	234	37	127
	炉心燃料		76	6.7	76	i.8	0
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	62	62.9		2.9	143.4
	合 計		13	9.6	13	143.4	

燃料要素仕様		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素
全長		mm	2,935	2,935	2,935	2,935	2,935
長 さ 炉心燃料 // デランケット燃料	炉心燃料		800	800	800	800	0
	ブランケット燃料		上300/下400	0	上300/下400	0	1,500
ペレット伊教	炉心燃料	個/木	90.8	90.8	90.8	90.8	0
いしつい回数	ブランケット燃料	1回/ 4	67.3	0	67.3	0	120.9
重量	炉心燃料		283	283	284	284	0
	ブランケット燃料	g-HM/本	269	0	269	0	1,129
	合 計		552	283	552	284	1,129

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	mm	7.50	7.50	7.50	10.50
ペレット外径	mm	7.34	7.34	7.34	10.34
ペレット高さ	mm	8.81	8.81	10.40	12.41
Pu富化度*	%	22.2	27.8	0.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.07	11.10	10.96	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0	0.0
ペレット密度	%TD	92.5	92.5	94.0	92.8
ペーミンを	g-MOX/個	3.53	3.54	4.53	10.60
トレット里里	g−HM/個	3.11	3.12	3.99	9.34

燃料集合体		単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
生産量	<b>止 去</b> 扫 捞	体∕y	121	119	115	355
	生性况候 50+_UM/\/	体∕d	0.6	0.6	0.6	1.8
	JUE-HIWI/ y	t−HM/y	16.9	16.7	16.5	50.0

燃料要素		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
生産量	生産規模 50t-HM/y	本/y	28,907	4,571	28,541	4,513	14,894	81,426
		本/d	145	23	143	23	74	407.1
		t-HM/y	15.9	1.3	15.8	1.3	16.8	51.1

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	3,298,471	3,256,718	4,194,535	1,953,251	12,702,975
<b></b>	生産規模	個/d	16,492	16,284	20,973	9,766	63,515
工度里	50t-HM/y	t−HM/y	10.3	10.2	16.8	18.2	55.4
		kg−HM/d	51.4	50.8	83.8	91.2	277.2

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
<b></b>	生産規模	t−HM/y	10.3	10.2	16.8	18.3	55.6
工作里	50t-HM/y	kg−HM/d	51.5	50.9	84.0	91.4	277.8

五 王	設	ケース	Ϋ́Ž	ェ エ の で で で で で で し イ ボ の し で の の し の の し の の の の の の の の の の の	日開和	<b>帯設定</b> 00t規模 ム)		2	フェ Na ふ Jr 一ズ 一ズ 一ズ 一ズ 一ズ 一ズ 一ズ 一ズ し ズ ーズ し オ し ズ ち の が し ろ ち の が し が の が の が の が の が の が の が の の の の	▲ 工 中 間 大 型 小 一 一 日 日 日 日 一 一 日 日 一 一 一 日 日 一 一 一 日 日 一 一 一 日 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	市設店 505規模 502			フェーズ la 冷却 d 資源]	五中間 中型炉 重視型小	時設定 50t規模 沪心	
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	습計	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	습計	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	습計
		処理量 t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	11.4	10.0	17.6	16.5	55.5	10.3	10.2	16.8	18.3	55.6
<sup>时 14</sup> 15 14 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	<b>斗受入設備</b>		2	2	2	Ţ	9	2	2	2	Ţ	9	2	2	2	Ţ	6
加明虹突一位	∮•転換設備		e	2	2	2	6	-	-	-	Ţ	3	-	-	-	Ţ	3
成型	訬備		2	-	-	-	5	-	-	-	Ţ	3	-	-	-	Ţ	S
「「「」「「「「」」「「」」で	<b>詰</b> 設備		2	-	-	-	5	-	-	-	Ţ	S	-	-	-	Ţ	S
いいよね	<b> </b> 設備		2	-	-	-	5	-	-	-	Ţ	3	-	-	-	Ţ	3
しゃ	ット検査設値	瞱	2	-	-	-	5	-	-	-	Ţ	3	-	-	-	Ţ	3
レンもナナ語	ック調整設備	押	-	-		-	S	-	Ţ			2	-	Ţ			2
「ノニートは「然料」	事業組立副	及備	-	-		-	e	-	Ţ			2	-	Ţ			2
端柱	<b>詮溶接熱処</b> 理	<b>謃</b> 設備	1	-		1	3	1	Ţ		Ļ	2	1	Ţ		1	2
パ、体体上語	<b>钭要素検査</b> 認	₽備	-	-		-	S	-	1,			2	-	Ţ			2
	や巻付設備		1	-		1	3	1	Ţ		1	2	1	Ţ		1	2
燃料	<b> 要素総合</b> 梅	袬査嗀備	1	-		1	3	1	Ţ		1	2	1	Ţ		1	2
<u> まんよっ 認知</u>	<b>斗集合体組</b> 立	L設備	1	Ţ		1	2	1	Ţ		Ļ	1	1	Ţ		Ţ	-
* ロ ゆ ー 唯 一 唯 一 唯 知	<b>斗集合体</b> 検 <b></b>	<b></b>	1	Ţ		1	2	1	Ţ		↓	1	1	Ţ		Ļ	1
¢□	랆		21	14	8	14	57	15	7	7	9	35	15	7	7	9	35
基準システル	ムとの相違			香	シスナ	(۲		ポペピ集 ポペング おいろ	転した 「 して で で で で し で し で し で し で し で し で し で	:5⇒3小 2⇒1小	基心 シ		* * * * 影ペピ集 部レン合	転 小工 で 一 で 一 で 一 で し で し で し で し で の の の の の の の の の の の	==:0 500 500 500 500 500 500 500 500 500 5	速心 ひ	

表4.1.24 ライン構成検討結果(処理規模50t・資源重視型炉心)

	<u>ک</u>
₩	庐
発	뾄
麧	曹彷
瀼	源
廣	資
1 2 2	模
臣の	既
もして	50
氏	Ē
重	뾒
宅 じ	₽
喧	Ē
• न	計レ
25	払し
<b>1</b> .	实
表	(Na

			光工里		
廃棄物区分	分類	重量 (t/y)	容量 (m3/y)	ドラム (本/y)	<b> </b>
(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	金属	3.7	7.5	101	「「「「「」」「「」」」「「」」」「「」」「「」」」「「」」」「「」」」「
ゆて、と尻米物、心戸ないま	セラミック	1.3	2.6		炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
(五) シニ 威脅者(令然)が再合む()	金属	2.5	4.9	6 9	, 」 ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
あて、この米約、米枯、水気、ビー	セラミック	0.7	1.3	7.0	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
クリアランス以下	金属	2.4	4.8	4.8	─   燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等
合 計		10.6	21.1	3	2

# 表4.1.26 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Na冷却大型炉/中型炉・50t規模・資源重視型炉心)

	角 し ぐ し	レ廃棄物	角 レベル	、廃棄物		クリアラ	5 ンス以下			
対象廃棄物	(地層	<b>厄公</b> 並)	(余裕深度	<b>[処分並)</b>	コンクリ-	ート以外	コンク	4-1	備考	
	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)		
≧設備(保守・補修設備含む)	400	800	140	280	260	520		1		
è備(保守·補修設備除<)	5	10	2,500	5,000	2,200	4,400		Ι		
ドイニング	390	780	180	360	Ι	I		1	ライニング厚5mmと想定	
呕体(上記を除く)			Ι	I	24,000	48,000	270,000	540,000		
合 計	795	1,590	2,820	5,640	26,460	52,920	270,000	540,000		

### 表4.1.27 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズ II 中間時設定・Na冷却大型炉・50t規模・経済性重視炉心)

### 1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体		
電気出力	MWe		1,500			
熱出力	MWth		3,570			
運転サイクル長さ	ヶ月		26.5			
増殖比(目標値)	-	1.04				
集合体配列ピッチ	mm		185.7			
燃料交換バッチ数	バッチ	4	4	0		
集合体数	体	384	321	0		

能料集合件。	4 堆	甾位	内側炉心炸	然料集合体	外側炉心炸	燃料集合体
2017年1月21日	111.1738		IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	OCのみ(AB無し)
全	E.	mm				
燃料要素の	本数	本/体	180	37	180	37
	炉心燃料		10	4.3	10	4.5
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	49	9.6	49	9.6
	合 計		15	3.9	15	4.0

燃料要素仕	ŧ様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm	2,480	2,480	2,480	2,480
E +	炉心燃料		950	950	950	950
жe	軸ブランケット燃料		上200/下300	0	上200/下300	0
ペレット (田米)	炉心燃料	佃 /★	89.8	89.8	89.8	89.8
ハレット画数	軸ブランケット燃料	1回/平	47.2	0	47.2	0
	炉心燃料		481	481	481	481
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	275	0	275	0
	수 計	1	756	481	757	481

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	8.98	8.98	8.98
ペレット外径	mm	8.82	8.82	8.82
ペレット高さ	mm	10.58	10.58	10.58
Pu富化度*	%	18.7	21.9	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.05	11.07	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	89.6	89.6	93.3
ペーミンを	g-MOX/個	6.08	6.08	6.61
ハレット里里	g-HM/個	5.36	5.36	5.83

燃料集合	本	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	<b>上 去 坦 措</b>	体∕y	177	148	0	325
生産量	土 / 生 尻 代 50+	体/d	0.9	0.7	0.0	1.6
	50L 11WI/ y	t−HM/y	27.2	22.8	0.0	50.0

燃料要素	ł	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
<b>生 支 担 持</b>	生女担体	本/y	32,548	6,690	27,208	5,593	0	72,040
生産量	生 産 規 候 50+	本/d	163	33	136	28	0	360.2
	JUL-HIVI/ y	t-HM/y	24.6	3.2	20.6	2.7	0.0	51.1

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	3,820,601	3,193,783	3,062,307	0	10,076,691
生帝号	生産規模	個/d	19,103	15,969	15,312	0	50,383
工作里	50t-HM/y	t−HM/y	20.5	17.1	17.8	0.0	55.4
			102.3	85.7	89.2	0.0	277.2
			中国后心器类	时间后心避到	動士白ざいた…」	な 士 向 ご き よ か し	

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
上帝号	生産規模	t−HM/y	20.5	17.2	17.9	0.0	55.6
工作里	50t−HM/y	kg−HM/d	102.5	85.8	89.4	0.0	277.8

### 表4.1.28 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズII中間時設定・Na冷却中型炉・50t規模・経済性重視炉心)

### 1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体
電気出力	MWe		750	
熱出力	MWth		1,785	
運転サイクル長さ	ヶ月	26		
増殖比(目標値)	-	1.04		
集合体配列ピッチ	mm	179.7		
燃料交換バッチ数	バッチ	4	4	0
集合体数	体	183	150	0

能料集合片。	+堆	畄位	内側炉心燃	然料集合体	外側炉心燃	然料集合体
22111121212121212121212121212121212121	1178	- 単位	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	OCのみ(AB無し)
全長		mm				
燃料要素のス	本数	本/体	180 37		180	37
	炉心燃料		10	9.8	11	0.0
重量	重量 ブランケット燃料		59.5		59	9.5
	合 計		16	9.3	16	9.5

燃料要素仕	:様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm				
E +	炉心燃料		1,000	1,000	1,000	1,000
жe	軸ブランケット燃料		上300/下300	0	上300/下300	0
~!	炉心燃料	佃 / ★	92.8	92.8	92.8	92.8
ハレット個数	軸ブランケット燃料	1回/平	55.7	0	55.7	0
	炉心燃料		506	506	507	507
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	330	0	330	0
	合 計		837	506	837	507

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	8.98	8.98	8.98
ペレット外径	mm	8.82	8.82	8.82
ペレット高さ	mm	10.78	10.78	10.78
Pu富化度*	%	19.3	23.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.06	11.08	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	89.6	89.6	93.3
ペーミンを	g-MOX/個	6.19	6.20	6.73
ハレット里里	g-HM/個	5.45	5.46	5.93

燃料集合	本	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	上产进行	体∕y	162	133	0	295
生産量	土 / 庄 况 代 50+ 山 M / 小	体∕d	0.8	0.7	0.0	1.5
	JOL TIM/ y	t−HM/y	27.5	22.5	0.0	50.0

燃料要素	ł	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	生女担体	本/y	29,845	6,135	24,463	5,028	0	65,471
生産量	生性况候 50+	本/d	149	31	122	25	0	327.4
	JOL THM/ y	t−HM/y	25.0	3.1	20.5	2.5	0.0	51.1

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	3,621,925	2,968,791	3,280,172	0	9,870,888
生在号	生産規模	個/d	18,110	14,844	16,401	0	49,354
工度里	50t-HM/y	t−HM/y	19.8	16.2	19.5	0.0	55.4
		kg−HM/d	98.8	81.1	97.3	0.0	277.2

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
生在号	生産規模	t−HM/y	19.8	16.3	19.5	0.0	55.6
工作里	50t−HM/y	kg−HM/d	99.0	81.3	97.5	0.0	277.8

	44.1.23	モノコン	电影	יי נים א	Ψ.	せた	- 221天	- <b>- - - - - - - - - -</b>	モン	H H	H K	ים, _ע י	~			
田 王	設	ケース	Ż	フェーズ a ふ 助 J (基 <sup>述</sup>	、日 開始 て 村 市 く イ	時設定 200t規様 ム)	łmi	て Na 上 で 経 経	ーズロ4 却大型 済性重約	-間時設 炉 - 50t 見型炉心	定戰。	ー 王 の 記 の 記 の 記 の に の の に の の の の の の の の の	- ズロ4 却中型 発性重な	-間時設 炉 - 50t 視型炉心	定戰	
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	合計	内側	外側	軸ブラ	合計	内側	外側	軸ブラ	合計	
		処理量 t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	20.5	17.2	17.9	55.6	19.8	16.3	19.5	55.6	
	原料受入設備		2	2	2	Ţ	9	2	2	2	9	2	2	2	9	
加调知误土住	脱硝·転換設備		3	2	2	2	6	-	-		3	-	-	-	с С	
	成型設備		2	-	-	-	5	-	Ţ	↓	-	-	Ţ	Ţ	-	
シージャー	<b>焼</b> 結設備		2	1	1	1	5	1	Ļ	Ļ	2	1	Ļ	1	2	
いていて	研削設備		2	-	-	-	5	-	Ţ	Ţ	-	-	Ţ	Ţ	-	
	ペレット検査設備	₩₩	2	-		-	5	-	Ţ	Ţ	-	-	Ţ	Ţ	-	
김 누 누 넘 신 지	スタック調整設備	₩E	-	—		-	e	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
「ノミナト	燃料要素組立設	č備	-	—		-	e	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
	端栓溶接熱処理	昆彼備	-	—		-	c	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
プン核木工品	燃料要素検査設	č備	-	—		-	e	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
「ノ役」上住	ワイヤ巻付設備		-	—		-	e	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
	燃料要素総合検	鴍査設備	-	-		-	e	-	Ť		-	-	Ť		-	
年へよてお	燃料集合体組立	記備	-	Ţ		-	2	-	Ţ		-	-	Ţ		-	
未口体土性	燃料集合体検査	酝設備	1	↓		1	2	1	Ţ		1	1	Ţ		1	
	合計		21	14	8	14	57	15	3	4	22	15	З	4	22	
· 小 東 番	ステムとの相違			(基2	挿シスナ	(۲ ب		* * * * * 脱ペンピ集 硝レ焼ン合 ・ <sup>ツ紀工会</sup>	表 「 た に で た た た た た で で で で で で で で	舗:9世( 5世10- 2010- 10人/ 2010-	速 心 載 し	* * 影ペンピ集 硝レ焼ン合 小年	転 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	舗:9⇒35⇒111/2	速心勘 つ	

Ń
툳
퇤
街
Ш
훈
溉
治
慔
現
Б
<b>2</b> •
匠
斯
₽
ц
뻸
Ř
臣
₹F

	例	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等	
	ドラム缶 (本/y)	12	2	y	0	Ι	49
		оR	0.0	1 1	3	3.1	
オーシン	容量 <sup>(m3/y)</sup>	6.0	2.6	1.0	0.1	3.1	12.8
	重量 (t/y)	3.0	1.3	0.5	0.1	1.5	6.4
	類		うり		ミック	14	
	尔	金属	オラミ	金属	もも	金属	

# 表4.1.31 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Na冷却大型炉/中型炉·50t規模·経済性重視型炉心)

		角 し ぐ し	レ廃棄物	角レベル	、廃棄物		7U7-	ランス以下		
	対象廃棄物	(花圃)	<b>厄公</b> 壮)	(余裕深度	[処分並)	コンクリ-	ート以外	コンク		備考
		重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	
した	主工程設備(保守・補修設備含む)	360	720	20	40	270	540	Ι	Ι	
	周辺設備(保守·補修設備除<)	2	10	2,200	4,400	2,000	4,000	I	1	
2争 重 <del>10</del>	セルライニング	380	760	80	160	Ι	Ι	Ι	1	ライニング厚2mmと想定
所 王 王 王	建屋躯体(上記を除く)	Ι	Ι	Ι	1	22,000	44,000	240,000	480,000	
	合 計	745	1,490	2,300	4,600	24,270	48,540	240,000	480,000	

### 表4.1.32 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズII中間時設定・Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・資源重視型炉心)

### 1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	
電気出力	MWe		750		
熱出力	MWth		1,875		
運転サイクル長さ	ヶ月		17.5		
増殖比(目標値)	-	1.10			
集合体配列ピッチ	mm		177.5		
燃料交換バッチ数	バッチ	6	6	6	
集合体数	体	288	246	186	

游戏集合社	4 推	畄位	内側炉心り	然料集合体	外側炉心炸	燃料集合体	径方向ブランケット
<b>滁村未口钟</b>	LL 1来	1 1 1	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	0Cのみ(AB無し)	集合体
燃料要素のス	本数	本/体	331	0	331	0	217
	炉心燃料		7:	3.3	7:	3.4	0
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	4	8.7	48	3.7	156.7
	合 計		12	2.0	12	2.2	156.7

燃料要素仕	Ł様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素
	炉心燃料		900	0	900	0	0
жe	ブランケット燃料	mm	上0/下550	0	上0/下550	0	1,450
ペレット伊教	炉心燃料	個/木	123.0	0.0	123.0	0.0	0
いしつに回致	ブランケット燃料	1回/平	52.9	0	52.9	0	144.2
	炉心燃料		222	0	222	0	0
重量	ブランケット燃料	g-HM/本	147	0	147	0	722
	수 計	]	369	0	369	0	722

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	mm	6.26	6.26	6.26	8.54
ペレット外径	mm	6.10	6.10	6.10	8.38
ペレット高さ	mm	7.32	7.32	10.40	10.06
Pu富化度*	%	20.5	23.8	0.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.06	11.08	10.96	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0	0.0
ペレット密度	%TD	96.8	96.8	94.8	93.5
ペレット声号	g-MOX/個	2.04	2.05	3.16	5.68
シレット里里	g-HM/個	1.80	1.80	2.78	5.01

燃料集合	本	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	<b>止 去 扫 持</b>	体∕y	611	521	394	1,526
生産量	生性况候 200+	体/d	3.1	2.6	2.0	7.6
	2001 11W/ y	t−HM/y	74.5	63.7	61.8	200.0

燃料要素	ł	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	<b>上 去 坦 措</b>	本/y	206,574	0	176,449	0	87,464	470,487
生産量	土 / 生 况 代 200+ 山M / 小	本/d	1,033	0	882	0	437	2,352
	2001 THM/ y	t−HM/y	76.2	0.0	65.1	0.0	63.2	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	27,551,839	23,533,862	21,973,401	13,680,882	86,739,984
<b></b>	生産規模	個/d	137,759	117,669	109,867	68,404	433,700
土佐里	200t-HM/y	t−HM/y	49.6	42.5	61.2	68.5	221.8
		kg-HM/d	248	212	306	343	1,109

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
生帝号	生産規模	t−HM/y	49.7	42.5	61.3	68.7	222.2
工作里	200t-HM/y	kg−HM/d	249	213	306	343	1,111

				J I – Z	開始	時設定			JI-X	町中	時設定			
田 王	設備	ケース	Z	a冷却/ (基 <sup>3</sup>	<型炉・2 声ンステ.	00t規模 ム)		Pb	- 81冷却 資源	「 一 一 一 型 グ	・200t規 沪心	楔	備 考	
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	뺩	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	郃		
		処理量t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	49.7	42.5	61.3	68.7	222.2		
마가 그는 약수 그는 카미	原料受入設備		2	2	7		9	2	2	2		9		
<b>加"时</b> 平51奖 作王	脱硝·転換設備		S	2	2	2	6	З	3	2	2	10		1
	成型設備		7	-	-	-	5	2	2	-	-	9		1
°   ``' L ⊤ ≢⊡	<b>焼結</b> 設備		2	-	-	-	5	2	2	-	-	9		1
くレット上住	研削設備		2	-	-	-	5	2	2	-	-	9		
·	ペレット検査設備	цш	7	-	-	-	5	2	2	-	-	9		
	スタック調整設備	ШĻ	-	-		-	e	-	-		-	S		
ロノルユー作	燃料要素組立設	備	-	-		-	3	2	2		-	5		
	端栓溶接熱処理	設備	-	-		-	3	2	2		-	5		
プン技术工程	燃料要素検査設	備	-	-		-	3	2	2		-	5		
ロノ作旦上住	ワイヤ巻付設備/	/ グリッド設備	-	-		-	e	2	2		-	5	Pb-Bi炉にはワイヤ巻付設備なし	
·	燃料要素総合検	查設備	-	-		-	e	2	2		-	5		
<b>佳心休</b> 丁扫	燃料集合体組立	設備	-			-	2	-	-		-	3		
来口仲上住	燃料集合体検査	設備	-			-	2	-	-		-	3		
	合計		21	14	8	14	57	26	26	8	14	74		
、	/ ステムとの相違			<b>云</b> 音	<b>芦システ.</b>	<b>ل</b> م)		* * * * * * * * * * * * * *	転換設 ト工程: 「程:3 ック調整 本工調:	・ 5 5 5 5 5 5 7 、 5 5 7 、 5 5 7 、 5 5 5 7 、 5 5 5 7 、 5 5 5 7 、 5 5 5 5	速 し、変) 更 無	( )		

表4.1.33 ライン構成検討結果(Pb-Bi冷却・資源重視型炉心)

圣生	心戶
極多	튾 깯
棄	重待
医度	<b>気</b> 流
固合	ぼ 》
<u>6</u>	L規札
話	2001
曹豐	庐 ·
肥	뇬 벬
浭	站
.34	₩Ë
4.1	Pb-
表	$\sim$

例	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	「炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	-  燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等	
ドラム缶 (本/y)	101	101	63	S	I	194
容量 (m3/y)	0 90	7.07	12.6		12.2	
	20.8	5.4	9.8	2.8	12.2	51.0
重量 (t/y)	10.4	2.7	4.9	1.4	6.1	25.5
分類	金属 セラミック		金属	セラミック	金属	
廃棄物区分	「「」」の推荐「社園品」では、	ゆていて来る、も同なりまし	11. ショ 肉 華 者 (今 茨 彭 申 印 く 井)	国レンア既米物へお甘水反必に当	クリアランス以下	合 計
	廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           (t/y)         (m3/y)         (本/y)         (m3/y)         (本/y)         (m3/y)         (m3/y) <td>廃棄物区分 分類 重量 容量 ドラム缶 例 (t/y) (m3/y) (本/y) (本/y) ル1.ベ. 16 森 4 (4 20.8 20.8 20.9 1.1 (本/y) 20.8 20.9 1.1 (本/y) (+ (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (-</td> <td>廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           (t/y)         (t/y)         (m3/y)         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         13.1         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等</td> <td>廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           ボレシボ湾         を属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉耐火レンガ等           ボレシボッホホハム・メ・ジェホル (ヘ・メ・ジェホハム・ハン         金属         4.9         9.8         1.02         5.3         7.5 ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビーク、集塵機フィルタ等</td> <td>廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(金額の分並)         金属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         5.3         7.5ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集塵機フィルタ等</td> <td>廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         131         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉尼一タ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         6.3         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         セラミック         1.4         2.8         12.6         6.3         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           グリアランス以下         金属         6.1         12.2         12.2         12.2         12.2         12.2</td>	廃棄物区分 分類 重量 容量 ドラム缶 例 (t/y) (m3/y) (本/y) (本/y) ル1.ベ. 16 森 4 (4 20.8 20.8 20.9 1.1 (本/y) 20.8 20.9 1.1 (本/y) (+ (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (- (-	廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           (t/y)         (t/y)         (m3/y)         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         13.1         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           ボレシボ湾         を属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉耐火レンガ等           ボレシボッホホハム・メ・ジェホル (ヘ・メ・ジェホハム・ハン         金属         4.9         9.8         1.02         5.3         7.5 ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビーク、集塵機フィルタ等	廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(金額の分並)         金属         10.4         20.8         26.2         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         131         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         5.3         7.5ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集塵機フィルタ等	廃棄物区分         分類         重量         容量         ドラム缶         例           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         (本/y)         (本/y)         (本/y)           低レベル廃棄物(地層処分並)         金属         10.4         20.8         131         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉尼一タ、集塵機フィルタ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         金属         4.9         9.8         12.6         6.3         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           低レベル廃棄物(余裕深度処分並)         セラミック         1.4         2.8         12.6         6.3         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           グリアランス以下         金属         6.1         12.2         12.2         12.2         12.2         12.2

# 表4.1.35 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・資源重視型炉心)

### 表4.1.36 燃料の基本仕様と必要生産量 (Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・経済性重視炉心)

### 1. 燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体		
電気出力	MWe		750			
熱出力	MWth		1,875			
運転サイクル長さ	ヶ月	17.5				
増殖比(目標値)	-	10.4				
集合体配列ピッチ	mm	177.5				
燃料交換バッチ数	バッチ	6	6	6		
集合体数	体	288	246	90		

影幻会会社	4 / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	畄佔	内側炉心炉	然料集合体	↓集合体 外側炉心燃料集		径方向ブランケット
22.24年1月21日1月1日1月1日1月1日1月1日1月1日1日1日1日1日1日1日1日1	LL 1来	中世	IC+AB	ICのみ(AB無し)	OC+AB	0Cのみ(AB無し)	集合体
燃料要素のス	本数	本/体	331	0	331	0	217
	炉心燃料		7:	3.3	73	3.4	0
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	kg-HM/体 32.7		32.7		142.6
1	合 計	]	10	6.0	10	6.2	142.6

燃料要素仕	<b>·様</b>	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素
	炉心燃料		900	0	900	0	0
жс	ブランケット燃料		上0/下350	0	上0/下350	0	1,250
ペレット伊教	炉心燃料	個/木	123.0	0.0	123.0	0.0	0
マレット回数	ブランケット燃料	1回/ 平	33.7	0	33.7	0	124.3
	炉心燃料		221	0	222	0	0
重量	ブランケット燃料	g-HM/本	99	0	99	0	657
	合 計		320	0	321	0	657

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)
被覆管内径	mm	6.26	6.26	6.26	8.54
ペレット外径	mm	6.10	6.10	6.10	8.38
ペレット高さ	mm	7.32	7.32	10.40	10.06
Pu富化度*	%	20.3	23.7	0.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.06	11.08	10.96	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	95.0	95.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0	0.0
ペレット密度	%TD	96.8	96.8	100.0	98.7
るしいと声号	g-MOX/個	2.04	2.05	3.33	6.00
ハレット里里	g−HM/個	1.80	1.80	2.94	5.29

燃料集合	<b>本</b>	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	<b>止 去 扫 持</b>	体∕y	829	708	259	1,796
生産量	生性况快 200+	体∕d	4.1	3.5	1.3	9.0
		t-HM/y	87.9	75.2	36.9	200.0

燃料要素	ł	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	上产日本	本/y	280,471	0	239,569	0	57,461	577,501
生産量	生性况候 200+	本/d	1,402	0	1,198	0	287	2,888
	200L-HIM/ y	t-HM/y	89.9	0.0	76.8	0.0	37.8	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	37,407,808	31,952,502	18,985,162	7,748,138	96,093,610
<b></b>	生産規模	個/d	187,039	159,763	94,926	38,741	480,468
土佐里	200t-HM/y	t−HM/y	67.4	57.7	55.8	41.0	221.8
	kg-HM/d	337	288	279	205	1,109	

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
生在号	生産規模	t−HM/y	67.5	57.8	55.9	41.0	222.2
工作里	200t-HM/y	kg−HM/d	338	289	279	205	1,111

		L — 4		ドーズ	開始日	時設定	łmł		ユーズ B	町町	時設定 2001 相加	臣	
工程	設備	<	2	(単一)	「システ	<b>A</b> )	v	-	经济性	重視型	やし、	ĸ	備 老
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	心計	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	郃	
		処理量t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	67.5	57.8	55.9	41.0	222.2	
	原料受入設備		7	2	2		9	7	2	7		9	
	脱硝·転換設備		3	2	2	2	6	4	З	2	2	1	
	成型設備		2	-	-	-	5	2	2	-	-	9	
ر ۱۲ ± ± 1 ۷	<b>捒</b> 結設備		2	-	-	-	5	2	2	-	-	9	
	研削設備		2	-	-	-	5	2	2	-	-	9	
	ペレット検査設備	丰田	2	-	-	-	5	2	2	-	-	9	
、 コート コープ	スタック調整設備	100	-	-		-	S	-	-		-	S	
	燃料要素組立設	1.備	-	-		-	S	2	2		-	5	
	端栓溶接熱処理	誏傋	-			-	S	2	2		-	5	
	燃料要素検査設	1.備	-	-		-	S	2	2		-	5	
	ワイヤ巻付設備、	/ グリッド設備	-	-		-	S	2	2		-	5	Pb-Bi炉にはワイヤ巻付設備なし
	燃料要素総合検	渣設備	-	-		-	S	2	2		-	5	
(▲ (▲ (▲)	燃料集合体組立	設備	-			-	2	-	-		-	က	
	燃料集合体検査	設備	1			1	2	1	-		1	3	
	合計		21	14	8	14	57	27	26	8	14	75	
~ 載 費	ステムとの相違			* <b>*</b> 〕	<b>Ĕシステ</b> .	<b>ک</b> (		脱ペピ集館レン合説が工作	2 〒 田 田 田 3 田 3 日 3	11基 5 6系 5系列 2 3系3	列列		

表4.1.37 ライン構成検討結果(Pb-Bi冷却・経済性重視型炉心)

	$\overline{\mathcal{L}}$
ŧ	「 「
発	되
烫	既
檕	重
毲	乀
¥	恢
मि	谽
	椟
寺の	現
臣	<b>0</b> 0
iii) Cinul	- -
週	匝
泄	勤
運	벋
ω	当
с.	M.
4.1	<u>b</u> –1
表	Ē

	(j)	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等		
	ドラム缶 (本/y)	105		63	20	Ι	198	
		0 2 0	0.12	106	0.21	12.0		
先工里	容量 <sup>(m3/y)</sup>	21.4	5.6	9.8	2.8	12.0	51.6	
	重量 (t/y)	10.7	2.8	4.9	1.4	6.0	25.8	
	分類	金属	セラミック	金属	セラミック	金属		
	区分	「基層宮公共)		<b>今</b> 狄涩 <b>府</b> 加 <b>公</b> 批)	<b>亦怕休良処乃</b> 业/	<b>ランス以下</b>	6 計	

# 表4.1.39 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・経済性重視型炉心)

	備考				ング厚5mmと想定		
			1	1	<b>-</b>	0	0
	<u>۱</u> –۲	容量(m3)				700,00	700,00
シス以下	コンク	重量(t)	Ι	1	1	350,000	350,000
<b>ラリア</b> ∋	以外	容量(m3)	1,120	5,200	I	64,000	70,320
	コンクリー	重量(t)	560	2,600	Ι	32,000	35,160
廃棄物	処分並)	容量(m3)	500	6,100	680	Ι	7,280
低レベル	(余裕深度	重量(t)	250	3,050	340	Ι	3,640
、廃棄物	<u>いいました</u> )	容量(m3)	1,540	20	1,820	Ι	3,380
低しベル	(地層タ	重量(t)	770	10	910	1	1,690
	対象廃棄物		主工程設備(保守・補修設備含む)	周辺設備(保守·補修設備除<)	セルライニング	建屋躯体(上記を除く)	合 計
			売 (推		中皇中之	任 <b>周</b> 決	

### 表 4.1.40 炉心主要諸元と炉心特性(水冷却炉)

日	低除染先進湿式多重	ABWR(参考)
	リサイクル平衡炉心	
MWe	1,356	1,356
MWt	3,926	3,926
MPa	7.2	7.2
m	3.8	2.7
	900	872
GWd/t	54	45
GWd/t	45	45
m	0.845	3.71
10⁴t∕h	1.8	5.2
%	51	14.5
%	69	43
MPa	0.043	0.18
wt%/HM	31.0	—
wt%/HM	9.3	3.8(ウラン濃縮度)
t	15.4	—
	1.05	—
kW/ft	16	12
	1.3	1.3
$10^{-4}\Delta k/k/\%$ void	-0.5	-8
Month	18	13
wt%/HM	2.1	—
wt%/HM	0.04	—
DUcmwt%cmDUcmwt%cmDUcm	DU         15.0           18         21.5           DU         41.0           18         22.0           DU         15.0	
	MWe         MWt         MPa         m         GWd/t         GWd/t         GWd/t         MPa         10 <sup>4</sup> t/h         %         MPa         wt%/HM         wt%/HM         t         b         10 <sup>-4</sup> Δ k/k/%void         Month         wt%/HM         wt%/HM         wt%/HM         DU       cm         DU       cm	日 WWe MWe 1,356 MWt 3,926 MPa 7,2 m 3,8 900 GWd/t GWd/t GWd/t 45 m 0.845 10 <sup>4</sup> t/h 1.8 % 51 % 69 MPa 0.043 wt%/HM 9,3 t 15.4 1.05 kW/ft 16 1.3 10 <sup>-4</sup> $\Delta$ k/k/%void Month wt%/HM 2.1 wt%/HM 2.1 wt%/HM 18 2.1 Wf%/HM 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 Wf%/HM 18 2.1 DU cm Wf% cm DU cm Wf% cm DU cm Wf% cm DU cm Wf% cm DU cm Wf% cm DU 15.0 DU 15.0

\* :MOX 部+内部ブランケットの平均燃焼度

\*\*:MOX 部+全ブランケットの平均燃焼度

### 表4.1.41 燃料の基本仕様と必要生産量 (水冷却大型炉・200t規模・BWR型炉心)

ピン外径	13.7	mm
肉厚	0.87	mm
ギャップ	0.08	mm
ピン内径	11.96	mm
ペレット外径	11.8	mm
ペレット高さ	14.2	mm

軸方向構成	スタック長 (cm)	容積 (cm3)	スミア密度 %TD	燃料重量 (kg/本)	重金属重量 (kgHM/本)	集合体当り 重金属重量 (kgHM/体)	ペレット重量 g-HM/個
上部ブランケット	15.0	16.852	92.0%	0.1705	0.1502		14.18
上部炉心	21.5	24.154	91.0%	0.2418	0.2130		14.03
中部ブランケット	41.0	46.061	92.0%	0.4661	0.4107		14.18
下部炉心	22.0	24.716	91.0%	0.2474	0.2180		14.03
下部ブランケット	15.0	16.852	92.0%	0.1705	0.1502		14.18
合計					1.1421	247.84	
備考				ρ=11gMOX/cc	HM含有率 0.881		

年間製造量	200	tHM
集合体数	806.96	体/年

燃料ピンタイプ	単位	1	2	3	4	5	合計
炉心燃料Pu富化度	(%)	23.1%	26.2%	27.4%	30.4%	33.5%	
集合体中本数	(本/体)	1	13	10	47	146	217
年間製造量	(本/年)	825	10,724	8,249	38,770	120,435	179,002
≤−ト製造量							
炉心燃料	(tHM/年)	0.4	5.0	3.9	18.2	56.4	83.9
ブランケット燃料	(tHM/年)	0.6	8.3	6.4	30.0	93.1	138.4
合 計	(tHM/年)	1.0	13.3	10.2	48.1	149.5	222.2
ペレット製造個数							
炉心燃料	(個/年)	27,545	358,080	275,446	1,294,597	4,021,514	5,977,182
ブランケット燃料	(個/年)	44,958	584,452	449,579	2,113,020	6,563,851	9,755,860
合 計	(個/年)	72,502	942,532	725,025	3,407,617	10,585,365	15,733,042

~
<u> </u>
IЩ
#11
10
<1
×
•
Ť
Ō
0
$\sim$
÷πŪ
皆
ШŽ
++<
ΠH
ΠĤ'
ا ف
R
$\mathbb{C}$
<u> </u>
ΠK
ШΛ
-HΠ
<u> 45</u>
÷
 € HK
÷
<del>У</del> Ъ
E)
-##
豐
$\overline{\mathbf{x}}$
.)
< 1
, Ň
11)
•
$\sim$
4
4
₩Ľ
11/1

工 辑	設	ケース	Ϋ́Ž	ィーズ デ も が 相 、 新 が が に ノ ズ ーズ	ロ開始 - - - - - - ス - - ス - -	時設定 00t規模 ム)		フ水王冷	ーズロ 哲大型 BWR型	中間時影 炉-200년 世炉心	近期	補
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	습計	Pu33.5	Pu他	軸ブラ	습計	
		処理量t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	56.4	27.4	138.4	222.2	
	原料受入設備		2	2	2	Ţ	9	2	8	2	12	
加加明邦研究上在	脱硝·転換設備		3	2	2	2	6	4	2	4	10	
	成型設備		2	-	-	-	5	2	-	2	5	
「 日子 「 1・・・・」 ~	<b>焿</b> 結設備		2	-	-	-	5	2	-	2	5	
くフジト上位	研削設備		2	-	-	-	5	2	-	2	5	
	ペレット検査設備	摧	2	-	-	-	5	2	-	2	5	
に い に し し し し し し し し し し し し し	スタック調整設備	睢	-	-		-	3	2	Ţ		2	
トノルナナ体	燃料要素組立設	法備	-	-		-	3	2	Ţ	$\left  \right $	2	
	端栓溶接熱処理	設備	-	-		-	3	2	Ţ	$\left  \right $	2	
北本が	燃料要素検査設	(備	-	-		-	3	2	Ţ	$\left  \right $	2	
「ノ仭耳」」在	ワイヤ巻付設備	/グリッド設備	-	-		-	3	2	Ţ		2	水冷却炉にはワイヤ巻付設備なし
	燃料要素総合検	渣設備	-	—		-	3	2	Ţ		2	
	燃料要素整列設	5備		$\backslash$			0	-	Ţ		-	Pu富化度の異なる要素を整列
集合体工程	燃料集合体組立	設備	-	Ţ		-	2	2	Ţ		2	
	燃料集合体検査	設備	-	Ţ		-	2	2	Ţ		2	
	合計		21	14	8	14	57	31	14	14	59	
<b>☆</b> 新	ィステムとの相違			~ 耷 )	<b>ドシステ</b>	(۲		* * * * 原記ピン紫 料硝ンワ料	承 「 志 志 志 記 に 部 で ま で を で で で し ま で で で で し で で で し で で し で で で し で で で で で む で で で で	講:6→1; (講:9→ ⇒2ライン 設備2⇒	2基 10基 0型)	

1.1.43 通常運転時の固体廃棄物発生量	(水冷却大型炉-200t規模-BWR型炉心)
₹4.1. <sup>,</sup>	<u>.</u>
ШH	

	例	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等	
	ドラム缶 (本/y)	00	8	15	2	Ι	103
		a 1 1 6	0.71	06	۶.3	0.0	
充任重	容量 <sup>(m3/y)</sup>	13.4	4.2	0.0	2.9	0.0	20.5
	重量 (t/y)	6.7	2.1	0.0	1.4	0.0	10.2
	<b>少</b> 類	金属	セラミック	医属	セラミック	医属	
	廃棄物区分	(1)、「肉番替(社園の公社)	ゆし、この未初、も言やりまし		ゆしていぼ米物(米柑ネ反グリー)	クリアランス以下	合計

# 表4.1.44 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (水冷却大型炉・200t規模・BWR型炉心)

低レベル廃棄物   低レベル廃棄物   (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	(地層処分並) (余裕深度処分並) コンクリート以外	重量(t) 容量(m3) 重量(t) 容量(m3) 重量(t) 容量(n	段備含む) 570 1,140 190 380 310	着除く) 10 20 3,000 6,000 2,600 5	710 1,420 220 440 -	<u>31,000</u> 62	1 290 2 580 3 410 6 820 3 3 010 67
物 ク	並) コンクリート以外	f(m3) 重量(t) 容量(m	380 310 (	6,000 2,600 5,2	440 -	- 31,000 62,0	6 820 33 010 67 5
リアランス以下	コンクリート	3) 重量(t) 容量(m3)	320	200 -		340,000 680,000	340.000 680.000
	備考				ライニング厚2mmと想定		

表4.1.45(1/2) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
技術的成立性	基本プロセスの成立性	粉末の流動性改善/充填技術開 発	粉末造粒技術開発	大	簡素化プロセス技術
			エアータップ粉末充填法技術開発	大	(簡素化プロセス技術)
		製造プロセス条件の最適化	燃料製造仕様に応じた均質性確保のた めの焼結プロセス条件の把握	大	低除染·TRU燃料製造技術
			MA、、FP混入による原料の発熱、放射 線に伴う各プロセス条件への影響把握	大	低除染·TRU燃料製造技術
		一検査技術開発	端栓溶接部検査工程での標準試料片 の形状・製作方法検討	中	超音波検査技術
			端栓溶接部検査工程での溶接部強度 の非破壊検査方法確立	中	超音波検査技術
			X線検査工程でのペレット識別検査 技術開発	中	X線検査技術
		製造工程における原料発熱の影響評 価	O/Mドリフト防止	大	システム設計、除熱技術
			集合体組立・検査工程での除熱方法検 討	中	システム設計、除熱技術
		量産技術開発	大型脱硝容器での脱硝性能確 認	大	量産技術(スケールアップ)
		処理能力の向上	脱硝転換/端栓溶接部熱処理工程での 冷却時間短縮	中	システム設計、冷却技術
			多数(14個)同時成型時の処理速度と ペレット品質ばらつきの確認	中	システム設計、量産技術
				中	システム設計、量産技術
			超音波検査/X線検査/総合検査工程で の処理能力と検査精度の関係	中	システム設計、量産技術、各種検査技術
		製造歩留りの把握	TRU低除染燃料量産時の製造歩留り確 認	大	低除染·TRU燃料製造技術
	セル内安定操業性	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		一計測制御		小	システム設計 計装制御技術
		工程間の核物質移送技術高度 化		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		高信頼性機器の開発(MA含有低除染 燃料の機器安定性への影響)	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		計量管理技術の高度化		中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
		遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	大	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	小	除染技術
安全性	臨界防止	単ーユニットの臨界管理	臨界管理ロジックの具現化	中	システム設計/Pu物流管理手法 物質移送・マテハン技術
		複数ユニットの臨界管理	臨界管理ロジックの具現化	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
	- 作業員の被ばくの低減 -	遠隔自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	中	除染技術
		- ホールドアップ低減技術の開発	粉末の飛散防止技術開発	中	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	中	システム設計 集塵技術、付着防止技術
		脱硝・焼結時のオフガスへのFP/MA移 行の抑制(TRU・低DF燃料)	脱硝・焼結時のオフガスへのFP/MA移 行挙動把握	小	要素技術
	火災・爆発防止	化学的安全性		小	シズテム設計
	一耐震性	耐震設計		中	システム設計
	安全評価	安全設計方針・判断基準整備		中	システム設計
		安全評価		中	システム設計

★:技術成立性、目標達成のために特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

表4.1.45(2/2) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
経済性	建設費低減	プロセス合理化	エアータップ粉末充填法の技術開発(造 粒工程削減)	中	(簡素化プロセス技術)
		製造系列数の合理化	脱硝転換-ペレット製造工程間の 粉末移送技術の高度化	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		──製造機器の機能・構造合理化	生産量に応じた処理能力最適化	大	システム設計/特に小規模プラント
	一操業費低減	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		一機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		品質管理の合理化	検査項目の合理化、検査頻度・基準の 緩和	中	システム設計
		集合体部材の低価格化		大	システム設計 要素技術
	一稼働率向上	機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		保守・補修期間の短縮	遠隔保守補修技術	大	システム設計
		高信頼性機器の開発(MA含有低除染 燃料の機器安定性への影響)	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
	廃止措置費低減	プロセスのコンパクト化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		中	システム設計
資源有効利用性	U/TRUのリサイクル	U/TRUの回収率向上	成型、研削工程からの発生粉末の回収 率向上	小	システム設計 粉末集塵・回収技術
			リワーク(DS・CS処理工程)からの回収 率向上	小	システム設計 分離・回収技術
	U/TRUのロス低減		分析サンプルサイズの最適化	小	システム設計 分析技術
			分析箇所、頻度、サンプル数の合理化	小	システム設計 分析技術
環境負荷低減性	廃棄物発生量低減	工程廃棄物(分析廃棄物)発生量低 減	分析箇所、頻度、サンプル数、サイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
		二次廃棄物発生量低減	機器の長寿命化	中	システム設計 要素技術
			機器の台数削減	中	システム設計
	廃棄物への核種移行量低 減	工程廃棄物(分析廃棄物)への移行量 低減	分析箇所、頻度、サンプル数、サイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
		二次廃棄物への移行量低減	粉末の飛散防止技術開発	大	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	大	システム設計 集塵技術、付着防止技術
			機器の除染技術開発	中	除染技術
	廃止措置時の固体廃棄物量 低減	プロセスのコンパクト化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		中	システム設計
核拡散抵抗性	保障措置	ホールドアップ対策(発生の抑止)	粉末の飛散防止技術開発	大	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	大	システム設計 集塵技術、付着防止技術
		計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術/(要素技術)
	核物質防護			中	システム設計
運転·保守補修性		運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		計測制御		小	システム設計 計装制御技術
		工程間の核物質移送技術高度 化		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		MA含有低除染燃料の機器安定性への 影響	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
		遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	大	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	小	除染技術

大:技術成立性、目標達成のために特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題










図4.1.4 ターンテーブル式脱硝転換 試験設備



	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
燃料集合体	体∕y	512	431	321	1,263
	体∕d	2.6	2.2	1.6	6.3
	t−HM/y	76.5	64.4	59.1	200.0

	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
燃料要素	本/y	141,746	0	119,318	0	41,622	302,686
	本/d	709	0	597	0	208	1,513
	t-HM/y	78.2	0.0	65.9	0.0	60.4	204

	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
Al mik	個/y	13,962,634	11,753,356	19,061,360	4,907,700	49,685,050
NU OF	個/d	69,813	58,767	95,307	24,538	248,425
	t−HM/y	43.5	36.7	76.2	65.5	221.8
	kg-HM/d	217	183	381	327	1,109

松士	単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
1/1 不	t−HM/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2
	kg−HM/d	218	184	382	328	1,111

### 図4.1.5 マスフローと必要生産量(基準システム)



### 図4.1.6 成型設備 鳥瞰図



### 図4.1.7 焼結設備 鳥瞰図



### 図4.1.8 研削設備 鳥瞰図



### 図4.1.9 ペレット検査設備 鳥瞰図



### 図4.1.10 スタック調整設備 鳥瞰図



### 図4.1.11 燃料要素組立設備 鳥瞰図



### 図4.1.12 超音波検査装置 鳥瞰図





### 図4.1.14 燃料集合体検査設備 鳥瞰図





## 図4.1.16 保守·補修手順 概念図



図4.1.17 燃料製造/再処理一体化プラント 概念図



# 図4.1.18 燃料製造施設物流概念図







図4.1.21 燃料製造施設 B1F配置図(燃料要素組立-集合体組立工程)



バッファ容量	稼働率計算結果 (%)
バッファなし	65.4
3時間分	73.0
6時間分	81.5
12時間分	81.7
18時間分	81.7
24時間分	81.7



### 図4.1.23 システム稼働率計算結果



図 4.1.24 水冷却炉の燃料集合体MOX部 Pu 富化度分布

### 4.2 窒化物燃料に対するペレット製造システムの検討

本システムは、4.1 節「MOX 燃料に対する簡素化ペレット製造システムの検討」で 検討した MOX 燃料基準システムに炭素熱還元工程を追加したものであり、湿式再処 理製品の MA 含有低除染 Pu 富化度調整済み溶液を出発物質とし、脱硝・転換で得られ た粉末に炭素を添加し、炭素熱還元を行い窒化物粉末に転換した後、MOX 燃料基準 システムと同様のペレット成型、焼結、研削、被覆管充填等の工程を経て燃料集合体 とする燃料製造システムである。

システムの特徴として、窒化に必要な窒素ガスは、天然窒素の(n,p)反応により長寿 命核種である<sup>14</sup>Cが生成されることを防ぐ目的から、<sup>15</sup>Nを同位体分離し 99.9%に濃 縮したものを使用することである。

本節では、MOX 燃料基準システムに追加となる炭素熱還元工程等のプロセス、設備概念等について概略的な検討を行ない、この結果を踏まえ窒化物ペレットの燃料製造/再処理一体化プラントについて施設概念を概略検討し、経済性、環境負荷低減性等を概略評価することで、サイクルシステムスクリーニングに資する評価データを整備する。

### 4.2.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

Pb-Bi 冷却中型炉・窒化物燃料・200 t 規模・資源重視型炉心(以下、資源重視型炉心) および Pb-Bi 冷却中型炉・窒化物燃料・200 t 規模・経済性重視型炉心(以下、経済性重 視型炉心)にそれぞれ燃料集合体を供給する燃料製造システムついて検討する。生産 規模はともに 200tHM/y とする。

### 4.2.1.1 施設概念構築

(1) 設計検討の基本方針と前提条件

設計検討の基本方針と前提条件は 4.1 節の MOX 燃料基準システムに準じる。ただし、製品燃料条件については以下の通りとする。

資源重視型炉心および経済性重視型炉心の炉心構成、燃料集合体および燃料要素の 基本仕様と、製造歩留りを考慮した必要生産量をそれぞれ表 4.2.1.および表 4.2.2 に示 す。両炉心とも電気出力は 750MWe、運転サイクル長は 18 ヶ月、燃料交換バッチ数 は内側および外側炉心燃料とも 5 バッチ、燃料集合体体数は内側炉心燃料 288 体、外 側炉心燃料 246 体であり、径方向ブランケット燃料は無い。主な相違点は軸方向ブラ ンケット長のみであり、資源重視型炉心は 350mm、経済性重視型炉心は 100mm で ある。

(2) 安全設計に係わる検討

臨界安全、火災・爆発防止、耐震の検討を行い、システム設計に当たっての制約条 件を明らかにする。 () 臨界安全

MOX 燃料基準システムに対して追加となる炭素熱還元工程は、粉末混合プロセス があることを踏まえバッチ処理を基本とし、質量管理を適用するものとする。炭素熱 還元工程以外は MOX 燃料基準システムに準じ、形状管理と主体とした臨界管理とす る。

() 火災・爆発防止

窒化物燃料を粉末状態で取り扱う場合には、常温での発火の潜在的危険性があり、 これを回避するために炭素熱還元工程から燃料要素組立工程まではアルゴン雰囲気セル内に設置するものとする。その他については、MOX燃料基準システムに準じる。

() 耐震

MOX 燃料基準システムでの分類の考え方に基づき、炭素熱還元工程は耐震クラス Bとし、その他については、MOX 燃料基準システムに準じるものとする。

(3) プロセス検討

窒化物燃料製造プロセスとして、簡素化プロセスに炭素熱還元工程を追加する。図 4.2.1 に MOX 燃料の簡素化プロセスを、図 4.2.2 に簡素化プロセスに炭素熱還元法を 適用した場合の窒化物燃料の製造フローを示す。図中の網掛け部分が追加となる工程 (設備)を示しており、混合、成型、炭素熱還元および粉砕から成る炭素熱還元工程 が新たに必要となる。この他にオフガス処理として、濃縮<sup>15</sup>Nを回収・再使用する系 統が付加される。

炭素熱還元工程およびオフガス処理のプロセス概念および物質収支について検討 した結果を以下に示す。

() 炭素熱還元工程

MA 混入の PuO<sub>2</sub>・UO<sub>2</sub>粉末に炭素粉末を投入・混合し、粗成型によりタブレット形状とした後、水素/窒素(<sup>15</sup>N)ガス雰囲気中、約 1500 にて PuN・UN に還元する。その後、ボールミルにより粉砕し、窒化物粉末を得る工程である。

炭素熱還元装置内での反応について、ウランを代表させて以下に示す。

 $UO_2 + (2+x)C + 1/2N_2 + 2xH_2 = UN + 2CO + xCH_4$ 

酸化物燃料 200tHM/y を還元するのに必要な物質は、窒素、水素、一酸化炭素およびメタン合わせて、設計流量として 345Nm<sup>3</sup>/h 程度となる。その内訳は以下の通りである <sup>13)</sup>。なお、フェーズ では 1,340Nm<sup>3</sup>/h 程度と推定しており、再評価により操業 費が低減できる見通しである <sup>14)</sup>。

H<sub>2</sub>供給量:約25Nm<sup>3</sup>/h(消費量の5倍)

<sup>15</sup>N供給量:約226Nm<sup>3</sup>/h(試験実績による)

CO 発生量:約 10Nm<sup>3</sup>/h

メタン発生量:約2.5Nm<sup>3</sup>/h

アルゴン(8%)使用量:約 81Nm<sup>3</sup>/h

<sup>15</sup>Nの補充量は以下に示すとおり通り約 0.25Nm<sup>3</sup>/h となる。

窒素供給量のうち、約 2.5Nm<sup>3</sup>/h は炭素熱還元工程で燃料の窒化のため消費される。 一方、再処理施設の酸化工程(UN+O<sub>2</sub> UO<sub>2</sub>+1/2N<sub>2</sub>)で使用済み燃料中の <sup>15</sup>N を回 収するが、このときの回収率を 90%と想定すると、補充量は約 0.25Nm<sup>3</sup>/h となる。

() オフガス処理

オフガス処理系のマスフローバランスを図 4.2.3 に示す。炭素熱還元装置から回収 した濃縮<sup>15</sup>N は窒素回収装置に送られ、Ar、CO、CH<sub>4</sub>と分離した後、窒素貯槽に貯 蔵される<sup>13)</sup>。

(4) 設備概念の検討

() 必要生産量の検討

資源重視型炉心および経済性重視型炉心の製造歩留りを考慮し算出した必要生産 量をそれぞれ表 4.2.1 および表 4.2.2 に示す。

資源重視型炉心の場合、燃料集合体の年間必要生産体数は内側炉心燃料 936 体、外 側炉心燃料 800 体となる。燃料要素の日間必要生産量は内側炉心燃料 1,584 本、外側 炉心燃料 1,353 本となり、ペレットの場合では内側炉心燃料約 15 万 9 千個 (375kgHM)、外側炉心燃料約 13 万 6 千個(321kgHM)、軸方向ブランケット燃料 約 14 万 7 千個(413kgHM)となる。

経済性重視型炉心の場合、燃料集合体の年間必要生産体数は内側炉心燃料 1,275 体、 外側炉心燃料 1,089 体となる。燃料要素の日間必要生産量は内側炉心燃料 2,158 本、 外側炉心燃料 1,843 本となり、ペレットの場合では内側炉心燃料約 21 万 7 千個 (511kgHM)、外側炉心燃料約 18 万 5 千個(437kgHM)、軸方向ブランケット燃料 約 5 万 7 千個(161kgHM)となる。

() 設備・機器概念

MOX 燃料基準システムに対して追加となる炭素熱還元工程およびオフガス系統に ついて設備概念を検討する。その他の主工程設備および周辺設備については、MOX 燃料基準システムと同等設備とする。ただし、主工程設備の必要台数については、必 要生産量の違いを踏まえ検討した。

(a) 炭素熱還元工程設備

粉末混合・投入装置、粗成型装置、炭素熱還元装置および解砕機等から構成される。 主要装置である炭素熱還元装置の外形図を図 4.2.4 に示す。本装置はバッチ式の真空 熱処理炉であり、グラファイト・ヒーターにより加熱する。主要な材質は耐熱鋼で、 1,600 の運転温度に耐えられるようになっている。

安全対策として、炭素熱還元工程から燃料要素組立工程まではアルゴン雰囲気セル 内に設置し、窒化物粉末の常温での発火の潜在的危険性を回避する。ホールドアップ 対策として、粉末混合・投入装置、粗成型装置、炭素熱還元装置および解砕機の粉末 投入・排出部や成型部等は、集塵カバーや局所カバーで覆い、集塵装置により飛散微粉 末を吸引・回収するシステムを設ける。

設備処理能力は、粉末混合・投入装置、炭素熱還元装置および解砕機については、1 バッチ 80kgHM、1 バッチ当たりの処理時間を 24 時間と想定し 16tHM/y とした。粗 成型装置については 150kgHM/5 時間・2 基(搬送時間含む)と想定し 72t/y とした。 これにより算定される設備台数は、粉末混合・投入装置、炭素熱還元装置および解砕機 については 16 基(IC用5基、OC用5基、ブランケット用6基)、粗成型装置につい ては5基(IC用2基、OC用1基、ブランケット用2基)となる。

(b) 原料受入設備

オフガス系統は再処理工程と共通設備として利用され、MOX 燃料基準システムに 対して窒素回収装置、窒素貯槽および窒素ボンベ等が追加される。窒素の回収には、 混合ガスの分離、回収として従来から用いられている気相吸着法(PSA法)を採用す る。

(5) ライン構成の検討

物流合理性、核物質の異常集積防止、遠隔保守・補修性、相互汚染防止、クリーン アップ負荷軽減の観点からライン構成の検討を行った。結果を表 4.2.3 に示す。MOX 燃料基準システムと比較し、総じて設備台数が多くなっている。これは、燃料要素ミ ート長が MOX 燃料の約 1/1.5~1/1.9 と短く、燃料要素および燃料集合体必要生産数 が多くなること、臨界管理の観点で処理能力が制約される炉心燃料の必要生産量が多 いこと、さらには燃料要素ピン内径や細いことなどによる。

(6) 配置検討

燃料製造/再処理一体化プラントは、MOX 燃料基準システムと同様に、燃料製造/ 再処理の主工程設備と周辺設備を配置する主建屋、設計統一条件により独立させた使 用済燃料貯蔵建屋と新燃料貯蔵建屋、および管理棟の4建屋構成とした。

建屋容積は、MOX 燃料基準システム建屋容積をベースに概算するものとし、主建 屋については追加設備容積を概略見積り約 75 万m<sup>3</sup>、新燃料貯蔵建屋は生産量依存と 見直し、MOX 燃料基準システムと同じ 18.7 万m<sup>3</sup>とした。

### 4.2.1.2 技術評価

(1) 技術的成立性

MOX 燃料基準システムに対して新たに追加されるプロセスおよび機器について、 基本プロセスの成立性および量産性(セル内での安定操業性)を概略検討する。

() 基本プロセス成立性

炭素熱還元プロセスは、窒化物燃料を扱う研究室では実際に行なわれており、基本 プロセスの成立性はあるものと考える。ただし、工学的規模の装置にて工学的成立性、 炭素熱還元に要する反応時間、反応効率等のプロセス条件を確認する必要がある。

オフガス処理設備の中の窒素回収装置については、一般産業にて既に実績のある装置が存在するため、基本プロセスの成立性はあるものと考える。ただし、高価な<sup>15</sup>Nを回収することを考慮すると、回収率の確認または向上のための試験が必要と考えられる。

() 量産性(セル内での安定操業性)

MOX 燃料基準システムに対して追加となる混合設備、炭素熱還元設備、粉砕設備 等について、設備稼働率を算出できるレベルの設計検討は行なっていないため、安定 操業性の検討は今後の課題である。

(2) 安全性

(a) 臨界安全

概略的評価であることから、MOX 燃料の核的制限値を用いて単一ユニットにおける 臨界評価を行った。炭素熱還元工程設備および成型設備については質量管理を、燃料要 素検査設備、燃料集合体組立設備および燃料集合体検査設備については本数管理(質量 管理)を、ペレット貯蔵庫、燃料要素貯蔵庫および燃料集合体貯蔵庫については数(個 数、本数、体数)と形状寸法の組合せ管理を、その他の設備については形状管理にて臨 界安全が確保されている。

複数ユニットでの臨界安全評価は詳細には行っておらず、今後、設備の基本設計を 行なう時点で評価する必要がある。

ただし、MOX 燃料と窒化物の密度の違いから、バッチ最大取扱量が減少すること も考えられるため、窒化物燃料特有な機器、工程も含めて今後、臨界評価を行う必要 がある。また、燃料要素組立設備は形状管理としているが、燃料要素の移動に傾斜あ るいはピックアップを採用しており、厳密には同一平面上での扱いではないため、今 後、臨界計算による評価が必要になることも考えられる。

(b) 火災・爆発防止

窒化物燃料を粉末状態で取り扱う場合には、常温での発火の潜在的危険性があり、 これを回避するために炭素熱還元工程から燃料要素組立工程まではアルゴン雰囲気セル内に設置し、火災の発生を防止する対策が取られている。

その他、燃料製造で使用する火災・爆発に係わる物質は、脱硝・転換設備および焼結 設備で使用する水素ガスであり、不活性ガスで5%に希釈したものを使用するため、空 気中に漏えいしても爆発の恐れは無い。万一の漏えいに備え、設備への供給前に濃度異 常を検知し、希釈水素ガスの供給を停止するインターロックの設置を考慮している。

U/Pu 硝酸溶液を長時間貯留する槽については、放射線分解により発生する水素ガスの濃度が爆発限界を下回るよう、安全圧縮空気系により定常的にバブリングを行い、水素ガスを掃気するものとする。

以上の通り、火災・防爆対策は施されている。

(c) 耐 震

セル、セル換気系、およびその電源設備(非常系を含む)と、核燃料物質を含む溶液を包蔵する槽類は、再処理施設安全審査指針および MOX 加工施設安全審査基準を 参考に耐震クラスAとし、その他の設備については、耐震クラスBとしており、上記 の指針に準じた耐震性を有するものと考える。

なお、本設計では、耐震クラスに対応した設備の構造設計は行なっておらず、今後、 設備の基本設計を行なう時点で考慮する必要がある。

(2) 経済性

MOX 燃料基準システムの経済性評価結果をベースに、概略評価を行う。

- () 評価結果
- (a) 建設費

主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 4.2.4 に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 4.2.5 に示す。

主工程設備費は上記の台数に基づく。保守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・ 換気設備費は、主工程設備構成の MOX 燃料基準システム設計との相違を踏まえ算 定し、追加設備である Ar セル冷却浄化設備費を加算した。新燃料貯蔵建屋設備費 は生産量依存と見なし、MOX 基準システムでの費用と同額とした。

(b) 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、事業税および一般管理費を表 4.2.6 に示す。人員 および単価は 3.2.1 節で設定した 300 人、900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の 要領にしたがい主工程設備費から求めた。消耗品等諸費は、MOX 燃料基準システム での費用 28 億円/年に、<sup>15</sup>N および炭素粉末の試薬代を加算した。<sup>15</sup>N の消費量は使 用量の 10%と仮定し、単価は 1,000 円/g とした。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価は、表 4.2.7 に示す。

燃料製造 HM 単価は資源重視型炉心で 18.9 万円/kgHM、経済性重視型炉心で 19.7 万円/kgHM であり、ともに目標値の 16 万円/kgHM を満足できなかった。燃料製造単 価を発電単価に換算すると、資源重視型炉心は平均燃焼度が 105GWd/t なので 0.17 円/kWh、経済性重視型炉心は平均燃焼度が 143GWd/t なので 0.13 円/kWh となり、 ともに MOX 燃料基準システムでの単価 0.22 円/kWh より低額となった。

(4) 環境負荷低減性

3.1.2 節で述べた廃棄物区分に基づき、通常運転時および廃止措置時の固体廃棄物発 生量を求めた。また、通常運転時の環境への放出放射能量と U・TRU の放射性廃棄 物への移行量を評価した。なお、基準システムとの比較のため、基準システムの値を

()内に併記した。

() 通常運転時の廃棄物発生量

固体廃棄物の発生量は、MOX 燃料基準システム設計と同等設備については発生量 に設備台数比を乗じて算出し、炭素熱還元工程設備については類似設備を参考に類推 し求めた。資源重視型炉心および経済性重視型炉心の固体廃棄物発生量の検討結果を 表 4.2.8 および表 4.2.9 に示す。固体廃棄物は、保守・補修に伴い発生する交換部品、 脱硝容器、フィルタエレメント、HEPA フィルタ、ヒータ、耐火レンガ等であり、年 間発生量は低レベル廃棄物(地層処分並)でそれぞれ約 19.1 t および 25.3 t (8.9 t) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)でそれぞれ約 7.0 t および 3.7 t (5.8 t)となっ た。2001 ドラム缶換算では低レベル廃棄物(地層処分並)でそれぞれ約 191 本および 253 本 (89 本)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)でそれぞれ約 70 本および約 37 本 (59 本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、発生源となる粉末取り扱い工程が MOX 燃料基準システムに比べて増加していることから、MOX 燃料基準システムでの 値 2×107Bq/y より数倍多いものと予想される。

() 廃止措置時の固体廃棄物発生量

資源重視型炉心および経済性重視型炉心の固体廃棄物発生量の検討結果を表 4.2.10 および表 4.2.11 に示す。発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)でそれぞれ約 2,560 tおよび 2,960 t (1,360 t) 低レベル廃棄物(余裕深度処分並)でそれぞれ約 4,580 tおよび 4,510 t (3,510 t) クリアランス以下(コンクリート以外)でそれぞれ 4.6 万 tおよび 4.7 万 t (3.4 万 t) クリアランス以下(コンクリート)でそれぞれ 4.7 万 tおよび 48 万 t (34 万 t) となった。

(5)資源有効利用性

本システムでは、仏) MELOX の MOX 燃料製造プラントにおける実績に基づき、 年間 0.1%の核物質が廃棄物に移行するものと想定し、U、Pu の回収率 99%は確保 できるものとした <sup>12)</sup>。

(6) 核拡散抵抗性

単体 Pu の存在の有無、ホールドアップ、計量管理および物流管理の観点から評価 する。

( ) 単体 Pu の存在の有無

再処理施設から受入れる原料は、Pu 富化度を 14.7~18.2 wt%に調製した硝酸溶液 であり、また、燃料製造施設内では Pu を単離する工程は存在しない。したがって、 Pu が単独で存在することはない。なお、本システムは、MA 含有低除染燃料を取り扱 うことが可能で、かつセル内での取り扱いとなることから、現行システムに比べ核物 質防護の観点から有利である。

() ホールドアップ

粉末取扱工程が多く、ホールドアップ対策が重要である。ホールドアップ低減のた め、工程・設備にはバイブレータやノッカの設置、吸引やブロー等のシステムを設置 することにより、適切に回収するものとしている。特に、セル内への粉末飛散がある と回収が極めて困難になるため、炭素混合、粗成型、炭素熱還元、粉砕、ペレット成 型、研削装置など粉末飛散の可能性がある装置については、カバーを行うと同時に集 塵システムを設け、局所排気を行うことで、適切に回収するものとしている。ただし、 その効果を含めた最適化について、モックアップ試験等による事前確認試験が必要と 考える。

### () 計量管理

サンプルによる成分分析値と秤量値から Pu 量の把握は可能と考える。ただし、保 障措置の精度との関係で、機器ごとの核物質量の直接測定を求められた場合には、新 たなる計量技術開発が必要になる。

(7) 運転・保守補修性

本項については、事項(1)技術的成立性で言及しているため、省略する。

### 4.2.2 技術開発項目

開発課題を表 4.2.12 に示す。また、MOX 燃料基準システムに対して追加となるプロセス、設備に関する技術開発項目の概要を以下に示す。

### (1) 炭素熱還元プロセス条件の確認

炭素熱還元プロセスは、窒化物燃料を扱う研究室では実際に行なわれているが、ス ケールアップが課題である。今後、小規模試験でプロセス成立性を実証し、工学規模 の装置にて工学的成立性、炭素熱還元に要する反応時間、反応効率等のプロセス条件 を確認する必要がある。

### (2) 粉砕プロセス条件の確認

粉砕プロセスは、高密度の製品ペレットを製造するために微粉砕が必要と考えられ る。今後、小規模試験にて、焼結密度の仕様値を達成するために必要な粉砕レベルや 粉砕時間等の粉砕条件を確認する必要がある。

(3) 窒素回収装置

オフガス処理設備の中の窒素回収装置については、一般産業にて既に実績のある装置が存在するものの、高価な<sup>15</sup>Nを回収することを考慮すると、回収率の確認または

向上のための試験が必要と考えられる。

### (4) 窒素濃縮装置

現在、分離効率が高く有望視されている気相吸着法について、小規模試験にて同位 体濃縮メカニズムの解明、分離効率の確認等を行なうとともに、工学試験にて工業化 データの取得、経済性の確証が必要である。<sup>15)</sup> 参考文献

- 1) 吉村,他;"低除染/ペレット燃料製造プラント技術調査(2)",サイクル機構報告書, JNC ZJ9420 2001-001(2000)
- 2) 高澤,他;"ショートプロセス技術開発 1.Pu 富化度調整技術開発(平成 12 年度実 績報告)", JNC ZN8400 2001-021(2001)
- 3) 栗田,他;日本原子力学会,「2003春の年会」B6(2003)
- 4) 牧野,他;"ショートプロセスによるペレット製造方法の基礎的検討",サイクル機構技報 20(2003)
- 5) 加藤,他;日本原子力学会,「2003秋の大会」H4(2003)
- 6) 森本,他;日本原子力学会,「2003秋の大会」H5(2003)
- 7) 加藤,他;日本原子力学会,「2004春の年会」D9(2004)
- 8) 吉持,他;日本原子力学会,「2003春の年会」B2(2003)
- 9) 吉持,他;日本原子力学会,「2004春の年会」D10(2004)
- 10) 上村,他;"燃料ピン端栓接合",原子力工業第42巻第9号(1996)
- 11) 星野,他;"燃料製造システムの環境負荷低減性に関する検討",サイクル機構報告書,JNC ZN9400 2002-030(2002)
- 12) NEA/OECD ; " MANAGEMENT OF SEPARATED PLUTONIUM THE TECHNICAL OPTIONS " , OECD , (1997) 43
- 13) 田中,他;"FBR 用窒化物燃料製造に関する検討(1)", サイクル機構報告書, JNC TN9400 2002-039(2002)
- 14) 河野,他;"燃料製造システムの技術検討書",サイクル機構報告書,JNC TY9400 2001-023(2001)
- 15) 井上,他;"窒素同位体の濃縮技術評価",サイクル機構報告書,JNC TN9400 2000-072(2000)

# 表4.2.1 燃料の基本仕様と必要生産量 (Pb-Bi冷却中型炉·窒化物燃料200t規模·資源重視型炉心)

### 1.燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 外側炉心燃料 径方向ブラン 集合体 集合体 集合体 集合体				
電気出力	MW e		750			
熱出力	MWth		1,875			
運転サイクル長さ	ヶ月		18			
増殖比(目標値)	-		1.19			
集合体配列ピッチ	mm	177.5				
燃料交換バッチ数	バッチ	7 7				
集合体数	体	288 246				

維料集合法	燃料集合体什样		内側炉心炸	然料集合体	外側炉心燃料集合体	
	LT 498	中国	IC + A B	ICのみ(AB無し)	OC + A B	OCのみ(AB無し)
全長		mm	3,465		3,465	
燃料要素のス	燃料要素の本数		331 0		331	0
	炉心燃料	kg-HM/体	72.3		72	2.3
重量	重量フランケット燃料		42.9		42.9	
	合 計		115.2		11	5.2

燃料要素仕様		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(1Cのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm	2,190		2,190	
	炉心燃料		700	0	700	0
tk c	軸ブランケット燃料	111111	上0/下350	0	上0/下350	0
ペーシート田教	炉心燃料	佃 / 木	92.6	0.0	92.6	0.0
	軸ブランケット燃料	1四/ 平	46.3	0	46.3	0
	炉心燃料		218	0	218	0
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	130	0	130	0
	合 計		348	0	348	0

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	6.46	6.46	6.46
ペレット外径	mm	6.30	6.30	6.30
ペレット高さ	mm	7.56	7.56	10.40
Pu富化度*	%	15.2	18.2	0.0
ペレット理論密度	g/cc	13.50	13.50	13.50
スミア密度	%TD	80.0	80.0	95.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	93.5	93.5	99.9
ペールト声号	g-MOX/個	2.68	2.68	4.37
ハレット里里	g-HM/個	2.36	2.36	3.85

### 2.必要生産量(製造歩留り考慮)

燃料集合	<b>本</b>	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
<b>// </b>		<b>体</b> /y	936	800	0	1,736
生産量	生産規模 2005 日M/y	<b>体</b> /d	4.7	4.0	0.0	8.7
	2001-1107 y	t-HM/y	107.9	92.1	0.0	200.0

燃料要素		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(1Cのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	十支扫描	本/y	316,734	0	270,543	0	0	587,277
生産量	生産規模 2001 日M/y	本/d	1,584	0	1,353	0	0	2,936
	2001-1101/ 9	t-HM/y	110.3	0.0	94.2	0.0	0.0	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	<b>軸方向ブランケット</b> ベレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	31,813,614	27,174,128	21,439,775	0	80,427,517
生産量	生産規模	個/d	159,068	135,871	107,199	0	402,138
土烓里	200t-HM/y	t-HM/y	75.1	64.1	82.6	0.0	221.8
		kg-HM/d	375	321	413	0	1,109
粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブ <del>ランケ</del> ット 粉末(RB)	合 計
牛菇曼	生産規模	t-HM/y	75.2	64.2	82.8	0.0	222.2
土庄里	200t-HM/y	kg-HM/d	376	321	414	0	1,111

# 表4.2.2 燃料の基本仕様と必要生産量 (Pb-Bi冷却中型炉·窒化物燃料200t規模·経済性重視炉心)

### 1.燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体
電気出力	MW e		750	
熱出力	MWth		1,875	
運転サイクル長さ	ヶ月		18	
増殖比(目標値)	-		1.03	
集合体配列ピッチ	mm		177.5	
燃料交換バッチ数	バッチ	5	5	0
集合体数	体	288	246	0

带料集合体	1-14 <b>4</b>	出合	内側炉心燈	然料集合体	外側炉心灼	然料集合体
	工作家	中位	IC + A B	ICのみ(AB無し)	OC + A B	OCのみ(AB無し)
全 <del>[</del>	R.	mm	3,4	65	3,4	65
燃料要素のス	本数	本/体	331	0	331	0
	炉心燃料		72	2.3	72	2.3
重量	ブランケット燃料	kg-HM/体	12	2.3	12	2.3
	合計		84	ł.6	84	1.6

燃料要素仕	様	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm	2,190		2,190	
E +	炉心燃料		700	0	700	0
ਲ ਟ	軸ブランケット燃料		上0/下100	0	上0/下100	0
ペーット伊物	炉心燃料	個/木	92.6	0.0	92.6	0.0
	軸ブランケット燃料	四/4	13.2	0	13.2	0
	炉心燃料		218	0	218	0
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	37	0	37	0
	合 計		255	0	255	0

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	6.46	6.46	6.46
ペレット外径	mm	6.30	6.30	6.30
ペレット高さ	mm	7.56	7.56	10.40
Pu富化度*	%	14.7	18.0	0.0
ペレット理論密度	g/cc	13.5	13.5	13.5
スミア密度	%TD	80.0	80.0	95.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	93.5	93.5	99.9
ペレット声号	g-MOX/個	2.68	2.68	4.37
	g-HM/個	2.36	2.36	3.85

### 2.必要生産量(製造歩留り考慮)

燃料集合	体	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	<b>上 安坦塔</b>	<b>体</b> /y	1,275	1,089	0	2,36
生産量	主性現候 2001-HM/y	体/d	6.4	5.4	0.0	11.8
	2001-1101/ y	t-HM/y	107.9	92.1	0.0	200.0

燃料要素		単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	牛车扫描	本/y	431,572	0	368,635	0	0	800,207
生産量	注度规保 2001 UM/y	本/d	2,158	0	1,843	0	0	4,001
	2001-HIVI/ y	t-HM/y	110.3	0.0	94.2	0.0	0.0	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	43,348,337	37,026,705	834,664	0	81,209,706
牛菇曼	生産規模	個/d	216,742	185,134	4,173	0	406,049
土庄里	200t-HM/y	t-HM/y	102.3	87.4	32.2	0.0	221.8
		kg-HM/d	511	437	161	0	1,109
粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(0C)	軸方向ブ <del>ランケ</del> ット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(IC)	外側炉心燃料 粉末(OC)	軸方向/ 500 %F 粉末(AB)	住方向/ 7/99F 粉末(RB)	合 計
十五回	生産規模	t-HM/y	102.5	87.5	32.2	0.0	222.2
土烓里	200t-HM/y	kg-HM/d	512	438	161	0	1,111

(室化物燃料)	
構成検討結果(	
しイン	
表4.2.3 ;	

相 工	設備	ケース	Na沙去	して 「上」 (基本)	く 開始 で MOX燃 挿 システ	時設定 <sup>低料・200</sup> ム)	規模	陸	0-Bi冷去 5物燃料 3源重視	日中型炉 ・2001規 「型炉心	橂	室。	b - Bi冷却中 比物燃料· 20 诊性重視型	1型か 2001規想 週から	慧天
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	습計	内側	外側	軸ブラ	습計	内側	外側軸	ブラ	습計
		処理量 t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	75.2	64.2	82.8	222.2	102.5	87.5	32.2	222.2
머카 그는 부산 그는 무지 집	原料受入設備		2	2	2		9	2	2	2	9	2	2	2	9
加加明早厶1突土作至	脱硝·転換設備		3	2	2	2	6	4	4	S	11	5	5	-	11
	粉末混合設備						0	5	5	9	16	7	9	e	16
窒化物化工程	粗成型設備						0	2	-	2	5	2	2	-	5
(追加工程)	炭素熱還元設備	цш					0	5	5	9	16	7	9	e	16
	粉砕設備						0	5	5	9	16	7	9	e	16
	成型設備		2	1	-	-	5	2	2	2	9	3	e	-	7
	焼結設備		2	-	-	-	5	2	2	2	9	S	e	-	7
	研削設備		2	1	1	1	5	2	2	2	9	3	3	1	7
	ペレット検査設備	詽	2	-	-	-	5	2	2	2	9	S	S	-	7
プン吉十十祖	スタック調整設体	柵	-	-		-	e	-	-		2	2	2		4
「ノジェート」を	燃料要素組立設	设備	~	1		-	n	e	2		5	S	e		9
	端栓溶接熱処理	皀訯備	~	1		-	e	-	-		2	-	-		2
プン協会工品	燃料要素検査設	橫	~	-		-	e	e	2		S	S	3		9
「ノ家山上住	ワイヤ巻付設備	/ グリッド設備	~	1		-	с С	S	2		5	Э	e		9
	燃料要素総合検	<b>渣</b> 訖備	~	1		-	с С	S	2		5	Э	e		9
<b>∉ △/k ⊤</b> 把	燃料集合体組立	設備	~			-	2	-	-		2	2	-		3
米口や上住	燃料集合体検査	<b>誋</b> 覘	~			-	2	-	-		2	2	-		3
	合		21	14	8	14	57	47	42	33	122	61	56	17	134
∽ 載 野	ィステムとの相違			(霍)	準システ	(ح	* * * *	解 化 が 部 に か に ち ま し し た か し し た し し し し し し し し し し し し し	化工程 換設備 工程:5 13 55 7調整訳	昌 13 13 14 5イン た た イン た た し 1 4 月 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1	Ę 2基)	* 離後 ・ たいいに で し し し し し し で た で た に た に た に た に た に た に た に た に た	化工程追加 (検討備:9 工程:5 7: 里:3 4ライ ク調整設備 1 1 1 1 1 1 2 3 5 3 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	- 「 た か 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	(春)

表 4.2.4	主工程設備	盲台数	
		設備台数(基)	
記様夕粉	Na 冷却大型炉	⊱i i-d	冷却中型炉
[22] [14] 그 12]	MOX200t	窒化	<b>物</b> 200t
	基準システム	資源重視	趾重鬽豜
脱硝• 転換設備	6	11	11
混合設備、炭素熱還元設備、粉砕設備	1	16	16
粗成型設備	ı	5	5
成型設備、研削設備、ペレット検査設備	₫ 5	各 6	1号
焼結設備	5	9	2
スタック調整設備	З	N	4
燃料要素組立設備	3	5	9
端栓溶接熱処理設備	3	5	9
燃料要素検査設備	3	5	9
ワイヤ巻付設備	3	I	-
グリッド設備	ı	5	9
燃料要素総合検査設備	3	5	9
燃料集合体組立設備	2	2	3
燃料集合体検査設備	2	2	8
合計台数(リワーク設備、保管庫類等含む)	65	134	741

		設備台数(基)	
	Na 冷却大型炉	≶ i-da	动中型炉
Щ	MOX200t	窒化	物 200t
	基準システム	資源重視	経済重視
主工程設備費	508	766	870
保守•補修設備費、共通設備費	458	677	744
建屋·電気·換気設備費	708	867	881
新燃料貯蔵建屋設備費	129	129	129
建設費合計	1,803	2,439	2,624

表 4.2.5 建設費

# 表 4.2.6 操業費

		設備台数(基)	
E E	Na 冷却大型炉	¥ ia-da	这中型炉
II K	MOX200t	窒化	<b>物 200</b> t
	基準システム	資源重視	経済重視
人件費(人員 300 人/年)	27.0	27.0	27.0
修繕費(機器交換費、定検材料費)	31.6	49.2	54.4
消耗品等諸費(補充 U、1-ティリティ等を含む)	28.0	41.6	41.6
業務分担費	13.0	17.6	18.4
事業税	4.6	5.6	6.0
操業費合計	104	142	148

	表 4.2.7  燃料製造单価	<ul> <li>○</li> <li>○<th>- 王田 単 一 (万円/kgHM) 一 Bb-Pi 18.9 6.8 6.8 7.1</th><th>Na 冷却大型炉 Na 冷却大型炉 MOX200t 基準システム 15.3 5.1 5.2</th><th>項目 (料製造単価 (本費 (業費</th></li></ul>	- 王田 単 一 (万円/kgHM) 一 Bb-Pi 18.9 6.8 6.8 7.1	Na 冷却大型炉 Na 冷却大型炉 MOX200t 基準システム 15.3 5.1 5.2	項目 (料製造単価 (本費 (業費
	項目     単価(万円/kgHM)       項目     Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉       Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉       新製造単価     MOX200t     変化物 200t       料製造単価     15.3     18.9     19:       本費     5.1     6.8     7.3       業費     5.2     7.1     7.4	5.0	5.0	5.0	材費
	項目         単価(万円/kgHM)           項目         Na 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           Na 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           Na 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 冷却中型炉         MOX200t         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 冷却中型炉         MOX200t         Pb-Pi 冷却中型炉           「A 約         15.3         18.9         19.7           資本費         5.1         6.8         7.3	7.4	7.1	5.2	業費
操業費 5.2 7.1 7.4	項目     単価(万円/kgHM)       項目     Na 冷却大型炉       Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉       MOX200t     空化物 200t       基準システム     資源重視     経済重視       燃料製造単価     15.3     18.9	7.3	6.8	5.1	[本費
<u>資本費 5.1 6.8 7.3</u> 操業費 5.2 7.1 7.4	項目     単価(万円/kgHM)       項目     Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉       MOX200t     アb2-Pi 冷却中型炉     第代物 200t       基準システム     資源重視     経済重視	19.7	18.9	15.3	<b>狱製造単価</b>
燃料製造単価15.318.919.7資本費5.16.87.3操業費5.27.17.4	項目     単価(万円/kgHM)       項目     Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉       MOX200t     変化物 200t	経済重視	資源重視	基準システム	
基準システム     基準システム     資源重視     経済重将       燃料製造単価     15.3     18.9     19.7       資本費     5.1     6.8     7.3       操業費     5.2     7.1     7.4	項目     単価(万円/kgHM)       10月     Na 冷却大型炉     Pb-Pi 冷却中型炉	<b>;物</b> 200t	窒化	MOX200t	Ĩ
端日     MOX200t     室化物200t       基準>入テム     資源重視     経済重都       燃料製造単価     15.3     18.9     19.7       資本費     5.1     6.8     7.3       操業費     5.2     7.1     7.4	単 (而) kgHM)	令却中型炉	Pb-Pi 🕅	Na 冷却大型炉	Ш Ш
項目         Na 冷却大型炉         Pb-Pi 冷却中型炉           燃料製造単価         MOX200t         Pb-Pi 冷却中型炉           燃料製造単価         基準システム         資源重視         経済重視           資本費         5.1         6.8         7.3           操業費         5.2         7.1         7.4		(	単価(万円/kgHM)		
通常運転時の固体廃棄物発生量	i冷却中型炉·200t規模·資源重視型炉心)				
----------------	------------------------				
表4.2.8	(Pb-Bi)				

小類         重量         容量         「 $(1/y)$ (m3/y)         ( $1/y)$ ( $1/z)$				発生			
金属         14.2         28.4         38.2         191         炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集筐機フィルタ等           セラミック         4.9         9.8         38.2         191         炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           金属         4.4         8.8         14.0         75ンケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           シミック         2.6         5.2         14.0         70         75ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ビータ、集筐機フィルタ等           金属         2.6         5.2         10.6         70         75ンケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉ビータ、集筐機フィルタ等           金属         5.3         10.6         10.6         -         燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等           31.4         62.8         261         261         261         261		分類	重量 (t/y)	容 [m3/	置 (y)	ドラム缶 (本/y)	<b>(9)</b>
セラミック         4.9         9.8 <sup>JOL4</sup> <sup>131</sup> 你心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           金属         4.4         8.8         14.0         75ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集産機フィルタ等           セラミック         2.6         5.2         14.0         70         75ンケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集産機フィルタ等           金属         5.3         10.6         10.6         70         75ンケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           金属         5.3         10.6         -         燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等           31.4         62.8         261         261	111	金属	14.2	28.4	C 0C	101	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
金属         4.4         8.8         14.0         70         グランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等           セラミック         2.6         5.2         14.0         70         ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等           金属         5.3         10.6         -         燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等           31.4         62.8         261         261	-	セラミック	4.9	9.8	2.00	191	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
<ul> <li></li></ul>	11	金属	4.4	8.8	0 7 7	02	プランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
金属         5.3         10.6         - 10.6         - 燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等           31.4         62.8         261         261	<u>.</u>	セラミック	2.6	5.2	-+-	2	ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
31.4 62.8 261	111	金属	5.3	10.6	10.6	-	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等
			31.4	62.8	3	261	

# 表4.2.9 通常運転時の固体廃棄物発生量 (Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・経済性重視型炉心)

			発生量		
廃棄物区分	公類	重量 (t/y)	容量 (m3/y)	ドラム缶 (本/y)	例
(年二次: (反角を)(本)配合()()	金属	18.5	37.0 50.6	753	炉心燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
	セラミック	6.8	13.6	CC7	炉心燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、1、	金属	2.4	4.8	70	ブランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
また、ことの主体の(大台を取りま))	セラミック	1.3	2.6		ブランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
クリアランス以下	金属	6.7	13.4 13.4	•	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等
令		35.7	71.4	290	

	備考				ライニング厚5mmと想定		
	<u> </u>	容量(m3)	1	1	1	940,000	940,000
シス以下	コンク	<b>重量</b> (t)	1	I	1	470,000	470,000
51175	- ト以外	容量(m3)	1,040	6,400	1	84,000	91,440
	コンクリ-	<b>重量</b> (t)	520	3,200	•	42,000	45,720
/廃棄物	<b></b> 〔2013〕	容量(m3)	520	7,560	1,080	•	9,160
低レベル	(余裕深度	<b>重量</b> (t)	260	3,780	540		4,580
レ廃棄物 処分並)		容量(m3)	2,160	20	2,940	•	5,120
低レベ	(地層)	<b>重量</b> (t)	1,080	10	1,470	•	2,560
	対象廃棄物		主工程設備(保守・補修設備含む)	周辺設備(保守·補修設備除<)	セルライニング	建屋躯体(上記を除く)	合計
			≑Ω. /#	ЦЩ Ш	3争 壶 七份	生また	

棄物発生量	重視型炉心)
の固体例	.規模 · 資源
-措置時	ョ型炉・2001
.10 廃止	o-Bi冷却中
表4.2	Ē

# 表4.2.11 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (Pb-Bi冷却中型炉・200t規模・経済性重視型炉心)

		ルシイ到	/廃棄物	低レベル	<b>ミ棄物</b>		クリアラ	シス以下		
	対象廃棄物	(地層处	<u> いいましょう しんしょう しんせい しんせい しんしょう しんしょ しんしょ</u>	(余裕深度处	心分並)	コンクリー	- ト以外	コンク	- L	備考
		<b>重量</b> (t)	容量(m3)	重量(t) 🧎	容量(m3)	重量(t)	容量(m3)	<b>重量</b> (t)	容量(m3)	
т (#	主工程設備(保守・補修設備含む)	1,340	2,680	140	280	570	1,140		1	
Ē	周辺設備(保守·補修設備除<)	10	20	3,780	7,560	3,200	6,400		•	
雪雪枝	セルライニング	1,610	3,220	590	1,180	•	1		1	ライニング厚5mmと想定
王王	建屋躯体(上記を除く)	•	•	1	•	43,000	86,000	480,000	960,000	
	100 二	2,960	5,920	4,510	9,020	46,770	93,540	480,000	960,000	

表4.2.12 (1/2) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
技術的成立性	基本プロセスの成立性	粉末の流動性改善/充填技術開 発	粉末造粒技術開発	大	簡素化プロセス技術
			エアータップ粉末充填法技術開発	大	(簡素化プロセス技術)
		- 製造プロセス条件の最適化 -	燃料製造仕様に応じた均質性確保のた めの焼結プロセス条件の把握	大	低除染·TRU燃料製造技術
			MA, FP混入による原料の発熱、放射 線に伴う各プロセス条件への影響把握	大	低除染·TRU燃料製造技術
			」炭素熱還元/粉砕プロセス条件の最適 化	大	窒化物燃料製造技術
		- 検査技術開発 -	端栓溶接部検査工程での標準試料片 の形状・製作方法検討	中	超音波検查技術
			端栓溶接部検査工程での溶接部強度 の非破壊検査方法確立	中	超音波検查技術
			_X線検査工程でのペレット識別検査 技術開発	中	X線検查技術
		製造工程における原料発熱の影響評 価	0/Mドリフト防止	大	システム設計、除熱技術
			集合体組立・検査工程での除熱方法検 討	中	システム設計、除熱技術
	量産性	量産技術開発	大型脱硝容器での脱硝性能確 認	大	量産技術(スケールアップ)
		処理能力の向上	脱硝転換/端栓溶接部熱処理工程での 冷却時間短縮	中	システム設計、冷却技術
			多数(14個)同時成型時の処理速度と ペレット品質ばらつきの確認	中	システム設計、量産技術
			端栓溶接/ワイヤ巻付工程の処理能力 向上	中	システム設計、量産技術
			超音波検査/X線検査/総合検査工程で の処理能力と検査精度の関係	中	システム設計、量産技術、各種検査技術
		製造歩留りの把握	TRU低除染燃料量産時の製造歩留り確 認	大	低除染·TRU燃料製造技術
	セル内安定操業性	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		- 計測制御		小	システム設計 計装制御技術
		工程間の核物質移送技術高度 化		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		高信頼性機器の開発(MA含有低除染 燃料の機器安定性への影響)	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		計量管理技術の高度化		中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
		遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	大	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	小	除染技術
安全性	臨界防止	単一ユニットの臨界管理	臨界管理ロジックの具現化	中	システム設計/Pu物流管理手法 物質移送・マテハン技術
			室化物燃料の臨界評価	中	システム設計/臨界管理
		複数ユニットの臨界管理	臨界管理ロジックの具現化	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
	──作業員の被ばくの低減	遠隔自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		ー遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	中	除染技術
		- ホールドアップ低減技術の開発 -	粉末の飛散防止技術開発	中	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	中	システム設計 集塵技術、付着防止技術
		脱硝・焼結時のオフガスへのFP/MA移 行の抑制(TRU・低DF燃料)	脱硝・焼結時のオフガスへのFP/MA移 行挙動把握	小	要素技術
	火災·爆発防止	化学的安全性	窒化物燃料粉末等の取り扱い工程の 不活性化	中	シズテム設計
	一耐震性	耐震設計		中	システム設計
	安全評価	安全設計方針·判断基準整備		中	システム設計
		安全評価		中	システム設計

大:技術成立性、目標達成のために特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

表4.2.12 (2/2) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
経済性	建設費低減	プロセス合理化	エアータップ粉末充填法の技術開発(造 粒工程削減)	中	(簡素化プロセス技術)
		製造系列数の合理化	脱硝転換 - ペレット製造工程間の 粉末移送技術の高度化	中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		製造機器の機能・構造合理化	生産量に応じた処理能力最適 化	大	システム設計/特に小規模プラント
	- 操業費低減 -	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		一機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		品質管理の合理化	検査項目の合理化、検査頻度・基準の 緩和	中	システム設計
		—N-15濃縮技術開発	安価なN-15濃縮技術開発	大	N-15濃縮技術
		集合体部材の低価格化		大	システム設計 要素技術
	──稼働率向上 ────	機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		保守・補修期間の短縮	遠隔保守補修技術	大	システム設計
		高信頼性機器の開発(MA含有低除染 燃料の機器安定性への影響)	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
	廃止措置費低減 -	プロセスのコンパクト化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		中	システム設計
資源有効利用性	U/TRUのリサイクル	U/TRUの回収率向上	成型、研削工程からの発生粉末の回収 率向上	小	システム設計 粉末集塵 · 回収技術
			リワーク(DS·CS処理工程)からの回収 率向上	小	システム設計 分離 · 回収技術
	U/TRUのロス低減	──分析廃棄物への核物質移行量低減	分析サンプルサイズの最適化	小	システム設計 分析技術
			分析箇所、頻度、サンプル数の合理化	小	システム設計 分析技術
環境負荷低減性	廃棄物発生量低減	工程廃棄物(分析廃棄物)発生量低 減	分析箇所、頻度、サンプル数、サイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
		二次廃棄物発生量低減	機器の長寿命化	中	システム設計 要素技術
			機器の台数削減	中	システム設計
	廃棄物への核種移行量低 減	工程廃棄物(分析廃棄物)への移行量 低減	分析箇所、頻度、サンプル数、サイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
		二次廃棄物への移行量低減	粉末の飛散防止技術開発	大	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	大	システム設計 集塵技術、付着防止技術
			機器の除染技術開発	中	除染技術
	- 廃止措置時の固体廃棄物量 低減	プロセスのコンパクト化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		中	システム設計
核拡散抵抗性	保障措置	ホールドアップ対策(発生の抑止)	粉末の飛散防止技術開発	大	システム設計 飛散防止技術
			粉末の回収技術開発	大	システム設計 集塵技術、付着防止技術
		計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術/(要素技術)
	核物質防護			中	システム設計
運転·保守補修性	ーセル内安定操業性 -	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		一計測制御		小	システム設計 計装制御技術
		工程間の核物質移送技術高度 化		中	システム設計 物質移送・マテハン技術
		MA含有低除染燃料の機器安定性への 影響	耐放射線対策/高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
		遠隔保守補修技術の確立	遠隔保守対応機器開発	大	システム設計 物質移送・マテハン技術
			機器の除染技術開発	小	

大:技術成立性、目標達成のために特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題







真空バルブ

図4.2.4 炭素熱還元装置 外形図



5. 振動充填法

5.1 ゲル化・スフェアパック燃料製造システムの検討

本システムは、湿式再処理製品である Pu 富化度調整済み溶液を出発物質 に、外部ゲル化法により球状 MOX 粒子を調製し、これを被覆管に振動充填 して燃料を製造するシステムである。本スフェアパック燃料製造システムに は以下の特徴がある。

燃料を溶液および顆粒で取り扱うことから、微粉の発生、燃料の飛散が 極めて少ない。

溶液および球状粒子のため流動性が高く、遠隔でのマテリアルハンドリ ング性が高い。

粒子製造工程からの廃液発生量が多くなる。

実用化戦略調査研究フェーズ II では、セル内遠隔製造への適合性(遠隔 自動運転、遠隔保守補修)を示すことを目標に機器概念設計検討を行う。

# 5.1.1 基準システム設計

基準システムの燃料製造施設は、フェーズ II 開始時点で設定した Na 冷却 大型炉・MOX 燃料対応資源重視型炉心 / 先進湿式再処理に対応した施設と し、生産規模は 200tHM/y とする。

### 5.1.1.1 施設概念構築

(1)設計の基本方針と前提条件

(i)施設設備の設計および配置方針

保守方針および操業条件に関しては簡素化ペレット燃料製造システムの 基準システム設計と基本的に同一である(4.1.1 節参照)。

(ii) 製品燃料条件

製品燃料仕様の前提となる炉心および再処理は、簡素化ペレット燃料製造 システムの基準システムで前提とする炉心および再処理と同一とする。スフ ェアパック燃料では粒径800µmおよび粒径80µmの燃料粒子を重量比3:1 で被覆管に充填する。

以上の仕様を踏まえ設定される製品燃料の基本仕様を表 5.1.1 に示す。燃料要素のスタック重量は、内側および外側炉心燃料要素がともに 552 gHM、 径方向ブランケット燃料要素が 1,451gHM となる。

(iii) 製品歩留り

不良品率を粒子製造工程8%、燃料要素組立て・集合体組立工程2%とし、 燃料製造全体での歩留りを90%とした。 (iv) スクラップ処理

粒子製造工程で発生する不良品は、燃料の酸への溶解性および添加剤の除 去を考慮し、焼結工程の後の検査工程で回収し、リワーク設備で硝酸に溶解 し再処理設備に戻す。また、燃料ピンについては解体して燃料粒子を回収し、 所定の製造設備へ戻す。燃料製造の受け入れ基準に適合しない不純物等を多 く含むスクラップはリワーク施設で溶解し再処理設備へ戻す。

(v)製品検査

検査設備として、溶液・燃料粒子検査設備、燃料要素検査設備、燃料集合 体検査設備を考慮する。

(2)安全設計に係わる検討

プラントの安全性として、臨界安全、耐震、火災・爆発防止について以下 のように設計方針を定めた。

(i)臨界安全

燃料溶液および燃料粒子の取扱いは、形状管理を基本とする。燃料要素組 立・検査工程、燃料集合体組立・検査工程では、質量管理または本数管理を 適用し、核燃料物質の受入れ・払い出し信号及び核燃料物質の有無のモニタ リング信号による搬送機器のインタロック制御を行い、ダブルバッチによる 臨界を防止する。

(ii) 耐震

簡素化ペレット法と同様の基準によって耐震クラスを分類する。なお、湿 潤ゲルは溶液と同等とみなした。

分類結果を表 5.1.2 に示す。

(iii)火災・爆発防止

燃料製造で使用する物質で火災・爆発に関連するものは、添加剤として加 えるポリビニルアルコール(PVA)およびテトラヒドロフルフリルアルコール (THFA)、ゲル球洗浄に用いるイソプロピルアルコール(IPA)、還元・焼結に 用いる水素ガスである。また、水溶液の放射線分解による水素およびゲル化 反応の副生成物としての硝酸アンモニウムが生成する。これらの物質の取扱 いにあたっては以下のようにして火災・爆発を防止する。

PVA は水溶液で扱う。

焙焼工程では THFA 濃度が爆発下限未満となるよう十分な焙焼ガスを 流して穏やかに分解する。

IPA を取り扱うセル内の機器で接点やリレー等を有するものには防爆 構造を取り入れる。また、ガス検知器によって漏洩ガスの滞留を検知す る。

水素ガスは不活性ガスで5%に希釈したものを使用する。

放射性物質を含有する溶液を貯蔵する貯槽は、槽内換気によって水素の 滞留を防止する。なお、塩類の析出を防止するため、槽内換気及び計装 用圧縮空気は、水蒸気で飽和させて供給する。

硝酸アンモニウムを含む溶液の蒸発乾固を防止する。

(iv) 高発熱および高放射能の原料取扱いに関する検討

燃料の発熱および放射線によるプロセスへの影響を考慮する。スフェアパック燃料製造システムでは、粒子製造工程における滴下溶液の劣化防止と O/M 調整後の MOX 粒子の再酸化防止に留意する。

(3)プロセス設計

粒子製造工程の基本はアンモニアによる沈殿反応である。反応に必要なア ンモニアの供給方法により、燃料溶液をアンモニア水に滴下し液滴の外部か らアンモニアを供給する外部ゲル化法と、燃料溶液に添加した試薬の加水分 解によって液滴内部でアンモニアを発生させる内部ゲル化法とがある。外部 ゲル化法では、燃料溶液をアンモニア水中に滴下するため、液滴の形状維持 のために燃料溶液に増粘剤を添加するという特徴がある。内部ゲル化法では、 熱媒として使用するシリコンオイル中で表面張力によって燃料溶液が球状 となるため増粘剤を必要としない。内部ゲル化法で使用するシリコンオイル は繰り返し使用可能で、少量が施設廃止時に廃棄物となると考えられるが、 その処理・処分方法について具体的検討はされていない。

本システムの概念設計検討にあたっては、故障時も含めた発熱性の燃料溶 液の取扱い性と廃棄物の処理方法を考慮し、外部ゲル化法を基本プロセスと した。

プロセスフローを技術的課題および対応する要素技術開発の成果ととも に図 5.1.1 に示す。基本プロセスにおいて特に重要な工程は、MA・FP を含 有する多成分系でのゲル化、焼結および被覆管への MOX 粒子の高密度充填 工程である。

多成分系でのゲル化については、PSIとの共同研究において内部ゲル化法 で Pu 富化度 30%、Np 含有率 5 %の Np-MOX 粒子製造試験を実施しており、 低除染 MA 含有燃料での成立性の見通しを得ている。

低除染 MA-MOX の焼結性については、要素技術開発により模擬 FP を添加した MA 含有 MOX ペレットの焼結および O/M 調整の条件が明らかとなっており(4.参照)、スフェアパック燃料においても焼結および O/M 調整は可能であると考える。

被覆管への高密度充填については、HfO2等の模擬物質を用いた要素技術

開発にて充填密度 85%TD を達成しており、実燃料での高密度充填の見通し を得ている。

主要なプロセスについて以下に述べる。

溶液受け入れ

再処理製品である MA・FP 含有の Pu 富化度調整済み溶液を受け入れ、 燃料製造の7日分を1ロットとして取り扱う。

ゲル化溶液調製

ゲル化工程において滴下した燃料溶液液滴がアンモニア水に着水する際に衝撃で液滴が変形するのを防ぐため、増粘剤として PVA を添加する。 増粘剤は焙焼工程で除去されるまでの間、ゲル球の機械的強度の維持にも 寄与する。また、増粘剤を添加した溶液に THFA を添加する。

THFAは PVA と同じ官能基(水酸基)を持つ低分子化合物であり、これが重金属に配位することで、滴下前に増粘剤が重金属イオンに配位して ゲル化するのを防ぐものである。

要素技術開発において、硝酸ウラニル溶液を用いた粒子製造試験により 滴下溶液組成を確認している。また、模擬溶液を用いて酸、熱、放射線に 対する滴下溶液の粘度の安定性を確認し、液温 30 以下では 8 時間以上 にわたって粘度が安定するという結果が得られている。

要素技術開発によって明らかとなった滴下およびゲル化に適した溶液 組成<sup>1)</sup>に基づき、滴下溶液組成を重金属濃度130g/l(大粒子用)または 150g/l(小粒子用)、PVA1wt%、THFA40vol%とした。滴下溶液の液温を 30 以下に保ち、溶液調製から滴下・熟成までの工程を3時間で完了(調 製1時間、滴下1.5時間、熟成0.5時間)することで、滴下溶液の粘度低 下を防止する。これを1バッチとして1日8バッチの溶液調製を行う。

滴下・熟成

滴下溶液をアンモニア水中に滴下して重ウラン酸アンモニウムおよび 水酸化プルトニウムのゲルに転換する工程である。一定の大きさの球状ゲ ルを得るため、振動ノズルから滴下する。ノズルからアンモニア水面まで の空間をアンモニアガスで満たしておくことにより、落下中の液滴の表面 をゲル化し着水時の衝撃に耐えられる強度をもたせる。滴下ノズル1個当 りの溶液流量は、大粒子で40ml/分、小粒子で3.3ml/分とした。

ゲル化反応は液滴内へのアンモニアの拡散によって進行する。このため、 滴下完了後短時間の熟成を行い、液滴の中心まで完全に反応させる。

洗浄

洗浄工程は水洗浄とアルコール洗浄の2つの操作から成る。

水洗浄の目的はゲル球内の硝酸アンモニウムの除去である。ゲル球内に 残留した硝酸アンモニウムは焙焼工程で球の割れやポアの原因となる。十 分な洗浄を行うため、ゲル球の5倍容の水を使用する。 その後アルコール洗浄によって水をアルコールで置換する。表面張力の 強い水を表面張力の弱い IPA で置換することにより、乾燥工程で表面張力 によるゲル球の凝集を防ぐ。IPA はゲル球内の水にも同様に作用し、水の 表面張力でゲル球内部の空隙が収縮するのを防ぎ、焙焼ガスが拡散する経 路を維持する。アルコール洗浄にはゲル球の2倍容のアルコールを使用す る。使用するアルコールは、水との親和性、沸点、引火点等を考慮し、イ ソプロピルアルコール(IPA)とする。

洗浄時間は、ウランを用いた要素技術開発成果に基づき、大粒子で6時 間、小粒子で3時間とする。

乾燥

減圧乾燥によって、60 、0.04MPa で IPA を蒸発させ乾燥ゲル球を得る。オフガス中の IPA 蒸気は冷却トラップで回収する。

焙焼

空気中で加熱し、重ウラン酸アンモニウムおよび水酸化物を酸化物に転換するとともに、添加剤を燃焼によって除去する。ウランを用いた要素技術開発成果に基づき、焙焼温度 400 、保持時間 2 時間とする。空気流量は、添加剤を完全に分解するために反応量の 2 倍量必要である。また、気化した THFA の発火・引火を防ぐため、THFA 濃度が爆発下限未満となる空気流量とする。

還元

水素雰囲気下で加熱し、UO3をUO2に還元する。ウランを用いた要素 技術開発成果に基づき、還元温度 600 、保持時間 2 時間とする。火災爆 発防止のため 5%H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>を使用し、充分な反応のため反応必要量の 5 倍量 流す。

焼結

水素雰囲気下で高温に加熱し、MOX 粒子を焼結する。ウランを用いた 要素技術開発では 5%H<sub>2</sub>-Ar 雰囲気、焼結温度 1600 、保持時間 6 時間で の粒子焼結の実績がある<sup>2)3)</sup>。これに基づき、焼結温度 1700 、保持時間 5 時間とした。焼結温度を高くし、保持時間を短縮している。焼結ガス流 量は還元工程と同量とする。自重による粒子間焼結を防ぐため、粒子ベッ ド厚さを 1 cm 以内とする。

振動充填・スペーサ挿入

粒径 800µmの大粒子と粒径 80µmの小粒子を重量比 3:1 で、浸透充 填法により被覆管に装填する。浸透充填法は、大粒子を燃料ピンへ装荷後、 その上部へ小粒子を装荷して振動充填を行うものであり、小粒子が大粒子 と大粒子の隙間を通って下部へ浸透・充填される。この方法は粒子同士の 摩擦が小さい球形に近い燃料粒子の場合に有効で、比較的弱い振動で充填 できるという特徴がある。 模擬物質を用いた要素技術開発成果に基づき、振動周波数 200Hz、振動 加速度 5 G とする <sup>4)</sup>。炉心燃料と軸方向ブランケット燃料との間にはスペ ーサを挿入し、振動充填中の混合を防止する。

端栓溶接

被覆管内を He で置換し端栓を溶接する。溶接法には、ODS 鋼の溶融・ 再結晶による強度低下を避けるため加圧抵抗溶接法を用いる。

溶接部検査

超音波探傷法により、未接合部やクラックの有無を確認する。

密度分布測定

<sup>137</sup>Csを線源として 線透過法により、軸方向密度分布を測定する。

Heリーク試験

減圧下で燃料ピンからの He の漏洩量を測定し、燃料ピンの密封性を確認する。

ピン検査

燃料ピンの外観検査、 スキャンによる燃料の同定、重量測定、真直度 測定を行う。

集合体組立

加工された燃料ピンを燃料集合体に組み立てる。

集合体検査

燃料集合体の曲り・捩じれ等の項目について検査を実施する。

(4) 主工程設備設計

(i)必要生産量の検討

年間生産量、製品燃料条件および製造歩留りからマスフローを設定し、必要生産量を求めた結果を図 5.1.2 に示す。燃料集合体の年間必要生産体数は、 内側炉心燃料 512 体/y、外側炉心燃料 431 体/y、径方向ブランケット燃料 321 体/yとなる。また、燃料要素の日間必要生産量は内側炉心燃料 709 本/ 日、外側炉心燃料 597 本/日、径方向ブランケット燃料 208 本/日となり、燃料粒子の製造量は内側炉心燃料大粒子 163.0kgHM/日、内側炉心燃料小粒子 54.3 kgHM/日、外側炉心燃料大粒子 137.5 kgHM/日、外側炉心燃料小粒子 45.8 kgHM/日、ブランケット燃料大粒子 531.2 kgHM/日、ブランケット燃 料小粒子 177.1kgHM/日となる。

(ii)設備・機器概念

要素技術開発成果を踏まえた必要生産量検討結果に基づき、安全性(臨界、 火災・爆発)、核拡散抵抗性(ホールドアップ)、遠隔保守・補修性等の設計要 求を満たす設備概念を検討し、概略構造、安全対策、設備台数等を明示する。

原料受け入れ設備

本設備は、再処理から炉心燃料用に富化度調整済みU/TRU 混合溶液を、 ブランケット燃料用にU濃縮液を受け入れ、サンプリング分析を行った後 に、ゲル化/造粒工程へ送液するための設備である。

炉心燃料用の貯槽形状は円環槽とし、形状管理により臨界安全を担保す る。ブランケット燃料用貯槽は臨界安全上の制約が無いので円筒槽とする。

7日分の製造量に対応する貯槽容量は、内側炉心燃料用 6,2001、外側 炉心燃料用 3,9001、ブランケット燃料用 18,0001となる。再処理からの 溶液受け入れ用と燃料製造工程への払い出し用に 2 基の貯槽を交互に切 り替えて使用する。TRU 組成等の品質管理はこのロット単位で実施する こととする。

溶液調製槽

溶液受け入れ槽から1バッチ分の燃料溶液を受け入れ、PVA水溶液および THFA を添加・混合し滴下溶液を調製するための槽である。

炉心燃料用は円環槽、ブランケット燃料用は円筒槽とし、1 バッチ分の 滴下溶液を調製する。調製する滴下溶液量は、内側炉心燃料大粒子 153.8l/ バッチ、内側炉心燃料小粒子 45.2l/バッチ、外側炉心燃料大粒子 132.5l/ バッチ、外側炉心燃料小粒子 38.9l/バッチ、プランケット燃料大粒子 501.3l/バッチ、ブランケット燃料小粒子 147.3l/バッチとなる。

供給槽

調製した滴下溶液を振動滴下装置に送液するための槽である。

貯槽形状は円筒槽とし、水冷ジャケットによって液温を一定に保ち、粘度の変動を防ぐ。

次項で述べるように、滴下・熟成槽1基に対して供給槽4基を配置する。 その結果、内側炉心燃料および外側炉心燃料のそれぞれに対して、大粒子 用に12基、小粒子用に8基、ブランケット燃料の大粒子用および小粒子 用にそれぞれ8基とする。

滴下・熟成槽

滴下溶液をアンモニア水に振動滴下し球状のゲル球とするための設備 である。溶液を滴下するための振動滴下装置とアンモニア水中でゲル化反 応を進行させる反応槽とからなり、振動滴下装置は振動機と滴下ノズルで 構成される。設備概念を図 5.1.3 に示す。

臨界安全担保のため、炉心燃料用は円環槽とした。ブランケット燃料用 は臨界安全上の制約がないので円筒槽とした。滴下ノズルからの液滴の落 下距離を一定とするため、オーバーフローによってアンモニア水液位を一 定とした。廃液発生量を抑制するため適切な容積の槽とする必要があり、 また後工程の洗浄工程および乾燥工程までのスムーズな物流を考慮し、1 基当りの核物質取扱い量を定め槽容積を決定した。槽容積および基数は、 内側炉心燃料大粒子用 801×3基、内側炉心燃料小粒子用 531×2基、外 側炉心燃料大粒子用 711×3基、外側炉心燃料小粒子用 461×2基、ブランケット燃料大粒子用 4001×2基、ブランケット燃料小粒子用 1201×2
基となる。

滴下ノズルの必要個数は、滴下すべき液量と滴下速度および滴下時間で 決まる。ノズルを振動させる振動機は、円環槽に対する滴下ノズルの幾何 学的配置と、複数ノズルを1基の振動機で振動させる場合のノズルの重心 位置を考慮し、滴下・熟成槽1基に振動機4基を配置する。振動機と供給 槽を1対1で対応させ、振動機1基当りの滴下ノズル個数を、炉心燃料大 粒子用4個/基、炉心燃料小粒子用20個/基、ブランケット燃料大粒子用 18個/基、ブランケット燃料小粒子用62個/基とした。ひとつの送液系で 複数のノズルからの滴下については、要素技術開発では、12個のノズル へッドを装着したプレート型ノズルを用いて3個から最大7個のノズル からの滴下に成功しており、送液条件の最適化によって複数ノズルからの 滴下の実現性の見通しを得ている<sup>2)</sup>。

洗浄槽

滴下・熟成槽からゲル球をアンモニア水ごと受け入れ、水およびアルコ ールでゲル球を洗浄する設備である。設備概念を図 5.1.4 に示す。

槽の底部から水およびアルコールを供給し、オーバーフローによって排 出する。槽形状は円筒槽とし、炉心燃料用には中性子吸収材としてカドミ ウムを巻く。大粒子の製造ラインでは機器数の増大を抑制するため、洗浄 槽は乾燥装置の2倍の容量とし、1基の洗浄槽から2基の乾燥装置にゲル 球を切り分けて送る。また洗浄槽1基が滴下・熟成槽1基のゲル球をアン モニア水とともに全量受け入る。大粒子の洗浄時間は溶液調整から滴下・ 熟成工程の2バッチ分の処理時間に相当するため、滴下・熟成槽1基に対 して2基の洗浄槽を交互に使用する。槽容量は内側炉心大粒子用971、 同小粒子用561、外側炉心大粒子用861、同小粒子用501、ブランケッ ト燃料大粒子用3601、同小粒子用1501とした。

乾燥装置

洗浄槽から湿潤ゲル球を IPA とともに受け入れ、減圧乾燥して乾燥ゲル 球を得る設備である。設備概念を図 5.1.5 に示す。

乾燥装置は、乾燥ゲル球で臨界評価した容器に重金属密度のより低い湿 潤ゲル球をアルコールに分散した状態で受け入れるため、重金属としての 取扱量が最も小さい装置である。製造ライン全体の機器数の増大を抑える ため、大粒子製造ラインでは洗浄槽1基のゲル球を乾燥装置2基に切り分 ける。装置容量は炉心燃料用821、ブランケット燃料大粒子用4321、 ブランケット燃料小粒子用1821とした。基数は、内側炉心燃料大粒子用

6基、内側炉心燃料小粒子用162120た。基数は、内側炉心燃料入粒子用 6基、内側炉心燃料小粒子用2基、外側炉心燃料大粒子用6基、外内側炉 心燃料小粒子用2基、ブランケット燃料大粒子用2基、ブランケット燃料 小粒子用2基とした。

焙焼炉

乾燥ゲル球中の ADU および水酸化物を酸化物に転換するとともに、添加剤の PVA および THFA を酸化除去する設備である。設備概念を図 5.1.6 に示す。

焙焼炉にはロータリキルン方式を採用し、連続的に処理する。炉心燃料 製造ラインでは臨界制限で径が決定されるので、各ラインで機器寸法は同 ーとした。1 バッチ分の乾燥ゲル球をバッチ間隔の3時間で処理するため に、内側炉心および外側炉心の大粒子製造ラインでそれぞれ3基、内側炉 心および外側炉心の小粒子製造ラインでそれぞれ1基とした。ブランケッ ト燃料製造ラインでは臨界上の制限がないため、処理量に応じて径を大型 化し、大粒子および小粒子の各製造ラインで1基ずつとした。

焙焼球貯槽

中間バッファとして焙焼球を焙焼炉から受入れ、還元炉に供給する設備 である。

粒子受入れ用と供給用に2基の容器を交互に切り替えて使用する。

還元炉が停止した場合、本貯槽から還元炉への粒子供給は停止する。 焙焼炉は乾燥ゲル球の受け入れを停止し、炉内の乾燥ゲル球の焙焼・排出 が完了した後に炉を停止する。このため、貯槽には焙焼炉内滞留分の燃料

粒子を受け入れられる十分な容量を持たせた。

還元炉

焙焼球中の UO3を UO2に還元する設備である。

還元炉の構造は焙焼炉(図 5.1.6)と同一とした。ただし焙焼によって 粒子が収縮するため、すべての製造ラインで、各1基ずつとした。

還元球貯槽

中間バッファとして還元球を還元炉から受入れ、焼結炉に供給する設備 である。

槽形状は円筒槽とし、還元球の酸化防止のため、水冷ジャケットにより 容器を冷却する。粒子受入れ用と供給用に2基の容器を交互に切り替えて 使用する。

焼結炉が停止した場合、本貯槽から焼結炉への粒子供給は停止する。還 元炉は焙焼球の受け入れを停止し、炉内の焙焼球の還元・排出が完了した 後に還元炉を停止する。このため、貯槽には還元炉内滞留分の燃料粒子を 受け入れられる十分な容量を持たせた。

焼結炉

還元球を焼結し高密度化するための設備である。設備概念を図 5.1.7 に 示す。

焼結炉は1600 という高温での運転となるため、ロータリキルンでは

なく、焼結皿を使用した連続炉とした。炉内でジャミングが起きると、皿 からこぼれた球が散逸し、回収が極めて煩雑となることが予想される。そ のため、焼結皿の駆動方式はウォーキングビーム方式とした。

無限平板での臨界評価から粒子ベッド厚さは4cm以下に制限する。また、粒子自重による粒子間焼結を防ぐため、粒子ベッド厚さは1cmとする。焼結を終え、十分冷却された粒子は気流搬送によって貯蔵容器に移され、中間貯蔵庫に貯蔵する。

燃料ピンマガジン

概念を図 5.1.8 に示す。

燃料ピンマガジンの構造は、 1100mmの円筒と 1600mmの円盤で 構成され、円盤部に燃料ピンを 100 本装荷できるものとした。

下板には、燃料ピンを保持するための穴を設け、燃料ピンの外周を支持 するための板バネを半径方向に設置し、かつ燃料ピン長さ誤差を吸収する ために下側にバネを設置した。

また、中間板と上板には、回転できる円盤に板バネを設置し燃料ピン外 径を支持できる構造とした。中間板は、燃料ピンの座屈荷重設計の結果よ り、2箇所に設置することとした。上板には、燃料供給部と押さえ蓋部を 設置してあり、円盤の上下降と回転により、それぞれの機能を選択できる 構造となっている。なお、この上板は、上部を分解できる構造とし、燃料ピ ンの挿入および引き出しを可能とする。

### 振動充填設備

振動充填設備は、燃料粒子を被覆管に供給する燃料供給装置、燃料を装 填した被覆管を加振して所定の充填密度とする振動充填装置、被覆管内で 炉心燃料とブランケット燃料とが混合するのを防止するためのスペーサ を挿入するスペーサ挿入装置、スペーサ挿入のため燃料ピンマガジンの上 部構造を取外すハンドリング装置で構成される。振動充填設備の基本構造 図を図 5.1.9 に示す。

・燃料供給装置

燃料供給装置の概念図を図 5.1.10 に示す。

燃料供給装置は、燃料粒子の容器である供給ホッパ、燃料ピン1本分の燃料粒子を量り取り被覆管に装填する計量部からなる。

ホッパ径は、臨界管理寸法と温度上昇による再酸化の防止から定めた。 臨界管理の点からはホッパ径 150mm 以下、再酸化防止のための温度制 限の点からは空気中を想定して 50mm 以下とする必要があるため、ホ ッパ径の基準を 50mm とした。

1 ホッパ当たり 10 本の燃料ピンに供給することとし、大粒子の供給 ホッパ長さは余裕を見て 300mm とした。同様に小粒子の燃料ピンへの 装荷量は大粒子の 1/3 なので、小粒用のホッパは径 30mm となる。な お、径方向ブランケット燃料については、発熱が無いため、大粒燃料用の ホッパは径 100mm、長さ 300mm とし、小粒はホッパ径 60mm、長さ 300mm とした。

計量部は、燃料供給ホッパから計量ホッパへ粒子燃料を供給する計量 フィーダ(水平に設置したスクリューフィーダを想定),計量ホッパ(重 量による計量)および燃料ピンに供給する供給フィーダから構成される。 機器の寸法制限として、燃料供給ホッパと同様に温度上昇による再酸化 防止のため、50mm以下の径とした。

なお、燃料供給ホッパおよび計量部(スクリューフィーダ、計量ホッ パ、およびフィーダ)は、燃料供給後の振動充填時に燃料ピンマガジン より分離し、振動の影響(燃料供給装置内の燃料粒子の充填率変化によ る閉塞や燃料の飛散)を受けないような構造とした。

・振動充填装置

振動充填装置の基本構造図を図 5.1.11 に示す。

振動充填装置は被覆管を装荷した燃料ピンマガジンを加振する加振 装置、加振時に燃料ピンマガジンと燃料供給装置とを切り離す燃料供給 装置昇降機構で構成される。

振動充填装置の導入部に燃料ピンマガジンを供給し、振動充填装置内 燃料ピンマガジン移送装置により加振装置上に運搬する。この時、加振 装置と燃料ピンマガジンとは、複数のピンにより軸位置の合わせと回転 方向位置の合わせを行うと共に、振動時の燃料ピンマガジンの固定を行 う構造とした。また、振動充填後の燃料ピンマガジンは、供給時と同様 に移動装置により排出し、移送台車により次の工程であるスペーサ挿入 装置へ供給する構造とした。

なお、加振装置の基礎は他の機器とは独立とし、他の機器に振動の影響が及ばないようにする。

・ハンドリング装置およびスペーサ挿入装置

ハンドリング装置およびスペーサ挿入装置基本構造図を図 5.1.12 に 示す。

スペーサを挿入するために、燃料ピン先端を露出する必要がある。ハ ンドリング装置はマガジン上板の一部の取り外し・取り付けを行う。

上板を取り外した燃料ピンマガジンを移送台車によりスペーサ挿入 位置に導入する。スペーサ挿入は、以下の手順により、100本の燃料ピ ンに同時にスペーサの挿入を行う。

-供給冶具によるスペーサの供給

-挿入ロッドによるスペーサの吸着

-スペーサの案内管への挿入

-供給冶具の排出

-燃料ピンへのスペーサの挿入

供給冶具には、スペーサを供給するための穴とスペーサを案内管に注入するための突起を設けてあり、供給冶具を回転させることにより選択 できる構造とした。また、燃料粒子最上段に挿入する反射体やバネも上 記スペーサと同様に、同一機構により挿入できるものとした。

スペーサ挿入後、更に炉心燃料または上部ブランケット燃料の充填を 行う場合は、ハンドリング装置でマガジン上板を再度取り付け、振動充 填装置に戻す。全ての燃料の充填を終えたマガジンは次工程の上部端栓 溶接装置に移送する。

端栓溶接装置

燃料を装填した被覆管に上部端栓を溶接する設備である。設備概念を図 5.1.13 に示す。

端栓溶接には、大電流による端栓と燃料ピン間の接触抵抗部の発熱により溶接する加圧抵抗溶接法を用いることとした。

端栓溶接装置は、端栓の供給冶具、燃料ピンを保持・燃料ピン側チャック に挿入するハンドリング装置、端栓と燃料ピンを溶接する溶接部と燃料ピ ン内を He ガスに置換するための装置により構成される。溶接部には、端 栓側チャックと燃料ピン側チャックおよび予熱用ヒータを内蔵した真空 チャンバ、加圧装置、抵抗溶接に使用する電源部により構成される。He ガス置換装置には、上記真空チャンバに接続された真空ポンプと He タン クと He 回収装置がある。

端栓溶接前の燃料ピンを単体でハンドリングすることは燃料飛散など の点で不安定であるため、燃料ピンマガジンにて運搬することとした。燃 料ピンマガジンの供給・排出は、移送台車にて行うこととした。

真空チャンバ部は、真空引き時間の短縮のためその空間体積を小さくす ることと燃料ピン挿入部のシール方法を検討する必要がある。

密度分布測定装置

設備概念を図 5.1.14 に示す。

燃料ピンの密度測定には、これまでの実績から 線透過法を採用した。 密度測定装置は、25本の燃料ピンを同心円状に配置するためのベッド

と、燃料ピンを軸方向に移動させると同時に軸廻りに回転させるための駆動装置を有している。また、測定部には、中心部にガンマ線発生装置、その 廻りにスリット、燃料ピンの外側に検出装置を同軸円状に配置し、25本の 燃料ピンの密度を同時に測定可能な構造とした。

燃料ピンは、燃料ピンマガジンからハンドリング装置により抜き出され、 密度測定装置のベッドに載せ、駆動装置にチャックされる。密度測定時に は、5mm ピッチで 線検査部をスキャンする構造とし、充填燃料の密度 を測定すると同時に、燃料スタック長さ(プレナム長さ)を測定する。こ の時、燃料ピンは駆動装置により回転させ、全周を平均的に測定する。

その他検査装置

その他の検査装置として、以下のものが必要となる。これらの装置は従 来技術を応用するものとし、概要のみを示す。

・除染装置

燃料ピン外面をスミヤ法により汚染度を調べる。

・ヘリウムリーク試験装置

燃料ピンの He 封入不具合を調べる。

・端栓溶接部検査装置

端栓溶接部の欠陥をX線検査により調べる。

・総合検査装置

カメラにより、外観のキズや寸法・曲がり量を検査。 線測定にて、 炉心燃料・ブランケット部の区分を検査。

なお、燃料スタック長さは、密度測定におけるスキャン位置から算出す ることとした。

# 集合体組立装置

燃料要素をラッパ間に挿入し、燃料集合体とする設備である。燃料集合体組立て装置は、現行のペレット燃料の集合体組立て装置と基本的に同等であるため、基本構造は同様とし、燃料集合体の組み立て方は組立済燃料 ピンを一括保持しエントランスノズルおよびラッパ管をかぶさるように 挿入する方式を、ラッパ管とエントランスノズルの継目を溶接する方法は TIG 溶接を採用した。

本装置の構成はパレット搬送台車で搬送されてくる燃料ピンパレット を受け取り次工程に搬送するパレット移送装置 I・II、燃料ピンパレット より燃料ピンを1本ずつ取り出し、整列台に燃料集合体1列分を整列させ る燃料ピン移送装置および燃料ピン整列移送装置、整列台上に整列された 燃料ピンを1列分ー括保持し、集合体組立部に搬送する燃料ピン吸着移送 装置、組立済燃料ピンを一括保持し、エントランスノズルおよびラッパ管 をかぶさるように移動し挿入する集合体組立装置、仮組みされた溶接前の 集合体をクランプし、組込み部から溶接部に搬送するための集合体移送装 置、搬送された集合体を水平から垂直に立てるための集合体ベッド起倒装 置、およびラッパ管とエントランスノズルの継目を全周 TIG 溶接するた めの溶接装置から成る。

### 集合体検査装置

燃料集合体検査装置は、現行のペレット燃料の集合体検査装置と基本的 に同等であるため、基本構造は同様とし、燃料集合体の曲がり、捩れ、幅 を測定するのにマグネスケールを、外観を検査するのに ITV カメラを採 用した。 本装置の構成は燃料集合体の曲がり、捩れ、幅を測定する幅、曲がり、 捩れ測定装置、外観を ITV カメラにより検査する外観検査装置、集合体 の全長を測定する全長測定装置、ラッパ管とエントランスノズルの溶接部 のビート高さを測定する溶接ビート高さ測定装置、および集合体下部の上 下2箇所をチャックする下部チャック装置から成る。

機器能力と台数の関係の例を表 5.1.3 に、主工程全体の設備構成を表 5.1.4 に示す。

(5)周辺設備

(i) 試薬回収設備

燃料製造工程からは、硝酸アンモニウムや IPA を含む廃液が発生する。これらを再処理施設に送液し硝酸系廃液とともに蒸発濃縮処理するためには、 硝酸アンモニウムおよび IPA を除去する必要がある。また、アンモニアおよび IPA は使用量が多いことから、廃棄物発生量およびプラントのインベント リを小さくするために、回収して再利用する。

主工程からの廃液は一旦形状管理した廃液受け槽に受け、核物質が未臨界 濃度であることを確認して回収設備に送る。廃液受け槽は試薬回収設備が故 障した場合でも修理の間主工程設備が運転できるよう、1日分の容量を持た せる。

試薬回収フローを図 5.1.15 に示す。廃液はアンモニア系廃液とアルコー ル系廃液とに大別できる。アンモニア系廃液は少量の硝酸アンモニウムを含 んでおり、蒸留と電解透析によってアンモニア水および硝酸を回収する。ア ルコール系廃液は蒸留によって IPA を粗分離した後、膜分離によって精製す る。回収したアンモニア水、硝酸、IPA、精製水は再利用される。

(ii)分析設備

本設備は、サンプリングベンチ等によりサンプリングした試料を分析セル 等に移送し分析する設備である。分析装置は試料の放射能レベルにより、プ ロセス側で要求される分析項目に対し、適切な分析方法を考慮して決定する。 分析セル等から発生する廃液は、有機相、水相、分析試薬添加の有無等によ り区分し、一時タンクに貯留後、中放射性廃液処理設備、または不良品回収 設備へ移送する。

検査・分析は、以下のように品質管理、工程管理の目的で行う。

品質管理上必要な分析項目

工程管理上必要な分析項目

a.臨界管理から必要な分析項目

b.核物質管理の面から必要な分析項目

c.環境への影響評価のために必要な分析項目

分析項目および分析方法を表 5.1.5 に示す。

(iii)保守・補修設備

故障した機器はモジュール交換により速やかな復旧を図る。故障品はイン セルクレーン(ICC)およびパワーマニプレータ(PM)を用いて除染セル に搬送し、除染した後に保守グローブボックス(GB)で修理する。ICC/PM が工程セル間を移動するためにメンテナンス用搬送通路で工程セルを連結 しトラバーサを使用する。ICC/PMによる作業を補助するため、主工程機器 毎にマスタースレーブマニプレータ(MSM)を設置する。

(iv) 除染設備

工程セルから搬出した故障モジュールを保守 GB にて修理するため、除染 セルにて除染する。

(∨)廃棄物処理設備

本設備は、再処理/燃料製造の各設備から発生する廃液を、放射能濃度に 応じて中放射性・低放射性・極低放射性に区分して受け入れ処理を行うとと もに、低放射性固体廃棄物を 系と 系固体廃棄物に区分して受け入れ、 別系統として処理、貯蔵する設備である。

工程廃液は前述の試薬回収設備でアンモニアおよび IPA を回収した後に、 残液を中放射性廃液として受け入れる。中放射性廃液の濃縮液は高レベル放 射性廃液処理設備へ送り、処理済液は低放射性廃液処理設備へ送る。低放射 性廃液の濃縮液は中放射性廃液処理設備へ送り、処理済液は極低放射性廃液 処理設備へ送る。極低放射性廃液の濃縮液は低放射性廃液処理設備へ送り、 処理済液は放射能濃度が海洋放出設備の受け入れ条件を満足していること を確認後、同設備へ送液する。

燃料製造設備から発生する固体廃棄物は、低レベル廃棄物(地層処分並)、 低レベル廃棄物(余裕深度並)に分類し、処理後の固体廃棄物はドラム缶収 納体として、一時保管設備(1年分)に受け入れ保管する。

(vi) 固体廃棄物貯蔵庫

プラントから発生する固体廃棄物は、容器に収納して貯蔵する。1年分の 容量の固体廃棄物貯蔵庫をプラント内に設置する。

(vii) ユーティリティ設備

本システムで使用する電力およびユーティリティを表 5.1.6 に示す。

(viii) 建・電・換設備

主建屋は地下1階、地上3階の鉄筋コンクリート造りで一部鉄骨鉄筋コン クリート造りとした。

建屋換気設備は各室内での機器類からの熱発生等に対処し、室内温度を調整するとともに、作業員を空気汚染等から防護するために設ける。設備構成は、給排気ファン、外気処理装置(フィルタ、加熱・冷却コイル、加湿装置等)、排気フィルタユニット、空調ユニット、ダクト・ダンパ、配管・弁類、計測制御機器等である。給気系はグリーン、アンバー区域としてそれぞれ外気を取り入れ、外気処理装置と給気ファンを設けて2系統とする。排気系はレッド区域を通過したものはすべて HEPA フィルタ2段のセル内排気フィルタユニットと排気ファンを、またアンバー区域は HEPA フィルタ2段の機械室系排気ユニットを通過させるものとした。また、外気は塵埃などによる汚染拡大の可能性を少なくするため、フィルタで除塵し、清浄な外気は冷却、加熱コイルと加湿装置により、除湿冷却あるいは加湿加温するものとした。

(ix)放射線管理設備

従業員の作業環境、作業内容、作業時間などを考慮し、本施設設計では、 遮へい、封じ込め機能、出入り口管理、汚染管理、線量率モニタリング、空 気モニタリングおよび個人モニタリングを実施することにより、被ばく線量 を可能な限り低減させる設計とした。本施設では給気室などの一部を除き、 管理区域を設定し、敷地、施設に対して適切な出入り管理を行い、出入り口 には放射線管理設備を設置し、従業員の汚染チェックが可能な管理を行うも のとした。

管理区域には必要な箇所に線量率モニタ、空気モニタ類を設置し、空間線 量率、空気中放射性物質濃度などの連続測定、監視ができ、中央監視システ ムにより、従業員の作業環境を良好な状態で維持できる設計とした。

環境への放射性物質の放出については、環境へ直接放出される可能性のあ る放射性気体廃棄物について放出前に濃度チェック、監視を行い、法令値以 下であることを確認することとした。

(×)新燃料貯蔵設備

1年分の新燃料貯蔵庫を設置する。

(6)配置検討

(
i)
セル内機器配置の検討

(a)機器配置の基本方針

主工程セル内機器の配置にあたっては、マテリアルハンドリングおよび保 守補修を考慮する。

- マテリアルハンドリングの方針を以下に示す。
  - ・機器間の湿潤ゲル球の搬送はラジアルスクリューポンプによる機械搬 送とする。
  - ・燃料要素加工工程では、被覆管を装着したマガジンを台車で搬送する ため、直線的な機器配置とする。
- また、保守補修の方針は以下に示す通りである。
  - ・軽微な故障は MSM を用いて補修する。
  - ・重度の故障は PM,ICC を用い、モジュールの交換により速やかな復 旧を図る。故障品は補修セルに搬送して修理する。

粒子製造設備のセルが大きくなることから、再処理施設、粒子製造施設および燃料要素組立・集合体組立施設はそれぞれ独立建屋とした。燃料製造施設全体の配置検討を以下の方針のもとに行った。

- ・燃料製造設備の各工程のストリームと放射能レベルを考慮し、被曝安 全上適切な構成とゾーニングを行う。
- ・主要プロセスの動線は設備配置が合理的になるように最短ルートとす る。
- ・放射性廃液等の各種廃液回収用貯槽は、地下階に配置し、各工程から の廃液は極力重力流で回収する。
- ・施設運転は、連続運転と常時監視を必要とする工程は、中央制御室主体で運転操作を行う。また中央で制御が難しい工程は現場主体の操作 とする。
- ・セルは、遮へい窓や ITV を通し、MSM、ICC 等により遠隔操作可能 な設計とする。
- ・セルの形状は、MSM での操作性を考慮し、セル幅を抑えた長尺セル とする。
- ・各セルには保守のために ICC と PM をセル内に設置し、遮へい壁に は必要箇所に MSM を設置し、保守する。
- ・保守については、プラント稼働率向上、作業員の被ばく低減を目的とし、定期保守、機器交換、補修等の頻度が高く、または除染困難な機器を有し、直接保守が容易でないセルを遠隔保守セルとする。具体的には、燃料要素への密封が完了し燃料要素表面の汚染が無いことを確認するまでの工程を完全遠隔保守セルとし、各セルには上階にICC保守セルを設けるとともに隣接してセル内機器用の保守セルを設け、セルとの取り合いは、セル間に遮へい扉を設け、台車またはICCで実施する。
- ・燃料の密封完了後の燃料要素検査工程以降の工程は、保守時は線源と

なる燃料要素又は集合体を隔離遮蔽できるようにしてセル内に人が 立ち入れる設計とする。

(b) 配置設計の概要

施設全体の配置イメージを図 5.1.16 に示す。

- その概要は以下のとおりである。
  - ・主工程設備(粒子製造ラインおよび振動充填ライン) 廃棄物処理、 ユーティリティ等の各設備を収容する燃料製造建屋、新燃料貯蔵建屋、 廃棄物貯蔵建屋および管理棟を配する建屋構成とする。
  - ・燃料製造建屋、新燃料貯蔵建屋および廃棄物貯蔵建屋間は地上1階に 連絡通路を設け、作業員および物品類と台車による燃料集合体および 固体廃棄物収納容器の移動作業の向上を図る。

燃料製造設備の主建屋および新燃料貯蔵建屋、廃棄物貯蔵建屋内機器配置 の概要は、以下のとおりとなった。なお、建屋寸法および建屋容積は外壁間 寸法を基準とし、セル容積はセル壁厚の内寸法を基準とする。

建屋容積は、粒子製造建屋 85.9 万 m<sup>3</sup>、燃料要素組立・集合体組立建屋 41.7 万 m<sup>3</sup>、新燃料貯蔵建屋 18.7 万 m<sup>3</sup>を合せて 146.3 万 m<sup>3</sup>である。

### 主建屋内配置

主建屋内には、燃料製造設備に含まれるすべての装置・機器と、廃棄物 処理設備、ユーティリティ設備、中央制御室を設置する。

粒子製造建屋のセル容積は主工程セル約 6.5 万 m<sup>3</sup>、付属セル(保守セ ル、分析セル)約 9.6 万 m<sup>3</sup>、廃液処理セル約 4.1 万 m<sup>3</sup>で、セル容積合計 は約 20.2 万 m<sup>3</sup>となった。建屋規模は地下 1 階、地上 3 階建てで、約 165m × 148m×高さ 44.5m である。振動充填・集合体組立建屋のセル容積は主 工程セル約 6 万 m<sup>3</sup>、付属セル(保守セル、分析セル)約 1.5 万 m<sup>3</sup>で、セ ル容積合計は約 7.5 万 m<sup>3</sup>となった。建屋規模は地下 1 階、地上 2 階建て で、約 198m×81m×高さ 26m である。

新燃料貯蔵建屋

新燃料貯蔵建屋は、地下1階、地上2階建てで、約68m×110m×高さ 25mである。

### 5.1.1.2 技術評価

(1)技術的成立性の評価

(i)基本プロセスの成立性

多成分系での粒子製造については、外部ゲル化法による MOX 燃料製造及 び内部ゲル化法による 5%Np 含有 MOX 燃料製造の海外実績がある。また、 窒化物燃料用に炭素粉末を添加した硝酸ウラニル水溶液からの粒子製造例 として、外部ゲル化法によるゲル球製造試験(C 添加量約 10wt%) <sup>5)</sup>及び内 部ゲル化法による窒化物粒子製造試験(C添加量約6wt%)<sup>6)</sup>が行われている。これらの成果から、MA及びFPがそれぞれ1.2wt%含まれてもプロセス 上問題となるようなゲル球の強度低下は起こらないと考えらる。

粒子の焼結性については、模擬 FP 含有 MA-MOX ペレットの調製試験に てペレットの焼結及び O/M 調整を行っており、この成果を適用することで 粒子燃料でもプロセスが成立する見通しを得ている。

燃料の高密度密度充填については、HfO2等の模擬物質を用いた短尺ピンへの振動充填試験により、充填密度 85% が得られている。

(ii) 量産性

(a)機器能力

マテリアルハンドリングで構成される燃料要素組立て・検査工程および集 合体組立て・検査工程は機器の動作をステップに分解し、ステップごとの操 作時間の積み上げにより機器能力を見積もった。

(b)安定操業の可能性

機器を構成する部品ごとに定期交換間隔および故障頻度を設定し、保守補 修のための設備停止時間を見積もった。

年間操業日数 250 日に対する定期交換のための停止日数は 41 日であり、 計画停止期間内で対応できる。また、修理のための停止日数は 4.2 日であり、 年間稼働日数 200 日を確保できる見通しを得た。

(2)安全性に係わる評価

(i)臨界安全

粒子製造工程の炉心燃料を扱うまたはその可能性のある装置および槽類 は形状管理によって単一ユニットの臨界安全を担保している。溶液の漏洩に 対してはドリップトレイで受け、形状管理した受け槽に貯える。

ピン加工工程では、ピンに充填する前の燃料粒子は形状管理した容器で取 り扱う。充填工程以降では、同時取扱い量が臨界質量の1/2 未満となるよう に設計したマガジンを単位として取扱うとともに、核燃料物質の受入れ・払 い出し信号及び核燃料物質の有無のモニタリング信号による搬送機器のイ ンタロック制御を行い、ダブルバッチによる臨界を防止している。装置間の 燃料の搬送機器は移動経路を固定し、核物質の異常な集積を起こさない設計 としている。

複数ユニットの評価については、十分な機器間距離を確保して機器配置を 行うことで、臨界安全が確保できるものとした。今後、経済性向上のためよ リコンパクトな機器配置を行う場合、複数ユニットの臨界評価が必要となる。

(ii) 火災・爆発防止

PVA は水溶液で扱うため、火災および爆発の恐れはない。

THFA は焙焼工程で引火点・発火点以上に加熱されるが、THFA 濃度が爆 発下限未満となるよう十分な焙焼ガス(空気)を流して穏やかに分解するこ ととし、その他の工程では引火点未満の温度で取り扱うことで火災・爆発を 防止する設計とした。

ゲル球の洗浄に用いる IPA は、同一セル内の機器で接点やリレー等を有す るものは防爆構造とするとともに、ガス検知器によって漏洩ガスの滞留を検 知することで、爆発を防止する設計とした。更なる対策としては、IPA を使 用するセル内雰囲気を窒素等の不活性ガスで置換する方法が考えられる。こ の場合、領域を区切り、置換する容積をできるだけ小さくする工夫が求めら れる。

還元および焼結に使用する水素ガスは不活性ガスで5%に希釈したもの を使用するため、爆発の恐れは無い。

ゲル化反応で副生する硝酸アンモニウムは水溶液の状態で扱い、電解透析 によって分解した後に廃液処理設備に送るため爆発の恐れは無い。

以上より、火災・爆発防止のための対策は可能であるが、特に IPA の使用 に関しては設備負荷が増大する可能性がある。

(iii) 耐震

安全審査指針では、核燃料物質の閉じ込め機能に係わる設備をクラスAに、 それ以外の主要設備をクラスBに分類している。本設計では、閉じ込め機能 はセルに閉じ込め機能を持たせているため、セル、セル換気系、およびその 電源がクラスAに該当する。さらに本設計では、核燃料物質を含む溶液を包 蔵する槽類をクラスAに設定している。したがって、本設計は指針と同等以 上の耐震性を有している。

(3)経済性の評価

(i)建設費

設備費および建屋費を表 5.1.7の基準システムプラントの欄に示す。

(ii) 操業費

操業費を内訳とともに表 5.1.8の基準システムプラントの欄に示す。

(iii) 燃料製造単価

(i)および(ii)の結果から算出した基準システムの燃料製造単価は 20.5 万円/kgHM となった。炉心燃料とブランケット燃料を合わせた平均燃焼度 63.1GWd/t のときの発電単価は 0.30 円/kWh となる。 (4)環境負荷低減性の評価

(i)廃棄物発生量

(a) 通常運転時の廃棄物

ゲル化振動充填燃料製造システムからは工程廃棄物として液体および気体廃棄物が発生する。

液体廃棄物として、粒子製造工程で発生する廃液から前述の試薬回収工程 でアンモニアおよび IPA を回収した残液が中レベル放射性廃液となる。その 発生量は 42m<sup>3</sup>/d である。中レベル放射性廃液は、再処理システムからの廃 液とともに蒸発凝縮処理を経て最終的に海洋放出される。濃縮液は高レベル 放射性廃液にまわされ、最終的にガラス固化体となり、高レベル廃棄物とし て処分される。ゲル化工程における核種の移行率については今後の要素技術 開発を通じた確認が必要であるが、アンモニア沈殿法で沈殿を形成しないア ルカリ金属、アルカリ土類金属元素(Rb、Sr、Ba、Cs)が全量移行するも のとした。これらの FP 重量からガラス固化体の発生量を年間 0.5 体と見積 もった。また、海洋放出される放射能は、再処理の高レベル放射性廃液から の移行率 10<sup>-9</sup>をもとに、中レベル放射性廃液からの移行率を 1.7×10<sup>-7</sup>とし、 年間 5.3×10<sup>9</sup>Bq と見積もった。

気体廃棄物として、乾燥、焙焼、還元、焼結工程でオフガスが発生する。 しかし、揮発性 FP はゲル化・熟成、洗浄工程で除去されるため、オフガス への核種移行は無視できるものと考えられる。

二次廃棄物として、保守補修に伴って交換された機器部品が不燃性固体廃 棄物となる。本システムは燃料微粉の発生が少ないことを特徴としている。 本設計では DF10 以上の除染を想定しており、ブランケット燃料を非密封で 取り扱うセルからの廃棄物は全量低レベル廃棄物(余裕深度並)として扱え るものとした。部品重量、交換頻度の積み上げにより評価した年間発生量は、 低レベル廃棄物(地層処分並)10.6t(2001ドラム缶 106 本)、低レベル廃棄 物(余裕深度並)3.9t(同 39 本)、クリアランスレベル以下の廃棄物 2.2t となった。

(b)廃止措置時の廃棄物

セル内機器重量は機器設計データに基づく。セルライナー重量は配置設計 に基づいて算出した非密封セルの内表面積にライナー厚さ5mm およびラ イナー比重 8.0 を乗じて算出した。またセル配置図から鉄筋およびコンクリ ート重量を算出した。廃棄物発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)7,200t (2001ドラム缶 72,000本)、低レベル廃棄物(余裕深度並)4,100t(同 41,000 本)、クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)21,500t、同(コ ンクリート)394,500t となった。

(ii) 廃棄物への移行率

核燃料物質の環境への移行経路としては、オフガス及び工程廃液を通じての移行と、交換廃棄される機器類に付着しての移行が考えられる。ゲル化スフェアパック法の特長として、燃料を溶液及び表面平滑な球状粒子の形態で取り扱うため、微粉の発生および機器類への付着が少なく、廃棄物を通じて系外に移行する核燃料の量は少ないと考えられる。

英国 BNFL での外部ゲル化法による MOX 振動充填燃料製造実績から受け 入れ量に対する製品収率 99.9%以上が報告されており <sup>7)</sup>、本システムにおい ても環境への移行率 0.1%未満を満足すると考えられる。

また、上記実績において、ゲル化・洗浄廃液への Pu 移行率として取扱い Pu 量1 t 当り5 g 未満と報告されており<sup>7)</sup>、工程廃棄物を通じた環境への 移行は非常に少ないと考えられる。

(5) 資源有効利用性

本システムは燃料微粉の発生・飛散が非常に少なく、工程からのロスは少 ないと考えられる。BNFL での実績として受入れ量に対する製品収率 99.9% 以上が報告されており <sup>7</sup>、本システムにおいても同等と考えられる。

(6)核拡散抵抗性

本システムにおいて、PuはUとともに硝酸溶液として供給される。製造 工程中、Puが単離される工程は無く、ゲル化工程でも Puは Uとともにゲ ル状沈殿を形成する。したがって、Puが単独で存在することはない。

本システムでは、溶液または表面平滑な球状粒子の形態で燃料を取り扱う ため、燃料微粉の発生および飛散が生じにくく、設備のホールドアップは少 ないと考えられる。

計量管理の観点からは、溶液状態で Pu 富化度調整を行うため、顆粒単位 での Pu 富化度は均一と考えられ、サンプルによる成分分析値と秤量値から Pu 量の把握は可能である。

上記から、MBA内の核物質管理は、計算により現行と同程度の精度で見 積もりが可能である。ただし、機器毎の核物質量の確定は技術検討が必要で ある。

(7)システム合理化策の検討

(i)粒子製造工程の顆粒搬送方法見直し

基準システム設計では、焙焼・還元・焼結工程において工程間の顆粒搬送 を重力搬送によって行っており、工程セルは1階から3階までの吹き抜けと なっている。これを機械搬送とし、すべての機器を1階に配置することで、 焙焼・還元・焼結工程のセル長さは若干長くなるがセル高さを1階分に抑え ることができる。これによって、建屋の2階、3階部分の保守セルおよびメ ンテナンス用搬送セルが削除できる。また、保守用の ICC および PM が配 管等に遮られることなくセル内を走行できるようになるため、1 階部分のメ ンテナンス用搬送セルは1 列で済み、メンテナンス用搬送セル間の移動に使 用する移動セルが不要になる。

顆粒の搬送装置には、顆粒の飛散防止への配慮が必要である。

この合理化によって、粒子製造建屋容積を約3割削減できる。顆粒搬送装置のコストが追加となるが、乾燥ゲル球搬送設備の簡略化、メンテナンス用 搬送セルの削減で吸収されるものとしている。

(ii)振動充填・集合体組立建屋の省スペース化

振動充填工程でピンを立てて取扱い鉛直方向のスペースを要する工程で は、地下1階から地上1階までの吹き抜けとなっており、十分な空間が確保 されている。そこで、今後更に設備の低床化が可能なものとして、地下1階 および地上1階のセル高さをそれぞれ1m削減した。また、ユーティリティ 室の床面積が、大量の試薬類を使用する粒子製造工程と同程度確保されてい るが、ピン加工、集合体組立・検査工程でのユーティリティ使用量は少ない と考えられるので、これらを含む2階部分の容積を半分とした。これらによ って、振動充填・集合体組立施設の建屋容積を約2割削減した。

ピン検査工程での検査項目は簡素化ペレット法と同じであり、ピン取扱い 上の制約も特にないため、簡素化ペレット法で検討している設備が配置でき るものと仮定して、ピン検査工程の設備費を簡素化ペレット法におけるピン 検査工程の設備費と同等とした。

セル高さの削減については、マテリアルハンドリング機器や保守補修機器 との干渉の有無について検討が必要である。また、周辺設備については、今 後の設計詳細化っともに適切な容量を確認する必要がある。

(iii)粒子製造工程のメンテナンス方法の見直し

基準システム設計では、全ての機器に対して MSM によるアクセスが可能 となるように、セルの両面に保守通路を設けている。セル内機器への直接ア クセスが ICC、PM のみで保守・補修できるなら、全ての機器に MSM でア クセスできる必要はなくなる。このような仮定のもとに、粒子製造設備の MSM の配置をセルの片側のみとし、2 セルを隣接することで保守通路の数 を削減する。

また、基準システム設計において除染セルおよび補修セルが製造ラインご とに設けられているが、複数機器の修理を同時並行で行わなくても必要な年 間稼動日数を確保できる見通しが得られているので、予備を考慮して、炉心 燃料製造ライン用に2セル、ブランケット燃料製造ライン用に1セルとする。

この合理化により粒子製造施設の保守補修設備費が 1/2 になる。また、保

守通路、補修セルの削除分建屋容積が小さくなる。

この保守補修方式では、MSM によるアクセスができない設備が存在する ため、ICC/PM おみによる保守補修の成立性確認が必要である。

(iv)ゲル球洗浄方法の見直し

基準システム設計ではゲル球の洗浄は洗浄液を連続的に流す方式となっている。洗浄方法の改良によって洗浄廃液量を低減できると、試薬回収および廃液処理設備コストを削減できる可能性がある。

洗浄水使用量を 1/2 に削減できた場合、ブランケット燃料製造ライン用の 試薬回収設備が1系列削減でき、1セルを削減できる。また、再処理と共用 の廃液処理設備の負荷も低減され、機器費および設備容積の燃料製造按分は ともに約4割削減できる。

洗浄液使用量については、要素技術開発を通じて、洗浄槽の台数に影響す る洗浄時間を考慮にいれて最適化を図る必要がある。

以上の合理化ができた場合、建屋容積 95.1 万m<sup>3</sup>(35%削減) 建設費 2494 億円(28%削減)となり、燃料製造単価は 17.2 万円/kgHM となる。

その他の合理化方策として、以下に示す合理化の可能性がある。

焙焼炉・還元炉

焙焼炉と還元炉をバッファを介さずに接続することで、焙焼後の冷却お よび還元炉での再加熱を削除し、炉の長さを短縮できる可能性がある。

振動充填装置

振動時間の最適化、大粒子・小粒子の同時装填により1マガジン当りの 振動充填時間を約1時間短縮できる可能性がある。この合理化によって、 機器数を削減することはできないが、設備野力に余裕が生じ、操業費を削 減できる可能性がある。

密度分布測定装置

測定ピッチを10mmに拡大できると測定時間を約1/2に短縮できる可能 性がある。また、高エネルギーX線を用いたX線CTを適用することで、 燃料の放射能の影響を低減しつつ多数の燃料ピンを同時に短時間で測定 できる可能性がある。X線CTの適用例として、模擬振動充填燃料の密度 分布測定<sup>8)</sup>及び照射済み燃料集合体の非破壊検査9)がある。低除染燃料に X線CTを適用するためには、小型高輝度の線源が必要となる。

### 5.1.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

(1)経済性重視型炉心対応システムの検討

(i)システム概念構築

経済性重視型炉心に対応した年間製造量 200tHM の燃料製造プラントに おける内側炉心燃料、外側炉心燃料、軸方向ブランケット燃料の年間製造量 内訳は歩留り 90%を考慮してそれぞれ、82.0tHM、68.7tHM、71.5tHM と なる。これは基準システムプラントにおける内側炉心燃料、外側炉心燃料、 ブランケット燃料の年間製造量内訳に対してそれぞれ、1.89 倍、1.87 倍、 0.505 倍となっている。

燃料ピンの年間製造数は内側炉心燃料および外側炉心燃料でそれぞれ 156,955 本/y および 131,204 本/y であり、基準システムプラントに対して それぞれ 1.11 倍および 1.10 倍である。

集合体の年間製造数は内側炉心燃料および外側炉心燃料の合計で 1,299.1 体/y であり、基準システムプラントの炉心燃料集合体製造数に対して 1.38 倍である。

径ブランケットを削除し、原則として基準システムプラントと同一の機器 を用いて炉心燃料集合体のみを製造する場合について検討する。

### 主工程機器

必要となる機器数を表 5.1.9 および表 5.1.10 に示す。

経済性重視型炉心対応プラントにおける炉心燃料の粒子製造工程の機器数は、小粒子用の還元炉および焼結炉を除き、基準システムプラントの2倍となる。小粒子用の還元炉および焼結炉は能力に余裕があるため、内側炉心および外側炉心用に基準システムプラントと同様それぞれ1台となる。基準システムプラントと同様のセル内機器配置を行うと、ゲル化・熟成~乾燥工程で内側炉心および外側炉心の大粒子用に各3セル、同じく小粒子用に各2セル、焙焼・還元・焼結工程で内側炉心および外側炉心の大粒子用に各2セル、同じく小粒子用に各1セルとなる。

軸方向ブランケット燃料粒子製造ラインについては、台数を削減するま でには至らず、基準システムプラントと同じ構成となる。

ピン加工では、ブランケット燃料製造ラインが削除され、炉心燃料製造 ラインは各ラインで機器を1系列追加する必要がある。この結果、セル容 積はほとんど変わらない。集合体組立・検査工程では、ピン製造量がほと んど変わらないので基準システムプラントと同じ構成となり、機器数およ びセル容積に変更はない。

試薬回収設備

試薬回収設備本体は物量が変わらないので基準システムプラントと同 じであるが、炉心燃料製造ラインからの廃液受け槽の数が2倍となり、そ れに対応して1セル追加となる。これは、核物質濃度が確定するまで、円 環槽によって形状管理しており、槽の大型化による大容量化がセル内配置 上困難なためである。

保守補修設備

粒子製造工程について、主工程の系列数の増大に応じて除染セルおよび 保守セルを追加する。

ユーティリティ

ユーティリティ使用量は燃料製造量に依存すると考えられるので、基準 システムプラントと変わらない。

建屋・電気・換気設備

基準システムプラントを基準として、セル容積に比例するものとして考 える。

(ii)経済性および環境負荷低減性に関する検討

(a) 経済性

建設費

設備費および建屋費を表 5.1.7 の経済重視型プラントの欄に示す。

操業費

操業費を内訳とともに表 5.1.8の経済重視型プラントの欄に示す。

燃料製造単価は 22.5 万円/kgHM となる。平均燃焼度 110 GWd/t のときの 発電単価は 0.19 円/kWh となる。経済性重視型炉心対応プラントでは炉心燃 料の製造量の増大が機器数およびセル容積の増大につながる一方で、ブラン ケット燃料製造量の減少は機器数およびセル容積に影響しないため、全体と して基準システムプラントよりも燃料製造単価が高くなるが、平均燃焼度が 高いため発電単価は安くなる。

(b) 環境負荷低減性

工程廃棄物としての廃液発生量は年間製造量に依存しているため、基準シ ステムプラントとほぼ同じである。高燃焼度化により FP 含有率が増大する と、再処理製品中の Cs・Sr 含有量に応じてガラス固化体本数が増加する。 しかし、再処理からのガラス固化体発生本数に比べるとごく僅かであり寄与 は小さい。二次廃棄物発生量は、炉心燃料製造量の増大に伴い、炉心燃料を 非密封で取り扱う粒子製造工程の炉心燃料製造ラインの機器数が2倍に増 え、低レベル廃棄物(地層処分並)発生量が基準システムプラントに比べて 増大する。年間廃棄物発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)15.9t(200 1ドラム缶 159本)、低レベル廃棄物(余裕深度並)3.7t(同 37本)、クリ アランスレベル以下の廃棄物 2.2t となった。

廃止措置時の廃棄物も、粒子製造工程の炉心燃料製造ライン機器数の増大の結果、低レベル廃棄物(地層処分並)11,100t(2001ドラム缶111,000本)、低レベル廃棄物(余裕深度並)3,500t(同35,000本)、クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)28,200t、同(コンクリート)560,400tとなった。

### 5.1.3 技術開発項目

ゲル化振動充填燃料製造システムの開発課題を表 5.1.11 に示す。そのうち 主要な開発課題について以下に述べる。

(1)プロセス成立性に係わる開発課題

プロセス成立性に係わる主要な技術開発項目を以下に示す。

粒子製造条件の最適化

多成分系での粒子製造としては、Pu 富化度 30%の高除染 MOX 及び Np 5%を含有した Pu 富化度 30%の高除染 MOX の例があるのみで、MA 及び 雑多な FP を含有した系での例は無い。このような多成分系でのゲル化条 件や均質な顆粒を得るための焼結条件を、小規模ホット試験を通じて把握 し最適化することが重要である。

燃料粒子の高密度充填

小規模試験では短尺ピンを用いて高密度充填のための充填条件や重点 挙動の把握を行っている。これらの成果を踏まえ、工学規模試験では長尺 ピンでの高密度充填のための充填条件の最適化が必要である。

高発熱燃料の取扱い

製造工程における燃料発熱の影響を把握しておく必要がある。

(2) 量産性に係わる開発課題

マルチノズルからの安定滴下

機器単体の生産性を高めるため、ゲル化反応槽の振動滴下装置は複数ノ ズルから同時に滴下する構造としている。全てのノズルから安定して滴下 するための条件把握が量産性確保の上で重要である。

複数ピンの同時振動充填

本設計で採用した複数ピンの同時浸透充填についてはこれまでに実績 がない。小規模試験での成果を踏まえ、工学規模試験にてピン間の密度均 一性を確認する必要がある。

(3)安全性に係わる開発課題

IPAの代替溶媒の選定

本システムでは、湿潤ゲル球の洗浄に IPA を使用している。引火点以上の温度での取扱いとなるため、電気接点等を防爆構造とするなどの設備対応によって火災・爆発を防止しているが、高引火点の代替溶媒が使用できれば安全性が大幅に向上する。

(4)経済性に係わる開発課題プロセスの合理化

-175-

機器及びラインとしての製造能力を向上し機器数を削減するために、小 規模試験、工学規模試験を通じてプロセス条件の最適化を図り、機器設計 に反映することが重要である。

機器配置の合理化

本システムでは特に粒子製造工程のセル容積が大きく、建設費を押し上 げている。マテリアルハンドリングを見直し、よりコンパクトな機器配置 とする。

集合体構成部材の低価格化

被覆管、ラッパ管、エントランスノズル等の集合体構成部材の安価な加 工方法を開発する。

(5)環境負荷低減に係わる開発課題

廃液処理・リサイクル技術の確立

試薬回収技術として、廃液中の FP やスケールの透析膜性能への影響を 把握することが重要である。また、廃液処理設備の負荷低減のため脱塩水 の再利用可能性の検討が有効である。

廃棄物への核種移行量の定量的評価

ゲル化振動充填燃料製造システムは、定性的には微粉発生が少なく、環 境負荷低減性に優れたシステムとされている。しかし、簡素化ペレット法 でも環境への移行率 0.1%未満と見積もられており、システムの優位性を 示すには定量的評価が必要である。これは、資源有効利用性、核拡散抵抗 性にも関連する技術開発課題である。

分析サンプルサイズ、サンプリング頻度の最適化

現設計では分析サンプルは全量廃棄物となる。核種移行率の更なる低減 として 0.01%未満を目指すとき、分析サンプルの量が無視できなくなる (1日の製造量1tに対して100g)。この場合、サンプルの代表性を維持 しながら、分析サンプル量、サンプリング頻度の最適化が重要となる。

(6)核拡散抵抗性に係わる開発課題

核物質滞留量の確認方法

機器への核物質滞留量の多寡にかかわらず、これを確定するための測定 技術の確立は保障措置上重要である。

(7)運転・保守補修性

運転自動化技術の開発

本システムではセル内製造であり、機器の運転状況を直接確認及び制御 することは困難である。また、セル内では多数の機器が互いに連携を取り ながら動作することになる。このため、リモートセンシング及び自動制御 技術の開発が重要である。

参考文献

- 1) 西村他、「振動滴下装置を用いたウラン粒子燃料製造に係る外部ゲル化試験」 JNC TN8430 2001-005 (2001)
- 2) 尾上他、「小径粒子滴下ウラン試験」JNC TJ8400 2001-040 (2001)
- 3) 森平他、「外部ゲル化法による大径粒子製造技術開発」日本原子力学会 2003 年春の年会予稿集, B12 (2003)
- 4) 比内他、「振動充填燃料の充填技術開発(5) 燃料ピン構造による影響 」 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, E9 (2002)
- 5) 渡海他、「ゲル化法による湿式顆粒製造試験報告書」JNC ZJ1005 95-001(1995)
- 6) G.Ledergerber et al., "Preparation of uranium nitride in the form of microspheres", *J. Nucl. Mater.*, **188**, 28-35(1992)
- 7) R.L.Nelson et al., "U.K. DEVELOPMEMT TOWARD REMOTE FABRICATION OF BREEDER REACTOR FUEL", Nucl. Technol., 53, 196-203(1981)
- 8) 永田他、「マイクロフォーカス X 線 CT 法による振動充填燃料の内部構造 の分析」JNC TJ8430 2003-002 (2003)
- 9) 永峯他、「高エネルギーX線 CT を利用した非破壊照射後試験技術の開発」 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2(2002)
| ~ `        |
|------------|
| ~          |
| 2          |
| $\geq$     |
| Т          |
| ð          |
| õ          |
| $\sim$     |
| 1          |
| 1          |
| ιĽ         |
| ירי        |
| R          |
| N          |
| <b></b>    |
| 票          |
| нКu        |
| THK1       |
| *          |
| 雫          |
| ++         |
| *          |
| ₩          |
| њКu        |
| THE T      |
| 6          |
| *          |
| ✷          |
| 然          |
|            |
| -          |
| <u>`</u> . |
|            |
|            |
| ₩Ŷ         |
|            |

炉心仕様	単位	内側炉心燃料	外側炉心燃料	径方向ブランケット
	<u> </u>	味らる	味らる	味らる
山田の一日の日本	MWe		1,500	
「「「「」」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「	MWth		3,570	
運転サイクル長さ	ヶ月		17	
は一部である。	-		1.2	
集合体配列ピッチ	шш		179.7	
燃料交換バッチ数	バッチ	7	4	4
集合体数	体	316	266	198

燃料集合	<b>合体仕様</b>	単位	内側炉心燃料集合体	外側炉心燃料集合体	径方向ブランケット 集合体	
∢₩	長	mm	4,370	4,370	4,370	
燃料要引	素の本数	本/体	271	271	127	
	炉心燃料		76.6	76.7	0	
	ブランケット燃業キ	kg-HM/体	72.9	72.9	184.2	
	合計		149.5	149.6	184.2	
			内個叱戶心够業生	た米 洋外 パープ ロイトローク	な古向ブランケット燃料	

				- 460 40 4		NU-141		
	日来什样	近行	内側が	心 然然 本斗	外側分	いい 然然 本斗	径万回ファ	2
K&+13	て発口係	五 十	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子	大粒子	
Æ	長	шш	2,9	05	2,5	305	5'2	905
被覆	管内径	mm	7.5	50	7.	50	11	<u>.</u> 06:
łт Щ	炉心燃料	8	80	0	õ	00		0
κ υ	ブランケット燃業斗		20	0	7	00	1,1	500
	炉心燃料		212	71	212	71	0	
∎ ₩	ブランケット燃業キ	g-HM/本	202	67	202	67	1,088	
	令		55	5	ŭ.	52	1,	451

耐震クラス	設備
クラス A	セル、セル換気設備、セル換気設備電源、溶液受入れから
	乾燥までの主工程設備、廃液受入れ槽
クラス B	焙焼以降の主工程設備、試薬回収設備、その他セル内機器
クラス C	その他の設備

表 5.1.2 耐震区分

表5.1.3 (1) 機器能力と台数設定
(粒子製造工程:内側炉心燃料大粒子製造ライン)

<b></b>		機器能力及び台数	
衣且有你	設計処理能力	要求処理能力	機器台数
溶液調製槽	20kgHM/バッチ 8バッチ/日 (160kgHM/日)		1
反応·熟成槽	7kgHM/バッチ 8バッチ/日 (56kgHM/日)		3
洗浄槽	7kgHM/パッチ 浄槽 4バッチ/日 (28kgHM/日) 160kgHM/		6
乾燥装置	4kgHM/バッチ 8バッチ/日 (32kgHM/日)		6
焙焼炉	53kgHM/日		3
還元炉	160kgHM/日		1
焼結炉	160kgHM/日		1

### 表5.1.3 (2) 機器能力と台数設定 (燃料要素組立・検査工程:内側炉心燃料製造ライン)

壮军々称		機器能力及び台数	
衣直石柳	設計処理能力	要求処理能力	機器台数
顆粒供給装置	100本/バッチ 1.5h/バッチ (1600本/日)	炉心: 710本/日 軸ブラ:710本/日	2
振動充填装置	100本/バッチ 6h/バッチ (400本/日)		2
端栓溶接装置	100本/バッチ 6h/バッチ (400本/日)		2
密度検査装置	25本/バッチ 2h/バッチ (300本/日)		4
除染装置	25本/バッチ 0.7h/バッチ (800本/日)		4
Heリークテスト	25本/バッチ 2h/バッチ (300本/日)	710本/日	4
端栓溶接部検査装 置	25本/バッチ 20min/バッチ <u>(1800本/日)</u>		1
ワイヤ巻付装置	25本/バッチ 70min/バッチ <u>(500本/日</u> )		2
燃料ピン総合検査 装置	25本/バッチ 80min/バッチ <u>(450本/日)</u>		2
燃料ピン洗浄装置	25本/バッチ 25min/バッチ (1440本/日)		1

### 表5.1.3 (3) 機器能力と台数設定 (集合体組立・検査工程:炉心・ブランケット燃料製造ライン)

<b></b>		機器能力及び台数	
衣且口你	設計処理能力	要求処理能力	機器台数
集合体組立装置	4体/日	6.5休/日	2
集合体検査装置	29体/日	0.5 ф / Ц	2

		内側炉	心燃料	外側炉	心燃料	ブランケ	ット燃料
	慨岙石杺	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子
	溶液調製槽	1	1	1	1	1	1
	反応·熟成槽	3	2	3	2	2	2
	洗浄槽	6	2	6	2	4	2
粒子製造工程	乾燥装置	6	2	6	2	2	2
	焙焼炉	3	1	3	1	1	1
	還元炉	1	1	1	1	1	1
	焼結炉	1	1	1	1	1	1
	顆粒供給装置	2			2		1
燃料要素組 立·検査工程	振動充填装置		2		2	,	1
	端栓溶接装置		2		2	,	1
	密度検査装置	4	1		2	,	1
	除染装置	4			2	,	1
	Heリークテスト	4		2		1	
	端栓溶接部検査装置	1		1		1	
	ワイヤ巻付装置	2		2		1	
	燃料ピン総合検査装置		2	2		1	
	燃料ピン洗浄装置		1		1		1
集合体組立	集合体組立装置				2		
検査工程	集合体検査装置				2		

表5.1.4 基準システムプラントの主要機器台数

工程	試料名	分析項目	分析方法	表 2.1.5 分析項 品質 <u>工程管理</u> 分析 保証 品質 臨風 核會 禮谱 時間	(目及び分析方法 装置概略寸法	試料採取位置	液体試料 採取量	固体試料 採取量	鋪光
1 公共	<b>写 火</b> 1:次	日前日	<u>雷</u> 位美语定法	/////////////////////////////////////	1000 × 1000 × 1000Hmm	宣化 色细敕 捕内	(ml/回) 1	(回/0)	
	X1/L-1 /1/	L UNRIX U濃度	電位差洞定法	30	1000 × 1000 × 1000Hmm	■IU/Zeneza 同上			
と言う	<u> </u>	粘度	プロセス用振動式粘度計(インライン )   <sub>雷位至 23</sub> 231		インライン <u> </u>	滴下液混合槽内 遮干,站止捕%			
70 JJ	<b>アノトーン 宪波</b>	r u,底皮 U濃度	<u>亀</u> 诎在鸠佐広 電位差滴定法	30	と同り法(共用) と同寸法(共用)	滴下・ 税 成 備 後 い 及 心 焼 液 備 同 上			
		Am濃度 子/#///////////////////////////////////	線スペクトル分析 ガスクロフトガミコハギ	0000	1000 × 1000 × 1000Hmm				
		17/#1/101 (1917) N03濃度	<u> </u>	30	500 × 500 × 1000Hmm	同上			
	キダ原がくせく	不純物(金属)	ICP-AES  == (A-至   弦空 : +	30	1000×2000×1000Hmm LE++ / ++ E /	単式値次からの調査を見			
-	九浔箎液(小)	FUi)很多。 III 進度	<u></u>	30	と回っば(共用) と同さば(井田)	沈冲表直仮い沈津焼液帽 同 ト			
		omero Am濃度	「「協工の」の「「「「「「」」の「「「「」」の「「」」の「「」」の「「」」の「「	09	と同寸法(共用)				
		pH 不在地/ / 按线/	<u> 早計( インライン ) </u>		インライン ・回ナキ・キー、	10	-		
		1/2:1/1 (19 132) NO3:連度	/ / / / / / / / / / / / / / / / / / /	30	「同っ法(共用)				
		<u>不純物(金属)</u>	ICP-AES	300	と同寸法(共用)	1 L D			
	先净廃液(IPA)	Pu濃度	電位差滴定法 重位差流定法	30	と同寸法(共用)	洗浄装置後の洗浄廃液槽	<del>،</del> -		
		U) 一 D M m 	電仏を渦足法     線 スペクトル分析	80	と同い法(共用) と同れ法(共用)				
		不純物(有機)	旅会 つくトグラフ分析	30	と同寸法(共用)	14			
		N03濃度 - 7/1/// / 今 = /	イオンクロマトグラフ分析	30	と同寸法(共用)	10			
1		1/能彻(亚周)	101-AEO		<b>こ回り返く共用</b> )	乾燥装置~乾燥ゲル球貯槽間	-		
	乾燥ゲル球	<b></b>	近赤外線式(インライン)		インライン	計量供給装置			
	<b>垒/</b> 曲 F <del>X</del>	令大孩	活赤外 綿井 (インライン)		インモイン	焙焼炉 ~ 焼絽炉 計量供給装置			
	<u> </u>	早均粒径	<u>CCDカメラ+光学顕微鏡+画像解析</u>	30	1000 × 1000 × 1000Hmm	焼結球貯蔵容器		1	
		真球度	CCDカメラ+光学顕微鏡+画像解析	30	と同寸法(共用)	19 1		-	
		表面観察 内部錮薮	0CDカメラ+光学顕微鏡+画像解析 樹晗+冊シス ヵ/研藤準署ュ米学館漁篷+0CD+45	30	と同寸法(共用) 1000~2000~1000Hmm	T T T T T T T T T T T T T T T T T T T		- ¢	樹脂細ジュ並署1研藤姓署の大きよ
		比表面積	低温物理吸着法	30	1000 × 1000 × 1000Hmm			2 m	···································
		感度	定容積膨張法(乾式)	30	500 × 500 × 200Hmm			en S	
		から脱版	JIS準拠  1、一ず回拓・勘到は	30	500 × 500 × 1000Hmm 1000 × 1000 × 1000Hmm			- 20	JIS K1628 ファインセフミックス粉末のかさ密度測定万法(1997)
		<u> </u>		30	1000 × 1000 × 1000Hmm	14		- 2	ASTMでは、五酸化リンを利用した電解セル方式
		0/W	酸化還元重量法	120	1000 × 1000 × 1000Hmm	1-		5	
		Pu站有举 II令右寂	酸化重量活酸化香旱注	120	1000 × 1000 × 1000Hmm	II E		ы С	
		0台语举 (Pu同位体组成)	敗112里里/云  1CP-MS	240	1000 × 2000 × 1000Hmm			o <del>-</del>	
		(1)同位体組成)	ICP-MS	240	と同寸法(共用)	14		- <del>-</del>	
		MA濃度	線スペクトル分析	60	1000 × 1000 × 1000Hmm	1 E		-	
		(FP濃度) AI	ICP-AES ICP-AES	240	と同寸法(共用) と同寸法(共用)	11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 1			ASTMIt 直流アークプラズフ発米公米公析
		0	ガスクロマトグラフ分析(Cを燃焼後C02分析	60	と同寸法(共用)	同上		· -	C、N、Hの同時測定可能
		Ca+Mg	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	-Ц- С		-	ASTMは、直流アークプラズマ発光分光分析
		5. C	ITンクロくトクラノが桁 ICP-4FS	240	と同り法(共用) と回れ深(井田)				ASIMIA、電気化子的分析法(イイノ選択性電極) ASTMIA 首流アークプラズマ発米公米公析
		00	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	14			West March Active Act
		Cu	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	日上		-	
		F U/A-V=V	イオンクロマトグラフ分析 ガネクロプトグラコ公托/詳料雑棟後U20公托	240	と同寸法(共用) と回斗洋(井田)	10			ASTMLA、電気化学的分析法(イオン選択性電極) C N UMの回時測を記念
		n(王小系) Fe	ノノ人ノ コ く トン フ ノ ガ ヤロ ( 試 セート タタ)洗 (を ロ < U び ヤロ ( ご) ヘ + ト%)洗 (を ロ < U び ヤ I   I C P - ۵ F S	240	C回りば(共用) と同寸法(共田)				O、N、INO/回時測定り肥 VSTMけ 直流アークプラズマ斑米公米公析
		Pb	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	1 1 1 1			
		Mn	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	1 E		1	
		Mo N:	ICP-AES	240	と同寸法(共用) レ同六は(井田)	부명			24/2 赤 X 字 M ー デ ー デ A 字 A + M H 3 v
		N(含窒化物)	INF-MES ガスクロマトグラフ分析(試料加熱後N2分析	240	と同寸法(共用)	10			Adimite、 1mm、
		P	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	e T		1	
		Si To	ICP-AES	240	と同寸法(共用) と回斗洋(井田)	10			ASTMIは、直流アークプラズマ発光分光分析
		Th	107-AES 100-AFS	240	「回っ法(共用) と同さは(共田)			-	ASTMH
		Sn	ICP-AES	240	と同寸法(共用)				volmio、山川ノ ノノノストガルジルジョン
		Ti	ICP-AES	240	と同寸法(共用)	1 E		-	
		M	ICP-AES	240	と同寸法(共用) レ同寸法(井田)	1 E			
		Zn	ICP-AES	240	と同うば(共用)と同寸法(共用)				
		<u>有機物濃度</u>	ガスクロマトグラフ分析	240	と同寸法(共用)	14		~	
		重重	ロードセル(インライン)		インライン	同上			

### JNC TN9400 2004-036

名称	用途	使用量
電力		81000 kWh/d
プロセス冷水(常用)	乾燥機廃気凝縮機	1000 m <sup>3</sup> /d
プロセス冷水(非常用)	崩壊熱除去	130 m <sup>3</sup> /d
プロセス冷水(非常用)	焼結炉冷却	260 m <sup>3</sup> /d
プロセス冷却水(常用)	オフガス冷却	780 m <sup>3</sup> /d
圧縮空気(常用)	焙焼ガス、焙焼炉・還元炉冷却	210000 Nm <sup>3</sup> /d
H2-N2	還元ガス・焼結ガス	6400 Nm <sup>3</sup> /d
1.5%PVA水溶液	滴下溶液調製	1000 I/d
1.0%PVA水溶液	滴下溶液調製	260 I/d
THFA	滴下溶液調製	3300 I/d
アンモニア水	ゲル化	13 m <sup>3</sup> /d
アンモニアガス	ゲル化	78 Nm <sup>3</sup> /d
純水	ゲル球洗浄	41 m <sup>3</sup> /d
イソプロピルアルコール	ゲル球洗浄	20 m <sup>3</sup> /d
10N硝酸	スクラップ溶解	730 l/d
濃硫酸	試薬回収(電解透析)	13 kg/d
水酸化ナトリウム	試薬回収(電解透析)	10 kg/d
Не	燃料要素内充填	1.2 Nm3/d

表5.1.6 電力及びユーティリティ使用量

業務分担費

操業費合計

事業税

	費用(億円)			
項目	基準システム	経済性重視型炉心		
	プラント	対応プラント		
主工程設備費				
粒子製造工程	218	364		
燃料要素組立・検査工程	357	357		
燃料集合体組立・検査工程	61	61		
保守・補修設備費、共通設備費	614	681		
建屋・電気・換気設備費	1825	2,104		
新燃料貯蔵建屋・設備費	397	397		
建設費合計	3472	3,963		

表 5.1.7 建設費内訳

	費用(億円)			
項目	基準システム	経済性重視型炉心		
	プラント	対応プラント		
人件費(人員 300 人)	27	27		
修繕費(機器交換費、定検材料費)	37	43		
消耗品等諸費(補充 U、ユーティ	26	29		
リティ含む)				

13

6

110

15 7

121

表 5.1.8 操業費内訳

表5.1.9 (1)	経済性重視型炉心対応プラントにおける機器能力と台数設定
	(粒子製造工程:内側炉心燃料大粒子製造ライン)

<b></b>	機器能力及び台数					
衣且白竹	設計処理能力	要求処理能力	機器台数			
溶液調製槽	20kgHM/バッチ 8バッチ/日 (160kgHM/日)		2			
反応·熟成槽	7kgHM/バッチ 8バッチ/日 (56kgHM/日)		6			
洗浄槽	7kgHM/バッチ 4バッチ/日 (28kgHM/日)	290kgHM/日	12			
乾燥装置	4kgHM/バッチ 8バッチ/日 (32kgHM/日)		12			
焙焼炉	53kgHM/日		6			
還元炉	160kgHM/日		2			
焼結炉	160kgHM/日		2			

### 表5.1.9(2) 経済性重視型炉心対応プラントにおける機器能力と台数設定 (燃料要素組立・検査工程:内側炉心燃料製造ライン)

壮军夕称	機器能力及び台数					
衣且石朳	設計処理能力	要求処理能力	機器台数			
顆粒供給装置	100本/バッチ 1.5h/バッチ (1600本/日)	炉心: 785本/日 軸ブラ:785本/日	2			
振動充填装置	100本/バッチ 6h/バッチ (400本/日)		2			
端栓溶接装置	100本/バッチ 6h/バッチ (400本/日)		2			
密度検査装置	25本/バッチ 2h/バッチ (300本/日)		4			
除染装置	25本/バッチ 0.7h/バッチ (800本/日)		4			
Heリークテスト	25本/バッチ 2h/バッチ <u>(300本/日</u> )	785本/日	4			
端栓溶接部検査装 置	25本/バッチ 20min/バッチ <u>(1800本/日</u> )		1			
ワイヤ巻付装置	25本/バッチ 70min/バッチ <u>(500本/日</u> )		2			
燃料ピン総合検査 装置	25本/バッチ 80min/バッチ <u>(450本/日)</u>		2			
燃料ピン洗浄装置	25本/バッチ 25min/バッチ (1440本/日)		1			

### 表5.1.9 (3) 経済性重視型炉心対応プラントにおける機器能力と台数設定 (集合体組立・検査工程:炉心燃料製造ライン)

牲罟夕称	機器能力及び台数				
衣直口竹	設計処理能力	要求処理能力	機器台数		
集合体組立装置	4体/日	6.5休/日	2		
集合体検査装置	29体/日	0.547 口	2		

	機器名称	内側炉	心燃料	外側炉心燃料		ブランケット燃料	
	没由 口10-	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子
	溶液調製槽	2	2	2	2	1	1
	反応·熟成槽	6	4	6	4	2	2
	洗浄槽	12	4	12	4	4	2
粒子製造工程	乾燥装置	12	4	12	4	2	2
	焙焼炉	6	2	6	2	1	1
	還元炉	2	2	2	2	1	1
	焼結炉	2	2	2	2	1	1
	顆粒供給装置	2		2		-	
	振動充填装置	2		2		-	
	端栓溶接装置		2		2		-
	密度検査装置	4	1 2		2		-
燃料要素組	除染装置	4	4	2		-	
立·検査工程	Heリークテスト	4	4		2		-
	端栓溶接部検査装置	1		1		-	
	ワイヤ巻付装置		2	2		-	
	燃料ピン総合検査装置		2	2			-
	燃料ピン洗浄装置		1	1			-
集合体組立·	集合体組立装置			2		-	
検査工程	集合体検査装置			2			-

表5.1.10 経済性重視型炉心対応プラントの主要機器台数

		ztto.i.ii(1/	2)	1又1们用光坦日		
大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)		課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
技術的成立性	基本ブロセスの成立 性	粒子製造条件の最適  化		ゲル球製造の最適条 件の把握	大	ゲル化法
			Ł.	_ 多成分系(MA・FP含有)で の焼結条件の最適化	大	ゲル粒子焙焼・焼結技術
	-	燃料粒子の高密度充  填		高密度充填のための 振動条件最適化	大	振動充填技術
			Ļ	解析評価技術の開発	大	検査技術
	L	- 高発熱燃料の取扱い		-0/Mドリフトの防止	中	システム設計
			L	集合体の冷却	中	冷却技術
	量産性	_ 量産に対応した機器 構造	$\left  \right $	_マルチノズルからの 安定滴下	大	振動滴下技術
	:		L	_複数ピン同時振動充 填の確認	大	振動充填技術
	-	処理能力の向上		- プロセスの合理化	大	システム設計
	<u> </u>	製品の品質管理	$\vdash$	ゲル球を変形させな い輸送方法	中	システム設計
	:			低除染TRU燃料対応の非 破壊検査装置の開発	中	要素技術 システム設計
			+	スキャンの代替装 置の調査・開発	中	要素技術 システム設計
		:	L	X線検査装置の代替装 置の調査・開発	中	要素技術 システム設計
	セル内安定操業	運転自動化技術の開 発	]		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク <sup>゙</sup> 技術
		計測制御			小	システム設計
	-	工程間の核物質移送 技術高度化	]		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク <sup>゙</sup> 技術
	-	計量管理技術の開発	ŀ	計算による計量管理 手法	中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
	-	_ 高放射能燃料取扱い における機器安定性	$\vdash$	放射線対策	中	システム設計
			L	高発熱対策	中	冷却技術
	Ĺ	遠隔保守補修技術の 確立	$\vdash$	機器のモジュール化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク <sup>゙</sup> 技術
			L	保守補修対象機器の 除染	小	除染技術
安全性	臨界防止	一質量管理		粒子系・TRU混在を考 慮した臨界評価	中	システム設計/Pu物流管理手法
				_セル内インベントリ の確認方法	中	システム設計/Pu物流管理手法 核燃料物質量測定技術
		複数ユニットの臨界 管理	1:		中	システム設計/Pu臨界管理手法 物質移送・マテリアルハンドリング技術
	- 作業員の被ばく低減	運転自動化技術の開 発			大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク゚技術
		遠隔保守補修技術の 確立		機器の除染技術開発	中	除染技術
		焙焼・焼結時のオフガス へのFP/MA移行の抑制	-	焙焼・焼結時のオフ ガスへのFP/MA移行挙	中	ゲル粒子焙焼・焼結技術
	- 火災・爆発防止	化学的安全		_ 電解透析による硝酸 アンモニウムの分解	中	要素技術 システム設計
			-	IPAの火災・爆発対策	大	システム設計/火災爆発防止技術
			+	高引火点の洗浄用代 替溶媒の選定	大	要素技術 システム設計
				焙焼雰囲気の見直し	中	要素技術 システム設計
	一耐震性	一耐震設計	]		中	システム設計
		安全設計方針・判断 基準整備			中	システム設計
		安全評価	-		中	システム設計

表5 1 11(1/2) 技術開発頂日

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

表5.1.11(2/2) 技術開発項目							
大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)		
経済性	建設費低減	 合理的な富化度調整 プロセスの開発	- 機器設計の最適化	大	要素技術 システム設計		
		合理的な造粒プロセ スの開発	ゲル球製造の最適条 件の把握	大	ゲル化法		
			多成分のゲル化法の 確立(除熱対策等)	大	ゲル粒子焙焼・焼結技術		
			小粒径粒子製造の量 産化技術開発	大	ゲル化法		
		合理的な充填プロセ スの開発	- 高密度充填のための 振動条件最適化	大	振動充填技術		
			一解析評価技術の開発	中	検査技術		
		一機器配置の合理化の一	系列数・配置の最適 化	大	システム設計		
			保守・補修システム の最適化	大	システム設計 遠隔保守補修技術		
		:	マテリアルハンドリ ングの最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術		
	一操業費低減	遠隔操作・遠隔保守 技術	燃料製造自動化技術	大	システム設計 要素技術		
		品質管理	検査手法の確立	大	システム設計		
			検査基準の確立	中	システム設計		
		:	—燃料仕様最適化	大	システム設計		
		一機器の長寿命化		大	システム設計		
	一稼働率向上	保守・補修時間の短 	— 遠隔保守技術	大	システム設計 要素技術		
		放射線劣化対策	一遠隔保守技術	中	システム設計		
	一廃止措置費の低減	フロセスのコンバク . ト化		小	システム設計		
資源有効利用	U/TRUリサイクル	回収率向上	製品収率の確認	小	粒子製造技術		
		リワーク	DSからの回収	小	システム設計		
	U/TRU工程ロス低減	U/TRUの工程ロスの定 量的評価	ゲル化・洗浄廃液へ の移行量の確認	小	システム設計		
			分析サンプルサイ ズ、サンプリング頻	小	分析技術 システム設計		
環境負荷低減	廃棄物発生量低減	工程廃棄物発生量低 減	廃液処理・リサイク ル	大	要素技術 システム設計		
	廃棄物への核種移行 量低減	ゲル化・洗浄廃液へ   の核種移行量把握	ゲル化・洗浄廃液へ の核種移行量把握	中	ゲル化法		
		廃棄物への核燃料物 質移行量低減	 固体廃棄物への核燃 料物質付着量把握	中	振動充填技術		
	-		固体廃棄物の除染技 術開発	中	除染技術		
			分析サンプルサイ ズ、サンプリング頻	中	分析技術 システム設計		
		プロセスのコンパク ト化		中	システム設計		
核拡散抵抗性	保障措置	ホールドアップ対策	核物質の残留量の確 認手法	中	システム設計		
			固体廃棄物の除染技   術開発	中	システム設計		
	•	計量管理技術の高度 化		中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術		
	—核物質防護			中	要素技術		
運転・保守補修 性		運転自動化技術の開 │ 発		大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術		
				小	システム設計		
		工程間の核物質移送 技術高度化		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術		
			•	中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術		
		遠隔保守補修技術の 確立	機器のモジュール化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術		
			機器の除染技術開発	中	除染技術		

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題 注:計算(成分分析値×秤量値)による評価とは異なる、直接計測による機器内Pu量の評価を保障措置上求められた場合に、大となる







必要生産量

燃料集合体	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合	計
	体∕y	511.7	430.7	320.6		1,263.0
	体∕d	2.56	2.15	1.60		6.32
	t-HM/y	76.49	64.44	59.07		200.00

ſ	燃料要素	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
ſ		本/y	141,746	119,318	41,622	302,686
		本/d	708.7	596.6	208.1	1,513
		t-HM/y	78.19	65.88	60.38	204.44

燃料粒子	単位	内側炉心燃料		外側炉心燃料		ブランケット燃料		소라
		大粒子	小粒子	大粒子	小粒子	大粒子	小粒子	
	+LIM /.	43.47		36.66		141.65		222
	thm/y	32.60	10.87	27.50	9.17	106.24	35.41	222
	kgHM∕d	163.01	54.34	137.48	45.83	531.19	177.06	1,109

図5.1.2 マスフロー及び必要生産量



図5.1.3 滴下·熟成槽



### 図5.1.4 洗浄槽



図5.1.5 乾燥装置



図5.1.6 焙焼炉·還元炉



温度·保持時間	1700°C × 5h
能力	6.6kgHM/h

図5.1.7 焼結炉



被覆管装荷本 数	100本
-------------	------





顆粒充填方式	浸透充填法
同時取扱量	燃料ピン100本 (マガジンに装荷して一括して取扱う)
能力	6h/マガジン

# 図5.1.9 振動充填設備



図5.1.10 燃料供給装置



図5.1.11 振動充填装置



図5.1.12 ハンドリング装置及びスペーサ挿入装置



## 図5.1.13 端栓溶接装置



## 図5.1.14 密度分布検査装置



図5.1.15 試薬回収フロー





### 5.2 酸化物電解顆粒振動充填燃料製造

本システムは、乾式再処理製品である UO<sub>2</sub> 顆粒、MOX 顆粒、絞り電解で回収した MA 顆粒を出発物質に、燃料ピン平均 Pu 富化度仕様を満たすよう UO<sub>2</sub> 顆粒、MOX 顆粒および絞り電解顆粒を混合し、これを被覆管に振動充填して燃料を製造するシス テムである。本システムの特徴を以下に示す。

燃料の製造はバッチ処理による小規模ロット生産方式になる。

酸化物電解再処理で得られる MOX 顆粒の Pu 含有率のバラツキが大きい。この ため核物質量の確定技術が重要となる(臨界安全、計量管理、品質管理等)。 他のシステムと比較して、燃料製造工程が簡易である。そのため、主工程設備機

器数が少なくて済み、経済性向上が期待される。 RIAR 技術をベースとして、MOX 共析顆粒を用いた小規模ピン製造試験経験が

ある。

### 5.2.1 基準システム設計

本節では、燃料の増殖比増大を目指す資源重視型の Na 冷却高速炉に燃料を供給す る酸化物電解再処理からの原料を利用した MOX 顆粒振動充填燃料製造システムにつ いての検討を行う。

本システムは再処理施設と一体の、生産規模 50tHM/年、炉心燃料およびブランケット燃料の製造ラインを有するものとする。

### 5.2.1.1 施設概念構築

(1) 設計の基本方針と前提条件

乾式再処理法の一つである酸化物電解法(ロシア RIAR 技術)による振動充填燃料 製造システムプラントについて、乾式法の絞り込みのために必要な経済性等に係わる データベースの整備を主な目的として、システム設計検討を行った。

主な設計条件を以下に示す。

(i)施設設備の設計および配置方針

燃料製造施設は、再処理施設との一体型プラントとした。主工程設備は原則として セル内に収納し、遮へい機能は原則セル壁で担保する。

### (ii) 保守方針

機器の保守・補修は、主工程セル内のメンテナンスエリアでの遠隔保守・補修を原 則とする。また、遠隔保守・補修が困難な場合を考慮し、機器の除染後に近接保守・ 補修が可能なよう除染に配慮するものとする。

(iii) 操業条件

製造規模は 50tHM/年、年間の運転日数は 250 日とする。ただし、そのうち 50 日

は故障により停止しているものとし、実稼働日数は 200 日(24 時間運転)と見積も る。

(iv) 製品燃料条件

主要な製造燃料の仕様を表 2.3.1 および表 2.3.2 に示す。内側炉心燃料は Pu 富化度 21.1%、MA 含有率 1.0wt%、FP 含有率 1.2wt%以下、外側炉心燃料で 24.9%、MA 含有率 1.2wt%、FP 含有率 1.2wt%以下である。なお、燃料充填密度は炉心燃料部で 82%TD、ブランケット部で 90%TD としている。製品燃料の概略仕様を表 5.2.1 に示 す。

(v) 製品歩留まり

燃料製造全体での歩留まりを 97%とした。

不合格 3%の内訳は、分級工程での顆粒径および残留塩素量の不合格として 1%、 燃料ピン検査工程での外観・端栓部健全性・寸法(全長・真直度)・重量・充填密度軸 方向分布・Pu 密度軸方向分布の不合格で 2%と設定した。

(vi) 製品検査

本システムの検査設備としては、He リーク検査設備、ピン検査設備、および集合 体検査設備を考慮する。この検査により不合格になった燃料ピン、燃料集合体は、集 合体解体工程でリワークを行うこととした。

(2) 安全設計に関わる検討

プラントの安全性として、臨界安全、火災・爆発防止および耐震について検討する こととした。

(i) 臨界安全

酸化物燃料乾式燃料製造システムでは、燃料をバッチ概念で取扱うことを基本としており、主要機器では各プロセス処理のために設備内にある程度の空間が必要となる ことなどから、形状管理概念が適さないものが多く、ピン検査設備や集合体組立設備 については質量管理を基本としている。質量管理を適用する機器は、万一運転計画値 の2倍の燃料量を投入した場合でも未臨界を維持できるようにしている(ダブルバッ チ想定)。

質量管理対象機器について、各機器における Pu の存在量が臨界制限値を上回らな いようにするためには、設備への投入量と投入前の設備内に存在する量を把握し、管 理することが基本となる。主要機器の質量制限値を表 5.2.2 に示す。

(ii) 火災・爆発防止

本システムでは可燃性ガス等を使用しない。また高燃焼度下での燃料健全性維持の

目的で燃料の O/M を下げるために金属ウランゲッターをあらかじめ添加しているが、 比表面積の小さい球状粒子としており空気中で安定なため、本検討では空気雰囲気で の使用とする(RIAR の設備対応と同等)。今後ゲッタの安全取扱上の検討が必要とな る。

(iii) 耐震

各燃料製造機器を、各機器が内包する放射能により、ウラン・プルトニウム混合酸 化物燃料加工施設安全審査指針の施設の耐震設計上の重要度分類に応じて分類し、各 機器はこれに応じた耐震性を有するような構造概念となるよう配慮した。

(3) プロセス設計

酸化物電解顆粒振動充填燃料製造法のプロセスブロックフローを図 5.2.1 に、各設備で今後必要な要素技術開発課題の主な項目を図 5.2.2 に示す。以下に主要プロセスの概要を述べる。

(i) 顆粒の分級工程

再処理の電解工程で析出した MOX、UO<sub>2</sub>、MA 析出物を、粉砕、水洗・乾燥後、 燃料製造設備へ受け入れる。分級工程では、後工程の振動充填工程での充填密度向上 のため、受入れた顆粒を数種類の顆粒サイズに分級する。分級の数については 3~6 種類に分けることが考えられており、今後最適化の必要があるが、本検討では6種類 に分級し、そのうち粒径 1000 µ m以下の5種類を製造に使用することとした。表 5.2.3 に分級顆粒の粒径範囲と想定される概略の粒度分布を示す。

粉砕・分級工程では、高充填密度を得るため顆粒燃料は粒径の分布のコントロール が必要となる。粉砕工程で要求する粒径比率を得ることにより、顆粒の余剰、端数が 出ないようにコントロールする必要がある。

(ii) 顆粒の混合工程

国内の UO<sub>2</sub> 顆粒および模擬 UO<sub>2</sub> 顆粒(不規則形状顆粒)を用いた振動充填実験か ら、粒径の異なる顆粒の混合では、充填前にある程度混合を行っておくことは合理的 で、均一な混合状態を作り易い<sup>1)</sup>との知見を得ている。そこで混合工程では、分級工 程で5種類に分級された MOX、UO<sub>2</sub>、MA 顆粒およびウランゲッターを Pu 富化度調 整等のため、所定の分量ずつ混合する。混合した顆粒は顆粒容器で次工程の振動充填 工程に移送する。

(iii) 振動充填/端栓溶接工程

下部端栓付きの被覆管の内部を He で置換し、そこに混合された顆粒等を振動充填 するとともに、上部端栓を溶接して、内側/外側炉心用燃料ピンおよび径ブランケット 用燃料ピンを製造する。製造した燃料ピンは、燃料集合体組み立て工程へ移送する。 国内での UO<sub>2</sub> 顆粒を用いた振動充填実験より、混合比の充填密度への影響、顆粒スタック上部の密度の低下の改善等によりスミア密度 80%TD 以上(スタック全長平均)の達成が可能と考えられている。<sup>1)</sup>

(iv) 燃料ピン検査工程

燃料ピンを表面除染後、燃料ピンの気密検査、燃料ピン検査設備でピン単体の全長、 重量測定、外観検査、非破壊検査による端栓溶接部の欠陥検査、充填密度軸方向分布、 および Pu 軸方向分布検査を行なう。

(v) 燃料集合体組立工程

燃料ピンへのワイヤ巻付後、縦型組立機構を有する設備を用いて燃料集合体に組み 立てる。組み上がった燃料集合体は、各種寸法、重量、曲がり、ねじれ等を測定して 燃料保管場所へ払い出す。

(vi) 燃料集合体貯蔵、払い出し工程

製造された燃料集合体を自然空冷の乾式貯蔵システムで保管する。また、燃料集合体を貯蔵施設から取り出し、輸送用トラックで原子炉サイトへ払い出しを行う。

(vii) 燃料製造施設から発生する放射性廃棄物処理工程

燃料ピン製造および燃料集合体組み立て工程から発生する放射性廃棄物は、燃料製 造セルから発生する交換部品等の廃棄物であり、これらは圧縮後ドラム缶に入れ、セ メント充填処理を行う。それ以外の施設から発生する廃棄物はクリアランスレベル以 下の廃棄物とする。

(viii) ユーティリティ/燃料製造・再処理共有設備

ユーティリティ/共有設備を主建屋に収容するものとする。ユーティリティ/共有設備としては、換気・空調設備、電気制御設備、分析設備、非常用設備、放射線管理設備、計量管理設備その他からなる。

(4) 主工程設備設計

(i) 必要処理量の検討

炉心及び燃料仕様に基づいて設定した、燃料集合体の年間製造体数、燃料ピンの1 日当り製造本数及び燃料顆粒の使用量を表5.2.4 に示す。また、燃料製造工程の物質 収支を図5.2.3 に示す。物質収支の設定にあたっては、炉の仕様から、MOX 電解回収 物の内45%を内側炉心へ、45%を外側炉心へ配分し、10%は余剰 MOX として貯蔵す ることとした。FBR では Pu が増殖してしが減少するので、新燃料製造にあたっては UO2 補充が不可欠となるが、ブランケットのうち、最も大量に UO2 を必要とする径 ブランケットに補充することとした。一方、ウランゲッターは、RIAR の実績から、 燃焼度の高い内側炉心燃料および外側炉心燃料に 7wt%添加することとした(ウラン ゲッターを 7wt%添加すると、O/M 比が 1.94~1.95 程度になり、燃料の健全性が保た れるといわれている)。

(ii) 設備・機器概念

安全性(臨界、火災・爆発) 核拡散抵抗性(ホールドアップ) 遠隔保守・補修性 等の設計要求を満たす設備概念を検討し、概略構造、安全対策、設備台数等を明示す る。

(a) 顆粒の分級設備

本設備では、再処理の電解工程で析出された MOX、UO<sub>2</sub>、MA 顆粒を各々粒径数 µm ~ 1mm の 5 種類と粒径 1mm 以上の合計 6 種類の顆粒サイズに分級する。このうち粒 径 1mm 以下の 5 種類を燃料製造に使用する。臨界管理から、取扱い容量は MOX 顆 粒で 28kgHM/バッチとし、他の顆粒についても設備の共通設計で同一容量とした。 設備の処理能力は、ロシアでの小規模設備の実績 10kg/時間から、総合処理時間は 1 バッチ(28kgHM)を 1.5 時間で処理することとした。このうちプロセス処理時間は 1 時間、マテリアルハンドリング時間は 0.5 時間とした。設備台数は、必要処理量と 設備処理時間から UO<sub>2</sub>用1台、MOX 顆粒および絞り電解顆粒について各1台とした。 分級設備を図 5.2.4 に示す。

(b) 顆粒の混合設備

本設備では分級工程で 5 種類に分級された MOX、UO<sub>2</sub>、MA 顆粒およびウランゲ ッターを Pu 富化度調整等のため、所定の分量ずつ混合する。混合した顆粒は顆粒容 器で次工程の振動充填工程に移送する。設備の処理能力は、ペレット製造での粉末混 合の国内実績 30kg/3 時間を参考にし、プロセス時間を 28kg/30 分、マテリアルハン ドリング時間を 0.6 時間とし、総合処理時間で 28kg/1.1 時間とした。設備台数は、必 要処理量と設備処理時間から、内側炉心燃料用で 1 台、外側炉心燃料用で 1 台とした。 混合設備を図 5.2.5 に示す。

混合設備については、特に大きな開発要素、技術的な課題は無いと思われるが、混合しすぎると粒径の粗い粒子が遊離する過混合状態となるため、混合条件(混合時間、 混合速度)を把握する必要がある。

(c) 振動充填/端栓溶接設備

本設備では下部端栓付きの被覆管に、混合された顆粒等を振動充填するとともに、 端栓を溶接して、内側/外側炉心用燃料ピンおよび径方向ブランケット燃料ピンを製造 する。製造した燃料ピンは、燃料集合体組み立て工程へ移送する。被覆管および燃料 ピンはピンカートリッジで取扱う。ピンカートリッジの容量は炉心燃料用で46 ピン/ カートリッジ(約1/6 集合体相当)、ブランケット用で43 ピン/カートリッジ(約1/4 集合体相当)とした。設備の処理時間はロシアの実績7~8分/ピンを参考に、マテリ アルハンドリング時間を含めて 16.1 分/ピンとした。なお、炉心燃料は 3 ピン同時処理、ブランケット燃料は 2 ピン同時処理と設定した。設備台数は、必要処理量と設備 処理時間から、内側/外側炉心用および径ブランケット用で各 1 台の計 3 台とした。振 動充填端栓溶接設備を図 5.2.6 に示す。

振動充填/端栓溶接設備の今後の技術課題を以下に示す。

・振動充填方法

実物大の被覆管を用いた試験により、燃料の充填率に対しては、充填速度、加 速度等のプロセス条件を把握し、振動充填条件の最適化を検証および評価を行う 必要がある。

・端栓溶接方法

加圧抵抗溶接法(PRW 法)の溶接条件を検証し、溶接性能の確認および品質 管理手法を評価する必要がある。

・粉末飛散防止

ロートからの燃料投下や各機器間の移動において、機器のシール構造およびカ バー設置に対する燃料の飛散防止性能に関する評価が必要である。

(d) 燃料ピン検査設備

本設備では、気密検査後の燃料ピンの全長測定、重量測定、外観検査、端栓溶接部 の非破壊検査、充填密度軸方向分布、および Pu 事項方向分布検査を3種類の検査設 備を用いて行なう。なお、軸方向分布の検査は大掛かりな遮へい体を必要とすること から、セルの壁近傍で壁を利用して検査する方式とした。また、径ブランケット燃料 ピンについては Pu 関連の検査は実施しないこととした。

検査設備1では全長測定、真直度測定、重量測定、外観および端栓部溶接非破壊検 査を行う。検査設備2では充填密度軸方向分布検査を行う。検査設備3では炉心燃料 のPu軸方向分布検査を行なう。一日の必要処理量は検査設備1および2で390ピン /日、検査設備3で336ピン/日(炉心燃料のみ)プロセス処理時間は全長測定・真直 度測定・重量測定・外観検査で1分/ピン、端栓部非破壊検査で5分/ピン、充填密度 軸方向分布検査で10分/ピンおよびPu軸方向分布で15分/ピンと設定した。マテリ アルハンドリングを含む処理時間と設備台数は、検査設備1で9分/ピン、3台、検査 設備2で10分/ピン、3台、検査設備3で15分/ピン、4台と設定した。検査方法や 処理時間は、将来の技術開発を見込んだ目標であり、今後検討が必要である。燃料ピ ン検査設備を図 5.2.7 に示す。

(e) 燃料集合体組立設備

ラッピングワイヤの巻付け後、縦置状態で燃料ピンをエントランスノズル部のノッ クバーに1本ごとに装荷し、燃料集合体を組み立てる。組み上がった燃料集合体は、 各種寸法、重量および外観検査を実施して燃料保管場所へ払い出す。設備の処理時間 は2.4 集合体/日とした。設備台数は、必要処理量と設備処理時間から、1台とした。 集合体組立設備を図 5.2.8 に示す。 (f) 燃料集合体貯蔵、払い出し設備

リサイクル建屋で製造され、乾式キャスクに収納された新燃料は、燃料集合体貯蔵 建屋の新燃料貯蔵エリアに搬送し貯蔵する(移送台車による建屋間取合い)。キャスク のサイズは 2m×H5.2m、施設貯蔵能力は施設処理能力の 1 年分(キャスク個数で 34 体)とし、自然空冷の乾式貯蔵設備(キャスク方式)で保管する。また、燃料集合 体を貯蔵施設から取り出し、輸送用トラックで原子炉サイトへ払い出すものとする。 (g)再処理/燃料製造共通放射性廃棄物処理設備

本設備は、再処理と燃料製造工程から発生するプロセス廃棄物とメンテナンス廃棄 物を性状別に分類し、それぞれに適した焼却、溶融、固化処理等を行う放射性廃棄物 処理設備である。放射性廃棄物の区分けを行うにあたって、燃料ピン製造セルまでは 非密封燃料を取り扱うため、原則として低レベル廃棄物(地層処分並)扱いとし、集 合体組立セルは燃料を密封状態(ピン)で扱うため、基本的に汚染はないと考え、ク リアランスレベル廃棄物として扱うこととした。

(5)周辺設備の設計

(i) 分析設備

乾式法においても、臨界管理、計量管理、プロセス管理を目的として迅速、精度の 良い分析方法が要求される。燃料製造での分析対象試料は分級後の電解析出物(UO<sub>2</sub>、 MOX、MA)であり、サンプリング位置から分析セルに気送される。分析項目は燃料 組成、O/M 等とする。分析頻度は、分級後の UO<sub>2</sub> で 9,300 回/年、MOX で 4,650 回/ 年、MA で 470 回/年程度と評価した。

(ii) 保守·補修設備

保守・補修は、主工程セル内のメンテナンスエリアで行うため、マテリアルハンド リング機器としては、主工程セル上部に天井走行クレーン型マニプレータ(PM)、イ ンセルクレーンを設置し、メンテナンスエリアにマスタースレーブマニプレータ (MSM)を設置することとした。

また、プロセス機器の部品交換を容易にするため、プロセス機器は分解できる構造 として、モジュール構成とした。

(iii) 除染設備

機器の本格点検で、機器・部品等をプロセスセルからセル外に搬送する際の除染は、 プロセスセルに隣接した除染室において、MSM か PM を用いたウエスによるふき取 り除染を検討している。

(iv) 固体廃棄物処理設備

固体廃棄物処理は減容等の処理を行い、容器に収納し貯蔵する施設内に1年分の固

体廃棄物貯蔵庫を設置する。

(v) ユーティリティ設備

プロセス設備、廃棄物処理施設等にユーティリティを供給する各設備別に系統概要、 主要機器容量等について示す。

(a) 純水設備

本設備は、補給水移送ポンプ2台、配管、弁等により構成され、ろ過水を脱塩処理 した補給水(純水)を貯蔵する給水処理設備の補給水(純水)タンクを水源とし、並 列2台の補給水移送ポンプにより内部に放射能を含まない機器、配管、弁等あるいは、 内部に放射能を含むが保守点検を頻繁に必要として操作時の被ばく低減から純水を使 用するのが好ましい機器、配管、弁等に補給水(純水)を供給する。

(b) 雑用水設備

本設備は、雑用水移送ポンプ2台、配管、弁等により構成され、原水を前処理した 雑用水(ろ過水)を貯蔵する給排水処理設備のろ過水タンクを水源とし、並列2台の 雑用水移送ポンプにより、放射能汚染がなく水質基準の緩やかな水を必要とする機器、 配管および弁類等に雑用水(ろ過水)を供給する。

(c) 非常用補器冷却水設備

本設備は、機器冷却水移送ポンプ2台、海水ポンプ2台、熱交換器2基、サージタ ンク1基、防食剤注入ポンプ1基、海水ストレーナ2台、配管、弁等で構成する。本 冷却系は、各建屋内、付属建屋等に設置される補機の冷却を行い、これらから除熱し た熱を最終的な熱の逃がし場である海に放出する。なお、プラント立地条件が未定に つき、現時点においては従来軽水炉プラントと同様な海水による冷却方式とした。

(d) 所内用圧縮空気設備

本設備は、並列に2列の圧縮機系列を有し、各系列は吸入フィルタ兼消音機、空気 圧縮機、アフタークーラー、セパレータおよびそれらを連絡する配管により構成され る。各セパレータ以降は合流し、空気貯槽を経て、各建屋内外の脱塩設備、ろ過設備 の再生・逆洗、空気作動工具等へ圧縮空気を供給する。

(e) 計裝用圧縮空気設備

本設備は、並列に2列の圧縮機系列を有し、各系列は吸入フィルタ兼消音機、空気 圧縮機、アフタークーラー、セパレータおよびそれらを連絡する配管により構成され る。各セパレータ以降は合流し、空気貯槽を経て2基(1基予備)並列に設置した除 湿設備から各建屋内の計装、制御品の作動用等にオイルレスでかつ除湿、除塵された 圧縮空気を供給する。

(f) 所内蒸気設備

本設備は、各建屋内および付帯設備等に設置される所内蒸気使用設備に補助ボイラ 設備により発生する清浄な蒸気を供給するものである。蒸気の用途は、タンクの加熱 用、廃棄物処理系のプロセス用、換気空調系による室内の暖房等である。補助ボイラ の容量は、先行軽水炉プラントにおける所内蒸気負荷と同等と仮定し、30t/時間×3 基(内1基は予備)とした。

(g) 試薬 / ガス供給設備

・Ar ガス

Ar ガスは、燃料製造関係では、振動充填端栓溶接の加圧抵抗溶接の際のバックガスとして使用する。流量は 31/分、溶接時間を 1 分として、必要量は 1.2 m<sup>3</sup>/日と評価した。

・He ガス

He ガスは、振動充填する際に燃料ピンを真空引きした後、燃料顆粒を封入する際に用いる。He 置換量は約350cc/ピンとして、必要量は1401/日と評価した。

(vi) 建屋・換気・電気設備

酸化物電解法再処理・振動充填法燃料製造施設のリサイクル建屋は地下1階/地上 3階(W104m×L58m×H32m)とし、1階に集中配置された再処理・燃料製造セル 内で再処理・製造を行うものとした。

換気空調設備は、対象施設の汚染区分、空調方法等を考慮して、管理区域換気空調 系、セル排気系および非管理区域換気空調系の3種類に区分した。なお、外気冷却お よび局所冷却を行う必要があり、空調用冷水系設備を設置して空調用冷水を供給する ものとする。

(a) 管理区域換気空調系

管理区域換気空調系は、中性能フィルタ、加熱コイル、冷却コイルで構成し、建屋 内のグリーン区域(-20~-60Pa)、イエロー区域(-80~-150Pa)およびレッド区域(セ ル)(-250~-300Pa)の換気を行う。排気は建屋排気系とセル排気系に区分して、建 屋排気系は排気フィルタ(高性能フィルタ内臓)を通して排風機により主排気筒から 排出する。

(b) セル排気系

セル排気系は、放射性廃棄物の閉じ込めを目的として、入気側に入気フィルタ(高 性能フィルタ内臓)を設置して、万一の汚染拡大を防止する設計とした。なお、燃料 処理セルは室内発生熱負荷が大きいこと、および非常時冷却が必要なため、入気冷却 コイルを設置する。排気は、セル近傍に前置排気フィルタを設置し、後置排気フィル タで放射性物質を低減し、セル排風機により主排気筒から排出する。

(c) 非管理区域換気空調系

非管理区域換気空調は、外気を中性能フィルタおよび冷却コイルを内蔵する給気ユ ニットで除塵、冷却して、送風機で建屋内非管理区域エリアに供給する。常用電気品 室は、発生熱負荷が大きいため、空調機を設置する。ディーゼル発電機室用に送風機 を設置してディーゼル発電機運転時のみ外気を取り入れ送風する。排気は、再循環す ると共に、ディーゼルタンク室等は建屋外壁開口より直接排気する。 電気設備について、プラントの通常運転、事故時の電源を確保し、また外部電源喪 失時においてもプラントを安全に停止する電源確保のための設計を行った。以下に設 計方針を示す。

プラントの運転、事故時において必要な機器への電力として、外部電源および非 常用所内電源を設けるものとした。

プラントの安全停止に必要な機器への電源は原則として電気的、物理的に分離独 立したものとする。

非常用電源は単一故障を想定してもプラントの安全停止に必要な安全機能を失わ ない設計とする。

計測制御用電源を設け、通常および事故時の監視・制御を行える設計とする。

(vii) 新燃料貯蔵設備

新燃料貯蔵についてはリサイクル建屋で製造される新燃料集合体を乾式キャスクに 収納し、自然空冷で貯蔵を行う。キャスクのサイズは、Φ2m×H5.2m とし、燃料集 合体 10 体収納できるものとする。また、乾式キャスクは、必要な遮へいおよび放熱 機能を有するものとする。

燃料集合体貯蔵建屋は W42.5m×D46.3m×H27.8m で、使用済燃料集合体貯蔵建 屋と新燃料集合体貯蔵建屋が隔離壁を挟んで一体となっている。各燃料貯蔵容量は、 施設処理能力の約1年分の燃料集合体を貯蔵できるものとする。キャスクの個数で示 した場合、34体の貯蔵容量となる。

(6) 配置検討

(i) 配置設計検討の方針

リサイクル建屋内機器配置計画の設計方針を以下に示す。

- a 系統・設備の機能要求を満足するように適切な機器配置とする。
- b 廃棄物搬送容器等の物流動線を考慮し、受入れより払い出し迄、水平或いは上下 方向にルートを確保するとともに搬送台車、リフター等を適切に配置する。
- c 人員アクセスはセルエリアを除き適切なアクセスルートを設定し、必要により階 段、エレベータを設置する。
- d 機器搬出入は管理区域、非管理区域毎に搬出入ルートを確保するものとし、ハッ チ開口、モノレール等を適切に配置する。
- e 建築物量、掘削物量の低減のため、極力コンパクトな建屋サイズとなるように計 画する。
- f 管理区域内の区分の異なるエリア間の物流動線にはエアロック、人員アクセス動 線上にはサブチェンジングエリアを設け、汚染管理を行うものとする。
- g 万一の地下水の浸透に対して、地下水の水を嫌うエリア(プロセスセル等)およ びライニング槽はそれらの壁・床が直接外壁・床とならないように二重床・壁等

を設けて、地下浸透水防止およびライニング部の保護を考慮する。

(ii) 配置設計結果

燃料製造工程関連機器は燃料ピン製造セルおよび集合体組立セルに設けた炉心とブ ランケットの各専用のラインに集中配置した。その際、燃料ピンは端栓溶接によって 密封される(リーク率ゼロ)という考えに基づき、表面除染設備までを燃料ピン製造 セル(非密封セル)に配置し、He リーク試験設備以降の工程は密封セルの集合体組 立セルに配置した。また、セル内にはバッファ(燃料ストック/仮置き場)、メンテナ ンスエリアを設け、セル内において容器等の仮置きをする場合は臨界管理上、容器設 置間隔を容器中心間で 500mm 以上確保することとした。各セル容積は、燃料ピン製 造セルで約7,400m<sup>3</sup>(17m×29m×15m)、集合体組立セルで約8,200m<sup>3</sup>(17m×32m ×15m)とし、セル-セル間の円滑な物質搬出入を考慮して、セルは隣接配置とした。 また、通常運転、保守・補修性を考慮したエリアを設け、燃料・廃棄物等の建物間の 物流および人員のアクセスを考慮した配置とした。図 5.2.9 にリサイクル建屋内機器 配置を示す。

(a) 燃料の経路

乾式キャスクに収納した使用済み燃料を中間貯蔵施設から、本リサイクル施設内に 搬送し、燃料集合体貯蔵建屋の使用済燃料貯蔵エリアで受入貯蔵する。その後、リサ イクル建屋に搬送し(搬送台車による建屋間取合い)、再処理・製造を行う。リサイク ル建屋で製造し、乾式キャスクに収納した新燃料を燃料集合体貯蔵建屋の新燃料貯蔵 エリアに搬送し貯蔵する(移送台車による建屋間取合い)。新燃料は、燃料集合体貯蔵 建屋から各FBR 発電プラントに搬送する。

(b) 廃棄物の経路

リサイクル建屋から発生する廃棄物は廃棄物搬出容器に収納された状態で、遮へい 機能を有する廃棄物移送容器に収納し搬送台車にて廃棄物処理建屋地下1階に移送す る。移送した廃棄物は搬出容器の状態で1階および地下1階の保管エリアに保管後、 各処理エリアにて処理を行う。各処理エリアにて処理を行った廃棄物充填ドラム缶は 地下1階の廃棄物収納・検査エリアにて検査後、廃棄体収納容器に収納され廃棄体貯 蔵建屋にて貯蔵する。

(c) 人員のアクセス

各主要機器建屋への人員のアクセスは、基本的に入退域管理設備を設置するサービス建屋から全て行うものと仮定する。非管理区域への人員のアクセスは、リサイクル 建屋・廃棄物処理建屋へは建屋間連絡路2階から、補助建屋(補給水設備、消火設備、 ボイラ設備を配置。W21.5m×L31.5m×H15.5m)へは建屋間連絡路1階から行うも のとした。管理区域への人員のアクセスは、リサイクル建屋・廃棄物処理建屋・廃棄 体貯蔵建屋へ建屋間連絡路1階から行うものとした。

(d) 屋外設備

排気筒は、六ヶ所再処理施設と同等な高さ 150m のものを、各建屋からの主排気ダ クトルートを考慮し、配置した。

各屋外タンクについては、補給水タンク(補給水設備)、消火用水タンク(消火設備、補給水設備)、重油タンク(ボイラ設備)は補助建屋近傍に配置した。

(7) 品質管理(Pu 富化度)に関する検討

酸化物電解再処理から得られる MOX を用いた燃料製造では、電極に析出した MOX を粉砕した後、U と混合し被覆管に振動充填する。その際、製造ロット毎およびロッ ト内の MOX 顆粒 Pu 含有率のバラツキは湿式再処理から得る MOX 原料粉体に比べ て大きくなる。

こうした原料顆粒を用い燃料ピン平均 Pu 富化度を精度良く管理するための製造シ ステム概念(Pu 富化度調整工程、品質管理工程等)検討が必要となる。

(i) 検討内容

酸化物電解対応振動充填燃料製造システムの特徴として主に次の2点が挙げられる。 ・MOX 共析により得られる原料顆粒の Pu 含有率は非均質であること(図 5.2.10)。

・充填密度を高めるための複雑な顆粒混合工程操作を伴うこと。

以上の特徴から、振動充填燃料の品質管理において、重要となってくる項目として、 次の2点が考えられる。

【振動充填燃料の重要品質管理項目】

- ・燃料ピン内の平均 Pu 富化度の管理
- ・燃料ピンの Pu 富化度の軸方向分布の管理

本検討では、原料顆粒の Pu 含有率の非均質性、製造工程での操作を考慮した平均 Pu 富化度への誤差の影響を検討した。

(ii) 原料顆粒調整工程例

原料顆粒調整工程例を図 5.2.11 に示す。

製造プロセスでは電極に析出した MOX を粉砕し、酸化物電解顆粒を得る。この酸 化物電解顆粒を、顆粒径に応じ5グループに分級する。次に、高充填密度を得るため 顆粒グループ毎に所定の量を秤量し混合する。平均 Pu 含有率を求めるには、各グル ープの代表 Pu 含有率と秤量値が必要である。また、各グループの代表 Pu 含有率は サンプリングと分析から求まる。さらに計算により求まった平均 Pu 含有率の値から、 所定の Pu 富化度となるように U を切出し、混合する。

燃料ピンに充填する核燃料の平均 Pu 富化度は分析値、秤量値に基づく計算値で管 理することを想定しており、Pu 富化度の精度は各顆粒グループの代表 Pu 含有率測定 誤差(サンプリング誤差、分析誤差)、秤量誤差およびウランの切出し誤差より定ま る。 (iii) 平均 Pu 富化度变動要因

上記、原料顆粒調整工程において、平均 Pu 富化度へ影響すると考えられる変動要因について、図 5.2.12 に示す。

(iv) Pu 富化度変動要因の設定

以上の変動要因を踏まえ、Pu 富化度平均予測計算を行った。設定した Pu 富化度変 動要因を図 5.2.13 に示す。

サンプリング誤差に関しては、顆粒の粒毎に Pu 含有率は様々であり、どのような Pu 含有率分布であるのか知見は得られていない。そこで本検討では、平均 Pu 富化度 に対するサンプリングの誤差の感度解析を行うために、顆粒グループ内の Pu 含有率 は、誤差評価上保守側となる一様分布であるとしたケース(ケース1) 正規分布であ るとしたケース(ケース2)の2ケースを想定し、モデル化した。その際、分布の変 動幅を仮定した。

また分析誤差と秤量誤差に関しては、これまでの知見により、各々相対値で 1%、 0.1%とした。

平均 Pu 富化度の管理目標を図 5.2.14 に示す。Pu 富化度仕様は 22.4±1wt%とした。 またし切り出しに伴う Pu 富化度調整誤差は、これまでの知見により、0.5wt%と設定 した。それにより、サンプリング誤差等の許容範囲は、Pu 富化度公差である±1wt% から 0.5wt%を引いた値、すなわち 0.5 wt%以下となる。

(v) 顆粒の Pu 含有率モデル

本検討で設定した顆粒の Pu 含有率モデルを図 5.2.15 に示す。

ここでは MOX 顆粒径に応じて、5 グループに分級した例を示す。それぞれの粒径 に応じた Pu 含有率は、図中の矢印で示した変動幅(MOX 共析実験例)を持つ。

これらの実測例による Pu 含有率の変動幅のデータを参考に、各顆粒グループの変 動幅を図 5.2.15 のようにモデル化した。その際、小粒径に関しては、MOX 共析の電 解時の Pu 含有率の平均値が高くなる傾向にあることを考慮してモデルを作成した。

以上の変動幅内に設定した Pu 含有率の分布形を図 5.2.16 に示す。

(vi) Pu 含有率への誤差伝播

上記の通り設定した各顆粒グループの Pu 含有率モデルから、最終的に得られる酸化物電解 MOX 共析顆粒の Pu 含有率への誤差の影響を計算した。計算にあたっては、図 5.2.17 に示すように製造工程にあわせた誤差伝播を模擬した。

顆粒 Pu 含有率の分布から m 個のサンプルの Pu 含有率の平均とすることで、代表 Pu 含有率が求まる。次に、この代表 Pu 含有率に分析と秤量の誤差の伝播を重ね合せ る。これまでの計算を同様に他の4つのグループについて行い、加重平均したものが、 酸化物電解 MOX 共析顆粒 Pu 含有率となる。以上の計算を繰返し行うことで、サン プリング誤差、分析誤差、秤量誤差を考慮した Pu 含有率の分布が得られる。

(vii) 顆粒グループ毎に平均値が異なる Pu 富化度変動予測計算結果

計算によって得られたサンプリング、分析誤差、秤量誤差を考慮した Pu 富化度分 布を図 5.2.18 に示す。

サンプル顆粒数 m と変動幅 20の関係を図 5.2.19 に示す。

管理目標であるサンプリング等の許容範囲 0.5wt%以下とするために必要な各顆粒 グループのサンプル顆粒数は、ケース1では50個以上、ケース2では20個以上必要 であることを示している。

(viii) まとめ

酸化物電解顆粒振動充填燃料製造では、燃料ピンの平均 Pu 富化度のバラツキのシュミレーション例からも、MOX 顆粒間の Pu 含有率の分布を把握することが重要であることを示した。

#### 5.2.1.2 技術評価

(1) 技術的成立性の評価

(i) プロセス成立性

酸化物電解顆粒振動充填燃料製造プロセス全般において、原理的な成立性の実証途 上で、基礎データの充足が必要である。具体的には、取扱う燃料が、内部組成の不均 ーな燃料であるため、各状態(顆粒、ピン、集合体)での核物質量を確定するサンプ リング方法について、要素技術の結果を反映した検討が必要である。

- (ii) 量産性
- (a) 機器能力

量産対応として、処理時間等を考慮し目標生産能力を満たすよう機器台数設定を行った。酸化物顆粒燃料製造に必要な機器単体能力設定を表 5.2.5 に示す。複数ユニットの臨界安全を考慮した機器配置、物質移送等に基づく製造ラインの生産能力の評価が必要である。

(b) 安定操業の可能性

遠隔保守対応としては、機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での 復旧を想定している。また、保守が必要な機器は両腕型マニプレータ(BSM)または PMのアクセス性を考慮した配置とした。今後はマテリアルハンドリング取り合い・ 秤量等に要する作業時間の検討、機器の故障頻度を考慮したプラント稼働率の検討が 必要である。

(2) 安全性にかかわる評価
(i) 臨界安全

燃料製造工程で顆粒燃料を扱うまたはその可能性のある設備および容器類は質量管 理によって単一ユニットの臨界安全を担保している。

ピン製造工程では、ピンに充填する前の顆粒燃料は質量管理した容器で取り扱う。 充填工程以降では、同時取扱い量が臨界質量の1/2未満となるように設計したピンカ ートリッジを単位として取扱い、ダブルバッチによる臨界を防止している。設備間の 燃料の搬送機器は移動経路を固定し、核物質の異常な集積を起こさない設計とした。

複数ユニットの評価については、十分な機器間距離を確保して機器配置を行うことで、臨界安全が確保できるものとした。今後、経済性向上のためよりコンパクトな機器配置を行う場合、複数ユニットの臨界評価が必要となる。

(ii) 火災防止(Uゲッタ)

Uゲッタに関しての要素技術開発の結果から、球状の金属粒子は自然発火しないとの情報を得ているが、今後、ゲッタの発火特性の把握およびこの特性に応じた設備検討が必要である。

(iii) 耐震

耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分類した。また、各機器のフレーム強度 について、1 質点モデルでの概略耐震計算を行った結果、架台支持脚応力、基礎ボル ト本数の設定に問題がないと概略評価した。

(3)経済性の評価

フェーズ の検討では、プロセス簡素化として、炉心燃料ピンとブランケット燃料 ピンの製造セルの統合、機器のコンパクト化として、振動充填設備と表面除染設備の 機器機能の統合による台数削減等の経済性向上策を実施した。

(i) 建設費

(a) 主工程機器台数

主工程設備費算定のために設定した燃料製造主工程の主要機器台数を表 5.2.6 の基 準システムの欄に示す。

(b) 建設費

設備費および建屋費を表 5.2.7 の基準システムの欄に示す。主工程設備費は上記の 台数に基づく。

(ii)操業費

(a) 人員および人件費

燃料製造関係の人員は 150 人、人件費単価は 900 万円/人年として、13.5 億円/年に 設定した。 (b) 修繕費、消耗品等諸費

試算の結果、修繕費(機器交換費、定検材料費)が12億円/年、消耗品等諸費(補充U、ユーティリティ等を含む)が20億円/年となった。

(c) 操業費(年間総操業費)

上記の人件費および修繕費、消耗品等諸費に以下の事業税および一般管理費を加えた年間総操業費は、54億円/年となった。表 5.2.8の基準システムの欄に操業費の内訳を示す。

(iii) 部材費

ラッパ管や被覆管などの燃料部材費用であり、製品 1kgHM あたり 5 万円、年間 25 億円とした。

(iv) 燃料製造単価

(i)、(ii)および(iii)の結果から算出した燃料製造単価を表 5.2.9 の基準システムの欄 に示す。

基準システムの燃料製造単価は、発電単価に換算して 0.34 円/kWh(平均燃焼度 63.1 GWd/t)となった。

(4) 環境負荷低減性の評価

- (i) 廃棄物発生量
- (a) 通常運転時の廃棄物

本システムで発生する廃棄物は、主として機器の回転部分等の交換部品による二次 廃棄物と考えられ、機器単体重量×保守補修による交換率(機器の種類により6wt%/ 年または2wt%/年ずつ交換されると想定)×台数により評価した。なお、廃棄物重量 100kgを200リットルドラム缶1本と換算した。

本システムでは、炉心燃料とブランケット燃料を同一セル内で製造するため、発生 する放射性廃棄物は全量低レベル廃棄物(地層処分並)となり、低レベル廃棄物(余 裕深度処分並)は発生しない。

発生量は低レベル廃棄物(地層処分並)約20t(ドラム缶約200本) クリアランス レベル以下の廃棄物(コンクリート以外)約15tと評価した。

(b) 廃止措置時の廃棄物

セル内機器重量は機器設計データに基づく。セルライナ量は、配置設計に基づいて 算出したセル内表面積にライナ厚さ 5mm およびライナ比重 8.0 を乗じて算出した。廃 棄物発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)約450t(ドラム缶約4,500本) クリア ランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)約12,600t、同(コンクリート)約 118,700t となった。 (ii) 廃棄物への移行率

核燃料物質の廃棄物への移行経路としては、交換廃棄される機器類に付着しての移 行が考えられる。本システムは微粉を取扱う為、機器類への微粉の付着による核物質 ロスが懸念されるが、回収設備および除染設備により廃棄物に移行する U、TRU を 0.1%未満に抑えることは可能と考えられる。

(5) 資源有効利用性

本システムは微粉を取り扱う為、飛散等により、工程からのロスが懸念される。但し、受入れ量に対する製品収率 99.9%以上を達成するため、微粉体の飛散防止対策および回収設備開発は可能と考えられる。

(6) 核拡散抵抗性

燃料製造の各プロセスにおいて、Puは MOX 顆粒、MA 顆粒として供給され、製造 工程中、Puが単離される工程は存在しない。よって、Pu が単独で存在することはな い。計量管理および物流管理に関して、以下のような課題がある。

(i) 計量管理

原料顆粒は Pu が不均一に分布していると考えられるため、サンプルによる成分分 析値と秤量値からの Pu 量の把握は今後検討する必要がある。

(ii)物流管理

セル内の核物質入出量管理が必要であるが、取扱う燃料のロットが小さく、セル内 の物流は複雑となり、評価作業量は膨大となるため、機器毎の核物質量入出量管理が 重要となる。ただ、取扱う燃料の Pu が不均一な為、統計処理となり、精度が悪くな る。

### 5.2.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

経済性重視型システムへの対応

(1) システム概念構築

径ブランケットを削除し、基本的に基準システムと同一のプロセス、機器を用いて 炉心燃料集合体のみを製造する場合について検討する。

経済性重視型システムにおける燃料製造量は、燃料集合体が内側炉心及び外側炉心 をあわせて 325 体/年となる。これは基準システムにおける炉心燃料集合の 1.2 倍であ る。燃料ピンの製造本数は、内側炉心 196 本/日、外側炉心 164 本/日であり、基本シ ステムにおける製造本数とほぼ同数である。燃料顆粒の使用量は、内側炉心燃料用 92.5kgHM/日、外側炉心燃料用 77.5kgHM/日、軸方向ブランケット燃料用 80.5 kgHM/ 日となり、基準システムと比べて、内側炉心燃料用及び外側炉心燃料用でともに約 2 倍、軸方向ブランケット燃料用で約 1 倍となっている。

- (2) 経済性
- (i) 建設費
- (a) 主工程機器台数

主工程設備費算定のために設定した燃料製造主工程の主要機器台数を表 5.2.6 の経 済性重視型システムの欄に示す。

(b) 建設費

設備費および建屋費を表 5.2.7 の経済性重視型システムの欄に示す。主工程設備費 は上記の台数に基づく。

(ii) 操業費

(a) 人員および人件費

燃料製造関係の人員は 150 人、件費単価は 900 万円/人年とし、13.5 億円/年に設定 した。

(b) 修繕費、消耗品等諸費

試算の結果、修繕費(機器交換費、定検材料費)が13億円/年、消耗品等諸費(補充U、ユーティリティ等を含む)が20億円/年となった。

(c) 操業費(年間総操業費)

上記の人件費および修繕費、消耗品等諸費に以下の事業税および一般管理費を加えた年間総操業費は、56億円/年となった。表 5.2.8の経済性重視型システムの欄に操業費の内訳を示す。

(iii) 部材費

ラッパ管や被覆管などの燃料部材費用であり、製品 1kgHM あたり 5 万円、年間 25 億円とした。

(iv) 燃料製造単価

(i)、(ii)、および(iii)の結果から算出した燃料製造単価は、表 5.2.9 の経済性重視型 システムの欄のとおりとなった。

燃料製造単価の目標値は 16 万円/kWh であるので、目標額を基準システムで 7.1 万 円/kgHM、経済性重視型システムで 8.2 万円/kgHM 超過しているが、燃料製造単価 を発電単価に換算すると、基準システムで 0.34 円/kWh(平均燃焼度 63GWd/t) 経 済性重視型システムで 0.20 円/kWh(平均燃焼度 108GWd/t)となる。

- (3) 環境負荷低減性
- (i) 廃棄物発生量
- (a) 通常運転時の廃棄物

基準システムと同じ方法で発生量を評価した。発生量は低レベル廃棄物(地層処分 並)約25t(ドラム缶約250本) クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以 外)約20tと評価した。

同一セル内で、内側炉心、外側炉心、ブランケットの各々で専用ラインを設ける製造形態は基準システムと変わらないが、炉心燃料ラインの処理量が約1.8倍となるため、機器数が増加し、廃棄物発生量が1.0~1.2倍程度に増加した。

(b) 廃止措置時の廃棄物

基準システムと同様の評価方法により、廃棄物発生量は、低レベル廃棄物(地層処 分並)約520t(ドラム缶約5,200本) クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリー ト以外)約12,900t、同(コンクリート)約122,000tとなった。

同一セル内で、内側炉心、外側炉心、ブランケットの各々で専用ラインを設ける製造形態は基準システムと変わらないが、炉心燃料ラインの処理量が約2倍となるため、機器数とセル容積が増加し、廃棄物発生量が1.0~1.1倍程度に増加すると評価した。なお、カッコ内の数値は100kgを200リットルドラム缶1本と換算したドラム缶本数である。

### 5.2.3 技術開発項目

酸化物電解顆粒振動充填燃料製造に係わる開発課題を表 5.2.10 に示す。また、概要 を以下に示す。

(1) 技術的成立性に係わる項目

低除染 MA 燃料棒の軸方向密度、および Pu 軸方向分布の充填特性把握

ピン製造における燃料ピン内 Pu 軸方向分布測定は、核分裂情報に比例性が高い アクティブ Y 法による遅発 Y 線測定が有望と考えられるが、中性子強度や燃料ピン 駆動速度に関する装置化の制約条件について詳細検討の必要がある。

Pu 富化度管理の精度の把握

酸化物電解再処理で得られる MOX 顆粒は Pu 含有率のばらつきが大きい。この ため核物質量の確定技術が重要となる(臨界安全、計量管理、品質管理)。

低除染 MA 添加燃料での機器の安定性

低除染 MA 燃料からの発熱・放射線量およびそれが設備(特に検査機器類)に及 ぼす影響の確認等を行う必要がある。

燃料仕様の最適化

上記の ~ を通じて量産性が高く、品質的に優れた燃料を製造可能な燃料仕様 を調査する必要がある。

(2) 安全性に係わる項目

質量制限値による臨界管理

質量管理機器の臨界防止に関しては、2 重装荷 (ダブルバッチ)を想定した場合

でも臨界とならない事を基本としており、核的制限値を 8.4kg-Puf と設定している

が、搬送容器などの複数ユニットの臨界防止は今後詳細な検討が必要である。

金属微粒子による火災・爆発防止

Uゲッタに関しての要素技術開発の結果から、球状の金属粒子なので空気中でも 発火しないとの情報を得ているが、今後ゲッタの発火特性の把握およびこの特性に 応じた検討が必要である。

(3) 経済性に係わる項目

セル内遠隔製造技術(機器開発)

保守・補修システムの最適化、検査手法を確立、機器の長寿命化の検討を行い、 建設費、操業費低減を図る必要がある。

集合体構成部材の低価格化

被覆管、ラッパ管、エントランスノズル等の集合体構成部材の安価な加工方法を 開発する。

(4) 資源有効利用性に係わる項目

本システムは微粉を取扱うシステムであり、核物質ロスが懸念される。発生粉末の 回収率の向上方策を実験室規模で検討する必要がある。

(5) 核拡散抵抗性に係わる項目

計算による計量管理手法の開発

実際の酸化物電解顆粒燃料の分級後顆粒の Pu 富化度のバラツキデータを把握し、 成分分析値と秤量値を用いて、計算により工程内の Pu 量の把握・管理を行う技術 を開発する必要がある。

直接測定による Pu 重量の評価技術開発

計算(成分分析値×秤量値)による評価とは違い、直接計測による各機器内の燃料顆粒滞留量の確認は、保障措置上必要となる技術である。

参考文献

1) 河野他、「乾式リサイクルシステム酸化物燃料の品質評価」JNC TN9400 2000-054
 (2000)

表5.2.1	燃料の概略仕様(基準システム、	50tHM/y )
--------	-----------------	-----------

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体
電気出力	MW e	1,500		
熱出力	MWth	3,570		
運転サイクル長さ	ヶ月	17		
増殖比	-	1.2		
集合体配列ピッチ	mm	179.7		
燃料交換バッチ数	バッチ	4	4	4
集合体数	体	316	266	198

燃料集合体仕様	単位	内側炉心 燃料集合体	外側炉心 燃料集合体	径方向ブランケット 集合体
全長	mm	4,370	4,370	4,370
燃料要素の本数	本/体	271	271	127
燃料重量	kgHM/体	125.0	129.4	180.0

		内側炉心燃料		外側炉心燃料		なち向プランケット
燃料要素仕様	単位	炉心燃料	上/下 軸ブランケット	炉心燃料	上/下 軸ブランケット	燃料
全長	mm	2	905	2	,905	2,905
被覆管内径	mm	7	.50	7	.50	11.90
燃料スタック長	mm	800	350/350	800	350/350	0
(株料) ま 早		C	.46	C	).48	1 4 2
※11年1月11日1日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日	купи/ 4	0.25	0.21	0.26	0.22	1.42

燃料	顆粒仕様	単位	内側炉心用 顆粒	外側炉心用 顆粒	軸ブランケッ ト用顆粒	径ブランケット 用顆粒
約次	酸化物顆粒	11 00		~ 1000	(5分級)	
↑⊻1도	ウランゲッター	μπ	100以下	100以下	100以下	100以下
	MOX顆粒		61.5	72.7	-	-
포스로	UO2顆粒		26.9	15.9	100	81.2
里玉周  混合割合	MA顆粒	wt%	3.8	4.5	-	-
	ウランゲッター		7.7	6.8	-	-
	補充UO <sub>2</sub>		-	-	-	18.8

搬送容器概要	装置外形寸法: W260mm×L260mm×H750mm	取扱容量: 56kgHM(63kgMOX)		
MOX 燃料取扱 制限量 (kg-MOX)	30kg 30kg	30kg		
想定最大 Pu-f 富化度	30% 30%	30%		
核分裂性 Pu 取扱 制限量 (kg-Pu f HM)	8kg 8kg	8kg		
ダブルバッチ想定 の有無	ダブルバッチ想定 ダブルバッチ想定	ダブルバッチ想定		
臨界制限の基本 概念	質量管理 質量管理	質量管理	形 状 で 取 い )	形状管理 (集合体単位で 取扱い)
装置	分級装置 顆粒混合装置	振動充填。 端栓溶接装置	ピン検査装置	集合体組立装置

表 5.2.2 主要機器の臨界管理の基本方針

分類	粒度	備考(想定使用量)
	1000µm以上	燃料として使用しない
	<b>850 ~ 1000 µ</b> m	200 1000 ······ 500/
	405 050	600 ~ 1000 μ m : 50%
	425 ~ 850 μ m	106 ~ 600 um · 159/
	$106 \sim 425 \ \mu$ m	108~000µm:13%
	$45 \sim 106 \ \mu$ m	
	45 μ m 以下	100µm以下.35%

# 表 5.2.3 分級顆粒の粒度分布(想定)

燃料種類	内側炉心用 顆粒	外側炉心用 顆粒	軸ブランケット 用	径ブランケット 用
燃料集合体(体/年)	144	121	-	90.4
燃料ピン(本/日)	195	165	-	57.4
顆粒(kgHM/日)	48.4	42.6	77.8	81.5

表5.2.4 燃料製造内訳(基準システム、50tHM/y)

# 表 5.2.5 酸化物顆粒燃料製造に必要な機器単体能力設定

工程	設計パラメータ	設計値	設計根拠(設定の考え方)
1) 分級工程	粉砕方法		
	分級能力(時間/ロット)	1hr/28kg-HMバッチ	時間的な余裕を見込んだ処理時間設定
	/分級方式	振動ふるい(2段)	一般産業の例を参考に設定
	/投入バッチサイズ	28 k g - HM /	臨界安全の設定根拠による
	/分級操作時間	1.5hr/パッチ(マテハン含む) (移送容器の搬入~分級~ 容器搬出)	移送容器の搬入から分級、容器搬出までの運転手順 を積上げ作業時間を設定した 正味の振動篩時間:60minでり、分級時間設定に問題 ないことの確認が必要。
	/ 分級種類	5分級	・RIARおよび国内試験実績により設定 ・分級後の顆粒を使い切ることが出来るよう、粒径毎 の混合割合に尤度を持たせた設定が必要。 ・内部の組成が不均一である顆粒のサンプリング代 表性を担保出来る手法に関する検討が必要。
2) 顆粒混合 工程	組成調整精度		富化度調整は事前に分級後の顆粒をサンプリング分析し、所定のPu富化度となるよう計算・計量して混合する。
	組成のロット内均質性		MOX顆粒、UO2顆粒とUゲッターが均一に混合されて いることの確認が必要。
	·混合/計量能力	0.5hr/28kg-HMバッチ	時間的な余裕を見込んだ処理時間設定
	/混合方式	ダブルコニカル式	一般産業の例を参考に設定
	/混合バッチサイズ	28 k g - HM / バッチ	臨界安全の設定根拠による
	/混合操作時間	1.1hr/パッチ(マテルン含む) (混合容器搬入~混合~搬 送容器搬出)	顆粒容器の搬入から混合、搬送容器搬出までの運転 手順を積上げ作業時間を設定した。 ・正味の混合時間:12minであり、計量と混合時間設 定に問題ないことの確認が必要。
3) 振動充填・端 栓溶接・ピン組	/端栓溶接方式	加圧抵抗溶接	東海R&Dを参考
立·検査工程	/振動充填時間 /端栓溶接時間	16.1min/ピン(マテハン含む) (ビンカートリッジ 搬入 ~ 軸プラ / 炉心部振動充填 ~ ス ペーサ取り付け) ~ 端栓溶 接 ~ ビンカートリッジ 払出)	ビンカートリッジ 搬入から振動充填、端栓溶接までの運転 手順を積上げ、作業時間を設定した。 ・振動充填時間:炉心部5.5min(L=850) ・上部端栓溶接時間:1.0min 振動充填中は顆粒投入ロートで抑え、微粉が飛散し ない構造としている。 Heガス置換はRIARを参考に顆粒充填前に行うものと しているが、燃料仕様(封入ガス組成)に問題ないこと を確認しておく必要がある。
	・歩留 ・仕様適合性 /スミア密度 /軸方向密度分布 /軸方向Pu分布 (溶接欠陥、表面汚染 密度等)	98%	高除染MOXペレット燃料、軽水炉燃料の実績等を参考に設定する。セル内雰囲気(汚染環境)で製造可能な表面汚染密度の設定、ODS鋼被覆管の端栓溶接欠陥等のスペックの設定が重要となる。 スミア密度、軸方向密度分布については東海R&Dの結果を参考に、被覆管長さ約2.9mの振動充填挙動に対する確認が必要。 (設計公差は今後の炉側との取り合い条件と考えている)

設備名称	基準システム	経済性重視型システム
分級設備	2	2
混合設備	2	2
振動充填・端栓溶接設備	3	4
燃料要素除染設備	3	4
He リーク試験設備	1	1
ピン検査設備1	3	3
ピン検査設備2	3	3
ピン検査設備3	4	4
ワイヤ巻付設備	3	4
集合体組立設備	1	1
集合体検査設備	1	1

表 5.2.6 主工程機器台数の比較

(単位:台数)

### 表 5.2.7 建設費の比較

項目	基準システム	経済性重視型システム
燃料製造主工程設備費	229	284
周辺設備費	228	228
建屋・電気・換気設備	201	212

(単位:億円)

# 表 5.2.8 操業費の比較

操業費内訳	基準システム	経済性重視型システム
人件費	13.5	13.5
修繕費	12	13
諸費(消耗品費等)	20	20
業務分担費	7	7
事業税	2	2
合計	54	56

(億円/年)

### 表 5.2.9 燃料製造単価の比較

項目	基準システム	経済性重視型システム
燃料製造単価	23.1	24.2
資本費	7.3	8.0
操業費	10.8	11.2
部材費	5.0	5.0

(単位:万円/kgᡰM)

大目標     目標達成の要素		目標達成方策(課題)		課題の細分化	ý	効果	対応する技術(重複して出現)
技術的成立性 基本プロセスの成立性	┡	Pu富化度管理		非均質顆粒のPu富化度 管理		大	燃料製造技術
	ł	燃料のO/Mの調整		ウランゲッターの開発		大	金属粒子燃料の製造技術開発
	L	燃料粒子の高密度充填	$\left  \right $	高密度充填のための振動 条件最適化		大	振動充填技術
			+	粒権分布のコントロール		大	振動充填技術
			L	解析評価技術の開発		大	振動充填技術
一量産性	┢┯	量産に対応した機器構造		複数ピン同時振動充填の 確認		大	振動充填技術
	┝	処理能力の向上		プロセスの合理化		中	システム設計
	┝	品質管理		検査手法の確立		大	システム設計 要素技術
			$\left  \right $	検査基準の確立		中	システム設計
			L	燃料仕様最適化		大	システム設計
	L	自己照射損傷の影響評価				中	低除染·TRU燃料製造技術
セル内安定操業	┢┌	運転自動化技術の開発				中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
	-	計測制御				小	システム設計
	-	工程間の核物質移送技術高度化				中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
	-	計量管理技術の開発				中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
	-	低除染MA添加燃料での機器の 安定性		耐放射線対策		大	システム設計 要素技術
			L	高発熱対策		大	システム設計 要素技術
	L	遠隔保守補修技術の確立		機器のモジュール化		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク技術
			L	保守補修対象機器の除染		小	除染技術
安全性臨界防止	$\left  \right $	Pu装荷量(質量)制限による単一ユニット の臨界管理		質量管理の高度化		中	システム設計/Pu物流管理手法 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		複数ユニットの臨界管理	T	- 設備配置間隔の最適化 臨界隔離壁設置		大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
				搬送台車の異常接近防止		大	システム設計
一作業員の被ば〈低減	┝	遠隔操作·遠隔保守技術		燃料製造自動化技術		大	セル内遠隔製造・保守技術(機器開発)
高発熱燃料の取り扱い (低除染・TRU燃料)		燃料の冷却		合理的な冷却対策		中	低除染·TRU燃料製造技術
一火災·爆発防止	-	化学的安全		ウランゲッターの開発		大	金属粒子燃料の製造技術開発
一耐震性	┝	耐震設計				中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
安全評価	╟┬	安全設計方針·判断基準整備				中	システム設計
	L	安全評価				中	システム設計

## 表5.2.10(1/2) 技術検討項目

大:技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)		課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
経済性	建設費低減	プロセス合理化		機器設計の最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク技術
				工程間の核物質移送技術高 度化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		機器配置のコンパクト化		系列数、配置等最適化	中	システム設計
				保守・補修システムの最適化	大	システム設計(遠隔保守技術)
	一操業費低減	」 遠隔操作·遠隔保守技術		燃料製造自動化技術	大	セル内遠隔製造技術(機器開発)
		品質保証	Т	検査手法の確立	大	非破壊検査技術(充填密度、Pu濃度分布)
			-	検査基準の確立	中	検査基準の整備
				燃料仕様最適化	大	燃料設計コード整備及び性能評価
		集合体部材の低価格化			大	システム設計
		ー機器の長寿命化			大	システム設計
	- 稼働率向上 -	保守期間短縮		遠隔保守技術	大	システム設計
		放射線劣化及び発熱対策		遠隔保守技術	中	システム設計(検査機器開発)
	廃止措置費低減	施設のコンパクト化			小	システム設計
資源有効利用	U/TRUのリサイクル	— U/TRUの回収率向上		発生粉末の回収率向上	大	低除線·TRU燃料製造技術
	工程ロス低減	U/TRU工程ロスの定量的評価			小	システム設計
環境負荷低減	廃棄物発生量低減	廃止措置時の二次廃棄物量低 減		機器の長寿命化	小	システム設計/解体廃棄物量評価
			L	台数削減	小	システム設計/解体廃棄物量評価
		_ 廃棄物除染技術開発			中	廃棄物発生量低減
		解体廃棄物の削減		プロセスのコンパクト化	小	システム設計/解体廃棄物量評価
		分析廃棄物中に含まれるTRUの低減		分析サンプルサイズ、 サンプリング頻度の最適化	小	システム設計
	解体廃棄物の削減	一プロセスのコンパクト化			小	システム設計/解体廃棄物量評価
核拡散抵抗性	保障措置	保障措置技術の高度化			大	保障措置技術(高精度非破壊分析技術)
						Pu物流管理手法
		核物質の滞留量 (ホールドアップ)の確認対策			大	保障措置技術(計量管理、分析技術)
						Pu物流管理手法
	核物質防護				小	システム設計
運転·保守補修性	運転			燃料製造自動化技術	大	システム設計
	保守補修	遠隔操作・遠隔保守技術の確 		モジュール化技術	大	システム設計
			L	除染技術開発	小	廃棄物発生量低減

### 表5.2.10(2/2) 技術検討項目

大:技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題



# 図 5.2.1 プロセスブロックフロー



	: k g / 目) (5 7) (5 7) (5 7) (0 02 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
	(単位 (単位 (258) (258) (258) (002) (007) (007) (000) (00
民 正程 (操作) とス廃棄物 た ス 廃棄物	(65) (6496) (013) (013) (013) (011) (01) (0
····································	外側軸7 (64) (64) (64) (64) (00) 000 000 000 000 000 000 0
	外側好心 (63) (63) 28.49 0.01 0.01 0.01 0.01 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.01 7% 7% 7% 1.1% 7% 1.1% 7% 1.1% 7% 1.1% 1
	$\begin{array}{c} (62)\\ \hline 79,10\\ \hline 003\\ \hline 003\\ \hline 001\\ \hline 001\\ \hline 001\\ \hline 001\\ \hline 001\\ \hline 000\\ \hline$
■ 	内周離子7 (61) (61) 002 000 000 000 000 000 000 000 000 00
<ul> <li>● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●</li></ul>	内側から (60) 35.78 001 10.65 0.38 0.01 0.01 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0
	(57) (57) (000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0
経済向ブ 	(56) (56) (107) (1
	(54) (5258) 0.002 0.001 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.000000
	(53) 38.74 0.01 0.000 0.00
	(52) (52) 000 000 000 000 000 000 000 000 000 0
	(51) (51) (51) (000 (00) (000
	(50) (50) (1380) (000) (1382) (000) (1382) (138
	貯蔵分 (42) (42) 229 682 682 000 000 000 000 000 000 000 000 000 0
	(41) (41) (41) (105
	(40) (40)
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □	小前 2093 0.08 0.77 0.77 0.77 0.77 0.77 0.00 0.00
理製品 MOX析出 70.1k 163.7 163.7 3.7 3.7 3.7	後り電解 (13) (13) 0.13 0.14 0.21 0.21 0.21 0.21 0.21 0.20 0.00 0.00
	● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●
	司時電報 (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10)
	<ul> <li>(1) (1) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2</li></ul>

酸化物電解法燃料製造工程物質収支 5.2.3**X** 

注:絞り電解析出物(13)には再処理する燃料から回収する析出物以外に、浴調整で用いた燃料の回収分を含む。





# 図5.2.5 顆粒混合設備







# 図5.2.8 集合体組立設備









図 5.2.11 原料顆粒調整工程 [粒度分布調整/Pu 富化度調整/ 品質管理](例)



図 5.2.12 平均 Pu 富化度变動要因

サンプリング 誤差	顆粒間Pu含有率分布(知見なし) :顆粒Gr.内は一様分布(モデル化) case 1 正規分布(モデル化) case 2 変動幅:仮定(実験値参考)
分析誤差	1 %(相対誤差)
秤量誤差	0.1 %(相対誤差)

図 5.2.13 Pu 富化度変動要因の設定

Pu富化度仕様	22.4±1.0 wt.%	サンプリング誤差等の
Pu富化度調整誤差 (U切出誤差)	0.5 wt.%(設定)	許容範囲 0.5 wt.% 以下

図 5.2.14 平均 Pu 富化度の管理目標設定



図 5.2.15 顆粒の Pu 含有率モデル(分布幅)



図 5.2.16 顆粒の Pu 含有率モデル(分布形)



図 5.2.17 Pu 含有率への誤差伝播



図 5.2.18 サンプリング誤差/分析誤差/秤量誤差を考慮 した Pu 富化度分布



図 5.2.19 サンプル顆粒数と変動幅 2 の関係

### 5.3 金属電解プロセスを利用した MOX 顆粒振動充填燃料製造

本システムは、金属電解プロセスを利用して得た(U,Pu,MA)O2 粉末、UO2 粉末等 を出発物質に、Pu 富化度を調製し、これを被覆管に振動充填して燃料を製造するシ ステムである。本システムの特徴を以下に示す。

形状管理が困難であり、質量管理を行わざるをえない工程(Pu 富化度調整等) が複数存在する。したがって、燃料の製造はバッチ処理による小規模ロット生産 方式になる。

顆粒性状に合った充填条件の確立、検査方法を含む品質保証の確立が必要である。

### 5.3.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

本節では、FBR 導入初期における燃料の増殖比増大を目指す資源重視型の Na 冷却 高速炉心および平衡期における同一出力をより少ない燃料で達成しようとする経済性 重視型の Na 冷却高速炉心に燃料を供給する金属電解プロセスを利用した MOX 顆粒 振動充填燃料製造システム(以下、それぞれ「資源重視型システム」および「経済性 重視型システム」という。)について検討を行う。両システムとも、燃料製造量は 50tHM/y とする。

(1)設計の基本方針と前提条件

乾式再処理法の一つである金属電解法(米国 ANL の改良技術)による再処理シス テムと振動充填燃料製造システムプラントについて、乾式法の絞り込みのために必要 な成立性に係るデータベースの整備と評価を主な目的として、システム設計検討を行 った。

燃料製造システムの設計・評価範囲は、顆粒燃料製造工程、振動充填工程および集 合体組立工程とする。顆粒燃料製造工程では、内側炉心用顆粒燃料、外側炉心用顆粒 燃料、軸方向および径方向ブランケット用顆粒燃料を製造する。振動充填工程以降の 工程は 5.2「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造」の検討結果で補完することとした。

炉心用顆粒燃料は、使用済燃料集合体を金属電解処理および酸化転換処理により得た (U,Pu,MA)O<sub>2</sub> 粉末と、使用済の径方向ブランケット燃料の熱脱被覆より得た UO<sub>2</sub> (若干の Pu、FP が混入)粉末を混合し、プルトニウム富化度を調整した後、転動造 粒、分級、焼結して製造する。また、ブランケット用顆粒燃料は、金属電解処理して 回収した U 金属を酸化転換した UO<sub>2</sub> 粉末を転動造粒、分級、焼結して製造する。以下 に顆粒燃料製造工程の各仕様を示す。

(i) 施設設備の設計および配置方針

顆粒燃料製造工程の施設設計および配置方針は、再処理施設との一体型プラントとし、再処理製品が電解分離設備(炉心および軸方向ブランケット処理)および脱被覆設備(径ブランケット処理)の2系統から供給されることに対応した設備構成とした。 再処理・顆粒製造工程設備は原則としてセル内に収納し、遮へい機能は原則セル壁で 担保する。

(ii) 保守方針

顆粒燃料製造工程で、セル内区域で汚染が想定されるセルでの保守は、インセルク レーン(ICC) 台車、パワーマニプレータ(PM) マスタースレーブマニプレータ (MSM) 両腕型マニプレータ(BSM) セル窓を用いた遠隔保守概念を採用する。 なお、MSM 操作スペースとして有効幅 5m 以上を確保する。

核燃料を非密封状態で扱うセルは完全遠隔保持セルとする。また、密封状態で扱い、 撤去が容易な場合は遠隔・直接併用セルとする。

(iii) 操業条件

製造規模は 50tHM/年、年間の運転日数は 250 日とする。ただし、そのうち 50 日 は故障により停止しているものとし、実稼働日数は 200 日(24 時間運転)と見積も る。予備機は設けない。顆粒製造工程各工程における物質収支上、有意な損失が想定 される工程にはリワーク設備を考慮するものとした。

(iv) 製品燃料条件

燃料充填密度は炉心燃料部で 82%TD、ブランケット部で 90%TD とした。内側炉 心燃料は、Pu 冨化度 21.1%、MA 含有率 1.0wt%、FP 含有率 1.2wt%以下、外側炉心 燃料で 24.9%、MA 含有率 1.2wt%、FP 含有率 1.2wt%以下である。

(v) 製品歩留まり

顆粒燃料製造工程における製品歩留まりは 60%程度と見込んでいる。不合格 40%の 内訳は、富化度調整工程のリワーク 10%(暫定) 分級工程においてリワーク 30%を 仮定した。いずれも、サンプリングにより処理状態を確認し、規格から外れたものを 原料として再利用するものである。なお、分級工程でのリワークは脱バインダ工程お よび微粉砕工程を別に設けて処理する。

(2) 安全設計に関わる検討

(i) 臨界安全設計

単一ユニットの臨界管理方法は、連続運転に適した形状管理を基本とする。

(ii) 火災爆発防止

燃料製造で使用する火災爆発に係わる物質は水素ガスであるが、不活性ガスで 5% に希釈して使用する。

(iii)耐震

各燃料製造機器を、各機器が内包する放射能により、ウラン・プルトニウム混合酸

化物燃料加工施設安全審査指針の耐震設計上の重要度分類に応じて分類し、各機器は これに応じた耐震性を有するような構造概念となるよう配慮した。

(3) プロセス設計

顆粒製造工程では、仕様の異なる燃料については混入を避けるため、基本的に別系 統とした。顆粒製造フローおよびシステム設計の前提である要素技術をそれぞれ図 5.3.1 および図 5.3.2 に示す。以下に主要プロセスの概要を述べる。

(i) Pu 富化度調整工程

酸化転換により得た(Pu,U,MA)O2 粉末と、熱脱被覆設備から払い出された UO2 粉 末を、収缶機にて所定量取り分け、混合機により混合し、所定の富化度の燃料粉末と した後、容器に収め、貯蔵する。なお、原料粉末の Pu 含有率が製品仕様の富化度と 大きく異なることを考慮し、2 段階で混合することとした。また、サンプルの Pu 富 化度分析で富化度を確認し、規定外の粉末燃料はリワークとして、同一プロセスにて 富化度調整を再度行なうこととした。

富化度調整のリワークを 10%と仮定した。また、1 バッチで処理する量は、臨界安全を考慮し暫定的に 5kgHM とした。

(ii) 転動造粒工程

バインダ(結合剤)の調整を行った後、バインダを添加しながら転動造粒機による 造粒を行う。なお、バインダにはブチラール系樹脂などを用いる。低除染、MA入り 燃料粉末にバインダなどの溶剤を添加する場合には発熱、高温化による揮発の問題が 存在する。すなわち、造粒過程で有機材であるバインダを加えるのが通常の製造方法 であり、高発熱で 70~80 になると通常使用する有機溶剤が蒸発する。これを回避す る手段として以下を検討した。

造粒機内の温度の上昇を防止するため、造粒機内雰囲気温度を冷却機により低く 制御し、燃料粉体からの除熱を図る。

燃料粉体の取扱量を制限する。例えば温度上昇を 50 に抑える場合、転動造粒 機回転板の上に載せる燃料粉体の積み上げ高さを 5.4cm に抑える。

高温まで耐える溶剤を使用する。以下の溶剤により100 程度まで耐える期待が あるが、核燃料製造に適用した実績がなく、今後開発試験が必要である。

a 水(80%) + アルコール(20%程度)

b エチレングリコール

(iii) 粒子の分級工程

転動造粒機で製造した粒子を、振動充填に適する3レベルの粒子径幅に、電磁振動 により分級する。後工程の焼結での焼きしまりを考慮した代表的な粒子径は200±50、 400±100、1000±250µm である。分級された造粒粉は所定量ずつ次の焼結工程用のボ ートに入れる。スペックアウトとなった粒子はリワークとして、脱バインダ加熱処理 を行った後、再度粉砕し、転動造粒工程に戻す。これまでの製造試験を参考に焼結工 程に移る粒子燃料の歩留まりは約70%と仮定した。

(iv) 焼結工程

粒径ごとに区別された造粒粒子を炭酸ガス雰囲気にて予備焼結(バインダ除去)本 焼結した後、水素ガス雰囲気で還元処理する。温度分布を持たせた焼結炉内に、原料 を入れたボートを一定時間ごとに入れ、炉内を移動中に昇温、加熱処理、降温した後、 払い出す。加熱条件を以下に示す。

- a 予備焼結:CO2雰囲気、700 、5時間
- b 本焼結 : CO2 雰囲気、1400 、6 時間
- c 還元 : H<sub>2</sub> 雰囲気、1400 、2 時間

予備焼結で転動造粒バインダを除去し、続いて本焼結を行い、最後に還元処理を行 なう。内側炉心用顆粒燃料となる造粒粉、外側炉心用顆粒燃料となる造粒粉から、焼 結により、(U,Pu,MA)O<sub>2</sub> 顆粒が得られる。またブランケット用顆粒燃料となる造粒 粉から、焼結により UO<sub>2</sub> 顆粒が製造される。オフガスには転動造粒バインダ、CO<sub>2</sub>、 H<sub>2</sub>、FP(Cs、Ru など)が含まれる。

(v) 顆粒燃料一時貯蔵工程

焼結後、検査を行った顆粒燃料の一時貯蔵を行う。内側/外側炉心燃料、ブランケット燃料ごとにラックを分けて、ホッパ缶の貯蔵容器(容器の形状は無限円筒直径臨界制限値より内径 14cm、容積約 5300cm<sup>3</sup>の円筒形)に入れて貯蔵する。貯蔵容量は官庁検査対応用に各2週間分の保管が出来るものとする。

(vi) リワーク用の脱バインダ工程および微粉砕工程

分級工程にて発生する規格外の造粒粉に対し、バインダ除去、微粉砕を行い、転動 造粒工程に戻す。微粉砕はジェットミルにより行う。脱バインダ加熱炉の加熱条件は 700 で5時間、CO₂雰囲気とした。微粉砕はジェットミルにより行なう。

### 5.3.1.1 資源重視型システム概念構築

- (1) 顆粒製造工程設備設計
- (i) 必要生産量の検討

顆粒燃料製造工程における、年間生産量、製品燃料条件および製品歩留まりから設 定した物質収支を図 5.3.3 に、工程フローを図 5.3.4 示す。製造する顆粒燃料は内側炉 心用顆粒燃料、外側炉心用顆粒燃料、ブランケット用顆粒燃料の3種類である。再処 理から受入れる原料重量と年間製造顆粒燃料重量を以下に示す。

- (a) 顆粒製造工程受入原料重量
  - ・再処理の金属電解工程から受入れる U は年間約 26t である。

・再処理の金属電解工程から受入れる(U,Pu,MA)は年間約 6.2t(U:約 1.5t、Pu:

4.4t、MA:約0.2t、FP0.02t)である。

- ・再処理の熱脱被覆工程から受入れる使用済み径ブランケットの粉末燃料は U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>、
   PuO<sub>2</sub>、MAO<sub>2</sub>、FP 酸化物の混合物であり、年間 15.3t(U:15.0t、Pu:0.3t、
   MA: < 0.01t、FP:0.01t)である。なお、原料の不足分は劣化 UO<sub>2</sub> 粉末で必要
   量補充することとした。
- (b) 年間製造顆粒燃料重量
  - ・内側炉心用顆粒燃料:2,131kg-Pu(Pu 富化度 0.21)
  - ・外側炉心用顆粒燃料:2,117kg-Pu(Pu 富化度 0.25)
  - ・ブランケット用顆粒燃料:31,395kg-U
- (ii) 設備・機器概念設計

安全性(臨界、火災・爆発) 核拡散抵抗性(ホールドアップ) 遠隔保守・補修性 などの設計要求を満たす設備概念を検討し、概略構造、安全対策、設備台数などを示 す。

(a) Pu 富化度調整設備

本設備は、酸化転換により得られた(U,Pu,MA)O<sub>2</sub> と径ブランケット燃料粉体を計 量式の混合機で所要の Pu 富化度に調整する設備である。内側/外側炉心燃料用にそれ ぞれ設置するものとし、処理能力は内側炉心燃料の場合、1 日当たりの必要な処理量 が 56.1 kgHM で、12 バッチの処理とした。なお、処理時間は 1 バッチあたり 1.5 時 間(暫定値)として、約 18 時間となる。また、外側炉心燃料の場合、1 日当たりの必 要な処理量が 47.3kgHM で、1 バッチで処理する量を 5kgHM(暫定値)とし、1 日 に 10 バッチの処理とした。なお、処理時間は 1 バッチあたり 1.5 時間として、約 14 時間となる。いずれの燃料も 1 基で処理できる。

内側炉心用顆粒燃料(Pu 富化度 21.1%(目標值))

必要処理量:56.1kgHM/日、運転時間:約18時間

外側炉心用顆粒燃料(Pu 富化度 24.9%(目標值))

必要処理量:47.3kgHM/日、運転時間:約14時間

富化度調整設備における今後の課題は、粉末混合法の最適化が挙げられる。現状の 混合粉末はロータ(羽根)の回転による混合としているが、最適化運転条件の選定、 設備設計、粉末物性制御面等に関する検討が今後必要である。

(b) 転動造粒設備

本設備は、Pu 富化度を調整した(U,Pu,MA)O2 混合粉末、UO2 粉末にバインダを添加して、転動造粒機により粒子径の成長(造粒)を行う設備である。内側/外側炉心燃料、ブランケット燃料用に設置するものとした。また、処理能力は、1 バッチ当たりの処理量の臨界安全を考慮して、炉心燃料で 5kgHM、ブランケット燃料で 10kgHM とした。分級によって粒径の仕様からはずれる割合が 30%と仮定して、内側炉心用顆粒燃料 70kgHM/日、外側炉心用顆粒燃料 60kgHM/日、ブランケット用顆粒燃料 225kgHM/日とした。なお、処理時間は1バッチあたり1時間(暫定値)として、そ れぞれ約15時間、13時間、23時間とした。

・内側炉心用顆粒燃料:1日分の必要処理量は72.1kgHM/日、運転時間約15時間
 ・外側炉心用顆粒燃料: 同上 60.8kgHM/日、 同上 約13時間
 ・ブランケット用顆粒燃料: 同上 224.3kgHM/日、 同上 約23時間
 ブランケット用顆粒燃料の1バッチで処理する量は10kgHMとし、1時間で処理するものとすると、それぞれの顆粒燃料の転動造粒設備は各1基で対応できる。転動造
 粒設備を図 5.3.5 に示す。

転動造粒設備における今後の課題は、造粒粒子の粒径分布・歩留まりの確認および 脱バインダの最適運転条件の実規模での把握が挙げられる。

(c) 粒子の分級設備

本設備は、転動造粒機で製造した粒子を、振動充填に適する 200±50、400±100、 1000±250µmの3種類の粒子径に分級する設備である。

内側/外側炉心燃料およびブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとし、製造する粒子の割合を上記の代表的な粒径について、それぞれ10%、20%、40%とし、分級によって粒径仕様から外れる確率を30%としたとき、処理能力は、1バッチ当たりの処理量が臨界安全を考慮して5kgHM(内側及び外側炉心用顆粒燃料)、10kgHM(ブランケット用顆粒燃料)となること、および1日当たりの必要処理量から、内側/外側炉心燃料、ブランケット燃料のそれぞれについて75kgHM/日、65kgHM/日、230kgHM/日とした。

内側炉心用顆粒燃料:1日分の必要処理量は72.1kgHM/日、運転時間約15時間 外側炉心用顆粒燃料: 同上 60.8kgHM/日、 同上 約13時間 ブランケット用顆粒燃料: 同上 224.3kgHM/日、 同上 約23時間 それぞれの顆粒燃料の分級設備は各1基で対応できる。分級設備を図5.3.6に示す。 (d) 焼結設備

本設備は、転動造粒後の粒子を、炭酸ガス雰囲気にて予備焼結(バインダ除去)本 焼結した後、水素ガス雰囲気で還元処理し、(U,Pu,MA)O2 顆粒、UO2 顆粒を得る設 備である。内側/外側炉心燃料およびブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとし た。1 バッチの処理量は焼結用ボートの大きさで決まり、ボートの大きさは炉心管内 径で決まる。内側炉心用顆粒燃料及び外側炉心用顆粒燃料の焼結炉は炉心管内径を無 限円筒直径制限値とすることで臨界安全を担保する。炉心全長を 10m前後とすると、 ボート形状は L250×W100×H50mm となり、ボート内の粒子量は 3.5kgHM となる。 この場合の1日当りの処理量は 84kgHM/日となる。

ブランケット用顆粒燃料用の焼結炉は、その処理量を多くするため、ボート幅を 2 倍にし、ボート形状を L250 × W200 × H50mm、ボート内の粒子量を 7kgHM とする。

処理能力は、分級工程から受け入れる粒子燃料に対応させ、内側炉心燃料で 51kgHM/日、外側炉心燃料で 43kgHM/日、ブランケット燃料で 157kgHM/日とし た。焼結設備を図 5.3.7 に示す。

(e) リワーク用脱バインダ設備

本設備は、分級工程にて発生した規格外の造粒粉を転動造粒工程に戻すため、CO<sub>2</sub> 雰囲気で加熱してバインダを除去する設備である。なお、分級工程で設定したリワー ク割合 30%から、各必要処理量は以下のように評価した。

内側炉心用顆粒燃料:22kgHM/日

外側炉心用顆粒燃料:19kgHM/日

ブランケット用顆粒燃料:67kgHM/日

炉用ボート寸法を焼結炉と同一とし、1 バッチあたりの処理量は、炉心燃料ライン で 3.5kgHM、ブランケットラインで 7kgHM とした。1 日 1 回、7 ボート分をバッチ 処理すれば内側及び外側炉心用顆粒燃料の処理量は 24.5kgHM/日となり、各 1 系統 で対応できる。ブランケット用顆粒燃料に対しては、1 日 1.5 回、7 ボート分を 1 系 統でバッチ処理することで、73.5kgHM/日処理することが可能となる。

(f) リワーク用微粉砕設備

本設備では、脱バインダ処理した規格外造粒粉を微粉砕して粉末燃料とし、再度転 動造粒工程に戻す。

必要処理量はリワーク用脱バインダ設備と同一であり、1 バッチあたりの処理量も リワーク用脱バインダ設備と同一とし、内側炉心用顆粒燃料、外側炉心用顆粒燃料は 1 バッチあたり 3.5kgHM、ブランケット用顆粒燃料は 7kgHM とする。1 バッチあた りの処理時間を暫定値として 1.5 時間とすると、1 日あたりの運転時間は内側炉心用 顆粒燃料 3 時間、外側炉心用顆粒燃料 4 時間、ブランケット用顆粒燃料 10 時間とな り、各1系統で対応できる。

(2) 周辺設備の設計

(i) 分析設備

顆粒製造工程における、試料区分(放射能レベル)、分析項目、分析機器および分析 回数を明確にした。顆粒製造工程の分析項目を表 5.3.1 に示す。

(ii) 保守·補修設備

プラントの通常運転時のマテリアルハンドリングは軽荷重の移送容器などの設備間 移送が主体となり、保守・補修時では設備本体のメンテナンスエリアなどへの移送が 主体となるため、マテリアルハンドリング機器としては、主工程セル上部に PM、ICC を設置し、メンテナンスエリアに MSM を設置する。

また、保守・補修時でプロセス機器の部品・部材の交換および本格点検・補修など の設備の分解を伴う項目はセル内のメンテナンスエリアでの操作となるため、プロセ ス機器はユニット構成とし、一括補修すべきものだけ分解できる構造とする。

(iii) 除染設備

顆粒製造工程の直接保守を行う設備、機器は作業員の被ばく低減、汚染拡大防止の 観点から、保守対象機器の除染を行い、含有放射能レベルの低減をはかることとする。
(iv) 廃棄物処理設備

再処理・顆粒燃料製造工程で発生する廃棄物の廃棄物処理貯蔵建屋は、地下2階、 地上3階(W55m×L42m×H38m)で、このうち、廃棄物処理設備は廃棄物処理貯 蔵建屋地階に設置した。廃棄物処理貯蔵建屋と顆粒製造セルとのアクセスは地下2階 で行う。以下に廃棄物処理貯蔵建屋内の機器配置設計の基本方針を示す。

低および高放射性固体廃棄物処理設備は廃棄物処理貯蔵建屋に設置し貯蔵 分析・サンプリング設備とオフガス処理設備は再処理・顆粒製造建屋と廃棄物 処理貯蔵建屋の両方に設置

(v) 固体廃棄物貯蔵設備

廃棄物処理貯蔵建屋内に設置し、処理容量は1年分とした。

(vi) ユーティリティ設備

本設備は冷却水製造供給設備、冷水製造供給設備、用水製造供給設備、圧空 / ガス 供給設備、蒸気製造供給設備からなる。各設備の概要を以下に示す。

(a) 冷却水製造供給設備

再処理・顆粒製造建屋内の各設備、各セルに冷却水を供給する設備であり、冷却水の製造・供給機能を有する。本設備は安全系と常用系の2系統からなり、安全系は2 系統の冷却水製造・供給系としている。

(b) 冷水製造供給設備

再処理・顆粒製造建屋内の各設備、各セルに冷水を供給する設備であり、冷水の製 造・供給機能を有する。本設備は安全系と常用系の2系統からなり、安全系は2系統 の冷却水製造・供給系としている。

(c) 用水製造供給設備

再処理・顆粒製造建屋内の各設備、各セルに浄水および純水を供給する設備であり、 浄水の供給および純水の製造・供給機能を有する。純水および浄水の供給には遠心式 ポンプを用い、予備を1系統備える。

(d) 圧空 / ガス供給設備

再処理・顆粒製造建屋内の各設備、各セルに圧空およびガスを供給する設備であり、 圧縮空気を製造・供給する系統(圧空系)とガスを備蓄・混合・供給する系統(ガス 供給系)により構成する。

(e) 蒸気製造供給設備

再処理・顆粒製造建屋内の各設備、各セルに蒸気および燃料油を供給する設備であ り、蒸気の供給および燃料油の備蓄・供給機能を有する。

(vii) 建屋・電気・換気設備

再処理・顆粒製造一体化建屋とし、顆粒製造工程は地下2階に設置した。閉じ込め

/ 換排気設計では、放射線管理上の区域区分を以下のように設定し、換気風量については建築基準法などに要求される換気量と設定した温度、負圧を満足できる風量を考慮した。

a ホワイト区域:汚染のない区域

b グリーン区域:操作区域など、通常運転には汚染のない区域

c アンバー区域:保守作業や一部工程を含む区域で、若干の汚染が想定される区域 d レッド区域:セル内区域で汚染が想定される区域

なお、新燃料貯蔵建屋、廃棄物処理・貯蔵建屋など他の建屋は 5.2「酸化物電解顆 粒振動充填燃料製造」で検討することとした。

(3) 配置検討

(i) 機器配置の基本方針

顆粒製造工程セル内の機器配置設計検討にあたり、以下の設計方針のもとに検討を 行った。

顆粒燃料製造セルは、燃料種別に応じて、内側炉心用顆粒燃料及び外側炉心用顆粒 燃料を製造する炉心燃料製造セルと、ブランケット用顆粒燃料を製造するブランケット燃料製造セルの2つのセルに分けた。各顆粒燃料製造ラインにおいて、 (U,Pu,MA)O<sub>2</sub>、UO<sub>2</sub>粉末の取扱いは空気セル内とした。

セル内の主要機器は、物流に従って、各燃料別に直列配置し、壁側に燃料移送台車 を走行する配置とした。機器の補修のため、BSM を設置した。

各顆粒燃料製造ラインには、一時バッファとして1日あたりの処理量を保有する貯 蔵庫を設ける。ただし、原料を受け入れる貯蔵庫は、炉心燃料集合体3体分および径 方向ブランケット燃料集合体1体分(2.25日相当)の原料を一時バッファとして保有 する。なお、UO2など粉末一時貯蔵庫は他施設から受け入れて本設備であらかじめ貯 蔵しておくものであるから、2週間分を保有する。

リワークラインがある場合、一時バッファに加え、品質管理バッファとして1日当 りの処理量も保有するため2日分の処理量を保有することとした。

本顆粒燃料貯蔵庫から払い出す、内側炉心用、外側炉心用及びブランケット用の各 顆粒燃料の貯蔵庫は、官庁の立会検査に対応するため、品質管理バッファとして2週 間分の処理量を保有する。

(ii) 配置設計結果

再処理・顆粒製造建屋内の顆粒製造設備配置を図 5.3.8 に示す。再処理・顆粒製造 建屋全容積は、地下1階(一部地下2階)、地上4階建て(W95m×L96m×H39m) で、約 31.5 万m<sup>3</sup>となった。そのうち、顆粒製造設備関係容積は、炉心燃料製造セル で約 1.0 万m<sup>3</sup>(15m×62m×11m)、ブランケット燃料製造セルで約 0.6 万m<sup>3</sup>(10.5m ×55m×11m)である。

- (4) 技術評価
- (i) 技術的成立性の評価
- (a) 基本プロセスの成立性

顆粒燃料製造工程における主要な課題を以下に示す。

富化度調整における粉末混合法の最新の成果を反映させる必要がある。

富化度調整における粉末混合はロータ(羽根)の回転による混合法を設定しているが、高速大量処理が可能な富化度調整機器の選定と実証が必要である。

転動造粒における造粒粒子の粒径分布・歩留の確認および脱バインダの最適運 転条件の把握が必要である。

造粒において、得られる粒子の粒径分布およびその歩留を実規模で確認する必要 がある。また、設定した粒径での歩留が最大になるように、造粒条件(バインダ組 成、バインダ添加要領など)を最適化する必要がある。

高密度粒子を得るための焼結プロセス開発が必要となる。

粉体に対する代表サンプルの取得方法についての検討および基準の作成が必要 である。

粉体に対する代表サンプルの取得方法について検討するとともに、その基準を設定 する必要がある。これらの課題は、原理的に解決不能な問題ではなく、一般的には試 験の実施が困難な Pu を使用した試験や、照射済み燃料に関わる確証、実規模での確 証に関する課題であり、現時点では金属電解プロセスを利用した MOX 顆粒振動充填 燃料製造の成立性を否定する大きな課題は認められない。

- (b) 量産性
  - 機器能力

量産対応として、処理時間などを考慮し目標生産能力を満たすよう機器台数設定 を行った。

安定操業の可能性

顆粒製造工程における遠隔保守対応としては、機器をモジュール化し、モジュー ル交換による短時間での復旧を想定している。また、保守が必要な機器はBSMま たはPMのアクセス性を考慮した配置とした。今後はマテリアルハンドリングの取 り合い・秤量などに要する作業時間の検討、機器の故障頻度を考慮したプラント稼 働率の検討が必要である。

(ii) 安全性にかかわる評価

顆粒製造工程における各機器は臨界形状管理を原則としたうえで、各機器へ安全上 から付加すべき要求事項をまとめた。今後は構造を具体化し、その効果の検討が必要 である。

(a) 臨界安全

粉末容器が複数接近することを防止するため、ラックを形状管理とするのに加え、 物理的に接近できない設計とした。また、UO2粉末容器搬送設備は(U,Pu,MA)O2 粉末容器を扱えない設計または実入り容器は返送できないインターロックを設け、(U,Pu,MA)O2粉末容器搬送設備もまた UO2粉末容器を扱えない設計とした。 粉末を受け入れる容器は形状管理または容積管理機器とする。容器同士の異常接触を防止するため、秤量器および警報の多重化を行う。

ボートを使用する脱バインダ加熱炉では、ボート固着時のボートの重なりを防止 する設計とした。

転動造粒設備ではバインダを添加するので減速条件が変化する。核的制限値を決める際には保守的な条件を設定する。

目詰まりが起こりえる分級設備、オフガスラインへのフィルタ類は形状管理を行う。

炉心燃料製造セルの空気セルでは内側炉心用顆粒燃料製造ラインと外側炉心用 顆粒燃料製造ラインが同居するため、転倒(接近)防止設計を行った。

(b) 火災・爆発防止

顆粒製造工程における火災に関する熱的/化学的制限値は確立されていないが、現状 で懸念される事項については検討を行った。

焼結炉での水素爆発を防止するため、焼結ガス供給系に多重の水素濃度計、多重の隔離弁を設置するなどの設計対応を行う。

酸化転換設備、脱バインダ加熱炉および焼結炉は、温度の異常上昇を防止するため、炉内温度制御に加えて、温度高または電流高にて電源を自動遮断するインタ ーロックを設置する。

(iii) 経済性評価

プロセス簡素化として、炉心燃料及びブランケット燃料のそれぞれについて、顆粒 製造主工程ラインとリワークラインを同じセルに設置することとした。

振動充填工程以降の経済性を 5.2 節「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造システム」 で補完した経済性評価結果を以下に示す。

(a) 建設費

主工程機器台数

主工程設備費算定のために設定した顆粒製造主工程の主要機器台数を表 5.3.2 の 資源重視型システムの欄に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 5.3.3 の資源重視型システムの欄に示す。主工程設備費 は上記の台数に基づく。

(b) 操業費

人員および人件費

燃料製造関係の人員は150人、人件費単価は900万円/人年として、人件費を13.5 億円/年に設定した。

修繕費、消耗品等諸費

試算の結果、修繕費(機器交換費、定検材料費)が16億円/年、消耗品等諸費(補充U、ユーティリティなどを含む)が22億円/年となった。

操業費(年間総操業費)

上記の人件費、修繕費、消耗品などの諸費に業務分担費および事業税を加えた年 間総操業費は、61 億円/年となった。操業費の内訳を表 5.3.4 の資源重視型システ ムの欄に示す。

(c) 部材費

ラッパ管や被覆管などの燃料部材費用であり、製品 1kgHM あたり 5 万円、年間 25 億円とした。

(d) 燃料製造単価

(a)、(b)および(c)の結果から算出した燃料製造単価を表 5.3.5 の資源重視型システムの欄に示す。

燃料製造単価は 25.6 万円/kgHM となり、目標額を 9.6 万円/kgHM 超過している。 発電単価は、平均燃焼度 63.1GWd/t のとき、 0.38 円/kWh である。

- (iv) 環境負荷低減性の評価
- (a) 廃棄物発生量

通常運転時の廃棄物

振動充填工程以降の発生廃棄物を 5.2 節「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造シス テム」で補完した燃料製造システムに関して、保守補修に係わる二次廃棄物(不燃 性の固体廃棄物)の発生量について検討した。保守補修に係わる二次廃棄物は、機 器単体重量×保守補修による交換率(機器の種類により 6%/年または 2%/年ずつ交 換されると想定)×台数により評価した。なお、200 リットルドラム缶 1 本に 100kg の廃棄物を充填することとした。

燃料製造工程から発生する二次廃棄物発生量は低レベル廃棄物(地層処分並)約 25t(ドラム缶約250本)低レベル廃棄物(余裕深度処分並)5t(同50本)クリ アランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)が15tと評価した。

廃止措置時の廃棄物

振動充填工程以降の設備からの発生廃棄物を 5.2 節「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造システム」で補完した。

セル内機器重量は機器設計データに基づく。セルライナは、配置設計に基づいて 算出したセル内表面積にライナ厚さ 5mm およびライナ比重を乗じて算出した。廃 棄物発生量は、低レベル廃棄物(地層処分並)約 400t(ドラム缶約 4,000 本)低 レベル廃棄物(余裕深度処分並)80t(同 800 本)、クリアランスレベル以下の廃棄 物(コンクリート以外)約 11,400t、同(コンクリート)約 97,600t と評価した。

(b) 廃棄物への移行率

核燃料物質の廃棄物への移行経路としては、交換廃棄される機器類に付着しての移 行が考えられる。機器類への微粉の付着による核物質ロスが懸念されるが、回収設備 および除染設備により、廃棄物に移行する U、Pu、FP を 0.1%未満に抑えることは可能と考えられる。

(v) 資源有効利用性

微粉を取り扱うシステムであり、飛散などにより、工程からのロスが懸念される。 但し、受入れ量に対する製品収率 99.9%以上を達成するため、微粉体の飛散防止対策 および回収設備開発は可能と考えられる。

### (vi) 核拡散抵抗性

顆粒燃料製造各プロセスにおいて、原料は(U,Pu,MA)O2酸化物として供給され、 製造工程中、Puが単離される工程は存在しない。但し、計量管理および物流管理に 関して、以下のような課題がある。

### (a) 計量管理

原料顆粒は均質性に対する評価を行い、サンプルによる成分分析値と秤量値からの Pu量の測定精度に関する検討を今後実施する必要がある。

(b) 物流管理

セル内の核物質入出量管理が必要であるが、取扱う燃料のロットが小さく、セル内 の物流は複雑となり、評価作業量は膨大となるため、機器ごとの核物質量入出量管理 が重要となる。

### 5.3.1.2 経済性重視型システム概念構築

(1) システム設計

基本プロセスは資源重視型システムと同一で、内側炉心顆粒燃料、外側炉心顆粒燃料 料および軸ブランケット顆粒燃料を製造する。振動充填工程以降の工程は、5.2節「酸 化物電解顆粒振動充填燃料製造システム」で補完した。

(2) 顆粒製造工程設備設計

(i) 必要生産量の検討

径ブランケットを削除し、基本的に資源重視型システムと同一の機器を用いて炉心 燃料集合体のみを製造する場合について検討する。

経済性重視型システムプラントにおける内側炉心顆粒燃料、外側炉心顆粒燃料、軸 方向ブランケット顆粒燃料の年間製造量の内訳は、それぞれ約18.5tHM、約15.5tHM、 約16.1tHM となる。これは資源重視型システムにおける内側炉心顆粒燃料、外側炉 心顆粒燃料、ブランケット顆粒燃料の年間製造量内訳に対して、それぞれ約1.8 倍、 約1.8 倍、約0.5 倍となっている。燃料種類ごとの製造量の増減に応じて機器台数を 設定した。

(a) Pu 富化度調整設備

設備仕様は資源重視型システムと同一であるが、内側炉心燃料製造ラインで必要台

数が増加すると評価した。

内側炉心用顆粒燃料 (Pu 富化度 21.1% (目標值))

必要処理量:約100kgHM/日、設備台数:4台(資源重視型:2台)

外側炉心用顆粒燃料(Pu 富化度 24.9%(目標值))

必要処理量:約90kgHM/日、設備台数:2台(資源重視型:2台)

(b) 転動造粒設備

設備仕様は資源重視型システムと同一であるが、必要台数が内側及び外側炉心用顆 粒燃料用にそれぞれ1台ずつ増加すると評価した。

内側炉心用顆粒燃料:1日分の必要処理量は約130kgHM/日、設備台数2台

外側炉心用顆粒燃料: 同上 約 110kgHM/日、設備台数 2 台

ブランケット用顆粒燃料: 同上 約 110kgHM/日、設備台数1台

# (c) 粒子の分級設備

設備仕様は資源重視型システムと同じであるが、必要台数が資源重視型システムに 対し、内側及び外側炉心用顆粒燃料用設備がそれぞれ2台ずつ追加と評価した。

内側炉心用顆粒燃料:1日分の必要処理量は約130kgHM/日、設備台数4台 外側炉心用顆粒燃料: 同上 約110kgHM/日、設備台数4台 ブランケット用顆粒燃料: 同上 約110kgHM/日、設備台数2台

(d) 焼結設備

設備仕様は資源重視型システムと同一である。資源重視型システムでの炉心燃料用 設備の利用率は50~60%程度であり、経済性重視型システムでの必要処理量を満たす 性能を有している。したがって設備台数は、資源重視型システム同様、内側炉心用顆 粒燃料、外側炉心用顆粒燃料およびブランケット用顆粒燃料用に各1台と評価した。 (e) リワーク用脱バインダ設備

設備仕様は資源重視型システムと同一である。分級工程で設定したリワーク割合 30%から、各必要処理量は以下のように評価した。

内側炉心用顆粒燃料:約40 kgHM/日

外側炉心用顆粒燃料:約 30kgHM/日

ブランケット用顆粒燃料:約 30kgHM/日

(f) リワーク用微粉砕設備

必要処理量は脱バインダ加熱炉と同一である。

(3)周辺設備の設計

基本的な設備構成は資源重視型システムと同一で、分析、保守・補修、除染、廃棄物処理、固体廃棄物貯蔵設備を設けることとした。

(4) ユーティリティ設備

基本的な設備構成は資源重視型システムと同一で、冷却水製造供給設備、冷水製造供給設備、用水製造供給設備、圧空 / ガス供給設備、蒸気製造供給設備を設けること

とした。

(5) 建屋・電気・換気設備

建電換設備の基本的な考え方は資源重視型システムと同一である。

(6) 配置検討

(i) 配置設計の検討方針

配置設計の検討方針は資源重視型システムと同一である。

(ii) 配置設計結果

資源重視型システム同様、顆粒燃料製造セルは、燃料種別ごとに2つのセル(炉心 燃料製造セル及び、ブランケット燃料製造セル)で構成するものとし、炉心燃料製造 セルは、資源重視型システムの約1.0万m<sup>3</sup>(15m×62m×11m)に対し、約1.5倍の 約1.5万m<sup>3</sup>(22.5m×62m×11m)になると評価した。ブランケット燃料製造セルは 資源重視型システムと同一とし、約0.6万m<sup>3</sup>(10.5m×54m×11m)と評価した。

(7) 技術評価

(i) 技術的成立性の評価

経済性重視型ケースは、資源重視型システムと同一の基本プロセス、機器仕様で、 内側炉心顆粒燃料、外側炉心顆粒燃料、軸ブランケット顆粒燃料を製造するため、プ ロセス成立性、量産性の評価は資源重視型ケースと同一である。

(ii) 安全性にかかわる評価

基本的に資源重視型システムと同一の機器を用いて炉心燃料集合体のみを製造するため、各機器へ安全上から付加すべき要求事項は資源重視型システムと同一である。

(iii) 経済性評価

振動充填工程以降の工程を 5.2 節「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造システム」で 補完した燃料製造システムの経済性評価結果を以下に示す。

(a) 建設費

主工程機器台数

主工程設備費算定のために設定した燃料製造主工程の主要機器台数を表 5.3.2 の 経済性重視型システムの欄に示す。

建設費

設備費および建屋費を表 5.3.3 の経済性重視型システムの欄に示す。主工程設備 費は上記の台数に基づく。

(b) 操業費

人員および人件費

燃料製造関係の人員は150人、件費単価は900万円/人年とし、13.5億円/年に設 定した。

修繕費、消耗品等諸費

試算の結果、修繕費(機器交換費、定検材料費)が21億円/年、消耗品等諸費(補充U、ユーティリティなどを含む)が22億円/年となった。

操業費(年間総操業費)

上記の人件費、修繕費、消耗品などの諸費に業務分担費および事業税を加えた年 間総操業費は、67億円/年となった。操業費の内訳を表 5.3.4の経済性重視型シス テムの欄に示す。

(c) 部材費

ラッパ管や被覆管などの燃料部材費用であり、製品 1kgHM あたり 5 万円、年間 25 億円とした。

(d) 燃料製造単価

(a)、(b)および(c)の結果から算出した燃料製造単価を表 5.3.5 の経済性重視型シス テムの欄に示す。

経済性重視型システムの燃料製造単価は 28.1 万円/kgHM となり、目標額を 12.1 万円/kgHM 超過している。平均燃焼度 110GWd/t のときの発電単価は 0.24 円/kWh となる。

(iv) 環境負荷低減性

(a) 廃棄物発生量

通常運転中の廃棄物

基準システムと同じ方法で発生量を評価した。発生量は低レベル廃棄物(地層処分並)約30t(ドラム缶約300本)低レベル廃棄物(余裕深度処分並)5t(同50本)、クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)が20tとなった。

同一セル内で、炉心顆粒燃料、ブランケット顆粒燃料の各々で専用ラインを設ける製造形態は資源重視型システム(50tHM/y)と変わらないが、炉心燃料ラインの処理量が約1.8倍となり機器数が増大した結果、廃棄物発生量が1.0~1.5倍程度に増加した。

廃止措置時の廃棄物

基準システムと同じ方法で発生量を評価した。廃棄物発生量は、低レベル廃棄物 (地層処分並)約480t(ドラム缶約4,800本)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 80t(同800本)、クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外)約11,800t、 同(コンクリート)約101,300tと評価した。

同一セル内で、炉心顆粒燃料、ブランケット顆粒燃料の各々で専用ラインを設ける製造形態は資源重視型システム(50tHM/y)と変わらないが、炉心燃料ラインの処理量が約1.8倍となるため、機器数とセル容積が増加し、廃棄物発生量が1.0~1.5倍程度に増加した。

### 5.3.2 技術開発項目

金属電解法 (ANL 技術)による顆粒燃料製造技術に係わる開発課題を表 5.3.6 に示 す。また、概要を以下に示す。

(1) 技術的成立性に係わる項目

転動造粒、焼結における最適運転条件の把握

造粒および焼結において、得られる粒子の粒径分布およびその歩留を実規模で確認する必要がある。

低除染 MA 添加燃料での機器の安定性

低除染 MA 燃料からの発熱・放射線量およびそれが設備(特に検査機器類)に及 ぼす影響の確認等を行う必要がある。

燃料仕様の最適化

上記の ~ を通じて量産性が高く、品質的に優れた燃料を製造可能な燃料仕様 を調査する必要がある。

(2) 安全性に係わる項目

質量制限値による臨界管理

質量管理機器の臨界防止に関しては、2 重装荷(ダブルバッチ)を想定した場合 でも臨界とならないことを基本としており、核的制限値を 8.4kg-Puf と設定してい るが、搬送容器などの複数ユニットの臨界防止は今後詳細な検討が必要である。

(3) 経済性に係わる項目

セル内遠隔製造技術(機器開発)

保守・補修システムの最適化、検査手法を確立、機器の長寿命化の検討を行い、 建設費、操業費低減を図る必要がある。

集合体構成部材の低価格化

被覆管、ラッパ管、エントランスノズル等の集合体構成部材の安価な加工方法を 開発する。

(4) 資源有効利用性に係わる項目

本システムは微粉を取扱うシステムであり、核物質ロスが懸念される。発生粉末の 回収率の向上方策を実験室規模で検討する必要がある。

(5) 核拡散抵抗性に係わる項目

計算による計量管理手法の開発

実際の酸化物電解顆粒燃料の分級後顆粒の Pu 富化度のバラツキデータを把握し、 成分分析値と秤量値を用いて、計算により工程内の Pu 量の把握・管理を行う技術 開発が必要である。 直接測定による Pu 重量の評価技術開発

計算(成分分析値×秤量値)による評価とは違い、直接計測による各機器内の顆 粒燃料滞留量の確認は、保障措置上必要となる技術である。

	铺考		<u>ホッパ缶1つで1回</u> 5回/日 試料採取量:約18 /同	<u>ポッパ(缶1つで1回</u> 4回/日 試料採取量:約1g /回		ホッパ缶1つで1回 2回/日	  武料採取量:約2g  /回			ホッパ缶1つで1回   2回/日	  /回			ホッパ缶1つで1回 6回/日	武*キナ採取量:約2 g  /回	
分析機器		K吸収端蛍光X線 分析装置	K吸収端蛍光X線 分析装置	電位差滴定法	クーロメトリ法	熱重量分析装置	ICP-AES法	電位差滴定法	クーロメトリ法	熱重量分析装置	ICP-AES法	電位差滴定法	クーロメトリ法	熱重量分析装置	ICP-AES法	
	水分	(wt%)														
	不 統 統	(wt%)														
	粒径	(ш п)														
	o_∺ ™	(-)														
	-															
	U.Fu 回合															
	い原価	(-)														
項目	ر برم برح	(-)														
分析	ر برگر <del>ا</del>	(-)														
	<b>⟨</b> H															
	¢H															
	<b>∢</b> H															
	E C															
	Am															
	dN															
	Ρn	(wt%)														
	D	(wt%)														
	分析目的		孙役MH	HM分析	ᄪᅭᇖᄝᆸᆘᅮ	訂重官埋	田 文 王 史	印具官任		訂里官理	ᄪᅭᅏᇴᆧᆿᄃ	印具官任	ᄈᅚᆓᄫᇔᅚᆕ	王昌王	ᄪᇔᇔᆇ	印具旨任
分析頻度 (回 / 年)		1000	1000		0	400			007	400			0007	0021		
ば お と		НА	НА			AH		٩				<	5			
採取試料 形態		粉体 (粒径1 µ m)	粉体 (粒径1 µ m)		顆粒(粒径	50.100. 800 μ m)			顆粒(粒径	зо. год. 800 µ m )			顆粒(粒径	900 ги0. 800 µ m)		
戁 路 名		富化度調 整装置	富化度調 整装置			₩ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				X 日後				X 日後		
分析ポイント			富化度調整	置						粉体貯蔵設	<b>筆</b>					

表5.3.1 分析項目

	資源重視型	経済性重視型	
	システム	システム	備考
	( 50tHM/y )	( 50tHM/y )	
富化度調整設備	4	6	
(炉心燃料)			
転動造粒設備	3	5	
分級設備	6	10	
焼結設備	3	3	
脱バインダー加熱炉	3	5	
微粉砕器	3	3	
振動充填・端栓溶接設備	3	4	
燃料要素除染設備	3	4	
He リーク試験設備	1	1	
ピン検査設備1	3	3	また
ピン検査設備 2	3	3	11111711111111111111111111111111111111
ピン検査設備3	4	8	した
ワイヤ巻付設備	3	4	
集合体組立設備	1	1	
集合体検査設備	1	1	

(単位:台数)

# 表 5.3.3 建設費の比較

	資源重視型	経済性重視型
項目	システム	システム
	( 50tHM/y )	( 50tHM/y )
燃料製造主工程設備費	296	408
周辺設備費	228	228
建屋・電気・換気設備	229	245

(単位:億円)

表 5.3.4	操業費の比較
---------	--------

操業費内訳	資源重視型	経済性重視型
	システム	システム
	( 50tHM/y )	( 50tHM/y )
人件費	13	3.5
修繕費	16	21
諸費(消耗品費等)	22	22
業務分担費	8	9
事業税	2	2
合計	61	67

(億円/年)

# 表 5.3.5 燃料製造単価の比較

項目	資源重視型	経済性重視型
	システム	システム
	( 50tHM/y )	( 50tHM/y )
燃料製造単価	25.6	28.1
資本費	8.3	9.7
操業費	12.3	13.3
部材費	5.0	5.0

(単位:万円/kgHM)

技術的成立性  基本プロセスの成立性  粒子製造条件の最適  多成分系(MA・FP含有) での焼結条件の最適化  大  転動造粒・焼結技術    燃料のO/Mの調整  熱処理条件の検討  大  低O/M粒子燃料製造技術    燃料粒子の高密度充填  高密度充填のための振動 条件最適化  大  振動充填技術    粒径分布のjコントロール  大  振動充填技術    量産性  量産に対応した機器  複数ピン同時振動充填 の確認  大  振動充填技術	
一燃料のO/Mの調整  熱処理条件の検討  大  低O/M粒子燃料製造技術    燃料粒子の高密度充填  高密度充填のための振動 条件最適化  大  振動充填技術    粒径分布のjコントロール  大  振動充填技術    量産性  量産に対応した機器  複数ピン同時振動充填 の確認  大  振動充填技術	
一燃料粒子の高密度充填  高密度充填のための振動 条件最適化  大  振動充填技術    粒径分布のjコントロール  大  振動充填技術    単位分布のjコントロール  大  振動充填技術    量産性  量産に対応した機器  複数ピン同時振動充填  大    小畑畑作ちの向内  大  振動充填技術	
上  粒径分布のjコントロール  大  振動充填技術    解析評価技術の開発  大  振動充填技術    量産性       構造  の確認  の確認     の確認	
解析評価技術の開発  大  振動充填技術    量産性  量産に対応した機器  複数ピン同時振動充填  大  振動充填技術    1  一量産性  一  一  1    1  一  1  1  1    1  1  1  1  1	
量産性      量産に対応した機器      複数ビン同時振動充填      大      振動充填技術        加畑能力のウト      ブロカスの合理化      中      システィ(4)社	
処理能力の向上 クロビスの言理化 中 システム設計	
品質管理      検査手法の確立      メ      システム設計 要素技術	
検査基準の確立 中 システム設計	
燃料仕様最適化 大 システム設計	
セル内安定操業 運転自動化技術の開発 ウステム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術	
工程間の核物質移送技術高度化      中      システム設計	
計量管理技術の開発      中      システム設計/Pu物流管理手法 分析技術	
低除染MA添加燃料での  耐放射線対策  システム設計    機器の安定性  耐放射線対策  大	
- <mark>高発熱対策 大</mark> システム設計 要素技術	
遠隔保守補修技術の 確立 機器のモジュール化 中 システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術	
保守補修対象機器の除染 小 除染技術	
安全性      臨界防止      Pu装荷量(質量)制限による 単一ユニッhの臨界管理      質量管理の高度化      中      システム設計/Pu物流管理手法 物質移送・ママリフルハンドリンク 技術	
複数ユニットの臨界管理 設備配置間隔の最適化・臨 界隔離壁設置 大 システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術	
- 放射線被ばくの低減 遠隔操作・遠隔保守技 病 燃料製造自動化技術 大 セル内遠隔製造・保守技術(機器開発)	
高発熱燃料の取り扱い (低除染・TRU燃料)      燃料の冷却      合理的な冷却対策      中      低除染・TRU燃料製造技術	
火災・爆発防止 化学的安全 焼結雰囲気の見直し 中 システム設計	
耐震性      耐震設計      中      システム設計 物質移送・マデリアルバンドリング技術	
安全評価  安全設計方針・判断基 準整備  中  システム設計	
安全評価      中      システム設計	

# 表5.3.6(1/3) 技術検討項目

大:技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

经济性 建						
жин <u>е</u>	設費低減	プロセスの合理化	機	きという。	大	システム設計 物質移送・マテリアルハントリング技術
			 度	程間の核物質移送技術高 【化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		機器配置のコンパクト化	系	系列数、配置等最適化	中	システム設計
			保	、補修システムの最適化	大	システム設計(遠隔保守技術)
一操	業費低減	遠隔操作·遠隔保守技術	燉	<b>然料製造自動化技術</b>	大	セル内遠隔製造技術(機器開発)
	_	品質保証	検	検査手法の確立	大	非破壊検查技術(充填密度、Pu濃度分布)
			検	検査基準の確立	中	検査基準の整備
			燉	然料仕様最適化	大	燃料設計コード整備及び性能評価
		集合体部材の低価格 化			大	システム設計
		機器の長寿命化			大	システム設計
一稼	國率向上	保守期間短縮	逮	<b>遠隔保守技術</b>	大	システム設計
	L	放射線劣化対策	高	哥信頼性機器開発	中	システム設計(機器開発)
一廃	8止措置費低減	プロセスのコンパクト化			小	システム設計
製	品の品質保証	検査技術の高度化	FS	S対応型NDA装置の開発	中	システム設計(検査機器開発)
				スキャンの代替装置の調 証・開発	中	システム設計(検査機器開発)
			X約 調	線検査装置の代替装置の 動査・開発	中	システム設計(検査機器開発)
		自己照射損傷の影響評価			中	低除染·TRU燃料製造技術
資源有効利用 U/	/TRUのリサイクル	U/TRUの回収率向上 一	発	巻生粉末の回収率向上	大	低除線·TRU燃料製造技術
LI	2程ロス低減	U/TRU工程ロスの定量的 評価			ılı	システム設計
環境負荷低減 廃	£棄物発生量低減	廃止措置時の二次廃 棄物量低減	機	き器の長寿命化	小	システム設計/解体廃棄物量評価
			台	<b>计数削</b> 減	小	システム設計/解体廃棄物量評価
	-	廃棄物除染技術開発			中	廃棄物発生量低減
		解体廃棄物の削減	- ブ	プロセスのコンパクト化	小	システム設計/解体廃棄物量評価
		分析廃棄物中に含まれるTRUの低減	分 サ	トインプルサイズ、 トンプリング頻度の最適化	小	システム設計
一解	保体廃棄物の削減 ――	プロセスのコンパクト化			小	システム設計/解体廃棄物量評価
核拡散抵抗性	R障措置	保障措置技術の高度 化			大	保障措置技術(高精度非破壊分析技術)
						Pu物流管理手法
		核物質の滞留量(ホールド アップ)の確認対策			大	保障措置技術(計量管理、分析技術)
						Pu物流管理手法
核	物質防護				小	システム設計

# 表5.3.6(2/3) 技術検討項目

大:技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

大目標 目標達成の要素 目標達成方策(課題) 課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
運転・保守補修性  運転  遠隔操作・遠隔保守技	大	システム設計
弦  燃料製造自動化技術    保守補修  」遠隔操作・遠隔保守技	大	システム設計
折  一	大	廃産物発生量低減

# 表5.3.6(3/3) 技術検討項目

大:技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中:技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小:技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題





振動充填工程

-268-

# 振動充填工程以降は 5.2 章「酸化物電解顆粒振動充填燃料製造」で検討した。

顆粒製造工程

JNC TN9400 2004-036

ונצסנ	IC + 0C	ABとRB
< = 1	∧ ∥	^ 11
+	RB	Э

単位Kg/y



図5.3.3 5 0 tHM/yの顆粒燃料製造工程物質収支



(1/4)

顆粒燃料製造工程フロー

义 5.3.4

-270-







-272-

図5.3.4 顆粒燃料製造工程フロー (3/4)



-273-









符号	名称
	振動ふるい機
	計量フィーダ(製品用)
	計量フィーダ(リワーク用)
	ホッパ缶設置台

図 5.3.6 分級設備

名称	予備焼結炉	本焼結炉	遍 元 炉	ボート挿出機構	メカニカルドア	中間パージ室	酸化転換用ボート
符号							





(1520)





5.3.8 顆粒製造設備配置

 $\mathbb{X}$ 

6.射出成型法

本システムは、乾式再処理法の一つである金属電解法との組み合わせが可 能な方式である。金属電解法で得られる金属形態の再処理燃料(Pu-U-MA 合金および U-Zr 合金)を組み合わせて Pu 富化度を調整したのち溶融し、 モールドと呼ばれる石英ガラス管に射出成型して燃料スラグに加工し、燃料 要素、燃料集合体に組み立てる燃料製造法である。

本システムの特徴を以下に示す。

形状管理が困難であり、質量管理を行わざるを得ない工程(射出成型等) が複数存在する。したがって、燃料の製造は、バッチ処理による小規模 ロット生産方式になる。

他のシステムと比較して、燃料製造工程が簡易である。そのため、主工 程設備機器数が少なくてすむ。

粉末や微小顆粒の状態で核燃料物質を取り扱うことが無いため、機器汚 染は軽減される。それにより、炉心燃料とブランケット燃料を同一機器 で製造することが可能となる。

原料の重量を 100 としたとき、射出成型工程で約 30、スラグ加工・検 査工程で約 20、燃料要素加工・検査工程で約 1 のスクラップが発生す る。これらは他の燃料製造システムのように再処理側には戻されず、リ サイクル品として成分調整工程に再投入される。(図 6.1.1 参照)

これらの特徴は、本システムが小規模燃料製造に適したシステムであると ともに、マテリアルフローが複雑で、分析・検査等の品質管理上の負荷が大 きいことを示している。

フェーズ では、セル内での安定操業が可能であることを前提に、上記特 徴に着目して小規模(50tHM/年)・単一製造ライン(炉心およびブランケ ット燃料を交互に製造する)を有する燃料製造システムについて、主工程設 備の概念設計を行ない、経済性および廃棄物発生量についての概略評価を実 施した。

これに対し、フェーズ では、以下の設計検討を行なった。

主工程設備について、安全性(臨界安全、火災・爆発防止)、核拡散抵抗 性(ホールドアップ)、運転・保守補修性および要素技術開発成果を反映し た設備概念設計を行い、機器能力、概略構造、運転手順、遠隔保守・補修方 法を明らかにした。この結果に基づき、小規模(38tHM/年)・単一製造ラ インを有する燃料製造システムについて、セル内での安定操業の見通しを概 略評価した。

さらに、システム固有の廃棄物発生量を評価することにより、環境負荷低 減性評価の精度を向上させた。

# 6.1 基準システム設計

再処理施設と一体型の、生産規模 38tHM/年、単一製造ラインを有する システムであり、Na冷却大型炉資源重視型炉心向けの金属燃料を製造する。

### 6.1.1 施設概念構築

- 以下に示す設計検討手順に従い、基準施設概念構築を行う。 設計方針と前提条件の整理(建屋構成、操業条件、炉心仕様等) 安全性に係わる設計制約条件の整理(核的制限、熱的制限等) プロセス設計(要素技術開発成果の整理とプロセス設計への反映) マスフローの設定および必要生産量の検討 主工程設備の設計 周辺設備の設計検討(保守・補修方針の明示、品質管理手法の検討) ライン構成の検討(物流合理性、核物質の異常集積防止等を考慮) 安定操業性の検討 基本プロセスの成立性検討 燃料製造/再処理の一体化プラントの配置検討
- (1) 設計検討の基本方針と前提条件

システム設計検討にあたり、基本方針と前提条件を整理する。

() 施設・設備の設計および配置方針

燃料製造施設は、フェーズ と同様に再処理施設との一体化プラントとし、 使用済燃料貯蔵設備および新燃料集合体貯蔵設備はそれぞれ別建屋とする。 主工程設備は原則としてセル内に収納し、遮蔽機能は原則セル壁で担保する ものとする。

() 保守方針

(a) 完全遠隔保守セル内設備に対する保守

本検討燃料製造施設においては、放射性物質を非密封で取扱うセル(原料 受け入れ・一時貯蔵工程から表面汚染検査工程までの設備を設置するセル。 以下、非密封セルと呼称する。)を完全遠隔保守セルとする。

上記セルに設置された設備および設備保守・補修用遠隔操作機器の保守・ 補修は、共に遠隔で行い、作業員がセル内に進入することを想定しない。 (b) 遠隔・直接保守併用セル内設備に対する保守

本検討燃料製造施設においては、放射性物質を密封で取扱うセル(Naボ ンディング工程から集合体検査工程までの設備を設置するセル。以下、密封 セルと呼称する。)を遠隔・直接保守併用セルとする。

上記セルに設置された通常設備の保守・補修は遠隔で行う。保守頻度の低

い設備および設備保守・補修用遠隔操作機器の保守・補修は、線源の撤去を 遠隔で行い、さらに必要に応じて除染を行った後、セル内に作業員が立ち入 り直接保守を行うものとする。

(c) 直接保守セル内設備に対する保守

本検討燃料製造施設においては、エアロックセルおよび保守セルを直接保 守セルとする。

上記セルに設置された設備および上記(a)・(b)のセルから保守・補修 のために搬入された設備は、線源の撤去を遠隔で行い、さらに必要に応じて 除染を行った後、セル内に作業員が立ち入り直接保守を行うものとする。

() 操業条件

年間運転日数は 250 日とする。ただし、そのうち 50 日は故障により設備 が停止しているものとし、実稼動日数を 200 日と見積もる。残りの 115 日は、 年次保守点検、核物質在庫調査、月例査察、年末年始などであり運転停止と する。

操業形態は、5班3交代による24時間連続運転を基本とする。

運転方式は、単一燃料製造ラインによる各種燃料のローテーション生産方 式を採用し、1週間で一巡するものとする。

() 製品燃料条件

製品燃料仕様の前提となる炉心仕様を表 2.3.1 に示す。フェーズ の Na 冷却大型炉資源重視型炉心(以下、基準炉心と呼称)とし、電気出力は 1,500MWe、運転サイクル長は 20 ヶ月、集合体体数は内側炉心燃料 276 体、 外側炉心燃料 138 体、径方向ブランケット燃料 78 体、燃料交換バッチ数は 炉心燃料および径方向ブランケット燃料とも 4 バッチである。

この炉心に基づき設定される基準燃料の基本仕様を表 2.3.3 に示す。

() 製造歩留まり

本検討では、工程Aに投入された核燃料物質重量に対し、工程Aから次工 程に払い出される核燃料物質重量の割合を工程Aにおける製造歩留まりと 定義する(リワーク工程に送られる分、分析・廃棄物処理工程に送られる分 および再処理施設に送られる分は次工程への払い出しとは見なさない)。

上記定義に基づく燃料製造工程全体での製造歩留まりは、炉心燃料および 径方向ブランケット燃料で48%、軸方向ブランケット燃料で51%となる。 内訳は、射出成型工程で70.0%、モールド除去・せん断工程で74.7%(軸方 向ブランケット燃料スラグの場合79.1%、径方向ブランケット燃料スラグの 場合74.8%)、スラグ検査工程で94.4%、燃料要素組立・検査工程で98.0% である。なお、この値は現状の要素技術開発成果および類似プラントの評価 結果に基づいた暫定的なものである。図 6.1.1 に工程毎の製造歩留まりを示す。

() スクラップの処理

本システムから発生するスクラップには、以下の種類がある。

射出成型時にるつぼに残った溶融合金が冷え固まったもの(ヒール) モールド下端外側に溶融合金が付着し、膜状になって冷え固まったもの

モールドから取り出した棒状合金(射出成型体)で長さ不足のもの 射出成型体の長さを切りそろえ、燃料スラグとする際のせん断片

スラグ検査における不合格品

燃料要素検査における不合格品

の表面にはドロス(主成分は、合金との剥離を容易なものにするため、 るつぼ・モールド内面に塗布されたコーティング材であるが、合金がコーテ ィング材の酸素を奪って生じた合金酸化物も微量に含まれている)が粉状に 付着しているため、それを剥離・回収する。ドロスは、再処理施設に搬送す る。

にはモールドから溶け出した石英成分の混入・モールド剥離時の異物混入(モールド砕片や剥離ブラシの毛)等が考えられるため、再処理施設に搬送する。

~ は一片の重量が十~数十gになるようせん断する。

は中のスラグを取り出し、せん断する。なお、後述するように、Naボ ンディング工程以降では、検査不合格品は発生しないと想定しているが、発 生した場合には、そのまま再処理施設に搬送するものとする(スラグに付着 した Naを除去しない限り、燃料製造工程には再投入できないため)。

及び の後者以外のスクラップは、上記リワーク処理を行った後、リサ イクル品として専用貯蔵庫に収納し、成分調整工程に再投入する。

() 製品検査

本システムの検査設備としては、スラグ検査設備、燃料要素の各検査設備 および集合体検査設備を考慮する。また、スラグせん断時に発生するせん断 片から分析サンプルを採取し、燃料スラグの成分分析を行うとする。

(2) 安全設計に係わる検討

システムの安全性として、臨界安全、火災・爆発防止および耐震について 検討し、システム設計に際しての設計制約条件を明らかにする。 () 臨界安全

非密封状態で核燃料物質を取り扱うセルにおいては、射出成型等、形状管 理を適用することが困難な設備が多数存在するため、質量を基本とした臨界 管理を行う。臨界安全評価上もっとも厳しい設備であると考えられる射出成 型装置に<sup>239</sup> Puを装荷したケースについて臨界計算を行ない、実効増倍係数 が 0.95 になる Pu 量を求めたところ 5.8kg<sup>239</sup> Pu の結果が得られたこと、同 装置に 1 バッチ当り最大 4.5kgPu 装荷することが、再処理施設側との取り合 いの観点から見て最も合理的であることから、暫定的に 1 バッチ当りの質量 制限を 4.5kgPu として、設計を進めた。なお、本システムでは通常の質量管 理で行われる、二重装荷を考慮した質量制限値(臨界質量の 1/2 未満の値を 設定することにより、誤操作により 2 バッチ分の核燃料物質が装荷されても 臨界質量未満とする)をスラグ製造工程に適用しない。以下に示す方法によ り、誤操作の可能性を排除するためである。

制御系の二重化

工程管理計算機・主工程機器の制御ユニットの故障、またはノイズによ る作業指示のエラー発生を防止するため、制御系を回線も含めて二重化し、 両者の指示が一致したときのみ、主工程機器が動作する仕様とする。

臨界管理領域の設定

セル内を必要に応じて複数の臨界管理領域に区分し、領域内では常に質量制限値以下の核燃料物質しか存在しないように計量管理を行う。計量管理を容易にするため、物質の種類毎に領域への核燃料物質の搬入・搬出経路およびそれにたずさわる機器を一意に定め、それ以外の経路・機器では臨界管理領域への出入りができないように搬送経路に制限を設ける。

機器構成

領域内には、装置本体、秤量ポートおよび装置 - 秤量ポート間の搬送機器(複数存在する)が設置されているものとする。設備に核燃料物質等を 供給する主搬送路には容器 ID 読取装置を設置し、領域と主搬送路の間に 臨界管理領域をまたぐ搬送機器を設置する。これらの機器を用いての手順で二重装荷を防止する。

搬入出の管理

バッチ単位で製造を行うため、臨界管理領域での搬入出管理は以下の手順に従って行う。

- a. バッチ毎に工程管理計算機から、使用する容器の ID・重量、収納 物重量および収納物中の Pu 重量のリストを受け取る。リスト中の Pu 重量の合計が質量制限を越えていないことを確認する。
- b. 主搬送路を搬送されてきた容器の ID を読み取り、リストと一致し た場合、臨界管理領域をまたぐ搬送機器により秤量ポートに移送する。
- c.秤量ポートで重量を秤量する。

- d.cで実測した値が、aのリストの容器重量 + 収納物重量に一致する ことを確認する。
- e.装置 秤量ポート間の搬送機器を動作させ、容器を装置まで搬送す る。
- f.eの搬送機器の動作を停止する。
- (b~fを全ての物質に対して繰り返す。加工後の核燃料物質を収納し、 搬出するために必要な空容器も、上記の手順に従って搬入する。)
- g.臨界管理領域をまたぐ搬送機器の動作を停止する。
- h. 容器から核燃料物質を取り出し、装置に装荷する。
- i.核燃料物質の加工を行う。この際、必要に応じて、加工後の核燃料 物質・工程廃棄物等を容器に収納する。
- j.装置 秤量ポート間の搬送機器を動作させ、容器を秤量ポートまで 搬送する。
- k.jの搬送機器の動作を停止する。
- 1.秤量ポートで重量を秤量する。
- m.1で実測した値とaのリストの容器重量の差を収納物の重量とする。
- (j~mを全ての物質に対して繰り返す。)
- n.cで秤量した搬入物質重量の合計と、1で秤量した搬出物質重量の 合計を比較し、両者が一致することを確認する。一致していない場合、 臨界管理領域内に核燃料物質が滞留している可能性がある。
- o.臨界管理領域をまたぐ搬送機器を動作させ、秤量ポート上の容器を 主搬送路に移送する。
- p.臨界管理領域をまたぐ搬送機器の動作を停止する。
- (o~pを全ての物質に対して繰り返す。)

上記の各工程において、容器 ID の読み取り・秤量・計算結果に異常が ある場合は、搬送機器の動作を停止し、中央制御室からの指示が無い限り、 復旧しないものとする。

容器 ID の読み取り・秤量の二重化

上記において、容器 ID の読み取りを行う際には、異なる2つのセンサ ーを用いて2回読み取りする。秤量の場合も同様とする。

核燃料物質を閉じ込め可能な容器の使用

搬送の際に、核燃料物質が落下することを防止するため、核燃料物質は 可能な限り、密閉性の容器に収納して搬送する。

以上の臨界安全に係わるシステム設計方針をまとめたものを表 6.1.1 に示 す。

なお、()火災・爆発防止の項で述べているように、セル内への水の浸入 は、可能な限り防止されている。したがって、セル内は反射体・減速材不足 の状態であり、実際の未臨界極限値は、5.8kg<sup>239</sup>Puよりも高い値であろうと 考えられる。臨界安全評価上もっとも厳しいと思われる射出成型装置の詳細 設計が定まれば、それに基づいて臨界計算を行ない、より現実的な臨界制限 値を得ることが可能である。

一方、スラグ貯蔵棚等の保管・貯蔵設備は、質量制限を越える核燃料物質 を収納する必要があるため、臨界計算による寸法管理・中性子吸収材の使用 等により、臨界安全を担保するものとする。

() 火災・爆発防止

スラグ加工セル内では、合金状の核燃料物質および金属 Na を使用しているため、火災・爆発に対する防止策を講じる。

(a) 火災防止

非密封セルにおける対策

金属 Na は空気中で発火するため、セル内を Ar ガスで満たし、酸素お よび水分を排除する。物品の搬入出は、エアロックセルを用いて行い、空 気の流入を防止する。また、セル内の機器は圧縮空気による駆動を行わな いものとする。加熱設備の冷却も Ar ガスで行うものとし、冷却水を使用 しない。万が一、セル内に空気が流入する等して、セル内火災が発生した 場合にも窒息ガスによる消火を行い、放水は行わない。

合金状の核燃料物質は、常温では安定しており、空気に触れても穏やか に酸化していくだけである。しかしながら、200 以上では、空気中で発 火する。そこで、万一セルが破損し、空気が流入した場合に核燃料物質が 発火することを防止するため、射出成型装置については、装置内温度が 200 以上の状態では、装置が開かないように開閉機構にインターロック を設置する。

密封セルにおける対策

Na および合金状の核燃料物質は、燃料要素内に密封されているため、 Ar セルとはしない。しかしながら、燃料要素破損により、Na ボンディン グ材が漏洩、発火する可能性があるため、窒息ガスによる消火設備を設置 する。

(b) 爆発防止

セル内では可燃性ガス・揮発性の有機溶媒を使用しない。また、水分を可 能な限り排除しているため、放射線分解等による水素ガスの発生も考えられ ないので、爆発は起こりえないと考えられる。

() 耐震

セルに核燃料物質の閉じ込め機能を持たせるものとする。したがって、セル、セル換気系、およびその電源設備(非常系を含む)は、再処理施設安全審

査指針および MOX 加工施設安全審査基準を参考に、耐震クラスAとする。 一方、質量管理を基本とした臨界管理を行うため、セル内の個々の設備の 扱う核燃料物質重量は小さい(保管・貯蔵設備を除く)。また、粉末・微小 顆粒等の飛散しやすい形態で核燃料物質を取り扱うことは無い。したがって、 セル内の製造設備は耐震クラスBとする。保管・貯蔵設備については、トン 単位で核燃料物質を収納することから耐震クラスAとする。

(3) プロセス設計

射出成型法のプロセスフローを図 6.1.2 に示す。本フローにはプロセス成 立性に係わる要素技術開発課題および工学的技術開発課題を R&D 成果とと もに併記している。以下に主要プロセスの概略を述べる。なお、工程および 臨界管理領域間の移動の際には計量上および臨界管理上の秤量を行うが、以 下の説明では省略する。

## ( ) 原料受け入れ・一時保管

	原料と	して受けノ	∖れる諸品を	下表に示す。
--	-----	-------	--------	--------

種類	供給元	用途	形状	重量単位
Pu-U-MA	市切田佐凯	十百芝	インゴット	9.41IIM
合金	<u> </u>		コンコット	3.4KgHM
U-Zr 合金	再処理施設	主原料	インゴット	10.0kgHM
金属 U	燃料製造施設	成分の微調整	線状または粒状	-
金属 Zr	燃料製造施設	不足量の補充	線状または粒状	-

主原料は、再処理施設の仕様により、約 3.4kgHM および 10kgHM 単位の 合金インゴットとして供給される。これらの原料の Pu 富化度、核分裂性 Pu 比等は、再処理側で成分分析され、受け入れ時には明らかになっているもの とする。金属 U および Zr については、必要量を分取しやすいように、線状 または粒状のものを燃料製造施設側で購入する。これらの原料は容器に収納 され、各々専用の保管棚に保管される。

一時保管容量は、燃料製造の1ローテーションが1週間であることから、1週間分とする。

() 成分調整

上記の原料およびリサイクル品をY<sub>2</sub>O<sub>3</sub> でコーティングされた黒鉛るつぼ に投入し、Pu 富化度 12.3%の内側炉心燃料、同 17.2%の外側炉心燃料(共 に(U,Pu,MA)-10wt%Zr)と、ブランケット燃料(U-10wt%Zr)に成分調整 する。

原料のうち、Pu-U-MA 合金インゴットには約 1.8wt%の MA および約

1.9wt%の FP(RE)が含まれると考えられるが、後述するように成分調整(Pu 富化度及び Zr 濃度調整)のために、U-Zr 合金、金属 U 及び金属 Zr と混合 されるので、MA および FP 含有率は低減される。なお、金属燃料に対する MA および FP(RE)の添加限界の確認試験結果は、以下に示すとおりであり、 後工程で問題が生じることはない(合金の溶解時に成分が分離したり、冷却 時に偏析が生じたりしない)と考えられる。ただし、それらの試験はアーク 溶解 - 急速冷却によって行われたものであり、誘導加熱 - 射出成型によって も同様の結果が得られるか、確認する必要がある。

- ・MAは25wt%まで添加しても鋳造可能である。<sup>1)</sup>
- ・RE 濃度 5wt%以下では RE は合金中に均一に分散する。<sup>1) 2)</sup>
- MA および RE を 5wt%まで添加しても合金特性に有意な変化はない。
  <sup>1) 2)</sup>

本工程には質量管理を適用し、炉心燃料の成分調整における暫定的なバッ チサイズを 4.5kgPu とする。したがって、内側炉心燃料の1バッチ当りの最 大装荷量は 36.6kgHM、外側炉心燃料の最大装荷量は 26.2kgHM となる。ブ ランケット燃料に関しては、射出成型装置に取り付け可能なモールド本数お よびるつぼ容量の兼ね合いから、軸方向ブランケット燃料で 45.0kgHM、径 方向ブランケット燃料で 54.0kgHM を1バッチ当りの最大装荷量とする。

このとき、成分調整は以下の順序で行うものとする。

Pu-U-MA 合金インゴット、ヒールを投入して Pu 重量の粗調整を行う。
 Pu-U-MA 合金インゴットの Pu 富化度は 64.9wt%と想定されている。
 このときインゴット 1 個に含まれる Pu 重量は 3.4×0.649 = 2.2kgPu、 ヒール 1 個当りに含まれる Pu 重量は 4.5×0.30 = 1.4kgPu であるから、両者を 1 個ずつ投入することにより、3.6 kgPu が粗調整される。

せん断片等を投入して Pu 重量を精密調整する。

製造歩留まりの項で述べたように、成分調整1バッチ分の約 30%がヒールに、約 21%がせん断片等のスクラップになる。よって、4.5×0.21=0.9kgPuのせん断片のほほ全量を投入することにより、4.5kgPuとすることが可能である。

なお、炉心燃料のせん断片の密度、直径、平均長さは、それぞれ 16.83gHM/cm<sup>3</sup>、0.65cm、(50 - 42.5) / 2 = 3.5cm 程度である。よって、 このせん断片 1 本当りの Pu 重量は、 ×(0.65/2)<sup>2</sup> × 3.5 × 16.83 × Pu 富化 度 = 2.5gPu(内側炉心)または 3.5 gPu(内側炉心)となる。

従って、せん断片1本単位で Pu 重量が調整可能であるとすれば、成分 調整における Pu 富化度の調整精度は、せん断片1本の Pu 重量/1バッ チ分の Pu 重量=2.5~3.5×0.001/4.5=0.06~0.08wt%となる。

U-Zr 合金インゴットおよび補充用 U 金属を投入して HM 重量を精密調 整する。
インゴット1個当りのU重量は、10kgUであるから、補充用U金属の 投入量はバッチ当り10kgU未満となる。

補充用 Zr 金属を投入して全体の重量を調整する。

Pu-U-MA 合金インゴットにはほとんど Zr は含まれず、U-Zr 合金イン ゴットには 1.1kg の Zr が含まれると想定されている。また、リサイクル 品には約 10wt%の Zr が含まれる。それらを考慮して、補充用 Zr 金属の 投入量を決定する。

内側炉心燃料の場合、Pu-U-MA 合金インゴットを1個、リサイクル品 を 4.5kgPu×(0.30+0.21)/0.123 = 18.7kgHM(ヒール1個およびせん断 片 7.7 kgHM)投入すると、Pu 重量が 4.5kgPu、HM 重量が 22.1kgHM となる。次に、HM 重量を 36.6 kgHM とするため、U-Zr 合金インゴット 1個と補充用 U 金属 4.5kgUを投入する。U-Zr 合金インゴットには 1.1kg、 リサイクル品には 2.1kg の Zr が含まれているから、補充用 Zr 金属を 36.6 / 0.9×0.1 - (1.1+2.1) = 0.9kg 投入する。

なお、炉心燃料の場合は1つのバッチから生じたリサイクル品のほぼ全 量を別のバッチに投入するため、使い残しはほとんど生じないが、ブラン ケット燃料の場合は、使い残しが生じるため、数回に1回はリサイクル品 のみで成分調整を行う必要がある。

例えば、径方向ブランケット燃料の場合、製造歩留まりは約 49%であ るから、バッチ当り 54×(1 - 0.49) = 27.5kgHM のリサイクル品が生じる が、U-Zr 合金インゴット 3 個、ヒール 1 個(16.2 kgHM)、せん断片 7.8 kgHM で成分調整すると、せん断片が 3.5 kgHM 余る。

よって、インゴット3個分の剰余がたまった時点、すなわち 30 / 3.5 = 8.6 より 8.6 回に1回はリサイクル品のみで成分調整を行うことになる。

() 射出成型

成分調整済みの原料が入った黒鉛るつぼを誘導加熱により 1400 まで熱 して原料を溶解すると共に電磁攪拌し、均質な液状合金とする。Amの蒸発 を低減するため、射出直前に系全体を 1Torr 程度に減圧した後、上端を閉じ た中空の石英モールド(内面が ZrO<sub>2</sub> でコーティングされている)を液面に 浸け、系内の圧力を急速に常圧に戻すことで、液状合金をモールド内に射出 する。モールド内で合金は急冷し、 6.5mm×L50cm の炉心燃料射出成型 体および軸方向ブランケット燃料射出成型体、あるいは 12.7mm×L45cm の径方向ブランケット燃料射出成型体になる。米国 ANL および国内におけ る高除染の U-Pu-Zr 合金を用いた実験室規模試験 <sup>3) 4)</sup>、国内における U-Zr 合金を用いた実規模試験 <sup>5)</sup>において、均質・直径が一様・表面にクラック等 の有意な欠陥がない等の条件をみたす成型体を射出できる見通しが得られ ていることから、本検討では射出成型法を採用している。また、米国 ANL および国内試験により原料の 70%以上がモールド側に移行する結果が得ら れている <sup>4) 6) 7)</sup>ことから、本工程の製造歩留まりを 70%とした。

なお、本工程で使用されたるつぼおよび石英モールドは工程廃棄物になる。 米国における実績を参考に、るつぼは 10 バッチ毎に交換するものとする。 モールドは射出成型体取り出しの際に破砕するため、バッチ毎に交換する。

() モールド除去・せん断

モールドを破砕し、射出成型体を取り出す。なお、モールドの下端外部(射 出成型の際に液状合金に接した部位)には膜状に合金が付着しており、モー ルドとともに廃棄物に移行する。この付着物は、破砕する前にモールド表面 をブラシで研磨することで回収できる可能性がある。

次に、射出成型体の両端を切り落として所定の長さに加工し、燃料スラグ とする。炉心燃料、軸方向ブランケット燃料および径方向ブランケット燃料 のスラグ長は 42.5cm、15cm、38.3cm とする(軸方向ブランケット燃料に ついては、1本の射出成型体を分割して3本のスラグを得る)。

モールド付着物以外に、ドロス含有物、分析廃棄物の形態で、核燃料物質 が廃棄物に移行する。その量は、米国における実績を参考に、全射出物量の 0.4%(最終製品重量の 0.5%)程度と推測される。本工程における製造歩留 まりは、上記推測値およびスラグの寸法仕様を基に以下のように想定した。

全射出物量の 0.4% がモールド付着物として廃棄物または再処理工程へ の搬送品になる。

射出成型体のうち、11.8%が不良品(長さ不足)になる。

射出成型体の両端切り落としにより、炉心燃料については射出成型体良 品の重量の 15.0%、軸方向ブランケット燃料については 10.0%および 径方向ブランケット燃料については 14.8% がせん断片になり、残りがス ラグとなる。

従って、本工程の製造歩留まりは、(1 - モールド付着物の割合)×(1 - 射出 成型体不良の割合)×(1 - せん断片の割合)となり、炉心燃料で 74.7%、軸方 向ブランケット燃料で 79.1%、径方向ブランケット燃料で 74.8%となる。

() スラグ保管

得られた燃料スラグは、一旦スラグ保管棚に搬入される。燃料の種類毎に 容器に収納され、各々専用の保管棚に保管される。その後、スラグ検査を行 うために搬出され、合格品は再度保管棚に戻される。燃料製造の1ローテー ション分(1週間分)の合格品スラグがたまった時点で官庁検査(注)を受け、 燃料要素組立工程に払い出される。

保管容量は、1週間分×2式とする。

- (注)事業者が行う品質検査(下記の()スラグ検査)とは別に、監督官庁が行 う検査。本検討では、抜き取り検査+事業者が実施した検査記録の確認 の組み合わせを想定している。
- () スラグ検査

燃料スラグ全数に対し、重量、全長、外径、真直度および外観の検査を行う。検査方法については、工業的にみて一般的と思われる手法(下記)、 または開発状況からみて将来は実用化されているであろう手法(下記 における外観異常の自動認識・判定処理)を採用した。なお、米国における試験 結果 <sup>6)</sup>より、本工程の製造歩留まりを 94.4%とした。

重量

電子天秤により重量を計測する。

全長

レーザーマイクロゲージにより全長を測定する。

外径・真直度

軸方向に対し、互いに直角になるよう取り付けられた2個のレーザーマ イクロゲージにより、全長にわたり外径および真直度を測定する。

外観

ビデオカメラで得た光学映像等に対し、自動認識処理を行い、肌荒れ、 空孔、亀裂等の一次判定を行い、有意な異常が認められた場合、運転員が モニタ映像による目視判定を行うとする。

() 燃料要素組立・溶接部検査

あらかじめ下部端栓が溶接済みの ODS 鋼製被覆管に、所定量の金属 Na および燃料スラグを挿入し、上部端栓を溶接する。抵抗溶接法を用いれば、 ODS 鋼の健全性が損なわれないため、本検討では上記方式を採用する。こ のとき、燃料要素内部に He ガスを封入する。

次に、抵抗溶接によって発生した溶接部のバリを研削で除去し、外径検査 および超音波検査を行って、溶接部の健全性を確認する。

リーク検査

燃料要素の健全性を確認するため、燃料要素をチャンバーに挿入して減圧し、He ガスの漏洩の有無を確認する。

() 表面除染・汚染検査

燃料要素表面をブラシにより除染する。

次に、燃料要素全面をろ紙でふき取り、スミヤ法により表面汚染検査を行う。また、上部端栓溶接部をガスフローカウンタにより測定し、固着汚染検

査を行う。

国内 MOX 燃料製造実績より、上記()~()項全体での製造歩留まりを 98%とした。

() 燃料要素保管

汚染検査で良品となった燃料要素は、燃料要素トレイに乗せられて空気セルに払い出され、燃料要素保管棚に搬入される。炉心燃料要素および径方向 ブランケット燃料要素はトレイごと、各々専用の保管棚に保管される。その 後、下記(xi)~(xiii)の工程を行うために搬出され、再度保管棚に戻される。 燃料製造の1ローテーション分(1週間分)の燃料要素検査合格品がたまっ た時点で官庁検査を受け、集合体組立工程に払い出される。

保管容量は、1週間分×2式とする。

(xi) Na ボンディング・ボンディング検査

燃料要素をArガス雰囲気下で400~500 (米国における試験では加熱温 度を500 としているが、370 以上で Na とスラグ・被覆管との濡れ性が 良くなることから400 程度までは低温化が可能であると思われる)に加熱 したのち加振する。これにより、燃料スラグを液状化した金属 Na 内に沈降 させ、燃料スラグと被覆管とのギャップ部を充填する。Na 凝固時のひけ巣 の発生を防止するため、充填後は燃料要素下部から冷却する。

冷却終了後、Na の充填高さ、ひけ巣の有無およびスラグ下端浮き上がり 高さを渦電流探傷検査およびX線検査により確認する。

本工程において不合格品が発生した場合、再度 Na ボンディングを行う。 従って、リサイクル品は発生しないものとする。

(xii) ワイヤラッピング

燃料要素表面にらせん状にラッピングワイヤを巻き付け、両端を上下端栓 部に溶接する。

(xiii) 燃料要素検査

燃料要素全数に対し、重量、全長、外径、曲がり、ワイヤ巻き付けピッチ および要素 - ワイヤ間隙の検査を行う。検査方法については、国内 MOX 燃 料製造施設において実施されている手法を採用した。

国内 MOX 燃料製造実績より、本工程における不合格品発生率はきわめて 小さく無視し得るとして、製造歩留まりを 100%とした。

(xiv) 燃料集合体組立・検査

中性子線量を測定することにより、燃料要素の種類の最終確認(注)を行っ

た後、燃料要素を束ね、ダクト、遮蔽、エントランスノズル、ハンドリング ヘッドの溶接を行う。完成した集合体に対し、重量、全長、要素ピッチ等の 検査を行う。検査方法については、国内 MOX 燃料製造施設において実施さ れている手法を採用した。

本工程において不合格品が発生した場合、集合体は解体されるものの、得 られた燃料要素は再び集合体組立に利用され、リサイクル品とはならないも のとする。

(注) 燃料要素組立・溶接部検査以後の工程では、端栓に付けられた識別 ID を読み取ることにより、間接的に燃料要素の識別を行うが、ここでは最 終確認の意味で、燃料要素の種類を直接識別するものとした。

# (xv) リワーク

以下に示す複数の工程がある。 ヒール除去(射出成型の後工程) るつぼからヒールを取り出し、ヒール表面に付着したドロスを隔離する。 ドロス除去(ヒール除去の後工程) るつぼ表面に付着したドロスを剥離する。その後、るつぼに Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コー

ティングをほどこす。 スクラップせん断(モールド除去および燃料要素切断の後工程)

検査工程で不良となった射出成型体およびスラグを、リサイクル品とし てるつぼに投入できる長さ(2.5~10cm 程度)に切断する。 燃料要素切断(溶接部検査・リーク検査・表面汚染検査の後工程) 検査工程で不良となった燃料要素を切断し、燃料スラグおよびボンド

Na を取り出す。

スクラップ保管

上記 ・ で得られたヒール、せん断片を製造ロット毎に一時保管する。

(xvi) 成分分析

モールド除去工程で得られたせん断片の一部を切り取り(1gHM 程度)、成 分分析を行う。分析項目・手法については、国内 MOX 燃料製造施設におい て実施されている項目・手法を採用した。

前処理(分析試料を作成する工程)

a . 溶解

金属片の一部を溶解液(希硝酸等)に溶かした後、純水で希釈して濃度 を調整する。

b.同位体分離

aの希釈液をイオン交換樹脂に通して同位体分離し、分析試料を得る。 c.同位体分離 aの希釈液から PUREX 法を用いて U、Pu を分離し、MA を含む分 析試料を得る。

d.熱処理

金属片を高温水蒸気にさらし、熱分解により遊離した塩素を回収して 分析試料を得る。

.分析

- (溶解で得られた分析試料を使用)
  - a.電位差滴定法による U 分析

b. クーロメトリ法による Pu 分析

- c.誘導結合プラズマ発光分光分析法による不純物(FP、Zr等)分析
- d.K-edge+ 蛍光 X 線分析法による U, Pu 分析
- e. スペクトロメトリ法による 核種分析
- (同位体分離 で得られた分析試料を使用)
  - f.同位体希釈質量分析法によるU、Pu、MAの同位体分析
- (同位体分離 で得られた分析試料を使用)
- g. スペクトロメトリ法による 核種分析
- (熱分解で得られた分析試料を使用)
  - h.イオンクロマトグラフィ法による Cl 分析
- (金属片をそのまま分析に使用)
  - i.融解法による O、C、N 分析

### (4) 主工程設備の設計

() 必要生産量の検討

年間生産量、製品燃料条件および製造歩留りからマスフローを設定し、必要生産量をまとめた結果を表 6.1.2 に示す。年間製造量を実稼動日数で割って得られた各設備の要求生産能力は、燃料集合体、燃料要素、スラグおよび射出成型体の製造・検査設備に対し、各々1.0 体/日、301 本/日、1251 本/日および 970 本/日となる。また、射出成型バッチ数では 10.3 バッチ/日となる。

() 設備・機器概念

プロセス設計結果を踏まえ、安全性(臨界安全、火災)、核拡散抵抗性(ホ ールドアップ)、遠隔保守・補修性等の設計要求を満たす主工程設備概念を 検討し、概略構造、安全対策、ホールドアップ対策を明示する。また、設備 単体の1バッチ当りの処理時間について検討し、必要機器台数を求める。

(a) 原料一時保管・秤量設備

本設備は、再処理施設から供給されたインゴット状の Pu-U-MA 合金および U-Zr 合金、成分調整用に外部から搬入した線状または粒状の金属 U およ

び金属 Zr を保管するための一時保管棚と、成分調整工程に払い出す際に秤 量し、必要に応じて分取を行う受入秤量器の計4式からなる。

各原料物質は、専用のパレット(ふたおよび固定金具がついており、搬送途中で落下しても収納物が飛散しないようになっている)に収納された状態で搬入されるものとする。なお、Pu-U-MA 合金および U-Zr 合金を収納するパレットは、合金インゴットが各1個しか入らないように容積を制限するものとする。

これらのパレットを収納する一時保管棚は、原料物質を保管するラック、 パレット搬送のためのクレーン、コンベア等から構成される。ハンドリング ミスを防止するため、全てのパレットは1度に1個ずつ搬送するものとし、 クレーン、コンベア等にはセンサ・インターロックを設置する。また、 Pu-U-MA 合金を収納する棚は、形状制限を適用する。

受入秤量器は、各原料物質を秤量し、必要に応じて分取を行う秤量器、パ レットから収納物を取り出し・収納するためのハンドリングアーム、パレッ ト搬送のためのクレーン、コンベア等から構成される。これらの搬送機器に おいても、全てのパレットは1度に1個ずつ搬送するものとし、上述のセン サ・インターロックを設置する。

(b) 成分調整設備

本設備は、受入秤量器から搬送された原料物質およびリサイクル品をるつ ぼに投入するハンドリングアーム、パレットおよびるつぼ搬送のためのクレ ーン、コンベア等から構成される。

本設備は、臨界管理領域内に置かれるものとし、臨界安全の項で述べた計 量管理、搬入出管理を行う。

なお、プロセス設計の項で述べた原料の単位重量および上記搬送方式から 概略検討された処理時間は以下のようになった。

		Pu-U-MA	U-Zr 合金	リサイクル品	旦十
11 米石	最大	合金		金属 U	取八加田
	装荷量	(3.4kgHM	(10kgHM/	金属 Zr	火埕
		/個)	個)	の装荷	1441日
内側炉心燃料	37kgHM	1個	1個	有	80分
外側炉心燃料	26kgHM	1個	0個	有	70分
軸方向ブランケット燃料	45 kgHM	0個	3個	有	90分
径方向ブランケット燃料	54kgHM	0 個	3個	有	90分

注1: Pu·U·MA 合金の平均 Pu 富化度を約 65wt%とした。

注2: 合金インゴット1個の装荷に10分かかるとした(搬送・計量等)。

注3:リサイクル品、金属 U および金属 Zr の装荷に全部で 60 分かかるとした。

表より、射出成型1バッチ分の原料の成分調整を行うのに、約1.5時間かかると考えられる。すなわち、設備単体の処理能力は16バッチ/日・台となり、要求処理能力10.3バッチ/日を上回っている。従って、必要設備数は1台である。

(c) 射出成型設備

本設備は、成分調整済みの原料を溶解・射出成型する射出成型装置、モー ルドと固定用円盤を組み合わせるモールドパレット組立装置、るつぼおよび モールドパレット搬送のためのクレーン、コンベア等から構成される。射出 成型装置および搬送機器は、臨界管理領域内に置かれるものとし、臨界安全 の項で述べた計量管理、搬入出管理を行う。

射出成型装置の概略を図 6.1.3 に示す。装置本体は円筒形の圧力容器であ り、モールドパレットおよびるつぼを装荷できるように、誘導コイル上面で 分離可能な構造になっている。ただし、火災・爆発防止の項で述べたように、 装置内部が 200 以上ある場合は分離できないよう、インターロックを設置 する。

誘導コイルは、原料を電磁誘導により溶解・攪拌するために用いられる。 万一、液状合金がるつぼからこぼれた時のために、コイル下部にはドリップ バンが設置されている。誘導コイル上面高さには、開閉式の熱遮蔽板があり、 原料溶解時およびモールド冷却時には閉じて、るつぼからの Am の蒸発およ びモールドへの熱輻射を遮る。

装置上部にはモールドパレット駆動機構(Ar ガスシリンダ)が設置されて おり、射出成型時にはモールド下端が液状合金に接するまでモールドパレッ トを降下させる。また、モールドを冷却するための Ar ガス給排気管が付い ている。

装置の外には、装置内部を1Torr程度に減圧するための真空ポンプおよび 急速に常圧に戻すための蓄圧タンクが設置されており、射出成型の直前に減 圧を行い、モールドパレット降下後に常圧への復帰を行う。

上述したように、火災防止対策のため、射出成型装置の内部温度が 200 を下回るまでは射出成型体を取り出すことができない。この冷却時間が、本 工程に要する時間の大半を占めると想定される。自然放熱だけでは十数時間 程度かかると考えられているが、本検討では Ar ガスにより強制冷却するこ とにより 4 時間に短縮されることを期待した。結果、1 バッチ当りの処理時 間は、るつぼおよびモールドの装荷に 1.5 時間、加熱および射出成型に 1 時 間、冷却に 4 時間、モールドおよびるつぼの取り出しに 1.5 時間の計 8 時間 を見込んでいる。

従って、設備単体当りの処理能力は、3 バッチ/日・台となり、要求処理能力 10.3 バッチ/日に対し、10.3(バッチ/日)/3(バッチ/日・台)=3.4(台)が得られる。必要設備数は4台である。

次に、モールドパレット組立装置は、施設外から供給されるモールドを固 定用円盤にはめ込み、モールドパレットを作るための組立装置である。モー ルドを収納するラック、組立用のハンドリングアーム、搬送のためのクレー ン、コンベア等から構成される。

固定用円盤は、モールド貫通穴の開いた2枚の円盤の重ね合わせ構造をしている。中心軸で円盤は連結されているが、上の円盤はわずかに回転させることができる。モールドをパレットにはめ込むときは、円盤同士の穴を重ねておき、組立が終了した時点で上の円盤を回転させ、穴の位置をわずかにずらす。穴の重なり部分が小さくなり、モールドは円盤に固定される。 (d) モールド除去設備

本設備は、モールドパレットを解体し、モールドを取り出す解体部、モー ルドを破砕し、射出成型体を取り出す破砕部、射出成型体の長さを測定し、 不合格品を除く測長部および射出成型体を所定の長さに切り揃える切断部、 燃料スラグをスラグ収納容器に収める収納部からなるモールド除去装置と、 モールドパレット、燃料スラグ等を搬送するクレーン、コンベア等から構成 される。本設備は、臨界管理領域内に置かれるものとし、臨界安全の項で述 べた計量管理、搬入出管理を行う。

モールド除去装置の概略を図 6.1.4 に示す。解体部はモールドパレット装 荷ボックス、解体用のハンドリングアームと搬送用のコンベアからなる。ボ ックスに立てて入れられたモールドパレットの固定用円盤を回転させるこ とにより、円盤からモールドが落下する。ボックスを横に倒し、モールドを 1本ずつ破砕部に送る仕様とする。

破砕部は、モールド下端表面に付着した膜状合金を剥離するためのブラシ、 剥離片の吸引機、モールド破砕用のローラー、射出成型体搬送兼廃モールド 分離用のローラーコンベア、射出成型体の表面に付着したモールド砕片およ びドロスを除去するためのブラシ、これらの剥離物の吸引機からなる。

モールド破砕用のローラーは、モールドの軸方向に対し直角に配置されて おり、モールドを挟み割る。破砕されたモールドは、ローラーコンベアの隙 間から廃モールド受けに落下し、射出成型体と分離される。

測長部は、射出成型体を測長するレーザーマイクロゲージと搬送用のハン ドリングアーム・ローラーからなり、規定の長さ以上であれば切断部へ、長 さ不足であれば不合格品受けへ仕分けされる。

切断部は、複数のせん断刃、せん断位置決め機構、搬送用のハンドリング アーム・ローラーからなる。射出成型体はせん断位置決め機構により位置決 めされた後、複数のせん断刃により所定の長さに切り分けられる。得られた スラグはスラグ受けに、せん断片はせん断片受けに仕分けされる。

収納部は、燃料スラグをスラグ収納容器に収めるためのハンドリングアーム、収納容器を置くための台、収納容器を搬送するためのクレーン、コンベ

ア等からなる。

上記に示す作業は、連続的になされるものとする。すなわち、処理時間は「破砕・測長・切断の各作業にかかる時間のうち、律速となる値×モールド本数」で決定される。本検討では、作業の律速時間を1.5分と仮定した。従って、設備単体の処理能力は960本/日・台となり、要求処理能力970本/日・台に対し、14本/日・台不足する。しかしながら、本検討では運用により定格能力オーバー分を吸収するものとし、設備台数は1台とした。

(e) スラグ保管棚

本設備は、スラグ収納容器に収められた燃料スラグを保管するラック、収 納容器搬送のためのクレーン、コンベア等の計4式からなる。ラックは同一 形状のものを2基並べて配置するものとし、炉心燃料を収納するラックは、 形状制限を適用する。

ハンドリングミスを防止するため、全ての収納容器は1度に1個ずつ搬送 するものとし、クレーン、コンベア等にはセンサ・インターロックを設置す る。なお、収納容器には暫定的な質量制限値である 4.5kgPu に相当する本数 (すなわち射出成型1バッチ分)のスラグしか収納できないように容積を制 限する。

(f) スラグ検査装置

本設備は、燃料スラグの重量、全長、外径、真直度および外観の検査を行 う検査装置、スラグ収納容器から燃料スラグを取り出し、検査装置に供給す るハンドリングアーム、収納容器を搬送するクレーン、コンベア等から構成 される。

スラグ検査装置の概略を図 6.1.5 に示す。検査装置は、重量を秤量する電 子天秤、全長・外径・真直度を測長するレーザーマイクロゲージ、外観の光 学映像を得るためのビデオカメラ、それらの検査器具の駆動機構および燃料 スラグの位置決め・搬送用のハンドリングアーム、コンベア等からなる。燃 料スラグは1本ずつ連続的に検査装置に供給され、上記の検査を受けるもの とし、各検査工程で不合格品と判定されたスラグは、不合格品受けに送られ る。

上記に示す作業は、連続的になされる。すなわち、処理時間は「各検査に かかる時間のうち、律速となる値×スラグ本数」で決定される。本検討では、 検査の律速時間を2分と仮定した。従って、設備単体の処理能力は720本/ 日・台となり、要求処理能力1251本/日・台に対し、1251(本/日・台)/720 (本/日・台)=1.74(台)が得られる。必要設備数は2台である。

(g) 燃料要素組立·溶接部検査設備

本設備は、被覆管に燃料スラグを挿入して上部端栓を抵抗溶接する燃料要 素組立装置、超音波検査および外径測定を行うことにより溶接部の健全性を 確認する超音波検査装置と外径検査装置、スラグ収納容器および燃料要素ト レイ等を搬送するクレーン、コンベア類から構成される。本設備は、臨界管 理領域内に置かれるものとし、臨界安全の項で述べた計量管理、搬入出管理 を行う。

燃料要素組立装置の概略を図 6.1.6 に示す。組立装置は編成部、挿入部、 溶接部、研削部からなる。

編成部は、スラグ収納容器からスラグを取り出し、または金属 Na 収納容器から金属 Na を取り出し波板状の編成トレイに並べるためのハンドリングアーム、編成トレイを横方向にスライドさせ、被覆管開口部位置までスラグを搬送する編成トレイ駆動機構、被覆管にスラグを押し込む棒状の燃料スラグ挿入装置で構成される。

挿入部は、外部から供給された被覆管(下部端栓は溶接済み、上部には仮 端栓がはめられている)トレイから被覆管を取り出し、仮端栓を抜いた上で、 挿入部に並べるためのハンドリングアーム、スラグ挿入位置、溶接部および 研削部まで被覆管を搬送するための移動装置から構成される。

溶接部は、被覆管を固定すると共に通電するための被覆管チャック、上部 端栓を被覆管に挿入すると共に通電するための端栓チャック、これらを内包 する He ガスチャンバーから構成される。

研削部は、溶接の結果生じたバリを研削するグラインダ、発生する研削粉 を吸引する吸引機、研削終了後に研削部に付着している研削粉をふき取るふ き取り機から構成される。

編成トレイ上に一列に並べられた4本のスラグ(炉心燃料要素を製造する 場合:軸方向ブランケットスラグ1本、炉心燃料スラグ2本、軸方向ブラン ケット1本の順)、または3本のスラグ(径方向ブランケット燃料要素を製 造する場合:径方向ブランケット燃料スラグ3本)および金属 Na は燃料ス ラグ挿入装置で一度に被覆管内に挿入される。続いて、溶接部に送られて He ガスで置換された後、上部端栓と被覆管を固定するチャックに通電され、 接触部が抵抗溶接される。最後に、研削部に送られてバリを削り落とした後、 ウエスで表面をふき取って、研削粉を除く。

上記に示す作業は、連続的になされるものとする。すなわち、処理時間は「各作業にかかる時間のうち、律速となる値×燃料要素本数」で決定される。 本検討では、律速時間を 4 分と仮定した。従って、設備単体の処理能力は 360本/日・台となり、要求処理能力 301本/日・台を上回る。必要設備数は 1台である。

超音波検査装置は、超音波センサおよび検査液を入れた箱であり、燃料要素の溶接部位1本ずつ検査穴に挿入して検査する。

外径検査装置は、レーザマイクロゲージとその駆動機構からなっており、 溶接部分(溶接部前後 10mm 範囲)をらせん状に測定、評価する。

各検査に要する時間を本検討では、燃料要素1本当り 3.5 分と仮定した。

従って、設備単体の処理能力は 411 本/日・台となり、要求処理能力 301 本/ 日・台を上回る。必要設備数は各 1 台である。

なお、本検討では比較的低コスト・省スペースで検査が可能であることか ら、超音波検査方式を採用したが、この方式では少量の水(検査液)を使用 する必要があり、火災防止のための「セル内では水を使用しない」方針に反 している。溶接不良の被覆管内に検査液が浸入して Na と反応する可能性、 検査液が蒸散して、核燃料物質に酸化物皮膜が発生する可能性等について検 討し、工程上における超音波検査の位置の変更、或いは超音波検査方式以外 の検査方法の採用等も含めて判断する必要がある。

(h) リーク検査設備

本設備は、燃料要素を真空引きして He ガスの漏洩の有無を確認するため の真空チャンバー、He ガス検出器、真空ポンプ、および燃料要素を搬送す るクレーン、コンベア類から構成される。検査には時間がかかるため、5本 の燃料要素を同時に検査することとし、チャンバーおよび検出器を5式設置 する。リーク検査設備の概略を図 6.1.7 に示す。

なお、本設備以降は、燃料要素トレイ単位で核燃料物質の工程作業が行われる。トレイ当りの燃料要素本数を暫定的に 25 本とすると、Pu 量は最大でも 1.7kgPu(外側炉心燃料)であり、暫定的な質量制限値の 1/2 未満となる。 従って、本設備以降(ただし、Na ボンディング装置および集合体組立・検 査装置を除く)は、二重装荷を考慮した質量管理(本数管理)を適用し、臨 界管理領域は設けない。

検査に要する時間を本検討では 15 分と仮定した。ただし、5本同時に検 査するため、燃料要素1本当り3分となる。従って、設備単体の処理能力は 480本/日・台となり、要求処理能力301本/日・台を上回る。必要設備数は 各1台である。

(i) 表面除染・汚染検査設備

本設備は、燃料要素を除染する表面除染装置、スミア汚染・固着汚染検査 を行う汚染検査装置および燃料要素を搬送するクレーン、コンベア類から構 成される。

表面除染装置の概略を図 6.1.8 に示す。装置は回転ブラシ、ブラシ駆動機 構、燃料要素回転機構、ファン、フィルタおよび燃料要素のハンドリングア ームからなる。装置は箱状になっており、装置にセットされた3本の燃料要 素を回転ブラシが両側から挟みこんで、表面に付着した汚染をはじき飛ばす。 燃料要素自体も回転し、全面にブラシがあたるようにする。装置内にはじき 飛ばされた汚染粒子は、フィルタに捕集される。

除染に要する時間を本検討では6分と仮定した。ただし、3本同時に検査 するため、燃料要素1本当り2分となる。従って、設備単体の処理能力は 720本/日・台となり、要求処理能力301本/日・台を上回る。必要設備数は 1台である。

汚染検査装置は、ふき取りアーム、アーム駆動機構、自動ろ紙供給機構、 シンチレーションカウンタ、ガスフロー検出器および燃料要素のハンドリン グアームからなる。

スミア検査用のろ紙を付けたふき取りアームで、装置にセットされた1本 の燃料要素の表面をふき、得られた試料を脇に置かれたシンチレーションカ ウンタにセットして表面汚染密度を測定する。また、装置にはガスフローカ ウンタが付いており、ふきとりを行っている間に溶接部のフィックス汚染検 査を行う。

除染に要する時間を本検討では3分と仮定した。従って、設備単体の処理 能力は480本/日・台となり、要求処理能力301本/日・台を上回る。必要設 備数は1台である。

なお、本検討では3分で汚染検査が終了すると仮定しているが、セル内の バックグラウンドは相当高くなるものと見込まれるので、検出器の遮蔽およ びストリーミング低減の程度によっては、検査時間の延長が必要になる可能 性がある。

(j) 燃料要素保管棚

本設備は、燃料要素トレイに収められた燃料要素を保管するラック、トレ イ搬送のためのクレーン、コンベア等の計2式からなる。ラックは同一形状 のものを2基並べて配置するものとし、炉心燃料を収納するラックは、形状 制限を適用する。

ハンドリングミスを防止するため、全てのトレイは1度に1個ずつ搬送す るものとし、クレーン、コンベア等にはセンサ・インターロックを設置する。 (k) Na ボンディング・ボンディング検査設備

本設備は、燃料要素を加熱して Na を液状化した後、加振してスラグと被 覆管の隙間を充填する Na ボンディング装置、冷却後の燃料要素に対し渦電 流探傷検査および X 線検査を行う渦電流探傷検査、 X 線検査装置、燃料要素 トレイを搬送するクレーン、コンベア類から構成される。

Na ボンディング装置の概略を図 6.1.9 に示す。装置は円筒状の炉で、上部から吊られた冶具に燃料要素 101 本を固定する。冶具には加振装置がつながっている。装置下部には円周状にヒーターが配置されている。なお、高温による燃料要素表面の変色を避けるため、Ar ガス雰囲気下で加熱する。冷却の際には、ひけ巣の発生を防止するため、燃料下端部のヒーターから停止するものとする。

Na ボンディング1回の処理時間として、12時間(500 まで加熱した場合:米国における実験結果)の値が得られている。加熱温度を400 程度まで低く抑えることで処理時間を8時間以下に短縮可能であれば、設備単体で3回/日(燃料要素本数で303本/日)以上の処理能力が得られ、必要設備数は1

台で済む可能性がある。

ただし、燃料要素 101 本分の Pu 量は最大で 7.0kgPu(外側炉心燃料)に 達し、暫定的な質量制限値を超過する。したがって、本設備には形状管理を 適用するものとする。具体的には、円環状の冶具に固定される燃料要素のピ ッチ等をパラメータとする臨界計算を実施し、未臨界となる寸法条件で装置 の寸法・構造を定めるものとする。

(1) ワイヤラッピング設備、燃料要素検査設備、燃料集合体組立・検査設備

国内 MOX 燃料製造施設で使用されている設備と同等の設備とする。各装置の概略を図 6.1.10~13 に示す。必要設備台数は、現行設備能力(各々360、360本/日・台、4.8、9.6体/日・台)と要求処理能力の比較から各1台で済む と考えられる。

() 必要設備・機器数の検討

設備設計より得られた、設備単体処理能力および 38tHM/y の製造能力を 得るために必要な設備台数をまとめたものを表 6.1.3 に示す。

原料保管棚は物質の種類毎に各1台、燃料スラグ等の中間製品の保管棚は、 燃料の種類毎に2台、射出成型設備は4台、燃料スラグ検査設備は2台、そ の他の製造・検査設備は各1台必要である。

(4) 周辺設備の設計

() 分析設備

再処理との共用設備である。本設備では、燃料スラグの組成を明らかにし、 品質・計量管理に期することを目的に、成分分析が行われる。射出成型時に 均一組成の成型体が得られるとの想定に基づき、射出成型1バッチ当り1サ ンプルの試料(1gHM 程度)を分析するものとする。分析項目リストを表 6.1.4 に示す。

プロセス設計の項で示したように、前処理として、試料の溶解・同位体分離等の作業を行う必要があるが、国内 MOX 燃料製造実績(グローブボック ス作業)によれば、十数時間~数日が必要とされている。

本検討では、セル内で遠隔自動運転を行うことにより、前処理時間の短縮 が図られるとしているが、それでも溶解に5時間、同位体分離I・ に各々 9時間、熱処理に3時間かかるものと考えられている。また、分析自体は1 時間程度で済むものと考えられる。従って、前処理設備(溶解、同位体分離、 熱処理)および各分析設備の機器単体が1日当りに処理可能な分析試料数は、 各々4.8、2.7、8.0、24.0 試料/日となる。燃料製造側の分析頻度は、10.3 試 料/日であるため、再処理側の分析試料を考慮しないとしても、各設備は各々 3、4、2、1台必要である。 () 廃棄物処理・貯蔵設備

燃料製造から発生する工程廃棄物として、黒鉛製の射出成型るつぼ、SiO<sub>2</sub> 製の廃モールドおよびドロス(酸化物膜およびコーティング材)がある。る つぼは粉砕・焼却処理され、廃モールドは粉砕後、人工鉱物の原料にされる。 ドロスは化学処理により、混入した HM を除去した後、セメント固化される。 これらの処理を行う設備は、再処理側の廃棄物処理設備と共通であり、燃料 製造分を含めた設計がなされている。

その他、燃料製造に関連する廃棄物処理設備としては、オフガス処理設備、 Ar セル浄化設備、中放射性廃液処理設備(分析廃液分)、低放射性廃液処理 設備、極低放射性廃液処理設備、高放射性固体廃棄物処理設備(交換機器分)、 低放射性固体廃棄物処理設備、人工鉱物固化設備、ドロス処理設備があるが、 再処理側の廃棄物処理設備と共通であり、燃料製造分を含めた設計がなされ ている。

関連する廃棄物貯蔵設備についても、再処理側の設備と共通であり、燃料 製造分を含めた設計がなされている。

() ユーティリティ設備

主工程設備および分析・廃棄物処理等の周辺設備に関連するユーティリテ ィ設備として、ガス製造設備、試薬供給設備、冷却水設備、冷水設備、圧縮 空気設備、加湿設備があるが、再処理側のユーティリティ設備と共通であり、 燃料製造分を含めた設計がなされている。

() 保守・補修設備

保守・補修作業を実施する場合は、保守頻度、放射能レベル、除染の容易 性(除染性)を考慮して保守方式を選択する。表 6.1.5 に基本的な考え方を示 す。

上記の考え方に基づき、完全遠隔保守セル、遠隔・直接保守併用セルおよび直接保守セルに以下に示す設備を設ける。

完全遠隔保守セル(非密封状態で核燃料物質を取り扱うセル)

主要な機器には、専用のマスタースレーブマニピュレータ(MSM)を設置 し、保守を行う。MSM の設置されない機器および MSM ではアクセスで きない部位に対する保守は、天井走行式パワーマニピュレータ(PM)で行う。 また、現場の状況を確認するため、視聴覚システム(ITV、集音マイク)を 設置する。

なお、現場での作業は、基本的に部品交換に限定し、修理は行わない。 現場での保守が不可能であり、修理のために機器を保守セルに搬送する 場合、あるいは交換用の部品を搬入出する場合のために、天井走行式イン セルクレーン(ICC)を設置する。 遠隔・直接保守併用セル(密封状態で核燃料物質を取り扱うセル)

と同じ設備を設置する。また、隣接するアンバー区域の部屋には、作 業員がセル内に立ち入ることを可能とするための設備として、グリーンハ ウス設置用スペース、呼吸用空気(BA)、放射線モニタ、ダストモニタ等を 設置する。

直接保守セル(保守セルおよびエアロックセル)

保守・補修作業用に MSM を設置し、機器、交換部品、廃棄物収納容器 等の搬送用には、ICC を設置する。また、隣接するアンバー区域の部屋に は、グリーンハウス設置用スペース、呼吸用空気(BA)、放射線モニタ、ダ ストモニタ等を設置する。

保守セルには、上記に加え、完全遠隔保守セルから搬入した機器を除染す るための除染設備を設置する。

(5) 配置設計

() 配置設計検討の方針

全体の配置設計検討にあたり、以下の設計方針のもとに、プロセスの構成、 主要機器の寸法、プロセス要求によるセル内雰囲気、保守方針等を考慮して 検討を行った。

- ・燃料製造設備の各工程のストリームと放射能レベルを考慮し、被曝安全 上適切な構成とゾーニングを行う。
- ・主要プロセスの動線は設備配置が合理的になるように最短ルートとする。
- ・連続運転と常時監視を必要とする工程は、中央制御室主体で運転操作を 行い、特に中央で常時監視と制御を行う必要のない工程は、現場主体の 操作とする。
- ・セルは遮へい窓や ITV を通し、PM、ICC 等により遠隔操作可能な設計 とする。
- ・セルの形状は、MSM での操作性を考慮し、セル幅を抑えた長尺セルと する。
- ・各セルには保守のために ICC と PM を内部に設置し、遮へい壁には必要箇所に MSM を設置する。
- ・保守については、プラント稼働率の向上と、作業員の被ばく低減を目的 とし、保守頻度が高いか除染困難で直接保守が容易でない機器を有する セルを遠隔保守とする。具体的には、燃料を非密封で扱う工程を完全遠 隔保守セルとし、各セルには上階に ICC 保守セルを設けるか、隣接し てセル内機器用の保守セルを設ける。セル間の取り合いは、遮へい扉を 設け、台車または ICC で実施する。
- ・非密封燃料を扱うセルは Ar セル、その他は空気セルとし、Ar セルと空気セルとの間には、エアロックセルを設けて雰囲気の流入を防止する。

- ・空気セルでは、保守時には線源となる燃料要素又は集合体を隔離遮蔽で きるようにして、セル内に人が立ち入れる設計とする。
- ・施設の構成は、建屋総面積を抑える観点から、廃棄物処理・貯蔵設備を 含む燃料製造/再処理一体型建屋とし、設計統一条件による新燃料/使用 済燃料貯蔵建屋を独立させた他に、主建屋に隣接して、管理棟、非常用 発電設備、排気筒、ボイラ設備、燃料タンクを設置する。
- () 配置設計結果

38tHM/yの燃料製造/再処理一体型施設は、染料製造および再処理を行う 主建屋、新燃料および使用済み燃料の貯蔵を行なう燃料貯蔵建屋およびその 他の建物・構築物(非常用発電建屋、管理棟、排気筒等)からなる。図 6.1.14 に施設の全体構成図を示す。

主建屋は地下1階、地上4階建てで、約53m×104m×高さ37mである。 燃料製造・再処理施設の大部分は地下1階から地上2階にかけて配置され、 地上3階以上にはユーティリティ設備、受配電設備、建屋換気空調設備を配 置し、中央制御室と出入管理室は4階に配置する。

燃料製造施設は、地下1階にある約 67m×15m×8.5mの核燃料物質を非 密封状態で取り扱うArセルおよび地上1階にある約 43m×15m×10mの核 燃料物質を密封状態で取り扱う空気セルからなる。燃料製造施設の主工程設 備配置を図 6.1.15 に示す。

セル内設備配置は、単一燃料製造ラインによる各種燃料のローテーション 生産方式を採用していること、臨界安全上の観点から、核燃料物質の搬送に はレール式の台車を用いるべきであると考えられることから、1本の搬送レ ールに沿って一列に配置される設計とした。原料受け入れ・一時保管から表 面除染・汚染検査まで(スラグの中間貯蔵も含む)は、Ar セルで行う必要 があるため、1つのセル内にまとめている。なお、これらの設備を直線的に 配置すると100mを超えてしまうため、搬送レールをU字型に折り曲げ、そ の内側に設備を配置するようにしている。

一方、Na ボンディングから燃料集合体検査までは、設備数が少ないため、 直線状の搬送レールの片側に製造・検査設備を配置し、反対側には Ar セル と空気セルを結ぶエアロックセル、集合体一時貯蔵・搬送、メンテナンスス ペースを配置した。

なお、主建屋と燃料貯蔵建屋は地下1階の通路(新燃料用と使用済燃料用 の2つの通路がある)を介して結ばれており、台車を用いて燃料の搬送を行 う。

建屋容積は、主建屋が約 20.3 万 m<sup>3</sup>となり、これに燃料貯蔵建屋が約 12.1 万 m<sup>3</sup>を合わせて約 32.5 万 m<sup>3</sup>である。そのうち、燃料製造セルの容積は、 Ar セルが 0.53 万 m<sup>3</sup>、空気セルが 0.33 m<sup>3</sup>である。 なお、建屋寸法及び建屋容積は外壁間寸法を基準として外壁は柱芯から1 m 張り出すものとし、セル容積はセル壁厚の内寸法を基準として算出した。

6.1.2 技術評価

(1) 技術的成立性

基本プロセスの成立性、量産性およびセル内での安定操業性について評価 する。

() プロセスの成立性に係わる項目

アーク溶解 - 急冷試験により、MA および FP を含む U-Pu-Zr 合金の溶解・ 冷却時の均一性が確認されている。また、U-Pu-Zr 合金による実験室規模の 射出成型試験および U-Zr 合金による実規模の射出成型試験が行われ、それ ぞれ数百本の射出成型体が得られている。

以上に示した要素技術開発成果から、射出成型法に対する基本的なプロセ ス成立性の見通しは得られたと考えられる。

ただし、MA および FP を含む U-Pu-Zr 合金の溶解・冷却時の均一性につ いては、実際のプロセス(誘導加熱 - 射出成型)で同様の結果が得られるこ とを確認する必要がある。また、得られた射出成型体の直径の一様性、曲が り、欠陥(表面の肌荒れ・空孔・クラック等)の有無等について確認し、品 質管理をも考慮した製造歩留まりを評価する必要がある。

() 量産性およびセル内での安定操業性に係わる項目

スラグ製造工程の主要な設備である射出成型装置、モールド除去装置およ びスラグ検査装置について、機器の動作機構の検討を実施し、基本構造概念 を定めた。燃料要素組立以降の工程の設備については、Na ボンディング・ 同検査装置を除き、簡素化ペレット製造システムの機器設計を参照して、設 計を進めることとしている。また、遠隔保守に対応するため、機器をモジュ ール化し、モジュール交換方式による短時間での復旧を想定している。

核燃料物質の工程間の搬送には、搬送台車を使用し、左記台車と製造設備 間の核燃料物質の搬入出にはクレーン・ハンドリングアーム等を使用するこ ととして、マテリアルハンドリングのような定型の操作については自動化を 図る方向で検討している。

一方、設備の保守補修のような不定型の操作に対しては、実績のある MSM、 ICC および PM を使用し人が操作するものとした。

以上より、基本的プロセスの成立性(工学的技術に係わる項目を含む)の 見通しが得られたこと、主要機器の動作機構について検討し、動作の見通し が得られたことから、セル内での操業の可能性が示された。ただし、現状で は、以下の項目についての検討が未着手であり、量産性および安定操業性の 確認には至っていない。

遠隔保守に対応した機器のモジュール化設計(モジュールの取付け・取 外し機構含む)

マテハン・秤量器の設計検討

マテハン取り合い・秤量に要する作業時間の検討、左記時間および機器の故障頻度を考慮した設備稼働率の検討

を考慮した機器台数・配置設計の見直し

本システムの場合はバッチ処理が基本となり、質量管理を行わざるを得な いため、溶液系、粉末系あるいはペレット系と比較して、取り扱いロットは 細分化される。この結果、ハンドリング機器の動作トラブルを如何に低減さ せられるかが量産および安定操業を成立させる鍵になると考えられる。

(2) 安全性

臨界安全、火災・爆発防止、耐震の3項目について、現行指針との対応の 可能性を示した。しかしながら、概念設計の段階では未検討の項目も存在す る。複数ユニットの臨界安全性、耐震クラス分類の設備設計への反映等につ いては、設備の詳細設計を行う時点で評価する必要がある。

() 臨界安全

基本的に製造設備には質量管理およびその変形である本数管理・体数管理、 貯蔵設備には臨界計算による形状管理を適用することとし、以下の検討を行った。

インゴット・スラグを取り扱う製造設備については、臨界的に最も厳しい 設備であると考えられる射出成型装置に<sup>239</sup>Puを装荷した場合に実効増倍係 数が 0.95 となる質量(5.8kgPu)に対し、再処理施設側との取り合いの観点 から見て最も合理的な取り扱い単位である 4.5kgPu を暫定的な質量制限値 とする設計を行った。また、二重誤装荷を考慮しない質量管理を成立させる ための安全対策として、臨界管理区域の設定、臨界管理用の機器構成、マテ ハン手順およびインターロック作動条件設定を主とする搬入出の管理方法、 二重秤量等について検討し、計量管理の徹底および装置内への核燃料物質の 滞留の防止を図った。これらの安全対策は、成分調整工程および射出成型工 程で特に重要となる。射出成型装置への適用例を図 6.1.16 に示す。

燃料要素を取り扱う製造設備については、一度に取り扱う本数を 25 本 (1.7kgPuに相当)以下とする設計を行い、二重誤装荷を考慮した質量管理 を行うこととした。ただし、Na ボンディング装置のみ 101 本(7.0kgPu に 相当)以下としているため、燃料要素ピッチ等を考慮した上で臨界計算を行 ない、未臨界となることを確認する必要がある。集合体を取り扱う製造設備 については、一度に取り扱う本数を1体以下とする設計を行った。 一方、各種貯蔵棚についてはトン規模で核燃料物質を貯蔵する必要がある ため、ラックのピッチ・中性子吸収材の使用等を考慮した上で、臨界計算を 行い、未臨界となることを確認する必要がある。

以上より、製造設備類については基本的に、単一ユニットの臨界安全が確保されていると考えられる。貯蔵設備類については、詳細設計を行う時点で 単一ユニットの臨界安全性を確認する必要がある。

なお、本検討では、設備間の中性子相互干渉による複数ユニットの臨界安 全評価は行っていない。今後、設備の詳細設計を行う時点で評価する必要が あるが、その結果、セル内設備配置の見直し(距離を開ける・臨界隔離壁を 設置する等)が生じる可能性がある。

() 火災・爆発防止

燃料製造で使用する火災・爆発に係わる物質は、合金状の核燃料物質およ びボンディング用の金属 Na である。これらの物質を非密封状態で取り扱う 燃料製造セルは Ar セルとし、圧縮空気・冷却水を使用しない設計とした。 また、射出成型装置は、装置内温度が 200 以上の状態では、装置が開かな いように開閉機構にインターロックを設置する設計とし、万一セルが破損し て空気が流入した場合にも、高温の核燃料物質が自然発火することを防止す るものとした。さらに、Ar セル、空気セルとも窒息消火設備を配置する設 計とした。

以上のように、核燃料物質および Na を空気・水と極力接触させない方策 を検討しているため、火災・爆発が生じる可能性は極めて小さいと考えられ る。

ただし、超音波検査装置は少量の水(検査液)を使用する必要があり、Ar セル内での水の不使用は達成できていない。溶接不良の被覆管内に検査液が 浸入して Na と反応する可能性、検査液が蒸散して、核燃料物質に酸化物皮 膜が発生する可能性等について検討し、工程上における超音波検査の位置の 変更、或いは超音波検査方式以外の検査方法の採用等も含めて判断する必要 がある。

() 耐震

設計方針で述べたように、セルに核燃料物質の閉じ込め機能を持たせるものとする。したがって、セル、セル換気系、およびその電源設備(非常系を含む)は、耐震クラスAとする。

また、臨界質量未満の核燃料物質物質しか取り扱わないセル内の製造設備 は耐震クラスBに、トン単位で核燃料物質を収納する保管・貯蔵設備は耐震 クラスAとする。

したがって、本設計は指針と同等以上の耐震性を有していると考えられる。

ただし、本検討では、上記分類を基に、設備のフレーム強度を設計・評価す る等の方策は行っていない。今後、設備の詳細設計を行う時点で評価する必 要がある。

(3) 経済性

- () 建設費
- (a) 主工程設備台数

燃料製造主工程の主要機器台数を表 6.1.6の基準システムの欄に示す。

(b) 建設費

設備費および建屋費を表 6.1.7 の基準システムの欄に示す。主工程設備費 は設備単価×台数により算出した。

# () 操業費

人件費、修繕費、消耗品等諸費、業務分担費および事業税を表 6.1.8 の基 準システムの欄に示す。人員は 152 人、単価は 900 万円/人・年に設定した。 修繕費に関しては、定期検査に必要な資材等の評価が済んでいないため、定 検材料費を見込んでいない。消耗品については、国内実験における購入単価 の半額を本施設における購入単価として設定した。

() 燃料製造単価

()()の結果から算出した燃料製造単価を表 6.1.9の基準システムの欄 に示す。また、炉心平均取出燃焼度 94.2GWd/t を用いて、燃料製造単価を 発電単価に換算した値を合わせて示す。

燃料製造単価の目標値が 16 万円/kgHM であるのに対し、本システムは 25.9 万円/kgHM であるので、大幅なコストダウン方策の検討が必要である。

(a) コストダウンの方向性

燃料製造施設のコストダウンの方向性は、燃料製造単価の構成から、資本 費に関しては建設費の一層の見直しによる削減が挙げられる。操業費に関し ては人員の見直しによる人件費の削減、消耗品等諸費については再処理施設 側での資源回収率向上による補充U・Zr購入量の低減、大量生産によるるつ ぼ・モールドの購入価格低減等が挙げられる。また、製造歩留まりおよび設 備稼働日数の向上による生産量の増加は燃料製造単価の低減に有効である。 (b) コスト削減方策

燃料製造施設のコスト削減方策としては、ピン径太径化による燃料ピン本 数の低減およびブランケット燃料の外部購入が建設費、操業費、燃料部材費 のいずれの削減にも有効であり、運転自動化の徹底、メンテナンスフリー機 器の開発と採用、保守の効率化等による運転・保守人員の低減が操業費の削 減に有効である。なお、本施設が再処理との一体化施設であって、かつ再処 理と比較して施設容積がかなり小さいことを考慮すれば、廃棄物処理、分析、 放射線管理および技術・保守等は、再処理施設側との合同班を構成すること により、燃料製造側で単独の班を構成するより大幅に人数を減らせる可能性 がある。さらに、新燃料貯蔵・払い出し業務と再処理側の使用済み燃料搬入・ 貯蔵業務は、1つの班で兼任することが可能であり、人数を半減できる。

また、メンテナンスフリー機器の開発と採用や保守の効率化は稼働率の向 上、操業日数の増加、燃料製造量の増加を通じて燃料製造単価を低減させる ことができる。

(4) 環境負荷低減性

() 廃棄物発生量

3.1.2 で述べた廃棄物区分に基づき、燃料製造/再処理一体化プラントにおける燃料製造所掌分について、通常運転時の年間固体廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄物発生量を求めた。

(a) 通常運転時の廃棄物発生量

工程廃棄物および保守補修に係わる二次廃棄物(不燃性の固体廃棄物)の 発生量を表 6.1.10の基準システムの欄に示す。

廃棄物量を低減させるため、主要な工程廃棄物である黒鉛るつぼ(射出成型工程から発生)は焼却処理するものとし、廃モールド(モールド除去工程から発生)は、全量を再処理側に引渡し、人工鉱物固化体の副原料に利用するものとした。よって、固体廃棄物としての発生量は、表に示されているように0となる。なお、参考までに、処理前の量を併記した。

一方、保守補修に係わる二次廃棄物は、機器単体重量×保守補修による交換率(機器の種類により 6wt%/年または 2wt%/年ずつ交換されると想定)×台数により評価した。

この他、高レベル固体廃棄物処理、オフガス処理、Ar セル浄化、低レベ ル固体廃棄物処理、人工鉱物固化、ドロス処理の各設備から発生する廃棄物 が燃料製造に関係するが、再処理との共通設備であるため廃棄物の区分が明 確となっておらず、本検討では評価していない。

(b) 廃止措置時の固体廃棄物発生量

主建屋、燃料貯蔵建屋および非常用発電設備建屋のうち、燃料製造所掌の 設備および建屋の固体廃棄物発生量を表 6.1.11の基準システムの欄に示す。

() 廃棄物への移行率

プロセス設計の項で示したように、燃料製造工程における工程廃棄物への 核燃料物質の移行率は、モールド付着物、ドロス含有物および分析廃棄物を 合わせると約 0.5%に達すると推測される。

一方、本システムは粉末を扱うシステムと比較して、ホールドアップが相 対的に少ないと考えられる。よって、機器の除染に特別の困難が伴わなけれ ば、簡素化ペレット燃料製造システムよりも二次廃棄物への核燃料物質の移 行率は小さく、工程廃棄物への移行率と比較して無視し得ると考えられる。

したがって、工程廃棄物および二次廃棄物への核燃料物質の移行率は、約 0.5%となり、目標(0.1%以下)を満足しない。

しかしながら、工程廃棄物に移行する核燃料物質の大部分は、モールド付 着物(射出の際に溶融金属に浸る部位であるモールド下部の外側表面に皮膜 状に付着している合金)であり、比較的容易にモールドから剥離できること がコールド試験により確認されている。よって、モールド除去工程において、 破砕する前にブラシ等でモールド表面を研磨し皮膜を除去・回収することに より、モールドと共に廃棄物に移行する核燃料を大幅に削減することは可能 である。また、モールドを酸洗浄する工程を導入し、モールド内面に付着し ている核燃料物質をも分離回収すれば、より一層の削減が望める。

以上のことから、現状では目標を満足できないが、製造設備(あるいは廃 棄物処理設備も含めた)の設計如何では、目標を満足できる可能性もあると 言える。

(5) 資源有効利用性

上述したように、工程廃棄物および二次廃棄物への核燃料物質の移行率は、 約 0.5%となり、設計要求の 99%を満足できるものと判断される。

(6) 核拡散抵抗性

単体 Pu の存在の有無、ホールドアップ、計量管理および物流管理の観点から評価する。

単体 Pu の存在の有無

本システムにおいて、Pu は金属電解法再処理で得られる Pu-U-MA 合金の形態で供給され、Puを単離する工程は存在しない。したがって、Pu が単独で存在することはない。

( ) ホールドアップ

インゴットおよび棒状合金の状態で核燃料物質を取り扱うため、微粉が発 生・飛散しにくく、セル内ホールドアップの極めて少ない、保障措置性に優 れたシステムであると考えられる。ただし、るつぼおよびスラグ表面に付着 したドロス剥離時には、吸引機を用いて粉塵の飛散を防止する設備設計とし ている。 ) 計量管理

インゴットおよびスラグ中には、Pu が均一に分布していると考えられる ため、分析試料による成分分析値と秤量値から Pu 量の把握は可能である。

ただし、ロットサイズの小ささ、成分調整工程で Pu 富化度が変化すること、各工程でのリサイクル品発生等により、評価作業量は膨大なものとなる。

また、成分分析に一日弱の時間を要することから、射出成型で得られたス ラグおよびヒール等のリサイクル品に対する即時の評価が不可能であるこ とが問題点として上げられる。

() 物流管理

ロットサイズの小ささ、各工程でのリサイクル品発生等により、工程内の 物流は複雑かつ極めて多数のロットが存在するものになる。

以上より、計量・物流管理の負担は大きいが、本システムは核拡散抵抗性 に優れたシステムであると言える。ただし、保障措置制度との関連において、 計算法(成分分析値×秤量値)とは異なり、機器毎の Pu 量の直接測定を求 められた場合には、新たなる技術開発(Pu の自発核分裂 or 中性子照射によ る核分裂放射線を検出し、Pu 量を同定する等)が必要になる。

(7) 運転・保守補修性

本項については、技術的成立性の項で言及した。

# 6.2 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

(1) 基準炉心設計とフェーズ 炉心設計との比較

フェーズ の資源重視型炉心および経済性重視型炉心設計のうち、燃料仕様に関連する項目で、基準炉心とは有意な差がある項目を表 6.2.1 および表 6.2.2 に示す。

基準炉心設計に対し、資源重視型および経済性重視型炉心設計の炉心燃料 体数が増加しているのは、集合体当りの HM 重量の低減(集合体当りの燃料 要素本数を参照)を補うためである。

なお、Pu 富化度、スタック長等が変更されたことにより、燃料スラグの 製造に関する諸元が変更される。表 6.2.3 に比較結果を示す。

(2) 資源重視型システムおよび経済性重視型システム

資源重視型炉心および経済性重視型炉心に燃料を供給する燃料製造シス テムについて、経済性および廃棄物発生量の評価を行なった。

設計の基本方針および前提条件については、上記(1)項に示された値以外 は基準システム設計のとおりとする。ただし、他の燃料製造システムとの比 較を容易にするために、生産規模を 50tHM / 年としている。

() 経済性の評価

(a) 年間製造量

歩留まりを考慮して年間に製造する必要のある燃料要素本数、燃料スラグ 本数を射出成型バッチ数とともに表 6.2.4 および表 6.2.6 に示した。

(b) 必要機器数

表 6.2.4 および表 6.2.6 に示す燃料を製造するために必要な機器数を求め、 表 6.2.5 および表 6.2.7 に示した。また、システム間の主工程設備台数の比 較を表 6.1.6 に示す。

なお、貯蔵設備の台数は燃料の種類ごとに1台としているため、数に変更 は無いが、容量自体は年間製造能力の増加に伴い50/38=1.32倍している。 (c) 建設費

台数および単価が明確な設備(主工程設備の製造設備、周辺設備の保守・ 補修設備、建屋・電気・換気設備の主工程セル容積)については、積み上げ 方式で求め、それ以外の設備(主工程設備の貯蔵設備、周辺設備の廃棄物処 理・貯蔵設備、建屋・電気・換気設備の主工程セル以外の容積等)について は、年間製造能力に依存するとして、基準システムのコスト×(50/38)<sup>0.6</sup> と した。

結果を表 6.1.7 に示す。

(d) 操業費

人件費に関しては、機器数および年間製造能力が大きく変わる訳では無い ので、基準システムと同人数で運転することとし、増額しなかった。

修繕費に関しては、高額の機器(モールド除去設備等)が増えたため、金額 の増加が大きい。

消耗品等諸費に関しては、数量が計算できるものについては直接計算し、 それ以外のものについては、年間製造能力または建物容積に比例するとして 基準システムの値より推定した。具体的には、以下のようにした。

るつぼ費:射出成型バッチ数×購入単価

モールド費:射出成型バッチ数×バッチ当りモールド本数×購入単価 補充 U・Zr 費:基準システムのコスト×50/38

-1 電力費のうちの設備分: に同じ

-2 電力費のうちの換気分:基準システムのコスト×建物容積の比結果を表 6.1.8 に示す。

(e) 経済性評価結果

以上の検討の結果得られた燃料製造単価および発電単価を表 6.1.9 に示す。 基準システムに対し、資源重視型および経済性重視型システムは年間製造能 力が大きいため、燃料製造単価は若干割安なものとなっている。 一方、径方向ブランケット燃料の有無により、炉心平均取出燃焼度に大き な差が生じ、それが発電単価の大小を決定している。増殖比を重視した基準 および資源重視型システムに対し、経済型システムは約4割減の低コスト化 を達成している。

() 廃棄物発生量

(a) 通常運転時の廃棄物発生量

基準システムと同様の考え方に基づき固体廃棄物発生量を評価した。結果 を表 6.1.10 に示す。

燃料スラグの取り扱い本数に応じて主工程設備機器数が増えるため、炉心 燃料スラグのみを製造する経済性重視型システムで最も二次廃棄物量が多 くなっているが、年間生産能力に比例するほどの増加傾向は示されていない。 (b) 廃止措置時の固体廃棄物発生量

数量が計算できるものについては直接計算し、それ以外のものについては、 年間製造能力または建物容積に比例するとして基準システムの値より推定 した。具体的には、以下のようにした。

主工程設備および保守・補修設備:設備単体重量×台数×換算係数

以外の設備:基準システムの廃棄物量 × 50/38

SUS ライナ:セル内全面に 5mm 厚さで存在するとして計算

建物躯体:基準システムの廃棄物量××建物容積の比

結果を表 6.1.11 に示す。

低レベル廃棄物(地層処分並)量は、年間製造能力に応じて増加しており、 資源重視型・経済性重視型間での相違も見られるが、放射性物質濃度区分が 下がるにつれ年間製造能力および資源・経済性重視の差の影響が小さくなる 傾向を示している。

#### 6.3 技術開発項目

燃料製造に係わる開発課題を表 6.3.1 に示す。また、概要を以下に示す。

(1) 技術的成立性に係わる項目

スラグの均一(分散)性の確認

基準システムで検討している燃料組成を用いて、実験室規模の射出成型 試験を実施し、アーク溶解 - 急速冷却試験と同様の結果が得られることを 確認する。同様に、スラグの物性(スラグの切断性等)を確認する。

また、廃モールドへ移行する核燃料物質の割合の評価・低減策の検討(モ ールド下端部の皮膜除去・モールド洗浄の効果等)を行うことにより、資 源有効利用・環境負荷低減に対する基礎的な知見も合わせて得る。 スラグ製造実証および製造歩留まりの確認

次に、実規模の射出成型試験を実施し、スラグ製造の実証を行う。一度 に多数本の射出成型を行った場合でも、実験室規模試験と同等のスラグの 均一(分散)性・物性が得られることを確認する。また、品質管理の観点か ら得られたスラグの直径・外観等の評価を行うことにより、量産性に対す る知見を得るとともに、製造歩留まりの確認を行う。

さらに、スラグからの発熱・放射線量およびそれが設備(特に検査機器 類)に及ぼす影響の確認等を行う。

機器設計の最適化(高放射線対策・高発熱対策を含む)

模擬スラグを用いたモックアップ試験および上記 ・ で得られた知見 等を基に、マテリアルハンドリング設備および秤量器を含む機器設計の最 適化を行い、高稼働率・低故障率・設備の高寿命化を図ることにより、セ ル内安定操業を目指す。これは経済性、運転・保守補修性に係わる課題で ある。

品質検査手法の確立

で得られたスラグからの発熱・放射線量およびそれが設備(特に検査 機器類)に及ぼす影響等を考慮した、量産に対応した品質検査手法を確立 する。

燃料仕様最適化

~ を通じて量産性が高く、品質的に優れた燃料を製造可能な燃料仕様をサーベィする。

(2) 安全性に係わる項目

二重識別・秤量による臨界管理、マテハン設備へのインターロックの組 込み(搬送台車の異常接近防止を含む)

今回示した二重誤装荷を防止するためのシステム設計方針(二重識別・ 秤量、マテハン設備へのインターロックの組込み等)を個々の工程につい て具体化し、工程管理手法および機器設計に反映する。

設備配置間隔の最適化・臨界隔離壁設置

複数ユニットの臨界安全を確保するために必要な設備配置間隔につい て、評価を行う。同様に、臨界隔離壁を設置する場合の壁厚・設置位置に ついて評価を行う。臨界隔離壁を設置しても、運転・保守補修上支障が無 い場合は、経済的に有利な方(間隔を取ってセル容積を大きくするか、壁 を設けて容積を小さく保つか)を選択し、配置設計を最適化する。

(3) 経済性に係わる項目

製造歩留まりの向上

るつぼ・モールド形状および射出成型工程の運転条件の最適化を行い、

モールドからるつぼへの鋳込み率の向上、スラグ長に近い均一組成の射出 成型体を得る技術を開発する。製造歩留まりの向上は、資本費および操業 費の削減につながる。

# (4) 核拡散抵抗性に係わる項目

計量管理技術の高度化

成分分析値と秤量値を用いて、計算により工程内の Pu 量の把握・管理 を行う手法について、その高度化を図り、現在用いられている工程内の核 燃料物質量を直接測定する手法と同等の信頼性を有する技術にまで高め る。

これは、技術的成立性、運転・保守補修性にも係わる課題である。

なお、上記技術の代替技術として、直接計測による機器内の Pu 重量の 評価手法を検討しておく必要がある。

# 参考文献

- 1) 倉田,他:"電力中央研究所報告",T92005(1992).
- 2) M.Kurata, et al.: "Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems ", Global '97, Yokohama, Japan ,Oct. 5-10, (1997).
- 3) C.L.Trybus, et al. : "Casting of metallic fuel containing minor actinide additions", J. Nucl. Mater., No.204, pp.50 ~ 55 (1993).
- 4) 中村勤也、尾形孝成: "U-Pu-Zr 合金燃料スラグ製造技術開発(I)-模擬 合金の射出鋳造試験-"、日本原子力学会 2003 年春の年会 B10、長崎県佐 世保市、2003-3-27.
- M. Tokiwai, R. et al.: "Development of Fabrication Technology of Metallic Fuel by Injection Casting", J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, pp.910 ~ 912 (2002).
- C.E. Stevenson : "The EBR- II Fuel Cycle Story", American Nuclear Society, pp.123 ~ 151 (1987).
- 7) 尾形孝成、他:"金属燃料の射出成型技術の開発 U-Zr 合金の工学規模射 出成型試験 - 」、日本原子力学会 2002 年秋の大会 E17、いわき明星大学、 2002-9-14~16.

項目	算機-設備間の通信データへのノイズ 制御ユニットの多重化 F業指示ミスの防止	臨界管理領域の設置(領域毎に質量管理)	1	ハンドリンを吊む) 燃約物館の異常な活席は	※11129号シミルコミンのエートを開催した。 搬送台車数の最小化	接近防止バー ・ 接近センサー連動インターロック	0.11110.111	2)識別ミ人の防止 + _ グル第ド + Z 恋 器 in の詰む 聞いまっ 「センサーの自己診断・多重化	ノーカル寺によっす品にのの訳の取りこへ  搬送路から臨界管理領域への搬入出路を物質の   \$器の読み取り	種類毎に指定	<u>⇒む</u> # の + 11 1 3 min and 1 min a	Ξ៲x l曲 いいい 離 0 撤送路と臨界管理領域をマテハン設備で結ぶ	等による秤量ミスの防止	の詰まり・走路からの落下による    機器設計の考慮	での核燃料物質の滞留防止	、、ĸıı、, y	
	とミンは業計のようの 「社管理計算機 - 設備間			(<アリア)レハントリンジ 植注曲の核験判断層の	- ^ ビ ビ い ー / メ / / / / / / / / / / / / / / / / /		0 — 4 ha wee 0 33 4 k k k k 4 7 f	核燃料物質の識別に入り、チャ・センキーダル第1	1916-6~2-1917年11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-		ごうちょう とうご 供力 ひょうご	うぼったう 「ろうで、 「ろう」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろう」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ」、 「ろ	<b>秤量器故障等による秤</b> 量	「羊・いま詰の置物は「茶」	製造設備内での核燃料	<i>゚゚゚゚゚゚゚゚゚</i> バンコン コン シン	<b>メ ブ リ デ ノ フ ノ ブ リ ノ ン</b>

表6.1.1 臨界安全に係わるシステム設計方針

表6.1.2	年間燃料製造量(	(基準システム)
--------	----------	----------

項目	るつぼ 投入重量	モールド 射出物 重量	射出 成型体 重量	検査前 スラグ 重量	検査後 スラグ 重量	検査前 燃料要素 重量	検査後 燃料要素 重量	集合体重量
	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(tHM)
内側炉心	30.3	21.2	18.7	15.9	15.0	20.3	19.9	19.9
外側炉心	15.2	10.6	9.3	7.9	7.5	10.1	9.9	9.9
軸ブラ	15.2	10.6	9.3	8.4	7.9			
径ブラ	17.0	11.9	10.4	8.9	8.4	8.4	8.2	8.2
計	77.7	54.4	47.8	41.1	38.8	38.8	38.0	38.0

百日	射出成型 バッチ数	モールド 射出物	射出 成型体	検査前 スラグ	検査後 スラグ	検査前 燃料要素	検査後 燃料要素	集合体 体数
	/ / / / / /	本数	本数	本数	本数	本数	本数	I'T'XX
内側炉心	830	90042	79099	79099	74670	37335	36588	110.5
外側炉心	580	45021	39550	39550	37335	18667	18294	55.3
軸ブラ	337	45021	39550	118649	112004			
径ブラ	314	14645	12865	12865	12145	4048	3967	31.2
計	2061	194729	171064	250163	236154	60051	58850	197.0

表6.1.3 必要機器数(基準システム)

装置名称	年間	年間製造量		1日当り 要求生産能力		装置能力		設置 台数
成分調整装置	2061	<b>パ</b> ѡチ / \ノ	10.3	ト/ チップ	16	しょう/チンチ	0.64	1
射出成型装置	2001	<i>К 91 г</i> у	10.5	<i>N 91 /</i> u	3	л ул/u· 🗗	3.43	4
モールド除去装置(注)	194729	本/y	974	本/d	960	本/d·台	1.01	1
スラグ検査装置	250163	本/y	1251	本/d	720	本/d·台	1.74	2
燃料要素組立装置		$\begin{array}{c} 360 \\ 411 \\ 411 \\ 480 \\ 720 \\$		0.84	1			
超音波検査装置					411		0.73	1
外径検査装置					411		0.73	1
リーク試験装置					480		0.63	1
表面除染装置	60051		+ / 201	201	* \4	720	- +/a.	0.42
汚染検査装置	00051	<b>平</b> /y	本/y 301	4/0	480	- 4/0·台	0.63	1
Naボンディング装置					303		0.99	1
ボンディング検査装置					720		0.42	1
ワイヤラッピング装置					720		0.42	1
燃料要素検査装置					720		0.42	1
集合体組立装置	107.0		0.00	(木 / d	2	休/1.4	0.49	1
集合体検査装置	197.0	°/4∓/y	0.99	1/44/U	2	1/4×/U'□	0.49	1

注:運用により定格能力オーバー分(14本/d)を吸収するものとし、台数は増やさない。

JNC TN9400 2004-036

	徧		3回/日基×4基×200日			1	1	1	
	公析機器		電位差滴定法	9-11小法	質量分析計	a. 7. 9401-4	4-40+0.xxv	1CP-AES法	0, C, N計
	不純物	(wt%)						0	0, C, N
	Zr	(wt%)						0	
	- <sup>7</sup> E M M	$\hat{}$							
位)	し・ <sup>3</sup> 原子瓶 								_
唐し		-					0		_
<b>—</b>	びスペクトル	) ( -							
項	¥ ۲	Ĵ							
桥	名名 (1)	C							
⋪	a A	Ĵ							
	в С	Ĵ				0			
	Am	( )				0			
	đZ	$\hat{}$				0			
	ମ ଜ୍	(wt%)		0					
	D	(wt%)	0	- 2011					
	今日 析的			計量管理		HM分析	FP分析	品質管理	
	分類が度	(回/年)				2400			
	試区					ΗA			
	採取試料形態					固体	(mmCU)		
	析ント	機器名称				モーケド家士装置			
	おび	機器番号				V32M12			

表 6.1.4 分析項目リスト

-316-

# 表 6.1.5 保守方式選択における基本的考え方

放射能レベル	高/	个中	任	極低/非放射性	
保守 頻度	除染性 難	除染性 易			
大	遠隔保守	遠隔保守	直接保守		
中	遠隔保守	遠隔保守	直接保守	直接保守	
小	遠隔・直接保守 併用	直接保守	直接保守	一般プラントの 設備保守に準ず	
極小	直接保守	直接保守	直接保守		

備考:

(1) 保守頻度:大は数回/年、中は1回/年、小は1回/数年、極小は1回/プラント寿命

(2) 放射能レベル:高は 3.7×10<sup>13</sup>Bq/m<sup>3</sup>以上、中は 3.7×10<sup>13</sup>Bq/m<sup>3</sup>~3.7×10<sup>10</sup>Bq/m<sup>3</sup>、低は 3.7×10<sup>10</sup>Bq/m<sup>3</sup>~3.7×10<sup>7</sup>Bq/m<sup>3</sup>、極低は 3.7×10<sup>7</sup>Bq/m<sup>3</sup>以下。

(3) 除染性:難は構造が複雑なもの、易は構造が単純なもの。

计供存物	基準	資源重視型	経済性重視
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	システム	システム	型システム
原料一時保管設備	4	4	4
秤量設備	4	4	4
成分調整設備	1	1	1
射出成型設備	4	5	5
モールド除去設備	1	2	2
スラグ保管設備	4	4	4
スラグ検査設備	2	2	3
燃料要素組立設備	1	1	2
超音波検査設備	1	1	2
溶接部外径検査設備	1	1	2
リーク検査設備	1	1	1
表面除染設備	1	1	1
汚染検査設備	1	1	1
Na ボンディング設備	1	(注) 1	1
ボンディング検査設備	1	1	1
ワイヤラッピング設備	1	1	1
燃料要素検査設備	1	1	1
燃料要素保管設備	2	2	2
燃料要素識別検査設備	1	1	1
集合体組立設備	1	1	1
集合体検査設備	1	1	1
リワーク設備	4	4	4
合計	39	4 1	4 5

表 6.1.6 主工程設備台数

注:資源重視型システムにおいて、10本/日だけ製造能力が不足するため、 1バッチ当り5トレイ分の燃料要素(125本)を一度に処理する設計とす ることにした。また、設備費に関しては処理能力に依存するものとして、 基準システムの設備費×(125/100)<sup>0.6</sup>とした。

Τα	基準	資源重視型	経済性重視
山口	システム	システム	型システム
主工程設備費	152 億円	171 億円	201 億円
保守・補修設備費、共通設備費	139 億円	158 億円	162 億円
建屋・電気・換気設備費	162 億円	184 億円	185 億円
新燃料貯蔵建屋設備費	64 億円	76 億円	76 億円
建設費合計	517 億円	589 億円	624 億円

表 6.1.7 建設費内訳

表 6.1.8 操業費内訳

ΤΕ	基準	資源重視型	経済性重視
	システム	システム	型システム
人件費(152人×900万円/人・年)	13.7 億円	13.7 億円	13.7 億円
修繕費(機器交換費)	10.9 億円	13.2 億円	15.0 億円
消耗品等諸費	191倍田	919倍田	990倍田
(補充 U、ユーティリティ等を含む)(注)	10.1 闾门	0.1 闾门 61.6 闾门	
るつぼ費	0.2 億円	0.3 億円	0.3 億円
モールド費	5.8 億円	6.7 億円	8.2 億円
補充U・Ζr費	1.1 億円	1.4 億円	1.4 億円
電力費	11.0 億円	12.8 億円	12.9 億円
業務分担費(上記 3 項目 × 15%)	6.4 億円	7.2 億円	7.7 億円
事業税(上記 4 項目 × 1.5%)	0.7 億円	0.8 億円	0.9 億円
操業費合計	49.9 億円	56.1 億円	60.2 億円

(注)項目 ~ 以外に、セル補充用 Ar ガス、金属 Na、分析試薬、分析 用使い捨て器材等があるが、詳細検討には至っていないため、本評 価では検討していない。

БО	基準	資源重視型	経済性重視
月 月 月 月 日	システム	システム	型システム
燃料製造単価(万円/kgHM)	25.9	22.2	24.0
資本費(万円/kgHM)	7.6	7.4	8.5
操業費(万円/kgHM)	13.3	9.8	10.6
部材費(万円/kgHM)	5.0	5.0	5.0
発電単価(円/kWh)	0.254	0.295	0.165
炉心平均取出燃焼度(GWd/t)	94.2	71.9	135.0

表 6.1.9 燃料製造単価および発電単価

农 0.1.10 应用 是 4 时 0 首 件 庞 未 10 儿 上 呈	表 6. 1.10	通常運転時の固体廃棄物発生量
--------------------------------------	-----------	----------------

単位: t/y (本/y)

区分		種類	基準 システム	資源 重視型 システム	経済性 重視型 システム
低レベル廃	工程	るつぼ	0(0)		
棄物(地層	廃棄物	(焼却処理量)	3.3(33)	4.7(47)	3.8(38)
処分並)		廃モールド	0(0)		
		(再処理引渡し量)	9.0(90)	10.7(107)	12.5(125)
	二次 廃棄物	保守補修に 係わる廃棄物(注)	6.4(64)	6.9(69)	7.4(74)
クリアラン	工程				
スレベル以	廃棄物	-	-	-	-
下の廃棄物	二次 廃棄物	保守補修に 係わる廃棄物(注)	3.2(32)	3.2(32)	3.3(33)

注:セル内に設置されたITVカメラ等の設備は含まれていない。また、 廃棄物処理等の再処理との共通設備からの廃棄物量は評価していない。

区分	基準 システム	資源 重視型 システム	経済性 重視型 システム	
低レベル廃棄物(地層	<b>380</b> t	570 t	590 t	
低レベル廃棄物(余裕	110 t	140 t	140 t	
クリアランスレベル	コンクリート以外	10000 t	12000 t	12000 t
以下の廃棄物	コンクリート	99000 t	110000 t	110000 t

表 6.1.11 廃止措置時の固体廃棄物発生量

	百日	甘淮心心宫斗	資源重視型	経済性重視型	
<b>坦日</b>		基华尔心议司	炉心設計	炉心設計	
	内側炉心燃料	276 体	336 体	327 体	
集合	外側炉心燃料	138 体	198 体	459 体	
体数	径ブラ燃料	78 体	186 体	-	
	合計	492 体	720 体	786 体	

表 6.2.1 炉心設計の相違点(燃料製造システムに関係する項目)

表 6.2.2 燃料設計の相違点(燃料製造システムに関係する項目)

項目		基準燃料		資源重視型燃料		経済性重視 型燃料
		炉心	径ブラ	炉心	径ブラ	炉心
集合体全長		4600mm		4445mm		4375mm
燃料要素本数		331 本	127 本	271 本	127 本	271 本
燃料要素全長		2670mm		2980mm		2910mm
スタック長		1150mm		1250mm	1250mm	1150mm
U-Pu-Z	r	950		800		1000
スタック長		850mm	-	80011111	-	TOODIIIII
U -Zr		150mm(上)	1150mm	400mm(上)	1250mm	150mm(上)
スタック長		150mm(下)		50mm(下)		0mm(下)
Pu	内側	12.3wt%	-	14.3wt%	-	12 <b>A</b> w+0/
富化度	外側	17.2wt%	-	18.5wt%	-	13.0wt%
Zr	内側	10.0wt%		10.0wt%		16.0wt%
含有率	外側					10.0wt%
(射出成型体・スラグ仕様)						
---------------						

HM密度(q/cm3)内側炉心軌ブラ径ブラ内側炉心軸ブラ径ブラ内側炉心小HM電度(q/cm3)16.8316.9316.7316.7316.7316.7316.7316.7316.73	項目		基準燃料	रते			資源重視到	<b>揱</b> 燃料		経済!	生重視型燃	<u>{</u> *4
HM密度(g/cm3)H6.8316.9316.9316.9316.9316.9316.9316.93<		内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	内側炉心	外側炉心	軸ブラ
HM重量比(wi%)909090909090909090909084Zr密度(q/cm3)6.516.516.516.516.516.516.516.516.516.51Zr重量比wt%101010101010101016Tr重量比wt%15.8015.8015.8015.8015.8015.8015.8015.8015.80亚均密度(q/cm3)0.650.650.651.270.650.651.270.65重径(cm)0.650.650.651.270.650.651.270.65動出成型体長さ(cm)50.050.050.045.045.050.050.055.0スラグ長さ(cm)42.542.515.038.340.040.041.750.0	HM密度(g/cm3)	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83	16.83
Zr密度(q/cm3) $6.51$ $7.61$ $7.62$ $12$ (cm) $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.80$ $15.18$ $16.65$ $16.5$ $16.5$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$ $0.65$ $1.27$ $0.65$	HM重量比(wt%)	06	06	60	90	06	06	06	06	84	06	06
Zr重量比wt%         10         16         16           平均密度(q/cm3)         15.80         15.80         15.80         15.80         15.80         15.80         15.80         15.80         15.80         15.18         15.17         0.65         15.17         0.65         15.17         0.65         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18         15.18 <td>Zr密度(g/ cm3)</td> <td>6.51</td>	Zr密度(g/ cm3)	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51
平均密度(g/cm3) 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.80 15.18 直径(m) 0.65 0.65 0.65 1.27 0.65 0.65 0.65 1.27 0.65 $\eta$ 動出成型体長さ(cm) 50.0 50.0 50.0 45.0 45.0 45.0 50.0 50.0	Zr重量比wt%	10	10	10	10	10	10	10	10	16	10	10
直径(cm) <u>動出成型体長さ(cm)</u> スラグ長さ(cm) スラグ長さ(cm) オ5.0 40.0 50.0 50.0 40.0 50.0 50.0 50.0 5	平均密度(g/cm3)	15.80	15.80	15.80	15.80	15.80	15.80	15.80	15.80	15.18	15.80	15.80
<u>射出成型体長さ(cm) 50.0 50.0 50.0 45.0 45.0 50.0 50.0 50.0</u>	直径(cm)	0.65	0.65	0.65	1.27	0.65	0.65	0.65	1.27	0.65	0.65	0.65
スラグ長さ(cm) 42.5 42.5 15.0 38.3 40.0 40.0 41.7 50.0	射出成型体長さ(cm)	50.0	50.0	50.0	45.0	45.0	45.0	50.0	50.0	55.0	55.0	50.0
	スラグ長さ(cm)	42.5	42.5	15.0	38.3	40.0	40.0	40.0 5.0	41.7	50.0	50.0	15.0

# 基準燃料と資源重視型燃料および経済性重視型燃料の諸元の比較 (成分調整・射出成型工程に係る仕様) 表6.2.3 (2)

<b>見型</b> 燃料	炉心 軸ブラ	13.0 -	4.5 0.0	34.6 45.0	24.2 31.5	59.5 235.9	93 133
经済性重排	<u> </u>	13.0	4.5	34.6	24.2	232.7 2	104
	径ブラ	1	0.0	54.0	37.8	900.5	41
<b>业</b> 燃 米斗	軸ブラ	ı	0.0	45.0	31.5	235.9	133
資源重視到	外側炉心	18.5	4.5	24.3	17.0	212.3	80
	内側炉心	14.3	4.5	31.5	22.0	212.3	103
	径ブラ		0.0	54.0	37.8	810.5	46
रो	軸ブラ		0.0	45.0	31.5	235.9	133
基準燃料	外側炉心	17.2	4.5	26.2	18.3	235.9	77
	内側炉心	12.3	4.5	36.6	25.6	235.9	108
通目		[化度(wt%)	ッチ当りPu重量(kgPu)	ッチ当りHM重量(kgHM)	成型体の総重量(kgHM)	成型体1本の重量(gHM)	ッチ当りの射出成型体数(取出時点)

注)1/バッチ当りの射出成型体数(取出時点)の頃は、るつぼからモールドに鋳込まれた射出成型体の本数を意味する。 モールドを除去し、取り出された射出成型体のうち11.8%は長さ不足等により、スラグせん断を行う前にスクラップとなる。

表6.2.4	年間燃料製造量	(資源重視型シ	vステム∶50tHM/y	゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚゚
--------	---------	---------	--------------	---

項目	るつぼ 投入重量	モールド 射出物 重量	射出 成型体 重量	検査前 スラグ 重量	検査後 スラグ 重量	検査前 燃料要素 重量	検査後 燃料要素 重量	集合体 重量
	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(t <b>HM</b> )	(tHM)	(tHM)
内側炉心	24.5	17.2	15.1	13.4	12.7	19.8	19.4	19.4
外側炉心	14.5	10.1	8.9	7.9	7.5	11.7	11.4	11.4
軸ブラ	21.7	15.2	13.3	12.0	11.3			
径ブラ	40.5	28.3	24.9	20.7	19.6	19.6	19.2	19.2
計	101.1	70.8	62.2	54.0	51.0	51.0	50.0	50.0

項目	射出成型 バッチ数	モールド 射出物 本数	射出 成型体 本数	検査前 スラグ 本数	検査後 スラグ 本数	検査前 燃料要素 本数	検査後 燃料要素 本数	集合体 体数
内側炉心	780	80870	71042	71042	67064	33532	32861	121.3
外側炉心	594	47656	41864	41864	39520	19760	19365	71.5
軸ブラ	481	64263	56453	112907	106584			
径ブラ	750	31469	27645	27645	26097	8699	8525	67.1
計	2605	224259	197005	253458	239265	61991	60751	259.8

# 表6.2.5 必要機器数(資源重視型システム:50tHM/yプラント)

装置名称	年間製	造量	1日 要求生症	当り 産能力	装置	能力	必要 台数	設置 台数
成分調整装置	2605	<b>バ</b> ッ手/\/	13.0	ກ, ≞*∖ (	16	ピッチ/とく	0.81	1
射出成型装置	2005	N 977 y	15.0	<i>N yr u</i>	3		4.34	5
モールド除去装置	224259	本/y	1121	本/d	960	本/d·台	1.17	2
スラグ検査装置	253458	本/y	1268	本/d	720	本/d·台	1.76	2
燃料要素組立装置					360		0.86	1
超音波検査装置					411		0.75	1
外径検査装置					411		0.75	1
リーク試験装置					480		0.65	1
表面除染装置	61001	+ $()$	210	۲. A	720	★/d.ム	0.43	1
汚染検査装置	01991	<del>4</del> /у	310	平/u	480	华/u'口	0.65	1
Naボンディング装置(注)					375		0.83	1
ボンディング検査装置					720		0.43	1
ワイヤラッピング装置					720		0.43	1
燃料要素検査装置					720		0.43	1
集合体組立装置	250.9		1 20	(木 / 占	2	休/1.4	0.65	1
集合体検査装置	209.8	η <del>μ</del> γγ	1.30	·μ4 / μ	2	1/4×/U'	0.65	1

注:1バッチ当り5トレイ分の燃料要素(125本)を処理する設計とすることにより、台数を増やさない。 設備費は、(125/100)<sup>0.6</sup>=1.14より、14%アップで評価する。

項目	るつぼ 投入重量 (tHM)	モールド 射出物 重量 (tHM)	射出 成型体 重量 (tHM)	検査前 スラグ 重量 (tHM)	検査後 スラグ 重量 (tHM)	検査前 燃料要素 重量 (tHM)	検査後 燃料要素 重量 (tHM)	集合体 重量 (tHM)
内側炉心	32.6	22.8	20.0	18.2	17.2	20.1	19.7	19.7
外側炉心	51.0	35.7	31.4	28.5	26.9	31.0	30.3	30.3
軸ブラ	13.2	9.3	8.1	7.3	6.9			
計	96.8	67.8	59.5	54.0	51.0	51.0	50.0	50.0

# 表6.2.6 年間燃料製造量(経済性重視型システム:50tHM/yプラント)

項目	射出成型 バッチ数	モールド 射出物 本数	射出 成型体 本数	検査前 スラグ 本数	検査後 スラグ 本数	検査前 燃料要素 本数	検査後 燃料要素 本数	集合体 体数
内側炉心	941	98000	86090	86090	81269	40634	39822	146.9
外側炉心	1473	137559	120842	120842	114075	57037	55897	206.3
軸ブラ	294	39260	34489	103466	97672			
計	2709	274819	241420	310398	293015	97672	95718	353.2

# 表6.2.7 必要機器数(経済性重視型システム:50tHM/yプラント)

装置名称	年間	製造量	1日 要求生症	当り 産能力	装置能力	必要 台数	設置 台数	
成分調整装置	2700	<b>バ</b> ѡチ / \ノ	13.5	۲, ۴۳, ۲	16 <u>∥'</u> ₩∓/d.	0.85 ج	1	
射出成型装置	2109	N 977 y	15.5	<i>N 91 /</i> U	3	4.51	5	
モールド除去装置	274819	本/y	1374	本/d	960 本/d·台	ì 1.43	2	
スラグ検査装置	310398	本/y	1552	本/d	720 本/d·台	ì 2.16	3	
燃料要素組立装置					360	1.36	2	
超音波検査装置					411	1.19	2	
外径検査装置					411	1.19	2	
リーク試験装置(注)					480	1.02	1	
表面除染装置	07670		+ $()$	490	*/4	720 + /d. 4	0.68	1
汚染検査装置(注)	9/0/2	华/y	409	央/u	480 <sup>本/U1</sup> 日	1.02	1	
Naボンディング装置					300	1.63	2	
ボンディング検査装置					720	0.68	1	
ワイヤラッピング装置					720	0.68	1	
燃料要素検査装置					720	0.68	1	
集合体組立装置	252.0		1 77	<b>/★</b> /a		0.88	1	
集合体検査装置	303.Z	Ή <del>γ</del> γ	1.77	144 / Q	2 14/01	0.88	1	

注:運用により定格能力オーバー分(9本/d)を吸収するものとし、台数は増やさない。

表6.3.1(1/3) 技術開発項目



大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題

小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

表6.3.1(2/3) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
経済性	建設費低減	プロセス合理化	機器設計の最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
			工程間の核物質移送技 術高度化	中	システム設計 物質移送・マテリアルレンドリング技術
		処理速度の向上	射出成型・Naボンディン グ装置の冷却時間短縮	小	システム設計 要素技術
-	操業費低減	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		集合体構成部材の低価 格化		大	要素技術開発
	稼働率向上	機器の長寿命化		中	システム設計 要素技術
		□ 分析時間の短縮(新技術開発)		中	分析技術
	廃止措置費低減	プロセスのコンパクト   化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		小	システム設計
資源有効利用	―U/TRUのリサイクルー	——U/TRU回収率向上	廃モールド付着物の回 │ 収	中	システム設計
			_ ドロス(U/TRUの酸化 物)粉塵の回収	小	システム設計
	U/TRUのロス低減	分析廃棄物への核物質 移行量低減	分析サンプルサイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
			新(乾式)分析技術開発	小	システム設計 分析技術
環境負荷低減	廃棄物発生量低減	工程廃棄物(分析廃棄 ┃ 物)発生量低減	分析サンプルサイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
			新(乾式)分析技術開発	小	システム設計 分析技術
		二次廃棄物発生量低減	機器の長寿命化	中	システム設計 要素技術
			機器台数削減	中	システム設計
-	廃棄物への核種移 行量低減	工程廃棄物(分析廃棄 ↓ 物)への移行量低減	廃モールド付着物の回 収	中	システム設計
			分析サンプルサイズの 最適化	小	システム設計 分析技術
			新(乾式)分析技術開発	小	システム設計 分析技術
		□ 二次廃棄物への移行量 低減		小	除染技術
			ドロス(U/TRUの酸化 物)粉塵の回収	小	システム設計
l	廃止措置時の固体 廃棄物量低減	プロセスのコンパクト   化		小	システム設計 要素技術
		施設のコンパクト化		小	システム設計
核拡散抵抗性	一保障措置	ホールドアップ対策 (発生の抑止)	<u>ドロス(U/TRUの酸化</u> 物)粉塵の回収	小	システム設計
		計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術/(要素技術(注))
	核物質防護			中	システム設計

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

注:計算(成分分析値×秤量値)による評価とは異なる、直接計測による機器内Pu量の評価を保障措置上求められた場合は要素技術開発を伴う

表6.3.1(3/3) 技術開発項目

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
運転・保守補修 性	セル内安定操業	運転自動化技術の開発		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリンク <sup>゙</sup> 技術
		計測制御		小	システム設計 要素技術
		工程間の核物質移送技 術高度化		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		低除染TRU燃料取扱い 下での機器の安定性	高放射線対策	大	システム設計 要素技術
			高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		一計量管理技術の高度化		大	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術/(要素技術(注))
		遠隔保守補修技術の確 立	機器のモジュール化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
			機器の除染技術開発	小	除染技術

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題



次工程に払い出される核燃料物質重量(成分調整で投入される重量を1とする)

工程	炉心燃料	軸ブラ燃料	径ブラ燃料			
成分調整		1.00				
射出成型		0.70				
モールド除去		-				
・剥離+モールト除去		0.70				
·射出成型体測長		0.61				
・せん断	0.52	0.55	0.52			
スラグ検査	0.49	0.52	0.49			
リーク検査・他	0.48	0.51	0.48			

図6.1.1 製造歩留まり



図6.1.2(1/2) プロセスフロー



パレット モールドパレット 日・ルドパレット 「1.6m」 1.6m」 1.6m」 高コイル ドリップパッ ドリップパッ 1.0m

-331-

図6.1.3 射出成型装置



図6.1.4 モールド除去装置





図6.1.5 スラグ検査装置



# 図 6.1.6 燃料要素組立装置



図 6.1.7 リーク検査装置



# 図 6.1.8 表面除染装置



# 図 6.1.9 Na ボンディング装置



# 図 6.1.10 ワイヤラッピング装置



図 6.1.11 燃料要素検査装置



# 図 6.1.12 集合体組立装置



# 図 6.1.13 集合体検査装置





设備	崁	考慮	(			)		羰置	中車	₩	送台車	医合单	中	圕		
スクラップ。回収] 搬送設備	臨界管理領	二重誤装荷		20	19 18		医面除染装置	<b>長面汚染検査</b>	<b>凡容器移送</b>	つぼ移送台	ールド・パレット移	、ラグ容器移	燃料要素移送	い間移送装		
					19	35	31 ∄	32 <del>∄</del>	33 33	34 &	35 E	36 ス	37 漆	38 t		
<ul> <li>■ 製造設備</li> <li>● 検査設備</li> </ul>	▲ 保管設備	■ 秤量設備 [		22 21	1516		F保管棚	グー時保管棚	グー時保管棚							
	Almi			26 23 2	12 13 14	4	<b>^ 燃料スラグ一時</b>	「ランケット燃料スラ・	「ランケット燃料スラ・	出装置	断装置	グ検査装置	<b>髩</b> 組立装置	検査装置	<b>昏装置</b>	査装置
	客を配置			26	1		▶側炉心	由方向7	圣方向7	くラグ取	くラグ切	然料スラ	然料要才	<b>留</b> 音 波 梅	Ւ径検₫	
	て機器			25	11		21 \$	22 車	23	24 7	25 7	26 虏	27 虏	28 ₿	29 4	30 1
	シレに沿っ	実施	36	24	<b>1</b>								<b>է管棚</b>		副	寺保管棚
	台車レー	- 里祥重		3 27	10				٩Jml		围	ップ秤量器	ップー時保	置 援	<sub>能</sub> 取移送装	スラグー
	の滅る。	۱ ک ۶	37	2928			(型装置	秤量器	除去装置	秤量器	除去装	・スクラ	・スクラ	ド除去	リング技	言い然料
	三十二日	シレシン		30			射出成	るしぼ	ドロス	КПХ К	トール	トール	トール	モール	サンブ	内側炉
	カに、「	<b>拒</b> 領1			2		1	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	DArセル の の 定 画 紙	0553年間		31	<mark>3</mark>		管棚		管棚		田		朔			組立装置
置上の特徴	37m × 15m0	セル内を複数の		32			I-U合金一時保	I-U合金秤量器	Zr合金一時保信	Zr合金秤量器	属U一時保管棚	属U秤量器	属Zr一時保管ホ	属Zr秤量器	分調整装置	ールド・ペレット
聞い		•		ñ			1 Pu	2 Pu	3 1	4 U-	5 金	0 金	7 金	8 金	9 成	10 ₽

図6.1.15 主工程設備の配置設計



# 7. 被覆粒子法

被覆粒子法は、He ガス冷却高速増殖炉用の燃料製造方法であり、湿式再 処理製品の Pu 富化度調整済溶液を出発物質に、炭素粉末を添加した状態で 湿式ゲル化法により燃料核粒子を形成し、洗浄、乾燥、焙焼、還元工程を経 て出来た酸化物燃料を、炭素熱還元法により窒化物燃料に転換し、更に再還 元、焼結工程の後、燃料核周囲に保護のための被覆層を生成させて被覆粒子 を製造するものである。従って、5.1.1 節のゲル化・スフェアパック燃料製 造基準システムのうちの粒子製造工程をベースに、炭素熱還元および被覆工 程を追加することにより、システムの設計検討を行った。

なお、システムの特徴として窒化に必要な窒素ガスは、炉内での(n,p)反応 により長寿命核種 <sup>14</sup>Cが生成することを防ぐために、天然窒素(<sup>14</sup>N)では なく、<sup>15</sup>Nを濃縮したものを使用するものとする。

### 7.1 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

# 7.1.1 施設概念構築

本節では、FBR導入初期における燃料の増殖比増大を目指す資源重視型 炉心、および平衡期における同一出力をより少ない燃料で達成しようとする 経済性重視型炉心に燃料を供給する窒化物被覆粒子燃料製造システム(以下 資源重視型システムおよび経済性重視型システムと呼称する)について検討 を行う。

両システムとも、燃料製造量は 200tHM/y とする。

# (1) 設計の基本方針と前提条件

窒化物燃料製造に関する検討での前提となる、燃料製造システム設計デー タを表 7.1.1 に示す。

両炉心とも原子炉熱出力は 2400MWt、燃料交換バッチ数は8、ただし、 運転サイクル長は資源重視型炉心で 20.0 ヶ月、経済性重視型炉心で 19.4 ヶ月 であり、1 回の燃料交換当りの装荷量はウラン量で各々約 26000kg および 21000kg、プルトニウム量では共に約 3300kg となっている。

従って、原子炉 1 基・1 年当りに必要な燃料製造量は約 16 トン (=(26000+3300kg)/(20.0月/12月))および約 13 トン(=(21000+3300kg) /(19.4月/12月))となる。ただし、検討のベースとしたゲル化・スフェアパ ック燃料製造基準システムの粒子製造工程(以下、基準システムと呼称する) が 200 tHM/y であるため、両システムの能力を共に 200tHM/y と設定した。 なお、製造する燃料の内訳は 1 回の燃料交換当りの装荷量割合により案分し た。

その他年間操業日数、製造歩留まりについては、基準システムと同一の数 値を用い、1日当りの燃料製造量を算出した。 (2) 安全設計に係わる検討

安全設計についてはウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審 査指針および再処理施設安全審査指針を満足するものとし、臨界安全対策、 遮蔽対策、発熱対策、耐震対策、閉じ込め対策、火災・爆発対策について、 安全設計に係る基本的考え方を表 7.1.2 に示す。

以下に概要を示す。

() 臨界安全対策

上記安全審査指針(指針 10 および 11)により、機器の設計においては単 ーユニットに対してはもちろん、複数ユニット間に対しても臨界とならない 設計とする。また単一故障や単一誤動作によっても臨界とならないように設 計する。

酸化物燃料製造のためのゲル化プロセスと比較した、窒化物燃料製造主要 機器における臨界安全上の機器制限寸法を表 7.1.3 に示す。

炭素が添加されることにより減速効果により臨界制限は厳しくなる傾向 にあるが、有機溶媒成分がある乾燥ゲル球の場合にはある程度減速された状 態であり、炭素の添加による影響は小さい。還元工程以降では添加炭素の影 響が大きくなるが水反射体を考慮して臨界評価しており、水反射体の影響が 小さい内径の大きな体系で、より大きな炭素の添加効果(臨界制限)が現れ ている。また炭素熱還元工程以降では、炭素は減少あるいはなくなるが窒化 物となることにより重金属密度が大きく、単位体積あたりのウラン・プルト ニウム原子数が多いことから、臨界寸法制限は若干厳しくなる。

また指針 12 に従い、臨界警報装置を設けまた臨界上重要な施設において 事故が発生しても、これを未臨界にするための措置が講じられる設計とする。

() 遮蔽対策

遮蔽設計に当っては以下の基本方針に基づくものとする。 通常運転時、定期検査時において、放射線業務従事者の立入場所におけ る線量当量を合理的に達成出来る限り低くする設計とする。 施設からの平常時の直接線及びスカイシャイン線による一般公衆の受 ける線量当量が合理的に達成出来る限り低くなるよう遮蔽等を行う。 建物内の遮蔽設計に当っては、放射線業務従事者の関係各場所への立入 頻度、立入時間等を考慮した遮蔽設計区分を設け、区分の基準線量率は, 放射性物質を内蔵する機器の遮蔽及びこれらの機器を収納するセル又 は部屋の遮蔽を適切に組合せることによって低減する。

() 発熱対策

溶液系として扱うことができる滴下液混合槽、滴下・熟成槽、洗浄装置に

ついては崩壊熱による溶液温度の異常な増加を防止するために、冷却水を槽 外部に流通させる構造とする。

被覆粒子を一時保管する中間貯蔵庫については再酸化温度を越えないこ とを前提条件とし空気雰囲気中で100 以下に保持できる構造とする。

### () 耐震対策

耐震設計上の重要度分類については、上記の安全審査指針(指針 13)に て制定されており、本燃料製造施設においても同指針の考え方を参考に設定 するものとする。

同指針では大量の放射性物質又はプルトニウムの閉じ込め機能を維持す るための施設および放射性物質の外部に対する放散を抑制するための施設 等はAクラスに分類されており、本燃料製造施設においても一連の主要機器 およびセル壁等はこれに該当するものとして、全てAクラスとなることが想 定される。

() 閉じ込め対策

上記の安全審査指針の指針4に、以下の閉じ込め機能が要求されており本 燃料製造施設もこれに基づいた対策をとるものとする。

- 放射性物質を収納する系統及び機器は、放射性物質が漏洩し難い構造で あること。また使用する化学薬品等に対して適切な腐食対策が講じられ ていること。
- プルトニウムを含む溶液、粉末及び高レベル放射性液体廃棄物を内蔵す る系統及び機器は、原則としてセル等に収納されること。セル等は液体 状の放射性物質が漏洩した場合に、その漏洩を検知し、漏洩の拡大を防 止すると共に漏洩した放射性物質を安全に移送及び処理することが出 来る設計であること。

プルトニウムを含む溶液及び高レベル放射性液体廃棄物を内蔵する系 統及び機器、ウランを非密封で大量に取扱う系統及び機器、セル等並び にこれらを収納する構築物は、以下の事項を満足する換気系統を有する こと。

- ・換気系統は、放射性物質が漏洩し難く、かつ逆流し難い構造であるこ と。
- ・換気系統により、プルトニウムを含む溶液及び高レベル放射性液体廃 棄物を内蔵する系統及び機器、ウランを非密封で大量に取扱う系統及 び機器、セル等並びにこれらを収納する構築物は、原則として、常時 負圧に保たれていること。構築物、セル等、系統及び機器の順に低く すること。
- ・換気系統には、フィルタ、洗浄塔等の放射性物質を除去するための系

統及び機器が適切に設けられていること。

() 火災・爆発対策

上記安全審査指針の指針 15 には、以下の火災・爆発に対する考慮が要求 されている。

- 安全上重要な施設は、可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計 であること。
- 可燃性若しくは熱的に不安定な物質を使用するか又は生成する系統及 び機器は、火災・爆発の発生を防止するため、着火源の排除、異常な温 度上昇の防止対策、可燃性物質の漏洩防止対策、混入防止対策等適切な 対策が講じられる設計であると共に、適切な熱及び化学的制限値が設け られていること。
- 火災の拡大を防止するために、適切な探知、警報系統及び消化設備が設 けられていると共に、火災による影響の軽減のために適切な対策が講じ されている設計であること。

火災・爆発の発生を想定しても、閉じ込めの機能が適切に維持できる設 計であること。

- 具体的には以下の対策をとるものとする。
  - ゲル化プロセスではアルコール類を系内で燃焼させるが、系内燃焼以外 の火災・爆発の発生を防止するため系統及び機器の付近には、着火源と なるものの無い様な設計とする。また静電気の発生の恐れがある系統及 び機器には接地を施す。モータ、リレー等の電気接点を有する機器は、 その使用環境を考慮し、必要に応じて防爆構造のものを採用する。

還元工程を始め原料ガスとして水素を使用する場合には、キャリアガス にアルゴンガス等を用いて爆発限界以下とする、酸素との混触を避ける 等の設計とする。

炭素熱還元工程以降では窒化物形態の燃料となり、酸素・水と反応し発 火する恐れがあることから被覆粒子生成工程までをアルゴン雰囲気の セル内に設置する。

(3) 主工程設備の設計

() プロセス設計

プロセスフローを図 7.1.1 に示す。本図にはプロセス成立性に係わる要素 技術開発課題を併記している。以下に主要プロセスの概略を述べる。

(a) 基本系統構成

燃料核については、粘度調整した原料溶液を適当な溶液中に滴下して形成 する湿式ゲル化法により製造するが、燃料核直径を 1.5mm(炉心燃料)、 1.7mm(ブランケット燃料)とする必要があり、国内外で実績のある内部ゲル 化法、外部ゲル化法共現状ではこの様な大粒径粒子の製造経験はほとんどな いことから昨年、燃料核製造技術に関する検討を実施しシステム設計および 要素技術開発に関する課題内容について取りまとめ、解決見通しと裏付けと なるデータ取得時期を明らかにした<sup>1)</sup>。

また、上流側工程の大部分は湿式ゲル化プロセス燃料製造システムと共通 する技術であり、そちらで得られた知見は最大限活用とする。

これらを踏まえ、本検討における基本プロセスでは、真球度の不良率が高 くなる可能性はあるが、高温ガス炉で豊富な製造実績を有し、原料溶液の温 度管理が内部ゲル化法よりも容易な、外部ゲル化法を採用とする。その他、 従来の酸化物燃料による湿式ゲル化プロセスをベースに窒化物被覆粒子燃 料製造に必要なプロセスを追加、見直した。

基本的な相違点は以下の通りである。

- ・混合器に原料炭素を混合するラインを追加。
- ・還元工程の後、酸化物燃料を窒化するための炭素熱還元炉及び関連して 必要となる窒素リサイクル設備を追加。
- ・被覆設備及び燃料集合体組立設備を追加。

炭素熱還元工程より被覆粒子生成工程までは、窒化物の粒子を取扱うため、 火災・爆発防止の観点からAr雰囲気とする。

また、天然窒素中の存在比が 0.36%の <sup>15</sup>Nを 99.9%濃縮したものを使用する、と想定した。

(b) 物質収支

製造する燃料は、内側および外側炉心燃料の各々につき中央部および上下 部用として4種類、径方向及び軸方向ブランケット燃料用として2種類の計 6種類ある。ただし、物質収支は、フェーズのシステム設計結果をそのま ま引用した。

(イ) 滴下液混合設備

滴下原液を混合する際は、濃度の高いポリビニルアルコール(PVA)水 溶液にテトラヒドロフルフリルアルコール(THFA)を混合すると溶液が分 離してしまうため、U/Pu 混合溶液に PVA 水溶液を混合し、その後 THFA を加える手順とする。

・調整液の硝酸(HNO3)濃度 : 0.7 モル/リットル(再処理システムより

受入)

- ・PVA 添加量 : 1.5wt%
- ・TFHA 添加量 : 40vol%

また窒化物燃料で必要となる炭素はこの工程で添加する。炭素の量は炭 素熱還元設備での下記に示す反応式より決定される。

- $\cdot$  UO<sub>2</sub>+3C+0.5N<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub> UN+2CO +CH<sub>4</sub>
- $\cdot$  PuO<sub>2</sub>+3C+0.5N<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub> PuN+2CO +CH<sub>4</sub>

・炭素添加量

:必要量の2倍

(ロ) 滴下・熟成設備

滴下ノズルから滴下・熟成槽までの空間は、アンモニアガスを流通しア ンモニア雰囲気とする。滴下中の原液はアンモニアガスと反応し、液滴の 周囲に薄い重ウラン酸アンモニウム(ADU)の殻を形成する。その殻の存 在により、液滴がアンモニア水に落下した際の衝撃でゲル球が変形するこ とを防止する。アンモニア雰囲気ガスと滴下原液との反応量は非常に少な いと考えられている。

滴下・熟成槽中のアンモニア水は、滴下原液を滴下した分だけオーバフ ローによって排液し、滴下ノズルとアンモニア水の液面との距離を一定に 保つ様にする。

・滴下空間中のアンモニア雰囲気ガスの流量:反応必要量の 1/5

・滴下・熟成槽中のアンモニア水の液量 :反応必要量の 10 倍

(必要反応量の5倍+オーバフロー5倍)

滴下熟成工程での反応は以下の通りである。

 $\cdot UO_2(NO_3)_2 + 3NH_4OH = 0.5(NH_4)_2U_2O_7 + 2NH_4NO_3 + 1.5H_2O_3$ 

- $\cdot$  Pu(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>+4NH<sub>4</sub>OH Pu(OH)<sub>4</sub> +4NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>
- (八) 洗浄設備
  - ・洗浄水量 : 滴下原液溶液の5倍
  - ・洗浄時間 : 約6時間 (イソプロピルアルコール(IPA) および水洗浄 含む)
  - ・IPA の容積:滴下原液溶液の 2.5 倍
  - ・乾燥設備に払い出される IPA の量:湿潤ゲル球を含むゲル粒子のか さ体積の 1.5 倍
- (二) 乾燥設備
  - ・乾燥圧力 : 0.04MPa(300mmHg)
  - ・乾燥温度 :60
  - ・乾燥時間
     :約2時間
- (木) 培焼設備

本設備では、乾燥設備より受入れた乾燥ゲル球を、内壁にらせん状の羽根がついたロータリーキルン型培焼炉に所定量を連続的に供給し空気中で培焼し、下記反応により ADU を UO<sub>3</sub> に、Pu(OH)<sub>4</sub> を PuO<sub>2</sub> にする。

- ・(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 2UO<sub>3</sub>+2NH<sub>3</sub> +H<sub>2</sub>O (熱分解)
- ・Pu(OH)<sub>4</sub> PuO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O (熱分解)
- ・供給する空気量 :反応必要量(PVA および THFA の酸化反応分も 含む)の 2 倍
- ・培焼温度 :400
- ・ 培焼温度での保持時間 :2 時間 (炉内での滞留時間は3時間)

・昇温速度

:約13 / min

(へ) 還元設備

本設備では、培焼設備より受入れた培焼球(UO<sub>3</sub>/PuO<sub>2</sub>)を、ロータリ ーキルン型培焼炉に所定量を連続的に供給し 5%H<sub>2</sub>-Ar ガス中で還元し、 下記反応により三酸化ウラン(UO<sub>3</sub>)を二酸化ウラン(UO<sub>2</sub>)に還元する。

- $\cdot$  UO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub> UO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O
- ・供給する 5%H<sub>2</sub>-Ar量 :反応必要量の 2 倍
   ・還元温度 : 600
   二温度 の保持時間 : 2 時間 ( 炉内 不の滞留時間は)
- ・還元温度での保持時間 :2時間(炉内での滞留時間は3時間)
- ・昇温速度 :約 20 / min

(卜) 炭素熱還元設備

本設備では、還元設備より受入れた還元球(UO<sub>2</sub>/PuO<sub>2</sub>)を水素/窒素(<sup>15</sup>N) ガス雰囲気中約 1500 にて(UN、PuN)に還元し、炭素熱還元球製品を 得る。

- ・UO<sub>2</sub>+3C+0.5N<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub> UN+2CO +CH<sub>4</sub>
   ・PuO<sub>2</sub>+3C+0.5N<sub>2</sub>+2H<sub>2</sub> PuN+2CO +CH<sub>4</sub>
   ・供給されている炭素量 : 必要量の2倍(滴下液混合工程)
   ・供給する5%H<sub>2</sub> 95%・<sup>15</sup>N<sub>2</sub>量 : H<sub>2</sub>について必要量の5倍
   <sup>15</sup>N<sub>2</sub>については、H<sub>2</sub>を5%に希釈する量(H<sub>2</sub>のモル数の19倍)
   ・炭素熱還元温度での保持時間 : 約 15 時間(炉内での滞留時間は 24 時間)
   ・昇温速度 : 約 20 / min
- (チ) 再還元設備

本設備では、炭素熱還元設備より受入れた炭素熱還元球(UN/PuN)の、 過剰に添加した炭素を確実に除去し燃料核を完成させる。

- $\cdot C+2H_2 CH_4$
- ・供給する 5%H<sub>2</sub> 95%Ar 量:H<sub>2</sub>について必要量の 5 倍

Ar については、H<sub>2</sub> を 5%に希釈する量 (H<sub>2</sub>のモル数の 19 倍)

- ・再還元温度 :約 600
- ・再還元温度での保持時間 :約2時間(炉内での滞留時間は3時間)
   ・昇温速度 :約20 / min
- (U) 焼結設備

得られた窒化物燃料を理論密度近くまで焼き固める焼結プロセス用の 設備である。

供給する焼結ガスは還元設備と同じ 5%H<sub>2</sub>-Ar とし供給量も同量とする。

本プロセスは化学変化を伴わないので、焼結排ガス量及び組成は供給ガ スと同じとする。

・供給する 5%H<sub>2</sub>-Ar 量 : 還元設備と同量

・焼結温度 :1700

・焼結温度での保持時間:5時間(予熱2時間、焼結5時間、冷却5時間の12時間処理)

(ヌ) 被覆設備

被覆層は燃料粒子を保護し、発生 FPを閉じ込めるために燃料核の周囲 に設けられ、材質は高温強度に優れ中性子吸収の小さい TiN (Nは<sup>15</sup>Nと する)が想定されている。

この被覆層は密度の異なる2層にて構成される。

TiN 被覆層の主な生成反応式は以下の3つが想定される。

 $2\text{TiCl}_4$  +  $(2+2/3)\text{NH}_3$  2TiN + 8HCl +  $1/3\text{N}_2$ 

 $TiCl_4 + 2H_2 + 0.5N_2 TiN + 4HCl$ 

 $TiCl_4 + 3CH_4 + 0.5N_2$   $TiN + 4HCl + 3C + 4H_2$ 

上記反応の内、 の反応では、ユーティリティとして窒素ガスを使用す るので、<sup>15</sup>Nの供給については燃料核生成に使用する窒素ガス(<sup>15</sup>N)系統と 共用可能であり、本システムとして採用とする。

上記 に示す反応では、HCIが未反応のアンモニア(NH<sub>3</sub>)と副反応し て塩化アンモニウム(NH<sub>4</sub>CI)が生成され、排気系の低温部に凝固すると考 えられることから検討対象より除外とした。

また の反応では、ユーティリティとして窒素ガスを使用することは と同様の利点であるが、もう一つの反応ガスであるメタン(CH4)の爆発下 限値が、 で使用する水素とほとんど変わらない状況では、付随して発生 する炭素(C)の除去対策が必要と想定される分、評価は に比べ低いと 判断した。

反応ガスとして水素及び窒素を使用するの反応では、セル内での水素 爆発を防止するため還元設備、炭素熱還元設備等と同様水素を希釈して供 給する。

 $\cdot \operatorname{TiCl}_4 + 2\operatorname{H}_2 + 0.5\operatorname{N}_2 \qquad \operatorname{TiN} + 4\operatorname{HCl}$ 

・供給する 5%H<sub>2</sub> 95%N<sub>2</sub>量:H<sub>2</sub>について必要量の 2 倍

N<sub>2</sub>については、H<sub>2</sub>を 5%に希釈する量 (H<sub>2</sub>のモル数の 19 倍)

・被覆温度 :約 1100 (汎用化学反応計算コード

(Fact Sage)による最大反応効率温度点)

・処理時間

:約 12 時間(炉内での滞留時間は 8 時間)

以上による物質収支計算結果を表 7.1.4 および表 7.1.5 に示す。後者は被 覆粒子生成に関わる物質収支計算結果である。 またユーティリティの供給及び排出量を表 7.1.6 にまとめる。

() 機器設計

製造燃料種類は炉心燃料(内側および外側の各々につき中央部および上下部)4種及びブランケット燃料(径方向及び軸方向)2種の合計6種類であり、炉心燃料ではウランとプルトニウムの混合物、ブランケット燃料ではウランのみを使用するので臨界対策上からも炉心燃料とブランケット燃料とで製造ラインを分けるものとする。

またブランケット燃料については径方向と軸方向ブランケットでは粒子 仕様が同じことから径方向と軸方向の区別を行わず、機器処理容量を平準化 して機器数増加を抑制する。

なお炉心燃料およびブランケット燃料の各製造ラインの処理工程は同一 である。

各製造ラインの、各工程における系統数及び1系統の機器数設定結果を根拠と共に表 7.1.7 に示す。

概要は以下の通りである。

1)炭素熱還元工程より上流工程の機器については、基準システムの製造プロ セス(ゲル化プロセス)で使用される機器と基本的に同等であり、機器構造・ 容量についてはこれをベースに設定する。

2)再処理システムからの Pu 富化度調整済溶液は、本システムに含まれる富 化度調整液受入槽で取合い、取合容量は他燃料製造システムと同じく、各ラ インに7日分容量のものを2基設置とする。

3)焼結炉までの製造ラインは、資源重視型システムで合計6ライン構成(内 側炉心の中央部、同上下部、外側炉心の中央部、同上下部、およびブランケ ット2ライン)、経済性重視型システムで合計5ライン構成(資源重視型シ ステムと比較して径方向ブランケット燃料の製造量が少ないため、ブランケ ットを1ラインとした)とし、被覆生成装置および被覆粒子中間貯蔵庫につ いては燃料核の種類に応じた5ライン構成(内側炉心の中央部、同上下部、 外側炉心の中央部、同上下部、およびブランケット1ライン)、更に燃料集 合体組立装置および燃料集合体貯蔵庫については1ラインに集約する。

4)内側炉心燃料、外側炉心燃料、ブランケット燃料毎に、1日当りの必要生 産量および1バッチ当りの処理時間から、バッチ当りの処理量を求め、臨界 条件および運転条件から機器サイズ(容量)・基数を定めた。炉心燃料につ いては、中央部および上下部の製造量から基数を按分した。ただし、運転条 件から来る機器構成比(滴下・熟成槽1基に対し、滴下液供給槽4基を割り 当てる等)は変更しないものとした。

5)各機器の運転方式は表 7.1.7 に示す通りであり、1 工程に要する処理時間 は原則 3 時間/1 バッチ、但し洗浄装置で 6 時間/1 バッチ(水洗浄及びイソ プロピルアルコール洗浄含む)、炭素熱還元炉で 24 時間/1 バッチ、焼結炉で 12時間(連続式)とする<sup>2)</sup>。

6) 炉心燃料製造ラインの機器については臨界防止機能が要求される。窒化物 粒子燃料製造設備では基準システム(ゲル化プロセス)設備と比べ、炭素熱 還元工程より上流工程では別途炭素が添加されていること、また炭素熱還元 工程以降ではウラン・プルトニウム酸化物に対してウラン・プルトニウム窒 化物の方が比重が大きく、単位体積あたりのウラン・プルトニウム原子数が 多いことから、臨界上の制限寸法が表 7.1.3 に示す通り若干厳しくなり、こ れによる機器容量の上限を考慮している。

7) ブランケット燃料にはプルトニウムを含まず、臨界上の制限は特に無い。 従って Cd 吸収材が不要となりまた、機器の寸法制限は無くなるが、機器寸 法については反応効率、工学的な取扱い及び水冷ジャケットによる除熱効率 等を考慮して、原則として外径、高さ等は基本的に炉心燃料製造ラインの機 器寸法を踏襲としたが、一部機器については以下の様に機器容量を増加させ て設置台数を抑えた。

- ・滴下混合槽、滴下・熟成槽については臨界制限による円環構造とする必 要が無いので単純な円筒構造とする。
- ・滴下液供給槽については高さを延長する。
- ・乾燥装置については胴径を増加する。
- ・炭素熱還元炉についてはトレー上の燃料核の供給深さを厚くする。

8)製品の一時貯蔵容量としては、他の燃料製造システムと同じ設計思想とし、 被覆粒子について中間貯蔵庫を14日分、燃料集合体について1年(200日) 分とする。

9)集合体組立工程、被覆粒子中間貯蔵庫および燃料集合体貯蔵庫の除熱は空 気中の自然法令によるものとし、被覆粒子中間貯蔵庫については再酸化温度 を越えない 100 以下とするため、容器は基準システムでの検討結果を踏襲 して 50 の長尺型とする。

() 機器配置設計

配置設計条件は以下の通りである。

- ・被覆粒子製造設備のセルが大きくなることから、再処理施設と燃料製造 施設はそれぞれ独立建屋とする。使用済燃料および新燃料の貯蔵は、上 記施設内で行うものとし、燃料貯蔵専用の建屋を設けない。
- ・異なる富化度の混入を防止するため、資源重視型システムについては内 側外側炉心燃料の各々につき中央部および上下部の製造ラインの系列 を独立して各1ライン、ブランケット燃料については径方向及び軸方向 用を共用化して2ライン、合計6ラインを各々気密セル内に設ける。経 済性重視型システムについては、ブランケット燃料の製造ラインを1ラ インとして、合計5ラインを設ける。

- ・基本的には、出来る限り重力落下による移送によるものとするが、重力 落下のみでは階高が大きくなるので、必要により上階に移送する配置と する。
- ・各製造ラインでは、運転、保守時のマスタスレーブマニプレータ(MSM)、 パワーマニプレータ(PM)への接近性確保のため、滴下液混合工程から 焼結工程までの各機器を壁沿いに直線的に配置する。
- ・被覆工程の機器数は、数量が多いため、MSM で補修を行うためには極めて長尺のセルが必要になる。よって、機器単位でメンテナンスエリアに移行して保守・補修を行うこととし、長方形のセル内に複数列の機器を配置する。

上記方針に基づく、資源重視型システムの配置図を図 7.1.2 に示す。なお、 経済性重視型システムは、ブランケットラインが1 ライン削減されたものと なる。

主建屋は、地上 3 階・地下 1 階の4階立て(資源重視型システム:約 113m×99m×高さ 43m、経済性重視型システム:約 96m×99m×高さ 43m、 ともに外寸ベース)の被覆粒子製造エリアと、地上1階・地下1階の2階立 て(資源重視型および経済性重視型システムともに約 79m×35m×高さ 22m (一部高さ 32m)、外寸ベース)の集合体製造・貯蔵・払出しエリアからな る。なお、炭素熱還元工程から被覆粒子生成工程までの機器はアルゴン雰囲 気セルに設置される。

なお、経済性評価における建屋容積は配置図に表されていない、製造設備 に係わらず必要な一般的なスペース等も考慮して資源重視型システム:約 610,000 m<sup>3</sup>、経済性重視型システム:約 550,000 m<sup>3</sup>(ともに外寸ベース) として取扱った。

# 7.1.2 技術評価

(1) 設定システムの成立性評価

表 7.1.8 に主な技術開発項目と工程成立性の見通しを示す。

窒化物被覆粒子燃料製造システムの工程の成立性は基本的、部分的には確認されているが、基本とする酸化物燃料湿式ゲル化法システムと比べ、真球度の高い大口径粒子の製造技術、窒化物燃料への転換技術、TiN 被覆粒子生成技術等越えるべきハードルは高く、製造工程も多い。

また燃料製造システムとは別であるが、安価な<sup>15</sup>Nガスを大量に供給する ことが出来る同位体分離・濃縮技術の確立も重要である。

また設置機器数に影響する、1 バッチ当りの所要時間即ち各機器で必要な 反応速度、最適な反応容器の容量に関する試験データ等も取得する必要があ る。 (2) 経済性評価

両燃料製造システムの経済性評価結果を表 7.1.9~表 7.1.11 に示す。

() 建設費

建設費試算結果については参考として、本システムの基本とする酸化物燃料湿式ゲル化法システム(スフェアパック)と併記した。

概要は以下の通りである。

- ・主工程設備の上流側(原料受入れおよびゲル化顆粒製造の前半(炭素熱 還元設備を含まない上流工程))については、設備内容はほぼ同等であ るがライン数が窒化物被覆粒子燃料製造システムの方が少なくその分、 建設費は少ない。
- ・主工程設備の下流側については窒化物被覆粒子燃料製造システムでは窒 化還元工程から被覆粒子生成工程が必要であり、設備が追加、建設費増 加となる。
- ・一方、ピン加工・検査工程は不要であり、また集合体組立・検査工程は ほぼ同等(以下)と考えられる。
- ・周辺設備の内、保守・補修設備については、設備内容はほぼ同等と想定 されるが製造ライン数が窒化物被覆粒子燃料製造システムの方が少な い等のことから建設費は少なくなる。
- ・周辺設備の内、付帯設備・ユーティリティについては、窒化物被覆粒子 燃料製造システムではアルゴンガス及び<sup>15</sup>Nガスを取扱う設備が追加 となり建設費増加となる。但し各種ユーティリティタンク類は、屋外に 設置することで、建屋容積の削減化を図った。
- ・周辺設備の内、廃棄物処理・貯蔵設備については被覆生成装置からの廃 ガス(水素および<sup>15</sup>Nガス)を回収・再利用するための試薬回収設備等 が本システムで追加となり建設費増加となる。またこの工程では発生す る塩酸を分離することが必要である。
- ・建屋・電気・換気設備費については、窒化物被覆粒子燃料製造システム では2種類のブランケット燃料粒子仕様が同一であることから製造ラ インを共用化し、機器稼働率の平準化を図ることにより、設置器基数を 削減し、建屋容積の削減化を図ったことから本システムの建設費は湿式 ゲル化システムより大幅に減少している。

ただし建設費見積については、両システム間の設計において製造ライン構成の考え方、建屋配置の考え方等に相違がありまた機器単位での見積ベース も必ずしも共通化出来ていない状態での概算検討結果であり、以下に示す操 業費、燃料製造単価も含め今後更に詳査が必要である。 () 操業費

両燃料製造システムの操業費について、他の燃料製造システムと同じ計算 方式で算出した結果を表 7.1.9(2/3)に示す。

直接操業費の内、消耗品等諸費には供給ユーティリティの他、集合体部材である SiC コンポジットのコストを含むものとしている。

() 燃料製造単価

同様に両燃料製造システムの燃料製造単価の計算結果を表 7.1.9(3/3)に示 す。

なお部材費は燃料単価計算の前提条件に従い、5万円/kgHM としている。 操業費が湿式ゲル化システムと比較しても高価であることから、目標値(16 万円/kgHM)はクリアしていないが、資本費のベースとなる建設費が比較的 安いことから、資源重視型システムで約 22.2 万円/kgHM、経済性重視型シ ステムで約 21.5 万円/kgHM となった。

この他、kWh 当りの燃料製造単価については、炉心平均燃焼度が 58GWd/t および 76GWd/t であることから 0.35 円/kWh および 0.26 円/kWh 程度とな る。

(3) 廃棄物量評価

製造工程からの排出物発生量を表 7.1.6 に示すが、高価な <sup>15</sup>Nガスを含め 極力回収・再使用するものとして、外部への廃棄物を減らし環境負荷低減化 を図る設計とする。

その他、通常運転時の工程廃棄物として、燃料溶液に含まれる FP 元素の 内、アルカリ金属、アルカリ土金属元素等の沈殿を形成しない元素はゲル 化・熟成工程および洗浄工程で廃液中に移行したものがあるが、その発生量 は高レベル廃棄物のガラス固化体相当でともに約 0.3 本/年(0.05m<sup>3</sup>/年)と 少量である。

年間に発生する廃棄物量に関し、保守・補修に伴う発生廃棄物量および燃料製造時の検査に伴う発生廃棄物量の検討結果を各々表 7.1.12 および表 7.1.13 に示す。

また、廃止措置時に発生する固体廃棄物量を表 7.1.14 に示す。

# 7.2 技術開発項目

燃料製造に係わる開発課題を表 7.1.15 に示す。

7.1.2 項に示した通り、外部ゲル化法によるゲル化転換工程、被覆粒子生成工程、安価な<sup>15</sup>N製造工程等の確立に向けた技術開発が特に重要である。

この他工学的観点から必要な技術開発項目として、遠隔操作による燃料集 合体組立手順、膨大な数にのぼる燃料粒子の検査サンプリング評価手法およ
び検査方法の確立等が必要と考えられる。

参考文献

- 1)新開他、「FBR 用窒化物燃料製造に関する検討(1)」JNC TN9400 2002-039、 (2002)
- 2) 梅村他、「ゲル化プロセス機器構造の調査」JNC ZJ9420 2002-004、(2002)

項目		資源重視型システム 炉心(内側:外側)/ブランケット(径:軸方向)	経済性重視型システム 炉心(内側:外側)/ブランケット(径:軸方向)	備考
<b>被覆粒子</b> 燃料仕様				
·Pu富化度 炉心燃料中	1 央部	17.0:21.2 wt% / -:-	17.0:21.2 wt% / -:-	
炉心燃料上	下部	22.7 : 27.8 wt% / -: -	22.7 : 27.8 wt% / - : -	
,燃米斗材米斗		UN+PuN / UN	UN+PuN / UN	99.9%濃縮 <sup>15</sup> Nの化合物
·被覆粒子径		1.94 / 1.98 mm	1.94 / 1.98 mm	
燃米斗核		1.5 / 1.7 mm	1.5 / 1.7 mm	
被覆第1層		120 / 60 µm	120 / 60 µ m	40%密度TiN・/ビッファ層
被覆第2層		100 / 80 µ m	100 / 80 µ m	100%密度TiN·強度層
コンパートメント仕様				
・スタック長		2500 mm	2500 mm	
·被覆粒子充填率		60 / 60 %	60 / 60 %	
炉心仕様				
·集合体本数		303:240 / 186:- 体	303:240 / 42:- 体	
・燃料交換1/バッチ   [	重重	8940:7080 / 7540:6160 kgHM	8940:7075 / 1700:6160 kgHM	
当りの装荷量	割心	30:24 / 25:21 %	37:30 / 7:26 %	
・運転サイクル長さ		20.0 月	19.4 月	
・燃料交換バッチ数		8	8	
燃料製造システム仕様				
·年間製造量		200 tHM/y	200 tHM/y	
·年間操業日数		200日(24時間操業)	200日(24時間操業)	キャンペーン日数250日の80%稼動を想定
・燃料製造歩留まり		80 %	80%	
・1日当り燃料製造量 🛛 🗧	凯	1111 kgHM/d	1111 kgHM/d	=200tHM/y / 200d / 0.9
	n	190:143 / 282:230 kgHM/d	236:177 / 79:287 kgHM/d	
	Pu	39:38 / -:- kgHM/d	48:48 / -:- kgHM/d	
	N	82:61 / -:- kgHM/d	102:75 / -:- kgHM/d	
	Pu	24:23 / -:- kgHM/d	30:29 / -:- kgHM/d	
-1日当り集合体 [	合計	3.6 体/ d	3.3 体/ d	
製造量	種別	1.4:1.2 / 1.0:- 体	1.7:1.4 / 0.2: - 体	

表7.1.1 燃料製造システム設計データ

# 表7.1.2 安全設計に係る基本的考え方

機器名称	臨界安全対策	遮蔽対策	発熱対策	耐震対策	閉じ込め対策	火災·爆発対策
基本方針	・形状管理を原則とする ・形状管理できないもの については質量管理と する ・プランケット燃料製造ライン については臨界管理不 要であり、炉心燃料製 造ラインと混用されないよ う両者を分離する	・セル内設置機器の遮 蔽はセル壁にて担保する ・セル外設置機器につ いては配置、補助遮蔽 にて対応する	・溶液系として取扱う機器については冷却水を 槽外部に流通させる ・固体、粉体)を取扱う機器については空気雰囲気で自然空冷により 100 以下とする	・主要機器については 耐震Aクラスで設計する	・放射性物質を収納する 系統・機器は内包物質 が漏洩し難い構造とす を ・使用する化学薬品等 に対して適切な腐食対 策を講じる ・ブルにうなを含む物質及 び高い、N放射性物質を 収納する系統・機器は 原則としても内に設置 し液体状の放射性物質 が漏洩した場合には検 知し漏洩の拡大が防止 できる構造とする	・ゲル化プロセスではアルコー ル類を系内で燃焼させる が系統・機器近辺には 者火源の無い設計とす る ・原料ガスに水素を使用 する場合には不活性と する場合には不活性と 混合し爆発限界以下と する。 、炭素熱還元工程以降 被覆粒子生成工程まで の窒化物燃料形態では アルゴン雰囲気セル内に設 置とする
富化度調整液受入槽	<ul> <li>・形状制限/円環槽の厚み85mm以下(Cd付き)</li> </ul>	・セル内設置	·水冷構造	・耐震Aクラス	·水密構造	
滴下液混合槽	・形状制限/円環槽の厚 み85mm以下(Cd付き)	・セル内設置	·水冷構造	・耐震Aクラス	·水密構造	
滴下液供給槽	・形状制限/円筒容器内 径261mm以下(Cd付き)	・セル内設置	·水冷構造	・耐震Aクラス	·水密構造	
滴下·熟成槽	・形状制限/円環槽の厚 み85mm以下(Cd付き)	・セル内設置	·水冷構造	・耐震Aクラス	·水密構造	
洗浄装置	・形状制限/円筒容器内 径261mm以下(Cd付き)	・セル内設置	·水冷構造	・耐震Aクラス	·水密構造	
乾燥装置	·形状制限/円筒容器内 径157mm以下	・セル内設置	·容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	·気密構造	
乾燥ゲル球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径157mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	·気密構造	
培焼炉	·形状制限/円筒容器内 径129mm以下	・セル内設置	·容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	·気密構造	
培焼球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径229mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	·気密構造	
還元炉	·形状制限/円筒容器内 径229mm以下	・セル内設置	·容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	·気密構造	・還元用水素はアルゴンガスにて 5%に希釈
還元球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径229mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	·気密構造	
炭素熱還元炉	/トレーの厚み32mm以下	・セル内設置	・容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	・気密構造 (供給・排出時はアルゴンセル内 で開放)	・アルコンセル内に設置 ・窒化還元用水素は窒素にて 5%に希釈
窒化還元球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径109mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	·気密構造	・アルコンセル内に設置
再還元炉	·形状制限/円筒容器内 径118mm以下	・セル内設置	·容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	·気密構造	・アルコンセル内に設置
						・還元用水素はアルゴンガスにて 5%に希釈
再還元球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径118mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	·気密構造	・アルゴンセル内に設置
焼結炉	·形状制限/トレーの厚 み32mm以下	・セル内設置	・容器外からの自然空冷	・耐震Aクラス	・アルコンセル内で開放 (ウォーキングビーム式)	・アルゴンセル内に設置
焼結球貯槽	·形状制限/円筒容器内 径109mm以下	・セル内設置	·水冷構造	-(移送容器として使用)	• 気密構造	・アルコンセル内に設置 ・還元用水素はアルコンガスにて
分級装置		・セル内設置	·自然空冷	·耐震Aクラス	· 気密構造	
具 <u>球 医 判 正 装 直</u> 公 4 4 年 1 世 博		・セル内設直		・・・・・耐震Aクラス	<u>'                                    </u>	・パルコンセル内に設置
<u>刀                                    </u>		<u>・ビル内設直</u> ・セル内設置	1日公主液 ・水冷構造(保守時)	· init i i i i i i i i i i i i i i i i i	<u>- 丸置伸垣</u> - 気変構造	・アルゴンセル内に設直
被覆粒子直球度判定装置		・セル内設置	コパマ1再に(下小寸)	·耐震Aクラス	- 気密構造	・アルゴンヤル内に設置
被覆粒子貯槽			・容器外からの自然空冷		· 気密構造	
中間貯蔵庫(被覆粒子)	・貯蔵ピッチ400mm(暫定)		容器外からの自然空冷	·耐震Aクラス	· 気密構造	
燃料集合体組立装置			自然空冷		<ul> <li>セル内で開放</li> </ul>	
燃料集合体貯蔵庫	<ul> <li>・貯蔵ピッチ400mm(暫定)</li> </ul>		·自然空冷	・耐震Aクラス	·気密構造	

# 表 7.1.3 臨界安全上の機器制限寸法

			窒化物被覆	<b>慰粒子燃料に</b>	<b>ታ በ</b> /ዘጋ በታእ	備考
			おけ	る評価	における評価 <sup>2)</sup>	
機器	機器形状	評価対象	臨界寸法(mm)	ゲル化プ 叱スとの差	臨界寸法(mm)	
滴下液混合槽	円環型 ( Cd	富化度調整液	85		85	
	付)					
滴下・熟成槽	円環型 ( Cd	富化度調整液	85		85	
	付)					
洗浄装置	円筒型 (Cd	富化度調整液	261		261	
	付)					
乾燥装置	円筒型 (Cd	乾燥ゲル球	157	直径約 2mm の	163	
	付)			縮小		
乾燥ゲル球貯	円筒型 (Cd	乾燥ゲル球	157	直径約 2mm の	163	
槽	付)			縮小		
焙焼炉	円筒型	乾燥ゲル球	129	直径約 1mm の	131	
				縮小		
焙焼球貯槽	円筒型	還元球	229	直径約 50mm の	279	
		(UO²/PuO²)		縮小		
還元炉	円筒型	還元球	229	直径約 50mm の	279	
		(UO²/PuO²)		縮小		
還元球貯槽	円筒型	還元球	229	直径約 50mm の	279	
		(UO²/PuO²)		縮小		
炭素熱還元炉	平板型	焼結球	32	1mm 以下	無し	
窒化還元球貯	円筒型	焼結球	109	直径約 9mm の	無し	
槽				縮小		
再還元炉	円筒型	再還元球	118		無し	
再還元球貯槽	円筒型	再還元球	118		無し	
焼結炉	平板型		32	1mm 以下	35	
焼結球貯槽	円筒型		109	直径約 9mm の		
				縮小		
被覆生成装置	円筒型	再還元球	質量制限により管		無し	
			理(15.9kg以下)			

採用機器寸法は原則、臨界寸法マイナス 10mm とする。

表7:1.4 窒化物被覆粒子燃料物質收支計算結果(1日当り)



			奄)		集合体組立						
m <sup>3</sup> /d	m³/d	m³/d	H。濃]		Γ		₽/a	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d		
129 N	515 N	9.792 N	( <sup>15</sup> Nガス・5%	4 7 7 1	型十年段 十		839 k	258 N	9.727 N		
	- -			980 444	<b>侦復</b> ]		- IO	<u>+</u>	- - -		
	Nm <sup>3</sup> /d F	Nm <sup>3</sup> /d		<u> </u>		┹╌╢	Nm <sup>3</sup> /d F	Nm <sup>3</sup> /d F	12	J	
	193	3,669	(5%H2濃度	h在 &±	况不可		193	3,669			
	<sup>d</sup> H <sup>2</sup>	d Ar			r	L	цН,	Ar	]_		
	Nm <sup>3</sup> /	Nm <sup>3</sup> /	ເພ				Nm <sup>3</sup> /6	Nm <sup>3</sup> /6	Nm <sup>3</sup> /6	_	
	633	12,033	(5%H2濃度	調	もほん		0	12,033	317		
	H <sub>2</sub>	Ar			+		н <sup>2</sup>	Ar	CH4		
	√m³/d	√m³/d	濃度)				4m <sup>3</sup> /d	√m³/d	√m³/d	, b∕°m	
	1,056	20,055 1	( <sup>15</sup> Nガス・5%H	「二字のの	1/ <del>3</del> /2		844	20,003	106	211	
	$H_2 \ddot{J} \chi$	$N_2 J M_2$		影	<b>下</b>		$H_2 \ddot{\mathcal{M}} \mathcal{A}$	N₂ガス	CH₄	co	
	m³/d	m³/d	•			-₽	m³/d	m³/d	m³∕d		
	193 N	3,669 N	(5%H2濃度)		2		97 N	3,669 N	97 N		
	Nm <sup>3</sup> /d H <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> /d Ar		- 1 1	×	-	Nm <sup>3</sup> /d H <sub>2</sub>	Nm³/d Ar	Nm <sup>3</sup> /d H <sub>2</sub> Oh'A	Nm³/d	Nm <sup>3</sup> /d
	12,303	46,284	(空気)				4,739	6,152	46,284	193	4,854 1
	02	$N_2$				-	$CO_2$	02	$N_2$	NH <sub>3</sub> ħ`Ҳ	Н <sub>2</sub> О⊅`Х
				$\overline{*}$							

-362-

PVA: ポリビニルアルコール THFA: テトラヒドラフルフリルアルコール IPA: イソプロピルアルコール

JNC TN9400 2004-036

	K料製造量 200tHM/y	備考								化学大辞典・共立出版による						<u></u> 操			五論反応量ベース			水素を窒素に対して	2%在まれ、C.小米、A.H. 殺着用、T.I.C. 1、6.1位 <sup>*1</sup>	光彻具(11014/074后 沃加	H[/.w2/
	<u> </u>	至方向 】7、 ランケット(軸方向)	NN	165.8	8.50E - 04	9.90E - 04	2.57E - 09	1.49E-09	14.32	5.43	3.68E - 05	8.10E-06	1E+07 4.50E+06	122.0 36.5			$H_2$ $N_2$	36.45 2.0 30.0	23.0	838.6	515.4	SNとする	23.0 11.5 434.3	838.6 23.0 13027.8	515.4 257.7 9727.4
.算(1日当り)		フ゛ ランケット ( 彳	NN NN	5.7 554.9					14.22		2.51E-05		1.82E+06 1.5	20.3		いとする	HC	62.9	5.75	361.8	1	+ 75.5N <sub>2</sub> : NLt <sup>1</sup>	5.75	361.8	1
竇層生成反応計		外側炉心燃料	UN F	UN PuN 155.2 45.7	7.50E-04	9.70E-04	1.77E-09	2.06E-09	14.32	5.43	2.53E-05	1.12E-05	6.13E+06	68.5	361.8	+ 4HCI : NIX <sup>15</sup>	TiN	30.0	2.88	86.3	64.4	+ 4HCI + 2H <sub>2</sub> -	437.14	13114.1	9791.9
表7.1.5 被裂		心燃料	PuN	44.6	-04	-04	-00	-00	14.22	3	2.51E-05	:-05	1.77E+06	19.8		+ 0.5N <sub>2</sub> TiN	$H_2$ $N_2$	2.0	11.5	23.0	257.7	+ 76N <sub>2</sub> TiN -	23.0	46.0	515.4
		内側炉/	NN	214.7	7.50E	m 9.70E	1.77E-C	2.06E - 0	14.32	2.4	国 2.53E-05	国 1.12E	8.48E+06	d 94.7		$TiCI_4 + 2H_2$	TiCl₄	189.7	5.75	d 1091.1	128.8	TiCI4 + 4H2	5.75	d 1091.1	128.8
			燃料材質	燃料製造量(W) Kg/d	燃料核の半径(ri)m	被覆層までの半径(ro)	燃料核の体積(vi) m <sup>3</sup>	被覆層の体積(vo) m <sup>3</sup>	燃料核の比重(di)	被覆層(TiN)の比重(do)	燃料核の重量(wi) Kg/低	被覆層の重量(wo) Kg/低	被覆粒子個数(N) 個/d	被覆層TiN重量(Wo) Kg/	被覆層TiN消費量 Kg/d	被覆層生成反応式	分子量		反応モル数 ドモル	ユーティリティ量・廃棄物量 Kg/	<u>ユーティリティ量・廃棄物量 Nm<sup>3</sup>/c</u>	被覆層生成反応式	反応モル数 ドモル	1-ティリティ量・廃棄物量 Kg/	<u> ユーティリティ量・廃棄物量 Nm<sup>3</sup>/c</u>

\*1:理論上の反応では出発物質(TiCl₄) 1 モルに対し水素 2 モルを要するので、水素を出発物質の 4 倍添加することは、理論上反応に必要な水素の 2 倍を添加することに相当する。

### JNC TN9400 2004-036

(燃料製造量 200tHM/y)

ユーティリティ名称	供給量	mimi	推出 推 二 4	勿量
			廃棄分	回収·再使用分
炭素粉末	約 350	Kg/d		
ΡVA(ポリビニルアルコール)	約 250	Kg/d		
<b>ΤΗFA</b> ( <u></u>	約4,500	Kg/d		
$NH_3(\mathcal{P}\mathcal{Y}\mathfrak{E}\mathcal{P})$	約 3	b/d		約 2.7 トン/d
۲. ۲	約 59	hy/d		約 58 トン/d
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (硝酸アンモニウム)			約 1 hy/d	
IPA(47) 0L' N7 N - N )	約 20	b/d		約 20 トン/d
O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> (空気)	約60,000	Nm <sup>3</sup> /d	約54,000 Nm <sup>3</sup> /d	
c_0,			約 5,000 Nm <sup>3</sup> /d	
H <sub>2</sub> +Ārガス(5%H <sub>2</sub> 濃度)	約21,000	Nm <sup>3</sup> /d		約20,000 Nm <sup>3</sup> /d
<sup>15</sup> N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> ガス(5%H <sub>2</sub> 濃度)	約32,000	Nm <sup>3</sup> /d		約31,000Nm <sup>3</sup> /d
			約 250 Nm <sup>3</sup> /d	
$C H_4$			約 450 Nm <sup>3</sup> /d	
TiCl4	約150 N	lm <sup>3</sup> /d		
HC			約850 kg/d	

必要機器数の検討
$\widehat{\mathfrak{S}}$
5
2
₹7.1
₩Ŷ

Ē	きょう	資源重	1111日の日本の目的では、111日の日本の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の目前の	ステム	107E (1991 -	f	经济	§性重視 <sup>躁业1</sup>	<u> 型システ - 周期</u>	<u>م</u>	5					* 80 99+	4~十八 六 4名	+***	
ЦĦ		たい際は	- *	「上下」		ς -	東をし	жа <del>к</del> + В)	N 王 王	大部)	t.					(残宿)	<b>欲で沃止りつ</b> に	いったまり	
製造量(KgHM/d)		229		106	<i>(</i> -		284	_	_	132		窒化物被覆粒子め	獣製浩条件(注		वर्ष	製浩条件を満	足する機器仕#	*	
プルトニウム富化度(w%)		0.71		22.7			17.0		2	2.7			モンコントラント		s'			ŧ	
機器名称	系統数 1000000000000000000000000000000000000	統機数	機器 数 5計	酸 で 認 総 総 総	機数合義数計		が 数 数 数 数 数 数 数 数 数 数 数 数 数	戁 耧 む 計	系統数 11: min 0	続機数	器数計	運転方式	必要処理量 (バッチ又は 3時間あたり)	機器 機構 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1	器有効 容量 1基分)	饑몲껲式	機器サイズ	臨界条件	施
富化度調整液受入槽	2	-	7	2	-	~		1 2	2	-	2	バッチ、次バッチ 分の受入・切替	6300L×2 (7日分)	2 65	001 田邇. (Cdī	槽 吸収体付) (引	5000*h5000 貯蔵部幅85)	幅85以下 (Cd吸収体付)	
滴下液混合槽	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	<b>バッチ</b> (3h)	250L	125	oL 円週· Cdu	槽 吸収体付) (4	1000*h1000 許蔵部幅85)	幅85以下 (Cd吸収体付)	必要容量にあわせて大型化(性能には影響しない)
滴下液供給槽	3	4	12		2	9	4	i 12	з	ю	6	J℃ッチ(3h)	250L	12 25	T 円筒	容器 吸収体付)	260*h500	内径261以下 ( C d 吸収体付)	滴下・熟成槽数の4倍(ノズルが4箇所ノ基)
滴下·熟成槽	3	-	з	3	-	3	-	3	3	-	з	<b>パッチ</b> (3h)	250L	390	「 「 「 C d j	槽 吸収体付) ((	600*h600 拧蔵部幅85)	幅85以下 (Cd吸収体付)	性能上、サイズは変えないが、約10%の能力向上を期待
洗浄装置	3	2	9	3	-	6	2	9	3	2	9	<b>パッチ</b> (6h)	洗净水 : 2450 IPA:1250L	6 10	or 円筒: (Cdu	容器 吸収体付)	260*L2400	内径261以下 ( C d 吸収体付)	運用上、滴下・熟成槽の基数の2倍必要
乾燥装置	е	2	9	e	-	e, e,	5	9	e	2	9	J∛ッチ(3h)	460kg	6 50	L 横置 (Cd视	き円筒型 及収体付)	145*L3200	内径147以下 (Cd吸収体付)	運用上は滴下・熟成槽の基数と同数でかまわないが、 臨界上容量が確保できないため機器数を増やした
亁燥ゲル球貯槽	е	-	e	e	-	6	-		e	-	З	培焼炉1基分 のバッチ移送	160kg	331. (75	L 田筒 5kg) (Cdi	容器 吸収体付)	145*h2000	内径147以下 ( C d 吸収体付)	培焼炉と同基数、同じ処理容量とした
培焼炉	е	-	Э	е	-	6	5	3	3	-	е	連続(3h)	160kg	3 26. (6!	L 横置 5kg)	き円筒型	115*h4500	内径119以下	(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
培焼球貯槽	2	-	2	-	-	1	-	- 2	2	-	2	還元炉1基分の バッファ・切替運転	50kg	232	L 田圃 90ka)	容器	200*h1300	内径219以下	
還元炉	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	連続(3h)	50kg	1 26. (9(	L 横置 Oka)	き円筒型	215*h4500	内径219以下	(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
還元球貯槽	2	2	4	2	-	2	5	4	2	2	4	炭素熱還元炉1基 分のバッチ移送	360kg (24h 分)	4 32. (18	L 田筒 80ka)	容器	200*h1300	内径219以下	
炭素熱還元炉	2	-	2	2	-	2	-	- 2	2	-	2	<b>)</b> ペッチ (24h)	360kg (24h分)	2 32. (18	L 71-	-型 21	レー )*2000*800	№-厚22以下	トレー厚の縮小にあわせて、長さと幅で補正
窒化還元球貯槽	2	4	8	2	5	4	4	t 8	2	ю	9	炭素熱還元炉1基分 のバッファ・切替運転	300kg (24h 分)	8 14. (1(	.L. 田圃 00kg)	容器	95*h2000	内径99以下	径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
再還元炉	-	+	-	-	-	1		-	-	-	-	連続(3h)	38k g	1 7	L 横置 Okg)	き円筒型	105*h2000	内径108以下	径縮小で容量削減 元々持っている余裕で吸収
再還元球貯槽	-	2	2	-	-	1	2	2	-	2	2	再還元炉1基分の バッファ・切替運転	38kg	2 14. (1(	L 田圃 00ka)	容器	95 *h2000	内径108以下	
焼結炉	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	連続(12h)	150kg (12h分)	1 39. ( 28	L 71-	-型 -	レー厚さ20	№-厚22以下	トレー厚が薄くなるが、 元々持っている余裕で吸収
焼結球貯槽	-	4	4	-	2	2	4	1 4	-	4	4	焼結炉1基分の バッファ・切替運転	150kg (12h分)	414. (1(	.L 日简 00kg)	容器	95*h2000	内径99以下	径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
分級装置	1	+	-	-	+	1	-	1	+	۲	-		150kg (12h分)	1 10	0kg/h				
真球度判定装置	٢	25	25	1	2 1:	2	30	) 30	+	14	14		150kg (12h分)	25 0.5	5kg/h				
分級装置貯槽	-	4	4	-	2	3	4	l 4	-	е	З		150kg (12h分)	414. (1(	.L 田简. 00ka)	容器	95*h2000	内径99以下	焼結球貯槽と同一条件
<b>被覆生成</b> 装置	-	1	11	-	2	5	4	l 14	-	9	9	Jでッチ(8h) 3M'ッチ/日	300kg (24h 分)	11 10 /	kgHM/ 田御 ッチ	容器	200*h2000	質量制限 15.7kgHM以下	基準条件ベース
被覆粒子真球度判定装置	1	25	25	1.	2 1:	2	30	) 30	+	14	14		300kg (24h 分)	25 0.5	5kg/h				
被覆粒子貯槽	-	4	4	-	~	2	4	l 4	-	3	в	12時間分貯蔵	150kg (12h分)	414. (1(	.L. 田圃 00ka)	容器	95*h2000	内径99以下	
中間貯蔵庫(被覆粒子)	1	149	149	1 6	9 6	9	192	: 192	1	87	87	14日分貯蔵	4200kg (14日分)	160 3.5 (2:	9L 財蔵 7kg)	ラック ヒ	50*h2000 ごッチ400		
燃料集合体組立装置		集	<b>含体1.4体</b>	₹/⊟			, n	集合体1	.7体/日				2体/日	-					
燃料集合体貯蔵庫			300					4(	00			1年分貯蔵	400体 (1年分)	<u>ا</u> بل	貯蔵	ラック ヒ	<u> ^</u> ッチ400		
注:基準システムおよびつ	μ-Τ Υ	窒化物	功被覆粒	子燃料シ	いステム	、検討結	課を基	に、物量	質収支お。	よび臨り	界条件;	を反映させて定めた仕	樣。						

必要機器数の検討	
表7.1.7(2/3)	

項目	外側	資源	重視型 料	システンチョン	ム 戸心燃料	*	本側行	<u>海性重</u> 少然料	<u>視型</u> ぐ 文	ステム 、側炉心燃	茶					機器	数を決定する	ための検討	
	<u>н</u>	「男郎)		H	- 下部()		₩ E	部)		「上下部、				-					
製造量(KgHM/d)		181			84		22	5		104		窒化物被覆粒子	燃料製造条件(注	(:	1100	製造条件を這	≒足する機器(	士様	
プルトニウム富化度(w%)		21.2		2	27.8		21.	2		27.8					-				
機器名称	系税数 1	米の器統数	戀教合 器教計	系統数 	米 総 総 総 教 を 総 を 総 を の の	器 払 計 ※	数3 その第 1 6 8 3	統幾数 機数合 器数計	略 十	& その器 総数数	嶘敎 器斁誹	運転方式	必要処理量 (バッチ又は 3時間あたり)	<ul> <li></li></ul>	器有 率量 少) 表	幾器型式	機器サイズ	臨界条件	萹沸
富化度調整液受入槽	2	-	2	2	-	2	2	-	5	2 1	2	バッチ、次バッチ 分の受入・切替	4200L×2 (7日分)	2 450	oL 田壩 (Cd	瞏槽 吸収体付)(		) 幅85以下 (Cd吸収体付)	
滴下液混合槽	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	バッチ(3h)	175L	1 250	F E C q	景槽 吸収体付)((	ゆ1000*h1000 (貯蔵部幅85)	) 幅85以下 (Cd吸収体付)	必要容量にあわせて大型化(性能には影響しない)
滴下液供給槽	2	4	8	2	2	4	33	4 1	2	3 2	9	バッチ(3h)	175L	8 25L	。 第日) (日明)	5容器 吸収体付)	φ260*h500	内径261以下 (Cd吸収体付)	滴下・熟成槽数の4倍(ノズルが4箇所/基)
滴下 · 熟成槽	2	-	2	2	-	2	3	-	e	3 1	з	バッチ(3h)	175L	2 901	ECd Edd	[] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []	<i>ϕ</i> 600*h600 〔貯蔵部幅85〕	幅85以下 (Cd吸収体付)	性能上、サイズは変えないが、約10%の能力向上を期待
洗浄装置	2	2	4	2	-	2	e	2	9	3 1	ы	<i>\</i> ヾ゚ッチ(6h)	洗净水:1750 IPA:900	4 100	L 第日 (Cd	5容器 吸収体付)	φ260*L2400	内径261以下 (Cd吸収体付)	運用上、滴下・熟成槽の基数の2倍必要
乾燥装置	2	2	4	2	-	2	3	2	9	3 1	З	<b>バ</b> シチ(3h)	350kg	4 50L	· 横置 (Cdf	『き円筒型 吸収体付)	φ145*L3200	内径147以下 (Cd吸収体付)	運用上は滴下・熟成槽の基数と同数でかまわないが、  臨界上容量が確保できないため機器数を増やした
乾燥ゲル球貯槽	2	-	2	2	-	2	e	-	e	3 1	3	培焼炉1基分 のバッチ移送	120kg	2 31L (75	kg) (Cd	5容器 吸収体付)	ф145*h2000	内径147以下 (Cd吸収体付)	培焼炉と同基数、同じ処理容量とした
培焼炉	2	-	2	-	-	-	3	-	e	3 1	3	連続(3h)	120kg	2 26L (65	· 横置 kg)	「き円筒型	ф115*h4500	内径119以下	(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
培焼球貯槽	2	-	2	-	-	-	2	-	2	2 1	2	還元炉1基分の バッファ・切替運転	40kg	2 32L (19	· · · 田衡 Okg) 田衡	5 容器	ф 200*h1300	内径219以下	
還元炉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	連続(3h)	40kg	1 26L (90	· 横置 kg)	「き円筒型	ф215*h4500	内径219以下	(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
還元球貯槽	-	4	4	-	2	2	2	2	4	2 1	2	炭素熱還元炉1基 分のバッチ移送	280kg (24h分)	4 32L (18	· 田衡 Okg)	5容器	ф 200*h1300	内径219以下	
炭素熱還元炉	-	2	2	-	2	2	2	-	2	2 1	2	<b>バッチ</b> (24h)	280kg (24h分)	2 32L (18	- FL- Okg)	型 	トレー 20*2000*800	№-厚22以下	トレー厚の縮小にあわせて、長さと幅で補正
窒化還元球貯槽	-	8	8	-	4	4	2	4	8	2 2	4	炭素熱還元炉1基分 のバッファ・切替運転	▶ 240kg (24h分)	8 14L (10	. 田衡 Okg)	約24	ф 95*h2000	内径99以下	径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
再還元炉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	連続(3h)	30kg	1 10L (70	. 横置 kg)	『き円筒型	ф 105*h2000	内径108以下	径縮小で容量削減 一元々持っている余裕で吸収
再還元球貯槽	F	2	2	-	-	-	-	2	2	1	-	再還元炉1基分の バッファ・切替運転	30kg	2 14L (10	· 田衡 Okg)	約名器	ф 95*h2000	内径108以下	
<b>挽</b> 結炉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	連続(12h)	120kg (12h分)	1 39L (28	. FL-	型	トレー厚さ20	№-厚22以下	トレー厚が薄くなるが、元々持っている余裕で吸収
<b>掶</b> 結球貯槽	1	4	4	1	2	2	-	4	4	1 2	2	焼結炉1基分の バッファ・切替運転	120kg (12h分)	4 14L (10	. 円筒 Okg)	5 容器	ф 95*h2000	内径99以下	径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
分級装置	1	-	-	1	1	-	-	1	-	1	1		120kg (12h分)	1 100	kg∕h				
真球度判定装置	1	20	20	1	10	10	1	23 2	33	1 11	11		120kg (12h分)	20 0.5	≺g∕h				
分級装置貯槽	1	4	4	1	2	2	-	4	4	1 2	2		120kg (12h分)	4 14L (10	. 円筒 Okg)	5 容器	ф 95*h2000	内径99以下	燒結球貯槽と同一条件
被覆生成装置	1	6	6	1	4	4	1	11 1	-	1 5	5	ノ <b>ヾッ</b> チ(8h) 3 <i>バッ</i> チ/日	240kg (24h分)	9 10k バッ	gHM/ 円筒 /チ	有容器	ф 200*h2000	質量制限 15.7kgHM以下	基準条件ベース
被覆粒子真球度判定装置	1	20	20	1	10	10	1	23 2	33	1 11	11		240kg (24h分)	20 0.5	⟨g∕h				
被覆粒子貯槽	-	4	4	-	2	2	-	4	4	1 2	2	12時間分貯蔵	120kg (12h分)	4 14L (10	. 田筒 Okg)	容器	ф 95*h2000	内径99以下	
中間貯蔵庫(被覆粒子)	-	125	125	-	57	57		48 14	8	1 70	70	14日分貯蔵	3360kg (14日分)	130 3.91 (27	- 貯蔵 kg)	<b>ドラック</b> L	ゟ50*h2000 ピッチ400		
燃料集合体組立装置		兼	合体1.2	2(本/日				集合仅	<b>\$1.4体</b>	Ē			1体/日	-					
燃料集合体貯蔵庫			280	0					340			1年分貯蔵	200体 (1年分)	1 년	貯蔵	ほうック l	ピッチ400		

注:基準システムおよびフェーズ1窒化物被覆粒子燃料システム検討結果を基に、物質収支および臨界条件を反映させて定めた仕様。

項目	資源重視 システ <i>1</i> プランケット燃	型、環	経う	F性重視 <u>、ステム</u> <u>、ケット燃</u> 3	봐. 화				*	幾器数を決定する	ための検討	
製造量(KgHM/d)	282(径方向 230(軸方向	用)  用)	79(: 287()	径方向) 軸方向)	() () () () () () () () () () () () () (	路 个 站 法 清 法 - 5	∦判 <u>制</u> 浩条件(注		<u> </u>	を満にする機器件	挨	
プルトニウム富化度(w%)	0.0			0.0		王 10-12/12/12/12 1 %	****	、 、	☆ L 木 L	피뾰했	*	
機器名称	<ul><li>※統数</li><li>2</li><li>(1)</li><li>※統数</li><li>(2)</li><li>(3)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><li>(4)</li><l< td=""><td>嶘 쁆 教 計</td><td>系統数</td><td>作の器 統機数</td><td>糭 萒 都 計</td><td>運転方式</td><td>必要処理量 (バッチ又は 3時間あたり)</td><td>機器 機器 物理 合構 二 加 名 加 合 構 の</td><td><u>沙</u> 機器型式</td><td>機器サイズ</td><td>臨界条件</td><td>備考</td></l<></ul>	嶘 쁆 教 計	系統数	作の器 統機数	糭 萒 都 計	運転方式	必要処理量 (バッチ又は 3時間あたり)	機器 機器 物理 合構 二 加 名 加 合 構 の	<u>沙</u> 機器型式	機器サイズ	臨界条件	備考
富化度調整液受入槽	2 1	2	2	-	2	バッチ、次バッチ 分の 受入・切替	20300L×2 (7日分)	2 21000L	円筒容器	φ 3000*h3200		
滴下液混合槽	2 1	2	-	-	-	バッチ(3h)	815L	2 420L	円筒容器	φ1100*h950		必要容量にあわせて大型化(性能には影響しない)
滴下液供給槽	2 10	20	-	12	12	バッチ(3h)	815L	24 40L	円筒容器	ф 260*h850	滴下・熟成槽数 の4倍(ノズルが	滴下・熟成槽数の4倍(ノズルが4箇所/基)
滴下·熟成槽	2 3	6	-	3	3	バッチ(3h)	815L	6 160L	円環槽	ф 600*h600		性能上、サイズは変えないが、約10%の能力向上を期待
洗浄装置	2 5	10	-	9	9	バッチ(6h)	洗净水:8250 IPA:4150	12 100L	円筒容器	φ260*L2400	運用上、滴下・ 熟成槽の基数	運用上、滴下・熟成槽の基数の2倍必要
乾燥装置	2 3	9	-	ю	3	<b>バッ</b> チ(3h)	1550kg	6 210L	横置き円筒型	φ 260*L4000	運用上、滴下・ 熟成槽と同数必	運用上は滴下・熟成槽の基数と同数でかまわないが、 臨界上容量が確保できないため機器数を増やした
乾燥ゲル球貯槽	2 4	8	-	4	4	培焼炉1基分 のバッチ移送	510kg	8 31L (75kg)	円筒容器	φ130*h2500	培焼炉と同基 数、同じ処理容	培焼炉と同基数、同じ処理容量とした
培焼炉	2 4	8	-	4	4	連続(3h)	510kg	8 26L (65kg)	横置き円筒型	<u>φ</u> 115*h4500		(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
培焼球貯槽	2 2	4	-	2	2	還元炉1基分の バッファ・切替運転	130kg	4 40L (130kg)	日筒容器	ф 200*h1300		
還元炉	2 1	2	-	-	-	連続(3h)	130kg	2 26L (85kg)	横置き円筒型	¢ 215*h4500		(基準条件の容量とサイズが整合しない) 径の縮小にあわせて長さで補正
還元球貯槽	1 4	4	-	2	2	炭素熱還元炉1基 分のバッチ移送	990kg (24h分)	4 90L (495kg	日筒容器	ф 300*h1300		
炭素熱還元炉	1 4	4	-	2	2	<b>バッチ</b> (24h)	990kg (24h分)	4 45L (245kg	トレー型 型	トレー 30*2000*800	トレーサイズ拡大(面積は炉心	トレー厚の縮小にあわせて、長さと幅で補正
窒化還元球貯槽	1 4	4	-	2	2	炭素熱還元炉1基分 のバッファ・切替運転	850kg (24h分)	4 60L (430kg	日筒容器	ф 200*h2000		径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
再還元炉	1 2	2	-	-	-	連続(3h)	110kg	2 10L (70kg)	横置き円筒型	φ 105*h2000		径縮小で容量削減 元々持っている余裕で吸収
再還元球貯槽	1 4	4	-	2	2	再還元炉1基分の バッファ・切替運転	97kg	4 14L (100kg	田筒容器	φ 95*h2000		
<b>獟</b> 結炉	1 2	2	-	-	-	連続(12h)	430kg (12h分)	2 39L (270kg)	トレー型	トレー厚さ20		トレー厚が薄くなるが、元々持っている余裕で吸収
<b>獟</b> 結球貯槽	1 4	4	-	2	2	焼結炉1基分の バッファ・切替運転	430kg (12h分)	4 60L (430kg)	田筒容器	ф 200*h2000		径縮小で容量削減 配置高さの制約を考慮して基数増加
分級装置	1 1	1	-	1	1		430kg (12h分)	1 100kg/1				
真球度判定装置	1 60	60	-	40	40		430kg (12h分)	720.5kg/	<u> </u>			
分級装置貯槽	1 2	2	-	-	-		430kg (12h分)	2 60L (430kg)	田筒容器	ф 200*h2000		焼結球貯槽と同一条件
被覆生成装置	1 24	24	-	16	16	/ヾ゚ッチ(8h) 3バッチ/日	860kg (24h分)	28 10kgHN バッチ	/ 円筒容器	ф 200*h2000	基準条件ベース	基準条件ベース
被覆粒子真球度判定装置	1 60	60	-	40	40		860kg (24h分)	72 0.5kg/h 台	/			
被覆粒子貯槽	1 2	2	-	1	1	12時間分貯蔵	430kg (12h分)	2 60L (430kg	田筒容器	ф 200*h2000		
中間貯蔵庫(被覆粒子)	1 340	340	-	243	243	14日分貯蔵	12040kg (14日分)	450 3.9L (27kg)	貯蔵ラック	<i>は</i> 50*h2000 ピッチ400		
燃料集合体組立装置	集合体1.04	\$∠⊟	集合	体0.2体	Ē		1体/日	11体/日				
燃料集合体貯蔵庫	220			60		1年分貯蔵	200体 (1年分)	1式 200体 (1年分	 	ピッチ400		

注:基準システムおよびフェーズ I 窒化物被覆粒子燃料システム検討結果を基に、物質収支および臨界条件を反映させて定めた仕様。

備考				こは部									こは部
工程成立性	にぼ確立	にぼ確立	実証試験要	機器詳細設計のために 分的に試験データ要	実証試験要	(		▲ 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 」 「」 」 「」 」 」 「」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」		ᅖᅒᆙᆊᅸᆕ		実証試験要	機器詳細設計のために
内容	基本的に湿式ゲル化システムと同じ	基本的に湿式ゲル化システムと同じ。但し炭素添加による影響を考慮する必要  あり。	しの速度データや反応効率の基礎的なデータを試験により取得する必要がある。 上記以外、基本的に湿式グリパセシステムと同じ。	反応速度データや反応効率の基礎的なデータを試験により取得する必要があ る。	反応速度データや反応効率の基礎的なデータが無く、試験データを取得する必 要がある。	┃IIN被覆生成反応候補を調査し暫定設定したが反応速度データや反応効率の 基礎的なデータが無く、試験データを取得する必要がある。	内側低密度、外側高密度の2層構造を分離生成させる方法につき、試験データ を取得する必要がある。	TIN被覆反応度データに基づき流動床の安定的な流動条件と被覆層の生成条件を試験により明確にし、処理時間、処理量の大型化の対応可能性について 試験データを取得し、装置概念を具体化する必要がある。	先行するHTTR被覆装置ではメンテナンス上の制約となっており、メンテナンス   性の向上を図る必要がある。	被覆粒子のコンパートメントへの装填方法及びコンパートメントへの密封方法を  設定し、組立設備の具体化を図る必要がある。	集合体構成部品(燃料コンバートメント、上・下遮蔽体、上・下ブランケット、エントランスノ  ズル、ハンドリングヘット、コーナ支持ロッド)の組立方法及び組立設備の具体化	要求される製造コストで製造可能な方法の確立	オフガスの分離・再利用に必要な系統概念の具体化を図る必要がある。特に被
技術開発項目			外部ゲル化法による大口径粒子生成方法の把ま	基本的に湿式ゲル化システムと同じ	炭素熱還元反応挙動の把握	TiN 被覆反応挙動の把握	高・低密度層の分離生成方法の把握	被覆装置概念の具体化	ガスディストリビュータの検討	被覆粒子のコンパートメントへの装填方法	集合体全体の組立方法	経済的な製造方法の確立	オフガス系統の具体化
工程	)原料受け入れ工程	<u>)</u> 原液調製工程	8) グル化転換工程	·) 乾燥·焙焼·還元工程	<b>)) 炭素熱還元工程</b>	<b>)) 被覆粒子生成工程</b>	_		_	)集合体組立工程		)) 窒素15製造工程	() オフガス処理工程

表7.1.8 窒化物被覆粒子燃料製造に必要な技術開発項目

				(単位:億円)
	多様な燃料サ	イクルシステム	参考	
道目	資源重視型	<b></b>	基準システム	備考
	システム	システム	(酸化物湿式ゲル化)	
主工程設備費	379	388	508	
周辺設備費	428	412	458	
建屋 · 電気 · 換気設備費	906	817	708	
新燃料貯蔵設備費	129	129	129	
建設費合計	1842	1746	1803	

表7.1.9 建設費内訳

操業費内訳
表7.1.10

				(単位:億円)
		多様な燃料サ	イクルシステム	
	項目	資源重視型	経済性重視型	備考
		システム	システム	
	人件費	27	27	300人/年
	修繕費	c	c	機器交換費=機器コスト*2%
直接費	(機器交換費、定検材料費)	Q	Q	定検材料費=0
	消耗品等諸費	157	150	
	(補充U、ユーティリティ等を含む)	2	202	
<b>門:市</b> 二	業務分担費	29	28	直接費 *15%
别还具	事業税	3	3	(直接費+業務分担費)*1.5%
	操業費合計	224	216	

囲
漸
Ē
発
Ď
ч
<u><del>16</del></u>
龟
严
迥
製
業
爕
~
ς.
Σ.
表7

	備考				目標: 16万円 / kgHM以下		
ィクルシステム	経済性重視型 システム	4.9	11.6	5.0	21.5	0.261	26
多様な燃料サ	資源重視型 システム	5.2	12.0	5.0	22.2	0.353	58
	道目	資本費 (万円 / kgHM)	操業費 (万円 / kgHM)	部材費 (万円 / kgHM)	燃料製造単価 (万円 / kgHM)	発電単価 (円 / kWh)	炉心平均取出燃焼度 (GWd/t)

表7.1.12 保守・補修に伴う発生固体廃棄物量

単位:t/y)		備考			
)		小計	9.59	4.62	14.21
	型システム	クリアランス レベル以下 の廃棄物	0.34	0.04	0.38
	経済性重視	低レベJレ 廃棄物 (余裕深度 処分並)	3.90	0.96	4.86
		低レベル 廃棄物 (地層処分 並)	5.35	3.62	8.97
		小計	10.45	5.45	15.90
	型システム	クリアランス レベル以下 の廃棄物	0.34	0.04	0.38
	資源重視到	低レベル 廃棄物 (余裕深度 処分並)	5.15	1.86	7.01
		低レベル 廃棄物 (地層処分 並)	4.96	3.55	8.51
		廃棄物区分	金属	非金属 (保温材·耐火材、フィルタ等)	合計

体术话口	<u> </u>	科 ゴ 、 二 『 、 十	サンプル数(個ま	<u> またはサンプル</u>	1 * b / (	廃棄物量 g/d
快重項日	快旦刀沽(破场快旦寺)	サノノレノノ	内側炉心	外側炉心	<b>ブ ラン</b> ケット	* 2
滴下液 U・Pu 濃縮度	マススペクトル及び 線スペクトロ分析	1試料ノ製造パッチ	8	8	×	300
滴下液不純物(有機)	ガスクロマトグラフ分 析	1 試料 / 製造パッチ	8	×	∞	300
滴下液不純物(無機)	ICP-AES	1 試料 / 製造バッチ	8	∞	∞	300
燃料核密度	水銀浸漬	3 サンプルノ燃料核ロット	48.81	37.8	135.6	9.5
燃料核 O/U レシオ	酸化重量法	1サンプルノ燃料核ロット	16.27	12.6	45.2	3.2
被覆粒子被覆層厚さ	溶媒浸漬またはシンク	3サンプル / 被覆燃料粒子ロ	48.81	37.8	135.6	17.2
	フロート	ĕ۲				
被覆粒子密度第1層	浮遊沈殿法等	3 サンプル / 検査ロット	488.1	378	1356	171.8
		(10粒子/1サンプル以上)				
被覆粒子密度第 2 層	浮遊沈殿法等	3 サンプル / 検査ロット	488.1	378	1356	171.8
		(10粒子/1サンプル以上)				
被覆粒子光学的異方性因	ポラリゼーションフォ	1 サンプル(5 粒子 / サンプ	81.35	63	226	28.6
۴	トメータ	ル)/ 濃縮度				
被覆粒子断面	セラモグラフィ	1サンプル(20 粒子)/ 被覆	325.4	252	904	114.5
		燃料粒子ロット				
被覆粒子強度	ポイントクラッシング	30 粒子 / 濃縮度	488.1	378	1356	171.8
合計						1588.4
* 1 : 製造量内側炉心 244k <sub>8</sub>	gHM/d、外側炉心 189kgHI	M/d、ブランケット 678kgHM/d、	燃料核ロット及	び被覆粒子ロッ	F 15kgHM Z	して内側炉心
16.27 ロット/d、外側火	ゆ心 12.6 ロット / q.、ブラ	ンケット 45.2 ロット/d から算出,	,溶液系では1バ	ッチ 3 時間で 8	: バッチ / d から	5算出。
* 2、燃料核比重 14.3g/cm3.	、 被覆粒子比重 14g/cm3 よ	c U 炉心燃料核 0.0379g/個、ブラン	ンケット燃料核 0	.0460g/個、炉心	,被覆粒子 0.080	28g/個、ブラ
ンケット被覆粒子 0.07	7542g/個から算出。溶液系	では1サンプル10mL として比重	直1.25kg/L より1	2.5g/サンプルな	を想定して算出	

-371-

表 7.1.13 燃料製造時の検査に伴う発生廃棄物

<b>廃止措置時発生固体廃棄物量</b>
表7.1.14 月

(単位:t)		備考								
		ᆤ	1,750	6,485	2,500	46,100	510,000	26,835	510,000	566,835
	見型システム	ゥリアランス レベル以下 の廃棄物	160	4,950	0	46,100	510,000	51,210	510,000	561,210
	経済性重れ	( ( ( ( ( ( ) ( )	230	625	0	0	0	1,455	0	1,455
		低レベル 廃棄物 (地層処 分	1,060	610	2,500	0	0	4,170	0	4,170
		北京	1,925	7,230	2,750	51,500	570,000	63,405	570,000	633,405
	型システム	ゥリアランス レベル以下 の廃棄物	160	5,520	0	51,500	570,000	57,180	570,000	627,180
	資源重視	低レベル 廃棄物 (余裕深度 処分並)	760	1,030	0	0	0	1,790	0	1,790
		低レベル 廃棄物 (地層処 分	1,005	680	2,750	0	0	4,435	0	4,435
		廃棄物 性状	金属	金属	金属	金属	コンクリート			
		対象廃棄物	主工程設備(保守・補修設備含む)	周辺設備(保守·補修設備除<)	セルライニング	鉄筋	建屋躯体(上記を除く)	小計(金属)	小計(コンクリート)	合計
			<u>≑0,/#</u>	町と間		建電換				



技術開発項目 表7.1.15(1/3)

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、

目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

大目標	目標達成の要素	目標達成方策(課題)	課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
経済性	建設費低減	合理的な富化度調整プ □セスの開発	機器設計の最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		合理的な造粒プロセス の開発	直径1700 µ mのゲル球 製造技術の開発	大	要素技術
			多成分のゲル化法の確 立(除熱対策等)	大	システム設計
			炭素熱還元の最適条件 の把握	中	要素技術
		合理的な被覆プロセス の開発	球面への均一被覆	大	要素技術
			被覆速度の向上	大	要素技術
			被覆密度のコントロー ル技術の開発	大	要素技術
		機器配置の合理化	系列数・配置の最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルレンドリング技術
			保守・補修システムの 最適化	大	システム設計 物質移送・マテリアルレンドリング技術
		:	マテリアルハンドリン グの最適化	中	システム設計 物質移送・マテリアルレンドリング技術
	一操業費低減	遠隔操作・遠隔保守技 術	燃料製造自動化技術	大	システム設計 要素技術
		品質保証	検査手法の確立	大	要素技術
			検査基準の確立	中	システム設計
		:	燃料仕様最適化	大	システム設計
		機器の長寿命化		大	システム設計
	一稼働率向上	保守・補修時間の短縮	遠隔保守技術	大	システム設計 要素技術
		放射線劣化対策	遠隔保守技術	中	システム設計 要素技術
	廃止措置費の低減	プロセスのコンパクト 化	- 	小	システム設計
資源有効利用	U/TRUリサイクル	一回収率向上	製品収率の確認	小	要素技術
		- - - - - - - - - - - - - - - -	DSからの回収	小	システム設計 要素技術
	U/TRUの工程ロス低 減	U/TRUの工程ロスの定 量的評価	 ゲル化・洗浄廃液への ┃ 移行量の確認	小	要素技術
				小	システム設計 分析技術

表7.1.15(2/3) 技術開発項目

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

大目標	目標達成の要素		課題の細分化	効果	対応する技術(重複して出現)
環境負荷低減	· 王王子子,王子子子,王子子子,王子子子,王子子子,王子子子,王子子子,王子子		廃液処理・リサイクル	大	システム設計 要素技術
	l	二次廃棄物発生量低減	機器の長寿命化	中	システム設計 要素技術
		L	機器台数削減	中	システム設計
廃	経棄物への核種移 	_ ゲル化・洗浄廃液への 移行量把握		中	要素技術
	-	分析廃棄物への移行量 低減	_分析サンプルサイズ、サンプリ ング頻度の最適化	中	システム設計 分析技術
	ļ	固体廃棄物への核燃料 物質付着量低減	固体廃棄物への核燃料 物質付着量把握	中	システム設計
		L	_ 固体廃棄物の除染技術 開発	中	システム設計
上 解		_ プロセスのコンパクト 化		中	システム設計
核拡散抵抗性	障措置	核物質の滞留量(ホー ルドアップ)低減	_核物質の残留量の確認 手法	中	システム設計
			_ 固体廃棄物の除染技術 開発	中	システム設計
		計量管理技術の高度化		中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術/(要素技術(注))
村村	物質防護			中	システム設計
運転・保守補修セ 性	zル内安定操業	運転自動化技術の開発		大	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
	1	計測制御		小	システム設計 要素技術
		_ 工程間の核物質移送技 術高度化		中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		計量管理技術の高度化		中	システム設計/Pu物流管理手法 分析技術
	-	低除染TRU燃料取扱い 下での機器の安定性	高放射線対策	大	システム設計 要素技術
		Ĺ	高発熱対策	大	システム設計 要素技術
		遠隔保守補修技術の確  	機器のモジュール化	中	システム設計 物質移送・マテリアルハンドリング技術
		- -	機器の除染技術開発	中	除染技術

表7.1.15(3/3) 技術開発項目

大;技術成立性、目標達成に特に大きな効果があると考えられる課題 中;技術成立性、目標達成に効果があると考えられる課題 小;技術成立性確認のためには必要であるが、目標達成に対しての効果はそれほど大きくない課題

注:計算(成分分析值×秤量値)による評価とは異なる、直接計測による機器内Pu量の評価を保障措置上求められた場合は要素技術開発を伴う











図7.1.2(3)Heガス高速炉被覆粒子型燃料製造システム配置図(鳥瞰図) (資源重視型 )











8. MA/FP リサイクル

### 8.1 MA リサイクルに伴う燃料製造システムへの影響検討

MA をリサイクルするために原料が高発熱のものとなり、製品である燃料の品質の 低下および製造設備の劣化に対応した燃料製造システムとする必要がある。ここでは、 燃料製造における原料の発熱制限に関する検討を行なう。

(1) 発熱に対するシステム設計の基本的考え方

システム設計では発熱による影響を考慮して設備設計を進めることが重要である。 設計を行うに当たって重要と考えられる方針を以下に整理した。

() 製品の品質安定性の確保

発熱への設計対応設備(冷却設備など)の機能異常を想定しても燃料製造プロセス 毎に原料、中間製品および完成品の品質の安定性に大きな影響を与えない設計とする。

### () 量産システム適合性

発熱への設計対応(形状制限、放熱機能、冷却設備など)が燃料製造システムの量 産能力を極端に低下させない設計とする。

### () 安定操業の確保

設計対応設備(冷却設備など)の異常を想定しても、設備が長期間停止することに よって、操業の安定性を損なう恐れのない設計とする。

(2) システム設計における検討

発熱に対するシステム設計の基本的な考え方に基づいて、システム設計での検討内 容について示す。

() 「製品の品質安定性の確保」「量産システム適合性」に関する検討

(a) 粉末受入ホッパおよび成型ホッパ

4.1.1 節の MOX 燃料 基準システムの設計において、ホッパの MA による熱的影響 を検討し、ホッパは内包粉末の再酸化防止の観点から強制冷却が必要なことを示唆し た。具体的には、原料発熱量が MA5%含有時の 13.5W/kg-HM の場合、ホッパ内径を 22cm(臨界制約)、ホッパ内除熱のためにホッパ内壁に設ける伝熱フィン長を 7cm と し、強制冷却によってホッパ外表面温度を 0 とすることにより、ホッパ内の粉末温 度を再酸化防止制限温度(100 と想定)以下にできる可能性を示している。なお、 伝熱フィン長さを短くできれば、粉末流動の安定化など、より「量産システム適合性」 に優れたものになる。

(b) 焼結皿ペレット

4.1.1 節の MOX 燃料 基準システムの設計において、焼結皿上ペレットの MA によ る熱的影響を検討し、焼結皿はペレットの再酸化防止の観点から2段積み以下とする 必要があることを示唆した。2 段積みでの原料発熱量とペレット中心温度との関係を 図 8.1.1 に示すが、本図より、ペレット中心温度を再酸化防止温度(約100 と想定) 以下に制限するためには、発熱量が約10W/kgHM以下の原料とする必要がある。

(c) 燃料集合体

4.1.1 節の MOX 燃料 基準システムの設計において、燃料集合体の MA による熱的 影響を検討している。検討結果である原料発熱量と燃料集合体中心温度(ピット貯蔵) との関係を図 8.1.2 に示すが、本図より、発熱量を約 10W/kgHM にできた場合でも、 表面酸化防止の観点からの温度制限(約 300)以下とするためには、強制冷却用設 備が必要となることがわかる。

() 「安定操業の確保」に関する検討

製造システムの安定操業に比較的大きな影響が発生すると考えられる集合体組立で ラッパ管にピンバンドルを挿入する工程のトラブル(ピンバンドルのラッパ管への挿 入中のスティック)発生の可能性について検討を行った。

(a) 検討内容

燃料集合体表面温度をラッパ管温度、中心温度(燃料ピン表面温度)をピンバンド ル温度とし、両者の熱膨張差を計算して、ラッパ管とピンバンドルのギャップが無く なることにより発生する機械的干渉について調べることとした。

(b) 検討条件

検討に用いる MOX および金属燃料集合体仕様(基準システム)を表 8.1.1 に示す。 被覆管材料は酸化物分散型ステンレス鋼(ODS 鋼、マルテンサイト系)とし、ODS 鋼の熱膨張率は 400 の 12×10<sup>-6</sup> / としている。ピンバンドルおよびラッパ管の除 熱冷却は自然対流条件とし、解析体系は輪切り六角柱とする簡易解析の手法を用いた。 (c) 検討結果

バンドルとラッパ管の干渉の関係を図 8.1.3 に示す。バンドルとラッパ間の干渉が 起こる公差幅 0mm 時のバンドル/ラッパ管温度差は、MOX 燃料集合体で 242 、金 属燃料集合体では 313 となった。図 8.1.4 には原料の発熱量とバンドル/ラッパ管温 度差の関係を示した。部材の製作公差を考慮したバンドルとラッパ管の間隙(バンド ルの対面距離:ノミナル値、ラッパ管内対面距離:最小寸法(公差考慮))に対して、 ピンバンドルのラッパ管への挿入中のスティックを回避できる発熱量は MOX 燃料集 合体で約 9W/kgHM 以下であり、金属燃料集合体では約 8W/kgHM 以下であった。

以上の製品ペレットの再酸化防止、機器表面温度、集合体組立と原料発熱量の概略 検討により、原料の発熱量は10W/kgHM以下に抑えることが望ましい。

## 表 8.1.1 MOX燃料および金属燃料集合体の 炉心燃料集合体仕様(基準システム)

項目	MOX燃料集合体	金属燃料集合体
燃料ピン本数	271 本	331 本
燃料要素配列ピッチ	9.65mm	9.95mm
ラッパ管内対面幅	161.2mm	183.7mm
(公差)	± 0.39mm*	± 0.44mm*
ラッパ管外対面幅	169.9mm	191.7mm
ラッパ管肉厚	4.35mm	4.0mm
スペースワイヤ径	1.1mm	1.39mm
燃料ピン外径	8.5mm	8.5mm
(公差)	± 0.04mm*	± 0.04mm*
炉心燃料スタック長	1,000mm	850mm
集合体貯蔵ピット径	24.88mm	24.88mm
備考	*FBR 実績から推定	



図 8.1.1 原料発熱率と焼結皿ペレットの中心温度



### 図 8.1.2 原料発熱率と燃料集合体中心温度(ピット貯蔵)



図 8.1.3 燃料集合体のバンドル/ラッパ温度差とギャップ幅



図 8.1.4 燃料集合体の発熱量とバンドル/ダクト温度差

### 8.2 FP リサイクルシステムの検討

実用化戦略調査研究では4核種(Tc,I,Cs,Sr)についてサイクル内で合理的に 低減することができる FP リサイクルシステム概念の検討を進めている。特に、 Tc 及びIは、高速炉内での消滅の可能性を検討している。なお、発熱性核種で ある Cs,Sr については、分離後、発熱量が十分低減するまで長期間保管管理す ることを検討している。

環境へ移行する FP 量の低減を目指した高速炉サイクルの有効性検討の一環 として、FP 消滅のための FP ターゲット集合体製造に関するコストおよび2次 廃棄物発生量の概略見積もりを行なう必要がある。本節では Tc 及び I に対する ターゲット集合体の製造施設の基本構想を示し、集合体製造費等についての参 考データを示す。また、簡素化ペレット燃料製造システムを例に、FP リサイク ル用の炉心燃料製造システムのコストおよび2 次廃棄物発生量の概略見積もり 結果を合わせて示す。

### 8.2.1 FP ターゲット集合体製造施設構想の検討

(1) 検討方法

Tc(<sup>99</sup>Tc:半減期 2.11×10<sup>5</sup>年)は金属状態をターゲット候補とする。また、I (<sup>129</sup>I:半減期 1.57×10<sup>7</sup>年)は化合物状態(CuI)をターゲット候補とする。FP ターゲット集合体製造施設規模の設定は将来の高速炉サイクルが平衡となった 状態(70GW:Na-FBR(1500MWe)が47基)で全ての高速炉にFPターゲッ ト集合体を供給できる製造規模とする。なお、本検討では減速用のZrH ピンは 部材として製造施設外部から供給するものとする。製造ライン構成の検討では 以下に示す考え方で機器構成(機器基数)を定め、建設費等を見積もる。

() Tc ターゲット集合体製造プロセス

粉末状 Tc を出発物質とし、粉末冶金(プレス、焼結等)による Tc 金属焼結 体製造工程、ピン組立工程、集合体組立工程等の主工程設備機器構成を簡素化 ペレット製造システム概念設計における機器能力に基づき定める。

() Cul ターゲット集合体製造プロセス

Cul 粉末を出発物質とし、圧粉体プレス工程、ピン組立工程、集合体組立工 程等の機器構成を簡素化ペレット製造システム概念設計における機器能力に基 づき定める。 (2) 検討条件(集合体仕様、マスバランス)

() 集合体仕様

Na 大型冷却炉に MOX ペレット燃料と共に装荷するケースについて検討する。 表 8.2.1 に Na 大型冷却炉による FP 核変換型炉心の仕様を示す。

表 8.2.2 に Tc ターゲット集合体と Cul ターゲット集合体の仕様、表 8.2.3 に それぞれの FP ペレットの仕様を示す。<sup>99</sup>Tc および <sup>129</sup>I は、熱中性子によって 消滅するため、集合体は FP を収納した FP ピンの周りに、中性子減速材である 水素化ジルコニウムを収納した ZrH ピンを配した構造をしている。

() 施設規模

(a) 必要生産量の検討

国内の FBR の総数を 47 基と想定し、その全てに FP ターゲット集合体を供 給することを考える。表 8.2.1 より、 1 炉心当りの FP ターゲット集合体装荷体 数は Tc ターゲット集合体が 55 体、CuI ターゲット集合体が 78 体であり、装荷 時間は各々40 サイクル(60年)および 32 サイクル(48年)である。したがっ て、本システムにおける FP ターゲット集合体の年間製造体数は、

Tc ターゲット集合体:55(体/炉心)×47(炉心)/60(年)=43.1(体/年)

Cul ターゲット集合体:78(体/炉心)×47(炉心)/48(年)=76.4(体/年) となる。

また、プレス~集合体検査までの物質収支を求めると、表 8.2.4 の値となる。 なお、製造歩留まりについては、簡素化ペレット法の各工程における値をその まま用いた。

(b) 必要設備・機器数の検討

簡素化ペレット燃料製造設備の単体処理能力と、表 8.2.4 に示された要求生産 能力から必要機器台数を算出した結果を表 8.2.5 に示す。

全ての機器台数が1台で済み、かつほとんどの設備の稼動率が20%未満であることから、Tc ピンおよび CuI ピンの製造ラインを個々に設けることはせず、両者を同一製造ラインで交互に製造することとする。また、それでも稼働率が30%程度しかないため3交代性の24時間操業は行わず、1日8時間操業を想定することにした(焼結炉のみ炉番を置いて24時間稼動させる)。

(3) 施設構想検討

() FP ターゲット集合体のプロセス設計

ZrH ピンについては別施設でピン加工し、本施設に搬入するものとする。したがって、ここではZrH ピンについては検討しない。

(a) Tc ターゲット集合体

再処理施設から、Tc 金属粉末を受け取るものとする。出発物質が金属粉末で あり、かつ融点が高い(2172)ため、射出成型法は適用できない(るつぼが もたない)。したがって、本検討では Tc ペレットの製造を粉末冶金法で行なう ものとした。

プレス

Tc 金属粉末をプレス成型し、ペレット状に成型する。その際、ダイ潤滑法 およびエアータッピング法を採用することにより、粉末粒径調整・潤滑材混 合工程を省略する。

焼結

Tcペレットを還元雰囲気下で焼結し、焼き固める。雰囲気ガスには、Ar+Hガスを使用するものとする。

一般的な粉末冶金用の焼結温度は、対象物の融点の 65~80%程度である。 従って、Tcペレットの焼結温度は 1400~1750 程度となる。

研磨

焼結体を研磨し、バリを取る。

ピン組立

焼結体の長さを揃え、ODS フェライト鋼製の被覆管に挿入し、端栓を加圧 抵抗溶接する。その際、He ガスを 0.1MPa で封入する。

ピン検査

端栓溶接部の健全性、ピンの気密性・重量・外観等の検査を行う。

集合体組立

別施設で加工された ZrH ピンと本施設で加工した Tc ピンを組み合わせ、 集合体とする。

集合体検査

ピン間隔、集合体重量・外観等を検査する。

以上の工程は、簡素化ペレット燃料の製造プロセスとほぼ同じである。した がって、設備の仕様は、簡素化ペレット燃料製造設備の仕様をそのまま転用す ることとした。

(b) Cul ターゲット集合体

再処理施設から、CuI 粉末を受け取るものとする。CuI 粉末は柔らかく、そのままプレスするだけで 86%TD 程度の密度に成型可能であること、同時に製造する Tc ペレットが簡素化ペレット法に類似した方法で製造されることから、本検討では CuI ペレットの製造をプレス成型法で行なう(ただし、焼結・研磨は行わない)ものとした。

プレス

Cul 粉末をプレス成型し、ペレット状に成型する。その際、エアータッピング法を採用することにより、粉末の成型密度の均一化を図る。なお、ダイ 潤滑法は使用しない。

ピン組立

プレス成型したペレットの長さを揃え、そのまま ODS フェライト鋼製の被 覆管に挿入し、端栓を加圧抵抗溶接する。その際、He ガスを 0.1MPa で封入 する。

ピン検査、集合体組立、集合体検査 以後は、Tc集合体の製造と同じである。

(4) 経済性評価

簡素化ペレット製造プラント(200tHM/y)の基準ケースに基づき、経済性評価を行った。

() 建設費

主工程設備費については、基準プラントの設備単価×台数により求め、集合体貯蔵設備については、基準プラントの設備費にFPターゲット集合体プラントと基準プラントの年間製造集合体数の比を乗じることにより求めた。また、保守・補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費については、基準プラントの設備費(建設費)にFPターゲット集合体プラントと基準プラントの主工程設備機器数の比を乗じることにより求めた。

結果を表 8.2.6 に示す。

() 操業費

人件費については、小規模プラントの基準人数に、3交代24時間操業と日勤 8時間操業の員数比(0.5と仮定)を乗じて運転員数を求め、それに人件費単価 を乗じて算出した。

修繕費のうち、機器交換費については、原料受け入れ~燃料要素組立設備までを年6%、他の設備を年2%の率で修繕するものとして求めた。定検材料費については、そこまで検討が進んでいないため、無視している。

消耗品等諸費については、主なものとして ZrH ピンの購入費と電力費につい て検討することとし、Zr の年間消費量×Zr 購入単価の 10 倍の額を ZrH ピンの 購入費と見なした。設備にかかる電力費は、基準プラントの設備電力費に主工 程設備機器数の比を乗じて、換気にかかる電力費は、基準プラントの換気電力 費にプラント容積の比を乗じて算出した。

結果を表 8.2.7 に示す。

() 部材費

MOX ペレット燃料集合体とほぼ同額となると仮定して算出した。MOX ペレット集合体当りの HM 重量を約 150kg、部材単価を 5 万円/kgHM として、部材 費を 750 万円/体と見積もった。

() 燃料製造単価

()~()より得られた FP ターゲット集合体製造単価を表 8.2.8 に示す。

(5) 廃棄物発生量評価

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄物発生量を求めた。 なお、FP ターゲット集合体プラントでは TRU は取り扱わないため、廃棄物を 廃棄物と非放射性廃棄物・クリアランス廃棄物に分けて求めている。

()通常運転時の廃棄物発生量

主工程設備から発生する不燃性の固体廃棄物発生量について検討した。評価 は、設備単体重量×保守補修による交換率(機器の種類により 6wt%/年または 2wt%/年ずつ交換されると想定)×台数×換算係数(100kg=200l ドラム缶1本) による積み上げ方式で行った。

FP ターゲット集合体プラントから1年間で発生する不燃性の固体廃棄物量 を表 8.2.9 に示す。

この他、周辺設備等から廃棄物が発生するが、本検討では評価していない。

() 廃止措置時の廃棄物発生量

固体廃棄物発生量について検討した。主工程設備機器の廃棄物量については 積み上げ方式で求め、周辺設備および建電換の廃棄物量については基準プラントの廃棄物量に FP ターゲット集合体プラントと基準プラントの容積比を乗じ ることで求めた。発生量を表 8.2.10 に示す。

### 8.2.2 炉心燃料集合体製造施設構想の検討

簡素化ペレット燃料製造システムの基準システムをベースに、FP リサイクル 用の炉心燃料を製造するシステムのコストおよび2 次廃棄物発生量の概略見積 もりを行なう。検討条件となる年間生産量は200 t HM/y とする。なお、参考ま でに基準システムの値を()内に併記した。
(1) 主工程設備等の検討

炉心構成、燃料集合体および燃料要素の基本仕様と、製造歩留りを考慮した 必要生産量を表 8.2.11 にまとめて示す。燃料集合体の年間必要生産体数は、内 側炉心燃料 712 体(512 体)、外側炉心燃料 626 体(431 体)、総数 1,338 体(1,264 体)となる。

必要生産量から主工程設備の製造ライン構成について検討した結果を表 8.2.12 に示す。この際、主工程設備の処理能力およびライン構成検討条件(相 互汚染防止、物流合理性考慮等)は基準システムに準じた(表 4.1.5 および表 4.1.8 参照)。検討の結果、主工程設備台数は基準システムに対して、脱硝・転換 設備が9基から10基に、ペレット工程が5から6ラインに、ピン加工・検査工 程が3から4ラインに、また、スタック調整設備が3基から2基に変更となっ た。

- (2) 経済性
- () 評価結果
- (a) 建設費
  - 主工程設備台数

主工程設備費算定のために設定した、燃料製造主工程の主要機器台数を表 8.2.13 に示す。

建設費

建設費内訳を表 8.2.14 に示す。主工程設備費は上記の台数に基づく。保守・ 補修設備費、共通設備費、建屋・電気・換気設備費は、分析設備費のみ基準シ ステムと同額と評価し、それ以外は主工程設備台数に依存するとみなして、 基準システムの費用の(74/65)倍とした。新燃料貯蔵建屋設備費は生産量に依 存するとみなし、基準システムの費用と同額と評価した。

(b) 操業費

操業費内訳を表 8.2.15 に示す。人員および単価は 3.2.1 節で設定した 300 人、 900 万円/人・年とした。修繕費は 3.2.1 節の評価方法に従って算出した。消耗品 等諸費は生産規模が基準システムと同等なので、基準システム費用と同額と評 価した。

(c) 燃料製造単価

(a)および(b)の結果から算出した燃料製造単価を表 8.2.16 に示す。また、集合体 1 体当たりの HM 重量が 149kgHM であることから、集合体 1 体当たりの製造単価を求め、併記した。

これらの数値は FP リサイクルシステムにおける炉心燃料製造コストであり、 FP ターゲット集合体製造コストは加味されていない。 (3) 環境負荷低減性

通常運転時の廃棄物発生量および廃止措置時の固体廃棄発生量を求めた。

() 通常運転時の固体廃棄発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 8.2.17 に示す。年間発生量は、低レベル廃 棄物(地層処分並)で約 13.5 t (8.9 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で 約 4.5 t (5.8 t)となった。2001 ドラム缶換算ではそれぞれ約 135 本(89 本)およ び約 45 本(59 本)となる。

気体廃棄物の大気放出放射能量については、生産量依存と見なし基準システムに同じ2×10<sup>7</sup>Bq/y程度と評価した。

# () 廃止措置時の固体廃棄物発生量

固体廃棄物発生量の検討結果を表 8.2.18 に示す。発生量は、低レベル廃棄物 (地層処分並)で約 1,590 t (1,360 t)、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)で約 3,500 t (3,510 t)、クリアランス以下(コンクリート以外)で 3.4 万 t (3.4 万 t)、 クリアランス以下(コンクリート)で 35 万 t (35 万 t)となった。

		(非均筫幼米
MWt	3570	3570
EFPM	18	18
-	4	4
- - - - cycle cycle	316/278 198 40/15 108/114 - -	316/278 0 40/15 169/114 55 78 40 34
cm	80	80
cm	30/40	30/40
w/o	21.7/24.4	22.1/25.7
10 <sup>4</sup> MWd/t	14.8	15.1
-	1.16	1.03
% k/kk'	3.2	3.6
10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> ·s	2.4	2.6
10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	4.6	4.9
\$	5.8	5.7
10 <sup>-3</sup> Tdk/dT	-4.7	-4.7
-	-	1
	MWt EFPM - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	MWt       3570         EFPM       18         -       316/278         -       198         -       198         -       108/114         -       -         -       108/114         -       -         cycle       -         cycle       -         cycle       30/40         w/o       21.7/24.4         10 <sup>4</sup> MWd/t       14.8         -       1.16         %       k/kk'         10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> · s       2.4         10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> · s       4.6         \$       5.8         10 <sup>-3</sup> Tdk/dT       -4.7         -       -         -       -

表8.2.1 FP核変換炉心の主要炉心特性(Na冷却MOX大型炉)

\*[Pu isotopes]=Pu Pu富化度=[Pu isotopes]/([Pu isotopes]+U) w/o

	Tcターゲット集合体			Culターゲット集合体			
	Τcビン	ZrHビン	合計	Culビン	ZrHピン	合計	
ピン本数	172	159	331	379	252	631	
ピン割合	52%	48.00%		60.10%	39.90%		
スミア密度	80%	90%		70%	89.90%		
ピン内径(cm)	0.776			0.484			
ピン外径(cm)	0.842			0.55			
<b>肉厚(cm)</b>	0.033			0.033			
ピンピッチ	0.92			0.66			
P/d	1.093			1.2			
ワイヤ径	0.07			0.106			
ラッパ管内面距離(cm	16.92			16.92			
ラッパ管外面距離(cm	17.92			17.92			
肉厚(cm)	0.5			0.5			
集合体配列ピッチ	18.32			18.32			
FPスタック長		150		150			
FP装荷量(kg)	112.9 20.19						
体積比							
<u><u></u><u></u><u></u><u></u></u>	0.28	0.259	0.539	0.24	0.16	0.399	
構造材	0.204			0.239			
冷却材	0.258			0.361			

# 表8.2.2 Na冷却MOX大型炉におけるFPターゲット集合体仕様

		小集合体	Culターケ	小集合体				
		Tcビン	ZrHピン	Culビン	ZrHピン			
	理論密度(g/cm3) (注1)	11.50	5.64	5.63	5.64			
	充填密度(%TD)	80.0	90.0	70.0	89.9			
仕	被覆管内径(cm)	0.776		0.484				
様	スタック長さ(cm)	150.0		150.0				
	集合体当りのFPピン本数	172	159	379	252			
	1291-99Tcの集合体当り重量(kg)	112.9		20.2				
±∔	ペレット密度(%TD)	92.5	100.0	86.0	100.0			
百倍	ペレット直径(cm)	0.722	0.694	0.437	0.405			
异	ペレット高さ(cm)	1.023		0.619				
	I・Tcの集合体当り重量(kg)	112.3	56.2	27.6	34.6			

表8.2.3 FPターゲット集合体の諸元

(注) Tc:粉末冶金法によりペレットを製造し、被覆管に挿入 Cul:粉末をプレスしてペレット化し、被覆管に挿入

	粉末	成型体	研削前	研削後	検査前	検査後	集合体
西미	重量	(ペレット)	焼結体	焼結体	燃料要素	燃料要素	重量
坦日		重量	重量	重量	重量	重量	
	(kgFP)						
Tcターゲット集合体	5064.5	5054.4	5054.4	4963.4	4963.4	4864.1	4864.1
Culターゲット集合体	1576.6	1573.5			1573.5	1542.0	1542.0
計	6641.1	6627.8	5054.4	4963.4	6536.9	6406.1	6406.1

表8.2.4 年間製造量(FPターゲット集合体製造施設)

項目	成型体 (ペレット) 本数	研削前 焼結体 本数	研削後 焼結体 本数	検査前 燃料要素 本数	検査後 燃料要素 本数	集合体 体数
Tcターゲット集合体	1109251	1109251	1109251	7562	7410	43.08
Culターゲット集合体	7160992			29537	28946	76.38
計	8270243	1109251	1109251	37098	36356	119.5

表8.2.5(1) Tcターゲット集合体製造必要機器数

装置名称	年間製造量 1日当 要求生産		当り 産能力	装置能力		必要 台数	設置 台数	
原料受入設備								
成型設備					125000	個/d·台	0.04	1
焼結設備	1109251	個/y	5546	個/d	102500	個/d·台	0.05	1
研削設備					107500	個/d·台	0.05	1
スタック形成設備					1730	本/d·台	0.02	1
燃料要素組立設備 端栓溶接熱処理設備 燃料要素検査設備 ワイヤ巻付・総合検査設備	7562	本/y	38	本/d	770	本/d·台	0.05	1
集合体組立装置	13.1	休 / 、	0.2	休/d	5	休/小台	0.04	1
集合体検査装置	43.1	1/ <del>1</del> / y	0.2	r4+7 U	5	кт/u. П	0.04	1

# 表8.2.5(2) Culターゲット集合体製造必要機器数

装置名称	年間製造量 1日当り 要求生産能力		当り 産能力	装置能力		必要 台数	設置 台数	
原料受入設備								
成型設備 (注)	7160992	個/y	35805	個/d	125000	個/d·台	0.29	1
スタック形成設備					1730	本/d·台	0.09	1
燃料要素組立設備 端栓溶接熱処理設備 燃料要素検査設備 ワイヤ巻付・総合検査設備	29537	本/y	148	本/d	770	本/d·台	0.19	1
集合体組立装置 集合体検査装置	76.4	体/y	0.4	体/d	3	· 体/d·台	0.15 0.15	1 1

注:Cul成型の場合、設備の必要台数(=稼働率)が他の設備と比較して若干高い値を示すが、これは金型の数を増やし、 一度にプレスできる数量を増加することにより、低減できる。

項目	費用(億円)
主工程設備費	176
保守・補修設備費、共通設備費	126
建屋・電気・換気設備費	194
新燃料貯蔵建屋設備費	12
建設費合計	508

表 8.2.6 建設費内訳 (FP ターゲット集合体製造施設)

表 8.2.7 操業費内訳 (FP ターゲット集合体製造施設)

項目	費用(億円)
人件費(150人×0.5×900万円/人・年)	6.8
修繕費(機器交換費、定検材料費)	8.7
「消耗品等諸費 (注)	20.0
ZrH ピン購入費	3.6
電力費	14.7
業務分担費(上記3項目×15%)	5.1
事業税(上記 4 項目 × 1.5%)	0.6
操業費合計	39.3

注:項目 以外に、焼結炉用 Ar - H ガス、冷却水、分析試薬、分析用使い捨 て器材等があるが、詳細検討には至っていないため、本評価では検討して いない。

表 8.2.8 集合体製造単価 (FP ターゲット集合体製造施設)

項目	単価(万円/体)
FP ターゲット集合体製造単価	6486
資本費	2394
操業費	3342
部材費	750

区分	種類	廃棄物量	備考
低レベル廃棄物	保守補修に	5.8 t	FP を非密封状態
(余裕深度並)	係わる廃棄物	(58本)	で取り扱う機器
クリアランスレベル	保守補修に	3.6 t	FP を密封状態で
以下の廃棄物	係わる廃棄物	(36 本)	取り扱う機器

表 8.2.9 通常運転時の固体廃棄物発生量(FP ターゲット集合体製造施設)

# 表 8.2.10 廃止措置時の固体廃棄物発生量(FP ターゲット集合体製造施設)

	廃棄物量	
低レベル廃棄物(余裕	<b>96</b> t	
クリアランスレベル	コンクリート以外	12000 t
以下の廃棄物	コンクリート	110000 t

# 表8.2.11 燃料の基本仕様と必要生産量 (フェーズ 中間時設定・Na冷却大型炉・200t規模・FP核変換炉心燃料製造施設)

1.燃料の基本仕様

炉心仕様	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	
電気出力	MWe		1,500		
熱出力	MWth	3,570			
運転サイクル長さ	ヶ月		18.0		
増殖比(目標値)	-		1.16		
集合体配列ピッチ	mm	183.2			
燃料交換バッチ数	バッチ	4 4 0			
集合体数	体	316	278	0	

能料集合法	牛螻	甾位	内側炉心炉	然料集合体	外側炉心炉	然料集合体
	17.42% 1	半世	IC + A B	ICのみ(AB無し)	OC + A B	OCのみ(AB無し)
全 <del>[</del>	Ē.	mm	4,3	370	4,3	370
燃料要素のス	本数	本/体	234	37	234	37
	炉心燃料		82	2.0	82	2.1
重量	軸ブランケット燃料	kg-HM/体	67	7.4	67	7.4
	수 화		14	9.4	14	9.5

燃料要素仕	L棣	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)
全長		mm	2,905	2,905	2,905	2,905
E +	炉心燃料	<b>mm</b>	800	800	800	800
K C	軸ブランケット燃料		700	0	700	0
ペーット個数	炉心燃料	個/木	87.7	87.7	87.7	87.7
	軸ブランケット燃料	四/ 华	67.3	0	67.3	0
	炉心燃料		303	303	303	303
重量	軸ブランケット燃料	g-HM/本	288	0	288	0
	合 計		591	303	591	303

ペレット仕様	単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)
被覆管内径	mm	7.76	7.76	7.76
ペレット外径	mm	7.60	7.60	7.60
ペレット高さ	mm	9.12	9.12	10.40
Pu富化度*	%	21.7	24.4	0.0
ペレット理論密度	g/cc	11.07	11.08	10.96
スミア密度	%TD	82.0	82.0	90.0
中空径	mm	2.0	2.0	0.0
ペレット密度	%TD	91.8	91.8	93.8
ペールト声号	g-MOX/個	3.91	3.92	4.85
ハレット里里	g-HM/個	3.45	3.46	4.28

# 2.必要生産量(製造歩留り考慮)

燃料集合	*	単位	内側炉心燃料 集合体	外側炉心燃料 集合体	径方向ブランケット 集合体	合 計
	十五日井	体/y	712	626	0	1,338
生産量	"土性稅候 200t-HM/y	体/d	3.6	3.1	0.0	6.7
	2001-1107/	t-HM/y	106.4	93.6	0.0	200.0

燃料要素	t	単位	内側炉心燃料 要素(IC+AB)	内側炉心燃料 要素(ICのみ)	外側炉心燃料 要素(OC+AB)	外側炉心燃料 要素(OCのみ)	径方向ブランケット 燃料要素	合 計
	<b>牛</b>	本/y	170,295	26,927	149,817	23,689	0	370,728
生産量	土住稅保 2001-HM/y	本/d	851	135	749	118	0	1,854
1	2001-1101/ 9	t-HM/y	100.6	8.2	88.5	7.2	0.0	204.4

ペレット		単位	内側炉心燃料 ペレット(IC)	外側炉心燃料 ペレット(OC)	軸方向ブランケット ペレット(AB)	径方向ブランケット ペレット(RB)	合 計
		個/y	18,766,944	16,510,160	23,372,708	0	58,649,812
牛菇曼	生産規模	個/d	93,835	82,551	116,864	0	293,249
土庄里	200t-HM/y	t-HM/y	64.8	57.1	100.0	0.0	221.8
		kg-HM/d	324	285	500	0	1,109

粉末		単位	内側炉心燃料 粉末(1C)	外側炉心燃料 粉末(0C)	軸方向ブランケット 粉末(AB)	径方向ブランケット 粉末(RB)	合 計
牛菇曼	生産規模	t-HM/y	64.9	57.2	100.2	0.0	222.2
工作里	200t - HM / y	kg-HM/d	324	286	501	0	1,111

造	没定 [規模	4
米斗夷	中間時 か 200	    -{#
い際	ーズ や FP核 施	H /Bil
換炉	ла Ма Ми	Ē
核痰		くさ
t • FP	時設定 1応炉心 ム)	ןן יין
₹200	、開始 大型が外 挿システ	   
皀 挸 付	フェーズ La谷む (基注	AL /BI
(処理	2	Ē
討結果	ケース	
成検	推	•
い構	Ц	
IU A		
2.12	王 王	
表8.		

工 程	設備	ケース	2	レート マート に で の の が の に し い い の の に し に し に し に し に し に し に し に し に し	く 馬谷 御谷 神システ	時設定 対応炉心 - ム)		し N a 込	ーズ - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	中間時設 炉・2001 換炉心	说 現 種
		燃料種別	内側	外側	軸ブラ	径ブラ	合計	内側	外側	軸ブラ	合計
		処理量t/y	43.6	36.7	76.3	65.6	222.2	64.9	57.2	100.2	222.3
머카 그는 부산 그는 보다	原料受入設備		2	2	2		9	2	2	2	9
MX11月早∆1突⊥_1生	脱硝·転換設備		3	2	2	2	6	4	с	3	10
	成型設備		2	-	-	~	5	2	2	2	9
м г. т. <del>г</del> .	焼結設備		2	-	-	-	5	2	2	2	9
いした	研削設備		2	-	-	-	5	2	2	2	9
	ペレット検査設備	ᆂ	2	-	-	-	5	2	2	2	9
	スタック調整設備	Щщ	-	-	$\left  \right $	-	З	-	-		2
<b>レノル上上作</b>	燃料要素組立設	设備	-	-	$\left  \right $	-	З	2	2		4
	端栓溶接熱処理	誋伇備	-	-	$\left  \right $	~	e	2	2		4
プン読み上記	燃料要素検査設	设備	-	-	$\left  \right $	~	e	2	2		4
<b>レノ快旦上</b> 住	ワイヤ巻付設備		-	-	$\left  \right $	~	e	2	2		4
·	燃料要素総合検	き査設備	-	-	$\overline{\left  \right }$	-	n	2	7		4
<b>隹</b> 今休 丁 扫	燃料集合体組立	<b>Ē</b> 段備	1	<b>\</b>		L	2	1	1		2
┺╫╋	燃料集合体検査	誋伇備	1	<b>\</b>		L	2	1	1		2
	습 計		21	14	8	14	57	27	26	13	66
·八 <sub>東</sub> 野	ステムとの相違			<b>₹</b> ₹)	挿システ	(۲ ۲		* * 脱・ 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	・転換部 ト工程:5 少調整( 工程:3	设備:9 5 65イン のみ3 2 45イン	10基 注基)

施設)

	設備	台数(基)
設備名称	基準システム	FP 核変換
	(200t、資源)	( 200t )
脱硝·転換設備	9	10
成型設備、焼結設備、研削設備	各 5	各6
ペレット検査設備	5	6
スタック調整設備	3	2
燃料要素組立設備	3	4
端栓溶接熱処理設備、燃料要素検査設備	各3	各4
ワイヤ巻付設備、燃料要素総合検査設備	各3	各4
燃料集合体組立設備	2	2
燃料集合体検査設備	2	2
合計台数(リワーク設備、保管庫類等含む)	65	74

表 8.2.13 主工程設備台数 (FP 核変換炉心燃料製造施設)

	費用 (	億円)
項目	基準システム	FP 核変換
	(200t、資源)	(200t)
主工程設備費	508	575
保守·補修設備費、共通設備費	458	517
建屋·電気·換気設備費	708	806
新燃料貯蔵建屋設備費	129	
建設費合計	1,803	2,028

表 8.2.14 建設費内訳 (FP 核変換炉心燃料製造施設)

表 8.2.15 操業費内訳 (FP 核変換炉心燃料製造施設)

	費用(億円/年)		
項目	基準システム	FP 核変換	
	(200t、資源)	(200t)	
人件費(300 人×900 万円/人・年)	27.0		
修繕費(機器交換費、定検材料費)	31.6	35.8	
消耗品等諸費(補充 U、ユーティリティ等を含	28.0		
む)			
業務分担費	13.0	13.6	
事業税	4.6	4.8	
操業費合計	104	109	

	単価(万円/	/kgHM)	単価(万円/体)	
項目	基準システム	FP 核変換	基準システム	FP 核変換
	(200t、資源)	(200t)	(200t、資源)	(200t)
燃料製造単価	15.3	16.2	2,280	2,414
資本費	5.1	5.7	760	849
操業費	5.2	5.5	775	820
部材費	5.0	5.0	745	

表 8.2.16 燃料製造単価 (FP 核変換炉心燃料製造施設)

通常運転時の固体廃棄 (FP核変換炉心燃料製造施設)
長8.2.17

			発生量		
廃棄物区分	分類	重重	容量	ドラム缶	例
		(t/y)	(m3/y)	( <b>本</b> /y)	
(北京市を住宅を	金属	10.7	21.4	1 721	ゆ心燃料製造用の成型プレス金型、 焼結炉ヒータ、 集塵機フィルタ等
ほとことも来る(も言うとう)ま)	セラミック	2.8	5.6 21.0	2	<b>ゆ心燃料製造用の脱硝容器、 焼結炉耐火レンガ等</b>
年二爻 II 咳棄物 (今淡淡帝加公社)	金属	3.1	6.2	4	プランケット燃料製造用の成型プレス金型、焼結炉ヒータ、集塵機フィルタ等
11.17、ことまま約(水箱・水気をひょう)ま)	セラミック	1.4	2.8		プランケット燃料製造用の脱硝容器、焼結炉耐火レンガ等
クリアランス以下	金属	4.5	9.0 9.0	-	燃料要素検査設備構成モジュール、集合体組立設備構成モジュール等
合 計		22.5	45.0	180	

# 表8.2.18 廃止措置時の固体廃棄物発生量 (FP核変換炉心燃料製造施設)

	低レベル層	<b>훈棄物</b>	低レベビ	、廃棄物		クリアラ	シス以下		
対象廃棄物	(地層処)	() 料()	(余裕深厚	<b>覂処分並</b> )	コンクリ-	- ト以外	コンク	×	諸
	重量(t) 7	容量(m3)	<b>重量</b> (t)	容量(m3)	<b>重量</b> (t)	容量(m3)	<b>重量</b> (t)	容量(m3)	
(# 」主工程設備(保守・補修設備含む)	170	1,540	150	300	440	880	1	1	
	10	20	3,050	6,100	2,600	5,200	1	1	
★ セルライニング	810	1,620	300	600	•	•	ı	- ライニング厚5mm	想定
3、 建屋躯体(上記を除く)	ı	1	I	1	31,000	62,000	350,000	700,000	
合	1,590	3,180	3,500	7,000	34,040	68,080	350,000	700,000	

### 9.燃料製造システムの技術的総括

# 9.1 湿式法の技術的見通し(簡素化ペレット、スフェアパック)

MOX 燃料製造に対応する両システムについて評価項目毎の技術総括を行う。窒化 物燃料製造システムは酸化物燃料製造の簡素化ペレット及びスフェアパックの製造プ ロセスに炭素熱還元工程等を付加するものであり、燃料ミートの製造に係る技術的総 括の多くの部分が共通するものである。このため、鉛ビスマス冷却炉用窒化物ペレッ ト燃料及びガス冷却炉用窒化物被覆粒子燃料については、システムの特徴を踏まえ、 技術的見通しについて定性的検討を行う。概念設計及び評価結果を表 9.1 に示す。

(1) 技術的成立性

システム設計における基本的プロセスである MA-MOX ペレットの焼結、多成分組成のゲル生成、焼結顆粒等の見通しが小規模試験から得られた。

量産規模の製造プラント性能に関し、マテリアルハンドリング機器の能力を含め所 定の生産能力を発揮できる可能性を示した。

# (2)安全性

臨界に対する安全設計において、簡素化ペレット燃料製造システムでは、形状管理 を基本とし、プレス機等の核物質の取り扱いが複雑となる機器は質量管理を基本とし 臨界設計を行った。スフェアパック燃料製造システムでは、溶液系のゲル化設備を形 状管理とし、ピン組立設備等を質量管理として臨界設計を行った。両システムともに セル内製造システムであり、核物質の移送等のハンドリングに伴う異常集積を排除す るため核物質の搬送経路を確定する設計とした。従って、両システムは同等の臨界安 全の考え方に基づく施設設計である。

火災爆発に対する安全設計では、簡素化ペレットでは還元ガスとして N<sub>2</sub>-5%H<sub>2</sub> を 用い、爆発下限の状態での取り扱う設計とした。一方、スフェアパックでは爆発性を 有する硝酸アンモニウムの生成及び洗浄液としてのアルコールの使用に対する設計対 応が必要となる。硝酸アンモニウムに関しては、対象となる工程において硝酸アンモ ニウムが固体状に析出しない設計とするため、液面を湿り空気でカバーする等の対策 が必要となる。また、生成した硝酸アンモニウムは硝酸とアンモニア水に分解し、回 収、リサイクルする設備を設計した。引火点の低い洗浄用アルコールの使用に対して は、着火源に対する防爆対策、ガス検出器の設置及び換気による希釈を設備対応の基 本とした。これらの火災爆発に対する安全設計は可能であるが、引火点の低いアルコ ールの使用に対する安全対策(不活性雰囲気等)の面でスフェアパックは簡素化ペレ ットに比べ課題があると考える。

(3) 経済性

軽水炉サイクルシステムに比肩する経済性を達成することを目標に、燃料サイクル 費の要求値を 0.8 円/kWh にする。この要求を達成するのに十分と考えられる燃料製 造単価の目標値を暫定的に 16 万円/kgHM と設定する。

MOX 製造プラント(200tHM/y)における、簡素化ペレット製造システム及びスフ ェアパック製造システムの製造コストは、それぞれ約 15 万円/kgHM 及び約 20 万円 /kgHM となる。簡素化ペレットではコスト要求を達成できる見通しを得た。スフェア パックでは、目標値には到達していないが、サイクルコストとして FBR サイクル全 体での経済性評価が必要である。

(4) 環境負荷低減性

環境負荷低減の観点から、U,TRUの環境(廃棄物)への移行を 0.1%以下に抑える ことを目標としているが、現行 MOX ペレット製造プラントの実績より、両システム とも達成可能と考える。簡素化ペレットシステムでは、現行システムに比べ粉末を取 り扱う工程を極力低減すると共に、粉末を取り扱う機器は密封構造を提案している。 スフェアパックシステムでは、本質的にダスト発生を抑えることが可能であり、廃棄 物への TRU 等の移行は簡素化ペレットシステムより小さくなると考える。

製造システムからの放射性固体廃棄物の発生量の見積もりでは、加熱工程における 高温劣化及び可動部の摩耗による設備機器の交換部品を設定し、これらを積算するこ とにより実施した。廃棄物の放射能区分については、非密封状態で燃料を取り扱うセ ル(燃料ミート製造及び燃料ピン加工のセル)から発生するものについて、炉心燃料 製造セルから発生する廃棄物を低レベル廃棄物(地層処分並)とし、ブランケットの みを製造する燃料製造セルから発生する廃棄物を低レベル廃棄物(余裕深度処分並) とした。

200tHM/y 製造プラントにおける、簡素化ペレット製造システムから発生する低レベル廃棄物(地層処分並)及び低レベル廃棄物(余裕深度処分並)は、それぞれドラム缶 89 本及び 59 本である。また、スフェアパック製造システムからの廃棄物は、それぞれ 104 本及び 34 本となる。

スフェアパックの方が低レベル廃棄物(地層処分並)の発生割合が高いが、これは、 炉心燃料及びブランケット燃料製造ラインを構成する設備機器数の差異によるもので ある。

両システムの比較では、低レベル廃棄物(地層処分並)と低レベル廃棄物(余裕深 度処分並)の割合は異なるものの、全廃棄物量はほぼ同等となる。

システムの特徴としてスフェアパックは核物質のダスト発生を最小限に抑えるこ とが可能であり、燃料を非密封で扱うセルからの発生廃棄物の放射能は、多くのダス トを含む脱硝転換工程を有する簡素化ペレットに比ベスフェアパックでは低くできる 可能性がある。このことを考慮した場合、低レベル廃棄物(地層処分並)の発生に関 しスフェアパックシステムが有利となる可能性がある。 (5) 資源の有効利用性

簡素化ペレット及びスフェアパックとも製造時に生じた燃料スクラップ等の回収再 利用が可能なシステムとしており、99%の資源利用は可能と考える。なお、核物質の 滞留等に関してダスト発生の少ないスフェアパックが有利となる可能性があるが、簡 素化ペレットは粉末の取り扱い工程を合理化しており、核物質の滞留低減が可能であ る。資源の有効利用の観点では、両者に大きな差はないと考える。

#### (6)核拡散抵抗性

各燃料製造システムとも、製造工程中に純粋な Pu が単独で存在しない設計とし得 ることを示した。また、本検討において主要な取り扱い対象となっている低除染燃料 では、これまでの高除染燃料と比較して FP 等の含有量が多く、放射線線量率が高く なり、核燃料の盗取は困難になると考えられる。MA 添加燃料では特にその傾向が強 くなる。さらに、低除染燃料に対応するために燃料製造はセル内で行われることとな り、核物質防護の観点から有利になる。

核物質の計量管理の観点で、核物質の滞留低減等に関してダスト発生の少ないスフ ェアパックが有利となる可能性がある。今後の課題としては、MA 含有燃料の計量管 理方法の検討、査察時のセル内設備対応検認方法の検討等がある。

(7) 運転・保守補修性

セル内での燃料製造を実現するためには遠隔製造技術(遠隔保守補修)は重要な評価項目の一つであり、技術的成立性の評価に含める。

(8) 窒化物燃料製造に係る技術的見通し

窒化物ペレット製造システムは、簡素化 MOX ペレットシステムに比べ工程増(粉 末取扱設備、炭素熱還元設備等)、製造雰囲気管理(Ar セル)、<sup>15</sup>N リサイクル等の設 備付加、並びに<sup>15</sup>N 濃縮等により製造コスト増となる。また、粉末取り扱いに伴う核 物質の廃棄物への移行量が簡素化 MOX ペレットシステムに比べ多くなる可能性があ る。

窒化物被覆粒子燃料製造システムの検討では基本プロセスを仮定し、経済性等のシ ステム特性を評価したものである。炭素パウダーを分散したゲル生成等、部分的なプ ロセスは確認されているが、基本となる TiN 被覆粒子生成プロセスの成立性、SiC 材 料を用いた集合体構成部材の製造については今後、基礎的な知見を蓄積し、技術見通 しを得る必要がある。

# 9.2 乾式法の技術的見通し(バイパック(酸化物電解法、金属電解法)、射出成型) 概念設計及び評価結果を表 9.2 に示す。

(1) 技術的成立性

酸化物電解法のバイパックシステム設計における基本的プロセスである酸化物微小

顆粒の振動充填技術は、海外における小規模試験からその実現可能性が示されている。 この技術に対する検証が必要である。金属電解法のバイパックシステム設計における 顆粒製造プロセス及び高密度充填プロセス関するデータは僅少である。また、射出成 型システム設計における基本的プロセスである U-Pu-MA 合金の射出成型の見通しが 海外における小規模試験から得られている。

量産規模の製造プラント性能に関し、臨界安全性を考慮した機器配置設計について は不明な部分もあるが、製造システムとして所定の生産能力を発揮するために必要な 機器構成を明確にした。この際、設定した機器稼働率に対し使用環境の影響評価が重 要となる。特に、機器故障に対して大きな影響を及ぼすと考えられる 放射能核種の ダスト発生が特徴であるバイパックシステムでは、安定操業に関する見通しは現状で は困難である。

(2)安全性

臨界に対する安全設計においては、全システムで質量管理を基本とし、臨界設計を 行った。バイパックシステムでは、二重装荷を考慮した核燃料物質取扱量を定め、射 出成型法では、二重装荷の代わりに二重の秤量を行うことで臨界安全性を担保してい る。また、全システムともにセル内製造システムであり、核物質の移送等のハンドリ ングに伴う異常集積を排除するため、核物質の搬送経路を確定する設計とした。従っ て、全システムは同等の臨界安全の考え方に基づく施設設計である。ただし、臨界安 全性を考慮した機器配置設計については検討未了の部分もある。また、酸化物電解再 処理からの原料顆粒は非均質であり、質量管理のための核物質確定方法を検討する必 要がある。

火災爆発に対する安全設計では、バイパック(酸化物電解法)システムは、金属ウ ランゲッタの使用に対し、海外情報を参考に使用環境を空気雰囲気としているが、発 火条件等の評価が必要である。一方、バイパック(金属電解法)システムは、可燃性 物質を使用しない設計となっている。射出成型システムでは、スラグ加工・燃料要素 組立工程で Pu/U合金燃料、金属 Na 等を取り扱うため、Ar セルの使用、冷却水や駆 動用の圧縮空気を使用しない等の対策を取っている。

なお、全システムとも可燃性ガス・有機溶媒は使用しないため、爆発の恐れは無い。

これらの、火災爆発に対する安全設計が可能であるが、火災に対する安全設計の面 でバイパック(酸化物電解法)システムは他システムに比べ課題があると考える。

(3) 経済性

湿式法と同様に、燃料製造単価造の目標値を暫定的に 16 万円/kgHM と設定する。 50tHM/y 製造プラントにおける酸化物電解法のバイパック、金属電解法のバイパッ ク、及び 38tHM/y 製造プラントにおける射出成型システムの製造コストは、それぞ れ約 22 万円/kgHM、約 24 万円/kgHM 及び約 23 万円/kgHM となる。全てのシステ ムで、目標値には到達していないが、サイクルコストとして FBR サイクル全体での 経済性評価が必要である。

(4) 環境負荷低減性

バイパックシステムでは、酸化物微小顆粒を取り扱うため、それらの機器を密封構 造にする等の設計対応が必要である。一方、射出成型システムでは、モールドに付着 した TRU 等の廃棄物への移行を小さくする設計対応が必要である。

製造システムからの放射性固体廃棄物の発生量の見積もりでは、装置毎に可動部の 摩耗による機械的寿命を設定し、これらを積算することにより実施した。廃棄物の放 射能区分については、非密封状態で燃料を取り扱うセル(燃料ミート製造、燃料要素 加工のセル)から発生するものについて、炉心燃料製造セルから発生する廃棄物を低 レベル廃棄物(地層処分並)とし、ブランケットのみを製造する燃料製造セルから発 生する廃棄物を低レベル廃棄物(余裕深度処分並)とした。

50tHM/y 製造プラントにおける酸化物電解法のバイパックシステムから発生する 低レベル廃棄物(地層処分並)及び低レベル廃棄物(余裕深度処分並)は、それぞれ ドラム缶 200 本及び 0 本である。また、金属電解法のバイパックシステムからの廃棄 物は、それぞれ 230 本及び 40 本となる。38tHM/y 製造プラントにおける射出成型シ ステムからの廃棄物は、それぞれ 64 本及び 0 本となる。

これらの小規模プラントでは、炉心燃料とブランケット燃料を同一セルで製造する こととしているものもある。その場合、発生する放射性廃棄物は全量低レベル廃棄物 (地層処分並)となり、低レベル廃棄物(余裕深度処分並)の発生量は0となる。

(5) 資源の有効利用性

全システムとも製造時に生じた燃料スクラップ等は回収再利用することとしており、 99%の資源利用は可能と考える。

バイパックシステムは核物質の滞留等が発生し易いシステムである。その点で、ダ スト発生の少ない射出成型システムが有利となる可能性はあるが、モールドに核燃料 が付着しロスとなり、資源の有効利用性において不利となる可能性がある。以上より、 バイパックシステム及び射出成型システムは、湿式対応システムに比べ不利となる可 能性がある。

(6) 核拡散抵抗性

全システムとも、製造工程中に純粋な Pu が単独で存在しない設計とし得ることを 示した。また、本検討において主要な取り扱い対象となっている低除染燃料では、こ れまでの高除染燃料と比較して FP 等の含有量が多く、放射線線量率が高くなり、核 燃料の盗取は困難になると考えられる。MA 添加燃料では特にその傾向が強くなる。 さらに、低除染燃料に対応するために燃料製造はセル内で行われることとなり、核物 質防護の観点から有利になる。

核物質の計量管理の観点で、核物質の滞留低減等に関してダスト発生の少ない射出

成型システムが有利となる可能性がある。ただし、Pu 富化度を求めるための成分分 析におけるサンプルの代表性について、全システムともに解決すべき課題を有してい る。特に、酸化物電解法のバイパックシステムでは、複数のサンプルを採取し、統計 的手法に基づき富化度を求める必要があるため、採取方法、統計処理手法ともに要素 技術開発が必要である。また、バイパックシステムは核燃料の微粉がセル内に飛散す ることを考慮する必要があり、核物質量の確定に対し現段階ではその成立性の判断は 難しい。

(7) 運転・保守補修性

セル内での燃料製造を実現するためには遠隔製造技術(遠隔保守補修)は重要な評価項目の一つであり、技術的成立性の評価に含める。

表9.1 フェーズ 中間取りまとめにおける燃料製造システム概念設計結果のまとめ(簡素化ペレット、スフェアパック)(1/3)

÷		簡素化ペ	、レット	771	アパック
評1叫1貝	<sup>1</sup>		窒化物		<b>室化物(被覆粒子燃料)</b>
技術的成立	基本プロセ 、 成立性(要 、 長 技 術 開 発 課 <u>1</u> )	開発状況 以下により、簡素化プロセスによるペレット製造の可能性を確認 ・溶液でのPu富化度調整で目標精度±2.5%を達成 ・転動造粒法で粉末流動性指数目標値60以上を達成 ・ダイ潤滑成型ペレットの外観、密度、強度は現行法と同等以上 であることを確認 ・上記を現行法で焼結し得たペレットの外観、Pu均一性、微細構造 は現行法と同等、密度は目標値95%TD以上を達成 また、以下によりMA含有低除染MOXペレット製造の可能性を確認 ・Pu30%の2%Np/2%Am/2%模擬FP含有MOXペレット製造の可能性を確認 ・Pu30%の2%Np/2%Am/2%模擬FP含有MOXペレット製造の見通し得た。 ・焼結後の熱処理条件制御により所定ペレット製造の見通し得た。 ・焼結後の熱処理条件制御により所定ペレット製造の見通し得た。 ・焼結後の熱処理条件制御によりがたペレットの成結試験で、 焼結時の温度や酸素分圧制御によりが定ペレット製造の見通し得た。 ・焼結後の熱処理条件制御によりが常体積の/M=1.95のペレットを得た。 ・セル内遠隔手動製造で3%および5%Am含有MOXペレットの試作に成功 開発課題 ・造粒条件最適化、造粒法に代わるエアータップ充填法の適用性確認と 方式選定、焼結プロセス条件最適化、照射試験でリサイクル成立性確認 簡素化プロセスによるMA含有低除染MOXペレット製造の確認	開発状況 ・原研で窒化物ペレット製造の実績あり 開発課題 ・N-15濃縮技術開発 ・MA含有低除染窒化物ペレットの製造性確認 ・炭素熱還元工程のプロセス実証	<ul> <li>開発状況         <ul> <li>小粒径~70µm、大粒径~900µmの高除染UO₂顆粒製造に成功</li> <li>・低除染MA含有MOX粒子の焼結性については、ペレットでの結果から類推</li> <li>・HfO₂等を用いた振動充填試験で充填率84%を達成(スタック長30cm)</li> <li>・軸方向、径方向、周方向に密度分布の偏りがない(±2%未満)ことをX線CTで確認</li> <li>・端栓溶接・超音波探傷技術開発</li> <li>・照射済み燃料に対するX線CT撮像の例があり、密度分布測定に適用の可能性がある。</li> <li>・高除染のMOX(Pu30%、外部ゲル化、BNFL)及び5%Np含有MOX(Pu30%+Np5%、内部ゲル化、PSI)の振動充填燃料製造の海外実績がある。</li> </ul> </li> <li>開発課題         <ul> <li>・低除染燃料でのゲル化条件の確認</li> <li>・低除染MOX顆粒の焼結条件の確認</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>開発状況</li> <li>ゲル化顆粒製造技術の開発</li> <li>・炭素粉末を均一に分散させたゲル球を製造</li> <li>・目標直径1700µmに対し、約900µmの高除染のMOX(外部ゲル化) およびNp含有MOX(内部ゲル化)を製造</li> <li>被覆技術の開発</li> <li>・TIN平板上に22回の繰り返し蒸着を行い、TIN/TICN/TICの3層コー ティングによる100µmの厚膜を形成(2ヶ月間)</li> <li>開発課題</li> <li>ゲル化顆粒製造技術</li> <li>・低除染燃料での直径1700µmのゲル球製造</li> <li>・上記ゲル球の炭素熱還元の実証</li> <li>被覆技術</li> <li>・実用速度でのTIN被覆</li> <li>・TINの低密度/高密度2層被覆</li> </ul>
语	平価	<ul> <li>小規模試験結果から基本プロセス成立性の見通しを得た</li> <li>・実機組成燃料を用いたプロセス実証が必要である</li> </ul>	・MAなし、高除染での基本プロセス成立性の見通しを得た。 ・MA含有低除染燃料での確認が必要である。	・小規模試験結果から基本プロセス成立性の見通しを得た。 ・実機組成燃料を用いたプロセス実証が必要である。	現在、プロセス技術の開発中である。
··: 言 (: 村	量産設備設 †/安定操業 遠隔保守) ↓討状況	<ul> <li>量産対応 <ul> <li>ロット大規模化による品質管理の簡素化</li> <li>形状管理の適用による工程管理の簡素化</li> <li>脱硝転換設備:臨界制限を考慮した大型脱硝容器採用による生産性向上</li> <li>成型設備:パンチ数増加による成型能力向上(12本)</li> <li>燃料要素組立設備:24本同時挿入方式採用による生産性向上</li> </ul> </li> <li>安定操業(遠隔保守対応) <ul> <li>機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での復旧を想定</li> <li>(主要機器の脱硝転換設備については、モジュール構造の具体化を図る)</li> <li>簡易シミュレータでシステム稼働率を評価、年間運転日数250日のうち 実稼動日数200日で年間200t-HMの生産量が確保できる可能性確認</li> </ul> </li> <li>課題 <ul> <li>大型脱硝容器での脱硝性能把握</li> <li>成型設備での成型能力・品質確認</li> <li>MA含有低除染燃料の製造歩留まり確認</li> <li>遠隔保守に対応した、モジュールの取付け・取外し機構の具体化</li> <li>実規模モックアップによる遠隔・補修性確認</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>■産対応</li> <li>・炭素熱還元工程設備は原研での試験実績を参考に処理量および 処理能力を想定し、台数を算出</li> <li>・脱硝転換設備:臨界制限を考慮した大型脱硝容器の採用</li> <li>・成型設備:パンチ数増加による成型能力向上(12本)</li> <li>・燃料要素組立設備:24本同時挿入方式採用による生産性向上 遠隔保守対応</li> <li>・機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での復旧を想定</li> <li>・炭素熱還元設備の処理量と反応時間の相関確認及び台数最適化</li> <li>・炭素混合設備、粉砕設備の処理量と粉砕時間の相関確認及び 台数最適化</li> <li>(その他は簡素化ペレットの酸化物に同じ)</li> </ul>	<ul> <li>■産対応         <ul> <li>・単体 / ズルの最適流量に基づき、所定能力を得るために複数 / ズルからの溶液滴下とした。</li> <li>・振動充填工程での複数ピン(100本)同時振動の採用</li> <li>・マテハンを考慮した。</li> <li>・成障要因、故障頻度を考慮した保守補修頻度の推定</li> <li>遠隔保守対応             <ul></ul></li></ul></li></ul>	<ul> <li>量産対応</li> <li>ゲル化顆粒製造</li> <li>・処理時間及び形状制限を考慮して得られた機器能力を基に、台数を 設定</li> <li>被覆</li> <li>・SiC被覆と同等の処理時間で、TiNの2層被覆が可能であるとの仮定の下に、形状制限を考慮した機器能力を想定し、台数を設定</li> <li>遠隔保守対応</li> <li>・機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での復旧を想定している。</li> <li>・被覆装置・真球度判別装置は必要数の20%増しの台数を設置し、 故障時に即時に予備機に代替することにより、生産性を維持 (冗長性を有するため、経済性・環境負荷低減性に難あり)</li> <li>課題</li> <li>ゲル化顆粒製造</li> <li>・運転手順等の合理化による機器能力向上及び台数削減 被覆</li> <li>・プロセス技術開発結果に即した機器の設計 共通</li> <li>・遠隔保守に対応した、モジュールの取付け・取外し機構</li> </ul>
計 	₽価	<ul> <li>・工学試験規模でのプロセス成立性の実証が必要</li> <li>・実規模モックアップによる遠隔・補修性の確認が必要</li> </ul>	・炭素熱還元工程の各設備能力の確認が必要	<ul> <li>・工学試験規模でのプロセス成立性の実証が必要</li> <li>・モックアップによる、遠隔保守・補修性の確認が必要</li> </ul>	量産対応: ・プロセス技術が開発されていないため、SiC被覆設備の仕様に準じて 被覆設備の基本設計検討を実施 安定操業: ・遠隔保守に対応した機器のモジュール化設計検討は未着手
安全性 に 安 少 山	現行指針類 二準拠(臨界 そ全、爆発防 く災・爆発防 と) 安全上の特 とし 安全配慮した 受計	臨界安全性 ・基本的に、形状管理により単ーユニットでの臨界安全性を担保 ・形状管理に困難が予測されるペレット成型工程は質量管理を適用 耐震 ・耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分類 火災・爆発防止 ・火災を生じる可能性のある物質に対して、設備対応 火災・爆発防止 ・水素ガスは不活性ガスで5%に希釈したものを使用 MAによる熱的影響対策	臨界安全 ・MOX燃料の核的制限値を用い、基本的に形状管理により単ーユニッ トでの臨界安全性を担保 ・形状管理に困難が予測されるペレット成型工程は質量管理を適用 耐震 ・耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分類 火災・爆発防止 ・火災を生じる可能性のある物質に対して、設備対応 火災・爆発防止 ・水素ガスは不活性ガスで5%に希釈したものを使用 ・UN、PuNは空気中で発火するため、Arセル内で取り扱う。	<ul> <li>臨界安全         <ul> <li>・粒子製造工程では形状管理により単一ユニットの臨界安全を担保</li> <li>・振動充填工程以降では数量管理とインタロックによるダブルバッチ</li> <li>防止で単一ユニットの臨界安全を担保</li> </ul> </li> <li>耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分類</li> <li>火災・爆発防止</li> <li>・水素ガス濃度の制限、硝酸アンモニウム含有溶液の取扱い方法</li> <li>によって火災爆発を防止</li> <li>火災・爆発防止</li> <li>・還元・焼結に使用する水素は不活性ガスで5%に希釈したものを使用</li> <li>・硝酸アンモニウム析出防止のため、槽内換気には水蒸気で飽和した</li> </ul>	臨界安全性 ・粒子製造工程設備については、形状制限により単ーユニットの臨界安 全性を担保 ・被覆工程以降の設備及び一部のマテハン設備については、質量管理 により、二重誤装荷を考慮した単ーユニットの臨界安全性を担保 耐震 ・耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分類 火災・爆発防止 ・火災・爆発を生じる可能性のある物質に対して、設備対応 臨界安全性: ・各燃料形態毎に形状制限値及び質量制限値を求め、機器仕様(円環 槽の厚さ、容器直径、容器に装荷できる重量等)に反映
		<ul> <li>・再酸化防止:ホッパ内雰囲気管理、強制冷却、焼結皿段数制限を考慮</li> <li>・表面酸化による燃料要素被覆管の外観不良防止:強制冷却を考慮</li> <li>・熱膨張による燃料集合体の組立不良防止:強制冷却を考慮</li> <li>・燃料集合体検査設備の検査誤差拡大防止:強制冷却を考慮</li> <li>・燃料集合体検査設備の検査誤差拡大防止:強制冷却を考慮</li> <li>(原料の発熱量は10W/kgHM以下に抑えることが望ましいことを確認)</li> <li>課題</li> <li>・ペレット、燃料要素の搬送時における形状管理手段・設備対応の具体化</li> <li>・水冷却ホッパ境界部材の腐食、破損等による水没臨界の対策検討</li> <li>・複数ユニットの臨界安全性の検討(設備配置の最適化、臨界隔離壁の 採用等)</li> <li>・耐震クラス分けの機器設計への反映(フレーム強度等)</li> </ul>	<ul> <li>(その他は簡素化ペレットの酸化物に同じ)</li> <li>課題         <ul> <li>・MOX燃料と窒化物の密度の違いにより、</li> <li>核的制限値の検討が必要となる可能性がある。</li> <li>(その他は簡素化ペレットの酸化物に同じ)</li> </ul> </li> </ul>	空気を用いる。 ・ゲル化工程で生成する硝酸アンモニウムは電気透析・電解透析で 分解・回収する。 ・アルコールを使用するセルのセル内設備の接点等は防爆構造とする。 課題 ・複数ユニットでの臨界安全 ・耐震クラス分類の機器設計への反映 ・IPAは引火点約11度であり、温度または雰囲気制御による対応が 必要となる可能性がある。 ・セル内に析出する硝酸アンモニウムの取扱いについて検討が必要	<ul> <li>火災・爆発防止:</li> <li>・水素、硝酸アンモニウム及びアルコールについては、酸化物燃料に同じ</li> <li>・UN、PuNは空気中で発火するため、Arセル内で取り扱う。</li> <li>課題         <ul> <li>・複数ユニットの臨界安全性の検討。</li> <li>・耐震クラス分けの機器設計への反映(フレーム強度等)</li> <li>・IP Aの引火防止対策(温度制御等)</li> <li>・試薬回収機器内に析出する硝酸アンモニウムの取り扱い</li> <li>・欠陥被覆粒子による空気中での異常発熱の可能性</li> </ul> </li> </ul>
部	₽価	・現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。	・現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。	・現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。ただし火 災・爆発防止に関しては、洗浄用アルコール及び硝酸アンモニウムの取 扱いについて課題が残る。	・現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。ただし、複数 ユニットの臨界安全性、欠陥被覆粒子による空気中での異常発熱の可能 性等については問題が残る。

表9.1 フェーズ 中間取りまとめにおける燃料製造システム概念設計結果のまとめ(簡素化ペレット、スフェアパック)(2/3)

=	百日	簡素化^	ペレット	געד	アパック
計測		酸化物	窒化物	酸化物	
経済性	<ul> <li>・要求値:0.8</li> <li>円/kWh以下</li> <li>・目標値:16</li> <li>万円/kgHM</li> <li>以下</li> </ul>	<ul> <li>・基準システム(200t)で15.3万円/kgHMとなった(目標値を満足)</li> <li>・50t資源重視では31.2万円/kgHMとなった。</li> </ul>	・資源重視システム(200t)で18.9万円/kgHMとなった。	・基準システム(200t)で20.5万円/kgHMとなった。	・資源重視型システムで22.2万円/kgHMとなった。
	<ul> <li>・プロセス簡素化,</li> <li>機器のコンパクト化</li> </ul>	プロセス簡素化 ・簡素化プロセスの採用で、現行の粉末混合、添加剤混合工程等を削除 ・燃料要素総合検査後の洗浄工程を削除 機器のコンパクト化 ・脱硝転換設備:大型脱硝容器および合理的な核物質の移送機構の採用	プロセス簡素化 ・Pu富化度調整までは現行の粉末混合、添加剤混合工程等を削除 ・ただし、炭素熱還元工程での炭素混合等、粉末取扱工程は削除不可 ・燃料要素総合検査後の洗浄工程を削除 機器のコンパクト化 (簡素化ペレットの酸化物に同じ)	<ul> <li>・取り扱い量に応じた貯槽、装置等の寸法最適化</li> <li>・反応槽への滴下装置の複数配置によるコンパクト化</li> </ul>	・酸化物燃料に同じ。
	評価	目標達成の有無: ・2001では目標値を満足。501では目標値を約10万円/kgHM超過 ・ただし、サイクルシステム全体評価では、501経済性重視ケースにおいて 要求値0.8円/kWhを満足する。 コスト削減の可能性: ・501は2001を基準に推定した結果であり、501プラント設計検討の具体化 により、コスト削減の可能性有り。	目標達成の有無: 目標値を約3万円/kgHM超過。ただし、サイクルシステム全体として は、要求値0.8円/kWhを満足する。	目標達成の有無: ・目標額を約4.5万円/kgHM超過。ただし、サイクルシステム全体として は、要求値0.8円/kWhを満足する。 コスト削減の可能性: ・マテハンの合理化、保守通路の削減等によって、17.2万円/kgHMまで 下がる可能性がある。	目標達成の有無: ・目標額を約6万円/kgHM超過。ただし、ササイクルシステム全体として は、要求値0.8円/kWhを満足する。
資源有効 利用性	·要求値: U/TRU回収 率:99%以上	・仏国MELOXのMOX燃料製造プラントにおける実績に基づき、核物質の 廃棄物への移行を取り扱い原料の0.1%以下に抑えることにより、 UおよびPuの回収率99%は確保できるものと考える	<ul> <li>・粉末を取り扱う炭素熱還元工程の追加により、簡素化ペレットの酸化物 よりも核物質の廃棄物への移行量は増えるものと考えられる。</li> </ul>	<ul> <li>・燃料を溶液及び顆粒で取り扱うため、微粉の発生、飛散、機器への 付着が極めて少ないと考えられる。</li> <li>・燃料が飛散しやすいと考えられる振動充填工程では、被覆管口を 覆うことで飛散を防止する構造とした。</li> <li>・英国での実績として、インブットに対する製品収率&gt;99.9%、飛散の 要因となるような低密度のダストは発生しないことが報告されてい る。</li> <li>課題</li> <li>・定性的には上述の通りであるが、実測データがない。工学規模試験や モックアップ試験を通じてデータを得る必要がある。</li> </ul>	<ul> <li>・燃料を溶液及び顆粒で取り扱うため、基本的に微粉の発生、飛散、 機器への付着が極めて少なく、要求を達成できる可能性がある。 ただし、被覆工程における飛散率の確認が必要である。</li> <li>課題</li> <li>・酸化物燃料に同じ。</li> </ul>
設 計	評価	要求達成の有無: ・海外実績より、達成できるものと考える	要求達成の有無: ・酸化物燃料の粉末取り扱い、回収技術実績より、達成の可能性を 有すると考える。但し、簡素化ペレットの酸化物に比べ粉末取扱工 程が多く、核物質のロスは多くなる傾向にある	要求達成の有無: ・海外実績より要求(回収率>99%)を達成可能と考えられる。 ・ペレット法に比べ微粉の発生・飛散が少ないと考えられる。	要求達成の有無: ・要求を達成できる可能性があるが、被覆工程における飛散率の確認 が必要。
要求適合性	· 廃棄物発生 量評価 (200t/y)	評価方法: 通常運転時の酸化物二次固体廃棄物 ・モジュール単位の定期交換頻度とモジュール中の廃棄部品重量から 廃棄物重量を推定 廃止措置時の固体廃棄物 ・機器重量及び建屋躯体体積から推定	評価方法: 通常運転時の二次固体廃棄物 ・モジュール単位の定期交換頻度とモジュール中の廃棄部品重量から 廃棄物重量を推定。ただし、炭素熱還元工程は簡素化ペレット酸化物 の類似設備から類推。 廃止措置時の固体廃棄物 ・機器重量及び建屋躯体体積から推定	<ul> <li>評価方法:</li> <li>通常運転時の工程廃棄物</li> <li>・主工程及び廃液処理系の物質収支をもとに、液体廃棄物発生量を評価</li> <li>・FPのうち、アルカリ金属・アルカリ土類金属元素の全量が 廃液に移行するものとして、ガラス固化体数及び海洋放出放射能を推定</li> <li>通常運転時の二次廃棄物</li> <li>・簡素化ペレット法(酸化物)と同じ手法により廃棄物重量を推定 廃止措置時の固体廃棄物</li> <li>・簡素化ペレット法(酸化物)と同じ手法により廃棄物重量を推定</li> </ul>	評価方法: 通常運転時の工程廃棄物 ・主工程及び廃液処理系でのFPの移行率をもとに、ガラス固化される FP量を評価 通常運転時の二次廃棄物 ・部品レベルの故障率をもとに設定した定期保守頻度、予防保全を前提 とした故障頻度、保守補修によって廃棄される部品重量から廃棄物重 量を推定 廃止措置時の固体廃棄物 ・機器重量及び建屋躯体体積から推定
		発生量: 通常運転時の二次廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 8.9t/年 ・低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 5.8t/年 ・クリアランスレベル以下の廃棄物 3.8t/年 廃止措置時の固体廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 1,360t ・低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 3,510t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(金属) 34,000t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 340,000t	発生量: 通常運転時の二次廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 19.11/年 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 7.01/年 ・クリアランスレベル以下の廃棄物 5.31/年 廃止措置時の固体廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 2,5601 ・低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 4,5801 ・低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 4,5801 ・クリアランスレベル以下の廃棄物(金属) 46,0001 ・クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 470,0001	発生量: 通常運転時の工程廃棄物 ・中放射性廃液42m3/d (ガラス固化体0.5体/年、海洋放出放射能5.3×109Bq/年) 通常運転時の二次廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 10.6t/年 ・低レベル廃棄物(沈層処分並) 3.9t/年 ・クリアランスレベル以下の廃棄物 2.2t/年 廃止措置時の固体廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並)7,200t ・低レベル廃棄物(未裕深度処分並)4,100t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(金属)21,500t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート)394,500t	発生量: 通常運転時の工程廃棄物 ・中放射性廃液(ガラス固化体換算で0.25体/年) 通常運転時の二次廃棄物 ・低レベル廃棄物(地層処分並) 8.5t/年 ・低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 7.0t/年 ・クリアランスレベル以下の廃棄物 0.4t/年 廃止措置時の固体廃棄物 ・低レベル廃棄物(常裕深度処分並) 1,800t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外) 57,200t ・クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 570,000t
	・目標値: U/TRUの廃 棄物への移 行率:0.1%以 下	・仏国MELOXのMOXペレット燃料製造プラントにおける実績で、核物質の 廃棄物への移行を取り扱い原料の0.1%以下に抑えることが可能とされて いる。簡素化ペレットシステムは脱硝転換工程の合理化及び粉末混合 工程の削除により粉末取り扱い工程を削減しており、廃棄物への移行を 低減できる可能性がある。	<ul> <li>・簡素化ペレットの酸化物に比べ粉末取扱工程が多く、核物質のロスは 多くなる傾向にある</li> </ul>	英国実績(Pu30%MOX)として、ゲル化・洗浄廃液へのPu移行量は取扱い Pu1tあたり5g未満、低密度のダストは生成しないこと、インプットに対する 製品収率>99.9%であったことが報告されている。	工程廃棄物への移行率 ・酸化物燃料に同じ。ただし、被覆工程については、未検討 二次廃棄物への移行率 ・酸化物燃料に同じ。ただし、被覆設備については、未検討
	評価	目標達成の有無: ・海外実績及び簡素化ペレットシステムの特徴より達成できるものと考え られる。	  目標達成の有無: ・酸化物の粉末取り扱い技術実績より目標達成の可能性があると考え られる。	目標達成の有無: ・粉末を取り扱う工程がなく、ダスト発生を抑制でき廃棄物への移行率0.1% 以下は達成可能と考える。	目標達成の有無: ・現状の評価(被覆設備を除く)では、目標値を満足する可能性があると 考えられる。

表9.1 フェーズ 中間取りまとめにおける燃料製造システム概念設計結果のまとめ(簡素化ペレット、スフェアパック)(3/3)

河(市)百	А	簡素化ペ	、レット	271
計画項	Π	酸化物	窒化物	酸化物
核拡散抵 · 糸 抗性 単 な	純粋なPuが 単独で存在し い	・PuはUとの混合溶液として供給され、製造工程中、Puが単離される工程 は存在しない。よってPuが単独で存在することはない。	·PuはUとの混合溶液として供給され、製造工程中、Puが単離される 工程は存在しない。よってPuが単独で存在することはない。	・PuはUとの混合溶液として供給され、製造工程中、Puが単離される 工程は存在しない。ゲル化工程でもPuはUとともにゲル状沈殿を 形成し、単離されることはない。よってPuが単独で存在することはない。
·化 考	保障措置を 5慮した設計	ホールドアップ ・成型設備、研削装置など粉末飛散の可能性がある装置については、 局所カバーを行うと同時に集塵システムにより飛散微粉末を吸引・ 回収するものとしている。 計量管理(Pu量測定) ・Pu富化度調整は溶液段階で行なうことからPuは均一に分布している と考えられるため、サンプルによる成分分析値と秤量値からPu量の 把握は可能である。 課題 ・ホールドアップ対策の効果を含めた最適化について、モックアップ試験等 による事前確認試験が必要 ・保障措置精度との関係で、セル内での燃料製造に伴う機器毎の 核物質量の確定技術検討が必要	ホールドアップ ・粉末混合設備、粗成型設備、粉砕設備成型設備、研削装置など 粉末飛散の可能性がある装置については、局所カバーを行うと 同時に集塵システムにより飛散微粉末を吸引・回収するものとし ている。 計量管理(Pu量測定) ・Pu富化度調整は溶液段階で行なうことからPulは均一に分布して いると考えられるため、サンプルによる成分分析値と秤量値 からPu量の把握は可能である。 課題 ・ホールドアップ対策の効果を含めた最適化について、モックアップ 試験等による事前確認試験が必要 ・保障措置精度との関係で、セル内での燃料製造に伴う機器毎の 核物質量の確定技術検討が必要	ホールドアップ ・燃料を溶液及び顆粒で取り扱うため、微粉が発生・飛散しに〈〈、 ホールドアップは極めて少ないと考えられるため、特段の集塵設備なし で対応可能 計量管理(Pu量測定) ・Pu富化度調整は溶液段階で行なうことからPulは均一に分布して いると考えられるため、サンプルによる成分分析値と秤量値から Pu量の把握は可能である。 課題 ・ホールドアップ対策の効果を含めた最適化について、モックアップ 試験等による事前確認試験が必要。 ・セル内での燃料製造に伴う機器毎の核物質量の確定技術検討が必要
評	平価	・MBA内の核物質管理は、計算により現行と同程度の精度で見積もることが可能であると考える。ただし、機器毎の核物質量の確定は技術検討が必要である。	<ul> <li>・MBA内の核物質管理は、計算により現行と同程度の精度で見積もることが可能と考えられる。ただし、機器毎の核物質量の確定は技術検討が必要である。</li> <li>・酸化物ペレットよりホールドアップ低減性は劣ると考えられる。</li> </ul>	<ul> <li>・MBA内の核物質管理は、計算により現行と同程度の精度で見積もることが可能と考える。ただし、機器毎の核物質量の確定は技術検討が必要である。</li> <li>・ただしシステムの特徴としてホールドアップが少なく、保障措置性が高いと考えられる。</li> </ul>
その	D他			

	アパック
	窒化物(被覆粒子燃料)
	・酸化物燃料に同じ。
1	
-	・酸化物燃料に同じ ただし 被覆工程については 未検討
,	
	" 倣復工柱を味さ、 酸化初燃料に回し。

# 表9.2 フェーズ 中間取りまとめにおける乾式燃料製造システム概念設計設計結果のまとめ(バイパック、射出成型)(1/2)

並佈℡百中		バイパック	(酸化物燃料)	
町1町4月	++ 1 * -	酸化物電解対応	金属電解対応	
技術的成立 性	<ul> <li>・基本ブロセ ス成立性(要 素技術開発 状況、開発 課題)</li> </ul>	開発状況 100µm程度の球形金属Uゲッタの試作に成功 ·UO <sub>2</sub> 、PuO <sub>2</sub> 顆粒による燃料ビン製造実績(RIAR) ·MOX共析法によるビン製造実績(解体核における研究) ·UO2顆粒による充填試験(東芝) ·燃料ビン軸方向密度分布分析開発試験(JNC東海) 開発課題 ·低除染MA燃料棒の軸方向密度、およびPu軸方向分布の充填特性把握 ·Pu富化度管理の精度の把握	開発状況 ・模擬物質による有機溶剤を用いた転動造粒実験で、処理時間、有機溶剤量の確認 開発課題 ・再処理製品を所定のPu富化度燃料顆粒にする技術。 ・転動造粒における顆粒特性評価とPuスポットが生じないことの確証。 ・振動充填におけるスミア密度確保に対する実規模での確証。 ・焼結級で所定の焼結密度が得られるか今後確認が必要。	<ul> <li>開発状況</li> <li>合金の溶解性・冷却時の均一性の確認</li> <li>・U-Pu-10Zr-25MA合金及びU-Pu-Zr-10(未)</li> <li>確認。</li> <li>・アーク法により溶解後急冷したU-Pu-Zr-2M</li> <li>製造試験(射出成型)の実証</li> <li>・U-Pu-Zr合金による試験規模射出成型の海</li> <li>・U-Zr合金による実規模射出成型の国内実績</li> <li>・U-20Pu-10Zr-2.1Am-1.3Np合金の射出成型</li> <li>開発課題</li> <li>・射出成型法によるU-Pu-Zr-MA-RE合金ス5</li> <li>・製造されたスラグの均一(分散)性確認。</li> </ul>
	評価	基本プロセス成立性に関する検証が必要である。	酸化物電解法と同じ	基本的プロセスの成立性の見通しが得られた。
	·量産設備設 計/安定操業 (遠隔保守) 検討状況	量産対応 ・処理時間、臨界管理、マテリアルハンドリングを考慮した機器台数設定 遠隔保守対応 ・機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での復旧を想定している。 ・保守が必要な機器はBSM又はP.Mのアクセス性を考慮した配置とした。 課題 ・マテハン取り合い・秤量等に要する作業時間の検討、機器の故障頻度を考慮したプラント 稼働率の検討	量産対応 ・処理時間、臨界管理、マテリアルハンドリングを考慮した機器台数設定 遠隔保守対応 ・機器をモジュール化し、モジュール交換による短時間での復旧を想定している。 ・保守が必要な機器はBSM又はP.Mのアクセス性を考慮した配置とした。 課題 ・マテルン取り合い・秤量等に要する作業時間の検討、機器の故障頻度を考慮したプラント 稼働率の検討。	量産対応 ・射出成型装置、モールド除去装置及びスライ 図面作成 遠隔保守対応 ・機器をモジュール化し、モジュール交換によ 課題 ・搬送ラインと主工程設備との間で、核燃料料 ・マテハン取り合い・秤量に要する作業時間の ・上記結果を反映した実効機器能力に基づく ・遠隔保守に対応した、モジュールの取付け・
	評価	量産対応: ・機器単体能力は確認した。プラント処理能力は今後確認が必要である。 安定操業: ・清原保守に対応した機器のまジュール化設計の実証が必要である。	酸化物電解法と同じ	基本的プロセスの成立性、及び主要機器の動 とから、量産対応の可能性が示された。ただし、 設計検討が未着手である。
 安全性	現行指針類 に準拠(臨界 安全、耐震、 火災・爆発防 止)	協 開 除 引 に 対 応 じ た 低 語 の に ジ コ ー ル に 設 語 い の 実 証 い	酸化物電解法と同じ	臨界安全性 ・主工程設備について、質量管理により単一: ロックを組み合わせることにより、二重誤装 耐震 ・耐震クラスの分類基準を設定し、機器毎に分 火災・爆発防止 ・火災を生じる可能性のある物質に対して、設
	・安全上の特 徴に配慮した 設計	臨界安全性 ・単ー1=ットの臨界管理は、顆粒搬送容器が接触しないように間隔を取る(50cm)事により 担保。 火災・爆発防止 ・搬送容器形状制限による容器内燃料の過昇温の防止。 課題 ・複数ユニットの臨界安全性の検討(設備配置の最適化、臨界隔離壁の採用等)。 ・耐震クラス分けの機器設計への反映(フレーム強度等)。	<ul> <li>臨界安全性         ・単一1こットの臨界管理は、顆粒搬送容器が接触しないように間隔を取る(50cm)事により 担保。</li> <li>火災・爆発防止         ・搬送容器形状制限による容器内燃料の過昇温の防止。</li> <li>課題         ・火災を生じる可能性のある物質に対して、設備対応が今後必要。         ・乾式系での臨界事故の場合には、現状では沈静化させ得るメカニズムが考えられないので、 きわめて保守的な設計により事故発生防止対策を講じ、事故想定から除外させる必要が ある。</li> </ul>	臨界安全性 ・スラグ製造工程設備への燃料搬入出時には し、二重誤装荷及び装置内への核燃料物質 火災・爆発防止 ・Na、200 以上のU合金は空気中で発火する ・Arセル内の設備は、水及び圧縮空気を使用 (1)超音波検査は水を使用する必要があるの (2)表面除染は除染液を使用せず、乾式ブラ 課題 ・マテハン、秤量器或いはインターロック故障 ・複数ユニットの臨界安全性の検討(設備配置 ・耐震クラス分けの機器設計への反映(フレー
	評価	現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。ただし、複数ユニットの臨界安全 性の検討等については問題が残る。	現行指針類の一部の項目について、対応の可能性を示した。	現行指針類の一部の項目について、対応の可 単一ユニットの臨界安全対応、複数ユニットのE
経済性	・要求値:0.8 円/kWh以下 ・目標値:16 万円/kgHM 以下	基準システムで23.1万円/kgHMとなった。 経済重視型システムで24.2万円/kgHMとなった。	資源重視型システムで25.6万円/kgHMとなった。	基準システムで25.9万円/kgHMとなった。
	・プロセス簡 素化, 機器のコン	・炉心燃料ピンとブランケット燃料ピンの製造セルの統合 ・機器機能の統合による台数削減(振動充填装置と表面除線装置)	主工程ラインとリワークラインンを同じセルに設置(炉心ライン、プランケットライン)	モールド除去工程において、モールド除去とス 工程バッファと中間製品(スラグ・燃料ピン)貯蔵
	評価	目標達成の有無: ・目標額を約7.1万円/kgHM超過であり、サイクル全体としては0.89円/kwhとなり、さらにシステム 合理化が必要なことがわかった。経済性重視型システムでは0.59円/kwhとなり要求を満足	目標達成の有無: 目標額を約8.2万円/kgHM超過であり、サイクル全体として0.98円/kwhとなり酸化物電解サイクルシステムに比較しコスト高となる。	   目標達成の有無:   目標額を約10万円/kgHM超過。ただし、サイ・ 
資源有交       設     利用性       計     要	か·要求値∶ U/TRU回収 率∶99%以上	本システムはセル内開放系で微粉を取り扱う為。核物質ロスが懸念されるが、現状のMOX工程 (仏国MELOX)に比べ振動充填工程は簡素であること等から粉末飛散防止及び粉末回収対策 により現状MOX工程の実績である99.9%の回収と同等とする可能性があると考えられる。	2 酸化物電解法と同じ	・ANL実績を参考に、0.5%(廃モールド付着++ 物に移行するものと想定している。 ・モールド除去前に、モールド下端外周部に膜 上記移行率の低減を検討した。
が適合性	評価	要求達成の有無: ・現状の粉体取扱技術の実績(仏国MELOX等)から99%以上の回収の可能性があると考えら れる。	要求達成の有無: 酸化物電解法と同じ	要求達成の有無: ・ANL実績より、要求は達成できるものと思わ ・機器設計(モールド付着合金の回収)で、さら

出成型 満)RE合金が、アーク法により均一に溶解することを MA-2RE合金組織の均一(REは分散)性を確認。 每外実績(600本)。 責(500本)。 』を実施。 ラグ製造実証。 実機組成燃料を用いたプロセス実証が必要。 グ検査装置について、機器の動作機構を検討し、 こる短時間での復旧を想定している。 ŋ資の搬入出を行うマテハン・秤量機器の設計検討 )検討、機器の故障頻度を考慮した稼働率の検討 機器台数の設定。(建設費の増額に繋がる) 取外し機構の検討 作機構について検討し、動作の見通しが得られたこ 現状では遠隔保守に対応した機器のモジュール化 ユニットの臨界安全性を担保。(二重秤量とインター 荷の可能性を排除するものとする) う類。 備対応。 は二重秤量を実施する。また、インターロックを設置 の滞留を防止。 らため、Arセル内で取り扱う。 月しない。 ので、空気セル内で実施(Heリーク検査を先に行う) ラシによる研磨法で行う。 時における単一ユニットの臨界安全対応。 置の最適化、臨界隔離壁の採用等)。 ・ム強度等)。 能性を示した。ただし、マテハン等の機器故障時の 臨界安全性の検討等については問題が残る。 ラグせん断を同時に実施。 遺庫を兼用 フル全体での要求値0.8円/kwhは満足している。 ドロス含有 + 分析サンプル分を合わせた値)が廃棄 状に付着した合金を剥離・回収する機器設計とし、 れる。 なる低減対策を実施する必要がある。

# 表9.2 フェーズ 中間取りまとめにおける乾式燃料製造システム概念設計設計結果のまとめ(バイパック、射出成型)(2/2)

≘亚/而	百日		バイパック(	酸化物燃料)	射出亞型
百千1川。			酸化物電解対応	金属電解対応	1 オンロルビー
3	睘境負荷 氐減性	ī · 廃棄物発生 量評価(50 or 38t/y)	評価方法: 通常運転時の二次廃棄物 機器個別に寿命を定め、一定割合ずつ交換されるとの想定の下に、廃棄物重量を推定 廃止措置時の固体廃棄物 機器重量及び建屋躯体体積から推定	評価方法: 通常運転時の二次廃棄物 機器個別に寿命を定め、一定割合ずつ交換されるとの想定の下に、廃棄物重量を推定 廃止措置時の固体廃棄物 機器重量及び建屋躯体体積から推定	評価方法: 通常運転時の工程廃棄物 ・主工程の物質収支をもとに、固体廃棄物発生量を評価 通常運転時の二次廃棄物 ・保守補修によって、機器が一定割合(機器の種類により、全重量の6%/年又は2%/年)ずつ交換 されるとの想定の下に、廃棄物重量を推定 廃止措置時の固体廃棄物 ・機器重量及び建屋躯体体積から推定
設計要求			発生量: 二次廃棄物 低レベル廃棄物(地層処分並) 19.9t/年 低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 0t/年 クリアランスレベル以下の廃棄物 14.9t/年 廃止時 低レベル廃棄物(地層処分並) 450t 低レベル廃棄物(余裕深度処分並) なし クリアランスレベル以下の廃棄物(金属) 12,600t クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 118,700t	発生量: 二次廃棄物 低レベル廃棄物(地層処分並) 23.4t/年 低レベル廃棄物(余裕深度処分並) 4.0t/年 クリアランスレベル以下の廃棄物 14.9t/年 廃止時 低レベル廃棄物(地層処分並) 400t 低レベル廃棄物(治層処分並) 80t クリアランスレベル以下の廃棄物(金属) 11,400t クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 97,600t	<ul> <li>発生量:</li> <li>工程廃棄物</li> <li>廃るつぼ 3.3t/年(焼却処分されるため、固体廃棄物にはならない)</li> <li>廃モールド 9.0t/年(人工鉱物固化体の原料となるため、固体廃棄物にはならない)</li> <li>二次廃棄物</li> <li>低レベル廃棄物(地層処分並) 6.4t/年</li> <li>低レベル廃棄物(法層処分並) なし</li> <li>クリアランスレベル以下の廃棄物 3.2t/年</li> <li>廃止時</li> <li>低レベル廃棄物(地層処分並) 380t</li> <li>低レベル廃棄物(地層処分並) 110t</li> <li>クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート以外) 10,000t</li> <li>クリアランスレベル以下の廃棄物(コンクリート) 99,000t</li> </ul>
<b>う適合性</b>		·目標値: U/TRUの廃 棄物への移 行率:0.1%以 下	資源有効利用性記載と同じ	酸化物電解法と同じ	<ul> <li>工程廃棄物への移行率         <ul> <li>ANL実績を参考に、0.5%(廃モールド付着+ドロス含有+分析サンプル分を合わせた値)が 工程廃棄物に移行するものと想定             <li>モールド除去前に、モールド下端外周部に膜状に付着した合金を剥離・回収する機器設計とし、工程廃棄物への移行率の低減を検討             </li> <li>次廃棄物への移行率             </li> <li>ホールドアップが相対的に少ないシステムであり、機器の除染に特別の困難が伴わなければ、             簡素化ペレットシステムよりも移行率は小さく、工程廃棄物への移行率と比較して無視し得る             と考えられる。         </li> </li></ul> </li> </ul>
		評価	目標達成の有無: 現状MOX工程の実績である99.9%の回収技術を考慮し、廃棄物への移行率を0.1%とできる可 能性があると考えられる。	目標達成の有無: 酸化物電解法と同じ	日標達成の有無: ・工程廃棄物 + 二次廃棄物への移行率は0.5%程度となるため、目標値を満足しない。 ・機器設計(モールド付着合金の回収)で、工程廃棄物への移行率低減対策を実施する必要が ある。
1	亥拡散抵 亢性	t・純粋なPuが 単独で存在 しない	PuはMOX顆粒、MA顆粒として供給され、製造工程中、Puが単離される工程は存在しない。 よってPuが単独で存在することはない。	PuはU-Pu酸化物として供給され、製造工程中、Puが単離される工程は存在しない。よってPu が単独で存在することはない。	PuはUとの合金として供給され、製造工程中、Puが単離される工程は存在しない。よってPuが単独で存在することはない。
		·保障措置を 考慮した設 計	ホールドアップ ・燃料を顆粒で取り扱うため微粉が発生・飛散しやすいので、飛散防止、集塵回収対策を実施 する。 計量管理 ・原料顆粒はPuが不均一に分布していると考えられるため、サンプルによる成分分析値と 秤量値からのPu量の把握について今後検討する必要がある。 物流管理 ・MBA内の核物質を算出するにあたり誤差が多い。 課題 ・機器毎の核物質入出量管理が必要。	酸化物電解法と同じ	ホールドアップ ・燃料をインゴット及び棒状合金で取り扱うため、微粉が発生・飛散しに〈〈、セル内ホールドアッ ブの極めて少ない、保障措置性に優れたシステムである。ただし、るつぼ及びスラグ表面に 付着したドロス剥離時には、吸引機を用いて粉塵の飛散を防止する。 計量管理 ・原料インゴット・スラグ中にはPuが均一に分布していると考えられるため、サンプルによる成分 分析値と秤量値からPu量の把握は可能である。ただし、ロットサイズの小ささ、成分調整工程 でのPu富化度調整、各工程でのリサイクル品発生等により、評価作業量が膨大なものとなる。 物流管理 ・ロットサイズの小ささ、各工程でのリサイクル品発生等により、工程内の物流が複雑かつ膨大な ものになる。 課題 ・保障措置制度との関連において、計算法(成分分析値×秤量値)とは異なる、機器毎のPu量の 直接測定を求められた場合の対応(Puの自発核分裂または中性子照射による核分裂放射線 を検出し、Pu量を同定する等の技術開発が必要になる)
		評価	計算法により、対応は可能であると考えるが、評価作業量は膨大なものとなる。但し、取り扱う 原料が非均質なため、Pu量の確定方法は統計処理となり、精度が悪くなる。また、保障措置制 度との関連において、Pu量の直接測定を求められる場合には、新技術の開発が必要となる。	計算法により、対応は可能であると考えるが、評価作業量は膨大なものとなる。また、同一ロット 内の組成の均一性を確保する必要がある。保障措置制度との関連において、Pu量の直接測定 を求められる場合には、新技術の開発が必要となる	計算法により、対応は可能であると考えるが、評価作業量は膨大なものとなる。また、保障措置制度との関連において、Pu量の直接測定を求められる場合には、新技術の開発が必要となる。
	ዮの曲				

# 10.フェーズ の今後の進め方

フェーズ の中間評価では低除染 TRU 燃料製造システムの基本プロセスの 成立性について現段階の要素技術開発進捗状況に基づく検討を実施した。また、 施設全体(周辺設備等含む)の概念設計より経済性目標が達成可能なシステム 構成を提示し、将来のサイクルシステムのニーズに適合する可能性を示した。 さらに、高速炉サイクルを導入する段階では小規模のサイクルシステムにおい ても経済性が成立することが求められる可能性があり、今回の中間評価では湿 式再処理に対応する簡素化ペレットシステム 200tHM/年規模プラントの設備構 成を基準として、機器基数/配置の概略検討を行い 50tHM/年の生産規模の簡素 化ペレット燃料製造システムの製造コストを検討した。その結果、製造ライン 統合等の合理化が製造コスト低減に有効であることを確認した。また、乾式サ イクルシステムでは 50tHM/年の生産規模で経済性が成立する可能性を示して いるが、燃料製造システムでは目標コストを達成するための設備合理化検討が 必要であることが分かった。

フェーズ の後期においては、小規模燃料製造システムの合理化設計を要素 技術開発の成果に基づき実施し、50tHM/年の生産規模で技術的成立性等の検討 を深める。このシステム設計によりサイクルシステムのスクリーニングに必要 な、経済性等の評価データの信頼性を高める。また、概念設計を通じて将来の 先進燃料製造機器構造に対する知見を蓄積し、次の開発フェーズである工学試 験に向けての機器設計情報を整理する。

# 1.フェーズ 検討の展開と検討対象技術

1.1 フェーズ | における主要な成果

FBRサイクルの実用化戦略調査研究(以下「FS」という)のフェーズ にお いては、酸化物、金属、窒化物の3種類の燃料に対して、湿式および乾式再処理 システムを設計検討対象とした。フェーズ の主な成果を以下に示す<sup>1)~4)</sup>。

- (1) 湿式法
  - (i) 高除染U/Pu回収を目的とした従来のPUREX法\*1に対して、先進湿式法(晶 析+簡素化溶媒抽出+SETFICS/TRUEX)は大幅な経済性向上が達成され ており、200tHM/y程度の規模のプラントでその効果が顕著である。一方、 50tHM/y規模のプラントではLWRサイクル並みの経済性を達成するため には、革新的な技術等を採り入れた大幅な合理化が必要である。
  - (ii) 上記プロセスから発生するTRU廃棄物の量は、主工程のソルトフリー化
     等の効果により、従来のPUREX法の約1/5まで低減している。
  - (iii) MA回収のためのSETFICS法では、塩析剤(硝酸ナトリウム)のNaが廃 棄物側に移行するため、高レベル廃棄物(ガラス固化体)が従来のPUREX 法よりも多量に発生することになり、プロセスあるいは試薬の見直しが不 可欠である。SETFICS法に代わるシステムとしては、イオン交換法の適 用が、経済性上の効果が最も高い。
  - (iv)再処理主工程の代替システムとしては超臨界直接抽出法が、U・TRUの
     一括回収システムとしてはアミン抽出法が、各々解決すべき課題はあるが、
     経済性向上の点から魅力のある技術である。
- (2) 乾式法
  - (i)酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の3法に関し、検討を実施した。50tHM/y程度の小規模プラントでも、先進湿式法に比べていずれも高い経済性を有している。ただし、酸化物電解法と金属電解法では、LWRサイクル並みの経済性目標を達成するには、さらなる合理化努力が必要であり、処理速度の向上等による機器数削減やプロセスの合理化の可能性を今後見極めることが必要である。
  - (ii) 酸化物電解法では、従来のPUREX法よりも高レベル廃棄物(ガラス固化体)発生量が多い。これは、廃棄塩中のCsのガラス中への含有量制限によるものであり、廃棄物処理法の見直しを含めた検討が必要である。

<sup>\*1</sup> 従来の PUREX 法: FBR 燃料対象 抽出工程 1 サイクル/U 精製工程 2 サイクル/Pu 精製工程 2 サイクルの計 5 サイクルの溶媒抽出工程で構成(MA 回収工程無) 溶媒洗浄等に Na を含む試薬を使用、中低レベル濃縮廃液の 固化体を製造

- (iii) 金属燃料および窒化物燃料処理に対しての適用性は金属電解法とフッ化 物揮発法が有するが、経済性の観点からは金属電解法が優れている。
- (iv) フッ化物揮発法については、 $PuF_6$ の安定性確認等の課題が指摘された。

# 1.2 フェーズ || における設計検討の展開

フェーズⅡでは、フェーズⅠでの検討・評価結果を踏まえ、再処理システム の設計研究としては、表 1.2.1に示すように、再処理法と燃料形態との有望な組 合せとして以下を抽出し、設計検討を進めている<sup>4)</sup>。

(1) 湿式再処理システム(酸化物燃料、窒化物燃料対応)

(1-1) 先進湿式法(晶析法+簡素化溶媒抽出法+MA回収システム)

(1-2) 代替·補完技術

(①超臨界直接抽出法、②アミン抽出法、③イオン交換法)

(2) 乾式再処理システム

(2-1) 酸化物電解法(酸化物燃料対応)

(2-2) 金属電解法(酸化物燃料、金属燃料、窒化物燃料対応)

なお、フッ化物揮発法については、フェーズ I 評価でPuF<sub>6</sub>の安定性確認等の 課題が指摘され、国内外で実施される研究の進み具合を調査していく技術と判 断されたため、LWR再処理への適用を念頭にしたFLUOREX法等の動向をフォ ローし、再評価する。

また、その他の再処理技術として、ハイブリッド再処理システム、窒化物燃料を対象としたLINEX法についても調査、検討および評価を行う。

さらに、本編では再処理システムと燃料製造システムを一体化した燃料サイ クルシステムとしての技術評価も実施する。その組合せについてはプロセス特 性等を考慮した適切な組合せとして以下とする。

(1)湿式法 +ペレット法(酸化物燃料、窒化物燃料対応)

- (2)湿式法 +振動充填法(酸化物燃料)
- (3)湿式法 +被覆粒子法 (窒化物燃料対応)
- (4)酸化物電解法+振動充填法(酸化物燃料対応)
- (5)金属電解法 +射出成型法(金属燃料対応)
- (6)金属電解法 +振動充填法 (酸化物燃料)
- (7)金属電解法 +ペレット法 (窒化物燃料対応)

フェーズⅡにおける設計検討の展開について、その概要を湿式法について図 1.2.1に、乾式法について図 1.2.2に示す。

湿式再処理システムの設計検討については、2003年度末の中間評価までに、 超臨界直接抽出法並びにMA回収システムとしてソルトフリー化を図った改良 SETFICS法、およびその代替技術としてアミン抽出法、イオン交換法について 技術的成立性の評価と期待される効果の定量化を行い、それらの比較評価を踏 まえてリファレンスシステムとして検討すべき技術を選定し、システム設計と 設計要求に対する適合性を評価した。2004~2005年度の最終評価までの期間では、要素技術開発成果を反映し、原子炉プラントシステムと整合した燃料製造と一体化した全体システムの設計詳細化と総合評価を行うとともに、フェーズ Ⅲ以降の開発計画を検討・策定する。

乾式再処理システムの設計検討については、2003年度末の中間評価で、各シ ステムの優劣評価に資するための設計目標を達成しうるシステムの構築に見通 しをつける。2004~2005年度の最終評価までの期間では、要素技術開発成果を 反映し、原子炉プラントシステムと整合した燃料製造と一体化した全体システ ムの設計詳細化と総合評価を行うとともに、フェーズⅢ以降の開発計画を検 討・策定する。

また、炉側の検討結果をも踏まえ、有望なFBRサイクルシステム概念として 抽出された22ケースの炉とサイクルの組み合わせに対して、リファレンスシス テムの検討結果等をベースにしてシステム評価を行った。

# [参考文献]

- 田中 博,他:"再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- 2) 西村友宏,他:"再処理システムに関する設計評価",サイクル機構技報,No. 12別冊(2001).
- H. Tanaka, et al. : "Design Study on Advanced Reprocessing Systems for FR Fuel Cycle", GLOBAL 2001, France, Paris (2001).
- 4) 佐藤浩司,他:"再処理システム技術検討書 FBRサイクルの実用化戦略調査研究(フェーズⅡ) 平成13年度成果報告",JNC TY9400 2002-019 (2002).

再処理システム	湿式	乾式		
燃料形態	先進湿式法	酸化物電解法	金属電解法	
酸化物燃料	0	0	0	
金属燃料	_	_	0	
窒化物燃料	0	_	0	

表 1.2.1 フェーズⅡにおける燃料形態と再処理システムの検討対象



図 1.2.1 フェーズⅡにおける設計検討の展開 /湿式法



図 1.2.2 フェーズⅡにおける設計検討の展開 / 乾式法

# 2. 設計要求とその対応方針

### 2.1 基本方針

FSにおいては、安全性確保を前提とし、優れた経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性等を有する燃料サイクルシステムを開発することを目標としている。

フェーズIIのシステム設計においては、フェーズIの成果を踏まえつつ、要素技術開発のR&D成果も取込み、システムの技術的成立性に十分留意した設計 を進めるものとし、適正なプロセスの構築、主要機器の概念設計、プラントの 操業性を考慮した配置設計、燃料製造と一体化した施設設計を行い、経済性等 に対する技術評価を行う。

以下に各燃料サイクルシステムの基本概念を検討するに際しての、設計要求 事項、設計条件および対応方針を示す。

### 2.2 設計要求事項

本項では、再処理システムの設計にあたっての基本的な考え方、および設計 の要求値(リファレンス設計において最低限達成すべき値)と、目標値(各シ ステムの特長を活かして目指すべき目標の目安となる値)を記した。なお、目 標値を目指した設計においては、必ずしも全ての項目を達成することが要求さ れるものではない。また、目標値は上限を示すものではなく、システムの特長 を活かすために目標値より高い目標を目指すことを妨げるものではない<sup>1)</sup>。

設計要求の内容は以下の通りであり、設計要求に基づく要求値と目標値については表 2.2.1<sup>2)</sup>に示す。

2.2.1 全般

(1) 適用規格

これまでの再処理/燃料製造施設設計に適用された規格・基準類に準拠する。

(2) FP 混入率

フェーズIで検討した各再処理手法について「1.2wt%以下」を要求値として 設定する。

2.2.2 安全性

深層防護の考え方を基本として、FBRシステムと相俟って同時代のLWRサイ クルシステムと同等以上の安全性を確保するとともに、各システムの特長を踏 まえた安全性確保方策の実現を目標とする。

(1) 安全要求

(i) 決定論的安全要求

開発目標で設定した高い安全性を確保するために、異常発生要因を極力排除 した簡素なプロセス概念を追求する。また、内在する放射性物質の形態・性状 および量に応じて、異常の拡大防止および終息、放射線の遮蔽および放射性物 質の閉じ込め機能に、十分な信頼性を確保する設計概念とする。さらに、大量 の放射性物質が制御されずに機器からセルまたは建家内へ放出あるいは排気系 へ移行する事象(これを、ここでは「施設内での大規模放出事象」と呼ぶ)を 仮想したとしても放射性物質の閉じ込め能力を確保し、その影響を周辺環境に 有意に及ぼさない設計とする。
(ii) 確率論的安全要求

決定論的安全要求を補完する目的で、当面の要求を次のように定める。

「施設内での大規模放出事象」の発生頻度を適切に抑制する(目標値として プラント当たり10<sup>-6</sup>/年以下(暫定))とともに、本事象を想定しても、閉じ込 め機能に対して非信頼度を十分低く(目標値として1/100以下(暫定))維持す ることを目指す。

(2) 安全設計の基本原則の遵守

使用する物質の物理・化学的な特性等、プロセス概念が有する安全上の特徴 を考慮しつつ、現行および現在検討中の再処理施設・MOX燃料製造施設に適用 される法令、規格、基準、指針類等に準拠した設計とする。なお、適用範囲外 の設計とする場合には、その考え方を明確にする。

(3) 安全設計における個別留意事項

安全性確保方策の検討にあたっては、以下のシステムの特徴に留意する。

- (i) 湿式法
  - ・配管で接続されたシステムであるため、配管を介して通常の経路外の場所に核分裂性物質が集中する可能性があること。
  - ・処理温度が常温(水溶液の凝固点~沸点程度)であること。
  - ・減速系で核分裂性物質を取扱うこと。
  - ・可燃性または爆発性の物質(抽出溶媒、試薬およびその劣化物、錯体等) を取扱うこと。
  - ・水溶液系での放射線分解で水素が発生すること。
- (ii) 乾式法
  - ・バッチ処理であり、一度に取扱う核分裂性物質の量が制限されること。
  - ・非減速系で核分裂性物質を取扱うこと。
  - ・核分裂性物質を含む機器の開放操作が必要なこと。
  - ・処理温度が高温であること。
  - ・金属状の核分裂性物質を取扱う場合があること。
  - ・腐食性のガスを取扱う場合があること。
- 2.2.3 経済性

FBRの実用化段階において、将来の軽水炉サイクルシステムとの競争力を有 することを目標とし、さらに国際的展開も視野に入れ、より高い経済性を目指 す。

具体的には、第一段階としてフェーズ I と同様の手法で評価した燃料サイク ル費の要求値として「1.1円/kWh以下」、そのうち再処理費+燃料製造費として 「0.8円/kWh以下」を設定する。

また、第二段階として、海外における発電単価の動向を視野に入れ、経済性 に関する国際的水準を達成する見通しを得ることを目指す。

プラント稼働率は、設計および運転実績に乏しい現状を考慮して「年間200日 間、機器が100%の稼働率で稼動する」ものとして設計を行い、この日数で定格 容量を処理できる機器構成とする。

プラント寿命は、建屋(セルライナを含む)を40年とし、内装機器について は個別に交換頻度を評価する。

2.2.4 環境負荷低減性

FBRサイクルの特長を活かして、軽水炉およびFBRサイクルで生じる放射性 廃棄物中の長寿命核種の分離・核変換により、最終処分される廃棄体量の低減 や処分場の合理化につながる可能性を追求することを目標とする。

通常運転時の環境放出放射能については、「単位発電量あたりの放出量がLWR 再処理施設およびMOX燃料製造施設の承認申請書・許可申請書記載値に対して 同等以下」を要求値として設定し、これを極力削減することを目指す。

通常運転時の放射性廃棄物は、最終処分に適合した形態とする。また、その 発生量については、各処分区分毎の発生体積、およびこれに処分場の負荷に応 じた重みを掛けたものを指標とし、それぞれの指標について要求値として「単 位発電量あたりの発生量がLWR再処理施設およびMOX燃料製造施設と同等以 下」と設定し、目標値としてこれを「1/10に削減」することを目指す。

高レベル廃棄物の放射能毒性低減のため、TRUの放射性廃棄物への移行率低 減および長寿命FP等の分離回収・リサイクル等の可能性について検討する。

UおよびTRUの放射性廃棄物への移行率は、目標値として0.1%を目指す。

分離回収・リサイクル等の対象とする元素はI、Tc、Cs、Srとし、放射性廃棄 物への移行率の目標値を、リサイクルの対象となる「I、Tcについては1~0.1%」、 発熱核種である「Cs、Srについては1%」とする。

また、廃止措置のし易さ(解体性)と廃止に伴う廃棄物発生量の少ない設計 を目指す。

2.2.5 資源有効利用性

UおよびTRUの有効利用のため、これらの放射性廃棄物への移行率をできる 限り低くすることを目標とする。 具体的には、U、TRUの放射性廃棄物への移行率の要求値としてそれぞれ「1% 以下」を設定する。

2.2.6 核拡散抵抗性

保障措置および核物質防護への対応を考慮した設計とし、これらの制度の運 用の効率化や制度に係わる負荷を軽減することを目標とする。

具体的には、各プロセスの特長を活かして、遠隔監視、自動化技術等による 制度の運用の効率化や、各プロセスにおいて純粋なPuが単独に存在することが ない設計等による制度対応の負荷軽減を目指す。

また、現行および現在検討中のLWR再処理施設およびMOX燃料製造施設にお ける計量管理手法、核物質防護手法等の適用が困難もしくは合理的でない場合 には、システムの特徴に整合する手法とその考え方を提案する。

2.2.7 運転·保守補修性

運転・保守補修性に配慮した設計とし、運転・保守補修に対する考え方を明 確にする。

保守補修を要する機器については、保守・補修区分を検討し、必要なアクセ スルートや保守・補修スペースを確保するとともに、作業員の被曝低減を図っ た設計とする。

また、運転の簡素化、自動化、運転制御系の高度化、メンテナンスし易い設 計等により、運転・保守作業におけるヒューマンエラーの防止、保守作業量の 低減、運転員・保守員の省力化、保守作業員の被曝低減を図る。

2.2.8 技術的成立性

設計根拠としての裏付けデータを踏まえたシステムを構築する。

百日		設計要求		
坝日		口描述	<b>西</b>	
		日 悰 旭 (各システムの特長を踏まえて目指すべき値)	安水旭 (リファレンス設計で満たすべき値)	
全般	適用規格	_	これまでの再処理/燃料製造施設設計 に適用された規格・基準類に準拠	
	FP 混入率	-	フェーズ I で検討した各再処理手法に ついて 1.2wt%以下(酸化物で 2vo1% 以下)	
安全性		-	LWR 再処理施設・MOX 製造施設と同等以 上	
経済性	再処理費+ 燃料製造費	(グローバルスタンダードに基づき設 定)	0.8円/kWh以下 (輸送費等を含む燃料サイクル費は 1.1円/kWh以下)	
環境負荷低減性	環境放出放射能	_	単位発電量あたり LWR 再処理施設・MOX 製造施設と同等以下	
	処分区分毎の廃 棄物発生量の合 計	単位発電量あたり LWR 再処理施設・MOX 製造施設の 10%以下	単位発電量あたり LWR 再処理施設・MOX 製造施設と同等以下	
	処分場の負荷に よる重みを掛け た廃棄物発生量 の合計	単位発電量あたり LWR 再処理施設・MOX 製造施設の 10%以下	単位発電量あたり LWR 再処理施設・MOX 製造施設と同等以下	
	U・TRU の廃棄物 への移行率	0.1~0.01%	-	
	FP の廃棄物 への移行率	リサイクル対象元素(I、Tc) 0.1~1% 発熱元素(Cs、Sr)1%	プロセス固有の方法で回収できる範囲 で回収	
資源有効利用性	U・TRU 回収率	_	U・TRU 回収率 各 99%以上	
核拡散抵抗性		(可能な限りの向上を努力目標とする)		
運転・保守補修性		—	(設定値) 年間稼動日数 200 日/年以上	
技術的成立性		-	裏付けデータの存在	

### 表 2.2.1 燃料サイクルシステムの設計要求に基づく設計目標

### 2.3 設計条件と進め方

2.3.1 設計検討の着眼点と進め方

検討対象となる燃料形態は酸化物、金属、窒化物の3種類であるが、まずこ れまでで経験が最も多い酸化物燃料サイクルに着目して、湿式および酸化物燃 料再処理に適すると考えられる乾式酸化物電解法について検討を行う。これと 並行して固有の特徴を持つ金属燃料サイクルについては乾式金属電解法につい て検討を行うものとし、金属電解法については酸化物燃料への適用の検討を加 える。これらをリファレンスシステムとして、フェーズIIにおける設計検討を 進める。

- (1) 酸化物燃料対象先進湿式再処理法
- (2) 酸化物燃料対象酸化物電解法(乾式再処理法)
- (3) 金属燃料対象金属電解法(乾式再処理法)
- (4) 酸化物燃料金属電解法(乾式再処理法)

上記の各リファレンスシステムの設計検討では、想定した再処理製品を回収す るべくプロセスを構築し、物質収支、廃棄物発生量、機器・設備仕様等の概略 設計検討を行う。その後、施設設計として施設内の機器配置設計を行い、施設 全体の物量を把握した上で経済性等の技術評価を行う。

次に窒化物燃料への適用として、以下のシステムについて、リファレンスシ ステムの設計をもとに同様のシステム設計と技術評価を行う。

- (5) 被覆粒子窒化物燃料対象先進湿式再処理法
- (6) ペレット窒化物燃料対象先進湿式再処理法
- (7) ペレット窒化物燃料対象金属電解法(乾式再処理法)

次項に各システムにおける設計条件の詳細を示す。

さらに、多様な燃料サイクルシナリオにおける燃料サイクルシステムについても評価するものとし、2.3.2(3)項に示す主要な検討項目についてリファレンスシステムでの設計検討結果をもとに考察する。

なお、2.3.2 の設計条件に示すリファレンスシステム設計検討用の炉心・燃料 仕様は、フェーズⅡ開始時に燃料サイクルシステムの設計検討に先立ち、原子 炉プラントシステムより提示されたもの(以下「フェーズⅡ検討用炉心・燃料 仕様」という)である。したがって、原子炉プラントシステムでは並行して設 計検討を進めているため、設計検討の進捗で炉心・燃料仕様がより最適化され ており、FS中間報告時に原子炉プラントシステム側が選定した炉心・燃料仕様 は燃料サイクルシステム側が設計検討を進めた炉心・燃料仕様と異なったもの になっている。そこで、燃料サイクルシステムの検討では、多様な燃料サイク ルシナリオにおける燃料サイクルシステムの評価の一つとして、原子炉プラン トシステムにおいて多面的評価向けのFBRサイクル候補概念に選定した炉心・ 燃料仕様(以下「多面的評価向炉心・燃料仕様」という)に基づく燃料サイク ルシステムの考察を行うものとする。

2.3.2 設計条件

(1) リファレンスシステム設計条件

酸化物燃料または金属燃料を用いるナトリウム冷却炉(資源重視型炉心)に ついて、検討に用いた炉心・燃料仕様(フェーズII検討用炉心・燃料仕様)を 示す。

(i) プラント構成

使用済燃料の再処理と燃料製造の機能を有する単一の施設を検討した。燃料 の種類、処理技術および設計作業を行った処理規模を表 2.3.1に示す。ここで、 処理規模は新燃料中の重金属(HM、UおよびTRU)の重量を表す。金属燃料に ついては、年間発電量において50 tHM/yの酸化物燃料処理に相当する処理規模 とした。

使用済燃料の一時貯蔵設備については、1年分の処理に相当する燃料集合体を 貯蔵できるものとした。

稼働率が低いことが予想され、将来的に他の施設との共用が期待される設備 については、別の建屋を設けることを許容した。

(ii) 処理対象燃料

出力規模1.5GWeの大型2領域均質炉心のFBR燃料を再処理の対象とした。酸 化物燃料炉心と金属燃料炉心の概念を図 2.3.1と図 2.3.2にそれぞれ示す。炉心 の基本仕様、特性、集合体および燃料要素の仕様、領域平均燃焼度、集合体最 大燃焼度をそれぞれ表 2.3.2から表 2.3.6に示す。増殖比は1.2(資源重視型)、 使用済燃料の炉外冷却期間は4年とした。

使用済燃料の組成を表 2.3.7に示す。

(iii) 製品仕様

再処理製品の仕様を表 2.3.8に示す。

(iv) 廃棄物の取り扱い

核分裂生成物は原則としてガラス固化体とする。その他の廃棄物は処分に適当 と考えられる形態の廃棄体に加工する。FSの廃棄物評価のために暫定的に設定 した廃棄物の分類を

表 2.3.9 および表 2.3.10 に示す。

なお、

表 2.3.9 に示した分類に関し、現在検討が進められているわが国における放射 性廃棄物の分類と処分方策との対比を表 2.3.11 に示す。

(v) 施設設計

施設設計の条件を表 2.3.12に示す。施設の稼働率は 200日/y(稼働率100%) とする。施設内の区域区分を表 2.3.13に示す。

(2) システム設計検討条件

窒化物燃料を用いるヘリウムガス冷却炉と鉛ビスマス冷却炉について、検討 に用いた燃料仕様を示す。

(i) 鉛ビスマス冷却炉燃料

鉛ビスマス冷却炉ではペレット燃料を検討に用いた。炉心部の高さは70cm、 軸ブランケットは下部のみ有し、ボンド材はHeである。

評価対象とした鉛ビスマス冷却炉の炉心基本仕様、特性、集合体および燃料 要素の仕様、領域平均燃焼度についてはそれぞれ付録1の付表 1.16~付表 1.19に示す。

(ii) ヘリウムガス冷却炉燃料

ヘリウムガス冷却炉ではUとPuの混合窒化物粒子をTiNで二層に被覆した被 覆粒子燃料を検討に用いた。被覆粒子燃料は、窒化物燃料(MN)を核に、内側 のTiN 被覆は低密度とし、FPのプレナムとしての機能を持たせ、外側のTiN被 覆は高密度とし、FPの放出防止機能を持たせている。被覆粒子燃料の仕様を表 2.3.14に示す。

被覆粒子燃料はSiCの二重管内に充填し、二重管の内側から外側へとHe冷却 材が流れる。被覆粒子燃料を充填した二重管を燃料コンパートメントと呼ぶ。 燃料コンパートメントに金属製のダクトを接合して燃料集合体とする。燃料コ ンパートメントの構造を図 2.3.3に示す。炉心部の高さは180cmで、上下に軸ブ ランケットを有する。

評価対象としたヘリウムガス冷却炉の炉心基本仕様、特性、集合体および燃

料要素の仕様、領域平均燃焼度についてはそれぞれ付録1の付表 1.24~付表 1.27に示す。

(3) 多様な燃料サイクルシナリオへの対応評価

リファレンスシステムでの設計検討結果をもとに、以下に示す様々な燃料サ イクルシナリオにおける各再処理システムの成立性と特徴について検討する。

(i) 増殖比の効果

リファレンスシステムの設計検討では、FBR導入時を考慮した増殖比1.2(資源重視型)の使用済燃料を対象としている。しかしながら、FBR導入後の平衡期においては可能な限り余剰Puを保有しないことを目的に、増殖比1.0をわずかに上回る炉心・燃料仕様(経済性重視型)についても検討がなされている。ここでは、増殖比1.2の炉心・燃料仕様(フェーズ 検討用炉心・燃料仕様)をベースに、径ブランケットを削除することにより増殖比を1.05にした炉心・燃料 仕様に基づく再処理システムについて評価する。本仕様に基づく酸化物燃料および金属燃料の使用済燃料組成を表 2.3.15に示す。

(ii) LWR から FBR への移行期における施設のあり方

FBRの導入シナリオにおける軽水炉から高速炉への移行期では、比較的小規 模なFBRサイクル用のプラントが必要とされるシナリオの他に、本来の処理対 象燃料でありFBR使用済燃料が少ないため、軽水炉使用済燃料も再処理するシ ナリオも考えられる。ここではFBRサイクル用プラントで軽水炉使用済燃料を 処理する場合について検討し、経済性への影響の他にその時の施設のあり方に ついて考察する。検討の対象とした軽水炉使用済燃料のUO<sub>2</sub>およびMOX組成を それぞれ表 2.3.16に示す。

(iii) FP 回収・リサイクル/貯蔵に関する再処理システム評価

FSでは環境負荷低減性の観点から、廃棄物発生量をできるだけ減らす必要が ある。そこで、長寿命元素であるI、Tcと、高レベル固化体の発生本数に大きく 影響を及ぼす高発熱元素であるCs、Srの分離・回収技術について検討する。

また、湿式法ではCmの遅延サイクルシステムについても検討する。

(iv)多面的評価向け炉心・燃料仕様における再処理システム評価

2.3.1項にて記したようにFBR燃料サイクルとして、原子炉プラントシステム と燃料サイクルシステムとで整合したFBRサイクル候補概念の評価を行うこと を目的として、FS中間報告時の多面的評価向けに選定した、資源重視型と経済 性重視型それぞれの炉心・燃料仕様(多面的評価向炉心・燃料仕様)について 再処理システムの評価を行う。評価対象ケースは全22ケースで各ケースの炉心 の基本仕様、特性、集合体と燃料要素の仕様、および領域平均燃焼度をそれぞ れ付録1に示す。本評価については10.1項にて記すが、一部の主要ケースについ ては各再処理システムの章にも記すものとする。

(v) その他

上記以外で、リファレンスシステムでの設計検討結果等を踏まえて、各再処 理技術で個別に評価を加えたものについては本項に記するものとする。

#### 表 2.3.1 燃料の種類と処理技術

燃料の種類	処理技術	処理規模, tHM/y
酸化物	湿式再処理、	50, 200
	ペレット燃料/振動充填燃料製造	
酸化物	乾式再処理、振動充填燃料製造	50
金属	乾式再処理、射出成型燃料製造	38

注) ここで、処理規模は燃料製造における処理規模を起点として示している。本設 計研究では、上記処理規模に基づき製造された新燃料が炉で燃やされ使用済燃 料となり、全量再処理されるものとしている。したがって、再処理では炉にお ける燃焼に伴い HM 量が減少している。また使用済燃料中の Pu 量は炉の増殖 性能により新燃料より増大しており、リサイクルを考える際に燃料製造の処理 規模以上の Pu が余剰に発生することになる。これは評価上発生するものであ り、実プラントにおいては当然ながら適切な Pu バランスが図られる。故に、 ここでは余剰 Pu について設備対応を実施しないものとする。

項目	酸化物燃料炉心	金属燃料炉心
電気出力	1,500 MWe	1,500 MWe
熱出力	3,570 MWth	3,900 MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心
運転サイクル長さ	17ヶ月	18ヶ月
炉心取出平均燃焼度(目標値)	15万MWd/t	15万MWd/t
増殖比(目標値)	1.2	1.2
集合体数		
内側炉心燃料	316 体	276 体
外側炉心燃料	266 体	138 体
径方向ブランケット燃料	198 体	78 体
主炉停止系	40 体	30 体
後備炉停止系	15 体	7 体
集合体配列ピッチ	179.7 mm	197.7 mm
炉心高さ	80 cm	85 cm
炉心等価直径	480 cm	440 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4/4	4/4
サイクルあたりの燃料交換体数 (内側炉心/外側炉心/径ブランケット)	約 79/66/50	約 69/35/20
TRU組成	*1に示す通り	*2に示す通り
U組成 (U-234/U-235/U-236/U-238)	-/0.3/-/99.7 wt%	0.06/0.01/0.03/99.9wt%

表 2.3.2 炉心の基本仕様

\*1 : Pu-238/ Pu-239/ Pu-240/ Pu-241/ Pu-242/ Np-237/ Am-241/ Am-243/ Cm-244  $= 1.1/\ 54.1/\ 32.1/\ 4.3/\ 3.9/\ 0.5/\ 2.0/\ 1.0/\ 1.0\ wt\%$ 

\*2: Pu 組成:Pu-238/Pu-239/Pu-240/Pu-241/Pu-242 = 1/ 68/ 26 / 2.5/ 2.5 wt%

MA 組成:Np-237/ Am-241/ Am-242m/ Am-243/ Cm-243/ Cm-244/ Cm-245 = 13/ 52.5/ 1.5/ 18/ 0.2/ 12/ 2.8 wt%

項目	酸化物燃料炉心	金属燃料炉心
TRU富化度(内側炉心/外側炉心)	22.1 / 26.1 wt%	12.7 / 17.7 wt%
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu富化度*1	21.1 / 24.9 wt%	12.3 / 17.2 wt%
MA量	1.0 / 1.2 wt%	0.4 / 0.5 wt%
希土類FP混入量	1.3 / 1.3 wt%	0.3 / 0.3 wt%
増殖比	1.17	1.19
燃焼反応度	3.1 %⊿k/kk′	-0.1 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	149,000MWd/t	149,400MWd/t
炉心平均出力密度(BOEC)度*2	$246 \text{ W/cm}^3$	$298 \text{ W/cm}^3$
炉心平均線出力 (BOEC)*2	254 W/cm	304 W/cm
炉心部Naボイド反応度 (ラッパ管内ボイド)	約 5.7 \$	約 7.9 \$

表 2.3.3 主な炉心特性

\*1:Pu富化度=Pu/(U+Pu+MA)

\*2:平衡サイクル初期

F

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
酸化物	集合体		
	燃料要素本数	271 本	127 本
	燃料要素配列ピッチ	10.03 mm	14.56 mm
	全長	4,370 mm	4,370 mm
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	外対面幅	176.7 mm	176.7 mm
	肉厚	4.4 mm	4.4 mm
	スペーサ 型式	ワイヤ	ワイヤ
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	ワイヤ径	1.48 mm	1.50 mm
	ワイヤ巻付ピッチ	200 mm	200 mm
	燃料要素		l.
	全長	2,905 mm	2,905 mm
	スタック長	_	1,500 mm
	炉心燃料	800 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下) *	350 mm/ 350 mm	_
	ガスプレナム位置と長さ	下部、1020 mm	下部、1020 mm
	ボンド材	Не	Не
	型式	一体密封型	一体密封型
		ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	8.5mm	13. 0mm
	肉厚	0. 5mm	0. 55mm
金属	集合体		I.
	燃料要素本数	331 本	127 本
	燃料要素配列ピッチ	9.95 mm	16.02 mm
	全長	4,600 mm	4,600 mm
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	外対面幅	191.7 mm	191.7 mm
	肉厚	4.0 mm	4.0 mm
	スペーサ 型式	ワイヤ	ワイヤ
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	ワイヤ径	1.39 mm	1.21 mm
	ワイヤ巻付ピッチ	250 mm	250 mm
	燃料要素		I.
	全長	2,670 mm	2,670 mm
	スタック長	_	1,150 mm
	炉心燃料	850 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	150 mm/ 150 mm	_
	ガスプレナム位置と長さ	上部、1,450 mm	上部、1,450 mm
	ボンド材	Na	Na
	型式	一体密封型	一体密封型
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	8. 5mm	14.8mm
	肉厚	0. 5mm	0. 5mm

### 表 2.3.4 集合体および燃料要素の仕様

\* 中央部の 37 ピンは削除。(軸ブランケット無)

領  域	酸化物燃料炉心	金属燃料炉心
内側炉心	170, 000	157, 700
外側炉心	124, 000	132, 900
軸方向ブランケット	20,000	26, 600
径方向ブランケット	4, 300	10, 500
炉心平均	149,000	149, 400
炉心・軸方向ブランケット平均	89, 400	117, 400
全体平均	63, 100	94, 200

# 表 2.3.5 領域平均燃焼度 (MWd/t)

# 表 2.3.6 集合体最大燃焼度 (MWd/t)

項目	酸化物燃料炉心	金属燃料炉心
内側炉心燃料		
炉心部	182, 000	162, 500
軸ブラ (上部/下部)	(平均) 25,100	25, 900/40, 400
外側炉心燃料		
炉心部	189, 000	166, 100
軸ブラ (上部/下部)	(平均)20,700	19,800/29,100
径方向ブランケット	11, 800	14,000

	新燃料1tHM 当りの質量 ( kg/tHM)			
元素	酸化	比物	金属	
	炉心+軸方向		炉心+軸方向	
	ブランケット合計	径万向フランケット	ブランケット合計	径万向フランケット
U	5. 37E+02	3.01E+02	5. 94E+02	2.06E+02
Pu	8.85E+01	6. 24E+00	9. 15E+01	8. 60E+00
Np	3 22F-01	9 24F-03	3 63F-01	2 31F-02
Δm	3 18E+00	1 53E-03	2 02E+00	4 67E-03
Cm	9.37E-01	-	4 15E-01	1 20E-06
Sub total	6 30E+02	3 08E+02	4.10E 01	2 15E+02
Н	0.00E+02	0.00E+02	1 46E-04	2.10E-02
	9.07E 03	4. 92L 07	1.402 04	5.092.00
Bo	0.50E 07	1 11E_00		_
De C	2. JOL 07	1.055-10		
0 7n	4.40E-00	7.67E_12		
	0. 2/E-11	1.075-13	-	
da 0-	1.04E-00	1. 20E-11	-	
Ge	1. /8E-03	1.44E-05	-	
As	5.32E-04	5. 1/E-06	-	
5e	6. 40E-02	4. /8E-04	1.29E-01	3. 2/E-03
Br	1.98E-02	1.86E-04	4. 22E-02	1. 12E-03
Kr	3.9/E-01	2.5/E-03	6. /2E-01	1.82E-02
Rb	3. 48E-01	2. 22E-03	5. //E-01	1.59E-02
Sr	7. 34E-01	4.94E-03	1.15E+00	3.16E-02
Y	4. 12E-01	2.82E-03	7.14E-01	1.82E-02
Zr	4. 29E+00	2. 30E-02	7. 01E+00	1.87E-01
Nb	6.61E-06	1.67E-08	1. 04E-05	1.64E-07
Mo	5. 23E+00	2. 37E-02	8. 34E+00	2. 15E-01
Tc	1.29E+00	6. 15E-03	2. 08E+00	5. 73E-02
Ru	4. 82E+00	1.87E-02	7. 93E+00	1.94E-01
Rh	1.42E+00	5.86E-03	2. 40E+00	6.50E-02
Pd	4. 22E+00	1.05E-02	6. 43E+00	1. 42E-01
Ag	3.89E-01	8.58E-04	6. 62E-01	1.52E-02
Cd	3. 59E-01	2.33E-03	4. 56E-01	8. 14E-03
In	1.67E-02	4. 47E-04	2.73E-02	6. 69E-04
Sn	3.04E-01	3. 17E-03	3. 40E-01	7.78E-03
Sb	7. 43E-02	9.66E-04	7. 49E-02	1.88E-03
Te	1.05E+00	5. 53E-03	1. 70E+00	4.16E-02
I	5.65E-01	3.18E-03	9. 04E-01	2. 32E-02
Xe	7. 49E+00	3.11E-02	1.24E+01	3.13E-01
Cs	6. 04E+00	2.50E-02	9.95E+00	2.57E-01
Ba	2.65E+00	9.65E-03	4. 22E+00	9. 78E-02
La	1.92E+00	8. 48E-03	3. 28E+00	7. 77E-02
Се	3. 47E+00	1.51E-02	6. 08E+00	1.44E-01
Pr	1.79E+00	7. 49E-03	3. 03E+00	7. 31E-02
Nd	1.07E+01	2.87E-02	1.01E+01	2. 43E-01
Pm	9.13E-02	6.74E-04	1.87E-01	5.60E-03
Sm	1.85E+00	7.99E-03	2. 93E+00	6. 93E-02
Eu	1.84E-01	7.85E-04	3. 33E-01	8. 11E-03
Gd	2. 17E-01	4. 50E-04	3. 70E-01	6. 85E-03
Tb	1. 27E-02	2. 81E-05	1.85E-02	4. 64E-04
Dv	1, 25F-02	1.86F-05	2.08F-02	3, 19F-04
Но	3 01F-04	9 15F-07	6. 38F-04	1, 24F-05
Fr	4 18F-04	8 44F-07	7 32F-04	1 11F-05
Tm	2 36F-07	7 93F-13	1 88F-07	1 99F-10
Yh	8 30F-08	7 61F-15	7 85F-08	2 65F-11
Sub total	6 24F+01	2 53F-01	9 46F+01	2.30E 11
Total	6 92F+02	3 08F+02	7 83F+02	2.01E+00
10101	U. JLL VL	0. UUL ' VZ	7. UUL'UZ	2. I/L'VZ

表 2.3.7 使用済燃料の組成(新燃料 1t 当たり)

TE FI	仕様			
項目	湿式法	乾式-酸化物電解法	乾式·金属電解法	
再処理製品	・U 製品	・U 製品	・U 製品	
	・U-TRU 製品*1	・U-Pu-Np 製品	・U-TRU 製品	
		・Am-Cm 製品 *2		
FPの回収	• Cs-Sr *3	• Cs	• Cs	
	• Tc	• Sr	• Sr	
	٠I	• Tc	• Tc	
		٠I	٠I	
Puを含む最終製品中の	• 21.1/24.9% *4	• 30 %	• 70 %	
Pu富化度				
除染度	・FP について 1.2 wt%	以下		
回収率	• U , Pu, Np, Am, Cm :	99%以上		
	• Cs, Sr, Tc, I $\therefore$	プロセス固有の方法で回収	できる範囲で回収	

### 表 2.3.8 再処理製品の仕様と回収率

\*1 Cm 遅延サイクルを前提とする場合には MA 回収後に相互に Am と Cm を分離する必要が生じる。

\*2 Cm 遅延サイクルを前提とする場合には相互に Am と Cm を分離する必要が生じる。

\*3 Cs と Sr を混合した状態で保管する場合を想定する。

\*4 新燃料仕様にあわせて溶液状態で Pu 富化度を調整する。

分類	概要
高レベル廃棄物	現行法規制下における高レベル放射性廃棄物(使用済燃料の再処理により
	分離された核分裂生成物を含む濃縮廃液およびこれを処理したもの)で地層
	処分が適切と考えられるもの。
	また、TRU核種を含む放射性廃棄物で、払い出される廃棄物の内包する放
	射能がTRU廃棄物の要件を越えるものについてもこれに区分する。廃棄塩、
	廃ボンドNa等の固化体が該当する。
TRU廃棄物 <sup>*1</sup>	TRU核種を含む放射性廃棄物でα核種の放射能濃度が比較的高い廃棄物
	(浅地中以外の地下埋設処分(地層処分)が適切と考えられるもの)。
	$\alpha$ 放射能1.11×10 <sup>9</sup> ~10 <sup>12</sup> Bq/t、 $\beta$ $\gamma$ 放射能 1.11×10 <sup>15</sup> Bq/t未満を目安と
	する*2。
高βγ廃棄物*1	全 α 核種の濃度が現行の政令に定める上限値未満でβ γ 放射能濃度が比較
	的高い廃棄物(地下利用に余裕を持った深度への処分(余裕深度処分)の可
	能性のあるもの)。
	$\alpha$ 放射能1.11×10 <sup>9</sup> Bq/t未満、 $\beta \gamma$ 放射能1.11×10 <sup>13</sup> ~10 <sup>15</sup> Bq/tを目安とす
	న <sup>*2</sup> ం
低レベル廃棄物*1	現行の政令濃度上限値未満の放射性廃棄物(浅地中処分(コンクリートピ
	ット処分、トレンチ処分)の可能性のあるもの)。
	$\alpha$ 放射能1.11×10 <sup>9</sup> Bq/t未満、 $\beta \gamma$ 放射能1.11×10 <sup>13</sup> Bq/t未満を目安とす
	S *3。
	なお、低レベル廃棄物のうち放射能濃度が「核原料物質、核燃料物質およ
	び原子炉の規制に関する法律施行令(政令第324号)」の13条の9の表三、表
	四に掲げる濃度以下に該当するものを極低レベル廃棄物として区分する。
クリアランスレベル以	放射性廃棄物のうち、線量が自然界の放射線レベルと比較して十分小さく、
下の廃棄物	放射性物質として扱う必要がないもの。
	10 <sup>6</sup> Bq/t未満を目安とする <sup>*4</sup> 。

\*1 廃棄物の分類は想定している処分方法(地層処分、余裕深度処分、浅地中処分)に対応させ、それぞれの呼称はフェーズ I を踏襲した。

今後は処分方法との対応がより明確となる呼称の検討も必要である。

\*2 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会「現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄 物処分の基本的考え方について」(平成10年10月16日)

\*3 現行政令濃度上限值

\*4 Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials: Application of Exemption Principles Interim Report for Comment, IAEA TECDOC Series No. 855 (1996)

### 表 2.3.10 発生の由来による廃棄物分類

名称	内容
プロセス廃棄物	操業に伴い発生するプロセス廃棄物
雑廃棄物	運転、保守および補修に伴い発生する種々雑多な雑廃棄物

表 2.3.11 わが国における放射性廃棄物の分類と処分方策との対比

【わが国における放射性廃棄物の分類と処分方策】 【フェーズⅡにおける放射性廃棄物の分類】

	J	廃棄物の名称		処	分方策			分類	想定する処分方式
高レベル放射性廃棄物			放射性廃棄物	地下の深い地層中に処分(地層処分)				高レベル廃棄物	地層処分
低レベル放射性廃棄物		発雷	放射能レベル の比較的高い 廃棄物	ー般的であると考えられ 裕を持った深度に埋設	れる地下利用深度に十分余 (余裕深度処分)			TRU廃棄物	地層処分
	低	<sup>电</sup> 所 廃	放射能レベル の比較的低い 廃棄物	浅地中処分					
	センベー	棄 物	放射能レベル の極めて低い 廃棄物	簡易な方法による浅地	中処分			高βγ廃棄物	余裕深度処分
	放射性	超ウ	ラン核種を含む	下記に該当せず、発 電所廃棄物の処分方 策が適用できないもの	地層処分の適用が考えら れている	┛Ĺ	低レベル廃棄物		
	廃 棄 物	放射性	生廃棄物	α 核種濃度が区分目 安値(約1GBq/t)を大 きく超えないもの	濃度に応じて、発電所廃棄 物の処分方策に準じて処分				浅地中処分(コンクリート ピット処分、トレンチ処 分)
		ウラン廃棄物			► 略			極低レベル廃棄物	
		RI・研究所等廃棄物			略				
	クリアランスレベル以下 の廃棄物		スレベル以下		_			クリアランスレベ ル以下の廃棄物	_
									-

## 表 2.3.12 施設設計の条件

項	3	内容	備考
プラント		・再処理と燃料製造工程は単一の建屋に内包する。	主建屋は可能な限
構成		・使用済燃料貯蔵建屋、主建屋(分離および高レ	り一つの建屋とす
		ベルガラス固化体製造),廃棄物処理建屋(ガラ	るが, 同一サイトに
		ス固化体製造を除く),貯蔵建屋,製品集合体貯	再処理建屋と燃料
		蔵建屋, 排気筒から成る。このうち, 廃棄物処理	製造建屋を近接配
		と貯蔵建屋は主建屋に含めても良い。	置し,建屋間をトレ
		・共用設備については主建屋からの供給を可とす	ンチ等でつなげた
		る。	ものも可とする。
		・排気筒の仕様は六ヶ所再処理工場相当とする。	
	1	・廃液海洋放出管は設計・検討範囲外とする。	
集合体貯蔵	貯蔵方式	・任意(キャスクもしくはボールト)。	
	輸送容器	・「もんじゅ」使用済燃料集合体輸送容器と同様	
		のものを想定する。	
	貯蔵量	<ul> <li>1年分。</li> </ul>	
余剰Puの取り扱	200	・考慮しない。	
廃棄物処理等 廃棄体仕様		・ガラス固化体	
		六ヶ所再処理工場と同様とする。	
		ただし、2.3 kW/本以下に制限する。	
		・その他廃棄体	
		最終処分体として想定しうる形態とする。	
	大気放出量	・六ヶ所再処理工場相当(*)またはそれ以下とす	(*)単位発電量お
	海洋放出量	る。	よび処理規模を考
			慮し換算。
	貯蔵量	<ul> <li>1年分。</li> </ul>	
配置・構造	耐震設計	・プロセス設備・機器を耐震クラス分類に準じて	
		分類し、各々の耐震設計上の重要度分類に対して、	
		一般的な構造を採用すること。	
		・マテリアル・ハンドリング上の要求で耐震構造	
		が困難な場合、免震床等により入力加速度を低減	
		することを可とする。	
	セル配置	・原則としてセルは外壁、屋上と接しないこと。	
	通路幅	・マスター・スレーブ・マニプレータ (MSM) の	
		操作を考慮し,5 m 以上を確保すること。	

# 表 2.3.13 区域の区分

区分	定義	線量率, μSv/h
ホワイト区域	汚染のない区域	<6.25
グリーン区域	操作区域等,通常運転時には汚 染のない区域	<b>≦</b> 12.5
アンバー区域	保守作業や一部工程を含む区域 で,若干の汚染が想定される区 域	≦25.0(作業頻度の高い箇所) ≦500(立ち入る可能性の極め て少ない箇所)
レッド区域	セル内区域で汚染が想定される 区域	>500

# 表 2.3.14 窒化物 TiN 被覆粒子燃料の仕様

項目		炉心	ブランケット
燃料核	直径, mm	1.5	1.7
第1層	厚さ, µm	120	60
(低密度バッファ層)	密度,%	50	50
第2層	厚さ, µm	100	80
(高密度被覆層)	密度,%	100	100

### 表 2.3.15 使用済燃料組成(増殖比 1.05、新燃料 1t 当たり)

\*集合体平均燃焼度:酸化物燃料 89,400MWd/t、金属燃料 135,000MWd/t

	新燃料 1tHM 当りの質量 (kg/tHM)			
	酸化物燃料	金属燃料		
元素	炉心+軸方向	炉心+軸方向		
	ブランケット合計	ブランケット合計		
U	7.76E+02	7. 29E+02		
Ри	1 28F+02	1 31F+02		
Np	4 66F-01	5 94F-01		
Am	4. 60E+00	4, 48E+00		
Cm	1.36E+00	1.35E+00		
Sub total	9.11E+02	8.66E+02		
Н	1.31E-04	2.10E-04		
Li	9.50E-07	1.50E-06		
Be	3. 62E-07	5.83E-07		
C	6. 37E-08	1.03E-07		
Со	0.00E+00	0.00E+00		
Ni	0.00E+00	0.00E+00		
Cu	0.00E+00	0.00E+00		
Zn	1.20E-10	1.82E-10		
Ga	1.50E-08	2.36E-08		
Ge	2.58E-03	4. 29E-03		
As	7. 70E-04	1.27E-03		
Se	9. 27E-02	1.53E-01		
Br	2.87E-02	4. 72E-02		
Kr	<u>5. 74E-01</u>	<u>9.44E-01</u>		
Rb	5.04E-01	8.24E-01		
<u>Sr</u>	1.06E+00	1. /4E+00		
Y	5.9/E-01	9.86E-01		
<u>Zr</u>	6.21E+00	1.01E+01		
ND	9.50E-00	1.00E-00		
MO	1.0/E+00	1. 22E+01		
TC Pu	1.00E+00 6.07E+00	2.90E+00 1.12E+01		
Rb	0.97E+00 2.05E+00	1.12E+01 3.23E+00		
Pd	6 11E+00	0.81F+00		
Δσ	5 63E-01	8 71E-01		
Cd	5 20F-01	8 78F-01		
In	2 42F-02	3 67E-02		
Sn	4 39F-01	7 68F-01		
Sb	1.07E-01	1.83E-01		
Te	1.52E+00	2. 49E+00		
	8. 18E-01	1.31E+00		
Хе	1.08E+01	1.74E+01		
Cs	8. 73E+00	1.39E+01		
Ba	3.84E+00	6. 30E+00		
La	2.77E+00	4. 46E+00		
Ce	5. 02E+00	8.08E+00		
Pr	2. 59E+00	4. 15E+00		
Nd	1.55E+01	2. 14E+01		
Pm	1.32E-01	1.92E-01		
Sm	2.67E+00	4.36E+00		
Eu	2.66E-01	4. 23E-01		
Gd	<u>3.14E-01</u>	<u>5. 22E-01</u>		
ID Dec	1.84E-02	2.85E-02		
UV Us	1. 81E-02	3. U4E-U2		
<u> </u>	4. JOE-U4			
<u> </u>	0. U4E-U4 2 /1E 07	1.UIE-U3		
1111 Vh	<u>3.41E-U/</u> 1.21E_07	<u>1.42E-U/</u> 2.27E_07		
Sub Total	0.03E+01	J. Z/E=U/ 1 /2E±02		
	9. USE+UI			
IOTAI	1. UUE+03	1. UIE+03		

# 表 2.3.16 LWR 使用済燃料組成

- +	新燃料 1t 当りの質量(kg/t)			
兀系	ウラン燃料炉心	プルサーマル燃料炉心		
U	9. 25E+02	8.96E+02		
Pu	1.15E+01	3. 73E+01		
Np	9. 77E-01	1.70E-01		
Am	6.16E-01	4. 40E+00		
Cm	9.14E-02	1.34E+00		
Sub total	9. 38E+02	9.40E+02		
Se	6.06E-02	-		
Kr	6. 27E-01	3. 37E-01		
Rb	6. 34E-01	3.14E-01		
Sr	1.51E+00	6.98E-01		
Y	8. 38E-01	3. 79E-01		
Zr	6. 48E+00	4. 32E+00		
Nb	1.16E-08	9.72E-09		
Мо	6.06E+00	5.46E+00		
Tc	1.28E+00	1.30E+00		
Ru	4. 03E+00	5.01E+00		
Rh	6. 63E-01	1.08E+00		
Pd	2. 61E+00	5.19E+00		
Ag	1.19E-01	3.01E-01		
Cd	8.76E-02	4.91E-01		
Sn	-	6.28E-02		
Te	8. 23E-01	9. 76E-01		
	3. 99E-01	5. 33E-01		
Xe	9. 43E+00	9.13E+00		
Cs	4. 56E+00	5.01E+00		
Ba	2.96E+00	2.77E+00		
La	2. 19E+00	2.01E+00		
Ce	4. 28E+00	3. 77E+00		
Pr	2. 02E+00	1.82E+00		
Nd	7. 31E+00	6. 23E+00		
Pm	5. 34E-02	6.06E-02		
Sm	1.28E+00	1.46E+00		
Eu	2. 62E-01	3.84E-01		
Gd	1.91E-01	2.83E-01		
Sub Total	6. 14E+01	6.00E+01		
Total	1.00E+03	1.00E+03		

#### \*集合体平均燃焼度:60,000MWd/t



図 2.3.1 酸化物燃料炉心の概要



図 2.3.2 金属燃料炉心の概要



図 2.3.3 ヘリウムガス冷却炉燃料コンパートメントの構造

### 2.4 設計要求への対応

フェーズIIとして、2.2項の設計要求、2.3項の設計条件を踏まえた再処理システムの構築を遂行する。

本設計検討を進めるに際して、各設計要求項目に対して個別要求値を達成す るシステムを構築するとともに、目標値を目指した設計を行うものとし、その 対応方針を以下に示す。なお、設計要求項目毎の具体的な設計対応については、 第3章再処理システム(燃料サイクルシステムを含む)の技術評価の視点に記述 する。

2.4.1 全般

(1) 適用規格

表 2.4.1に示す法令・指針類およびその下に定められた各種基準類に原則とし て準拠するよう設計し、準拠等の可否を評価する。

(2) FP 混入率

サイクル製品へのFPの混入率が1.2wt%以下となるよう、再処理システムでは FPの混入率を下げることを考慮した設計を行うものとする。なお、燃料製造シ ステムでは製品仕様の調整に劣化ウランを添加する場合もあり、その場合はサ イクル製品としてのFPの混入率は再処理製品よりさらに下がることが期待でき る。本FP混入率については「資源有効利用性」の中で、あわせて評価するもの とする。

2.4.2 安全性

2.2項の要求を踏まえた設計を行うものとし、再処理施設安全審査指針\*1等への対応の可否についても評価する。

2.4.3 経済性

再処理費と燃料製造費の合計の要求値である燃料サイクル費0.8円/kWh以下 を設定し、プロセス・システムの改良、運転・保守の改善、標準化等の追求に 取り組んで算定した費用の多寡を評価する。燃料製造システムと合わせた燃料 サイクル費としての評価については10.3項に記載する。

<sup>\*1</sup> 湿式法(PUREX 法)による発電用軽水型原子炉施設の使用済燃料を対象とする再処理施設に適用するべく定められた もの。

2.4.4 環境負荷低減性

(1) 環境放出放射能

前述の再処理施設安全審査指針のうち、指針2(平常時の線量評価)および 指針7(放射性廃棄物の放出管理)への対応を考慮し、環境放出放射能の多寡 を評価する。

(2) 処分区分毎の廃棄物発生量の合計

廃棄体として払い出される放射性廃棄物の区分は下記とし、操業時および廃止措置時の廃棄物発生量について検討し、算定した廃棄物量の多寡を評価する。

- (i) 高レベル廃棄物
- (ii) TRU廃棄物
- (iii) 高 $\beta \gamma$  廃棄物
- (iv) 低レベル廃棄物
- (v) クリアランスレベル以下の廃棄物

(3) 処分場の負荷による重みを掛けた廃棄物発生量の合計 本検討書では今回の評価対象外とする。

(4) U・TRU の廃棄物への移行率

高レベル廃棄物の放射能毒性低減にも考慮し、構築したシステムにおける廃 棄物への移行率低減の可能性を評価する。

(5) FP の廃棄物への移行率

(4)項に同じ。

2.4.5 資源有効利用性

再処理システムと燃料製造システムを合わせた燃料サイクルシステムでの要求値であるU・TRU回収率各99%以上を設定し、再処理製品へのU・TRUの高回収を目指し、U・TRUの放射性廃棄物への移行率を抑制し、廃棄物処理系へU・TRUの移行しにくいプロセスおよびシステム、あるいは廃棄物処理系からU・TRUを回収するプロセスおよびシステムを構築するものとする。燃料製造システムと合わせた燃料サイクルシステムとしての評価については10.4項に記載する。

なお、再処理製品の純度に関わる検討として2.4.1(2)FP混入率についても本項 にて評価するものとする。 2.4.6 核拡散抵抗性

すべての工程において、核物質の目的外転用が困難となるようシステムを構築し、システム設計の可否を判断する。各々のシステムで適用可能な計量管理 の考え方とその手法を明確にする。

2.4.7 運転·保守補修性

所定の条件を満たす稼働が可能であるように設計し、稼働の可否を評価する。 運転・保守補修の考え方を明確にする。

2.4.8 技術的成立性

システムの構築に際して、設計根拠を明確にするとともに、設計根拠の信頼 性に着目し、技術的成立性を評価する

### [参考文献]

- 佐藤浩司,他:"再処理システム技術検討書 FBRサイクルの実用化戦略調査研究(フェーズⅡ) 平成13年度成果報告",JNC TY9400 2002-019 (2002).
- サイクル機構,日本原子力発電(株): "高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究(フェ ーズⅡ) 2001年度成果報告書",JNC TN1400 2002-001 (2002).

分類	名称
法規類	<ul> <li>(1)核原料物質,核燃料物質および原子炉の規制に関する法律</li> <li>(2)放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律</li> <li>(3)建築基準法</li> <li>(4)消防法</li> <li>(5)高圧ガス保安法</li> </ul>
指針類	<ul><li>(1)再処理施設安全審查指針</li><li>(2)核燃料施設安全審查基本指針</li></ul>

表 2.4.1 法令・指針類

### 3. 再処理システム(燃料サイクルシステムを含む)の技術評価の視点

技術的成立性を含めた設計要求項目に対する具体的な設計対応を以下に示す。 各技術評価については、設計要求項目に対し再処理システムおよび燃料製造 システム各々で評価するのが原則であるが、再処理と燃料製造を一体化した燃 料サイクルシステムとしての評価が必要な項目についても、本編で記するもの とする。燃料サイクルシステムとしての評価が必要な項目は、安全性のうち安 全評価、経済性、環境負荷低減性および資源有効利用性である。他の項目につ いては、要求される要件を再処理、燃料製造個別に評価できる項目として記す るものとする。

#### 3.1 評価項目

(1) 安全性

(i) 再処理システム設計検討における安全設計の基本的考え方

核燃料取扱施設の安全設計の基準として、「核燃料施設安全審査基本指針」 に基づき、主たるものとして「再処理施設安全審査指針」、「ウラン加工施設 安全審査指針」、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」および「ウ ラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針」が策定されている。 原則として、本設計検討における安全設計においてもこれらの指針類の考え方 を第一に尊重し、これらに準拠した設計となるよう検討する。

しかしながら、上記指針類の個別の記述においては、それらの対象となるプロセスおよび施設を具体的に特定した上で規定がなされている箇所が含まれている。したがって、本設計検討が対象する新プロセスおよびシステムが上記指針類の対象としているプロセスおよびシステムと異なる特徴を持つ場合、上記指針類の規定にしたがって設計を行うと部分的に不整合のある、あるいは不合理な設計となりうる。このような場合には、上記指針類の細目よりむしろその基本的考え方を尊重して対象とするプロセスおよびシステムの特徴に基づいた合理的な安全設計を検討し、その考え方および課題を明らかにすることとする。

なお、上述したように安全審査指針の体系として「核燃料施設安全審査基本 指針」を規範として各個別施設に対する安全審査指針が規定されているが、将 来的に本検討対象であるシステムに対してもそれらの特徴を踏まえた個別の安 全審査指針が規定されるのが望ましい。

(ii) 安全設計の目的

当該システムにおいて技術的に発生が想定される如何なる異常事象において

も、周辺の公衆に対して過度な放射線被ばくのリスクを与えない設計とする。

(iii) 安全設計方針

当該システムが潜在的に持つ固有の危険性を考慮し、多重防護に基づいた適切な安全設計を行うことによって安全設計の目的を満足させる。

すなわち、本検討対象とする全てのシステムでは核燃料物質および放射性物 質を必ず取り扱うことから、

放射線防護(遮蔽)

放射性物質の閉じ込め

核燃料物質の臨界防止

に対しては安全設計を必ず検討し、適切な設計対応を行う。放射性物質の過度 の放出を生じる危険性のあるその他の異常事象(火災・爆発、溶液沸騰、漏洩 等)については、システムおよびプロセスの特徴を踏まえた検討を行い、合理 的な設計対応を行う。

(a) 多重防護

当該システムにおいて想定される異常事象に対し、その発生防止を適切に行 うと共に、万が一の発生を考慮して事象の拡大防止・終息の為の方策およびそ の事象によってもたらされる影響(最終的にはシステム外への放射性物質の放 出)を緩和する為の機能をあらかじめ用意する。

あらかじめ用意される異常事象の拡大防止および影響緩和の機能は、対象と する異常事象の規模・頻度の想定値および実装される異常発生防止策の信頼性 に応じて適切に設計し、必要ならば多重化するものとする。

(b) 放射線防護(遮蔽)

システム内で取り扱う放射性物質の種類および量を考慮し、作業員および周 辺公衆に対して直接放射線およびスカイシャイン放射線による過度の被ばくを 与えないような放射線遮蔽設計を行う。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針5における要求に基づく。

(c) 放射性物質の閉じ込め

システム内で取り扱う放射性物質の形態(固体、液体、気体状および気体に 随伴する形での放射性物質)、性状(特に拡散のし易さ)、量および取り扱う 環境を考慮し、多重防護に基づいた適切な閉じ込め設計を行う。

閉じ込めの機能を有する系統、機器、セル等および建屋によって放射性物質 を限定された区域・経路に閉じ込め、システム外への放出が生じる場合におい てはその放出経路を限定するとともに系路上に設けられた除染設備(スクラバ、 フィルタ等)およびスタックにより、周辺公衆に過度の被ばくのリスクを与え ないようにする。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針2、3、4および17における要求 に基づく。ただし立地点により影響する要素を除くものとする。

(d) 核燃料物質の臨界防止

核燃料物質を取り扱うシステムにおいては、技術的にみて想定されるいかな る場合においても臨界(意図しない核連鎖反応)の発生を防止する設計とする。 そのために、臨界管理においては二重偶発性原理に基づいた厳格な発生防止対 策を行う。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針10、11および12における要求 に基づく。

(e) 地震に対する考慮

当該システムにおいて、想定される如何なる地震の発生においても、それに よって「運転時の異常な過渡変化」を超える事象が誘発されない設計とする。 すなわち、地震によって安全上の機能を喪失しないよう、構築物、系統および 機器を十分な耐震性を持つものとする。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針13における要求に基づく。な お、求められる耐震設計に対する機能上の分類は「再処理施設安全審査指針」 および「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針」に基づ くものとし、六ヶ所再処理施設等の既存施設の耐震設計をベースに検討する。

(f) 動的に維持される安全上の機能\*1

安全上の機能が動的な機器により達成される場合、単一の動的な機器について、偶発的な故障または保守作業による機能停止を考慮しても安全上の機能を 維持することとする。

[動的な機能を維持するための動力源に対する考慮]

安全上の機能を有する系統および設備のうち、その機能維持のために電源そ の他の動力源・エネルギー源を必要とするものについては、通常時の供給系の 他に十分独立した2つ以上の系統からなる非常用の供給系を用意することによ って、いかなる場合にでもそれらの安全機能の喪失がないものとする。

[異常事象発生防止系および異常影響緩和系を兼ねる場合の留意事項] 異常発生防止系(PS: Prevention System)を担う動的な系統・機器が異常

<sup>\*1</sup> これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針 16 および 22 における要求に基づく。

影響緩和系(MS: Mitigation System)をも兼ねる場合\*1には、起因事象(PS の機能喪失)としての系統・機器の単一の故障に加えて、さらにMSとしての動的機器の単一故障を重畳しても、それらによって提供される安全上の機能が喪失しない設計とする。その場合、非常用電源供給系統のみの運転下においても、その機能を維持できるようにする。

なお、単一故障があったとしても、安全上支障のない期間内に原因の除去ま たは修理等が期待できる場合は、その単一故障を想定しなくてよい。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針16および22における要求に基づく。

(g) システムおよびプロセス固有の危険性に対する考慮

当該システムおよびプロセスの設計においては、異常事象の発生要因を極力 排除した簡素なものを追求する。

しかしながら、当該システムの操業およびプロセスの運転において以下に示 す固有の危険性を有する物質あるいは操作を取り扱う場合には、それぞれの危 険性に応じて多重防護に基づいた適切な安全設計を行う。

- ・可燃性および爆発性物質の使用あるいは生成の可能性
- ・自己反応性の化学物質の使用あるいは生成の可能性
- ・発熱源あるいは加熱操作
- ・加圧源あるいは加圧操作
- ・放射性物質を含む液体の漏洩
- ・放射性物質を含む液体の沸騰
- ・放射性物質を含む物質の飛散あるいは気化による気相拡散
- ・力学的エネルギーを持つ機器あるいは操作
- ・その他異常な過渡変化を超える事象

なお、ここで検討すべき事象は、それ自体が直接人的被害をもたらす可能性 があるだけでなく、それらの生起により放射性物質の閉じ込め、臨界防止およ び放射線遮蔽に対する著しい影響を与えるものである。

これは「核燃料施設安全審査基本指針」の指針15における要求に基づく。

<sup>\*1</sup> 例えば、湿式施設における高放射性廃液を貯留する槽については、液の沸騰防止を目的とした冷却機能が安全上必要 となる。この場合の冷却機能は、PS に位置づけられる。液の沸騰を想定した場合の影響緩和機能としては、オフガス 系や排気系における放射性物質の閉じ込め機能が考えられるが、HEPA フィルタやよう素フィルタにより実現される 閉じ込め機能を維持するためには、オフガス系へ流入する沸騰蒸気の凝縮および除去が必要となる。この観点で、凝 縮のための冷却機能は MS に位置づけられる。仮に両冷却機能が共通の設備により実現される場合には、ここで述べ た事項に留意して設計することが重要である。

(iv) 安全評価方針

(a) 目的

先に示した安全設計方針に基づき当該システムの特徴を踏まえて具体化され た安全設計の妥当性を客観的かつ定量的な指標を用いて確認することを目的と して、決定論的安全評価およびこれを補完する位置づけとして確率論的安全評 価を実施する。

(b) 決定論的安全評価

フェーズ2中間とりまとめに当たっては、決定論的安全評価として、①排気に 含まれる放射性物質の環境への放出に焦点を当てた平常時の線量評価、および ②安全設計の妥当性を判断することを目的とした安全設計評価を行う。各評価 の方法および判断基準は以下の通りとする。

1) 平常時の線量評価

施設から環境へ放出される排気に含まれる放射性物質の組成および年間放出 量、環境中での大気拡散効果、被ばく経路を適切に考慮して、施設周辺の公衆 の受ける実効線量を推定する。判断基準は、この実効線量が50 µ Sv以下である こととする。

2) 安全設計評価

特に多重防護における異常拡大防止および異常影響緩和の考え方が適切に採用されていることを確認するために、技術的に発生が想定される異常事象の抽出を行う。本評価では、抽出した事象の中から周辺公衆に対する放射線被ばくリスクの恐れのある事象を選定し、発生事象当たり周辺公衆の個人が受ける実効線量を評価する。判断基準は、この実効線量が5mSv以下であることとする(ただし、本中間報告での事故時評価は、ICRP Publ.30をベースにした実効線量当量による評価である。)。

(c) 確率論的安全評価

2.2 の設計要求事項に示す(1)安全要求の中の確率論的安全要求は、フェーズ 2の開始に当たって、原子炉プラントシステムへの要求内容を参考に当面の要求 として暫定的に定めたものである。この要求へ応えるべく、燃料サイクルシス テムのリスク分析を行った結果、原子炉プラントシステムと異なって「周辺公 衆の急性死亡をもたらす規模の放射性物質放出事象」\*<sup>1</sup>は同定されなかった。こ のため、確率論的安全評価にあたっては、後述するように確率論的安全要求の 設定根拠となる安全性に関する開発目標およびリスクについての定量的な要求

<sup>\*1</sup> 原子炉プラントシステムに対する確率論的安全要求を設定する際に、この規模の事象を放射性物質の大規模放出事象 とみなして炉心損傷発生頻度の要求値を設定した。

事項\*1に遡って評価目的および判断基準を設定することとした。

すなわち、燃料サイクル施設の立地によって、周辺公衆の死亡リスクが有意 に増加しないことを確認するために確率論的安全評価を実施することとした。 特に、公衆の放射線障害防止に主眼を置くため、評価の中で考慮に入れる死亡 の種類を、放射性物質の異常な放出がもたらす周辺公衆の放射線被ばくによる 急性死亡および晩発性死亡(致死ガン)に限定する。

フェーズ2での評価に当たっては、大規模な放射能放出をもたらす異常を漏 れなく考慮に入れることを重視する。また、システムの基本的な安全上の特性 を評価する観点から、考慮に入れる異常事象の範囲を施設内における系統・機 器またはこれに動力源を供給する外部電源の故障もしくは従業員の人的過誤が 直接の原因となって生じる異常に限定する。これ以外の例えば地震、津波等の 2次的被害として施設内で生じる異常については、評価の範囲外とする。

評価の判断基準は、周辺公衆について、放射線被ばくによる急性死亡の年間 発生確率を10<sup>-7</sup>死/人/年/サイト以下とし、なおかつ晩発性死亡(致死ガン)の年 間発生確率を10<sup>-6</sup>死/人/年/サイト以下とした。したがって、単一のサイトに立地 する再処理施設および燃料製造施設の数を各々1施設とするならば、両施設の 合計リスクが上記判断基準を満足すればよい。

(2) 経済性

(i) 経済性評価の対象

経済性評価は再処理単価(万円/kgHM)および燃料サイクル費(円/kWh)の 2種類の評価指標を用いて評価する。また、これらの単価を算出するために必 要な以下に示す費用を、検討対象である各再処理技術のシステム設計検討結果 を基に算出する。

- ·建設費
- ·年間運転経費
- (ii) 建設費の算出基準

建設費は各再処理技術のシステム設計結果で検討された物量(各設備の機器

<sup>\*1</sup> フェーズ II における安全性の設計要求を定めるに当たり、開発目標に述べられた「FBR サイクルの導入によるリス クが、社会に既に存在するリスクと比べて十分に小さくなること」のめやすとして、「サイト周辺の個人および社会の リスクの増加が既存リスクの 0.1%以下であること」を設定した。なお、これは、周辺公衆について、放射線被ばくに よる急性死亡の年間発生確率を 10<sup>-7</sup> 死/人/年/サイト(国内における不慮の事故による死亡の年間発生確率値を小さい 側に丸めた値 10<sup>-4</sup> 死/人/年の 0.1%)以下とし、なおかつ晩発性死亡(致死ガン)の年間発生確率を 10<sup>-6</sup> 死/人/年/サイ ト(国内における悪性新生物による死亡の年間発生確率値を小さい側に丸めた値 10<sup>-3</sup> 死/人/年の 0.1%)以下とするこ とである。これらを間接的に表す燃料サイクル施設の性能指標として、施設内での大規模放出事象の発生頻度および 閉じ込め機能に対する非信頼度を選び、2.2 節に示す確率論的安全要求が設定された<sup>10</sup>。
仕様および台数、建屋体積等)に対するコストを評価し、それらを積算するこ とで算出する。

(a) 積算対象物の範囲

建設費の積算対象物は以下とする。

- ·使用済燃料貯蔵施設
- ・再処理・燃料製造一体化施設の内、再処理に関する範囲
- ・廃棄物処理貯蔵施設の内、再処理に関する範囲
- ・排気筒の内、再処理に関する範囲

各積算対象物は、各施設内に内装される機器にかかる費用である設備費(機電 関係費)と、建屋に付随する換気設備・電気設備・建屋駆体およびライニング にかかる費用である建屋費(建電換費)を個別に積算する。これは、ライフサ イクルコストに影響する償却年数が、機電関係費と建屋関係費で異なるからで ある。

(b) 設備費

設備費は以下の設備に区分して算出する。

- ・主要プロセス設備:再処理・燃料製造に直接関係する工程を 含む設備
   ・廃棄物処理・貯蔵設備:廃棄物処理・貯蔵に関係する工程を含む設備
- ・燃料貯蔵設備 :使用済・新燃料集合体貯蔵に関係する工程を 含む設備
- ・分析設備 :分析に関係する工程を含む設備
- ・ユーティリティ設備: : 試薬・蒸気、ユーティリティに関係する
   工程を含む設備
- ・計装制御設備
   :運転管理に際し、計測・制御系に関係する
   設備
- ・非常用発電設備 : 非常用電源供給に関係する工程を含む設備
- ・その他設備 :上記に含まれない設備
- また、設備費の積算対象は以下とする。
  - ・設計費
  - ・機器費(工場製作にかかる費用)
  - ・工事・検査費(工場出荷から現地作業にかかる費用)
  - ·管理経費
  - (c) 建屋費

建屋費は、建屋体積と体積単価を用いて算出する。体積単価は、既存の原子 力関係施設を参考とし、13万円/m<sup>3</sup>とする。 (d) 評価対象外

本検討では下記の費用は評価対象外とする。

- ・用地取得に関する費用(土地代、造成費用、道路港湾の整備、補償等)
- ・廃棄物の輸送および処分費
- ・研究開発に関する費用(開発費、試作費等)
- ・コンティンジェンシーに関する費用
- (iii) 年間運転経費の算出基準

年間運転経費は各再処理技術のシステム設計結果を基に、下記に示すコスト を評価して算出する。

- ・人件費 : 操業に必要な人員に係る費用
- ・機器交換費: : 定検時等における機器リプレースに係る費用
- ・定期検査費: 定検時に臨時に必要な人員および定検作業に必要な 機器等に係る費用
- ・消耗品等費: 操業に必要なユーティリティ・消耗品等に係る費用
- (a) 人件費

人件費単価は900万円/人年とする。また、要員数の積算範囲は以下とする。

・運転要員
 : 工程毎に、運転に直接携わる人員。
 日勤および3交代制(5班)を含む。
 ・廃棄物処理業務に携わる人員。
 日勤および3交代制を含む。
 ・分析要員
 : 分析業務に携わる人員。
 日勤および3交代制を含む。
 ・放射線管理要員
 : 放射線被ばく、環境保安業務等に携わる人員。
 日勤および3交代制を含む。
 : 放射線被ばく、環境保安業務等に携わる人員。
 日勤および3交代制を含む。
 : 通常時の電気・機械保守点検業務等に携わる
 人員。基本的に日勤とする。

(b) 機器交換費

機器の交換は、その機器の寿命に合わせて行うのが通常であり、その時点で 機器交換費が発生する。本検討の経済性評価では、これを年平均として算出す る。機器交換費の対象は機電に関係する設備費とし、建屋駆体、ライニング、 および排気筒については、範囲外とする。機器の交換頻度は、原則として下記 の基準にしたがって積算する。

対象	機器交換頻度
腐食の厳しい環境の工程で使用する機器	機器費の6%
マテハン等,動的な操作が主体の工程で使用する機	機器費の6%
器	
静的な操作が主体の工程で使用する機器	機器費の2%
メンテナンスの必要性が低い機器	機器費の2%
メンテナンスが不要な機器	なし

(c) 定期検査費

定期検査時の臨時人件費を対象とし、仮設費等は、機器交換費に含まれるものとする。

人件費単価は10万円/人日とする。また、定期検査期間は非運転日である165日 (=365日-200日)の約半分として80日とする。

(d) 消耗品等費

消耗品等費の積算範囲は以下とする。

- ・ユーティリティ (電気・水道等)
- ・試薬類
- ・補充ウラン等
- ・交換頻度が1年以内の機器・部品(せん断刃、ルツボ等)

(iv) 再処理単価の算出基準

使用済燃料を再処理して再処理製品1kgHMを製造するのにかかる費用を再 処理単価と定義する。再処理単価は資本費と操業費で構成され、再処理施設の 建設から廃止措置までのライフサイクルコストを算出し、これをプラント運転 期間で除した平均値として算出する。

各費用の算出に用いる諸数値(設定値)を表 3.1.1に示す。

(a) 資本費

資本費を構成する費用は、すべて建設費を基に算出する。ただし、ここでの 建設費には所有者費用(工事全体のプロジェクト管理費、許認可助成費等、プ ラント所有者側にかかる費用)として、前述の建設費に10%を加算した値を用 いることとする。

資本費を構成する費用を以下に示す。

- ・減価償却費:再処理施設の減価償却にかかる費用である。
   建屋、設備の償却期間、償却方法、残存価格割合を
   用いて算出する。
- ・事業報酬:電気事業の公共性から、事業が健全に展開できるため

の費用を事業報酬として考慮し、事業報酬率により 算出する。

- ・固定資産税 : 施設の固定資産税であり、固定資産税率を用いて 算出する。
- ・廃止措置費:再処理施設の解体費と解体廃棄物の処理処分費であり、
   これらを暫定的に建設費の20%と設定し、積立方法、
   積立期間、積立利率を用いて算出する。

(b) 操業費

操業費を構成する費用は、主に年間運転経費を再処理製品1kgHM当たりに換算したものである。操業費を構成する費用を以下に示す。

- ・人件費: : 年間運転経費の人件費が対象である。
- ・定期検査・修繕費 : 年間運転経費の機器交換費および定期検査費 が対象である。
- ・消耗品等諸費 :年間運転経費の消耗品等費が対象である。
- ・事業税・一般管理費 : 建設費と年間運転経費から、事業税率および 業務分担比率を用いて算出する。

(v) 燃料サイクル費(再処理費)の積算の考え方

再処理単価評価結果を基に、対象としている使用済燃料の炉心およびブラン ケットを含めた平均燃焼度と発電効率を用いて再処理費(円/kWh)を算出する。

(vi) 経済性評価の判断基準

フェーズIでは、原子炉プラントシステムの検討の影響を受けない再処理単価を指標として評価してきた。そこで、フェーズIIにおいても個々のシステムについて、①建設費(億円)、②年間運転経費(億円/年)、③資本費・操業費・再処理単価(万円/kgHM)を算出する。

次に原子炉プラントシステムとの整合を考慮して再処理単価から再処理費を 算出し、同じく燃料製造単価から算出した燃料製造費と合算して燃料サイクル 費を算出し、フェーズⅡにおける経済性の設計要求である燃料輸送・廃棄物処 分費を除く燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8円/kWh以下を指標とし て、評価を行うものとする。

(3) 環境負荷低減性

- (i) 評価項目
- 通常運転時の環境放出放射能

- 通常運転時の放射性廃棄物
- ③U、TRU、FPの廃棄物への移行率
- ④ 施設の廃止に伴う放射性廃棄物 (解体廃棄物までを評価)

(ii) 評価指標および判断基準

(a) 通常運転時の環境放出放射能

通常運転時に於ける、環境への放射性物質の年間放出量を評価指標とする。 2.2項に示す設計要求を判断基準とする。

(b) 通常運転時の放射性廃棄物

通常運転時の放射性廃棄物(固化後の廃棄体)の年間発生量を評価指標とする。

廃棄体は最終処分に適合した形態とする。 2.2項に示す設計要求を判断基準とする。

(c) U、TRU、FPの廃棄物への移行率
 通常運転時の移行率を評価指標とする。
 2.2項に示す設計目標を判断基準とする。

(d) 施設の廃止に伴う放射性廃棄物

<廃止措置のし易さ(解体性)>

実用化戦略調査研究における現在までの設計検討では2.2項の設計要求にある 廃止措置のし易さ(解体性)を設計条件として具体化するまでには至っていな いものの、「廃止措置のし易さ(解体性) = 解体作業のし易さ」と考えれば、 施設設計では下記の様な点が考慮されていなければならない。

① 接近性

例えば、遠隔除染、遠隔解体等の操作性。作業員、作業機械のアクセス性等。 ② 除染性

例えば、除染設備、スペースの確保。除染を考慮した機器分割 等。

③ 搬出入性

例えば、開口、通路スペースの確保 等。

一方で、これらは施設の保守、補修性として考慮されなければならないもの でもあることから、解体時の作業性も保守、補修性を考慮した施設設計を行な うことにより基本的に確保されると考えられる。 この様な点から、フェーズII段階では、解体性は設備の保守、補修性を考慮 した施設設計により確保されるものと考えて評価する。

なお、今後国内外で施設の解体実績が積まれるにしたがって、作業性以外に も設計段階で取り込んでおくべき項目に関する知見も増すものと考えられ、こ れらについては適宜設計へ反映する必要がある。

<放射性廃棄物の発生量>

施設の解体に伴い発生する解体廃棄物の発生量を評価指標とする。

なお、解体廃棄物発生量は施設規模の影響を受けるため各再処理システム間 で積算施設の範囲を合わせておくものとし、再処理建屋(再処理工程およびそ の付帯設備を収容する建屋)、使用済燃料貯蔵建屋、放射性廃棄物処理・貯蔵 建屋をその範囲とする。

(4) 資源有効利用性

(i) U・TRU の放射性廃棄物への移行率

資源有効利用性は、UおよびTRUの有効利用を目的としたものであり、評価 対象はUおよびTRUとする。放射性廃棄物への移行率を評価指標とし、各再処 理技術のシステム設計検討で評価される物質収支結果を用いて、次式で評価す る。

(放射性廃棄物への移行率)=1-(再処理製品への移行量)/(再処理量)

(ii) 再処理製品への FP 混入率

(i)と同様に、各FPに関し各再処理技術のシステム設計検討で評価される物質 収支結果を用いて、次式で評価する

(FPの混入率) = (再処理製品への移行量) / (再処理量)

(5) 核拡散抵抗性

当該システムで取り扱う核物質が目的外へ転用されることをより困難とする ようなプロセスおよびシステム設計を検討する。具体的には、システムの全工 程を通じてPuが高い純度の単体で存在することがなく、UおよびFPなど他元素 と混在した状態で取り扱うプロセスとして構築する。また、中性子を放出する 同位体核種等の含有率が高い状態で取り扱うように配慮した設計とする。

また、施設で取り扱っている核物質が転用されていないことを検証するため の保障措置、第三者による核物質の盗取等を防止するための核物質防護の適用 に関してもプロセスおよび施設設計の特徴を踏まえた検討を行う。技術レベル の具体的な設計については、現行および現在検討中の国内外のLWR再処理施設 およびMOX燃料加工施設における計量管理技術・核物質防護設計等を参考とす るが、これらの技術の適用が困難もしくは合理的でない場合には、対象システ ムの特徴に整合する技術、手法とその考え方を提案する。

(6) 運転・保守補修性

運転・保守補修性に配慮した設計とし、運転・保守補修に対する考え方を明 確にする。

(i) 基本的な考え方

所定の処理能力を保障するとともに、運転の簡素化、自動化、運転制御系の 高度化、メンテナンスしやすい設計などにより、運転・保守補修作業における ヒューマンエラーの防止、保守作業量の低減、運転員・保守員の省力化、保守 作業員の被曝低減を図る。また、保守補修を要する機器については、保守補修 区分を検討し、必要なアクセスルートや保守補修スペースを確保すると共に、 作業員の被曝低減を図った設計とする。

(ii) 設計対応

(a) 処理能力

工程機器の処理能力に搬送および分析等の工程管理にかかる時間を加味して、 プラントとしての処理能力を保証する。

(b) 運転性向上方策

自動制御システムや自動搬送システムおよび遠隔監視システム等を用いて運転の簡素化、自動化、運転制御系の高度化の方策を適用することにより、運転性の向上を図る。技術の選定にあたっては、使用環境に対応した信頼性の高い機器を用いると共に、システムの複雑化に起因する稼働率の低下を招かないように配慮する。

(c) 保守補修システム

施設の全運転期間を通して保守補修を必要としないと想定されるものを除き、 全ての設備・機器は保守補修の対象となる。運転期間中のセル内への立ち入り は厳しく制限されるため、大型セル方式を採用する場合、再処理施設には必ず 遠隔保守のためのシステムとして、保守セル、保守スペース、遠隔作業用機器、 視聴覚システムなどの装置あるいは設備を備える。また直接保守を行うため、 遠隔操作によって設置場所から取り外された装置等を除染するセルと設備を備 える。さらに作業員が直接立ち入って作業するために必要な設備として、グリ ーンハウス設置スペースや呼吸用空気、放射線モニタ、等を備える。なお、保 守補修を必要としない設備・機器の想定にあたっては、その根拠を十分な検討 のもとに示すこととする。

(d) 保守補修計画

乾式再処理施設の保守は、その操作方式の観点から遠隔保守、直接保守、および両者の折衷案の3方式に分類され、その何れかを作業エリアの放射能レベル と作業頻度あるいは除染の容易性などを考慮して選択する。遠隔保守では人、 機器、対象、廃棄物について、作業中における干渉を考慮して動線を定める。 保守補修作業では作業員の被曝量や廃棄物量も考慮して、図 3.1.1に示すような 保守フローに基づき作業計画を作成する。

(e) 機器設計

セル内に配置される機器は、補修し易くするために、作業頻度、機器重量、 セル内の配置などの制限を考慮して、モジュール交換、機器一括交換、ユニッ ト交換の何れかの方式が可能なように設計する。この際、技術的成立性を確保 し、また過度のユニット化により設計の合理性を阻害しないようにする。

(7) 技術的成立性

技術的成立性は、当該技術の現時点での成熟度に拘泥せず、潜在的な技術的 可能性をも含めて評価する。なお、実用化に必要な開発投資(人、予算、施設)、 開発期間、開発リスクの分析を踏まえた技術的実現性の判断は、この技術的成 立性の判断とは別のものと位置付けられ、本編には含まれていない。

FSは、「FBRサイクルを将来主要なエネルギー源として確立すべく、その技術体系を2015年までに整備する」、ことを目標に研究開発を進めている。ここで、技術体系を確立するとは、「実用プラントの基本設計図書をとりまとめ、かつその許認可に必要な体系を整備すること(開発当事者として、自信を持って信頼性のある基本設計図書を提示でき、かつ事業者として有すべき安全レベルに到達していること)」と定義する。

したがって、中間評価においては、システム概念構築に際しての設計根拠の 信頼性に着目し、潜在的な技術的可能性をも考慮した現行の知見に基づく 「2015年技術体系確立」達成の難易度の考察を技術的成立性評価の目安とする。

#### [参考文献]

 栗坂健一,他: "FBRサイクルの安全性総合評価 安全性の開発目標の検討および湿式燃料 サイクルシステムのリスク分析", JNC TN9400 2002-031 (2002).

評価	条件の	項目				設定	備考
			割引率			3%	JUTT199評価 <sup>U</sup> 同様
			プラント携	見模		※tHM/年	設計による
	滅価値	賞却費	建設費	建屋、建物、構象	亳物	※億円	設計による
				設備、機器、ユーテ	イリティー	※億円	設計による
				土地代			既存事業所内設置につき考慮しない
				建設期間		<del>※</del> 年	設計による
				建中利率		3%	割引率同様
				建中利子計上法		期末払い	
			運転期間(=	コストを均等化する	5期間)	40年	MIT199評価 <sup>1)</sup> 同様
			償却期間	建屋、建物、構築	亳物	40年	字州のも知能以強くたたとは来り田性は波旦
資*				設備、機器、ユーテ	イリティー	9年	凷枕/向顺/井平釵衣にわりる親似設備より推足
(書			設備更新				更新費用は年額換算により修繕費に算入
			償却方法			定率法	一般的に使用されている
			残存価額割	心		10%	一般的な設定
	固定诊	篒産税	固定資産税	记率		1.4%	法定值
	廃止有	普置費	解体、処理	<b></b> 1 1 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3		※億円	設計による(建設費の20%程度を目安とする)
			積立方法			减債基金法	定額積立
			積立期間			40年	運転期間と同様
			積立利率			3%	割引率同様
	事業幸	<b>银西州</b>	事業報酬率	K		4.4%	MITI99評価 <sup>1)</sup> 同様(償却中金利、利益準備金、配当金、社債発行費用
		人件費	人件費単価	П		900万円/人年	労働省発表の電気・ガス事業の全年齢平均賃金に福利厚生などの諸経
	面将		要員数			$\tilde{\times}$	設計による(委託業務人件費は含めない)
操業	広費	修繕費	修繕費率		(×建設費)	※%/年	設計による(年額に換算された設備更新費用を含む)
未費		消耗品等諸費	消耗品等費		(×建設費)	*%/年	設計による(消耗品費、委託費等)
		業務分担費	業務分担費	奉	(×直接費)	15%/年	
	驖	事業税	税率		(×全経費)	1.5%/年	法定值
部材	顜		部材費(燃	(料製造に含める)		業万円/kgHM	設計による

表 3.1.1 再処理単価算出に用いる諸教値(設定値)

<sup>※:</sup>プラントの設計により得られるデータ 1) 通産省総合エネルギー調査会原子力部会,第70回,資料3(1999.12)



### 図 3.1.1 遠隔保守対象機器保守フローの一例

#### 4. 湿式再処理法

フェーズIIの前期においては、酸化物燃料を主な処理の対象として、先進湿式 法および代替補完技術である超臨界直接抽出法、イオン交換法およびアミン抽 出法に関する設計研究を行い、それらの比較評価を踏まえて先進湿式法のリフ アレンスシステムを設定した。本章では、上記の湿式再処理法に関する検討の 結果を示す。本章の構成は以下の通りである。

初めに4.1 において各技術の概要を示す。4.2 では、超臨界直接抽出法に関す る検討について、4.3 では、先進湿式法においてマイナーアクチニド(MA)を回 収する技術を取り上げ、SETFICS法、イオン交換法とアミン抽出法のプロセス 設計の結果を示す。なお、アミン抽出については、フェーズII検討の初期の段階 において、すべてのアクチニドを共抽出する条件が得られないことが分かり、 MAの回収を目的としたプロセスとして検討を行った。4.4 では、代替補完技術 を評価し、先進湿式法への適用性について議論する。4.5 では、新たに構成した 先進湿式法のプロセス設計の結果をまとめる。4.6 および4.7 では、多様なサイ クルシナリオに対する適用性、および窒化物燃料への適用性について検討した 結果をそれぞれ示す。4.8 では、今後さらに検討を深めていく主要な技術開発項 目をまとめた。

#### 4.1 湿式再処理法の概要

先進湿式法は、現在、商業用再処理プラントに採用されている唯一の再処理 プロセスであるPUREX法を基礎とし、高速炉燃料を処理することを前提に、プ ロセスの簡素化や廃棄物発生量の低減などを目指して最適化した複合工程であ り、晶析法、簡素化溶媒抽出法とMAを回収するためのSETFICS法を中心とし て構成している<sup>1)</sup>。簡素化溶媒抽出法は、精製工程を廃した抽出-逆抽出のみの 単一サイクル抽出工程である。あらかじめUを粗分離することにより、Pu分配 工程を排するとともに抽出工程を最小化することを目的として晶析工程を導入 している。

図 4.1.1にプロセスのブロックフローを示す。使用済酸化物燃料は硝酸溶液に 溶解した後、清澄する。晶析工程では硝酸溶液中のUを選択的に硝酸ウラニル六 水和物(UNH)の固体として回収する。得られたUNHはブランケット燃料製造工 程に供し、晶析操作後の硝酸水溶液は簡素化溶媒抽出法により処理する。晶析 操作におけるUの回収率は、簡素化溶媒抽出工程で分配操作を必要としない値と する。簡素化溶媒抽出工程は共除染と逆抽出を行う、いわゆるシングルサイク ルのフローシートに基づく。AmとCmは抽出されないので、簡素化溶媒抽出工 程の抽出残液(ラフィネート)からSETFICS法により回収する。製品は一部の 希土類元素を含む硝酸溶液として得られる。先進湿式法は以後、NEXT法("New <u>EX</u>traction System for <u>TRU Recovery</u>"の略) と呼ぶ。

SETFICS法はCMPOを主抽出剤とする溶媒抽出法であり、高酸性溶液から AmおよびCmを回収する。キレート剤と塩析剤の混合溶液を用いて希土類元素 を粗分離して回収することができる<sup>20</sup>。フェーズI研究では、塩析剤として硝酸 ナトリウムを用いたフローシートを検討したが、Naを含む廃棄物が多量に発生 する点が技術課題であった。

フェーズIではイオン交換法による再処理を検討した。このシステムではAm とCmの回収に抽出クロマトグラフィーを利用したが、フェーズII研究では後半 の処理工程である抽出クロマトグラフィーのみを取り上げて検討している。多 孔質シリカ粒子を支持体とする吸着材を用いる点が特徴である<sup>3)</sup>。抽出剤として CMPOおよびCyanex 301を用いるプロセスを検討した。本報告書では以後抽出 クロマトグラフィーと呼ぶ。

アミン抽出法はジオクチルアミンを主抽出剤として用いる溶媒抽出法であり、 4価のアクチニドを優先的に抽出する点に着目したプロセス検討を行った。

超臨界直接抽出法は、超臨界状態の二酸化炭素(sf-CO<sub>2</sub>)を媒質として用いる抽出技術であり、Super-DIREX (Supercritical Fluid Direct Extraction)法の呼称が一般に浸透しつつある<sup>4)</sup>。本法はsf-CO<sub>2</sub>とTBPの混合物を抽出の媒体として用い、酸化物燃料粉末から直接目標とする元素を抽出する。UやPuを抽出するには酸化剤および塩析剤が必要であり、このために硝酸を含むTBP-sf-CO<sub>2</sub>混合流体を用いる。U、NpおよびPuを使用済酸化物燃料から抽出し、核分裂生成物は残渣として残留する。U等の逆抽出は水溶液との接触により行う。また、残渣に含まれるAmやCmはTRPOなどの別の抽出剤を含むsf-CO<sub>2</sub>を用いて回収する。

#### [参考文献]

- T. Takata, et al. : "Conceptual Design Study on Advanced Aqueous Reprocessing System for Fast Reactor Fuel Cycle", J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 41, p. 307 (2004).
- 2) Y. Koma, et al. : "Trivalent f-Element Intra-group Separation by Solvent Extraction with CMPO-complexant System", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 35, p. 130 (1998).
- Y.-Z. Wei, et al.: "Studies on the Separation of Minor Actinides from High-Level Wastes by Extraction Chromatography Using Novel Silica-Based Extraction Resins", Nuclear Technology, Vol. 132, p. 413-423 (2000).
- T. Shimada, et al. : "Direct Extraction Process of U with Super-DIREX Reprocessing Method", Global 2003, Atoms for Prosperity: Updating Eisenhower's Global Vision for Nuclear Energy, November 16 - 20, 2003, New Orleans, Louisiana (2003).



図 4.1.1 先進湿式法 (NEXT 法) のブロックフロー

#### 4.2 超臨界直接抽出法

フェーズIIの前半においては、50tHM/yの処理能力を有するプラントを設計するとともに、安全に関する検討を行った。前者については、建設費等をフェーズIにおいて設計した先進湿式法による同規模のプラントと比較した。

4.2.1 施設概念構築

(1) プロセス

超臨界直接抽出法のブロックフローおよびプロセスフローダイヤグラム (PFD)を図 4.2.1および図 4.2.2にそれぞれ示す。主要な工程の概要を以下に 述べる。なお、フェーズIでの検討から変更は加えていない。

(i) 使用済燃料の一時貯蔵

輸送キャスクに収めた使用済燃料を受け入れ、キャスクから取り出して一時 的に貯蔵する。1年分の使用済燃料の貯蔵を想定した。本設備は以後の分離操作 等を行う主建屋とは別に設け、主建屋にはさらに2週間分の使用済燃料を一時貯 蔵するものとした。

(ii) 前処理

燃料集合体を解体し、燃料ピンは集合体を単位として機械的にせん断する。 次の直接抽出工程における処理を容易にし、ヨウ素などの一部の核分裂性生物 を除去することを目的として、せん断した燃料に熱処理を施して粉体とする。 熱処理は二段階で行う。初めに、480℃で3時間処理して、UO2がU3O8に酸化さ れる際に体積が膨張することを利用し、燃料を粉体とする。この後、加振器を 用いて、燃料粉体とハルやワイヤを分離する。得られた燃料粉体は、750℃に加 熱し、ヨウ素など揮発性の核分裂生成物を気体として除去する。

(iii) 直接抽出

燃料粉体と超臨界流体間の物質移動における分離であり、固液抽出の一種と 考えられる。

この工程では、直接抽出塔において、TBPと硝酸を含む超臨界二酸化炭素(以後、TBP-sf-CO<sub>2</sub>という)を燃料粉体と接触し、U、PuおよびNpを回収する。 他の多くの成分は固体として塔内に残留する。また、前処理工程からのハルや ワイヤは、これらに付着する微量のUやPuを回収するため、ハル洗浄塔におい て同様にTBP-sf-CO<sub>2</sub>と接触する。ハルなどは収納容器に回収し、高放射性固体 廃棄物処理設備に払い出す。

TBPを12M硝酸溶液(定常運転時には回収酸を用いる)と接触し、TBP-硝酸 混合物を調製する。これをsf-CO<sub>2</sub>と混合して塔に導入する。公募研究等におい て実施した基礎試験の結果から、この時の混合比は体積単位でTBP-硝酸混合 物:sf-CO<sub>2</sub> = 135:1000とし、運転温度は40℃、運転圧力は18MPaをそれぞれ 想定した。

燃料粉体中でアクチニド元素は、U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>やPuO<sub>2</sub>などの酸化物として存在する。 これらがTBP-sf-CO<sub>2</sub>中に移行する機構は次のように考えられる。燃料粉体を TBP-sf-CO<sub>2</sub>と接触すると、アクチニドはイオン化され、硝酸および TBP 分子 と溶媒和を形成する。溶媒和はsf-CO<sub>2</sub>に対して相当の溶解度を有するのでこれ に移行する。PUREX 法では、使用済燃料を硝酸溶液に溶解し、水溶液からTBP 混合溶媒に抽出する。一方、超臨界直接抽出法は、アクチニド等のイオンが水 和した状態を経ずに抽出剤を含む相に移動する点が異なるが、移行に係わる基 礎となる反応は同様であるといえよう。なお、sf-CO<sub>2</sub>はその浸透性により見か けの反応速度を高めるが、上記の反応には寄与しないものと考えられる。

(iv) 逆抽出

直接抽出工程と異なり、水溶液と超臨界流体の二相系における操作である。 直接抽出工程において抽出されたアクチニド元素を含むTBP-sf-CO<sub>2</sub>を0.2 N 硝酸水溶液と接触し、アクチニドを水溶液に移行させる。原理はPUREX法と同 様である。水溶液とTBP-sf-CO<sub>2</sub>の流量比は、PUREX法に比べて見かけのTBP 濃度が低いので、TBP-sf-CO<sub>2</sub>:水溶液 = 5:1と設定した。

逆抽出により得られる水溶液の組成は、約120gU/L、約18gPu/L、 1.2M-HNO3を想定している。この溶液は晶析工程に供給しPu分配を行うが、晶 析操作を行うには希薄である。このため、濃縮並びに調整操作を行い、450 gU/L、 70 gPu/L、4.4 M HNO3の組成の溶液を得る。

(v) 晶析

U-Pu-Np溶液を冷却してUをUNHとして分離回収し、適度なU/Pu比のPu製 品溶液を得る。Puを含む母液のPu富化度を30%に調整するよう、約60%のUを UNH結晶として除去する。10℃まで冷却して行う。得られたUNHは5M硝酸溶 液を用いて洗浄する。この洗浄液と母液を混合して製品溶液のPu濃縮設備へと 送る。UNH結晶は溶解して再び水溶液とし、富化度調整設備へ払い出す。

(vi) MA回収

TBPを用いる溶媒抽出法ではAmやCmを分離回収することは困難であり、一

般に別の抽出剤が用いられる。この目的のために、**TRPO**<sup>1)</sup> と**Cyanex** 301<sup>2)</sup> の 二種類の抽出剤を用いることとして**MA**回収工程の設計を行った。

UやPuを回収した後に燃料粉末の残渣が直接抽出塔の底部に残留する。これからMAを回収するため、TRPO-硝酸混合物を含むsf-CO<sub>2</sub>と接触させ、このTRPO-sf-CO<sub>2</sub>にAmとCmを回収する。この時、化学的な挙動が類似する希土類元素も同伴する。MAを含むTRPO-sf-CO<sub>2</sub>は逆抽出塔に送り、希薄硝酸溶液を用いて逆抽出する。処理後の燃料粉末残渣はガラス固化処理設備へ払い出す。

Am、Cmおよび希土類元素を含む水溶液は、希土類元素を除去するために、 Cyanex 301を用いた分離サイクルにより処理する。TRPOの場合と同様に希硝 酸溶液の製品を得る。

(vii) 溶媒洗浄

TBP、TRPOやCyanexを含むsf-CO<sub>2</sub>を処理する。それぞれの流体をソルトフ リー試薬であるシュウ酸ヒドラジンおよび炭酸ヒドラジンの水溶液と接触し、 抽出剤の劣化物等を除去する。最後に希硝酸溶液で洗浄する。それぞれの流体 について、3基の洗浄塔を用いて処理する。洗浄後の溶媒は、臨界管理上の観点 から、有意な量のPuを含まないことを確認し試薬調製設備へ払い出す。洗浄廃 液は中放射性廃液として処理する。

(viii) ガラス固化

直接抽出塔内に最終的に残留するFPを含む燃料粉末残渣は、ガラス原料と混 合し誘導加熱によりガラス固化する。

(ix) 廃液処理

再処理工程から発生するプロセス廃液は、それぞれの放射能レベルに応じて 各濃縮工程へ送る。蒸発濃縮を繰り返すことにより、プロセス廃液を高放射性 廃液と極低放射性廃液に二極化して処分体の量を最小化する。

また、処理に使用する硝酸は、酸回収蒸発缶・精留塔により回収し再利用する。

(2) 物質収支および回収率

50 tHM/yの処理能力を有するプラントを設計した。設計したプラントの全体 物質収支を図 4.2.3に示す。

回収率の計算は、フェーズIにおける計算方法と同様に以下の通りである。 1)各主要プロセス(設備)の損失率を決める。損失率は以下のように定義する。

#### 損失率 = <u>製品以外の系統への移行量</u> 各設備の受入量

損失の発生要因として、スラッジへの移行、オフガス系への移行、分析試料 への移行などを考慮して発生量を決め、損失率を求める。

2)次の式で各主要プロセス(設備)の回収率を求める。

回収率 (%)=100 (%) - 損失率 (%)

3)プロセス全体の回収率を図 4.2.4に示したフローにより求める。

アクチニド元素について求めた回収率を表 4.2.1に示す。

(3) 廃棄物

物質収支や設定した機器の仕様などを元に発生する廃棄物量を見積もった。 求めた量を、同一処理能力のソルトフリー化したNEXTプロセスによるプラント の廃棄物発生量とともに表 4.2.2に示す。いずれのプロセスもナトリウム化合物 を使用しないため、ガラス固化体発生量はFP量により決定される。したがって、 両プロセスにおいてガラス固化体発生量はほぼ同量となる。また、TRU廃棄物、 低レベル廃棄物については、再処理工程機器が簡素になり、機器のインベント リが減少したことにより、機器交換・保守作業に伴う廃棄物量が減少し、超臨 界直接抽出法における発生量はNEXTプロセスに比べてTRU廃棄物で約10%

(200Lドラム缶換算で95本から70本)、低レベル廃棄物で約40%(200Lドラム缶換算で149本から90本)の削減となった。なお、高 $\beta\gamma$ 廃棄物については、超臨界直接抽出法では前処理工程に加熱炉を追加したことにより、加熱炉本体、ヒータ等の交換に伴う廃棄物が新たに発生し、25%の増加(200Lドラム缶換算で20本から25本)となった。

(4) 機器設計

超臨界直接抽出法の主要機器の特徴として、燃料を粉体とする、熱処理工程 の追加に伴い、前処理工程設備が増加すること、また、直接抽出設備について は、セルの高さや抽出塔内径の核的制限値等の制限により、1系列あたりの処理 能力はあまり大きくできず、処理量増加に伴い多系列化することが挙げられる。 また、NEXT法では連続溶解槽、遠心清澄機、遠心抽出器といった動的機器が中 心であるのに対して、超臨界直接抽出法では、これらを超臨界状態(40℃、 18MPa)で運転される直接抽出塔、ハル洗浄塔、逆抽出塔、溶媒洗浄塔といっ た静的機器で置換していることも特徴的である。

主要機器の設計条件を表 4.2.3に示す。また、図 4.2.5に直接抽出塔の概念図 を示す。

今回設計した処理能力50tHM/yのプラントにおいては、フェーズ I において

設計した処理能力200tHM/yのプラント<sup>3</sup>に比べ、ハル洗浄塔、直接抽出塔およ び逆抽出塔から成る一連の工程が4系統から1系統に減少し、これに伴い溶媒洗 浄塔の規模も小さくなった。また、貯槽、蒸発缶類についても容量が1/4となり、 再処理工程内の形状管理されている貯槽類は全て円環槽から平板槽へ仕様の緩 和が可能となった。

超臨界直接抽出法を用いた再処理プラントの各設備の主要機器および槽容量 を、同一処理能力のNEXT法を用いたプラント(フェーズ I 設計)の各設備の主 要機器および槽容量とともに表 4.2.4に示す。

(5) 配置設計

機器配置については、超臨界圧力で運転される機器を集約して配置すること とした。sf-CO<sub>2</sub>が異常に漏洩した時の負圧を維持する対策については、超臨界 圧力において運転される系統の配管の1箇所が破断し、漏洩が発生した場合にも セル内の負圧が維持できるセル容積を確保するという考え方を採用し、再処理 セルおよび保守セルを連通させることによりこれを確保することとした。

このような方針に基づき検討したセル内の機器配置を図 4.2.6から図 4.2.8に示す。MA回収工程を含めた建屋容積は約42万m<sup>3</sup>となった。

4.2.2 設計の評価

(1) 技術的成立性

超臨界直接抽出法の各工程の設計要求や現状までの実績について表 4.2.5に 示す。多くの工程について実験データが不足しており、暫定の値を適宜設定し て設計を行った。設計作業において、現在の段階で技術的に成立しえない決定 的な事項は摘出されなかった。一方、処理工程を簡素にしうる可能性を再確認 できたので、更なる実験データ(抽出剤ー硝酸錯体の超臨界CO<sub>2</sub>への溶解度、逆 抽出工程の分配係数等)の収集、燃料粉体化方法の最適化、燃料粉体の移送方 法に関する検討等を実施し、詳細な評価につなげていくことが重要と考えられ る。

(2) 安全性

(i) 平常時における一般公衆の線量評価

平常時に環境へ放出される放射性物質の量については、基本的にNEXT法と同 等と考えられるので、4.5.2 に述べる実効線量の評価値を施設の処理規模で補正 することにより、平常時に大気へ放出される放射性物質による個人の実効線量 を約1.7 $\mu$  Sv/yと推定した。この値は、判断基準である50 $\mu$  Sv/y以下を満足している。

(ii) 安全設計評価

前述の通り、超臨界直接抽出法は、従来の湿式再処理における溶解から清澄、 調整、抽出までの一連のプロセスを一つの直接抽出塔で実施可能なため、再処 理コストを大幅に低減できる可能性がある。しかし、超臨界流体の圧力が20MPa 程度と高く、従来の湿式再処理で採用してきた負圧維持の原則から外れている こと、また、TBP-硝酸錯体が高い崩壊熱をもった使用済燃料粉体(重金属酸化 物粉体)と直接接することから、その安全性について以下に検討した。

(a)検討対象範囲と設計基準事象候補選定、ハザード源洗い出し

設計したプラントの各設備、機器ごとにハザード源候補の洗い出し、起因事 象および擾乱の整理を行い、「運転時の異常な過渡変化」事象(AT事象)、「運 転時の異常な過渡変化」を超える事象(BAT事象)の候補を選定した。

表 4.2.6にAT事象の候補を、表 4.2.7にBAT事象の候補を整理した。表 4.2.6および表 4.2.7から、設計基準事象候補として挙げられる事象のうち、BAT 事象の「漏洩」に分類されるもののハザード源として「超臨界圧力機器からの 漏洩」が洗い出された。また、AT事象の「爆発への拡大」、「外部電源喪失(超 臨界流体、冷却水供給停止)」、およびBAT事象の「爆発」、「短時間の全動 力電源喪失(超臨界流体供給停止)」に分類されるもののハザード源として「TBP 錯体の急激な分解反応」が洗い出された。なお、今回の評価においては、機器 の具体案が決定していない段階では評価が困難と考えられる上記以外のハザー ド源については評価の対象外とした。

(b) 対策の立案、評価

1) 超臨界圧力機器からの漏洩

超臨界圧力機器からの漏洩に対しては、再処理セルにハル洗浄塔、直接抽出 塔、逆抽出塔各1基、溶媒洗浄塔3基の計6基の塔が設置されたケースについて、 これらの接続配管(直径約15mm)の1箇所が完全に破断し、超臨界流体がセル 内へ漏洩した場合を想定し、この場合においてもセル内の負圧が保たれている かどうかを評価することとした。なお、本検討においては、加圧系機器からの 漏洩発生による圧力上昇を緩和するために十分なセル容積を確保することによ りセル負圧を維持するという考え方を基本とした。

評価モデルとして容積10,000m<sup>3</sup>のセル(フェーズ I 設計の処理能力50tHM/y のプラントのセル容積11,700m<sup>3</sup>を小さめに丸めた)に、上記塔類の合計容積 0.5m<sup>3</sup>の超臨界圧容器を設置したモデルを考え、初期セル負圧を40mmAqとして 配管破断時のセル負圧の経時変化を計算した。計算モデルを図 4.2.9に、結果を 図 4.2.10に示す。

図 4.2.10から明らかなように、破断による超臨界流体の漏洩のため約4秒後に 負圧が最小(4.5mmAq)となるが、セル内の負圧は保たれており、その後はブ ロアの排気により、セル負圧は通常時の値に徐々に復帰する。

すなわち、本モデルでは、通常時のセル負圧を40mmAq程度に保っていれば、 配管が1箇所破断してもセル内を正圧としない設計の可能性を確認することが できた。

2) TBP錯体の急激な分解反応

TBP錯体の急激な分解反応に対しては、TBPを取扱う系の熱的制限値は先行 湿式再処理設備の許認可資料において135℃と記載されている。超臨界直接抽出 法の各機器はその温度より十分低い40℃で運転されるため、通常運転時に急激 な分解反応が発生する可能性は低いと考えられる。しかしながら、超臨界流体 の供給が停止し、超臨界流体による除熱が行われなくなった場合を想定し、直 接抽出塔温度が135℃まで上昇する場合の対策を考慮することとした。

抽出塔を無限円筒とした図 4.2.11に示すようなモデルとし、表 4.2.8に示す 前提条件において超臨界流体供給停止から抽出塔温度が135℃に達するまでの 時間を加圧および常圧条件で計算した。常圧条件では、媒質は気体のCO2である とした。計算結果を図 4.2.12および図 4.2.13に示す。

図 4.2.12および図 4.2.13から、加圧条件、常圧条件とも約23分で135℃に達 することがわかった。一方、東海再処理工場の設計思想では、警報発報から運 転員が手動で異常に対処できる時間を20分としている。これらのことから、超 臨界流体供給停止に対しては、インターロックとして抽出塔の強制冷却設備を 備える必要性が示唆された。これについては、今後詳細化する計測制御設備の 設計に反映していく。

(c) 評価のまとめ

二酸化炭素を用いることに伴う閉じ込めに関する対策、並びに有機化合物で あるTBPと硝酸が混合する系であることに対する対策が必要である。これらに ついては、安全設計を現実的に行うことができると考えられ、現在の段階で安 全性を本質的に損なう事項はないと判断できる。

(3) 経済性

超臨界直接抽出法によるMA回収工程を含む処理能力50tHM/yの再処理プラントについて、建設費(建屋費、設備費等)、操業費(人件費、修繕費、消耗品費等)をフェーズIと同様の方法により算出した。その結果、再処理単価は

41.0万円/kgHMとなった。内訳は資本費が16.5万円/kgHM、操業費が24.5万円 /kgHMである。また、再処理にかかる燃料サイクル費を評価すると0.60円/kWh となる。

また、SETFICS法によるMA回収工程を含む同一の処理能力の先進湿式再処 理プラントと比較した。結果を図 4.2.14に示す。超臨界直接抽出法を用いたプ ラントでは、建設費で約30%、操業費で約25%のコストが削減され、これを合 わせた再処理単価では約30%のコスト削減が可能なことがわかった。超臨界直 接抽出法はNEXT法に比べ、主たる分離工程を縮小でき、これに伴い多くの周辺 設備を縮小した結果である。

(4) 資源有効利用性

表 4.2.1に示したように、U、TRUの回収率99%以上という設計要求は満足で きると考えられる。損失のうち超臨界直接抽出法に特徴的なものは、燃料粉体 化のため追加した熱処理によるもので、これにより回収率は0.5%悪化している。 また、熱処理に伴って難溶性のPu富化度の高い相が生成した場合にはPu回収率 がさらに悪化するため、熱処理条件の設定には注意が必要である。

(5) 環境負荷低減性

主工程が簡素になったことにより、表4.2.2に示すとおり同一の処理能力を有 するNEXT法によるプラントに比べ、廃棄物発生量はTRU廃棄物で25%、低レ ベル放射性廃棄物で40%削減されることがわかった。

一方、ガラス固化体の発生量はFP量により決定され、NEXT法とほぼ同量となる。

(6) 核拡散抵抗性

検討対象のプロセスは、Puを単離する工程を有しておらず、超臨界直接抽出 法の各工程において、Puは単独では存在しない。なお、径ブランケット燃料に ついては脱被覆後に主工程をバイパスして燃料製造設備に送る設計としており、 バイパス処理される燃料中のPuは<sup>239</sup>Puの割合が高いままであるが、主分離工程 を経ないため、相当量のUと混在したままで取り扱うこととなる。

計量管理については、熱処理後の粉末を入量計量することとなり、計量槽に よる現行の分析とは異なった装置システムの開発が必要となる。この開発にあ たっては試料の代表性や容量等の測定等に留意が必要である。

(7) 運転・保守・補修性

設計したプラントは、遠隔運転、遠隔保守可能な設計となっているが、従来

にない熱処理、燃料粉体/固体FPの取り扱い、高圧システムの運転が追加されることから、運転・保守に関しては十分な経験を積み、異常時の対策等を明確にしていく必要がある。

#### [参考文献]

- C. Song, et al. : "Hot Test of Total Partitioning Process for the Treatment of High Saline HLLW", Proc. Global'99, USA (1999).
- J. Chen, et al. : "A Hot Test for Separating Americium from Fission Proiduct Lathanides by Purified Cyanex 301 Extraction in Centrifugal Contactors", J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, p. 325 (2002).
- 3) 田中 博,他:"再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).

元素	回収率,%
U	99.25
Pu	99.21
Np	99.21
Am	98.37
Cm	98.37
TRU	99.18

#### 表 4.2.1 超臨界直接抽出法を用いた再処理プラントの回収率

# 表 4.2.2 廃棄物発生量の比較(50tHM/y)

廃棄物分類	廃棄物形態	NEXT	Super-
			DIREX
ガラス固化体	150Lキャニスタ	60	60
ハル・エンドピース	200Lドラム缶	171	171
TRU廃棄物	200Lドラム缶	95	70
高βγ廃棄物	200Lドラム缶	20	25
低レベル廃棄物	200Lドラム缶	149	90

表 4.2.3 主要な塔の設計条件

項目	直接抽出塔	逆抽出塔	溶媒洗浄塔
設計目標	処理能力:50tHM/y/系列	処理能力:50tHM/y/系列	処理能力:50tHM/y/系列
	DF:100以上		
性能	抽 出 濃 度 :	必要向流接触時間: 10	必要向流接触時間: 1.6
	$30 gU/L$ -sf-CO $_2$	min以下	min以下
	平衡到達時間:	必要水相流量:	必要水相流量:
	10分以下	超臨界流体流量の 1/5	超臨界流体流量の1/125
	超臨界CO2流量:	水相へのU,Pu移行率:	
	$\sim$ 6L/min	$\sim 100 \%$	
	TBP濃度:0.5mol/L-sf-	水相へのTBP移行率:	
	$\mathrm{CO}_2$	$\sim 0 \%$	
	TBP反応率:~50%		
設計上の制約	内径:137mm以下(混合	内径:155 mm以下	内径:155 mm以下
	酸化物系の核的制限値)	(Pu100 wt%溶液の核的	(Pu100 wt%溶液の核的
	高さ:10m以下(セル高	制限值)	制限值)
	さを考慮)	高さ:10 m以下(セル高さ	高さ:10 m以下(セル高さ
	粉体投入・排出時間:	を考慮)	を考慮)
	4.5時間/バッチ		

衣 4.2.4 谷設幅の王晏機器と憎谷重の比
------------------------

設備	主要機器数および槽容量				
12.7用	Super-DIREX 50tHM/y	NEXT 法 50tHM/y(フェーズ I 設計)			
使用済燃料 一時貯蔵	貯蔵集合体数:284体	貯蔵集合体数:284体			
受入・貯蔵	主建家内一時貯蔵集合体数:20体	主建家内一時貯蔵集合体数:20体			
機械的前処理	一体型解体/せん断機×1 (処理能力 170min/集合体)	一体型解体/せん断機×1 (処理能力 115min/集合体)			
熱処理	酸化加熱炉×1				
溶解	-	回転ドラム型連続溶解槽 (10kgHM/hr相当×1 系列) 平板槽×3 円筒槽×1 槽容量小計 約 325L			
清澄	-	遠心清澄磯×1 平板槽×2 槽容量小計 約252L			
調整	-	平板槽×1 槽容量小計 約 200L			
晶析	キルン式晶析装置×1 (10kgHM/hr 相当) 平板槽×4 槽容量小計 約 725L	キルン式晶析装置×1 (10kgHM/hr 相当) 平板槽×4 槽容量小計 約 1,150L			
抽出	ハル洗浄塔×2 直接抽出塔×2 逆抽出塔×2 (7kgHM/hr 相当×2系列) 蒸発缶×1 平板槽×8 槽容量小計 約 1,490L	第1希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4 段) 第1抽出器(遠心抽出器、17 段) 第2希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4 段) 第2抽出器(遠心抽出器、12 段) (3kgHM/hr 相当×1 系列) 平板槽×8 槽容量小計 約 1520L			
溶媒洗浄	溶媒洗浄塔×3 平板槽×4 槽容量小計 約230L	溶媒洗浄器(遠心抽出器、6 段) 円筒槽×2 槽容量小計 約 240L			
U/Pu/MA 濃縮	Pu 溶液濃縮缶×1 平板槽×5 槽容量小計 約 810L	Pu 溶液濃縮缶×1 平板槽×6 槽容量小計 約 1,520L			
富化度調整	混合器×2 平板槽×5 円筒槽×3 槽容量小計 約2,300L	混合器×2 平板槽×5 円筒槽×3 槽容量小計 約 5,250L			
MA 回収 (MA 回収)	MA 抽出塔×2 MA 逆抽出塔×2 平板槽×4 槽容量小計 約 120L	<ul> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4段)</li> <li>抽出・洗浄器(遠心抽出器、16段)</li> <li>シュウ酸電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4段)</li> <li>硝酸逆抽出器(遠心抽出器、16段)</li> <li>HAN 電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(は段)</li> <li>Am/Cm 逆抽出器(遠心抽出器、4段)</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4段)</li> <li>RE 逆抽出器(遠心抽出器、4段)</li> <li>RE 逆抽出器(遠心抽出器、4段)</li> <li>Am/Cm 製品抽出・洗浄器(遠心抽出器、4段)</li> <li>Am/Cm 製品抽出・洗浄器(遠心抽出器、16段)</li> <li>HAN、DTPA 電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4段)</li> <li>Am/Cm 製品通出器(遠心抽出器、46)</li> <li>HAN、DTPA 電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、46)</li> <li>HAN、DTPA 電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、46)</li> <li>HAN、DTPA 電解槽×1</li> <li>希釈剤洗浄器(遠心抽出器、46)</li> <li>Am/Cm 製品通出器(遠心抽出器、46)</li> <li>円筒槽×22</li> <li>槽容量小計 約 19,755L</li> </ul>			
溶媒洗浄 (MA 回収)	溶媒洗浄塔(TRPO 系)×3 溶媒洗浄塔(Cyanex 系)×3 平板槽×8 槽容量小計 約 460L	アルカリ洗浄器(遠心抽出器、4段) 希硝酸洗浄器(遠心抽出器、4段) 希釈剤洗浄器(遠心抽出器、4段) 炭酸ヒドラジン電解槽×1 円筒槽×12 槽容量小計 約 9,010L			
リワーク (MA 回収)	-	平板槽×2 槽容量小計 約 2,920L			

主要設備	主要な技術	設計要求	技術的成立性(原理確認基礎データ、実績、 開発状況等根拠)
機械的前処理	解体・せん断	解体不良、燃料ピンの 損傷がない	解体機については、YAGレーザによる可 能性を確認している。 せん断機は耐久性や遠隔保守性につい ての確認を残すのみである。
	酸化加熱	燃料ペレットを粉体と する 粉体を損失させない	30%のPu富化度では困難であること をホット試験により確認した。設計条件を 精査し、必要なPu富化度を再検討し、必要 に応じて別の方法を検討することになる。 実験データがない。機器開発に依存す
		(>99.9 %) ヨウ素を除去する	る。 実験データがない。ホット試験が必要で ある。また、有機ヨウ素の生成を考慮する 必要がある。
再処理	直接抽出	燃料粉体から sf-CO <sub>2</sub> への抽出 (>99.9%)	U 試験を実施し、回収の可能性が確認されている。Pu 試験やホット試験を継続して行う必要がある。
		核分裂生成物等の除去	U 試験を実施し、数 10 の除染係数か 得られると見込まれている。特に希土類や Zr に着目してホット試験を継続して行う 必要がある。
		ハルからの回収 (>99.9 %)	実験データがない。ホット試験が必要で ある。
	逆抽出	sf-CO <sub>2</sub> からの逆抽出 (>99.9 %)	U 試験を行い、可能性を確認している。
	MA 回 収 (TRPO)	Am、Cm および希土類 元素の回収 (>99.9 %)	回収率に関する実験データがない。試験 研究が必要である。
		核分裂生成物等の除去	除染係数に関する実験データがない。試 験研究が必要である。
	MA 回 収 (CYANEX)	Am および Cm と希 土類元素の相互分離 (>99.9%)	回収率や除染係数に関する実験データ がない。試験研究が必要である。
	溶媒洗浄	劣化物の除去	劣化物の生成量や除染係数に関する実 験データがない。試験研究が必要である。
付帯設備	廃溶媒処理	安全、円滑な処理	希釈しないTBP を取り扱う技術の確立 を要するが、試験研究が必要である。
	CO2リサイクル	放射性物質の除去	揮発性の物質の以降率や除染係数に関 する実験データがない。試験研究が必要で ある。

# 表 4.2.5 超臨界直接抽出法の技術的成立性

分類	AI 俟佣爭家名	機畚名	設計基準事家の選定傾討	判定
A 火災への拡大	候補事象なし (ドデカンのような低引火点のもの			
B 爆発への拡大	を使用していないう 超臨界CO <sub>2</sub> の流量低下又は停止に伴う TBP硝酸錯体温度上昇	直接抽出塔 ハル洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	冷却水の流量低下又は停止に伴うTBP 硝酸錯体温度上昇	直接抽出塔 ハル洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	加熱能力増加によるTBP硝酸錯体温度 上昇	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 溶媒洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	漏洩によるTBP硝酸錯体のセル内蓄積 /温度上昇	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 溶媒洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	掃気圧空流量低下による水素濃度上 昇	U-Pu溶液受槽	水素の可燃限界(4vol%)に至るまでに運転員対 応が可能な時間余裕(1日以上)があるように 設計する。	X-2
C 臨界への拡大	候補事象なし (形状管理を行う)			
D 冷却能力の低下	「爆発への拡大」で扱う			
E 機器の過加熱	「爆発への拡大」及び「計画放出経 路外への放射性物質の過度の放出」 で扱う			
F 放射性物質の過度	希硝酸流量低下又は停止による逆抽 出失敗	U-Pu逆抽出塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
の移行	撹拌用圧空の供給過剰	U-Pu溶液受槽	廃ガス中の放射性物質の増加はわずかであり、 運転員対応に必要な時間(1日)放置しても平 常時の年間被ばく線量を十分下回る。(詳細設 計時要確認)	X-2
G 計画放出経路外へ	燃料粉末の逆流	直接抽出塔 ハル洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
の放射性物質の過 度の放出	抽出不良によるU, Puのハル又は固体 FPへの残存	直接抽出塔 ハル洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
H 放射性物質の浄化 機能の低下	抽出停止操作遅れによるFPの過抽出	直接抽出塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
I 外部電源喪失	超臨界CO <sub>2</sub> の流量停止によるTBP硝酸 錯休温度上昇	直接抽出塔 ハル洗浄塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	冷却水の流量停止によるTBP硝酸錯体 温度上昇	直接抽出塔	左記事象時の安全設計の妥当性を確認する必要 がある。	0
	水素掃気機能の一時低下	U-Pu溶液受槽	非常用ディーゼル発電機の作動により必要な電力は確保され、安全上の問題には至らない。	X-3

## 表 4.2.6 超臨界直接抽出法の AT 事象候補

4

判定の欄の説明

○ 安全設計の妥当性を確認する必要があり、設計基準事象である事象

X-1;自動起動のバックアップがある。 X-2;最大許容限度に至るに時間余裕がある事象 X-3;非常用所内電源系統の作動により、安全機能が維持される事象 X-4;外部電源喪失発生後、最大許容限度に至るに時間余裕がある。

分類	BAT候補事象名	機器名	設計基準事象の選定検討	判定
I 火災	候補事象なし (ドデカンのような低引火点のものを 使用していない)			
Ⅱ 爆発	槽内でのTBP等錯体の急激な分解反 応	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 溶媒洗浄塔	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
	セル内でのTBP等錯体の急激な分解 反応	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 溶媒洗浄塔	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
	水素爆発	U-Pu溶液受槽	発生水素を安全圧空系により掃気している。仮に 安全圧縮機が停止したとしても、空気貯槽は30分 以上の供給能力を有しているので、水素の可燃限 界(4vo1%)に至るまでには予備機起動のが時間余裕 (30分以上)がある。	X-1(設 計時確認 を要す)
Ⅲ臨界	漏洩した溶液の臨界	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 U-Pu溶液受槽 溶媒洗浄塔	漏洩液受皿の集液部に二重化した漏洩検知装置を 設置しており、速やかに漏洩を検知し運転員対応 (工程停止)する時間余裕(1時間)があるた め、漏洩した溶液の液厚が臨界制限液厚を下廻る ので臨界安全上の問題はない。	X-1(設 計時確認 を要す)
IV 漏洩	配管、弁等からセルへの漏洩	直接抽出塔 ハル洗浄塔 U-Pu逆抽出塔 U-Pu溶液受槽 溶媒洗浄塔	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
	燃料粉末のセルへの漏洩	直接抽出塔 ハル洗浄塔	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
V 機能喪失	冷却機能喪失、超臨界CO <sub>2</sub> 供給機能停止 等を別途評価			
VI 短時間の全動力電 源喪失	短時間の全動力電源喪失による超臨界 C02の流量停止及び冷却水流量停止に伴 う冷却機能喪失	直接抽出塔 ハル洗浄塔	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
	短時間の全動力電源喪失に伴う水素掃 気機能の喪失	U-Pu溶液受槽	発生の可能性及びその結果の影響の大きさとの関 連で、影響緩和対策の妥当性を確認する必要があ る。	0
VII 重量物の落下	候補事象なし			

#### 表 4.2.7 超臨界直接抽出法の BAT 事象候補

判定の欄の説明

X-2; 十分な事故防止対策に加えて十分な点検管理で健全性が確認できるため、設計基準事象とする必要のない事象

項目	計算	条件	
	超臨界条件	常圧条件	
崩壊熱, W	79.3	同左	
充填物質	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> および	FP および TBP-U	
	TBP-U		
空隙部物質	$Sf-CO_2$	$CO_2$	
熱伝達係数,W/m·K	0.761	0.705	
空隙率	0.759	同左	
固相熱伝導率,W/m·K	0.28 (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	8.2 (UO <sub>2</sub> の値)	
流体熱伝導率,W/m·K	0.08	0.02	
固体内熱伝導距離	2	同左	
粒子直径, µm	5	同左	
放射熱伝達係数,W/m·K	0	同左	
初期温度,℃	40	同左	
直接抽出塔外表面温度,	40	同左	
°C			

# 表 4.2.8 温度上昇計算前提条件



図 4.2.1 超臨界直接抽出法 (Super-DIREX 法) のブロックフロー







工程	受入	せん断・解体	熱処理	直接抽出	晶析	Am/Cm回収	濃縮・ 富化度調整
物流番号	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1
	使用済燃料						
成分	集合体	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス
	(炉心)						
U	1. 38E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00
Pu	2.14E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00
MA	1.08E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00
FP	1.65E+01	2.33E+00	1.53E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
物流番号	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2
	使用済燃料						
まム	集合体	肉斑腸	应弃物	司政济	肉斑枷	肉斑枷	肉斑腸
成 77	(ブランケッ	焼米忉	焼米物	詞登仪	焼朱忉	<b>焼</b> 朱 彻	焼米忉
	۲)						
U	4. 93E+01	0.00E+00	0.00E+00	1. 38E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pu	1.77E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.14E+01	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00
MA	6.54E-03	0.00E+00	0.00E+00	8.46E-02	0.00E+00	9.83E-03	0.00E+00
FP	4.84E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5. 50E+00	0.00E+00
物流番号		2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3
中心		++ 4. 医酸粘	<b>林井 本1 本1</b>	<b>肉</b>	11家 汯	MA滚流	U/Pu/MA溶液
112,73		已心到然科	እ። ተተ ተ/ጋ	庞未初	の谷心	WIA /谷 /仪	(1) 内側炉心用
U		1.87E+02	1.38E+02	1.38E-01	8.82E+01	0.00E+00	6.13E+01
Pu		2.32E+01	2.14E+01	3.21E-02	1.37E-01	0. 00E+00	1.19E+01
MA		1.08E+00	1.08E+00	9.40E-03	5.41E-04	9.73E-01	5. 59E-01
FP		1.47E+01	1.41E+01	8.01E+00	0.00E+00	6.12E-01	3.22E-01
物流番号			3-4	4-4	5-4		7-4
成分			<b>燃</b> 約 約	MA诙汯	II/Pu/MA 滚 汯		U/Pu/MA溶液
120.75			እ። ተተ ነ/ጋ		0/1 u/ m/( <del>/H</del> /)		(2)外側炉心用
U			4.93E+01	0.00E+00	4.96E+01		3. 15E+01
Pu			1.77E+00	0.00E+00	2.12E+01		1.07E+01
MA			6.54E-03	9.83E-01	8. 40E-02		5.04E-01
FP			4.84E-01	6. 12E+00	0.00E+00		2.90E-01
物流番号							7-5
成分							U溶液
U							4. 80E+01
Pu							7. 45E-02
MA							2.95E-04
FP							0.00E+00
物流番号							7-6
	$\sim$				$\sim$		U/Pu/MA溶液
成分							(3)
	$\sim$						燃料製造より
U					~		3.09E+00
Pu							1.32E+00
MA							5.24E-03
FP							0.00E+00
					(*)単	位は全てkg/dav	

図 4.2.3 超臨界直接抽出法物質収支図(50tHM/y)



全体回収率 = HE × {(EX1 × CR1+EX2 × ST) × CO+EX1 × CR2} × AD

図 4.2.4 回収率算出フロー



図 4.2.5 直接抽出塔の概念図



図 4.2.6 超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置(地下2階)



図 4.2.7 超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置(地下1階)


図 4.2.8 超臨界直接抽出法を用いた湿式再処理プラントのセル内機器配置 (地上2階および屋上)



図 4.2.9 抽出塔接続配管破損時セル圧力評価のモデル



図 4.2.10 配管破断時のセル負圧の経時変化



図 4.2.11 直接抽出塔の計算モデル



図 4.2.12 二酸化炭素供給停止時の温度上昇(加圧下)



図 4.2.13 二酸化炭素供給停止時の温度上昇(常圧下)



図 4.2.14 NEXT プロセスとの経済性の比較

### 4.3 Am および Cm 回収技術のプロセス設計

フェーズI研究において、先進湿式法のリファレンスシステムにはSETFICS 法を検討した。課題として硝酸ナトリウム NaNO<sub>3</sub> を使用することによるガラ ス固化体の発生量の増大等が指摘された<sup>1)</sup>。これを受け、フェーズII ではソルト フリー化したSETFICS法、アミン抽出法およびイオン交換法を比較検討した。 本節では、各技術に関する技術検討のあらましを示す。フェーズ II におけるこ れらについての検討の着眼点を表 4.3.1に示す。なお、イオン交換法については、 本検討では抽出クロマトグラフィーによる工程を対象とするので以後はそのよ うに呼ぶ。プラントの設計研究においては、200tHM/y 規模の施設を想定した。

#### 4.3.1 SETFICS 法

(1) 分離化学

TRUEX溶媒を用いる溶媒抽出法である。有機リン抽出剤のCMPO、TBPと飽 和炭化水素希釈剤の混合物をTRUEX溶媒と呼ぶ。三価アクチニド(An(III))であ るAmおよびCmと希土類元素の相互分離は、TRUEX溶媒とジエチレントリアミ ン五酢酸(DTPA)および硝酸塩の混合溶液を用いることにより行う。LaからNd までの元素を分離できるので、希土類元素についておよそ9割の除去率を達成す る。主たる反応は次の式で表され、希土類元素を抽出し、An(III)はDTPAとの 錯体を形成させ水溶液中に留めるよう分離条件を決定する。

$$\mathbf{M}^{3+} + 3 \operatorname{NO}_{3}^{-} + 3 \operatorname{\overline{CMPO}} \longleftrightarrow \mathbf{M} (\operatorname{NO}_{3})_{3} \cdot 3 \operatorname{CMPO}$$
(1)

 $M^{3+} + DTPA^{5-} \longleftrightarrow M \cdot DTPA^{2-}$ 

(2)

DTPAを含む水溶液のpHは2に調整する必要があるので、塩析剤を混合することが必須となる。このため、製品溶液はDTPAと硝酸塩を含むが、いずれも有機相への分配比が極く小さいため、酸濃度を調整した上で再び溶媒抽出処理を行うことで除去できる。これらは試験研究により確かめられている。

従来NaNO<sub>3</sub>を、An(III)を選択的に逆抽出するための逆抽出液に混合して用いていた。これをソルトフリー化合物である硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)に 替えることについては、上記の分離に係わる反応への影響、薬品としての取り 扱いに着目する必要がある。三価金属の相互分離については、DTPA-HAN溶液 に替えても逆抽出時の分離係数に変化はないので<sup>20</sup>、分離工程に供給する場合の 留意点を検討する。

HANはカタログ製品として販売されておらず特別に合成を依頼しなければならないが、30%の水溶液を入手することができる。An(III)逆抽出液としては2M

HAN溶液を想定しており、30%溶液を用いての調製作業は適当と考えられる。

PUREX法においてHANはPuの還元剤として用いられ、反応性が高い物質で あるといえる。このため、再利用する時のHANおよびその分解生成物の濃度管 理には特別の注意を払う必要がある。水溶液中の窒素化合物の分析や濃度の制 御は煩雑な操作になるものと見込まれるため、使用したHANは分解処理するこ とが適当と考えられる。以上から、次項で述べるプロセスフローダイアグラム はHANを再利用しない前提で作成した。

塩析剤をワンス・スルーで使用するので、使用量を最小化することがより重要 となる。対策としては、溶媒への金属の最大装荷濃度限度を引き上げることが 効果的であり、これはすべての廃液の削減をもたらす。本検討では、TRUEX溶 媒中のTBP濃度を前設計における1.0 M から上げ、TRUEX溶媒の上限の濃度と される1.4Mとすることとした。

(2) プロセスフロー

多段向流抽出法により溶媒抽出を行う。プロセスフローを図 4.3.1に示すが、 基本的にフェーズIにおける検討と同様である。分離プロセスはSETFICS工程と TRUEX工程から成る。SETFICS工程では、簡素化溶媒抽出工程で発生する抽 出残液を処理し、An(III)製品を回収する。この中間的な製品溶液にはDTPAと 硝酸塩が含まれるので、TRUEX工程において三価金属を抽出することによりこ れらと分離する。主な操作の概要を表 4.3.2に示す。抽出器から排出される水溶 液は希釈剤洗浄を施し、溶液中の有機物成分を除去する。逆抽出後の溶媒は、 残留するFP成分や劣化生成物を除去するために、アルカリ溶液と接触する。シ ュウ酸、HANおよびDTPAを含む廃液は、電気分解によりこれらを分解した後 に、廃液の処理工程に送る。

建設費の設備費用を低減するために抽出器段数の削減が望まれる。SETFICS 工程のフローシートは試験研究の結果に基づいて作成されており、現時点にお いては削減の余地は小さい。一方、TRUEX工程は抽出と逆抽出を行う単純な工 程であり、特に抽出部においてはDTPAと硝酸塩の洗浄を行えば良いので、簡素 化することが可能と考えられる。本検討では、抽出部を12段、逆抽出部を8段と し、フェーズIの検討に対して約4割の段数を削減することとした。

(3) 主たる機器

溶媒抽出のための装置には遠心抽出器を用いる。1系列の装置で所定の処理量 を得るものとする。SETFICS、TRUEXおよび溶媒洗浄工程のそれぞれについ て、84、28および6段を用い、計118段である。

槽は計35基であり、平均1m<sup>3</sup>の容量である。また、4基の電解槽を要する。

(4) 機器配置

検討した配置を図 4.3.2に示す。機器は2つの階に配置した。定期的な保守を 要する機器は上階に、槽類等の保守が不要な機器は下階に設置した。上階の主 要な機器は遠心抽出器と電解槽である。

(5) フェーズ I 検討との違い

従来、TRUEX工程の段数が過剰であったのでこれを見直し、抽出器数はフェ ーズI検討において136段であったものを118段に削減できた。

結果として主要な工程機器の配置に必要な面積は、約2100m<sup>2</sup>(約13m×約80m×2階)から720m<sup>2</sup>(約8m×約50m,約8m×約40m)と低減できた。

4.3.2 抽出クロマトグラフィー

(1) 分離化学

均一な細孔径を有するシリカ粒子に基づく分離技術である。直径が40から 50μmで600nm径の細孔を多数有するシリカ粒子に、スチレンジビニルベンゼン(SDB)の被覆を施し、抽出剤分子を保持させたものを吸着材として用いる。分離の機能は抽出剤に依存するので、目的に応じて用いる抽出剤を替えることで 様々な用途に応用することができる。また、基本的な分離操作の条件は液液抽 出と同様となるので、溶媒抽出により原理等が明らかになっている方法はこれ を準用することができる。例えば、CMPOを用いる工程はTRUEX法と同様の機 能を果たし、操作方法も似たものとなる。

上述のシリカ粒子が均一な細孔を持ち機械的な剛性が大きいことから、効率 的かつ大規模な充填塔を構築することができる。U-235の濃縮を目的とした陰イ オン交換のセミコマーシャルプラントでは、塔径1m、塔長3mの設備が運転され、 技術的に困難とされてきた化学法による同位体濃縮を実現した実績がある<sup>3)</sup>。本 法においては、放射線による抽出剤等の分解を最小化するためにこの特別なシ リカ粒子が好適である。

本検討では、抽出剤としてCMPOとCyanex 301を用いたプロセスを対象とした。Cyanex 301はリンと硫黄を含む酸性の抽出剤であり、An(III)と希土類元素の相互分離に用いる際には、市販品をさらに精製して用いる。不純物や分解により精製する劣化物はAn(III)と希土類の分離性能を著しく低下させることに留意しなければならない。

CMPOを用いた分離サイクル(以下、CMPOサイクルと呼ぶ)では、簡素化 溶媒抽出工程の廃液を供給し、An(III)と希土類元素を選択的に吸着する。これ を希硝酸溶液により溶離させ、Cyanex 301を用いた分離サイクル(以下、Cyanex サイクルと呼ぶ)では、中間製品のpHを調整してAn(III)のみを選択的に吸着し、 希土類元素と分離して回収する。

抽出剤はSDB被覆の表面に静的に保持されているので、溶離液中での溶解度 に依存して一部の抽出剤が損失することとなる。液液抽出と同様に、水溶液中 の抽出剤を回収する必要があるが、クロマトグラフィーを中心とした工程とな るので、固体の吸着材を用いた回収方法が適当と考えられる。本法の吸着材の 支持体であるSDB被覆したシリカ粒子(以下、SiO<sub>2</sub>-Pと呼ぶ)を用いることと した。

吸着材を使用する限界は、抽出剤の流出と放射線等による抽出剤およびSDB の劣化が支配すると考えられる。本検討では、速やかな吸着および脱着が可能 となることを前提として、抽出剤の流出が使用限界を律するものとして物質収 支を検討した。吸着材を交換する作業回数を低減するために、溶離液はあらか じめ抽出剤で飽和してから分離塔に供給することとした。

使用済み吸着材の処理は、抽出剤とSDB被覆に分けて行うこととし、抽出剤 は有機溶剤によりSiO<sub>2</sub>-Pから回収し、SDBは熱分解することとした。

(2) プロセスフロー

検討したプロセスフローを図 4.3.3に示す。

CMPOサイクルでは、簡素化溶媒抽出工程から受け入れた供給液は必要な調整を行った後に分離塔に供給し、三価金属を吸着する。溶離液はあらかじめCMPOを飽和させてから分離塔に供給し、分離塔からの溶出液からはCMPOを回収する。希硝酸溶液により剥離したAn(III)は適切に分画して製品として回収する。Cyanexサイクルでも同様の操作を行い、An(III)を希土類元素と分離して製品溶液を得る。

使用した吸着材は、カラム法により有機溶剤と接触して抽出剤を除去し、再び抽出剤を保持する操作を行うか、もしくはSDBを加熱により分解する。抽出剤の保持は抽出剤を含む有機溶剤との接触により行い、有機溶剤は減圧下で揮発させて除去する。有機溶剤にはアセトンなどが用いられることが確かめられている。

(3) 主たる機器

クロマトグラフィーのための装置としてSiO<sub>2</sub>-P吸着材を充填した塔を用いる。 1系列の装置で所定の処理量を得るものとする。分離塔は円筒形を想定し、 CMPOサイクルの塔は直径30cmおよび高さ55cm(容量は約40L)、Cyanexサ イクルは直径15cmおよび高さ30cm(容量は約5L)である。抽出剤の飽和塔お よび回収塔もそれぞれ同等の寸法である。操作圧力は数気圧程度になるものと 思われる。

槽は計22基であり、平均1.5m<sup>3</sup>の容量である。また、2基の電解槽を要する。 使用済み吸着材の処理設備として、溶媒回収塔および吸着剤再生塔を備える。 いずれも寸法は直径15cmおよび高さ30cmである。また、吸着剤の乾燥装置と分 解炉を備える。

(4) 機器配置

検討した配置を図 4.3.4に示す。機器は2つの階に配置した。定期的な保守を 要する機器は上階に、槽類等の保守が不要な機器は下階に設置した。上階の主 要な機器は吸着材等を充填した塔、電解槽、乾燥装置、分解炉、ポンプである。 下階には槽類を配置した。

(5) フェーズ I 検討との違い

塔の数はフェーズI検討において2基であったが、抽出剤の飽和、回収等の処 理を行うため8基に増加した。一方、排出される水溶液から有機物を回収するた めに12段の遠心抽出器を使用することとしていたが、これを塔に替えたため全 廃することができた。

主要な工程機器の配置に必要な面積は、約620m<sup>2</sup>(約13m×約24m×2階)から480m<sup>2</sup>(約8m×約30m×2階)と低減できた。

4.3.3 アミン抽出法

フェーズI研究においては、抽出剤としてトリオクチルアミン(TOA)を用いた 溶媒抽出法を検討した。An(III)を抽出するためには、An(IV)に酸化して多価陰 イオンであるリンタングステン酸を用いて安定化、陰イオン化して抽出操作を 行う。別の試験研究の成果から、TOAによるAmの溶媒抽出では酸化された Am(IV)が溶媒との接触により還元されてしまい、期待される分配比が得られな いことが分かった。一方、ジオクチルアミン(DOA)を用いるとAm(IV)とリンタ ングステン酸の錯体が硝酸溶液から抽出できることが報告されている<sup>4</sup>。そこで、 本法に関する検討は、抽出剤をTOAからDOAに替えて行うこととした。

AmとCmはDOA混合溶媒により比較的低い硝酸濃度において抽出され、3M 以上の溶液を対象とすることはできない。これに対して、UやPuは高酸性条件 において抽出が容易となり、これらをともに回収する条件は得られない。結果 として、本検討では、AmとCmを簡素化溶媒抽出工程の抽出残液から回収する ことを目的として行った。 (1) 分離化学

アミンは陰イオンを抽出する液体イオン交換体として働く。AmとCmは水溶 液中でIV価で存在しうるが不安定であるので、多価陰イオンと作用させ、IV価 の状態を安定化するとともに負の電荷を有する錯体を形成し、アミンにより抽 出する。Amの酸化還元電位は非常に高いが、リンタングステン酸K10P2W17O61が 共存する条件では、電位が+1.52Vとなることが報告されており<sup>5</sup>、技術的な障壁 が高いと考えられる高濃度硝酸溶液中での酸化が容易となる。Cmの酸化還元電 位はAmよりも高く、リンタングステン酸が存在する場合でも2Vを超えるので、 酸化剤の適用はより困難となり、電解酸化技術の確立が求められる。酸化の速 度や収率は水溶液の硝酸濃度に依存し、酸濃度が高くなると酸化は非効率的と なる。

DOAはドデカンおよび2-エチルヘキシルアルコールと混合して用いる。水溶 液との相分離を考慮して、10%DOA-60%ドデカン-30% 2-エチルヘキシルア ルコールを用いる。DOA混合溶媒によるAm錯体の分配比は硝酸濃度に依存し、 低濃度の時に大きく、酸濃度とともに減少する。簡素化溶媒抽出工程の抽出残 液を処理する場合には、An(III)を酸化した後に溶媒抽出操作を行うことになる が、いずれにおいても硝酸濃度の調整が重要である。また、An(IV)の還元によ る抽出時の損失を低減するため、溶媒と水溶液の混合と分離は速やかに行う必 要があり、抽出装置としては遠心抽出器が適当である。

核分裂生成物や腐食生成物には、酸化と抽出の反応を阻害すると考えられる 元素が存在する。例えば、CeはCe(IV)に酸化されDOA混合溶媒にリンタングス テン酸錯体として抽出されるので、いずれの反応も妨害しうる。TcはTcO4<sup>-</sup>が抽 出されると考えられる。

リンタングステン酸は多価の陰イオンであるので溶媒に良く抽出される。こ のため、抽出残液にはほとんど移行しないと考えられる。一般に弱酸性やアル カリ溶液で加水分解しやすく、還元剤であるHANと接触すると分解するので、 この点に注意してプロセスフローを決定する。

(2) プロセスフロー

検討したプロセスフローを図 4.3.5に示す。

簡素化溶媒抽出工程から受け入れる抽出残液は酸濃度が高いので、希釈して酸化および抽出処理に供する。硝酸濃度は酸化と抽出が可能と考えられる1.5Mを想定し、以後の工程の物質収支を検討した。溶媒抽出は抽出、An逆抽出、FP逆抽出および溶媒洗浄の工程から成る。抽出工程において、An(IV)とともにFPの一部が共に抽出される。Anを選択的に逆抽出して製品溶液とするが、相互分離を効率的に行うためにAn(IV)のみを還元して逆抽出するようヒドラジンを含

む溶液を逆抽出液として供給する。FPは高濃度の硝酸溶液で装荷溶媒から回収 する。

(3) 主たる機器

溶媒抽出のための装置には遠心抽出器を用いる。1系列の装置で所定の処理量 を得るものとする。抽出、An(III)逆抽出、FP逆抽出および溶媒洗浄工程のそれ ぞれについて、10、10、8および6段を用い、計34段である。

槽は計17基であり、平均2.2m<sup>3</sup>の容量である。また、2基の電解槽を要する。

(4) 機器配置

検討した配置を図 4.3.6に示す。配置はSETFICS法と同様である。

#### [参考文献]

- 田中 博,他:"再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- Y. Koma, et al. : "Enhancement of the Mutual Separation of Lanthanide Elements in the Solvent Extraction Based on the CMPO-TBP Mixed Solvent by Using a DTPA-Nitrate Solution", J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 35, p. 130 (1999).
- 3) 武田邦彦: "化学法ウラン濃縮", 化学工学, Vol. 54, p. 130 (1990).
- B. F. Myasoedov, et al. : "Extraction of Tetravalent Americium", J. Less-Common Metal., Vol. 122, p. 195 (1986).
- V. N. Kosyakov, et al. : "Production and Stablity of Americium(IV), Curium(IV), and Californium(IV) in Solutions of Potassium Phosphotungstate", Soviet Radiochemistry, Vol. 19, p. 418 (1977).

方法	検討すべき内容				
SETFICS法	<ul> <li>・塩析剤として硝酸ナトリウム (NaNO<sub>3</sub>)を使用するが、使用後に Na をガラス固 化体に混合すると廃棄体の数が大幅に増加する。そのため、代替となる化合物の 適用を検討する必要がある。</li> <li>・工程が複雑なことから必要な段数が多くなるため、より簡素な工程を検討する必 要がある</li> </ul>				
アミン抽出法	<ul> <li>・U、Np および Pu の回収に関して先進湿式法に比べて経済性等に顕著な優位性が 認められず、代替としての魅力は小さいと考えられる。すべてのアクチニド元素 を一括して分離回収するプロセスの実現性を検討する必要がある。</li> </ul>				
イオン交換法 (抽出クロマトグラフ ィー)	・U、Np および Pu の回収に関して先進湿式法法に比べて経済性等に顕著な優位性 が認められず、代替としての魅力は小さいと考えられる。一方、Amおよび Cm を 回収するプロセスである抽出クロマトグラフィーはSETFICS 法と比べて建設費 を大きく低減できる見込みが得られ、プロセスの実現性を検討する必要がある。				

## 表 4.3.1 検討の対象とした Am および Cm 回収プロセス

#### 表 4.3.2 SETFICS および TRUEX 工程の概要

工程		操作の概要		
SETFICS	抽出一洗浄部	<ul> <li>・TRUEX法と同様に行う。</li> <li>・Zr と Mo の除染度を高めるため、供給液にシュウ酸を添加する。</li> <li>・TRUEX 溶媒と供給液を接触して、An(III) と希土類元素を抽出し、他の成分から分離する。</li> <li>・酸濃度の異なる2種類の洗浄液を供給し、FP 等を除染する。</li> <li>・排出される装荷溶媒には三価金属とともに硝酸が抽出される。</li> </ul>		
	硝酸逆抽出部	・装荷溶媒中の硝酸を除去するため、硝酸塩溶液と接触する。		
	An(III) 逆抽出部	・DTPAと硝酸塩の混合溶液を用いてAn(III)製品溶液を得る。		
	Ln 逆抽出部	<ul> <li>TRUEX法と同様に行う。</li> <li>・装荷溶媒中に残留する希土類元素を希硝酸溶液を用いて逆抽出する。</li> </ul>		
TRUEX	抽出部	<ul> <li>An(III) 中間製品溶液をわずかに酸性化する。</li> <li>TRUEX 溶媒と供給液を接触して、An(III) と希土類元素を抽出し、 DTPA および硝酸塩を分離する。</li> </ul>		
	逆抽出部	・装荷溶媒中の三価金属を希硝酸溶液を用いて逆抽出する。		



図 4.3.1 SETFICS 工程のプロセスフロー



(平面図)

図 4.3.2 SETFICS 工程機器の配置例 (200tHM/y 規模の施設)



図 4.3.3 抽出クロマトグラフィー工程のプロセスフロー



(平面図)

図 4.3.4 抽出クロマトグラフィー工程機器の配置例(200tHM/y 規模の施設)







図 4.3.6 アミン抽出工程機器の配置例(200tHM/y 規模の施設)

#### 4.4 代替技術の評価

4.4.1 先進湿式法における Am および Cm 回収工程

3つの分離技術を比較してリファレンスプロセスに組み込む方法を選択した。 比較評価は、技術的成立性、安全性、経済性、環境負荷低減の観点から行った。 それぞれの比較評価のポイントを表 4.4.1に示す。分離プロセスの一部となる工 程を相互に比較することが目的であるので、3章に示された内容から重要と考え られるものを抜き出して設定した。

(1) 技術的成立性

SETFICS法の分離は原理的に明らかになっている。除染性能については、Eu やSmなどの一部のランタニドが随伴するが、その他の成分は除去でき、問題と はならない。目的の回収率の達成は、現在のフローシートに基づいた実証試験 による確証を待たねばならないが、得られなかった場合においても、液液抽出 法であるので供給する溶液の流量を変更するなどの些少な変更で可能と考えら れる。

アミン抽出法の原理は概ね明らかになっていると考えられるが、所定の回収率と除染度を得る条件は求められていない。高酸濃度溶液中でのAmとCmの酸化は実験的に確認する必要があり、酸化処理により得られたAm(IV)およびCm(IV)の抽出と逆抽出の挙動も同様である。また、酸化および抽出におけるFPや腐食生成物の影響も評価しなければならない。

抽出クロマトグラフィーの分離の原理は溶媒抽出と同様であり、TRUEX法と Cyanex 301を用いた方法については明らかにされている。回収率と除染性能に 関しては、カラム法であるので運転操作の条件を適切に決定することにより達 成は可能と考えられる。

結果としては、技術的成立性の観点からSETFICS法および抽出クロマトグラフィーについては問題がないが、アミン抽出法には明らかにすべき課題が残されているといえる。ただし、現在のところ、これらの課題はアミン抽出法の可能性を否定するものではない。

(2) 安全性

SETFICS法は常温および常圧下で行う溶媒抽出法であるので、検討が必要と なるのは特有な薬品の安全性である。TRUEX溶媒の引火点、並びに溶媒と硝酸 の発熱反応の反応熱(発熱量)は30%TBP-n-ドデカン溶媒と同等である<sup>1)</sup>。放射 線による分解のG値はCCl4希釈の溶媒ではあるがTBPの場合と同等との報告が ある<sup>2)</sup>。TRUEX溶媒の取り扱いは簡素化溶媒抽出法における TBP 溶媒と同様 に行えば良いといえる。HAN はこれを取り扱う施設での事故事例が報告されて いるが、取り扱いの注意点が報告されており<sup>3)</sup>、これに基づき適切な取り扱い方 法を採用していくことで対応できる。DTPA は化学的に安定な化合物であり、 取り扱いにおいて特別な注意は要しない。

アミン抽出法も溶媒抽出法であり、特有な薬品としてDOA混合溶媒、リンタ ングステン酸およびヒドラジンが挙げられる。DOAを混合するアルコールの引 火点はドデカンよりも高いので、温度管理はTBP溶媒と同様に行えば良い。リ ンタングステン酸は無機化合物であり、還元剤であるHANとの接触においてリ ン酸およびタングステン酸化合物に分解していくが、爆発や火災には至らない。 ヒドラジンは水溶液として取り扱い、濃度を制御することで安全を確保できる。 被処理液の酸化については、無機水溶液中での反応であるので、火災等の可能 性はない。

抽出クロマトグラフィーは、抽出剤を用いるので溶媒抽出と同様の考慮が必要である。特有な薬品としてはCMPOとCyanex 301があるが、CMPOはSETFICS法と同様であり特に問題はない。Cyanex 301の引火点はドデカンよりも高いので温度制限値は簡素化溶媒抽出法よりも高く設定できる。抽出剤の脱着などに用いる有機溶剤は蒸気圧の低いものを選定する必要がある。また、カラム操作を行うので、万が一の除熱能力が低下した場合を含めて、閉じこめに対する考慮を要する。詳細は実規模の機器試験や劣化物の影響に関する検討を行い、加圧する操作の必要性を見極めた上で再び評価する必要があるが、減圧により必要な流速を確保するなど、安全設計は現実的な範囲で対応できると考えられる。

結果としては、用いる薬品の中で特に安全を損なうものはなく、抽出クロマ トグラフィーの閉じこめ設計も現時点において可能であると考えられる。

(3) 環境負荷低減性

環境負荷低減性は発生廃棄物量で比較した。水溶液、有機溶媒および交換に より廃棄物となる機器(固体廃棄物)について見積もられた発生質量を表 4.4.2に示す。いずれの廃棄物も中間的な形態であり、再利用や減容を考慮しな い値である。

廃液の発生は、SETFICS法が最大であり、以下、アミン抽出法、抽出クロマ トグラフィーの順である。抽出クロマトグラフィーは希釈剤を使用しないので、 有機溶媒の発生量が最小である。また、固体については、SETFICS法とアミン 抽出法が同等であり、抽出クロマトグラフィーが最小となった。 (4) 経済性

設備と建屋に係る費用を比較する(表 4.4.3)。建屋の費用はセルの容積に相関 するので主要機器を配置するセルの容積を示した。

(5) プロセスの選定

前述の内容を表 4.4.4にまとめる。技術的成立性と安全性については、3つの 方法の間に決定的な差はない。したがって、発生廃棄物量と設備費用を見積も った値を比較して決定することとなる。表から明らかなように、現時点におい て最も有望であると考えられる方法は抽出クロマトグラフィーであり、これを 先進湿式法のリファレンスプロセスに組み込むこととした。

4.4.2 先進湿式法の代替技術である超臨界直接抽出法

超臨界直接抽出法を先進湿式法(NEXT法)と比較した。

(1) 技術的成立性

分離の原理についてNEXT法では大きな課題はない。一方、超臨界直接抽出法 は現時点では実証がなされていないので、技術的成立性に関する最終的な判断 については実証データが整った後に行うべきであると考える。超臨界直接抽出 法は、加熱処理、直接抽出、逆抽出等の過程に関する実証が必要である。

いずれのシステムも機器開発を要するが、超臨界直接抽出法は原理実証の段 階であるのでより基礎的な開発を要する。基礎的な取り組みを要する装置は、 NEXT法における晶析装置、超臨界直接抽出法における加熱処理装置、直接抽出 塔、ハル洗浄塔、逆抽出塔、二酸化炭素の処理設備が挙げられる。

NEXT 法では遵守や準拠が特別に難しい基準等はない。超臨界直接抽出法は 高圧ガス保安法に対する考慮が必要である。

(2) 安全性

安全設計はいずれにも重大な問題はない。NEXTでは溶解から晶析工程間での 核物質の析出に対する考慮、抽出クロマトグラフィーにおける高濃度のAmおよ びCmの取り扱いが重要である。超臨界直接抽出法は高圧ガスの閉じこめに対す る考慮が重要である。

(3) 環境負荷低減性

発生廃棄物はTRUおよび低レベル放射性廃棄物のいずれについても超臨界直接抽出法が有利である。

(4) 経済性

建設・操業費は超臨界直接抽出法が有利で、同処理規模(50 tHM/y)のNEXT 法(フェーズI設計)に比べて建設費は約30%、操業費は約25%それぞれ低減で きる見込みがある。

(5) 超臨界直接抽出法についての評価

総じて、超臨界直接抽出法は費用および廃棄物の点で有利となる見込みがあ り、魅力的であるといえる。しかしながら、超臨界直接抽出法の技術的な課題 は、分離化学の原理的な確認や主要な装置の開発を含み、不確定要素が大きい ことである。超臨界直接抽出法は技術の成立性において NEXT に比べてより基 礎的な段階にあり、今後の10年程度で技術的な成立を確かなものとするには格 別の取り組みを要すると考えられる。主として、設計に必要な物質収支に関す る情報、これに基づき行う機器開発を今後手がけなければならない。主に着目 すべき点を例として以下に示す。

 ○超臨界二酸化炭素(sf-CO<sub>2</sub>)-TBP-硝酸の系で酸化物から核物質の回収を 行う(以下、直接抽出)が、水が共存しない系では、三価金属イオン (希土類元素、AmおよびCm)をともに回収することは避けられない<sup>4</sup>)。
 その程度は、UやPuの回収率に依存し、高い回収率を得ようとすると、 除染係数が悪くなる。これらの関係を明らかにするためには、照射燃料 を用いた試験を十分に行い、基礎的なデータを蓄積する必要がある。

○直接抽出、ハル洗浄と逆抽出・溶媒洗浄工程の機器はそれぞれ固体(燃料および残渣)、固体(ハル)、水溶液(硝酸もしくはアルカリ)とsf-CO₂の 二相系であり、装置設計は異なったものとなる。直接抽出については、 抽出後に残ると考えられる残渣の特性に関するデータが重要であるが、 これを得るためには前項と同様の照射燃料を用いた試験が必要である。

以上から、現時点において、超臨界直接抽出法は先進湿式法を代替する技術 としては未成熟であると判断できる。しかしながら、超臨界直接抽出法は費用 などの点で有利であり、工程を簡素化する方策としてNEXTの溶解と共除染を一 時に行うプロセスを採用しており分離化学の観点からも継続して着目すべきで ある。このことから、超臨界直接抽出法の技術的成立性を早期に確認するよう、 開発資源を十分に考慮しながら試験および設計研究を継続することが望まれる。

#### [参考文献]

- 林 直美,武田 伸荘: "TRUEX溶媒の熱特性および硝酸との発熱反応に関する試験",動燃 技報, Vol. 97, p. 18 (1996).
- Chiarizia, et al. : "Hydrolytic and Radiolytic Degradation of Octyl(phenyl)-N,N-diisobutylcarbamoylmethylphosphine Oxide and Related Compounds", Solvent Extraction and Ion Exchange, Vol. 4, p. 677 (1986).
- 3) U. S. Department of Energy : "Technical Report on Hydroxylamine Nitrate", DOE/EH-0555 (1998).
- 4) T. Mitsugashira, et al. : "Extraction of Americium and Lanthanides with Tributylphosphate from Water-Deficient Nitrate Media", J. Alloy. Compd., Vol. 213/214, p. 347 (1994).

項目	方法
技術的成立性	所定の回収率および除染性能を得ることに着目し、分離の化学的な 原理が明らかになっており、確かであると判断できることを相互に 比較する。
安全性	火災・爆発、閉じ込めについて安全設計が実現できることを相互に比 較する。
環境負荷低減性	分離工程から発生する廃棄物発生量を相互に比較する。廃棄物発生 量は処理工程から排出される溶液量、並びに交換のために廃棄する 主要な機器の質量とし、保守、廃止措置などから発生する廃棄物は 対象としない。
経済性	処理設備と建屋に係る費用を相互に比較する。

#### 表 4.4.1 分離技術の選択における比較評価の方法

## 表 4.4.2 Am および Cm 回収プロセスで発生する廃棄物量の見積もり (200tHM/y 規模の施設の場合)

方法	廃棄物, t/年		
	水溶液*1	有機溶媒*1	固体*2
SETFICS 法	約 3,300	約 85	約 1
アミン抽出法	約 2,600	約 18	約 1
抽出クロマトグラフィー	約 2,600	約 9	約 0.3

\*1 廃液処理工程に払い出す総量、再利用や減容は考慮していない

\*2 交換する主要な機器の質量

	設備費用(相対値)		
万法	設備 *1	建屋 *2	
SETFICS 法	1.0	1.0	
アミン抽出法	0.43	0.7	
抽出クロマトグラフィー	0.43	0.7	

# 表 4.4.3 Am および Cm 回収プロセスの設備費用の見積もり (相対値、200tHM/y 規模の施設の場合)

\*1 主要な機器に係わる費用

\*2 主要機器を配置するセルの面積に基づく

## 表 4.4.4 Am および Cm 回収技術の選択における比較評価の結果

項目	評価結果			
	SETFICS 法	アミン抽出法	抽出クロマトグラフィー	
技術的成立性	問題はない。	確認すべき課題がある。	問題はない。	
安全性	問題はない。	問題はない。	カラムの設計において閉じこ めに対する考慮を要する。	
環境負荷低減性	液体、固体廃棄物の発生量は 共に最大である。	液体、固体共に中位である。	液体、固体共に最小である。	
経済性	低い。	高い。	高い。	

## 4.5 リファレンスシステムの設計(酸化物燃料対応)

4.5.1 施設概念構築

(1) プロセス

今日において、軽水炉燃料再処理システムとして実用に供されている唯一の 技術は、使用済燃料を硝酸に溶解し、ドデカン(CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>CH<sub>3</sub>)等の希釈剤で 希釈したリン酸トリブチル(Tri-butylphosphate, TBP)により抽出する溶媒抽 出法を基本とした、PUREX法と呼ばれる湿式再処理システムである。サイクル 機構では動燃の時代から、PUREX法によるFBR燃料再処理に関する研究開発を 実施しており、これに特有の問題を解決し、かつさらに改良する技術として、 解体機、連続溶解槽、遠心抽出器、ソルトフリープロセス等の開発を行ってき た。

これらの研究開発成果を踏襲・採用しつつ、さらにその概念を推し進めた再 処理システムとして、FSのフェーズIにおいて、「先進湿式リファレンスシス テム」を選定した。このシステムは、以下の特徴をもって定義された。

 ①晶析法の採用

②簡素化溶媒抽出法の採用

- ・精製工程の削除
- ・U、PuおよびNpの共回収
- ・ソルトフリー化による低レベル廃液固化体の削減
- ・回収水、回収酸の再利用
- ・廃溶媒の蒸留処理の徹底

③MA回収工程の追加

フェーズIIにおいては、③のMA回収システムについて、抽出クロマトグラフィーを採用することにより再処理コスト低減を図ることとした。また、回収率の 更なる向上、廃棄物発生量の更なる低減および運転に即した設計という観点か ら、上記のほか以下の改良を加えることとした。

④清澄工程で発生するスラッジの再溶解によるU、TRU回収

⑤燃料製造設備の脱硝オフガスからのNOx回収による余剰酸削減

⑥リワーク設備の詳細化

以下、本項においては、上記①~⑥の特徴を有する湿式再処理システムを「リ ファレンスシステム」と呼ぶこととする。 (i) 各工程の説明

(a) 受入·貯蔵

輸送キャスクに収められた使用済燃料を再処理施設に受入れ、キャスクから 取り出した後、一時貯蔵する。

(b) 解体・せん断

使用済燃料集合体をせん断に適した形に解体し、せん断機により集合体ごと数cm程度の長さにせん断する。せん断された燃料ピンは次の溶解工程に送られる。この時発生する気体廃棄物をせん断オフガス(Shearing Off Gas, SOG)という。SOGには空気、ダスト、およびFPのうち希ガス成分(KrおよびXe)の一部、および他の揮発性FPの一部が含まれている。なお、ここまでの工程を機械的前処理工程という。

(c) 溶解

せん断工程から受入れたせん断片を高い濃度(9~12N)の硝酸に浸漬し、約 95℃に加温\*1することで、燃料ミートだけが溶解し、被覆材は溶けないで残る。 この未溶解の被覆材はハルと呼ばれ、本工程で分離される。本工程でほとんど 全てのFPは溶解するが、燃焼度が高い場合には、Mo、Zr、Ru、Rh、Pd等の元 素は完全には溶解せず、一部が不溶解性残渣として残る。また、UおよびPuに ついても、微少量が未溶解のまま残る。本工程で発生する気体廃棄物を溶解オ フガス(Dissolution Off Gas: DOG)という。DOGには水蒸気、空気、NOx、お よびFPのうちKr、Xe、I等が含まれる。

(d) 清澄・調整

溶解工程から払い出される溶解液には、前述の不溶解性残渣や燃料の未溶解 分および被覆管のせん断粉等が含まれている。これらの固体粒子(スラッジ)を遠 心清澄機で除去し、その後調整槽で抽出に好ましい状態に調整する。除去した スラッジを電解溶解することにより燃料の未溶解分を回収する。

(e) 電解溶解

電解溶解槽の隔膜で隔てられた陽極側に硝酸銀を加えたスラリー液を、陰極 側に硝酸を供給し、通電することにより不溶解残渣の溶解を行う<sup>1)</sup>。溶解反応 式は以下を想定する。

 $2Ag^{+} \rightarrow 2Ag^{2+}+2e^{-}$  (陽極反応) PuO<sub>2</sub>+2Ag<sup>2+</sup> → PuO<sub>2</sub><sup>2+</sup>+2Ag<sup>+</sup> 2H<sup>+</sup>+2e<sup>-</sup> → H<sub>2</sub>↑ (陰極反応)

<sup>\*1</sup> 溶解温度は沸騰温度が溶解性上は好ましいが、溶解槽の耐食性等の観点から、沸騰温度よりやや低い温度を採用した。

Pu以外の元素の溶解反応は、溶解設備の溶解槽での反応と同じであると想定する。

電解溶解によるU、TRUの溶解率は99.9%と設定する<sup>1)</sup>。

(f) 晶析

溶媒抽出による分離操作の前に、Uの一部を分離するためのプロセスとして、 晶析法を用いる。晶析法は、燃料溶解液中のUとPu等との存在割合および溶解 度の差を利用した分離プロセスである。清澄・調整後の高濃度の溶液を約10℃ に冷却することで、Uの一部(約70%)がUNH(硝酸ウラニル)として析出し分離 される。この操作により、燃料製造の際のPu富化度に合ったU/Pu比の粗調整も 行う。

これに伴い、抽出工程で扱う溶液量が大幅に減り、またUの一部を分離するための分配部が不要になる。その結果として、抽出工程の物量が全体的に削減され、廃液量を低減できる。また、晶析で分離されたUNHは再溶解するが、ここで高い濃度のU溶液が得られるため、U濃縮設備を削除できる。

(g) 抽出

簡素化溶媒抽出法を基本とした湿式再処理の根幹となる工程である。抽出溶 媒としては、ドデカンで希釈したTBPを用いる。TBPはIV価およびVI価のアク チニドイオンの抽出に適した抽出剤であり、U(VI)、Pu(IV)を良く抽出する。FP は主としてIからⅢ価の陽イオンであるため抽出されない。

NpはこれをVI価に調整してU、Puとともに抽出する。Npの共抽出性について はPUREX法の改良に関するこれまでの研究や東海再処理工場での実績等から、 抽出条件の制御(フィード液の酸濃度を上げる等)により特別な試薬等を用い ずにかなりの割合で、U-Puと共回収しうることがわかっている。

また、晶析工程においてU/Pu比の粗調整がすでになされているため、分配は 行わず、U-Pu-Npの混合硝酸溶液して逆抽出される。UとPuの分離の際に必要 であったU回収用の溶媒が削減できることから、抽出工程内の流量の削減が期待 できる。リファレンスシステムの概略フローシートを図 4.5.1に示す。

本工程で分離されたFPおよびAm、Cmを含む抽出残液は、Am-Cm回収設備 へと払い出す。使用済溶媒は溶媒洗浄設備へと払い出す。

このように、U-Pu-Npの共回収を行う抽出工程を構成することで再処理施設内にPuが単独で存在することがなくなる。

(h) 溶媒洗浄

抽出・精製工程で用いられた溶媒を洗浄試薬により洗浄し、劣化生成物等を 除去する。洗浄を行った溶媒は再利用される。

洗浄試薬としてソルトフリー試薬(シュウ酸ヒドラジン、炭酸ヒドラジン)を用

いる。洗浄廃液は中レベル放射性廃液処理設備へ払い出す。洗浄された溶媒は、 フィルタにより固形分および洗浄では除去できない劣化物を除去した上で抽出 設備に供給し再利用する。希釈剤洗浄において新溶媒を用いるために発生する 過剰分は、廃溶媒処理設備に払い出す。

(i) 希釈剤洗浄

溶媒抽出を行う工程から払い出される製品溶液および廃液には微量のTBPが 含まれる。これが蒸発処理を含む工程まで同伴し、蒸発缶に蓄積した場合、硝 酸錯体の熱分解反応による事故の原因となりうる。これを防止するため、溶媒 抽出から払い出される溶液に対しては希釈剤(ドデカン)と接触させ、有機成分を 除去する操作を行う。

(j) Am-Cm 回収システム

抽出クロマトグラフィーを用いて、抽出工程で発生する高放射性廃液から Am-Cmを回収する。回収したAm-Cm製品溶液は抽出工程からのU-Pu-Np製品 溶液と混合し、炉心燃料の原料とする。

(k) 液体廃棄物処理

液体廃棄物のうち最も放射能の高いものは共除染工程から発生するが、それ 以外の工程からも、様々な放射能の廃液が発生する。それらの廃液は、放射能 濃度によって高レベル、中レベル、低レベル、極低レベルの4系統に分けて処理 される。廃液の処理は、蒸発濃縮の繰り返しにより、放射能濃度の極めて高い ものと極く低いものに分化し、最終的に前者はガラス固化、後者は海洋放出す ることを基本としている。

また、蒸発濃縮による2極化の阻害要因となっているNaを使用しないこと(ソ ルトフリー)を基本とし、低レベル濃縮廃液固化体を発生しないシステムとして いる。

再処理工程内で発生する廃液の多くは硝酸廃液であるが、硝酸の再利用のた め廃液の濃縮処理とあわせて酸回収を行う。回収した硝酸および凝縮水には微 量のFPが残留しているが、本システムでは低除染を設計条件としており、必ず しも新硝酸等で洗浄を行う必要がないことから、回収酸の再利用範囲の拡大と 凝縮水の再利用も考慮した。

(1) 固体廃棄物処理

主要な固体廃棄物のうち特に放射能の高いものは、ハルおよびスラッジである。スラッジはフィルタで濾過し、フィルタごと容器に封入して固体廃棄物と する。圧縮した後専用容器に貯蔵する。

その他フィルタ、紙、ウェス等をはじめとする様々な固体廃棄物が発生する。

これらはその中に含まれる放射性核種とその濃度によりTRU廃棄物、βγ放射 性廃棄物、ウラン廃棄物等に、また廃棄物の性状から可燃物・難燃物・不燃物 に区分・分類し、それぞれ減容等の処理をした後貯蔵する。

(m) 廃溶媒処理

ドデカンおよびTBPを蒸留して再利用し、リン酸系の劣化成分のみを固化処 理するようにすることで、最終的に廃棄物となる廃溶媒量を大幅に低減する。

(n) リワーク

抽出工程、溶媒洗浄工程の各貯槽からのオーバーフロー液や、規格外となった種々の溶液を抽出設備や廃液処理設備へ送液する設備を設ける。水溶液、有機溶媒を、UやTRUの濃度に応じて適切に受入れ送液するように、UとTRU系の槽を独立させ、水相系、有機相系各2槽、計4槽の貯槽を備える。

(o) NO<sub>X</sub>回収設備

溶解工程においては、溶解液中のヨウ素を追い出すためNOxガスを吹き込む。 再処理設備内でNOxを再利用することにより余剰酸の発生を抑えることを目的 に、六ヶ所再処理施設において採用予定の圧力スイング吸・脱着 (PSA: Pressure Swinging Adsorption) 法によるNOx回収設備を設けた。

燃料製造設備の脱硝工程から発生する脱硝オフガス中のNOxを回収し、溶解 工程へリサイクルする。

(2) 物質収支

(i) 物質収支評価

リファレンスシステムの全体工程系統図および主工程の概要図 (PFD) を図 4.5.2、図 4.5.3に示す。

物質収支の例として、アクチニド元素とFPの物質収支の概略を図 4.5.4に示 す。また、各元素の製品・環境放出・廃棄物への移行率を表 4.5.1に示す。Am-Cm 回収システムにおいて、希土類元素の除染係数は100であるとした。

(ii) 回収率

回収率は以下の手順で算出した。

1)主要プロセス(設備)の損失率を決める。損失率は以下のように定義する。

#### 損失率 = <u> 製品以外の系統への移行量</u> 各設備の受入量

損失の発生要因としてスラッジへの移行、オフガス系への移行、分析 試料への移行、その他を考慮して発生量を決め、損失率を求める。 2)主要プロセス(設備)での回収率を次の式で求める。

回収率(%)=100- 損失率(%)

3)プロセス全体の回収率を図 4.5.5の計算方法により求める。

U、Pu、MA(=Np、Am、Cm)、TRU(=Pu、MA)の回収率を求め、表 4.5.2に示す。

(iii) 製品の DF

抽出工程については、UP3の運転実績<sup>2)</sup> やサイクル機構東海事業所のCPF<sup>3)</sup> における試験結果から、10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>程度のDFが期待できる。Am-Cm製品につい ても、サイクル機構におけるコールド試験<sup>4)</sup> やホット試験<sup>5)</sup>の結果から、10<sup>2</sup>~ 10<sup>3</sup>のDF(FP同伴率で約0.3wt%に相当する)が期待できる。晶析工程については、 CPFにおいてホット試験を実施しているところであるが、U製品のDFについて は、ウラン試験の結果<sup>6)</sup>等から10<sup>2</sup>と想定している。

得られるMOX製品は、抽出工程からのU-Pu-Np製品とAm-Cm回収工程からのAm-Cm製品が混合された後、富化度調整工程において晶析工程からのU製品とも混合されたものである。したがって、製品のDFは

U製品: DF≒10<sup>2</sup>

U-Pu-MA製品: DF≧10<sup>2</sup>

となる。

(iv) 廃棄物への移行率

それぞれの廃棄物への $\alpha$ 核種および $\beta$   $\gamma$ 核種の移行率を表 4.5.3に示す。移行率は、廃棄物処分に関する報告書  $\eta$  などに示されている実績から算定した。

(3) 廃棄物発生量

算出結果を表 4.5.4に示す。廃棄物は以下に示すように分類、想定して求めた。

(i) ガラス固化体

廃棄物成分として使用済燃料に含まれる成分に加え、ODS鋼製被覆管が溶解 工程において溶出する成分、硝酸による工程機器の腐食からの寄与を考慮した。

ガラス固化体の仕様は、六ヶ所再処理施設とTVFのものを考慮して設定した。 固化ガラスの量は1体当たり400kg、Na<sub>2</sub>Oの含有率は10wt%とし、FP酸化物と その他の廃棄物成分の含有率はそれぞれ12wt%、8wt%を上限として本数を算 出した。発熱について2.3kW/本を制限として考慮したが、結果として核分裂生 成物の量が発生量を決定し、1tの使用済燃料に対して1.2本のガラス固化体が発 生すると見積もられた。 (ii) 集合体部材

集合体構造部材については、セル内での解体時に汚染するものとして全て TRU廃棄物相当とし、廃棄物ドラム缶200Lあたり500kgを充填するものとした。

(iii) 廃溶媒

使用済溶媒を、蒸留処理した後の残留分を水熱固化処理するものとした。

(iv) 廃銀吸着剤

吸着剤としては、AgAl(銀アルミナ)を用いることとし、飽和量に対して80% まで吸着した段階で吸着剤を交換することを想定して、廃銀吸着剤発生量を算 出した。本設計対象燃料の場合、単位質量当りのヨウ素の含有量が、軽水炉の 約4倍である。

(v) 雑廃棄物

可燃性廃棄物、難燃性廃棄物、不燃性廃棄物等の雑廃棄物については、施設 に固有の要素が大きく、推定は困難であるため、フェーズIにおける評価と同 様に、サイクル機構再処理施設の実績を基に、従来湿式システムから25%減に なるものと設定した。また、廃液を2極化する処理の導入に伴い、低レベル濃縮 廃液を固化した廃棄物は発生しないものとした。

(4) 機器設計

(i) 設計方針

(a) 安全対策一般

基本的に従来湿式法で採られている安全対策を踏襲することとし、安全上重 要な機能の二重化を考慮する。

(b) 臨界防止

臨界上有意な核物質を含む溶液を取り扱う装置、容器については全濃度臨界 安全形状寸法管理を適用する。また燃料受入貯蔵についても形状寸法管理を適 用した設計とする。

(c) 火災および爆発の防止

有機溶媒を使用する工程については、使用溶媒の中で引火点の最も低いドデ カンを基準とし、その引火点である74℃を下回る温度に管理して操作を行うこ ととして設計した。また、機器の接地、電気接点を持つ機器の防爆構造は従来 の考え方を踏襲するものとする。 蒸発濃縮時におけるTBP等の錯体の急激な分解反応に対する対策として、濃 縮対象溶液について希釈剤洗浄により原因となる成分の除去を行うこと、濃縮 処理に用いる加熱蒸気温度を135℃以下とすることとして設計を行った。

放射線分解に伴って発生する水素の爆発防止対策として、爆発限界を下回る よう適当な掃気を行うこととする。ただし、機器、槽ごとの水素発生量の評価 までは実施していないため、過去の設計例から推定した掃気量を用いた。

(d) 漏洩の防止

機器、塔槽類の材質は使用条件に合わせて適切な材料を選定し、要求される 再処理容器区分に合わせた溶接および検査を想定した。

(e) 耐震

内蔵する放射性物質の性状、量に応じて耐震クラス分類を行った。

(f) 外部電源喪失に対する考慮

外部電源の喪失に対しては安全上重要な機能を維持するため、独立2系統の非 常用発電設備を設けることとした。

(ii) 機器·設備設計

プロセスフローダイアグラム(PFD)、物質収支に基づき機器の処理能力や槽類 の容量を決定した。さらに、機器リストを作成し、配置を検討した。また、ユ ーティリティ集計表、廃棄物発生量リスト、主要計測点リスト、分析項目リス ト、電気負荷リストを作成した。

以下では、主要な工程および本プロセスに特有な要素のある付帯工程の各設備・機器について述べる。なお、本施設は再処理/燃料製造\*1一体化施設として 検討しており、ユーティリティ設備等については再処理と燃料製造で共用する 設計となっている。

(a) 使用済燃料貯蔵

使用済燃料の搬入、移送、貯蔵を行うための一連の設備である。

キャスクの構造はもんじゅ燃料用のものと同等であると想定し、収納集合体 数については、もんじゅ燃料用キャスクの収納集合体重量と本検討における集 合体重量の比から6体を想定した\*2。また、キャスクの重量は約110tと仮定した。

受入設備には乾式法を採用した。キャスクの搬出入設備について設備容量を 検討した結果、1キャスクあたり6体の集合体を収納するとした場合、受入れの 作業は約21.5h以内で行うことができることを確認した。

<sup>\*1</sup>燃料製造プロセスはショートプロセスを採用している。

<sup>\*2</sup> もんじゅ燃料用キャスクの収納集合体数は17体である。

一時貯蔵設備はボールト方式\*3を採用した。貯蔵ピットはサイクル機構における過去の検討例に基づき750mm間隔の正方格子とし、臨界計算によりその妥当性を確認した。貯蔵容量は設計条件に基づき年間処理量相当とした。

使用済集合体の搬送および貯蔵時の崩壊熱除去については、過去の設計例と 同等として設備検討を行った。

(b) 解体・せん断

一体型解体・せん断機を採用した。また、付着した燃料粉を回収する装置を 設置することで、前処理工程における損失を低減する。

(c) 溶解

バッチ式溶解槽と連続式溶解槽を比較検討した結果、単基あたりの処理能力 に優れることなどから、サイクル機構のリサイクル機器試験施設(RETF)で採 用したものと同型の回転円筒型連続溶解槽を採用することとした。連続溶解槽 の外観を図 4.5.6に示す。

回転円筒型連続溶解槽の溶解部は螺旋構造になっており、端部から投入され たせん断片は、この螺旋部分の回転によって移送される。溶解用硝酸はせん断 片が投入される反対側の軸部分から供給され、せん断片と向流接触する形で溶 解が行われる。

溶解槽の臨界安全設計は、螺旋を形成するオーガを考慮した円環状に近い形 状管理と中心軸内部への中性子吸収材(B<sub>4</sub>C)の配置に基づいており、内部がせん 断片と溶解液で充たされる状態でも未臨界が担保される設計となっている。

(d) 清澄

処理量能力に優れる遠心清澄機を採用した。

(e) 晶析

溶解液を冷却し、Uの一部を硝酸ウラニル六水和物(UNH)の固体で析出させ、その他の成分から分離するための設備である。ここでUNH中のUの収率を制御することにより、母液のPu富化度を30%に整える。生成したUNHは硝酸で洗浄した後水に溶解してU溶液として、富化度調整設備およびU脱硝設備へと払い出す。

晶析装置は、薬品工業等の一般産業において工業的に使用されており、機器 概念も多数存在する。核燃料再処理への適用を考えた場合、核燃料物質を含ん だ溶解液を処理することから、臨界安全を確保できる形状であることが重要で ある。また、セル内に設置するために、小型で保守が容易であることが要求さ

<sup>\*3</sup>ボールト方式:コンクリート等で作られたボールト状の空冷式遮蔽セルの中に収納する、乾式の貯蔵方式の一種。

れる。これらの条件を満たしうるものとして、円環型晶析装置を採用した。ただしこの装置には、プロセス制御や装置内でのスケール(装置内壁面に付着する析出物)の発生等が確認の必要な課題として指摘されている。本装置の概念図を図 4.5.7に示す。

(f) U-Pu-Np 抽出

遠心抽出器を採用した。サイクル機構で開発してきた装置の処理 量(10kgHM/h)を30%増加したものを想定した。抽出器の外観を図 4.5.8に示す。

(g) 溶媒洗浄

U-Pu-Np抽出設備と同様の遠心抽出器を採用した。

(h) Am-Cm 回収

抽出クロマトグラフィーを採用した。

- (i) 高レベル放射性廃液処理
- ケトル型蒸発缶を中心に構成した。
- (j) 酸回収
- カランドリア式蒸発缶、棚段式精留塔を中心に構成した。
- (k) 中レベル放射性廃液処理

ソルトフリー試薬を分解するための電解槽、蒸発濃縮処理用のサーモサイフ オン式蒸発缶を中心に構成した。

(1) 低レベル放射性廃液処理

蒸発濃縮処理用のサーモサイフォン式蒸発缶を中心に構成した。

(m) 極低レベル放射性廃液処理

蒸発濃縮処理用のサーモサイフォン式蒸発缶を中心に構成した。

(n) ガラス固化

LFCM\*1式ガラス溶融炉、Ru吸着塔、ヨウ素吸着塔を中心に構成した。

(o) 固体廃棄物処理

高放射性廃棄物処理のために、キャン乾燥機、高圧圧縮装置およびモルタル 充填装置を設ける。低放射性廃棄物処理のために、流動床焼却炉、高周波溶融 炉およびモルタル充填装置を設ける。

パワーマニピュレータ(PM)、クレーン、ロードセル式計量装置、検査装置等

<sup>\*1</sup> Liquid Fed Joule-heated Ceramic Melter(液体供給式直接通電型セラミックメルター)

を備える。

(p) 廃溶媒処理設備

ケトル型蒸発缶、真空蒸留式溶媒蒸留塔、熱分解炉、熱水固化処理装置を中 心に構成した。

(q) SOG/DOG 処理設備

凝縮器、酸吸収塔、ヨウ素追出し塔、デミスタ、予熱器、HEPAフィルタ(2段)、 ヨウ素吸着塔(2段)、冷却器、排風機で構成し、フィルタ類および排風機は2系 統とした。

(r) VOG 処理設備

洗浄塔、凝縮器、デミスタ、予熱器、HEPAフィルタ(2段)、ヨウ素吸着塔、 冷却器、排風機で構成し、フィルタ類は4系統、排風機は2系統とした。

(s) 試薬供給設備

既存のプラントと同様の構成とした。

(t) サンプリング・分析設備

既存のプラントと同様の構成とした。

(u) ユーティリティ・電気設備

ユーティリティには、蒸気、温水、冷却水、冷水、純水・浄水、圧縮空気、 真空およびガス類がある。これらは供給条件で分類され、また安全系と常用系 とに系統分けされる。ユーティリティ設備の設計にあたっては、設備毎にユー ティリティの使用量を求め、これを積算して合計量を求めた。

電気設備は、特別高圧変電所より6.6kVの2回線を受電し、高圧配電盤へ給電 する高圧受配電盤、高圧負荷に給電する高圧配電盤、非常用発電機、低圧負荷 用ロードセンター、動力分電盤(モータコントロールセンター)、照明分電盤、無 停電電源装置および直流電源装置より構成され、各負荷へ給電される。これら の設備容量は設備毎に求めた電気負荷の積算に基づき設定した。

(5) 施設設計

前項までのプロセスおよび設備・機器に関する検討および配置にかかる前提 条件である

・再処理・燃料製造一体化プラントとする

・使用済燃料貯蔵設備と新燃料貯蔵設備は別建屋とする 等を踏まえてセル、設備および建屋の配置を検討した。 (i) 建屋・施設配置

本プラントは、

- ・主建屋
- ・使用済燃料・新燃料貯蔵建屋

・その他の関連設備(排気筒、受変電設備、燃料油貯槽、管理棟) から構成される。

(ii) 設備配置設計基本方針

配置設計は、以下に示す基本方針に基づいて実施した。

- ・主要プロセスの動線の短縮および単純化を図る。
- ・セル形状はマスタースレーブマニュプレータ(MSM)での操作を考慮 し、セル幅を抑えた長尺セルとする。
- ・厚い遮蔽を必要とする高レベル放射性物質を取扱うセルは、耐震設計の観点から、可能な限り建屋下層部に配置することが合理的であるので、化学処理セルおよび高レベル放射性廃棄物を取扱う設備は、地下2階〜地上1階に配置する。例外として、機械的前処理セルは、燃料の移送を考慮して地上2階に設置する。化学処理セルの上部からせん断した燃料を投入する。

(iii) 供給試薬・ユーティリティ

先進湿式法による処理では、硝酸、TBPやn-ドデカン等の試薬を用いる。表 4.5.5に主な供給試薬と電気について使用目的と使用量を示す。

(iv) 設備配置

再処理に係る主建屋、使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の各建屋に配置されるセルおよびセル相当の室を表 4.5.6に示す。

(a) 主建屋

主建屋の各階の設備配置図を、図 4.5.9(地下2階)~図 4.5.13(地上3階) に示す。主要な設備の置かれる再処理セル(A)、(B)は、地下2階から地上1階ま で貫通した高いセルになっているが、地上1階部分はインセルクレーン(I/C)、 パワーマニュプレータ(PM)が移動する空間である。地下2階には、溶解槽と 槽類が、建設時における据付や保守が可能な幅を保ちつつ密に配置される。清 澄機、抽出器、各種蒸発缶等の溶解槽を除くほとんどの主要機器は地下1階部分 に設置される。
(b) 使用済燃料·新燃料貯蔵建屋

使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の各階の設備配置図を図 4.5.14~図 4.5.16に示 す。

(v) セルおよび建屋規模

主建屋には使用済燃料受入設備から製品集合体払出設備までを配置した。図 4.5.17から図 4.5.19にセル内の機器配置の様子を示す。各設備の主要機器の基 本配置は以下のとおりである。

- (a) 地下2階、地下1階
- ・再処理主工程設備(MA回収設備含む)
- ・燃料製造設備(燃料要素組立、集合体組立)
- ・ガラス固化設備
- ·高放射性固体廃棄物貯蔵設備
- (b) 地上1 階、地上2 階
- 前処理設備
- ・燃料製造設備(脱硝転換、ペレット研削、集合体検査・払出し)
- ・オフガス処理設備
- 低放射性固体廃棄物処理設備
- ・ガス類供給設備
- 非常用電源設備
- · 圧空設備
- ·蒸気設備
- ・試薬供給設備
- ・換気空調設備
- ・排気フィルタ設備
- ・電気設備
- (c) 地上3階
- · 中央制御室
- ・空調機室
- ·空調用冷凍機室
- ·補助盤室

建屋は地下2階、地上3階建で、W 143.2m×L 146.2m×H 36mとなった。プラント全体建屋イメージ図を図 4.5.20に示す。主建屋のセル体積および建屋の全体規模を表 4.5.7に示す。

(vi) 保障措置対応に関する検討

設計した再処理・燃料製造一体化プラントの物質収支区域(MBA:Material Balance Area)および主要計測点(KMP:Key Measurement Point)の案を図 4.5.21に示す。

保障措置設計にあたっては、PUREX法と同様の考え方を適用できる。ただし、 従来湿式システムと比較して、

- ・同等の処理規模の軽水炉燃料再処理施設と比べるとPuインベントリが 大きい。
- ・低除染製品を得る設計のため、作業性・接近性が低下する。

・製品にFP、MAが混入するため、測定・分析精度が低下する。 等の点では技術的難度が上がる。

4.5.2 技術評価

(1) 安全性

(i) 安全設計

湿式再処理リファレンスシステムの安全設計に関しては、基本的に現行の「再 処理施設安全審査指針」に準拠するよう設計されている。

(a) 放射線防護(遮蔽)

再処理工程は全てコンクリートセル内部で実施される。それら主要セルのコンクリート壁厚さは2mとし、十分な放射線遮蔽能力を持たせている。

(b) 放射性物質の閉じ込め

固体および溶液状の放射性物質を内蔵する系統および機器は漏洩しがたい構造として設計し、固体および溶液状の放射性物質を閉じ込める。また、溶液を 内蔵する機器の場合には漏洩を考慮して漏洩液受け皿と漏洩検知器を設け、漏 洩が生じた場合には速やかに回収することが可能な設計としている。

気体状の放射性物質(揮発性のFPおよび溶液から発生するミスト等に同伴す る放射性物質、せん断操作で発生し空気中に浮遊する燃料粉等)に対しては、 系統および機器に設けられるSOG/DOG/VOGのオフガス系により系統および機 器を常時負圧に維持することで適切な放出経路を保つ設計とする。それら放出 経路上には放出される放射性物質の種類および性状を考慮して適切な除去設備

(HEPAフィルタ、スクラバおよびヨウ素フィルター等)を設けている。

さらに多重防護に基づいてセル排気系および建屋排気系により多重の動的閉 じ込めを実装し、建屋レベルでは想定される汚染レベルに応じてホワイト、グ リーン、アンバーの区域を設けてその順に気圧を低く維持する設計としている。 加圧送液を行う抽出クロマトグラフィーの分離塔では、塔内部を常時負圧と することができない。しかしながら、運転時には気相が存在しないため、塔内 部において気体状の放射性物質は発生しない。ただし、塔の損傷あるいはバル ブの不良等により低圧のセル空間へ放射性物質を内蔵する高圧溶液の漏洩が生 じた場合、気相へ移行する放射性物質の量は通常の溶液漏洩時に比べて増加す る恐れがある。そのような場合にはセル排気系あるいは建屋排気系に設けられ る放射性物質を除去するための系統および機器(HEPAフィルタ等)の能力が 問題となる。なお、現時点ではこのような高圧水溶液の漏洩事象における放射 性物質の気相への移行率などのデータが不足している。今後この事象に対して 多重防護に基づいた適切な閉じ込め設計を行うためには、これらデータの取得 が必要となる。またこれら高圧に起因する安全上の問題を除去するため、低い 水圧での運転を可能とするような検討も有効である。

(c) 核燃料物質の臨界安全

Puを含む溶液を内蔵する全ての系統および機器については全濃度安全形状に よる形状管理によって臨界事故防止を行う設計としている。また、これらの系 統および機器からの溶液の漏洩を考慮して設けられる漏洩液受け皿についても 形状管理を適用する。Puを含む溶液を内蔵する系統から設計上内蔵を想定しな い系統への送液は直接に行わず、一旦全濃度安全形状管理の貯槽に受けてPuが 含まれていないことを確認した後送液すると共に、送液系に放射線検出器を設 けてPuのリークを自動検知する設計となっているので誤移送による臨界事故の 発生は防止される。

晶析装置は装置自体がPu硝酸溶液に対して全濃度安全形状であるのに加え、 PuNH(硝酸Pu水和物)の析出を想定したとしても未臨界を維持できる形状で 設計しているが、PuNHの晶析を防止するため冷却温度によるインターロックも 設けている。また、晶析で回収したウランを受けるUNH溶解槽までをPu硝酸溶 液に対する全濃度安全形状で設計している。したがって、工程変動や溶解液の 誤移送等を考慮しても晶析工程における臨界事故の発生は防止される。

MA回収工程である抽出クロマトグラフィー工程ではAmおよびCmを含んだ 溶液を扱う。ただし、取り扱う元素は同位体組成に占める核分裂性核種(<sup>242m</sup>Am、 <sup>245</sup>Cm等)の割合が少なく、かつ元素濃度も十分低い状態で取り扱うため特にこ れらの核種による臨界安全管理は必要ない。したがって、本工程に受け入れる 前に受入液の組成および濃度を確認することによってMA回収工程を臨界管理 対象外とすることができる。

以上のように、全濃度安全形状による臨界安全設計を基本とするため、本シ ステムにおける臨界事故の発生は技術的に想定されない。 (d) 地震に対する考慮

基本的に「再処理施設安全審査指針」、「混合酸化物燃料加工施設安全審査 指針」における耐震要求および六ヶ所再処理工場等の既存施設の耐震設計をベ ースとしている。

(e) 動的に維持される安全上の機能

湿式リファレンスシステムでは放射性物質は沸点の低い水溶液中に含まれ、 特に放射性物質濃度の高い箇所や多量に内蔵する機器においては崩壊熱による 沸騰の危険性がある。沸騰が生じた場合、ミスト等によって気相へ移行する放 射性物質が増加し環境への影響が考えられる。したがって、放置した場合に沸 騰の危険性がある機器には冷却系からの冷却水により沸騰に至らないよう設計 対応が行われている。特に短期間で沸騰の可能性のある系統および機器には安 全冷却系による冷却を行い、短時間の外部電源喪失時においても機能喪失が生 じないような設計としている。また、これらの系統および機器からの漏洩液を 受ける漏洩液受け皿には、漏洩検出器と回収設備およびそれらを結ぶインター ロックが設けられており、万一の漏洩の際も漏洩液が沸騰する前に速やかに回 収される。

水溶液の放射線分解によって発生する水素ガスの爆発を防止するため、放射 性物質を含む水溶液を内包する系統および機器には圧空によって水素掃気を行 う設備を設けている。特に、短期間で水素の可燃限界濃度に達するほど水素発 生の多い系統および機器には安全圧縮空気系による掃気を行う設計としている。

負圧による閉じ込めを維持しているオフガス処理設備、セル換気設備および 建屋換気設備の動的機器についても独立二系統とし、非常用所内電源系統に接 続されている。

したがって、動的機器の単一故障および外部電源喪失を考慮しても動的に維持される安全上の機能が喪失することはない。

(f) システムおよびプロセス固有の危険性に対する考慮

湿式リファレンスシステム固有の危険性としては、「水の放射線分解により 発生する水素の爆発」、「水溶液の沸騰による放射性物質の気相への漏洩量の 増加」、「抽出に用いる有機溶媒の火災・爆発」、「抽出に用いる有機溶媒お よび樹脂の劣化物の急激な発熱化学反応」、「高圧溶液を内蔵する系統および 機器の破壊」が挙げられる。

「水の放射線分解により発生する水素の爆発」に対しては既に記述したよう に発生した水素が滞留しないように掃気を行い、可燃限界濃度以下を保つよう な設計としている。なお、MA回収設備で高圧溶液を取り扱う系統および機器に はオフガス設備が接続されておらずしたがって水素掃気も行えないが、これら の箇所で発生した水素は高圧溶液に溶存することになるので水素ガス爆発の可 能性はないと考えられる。ただし、加圧水溶液における溶解度および発生水素 量等の計算を行い定量的に確認する必要がある。

「水溶液の沸騰による放射性物質の気相への移行量の増加」に対しては既に 記述したように沸騰の可能性のある機器については安全冷却系を設けるととも に、その水溶液が漏洩した場合には自動的かつ速やかに回収することによって 沸騰が生じないような設計としている。

「抽出に用いる有機溶媒の火災・爆発」に対しては、使用する有機溶媒の引 火点以下に工程の温度を管理すると共に、諸機器は接地され電気機器等は防爆 構造とすることにより着火源を排除している。また、万が一火災が生じた場合 には、セル給気系のダンパを閉じることにより空気の流入を停止させて消火さ せることが可能である。MA回収工程では有機化合物の存在下で高発熱核種の MAを多量に処理することから、MAを吸着したままの状態が維持された場合(吸 着後に工程が停止した場合や溶離液の供給が行えなくなった場合など)には吸 着剤(有機化合物)の火災を生じる可能性がある。この事象については発生防 止策を始め安全設計が為されておらず、今後の課題である。

「抽出に用いる有機溶媒および樹脂の劣化物の急激な発熱化学反応」を考慮 する必要のある工程は、U-Pu抽出工程とMA回収工程である。有機化合物は放 射線および硝酸との接触により劣化し、様々に異なる有機化合物に変化する。 これらの劣化物の中には化学的に不安定なものが含まれ、温度上昇あるいは硝 酸との接触により急激な発熱化学反応(分解反応)を引き起こす可能性がある。 このような発熱化学反応においては発生する反応熱によりさらに反応が加速さ れる。したがって、反応熱による急激な温度上昇によって有機溶媒が火災を生 じる可能性があり、かつこの化学反応で気体が発生するならば、極めて短期間 に膨大な量の気体が発生して爆発現象を引き起こす。U-Pu抽出工程では TBP-nDDと硝酸水溶液の向流接触を行うが、遠心抽出器を使用するため接触時 間は短く、有機溶媒の劣化は進みにくい。その上、後段に設けられた溶媒洗浄 工程により溶媒は使用の度に劣化有機物の除去が行われるため、大規模な分解 反応を引き起こすほどの量の劣化物は蓄積しないと考えられる。一方、MA回収 工程ではクロマトグラフィー内の吸着剤および抽出剤(有機化合物)は比較的 長期間機器内に滞在し、硝酸および放射性物質との接触時間が長くなる。発生 した劣化物を洗浄操作により除去することは上記U-Pu抽出工程と同じだが、こ の操作を工程管理にしたがって操作員が行う必要がある点が異なる。したがっ て、運転員が操作を怠った場合には多量の劣化物が蓄積される可能性があり、 この危険性を排除するために洗浄操作を自動化するなどの対応が必要である。

MA回収工程である抽出クロマトグラフィー工程では最大で50気圧の高圧溶

液を使用する。したがって、「高圧溶液を内蔵する系統および機器の破壊」は 内包する放射性物質を一気にセル空間気相部へ移行させるだけでなく、破断時 に発生する圧力波によりセル換気系のHEPAフィルタを破損させる可能性があ る。破壊時には塔内の高圧液体が低圧領域に吹き出すためミスト状と化し、セ ル空間部気相への放射性物質の移行量が増大する。しかしながら、抽出塔等高 圧箇所に一度に保持する放射性物質の量が少ないため、セル換気系のHEPAフ ィルタが健全であれば外部への放出は多くないと予測できる。ただし、破壊時 には圧力波が発生する恐れがあり、その影響次第では影響緩和系として重要な 働きをするセル排気系のHEPAフィルタを破損させる恐れがある。そのような ことが実際に生じるかは、実際に発生する圧力波の強度およびセル設計やセル 排気系配管の設計に依存するため、この事象の評価を行うには運転条件の詳細 化、現象の具体的な解析とさらなる安全設計検討が今後必要である。

(ii) 安全評価

ここでは、ショートプロセスによるペレット型酸化物燃料製造施設をも含め た再処理および燃料製造一体型のリファレンスシステム(200tHM/y処理能力) を対象として評価を行った。

(a) 決定論的安全評価

1) 平常時における一般公衆の線量評価

平常時に施設から大気中へ放出される放射性物質による、周辺公衆個人に対する放射線被ばく評価を、i)からiv)に示す評価条件の下でATRENO-TERFOC コード<sup>8,9,10)</sup>を用いて実施した。

- i) 排気筒から放出される放射性物質の量については、施設の年間処理量 を基に、設計検討において設定した大気への移行率を基に設定した(表 4.5.8を参照)。このとき、施設内における放射性物質の除染機能とし てHEPAフィルタ、ヨウ素フィルタ等の能力を適切に考慮した。
- ii) 放射性物質を大気へ放出する排気口の地上高さ、内径および吹き出し 速度については、㈱原燃の六ヶ所再処理施設の主排気筒と同じ条件を 想定した。
- iii) 気象条件については、「もんじゅ」サイトにて過去に観測された気象 データを参考に設定した。
- iv) 放射性物質の経口摂取量を見積もるに当たり、個人が摂取する全ての 食物は、当該個人に対する被ばく評価地点において生育するものとみ なした。

その結果、1年間の操業期間中の平常時に大気へ放出される放射性物質による 個人の実効線量の推定値は、最大線量を与える地点において、約6.6 µ Sv/yとな った。このため、判断基準である50 μ Sv/y以下を十分に達成できると評価する。 なお、核種による内訳は、図 4.5.22に示すとおり<sup>14</sup>Cの寄与が最も大きく約64% を占めている。

2) 安全設計評価

PUREX法による燃料再処理施設ならびに粉末およびペレット状の核燃料を 使用する施設は国内に既に存在し、安全性評価も行われている。それらを参考 に、本検討での対象施設内で技術的に発生が想定される代表的な異常事象を抽 出し、表 4.5.9から表 4.5.10にまとめた。これらの異常事象を対象に、異常拡 大防止対策の妥当性について以下に述べるとともに、周辺公衆に対する放射線 被ばくリスクの恐れのある異常事象については、被ばく評価を行った。

① 主として液体放射性物質を扱う工程

湿式施設の特徴である液体放射性物質を主として扱う工程での異常事象を表 4.5.9に示す。

[臨界防止]

(i)の安全設計で述べたように、Pu燃料が流れる処理工程ライン上の設備については、基本的に処理する溶液がPu燃料について如何なる濃度であっても臨界とならないように、機器・配管・槽の幾何形状および寸法を設計する方針であるため、ここでの臨界は考えられない。また、溶液のバウンダリが破損してセル内へ漏洩した場合でも、早期に漏洩液の回収を行えるように多重の回収設備を設置するとともに、セル内での漏洩液の受け皿の幾何形状および寸法についても臨界を防止するように設計する方針であるため、溶液のバウンダリ破損を想定しても臨界に至るとは考えられない。

一方、表 4.5.9の「臨界の原因」に示した内容は、溶解から脱硝までの工程に おいて、使用済燃料の中からPuを含まない物質を分離除去する工程で分離不良 が生じた場合の臨界事故の可能性を述べたものである。この可能性を可能な限 り排除するための設計概念を図 4.5.23に示す。図は上から下へ、左から右へ流 れるプロセスフローを表す。太線がPu含有溶液の流れを表す。また、2重枠線は 槽類が未臨界を維持する幾何形状および寸法(臨界安全形状と呼ぶ)で設計さ れることを表し、1重枠線はそうでないことを表す。同図に示すように、分離不 良を臨界安全形状設備の範囲内で確実に多様な手段で検知するとともに、下流 工程への誤移送を防止するために移送操作スイッチを施錠管理するような概念 を採用する。このように多様かつ多重の臨界事故防止策が図られるため、起因 事象である分離不良に加えて、異常の検知における単一故障を想定しても確実 に異常は検出され、異常検知時における下流工程への移送禁止について運転員 の単一のエラーを想定しても、当直長による施錠管理によって誤移送は防止さ れる。この結果、下流工程での臨界事故には至らない。

[オフガス系浄化設備への沸騰蒸気の大量流入の防止]

放射性物質を内包する液体が沸騰すると、不揮発性物質の微粒子を同伴する 大量の蒸気がソースタームとして槽内の気相中に発生する。一方で、大量の水 蒸気がミスト状でオフガス系浄化設備(HEPAフィルタおよびよう素吸着塔) へ流入すると、ミストの付着によってやがては同浄化設備を機能喪失に至らし める。このように、ソースタームの発生要因および浄化設備の機能喪失要因と なる、オフガス系浄化設備への沸騰蒸気の大量流入を防止することは重要であ る。

溶解工程から脱硝工程までにおける放射性物質を内包する溶液は崩壊熱を有 するため、溶液沸騰の可能性を有する。また、①溶解処理のように沸騰を許容 しつつ高温運転を行う工程、②HAWおよび製品溶液の蒸発濃縮工程、ならびに ③HAW濃縮液のガラス固化および製品溶液の脱硝処理工程のように高温で水 分の積極的な蒸発を行う処理工程も存在する。このような特徴を有するため、 高い発熱源を有し且つ沸騰防止が必要な槽類では冷却機能が設けられ、大量の 水分蒸発を行う処理工程のオフガス系入口には水蒸気の凝縮機能が設けられて いる。これらの冷却機能および凝縮機能は、図 4.5.24に示すように独立な2系統 から構成される安全冷却系によって達成される。なお、冷却塔および冷凍機の 詳細仕様は今後の設計検討の中で具体化していくため、本検討では、各々多重 化された送風機およびコンプレッサが内蔵されているものと想定した。

安全冷却系の単一の系統機能を損なうような起因事象として冷却系配管破損 による冷却水の喪失を想定する。この場合、起因事象が発生した系統は冷却機 能を喪失する。残りの健全な1系統において、動的機器である冷却水循環ポンプ の単一故障を想定しても、残り1台の健全な循環ポンプによって冷却水循環が行 われるため冷却機能を喪失することはない。また、循環ポンプの単一故障の代 わりに、外部電源喪失を仮定し、さらに非常用電源系統のうち1系統の非常用発 電機の機能喪失を想定しても、残り1系統による非常用電源供給機能が維持され るため、安全冷却系の冷却機能が損なわれることはない。このように、安全冷 却系の冷却機能が完全に損なわれることはないので、オフガス系浄化設備へ沸 騰蒸気が大量に流入することはない。

[Puを装荷した可燃性有機溶媒のセル内漏洩および火災]

異常な量の放射性物質の施設外放出の恐れのある火災は、表 4.5.9に示すよう に、抽出工程にて発生の可能性がある。このほかに、Am-Cm回収設備において も同様の可能性があるが、大量のPu核種を有する観点から抽出工程が代表性を 有すると考えられる。このため、本検討では抽出工程について検討した。抽出 工程における火災発生の想定内容および火災防止対策の基本概念を図 4.5.25に 示す。

抽出器により抽出されたPu装荷溶媒は配管によって逆抽出器まで移送される。 この途中の配管で破損が生じた場合には、Puを含む可燃性有機溶媒がセル内の 受け皿上へ漏洩する。漏洩した液体はセル換気系によって冷却される一方、内 包するPuの崩壊熱によって熱せられるため、着火温度以下に制御される保証は ない。このため、漏洩液については、早期検知および早期回収が火災防止上重 要である。本検討に当たっては、単一故障を想定しても機能を失わないように 漏洩検出系および漏洩液回収設備を2重化するものと想定した。一方、抽出器、 逆抽出器、希釈剤洗浄器等に採用される遠心抽出器はモータ駆動機器であり、 駆動モータの電気的故障による火花は着火源となるため、これらの遠心抽出器 には防爆構造が施される。以上の前提条件の下で想定される火災とは、受け皿 上に漏洩した可燃性溶媒のうち、回収設備で回収されない回収残液が静電気等 の何らかの着火源の発生によって燃焼する場合であると考えられる。

また、火災発生時における放射性物質の施設外への異常放出を十分小さく抑 制するためには、燃焼に伴うセル温度上昇、セル圧力上昇、および煤煙の発生 を考慮に入れて、セル排気系のHEPAフィルタの健全性を損なわない範囲に燃 焼の量を制限することが必要である。仮に火災発生時に消火設備に期待しない 場合でも、六ヶ所再処理施設の安全評価を参考にすれば、回収残液の量を制限 することによりこの燃焼量を適切に制限することが可能と推察する。ただし、 今後の設備設計の具体化において、この点を確認することが必要である。

[その他の異常事象]

表 4.5.9に示すその他の異常事象には、槽類の液体バウンダリ破損によるセル 内への液体放射性物質の漏洩、水素の蓄積および爆発、ならびにTBP等錯体の 急激な分解反応がある。事象発生時の周辺設備に対する影響評価は設備設計が 具体化した時点で必要になるものの、爆発の影響を他の部屋に配置されたセル 排気系HEPAフィルタまで波及させずに、液体バウンダリ破損およびその近傍 のオフガス系配管破損に抑えることは可能と考えられる。この場合、漏洩およ び爆発による気相への放射性物質の移行率が火災よりも小さいことを考慮にい れると、これら3事象の影響は、上述の漏洩溶媒のセル内火災事象に包絡される といえる。 ② 主として固体放射性物質を扱う工程

主として非密封および密封の固体放射性物質を扱う工程での異常事象の抽出 結果を表 4.5.10に示す。粉末の飛散、装置の閉じ込め喪失、被覆管破損につい ては、いずれも粒子状放射性物質のセルまたは施設レベルでの閉じ込め機能の 健全性が維持される事象であることから、放射性物質放出の影響は他の異常事 象に包絡される。このため、臨界および水素爆発に対する異常拡大防止策につ いてのみ以下に述べる。

[脱硝・転換設備での臨界防止]

脱硝から還元までの処理は脱硝・転換装置に固定された未臨界維持形状の容 器内で行われる。さらに、脱硝により生成される単一容器内の粉体は漏洩など によって如何なる幾何形状に変化した場合であっても、臨界未満を維持するよ うに取扱量すなわち脱硝容器の容積が制限されている。このため、容器の破損 または、容器下部バルブの破損により万一容器内の粉体がセル内へ漏洩した場 合でも、臨界事故には至らない。

[成形設備での臨界防止]

一方、形状管理が困難と考えられるペレット成形工程においては、工程内で の2バッチ相当の処理量を臨界質量未満とするように、まず、1バッチの入量を 受入ホッパーの容量で制限している。つぎにバッチ処理の運用については、1バ ッチの処理が終了した段階で放射線モニター等によって同工程内に有意な量 の燃料物質が残っていないことを確認した上で、次のバッチ処理を行う運用を 想定した。さらなる臨界防止対策として、入量および出量を各々2重の重量計で 計量管理することによって工程内の燃料物質の質量を臨界未満に維持管理する よう設計が検討されている。

以上を基に起因事象として1バッチ処理量を超える量の誤供給をもたらすよ うなホッパーの故障、または工程内に有意な量が残留している状態での次のバ ッチ処理を促すような放射線モニターの誤信号を想定する。さらに、重量計は 安全系の動的機器であるため、入量の過小評価または出量の過大評価をもたら すような重量計の単一故障を想定する。この場合、ホッパーからの過剰な入量 または不十分な払出量を、残りの健全な重量計によって検知することにより工 程内の滞在量は適切に管理される。このため、臨界事故には至らない。

[焼結から燃料要素組立工程での臨界防止]

成形設備から払出されるグリーンペレットは焼結皿に載せられ、焼結皿は2段

重ねでボートに載せられた後、ボートごと自走台車によって焼結設備へ搬送さ れ、ボートに載せられた状態で焼結処理が行われる。この間、ボート全体の高 さを機器・構造物によって制限することで未臨界形状を維持する。特に、ボー トへ焼結皿を積載する際の持ち上げ動作に対して構造上高さ制限を越えないよ うな仕組みを講じるとともに、未臨界形状を維持するための静的機器・構造物 の健全性を維持する観点から、自走台車および処理工程内の動的機器には荷重 異常を検知して異常の拡大を防止する多重化された仕組みを具備するものと想 定した。この場合、起因事象としてジャミング等の異常を想定し、異常拡大防 止のための動的機器の単一故障を重畳しても、異常拡大防止機能は維持される ことから未臨界形状は維持され、臨界事故には至らない。

また、焼結設備から払出されたペレットは、研削設備、ペレット検査設備、 スタック形成設備を順に経て燃料要素組立設備で燃料要素として組立てられる。 この間、ペレットについては、1個単位で1列ずつ同一平面上で取扱われ、燃 料要素については1本ずつ同一平面上で扱われ、いずれも無限平板厚さを未臨 界に維持するよう制限している。なお、ペレットの持ち上げ動作を行う装置に ついては、ペレットの誤落下を検知して異常の拡大を防止する多重化された仕 組みを具備するものと想定した。この場合、起因事象として持ち上げ動作の異 常を想定し、異常拡大防止のための動的機器の単一故障を重畳しても、単一ペ レットの誤落下に留まることから未臨界形状は維持され、臨界事故には至らな い。

[燃料要素検査から燃料集合体検査までの工程での臨界防止]

燃料要素検査から燃料集合体検査までの工程では燃料要素の本数管理により 未臨界状態を維持管理している。

ー連の工程の入量本数および燃料集合体のラッパ管内へ収められる燃料要素の本数を燃料要素IDの読み取りおよび2重の計数機で数えるとともに、工程から払出される燃料集合体数を2重の計数機および監視カメラによる確認等の多重かつ多様な手段で計数することにより、工程内に存在する燃料要素の本数を臨界未満値に維持管理するものと想定した。

以上を基に、起因事象として入量の過小評価または出量の過大評価をもたら すような燃料要素IDの読み取り失敗を想定する。さらに計数機についても安全 系の動的機器であるため、起因事象と同じく入量の過小評価または出量の過大 評価をもたらすような単一故障を想定する。この場合、健全な計数機が正確な 本数を検知することにより過剰本数を処理する前に工程の運転が停止され、そ の結果、臨界事故は未然に防止される。 [燃料集合体を取扱う工程]

燃料集合体の貯蔵に当たっては、機器・構造物によって、燃料集合体の間隔 が未臨界を維持するよう制限される。このため、燃料集合体を移送するクレー ンの故障や誤操作が生じても、燃料集合体同士が近接して臨界に至ることは無 い。

また、燃料集合体の搬送、解体およびせん断設備は、単一の燃料集合体しか 取扱えないような構造となっているため、誤って複数の燃料集合体がこれらの 設備へ装荷されることはない。したがって、臨界事故には至らない。

[水素爆発の防止]

水素については、空気と混合した場合でも爆発下限以下となるように不活性 ガスと混合・調整された濃度の水素をユーティリティ設備で製造した後、焼結 炉等へ供給する。さらに、供給までの途中で水素濃度を2重化された設備で監視 し、濃度異常を検知した場合には水素ガスの供給を停止する。

以上を基に、起因事象としてユーティリティにおける過剰濃度の水素の誤製 造を想定し、さらに水素濃度監視および供給停止設備の単一故障を想定しても、 残りの健全な検知設備によって濃度異常が検知されるとともに水素ガスの供給 が停止されるため、還元炉や焼結炉等での爆発は未然に防止される。

③ 被ばく評価

各工程での臨界事故、冷却機能喪失に起因するオフガス系浄化設備への沸騰 蒸気の大量流入、および燃料製造システムでの水素爆発については、確実に防 止できることを確認した。ここでは、残りの異常事象の中で、放射性物質の異 常な放出の観点から代表的な事象として、抽出工程でのセル内漏洩溶媒火災を 選定し、周辺公衆の被ばく評価を行った。

セル内へ可燃性有機溶媒が漏洩した際の火災規模に支配的な因子は回収残液 量であるが、これについては設備設計の具体化の中で確認を行うことになる。 ここでは、六ヶ所再処理施設での設計例を参考に約0.1m<sup>3</sup>の回収残液を想定して、 施設外への放射性物質の放出量および周辺公衆の実効線量当量を算定した。回 収残液の全量が燃焼したものとみなして回収残液中に含まれる不揮発性放射性 物質の1/100が微粒子として気相中へ移行し、その全量が建屋排気系へ送られる ものと想定した。同排気系へ流入した排気は1段当たりDF=1000を有する HEPAフィルタ2段を通過して排気筒へ送られるため、粒子状放射性物質は、こ のHEPAフィルタによって捕獲される。評価上、2段のフィルタのDF値として 合計10<sup>5</sup>を見込んだ上で、周辺公衆の実効線量当量を算定したところ、風下最大 被ばく地点において気象条件の不確かさを考慮に入れても99%上限値で約 3.8 μ Svとなった。

④ 評価のまとめ

以上に述べたように、施設内で想定される異常事象を摘出し、異常の拡大防 止方策が適切にとられる見通しを確認するとともに、放射性物質の施設外への 異常な放出を伴う事象については、周辺公衆の被ばく線量を算定した。その結 果、判断基準である5mSv以下を十分満足するものと評価した。

(b)確率論的安全評価

確率論的安全評価手法を用いて、放射性物質放出リスク<sup>11,12)</sup>および周辺公衆の健康影響リスクを概算した。

1)評価の概要

決定論的安全評価で述べたように、施設内全工程の中で、放射性物質を大量 に含有する全工程を対象として異常事象を摘出し、さらに、機器の多重故障お よびヒューマンエラーの重畳した場合に異常な量の放射性物質の施設外放出要 因につながると考えられる異常事象を絞り込み、以下を評価対象として選定し た。

- ・施設内における放射性物質を内包する全槽での冷却機能の完全な喪失
   に起因する沸騰
- ・抽出工程における放射性物質を同伴する可燃性有機溶媒のセル内への 漏洩および火災
- ・燃料物質の分離工程における分離不良に起因する下流工程での臨界

これらの異常事象について、関連設備の応答や異常時の運転員の行動を検討 することにより、施設外へ放出される放射性物質の量に影響を及ぼす因子を同 定し、同因子の成功/失敗の分岐を展開したイベントツリーを構築することによ り、リスク評価上重要な事象シーケンスを漏れなく同定した。さらに、原因事 象の発生頻度をフォールトツリー手法により算定するとともに、イベントツリ ーの分岐確率を評価することにより、事象シーケンス発生頻度を算定した。ま た、事象シーケンス別に期待できる閉じ込め機能(例:HEPAフィルタの能力) を適切に考慮に入れて施設外へ放出される放射性物質の量を推定した。

以上を基に、排気筒条件は六ヶ所再処理施設と同一とし、気象条件は「もん じゅ」サイトで過去に観測された気象データを参考に設定して、風下最大被ば く地点における放出放射能による周辺公衆の急性死亡および50年間の放射線被 ばくによる致死ガンの発生確率を、事象シーケンス別に環境影響リスク評価コ ードMACCS2<sup>13)</sup>を用いて算定した。

2) 評価結果

本検討の中で考慮した異常事象シーケンスについて、短期の臓器被ばく線量

は高々ミリシーベルトのオーダーと算定されたため、急性死亡リスクは無視し うるほど小さいものと判断した。このため、判断基準のうち、一般公衆の個人 に対する急性死亡についての判断基準(10-7死/人/年/サイト以下)を満足すると 評価できる。

一方、一般公衆の個人に対する致死ガン発生リスクについては、異常事象に 起因するリスクの点推定値が約8×10<sup>-9</sup>死/人/年/施設となった。このため、1サイ ト当たり1施設の立地を前提として致死ガン発生リスクについての判断基準 (10-6死/人/年/サイト以下)を十分に満足すると評価できる。致死ガン発生リス

クの異常事象シーケンスによる内訳を図 4.5.26に示す。同リスクに支配的なシ ーケンスは、施設内における放射性物質を内包する全槽での冷却機能の完全な 喪失に起因する沸騰シーケンスである。なお、本検討の前提条件として、一般 冷却系は安全冷却系に配管および弁を介して接続されているものと想定した。 さらに、アクシデントマネージメントとして、安全冷却系が完全に機能喪失し た際には、一般冷却系を安全冷却系の1系統へ接続することにより代替冷却が可 能であるものとみなした。

次に、最も支配的なシーケンスの内訳を含めて、図 4.5.27に詳細なリスクプ ロファイルを示す。リスクに支配的なシーケンスの中で発生頻度の高いシーケ ンスは、安全冷却系2系統の冷却機能喪失時に、一般冷却系を代替冷却手段とし て活用した冷却に成功し、その間に故障した安全冷却系の修復に成功するシナ リオである。この場合の施設外への影響とは、弁操作による代替冷却手段への 切替え接続が完了するまでの間に溶解オフガス系から排気筒を介して環境へ放 出される放射性物質による影響である。なお、本検討では、切替え接続に最大1時 間を要するものとみなした。また、沸騰蒸気がオフガス系の除染機能を従属的 に喪失させることにより、この1時間の間、沸騰により気相へ移行した放射性物 質の全量が排気筒から環境へ放出されるものとみなして致死ガン発生確率を推 定した。

また、図 4.5.27の中でリスクに支配的なシーケンスは、代替冷却手段を含め て全冷却手段の喪失が少なくとも1日以上継続し、2日以内には冷却機能が復旧 するシーケンスである。この場合の施設外への影響とは、最大2日間の間に排気 筒から環境へ放出される沸騰蒸気中の放射性物質による影響である。なお、こ のシーケンスでは、沸騰継続に起因するオフガス系および排気系HEPAフィル タの従属的な機能喪失に伴い、沸騰によって気相へ移行した放射性物質の全量 が最大2日間にわたって環境中へ放出されるとみなした。

3) 今後の課題

一般冷却系をアクシデントマネージメントとして使用できるかどうか、およ

び冷却機能喪失時の運用としての溶解工程から下流工程への払い出しが可能か どうかについては、今後の設計および施設の運用を具体化していく中で確認す る必要がある。冷却機能喪失事象が発生した場合の沸騰蒸気中のミストのオフ ガス系および排気系での挙動およびHEPAフィルタの健全性への影響について もオフガス系および排気系の設計が具体化される中で、詳細に評価していく必 要がある。

(2) 経済性

システム設計検討結果から、建設費および運転経費を算出し、それを基に再 処理単価を求めた。

(i) 建設費

200 t/y 規模の再処理・燃料製造一体型プラントの再処理部分および使用済燃 料貯蔵施設に係る建設費の評価結果を表 4.5.11に示す。設備費は2,035億円、建 屋費は572億円で合計2,607億円と見積もられた。フェーズ I に比べ、廃棄体を 製造するなどの工程を付加したが、MA回収工程や配置設計の合理化が大きく寄 与し、コストを低減することができた。結果として13%低減した。なお、脱硝 設備は燃料製造の所掌であるとして費用算出の対象から除外している。

(ii) 年間運転経費

運転経費として人件費、機器交換費、定期検査費、消耗品費等、ユーティリ ティ費を内訳として見積もった。結果を表 4.5.12に示す。それぞれについて以 下に示す。

運転要員数の内訳を表 4.5.13に示す。基本的にクレーンやマニプレータ操作 を定常的に必要とする工程ついては1班を6人、配管系の工程については1班を 4人と設定し、5班3交代制とした。また1班と同じ要員数を日勤者として設定し、 要員数を多く必要とする作業は日勤に集中させるものとした。また、員数は工 程に割り付けており、機器単位への割付は行っていない。処理規模による機器 点数の変化は小さいこと、また、分析件数も大きく変わらないことから処理量 にかかわらず同じ要員数を必要とするものとした。その結果、運転員の総数は 366人となった。単価(900万円/人年)より算出した人件費は33億円/yとなっ た。

機器交換費は、各設備を4種類(機器、架台/配管類、電気計装および移送機器)に分類し、2もしくは6%/yの交換頻度をそれぞれについて設定し、積算して求めた。求められた機器交換費は約74億円/yであった。結果としてフェーズIでの値に比べて2割以上低減することができた。また、分類して見積もった結

果、従来、約17%の過大な評価を行っていたことが分かった。

定期検査費用はフェーズ I での評価と変わりなく 24 億円である。消耗品費等は、設備費用の 1% として算出した。ユーティリティ費用はフェーズ I の検討結果をそのまま用いた。

(iii) 再処理単価

以上の建設費・年間運転経費の結果をもとに、再処理単価を算出した。その 結果、17.6万円/kgHMとなった。フェーズ I 検討に比べて約 16 % 減少した。 内訳は資本費 7.9万円/kgHM、操業費 9.7万円/kgHMである。また、再処理に かかる燃料サイクル費を評価すると0.26円/kWhとなる。

(iv) 建設費および運転経費の増減について

本設計では、不溶解残渣から核燃料物質を回収する工程、溶媒等のリワーク 設備、NOx を再利用する工程、セメントを充填した廃棄体を得る工程などが付 加されている。これらの工程は、プラントに要求される環境負荷低減等の条件 を考慮して追加したものであるが、これら付加設備の必要性については将来プ ラントへの要求条件に依存する。例えば、不溶解残渣を処理する工程の費用は およそ50億円と見積もられるので、これを削減すると建設費は約2%低減する。

一方、晶析工程や抽出クロマトグラフィーによる MA 回収工程は、これから 確立していく技術であり、見積もった費用の不確かさが大きい。実際の費用が それぞれ見積もりの150%となった場合に、建設費は約1%上昇する。

運転経費の中で機器交換費の寄与が最も大きいので、機器等の交換頻度の低 減が再処理費用の抑制に効果的である。例えば、機器交換頻度を10分の1とし約 0.3%/yとすると、機器交換費は約8億円となり、再処理費用は約15万円/kgHMま で低減される。

(3) 環境負荷低減性

環境負荷低減性のうち、通常運転時の環境放出放射能と通常運転時の放射性 廃棄物発生量については六ヶ所再処理施設の事業指定申請書に記載の値を基に 比較、評価する。

(i) 通常運転時の環境放出放射能

大気へ放出される放射性物質(<sup>85</sup>Kr、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、よう素)を六ヶ所再処理施設 からの推定年間放出量(表 4.5.14)と比較〔年間再処理量と平均燃焼度および 発電効率(軽水炉の発電効率は1999年原子力部会試算モデルに準拠して34.5% と設定)を基に発電量当たりの放出量で比較〕すると、<sup>85</sup>Krについては設計要 求を満足する一方、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、<sup>129</sup>Iについては設計要求を上回る。

<sup>85</sup>Krの放出量は設計要求の約50%となる。

<sup>3</sup>Hについては、設計要求を満足するために除去設備の設置等の検討が必要となる。

<sup>14</sup>Cについては、現状の評価では設計要求を上回っているものの、<sup>14</sup>C生成量の 推定値は粗い見積もりに留まっており、高速炉における生成量を精度よく見積 もるためのデータを整備していく必要がある。

<sup>129</sup>I について設計要求を満足するには、移行率の精査や除去性能の向上等に よる放出量低減の検討が必要となる。

なお、<sup>131</sup>Iについては再処理施設における生成量を評価した上で、設計要求を 満足するための除去設備構成を検討する必要がある。

海洋へ放出される放射性物質(<sup>3</sup>H、<sup>129</sup>I)について上記と同様に六ヶ所再処理 施設からの放出量と比較すると、設計要求を満足する。

<sup>129</sup>Iの放出量は十分低く、<sup>3</sup>Hは設計要求の約70%となる。

(ii) 通常運転時の放射性廃棄物

通常運転に伴い発生する廃棄物について、六ヶ所再処理施設の発生量との比 較が可能な高レベル廃棄物と雑固体廃棄物について年間発生量を比較する。(年 間再処理量と平均燃焼度および発電効率を基に発電量当たりの発生量で比較)

(a) 高レベル廃棄物

高レベル廃棄物(ガラス固化体)の発生量について六ヶ所再処理施設と比較 すると〔事業指定申請書記載値(ガラス固化体の推定年間発生量約1000本)に 基づく〕、年間発生量は設計要求を満足する。

但し、発生量は設計要求の約60%であり、設計目標としている設計要求の 1/10に低減するまでには至っていない。

(b) 雜固体廃棄物

雑固体廃棄物の発生量について上記と同様に六ヶ所再処理施設と比較すると (推定年間発生量約4300本に基づき比較)、年間発生量は設計要求を満足する。

但し、発生量は設計要求の約60%であり、設計目標としている設計要求の 1/10に低減するまでには至っていない。

(iii) U、TRU、FPの廃棄物への移行率

U、TRUに関しては評価上の回収率が共に99.9%以上となっており、廃棄物への移行率は設計要求における目標値を満足している。

FP(Cs、Sr、Tc、I)については、現状検討しているシステムでは大部分が 廃棄物へ移行する。FPの分離回収について原理的に実現の可能性が高いと考 えられる手法について検討を行っているが、技術的な実証には今後の試験研究 の成果を待たなければならない。

(iv) 施設の廃止に伴う放射性廃棄物

(a) 解体性

施設の運転性、保守、補修性確保を目的にセルにはI/C、P/M、MSM等の遠隔 操作設備や相当数の遮へい窓があり、セル廻りおよび上下には保守エリア、通 路スペース等が確保されている。

また、セル内主要機器については部品をユニット化することなどが考慮されている。

これらは廃止措置時の遠隔解体、遠隔除染等の作業にも有効に活用可能と考えられる。

一方、搬出入性についても基本的に考慮されているが、セルからの搬出入性 に関しては開口のサイズや設置箇所の妥当性について詳細設計段階での評価が 必要である。

(b) 廃棄物発生量

施設設計の検討結果を基に評価した解体一次廃棄物の発生量を表 4.5.15に示 す。

一次廃棄物にはセルライニング、はつりコンクリートを含めている。(低レ ベル廃棄物に区分して集計)

TRU廃棄物や高βγの廃棄物発生量は放射性物質を直接取り扱うセルの規模 に影響を受け、低レベル以下の廃棄物や建屋解体に伴って発生するコンクリー ト等の廃棄物は建屋の規模に影響を受ける。

処理規模200tHM/yの施設と50tHM/yの施設とでは、処理規模の増減に比べて セル容積や建屋体積の増減は小さいため、単位処理量で比較すると処理規模の 大きいほうが解体廃棄物発生量は少ない。

(4) 資源有効利用性

UやPuの回収率を低下する要因には溶解工程における不溶解残渣の生成があ げられる。本設計ではこれを電解を併用した方法により溶解し回収率を高める 方策を適用した。このため、アクチニド元素(UからCm)の回収率として99.9% を見込んでいる。よって、再処理システムにおけるU、TRUの放射性廃棄物へ の移行率としてはそれぞれ0.1%以下となった。

また、再処理製品へのFP混入率については、U/TRU再処理製品で0.06wt%、 U再処理製品で0.05wt%となり、設計要求(1.2wt%以下)を満足する。

なお、超臨界直接抽出法では、再処理システムにおけるU、TRUの放射性廃 棄物への移行率としてはそれぞれ1%以下となった。また、再処理製品へのFP混 入率については、U/TRU再処理製品で0.5wt%、U再処理製品で0.5wt%となり、 設計要求(1.2wt%)を満足する。

(5) 核拡散抵抗性

検討された湿式リファレンスシステムでは、従来のPUREX法と異なりPuを単 離する工程がない。また、ブランケット燃料と炉心燃料を混合した状態で処理 するため、回収されるPuの同位体組成比も転用に困難なものである。したがっ て、本システムを用いて使用済燃料から高い純度のPuを直接取り出すことは困 難であり、潜在的な核拡散抵抗性は向上している。

保障措置に対しては、既存LWR再処理施設と同等の計量管理設計としている。 また多量のPuを扱うことから、適時性要件を達成するためにNRTAにも対応し ている。これらの計量管理システムで使用する個々の計量技術の精度および正 確さ等の能力および手順も現行施設で実証されているものであり、年間200tHM 処理のプラントとして特に大きな技術的課題はないと考えられる。

(6) 運転·保守補修性

湿式再処理のリファレンスシステムは、従来の液/液系での溶媒抽出技術を ベースとして、従来技術に対して幾つかの工程を別の技術で置き換え、その結 果不用になった工程を削除することで、全体として簡略化するように設計して いる。置き換えられた技術は、従来技術との整合が保たれており、運転性につ いて特に影響を与えるものとは言えない。また工程機器は、従来の湿式再処理 における設計手順を踏襲し、所定の能力に対して十分な余裕をもって設計して おり、プラントの処理能力は保障されている。以上のことから運転性は設計要 求を満たしていると考えられる。

保守・補修については、インセルクレーン、パワーマニピュレータ、マスタ ースレーブマニピュレータを用いた、セル壁の遮蔽窓からの視認による遠隔保 守とする。主要工程機器は、交換が想定される部分を遠隔操作で交換できるよ うに設計し、上記の遠隔保守用機器がアクセスできる地下1階のセルに配置した。 貯槽および配管は、これまでの湿式再処理プラントの実績に基づき保守を想定 せず、地下2階のセルに配置した。保守の必要性に応じて機器を配置するセル を分けたことで、主要工程機器は十分な間隔をあけて配置でき、セル内におけ る保守作業性を高めている。なお、晶析装置など新たに開発している機器については、現段階では保守補修性を検討できるまでには設計が詳細化されていないため、保守作業内容の検討には至っていない。

(7) 技術的成立性

NEXT法の各工程の設計要求、現状までの実績について表 4.5.16に示す。

技術的成立性の観点からは、2015年までに高濃度溶解、晶析、抽出クロマト グラフィー等、機器開発・ホット実証が必要な技術もあるが、各工程において 技術の原理については明らかとなっており、また、実績ある従来湿式法の技術 を適用可能なため、2015年までに技術体系を確立する可能性は高いと考えられ る。

### [参考文献]

- 1) 木原,他:"MOX燃料電解溶解技術開発",動燃技報, No. 89 (1994).
- D.Alexandre, et al. : "Operational Performance of the Reprocessing Plants of COMEGA La Hague Site", Proc. of RECOD '94, (1994).
- 滑川 卓志,他:"主要核分裂生成物およびアクチニド核種の抽出挙動 高速炉燃料再処理 試験における移行率のまとめ", PNC TN8410 92-213 (1992).
- (4) 渡部雅之,他: "CMPOを用いた三価アクチニドとランタニドの分離(3) ランタニド抽出 への塩析剤陽イオンの影響",日本原子力学会「1998年春の年会」 (1998).
- 5) 駒義和,他: "溶媒抽出による三価アクチニドとランタニドの分離",動燃技報, No. 101 (1997).
- 6) 柴田淳広,他: "PUREX再処理システムのための晶析法の開発 (II) ウランの晶析におけ る除染係数について",日本原子力学会「2000年春の年会」 (2000).
- 7) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会共同作業チーム:"TRU廃棄物処分概念検討書", JNC TY1400 2000-001 (2000).
- 8) O. Togawa, T. Homma : "Development of Collective Dose Assessment Codes for a Spent Nuclear Fuel Reprocessing Plant in Japan", Proc. of The Third International Conference on Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management RECOD '91, Sendai, Japan, April 14-18, 1991, Vol. 1, p. 253 (1991).
- 9) O. Togawa : "Computer Code TERFOC-N to Calculate Doses to Public Using Terrestrial Foodchain Models Improved and Extended for Long-Lived Nuclides", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 27, p. 360 (1990).
- 10) 外川織彦: "原子力施設の平常運転時に大気へ放出される放射性核種による公衆の被曝線量 を算出するための計算コードATERNFOC-N", JAERI-M 89-145 (1989).
- 11) 栗坂健一,他:"FBRサイクルの安全性総合評価 安全性の開発目標の検討および湿式燃料 サイクルシステムのリスク分析", JNC TN9400 2002-031 (2002).
- 12) K. Kurisaka, K. Kamiyama : "Risk Analysis of the Aqueous Fast Reactor Fuel Cycle Facility in the Conceptual Design Stage", ICONE11-36388, 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003 (2003).
- D. Chanin, M.L.Young : "Code Manual for MACCS2 User's Guide", NUREG/CR-6613, Vol. 1, (1998).

		製品	側	環境	放出	廃	棄物
	元素名	ウラン製品移行率	TRU製品移行率	大気放出側移行率	海洋放出側移行率	ガラス固化体移行率	深地中並廃棄物移行率
	Н			3. 0E-01	7. 0E-01		
	C			1.0E+00			
ΔΙΜ	Rb	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Cs	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
AL E	Sr	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1. 0E-09	0. 988	1.0E-03
ALL	Ba	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Y	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	La	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-13	1. 0E-09	0.989	1.0E-03
	Ce	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-13	1. 0E-09	0. 989	1.0E-03
	Pr	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-13	1. 0E-09	0.989	1.0E-03
	Nd	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-13	1. 0E-09	0.989	1.0E-03
	Pm	1.0E-02	0.01	1.0E-13	1. 0E-09	0.979	1.0E-03
RE	Sm	1.0E-02	0.03	1.0E-13	1.0E-09	0.859	1.0E-03
	Eu	1.0E-02	0.07	1.0E-13	1.0E-09	0.919	1.0E-03
	Gd	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	Tb	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	Dy	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	Ho	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	Er	1.0E-02	0.099	1.0E-13	1.0E-09	8.9E-01	1.0E-03
	Zr	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Mo	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
	Tc	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
NM	Ru	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
	Rh	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Pd	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Ag	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
	Cd	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	In	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
	Ge	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Sn	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
	As	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
	Sb	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
00	Se	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0.988	1.0E-03
66	Te	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-13	1.0E-09	0. 988	1.0E-03
110	Br	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-02	1.0E-09		0.990
Пü		1.0E-05	1.0E-06	1.0E-02	1.0E-09		0.990
NO	Kr			1.0E+00			
NG	Xe			1.0E+00			
	U	0. 7320	0. 2680	1.0E-13	1.0E-09		1.0E-06
	Np	1.0E-02	0.8900	1.0E-13	1.0E-09	1.0E-01	
AC	Pu	1.0E-02	0.9900	1.0E-13	1.0E-09		1.0E-06
	Am	1.0E-02	0.9900	1.0E-13	1.0E-09		
	Cm	1.0E-02	0.9900	1.0E-13	1.0E-09		
注)	ALM:ア	ルカリ金属 ALE:ア	ルカリ土類金属 RE	:希土類 NM:貴金属	CC:カルコゲン H	G:ハロゲン NG:希z	ガス AC:アクチニド

表 4.5.1 各元素の製品・環境放出・廃棄物への移行率

表 4.5.2 先進湿式リファレンスプロセスの回収率(200tHM/y)

			各工程の「	回収率 * <sup>1)</sup>		—————————————————————————————————————	
		U	Pu	MA <sup>(*2</sup>	TRU <sup>(*3</sup>	頒方	
受入		100.000%	100.000%	100.000%	100.000%		
解体	1	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%		
せん断	1	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%		
溶解	1	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%		
清澄	1	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%		
調整	1	99.997%	99. 997%	99. 997%	99. 997%	サンプリングによる損失	
上記合計回収率	HE	<u>99.997%</u>	99.997%	99.997%	99.997%		
晶析 (母液)	CR1	26.616%	99.265%	<u>99. 265%</u>	99.265%	サンプリングによる損失等	
晶析 (晶析塩)	CR2	73.382%	0. 734%	0. 734%	0.734%	"	
抽出 (U/Pu/MA 抽出液)	EX1	99.995%	99.995%	9. 336%	96,060%	"	
抽出(抽出残液)	EX2	0.004%	0.004%	90.659%	3.935%	"	
MA回収設備	ST	0.000%	0.000%	99.987%	99.999%	<u>〃、HAW への移行等</u>	
濃縮	C0	99,999%	99.999%	<u>99, 999%</u>	<u>99, 999%</u>	サンプリングによる損失	
富化度調整	AD	99.999%	99. 997%	99.997%	99.997%	サンプリングによる損失	
全体回収率 <sup>(*4</sup>	ļ	99, 99%	99, 99%	99, 98%	99, 99%		

\*1)回収率の考え方:当該設備の損失率が0である場合は回収率100%とする。

\*2) Np, Am, Cm

\*3) Pu, MA

\*4) 全体回収率=HE × {CR1 × (EX1 × C0+EX2 × ST)+CR2} × AD

		移行	亍率		
		α	βγ	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	
ガラス固化体			-	1.0E+00	希ガス、ヨウ素を除く
	ハル・エ	ンドピース	1.0E-03	1.0E-03	
	低レベル	濃縮廃液Ⅰ	1.0E-03	1.0E-03	リファレンスシステムでは発生なし
	(本 +1) (五	可燃性廃棄物I			
три	焼却火	難燃性廃棄物I	1.0E-05	1.0E-04	
	沿的平	廃活性炭等			
	廃銀吸着	材	-	9.9E-01	ヨウ素について
	不燃廃棄物I(金属)		1.0E-04	1.0E-04	
	不燃廃棄	物I(その他)	1.0E-04	1.0E-04	
	廃溶媒		1.0E-08	1.0E-07	
<b>吉</b> の 22	低レベル濃縮廃液日		1.0E-05	1.0E-05	リファレンスシステムでは発生なし
	可燃廃棄物目		1.0E-07	1.0E-07	
	難燃性廃棄物Ⅱ		1.0E-08	1.0E-08	
任しべま	不燃廃棄物11(金属)		1.0E-07	1.0E-06	
	不燃廃棄物Ⅱ(その他)		1.0E-07	1.0E-07	

## 表 4.5.3 廃棄物への移行率

表 4.5.4 廃棄物発生量(200tHM/y)

		処理方法	m3/y	本/y	発生場所	備考	例
	ガラス固化体	硼珪酸ガラス固化体	36. 0	240	ガラス固化設備	発熱制限;2.3kW/体 Na20;10wt% FPその他酸化物;18wt%	ガラス固化体
	ハル・エンドピース	ドラム缶詰、モルタル充填	137.0	685	解体,剪断,溶解	500kg/200Lドラム缶	集合体構造部材
	低レベル濃縮廃液日	①乾燥,粉体化 ②ペレット造粒 ③ドラム缶詰,モルタル充填	0.0	0	オフガス処理設備, 抽 出設備, 分析設備		オフガス洗浄廃液,溶媒洗浄廃液, 分析廃液,各工程・機器の除染廃液 等
	焼 却 可燃性廃棄物	①焼却,減容			運転・保守・補修作業 時のセル内		紙布類、木片、酢酸ビニル等
T R	次 溶 難燃性廃棄物   融	②ペレット造粒 ③ドラム缶詰,モルタル充填	6. 7	34	運転・保守・補修作業 時のセル内		RIゴム手袋, RIシューズ, テフロン 等
「座	体 廃活性炭等				VLAW処理設備		活性炭
棄物	廃銀吸着材	ドラム缶詰、モルタル充填	10. 0	50	オフガス処理設備		オフガス処理時のヨウ素除去に用い る銀フィルタのメディア
	不燃廃棄物I (金属)	①高圧圧縮減容 ②ドラム缶詰,モルタル充填	29. 7	149	運転・保守・補修作業 時のセル内	700kg/200Lドラム缶	機器, 配管, 工具, 針金, ボルト, ナット等
	不燃廃棄物I (その他)	①高圧圧縮減容 ②ドラム缶詰、モルタル充填	29. 7	149	運転・保守・補修作業 時のセル内	700kg/200Lドラム缶	ガラス, コンクリート, 断熱材, ア クリル等
	小計		76.1	381			
	廃溶媒	①蒸留 ②Ca(0H)2添加後熱分解 ③残渣を水熱固化処理 ④ドラム缶詰、モルタル充填	0.4	2	抽出設備		TBP, ドデカン, TBPの劣化物
高 β γ	低レベル濃縮廃液日	①乾燥, 粉体化 ②ペレット造粒 ③ドラム缶詰, モルタル充填	0.0	0	酸回収設備, MAW処理設 備, 等		凝縮水,床排水等
, 廃 棄 物	可燃廃棄物Ⅱ	①焼却, 減容 ②ペレット造粒 ③ドラム缶詰, モルタル充填	13. 1	65	運転・保守・補修作業 時のセル外		紙布類,木片,ポリエチレン,酢酸 ビニル等
	難燃性廃棄物日	①焼却, 減容 ②ペレット造粒 ③ドラム缶詰, モルタル充填	1.9	9	運転・保守・補修作業 時のセル外		RIゴム手袋, , 塩化ビニル, RI シューズ, テフロン等
	小計		15.3	76			
100 s	不燃廃棄物II (金属)	①高圧圧縮減容 ②ドラム缶詰,モルタル充填	59.4	297	運転・保守・補修作業 時のセル外		機器,配管,工具,針金,ボルト, ナット等
低レヘル 廃棄物	不燃廃棄物II (その他)	①高圧圧縮減容 ②ドラム缶詰,モルタル充填	59.4	297	運転・保守・補修作業 時のセル外		ガラス, コンクリート, 断熱材, ア クリル等
	小計		118.8	594			

区分	品目	使用目的	使用量
試薬	硝酸	溶解、溶媒抽出等	56,000 kg/y
	TBP	溶媒抽出	400 kg/y
	n- ドデカン	溶媒抽出	4,200 kg/y
	ヒドラジン	溶媒抽出(溶媒洗浄)等	4,400 kg/y
	シュウ酸	溶媒抽出(溶媒洗浄)等	3,800 kg/y
	ホルマリン (40%)	廃液濃縮	160,000 kg/y
	$Ca(OH)_2$	廃溶媒処理	79 kg/y
	NaOH (10 M)	用水製造、廃液中和	75,000 kg/y
	硫酸	用水製造	26,000 kg/y
	硝酸銀	溶解	2,200 kg/y
ユーティリティ	電気	再処理・燃料製造	32,000 kW

# 表 4.5.5 主な試薬・ユーティリティの使用量

表 4.5.6 各建屋のセルおよびセル相当室一覧
--------------------------

	使用済燃料受入設備(使用済燃料貯蔵建屋から)
	使用済燃料一時貯蔵ピット(2週間分)
	燃料受入/せん断セル
	再処理セル(A)
	再処理セル(B)
	せん断・溶解オフガス処理セル
	槽類オフガス処理セル
	ガラス固化セル
	ガラス固化体一時貯蔵セル
再処理/燃料製造建屋	ガラス固化体払出セル
(再処理分)	空ドラム準備セル
	高放射性固体廃棄物移送セル
	高放射性固体廃棄物処理セル(ハル)
	高放射性固体廃棄物処理セル(ラッパ管等)
	高放射性固体廃棄物一時貯蔵セル
	高放射性固体廃棄物払出セル
	分析セル
	前処理保守セル
	再処理保守セル
	高放射性固体廃棄物処理保守セル
	キャスク搬出入室
	燃料取出セル
使用済燃料・新燃料	燃料移送セル(燃料取出セル→使用済燃料/新燃料貯蔵セル)
貯蔵建屋	使用済燃料貯蔵セル
	新燃料貯蔵セル
	燃料移送セル(使用済燃料/新燃料貯蔵セル⇔主建屋)

		再処理セル(m <sup>3</sup> )	燃料製造セル(m <sup>3</sup> )	
地下2网	比	20,000	0	
地下18	比	24,100	20,200	
1階		7,580	26,000	
2階		12,800	0	
セル体	積合計	64,500	46,200	
建屋全体	主建屋	680,0	00m <sup>3</sup>	
規模燃料集合体貯蔵建屋		178,000m <sup>3</sup>		

### 表 4.5.7 主建屋のセル体積および建屋の全体規模

## 表 4.5.8 平常時被ばく評価において想定した主要な核種の大気放出放射能

	<sup>85</sup> Kr	<sup>3</sup> Н	$^{129}I$	$^{14}C^{*1}$
年間処理量(Bq)	7.6E+16	7.3E+15	6.4E+11	2.5E+13
大気への移行率	1	0.3	0.01	1
年間大気放出量(Bq/y)	7.6E+16	2.2E+15	6.4E+09	2.5E+13

※1:新燃料中の窒素含有率を50ppmと想定

### 表 4.5.9 液体状の放射性物質を扱う工程での異常事象

工程	臨界の原因	オフガス系浄化設備 への沸騰蒸気の大量 流入原因	火災原因	槽類の液体 バウンダリ 破損の原因	水素爆発の 原因	TBP等錯体の急激な分解反 応(レッドオイル爆発)の 原因
溶解工程	溶解不良(ハルへの燃料付着量増 大)によるハル廃棄物缶での臨界	冷却喪失に伴う溶解 オフガス中の沸騰蒸 気凝縮失敗				
清澄・調整工 程	なし		なし			なし
晶析工程	晶析異常によるPuNH析出による UNH溶解槽より下流工程での臨界 (Pu濃度確認失敗および誤移送に よる富化度調整設備での臨界)					
抽出工程	①抽出不良による抽出廃液中の U/Pu濃度上昇&濃度確認失敗およ び誤移送によるMA回収工程での臨 界 ②逆抽出不良による使用済溶媒中 U/Pu濃度上昇&濃度確認失敗およ び誤移送による溶媒洗浄工程での 臨界	冷却喪失に伴う槽内 沸騰	放射性物 質可燃溶体の で 機容 レ の 漏 、 と 、 没	腐食、地震 外力等	掃気機能喪 失による 槽 への 素の 蓄積	①抽出後および逆抽出後の 希釈剤洗浄不良によりU/Pu 中TBP濃度上昇&②TBP濃度 確認失敗による誤移送& ③HAW蒸発缶およびPu溶液 濃縮缶での温度管理失敗
液体廃棄物処 理工程 炉心燃料製造 (原料受入・ 脱硝)	なし	冷却喪失に伴う槽内 沸騰または凝縮器に おける沸騰蒸気凝縮 失敗	なし			なし

工程	臨界の原因	水素爆発の原因	粉末の飛散の原因	装置の閉じ込め 喪失の原因	
せん断	せん断粉の滞留	無し	クレーン等の転 倒、落下による閉 じ込めバウンダリ の機械的破損	オフガス系停止 による負圧喪失	
脱硝・粗砕・ 焙焼・還元	無し(形状管理の ため)		容器下部バルブの 開固着による漏洩 等		
成形	質量管理の失敗 (注1)	還元ガス中の水	ホッパの破損等	過加熱による	
<ul><li>焼結・研削・</li><li>ペレット検</li><li>査・スタック</li><li>形成・燃料要</li><li>素組立</li></ul>	無し(形状管理 のため)	素濃度調整失敗	ペレットの粉体化	シール破損	

#### 表 4.5.10 非密封の固体状の放射性物質を扱う工程での異常事象

注1)ダブルバッチ処理までは未臨界を維持できる

## 表 4.5.11 先進湿式法再処理プラントの建設費の見積もり(200tHM/yの規模の施設)

建屋	区分	費用(億円)
主建屋	受入・前処理	71
	分離	711
	廃棄物処理	450
	廃棄物貯蔵	21
	分析	136
	保守	167
	計装制御	212
	ユーティリティ	78
	建電換他	484
	小計	2,330
使用済み燃料貯蔵建屋	使用済み燃料一時貯蔵	189
	建電換	88
	小計	277
合計		2,607

# 表 4.5.12 先進湿式法再処理プラントの運転経費の見積もり(200tHM/y の規模の施設)

費目	費用, 億円/y
人件費	33
機器交換費	74
定検費	24
消耗品費等	20
ユーティリティ費	13

# 表 4.5.13 湿式プラントの運転要員構成

設備	日勤	交代勤務	小計
受入/貯蔵	6人	6人×5班	36人
機械前処理	6人	6人×5班	36人
分離(化学前処理)	6人	6人×5班	36人
分離(NEXT)	4人	4人×5班	24人
分離(MAREC)	4人	4人×5班	24人
廃液処理	4人	4人×5班	24人
廃棄物処理/貯蔵	20人	6人×5班	50人
分析	10人	10人×5班	60人
保守/技術	30人		30人
放射線管理	6人	6人×5班	36人
当直長		2人×5班	10人
合計			366人

## 表 4.5.14 六ヶ所再処理施設における推定年間放出量

核種		推定年間放出量 (Bq/y)	備考		
	$^{85}\mathrm{Kr}$	約3.3E+17			
大気への	<sup>3</sup> H	約1.9E+15			
成山	<sup>14</sup> C	約5.2E+13	・年間再処理量		
	$^{129}\mathrm{I}$	約1.1E+10	$800tU_{\rm Pr}$		
	$^{131}$ I	約1.7E+10	・平均燃焼度		
	<sup>3</sup> H	約1.8E+16	45,000MWd/t		
海洋への	$^{129}\mathrm{I}$	約4.3E+10			
<i>队</i> 田	$^{131}\mathrm{I}$	約1.7E+11			

	発生量(t)			
区 分	リファレンスシステム			
	処理規模	∫処理規模 )		
	200tHM/y	50tHM/y		
TRU、高β γ (金属廃棄物)	約500	(約400)		
低レベル、極低レベル(金属、コンク リート)	約5,800	(約4,400)		
クリアランスレベル以下、非放射性 (金属、コンクリート)	約500,000	(約380,000)		

# 表 4.5.15 解体一次廃棄物発生量

		各技術	設計要求	技術的成立性(原理確認基礎データ、実績等)
前処理		一体型解体・せん断	解体不良、燃料ピンの損 傷がないこと	【解体機】 •YAGレーザによる解体可能。 •解体機→上面装荷方式せん断機への受け渡し特性を評価。 •光ファイハ-のγ照射試験を実施→高出カレーザ伝送時、照射による 著しい伝送損失、温度上昇は認められず。 【せん断機】 •工学規模試験装置の設計、製作、試験。 •集合体せん断による短尺せん断可能[せん断長20mm,開口率約 80%]。 •解体・せん断設備の耐久性、遠隔保守性については確認が必要。
	前処理	高濃度溶解	燃料溶解率99.9%以上 燃料漏出率0.1%未満 粉砕したハル片が槽内に 蓄積しないこと	・高濃度溶解液(約560gHM/1)を得るための溶解方法で、せん断片 溶解では5時間で溶解率約80%、10時間後でも約95%と溶解終了 に至らず、過去のCPFデータに基づく溶解速度評価とほぼ一致。 ・粉化溶解時のオフガス発生量平坦化のために、温度制御(溶解初期 を60℃程度の低温としてから加温して溶解)の有効性が期待できる ことを溶解速度評価式を用いて確認。試験による実証が必要。 ・未溶解燃料及び堆積スラッジの有無の確認手段として、ファイバー スコープによる内部観察システムを開発。
		清澄	粒径1μmの粒子補集率: >99% 洗浄スラッジの回収率: >99%	<ul> <li>・残渣発生割合(燃料総重量に対する割合)は、Pu富化度が18%の場合で0.23%、30%程度で0.5~1.4%程度。</li> <li>・残渣粒径は、2µm以下が90%を占める。</li> <li>・残渣成分はMo,Pd,Ru,Rh,Tcであり、Mo含有率は20~30%程度。</li> <li>・Zrの残渣への移行率は0.3~11.5%。</li> <li>・Ruの残渣への移行率は5~16%。</li> <li>・Rhの残渣への移行率は約20%。</li> <li>・Uの残渣への移行率は0.008~0.07%。</li> <li>・Puの残渣への移行率は0.01~0.09%。</li> </ul>
		晶析	Uの析出率:70%以上 Puの結晶への移行率: 1%未満 DF:>102	・U試験、模擬溶解液試験を実施し、既知の溶解度曲線より予想され た通りの温度制御によりU回収率60%が得られることを確認し、模擬 FPIこついてはDF=10 <sup>2</sup> が期待できることを確認。 ・U(VI)+Pu(VI)混合試験で、UとPuの共析出を確認し、析出物中の U/Pu比は、若干Puの量が低い傾向にはあるが、ほぼ供給液中の U/Pu比と同じであることを確認。 ・U(VI)+Pu(IV)混合試験では共晶析せず、Uのみが析出し、Puは母 液中にとどまることを確認。 ・晶析U製品ハントリング試験を実施し、結晶のまま移送する場合の特性 データを取得するとともに、移送候補技術の洗い出しを実施。 ・実溶解液を用いた晶析データの把握が必要。
化学処理	化学処理	簡素化溶媒抽出	U、Np、Puの回収率: 99.9%以上 廃液へのU、Puリーク: 0.1%未満 DF:>102	・過去の試験結果より単サイクルでDF=10 <sup>4</sup> 程度が達成可能。 ・小型遠心抽出器を用いた実溶解液を用いた試験では、total-γに 対するDFは10 <sup>3</sup> 以上で、製品中へのFP移行量及びラフィネート中への U,Puリーク量は分析下限値以下。 ・上記試験で、U逆抽出液流量の低下及び調整酸流量の不安定さが 原因と思われる廃溶媒中へのUリークを確認。 ・Nplt約2%がラフィネートへ移行、殆どは製品中に回収。
		溶媒洗浄	廃溶媒へのUリーク0.1% 未満	・U,Zr,Ru,DBPを含む模擬劣化溶媒(照射試験後)を用いて、シュウ酸ヒト ラジン、炭酸ヒトラジンによる分液ロートによる洗浄試験を行った結果、Uの DFは800以上、ZrのDFは80以上、RuのDFは12以上得られることを確 認。
		MA回収	Am、Cmの回収率:99.9% 希土類除去率:90%	・CMPO含浸シリカ単体吸着剤の耐放射線性、耐熱性、耐酸性のデータ 取得(有機成分の溶出は僅か)。

# 表 4.5.16 NEXT プロセスの技術的成立性



図 4.5.1 簡素化溶媒抽出法の概略フローシート



図 4.5.2 先進湿式法(リファレンスシステム)の全体工程図





図 4.5.3 先進湿式法リファレンスシステム主要工程の概要図(PFD)



工程	受入	せん断・解体	溶解	清澄	晶析	抽出	Am∕Cm ⊠⊒ע	濃縮・ 富化度調整
物流番号	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1
成分	使用済燃料 集合体 (炉心)	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス
U	5.37E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pu	8.86E+01	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Np	3. 22E-01	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Am	3.18E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cm	9.38E-01	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FP	6. 25E+01	0. 00E+00	8. 47E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
物流番号	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	8-2
成分	使用済燃料 集合体 (ブランケッ ト)	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物
U	3. 02E+02	0.00E+00	0.00E+00	8.39E-04	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0. 00E+00
Pu	6. 25E+00	0. 00E+00	0.00E+00	1.42E-04	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0. 00E+00
Np	9.25E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.29E-02	0.00E+00
Am	1.54E-03	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cm	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FP	2.53E-01	0. 00E+00	0.00E+00	7.98E+00	0.00E+00	0. 00E+00	3.73E+01	0.00E+00
物流番号	/	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3	8-3
成分		せん断燃料	溶解液	調整液	U溶液	U/Pu/Np溶液	Am/Cm溶液	U/Pu/MA溶液 (1)内側炉心用
U		8. 39E+02	8. 38E+02	8.30E+02	6. 25E+02	2.14E+02	0.00E+00	1.75E+02
Pu		9. 49E+01	9. 47E+01	9.53E+01	7.06E-01	9. 42E+01	0.00E+00	4. 73E+01
Np		3. 32E-01	3. 32E-01	4.04E-01	2. 47E-03	2.96E-01	0.00E+00	1. 49E-01
Am		3. 19E+00	3. 19E+00	2.98E+00	2.37E-02	0. 00E+00	3.16E+00	1.62E+00
Cm		9. 38E-01	9. 38E-01	9.47E-01	6. 99E-03	0. 00E+00	9.31E-01	4.76E-01
FP	/	6. 27E+01	5. 43E+01	4.81E+01	3. 05E-01	0. 00E+00	2.18E-01	1.44E-01
物流番号	/		/	4-4	5-4	6-4		8-4
成分				スラッジ 再溶解液	U/Pu/MA溶液	抽出残液		U/Pu/MA溶液 (2)外側炉心用
U				8.38E-01	2. 13E+02	0.00E+00		1. 38E+02
Pu				1.42E-01	9.40E+01	0.00E+00		4. 69E+01
Np			~	0.00E+00	3. 29E-01	3. 29E-02	~	1. 48E-01
Am			1	0.00E+00	3. 16E+00	3.16E+00		1.55E+00
<u> </u>				0.00E+00	9.31E-01	9.31E-01		4.56E-01
FP       施法妥旦				5. 32E+00	4. U0E+01	3. /SE+01		1. ZZE-01
<u> 初流 番号</u>								δ−5 II波波波
成分	/		/		/	/	/	0浴液
Du Du								5.20E+02 5.05E-01
Np								2 09E_02
Am								2.00L-03
Cm								5 80F-02
FP	/		/					2 57E-01
物流悉号								
10 加量与						/		
<u> </u>								
Pu								
Np								
Am								
Cm								
FP								
							~	<u> </u>

(\*)単位は全てkg/day

### 図 4.5.4 先進湿式法 (リファレンスシステム)の物質収支 (200tHM/y)



全体回収率=HE×{CR1×(EX1×C0+EX2×ST)+CR2}×AD

図 4.5.5 先進湿式法(リファレンスシステム)の回収率計算フロー



## 図 4.5.6 連続溶解槽の外観



図 4.5.7 晶析装置の概念図



図 4.5.8 遠心抽出器の外観


図 4.5.9 再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(地下2階)



図 4.5.10 再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(地下1階)



図 4.5.11 再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(1階)



図 4.5.12 再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(2階)



図 4.5.13 再処理・燃料製造一体化プラント主建屋の配置図(3階)



図 4.5.14 使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(地下1階)



図 4.5.15 使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(1階)



図 4.5.16 使用済燃料・新燃料貯蔵建屋の配置図(2階)



図 4.5.17 先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地下2階)



図 4.5.18 先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地下1階)



図 4.5.19 先進湿式リファレンスシステムのセル内機器配置(地上1階~屋上)



図 4.5.20 先進湿式法リサイクルプラント全体建屋イメージ図



12廃液の払い出し

③新燃料集合体の保管区域への払い出し ④新燃料集合体の払い出し

### 図 4.5.21 施設の MBA および KMP 案



図 4.5.22 平常時における実効線量の核種による内訳



図 4.5.23 主な分離工程における分離不良に起因する臨界事故の防止概念図



注)ポンプA号機は非常用電源A系統へ接続し、同様にB号機はB系統へ接続するものと想定。

図 4.5.24 安全冷却系の系統構成の基本概念図



図 4.5.25 放射性物質同伴の可燃性有機溶媒の セル内漏洩、火災の想定および防止概念



図 4.5.26 一般公衆の年間致死ガン発生確率の推定結果 異常事象による内訳





## 4.6 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

前節において議論したリファレンスシステムについて燃料サイクルシナリオ の変化に対する適応性について検討した。

4.6.1 増殖比の効果

リファレンスシステムの設計検討では、FBR導入時を考慮した増殖比1.2(資源重視型)の使用済燃料を対象としている。しかしながら、FBR導入後の平衡期においては可能な限り余剰Puを保有しないことを目的に、増殖比1.05(経済性重視型)の炉心・燃料仕様が検討されている。本項では、増殖比1.2の炉心・燃料仕様を基に、径ブランケットを削除することにより増殖比を1.05にした炉心・燃料について、その仕様に基づく再処理システムについて検討し、経済性等を評価した。

(1) 評価の前提条件

検討の前提条件は以下のとおりである。

- ・処理対象燃料以外の項目は2.3.2(1)に準拠する。
- ・処理対象燃料の組成は、表 2.3.15の酸化物燃料の欄の通りとする。
- ・湿式リファレンスシステム(処理能力200tHM/y)を経済性重視型の燃料を専ら処理する再処理プラントとして使用した場合を評価する。
- ・製品のDF、回収率、溶媒の劣化等は、再処理プロセスと使用する機器 に変更がないため、リファレンス設計と同様とする。

湿式リファレンス設計の処理対象燃料(資源重視型)と経済性重視型の燃料 の差異は、次表のようにまとめられる。

平均燃焼度	リファレンス設計の処理対象燃料では63GWd/tであるのに対し、経済
	性重視型の燃料では径方向ブランケットが削除されることに伴い
	89GWd/tとなる。これに伴い、FP量が増加する。
Pu富化度	径ブランケット燃料が削除されることに伴い、経済性重視型燃料の
	Pu富化度(重金属量に対する全Puの比)は炉心燃料と軸ブランケッ
	トの混合平均で約14%となる。リファレンス設計の処理対象燃料は炉
	心燃料と軸・径ブランケット燃料の混合平均で約10%である。
FP量	経済性重視型の燃料ではFP量は新燃料重金属1t当たり90kg(リファ
	レンス設計では63kg)となる。

(2) プロセス・工程等への影響評価

(i) プロセス設計において考慮すべき事項

リファレンス設計との相違に起因してプロセス設計において考慮すべき事項 を以下に示す。

(a) Pu 富化度の相違に伴う溶解・晶析・抽出工程への影響

リファレンス設計における晶析工程は、Uを結晶として粗分離することにより、 次工程である抽出工程の処理量を最小化することを目的として追加したもので ある。したがって、本項においてもこの考え方を継承し、リファレンス設計で の晶析工程の運転条件(晶析温度10℃、溶解液のHM濃度500g/L、溶解液の酸 濃度4.4N)を経済性重視型燃料処理時のU回収率に適用した場合の影響につい て検討する。

上記運転条件を一定とすると、経済性重視型燃料のPu富化度(14%)の場合 には晶析工程におけるウラン回収率は65%と算出される。これにより、表 2.3.15に記載した経済性重視型燃料の組成から、抽出工程に送られる溶液のHM 量は約410kgHM/d、Pu富化度は約32%となる。一方、リファレンス設計(処理 能力200tHM/y)において使用している遠心抽出器の処理能力は13kgHM/hすな わち312kgHM/dである。すなわち、リファレンス設計に対し、抽出工程に送ら れるHM量は約1.3倍、溶液のPu富化度は約1.1倍となっている。これに伴い、遠 心抽出器の処理能力を約30%増加させるとともに、遠心抽出器の臨界形状の見 直し等が必要となる。

なお、溶解工程に関しては、これまでのサイクル機構における試験結果から、 現実的な溶解(3時間で溶解率100%)が可能なPu富化度目安は約31%と考えら れており<sup>1)</sup>、経済性重視型燃料の炉心燃料のPu富化度が最大で24%(外側炉心燃 料)であることから、燃料の溶解性等への悪影響は生じないと考えられる。

(b) FP 量の相違に伴う影響

廃棄物発生量の項で述べる。

(ii) 機器構成への影響

前項までの検討結果から、経済性重視型燃料をリファレンスシステムにおいて処理する場合には、晶析後の母液のPu富化度が大きいことに伴い、抽出器の処理能力および臨界設計の見直しが必要なことがわかった。

(iii) 廃棄物発生量

ガラス固化体の発生量とその他の廃棄物の発生量について、リファレンス設

計と比較する。

AmとCmを回収しこれらによる発熱の寄与がなくなるので、FP量がガラス固 化体の発生量を支配する。そこで、ガラス固化体発生量を処理対象燃料のFP量 の比により比較したところ、経済性重視型燃料ではガラス固化体発生量がリフ ァレンス設計の約1.4倍になると推定される。

工程運転、メンテナンスに起因する廃棄物については設備の規模に相関する と考えられるが、経済性重視型燃料の処理に伴う設備規模の変化はほとんどな いため、リファレンス設計と同等であると考えられる。

(iv) 経済性

(ii)項で述べた抽出工程の処理能力増加への影響について、リファレンス設計の建設費内訳をもとに算出したところ、主工程の設備費が約7%増加することがわかった。これは建設費全体で約2%の増加に相当する。

これらのことから、経済性重視型燃料をリファレンス設計の再処理プラント で処理した場合には、建設費の増加は約2%程度となり、経済性の観点からは、 リファレンス設計とほぼ同等のプラントとなるものと考えられる。

平均燃焼度がリファレンス設計の約1.4倍となることから、再処理単価を発電 量で規格化して求める場合には、経済性重視型燃料の再処理単価はリファレン ス設計から約30%削減される可能性がある。

4.6.2 燃料組成変動時の影響

設計研究では、内側炉心(Inner Core + Axial Blanket; IC+AB)、外側炉 心(Outer Core + Axial Blanket; OC+AB)および径方向ブランケット(Radial Blanket; RB)の各燃料を混合、平均化したものを基準燃料組成とした。実際の 運転においては、燃料集合体毎に解体、せん断の処理をし、複数の燃料集合体 の混合は溶解の前に行うので、実際の操業においては混合の割合は変動しうる と考えることが適当である。再処理によって得られた製品のPu富化度等が変動 する場合、燃料製造工程において要求されるPu富化度(内側炉心21.1%、外側 炉心24.9%)を満たさない可能性が生じる。また、RBの単独処理を実施した場 合には、高濃度Puフィッサイルを含む製品が発生する。

複数の種類の溶解液を調整設備において混合する方策について、フェーズIに おける設計を元に検討した。調整設備では、バッファ槽にて複数の燃料溶解液 を受け入れることとし、溶解液を受け入れるスケジュール(以後、処理モード と呼ぶ)を解析した。一例として、以下に示す燃料の処理モードを考えた。

処理モードA: IC+AB燃料体2体、OC+AB燃料体1体、RB燃料体1体の 計4体の処理を266回繰り返す。 処理モードB: OC+AB燃料体2体、RB燃料体1体の計3体の処理を21回繰 り返す。

# 処理モードC: IC+AB燃料体1体、RB燃料体2体の計3体の処理を1回行なう。

これらの処理モードにより処理した燃料溶液の組成を表 4.6.1および図 4.6.1に、製品溶液の年間回収量を表 4.6.2に示す。図 4.6.1から、各処理モード とも、燃料組成はフェーズ I 設計の設計条件である平均化燃料組成に近い値に ほぼ均一化され、フェーズ I 設計に大きな変更なく運転可能と考えられる。また、表 4.6.2から、IC+AB燃料、OC+AB燃料、RB燃料を集合体単位で混合処理 することによりPu富化度30%以上の製品の収率を増加させることができ、約 98%のPuを製品として回収(それ以外は余剰Puとして回収)できることがわかった。

フェーズ I 設計からの変更点としては、1バッチあたりの処理燃料集合体数が 多い処理モードAの溶液を受入れるため、調整槽の容量を増加させるのみで、そ の容量はフェーズ I 設計の800Lから1,440Lへ変更すればよいことがわかった。

一方、仮に使用済燃料中のFP量が数%程度増加したとしても、高レベル廃棄 物発生量が若干増加する程度であり、製品中へのFP混入量の変動は極僅かで、 経済性への影響も殆ど無いものと考えられる。FP量変動の影響は、湿式再処理 システム以外の各システムについても、同じ傾向を示すと考えられる。

4.6.3 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方

FBR燃料再処理プラントの導入時期が軽水炉から高速炉への移行期にあたる 場合には、本設計研究における処理対象燃料であるFBR使用済燃料が少なく、 軽水炉燃料を処理する必要が生じる可能性がある。

本項においては、FBR再処理プラントにおいて軽水炉燃料を処理した場合の ケーススタディを実施し、主に経済性への影響について評価を試みた。

(1) 検討の対象

検討の対象は以下の2ケースとした。受入対象燃料は燃焼度60GWd/tのPWR 燃料(冷却期間:4年)とした(各燃料の重金属内訳およびFP量は表 2.3.16に 示す)。

ケース	受入対象使用済燃料	払出製品	受入時のPu富化度
ケース1	軽水炉ウラン燃料	高速炉燃料	1.2%
ケース2	軽水炉MOX燃料	高速炉燃料	4.0%

- (2) 設備検討の前提
- (i) 前処理設備

FBR燃料と軽水炉燃料では、燃料集合体の形状に差異があるため、FBR燃料 再処理システムにおいて軽水炉燃料を受け入れる場合には、前処理設備の変更 が必要となる。前処理設備変更における前提は以下の通りとした。

- ・施設規模の検討はリファレンス設計の機器配置を基本にする。
- ・高速炉燃料用の解体・せん断設備は現設計と同様に燃料受入/せん断 セルに1系列を設置する。
- ・軽水炉用のせん断設備は高速炉用と別に1系列設ける。ウラン燃料と MOX燃料の共用とし、集合体の相違は治具等の交換により対応する。 切断片の分配器は共用する。
- ・軽水炉燃料の解体設備(チャンネルボックス、バーナブルポイズンの 取り外し、切断減容)については、燃料受入/せん断セル内に解体・ せん断のため6m×12mの面積を確保する。
- ・高速炉用燃料と軽水炉燃料を混合しない。
- ・燃料受入/せん断セル内の燃料一次貯蔵ピットは共用とする。
- (ii) 化学処理設備

化学処理設備についての前提条件は以下の通りとする。

- ・軽水炉燃料は高速炉燃料と混合しない。
- ・製品溶液のPu富化度は30wt%とする。

(3) 検討結果

(i) 前処理設備

リファレンスシステムと軽水炉燃料受入に対応した前処理設備の配置を図 4.6.2および図 4.6.3にそれぞれ示す。

(ii) 化学処理設備

前提条件として、晶析工程におけるUの収率を上げることとした。ケース1お よびケース2における化学処理設備の物質収支を図 4.6.4および図 4.6.5に示す。 リファレンス設計の物質収支については図 4.5.4を参照されたい。

Pu富化度30wt%の溶液を得るための晶析収率は、ケース1で97%、ケース2で 90%であった。また、抽出工程へ供給する晶析母液中の重金属量はケース1でリ ファレンス設計の約13%、ケース2でリファレンス設計の約42%となった。これ は、抽出工程以後の工程は、間欠的な運転となることを示す。上記の収率は、 硝酸ウラニル溶液の溶解度をもとに算出したが、いずれのケースにおいても-15℃以下の晶析温度が必要となる可能性がある。

経済性への化学処理設備への影響を表 4.6.3にまとめた。

(4) 経済性への影響評価

上述の変更に伴う影響について、再処理コストへの影響を評価した。

前処理設備が図 4.6.3に示した機器配置となった場合の再処理費への影響について、リファレンス設計と比較した。前提条件は以下の通りとした。

- ・前処理ラインを2系列とするので、解体・剪断の設備費用は2倍とする。 解体・剪断設備以外は変更無いものとする。
- ・前処理セルの増加に伴う、建屋容積の増加を考慮する。(セル容積増 加分は約2,100m<sup>3</sup>と算出された。)

再処理単価の算出結果を表 4.6.4に示す。軽水炉燃料の受入設備を追加した場合でも、再処理単価は約2%の増加に留まることがわかった。

晶析工程においてウランの収率を上昇せしめることにより、晶析温度が低下 し、冷却系配管の保冷等、設備費の増加が見込まれる。また、抽出工程から富 化度調整工程が間欠的な運転となるため、これらの工程の設備利用率が低下し、 操業費の増加が考えられる。再処理コスト変動にかかる部分の前提条件は以下 の通りとした。

・前処理2系列化、晶析温度変更双方の影響を評価する。

- ・晶析設備の保冷に係る設備費の増加を3倍とする。
- ・ケース1における抽出工程~富化度調整工程の設備利用率は13%とする。

・ケース2における抽出工程~富化度調整工程の設備利用率は42%とする。

これらを考慮し、再処理単価を算出した結果を表 4.6.5に示す。前処理工程の 2系列化および晶析収率上昇により、再処理単価はケース1では約17%、ケース 2では約5%の増加となることがわかった。

4.6.4 水冷却炉検討

日本原子力研究所が主体となり「BWR型水冷却高速炉」を検討している。以降これを「水冷却炉」と呼ぶ。水冷却炉は、燃料集合体を稠密にし、さらに扁平炉心とすることにより中性子の減速を抑制し、高い転換比を得る軽水炉である。本項では、水冷却炉への対応について述べる。

(1) 評価の前提条件

処理対象燃料の仕様を図 4.6.6、図 4.6.7、表 4.6.6および表 4.6.7に示す。他は

2.3.2(1)に準拠する。リファレンスシステムと水冷却炉の燃料では、以下のよう な相違がある。

- ・燃料集合体: 水冷却炉では扁平炉心を採用していることから、集合体の 全長が約2mとなっており、リファレンス設計の処理対象 燃料(約4m)に比べ半分程度である。集合体1体当たりの HM量が0.16t(HM:145.7t/炉心、集合体:900体/炉心)と なり、処理能力200tHM/yのプラントの場合、集合体処理 能力は6.25体/日以上必要である。これはリファレンスシス テムの6.7体/日とほぼ同等の値である。
- ・Pu富化度: Pu富化度(重金属量に対する全Puの比)は約16%となる。
   リファレンスシステムの処理対象燃料は約10%である。
- ・FP量: 水冷却炉燃料のFP量は新燃料重金属1t当たり47.1kgとなる。リファレンスシステムでは62.7kgである。

(2) プロセス・工程等への影響評価

(i) リファレンスとの相違による考慮すべき事項

前項に述べた相違点に起因して考慮すべき事項を以下に示す。FP量の相違に 伴う影響は次項で詳述する。

(a) 集合体形状の相違に伴う前処理工程への影響

集合体の長さが約半分となることにより、前処理工程機器の小型化が期待で きる。しかし、前処理装置の占有面積を縮小化しても、セルの階高が低くなる 等、プラント全体に波及するような大きな効果はなく、影響は小さいものと考 えられる。

(b) Pu 富化度の相違に伴う溶解・晶析・抽出工程への影響

リファレンス設計における晶析工程は、Uを結晶として粗分離することにより、 次工程である抽出工程の処理量を最小化することを目的として追加したもので ある。この考え方を継承し、リファレンス設計で用いている遠心抽出器によっ て処理可能となるよう、晶析工程においてUを粗分離した場合の影響について検 討する。ここでは、抽出工程において処理する単位時間当たりの重金属量が変 動しないよう検討した。

水冷却炉燃料のPu富化度は16%であり、晶析工程においてUを約80%除去す ることになる。このとき、母液のPu富化度は約50%であり、リファレンス設計 の母液のPu富化度(約30%)に対して約1.7倍となっている。これに伴い、遠心 抽出器や槽類の臨界設計の見直し等が必要となるが、機器設計において対応可 能なものと考えられる。

溶解工程に関しては、これまでのサイクル機構における試験結果から、現実 的な溶解(3時間で溶解率100%)が可能なPu富化度目安は約32%と考えられて いる。一方、水冷却炉の現炉心設計では、装荷時のPu富化度は最大で33.5% で あり、燃焼を考慮すれば、燃料の溶解性等への悪影響は大きくないと推測され る。

(ii) 廃棄物発生量

ガラス固化体発生量は処理対象燃料のFP量の比により比較することができる と考えられ、水冷却炉ではリファレンス設計に比べ固化体発生量が処理 量(tHM)当たり75%になると推定される。その他の廃棄物はリファレンス設 計と同等と考えられる。

(iii) 機器構成への影響

前項までの検討結果から、水冷却炉の燃料をリファレンスシステムにおいて 処理する場合には、燃料集合体の全長が短くなることに伴い、前処理工程の占 有スペースが縮小されうること、晶析後の母液のPu富化度が大きいことに伴い、 抽出工程の臨界設計の見直しが必要なことがわかった。

(iv) 経済性

経済性については、(iii)項で述べた事項が寄与するものと考えられる。しかし ながら、いずれも設備の大幅な変更やセル容積の増減に寄与するには至らない と考えられ、経済性の観点からは、リファレンス設計とほぼ同等のプラントと なるものと思われる。

4.6.5 FP の回収工程に関する検討

核分裂生成物の中からCs、Sr、Tc および I の4元素を分離回収の対象として 工程を検討した。検討の前提とした分離システムは NEXT プロセスである。文 献調査を元に、現時点において実現の可能性が高いと考えられ、回収率として 目標値である99%を達成しうる方法を選定し、概念的な工程を構成して提示し た。実験研究が今後の課題である。

(1) 対象とする元素とその回収後の取り扱い

対象とする元素の処理方策を表 4.6.8にまとめて示す。CsとSrは発熱特性に 着目し、主に寄与する核種である<sup>137</sup>Csと<sup>90</sup>Srの減衰を待つために長期間の保管 管理を行う。管理する化学的形態は未検討であるが、再処理製品を水溶液と仮 定することは妥当と考えられ、硝酸溶液として得ることを想定した。TcとIについては、<sup>99</sup>Tcと<sup>129</sup>Iが非常に長い半減期を有していることからこれらを核変換することを前提とした。ターゲットとしてTc金属とヨウ化銅(CuI)がそれぞれ想定されており、これらを製品として得ることとした。

分離回収においては回収率を可能な限り高めることが重要であり、分離方法 の選定においてはこの点を重視した。CsとSrは簡素化溶媒抽出法の共除染工程 からの抽出残液に、I は溶解工程およびヨウ素追い出し工程からのオフガスにほ とんどが移行するので、これらを分離回収の対象とすれば良い。Tcは溶解工程 で発生する不溶解残渣、簡素化溶媒抽出法の共除染工程から排出される抽出残 液と装荷溶媒に分散するので、回収率を高めるためにこれらのすべてを回収の 対象とした。

TcやIを照射する時に減速材として水素化ジルコニウム(ZrH)の使用が検討されている。照射後のZrHの処理についても併せて検討した。

(2) Cs と Sr の回収

分離技術を調査した結果、高い回収率を達成し、既往の機器を利用できるこ とから溶媒抽出法の中から選定することとした。高酸性溶液からCsやSrを回収 する方法としては、Srをクラウンエーテル系抽出剤で回収するSREX法<sup>2)</sup>、Csを カリックスアレン系抽出剤で回収するCSEX法<sup>3)</sup>、CsとSrを共に回収するDCC 法<sup>4</sup>およびUNEX法<sup>5)</sup>が挙げられる。本検討では、上記の方法の中で最も金属の 装荷度を高く設定できると考えられ、最小の溶媒抽出工程を構成しうるDCC法 を選定し、プロセスフローダイアグラム(PFD)や物質収支を検討した。なお、 DCC法は工学規模での適用が行われた唯一のプロセスである。

DCC 法は抽出剤としてコバルトジカルボリド(ChCoDiC, [(B<sub>9</sub>C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>Cl<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Co]<sup>-</sup>) とポリエチレングリコール(PEG 400)を用い、これらをフッ素化合物であるメタ ニトロベンゼン三フッ化物(MNBTF)に希釈して混合溶媒とする。溶媒の組成は 0.06-0.15 M ChCoDiC- 0.03-0.07 M PEG in MNBTFである。

分離工程は溶媒抽出法の典型的なものであり、調整、抽出、逆抽出、溶媒洗 浄から成る。フローシートを図 4.6.8に示す。簡素化溶媒抽出法の抽出残液から の回収を想定すると、供給液の硝酸濃度は3M以下にする必要があるので、溶液 をあらかじめ希釈する操作を行う。抽出工程においては、抽出溶媒にCsとSrが 抽出されるが、他にRbとBaが抽出されうる。逆抽出にはより高い硝酸濃度の逆 抽出溶液を用いる。溶媒洗浄にはヒドラジンを混合した硝酸溶液を用いる。各 抽出器から排出される水溶液は抽出溶媒の成分を含むものと考えられるので希 釈剤洗浄を行うが、MNBTFと接触させて抽出剤を除去する。運転の結果、製品 が仕様を満足できなかった場合にリワークを行うことを想定して、必要に応じ て濃縮操作を行えるよう蒸発缶と貯槽を設ける。ここで、廃液の濃縮および処理に係わる設備は簡素化溶媒抽出等の上流側の工程と共用できると想定した。 また、FやClを含む廃液について特別な処理工程は要しないものと仮定した。

物質収支および主要な機器を検討し、経済性の見込みを概略的に検討した。 200tHM/y規模の施設を仮定し、本分離施設を独立した建屋として建設する場合、 他の施設の建設費について試算した値を用いておよそ500億円と求められた。こ れは、フェーズI検討におけるSETFICS法に基づく施設の9割弱である。

(3) Tc の回収

使用済燃料の溶解液中でTcは過テクネチウム酸イオンTcO4 として存在し、 一部がUやZrとともにTBPに抽出される。抽出残液に含まれる成分は、陰イオン 交換により容易に回収することができる。フェーズI研究において検討したイオ ン交換法は、吸着材として無機-有機複合陰イオン交換体AR-01を用いるが、模 擬溶解液を用いた試験におけるTcの吸着が報告されており、これを適用するこ とが考えられる<sup>6</sup>。また、装荷溶媒からの選択的な分離回収については、装荷 溶媒を高濃度の硝酸溶液と接触させて回収する方法が報告されており<sup>7,8,9</sup>、簡素 化溶媒抽出工程を大きく変更することなく実現できるので適当と考えられる。

不溶解残渣からTcを回収するには、残渣成分のマトリックスを溶解する操作が不可欠である。一旦溶解してTcをTcO4 とすれば、前述の抽出残液と同様の方法により回収することができる。溶解する方法には、アルカリ化合物による融解や電気化学的な溶解が考えられる。

Tcは硝酸溶液として得られるので、TcO4<sup>-</sup>を酸化物に転換し金属へ還元する 処理が必要である。Tcの酸化物にはTcO2やTc2O7がある。TcO2は水溶液中で還 元して沈殿として得る可能性があり、水素還元によりTc金属とすることができ る。

照射ターゲットは金属であり、Tcの中性子吸収により生成するRuが含まれる と考えられる。Ru等の不純物を除去するためには、照射ターゲットを溶解して 硝酸溶液とし、上述の陰イオン交換による処理を施すことが適当と考えられる。 これらの処理の流れを図 4.6.9に示す。

(4) Iの回収

現行の簡素化溶媒抽出法による再処理においてIは溶解工程においてその大部 分が気相へと移行し、固体吸着材に捕捉される。固体吸着材は放射性廃棄物と して取り扱われる。現行のオフガス処理システムを改変することなくIを回収す ることを前提として、吸着材からIを脱着する方法を検討した。

銀を含む吸着材中でヨウ素はAgIとして存在するが、これを水素気流中でHI

に転換して回収する方法が報告されている<sup>10</sup>。一方、CuIは一般にCuSO<sub>4</sub>溶液に SO<sub>2</sub>を通気しKI溶液を加えて得られる。これを応用し、KI溶液の替わりにHIを 通気することによりCuIの沈殿を得ることが考えられる。CuSO<sub>4</sub>溶液を還元性に 保つよう工程を構築することができれば実現性が高まる。また、硫酸溶液を硝 酸溶液に替えることにより、硫酸廃液を処理する工程の削減を検討すべきであ ろう。

照射ターゲットにはIとCuの核反応生成物としてXeおよびZnが含まれると考 えられる。CuIマトリックスを酸性溶液を用いて溶解することでXeは容易に除 去できる。ZnI<sub>2</sub>の溶解度はCuIに比べて高いので、これらを相互に分離すること は比較的容易であると推測される。

これらの処理の流れを図 4.6.9に示す。

(5) ZrH 減速材の処理

照射中のZrH減速材からのHの損失やマトリックス構造の変化を考慮して、照 射減速材から金属Zrを回収して減速材の製造工程に供することを前提とした。

照射後の減速材は、放射化生成物としてMoを含むものと考えられる。Zrと Mo金属の融点は非常に高く、溶解性が悪い。Zrを回収するには、あらかじめZrH を加熱してHを除去し、塩化物系の溶融塩に基づくKroll法を適用することが適 当と考えられる。処理の流れを図 4.6.9に示す。

(6) FP を回収する技術の実現についての見通し

選定した手法は、その化学的な原理が既に示されているか、もしくは原理的 には実現の可能性が高いと考えられるものである。技術的な実証を行うには、 それぞれの手法について試験研究を行う必要がある。

研究開発の長期的な計画を作成するためには、複数の手法を候補技術として 摘出し、相互に比較する検討も必要となろう。

4.6.6 Cm 遅延サイクルシステム技術

使用済燃料に含まれるCmを分離して長期間保管管理するシステムを検討す る一環として、Cmを分離回収する手法について検討した。

4f元素であるランタニド(Ln(III))と5f元素であるAmおよびCm(An(III))は、 水溶液中の化学的挙動が良く似ており、その分離化学は古くからの研究開発課 題であった。特にAmとCmの相互分離は難しい技術とされている。

照射燃料からCmを回収するには、一般にLn(III)-An(III)混合物を得、これらの元素群を相互に分離した後に、AmとCmを相互に分離するという複数の工程が必要とされる。AmとCmを相互に分離する方法は、AmをAm(IV)以上の酸

化状態に酸化してCm(III)と分ける方法と、いずれも三価の状態としてわずかな 錯形成の差を利用する方法に大別できる。

Am(III)を酸化すると化学的な挙動をCm(III)と大きく変えることができるの で、良好な分離性能が期待できるが、水溶液中でのAm(III)の酸化はその酸化還 元電位が高いために難しい。また、酸化は高酸濃度の条件ではより困難となり、 CeやFeなどの相対的に容易に酸化されるイオンが共存すると酸化の効率は大き く低下する。これらのことから、Am(III)を酸化する分離手法は、AmとCmの混 合物に対して適用することが適当と考えられる。Am(III)の酸化を利用したCm との代表的な分離技術を表 4.6.9に示す<sup>11,12,13,14</sup>。

アミン抽出法とSESAME法はそれぞれAm(IV)もしくはAm(VI)を抽出する手 法であるが、水溶液にリンタングステン酸を加える点は同様であり、その濃度 を変えることにより Amの原子価を変えている。このことから、技術的には一 連のものとして考えることも可能である。一方、炭酸沈殿法は、無機溶液中で 無機塩としてAmを沈殿分離することから、化学工程の設計や安全設計は相対的 に容易であると思われる。

Am(III)の状態で分離する技術としては陽イオン交換法があり、米国Pacific Northwest LaboratoryにてkgオーダーのAmを回収した実績が報告されている <sup>15)</sup>。高酸性の溶液から An(III)を陽イオン交換体に吸着することはできないの で、あらかじめ低い酸濃度の溶液にしておく必要がある。大量のα放射体を取 り扱うイオン交換分離においては事故例が知られているが、多くの場合でα放 射体を吸着した状態で長期間放置したことが原因であり、運転管理を適切に行 うことでそのような可能性を低減することが可能である。また、代替技術とし て検討したイオン交換法で用いられる技術を応用し、SiO<sub>2</sub>-Pベースの陽イオン 交換体を利用すれば<sup>16)</sup>、分離に用いる有機物の量やα放射体を吸着する時間を 低減しうるので、潜在的な危険性を下げることができる。

以上のような状況から、Cmを分離するための候補技術としては、アミン抽出やSESAME法に代表されるAm(IV)もしくはAm(VI)の溶媒抽出、Am(V)の炭酸沈殿、並びにSiO<sub>2</sub>-Pを利用した陽イオン交換法が挙げられる。また、対象とする溶液は、抽出クロマトグラフィーやSETFICS法により得られるAmとCmを主成分とし多くの核分裂生成物や腐食生成物を除去したものが適当である。

Cm分離回収技術を確立するためには、これらの技術に関する試験研究が必要である。

4.6.7 Sr、Cs 分離後遅延処分に対する影響評価

(1) 検討の背景

FSでは環境負荷低減の観点および高レベル固化体処分費低減の観点等から、 高レベル放射性廃棄物のガラス固化体発生本数の低減が望まれている。ガラス 固化体発生本数を低減するためには、その支配的因子である高レベル放射性廃 棄物の発熱量を低減することが効果的であり、その方法の一例として、高発熱 性核種を含む核分裂生成物であるSr(高発熱性核種は<sup>90</sup>Sr)とCs(高発熱性核 種は<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Cs)を高レベル放射性廃棄物から分離する方法が考えられている <sup>20)</sup>。また、これについては米国において提唱された「第4世代原子力システム

(GEN-IV)」の開発において、2002年10月に完成したそのロードマップに明 記されており<sup>21)</sup>、次世代システムを担う技術としての開発が期待されている。

以上のような方法が環境負荷および経済性等に及ぼす影響を定量的に評価し、 SrおよびCsの分離システムの有用性を見極め、その情報を把握しておくことは、 今後、合理的なFBRサイクルを構築していく上で非常に重要であると考えられ る。しかし、これまで定量的な検討は殆ど行われていない。そこで、本検討で は、Sr、Csを分離しない従来のシナリオと、Sr、Csを分離するシナリオを設定 し、各シナリオに対してガラス固化体発生本数および高レベル放射性廃棄物の 処分にかかる費用等を試算することで、環境負荷および経済性等に及ぼす効果 を定量的に評価した。

(2) シナリオの設定

シナリオは、①Sr、Csの分離を行わない従来のシナリオ(シナリオ1)、②分離を行うシナリオ(シナリオ2)、の2つを設定した。各シナリオの概念を図 4.6.10に示す。

(i) シナリオ1 (従来シナリオ)

使用済燃料を再処理(MAの分離を含む)することにより発生した高レベル放 射性廃棄物をそのままガラス固化体にして処分するシナリオである。発熱量の 低減策を持たないため、ガラス固化体発生本数は多いが、Sr、Csの分離等に要 する費用がない。

(ii) シナリオ2 (Sr、Cs 分離処分シナリオ)

使用済燃料を再処理(MAの分離を含む)することにより発生した高レベル放射性廃棄物から、さらにSr、Csを分離する。分離したSr、Csは崩壊熱を減衰させるために一時的に貯蔵する。一定期間貯蔵後、Sr、Csを分離した高レベル放

射性廃棄物と混合し、ガラス固化体にして処分するシナリオである。Sr、Csは 全FP崩壊熱の約65%を占めており、この崩壊熱を低減することでガラス固化体 本数の低減の可能性がある。しかしながら、Sr、Csの分離および一時貯蔵に要 する費用が発生する。

(3) 前提条件

(i) 使用済燃料組成

本検討ではFSフェーズ I で検討した酸化物燃料FBR炉心(1.5GWe)に基づ く燃料を対象とした<sup>22)</sup>。炉心平均燃焼度は15万MWd/t、炉心・径ブランケット 平均燃焼度は6.9万MWd/tである。また、炉外冷却期間は4年である。

(ii) ガラス固化体条件

日本原燃(株)の六ヶ所再処理施設で採用しているガラス固化体の仕様条件 と同一とした<sup>23)</sup>。ガラス固化体重量は500kg/本、ガラス重量は400kg/本である。

(iii) ガラス固化体制限因子

ガラス固化体のFP添加量に対する制限因子としては以下の3つを設定し、この中で最も厳しい因子でFP添加量を制限した。なお、総FP酸化物量制限因子については、従来の検討では15wt%程度の添加量であるが、ガラス固化体への添加量を向上させる検討が進められており<sup>24)</sup>、これを考慮して25wt%までの添加量まで5wt%刻みで3ケースを設定した。

- ・ガラス固化体製造時の発熱制限:2.3kW/本以下と設定)。
- ・総FP酸化物量制限:15wt%以下、20wt%以下、25wt%以下の3ケースを設定。
- ・Mo量制限:2wt%以下と設定<sup>25)</sup>。
- (iv) 再処理·分離処理方法

Sr、Csの分離については湿式法による検討が行われており、これを踏まえて 再処理および分離処理方法は湿式法をベースとして以下のように設定した。

・再処理工程:PUREX法

(晶析併用簡素化溶媒抽出法)を用いて分離する<sup>22)</sup>。

- ・MA分離工程:SETFICS+TRUEX法を用いて分離する<sup>22)</sup>。
- ・Sr、Cs分離工程: DCC法を用いて分離し、液体で貯蔵する4)。

(v) 再処理・分離処理の移行率

高レベル廃棄物中の元素組成を決定するために、再処理および各分離処理に 対する元素の移行率に設定した。前述のように湿式法システムについては分岐 率についても詳細な検討を進めているが、ここでは高レベル放射性廃棄物への 移行率が重要であり、途中過程は不要として、ここで用いる移行率を概略的に 設定した。再処理工程の移行率を表 4.6.10に、MA分離工程の移行率を表 4.6.11に、Sr、Cs分離工程の移行率を表 4.6.12に示す。

(vi) その他

FBRのような高燃焼度燃料の場合、使用済燃料中のMo量が多く、ガラス固化 体発生本数についてMo量制限が支配的になる。これを避けるために、再処理に おけるMo回収率を80%と設定した。Moは溶解時の硝酸濃度調整により不溶解残 査中に移行できる可能性があるが、詳細については今後検討が必要である。

また、地層処分時にはガラス固化体の発熱量が制限されるが、これを0.4kW/ 本以下と設定した。

(4) ガラス固化体本数の評価

(i) シナリオ1のガラス固化体本数評価

前提条件をもとに、シナリオ1における物質収支計算を行い、高レベル放射 性廃棄物に移行する元素組成および発熱量を評価した。また、この元素組成お よび発熱量から各制限因子におけるガラス固化体本数を評価した。総酸化物量 は、各元素がガラス固化体中で最も安定な酸化物形態であるとして算出した。 各制限因子のもとでガラス固化体本数を評価したものを表 4.6.13に示す。

新燃料1tHMの燃焼で発生する使用済燃料を再処理して発生した高レベル放射性廃棄物の発熱量は2.4kWであった。これより発熱量を制限因子とした場合 ガラス固化体本数は1.03本/tHMとなる。

総酸化物量を制限因子とした場合、ガラス固化体本数は15wt%以下で1.08本/tHMとなり、発熱量制限よりもこちらが支配的になる。20wt%以下、25wt%以下では発熱量制限が支配的であるためガラス固化体本数には影響しない。

Moを制限因子とした場合、Moを80%回収することにより、ガラス固化体本数は0.23本/tHMとなり影響はない。しかし、Moを除去しない場合、ガラス固化体本数は1.15本/tHMとなり、これが支配的になる。このことからも、Moの除去はガラス固化体本数低減には不可欠なものであることが分かる。

以上より、シナリオ1では総酸化物量15wt%以下の場合で1.08本/tHM、一方、 15wt%以上となる各20wt%以下、25wt%以下の場合で1.03本/tHMとなった。 (ii) シナリオ2のガラス固化体本数評価

前述のように総酸化物量20wt%以下、25wt%以下の場合、発熱量制限因子が 支配的となった。これは、Sr、Csを分離し、一時貯蔵で崩壊熱を減少させるこ とで総酸化物量制限因子が支配的になるまでガラス固化体本数低減の可能性を 有することを意味している。総酸化物量制限20wt%以下の場合、総酸化物量を 制限因子とするとガラス固化体本数は0.81本/tHMとなる。よって、発熱量制限 因子でこの本数まで崩壊熱を低減させればよい。この低減量は5.0×10<sup>2</sup>W/tHM であり、Sr、Cs総発熱量の34%に当たる。総酸化物量制限25wt%以下の場合、 総酸化物量を制限因子とするとガラス固化体本数は0.65本/tHMで、発熱量の低 減量8.8×10<sup>2</sup>W/tHMとなり、Sr、Cs総発熱量の59%に相当する。

シナリオ2では分離したSr、Cs廃液は崩壊熱低減するために一時貯蔵する。 そこで、前述の崩壊熱低減までの冷却貯蔵期間を評価した。貯蔵期間と崩壊熱 量の関係を図 4.6.11に示す。この結果、Sr、Csの総発熱量を34%および59%低 減するために必要な貯蔵期間はそれぞれ12年、32年と評価した。

(5) 分離・貯蔵・処分コスト

以上に示した分離方法、ガラス固化体本数、貯蔵期間、等をもとに、各シナ リオの分離・貯蔵・処分の経済性を評価した。

(i) コストの評価範囲

本検討で評価するコストの範囲を以下に設定した。なお、各シナリオに共通 する再処理費用、MA分離費用については範囲外とした。また、処分対象は高レ ベル放射性廃棄物のみとし、低レベル放射性廃棄物、分離により発生する2次廃 棄物等についても範囲外とした。

- ・Sr、Cs分離(再処理・MA分離後の高レベル放射性廃棄物からSr、Cs を分離するコスト)
- ・Sr、Cs廃液一時貯蔵(Sr、Cs廃液を一時貯蔵するコスト)
- ・ガラス固化体中間貯蔵(処分前にガラス固化体を中間貯蔵するコスト)
- ・地層処分(ガラス固化体を地層処分するコスト)

また、各コストは単位物量あたりの費用を設定し、これを用いて評価すること とした。

(ii) 各コストの単価検討

(a) Sr、Cs 分離施設の設計とコスト

シナリオ2ではSr、Cs分離するためのコストを評価する。このコストを評価するに当たり、単位使用済燃料を再処理・MA分離して発生した高レベル放射性廃

棄物からSr、Csを分離するために要する費用として、「万円/tHM」を単価とし て用いることとした。

この単価は、処理規模:200tHM/y 再処理・MA 分離施設からの高レベル放射性 廃棄物を処理する施設を設定し、その概略的なプラント設計検討から建設費・ 年間運転経費を見積り、これを用いて算定した。Sr、Cs 分離施設のプラント概 念図を図 4.6.12 に、建設費・年間運転経費の算定結果を表 4.6.14 に示す。こ れらの結果から単価を 3000 万円/tHM と評価した。

(b) Sr、Cs 廃液貯蔵施設設計とコスト

シナリオ2ではSr、Csは分離後液体として払い出される。この崩壊熱を低減す るために、一時的に貯蔵するためのコストを評価する。このコストを評価する に当たり、単位使用済燃料を処理して発生したSr、Cs廃液を単位年一時貯蔵す るためにかかる費用として、「万円/tHM・年」を単位として用いることとした。

この単価は、これまでに実施した処理規模:200tHM/y再処理施設36施設から 出るSr、Cs廃液を受け入れる施設検討結果<sup>26)</sup>を踏まえて建設費・年間運転経費 を見積り、これを用いて算定した。建設費・年間運転経費の算定結果を表 4.6.15に示す。これらの結果から単価を67万円/tHM・年と評価した。

(c) ガラス固化体中間貯蔵施設設計とコスト

いずれのシナリオでもガラス固化体を製造するが、製造直後のガラス固化体 は2.3kW/本と発熱量が高く、このままでは地層処分に移行できないため、崩壊 熱低減のための中間貯蔵が必要となる。ここではこの中間貯蔵するためのコス トを評価する。このコストを評価するに当たり、単位ガラス固化体を単位年貯 蔵するためにかかる費用として、「万円/本・年」を単位として用いることとし た。

この単価は、ガラス固化体7920本を収容する施設(日本原燃(株)六ヶ所再 処理施設並)の検討結果<sup>26)</sup>を踏まえて建設費・年間運転経費を見積り、これを 用いて算定した。建設費・年間運転経費の算定結果を表 4.6.16に示す。これら の結果から単価を61万円/本・年と評価した。

(d) 地層処分のコスト

発生したガラス固化体を地層処分するためのコストを評価する。このコスト を評価するに当たり、単位ガラス固化体を地層処分するためにかかる費用とし て「万円/本」を単位として用いることとした。

この単価は、ガラス固化体40,000本を地層処分する処分施設の検討結果<sup>27)</sup>で 得られた処分総額を踏まえて処分費用を算出した。これらの結果から単価を 6,700万円/本と評価した。 (iii) ガラス固化体中間貯蔵必要期間の評価

前提条件でも示したように、製造時に発熱量が2.3kW/本あるガラス固化体は、 ガラス固化体を地層処分するためには0.4kW/本まで発熱量を低減する必要があ る。そこで、この崩壊熱低減までに必要な中間貯蔵期間を評価した。評価対象 はシナリオ1では総酸化物量15wt%の場合、シナリオ2では総酸化物量20wt%、 25wt%の場合とした。各々のケースにおける貯蔵期間とガラス固化体発熱量の 関係を図 4.6.13に示す。

各ケースで含まれる核種組成が異なるため、中間貯蔵期間も異なる。シナリオ1およびシナリオ2の総酸化物量20wt%添加の場合は中間貯蔵期間を50年、シナリオ2の総酸化物量25wt%添加の場合は中間貯蔵期間を40年と評価した。

(iv) 経済性評価結果

前述したガラス固化体本数評価結果、単価設定、貯蔵期間評価結果から、分離・貯蔵・処分の各コストを算出し、各シナリオにおける経済性を評価した。 経済性評価結果を表 4.6.17に示す。

シナリオ1に対して、シナリオ2ではSr、Csを分離・一時貯蔵することでガ ラス固化体本数が低下するために、ガラス固化体の中間貯蔵および地層処分費 の低減が図られた。その効果は総酸化物量制限値20wt%の場合で25%の低減、 総酸化物量制限値25wt%の場合で57%の低減となった。一方、シナリオ2ではSr、 Csを分離および一時貯蔵するため、シナリオ1に比べてその分コストがかかる。 この費用は総酸化物量制限値20wt%の場合で0.38億円/tHM、総酸化物量制限値 25wt%の場合で0.51億円/tHMとなった。よって経済性の観点からは、Sr、Cs 分離・一時貯蔵を含むシナリオ2の方が費用がかかるが、その程度は総酸化物 量制限値20wt%の場合で10%増、総酸化物量制限値25wt%の場合で5%増程度に 留まった。

(6) 総合評価

以上の検討結果を踏まえて、環境負荷への影響および経済性への影響を評価 した。

(i) 環境負荷への影響

各シナリオにおけるガラス固化体発生本数を表 4.6.18に示す。今回の検討条件では、Sr、Csを分離しないシナリオ1に対して、Sr、Csを分離・一時貯蔵するシナリオ2では、単位使用済燃料を処理して発生した高レベル廃棄物の崩壊熱を低減させることが出来るため、ガラス固化体本数を25~40%低減させることが出来ると評価された。

また、各シナリオで発生するガラス固化体の元素組成について、同族元素の グループ分けで評価結果を図 4.6.14に示す。この結果、各シナリオとも組成分 布は同等であり、元素組成による地層処分への影響はほとんど無いものと評価 された。

(ii) 経済性への影響

今回の検討条件では、Sr、Csを分離しない場合に対して、分離する場合では 単位使用済燃料を処理して発生した高レベル廃棄物の崩壊熱が低減できる。よ って、ガラス固化体本数も低減されることから、中間貯蔵・地層処分にかかる コストを低減することが出来ると評価された。一方、Sr、Csを分離する場合に はその分離コストが付加されるので、総合的に見るとコスト増となった。しか し、その増分は5%~10%程度であり、経済性に大きな影響はないものと評価さ れた。

(iii) 結論および今後の課題

以上の結果、Sr、Csを分離後一時貯蔵する場合、経済性に対して大きな影響 を与えずに、ガラス固化体本数の低減等環境負荷の低減を図ることが可能であ ると考えられる。今後本検討については、①Mo分離の成立性確認、②ガラス固 化体当たりの酸化物添加量の増加に関する研究開発、③Sr、Cs分離で発生する 2次廃棄物の低減、等を進める必要がある。

#### [参考文献]

- 菅谷,他:"高Pu富化度MOX燃料の溶解速度の評価",サイクル機構技報,No. 15, p. 41 (2002).
- 2) E. P. Horwitz, et al. : "SREX: A New Process for the Extraction and Recovery of Strontium from Nuclear Waste Streams", Solvent Extr. Ion Exch., Vol. 9, p. 1 (1991).
- R. A. Leonard, et al. : "Development of a Solvent Extraction Process for Cesium Removal from SRS Tank Waste", Sep. Sci. Technol., Vol. 36, p. 743 (2001).
- V. V. Babain, A. Yu. Shadrin : "New extraction technologies for management of radioactive wastes", Chem. Sep. Technologies Relat. Methods Nucl. Waste. Manag., 135-154 (1999).
- 5) J. D. Law, et al. : "The Universal Solvent Extraction (UNEX) Process. II. Flowsheet Development and Demonstration of the UNEX Process for the Separation of Cesium, Strontium, and Actinides from Actual Acidic Radioactive Waste", Solvent Extr. Ion Exch., Vol. 19, p. 23 (2001).
- Y. Wei, et al. : "The Application of an Advanced Ion Exchange Process to Reprocessing Spent Nuclear Fuels, (I) Separation Behavior of Fission Products from Uranium", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 35, p. 357 (1998).
- R. Baker, et al. : "A Technetium Rejection Flowsheet", Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., No. 119, p. 213 (1990).
- G. Uchiyama, et al. : "Advanced Technologies for Long-Lived Nuclides Separation in Reprocessing", GLOBAL 2001, France, Paris (2001).
- 9) B. Ya. Zilberman, et al.: "Separation of Long-Lived Radionuclides from NPP Spent Fuel and Its Processing Wastes Using SUPER PUREX as TBP-Compatible Process", GLOBAL'2001, France, Paris (2001).
- R.T. Jubin : "Literature Survey of Methods to Remove Iodine from Off-gas Streams Using Solid Sorbents", ORNL/TM-6607 (1979).
- B. F. Myasoedov, et al. : "Extraction of Tetravalent Americium", J. Less-Common Metal., Vol. 122, p. 195 (1986).
- G. A. Burney : "Curium Process Development II-I. Separation of Americium from Curium by Precipitation of K<sub>3</sub>AmO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>", DP-1109 (1968).
- 13) L. Donnet, et al.: "The Development of the SESAME Process", Fifth OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, SCK-CEN, Mol, Belgium, 25-27 November 1998 (1998).
- 14) M. Kamoshida, T. Fukasawa : "Solvent Extraction of Americium(VI) by Tri-n-butyl Phosphate", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 33, p. 403 (1996).
- 15) E. J. Wheelwright, F. P. Roberts : "The Use of Altering DTPA and NTA

Cation-Exchange Flowsheets for the Simultaneous Recovery and Purification of Pm, Am, and Cm", BNWL-1072 (1969).

- 16) A.-Y. Zhang, et al. : "A New Partitioning Process for High Level Liquid Waste by Extraction Chromatography", GLOBAL 2003 (2003).
- 17) M. Kamoshida, T. Fukasawa : "Solvent Extraction of Americium(VI) by Tri-n-butyl Phosphate", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 33, p. 403 (1996).
- 18) E. J. Wheelwright, F. P. Roberts : "The Use of Altering DTPA and NTA Cation-Exchange Flowsheets for the Simultaneous Recovery and Purification of Pm, Am, and Cm", BNWL-1072 (1969).
- 19) A.-Y. Zhang, et al. : "A New Partitioning Process for High Level Liquid Waste by Extraction Chromatography", GLOBAL 2003 (2003).
- 20) K. Fujii, et al. : "Effects of Separation of Minor Actinides, Cesium, and Strontium on High-Level Radioactive Waste", The RRTD 2<sup>nd</sup> International Workshop on Nuclear Cycle, p. 73, 2003 (2003).
- 21) Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum : "Generation IV Roadmap: Crosscutting Fuel Cycle R&D Scope Report", GIF-009-00 (2002).
- 22) 田中 博,他:"再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- 23) 日本原燃(株): "六ヶ所再処理事業所 再処理事業指定申請書", 1997版 (1997).
- 24) 米谷雅之,他:"高レベル放射性廃棄物の高減容処理研究",動燃技報, No. 98, p. 85 (1996).
- 25) K. Kawamura, J. Ohuchi : "Characterization of Highly Waste Loaded Glass for HLW", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1995, Vol. 353, p. 87 (1995).
- 26) 佐藤浩司,他:"再処理システム技術検討書 FBRサイクルの実用化戦略調査研究(フェーズⅡ) 平成13年度成果報告",JNC TY9400 2002-019 (2002).
- 27) 資源エネルギー庁: "総合エネルギー調査会 原子力部会資料, 資料5-2 特定放射性廃棄物 の最終処分費用および拠出金単価の見直しについて(案)"平成13年10月4日 (2001).

表	4.6.1	各処理モー	ドにおける母液の組成と Pu 富化度
---	-------	-------	--------------------

		処理	E―FA	処理1	∃—ŀ́B	処理モー	ードC(**)	混合·平	均化燃料
		計算値	変動率(%)*	計算値	変動率(%)*	計算値	変動率(%)*	計算値	変動率(%)*
流量	L/日	1876	2.51	1874	2.40	2091	14.26	1830	-
密度	kg/L	1.372	-2.97	1.373	-2.90	1.362	-3.68	1.414	-
HNO3濃度	Ν	5.69	-1.90	5.69	-1.90	5.54	-4.48	5.80	-
U濃度	g/L	111.36	-7.69	111.36	-7.69	123.98	2.77	120.64	-
Pu濃度	g/L	50.48	-2.36	50.69	-1.95	26.21	-49.30	51.70	-
MA濃度	g/L	2.28	-2.98	2.54	8.09	0.73	-68.94	2.35	-
FP濃度	g/L	25.57	-2.07	24.54	-6.01	10.44	-60.02	26.11	-
Pu 宮 化 度	%	31 19	3 97	31.28	4 2 7	17 45	-41.83	30.00	

(\*)変動率=((各処理モードの値)-(混合・平均化燃料の値))/(混合・平均化燃料の値)×100 (\*\*)調整設備にて、HNO3濃度条件4.4NとU濃度条件450g/Lを同時に満たすことができなかったので、 HNO3濃度条件のみを満たした。

表 4.6.2	各処理モー	ドで運転し	~た場合の	U晶析物と	U-Pu 溶液の <sup>4</sup>	<b>F間回収量</b>
---------	-------	-------	-------	-------	-----------------------	--------------

			処理モード			
			A	В	С	合計
一処理	IC+AB	[体/回]	2	0	1	
あたりの	OC+AB	[体/回]	1	2	0	
処理体数	RB	[体/回]	1	1	2	
処理回数		[回]	266	21	1	
モード	IC+AB	[体]	532	0	1	533
処理体数	OC+AB	[体]	266	42	0	308
	RB	[体]	266	21	2	289
一処理あれ	とりの時間	[日]	0.71	0.54	0.60	
各モード	U	[kg]	116,687	7,035	367	124,089
晶析物	Pu	[kg]	134	8	0	143
回収量	MA	[kg]	6	0	0	6
	FP	[kg]	68	4	0	72
	計	[kg]	116,895	7,047	368	124,310
各モード	U	[kg]	39,284	2,368	155	41,808
母液	Pu	[kg]	17,811	1,078	33	18,922
溶解成分	MA	[kg]	805	54	1	860
回収量	FP	[kg]	9,021	522	13	9,556
	計	[kg]	66,921	4,022	202	71,145
母液Pu	<b>富化度</b>	[%}	31.195	31.283	17.449	

# Pu富化度30%以上の母液

		各燃料体 単独処理
Pu収量	[kg]	18,889
Pu収率	[%]	98.9
Pu富化度	[%]	31.2

分類	工程名称	NEXT法との差異	経済性への影響の 見込み	備考
貯蔵	使用済燃料一時貯蔵設備	共用	経済性影響なし	
受入/前処理	受入れ・燃料貯蔵設備	共用	経済性影響なし	
受入/前処理	解体設備	解体不要	経済性影響なし	
受入/前処理	せん断設備	専用設備追加	2系列化によりコス ト増加	
受入/前処理	廃棄物処理設備	変更なし	経済性影響なし	
再処理	溶解設備	変更なし	経済性影響なし	
再処理	清澄設備	変更なし	経済性影響なし	
再処理	調整設備	変更なし	経済性影響なし	
再処理	晶析設備	NEXT:73%→ 軽水炉:97% Puサーマル:90%	U収率上昇に伴う 晶析温度低下によ る保冷措置追加に 伴いコスト増加	Pu富化度 30%の製品溶 液を得るため の収率
再処理	抽出設備	フィード液減少に より間欠運転	設備利用率低下に 伴いコスト増加	
再処理	溶媒洗浄設備	1	<b>↑</b>	
再処理	Pu濃縮設備	1	1	
再処理	富化度調整設備	1	1	

## 表 4.6.3 軽水炉燃料受入れ時の化学処理設備への影響評価

## 表 4.6.4 前処理設備変更による再処理単価への影響

再処理単価	前処理1ライン(FBRのみ)	前処理2ライン(FBR+LWR)
資本費	8.2	8.5
操業費	12.2	12.4
合計	20.4	20.9

単位:万円/kgHM

## 表 4.6.5 前処理工程の2系列化および晶析収率上昇による再処理単価への影響

再処理単価	FBR	ケース1 (LWR)	ケース2(Puサーマル)
資本費	8.2	8.5	8.5
操業費	12.2	15.4	13.0
合計	20.4	23.8	21.5

単位:万円/kgHM

項	目	低除染先進湿式多重	(ABWR)
		リサイクル平衡炉心	
電気出力	MWe	1,356	1,356
熱出力	MWt	3,926	3,926
原子炉圧力	MPa	7.2	7.2
炉心外接半径	m	3.8	2.7
燃料集合体数	体	900	872
炉心部取出燃焼度*	GWd/t	54	45
炉心取出燃焼度**	GWd/t	45	45
炉心部高さ	m	0.845	3.71
炉心流量	104t/h	1.8	5.2
出口クォリティ	%	51	14.5
炉心部平均ボイド率	%	69	43
炉心圧損	MPa	0.043	0.18
MOX 部 Pu 富化度	wt%/HM	31.0	—
炉心部 Puf 富化度	wt%/HM	9.3	3.8(ウラン濃縮度)
Puf 装荷量	t	15.4	—
増殖比		1.05	—
最大線出力密度	kW/ft	16	12
MCPR		1.3	1.3
ボイド反応度係数	$10^{-4} \Delta \text{k/k/\%void}$	-0.5	-8
連続運転期間	Month	18	13
MOX 部 MA 含有率	wt%/HM	2.1	—
MOX 部 FP 含有率	wt%/HM	0.04	—
軸方向5領域の	DU cm	DU 15.0	
Puf 富化度分布	wt% cm	18 21.5	
および高さ	DU cm	DU 41.0	
	wt% cm	18 22.0	
	DU cm	DU 15.0	

## 表 4.6.6 水冷却炉の主要緒元と炉心特性

\* : MOX 部+内部ブランケットの平均燃焼度

\*\*: MOX 部+全ブランケットの平均燃焼度
項	基準Pu組成	
同位体重量比率(wt%)	司位体重量比率(wt%) Pu-238	
	Pu-239	47.9
	Pu-240	30.3
	Pu-241	9.6
	Pu-242	8.5
	Am-241	1.0
Puフィッサイル(wt%)	57.5	

## 表 4.6.7 水冷却炉燃料の組成

# 表 4.6.8 分離回収の対象とする元素

元素	回収後の取り扱い	回収製品の性状	回収の対象とする物質
Cs	長期の保管管理	硝酸溶液	<ul> <li>・簡素化溶媒抽出工程の抽出残液(ラフィネート)</li> </ul>
Sr	長期の保管管理	硝酸溶液	<ul> <li>・簡素化溶媒抽出工程の抽出残液(ラフィネート)</li> </ul>
Тс	照射ターゲットに加工	金属	<ul> <li>・溶解工程の不溶解残渣</li> <li>・簡素化溶媒抽出法の抽出残液(ラフィネート)</li> <li>・同じく共除染工程からの装荷溶媒</li> </ul>
Ι	照射ターゲットに加工	ヨウ化銅 (CuI)	・溶解工程からのオフガス

# 表 4.6.9 Am(III) の酸化を利用した Cm との分離技術の例

Am の原子価	分離法の名称	分離法の概要	分離の実績	
Am(IV)	アミン抽出法 11)	硝酸もしくは硫酸溶液中で Am(IV)	旧ソビエト連邦で実験室規模の研	
		をリンタングステン酸と錯形成し、こ	究が行われた。	
		の錯体をジオクチルアミン混合溶媒で		
		抽出する。		
Am(V)	炭酸沈殿法 12)	炭酸カリウム溶液中で Am(V) を含	米国サバンナ・リバー研究所で	
		む複塩を沈殿させる。	「Curium Process」として工学規模	
			施設の検討が行われた。	
Am(VI)	SESAME 法 <sup>13)</sup>	低濃度のリンタングステン酸を含む	仏国原子力庁で実験室規模での研	
		硝酸溶液中で Am(VI) を生成し、これ	究が行われた。日立製作所において	
		を TBP などの抽出剤を含む溶媒を用	溶解液への適用に関する研究が行わ	
		いて抽出分離する。	れた <sup>14)</sup> 。	

表 4.6.10 再処理工程の移	行率設定
------------------	------

元素	移行率		
	再処理製品	高レベル廃棄物	
U,Np,Pu	99.7%	0.3%	
Am,Cm	1.0%	99.0%	
ALM,ALE,RE,NM,CC	1.0%	99.0%	
HG,NG	オフガスへ 100%種	多行	

※ALM:アルカリ金属、AME:アルカリ土類金属、RE:希土類、NM:貴金属、

CC:カルコゲン、HG:ハロゲン、NG:希ガス

## 表 4.6.11 MA 分離工程の移行率設定

元素	移行率	
	MA 製品	高レベル廃棄物
U,Np,Pu	0.1%	99.9%
Am,Cm	99.9%	0.1%
ALM, ALE	0.1%	99.9%
RE (Y,Gd 以降の重	99.9%	0.1%
RE)		
RE (La,Ce,Pr,Nd)	0.1%	99.9%
Pm	10.0%	90.0%
Sm	30.0%	70.0%
Eu	70.0%	30.0%

#### 表 4.6.12 Sr、Cs 分離工程の移行率設定

元素	移行率		
	Cs,Sr 廃液	高レベル廃棄物	
Rb,Sr,Cs,Ba	98.0%	2.0%	
その他	0.0%	100.0%	

制限因子	ガラス固化体本数
	(本/tHM)
発熱量制限值(2.3kW/本以下)	
	1.03
	(Cs、Sr の寄与分は 0.65)
総酸化物量制限值	
15wt%以下の場合	1.08
20wt%以下の場合	0.81
25wt%以下の場合	0.65
Mo 量制限值(2wt%以下)	
Mo80%除去の場合	0.23
(※Mo 除去無しの場合)	(1.15)

# 表 4.6.13 シナリオ1の各ガラス固化体制限因子におけるガラス固化体本数の評価結果

(使用済燃料(新燃料1tHMからの発生分)を再処理して発生する高レベル廃棄物当たり)

表 4.6.14 Sr、Cs 分離施設の建設費および年間運転経費の概算結果

費目		費用	備考
建設費	設備費	400 億円	設備費:建屋費=4:1
	建屋費	100 億円	
年間運転経	人件費	5.8 億円/年	<b>FS</b> フェーズ I の <b>MA</b> 回収施設を
費			参考
	修繕費	15 億円/年	建設費の3%
	消耗品費	5億円/年	建設費の1%

### 表 4.6.15 Sr、Cs 廃液貯蔵施設の建設費および年間運転経費の概算結果

費目		費用	備考
建設費	設備費	310 億円	
	建屋費	120 億円	
年間運転経	人件費	1.8 億円/年	
費	修繕費	13 億円/年	建設費の3%
	消耗品費	4億円/年	建設費の1%

費目		費用	備考
建設費	設備費	300 億円	
	建屋費	130 億円	
年間運転経	人件費	1.8 億円/年	
費	修繕費	13 億円/年	建設費の3%
	消耗品費	4億円/年	建設費の1%

#### 表 4.6.16 ガラス固化体中間貯蔵施設の建設費および年間運転経費の概算結果

# 表 4.6.17 各シナリオにおける経済性評価結果

費目	シナリ	リオ1	シナリ	リオ2
(百万円/tHM)	総酸化物量	総酸化物量	総酸化物量	総酸化物量
	15wt%以下	15wt%以上	20wt%以下	25wt%以下
Cs、Sr 分離			30	30
Cs、Sr 貯蔵			8	21
固化体中間貯	33	31	25	16
蔵				
地層処分	73	69	54	44
合計	106	100	117	111

#### 表 4.6.18 各シナリオにおけるガラス固化体発生本数評価結果

(使用済燃料(新燃料1tHMからの発生分)を再処理して発生する高レベル廃棄物当たり)

	シナリ	リオ1	シナリオ2		
	総酸化物量	総酸化物量	総酸化物量	総酸化物量	
	15wt%以下	15wt%以上	20wt%以下	25wt%以下	
ガラス固化体					
発生本数	1.08	1.03	0.81	0.65	
(本/tHM)					
制限因子	総酸化物量	発熱量	総酸化物量	総酸化物量	



図 4.6.1 単独処理時の燃料溶液の組成変動



図 4.6.2 NEXT 法 (処理能力 200 t HM/y)の前処理設備配置図



図 4.6.3 軽水炉燃料受入に対応した前処理設備配置図



工程	受入	せん断	溶解	清澄	晶析	抽出	Am/Cm回収	濃縮・ 富化度調整
物流番号	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1
成分	使用済燃料 集合体	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス
U	9.86E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pu	1.22E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Np	1.04E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Am	6.56E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cm	9.74E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FP	6.55E+01	0.00E+00	1.08E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
物流番号		2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	8-2
成分	/	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物	廃棄物
<u> </u>		0.00E+00	0.00E+00	9.86E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pu		0.00E+00	0.00E+00	1.83E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Np		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Am		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cm		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FP	/	0.00E+00	0.00E+00	9.06E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.84E+01	0.00E+00
物流番号	/	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	/-3	8-3
成分		せん断燃料	溶解液	調整液	U溶液	U/Pu/Np溶液	Am/Cm溶液	U/Pu/MA溶液 (1)内側炉心用
<u> </u>		9.86E+02	9.86E+02	9.85E+02	9.59E+02	2.65E+01	0.00E+00	2.62E+01
Pu		1. 22E+01	1.22E+01	1.22E+01	8.94E-02	1. 21E+01	0.00E+00	7.14E+00
Np		1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00	7.63E-03	9.29E-01	1.03E-01	<u>6.10E-02</u>
Am		6.56E-01	6.56E-01	6.56E-01	4.81E-03	0.00E+00	6.51E-01	3.85E-01
Cm		9. /4E-02	9. /4E-02	9. /4E-02	7.15E-04	0.00E+00	9.6/E-02	5. /1E-02
FP	/	6. 55E+01	5.4/E+01	4. 56E+01	3.35E-01	0.00E+00	1.69E+01	9.98E+00
物流畨号					5-4	6-4		8-4
成分					U/Pu/MA溶液	抽出残液		U/Pu/MA溶液 (2)外側炉心用
U					2. 65E+01	0.00E+00		1.46E+01
Pu					1.21E+01	0.00E+00		4.96E+00
Np					1.03E+00	1.03E-01		4. 23E-02
Am			~		6.51E-01	6.51E-01		2.67E-01
Cm				~	9.67E-02	9.67E-02		3.96E-02
FP	/		/	/	4. 53E+01	4. 53E+01	/	6.93E+00
物流番号			/				/	8-5
成分								U/Pu/MA浴液
		$\sim$			$\sim$			(3) 宗判分
U Du								0.00E+00
Np								0.00E+00
Am NP								0.00E+00
Cm								0.00E+00
FP								0.00L+00
物法承导								8-6
成公			/					
12.73								9 18F+02
Pu								8 56F-02
Np								7 31F-03
Am		$\sim$	$\sim$			$\sim$		4.61E-03
Cm								6.84E-04
FP								3. 21E-01
						(*)単	位は全てkg/day	

## 図 4.6.4 LWR 燃料処理時の物質収支図(NEXT 法、200tHM/y)

V06         V06         V06         V06         V06         V07         V07 </th <th></th> <th>受7</th> <th>SOG 1-1 せん単 廃棄料</th> <th>D0G 2-1 所 2-2 2-2 ↓ 3 魚 廃棄判</th> <th>VOG → → → → → → → → → → → → →</th> <th>V0G 1 4-2 晶析 3 ↓5-1 原棄物 4-4</th> <th>5-4</th> <th>3 U/Pu/MA</th> <th></th>		受7	SOG 1-1 せん単 廃棄料	D0G 2-1 所 2-2 2-2 ↓ 3 魚 廃棄判	VOG → → → → → → → → → → → → →	V0G 1 4-2 晶析 3 ↓5-1 原棄物 4-4	5-4	3 U/Pu/MA	
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $				V06 ★ (6-1) → 抽出 ★ (6-2) 廃棄物	V06 ↓(7-1) ▲m/Cm 回収 ↓(7-2) 廃棄物		(8-1) 温縮 富化度 調整 (8-2) (8-3) (8-4) (	<ul> <li>溶液 (1)</li> <li>U/Pu/MA</li> <li>溶液 (2)</li> <li>U/Pu/MA</li> <li>溶液 (3)</li> <li>U溶液</li> </ul>	連統 .
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	工程	受入	せん断	溶解	清澄	晶析	抽出	Am/Cm回収	富化度調整
U         9:54E+02         0:00E+00	成分	 使用済燃料 集合体	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス	オフガス
Piu         3.97±01         0.00±00	U	9.54E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ann         4.68E+00         0.00E+00         0.00E+00 <t< td=""><td>Pu Np</td><td><u>3.9/E+01</u> 1.81E-01</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td><td>0.00E+00 0.00E+00</td></t<>	Pu Np	<u>3.9/E+01</u> 1.81E-01	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00
□         1. 43£+00         0. 00E+00         0.	Am	4.68E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
物液菌号         2-2         3-2         4-2         5-2         6-2         7-2         8-2           成分         原素物         廃素物         廃素物         廃素物         廃素物         廃素物         ●         8-2         0.00E+00         0.0E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00 </td <td>Cm FP</td> <td>1. 43E+00 6. 33E+01</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td> <td>0.00E+00 1.09E+01</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td> <td>0.00E+00 0.00E+00</td>	Cm FP	1. 43E+00 6. 33E+01	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 1.09E+01	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00
脱27         陳素初         陳素和         ##素和         ####         ####         ####         ####         ####         ####         ####         ####         ####         ####         #####         #####         #####         #####         #####         #####         ######         #####         ######         ######         ######         ####################################	物流番号		2-2	3-2	4-2 ***	5-2	6-2	7-2	8-2
Pu         0.00E+00         0.00E+00 <th< td=""><td><u>成分</u> U</td><td></td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td><td><u>廃業物</u> 9.54E-01</td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td><td><u>廃業物</u> 0.00E+00</td></th<>	<u>成分</u> U		<u>廃業物</u> 0.00E+00	<u>廃業物</u> 0.00E+00	<u>廃業物</u> 9.54E-01	<u>廃業物</u> 0.00E+00	<u>廃業物</u> 0.00E+00	<u>廃業物</u> 0.00E+00	<u>廃業物</u> 0.00E+00
Np         0.00E+00         0.00E+00 <th< td=""><td>Pu</td><td></td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>5.96E-02</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td></th<>	Pu		0.00E+00	0.00E+00	5.96E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cm         0.00E+00         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0         0.	Am Np		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00 0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
PP         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         0.00E+00         2.73E+01         0.00E+00           物流番号         2-3         3-3         4-3         5-3         6-3         7-3         8-3           成分         ぜん断燃料         溶解液         調整液         U浴液         U/Pu/Np溶液         Am/Cm溶液         (I)/Pu/NA溶液           U         9.54E+02         9.54E+02         9.53E+02         8.68E+02         8.55E+01         0.00E+00         2.33TE+0           Pu         3.97E+01         3.97E+01         3.96E+01         2.33E+01         0.00E+00         2.34E+0           Am         4.65E+00         4.68E+00         3.43E-02         0.00E+00         4.65E+00         2.78E+01           Cm         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.43E+00         1.52E+01         0.00E+00         1.62E+00         8.72E+01           D         0         0         0.52E+01         0.00E+00         1.51E+01         8.97E+01           Np         -         -         -         -         -         -         -         -         -         -         -         -         - <th< td=""><td>Cm</td><td></td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td><td>0.00E+00</td></th<>	Cm		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
成分         ぜん断燃料         溶解液         調整液         U%pu/Np溶液         Am/Cm溶液         U/Pu/NA溶液         U/Pu/MA溶液         U/Pu/MA%液         U/Pu/MA%心         U/Pu/MA%液         U/Pu/MA%心	物流番号		2-3	0.00E+00 3-3	9.70E+00 4-3	0.00E+00 5-3	0.00E+00 6-3	2. /3E+01 7-3	0.00E+00 8-3
D         5. 34 C 22         5. 34 C 22 <td>成分</td> <td></td> <td>せん断燃料</td> <td>溶解液</td> <td>調整液</td> <td>U溶液</td> <td>U/Pu/Np溶液</td> <td>Am/Cm溶液</td> <td>U/Pu/MA溶液 (1)内側炉心用 9.37E±01</td>	成分		せん断燃料	溶解液	調整液	U溶液	U/Pu/Np溶液	Am/Cm溶液	U/Pu/MA溶液 (1)内側炉心用 9.37E±01
ND         1.81E-01         1.81E-01         1.32E-03         1.62E-01         1.90E-02         1.08E-00           Am         4.68E+00         4.68E+00         4.68E+00         3.43E-02         0.00E+00         4.65E+00         2.78E+0           Cm         1.43E+00         1.43E+00         1.05E-02         0.00E+00         1.42E+00         8.49E-0           FP         6.33E+01         5.24E+01         4.27E+01         3.13E-01         0.00E+00         1.51E+01         8.97E+0           物流番号	Pu		3. 97E+01	3. 97E+01	3. 96E+01	2. 91E-01	3. 93E+01	0.00E+00	2. 34E+01
Am         T. ddf 200         T. ddf 200 <td>Np Am</td> <td></td> <td>1.81E-01 4.68E+00</td> <td>1.81E-01</td> <td>1.81E-01</td> <td>1. 33E-03 3. 43E-02</td> <td>1.62E-01</td> <td>1.80E-02</td> <td>1.08E-01 2.78E+00</td>	Np Am		1.81E-01 4.68E+00	1.81E-01	1.81E-01	1. 33E-03 3. 43E-02	1.62E-01	1.80E-02	1.08E-01 2.78E+00
FP         6.33E+01         5.24E+01         4.27E+01         3.13E-01         0.00E+00         1.51E+01         8.97E+0           物流番号         5-4         6-4         8-4           成分         U/Pu/MA溶液         抽出残液         U/Pu/MA溶液           U         8.55E+01         0.00E+00         4.63E+0           Pu         8.55E+01         0.00E+00         4.63E+0           Np         1.80E-01         1.80E-02         7.46E-0           Am         4.65E+00         4.65E+00         1.82E+00         5.92E-0           FP         4.22E+00         4.22E+00         5.32E+01         8.53E+00           M流番号         9         4.22E+01         4.22E+00         5.32E+0           物流番号         9         9         9         9         9         9           U         9	Cm		1. 43E+00	1. 43E+00	1. 43E+00	1. 05E-02	0.00E+00	1. 42E+00	8. 49E-01
成分         U/Pu/MA溶液         U/Pu/MA溶液         U/Pu/MA溶液           U         8.55E+01         0.00E+00         4.63E+0           Np         3.93E+01         0.00E+00         1.62E+0           Np         1.80E-01         1.80E-02         7.46E-0           Am         4.65E+00         4.65E+00         1.93E+0           Cm         4.65E+00         4.22E+00         5.90E-0           FP         4.24E+01         4.24E+01         6.32E+0           物流番号         0.00E+0         0.00E+0         5.90E-0           物流番号         0.00E+0         0.00E+0         6.32E+0           Wa         2.92E+01         4.24E+01         6.32E+0           物流番号         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Np         0.00E+0         0.00E+0	FP 物流番号		6. 33E+01	5. 24E+01	4. 27E+01	3. 13E-01 5-4	0.00E+00 6-4	1.51E+01	8.97E+00 8-4
0         0.002700         4.63240           Pu         3.932401         0.002400         1.62240           Np         1.80E-01         1.80E-02         7.46E-0           Am         4.652400         4.652400         5.93240           Cm         4.652400         5.93240         5.93240           FP         4.242401         6.23240         5.93240           Ø激激音号         0.002400         1.422400         5.93240           Ø         4.242401         4.242401         6.23240           Ø.38940         0.00240         8-5         0.00240           Ø.38940         0.00240         8-5         0.00240           Ø.38940         0.00240         8-5         0.00240           VU/PV/MA374         0.00240         0.00240         0.00240           Np         0.00240         0.00240         0.00240           Np         0.00240         0.00240         0.00240           Ma         0.00240         0.00240         0.00240           Np         0.00240         0.00240         0.00240           Np         0.00240         0.00240         0.00240           Np         0.00240         0.00240         0.00240	成分					U/Pu/MA溶液	抽出残液		U/Pu/MA溶液 (2)外側炉心用
Np         1.80E-01         1.80E-02         7.46E-0           Am         4.65E+00         4.65E+00         1.93E+0           Cm         1.42E+00         5.90E-01         1.92E+00         5.90E-01           FP         4.24E+01         4.24E+01         6.23E+0           物流番号         8-5         8-5         8-5           成分         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Mp         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Mm         0.00E+0         0.00E+0         0.00E+0           Mpu         0.00E+0         0.00E+0	Pu					3. 93E+01	0.00E+00		4. 03E+01
ご         T. 602-100         T. 602-100         T. 602-100           Cm         1. 42E+00         5. 90E-0           FP         4. 24E+01         6. 23E+0           物流番号         8-5         0           成分         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0         0.00E+0           Np         0.00E+0         0.00E+0           Am         0.00E+0         0.00E+0           FP         0.00E+0         0.00E+0           V         0.00E+0         0.00E+0           Ma         0.00E+0         0.00E+0           Ma         0.00E+0         0.00E+0           Ma         0.00E+0         0.00E+0           Ma         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0         0.00E+0           Pa         0.00E+0         0.00E+0           Ma         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0	Np Am					1.80E-01 4.65E+00	1.80E-02 4.65E+00		7.46E-02
PP         4.24E+01         4.24E+01         6.23E+0           物流番号         8-5         U/Pu/MA溶液         (3)余剰分           U         0.00E+0         0.00E+0           Pu         0.00E+0         0.00E+0           Mm	Cm					1. 42E+00	1. 42E+00		5. 90E-01
成分         U/Pu/M溶液           U         0.00E+0           Pu         0.00E+0           Np         0.00E+0           Am         0.00E+0           Cm         0.00E+0           P         0.00E+0           Max         0.00E+0           Max         0.00E+0           Max         0.00E+0           Max         0.00E+0           V         0.00E+0	FP 物流番号					4. 24E+01	4. 24E+01		ь. 23E+00 8-5
D         0.00240           Pu         0.00240           Np         0.00240           Am         0.00240           Cm         0.00240           PP         0.00240           Max         0.00240           Pu         0.00240           V         0.00240           Pu         0.00240           Pu         2.00240           Pu         2.00240           Am         2.00240           Cm         2.00240           Pu         2.00240           Am         2.002240           Cm         2.00240           Pu         2.00240           Pu         2.002400           Pu         2.002400           Pu         2.002400           Pu         2.002400           Pu         2.0024000           Pu         2.0024000           Pu         2.00240000           Pu         2.0024000000000000000000000000000000000	成分								U/Pu/MA溶液 (3)余剰分
Np         0.00E+0           Am         0.00E+0           Cm         0.00E+0           FP         0.00E+0           物流番号         8-6           U         8-6           U         128夜           U         7.38E+0           Pu         2.47E-0           Am         2.92E-0           Cm         8.92E-0           FP         9.02E-0	Pu								0.00E+00
Am         0.00240           Cm         0.00240           FP         0.00240           物流番号         8-6           成分         Uš客液           U         7.38240           Pu         2.4712-0           Np         1.132-0           Am         2.922-0           Cm         8.922-0           FP         9.002-00	Np								0.00E+00
FP         0.00E+0           物流番号         8-6           成分         Uầx ở           U         7.38E+0           Pu         2.47E-0           Np         1.13E-0           Am         2.92E-0           Cm         8.92E-0           FP         9.92E-0	Cm	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	0.00E+00
12020年8月7日         0-0         UN2液           成分         UN2液         1.38E+0           Pu         1.13E+0         1.13E+0           Am         2.92E+0         8.92E+0           Cm         9         2.66E+0	FP 物法来早								0.00E+00
U         7.38E+0           Pu         2.47E+0           Np         1.13E+0           Am         2.92E+0           Cm         8.92E+0           FP         2.66E+0	<u>物派备亏</u> 成分				//				o=0 U溶液
Np         2. 472 G           Am         2.92E-0           Cm         8.92E-0           FP         2.66E-0	U P::								7. 38E+02
Am         2.92E-0           Cm         8.92E-0           FP         2.66E-0	Np	$\sim$	$\sim$		$\sim$		$\sim$	$\geq$	1. 13E-03
FP 0. 26F-0 2. 26F-0	Am Cm								2.92E-02 8.92E-03
	FP	$\backslash$							2. 66E-01

図 4.6.5 Pu サーマル燃料処理時の物質収支図 (NEXT 法、200tHM/y)



図 4.6.7 燃料集合体と制御棒概略図



分離回収工程



リワーク工程

#### 図 4.6.8 DCC 法による Cs および Sr 分離回収工程のフローシート



図 4.6.9 Tc と I の核変換に係わる分離回収工程の全体構成



図 4.6.10 各シナリオの概念図



図 4.6.11 Sr、Cs 廃液の貯蔵期間と崩壊熱の関係 (使用済燃料(新燃料 1tHM からの発生分)を処理して発生する Sr、Cs 廃液当たり)



## 図 4.6.12 Sr、Cs 分離施設のプラント概念図



図 4.6.13 各シナリオにおけるガラス固化体の中間貯蔵期間と発熱量の関係



図 4.6.14 各シナリオにおけるガラス固化体中の FP 元素組成

(シナリオ2(a):総酸化物量20wt%以下、シナリオ2(b):総酸化物量25wt%以下)

## 4.7 窒化物燃料への適用(被覆粒子燃料、ペレット燃料対応)

4.7.1 検討の要点

窒化物燃料を用いたFBRとして、ペレット燃料を用いた鉛ビスマス冷却炉と 被覆粒子燃料を用いたヘリウムガス冷却炉が検討されている。

酸化物燃料を対象とした湿式再処理技術の窒化物燃料への適用性を検討する にあたって考慮する必要のある点として、乾式再処理技術と共通である燃料形 態、<sup>15</sup>Nの回収、<sup>14</sup>Cの回収、窒化物燃料粉の火災・爆発対策が挙げられる。

(1) 燃料形態

フェーズIにおいては窒化物ペレット燃料への適用について検討した。ペレ ット燃料の場合、ボンド材がHeであれば、燃料母材が窒化物であることのほか に大きな違いはなく、湿式再処理で処理する場合に特に<sup>15</sup>Nの回収を考慮すれば、 前処理工程において酸化物に転換する工程(酸化工程)を追加することにより 対応できる。前処理工程で取合うことにより窒化物燃料を処理する方法は、湿 式再処理の主工程の大幅な変更を避けるという観点から有効である。

窒化物被覆粒子燃料を湿式再処理により処理する場合においても、前処理と して集合体の解体工程の変更、脱被覆工程および酸化工程の追加を行うことで 適用できるものと考えられる。

なお、再処理時に発生する<sup>14</sup>Cを低減するため、燃料核および被覆粒子を構成 する窒化物中の窒素は<sup>15</sup>Nを99.9%に濃縮したものを使用することが前提であ る。

(2) <sup>15</sup>Nの回収

天然窒素の99%以上を占める<sup>14</sup>Nは中性子吸収断面積が大きく、炉内で <sup>14</sup>N (n,p) <sup>14</sup>C反応により<sup>14</sup>Cを生成する。天然窒素を用いた窒化物燃料の場合、 この反応により炉内中性子経済が悪化する他、発生する大量の<sup>14</sup>Cが問題となる。 <sup>14</sup>Cは、オフガスから除去することが必要となるが、これはオフガス処理の負荷 を増すとともに、廃棄物処分に新たな問題をもたらす。

これらの問題を大幅に軽減するため、本検討における窒化物燃料は、<sup>15</sup>Nを 99.9%まで濃縮した濃縮窒素を用いることを前提とした。なお、被覆粒子燃料の 場合、被覆材となるTiNの窒素についても燃料と同様に濃縮窒素とすることとな る。<sup>15</sup>Nの濃縮技術については別途検討されているが、そのコストはサイクルコ スト評価上無視し得ないほど高価になるおそれがあり、可能な限り再処理プロ セスにおいて回収し再利用する方針としている。そこで、本検討では、使用済 燃料中の濃縮窒素を90%回収・再利用し、不足分の10%について新規濃縮窒素を 補充すると想定した。

<sup>15</sup>Nは、湿式法においても乾式法においても<sup>15</sup>N<sub>2</sub>の形でオフガス中に放出され るため、オフガスからのN<sub>2</sub>を回収する必要がある。このための技術として、多 成分の混合気体から特定成分を分離・濃縮する技術である圧力変動吸着(PSA: Pressure Swing Adsorption)法を採用した。

(3) <sup>14</sup>C の回収

設定した<sup>15</sup>Nの濃縮度99.9%は、<sup>14</sup>Cによる周辺環境への影響が酸化物燃料中に 含まれている不純物窒素の放射化により生成する<sup>14</sup>C量と同等となる濃縮度の 下限(<sup>14</sup>Cの放出量では上限に相当)である。酸化物燃料再処理の通常運転時は、 ここで評価された値より小さい<sup>14</sup>Cの放出量(上限値以下の放出量)となるため、 <sup>15</sup>N濃縮度99.9%の窒化物燃料を使用しても<sup>14</sup>Cの放出量が酸化物燃料のそれを 上回る可能性がある。また、燃料コンパートメントの構造材であるSiCからも照 射により<sup>14</sup>Cが生成するため、放出量はさらに増える傾向にある。したがって、 本検討では、環境負荷低減の観点から<sup>14</sup>Cの回収を行うこととした。

燃料中の<sup>14</sup>Cは、どのプロセスにおいてもそのほぼ全量がCO<sub>2</sub>の形でプロセス オフガスに移行する。オフガス系におけるCO<sub>2</sub>の回収には、アルカリスクラバに よる吸収やモレキュラーキューブによる吸着等、いくつかの方法が考えられる が、その選定は処分方法との整合性を考慮する必要がある。本検討では設計検 討の比較的容易なBa(OH)<sub>2</sub>・8H<sub>2</sub>Oの吸着カラムによる乾式回収法を採用した。

(4) 窒化物燃料粉の火災対策

焼結の十分でないUN粉末は空中発火性であることが知られているため<sup>1)</sup>、窒化物燃料粉についても火災の危険性を考慮する。このため、窒化物燃料粉が雰囲気中に露出する前処理セルはArセルとする、等の対応が必要となる。

4.7.2 先進湿式リファレンスプロセスの適用

前節を踏まえ、先進湿式リファレンスシステムの窒化物燃料への適用性について検討した。

(1) 燃料形態の影響

ペレット燃料の場合には、前述の通りフェーズ I で検討したプロセスにおい て解体・せん断工程後に酸化工程の追加が必要と考えられる。

被覆粒子燃料の場合に関しては、解体・せん断工程の変更、脱被覆の工程およ び酸化工程の追加が必要と考えられる。したがって、プロセスとしてはフェー ズIにおいて検討した窒化物ペレット燃料のプロセスに対して、酸化工程の前 に脱被覆工程を追加したプロセスとなるものと考えられる。さらに、被覆材 (TiN)やコンパートメント構造材(SiC)からの<sup>15</sup>Nおよび<sup>14</sup>Cの回収も問題と なると考えられる。

(2) <sup>15</sup>Nの回収方法

窒化物を硝酸に直接溶解<sup>\*1</sup>すると、<sup>15</sup>Nと硝酸HNO<sub>3</sub>を構成する天然窒素の<sup>14</sup>N との同位体交換反応が起こり、<sup>15</sup>Nの濃縮度が著しく低下するため、<sup>15</sup>Nを回収 する意義が失われる<sup>\*2</sup>。このため、溶解より前の工程で燃料中より窒素を放出さ せる必要がある。これを目的としたプロセスとして、窒化物を高温の酸化雰囲 気(30% O<sub>2</sub>/70% Ar)下で酸化し(2MN+2O<sub>2</sub>→2MO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>↑)、濃縮窒素をN<sub>2</sub>の形で 放出させる方法が提案されており<sup>2)</sup>、ここでもこの酸化法を採用した。この工 程で燃料から放出された<sup>15</sup>N<sub>2</sub>はオフガスに移行するので、オフガス処理工程で回 収する。

問題点と考えられるのは、燃料の酸化がMO2で止まらずにさらに進んだ場合 に、Puはそれ以上酸化され難いため、Puに富むMO2相とUに富むM3O8相への相 分離が起こる可能性があることである。この場合、前者は硝酸に対して難溶性 であり、溶解工程で問題となる。このため、酸化工程では、相分離が起こるま で酸化を進ませずに、MO2の単一相になるように反応を制御する必要がある。 この問題への対応として、酸化状態の制御が比較的容易であるCO2/COを酸化ガ スとして用いる案もあるが、この場合は次に述べる<sup>14</sup>Cの回収を目的とした CO2回収装置において、この酸化ガスも同時に回収されることとなり、結果とし てオフガス処理工程(CO2回収工程)の負荷と廃棄物発生量が著しく増加する。こ のため、本検討ではO2/Arを採用している。

なお、酸化の際に<sup>15</sup>NOxが発生する可能性もある。この場合は、N₂として回 収できるような装置がオフガス工程において必要となる。

(3) <sup>14</sup>C の回収方法

本プロセスでは先に述べた酸化工程で、大半の<sup>14</sup>CがCO<sub>2</sub>としてオフガス中に 移行すると考えられる。燃料中に残った<sup>14</sup>Cについては、酸化物の湿式再処理に おける挙動と同様に、ほぼ全量が溶解時にCO<sub>2</sub>の形態で移行すると推測される。 このため、<sup>14</sup>Cの回収方法としては、酸化オフガスおよびDOGからのCO<sub>2</sub>の回収

<sup>\*1</sup> 窒化物燃料の硝酸への溶解特性は酸化物燃料ほど良くわかってはいないものの、一般には酸化物よりも容易に溶解するとされている。

<sup>\*2</sup> 硝酸にも <sup>15</sup>N 濃縮窒素を用いることで、直接溶解における濃縮窒素と天然窒素の混合を避けることもできるが、この 方法は <sup>15</sup>N 濃縮窒素による硝酸の大量供給が必要で、かつ廃液へ移行する <sup>15</sup>N 濃縮窒素の量が膨大となり、現実的でな い。

を検討した。

DOG系からのCO<sub>2</sub>を回収することを考えた場合、溶解槽へ空気のインリーク があると、インリーク中に含まれるCO<sub>2</sub>を同時に回収することになり、回収設備 および処分への負荷が大きくなる。このため、溶解槽およびヨウ素追出し槽ま でをArセルに含める。

(4) 窒化物燃料粉の火災対策

本プロセスにおいて窒化物燃料粉が雰囲気中に露出する範囲は、解体・せん断から酸化工程の範囲であることから、これらの設備が置かれる前処理セルはAr セルとした。

(5) 再処理プロセス

ここまでの検討を踏まえた窒化物燃料湿式再処理の概略フローを図 4.7.1に 示す。比較のため、酸化物を対象とした先進湿式リファレンスシステムの全体 工程フローを併記している。このうち、主要な追加/変更点である解体・せん断 工程、脱被覆工程、酸化工程、オフガス処理工程、ならびにArセルの範囲につ いて以下に述べる。

(i) 解体・せん断工程

ペレット燃料の場合、集合体の構造が大きく変わることはないと考えられる が、被覆粒子燃料の場合、集合体の構造が大きく変わるためその解体に関して 検討が必要となる。また、せん断工程に代えて次項の脱被覆工程が必要となる。

(ii) 脱被覆工程

被覆粒子燃料の脱被覆工程では、化学的脱被覆としてフッ化物揮発法を検討 した。脱被覆技術としては機械的脱被覆もあるが、被覆材に使用される<sup>15</sup>N濃縮 窒素の回収方法を具体化するに至っていない。なお、いずれも概念検討の段階 であり、試験による裏付けに乏しい状態である。

(a) 化学的脱被覆

被覆層であるTiNは高硬度で耐衝撃性、化学的安定性にも優れた材料であるので、化学的脱被覆として、フッ化物揮発法を検討している。フッ化物揮発法では、TiNを300~400℃でフッ化揮発させ、TiF4(昇華性化合物)およびNF3として分離する。分離したNF3は熱分解処理などを通して<sup>15</sup>N2として回収が可能である。

(b) 機械的脱被覆

グラインダー、ジェットミル、あるいは熱処理などで被覆層を破砕し、燃料 核との比重差を利用して被覆材の分離・回収を行う。

現在、適用の検討がなされている方法として ガスジェット法、回転ディスク 型破砕法が挙げられる。ガスジェット法は、ガスジェットで粒子を加速させ、 流動層内の衝突板に衝突させて被覆層のみを破砕するもので被覆層と燃料核の 分離は良好であり、燃料核の破損も極めて少ない。回転ディスク型破砕法につ いても、固定円盤と回転円盤のギャップ量のコントロールで被覆層のみが破砕 し、燃料核の破壊を最小に押えることが可能である。この方法では摩耗材料の 混入が課題となるが、回転円盤内面を超硬コーティングすることで材料の摩耗 を押えるなどの対応で改善できる。

(iii) 酸化工程

本プロセスは、酸化雰囲気下でせん断した燃料を酸化するという点で、従来 ボロキシデーション\*1と呼ばれたプロセスや、超臨界直接抽出法および後述の乾 式再処理の一つである酸化物燃料金属電解法で、脱被覆法として提案されてい る酸化熱処理プロセスに類似しており、特に機器については、酸化雰囲気・温 度の管理やせん断片のハンドリング等、必要とされる機能がほぼ共通している。 このため、それらとほぼ同様の装置が利用できると考えられる。その中では、 酸化物燃料金属電解法で採用されている酸化熱処理装置の検討が進んでいるた め、本検討でもそれと同様の装置(酸化加熱炉)を用いることとした。その概念図 を図 4.7.2に示す。

(iv) オフガス処理工程

窒化物再処理におけるオフガス処理フローを図 4.7.3に示す。比較のため、酸 化物燃料を対象とした先進湿式リファレンスシステムの前処理オフガスフロー を併記している。

SOGの成分は、雰囲気ガスが空気ではなくArである他は、酸化物燃料再処理のSOGと同様である。本プロセスでは、せん断と溶解の間に酸化プロセスがあるため、SOGを溶解槽に導入することができない。このため、SOGは次で述べる酸化装置のオフガス(以後酸化オフガス (OOG))と合流して処理する。

酸化オフガスの成分は、酸化ガス(O<sub>2</sub>、Ar)、I、CO<sub>2</sub>(<sup>14</sup>Cを含む)、H<sub>2</sub>O(<sup>3</sup>Hを含む)、それに<sup>15</sup>N<sub>2</sub>等である。酸化オフガスはダストを除去した後のSOGと合流し

<sup>\*1</sup> ボロキシデーション法(Voloxidation = Volatilization と Oxidation の組み合わせ)は、過去に酸化物燃料の再処理技術 開発において、溶解に先立って Kr,Xe,I,3H 等の揮発性放射性物質を除去する方法として提案されたプロセスである。こ のプロセスでは、せん断後の燃料片を数 100℃の酸化ガス(空気/酸素/CO2/CO)で酸化する。UO2 と U3O8 との密度の 違いにより、反応の際に燃料は膨張して破砕され、内部に閉じ込められていた気体状 FP や揮発性ガスが放出される。

て処理する。Cs/Ru、CO<sub>2</sub>、ヨウ素の順でFP等を除去した後、窒素(<sup>15</sup>N)の回収 を行う。残留ガスはHEPAフィルタ等を通し排気筒から大気へ放出する。なお、 酸化プロセスで<sup>15</sup>NOxが発生する場合には、これをN<sub>2</sub>に還元する装置がN<sub>2</sub>回収 装置の前に必要となる。回収した窒素ガスは一時貯蔵した後、回収ロス分を補 充して、燃料製造設備(炭素熱還元工程)に供給する。ただし、回収までのプロセ スで、例えばオフガス処理設備の雰囲気ガス(空気)のオフガスラインへの漏れ込 みにより天然窒素が混入するような場合には、同位体希釈により<sup>15</sup>N濃縮度が落 ちるため、再濃縮が必要となる。

なお、燃料製造における炭素熱還元工程のオフガスからも<sup>15</sup>Nを回収する必要 があるため、酸化オフガス処理系と炭素熱還元工程のオフガス処理系を共用す ることも考えられる。このため、オフガス流量を評価した。その結果を以下に 示す。

SOG(脱被覆オフガス含む)	:数 Nm³/hr
酸化オフガス	: 約 220Nm³/hr
炭素熱環元工程のオフガス	: 約 380Nm³/hr

この結果より、FP除去の必要なSOG/酸化オフガスと不要な炭素熱還元工程オ フガスを一括して処理することは合理的でないと判断した。このため、 SOG/DOG処理系でFPを除去した後に炭素熱還元工程のオフガスと合流し、<sup>15</sup>N 回収装置のみ共有する設計とした。

CO<sub>2</sub>については、その大半が酸化工程でオフガスに移行すると考えられるが、 ここでは保守的に、その一部は燃料に残留しDOGに移行すると想定する。この ため、DOG処理系においてもCO<sub>2</sub>の回収を行う。

DOGには硝酸を起源とする<sup>14</sup>N<sub>2</sub>、<sup>14</sup>NOxが含まれることから、<sup>15</sup>Nの回収を行 う酸化オフガス処理系とDOG処理系とは共用することができず、独立に設置す る。

なお、本検討では、4.7.1 (1) で述べたように使用済燃料中の濃縮窒素を90% 回収し、不足分の10%について新規濃縮窒素を補充する、と想定しているが、 これには、回収の際に雰囲気中の<sup>14</sup>Nがインリークとして混入することによる濃 縮度の低下を、10%の新規濃縮窒素の補充により補える程度に抑えることが前 提となる。このためには回収する系内にリークする天然窒素の量を極めて小さ く抑える必要があるが、インリーク量をこのレベルにコントロールするのは工 学的に極めて困難である。これが達成できない場合は、回収した濃縮窒素を再 濃縮することを考慮する必要がある。

再濃縮を行う場合、著しく高いDFが得られない限り、回収した<sup>15</sup>N<sub>2</sub>を管理区 域内で取り扱う必要があるため、再濃縮のための設備を管理区域内に置く必要 がある。濃縮技術については、現在NITROX法、イオン交換法および気相吸着 法が考えられている。窒素をアンモニアとして取扱う方法を採用する場合には、 アンモニアとして取り扱う設備から発生する廃液・オフガスを他の硝酸系のオ フガスと共に処理することは安全上好ましくないため、再濃縮設備は別建屋と するのが妥当である。

(v) Ar セルの範囲

主に窒化物燃料粉の火災・爆発対策の観点から、解体から酸化工程の範囲を、 ならびにDOG処理系におけるCO2除去装置の負荷低減の観点から溶解工程をAr セルとするため、Arセルに入れる工程は解体から溶解までの範囲となる。なお、 解体から酸化工程までをArセルに入れることで、装置へのインリークに含まれ る天然窒素の量を低減する効果も期待できる。

4.7.3 経済性評価

経済性評価として、4.2.1項で検討した処理量200tHM/yの一体化プラントに、 前項で述べた窒化物燃料対応のために必要な設備の追加・変更を行った場合の 建設費の評価を行った。建設費算出にあたっては、200tHM/yの先進湿式リファ レンスシステムの建設費を基に、工程の変更・追加に伴う設備費の変動の評価 を行った。考慮した設備は、追加設備として、

・脱被覆設備(被覆粒子燃料の場合)

·酸化設備

・Arセル冷却浄化設備

変更設備として

・解体・せん断設備(被覆粒子燃料の場合)

・オフガス処理設備

である。ただし、これらの設備の追加・変更に伴う建屋、電気設備、換気設備 およびユーティリティ等の増加分は含まれていない。

その結果、建設費は先進湿式リファレンスシステムの場合と比較すると、窒化物ペレット燃料への適用の場合で約5%、被覆粒子燃料への適用の場合で約 10%増加する見込みとなる。

4.7.4 廃棄物発生評価

被覆粒子窒化物燃料を先進湿式法で再処理した場合、処理量200tHM/yの一体 化プラントにおいて発生量が変化すると考えられるハル、エンドピース廃棄物 およびガラス固化体について、発生量を概算した。

評価においては、被覆材のTiNがわずかながら硝酸に溶解すると考え、溶解したTiNが抽出工程へ移行し、Ti溶出分のガラス固化体が増加することと、燃料コ

ンパートメントとして使用されているSiCおよび脱被覆後のTiがハル、エンドピース廃棄物となることを考慮した。

SiCおよびTi分のハル、エンドピース廃棄物発生量は、年間99m<sup>3</sup>(200Lのド ラム缶で497本)発生する。また、溶解したTiがすべてガラス固化工程に移行す る場合、ガラス固化体へ移行する金属量は約1.5倍となり、発生するガラス固化 体は年間371本となる。

4.7.5 開発課題

(1) システム全体の技術課題

(i) 臨界安全設計条件の検討

本検討では、燃料を窒化物の状態で取扱う機器についても酸化物相当の臨界 制限値を用いているが、実際には窒化物((U,Pu)N)は一般に酸化物よりも若干臨 界制限が厳しいため、今後は窒化物の臨界制限値を取り入れた臨界安全設計を 行う必要がある。

(ii) 窒化物燃料粉の火災・爆発対策

本検討では、UN粉末の自己発火性からの類推から、窒化物燃料粉の火災・爆 発対策として前処理工程全体をArセル内に設置したが、これは施設にとって大 きな負担となるため、例えば装置単位での火災・爆発対策を講じることにより セルを空気雰囲気にできれば、施設全体として有意な合理化となる可能性があ る。よって今後試験により窒化物燃料粉の反応性を確認し、合理化の可能性を 検討する必要がある。ただしこの時、Arセルには濃縮窒素の濃縮度低下を防ぐ 効果もあることも考慮して、その是非を検討する必要がある。

(iii) <sup>15</sup>N の回収に関する課題

オフガス系からの多重PSA式窒素回収技術は、一般工業界では実績があり、 技術的成立性は高いと考えられるが、回収時の濃縮度の低下が大きい場合には、 その再濃縮を検討する必要がある。

再濃縮の要否、および再濃縮設備の具体的な検討にあたっては、回収率、回 収に伴う濃縮度の低下、同伴する不純物およびDF等の情報が必要となるため、 まずこれらのデータを得ることが必要となる。

この再濃縮を含む回収技術についての経済性の検討を行う際には、<sup>15</sup>N濃縮コ ストとのバランスを考える必要がある。

濃縮コスト>回収(+再濃縮)コスト

となる場合には回収するメリットがあるが、濃縮技術開発によりそのコストが 著しく下がるか、再濃縮設備のコストが著しく高い場合、つまり

濃縮コスト<回収(+再濃縮)コスト

となる場合には、<sup>15</sup>Nを回収せず燃料製造では常に新規に濃縮した窒素を用いる 方が妥当となる。その可能性は低いと考えられるが、その場合には、技術的確 度の低い開発課題を削減できる(酸化設備および窒素回収設備が不要になり、酸 化物燃料再処理プロセスがほぼそのまま利用できるようになる)ことも考慮すべ きである。

また、本システムの設計は、机上検討であるので、模擬ガス、実ガスを使用した窒素回収装置にて実証する必要がある。

(iv) <sup>14</sup>C の回収に関する課題

本検討では、濃縮度99.9%の<sup>15</sup>N濃縮窒素を使用しても、<sup>14</sup>Cの回収を行う必要 があるとの保守的な仮定をおいている。今後検討を進めるにあたっては、窒化 物燃料を採用する場合の濃縮度(99.9%を下限として標準値を何%とするか)、 その場合の濃縮コスト、<sup>14</sup>Cの発生量、再処理施設における<sup>14</sup>Cの回収の必要性等 を評価する必要がある。

回収の必要がなくなれば、その回収設備が不要になるほか、処分の困難な<sup>14</sup>C 廃棄物の発生もなくなる。さらに湿式再処理の場合は溶解設備をArセルに入れ る必要がなくなることにより、Arセルの範囲を狭めることが可能となる。

<sup>14</sup>Cの回収を行う場合には、回収技術の選定に当たって処分方法が重要となり、 その検討を進める必要がある。

(2) 各工程の技術課題

本検討の範囲における特徴的な工程は、酸化工程、オフガス処理工程であり 被覆粒子燃料の場合にはさらに解体・せん断工程、脱被覆工程が加わる。これら における技術課題について以下で述べる。

(i) 解体・せん断工程

被覆粒子燃料の場合、燃料集合体仕様が異なるため、その解体方法に関して、 燃料コンパートメントのせん断性および粒子燃料を取り出すために必要なせん 断面クリアランス、粒子燃料と燃料コンパートメントとの癒着程度、せん断時 に飛散する粒子燃料のハンドリング性といった点について明らかにする必要が ある。

さらに、燃料コンパートメントの構造材がSiCであることから、照射後に<sup>14</sup>C が生成するため、その回収方法についても検討が必要である。 (ii) 脱被覆工程

脱被覆工程に関してはいずれの方法についても、概念設計までの段階である ことから、まず、基礎試験によるプロセス成立性の確認が必要である。

化学的脱被覆については、フッ化物揮発により脱被覆できる程度の検証、フ ッ化物揮発処理の際発生するNF<sub>3</sub>(ガス:沸点-120℃)の処理、回収、リサイ クル、TiF<sub>4</sub>からTiNへの転換技術、ガス発生に伴う負圧管理への影響等が考えら れる。特に、NF<sub>3</sub>の処理、回収では図 4.7.4に示すプロセスフローが考えられて いる。このプロセスフローでは、UNなどのフッ化条件が解明できれば、再処理 もフッ化物揮発法を採用し、フッ化炉の脱被覆および再処理兼用によるプロセ スの簡素化を図ることも可能と考えられる。

機械的脱被覆については、被覆材中の<sup>15</sup>Nの回収が難しいことのほか、ダイヤ モンドに近い硬度と高融点(2950℃)のTiNの破砕方法(機械破砕、加熱・酸 化)の検証、TiNの破砕による機器寿命の低下(破砕機は定期交換機器となると 考えられる。)、破砕機使用による空気使用量の増加に伴う負圧管理への影響、 破砕粉のハンドリング等が考えられる。

また、脱被覆・酸化物転換後は従来の方式で対応可能であるが、被覆材、構造材成分が工程内でどのような挙動を示すかを明らかにすることが重要と考えられる。

(iii) 酸化工程

本プロセスは窒化物燃料再処理プロセスとしての提案例はあるが、開発実績 としては基礎試験例がいくつかあるのみである。したがって、まずプロセスの 成立性の確認を目的とした基礎試験により、酸化ガスの種類や酸化温度をパラ メータに、処理速度、各核種の酸化率、オフガス移行率・移行形態、酸化U/Pu/MA の性状、溶解特性、不溶解残渣移行率、不溶解残渣特性等の確認が必要である。 オフガスへの移行形態については、窒素がN2以外の形態、特にNOxになりうる か否か、N2に限定できる条件があるかどうかの確認が重要である。

(iv) オフガス処理工程

<sup>14</sup>Cの回収については、本検討では仮にBa(OH)<sub>2</sub>・8H<sub>2</sub>Oの吸着カラムによる乾 式回収法を採用したが、処分方法との整合性等を考慮した最適な技術を選択す る必要がある。Ba(OH)<sub>2</sub>・8H<sub>2</sub>Oによる吸着法を採用する場合には、ヨウ素吸着 や水分除去等、他のオフガス処理設備との整合性について検討を行う必要があ る。

<sup>15</sup>Nの回収については、回収技術としてPSAを採用しているが、その回収率、

回収後の濃縮度の低下率、DF(回収した窒素に含まれる不純物の割合および放射能)を確認する必要がある。

4.7.6 技術的成立性評価

窒化物に対応する湿式再処理システムについては、機器の概念、全工程を通 じてのシステム設計を実施していないため、定性的な評価とならざるを得ない が、上記工程を追加した再処理システムの技術的成立性について評価を試みる。

表 4.7.1に、上記技術の設計要求および現状についてまとめた。表 4.7.1に示 すとおり、試験による裏付けがない事項が多いが、2つの脱被覆方法を比べた場 合、機器交換頻度を下げるという観点からは、フッ化による化学的脱被覆法の ほうが有利ではないかと思われる。ただし、当然ながら酸化物燃料に対応した 湿式再処理システムに比べると技術的成立性はかなり低いと考えられる。窒化 物燃料に対応した再処理技術については、今後も研究開発の成果について注視 しつつ検討を進めていく必要がある。

# [参考文献]

- 1) 秋元勇巳,小島賢:"窒化物の化学的性質",原子力工業,Vol. 15, p.71 (1969).
- Hj, Matzke : "Science of Advanced LMFBR Fuels", North-Holland Physics Publishing, p.629 (1986).

主要設備	主要な技術	設計要求	技術的成立性 (原理確認基礎データ、実績、開発状況等根拠)
再処理	脱被覆/化学 処理	回収率 ・U/TRU : 99%以上	<ul> <li>・脱被覆については化学的脱被覆(フッ化)により対応可能と予測。フッ化反応条件の確認が必要。機械的破砕法は成立性の確認が必要。</li> <li>・被覆層からのTRUの回収については、TRUの被覆層中への移行量、溶解挙動等を確認する必要がある。</li> <li>・脱被覆・酸化物転換後は従来の方式で対応可能であるが、被覆材、構造材成分の工程内挙動の把握が必要。</li> </ul>
	窒素回収	窒素回収性能 製品窒素純度99.9%	多重PSA式窒素回収技術は、一般工業界では、実績がある。 本システムの設計は、机上検討であるので、模擬ガス、実
		窒素回収率90%以上	ガスを使用した窒素回収装置にて実証する必要がある。

衣 4.1.1 至旧物放復私了燃料开处型VX机时成立任时间	表 4.7.1	窒化物被覆粒子燃料再処理の技術的成立性評価
-------------------------------	---------	-----------------------







図 4.7.1 窒化物燃料再処理の概略フロー









<u>SOG/00G処理系</u>



図 4.7.3 窒化物燃料湿式再処理オフガス処理概略フロー



図 4.7.4 フッ化物揮発法を用いた脱被覆プロセスフロー

#### 4.8 技術開発項目

先進湿式法と超臨界直接抽出法に関する今後の技術開発項目をまとめる。概要を表 4.8.1に示す。

4.8.1 先進湿式法 (NEXT 法)

(1) 溶解

溶解工程は重金属を高濃度で含む溶解液を得る条件を設定している。この溶 液を得るために必要な操作条件、すなわち、燃料の性状、温度および時間を決 定することは重要である。特に、実験研究により溶解に供する燃料の性状を特 定することは、機械的前処理工程の開発の目標を与えるので優先度が高い。

(2) 晶析法

晶析工程においては、高濃度の Pu および硝酸を含む水溶液からU を選択的 に析出させる条件を特定することが重要である。このような系での実験データ は極く少ないので、精力的に実験を行い、分離条件の特定、分離機構の解明、 分離機構のモデル化を行う必要がある。

晶析のための機器としてロータリーキルン型の装置を検討している。所定の 処理量、回収率および除染性能を達成する可能性を早期に見極める必要がある。 これらの性能は機器に依存するので、装置の型式を早期に選定し、具体的な機 器の検討をプロセスと並行して進める必要がある。

晶析工程の実現性は、高濃度に重金属を含む溶液を調製できるか否かに影響 を受ける。せん段から抽出工程までを広範に検討し、燃料を粉体化する工程の 必要性を見極める必要がある。検討の項目には、溶解に供する燃料の性状、溶 解の速度や回収率、恒温条件で行うことが必要となる清澄や溶液の移送、Puな どの原子価調整の方法、抽出工程に与える影響などが含まれる。必要に応じて これに関する開発を行うことになる。

(3) 簡素化溶媒抽出法(Simplified PUREX 法)

遠心抽出器によるシステムでの分離性能を確証する必要がある。小規模な試験では、回収率および除染係数の実証、各種条件が変動した際の影響や異常時 挙動の調査が重要である。また、実規模の装置を用いた試験では、主に U を用 いてのシステム挙動の把握が重要である。

プロセスフローシートの決定においては、機器仕様を考慮して温度制御の必要性、Np 回収方法の確定が重要である。前者は特に U 逆抽出工程の最適化に

係わる。後者は、現在、共除染工程での Np(V) の自動的な酸化に期待したフ ローシートとしているが、原子価を積極的に制御することの必要性を議論すべ きである。

(4) 抽出クロマトグラフィー

結果として CMPO と Cyanex 301 を使用した抽出クロマトグラフィーを 選定したが、検討の焦点は遠心抽出器を用いる液液抽出法と SiO<sub>2</sub>-P を充填し たカラムクロマトグラフィーの相互比較にあったと言える。すなわち、被処理 液に含まれる目的とする金属イオンの濃度が希薄な場合には、遠心抽出器に基 づくシステムに比べてカラム法が有利になりうるということである。SiO<sub>2</sub>-P の 利用においては SDB 上の官能基や抽出剤を替えることにより吸着材の機能を 様々に制御することができる。この性質を利用し、さらに簡素な工程を得るよ う検討を進めることが重要である。

Cyanex 301 は An(III) と希土類元素の相互分離性能に優れるが、抽出剤が 容易に劣化し性能が低下するので、その取り扱いは非常に困難となる問題があ る。An(III) と希土類元素を相互に分離する別の抽出剤の利用などを検討する必 要がある。アミン抽出法はこの目的に活用することができる。

本検討では、CMPO サイクルは典型的な TRUEX 法のフローシートに対応 するものとした。SETFICS 法に準じて同一の設備を用いて処理をすると、希 土類元素を除去した An(III) を得るとともに、塩析剤を不要とする可能性があ る。SETFICS フローシートの適用はコールドでのカラム試験により実現性が 調べられており<sup>1)</sup>、その有用性を評価することが望ましい。

また、付加的な機能として Am と Cm の相互分離を陽イオン交換により行 うことも考えられる。スルホン酸基を有する SiO<sub>2</sub>-P を合成し、陽イオン交換 体として用いる試験が成功しており<sup>20</sup>、将来的な選択肢として考えることがで きる。

フローシートに関しては、CMPO サイクルと Cyanex サイクルによる分離 に拘ることなく、目的に合わせて様々な選択肢から最適化されたプロセスを構 築する取り組みが必要と考えられる。

現時点では、機器設計に取り組んでいないが、閉じこめ安全を考慮したカラ ム装置や、適切な製品溶液の分画を実現する制御機構の設計に取り組むべきで ある。

SiO<sub>2</sub>-P を利用する技術は(財)産業創造研究所が主体的に進めており、協力 して効率的に研究開発を進めていくことが望まれる。

Am と Cm の回収に関する技術については、日本原子力研究所がアミド系抽 出剤である TODGAを利用した方法を、仏国原子力庁(CEA)が窒素系配位子 を有する R-BTPを利用した方法をそれぞれ研究しており、これらの動向を把握 しつつ研究開発を進める必要がある。CEA が研究する SESAME 法は Am の 酸化と抽出を行う技術であり、アミン抽出法の開発と関連するので、これにも 注意を払うべきである。

(5) 廃棄物処理

廃液処理は二極化を目的として構成を構築している。蒸留工程と同様に廃液 処理工程も最小化するよう検討を深めていくことが必要と考えられる。施設内 で最終処分に適合する形態に廃棄物を加工することが重要であり、低レベルの 廃棄物処分方策の検討の進捗に伴い、適宜設計内容を見直していくことが必要 である。また、固体廃棄物処理も廃液と同様に最小化を図ることが重要である。

4.8.2 代替補完技術

(1) 超臨界直接抽出法(Super-DIREX 法)

現時点において、技術的成立性が確証されたとは言い難いと考えられる。こ のためには、さらなる実験データの積み重ねが必要である。

主たる工程である直接抽出過程の実現性を確認することが最重要である。混 合酸化物燃料からの U および Pu の回収特性、その他の成分との分離特性お よび分離された残渣の性状の把握が必要である。これらは、平衡状態とともに 過渡特性を知ることが重要である。また、機器の設計に必要な物性値、例えば U や Pu 錯体等の溶解度や密度に関するデータを揃えなければならない。

逆抽出および溶媒洗浄は水溶液との二相系となるので、直接抽出工程とは別 に操作条件を設定することになる。こちらも上記と同様の取り組みを要する。

MOX 燃料を用いた実証試験を行い、分離性能を明らかにする必要がある。試験は使用済燃料を用いることが望ましい。

上記のプロセス開発に基づき、機器の仕様を詳細化しなければならない。高 圧ガス保安法に係わる設備となるので、法の順守に必要な検査等の方策をでき るだけ具体的に検討する必要がある。

2015年を目安に技術体系を確立するには、実験研究と設計研究を並行して、かつかなりの資源を投入した取り組みが必要であると考えられる。

(2) SETFICS 法

MAREC 法をリファレンスとしたので、これに対する代替技術として検討を 進めることとなる。

遠心抽出器を用いてのプロセス実証が最優先課題である。

発生廃棄物を最小化するための薬品の再利用方法の検討、HEDTA などの代替キレート剤の適用検討、溶媒の劣化や再製に関する検討が重要である。

(3) アミン抽出法

高酸性溶液中におけるAm および Cm の酸化は非常に難しい技術であり、研 究開発は基礎的なものであると認識して進めなければならない。また、Am の 低酸濃度あるいはアルカリ溶液中での酸化は比較的容易で、Am/Cm の相互分 離技術として適用できる。本法は、より基礎的な技術であると認識し、Am/Cm 分離などの補完技術を目的として取り組むことが妥当と考えられる。

# [参考文献]

- 1) 倉岡 悦周,他:"抽出クロマト法によるMA回収設備の概念検討", JNC TJ8400 2002-005 (2002).
- 2) 倉岡 悦周, 新井 剛:"陽イオン交換試験", JNC TJ8420 2002-003 (2002).
| 工程     | 開発対象技術                    | 先進湿式法 (NEXT 法)   | 超臨界直接抽出法(Super-DIREX 法)  |
|--------|---------------------------|--|--|
|        |                           | 安全設計方針・技術基準・溶接基準・材                                     |  |
| 全般     | システム設計                    | 料選定基準等整備 ・ 許認可対応 データ取<br>得                             | 同左   |
|        |                           | 安全設計<br>・臨界設計、耐震設計、閉込め(含漏洩<br><u>対策)、火災・爆発防止、等</u>     | 同左   |
|        |                           | 安全評価<br>・決定論的安全評価、確率論的安全評価                             | 同左   |
|        |                           |  | 計量管理<br>・ (入/出量)計量管理時のサンプル代表<br>性等の評価<br>・適時性計量管理技術確立の為のNRTAシ<br>ステム笑の目体化  |
|        |                           | 廃止措置の評価  |  |
| 前処理    | 集合体解体                     | 機器交換頻度の検討<br>高効率機器の開発(機械式又はレーザー<br>ゴ                   | 间左<br>同左   |
|        | 機械式脱被覆・せん<br><sup>段</sup> | 高効率機器の開発   |  |
|        | ☆<br>機械式脱被覆・粉化<br>(*)     | 機械的破砕機器の開発   | 同左   |
|        |                           | ハル分離技術の開発  | 同左   |
|        | 熱的脱被覆 (*)<br>(*)候補技術      | バル元序役前の開発  | 回22<br>高Pu富化度燃料への適用性の確認<br>燃料回収率の確認<br>脱被覆工程でのFP分離性能の確認<br>照射変形した燃料の脱被覆性検討 |
|        | 溶解                        | 高金属濃度を達成する溶解操作条件の最<br>適化<br>燃料を粉体化する工程の導入による処理<br>の高速化 |  |
|        | 清澄                        | 高金属濃度溶液を処理する恒温条件での<br>処理                               |  |
| 分離     | 晶析                        | 最適な分離操作条件の確立<br>上記に伴い装置の開発                             | 同左同左   |
|        | 簡素化溶媒抽出                   | 遠心抽出器を用いたシステムにおける分<br>離挙動の確証<br>Npの高回収を得る操作条件の最適化      |  |
|        | 抽出クロマトグラフィー               | 抽出剤の選定<br>フローシートの確定<br>機器開発と実証                         |  |
|        | 直接抽出                      |  | 分離特性、残渣性状の把握<br>主要成分の物質収支の把握<br>基礎物性値の収集<br>装置開発(高圧機器としての対応を含<br>む)        |
|        | 逆抽出・溶媒洗浄                  |  | 分離特性の把握<br>主要成分の物質収支の把握<br>装置開発(高圧機器としての対応を含<br>む)                         |
|        | MA 回収                     |  | 抽出剤の選定<br>分離特性の把握<br>主要成分の物質収支の把握  |
| 廃液処理   | 水溶液                       | ニ極化処理の実証<br>処理工程の最小化                                   | 同左同左   |
|        | 有機溶媒                      | 処理工程の最小化   | 同左<br>高粘性物質の取扱い  |
| 固体廃棄物処 | ガラス固化                     | 稼働率の向上等の改良   | 同左<br>固体として回収される残渣の処理  |
|        | 低放射性廃棄物                   | 処理工程の最小化   | 同左   |
| LLFP回収 | I                         | 回収プロセスの開発  | 同左   |

表 4.8.1 湿式再処理システムにおける技術課題の整理

## 5. 酸化物電解法

## 5.1 酸化物電解法の概要

ロシアの原子炉科学研究所(RIAR: Research Institute of Atomic Reactors) において1960年代から高温電気化学再処理技術の開発が進められてきた<sup>1)</sup>。この 技術は、酸化雰囲気で溶融塩中に燃料物質を溶解し、電位および酸素ポテンシ ャルを制御することにより(U,Pu)O<sub>2</sub>として陰極表面上に電解析出させるもので ある。析出物が顆粒状であるため、当初は高DFのUとPuによる酸化物を用いて 振動充填法による燃料製造のための顆粒製造技術として開発されてきたものを、 電解制御によるFPとの弁別を図ることで、再処理技術としての応用が進められ てきた。顆粒状でかつPu偏差の低減が図られることから、振動充填法との相性 が良く、その組み合わせでは効率的な再処理・燃料製造システムが期待されて おり、ロシア解体プルトニウム処分においても研究が進められている<sup>2)</sup>。

フェーズ I における酸化物電解法は、この技術に工業規模での取り扱いや設 計要求を満たす観点から工程の変更・追加によるプロセスの改良を行ったもの である<sup>3)</sup>。フェーズ II では、この酸化物電解法に対して、

①小型プラントにおける経済性向上、

②運転・保守といった操業性の向上、

③国内外の要素技術試験成果等の反映、

等を踏まえて、より合理的なプロセスおよびシステムを検討した。具体的には、

- ①貴金属コーティング陰極による NM の分離電解回収技術
- ②減圧蒸留法による析出物中の溶融塩除去技術
- ③キャンペーン運転による機器台数削減方策を用いた廃棄物処理システム 技術

等を採用した。以下、本技術に対して、プロセス構築、システム設計、および 技術的評価を行った結果について示す。 5.2 リファレンスシステムの設計(酸化物燃料対応)

5.2.1 施設概念構築

(1) プロセス

酸化物電解法のプロセスフロー概念図を図 5.2.1に示す。また、以下に主要となるプロセスの概要を述べる。

(i) 前処理工程

前処理工程は、使用済燃料集合体を受け入れて燃料物質を取り出し、次工程 である燃料処理工程に払い出すまでの工程であり、集合体受入、集合体解体、 脱被覆、粉体混合、ハル洗浄で構成される。

燃料貯蔵施設に保管してある使用済燃料集合体を受け入れ、ピン単位に解体 する。次にピンの脱被覆を行うが、燃料は電解処理で用いる溶融塩中に溶解し やすいように機械的処理により粉体化され、取り出される。この粉体燃料は組 成を均一化させるために混合処理される。

この一連の操作は内側炉心燃料、外側炉心燃料、径ブランケット燃料の3種類の集合体に対して実施するため、3種類の粉体燃料が発生する。電解工程へ払い 出す燃料は一定の組成とするため、この3種類の燃料を一定比率で混合処理した のち払い出す。

機械的脱被覆で発生したハルには燃料が付着している。資源有効利用性の観 点から、このハルを洗浄し、付着燃料を回収する。

なお、フェーズIでは、径ブランケット燃料を熱処理し、揮発性FPを除去す る簡易再処理を行い、実際の電解工程では炉心燃料と軸ブランケット燃料のみ を処理する径ブランケットバイパス処理法が提案されており、フェーズIIにお いても6.3で述べる金属電解法再処理システムに採用されている。しかし、酸化 物電解法にこのバイパス処理法を採用するとした場合、電解工程に進む燃料処 理量を低減することができるが、Pu富化度が増加するため、1バッチの処理量が 従来の7割程度に低減する。また、熱処理工程、熱処理した径ブランケット燃料 粉末を顆粒にする工程を付加する必要があり、再処理製品が顆粒で得られると いう酸化物電解法のメリットが低減する。以上の理由から、酸化物電解法では 径ブランケットバイパス処理法は採用しないこととした。

(ii) 電解分離工程

電解分離工程は、前処理工程から受け入れた燃料を電解により処理し、U、

Pu等の核物質とFPを分離する工程であり、同時電解、塩素化溶解、貴金属(NM) 分離電解、MOX共析、絞り電解で構成される。

(a) 同時電解

前処理工程から受け入れた燃料粉体は電解処理を行うために、まず NaCl-2CsCl共晶塩中に塩素を用いて溶解させる必要がある。また、最終的に製品としての仕様を満たした(U,Pu)O<sub>2</sub>としてPuを電解回収するには、初期の燃料中のPu富化度が約10%と低いため、UO<sub>2</sub>の一部を先に回収し、Pu富化度を 30%程度まで上げておく必要がある。

従来の方法では、まず燃料すべてを塩素により溶融塩中に溶解し、その後 UO<sub>2</sub>を電解回収していたが、この方法では溶解に用いる塩素量が多く、また全 量溶解後に電解回収するため処理時間が長くなる。

これらを改善する方法として、酸化物電解法では同時電解法を採用した。この方法は、燃料溶解とUO2回収を同時に行うものである。つまり、電解条件を制御することで陽極溶解速度と陰極析出速度を同等に保ちながら、陽極においてUO2を酸塩化物として溶融塩中に溶解させ、同時に陰極ではUO2を析出させる。なお、電解を促進させるためには溶融塩中のUO2<sup>2+</sup>濃度をある程度高めておく必要があり、そのためにこの溶融塩にはあらかじめ一定量のUO2を塩素により溶解させたものを用いる。

その結果、塩素化溶解から陽極溶解とすることで塩素使用量の大幅な低減が図られるとともに、溶解とUO2回収を同時に進めることで処理速度の短縮が図られる。

(b) 塩素化溶解/NM 分離電解

同時電解で一定量のUO<sub>2</sub>を陰極表面上に析出回収した後、溶融塩中には未溶 解のUO<sub>2</sub>、PuO<sub>2</sub>およびMAが残存しており、これらの溶け残った燃料を塩素を 吹き込むことにより溶解する(塩素化溶解)。

(U,Pu)O<sub>2</sub>を電解回収する時、酸化還元電位の関係からNMも同時に回収され、 再処理製品へのFP混入量の増大から製品品質の低下を招く。そこで、MOX共析 工程よりも前に溶融塩中のNMを除去するために、低電流密度法でNMを電解に より析出回収する工程を設けた(NM分離電解)。また、従来の陰極にはパイロ グラファイト製のものを使用していたが、この場合、NMとともにUO<sub>2</sub>の一部が 析出し、この析出物は廃棄物側に移行するため、資源有効利用性の観点から改 善の必要があった。そこで、貴金属コーティングした陰極を採用した。U-Pd-Rh を用いた国内での試験結果から、貴金属コーティングした陰極を用いることで 析出物中へのUO<sub>2</sub>の混入を防止することができることが分かっている。 (c) MOX 共析

NM分離電解後、溶融塩中を酸化雰囲気にし、UO<sub>2</sub>とPuO<sub>2</sub>を(U,Pu)O<sub>2</sub>として 同時に電解析出する。

Puは溶融塩中ではIV価のPu<sup>4+</sup>で存在する。この場合、Puは電解により金属として回収される。また、UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>→UO<sub>2</sub>の還元電位に対して、Pu<sup>4+</sup>→Puの還元電位が低いことから、UO<sub>2</sub>の析出が早く共析は困難である。しかしながら、酸素吹き込みにより溶融塩中を酸化雰囲気にすると、PuはVI価のPuO<sub>2</sub><sup>2+</sup>となり電解による酸化物回収が可能となる。また、PuO<sub>2</sub><sup>2+</sup>→PuO<sub>2</sub>の還元電位はUO<sub>2</sub>の析出電位と同等であり共析が可能となる。以上から、電位、酸素ポテンシャルを制御することにより(U,Pu)O<sub>2</sub>の回収が可能となる。

なお、酸化雰囲気においては $PuO_2$ の沈殿析出が考えられ、これを防止する必要がある。そこで、酸素とともに塩素の吹き込みを行う。溶融塩中の溶存塩素量の増加とともに、 $PuO_2^{2+}$ の溶解度が増加することが知られている。また、 $PuO_2^{2+}$ の溶融塩中での安定性を高めるために、原子半径の大きいCsCl系の溶融塩を採用している。

なお、PuO<sub>2</sub>は非伝導体であるため、PuO<sub>2</sub>のみが陰極表面上に析出すると電解 が停止してしまう。よって、この方法ではPuO<sub>2</sub>の単独回収は困難であり、導電 性のUO<sub>2</sub>とともに共析するので、核拡散抵抗性の観点からもメリットがある。

(d) 絞り電解

以上で示した同時電解からMOX共析の工程を繰り返し実施することで、 UO<sub>2</sub>とMOX((U,Pu)O<sub>2</sub>)を顆粒状で得ることができるが、アルカリ金属FP、ア ルカリ土類金属FP、希土類FP、MAは溶融塩中に蓄積することになる。そこで、 同時電解からMOX共析の工程を20回繰り返してある程度MAの濃度が高くなっ た時点で、環境負荷低減と資源有効利用性の観点からMAを電解により析出させ る。また、同時に溶融塩中に残留しているPuO<sub>2</sub>を析出させ、回収する。MAの 電解回収ではUO<sub>2</sub>が同伴するため、同時電解前にあらかじめ投入したUO<sub>2</sub>を製品 中に回収してしまう恐れがある。そこで、同時電解前にあらかじめ溶融塩中に 溶解させたUO<sub>2</sub>を、UO<sub>2</sub>の析出電位で溶融塩中の90%程度まで電解回収する。 MAの析出電位は-3V程度でありUO<sub>2</sub>の析出電位よりも低いため、UO<sub>2</sub>単独の回 収が可能である。しかしながら、塩の分解電位である-3.5Vを越えないように電 位を制御して析出させる必要がある。

(iii) 溶融塩リサイクル工程

絞り電解後の浴塩中のFPとしてアルカリ金属、アルカリ土類金属、希土類が 存在する。この溶融塩をFPとともに廃棄する場合、廃棄物発生量が増加するこ とになる。そこで、環境負荷低減の観点から溶融塩をリサイクルするため、残 りのFPの除去工程を設ける。

絞り電解後、リン酸塩(Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>とCs<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)を投入し、化学反応によりアルカ リ土類金属FP、希土類FPを沈殿回収する(リン酸沈殿処理)。希土類FPを高 効率で回収するために、希土類FPと等モル以上(1.5倍程度)のリン酸塩を投入 するが、未反応のリン酸は塩素吹き込みにより塩化リンとして揮発させオフガ ス系にて回収する。このプロセスでは、沈殿回収時、未反応リン酸処理時に副 生成物としてNaCl、CsClが発生する。この副生成物の発生により溶融塩が増加 するため、余剰分を抜き取る。アルカリ金属FPは、この余剰塩に含まれる分だ け除去されることになる。

余剰塩回収後の溶融塩にはアルカリ金属FPの一部が存在するが、この溶融塩 を再度電解処理に用いる。

(iv) 塩除去工程

同時電解、MOX共析、絞り電解による陰極析出物には溶融塩が付着しており、 製品として払い出すためにはこれを除去する必要がある。従来法ではロシア RIAR等で実績のある水洗方式を採用していた。しかし、この方法では水を使用 することから臨界管理上の制約を考慮する必要があった。電解工程と塩除去工 程は一連の流れで進めるため同一セルに配置するのが望ましいが、この場合に は電解工程も臨界管理上の制約を受けることになるため、塩除去工程は独立し たセルに配置する必要がある。

その他の方法として、米国ANL等で金属燃料を対象とした実績のある減圧蒸 留法がある<sup>(4)</sup>。これは減圧高温下で、塩を蒸留し除去するもので、水を使わない ため臨界管理がより容易であり、電解工程と同一のセルに配置することが可能 である。

減圧蒸留法を酸化物燃料へ適用することについては、塩の残留率等、今後R&D を進めて確認していく必要があるが、水洗方式に比べてセルの統合等で施設設 計の合理化が図れるため、塩除去方法としてこれを採用した。

以上(i)から(iv)により、再処理製品として、UO<sub>2</sub>顆粒、MOX顆粒、MA(+UO<sub>2</sub>) 顆粒が生成する。また、廃棄物としてはNM分離電解で分離されたNM、リン酸 による沈殿物、余剰塩があり、NMについては金属インゴットとして、リン酸沈 殿物、余剰塩についてはそれぞれ鉛リン酸ガラス、フツリン酸ガラスとして固 化する。

(2) 物質収支

(1)のプロセス概念をもとにプロセスフローダイアグラム (PFD) を検討

し、物質収支を評価した。

(i) プロセスブロックフロー

概略のプロセスブロックフローを図 5.2.2に示す。脱被覆後の燃料は電解工程 とハル洗浄工程に進む。電解工程では同時電解からMOX共析まで一連の処理が 行われ、UO2析出物、NM析出物、MOX析出物が生成する。MOX共析後の溶融 塩は、再び脱被覆後の燃料を受け入れ同時電解から処理される。また、ハル洗 浄工程に移行した燃料はハルから分離され、そのHM量が電解工程1バッチ分に 達したときに、電解工程に移行する。

電解工程で繰り返し処理が行われ、希土類等のFPおよびMAが蓄積する。そこで、20サイクル処理を繰り返した後、絞り電解を行い、TRU析出物として回収する。その後、リン酸沈殿、余剰塩回収を行い溶融塩中にアルカリ金属の一部のみとなる状態として、再び電解処理を行う。

(ii) 移行率の設定と根拠

各工程における元素の移行率は、HMについては各元素毎に設定し、FPについては化学的性質の類似した8つのグループに分けて設定した。FPのグループは以下の通りである。

- ・アルカリ金属元素(ALM)
- ・アルカリ土類金属元素(ALE)
- ・希土類元素 (RE)
- ・貴金属元素 (NM)
- ・ハロゲン元素(HG)
- ・揮発性元素(VFP):塩化物が溶融塩の処理温度以下で揮発する元素。
- ・希ガス元素 (NG)
- ・トリチウム (T)

各工程で設定した移行率を表 5.2.1~表 5.2.2に示す。

脱被覆における移行率は、これまで未照射ペレット燃料を用いた実績から照 射燃料を考慮して設定した。電解における移行率は、国内のU試験や、国外の試 験を考慮して設定した。また、同時電解で析出回収するUO<sub>2</sub>は、必要なPu富化 度を得るために約75%を回収するに留めるなど、設計要求も考慮した上で設定 した。

絞り電解における移行率は、これまで試験等の実績が乏しいため、原理を基 にした理論的な解析を行い、その結果を考慮して設定した。このため、実用化 には原理確認を含めた試験データの蓄積が特に重要である。リン酸沈殿におけ る移行率は、国外の試験実績があり、これを考慮して設定した。

HG、NG、Tはいずれも揮発し、オフガス系に100%移行すると設定した。また、VFPの塩化物も溶融塩温度で揮発するため、オフガス系に100%移行すると設定した。

(iii) 物質収支評価

(i)のプロセスフローダイアグラムに基づき、(ii)の移行率を用いて物質収支を 評価した。評価は脱被覆受け入れ量を1日当たりに処理が必要な使用済燃料とし て、これを電解処理の1サイクル目から20サイクル目以降の余剰塩回収まで処理 した場合の、各工程での払出量を算出する。物質収支を簡易的に評価するため に設定した前提条件を以下に示す。

- ・脱被覆で受け入れる燃料は内側炉心、外側炉心、径ブランケットの平均 混合物とする。
- ・ハル洗浄で回収した燃料は次バッチで電解処理に移行する。
- ・浴塩調整用として初期に溶解する UO<sub>2</sub>はカウントしない。

この系の入量は使用済燃料で、出量は製品と廃棄物である。製品としては U 製品(同時電解析出物)、MOX 製品(MOX 共析析出物)、MA 製品(絞り電解析出物)があり、廃棄物としてはハル、NM 分離電解析出物、リン酸沈殿物、余 剰塩、オフガスがある。その他、滞留するところとしては、ハル洗浄で回収し た燃料、電解処理後の溶融塩がある。物質収支結果を一日当たりに規格化した ものを表 5.2.3 に示す。

(iv) HM 回収率および FP 混入率の評価

物質収支評価結果から使用済燃料から製品として回収するHMの回収率、および製品中へのFPの混入率を評価した。各製品へのHMの回収率を表 5.2.4に、FP混入率を表 5.2.5に示す。

HM回収率については、U、Npが最も回収率が高く99.8%で、Puが99.7%、 Amが97.9%であるが、Cmの回収率は94%に留まった。しかしながら、HMトー タルで見ると99.8%の回収率となった。

FP混入率については、同時電解析出物、MOX共析析出物への混入率は各々0.4、 0.6wt%であり、そのほとんどがNMであった。絞り電解析出物にはREが混入す るために、27wt%程度の混入率と大変高いものとなった。しかしながら、絞り 電解析出物は他の2つの析出物よりも絶対量が少ないため、FPトータルで見る と0.65wt%で、設計要求である1.2wt%を十分に下回る値となった。 (3) 廃棄物

今回評価した廃棄物は、プロセス廃棄物、気体廃棄物、液体廃棄物、に大別 して考える。また、廃棄物区分は表 2.3.10に準じて決定する。

(i) プロセス廃棄物

(a) 高レベル廃棄物

物質収支評価結果を基に、その処理方法を検討し、高レベル廃棄物に相当する固体廃棄物についてはその処分廃棄体の発生量を評価した。プロセス廃棄物の処理フローを図 5.2.3に示す。

高レベル廃棄物は、NM分離電解析出物、リン酸沈殿物、余剰塩が対象となる。 NM分離電解析出物は溶融固化により金属インゴット状態で専用容器に詰めて 処分廃棄体とする。

リン酸沈殿物はREを含むことから、フツリン酸ガラスでは添加量の制限が厳 しくなる。よって、鉛リン酸ガラス基材を添加して鉛リン酸ガラス固化するこ ととした。鉛成分はリン酸ガラスを安定させることで知られており、従来のリ ン酸ガラスに比べてリン酸塩の充填率を向上させることができ、充填率は国内 外の実績を考慮して30wt%と設定した。

余剰塩は従来の酸化転換してホウケイ酸ガラス固化する処理方法に対して、 処分固化体発生量を低減する観点から、リン酸による転換処理をして、フツリ ン酸ガラス基材を添加して充填率の高いフツリン酸ガラス固化処分することと した。充填率は国内外の実績を考慮して45wt%と設定した。

高レベル廃棄物の処分廃棄体発生量を表 5.2.6に示す。

(b) TRU 廃棄物等

TRU廃棄物は、ハル廃棄物などの放射能量がTRU廃棄物に区分されるものが 対象となる。処理方法は、基本的には切断後に高圧圧縮し、最終的にモルタル を充填してドラム缶に詰める。

また、高βγ廃棄物はラッパ管が対象となる。ハル廃棄物はローラにより圧 縮し、ドラム缶詰めした後、モルタル充填して固化する。ラッパ管は切断後高 圧圧縮しモルタル充填して固化する。

TRU廃棄物・高βγ廃棄物の処分廃棄体発生量を表 5.2.6に示す。

(ii) 2次廃棄物(機器交換部品)

主要機器および付帯機器における機器交換部品の年間発生量については、機器の設置環境(腐食環境など)および操作環境(動的操作の有無)などを踏ま えて、交換頻度を設定し、算出した。各交換部品をTRUおよびFPとの直接接触 の有無、程度を踏まえて、廃棄物区分毎にまとめた評価結果を表 5.2.7に示す。

(iii) 気体廃棄物

気体廃棄物は、オフガスが対象となる。オフガスに移行するFP元素は、希ガ ス、ハロゲン、トリチウム、および溶融塩温度(約650℃)で揮発性のVFPであ る。希ガスの対象であるKr、Xeは発生量が六ヶ所再処理施設の基準値以内であ るため全量希釈放出とする。ハロゲン(ヨウ素、シュウ素を対象)、トリチウ ム、およびVFPは、いずれも99%が電解工程に移行し、電解装置で全量揮発す るとしている。これらの揮発ガスのうち、ヨウ素以外は凝縮後フィルターで吸 着回収し、ヨウ素は後置のヨウ素除去フィルターで回収する。また、フィルタ ー通過したものについては、塩素をリサイクルするために設ける深冷分離装置 においても凝縮回収される。

よって、物質収支上の気体放出はクリプトン、キセノンに限定されるが、放 出量を評価する上では、希ガス以外のオフガス中FPは深冷分離装置で凝縮され、 粒子状で排気系に移行するとし、後置のHEPAフィルターで回収することとし た。

(iv) 液体廃棄物

メンテナンスなどで発生する除染廃液および分析廃液などを蒸発濃縮処理し た後の凝縮液が液体廃棄物となり、希釈して施設外に放出される。

(4) 機器設計

本プロセスに必要となる機器を洗い出し、それらの機器に対して安全性、運転性能等を考慮した概念設計を行った。

(i) 設計方針

(a) 安全設計

基本的には、現行の湿式法を想定した再処理施設安全審査指針に準拠した設計とし、安全上重要な機能に対しては二重化を行う。さらに、塩素ガスの使用に対しては検知器の設置、二重配管の採用等を行うとともに、高温下での操業など特有の安全対策についても考慮する。

(b) 耐震設計

再処理施設安全審査指針およびそれに準拠した六ヶ所再処理工場の耐震設計 をベースに、内蔵する放射性物質の性状や量に応じて耐震クラス分類を行い、 この耐震クラスに準じた設計を行う。 (c) 臨界設計

基本的には質量管理とする。このシステムで用いる各工程の核的制限値を評価した結果、最も厳しい電解装置内でダブルバッチを考慮した場合にPu6.8kgと評価した。フェーズⅠの設計では電解装置の1バッチ処理量を56kgHMと設定していたが、フェーズⅡにおける燃料組成でも56kgHMに含まれるPu量は核的制限値以下である。よって、フェーズⅠとフェーズⅡの設計横並びを考慮して、フェーズⅡでも電解装置の1バッチ処理量を56kgHMと設定した。

(d) 火災・爆発の防止に関する方針

安全上重要な施設は、原則として、不燃性または難燃性材料を使用する設計 とする。

火災への拡大防止の観点から、機器の異常加熱などを防止するよう設計する。 また、金属の取り扱い等の安全対策も考慮する。

(e) 閉じ込め機能(漏洩の防止などを含む)

電解分離を行う装置等、放射性物質を収納する機器の使用材質は、使用条件 に合わせて適切な材料を選定し、要求される再処理容器区分に合わせた溶接、 検査を想定した設計とする。また、これらの機器等は、通常運転状態での負圧 維持が困難となる場合があるため、セル内負圧担保にて閉じ込める設計とする。

(f) 機器の運転・保守補修

安全上重要な施設は、それらの安全機能を確認するために、必要に応じて、 運転中または定期検査等の停止時に安全機能を損なうことなく適切な方法によ り試験および検査ができる設計とする。

機器の運転は自動運転を基本とする。燃料等物質の移送はすべてセル内のた め、遠隔運転を基本とする。また物質移送は台車、パワーマニピュレータ等で 行い、機器と移送機器との物質の取り合いに関する機構は、各物質移送の操業 性を考慮して機器または移送機器に負荷する。

保守・補修については機器設置位置およびセル内のメンテナンスエリアでの 遠隔保守・補修を原則とし、さらに遠隔保守・補修が困難な場合を考慮して、 機器の除染後に近接保守・補修が可能となるように、保守動線等も含めて配慮 する。具体的には、インセルクレーン、パワーマニピュレータ等の遠隔操作機 器を用いて保守・補修対象機器を当該場所から遠隔保守で取り外した後、メン テナンスエリアに搬出し、直接保守にて行う。

(g) 電源喪失に対する考慮

安全上重要な施設のうち、その安全機能を確保するために電源を必要とする 場合には、必要電源として、外部電源系統および非常用所内電源系統を有する 設計とし、非常用所内電源設備は単一故障を仮定し、独立2系統の設計とする。

(h) 共用の考慮

安全上重要な施設は、燃料製造施設等との共用により、その安全機能を失う ことのない設計とする。

(ii) 機器・設備設計

主要プロセスに必要な機器、および廃棄物処理等の付帯設備に必要な機器に ついて、その仕様と機器概念を検討した。処理時間・処理量等の機器仕様は、 国内・国外の試験実績を考慮した上で工学的判断により決定した。前処理・再 処理を代表する主な機器の概略仕様を表 5.2.8に示す。

(a) 機器台数の評価

各機器の必要台数は運転性も考慮するために、機器仕様をもとにタイムチャートを作成し、その結果を踏まえて評価した。また、前処理と再処理の取り扱う単位が前処理は集合体単位、再処理は燃料量単位と異なるため個別に評価した。

物質収支評価から、前処理で1日に必要な使用済燃料集合体処理量は約 1.67体である。また、再処理で1日に必要な使用済燃料処理量は約234kgHMで ある。これを機器仕様から算出できる処理能力で除した値を暫定の機器台数と して、タイムチャートを作成した。

タイムチャートに考慮した機器は、前処理では集合体解体装置、脱被覆装置、 混合装置(燃料混合、電解用燃料混合)である。再処理では電極等装脱着装置、 電解装置、析出物粉砕装置、析出物掻取装置、塩除去装置である。ハル洗浄装 置については、電解工程への払出が年間に10回程度と少なく年間処理に大きく 影響しないことから、タイムチャートの範囲外とした。タイムチャート結果(処 理1日目から7日目まで)を図 5.2.4に示す。

この暫定機器台数における処理能力は、前処理では2.14体/日、再処理では約 245kgHM/日であり、それぞれ必要処理能力の約1.28倍、約1.05倍となり、必要 処理能力を満足することがわかる。以上から、施設設計、経済性等に必要な機 器台数は暫定機器台数と同数として設計を進めた。機器台数の評価結果を表 5.2.9に示す。

(b) 機器 · 設備

各設備、およびそれを構成する機器について、その概念設計を行った。各設 備の概要を以下に示す。

1) 前処理設備

前処理設備は主に集合体解体装置、脱被覆装置、燃料粉混合装置、電解用燃料混合装置で構成される。例として集合体解体装置の機器概念図を図 5.2.5に示す。

①集合体解体装置

集合体解体装置は、使用済燃料集合体を受け入れ、上部ハンドリング部、ラ ッパ管、下部ノズル部の構造材を解体除去し、後工程である脱被覆工程に燃料 ピンを払い出す装置である。フェーズIのシステム設計研究では、集合体解体 技術として炭酸ガスレーザー方式を採用してきたが、本研究ではYAG (Yttrium Alminium Garnet)レーザー方式を採用した。炭酸ガスレーザー方式はレーザ ービームの伝送に複数の金属面鏡を用いた光学設備が必要であったため、装置 が大型となる他、遠隔操作による光軸の調整作業に課題があった。これに対し て、YAGレーザーの場合、ファイバーを用いてレーザー光を伝送できるため、 光軸調整が不要になり、また、装置が小型化できる可能性を有している。

②脱被覆装置

脱被覆装置は、燃料ピンを受け入れ、被覆管から燃料粉を回収する装置であ る。脱被覆方法として多軸せん断法、熱脱被覆法、ロール矯正法等の研究が進 められている。酸化物電解法に適用する場合、多軸せん断法は燃料ピンをシュ レッダー式で破砕粉体化するもので、同時に大量の燃料処理が行えることから 処理速度が速い。しかし、ハル成分である腐食生成物の混入量が多くなり、こ れが電解工程の効率に大きく影響してしまう。熱脱被覆法は被覆管を短尺せん 断後、熱処理により燃料の酸化還元反応を利用して粉体化するもので、高い燃 料回収率が得られるが、Pu富化度30%程度の高Pu富化度燃料では燃料の粉体化 が困難となる。ロール矯正法は被覆管をロール圧縮で変形させることにより燃 料を粉体化するもので、燃料ピン毎に処理を行うため処理速度が遅いが、ハル 成分の混入は基本的になく、ハル洗浄との組み合わせで高い燃料回収率が得ら れると期待されている。したがって、本検討では燃料の高回収率、ハル成分の 混入防止等の観点からロール矯正法を採用し、脱被覆装置の機器設計を行った。

この装置はラッピングワイヤ除去、ロール矯正、燃料取り出し、被覆管細断 の4工程からなる。燃料ピンのラッピングワイヤを取り除いた後、燃料ピン内 で固形化している燃料をロール矯正によって破砕する。その後、被覆管を中央 から切断し、切断面を下に向け、ハンマーによる打撃振動で燃料粉を叩き出す。 燃料取り出し後の被覆管(ハル)は、資源有効利用の観点から被覆管に固着し た燃料を取り出すため、細断してハル洗浄工程に運ばれる。

③燃料粉混合装置

脱被覆後の燃料粉は、ピン軸方向の燃焼度差等から組成が不均一である。よって、燃料粉混合装置により燃料粉を混合し均一化する。混合後の燃料粉は専

用容器に収納する。ここまでの工程は集合体単位で行われるため、専用容器は 内側炉心燃料、外側炉心燃料、径ブランケット燃料の3種類が発生する。電解工 程にはこれら3種類の燃料の平均組成を受け入れるため、ここで電解用燃料粉混 合装置により3種類の燃料粉を混合し均一化する。ここで均一化された燃料粉は 専用容器で電解処理工程に払い出す。

④ハル洗浄装置

ハルは付着した燃料を回収するためハル洗浄装置に送られる。ハルはアルゴ ン雰囲気下の装置内で溶融塩中に浸され、ハルに残留した燃料は投入した塩化 ジルコニウムにより塩素化され溶融塩中に溶解する。溶出した燃料成分の溶融 塩中濃度が電解処理に移行する量と同等となったところで、電解工程に払い出 される。

2) 電解処理設備

電解処理設備は主に電解装置、電極等装脱着装置、析出物粉砕装置、析出物 掻取装置、塩除去装置で構成される。例として電解装置の機器概念図を図 5.2.6に示す。

①電解装置

電解装置は、使用済燃料粉体を受け入れ、同時電解から絞り電解までの電解 工程、およびリン酸沈殿等の溶融塩リサイクル工程を担う装置である。フェー ズIのシステム設計研究では、ルツボ材料としてパイログラファイトを採用し てきた。パイログラファイト製ルツボは導電性があり、ルツボ自体を陽極とし て使用できる利点があるが、PuO2が塩素でPuCl4になる過程で、パイログラフ ァイトを構成する炭素が酸素と結びつく等により腐食速度が早くなる。そのた め、約1000時間でルツボを交換する必要があり、経済性および操業性に課題が あった。そこで寿命延長の観点から、本研究では緻密化ジルコン(ZrSiO4)を 採用し、概念設計を行った。緻密化ジルコンは、通常多孔質なジルコンを粉末 段階から焼成条件を選んで表面および内部を緻密構造としたものであり、これ まで実施された試験片による耐食性試験研究の結果から耐食性に優れ、1年程 度の運転には十分耐え得る見通しを得た。

装置は、ルツボ・ヒーター等の本体と、搬送容器・電極等をハンドリングお よび移送するための収納容器とに分けられる。収納容器には、燃料粉投入、沈 殿物回収、余剰塩回収のためのプラグと、電極プラグを装脱着させる機構を設 けており、これを付け替えることにより、電解工程、溶融塩リサイクル工程の 各プロセスの運転およびマテリアルハンドリングを可能としている。

電解装置は耐震重要度分類ではAクラスに分類されるが、装置が縦長の形状で 不安定であるため、サポートによる耐震対策を採用すると、セル面積の大幅な 増大が必要となる。そこで、電解装置については床面を部分的に免震構造とすることで対応した。具体的にはセル床面に固定される床部分と免震床から構成され、結果として電解装置はセル床面から約30cmの位置に配置される。

## ②電極等装脱着装置

収納容器に装脱着するプラグを付け替える作業を電解装置に付加すると、電 解装置が複雑化する。そこで、操業性能向上の観点からプラグを付け替える機 能を持つ電極等装脱着装置を配置した。収納容器内に設置するプラグは陰極、 陽極、沈殿物回収用プラグ、余剰塩回収プラグ、燃料粉容器がある。電解装置 の処理運転中に、次工程で電解装置が必要とするプラグを装脱着させることで、 電解装置の円滑な運転を可能にする。

③析出物粉砕装置·析出物掻取装置

電解装置で製品として回収される陰極析出物は同時電解析出物、MOX共析析 出物、絞り電解析出物の3種類がある。析出物粉砕装置は、これらの析出物を陰 極から掻き取り、顆粒状に粉砕する装置である。装置は上部の掻き取り部と下 部の粉砕部で構成され、掻き取りは掻落し板によって剥離させ、粉砕はボール ミルで行う。また、NM分離電解析出については、析出物掻取装置を用いて析出 物を陰極から回収し、NM廃棄物として高レベル放射性廃棄物処理に移行する。

④塩除去装置

析出物粉砕装置で回収・粉砕した製品顆粒には電解時の溶融塩が付着している。塩除去装置はこの塩を回収する装置である。フェーズIでは水洗方式を採用してきたが、湿式法であることから、水洗後の乾燥工程が必要であり、また、臨界安全対策を最小限にするため、この装置を含む工程を個別のセルに配置していた。フェーズIIでは合理化の観点から塩を真空蒸留する方式を採用した。これにより、従来分離していた塩除去工程と電解処理工程を1つのセルに統合することが可能となった。

3) 高レベル放射性廃棄物固化設備

高レベル放射性廃棄物固化設備は主にガラス固化溶融炉、NM溶融炉、リン酸 沈殿物取扱装置で構成される。例としてガラス固化溶融炉の機器概念図を図 5.2.7に示す。

高レベル放射性廃棄物はNM廃棄物、リン酸沈殿物、余剰塩があり、それぞれ 異なる形態で処理を行う。NM廃棄物は金属であるため、NM溶融炉にて溶融し、 専用容器に充填して固化する。専用容器はNMの発熱量を考慮して0.4L容器とし た。

リン酸沈殿物にはリン酸沈殿回収時の溶融塩が付着している。リン酸沈殿物 取扱装置は、基本原理が塩除去装置と同様であり、減圧蒸留によりリン酸沈殿 物から塩を分離する。分離したリン酸沈殿物を誘導加熱方式のガラス固化溶融 炉でガラス基材と混合・溶融し、150Lキャニスターに充填して固化する。

余剰塩は塩化物であり、リン酸を用いてリン酸化物に転換する。その後、ガ ラス基材と混合・溶融し、150Lキャニスターに充填して固化する。

4) 使用済燃料集合体貯蔵設備

使用済燃料集合体貯蔵設備は高速炉から受け入れた使用済燃料を処理前に保 管する設備である。保管は乾式キャスクによる保管方式を採用した。乾式キャ スクへの貯蔵本数は、もんじゅのキャスク設計・発熱量を考慮し設定した。よ って、受入容量が設計要求から1年分333体と設定していることから、キャスク の必要貯蔵本数は34体となる。

5)固体廃棄物処理設備

固体廃棄物処理設備はTRU廃棄物、高βγ廃棄物、低レベル放射性廃棄物、 極低レベル放射性廃棄物を対象として処理し、処分廃棄体とする設備である。 設備合理化のため各廃棄物を処理する機器を共用する。この時、レベルが低い 側の廃棄物が汚染によりレベルが高い側の廃棄物に移行することの無いように、 レベルが低い側の廃棄物から処理を行い、順次放射能レベルを上げるキャンペ ーン運転を1年単位で行う。よって、極低レベル放射性廃棄物から処理を行い、 最終的にTRU廃棄物を処理した後、定期検査時に除染を行い再度極低レベル放 射性廃棄物の処理を行う。

6)液体廃棄物処理設備

液体廃棄物処理設備はメンテナンス等で発生する除染廃液および分析廃液を 対象として処理する設備である。これらの廃液は蒸発濃縮装置で濃縮液と凝縮 液に分離し、濃縮液はセメント固化処理する。また、凝縮液は希釈して施設外 に放出する。

7) 気体廃棄物処理設備

気体廃棄物処理設備は脱被覆、ハル洗浄、電解装置からのオフガスや、廃棄 物処理から発生する排ガスを対象とし、これらを回収処理する設備である。こ れらはそのガス性状に応じて、ベーパートラップ、凝縮器、ヨウ素除去装置等 を設け、最終的にはHEPAフィルターを介して排気筒より大気放出する。

また、電解工程で用いる塩素、ハル洗浄セルの雰囲気に用いるアルゴンについて、その使用量低減の観点からリサイクルする設備を設けている。

8)分析設備

分析設備は臨界管理、計量管理、プロセス管理を目的とした分析を実施する 設備である。分析対象は酸化物(脱被覆後の粉体および電解析出物)および溶 融塩である。分析サンプルは機器に付属したサンプリング装置により採取され た後、専用移送容器に収納され気送管で分析設備に移送される。移送されたサ ンプルは前処理後、ICP-MS、α線スペクトロメータ、化学天秤、密度計等によ り分析を行う。

9) ユーティリティ設備

ユーティリティ設備は主要プロセスの運転に必要な、蒸気、冷却水、冷水、 圧縮空気、プロセスに必要なガス・試薬類を供給する設備である。

(5) 施設設計

(i) 計量管理とセル区分

計量管理は、再処理・燃料製造一体型建屋を想定し、物質収支区域(MBA) として4つに分け、核物質の適切な閉じ込めを行えるように、セルの物理的境界 に一致するように設計した。設定した各MBAの主な工程(分級以降は燃料製造 に関する工程)を下記に記す。

- ・MBA-1:集合体受入・解体、脱被覆、ハル洗浄
- ・MBA-2:電解、析出物粉砕、塩除去、分級
- ・MBA-3:混合、振動充填、集合体組立
- ・MBA-4:新燃料貯蔵

主要測定点(KMP)での計量は、化学測定、重量測定および非破壊測定の何 れか、あるいはそれらの組み合わせによって行う。KMPを含めたMBA計画図を 図 5.2.8に示す。

(ii) セル内機器配置

セル内機器配置設計においては、セル内における運転・保守およびバッファ といった操業性、物質の動線、機器間の干渉等を考慮して合理的な配置を目指 した。

主要工程を内包するセルは、各工程の機能に応じて4分割した。つまり、燃料 搬入セル、集合体解体セル、ハル洗浄セル、電解処理セルである。セルは処理 が円滑に行われる様にセル同士が隣接しており、プロセスの流れに則した形で 配置している。各セルの大きさであるが、セル床面積については、機器のスペ ースの他、動線、機器の干渉を考慮し、また、必要なバッファスペース、保守 用メンテナンススペース等も確保する様に設定した。セル高さについては、内 包する機器の高さおよび上部に配置されるクレーン等の干渉を考慮して設定し た。また、セル壁圧は作業者の被ばくを考慮し一律2mとした。セル容積の結果 を表 5.2.10に示す。

セル外部と各セルの間では、廃棄物、試薬等の受け渡しが必要となるが、そ のアクセスは床面にポートを設置し、階下から搬出入する構造としている。ま た、セル間では、燃料物質等の受け渡しが必要となるが、そのアクセスは隣接 するセル壁にポートを設置し、そこから搬出入する構造としている。

電気、試薬ガス等のセル内への供給は、セル側面および下面から、ケーブル 等で機器近傍まで配して、機器とはマルチコネクタカプラで接続することとした。

各セルにおける機器の配置および物量の動線については、以下の通りである。

(a) 燃料搬入セル

使用済燃料集合体を階下からポートを通して縦向きで搬入する。次工程の集 合体解体は集合体を横向きで処理するため、集合体反転装置が設置される。

(b) 集合体解体セル

集合体解体・脱被覆処理が行われる。集合体解体および脱被覆装置が設置され、燃料粉およびハルはそれぞれ隣接する燃料処理・塩除去セル、ハル洗浄セルに払い出される。解体から脱被覆までは、装置間がベルトコンベア等で連結されており、燃料混合装置とバッファ間、およびポートへの払出は移送台車で行われ、廃棄物の搬出等はPMで行われる。

(c) ハル洗浄セル

ハル洗浄処理が行われる。ハル洗浄装置が設置され、ハルに付着した燃料を 回収する。回収した燃料は、燃料処理・塩除去セルに払い出される。マテハン はセル内に設置されたPMで行う。

(d) 燃料処理・塩除去セル

再処理の主工程である電解処理、および析出物の塩除去処理が行われる。電 解装置、析出物粉砕装置、塩除去装置等が設置される。生成した顆粒は、燃料 製造側へと払い出される。収納容器の移送に関する部分のアクセスは回数が多 いため、合理化を図りモノレールによる搬送方式を採用した。それ以外の燃料 処理に関する部分は、移送台車で行われ、廃棄物の搬出等はPMで行われる。

(iii) 供給試薬・ユーティリティ

酸化物電解法再処理設備に特徴的な供給試薬・ユーティリティは、主に

NaCl-CsCl、リン酸塩、および電気などがある。表 5.2.11に主な供給試薬・ユーティリティの使用目的と使用量を示す。

(iv) 施設概要

以上の設計検討を基に、再処理・燃料製造一体化としての施設設計を行った。 施設は大きく4つの建屋から構成される。つまり、リサイクル(再処理・燃料製 造)建屋、燃料集合体貯蔵建屋、廃棄物処理建屋、廃棄物貯蔵建屋であり、こ れらの建屋が管理棟、排気筒などの関連設備とともに隣接して配置されている。 プラント全体建屋イメージ図を図 5.2.9に、建屋容積の結果を表 5.2.12に示す。

(a) リサイクル建屋

リサイクル建屋は再処理・燃料製造の主要工程の他、高レベル廃棄物処理、 分析、ユーティリティ等を内包する。リサイクル建屋(再処理・燃料製造一体 建屋)の概略平面図を図 5.2.10~図 5.2.13に、立面図を図 5.2.14に示す。

建屋は地下1階、地上3階の4層構造であり、建屋規模は縦58m×横104m×高 さ32mである。地下1階部分は分析セルの他、主に資材置き場とユーティリティ を配置している。また、燃料貯蔵建屋、廃棄物処理建屋、廃棄物貯蔵建屋との 連絡はこの階で行う。地上1、2階部分に吹き抜け状に再処理・燃料製造および 高レベル廃棄物処理に関係するセルを配置している。地上3階部分は中央制御室、 保守エリア、オフガス処理、空調関係等を配置している。

(b) 燃料貯蔵建屋

燃料貯蔵建屋は使用済燃料および新燃料を燃料キャスクにて貯蔵する建屋である。燃料貯蔵建屋の概略平面図を図 5.2.15に、立面図を図 5.2.16に示す。

建屋は地上1階の1層構造であり、建屋規模は縦47m×横42m×高さ28mであ る。地上1階部分にはキャスクを保管するための空間が設けられている。燃料キ ャスクの冷却には自然冷却方式を採用している。また、保障措置上、使用済燃 料キャスク貯蔵エリアと新燃料キャスク貯蔵エリア間をキャスクがクレーンを 用いて移動できない様に、中央に必要高さまでの壁を設けるとともに、搬出入 エリアも個別に設けた。

(c) 廃棄物処理建屋

廃棄物処理建屋は高レベル廃棄物以外の固体廃棄物を処理する建屋である。 廃棄物処理建屋の概略平面図を図 5.2.17~図 5.2.19に、立面図を図 5.2.20に示 す。

建屋は地下1階、地上2階の3層構造であり、建屋規模は縦66m×横57m×高さ 28mである。地上1階部分には処理準備のためのエリアを設け、実際の処理は地 下1階部分で行う。また、キャンペーン運転に必要な廃棄物1年分のバッファス ペースも確保した。地上2階部分は制御室、空調関係等を配置している。

(d) 廃棄物貯蔵建屋

廃棄物貯蔵建屋は高レベル廃棄物、固体廃棄物の処分廃棄体を貯蔵する建屋 である。廃棄物貯蔵建屋の概略平面図を図 5.2.21に、立面図を図 5.2.22に示す。

建屋は地下1階、地上1階の2層構造であり、建屋規模は縦42m×横26m×高 さ40mである。高レベル廃棄物の処分廃棄体は地下1階部分に配置し、固体廃棄 物の処分廃棄体は2階層吹き抜けで配置した。廃棄体の冷却には自然冷却方式を 採用している。

5.2.2 技術評価

(1) 安全性

(i) 安全設計

酸化物電解法に基づくリサイクル施設において、想定される異常事象の抽出 を行い、それら異常の進展シナリオに沿って多重防護概念に基づく安全設計の 検討を行った。

(a) 放射線防護(遮蔽)

再処理工程は全てコンクリートセル内部で実施される。それら主要セルのコ ンクリート壁厚さは2mとし、十分な放射線遮蔽能力を持たせている。ただし、 保守・補修の際には主要セル上部(リサイクル建屋3階)に設けた共用保守室 にセル内機器を取り出すこととしているが、この共用保守室の壁厚は主要セル より薄く設計されている。保守・補修の考え方においては、主要セルより取り 出す際に十分な除染を行うこととしているため、共用補修室に求められる遮蔽 能力は低くすることは可能であるが、主要セル内における除染技術および取り 出す機器の線量の確認方法等に関する技術的確認が必要である。

(b) 放射性物質の閉じ込め

溶液状の放射性物質(溶融塩等)を内蔵する系統および機器は漏洩しがたい 構造とし、万一の漏洩に備え漏洩検知機および容器の二重化又は漏洩液の受け 皿等を用意することとしている。加熱機能をもつ機器については異常加熱によ る機器破損を防止するため、温度監視とインタロックによる加熱停止を可能と する。

またこれら液体を内蔵する装置(電解装置含む)内で発生する気体状の放射 性物質を閉じ込めるために、機器レベルにおいて負圧維持による動的閉じ込め 機能を備えている。特に電解装置では、塩素ガス、酸素ガスの吹き込みを行う ため気体に対する装置自体の閉じ込め能力が高くなるような設計(上蓋に耐熱 ゴムによるシーリング、電極収納容器と槽の接合を二重ドアバルブで行う、溶 融塩ミストトラップの設置等)を行っている。また、これらシール部の健全性 を確保するために冷却空気による除熱を行っているが、冷却機能の喪失や冷却 機能を上回る過加熱(ヒーター異常)を考慮し、冷却機能を二重化すると共に 温度監視とインタロックによるヒーター自動停止機能を装備している。溶融塩 を内蔵する機器の負圧維持に関しての懸念は、排気系での溶融塩の固着による 閉塞である。その防止のため、コールドトラップ等の設備上の対応を検討し、 溶融塩の移行率等の基礎データを取得した上で排気系配管の閉塞が生じない設 計とする必要がある。

酸化物電解法では粉体状の放射性物質を多量に取り扱うので、粉体状の放射 性物質が粉塵として気相中に移行し拡散する可能性がある。ただし、現時点で はこれらの粉塵の発生量は十分少ないと考えているので、固体を取り扱う系統 および機器に動的な閉じ込め機能を持たせていない。したがって、気相に浮遊 して拡散する微量の粉体状の放射性物質の閉じ込めは、セルレベルおよび建屋 レベルでの多重化された負圧機能によって行い、所定の経路を通して適切な除 去処理を行った後、排気筒より排出する設計としている。ただし、浮遊する粉 体状の物質の実際の発生量が上記設計で対応できない程の量になるならば、発 生源周辺に集塵機を設けるなどの対策が必要になると考えられる。

なお多重防護概念に基づいて気体、ミスト(液体)および粉塵(固体)など 気相中を拡散する放射性物質を確実に施設内に閉じ込めるため、外部環境、建 屋、セル、系統および機器の順に圧力を低く維持すると共に、建屋レベルにお いては想定される汚染レベルに応じてホワイト、グリーン、アンバーの区域を 設けてその順に圧力を低く維持する設計としている。

(c) 核燃料物質の臨界安全

核燃料物質の移動はバッチ式の移送機器によるものが基本であり、工程内で 固体、液体など多様な物理形態を取り扱う必要があることから、主たる臨界管 理方法を質量管理とし、容積管理、濃度管理、Pu富化度管理、Pu同位体管理を 適切に組み合わせている。また、主要工程セルでは少量のオイルなどの有機物 を除き、水等の有意な減速材の使用がなく、空気セルにおいては雰囲気の湿度 管理も実施されるため非減速系(乾燥系)である。多数のユニットを一つのセ ル内で扱うことから、複数ユニットの臨界安全管理には移動管理および剛構造 物による隔離距離維持を行う。

設計のベースとなる核的制限値について、現在の設計情報および知見に基づ き再評価を行った(表 5.2.13)。再評価では、各プロセス毎の酸化物燃料の組 成変動、嵩密度変動等を考慮し、電解工程における析出物のPu富化度異常やPu の単独沈殿(残留)などの不確定性に対しても保守的なモデル化を行った。工 程全体の制限値を左右する電解装置取扱量の評価結果(核的制限値)ではフェ ーズI設定値より少なくなるものの、マスバランス評価から算出した実際の工程 取扱量(標準最大値5.91kg-Pu)よりは大きな値となったため臨界安全設計上の 要請からは処理能力の変更は必要ないことが分かった。ただし、最新の設計情 報および知見を反映させるために、フェーズIで設定した核的制限値を再検討す る必要はある。なお、フェーズIではダブルバッチエラーを考慮した安全係数を 用いていた。しかしながら、本システムでは核燃料物質の移送を遠隔自動化さ れた搬送システムによって行うことから、質量管理を適用した施設で、人手に よる移送を行うときに問題となる誤装荷、過装荷等に対して、搬送システム上 に適切なインタロックロジックを組み込むことにより回避可能であると判断し、 再評価ではダブルバッチの安全係数を適用していない。

なお、るつぼ材料をグラファイトからジルコンに変更した場合の影響評価で は、グラファイトの方がジルコンよりも反射体効果が高く、核的に厳しいこと が確認できた。

上記再評価成立の前提となる遠隔自動化操作による誤移送・過装荷の防止に ついては、具体的なシステムの設計が課題である。また、特に電解プロセスに おけるPuの挙動について詳細な挙動、物性等が不明であるため評価モデルでは 保守的な想定をせざるを得ない。核的制限値の設定をより合理的に行うために は、これらプロセスに関する信頼性の高いデータの取得が鍵となる。

なお、設計方針に則り、二重偶発性原理を満足することを目標とするため、 臨界事故の発生は技術的に想定できないほど臨界管理システムの信頼性が高い ものでなくてはならない。したがって、臨界管理システムを担う全ての系統お よび機器を、求められる高い信頼性を満足できるように開発・設計することが 今後の課題である。

(d) 地震に対する考慮

基本的に「再処理施設安全審査指針」、「混合酸化物燃料加工施設安全審査 指針」における耐震要求および六ヶ所再処理工場等の既存施設の耐震設計をベ ースに検討した。主要機器では、地震による機能の喪失がさらに大きな事故の 発生を誘発する可能性は低く、比較的大きな放射能インベントリを保持する電 解装置のみAクラスで、他はBクラスの分類とした。しかしながら、マテハン等 の要求(装置の精緻化・複雑化や保守作業上取り外し可能とする必要があるな ど)から実際の装置設計において指定したグレードの耐震構造を持たせること が困難な場合も考えられる。そのような場合には床免震による耐震グレードの 緩和等を取り入れる方向で考えているが、セルあるいは建屋レベルでの免震化 に関する技術面からの検討については、今後の課題である。 (e) 動的に維持される安全上の機能

酸化物電解法再処理システムの主要工程における核燃料物質の物性は高融 点・高沸点である。したがって、放置した状態では沸騰等の現象により放射性 物質が過剰に気相へ移行する事象は無いと考えられ、その防止のための冷却系 を設ける必要はない。ただし、電解装置では装置の密閉性を高めるために設け られる耐熱ゴムシールの健全性を維持する必要から、電解装置上蓋部を冷却空 気で除熱する。また、上蓋温度の監視とヒータ切断インタロックを併用するこ とにより、冷却機能の喪失によるシール破損を防止する。

一方、セル内部には高温熱源が多数設置されるため、セル雰囲気の温度および圧力上昇を防ぎ、セルレベルの負圧維持および閉じ込めの健全性を維持する セル換気系が安全上重要となる。また、負圧による閉じ込めを維持しているセ ル換気設備および建屋換気設備の動的機器についても独立二系統とし、これら は非常用所内電源系統に接続されている。

したがって、動的機器の単一故障および外部電源喪失を考慮しても、動的に 維持される安全上の機能が喪失することはない。

(f) システムおよびプロセス固有の危険性に対する考慮

酸化物電解法の主要プロセス固有の危険性としては、「絞り電解回収物中に 含まれるTRU合金による火災」、「ハル洗浄工程で使用する塩化ジルコニウム の急激な化学反応」、「電解プロセスで使用する酸素ガスによる火災」、「電 解プロセスで使用する塩素ガスの漏洩」、「高温溶融塩の漏洩による設備損傷」、 「ハンドリングマシンの異常動作等による設備損傷」が挙げられる。

電解工程でAmとCmを回収する絞り電解工程の回収物は、UO<sub>2</sub>と少量のPu、 Am、Cmおよび少量のREの金属の混合状態であると考えられている。重量的に は回収物の重量約12kgの内4.55kg(0.25kgのPu、3.35kgのAmと0.95kgのCm) がTRUの金属状態であることから、自発発火による火災の可能性は十分考えら れる。また、析出物を電解装置から回収した後は空気セルでの取扱いとなる上 に、後工程の粉砕装置で粉砕することから比表面積が増大し、より反応性の高 い性状となる。このTRU金属の火災防止に対して現時点で設計上の防止策は実 装されていない。その理由として、現時点では絞り電解自体のプロセス成立性 を確認している段階であり安全性検討に使用できるデータがほとんど存在しな いこと、およびMA回収プロセスのプロセス選定自体に不確定性が高いことから 工学的な設計を実施できる段階に移れないことが挙げられる。金属状態で取り 扱うプロセスのままであれば、この火災事象に対する防止/事故影響緩和・終息 のための安全設計を行う必要があるが、MA回収プロセス自体の変更も含めた抜 本的なリスク源の排除も検討すべきである。

他に塩化ジルコニウムに関しては、水 (H<sub>2</sub>O)と激しく反応し水素ガスを発生

させる。特に急激に反応した場合には、一気に発生した水素ガスによる圧力波 によって爆発現象を生じる可能性がある。しかしながら、塩化ジルコニウムを 多量に取り扱うハル洗浄工程は工程全体が別セルであり、Ar雰囲気管理がなさ れた気密セルになっている上に、同工程で水は使用しないので上記の急激な化 学反応の発生はない。ただし、同工程セルをArセルにした設計上の主要な理由 は塩化ジルコニウムによる酸化物燃料の還元反応を効率よく進行させるためで あって、安全上の機能ではない。したがって、このArセルは後述する金属電解 法におけるArセルとは機能水準が全く異なる(化学制限値に対する安全上の機 能を期待しない)。

火災の可能性のある酸素ガス(電解プロセス)の使用については、その使用 量が少ないことおよび周辺に可燃物(酸素と急激に反応する物質)が少ないこ とから深刻な火災の可能性はないものと考えている。

電解プロセスで用いる塩素ガスについては、機器レベルでの負圧維持(動的 閉じ込め)とシーリング(静的閉じ込め)により機器外への漏洩を防止し、か つセル雰囲気中の塩素濃度を監視して1ppm以上の塩素を検知した場合には塩 素ガス除去装置により速やかに除去可能な設計としている。また、セル雰囲気 には乾燥空気を使用し、塩素ガスによる腐食が生じ難いようにしている。塩素 ガスの供給系は電解装置他の機器より独立して設置されており、使用した塩素 を回収・再利用するための系統(電解槽のオフガス系統に直列で接続されてい る深冷式分離装置)を設けて排気される塩素ガスの量を低減している。塩素ガ スに起因する腐食の影響は、通常の検査等により対応できる程度の十分緩慢な ものであると考えられる。しかしながら、セルへ漏洩した塩素ガスの排気はセ ル中へ拡散すると共に、セル排気系統および排気筒を通じて施設外に放出され る。したがって、これら動的な閉じ込め系を構成する排気系統の健全性が長期 にわたって確保可能か否かに関する懸念が存在する。特にこれらの系統は定期 的な検査等が難しく、設計寿命も施設寿命と同等と長期にわたって高い信頼性 を要求されるものであり、この懸念に対するより詳細な検討が必要である。

高温の溶融塩を取り扱うことから、高温物の漏洩によってセルライニング等の閉じ込めバウンダリが破損しないように溶融塩を保持する系統および機器は 容器を二重化するか漏洩液受け皿を設け、万一の漏洩の際にも漏洩物が直接セ ルライニングに接触しないような設計としている。

酸化物電解法の再処理システムでは物質移送をハンドリングマシンに依存す る。特に、動線が固定化されていない天井走行クレーン型パワーマニピュレー ターを駆使する設計となっているので、ハンドリングマシンの異常動作等によ る設備損傷に対して十分な配慮が必要である。すなわち、ハンドリングマシン の異常接近・暴走を防止するための対策および保持物の転倒・落下防止の対策 を、マテハン設計・保守補修性の観点と合わせて検討する必要がある。

(ii) 安全評価

(a) 平常時における一般公衆の線量評価

平常時に大気へ放出される主要な放射性物質の量は、基本的に年間処理量 50tHMの酸化物燃料を処理する先進湿式再処理施設と同等と考えられるので、 4.5.2 (1)(ii)で述べる実効線量の評価値を施設の処理規模で補正することに より、平常時に大気へ放出される放射性物質による個人の実効線量を、約1.7 $\mu$ Sv/y(=6.6 $\mu$ Sv/y×(50tHM÷200tHM))と推定した。この値は、判断基準で ある50 $\mu$ Sv/y以下を満足している。

(b) 安全設計評価

上述した安全設計の妥当性を定性的な観点から俯瞰するために、技術的に想定される異常事象の抽出を実施した。明らかにされた事象進展シナリオに対し 多重防護に基づいた適切な安全設計が採られていることを確認するとともに、 設計の現段階において対応が困難あるいは不十分な箇所については課題として 明確化した(表 5.2.14~表 5.2.15)。

決定論的安全性評価では、表 5.2.14~表 5.2.15で選定された事象の内で特に 影響が大きいと考えられる「電解装置内溶融塩の漏洩」と「絞り電解回収物中 TRU金属の火災」を多重防護設計の妥当性を検証するための設計基準事象と見 なして概算評価を行った。なお、両事象ともTRU核種を多く含む状態での事象 であり、内部被ばく評価上相対的に影響の小さくなるFP核種については評価の 簡略化のため省略した。決定論的評価で用いた共通データを表 5.2.16に示す。

なお、確率論的評価は現時点で未実施である。

(c) 電解装置内溶融塩の漏洩

電解装置内のアクチニドのインベントリが最大となるのは、20バッチ目の電 解開始直前である。したがって、この状態にある時に何らかの理由(腐食ある いは物理的損壊など)で内包する全ての溶融塩がセル内へ漏洩したと仮定する。 問題は空気中に放置された場合に溶融塩中の放射性物質のどれだけの割合が気 相へ移行するかであるが、それに関するデータが存在しないので水溶液におけ る値0.001を代用する<sup>4)</sup>。影響緩和が期待できるセルオフガス系の2段のHEPAフ ィルタについては、溶融塩ミストの固着によるフィルタ効率の悪化を想定して 1 段のみ有効であるとした。計算結果を表 5.2.17に示す。結果では 0.09mSv/eventとなり、多重防護に基づく影響緩和機能によって、安全評価上の 基準値を下回ることが大略確認できた。ただし、上記の通り本事象発生時にお ける溶融塩中の放射性物質の気相への移行率が不明なため、正確な評価を行う にはこれらのデータおよび事象発生時の挙動(影響緩和機能として重要なセル 排気系フィルタに与える影響など)の情報を取得することが不可欠である。

(d) 絞り電解回収物中 TRU 金属の火災

絞り電解では電解工程に入量する20バッチ分のAm、Cm同位体をまとめて回 収する。回収物は酸化物であるUO<sub>2</sub>とこれらの金属の混合状態にある。火災評 価においてはUO<sub>2</sub>は燃焼しないものとする。この析出物が電解装置から取り出 されて粉砕装置で粉砕され、塩除去装置での蒸留が行われるまでの工程で空気 セル中の酸素と反応し火災を起こすと想定する。火災により燃焼する量は回収 物1バッチ分とする。このようなアクチニド金属の火災における放射性物質の 気相への移行率についてのデータがないため、湿式における溶媒火災時の移行 率0.01を代用する<sup>4</sup>。影響緩和が期待できるセルオフガス系の2段のHEPAフィ ルタについては、火災時の煤煙によるフィルタ効率の悪化を想定して1段のみ 有効であるとした。計算結果を表 5.2.18に示す。結果では0.83mSvとなり、多 重防護に基づく影響緩和機能によって安全評価上の基準値を下回ることが大略 確認できた。

しかしながら、この火災防止に関する設計が未実装であることからこの火災 事象の発生頻度は極めて頻繁であると考えざるを得ず、「異常な過渡変化」を 超える事象としては扱えない。即ち、この事象については事故評価の基準では なく平常時の基準を適用すべきであり、その場合には平常時の基準値を大きく 超えるものとなる。ただし、現状では絞り電解についての実験的知見が乏しく、 実際に得られる回収物の性状が如何なるものであり、火災の可能性がどれだけ 高いかについては確定的なことは何も言えなず、上記の評価は極めて仮説的な ものである。以上から、このMA回収プロセスを採用する場合には実際の回収物 の基礎的データを収集し、火災にならないということを立証できないのであれ ば火災発生防止策を検討し、その発生が技術的に見て十分稀な事象と見なせる 設計を行う必要がある。その上で火災が生じた場合の気相への移行率などの安 全評価に必要な基礎データを取得し、正確な安全評価を実施する必要がある。

(2) 経済性

システム設計検討結果から、建設費および運転経費を算出し、それを基に再 処理単価および再処理にかかる燃料サイクル費を算出した。

(i) 建設費

建設費の評価結果を図 5.2.23に示す。設備費は960億円、建屋費は360億円で 合計1320億円と評価した。主工程設備はフェーズ I からの合理化でコスト低減 が図られた。建屋はセル合理化によるコンパクト化が図られ、コストも約2割の 低減が図られた。

(ii) 年間運転経費

年間運転経費の評価結果を図 5.2.24に示す。年間運転経費は84.3億円/年と評価した。

(a) 人件費

再処理に関する工程は5班3交替制による直体制を組むこととした。また、各 工程の員数は遠隔自動化システムであることを考慮して、主要機器3基を1名が 担当するものとし、この考えのもと要員を配置した。

廃棄物処理に関する工程の内、固体廃棄物処理に関するものは、稼働率が低いことから、日勤者による対応とした。また、5班3交替制では常に1班は日勤対応が可能であり、これを応援業務として配置するものとした。

廃棄物処理に関する工程の内、液体・気体廃棄物処理に関するもの、および ユーティリティは基本的には連続運転設備であり、運転状態については直勤務 者で管理が可能であり、操作そのものに関しては日勤者による対応とした。

高レベル固化体貯蔵、固体廃棄体貯蔵、使用済燃料貯蔵は管理と搬出入操作 があり、夜間の搬出入も想定されることから直体制を組むこととした。

分析は、運転時は24時間定期的に発生することから、直体制を組むこととした。

放射線管理はJNC東海の実績を考慮して工学的判断により設定した。また、 保守に関しても既存の原子力施設等の実績を考慮して設定した。

以上より評価した要員数を表 5.2.19に示す。その結果、日勤者67名、直勤務 者125名の計192名と評価した。人件費の算出は、再処理燃料製造一体化設備で あるため、主要プロセス設備にかかる人員以外は再処理分の費用を積算した。

(b) その他の年間運転経費

人件費以外の年間運転経費である機器交換費、定期検査費は 3.1 (2)(iii)の 評価手法を用いて算出した。また、消耗品等費は年間の試薬・ユーティリティ 使用量(表 5.2.11)を評価しこれをもとに算出した。

(iii) 再処理単価・燃料サイクル費(再処理分)

以上の建設費・年間運転経費の結果をもとに、再処理単価を算出した。その 結果、36.0万円/kgHMとなった。内訳は資本費は16.0万円/kgHM、操業費は 20.0万円/kgHMである。なお、技術的成立性追求時の経済性への影響評価を 5.2.2 (8) に示す。 (3) 環境負荷低減性

環境負荷低減性のうち、通常運転時の環境放出放射能と通常運転時の放射性 廃棄物発生量については六ヶ所再処理施設の事業指定申請書に記載の値を基に 比較、評価する。

(i) 通常運転時の環境放出放射能

酸化物電解法において大気へ放出される放射性物質(<sup>85</sup>Kr、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、よう素) を六ヶ所再処理施設からの推定年間放出量(表 4.5.14)と比較〔年間再処理量 と平均燃焼度および発電効率(軽水炉の発電効率は1999年原子力部会試算モデ ルに準拠して34.5%と設定)を基に発電量当たりの放出量で比較〕すると、<sup>85</sup>Kr については設計要求を満足する。放出量は設計要求の約50%となる。

一方、<sup>3</sup>H、<sup>129</sup>I、<sup>14</sup>Cについては気体廃棄物処理設備のベーパートラップと凝縮器、および深冷分離装置により捕集されるため、これらの除去性能を適切に 考慮した設備構成とすることにより設計要求を満足できる見通しである。

なお、<sup>131</sup>Iについては再処理施設における生成量を評価した上で設備構成を検 討する必要がある。

また、<sup>14</sup>Cについては、その生成量の推定値は粗い見積もりに留まっており、 高速炉における生成量を精度よく見積もるためのデータを整備していく必要が ある。

海洋へ放出される放射性物質(<sup>3</sup>H、<sup>129</sup>I)について上記と同様に六ヶ所再処理 施設からの放出量と比較すると、いずれも設計要求を満足する。

<sup>129</sup>Iの放出量は十分低く、<sup>3</sup>Hは設計要求の約70%となる。

(ii) 通常運転時の放射性廃棄物

通常運転に伴い発生する廃棄物のうち、高レベル廃棄物(ガラス固化体等) について六ヶ所再処理施設の推定年間発生量〔事業指定申請書記載値(ガラス 固化体の推定年間発生量約1000本)に基づく〕と、年間再処理量と平均燃焼度 および発電効率を基に発電量当たりに換算した発生量で比較すると、年間発生 量は設計要求を満足する。但し、発生量は設計要求の約40%であり、設計目標 としている設計要求の1/10に低減するまでには至っていない。

なお、雑固体廃棄物については主要プロセスおよび付帯設備からの発生量を 評価する必要があり、設計要求との比較のためには付帯設備を含めた発生量評 価の詳細化が課題である。 (iii) U、TRU、FPの廃棄物への移行率

U、TRUに関して、検討しているシステムでは回収率がそれぞれ99.8%、99.6% となっており、廃棄物への移行率に関して設計要求における目標値の達成を目 指すには処理工程での回収率向上が課題となる。

FP(Cs、Sr、Tc、I)については、検討しているシステムではその多くが廃 棄物へ移行する。FPの分離回収について原理的に実現の可能性があると考えら れる手法について検討を行っているが、技術的な実証には今後の試験研究の成 果を待たなければならない。

(iv) 施設の廃止に伴う放射性廃棄物

(a) 解体性

施設の運転性、保守、補修性確保を目的にセル内にはI/C、P/M、MSM等の遠 隔操作設備や遮へい窓があり、また、セル廻りおよび上下には保守エリア、通 路スペース等が確保されている。

セル内主要機器については部品をユニット化することなどが考慮されている。 これらは廃止措置時の遠隔解体、遠隔除染等の作業にも有効に活用可能と考え られる。

一方、搬出入性についても基本的に考慮されているが、セルからの搬出入性 に関しては開口のサイズや設置箇所の妥当性について詳細設計段階での評価が 必要である。

(b) 廃棄物発生量

施設設計の検討結果を基に評価した解体一次廃棄物の発生量を表 5.2.20に示 す。

ー次廃棄物にはセルライニング、はつりコンクリートを含めている。(低レ ベル廃棄物に区分して集計)

TRU廃棄物や高βγの廃棄物発生量は放射性物質を直接取り扱うセルの規模 に影響を受け、低レベル以下の廃棄物や建屋解体に伴って発生するコンクリー ト等の廃棄物は建屋の規模に影響を受ける。

酸化物電解法はセル規模や建屋の規模が比較的コンパクトな設計となってお り、このため廃棄物発生量が全般的に少ない結果となっている。

(4) 資源有効利用性

Uの回収率は99.8%であり、TRUの回収率も平均的には99.6%であり、廃棄物 への移行率はU、TRUそれぞれ0.2%、0.4%となる。よって、再処理システムに おけるU、TRUの放射性廃棄物への移行率としてはそれぞれ1%以下となり、設 計要求値を満足する。ただし、この回収率を保証するためにはAmとCmを用いた電解実験によるAmとCmの回収率データの取得が必要である。

また、再処理製品へのFP混入率については、U/TRU再処理製品(MOX共析物)で0.6wt%、U再処理製品(U析出物)で0.4wt%となり、FP量が多い絞り電解析出物を考慮しても全体では設計要求(1.2wt%以下)を満足する。

(5) 核拡散抵抗性

検討された酸化物電解法システムでは、Puを単離する工程がなく、Pu回収物 にはFPが若干量付随する。また、脱被覆後にブランケット燃料と炉心燃料を混 合する工程を設けているため、回収されるPuの同位体組成比も転用に困難なも のである。したがって、本システムを用いて使用済燃料から高い純度の核分裂 性物質を直接取り出すことは困難であり、潜在的な核拡散抵抗性は高いものと 考えられる。

保障措置に対しては、既存のLWR再処理施設やMOX燃料加工施設の例を参考 にしてMBAおよびKMPの設計および計量技術の検討が為された。本システムで の計量管理は主として秤量器による質量計量と、燃料粉体および溶融塩のサン プリングによって行う。入量計量(S/RDにおける受入量計量)は脱被覆後の粉体 をバッチ単位で均質化混合し、そのサンプリング分析と秤量値によって行う。 この場合、粉体の混合操作などによって湿式再処理システムにおける溶液と同 等程度の均一性の高い状態が得られるかが問題である。また、溶融塩について もどの程度までサンプリングの代表性が確保できるかは不明である。この点に 関して、本システムでは核拡散抵抗性の観点から純度の高い状態でPu等の核物 質を扱わない様になっているが、計量方法によってはその精度を悪化させる要 因となる可能性があり計量管理上一概に好ましいものとは言えない。したがっ て、本システムの実用化に当たっては、計量管理検認目標をクリアできるだけ の正確さと精度を持った計量技術を開発することが課題となる。

また、酸化物粉体を取り扱うことからMOX加工施設の先例にあるように粉体 の工程内滞留が生じる可能性がある。本システムでは開けたセル空間に多数の 工程機器が配置されているため、燃料粉体を内蔵する機器からの飛散を防止し 工程内滞留量を低減させる方策が求められる。

さらに、適時性要求に対してNRTA等の対応策は未検討であるため、今後の課 題である。

(6) 運転・保守補修性

搬送を詳細に検討し、フェーズ I の設計に対して、ボトルネックとなる機器 の増設、搬送機器の役割分担の明確化、適切なバッファ容量の設定等の改善を 実施した。主要機器については基本的な運転操作手順の概略検討を行った。ま た坩堝寿命の長寿命化や電解回収物からの塩除去方法の変更により、プロセス を簡略化した。これらの変更を踏まえ、タイムチャートに基づく概略の処理能 力評価を実施し、所定の処理能力を満たしていることを確認した。搬送には、 モノレール、台車、インセルクレーンを用い、それぞれの機器は遮蔽や運用方 法の制限により耐放射線性を考慮した設計とした。

保守システムとしてセル内保守エリアと保守セルを有し、作業を実施するた めの機器としてマスタースレーブマニピュレータとパワーマニピュレータを具 備する。機器の保守・補修にあたって機器毎の交換が可能なようにラックなど に納め、インセルクレーンによる機器へのアクセスルートおよび保守セルまで の搬送経路を確保している。また、運転時における保守項目を検討し、抽出さ れた項目に対して保守が容易になるように各工程機器の設計に反映している。

(7) 技術的成立性

酸化物電解法に関する技術的成立性を表 5.2.21~表 5.2.22にまとめる。

前処理については、電解工程ではFe、Cr等の被覆管成分が混入することで電 流効率が低下することが知られている。よって、脱被覆時に燃料粉体中へのハ ル成分混入率を低減する必要がある。これを踏まえてロール矯正法の他、多軸 せん断粉砕法等の技術開発を進める必要がある。

再処理に関しては同時電解法、MOX共析、MA回収の成立性を確認するための試験データの取得が進められている。MOX共析については原理的な成立性は確認されたものの、電流効率が30%程度と低い結果が得られている。よって、電流効率の向上を目指すとともに、電位、酸素ポテンシャルについても最適条件を検討する必要がある。また、MA回収については絞り電解の回収効率を確認する試験を進めている。しかしながら、Am、Cmの還元電位が塩の分解電位に近く、制御が困難であり、実用化に向けては試験データの蓄積が最重要である。また、代替法として炭酸ナトリウムを用いてMAを沈殿回収する技術についても、試験データの蓄積が必要であり、その効率向上に向けた試験を進めている。これら再処理は電解装置で実施されるものであり、その耐食性を向上させる目的でルツボ材料の腐食試験を実施しデータの蓄積が必要である。また、高耐食性を期待したCCIMの開発も進めている。

廃塩処理として高充填率のリン酸ガラス固化を採用している。これは、ロシアRIARの知見に基づいているが、実用化に向けた基礎データの充足が必要である。また、塩素を取り扱うため、これをリサイクルするために深冷分離装置を採用している。しかしながら、これに対する工学規模の原子力施設での使用は未知であり、今後の開発が必要である。

その他、使用済燃料貯蔵として乾式キャスクによる貯蔵方式を採用している が、乾式キャスクは概念設計段階であり、実用化に向けたR&Dを進める必要が ある。

(8) 技術的成立性追求時の経済性への影響評価

酸化物電解法の電解工程では、電位・酸素ポテンシャル等の制御因子が多く、 設計仕様を満たす再処理製品を生成するためにはR&D課題が多い。特に電解工 程における電流効率は、リファレンス設計では今後の技術開発に期待した理想 的な電流効率として80%を設定しているが、ロシアRIARの試験結果は電流効率 が30%程度と現状では低い結果が得られている。そこで、現状の30%程度から今 後の技術開発を考慮して電流効率40%と設定した場合に、システムに与える影 響について経済性を中心に評価した。また、使用済燃料貯蔵方式について、ガ ラス固化体の貯蔵等で実績があり、他の再処理システムで採用しているボール ト方式を採用した場合の経済性への影響についても評価した。

(i) 電流効率 40% とした場合の影響評価

電流効率80%から40%とした場合の影響を以下に示す。

(a) 設備費への影響

主要プロセス設備は主に電解装置の機器台数に影響がある。電流効率の低下 から処理能力が低下し、必要燃料処理量を満足するためには、現行の6基から 10基とする必要がある。その他の機器については、処理能力は変更は無く、ま た物質移送ののべ回数も変更がないため(電解装置への燃料の受入、払出のの べ回数は必要燃料処理量が同じであるため変わらない)、機器台数の変更はな い。

廃棄物処理設備については、電解装置の増加に伴い塩素ガス処理設備が増加 するが、それ以外は設備に十分な余裕があるため変更はない。また、分析設備 についても電解装置で処理するのべ回数は変わらないので変更はない。計装制 御設備については、電解装置の増設分に対する付加が必要である。保守設備に ついては、セル数は変更がないため、インセルクレーン、パワーマニピュレー タ等の変更はない。ユーティリティ設備についても設備に余裕があることから 変更はない。

以上から設備費は主要プロセス設備、塩素ガス処理設備、計装制御設備が増加し、結果としてリファレンス設計から約4%程度の増加が見込まれる。

(b) 建屋費への影響

建屋費への影響は、主に電解装置の増設に伴う燃料処理・塩除去セルの床面

積の増加がある。この影響により、リファレンス設計から約1%程度の増加が見 込まれる。

(c) 年間運転経費への影響

運転要員数は、電解装置の増設に伴い、この運転監視に伴う人員が1班当たり 2人、計10人の増加が見込まれる。機器交換費は、前述の増設した設備分にかか る機器交換費が増加する。消耗品費は、電解槽の増設に伴い溶融塩、ルツボ、 試薬使用量等にかかる費用が増加する。定期検査費については変更はないとし た。

以上から、年間運転経費は約6%の増加が見込まれる。

(ii) ボールト方式による使用済燃料貯蔵とした場合の影響評価

使用済燃料貯蔵方式を変更した場合、影響があるのは主に使用済燃料貯蔵設備および建屋、リサイクル建屋への使用済燃料の受入設備である。受入設備は、 リファレンス設計ではキャスクの搬入を行っていたが、ボールト方式では集合 体の受入となる。キャスク搬入では搬入路のスペースを大きく取る必要がある が、遮へい壁にする必要はない。逆に、集合体搬入では搬入路のスペースは小 さくてすむが、遮へい壁にする必要がある。これらを考慮すると、いずれの場 合も搬入にかかるスペースは同等と考え、設備費についても搬入設備は同等と した。

使用済燃料貯蔵設備は、ボールト方式の場合、強制冷却設備等が必要となる が、乾式キャスクにかかる費用が削除されることから、結果として設備費は35% の低減が見込まれる。使用済燃料貯蔵建屋は、キャスク貯蔵ではキャスクを保 管するためのエリア確保ですむが、ボールト方式の場合、燃料ピンが臨界管理 上の距離を持って配置されるため床面積が増加する。

(iii) 経済性への影響

上記の電流効率と使用済燃料貯蔵方式の変更をリファレンス設計に取り入れた場合について、建設費は1350億円(設備費960億円、建屋費390億円)、年間運転経費は88.5億円/年と評価した。資本費は16.5万円/kgHM、操業費は20.8万円/kgHMで、再処理単価は37.3万円/kgHMとなり、5.2.2 (2)の経済性評価に対し約4%の増加に留まった。また、再処理にかかる燃料サイクル費を評価すると0.55円/kWhとなる。

## [参考文献]

- 1) 原子力安全委員会:"再処理施設安全審查指針", (1986) 2001改訂版.
- 2) 原子力安全委員会:"ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針", (2002).
- 3) 日本原燃(株):"六ヶ所再処理事業所 再処理事業指定申請書", (1989) 1997補正.
- E. Walker : "A Summary of Parameters Affectiong the Release and Transport of Radioactive Material from an Unplanned Incident", BNFO-81-2 Bechtel national Inc. (1981).
- 5) 中林弘樹,田中博: "乾式リサイクルシステムの臨界安全設計概念検討", JNC TN9400 2001-072 (2001).

	ÐΝ	20%	%0	%08	定。NG										いM は	•, T /1	
	Τ				9% と殼		6	9	%						。殼定。	G、VFF	
	VFP				悪して 9		60	60	100		0%	0/0	0%0	100%	実績から	した。H	
	HG				料を考慮										は試験	くと設定	
$\mathcal{I}^{\circ})$	MN				、照射燃					発。	15%	0/01	95%		Pu~RF	15%回收	
グループ	RE				きがあり					見度で揮	0.1%	0/ 1.0	99.9%		同挙動。	慮して	
たしいては	ALE	%	9	9	の回収率					溶融塩漲	%	0/1	8%		よりと	ことを表	
(FP {C	ALM	66	19	60	于73%6.		%	%	9	P、T /1	0.00	70.0	9.99		up اللام، ال	あり、	
元素	Cm				職で 99	設定。	06	10	60	找定。VF	%	0/	%6	%0	うUを回	0 程度て	
	Am				说被覆討	춘 80% と				国収 と	0.1	1.0	66		よるな	では DF1	
	Pu				101 ~ ~	~の放出:				%06 シ	%S ()	0.0.0	99.5%		%程度に	~ 如回%0	ī采。
	Np				模擬ペレ	ナム部~				浄により	%	/0	%		度を 30	験で U7(	温度へ損
	Ŋ				未照射	はプレ				彩くく	91		24		Pu 富化	国内就	溶融塩
移行先		電解処理	ハル洗浄	オフガス	設定理由		電解処理	ノイノ	オフガス	設定理由	同時電解	析出物	溶融塩	オフガス	設定理由		
工程		脱被	顏				ノハ	洗浄			同時	電解					

表 5.2.1 各工程の移行率設定(1/2)

工程	移行先	元素 (FF	いっしい	はグループ	(									
		U	Np	Pu	Am	Cm	ALM	ALE	RE	NM	HG	VFP	Т	NG
MN	NM标出物	0.1%					0.02%		0.1%	%06	1			
分離	溶融塩													
電解		99.9%					99.98%		99.9%	10%				
_	設定理由	核物質、	REは若干	の混入を想	(定し0.1%	回収と設定。	, ALM, A	LEは還元	電位が大き	く卑なこ。	とを考慮し	て0.02%回	回収と設定。	NMは国
_		内試験実)	績から90%	6回収と設3	Ť٣									
MOX	MOX析出物	90%			0.1%		0.02%		0.1%	100%				
共析	溶融塩	10%			99.9%		99.98%		99.9%	0%0				
	設定理由	MOX/±9	0%回収す.	ると設定。	Am~RE	は還元電位な	い卑なこと	を考慮して	設定。NM	はリ以上に	こ容易に析	出するため	5、100%回1	以と設定。
絞り	絞り電解	/00 00			/000	OE0/	/000 0		1 0.07					
電解	析出物	99.9%			0%.R.A	90%0	0.770		10%0					
	溶融塩	0.1%			1%	5%	99.98%		90%					
	設定理由	原理を基	に理論的角	<b>军析から設</b> (	萣。ALM、	ALEは還う	元電位が卑:	なことを考	慮して0.02	2%回収と	設定。			
リン酸	沈殿物	90%	100%	97%	99.9%		0.1%	99.5%						
沈殿	溶融塩	10%	0%0	3%	0.1%		99.9%	0.5%						
	設定理由	国外の試	験実績から	う設定。										
余剰塩	余剰塩	37.6%		37.6%										
回収	溶融塩	62.4%		62.4%										
	設定理由	リン酸投	入による身	<b>冷剩分。</b>										

表 5.2.2 各工程の移行率設定(2/2)
: $kg/ \exists$	R.	3E-02	3E-05	7E-02	3E-04	3E-04	5E-01	2E-01	2E-03	4E-02	5E-03	)E+00	)E+00	)E+00	)E+00	1E+00
単位	滞昏	9.4	3.6	1.0'	3.6	1.1;	1.0;	9.9	3.05	$1.6^{\prime}$	1.7;	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Į	余剰塩	9.67E-06	0.00E+00	1.47E-06	2.89 E-06	4.26E-06	1.83E-05	5.97E-01	1.59E-03	8.48E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.07E-01
	リン酸 沈殿物	2.31E-04	9.98E-08	1.27E-04	7.69E-03	1.13E-02	1.94E-02	1.59E-03	8.40E-01	4.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.33E+00
	絞り電解 析出物	2.57 E-01	9.97 E-05	1.30 E-01	7.62 E-01	2.15 E-01	1.36E+00	3.18E-04	1.69 E-04	5.01 E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.02 E-01
	MOX共析 析出物	4.62 E + 01	1.79 E-02	2.34E+01	8.16E-03	2.40 E-03	6.96E + 01	3.35 E-03	1.78E-03	$5.32 \text{E} \cdot 02$	3.30 E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.89E-01
	NM分離 電解析出物	5.14E-02	1.99 E - 05	$2.60 \text{E} \cdot 02$	8.17E-03	$2.41 \text{E} \cdot 03$	8.80E-02	3.35 E-03	1.78E-03	$5.32 \text{E} \cdot 02$	2.97E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.03E+00
	同時電解 析出物	1.63E+02	$6.31 \text{E} \cdot 02$	1.31E-01	8.18E-03	2.41E-03	1.63E+02	3.35E-03	1.78E-03	5.33E-02	5.83E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.41E-01
	オフガス	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.47E-01	2.02E+00	2.28E-05	1.98E+00	4.15E+00
	ハル廃棄物	$2.10  ext{E-01}$	$8.13  ext{E-05}$	$2.37 \text{E} \cdot 02$	7.96E-04	2.34E-04	2.34E-01	$1.60 \pm 0.03$	8.51 E-04	5.18E-03	3.89 E- 03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.15E-02
	受入	2.10E+02	8.13 E - 02	2.37E+01	7.96E-01	2.34 E-01	2.34E + 02	1.60E+00	8.51E-01	5.18E+00	3.89E+00	1.47E-01	2.02E+00	2.28E-05	1.98E+00	1.57E+01
	元素	U	Np	Pu	Am	Cm	HM合計	ALM	ALE	$\operatorname{RE}$	NM	HG	VFP	Т	NG	FP습랆

表 5.2.3 物質収支評価結果(1日当たりの平均収支)

	-			
HM元素	U製品 (同時電解 析出物中)	MOX製品 (MOX共析 析出物中)	TRU製品 ( 絞り電解 ) 析出物中 )	合計
U	77.7%	22.0%	0.1%	99.8%
Np	77.7%	22.0%	0.1%	99.8%
Pu	0.6%	98.6%	0.5%	99.7%
Am	1.0%	1.0%	95.8%	97.9%
Cm	1.0%	1.0%	91.9%	94.0%
全体回収率				99.8%

### 表 5.2.4 物質収支から評価した各製品への HM 回収率

表 5.2.5 物質収支から評価した各製品への FP 混入率

FP元素	U製品 (同時電解 析出物中)	MOX製品 (MOX共析 析出物中)	TRU製品 ( 絞り電解 ) 析出物中 )	平均混入率
ALM	<0.01wt%	<0.01wt%	0.02wt%	
ALE	<0.01wt%	<0.01wt%	0.01wt%	
RE	0.03wt%	0.08wt%	26.90wt%	0.65wt%
NM	0.36%	0.47wt%	<0.01wt%	
合計	0.39wt%	$0.56 \mathrm{wt}\%$	26.9wt%	

#### 表 5.2.6 処分廃棄体発生量 (プロセス廃棄物)

		高レベル廃棄物		TRU・高βγ廃棄物		
	鉛リン酸 ガラス 固化体	フツリン酸 ガラス 固化体	金属 廃棄体	TRU 廃棄体	高βγ 廃棄体	
処理対象	リン酸 沈殿物	余剰塩	NM分離 電解析出物	ハル ルツボ等	ラッパ管	
年間発生量	2.1t/y	5.1t/y	0.6t/y	34.9t/y	68.6t/y	
年間発生 固化体本数	20本	26本	140本	109本	153本	

## 表 5.2.7 セル内機器交換品

廃棄物区分	発生量(t/y)	代表的な機器				
TRU廃棄物	21.9	脱被覆装置、ハル洗浄装置/電解装置(ドアバルブより下部)、沈澱物回収				
		装置、余剰塩回収装置、析出物粉砕装置、塩除去装置、				
低レベル廃棄物	8.6	ハル洗浄装置/電解装置(ドアバルブより上部)、搬送装置				
極低レベル廃棄物	8.8	集合体解体装置、秤量器/ID確認装置				

## 表 5.2.8 主な機器の概略仕様

	機器名	処理制限値	運転条件	処理能力
		(1バッチ処理量)		
前	集合体	1集合体	運転温度:常温	4時間/バッチ
理	解体装置		運転圧力:常圧	
	脱被覆	1集合体分燃料ピン	運転温度:常温	9時間/バッチ
	装置		運転圧力:常圧	
再如	電解装置	56kgHM	運転温度:650℃	同時電解:6時間
理			運転圧力:微負圧	塩素化溶解:2時間
				NM分離電解:4時間
				MOX共析:12時間
				浴調整:2時間
				UO2回収:7時間
				絞り電解:29時間
				廃塩処理:4時間
				(浴調整以降は20サイク
				ルに1回処理)
	析出物	4電極析出物	運転温度:常温	100分/バッチ
	粉砕装置		運転圧力:常圧	
	塩除去	UO2析出物・絞り電解析	運転温度:1000℃	4.5時間/バッチ
	装置	出物は2電極析出物	運転圧力:10 <sup>-3</sup> Torr	
		MOX共析析出物は4電極	(装置能力)	
		析出物		

機器	機器台数
集合体受入装置	1
集合体解体装置	1
脱被覆装置	1
燃料粉混合装置	1
電解用燃料粉混合装置	1
ハル洗浄装置	1
電極等装脱着装置	2
電解装置	6
析出物粉砕装置	2
析出物掻取装置	1
塩除去装置	3

表 5.2.9 主要機器台数

#### 表 5.2.10 セル容積評価結果

セル名	セル容積
集合体受入セル	800m <sup>3</sup>
前処理(集合体解体・脱被覆)セル	3300m <sup>3</sup>
ハル洗浄セル	1600m <sup>3</sup>
再処理(電解処理・塩除去処理)セル※	$5400 m^3$
合計	11100m <sup>3</sup>

※再処理セルに内包される工程の内、燃料製造である分級以降が占める容積は除外。

試薬・	使用目的	使用量					
ユーティリティ							
試薬							
NaCl·CsCl	溶融塩	1600kg/年					
$Na_3PO_4 \cdot Cs_3PO_4$	高レベル廃棄物固化用	4900kg/年					
リン酸	余剰塩のメタリン酸化	1300kg/年					
アルゴン	ハル洗浄セル内雰囲気管理用	124000m³/年					
塩素	塩素化用	2700m³/年					
酸素	MOX 電解用	1000m³/年					
鉛リン酸ガラス	鉛リン酸ガラス固化基材	5600kg/年					
フツリン酸ガラス	フツリン酸ガラス固化基材	4500kg/年					
ユーティリティ	ユーティリティ						
電気	空調・電解槽の加熱など	4.0×107kWh					

# 表 5.2.11 主な試薬・ユーティリティ

## 表 5.2.12 建屋容積評価結果

建屋名	建屋容積
リサイクル建屋	19万 m <sup>3</sup>
廃棄物処理建屋	10万 m <sup>3</sup>
廃棄物貯蔵建屋	4万m <sup>3</sup>
燃料貯蔵建屋	5万 m <sup>3</sup>
合計	38万 m <sup>3</sup>

		フェーズ川中間評価での再評価値					
	フェーズ 評価	電解装置入量 前	電解装置内	電解装置から の取り出し直 後	富化度調整以降		
臨界質量	16.83 kg-Fis	12.11 kg-Fis	9.72 kg-Fis	10.28 kg-Fis	34.00 kg-Fis		
安全係数	1.0  or  0.5	0.7					
核的制限值	16.83 kg-Fis (8.4 kg-Fis)	8.47 kg-Fis	6.80 kg-Fis	7.19 kg-Fis	23.80 kg-Fis		
評価形態	酸化物	酸化物	酸化物	酸化物	酸化物		
形状	球	球	高さ/直径 =1/1の円柱	球	球		
Pu富化度	30%	100%	100%	100%	26.5%		
Pu同位体組成	<sup>239</sup> Puのみ	<sup>239</sup> Puのみ	<sup>239</sup> Puのみ	<sup>239</sup> Puのみ	<sup>239</sup> Pu/ <sup>240</sup> Pu/ <sup>241</sup> Pu =80/10/10		
燃料物質嵩密度	8.8g/cc (約80%TD)	8.8g/cc (約80%TD)	11.46g/cc (100%TD)	10.28g/cc (約90%TD)	8.8g/cc (約80%TD)		
吸水率	0wt%	1wt%	0wt%	1wt%	1wt%		
反射条件	10cm厚 グラファイト	20cm厚 グラファイト	20cm厚 グラファイト	20cm厚 グラファイト	20cm厚 グラファイト		
複数ユニット条件	あり	なし	なし	なし	なし		

### 表 5.2.13 核的制限値の評価

### 表 5.2.14 酸化物電解法再処理システムで想定される異常事象と設計対応(1/2)

		想定される異常事象の摘	出	設計対応策			
異常事象カテゴリ	発生機器/工程	原因	進展シナリオ	発生防止	影響緩和/終息	課題/備考	
核燃料の臨界	粉末を取り扱う 全工程	過剰装荷あるいは蓄積	誤操作(誤移送、多重装荷、蓄積の確認無視) 等により核燃料物質が過剰に存在する。 粉体状の燃料物質の滞留/蓄積。	受入物質の分析/秤量/確認。 上記操作のルーチン化(自動化)。 ルール化されたクリーンアップ操作。 機器および容器容量の物理的制限。	なし	臨界事故防止については二重 偶発性原理に基づく発生防止 設計に重点を置く。 したがって、個々の発生防止 策は極めて信頼性の高い装 置、ロジックおよびシステム で構築されなくてはならな い。	
放射性物質の閉じ込め 機能の喪失 (放射性物質の放出経 路の異常)	粉末を取り扱う 全工程	粉体化された使用済燃 料あるいは核燃料物質 を内包する機器・容器の 破損/転倒	容器のハンドリング操作失敗等(位置決めの失 敗など)によって転倒した容器から、内包する 粉体がセル内に飛散する。 ハンドリングマシンの打撃による機器・容器の 破損により、内包する粉体がセル内に飛散す る。	粉体を内蔵する容器は蓋を設け、転倒 等により内包する粉体が容易に漏洩し ないような構造にする。 ハンドリング機構および容器の設計に おいて、転倒等が生じがたい構造とす る。 - (未定)	<ul> <li>単位容器に内包する量が少なく、かつ粉体状であるため排気系へ移行する要は少ないと考えられる。</li> <li>セル排気系の HEPA フィルタ等の低減装置。</li> </ul>	ハンドリングマシンの誤操作 や異常動作防止に対する設計 対応を検討する必要がある。	
			ハンドリング中の容器の落下により破損した 容器より、内包する粉体がセル内に飛散する。	— (未定)			
		粉体化された使用済燃 料あるいは核燃料物質 の取扱中における操作 の失敗	粉体の移し替え、充填等の操作において、位置 決めの失敗等によって機器・容器外へこぼれる など。	粉末の移し替え等の操作においては、 容器の位置決めのためのリミットスイ ッチを複数設け、インターロックによ り所定の位置・状態にある場合にのみ 操作が可能なようにする。			
	電解装置	電解装置主容器の破損	溶融塩を保持する容器の破損(腐食あるいは熱 的、機械的ダメージ、経年劣化等)により、セ ル中に HM、FP を含んだ溶融塩が直接さらさ れる。	漏洩しがたい材質/構造とする。 上蓋部の冷却。 温度計と連動したヒーター動作停止の インタロック。	<ul> <li>・漏洩検知器と2次容器の設置。</li> <li>・上蓋部冷却系の二重化。</li> <li>・セル排気系のHEPAフィルタ</li> <li>等の低減装置。</li> </ul>	定量的評価のためには、溶融 塩中放射性物質の気相への移 行率データを取得する必要が ある。	
		オフカスラインの機能 喪失/閉塞	・排気ノロリの故障。 ・コールドトラップフィルタの閉塞 上記現象により、オフガスの排気経路維持が困 難となり、装置からセルへ直接オフガスが漏 出。	† 価機の設置。	・セル排気系の HEPA フィルタ 等の低減装置。	溶融塩は高融点であるため、 外部からの熱供給がない場合 には固化する。	
	ハル洗浄装置	装置主容器/塩移送配管の破損	溶融塩を保持する容器および系統の破損(腐食 あるいは熱的、機械的ダメージ、経年劣化等) により、セル中に HM、FP を含んだ溶融塩が 直接さらされる。	漏洩しがたい材質/構造とする。	<ul> <li>・セル床に漏洩塩受け皿を設置する。</li> <li>・漏洩検知器の設置。</li> <li>・セル排気系の HEPA フィルタ</li> <li>等の低減装置。</li> </ul>		
		塩化ジルコニウムの急 激な化学反応	Ar セルバウンダリ破損によって流入した空気 中の水分と塩化ジルコニウムが反応し、水素ガ スを発生させる。反応の程度によっては急激な 圧力波の発生を伴う。 圧力波により発生したエアロゾルなどが排気 系へ移行し、排気系に設置された HEPA フィル タを閉塞させ負圧維持機能を喪失させる。	Ar セルバウンダリは外部雰囲気が漏 洩しがたい構造とする。	<ul> <li>・発生するエアロゾルが全て排気 系へ移行したとしても、HEPA フィルタの能力を超えないよう にする。</li> <li>・建屋排気系の HEPA フィルタ 等の低減装置。</li> </ul>	塩化ジルコニウムの反応自体 が放射性物質の気相への移行 を促進するわけではなく、反 応を拡大させうる他の反応物 も周辺には存在しない。 塩化ジルコニウムの反応条 件、反応挙動等基礎データの 収集。	

# 表 5.2.15 酸化物電解法再処理システムで想定される異常事象と設計対応(2/2)

		想定される異常事象の摘	间出	設計対応策						
異常事象カテゴリ	発生機器/工程	原因	進展シナリオ	発生防止	影響緩和/終息	課題/備考				
放射性物質の閉じ込め 機能の喪失 (放射性物質の放出経 路の異常)	オフガス系	オフガス系の破損	塩素ガスによる長期的な腐食によりオフガス 系配管が破損し、経路外へのオフガスの漏洩が 発生。	塩素ガス回収/再利用のための設備を用 意し、排出量を削減する。 セル内雰囲気中の塩素ガス濃度を監視 する。	セル雰囲気中の塩素ガス濃度 上昇時に備え、塩素ガス除去装 置を設ける。	オフガス系は負圧になっている ため、完全破断等の大規模な破 損が生じない限り、経路外への オフガスの漏洩は生じないもの と考えられる。 長期的な塩素ガスの影響等につ いて詳細な検討を要する。				
放射性物質の気相への 移行量の増大 (放射性物質の放出量	電解装置	溶融塩温度上昇	温度制御の故障等による加熱装置異常により 気相への移行量が増大。	温度計と連動したヒーター動作停止の インタロック。 ヒーター容量の制限。	・電解装置排気系のコールドト ラップ、HEPA フィルタ等の低 減装置。					
の増大)		供給プロセスガスの増 大	電解操作に使用する酸素ガス、塩素ガスおよび Ar ガスの供給系異常により多量のガス吹き込 みが行われ、バブリングあるいはオフガス系へ の流量の増大により排気系への移行量が増大。	- (未定)	<ul> <li>・電解装置排気系のコールドト ラップ、HEPA フィルタ等の低 減装置。</li> </ul>	被ばく量評価の結果次第では対 策が必要。				
	析出物粉砕装置 ~塩除去装置	<b>TRU</b> 合金の火災	高温その他の原因によって絞り電解で回収した TRU 合金が空気セル中の酸素と反応し火災に至る。	- (未定)	— (未定)	MA 回収プロセスの変更も視野 に入れた抜本的な火災防止およ び影響緩和/終息のための具体 的方策を検討する必要がある。 絞り電解回収物の性状、発火条 件等基礎データの収集が必要。				
	ハル洗浄装置	溶融塩温度上昇	温度制御の故障等による加熱装置異常により 気相への移行量が増大。	温度計と連動したヒーター動作停止の インタロック。 ヒーター容量の制限。	・ハル洗浄装置排気系のコール ドトラップ、HEPA フィルタ等 の低減装置。					
		<ul> <li>塩化ジルコニウムの急</li> <li>Ar セルバウンダリ破損によって</li> <li>激な化学反応</li> <li>中の水分と塩化ジルコニウムが反</li> <li>スを発生させる。反応の程度によ</li> <li>圧力波の発生を伴う。</li> <li>また、圧力波により発生したエア</li> <li>排気系へ移行し、排気系に設置さ</li> <li>ィルタを閉塞させ負圧維持機能を</li> </ul>		Arセルバウンダリは外部雰囲気が漏洩 しがたい構造とする。 放射性物質そのものあるいはそれを含 んだ物質が反応物になるわけではな い。	・建屋排気系の HEPA フィル タ等の低減装置。	塩化ジルコニウムの反応自体が 放射性物質の気相への移行を促 進するわけではなく、反応を拡 大させうる他の反応物も周辺に は存在しない。 塩化ジルコニウムの反応条件、 反応挙動等基礎データの収集。				
	充填装置	U ゲッターの火災	ゲッターに用いる U 粒子が空気セル中の酸素 と反応し火災に至る。	U ゲッターが直接酸素と反応しないようなコーティングを施す。	<ul> <li>・燃焼物が U であるため、被 ばく影響は低い。</li> <li>・セル排気系の HEPA フィル タ等の低減装置。</li> </ul>	被ばく量評価の結果次第では対 策が必要。				

排気系のDF	$1.00  imes 10^{3}$	溶融塩の固着あるいは火災時の煤 煙が2段あるフィルタの効率を悪 化させうることを考慮してセルオ フガス系のHEPAフィルタは1段 分のみ考慮する。
呼吸率 R [m³/s]	$3.33  imes 10^{-4}$	「発電用軽水型原子炉施設の安全 評価に関する審査指針」より成人 の活動時の呼吸率を適用。
相対濃度 χ/Q [s/m <sup>3</sup> ]	$1.30  imes 10^{-6}$	六ヶ所再処理施設の主排気筒から の放出の場合の値を代用。

#### 表 5.2.16 被ばく評価のための共通データ

	同位体組成	20バ インベ 元素量	ッチ目の ントリ[kg] 核種量	比放射能 [Bq/kg]	放射能 インベントリ [Bq]	気相への 移行率	DF	大気中への 放出量 [Bq]	呼吸率 R [㎡/s]	相対濃度 <i>χ /</i> Q [s/㎡]	換算係数 H₅o	内部被ばく [Sv]
U234	0.0000		0.0024	2.3131E+11	5.4969E+08			5.50E+02			3.6E-05	8.6E-12
U235	0.0019		0.1043	8.0000E+07	8.3469E+06			8.35E+00			3.3E-05	1.2E-13
U236	0.0003		0.0168	2.3958E+09	4.0213E+07			4.02E+01			3.4E-05	5.9E-13
U238	0.9978		55.3165	1.2447E+07	6.8851E+08			6.89E+02			3.2E-05	9.5E-12
U		55.44										
Pu238	0.0121		0.0640	6.3367E+14	4.0564E+13			4.06E+07		1.30E-06	1.0E-04	1.8E-06
Pu239	0.6064		3.2016	2.3006E+12	7.3658E+12			7.37E+06			1.1E-04	3.5E-07
Pu240	0.3077		1.6248	8.4334E+12	1.3703E+13			1.37E+07			1.1E-04	6.5E-07
Pu241	0.0381		0.2012	3.8153E+15	7.6777E+14			7.68E+08			2.3E-06	7.6E-07
Pu242	0.0357		0.1883	1.4139E+11	2.6618E+10	0.001	1.00E+03	2.66E+04	2 225-04		1.1E-04	1.3E-09
Pu		5.28				0.001	1.002.00		0.002 04			
Am241	0.6826		2.3071	1.2701E+14	2.9303E+14			2.93E+08			1.2E-04	1.5E-05
Am242m	0.0280		0.0948	3.5984E+14	3.4111E+13			3.41E+07			1.1E-04	1.6E-06
Am243	0.2894		0.9781	7.3806E+12	7.2188E+12			7.22E+06			1.2E-04	3.8E-07
Am		3.38										
Cm242	0.0007		0.0007	1.2241E+17	8.9335E+13			8.93E+07			4.4E-06	1.7E-07
Cm243	0.0098		0.0098	1.9112E+15	1.8817E+13			1.88E+07			8.0E-05	6.5E-07
Cm244	0.8246		0.8246	2.9953E+15	2.4698E+15			2.47E+09			6.4E-05	6.8E-05
Cm245	0.1649		0.1649	6.3554E+12	1.0478E+12			1.05E+06	ļ		1.2E-04	5.4E-08
Cm		1								I		
HM		65.1			3.7428E+15			3.74E+09			合計 [Sv]	9.005E-05

### 表 5.2.17 「電解装置内溶融塩の漏洩」事象の概算被ばく評価

#### 表 5.2.18 「絞り電解回収物中 TRU 金属の火災」事象の概算被ばく評価

	同位体組成	絞り電射 インベ	解回収物の ントリ[kg]	比放射能 [Bg/kg]	放射能 インベントリ	気相への 移行率	DF	大気中への 放出量	呼吸率 R [mʲ/s]	相対濃度 x/Q[s/m]	換算係数 H₅o	内部被ばく 「Sv]
		兀素重	核種量	65	[Bq]			[Bq]		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		
U234	0.0000		0.0000	2.3131E+11	0.0000E+00			0.00E+00			3.6E-05	0.0E+00
U235	0.0019		0.0000	8.0000E+07	0.0000E+00			0.00E+00			3.3E-05	0.0E+00
U236	0.0003		0.0000	2.3958E+09	0.0000E+00			0.00E+00			3.4E-05	0.0E+00
U238	0.9978		0.0000	1.2447E+07	0.0000E+00			0.00E+00			3.2E-05	0.0E+00
U		0										
Pu238	0.0121		0.0030	6.3367E+14	1.9207E+12			1.92E+07		1.30E-06	1.0E-04	8.3E-07
Pu239	0.6064		0.1516	2.3006E+12	3.4876E+11			3.49E+06	· 3.33E-04		1.1E-04	1.7E-07
Pu240	0.3077		0.0769	8.4334E+12	6.4881E+11		1.005+00	6.49E+06			1.1E-04	3.1E-07
Pu241	0.0381		0.0095	3.8153E+15	3.6353E+13			3.64E+08			2.3E-06	3.6E-07
Pu242	0.0357		0.0089	1.4139E+11	1.2603E+09	0.01		1.26E+04			1.1E-04	6.0E-10
Pu		0.25				0.01	1.00E+03					
Am241	0.6826		2.2866	1.2701E+14	2.9043E+14			2.90E+09			1.2E-04	1.5E-04
Am242m	0.0280		0.0940	3.5984E+14	3.3808E+13			3.38E+08			1.1E-04	1.6E-05
Am243	0.2894		0.9694	7.3806E+12	7.1547E+12			7.15E+07			1.2E-04	3.7E-06
Am		3.35										
Cm242	0.0007		0.0007	1.2241E+17	8.4869E+13			8.49E+08			4.4E-06	1.6E-06
Cm243	0.0098		0.0094	1.9112E+15	1.7876E+13			1.79E+08			8.0E-05	6.2E-06
Cm244	0.8246		0.7833	2.9953E+15	2.3463E+15			2.35E+10			6.4E-05	6.5E-04
Cm245	0.1649		0.1566	6.3554E+12	9.9541E+11			9.95E+06			1.2E-04	5.2E-07
Cm		0.95										
HM		4.55			2.8207E+15			2.82E+10			合計 [Sv]	8.307E-04

## 表 5.2.19 運転に関わる人員

# (人日)

設備	工程	日勤	直勤務	合計	備考
前処理	受入		5	5	常時運転で直勤務対応。
	解体		5	5	主要機器3基程度に対し
	脱被覆		5	5	て1人が対応と設定。
	混合		5	5	
	ハル洗浄		5	5	
電解処理	電解処理		1 0	1 0	
	粉砕		5	5	
	塩除去		5	5	
高レベル	ガラス固化	1		1	処理頻度低で日勤対応。
廃棄物固化	貴金属固化	1		1	また、直勤務は5班の為
固体廃棄物	ハル圧縮	1		1	1 班は常時日勤対応が可
処理	切断・圧縮	1		1	能であり、応援要員とす
	モルタル充填	1		1	る。
	焼却	1		1	
液体廃棄物效	心理	2		2	連続運転設備で日勤対
気体廃棄物処	心理	2		2	応。
ユーティリラ	ディ	2		2	
高レベル固住	上体貯蔵		5	5	管理・搬出入操作で直勤
固体廃棄体則	宁蔵		5	5	務対応。
使用済燃料期	宁蔵		5	5	
分析	サンプリング		5	5	常時運転で直勤務対応。
	前処理		25	25	
	分析		1 0	1 0	
放射線管理		5	2 5	3 0	
保守		50		5 0	
合計		6 7	1 2 5	192	

※直勤務は5班3交代制

区分	発生量(t)
TRU、高βγ廃棄物 (金属廃棄物)	約300
低レベル、極低レベル廃棄物 (金属、コンクリート)	約1,600
クリアランスレベル以下、非放 射性廃棄物	約190,000
(金属、コンクリート)	

## 表 5.2.20 解体一次廃棄物発生量

	技術	設計要求事項	技術的成立性
前	脱被覆	燃料粉体回収率	粉体化については産創研開発のロール矯正/ハン マ打撃法、ハル洗浄は電中研の実績に基づき評価。
理		99.9%以上	現状新規の開発計画無し。 サイクル機構で開発中の多軸せん断粉砕法の適
		(ハル洗浄含)	用も検討中。
		ハル混入率	同上。 電解構での電解性能向上にけ混入率を極小化す
		暫定 1%	る技術が必要。
再	同時	電流効率	ロシア RIAR およびサイクル機構等国内実績に
処 理	電解	60~80%	的な条件。工学的には裕度が必要。 (塩素化溶解以下も同様)
	塩素化	溶解率	ロシア RIAR およびサイクル機構等国内実績に 基づき工学的判断に上り設定
	溶解	100%	データ拡充により実現性、実現時の条件(塩素
			ガス供給時間等)把握が必要。
	NM	FP回収率	レンク RIAR わよいサイクル機構等国内美額に 基づく。
	除去 90%		
	MOX	HM 回収率	ロシア RIAR およびサイクル機構等国内実績に 基づき工学的判断により設定。
	共析	U/Np/Pu : 90%	ロシア RIAR でのホット試験実施。プロセス運
		Am/Cm : 0.1%	転条件把握(Pu 富化度、電流効率等)の見通し有り。
	MA回収	HM 回収率	ロシア RIAR およびサイクル機構等国内知見を 踏まえ 理論解析に基づき設定
	(絞り電解)	U/Np/Pu : 99.9%	ロシアRIARでホット試験実施。実用上絞り電
		Am : 99%	解は困難な見込み。   代替技術としての沈殿法でも相当のデータ整備
		Cm : 95%	が必要。
	総合	耐食性	国内知見に基づきパイログラファイトから緻密
	(電解槽)	1 年以上	11 / 12 / 2 変更し間長性同工に自処をうける   も、今後の機器設計には基礎データの拡充が必要。
			サイクル機構にて高耐食性を期待した CCIM を開 発中。

表	5.2.21	酸化物電解法に関す	る技術的成立性評価(1/2)
---	--------	-----------	----------------

	技術	設計要求事項	技術的成立性
廃塩処理	FP リン酸塩処理	ガラス固化体浸出速度 ホウケイ酸ガラス並	<b>FP</b> リン酸塩にリン酸ガラス基材を添 加し固定化。 ロシア RIAR 等の知見に基づき <b>FP</b> 添 加率が 27.5%と高いが実用化には基礎デ ータの相当の拡充が必要。
	余剰塩処理	ガラス固化体浸出速度 ホウケイ産ガラス並	余剰塩をリン酸により展開しリン酸ガ ラス基材を添加し固定化。 ロシア RIAR 等の知見に基づき FP 添 加率が 45%と高いが実用化には基礎デー タの相当の拡充が必要。
その他	塩素ガス取り扱い		ロシア RIAR での知見により回収には 深冷分離法を採用。工学規模原子力施設 での使用は未知。

# 表 5.2.22 酸化物電解法に関する技術的成立性評価(2/2)







図 5.2.2 酸化物電解法の概略プロセスブロックフロー



図 5.2.3 プロセス廃棄物処理フロー



図 5.2.4 タイムチャート結果(運転開始から7日目まで)







図 5.2.6 電解装置の機器概念図



図 5.2.7 ガラス固化溶融炉の機器概念図



H 集合体組立工程の在庫

I 新燃料貯蔵庫の在庫

- ⑦ U酸化物粉末並びに金属 Uの受け入れ
- ⑧ 新燃料集合体の MBA-3 から MBA-4 への移動
- ⑨ 新燃料集合体の払い出し





図 5.2.9 酸化物電解法リサイクルプラント全体建屋イメージ図



図 5.2.10 リサイクル建屋の概略平面図(1/4) -B1F-



図 5.2.11 リサイクル建屋の概略平面図(2/4) -1F-



図 5.2.12 リサイクル建屋の概略平面図(3/4) -2F-



<u>非管理区域 | 管理区域</u>

図 5.2.13 リサイクル建屋の概略平面図(4/4) -3F-



図 5.2.14 リサイクル建屋の概略立面図



図 5.2.15 燃料貯蔵建屋の概略平面図



図 5.2.16 燃料貯蔵建屋の概略立面図





図 5.2.18 廃棄物処理建屋の概略平面図(2/3) -1F-



図 5.2.19 廃棄物処理建屋の概略平面図(3/3) -2F-



図 5.2.20 廃棄物処理建屋の概略立面図











図 5.2.23 建設費の内訳





#### 5.3 多様な燃料サイクルシナリオへの対応

5.3.1 増殖比の効果

ここではリファレンス炉心および増殖比1.05炉心に対する酸化物電解法シス テムの主な相違点のみを示す。増殖比の差異を踏まえたシステムの評価につい ては、5.3.5(2)経済性重視型炉心・燃料仕様に示す。

(1) 電解処理量

酸化物電解法では質量管理で臨界防止を管理しているため、例えば電解工程の1バッチ当たりのPu取扱量は約6kgに制限している。このことからリファレンス設計で1バッチの電解処理量は56kgHMと設定した。リファレンス炉心における使用済燃料中の平均Pu富化度は約10%であったが、増殖比1.05炉心における使用済燃料では径ブランケットが削除されているためPu富化度は約15%となっている。よって、増殖比1.05炉心に対する設計では1バッチの電解処理量は38kgHMとする必要がある。

(2) 電解処理時間

リファレンス設計ではMOX共析電解前の溶融塩中のU/Pu比を30%とするために、同時電解で76%のUO2を回収する。増殖比1.05炉心に対する設計ではPu 富化度が高いために同時電解で60%のUO2を回収するに止めることができ、処理時間の低減が図れる。しかしながら、逆にPuの絶対量が増加しているため、MOX 共析電解の処理時間が増加する。

(3) 平均燃焼度

リファレンス炉心では炉心+ブランケットの平均燃焼度は63GWd/tであるが、 増殖比1.05炉心では径ブランケットが削除されたことにより平均燃焼度は 108GWd/tとリファレンス離心に比べて約1.7倍となっている。この効果として は、発電電力量当たりの再処理費用の低減が図れる。

(4) 発熱量

平均燃焼度の増加に伴い、Cm、FP等発熱性核種も増加していることから、 増殖比1.05 炉心の使用済燃料の発熱量もリファレンス炉心に比べて約1.8 倍とな っている。その結果、使用済燃料キャスクの本数増加に伴う使用済燃料貯蔵設 備への影響、およびガラス固化体等、廃棄物発生量の増加が考えられる。 5.3.2 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方

UO<sub>2</sub>燃料軽水炉からの使用済燃料中のPu富化度は1%程度である。酸化物電解 法システムを用いて、この使用済燃料50tHMを再処理し高速炉燃料を製造する 場合、Pu富化度30%再処理顆粒を製造するものとすると、製品としてはUO<sub>2</sub>顆 粒が約48.5t、MOX顆粒が約1.5tとなる。高速炉燃料として利用可能なのは主に MOX顆粒であり、小型プラントでは経済的にも不利である。そこで、Pu富化度 が約4%とUO<sub>2</sub>軽水炉燃料よりはPu富化度の高いPuサーマルMOX軽水炉燃料の 処理を考えた場合に限定する。

本検討では、 MOX軽水炉燃料(平均燃焼度60GWd/t)を処理した場合のシ ステムへの影響を評価する。また、物質収支を評価し、再処理製品としての価 値を評価する。

(1) システムへの影響

前処理では、軽水炉燃料の集合体を受け入れるための施設改造が必要となる。 集合体の全長は軽水炉燃料および高速炉燃料とも約4mであるから、受入設備に 大きな変更は必要ないが、集合体形状、ピン径が異なるため、集合体解体設備 からは改造が必要となる。

再処理では、Pu富化度が高速炉燃料よりも低いため核的制限値が緩和され、 電解装置の1バッチ当たりの燃料処理量を増加させることが可能である。また、 Pu富化度30%のMOX顆粒を得るためには、同時電解で90%のUO2を回収する必 要があり、処理時間が長くなる。しかし、MOX共析ではMOX回収量が少ないた め、ここでは処理時間の短縮が計られる。

(2) 再処理製品への影響

MOX軽水炉燃料対応システムの物質収支結果を表 5.3.1に示す。50tHM/yの 処理で再処理製品の内、同時電解析出物は約41tHM、MOX共析析出物は6tHM、 絞り電解析出物は0.3tHM生成する。また、製品中へのFP混入率は平均すると 0.6wt%程度であるが、高速炉燃料となるMOX共析析出物中のFP混入率はリフ アレンス炉心対応システムの約2.4倍である1.3wt%となり、設計要求(1.2wt% 以下)を満足するためには除染能力を向上させる必要がある。

5.3.3 FP 回収の検討

設計要求で謳われているCs、I、Tc、Srの4元素について、酸化物電解法による分離回収の検討を行った。

(1) Cs の分離回収

FP回収を前提条件としていないプロセスでは、電解槽へ移行したFPのCsは浴 塩構成元素の同位体であり、化学操作により浴塩から分離されることなく余剰 塩の廃棄物に付随して、フツリン酸ガラス固化体に添加される。

そのためCsを分離回収するとすれば、浴塩と混合される電解工程の前で行う 必要がある。回収した燃料粉末を減圧下で1000℃に加熱して、Csとその化合物 を揮発させる方法が考えられる。使用済燃料中では、Csは単体ではなく化合物 CsIとなっている可能性があるため、CsI(沸点 1280℃)、Cs(沸点 760℃)が混在 した状態で揮発される。この方法の課題としては、ロール矯正法で回収した比 較的粒径が大きい燃料粉末からのCsとCsIの揮発率に関する試験等での確認、ま た、Cs、CsIを効率的に捕集するための装置の形状、構造、材質の選定、高温下 で処理を行うため細粒化した燃料の再焼結等が挙げられる。

(2) I の分離回収

FP回収を前提条件としていないプロセスでは、ロール矯正法で機械的に脱被 覆を行うため、使用済燃料中でMo、Cs、Uと化合物を形成している殆どのIが、 揮発することなく電解工程へと移行する。浴塩中では、浴塩やFPのCsと化合し てCsI(沸点 1280℃)の形態で存在し、運転温度が約600~700℃である同時電解 では揮発しない。しかし、塩素化溶解で吹き込まれる塩素ガスにより、CsIとな っているIイオンが酸化され揮発する。CsIはオフガス処理系へ移行したIとの反 応により、CsClとI<sub>2</sub>になるため、I<sub>2</sub>は揮発する。オフガス処理系へ移行したI<sub>2</sub>に は、塩素化溶解に使用された塩素ガスが同伴するため、ヨウ素フィルターによ る吸着ではなく、コールドトラップにより回収される。

Iの分離回収方法としては、コールドトラップに捕獲された結晶状態のIを、純水またはヨウ化カリウム溶液によって洗浄し、ヨウ素水として単離することが考えられる。Csを回収する目的で、電解工程の前に熱処理工程を付加した場合には、ほぼ全量のIがCsと共に熱処理工程でオフガス処理系に移行する。この時の課題としては、Cs回収の場合と同様に、Cs、CsIを効率的に捕集するための装置の形状、構造、材質の選定等が挙げられる。

(3) Tc の分離回収

FP回収を前提条件としていないプロセスでは、塩素化溶解でTcは揮発性塩化物(沸点 300℃)となり、他の揮発性FP塩化物(Mo、Sb等)とともに揮発して、コールドトラップにより捕獲される。

Tcの分離回収を行うためには、コールドトラップを定期的に希硝酸で洗浄して捕獲された揮発性FP塩化物を水溶液として回収した後で、過酸化水素水等で

Tcを7価のTcO4 に変化させて陰イオン交換樹脂カラムを通すことによって、 TcO4 を選択的に吸着させることが考えられる。これにより、他の揮発性FPから Tcを単離回収することが可能となる。活量の低下によりTcCl4の状態で溶融塩中 に溶解しているものについては、液体Cdによる抽出分離が考えられる。この時、 TcはNMと共に、液体Cd中に抽出される。Cdを蒸留した後、酸素雰囲気で加熱 することにより、Tcは蒸気圧の高いTc2O7(沸点 311℃)となり揮発するため、他 のNMから酸化物の形態で分離することが可能である。揮発したTcについては、 別途コールドトラップを設けることにより回収する。

(4) Sr の分離回収

FP回収を前提条件としていないプロセスでは、Srはリン酸沈殿工程でリン酸 塩として沈殿回収され、鉛リン酸ガラス固化体とする。

金属Srを得る方法として、SrCl<sub>2</sub>とNaClの混合物を融解した後、電解によっ て分離する方法がある。絞り電解後の浴塩中では、Srの濃度は1%程度と非常に 低いが、電解電位をコントロールすることで金属Srの回収は可能である。回収 作業の効率を向上させる方策として、回収物の比放射能は低下するが試薬とし てSrCl<sub>2</sub>を投入することが考えられる。回収されたSrに混入しているBaは、回収 物が溶融塩から分離されたものであることから湿式の方法を適用して除去する。 Srを回収するための電解条件が、今後の研究課題である。

5.3.4 MA 回収代替技術の検討

酸化物電解法ではMA回収技術として絞り電解法を採用している。しかしなが ら、析出電位を-3.0V程度に精度良く制御する必要があり、技術的にも課題が残 っている。一方、絞り電解法の代替技術として、MAを炭酸Naと反応させ、酸 化物として沈殿させる炭酸沈殿法があり、国内外でも試験が行われ実用化の可 能性を持つ。そこで、本検討では、MA回収の代替技術としてこの炭酸沈殿法に ついて検討した。

(1) 炭酸沈殿プロセス

沈殿法によるMAの回収は溶融塩中に炭酸ナトリウムを投入することにより、 MAおよびFPそれぞれの、酸素原子との親和力の違いを利用して酸化物として 沈殿させる化学反応を利用した分離法である。Ce、Eu、Amを用いて実施され た試験では、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を少量ずつ添加することにより、Ce→Am→Euの順に沈殿 が生じ、それぞれ分離沈殿できること、また、Amの沈殿率は約97%であること が確認されている。 (2) 酸化物電解法システムへの影響

MA回収法として現在検討している絞り電解法を、炭酸沈殿法に置き換えた場合、プロセスフローは以下の通りとなる。

- ・同時電解~MOX 共析を 20 回繰り返した後、UO<sub>2</sub>回収を実施。
- ・炭酸ナトリウムを投入し FP を沈殿回収。
- ・炭酸ナトリウムを投入し TRU を沈殿回収。
- ・TRU 沈殿物は塩除去後、製品として払出。
- このプロセスによる酸化物電解法システムへの影響は以下の通りである。
  - ・収納容器、炭酸ナトリウム容器、沈殿物回収のための装置等が新たに必要。
  - 沈殿物取扱装置が新たに必要。
  - ・沈殿反応は電解反応に比べて短く、処理時間の短縮が図れる。
  - ・FP は酸化物形態であり、ホウケイ酸ガラス固化し処分する。

5.3.5 多面的評価向け炉心・燃料仕様における再処理システムの評価

多面的評価向炉心で照射した使用済燃料を受入燃料として再処理した場合に ついて評価し、リファレンスシステムと比較検討した。

(1) 資源重視型炉心·燃料仕様

炉心仕様が異なると、再処理システムにも少なからず影響を及ぼす。酸化物 電解法の場合、主にU/Pu比が異なると最も影響を受ける。これは、MOX共析で Pu富化度を30%に固定しているため、その比率を合わせるためは同時電解法で 回収するUの割合を変動させるからである。これにより燃料に含まれる各元素の 移行率が変動する。また、同時電解にかかる処理時間、MOX共析にかかる処理 時間が変動することで機器台数等への影響も考えられる。

リファレンス炉心と資源重視型炉心を比較すると、その燃料組成に大きな変動はなく、同時電解で回収するUの割合は同等であるため、システムとして大きな変動はない。よって、燃料物質の移行率、経済性等はリファレンスシステムにおける評価結果と同等であり、再処理単価は37.3万円/kgHM、再処理にかかる燃料サイクル費は0.55円/kWhとなる。

(2) 経済性重視型炉心・燃料仕様

前述のように、酸化物電解法はU/Pu比に対して大きく影響を受ける。リファ レンス炉心と経済性重視型炉心を比較すると、U/Pu比が8.8から5.5に大きく変 更している。この影響は5.3.1増殖比の効果で述べた影響と同等のものである。 ここでは、この影響を定量的に評価した。なお、比較対象とするリファレンス システムは5.2.3技術的成立性の向上に対する経済性への影響評価で述べたもの

#### とした。

(i) 物質収支

物質収支結果を表 5.3.2に示す。HMについては、同時電解のUO<sub>2</sub>析出率を76% から60%に低減したことで、析出量がリファレンスシステムに対して約70%低減 している。代わりに、Puのインベントリーが増加したことでMOX共析析出物が リファレンスシステムに対して約48%増加している。

FPについては、平均燃焼度の増加に伴い、いずれの析出物、廃棄物中にもリファレンスシステムの約2倍量となっている。

(ii) 廃棄物発生量

高レベル廃棄物であるNM分離電解析出物、リン酸沈殿物、余剰塩はリファレ ンスシステムに比べていずれも約2倍となっている。NM分離電解析出物の処分 廃棄体は発熱量を考慮して本数を制限しており、またリン酸沈殿物、余剰塩は ガラス固化体への充填率で本数を制限している。よって、本炉心に対するシス テム設計では、いずれの処分廃棄体もリファレンスシステムに比べて2倍の発生 量となり環境への影響が増大する。

また、単位発電電力量当たりの廃棄物発生量として評価した場合でも本炉心 に対するシステム設計はリファレンスシステムの約1.2倍となる。

以上のことから、環境負荷に対しては、Cs、Srといった高発熱性核種の分離 処分等のオプションを含めて今後廃棄物発生量の低減に向けた研究開発を進め る必要がある。

(iii) 主要機器台数

本炉心に対して、年間処理量50tHMを満足するために必要な主要機器台数を タイムチャートを基に評価した。機器台数の評価結果を表 5.3.3に示す。

受入および前処理は処理量に余裕があるため機器台数の増加はなかった。再 処理では、1バッチ当たりの電解処理量が56kgHMから38kgHMに変更になり必 要処理回数が増加することから電解槽は10基から13基に、塩除去装置(UO<sub>2</sub>用、 MOX用を含む)は3基から5基に増加した。析出物粉砕装置はリファレンスシス テムでも余裕があるため、増加はなかった。

(iv) 経済性への影響

(a) 建設費への影響

主要プロセス設備費の内、受入・前処理は主要機器台数に変更がないため大 きな影響はないが、再処理は主要機器台数の増加に伴いリファレンスシステム のコストに対して約1.3倍と評価した。

廃棄物処理・貯蔵設備費の内、高レベル廃棄物処理・貯蔵は発生量が約2倍と なることから、処理量も2倍になり、結果としてリファレンスシステムのコスト に対して約1.6倍(処理量に対する2/3乗則を適用)と評価した。その他の廃棄物 処理・貯蔵については処理容量に余裕があることから大きな影響はないと考え られる。

本炉心の使用済燃料集合体の発熱量は平均でリファレンスシステムの2倍で あり、その結果、使用済燃料貯蔵設備はリファレンスシステムのコストに対し て1.6倍(必要量に対する2/3乗則を適用)と評価した。

その他の設備の内、分析、計装制御については、主プロセス設備の機器増加 を考慮する必要があるが、保守についてはセルの増加がないので、クレーン等 の保守機器の増加はないものと考えられる。ユーティリティについてはリファ レンスシステムで余裕を見ていることから対応可能と考えられる。

リサイクル建屋については再処理工程機器数の増加に伴い再処理に関係する セル容積、建屋容積が増加する。廃棄物処理・貯蔵建屋については設備の増加 が無いためコストの増加はない。使用済燃料貯蔵建屋は必要なキャスク収納体 数が約2倍となっていることから、建屋費も約1.6倍(必要量に対する2/3乗則を 適用)と評価した。

以上を考慮すると、本炉心対応システムの建設費はリファレンスシステムの 約1.2倍と評価した。

(b) 年間運転経費への影響

人件費は再処理工程機器の増加に伴い10名(電解工程・塩除去工程に各々5 名ずつ)増加する。廃棄物処理・貯蔵、使用済燃料貯蔵の設備増加に伴う人員 については、直勤務者の内日勤が可能な1班の応援要員で賄うことで対応可能と した。

機器交換費は設備費の増加に伴いリファレンスシステムに対して約1.2倍と評価した。

定期検査費は処理規模は変わらないため変更無しとした。

消耗品等費は塩素・酸素等のガス使用量、溶融塩・リン酸等の試薬類、ルツ ボの交換数等の増加に伴いリファレンスシステムに対して約1.4倍と評価した。

(c) 再処理単価・燃料サイクル費(再処理分)

以上の評価を基に再処理単価を算出すると44.1万円/kgHMとなり、現行シス テムの37.3万円/kgHMより約20%高い。ただし、使用済燃料の平均燃焼度が高 いため、再処理にかかる燃料サイクル費は0.37円/kWhとなり、現行システムの 0.55円/kWhよりも約30%安くなる。

### [参考文献]

- A. V. Bychkov, et al. : "Pyroelectrochemical Reprocessing of Irradiated FBR MOX Fuel", Proc. Global 1997, Vol. 2, pp. 912-917 (1997).
- Y. Tsuboi, et al. : "Modernization of Fuel Production facilities for BN-600 Hybrid Core", Proc. of Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Mar.28 (2002).
- K.Fujii, et al. : "Conceptual Design on Oxide Electrowinning Method for FR Fuel Cycle", Proc. Global 2003 (2003).
- A.R.Brunsvold, et al. : "Design and Development of a Cathode Processor for Electrometallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel", Proc. ICONE8, ICONE-8702 (2000).
- 5) M. Asou, et al. : "The Corrosion Resistance Tests of Crucible Materials for the Oxide Pyro-process", Proc. Global 1999, 093 (1999).

思業	1.01 E-01	1.91E-05	4.20 E-03	5.02 E-04	1.61E-04	1.06E-01	8.23E-01	3.07E-03	$1.30 \text{E}{-}02$	1.84 E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.41E-01
余剰塩	$4.24 \text{E} \cdot 06$	$0.00 \pm 000$	5.80E-07	4.00 E-06	$6.11 \text{E} \cdot 06$	1.49 E-05	4.96 E-01	1.62 E- 03	6.71E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	5.04E-01
リン酸 沈殿物	1.02 E-04	2.14 E - 08	4.99 E- 05	1.06E-02	$1.62 \text{E} \cdot 02$	2.70E-02	1.32 E- 03	8.56E-01	3.55E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 000$	0.00E+00	4.41E+00
絞り電解 析出物	1.13E-01	2.14 E - 05	5.14E-02	1.05E+00	3.09 E-01	1.53E+00	2.64 E-04	1.72 E-04	3.97 E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	$3.97 \text{E}{-}01$
MOX 共析 析出物	2.03E+01	3.85E-03	9.20E+00	1.13E-02	$3.45 \text{E}{-}03$	2.95E+01	2.78E-03	1.81E-03	$4.21 \text{E} \cdot 02$	3.48E-01	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 000$	0.00E+00	$3.94 \text{E}{-}01$
NM 分離 電解 析出物	2.26E-02	4.29 E-06	1.02 E-02	1.13E-02	3.45 E - 03	4.76E-02	2.78E-03	1.81E-03	4.21E-02	3.13E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.18E+00
同時電解 析出物	2.03E+02	$3.86 \text{E}{-}02$	5.14E-02	1.13E-02	$3.45 \text{E}{-}03$	2.03E+02	2.78E-03	1.81E-03	$4.22 \text{E}{-}02$	6.14E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.60E-01
オフガス	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 000$	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	1.33E-01	1.95E+00	$0.00 \pm 000$	2.37E+00	4.45E+00
いい廃棄物	2.24E-01	4.25 E-05	9.33E-03	1.10E-03	3.36E-04	2.35E-01	1.33E-03	8.67E-04	4.10 E- 03	4.10 E- 03	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	1.04E-02
受入	2.24E+02	$4.25 \text{E} \cdot 02$	9.33E+00	1.10E+00	3.36E-01	2.35E+02	1.33E+00	8.67E-01	4.10E+00	4.10E+00	1.33E-01	1.95E+00	0.00E+00	2.37E+00	1.48E+01
元素	U	Np	Pu	Am	Cm	HM 合計	ALM	ALE	RE	NM	HG	VFP	T	NG	FP 습탉

表 5.3.1 MOX 軽水炉燃料対応酸化物電解法システムの物質収支評価(1日当たりの平均収支)
(1日当たりの平均収支)	
、ステムの物質収支評価	
<b>问経済炉心対応酸化物電解</b> 法シ	
5.3.2 多面的評価	
表	

_	02	05	<b>02</b>	04	04	01	00-	03	02	03	00-	00-	00-	00-	00
思	8.36E-(	6.32E-(	1.55E-(	6.21E-(	2.41E-(	1.00E-(	1.98E+	6.00E-(	3.25E-(	3.48E-(	0.00E+	0.00E+	0.00E+	0.00E+	2.02E+
余剰塩	1.45 E-05	$0.00 \pm 000$	2.14 E-06	4.96 E-06	9.13 E-06	3.07E-05	1.19E+00	3.16E-03	1.68E-02	0.00E+00	0.00E+00	$0.00 \pm 0.00$	0.00E+00	0.00E+00	1.21E+00
リン酸 沈殿物	3.48E-04	$2.92 \text{E}{-}07$	1.84E-04	$1.32 \text{E}{-}02$	$2.43 \text{E}{-}02$	$3.80 \text{E}{-}02$	$3.17 \text{E} \cdot 03$	1.67E+00	8.90E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.06E+01
絞り電解 析出物	3.86E-01	2.92 E-04	1.89E-01	1.30E+00	$4.61 \text{E}{-}01$	2.34E+00	6.34 E-04	3.36E-04	$9.94 \text{E}{-}01$	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.95 E-01
MOX 共析 桥出物	6.93E+01	$5.24 \text{E} \cdot 02$	3.39E+01	1.40E-02	5.15E-03	1.03E+02	6.66E-03	3.53E-03	1.05 E-01	6.57E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.72E-01
NM 分離 電解 析出物	7.71E-02	5.83E-05	$3.77 \text{E} \cdot 02$	1.40 E-02	5.16E-03	1.34E-01	6.66E-03	3.54E-03	1.06E-01	5.91E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.03E+00
同時電解 析出物	1.16E + 02	8.74E-02	1.90E-01	$1.40 \text{E} \cdot 02$	5.16E-03	1.16E+02	6.67E-03	3.54E-03	1.06E-01	1.16E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.27E+00
オフガス	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	$2.95 \text{E} \cdot 01$	4.04E+00	4.57E-05	3.94E+00	8.28E+00
ハル 廃棄物	1.86E-01	1.40E-04	$3.44 \text{E} \cdot 02$	1.36E-03	5.02E-04	2.22E-01	3.19 E- 03	$1.69 \text{E}{-}03$	1.03E-02	7.74E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	$2.29 \text{E} \cdot 02$
受人	1.86E+02	1.40E-01	3.44E+01	1.36E+00	5.02E-01	2.22E+02	3.19E+00	1.69E+00	1.03E+01	7.74E+00	$2.95 \text{E} \cdot 01$	4.04E+00	$4.57 \text{E} \cdot 05$	3.94E+00	3.12E + 01
元素	U	Np	Pu	Am	Cm	HM 合計	ALM	ALE	RE	NM	HG	VFP	T	NG	FP 合計

		(処理規模 50tHM/y)			
	機器台数(基)				
機器	増殖比 1.05 炉心	リファレンス炉心			
	対応システム	対応システム			
集合体受入装置	1	1			
集合体解体装置	1	1			
脱被覆装置	1	1			
燃料粉混合装置	1	1			
電解用燃料粉混合装置	1	1			
ハル洗浄装置	1	1			
電極等装脱着装置	2	2			
電解装置	8	6			
析出物粉砕装置	2	2			
析出物搔取装置	1	1			
塩除去装置	5	3			

# 表 5.3.3 多面的評価向経済炉心対応酸化物電解法システムに必要な主要機器台数

## 5.4 技術開発項目

酸化物燃料対応の酸化物電解法における、技術開発項目を表 5.4.1に示す。主要な技術開発課題は以下の通りである。

(1) 全般

プロセスの原理的な成立性の実証途上にあり、基礎データの充足が重要であ るとともに、移行率などの安全評価上のデータの拡充が必要であり、詳細なシ ステム設計を進める上で不可欠である。

電解装置などの各設備機器については、遠隔操作、高温融体取扱いを前提とし、耐震(免震)設計などの具体化を図り、工学規模の実証を要する。

また、計量管理技術(サンプリング代表性など)の確立、および保障措置体 系の検討が必要である。

(2) 前処理工程

集合体の解体では、レーザー式解体技術を検討しているが、集合体内部の燃料ピンを破損させない最適切断条件の確認が必要である。

脱被覆技術については、燃料の粉体化も考慮し、機械式脱被覆(ロール矯正/ ハンマ打撃法、多軸せん断粉砕法など)を適用することとしているが、工学規 模の設備における粉体化燃料の回収率を確認する必要がある。一方、熱的脱被 覆技術を適用する場合には、粉体化燃料の回収率の他に高Pu富化度燃料への適 用性などを確認する必要があり、今後、各技術の開発動向を踏まえ、脱被覆技 術を選択することになる。

(3) 溶解・電解工程

同時溶解・析出、塩素化溶解、白金族元素分離、MOX電解共析の一連のプロ セスについては、原理的な成立性を確認しつつ、より一層の基礎データの充足 が必要であり、特にMOX電解共析については、FP存在下でのPu/U共析出挙動、 電流効率などの最適制御条件の把握が必要である。

電解に用いるるつぼについては、耐食性向上の観点から従来のパイログラフ アイト材に代え、緻密化ジルコンなどの代替材料を採用することとしたが、代 替材料については基礎物性の把握に加え、製造技術の確立が必要である。また、 高耐久性を有し、高い処理能力が期待できる高性能機器としてCCIM(Cold Crucible Induction Melting)るつぼの開発・適用性検討も行っていく必要があ る。 (4) 塩分離工程

電解による析出物から、同伴する塩の分離、除去には真空蒸留技術を採用することとした。塩除去性能の確認が必要である。

(5) MA 分離工程

現設計では、国内外の知見により絞り電解を採用しているが、ロシアRIARに おけるホット試験の結果から、実用上困難な見通しである。したがって、代替 技術としての炭酸ナトリウム沈殿法について、プロセスの成立性、FP分離特性 およびMA回収性能などを確認する必要がある。

(6) 廃棄物処理処分

溶融塩中にリン酸を投入してFPをリン酸沈澱物として、分離、回収する廃棄 物処理技術では、リン酸沈殿特性を確認する必要がある。

また、廃棄物処分技術としてのFPおよび余剰塩のリン酸ガラス固化技術については、これまで知見はあるものの、実用化に供するにはリン酸ガラス固化の処分適合性に関わるデータの充足から工学規模での機器開発までを必要とする。

(7) その他

上記以外にも、実用化に向けて以下の技術開発が必要である。

- ・塩素取扱い技術の開発
- ・シミュレーション技術の開発(設計研究)
- ・自動運転・遠隔保守(ロボット技術)の開発
- ・分析技術(In-site分析手法など)の開発
- ・FP回収プロセスの開発

工程	開発対象技術	技術開発項目	開発 重要度
全般	システム設計	安全設計-電解槽等の臨界設計、耐震設計、閉込め、 火災・爆発防止、高温処理対策 等	中
		安全設計方針・判断基準整備	中
		安全評価	中
		合理化設計(プロセス・電解槽・その他主要機器等)	高
		保障措置体系検討	高
		工程管理(計量管理/サンプル代表性確認)技術の開発	高
		運転自動化・遠隔保守・補修性検討	中
前処理	集合体解体(共通)	解体技術の確立(レーザー式又は機械式)	中
	機械式脱被覆(共通)	機械的脱被覆による粉体化技術開発	高
		ハル分離、洗浄技術の開発	高
	熱的脱被覆(共通)	高 Pu 富化度燃料への適用性の確認	高
		燃料回収率の確認	高
		脱被覆工程での FP 分離	高
		照射変形した燃料の脱被覆性	低
溶解・	同時溶解析出技術	Pu 存在下での挙動評価	中
電解		処理速度の評価	中
	塩素化溶解・電解技術	塩素溶解時の各元素の溶解挙動	中
		塩素ガス低減化	中
	白金族分離技術	電解による白金族 FP の分離性確認(低電流密度法等)	中
		貴金属電極検討	高
	MOX 電解共析技術	FP 存在下での Pu/U 共析出挙動評価	高
		プロセス制御性の確認(酸化還元電位の整備)	高
		顆粒特性評価	高
	オフガス処理技術	オフガス中 FP 挙動評価	中
		オフガス回収技術の開発	中
	プロセス共通	プロセスシミュレーション技術の開発	中
	るつぼ等の長寿命化技術	パイログラファイト代替材料(ジルコン)の検討評価	高
	電解装置機器開発	高性能機器(CCIM)の開発	高
	塩素ガス取扱い技術	塩素ガスリサイクルシステムの検討	中
塩分離	析出物粉砕技術	析出物粉砕装置の開発	低
	真空蒸留技術	塩除去性能評価	中
		蒸留分離装置の開発	中
MA 分離	MA 回収技術	MA 回収技術の開発(絞り電解又は炭酸 Na 沈殿法)	高
		Am、Cm回収性評価	高
廃棄物	リン酸沈殿技術	リン酸沈殿特性の把握	中
処理		沈澱物回収技術の開発	中
処分	塩廃棄物の固化技術	固化体評価パラメータの検討	中
		鉛リン酸ガラス固化体の評価	中
		余剰塩からのフツリン酸ガラス固化体の評価	中
		金属廃棄物固化技術の評価	中
		固化装置の開発	中
	固体廃棄物の処理技術	TRU/非 TRU 廃棄物の分別処理技術の検討	中
その他	物質移送・マテリアルハン	シミュレーション技術の開発(設計研究)	中
	ドリング技術	自動運転・遠隔保守技術(ロボット技術)の開発	中
	溶融塩分析技術	分析技術(In-situ 分析手法等)の開発	高
	固体分析技術	固体分析(前処理を含む)技術の開発	中
	LLFP回収	LLFP 回収プロセスの開発	低

表 5.4.1 酸化物電解法における技術開発項目

## 6. 金属電解法

#### 6.1 金属電解法の概要

使用済金属燃料の電解処理技術は、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)において、1980年代前半から開発されてきた。EBR-II(Experimental Breeder Reactor-II)の使用済燃料(約25トン)を廃棄物として処分するため、Hot Examination Facility(HFEF)や2.2tHM/年の処理規模のFuel Conditioning Facility(FCF)において、その枢要技術である電解処理、廃棄物処理などのデ モンストレーション運転<sup>1)2)</sup>が実施されてきている。ANLでは将来5tHM/年の処 理規模とすることを狙っている。国内においても、(財)電力中央研究所、サ イクル機構などで、金属電解法に関する研究<sup>3)4)</sup>を実施している。また、米国の ほかに、英国<sup>5)6</sup>、仏国<sup>7)</sup>なども基礎的な研究を実施している。

一方、酸化物燃料の金属電解法(Li還元剤による酸化還元反応を利用したLi 還元法や電気化学に基づく電解還元法)については、軽水炉燃料を対象に、国 内において、(財)電力中央研究所、サイクル機構などで研究<sup>8)~12)</sup>を実施して おり、また、国外においては、米国<sup>13)</sup>、韓国<sup>14)</sup>などで研究を実施している。特に、 米国ANLでは100tHM/年程度の処理規模の電気化学に基づく電解還元技術を利 用した酸化物燃料金属電解法のプラント<sup>15)</sup>も検討している。

6章では、これらの技術に加え、燃料サイクルシステムの実用化を目指して、 大型規模の燃料再処理が可能な種々の改良を行った金属燃料の金属電解法再処 理システムをリファレンスとして検討を行った。さらに、この金属燃料金属電 解法再処理システムを基本として、Li還元法に基づく酸化物燃料の金属電解法、 窒化物燃料の金属電解法について、これらのシステムの特徴を加味して検討を 行った。

フェーズ I の金属電解法ついては、次の検討成果<sup>16)~22)</sup>を得た。

(1) 金属燃料の金属電解法

処理規模50tHM/年、200tHM/年のプラントの概略設計検討と評価を行った。 その結果、200tHM/年規模のプラントでは経済性目標値を達成することがわか った。また、50tHM/年規模のプラントにおいては経済性目標値をほぼ達成して いることがわかったが、さらに、機器の高性能化、運転・保守技術の改善等によ る合理化の検討が必要であることことがわかった。また、他の方法(酸化物電 解法)との比較評価を行い、金属電解法が優れていることことがわかった。

(2) 酸化物燃料の金属電解法

処理規模50tHM/年、200tHM/年のLi還元法プロセスと塩浴塩素化法プロセス

のプラントの概略設計検討と評価を行った。この製品は酸化物燃料とした。その結果、200tHM/年規模のプラントでは経済性目標値を達成することがわかった。また、50tHM/年規模のプラントにおいては、湿式と比較して高い経済性を有しているが、経済性目標を達成するには、さらなる合理化等の対策が必要であることがわかった。

(3) 窒化物燃料の金属電解法

処理規模50tHM/年、200tHM/年のプラントの概略設計検討と評価を行った。 その結果、金属燃料の金属電解法と同程度の経済性を有することがわかった。 また、他の方法(酸化物電解法、フッ化物揮発法)との比較評価を行い、金属 電解法が最も優れていることことがわかった。

フェーズIIにおいては、フェーズIの検討成果に基づき、さらに、次の点を 重点において検討した。

(1) 金属燃料の金属電解法

本プラントをレファレンスとした。プラント処理規模は、酸化物燃料の処理 量50tHM/年の炉発電量に相当する金属燃料処理量である38tHM/年とした。電 解精製槽大型化、連続式陰極処理装置(フェーズIでは回分式)等の機器の高 性能化による合理化、電解精製槽等の運転・保守技術の改善等を考慮し、プロセ スの見直し、機器等設備、セル、建屋配置等の詳細化検討と電解精製槽の臨界 安全性等の評価および経済性評価を行った。

(2) 酸化物燃料の金属電解法

廃棄物量のより少ないLi還元法プロセスとし、処理規模50tHM/年のプラント について、電解精製槽大型化等の機器の高性能化による合理化、電解精製槽等 の運転・保守技術の改善等を考慮し、プロセスの見直し、Li還元設備等の機器設 備、セル、建屋配置等の詳細化検討と評価および経済性評価を行った。

(3) 窒化物燃料の金属電解法

処理規模50tHM/年のプラントについて、フェーズIの設備をベースに、窒化 物回収設備等の見直し、検討を行い、金属燃料の金属電解法(フェーズI)と の経済性比較評価等を行った<sup>23)</sup>。なお、窒化物燃料の再処理法として、金属電 解法と異なるLINEX法プロセスの基礎研究が日本原子力研究所において実施さ れているが、このLINEX法プロセスの可能性の検討については、9章に記載して いる。 さらに、多様な燃料サイクルシナリオへの対応、すなわち、酸化物燃料の金 属電解法を例に、増殖比の効果、軽水炉から高速増殖炉への移行期における施 設のあり方などを検討するとともに、酸化物燃料と金属燃料の金属電解法の多 面的評価向炉心で照射した使用済燃料の再処理システムを検討した。最後に、 今後の枢要な開発課題を摘出した。

### [参考文献]

- J.E.Herceg, et al. : "Engineering and Acquisition of Equipment for Electromentallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel", Proc. ICONE8, ICONE-8541 (2000).
- 2) C.E.Stevenson : "The EBR-II Fuel Cycle Story", USA(1987).
- K.Sato, et al. : "Conceptual Design on an Integrated Metal Fuel Recycle System", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp.744-755, Nov.16-20 (2003).
- T.Kato, et al. : "Recovery of Plutonium and Uranium into Liquid Cadmium Cathodes at High Current Densities", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp1591-1595, Nov.16-20 (2003).
- B.Hanson, et al. : " Pyrochemistry: A Program For Industrialization", GLOBAL2003, NewOrleans, U.S.A., pp958-965, Nov.16-20 (2003).
- D.Hebditch, et al. : "Electrorefining of Uranium and Electropartitioning of U, Pu, Am, Nd and Ce", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp1574-1581, Nov.16-20(2003).
- H.boussier, et al. : "The European Pyrometallurgical Processing Research Program PYROREP : MAIN Issues", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp966-975, Nov.16-20 (2003).
- 8) T.Inoue, T.Yokoo : "Advanced Fuel Cycle with Electrochemical Reduction", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp2260-2265, Nov.16-20 (2003).
- 9) 宇佐見剛,井上正: "LiCl-Li<sub>2</sub>O系における金属酸化物の電解還元基礎研究(II) 一処理速 度向上のための原料形状とLi<sub>2</sub>O濃度の最適化一",L6,日本原子力学「2002年春の大 会」(2002).
- 10) 倉田正輝, 也: "酸化物のLi還元前処理を付加した金属燃料リサイクルプラントの物質収支 評価", N22, 日本原子力学会2002年「秋の大会」(2001).
- 11) 倉田正輝,他: "酸化物燃料の電解還元法",溶融塩および高温化学2003, Vol.46, No3, pp211-220(2003).
- 12) 小山正史,他:"CPFにおける金属電解法乾式再処理プロセス試験(6)—ウランを用いた連続 プロセス性能評価予備試験—",B56,日本原子力学「2004年春の大会」(2004).
- S.X.Li, et al. : "Electrochemical Reduction of Uranium Oxide Fuel in a Molten LiCl/Li<sub>2</sub>O System", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., 986-993, Nov.16-20 (2003).
- 14) B.H.Park, et al. : " A Study on the Electrolytic Reduction of Uranium Oxide in LiCl-Li2O Molten Salt", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp994-998, Nov.16-20 (2003).
- 15) A.A.Frigo, et al. : " A Conceptual Advanced Pyroprocess Recycle Facility",GLOBAL2003,New Orleans,U.S.A., pp981-984, Nov.16·20(2003).
- 16) 藤岡綱昭,他: "金属燃料リサイクルシステムの設計評価", JNC TY9400 2001-028 (2001).

- 17) 田中 博,他: "再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究 (フェーズ I) 成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- H.Tanaka, et al. : "Conceptual design Study on Advanced Reprocessing Systems for FR Fuel Cycle", GLOBAL 2001, Paris(2001).
- 19) 西村友宏,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計評価(その1)-リサイクル施設の前 提条件、設計、評価-",N18,日本原子力学会「2001年秋の大会」(2001).
- 20) 坂村義治,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計評価(その2) 電解精製法によるU、
   Pu、MAの回収-",N19,日本原子力学会「2001年秋の大会」(2001).
- 21) 尾形孝成,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計評価(その3) -射出成型による燃料 製造システム-", N20,日本原子力学会「2001年秋の大会」(2001).
- 22) 塚田毅志,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計評価(その4) -使用済塩処理と廃棄 物処理システム-", N21,日本原子力学会「2001年秋の大会」(2001).
- 23) 藤岡綱昭,他:"窒化物燃料の乾式再処理システム",N17,日本原子力学会「2001年秋の 大会」(2001).

## 6.2 リファレンスシステムの設計(金属燃料対応)

6.2.1 施設概念構築

(1) プロセス

金属燃料の処理規模は38tHM/年(新燃料として)とした。使用済燃料として は、34.3tHM/年(燃料集合体数として199体)で、その内訳は、炉心燃料18.6tHM/ 年(燃料集合体数として167体)(炉心燃料と軸方向ブランケット燃料7.6tHM/ 年含む)、径方向ブランケット燃料8.1tHM/年(燃料集合体数として32体)で ある。

金属燃料金属電解法のプロセスフロー概念図を図 6.2.1に、金属燃料リサイク ルプラントの再処理プロセスのブロックフロー図を図 6.2.2に示す。本検討では、 ANL開発のシステムに比べ、大きい処理能力が要求されており、合理化、運転 性の観点から、大処理量が可能な自動電極装填装置付き大型電解精製槽、連続 式固体陰極処理装置、連続式液体Cd陰極処理装置の採用、固体陰極/液体Cd陰極 の同時電解法の採用、廃棄物低減の観点から、電解前の燃料中Naボンドの除去、 塩浴中Li/K比相当の還元剤使用、陰極処理装置などのるつぼのコーティング材

(保護用)との反応等により生成したUO<sub>2</sub>ドロスの塩化処理による電解精製槽 への回収、アルゴンセル内不純物(酸素、水分、窒素)のPSA (Pressure Swing Adsorption)法による浄化などの改良を図った。本プロセスの構成は、フェー ズIのプロセス<sup>1)</sup>と同様、酸化物燃料の金属電解法のように、径方向ブランケッ ト燃料ついて再処理のバイパスを行うことを前提とせず、炉心燃料と径方向ブ ランケット燃料とを再処理する構成とした。これらのフロー図に基づき、主要 プロセスの改良点などの特徴について以下に述べる。

(i) ピンせん断工程

燃料集合体を解体した後の燃料ピンを機械式せん断機により約10mm程度<sup>2)</sup> (現行の湿式再処理のせん断片の長さは25~35mm程度)にせん断し、せん断 片を陽極バスケットに装荷する。

(ii) ナトリウム (Na) ボンド除去工程

金属燃料のボンド材として用いられるほとんどのNaが下流の電解精製槽の塩 浴に混入していくと融点が上昇し、塩浴の取り替え頻度が多くなり、塩浴廃棄 物量が増加する。塩浴廃棄物量を低減するため、Ar気流中(減圧下)、約500℃ の条件で燃料中Naを粗分離するプロセス<sup>3)</sup>を採用した。この処理により、揮発 性FPもある程度除去できる。

(iii) 炉心燃料と径方向ブランケット燃料の別々の電解精製

核拡散抵抗性の向上のためには、炉心燃料と径方向ブランケット燃料との混 合処理を原則としているが、本概念設計研究では、経済重視型に対応した径方 向ブランケットを削除した場合の検討等も行う必要がある。その際の評価をし 易くするために本設計評価においては径方向ブランケット燃料と炉心燃料をそ れぞれ別々の電解精製槽を使用して電解精製するプロセスを採用した。この方 法には、径方向ブランケット燃料の電解精製時の塩浴が炉心燃料の電解精製時 の塩浴による汚染を少なくし、塩廃棄物を低減できるという利点があるが、核 拡散抵抗性とのバランスで決めるべきものである。なお、炉心燃料と径方向ブ ランケット燃料の混合設備を設ければ、これらの混合燃料の電解精製も可能で ある。

(iv) 陽極溶解・U 回収と陽極溶解・U-Pu-MA 回収 4)~10)

溶融塩としてLiCl-KClを使用し、この共晶溶融温度360℃より高い約500℃で、 溶融塩中のU:Puの存在比として1:3程度で連続処理する。このため、電解精製槽 の溶融塩中のU、Puの存在量を40kg、130kg近傍に維持した状態で、せん断燃 料を陽極溶解させるとともに、固体陰極でのUの回収と液体Cd電極での U-Pu-MAの回収を同時に行う。この際、代表的な元素は、塩化物溶融塩中で図 6.2.3に示すような酸化還元電位をもつため、塩化物生成自由エネルギー<sup>11)</sup>の差 によって電位を適切にコントロールすることにより、貴な金属FP(NM)を溶 解させずに陽極バスケットにハルとともに残留させる。

(v) 塩処理、廃棄物処理<sup>12)~17)</sup>

U-TRUの還元剤としてLi-Kを用い、それをCd中に溶解し、U、TRUを含む塩 浴と向流接触させ、U、TRUを還元抽出しCd中に回収する。廃棄物低減の観点 から、Cd、Liをリサイクルするプロセスが考えられる。Cdリサイクルプロセス は廃Cd発生量を抑制することができるので、この方法を採用した。これに対し て、Liサイクルとする場合、還元剤電解設備、還元剤電解設備から発生する塩 素ガスのリサイクル設備およびヨウ素除去の設備を設ける必要がある。Liをリ サイクルしなくても、還元剤を塩浴構成の共晶塩化物のLi/K比と同じLi-Kとす ることにより、抽出後の塩浴中LiCl-KCl組成がほぼ一定に保たれ、廃Li発生量 を抑えることができる。したがって、多くの追加設備が必要となるLiサイクル プロセスは採用せず、Li-K還元剤を使用する方式とした。Cd中に抽出された重 金属は、CdCl2を含む塩化物と接触させることにより、再酸化し、塩化物の形に して、電解精製槽側に戻す。U、TRUを回収・除去した後の浴塩中は、Csなどのアルカリ金属FP、Srなどのアルカリ土類金属FPが蓄積している。これらをカラムに詰めたゼオライトに吸着、吸蔵させることにより浴塩を再生し、リサイクルする。

(vi) 回収 U、回収 U-Pu-MA の処理<sup>18)~19)</sup>

電解精製後の回収Uは、固体陰極処理装置内において、まず、温度約950℃、 10Torrで浴塩を除去した後、温度約1370℃、600Torrで溶融処理し、インゴッ トとする。また、電解精製後の回収U-TRUは、液体Cd陰極処理装置内において、 まず、温度約600℃、30TorrでCdを除去し、温度約950℃、10Torrで塩を除去 した後、温度約1000℃、600Torrで溶融処理し、インゴットとする。ANL開発 の陰極処理プロセスは回分式<sup>18)</sup>であるが、本プロセスは使用済燃料処理量増加 に伴い、処理速度を上げるため、昇温、冷却時間の短縮を図った連続式として いる。これらのインゴットは、燃料製造工程側に送られる。

(vii) 燃料中 Zr の取り扱い<sup>20)~21)</sup>

使用済燃料中のZrは炉心燃料の場合には、3.32t/年、RB燃料の場合には、0.92t/ 年で、合計4.24t/年(新燃料中Zrは炉心3.125t/年、径方向ブランケット0.865t/ 年で、合計3.99t/年)処理する。この燃料中のZrは、フェーズIでは全量電解精 製にて回収すると想定したが、フェーズIIでは、最近のANLの試験データ等を 考慮し、使用済燃料中のZrの約10%はハル等に同伴、その約70%は電解精製槽 にて電解運転し、固体陰極、液体Cd陰極にそれぞれU-Zr、U-Pu-MA-Zrとして 回収、残りの約20%は電解精製槽にて25日毎のZr電解運転を行い固体陰極に回 収し、廃棄物とすることとした。

(2) 物質収支

上記(1)のプロセス概念をもとにプロセスフローダイアグラム (PFD) を作成 し、物質収支を評価した。金属燃料リサイクルプラントの物質収支を図6-4に示 す。下記にその移行率の設定と根拠等を説明する。

(i) 移行率の設定と根拠

固体陰極、液体Cd陰極、TRU還元抽出における各元素の分離挙動について、 各元素の塩化物生成自由エネルギー<sup>22)</sup>や溶融塩/Cd系での分離係数<sup>23) 24) 25)など に基づき、アクチニドはU、Np、Pu、Am+Cmの4つのグループに、また、FP は挙動の似ているものを7つのグループに分けて、物質収支を評価した。</sup>

陰極処理工程において、回収Uに付着している浴塩や、U-Pu-MA-Cd合金の

Cdを除去するとき、グラファイト製るつぼの表面にコーティングしたZrO<sub>2</sub>とU とが反応して、Uの酸化物を主成分とするドロスが発生する。物質収支評価では、 ドロスの発生量を約3%としたが、ドロス中のUはドロス処理工程で塩化物にし て、電解精製槽に戻されるので廃棄物にはならないとした。

以下に、主な元素の挙動を述べる。

- ① せん断燃料中のUは、陽極溶解にてUCl<sub>3</sub>となって溶け出し、残りのせん断燃料中のPuやMAは、UCl<sub>3</sub>と反応し、PuCl<sub>3</sub>やPuCl<sub>4</sub>となって溶け出し、固体陰極にほとんどの金属Uが回収され、液体Cd陰極に一部のUとTRU(PuやMA)が回収される。
- ② Np、Am+Cm、および一部のREは、液体Cd陰極においてU-TRU回収時、U-TRU回収物に混入する。混入量は、分配実験データや電解試験の結果を基に分配係数を算出して<sup>(16)(17)(18)</sup>評価した。算出した分離係数(Uを基準とした値)を以下に示す。

Np : 1

Am+Cm : 2.6

REのうち、Y、Sm、Eu (表 6.2.1の希土類1)

: **U**-**Pu**回収物に同伴せず、物質移動はないものとする。 (アルカリ 土類金属と似た挙動)

REのうち、La、Gd(表6-1の希土類2) : 100

REのうち、Ce、Pr、Nd、Pmなど(表6-1の希土類3) : 30

- ③ NMおよびMo、TcなどのFPは、陽極側に金属の状態で残留して廃棄物 となる。Zrは80%が塩中に溶解して、固体陰極と液体Cd陰極に回収され るものとした。
- ④ アルカリ金属FP、アルカリ土類金属FP、アルカリ土類金属と似た挙動 をするY、Sm、Eu、およびハロゲンFPは、一部がボンドNa除去槽でボ ンドNaとともに除去され廃棄物となる。残りは、塩化物になって電解精 製槽の塩浴中に蓄積していき、最終的には、塩処理工程のゼオライトカ ラムで除去され、ゼオライト廃棄物となる。このゼオライト廃棄物は、 高温処理し、ガラス結合ソーダライトの人工鉱物固化体とし、廃棄物処 分される。

主な核種挙動を表 6.2.1に示す。また、環境への主な核種の放出挙動を表 6.2.2に示す。

(ii) 物質収支と除染係数

炉心燃料と径方向ブランケット燃料との平均マスバランス評価結果を表 6.2.3に示す。再処理回収製品は、固体陰極で回収されるU金属と液体Cd陰極で 回収されるU-TRU合金の2種類である。回収製品に混入する不純物は、金属燃料 を構成するZrを除くと、Ce、Pr、Nd、PmなどのREで、これらの除染係数は20以 上である。物質評価結果から求めた再処理製品の重量とFP混入率(金属燃料を 構成するZrを除く)、UとTRUの回収率は、表 6.2.3に示す通りとなった。Uと TRUの回収率は設計要求の99%以上という条件を満たしている。

(3) 廃棄物

(i) 環境放出

環境へ放出される気体および主な概略処理フロー図を図 6.2.5、図 6.2.6に示 す。これらの図に示すように、前処理工程、電解分離工程等から発生するオフ ガスは、ガス中の微粒子、揮発性、準揮発性物質のヨウ素(I)、セシウム(Cs)、 トリチウム(<sup>3</sup>H)を除去した後に、排気筒から放出される。溶解塩中のほとん どのIは、残留し、下流のゼオライトカラムにて除去される。本設備から発生 するクリプトン(<sup>85</sup>Kr)、カーボン(<sup>14</sup>C)、<sup>3</sup>Hについて、単位発電量当たりの 発生量と先行湿式再処理施設からの放出量とを比較した結果を表 6.2.4に示す。 <sup>85</sup>Kr、<sup>14</sup>Cの単位発電量当たりの発生量は、先行湿式再処理施設からの放出量と も同程度であり、これらの放出核種に対する除去設備は不要とした。<sup>3</sup>Hの場合、 六ヶ所再処理施設からの放出量と同程度にするには、トリチウム除去装置が必 要なので設置した。

液体廃棄物は、発生箇所により低放射性廃液、中放射性廃液、極低放射性廃 液に分けられ、それぞれ、蒸発装置(合計3基)にて処理され、処理後の蒸留 液は希釈後、海洋放出される。トリチウム除去装置によりオフガス中から除去 される<sup>3</sup>Hは、凝縮され、液体廃棄物処理側から海洋放出される。また、分析廃 液の中で有機廃液が発生するが、専用の有機廃液処理装置にて処理される。

(ii) プロセス廃棄物<sup>26)</sup>

各工程から発生するプロセス廃棄物の処理フローを図 6.2.7に示す。また、これらの廃棄物量を表 6.2.5にまとめて示す。高レベル放射性廃棄物、TRUを含む放射性廃棄物、高 $\beta$ ・ $\gamma$ 廃棄物の区分に基づき、表 6.2.5にまとめた廃棄物発生量の根拠について以下に説明する。

(a) 高レベル放射性廃棄物

高レベル放射性廃棄物は、塩吸蔵ゼオライト、廃Naボンド、射出成型モールド(燃料製造側)からなる。廃Naボンドは、あらかじめ酸化処理したものである。これらの発生量は、塩吸蔵ゼオライト14.1t/年、廃Naボンド0.8t/年の酸化物として1.3t/年、射出成型モールド9.0t/年の合計24.4t/年である。高レベル放射

性廃棄物の処理フローを図 6.2.8に示すとおり、これらの廃棄物に、ソーダライト中の塩化物の重量比約10%、固化体中のガラスの重量比約25%となるように、乾燥ゼオライト12.2t/年、ガラススリット1.0t/年を添加、混合し、高温にて人工鉱物(ガラス結合ソーダライト)固化体を得る。この固化体はキャニスターに詰められる。このキャニスター数は、1キャニスター当たり容量150L換算にて124本である。

(b) TRU を含む放射性廃棄物

TRUを含む放射性廃棄物は、電解精製槽内の使用済みCd陰極るつぼ、せん断 プレナム、Cd蒸留処理後のNM、ドロス(ZrO<sub>2</sub>など)処理後の廃棄物(以下ド ロスという)、使用済の陰極処理用プロセスるつぼと射出成型(燃料製造側) るつぼおよびハルからなる。Cd蒸留処理後のNMは、高レベル放射性廃棄物に 相当するとも考えられるが、ここでは他の廃棄物と混合希釈されることを考慮 して、TRUを含む放射性廃棄物としている。これらの発生量は、電解精製槽Cd 陰極るつぼ4.0t/年、せん断プレナム12.8t/年、Cd蒸留処理後のNM1.0t/年、ドロ ス2.0t/年、陰極処理用、射出成型るつぼ22.4t/年(陰極処理用18.5t/年、射出成 型3.9t/年)ハル3.3t/年で、合計45.5t/年である。

電解精製槽内使用済みCd陰極るつぼは、圧縮処理後、セメント固化され、ド ラム缶に詰められる。せん断プレナム、NM、ドロスはセメント固化され、ドラ ム缶に詰められる。陰極処理用、射出成型るつぼは、粉砕後、焼却する。焼却 後の灰は、セメント固化され、ドラム缶に詰められる。ハルは、圧縮処理後、 直接ドラム缶に詰められる。これらの固化体の缶数は1缶当たりの容量200L換 算にて40缶である。

なお、Cd蒸留処理後のNMが、高レベル放射性廃棄物に属するとした場合、 廃棄物処理設備の見直しとそれに伴う廃棄物量の再評価が必要となる。

(c) 高 β · γ 廃棄物

高β·γ廃棄物は、集合体部材がある。この発生量は55.5t/年である。

集合体部材は、セメント固化され、ドラム缶に詰められる。この固化体の缶数は1缶当たりの容量200L換算にて107缶である。

(4) 機器設計

(i) 設計方針

本設計は、前述の設計条件および以下に述べる設計方針に基づいて実施した。

(a) 安全設計全般

基本的には、乾式再処理特有の安全対策を考慮した設計とし、安全上重要な

施設はこれらの系統の2重化を考慮する。

(b) 耐震設計

電解精製槽などの機器は、内蔵する放射性物質の性状、量に応じて、耐震ク ラス分類を行い、この耐震クラスに準じた設計を行う。

(c) 臨界安全設計

電解精製槽など、臨界上、有意な核物質を含むものを取り扱う容器等については、質量管理等を適用する設計とする。燃料受入れ貯蔵は形状寸法管理を適用した設計とする。

(d) 火災・爆発防止の設計

安全上重要な施設は、原則として、不燃性または難燃性材料を使用する設計 とする。Naや金属燃料等を扱う機器、装置等は、不活性のアルゴン内で取り扱 う設計とする。

(e) 閉じ込め機能(漏洩の防止等含む)

電解精製槽などの放射性物質を収納する容器等の使用材質は、使用条件に合わせ適切な材料を選定し、要求される再処理容器区分に合わせた溶接、検査を 想定した設計とする。

(f)機器等の設計、材料の設定、製作および検査

安全上重要な施設の設計、材料の設定、製作および検査は、適切と認められ る規格および基準によるものとする。

(g) 機器等の運転·保守補修

安全上重要な施設は、それらの安全機能を確認するために、必要に応じて、 運転中または定期検査等の停止時に安全機能を損なうことなく適切な方法によ り試験および検査ができる設計とする。保守セル等を必要に応じて設け、適切 な保守および修理ができる設計とする。

(h) 電源喪失に対する考慮

安全上重要な施設のうち、その安全機能を確保するために電源を必要とする 場合には、必要電源として、外部電源系統および非常用所内電源系統を有する 設計とし、非常用所内電源設備は単一故障を仮定し、独立2系統の設計とする。

(i) 共用の考慮

安全上重要な施設は、燃料製造施設等との共用により、その安全機能を失う ことのない設計とする。 (ii) 機器·設備設計

各設備の主要な機器の概略仕様を表 6.2.6に示す。以下に、主要な機器の基数、 容量、処理量等の仕様について説明する。なお、ここで、ドロス処理設備、オ フガス処理設備、廃棄物処理・貯蔵設備、分析設備、アルゴンセル内ガス冷却・ 浄化設備、冷却水設備・冷水設備は、再処理施設と燃料製造施設の共用の設備で ある。

(a) 使用済燃料貯蔵設備

1) 使用済燃料貯蔵ピット

設計要求に基づき、1年分、すなわち使用済燃料集合体199体[心燃料(軸方向 ブランケット燃料含む)167体、径方向ブランケット燃料32体]を乾式貯蔵でき る容量のピットとする。ピットの材質はステンレス鋼としている。このピッチ の寸法は、正方格子配列等の臨界計算モデルを作成し、配列ピッチを評価し、 keff=0.95以下となる配置ピッチを考慮して設置した。本検討においては燃料表 面に付着したNaはあらかじめ炉側で除去されるものとして、使用済燃料貯蔵ピ ットは空気雰囲気とした。ピット内空気を排気し、2つの冷却系統により冷却 し、ピット内に循環することによって、使用済燃料の除熱を行う。なお、燃料 表面のNa除去の程度いかんによっては使用済燃料貯蔵ピットを不活性ガス雰囲 気にする必要が生じることも考えられるので、今後、炉側との取合い条件につ いて詰める必要がある。

(b) 使用済燃料受入れ・前処理(解体・せん断) 設備

本設備は、使用済燃料貯蔵ピットから一部の使用済燃料を受入れ、燃料集合体の解体、燃料ピンのワイヤ除去、せん断、燃料せん断片中に含まれるナトリウムボンドの除去、および燃料せん断片の電解精製側への装荷などに必要な機器からなる。これらの材質はステンレス鋼としている。

1) 使用済燃料一時保管ピット

設計要求に基づき、約2週間分(プラントの処理容量、機器の故障時の復旧時間を想定)の使用済燃料集合体14体を一時保管できる容量のピットとする。このピッチの寸法は使用済燃料貯蔵ピットの場合と同様とした。アルゴンセル内の雰囲気ガスを排気、2つの冷却系統により冷却し、ピット内に循環供給することによって、使用済燃料の除熱を行う。

2) 使用済燃料解体機

集合体解体機は金属燃料、Naの火災発生防止を考慮してアルゴンセル内に設置される。集合体解体方式として機械式とレーザ式とが考えられるが、現行の

レーザ式においては、アシストガスとして酸素を使用するので、この酸素のア ルゴンセル内への混入を避けるために、機械式を採用した。

3) ピンせん断機

燃料集合体を解体した後の燃料ピンを機械式せん断機によりせん断し、せん 断片を陽極バスケットに装荷する。入量計量管理の観点から、組成分析用のサ ンプルを採取するのために、せん断機内から一部のせん断片を抜き取り、せん 断片サンプル採取後、適宜、陽極バスケットに戻す。燃料ピンのせん断片長さ は、下流の電解精製槽での溶解を促進させるために約10mm<sup>2</sup>としている。

4) ボンドナトリウム除去装置

金属燃料中ボンドNaを、Ar気流中(減圧下)、高温(約500℃~650℃)の条件下で粗分離する。このNa除去率は基礎的なデータを考慮し、炉心燃料に対して約90%(ドレン処理で燃料中全量Naの約50%を除去、熱処理で残りのNaの約80%除去)とした。ANLでは、ブランケット燃料に対しては、温度650℃、10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup>Torr真空の条件で燃料中Naを99.8%程度除去できる<sup>3)</sup>ことを確認しているため、本検討においてもブランケット燃料中のNaはほとんど除去できるものとした。なお、減圧高温下でのNa蒸留処理の際、揮発性FPの除去も期待できる。

(c) 電解分離(再処理) 設備

本設備は、炉心燃料用電解精製槽、径方向ブランケット燃料用電解精製槽、 固体陰極処理装置、液体Cd陰極処理装置などの機器からなる。

1) 電解精製槽

電解精製槽は、プラントの処理規模が大きいことを考慮し、フェーズ I の電 解精製槽より大型化させ、基数を削減した。電解精製槽の外形図を図 6.2.9に示 すが、これらの大きさは、炉心燃料用、径方向ブランケット燃料用とも同じと し、ANL-FCFの電解槽<sup>4)</sup>より大型化し、ハンドリングの高さを含め、縦約2.7m、 横約1.2m、高さ約3m<sup>27) 28)</sup>の箱型構造とした。専用の電極装填装置の電解精製 槽への寄りつきを容易にするため、箱型構造としたが、今後、電解精製槽の強 度等について検討し、より最適な構造とする必要がある。電解精製槽容器の寸 法は、縦約2.7m、横約1.2m、高さ約1mである。陽極バスケット内から一部の 貴金属、Uなどが落下しても、回収できるように、Cdプールを設けている。槽 内の各層の高さは、Cdプール層約0.1m、溶融塩層約0.4m、気相部約0.5mであ る。槽内のLiCl-KCl共晶塩は約1700kg、塩下層のCdは1000kgとした。液体Cd 陰極電極にU、Pu、MAを回収できるように、電解精製槽の溶融塩のU/Puを約 1/3程度と低く<sup>29)</sup>した。 電解精製槽の臨界安全管理については、臨界計算モデル(溶融塩中に、陽極4基、 液体Cd陰極1基、固体陰極3基)を作成し、概略の評価<sup>30)</sup>を行い、通常時の電解 運転を想定した場合、Pu同位対比を全てPu239とした条件でもk<sub>eff</sub>=0.57程度と なることを確認している。これらの主要材料はANL-FCFの電解槽において実績 のある耐食性のCr-Mo鋼製<sup>4)</sup>、または相当品とした。この材質については鉄と溶 融塩との化学反応による腐食はほとんど無視できる<sup>22)</sup>。

電解精製槽は、溶融塩KCl-LiClとし、運転温度500℃、運転圧力を微正圧とした。運転温度は塩の晶析温度360℃に、Na混入による温度上昇や今までの運転 実績を考慮して設定した。運転圧力は負圧運転が考えられるが、電解精製槽の シール部等からの漏洩により、槽外から槽内への酸素などの不純物が混入した 場合、UO2などの不溶解酸化物が生成する可能性があるので、これを避けるた めに槽内を微正圧とした。電解精製槽設置のセル内雰囲気はアルゴンガスであ るが、さらに、電解精製槽気相側に純アルゴンガスを掃気させ、電解精製槽気 相の酸素、水分、窒素の濃度をそれぞれ10ppm以下に管理し、不溶解酸化物の 発生を防止している。

炉心燃料用電解精製槽は4基とし、1基当たり8個の電極(U、TRU回収運転時: 陽極バスケット4個、固体陰極アセンブリ3個、液体Cd陰極アセンブル1個、Zr 回収運転時:固体陰極アセンブリ8個)を設ける設計とした。

また、径方向ブランケット燃料用電解精製槽は1基とし、1基当たり8個の電極 (U回収運転時:陽極バスケット4個、固体陰極アセンブリ4個、U、TRU回収 運転時:陽極バスケット4個、固体陰極アセンブリ2個、液体Cd陰極アセンブル 3個、Zr回収運転時:固体陰極アセンブリ8個)を設ける設計とした。

陽極バスケットは、ステンレス製とし、1バスケット当たり次のせん断燃料 を装荷できる容量(平均値)とした。

・炉心燃料用陽極バスケット容量

U:約7.4kg、Pu:約1.1kg、MA:約0.03kg、FP:約0.9kg

・径方向ブランケット燃料用陽極バスケット容量

U:約10.9kg、Pu:約0.45kg、MA: <<0.1kg、FP:約0.1kg</li>
 固体陰極は鉄製の棒(約50mmφ)とした。液体Cd陰極はBeO製るつぼ(内
 径約240mm、深さ約150mm)とし、Cdを約31kg装荷(深さ約80mm)したものとした。

電極の接続回路は、例えば、陽極バスケット4個、固体陰極3個、液体Cd陰極 1個の運転の場合、図 6.2.10に一例を示すように、陽極バスケットー固体陰極、 陽極バスケットー液体Cd陰極、陽極バスケットー固体陰極、陽極バスケットー 固体陰極のように接続する。陽極バスケットー固体陰極においては、電流約300A、 電圧~1V程度の条件にて、運転時間約20時間で、10kgU/極回収できる設計とし た。[ANLのFCF電解槽の運転実績{電流効率は約56%4)ベース(理論値338A・ hr/kgUに対して400~600A・hr/kgU)}] また、陽極バスケットー液体Cd陰極に おいては、電流約100A、電圧0.2~0.3V程度の条件にて、運転時間約20時間で、 3.4kg (U+TRU) /極を回収できる設計とした。[電中研・日本原子力研究所の小 型電解槽試験データベース{溶融塩中約7.5wtHM% (U/Pu比約1/2) において、 10.4wt%のU、Puを陰極電流密度約100mA/cm<sup>2</sup>において電流効率ほぼ100%<sup>8)9)</sup> の効率で回収}] 電解精製槽内に陽極バスケット、固体陰極、液体Cd陰極を装 填しての固体陰極と液体Cd陰極の同時電解については、電解精製槽内の塩を十 分攪拌することとしているので、塩中UやTRUの濃度の偏りは考えられず、成 立性をさまたげることはない考えられる。今後、電解運転の制御性については 検討する必要がある。

電解精製槽の塩中の制限値は、FPの蓄積による発熱量15kW以下(電解精製 槽の表面温度を200℃程度以下に保つための自然放熱条件)、NaCl濃度10mol% (ボンドNaの蓄積による融点上昇の制限)とした。

2) 陰極処理装置

陰極処理装置は、フェーズ I のANL-FCF陰極処理装置の回分式から処理能力 向上が期待できる連続式とし、基数を、固体陰極処理装置1基、液体Cd陰極処理 装置1基に削除した。固体陰極処理装置、液体Cd陰極処理装置の外形図をそれぞ れ図 6.2.11、図 6.2.12に示すが、これらの大きさは、いずれも、縦約6.3m、 横約2.6m、高さ約2.6mである。これらの主要材料は耐食性の非Niステンレス鋼、 または相当品としている。固体陰極処理装置の運転温度、圧力は、付着塩の蒸 留除去時、約950℃、10Torr、U等の溶融処理時約1370℃、600Torrである。電 解精製槽から発生する析出固体陰極(1個当たり主に10kgUと塩約2kg)は15個/ 日であり、容量約24Lのるつぼ1個(直径約44cm×高さ約30cm)にこの陰極2個 分入れる。固体陰極処理装置では、このるつぼを8個/日(陰極析出物60kgU/日) で処理する。(昇温、蒸留、溶融が約7時間、降温が約8時間)また、液体Cd陰 極処理装置の運転温度、圧力は、Cd蒸留除去時、約600℃、30Torr、混入塩の 蒸留除去時、約950℃、10Torr、Pu等の溶融処理時、約1000℃、600Torrであ る。電解精製槽から発生する析出液体Cd陰極(1個当たり主に3.4kgHM、 31kgCd)は10個/日であり、容量11Lのるつぼ1個(直径約28cm×高さ約20cm) にこの陰極1個分を入れる。液体Cd陰極処理装置では、このるつぼを10個/日(陰 極析出物34kgHM/日)で処理する。(昇温、蒸留、溶融が約8.5時間、降温が約 8時間)これら装置の炉は、主に、蒸留炉(昇温含む)、溶融炉(インゴット処 理)、降温部からなる。降温部においては、現行の回分式陰極処理装置では、 降温時間が自然冷却により約12時間以上<sup>18</sup>かかっていたものを、冷却Arによる

強制冷却<sup>28)</sup>により、降温時間を大幅に短縮させた。析出物を装荷し、インゴットを捕集するるつぼは、グラファイト材であるが、このるつぼ材の保護のために、ZrO<sub>2</sub>をコーティングしたものを使用する。このコーティング材は使用時、 Uの一部と反応してドロスを生成するので、インゴット取出し時にあたってはドロスの掻き取りを行う。

3) Cd蒸留装置

Cd蒸留装置は、電解精製槽CdプールのCdを定期的に取り出し、精製し、精製 Cdを回収するものとし、1基とした。運転温度約800℃にて、Cdを蒸留させ、 NMやZrなどと分離する。これらの大きさは、いずれも、縦約4m、横約2m、高 さ約3mである。これらの主要材料は、耐食性の非Niステンレス鋼、または相当 品としている。炉心燃料の場合、25日に1回の頻度で炉心燃料の場合、電解精製 槽Cdプールの約80%のCdを取り出し、Cd蒸留装置にて処理する。また、径方 向ブランケット燃料の場合、1年に1回の頻度で電解精製槽Cdプールの約90%の Cdを取り出し、Cd蒸留装置にて処理する。

(d) 塩処理設備

1) TRU還元抽出器

TRU還元抽出器は、電解精製槽の塩を定期的に取り出し、U、Np、Pu、Am (Cm)および一部のREを還元抽出するもので、抽出されたU-TRUは、再酸化 処理し、塩化物として電解精製槽に戻される。炉心燃料の場合、4日に1回の頻 度で、電解精製槽内塩の1/30を抜き出して、TRU還元抽出処理と下記3)項の ゼオライトカラムにより使用済塩を精製処理する。径方向ブランケット燃料の 場合、約7年に1回の頻度で、電解精製槽内塩を抜き出して廃棄する。このTRU 還元抽出器の外形図を図 6.2.13に示すが、向流式3段(抽出器容量100cc×3) のものを1基とした。運転温度は500℃である。U-TRUを含む約50L(1バッチ 相当)/日の浴塩をLi-K-Cdと向流接触させ、U-TRUをCd中に還元抽出し回収す る。

2) 再酸化槽

再酸化槽は、TRU還元抽出器でCd中に還元抽出された重金属を温度500℃に てCdCl₂を含む塩化物と接触させて再び塩化物にするものである。この槽はTRU 抽出1バッチ分に相当する容量としている。

3) ゼオライトカラム

ゼオライトカラムは、炉心燃料の場合、4日に1回の頻度で、電解精製槽内塩の1/30程度を抜き出して、TRU還元抽出器においてU-TRUを除去された後の使

用済塩中に残留するCs等のアルカリ金属、Sr等のアルカリ土類および希土類FP を選択的にゼオライトに吸蔵<sup>15)</sup><sup>16)</sup>[約14.5%吸蔵(カチオンとしては約10w%濃 度まで)]させ、除去するものである。運転温度は約540℃である。径方向ブラ ンケット燃料の場合、約7年に1回の頻度で、電解精製槽内塩を抜き出し、ゼオ ライトカラムに通した後、廃棄する。ゼオライトカラムは、長さ100cm、直径 35cmのカラムを3つ直列した構成としており、TRU抽出済塩の8バッチ分約 400Lを単位として吸蔵処理する能力がある。

(e) ドロス処理設備

陰極処理と射出成型において発生するUO<sub>2</sub>を主成分とするドロスと、陰極処 理で回収されるLiCl-KCl塩をドロス塩化槽(1基)に受入れる。この槽にZrCl<sub>4</sub>お よび金属Zrを添加し、温度500℃にてドロスを次式の反応によりⅢ価の塩化物に 調整する。

## $4\mathrm{UO}_2 + 3\mathrm{ZrCl}_4 + \mathrm{Zr} \rightarrow 4\mathrm{UCl}_3 + 4\mathrm{ZrO}_2$

得られた塩化ウランは、陰極処理から受け入れたLiCl-KCl塩とともに、電解精製槽に戻される。ここで、プロセスの副産物ZrO<sub>2</sub>とコーティング材および射 出成型からのドロスに含有されるモールド材の残査が廃棄物として発生する。

(f) オフガス処理設備

オフガス処理設備では、電解精製槽、固体陰極処理装置、液体Cd陰極処理装置などからのオフガスを、HEPAフィルタ、Cs/Ru吸着塔、トリチウム除去装置

(酸化触媒(CuO)塔-ゼオライト水分除去塔)、ヨウ素吸着塔(AgS)、HEPA フィルタに通して浄化処理し、送風機にて排気筒から放出する。オフガス処理 設備は2系統設けている。

(g) 廃棄物処理·貯蔵設備

主要プロセスから発生した主要な廃棄物(高レベル放射性廃棄物、高βγ廃 棄物、TRU廃棄物)を処理する廃棄物処理設備は、塩吸蔵の使用済ゼオライト、 Naボンド(酸化物)、モールド(燃料製造側から発生)を高温にて固化する Pressureless Consolidation (PC)固化方式<sup>31)</sup>の人工鉱物固化装置(一式)、 Cd陰極るつぼ、ハルなどを減容する圧縮装置(一式)、Cd陰極るつぼの圧縮処 理後の廃棄物、せん断プレナム、Cd蒸留処理後NM、ドロス処理後の廃棄物、 焼却灰(陰極処理用るつぼ、射出成型るつぼの粉砕、焼却後の灰)、集合体部 材などをセメント処理するセメント固化装置(一式)、ハルの圧縮後のドラム 詰め装置(一式)などからなる。ここで、フェーズ I では、人工鉱物固化体製 造方式をHIP (Hot Isostatic Pressing)固化方式(高圧 (2×10<sup>8</sup>N/m<sup>2</sup>)×850℃ ×固化処理時間約4hr)<sup>32)</sup>としていたが、最近ANLがHIPに変わるものとして開 発されたシンプルな装置で、常圧にて運転できるPC固化方式[常圧(おもしの荷 重利用) ×915℃×固化処理時間約16hr]に変更した。

また、低放射性廃棄物の処理する廃棄物処理設備は、可燃性、難燃性固体廃 棄物や使用済るつぼ等を処理する流動床式焼却炉(一式)、使用済フィルタ、 金属等を処理する高周波方式溶融炉(一式)、焼却後の焼却灰などを処理する セメント固化装置(一式)などからなる。廃棄物貯蔵設備は、廃棄物処理装置 により処理し固化した廃棄物固化体を1年保管するもので、空気冷却装置付きの 人工固化体キャニスター貯蔵庫(約160体収納)、高放射性のドラム缶およびハ ル缶貯蔵ラック(ドラム缶、ハル缶等約200缶収納)、低放射性廃棄物缶貯蔵ラ ック(約250缶収納)からなる。1年保管後の廃棄物固化体は、廃棄物処分場へ 搬出されるものとしている。

(h) 分析設備

分析設備は、主に、前処理設備、再処理設備、燃料製造設備のサンプリング、 分析を行う設備である。各設備の主な分析個所、サンプリング対象(目的)は 次のとおりである。

①前処理設備の分析個所

・せん断機からの代表使用済燃料(計量管理用)

②再処理設備の分析個所

・電解精製槽の塩およびCdプール(HM、FP分析用)

・固体陰極処理装置からのU金属(品質管理用/計量管理用)

・液体Cd陰極処理装置からのPu-TRU合金(品質管理用/計量管理用)

③燃料製造設備の分析個所

・射出成型装置からのPu-MA-U/Zr、U/Zr(品質管理用/計量管理用)

これらの分析には、次の分析計を使用するとともに、分析の前処理用の溶解装置、不純物分離装置や熱分解装置などを用意する。また、これらの分析廃液の 一時貯蔵槽などを設ける。分析計は、サンプリング対象に対して1サンプリング -1分析の設計条件として、分析頻度等を考慮し、電位差滴定計2台、クーロメ ータ計2台、質量分析計2台、k-edge+蛍光X線分析計2台、αスペクトロメータ 3台、γスペクトロメータ3台、ICP-AES分析計3台、イオンクロマトグラフ2台、 酸素・炭素・窒素(O-C-N)計2台となる。今後、サンプリングの代表性や最適な サンプリング・分析回数について検討する必要がある。

- FP分析: αスペクトロメータ(α核種)、γスペクトロメータ(γ核種)、 ICP-AES分析計(不純物)
- ② 品質管理用分析:電位差滴定計(U)、クーロメータ計(Pu)、質量分析計(同 位体)、αスペクトロメータ(MA)、γスペクトロメータ(γ核種)、 ICP-AES分析計(不純物)、イオンクロマトグラフ(Cl)、O-C-N計(O、 C、N)を設ける設計とした。なお、HM分析は、計量管理用として高い

精度が要求される場合、電位差滴定計とクーロメータ計が使用される。

- ③ 計量管理用分析:電位差滴定計(U)、クーロメータ計(Pu)、質量分析計(同 位体)
- ④ HM分析:k-edge+蛍光X線分析計(U、Pu)
- ⑤ FP分析: αスペクトロメータ(α核種)、γスペクトロメータ(γ核種)、 ICP-AES分析計(不純物)
- ⑥ 品質管理用分析:電位差滴定計(U)、クーロメータ計(Pu)、質量分析計(同 位体)、αスペクトロメータ(MA)、γスペクトロメータ(γ核種)、 ICP-AES分析計(不純物)、イオンクロマトグラフ(Cl)、O-C-N計(O、C、 N)
- (i) アルゴンセル内ガス冷却・浄化設備

アルゴンセル内ガス冷却・浄化設備は、アルゴンセル内の雰囲気ガスを取り出 し、HEPAフィルタを経由した後、冷却器(約225000m<sup>3</sup>/h×約1300kW×2基) によって冷却するとともに、PSA方式の浄化装置(酸素除去装置(約5000m<sup>3</sup>/h×1基)、 1基)、水分除去装置(約500m<sup>3</sup>/h×1基)、窒素除去装置(約1600m<sup>3</sup>/h×1基)) によって浄化し、アルゴンセル内に戻すものである。これにより、セル内の照 明器具、電解精製槽崩壊熱などの発熱を除熱し、セル内雰囲気温度を適切な温 度に維持するとともに、セル内雰囲気の酸素、水分、窒素の濃度をそれぞれ 50ppm(最大100ppm)、50ppm(最大100ppm)、500ppm(最大1000ppm) に管理する。また、このほかに、アルゴン供給設備、真空排気設備がある。ア ルゴン供給設備は、アルゴンガス使用の機器、アルゴンセル圧力低下時、エア ロックセル開閉時などにアルゴンガスを供給する。真空排気設備はアルゴンセ ル圧力上昇時やエアロックセル開閉時などにこれらのセルのガス排気を行う。

(j) 冷却水設備·冷水設備

冷却水設備は、密閉式冷却塔ユニット(約1.5×10<sup>6</sup>Kcal/h×2基)により冷却 水を製造し、プロセス機器等に冷却水を供給するものである。安全系の動的機 器は2系統とし、一般系は1系統としている。異常時には一般系を隔離できる系 統構成としている。

冷水設備は、冷凍機(約450USRt(約1.35×10<sup>6</sup>Kcal/h相当)×2基)により 冷水を製造し、プロセス機器等に冷水を供給するものである。この設備も、安 全系の動的機器は2系統とし、一般系は1系統とし、異常時には一般系を隔離で きる系統構成としている。 (5) 施設設計

(i) 計量管理とセル区分

物質収支区域(Material Balance Area :MBA)をMBA-1、MBA-2、MBA-3の 3つに分け、核物質の適切な閉じ込めが行えるように設計した。主要測定点(Key Measurement Point; KMP)における計量は、化学分析、重量測定および非破 壊測定のいずれか、あるいはこれらの組み合わせ<sup>33)</sup>により行う。KMPを含めた MBA計画図を図 6.2.14に示す。入量計量管理法(図 6.2.14の②の部分)は、 色々な案が考えられるが、ここでは、ANLのFCFにおいて採用されている方法、 すなわち、代表的なピンせん断燃料をサンプリング、分析し、燃料計算結果を 補正する方法を考慮した。また、出量計量管理(図 6.2.14の③の部分)は、射 出成型スラグのサンプリング、分析と重量測定による方法を考慮した。

適時性の要求に対しては、NRTA等の対応策の検討は行っていないため、今後の課題である。

(ii) セル内機器配置

主要なセルは、金属燃料等の火災防止対策として、アルゴンセルとし、負圧 としている。アルゴンセル内雰囲気は、浄化装置により、酸素100ppm以下、水 分100ppm以下、窒素1000ppm以下に制限する。また、セル内の機器等の発熱 による温度上昇を抑えるために、アルゴンセル外に設置した冷却設備にセル内 Arを循環冷却することによりセル内雰囲気温度を40℃程度に維持する。

主建屋の再処理設備の主要なセル容積は、燃料受入れ・前処理セル2,500m<sup>3</sup>、 電解分離セル10500m<sup>3</sup>、TRU抽出/塩処理セル2700m<sup>3</sup>で合計約16000m<sup>3</sup>となる。 主建屋の主要なアルゴンセルおよび空気セルの容積を表 6.2.7に示す。

セル内の概略機器配置図を図 6.2.15に示す。3階の燃料受入れ・前処理セルで は、燃料貯蔵設備から受入れられた使用済燃料を集合体一時保管ピットに一時 保管し、集合体解体機、ピンせん断機にて処理し、ピンせん断片を1階の電解分 離セルのターンテーブルの陽極バスケットに装荷する。1階の電解分離セルでは、 陽極バスケット入りピンせん断片をNaボンド除去装置にてNaを除去する。その 後、この陽極バスケットを電解精製槽に装荷し、電解精製槽にて電解分離処理 する。電解にてU-Zrを回収した固体陰極とU-TRU-Zrを回収した液体陰極を電 解精製槽から取り出し、固体陰極処理装置、液体Cd陰極処理装置にて塩除去、 Cd除去し、それぞれ、U-Zrインゴット、U-TRU-Zrインゴットとして回収し、 一時保管される。その後、これらのインゴットは地下1階の燃料製造側セルに払 い出される。バスケット、アセンブリ、るつぼなどの移送・取り扱いは専用の移 送装置等を利用するために、レールを設けている。TRU抽出・塩処理セルは2階 に設置され、電解分離セルの電解精製槽の塩等を定期的に移送し、TRU抽出器、 ゼオライトカラム等にて、TRU抽出、塩処理が行われる。陰極処理装置は連続 式としたため、フェーズ I の回分式のものより、機器の高さを下げることがで きた。このために電解分離セルの階高をフェーズ I より抑えることができた。

燃料受入れ・前処理セルの使用済燃料集合体一時保管ピットは、使用済燃料貯 蔵設備からの燃料集合体の補給を考慮して、1週間分を保管できるバッファー容 量としている。また、電解分離セル内の主要な機器の間には、図 6.2.16に示す とおり、陽極バスケット仮置架台、陽極アセンブリ仮置架台、陰極仮置架台、 るつぼ一時保管庫、インゴット一時保管庫などのバッファーを設けた。これら のバッファーは、下流機器の1バッチ処理量分(約1日又は約0.5日分)に待避 用分を考慮した容量としている<sup>28) 34)</sup>。これらのバッファー機器のスペースを考 慮したために、セル内容積は、フェーズIの場合より、大きくなっている。

また、前処理セルのせん断機等の機器や電解分離セルの電解精製槽など機器 を保守、点検できるように、それぞれ保守セルを設けている。

(iii) 供給試薬・ユーティリティ

金属燃料の金属電解法再処理設備に特徴的な供給試薬・ユーティリティとして、主に塩、Cd、金属Li、K、グラファイトるつぼ、ゼオライト、アルゴン(Ar) ガス、電気などがある。以下に、これらの主な供給試薬・ユーティリティの項 目と使用目的、使用量を示す。主要な供給試薬・ユーティリティの使用量をま とめたものを表 6.2.8に示す。

(a) 溶融塩

溶融塩(LiCl-KCl)は、5基の電解精製槽などに使用される。1基あたりの電 解精製槽のLiCl-KCl量、Cd量は、それぞれ、約1700kg/基、約1000kg/基である。 炉心燃料用の電解精製槽(4基)のLiCl-KCl塩は、定期的に一部払い出し(塩を ゼオライトに吸蔵させ廃棄)、径方向ブランケット燃料の電解精製槽(1基)の LiCl-KCl塩は7年に1回払い出す。LiCl-KClの年間使用量は約820kgとなる。 一方、Cdは、電解精製槽のCdプールのほかに、液体Cd陰極、TRU還元・抽出(抽 出溶媒)に使用されるが、原則としてCd蒸留装置にて回収し、再使用される。

(b) 金属 Li-K

TRU還元抽出器の還元剤として使用する。年間使用量は約300kgである。

(c) グラファイトるつぼ

消耗品として使用される。年間使用量は、約22.4kg(陰極処理装置、射出成型装置のるつぼ)である。

(d) ゼオライト

ー式 (3カラムシリーズ設置) のゼイライトカラムにはゼオライトを使用する。 使用済ゼオライトは排出され、新ゼオライトを補給する。年間使用量は約19 t である。

(e) Ar ガス

前処理セルや電解分離セルなどのセルは、火災防止のためにAr雰囲気のアル ゴンセルとしている。Arガスは循環させているために、酸素、水分、窒素の濃 度を管理する設計としている。アルゴンセルのエアロック開閉による消費等に よりセル内の酸素、水分、窒素の濃度が上昇した場合に、Arガスをセル内に補 給する。年間使用量は、約520t/年である。このほかに、純Arガスが電解精製槽 気相部などに供給される。

(f) 電気

電解精製槽、陰極処理装置などの加熱設備や電気・制御設備、照明用等について考慮し、約9300kWとした。このほかに、プラントの設計では、燃料油、用水、 冷却水、冷水、蒸気、圧縮空気などのユーティリティも考慮している。

(iv) 施設概要<sup>28) 33)</sup>

38 t HM/年規模の金属燃料リサイクルプラントの全体配置イメージ図を図 6.2.17に示す。

本プラントにおいて、廃棄物処理・貯蔵設備、オフガス処理設備、分析設備、 アルゴンセル内ガス冷却・浄化設備、冷却水設備・冷水設備等のユーティリティ 設備、中央制御室、非常用発電機、放射線管理棟、排気筒などは、再処理施設 と燃料製造施設の共用の配置としている。

プラントの各建屋の容積を表 6.2.9に示す。

再処理・燃料製造一体型の主建屋(再処理設備、燃料製造設備、廃棄物処理・ 貯蔵設備、分析設備、ユーティリティ設備、中央制御室等)と燃料貯蔵建屋(使 用済燃料貯蔵設備と新燃料貯蔵設備の建屋)の配置イメージ図を図 6.2.18に示 す。また、主建屋の概略配置図を図 6.2.19~図 6.2.26に示す。地下1階(B1F) には、燃料製造セル(射出成型設備等)、CdCl<sub>2</sub>製造設備、人工鉱物固化・貯蔵 設備、高放射性固体廃棄物処理・貯蔵設備、低放射性固体廃棄物処理設備、極 低/低/中放射性廃液処理設備、分析設備等を設置している。1階には、電解分離 セル、燃料製造セル(燃料集合体組立設備等)、高放射性固体廃棄物取扱設備、 低放射性固体廃棄物処理設備、低放射性固体廃棄物貯蔵設備等を設置している。 2階TRU抽出/塩処理セル、分析設備、建屋換気設備などを設置している。3階に は、燃料受入れ・前処理(解体・せん断設備)セル、オフガス処理設備、アルゴ ンガスセル浄化冷却設備、圧空、ガス供給設備、保守セル、電気設備、高放射 性固体廃棄物処理設備、低放射性固体廃棄物処理設備、建屋換気設備等を設置 している。4階には、中央制御室、計算機室、電気設備、保守セル、冷水設備、 圧空、ガス供給設備、建屋換気設備等を設置している。屋上には、建屋換気設 備、純化、浄化設備、冷却水製造設備、冷却水設備等を設置している。 6.2.2 技術評価

(1) 安全性

(i) 安全設計

金属電解法に基づくリサイクル施設において特に代表的な工程・設備である 電解精製槽および陰極処理装置を中心に想定される異常事象を抽出し、それら 異常の進展シナリオに沿って多重防護概念に基づく安全設計の検討を行った

(表 6.2.10)。

(a) 放射線防護(遮蔽)

再処理工程は全てコンクリートセル内部で実施される。それら主要セルのコンクリート壁厚さは2mとし、十分な放射線遮蔽能力を持たせている。

(b) 放射性物質の閉じ込め

溶液状の放射性物質(溶融塩および液体金属等)を内蔵する系統および機器 は漏洩しがたい構造とし、万一の漏洩に備え漏洩検知機および容器の二重化又 は漏洩液の受け皿等を用意することとしている。加熱機能をもつ機器について は異常加熱による機器破損を防止するため、温度監視とインタロックによる加 熱停止を可能とする。

また、揮発性の放射性物質および溶液状の放射性物質の一部が気相へ移行す ることにより発生する気体状の放射性物質については、原則として系統および 機器レベル、セルレベルおよび建屋レベルでの負圧管理による多重化された閉 じ込めを行い、所定の経路を通して適切な除去処理を行った後、排気筒より排 出する。さらに建屋レベルでは想定される汚染レベルに応じてホワイト、グリ ーン、アンバーの区域を設けてその順に気圧を低く維持する設計としている。 乾式再処理の特徴として湿式再処理とは異なり、セル内部へ流入するプロセス 流体(スチーム、圧空等)が少なく、アルゴンセルは高い気密性を持つため、 通常時におけるセル負圧の維持に起因する気体放出量は少ない。

ただし、電解精製槽では運転管理上槽内部雰囲気の純度管理が厳しいため、 アルゴンセル雰囲気に対して微正圧を保持する設計としている。これについて は電解精製槽オフガス系により適切な排気経路を確保すると共に、Cd・ミスト トラップの設置や電極ポート等の構造によりセル環境へ放出する気体の量およ びそれらに随伴する放射性物質の量を極力抑えることで対応する。したがって、 溶液状の放射性物質を内蔵する系統の内では電解精製槽、その他固体状の放射 性物質を内蔵する系統および機器において発生する気体状の放射性物質の一次 閉じ込めはセルレベル(アルゴンセル)で対応することになる。溶融塩を内蔵 する機器の微正圧運転に関して定量的な観点からその正否を判断するためには、 溶融塩中の放射性物質の気相への移行挙動や移行率等のデータを取得する必要 がある。

ー方アルゴンセルは、品質管理上の要求からセル外部に対して内部負圧とした設計にしているが高いAr雰囲気純度を維持するために、気密性の高いライニングが敷設される。したがって、セル自体の基本性能として気体に対する閉じ込め能力は高い。マテリアルハンドリングを主たる移送手段とする乾式施設では湿式施設のセルに比べて配管等によるセル貫通部が少なくなる一方、物質移送用および保守用のハッチ、ポート類が増加する。これら可動部を持つポート類は気密扉、エアロック構造とすることなどによりセル全体の気密性を確保することとする。

(c) 核燃料物質の臨界防止<sup>38)</sup>

核燃料物質の移動はバッチ式の移送機器によるものが基本であり、工程内で 固体、液体など多様な物理、化学形態を取り扱う必要があることから、主たる 臨界管理方法を質量管理とし、容積管理、濃度管理、Pu富化度管理、Pu同位体 管理を適切に組み合わせている。また、主要工程セルでは少量のオイルなどの 有機物を除き水等の有意な減速材の使用がなく、アルゴンセルにおいては雰囲 気の湿度管理も厳しく実施されるため乾燥系(非減速系)である。多数のユニ ットを一つのセル内で扱うことから、複数ユニットの臨界安全管理には移動管 理および剛構造物による隔離距離維持を行う。

従来質量管理を適用した施設で人手による移送を行うときに問題となってい た誤装荷、過装荷等に関しては、核燃料物質の移送を遠隔自動化された搬送シ ステムによって行うことから搬送システム上に適切なインタロックロジックを 組み込むことにより回避可能である。

ただし、電解精製槽(単一ユニット)においては従来型の単純な質量管理を 適用した場合に核的制限値が保守的に評価され、システム成立上要求される量 の核燃料物質を取り扱うことが困難となる。そこで、電解プロセスにおいて、 核燃料物質は複数の化学形態で分散して存在し、それぞれの化学変化が比較的 安定であることに着目し、それら化学形態毎に質量管理を行う「化学形態管理」 を適用することで、比較的多量の核燃料物質を安全に取り扱うという方法論を 提案している(図 6.2.27)。この方法論の下でいくつかの臨界解析を実施し十 分な安全裕度が確保されることを確認した(図 6.2.28および表 6.2.11参照)が、 この方法論を現実のものとするには適用する系における化学的変化について幅 広い知見を得ると共に、臨界防止設計上の要求、すなわち二重偶発性原理の適 用に耐えうる信頼性の高い監視・プロセス制御技術を開発する必要があり、実 用化に当たっての重要な課題である。なお、電解精製工程以外の工程における 臨界管理についても二重偶発性原理を満足することをシステム設計上の要求事 項とする。これが満たされた場合、臨界事故の発生は技術的に想定し得なくな る。したがって、臨界管理システムを担う全ての系統および機器を、その求め られる高い信頼性を満足できるように開発・設計することが今後の課題である。

(d) 地震に対する考慮

基本的に「再処理施設安全審査指針」、「混合酸化物燃料加工施設安全審査 指針」における耐震要求および六ヶ所再処理工場等の既存施設の耐震設計をベ ースに設計することとしている。代表的な機器である電解精製槽および液体陰 極処理装置については耐震クラスAで設計するが、それ以外の機器に対しての検 討は未実施であり今後の課題である。

(e) 動的に維持される安全上の機能

金属電解法再処理システムの主要工程で取り扱う核燃料物質の物性は高融 点・高沸点であるため、機器レベルにおいては内蔵する熱源の自然冷却が可能 であり、安全冷却系統の設備は必要としない。

一方、アルゴンセル内部には高温熱源が多数設置されるため、セル雰囲気の 温度および圧力上昇を防ぎセルレベルの負圧維持および閉じ込めの健全性を維 持する必要がある。したがって、セル冷却系は安全上重要な施設となる。この 系統の動的機器および安全系冷却水供給系は独立二系統とし、非常用所内電源 系統に接続されている。また同じく負圧による閉じ込めを維持しているオフガ ス処理設備、セル換気設備および建屋換気設備の動的機器についても独立二系 統とし、非常用所内電源系統に接続されている。

したがって、動的機器の単一故障および外部電源喪失を考慮しても動的に維持される安全上の機能が喪失することはない。

(f) システムおよびプロセス固有の危険性に対する考慮

本施設の固有の危険性としては、「反応性の高いアクチニドの金属の火災」、

「高温媒体による設備損傷」、「ハンドリングマシンの異常動作等による設備 損傷」が挙げられる。一方で、放射性物質を内蔵する系統および機器の高所設 置がなく、また取り扱う流体(塩および液体金属)は融点が高いため固化しや すく沸騰などの現象は生じがたいなどの特性から、これらの漏洩により多量の 気体状の放射性物質が発生する危険性は少ないものと考えられる。

陰極処理工程から酸化物転換工程までは核燃料物質自体が燃焼反応を起こす 恐れのある金属形態を取ることから、金属火災に対する考慮が必要である。火 災の可能性としては他に金属リチウムや金属Cdがある。これらの火災の発生防 止策としては、セル雰囲気自体を不活性のArガスで満たし、酸素等の反応物を 除外すると共に酸素濃度計による監視を行うこととしている(ただし、具体的 な温度および化学制限値を設定するには知見が不足している)。アルゴンセル バウンダリの破損により酸素が流入し金属火災が発生した場合には、Arガス緊 急注入系により酸素濃度を低下させる方策が提供されている。さらにバウンダ リ破損がもっとも想定されるセル貫通配管系統の遮断機能や、防火区画の設置 などさらなる拡大防止・終息方策の検討が必要である。なお、使用する機器等 には不燃物・難燃物を使用しているため、金属火災がより大規模な火災に発展 することはない。

高温の物質を取り扱うことから、高温物の漏洩によってセルライニング等の 閉じ込めバウンダリが破損しないように、高温物を保持する系統および機器は 容器を二重化するか漏洩液受け皿を設け、万一の漏洩の際にも漏洩物が直接セ ルライニングに接触しないような設計としている。

ハンドリングマシンの異常動作等による設備損傷に対しては、通常操業時に 使用する搬送機器として動線が固定化されるものを使用することでハンドリン グマシンと設備の干渉を排除している。メンテナンス等で非定期的に使用する クレーン等の高所つり下げを行う装置については、保持器具にインターロック を設けるとともに、移送経路上の直下に放射性物質を内蔵する機器が配置され ないようにするなどの方策を、マテハン設計・保守補修性の観点と合わせて検 討する必要がある。

(ii) 安全評価

ここでは、射出成型による燃料製造施設をも含めた再処理および燃料製造一体型のリファレンスシステム(38tHM/y処理能力)を対象として評価を行った。

(a) 決定論的安全評価

1) 平常時における一般公衆の線量評価

平常時に施設から大気中へ放出される放射性物質による、最大被ばく地点に おける一般公衆個人に対する放射線被ばく評価を、i)からiv)に示す評価条件の下 でATRENO-TERFOCコード<sup>39)~41)</sup>を用いて実施した。

- i) 排気筒から放出される放射性物質の量については、施設の年間処理量を 基に、設計検討において設定した大気への移行率を基に設定した(表 6.2.12)を参照)。このとき、施設内における放射性物質の除染機能に ついては、HEPAフィルタ、ヨウ素フィルタ、トリチウム除去装置等の 能力を適切に考慮した。
- ii) 放射性物質を大気へ放出する排気口の地上高さ、内径および吹き出し
   速度については、㈱原燃の六ヶ所再処理施設の主排気筒と同じ条件を想定した。

- iii) 気象条件については、「もんじゅ」サイトにて過去に観測された気象 データを参考に設定した。
- iv) 放射性物質の経口摂取量を見積もるに当たり、個人が摂取する全ての 食物は、当該個人に対する被ばく評価地点において生育するものとみな した。

その結果、1年間の操業期間中の平常時に大気へ放出される放射性物質による個人の預託実効線量は、最大線量を与える地点において、約0.67 µ Sv/yと推定された。判断基準である50 µ Sv/y以下を十分に達成できると評価する。なお、核種による内訳は、図 6.2.29に示すとおり<sup>14</sup>Cの寄与が最も大きく約47%を占めている。

2) 安全設計評価

評価対象施設内での技術的に発生が想定される異常事象を体系的に漏れなく 抽出するために、表 6.2.13に示す変動項目に着目して、施設内における主要な 工程について変動の原因となる異常事象または変動の結果生じると考えられる 異常事象を検討し、表 6.2.14にまとめた。つぎに、表 6.2.15~表 6.2.16に示す ように、摘出した異常事象を放置した場合の影響を検討し、その影響を異常事 象選定のために分類整理した。分類の結果、摘出した異常事象は、計画外放出 の恐れのある異常として(1)臨界、(2)燃料被覆管破損、(3)金属火災、(4)せん断片 の飛散、および(5)放射性溶融物・固形物の漏洩・飛散、の合計5種類の影響、なら びに(6)通常放出経路での放射性ミスト発生量の増加、(7)工程停止、および(8) 施設内での線量異常にまとめることができた。これらの中から、周辺公衆に対 する放射線被ばくリスクの恐れのある事象として、次の3種類の異常事象を評価 対象に選定し、事象発生時に周辺公衆の個人が受ける実効線量当量を評価した。

- ・溶融状態の核分裂生成物および燃料核種を施設内で最も大量に内蔵する電 解槽からの使用済塩移送時におけるセル内への塩全量の漏洩、
- ・アルゴンセルバウンダリ破損に伴う空気侵入により生じる Cd 陰極処理装置から払出される Pu-U 合金インゴットの火災、
- ・燃料製造における成分調整工程での Pu の過剰装荷による臨界

[電解槽1基分の使用済塩のセル内への全量漏洩]

漏洩した塩および塩中に含まれる放射性物質の約1/1000が気相へ移行するものと想定した。次に、アルゴンセル冷却系に設置されたHEPAフィルタはセル内雰囲気中へ移行した塩ミストの付着によって破損するものと想定した。この場合、気相中の塩ミストに同伴した不揮発性の放射性物質もミスト状でセル内

を循環し、このうちの一部はせん断機付近に設置されたオフガス系への流入口 からオフガス系へ流入するので、オフガス系に設置されたHEPAフィルタも塩 ミストの付着により従属的に破損するものと想定した。一方、オフガス系から の排気は他の空気セルからの排気と合流して建屋排気系へ送られ、1段当たり DF=1000を有するHEPAフィルタ2段を通過して排気筒へ排気されるため、粒 子状放射性物質は、建屋排気系HEPAフィルタによって捕獲される。評価上は、 2段のフィルタのDF値として合計10<sup>5</sup>を見込んだ上で、周辺公衆の実効線量当量 を算定したところ、風下最大被ばく地点において気象条件の不確かさを考慮に 入れても99%上限値で約0.21mSvとなった。

[アルゴンセルバウンダリ破損による空気侵入および金属火災]

Cd陰極処理装置から払出されるPu-U合金インゴットは蒸留後で比較的温度 が高いと考えられることから、空気侵入時の火災を想定した。同装置1台で1回 の処理によって払出されるインゴットの全量が燃焼するものと想定し、その燃 焼生成物の1/1000が気相へ移行し、その全量が建屋排気系へ送られるものと想 定した。同排気系へ流入した排気は1段当たりDF=1000を有するHEPAフィル タ2段を通過して排気筒へ送られるため、粒子状放射性物質は、このHEPAフィ ルタによって捕獲される。評価上は、2段のフィルタのDF値として合計10<sup>5</sup>を見 込んだ上で、周辺公衆の実効線量当量を算定したところ、風下最大被ばく地点 において気象条件の不確かさを考慮に入れても99%上限値で約0.008mSvとな った。

[成分調整工程での臨界]

金属固体を取り扱う工程の中での臨界事故として発生の可能性が高いと考えられる成分調整工程での臨界事故を検討した。

臨界事故時の総核分裂数については、過去の溶液系および固体系での臨界事 故事例に照らして過小評価とならないように保守的な値として10<sup>19</sup>を想定した。 また、固体の放射性物質のうち、FP以外のソースタームとしては、初期Pu量を 約17kg(単体では未臨界を維持する最大量のPu金属球2個分相当)と仮想し、 このうちの1/100が臨界による発熱により、微粒子状で気相中へ移行するものと 想定した。臨界事故を生じたセル内雰囲気はオフガス系、建屋排気系を順に介 して排気筒から環境中へ排気される。排気の過程での除染機能としてHEPAフ ィルタ2段(DF値として合計10<sup>5</sup>)のみを考慮して、周辺公衆の実効線量当量を 算定したところ、風下最大被ばく地点において気象条件の不確かさを考慮に入 れても99%上限値で約0.97mSvとなった。

なお、固体系での臨界事故では、固体核燃料の破片が周辺へ飛散するおそれ

があるが、過去の事例をみる限り、セル壁を貫通するような飛来物が発生する ことはないと推定できる。このため、2次的な被害としてアルゴンセルバウンダ リ破損やセル壁を隔てた位置に配置された電解槽からの塩移送配管の破損は生 じないものと判断できる。

以上に述べた3種類の異常事象ともに、実効線量についての判断基準(5mSv 以下)を満足していると評価できる。

(b)確率論的安全評価

1) 評価の概要

決定論的安全評価での述べたように、施設内全工程の中で、放射性物質を大量に含有する全工程を対象として異常事象を摘出し、さらに異常な量の放射性物質の施設外放出要因の観点から異常事象を絞り込み、評価対象として選定した(上述の3事象)。

それらの異常事象について、関連設備の応答や異常時の運転員の行動を検討 することにより、施設外へ放出される放射性物質の量に影響を及ぼす因子を同 定し、同因子の成功/失敗の分岐を展開したイベントツリーを構築することによ り、理論上考えられるリスク評価上重要な事象シーケンスを漏れなく同定した。 さらに、原因事象の発生頻度をフォールトツリー手法により算定するとともに、 イベントツリーの分岐確率を評価することにより、事象シーケンス発生頻度を 算定した。また、事象シーケンス別に期待できる閉じ込め機能(例:HEPAフ ィルタの能力)を適切に考慮に入れて施設外へ放出される放射性物質の量を推 定した。

以上を基に、排気筒条件は六ヶ所再処理施設と同一とし、気象条件は「もん じゅ」サイトで過去に観測された気象データを参考に設定して、風下最大被ば く地点における放出放射能による周辺公衆の急性死亡および50年間の放射線被 ばくによる致死ガンの発生確率を、事象シーケンス別に環境影響リスク評価コ ードMACCS2を用いて算定した。

2) 評価結果

本検討の中で考慮した異常事象シーケンスについて、短期の臓器被ばく線量 は高々ミリシーベルトのオーダーと算定されたため、急性死亡リスクは無視し うるほど小さいものと判断した。このため、判断基準のうち、一般公衆の個人 に対する急性死亡についての判断基準(10<sup>-7</sup>死/人/年/サイト以下)を満足すると 評価できる。

一方、一般公衆の個人に対する致死ガン発生リスクについては、異常事象に 起因するリスクの点推定値が約4×10<sup>-11</sup>死/人/年/施設となった。このため、1サ
イト当たり1施設の立地を前提として致死ガン発生リスクについての判断基準 (10・6死/人/年/サイト以下)を十分に満足すると評価できる。致死ガン発生リス クの異常事象シーケンスによる内訳を図 6.2.30に示す。同リスクに支配的なシ ーケンスは、成分調整工程での臨界事故が発生してオフガス系および建屋換気 系が健全なシーケンスである。図 6.2.31に、詳細なリスクプロファイル(事故 発生頻度と一事象当たりの公衆個人の致死ガン発生確率との関係)を示す。致 死ガン発生リスクに支配的なシーケンスにおける支配的な核種は臨界事故によ って新たに発生する短半減期の放射性希ガスである。事象発生当たりの致死ガ ン発生確率は極めて低いものの、事象の年間発生頻度が高いために、致死ガン 発生リスクに最も大きな寄与を示す結果となった。

3) 今後の課題

現在の設計では、アルゴンセルバウンダリの破損時には、アルゴンセル内への緊急アルゴンガス注入によって火災を防止あるいは消火することとしている。 リスクの評価に当たってはこの手段が有効な性能を発揮することを前提とした ものであるが、火災防止および消火の手段について有効性を今後評価すること が課題である。また、成分調整工程以外の工程についても、臨界防止設計の具 体化および評価を行うことが今後の課題である。

(2) 経済性

システム設計検討結果から、建設費および運転経費を算出し、それを基に再 処理単価および再処理にかかる燃料サイクル費を算出した。

(i) 建設費

設備費は960億円、建屋費は280億円で、建設費は合計1240億円と評価した。 その建設費の内訳を図 6.2.32に示す。

(ii) 年間運転経費

年間運転経費は77.2億円/年と評価した。その年間運転経費の内訳を図 6.2.33に示す。

(a) 人件費

再処理に関する工程は5班3交替制による直体制を組むこととした。また、各 工程の員数は遠隔自動化システムであることを考慮して、主要機器3基を1名が 担当するものとし、この考えのもと要員を配置した。

廃棄物処理に関する工程の内、固体廃棄物処理に関するものは、稼働率が低いことから、日勤者による対応とした。また、5班3交替制では常に1班は日勤対

応が可能であり、これを応援業務として配置するものとした。

廃棄物処理に関する工程の内、液体・気体廃棄物処理に関するもの、および ユーティリティは基本的には連続運転設備であり、運転状態については直勤務 者で管理が可能であり、操作そのものに関しては日勤者による対応とした。

高レベル固化体貯蔵、固体廃棄体貯蔵、使用済燃料貯蔵は管理と搬出入操作 があり、夜間の搬出入も想定されることから直体制を組むこととした。

分析は、運転時は24時間定期的に発生することから、直体制を組むこととした。

放射線管理はJNC東海の実績を考慮して工学的判断により設定した。また、 保守に関しても既存の原子力施設等の実績を考慮して設定した。

以上より評価した要員数を表 6.2.17に示す。その結果、日勤者67名、直勤務 者125名の計192名と評価した。人件費の算出は、再処理燃料製造一体化設備で あるため、主要プロセス設備にかかる人員以外は再処理分の費用を積算した。

(b) その他の年間運転経費

人件費以外の年間運転経費である機器交換費、定期検査費は3.1 (2)(ii)の評価手法を用いて算出した。また、消耗品等費は消耗品物量を評価しこれをもとに算出した。

(iii) 再処理単価・燃料サイクル費(再処理分)

以上の建設費・年間運転経費の結果をもとに、再処理単価を算出した。その 結果、43.7万円/kgHMとなった。内訳は資本費は19.7万円/kgHM、操業費は 24.0万円/kgHMである。また、再処理にかかる燃料サイクル費を評価すると 0.47円/kWhとなる。

(3) 環境負荷低減性

環境負荷低減性のうち、通常運転時の環境放出放射能と通常運転時の放射性 廃棄物発生量については六ヶ所再処理施設の事業指定申請書に記載の値を基に 比較、評価する。

(i) 通常運転時の環境放出放射能

金属燃料金属電解法において大気へ放出される放射性物質(<sup>85</sup>Kr、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、 よう素)を六ヶ所再処理施設からの年間放出量(表 4.5.14)と比較〔年間再処 理量と平均燃焼度および発電効率(軽水炉の発電効率は1999年原子力部会試算 モデルに準拠して34.5%と設定)を基に発電量当たりの放出量で比較〕すると、 いずれも設計要求を満足する。

<sup>85</sup>Krの放出量は設計要求の約60%、<sup>14</sup>Cは約30%、<sup>129</sup>Iは約70%となる。

<sup>3</sup>Hについては除去装置を設置することにより設計要求を満足している。

なお、<sup>131</sup>Iについては再処理施設における生成量を評価した上で、設計要求を 満足するための除去設備構成を検討する必要がある。

また、<sup>14</sup>Cについては、現状の評価では設計要求を満足しているものの、<sup>14</sup>C 生成量の推定値は粗い見積もりに留まっており、高速炉における生成量を精度 よく見積もるためのデータを整備していく必要がある。

海洋へ放出される放射性物質(<sup>3</sup>H、<sup>129</sup>I)について上記と同様に六ヶ所再処理 施設からの放出量と比較すると、いずれも設計要求を満足する。

<sup>129</sup>Iの放出量は十分低く、<sup>3</sup>Hは設計要求の約80%となる。

(ii) 通常運転時の放射性廃棄物

通常運転に伴い発生する廃棄物のうち、高レベル廃棄物(人工鉱物固化体) について六ヶ所再処理施設の発生量と比較すると〔事業指定申請書記載値(ガ ラス固化体の推定年間発生量約1000本)に基づく〕、年間発生量は設計要求と ほぼ同程度である。(年間再処理量と平均燃焼度および発電効率を基に発電量 当たりの発生量で比較)

なお、雑固体廃棄物発生量については主要プロセスおよび付帯設備からの発 生量を評価する必要があり、設計要求との比較のためには付帯設備を含めた発 生量評価の詳細化が課題である。

(iii) U、TRU、FPの廃棄物への移行率

U、TRUに関して、検討しているシステムでは回収率がそれぞれ99.5%、99.8% となっており、廃棄物への移行率に関して設計要求における目標値の達成を目 指すには損失率の精査や処理工程での回収率向上が課題となる。

FP(Cs、Sr、Tc、I)については、検討しているシステムでは大部分が廃棄 物へ移行する。FPの分離回収について原理的に実現の可能性があると考えられ る手法について検討を行っているが、技術的な実証には今後の試験研究の成果 を待たなければならない。

(iv) 施設の廃止に伴う放射性廃棄物

(a) 解体性

施設の運転性、保守、補修性確保を目的にセルにはI/C、P/M、MSM等の遠隔 操作設備や相当数の遮へい窓があり、セル廻りおよび上下には保守エリア、通 路スペース等が確保されている。

また、セル内主要機器については部品をユニット化することなどが考慮され

ている。これらは廃止措置時の遠隔解体、遠隔除染等の作業にも有効に活用可 能と考えられる。

一方、搬出入性についても基本的に考慮されているが、セルからの搬出入性 に関しては開口のサイズや設置箇所の妥当性について詳細設計段階での評価が 必要である。

(b) 廃棄物発生量

施設設計の検討結果を基に評価した解体一次廃棄物の発生量を表 6.2.18に示 す。

ー次廃棄物にはセルライニング、はつりコンクリートを含めている。(低レ ベル廃棄物に区分して集計)

TRU廃棄物や高βγの廃棄物発生量は放射性物質を直接取り扱うセルの規模 に影響を受け、低レベル以下の廃棄物や建屋解体に伴って発生するコンクリー ト等の廃棄物は建屋の規模に影響を受ける。

金属電解法は建屋規模に占めるセルの比率が比較的高い分、TRU廃棄物の発 生割合が高い結果となっている。

(4) 資源有効利用性

Uの回収率は99.5%であり、TRUの回収率は99.9%であり、廃棄物への移行率 はU、TRUそれぞれ0.5%、0.1%となる。よって、再処理システムにおけるU、 TRUの放射性廃棄物への移行率としてはそれぞれ1%以下となり、設計要求値を 満足する。

また、再処理製品へのFP混入率については、U再処理製品(U合金)で~0wt%、 U/TRU再処理製品(U/TRU合金)で2.2wt%(Pu富化度約65%)となったが、 燃料製造後のサイクル製品では、U添加によるPu富化度成分調整でサイクルシ ステムとしての設計要求(1.2wt%以下)を満足する。

(5) 核拡散抵抗性

検討された金属燃料金属電解法システムでは、Puを単離する工程がなく、Pu 回収物にはFPが若干量付随する。したがって、本システムを用いて使用済燃料 から高い純度のPuを直接取り出すことは困難であり、潜在的な核拡散抵抗性は 高いものと考えられる。ただし、塩廃棄量低減のために径ブランケット専用の 電解精製槽を用いるため、この電解精製槽から回収されるU-Pu合金中のPuの同 位体組成比は<sup>239</sup>Puに富んだものとなる。

保障措置に対しては、既存のLWR再処理施設やMOX燃料加工施設の例を参考 にしてMBAおよびKMPの設計および計量技術の検討が為された。本システムで の計量管理は、主として秤量器による質量計量と、せん断燃料片、金属インゴ ットおよび溶融塩などのサンプリングによって行う。入量計量(S/RDにおける受 入量計量)では複数の方法が提案されているが、いずれも技術的な課題を有して おり、それらの技術が湿式再処理システムにおける入量計量と同等程度の正確 さ・精密さを達成できるかが重要であり、今後の枢要な技術開発項目である。 また、本システムでは核拡散抵抗性の観点から純度の高い状態でPu等の核物質 を扱わない様になっているが、計量方法によってはその精度を悪化させる要因 となる可能性があり、計量管理上一概に好ましいものとは言えない。したがっ て、本システムの実用化にあたっては計量管理検認目標をクリアできるだけの 正確さと精度を持った計量技術を開発することが課題となる。

さらに、適時性要求に対してNRTA等の対応策は未検討のため、今後の課題で ある。

(6) 運転·保守補修性

フェーズ I の設計で未検討であった工程間の搬送について、効率的な運転が 可能になるように、工程機器、搬送機器、および配置の設計を行い、分析を考 慮した運転のタイムチャートを作成して、所定の処理能力を有することを確認 した。主要機器については基本的な運転操作手順の概略検討を行った。また試 薬の搬入および廃棄物の搬送の自動化について、作業頻度や自動化による効果 を調べ、これらの付帯作業の自動化が困難であるが、自動化できないことによ る省力化などへのデメリットがないことを確認し、合わせて作業スペースの必 要性について確認した。本プロセスでは、固体の取り扱いに加えて、高温融体 である溶融塩および液体金属の移送が必要になる。これらの搬送方式は、対象 物の性状、量、頻度などを考慮して、固体については専用の搬送装置を用い、 液体については配管輸送システムを適用することとしている。固体搬送システ ムの設計にあたっては、使用環境を考慮し動作条件などと照らして技術的成立 性を評価した上で、耐放射線性の高い部品により構成することとした。

保守・補修システムとして他の再処理方式と同様にセル内の保守エリアと保 守セルを有し、マスタースレーブマニピュレータやパワーマニピュレータを用 いて作業する。金属電解法では酸化物電解法と比較して大型の機器が多く、ま た溶融塩移送用配管がセル内に配置されており、アクセスおよび搬送経路への 制約が多くなり、機器毎の交換が困難な場合が想定される。これに対し、各工 程機器は設計に際してユニット化を進め、機器や保守内容に応じてユニットあ るいはモジュール単位での交換を考慮した設計とすることで対処している。一 部の機器については、保守作業の手順と動線、並びに必要な機器の検討を進め ている。 (7) 技術的成立性

上記に説明した安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散 抵抗性、運転・保守補修性の観点からは、特に、実用化の障壁となるような問題 はないと考えられる。

主要設備の技術について、枢要技術の基本的な設計要求に対する原理確認基礎データ、実績、開発状況等の観点からの技術的成立性を評価した。その結果を表 6.2.19に示す。金属燃料の金属電解法の基本的なプロセス自体、米国ANLのFCFにて原理の確認等の開発および小規模の施設で開発されてきた再処理技術であり、主要な設備の技術については、表 6.2.19に示すとおり、原理確認基礎データがほとんど揃っておりこの技術的成立性もあると考えられる。また、電解精製槽など容器材料は、500℃程度(共晶溶融温度360℃)の塩(LiCl-KCl)の条件において十分耐食性の実績のあるCr-Moまたは相当品を使用するので、これらの高温機器は、長期間運転に対して使用することができ、機器の健全性の観点からも技術的成立性がある。また、ほとんどの工程はバッチ式であり、円滑に操業するためには遠隔操作や物流技術を採用する必要があるが、FCF等である程度規模設備での実績があり、いくつかの課題が存在する(6.6章の実用化のための技術開発項目参照)が、技術的成立性は見通せると考えられる。

但し、U、TRUの回収率等性能については使用済燃料を用いた性能の実証や 電解精製槽大型化、連続式陰極処理装置など工業化を狙った技術や許認可対応、 計量管理対応などについては、今後の技術開発の成果により再評価等が必要で あると考えられる。

### [参考文献]

- 1) 藤岡綱昭,他: "金属燃料リサイクルシステムの設計評価", JNC TY9400 2001-028 (2001).
- 2) E.J.Karell, et al. : "Electro-metallurgical Treatment of Oxide Spent Fuels", Proc. GROBAL'99 (1999).
- 3) K. L. Toews, et al. : "Application of the MEDEC Process to Treat FERMI-1 Sodium-Bonded Spent Nuclear Fuel", Proc. 5th Topical. Mtg. DOE Owned Spent Nuclear Fuel and Fissile Materials Management, Charleston, SC, USA, Sept. 7-20(2002).
- 4) J.E.Herceg, et al. :"Engineering and Acquisition of Equipment for Electromentallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel", Proc. ICONE8, ICONE-8541 (2000).
- 5) R.Ahluwalla, et al. : "Behavior of Uranium and Zirconium in Direct Transport Tests with Irradiated EBR-II fuel", Nuclear Technology, Vol.126, pp294 (1999).
- E.C.Gay, et al.: "Plant-Scale Anodic Dissolution of Unirradiated IRF Fuel Pins", Proc. GLOBAL' 93, pp1086~1093 (1993).
- H.F.Mcfarlane, et al.: "The IFR Cycle Demonstration", Progress in Nuclear Energy, Vol.31, No.1/2 Proc. Intl. Conf., pp155~173 (1997).
- 8) 飯塚政利: "溶融塩電解精製によるプルトニウム回収技術の開発—液体カドミウム陰極に おけるプルトニウムの挙動—",電力中央研究所,2000年版研究年報,pp16~17(2000).
- 9) 加藤徹也,他:"液体カドミウム陰極へのウラン、プルトニウムの同時回収試験(IV)", N42, 日本原子力学会「2003年春の大会」(2003).
- 10) 木下賢介也,他: "U-Pu-Zr合金陽極から固体陰極へのUの回収",N43,日本原子力学会 「2003年春の大会」(2003).
- 11) 小山正史他: "高温冶金法物性值集", 電力中央研究所調查報告T93033(1994).
- L.S.Chow, et al.: "Continuous Extraction of Molten Chloride Salts with Liquid Cadmium Alloys", Proc. GLOBAL' 93, pp1080~1085 (1993).
- J.P.Ackerman, et al.: "Treatment of Wastes in the IFR Fuel Cycle", Progress in Nuclear Energy, Vol.31, No.1/2 Proc. Intl. Conf., pp141-154 (1997).
- 14) B.R.Westphal, et al.: "Recent Advances during the Treatment of Spent EBR-II Fuel", Proc. of the Embedded Topical Meeting on DOE Spent Nuclear Fuel and Fissile Material Management, pp153~158 (2000).
- 15) K.M.Goff, et al.: "Electrometallurgical Treatment Demonstration at ANL-WEST", Proc. of the Embedded Topical Meeting on DOE Spent Nuclear Fuel and Fissile Material Management, pp58~64 (2000).
- 16) 木下賢介,他:"金属燃料の乾式再処理プロセスの合理化に関する技術開発(3)-工学規模癌 元抽出試験装置の製作と基礎試験-",I25,日本原子力学会「2003年秋の大会」(2003).
- 17) 塚田毅志也,他:"使用済塩中FP元素のゼオライトへの吸蔵特性",N44,日本原子力学会

「2003年春の大会」(2003).

- 18) A.R.Brunsvold, et al. : "Design and Development of a Cathode Processor for Electrometallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel", Proc. ICONE8, ICONE-8702 (2000).
- 19) 加藤徹也,他:"ウランープルトニウムーカドニウム合金からのカドミウムの蒸留",B58,
   日本原子力学会「2004年春の大会」(2004).
- 20) R.K.Ahluwalia, et al.: "Behavior of Uranium and Zirconium in Direct Transport Tests with Irradiated EBR-II Fuel", Nuclear Technology, Vol.133, pp103~118 (2001).
- 21) 坂村義治也,他:"金属燃料乾式再処理における電解精製槽からのジルコニウム回収",I22, 日本原子力学会「2003年秋の大会」(2003).
- 22) 常磐井守泰,他: "金属燃料FBRサイクル―開発の現状と課題―",原子力工業,第33巻第 7号,pp66-79 (1987).
- 23) 井上正,他: "超ウラン元素の乾式分離技術の開発-分離プロセスの改良と実証-",電力 中央研究所総合報告T57 (1998).
- 24) K.M.Goff, et al.:"Simulated First Operating Campaign for the Integral Fast Reactor Fuel Cycle Demonstration", Proc. GLOBAL'93, pp1180-1185 (1993).
- 25) T.Koyama, et al.: "An Experimental Study of Molten Salt Electrorefining of Uranium using Solid Iron Cathode and Liquid Cadmium Cathode for Development of Pyrometallurgical Reprocessing", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.34, No.4, pp384-393 (1997).
- 26) 北島庄一,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計(その8) 一廃棄物処理方法および発 生量の検討一",B44,日本原子力学会「2004年春の大会」(2004).
- 27) 藤岡綱昭,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計(その5) 一電解精製槽プロセスの検討一",N46,日本原子力学会「2003年春の大会」(2003).
- 28) K.Sato, et al. : "Design on an Integrated Metal Fuel Recycle System", GLOBAL2003, New Orleans, U.S.A., pp744-755, Nov.16-20 (2003).
- 29) 魚住浩一,他: "電解精製によるウラン、プルトニウム回収技術の開発一液体カドミウム 陰極への同時回収時におけるウラン、プルトニウムの電解挙動一",電力中央研究所報告, T02004, (2003).
- 30) 中林弘樹,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計(その6) 一電解精製槽の臨界安全設計検討一",N47,日本原子力学会「2003年春の大会」(2003).
- 31) T.J.Battisti,et al. : "Ceramic Waste Form Production and Development at ANL-WEST", ANS Fifth Topical Meeting on Spent Nuclear Fuel and Fissile Materials Management, Sep. 2002, Charleston, SC USA (2002).
- 32) M.F.Simpson, et al.: "A Description of the Ceramic Waste Form Production process from the Demonstration Phase of the Electrometallurgical Treatment of EBR-II Spent Fuel",

Nuclear Technology, Vol.134, pp263~277 (2001).

- 33)藤岡綱昭,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計(その7)一計量管理方法の検討—", N18,日本原子力学会「2003年秋の大会」(2001).
- 34) 藤岡綱昭,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計(その10) 一主要機器とセル・建屋内 配置の検討一",B46,日本原子力学会「2004年春の大会」(2004).
- 35) 原子力安全委員会:"再処理施設安全審查指針",(1986)2001改訂版.
- 36) 原子力安全委員会:"ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針",(2002)
- 37) 日本原燃(株):"六ヶ所再処理事業所 再処理事業指定申請書", (1989) 1997補正.
- 38) 中林弘樹,他: "金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討(I)", JNC TN9400 2003-082 (2003).
- 39) O. Togawa, T. Homma : "Development of Collective Dose Assessment Codes for a Spent Nuclear Fuel Reprocessing Plant in Japan", Proc. of The Third International Conference on Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management RECOD '91, Sendai, Japan, April 14-18, 1991, Vol. 1, p. 253 (1991).
- 40) O. Togawa : "Computer Code TERFOC-N to Calculate Doses to Public Using Terrestrial Foodchain Models Improved and Extended for Long-Lived Nuclides", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 27, p. 360 (1990).
- 41) 外川織彦: "原子力施設の平常運転時に大気へ放出される放射性核種による公衆の被曝線量 を算出するための計算コードATERNFOC-N", JAERI-M 89-145 (1989).

_	元素グループ	回収物への	* 바무 버구	回収物への	* 바카 버구	回収物への	* 444 844	ゼオライトカラム
_		移行率(%)	仗拠	移行率(%)	快炒	移行率(%)	快炒	への移行率(%)
_	U	0.0	[1]	96.03	[2]	88.70	[9]	0.0
_	Np	0.0	[1]	0.0	[3]	99.85	[2]	0.11
_	Pu	0.0	[1]	0.0	[3]	99.79	[9]	0.17
_	Am,Cm	0.0	[1]	0.0	[3]	99.41	[2]	0.35
_	ALM	50.0	[1]	0.0	[3]	0.0	[3]	95.48
_	ALE	10.1	[1]	0.0	[3]	0.0	[8]	95.48
_	希土類1	0.0	[1]	0.0	[3]	0.0	[2]	95.96
_	希土類2	0.0	[1]	0.0	[3]	1.05	[2]	93.29
_	希土類3	0.0	[1]	0.0	[3]	4.54	[2]	68.95
_	NM, Mo, Tc	3.8	[1]	0.0	[4]		-	•
_	HG	50.0	[1]	0.0	[3]	0.0	[8]	100.00

金属電解法の元素挙動(炉心燃料処理時) 表 6.2.1

移行率の根拠

 $\mathbf{Z}_{\mathbf{r}}$ 

 第.4.7.5、揮発性等、性状毎に分岐率を設定。
 第.4.7.5、揮発性等、性状毎に分岐率を設定。
 第.4.4 (1) 静振電位の比較。
 [4] NM は、貴であるため溶解せずに、陽極バスケットに残留するか Cd プールへと落下する。
 [5] Cd 陰極中で Pu が PuCdeを生成し、且つ、その他の元素が固相としては折出しない場合と、全元素が液体 Cd 中で分配するとしたときの分離係数を平均した値をもとに移行 率を算出。

9.66•

3  $\overline{\mathbb{C}}$ 

37.96

 $\overline{\mathfrak{O}}$ 3

67.76

Ξ Ξ

0.0

90.0

 $\sharp^* {\mathcal V} {\mathbb P}^* \mathbf{Na}$ 

0.0

0.0

<u>9</u> E

操業上の設定値。 アクチニドと希土類の一部は、TRU 還元抽出器によりバイパスされる。ゼオライトでは、3 価(アクチニドと希土類)が 98%、2 価(ALE と Sm、Eu)および Cs、Rb が 95%吸 着されると設定した。

根拠\*

浴塩精製工程

陽極溶解・U-Pn-MA回収

陽極溶解・U回収

ボンドNa 除去

Г Е Б Е Е Б Е Б Б , Е Е .

- = 2		製品	品側	環境	放出	廃棄物		
□ 元素名		ウラン製品	TRU製品	大気放出側	海洋放出側	ガラス固化	深地中並廃	その他
		移行率	移行率	移行率	移行率	体移行率	棄物移行率	
	Н	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-01	1.00E-09	0.00E+00	0. 00E+00	9.00E-01
	C	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E-09	0.00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00
ALM	Rb	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
/\ <b>_</b>	Cs	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
ALF	Sr	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9. 50E-01	5.00E-02	1.00E-06
	Ba	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9. 50E-01	5. 00E-02	1.00E-06
	Y	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0. 00E+00	1.00E-06
	La	0. 00E+00	2.34E-02	1.00E-13	1.00E-09	9.77E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Ce	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Pr	0.00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Nd	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
RE	Pm	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
RE	Sm	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0. 00E+00	1.00E-06
	Eu	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0. 00E+00	1.00E-06
	Gd	0. 00E+00	2. 34E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 77E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Tb	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Dy	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Но	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
	Er	0. 00E+00	7.83E-02	1.00E-13	1.00E-09	9. 22E-01	0. 00E+00	1.00E-06
NM	Zr	6.96E-01	1.04E-01	1.00E-15	1.00E-09	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Mo	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-07	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Tc	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-07	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Ru	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Rh	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Pd	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Ag	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-15	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Cd	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	8. 50E-01	1.50E-01	1.00E-06
	In	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	8.60E-01	1. 40E-01	1.00E-06
	Ge	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Sn	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	As	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
	Sb	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01	1.00E-06
CC	Se	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	8.50E-01	1.50E-01	1.00E-06
	Te	0. 00E+00	0.00E+00	1.00E-05	1.00E-09	8.50E-01	1.50E-01	1.00E-06
НС	Br	0.00E+00	0.00E+00	5.00E-03	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
nu	Ι	0.00E+00	0.00E+00	5.00E-03	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
NC	Kr	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
nu	Хе	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	0. 00E+00
	U	9.63E-01	3.24E-02	1.00E-13	1.00E-09	1.13E-06	5.00E-03	1.00E-06
AN	Np	0.00E+00	9.87E-01	1.00E-13	1.00E-09	1.17E-02	1.00E-03	1.00E-06
	Pu	0.00E+00	9.98E-01	1.00E-13	1.00E-09	7.56E-04	1.00E-03	1.00E-06
	Am	0.00E+00	9.62E-01	1.00E-13	1.00E-09	3.74E-02	1.00E-03	1.00E-06

表 6.2.2 金属電解法の各元素の製品・環境放出・廃棄物への移行率

注) ALM:7//かり金属 ALE:7//かり土類金属 RE:希土類 NM:貴金属 CC:かっゲッ HG:ハロゲッ NG:希がえ AN:7/チード

再処理 製品	製品重量(FP 混入率*)		
U-TRU 合金	5.3 t (FP~2.2 wt%)		
金属U	29.6 t (FP~0 wt%)		
U, TR	Uの回収率		
U**	99.5 %		
TRU	99.8 %		
TRU の回収率内訳			
Np	99.4 %		
Pu	99.8 %		
Am	99.4 %		
Cm	99.4 %		

# 表 6.2.3 金属燃料の金属電解法による再処理製品と U, TRU 回収率(38tHM/年)

\*金属燃料(U-Zr、U-TRU-Zr)の成分である Zr を除いた FP 混入率

\*\*浴塩調整用として加えた UCI3も考慮した回収率

核種	金属燃料リサイ (38tH	イクルプラント M/年)	先行湿式 再処理施設	備考
	発生量 <sup>(注記2)</sup> (Bq/GWd)	放出量 <sup>(注記2)</sup> (Bq/GWd)	放出量 <sup>(注記 1、2 )</sup> (Bq/GWd)	
Kr-85	5.8> (排参	< 10 <sup>12</sup> 氦側)	9.1×10 <sup>12</sup> (排気側)	
C-14	5.0×10 (排 ~ (海洋加	<sup>8(注記3)</sup> <b>〔</b> 側〕 ~0 攻出側〕	1. 4×10° (排気側)	発生量は、 冷却期間
H-3	5. 0 × 10 <sup>11</sup>	5.0×10 <sup>10 (注記 4)</sup> (排気側) 4.5×10 <sup>11 (注記 4)</sup> (海洋放出側)	5.3×10 <sup>10</sup> (排気側) 5.1×10 <sup>11</sup> (海洋放出側)	
I-129	2.5×10 <sup>7 (注記5)</sup> (排気側)	2.5×10 <sup>5 (注記5)</sup> (排気側)	3.1×10⁵ (排気側)	

# 表 6.2.4 金属燃料リサイクルプラント(38tHM/年)の主な核種の 放射性廃棄物発生量/放出量と六ヶ所再処理施設の放出量

(注記1)先行湿式再処理施設データの出典:六ヶ所再処理工場事業指定申請書添付書類-七

(注記 2) 炉の平均燃焼度は、六ヶ所再処理工場の場合 45GWd/t、金属燃料リサイクルプラントの場合、94.2GWd/tとし、Bq/GWd 単位の発生量、放出量を換算した。

- (注記3)金属燃料中の不純物窒素量を50ppmと想定して算定した。
- (注記 4) 排気側のオフガス処理設備にトリチウム除去装置(性能; DF=10)を設置するものとした。燃料中トリチウムの全量のうち、Na除去装置、電解精製槽などから排気側に10%、海洋放出側に90%移行するとした。(トリチウムは、排気側オフガス処理設備にほぼ100%移行するが、オフガス処理設備のトリチウム除去装置にて90%除去される。トリチウム除去装置にて回収した90%(凝縮液)は、廃液処理設備を経由し、海洋に放出される)
- (注記 5) 燃料中全量ヨウ素の 50%が Na 除去装置から排気側のオフガス処理設備に移行するものと想定した。排気側のオフガス処理設備にヨウ素除去装置(性能; DF=100)を設置するものとした。燃料中の残りのヨウ素 50%は、ほとんど、電解精製-塩処理経由高レベル廃棄物側に移行ものとした。

廃棄物	処分の観点からの廃棄物	廃棄物	<b>≟</b> (m³/y)
廃棄物区分	主要な廃棄物	生廃棄物(t/年)	固化体(m³/年)
	廃ボンドNa	1.3 (酸化物として)	10.0
高レベル廃棄物	塩吸蔵ゼオライト	14. 1	18. 6 (124本*/年)
	モールド(燃料製造側)	9.0	*150リットル/本 (たちーフター)
	合計	24. 3	(47-83-)
	電解精製槽Cd陰極るつぼ	4. 0	
	せん断プレナム	12. 8	
	Cd蒸留処理後残渣(NM)	1.0	8
TRU廃棄物	ドロス	2. 0	(40缶**/年) **200川yトル/缶
	陰極処理用るつぼ 射出成型るつぼ(燃料製造側)	22. 4	(廃棄物缶)
	ハル	3. 3	
	合計	45.5	
高βγ廃棄物	集合体部材	55. 5	21.4 (107缶***/年) ***200リットル/缶 (廃棄物缶)
備考	<ol> <li>Cd蒸留処理後残渣(NM)は、残渣中にし物相当以上と考えられるが、他の廃棄物TRU廃棄物の扱いとした。</li> <li>面化、ドラム詰めの充填率等の条件は、</li> <li>せん断プレナム、ハル;密度(SUS)は7.た、集合体部材は、密度(SUS)7.9g/cm<sup>3</sup></li> <li>・せん断プレナム、ハル;密度(SUS)7.9g/cm<sup>3</sup></li> <li>・NM;かさ密度は10g/cm<sup>3</sup>とした。</li> <li>モールド;密度(シリカ)は2.66g/cm<sup>3</sup>、</li> <li>・ドロス;密度は5g/cm<sup>3</sup>とした。</li> <li>・セメント固化は、処理する廃棄物と等量(</li> <li>人工鉱物固化(PC固化)は、ガラスフリー 固化減容率は約1.67、PC処理後の密度は2</li> <li>分析設備の廃液等、廃Zrの発生量等は第</li> <li>優極バスケットは、ある程度リサイク) 上記に含んでいない。</li> <li>径方向ブランケット燃料を電解精製する 塩を廃棄処理することを考えているが、 ない。</li> </ol>	<ol> <li>Puやその酸化物がな かと混合希釈を考慮し、 (次の通りとした。 9g/cm<sup>3</sup>、圧縮処理の源 (で)、 ()、 ()、 ()、 ()、 ()、 ()、 ()、 ()、 ()、 (</li></ol>	<ul> <li>にとは言えず、TRU廃棄 高レベル廃棄物とせず、</li> <li>成容率は約1/2とした。ま は約1/3とした。</li> <li>した。</li> <li>とした。</li> <li>ト+塩の重量の1/3とし、</li> <li>し、この発生廃棄物は、</li> <li>後、電解精製槽の使用済 棄物は、上記に含んでい</li> </ul>

表 6.2.5 金属燃料リサイクルプラントの主な廃棄物量

設備	主要な機器	処理能力	機器数
使用済燃料貯蔵	使用済燃料貯蔵ピット (冷却設備付)	199 体貯蔵(炉心燃料 167 体、径方向ブラン ケット燃料 32 体)	1
	使用済燃料一時保管ピット (冷却設備付)	14 体貯蔵(約2週間分)	1
使用済燃料受入れ・	集合体解体機	2 hr/体	1
前処理(解体・せん断)	ピンせん断機 (ワイヤ除去装置付)	5.8 hr/ 体	1
	Na ボンド除去装置	1.7 体/日	1
		容量 2720 L	
	雷解精製槽	4 陽極バスケット+4 陰極	
	(電気加熱方式)		5
再処理(電解分離)	固体陰極処理装置 (誘導加熱方式)	180 kgU/日	1
	液体 Cd 陰極処理装置 (話道加熱士士)	44 kgU-TRU /日	1
	(品等加款分式) (d 蒸留装置 (電気加熱方式)	約 500kgCd (70L相当) /日	1
	TRU 還元抽出器	17 hr/バッチ、3段	1
塩処理	HM 再酸化槽	容量 1900L	1
	ゼオライトカラム	19 hr/バッチ、3 カラム	1
ドロス処理	ドロス塩化槽	容量 200L	1
	HEPA フィルタ	流量~13Nm <sup>3</sup> /h	6
	Cs/Ru 吸着塔	流量 10Nm <sup>3</sup> /h	2
オフガス処理	トリチウム除去装置	流量 10Nm <sup>3</sup> /h	1
	日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日	流量 10Nm <sup>3</sup> /h	2
	人工鉱物固化装置		-
	(PC 装置)	約1キャニスター/日	1
		圧縮荷重 2000t	1
	セメント固化装置	セメント充填固化約1缶/日	2
廃棄物処理·貯蔵		最大処理能力約 500kg/日	1
	溶融炉	「東天処理能力」 #燃物約 50kg/b 全属約 180kg/b	1
	キャニスター貯蔵庫	空冷ファン冷却設備付	一式
	缶貯蔵ラック	収納缶数ドラム缶 100 缶/ハル缶他 100 缶	一式
	溶解装置、不純物除去装置、 電位差滴定計、クーロメータ、	・品質管理用分析(U、Pu、同位体、MA等)	
分析	質量分析計、K-edge+蛍光 X 線	<ul> <li>・ FP 分析 (0、 PU)</li> <li>・ FP 分析 (α核種 α核種 不純物)</li> </ul>	一式
	分析計、αスペクトロメータ、	<ul> <li>・計量管理用(U、Pu、同位体)</li> </ul>	
	y スペクトロメータ等		-4
	HEPA ノイルタ マルゴンガス為却界	流重約 225,000Nm <sup>o</sup> /h	
アルゴンセル	ノルコンガス行动器		2
冷却·浄化設備	アルゴンガス浄化装置(酸素	水分除去	各1
	际去、水分际去、室素际去)	窒素除去	
W-tn-k, W-k	冷却水用冷却塔ユニット	約 1.5×10 <sup>6</sup> Kcal/h	2
们可小で行水	冷水用冷凍機ユニット	約 1.35×10 <sup>6</sup> Kcal/h(約 450USRt)	2
		定格荷重 100t/5t/2t 天井クレーン	4
	クレーン	定格荷重 5t I/C クレーン	26
保守設備		定格荷重 100kg P/M クレーン	6
UN 1 UK UH	マスタースレーブ マニプレータ	取扱荷重 23kg	140
	モノレールホイスト	定格荷重 5t/2t/1t	7

# 表 6.2.6 主要な機器の概略仕様(金属燃料リサイクルプラントの規模 38 t HM/年)

	セル名	<b>各セル容積</b> (m <sup>3</sup> )	合計セル容積	(m³)
	前処理セル	2, 500		
۸» ملح ال	電解分離セル	10, 500		
	塩処理セル	2, 700	21, 300	
	射出成型セル	5, 300		
	その他	300		
空気 セル	燃料払出・燃料集合体セル	4, 000		
	人工鉱物固化セル	1,000		
	高放射性廃棄物処理セル	2, 800	12.300	
	保守セル	2, 000		
	エア・ロックセル(Ar置換)	1, 800		
	その他	700		
	合計(Arセル+空気セ	:ル)	33, 600	

表 6.2.7 38tHM/年規模の金属燃料リサイクルプラントのセル容積

表 6.2.8 主な供給試薬、ユーティリティの使用量

主な供給試薬、 ユーティリティ	主な使用目的	使用量
LiCI-KCI	電解精製槽への LiCI-KCI 塩の補給	820kg/年
金属K、Li	TRU 還元抽出器の 還元剤 K、Li の供給	300kg/年
るつぼ	陰極処理装置、射出成型への 新るつぼの補給	22.4t/年
ゼオライト	ゼオライトカラムへの 新ゼオライト補給	19ton/年
液化アルゴン	機器内、Ar セル内への アルゴン供給用	520ton/年
電気	電解精製槽、陰極処理装置等加熱、 セル内照明器具等 (燃料製造設備含む)	9,300 kW

各建屋	主要な設備/建屋の容	積(m <sup>3</sup> )
主建屋	<ul> <li>①燃料受入、前処理設備</li> <li>②再処理設備</li> <li>③燃料製造設備、燃料払出設備</li> <li>④共用設備</li> <li>・オフガス処理設備</li> <li>・アルゴンセル浄化冷却設備</li> <li>・廃棄物処理・貯蔵設備</li> <li>・分析設備</li> <li>・保守設備</li> <li>・ユーティリティ設備</li> <li>・中央制御室</li> <li>・計装制御設備</li> <li>・建電換気</li> </ul>	21万* (53m×104m×高さ37m)
燃料貯蔵建屋	使用済燃料貯蔵設備 製品燃料貯蔵設備	9万** (55m×58m×高さ29m)
その他	非常用発電建屋、ボイラ建屋、建屋燃料	用貯油槽、管理棟、排気筒

表 6.2.9 38tHM/年規模の金属燃料リサイクルプラントの各建屋容積

\* これらの値は外壁ベース。通り芯ベースでは17.3万m<sup>3</sup>(51.4m×103m×高さ33.5m) \*\*これらの値は外壁ベース。通り芯ベースでは7.7万m<sup>3</sup>(53m×56m×高さ26m)

		想定される異常事象の摘出	1		設計対応策	
異常事象カテゴリ	発生機器/工程	原因	進展シナリオ	発生防止	影響緩和/終息	課題
核燃料の臨界	電解精製槽	過剰装荷あるいは蓄積	誤操作(誤移送、多重装荷、蓄積の確認無視) により核燃料物質が過剰に存在する。	受入物質の分析/秤量/確認。 上記操作のルーチン化(自動化)。 塩中 HM 濃度の管理。	なし	臨界事故については二重 偶発性原理に基づく発生 防止設計に重点を置く。
		Cd プールにおける PuCd 化 合物の異常蓄積	液体 Cd 陰極において過剰に析出した PuCd 化 合物の一部が陰極よりこぼれ落ちることによ って、電解槽下部の Cd プール内に蓄積する。	液体 Cd 陰極の容積および装荷 Cd 量の制限。 Cd プール中 HM 濃度の管理。 電解電流の監視。		したがって個々の発生防 止策は極めて信頼性の高 い装置、ロジックおよび システムで構築されなく
		核燃料物質の陽極への異常 析出	陽極-陰極の電位が逆転した状態で電解操作 を実行する。	電極コネクタの形状等により配線 ミスを排除する。		てはならない。
	陰極処理装置	過剰装荷	プロセスるつぼへの多重装荷。	受入物質の秤量/確認。 上記操作のルーチン化(自動化)。		
放射性物質の閉じ込め 機能の喪失 (放射性物質の放出経路 の異常)	電解精製槽	溶融塩保持容器の破損/漏洩	溶融塩を保持する容器の破損(腐食あるいは熱 的、機械的ダメージ、経年劣化)により、Ar セル中に HM、FP を含んだ溶融塩が直接さら される。	漏洩しがたい材質/構造の容器を使 用。	漏洩検知器と2次容器の設置。 溶融塩は高融点であるため、外部か らの熱供給がない場合には固化す る。	漏洩検出技術の検討が必 要である。 定量的評価のためには、
		溶融塩のオーバーフロー	溶融塩供給量の過剰によりオーバーフローし た溶融塩が Ar セル中に直接さらされる。	塩供給操作のバッチ化。 液位計と連動したインターロッ ク。 圧力計による異常検知。		溶融塩中放射性物質の気 相への移行率データを取 得する必要がある。
		オフガスラインの機能喪失/ 閉塞	・排気ブロワの故障。 ・コールドトラップフィルタの閉塞 上記現象により、オフガスの排気経路維持が困 難となり、機器から Ar セルへ直接オフガスが 漏出。	予備機の設置。	圧力計による監視を行い、予備的対応を取る。	
	陰極処理装置	プロセスるつぼの破損/転倒	・るつぼの熱的・機械的破損、経年劣化 ・取扱中の転倒等 上記現象により包蔵する燃料物質がArセル内 に直接飛散する。	るつぼの検査。 温度計による監視。 取扱機器へ落下防止機構を付加。	・装置内での破損時には装置圧力バ ウンダリが閉じ込め機能を提供。 ・装置外での破損では、包蔵物は固 体であるため大規模な放射性物質の 放出事象に至らない。	
		耐圧バウンダリの破損	シール部の損傷により、外部 Ar セル雰囲気が 流入。	圧力計、温度計によるシールの健 全性監視。	装置内負圧維持のため、装置外へ大 規模な放射性物質の放出は生じない。	
		真空排気ラインの閉塞	真空ポンプ配管内で塩/Cd が蓄積、固化することにより装置内真空度の低下が生じる。	フィルタ類の適切な設置と保守。	圧力計による監視と、異常時の蒸留 操作停止。	
放射性物質の気相への 移行量の増大 (放射性物質の放出量 の増大)	電解精製槽	溶融塩温度上昇	温度制御の故障等による加熱装置異常により 気相への移行量が増大。	温度計と連動したインターロック の設置。 ヒーター容量の制限。	なし	
		供給 Ar ガスの増大	Ar ガス圧力制御系または流量制御系の故障に より、オフガス流量が増大。	圧力計による検知と予備的対応。	オフガス系 HEPA フィルタ等による 浄化。	
		FP の蓄積	塩浄化操作の不作為によって塩中 FP が蓄積 し、気相への移行量が増大すると共に崩壊熱に よる槽内温度上昇が生じる。	塩浄化操作のルーチン化(自動化)。	なし	
	陰極処理装置	HM 金属インゴットの火災	Ar セルバウンダリ破損によって流入した空気 と金属インゴットが反応し火災に至る。	Arセルバウンダリには全面ライニ ングを施設し、外部雰囲気が漏洩 しがたい構造とする。	Ar セル雰囲気酸素濃度計の設置。 酸素濃度上昇防止のための緊急 Ar ガス注入系の設置。	HM 金属の熱的/化学的 制限値を定める為に、燃 焼条件等のデータを取得 する必要がある。

# 表 6.2.10 金属電解法再処理システムの電解精製槽・陰極処理装置で想定される異常事象と設計対応

	Case-A	Case-B	Case-B'		
幾何学モデル		図 6.2.28参照			
溶融塩	容量 : 10	000L	なし		
	Pu濃度 : 2	0wt%			
	Pu同位体比 : F	Pu239のみ			
	Puインベントリ:4	25.0kg			
Cdプール	容量 :33	32L (液面高さ10cm)	なし		
	Pu濃度 : 3	.62wt%(飽和濃度仮定)			
	Pu同位体比 : F	Pu239のみ			
	Puインベントリ:9	9.5kg			
陽極	なし	4基装荷			
		物質:HM-Zr合金	2		
		組成:外側燃料炉	心部相当		
		Puインベントリ:	$7.1 \text{kg} \times 4$		
固体陰極	なし	3基装荷			
		物質:金属ウラン			
		組成:劣化ウラン	相当		
液体Cd陰極	なし	1基装荷			
		物質:PuCd <sub>6</sub>			
		組成 : Pu239のみ			
		Puインベントリ:	19.3kg		
反射条件	電解槽本	体:3.5cm厚のSUS			
	ヒーター	: 3.5cm厚のSUS			
	側面熱遮	蔽体:10cm厚のSUS			
	上部熱遮	<b>遮蔽体:15cm厚のSUS</b>			
	上蓋:5c	m厚のSUS			
	下部セル	フロア:1m厚の重コンクリー	$\mathbb{P}$		
	系外周に	20cm厚さの水反射体			
総インベントリ	524.5 kg-Pu	572.2 kg-Pu	47.7 kg-Pu		
$k_{eff}$ +3 $\sigma$	0.538	0.667	0.548		

# 表 6.2.11 大型 8 極電解精製槽の臨界解析評価例

	<sup>85</sup> Kr	<sup>3</sup> Н	$^{129}$ I	<sup>14</sup> C <sup>注 1</sup>
1年間に受入れる使用済燃料中の量(Bq/y/施設)	2.1E+16	1.8E+15	1.8E+11	1.8E+12
大気への移行率	1	0.1	0.005	1
年間大気放出量(Bq/y/施設)	2.1E+16	1.8E+14	8.9E+08	1.8E+12

### 表 6.2.12 平常時被ばく評価において想定した主要な核種の大気放出放射能

注1) 新燃料中の窒素含有率を50ppmと想定。

# 表 6.2.13 工程内における物質の出入り、エネルギーの出入りおよび位置の変化 に関する変動項目

変動項目の大分類	変動項目の小分類
	流量の変化
	核燃料物質濃度の変動
	核分裂生成物濃度の変動
液体及び固体に係る異常な変化	試薬濃度の変動
	保有量の変動
	移送経路の変化、固体位置の変化
	電解電流の変動(注)
	流量(又は圧力)の変動
気体に係る異常な変化	組成の変動
	流路の変化
泪座の思告わ亦化	加熱能力の変動
価皮の共用な変化	冷却能力の変動

人工鉱物 出ノ塩 固化設備 内酸器(	空気セル				/	2. 新術指	<b>E</b> 14) 容器破 這過剰供 損		直移送ラ い <sub>留油</sub>	観波で 国務送う × の閉塞		rガスの × t給 ×	×	トフガス への閉塞 ガスライ × 1.機停止	加熱、加熱機能喪失	×
然料 スラグ TRU抽 一時 港蔵庫 槽					~	(59)ス(14)枩	(12) 神 ラグの (12) 神 集合 整		(30)ス (16) 插 サダ形 メンク	後 水 小 小 で イ い の イ の イ の イ の イ の イ の で で で い で で い で い で い で い で い で い で い	×	× (20) A1 ※ 過剰供		(21)メ イインメ オレイン 推画	亹(6) ×	
連 動 波型 機置					11/	i i i i i i	過剰充填 ぼ破損		1の (26)る 債 (ごぎ)る	ぼ落っ扱落したい		バウンダリ		× ~	熟、加熱機 喪失	
Cd陰極処 装置				(23) 然彩	剰充填		<ul> <li>(23) 熱料</li> <li>(24) るつ(</li> </ul>		< (25) 塩/Co 装置内蓄	(26) るし 現扱い 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	-	(27)耐圧, 機能喪失	<u>り</u> 破損)	(28)真空 気ラインク 関審	(6) 過加熱 能	幾能喪失
- 勝スケ仮台 極 ッ置 バ ト発	バみ	>	<	>	<	(7) 4-7	が断集がたる。		(8) イジト	坂市		×	ミウンダ	×	×	ル冷却核
電解精製装置	Ar	,		(10)燃料過剩充填/蓄積	(10)燃料過剰充填/蓄積 (11)FP過剰蓄積	(10)燃料過剰充填/蓄積 (19) HMの渦剰お出	(13) HMの異常析出 (13) HMの異常析出 (14) 容器破損	(12) 塩の過剰供給	(16)塩移送ラインの漏洩 (17)塩移送ラインの閉塞	(18)電極取扱い中落下,衝突 (19)電極がCdプールに接触 (PuがCdプールに析出)	(11) HMの過剰析出 (12) HMの異常析出	(20) Arガスの過剰供給	<ul><li>(2)空気の流入(Arセル)</li></ul>	(21)オフガスラインの閉塞 オフガスライン排風機停止	9) 過加熱、加熱機能喪失	た(22)
Na ボン 除 井 博					ţ.	-f+ (2)	の第二		(8)バ スケッ	トいて 取中 務権	-				5)	×
解体機 及びピン せん断機				>	<	(4)集合 休 <sup>レ°</sup>	本、 、 本、 に 一 を た の 他 ろ の (	断 下 の 集 0	(新文庄) (王 <b>父</b>	N KE	×	×		×		
使用済続 料一時貯 燃料 蔵ピット 一時 製品燃料 保管 下蔵ピッ ピット	建屋					(1) 集合体集合	<ul> <li>(装下、衝突に伴う)</li> </ul>		<ol> <li>(9) 他</li></ol>	送中)			×		×	(3)集合体冷却機 能喪失(貯蔵 中、移送中)
原結の 第18~ 18~		原因	結果		11 - 4		原因			[	結果		E E	۲ ۲		原因
<ul> <li>変動項目</li> <li>の小分類</li> </ul>		流量	試薬濃度	· 核燃料 物質濃度	核分裂 生成物濃度		保有量 <sup>%2</sup>		移送経路	固体位置	電解電流	、流量又は 「圧力	組成	流路	加熱能力	冷却能力
変動項目の 大分類		液体及び	固体に係る国地ながある	<b>乗</b> 市 よ変化								気体に係る 異常な変化			温度の 異常な変化	

表 6.2.14 物質、エネルギー等の変動に直接関係する異常事象発生項目

※1原因/結果の別:原因とは小分類の変化や変動を生じさせる原因事象を指し、結果とは小分類の変化や変動の結果として生じる事象を指す。 ※2保有量:槽、装置、ピット、架台、貯蔵庫について、総量の変化を伴わない内部の局所的な保有量の変化もこれに含まれる。 ×は安全に係る該当事項がないと判断したことを示す。

設備	異常事象	事象進展シナリオ / = = = = = = = = = = = = = = = = = = =	事象分類
使用済燃料一時貯蔵ピット 練料一時足感ピット	(1)使用済燃料取扱い中落下, 衝突(貯蔵中,移送中)に伴	(斑絽事家で灰直した場合の影響) 集合体集合→臨界	(速度し待る事業) (1) 臨界→計画外放 出
解体機及びピンせん断機	<ul> <li>9 果台体集台</li> <li>(4) 燃料ピン, 燃料集合体の集合: せん断片の集合</li> </ul>	集合体集合等→臨界	
Naボンド除去槽 陽極バスケット仮置架台 電解精製装置	<ul> <li>(1)、ススケット取扱い中落下によるせん断片集合</li> <li>(10)燃料の過剰充填/蓄積</li> <li>(12) HMの過剰析出</li> </ul>	せん断片集合→臨界 過剰充填/蓄積→臨界 電解停止忘れ/過剰電流→Pu過剰析出→Cd陰 極オーバーフロー→CdプールにPuの蓄積→臨	
電解精製装置	(13) HMの異常析出 (19) 電柩がCdプールに接触	界 電極の逆接続→本来の陽極(陽極バスケット の場合とCdプールの場合とがある)にPu/U桁 出→臨界 電極破損→電極がCdプールに接触→Cdプール	
cd陰極処理装置 計量や調査業	(23) 燃料の過剰充填	にbuの析出・蓄積→臨界 過剰充填→臨界	
タ1山灰望姿直 燃料スラグー時貯蔵庫	(29) スラグ取扱い中落下によ ろスラグ隼合	スラグ集合→臨界	
使用済燃料一時貯蔵ピット 燃料一時保管ピット 細体雄みびピンナル断維	(2)使用済然料取扱い中落下, 衝突 (貯蔵中,移送中)	落下→燃料被覆管破損	(2)燃料被覆管破損 →挿発性FP放出およ び(燃料報齢→エアロ
<u>###PRAXOでしてしたBN198</u> 使用済然料一時貯蔵ピット 然料一時保管ピット	<ul><li>(3)使用済燃料の冷却機能喪失</li><li>(貯蔵中,移送中)</li></ul>	被覆管温度高→燃料被覆管破損	· O ※11 // W W · · · · · · · · · · · · · · · ·
解体機及びピンせん断機 解体機及びピンせん断機 Naボンド除去槽 電解精製装置 陽極バスケット仮置架台 cd陰極処理装置 et u.emanta要	<ul> <li>(6)使用済燃料の冷却能力喪失</li> <li>(5)空気の流入 (Arセルバウン ダリ破損)</li> </ul>	酸素との酸化反応・火災	<ul> <li>(3)火災→エアロゾ ル発生→計画外放出</li> <li>(セルバウンダリ破損)</li> </ul>
anuw王丞追 燃料スラグー時貯蔵庫	(12) (首先市家) (12) (12) (12) (12) (12) (12) (12) (12	ジール相値→バガスが粧帯内に並入(バ+ ハ	
Cd陰極処理装置 射出成型装置 Naボンド除去槽 陽極バスケット仮置架台	(21) IIIJIエバリンクリ (呉王及神 持)機能喪失 (8) バスケット取扱い中落下	ノール頃廠一品カイバ波県PJに品入(Harew バウンダリが破損している場合には空気が流 入し、火災に至る) 落下→容器の破損→FPおよび燃料飛散	(4)せん断片の飛散 →エアログル発生- ************************************
Naボンド除去槽 電解精製装置 Cd陰極処理装置 射出示型站置	(9) 過加熱	容器やるっぽの破損→燃料、溶融塩、Na等の 溶融物の漏洩	■1回77.02日 (5)放射性溶融物の 漏洩または放射性固 形物の飛散→エアロ ブルの発牛→計画外
TRU抽出/塩処理設備内貯槽 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 人工鉱物固化設備内機器(V型 ヒートミキサー他)		容器の破損→溶融塩、塩吸着ゼオライトの飛 散	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 人工鉱物固化設備内機器(V型 レート、シャーの)	(14) 容器破損	容器破損→溶融物の漏洩 容器破損→塩吸着ゼオライトの飛散	
<u>。 電解精製装置</u> TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(15) 塩の過剰供給	塩供給継続→Arガス排気管/給気管に移行→ 管閉塞→シール部損傷→溶融物の漏洩	
電解精製装置 TRU抽出人塩処理設備内貯槽	(16)塩移送ラインの漏洩	<b>塩移送配管破断→塩漏洩検知失敗→ボンプ運</b> 転継続→溶融物の漏洩	
電解精製装置の電極 Cd陰極処理装置 射出成型装置 Cd略極処理速置	(18) 電極取扱い中落下, 衝突 (24) プロセスるつぼ破損 (96) プロセスるつぼ破損	燃料飛散→計画外放出 るつぼ破損→燃料の飛散→計画外放出 燃料報数→計画外お出	
culer®で生まし 射出成型装置 燃料スラグー時貯蔵庫	(20) / テレイン / Jan WW · T 落下, 衝突 (30) スラグ取扱い中落下	///////////////////////////////////	
設備	異常事象	事象進展シナリオ (異常事象を放置した場合の影響)	事象分類 (進展し得る事象)
Naボンド除去槽 電解精製装置 cd陰極処理装置 射出成型装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 人工鉱物固化設備内機器(V型 ヒートミキサー他)	(9)過加熱	温度上昇による蒸発量増加→ミスト発生量の増加	(6)放射性ミスト発 生量の増加
電解精製装置	(11) F P 過剰蓄積	溶融塩浄化操作忘れ→PP蓄積→溶融塩温度上 昇→ミスト発生量の増加	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(20)Arガスの過剰供給	Arガス流量増加→塩中PP等の気相への移行量 増加→計画外放出	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 解体機及びピンせん断機 Naボンド除去槽 電解精製装置 陽極バスケット仮置架台 Gd陰極処理装置 射出品型站電	(21)オフガスラインの閉塞 (5)空気の流入(Arセルバウン ダリ破損)	閉塞→IM電解槽内圧力上昇→気相のかセルヘ の漏洩→計画外放出 酸素との酸化反応→製品品質低下→工程停止	(7)工程停止
然日バンシント 燃料スラグー時貯蔵庫 まがは創せま	(11) F P 過剰蓄積	溶融塩浄化操作忘れ→PP蓄積→溶融塩温度上	
電解精製装置 電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 電解精製装置 TPU抽出/垢的理設備内贮備	(15)塩の過剰供給 (17)塩移送ラインの閉塞	鼻→ビーク制御不能→工程停止 塩供給継続→Arガス排気管/給気管に移行→ 同ガス管の閉塞→工程停止 閉塞→移送停止→送り側容器液位不変→受け 間密駆ぶけ不亦	
- <u>monul/ 通べ生まが開け1411年</u> 電像精製装置 引は陰極処理装置 射出成型装置 陽極ベスケット仮置架台 燃料スラグー時貯蔵庫	(22) セル冷却機能喪失	Watatantuurt変 アルゴンセル内雰囲気温度上昇→セル内配置 の動的機器の異常による工程停止	

# 表 6.2.15 事象の進展シナリオの一覧(1/2)

注)異常事象欄の数字(1)~(30)は表 6.2.14の(1)~(30)に対応している。

設備	異常事象	事象進展シナリオ (異常事象を放置した場合の影響)	事象分類 (進展し得る事象)
Naボンド除去槽 電解精製装置 cd陰極処理装置 射出成型装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽 人工鉱物固化設備内機器(V型 ヒートミキサー他)	(9) 過加熱	温度上昇による蒸発量増加→ミスト発生量の増加	(6)放射性ミスト発 生量の増加
電解精製装置	(11) F P 過剰蓄積	溶融塩浄化操作忘れ→FP蓄積→溶融塩温度上 昇→ミスト発生量の増加	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(20)Arガスの過剰供給	Arガス流量増加→塩中FP等の気相への移行量 増加→計画外放出	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(21)オフガスラインの閉塞	閉塞→HM電解槽内圧力上昇→気相のArセルへ の漏洩→計画外放出	
解体機及びピンせん断機 Naボンド除去槽 電解精製装置 陽極バスケット仮置架台 Cd陰極処理装置 射出成型装置 燃料スラグー時貯蔵庫	(5)空気の流入(Arセルバウン ダリ破損)	酸素との酸化反応→製品品質低下→工程停止	(7) 工程停止
電解精製装置	(11) F P 過剰蓄積	溶融塩浄化操作忘れ→FP蓄積→溶融塩温度上 昇→ヒータ制御不能→工程停止	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(15) 塩の過剰供給	塩供給継続→Arガス排気管/給気管に移行→ 同ガス管の閉塞→工程停止	
電解精製装置 TRU抽出/塩処理設備内貯槽	(17)塩移送ラインの閉塞	閉塞→移送停止→送り側容器液位不変→受け 側容器液位不変	
電解精製装置 Cd陰極処理装置 射出成型装置 陽極バスケット仮置架台 燃料スラグー時貯蔵庫	(22)セル冷却機能喪失	アルゴンセル内雰囲気温度上昇→セル内配置の動的機器の異常による工程停止	
Cd陰極処理装置	(25)塩/C d の装置内蓄積	閉塞→礙縮異常→受けるつぼへの礙縮なし/ 冷却時間過大	
Cd陰極処理装置 射出成型装置	(27) 耐圧バウンダリ (真空度維持) 機能喪失	シール損傷→Arガスが装置内に流入→工程停止	
Cd陰極処理装置	(28)真空排気ラインの閉塞	閉塞→陰極処理装置内負圧不良→塩/Cdの蒸 発不良→製品品質低下	
電解精製装置	(10) 燃料の過剰充填/蓄積 (11) F D 温利共建	過剰充填/蓄積→線量異常→遮へい能力超過 診酔病% 10幅がする、EDD変建	(8)線量異常
<b>龍</b> 解精製装置	(11/ F ビ 迥 料 首 倶	谷間地は行化が下いですいていていまし	

表 6.2.16 事象の進展シナリオの一覧(2/2)

注)異常事象欄の数字(1)~(30)は表 6.2.14 の(1)~(30)に対応している。

表 6.2.17 運転に関わる人員

(人日)

設備	工程	日勤	直勤務	合計	備考
前処理	受入		5	5	常時運転で直勤務対応。
	解体		5	5	主要機器3基程度に対し
	せん断		5	5	て1人が対応と設定。
	Na 除去		5	5	
電解処理	試薬調整		5	5	
	電解		10	10	
	廃塩処理		5	5	
	陰極処理		5	5	
高レベル廃棄	美物固化	1		1	処理頻度低で日勤対応。
固体廃棄物	ハル圧縮	1		1	また,直勤務は5班の為
処理	HLW 処理	1		1	1 班は常時日勤対応が可
	圧縮	1		1	能であり、応援要員とす
	焼却	1		1	る。
	ドラム缶詰	1		1	
液体廃棄物效	心理	2		2	連続運転設備で日勤対
気体廃棄物效	心理	2		2	応。
ユーティリラ	ティ	2		2	
高レベル固住	上体貯蔵		5	5	管理・搬出入操作で直勤
固体廃棄体則	宁蔵		5	5	務対応。
使用済燃料則	宁蔵		5	5	
分析	サンプリング		5	5	常時運転で直勤務対応。
	前処理		25	2 5	
	分析		1 0	1 0	
放射線管理	-	5	2 5	3 0	
保守		5 0		5 0	
合計		67	1 2 5	192	

※直勤務は5班3交代制

区分	発生量 (t)
<b>TRU</b> 、高βγ (金属廃棄物)	約550
低レベル、極低レベル (金属、コンクリート)	約2,200
クリアランスレベル以下、非放射性 (金属、コンクリート)	約190,000

# 表 6.2.18 解体一次廃棄物発生量

主要			技術的成立性								
設備	主要な技術	設計要求	(原理確認基礎データ、実績、開発状況等根拠)								
	燃料集合体 解体	<ul> <li>・解体不良、燃料ピンが損傷なく</li> <li>く集合体解体ができること。</li> <li>・解体時間約 2h/体</li> </ul>	ANL FCF 等にて機械式解体の実績がある。 レーザ 式解体の場合、Ar セル内での使用は、現状、 アシスト酸素が必要で Ar セル内酸素濃度を高める。酸 素を使用しない高出カレーザ 開発が必要である。								
	ピンせん断	<ul> <li>・せん断長さ 10mm 程度</li> <li>・ピンせん断時間約 5.8h/体</li> </ul>	ANL FCF 等にて実績がある。								
削処理	Na ボンド 除去	<ul> <li>·Na 除去率</li> <li>炉心燃料 90%</li> <li>径ブランケット燃料 99%</li> <li>·Na 除去時間約 1.7 体/日</li> </ul>	Na 除去に関する基礎的なデータがある。 ANL で試験したブランケット実燃料 Na ボンド除去率 99%以上の性能。								
	燃料回収	・燃料回収率 約 99.5% (ハル混入燃料 約 0.5%)	ANL FCF 等の実績データ等に基づく評価にて確認。								
<b>=</b> 00 HB	HM 電解精製	<ul> <li>・回収率</li> <li>固体陰極U&gt;99.9%、Zr&gt;70%</li> <li>液体 Cd 陰極</li> <li>U/TRU&gt;99.8%、Zr&gt;70%</li> <li>・回収時間</li> <li>固体陰極 10kgU/20h・極</li> <li>液体 Cd 陰極</li> <li>3.4kgU-TRU/10h・極</li> </ul>	それぞれ、陽極バスケット入り燃料一固体陰極、陽 極バスケット入り燃料一液体 Cd 陰極の電解処理法 は、ANL FCF、原研などにて実績がある。陽極バ スケット入り燃料一固体陰極と陽極バスケット入り燃料 一液体 Cd 陰極の同時電解処理法について実績は ないが、理論的には電解精製は可能である。ま た、ITU のホット試験にて U-TRU の電解回収を実証。								
冉処埋	電解精製槽 内雰囲気	酸素、水分、窒素濃度 10ppm 以下(それぞれ)	不溶解酸化物の発生防止のために酸素、水分、窒 素濃度を下げ管理。ANL FCF等にて実績がある。								
	固体陰極 処理装置	・固体陰極析出のUと塩・Cdと の分離 U 100% ・処理時間 180kgU/日	回分式は ANL FCF などにて実績がある。 連続式は、実績がないが、一般産業では真空高 温処理の実績がある。昇温、低圧高温塩、Cd 分								
	液体 Cd 陰極 処理装置	<ul> <li>·液体 Cd 陰極回収 U−TRU と塩・ Cd との分離 U−TRU 100%</li> <li>·処理時間 44gU−TRU/日</li> </ul>	離、溶融、降温の温度、圧力の設定条件は回 式と同様であり、これらを隔離処理する方式に て対応可能。								
	U/TRU 抽出	・U/TRU 回収率 U;99.9%、Pu;99.8% Am/Cm;99.7%、Np;99.9% ・FP(RE)のDF 10以上 ・抽出時間約2h/バッチ	ANLの抽出試験データをベースとしている。 ITUのホット試験にて、TRU回収。試験現在継続中。								
逼処理	FP 除去	<ul> <li>・ゼオライトカラム FP 吸着率</li> <li>アクチニド,希土類(3 価)98%</li> <li>希土類(2 価),7ルカリ土類95%</li> <li>Cs95%</li> <li>・塩処理時間約12時間/8 バッチ</li> </ul>	電中研等の試験に確認している。 但し、基礎試験継続中。								
廃棄物 固化	人工鉱物 固化	・廃棄物処分条件を満足させ る固化体の製造 ・浸出速度 ホウケイ酸ガラス並	ANLにおいて人工鉱物固化製造の実績がある。 米国 DOE では、種々研究が進められ、米国廃棄 物処分条件を満足しているとしているが、国内 においては、廃棄物処分条件を満足しているこ との確認が必要である。								
付帯 設備	Ar セル内 雰囲気	セル雰囲気管理 酸素、水分<50ppm(それぞ カ) 窒素<500ppm	ANL FCF 等の実績による。           今後、Ar thの大型化に伴うth雰囲気管理を確認           する必要がある。								
その他	プラントの 運転性	稼働率 約 200 日/年	<ul> <li>主要プロセスの基本的な運転の稼働率(サンプリング、</li> <li>分析時間考慮)は、約200日/年。今後、機器間</li> <li>マテリアルハンドリング操作時間等を考慮した全体プラント</li> <li>稼働率検討が必要。</li> </ul>								

## 表 6.2.19 主要な設備の技術的成立性の評価



図 6.2.1 金属燃料の金属電解法プロセスフロー概念図(ANL 開発プロセスとの比較)



図 6.2.2 金属燃料リサイクルプラントの再処理プロセスブロックフロー



図 6.2.3 金属電解法の電解時(500℃)標準酸化還元電位

		まるで数字	元素 量 (kg/年)	11 26 587	Pu 3 081	WA DO	MA 등		7ルカリ土類FP 0	希土類FP 92	貴金属FP 0	NDY YEP	**** 2ED			その他FP 0	Zr 3, 124	Na 737	被落管 15 132	その他部材 46 689		「新燃料	38+HM/年	新径方向了、ランケット燃料	元素 量 (kg/年)		D, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,			7.1/hi 十 著百FP 0	希土類FP 0	<u> </u>	101, 2FP 0	希扩 XFP 0	Zr-FP 50	その他FP 0	Zr 865	Na 112	被落管 1 975	<u>その</u> 他部材 8.796		である.	D. D. D. A. C. S.		н
	保管	量 (kg/年)	358	717	13			о ;	21	0	0	C	• a	<b>o</b> c	0	106	0	0	0	>			「三日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一日本の一			五 五 二 一 子	17/	-/4 15	20	0	0	0	0	0	0	2	0	21	0	0	0	元素は次の通り		XHYVILEr XHT X X 3	<b>帯刀人</b> : Kr、 Ae、
	補充	量(kg/年)	5, 124	C				о (	0	0	0	C			D :	424	849	17, 107	55,485			Lab. dat	すたと		<b>固化 (kg/年)</b>	オオルメト		> <		205	188	939	0	18	0	0	0	0	85	0	0	系列のキな		: : :	a, Eu, om
		元素	N	PII	MA	711+11个层 CD	////) 世通[[	<i>IWN</i> リ工領LL	希土類FP 主 。 EEE	貴金属FP	NDY VFP	希h゙ スFP		21 - 1 L	もの他ド	Zr	Na	被覆管	をのも割材					-	人工鉱物	Na 获	C 田 光 pu			164	10	0	0	15	0	0	34	0	340	0	0	素の欄のうち	m Nn	ENS, HD	
																							心堆			11, 十7, 张				0 41	0 10	0	1 0	0 4	0	4 0	6	3	0 424	0	0	上図の市	MA · Am		TINAL
Г	X	(1	0	C				<b>-</b> (	0	0	0	10	2			0	0	0		,		ł	¢		g/年)	ן ני ז'	200	20			0	0	68 61	0	0	27 1.	47 41	22 21	C	20	0	-			
燃料含む。	オフガン	量 (kg/4										LC.	•											1	属廃棄物(k	1111												4		4.3		_			
方向ブランケット		元素	N	PII	MA	711+11个层CD	/////11/11/11/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/11/12/	<i>い</i> 」り工領FF × ・ **FE	希土類FP 主	貴金属FP	ADT YEP	希h° xFP	7r_ED		た の 他 F ド	Zr	Na	被覆管	※ の も 部 材			   	同処理		金	サム、新					0	0	0	0	0	0	0		C	12.748	55, 485				
* 炉心燃料は軸]																				菜拳探田世	2/ 2+HW/4					楽世			MA	TILTIALEEE	アルカリナ 猫FP	希土類FP	貴金属FP	NDY* JFP	希扩,XFP	Zr-FP	その他Fb	Zr	Na	被覆管	その他部材				
	<b>然米斗 *</b>	量 (kg/年)	22, 566	3 494	106	VUV	100	204	1, 028	662	36	497	266	007	494	3, 307	737	15.132	46,689			r 1 7	く く ない とう しょう しょう しょう うちょう いちょう いちょう いちょう いちょう いっぽう いっぽう いっぽう いっぽう いっぽう いっぽう いっぽう いっぽ		5ンケット燃料	帯(kơ/年)	7 000	326	1	10	2	25 25	16	-	13	7	13	916	112	1.975	8, 796				
	炉で焼	元素	Π	PII	MA	711+11소로CD	///// 11/1/12/12/12	//w///王領LL	希 土 鎖 F P E E E	貴金属FP	MDY YFP	希fi zFP	7*_ED	2 © 11-12	ちの向け	Zr	Na	被覆管	その生能材					 	径方向7*5	<b>半</b> 半	11		MA	7ILhII金属FP	アルカリナ都FP	希土類FP	貴金属FP	ADA* JFP	希fi XFP	Zr-FP	その他FP	Zr	Na	被覆管	その他部材				

\*±#:Y.la、ca、Pr. Na、Pm. ca、Pr. Na、Pm. ca, Tp. Dy. Ho. Fr. 図 6.2.4 金属燃料リサイクルプラントの概略物質収支図



図 6.2.5 環境放出に関する廃棄物処理フロー図(気体関係)



図 6.2.6 環境放出に関する廃棄物処理フロー図(液体関係)



図 6.2.7 主要な廃棄物処理フローと廃棄物量



図 6.2.8 高レベル放射性廃棄物処理フロー



図 6.2.9 電解精製槽の概略外形図



図 6.2.10 電解精製槽内の陽極バスケットと陰極の配置と電気回路



図 6.2.11 陰極処理装置の概略外形図 (固体陰極処理装置)



図 6.2.12 陰極処理装置の外形図(Cd 陰極処理装置)



図 6.2.13 TRU 還元抽出器の概略外形図



注記)上記の②は入量計量管理ポイント、③は出量計量管理ポイントを示す。

図 6.2.14 金属燃料リサイクルプラントの物質収支区域 (MBA)






# 図 6.2.16 主要機器間の仮置架台、一時保管庫庫等の容量設定の考え方



図 6.2.17 金属燃料リサイクルプラント(38tHM/y)の全体配置イメージ図



図 6.2.18 金属燃料リザイグルノラント(38tHM/y)の全体建屋イメージ図 (主建屋(再処理、燃料製造、廃棄物処理貯蔵、ユーティリティ等)、燃料貯蔵建屋)



(寸法:通り芯ベース) 図 6.2.19 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図(地下1階)





図 6.2.21 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図(地上2階)



図 6.2.22 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図(地上3階)



図 6.2.23 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図(地上4階)



図 6.2.24 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の平面配置図(屋上)



図 6.2.25 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の立面配置図(A-A 面)



図 6.2.26 金属燃料金属電解法リサイクルプラント(38tHM/y)の立面配置図(B-B面)







※解析コード:MVP94+JENDL-3.2(一部ENDF-B/VI)









図 6.2.30 一般公衆の年間致死ガン発生確率の推定結果の異常事象による内訳



図 6.2.31 年間致死ガン発生確率のプロファイル (異常事象の年間発生頻度と1事象当たりの公衆の致死ガン発生確率の関係)



図 6.2.32 建設費の内訳





# 6.3 酸化物燃料への適用

6.3.1 施設概念構築

酸化物燃料金属電解法による再処理システムでは、50tHM/yの処理能力を持 つプラントについて検討する。50tHM/yの酸化物燃料をFBR酸化物燃料炉心(表 2.3.2~表 2.3.7参照)に装荷した場合に発生する使用済燃料は46.9tHM/yであり、 その内訳は31.5t/yの炉心燃料(炉心内側:IC+炉心外側:OC+軸方向ブランケ ット:AB燃料)と15.4 tHM/yの径ブランケット:RB燃料である。

(1) プロセス

金属燃料の再処理方法として研究開発が進められてきた金属電解法を、酸化物燃料に適用するためにはプロセスの一部を変更する必要がある。FBRで照射した使用済み酸化物燃料を受入れ、金属電解法で再処理した後に、酸化物燃料を製造するために考案したプロセスフローの概念図を図 6.3.1に示す。金属燃料を対象にしたシステムと比較したときの主な相違点は、「FP存在率が低いRB燃料のバイパス処理(熱脱被覆後に直接振動充填工程に供する)」、「酸化物燃料を金属に還元するためのLi還元工程の付加」、「HM金属を酸化するための酸化転換工程の付加」にある。

前処理工程で粉体化した酸化物燃料をLi還元工程でHM金属に還元した後、得 られたHM金属を陽極バスケットに装荷し、HM電解精製槽に移送する。電解す ることにより、HM電解精製槽のLiCl-KCl溶融塩中に塩化物として溶解するHM を陰極で回収する。陰極処理工程では、回収物からLiCl-KClおよびCdを分離し、 HMインゴットを生成する。生成したHMインゴットは、酸化転換工程で、HM 酸化物の粉末(再処理製品)とする。

なお、廃塩処理工程では、LiCl-KCl溶融塩からFPを分離回収することにより、 溶融塩をリサイクルし、塩廃棄物量の低減を図る。

(i) 前処理工程<sup>(1),(2),(3),(4)</sup>

被覆管からの酸化物燃料の取出しを容易にするため、レーザー切断機等を用 いてラッパ管を取り除いた燃料ピンを、機械切断により、ワイヤーごと約10mm 程度の短尺ピンに切断する。

短尺ピンから燃料成分を回収する方法としては、熱脱被覆法を採用する。この方法では酸素雰囲気中において燃料ピンを約700℃に加熱することにより酸化物燃料(UO2)をU3O8に酸化させ、これに伴う体積膨張を利用してハルから分離すると同時に粉体化する。その後、約800℃の還元雰囲気(95%Ar+5%H2)

にすることにより酸化物燃料粉体 ( $U_3O_8$ )を $UO_2$ に還元する。この方法には、 希ガス (Kr, Xe)の全量と発熱量が多い揮発性FP元素 (Cs, I, Ruなど)の一部を 粗分離できる利点がある。各元素のオフガスへの移行率を以下に示す。

なお、希ガスおよびトリチウム以外の揮発性FP元素はコールドトラップ等で 回収する。

元素	<sup>3</sup> H,Kr,Xe	I,Ru,Br,Sb,Se,Te,Tc,Rb,Cs	その他
オフガスへの移行率(%)	100	70	0

(ii) Li 還元工程

酸化物燃料を金属に還元する方法には幾つかの候補が挙げられるが、FSフェ ーズ2では、現時点で基礎試験データが蓄積されており、廃棄物発生量を比較的 抑制できるLi還元法を採用した。

本工程は、「Li還元槽」、「LiCl濾過槽」、「Li電解槽」、「LiCl廃塩処理 システム」などから構成される。LiClをリサイクルするため、これらの機器間 でLiClを頻繁(1回/日あるいは2回/日)に移送する必要がある。

Li還元槽には650℃に保温したLiClが貯蔵されている。これに前処理工程から 受入れた酸化物燃料粉体を投入し、還元剤としてLi金属を添加する。このプロ セスでは、HM酸化物と同時にRE酸化物、アルカリ金属酸化物、アルカリ土類 金属酸化物、Zr酸化物の一部が還元され、副産物としてLi2Oが生成される。一 方、貴金属、Zrの一部は、金属として蓄積する。各元素の還元率を以下に示す。

元素	U,Np	Pu	Am,Cm
還元率(%)	98	97.9	97

還元処理した燃料成分はLiClと一緒にLiCl濾過槽に移送する。このプロセスでは、メッシュ等を用いて固体相(金属あるいは酸化物の燃料成分)と液体相(RE等のFPを含むLiCl)を物理的に分離する。分離回収した燃料成分は陽極容器に装荷し、可能な限りLiClを取り除いた後、HM電解精製工程に移送する。

Li電解槽では、Li還元槽で副産物として生成されたLi<sub>2</sub>Oを電気分解すること により、陰極でLi金属を、陽極でO<sub>2</sub>ガスを回収する。回収したLi金属はLi貯蔵 槽に貯蔵し、必要量をLi還元槽に移送し、再び還元剤として利用する。

塩廃乗物量を低減するため、LiCl廃塩処理システムでは、LiClに溶解しているハロゲン、カルコゲン(Se,Teなど)、希土類などのFPをゼオライトカラムで分離回収することにより、LiClをリサイクル利用する。また、1回/30日の頻度

で、金属フィルターを用いてLiClを濾過することにより、槽内に蓄積するRE酸 化物等を分離する。

### (iii) HM 電解精製工程

HM電解精製槽には、500℃のLiCl-KCl溶融塩とCd金属を貯留する。LiCl-KCl 溶融塩中に、陽極容器に装荷したHM金属と固体およびCd陰極を設置する。そ して、電解反応により、固体陰極でU金属を、Cd陰極でU+Pu+MA金属を回収 する。Cd陰極で十分な量のPuを回収するためには、電解精製槽中のPu/Uを高 くする必要がある。実験値に基づいて設定した陽極溶解率および分離係数を以 下に示す。

元素	U	Pu,Np,Am,Cm
陽極溶解率(%)	98	99

元素	U	Pu,Np	Am,Cm	Ce,Pr,Nd,Pm	La,Gd	Y,Sm,Eu,HRE
分離係数(-)	0.67	1	2.6	30	100	$\infty$

陽極容器には貴金属元素とRE酸化物との交換反応により生成するUO<sub>2</sub>が蓄積 する。これらは1回/20日の頻度で陽極容器ごと破棄する。

(iv) 廃塩処理工程

HM電解精製槽中のFP濃度を一定値以下に保持し、再処理製品中のFP濃度を 規定値以下に保持するため、LiCl-KCl溶融塩の0.6%を毎日抜き取り、廃塩処理 システムに移送する必要がある(金属燃料の再処理システムでは制限条件とな る、Na混入量の増加と発熱性FPによるLiCl-KCl溶融塩の温度上昇は問題となら ない)。廃塩処理システムは「パイロコンタクタ(抽出)」、「ゼオライトカ ラム」、「再酸化槽」などから構成されている。

パイロコンタクタに還元剤であるLi-K含有するCdを添加することにより、 LiCl-KCl溶融塩中のHM塩化物を還元し、HM金属とする。これを、パイロコン タクタ内でCd金属に接触させることにより、Cd金属中にHM金属を回収する。 この時の回収率を以下に示す。

元素	U	Pu	Np	Am,Cm	Ce,Pr,Nd,Pm	La,Gd
回収率(%)	99.996	99.79	99.89	99.65	20	5

HM回収処理済みのLiCl-KCl溶融塩をゼオライトカラムに移送し、吸着反応

によりFPの一部を分離する。

ゼオライトカラムでFPの一部を除去済みのLiCl-KCl溶融塩およびパイロコ ンタクタでHM金属を回収したCd金属は再酸化槽に移送する。ここで、CdCl<sub>2</sub>を 酸化剤として添加することにより、HM金属をHM酸化物に変換し、LiCl-KCl 溶融塩中に逆抽出する。

(v) 陰極処理工程

HM電解精製工程から、固体陰極で回収したU金属およびCd陰極で回収した Cd-U-Pu-MA金属が払い出される。

デンドライト状のU金属にはLiCl-KCl溶融塩が付着している。この回収物を 電極から掻き落とし、固体陰極処理装置で蒸留処理することによりLiCl-KCl溶 融塩(950℃,10Torr以下)を分離した後、1370℃まで昇温してU金属インゴッ トを回収する。

また、Cd-U-Pu-MA金属にもLiCl-KCl溶融塩が付着しているため、Cd陰極処 理装置で、Cd金属(600℃,30Torr以下)とLiCl-KCl溶融塩(950℃,10Torr以下) を蒸留処理することにより分離した後、1000℃まで昇温してU-Pu-MA金属イン ゴットを回収する。

(vi) ドロス処理工程および Cd 蒸留工程

陰極処理工程では、UとコーティングZrO2が反応して副産物であるドロスが 生成される。ドロス処理工程では、ドロスの主成分であるUO2と試薬として投 入するZrCl4を反応させることによりUCl3を生産し、HM電解精製工程に移送す る。

Cd蒸留工程における処理は、操業日数以外の期間に1回/年の頻度で実施する。 ここでは、HM電解精製槽の底部に貯蔵したCd金属をCd蒸留装置に移送し、蒸 留分離することにより、FP等を回収する。

(vii) 酸化転換工程

陰極処理工程から移送されたU金属およびU-Pu-MA金属インゴットを粉砕機 により粉末化し、粒径を均一化する。高温の酸素雰囲気中(95%Ar+5%O<sub>2</sub>)で 酸化転換することにより、UおよびU-Pu-MA酸化物(再処理製品)を製造する。

(2) 物質収支

要素試験から得られた基礎データ、想定した機器性能等を基に再処理システムの物質収支を計算した。「前処理工程」において要求される処理量は、酸化物燃料47tHM/yである。このうちRB燃料に関しては、「前処理工程」におい

て燃料成分を分離回収した後、バイパス処理される。このため、「Li還元処理 プロセス」以降のシステムに要求される処理能力は約32tHM/yである。

本再処理システムでは、HM電解精製槽からUだけを約20日間回収することに より、LiCl-KCl溶融塩中のUとPuの比率を平衡状態にできる。ただし、HM電 解精製槽からのLiCl-KCl溶融塩抜き取り量が少ないため(0.6%)、HM電解精製槽 中のFP濃度が一定値になるまでには長時間を要する。FP濃度がほぼ定常値に達 する操業開始5年経過後におけるHMおよびFPに関する物質収支計算結果の概 要を図 6.3.2に示す。なお、HMについては、U、Pu、MAの3群に、FPについ ては、希ガス、アルカリ金属、アルカリ土類金属、希土類、貴金属、カルコゲ ン、ハロゲンの7群に分けて記載している(各元素の所属群は図 6.3.2参照)。 また、表中の物質収支は、基本的に1日当たりの物質移動量(kg/d)を示してい るが、30日に1回の頻度で実施される金属フィルターと陽極容器の廃棄操作に ついては、1回あたりの物質移動量(kg/30d)を示している。

(i) 前処理工程

炉心燃料(IC+OC+AB燃料)およびRB燃料あわせて234.4kgHM/dの酸化物燃料には15.7kg/dのFPが含有されている。熱脱被覆することにより、希ガス、アルカリ金属、貴金属などを中心に4.5kg/dのFPを燃料から分離回収する。

ハルの付着物は1.2kgHM/dのHMと0.06 kg/dのFPである。ハル付着物として 廃棄されるHMが、本再処理システム全体におけるHM損失の中で最大量となっ ている。

本工程で、使用済燃料に蓄積していたFPの約30%が除去されることになる。

(ii) Li 還元工程

炉心燃料(IC+OC)とAB燃料あわせて156.6kgHM/dの燃料が供給される。この 酸化物燃料には、11kg/dのFPが含有されている。LiClに溶解するアルカリ金属、 アルカリ土類金属などのFPはゼオライトに吸着させて分離し、廃棄物とする。 この廃棄物には、0.07kgHM/dのHMと1.5kg/dのFPが含まれる。また、30日に 1回の頻度でLiClを金属フィルターで濾すことにより、酸化物として蓄積する 希土類などのFPを45.3kg/30dの速度で分離する。

本工程で使用済燃料に蓄積していたFPの約20%が除去されることになる。

### (iii) HM 電解精製工程

Li還元工程から供給される燃料成分には156.6kgHM/dの還元したHM金属と 8.1kg/dのFPが含まれている。HM電解精製槽中のHM濃度を8wt%に維持する運 転条件では、LiCl-KCl溶融塩中のUとPuの重量比は、約1:3になる。 固体陰極で回収する127.5kgHM/dのUには0.8kg/dのFPが、Cd陰極で回収する35.2kgHM/dのHMには0.9kg/dのFPが含まれている。

陽極容器は、蓄積物と同時に30日毎に破棄する。この陽極容器廃棄物には、 UO<sub>2</sub>など12.8kg/30dのHMと貴金属など117.0kg/30dのFPが含まれる。したがっ て、本工程で使用済燃料に蓄積していたFPの約25%が除去されることになる。

(iv) 廃塩処理工程

HM電解精製槽中のFP濃度を制限するため、LiCl-KCl溶融塩の0.6%を毎日抜き取り、本工程で処理する。約51kg/dのLiCl-KCl溶融塩には4.6kgHM/dのHMと3.7kg/dのアルカリ土類金属を中心としたFPが含まれている。HMに関しては、Cd金属に溶解させた後、再びLiCl-KCl溶融塩に再溶解させるため、ほぼ全量がHM電解精製槽に戻される。一方、FPの一部はゼオライトカラムで吸着されるため、戻り量は0.7kg/dとなる。この工程で使用済燃料に蓄積していたFPの約20%が除去されることになる。

(v) 陰極処理工程

HM電解精製工程から供給される162.7kgHM/dのHMには1.7kg/dのFPが含 まれている。このHMを蒸留処理して回収する157.8kgHM/dのインゴットには、 0.7kg/dの希土類FPが含まれている。

(vi) ドロス処理工程および Cd 蒸留工程

陰極処理工程において蒸留処理するHMの3%がドロスとなると設定している ため、4.9kgHM/dのHMがドロス処理工程に供給される。本工程では、HM電解 精製槽中のHM濃度を8%に保つため、0.8kgHM/dのUがUCl<sub>3</sub>の形で追加補充さ れる。

なお、本物質収支評価では、操業期間外に実施するCd蒸留工程に関しては評 価対象外とした。

(vii) 酸化転換工程

本工程では、157.8kgHM/dのインゴットが、全て酸化物燃料に転換される。 再処理製品の詳細は表 6.3.1に記載した。固体陰極で回収されるUインゴットに は、ほとんど不純物が混入しない。一方、Cd陰極で回収されるU-Pu-MAインゴ ットのPu富化度は約63%であり、2wt%程度のFPが含有される。また、Uおよ びTRUの回収率は、各々99.5%および99.2%である。

この物質収支評価から計算される年間の製品製造量を表 6.3.2に示す。1年間 で約42.0tのUと約4.7tのPuが製造される。 (3) 廃棄物

今回評価した廃棄物は、プロセス廃棄物、2次廃棄物(機器交換部品)、気体 廃棄物、液体廃棄物、に大別して考える。また、廃棄物区分は表 2.3.10に準じ て決定する。

(i) プロセス廃棄物

各工程から発生するプロセス廃棄物の処理フローと廃棄物量を図 6.3.3に示 す。各工程で発生する廃棄物を、性状に応じて「高放射性固体廃棄物処理設備」、

「人工鉱物固化設備」、「低放射性固体廃棄物処理設備」のいずれかの設備で 処理する。

「集合体ラッパ管等(ハンドリングヘッド、遮蔽部、ラッパ管)」にTRUは 付着していないが、炉内照射により高レベルまで放射化されているため、高β γ廃棄物に区分する。この廃棄物の発生量は408.8kg/d(81.75t/y)であり、高 放射性固体廃棄物処理設備で圧縮処理後にセメント固化する。SUSの密度は 7.9g/cm<sup>3</sup>であるから、圧縮処理後のかさ密度を約1/3の2.6g/cm<sup>3</sup>と想定すると、 年間の廃棄物発生体積は31.4m<sup>3</sup>/yとなる。これは200Lドラム換算で158本/yの廃 棄体に相当する。

「陽極容器」、「Cd陰極用るつぼ」、「酸化皿」は、微量のTRUが付着する と考えられるためTRU廃棄物に区分する。これらは高放射性固体廃棄物処理設 備で圧縮処理後にセメント固化する。「陽極容器」は30日間のサイクル運転毎 に40個、蓄積したNMとともに廃棄物とする。陽極容器の重量を30kg/個とすれ ば発生量は40kg/d(8t/y)となり、圧縮処理後のかさ密度を約1/2の4.0g/cm<sup>3</sup>と 想定すると、廃棄物発生体積は2.0m<sup>3</sup>/yとなる。また、付着するNMの発生量は 4.6kg/d(0.92t/y)であり、密度を約10.0g/cm<sup>3</sup>とすると、廃棄物発生体積は 0.09m<sup>3</sup>/yとなる。これらを合わせると約2090 L/yとなり、200Lドラム換算で11本 /yの廃棄体に相当する。「Cd陰極用るつぼ」の重量は40kg/個であり、20回繰り 返し使用する。よって、0.5個/dの割合で廃棄され、発生量は20kg/d(4t/y)と なる。BeOの密度は3.02g/cm<sup>3</sup>であるから、圧縮処理後のかさ密度を約1/2の 1.51g/cm<sup>3</sup>と想定すると、廃棄物発生体積は2.65m<sup>3</sup>/yとなる。これは、200Lドラ ム換算で14本/yの廃棄体に相当する。「酸化皿」の発生量は1.28kg/d(0.256t/y) である。アルミナの密度は3.92g/cm<sup>3</sup>であるから、圧縮処理後のかさ密度を1/2の 1.96g/cm<sup>3</sup>と想定すると、廃棄物発生体積は0.13m<sup>3</sup>/yとなる。また、付着するHM の発生量は0.084kg/d(0.017t/y)であり、HMの密度を約19.0 g/cm<sup>3</sup>とすると、 廃棄物発生体積は0.001 m<sup>3</sup>/yとなる。これらを合わせると約130L/yとなり、200L ドラム換算で1本/yの廃棄体に相当する。以上より、セメント充填するTRU廃棄 体の発生数は26本/yとなる。

「ハル等」、「オフガストラップ吸着剤および付着FP」についてもTRU付着 が想定されており、TRU廃棄物に区分される。これらについては圧縮装置を用 いて減容した後、容器に封入する。「ハル等」の発生量は97.4kg/d(19.48t/y) である。SUSの密度は7.9g/cm<sup>3</sup>であるから、圧縮処理後のかさ密度を約1/2の 4.0g/cm<sup>3</sup>と想定すると、廃棄物発生体積は4.87m<sup>3</sup>/yとなる。「オフガストラップ 吸着剤」の発生量は6.0kg/d(1.2t/y)である。SUSの密度は7.9g/cm<sup>3</sup>であるか ら、圧縮処理後のかさ密度を約1/2の4.0g/cm<sup>3</sup>と想定すると、廃棄物発生体積は 0.3m<sup>3</sup>/yとなる。「付着FP」の発生量は2.45kg/d(0.49t/y)であり、FPの平均 密度を約5 g/cm<sup>3</sup>とすると、廃棄物発生体積は0.098 m<sup>3</sup>/yとなる。これらを合わ せると5270L/yとなり、200Lドラム換算で27本/yに相当する。以上より、セメ ント充填しないTRU廃棄体の発生数は27本/yとなる。

Li還元工程および廃塩処理工程で発生する「塩吸蔵ゼオライト」と金属フィ ルターで回収する「RE酸化物」については、高レベル廃棄物に区分される。「塩 吸蔵ゼオライト」の発生量は54.3kg/d(10.85t/y)である。これには、7.4kg/d (1.49t/y)のHMおよびFP塩化物と5.94kg/d(1.19t/y)の付着塩が含まれてい る。また、「RE酸化物」の発生量は1.9kg/d(0.37t/y)である。これらの廃棄 物に含まれるFPおよび付着塩等を安定化するため、人工鉱物固化設備において、 58.6kg/d(11.7t/yの)乾燥ゼオライトと49.2kg/d(9.8t/y)のガラスフリット追 加混合し、人工鉱物固化する。したがって、人工鉱物固化体中のFP含有率は9% 程度になる。発生量は32.8t/yであるが、PC処理により密度は2.0g/cm<sup>3</sup>(減容比: 1.67)になるため、廃棄物発生体積は16.4m<sup>3</sup>/yになる。これは、150Lキャスク で110本/yに相当する。

「固体陰極用プロセスるつぼ」、「Cd陰極用プロセスるつぼ」、「蒸留塩回 収るつぼ」は低レベル廃棄物に区分し、低放射性固体廃棄物処理設備で処理す る。「固体陰極用プロセスるつぼ」はグラファイト製であり、重量は155kg/個 である。このるつぼは0.3個/dの割合で廃棄されるため、発生量は46.5kg/d (9.3t/y)となる。「Cd陰極用プロセスるつぼ」もグラファイト製であり、重量 は35kg/個である。このるつぼは0.5個/dの割合で廃棄されるため、発生量は 17.5kg/d (3.5t/y)となる。これらのるつぼは、粉砕後に焼却処分し、灰は低レ ベル廃棄物に区分する。「蒸留塩回収るつぼ」の重量は30kg/個である。このる つぼは6個/dの割合で廃棄されるため、発生量は9.0kg/d (1.8t/y)となる。この 廃棄物はセメント充填後、ドラム缶に詰められる。

(ii) 2 次廃棄物(機器交換部品)

機器交換頻度は、以下の方針に沿うものとした。

・交換頻度が明確な機器については、実績等のデータに基づき設定する。

・腐食環境等にある機器、動的操作が主体の機器については、操業期間中に 2回更新する。

・静的操作が主体の機器については、操業期間中に1回更新する。

・メンテナンスが不要な機器については、更新の必要なし。

また、廃棄物量を低減するため、モジュール化による短寿命部品の交換を前提 とした。

Cd陰極処理装置を例にとると6部品に分割した機器部品の交換頻度は、以下のように設定される。この方法で算定すると、Cd陰極処理装置1基に対して見積もられる年間交換品重量は、TRU廃棄物350kg/y+低レベル廃棄物218.5kg/yである。

本体  $(5000 \text{ kg}): 腐食環境等 \rightarrow 0.07 \text{ D/y}$  : TRU廃棄物 架台  $(5000 \text{ kg}): 静的機器 \rightarrow 0.03 \text{ D/y}$  : 低レベル廃棄物 リフター電動機  $(50 \text{ kg}): 実績データ \rightarrow 0.20 \text{ D/y}$  : 低レベル廃棄物 リフターローラガイド $(50 \text{ kg}): 動的機器 \rightarrow 0.07 \text{ D/y}$  : 低レベル廃棄物 ヒータ  $(100 \text{ kg}): 実績データ \rightarrow 0.20 \text{ D/y}$  : 低レベル廃棄物 断熱材  $(500 \text{ kg}): 腐食環境等 \rightarrow 0.07 \text{ D/y}$  : 低レベル廃棄物

同様の算定方法に基づいて、主要機器および付帯機器の年間必要な交換品物 量を計算した。各交換品の廃棄物区分ごとにまとめた評価結果を表 6.3.3に示す。 セル内機器交換品の合計は62t/yであり、その大部分はTRU廃棄物(23.3t/y)と 低レベル廃棄物(19.2t/y)に区分される。

(iii) 気体廃棄物

前処理工程の空気セルから、使用済燃料から発生するトリチウムと希ガス(Kr、 Xe)の全量と、その他の揮発性FP(Sb,Se,Te,Br,I,Tc,Ru,Rb,Cs)の一部をオフ ガスとして回収する。また、Li還元工程~酸化転換工程のアルゴンセルから、 酸素と微量の揮発性FPを、オフガスとして回収する。

オフガスを、HEPAフィルターに通過させた後、FP吸着塔およびヨウ素吸着 塔を通過させることにより、オフガス中の揮発性FPのほとんどを回収する。ト リチウムに関してはトリチウム除去装置で90%を回収する設計となっているた め、大気中に放出される放射能は1.6×10<sup>14</sup>Bq/yとなる。また、希ガスに関して は、基準値以下であることを確認して大気中に希釈放出する。この結果、大気 中に放出される希ガスの放射能は1.3×10<sup>16</sup>Bq/yとなる。

(iv) 液体廃棄物

再処理システムから発生する廃液は、顆粒燃料製造システムから発生する廃 液とあわせて図 6.3.4のフローに沿って処理する。廃液処理システムは「中放射 性廃液処理設備」、「低放射性廃液処理設備」、「極低放射性廃液処理設備」 から構成されており。これらの設備は受入れる廃液濃度に差があり、各処理設備の蒸発缶により濃縮液と凝縮液に分離する。これを繰り返すことにより、最終的にはTRU廃棄物に充填するセメントに混ぜる中濃度廃液と、希釈して海洋など施設外へ放出する希釈廃液に2極化する。

本システムでは、トリチウム除去装置で回収したトリチウムは全量海洋放出 される。この結果、海洋放出されるトリチウムの放射線量は1.5×10<sup>15</sup>Bq/yとな る。

(4) 機器設計

設計した再処理プロセスを具体化するため、必要な主要機器を選定し、要求 される処理能力を物質収支評価結果に基づき算定した。臨界制限等の理由から 機器の大型化が困難であり、1基当たりの処理能力が不十分な場合は、同一機器 を複数基設置することにより対応することとした。なお、前処理工程の取扱量 を250kgHM/d、Li還元工程以降の取扱量を160kgHM/dとして設計を進めた。ま た、機器設計の基本方針は、6.2.1(4)節に記述した「金属燃料の金属電解法によ る再処理システム」の場合と同様である。

表 6.3.4に示すように、選定した主要機器は、移送装置を含めて28種類(48基) である。このうち、21種類(44基)については機器概念設計を実施した。

「HM電解精製工程」、「廃塩処理工程」、「陰極処理工程」、「ドロス処理 およびCd蒸留処理工程」に関する主要機器は、6.2.1 で説明した金属燃料の再 処理システムの機器と類似である。一方、「前処理工程」、「Li還元工程」、

「酸化転換工程」に設置している主要機器のほとんどは、酸化物燃料の再処理 システムに特有な機器である。これらの工程の主要機器の基礎データを表 6.3.5に示す。また、機器概念設計の例として、Li還元槽、Li電解槽、濾過槽の 概念図を図 6.3.5~図 6.3.7に示す。

Li還元槽、Li電解槽、濾過槽、ゼオライトカラム等の運転中にLiClを貯蔵す る機器は、LiClを650℃の液体に保つため、機器外面にヒータと断熱材を巻く必 要がある。同じ理由で、これらの主要機器を繋ぐ配管に関しても、ヒータと断 熱材が必要である。これらは、遠隔操作による交換を前提とする必要があるた め、ヒータと断熱材をモジュール化するなどの工夫が要求される。

各主要機器には必要に応じてサンプリング取得装置が取り付けられており、 専用モノレール上を移動するサンプリングビークルで、ホームステーションま でサンプル容器を移送する。

操業運転を円滑に進めるため、移送容器などに関するバッファ容量を検討した。再処理システム施設で必要となるバッファは以下に述べる「ミニマムバッファ」と「一時バッファ」の2種類である。

(i) ミニマムバッファ

設備間の処理能力の不整合を調整するために設定するバッファ。 (例)脱被覆設備→電解分離設備:炉心燃料集合体1体分

(ii) 一時バッファ

故障等の原因で、一部の機器が停止した場合に、合理的に運転を継続あるい は停止するために設定するバッファ。

機器間:上流機器に軽微な故障(数時間で修理可能な故障)が生じた場合に、 下流機器が継続して運転できるように、1バッチ分あるいは上流機器の全基数の 未処理燃料分を貯蔵できるバッファ容量を設定する。また、下流機器に軽微な 故障が生じた場合には原則として上流機器の運転を停止するが、上流機器が複 数ある場合は、1バッチ/基分のバッファ容量を設定する。

設備間:1日以内で修理可能な故障に対しては運転を継続できるように、上流 機器の払出し量+1単位分(炉心燃料1集合体+RB燃料1集合体)のバッファ容 量を設定する。

これらの基準に基づき再処理システムに設定すべき「ミニマムバッファ」と 「一時バッファ」のバッファ容量を算出した結果を表 6.3.6に示す。この評価結 果に基づき、各一時保管架台の容量を評価し、外形寸法を決定した。これに加 えて、各種の試薬および塩の貯蔵槽、塩受槽などの付帯機器についても要求性 能に基づき機器外形寸法を検討し、次節に述べる施設設計に反映した。

(5) 施設設計

(i) セル内機器配置

セル内の機器配置設計においては、「主要機器に加えて付帯機器を収納できる空間」、「操業運転中に効率的なマテハン作業ができる動線」、「遠隔操作で保守補修ができるメンテナンススペース」などの確保に留意した。操業費の低減を目的に、マテハンによるセル内の物質移送に関しては、遠隔自動運転を基本とした。また、保守補修を目的とした主要機器の搬送は天井付近に敷設するI/CおよびBSMを利用するため、メンテナンススペース以外にはMSMは設置しない。

本再処理システムでは、金属燃料を取り扱う工程はHM金属の酸化防止の観点 から、全面にステンレスライナを張り、アルゴンセル雰囲気とする必要がある。 したがって、「Li還元工程」、「HM電解精製工程」、「廃塩処理工程」、「陰 極処理工程」、「ドロス処理工程およびCd蒸留工程」に関する機器は、同一の アルゴンセル内に設置した。アルゴンセル内の機器配置図を図 6.3.8に示す。「再 処理/顆粒燃料製造建屋」の一辺を短くするため、アルゴンセルはコの字型とし た。また、下階に位置する「酸化転換工程」のアルゴンセル内機器配置図を図 6.3.9に示す。一方、酸化物燃料を取り扱う「前処理工程」に関する機器は空気 セル内に設置する。空気セル内の機器配置図を図 6.3.9に示す。なお、放射性物 質の閉じ込め性を確保するため、セル内は全て負圧維持している。

(a) 前処理工程

集合体解体装置、燃料ピンせん断装置などの主要機器の処理能力は、必要処 理量に対して十分余裕があるため1系列で処理する。一方、3基の酸化還元炉から2基の粉体分離機に払出され燃料成分は、エアロックを介してアルゴンセル内 に移送する。

(b) Li 還元工程

本工程は南側セルの西側に位置しており、前処理工程から搬入される酸化物 燃料は2系列準備されている主要機器で処理する。効率的にLiClを輸送するため、 主要機器は配管で接続した。配管にはヒータと断熱材を巻く必要があり、メン テナンスが容易でないことが予想されるため、配管距離は可能な限り短いこと が望ましい。したがって、本工程の主要機器は、互いに近接した位置に配置し た。

(c) HM 電解精製工程

本工程は南側セルの中央に位置しており、基幹機器であるHM電解精製槽を 2列(3基と2基)に配置した。その東側に燃料成分を装荷する陽極容器アッセン ブリ仮置架台、および、HM金属成分を回収する陰極アッセンブリ仮置架台を2列 に配置した。更に東側には、これらのアッセンブリの組立装置およびメンテナ ンス装置を配置した。これらの機器間における陽極アセンブリおよび陰極アセ ンブリの移送は、HM電解精製槽の両側に設置したレール上を移動する専用装置 により実施する。

また、LiCl-KCl溶融塩の一部を毎日移送し、FPを除去する必要があるため、 HM電解精製工程と廃塩処理工程は配管で接続されている。

(d) 廃塩処理工程

HM電解精製工程から配管を介して毎日移送されるLiCl-KCl溶融塩を処理するため、HM電解精製槽に比較的近接している南側セル中央付近に配置されている。

(e) 陰極処理工程

HM電解精製工程でHM燃料成分を回収した固体陰極用るつぼとCd陰極用る

つぼは、専用移送装置を利用したマテハンで、北側セルに位置する陰極処理工 程に移送する。

本工程には3基の固体陰極処理装置と5基のCd陰極処理装置が、各々1列に配置されている。

(f) ドロス処理工程および Cd 蒸留工程

毎日運転する必要があるドロス処理工程の設備は、南側セルのLi還元工程と HM電解精製工程の間に設置した。

Cd蒸留工程の機器は、HM電解精製槽と配管で接続する必要があるが、操業 期間外に1回/年の頻度でしか運転しないため、配管距離は長くなるが、南側セル の西側に配置した。

(g) 酸化転換工程

顆粒燃料製造工程はIC+OC用とAB+RB用の2系列の空気セルで別々に処理するよう設計されており、これに合わせて酸化転換工程も2系列のアルゴンセルが別々に準備されている。

各工程のセル体積の比較を表 6.3.7に示す。アルゴンセルでは天井付近にI/C とBSMを設置するため、14mのセル高さが必要となる。また、頻繁な塩輸送が 必要となるため廃塩処理関連設備を同一セルに設置している。これらの原因の ために、「Li還元工程」等の酸化物燃料特有の工程付加から予想される以上に、 金属燃料のアルゴンセルに比べてセル容積が増加する。

(ii) 供給試薬・ユーティリティ

表 6.3.8に主な供給試薬・ユーティリティの使用目的と使用量を示す。LiCl およびLiCl-KCl溶融塩からFPを回収・吸蔵するゼオライトに関しては、年間20t 程度が必要となる。その他の試薬は、酸化物燃料の還元反応に用いられるLi金 属と、ゼオライトに付着して破棄されるLiClおよびLiCl-KCl溶融塩を補充する ためのLi金属,K金属,LiCl,KClであり、使用量は比較的少量である。

また、主なユーティリティとしては、電気が挙げられる。

(iii) 施設概要

前述の再処理セルと顆粒燃料製造セルなどの設計を基に施設配置を設計した。 この設計を基に構築した再処理プラントの全体建屋イメージ図(95m×94m× H45m)を図 6.3.10に示す。再処理/顆粒燃料製造建屋は地下2階/地上4階である。 図 6.3.11~図 6.3.16に再処理/顆粒燃料製造建屋のB1F~4Fの施設配置図を示 す。 (a) 地下2階

「人工鉱物固化体を廃棄物貯蔵建屋に移送するための廃棄物地下搬送路」と 「振動充填/集合体組立建屋に移送する前の顆粒燃料一時貯蔵庫」などが配置さ れている。

(b) 地下1階

IC+OC用とAB+RB用の酸化転換セルおよび顆粒燃料製造セルが配置されている。

(c) 地上1階および地上2階

電解精製セル(アルゴンセル)は、地上1Fと2Fを打ち抜きで設計しており、 建屋の中央部に配置している。地上1Fにはアルゴンセルを取り囲むように保守 区域を設けており、CdCl2製造設備、分電盤室なども配置している。また、地上 2Fには前処理セル、安全管理室などが配置されている。

(d) 地上3階

オフガス処理設備、建屋換気設備の他に、中央制御室などが配置されている。

(e) 地上4階

蒸気製造供給設備、冷却水製造供給設備などが、配置されている。

各建屋の体積の比較を表 6.3.9に示す。金属燃料の建屋と比較すると、再処理 顆粒燃料製造建屋はかなり大きくなっている。この原因は、「Li還元工程の付加」、「顆粒燃料製造/振動充填工程が射出成型工程より複雑であること」に加 えて「金属燃料で実施していた革新的な合理化を適用していない」ことが挙げ られる。

廃棄物処理貯蔵建屋は地下2階/地上3階である。再処理/顆粒燃料製造建屋からの高レベル廃棄物は、地下2階の搬送通路を介して行う。

図 6.3.17に廃棄物処理建屋の断面図を示す。人工物固化体貯蔵設備は、地下 2階から地上1階に渡って設置している。また、地下2階には中放射性廃液処理セ ル、低放射性廃液処理セル、極低放射性廃液処理セルから構成される廃液処理 システムを設置している。地下1階には高放射性固体廃棄物の処理セルと貯蔵セ ルが、地上1~2階には低放射性固体廃棄物処理セルと貯蔵セルが配置されてい る。地上4階には、制御室や分電盤室などが設けられている。 6.3.2 技術評価

(1) 安全性

(i) 安全設計

酸化物燃料へ適用したシステムに求められる安全設計は基本的に金属燃料対象のリファレンスシステムと同様のものである。したがって、ここでは金属燃料のリファレンスシステムと異なる部分のみ記載することとする。

(a) 放射線防護(遮蔽)

金属燃料対象のリファレンスシステムと同様である。

(b) 放射性物質の閉じ込め

金属燃料対象のリファレンスシステムと同様である。

(c) 核燃料物質の臨界防止

金属燃料対象のリファレンスシステムと同様である。

(d) 地震に対する考慮

金属燃料対象のリファレンスシステムと同様である。

(e) 動的に維持される安全上の機能

金属燃料対象のリファレンスシステムと同様である。

(f) システムおよびプロセス固有の危険性に対する考慮

金属電解法を酸化物燃料へ応用したシステムにおいて、金属燃料対象のリフ アレンスシステムのもつ固有の危険性に加えて新たに考慮が必要となるものと して、「酸化還元操作に使用する水素および酸素ガスによる火災・爆発」、「還 元反応に使用する金属Liの火災」が挙げられる。

受け入れた酸化物燃料を脱被覆する熱脱被覆工程および電解精製工程で回収 した金属インゴットを酸化物に転換する酸化転換工程では爆発・火災の恐れの ある水素ガスおよび酸素ガスを使用する。これらの気体を扱う系統および機器 は負圧維持を行い、ガスが機器外へ出ることを防止する設計としている。爆発 性を持つ水素ガスは希釈して濃度調整を行い十分低い濃度に調整した後でセル へ送気するため、セル内において水素爆発が生じる恐れはない。同じく火災の 可能性のある酸素ガス(熱脱被覆および酸化転換工程での使用)については、 その使用量が少ないことおよび周辺に可燃物(酸素と急激に反応する物質)が 少ないことから深刻な火災の可能性はないものと考えている。 (ii) 安全評価

(a) 平常時における一般公衆の線量評価

平常時に大気へ放出される主要な放射性物質の量は、基本的に年間処理量 50tHMの酸化物燃料を処理する先進湿式再処理施設と同等と考えられるが、実 効線量に対して約16%の寄与を有するトリチウム(図 4.5.22参照)については金 属電解式再処理施設では大気への移行率が先進湿式再処理施設の約1/3 (=0.1÷ 0.3:表 4.5.8および表 6.2.12参照)となるので、4.5.2 (1)(ii)の評価値を基に、 平常時に大気へ放出される放射性物質による個人の実効線量を約1.5 $\mu$ Sv/y (= 6.6 $\mu$ Sv/y×(50tHM÷200tHM)×(100%-16%+16%×1/3)÷100%)と推定し た。この値は、判断基準である50 $\mu$ Sv/y以下を満足している。

(b) 安全設計評価

定量的評価に関しては、酸化物燃料金属電解法の再処理システムは脱被覆~ 還元工程および酸化物転換工程以外の再処理の主工程およびその主要機器・系 統が金属燃料金属電解法再処理システムに類似するものであり、内在するリス ク源の定量的評価は金属燃料金属電解法のリスク源分析に包括される(金属燃 料金属電解法の再処理システムについては、燃料集合体の受入から製品の払出 までの全工程にわたるリスク源分析が実施済である)。今後は酸化物燃料処理 に特有の脱被覆~還元工程について定量的な安全性評価を別途実施する必要が ある。

(2) 経済性

システム設計検討結果から、建設費および運転経費を算出し、それを基に再 処理単価および再処理にかかる燃料サイクル費を算出した。

(i) 建設費

建設費の評価結果を図 6.3.18に示す。設備費は1350億円、建屋費は530億円 で合計1880億円と評価した。

(ii) 年間運転経費

年間運転経費の評価結果を図 6.3.19に示す。年間運転経費は99.5億円/年と評価した。

(a) 人件費

再処理に関する工程は5班3交替制による直体制を組むこととした。また、各 工程の員数は遠隔自動化システムであることを考慮して、主要機器3基を1名が 担当するものとし、この考えのもと要員を配置した。 廃棄物処理に関する工程の内、固体廃棄物処理に関するものは、稼働率が低いことから、日勤者による対応とした。また、5班3交替制では常に1班は日勤対応が可能であり、これを応援業務として配置するものとした。

廃棄物処理に関する工程の内、液体・気体廃棄物処理に関するもの、および ユーティリティは基本的には連続運転設備であり、運転状態については直勤務 者で管理が可能であり、操作そのものに関しては日勤者による対応とした。

高レベル固化体貯蔵、固体廃棄体貯蔵、使用済燃料貯蔵は管理と搬出入操作 があり、夜間の搬出入も想定されることから直体制を組むこととした。

分析は、運転時は24時間定期的に発生することから、直体制を組むこととした。

放射線管理はJNC東海の実績を考慮して工学的判断により設定した。また、 保守に関しても既存の原子力施設等の実績を考慮して設定した。

以上より評価した要員数を表 6.3.10に示す。その結果、日勤者67名、直勤務 者140名の計207名と評価した。人件費の算出は、再処理燃料製造一体化設備で あるため、主要プロセス設備にかかる人員以外は再処理分の費用を積算した。

(b) その他の年間運転経費

人件費以外の年間運転経費である機器交換費、定期検査費は3.1 (2)(iii)の 評価手法を用いて算出した。また、消耗品等費は消耗品物量を評価しこれをも とに算出した。

(iii) 再処理単価・燃料サイクル費(再処理分)

以上の建設費・年間運転経費の結果をもとに、再処理単価を算出した。その 結果、45.5万円/kgHMとなった。内訳は資本費は22.9万円/kgHM、操業費は 22.6万円/kgHMである。

(iv) 再処理システムの経済性追求検討

酸化物燃料金属電解法に対して、金属燃料金属電解法と同等の合理化を適用 した場合の再処理単価および燃料サイクル費を評価した。合理化の基本的な方 針は、「電解精製槽など主要機器の1列化により、MSMによる保守補修を可能 とし、BSMを削減して天井を低くすること」、「連続陰極処理装置採用による 機器費とセル内機器専有体積を削減すること」に集約される。これらの方針に 基づいて以下の4工程に関して合理化方策を適用する。

・Li還元工程 :別セルとして主要機器を1列配置とする。

- ・廃塩処理工程 :別セルとして主要機器を1列配置とする。
- ・電解精製工程 : HM電解精製槽を1列化する。
- ・陰極処理工程 : 連続陰極処理装置を採用する。

これらの変更により、アルゴンセル容積を約25%削減することができ、アルゴンセル容積と建屋体積の間に0.7乗則を適用すると、建屋体積を約55000m<sup>3</sup>(約18%)削減することが期待できる。

Li還元工程および廃塩処理工程を別セルにすることにより、主要機器の搬送 等に利用するICとPMを追加する必要がある。また、BSMを削除する代わりに 多数のMSMを設置する必要がある。これら保守補修用のマテハン機器の追加お よび削除基数を以下に記す。

・IC(5t) : 2基 ・PM(100kg) : 2基

- MSM : 70基
- ・BSM(15kg×2腕) : -2基

電解精製槽の1列化にともない、マテハン機器および主要機器の数を変更する 必要がある。これらの変更基数を以下に記す。

- ・電極装填装置 : 2基
- ・るつぼ等移送装置 : 2基
- ・陽極アッセンブリ組立装置 : -1基

バッチ式陰極処理装置(固体陰極処理装置3基+Cd陰極処理装置5基)を連続 式陰極処理装置(固体陰極処理装置1基+Cd陰極処理装置1基)に変更すること により、付帯機器も含めて設備費の削減が図れる。

「保守補修用のマテハン機器数の変更」、「電解精製関連設備の機器数の変 更」、「連続式陰極処理装置採用」により、設備費を約8%削減することができ る。

一方、年間運転経費のうち人件費、定期検査費、消耗品等費については変更 がないと考えられる。

建屋体積と設備費の削減を考慮した建設費、および、設備費削減に起因する 機器交換費削減を考慮した年間運転費を算出した結果、各々建設費は1660億円、 年間運転経費は91.4億円/年となり、酸化物燃料金属電解法の経済性を評価する と、再処理単価は41.8万円/kgHMとなった。内訳は資本費は20.2万円/kgHM、 操業費は21.6万円/kgHMである。また、再処理にかかる燃料サイクル費を評価 すると0.61円/kWhとなる。

(3) 環境負荷低減性

環境負荷低減性のうち、通常運転時の環境放出放射能と通常運転時の放射性 廃棄物発生量については六ヶ所再処理施設の事業指定申請書に記載の値を基に 比較、評価する。 (i) 通常運転時の環境放出放射能

酸化物燃料金属電解法において大気へ放出される放射性物質(<sup>85</sup>Kr、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、 よう素)を六ヶ所再処理施設からの放出量(表 4.5.14)と比較〔年間再処理量 と平均燃焼度および発電効率(軽水炉の発電効率は1999年原子力部会試算モデ ルに準拠して34.5%と設定)を基に発電量当たりの放出量で比較〕すると、<sup>85</sup>Kr、 <sup>3</sup>H、<sup>129</sup>Iについては設計要求を満足する一方、<sup>14</sup>Cについては設計要求を上回る。

<sup>85</sup>Krの放出量は設計要求の約40%となり、<sup>129</sup>Iは約80%となる。

<sup>3</sup>Hについては除去装置を設置することにより設計要求を満足している。

<sup>14</sup>Cについては、現状の評価では設計要求を上回っているものの、<sup>14</sup>C生成量の 推定値は粗い見積もりに留まっており、高速炉における生成量を精度よく見積 もるためのデータを整備していく必要がある。

なお、<sup>131</sup>Iについては再処理施設における生成量を評価した上で、設計要求を 満足するための除去設備構成を検討する必要がある。

海洋へ放出される放射性物質(<sup>3</sup>H、<sup>129</sup>I)について上記と同様に六ヶ所再処理 施設からの放出量と比較すると、いずれも計要求を満足する。

<sup>129</sup>Iの放出量は十分低く、<sup>3</sup>Hは設計要求の約80%となる。

(ii) 通常運転時の放射性廃棄物

通常運転に伴い発生する廃棄物のうち、高レベル廃棄物(人工鉱物固化体) について六ヶ所再処理施設の発生量と比較すると〔事業指定申請書記載値(ガ ラス固化体の推定年間発生量約1000本)に基づく〕、年間発生量は設計要求と ほぼ同等である。(年間再処理量と平均燃焼度および発電効率を基に発電量当 たりの発生量で比較)

なお、雑固体廃棄物発生量については主要プロセスおよび付帯設備からの発 生量を評価する必要があり、設計要求との比較のためには付帯設備を含めた発 生量評価の詳細化が課題である。

(iii) U、TRU、FPの廃棄物への移行率

U、TRUに関して、検討しているシステムでは回収率がそれぞれ99.5%、99.2% となっており、廃棄物への移行率に関して設計要求における目標値の達成を目 指すには損失率の精査や処理工程での回収率向上が課題となる。

FP(Cs、Sr、Tc、I)については、検討しているシステムでは大部分が廃棄 物へ移行する。FPの分離回収について原理的に実現の可能性があると考えられ る手法について検討を行っているが、技術的な実証には今後の試験研究の成果 を待たなければならない。 (iv) 施設の廃止に伴う放射性廃棄物

(a) 解体性

施設の運転性、保守、補修性確保を目的にセルにはI/C、P/M、MSM等の遠隔 操作設備や相当数の遮へい窓があり、セル廻りおよび上下には保守エリア、通 路スペース等が確保されている。

また、セル内主要機器については部品をユニット化することなどが考慮されている。

これらは廃止措置時の遠隔解体、遠隔除染等の作業にも有効に活用可能と考えられる。

一方、搬出入性についても基本的に考慮されているが、セルからの搬出入性 に関しては開口のサイズや設置箇所の妥当性について詳細設計段階での評価が 必要である。

(b) 廃棄物発生量

施設設計の検討結果を基に評価した解体一次廃棄物の発生量を表 6.3.11に示 す。

ー次廃棄物にはセルライニング、はつりコンクリートを含めている。(低レ ベル廃棄物に区分して集計)

TRU廃棄物や高βγの廃棄物発生量は放射性物質を直接取り扱うセルの規模 に影響を受け、低レベル以下の廃棄物や建屋解体に伴って発生するコンクリー ト等の廃棄物は建屋の規模に影響を受ける。

酸化物燃料適用の場合、施設規模が比較的大きいため、他の乾式法に比べて 廃棄物発生量が多い結果となっている。

(4) 資源有効利用性

Uの回収率は99.5%であり、TRUの回収率は99.2%であり、廃棄物への移行率 はU、TRUそれぞれ0.5%、0.8%となる。よって、再処理システムにおけるU、 TRUの放射性廃棄物への移行率としてはそれぞれ1%以下となり、設計要求値を 満足する。

また、再処理製品へのFP混入率については、U再処理製品(U合金)で~0wt%、 U/TRU再処理製品(U/TRU合金)で2.0wt%(Pu富化度70%)となった。ただ し、燃料製造後のサイクル製品では、U添加による成分調整でサイクルシステム としての設計要求(1.2wt%以下)を満足する。

(5) 核拡散抵抗性

基本的に金属燃料金属電解法システムと同様の設計であるが、径ブランケッ

ト燃料は脱被覆後に主工程をバイパスして直接燃料製造に流す工程としている。 バイパス処理される燃料中のPuは239Puの割合が高いままであるが、主分離工程 を経ないため(金属燃料金属電解法の径ブランケット処理に比べて)相当量のU と混在したままで取り扱う。また、酸化物粉体を扱うことから、燃料粉体を内 蔵する機器からの飛散を防止し工程内滞留量を低減させる方策が求められる。 入量計量技術に関しても、脱被覆後の粉体を秤量・サンプリング分析する方法 を代表に複数の案が検討されたが、いずれも今後の技術開発が必要である。

さらに、適時性要求に対してNRTA等の対応策は未検討であるため、今後の課 題である。

(6) 運転·保守補修性

酸化物燃料に対応するため、再処理工程では電解回収前に酸化物から金属へ の転換が行われる。溶融塩中で金属リチウムを用いて還元するためのシステム として還元装置、濾過装置、リチウム電解装置、受け槽、ポンプが追加される。 各装置の動的メカニズムは、電解装置など他の主要工程機器と比べて特に複雑 ということはなく、運転性の技術的課題は金属燃料を取り扱うシステムと同等 である。ただし今後、工程数の増大による処理能力への影響を検討する必要が ある。

本施設ではメンテナンススペースを除きMSMを設置せず、セル内の設備・機器に対する保守はBSMを利用するため、同時に実施できる作業数に限度がある。 一方で機器数は金属燃料対応のシステムに比べ多く、作業の所要時間は長くなるものと予想される。保守作業計画を策定するにあたって、この点に配慮が必要である。

(7) 技術的成立性

金属燃料の金属電解法と共通部分については既に6.3.1 に明記した。ここでは、 酸化物燃料特有の技術について技術的成立性を検討する。

各工程の個々のプロセスに関しては、ほとんど実験的に確認されている。一 方、工学的検証に関しては十分であるとは言えない。技術的成立性に関する検 討結果のまとめを表 6.3.12に示す。基礎試験レベルのデータが不足しているの は、LiClからのFP回収に関する技術である。650℃の高温塩で安定してFPを回 収できるゼオライトの選定・開発を含めて、研究を進めていく必要がある。そ の他の工程における未確認事項は、機器性能に関するデータ不足が原因であり、 工学試験実施により解決できる可能性が高い。

### [参考文献]

- J.H.Goode, et al. : "Voloxidation removal of Volatile Fission Products from Spent LMFBR Fuels", ORNL-TM-3723 (1973).
- 2) L.F. Grantham, et al. : "Airox Dry Pyrochemical Processing of Oxide Fuels a Proliferation Resistant Reprocessing Method", (1980).
- G.M.Vinogradov, et al. : "Circulating Plants for Oxidative Recrystallization of Oxide Fuel", Sov. At. Energy, Vol.62, No.2, pp.156-157 (1987).
- K.W.Song, et al.: "Effect of High Temperature Treatment and Subsequent Oxidation and Reduction on Power Property of Simulated Spent Fuel", J. Korean Nucl. Soc., Vol.28, No.4, pp.366-372 (1996).
- 5) 原子力安全委員会:"再処理施設安全審查指針",(1986)2001改訂版.
- 6) 原子力安全委員会: "ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針", (2002).
- 7) 日本原燃(株):"六ヶ所再処理事業所 再処理事業指定申請書",(1989)1997補正.
- 8) 中林弘樹,他: "金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討(I)", JNC TN9400 2003-082 (2003).

	使用済	<b>F</b> 燃料	再処理製品		バイパス	Ī	再処理+バイパス処況	
	炉心燃料	RB燃料	固体陰極	Cd陰極	処理製品		回収率	混入率
	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)		(%)	(%)
U*	134.189	75.370	123.675	11.093	74.993		99.5	-
Np	0.080	0.002	0.000	0.080	0.002		99.3	-
Pu	22.132	1.560	0.000	21.967	1.552		99.3	-
Am	0.795	0.000	0.000	0.783	0.000		98.5	-
Gm	0.234	0.000	0.000	0.231	0.000		98.5	-
H-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Kr	0.099	0.001	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Xe	1.873	0.008	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Sb	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Se	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Te	0.263	0.001	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Br	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Ι	0.141	0.001	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Mo	1.309	0.006	0.000	0.000	0.006		-	0.003
Tc	0.321	0.002	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Ru	1.205	0.005	0.000	0.000	0.001		-	0.001
Rh	0.355	0.001	0.000	0.000	0.001		-	0.001
Pd	1.056	0.003	0.000	0.000	0.003		-	0.001
Ag	0.097	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Cd	0.090	0.001	0.000	0.000	0.001		-	0.000
Sn	0.076	0.001	0.000	0.000	0.001		-	0.000
Zr	1.074	0.006	0.000	0.000	0.006		-	0.002
Rb	0.087	0.001	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Cs	1.509	0.006	0.000	0.000	0.002		-	0.001
Sr	0.184	0.001	0.000	0.000	0.001		-	0.001
Ba	0.663	0.002	0.000	0.000	0.002		-	0.001
Y	0.103	0.001	0.000	0.000	0.001		-	0.000
La	0.479	0.002	0.000	0.024	0.002		-	0.011
Ce	0.867	0.004	0.000	0.142	0.004		-	0.062
Pr	0.447	0.002	0.000	0.074	0.002		-	0.032
Nd	2.674	0.007	0.000	0.439	0.007		-	0.190
Pm	0.023	0.000	0.000	0.004	0.000		-	0.002
Sm	0.462	0.002	0.000	0.000	0.002		-	0.001
Eu	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000		-	0.000
Gd	0.054	0.000	0.000	0.003	0.000		-	0.001
HRE	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	l	-	0.000

# 表 6.3.1 使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量

\*: HM電解精製槽のHM濃度を一定にするために、毎日微量のUを追加(図 6.3.2 参照)

	U製品	U-Pu-MA製品	バイパス処理	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)	(t/y)
U	24.74	2.22	15.00	41.95
Pu	0.00	4.39	0.31	4.70
MA	0.00	0.22	0.00	0.22
FP	0.00	0.14	0.01	0.15

# 表 6.3.2 再処理製品の年間製造量

# 表 6.3.3 セル内機器交換品

廃棄物区分	発生量(t/y)	代表的な機器
高レベル廃棄物	0.0	-
TRU廃棄物	23.3	前処理サンプリング装置、Li還元槽、ろ過槽、HM電解槽、Cd蒸留装置、
		Cd陰極処理装置、固体陰極処理装置、再酸化槽、HM塩受槽、UCl3受槽、
		ゼオライトカラム
高βγ廃棄物	0.4	集合体解体機(集光ヘッド)
低レベル廃棄物	19.2	台車、トレイ装荷機、短尺ピン分配器、Li還元槽ヒータ、
		HM電解槽ヒータ、陽極アッセンブリ組立装置、Cd供給槽、Cd陰極用
		取出し・組立装置、固体陰極用プロセスるつぼメンテナンス装置、再酸
		化槽ヒータ、UCl3受槽ヒータ、CdCl2受槽
極低レベル廃棄物	5.3	LiCl-KCl供給槽、LiCl-KCl供給槽ヒータ、燃料缶移送装置、るつぼ等
		移送装置(その1)、るつぼ等移送装置(その2)、ZrCl4供給槽
クリアランスレベル	0.4	集合体解体機(レーザー発振機、集光ヘッド冷却ユニット)、せん断機
以下の廃棄物		油圧ユニット
表	6.3.4	酸化物燃料金属電解法の主要機器
---	-------	-----------------

工程名	機器名	基数
	集合体解体機	1
前処理工程	燃料ピンせん断機	1
	酸化還元炉	3
	粉体分離機	2
	Li還元槽	2
Li還元工程	Li電解槽	2
	濾過槽	2
	ゼオライトカラム	1
	HM電解精製槽	5
HM電解精製工程	陽極アッセンブリ組立装置	2
	固体陰極用析出物回収・組立装置	2
	Cd陰極用析出物回収・組立装置	2
	パイロコンタクタ	1
廃塩処理工程	再酸化槽	1
	ゼオライトカラム	1
	Cd蒸留装置	1
	固体陰極処理装置	3
	Cd陰極処理装置	5
	Uインゴット回収装置	1
陰極処理工程	U-Puインゴット回収装置	1
	固体陰極用プロセスるつぼメンテナンス装置	1
	Cd陰極用プロセスるつぼメンテナンス装置	1
	蒸留塩回収装置	1
酸化転換工程	粉砕機	2
	酸化転换装置	2
	燃料缶移送装置	1
(セル内専用移送装置)	るつぼ等移送装置(その1)	2
	るつぼ等移送装置(その2)	2

表 6.3.5 主要機器のデータ表

	機器名	機器概要	運転条件	処理能力
	集合体	材料	運転温度	処理量
	解体機	SUS304	室温	1.7 集合体/日
		<u>重量</u>	運転圧力	処理速度
	10440	5000kg	セル内圧	85分/集合体
	然科ビン	<u> 松科</u> <u> CUIS</u> 204	<u>連転温度</u> 安退	<u>処理重</u> 510 本/日
	せん町機	SUS304 香島	主価 運転圧力	510 平/ 口 加理演座
前		<u>単単</u> 3500kg	セル内圧	$\frac{22\pm\sqrt{2}}{22}$ $\frac{1}{22}$ $1$
処			酸化温度	如理量
理		<u></u> アルミレンカ <sup>*</sup> 等	700°C	$\frac{1}{40 \text{kgHM}}/10^{\circ} \text{yf}$
Т.		外形寸法	還元温度	運転時間
程	酸化	$\overline{2220 \times 1650 \times 1600}$ H	800°C	~12時間/バッチ(昇温 1h+酸化処理 4h+置換処理 1h+還元
	還元炉		運転圧力	処理 4h+降温 1h+ハンドリング 1h)
			-0.02MPa	運転回数
		<u> 松科</u> <u> CUIS</u> 204	<u> 連転温度</u>	<u>处理重</u> AOLaHM/Lint
	粉体	SUS304 香島	- 00 C 運転圧力	40Kg FIMI/パック 運転時間
	分離機	<u>単単</u> 1000kg	-0.02MPa	$\sim 20$ 分// $\%$ (粉体受入 5min+分体分離処理 5min+//反転
	77 PILL 178	TOOONG	0.021111 a	機へ払出 5min+トレイハント リング 5min)
				運転回数
				2 バッチ/日
		材料	運転温度	処理量
		SUS316	650°C	40kgHM// ッチ
	т · )Щ — +#	タンクステン内張り	連転上力	
	Li 遼兀槽	外形可法	セル内庄	
		1400 \$ × 4401H (合业)7°业历纪准罢)		(退元処理 bn+//ト リンク 2n) 海転回粉
		(百)// //取侍表直/ 貯蔵量		<u>) 理料回数</u> 9
		<u>×1)咸重</u> 550kgLiCl/基		
			運転温度	処理量
		$\overline{SUS}316$	$650^{\circ}\mathrm{C}$	1000L LiCl/バッチ
	Li 電解槽	外形寸法	運転圧力	運転時間
		$1600 \phi \times 4561 \mathrm{H}$	セル内圧	~24 時間/バッチ
т.		(含サンブル取得装置)		
温		++*	海村洞府	
元		SUS316	<u>連転価度</u> 500℃	$\frac{2^{12} \pm 2}{32 \log HM/n^{3}}$
I		外形寸法	運転圧力	運転時間
程	瀘渦槽(1)	$2220 \times 1220 \times 4230H$	<u>////////////////////////////////////</u>	~12時間/バッチ
		(含サンプル取得装置)		運転回数
		陽極容器装荷数		2 バッチ/日
		4 基		
		材料	運転温度	処理量
		SUS316	500°C	48kgHM/ハッチ
	ショート (の)	<u>外形寸法</u>	<u>連転上力</u>	
	濾.適.槽(2)	2820×1220×4230H (合わげ)11版現状署)	セル内庄	~12 時间// ツケ 治電転回粉
		【百》///取侍表直/ ]] []] []] []] []] []] []] []] []] []]		<u>) 理料回数</u> 9
		6基		
		材料	運転温度	処理量
	粉砕機(1)	SUS304	室温	31kgHM/日
	U-PU-MA			運転時間
				~5時間/日
	10 Th 1/4 (a)	<u>材料</u>	運転温度	処理量
画会	粉砕機(2)	SUS304	至温	130kgHM/日 SEt The
酸ル	U			<u> 理転時间</u> ~10時間/日
転		材料	運転温度	- 1.0 (5月月) 日 処理量
換	酸化転換装	耐火材	300°C	<u>~~ 単</u> 34kgHM/目
I	置(1)	外形寸法	運転圧力	運転時間
程	U-PU-MA	$\overline{6000 \times 2000} \times 2500 H$	セル内圧	~5時間/日
		材料	運転温度	処理量
	酸化転換装	耐火材	300°C	144kgHM/日
	置(2)	<u>外形寸法</u>	運転圧力	
	U	$6000 \times 2000 \times 2500 \text{H}$	セル内圧	~21 時間/日

	前工程		後工程		ミニマム	機器間	設備間	ハ゛ッファ
一時保管 架台名	機器名	処理量 (kgHM/d)	機器名	処理量 (kgHM/d)	ハ <sup>、</sup> ッファ (kgHM)	一時 <sup>ハッファ</sup> (kgHM)	一時 <sup>バッファ</sup> (kgHM)	容量 (kgHM)
炉 心燃料粉末 貯蔵庫	粉体分離機	169 (4 缶)	Li 還元槽	169 (4 缶)	_	127 (3 缶)		(4 缶)
炉 心 燃 料 粉 末 受入貯蔵庫	粉体分離機	169 (4 缶)	Li 還元槽	169 (4 缶)	127 (3 缶)	380 (9 缶)	_	(10 缶)
ブランケット燃料粉 末貯蔵庫	粉体分離機	72.7 (2 缶)	収缶機	72.7 (2 缶)	_	109 (3 缶)	_	(4 缶)
UO2等粉末 貯蔵庫	粉体分離機	72.7 (2 缶)	収缶機	72.7 (2 缶)	182 (5 缶)	182 (5 缶)	_	(6 缶)
陽極アセンブリ 仮置架台(1)	濾過槽	100 (12 個/1 基)	HM 電解精製槽 (3 基)	100 (12 個/3 基)	_	_	150 (18 個)	150 (18 個)
陽極アセンブリ 仮置架台(2)	濾過槽	66.7 (8 個/1 基)	HM 電解精製槽 (2 基)	66.7 (8 個/2 基)	_	_	100 (12 個)	100 (12 個)
固体陰極 仮置架台(1)	HM 電解精製槽 (3 基)	78 (9 個/3 基)	固体陰極用析出物 回収·組立装置	78 (9 個/1 基)	_	_	104 (12 個)	104 (12 個)
固体陰極 仮置架台(2)	HM 電解精製槽 (2 基)	52 (6 個/2 基)	固体陰極用析出物 回収·組立装置	52 (6 個/1 基)	—	—	87 (10 個)	87 (10 個)
Cd 陰極 仮置架台(1)	HM 電解精製槽 (3 基)	18.5 (6 個/3 基)	Cd 陰極用取出・ 組立装置	18.5 (6 個/1 基)	_	_	12.3 (4 個)	12.3 (4 個)
Cd 陰極 仮置架台(2)	HM 電解精製槽 (2 基)	12.3 (4 個/2 基)	Cd 陰極用取出・ 組立装置	12.3 (4 個/1 基)	_	_	12.3 (4 個)	12.3 (4 個)
固体陰極用 プロセスるつぼ 貯蔵庫	固体陰極用析出 物回収・組立装 置(2基)	130 (3 個/2 基)	固体陰極処理装 置(3基)	130 (3 個/3 基)	_	_	170 (4 個)	170 (4 個)
Cd 陰極用プロセス るつぼ貯蔵庫	Cd 陰極用取出・ 組立装置(2基)	30.8 (5 個/2 基)	Cd 陰極処理装置 (5 基)	30.8 (5 個/5 基)	_	_	37 (6 個)	37 (6 個)
Cd 陰極用 るつぼ貯蔵庫	Cd 陰極用取出・ 組立装置(2基)	0 (10 個/2 基)	Cd 陰極処理装置 (5 基)	0 (10 個/5 基)	_	_	0 (12 個)	0 (12 個)
蒸留塩 るつぼ貯蔵庫	固体陰極処理 装置(3 基)	0 (3 個/3 基)	蒸留塩回収装置	0 (3 個/1 基)	_	_	0 (4 個)	0 (4 個)
U インゴット 貯蔵庫	U インゴット 回収装置	130 (3 缶/1 基)	U インゴット 受入貯蔵庫	130 (3 缶)	_	130 (3 缶)	_	(4 缶)
U-Pu インゴット 貯蔵庫	U-Pu インゴット 回収装置	30.8 (10 缶/1 基)	U-Pu インゴット 受入貯蔵庫	30.8 (10 缶)	_	30.8 (10 缶)	_	(10 缶)
Li 電極用陽·陰 極一時貯蔵庫	Li 電解槽 (陽極:2 個 陰極:2 個)	1回/年	セル外	1回/年	_	_	0 (4 個)	0 (4 個)
Li 電極用陽·陰 極一時貯蔵庫	Li 電解槽 (陽極:2 個 陰極:2 個)	1回/年	セル外	1回/年	_	_	0 (4 個)	0 (4 個)

### 表 6.3.6 貯蔵バッファ容量の評価結果

前処理セル(空気セル)
再処理セル(Ar セル)
顆粒燃料製造セル(空気セル)
セル外

表	6.3.7	セル容積の比較
---	-------	---------

工程名	セル内雰囲気	容積	
前処理工程	空気セル	$2700 \text{ m}^3$	
Li還元工程			
HM電解精製工程			
廃塩処理工程	Arセル	$20800 \text{ m}^3$	
陰極処理工程			
ドロス処理工程,Cd蒸留工程			
酸化転換工程	Arセル	2600 m <sup>3</sup>	

# 表 6.3.8 ユーティリティ使用量

項目	主な使用目的	使用量
電気	-	9,300 kW
液化アルゴン	機器内および Ar セル内供給用	510,000 kg/y
液化酸素	熱脱被覆装置および酸化転換炉供給用	26,000 kg/y
水素	熱脱被覆装置供給用	1,300 m <sup>3</sup> /y
UO <sub>2</sub>	燃料製造用、HM 電解槽濃度調整	6 500 kg/y
	用	0,000 Kg/ y
金属 Li	Li 還元槽の還元剤	400 kg/y
金属K	パイロコンタクタの還元剤	1,700 kg/y
LiCl	Li 還元槽および HM 電解槽供給用	3,000 kg/y
KCl	KCl HM 電解槽供給用	
ゼオライト	ゼオライトカラム供給用	23,000 kg/y

### 表 6.3.9 施設体積の比較

建屋名	体積
使用済燃料貯蔵建屋	5万 m <sup>3</sup>
再処理顆粒燃料製造建屋	34万 m <sup>3</sup>
廃棄物処理貯蔵建屋	8万 m <sup>3</sup>
新燃料貯蔵建屋	5万 m <sup>3</sup>
非常用発電建屋	$2$ 万 m $^3$

# 表 6.3.10 運転に関わる人員

(人日)

設備	工程	日勤	直勤務	合計	備考
前処理	前処理 受入		5	5	常時運転で直勤務対応。
	解体		5	5	主要機器3基程度に対し
	せん断		5	5	て1人が対応と設定。
	熱脱被覆		5	5	
電解処理	試薬調整		5	5	
	Li 還元		5	5	
	Li 還元塩処理		5	5	
	電解		1 0	1 0	
	電解塩処理		5	5	
	陰極処理		5	5	
	酸化転換		5	5	
高レベル廃棄	〔 秦物固化	1		1	処理頻度低で日勤対応。
固体廃棄物	ハル圧縮	1		1	また,直勤務は5班の為
処理	HLW 処理	1		1	1 班は常時日勤対応が可
	圧縮	1		1	能であり、応援要員とす
	焼却	1		1	る。
	ドラム缶詰	1		1	
液体廃棄物效	心理	2		2	連続運転設備で日勤対
気体廃棄物效	心理	2		2	応。
ユーティリラ	ティ	2		2	
高レベル固住	匕体貯蔵		5	5	管理・搬出入操作で直勤
固体廃棄体則	宁蔵		5	5	務対応。
使用済燃料貯蔵			5	5	
分析	サンプリング		5	5	常時運転で直勤務対応。
	前処理		25	2 5	
	分析		1 0	1 0	
放射線管理		5	2 5	3 0	
保守		5 0		50	
合計		67	140	207	

※直勤務は5班3交代制

区分	発生量(t)
<b>TRU</b> 、高βγ (金属廃棄物)	約650
低レベル、極低レベル (金属、コンクリート)	約3,800
クリアランスレベル以下、非放射性 (金属、コンクリート)	約320,000

## 表 6.3.11 解体一次廃棄物発生量

I	技術	設定値	評価
程			
	集合体	—	YAG レーザーによる解体可能。
	解体		γ 照射条件下における光ファイバーの耐久性
			(伝送損失、温度上昇)を確認。
前	燃料ピン	ハル成分混入量	エンジニアリングジャッジによる。
処	切断	ステンレス<0.1%	
理		燃料成分ハル付着量	Pu 富化度が 30%を超える燃料の場合、熱処理
	熱脱被覆	酸化物燃料付着<0.5%	による粉体化が困難であることを確認。
		燃料粉形状	エンジニアリングジャッジによる。
		粒径<2~3mm	
	Li 還元	還元率	電中研等が実施した実験により HM 酸化物の
		U,Np >98%	還元率を確認。
		Pu >97.9%	
		Am,Cm>97.9%	
Li	Li 電解	—	現行技術の延長線で対応可能。
還		FP吸着率	LiCl-KClなどの溶融塩からのFP回収について
元	ゼオライト	アニオン = 10%	は ANL 等の実績があるが、相対的に高温であ
	吸着	アルカリ金属 = 50%	る LiCl (650℃)からの FP 回収についてはデー
		アルカリ土類金属= 50%	タ不足である。
		希土類 =100%	
	ろ過	塩付着率	エンジニアリングジャッジによる。
		LiCl 付着率<10%	
酸	粉砕	粒径調整	現行技術で十分対応可能。
化			
転	酸化転換	化学量論比調整	現行技術で十分対応可能。
換			

### 表 6.3.12 酸化物燃料の金属電解法の技術的成立性の評価



図 6.3.1 酸化物燃料金属電解法のプロセスフロー概念図



図 6.3.2 HM および FP に関する物質収支計算結果の概要(操業開始から5年経過時)



図 6.3.3 プロセス廃棄物の処理フローと廃棄物量



図 6.3.4 廃液処理フローの概略図



図 6.3.5 Li 還元槽の機器概念設計図(H4000mm×Φ1400mm)



図 6.3.6 Li 電解槽の機器概念設計図(H4300mm×Φ1600mm)



図 6.3.7 ろ過槽の機器概念設計図(H4200mm×3800mm)



図 6.3.8 Ar セル (電解精製セル) 内の機器配置図(1F)



図 6.3.9 (左)前処理セル内の機器配置図(2F)、(右)酸化転換工程セル内の機器配置図(B1F)



図 6.3.10 酸化物燃料金属電解法リサイクルプラントの全体建屋イメージ図







図 6.3.12 再処理顆粒燃料製造建屋 B1Fの施設配置図(95×94×9m)



図 6.3.13 再処理顆粒燃料製造建屋 1F の施設配置図(95×94×6.5m)



図 6.3.14 再処理顆粒燃料製造建屋 2F の施設配置図(95×94×6.5m)



図 6.3.15 再処理顆粒燃料製造建屋 3F の施設配置図(95×94×7.5m)















### 6.4 窒化物燃料への適用(ペレット燃料対応)

6.4.1 施設概念構築

(1) プロセス

窒化物燃料の乾式再処理技術については、今まで、金属電解法を利用したプロセスが試験、研究されてきている。日本原子力研究所(以下「原研」

という)、サイクル機構などにおいては、U、Pu、MA窒化物の小規模(gオー ダ)溶融塩(LiCl-KCl)電解試験<sup>1)~7)</sup>やプロセス概念の検討<sup>8)</sup>を実施している。また、 ロシアにおいては、約500g規模のU窒化物の溶融塩(LiCl-KCl)電解試験<sup>9)</sup>を実施 している。ここでは、このように、数多くの試験研究が行われている金属電解 法を利用するプロセスについて検討した。湿式再処理と共通事項である<sup>15</sup>Nの回 収・再利用技術、<sup>14</sup>Cの除去による環境被ばく低減化などに加えて、窒化物燃料 の溶解・金属回収、電解精製後のU、TRUの窒化技術が重要となる。

窒化物燃料リサイクルプラントの設計は、使用済燃料処理量50tHM/年とし、フェーズ I 検討<sup>10</sup>に基づいている。窒化物燃料リサイクルプラントの再処理プロセスフローの概念図を図 6.4.1に、全体のプロセスブロックフローを図 6.4.2に示す。この基本的なフローは、フェーズ I の金属燃料の金属電解法プロセスにしている。窒化物燃料の再処理プロセスと類似している金属燃料の金属電解法と比較するために、本検討において、径方向ブランケット燃料は、再処理をバイパスしないで、炉心燃料とともに再処理するプロセスを検討した。また、基本的なプロセスは、燃料入りの陽極バスケットを電解精製槽に装荷し、電解精製槽内の溶融塩KCl-LiCl中で電解精製処理し、Uおよび U-TRUとして回収した後、それぞれ、窒化装置にて、窒化処理、Cd等除去を行い、UNと(U-TRU)Nの窒化物プロダクトを得るものである。ここで、電解精製槽の溶融塩のTRU還元抽出、塩処理などのプロセスは金属燃料の金属電解法と同様とした。

以下に、処理量50tHM/年の窒化物燃料リサイクルプラントの各プロセスについて、金属燃料の金属電解法との主な相違点や設計要求への対応などを含めて、 概要を説明する。

(i) 前処理

金属燃料処理の場合と同様、アルゴンセル内において、燃料集合体を機械式 に解体し、燃料ピンをせん断する。ただし、窒化物燃料のボンド材をHeとする ことで、金属燃料の再処理のようにボンドNaを除去するプロセスやこの廃Na を処理する廃棄物処理プロセスを設ける必要はない。電解精製時間の短縮の観 点から、解体・せん断の代わりに、解体・脱被覆処理(燃料を粉体化する)とする ことが考えられるが、この場合は、酸化物燃料の金属電解法と同様に加熱炉が 必要となる。

(ii) 陽極溶解 · U 回収 · 窒化

溶融塩(LiCl-KCl)電解により、Uを固体陰極にデンドライト状U金属として回 収する。このU金属をCdに溶解させた後、Cd中に窒素ガスを吹き込み、金属U を窒化するプロセスが必要である。金属燃料のように、燃料中にZrを含んでい ないので、Zrの電解処理は必要ない。

(iii) 陽極溶解・U-TRU 回収・窒化

溶融塩(LiCl-KCl)電解により、U-TRUを液体Cd陰極にU-TRU合金として回収 し、Cd中に窒素ガスを吹き込み、Cdを蒸留させ、U-TRU合金を窒化するプロ セスが必要である。上記のU回収と同様に、Zrの電解処理は必要ない。

(iv) 回収 U、回収 U-Pu-MA の処理

窒化物燃料は、金属燃料の場合のように、インゴットを製作する必要がないので、高温(~約1400℃)での燃料物質溶融処理は必要なく、約1000℃以下の 温度でCd除去処理、塩除去処理し、粉体化させ、燃料製造側へ送ることができる。これらの処理装置は、上記(ii)、(iii)の窒化処理との共用が可能である。

(v) オフガス処理工程

電解精製槽、窒化装置等からは、カバーガスのArのほかに、窒素(<sup>15</sup>N)ガスが 発生するので、窒化回収装置にて、回収し、<sup>15</sup>Nガスを再利用する必要がある。

(2) 物質収支

構築したプロセス概念をもとに概略フロー図を作成し、物質収支を評価した。

(a) 移行率の設定と根拠

金属燃料にはZrやボンドNaが含まれているが、窒化物燃料には含まれていない。この点を除き、窒化物燃料に関する電解処理等の移行率は基本的には金属 燃料の金属電解法と同じである。

(b) 物質収支と除染係数

炉心燃料処理と径方向ブランケット燃料処理を平均化した物質収支の評価結 果を図 6.4.3に示す。電解精製関係の物質収支は基本的な考え方は金属燃料の金 属電解法と同様である。金属電解法再処理回収製品は、固体陰極で回収され、 窒化したUNと、液体Cd陰極で回収され、窒化した(U-Pu-MA)Nの2種類である。 回収製品に混入する不純物は、Ce、Pr、Nd、PmなどのREで、それらの除染係 数は20以上である。製品の重量とFP混入率、UとTRUの回収率は、FP混入率は 設計要求の1.2wt%以下という条件を満たしている。UとTRUの回収率も設計要 求の99%以上という条件を満たしている。

(3) 廃棄物

(i) 環境放出

前処理工程、電解分離工程等から発生するオフガスは、ガス中の微粒子、揮 発性、準揮発性物質(Cs、I)、トリチウム(<sup>3</sup>H)を除去した後に、排気筒から放出 される。燃料中のIは、金属燃料の場合と同様に、溶融塩中に塩素ガスを吹き込 まないために、ほとんどのIは溶融塩中に存在し、下流のゼオライトカラムにて 除去される。本施設から発生する<sup>85</sup>Kr、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>Hについては、これらの発生量と 六ヶ所再処理施設からの放出量と比べて、<sup>85</sup>Kr、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>Hとも六ヶ所再処理施設 の単位発電量あたりの放出量を越えており、<sup>85</sup>Krは希釈放出、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>Hはそれぞ れ除去装置を設けることとする。

(ii) プロセス廃棄物

50tHM/年施設の各工程から発生するプロセス廃棄物の概略処理フローを図 6.4.4に、放射性廃棄物の区分毎にこれらの廃棄物量を表 6.4.1に示す。窒化物 燃料リサイクルプラントから発生する<sup>14</sup>Cの回収に使用した廃CO<sub>2</sub>吸着剤(水酸 化バリウム)は、生廃棄物として142kg/年、固化体としては、200Lドラム缶に充 填するものと想定すれば、1本/年程度発生する。

(a) 高レベル放射性廃棄物

FP塩化物を吸着・吸蔵したゼオライト(以下、塩吸蔵ゼオライトと略す)は、 生廃棄物として約22.8t/年発生する。これらを一括して、高温にて人工鉱物固化 するものとし、人工固化体として、150L缶として85本/年発生する。Cd蒸留残 渣は、生廃棄物として約1.3t/年発生する。これをセメント固化し、セメント固 化体としては、200ドラム缶として1本/年発生する。

(b) TRU を含む放射性廃棄物

ZrO<sub>2</sub>(るつぼのコーティング材)のドロスは、生廃棄物として1.57t/年発生する。これをセメント固化し、セメント固化体としては200Lドラム缶として4本/ 年発生する。 以上のほかに、乾式再処理の発生廃棄物に共通なものとして、ハル、集合体 部材があり、これらの発生量は、酸化物燃料の場合とほぼ同等である。

(4) 機器の設計

(i) 設計方針

本設計は、設計条件および以下に述べる設計方針に基づいて実施した。

(a) 安全設計一般

基本的には、乾式再処理の特有の安全対策も考慮した設計とし、安全上重要 な機能の二重化を考慮する。

(b) 耐震設計

電解精製槽などの機器等は、酸化物燃料の場合を参考に、内蔵する放射性物 質の性状、量に応じて、耐震クラス分類を行った設計とする。

(c) 臨界安全設計

電解精製槽などの臨界上、有意な核物質を含むものを取り扱う容器、装置に ついては、金属燃料の場合を参考に、質量管理等を適用する設計とする。燃料 受入れ貯蔵については、形状寸法管理を適用した設計とする。

(d) 火災・爆発の防止に関する方針

粉末状の窒化物燃料を扱う機器、装置等については、空気セルでなく、アル ゴンセル内にて取り扱う設計とする。また、集合体解体機は、機械方式とし、 アルゴンセル内に設置する。

(e) 閉じ込めの機能(漏洩の防止等含む)

電解精製槽などの放射性物質を収納する機器等の使用材質は、使用条件に合わせて適切な材料を選定し、要求される再処理容器区分に合わせた溶接、検査を想定した設計とする。また、放射性物質を内蔵する機器等は、セル等にて閉じ込める設計とする。

(f) 機器の運転・保守・補修

安全上重要な施設は、運転中、停止時に安全機能を失うことなく安全機能を 確認するための試験、検査ができ、安全機能維持を健全に維持するための適切 な保守、修理ができる設計とする。

(g) 電源喪失に対する考慮

外部電源の喪失に対して、安全上重要な機能を維持するために、独立2系統

の非常用所内電源設備を設ける設計とする。

(ii) 機器設計

50tHM/年施設の主要な機器の機器数等は、金属燃料の金属電解法に基づき検討 した。50tHM/年施設の再処理に必要な機器基数は、金属燃料の金属電解法プロ セスと同様に、機器1基あたりの処理容量と処理時間、ならびに1日あたりに 処理しなければならない処理量に基づいて決めた。ここで、予備機は設けない 設計としている。主要な機器等の基数を

表 6.4.2に示す。

以下に、主要な機器の概要について説明する。

(a) 集合体解体機、ピンせん断機

前処理工程の主要機器としては、集合体解体機、ワイヤ除去装置、せん断機 があり、アルゴンセル内に設置する。集合体解体機は、金属燃料の場合と同様 に機械方式とした。金属燃料の場合設けたNaボンド除去槽は、燃料ボンド材を Heとしているために設けてない。前処理工程において、電解精製側に粉体化燃 料を供給する場合は、加熱炉を追加設置し、加熱炉内のガスは窒素とする。こ の場合、加熱炉内に窒素を供給し、このパージガスは窒素回収系(パージ窒素ガ スは、窒素回収系から再循環使用)に送られる。大気圧、窒素ガス雰囲気中にお いて、ペレット状UNは650~750℃程度で熱処理され、次の反応により、高次 のU<sub>2</sub>N<sub>3</sub>となり、粉体化<sup>12) 13)</sup>する。

 $2UN\text{+}1/2N_2 \text{-} U_2N_3$ 

(b) 電解精製槽

フェーズIIにおける金属燃料の金属電解法や酸化物燃料の金属電解法の場合、 電解精製槽は合理化を考慮して4極対/基としている。窒化物燃料の金属電解法の 場合の電解精製槽は本来フェーズIIと合わせた方がよいが、今回は、フェーズ Iで検討した3極対/基<sup>10/11</sup>(図 6.4.5参照)をベースとした。電解精製槽はCr-Mo 鋼製または相当品のものを9基設ける。電解精製槽は、基本的には、金属燃料金 属電解法の電解精製槽とほぼ同じものとしている。せん断された窒化物燃料を 陽極バスケット内に入れ、このバスケットを電解精製槽へ装荷する。金属燃料 の金属電解と同様に、温度約500℃で、溶融塩電解処理し、固体陰極棒にデント ライト状析出Uを、Cd陰極にU-TRUを回収する。窒化物燃料の場合、せん断燃 料の粉末が溶融塩上に浮遊する可能性があるので、これを防ぐために、陽極バ スケットの上部に、粉末浮遊防止用のカバーを設ける設計としている。また、 電解精製槽内には、純度の高いArを槽内カバーガスとして供給する。槽内陽極 より窒素が発生するので、ほとんどの窒素-アルゴンの混合ガスはオフガス処 理系へ送る(一部アルゴンセル内)設計としている。窒化物燃料の電解精製の 性能に関しては、ロシアの試験データがあり、窒化物燃料の電解の電流効率は、 電流密度0.25A/cm<sup>2</sup>の条件において、温度約500℃で、約62%(370AHr/kg<sup>9</sup>)、 温度約600℃では84%(350AHr/kg<sup>9</sup>)であり、金属燃料の場合の運転温度500℃ でのU電流効率約56%<sup>14)</sup>(600AHr/kg)より高いと考えられる。したがって、U の電解処理の場合、温度約500℃でのUNの1極対当たりの電解時間は、電流 300A(電流密度0.25A/cm<sup>2</sup>)で、次の通り、金属燃料よりもかなり短くなる。

①窒化物燃料の電解処理時間:

(370AHr/kg×10kg/極) ÷300A=13hr/10kg・極
 ②金属燃料の電解処理時間(一例):

(600AHr/kgU×10kg/極)÷300A=20hr/10kg・極 温度約600℃での窒化物燃料の電解時間は、約500℃の場合より電流効率が高 くなり、より短くなるが、Cdの蒸発量を抑えるために、溶融塩の温度は、金属 燃料の場合と同様に約500℃とした。

これらのデータからは、電解精製槽は3極対/基で7基になると考えられる。 UNの電解時間を安全側に金属燃料のものと同程度と想定し、3極対/基の電解精 製槽9基と設定している。

粉体状の燃料を電解精製する場合、原研にて行われたAmNを模擬した粉末の DyN(ジスプロシウム窒化物)の酸化溶解試験<sup>15)</sup>では、窒化物DyNは、酸化剤 としてCdCl₂を添加した温度約500℃程度の電解塩(LiCl-KCl)に速やかに溶解 し、溶解反応物の窒素ガスが99%程度放出された。このことから、AmNなど粉 体化燃料の溶解は、溶融塩温度500℃程度で、3~4時間程度と短時間と考えられ る。なお、基礎的な研究は進められているが、今後、さらに、実規模の電解精 製槽などを使用して、電解精製時の溶解速度、電解速度などのデータを取得し ていく必要がある。

(c) 窒化装置

窒化装置は、電解精製槽からの金属のU、U-TRUを窒化し、Cd、塩の蒸留分離を行うもので、金属燃料の陰極処理装置と窒化の機能を兼ね備えたU窒化装置、U-TRU窒化装置を設ける。窒化装置の概略機器図(一例)を図 6.4.6に示す。 窒化装置内において、Uの場合、UをCdに溶解させた後、約600℃にてCd-U中に窒素ガスを吹き込み、Uを窒化させた後、さらに温度950℃、圧力約10torrで塩蒸留を行い、塩を除去し、粉体状のU-Nの窒化物を得る。U-TRUの場合、Cdの凝縮、窒化処理部(窒素ガスバブリング部)へ再循環させるように、Cdリサイクルの構造とし、約600℃にてU窒化を行う。U窒化が終了した後、Cdの再循環を止め、さらに約700℃高温とし、Cd循環しないで、Cdを蒸留し、TRUを窒化させた後、温度950℃、圧力約10torrで塩蒸留を行い、塩を除去し、粉体状の (U-TRU) Nの窒化物を得る。

金属Uの窒化処理については、窒素ガス吹込みにより、次の反応により金属が 窒化できることが確認されている。

 $2U(Cd 中に溶解) + 3/2N_2(g) = U_2N_3(s)$ 

原研ではCd中のウランの窒化試験において、温度500℃、600℃の窒化処理で UからU<sub>2</sub>N<sub>3</sub>への転換率がそれぞれ78.3%、91.5%<sup>16)</sup>あることを確認している。ま た、サイクル機構では、窒素ガス吹き込み窒化の基礎試験において、温度500℃ ~550℃で、Cd中2~2.4wt%のUに化学当量以上の窒素ガスを約5時間吹込み、 粒径数+µmから1mm程度のUN、UNxを生成しており、ほとんどのUがUNに 転換<sup>17)</sup>したことを確認している。これらのデータを考慮して、窒化温度は、反 応速度の点から約550℃とし、Cd中へのN<sub>2</sub>バブリングガス流量約4L/min・kg、 そのバブリング時間を5hrと想定した。U窒化装置、U-TRU窒化装置の1基あた りの処理能力は、金属燃料の場合と同様に、それぞれ、約60kgHM(6極分)/バッ チ・日、約6kgHM(1極分)/バッチ・日としている。

Puの窒化については、N<sub>2</sub>バブリングガスのみによる窒化は難しく、約700℃で、Cd-Pu中でN<sub>2</sub>バブリングを行いながら、Cdを蒸留することで、顆粒状のPu 窒化物を得る<sup>18</sup>ことが明らかになっており、この原理を利用したものである。

なお、今後さらに実規模の窒化装置などを使用して、窒化処理時間などのデ ータを取得していく必要がある。

U窒化装置では、窒化後、温度600℃、圧力約30torrでCd蒸留を行い、さらに、 Cd、塩を除去し、U窒化物を回収する。U-TRU窒化装置では、窒化後、U-TRU 窒化物を回収する。

金属燃料の陰極処理の場合、燃料物質の溶融処理時間が必要であるが、窒化物燃料の場合、この処理は省略することができる。

(d) 窒素回収装置等

オフガス処理工程では、燃料ピンせん断機のArリッチなパージガス、電解精 製槽のArリッチなパージガス、窒化装置のN2リッチなパージガス等のオフガス を、それぞれCs/Ru吸着塔、CO2除去塔、ヨウ素吸着塔(ヨウ素除去塔の前に 水分除去を行う)にて処理し、Cs/Ru、CO2、ヨウ素などを除去するが、その 後、窒素回収装置にて、N2を回収し、N2をリサイクルする。

このリサイクルのための窒素ガス(<sup>15</sup>N)回収技術は、溶解時などで発生する 窒素ガス(おもに<sup>15</sup>N)やFPなどのガスとの混合ガスがオフガス側に流れるので、 Arなどのガスと分離し、この<sup>15</sup>Nを回収・再使用する。この窒素ガス回収装置と してPSA (Pressure Swing Adsorption)法、深冷分離法、膜分離法等があるが、 深冷分離法はコスト高となり、膜分離法は分離性が悪く低純度の製品しか得ら れないので、最近、分離性能の向上がめざましいPSA法を選定した。窒化物燃 料リサイクルシステムにおいては、Arが電解精製槽などのカバーガスとして使用されており、Arガスとともに電解精製時に窒素ガスや希ガスなどの混合ガス が発生する。この混合ガスから<sup>15</sup>Nを回収・再使用するためには、Arなどのガス と分離するシステムが必要である。この窒素ガスの回収方式は、活性炭PSA方 式とゼオライトPSA方式などがあり、いずれも、製品窒素の純度は99.99%程度 まで得られるが、窒素回収率はゼオライトPSA方式の方が活性炭PSAプロセス より高く、窒素とArなどとを分離することができる特徴があるので、ゼオライ トPSA方式<sup>19)20)</sup>を適用した。この窒素回収システムの性能としては、多重PSA システムなどとすることにより、製品の窒素純度99.9%、窒素回収率90%(10% は不純物ガスとともにパージ)を想定した。PSA窒素回収の原理は、図 6.4.7に 示すように、窒素を含む混合ガスを吸着剤充填容器に供給し、窒素を吸着剤に 吸着させて不純物ガスを分離した後、容器内不純物ガスを排気し、その後、吸 着剤からの窒素を脱着させ窒素を回収する工程を繰り返す。

窒素回収方法は、<sup>15</sup>N全量循環処理法(電解精製槽で発生する窒素ガスを含む 混合ガスと窒化装置で発生する窒素ガスの両方とも窒素回収設備にて処理し再 循環運転する方法)と<sup>15</sup>N部分循環処理法(電解精製槽で発生する窒素ガスを含 む混合ガスのみ窒素回収設備にて処理し、窒化装置で発生する窒素ガスは窒素 ガス貯蔵タンク経由再循環使用する方法)の2案が考えられる。フェーズIでは <sup>15</sup>N全量循環処理法のシステムを検討したが、今回は、<sup>15</sup>N部分循環処理法を考 案した。この方式の場合、<sup>15</sup>N全量循環処理法よりも窒素回収設備からの窒素の 排出量が少ないために、濃縮窒素<sup>15</sup>N補給量が少なく、補給濃縮窒素コストも少 ないことがわかった。

窒素処理量約0.6Nm<sup>3</sup>/hrの窒素回収装置を図 6.4.8に示すが、電解精製槽では 窒素ガスが0.6Nm<sup>3</sup>/hr発生し、これをこの窒素回収装置にて処理し、この90%を 回収し、窒化用供給窒素として使用し、残りの10% (0.06Nm<sup>3</sup>/hr) 排出される。 窒化装置では窒化用窒素9.8Nm<sup>3</sup>/hrを循環使用し、このうち、電解精製槽から回 収した窒素0.54Nm<sup>3</sup>/hrを再使用する。

燃料を窒化物にするために、窒素が0.06Nm<sup>3</sup>/hr消費されるので、窒素の補給 量は0.06Nm<sup>3</sup>/hr(235Nm<sup>3</sup>/年)となる。したがって、この濃縮窒素の補給量の コストは、3.2億円/年となる。N-15部分循環処理法ベースの窒素(<sup>15</sup>N)マスバ ランスを図 6.4.9に示す。このマスバランスより、窒化物燃料リサイクルプラン トに対する99.9%の濃縮窒素の製造プラント<sup>22)</sup>の規模は1基当たり235Nm<sup>3</sup>/年 程度になることがわかった。 (5) 施設設計

(i) 計量管理とセル区分

計量管理は、金属燃料の金属電解プロセスと同様に、物質収支区域(MBA)として3つに分け、核物質の適切な閉じ込めが行えるように設計している。

(ii) セル機器配置計画

再処理関係のセルは、集合体解体装置とせん断機などの入った燃料受入・前 処理セル(アルゴンセル)と再処理設備(電解精製槽、窒化装置、TRU抽出器、ゼ オライトカラム等)の入った電解分離セル(アルゴンセル)、保守セル、エアロッ クセル等からなる。これらのセル雰囲気の浄化と冷却のために、セル外にアル ゴンセル浄化・冷却設備を設けている。セル内Ar冷却設備は、セル内機器の発 熱による温度上昇を抑えるように設計している。また、アルゴンセル浄化設備 は、金属燃料の場合と同様に、セル内に空気がインリークしても、セル内雰囲 気が酸素100ppm以下、水分100ppm以下、窒素1000ppm以下となるように設計 している。

(iii) 試薬供給・ユーティリティ

窒化物燃料金属電解法の再処理設備に、特徴的なユーティリティとしては、 次のものが上げられる。

・15N窒素(15N濃縮度99.9%)の補給量;約235Nm<sup>3</sup>/年

(iv) 施設の概要

50tHM/年施設の全体配置イメージ図を図 6.4.10に示す。また、建屋の配置図 を図 6.4.11~図 6.4.15に示す。主要セル(アルゴンセル)の容積は、受入れ・ 前処理セル約3200m<sup>3</sup>、電解分離セル約6400 m<sup>3</sup>で、合計約9600 m<sup>3</sup>となる。(フ ェース I にて検討した50tHM/年規模の金属燃料金属電解法プラントと同程度。 但し、フェーズIIでは、38tHM/年規模の金属燃料金属電解法プラントを検討し ているが、バッファー設備、保守セル等を考慮し、詳細化しているために、セ ル容積がより大きくなっている)

主建屋のセル、建屋の概略容積を表 6.4.3に示す。一体型の主建屋の寸法、容 積は、フェーズ I ベースの場合で、約89m×約104m×約32mH(地下1階、地 上3階)約30万m<sup>3</sup>となる。燃料製造設備をキャンペーン運転方式として金属を扱 い、粉体を取り扱わないので、雰囲気中での相互汚染は生じないとし、1系列 1 セルとしているのに対して、窒化物燃料の場合、燃料製造設備をペレット成 型方式とし、内側炉心燃料・軸方向ブランケット用、外側炉心燃料・軸方向ブラン ケット用、径方向ブランケット用の燃料製造設備を雰囲気中での相互汚染の防止の観点から、安全側に、それぞれ3系列、3つの隔離したセルを想定したケースを検討したために建屋が大きくなっている。また、アルゴン浄化設備、窒素回収装置等による影響もある。主建屋のセル容積、建屋容積を表 6.4.3に示す。 燃料貯蔵設備(使用済燃料設備・新燃料貯蔵設備)の寸法は約56m×約86m×約 26mH、この容積は約8万m<sup>3</sup>となる。

6.4.2 技術評価

経済性評価、経済性以外の評価および技術的成立性について以下に技術評価 を行った。

(1) 経済性

窒化物燃料リサイクルプラントの建設費、操業費を評価した。これらの結果 を表 6.4.4に示す。処理規模50tHM/年のプラントの場合、建設費は、金属燃料 金属電解法(フェーズIベースの経済性評価)と比べ、次の通り、窒素回収設 備が追加となるが、Na除去装置は必要ないので、ほぼ同程度(約21億円の増加: 金属燃料金属電解法の約2%)となる。燃料製造側コスト増加の影響はほとんど ない。

①金属燃料の場合、設置したNa除去装置は削除できる(-約3億円)

②電解精製関係の主な機器基数は、金属燃料の場合と同程度(約0億円)

③オフガス処理設備窒素回収装置、窒素貯蔵タンク等の追加(+約24億円)

また、操業費については、金属燃料金属電解法と比べ、窒素(<sup>15</sup>N)補給が追加となるが、1,000円/g<sup>15</sup>N(<sup>15</sup>N濃縮度99.9%)で評価して、約3.2億円/年の増加(フェーズ I 金属燃料金属電解法の約4%)となる。燃料製造側コスト増加はほとんどない。操業費のうち、供給濃縮窒素<sup>15</sup>N費の影響が大きい。

なお、処理規模200tHM/年のプラントの場合、建設費は、金属燃料金属電解法 と比べ、次の通り、ほぼ同程度(約72億円の増加:金属燃料金属電解法の約2.6%) となる。

①金属燃料の場合、設置したNa除去装置は削除できる(-約5億円)

②電解精製関係の主な機器基数は、金属燃料の場合と同程度(約0億円)

③オフガス処理設備窒素回収装置、窒素貯蔵タンク等の追加(+約77億円)

また、操業費は、金属燃料金属電解法と比べ、窒素(<sup>15</sup>N)補給の追加分により約12.8億円/年の増加(金属燃料金属電解法の約5.5%)となる。

今後、さらにより廉価な供給濃縮窒素<sup>15</sup>N費(250~500円/g)とすることが重要である。

(2) 経済性以外の評価

経済性以外に、安全性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性に ついて、以下に検討した。

(a) 安全性

窒化物燃料の金属電解法は、金属燃料の金属電解法と同様に、

①高温の溶融塩の使用

②電解精製槽等の電極、電解析出物、るつぼ等出し入れ時の槽内開放時の 対策

③臨界安全の確保

④金属による火災・爆発

などが上げられる。基本的には、金属燃料の金属電解法と同様の対策が必要で ある。特に、窒化物燃料の金属電解法の特徴的なものとしては、③臨界安全対 策、④粉体化窒化物による火災・爆発が上げられる。③臨界安全対策について は、電解精製槽、窒化装置は、金属燃料の再処理の電解精製槽、陰極処理装置 と同程度の寸法と安全側に設定している。④粉体化窒化物による火災・爆発の 対応については、粉体窒化物の火災防止のために、粉体窒化物を取り扱う設備 は、アルゴンセル内に設置する設計としている。

(b) 資源有効利用性

U、TRUは、今後さらに検討する必要があるが、99%以上の回収の可能性が あり、資源有効利用性を有すると考えられる。窒化物燃料の再処理に関する物 質収支データにより、再処理製品中の主な核種の回収率は、使用済燃料の核種 を100%とした場合、次の通りである。

U = 99.5%

TRU=99.8%

(c) 環境負荷低減性

せん断機、電解精製槽などから発生するオフガス中の微粒子、揮発性または 準揮発性FP(Cs、I)、トリチウム(<sup>3</sup>H)は、オフガス処理設備にて除去され、排 気筒から放出される。本設備から発生する<sup>85</sup>Kr、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>Hは、六ヶ所再処理工場 からの単位発電量当たり放出量以下とするために、<sup>85</sup>Krは希釈、<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>Hは除去 設備を設置している。

(d) 核拡散抵抗性

金属電解法では、PuにU、MAなどが同伴するため、工程内に純粋なPuが単 独に存在することはない。また、製品は低除染であるため、近接は容易でない。 計量管理は、酸化物燃料処理の金属電解法と同様に、核物質収支区域(MBA)と 主要計測点(KMP)によって管理することとしているが、今後の課題としては、 ①窒化物燃料の入量計量手法の開発、②運転時および保守時の電解装置などの 機器・設備における核物質存在量の測定手法の開発、③適時性要求に対する NRTA等の対策などがある

(e) 運転·保守補修性

定型の操作に対しては、極力自動化を図っている。また、不定型の操作に対しては、マスタースレーブマニピュレータ(MSM)、インセルクレーン(IC)、 インセルパワーマニプレータ(PM)などを使用する。主な機器等には保守補修 のスペースを設ける。

金属燃料の金属電解法と同様に、主要な機器の運転・保守補修を考慮している が、今後、粉体を扱うことも考慮し、マテリアルハンドリング装置の操作等詳 細に詰めていき、配置などに反映していく必要がある。

(3) 技術的成立性

窒化物燃料の金属電解法は、原研などで、U、Puの基礎試験を実施しており、 U、Pu、Npの窒化物についての電解回収、U、Puの窒化処理については、基礎 試験にて実証しており、基本的な原理確認が成されている。主要な設備の技術 的成立性の評価を表 6.4.5に示すが、この表より成立性はあると考えられる。

PSA法利用の窒素<sup>15</sup>N回収技術については、成立性はあるが、今後、さらに模 擬ガス等を使用し、実証する必要がある。また、最適な窒化装置の構造につい て検討していく必要がある。

さらに、工学的な試験等にて不足データを取得し、プロセス、機器の詳細な 設計が重要である。なお、脱被覆技術を採用する設計においては、窒素雰囲気 による(U,Pu)Nペレットの熱処理試験にて、窒化物の脱被覆、粉体化の挙動 を明らかにすることが重要である。

なお、窒化物燃料リサイクルプラントの実用化に当たり、アンモニアプラントとリンクさせた廉価な高濃縮<sup>15</sup>N窒素製造プラントの開発も重要である。

#### [参考文献]

- 荒井康夫,小川徹:"窒化物燃料の乾式再処理",部会企画セッション,第Ⅲ分冊,日本原子 力学会「2000年春の年会」, p.(7) (2000).
- 2) 鈴木康文: "2.炭窒化物燃料", 日本原子力学会誌, Vol. 41, No. 4, pp.376-377 (1999).
- 3) 岩井孝,他:"塩化物溶融塩中におけるプルトニウム窒化物の電解",K21,日本原子力学会「1998年春の年会」(1998).
- 4) 岩井孝,他:"塩化物共晶塩中におけるネプツニウム窒化物の電解",K36,日本原子力学会「1998年秋の大会」(1998).
- O. Shirai, et al. : "Electrolysis of Plutonium Nitride in LiCl-KCl Eutectic Melts, Journal of Nuclear Materials", vol. 277, pp226-230 (2000).
- T. Inoue, H. Tanaka : "Recycling of Actinides Produced in LWR and FBR Cycles by Applying Pyrometallurgical Process", Proc.Conf. Future Nuclear Systems GLOBAL93, pp646-652 (1993).
- Y. Kasai, et al. : "Design Study on Advanced Nuclear Fuel Recycling System", Proc.Intl. Conf. Future Nuclear Systems GLOBAL99 (1999).
- 藤岡綱昭,他:"窒化物燃料の乾式再処理システムの検討",N17,日本原子力学会「2001年 秋の大会」(2001).
- 9) B.D.Rogozkin, et al. : "Properties and Synthesis and Reprocessing Technology of Mononitride Fuel for Inherently Safe Reactors", American Nuclear Society, 1994, pp. 382-389 (1994).
- 10) 田中 博,他: "再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- 11)藤岡綱昭,他: "金属燃料リサイクルシステムの設計評価", JNC TY9400 2001-028 (2001).
- T. Fujioka, et al. : "Development of Fuel Recycles System Based on Dry Pyrochemical Processing Technology", Proc. RECOD98, pp125-133(1998).
- 13) 高阪裕二,他:"FBR核燃料リサイクルシステム概念の検討(その4)窒化物燃料への乾式 熱処理技術の適用性",K58,日本原子力学会「1997年秋の大会」(1997).
- 14) J.E.Herceg, et al.: "Engiceering and Acquisition of Equipment for Electromentallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel", Proc.ICONE8, ICONE-8541, pp.1~16 (2000).
- F.Kobayashi, et al. : "Dissolution of Metal Nitrides in LiCl-KCl Eutectic Melts", Proc. Intl. Conf. Future Nuclear Systems (GLOBAL '99)(1999).
- M. Akabori, et al. : "Nitridation of Uranium and Rare-Earth Metals in Liquid Cd, Journal of Nuclear Materials", vol. 248, pp338-342 (1997).
- 17) 掛樋勲,他: "先進的核燃料リサイクルシステムの設計研究(溶融塩を用いたリサイクルシステムの概念検討)", PNC TN9410 97-015, pp2.1-1-2.1-13 (1996).
- 18) 中園祥央, 也: "液体Cd陰極回収Puの再窒化試験", D25, 日本原子力学会「2004年春の大

会」 (2004).

- 19) K.Nagahama, et al. : "Handbook of High-purification Technology", Fuji Technosystem, 383-469 (2001) (in Japanese).
- 20) H.S.Shin, K.S.Knaebel : "Pressure Swing Adsorption: An Experimental Study of Diffusion-Induced Separation", AICHE J., Vol.33, No.4, 654-662 (1987).
- 21) H.S.Shin, K.S.Knaebel : "Pressure Swing Adsorption: An Experimental Study of Diffusion-Induced Separation", AICHE J., Vol.34, No.9, 1409-1416 (1988).
- 22) M.Inoue, et al. : "Feasibility Study on Nitrogen-15 Enrichment and Recycling system for innovative Recycle with nitride fuel", Design Study on Advanced Nuclear Fuel Recycling System", Proc. ICONE10 (2002).

廃棄物処分の観点からの廃棄物		発生廃棄物量	
廃棄物区分	主要な廃棄物	生廃棄物(t/年)	固化体(m <sup>3</sup> /年)
古しぐ山内英物	塩吸蔵ゼオライト	約22.8	人工固化体 約12.7(85本/年)
同レベル虎米初	Cd蒸留残渣(NM)	約1.3	セメント固化 約0.2(1本/年)
TDU肉薙物	ドロス	約1.6	セメント固化 約0.63(4本/年)
TRO 完果物	CO₂吸着剤 (水酸化バリウム)	約0.14	約0.11(1本/年)
備考	<ul> <li>①塩-Cd 蒸留るつぼ (グラファイト)は、生廃棄物として、約13t/年発生するが、粉砕、焼 却するので、固化体はほとんど発生しないとし、本表には載せていない。</li> <li>②上記の廃棄物の他に、TRU 廃棄物としてハル、剪断プレナム、高β γ廃棄物として集合体 部材がある。</li> <li>③高レベル廃棄物の Cd 蒸留残渣はセメントと共に容器へ封入する。</li> <li>④TRU 廃棄物、高β γ廃棄物、低レベル廃棄物はセメントと共に容器へ封入する。</li> <li>⑤人工鉱物固化体充填キャニスター容量は150リットル、セメント封入ドラム缶容量は200リットル。</li> <li>⑥使用済CO2吸着剤の処分対応の固定法は、現段階では未定であるが、ドラム缶200リットルに 固定すると想定。</li> </ul>		

表	6.4.1	窒化物燃料リサイクルプラント	(50tHM/年)	の主要な廃棄物量
2	0.4.1		$(000000 \pm)$	ッエ女は虎米が里

表 6.4.2	窒化物燃料金属電解法の	50tHM/v プラン	トの主要機器仕様
---------	-------------	-------------	----------

設備	主要な機器	機器仕様(基数等)	備考
前処理	集合体解体機	1 基 (約 2h/集合体)	機械式
	ピンせん断機	1 基 (0.25 日/集合体)	機械式
	脱被覆処理装置	_	-
	電解精製槽	7基	4 日毎の電解精製サイクル運転
	(炉心燃料用)	(3陽極-3陰極/バッチ)	想定
	電解精製槽	2基	10 日毎の電解精製サイクル運転
再処理	(径ブランケット用)	(3陽極-3陰極/バッチ)	想定
(電解分離)	U窒化装置	4 基	Cd 溶解、窒化、塩-Cd 蒸留除去
		(60kgU/バッチ× 1 バッチ/日)	を1つの装置で行うものとする。
	山口山名穷化壮罴	6基	窒化、塩-Cd 蒸留除去を 1 つの
	0-Fu-MA至化表值	(6kgHM/バッチ× 1 バッチ/日)	装置で行うものとする。
	TDII漂示抽出哭	1基	
恒机理	INU 速九抽山船	(3 段抽出器・17h/バッチ)	
	ゼオライトカラム	1基	
		(3 カラム・19h/バッチ)	
	オフガス処理設備	一式	PSA 法による窒素回収処理。
その他	(N-15 回収装置等含む)	(窒素回収装置 0.6Nm³/hr)	
	Ar セル冷却/浄化設備	一式	PSA法によるArt加内浄化(酸素、 水分、窒素除去)処理。
備考	前処理工程に脱被覆処理装置を設置する場合は、1基必要となる。		

セル、建屋		容積(m <sup>3</sup> )	備考
	燃料受入・前処理セル	約 3, 200	
セル	電解分離セル	約 6, 400	
	再処理関係主要セル合計	約 9,600	
建屋	主建屋	約 30 万	建屋容積は、再処理、燃料 製造、廃棄物処理・貯蔵等。
	燃料貯蔵建屋	約8万	使用済燃料、新燃料の貯蔵
	合計 (主建屋·燃料貯蔵建屋)	約 38 万	

表 6.4.3 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)主要セル、建屋の容積

(注記) セルは内法、建屋は外法

表 6.4.4	窒化物燃料リ	サイクルプラン	トの経済性概略評価
---------	--------	---------	-----------

プラント規模		50tHM/年	200tHM/年	
リファレンスプラント		金属燃料金属電解法		
	リファレンスか	追加	窒化・陰極処理装置、窒素回収 装置など (+約24億円)	窒化·陰極処理装置、窒素回収 装置など (+約77億円)
建設費	らの追加/削除 の設備	削除	Na除去装置など (-約3億円)	Na除去装置など (-約5億円)
	リファレンスプラント (100%)からの増減率 (追加設備費)		+約2% (約21億円)	+約2.6% (約72億円)
	リファレンスか らの追加/削除	追加	濃縮窒素(N-15)補給 (約3.2億円/年 <sup>*</sup> )	濃縮窒素(N-15)補給 (約12.8億円/年*)
操業費	の 操業項目 削除		-	_
リファレンスプラント (100%)からの増減率 (追加操業費)		+約4%/年 (約3.2億円/年)	+約5.5%/年 (約12.8億円/年)	

\*補給濃縮窒素(N-15) 1000円/g (N-15濃縮度99.9%の窒素)と想定

主要	主要な技術	いきませ	技術的成立性
設備	土安な扠州	<b>武司安水</b>	(原理確認基礎データ、実績、開発状況等根拠)
		回収率	U、Pu、Np の窒化物の溶解挙動については基礎
		• U>99. 9%	試験にて実証している。Am、Cm 等を含む窒化物
		• U/TRU>99.8%	の溶解の回収技術は確認等が必要である。
		回収時間	ロシアの基礎試験では、窒化物燃料の電解処理
	HM 電解精製	・固体陰極 10kgU/20h 極	時間(約 600℃の条件)が金属燃料の場合より
		・Cd 陰極	早いデータがあり、試験等にて確認する必要が
		3.4kgU-TRU/10h 極	ある。(今回の設計は、金属燃料の電解精製相
			当の性能としている)
		①U 窒化処理	Uの窒化処理は、小型試験装置にて N₂ガスバブ
		N₂ガスバブリング方式	リング方式にて窒化日が得られることを実証し
		N₂ガス流量約 4L/min·kg	ている。
		(バブリング時間約 5hr)	また、Pu の窒化処理は、小型試験装置にて $N_2$
<b>五</b>	II II-TRIL O	U窒化装置処理量	ガスバブリング方式では窒化効率が悪く実用
The second	Storms of 窒化 Cd、塩等除 去	60kgHM(6 極分)/バッチ・日	化は難しいが、Cd 蒸留方式にて窒化 Pu が得ら
		②U-TRU(Pu-MA)窒化処理	れることを実証している。
			さらに、U-Pu-MA 等の窒化に必要な実規模の窒
		Cd 蒸留方式	素ガス量、窒化時間等のデータを取得し、最適
		U-Pu-MA 窒化装置処理量	な窒化方法 (UN、 $U_2N_3$ の窒化生成物の制御等)を
		6kgHM(1 極分)/バッチ・日	確認する必要がある。
			Cd、塩等の除去は、金属電解法の陰極処理技術
			と同じ技術が利用できる。
		窒素回収性能	多重 PSA 式窒素回収技術は、一般工業界では、
		製品窒素純度 99.99%	実績がある。本システムの設計は、机上検討で
	窒素回収	窒素回収率 90%以上	あるので、模擬ガス、実ガスを使用した窒素回
			収装置にて実証する必要がある。

### 表 6.4.5 主要な設備の技術的成立性の評価




図 6.4.2 窒化物燃料リサイクルプラントの再処理プロセスブロックフロー

				000000
	合計(1/y) 0.000E+0 0.0	0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 4.781E-0 1.061E+0	合計[L/y] 1.958E-0 4.794E-0 2.030E-0 1.495E-0 1.495E-0 0.000E+0	6.476E-0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 7.617E-0 3.418E-0
	[L/y] 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00	00E+00 00E+00 00E+00 37E-02 99E-02	(t/y) 66E-02 66E-04 99E-06 99E-06 52E-07 65E-10	24E-03 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00 00E+00
	000 000 000 000 000 000 000 000 000 00	000 0.00 000 0.00 01 1.93 00 4.29	VJ         RB           01         7.05           03         5.12           05         1.50           05         2.16           05         2.16           05         2.16           06         0.00	02 2.62 00 0.00 00 0.00 00 0.00 00 0.00 02 3.08 01 7.67
	Driver[t/ 0.000E+ 0.000E+ 0.000E+ 0.000E+ 5.592E- 0.000E+	0.000E+ 0.000E+ 4.587E- 1.018E+	Driver[t/ 1.253E + 4.281E 1.879E 1.491E 1.491E 0.000E ++	6.213E-( 0.000E+( 0.000E+( 0.000E+( 7.308E-( 2.650E-(
2.020E-02 1.466E-01 4.12E-02 3.142E-02 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 3.085E-02 6.178E+00	A Am	ALE ALE 名がス その他FP 合計	MA Am RE Cm RE	NM ALM ALE ALE ALE I I その他FP 合計
730E -03 228E -04 228E -04 2000E +00 000E +00 000E +00 000E +00 000E +00 149E -04 149E -04	6 数 ▼			
	1/PD	離	1.	
1.877 1.482 2.4724 2.4724 0.00000 0.0000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000000		1.2	ē.	
ALM ALM の他FP 合計		salt(FP		
MA 44				
		<del>7</del> 571-25	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	
00000000000000000000000000000000000000	Z精製	11(1/y) 27E-05	56E-05 56E-04 18E-04 32E-01 32E-01 77E-01 71E-01	55E-02 00E+00 32E-03 41E+00
000 000 000 000 000 000 000 000	salt salt Cod(U	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	-03 3.35 -05 1.10 -02 1.54
0.000E 0.000E 0.000E 0.000E 0.000E 0.000E 1.405E		salt RB[t/y 0.000E	7.718E- 5.824E- 3.306E- 3.190E- 0.000E- 1.530E- 8.391E-	1.359E- 0.000E- 4.830E- 5.713E-
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 2.655E+01 2.655E+01	U製品 建築工程 建設小	Driver[L/y] 3.627E-05	9.1000 9.4806-06 7.2736-04 2.3186-04 8.8436-01 0.0006+00 3.6246-01 1.9876-01	3.219E-02 0.000E+00 1.144E-03 1.484E+00
A L L L L L L L L L L L L L L L L L L L		」 》 》 》	A R B B B B B B B B B B B B B B B B B B	地口
AN AI AI AI		spent 2	MA	- ◆ ◆ ◆ ◆ ◆
	剪断工程			
2.030E-02 1.495E-01 2.476E-01 2.476E-01 2.071E-01 2.071E-01 3.355E-02 2.0718E-01 7.629E-01 7.629E-01	ZHX	各目[[//y] 0.000E+000	00000000000000000000000000000000000000	0.000E+00 4.718E-01 5.234E-06 4.718E-01
98 - 03 96 - 03 97 - 03 96 - 03 96 - 03 97 - 03 96 - 03 97 - 03 96 - 03 97	*	00E+00	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0E+00 2E-02 2E-02 2E-02
002 1.50 01 3.81 01 2.62 01 2.62 01 1.53 01 1.91 01 1.49 01 1.49		V] RB		00 0.00 01 1.91 06 2.12 01 1.91
1.879E 1.491E 1.491E 9.075E 6.213E 5.215E 1.987E 1.987E 4.527E 4.527E 3.532E +		Driver[t/ 0.000E+	0.000E+ 0.000E+ 0.000E+ 0.000E+ 0.000E+ 0.000E+	0.000E+ 4.527E- 5.022E- 4.527E-
Am Am ALM ALM ALE 合計 合計		。 業 D d	NP Cm NM ALM ALE	- 6ガス の他印 合計
M M	R	off ga	W	₩# N+
	斎懋料庚			
	使用			

図 6.4.3 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の概略物質収支図

50



図 6.4.4 窒化物燃料リサイクルプラントの廃棄物処理フロー図



図 6.4.5 電解精製槽(3 電極対/基)の概略外形図



図 6.4.6 窒化装置の概略外形図



図 6.4.7 気相吸着法 (PSA) による窒素回収の原理フロー図

窒素回収装置の概略仕様			
形式 PSA方式			
処理量	約0.6Nm <sup>3</sup> /h		
	窒素回収率約90%		
性能	<sup>15</sup> N濃縮度 99.9%		
主要材質	ステンレス鋼		
運転温度	~60°C		
運転圧力	~0.5MPa		



図 6.4.8 窒素回収装置の概略外形図



図 6.4.9 乾式燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の窒素バランス



図 6.4.10 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の全体配置イメージ図



図 6.4.11 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(地下1階)



図 6.4.12 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(1 階)



図 6.4.13 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(2階)



図 6.4.14 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(3階)



図 6.4.15 窒化物燃料リサイクルプラント(50tHM/年)の建屋配置図(屋上)

6.5 多様なサイクルシナリオへの対応

6.5.1 増殖比の効果

6.3.1 節で述べたように、酸化物燃料の金属電解法では、RB燃料を前処理工程で熱 脱被覆した後にバイパス処理する。Li還元以降の工程は、IC+OC+AB燃料の受入量に 合わせた処理能力で設計されている。増殖比を1.20→1.05に変更することは、受入燃 料をIC+OC+AB+RB燃料→IC+OC+AB燃料に変更することに相当する。したがって、 増殖比を変更しても、Li還元以降の工程の処理能力に変更は無く、160kgHM/d であ る。

増殖比の変更により、前処理工程の必要処理量は250kgHM/d→160kgHM/dに減少 する。主要機器の「集合体解体機」と「燃料ピンせん断機」は各々1基設置されてお り、既に十分な処理能力を有している。したがって、これらの機器の基数は変更しな い。「酸化還元炉」は3→2基に変更できると思われるが、小型の機器であり施設設計 に与える影響は小さい。他に、新燃料受入貯蔵庫の容積、バイパス燃料の移送装置の 削除などが考えられるが、いずれも施設設計に与える影響は大きくない。

以上より、増殖比を1.20→1.05に変更することによる施設設計への影響は小さく、 現行設計の再処理施設の処理能力が50HMt/y→32HMt/yになると見なせる。ただし、 使用済燃料の平均燃焼度が高くなるため、両者の燃料サイクル費はほぼ同等となる。

6.5.2 軽水炉から高速炉への移行期における施設のあり方

FBR導入時に、FBR再処理施設で軽水炉MOX燃料を平行して受入れるシナリオも 考えられる。ここでは、PWRで照射した高燃焼度MOX燃料(表 6.5.1参照)を、現 行のシステムで再処理する場合を評価対象とした。

軽水炉は1領域MOX燃料炉心であるから、ブランケットは存在しない。使用済MOX 燃料は、約6%のFPを含むため、バイパス処理することができない。よって、前節と 同じ理由で、使用済燃料32tHM/yを再処理システムが受入れる量と考えて評価する。 使用済燃料中のPu濃度は3.7wt%であり、FBR炉心およびAB燃料の平均値(約 13wt%)と比較すると、1/3程度である。したがって、FBR燃料を受入れられる施設 であれば、臨界安全性、核拡散抵抗性などに関しては全く問題ない。

(1) 物質収支

上記の軽水炉MOX燃料を160kgHM/dで受入れた場合、HM電解精製槽内のHM濃度が平衡に達した後LiCl-KCl溶融塩中のPu/(U+Pu)は約0.75となる。この値が0.6以下の条件ではPu回収量に限界があることが報告されており、0.75程度に設定することが望ましい。Pu/(U+Pu)=0.20の条件でも、Puを十分に回収できると仮定して計算した物資収支を図 6.5.1に示す。使用済燃料中のFPは、前処理工程で約30wt%、Li還元工程で約15wt%、HM電解精製工程約30wt%、廃塩処理工程で約20%が、分離回収される。

この物質収支計算結果に基づく、再処理製品中のHMおよびFP含有量を表 6.5.2に

示す。固体陰極では126kgHM/dのUインゴットが回収される。この回収物のFP含有率が0%と見なせるのは、FBR燃料を受入れた場合と同じである。一方、Cd陰極では35kgHM/dのU-Pu-MAインゴットが回収される。HMの回収量としては、FBR燃料を受入れた場合と同等であるが、製品中のPu富化度が63→18%に減少している。HMの回収率は、FBR燃料を受入れた場合と同等以上であり、製品中のFP含有率は約0.2wt%である。1年間に製造できる再処理製品中のU、Pu、MA量を表 6.5.3に示す。Puの年間製造量は1.26t/yであり、FBR燃料を受入れた場合の製造量4.7t/yに比べると1/4程度である。

製品中のPu富化度に関しては、以下のようにHM電解精製槽に装荷する電極数を 「運転モードA」から「運転モードB」などに変更することにより調整可能である。 この運転モード変更により、HM電解精製槽中からCd陰極を用いてU-Pu-MAインゴ ットを回収する際のPu/(U+Pu)比を高くできるため、Pu回収速度上昇と回収物中の Pu濃度上昇が期待できる。

運転モーFA				
<u>1日目</u>	2日目	3日目	4日目	5日目
固体陰極:3極	固体陰極:3極	固体陰極:3極	固体陰極:3極	固体陰極:3極 ••••
Cd陰極 :1極	Cd陰極 : 1極	Cd陰極 : 1極	Cd陰極 : 1極	Cd陰極 : 1極
運転モードB		₽		
1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
固体陰極:4極	固体陰極:4極	固体陰極:4極	固体陰極:3極	固体陰極:4極
Cd陰極 : 0極	Cd陰極 : 0極	Cd陰極 :0極	Cd陰極 :1極	Cd陰極 :0極

(2) 廃棄物量

いまた いう

軽水炉MOX燃料を受入れた場合には、処理量が32t/yとなるため直接比較すること はできないが、使用済燃料中のFP濃度が低いため廃棄物発生量は減少すると言える。

物質収支計算から得られるプロセス廃棄物量を、表 6.5.4に示す。使用済燃料中の 低FP濃度に起因するゼオライトカラムのFP吸着量減少のため、人工鉱物固化体廃棄 物が110→77本に減少する(最適運転条件を検討すれば更に減少する可能性あり)。 陽極容器上に蓄積するNMも2/3程度に減少するが、同時に処分する陽極容器の重量が 重いため、全体としての減少量は僅かである。

FBR燃料と軽水炉MOX燃料の集合体構造の相違に起因して、集合体部材の廃棄物 量は変化する。軽水炉MOX燃料のプレナム長は、FBR燃料に比較して短いため、HM 重量当たりの集合体部材量が少ない。その分だけ、TRU廃棄物および高βγ廃棄物が 減少すると考えられる。 (3) 機器設計

前処理工程では、燃料集合体、燃料棒などの仕様が異なるため、軽水炉MOX燃料 専用の集合体解体機、燃料ピン切断機が必要となる。他の工程で、新らたに必要とな る主要機器は存在しないと考えられる。

ただし、運転モードを変更する場合は、固体陰極、Cd陰極、固体陰極処理装置、 Cd陰極処理装置などの基数を調整する必要がある。

以上より、本再処理システムは、前処理工程に関する設備追加により、32tHM/yの軽水炉MOX燃料を受入れ可能であり、理想的には1.26t/yの Puを製造できる。ただし、運転モードを変更しなければ、Pu回収速度が不十分であることが予想され、製品中のPu濃度も最大で約18%に留まる。

6.5.3 FP 回収の検討

酸化物燃料の金属電解法に関して、以下の4元素について回収方法を検討した。現 行の再処理システムにおける4元素の移行率を表 6.5.5に示す。

(1) I

ヨウ素は現行の軽水炉使用済み燃料の湿式再処理においては、ヨウ化銀に吸着して 回収される。これをTRU廃棄物として処分すると、その高い浸出率のため、高レベル ガラス固化体中に含有される他の長半減期FPに比べ環境負荷が大きくなる。そこで、 これを回収し核変換することで超長期間の環境への影響を低減できる。一方で、ヨウ 素廃棄物を高レベル廃棄物並に安定な化学形態に処理してから処分することができ れば、ヨウ素の浸出速度を低下させ、環境への影響を低減することができる。すなわ ちヨウ素に関しては、核変換技術開発とヨウ素廃棄物開発の2つのアプローチがある。 核変換技術に関しては、ヨウ素の核変換速度が小さいこと、核変換に適したヨウ素タ ーゲットの選定、等が大きな課題となっている。

現行の金属電解法再処理システムでは前処理工程において熱脱被覆処理を実施するため、ヨウ素の70%はオフガス系に移行し、ヨウ素吸着塔で回収される。残りの30%はLiCl中に溶解するが、ゼオライトに吸着吸蔵された後、フリットガラス等を添加されて人工鉱物固化体(高レベル廃棄物)となる。

人工鉱物固化体を高レベル廃棄物として深地層処分する場合、ヨウ素の浸出速度を 低く抑制でき、高効率で核変換を目指すのと同等以上に、環境負荷を低減できること が期待される(ヨウ素の浸出率に関してはデータの拡充が必要)。ヨウ素吸着塔で回 収したヨウ素も人工鉱物固化体に混入させることで高レベル廃棄物として処分する ことができる。したがって、金属電解法においては、ヨウ素を含有する人工鉱物固化 体の開発についても並行して進める必要がある。。

これは金属燃料を処理する場合にも同様なことが言える。

(2) Tc

現行の金属電解法再処理システムでは前処理工程において熱脱被覆処理を実施す

るため、Tcの70%はオフガス系に移行し、FP吸着塔で他の揮発性FPと同時に回収される。残りの30%は陽極容器中に他の貴金属と同時に蓄積し、セメント固化されてTRU廃棄物となる。

オフガス中のTcについては、Tc吸着等を設けることにより、単離できる可能性がある。また、陽極容器中のTcについては、酸化物として揮発させ、トラップで回収することにより、単離できる可能性がある。

金属燃料を処理する場合には、熱脱被覆工程がないためにTcはほとんど陽極容器あるいは電解槽底に蓄積する。それ以外は酸化物燃料の処理と同様となる。

(3) Cs

現行の金属電解法再処理システムでは前処理工程において熱脱被覆処理を実施するため、Csの70%はオフガス系に移行し、FP吸着塔で他の揮発性FPと同時に回収される。残りの30%はLiCl中に溶解するが、ゼオライトに吸着吸蔵された後、フリットガラス等を添加されて人工鉱物固化体(高レベル廃棄物)となる。

オフガス中のCsについては、Cs吸着等を設けることにより、単離できる可能性が ある。また、LiCl中のCsについては、多段ゼオライトをイオン交換材料として用いる ことにより、単離できる可能性がある。

金属燃料を処理する場合には、熱脱被覆工程やLi還元工程の代わりにボンドNa除 去工程においてCsの70%が除去される。残りの30%は電解槽の塩浴に溶解し、塩廃棄 物処理工程で回収され人工鉱物固化体に含有される。ボンドNa廃棄物も人工鉱物固 化体に含有される。Csの単離に関しては上と同様となる。

(4) Sr

現行の金属電解法再処理システムでは、Srの1%はLi還元製品に随伴して電解槽に 移行するが、残りの99%はLiCl中に溶解する。このSrは、ゼオライトに吸着吸蔵され た後、フリットガラス等を添加されて人工鉱物固化体(高レベル廃棄物)となる。電 解槽に移行したSrも人工鉱物固化される。

多段ゼオライトをイオン交換材料として用いることにより、単離できる可能性がある(SrはCsの前に回収される)。

金属燃料を処理する場合には、Srは全て電解槽塩中に溶出され、塩廃棄物処理工程 で回収され、人工鉱物固化体に含有される。多段ゼオライトを用いることで単離でき る可能性がある。

6.5.4 多面的評価向炉心・燃料仕様における再処理システム評価

(1) 酸化物燃料金属電解法

多面的評価向炉心(資源重視型炉心)で照射した使用済燃料を受入燃料として再処 理した場合について評価し、本検討書で構築した「酸化物燃料金属電解法を用いた再 処理システム(現行システム)」と比較検討した。 (i) 物質収支

多面的評価向炉心(資源重視型炉心)で照射した使用済燃料を受入燃料として計算 した物資収支を図 6.5.2に示す。現行システムと比較して、使用済燃料(IC+OC+AB 燃料)中のU重量が僅かに大きいため、固体陰極1極当たりのU回収量を8.5→ 8.6kgHM/d/極に変更したが、他の運転条件は現行システムと同様として物質収支を 計算した。計算結果はHM電解精製槽中のHM濃度、FP濃度、U/Pu比など、システム 設計に重要な影響を与えるパラメータに関しては、現行システムとほとんどの差がな い。

使用済燃料および再処理製品中のHMおよびFP含有量を表 6.5.6に示す。固体陰極 では125.1kgHM/dのUインゴットが、Cd陰極では34.2kgHM/dのU-Pu-MAインゴッ トが回収される。U-Pu-MA製品中のPu濃度が62%であり、現行システムとほぼ同等 であり、UおよびTRU回収率、FP混入率ともに設計要求を満たしている。

1年間に製造できる再処理製品中のU、Pu、MA量を表 6.5.7に示す。Puの年間製造量は4.65t/yであり、現行システムの製造量4.70t/yに比べて遜色ない量である。

(ii) 廃棄物量

物質収支計算から得られるプロセス廃棄物量を、表 6.5.8に示す。使用済燃料 (IC+OC+AB燃料)中のFP濃度が9.0→9.4wt%に上昇するため、ゼオライトカラム で吸着するFP量が増加するため、人工物固化体(高レベル廃棄物)が110→115本に 増加する。

集合体部材の質量は同等と考えられるので、他の廃棄物量に大きな差はないと予想 される。

(iii) 機器設計

各工程で求められる処理能力は、現行システムと同等であり、新たに機器設計を検 討する必要はない。

多面的評価向炉心で照射した使用済燃料を受入燃料として再処理システムを構築 しても、現行システムとほとんど差はないことが判明した。ただし、高レベル廃棄物 量は僅かに増加することが、予想される。

(2) 金属燃料金属電解法

多面的評価向炉心(資源重視型)で照射した使用済燃料を受入燃料として再処理した場合について評価し、本検討書で構築した「金属燃料金属電解法を用いた再処理シ ステム(現行システム)」と比較検討した。

(i) 資源重視型(増殖率:1.17)

資源重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料の平均燃焼度は72MWd/kgUである。このため、同一発電量で規格化すると、1年間に約46tHMの使用済燃料を処理する必要がある。ただし、現行の金属燃料炉心からの使用済燃料に比べてPu含有率

が低いため、炉心燃料中のPu含有量を一致させることにより、再処理プラントの年間 処理量を50tHM/yに設定した。現行および資源重視型の金属燃料炉心からの使用済燃 料中のU、Pu、MA、FP含有量を表 6.5.9および表 6.5.10に示す。炉心燃料に関しては HM、Pu量に大差はないが、径ブランケット燃料に関してはHM量が約2倍に増加して いる。よって、電解精製槽の基数を以下のように変更する。

炉心燃料用 :4基→4基

ブランケット燃料用:1基→2基

(a) 物質収支

多面的評価向炉心(資源重視型)で照射した使用済燃料を、50tHM/y受入れるとして計算した資源重視型金属電解法プラントの物質収支計算結果を図 6.5.3に示す。

炉心燃料(IC+OC+AB燃料)の再処理に関しては、電解精製槽1基当たりのHM受入量が約15%増加している。よって、HM電解精製槽の溶融塩中Pu濃度を、現行再処理システムと同レベルに維持するため、固体陰極1極当たりのU回収量を9.2→11kgHM/d/極に変更した。また、電解精製槽1基当たりのNa受入量が約40%増加している。よって、HM電解精製槽の溶融塩中NaCl濃度を、現行再処理システムと同レベルに維持するため、溶融塩廃棄率を14.5→20%に変更した。電解精製槽の溶融塩中のHM濃度、U/Pu比など、他の運転条件は現行システムと同様として物質収支を計算した。固体陰極では132kgHM/dのUインゴットが、Cd陰極では27kgHM/dのU-Pu-MAインゴットが回収される。

ブランケット燃料(RB燃料)の再処理に関しては、電解精製槽1基当たりのHM受 入量が現行再処理システムとほぼ等しい。受入燃料中のPuおよびFP含有量は、各々 約35および45%減少しているが、Na受入量が同等であるため、塩全量廃棄までの期 間は現行システムと等しい7年とした。また、電解精製槽の溶融塩中Pu濃度を現行再 処理システムと同レベルに維持するため、固体陰極1極当たりのU回収量を11.45→ 12kgHM/d/極に変更した他は、電解精製槽の溶融塩中のHM濃度、U/Pu比などの運 転条件は現行システムと同様として物質収支を計算した。固体陰極では84kgHM/dの Uインゴットが、Cd陰極では3kgHM/dのU-Pu-MAインゴットが回収される。

1年間に製造できる再処理製品中のU、Pu、MA量を表 6.5.12に示す。Puの年間製造 量は3.96t/yであり、回収率は99.9%である。また、U-Pu-MA製品中のPu濃度は69% であり、現行システムとほぼ同等であり、UおよびTRU回収率、FP混入率ともに設 計要求を満たしている。

(b) 廃棄物量

物質収支計算から計算される人工鉱物固化体の発生量を、表 6.5.13に示す。使用済 燃料中のFP含有量および塩廃棄量(=電解精製槽内塩量×塩移送頻度×塩移送率× 塩廃棄率)の上昇により、ゼオライトカラムで吸着する必要があるFPおよびNa塩化 物の量が増加するため、人工鉱物固化体(高レベル廃棄物)が139→209本に増加す る。

- (c) 機器設計
  - ・前処理設備(集合体解体機、せん断装置、Na 蒸留装置等) 主要機器は 50tHM/y 以上の能力を有しており、基数および能力の変更は必要 ない。
  - ・電解精製設備(電解精製槽、陽極アセンブリ組立装置、LiCl-KCl供給槽等) 電解精製槽を5→6基に増加する必要がある。これに伴いLiCl-KCl供給槽の 容量を増加させると同時に、電極装填装置等のマテハン機器を増強する必要 がある。
  - ・塩処理設備(パイロコンタクタ、再酸化槽、ゼオライトカラム、ドロス塩化 槽等)

塩処理量が約15%増加するため、主要機器の処理能力を約15%増強する必要がある。

•陰極処理設備(固体陰極処理装置、Cd 陰極処理装置、固体陰極用析出物回収 組立装置等)

固体陰極処理装置の能力を約40%、Cd 陰極処理装置の能力を約20%増強す る必要がある。これに伴いるつぼ移送装置等のマテハン機器を増強する必要 がある。

- ・試薬調整設備、廃棄物処理設備、廃棄物貯蔵設備、分析設備、保守設備、計 装制御設備、ユーティリティ設備 個々の評価は困難であるが、約20%の能力増強が要求されることが見込まれ る。
- (d) 経済性評価

設備費は225億円の上昇となる。なお、内訳は以下のとおりである。

- ・前処理設備(集合体解体機、せん断装置、Na 蒸留装置等) ±0円
- ・電解精製設備(電解精製槽、陽極アセンブリ組立装置、LiCl-KCl 供給槽等) +29 億円(20%)
- ・塩処理設備(パイロコンタクタ、再酸化槽、ゼオライトカラム、ドロス塩化 槽等)
  - +13 億円(15%)
- •陰極処理設備(固体陰極処理装置、Cd 陰極処理装置、固体陰極用析出物回収 組立装置等)
  - +28億円(30%)
- ・試薬調整設備、廃棄物処理設備、廃棄物貯蔵設備、分析設備、保守設備、計 装制御設備、ユーティリティ設備
  - +155 億円(20%)

受入れる使用済燃料中のHM量が現行システムに比べて約30%増加するため、これ に比例して消耗品費が30%増加すると仮定する。

受入れる使用済燃料中のHM量が現行システムに比べて約30%増加するため、0.7乗 則を適応して建屋体積が20%増加すると仮定する。

これらの変更を考慮すると、再処理単価は38.7万円/kgHMとなり、現行システムの 43.7万円/kgHMよりも約10%安い。ただし、使用済燃料の平均燃焼度が低いため、燃 料サイクル費は0.52円/kWhとなり、現行システムの0.47円/kWhよりも約20%高くな る。

(ii) 経済性重視型(増殖率:1.04)

経済性重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料の平均燃焼度は 135MWd/kgUである(付表 1.11参照)。このため、同一発電量で規格化すると、1年 間に約24tHMの使用済燃料を処理する必要がある。ただし、現行の金属燃料炉心から の使用済燃料と比較してPu含有率が高いため、電解精製槽5基で炉心燃料を処理する として、1基当たりのPu処理量を一致させることにより、再処理プラントの年間処理 量を38tHM/yに設定した。経済性重視型の金属燃料炉心からの使用済燃料中のU、Pu、 MA、 FP含有量を表 6.5.11に示す。

炉心燃料用 :4基→5基 ブランケット燃料用:1基→0基

(a) 物質収支

多面的評価向炉心(経済性重視型)で照射した使用済燃料を、38tHM/y受入れると して計算した経済性重視型金属電解法プラントの物資収支計算結果を図 6.5.4に示す。 電解精製槽1基当たりのHM受入量は同等であるから、固体陰極1極当たりのU回収 量は9.2kgHM/d/極とした。電解精製槽1基当たりのNa受入量は約10%、FP受入量は 約25%増加する。よって、HM電解精製槽の溶融塩中NaClおよびFP濃度を、現行再 処理システムと同レベルに維持するため、4日に1回実施する廃塩処理工程への塩移送 率を3.3→4.4%、塩廃棄率を14.5→11%に変更した。電解精製槽の溶融塩中のHM濃 度、U/Pu比など、他の運転条件は現行システムと同様として計算した物質収支は、 固体陰極で138kgHM/dのUインゴット、Cd陰極で34kgHM/dのU-Pu-MAインゴット が回収されることを示している。

1年間に製造できる再処理製品中のU、Pu、MA量を表 6.5.14に示す。Puの年間製造量は4.5t/yであり、回収率は99.9%である。また、U-Pu-MA製品中のPu濃度は、68%であり、現行システムとほぼ同等であり、UおよびTRU回収率、FP混入率ともに設計要求を満たしている。

(b) 廃棄物量

物質収支計算から計算される人工鉱物固化体の発生量を、表 6.5.13に示す。使用済 燃料中のFP含有量および塩廃棄量の上昇により、ゼオライトカラムで吸着する必要 があるFPおよびNa塩化物の量が増加するため、人工鉱物固化体(高レベル廃棄物) が139→178本に増加する。

(c) 機器設計

- ・前処理設備(集合体解体機、せん断装置、Na 蒸留装置等) 主要機器に関して、基数および能力の変更は必要ない。
- ・電解精製設備(電解精製槽、陽極アセンブリ組立装置、LiCl-KCl供給槽等) 炉心燃料用とブランケット燃料用の電解精製槽に機器設計の差は無いため、 見直す必要はない。ほとんどの主要機器はは現行再処理システムと同等であ るが、LiCl-KCl供給槽等の容量は約25%増加する必要がある。

- ・塩処理設備(パイロコンタクタ、再酸化槽、ゼオライトカラム、ドロス塩化 槽等)
   塩処理量が約30%増加するため、主要機器の処理能力を約30%増強する必要 がある。
- ・陰極処理設備(固体陰極処理装置、Cd 陰極処理装置、固体陰極用析出物回収 組立装置等)
   固体陰極処理装置の能力を約 10%削減できるが、Cd 陰極処理装置の能力を 約 20%増強する必要がある。これに伴いるつぼ移送装置等のマテハン機器を
- 増強する必要がある。 ・試薬調整設備、廃棄物処理設備、廃棄物貯蔵設備、分析設備、保守設備、計 装制御設備、ユーティリティ設備

能力増強はほとんど必要ないと見込まれる。

- (d) 経済性評価
- 設備費は、35億円の上昇となる。なお、内訳は以下のとおりである。
  - ・前処理設備(集合体解体機、せん断装置、Na 蒸留装置等) ±0円
  - ・電解精製設備(電解精製槽、陽極アセンブリ組立装置、LiCl-KCl供給槽等) ±0円
  - ・塩処理設備(パイロコンタクタ、再酸化槽、ゼオライトカラム、ドロス塩化 槽等)

+26 億円(30%)

•陰極処理設備(固体陰極処理装置、Cd 陰極処理装置、固体陰極用析出物回収 組立装置等)

+9億円(10%)

・試薬調整設備、廃棄物処理設備、廃棄物貯蔵設備、分析設備、保守設備、計 装制御設備、ユーティリティ設備

±0円

受入れる使用済燃料中のHM量が現行システムと同等であるため、消耗品費は現行 再処理システムと同等と推定される。

受入れる使用済燃料中のHM量が現行システムと同等であるため、建屋体積は現行 再処理システムと同等と推定される。

これらの変更に基づき再処理単価を算出すると44.6万円/kgHMとなり、現行システムの43.7万円/kgHMよりも約2%高い。ただし、使用済燃料の平均燃焼度が高いため、 燃料サイクル費は0.31円/kWhとなり、現行システムの0.43円/kWhよりも約30%安い。

以上38tHM/yの処理能力を持つ再処理プラントについて検討したが、50tHM/yの処理能力を持つ再処理プラントについて試算すると、再処理単価が39.4万円/kgHM、燃料サイクル費が0.27円/kWhとなる。

Pu 富化度	7.2 %
集合体平均燃焼度	60 MWd/kgM
冷却期間	4 年

# 表 6.5.1 PWR 高燃焼度 MOX 燃料仕様

### 表 6.5.2 使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量

	<b>は田这勝</b> 約	再処理製品		再処理製品	
	使用消除种	固体陰極	Cd陰極	回収率	混入率
	( kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(%)	(%)
U*	152.572	125.858	26.785	99.5	-
No	0.029	0.000	0.029	99.3	-
Pu	6.354	0.000	6.307	99.3	-
Am	0.816	0.000	0.804	98.5	-
Gm	0.229	0.000	0.225	98.5	-
H-3	0.000	0.000	0.000	_	0.000
Kr	0.057	0.000	0.000	-	0.000
Xe	1.555	0.000	0.000	-	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	-	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	-	0.000
Te	0.166	0.000	0.000	_	0.000
Br	0.000	0.000	0.000	-	0.000
Ι	0.091	0.000	0.000	-	0.000
Mo	0.930	0.000	0.000	-	0.000
Tc	0.221	0.000	0.000	-	0.000
Ru	0.852	0.000	0.000	-	0.000
Rh	0.184	0.000	0.000	-	0.000
Pd	0.884	0.000	0.000	-	0.000
Ag	0.051	0.000	0.000	-	0.000
Cd	0.084	0.000	0.000	-	0.000
Sn	0.011	0.000	0.000	-	0.000
Zr	0.735	0.000	0.000	-	0.000
Rb	0.053	0.000	0.000	-	0.000
Gs	0.853	0.000	0.000	-	0.000
Sr	0.119	0.000	0.000	-	0.000
Ba	0.472	0.000	0.000	-	0.000
Y	0.065	0.000	0.000	-	0.000
La	0.343	0.000	0.015	-	0.009
Ce	0.642	0.000	0.092	-	0.057
Pr	0.310	0.000	0.045	-	0.028
Nd	1.060	0.000	0.152	-	0.095
Pm	0.010	0.000	0.001	-	0.001
Sm	0.249	0.000	0.000	-	0.000
Eu	0.065	0.000	0.000	-	0.000
Gd	0.048	0.000	0.002	-	0.001
HRE	0.000	0.000	0.000	-	0.000

\*: HM電解精製槽のHM濃度を一定にするために、毎日微量のUを追加(図 6.5.1 参照)

	固体陰極	Cd 陰極	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)
U	25.17	5.36	30.36
Pu	0.00	1.26	1.26
MA	0.00	0.21	0.21
FP	0.00	0.06	0.06

#### 表 6.5.3 軽水炉 MOX 燃料を再処理したときの再処理製品の年間製造量

#### 表 6.5.4 軽水炉 MOX 燃料を再処理したときのプロセス廃棄物量

	区分	FBR 燃料	軽水炉 MOX 燃料
人工鉱物固化体	高レベル廃棄物	110本(キャニスタ)	77本(キャニスタ)
陽極容器+NM	TRU 廃棄物	11 本(ドラム)	僅かに減少
ハル等	TRU 廃棄物	27 本(ドラム)	大幅に減少
集合体ラッパ管	高 $β$ γ廃棄物	158本(ドラム)	大幅に減少

# 表 6.5.5 現行の再処理システム(酸化物燃料の金属電解法)による I,Cs,Tc,Sr の移行率

	オフガス	TRU 廃棄物	高レベル廃棄物	製品
Ι	70 %	0 %	30 %	0 %
Тс	70 %	30 %	0 %	0 %
Cs	70 %	0 %	30 %	0 %
Sr	0 %	0 %	99 %	1 %

	使用済	燃料		再処	理製品	バイパス		再処理+バン	イパス処理
	炉心燃料	RB燃料		固体陰極	Cd陰極	処理製品		回収率	混入率
	(kg/d)	(kg/d)		( kg/d)	(kg/d)	( kg/d)		(%)	(%)
U*	136.463	73.305		125.130	11.283	72.939		99.5	-
Np	0.076	0.002		0.000	0.076	0.002		99.3	-
Pu	21.892	1.532		0.000	21.730	1.525		99.3	-
Am	0.810	0.000		0.000	0.798	0.000		98.5	-
Gm	0.266	0.000		0.000	0.262	0.000		98.5	-
H+3	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Kr	0.108	0.003		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Xe	1.998	0.032		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Sb	0.021	0.001		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Se	0.018	0.000		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Te	0.284	0.006		0.000	0.000	0.002		-	0.001
Br	0.006	0.000		0.000	0.000	0.000		-	0.000
Ι	0.153	0.003		0.000	0.000	0.001		-	0.000
Mo	1.402	0.024		0.000	0.000	0.024		-	0.010
Tc	0.345	0.006		0.000	0.000	0.002		-	0.001
Ru	1.282	0.019		0.000	0.000	0.006		-	0.002
Rh	0.379	0.006		0.000	0.000	0.006		-	0.003
Pd	1.108	0.011		0.000	0.000	0.011		-	0.005
Ag	0.102	0.001		0.000	0.000	0.001		-	0.000
Cd	0.098	0.002		0.000	0.000	0.002		-	0.001
Sn	0.086	0.003		0.000	0.000	0.003		-	0.001
Zr	1.158	0.023		0.000	0.000	0.023		-	0.010
Rb	0.095	0.002		0.000	0.000	0.001		-	0.000
Cs	1.610	0.025		0.000	0.000	0.008		-	0.003
Sr	0.201	0.005		0.000	0.000	0.005		-	0.002
Ba	0.704	0.010		0.000	0.000	0.010		-	0.004
Y	0.113	0.003		0.000	0.000	0.003		-	0.001
La	0.512	0.009		0.000	0.026	0.009		-	0.015
Ce	0.926	0.015		0.000	0.152	0.015		-	0.071
Pr	0.478	0.008		0.000	0.078	0.008		-	0.037
Nd	2.807	0.029		0.000	0.461	0.029		-	0.209
Pm	0.025	0.001		0.000	0.004	0.001		-	0.002
Sm	0.493	0.008		0.000	0.000	0.008		-	0.003
Eu	0.049	0.001		0.000	0.000	0.001		-	0.000
Gd	0.057	0.000		0.000	0.003	0.000		-	0.001
HRE	0.007	0.000		0.000	0.000	0.000		-	0.000
*	:HM電解	器製槽のH	IM濃厚	まを一定に <sup>-</sup>	するために	、毎日微量	のUを	:追加(図(	6.5.2 参照)

### 表 6.5.6 使用済燃料と再処理製品中の HM および FP 含有量

	U製品	U-Pu-MA 製品	バイパス処理	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)	(t/y)
U	25.03	2.26	14.59	41.87
Pu	0.00	4.35	0.30	4.65
MA	0.00	0.23	0.00	0.23
FP	0.00	0.14	0.04	0.18

# 表 6.5.7 再処理製品の年間製造量

### 表 6.5.8 多面的評価向炉心からの使用済燃料を再処理したときのプロセス廃棄物量

	区分	現行炉心	多面的評価向炉心
人工鉱物固化体	高レベル廃棄物	110本(キャニスタ)	115本(キャニスタ)
陽極容器+NM	TRU 廃棄物	11 本(ドラム)	現行炉心と同等
ハル等	TRU 廃棄物	27 本(ドラム)	現行炉心と同等
集合体ラッパ管	高 $β$ γ廃棄物	158本(ドラム)	現行炉心と同等

	炉心燃料(t/y)	ブランケット燃料(t/y)	全燃料(t/y)
	装荷燃料→取出燃料	装荷燃料→取出燃料	装荷燃料→取出燃料
U	$26.6 \rightarrow 22.6$	8.2  ightarrow 7.8	$34.8 \rightarrow 30.4$
Pu	$3.1 \rightarrow 3.5$	0.0  ightarrow 0.3	$3.1 \rightarrow 3.8$
MA	$0.1 \rightarrow 0.1$	0.0  ightarrow 0.0	$0.1 \rightarrow 0.1$
FP	$0.2 \rightarrow 0.2$	$0.0 \rightarrow 0.0$	$0.2 \rightarrow 0.2$

### 表 6.5.9 現行の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および FP 含有量(38t/y)

#### 表 6.5.10 資源重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および FP 含有量(50t/y)

	炉心燃料(t/y)	ブランケット燃料(t/y)	全燃料(t/y)
	装荷燃料→取出燃料	装荷燃料→取出燃料	装荷燃料→取出燃料
U	$29.9 \rightarrow 26.2$	$16.6 \rightarrow 16.1$	$46.5 \rightarrow 42.3$
Pu	$3.4 \rightarrow 3.5$	$0.0 \rightarrow 0.4$	$3.4 \rightarrow 4.0$
MA	$0.1 \rightarrow 0.1$	$0.0 \rightarrow 0.0$	$0.1 \rightarrow 0.1$
FP	$0.4 \rightarrow 0.4$	$0.1 \rightarrow 0.1$	$0.4 \rightarrow 0.4$

### 表 6.5.11 経済重視型の金属燃料炉心から発生する使用済燃料中の HM および FP 含有量(38t/y)

	炉心燃料(t/y) 装荷燃料→取出燃料	ブランケット燃料(t/y) 装荷燃料→取出燃料	全燃料(t/y) 装荷燃料→取出燃料
U	$33.6 \rightarrow 28.0$	-	$33.6 \rightarrow 28.0$
Pu	$4.3 \rightarrow 4.5$	-	$4.3 \rightarrow 4.5$
MA	0.1  ightarrow 0.2	-	$0.1 \rightarrow 0.2$
FP	0.5  ightarrow 0.5	-	0.5  ightarrow 0.5

	U製品	U-Pu-MA製品	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)
U	41.47	1.65	43.12
Pu	0.00	3.96	3.96
Np	0.00	0.01	0.01
Am+Cm	0.00	0.10	0.10
アルカリ金属FP(Rb,Cs)	0.00	0.00	0.00
アルカリ土類FP(Sr,Ba,Eu,Sm)	0.00	0.00	0.00
Y	0.00	0.00	0.00
希土類FP(Ce,Pr,Nd,Pm)	0.00	0.14	0.14
希土類FP(La,Gd)	0.00	0.01	0.01
貴金属FP(Mo,Tc,Ru,Rh,Pd,Ag,Cd,Sn)	0.00	0.00	0.00
ハロゲンFP(I,Br)	0.00	0.00	0.00
カルコゲンFP(Se,Sb,Te)	0.00	0.00	0.00
希ガスFP(Kr,Xe)	0.00	0.00	0.00
Zr	3.55	0.48	4.03

## 表 6.5.12 再処理製品中の HM および FP 含有量(資源重視型)

# 表 6.5.13 人工鉱物固化体発生量の比較

	人工鉱物固化体(150Lキャニスタ)	
現行炉心	139本(124本*)	
資源重視型炉心	209 本	
経済重視型炉心	178 本	
* 『ケビンは知四子フロゴニント』したとの広素焼き 吟いた 十兆		

\*:7年ごとに処理する径ブランケットからの廃棄物を除いた本数

久 0.0.11	表 6.5.14	<b>M および FP 含有量(経済</b>	i重視型)
----------	----------	------------------------	-------

	U製品	U-Pu-MA製品	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)
U	26.50	1.92	28.42
Pu	0.00	4.50	4.50
Np	0.00	0.02	0.02
Am+Cm	0.00	0.15	0.15
アルカリ金属FP(Rb,Cs)	0.00	0.00	0.00
アルカリ土類FP(Sr,Ba,Eu,Sm)	0.00	0.00	0.00
Y	0.00	0.00	0.00
希土類FP(Ce,Pr,Nd,Pm)	0.00	0.17	0.17
希土類FP(La,Gd)	0.00	0.01	0.01
貴金属FP(Mo,Tc,Ru,Rh,Pd,Ag,Cd,Sn)	0.00	0.00	0.00
ハロゲンFP(I,Br)	0.00	0.00	0.00
カルコゲンFP(Se,Sb,Te)	0.00	0.00	0.00
希ガスFP(Kr,Xe)	0.00	0.00	0.00
Zr	3.24	0.83	4.07



図 6.5.1 軽水炉 MOX 使用済燃料を再処理した際の、HM および FP に関する物質収支計算結果の概 要(操業開始から5年経過時)



図 6.5.2 資源重視型高速炉 MOX 使用済燃料を再処理した際の、HM および FP に関する 物質収支計算結果の概要(操業開始から5年経過時)



#### 図 6.5.3 資源重視型高速炉金属使用済燃料を再処理した際の、HM および FP に関する 物質収支計算結果の概要



図 6.5.4 経済重視型高速炉金属使用済燃料を再処理した際の、HM および FP に関する 物質収支計算結果の概要

### 6.6 技術開発項目

(1) 金属燃料金属電解法システム

金属燃料金属電解法の主な技術は、Naボンド除去技術、電解精製技術、陰極 処理技術等である。実用化のための主な技術開発課題は、次の通りである。こ れらの今後の技術開発課題を表 6.6.1にまとめて示す。

(i) 全般

(a) 運転制御と臨界安全

大型電解精製槽については、化学形態管理と質量管理を併用した臨界安全管理としている。この化学形態管理では、電解電位/電流などの間接的な運転パラメータから電解精製槽内のPuの状態を正確に把握、制御できることが前提であるために、今後、以下に述べる信頼性の高い監視、制御等の技術の開発が必要である。また、ANLの臨界実験データの入手と確認解析、これらのデータによっては、溶融金属系の臨界実験、解析による確認も必要と考えられる。

- ・核燃料物質の監視方法の確立(Cd プール中の酸化 Pu 沈殿物発生)
- ・制御技術(液位計、密度計等、電位・電流の電解制御、核燃料物質のサン プリングー分析またはモニター、電解精製槽気相部の酸素、水分等不純 物の影響と制御)の開発
- ・陰極、陽極の相互干渉の評価
- ・臨界安全評価に用いるデータ(核データや物質密度など)の充実

(b) 閉じ込め機能

オフガス処理系、セル排気系の設備設計を行う上で、電解精製槽などの溶融 塩中放射性物質の気相部への移行率のデータの取得が必要である。

また、高温塩の漏洩時の対策も検討しておく必要がある。

(c) 火災·爆発防止

現設計では、U、Pu等の金属を取り扱う機器は、アルゴンセル内に設けているが、空気の混入の可能性と空気混入が考えられる場合、空気混入時の火災・爆発防止対策を考慮する必要がある。また、空気混入が考えられる場合には、電解精製後の陰極U-Pu-MA析出物などの移送時の火災・爆発防止の観点から、析出物形状を考慮した適切な温度条件について確認する必要がある。

(d) 計量管理

次の技術開発が必要である。技術開発以外に、IAEA、DOE側合意のための対

応シナリオも重要である。

- ・入量計量管理、出量計量管理のために、せん断片、インゴットなどの代表サンプルのサンプリング方法の実証。
- ・適時性計量管理のための NRTA 手法の確立

(e) 全体設備機器の円滑な運転性と主要機器の交換程度

主要機器、マテリアルハンドリング装置も考慮した前処理設備-再処理設備 の総合的な運転性について把握する必要がある。自動化マテリアルハンドリン グ装置の開発も重要である。

また、設備の運転性や主要機器の交換頻度等については、運転実績のある ANL-FCFの実績等を把握することが重要である。

(f)許認可対応(運転管理、技術基準、溶接基準等含む)

安全上重要な施設(設備、機器)の選定や設備、機器の耐震クラスの選定、 環境への影響評価の観点から、電解精製槽などの溶融塩中放射性物質の気相部 への移行率等のデータの取得が必要である。米国ではあるが、許認可の実績の あるANL-FCFの許認可状況の把握も重要である。

(ii) 設備機器関係

(a) 前処理

- ・機械式解体技術又はレーザ式解体技術の確立
   ANLのFCFでは、機械式解体技術を採用しているが、実用化に当たっては、
   刃物の耐久性などの確認が必要である。レーザ式解体技術の場合、アシストガスとして、酸素を使用するので、ArセルのAr雰囲気中酸素濃度が上昇していく必要があり、アシストガスを見直す必要がある。
- ・燃料中Naボンド除去性能の実証 ANLでは、ブランケット燃料中のNaボンドの除去率は99%以上あることを 確認しているが、炉心燃料も含めた燃料中Naボンドの除去率を確認する必 要がある。
- (b) 再処理

① 電解精製技術

・大型電解精製槽の実用化

多電極の実用大型電解精製槽の高温構造の強度(耐震性含む)、耐久性(耐 食性)、電解精製の性能、槽内塩、Cdの攪拌性能、電極装填装置等の自動化 機能、槽内の沈殿物挙動、塩、Cd(沈殿物含む)の槽外への払出し機能など の確認が必要である。

- ・電解精製の運転制御性 固体陰極と液体Cd陰極の同時運転制御性の確認が必要である。
- ・液体 Cd 陰極用るつぼの寿命の確認 液体Cd陰極用るつぼの最適な材料とその寿命の確認が必要である。
- ・高速電解精製技術の開発 電解性能は、ANL-FCF電解槽等のデータをベースに設備設計をしている。さらなる設備合理化を図るために、高性能電解精製(電解時間高速化)を開発
- し、電解精製槽の基数削減を図ることが重要である。
- ② 陰極処理技術
- ・連続式陰極処理装置の実用化
   連続式陰極処理装置の具体的な設計を実施し、塩、Cd除去の性能(温度、圧量と処理時間)、降温性能(Ar冷却効果)、真空隔離性能、るつぼ連続供給装置の性能等を確認する必要がある。
- ・連続式陰極処理装置の運転制御性
   連続式陰極処理装置の予熱部、塩除去部、Cd除去部、溶融部、降温部の温度、
   圧力および装置内Ar流動等の運転制御性を確認する必要がある。
- ・陰極処理装置用るつぼの寿命の確認 陰極処理装置用るつぼの寿命(コーティング塗布方法、コーティング材最適 厚み等含む)を確認する必要がある。
  - (c) 塩処理
    - ・TRU 還元抽出器の最適性能の実証(使用済燃料等を使用した実証)
    - ・ゼオライトの塩と FP、および燃料中 Na ボンドを蒸発除去した Na を酸化した Na 酸化物の吸蔵性能の実証(使用済燃料等を使用した実証)
  - (d) 廃棄物固化
    - ・廃棄物金属(ハル、NM、Zr)の溶融処理技術の確立(Zr を廃棄物処理す る場合)
    - ・ゼオライトの塩と FP、および Na 酸化物の吸蔵性能と PC 等固化技術の実 証、処分要求基準(浸出率)の実証
  - (e) 自動マテリアルハンドリングの最適化
  - ・最適なマテリアルハンドリングの設計と実証
  - (f) 主要な計装制御設備の設計と実証
  - ・プラントの運転制御性確立のための計装制御設備の設計と実証

重要な基本的な技術である電解精製技術等は、実験室レベル等の試験データ

については、一部データ取得中であるが、ほぼ取得済みである。

今後、高速電解精製技術を利用したさらなる合理化システムの検討確立、お よび今までの研究成果やANL-FCF等の小規模の実運転等をベースにした電解 精製槽の大型化、連続式陰極処理装置、遠隔マテリアルハンドリング装置等主 要機器の実用化の開発、廃棄物処分を考慮した廃棄物減容固化技術の開発、許 認可対応、計量管理対応を詰めていく必要がある。

(2) 酸化物燃料金属電解法システム

酸化物燃料金属電解法の主な技術の大部分は金属燃料金属電解法と共通であ り、酸化物燃料金属電解法特有の技術は、熱脱被覆技術、Li還元技術、酸化転 換技術である。これらの技術を実用化するための主な開発課題は、次の通りで ある。

(i) 熱脱被覆技術

酸化還元雰囲気および温度等の熱脱被覆の最適化条件を設定し、熱脱被覆後 の燃料成分付着量を確認するため、使用済燃料を用いた工学規模試験を実施す る必要がある。

(ii) Li 還元試験

熱脱被覆工程で、粉体化された燃料成分を保持可能である陽極容器メッシュ 材料を開発する必要がある。また、塩輸送を円滑に進めるため、工学規模コー ルドを実施する必要がある。更に、650℃のLiClからFPを除去するためのゼオ ライトについても研究開発を進める必要がある。

なお、使用済燃料の還元技術においては、「電解還元法」も有力な候補技術 であり、その採用可能性について検討する必要がある。電解還元法はプロセス が簡素であり、Li還元技術と比較して、機器数、廃棄物量、塩輸送回数等を低 減できることが期待されている。

(iii) 酸化転換技術

酸化転換技術は、MOX燃料製造技術等で用いられている技術の応用であり、 大きな技術開発課題は無いと考えられる。
Г

設備等	主な技術開発項目					
全般	<ul> <li>電解精製槽等の運転制御と臨界安全</li> <li>         ・ 質量管理と化学形態管理を併用した臨界安全管理システム         <ul> <li>(異常事象摘出と臨界安全性評価、保守的臨界残全設計、不溶解 Pu 酸化物の発生防止対策</li></ul></li></ul>					
	<ul> <li>閉じ込め機能、火災・爆発防止</li> <li>・機器、セルの閉じ込め機能</li> <li>・金属等の火災・爆発防止の対応</li> </ul>					
	計量管理 ・入量計量管理、出量計量管理のためのサンプリング手法、サンプル均一性等 ・適時性計量管理技術確立のための NRTA システム ・ IAEA、DOE 対応のシナリオ					
	主要機器、部品の取替え基準 (ANL FCF 機器等の実績調査等が必要)					
	許認可等の対応; ・乾式プラントの許認可、運転管理、技術基準、溶接検査等 ・FP 移行率等の許認可用データ	高				
	機械式解体技術(又はレーザ式解体技術)	中				
前処理	処理 燃料中 Na ボンド除去性能(但し、ANL ではブランケット燃料について Na ボンド高除去性能 確認済)					
再処理	<ul> <li>大型電解精製槽の実用化</li> <li>高温、常圧の電解精製槽の強度(耐震性含む)</li> <li>電解精製槽内の均一攪拌性能と不溶解物の把握</li> <li>陽極バスケット内せん断燃料の溶解速度(せん断片長さ約1cm)</li> <li>陽極バスケット内残留物の把握</li> <li>電解精製槽内固体陰極のU-Zrの回収性能(回収速度、回収率等)</li> <li>電解精製槽内液体 Cd 陰極の U-TRU-MA-Zrの回収性能(回収速度、回収率等)</li> <li>電解精製槽のシール部の健全性(リーク量)</li> </ul>					
	電解精製の運転制御性(槽の圧力制御含む)					
	高速電解精製技術の開発					
	<ul> <li>連続式陰極処理装置の実用化</li> <li>・ Cd、塩等の蒸留特性、回収性能</li> <li>・ 昇温-蒸留炉、再昇温-インゴット処理炉、降温室の隔離性能</li> <li>・ 炉内の昇温期間、アルゴン冷却による冷却期間等の性能</li> <li>連続式陰極処理装置の運転制御性(装置内圧力、温度制御)</li> <li>陰極処理装置るつぼ寿命</li> </ul>					
塩処理	TRU還元抽出器の最適性能の実証(使用済燃料等使用)					
	ゼオライトの塩等吸蔵性能の実証(使用済燃料等使用)   廃棄物全属(ハル、7r NM 等)の深融加囲せ後					
廃棄物 固化処理	・吸蔵ゼオライト、Na (酸化物) の Pressureless Consolidationg 固化技術 ・廃棄物固化体の処分要求基準 (浸出率等)	上 日 日				
サンプリ ング・分 析	・せん断ピン、電解精製槽内塩、Cd、インゴット等代表サンプリング・分析技術 ・プラント運転性への影響	高				
マテリア ルハンド リング等	自動化運転、遠隔保守技術(又はロボット化)         プラントシミュレーション技術、マテリアルハンドリング速度等の性能         電解精製槽内の塩、Cd 等の移送技術         耐放射性考慮のマテリアルハンドリング機器等         主要機器、部品の交換方法(寿命)         プラントの操業性					
Arセル	セル内 Ar 雰囲気制御性	中				
主要計装 制御	電解精製槽液位計等の性能	中				

### 表 6.6.1 金属燃料金属電解法の技術開発項目

## 7. フッ化物揮発法

### 7.1 フッ化物揮発法の検討経緯

FSフェーズ I 研究<sup>1)</sup>では、乾式法として、酸化物電解法、金属電解法および フッ化物揮発法の3方式について再処理システムの設計研究を実施した。その結 果、フッ化物揮発法については、図 7.1.1に示すように、他の二法と比較して経 済性において優れていたが、六フッ化プルトニウム(PuF<sub>6</sub>)の安定性に対する 懸念があり、それにかかる工学規模試験を進める国内の実施基盤が未整備であ るため、後述するFluorex法研究者等が開発に取り組んでいる軽水炉燃料サイク ルにおけるハイブリッド化研究等の動向を見極めた上で、フェーズ II の絞込み 段階において他の方法とともに再評価を行うこととされていた。そこで、フェ ーズ II の前半においては、Fluorex法等の開発動向を調査すると共に、PuF<sub>6</sub>の安 定性について検討評価した。

### [参考文献]

サイクル機構,日本原子力発電(株): "高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズI報告書",JNC TN1400 2001-006 (2001).



### 7.2 フェーズ I におけるフッ化物揮発法のシステム設計研究の概要

フッ化物揮発法を用いた精製技術は、ウラン精鉱から六フッ化ウラン(UF<sub>6</sub>) を製造するウラン転換プロセスの小工程として、Honeywell社(米国イリノイ州) において商業的に採用されている方法であり、プロセスの最終工程に精留工程 として組み込むことにより、製品中のUF<sub>6</sub>とその他のフッ化物(不純物)との蒸 気圧の違いを利用して、製品UF<sub>6</sub>の純度を99.99%に高めている。

なお、一般的なUF6製造方法では、ウラン精鉱を酸溶解し、溶媒抽出法または イオン交換法によって最初に不純物を除去した後、UF6に転換するが、このとき のフッ化反応において、微量に残留している一部の不純物とウランとのフッ化 挙動が異なるため、UF6の精製効果があり、純度向上が期待できる。さらに揮発 したUF6(昇華点:56.54°C)を固化回収する捕集工程においても、フッ化物の 凝縮温度の相違による精製作用がみられ、特に、過剰に供給したフッ素(沸点:  $-188.14^{\circ}$ C)やフッ化水素(沸点:19.52°C)の分離に効果的である。

このようにUF6の物理化学的特性の違いを応用して、使用済燃料中からウラン を分離し、さらにUF6に似た熱力学的傾向があるPuF6(沸点:62.5°)を単独 で、またはUF6と共に回収することを目的として、フッ化物揮発法による再処理 技術の開発は進められている。

フッ化物揮発法の開発は、図 7.2.1に示すように1950年代から米国およびロ シアを中心として各国で行われてきた経緯があるが、これを再処理に適用させ る観点からいえば、いずれの技術もプルトニウムの高原子価のフッ化と精製に 課題があり、実用化段階に到達したものはなく、1970年代以降の進展はみられ なくなった。国内では、日本原子力研究所が1960年代から70年代前半にかけて 実施しており、同法に対して多くの利点を見出したものの、プルトニウム精製 工程を確立させることができないまま、技術開発を終了している。当時は、高 除染のプルトニウムを得ることを目的に開発が進められていたが、フッ化物揮 発法を用いたプルトニウムの高除染化に苦労していたといえる。

このようなフッ化物揮発法開発の流れを踏まえ、これまでの欠点を補うべく、 新たな概念を採り入れた上で、実用化に向けた開発を行っていくこととし、フ ェーズIでは、以下の項目を調査研究の前提条件とした。

- (1)流動床炉を用いて、ウランとプルトニウムの二段階フッ化による除染を 行う技術を基本とする。
- (2) プルトニウム富化度に適した程度まで余剰ウラニウムをフッ化させた後、 精製せずに低除染のウランおよびプルトニウムの六フッ化物を共回収す る。
- (3) 流動媒体中に残留する不揮発性物質を回収するプロセスを設置する。

(4) 配管長の短縮化、機器等に対する適切な温度制御、PuF<sub>6</sub>の急冷等による PuF<sub>6</sub>の分解防止対策をとる。

すなわち、従来の技術開発成果を活かしつつ、大きな問題となっていたプルト ニウムの精製工程については、プロセスに核拡散抵抗性をもたせるという観点 から、ウランとプルトニウムの低除染、共回収を行う工程とすることで対応し ている。図 7.2.2 にこれまでの開発成果であるフッ化物揮発法(従来法)による再 処理プロセスフローを、また図 7.2.3 にフェーズ I での検討結果(以下、フェ ーズ I フッ化法)を示す。同図にみられるように、ウランとプルトニウムの二 段階フッ化工程において、従来技術が一段目で全量のウランをフッ化し、二段 目でプルトニウムのフッ化および精製を行うのに対し、フェーズ I フッ化法で は、一段目でプルトニウムの富化度に合わせたウランのフッ化を行い、二段目 において残りのウランとプルトニウムの共フッ化および共回収を行うところが 異なっている。

フェーズIでは、構築したプロセスに基づき、50tHM/y規模プラント(スケール効果の評価を行うために200tHM/y規模プラントについても実施)についてシステム設計と技術評価を行い、フェーズIフッ化法による再処理プロセスの 各工程について、以下の技術開発課題を摘出した。

フッ化物揮発法による再処理プロセスを実現可能なシステムとして成立させ るためには、これらの課題について、技術的な検討を進め、対応策を明確にし ていく必要がある。

- ① 脱被覆工程:
  - ・AIROX 法による使用済燃料での核物質回収率
  - ・核分裂生成物(以下、FP)核種の揮発挙動の確認
- ② フッ化工程:
  - ・高濃度 FP、プルトニウム共存下でのフッ化挙動の確認(特にプルトニウム回収率向上と PuF6 分解回避条件の確認)
  - 流動床炉の代替オプションとして、フレーム型反応炉を用いる場合には、 余剰ウランの回収方法の確立
- ウラン精製工程:
- ・揮発性 FP (ルテニウム(Ru)、テクネチウム(Tc)等)、MA(ネプツニウム(Np)) の挙動確認
- ④ 酸化転換工程:
  - ・混合フッ化物からの MOX 顆粒の最適生成条件把握(粒径コントロール、 酸化物組成、顆粒生成、高密度酸化物粒子生成挙動等)
- ⑤ マイナー・アクチニド(以下、MA)回収工程:
  - ・MA試験での成立性確認

- ⑥ 廃棄物処理工程:
  - ・廃棄物処理技術(廃アルミナ、廃吸着剤等)の確立と処分対応性(浸出率 評価等)の検討
- また、システム設計上の課題として以下の項目を摘出した。
- ⑦ 計量管理·保障措置技術体系の確立
- ⑧ 遠隔運転・保守技術の確立(粉体取扱技術を含む)
- ⑨ フッ素ガス漏洩等、プロセス特有の事故事象の評価
- ① 余剰ウランを高除染で回収し、外部の燃料加工メーカに発注する際の 経済的効果の評価

なお、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)においても、最近、1段目で 使用済燃料の約95%をフッ化分離し、残渣についてさらにフッ化してFP等を分 離除去するとともに、フッ化回収したU、Puは精製してUとMOX製品として回 収する方法(Trufluor法)の開発が進められている<sup>1)</sup>。

## [参考文献]

 Lee.D.Trowbridge, et al., : "Advanced Spent Fuel Processing Based on Fluorination and Volatility of Fluoride Species : The "Trufluor" Concept", 2004 ANS Annual Meeting, Pittsburgh, PA USA (2004).





図 7.2.2 フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー (従来法)



図 7.2.3 フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー(フェーズ I フッ化法)

### 7.3 課題への対応

7.3.1 これまでの対応状況

フェーズIIでは、フッ化物揮発法による再処理プロセスの技術的成立性を図るために、フェーズIで摘出した技術開発課題の解決に取り組んでおり、2001年度から2003年度は、国内外における情報収集を行っている。

2001年度は、前述した課題の内、フッ化工程におけるPuF<sub>6</sub>分解回避条件の確認および酸化転換工程における混合フッ化物からのMOX顆粒の最適生成条件把握に関して、ロシア原子炉科学研究所(RIAR)のFregat-1施設とFregat-2実験施設等における経験に関する調査を実施した。

また国内においては、軽水炉からFBRまでの幅広い燃料サイクルに対応する 優れた経済性の再処理技術の検討を行うことを目的として、2002年度に設立さ れた「Fluorex法技術検討委員会」を中心に技術的な検討が進められている Fluorex法(フッ化物揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理システム)の開 発状況に注目し、同委員会から技術的知見を入手することに努めている。

Fluorex法にかかる技術開発は、「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」 の一環として、(株)日立製作所が、(財)エネルギー総合工学研究所から委 託を受けて、(株)日立製作所、埼玉大学、名古屋大学および東京電力(株) による共同研究体制にて2000年度から2002年度にかけて実施している。本技術 開発は、Fluorex法を実現可能な再処理技術の一つとして成立させるべく、既存 データが不足しているフッ化物揮発法の研究を中心に、コールド試験およびウ ラン試験を国内の施設にて推進している。また、委託範囲とは別に、プルトニ ウムを用いた試験をロシアの研究所にて行っている。

図 7.3.1にFluorex法のプロセスフローを示す。同図にみられるように、 Fluorex法を軽水炉燃料サイクルに用いる場合、ウランフッ化工程において、所 定量のウランを濃縮用原料であるUF<sub>6</sub>(気体)に転換する一方、プルトニウムの 化学形態をPuF<sub>4</sub>(固体)にすることにより固気分離を図る。次に、生成したUF<sub>6</sub>に 含有される不純物の除去を、ウラン精製工程において行う。すなわち、ウラン フッ化工程とウラン精製工程に、再処理工程と回収ウラン転換工程の役割を負 わせることにより工程の大幅な合理化を図っている。またプルトニウムは、 PuF<sub>4</sub>となるため、課題のひとつであるPuF<sub>6</sub>の安定性にかかる問題は解消される。 さらにUF<sub>6</sub>に転換されなかったウランを含有するPuF<sub>4</sub>は、酸化物に再転換し、 湿式法で精製することにより、FBR燃料サイクルでの再利用を可能としている。

Fluorex法に関する設計研究<sup>1)</sup>は、前述した概念検討とこれに伴う一部の基礎 試験および評価を2003年度で終了しており、今後の展開が期待される。 7.3.2 フェーズ I フッ化法と Fluorex 法との比較

Fluorex法(図 7.3.1)のフェーズ I フッ化法(図 7.2.3)に対する大きな相 違点は、前述したように軽水炉燃料サイクルに対応しているところにある。か つFluorex法の場合、湿式法との組み合わせによるハイブリッドプロセスである ことを特徴としているため、ウランフッ化後のウランープルトニウム混合物の 精製をフェーズ I フッ化法のようにフッ化揮発に依らず、溶媒抽出法を用いて いるところにある。したがって、ウランープルトニウム混合物の分離・精製につ いては、Purex法のデータが活用できる。

フェーズ I フッ化法とFluorex法にかかるフッ化工程およびウラン精製工程 について、装置等の比較をした結果を表 7.3.1にまとめた。

同表にみられるように、フェーズ I フッ化法では、フッ化装置として流動床 型反応炉(以下、流動床炉)を採用し、ウランとプルトニウムの分離を、三段 階の昇温で、またフッ素濃度を二段階で調整することにより行っているのに対 し、Fluorex法では、フレームタワー型反応炉(以下、フレーム炉)を用いて、 高温、高フッ素濃度の条件のもとでUF6転換を行うとともに、同時に生成される プルトニウムフッ化物の化学形態をPuF4になるように調整している点が異なる。

流動床炉およびフレーム炉は、いずれもウラン転換工程においてUF6製造用と して用いられている反応装置であり、適切な運転条件を設定することにより、 UF6への転換反応は十分起きるが、反応率は、供給する原料の粒径や比表面積等 の物性に大きく依存する。

ここで、UF<sub>6</sub>製造における一般的な反応である「UF<sub>4</sub> + F<sub>2</sub>  $\Rightarrow$  UF<sub>6</sub>」は、 ガス境膜拡散律速という律速過程を有しており、条件さえ適切であれば、極め て速く反応は進行する。今回の転換反応である「UO<sub>2</sub> +3F<sub>2</sub>  $\Rightarrow$  UF<sub>6</sub>」は反 応律速であり、この反応の進行は、UF<sub>4</sub>の転換反応と比較して遅いことが知られ ている。

これまでの国内におけるフレーム炉を用いたウランの転換経験では、UO<sub>2</sub>を 若干含有しているUF<sub>4</sub>の場合、UF<sub>4</sub>はほぼUF<sub>6</sub>に転換されるが、UO<sub>2</sub>は、フッ素 が優先的にUF<sub>4</sub>のフッ化に消費されてしまうため、十分転換できないまま、未反 応物または中間フッ化物として反応炉内に蓄積する傾向が見受けられた。しか しながらFluorex法における主たる転換対象物質は、UO<sub>2</sub>とPuO<sub>2</sub>であり、500<sup>°</sup> における標準生成自由エネルギーを比較してみると、UO<sub>2</sub>( $\triangle_f G^{0}$ =-950kJ/mol) がPuO<sub>2</sub>( $\triangle_f G^{0}$ =-905kJ/mol)よりも転換され易い傾向にある。

今後このシステムを実用化していくためには、反応条件によって残留物が抜き出し口を閉塞させる可能性に鑑み、反応炉内に蓄積した残留物の適切な抜き 出し条件についても併せて確立していく必要があるように考えられる。

フェーズIフッ化法では流動床炉を用いて、三段階に条件を設定して選択フ

ッ化を行っているが、二段目および三段目において定めているフッ素濃度 (90%)は、流動媒体(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を使用する流動床炉では濃度が高すぎ、UO<sub>2</sub>や PuO<sub>2</sub>とフッ素ガスが過激な反応を起こし、流動不良となる可能性が大きいので、 これまでのウラン転換実績に鑑みて、フッ素濃度を20~40%に低下させ、より 緩慢な反応を起こさせた方がよいと考えられる。しかしながら高濃度のフッ素 ガスの使用が必要条件である場合は、これと同一条件による流動性確認試験を 行い、最適条件を取得しておくべきであり、可能であれば、流動床炉とフレー ム炉の組み合わせも考慮した方がよい。

この他にもフェーズ I フッ化法とFluorex法のプロセス比較において、ウラン 精製工程のプルトニウム除去材に相違がみられた。すなわち、フェーズ I フッ 化法では、プルトニウム除去用のケミカルトラップ充填材にフッ化リチウム

(LiF)を採用しているのに対して、Fluorex法ではフッ化ウラニル(UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) を用いている点である。文献調査によると、いずれの充填材もプルトニウム除 去に使用された実績はあるので、今後、プルトニウムの捕集効果、取り扱い易 さ、入手のし易さ、使用後の取り扱い等の観点から、適切なものを決定してい く必要がある。

### [参考文献]

(株)日立製作所,他: "革新的実用原子力技術開発提案公募事業 平成14年度成果報告
 書 フッ化揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理に関する技術開発 ", IAE-C0228,
 (財)エネルギー総合工学研究所 (2004.3).

## 表 7.3.1 フェーズ I フッ化法と Fluorex 法の装置等比較

	方法	フェーズIフッ化法			Fluorex法		
工程名称		名称	装置 諸元	条件	名称	<u>装置</u> 諸元	条件
ウランフッ化	方法:フッ化装置を 用いて,使用済み燃 料中のウランの一部 をUF6に転換	流動床炉	形状:箱型 寸法:100×500 ×2000H 形式:流動床型 材質:ニッケル	フッ素濃度 20%, フッ化温度623K, フッ素化剤 F2ガス Pu装荷量<50kgPu	フレーム炉	形状:円筒堅型 寸法:約100× 500×2000H 形式:フレーム タワー型 材質:ニッケル /モネル	フッ素濃度: 90%, フッ化温度: >1573K, フッ素化剤: F2ガス
U-Puフッ化	核不拡散を目的とし たUとPuの同時フッ 化。ウラン焼結を防 止するため,2段 フッ化実施			フッ素濃度 90%, Uフッ化温度673K, Puフッ化温度773K, フッ素化剤 F2ガス, その他 PuF6ガスを 373K以下に冷却, 気送配管温度303K (PuF6の分解抑制)			
ウラン精製	方法:ウランフッ化 において発生した気 体をケミカルトラッ プに通過させ,Puを 吸着除去	ケミカル トラップ	形状:円筒竪型 寸法:254 $\phi$ × 1066.8H 形式:充填床型 材質:ニッケル 充填材:LiF	LiF吸着塔 : Pu除去 吸着温度573K 脱離温度823K	ケミカルプ	形状:円筒竪型 寸法:約500 ×1000H 形式:充填床型 材質:ニッケル 充填材:U02F2	U02F2吸着 塔:Pu除去 吸着温度573K 脱離温度823K
	方法:ウランフッ化 において発生した気 体をケミカルトラッ プに通過させ,気体 状不純物(Ru,Nb) を除去		形状:円筒堅型 寸法:609.6φ ×2743.32H 形式:充填床型 充填材:NaF	NaF吸着塔:Ru, Nb除去 吸着温度 673K		形状:円筒堅型 寸法:1600 $\phi$ × 2500H 形式:充填床型 材質:ニッケル 充填材:NaF	NaF吸着塔: Ru, N b 除去 吸着温度 ~673K
	方法:ウランフッ化 において発生した気 体をケミカルトラッ プに通過させ,気体 状不純物(Mo,Tc, Sb,Np等)を除去		形状:円筒堅型 寸法:609.6¢ ×2743.32H 形式:充填床型 充填材:MgF2	MgF2吸着塔: Mo, Tc, Sb除去 吸着温度 398K		形状:円筒竪型 寸法:1400 Ø × 2500H 形式:充填床型 材質:ニッケル 充填材:MgF2	MgF2吸着塔 : Np, Tc除去 吸着温度 ~393K
	方法:ウランフッ化 において発生した気 体をケミカルトラッ プに通過させ,気体 状不純物(Nb, Ru) を除去		_	1		形状:円筒竪型 寸法:1600 Ø × 2500H 形式:充填床型 材質:ニッケル 充填材:NaF	NaF吸着塔: Nb, Ru除去 吸着温度: ~673K
凝縮・揮発	UF6ガスおよびPuF6 ガスを逆昇華して固 化。F2ガスは気体で 除去	コールド トラップ		凝縮温度 : 193K 揮発温度 : 353K	コールド トラップ	形状:円筒横型 寸法:約300 φ ×1200L 方式:シェルア ンドチューブ フィン型 材質:本体SUS, フィン銅	凝縮温度: 193K 揮発温度: 353K

# (フッ化工程およびウラン精製工程)



図 7.3.1 フッ化物揮発法による再処理プロセスフロー(Fluorex 法)

### 7.4 本年度の実施内容および結果

7.4.1 実施内容

フェーズIフッ化法にかかる技術開発課題に対応すべく、本年度は、前項の 「7.2フェーズIにおけるフッ化物揮発法のシステム設計研究の概要」で述べた 課題のうち、「②フッ化工程」および「③ウラン精製工程」における検討項目 を対象として、文献調査と熱力学的解析により、PuF6の分解を抑制できる条件 を明確にするとともに、揮発性FPやMAの挙動について理論解析を行った。ま た得られたデータを、人形峠環境技術センターが実施した回収ウラン転換実用 化試験結果<sup>1)</sup>と比較することにより、妥当性の評価を試みた。

なお今回の検討について、プルトニウムの分解については「Plutonium Handbook<sup>2」</sup>」および「The Chemistry of the Actinide Elements<sup>3)</sup>」を主たる参 考文献とした。

熱力学計算については、ChemSage<sup>4)</sup> とMalt2<sup>5)</sup>のふたつの計算ソフトとこれ に内蔵されているデータベースを活用した。さらにこれらのデータベースに含 まれていない物質の蒸気圧の算出には、「無機ふっ化物主要性質便覧<sup>6)</sup>」のデー タを使用した。

また回収ウラン転換実用化試験結果については、ACTINIDE2001<sup>7</sup>で公開しているデータを用いている。

7.4.2 検討結果

(1) PuF6分解抑制条件について

前回までの調査により、PuF<sub>6</sub>は、熱や放射線等の影響により、また強い酸化 剤として他の物質に作用するために、容易に分解して熱力学的に安定なPuF<sub>4</sub>を 形成することがわかっている。

「再処理システム技術検討書<sup>8)</sup>」におけるPuF<sub>6</sub>分解の抑制策では、PuF<sub>6</sub>を、 可能な限り分解促進領域の温度(150~350℃)に滞留させないシステム設計を 行い、PuF<sub>6</sub>生成後数時間以内に、UF<sub>6</sub>と混合して酸化物に転換することを提案 している。

今回、PuF6の分解について、熱力学的な解析および文献調査を行ったところ、 次のような結果を得ることができた。

(i) 熱力学的解析結果

・ウランとプルトニウムのフッ化物としての安定性に関して標準生成自由エ

ネルギーの順位から考察したところ、図 7.4.1 に示すように、

UF<sub>6</sub>(気体)>UF<sub>6</sub>(固体)>UF<sub>4</sub>(固体)>PuF<sub>4</sub>(固体)>PuF<sub>6</sub>(気体) の傾向があるため、ウランとプルトニウムが共存する場合、供給するフッ 素は、ウランのフッ化に優先的に消費され、十分な量のフッ素を与えない 限り、プルトニウムは、PuF<sub>6</sub>に転換されず中間フッ化物を形成する。

・PuF<sub>6</sub>には強い酸化力があり、周辺の物質を酸化させて、自らは PuF<sub>4</sub>に 還元する傾向を示すため、この還元による分解を抑制する観点から、化学 量論より過剰のフッ素ガスが、酸化雰囲気を維持していくために必要とさ れる。

Trevorrow<sup>9)</sup>の研究によると化学平衡に到達する時間は温度に依存しており、150℃において150~300時間、200℃で24~60時間、300℃において2時間以下であることが知られている。この傾向に鑑みると、設定温度である500℃では、さらに速い速度でフッ化反応が進むものと推察されるため、反応速度に見合った適切なフッ素供給速度を決定していく必要がある。

なお、人形峠環境技術センターにおけるウラン転換では、フッ素の供給率 を化学量論的に必要とされる量の 115~120%に設定していた。このとき のフッ素ガス濃度は 20~40%であり、回収ウランにおいて 1 時間当たり 最大 140mol-U を UF6に転換していた。

図 7.4.2は、プルトニウム転換に及ぼすフッ素濃度の影響について調べた結果である。ここで PuF6 生成率の理論計算は、10~98vol%の濃度に設定したフッ素ガスを反応当量分、UO2 とともに密閉容器内に充填し、温度を変化させることにより行っている。

同図から、527°C(800K) ~727°C(1000K)の範囲における PuF<sub>6</sub> 生成率 は、フッ素濃度の影響をあまり受けないが、昇温することに高まることが わかる。しかしながら、約700°Cを越すと、フッ素濃度が低い場合、温度 の低い方が PuF<sub>6</sub>の生成率は高く、フッ素濃度を高めることにより、温度 による生成率の差は小さくなる傾向がみられる。本計算結果によれば、約 800°Cの反応温度において最大7%弱の PuF<sub>6</sub>生成率が期待できる。

このことから、700℃以下でプルトニウム転換反応を行いたい場合は、低 濃度のフッ素ガスを用いた方が良く、高温域においては高濃度のフッ素ガ ス使用が適している。すなわち、流動床炉(比較的低い温度領域において 希釈したフッ素ガスを使用)やフレーム炉(高温域において高濃度フッ素 を使用)は、適切な条件で使用されているといえる。 密閉系内に反応当量の PuO<sub>2</sub> とフッ素ガスを封入し、加熱した結果を図 7.4.3 に示す。PuF<sub>6</sub>は、700~1000 $^{\circ}$ (約 1000~1300K) において他の温 度領域と比較して高い生成率を示し、この範囲において約 6.5%の PuO<sub>2</sub>が PuF<sub>6</sub> に、残りは PuF<sub>4</sub> にフッ化される。ここで、実際の反応装置は、絶 えず系内のガスを排気している開放系であるので、PuF<sub>6</sub> への転換反応は 進行し、反応が早く進むようであれば、単位時間当たりのフッ素供給量を 増大することにより PuF<sub>6</sub>生成量も増えるものと思われる。なお、フッ素 ガス供給速度は、プルトニウム転換速度に律速しているため、適正供給速 度は今後決定していくべき課題である。

適切な反応温度については、容易に昇温・維持できる温度は装置的に限界 があり、かつ、本計算結果では、高温側では  $PuF_6$ の熱分解も考えられる ので、500~800℃が妥当な範囲であるように判断できる。なお、500℃か ら 800℃における平衡定数(K=a[PuF\_6]/a[PuF\_4])は、10<sup>-2</sup>の範囲であ り、750℃ 以上で  $PuF_6$ 転換反応が促進するという記述 <sup>10)</sup>もみられるが、 今後の設計に当たっては、反応速度の観点からもデータを取得しておく必 要がある。

・図 7.4.4 は、初期条件について、反応温度を 700℃(973K)、フッ素ガス供給量を反応当量に設定し、PuF6 転換に及ぼす圧力の影響について計算した結果である。
 同図によると、PuF6 の生成率は、圧力の影響をほとんど受けていないことがないことがわかる。すなわち、フッ化反応装置の圧力に係る運転条件については、十分な裕度があるものと考えられる。

(ii) 放射線による分解にかかる文献調査

放射線によるPuF6の分解挙動について文献調査を行った結果を以下に示す。

(a) α · 放射線による分解

PuF<sub>6</sub>は、自ら (Pu-239) の $\alpha$ -放射線によって連続的に分解する。すなわち、 プルトニウムから放射された $\alpha$ 粒子が、結晶格子を通過するときPuF<sub>6</sub>の結合を 切るもので、低級プルトニウムフッ化物とフッ素が生じる。Wagner等は、 PuF<sub>6</sub>の分解率は線形的な変化を示さず、26℃における初期圧力が1.3×10<sup>4</sup>Pa

(100mmHg)の場合、測定当初の半日については1.78%/dayであるが、571日 間で0.064%/day(全体の約36.5%のPuF6が分解)に低下すると述べている<sup>11)</sup>。 ここで1.78%/dayという高い分解率は、封じ込めに使用した容器材料とPuF6の 反応の影響を受けた可能性が大きく、またPuF6の初期圧力を低下させることに より、分解率も下がると考察している。 (b) γ · 放射線による分解

使用済燃料から製造した $PuF_6$ は、核分裂生成物からの $\gamma$ -放射線の影響も受け、  $PuF_4$ とフッ素に分解する。Steindler等の研究<sup>12)</sup>によれば、このときのG値は 7.5±1.7である。

Weinstock等の研究<sup>13)</sup>では、PuF<sub>6</sub>が固体であれば、1日当たり約1.5%の分解 が起こる。ただし、PuF<sub>6</sub>の分圧が低い場合やPuF<sub>6</sub>の貯蔵容器内にフッ素や酸素 等が存在する場合は、分解率は低下する。さらに放射線の影響により、長期的 にはPuF<sub>4</sub>とフッ素ガスとの再結合がなされ、いずれかの時点でPuF<sub>6</sub>の分解と生 成が平衡状態になるものと考えられる。

(iii) まとめ

MALT2とChemSageの二つの熱力学計算ソフトを用いた計算および文献調 査により、PuF6の生成挙動について調べたところ、プルトニウムはウランのフ ッ化挙動と異なり、高級フッ化物を形成しにくい傾向があることがわかった。 今回得られた最適転換条件である500~800℃の温度範囲においても、平衡定数  $K=a[PuF_6]/a[PuF_4]$ は、 $10^{-2}$ の範囲であるので、今後、適切なフッ素供給条件を 定めていく必要がある。

なお、フッ素供給を化学量論以上に行い、反応系内を酸化雰囲気に保つことで、温度や放射線による分解を抑制することができるため、一定の時間であれば、生成したPuF6の安定性を維持できるものと考えられる<sup>14)15)</sup>。また、反応系内に滞留するPuF4については、運転方法として、転換モードの間にフッ素洗浄モード\*1を組み入れることにより、PuF4除去はできるように思われる。洗浄剤としては、フッ素ガスが好ましいが、一部のフッ化ハロゲンの使用も考慮に入れておいた方がよい。放射線による分解の抑制方策としては、過剰のフッ素による酸化雰囲気の形成、PuF6分圧の管理等が考えられる。

(2) FP および TRU の挙動評価

「(1) PuF<sub>6</sub>分解抑制条件について」では、プルトニウムのフッ化挙動に注 目し、PuF<sub>6</sub>の生成と分解にかかる条件についての検討を行った。

その結果、 $PuO_2$ のフッ化を行った場合、化学平衡の関係から大部分は $PuF_4$ になり易いことがわかった。また、 $PuF_6$ は、熱、光化学、放射線等、さまざまな影響によって分解するため、分解抑制条件を設定するとともに、分解した $PuF_4$ の除去にかかる対応策を提案した。

<sup>\*1</sup> ウラン転換工程で用いていた実績があり、流動床炉内の未反応残留物量が増大することにより、流動媒体の差圧が上 昇して運転の制御が行いにくくなったとき、原料投入を一時停止しフッ素ガスを加熱した炉内に供給することにより、 未反応物を高級フッ化物にして揮発させ、炉内の洗浄を行うモード

ここで、PuO<sub>2</sub>をPuF<sub>6</sub>に転換する目的は、各物質の蒸気圧の差を利用して、使 用済燃料中のウラン、プルトニウムをその他の物質(不純物)から精製・分離す ることである。

したがって、本項ではフッ化不純物の挙動を知るため、各物質の標準生成自 由エネルギー(⊿Gr<sup>0</sup>)を基にした熱力学計算と文献調査により関連物質の蒸気 圧を考察している。

(i) 熱力学計算による蒸気圧の算出

一般に、純粋な液体または固体の飽和蒸気圧は、飽和蒸気が理想気体とみな せる場合、次式にて算出することができる。

 $P_{\rm T} = \exp[-\bigtriangleup G_{\rm f}^0/RT] \tag{1}$ 

ここで、

Pr :対象とする物質の温度Tにおける飽和蒸気圧 (Pa)

△G<sup>0</sup>:標準生成自由エネルギー (kJ/mol)

R : 一般ガス定数、8.31451 ×10<sup>-3</sup> (kJ/mol·K)

T : 絶対温度 (K)

また

 $=-RTln(P_T/P_0)(P_0:標準圧力=1.01325 \times 10^5 P_a)$ 

∠Gf<sup>Q</sup>(気体) :対象とする物質(気体)の温度Tにおける

標準生成自由エネルギー (kJ/mol)

✓GP(液体または固体):対象とする物質(液体または固体の温度Tに)

おける標準生成自由エネルギー(kJ/mol)

今回の計算には、ChemSageに収められているデータベースを用い、対象とする化合物の各温度(27~1727℃の間で100℃刻み)における⊿Gtやを算出し、得られた値を(1)式に代入することにより、飽和蒸気圧PTを決定した。

なお、ChemSageのデータベースから利用したデータは、フッ化セシウム(CsF)、二フッ化ストロンチウム(SrF<sub>2</sub>)、三フッ化ネオジム(NdF<sub>3</sub>)、三フッ 化モリブデン(MoF<sub>3</sub>)、 五フッ化モリブデン(MoF<sub>5</sub>)、 六フッ化モリブデン(MoF<sub>6</sub>)、 二フッ化ジルコニウム(ZrF<sub>2</sub>)、 三フッ化ジルコニウム(ZrF<sub>3</sub>)および 四フッ化ジルコニウム(ZrF<sub>4</sub>)の合計9種の化合物である。

(a) **FP** フッ化物の蒸気圧

ChemSageのデータベースから選択したストロンチウム(Sr)、ジルコニウム(Zr)、モリブデン(Mo)、セシウム(Cs)およびネオジム(Nd)を代表的なFPとし、 それらのフッ化物の蒸気圧について算出した結果を図 7.4.5に示す。

本結果によると、全体的な傾向は、価数の大きなフッ化物ほど高い蒸気圧を

示している。ただし、CsFについては、1価のフッ化物であるにもかかわらず、 1500℃付近までは、他の3価のフッ化物よりも蒸気圧は高いが、727℃において も約170Pa程度である。800℃までの温度で、UF6と分離できる可能性がある元 素はストロンチウムおよびネオジムであり、そのほかの元素は、蒸気圧のみに よる分離の可能性は小さい。

(b) TRU 等の蒸気圧に関する文献調査

TRUに関する熱力学的なデータは、その特殊性ゆえに十分に整備されている とはいえず、MALT2やChemSageに収納されているデータベースにも活用でき るデータは少ない。したがって、不足するデータは、文献調査を行ってみる必 要がある。

今回の文献調査結果、「無機ふっ化物の主要性質便覧」からTRUなどについ て多くの物性値を見出したので、これを引用して図 7.4.6にまとめた。なお、同 図には、 TRU(ネプツニウム(Np)、プルトニウム、アメリシウム(Am)の3種)の みでなく、TcF<sub>6</sub>、 RuF<sub>5</sub>、CeF<sub>3</sub>および参考としてThF<sub>4</sub>や図 7.4.5にも示してい るCsF、ZrF<sub>4</sub>並びにUF<sub>6</sub>の蒸気圧を記載している。

図 7.4.6によるとPuF<sub>6</sub>の蒸気圧は高く、沸点は、UF<sub>6</sub>の昇華点(約56.54℃) に近い62.31℃付近にあり、この温度を利用すれば、350℃以下における使用済 燃料のフッ化によって、蒸気圧の相違からAmF<sub>3</sub>、AmF<sub>4</sub>、CeF<sub>3</sub>、CsF、NpF<sub>4</sub>、 およびZrF<sub>4</sub>をウランとプルトニウムの六フッ化物から分離できるものと考えら れる。しかしながらTcF<sub>6</sub>とNpF<sub>6</sub>については、蒸気圧の傾向が近いために分離で きる可能性は低い。またRuF<sub>5</sub>についても、完全に分離することは困難であるも のと判断される。

次に、UF4のフッ化温度として通常、用いられている400~700℃における分離挙動について検討してみると、350℃以下の温度で分離できなかった物質に、 NpF4とZrF4を分離できない物質として加える必要性がある。なお、温度条件が700℃までであれば、AmF3およびCeF3については分離できる。

(ii) まとめ

使用済MOXに含有されている元素のうち、熱力学データが整備されている物 質について選択し、それぞれのフッ化物の蒸気圧を算出したところ、フッ素価 数の大きな化合物ほど、比較的低い温度で高い蒸気圧を示す傾向があることが わかった。すなわち、蒸気圧を利用して、UF6とPuF6を分離することは難しく、 また一部の六フッ化物もウラン、プルトニウムとよく似た挙動を示すため、蒸 気圧の差のみによる十分な精製効果は期待できないものと判断され、ケミカル トラップ等の専用の精製設備を考慮する必要がある。しかしながら多くの三フ ッ化物や四フッ化物の蒸気圧は700℃以下において非常に低いので、温度雰囲気 を適切に設定することにより六フッ化物との分離ができる。

今回の文献調査では、キュリウム(Cm)の蒸気圧に関するデータは見出すこと はできなかった。ここで参考として述べると、アメリシウムとキュリウムのフ ッ化物は、類似点が多く、また各三フッ化物の融点も非常に近いため、CmF<sub>3</sub>(融 点:1410°C)の蒸気圧は、AmF<sub>3</sub>(融点:1390°C)に似たような挙動を示すものと 考えられる。またAmF<sub>4</sub>は非常に低い蒸気圧を示すが、635°C以上では熱的に不 安定となる。

(3) ウラン転換試験実績

(i) 回収ウラン転換実用化試験概要

人形峠環境技術センターでは、1991年度から1999年度にかけて、回収ウラン の有効利用を目的とした「回収ウラン転換実用化試験」を電力会社との共同研 究で実施している。同研究には、回収ウラン中にごく微量存在するFPやTRUの 挙動調査も含まれており、結果については解析・評価され、外部発表等を通じて 公開している<sup>16</sup>。

これらのデータは、今後、フッ化物揮発法を用いた再処理技術の開発を進め て行く上で有効なデータとなり得るので、同センターが「ACTINIDE2001」に おいて紹介した内容から一部を引用し、前述したFPおよびTRUフッ化物のフッ 化挙動や蒸気圧に関する検討結果と比較してみる。

(ii) ウラン転換プロセスについて

図 7.4.7に、回収ウラン転換実用化試験に用いたウラン転換プロセス概要図と、 FPやTRUの蓄積箇所を示す。

ここで、簡単にプロセスの説明を加えると、回収ウラン転換プロセスで用いる原料は、使用済燃料から分離・精製した三酸化ウラン(UO<sub>3</sub>)であり、図中の番号①~③までの工程で、UF<sub>4</sub>にHFフッ化される。ここまでの工程はFPやTRUに対する除染効果はない。

④と⑤はF₂フッ化工程を表しており、④の装置はフレーム炉、また⑤は流動
 床炉であり、フレーム炉で処理できなかった未反応物を流動床炉で処理する2段
 フッ化のシステムを採用している。また、④で用いるフッ素ガスの余剰分は、
 流動床炉に送られ、有効利用される。UF6にフッ化された気体状のウランは、
 ⑥のコールドトラップで凝縮(逆昇華)される。固体となったUF6は液化され、
 製品として⑦のシリンダに充填される。ここまでの工程において、
 ④および
 ⑤では、各フッ化物の蒸気圧の違いによる分離効果がある。また、⑥では凝縮
 する沸点の違いによる分離効果が期待できる。UF6を液化し、シリンダに充填す

る⑦の工程においては、液状のUF<sub>6</sub>をフィルタでろ過することにより固体状の 不純物と固液分離できる。

(iii) ウラン転換工程における不純物挙動

図 7.4.7に示すように、ウランをフッ化することにより、蒸気圧や化学形態の 違いにより、不純物が次の箇所において分離されている。

(a) 流動媒体

F₂フッ化工程に設置されている流動床炉は、UF₄をUF6に転換することを目的 としており、炉内において、装置の上部から連続的に供給されるUF4粉体が、下 部から供給されるフッ素ガス(窒素ガスによって希釈されている)によって UF6にフッ化される。反応生成物であるUF6は揮発するので、 炉内に形成され た流動層の差圧を維持していくために、フッ素に対して耐性のある流動媒体を 必要とする。流動媒体には、焼結アルミナが用いられており、流動層差圧維持 のほか、供給したUF4の希釈効果(急激なフッ化反応を抑制する)、流動床内に残 留する不揮発性物質の除去効果(流動床炉から流動媒体を抜き取ることにより 炉内の不揮発性物質も同伴して系外にでる)がある。ウラン転換における不揮 発性物質は、トリウム(Th)とその娘核種が主なものであるが、使用済流動媒 体の分析を行ったところ、ネプツニウム、アメリシウム、ルテニウムも検出さ れた。

流動床炉におけるフッ化反応により、トリウムはThF4に、ネプツニウムは NpF4とNpF6に、アメリシウムはAmF3に、またルテニウムは、RuF5(融点:86.7℃、 沸点:227℃)またはRuOF4(融点:115℃、沸点:187℃)に転換されたもの と推察される。ここで、図 7.4.6で示したように、ThF4とAmF3については、蒸 気圧が非常に低いので、不揮発性物質として、流動媒体に残留する。また一部 のNpF6については、大量に存在しているUF4によって、蒸気圧の低いNpF4に還 元されたのもと考えられる。しかしながら、ルテニウムの化合物については、 融点、沸点ともそれほど高くないため、熱力学的に挙動を説明するのは困難で ある。なお、プルトニウムについては、ネプツニウムに類似した、またキュリ ウムについては、前述したようにアメリシウムに似た挙動をとるように思われ る。

(b) ケミカルトラップ(充填材: MgF<sub>2</sub>)

ケミカルトラップは、フレーム炉および流動床炉からコールドトラップに UF6を気送するラインに、NpF6、TcF6、TcO3F、RuF5、SbF3等の除去を目的 として設置している。回収ウラン転換の結果、このケミカルトラップにおいて、 ネプツニウム、テクネチウムおよびルテニウムが回収されている。 UF<sub>4</sub>に還元されなかったNpF<sub>6</sub>、またTcF<sub>6</sub>、RuF<sub>5</sub>等は、蒸気圧の関係から、 UF<sub>6</sub>と挙動をともにする。フッ化マグネシウム(MgF<sub>2</sub>)には、これらのフッ化 物およびプルトニウムに対する吸着効果があることが知られており、分析結果 によれば実際ここで除去されている。

(c) ケミカルトラップ(充填材: NaF)

このケミカルトラップは、排ガス処理系に設置され、排ガス中に混入する微量のUF6を除去することを目的としている。充填材であるフッ化ナトリウム(NaF)には、UF6を吸着する作用があることがわかっている。

ネプツニウムやルテニウムの除去は当初の目的ではないが、分析結果による とUF<sub>6</sub>に付随したこれらの物質がウランとともに吸着されていた。

(d) ケミカルトラップ(充填材:活性アルミナ)

活性アルミナを充填材に用いたこのケミカルトラップは、排ガス処理工程に 設置されており、排ガス中のフッ素の除去を目的としている。使用済活性アル ミナの分析により、ルテニウムを検出したが、前述したように、このようなル テニウムの挙動は別途、検討を要する。

(e) 充填ラインフィルタ (ニッケル製)

液化したUF<sub>6</sub>をシリンダに充填するラインに取り付けているニッケル製のフ ィルタであり、ウラン転換工程の製品であるUF<sub>6</sub>中の固体状不純物を取り除くこ とを目的としている。充填フィルタでは、ネプツニウムが検出された。UF<sub>6</sub>と挙 動をともにしたNpF<sub>6</sub>がフィルタ材料であるニッケルによって、NpF<sub>4</sub>(固体)に 還元されたものと考えられる。PuF<sub>6</sub>が同伴すれば、ネプツニウムと同様の挙動 をとるように推察され、実際にごく微量のプルトニウムも確認されている。

(iv) まとめ

人形峠環境技術センターで実施した「回収ウラン転換実用化試験」の成果から、FPとTRUの不純物挙動に着目して、「(2)FPおよびTRUの挙動評価」 と比較してみたところ、ルテニウムを除いて、ほぼ熱力学的な説明ができるような挙動を示していることがわかった。

回収ウラン中には、ごく微量の不純物しか含まれていないため、長期にわた るウラン転換運転によって得られたデータであるが、大量のウラン中に含有さ れる検出限界程度の少量の物質でも、ほぼ理論どおりの動きをしていることが わかり、今回の解析結果が、今後の設計や評価に有効に活用できる見通しを得 ることができた。なお、「回収ウラン転換実用化試験」によれば、ネプツニウ ムの大半は流動媒体中とUF6充填ラインフィルタから、検出されたとある。また、 フッ化工程におけるこれらの物質の除染係数(DF)を、10~10<sup>4</sup>(ネプツニウ ム)、 $10^{3} \sim 10^{4}$  (アメリシウム)、 $10 \sim 10^{2}$  (ルテニウム) としている。

なお、「回収ウラン転換実用化試験」によれば、ネプツニウムの大半は流動 媒体中とUF6充填ラインフィルタから、検出されたとある。また、フッ化工程に おけるこれらの物質の除染係数 (DF) を、10~10<sup>4</sup> (ネプツニウム)、10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> (ア メリシウム)、10~10<sup>2</sup> (ルテニウム)としている。

#### [参考文献]

- 1) 天本一平, "ウラン転換技術", サイクル機構技報 No.9 (2000.12).
- J.Wick (Editor) : "Plutonium handbook A Guide to the Technology vol1", The American Nuclear Society, pp.335-401 (1980).
- J.katz, et al. : "The Chemistry of the Acnide Elements second edition vol.1", Chapman and Hall Ltd., pp.730-745 (1986).
- 4) G.Eriksson, K.Hack, "ChemSage", 金商又一(株) (1991).
- 5) 日本熱測定学会編, "MALT2", (株)科学技術社 (1992).
- 6) Η.Π. Галкина (編集者): "無機ふっ化物主要性質便覧",モスクワアトム出版所 (1976).
- I.Amamoto, et al. : "Behaviour of Inpurities in Recycled Uranium at Uranium Conversion Process", Proc. of Actinide 2001 Int. Conf., J. Nucl. Sci. Technol. ,suppl.3, pp669-771 (Nov. 2002).
- 8) 田中 博,他: "再処理システム技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告", JNC TY9400 2001-014 (2001).
- L.E.Trevorrow, et al. : "The Thermal Decomposition of Plutonium Hexafluoride", J.Phys.Chem.,65, pp398 (1961).
- 10) J.katz, G.T.Seaborg : "The Chemistry of the Acnide Elements (First published)" ,pp. 304 (1957).
- R.P.Wagner, et al. : "Laboratory Investigations in support of Fluid Bed Fluoride Volatility Process Part VII. The Decomposition of Gaseous Putonium Hexafluoride by Alfa Radiation", USAEC Report, ANL-7013 (1965).
- 12) M.J.Steindler, et al. : "Laboratory Investigations in Support of Fluid Bed Fluoride Volatility Process Part V. The Radiation Chemistry of Plutonium Hexafluoride", USAEC Report, ANL-6812 (1963).
- 13) Weinstock, B., Malm, J.G. : "The properties of Plutonium Hexafluoride", J. Inorg. Nucl. Chem., 2,380 (1956).
- 14) 河村文雄,他: "軽水炉先進再処理システム「FLUOREX法の開発」(16)",日本原子力学会 2003年秋の大会予稿集 第Ⅲ分冊(総論,核燃料サイクルと材料),pp487 (2003).
- 15) 天本一平,他:"フッ化物揮発法を用いた再処理技術に係る検討(1)",日本原子力学会 2004年春の年会要旨集 第Ⅲ分冊(総論,核燃料サイクルと材料),pp645 (2004).
- 16) 天本一平,他:"回収ウラン転換技術開発-1~8",松山市,2000年3月28日~30日,日本原子力学会2000年(第38回)春の年会 第Ⅲ分冊(総論,核燃料サイクルと材料), pp867-874 (2000).



図 7.4.1 ウランおよびプルトニウムフッ化物の標準生成自由エネルギー



図 7.4.2 PuF6転換に及ぼすフッ素濃度の影響



図 7.4.3 PuF6転換に及ぼす温度の影響



図 7.4.4 PuF6転換に及ぼす圧力の影響(at 973K)











図 7.4.7 ウラン転換プロセス概要図

### 7.5 まとめと今後の課題

今回のフッ化物揮発法にかかる調査研究では、同プロセスの主要工程である フッ化工程とウラン精製工程について、必要データの充実を図る一環として、 PuF<sub>6</sub>の安定性やFP、TRUの挙動を中心とした文献調査と、これらの物質の熱力 学的解析を実施し、次のようなことがわかった。

① PuF<sub>6</sub>の分解は、 PuF<sub>4</sub>が PuF<sub>6</sub>よりも熱力学的に安定していることに 起因しており、これまでにも検討がなされてきたように、熱、光化学、 放射線、および雰囲気中のフッ素濃度による影響を受け易い。熱による 影響については、適正な領域に PuF6の温度を保持することにより抑制 できる。すなわち、 PuF6の保持温度を 100℃以下にすれば、平衡状態  $(PuF_4 + F_2 \Leftrightarrow PuF_6)$ に達するのに長時間 (数百日と推算) かかるため、 分解は非常に緩慢になる。また、400℃以上の温度領域における PuF6の 生成反応は、僅かながら進む方向にあるため、PuF6の分解を抑えるに は有利な条件といえる。しかしながら、今回、行った熱力学計算による と、900℃以上では、PuF6が分解する傾向も見受けられたので、800~ 850℃が PuF6生成温度として好ましいように考えられる。光化学につい ては、通常、金属製の密閉装置を用いてフッ化処理は行うので、ほとん ど考慮する必要はないものと考えられるが、放射線による分解について は、プルトニウム自身も放射性物質であることから避けがたい。分解抑 制対策としては PuF6を気体状で保持すれば密度が低下するため、放射 線の影響を緩和できる。なお放射線による分解は、26℃における初期圧 力 1.3×10<sup>4</sup>Pa の PuF<sub>6</sub>に対して、571 日間の平均で 0.064%/day との 報告がある。また、PuF6 が分解しないように、酸化雰囲気にしておく ことも重要であり、化学量論比よりも過剰なフッ素を供給することで達 成可能である。

系内の PuF<sub>4</sub> については、ウラン転換工程で実施しているように、多 量の PuF<sub>4</sub> が系内に蓄積や付着する前に、運転を一時停止し、フッ素洗 浄を行えば効果的である。

フッ素洗浄で除去できない不揮発性物質に対しては、さらに強力なフ ッ素化力のあるフッ化ハロゲンを選定すればよいように考えられる。

② PuF6の分解に対する対応策として、Fluorex 法が提案するような、ウランのみを UF6として回収し、装置内に PuF6分解領域を設けることにより、生成した PuF6を安定な PuF4に還元し、ウランを含むその他の揮発しなかった物質とともに固体として留めておき、次工程において不

純物を除去する方法がある。Fluorex 法では、不揮発性物質を酸化物に 再転換した後、実績のある湿式法を用いた不純物除去を想定している。 このようにフッ化揮発法を他の方式と組み合わせ、より効果的で経済性 に見合ったハイブリッド方式を構築していくことも考慮していくべき である。

今回、熱力学計算および文献調査により、使用済燃料に含まれる不純物(主として FP および TRU フッ化物)の蒸気圧をもとめた。得られた結果によると、PuF6の蒸気圧に近い値を示す化合物は、UF6、RuF5、NpF6、TcF6および MoF6であった。

これらのデータと人形峠環境技術センターが実施した回収ウラン転 換試験におけるウランを中心とした不純物の挙動評価結果を比較する と、ほとんどの物質は、ほぼ熱力学計算で算出したデータから期待され る挙動をとることがわかった。例えばネプツニウムの大部分は NpF6と して UF<sub>6</sub>に随伴するが、一部はフッ化工程において、UF<sub>4</sub>によって還元 され、不揮発性の NpF<sub>4</sub> として系内に残留してしまう。さらに、NpF<sub>6</sub>は、 UF6とともにコールドトラップで捕集されるが、UF6を液化して製品シ リンダに充填する時点で、充填ラインに設置しているインラインフィル タ(ニッケル製)によって、 NpF4(固体)に還元、除去される。以上 のようなネプツニウムの挙動は、プルトニウムの挙動に置き換えて考え ることができるであろう。アメリシウムについては、不揮発性物質とし て、流動床内に残留することを想定していたが、実際の結果もこれに合 致していた。したがって、キュリウムについても、アメリシウムと同様 に流動床内に残る可能性が高いものと考えられる。このように熱力学計 算の結果は、今後の検討材料として有効なデータとなるものと考えられ る。

④ 現在、ウラン転換に実績のあるフッ化装置として、流動床炉とフレーム炉の二種類が提案されている。二つの装置は、異なった運転特性を持っており、流動床炉が、希釈したフッ素とUF4を用いて、比較的低い温度で、緩慢なフッ化反応を起こすことによりUF6を生成させるのに対して、フレーム炉は高濃度のフッ素とUF4を高温で接触させ、過激な反応でUF6を生成させる装置である。プルトニウムをPuF6に転換する観点から考えると、フレーム炉の方が適切な装置であろうと考えられるが、今後、各装置の特徴を見極めた上で、装置の選択を行っていく必要がある。

今回の熱力学計算結果によると、 $PuF_6$ の生成反応は、ほとんど圧力 に依存せず、また、わずかではあるが、低濃度のフッ素ガスは低温側に おいて  $PuF_6$ 生成に効果的であり、700 C以上において、高濃度フッ素雰 囲気は、ほとんど  $PuF_6$ 生成率に影響を及ぼさないという結果が得られ たので、両反応装置とも、従来の操作方法で適切に使用できることがわ かった。

これまでにも問題提起されているが、使用済 MOX の転換運転によっ て廃棄物として発生する流動床炉からの流動媒体、およびフレーム炉か らのアッシュの処理法について検討していく必要がある。また、フレー ム炉を使用する場合は、冷却機構、分散機構の設計に十分な配慮を行っ ていく必要がある。

### 8. ハイブリッド再処理システム

#### 8.1 国内外の動向とハイブリッド再処理システムの検討

ハイブリッドシステムは、異なる方式あるいは機能を複合することで、オリ ジナルのシステム以上の性能を引き出すことを主眼としているが、複数のシス テムを備えることにもなりかねずオリジナルのシステムより冗長的になり複雑 化する可能性もあり、システムとしてのメリット、デメリットをよく見極める 必要がある。

これまでの調査によれば、湿式再処理システムと乾式再処理システムを組み 合わせたものとしては、湿式再処理法とフッ化物揮発法あるいは金属電解法を 組み合わせたハイブリッドシステムが検討されるに留まっている。

上記の湿式再処理法とフッ化物揮発法を組み合わせたハイブリッドシステム は、以下の2方法である。

- (1)使用済燃料のせん断・溶解からU脱硝までを湿式で行い、脱硝したUO<sub>3</sub>を フッ化物揮発法で精製する方法
  - ・米国 GE 社により Aquafluor 法として MIDWEST 燃料回収プラント(Morris 工場)が建設されたが、試運転中のトラブルがもとで 1974 年に運転が中止された。原因は湿式法および後続のフッ化物揮発法自体に起因するプロセス上の原理的不具合ではなく、プラント設計上の問題とされている。
- (2)使用済燃料の脱被覆後、フッ化物揮発法でUを揮発・精製除去し、残った Pu、MA等を湿式法で抽出し、FPを分離する方法
  - ・本原理に基づく方法は国内外で検討されており、国内ではLWR使用済燃料を対象にしたFluorex法<sup>1),2)</sup>として現在検討が現在進められている。使用済燃料中の大量のUを効率よくフッ化物揮発法で分離し、FPの分離・除去には実績の多いPurex法を採用し、湿式法での処理負荷を軽減する特長を有している。

また、湿式再処理法と金属電解法を組み合わせたハイブリッドシステムとしては、使用済燃料から湿式溶媒抽出法でUを分離後、金属電解法でTRUとFPを分離するハイブリッドプロセス(UREX/PYRO)が、米国において検討されている<sup>3)</sup>。このプロセスでは溶媒抽出法で高除染のUを回収し、残ったU/Pu/MAはTRUとして一括回収することを期待している。

現在国内でハイブリッド再処理システムとして勢力的に検討が進められているのは、上記のFluorex法である。また、超臨界流体を用いる超臨界直接抽出法、および窒化物被覆粒子燃料湿式再処理の脱被覆工程にフッ化物揮発法を取込ん
だプロセスについては超臨界流体を用いることから、従来のPurex法とは異なる ものであり、ハイブリッド再処理システムと考えることもできる。

これら以外の主なハイブリッド再処理システムとしては、以下のシステムが 考えられる<sup>4), 5)</sup>。

- (1)フッ化物揮発法で U を揮発・精製除去し、一方残った Pu、MA 等を超臨 界直接抽出法あるいは溶融塩抽出などの乾式法で抽出し、FP を分離する 方法
- (2)湿式法、フッ化物揮発法などによる再処理製品を酸化物電解法で電解析出 させて、顆粒を製造する方法

以上から、各再処理技術の個々の特長を踏まえれば、主プロセスへの付加プロセスとして、フッ化物揮発法は高精製したU製品を得たい場合、酸化物電解法は顆粒製品を得たい場合の方法として、他の再処理システムに組み合わせるバリエーションとして考えることもできる。ただし、プロセスを付加することになるので、高精製U製品あるいは顆粒製品が得られる一方で、システムとしては複雑化する可能性があることに留意が必要である。

なお、ハイブリッド再処理システムを広義に捉えれば、FSの主たる検討の対象とはなっていないが、溶融塩サイクルにおいて使用済燃料からTRUをフッ化物揮発法で分離しフッ化物溶融塩としてリサイクルする方法なども考えられている。

### [参考文献]

- O. Amano, et al. : "Verification of Key Technologies for FLUOREX, the New Reprocessing System for LWR Fuel Cycle", Global 2003, New Orleans, U.S.A., Nov.16-20 (2003).
- 河村文雄: "フッ化物揮発法と溶媒抽出法のハイブリッド再処理技術 軽水炉燃料用先進再処理システム、FLUOREX法の開発 ",エネルギー・資源, Vol. 23, No. 6, pp.417-421 (2002).
- U.S.DOE Office of Nuclear Energy, Science and Technology : "Advanced Fuel Cycle Initiative(AFCI) Comparison Report", FY2003
- 4) 井上明,他:"ハイブリッド再処理システムに関する調査",JNC TY9400 2001-002(2001).
- 5) 佐藤浩司,他:"再処理システム技術検討書 FBRサイクルの実用化戦略調査研究(フェーズ) 平成13年度成果報告", JNC TY9400 2002-019 (2002).

#### 9. LINEX 法

#### 9.1 施設概念構築

9.1.1 プロセス概念

LINEX法は、日本原子力研究所(原研)により窒化物燃料再処理技術として 開発されたプロセスである。このLINEX法の基本原理は、使用済燃料を金属電 解精製槽と同様の高温塩(KCl-LiCl)に装荷し、この塩に窒化リチウム(Li<sub>3</sub>N) を添加し、U、Pu、Amなどの元素が順に窒化物を形成して沈殿することを利用 して、元素分離するものである。この基本的な原理は、原研によるU等によるビ ーカ試験等により確認<sup>1) 2)</sup>されている。本章では、LINEX法を利用した窒化物燃 料リサイクルプロセスについて検討したが、再処理量は、金属電解法のシステ ムに合わせて、50tHM/年の規模とした。LINEX法のLi<sub>3</sub>N添加処理方式は、 表 9.1.1に示すように、U、Pu、MAの回収のみでなく、RE等の除去にも適用で きる。しかしながら、ここでは、金属電解法のTRU抽出処理・塩処理(ゼオライ ト)方式<sup>3)</sup>に基づくものとした。この方式を考慮した改良LINEX法を表 9.1.2に 示す。改良LINEX法プロセスの原理図を図 9.1.1に、本プロセスの概略フロー 図を図 9.1.2に示す。主要な工程のプロセスは次の通りである。

(1) 前処理

燃料集合体をレーザ式などにより解体する。その後、燃料ピンをせん断する。 下流側再処理工程の燃料溶解の時間を短縮させるために、熱処理などにより、 燃料を粉体化する代案も考えられる。

(2) 再処理

粉体窒化物燃料を陽極バスケットに装荷する。このバスケットを塩(KCl-LiCl-CdCl<sub>2</sub>)の入った溶解窒化槽に装荷し、温度約600℃の条件で窒化物燃料 を溶融塩中溶解させる。その際、溶解窒化槽から発生する窒素ガスを金属Liの 窒素トラップによりLiと反応させ、Li<sub>3</sub>Nとする。次に、溶解窒化槽に初期Uの 2.4倍(モル比)のLi<sub>3</sub>Nを添加し、Uを窒化物とする。このU窒化物をCdととも に取り出し、Cd蒸留装置により、Cdを蒸留除去し、U窒化物を粉体とした後、 燃料製造側に払い出す。その後、溶解窒化槽に初期Uの0.25倍のLi<sub>3</sub>Nを添加し、 Cd中でU-Pu-MAを窒化物とする。このU-Pu-MA窒化物をCdとともに取り出し、 Cdを蒸留し、U-Pu-MA窒化物の粉体とし、燃料製造側に払い出す。これらの蒸 留Cdは、再使用される。TRU抽出器はU-Pu-MAの回収効率を高めるために設け ることとした。塩中のREは、金属電解法の場合と同様、ゼオライトカラムに定 期的に通液し、除去する。なお、再処理の製品であるU窒化物、U-Pu-MA窒化物は、振動充填方式などにより、燃料ピンに加工する。

9.1.2 機器の検討

機器の検討に当たり、溶解、窒化の反応時間等は次の通りとする。

- 溶解、窒化の反応時間は、早いと考えられるが、現時点まで反応時間のデータは得られていないので、1日1バッチが可能と想定する。
- ② 反応容器の塩の容量は、金属電解法の電解槽と同程度と想定する。
- ③ 燃料溶解などで、窒素ガスが発生するが、この窒素はLiと反応させ、Li<sub>3</sub>N として再使用させる。
- ④ 溶解窒化槽の接液部材質は、タングステンライニングとする。
- ⑤ 窒素トラップは、液体 Li 中に窒素ガスを吹き込み、Li<sub>3</sub>N として回収する 方式とする。

以上の検討条件に基づき検討したLINEX法再処理プロセスの主要機器の基数に ついて、金属電解法利用再処理プロセス<sup>4)</sup>の場合と比較して表 9.1.3に示す。金 属電解法利用再処理プロセスの主要機器数約34基に対して、LINEX法再処理プ ロセスの主要機器基数は約26基となった。



### 表 9.1.1 LINEX 法基本プロセス(日本原子力研究所開発オリジナル)



### 表 9.1.2 改良 LINEX 法基本プロセス(抽出器、ゼオライトカラム利用)

	機器	機器基数				
主要機器(形式)	金属電解法利用 システム (フェーズ I ベース)	LINEX法 システム				
集合体解体機(機械式)	1基	1基				
ピンせん断機 (テーブル式)	1基	1基				
熱処理装置(電気加熱式)	—	_				
電解精製槽(電気加熱式)	9基	—				
溶解窒化槽(電気加熱式)	—	9基				
UN用窒化装置(誘導加熱式)	4基	_				
(U-Pu-MA)N用窒化装置(誘導加熱式)	6 基	_				
Cd蒸留装置(誘導加熱式)	10基	10基				
TRU還元抽出器(向流遠心式)	1基	1基				
ゼオライトカラム(ゼオライト充填式)	1基	1基				
窒素回収装置(PSA吸着式)	1式(約20m <sup>3</sup> /h)	1式(約20m <sup>3</sup> /h)				
窒素トラップ(液体Li充填吸収式)	—	1基(200L/基)				
Li回収装置(電解式)	—	1式				
合計機器数(一式は1基相当と見なした)	34基	26基				
備考		Li回収装置を1基として 合計した。 熱処理装置を設置する 場合の合計機器数は2 7基となる。				

# 表 9.1.3 LINEX 法システムと金属電解法利用システムとの主要機器の物量比較 (プラント規模 50tHM/年ベース)







<sup>(</sup>注記) LINEX法プロセスは熱処理工程を設けないが、溶解処理時間を短縮させるために、 熱処理工程を設け、燃料を熱処理し粉体化する代案が考えられる。

図 9.1.2 窒化物燃料の LINEX 法再処理概略フロー図

#### 9.2 技術評価

LINEX法再処理プロセスと金属電解法利用の再処理プロセス(フェーズ I 検 討設備ベース)との主な類似点、相違点は、次のとおりである。

- ①最も重要な機器は、金属電解法利用の再処理プロセスの場合、電解精製槽であるのに対して、LINEX法再処理プロセスの場合、溶解窒化槽である。これらの機器の基数は、今回の検討では同程度である。
  - ②塩処理設備、窒素回収設備は、金属電解法利用の再処理プロセス、LINEX 法再処理プロセスとも必要であるが、LINEX 法再処理プロセスでは、液体 Liを用いた窒素トラップおよび Li 回収装置も必要となる。
  - ③金属電解法利用再処理プロセス、LINEX 法再処理プロセスとも再処理速度 を同程度と想定したが、LINEX 法再処理プロセスでは、さらに再処理反応 を速める改良のために、前処理設備に熱処理法などによる燃料の粉体化機 能を設けることが考えられる。

以上のように物量の差は大きくないと考えられ、主要な機器数の比較(表 9.1.3参照)から、LINEX法再処理プロセスの経済性は、金属電解法利用再処理 プロセスとほぼ同程度と考えられる。

しかしながら、LINEX法は、次の通り、溶解・窒化速度データの不足、Li<sub>3</sub>N 添加量制御の難しさがあり、今後、不足の基礎データなどを取得していく必要 があると考えられる。

- ① 溶解、窒化の反応時間、U、U-Pu-MAの回収率など基礎データの取得 装置設計のため、U回収窒化、Pu/U/MA回収窒化、RE回収窒化の各反応 速度を把握する必要がある。また、運転操作検討のため、Uの存在下でPu およびREがどの程度析出するか(分配係数)を把握する必要がある。
- ② MAの溶解、窒化等挙動データの取得 MAの実験データがないので、今回の検討では Pu と同様な挙動を示すものとして検討した。実験により確認する必要がある。
- ③ Li<sub>3</sub>N 添加制御技術の確立
- 窒素トラップで固体となった Li<sub>3</sub>N の輸送方法を検討する必要がある。今回の検討では液体 Li とともにポンプ輸送できるものとしたが、液体 Li 中の Li<sub>3</sub>N 濃度の制御法を実証する必要がある。また、LINEX 法の基本プロセスは発熱を伴う化学反応であるので、その制御技術を実証する必要がある。
- ④ 窒素トラップの設計
   酸化溶解、U回収窒化、Pu-U-MA回収窒化、RE回収窒化の各操作にて発

生する窒素( $^{15}N$ )は、液体 Li 中に吹き込んで Li<sub>3</sub>N(固体)として回収するが、6Li+N<sub>2</sub>→2 Li<sub>3</sub>Nの反応速度を把握する必要がある。

⑤ 溶解窒化槽などの材質の選定とその実証 容器はタングステンライニングなどが考えられるが、高温でLiと両立性の ある材料の最適な選定および実証が必要である。

## [参考文献]

- T.Ogawa, et al. : "Nitride Fuel Cycles on Pyrochemistry", Proc. Intl. Conf. Future Nuclear Systems (GLOBAL'97), pp812-815(1997).
- 2) F.Kobayashi, et al. : "Dissolution of Metal Nitrides in LICI-KCl Eutectic Melt", Proc. Intl. Conf. Future Nuclear Systems (GLOBAL'99)(1999).
- 3) 西村友宏,他:"金属燃料リサイクルプラントの設計評価(その1) リサイクル施設の前 提条件、設計、評価-",N18,日本原子力学会「2001年秋の大会」(2001).
- 4) 藤岡綱昭,他:"金属燃料リサイクルシステムの設計評価", JNC TY9400 2001-028 (2001).

### 10. 燃料サイクル (燃料製造+再処理)システムの技術評価

本章では、湿式、乾式再処理共通の評価項目であるFBRサイクル候補概念の 多面的評価、処理規模と経済性の相関、および再処理システムと燃料製造シス テムを合わせた燃料サイクルシステムとしての評価が必要とされている経済性、 資源有効利用性について、検討した結果を以下に示す。

10.1 FBR サイクル候補概念の多面的評価

10.1.1 目的

FBRサイクル実用化戦略調査研究フェーズ において、有望なFBRサイクル 概念を明確化し、研究開発計画を策定していくにあたり、各候補概念の開発目 標(安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性)に対 する達成度および技術的成立性、社会的受容性の観点から多面的に評価を行う こととしている。これら7つの評価指標のうち、経済性、資源有効利用性、環境 負荷低減性については定量的評価を行った。本項では評価に用いたデータをま とめる。

10.1.2 多面的評価のためのデータ

多面的評価のためのデータを提示する対象として、以下に示すFBR炉型、燃料形態、再処理システム、燃料製造システムおよびリサイクルプラントの処理 規模を組み合わせた22ケースの炉・燃料サイクルの候補概念を選定した。

FBR炉型(6種)

- ・ナトリウム冷却大型炉(1500MWe)
- ・ナトリウム冷却中型シングル炉(750MWe)
- ・ナトリウム冷却中型モジュール炉(750MWe)
- ・鉛 ビスマス冷却中型強制循環炉(750MWe)
- ・ヘリウム冷却大型炉(1124MWe)
- ・水冷却炉(1350MWe)

燃料形態(2種)

- ・資源重視型
- ・経済性重視型

再処理システム(6種)

- ・晶析併用簡素化溶媒抽出法 + 抽出クロマトグラフィーによるMA回収 (NEXT法)
- ・窒化物 酸化物転換工程 + NEXT法
- ・被覆粒子脱被覆工程 + NEXT法

- ·超臨界直接抽出法
- ·金属電解法
- ·酸化物電解法
- ④燃料製造システム(4種)
- ・簡素化ペレット法
- ·振動充填法
- ·射出成型法
- · 被覆粒子法
- ⑤リサイクルプラントの処理規模(2種)
- ・大規模(200tHM/y)および小規模(50tHM/y)

22ケースの候補概念を表 10.1.1に示す。なお、これら22ケースのうち、

ケース 1,4:NEXT 法、大規模、資源重視炉心

については、4.5 項のリファレンスシステムの評価とほぼ同等であるため、本項 においてその詳細には言及しない。また、

ケース8:超臨界直接抽出法、小規模、資源重視炉心(4.2.2)

- ケース 10:酸化物電解法、小規模、資源重視炉心(5.3.5)
- ケース11:酸化物電解法、小規模、経済性重視炉心(5.3.5)
- ケース12:金属電解法、小規模、資源重視炉心(6.5.4)
- ケース13:金属電解法、小規模、経済性重視炉心(6.5.4)
- ケース 22: NEXT 法、大規模、水冷却炉対応(4.6.4)

については、上記に示した項において論じられた候補概念に相当するため、本 項においてその詳細には言及しない。

表 10.1.1に示した各ケースの再処理システム部分について経済性、資源有効 利用性および環境負荷低減性に関するデータをとりまとめた。主要なデータは 以下のとおりである。

①経済性に係るデータ

- ・プラント建設費
- ・プラント運転維持費(修繕費、消耗品費、人件費、業務分担費率) ②資源有効利用性に係るデータ

・重金属元素の回収率

- ③環境負荷低減性に係るデータ
- ・廃棄物発生量
- ・プラント廃止措置に伴い発生する廃棄物量

10.1.3 算定方法

10.1.2において記載した主要なデータの算定方法について以下に示す。

(1) プラント建設費

建設費については、リファレンスシステムにおける検討結果をもとに、各ケ ースにおける設備の追加、削減に伴う設備費および建屋費の増減について積算 し、評価した。

(2) プラント運転維持費

プラント運転維持費を構成する修繕費、消耗品費、人件費および業務分担費 については、3.(2)において以下のように定義されている。

- ・修繕費 : 年間運転経費の機器交換費が対象。
- ・消耗品費 :年間運転経費の消耗品費が対象。
- ・人件費 :年間運転経費の人件費が対象、人件費単価(労働省発表の電気・ガス事業の全年齢平均賃金に福利厚生などの諸経費、900万円/人年)に要員数を乗じて算出。
- ・業務分担費:年間運転経費(修繕費、消耗品費、人件費)から、業務分担
   比率を用いて算出する。

すなわち、修繕費率は各設備の機器交換頻度から求められる機器交換費の建 設費に対する比として算出され、消耗品費率は同様に消耗品費の建設費に対す る比として算出される。各ケースにおける修繕費率および消耗品費率を表 10.1.2に示す。超臨界直接抽出法、金属電解法のように、他のケースよりも比較 的交換頻度の高いと考えられる機器(高圧で運転される機器、電解槽等)を有 するケースでは修繕費率は大きくなる。消耗品費率は各ケースとも建設費の約 1%となっている。

また、人件費については、各ケースにおける要員数を各プロセスに必要な人 員を配置し、積算することにより算出した。

事業分担費率については各ケースとも年間運転経費の15%とした。

(3) 重金属元素の回収率

先進湿式法については、4.5 に記載した設計(フェーズ I 設計に対し、清澄工 程にスラッジの再溶解工程を追加、MA回収工程に抽出クロマトグラフィーを採 用、処理能力200tHM/y)において採用した移行率を用いて算出した。

また、超臨界直接抽出法、酸化物電解法および金属電解法については、各々 4.2.2 、5.3.5 および6.5.4 に記載した設計に基づき算出した。 (4) 廃棄物発生量

高レベル廃棄物の発生量については、処理対象燃料中のFP量と相関があると 考えられるため、湿式リファレンスシステムの処理対象燃料のFP量と他の候補 概念の処理対象燃料のFP量の比例計算により各候補概念の発生量を算出した。 高レベル廃棄物以外の放射性廃棄物については、プラントの保守作業に伴い発 生する廃棄物が大部分を占めるため、これら廃棄物の発生量については処理能 力、再処理方式が同一のプラントについては同一と仮定した。すなわち、以下 の群に各ケースを分類した。

- ①大規模、NEXT 法 (ケース 1~5,16~21): 4.5 に記載した設計の結果を用 いた。
- ②小規模、NEXT 法(ケース 6,7):発生量は処理能力に比例すると仮定し、 大規模の 1/4 とした。
- ③小規模、超臨界直接抽出法 (ケース 9,14,15): 4.2.2 に記載した設計の結果を用いた。
- ④小規模、酸化物電解法(ケース 10,11): 5.3.5 に記載した設計の結果を用いた。
- ⑤小規模、金属電解法(ケース 12,13): 6.5.4 に記載した設計の結果を用いた。
- (5) プラント廃止措置に伴い発生する廃棄物量

プラント廃止措置に伴い発生する廃棄物量については、これを推定するため に必要な設計図書(機器リスト、セル内配置図、建屋配置図等)が存在する候 補概念について算出を実施し、それ以外の候補概念についてはこれらと同一と 仮定、あるいはプラント規模の比較から推定した。すなわち、以下のとおりと した。

- ①大規模、NEXT法、簡素化ペレット(ケース1~4):4.5 に記載した設計の設計図書から算出。なお、フェーズI設計のデータも一部使用(使用済燃料貯蔵建屋)。
- ②大規模、NEXT 法、振動充填(ケース 5):①をベースに、燃料製造工程 変更に伴うセル容積増分を考慮し廃棄物量を算出。
- ③小規模、NEXT 法、簡素化ペレット(ケース 6,7):フェーズⅡにおいて設計を実施していないため、フェーズ I 設計の処理能力 200tHM/y と50tHM/yのプラントの比較結果(50tHM/yでは 200tHM/y と比べて、処理能力 25%に対して建設費は約 70%)と、上記①の結果から算出。
- ④小規模、超臨界直接抽出法、簡素化ペレット(ケース 9,14,15): 4.2.2 に
   記載した設計の設計図書から算出。

- ⑤小規模、酸化物電解法、振動充填(ケース 10,11): 5.2 に記載した設計の 設計図書から算出。
- ⑥小規模、金属電解法、射出成型(ケース 12,13): 6.2 に記載した設計の設計図書から算出。
- ⑦大規模、窒化物→酸化物転換工程+NEXT 法、簡素化ペレット(ケース 16,17,18,19):処理能力、再処理方式が同様のため、①と同様と仮定。
- ⑧大規模、被覆粒子脱被覆工程+NEXT 法、被覆粒子法(ケース 20,21):処 理能力、再処理方式が同様のため、②と同様と仮定。

10.1.4 算定結果

選定した各候補概念の建設費、HM回収率、操業中の廃棄物発生量および廃止 措置に伴う廃棄物量について記載する。算出結果を表 10.1.3および表 10.1.4に 示す。また、以下に各ケースに特徴的な点について記載する。

(1) Na 冷却大型炉、大規模、経済性重視炉心の検討(ケース 2,5)

(i) NEXT 法

ケース2および5については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約1.8倍(64 m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース1と同じであった。

(2) Na 冷却大型炉、大規模、LLFP 回収炉心の検討(ケース 3)

(i) NEXT 法

ケース3では、建設費についてはLLFP回収工程追加による増分(設備費増分約500億円、これに伴う建屋費増分約150億円)を考慮しケース1の約1.2倍(3500億円)、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約1.3倍(48 m<sup>3</sup>/年)となった。他はケース1と同じであった。

(3) Na 冷却大型炉、小規模、資源重視炉心の検討

(i) NEXT 法 (ケース 6)

ケース6については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量は処理能力に比例 すると仮定し、200tHM/yの1/4とした。廃止措置に伴う廃棄物発生量について は、フェーズ I 設計の処理能力200tHM/yと50tHM/yのプラントの比較結果 (50tHM/yでは200tHM/yと比べて、処理能力25%に対して建設費は約70%) と、ケース1の結果から算出した。 (ii) 超臨界直接抽出法 (ケース 8)

ケース8については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量および廃止措置 に伴う廃棄物発生量について、4.2.2 に記載した設計の結果を用いて算出した。

(iii) 酸化物電解法 (ケース 10)

ケース10については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量および廃止措置 に伴う廃棄物発生量について、5.2 に記載した設計の結果を用いて算出した。

(iv) 金属電解法 (ケース 12)

ケース12については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量および廃止措置 に伴う廃棄物発生量を、6.2に記載した設計結果を基に算出した。本ケースは、 リファレンスシステムと比較して、高レベル廃棄物量が約1.15倍(31 m<sup>3</sup>/年)と なった。

(4) Na 冷却大型炉、小規模、経済性重視炉心の検討

(i) NEXT 法 (ケース 7)

ケース7については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース6の約1.8倍(16 m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース6と同じであった。

(ii) 超臨界直接抽出法 (ケース 9)

ケース9については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量、廃止措置に伴う 廃棄物発生量について、4.2.2 に記載した設計の結果を用いて算出した。資源重 視炉心の燃料を処理対象としたケース8に対し、使用済燃料組成変化に伴い高レ ベル廃棄物が約1.8倍(16 m<sup>3</sup>/年)となった。

(iii)酸化物電解法(ケース 11)

ケース11については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース 10の約1.9倍(13 m<sup>3</sup>/年)となった。

(iv) 金属電解法 (ケース 13)

ケース13については、前述のとおり、操業中の廃棄物発生量および廃止措置 に伴う廃棄物発生量を、6.2に記載した設計結果を基に算出した。本ケースは、 リファレンスシステムと比較して、大幅に燃焼度が高いため、主に使用済燃料 中のFP含有量増加に起因して、高レベル廃棄物量が約1.3倍(ケース12の約1.1倍、 35 m<sup>3</sup>/年)となった。 (5) Na 冷却中型炉、小規模、資源重視炉心の検討(ケース 14)

(i) 超臨界直接抽出法

ケース14については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース8の約0.9倍(8m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース8と同じであった。

(6) Na 冷却中型炉、小規模、経済性重視炉心の検討(ケース 15)

(i) 超臨界直接抽出法

ケース15については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース8の約1.7倍(15 m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース8と同じであった。

(7) Pb-Bi 冷却炉、大規模、資源重視炉心の検討

(i) 窒化物→酸化物転換工程 NEXT 法 (ケース 16)

ケース16では、建設費については窒化物燃料の酸化物への転換工程追加による増分(設備費増分約100億円、これに伴う建屋費増分約30億円)を考慮しケース1の約1.05倍(3000億円)、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約1.6倍(58 m<sup>3</sup>/年)となった。他はケース1と同じであった。

(ii) NEXT 法 (ケース 18)

ケース18については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約0.94倍(34 m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース1と同じであった。

(8) Pb-Bi 冷却炉、大規模、経済性重視炉心の検討

(i) 窒化物→酸化物転換工程+NEXT法(ケース17)

ケース17では、建設費については窒化物燃料の酸化物への転換工程追加による増分(設備費増分約100億円、これに伴う建屋費増分約30億円)を考慮しケース1の約1.05倍(3000億円)、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約2.2倍(79 m<sup>3</sup>/年)となった。他はケース1と同じであった。

(ii) NEXT 法 (ケース 19)

ケース19については、使用済燃料組成変化に伴い高レベル廃棄物がケース1の約1.4倍(49 m<sup>3</sup>/年)となったほかは、ケース1と同じであった。

(9) He 冷却炉、大規模、資源重視炉心の検討(ケース 20)

(i) 被覆粒子脱被覆工程+NEXT 法

ケース20では、建設費については窒化物ペレット燃料対応ケース(ケース16) に被覆粒子燃料の脱被覆工程を追加することにより建設費がさらに5%増加す るとし、建設費はケース1の約1.1倍(3100億円)、使用済燃料組成変化に伴い 高レベル廃棄物がケース1の約1.5倍(53m<sup>3</sup>/年)となった。

また、被覆粒子の脱被覆工程追加に伴い、この工程から発生する廃棄物(前 処理機器、TRU廃棄物)の増分を約10%と見込み、TRU廃棄物発生量は180m<sup>3</sup>/ 年となった。

(10) He 冷却炉、大規模、経済性重視炉心の検討(ケース 21)

(i) 被覆粒子脱被覆工程+NEXT 法

ケース21では、建設費については窒化物ペレット燃料対応ケース(ケース17) に被覆粒子燃料の脱被覆工程を追加することにより建設費がさらに5%増加す るとし、建設費はケース1の約1.1倍(3100億円)、使用済燃料組成変化に伴い 高レベル廃棄物がケース1の約1.9倍(67m<sup>3</sup>/年)となった。

また、被覆粒子の脱被覆工程追加に伴い、この工程から発生する廃棄物(前 処理機器、TRU廃棄物)の増分を約10%と見込み、TRU廃棄物発生量は180m<sup>3</sup>/ 年となった。

これら各ケースの建設費および高レベル廃棄物発生量をリサイクルプラントの処理規模ごとに比較したものを図 10.1.1および図 10.1.2に示す。なお、図中の数値についてはそれぞれの処理規模のプラントのうち、NEXT法を用いたプラントの値を1とした相対値にて示している。

図 10.1.1および図 10.1.2より、建設費については、大規模プラントではいず れのケースでも大きな差はない一方、小規模プラントでは超臨界直接抽出法お よび乾式の2法(金属電解法、酸化物電解法)を用いたプラントについて、NEXT 法に比べてそれぞれ約40%、約30%の削減されていることがわかる。これはこ れらのプロセスがNEXT法に比べ、再処理工程を簡素にすることができるという 特徴に基づくものと考えられる。

高レベル廃棄物については、各ケースにおける処理対象燃料のFP含有率により発生量が増減すると考えられ、平均燃焼度が高い経済性重視型の燃料を処理 対象としたケースで高レベル固化体発生量の増加が見られるという傾向がある。

なお、U、TRUの回収率については、いずれのケースもフェーズⅡにおける

設計目標である99%以上であり、資源有効利用性に関しては各ケースにおいて 差異はないとの結果となった。しかしながら、回収率の算出根拠である移行率 について、主工程における実運転でのデータを有するのはNEXT法のみであり、 今後、その他各プロセスの移行率データに関する知見の拡充を図る必要がある と考える。

ケース	炉	燃料	湿/乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心
1							資源
2				+ +8+#		簡素化ペレット	経済
3				入	先進湿式		LLFP
4				(200t/ y)		ゲール・拒動女技	資源
5			湿式			クル化・派到尤填	経済
6	2. 十型运	MOX			<b>生准扫</b> 书	筋まれペレット	資源
7	Na入型炉 (1500MWa)			小規模	元進述式	間糸化ハレット	経済
8	(1000mme)			(50t∕y)	却吃用	筋実化ペレット	資源
9					但師介	間系化ハレット	経済
10		ᄨᅷ	小規模	敵ル物重級	乍動女技	資源	
11			乾式	(50t∕y)	的儿初电件	派到兀坞	経済
12		~ 尽民	おず	小規模	<b>今</b> 尾重 <i>时</i>	計中中期	資源
13		並周	早乙 工	(50t∕y)	立周电胜	射击成空	経済
14	Na 中型炉シングル (750MWe)	MOX	归十	小規模	却防用	節書化ペレット	資源
15	Na 中型炉モジュール (750MWe)	MOX	迎北	(50t∕y)	た日本語うと	間来にハレット	経済
16	이 아수페셜	将たち	迫士	大規模	生准识书	筋表化ペレット	資源
17	PD-BI中空炉	主化物	迎1	(200t∕y)	九進湿式	間来に、レクト	経済
18	) 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工工 「 工 工 工 工 工 工 工 工 工 工 工 工 工	MOX	迫士	大規模	生准识书	筋表化ペレット	資源
19	() 0000000	MOX	迎九	(200t⁄y)	九進湿式	間来に、レット	経済
20	He大型炉	空化物神運動で	泊井	大規模	脱被覆+	抽磨料ユ油	資源
21	(1124MWe)	主心彻恢復松于	迎九	(200t⁄y)	先進湿式	<b>恢復</b> 松丁 <i>达</i>	経済
22	水冷却炉	MOY	混ず	大規模	先進湿式	簡素化ペレット	
~~~	(1350MWe)	WICA	<u>/₩</u> -13	(200t∕y)	儿连座式	回来に、レノト	

表 10.1.1 多面的評価対象の FBR サイクル候補概念

ケース	修繕費率(%)	消耗品費率(%)
大規模、 NEXT 法 (2,5,16~19)	3.2	1.1
大規模、NEXT法(LLFP回収)(3)	2.8	0.93
大規模、被覆粒子脱被覆工程+NEXT法(20,21)	2.6	1.0
小規模、NEXT法(6,7)	2.8	0.89
小規模、超臨界直接抽出法 (9,14,15)	3.6	0.8
小規模、酸化物電解法(10)	3.8	0.88
小規模、酸化物電解法(11)	3.9	0.79
小規模、金属電解法(12,13)	3.3	1.1

表 10.1.2 各ケースにおける修繕費率および消耗品費率

ケース		1	2	3	4	5	16	17	18	19	20	21	22
建設費(1	億円)	2900	同左	3500	2900	同左	3000	同左	2900	同左	3100	同左	2900
- ו ו	修繕費率(建設費に対する比)(%)	3. 2	同左	2.8	3. 2	同左	2.7	同左	3. 2	同左	2.6	同左	同左
ノレント語が	消耗品費(建設費に対する比)(%)	1.1	同左	0.93	1.1	同左	同左	同左	同左	同左	1.0	同左	1.1
建乾油谷毒肉白	従業員数(人)	366	同左	390	363	同左	366	同左	同左	同左	同左	同左	同左
「「」である」	業務分担費率(年間運転経費に対する比)(%)	15	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
HM回収率	(%)	<u>99.99</u>	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
	高レベル廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	36	64	48	36	64	58	79	34	49	53	67	25
金士寺	TRU廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	210	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	180	同左	140
採★ 予 参 書 お の	高 <i>B</i> ア廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	15	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
照米物	低放射性廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	120	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
	極低放射性廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	0	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
	TRU廃棄物(t)	480	同左	同左	510	同左	480	同左	同左	同左	510	同左	480
	高 <i>B</i> ヶ廃棄物(t)	31	同左	同左	31	同左	31	同左	同左	同左	31	同左	31
	低レベル廃棄物(金属)(t)	5400	同左	同左	4800	同左	5400	同左	同左	同左	4800	同左	5400
廃止措置	低レベル廃棄物(コンクリート)(t)	260	同左	同左	220	同左	260	同左	同左	同左	220	同左	260
に伴う廃	極低レベル廃棄物(金属)(t)	89	同左	同左	89	同左	89	同左	同左	同左	89	同左	89
棄物	極低レベル廃棄物(コンクリート)(t)	0	同左	同左	0	同左	0	同左	同左	同左	0	同左	0
	非放射性廃棄物(金属)(t)	44000	同左	同左	38000	同左	44000	同左	同左	同左	38000	同左	44000
	非放射性廃棄物 (コンクリート) (t)	450000	同左	同左	380000	同左	450000	同左	同左	同左	380000	同左	450000
	二次廃棄物(t)	4800	同左	同左	4200	同左	4800	同左	同左	同左	4200	同左	4800

表 10.1.3 各候補概念の主要データ比較(大規模プラント)

ケース		9	7	8	9	10	11	12	13	14	15
建設費(	億円)	2000	同左	1500	同左	同左	1800	1600	同左	1500	同左
- ע ו	修繕費率(建設費に対する比)(%)	2.8	同左	3.6	同左	3.8	3.9	3.3	同左	3.6	同左
ノレント通転が	消耗品費(建設費に対する比)(%)	0.89	同左	0.8	同左	0.88	0.79	1.1	同左	0.8	同左
捕 材 店 方 古 分	従業員数(人)	366	同左	178	同左	142	152	147	同左	178	同左
マケョム	業務分担費率(年間運転経費に対する比)(%)	15	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
HM回収率	(%)	99.99	同左	99.24	同左	99.8	同左	99.5	同左	99.24	同左
	高レベル廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	6	16	6	16	6.7	13	31	35	8	15
● 十 非 毕	TRU廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	53	同左	48	同左	50	同左	13	14	48	同左
採★ 〒 ★ 十 の 1 4 1 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	高 <i>B</i> ア廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	3.8	同左	5.0	同左	31	同左	19	19	5	同左
<b>光米</b> 初	低放射性廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	30	同左	18	同左	24	同左	4.1	4.9	18	同左
	極低放射性廃棄物(m <sup>3</sup> /年)	0	同左	0	同左	20	同左	1. 2	1.4	0	同左
	TRU廃棄物(t)	370	同左	220	同左	310	同左	490	同左	220	同左
	高βア廃棄物(t)	25	同左	51	同左	0	同左	69	同左	51	同左
	低レベル廃棄物(金属)(t)	4200	同左	3400	同左	1300	同左	2000	同左	3400	同左
廃止措置	低レベル廃棄物(コンクリート)(t)	150	同左	120	同左	52	同左	06	同左	120	同左
に伴う廃	極低レベル廃棄物(金属)(t)	55	同左	36	同左	210	同左	140	同左	36	同左
棄物	極低レベル廃棄物(コンクリート)(t)	0	同左	0	同左	0	同左	0	同左	0	同左
	非放射性廃棄物(金属)(t)	35000	同左	28000	同左	17000	同左	17000	同左	28000	同左
	非放射性廃棄物(コンクリート)(t)	350000	同左	280000	同左	170000	同左	180000	同左	280000	同左
	二次廃棄物 (t)	3800	同左	3100	同左	1500	同左	1900	同左	3100	同左

(小規模プラント)	
各候補概念の主要データ比較	
10.1.4	
表	



図 10.1.1 各候補概念の建設費・高レベル廃棄物発生量比較(大規模プラント)



図 10.1.2 各候補概念の建設費・高レベル廃棄物発生量比較(小規模プラント)

10.2 再処理システムの処理規模と経済性

FSにおける導入シナリオでは、FBR燃料再処理プラントの導入時期がLWRからFBRへの移行期にあたる。このため、導入する再処理プラントの処理規模は比較的小規模となる可能性がある。一方、これまでの検討結果から、再処理システムは処理規模が小さくなるにしたがい再処理コストが上昇する傾向が示唆されている。

そこで、本項においては、湿式再処理システムおよび乾式再処理システムとして酸化物電解法に関し、処理規模に対する経済性への影響について評価する。

10.2.1 湿式再処理システムの検討

(1) プラントの建設費に対する影響の試算

50から200 tHM/y の処理規模の範囲において、この間の再処理プラントの建 設費を試算した。積算の対象となる機器を表 10.2.1の4種類に分類して、機器の 単価を求めてこれを積算した。

結果として、50から200 tHM/y への処理規模の増加に伴い、建設費は一次式 に近似できることが分かった。これは、系列化を要する機器が少ないことによ る結果であると考えられる。また、本体建屋、保守設備、計装制御設備につい ては、比例並びに 2/3 乗則を適用して比較したところ、ほとんど影響がなかっ た。200 HM/y に近づくと建設費の増加が小さくなる様子が窺われ、外挿につ いてはさらに検討が必要である。

(2) 再処理単価の試算

先進湿式法(NEXT法)および超臨界直接抽出法によるシステムについて再処 理単価の処理規模に対する依存性を試算した。上述の結果を利用して、建設費 については50および200tHM/yの建設費を一次式で近似して算出した。また、 機器交換費、ユーティリティおよび消耗品費も同様に直線で補間して得た。人 件費と定期検査費は処理規模に係わらず一定とした。

システムの概要を表 10.2.2に示す。先進湿式法によるシステムについては、 99%の回収率を想定し、機器交換頻度を低減した合理化を取込んだケースも参 考として求めた。再処理単価の施設の処理規模に対する再処理単価の依存性を 図 10.2.1に示す。 10.2.2 酸化物電解法再処理システムの検討

(1) 対象処理規模

評価の対象とする処理量は50tHM/y、75tHM/y、100tHM/y、150tHM/y、200tHM/y、300tHM/yとし、各々に対して建設費、年間運転経費を概略評価した上で再処理単価を算出した。

(2) 建設費の評価方法

(i) 設備費

(a) 主要プロセス設備費

受入、前処理、ハル洗浄、再処理の各工程を1つのユニット(セル)と考え、 処理規模はこのユニット数で評価することとした。

受入、前処理、ハル洗浄の1ユニットは1セル1系列とした。各処理能力はタ イムチャートを作成して評価した結果、

・受入 :最大4000集合体/年

・前処理 : 最大427集合体/年

ハル洗浄:最大800集合体/年

と評価された。

再処理については、タイムチャートの結果、操業性の観点から最大75tHM/y までとし、1ユニット50tHM/yと75tHM/yの2種類を設定した。

以上から評価した、各処理規模のユニット数を表 10.2.3に示す。

この結果を基に各ユニットの単価を乗じて主要プロセス設備費を算出した。 なお、今回の評価ではユニット複数化に伴う習熟効果は考慮していない。

(b) 廃棄物処理・貯蔵、ユーティリティ、分析設備費

機器能力を向上させることで対応することとし、経済性評価で一般的に用い られる処理規模に対する2/3乗則を用いて評価した。

(c) 保守設備費

保守設備として計上するものは主にセル内のクレーン・マニピュレータ等で あり、これらに係る費用はユニット数に比例するものとした。また、付帯機器 に係るものについては処理規模に対する2/3乗則を用いて評価した。

(d) 計装制御設備費

各機器の計装に係る費用は主要機器数に比例するものとした。また、中央制 御室に係る費用は処理規模に対する2/3乗則を用いて評価した。 (e) 使用済燃料貯蔵設備費

キャスク台数は処理規模に比例して増加することから、キャスク費用も処理 規模に比例するものとした。また、付帯機器に係るものについては処理規模に 対する2/3乗則を用いて評価した。

(ii) 建屋費

乾式再処理法のリサイクル建屋は、湿式と異なり機器数の増加が建屋容積に 大きく影響してくるため、経済性評価に一般的に用いられる処理規模に対する 2/3乗則は適用できない。

フェーズ I の50tHM/y、200tHM/yプラント設計検討結果から、セル容積とリ サイクル建屋容積に相関があることが分かっており、フェーズ II の設計検討の 結果を考慮して、セル容積は建屋容積の0.18倍に相当すると設定した。よって、 リサイクル建屋の建屋費はリサイクル建屋容積を、各処理規模のセル容積(各 工程セル容積×各工程ユニット数の和)から算出し、これに建屋体積単価(13万 円/m<sup>3</sup>)を乗ずることで算出することとした。

廃棄物処理建屋、廃棄物貯蔵建屋、使用済燃料貯蔵建屋は、建屋容積の処理 規模に対する相関が一般産業プラントと同様であることから、処理規模に対す る2/3乗則を用いて評価した。また、同様に非常用発電機設備等も処理規模に対 する2/3乗則を用いて評価した。排気筒は基本的にはどの処理規模に対しても同 一費用とした。

(3) 年間運転経費の評価方法

(i) 人件費

要員数は主要プロセスにおける直勤務者に対しては、各工程毎に設定した。 放射線管理・保守に関する要員はどの処理規模に対しても同一とした。また、 その他については処理規模に対する2/3乗則で評価した。人件費は、以上のよう に評価した要員数に人件費単価(900万円/人年)を乗ずることで算出した。

(ii) 機器交換費

機器交換費は、各処理規模に対する設備費と機器交換頻度をもとに評価した。

(iii) 定期検査費

定期検査費は、フェーズ I では50tHM/y処理規模施設で8億円/年、200tHM/y 処理規模施設で24億円/年と設定していた。本評価ではこの2点をベースに処理 規模に対して比例するものとして算出した。 (iv) 消耗品等費

消耗品は処理規模に比例して増加するので、消耗品等費も同様に処理規模に 比例して算出した。

(4) 検討結果

以上の検討に基づく建設費および年間運転経費から、再処理費用として再処 理単価を算出した。各処理規模における再処理単価の依存性を図 10.2.1に示す。

10.2.3 処理規模と経済性の評価

前項までの検討を踏まえ、湿式再処理システム(NEXT法/超臨界直接抽出法) および酸化物電解法再処理システムに関する、再処理単価の処理規模に対する 依存性を図 10.2.1に示す。

湿式再処理システムは全般的に、乾式再処理システムに比べて、処理規模の 大型化に伴い経済性が向上しやすいと考えられる。一方、酸化物電解法は処理 規模の変動による経済性への影響はゆるやかで、処理規模が増加しても経済性 は向上しにくい。

本検討条件の場合においては、フェーズ I 目標の27万円/kgHMを満足するの は、NEXT法では100~110tHM/y、NEXT法(合理化取込)および超臨界直接 抽出法では70~80tHM/y、一方、酸化物電解法では200tHM/y前後となった。な お、酸化物電解法については習熟効果を考慮すれば、特に処理規模が大きい場 合に再処理単価が下がるので、27万円/kgHMを満足する処理規模は下がるもの と考えられる。また、金属燃料金属電解法については、金属燃料の場合27万円 /kgHMに相当するのは40万円/kgHM(等価発電量で換算)であり、小規模でも 十分に経済性があると判断できる。

分類	単価の補間方法	機器の例
2/3 乗則を適合する機器	処理容量の 2/3 乗に比例して	塔槽類、ポンプ、ブロア
	単価を試算	
比例による機器	処理容量に比例して単価を試	燃料貯蔵ピット、ガラス固化体
	算	貯蔵ピット
系列化を要する機器	50から200tHM/y への処理規	分析用グローブボックス・フー
	模の増加に伴い、系列が増加す	ド、ハル収納容器
	る機器	
単価に変化がない機器	50から200tHM/y への処理規	解体機、せん断機、清澄機、晶
	模の増加に伴い、単価が増加し	析装置、遠心抽出器、移送機器
	ないと考えられる機器	類、焼却炉、溶融炉、汚染検査
		装置

表 10.2.1 積算対象機器の分類

# 表 10.2.2 再処理単価を算出したシステムの概要

(湿式再処理システム)

システム	備考
1) 先進湿式法(NEXT法)によるシステム	MA回収は抽出クロマトグラフィーによる。
<ol> <li>2) 先進湿式法 (NEXT法) によるシステム (合理化取込みベース)</li> </ol>	<ol> <li>1)をベースに、乾式再処理システムと比較基準 (回収率99.9%→99%)を合わせ、期待される さらなる合理化方策(機器交換頻度の低減)を 取り入れた。</li> </ol>
3) 超臨界直接抽出法によるシステム	MA回収も超臨界流体を用いた方法による。

#### 表 10.2.3 各処理規模において評価したユニット(セル)数

(酸化物電解法再処理システム)

			処理量(f	HM/y)		
	50	75	100	150	200	300
受入	1	1	1	1	1	1
前処理	1	2	2	3	4	5
ハル洗浄	1	1	1	2	2	3
再処理※	1	1	2	3	4	6

※75tHM/y 以外は1ユニット処理容量 50tHM/y



図 10.2.1 再処理単価の処理規模に対する依存性

## 10.3 燃料サイクルシステムの経済性評価

本項で検討する燃料製造費、再処理費およびその和である燃料サイクル費に ついて、主たる検討を実施したリファレンスシステムにおける評価ケースと主 要仕様および条件を表 10.3.1に、原子炉プラントシステムにおいて本年度選定 した炉心・燃料仕様に基づいて検討した代表的な多面的評価向け燃料サイクル システムの評価ケースと主要仕様および条件を表 10.3.2に示す。

上記の評価ケースに基づき、第1編燃料製造システムおよび第2編再処理シス テムの各章で算出した、燃料製造費(円/kWh)、再処理費(円/kWh)およびそ の和である燃料サイクル費(円/kWh)について、リファレンスシステム仕様で の結果を表 10.3.3および図 10.3.1に、多面的評価向け仕様での結果を表 10.3.4および図 10.3.2に示す。

処理規模が200tHM/yの場合では、いずれのケースにおいてもフェーズⅡの要求値である0.8円/kWh以下を満足する見通しを得た。

一方、50tHM/y規模の場合、資源重視型炉心で要求値を概ね満足するのは金属燃料サイクルのみで、金属燃料サイクルは酸化物燃料サイクルに比べ経済性において優位であると考えられる。また、経済重視型炉心では、径ブランケット削除による平均燃焼度の向上が燃料サイクル費の評価に寄与し、処理規模が50tHM/yと小さい場合でも概ね要求値を満足する見通しを得た。

No	評価ケース	サイクル 処理規 模(tHM/y)	炉心・燃料仕様	燃料形態	炉形態
1	NEXT法+ペレット法	200	資源重視型	MOX	Na大型炉
2	NEXT法+振動充填法	200	資源重視型	MOX	Na大型炉
3	酸化物電解法+振動充填法	50	資源重視型	MOX	Na大型炉
4	金属電解法+振動充填法	50	資源重視型	MOX	Na大型炉
5	金属電解法+射出成型法	38	資源重視型	金属	Na大型炉

### 表 10.3.1 燃料サイクルシステムの評価ケース (リファレンスシステム仕様)

表 10.3.2 燃料サイクルシステムの評価ケース(多面的評価向仕様)

		サイクル			
No	評価ケース	処理規模	炉心・燃料仕様	燃料形態	炉形態
		(tHM/y)			
1	NEXT法+ペレット法(1)	200	資源重視型	MOX	Na大型炉
2	NEXT法+振動充填法(4)	200	資源重視型	MOX	Na大型炉
3	NEXT法+ペレット法(16)	200	資源重視型	窒化物	Pb-Bi炉
4	NEXT法+被覆粒子法(20)	200	資源重視型	窒化物	Heガス炉
5	NEXT法+ペレット法(2)	200	経済性重視型	MOX	Na大型炉
6	NEXT法+振動充填法(5)	200	経済性重視型	MOX	Na大型炉
7	NEXT法+ペレット法(17)	200	経済性重視型	窒化物	Pb-Bi炉
8	NEXT法+被覆粒子法(21)	200	経済性重視型	窒化物	Heガス炉
9	NEXT法+ペレット法(6)	50	資源重視型	MOX	Na大型炉
10	超臨界直接抽出法+ペレット法(8)	50	資源重視型	MOX	Na大型炉
11	酸化物電解法+振動充填法(10)	50	資源重視型	MOX	Na大型炉
12	金属電解法+射出成型法(12)	50	資源重視型	金属	Na大型炉
13	NEXT法+ペレット法(7)	50	経済性重視型	MOX	Na大型炉
14	超臨界直接抽出法+ペレット法(9)	50	経済性重視型	MOX	Na大型炉
15	酸化物電解法+振動充填法(11)	50	経済性重視型	MOX	Na大型炉
16	金属電解法+射出成型法(13)	50	経済性重視型	金属	Na大型炉

\*()内は多面的評価ケース No

## 表 10.3.3 燃料サイクルシステムの経済性(リファレンスシステム仕様)

(円/kWh)

		炉心・	燃料	燃料	再処理	燃料
No	評価ケース	燃料仕様	形態	製造費	費	サイクル費
1	NEXT法 + ペレット法	資源重視型	MOX	0.22	0.26	0.48
2	NEXT法 + 振動充填法	資源重視型	MOX	0.30	0.26	0.56
3	酸化物電解法 + 振動充填法	資源重視型	MOX	0.34	0.55	0.89
4	金属電解法 + 振動充填法	資源重視型	MOX	0.38	0.61	0.99
5	金属電解法 + 射出成型法	資源重視型	金属	0.28	0.47	0.75

### 表 10.3.4 燃料サイクルシステムの経済性(多面的評価向仕様)

(円/kWh)

		炉心・	燃料	燃料	再処理	燃料
No	評価ケース	燃料仕様	形態	製造費	費	サイクル費
1	NEXT法 + ペレット法(1)	資源重視型	MOX	0.22	0.26	0.49
2	NEXT法 + 振動充填法(4)	資源重視型	MOX	0.30	0.26	0.56
3	NEXT法 + ペレット法(16)	資源重視型	窒化物	0.17	0.16	0.33
4	NEXT法 + 被覆粒子法(20)	資源重視型	窒化物	0.31	0.25	0.56
5	NEXT法 + ペレット法(2)	経済性重視型	MOX	0.13	0.15	0.28
6	NEXT法 + 振動充填法(5)	経済性重視型	MOX	0.19	0.15	0.34
7	NEXT法 + ペレット法(17)	経済性重視型	窒化物	0.13	0.12	0.25
8	NEXT法 + 被覆粒子法(21)	経済性重視型	窒化物	0.23	0.18	0.41
9	NEXT法 + ペレット法(6)	資源重視型	MOX	0.46	0.71	1.17
10	超臨界直接抽出法 + ペレット法(8)	資源重視型	MOX	0.46	0.60	1.06
11	酸化物電解法 + 振動充填法(10)	資源重視型	MOX	0.34	0.55	0.89
12	金属電解法 + 射出成型法(12)	資源重視型	金属	0.31	0.52	0.83
13	NEXT法 + ペレット法(7)	経済性重視型	MOX	0.21	0.40	0.61
14	超臨界直接抽出法 + ペレット法(9)	経済性重視型	MOX	0.21	0.35	0.56
15	酸化物電解法 + 振動充填法(11)	経済性重視型	MOX	0.20	0.37	0.57
16	金属電解法 + 射出成型法(13)	経済性重視型	金属	0.17	0.27	0.44

\*()内は多面的評価ケース No

\*0.8 円/kWh で規格化した相対値



図 10.3.1 燃料サイクルシステムの経済性(リファレンスシステム仕様)



\*0.8 円/kWh で規格化した相対値

\*()内は多面的評価ケース No

図 10.3.2 燃料サイクルシステムの経済性(多面的評価向仕様)
#### 10.4 燃料サイクルシステムの資源有効利用性

資源有効利用性に関わる設計要求は、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU 回収率として99%以上を要求している。ここでは、2.3.1 にてリファレンスシス テムとした各再処理システムとそれに適合した燃料製造システムの以下の組合 せについて、U・TRUの回収率を評価する。

10.4.1 先進湿式法+ペレット法(酸化物燃料対応)

(1) 先進湿式法 (NEXT 法) との組合せ

NEXT法、ペレット法ともに、U・TRUの廃棄物への移行率は各0.1%と評価 しており、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU回収率99%以上を満足する。

(2) 先進湿式法(超臨界直接抽出法)との組合せ

超臨界直接抽出法のU・TRUの廃棄物への移行率は各0.3%以下であり、ペレット法における移行率は各0.1%と評価しているので、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU回収率99%以上を満足する。

10.4.2 先進湿式法+振動充填法(酸化物燃料対応)

(1) 先進湿式法(NEXT法)との組合せ

NEXT法、振動充填法(ゲル化・スフェアパック)ともに、U・TRUの廃棄物 への移行率は各0.1%と評価しており、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU 回収率99%以上を満足する。

(2) 先進湿式法(超臨界直接抽出法)との組合せ

超臨界直接抽出法のU・TRUの廃棄物への移行率は各0.3%以下であり、振動 充填法(ゲル化・スフェアパック)における移行率は各0.1%と評価しているの で、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU回収率99%以上を満足する。

10.4.3 酸化物電解法+振動充填法(酸化物燃料対応)

酸化物電解法では、U・TRUの廃棄物への移行率は各0.4%以下であり、振動 充填法における移行率は微粉体の飛散防止および回収を前提として各0.1%と評 価しているので、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU回収率99%以上を満 足する。 10.4.4 金属電解法+射出成型法(金属燃料対応)

金属電解法では、U・TRUの廃棄物への移行率は各0.5%、0.1%であり、射出 成型法における移行率は各0.5%と評価しているので、燃料サイクルシステムに おけるU・TRU回収率99%以上を満足する。

10.4.5 金属電解法+振動充填法(酸化物燃料対応)

金属電解法では、U・TRUの廃棄物への移行率は各0.3%、0.8%であり、振動 充填法における移行率は微粉体の飛散防止および回収を前提として各0.1%と評 価しているので、燃料サイクルシステムにおけるU・TRU回収率99%以上を満 足する。

#### 11. 再処理システムの技術的総括

#### 11.1 評価結果の概要

湿式および乾式各再処理システムに関し、下記のシステムを特にリファレン スシステムとして取り上げ、システム毎にプロセス、機器、施設などの施設概 念構築を実施し、安全性、経済性、環境負荷低減性などの設計要求に対する技 術評価を実施した。

(1) 酸化物燃料对象先進湿式再処理法(NEXT法、超臨界直接抽出法)

(2) 酸化物燃料対象酸化物電解法(乾式再処理法)

(3) 金属燃料対象金属電解法(乾式再処理法)

(4) 酸化物燃料金属電解法(乾式再処理法)

各リファレンスシステムの設計要求に対する評価結果の概要を一覧にしたもの を表 11.1.1に示す。

また、窒化物燃料を含めた各システムに関する技術評価結果の概要を表 11.1.2~表 11.1.7に示す。

上記技術評価を踏まえつつ、リファレンスシステムを含めた各再処理システムの技術見通しについて以下の通り評価した。

#### 湿式法(酸化物燃料対応) 乾式法 評価項目 設計要求への対応 NEXT法 超臨界直接抽出法(代替法) 酸化物電解法(酸化物燃料対応) 金属電解法(金属燃料対応) 200tHM/y 50tHM/v 38tHM/v 50tHM/v 現行の各種基準類に準拠し設計。 原則、現行の各種基準類に準拠し 現行の各種基準類 原則、現行の各種基準類に準拠し 原則、現行の各種基準類に準拠し・ 適用規格 全般 設計。 に準拠 設計。 設計 サイクル製品への 混入率1.2wt%以下を満足。 混入率1.2wt%以下を満足。 混入率1.2wt%以下を満足。 混入率1.2wt%以下を満足(燃料製 (U/TRU製品中0.5wt%) (U/TRU製品中0.06wt%) (MOX共析物中0.6wt%) 混入率1.2wt%以下 造後のサイクル製品ではU添加によ (U製品中0.05wt%) (U製品中0.5wt%) (U析出物中0.4wt%) る成分調整実施)。 FP混入率 (U/TRU合金中2.2wt%(Pu富化度 70%)。) (U合金中~0wt%) 臨界設計は形状管理。 臨界設計は質量管理。 臨界設計は基本的に質量管理。 LWR再処理施設・ 臨界設計は形状管理。 先行のLWR再処理施設の安全設 電解精製槽では質量管理と化学 MOX製造施設と同 超臨界圧力機器等の取扱を考慮 高温融体、塩素ガス等の取扱いを 考慮したシステム構築。 等以上 計手法を踏襲。 したシステム構築。 形態管理の組合せ。 高温融体、金属HM等の取扱を考 先行のLWR再処理施設と同等以 先行のLWR再処理施設と同等以 安全性 先行のLWR再処理施設と同等以 上の安全性を確保できる見通し。 上の安全性を確保できる見通し。 上の安全性を確保できる見通し。 慮したシステム構築。 先行のLWR再処理施設と同等以 上の安全性を確保できる見通し。 0.8円/kWh以下 ペレット法との合算で0.48 ペレット法との合算で1.06 振動充填法との合算で0.89 射出成型法との合算で0.75 燃料サイクル費 (0.26+0.22)円/kWh。 (0.60+0.46)円/kWh。 (0.55+0.34)円/kWh。 (0.47+0.28)円/kWh。 経済性 (再処理費 50tHM/yベース:1.17(0.71+0.46)円 +燃料製造費) /kWh。 先行LWR再処理施設と同等以下 先行LWR再処理施設と同等以下 単位発電量あたり 先行LWR再処理施設と同等以下 先行LWR再処理施設と同等以下 環境放出放射能 (\*1)LWR再処理施 を確保できる見通し。 を確保できる見通し を確保できる見通し を確保できる見通し 処分区分毎の廃設・MOX製造施設と 高レヘル廃棄物(ホウケイ酸カラス固化 高レベル廃棄物(ホウケイ酸ガラス固化 高レベル廃棄物(リン酸ガラス固化体) 高レベル廃棄物(人工鉱物固化体) 棄物発生量の合同等以下 体)発生量は先行サイクル施設の約 体)発生量は先行サイクル施設の約 発生量は先行サイクル施設の約 発生量は先行サイクル施設とほぼ同 計(\*2) 60% 60% 40% 程度の見通し。(\*3) 環境負荷 回収工程を付加すれば目標達成 U-TRUの廃棄物(0.1%以下を目標 不溶解残渣からの回収工程付加 回収工程を付加すれば目標達成 回収工程を付加すれば目標達成 低減性 への移行率 により目標達成見通し有り。 は可能。 は可能。 は可能。 プロセス固有の方法 Iはほぼ全量分離回収可能。 NEXT法と同等程度の回収見通し FP(Cs、Sr、Tc、I)については、そ FP(Cs、Sr、Tc、I)については、そ FPの廃棄物へので回収できる範囲 Cs、Sr、Tcについては、回収工程 有り。 の多くが廃棄物へ移行。 の多くが廃棄物へ移行。 の付加で回収可能と評価。 Iは人工鉱物固化で固定化の見通 で回収 移行率 し有り。 各99%以上 燃料サイクルシステムとして、99%以上 燃料サイクルシステムとして、99%以上 燃料サイクルシステムとして、99%以上 燃料サイクルシステムとして、99%以上 資源有効 し、TRU回収率 回収可能。 回収可能。 回収可能。 回収可能。 不溶解残渣からのU/TRUの回収 絞り電解でのMA回収成立が前 利用性 工程付加で、さらに向上可能。 提. 各プロセスで純粋な 全ての工程においてPuはUとの混・ 全ての工程においてPuはUとの混 全ての工程においてPuはUとの混 全ての工程においてPuはUとの混・ Puが単独で存在し 合物として存在し、Puの単離なし。 合物として存在し、Puの単離なし 合物として存在し、Puの単離なし。 合物として存在し、Puの単離なし ない設計 核拡散抵抗性 保障措置に配慮し 先行のLWR再処理施設等を参考 先行のLWR再処理施設等を参考 既存施設の設計例を参考にKMP, 既存施設の設計例を参考にKMP, とした計量管理システム構築。 とした計量管理システム構築。 た設計 MBAを設定。 MBAを設定。 主たる計量管理手法は秤量とサン 主たる計量管理手法は秤量とサン NRTAに対応。 プリング。 プリング。 年間稼働日数200 所定の処理能力を満足するシステム マテリアルハントリングによるバッチ処理を マテリアルハンドリングによるバッチ処理を・ 所定の処理能力を満足するシステム 日/年以上となるシ 基本とした遠隔自動化システムとし 基本とした遠隔自動化システムとし 構築。 構築。 ステム て、所定の処理能力を満足するシ て、所定の処理能力を満足するシ 運転·保守補修性 ステム構築。 ステム構築。 保守補修性に配慮 必要なアクセスルート及び保守補修ス 必要なアクセスルート及び保守補修ス 必要なアクセスルート及び保守補修ス 必要なアクセスルート及び保守補修ス ペースを確保。 した設計 ペースを確保 ペースを確保 ペースを確保 設計根拠の明確化 基本は実績のあるPUREX法で構 原理的な成立性の実証途上(直接 原理的な成立性の実証途上 全般的に実用化の障壁となるよう (MOX共析、MA回収等)で、基礎 なプロセス上の問題は無し。 と信頼性の向上 抽出、MA回収等)で、基礎データの 成。 各プロセスとも原理確認済。 充足が必要。 データの充足が必要。 国内及び米国ANLのFCFにて、原 晶析装置等の機器開発が必要。 主要機器の開発が必要。 移行率等の安全評価上のデータの 理確認の基礎データ取得済。 技術的成立性 比較的早期に技術体系確立の見 拡充が必要。 移行率等の安全評価上のデータの 遠隔操作、高温融体取扱を考慮し 拡充が必要。 通し。 た機器の開発が必要。 遠隔操作、高温融体取扱を考慮し た機器の開発が必要。

表 11.1.1 再処理システム/設計要求に対する技術評価のまとめ

(\*1) プラントの年間再処理量、平均燃焼度、発電効率を考慮。

(\*2)本検討では、設計要求記載の「処分場の負荷による重みを掛けた廃棄物発生量」は対象外。

(\*3) 処分体中の比放射能が低いので、一概に処分への負荷が大きくなるかは今後の精査が必要。

	/# <del>*/</del>
金禹電解法(酸化物燃料对応) 50tHM/√	1 偏 考
金属燃料と同様。	
混入率1.2wt%以下を満足(燃料製 造後のサイクル製品ではU添加によ る成分調整実施)。	()は再処 <sup>囲制 日 ^ 、</sup> 一
<ul> <li>(U/TRU合金中2.0wt%(Pu富化度 70%)。)</li> <li>(U合金中~0wt%)</li> <li>              へ見歴期と同様      </li> </ul>	<sub>埋我前へ</sub> 一 ス
並周燃科⊂回惊。	
振動尤填法との音算で0.99 (0.61+0.38)円/kWh。	資源炉心 の場合の 評価値
先行LWR再処理施設と同等以下 を確保できる見通し。	
高レヘブル廃棄物(人工鉱物固化体) 発生量は先行サイクル施設とほぼ同 等の見通し。(*3)	
回収工程を付加すれば目標達成 は可能。	
Cs、IIこついては、約70%分離回 収可能と評価。 Sr、Toについては、その多くが廃 棄物へ移行。	
燃料サイクルシステムとして、99%以上 回収可能。	
金属燃料と同様。	
金属燃料と同様。	
金属燃料と同様。	
金属燃料と同様。	
金属燃料と同様。 酸化物燃料特有のプロセス(Li還元 等)に関しても、原理確認済。	

		酸化物	窒化物燃料(ペレット)		
Ī	評価項目	NEXT法 (200tHM/y)	超臨界直接抽出法 (代替法) (50tHM/y)	NEXT法 (200tHM/y)	
FP混入率	サイクル製品への 混入率1.2wt%以下 ():再処理製品ペース	・混入率1.2wt%以下を満足。 ・(U/TRU製品中:0.06wt%) ・(U製品中 :0.05wt%)	・混入率1.2wt%以下を満足。 ・(U/TRU製品中:0.5wt%) ・(U製品中 :0.5wt%)	酸化物燃料と同じ	
安全性	現行指針類に準拠 (臨界安全, 耐震,火災・ 爆発防止)	<ul> <li>・先行のLWR再処理施設の安全設計手法を踏襲。</li> <li>[臨界安全性]</li> <li>・臨界設計は形状管理。</li> <li>[耐震]</li> <li>・耐震については「再処理施設安全審査指針」,「混合酸化物燃料加工施設安全審査指針」における耐震要求に基づき設計。</li> <li>[火災・爆発防止」</li> <li>・火災・爆発を生じる危険性のある物質に対して,設備対応。</li> </ul>	・超臨界圧力機器等の取扱を考慮したシステム 構築。 [ <b>臨界安全性]</b> ・同左 [ <b>耐震</b> ] ・同左 [ <b>火災・爆発防止</b> ] ・同左	酸化物燃料と同じ	
	安全上の特徴に 配慮した設計	[水素の取扱い] ・水の放射線分解により発生する水素について は掃気により水素濃度を可燃限界以下に保持。 [放射性物質の取扱い] ・水溶液の沸騰による放射性物質の気相への漏 洩量の増加については,安全冷却系を考慮。 [有機溶媒・樹脂の取扱い] ・抽出に用いる有機溶媒の火災・爆発について は,引火点以下に工程温度を管理,また,劣化 物については溶媒洗浄工程において除去。	[水素の取扱い] ・同左 [放射性物質の取扱い] ・同左 [火災・爆発防止」 ・同左 NEXT法において記載した項目に加え,「高圧 で運転される機器からの異常漏洩」を考慮し, 異常漏洩が発生しても負圧を保つことができる セル容積を確保することにより放射性物質の閉 じ込めを担保。	・窒化物燃料粉を取り扱うセル(酸化熱処理) はAr雰囲気に設定。	・窒 はAr
	線量当量評価 (線量目標: 50 µ Sv/y/サイト)	6.6µSv/y/サイト	1.7µSv/y/サイト	6.6µSv/y/サイト	
	検討結果	┃・先行のLWR再処理施設と同等以上の安全性を確 ┃保できる見通し。	・先行のLWR再処理施設と同等以上の安全性を確 保できる見通し。	・窒化物臨界制限値を用いた臨界安全設計が必  要。	・窒 要。
経済性	燃料サイクル費 (再処理費+ 燃料製造費) 0.8円/kWh以下	ペレット法との合算で 200tHM/y:0.48(0.26+0.22)円/kWh 50 t HM/y:1.17(0.71+0.46)円/kWh 条件:資源重視型炉心	ペレット法との合算で 1.06(0.60+0.46)円/kWh 条件:50tHM/y , 資源重視型炉心	ペレット法との合算で 0.33(0.16 + 0.17)円/kwh 条件:200 t HM/y ,資源重視型炉心	被覆 条件
	プロセス簡素化, 機器のコンパクト 化	・晶析工程においてUを粗分離することにより後 工程の規模をコンパクトにすることが可能。 ・MA回収工程に抽出クロマトグラフィーを採用 することにより,従来まで別建屋としていたMA 回収工程を主建屋内に収める事が可能となり, 建屋規模を縮小。	・燃料粉末から直接重金属元素を抽出できるこ とから,NEXTプロセスの溶解~抽出までの工程 を直接抽出塔及びハル洗浄塔からなる直接抽出 工程に簡素化。	酸化物燃料と同じ	
	検討結果	・燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8 円/kWh以下を200tHM/yでは達成する見通し。 ・付帯設備(廃液処理設備等)及び共用設備 (試薬,ユーティリティ等)の合理化によりさ らに再処理コストを削減可能。	・燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8 円/kWh以下を上回る見通し。 ・付帯設備(廃液処理設備等)及び共用設備 (試薬,ユーティリティ等)の合理化が必要。	酸化物燃料と同じ	

## 表11.1.2 湿式再処理システムの技術評価 (1/3)

窒化物燃料(被覆粒子)
NEXT法 (200+HM/y)
(2001111/7 y)
酸化物燃料と同じ
酸化物燃料と同じ
『你物燃料粉を取り扱うセル(酸化熱処理) 「雰囲気に設定。
同左
配化物臨界制限値を用いた臨界安全設計が必
粒子法との合算で 0.58(0.27+0.31)円/kwh 5:200tⅢ/y,資源重視型炉心 
酸化物燃料と同じ
酸化物燃料と同じ

評価項目		酸化物	勿燃料	窒化物燃料(ペレット)	窒化物燃料(被覆粒子)
		NEXT法 (200tHM/y)	超臨界直接抽出法 (代替法) (50tHM/y)	NEXT法 (200tHM/y)	NEXT法 (200tHM/y)
	環境放出放射能	・先行LWR再処理施設と同等以下を確保できる見 通し。	・先行LWR再処理施設と同等以下を確保できる見 通し。	-	-
環境負荷 低減性 (NEXT法:		[通常運転時に発生する廃棄物 <sup>•</sup> ] ・ガラス固化体:物質収支計算とTVF組成から推定。 ・TRU,高,低放射性廃棄物:先行LWR再処 理施設の実績を参考に推定。 [解体時に発生する廃棄物 <sup>•</sup> ] ・設計図書(建屋図,機器リスト等)から廃棄 物量を推定。	[通常運転時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・ガラス固化体:物質収支計算とTVF組成から推 定。 ・TRU,高,低放射性廃棄物:先行LWR再処 理施設の実績を参考に推定。 [解体時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・設計図書(建屋図,機器リスト等)から廃棄 物量を推定。	[通常運転時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・ガラス固化体:酸化物燃料処理時のガラス固 化体発生量と酸化物燃料及び窒化物燃料中のFP 量の比により推定。 ・TRU,高,低放射性廃棄物:酸化物燃料と 同様と仮定。 [解体時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・酸化物燃料と同様と仮定。	[通常運転時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・窒化物ペレット燃料処理時の値に,被覆粒子 燃料処理に伴う増分を加味。 [解体時に発生する廃棄物 <sup>*</sup> ] ・窒化物ペレット燃料の場合をベースに,燃料 製造方法が被覆粒子法となったことに伴う増減 を考慮し算出。
200tHM/y ,	廃棄物発生量評価	通常運転時に発生する廃棄物(年間)			
超臨界直接		<u>ホウケイ酸ガラス固化体: 36m<sup>3</sup></u>	9m <sup>3</sup>	58m <sup>3</sup>	53m <sup>3</sup>
抽出法: 50 tHM/y)		TRU , 高 並廃棄物 :230m <sup>3</sup>	53m <sup>3</sup>	230m <sup>3</sup>	190m <sup>3</sup>
		(極)低レベル廃棄物: 120m <sup>3</sup>	18m <sup>3</sup>	120m <sup>3</sup>	120m <sup>3</sup>
		解体時に発生する廃棄物(年間)			
		TRU,高 亚廃棄物(金属): 500t	250 t	500 t	550 t
	* 廃棄物分類: 表2.3.9参照	低レベル , 極低レベル 並廃棄物 ( 金属 ,コンクリート ) : 5,800 t	3,600 t	5,800 t	5,100t
		クリアランスレベル以下 の廃棄物(金属,コンクリート): 500,000t	310,000 t	500,000 t	420,000 t
	検討結果	・先行サイクル施設と同等以下を確保できる見 通し。	・先行サイクル施設と同等以下を確保できる見 通し。	・先行サイクル施設と同等以下を確保できる見 通し。	・先行サイクル施設と同等以下を確保できる見 通し。
資源有効 利用性	U・TRU回収率: 各99%以上	・燃料サイクルシステムとして,99%以上回収可 能。 ・不溶解残渣からのU/TRUの回収工程付加で,さ らに向上可能。	・燃料サイクルシステムとして、99%以上回収可 能。	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ
	検討結果	・設計要求を達成できる見通し。	・基礎データの拡充の必要性はあるが,設計要 求を達成できる見通し。	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ
	純粋なPuが 単独で存在しない	・全ての工程においてPuはUとの混合物として存 在し,Puの単離なし。	・全ての工程においてPuはUとの混合物として存 在し,Puの単離なし。	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ
核拡散 抵抗性	保障措置を 考慮した設計	・先行のLWR再処理施設等と参考とした計量管理 システム構築。 ・NRTAに対応。	・先行のLWR再処理施設等と参考とした計量管理 システム構築。	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ
	検討結果	・先行のLWR再処理施設に比べ,Puインベント リ,FP混入量が増加することへの対応が必要 (分析精度,作業性低下への対策)。	・先行のLWR再処理施設に比べ,Puインベント リ,FP混入量が増加することへの対応が必要 (分析精度,作業性低下への対策)。	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ

# 表11.1.3 湿式再処理システムの技術評価 (2/3)

評価項目		酸化物燃料		窒化物燃料(ペレット)	窒化物燃料(被覆粒子)
		NEXT法 (200tHM/y)	超臨界直接抽出法 (代替法) (50tHM/y)	NEXT法 (200tHM/y)	NEXT法 (200tHM/y)
運転・保守 補修性	200日/年以上の稼 動が可能なシステ ムで,保守補修性 に配慮した設計	[運転性] ・遠隔自動化運転 先行のLWR再処理施設との整合を取りつつ工程の 簡略化を図った設計としており,特に支障なく 遠隔自動化運転可能。 ・処理能力 所定の能力に対して十分な余裕を持った機器設 計とすることによりプラントの処理能力を保 証。 [保守・補修性] ・保守・オ格性] ・保守・マニプレータを用いた,セル壁の 遮蔽窓からの視認による遠隔保守システム。 ・機器設計 主要工程機器は交換が想定される部分を遠隔操 作で交換できるように設計。貯槽・配管につい ては先行のLWR再処理施設の実績に基づき保守を 想定せず。 ・保守計画/シナリオ検討 遠隔保守機器による機器へのアクセスルート及 び保守セルまでの移送経路を確保。ただし,晶 析装置等の新たに開発している機器について は,現段階で保守補修性を検討できるまでには 設計が詳細化されていないため,保守作業内容 の検討には至らず。	[運転性] 同左 [保守・補修性] 同左	酸化物燃料と同じ	酸化物燃料と同じ
技術的 成立性	設計根拠の明確化 と信頼性の向上	<ul> <li>・基本は実績のあるPUREX法で構成。</li> <li>・各プ 叱スとも原理確認済。</li> <li>・晶析装置等機器開発が必要。</li> <li>・比較的早期に技術体系確立の見通し。</li> </ul>	・超臨界直接抽出に関し,原理確認試験を実 施。 ・主要機器の開発が必要。	・前処理に関してはせん断後,加熱炉による酸 化物転換工程を追加することを想定している が,概念設計のみであり,試験実績はなし。	・前処理に関しては脱被覆とN-15回収のため フッ化物揮発法を想定しているが,概念設計の みであり,原理確証のための基礎試験段階。 ・真球度の高い窒化物燃料核を作るためには, 湿式ゲル化法を用いた燃料製造技術とつなげる 必要がある。これに伴う酸化物転換工程,フッ 素除去工程の検討結果が必要。
	検討結果	・機器開発を要する工程もあるが , システム全 体としては実証段階。	・原理的な成立性(直接抽出、MA回収等)の実 証途上で,基礎データの充足が必要。	・前処理に関してはプロセス技術の開発段階, 以降の工程は酸化物燃料と同じく,システム実 証段階。	・前処理に関してはプロセス技術の開発段階, 以降の工程は酸化物燃料と同じく,システム実 証段階。

# 表11.1.4 湿式再処理システムの技術評価 (3/3)

#### 酸化物燃料 金属燃料 酸化物燃料 評価項目 酸化物電解法 (50tHM/y) 金属電解法 (38tHM/y) 金属電解法 (50tHM/y) ・混入率1.2wt%以下を満足(燃料製造後のサイ 混入率1.2wt%以下を満足。 ・混入率1.2wt%以下を満足(燃料製造後のサイ 记 サイクル製品への (MOX共析物中0.6wt%) クル製品では U添加による成分調整実施)。 クル製品ではU添加による成分調整実施)。 FP混入率 混入率1.2wt%以下 (U析出物中0.4wt%) ・(U/TRU合金中2.2wt%(Pu富化度70%)。) ・(U/TRU合金中2.0wt%(Pu富化度70%)。) ():再処理製品ベース ·(U合金中~Owt%) ・(U合金中~Owt%) [臨界安全性] [臨 [臨界安全性] [臨界安全性] ・質量管理を主とした管理により単ーユニット ・質量管理を主とするが, 電解精製槽では「化 同 ・同左 の臨界安全性を確保。 学形態管理」を併用。 [放 「放射性物質の閉じ込め」 [放射性物質の閉じ込め] [放射性物質の閉じ込め] ・溶液を内蔵する機器 / セル / 建屋の各レベル ・同左。ただし,電解精製槽は微正圧での運転 同 ・同左 で負圧による動的閉じ込め。 (動的閉じ込め機能を持たない)とするため, セルレベルでの閉じ込め性を重視した設計。 [耐震] [耐 [耐震] [耐震] 同左 同 現行指針類に準拠 主要機器の耐震分類を設定。 ・主要機器である電解精製槽、陰極処理装置は (臨界安全, 電解槽の地震対策として免震床を採用。 「火 クラス分類。 [火災·爆発防止] 耐震,火災· [火災·爆発防止] [火災・爆発防止] ・金属火災防止のためAr雰囲気の気密セル。 金 爆発防止) ・熱脱被覆工程,酸化転換工程では使用する水 ・可燃物である塩化ジルコニウムを扱うハル洗 ・金属火災防止のためAr雰囲気の気密セル。 浄セルはAr雰囲気の気密セル。 素ガス及び酸素ガスの希釈,濃度制限実施。ま たこれらの工程機器は負圧による動的閉じ込め [動 [動的に維持される安全機能] [動的に維持される安全機能] 機能あり。 [動的に維持される安全機能] 単一故障を考慮しても機能喪失なし。 同 ・同左 ・同左 安全性 「高温融体の取扱い」 [高温融体の取扱い] 一次容器漏えいを考慮したドリップトレイの ・一次容器漏えいを考慮したドリップトレイの 設置あるいは二重化容器。 設置あるいは二重化容器。 ・電解槽上部シール材の強制冷却機能。 [TRU金属等の取扱い] 安全上の特徴に 「塩素ガスの使用) ・Arガス純化・冷却系による火災防止のための 同左 配慮した設計 「塩素ガスの使用:機器閉じ込めと回収装置の 化学的制限值維持。 設置。セルに漏えい検知器を設置(主に閉じ込 ・Ar雰囲気の異常事象(純度,圧力変動)に対 め性に与える腐食の影響抑止)。 する工学的安全設備としてArガス緊急注入系を 設置。 線量当量評価 (線量目標: 1.7µSv/v/サイト 0.7µSv/v/サイト 1.5µSv/v/サイト 50 µ Sv/y/サイト) ・現行指針類の一部の項目について,対応の可 能性を提示。 検討結果 同左 同左 ・先行のLWR再処理施設と同等以上の安全性を確 保できる見通し。 燃料サイクル費(再処理振動充填法との合算で 射出成型法との合算で 振動充填法との合算で 金属 0.89(0.55+0.34)円/kWh 0.99(0.61+0.38)円/kWh 0.75(0.47+0.28)円/kWh 費+燃料製造費) (10 条件:50tHM/y,資源重視型炉心 条件:38tHM/y,資源重視型炉心 条件:50tHM/y,資源重視型炉心 0.8円/kWh以下 ・電解精製槽は,8極/基,固体陰極/液体Cd陰極 ・基 ・UO2とNMの分離工程を削除(NM電解で貴金属 ・同左(陰極処理装置を除く) 同時電解方式を採用し,処理規模増加により基 及び コーティング電極を採用し, UO2の同伴を防 数削減。 ・塩素化溶解法からLi還元法に変更。 但し 止)。 ・電極装填装置は,電解精製槽付き方式から専 電 ・燃料処理セルと塩除去セルの統合(塩除去工 用レール移動方式とし,より多くの電極の扱い ・窒 程を水洗方式から蒸留方式に変更)。 採用 と他の電解精製槽との兼用が可能。 ・機器の共有化(固体廃棄物処理にタイムシェ ・陰極処理装置(塩/Cd除去,核物質溶融)は,回 プロセス簡素化 アリング方式を採用)。 分式・自然冷却方式(降温時)から連続式・Ar強 経済性 機器のコンパクト 制冷却方式とし,処理規模増加により基数を削 化 減,機器高さの抑制によりセルをコンパクト化 ・PC(Pressureless Consolidation)人工鉱物固 化設備,PSA法(圧力スウィング吸着法)アルゴン セル浄化設備を採用し,プロセスを簡素化 ・遠隔自動運転装置採用による運転員数の削減。 ・燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8 ・燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8 ・燃料サイクル費(再処理費+燃料製造費)0.8 円/kWh以下を上回る見通し。 円/kWh以下を満足する見通し。 円/kWh以下を上回る見通し。 検討結果 ・更なる合理化が必要。 ・更なる合理化が必要。

## 表11.1.5 乾式再処理システムの技術評価 (1/3)

窒化物燃料
金属電解法 (50tHM/y)
入率1.2wt%以下を満足。
界安全性]
左
射性物質の閉じ込め ]
左
震门
左
火・爆光的エコ 属火災防止のためAr雰囲気の気密セル。
的に維持される安全機能1
同左
_
同左
燃料金属電解法にほぼ相当
00円/g <sup>15</sup> Nベース)
本的には,ほとんど金属燃料金属電解法の 1と同様
,次の追加プロセスがある。
解精製後U, Pu, MAの窒化処理プロなを付加
素(N-15)の循環回収可能な窒素回収7 ロセス
_
-

⋽⋥⋌⋿⋶⋶		酸化物燃料	金属燃料	酸化物燃料	
Ē	泮1叫4月日	酸化物電解法 (50tHM/y)	金属電解法 (38tHM/y)	金属電解法 (50t₩/y)	
	環境放出放射能	・先行のLWR再処理施設と同等以上の安全性を確 保できる見通し。	同左	同左	
		[通常運転時に発生する廃棄物*] ・プロセス廃棄物発生量は物質収支評価結果を 基に評価。 ・雑廃棄物は機器交換品,消耗品等の発生量を 基に評価。	[通常運転時に発生する廃棄物*] ・プロセス廃棄物発生量は物質収支評価結果を 基に評価。 ・雑廃棄物のうち,機器交換品,消耗品等につ いてはその一部を評価。	[通常運転時に発生する廃棄物*] ・酸化物電解法の記載に準じる。	[ <b>通</b> ] ・金
環境負荷		[ <b>解体時に発生する廃棄物*]</b> ・機器配置設計情報,プロセス設計情報を基に評 価。	[ <b>解体時に発生する廃棄物*]</b> ・機器配置設計情報,プロセス設計情報を基に評 価。	<b>[解体時に発生する廃棄物*]</b> ・酸化物電解法の記載に準じる。	[解1 ・フ
低減性	廃棄物発生量評価	運転時に発生する廃棄物(年間)			
( 金属燃料: 38tHM/y ,		<u>リン酸カラス固化体, 金属廃乗体: 6./m°</u> TRU 高 並廢棄物・ 81m <sup>3</sup>	<u>人工鉱物固化体:21m°</u> 29m <sup>3</sup>	<u>人工鉱物卤化体: 16m°</u> 	
その他: 50tHM/y)			(如内交換機器、雑廃棄物不含)	F0 <sup>3</sup>	
		(1位) (低レヘル発業物: 44m) 解体時に発生する廃棄物(年間)	-	50m	
	* 成 东 物 八 粘 ,	TRU,高 並廃棄物(金属): 300t	550 t	650 t	
	* 廃棄物分類: <mark>表.2.3.9参照</mark>	低レベル , 極低レベル 並廃棄物 ( 金属 , コンクリート ) : 1,600 t	2,200t	3,800t	
		クリアランスレベル以下 の廃棄物(金属,コンクリート): 190,000t	190,000 t	320,000 t	
	検討結果	・先行サイクル施設と同等以下を確保できる見 通し。	・先行サイクル施設とほぼ同程度の見通し。 ・人工鉱物固化体については、処分体中の比放 射能が低いので,一概に処分への負荷が大きく なるかは今後の精査が必要。	・先行サイクル施設とほぼ同等の見通し。 ・人工鉱物固化体については、処分体中の比放 射能が低いので,一概に処分への負荷が大きく なるかは今後の精査が必要。	
資源有効 利用性	U・TRU回収率: 各99%以上	・未照射燃料試験の結果を考慮すると,脱被覆 工程で0.5%の燃料がハルへ移行。この燃料を回 収するため,ハル洗浄工程を設置。 ・MM電解におけるU,TRUの廃棄物への移行量を 低減。 以上の結果,燃料サイクルシステムとして, 99%以上回収可能。	・燃料の主たるロスは溶解残査としてハルへ移 行するU,TRU,及び廃塩処理工程でゼオライト へ移行するU,TRU。 これらを考慮して物質収支を評価した結果, 燃料サイクルシステムとして,99%以上回収可 能。	・燃料の主たるロスは,脱被覆時にハルへ移行 するU,TRU,並びにLi還元工程及び廃塩処理工 程でゼオライトに移行するU,TRU。 これらを考慮して物質収支を評価した結果, 燃料サイクルシステムとして,99%以上回収可 能。	・行へ 燃能。
	検討結果	・絞り電解によるMA回収等一部理論的見地から のデータに基づく評価であり,今後試験等で基 礎データを拡充し,評価していく必要性あり。	・国内外の基礎データに基づく評価であり,基 礎データの拡充の必要性はあるが,設計要求を 達成できる見通し。	同左	
	純粋なPuが 単独で存在しない	・全ての工程においてPuはUとの混合物として存 在し,Puの単離なし。	同左	同左	
核拡散 抵抗性	保障措置を 考慮した設計	・既存施設の設計例を参考にKMP,MBAを設定。 ・入量計量は脱被覆後,バッチ単位の均質化混 合粉体の秤量とサンプリング分析で行う。 ・主たる計量管理手法は秤量とサンプリング。	・既存施設の設計例を参考にKMP,MBAを設定。 ・入量計量には,せん断燃料片の秤量/サンプリ ング分析/炉燃焼計算値を組み合わせる方法等, 複数案を検討。 ・主たる計量管理手法は秤量とサンプリング。	・既存施設の設計例を参考にKMP,MBAを設定。 ・入量計量には脱被覆後粉体を秤量/サンプリン グ分析する方法等,複数案を検討。 ・主たる計量管理手法は秤量とサンプリング。	・既 ・入 様。 ・主
	検討結果	・溶融塩および析出物などの固体物からのサン プリングの代表性や、FP混入による分析精度の 低下など計量技術上の課題解決,適時性要求に 対応できるNRTAシステムの開発など課題あり。 ・長期的には、核拡散抵抗性という考え方を取 り入れた新しい保障措置概念を提案し、その概 念に対する国際的な合意を得る必要あり。	同左	同左	

## 表11.1.6 乾式再処理システムの技術評価 (2/3)

窒化物燃料
金属電解法 (50tHM/y)
同左
常運転時に発生する廃棄物*] :尾燃料記載内容に進じる
本時に発生する廃棄物*1
ェーズ 中間取りまとめでは評価せず。
<u> - 孤初固化14, セメノト固化14: 13m<sup>-</sup> 21m<sup>3</sup></u>
(加内交換機器、維廃棄物不含)
-
-
-
-
-
料の主たるロスは溶解残査としてハルへ移 ろ川 TRU 及び座塩処理工程でゼオライト
れらを考慮して物質収支を評価した結果, サイクルシステムとして,99%以上回収可
同左
存施設の設計例を参考にKMP,MBAを設定。 量計量は未定。基本的には金属燃料と同
たる計量管理手法は秤量とサンプリング。
同左

評価項目		酸化物燃料	金属燃料	酸化物燃料	窒化物燃料
		酸化物電解法 (50tHM/y)	金属電解法 (38tHM/y)	金属電解法 (50tHM/y)	金属電解法 (50tHM/y)
運転・保守 補修性	200日/年以上の稼 動が可能なシステ ムで,保守補修性 に配慮した設計	[運転性] ・遠隔自動化運転:マテリアルハンドリングに よるバッチ処理を基本とし、主要機器の運転操 作手順を確認。 ・処理能力:所定の処理能力を有することを運 転のタイムチャートで確認。 ・その他:坩堝寿命の長寿命化や電解回収物か らの塩除去方法の変更により,プロセスを簡略 化。 [保守・補修性] ・保守・補修性] ・保守・マスタースレーブマニピュレータ, パワーマニピュレータによる保守システムを構 築。 ・機器設計:機器毎の交換を可能にするため ラック構造を採用。保守項目の検討に基づき, 保守が容易になるように各工程機器の設計に反 映。 ・保守計画/シナリオ検討;インセルクレーン による機器へのアクセスルート及び保守セルま	[運転性] ・遠隔自動化運転:マテリアルハンドリングに よるバッチ処理に基づくと共に、高温融体であ る溶融塩及び液体金属の移送は配管輸送システ ムを適用。 ・処理能力:配置設計に際して物流に配慮。分 析を考慮した運転のタイムチャートにより,所 定の処理能力を有することを確認。 ・その他;試薬の搬入及び廃棄物の搬送は自動 化しない。 [保守・補修性] ・保守システム:セル内保守エリア,保守セ ル,マスタースレーブマニピュレータ,パワー マニピュレータによる保守システムを構築。 ・機器設計:工程機器のユニット化の推進。 ・保守計画/シナリオ検討;電解装置の保守作 業手順と動線,並びに作業に必要な機器を検討 し、アクセスルート及び保守セルまでの搬送経 路を確保。課題・大型の機器が多く,また配管 移送システムがアクセス及び搬送経路に制約を	[運転性] ・運転性については基本的に金属燃料を取り扱 うシステムと同等。 [保守・補修性] ・保守・補修性については基本的に金属燃料を 取り扱うシステムと同等。	[運転性] ・運転性については基本的には金属燃料を取り 扱うシステムと同等。 [保守・補修性] ・保守・補修性については基本的には金属燃料 を取り扱うシステムと同等。
技術的 成立性	設計根拠の明確化と信頼性の向上	での搬送経路を確保。 ・MOX共析の原理確認。運転制御の最適化に向けた試験実施中。 ・MA回収に関し,原理確認試験を実施。現状の 絞り電解の成立性は困難。代替技術である沈殿 回収法等の検討必要。 ・移行率等の安全評価上のデータの拡充が必要。 ・廃棄物固化技術についてリン酸ガラス等の性 能試験を実施。 ・遠隔操作,高温融体取扱を考慮した機器の開 発が必要。	<ul> <li>課す恐れあり。</li> <li>・国内及び米国FCFにて、電解精製等の原理 確認の基礎データは取得済。</li> <li>・米国ANLのFCFにて,工学規模で使用済燃料(ブランケット)の電解運転中。</li> <li>(例えば,電解槽は小型試験の結果に基づき,4 極/基を採用)</li> <li>・TRU回収に関し,高温抽出器, ゼオライトを使用した原理確認試験実施済。</li> <li>・移行率等の安全評価上のデータの拡充が必要。</li> <li>・廃棄物固化技術についてPC人工鉱物固化等の 性能試験,処分対応試験を実施中。</li> <li>・遠隔操作,高温融体取扱を考慮した機器の開発が必要。</li> </ul>	・同左 ・Li還元に関する原理確認試験実施済。	<ul> <li>・金属燃料金属電解法と同様。</li> <li>・窒化物燃料の電解精製に関する原理確認が必要。なお基礎データ(U, Pu, Np)は取得済。</li> <li>・電解精製後のU, Pu, MAの窒化処理に関する原理確認が必要。なお基礎データあり。さらに改良窒化処理法の研究推進中。</li> </ul>
	検討結果	の実証途上で,基礎データの充足が必要。	* 主阪町に美田1000 厚壁となるようなノロ セス上の問題はなし。	同左	・ 至11、初燃料の電解有製, 至111は, 原埋確認の 基礎データは取得しているが, 実用化に向けてのデータの充足, 機器設計の必要性あり。

# 表11.1.7 乾式再処理システムの技術評価 (3/3)

#### 11.2 湿式法の技術見通し

湿式再処理システムに関する技術見通しを以下に示す。

11.2.1 NEXT法(先進湿式法)

(1) 溶解·晶析·簡素化溶媒抽出

U、NpおよびPuの回収工程は、未確立の技術である晶析法の運転操作が容易 となるように設計している。すなわち、晶析工程はKfKの提案する工程に比べて 高温である10℃においてUを析出させることを条件としている。このために、高 い酸および重金属濃度の溶液を供給することとなり、溶解工程では粉体を溶解 し得られた溶液を定温に保持する必要が生じる。

当面、現在検討している工程条件の実現性を試験により実証することが急務 であるが、将来においては、低い温度での晶析操作の可能性を追求し、システ ム全体として合理的な工程を構築することが望ましい。

Npの回収は、主に共除染工程においてNp(V)が自動的に酸化されることを期待した設計としている。これについても試験により回収の実現性を評価することが必要である。また、十分に高いNpの回収率を安定に得ることを目的として、 上記とは別の方法を並行して検討することも重要である。

(2) MAREC(抽出クロマトグラフィー)

フローシートに関しては、CMPOとCyanexによる分離サイクルに拘らず、 様々な選択肢から最適化されたプロセスを構築する取り組みが必要である。 CMPOサイクルは典型的なTRUEX法のフローシートによるものとしたが、 SETFICS法に準じると、希土類元素を除去したAn(III)を得るとともに、塩析剤 を不要とする可能性がある。Cyanex 301はAn(III)と希土類元素の相互分離に優 れるが、抽出剤が容易に劣化するので別の方法を検討する必要があり、アミン 抽出法はこの目的に活用しうる。日本原子力研究所によるアミド系抽出 剤(TODGA)、仏国原子力庁(CEA)による窒素系配位子(R-BTP)、SESAME法な ども参考としていくことが望ましい。

機器開発の観点からは、閉じこめ安全を考慮したカラム装置や、適切な製品 溶液の分画を実現する制御機構の設計に取り組むことが必要である。安全性の 観点からは、溶媒劣化の影響について、溶媒抽出法と同様に検討していかねば ならない。

本技術に関する研究開発は現在(財)産業創造研究所が主体的に進めており、 効率的に研究開発を進めるため、適宜協力していくと良いと考えられる。 (3) その他の工程

前処理工程では、燃料集合体の解体やせん断を機械的に行う方法を採用して いるが、レーザーを利用した方法に適宜替えていくことが考えられる。また、 溶解工程において燃料粉体を得る必要が生じた場合には、このための技術の重 要度が特に増すことになる。

廃棄物処理については、今年度の設計作業において廃棄体を得るまでの工程 を包含した。低レベル廃棄物の処分に係る研究開発と歩調をそろえて進めてい くことが必要である。また、NOxを回収し再利用する工程を付加したが、主要 なプロセス成分について、物質収支をより精度良く評価し、適切な再利用方法 を適用していくことが望まれる。

機器等の保守は、マニプレータやクレーンなどを用いた既往の方法によるこ とを前提とした。保守機器の員数や仕様を定めるには、プロセス機器の詳細を 検討する必要があるが、可能な限り進めていくことが望ましい。

プロセスの運転制御に係わる設計はこれまでになされていない。このため、 前述のように保守設計が未熟である他に、操業費の見積もりにおいて重要な人 員配置を検討することができていない。プロセス機器の詳細を検討し、可能な 限り進めることが望ましい。

分析工程の設計は、品質保証や保障措置に対する対応など主にソフト面の設 計の進捗に影響を受ける。これまでにこのような設計は行っていないので、こ ちらも適宜進め、分析設計の詳細化を図ることが望ましい。

11.2.2 超臨界直接抽出法

超臨界直接抽出法はシステムの簡素化によりNEXT法に比べて費用および廃 棄物の点で有利となる見込みがあり、魅力的であるといえる。また、従来技術 における溶解と共除染工程を合わせた工程が中心であり、分離化学の観点から も継続して着目すべきである。しかしながら、技術的な課題は、分離離性能の 確認や主要な装置の開発を含むので、現時点において、超臨界直接抽出法は先 進湿式法の代替技術としては未成熟であると言える。

超臨界二酸化炭素(sf-CO<sub>2</sub>)-TBP-硝酸の系で酸化物から核物質の回収を行う

(以下、直接抽出)が、水が共存しない系では三価金属イオン(希土類元素、 AmおよびCm)をともに回収することは避けられない。その程度は、UやPuの 回収率に依存し、高い回収率を得ようとすると除染係数が悪くなる。これらの 関係を明らかにするためには、照射燃料を用いた試験を十分に行い、基礎的な データを蓄積する必要がある。

直接抽出、ハル洗浄と逆抽出・溶媒洗浄工程の機器はそれぞれ固体(燃料粉体および残渣)、固体(ハル)、水溶液(硝酸もしくはアルカリ)とsf-CO<sub>2</sub>の

二相系であり、装置設計は異なったものとなる。直接抽出については、粉体化 された燃料の取り扱い方法の確立、抽出後に残ると考えられる残渣の特性に関 するデータが重要であるが、照射燃料を用いた試験が必要である。

したがって、技術的成立性を早期に確認するよう、開発資源を十分に考慮し ながら試験および設計研究を継続することが望まれる。

研究開発の遂行に当たっては、三菱重工業や名古屋大学などの関係機関と協 力して効率的に進めていく必要がある。

11.2.3 NEXT法(先進湿式法) (窒化物燃料対応)

酸化物燃料対応の先進湿式法との差違は、<sup>15</sup>Nおよび<sup>14</sup>Cの回収、TiN 被覆粒 子燃料を用いる場合の脱被覆方法、窒化物を取り扱うことに起因する前処理工 程の雰囲気制御であり、これらについて述べる。

<sup>15</sup>Nは前処理の段階で高い割合で回収することが求められるが、候補技術とし て挙げたPSA法を含め技術は未確立といえる。プロセスの性能は工学的な規模 での気体の閉じ込めに依存する。このため、回収方法の選定や確立には、可能 な限り実際に近い規模での試験が重要となろう。<sup>14</sup>Cについても同様であり、試 験により回収性能を調べ、方法を選定するなどして、全体工程を最適化してい く必要がある。

TiN被覆の処理方法にはいくつかの候補が考えられるが、実験研究を踏まえて それぞれの得失を見極めていく段階にある。

前処理工程は火災・爆発の対策のためにAr雰囲気とすることを考えた。金属 電解法はAr雰囲気を採用しており、技術的な見通しはこれに準ずる。また、技 術的な困難さは管理の程度に依存するので、必要なArガスの組成をまず議論す べきであろう。O2は窒化物の火災、N2は<sup>15</sup>Nの回収率にそれぞれ影響し、これら を考慮して決定していくことが望まれる。

#### 11.3 乾式法の技術見通し

各乾式再処理システムの技術見通しを以下に示す。

- 11.3.1 酸化物電解法(酸化物燃料対応)
  - (1)現行の経済性評価は、技術的成立性を大前提としているが、現状の酸化物電解法は、理論を踏まえた詳細な設計を進めるには、元素の電気化学的制御に必要な信頼できる基礎的データが不足している。

(MOX 共析等には、溶融塩中の Pu、U 濃度等に応じて、酸化還元電位/ 塩素分圧/酸素分圧の適切な制御が必要であり、運転操作が複雑。絞り電 解による MA 回収は国内外の知見による理論解析に基づき設定したもの で、試験による原理確認の結果、困難な見通しであり、沈殿法などの代 替技術を含めたプロセス成立性の確認が必要。)

- (2) 電解槽等主要機器については工学実証までの技術開発事項が多い。
  - ・円滑操業に不可欠な長寿命るつぼ材料開発 (緻密化ジルコン製坩堝や電極構造の開発、CCIMの開発等)
  - ・塩素ガス使用に伴う機器、セル等の腐食対策
  - ・多量の FP 等の不純物の存在下での分離性能
- (3) 廃棄物処理処分技術についても工学実証を含めた技術開発が必要である。
- (4) 乾式プラントとしては国内に建設、操業の実績が無く、今後未知の開発 要素が生じる可能性があり、不確定要素が多い。

したがって、MA回収における代替技術を含めたプロセスの成立性確認と、 MOX共析等での基礎データの蓄積を図る必要があり、その成果を踏まえてあら ためてシステムの設計検討を進めることが望ましい。

- 11.3.2 金属電解法(金属燃料対応)
- (1) 金属燃料サイクルにおいては、再処理では金属電解法が最適である。
- (2)酸化還元電位の制御のみで元素を分離回収できることが、理論的に実証 されていること、Pu は低除染 TRU として回収されるため核拡散抵抗性 が高いこと等の特長がある。
- (3) 電解槽等主要機器については工学実証までの技術開発事項が多い。
  - ・新設計となる大型電解槽の高温構造設計
  - ・質量管理と化学形態管理を併用した臨界管理システムの構築
- (4) 廃棄物処理処分技術についても工学実証を含めた技術開発が必要である。
- (5) 乾式プラントとしては ANL-FCF 以外に建設、操業の実績が無く、今後

未知の開発要素が生じる可能性があるが、酸化物電解法よりは不確定要素が少ないと考えられる。

したがって、金属燃料対応として、システム設計検討および要素技術開発を 引続き進めることが望ましい。また、軽水炉から高速炉への移行期を考慮すれ ば酸化物燃料の金属還元技術(Li還元技術、電解還元技術開発等)の開発も進 めておく必要がある。

11.3.3 金属電解法(酸化物燃料対応)

- (1)酸化物燃料の金属還元および再処理製品の酸化転換がプロセス上必要と なるので、金属燃料サイクルよりも工程の増加は明白であり、経済性の 低下が不可避である。
- (2)現状の評価結果では経済性メリットにも乏しく、開発の有益性を見出し 難い。
- (3)主プロセスの開発は、金属燃料サイクルの開発成果の活用が可能であり、 金属電解法以外の酸化物燃料対応再処理技術開発の進展が望ましくなければ、再立上げは比較的容易と考えられる。

したがって、酸化物燃料を対象とした金属電解法について引続きシステム設 計検討を進める必要性は乏しい。

- 11.3.4 金属電解法(窒化物燃料対応)
  - (1) 電解精製後のUおよびTRUの窒化処理がプロセス上必要となり、また、 <sup>15</sup>Nを回収・リサイクルする技術が不可欠である。
  - (2)主プロセスの開発は、金属燃料サイクルの開発成果の活用が可能なので、 Pb-Bi 炉等原子炉プラントシステムの開発動向を踏まえ、当面は必要に応じ窒化転換技術および<sup>15</sup>N 回収・リサイクル技術などの開発を進めればよい。

したがって、窒化物燃料を対象とした金属電解法については、原子炉プラン トシステムの開発動向を踏まえシステム設計検討を進めるものとする。

- 11.3.5 フッ化物揮発法(酸化物燃料対応および窒化物燃料対応)
- (1)フェーズ I の時に課題とされた PuF6の不安定性について、その後の調査 で対応できる可能性が見出された。
- (2) 高除染の U を回収することが比較的容易であり、軽水炉から高速炉への

移行期にも対処しやすいプロセス構築が可能である。

- (3) フェーズ I において、経済性に優れているとの評価がなされており、さらに処理性能の向上などを見込んで流動床からフレーム塔への変更等も 検討されている。
- (4) 窒化物被覆粒子燃料の再処理については湿式法が検討されているが、被 覆粒子燃料の脱被覆および<sup>15</sup>N回収にはフッ化物揮発法の採用が有望と 考えられる。

したがって、酸化物燃料に対しては、最新の知見によりFSの設計要求に基づ くシステムの再設計が望ましい。一方、窒化物燃料に対しては、原子炉プラン トシステムの開発動向を踏まえシステム設計検討を進めるものとする。

11.3.6 LINEX 法(窒化物燃料対応)

LINEX法を利用した窒化物燃料サイクルについては、主要機器数は金属電解 法とほぼ同程度になると考えられるが、Li<sub>3</sub>Nが関与する化学反応の制御、溶解 窒化槽の耐食性の課題や、溶解、窒化反応時間、U-Pu-MAの回収率など基礎デ ータが不足しているため、これらのデータの取得が必要である。

したがって、現状において、LINEX法は金属電解法を代替する技術とは言え ず、システム設計検討を進める必要性は乏しい。

#### 11.4 その他再処理技術

11.4.1 ハイブリッド再処理技術

FBR酸化物燃料および金属燃料を対象としたFSにおいて積極的に設計検討に 取組む程魅力的なハイブリッド再処理技術は現状では見出されていない。しか しながら、乾式再処理におけるFPの分離回収性能向上のための湿式技術の適用、 窒化物被覆粒子燃料湿式再処理の脱被覆へのフッ化物揮発法採用および軽水炉 から高速炉への移行期を対象とした湿式法と乾式法のハイブリッドシステムな どが考えられるので、当面国内外の動向に留意していくことで十分であり、調 査の継続が必要と考えられる。

#### 12. フェーズⅡの今後の進め方

2004~2005年度の最終評価までの期間においては、中間評価までの成果をも とに、要素技術開発成果を反映し、原子炉プラントシステム側で評価、選定さ れた炉心仕様に基づき、原子炉プラントシステムと整合した燃料製造と一体化 したFBRサイクルシステムの設計詳細化と総合評価を行い、有望プラント概念 を構築する。また、フェーズII最終評価時点に残される課題を改めて明らかに し、実証試験を含めた開発ロードマップを整備することでフェーズIII以降の研 究開発計画を明確化する。

湿式再処理システムについては、簡素化溶媒抽出法および晶析法を組合せ、 MA回収には抽出クロマトグラフィー法を採用したNEXT法をリファレンスシ ステムとしてシステム設計検討を継続し、並行して超臨界直接抽出法の検討も 進める。

乾式再処理システムについては、酸化物燃料に対しては酸化物電解法、金属 燃料に対しては金属電解法に関し主たるシステム設計検討を継続し、必要に応 じその他の乾式再処理技術の検討も進め、最終年度における各技術の優劣の評 価に資する。

#### 付録1. 多面的評価向け炉心・燃料仕様

FBR燃料サイクルとして、原子炉プラントシステムと燃料サイクルシステム とで整合したシステムの評価を行うことを目的とし、本評価の前提とした多面 的評価向けの炉心・燃料仕様について以下に纏める。

評価対象ケースは全22ケースで、原子炉プラントシステム、燃料サイクルシ ステムの組合せとそれに対応する炉心・燃料仕様について付表 1.1に示す。ま た、各炉心・燃料仕様については、付表 1.2~付表 1.28に示す。

なお、振動充填燃料製造のケースでは、簡素化ペレット燃料製造における仕 様と同様とした。

ケー ス	炉	燃料	湿之 乾式	処理 規模	再処理	燃料製造	炉心	対応する 炉心・燃料仕様
1							資源	付表 1.2~1.5 参照
2				十月世	· 先進 · 湿式	簡素化	経済	同上
3				八 <u></u> (200t		ND 91	LL FP	付表 1.6~1.7 参照
4			湿	× y)		ゲル化・	資源	ケース1と同様
5			式			振動充填	経済	ケース2と同様
6	Na大型炉	MOX			先進	簡素化	資源	ケース1と同様
7	(1500			小規模 (50t/	湿式	ペレット	経済	ケース2と同様
8	MWe)			y)	招臨炅	簡素化	資源	ケース1と同様
9						ペレット	経済	ケース2と同様
10			乾	,  小規模 (50t/y)	酸化物 電解	振動充填	資源	ケース1と同様
11		金属	式				経済	ケース2と同様
12			乾	小規模	金属 電解	射出成型	資源	付表 1.8~1.11 参照
13			式	(50t∕y)			経済	同上
14	Na 中型炉 シングル (750MWe) Na 中型炉 モジュール (750MWe)	ΜΟΧ	湿	小規模	招阵炅	簡素化	資源	付表 1.12~1.15 参照
15		MOX	式	y)		ペレット	経済	同上
16	Ph-Bi	窒化物	湿	大規模 (200t	先進	簡素化	資源	付表 1.16~1.19 参照
17	中型炉		エ	⁄y)	湿式	ヘレット	経済	同上
18	強制循環 (750MWe) MOX	мох	湿	大規模 (200t	先進	簡素化 ペレット	資源	付表 1.20~1.23 参照
19			工	⁄y)	湿式		経済	同上
20	He大型炉 (1124	窒化物 袖覆粒	湿	大規模	脱被覆 十	被覆粒子	資源	付表 1.24~1.27 参照
21	MWe)	子	式	(2001 /y)	先進 湿式	法	経済	同上
22	水冷却炉 (1350 MWe)	мох	湿式	大規模 (200t /y)	先進 湿式	簡素化 ペレット	_	付表 1.28 参照

付表 1.1 評価対象ケースと炉心・燃料仕様

項目	資源重視型	経済性重視型	
電気出力	1,500 MWe	1,500 MWe	
熱出力	3,570 MWth	3,570 MWth	
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心	
運転サイクル長さ	18 ヶ月	26 ヶ月	
集合体数			
内側炉心燃料	316 体	297 体	
外側炉心燃料	278 体	279 体	
径方向ブランケット燃料	198 体	0 体	
主炉停止系	40 体	48 体	
後備炉停止系	15 体	16 体	
集合体配列ピッチ	183.2 mm	206.0 mm	
炉心高さ	80 cm	95 cm	
炉心等価直径	490 cm	541 cm	
燃料交換バッチ数	4/4	4/0	
(炉心/径方向ブランケット)	4/4		

#### 付表 1.2 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 1~11 除3: Na 大型 MOX)

付表 1.3 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 1~11 除3)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	21.5/24.1 wt%	18.3 / 20.9 wt%
MA 量	1.0 / 1.1 wt%	0.9 / 1.0 wt%
希土類 FP 混入量	1.3 / 1.3 wt%	1.3 / 1.3 wt%
增殖比	1.16	1.037
燃焼反応度	3.2 %∠k/kk'	2.4 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	148,000MWd/t	145,200MWd/t

\*1:Pu 富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	燃料要素本数	271 本	127 本
	全長	4,370 mm	4,370 mm
	ラッパ管		
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	肉厚	5.0 mm	_
	スペーサ		
	型式	ワイヤ	ワイヤ
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	燃料要素		
	全長	2,905 mm	2,905 mm
	スタック長		1,500 mm
	炉心燃料	800 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下) *	300  mm/400  mm	_
	ボンド材	Не	Не
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	8.8 mm	13.1 mm
	肉厚	0.5 mm	0.5 mm
経済性	集合体		
重視型	燃料要素本数	271 本	
	全長	4,370 mm	
	ラッパ管		
	材質	PNC-FMS 鋼	
	肉厚	5.0 mm	
	スペーサ		
	型式	ワイヤ	
	材質	PNC-FMS 鋼	
	燃料要素		
	全長	2,460 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	950 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)*	200 mm/ 200 mm	
	ボンド材	Не	
	材質	ODS 鋼	
	外径	10.4 mm	
	肉厚	0.7 mm	

付表 1.4 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 1~11 除3)

\* 中央部の 37 ピンは削除。(軸ブランケット無)

領域	資源重視型	経済性重視型
炉心平均	148,000	145,200
軸方向ブランケット	18,000	21,000
径方向ブランケット	3,000	_
炉心・軸方向ブランケット平均	88,000	110,000
全体平均	63,000	

## 付表 1.5 領域平均燃焼度 (MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 1~11 除3)

項目	単位	LLFP 核変換炉心 (非均質効果 0.95)
炉心		
原子炉熱出力	MWt	3570
運転サイクル長さ	EFPM	18
燃料交換バッチ数	-	4
炉心燃料集合体数(内側/外側炉心)	_	316/278
径方向ブランケット体数	-	0
制御棒本数(主/後備)	_	40/15
LLFP(Tc)集合体数(炉外)	-	55
LLFP(I)集合体数(炉外)	_	78
Tc 滞在期間	cycle	40
I 滞在期間	cycle	34
炉心高さ	cm	80
軸方向ブランケット厚(上部/下部)	cm	30/40
Pu 富化度(内側/外側炉心)	wt%	22. 1/25. 7
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^3 { m MWd/t}$	151
増殖比 燃焼反応度	- %Δk/kk'	1. 03 3. 6

付	表 1.6	炉心概念の主要な諸元と炉心特性	(多面的評価向仕様	<b>》ケース3:LLFP</b> )

付表 1.7 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース3)

	Tc 集合体		I 集合体	
	LLFP ピン	Zr-H ピン	LLFP ピン	Zr-H ピン
ピン本数 ピン外径 (cm) ピン肉厚 (cm)	$172 \\ 0.842 \\ 0.033$	159 ← ←	$379 \\ 0.55 \\ 0.033$	252 ← ←
集合体肉厚 (cm) 集合邸配列 ピッチ(cm)	0.5 18.32	← ←	0.5 18.32	$\stackrel{\leftarrow}{\leftarrow}$
LLFP スタック長 LLFP 装荷量(kg)	1	.50 2.9	20	150 0. 19

項目	資源重視型	経済性重視型
電気出力	1,500 MWe	1,500 MWe
熱出力	3,750 MWth	3,570 MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心
運転サイクル長さ	20 ヶ月	27 ヶ月
集合体数		
内側炉心燃料	336 体	327 体
外側炉心燃料	198 体	459 体
径方向ブランケット燃料	186 体	0 体
主炉停止系	34 体	20 体
後備炉停止系	15 体	12 体
集合体配列ピッチ	186.0 mm	175.0 mm
炉心高さ	80 cm	100 cm
炉心等価直径	472 cm	526 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	3/3	3/-

付表 1.8 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 12、13: Na 大型金属)

付表 1.9 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 12、13)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	14.3 / 18.5 wt%	13.0 / 13.0 wt%
MA 量	0.4 / 0.6 wt%	0.4 / 0.4 wt%
希土類 FP 混入量	0.3 / 0.3 wt%	0.3 / 0.3 wt%
增殖比	1.164	1.037
燃焼反応度	2.2 %∠k/kk'	1.4 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	152,500MWd/t	152,000MWd/t

\*1:Pu 富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	燃料要素本数	271 本	127 本
	全長	4,445 mm	4,445 mm
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	肉厚	5.0 mm	5.0mm
	スペーサ 型式	ワイヤ	ワイヤ
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	燃料要素		
	全長	2,980 mm	2,980 mm
	スタック長		1,250 mm
	炉心燃料	800 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	400 mm/ 50 mm	-
	ボンド材	Na	Na
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	8. 5mm	_
	肉厚	0. 5mm	_
経済性	集合体		
重視型	燃料要素本数	271 本	
	全長	4,375 mm	
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	
	肉厚	5.0 mm	
	スペーサ 型式	ワイヤ	
	材質	PNC-FMS 鋼	
	燃料要素		
	全長	2,910 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	1,000 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	150 / -	
	ボンド材	Na	
	材質	ODS 鋼	
	外径	8. 5mm	
	肉厚	0. 5mm	

## 付表 1.10 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 12、13)

領域	資源重視型	経済性重視型
炉心平均	152,500	152,000
軸方向ブランケット	19,000	25,000
径方向ブランケット	6,800	_
炉心・軸方向ブランケット平均	104,400	135,000
全体平均	71,900	_

## 付表 1.11 領域平均燃焼度 (MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 12、13)

項目	資源重視型	経済性重視型
電気出力	750 MWe	750 MWe
熱出力	1,785 MWth	1,785 MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心
運転サイクル長さ	18 ヶ月	26 ヶ月
集合体数		
内側炉心燃料	158 体	183 体
外側炉心燃料	156 体	150 体
径方向ブランケット燃料	150 体	0 体
主炉停止系	25 体	21 体
後備炉停止系	10 体	7 体
集合体配列ピッチ	178.0 mm	186.1 mm
炉心高さ	80 cm	100 cm
炉心等価直径	349 cm	370 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4/4	4/0

付表 1.12 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 14、15: Na 中型 MOX)

付表 1.13 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 14、15)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	22.0/27.4 wt%	19.1 / 22.7 wt%
MA 量	1.0 / 1.3 wt%	0.9 / 1.1 wt%
希土類 FP 混入量	1.3 / 1.3 wt%	1.3 / 1.3 wt%
增殖比	1.16	1.04
燃焼反応度	3.7 %∠k/kk'	2.9 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	147,100MWd/t	149,000MWd/t

\*1:Pu 富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	燃料要素本数	271 本	169 本
	全長	4,400 mm	4,400 mm
	ラッパ管		
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	肉厚	5.0 mm	—
	スペーサ		
	型式	ワイヤ	ワイヤ
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	燃料要素		
	全長	2,935 mm	2,935 mm
	スタック長		1,500 mm
	炉心燃料	800 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下) *	300  mm/400  mm	_
	ボンド材	He	Не
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	8.5 mm	11.3 mm
	肉厚	0.5 mm	0.4 mm
経済性	集合体		
重視型	燃料要素本数	217 本	
	全長	4,370 mm	
	ラッパ管		
	材質	PNC-FMS 鋼	
	肉厚	5.0 mm	
	スペーサ		
	型式	ワイヤ	
	材質	PNC-FMS 鋼	
	燃料要素		
	全長	2,710 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	1000 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)*	300 mm/ 300 mm	
	ボンド材	Не	
	材質	ODS 鋼	
	外径	10.4 mm	
	肉厚	0.7 mm	

付表 1.14 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 14、15)

\* 中央部の 37 ピンは削除。(軸ブランケット無)

領域	資源重視型	経済性重視型
炉心平均	147,100	149,000
軸方向ブランケット	14,500	15,300
径方向ブランケット	4,300	_
炉心・軸方向ブランケット平均	_	101,000
全体平均	53,700	_

#### 付表 1.15 領域平均燃焼度(MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 14、15)

項目	資源重視型	経済性重視型
電気出力	750 MWe	750 MWe
熱出力	1,875 MWth	1,875 MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心
運転サイクル長さ	18 ヶ月	18 ヶ月
集合体数		
内側炉心燃料	288 体	288 体
外側炉心燃料	246 体	246 体
径方向ブランケット燃料	0 体	0 体
主炉停止系	18 体	18 体
後備炉停止系	6 体	6 体
集合体配列ピッチ	177.5 mm	177.5 mm
炉心高さ	70 cm	70 cm
炉心等価直径	441 cm	441 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	5/-	5/-

付表 1.16 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 16、17: Pb-Bi 中型窒化物)

付表 1.17 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 16、17)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	15.2/ 18.2 wt%	14.7 / 18.0 wt%
MA 量	0.7 / 0.9 wt%	0.7 / 0.8 wt%
希土類 FP 混入量	1.6 / 1.6 wt%	1.6 / 1.6 wt%
増殖比	1.19	1.03
燃焼反応度	0.65 %∠k/kk'	0.56 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	157,000MWd/t	159,000MWd/t

\*1:Pu富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	燃料要素本数	331 本	
	全長	3,465 mm	
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	
	肉厚	5.0 mm	
	スペーサ 型式	グリッド支持	
	材質	PNC-FMS 鋼	
	燃料要素		
	全長	2,190 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	700 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	— / 350 mm	
	ボンド材	He	
	材質	ODS 鋼	
	外径	7.3 mm	
	肉厚	0.4 mm	
経済性	集合体		
重視型	燃料要素本数	331 本	
	全長	3,465 mm	
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	
	肉厚	5.0 mm	
	スペーサ 型式	グリッド支持	
	材質	PNC-FMS 鋼	
	燃料要素	1	<u>k</u>
	全長	2,190 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	700 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	- / 100 mm	
	ボンド材	Не	
	材質	ODS 鋼	
	外径	7.3 mm	
	肉厚	0.4 mm	

## 付表 1.18 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 16、17)

領  域	資源重視型	経済性重視型
炉心平均	157,000	159,000
軸方向ブランケット	18,000	50,000
全体平均	105,000	143,000

項目	資源重視型	経済性重視型
電気出力	750 MWe	750 MWe
熱出力	1,875 MWth	1,875 MWth
炉心概念	2領域均質炉心	2領域均質炉心
運転サイクル長さ	17.5ヶ月	17.5ヶ月
集合体数		
内側炉心燃料	288 体	288 体
外側炉心燃料	246 体	246 体
径方向ブランケット燃料	186 体	186 体
主炉停止系	18 体	18 体
後備炉停止系	6 体	6 体
集合体配列ピッチ	177.5 mm	177.5 mm
炉心高さ	90 cm	90 cm
炉心等価直径	441 cm	441 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	6/6	6/6

付表 1.20 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 18、19: Pb-Bi 中型 MOX)

付表 1.21 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 18、19)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	20.5 / 23.8 wt%	20.3 / 23.7 wt%
MA 量	1.0 / 1.1 wt%	1.0 / 1.1 wt%
希土類 FP 混入量	2.0 / 2.0 wt%	2.0 / 2.0 wt%
増殖比	1.10	1.04
燃焼反応度	2.4 %∠k/kk'	2.3 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	149,000MWd/t	148,000MWd/t

\*1:Pu 富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	燃料要素本数	331 本	217 本
	全長	_	_
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	肉厚	5.0 mm	5.0 mm
	スペーサ 型式	グリッド支持	グリッド支持
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	燃料要素		
	全長	_	_
	スタック長		1,450 mm
	炉心燃料	900 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	- / 550 mm	_
	ボンド材	Не	Не
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	7.3 mm	9.5 mm
	肉厚	0.4 mm	0.5 mm
経済性	集合体		
重視型	燃料要素本数	331 本	217 本
	全長	_	_
	ラッパ管 材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	肉厚	5.0 mm	5.0 mm
	スペーサ 型式	グリッド支持	グリッド支持
	材質	PNC-FMS 鋼	PNC-FMS 鋼
	燃料要素		ł
	全長	-	-
	スタック長		1,250 mm
	炉心燃料	900 mm	-
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	— / 350 mm	-
	ボンド材	Не	Не
	材質	ODS 鋼	ODS 鋼
	外径	7.3 mm	9.5 mm
	肉厚	0.4 mm	0.5 mm

#### 付表 1.22 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 18、19)

領域	資源重視型	経済性重視型
炉心平均	149,000	148,000
軸方向ブランケット	7,000	13,200
径方向ブランケット	3,400	7,300
全体平均	61,000	87,000

## 付表 1.23 領域平均燃焼度 (MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 18、19)
項目	資源重視型	経済性重視型
電気出力	1,124 MWe	1,124 MWe
熱出力	2,400 MWth	2,400 MWth
炉心概念	4 領域均質炉心	4領域均質炉心
運転サイクル長さ	20 ヶ月	19.3ヶ月
集合体数		
内側炉心燃料	303 体	303 体
外側炉心燃料	240 体	240 体
径方向ブランケット燃料	186 体	0 体
主炉停止系	27 体	27 体
後備炉停止系	7 体	7 体
受動的炉停止系	6 体	6 体
集合体配列ピッチ	222.3 mm	222.3 mm
炉心高さ	180 cm	180 cm
炉心等価直径	564 cm	564 cm
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	8/8	8/8

付表 1.24 炉心の基本仕様(多面的評価向仕様/ケース 20、21:He 大型窒化物)

付表 1.25 主な炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 20、21)

項目	資源重視型	経済性重視型
新燃料中の(内側炉心/外側炉心)		
Pu 富化度*1	18.7/23.1 wt%	18.7 / 23.1 wt%
MA 量	0.9 / 1.1 wt%	0.9 / 1.1 wt%
希土類 FP 混入量	1.1 / 1.1 wt%	1.1 / 1.1 wt%
増殖比	1.17	1. 03
燃焼反応度	0.8 %∠k/kk'	0.8 %∠k/kk'
炉心取出平均燃焼度	119,000MWd/t	119,000MWd/t

\*1:Pu 富化度=Pu/ (U+Pu+MA)

種類	項目	炉心燃料集合体	ブランケット燃料集合体
資源	集合体		
重視型	全長	4,830 mm	4,830 mm
	燃料要素		
	全長	2,500 mm	2,500 mm
	スタック長		2,500 mm
	炉心燃料	1,800 mm	_
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	350 mm/ 350 mm	_
	燃料核外径	1.50 mm	1.70 mm
	バッファ層		
		1.74 mm	1.82 mm
	材質	TiN	TiN
	保護層		
	外径	1.94 mm	1.98 mm
	材質	TiN	TiN
	被覆粒子充填率	60%	60%
経済性	集合体	[	
重相刑	全長	4,930 mm	
重优土	燃料要素		
	全長	2,600 mm	
	スタック長		
	炉心燃料	1,800 mm	
	軸方向ブランケット燃料(上/下)	400  mm/400  mm	
	燃料核外径	1.50 mm	
	バッファ層		
	外径	1.74 mm	
	材質	TiN	
	保護層		
	外径	1.94 mm	
	材質	TiN	
	被覆粒子充填率	60%	

付表 1.26 集合体および燃料要素の仕様(多面的評価向仕様/ケース 20、21)

資源重視型	経済性重視型
119,000	119,000
18,000	18,000
7,000	
58,000	80,000
	資源重視型 119,000 18,000 7,000 58,000

# 付表 1.27 領域平均燃焼度 (MWd/t) (多面的評価向仕様/ケース 20、21)

項	目	低除染先進湿式多重	(ABWR)
		リサイクル平衡炉心	
電気出力	MWe	1,356	1,356
熱出力	MWt	3,926	3,926
原子炉圧力	MPa	7.2	7.2
炉心外接半径	m	3.8	2.7
燃料集合体数	体	900	872
炉心部取出燃焼度*	GWd/t	54	45
炉心取出燃焼度**	GWd/t	45	45
炉心部高さ	m	0.845	3.71
炉心流量	104t/h	1.8	5.2
出口クォリティ	%	51	14.5
炉心部平均ボイド率	%	69	43
炉心圧損	MPa	0.043	0.18
MOX 部 Pu 富化度	wt%/HM	31.0	—
炉心部 Puf 富化度	wt%/HM	9.3	3.8(ウラン濃縮度)
Puf 装荷量	$\mathbf{t}$	15.4	—
増殖比		1.05	—
最大線出力密度	kW/ft	16	12
MCPR		1.3	1.3
ボイド反応度係数	$10^{-4} \Delta\mathrm{k/k/\%void}$	-0.5	-8
連続運転期間	Month	18	13
MOX 部 MA 含有率	wt%/HM	2.1	—
MOX 部 FP 含有率	wt%/HM	0.04	—
軸方向5領域の	DU cm	DU 15.0	
Puf 富化度分布	wt% cm	18  21.5	
および高さ	DU cm	DU 41.0	
	wt% cm	18 22.0	
	DU cm	DU 15.0	
		<u>.</u>	

## 付表 1.28 炉心概念の主要な諸元と炉心特性(多面的評価向仕様/ケース 22:水冷却炉)

\* : MOX 部+内部ブランケットの平均燃焼度

\*\*: MOX 部+全ブランケットの平均燃焼度

### おわりに

FBRサイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ(2001~2005年度)の一環として、フェーズIで抽出された再処理技術(先進湿式法、金属電解法、酸化物 電解法等)および燃料製造技術(簡素化ペレット法、顆粒燃料振動充填法、被 覆粒子法、射出成型法等)の各技術の特長を活用して、両者を組み合わせた燃 料サイクルシステムについて、炉心平均燃焼度15万MWd/tの酸化物、金属、窒 化物燃料FBRを対象に、年間50 t HM(金属燃料の場合には発電量で等価な 38tHM)および年間200 t HM規模で燃料を処理する一体型プラントの概念設計 検討を行い、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗 性、運転・保守補修性、技術的成立性に係る各設計要求に対する適合性の中間 評価を行った。本設計検討においては、革新技術等を導入して経済性向上を図 るとともに、低除染のTRU燃料が燃やせるというFBRの特長を活かしたリサイ クルシステムの構築による環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性向 上等を図るよう努めた。主要な評価結果は、以下の通りである。

酸化物燃料について、晶析法、簡素化溶媒抽出法およびMA回収技術として抽 出クロマトグラフィー法を採用した先進湿式法再処理と、粉末混合工程等を合 理化した簡素化ペレット法燃料製造を組み合わせたシステムが、これまでの豊 富な実績があり基本プロセスの技術的成立性も高く、抽出クロマトグラフィー の制御技術開発、低除染TRU燃料の製造技術開発等の課題はあるものの、比較 的早期に実用化が可能と期待される。超臨界直接抽出法再処理は、先進湿式法 の更なる経済性の向上が図れる可能性があるが、今後更に基礎データの充足が 必要である。先進湿式法再処理とゲル化法スフェアパック燃料製造を組み合わ せたシステムは、燃料製造を溶液および顆粒で取り扱うため微粉の飛散が少な い等の利点があるが、化学的安全取り扱いに配慮した試薬回収設備や廃液処理 設備の費用が負担増となる。一方、酸化物電解法再処理と振動充填法燃料製造 を組み合わせたシステムは、再処理で回収した顆粒をそのまま振動充填燃料と して使える等工程の簡素化による経済性向上が図れる可能性はあるが、MA回収 技術などの技術的成立性を左右する基礎的な課題が多い。

金属燃料の金属電解法再処理と射出成型法燃料製造を組み合わせたシステム は、使用済燃料を用いたTRU回収技術などの実証が必要であるが、比較的小規 模までの経済性が期待できる。導入初期に備えて、前処理技術(酸化物の金属 燃料への還元技術)も開発していく必要がある。

窒化物燃料は、基本的に先進湿式法や金属電解法が適用可能であるが、その ベースとなる窒化物燃料再処理、燃料製造特有のN-15同位体濃縮・回収リサイ クル、窒化転換等の枢要技術開発が必要である。また、被覆粒子燃料は、製造、 集合体組立、集合体解体、脱被覆等の技術開発が更に必要となる。 経済性評価結果については、200tHM/年処理規模の場合では、いずれの組み 合わせケースにおいてもフェーズIIの燃料燃料サイクル費(再処理費と燃料製 造費の合計)の要求値である0.8円/kWh以下を満足した。一方、50tHM/年処理 規模の場合、資源重視型炉心(増殖比約1.2)で要求値を満足するのは金属燃料 サイクルのみであったが、経済重視型炉心(増殖比約1.05)では、径方向ブラ ンケット燃料削除による平均燃焼度の向上が燃料サイクル費の低減に寄与し各 ケースとも要求値を満足した。

また、再処理システムにおいて発生する高レベル廃棄物量は、燃焼度等で規格化した場合、金属電解法以外は先行LWR再処理に比べてMAリサイクル等によるFP充填率の向上により、大幅に削減でき、金属電解法は先行LWR再処理とほぼ同等であった。その他の環境負荷低減性、安全性等については、再処理システムおよび燃料製造システムとも設計要求を満足することができた。

今後はこの中間とりまとめを踏まえ、フェーズⅡ最終とりまとめに向けて、 特に以下の点を中心に、各再処理システムと燃料製造システムの候補概念の設 計研究と要素技術開発を継続するとともに、先進リサイクルシステムに適合す る保障措置体系や、臨界安全設計手法の確立に向けた検討を行い、実用化候補 概念のより一層の明確化を図るとともに、実用化に至るまでの研究開発計画を 立案する予定である。

- ・先進湿式再処理法と簡素化ペレット法を組み合わせたシステムについては、最新実験データを反映した運転操作条件の見直しを行い、主工程の最適化等を図ったシステムを構築するとともに、軽水炉から高速炉への移行期への適用性の検討を行う。
- ・超臨界直接抽出法再処理システムについては、最新実験データを反映した運転操作条件の設計見直しや主要な機器概念の見通し検討を行い、経済性向上等のポテンシャルを見極める。
- ・酸化物電解法再処理システムについては、最新実験データを踏まえた MA回収プロセス等の再構築によるシステムの再検討を行う。
- ・金属電解法再処理システムについては、電解精製槽の構造強度検討、連続陰極処理装置等の具体化検討を行う。
- ・ゲル化法スフェアパック燃料製造システムについては、機器配置等の見 直しによる経済性の向上を図る。

## 謝辞

FBRサイクルの実用化戦略調査研究における燃料サイクルシステムの概念検 討における本成果は、東海事業所-環境保全・研究開発センター、再処理セン ターおよびプルトニウム燃料センター各部署の協力、支援の下でまとめられま した。

さらに、本概念検討を進めるにあたって多大なる貢献をいただいた

日本原子力発電株式会社

財団法人 電力中央研究所

日本原子力研究所

三菱重工業株式会社

三菱マテリアル株式会社

新型炉技術開発株式会社

株式会社 東芝

株式会社 日立製作所

富士電気システムズ株式会社

三井造船株式会社

日本エヌ・ユー・エス株式会社

東洋エンジニアリング株式会社

株式会社 ペスコ

に改めて深い感謝の意を表する次第であります。

また、フェーズIIの設計検討作業に加わってご尽力いただいた西村友宏、岡村 信生、吉田和生、岩佐勝令、星野康史、新開康夫、津坂康和の各氏に感謝いた します。

最後に、本書の構成等におきましてご指導いただいたFBRサイクル推進部の 方々、さらに本書の作成にあたり記述方針、内容の整合性等の検討を詳細に行 っていただいた技術検討書検討WGメンバー\*の各位の協力に感謝いたします。

<sup>\*</sup>小野清(リーダー)、木田正則(サブリーダ)、堀切守人(事務局)、大木繁夫、栗坂健一、岡野靖、小沢正基、井上賢 紀、井上明、鈴木嘉浩、杉野和輝