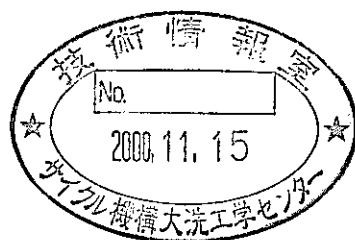


燃料製造システムの技術検討書

(研究報告書)

2000年7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

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.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

燃料製造システムの技術検討書
(研究報告)

*河野 秀作 田中 健哉 小野 清
岩佐 勝令 星野 康史 新開 康夫

要 旨

FBRサイクル実用化戦略調査研究においては、安全性の確保を前提とし、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核不拡散性を有し、原子炉システムと調和を図ったFBRリサイクルシステムの開発を目標としている。これを踏まえ、燃料製造システムの検討では、ペレット法、振動充填法による酸化物、窒化物燃料や、鋳造法による金属燃料の製造プロセスについて検討し、これらのプロセスを用いた燃料製造システムの概念検討およびシステム特性評価等を行い、今後の技術的課題を抽出した。

平成11年度の成果として、ペレット法では、従来のMOXペレット製造工程を大幅に簡素化した簡素化プロセスを用いた燃料製造プラントについて、振動充填法では、湿式ゲル化法ならびに乾式の酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法によるプラントについて、鋳造法では射出成型法、遠心鋳造法によるプラントについて概念検討し、機器設備、レイアウト、建屋容積等の評価を行い、システム成立性に関する見通しを得た。また、各燃料製造システムについて実用化に向けた課題を明らかにした。

今後、これまでの検討評価を詳細化し、フェーズⅡの研究計画を策定して行く予定である。

本報告書は、「高速増殖炉システムの実用化戦略調査研究に関する協力協定」に基づき実施したJNCと原電（9電力会社、電源開発株式会社及び原電の代表）との共有成果である。

本報告書には、「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及び電中研からの開示技術情報、並びに、「日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構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り決め」に基づく共同検討の成果を含む。

*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

TECHNICAL STUDY REPORT ON FUEL FABRICATION SYSTEM

* Shusaku Kono, Kenya Tanaka, Kiyoshi Ono, Katsuyoshi Iwasa,
Yasushi Hoshino, Yasuo Shinkai

Abstract

The feasibility study of FBR and related fuel cycle is performed for developing the FBR recycle system which ensures safety, economic competitiveness, efficient utilization of resources, reduction of environmental burden and enhancement of nuclear non-proliferation under consistency of FBR reactor and fuel cycle systems. In this study, a conceptual design study and system characteristics evaluation are conducted for fuel fabrication systems of pellet process, vibropack process for oxide and nitride fuel and casting process for metal fuel. Technical issues in each process are also extracted.

In 1999 fiscal year, a conceptual design study were conducted for the fuel fabrication plants adopting (1) the short pellet process which simplifies the conventional MOX pellet fabrication process, (2) vibropack processes of aqueous gelation process, improved RIAR process, improved ANL process and fluoride volatility process, (3) casting processes of injection process, centrifuging process. As a result, attainable perspective was obtained for each fuel fabrication system through the evaluation of apparatuses, layout and facility volume, etc. In each fuel fabrication system, technical issues for practical use were made clear.

Hereafter, more detailed study will be performed for each system, and research programs for phase II study will be planned.

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 the accordance with "the agreement about the development of a commercialized 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 the 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 the accordance with "the agreement of collaboration about the development of a commercialized fast breeder reactor cycle system".

* Fuel Fabrication System Engineering Group, System Engineering Technology Division (OEC)

目次

1. 検討対象技術の選定	1
1.1 燃料形態と燃料サイクルの組合せ	1
1.2 検討対象範囲の選定	1
参考文献	2
2. 選定した製造技術の現状	5
参考文献	7
3. 設計要求事項	8
3.1 基本方針	8
3.2 検討にあたっての前提条件	8
3.3 設計要求事項	10
(1) 経済性	10
(2) 資源の有効利用	10
(3) 環境負荷低減	10
(4) 核拡散抵抗性	10
(5) 安全性	10
(6) 運転・保守・補修性	11
3.4 特記事項	11
4. 概念検討	12
4.1 燃料製造技術検討の視点	12
4.2 ペレット法の検討	13
4.2.1 MOX燃料に対する各候補概念の検討状況	13
(1) 簡素化ペレット (グローブボックスでの製造)	13
(2) 簡素化パレット (セル内での製造)	49
4.2.2 窒化物燃料に対する各候補概念の検討状況	101
(1) 簡素化ペレット (グローブボックスでの製造)	101
(2) N-15濃縮コスト評価	105
参考文献	107
4.3 振動充填法の検討	111
4.3.1 MOX燃料に対する各候補概念の検討状況	111
(1) 湿式再処理との組合せ	111
(2) 乾式再処理との組合せ	157
(i) 酸化物電解法	157
(ii) 金属電解法	183
(iii) フッ化物揮発法	207
(3) 湿式法と乾式法との比較	215
4.3.2 窒化物燃料に対する検討状況	223
(1) 湿式再処理との組合せ	223

(2) 乾式再処理との組合せ	226
4.4 鋳造法の検討	232
(1) 射出成型法	232
(2) 遠心鋳造法	237
4.5 被覆粒子法の検討	255
5. 中間評価	271
(1) 安全性	271
(2) 経済性	271
(3) 資源有効利用性	273
(4) 環境負荷低減性	273
(5) 核拡散抵抗性について	273
(6) 技術的成立性	273
6. 今後の計画	276
6.1 平成12年度の計画	276
(1) 候補概念の詳細検討	276
(2) 達成度評価	276
(3) FBRサイクルの実用化候補概念の抽出	276
(4) フェーズ2以降の開発計画の策定	277
6.2 フェーズ2計画案	277

表・図目次

表		
表1.1.1	炉種別と燃料形態の組合せ (例)	3
表1.2.1	フェーズ I 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	4
表4.2.1	プラント設計検討における主要条件	30
表4.2.2	FBR燃料の概略仕様	30
表4.2.3	遮へい設計値	32
表4.2.4	現状プロセスおよびショートプロセスの分析項目	37
表4.2.5	ペレット製造プロセスの特徴比較	39
表4.2.6	コスト計算条件	44
表4.2.7	燃料の基本仕様	73
表4.2.9	バッチサイズ (200tHM/y、50tHM/y共通)	75
表4.2.10	大型プラント生産量 (200tHM/y)	76
表4.2.11	基準プラント生産量 (50tHM/y)	76
表4.2.12	各核種の重量組成 (燃料1t当り)	77
表4.2.13	各核種の放射能 (燃料1t当り)	77
表4.2.14	各核種の発熱 (燃料1t当り)	77
表4.2.15	系列数 (200tHM/y)	78
表4.2.16	系列数 (50tHM/y)	78
表4.2.17	分析方法一覧表	79
表4.2.18	分析項目表 (200t/y) (1/4)	80
表4.2.18	分析項目表 (200t/y) (2/4)	81
表4.2.18	分析項目表 (50t/y) (3/4)	82
表4.2.18	分析項目表 (50t/y) (4/4)	83
表4.2.19	燃料製造関連設備電気負荷一覧表	84
表4.2.20	補助/付帯設備電気負荷一覧表	85
表4.2.21	大型プラント炉心燃料系の固体廃棄物発生量リスト (脱硝設備～燃料集合体組立・検査設備)	86
表4.2.22	大型プラントブランケット燃料系の固体廃棄物発生量リスト (脱硝設備～燃料集合体組立・検査設備)	87
表4.2.23	大型プラント炉心燃料系の固体廃棄物放射能濃度	88
表4-3-1	炉心燃料集合体及び径方向ブランケット燃料集合体の基本仕様	124
表4-3-2	機器リスト 分級装置	169
表4-3-3	機器リスト 混合装置	170
表4-3-4	機器リスト 振動充填・端栓溶接装置	171
表4-3-5	機器リスト リーク検出装置	173
表4-3-6	機器リスト ピン検査装置	174
表4-3-7	機器リスト 燃料集合体組立て装置	175
表4-3-8	機器リスト 燃料集合体検査装置	177
表4.3.9	振動充填燃料製造システム比較検討結果	219
表4.3.9	振動充填燃料製造システム比較検討結果	220
表4.3.10	振動充填燃料製造システムの今後の設計検討課題	221
表4.3.10	振動充填燃料製造システムの今後の設計検討課題	222
表4.4.1	炉心燃料集合体の基本仕様	241
表4.4.2	ブランケット燃料集合体の基本仕様	241
表4.4.3	金型使用遠心鑄造法で発生する廃棄物	242
表4.5.1	ゲル沈殿法における各製造法の長所・短所	263
表4.5.2	HTTR初装荷燃料仕様	265
表5.1	燃料製造システムの経済性評価	275



図1.1.1	燃料の体系図	3
図4.2.1	現状プロセスと簡素化プロセスのペレット製造フローの比較	26
図4.2.2	MOX燃料製造プラントの設計検討の手順	27
図4.2.3	MOX加工プラントの所掌範囲	28
図4.2.4	ピン加工および集合体組立工程フロー	29
図4.2.5	分析・物性測定工程の比較	31
図4.2.6	核物質の閉じ込め方法	32
図4.2.7	グローブボックス内火災消火システムの概念図	33
図4.2.8	ペレット製造工程における設備構成の比較	34
図4.2.9	ペレット製造工程の物流方式および設備レイアウトのイメージ	35
図4.2.10	連続焼結炉のイメージ図	36
図4.2.11	改良型仕上げ・検査設備の概略図	36
図4.2.12	液体廃棄物処理設備の全体系統図	38
図4.2.13	固体廃棄物処理の全体系統図	38
図4.2.14	ショート・プロセスプラントの全体のレイアウトイメージ	40
図4.2.15	FBR50tonHMショートプロセスプラント (地下1階)	41
図4.2.16	FBR50tonHMショートプロセスプラント (地上1階)	42
図4.2.17	プラント内マテリアル・バランス	43
図4.2.18	ペレットサイズがコストに与える影響	45
図4.2.19	取扱を想定したTRU組成	46
図4.2.20	核種別の線量当量率への寄与	47
図4.2.21	TRU1gあたりの線量当量率	48
図4.2.8	FBR使用済燃料組成	74
図4.2.22	燃料製造工程ブロックフロー	89
図4.2.23	プロセス検討と物質収支評価 (低除染ペレット燃料製造システム)	90
図4.2.24	大型プラントABS(PUREX法)	91
図4.2.25	大型プラントABS(TRUOX法)	92
図4.2.26	崩壊熱による表面温度評価結果	93
図4.2.27	各FKMP IKMP ポイント説明図(炉心燃料製造ライン)	94
図4.2.28	U/Pu脱硝設備 (脱硝～粉末排出までの流れ)	95
図4.2.29	低除染/ペレット燃料製造プラント 換気空調系統図	96
図4.2.30	建屋断面イメージ図	97
図4.2.31	低除染/ペレット燃料製造プラント セル内機器配置図 (200tHM) B1F	98
図4.2.32	低除染/ペレット燃料製造プラント セル内機器配置図 (50tHM) 1F	99
図4.2.33	Purex最適化システム (200tHM/y) 全体機器配置図 1F	100
図4.2.34	窒化物燃料製造プロセスフロー (酸化物燃料との比較)	103
図4.2.35	窒化物燃料ペレット製造設備フロー (酸化物燃料との比較)	104
図4.2.36	Nitrox法システム概念	108
図4.2.37	気相吸着法を用いた同位体分離の原理	109
図4.2.38	N-15/N-14アンモニア分離評価試験の概要	110
図4-3-1	湿式リサイクルプラント検討用燃料要素概要図	125
図4-3-2	湿式振動充填燃料製造プロセスフロー	126
図4-3-3	プロセス検討と物質収支評価 湿式振動充填燃料製造プロセス	127
図4-3-4	コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (滴下液混合装置)	128
図4-3-5	コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (滴下槽)	129
図4-3-6	コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (熟成、洗浄、乾燥装置)	130
図4-3-7	コア燃料焼結設備主要機器 (倍焼炉/還元炉)	131
図4-3-8	コア燃料焼結設備主要機器 (焼結炉/再還元炉)	132
図4-3-9	コア燃料焼結設備主要機器 (粒径選別機)	133
図4-3-10	ブランケット燃料造粒設備主要機器 (造粒装置/造粒UO ₂ 篩分装置)	134
図4-3-11	ブランケット燃料焼結設備主要機器 (焼結炉)	135
図4-3-12	ブランケット燃料焼結設備主要機器 (再還元炉)	136
図4-3-13	ブランケット燃料焼結設備主要機器 (焼結UO ₂ 篩分装置)	137

図4-3-14	燃料ピン加工設備主要機器(燃料要素充填装置)	138
図4-3-15	燃料ピン加工設備主要機器(開口部除染・内挿物挿入装置)	139
図4-3-16	燃料ピン加工設備主要機器(端栓溶接装置)	140
図4-3-17	燃料ピン加工設備主要機器(密度測定装置)	141
図4-3-18	燃料検査設備主要機器(ヘリウムリーク試験設備)	142
図4-3-19	燃料検査設備主要機器(X線検査装置)	143
図4-3-20	燃料検査設備主要機器(ワイヤー巻付設備)	144
図4-3-21	燃料検査設備主要機器(燃料要素総合検査設備)	145
図4-3-22	施設全体配置イメージ(1)	146
図4-3-23	施設全体配置イメージ(2)	147
図4-3-24	建屋鳥瞰図	148
図4-3-25	主建屋配置図1F	149
図4-3-26	主建屋配置図2F	150
図4-3-27	燃料製造設備配置計画図	151
図4-3-28	燃料ピン加工設備配置計画図	152
図4-3-29	燃料検査設備配置計画図	153
図4-3-30	燃料集合体組立、検査設備配置計画図	154
図4-3-31	副建屋配置図B2F	155
図4-3-32	副建屋配置図断面図	156
図4-3-33	酸化物電解法振動充填燃料製造プロセスフロー	167
図4-3-34	プロセス検討と物質収支評価 酸化物電解法の燃料製造プロセスフローダイアグラム(PFD)	168
図4-3-35	燃料集合体組立装置	172
図4-3-36	振動充填端栓溶接装置	176
図4-3-37	使用済燃料貯蔵建屋概念図	178
図4-3-38	酸化物乾式再処理施設(50t)建屋内配置図地下1階	179
図4-3-39	酸化物乾式再処理施設(50t)建屋内配置図B-B, C-C断面	180
図4-3-40	ピン製造セル	181
図4-3-41	集合体組立セル	182
図4-3-42	プロセス検討と物質収支評価 金属電解法の燃料製造プロセスフローダイアグラム	192
図4-3-43	酸化転換装置・還元装置	193
図4-3-44	富化度調整装置	194
図4-3-45	転動造粒装置	195
図4-3-46	分級装置	196
図4-3-47	焼結炉	197
図4-3-48	振動充填装置	198
図4-3-49	上部端栓溶接機	199
図4-3-50	燃料要素検査ユニット	200
図4-3-51	燃料集合体組立装置	201
図4-3-52	燃料集合体検査装置	202
図4-3-53	金属電解法(塩浴塩素化法)50tHM/y 全体配置イメージ図 平面図	203
図4-3-54	金属電解法(塩浴塩素化法)50tHM/y 全体配置イメージ図 断面図	204
図4-3-55	全体配置計画図B1F	205
図4-3-56	全体配置計画図1F	206
図4-3-57	炉心燃料+ブランケット燃料製造工程系統図(PFD)	211
図4-3-58	燃料要素充填装置	212
図4-3-59	機器配置概念図B1F	213
図4-3-60	燃料製造セル配置図(B1F)	214
図4-3-61	窒化物燃料振動充填プロセスフロー	225
図4-3-62	窒化物燃料の乾式再処理説明図例	229
図4-3-63	MN振動充填燃料製造フロー	230
図4-3-64	金属燃料製造フロー	231
図4-4-1	射出成型加工・集合体組立プロセスフロー	243
図4-4-2	燃料スラグ成型加工工程におけるHMの物質収支	244

図4-4-3	射出成型装置	245
図4-4-4	モールド除去、スラグ検査装置(ピンプロセッサ)	246
図4-4-5	Naボンディング装置(エレメントセトラ)	247
図4-4-6	全体配置計画図(B1F)(1/2)	248
図4-4-6	全体配置イメージ図(断面図)(2/2)	249
図4-4-7	金型使用の遠心鋳造法のブロックフロー図	250
図4-4-8	遠心鋳造による燃料スラグ製造フロー	251
図4-4-9	金型遠心鋳造装置の機器図	252
図4-4-10	金型遠心鋳造装置の構成図	253
図4-4-11	金属燃料製造機器の配置図	254
図4-5-1	被覆粒子燃料の種類と名称	262
図4-5-2	ゾル・ゲル化法による燃料核製造工程	262
図4-5-3	SNAM法によるUO ₂ 核の調製	263
図4-5-4	ゲル化装置の概要	263
図4-5-5	流動層被覆装置概念図	264
図4-5-6	HTTR燃料コンパクトの製造	264
図4-5-7	NFIプラントの工程フロー	266
図4-5-8	各装置の外観	267
図4-5-9	He冷却粒子燃料専焼炉の燃料要素概念	268
図4-5-10	ゲル化法による窒化物粒子の製造フロー	269
図4-5-11	被覆粒子燃料	270
図4-5-12	CP-GCFBR用燃料	270

1. 検討対象技術の選定

1.1 燃料形態と燃料サイクルの組合せ

検討の対象とする燃料の種類と形態は、原子炉型や再処理方法と大きく関係する。

燃料の種類としては、物理形態として大きく固体、液体、気体に分かれる。固体燃料はさらにその化学形態により酸化物、窒化物、金属、炭化物、シリサイド、リン化物、イオウ化物などがこれまで検討の対象として挙げられている。液体燃料は主に塩化物が候補として挙げられている。図 1.1.1 に燃料の体系をまとめる。原子炉型との組合せで見ると、Na 冷却炉、重金属冷却炉、ガス冷却炉では、酸化物、窒化物、金属、炭化物等が物性的に適用可能であり、水冷却炉では酸化物、窒化物等が、熔融塩炉では塩化物が燃料の種類として相性が良い。表 1.1.1 に各種炉型と燃料種類の組合せを示す。

燃料の形態としては、固体燃料において、被覆管型燃料（ペレット型、振動充填型、スラッグ型、サーメット型）と非被覆管型燃料（被覆粒子型）が挙げられる。ペレット型や振動充填型は金属を除く燃料種類や熔融塩を除く原子炉型で広く適用できる概念である。スラッグ型は金属燃料に、被覆粒子型はガス冷却炉に適用した概念である。

燃料物質としてはウラン、プルトニウムを中心に、特に熔融塩炉を対象としたトリウム、環境負荷低減を狙ったネプツニウム、アメリシウム、キュリウム等のマイナーアクチニド (MA) および核分裂生成物 (FP) もリサイクル物質として対象となる。

1.2 検討対象範囲の設定

前節で取り上げた燃料形態と燃料サイクルの組合せのうち、実用化戦略調査研究のフェーズ I で対象とするものを表 1.2.1 にまとめる。

平成 10 年度に行われた FBR プラントの事前絞り込み評価 (JNC TN9400 99-080) では超小型炉、ガス冷却炉 (密封型、ベント型、被覆粒子の各燃料型)、鉛冷却炉、超臨界圧軽水冷却、三塩化物熔融炉等が候補概念として選定されている。これを受けて燃料の種類としては、Na 冷却炉、重金属冷却炉、ガス冷却炉等に広く適用可能であり、かつ加工や再処理 (湿式、乾式) への適用にも十分可能性のある次の 3 種類に絞り込んだ。

- ① 酸化物燃料 (MA、FP を含む)
- ② 窒化物燃料 (MA、FP を含む)
- ③ 金属燃料 (MA、FP を含む)

シリサイド、リン化物、イオウ化物は、総じて製造上の難しさが指摘されている上、これまでにその特性が十分調査されていないこともあり、対象から外した。シリサイドは研究炉などでの利用が検討されているが、重金属密度が酸化物並みに高くかつ熱伝導度が金属並みに高いという長所を有するものの、融点が低いことが指摘されてい

る。リン化合物は相の変態がなく安定であるが、イオウ化合物と同様、重金属密度が低いという欠点がある。炭化物燃料は過去に多くの調査研究が行われている。重金属密度が高く熱伝導度も高く優れているが、水分や酸素との反応性が非常に大きく化学的に活性である。このため燃料製造時の取り扱いが難しい上にさらに再処理での難溶解性の課題が指摘されているため、今回検討の対象から除いた。

フェーズIでは、これまでに経験の豊富な酸化物燃料を中心に検討を進める。窒化物燃料は酸化物燃料の知見を取り入れながら、効率的に評価を進めることとする。並行して金属燃料の評価を行う。

燃料の形態としては、大きく被覆管型燃料と被覆粒子型燃料を検討の対象とする。被覆管型燃料については酸化物燃料と窒化物燃料を対象としたペレット燃料と振動充填燃料、および金属燃料を対象とした射出燃料を検討する。

- ① ペレット燃料（酸化物燃料と窒化物燃料を対象）
- ② 振動充填燃料（同 上）
- ③ 射出燃料（金属燃料を対象）
- ④ 被覆粒子燃料（ガス冷却炉を対象）

燃料物質としては、ウラン、プルトニウムを対象とし、トリウム燃料の製造についてはフェーズIの検討対象から除いた。また、MAのリサイクルや再処理側での低除染工程概念の採用を考慮して、MAおよびFPが混入した燃料の製造は検討対象とした。

（参考文献）

- 1) 早船、江沼他 「実用化戦略調査研究 (FBR プラント)」 JNC TN9400 99-080
(1999年10月)

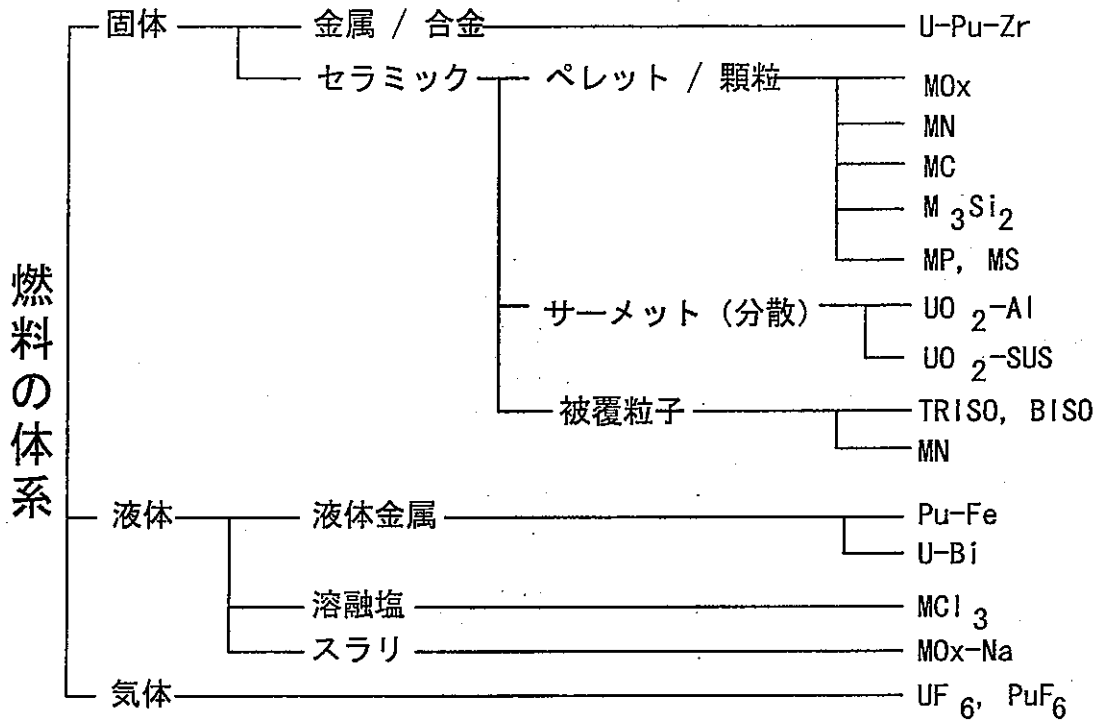


図 1.1.1 燃料の体系図

表 1.1.1 炉種別と燃料形態の組合せ (例)

被覆管燃料	燃料種別							
	MOx	MN	MC	M ₃ Si ₂	MP	MS	金属	塩化物
Na 冷却炉	○	○	○	△	△	△	○	○ (熔融)
ガス冷却炉	○	○	○	○	○	○	○	○ (熔融)
Pb 冷却炉	○	○	○	△	△	△	○	○ (熔融)

被覆粒子燃料	燃料種別							
	MOx	MN	MC	M ₃ Si ₂	MP	MS	金属	塩化物
被覆粒子燃料 ガス冷却炉	○	○	?	?	?	?	/	/

液体 (熔融) 燃料	燃料種別							
	MOx	MN	MC	M ₃ Si ₂	MP	MS	金属	塩化物
液体燃料炉	○	/	/	/	/	/	○	○

○ : 物性的に適用可能 △ : 特性を活かしきれない ? : 要検討

表1.2.1 フェーズ I 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

燃料形態 種類	被覆管型燃料棒			被覆粒子
	ペレット	振動充填	鑄造	
酸化物	○	○	×	○
窒化物	○	○	×	○
金属	×	×	○	×

2. 選定した製造技術の現状

(1) MOX ペレット燃料製造

酸化物燃料形態（セラミック）はその成型加工実績が豊富であること及び製造時取り扱いの容易性（化学的安定性）より燃料製造上非常に有利な燃料形態である。特にペレット燃料に関しては、軽水炉 UO₂ 燃料の製造実績を基礎とし開発した MOX ペレットの製造プロセスは技術的成立性を有する。この製造技術は湿式再処理の高除染を行った Pu を原料とし、グローブボックスにより包蔵性を確保したシステムで燃料製造設備の保守等はグローブを介した直接保守を基本としている。このシステムの研究開発を通して、実用化燃料製造システムとして不可欠の MOX ペレット品質の安定性及びプラントの円滑操業に係る重要事項（Pu 包蔵性、被曝管理、臨界安全、保障措置、PP 等）に対する多くの知見を得ている。FBR 用 MOX 燃料としてこれまでに照射されたピン本数は数十万本に及んでいる。製造技術は基本的に各国とも原料粉末処理工程を除いて大差はないが、原料粉末処理工程では処理する原料と製品特性等に対応するため、MIMAS 法、SBR 法、混合転換法など各国において種々の方法が開発されている。また、近年 Pu サーマルへの動きが世界的に活発化しており、特に欧州での軽水炉 MOX 燃料の製造は延べ 500tHM 余りに達している。この、MOX ペレット製造システムをさらに高度化する方向として、プロセス高性能化（溶液中 Pu 濃度制御技術、粉体特性制御技術等）による MOX ペレット加工コストの低減が重要となる。さらに、再処理システムの経済性向上/核不拡散性向上/廃棄物発生量低減に有効な簡素化再処理の製品である低除染の Pu, U 溶液原料に適応する、また MA のリサイクルに適応するペレット製造システムの実現性に係る調査研究が重要となる。

(2) 窒化物ペレット燃料製造技術

窒化物ペレット燃料製造は MOX を原料として炭素熱還元により窒化物を得る。これをプレス成形、焼結を行うことになるが、窒化物は焼結性が悪く高密度（95RD 程度）を得るためには、十分な粉碎が必要となる。酸化物製造プロセスをベースとした窒化物システム開発が可能であるが、酸化物工程に炭素熱還元工程が追加となり。また、窒化物は酸化物に比べ化学的に活性であり粉末を取り扱う工程は不活性雰囲気とする必要がある。窒化物燃料は炉心燃料としてロシアの BOR-10 などで採用されているが例は少ない。燃料製造技術としてはほぼ確立されているが、照射試験は欧米を中心に、高速中性子下では約 200 本程度の実績で燃焼度も 10at% 以下にとどまっている。システムの技術的成立の見通しを得るため N-15 濃縮技術開発、窒化物解離挙動の把握などが重要となる。

(3) MOX 燃料振動充填燃料製造技術

振動充填技術は製造工程の簡素化及び遠隔自動化に適したものと考えられ、低

除染燃料システム及びMA リサイクルへの適応性の評価が重要である。これまで国内外で振動充填燃料に関する多様な研究が行われた。大別して湿式再処理からの溶液を原料とするゲル化法及び乾式再処理（乾式高温電気化学法及びフッ化物揮発法）より得た酸化物顆粒を振動充填する方法がある。前者は溶液を出発物質としており、ゲル化を通して得られた酸化物顆粒は粒内及び顆粒間の高い均質性が得られる。しかし、ゲル化条件等は微妙なものであり、低除染燃料及びMA含有燃料の不純物を含む酸化物顆粒の製造性に係わる研究が重要となる。後者の電気化学法で得られる顆粒は、高い理論密度比が得られるが、顆粒内及び顆粒間でその組成のばらつきが生じることが考えられる。また、この燃料はゲッター（ウラン金属粉体）を顆粒と混合し充填し、酸素ポテンシャルをコントロールすることにより、FCCI を抑制しており、燃料製造技術開発においても酸素ポテンシャルのコントロールに関する研究が重要となる。フッ化物揮発法を通して得られる顆粒は、酸化物転換塔で粒を成長させたものであり顆粒内及び顆粒間の組成の均一性の確認が、製品燃料の品質保証上不可欠な事項となる。

これら製造法の共通事項として振動充填では燃料の充填密度を高めるため、顆粒の径をコントロールし最適な顆粒径の分布を持たせたものを被覆管に充填する必要がある。さらに、燃料ピンの軸方向の充填密度、Pu 濃度分布の変動に関する知見が得られており、燃料の品質保証上検討が必要となる。以下に、これまでの振動充填燃料製造実績を示す。

(i) 湿式ゲル化法…代表例として英国では BNFL が 1978 年に年間 1t 規模の施設を建設し、DFR、PFR 用燃料ピンを約 3700 本製造しているしかし、1980 年代後半の中空ペレット燃料の採用等により、ゲルプロセス 振動充填法は実用化に至っていない。

(ii) 乾式高温電気化学法…1977年にロシアRIAR研究所が酸化物燃料製造ラインを建設しこれまでにMOX燃料集合体をBOR60用426体、BN600用10体、BN350用2体の製造実績（ピン本数で約18,000本）を有している。

(iii) フッ化物揮発法…ロシアRICTにてPu濃度5-30%のUF₆+PuF₆を用いて酸化物転換及び振動充填用顆粒製造の試験を実施している。顆粒密度及び振動充填密度に関する基礎的な研究がなされている。RICTで生産したUO₂/PuO₂燃料ピンは2-3本であるがBN-350で照射された。

(4) 窒化物燃料振動充填燃料製造技術

湿式の内部ゲル化法による窒化物粒子燃料の製造研究がPSIで行われている。また、Am消滅ターゲット燃料製造の予備試験として(U,Zr)N粒子の製造試験も行われている。さらに、最近、原研においても内部ゲル化法による高純度UN粒子の製造結果が報告されている。照射試験はこれまでに実施例が少ないが、英国DFRにおいてTUIが製造したパイパック混合窒化物燃料についてペレット燃料ピンと合わせて6

本が最大線出力 1300W/cm、燃焼度 8at%まで照射されている。

(5) 金属燃料鑄造技術

金属燃料スラグの鑄造法として有望な射出成型法は真空に引いた石英鑄型（モールド）内に熔融金属を射出する製造法であり、冷却後、鑄型を破壊して燃料合金をとりだし、鑄造欠陥の生じやすい両端を切断し所定の長さの燃料スラグを得る。射出成型法は、設備がコンパクトである、操作手順が単純である、短時間で多数の燃料スラグを鑄造可能である、など特徴を持つ一方、破壊した鑄型が放射性廃棄物となる、両端の切断等 1 バッチ当たりの歩留まりが悪い、などの欠点もある

ANL において IFR 用の 3 元系の U-Pu-Zr 合金燃料の製造技術が実証された。①U-Pu-Zr 合金製造用に小型の射出成型装置（約 10 本/バッチ）を製作した。②通算数 100 回の運転を繰り返し合計 1000 本程度の照射試験用のピン（EBR-II 燃料仕様を満たす。）を製造した。国内において射出成型の基礎試験を実施しモールドの大きさや成型の関係を把握した。

課題としては、廃棄物低減のためモールドの再利用、核物質のロスの低減及び回収法の開発等である。なお、燃料スラグの鑄造技術として遠心鑄造法が ANL で検討がなされた。

(6) 被覆粒子燃料

被覆粒子燃料は燃料核（ $200 \times 600 \mu\text{m}$ のセラミック球）の周りに、バッファ層及び FP バウンダリの機能を有する、被覆層を蒸着等により形成させたものである。燃料核の製造では乾式法と、湿式法に大別できるが、高温ガス炉用被覆粒子燃料の燃料核製造は湿式プロセス（ゲル化）によるものである。燃料核への被覆は高温ガス炉燃料の場合、流動床による化学蒸着の方法による。高速炉燃料に適應する被覆層の概念として TiN が検討例としてある。

【参考文献】

- ① 古屋他 「プルトニウム燃料工学」 日本原子力学会（1998）
- ② 岩本他 「核燃料工学」 日本原子力学会（1993）
- ③ 常磐井他 「日本原子力学会誌 50 周年特集記事」（1999 年 4 月）

3. 設計要求事項

3.1 基本方針

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基本概念の検討においては、安全確保を前提とし、1) 経済性向上を最優先にして、2) 資源の有効利用性、3) 環境負荷低減性、4) 核不拡散性を有し、原子炉システムと調和を図った FBR サイクルシステムの開発を目標としている。

安全性については、MOX 燃料製造施設と同等ないしはそれ以上の安全性、信頼性を確保することを目標とする。その上で、1) 経済性については、FBR の本格的実用化段階で、FBR サイクルシステムとして軽水炉サイクルシステムに比肩しうる経済性を有することを目標とする。2) 資源の有効利用性については、U,Pu 等の核分裂性物質を高い回収率で回収し、再利用できることを目標とする。3) 環境負荷低減性については、施設から排出される放射性廃棄物を低減し、環境に対する負担を小さくすることを目標とする。4) 核不拡散性については、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ことを目標とする。

また、設計にあたっては、既存設計からの飛躍的な向上を期すため、従前の知見にとらわれることなく、アイデア公募、メーカー提案等の新規情報を積極的に活用するとともに、自らの創意工夫を最大限発揮し、大胆にブレークスルーを図ることとする。

3.2 検討にあたっての前提条件

(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。再処理製品の貯蔵施設等のバッファを設ける場合は、それも対象とする。

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

(2) 燃料製造能力、運転条件等

- ・小型施設：50tHM/年（炉とサイクル施設を近接させたコロケーション型施設を想定）
- ・大型施設：200tHM/年（サイクル施設のみを集中立地した施設を想定）
- ・運転条件：200日/年（暫定）

(3) 受け入れ原料の仕様（再処理製品）

- 燃料の種類：酸化物、窒化物、金属燃料
- 燃料の形態：酸化物、窒化物燃料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燃料。

○MAの混入率：5wt%/HM 程度以下（暫定値）

MAの混入率を5wt%に設定したのは、FBRのマルチリサイクルの平衡値である2wt%の他に、LWRからのMA燃焼サイクルを導入した際の燃料サイクルへの影響評価を行うことによっている。

○FPの混入率：2wt%/HM 程度以下（暫定値）

FPの混入率を2wt%に設定したのは、対象とされる再処理法の中で、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マルチリサイクルを計算すると全体のFP混入率が2wt%程度の値になること及び炉心性能への影響を考慮したことによる。

(4) 燃料製品の仕様

○ペレット燃料（酸化物及び窒化物燃料）

- ・スミア密度：80～85%程度、公差 $\pm 2 \sim \pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・Pu富化度：（別途設定）、公差 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・FP混入率：2wt%/HM 程度以下（暫定値）
- ・有意なPu、MA、FPの偏析のないこと

○振動充填燃料（酸化物及び窒化物燃料）

- ・スミア密度：80～85%程度、公差 $\pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・Pu富化度：（別途設定）、公差 $\pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・FP混入率：2wt%/HM 程度以下（暫定値）
- ・有意なPu、MA、FPの偏析のないこと

○射出成型燃料（金属燃料）

- ・スミア密度：75～80%程度、公差 $\pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・燃料スラグ直径公差： $\pm 3\%$ 以内（暫定値）
- ・Pu富化度：（別途設定）、公差 $\pm 5\%$ 以内（暫定値）
- ・FP混入率：2wt%/HM 程度以下（暫定値）
- ・有意なPu、MA、FPの偏析のないこと
- ・製品検査の可能なこと（気密性、Naボンドの状態等）

(5) 機器・構造設計

これまでの燃料製造施設の設計適用基準に準拠した技術的成立性を見通しを示すこと。適用範囲外の設計を行う場合は、新基準策定のための開発課題と解決方策を合わせて示すこと。

(6) 耐/免震設計

耐震設計上の重要度分類を明確にし、技術的成立性を見通しを示すこと。免震工法の採用による入力加速度の低減を図った設計を採用した場合は、その妥当性を示すこと。

(7) 製品貯蔵施設、放射性廃棄物処理施設等

施設運転に必要なバッファとして、年間処理相当の貯蔵容量（暫定値）を持つ再処理製品貯蔵施設及び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（高レベル、低レベル、TRU 廃棄物等）を処理及び保管できる容量（暫定値）を持つ放射性廃棄物処理・保管施設を設置する。なお、再処理/燃料製造/廃棄物処理施設の一体化設計や、炉とサイクル施設の近接によるコロケーション型の設計とする場合のように、これらの施設容量を削減できる場合には削減しても良い。

3.3 設計要求事項

以下の各項目の要求仕様を目標とする設計検討を行う。

(1) 経済性

- ・ 将来の軽水炉に比肩する経済性の達成。
- ・ 燃料製造費は 16 万円/kgHM を目標。

経済性の大きな目標は、FBR の本格的実用化段階で、FBR リサイクルシステムとして LWR リサイクルシステムと競争可能な経済性を有する燃料サイクル費を達成していることであり、廃止措置を含む発電単価で LWR と同等の 5 円/kWh 以下を目標としている。

このため、燃料サイクル費については、燃料製造費と再処理費を合わせて LWR サイクルとほぼ同等の燃料サイクル費を目標とし、FBR 燃料の製造費の目標は、約 16 万円/kgHM と算出し、設定している。

- ・ プロセスの簡素化、設備・機器のコンパクト化、施設建設期間の短縮化、高速処理化、機器故障率の低減。

(2) 資源の有効利用

- ・ U 資源の有効利用、リサイクルロスの低減。
- ・ U, Pu の回収率 99% 及び 99.9% 程度を目標。

(3) 環境負荷低減

- ・ TRU 燃焼及び長半減期 FP の核変換による放射性廃棄物量等の低減
- ・ 施設の運転保守、廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減

(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こと。
- ・ 核物質防護性及び保障措置性の対応が良好な設計。

(5) 安全性

- ・ 臨界安全、閉じ込め機能への十分な対策。
- ・ 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）をふまえた安全対策。

(6) 運転・保守・補修性

- ・ 運転の簡素化、自動化、運転制御系の高度化、メンテナンスの容易性によるヒューマンエラー防止、保守作業量の低減、運転・保守の省力化、被ばくの低減。
- ・ 保守、補修区分、アクセスルートスペース確保、適切な生体遮へい等。

3.4 特記事項

- (1) 実用化のための技術開発課題は、重要度を示すとともに解決方策、開発スケジュールとコストを含む研究開発計画を明確にし、成立性ポテンシャルを示すこと。
- (2) 燃料製造性向上の観点から、原子炉施設の要求性能を担保できる範囲内で、燃料製造仕様の緩和や検査基準の合理化に配慮した設計であること。
- (3) 燃料製品の品質を担保するため、特有の検査が必要な場合には検査方法を含めて明らかにすること。
- (4) 径ブランケット燃料を簡易熱処理して回収した燃料を使用する場合、比較のために通常再処理により得られた燃料を使用する場合も検討し、炉心への影響や経済性向上について比較して示すこと。
- (5) 燃料製造/再処理/廃棄物処理施設との一体化設計とする場合は、単独立地する場合と対比して、また、炉とサイクル施設を近接したコロケーション型の設計とする場合は、集中立地する場合と対比して、利点と欠点について評価すること。
- (6) 比較的高い FP 除染率で回収された U,Pu を用いてグローブボックスで燃料製造する場合は、セル構造に比べての経済性向上効果等について評価すること。

4. 概念検討

4.1 燃料製造技術検討の視点

FBRは軽水炉に比べて燃料中の不純物許容量が大きいことから、精製工程の削除等による再処理工程での低除染化が可能であり、これに伴い、燃料サイクルプロセスの簡素化、廃棄物発生量の削減、プラントのコンパクト化により経済性の向上のほか、核不拡散性の向上、環境負荷低減への寄与が期待できる。一方、将来のFBR燃料サイクルシステムにおいては多量のFPを含んだTRUを取り扱うことから臨界、閉じ込め機能、遮へいなどの十分な安全対策が必要という特徴を有している。

このようなFBR燃料サイクルシステムの中の燃料製造技術の検討においては、低除染燃料への適用をベースとして、ペレット燃料製造においては、工程の簡素化、遠隔自動化、振動充填燃料においては造粒工程の合理化、充填密度やPu濃度分布等の品質管理、廃棄物量の低減、金属燃料は鑄型廃棄物量の低減、歩留まりの向上、ルツボの寿命延長、被覆粒子燃料については、炉・再処理システムとの整合に留意して設計検討を進めることとした。

4.2 ペレット法の検討

4.2.1 MOX燃料に対する各候補概念の検討状況

(1) 簡素化ペレット（グローブボックスでの製造）

(i) 簡素化プロセスの概要

従来のペレット燃料製造プロセスでは、再処理から回収した硝酸プルトニウム溶液と硝酸ウラニル溶液の1対1混合溶液をマイクロ波脱硝加熱器で固体の酸化物に混合転換（MH法）した後、ウラン粉末や回収粉末との混合、造粒、成形、焼結等の各工程を経て製品ペレットになる。

現在、経済性向上のため、工程設備の自動化および一体化、検査基準の合理化等の技術開発を進めるとともに、ペレット製造工程自体の簡素化を目指した簡素化プロセス（以下、「ショート・プロセス」という）の開発に取り組んでいる。図 4.2.1 に従来の現状プロセスとショート・プロセスの比較を示す。ショート・プロセスでは再処理から回収した硝酸溶液段階でプルトニウム富化度調整を行った後、MH法で流動性の良い粉末を製造するため、現在のような粉末の状態での富化度調整を行う「混合工程」および粉末の流動性向上を目的とした「造粒・整粒工程」を削除することが可能となる。

(ii) 設計検討の基本方針

フェーズⅠの中間報告では、リファレンスケースとなる50tonHM/年規模のプラントについて、現状プロセスとショート・プロセスによる2つのプラントを想定し、双方のプロセスとコストを定量的に比較する。なお、50tonHMは炉心燃料のみを対象とした生産量である。さらにMAを添加した場合の影響等について評価を行う。200tonHM/年へのスケールアップ効果の検討は、平成12年度作業の中で実施する。

現状プロセス・プラントではPu燃料センターにおける30年間のR&Dの成果をもとにプラント設計を行い、ショート・プロセスプラントではこの成果に加え、現在実施中のR&Dの成果を適用し、プラント設計を行う。

プラント像の構築からコスト評価に至る一連の検討は、概ね図 4.2.2 の手順によって行った。設計要求である「50および200tonHM/年、200日稼動」からプラントの設計検討をスタートするものの、各製造プロセスで扱う単位処理量（バッチサイズ）の設定、要求処理量を満足する機器の選定および設備台数の設定、さらにこれらの設備を最適に配置したプラント全体像を構築した場合、必ずしも設計生産能力と合致しない場合がある。今回の場合、50tonHM/年の要求に対しては、現状プロセスのプラントで約58tonHM/年、ショート・プロセスのプラントで約70tonHM/年となった。表 4.2.1 にプラント像構築上の主要条件を示す。

フェーズⅠの中間報告では、リファレンスケースとなる50tonHM/年規模のプラントについて、現状プロセスとショート・プロセスによる2つのプラントを想定し、双方のプロセスとコストを定量的に比較する。さらにMAを添加した場合の影響等について評価を行う。200tonHM/年へのスケールアップ効果の検討は、平成12年度作業

の中で実施する。

(iii) 設計検討の前提条件

(a) プラントの想定範囲

MOX燃料加工プラントの所掌範囲については以下の通りとする。

再処理工場でMH転換されたウラン-プルトニウム混合酸化物原料粉末および母材となる回収ウラン原料粉末は、無償にて支給されるとする。また、軸方向ブランケットペレットおよび集合体部材については購入する。

これらの原材料をもとに、ペレット製造、ピン加工、集合体組立ならびに、これらを製品化するための種々検査・分析および製品集合体を発電炉に供給するための製品輸送までを行うとともに、燃料製造プロセスから発生する放射性廃棄物を灰化処理（PWF F相当）し、固化体を一時貯蔵するまでの一連の業務を所掌範囲とする。

なお、燃料製造プロセスから回収されるダーティ・スクラップ（DS）からプルトニウムを回収するための湿式回収処理機能は持たず、再処理工場に戻すことを前提とした。図4.2.3にMOX燃料加工プラントの所掌範囲を示す。

(b) 原料および製品燃料の仕様

プルトニウム原料は、取出平均燃焼度143GWd/tのFBRより現状の除染レベルで回収されたプルトニウムと、同じく回収されたウランと混合転換されたMH粉末とする。プルトニウム富化度は、現状プロセスでは50%、ショート・プロセスでは所定の製品Pu富化度（15～18%程度）に調整されたものとする。回収プルトニウムの同位体組成は以下の通りである。Puフィッサイル率は約64%である。

$$\text{Pu-238} : \text{Pu-239} : \text{Pu-240} : \text{Pu-241} : \text{Pu-242} = 2 : 58 : 27 : 6 : 7$$

本評価に使用する製品燃料の概略仕様を表4.2.2に示す。本製品燃料は、プルトニウム燃料センターにて設定した仕様であり、「もんじゅ」燃料や実証炉燃料と比較して燃料要素が太径（ペレット径：10.4mmφ、燃料要素径：12mmφ）、軸方向ブランケット域が小さく、MOX部のPuフィッサイル富化度が低く、低富化と高富化の差が2%程度と僅差であるという特徴をもつ。

(c) プラント操業形態の想定

プラントの操業形態は、現状プロセスプラント、ショート・プロセスプラントともメインのペレット製造工程については、3班2交替運転とする。なお、ペレット焼結には一昼夜必要となることから5班3交替運転を基本とする。

年間運転日数の想定は、現状プロセスプラントで248日、ショート・プロセスプラントで283日とした。ショート・プロセスでは、MOXプラント運転上不可欠な年次保守点検（32日間）、核物質在庫調査や月例査察（11日間）、ゴールデン・ウィーク10日間および年末年始（14日間）などは運転停止とし、設備数やプラントスペースおよび保障措置対応性などを踏まえて、プラント稼働率を現状プロセスプラント、シ

ョート・プロセスプラントそれぞれ90%および95%を前提として定めた。なお、製品Pu富化度変更に伴う設備のクリーンアウトに要する期間については、本プラントで製造する燃料スペックと取り扱いバッチサイズ（後述）に鑑み、無視できるものとした。

ここで想定しているFBR燃料の平衡サイクル時の1回の取替燃料は、集合体数で46体であり、その燃料重量は約6.5tonHMである。50tonHMを生産するには約8キャンペーンを要することになるが、1キャンペーン当たりの所要日数は、現状プラントで28日（但し、ペレット工程）およびショート・プロセスプラントで26日間（同）となる。したがって、1年間で行うことができるキャンペーン数は、現状プラントで最大8.9キャンペーン、ショート・プロセスプラントで最大10.7キャンペーンが可能である。

(iv) プロセス設計

(a) 燃料製造工程フロー

図 4.2.1 に示した通り、ショート・プロセスでは製品ペレットのプルトニウム富化度への調製を再処理工場において溶液段階で行うため、原料を直接成型することが可能となり処理プロセスを大巾削減できる。加えて、乾式工程は持たないシステムのため、総処理プロセスは22工程から5工程にドラスティックに減らすことが可能となる。

ピン加工および集合体組立工程は両プロセスとも同じである。（図 4.2.4）また、分析工程はショート・プロセスの場合、ペレット工程に準じて分析ポイントは大巾に削減できる。（図 4.2.5）

(b) 安全設計

安全設計は、プルトニウム燃料第三開発室に概ね準拠し、部分的により経済性と安全性に配慮した。以下に、臨界、遮へい、熱、耐震、閉じ込め等の安全設計の考え方を示す。

① 臨界設計

MOXプラントにおける単位処理量を定める上で第一の基本となるのが臨界設計である。現状プロセスおよびショート・プロセスともに、臨界事故を防止しつつ最大の単位処理量を確保するため、分析工程以外の全工程を乾式とし、単一ユニットの臨界管理方法を質量管理または形状管理とすることを原則とする。

Pu 同位体組成は安全裕度を考慮し、 $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}=65/20/15$ （Pu-fissile 割合：80%）とし、さらに、原料粉系、混合酸化物系、Pu-H₂O 系の3つに臨界管理区分を行い、取扱う核物質に応じてPu 富化度、燃料密度、含水率を設定し、各々の核的制限値を求めた。核的制限値は、臨界諸量（ $k_{\text{eff}} \leq 1.0$ ）に安全係数を乗じて求めた。安全係数は質量で0.7、円筒直径で0.85とした。ただし、分析工程の一部は、核物質の2重装荷を考慮し、安全係数を0.43（質量）とした。

② 遮へい設計

ICRP の Pub. 60 に準拠して、年間の被ばく線量当量限度の目標値を 20mSv/年とする。設計に当たっては、先ず遠隔・自動運転を踏まえて調整作業時間、監視作業時間および非定常作業時間を設定した。次いで、それぞれの作業環境における空間線量率の目標値を定め、これを担保できるコンクリート厚、グローブボックスのパネル厚さ等を計算により求めた。主要な設計値を表 4.2.3 に示す。

③ 熱設計

Pu の崩壊に伴う MOX 燃料の発熱により O/M 比の上昇、グローブボックス各種材料の劣化、設備の熱膨張による不具合などを防止するため、熱対策を施す必要がある。特に、添加剤を使用し、MOX 粉末をバッチで取扱う現状プロセスでは、熱設計により十分な温度管理が必要となる。

グローブボックスで使用している各種材料（グローブ、パネル、HEPA フィルタ等）の健全性を保つために、必要に応じて設備の放熱機構の付加および強制冷却等を行うことにより、グローブボックス内で扱う設備の表面温度を 60°C 以下に保持するとした。このため、現状プロセスの搬送で用いる粉末容器は放熱効果を高めたフィン付の中空容器を採用した。

粉末保管庫、集合体保管庫などでは、臨界設計と熱設計に基づき貯蔵ピッチを定め、保管庫内の雰囲気を一定温度以下に保持するように、冷却機能を持つこととした。

④ 耐震設計

MOX 加工施設においては「ウラン加工施設安全審査指針」に相当する安全審査指針はないため、本研究では、原子炉施設および再処理施設の耐震設計を参考に、設備ごとに重要度分類を行い、各クラスに応じた地震力等を設定して耐震設計を行った。MOX 加工施設は、原子炉施設および再処理施設における「反応の制御」（原子炉では核分裂反応、再処理では化学反応）を行う必要がないことから、耐震重要度 A クラスを最上位とする。

耐震設計上、閉じ込め機能を有するグローブボックスは重要である。本評価では、プルトニウム第三開発室のグローブボックスをリファレンスとした感度解析を実施し、同グローブボックスが耐震上十分な裕度を持つことを確認した。

⑤ 閉じ込め設計

MOX プラントは、プルトニウムが環境に漏洩しないような閉じ込め機能を有していなければならない。ここで想定するプラントにおいては、核物質は容器またはグローブボックス、工程室および建物による 3 重の閉じ込めを行うとする。また、既存の第 3 開発室と同様に管理区域区分ごと（工程管理室→廊下→工程室→グローブボックス）に差圧を深く管理する。核物質の閉じ込め方法を図 4.2.6 に示す。

⑥ 火災・爆発防止対策

ここで想定するプラントにおいては、可燃物および可燃性ガス（水素）等を取扱うことから、火災・爆発を防止する措置を講ずるとともに、万一、火災・爆発が発生したときに、その拡大を防止する措置を講ずる。

火災・爆発を予防するため、アルコール等の危険物のグローブボックス内への持込を制限するとともに、水素ガス供給系に水素濃度を監視する設備を設ける。また、爆発下限値を考慮して焼結炉の雰囲気ガスを4% H_2 -Arとする。また、火災・爆発の拡大防止策として、図4.2.7に示すような CO_2 ガスを自動噴射して消火するシステムを設ける。

(v) 主要設備の概要、レイアウト

(a) ペレット製造工程

現状プロセスプラントとショート・プロセスプラントのペレット製造工程における設備構成比較を図4.2.8に示す。

両プラントともペレット製造工程における工程設備間の粉末・ペレットの移動は容器搬送とする。ただし、ショート・プロセスプラントでは再処理施設間の物流、すなわち原料受入れと規格外品の払出しには気流搬送を用いる。

ショート・プロセスプラントでは、再処理施設から必要な分だけ原料を気流搬送により受け入れるため、Pu原料貯蔵庫を設けず、複数のホッパを備える中間保管庫を設置する。

現状プロセス・プラントでは、査察時に全ての核物質を中間保管庫に退避させることを踏まえ、ペレット製造工程の設備は第三開発室に準拠し、中間保管庫を中心とした櫛型配置を基本とする。一方、ショート・プロセスプラントでは、各設備間にバッファエリアとして中間保管庫を設け、工程設備を直列（ワンス・スルー型）に配置する。設備レイアウトのイメージを図4.2.9に示す。

以下に、ショート・プロセスのペレット製造工程で採用した主な設備の選定理由を示す。

① 成型設備

現状プロセスでは、潤滑剤を粉末に混合するためのデルタ型ミキサと中空ペレットの成型に確証が得られているレシプロ型プレスを採用するが、ショート・プロセスでは粉末に潤滑剤を添加しないため、ペレット成型時にダイスの内側に潤滑剤を塗布する機構を有するダイ潤滑方式のレシプロ型プレスとする。

② 焼結設備

現在 Pu 燃料センターで開発中の保守用グローブボックスが焼結炉上部に設置されたプッシャー搬送方式の連続焼結炉を選定する。本設備はグリーンハウスを設置せず

に、炉体内の部材交換を行うことができる。設備のイメージを図 4.2.10 に示す。

③ 仕上げ・検査設備

第3開発室FBRラインで実用化されている研削、外径・密度選別および外観検査の3機能が一体化した仕上げ・検査設備とする。外観検査装置は現在開発中の自動外観検査装置を採用する。改良型仕上げ検査設備の概略を図 4.2.11 に示す。

(b) ピン加工・集合体組立工程

MOXプラントのピン加工・集合体組立工程は、第3開発室FBRラインを基本として設備を構成した。ただし、ペレットを充填するとき被覆管口部の汚染を低減する「管口マスク」は、経済性および放射性廃棄物発生量低減の観点から使用せず、充填設備に充填治具を設けることにより管口部の汚染を防止する方式とした。また、被覆管の材質は燃焼度の関係からODS鋼（酸化物分散強化型フェライト鋼）が有力であるため、溶接機は抵抗溶接装置とした。

ピン加工・集合体組立工程の主な設備を以下に示す。ピン加工・集合体組立工程の設備構成は現状プロセスプラントでもショート・プロセスプラントとも同じである。

- ・充填設備
- ・端栓溶接設備
- ・燃料要素除染設備
- ・ヘリウムリーク試験設備
- ・エックス線検査設備
- ・寸法検査設備
- ・外観検査設備
- ・集合体組立設備
- ・集合体検査設備
- ・集合体梱包設備

(c) 分析工程

現状プロセスとショート・プロセスにおける工程ごとの分析項目を表 4.2.4 に示す。ここで想定するMOXプラントの分析レベルは、現状のFBR燃料設計仕様の品質管理レベルと同等とし、これを満足するのに必要な分析・物性測定設備を備えることとする。

ショート・プロセスプラントでは、分析項目およびサンプル数が少ないことから、装置種類および台数が少なく済み、運転体制は1シフトとなる。

(vi) 付帯設備の概要

(a) 給排気設備

給排気設備は施設からの排気の放出基準について、科学技術庁告示 20 号を遵守で

きるよう、必要な設備を設ける。

閉じ込め機能については、核燃料施設安全審査基本指針の閉じ込めに関する規定を遵守するように、十分な措置を講ずるものとし、また、建家内環境については、建家内の温湿度を制御することにより、作業従事者に対する作業環境を適切に維持する設計する。

(b) ユーティリティ設備

①電気設備

本施設では、安全上重要な設備へ常時給電を行い、その他の設備については、断線、受変電設備の故障等に起因する停電時間を可能な限り短くするよう設計する。

このため、本施設ではユーティリティ施設から、商用電源を1号系、2号系の並行2回線で受電し、一方の回線に故障等が発生しても、もう一方の回線から受電を継続できるようにする。さらに停電時には、ユーティリティ施設の非常用発電設備から、商用電源の回線で、非常用電源を並行2回線で受電する。

設備への給電は、安全上重要な設備に対して並行2回線で給電し、一方の回線に故障等が発生しても、もう一方の回線から給電を継続する。さらに、瞬時の停電でも支障のある設備へは、非常用発電設備の立ち上がりを考慮して無停電電源装置を設け、これを介して給電する。

また、電気火災や施設内の火災時に電路を確保する観点から、それぞれの回線の受変電設備及び電線・ケーブルは、合理的にできる限り間隔をおいて設置する。

②冷水供給設備

冷水は、一次冷水と二次冷水を熱交換して使用する二次冷水に区分し、一次冷水及び二次冷水は独立に循環するものとする。

一次冷水とはユーティリティ施設の冷凍機により製造され、燃料製造施設へ供給する冷水である。二次冷水は、燃料製造施設の熱交換器により一次冷水を熱交換して、燃料製造設備へ供給する冷水である。さらに、二次冷水はグローブボックス系冷水と機器系冷水とに区分し、それぞれ熱交換器及び循環ポンプを設け、独立に循環する。

i) グローブボックス系冷水

グローブボックス系冷水は、グローブボックス内設備・機器を冷却する冷水で、放射性物質を含む可能性がある。

ii) 機器系冷水

機器系冷水は、二次冷水のうち、グローブボックス外機器を冷却する冷水で、放射性物質を含む可能性がない。

③圧縮空気供給設備

本設備はユーティリティ施設で製造した圧縮空気を空気槽で蓄圧し、工程設備と給排気設備へ供給する。ユーティリティ施設でコンプレッサーの異常や停電等が発生し

た場合には、空気槽に残っている圧縮空気を給排気設備の負圧維持に必要な設備にのみ供給できるようにする。

このため、圧縮空気の供給系統は、工程設備系と給排気設備系に区分し、ユーティリティ施設等の異常により空気槽の圧力が低下した場合は、工程設備系を自動遮断する。

④混合ガス供給設備

混合ガス供給設備は、本施設の電気炉に還元用水素ガスを供給するものである。供給する水素ガスは、原則として爆発下限水素濃度以下に不活性ガス（窒素、アルゴン、ヘリウムなど）で希釈し、使用中は常時水素ガス濃度・酸素濃度を測定し、制限濃度を超えた場合は直ちに水素ガスの供給を停止する機構とする。

(c) 放射線管理設備

MOXプラントにおける放射線管理は、大別して以下の機能を有する。

- ・作業環境の線量当量率の監視
- ・汚染のチェック
- ・汚染の早期発見
- ・排気・排水等の環境放出前の濃度管理

このため、以下のような装置・システムを適切に配置する。

- ・作業環境の線量当量率をリアルタイムで監視するエリアモニタ
- ・表面汚染を発見するためのサーベイメータ、ハンドフットクロスモタ等
- ・空気汚染を発見するための α 線ダストモニタおよびエアスニッフア等
- ・環境に放出される排気中の放射性物質濃度を測定する排気モニタ
- ・万一の臨界事故の発生に備える臨界警報装置等
- ・個人被ばく管理を行うための個人線量計

装置の配備数はプラントスペースや工程室数および人員数などに関連が強く、ショート・プロセスプラントは現状プロセス・プラントに比べて少なく済む。

(d) 保障措置設備

現状プロセス・プラントにおける保障措置対応は、基本的には第三開発室FBRラインと同様とする。NDA装置などの設備は同FBRライン並みに配備することとし、現在開発中の遠隔監視システムに関しても当プラントにて適用可能とする。

一方、ショート・プロセスプラントは、現状プラントと比較して処理工程が少なく、グローブボックスの数も少ないことから査察時の測定ポイントが少なく済むことや、製造仕掛品が少ないため中間保管庫への移動時間も短くて済むことに加えて、プロセスモニタリングシステム等の新システムの導入も考慮して、中間査察は1シフト程度の工程停止で対応可能とする。

(vii) 廃棄物処理設備の概要

(a) 液体廃棄物処理設備

MOXプラントから発生する液体廃棄物（廃水）を周辺環境に放出するためには、法令で定められた放射性物質濃度以下になるように処理を行わなければならない。

廃水中の放射性物質の濃度および廃水の種類等を考慮して、液体廃棄物を施設廃水系（分析廃液、洗浄廃水、施設廃水）および洗濯廃水系に区分し、廃液処理設備、2つの排水設備（施設廃水系および洗濯廃水系）により効率的に処理を行う。廃液処理設備では凝集沈殿法、排水設備では希釈により廃水中の放射性物質濃度を低減する。図4.2.12に液体廃棄物処理設備の全体図を示す。

(b) 固体廃棄物処理・保管設備

可燃物・難燃物を焼却し、不燃物および焼却によって発生する焼却灰を溶融することにより減容処理を行う。ただし、可燃物、難燃物、不燃物の区分は、発生元で行うものとする。図4.2.13に固体廃棄物処理設備の全体図を示す。

(viii) システムの特徴

(a) プラントの全体イメージ

現状プロセスとショート・プロセスを比較すると表4.2.5のような差異があり、この差がプラントサイズに大きく現れる。

ショート・プロセスプラントのレイアウトイメージを図4.2.14に示す。現状プロセス・プラントが3階構造、総床面積約30,000 m²であるのに対して、ショート・プロセスプラントは2階構造、総床面積約20,000 m²となり、2/3のスペースで設置が可能となる。ショート・プロセスプラントの各フロアの具体的なレイアウトを図4.2.15と図4.2.16に示す。

(b) プラントの物質収支

ショート・プロセスプラントに対して、プラント内のマスバランスを評価し、原料必要量、各工程における原料投入量（処理量）、再処理施設への払戻量、低レベル放射性廃棄物への核物質移行量を求めた。図4.2.17にプラント内の核物質収支フローを示す。

ショート・プロセスプラントでは53.7tonHMの原料を投入し、ペレット製造工程でその4.9%（2.7tonHM）、加工組立工程でさらに約2%（1.0tonHM）が回収される。ショート・プロセスプラントでは乾式回収処理を行わないため、再処理施設への払戻量は3.7tonHMとなり、最終的に製品として50tonHMの炉心燃料（MOX燃料）が製造される。また、低レベル放射性廃棄物への核物質移行率をペレット製造工程取扱量の0.1%とすると（U、Puの回収率99.9%を想定）、54kgHMの核物質が廃棄物側に移行し、処理前の形態でドラム缶本数にして可燃性が192本、難燃性が55本、不燃性が106本発生する。

(c) 経済性評価

① プラント建設費

生産規模 50tonHM/年の現状プロセスプラントおよびショート・プロセスプラントをそれぞれ“サラ地”に建設する場合の建設費（土地取得費および土地造成費を除く総建設費）を積算し、比較する。

ショート・プロセスは現状のプロセスに比べて、ペレット製造工程において原料秤量、混合、造粒等の各工程を削除することによりおよそ1/3程度に大巾削減でき、追隨する効果として搬送系設備の削減、粉末などの保管庫スペースの削減が図れる。その結果、建屋は従来法よりコンパクトになり、建設費は2/3程度となる。

② 操業費

発注、管理・運営、生産、品質保証など全ての業務を賄えることを前提に組織・人員体制を想定した。事務・管理部門は日勤、運転部門は3班2交替を基本とし、ペレット焼結工程、ペレット検査工程、当直、施設運転管理、放射線管理は5班3交替とした。

生産規模 50tonHM/年の現状プロセス・プラントおよびショート・プロセスプラントの人員を比較すると、ショート・プロセスプラントの方が25%程度少なくなる。この人員体制は“サラ地・単独立地”ケースであり、コロケーション立地やサイクル施設の一体化を考えると、さらに事務・管理部門の人員を合理化できることになる。

生産規模 50tonHM/年の現状プロセス・プラントおよびショート・プロセスプラントの平衡運転時の直接操業費は、ショート・プロセスの方が現状プロセスの約2/3まで削減される。

ショート・プロセスでは、ペレット製造工程において大幅な工程の削減が進み、この工程数の減少は、運転員人数の削減、廃棄物発生量の低減、保守時間の削減、工程ロス減少（収率向上）、給排気設備などの容量小型化、ホールドアップ量減少、備品類の削減などに大きな効果があり、結果的にプラントの操業費の2/3程度の削減につながる。

③ 部材費

今回は「もんじゅ」の実績をベースに、太径燃料採用に伴う kgHM あたり部材費の低減効果、大量発注、検査の合理化等による部材単価の低減およびタグガス削除等による部材点数の削減などの効果を見込んで設定した。しかしながら、本研究で対象としている 15 万 MWd/t の燃焼度を達成するのに必要となるフェライト鋼ないし ODS 鋼製の被覆管の価格を見積ることは、現時点において非常に難しいため、今後更に検討が必要である。

④ 燃料加工コスト

コスト計算を行うにあたり、プラント建設費は全額長期借入金とする。また、運転期間は建家寿命期間と合わせて40年間とし、現在価値換算法によりこの期間中の平均コストを算出する。

設備などの償却は定率償却とし、償却年数は建家を40年、内装設備および付帯設備を16年とする。また、耐用年数は内装設備、付帯設備ともに建家と同じく40年とし、運転期間中の更新は考慮しない。表4.2.6にコスト計算条件内訳を示す。

ショート・プロセスプラントにおける単位重量当りの加工コストを算出した結果、年間50tonHM/年の生産規模の場合、約22万円/kgHMとなった。プラントの最大生産能力である約70tonHM/年の生産を行った場合には、約17万円/kgHMと低廉化した。これらのコストはいずれもプルトリウム原料費は含まないものの、廃棄物処理費および新燃料輸送費を含めた総コストである。

このように、概念的評価ではあるもののショート・プロセスによるプラントにおいて目標達成の見通しを得た。

⑤ 感度解析

燃料加工コストは燃料仕様に大きな影響を与えるため、その一例としてペレットサイズがショート・プロセスプラントの加工コスト（内装設備費、人件費）に与える影響を評価した。ペレット外径を細くするとkgHMあたりのペレット個数が増加するため、ペレット製造に係る内装設備費、人件費が増加する。

生産量50tonHM、スタック長1,200mm、169本バンドル集合体と一定としたときのペレット重量と本評価で使用した製品燃料（ペレット径 ϕ 10.4mm）の加工コストとの差額の関係を図4.2.18に示す。ペレット径を「超経済型FBR炉心燃料」の約半分である「もんじゅ」サイズ（ ϕ 5.4mm）とすると、加工コストは約2.3万円/kgHM上昇し、ペレット径を ϕ 15mmにすると約0.4万円/kgHM低減する。

また、ペレット外径を細くすると燃料重量あたりの部材点数が多くなるため、kgHMあたりの部材費が増加する。本評価で使用した製品燃料の部材費に対して「もんじゅ」サイズ（ ϕ 5.4mm）の場合、部材費は約3倍上昇し、ペレット径 ϕ 15mmの場合、約1/2に低減する。ペレットサイズが部材費に与える影響は、内装設備費、人件費に与える影響より大きく、今後さらに検討を行う必要がある。

(ix) グローブボックスによるMA取扱いの限界評価

グローブボックス設備においてMA（主にNp、Am、Cm）入り燃料を製造する場合、以下の対策を考える必要がある。

- ・被ばく対策
- ・発熱対策
- ・スカイシャイン対策
- ・保障措置対策

被ばく対策では具体的にグローブボックスの厚さを増加し、重遮蔽対策を講じる必要がある。発熱対策としては取り扱ひ量の低下、強制冷却の実施等を、スカイシャイン対策としては建屋壁厚の増加や地下構造の採用等を講じる必要がある。保障措置対策としては、新NDA（非破壊検査）機器の開発等が挙げられる。

特に問題となるのは被ばく対策である。ここでは、被ばく対策の観点からMA燃料の取り扱ひ可能量を評価した。

評価の前提は以下の通りとした。

- ① 作業性と視認性の面からグローブボックスパネル厚さの限界は、含鉛アクリル、鉛ガラスで 100mm 程度と想定
- ② 被ばく管理上、グローブボックスパネル表面から 30cm 位置の線量は、 $50 \mu\text{Sv/h}$ 以下を確保する

上記2つの観点から、グローブボックス製造概念の範囲で適応できるMA核種とその量を評価する。

TRU（MAにPuを含める）の同位体組成を図4.2.19に示す。想定したのは、軽水炉ウラン燃料から回収したTRU（冷却期間1年と40年）、軽水炉MOX燃料から回収したTRU（冷却期間1年と40年）、FBRでリサイクルを重ねて平衡に達したTRU（冷却期間0年）およびFBRブランケット燃料から回収されるTRU（冷却期間0年）の計6種類である。

このTRUの同位体存在比に、図4.2.20に示した各TRU同位体の線量当量率への寄与を乗ずることにより、検討対象とする各TRUがグローブボックス内に単位量滞留した場合の基準位置での線量当量率が得られる。鉛ガラスをパネル材に用いた場合の各種TRU 1gによる線量当量率を図4.2.21に示す。

グローブボックス内のTRU量を500gTRUと想定すると（グローブボックス内の粉末滞留量を2,500gと仮定し、粉末のTRU富化度を20%とした場合）、線量当量率目標値を満足するには、図4.2.21に示したTRU 1gによる線量当量率は $0.1 \mu\text{Sv/h/gTRU}$ （ $=50 \mu\text{Sv/h}/500\text{gTRU}$ ）でなければならず、図4.2.21の結果から以下のことが言える。

- ① Pu及びNpのみをリサイクルする場合には、どのTRU組成でも線量当量率は目標値に対し十分小さく、被ばく上の問題はない。
- ② Pu、Np及びAmをリサイクルする場合には、どのTRU組成でも線量当量率は目標値を超えるので全量のリサイクルは行えない。目標値に対する比は、FBR平衡組成で約3倍、軽水炉ウラン燃料から回収されるTRUで約4倍、軽水炉MOX燃料から回収されるTRUで約8倍である。
- ③ Cmも含め全てのTRUをリサイクルする場合には、線量当量率はさらに増大し、目標値に対する比は、FBR平衡組成で約11倍、軽水炉ウラン燃料から回収されるTRUで約5～8倍、軽水炉MOX燃料から回収されるTRUで約9～14倍である。

以上の結果から、長期間のFBRサイクルを考えた場合にリサイクルされるTRUの大部分を占めるFBR平衡組成のTRU全てをリサイクルすると線量当量率は目標値の約11倍となり、機器遮へい強化や粉末滞留量削減のための方策を講じても実現が困難なレベルにあることが分かった。一方、 C_m を除く N_p 、 A_m を P_u と一緒にリサイクルする場合は、線量当量率は目標値の3倍程度に収まっており、今後の検討により吸収できる可能性もある。実現に向けては、ショート・プロセスプラントの成型、研削設備の線量当量率の低減方策はもとより、全ての工程の運転、保守・調整時の被ばくに関する検討が必要である。また、燃料仕様の最適化等により、コスト増加を最低限に抑える検討も必要と考えられる。

(x) 開発課題

これまでの検討の結果、ショート・プロセスによるMOX燃料製造のメリットがほぼ明らかになってきた。しかしながら、本プロセスを実現するためには、

- ・溶液段階でのプルトニウム富化度調整技術開発
- ・粉末流動性向上技術開発
- ・ペレット直接成型試験および焼結試験
- ・ダイ潤滑ペレット成型技術開発

など種々の製造技術面の開発が必要である。他方、プラント技術面においても、

- ・粉末気流搬送システム開発

などが必要となる。

また、前述のようにペレット・サイズや燃料集合体の構造、それに合理的なスペックを定めることによるコスト低減効果が大きいことが確認されたので、燃料設計の面においても、炉心・再処理との取り合いを調整した上で経済性の高い燃料設計を行うことが重要となる。

これらについて、今後着実に開発を進めながら、複合化技術としてのショート・プロセスプラントの成立性を確認していく必要がある。

(xi) 今後の設計評価の進め方

平成12年度の設計評価においては、以下の点に留意して進めていく必要がある。

- ・燃料仕様の統一
- ・製造規模の定義（軸および径ブacket燃料を含めた生産規模とするかどうか）
- ・部材費、内装設備、ユーティリティー設備の見積もり精度の向上
- ・運転経費、輸送費、デコミ費の推定精度の向上
- ・廃棄物発生量および処分費の推定精度の向上
- ・200トン/年規模へのスケールアップ
- ・MA燃料製造プラントイメージの具体化

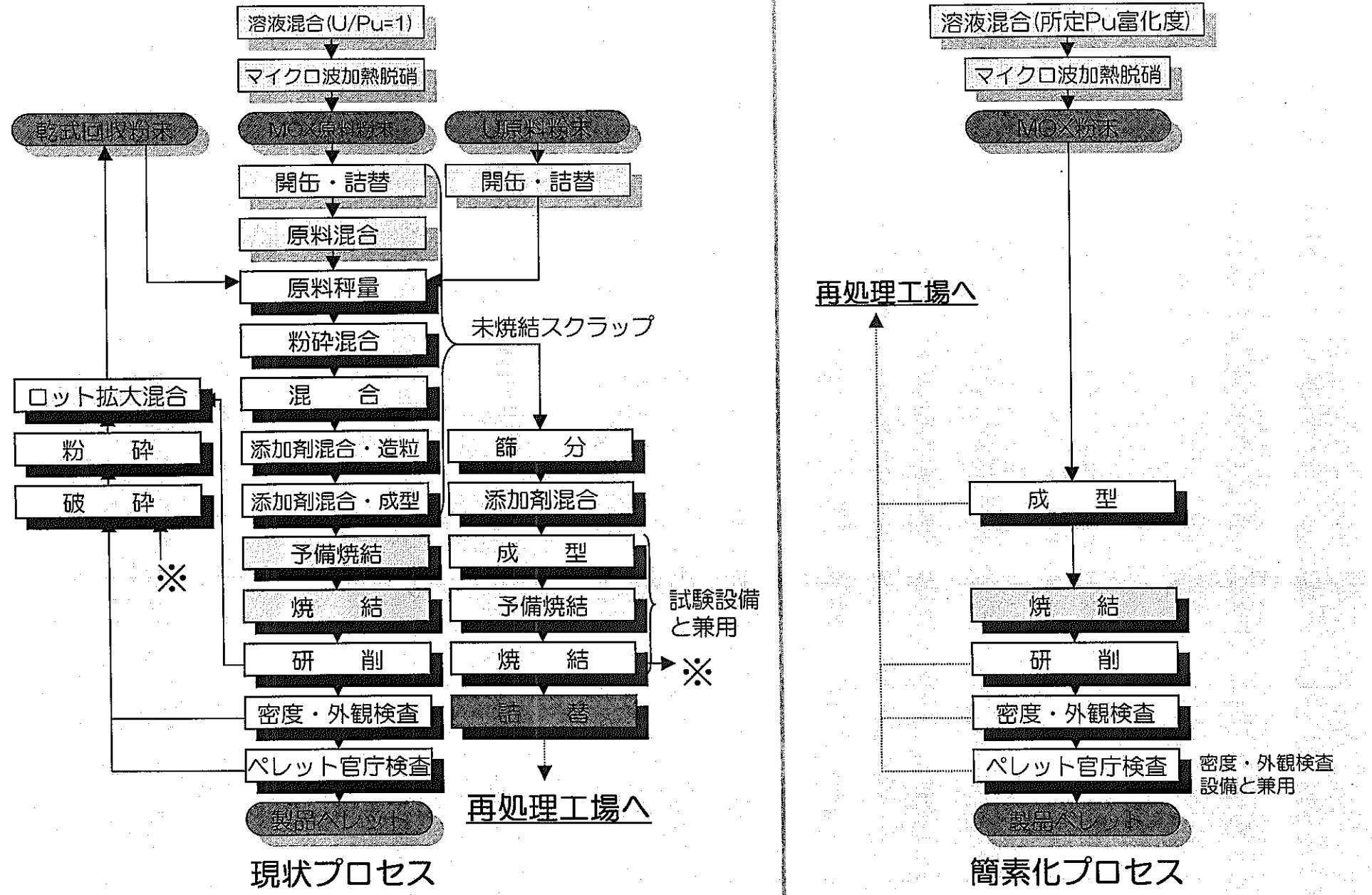


図4.2.1 現状プロセスと簡素化プロセスのペレット製造フローの比較

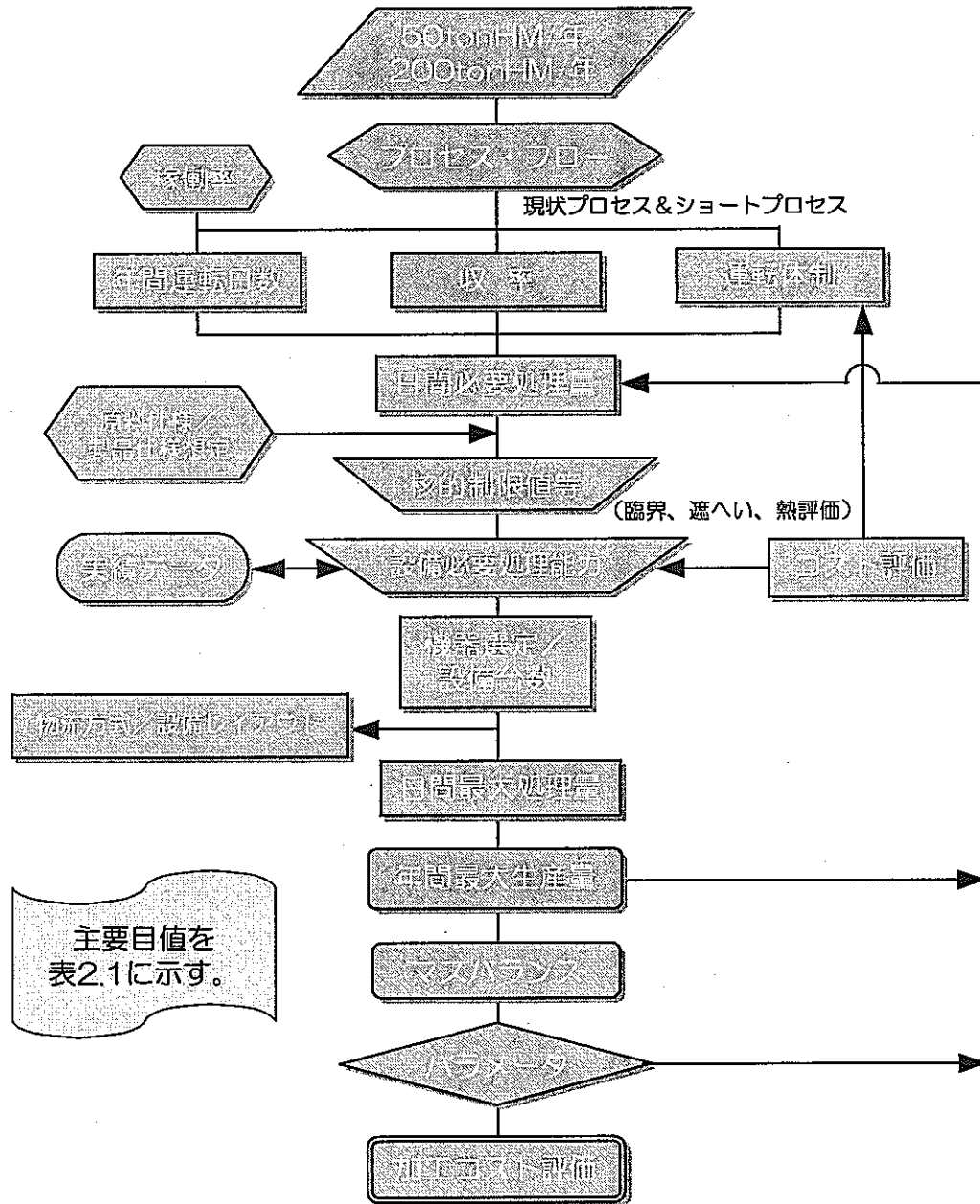


図4.2.2 MOX燃料製造プラントの設計検討の手順

(MOX原料粉、 UO_2 原料粉、要素／集合体部材からMOX燃料集合体を加工する。)

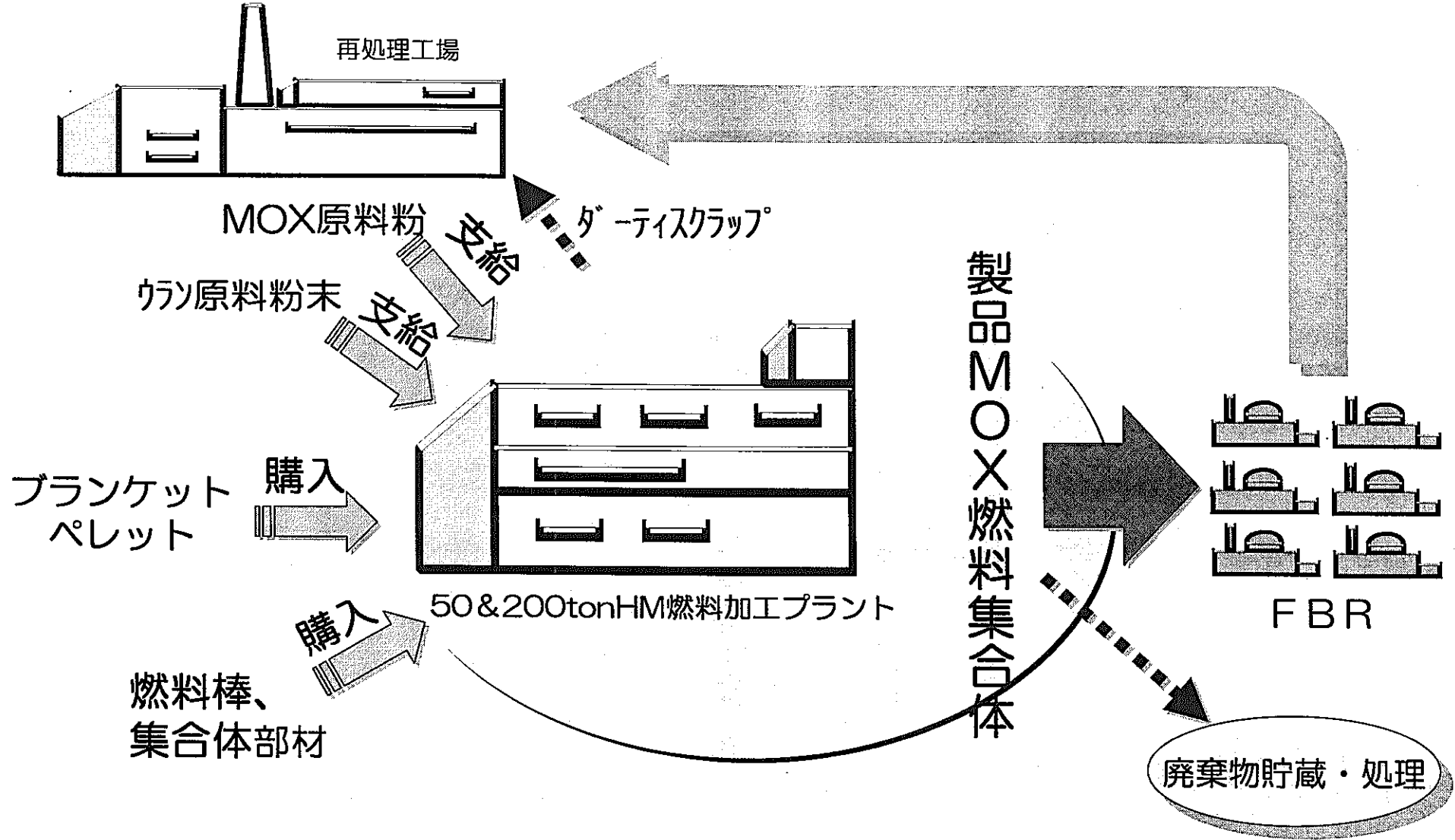


図4.2.3 MOX加工プラントの所掌範囲

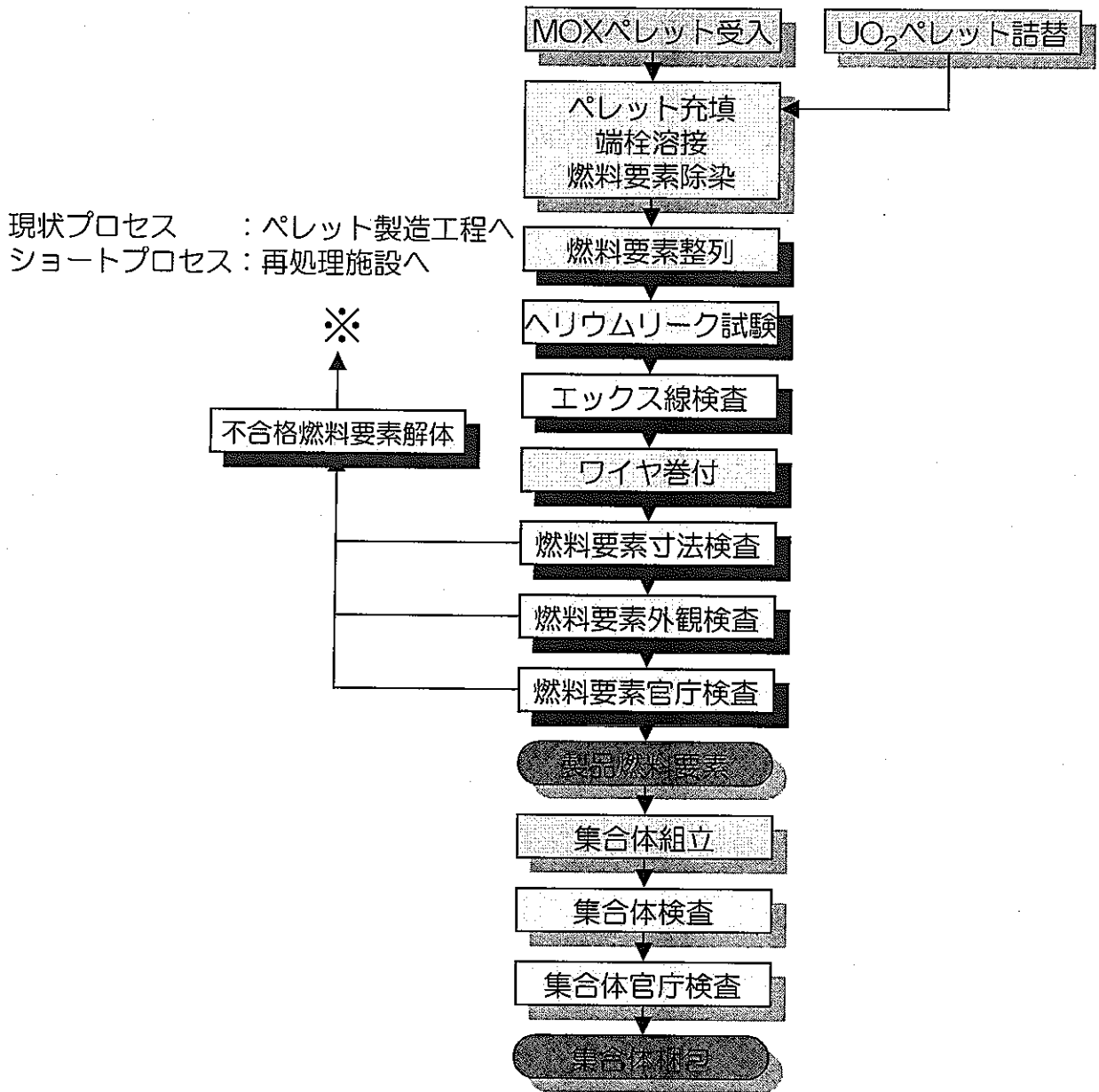


図4.2.4 ピン加工および集合体組立工程フロー

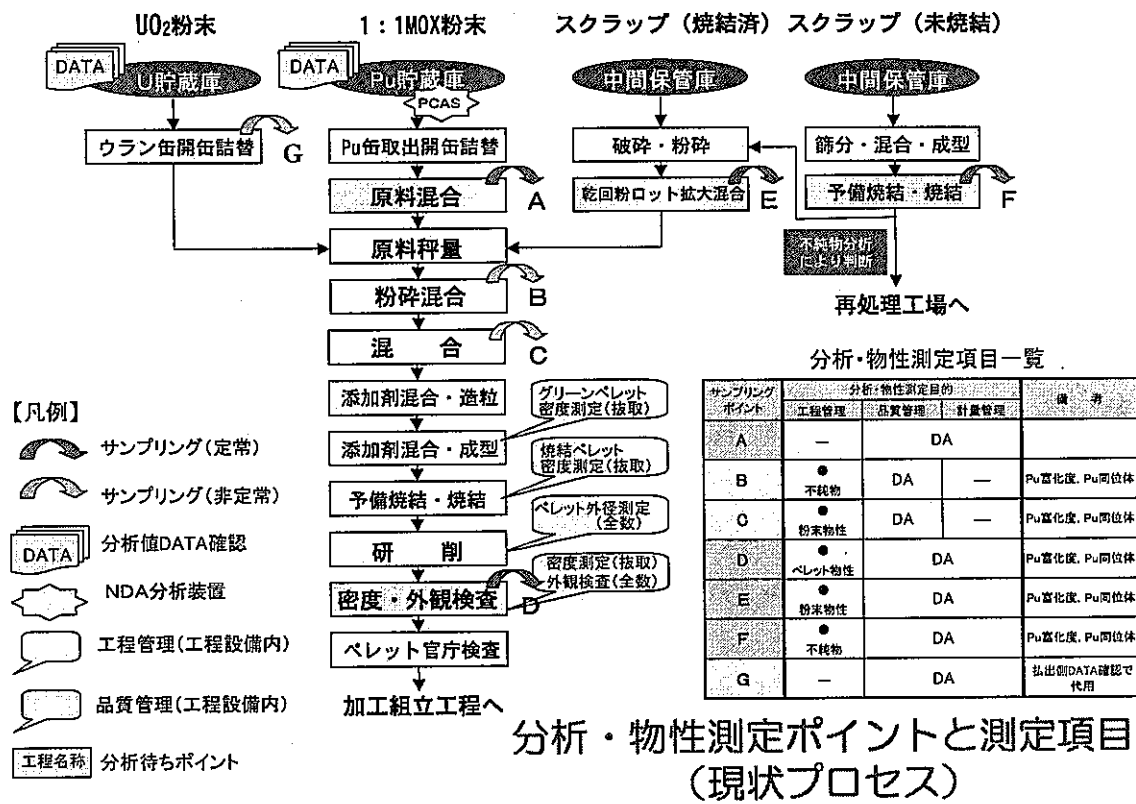
表4.2.1 プラント設計検討における主要条件

		現状技術	ショートプロセス	備考
運転体制		3班2交替 (焼結：5班3交替)	3班2交替 (焼結：5班3交替)	粉末性状変化および安全を考慮
年間運転日数		248日 ¹⁾	283日 ²⁾	ショートプロセスでは査察の合理化および設備の信頼性向上を考慮
収率	ペレット製造	90%	95%	ショートプロセスでは設備数削減による工程ロス低減を考慮
	加工組立	98%	98%	
日間必要処理量		259 kgMOX/日	215 kgMOX/日	
最大日間処理量		300 kgMOX/日	300 kgMOX/日	焼結設備の処理能力 (核的制限値から算出)
最大年間生産量		約58 tonHM/年	約70 tonHM/年	

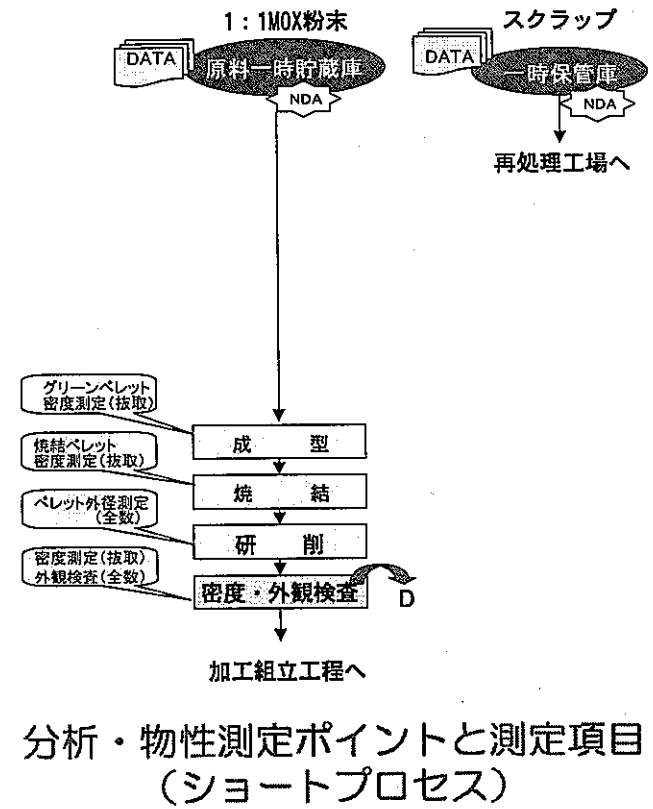
注) 1) $[365 - (10 + 14 + 43 + 22)] \times 0.9 = 248$ ()内左からGW、年末年始、保守、査察
 2) $[365 - (10 + 14 + 32 + 11)] \times 0.95 = 283$ 同上

表4.2.2 FBR燃料の概略仕様

		仕様	FBR
ペレット	形状		中空
	Pu富化度 (U)	低富化	約 15wt%
		高富化	約 18wt%
	寸法 (mm)	外径	φ10.40
		内径	φ3.4
		高さ	12
	重量 (g・MOX)		
密度 (%TD)			95.0
燃料要素	長さ (mm)	有効部長さ	3,135
		外径	φ12.00
		スリット長さ	1,200
		上部フラケット長さ	50
		下部フラケット長さ	200
	ペレット個数		
集合体	長さ (mm)	全長	4,600
		外対面間距離	182.5
	燃料要素本数		169本/体
	ペレット個数		約 16,900個/体
	1体当たりMOX重量 (kgMOX)		約 161
	種類		内側炉心 I (低富化65cm) 内側炉心 II (低富化50cm) 外側炉心



(1) 現状プロセスの分析・物性測定ポイント



(2) ショートプロセスの分析・物性測定ポイント

図4.2.5 分析・物性測定工程の比較

表4.2.3 遮へい設計値

	材質	厚さ
壁	コンクリート	最大500mm
GBパネル	含鉛アクリル (30wt%Pb)	最大50mm
機器遮へい	鉛	最大5mm

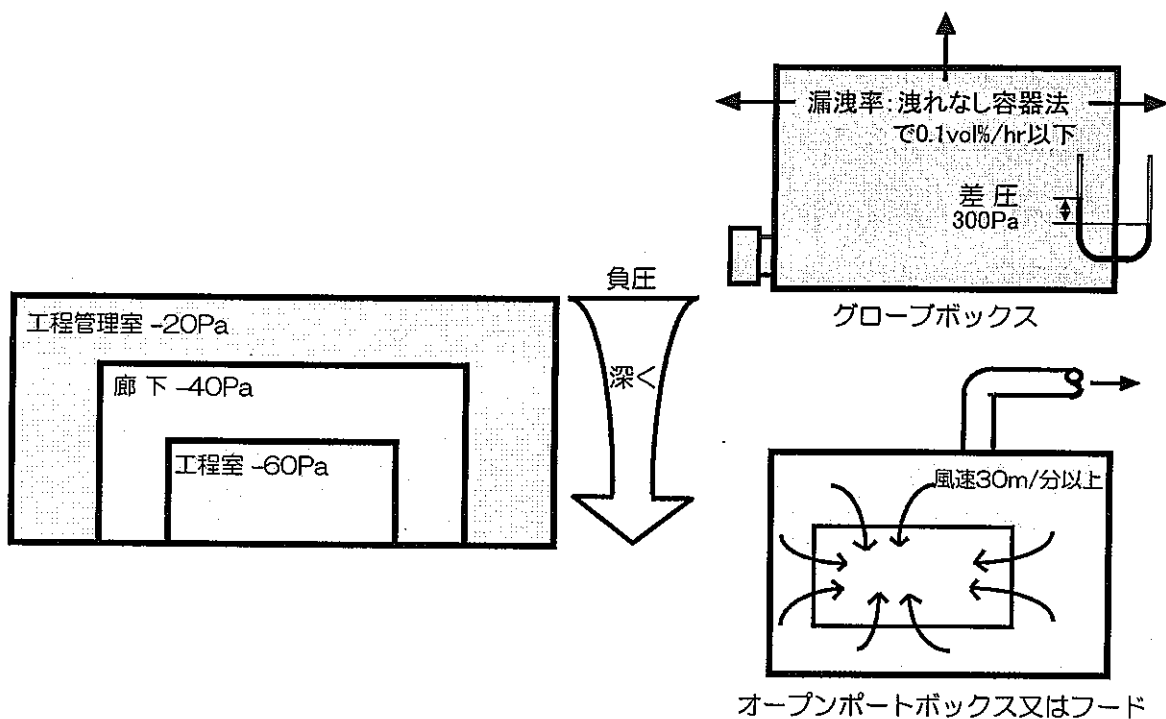


図4.2.6 核物質の閉じ込め方法

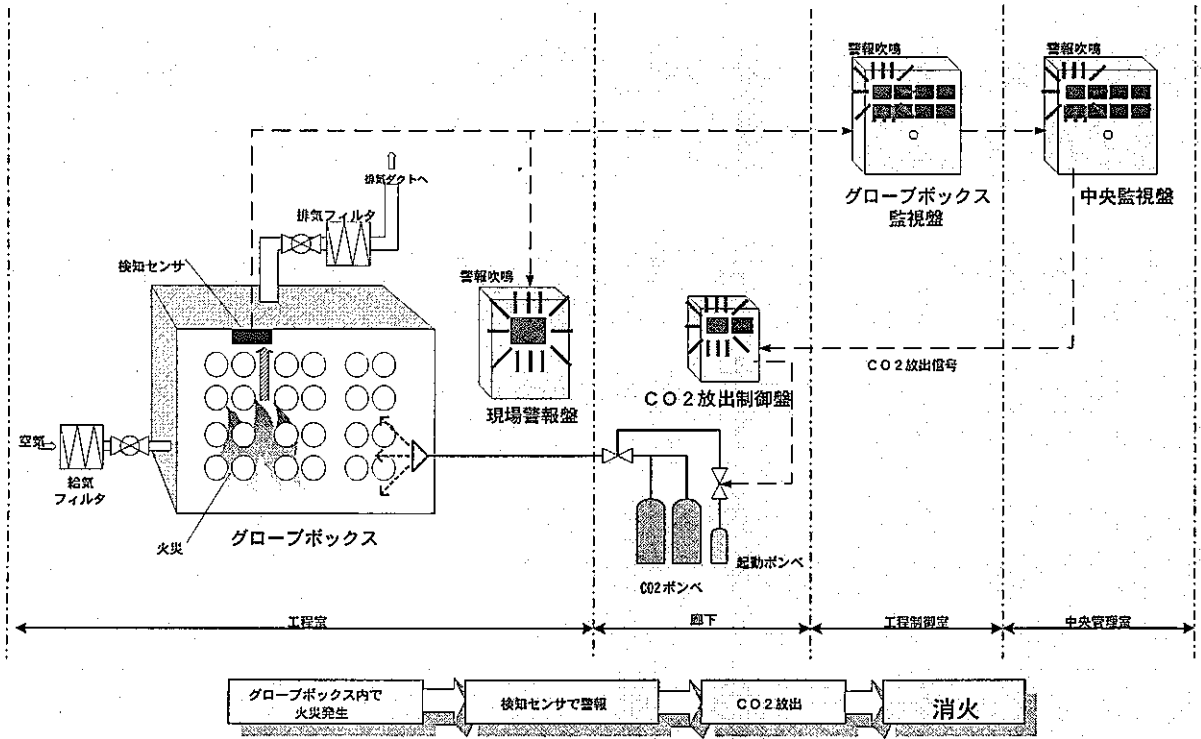
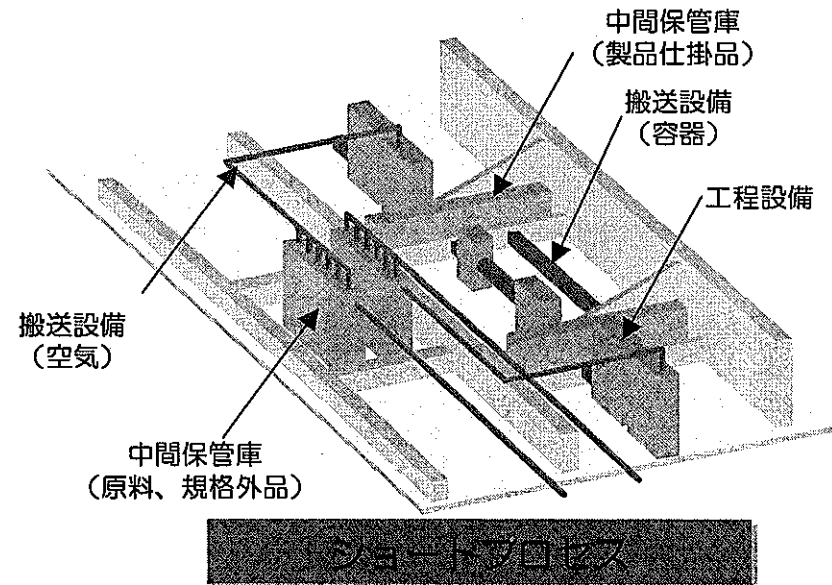
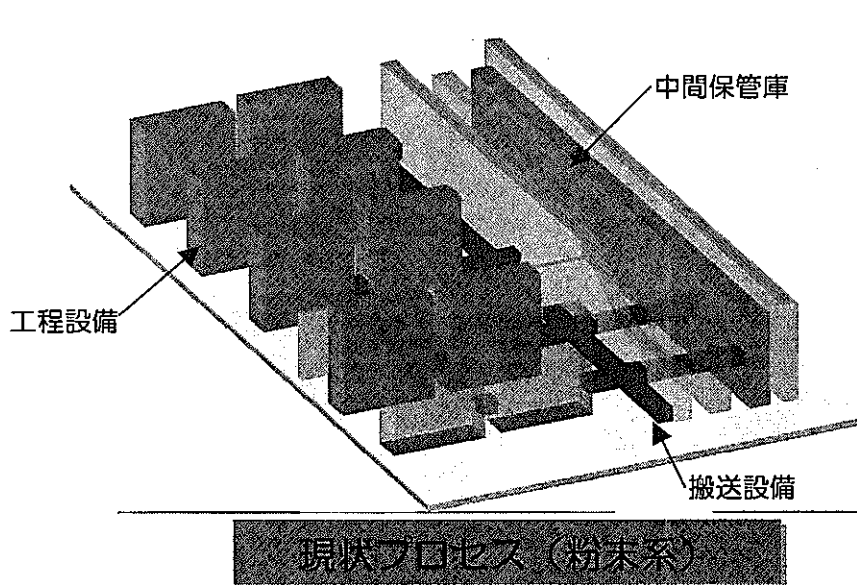


図4.2.7 グローブボックス内火災消火システムの概念図

図4.2.9 ペレット製造工程の物流方式および設備レイアウトのイメージ

		現状プロセス	ショートプロセス
設備レイアウト		中間保管庫を中心とした 楕形配置	処理順に配置した 直列配置
搬送設備	方式	粉末	容器+ローラコンベア
		ペレット	容器+ローラコンベア
	方法	バッチ搬送	連続（逐次）搬送
	系統	2系統（共用） （主搬送+保管庫搬送）	1系統（専用）
保管庫	方式	ベッセル方式	ベッセル方式
	役割	<ul style="list-style-type: none"> 仕掛品の保管 搬送設備のバックアップ メンテナンス時の核物質の退避場所 	<ul style="list-style-type: none"> 仕掛品の保管 （各工程設備間の処理能力の違いを吸収）



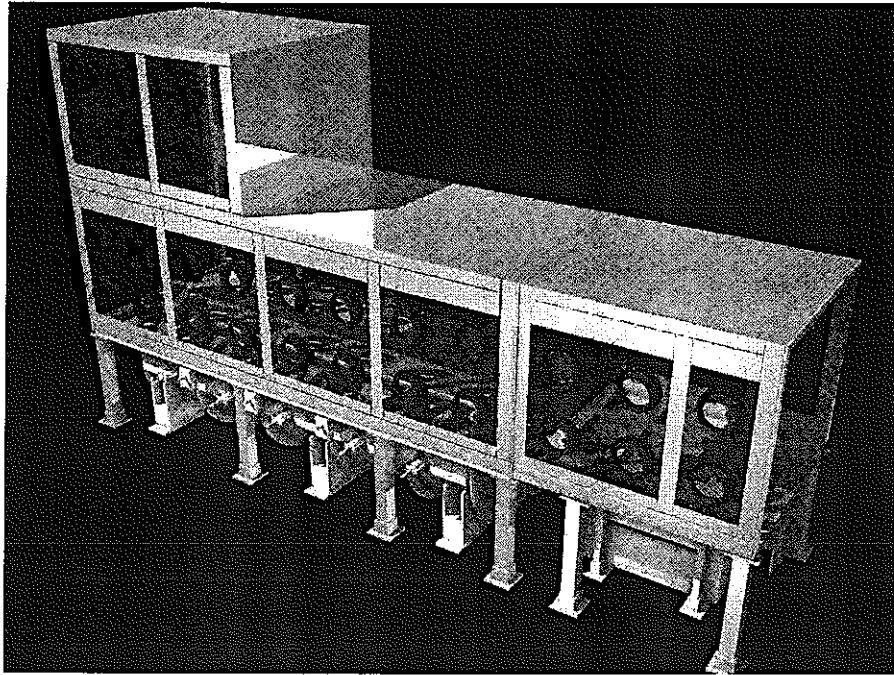


図 4.2.10 連続焼結炉のイメージ図

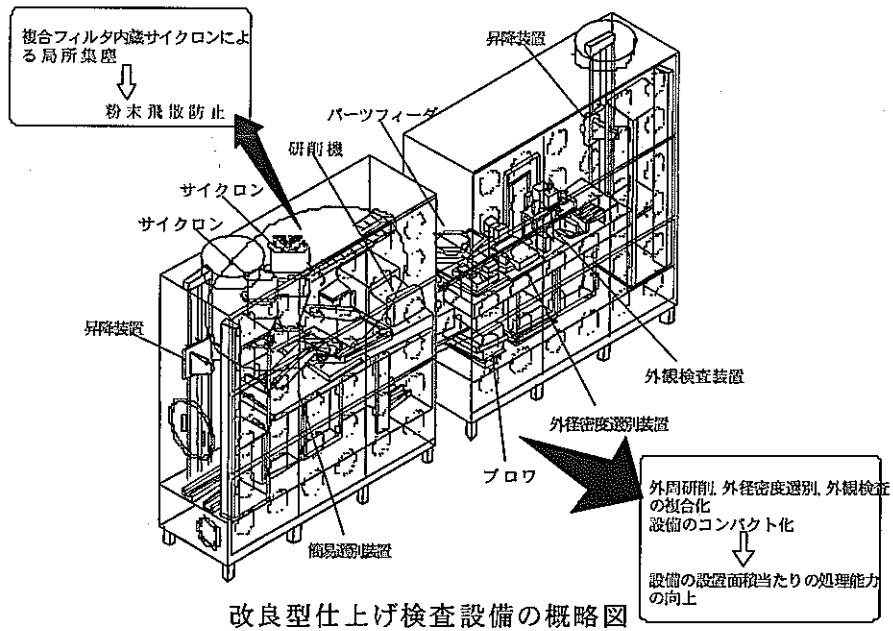
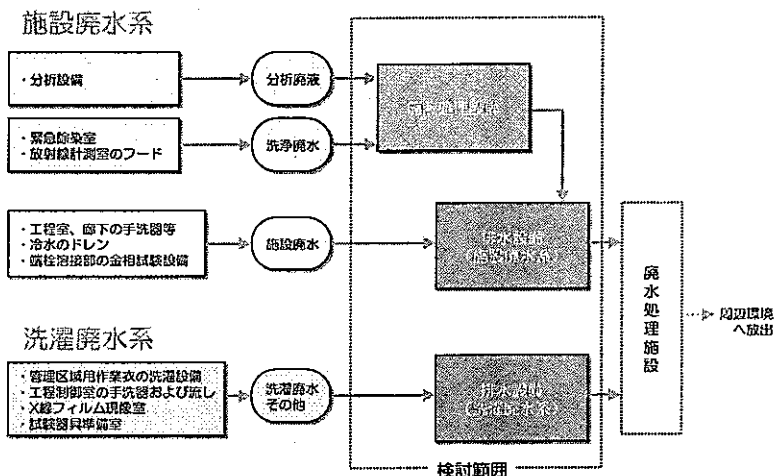


図 4.2.11 改良型仕上げ・検査設備の概略図

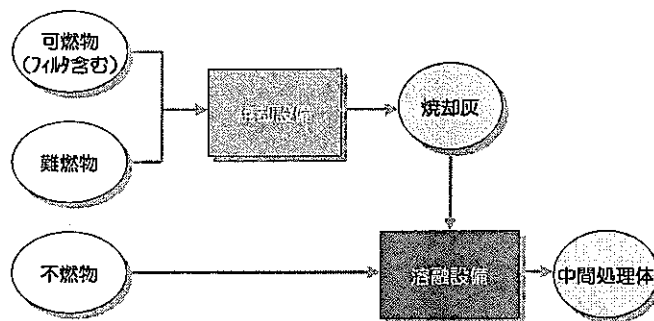
表 4.2.4 現状プロセスおよびショートプロセスの分析項目

工程	現状プロセス	ショートプロセス
原料混合	Pu・U濃度、Pu・U同位体 Am濃度 O/M 水分含有率 金属不純物・希土類	-
粉碎混合	金属不純物・希土類	-
混合	粒度分布 比表面積 流動性 表面観察、元素分析	-
密度・外観検査	Pu・U濃度、Pu・U同位体 Am濃度 O/M 水分含有率 蒸発性不純物含有率 炭素含有率 窒素含有率 フッ素・塩素含有率 金属不純物・希土類 金相 固溶度 焼結特性 ペレット溶解度 Puスポット	Pu・U濃度、Pu・U同位体 Am濃度 O/M 水分含有率 蒸発性不純物含有率 炭素含有率 窒素含有率 フッ素・塩素含有率 金属不純物・希土類 金相 固溶度 焼結特性 ペレット溶解度



液体廃棄物処理設備の全体系統図

図 4.2.12 液体廃棄物処理設備の全体系統図



固体廃棄物処理系統図

図 4.2.13 固体廃棄物処理の全体系統図

表4.2.5 ペレット製造プロセスの特徴比較

	現状プロセス	ショートプロセス
原料	1:1MOX粉、ウラン粉、乾式回収粉	プルトニウム富化度調整済MOX粉
粉末搬送	容器搬送	気流搬送
処理工程数	22工程	5工程
処理方法	バッチ処理	逐次処理
臨界管理	質量管理（安全係数0.7）	形状管理と併用
保障措置対応	II V受検時2日間工程停止	II V受検時1シフト工程停止
ペレット製造収率	90%	95%
建家スペース	大（本体建家：121m×71.5m×3階）	小（本体建家：121m×71.5m×2階）

- 1 一般倉庫
- 2 フィルタ室
- 3 分析工程制御室
- 4 試験調整室
- 5 監視室
- 6 分析・物性室
 - a 計量分析設備
 - b O.M.分析設備、水分分析設備
 - c 蒸発性不純物分析設備、水素分析設備
 - d 炭素・窒素分析設備
 - e 金属不純物分析設備
 - f Puスポット測定装置
 - g 金相試験設備
 - h 固溶度測定設備
 - i 粉末物性測定設備
 - j 表面状態観察設備
 - k 溶解度測定設備、廃液測定設備
 - l 試料受払・分配設備
 - m 試料配送設備
- 7 WS室
- 8 廃液処理室
- 9 電気室
- 10 給気室
- 11 空気循環・精製室
- 12 中央管理室
- 13 消火ガス、熱交換器、その他
- 14 廃棄物一時保管庫
- 15 排気室
- 16 一般倉庫
- 17 居室、会議室、倉庫
- 18 ベレット製造室(将来)
- 19 ベレット製造工程制御室
- 20 一時保管庫
- 21 フィルタ室
- 22 ベレット製造室
 - a 成型設備
 - b 焼結炉、予備焼結炉
 - c 研削設備
 - d 密度選別、外観検査設備
- 23 製品ベレット保管庫
- 24 MAGB
- 25 不合格燃料要素解体設備
- 26 Uベレット詰替設備
- 27 燃料要素加工工程制御室
- 28 部材準備室
- 29 燃料要素加工工程室
 - a 充填加工施設
 - b 端栓溶接設備
 - c 燃料要素除染設備
 - d 燃料要素整列設備
 - e ヘリウムリーク試験設備
- 30 集合体保管庫
- 31 集合体組立室
 - j 集合体官庁検査設備
 - k 集合体梱包設備
 - l 集合体組立設備
- 32 燃料要素保管庫
- 33 燃料要素検査室
 - m 燃料要素官庁検査設備
 - n 燃料要素外観検査設備
 - o 燃料要素寸法検査設備
 - p ワイヤ巻付設備

- 34 X線検査設備
- 35 現像室
- 36 加工組立工程制御室
- 37 放射線管理室
- 38 放射線計測室
- 39 ローディングドック
- 40 洗濯室
- 41 エアロック
- 42 除染室
- 43 防護具倉庫
- 44 更衣室
- 45 ロッカー
- 46 休憩室
- 47 ホール
- 48 エレベータ
- 49 階段
- 50 WC

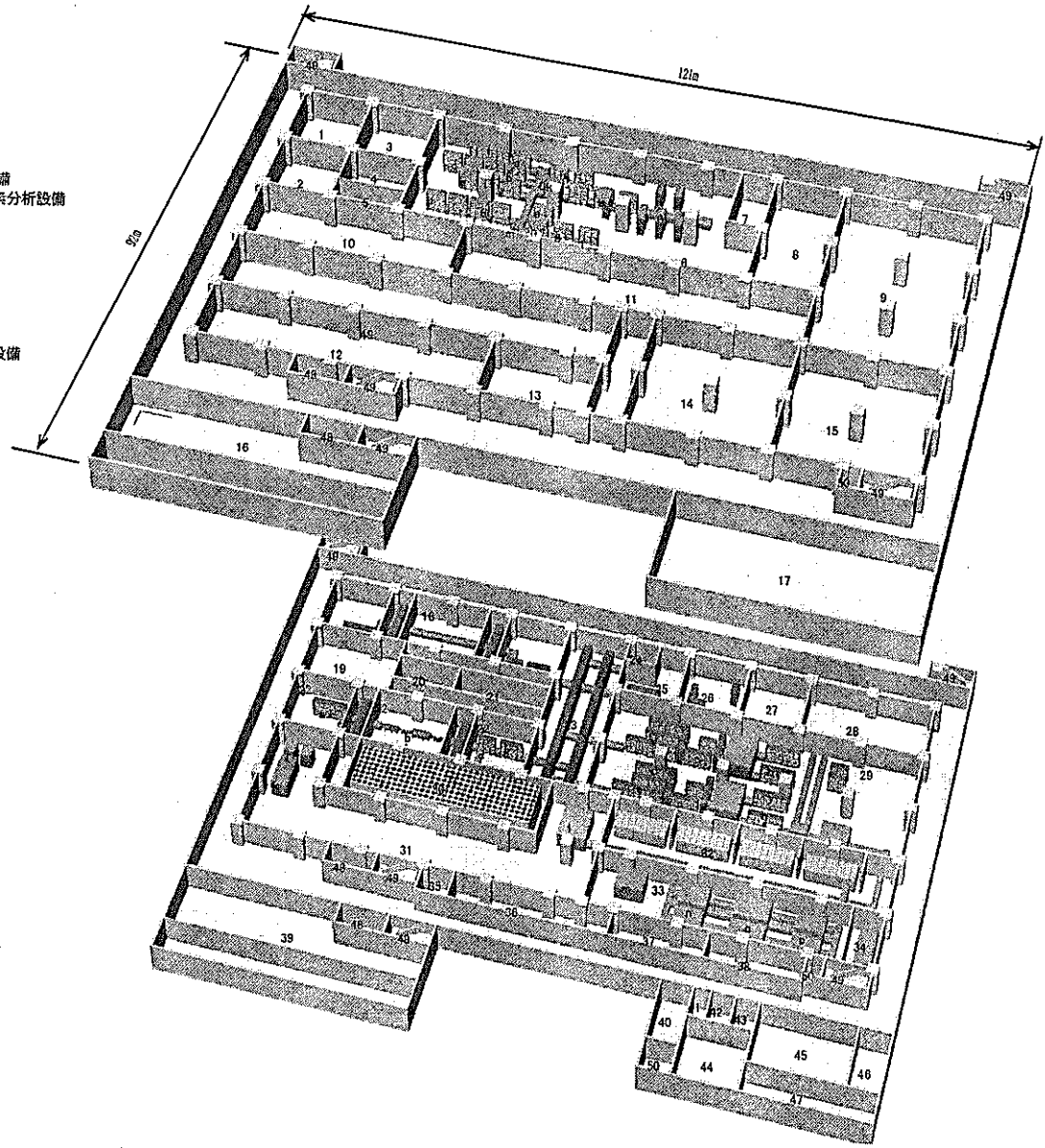


図4.2.14 ショート・プロセスプラントの全体のレイアウトイメージ

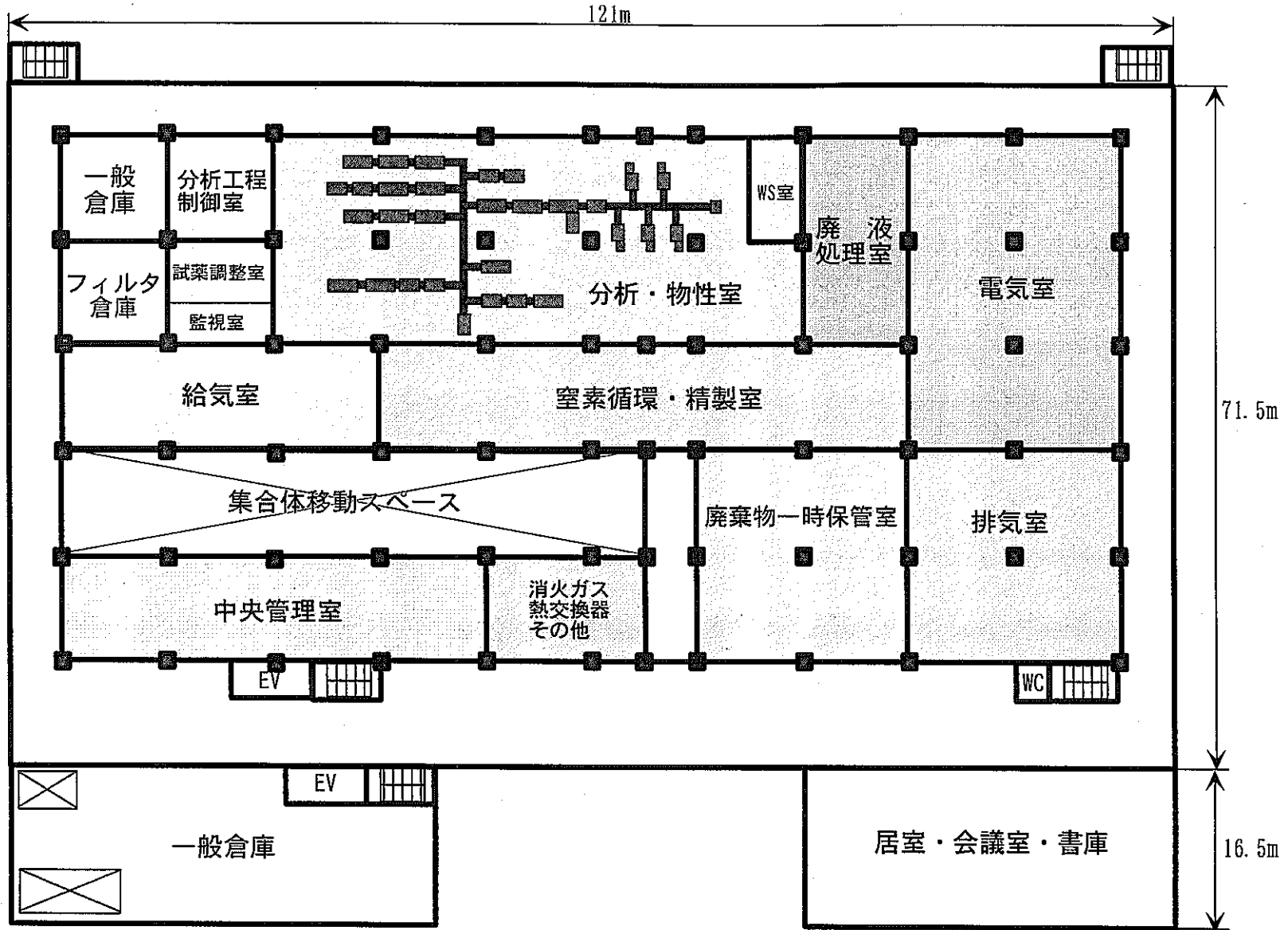
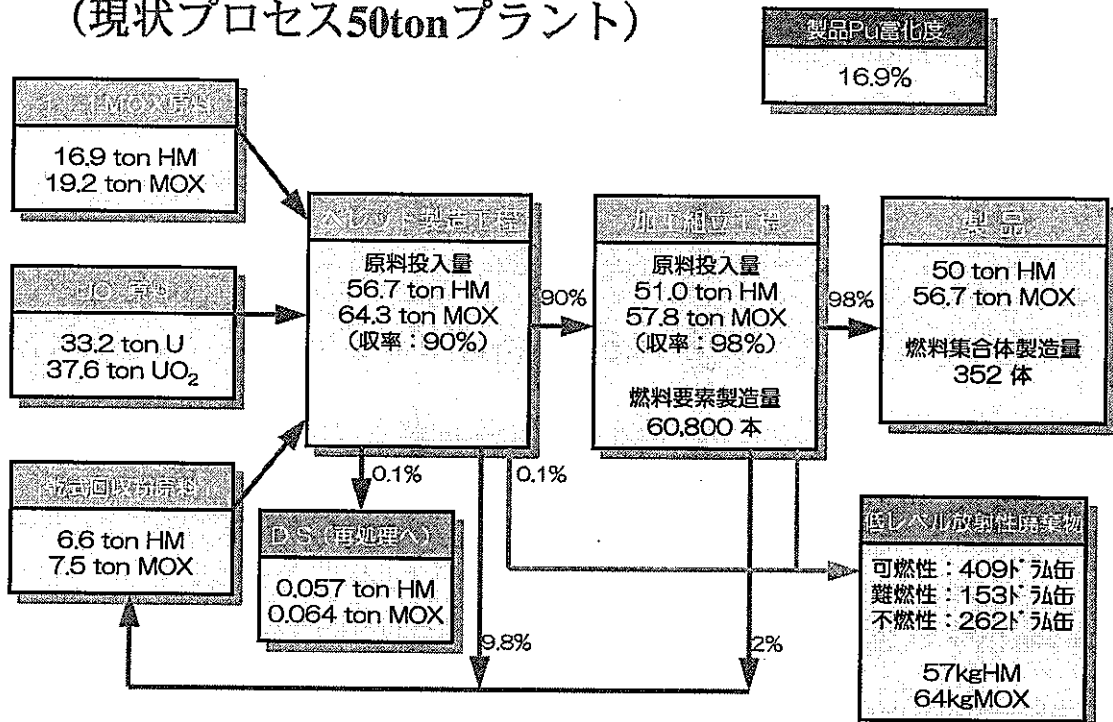


図4.2.16 FBR50tonHMショートプロセスプラント（地上1階）

プラント内核物質収支フロー図
(現状プロセス50tonプラント)



プラント内核物質収支フロー図
(ショートプロセス50tonプラント)

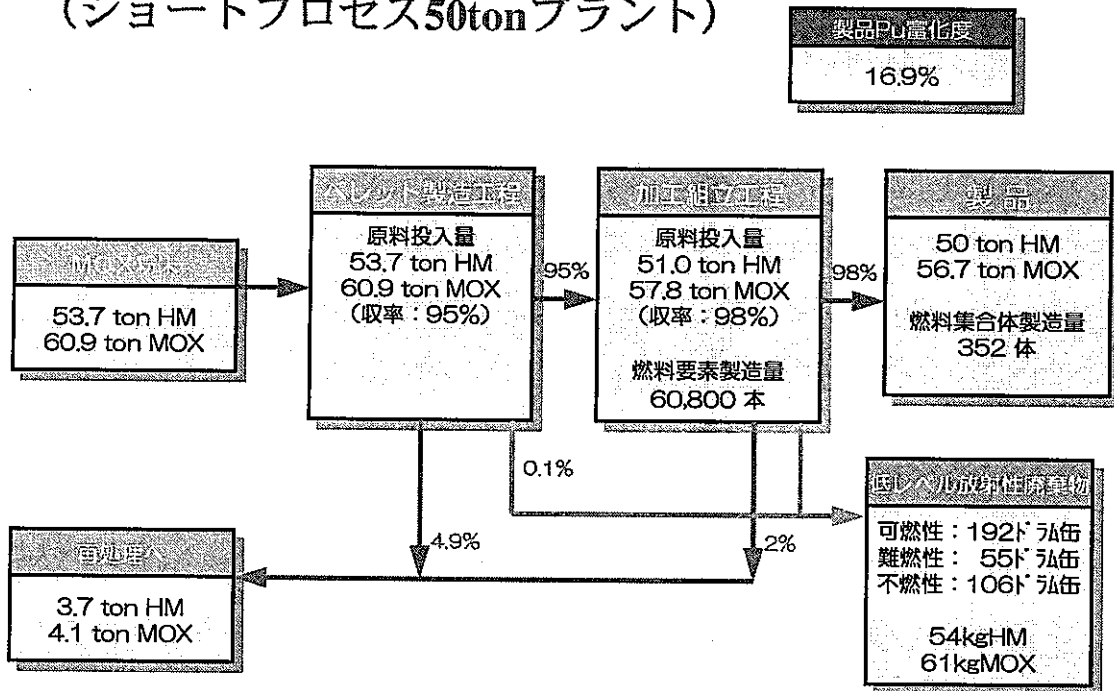


図 4.2.17 プラント内マテリアル・バランス

表 4.2.6 コスト計算条件

コスト計算条件

資金調達方法	: 全額借入金 (借入金金利: 3.0%)
年間製品量	: 50 tonHM
運転期間	: 40 年間 (建屋寿命期間)
建設期間	: 8 年間 (現状技術)、6 年間 (ショートプロセス)
耐用年数	: 建家 40 年 : 内装設備 40 年 : 付帯設備 40 年
償却方法	: 定額償却 (残存価格 10%)
償却年数	: 建家 40 年 : 内装設備 16 年 : 付帯設備 16 年
税金	: 固定資産税率 1.4%
保険費	: 施設建設費の 0.5%
Pu 原料費	: 考慮しない
施設解体費	: 施設建設費の 20%
コスト算出方法	: 現在価値換算法 (現在価値換算率 30%)

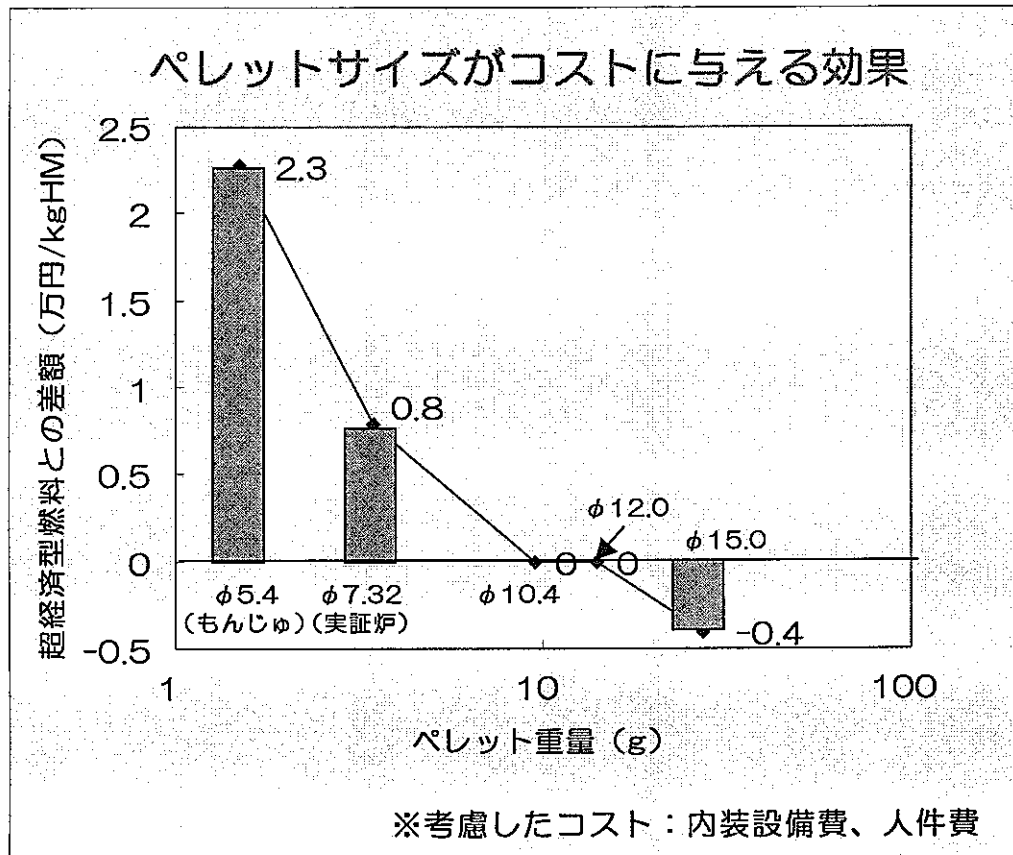


図 4.2.18 ペレットサイズがコストに与える影響

Pu同位体組成

MA同位体組成

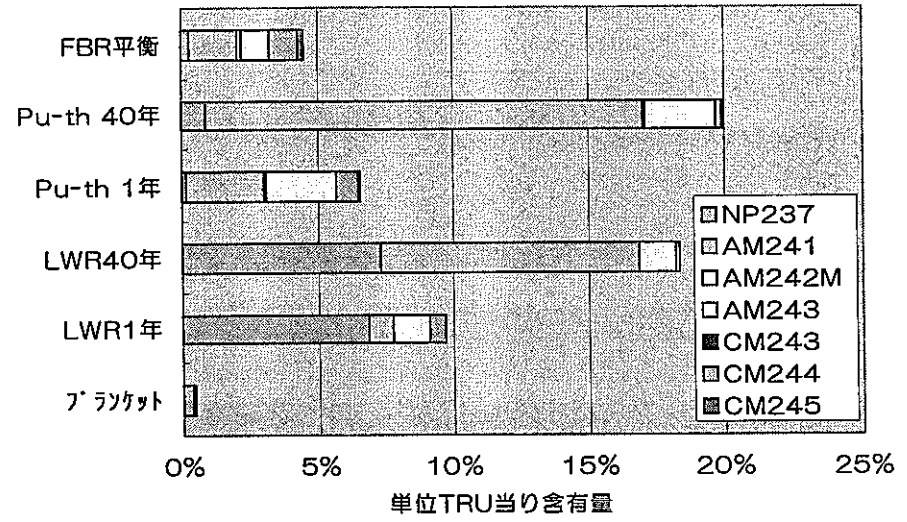
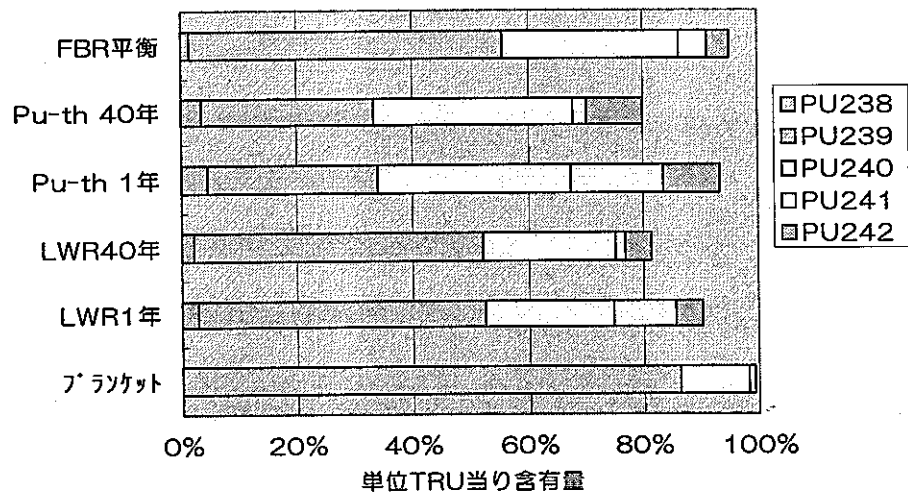


図4.2.19 取扱を想定したTRU組成

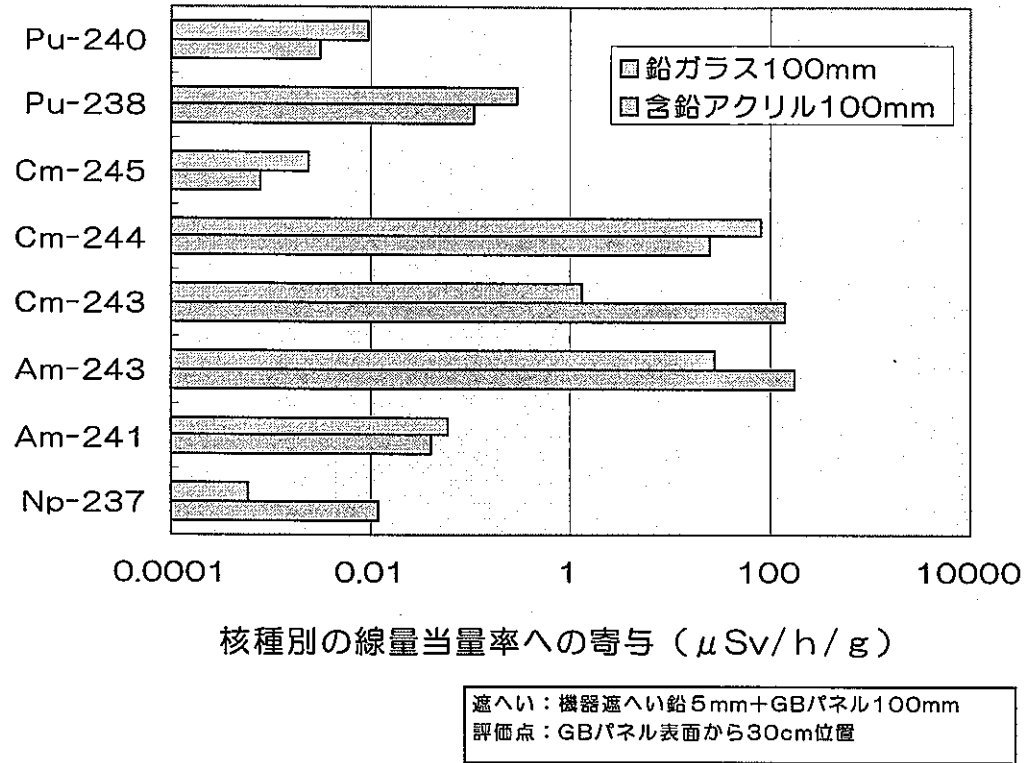


図4.2.20 核種別の線量当量率への寄与

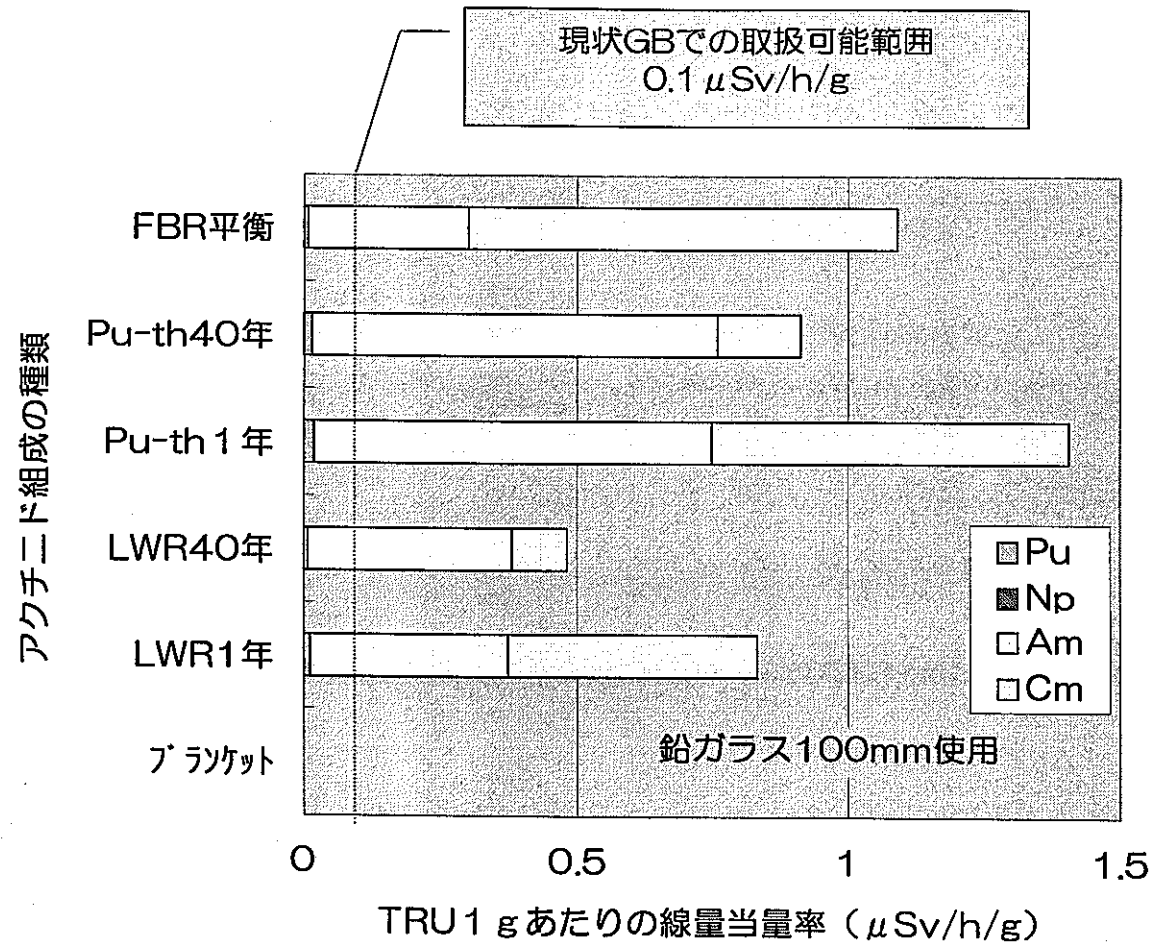


図4.2.21 TRU1gあたりの線量当量率

(2) 簡素化ペレット（セル内での製造）

(i) 設計検討の基本方針

燃料製造基本プロセスは、簡素化再処理工程から受け入れた硝酸溶液を出発物質とし、溶液の段階で、所定の Pu 富化度に調整する。その後脱硝転換を行い MOX 粉体を得ることで、現行の MOX ペレット燃料製造工程の粉体の混合調整等の工程を削除したプロセス（以下、「ショートプロセス」という。）とする。低除染燃料及び MA の取り扱いを前提として、燃料製造設備はホットセル内に設置し、燃料製造は完全自動化及び遠隔メンテナンスを基本とする。燃料製造プラント概念検討では、製造プラントとして基本的に自立したシステムの検討を主に実施するが、再処理との一体化プラントの配置に関する検討を行う。

(a) 施設・設備の設計及び配置

プロセス機器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。自立型燃料製造プラントの検討では原料溶液の受入を前提とし、再処理施設に隣接したプラントを想定する。セル内設備・機器のメンテナンスは原則遠隔とし、そのための配置スペースを有する配置とする。また、キャンペーンの切替及び保守・交換・点検等による運転停止を極力少なくするため必要に応じて設備、機器の多重化を図る。

(b) 設備の保守

① 完全遠隔保守セル

設備・機器の保守及び保守用の遠隔操作機器ともに遠隔保守を実施し、作業員がセル内に進入することを想定しない。本検討プラントにおいては、Pu 富化度調整工程 ばい焼・還元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。

② 遠隔・直接保守併用セル

保守頻度の低い設備、機器の保守及び保守用の遠隔操作機器に対しては直接保守を実施する。そのため、遠隔・直接保守兼用セルでは、保守用の遠隔操作機器を備えると共に、作業員がセル内に進入するためのグリーンハウス設置のスペースや呼吸用空気放射線モニタ等の設備をを隣接するアンバー区域の部屋を持つ。本検討プラントにおいては、成形工程 燃料要素端溶接工程までの放射性物質を非密封で取り扱う設備が配置するセルを遠隔・直接保守兼用セルとする。

③ 直接保守セル

線源の撤去を遠隔で実施し、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・機器の直接保守を行う。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、保守セル等を直接保守セルとする。

(ii) 設計検討の前提条件

低除染 MOX ペレット燃料の製品として製造可能な仕様範囲、燃料物性、照射性能等に関する要素技術開発が重要となる。特にプラント内のマスフロー検討で重要な製品の歩留まり等は燃料仕様に依存するものであるが、本検討はこれらの燃料製造の特性が高除染ペレット燃料と同等であるとの前提で進める。

また、安定操業のために重要な各プロセス機器の運転信頼性及び遠隔メンテナンスの実現性を前提とする。

(a) 製品燃料仕様

本検討に用いた製品燃料の基本仕様を表 4-2-7 に示す。また、この仕様に基づく内側炉心燃料、外側炉心燃料、軸方向ブランケット及び径方向ブランケット燃料のそれぞれのスタック重量は 415g/スタック、417g/スタック、288g/スタック及び 1320g/スタックとなる。

(b) 操作条件

① 生産規模、稼働日数

生産規模は、大型プラントについては 200tHM/年（内側炉心燃料集合体 533 体/年、外側炉心燃料集合体 308 体/年、径ブランケット燃料集合体 289 体/年）基準プラントについては 50tHM/年（内側炉心燃料集合体 134 体/年、外側炉心燃料集合体 77 体/年、径ブランケット燃料集合体 73 体/年）とする。稼働日数は 200 日/年（1 日 24 時間運転）とする。

② 受入原料仕様

低除染ペレット燃料製造システムでの受入原料は、取り出し平均燃焼度 15 万 MWd/t（燃焼期間 2700 日）を 4 年間冷却した使用済高速炉燃料に対し除染係数 1000 程度の簡素化湿式再処理（簡素化 PUREX 法）を行って得られたの原料組成とする。また、MA リサイクルに対応する低除染ペレット燃料製造システムの特徴を検討するための受入原料

は上記使用済燃料に対し TRUEX 法を行って得られた原料組成とする。原料組成を表 4-2-8 に示す。

(c) バッチサイズ

本システムでのロットの定義は、プルトニウム富化度調整がなされた硝酸溶液の貯槽 1 基分を 1 ロットとする。バッチサイズに関しては主として U/Pu 脱硝設備及び成形設備での取り扱い単位量と定義し、大型プラント及び基準プラント設備における製造バッチサイズを表 4-2-9 に示す。他設備についてはバッチという概念はなく、製品のトレーサビリティ上は全て溶液ロットで管理する。

(d) スクラップの処理

本プラントから発生するスクラップは湿式回収（クリーンスクラップ (CS) 処理設備及びダーティスクラップ (DS) 処理設備）を行い、溶液として調整槽に戻すこととする。

(e) 製品検査

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

(iii) プロセス設計

(a) 燃料製造プラントのブロックフロー及び物質収支

燃料製造工程ブロックフローを図 4-2-22 に示す。炉心燃料製造ラインとブランケット燃料製造ラインの相違点は炉心燃料製造プロセスに富化度調整工程及びスタック調整が付加されていることである。大型プラント (200tHM/y) 及び基準プラント (50tHM/y) の生産量の検討結果を表 4-2-10、11 に示す。また、図 4-2-23 に大型プラントの物質収支 (CFS) を示す。製造歩留まりについては 86% に設定した。大型プラントにおける 1 日当たりのペレット製造個数は外側炉心燃料、内側炉心燃料、軸方向ブランケット燃料及び径方向ブランケット燃料はそれぞれ 47584 個/日 (178.3kgHM/d)、81957 個/日 (307.1kgHM/d)、89803 個/日 (336.5kgHM/d) 及び 34035 個/日 (330.3kgHM/d) となる。

(b) 臨界安全

本製造システムでは富化度調整工程、脱硝工程等では燃料を溶液

状態で取り扱う。脱硝後の工程では酸化物の粉体、焼結体等での取り扱いとなり、現行 MOX 製造システムと同様となる。各工程機器の臨界管理方法は形状管理又は質量管理を基本とする。検討における原料組成は $U/Pu=7/3$ 、 $^{135}U=0.3$ 、 $^{239}Pu/^{240}Pu/^{241}Pu=71/17/12$ とする。

① PuNH-UNH 溶液

未臨界無限円筒直径/未臨界無限円平板厚さ/未臨界無限円環形状槽液厚はそれぞれ 22.3cm/9.8cm/5.8cm となる。

② MOX 粉末

MOX 粉末については密度 4.0g/cc、含水率 5.0%とした場合、未臨界無限円筒直径/未臨界無限円平板厚さ/未臨界質量はそれぞれ 30.8cm/12.5cm/198kg (U+Pu) となる。

(c) 放射能収支

① 燃料の核種組成について

放射能収支及び発熱量を検討するため Pu 富化度を調整した混合溶液の各核種重量組成、放射能及び発熱を表 4-2-12、13、14 にそれぞれ示す。この混合溶液組成は、使用済み燃料の簡素化 PUREX 法による処理後の組成比 (表 4-2-8) を固定し、ウラン以外の元素はプルトニウムと同様に濃縮されることし、プルトニウムの富化度に比例して FP 含有量を見積った。また、TRUEX 法については、プルトニウムと FP に関しては TRUEX 法の移行率を適用して上記と同様に設定するが、MA (Np, Am, Cm) については重量比が 5%になるように設定した。

② 放射能収支結果

低除染システム及び MA リサイクルシステムに対する大型プラントの放射能収支 (ABS) 結果を図 4-2-24 及び図 4-2-25 にそれぞれ示す。この各プロセスにおける Pu に関する放射能収支は混合溶液中の放射能 (表 4-2-13) と CFS (図 4-2-23) から放射能収支を計算した。他の核種については上記の仮定により組成を見積った。以下に計算に使用した前提条件を記す。

a. 硝酸溶液

硝酸溶液中の Pu については CFS 上の調整槽の値 (kg/d) を用いて、

それに表 4-2-13 の値を掛けて放射エネルギーを計算した。各プロセス Pu 以外の核種については CFS と組成が異なっているため、Pu 量から表 4-2-12 を基に存在量を換算して放射エネルギーを求めた。

b. 脱硝オフガス

Ru については 100%、吸着等に移行するものとした。それ以外の核種については過去の実績等を基に移行率 10^{-4} でオフガスに移行するものとした。

c. 焙焼還元オフガス

過去の実績等を基に、移行率 10^{-4} でオフガスに移行するものとした。

d. 成形オフガス

成形から集合体検査の間で発生するオフガスについては、過去の実績等を基に移行率 10^{-4} で移行するものとした。

e. DS, CS

DS は 2%、CS は 12%発生するため、その分の放射エネルギーが移行する。

f. 集合体貯蔵

硝酸溶液から上記の①～⑤を除いた値となる。

(d) 崩壊熱による温度変化

① 前提条件

熱解析では PUREX 法、TRUEX 法のそれぞれに対して、表 4-2-14 の単位重量当りの発熱量のうち評価上厳しい値となる富化度 26.5% の値 (3.93W/kgHM、18.22W/kgHM) を使用している。評価点は Pu/U 溶液貯槽、成形ホッパー、ペレット、燃料要素、集合体とした。また、成形ホッパー、ペレット、燃料要素、集合体については自然対流伝熱を仮定している。

② 解析結果

崩壊熱による主要機器の表面温度の計算条件及び結果を図 4-2-26 に示す。

a. Pu/U 溶液貯槽

発熱量を求めると PUREX 法では $1.35 \times 10^4 \text{kcal/kgHM}$ 、TRUEX 法では $6.27 \times 10^4 \text{kcal/kgHM}$ となる。

b. 成形ホッパー

自然対流では PUREX 法ではホッパーの表面温度は 42°C 、TRUEX 法では 105°C となる。

c. ペレット

自然対流では PUREX 法ではペレットの表面温度は 33°C 、TRUEX 法では 60°C となる。

d. 燃料要素

自然対流では PUREX 法では燃料要素の表面温度は 36°C 、TRUEX 法では 75°C となる。

e. 集合体

自然対流では PUREX 法では集合体の表面温度は 179°C 、TRUEX 法では 737°C となる。ただしこれは集合体を横置きにしたときに想定される表面温度であり、縦置きにすると、ラッパ管の上下からの対流が期待で切るため、上記の燃料要素の表面温度に近い値になるものと想定される。

(e) 計量管理及び保障措置

① 計量管理

本施設は、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コンタミによる組成変化がないよう、その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（ペレット成型前に粉末のロット混合を行わない——ショートプロセス）。従って、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が行われる。本施設をいくつの MBA（物質収支区域）に区分するかは、工程内 MUF やウラン、プルトニウム量の管理のし易さ等を検討し決定されるが、上記に述べたショートプロセスの特徴を考慮し、本施設を1つの MBA とすると、計量管理を行う上で設定される FKMP、IKMP は先行施設の事例に従い概略下記の通りになると考えられる。図 4-2-27 に炉心燃料製造ラインを例とした FKMP、IKMP の各ポイントを示す。

② 封じ込め・監視

本施設における保障措置上の要件として、上記計量管理に加えて査察側の実施する封じ込め・監視に対応する措置として下記項目が付加されると考えられる。

- a. 封じ込め区域の設定が容易な施設設計（貯蔵庫等の封じ込めが出来る構造）
- b. I T Vカメラ等の監視機器設置対応（セル、G B内における核物質の搬出入箇所）

(f) 系列数

大型プラント及び基準プラント設備毎の系列数をそれぞれ表 4-2-15、16 に示す。

(g) 貯蔵設備容量

燃料製造プラントの円滑な操業のため原料、ペレット、燃料ピン、燃料集合体及び廃棄物の適切な容量の貯蔵設備の設置する。

(iv) プロセス設備機器設計

(a) 原料受入・富化度調整設備

本設備は、再処理施設より受け入れたU溶液及びU/Pu混合溶液を用いて、所定の富化度のU/Pu混合溶液に調整し、U/Pu脱硝設備へ払出すものである。

なお、本設備は、DS・CS溶解設備にて処理されたクリーンスクラップ溶解液及びダーティスクラップ溶解液についても受入れる。

① 設備の概要

再処理施設より受け入れたU/Pu混合溶液（Pu富化度28%）及びU溶液はそれぞれU/Pu溶液受入槽、U溶液受入槽に貯留される。U/Pu溶液受入槽、U溶液受入槽のバッファ容量は、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、所定の富化度（Pu17%またはPu26.5%）となるよう富化度調整・供給槽に供給される。富化度調整・供給槽のバッファ容量については、円環槽の大きさについての実績から、3日分を1ロットとして受入れることとし、圧縮空気による攪拌、U、Pu濃度等の分析を行い組成の確定を行う。次に、計量ポットにてU/Pu混合溶液を所定量計量し、U/Pu脱硝設備へ払出す。

本設備では成型設備以降で発生し、DS・CS 溶解設備にて処理されたクリーンスクラップ溶解液及びダーティスクラップ溶解液についても富化度調整・供給槽にリサイクルし、再処理施設より受け入れた溶液と混合処理を行う。

なお、富化度調整・供給槽において組成を確定したロットは基準のロットとなり、このロット単位で下流設備にて必要な処理が行われるが、その間はコンタミによる組成（成分）の変化は発生しない独立のライン構成とする。

② 大型プラント（200tHM/y）と基準プラント（50tHM/y）との相違点

各槽の基数については、大型プラントの場合、U/Pu 混合溶液受入槽が 3 基（716kgHM/基）、富化度調整・供給槽が内側炉心燃料製造ライン、外側炉心燃料製造ラインそれぞれ 2 基、基準プラントの場合は U/Pu 混合溶液受入槽が 1 基（537kgHM/基）、富化度調整・供給槽が内側炉心燃料製造ライン、外側炉心燃料製造ラインそれぞれ 2 基である。また、大型プラント及び基準プラント共に、U 溶液受入槽が 1 基（大型プラント 4788kgHM/基、基準プラント 1204kgHM/基）、U 溶液供給槽が 2 基である。

(b) U/Pu 脱硝設備

本設備は、原料受入・富化度調整設備にて富化度調整された U/Pu 混合溶液及び U 溶液を受入れ、脱硝、粗碎、焙焼（または予焙焼）、還元を順次行い、 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ 粉体とするとともに成型設備へ払出すことを目的とする。

① 設備の概要

原料受入・富化度調整設備の計量ポットより、U/Pu 混合溶液を脱硝装置内にセットした脱硝容器（200φ×500mm セラミック材料、有効容量約 10 ）に受け入れる。U/Pu 混合溶液は約 350℃、約 1 時間にてマイクロ波脱硝し、 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_3$ とする。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、オフガス処理設備に移送する。

脱硝後の $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_3$ は、脱硝容器ごと搬送装置にて、次の粗碎ステージに搬送し、レーキ付きオーガを脱硝容器に取り付けた後、オーガの回転によって粗碎される。粗碎された $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_3$ は次の焙焼・還

元ステージにて、容器外側のヒータブロックの昇温により約 750℃まで加熱され、空気雰囲気中における焙焼（または予焙焼）及び水素窒素混合ガス雰囲気中における還元を行い $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ とする。続いて、次の粉末払出しステージに搬送後、脱硝容器下部バルブを開とし、重力流により成型設備へ払出す。この後、空になった脱硝容器は脱硝ステージまでの戻り搬送経路を使って搬送され、リサイクル使用される。なお、焙焼還元後の粉末については、各製造燃料ライン（内側炉心、外側炉心）毎に、混合溶液のロットに合わせて 3 日に 1 度の割合で粉末物性分析を行う。設備の概念例を図 4-2-28 に示す。

② 大型プラント (200tHM/y) と基準プラント (50tHM/y) との相違点

各プラントにおける系列数については、大型プラントの場合、内側炉心燃料製造ラインが 4 系列、外側炉心燃料製造ラインが 3 系列である。基準プラントの場合、内側炉心燃料製造ライン及び外側炉心燃料製造ライン共に 1 系列である。

また、ブランケット燃料製造ラインでは大型プラント 8 系列、基準プラント 2 系列である。

(c) ペレット加工設備

本設備では、U/Pu 脱硝設備にて脱硝、焙焼還元された $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ 粉末を受入れ、成型プレスにより中空ペレットに成形する。成形されたペレットはペレット整列機にて整列させ、Mo 製の焼結皿に載せ、焼結設備へ払い出す。

① 設備の概要

脱硝容器下部より排出された $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ 粉末を成型ホッパーに 4 バッチ分（約 14kgHM）受入れ、定量供給機により成型プレスへ粉末を定量供給し、中空ペレットに成形する。本設計では粉末の流動性がある程度確保できるとして粗成形・造粒工程を省略したが、ダイスへの粉末充填性を向上させる目的で、エアータップ方式*¹の粉末充填方式を取り入れるものとする。潤滑方式はプルトニウム崩壊熱による粉末温度上昇を考慮して、粉末潤滑剤供与方式ではなく、ダイ潤滑方式とする。成型ホッパーについても温度上昇を考慮して、フィン付き構造ならびに冷却機構付き構造とする。また、微粉末飛散防止のため、局所的に集塵ノズルを配置し、サイクロン型集塵機により粉末を回収

する。

成形されたペレットは、ペレット側面吸着により整列機へ搬送し、整列させた後M○製の焼結皿に載せる。焼結皿は搬送台車（AGV）により、焼結炉へ搬送する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

大型プラントでは、処理量の観点からロータリー式を採用した。一方、基準プラントでは、ペレット内の密度分布差がロータリー式に比べて小さいとされているレシプロ式プレスを採用した。レシプロ式を採用することにより、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。

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心それぞれ2系列、基準プラントでは、内側炉心、外側炉心それぞれ1系列である。軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に大型プラントでは2系列、基準プラントでは、軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に1系列である。

*1：エアータップ方式

粉末シェーカーの中の気圧を変えることにより、粉末充填性を向上させる方式。

(d) 焼結設備

本設備では、予焼／焼結一体型のプッシャー式連続焼結炉よりペレットを還元雰囲気下で焼結する。焼結されたペレットは、M○製の焼結皿に載せたまま、研削設備へ払い出す。

① 設備の概要

焼結皿を一定間隔で焼結炉へ挿入し、約1700℃の高温下で3～5時間焼結し、所定の密度の焼結体とする。また、焼結雰囲気は4%H₂-Arとする。焼結炉は脱ガスを行う予備焼結と本焼結とを一体化した構造とし、温度コントロールは予備焼結ゾーンと本焼結ゾーンそれぞれで行う。焼結されたペレットは、M○製の焼結皿に載せたまま、搬送台車（AGV）により、研削設備へ搬送する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心、軸方向ブ

ランケット及び径方向ランケットそれぞれ2系列、基準プラントでは、内側炉心、外側炉心、軸方向ランケット及び径方向ランケットそれぞれ1系列である。

(e) 研削設備

本設備では、焼結されたペレットの外径を仕様寸法に上げるため、センターレスグラインダで外周研磨する。研削したペレットは波板状のトレイ上にならべ、検査工程へ払い出す。

① 設備の概要

焼結皿のペレットをパーツフィードによりセンターレスグラインダへ送り込み、ダイヤモンド砥石でペレット外径を所定寸法に研削する。研削屑は集塵機により吸引回収する。研削直後のペレット直径を、レーザを用いて全数測定し、結果を研削機へフィードバックして直径をコントロールする。研削したペレットは波板状のトレイ上にならべ、ペレット検査工程へコンベヤにて搬送する。

② 大型プラント (200tHM/y) と基準プラント (50tHM/y) との相違点

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心、軸方向ランケット及び径方向ランケットそれぞれ2系列、基準プラントでは、内側炉心、外側炉心、軸方向ランケット及び径方向ランケットそれぞれ1系列である。

(f) 燃料要素組立設備

炉心燃料に使用される燃料要素には、軸方向上下にランケットペレットを挿入するため、あらかじめ燃料要素1本分のスタックを形成すると同時に、スタック重量も秤量する。スタック形成されたペレットは、ペレットトレイに載せ、ペレット挿入装置又はペレット貯蔵庫へ搬送する。

① 設備の概要

炉心燃料用燃料要素には、軸方向上下にランケットペレットが入るため、被覆管への装填の前にあらかじめ燃料要素1本分毎にスタックを形成する。炉心燃料用燃料要素の種類は、本システム検討では2種類（Pu富化度：17.0wt%、26.5wt%の2種類）である。また、スタック形成と同時にスタック重量も秤量し、スタック測長データと共にホストコンピュータに伝送され、管理される。スタック形成後のペレットは、ペレットトレイに

載せ、ペレット挿入装置又はペレット貯蔵庫へ搬送する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心それぞれ2系列、基準プラントでは、内側炉心、外側炉心それぞれ1系列である。

(g) ペレット挿入、端栓溶接設備

① 設備の概要

本設備は、ペレット及び燃料要素構成部材であるプレナムスプリング、上部端栓を被覆管に自動装填し、上部端栓を溶接する設備である。被覆管にはあらかじめ管理区域外で下部端栓を溶接し、検査済みのものを使用する。上部端栓溶接後、除染ならびにスミヤによる汚染確認を行った後、25本単位でアルミ製ロッドトレイに載せ、燃料要素検査設備へ搬送する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心がそれぞれ2系列、径方向ブランケットが1系列である。基準プラントでは、内側炉心、外側炉心及び径方向ブランケットそれぞれ1系列である。

(h) ワイヤ巻付・洗浄設備

① 設備の概要

本設備は、燃料要素の外周にワイヤを巻付け、燃料要素の総合検査の後、燃料要素の洗浄を行い、燃料要素の完成体に仕上げる設備である。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントの場合、ワイヤ巻付装置については処理能力の点から内側炉心、外側炉心及び径方向ブランケットそれぞれ2系列、洗浄装置については内側炉心、外側炉心及び径方向ブランケットそれぞれ1系列である。基準プラントの場合、全ての装置について内側炉心、外側炉心を合わせた炉心燃料検査ラインとして1系列、径方向ブランケットが1系列の構成としている。

(i) 燃料集合体組立設備

① 設備の概念

本設備では、燃料要素及びエントランスノズル等の部品を用いての燃

料集合体の組立てを行う。集合体組立て後は、燃料集合体検査装置に移送する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントの場合、炉心燃料集合体組立てラインとして2系列、径方向ブランケット組立てラインが1系列である。基準プラントの場合、炉心燃料集合体組立て及び径方向ブランケット燃料集合体組立て共に1系列の構成としている。

(j) ペレット検査設備

① 設備の概要

本設備では、研削されたペレットの外観、寸法及び密度の検査を行う。ペレット外観は自動外観検査装置により、ペレット個々の端面及び側面部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。寸法及び密度については抜取り検査とし、ランダムに抜取られたペレットの外径、長さ及び重量の測定値より計算で密度を算出する。全検査項目が仕様内であることを確認した後、ペレット貯蔵庫に一時貯蔵する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラントでは内側炉心、外側炉心、軸方向ブランケット及び径方向ブランケットそれぞれ2系列、基準プラントでは、内側炉心、外側炉心、軸方向ブランケット及び径方向ブランケットそれぞれ1系列である。

(k) 燃料要素検査設備

① 設備の概要

本設備での燃料要素の検査は、汚染度検査、ヘリウムリーク検査による欠陥検査、X線検査による溶接部及びプレナム部の検査、 γ スキャンによる燃料部とブランケット部の識別検査ならびにワイヤー巻付け後の総合検査を行う。ヘリウムリーク検査及びX線検査は25本単位(ロッドトレイ毎)で行い、 γ スキャン検査は1本ずつ行う。更にワイヤー巻付け後、総合検査装置にて燃料要素の全長、重量、外観、曲り及びワイヤー巻付けゆるみ等の最終検査を実施し、洗浄後に燃料要素貯蔵庫で一時貯蔵する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラント場合、汚染度検査装置、ヘリウムリー

ク検査装置、X線検査装置及び総合検査装置については内側炉心、外側炉心それぞれ1系列である。γスキャン検査装置については、処理能力の点から内側炉心、外側炉心が2系列、径方向ブランケットが1系列である。基準プラントの場合、全ての装置について内側炉心、外側炉心を合わせた炉心燃料検査ラインとして1系列、径方向ブランケットが1系列の構成としている。

(l) 燃料集合体検査設備

① 設備の概要

完成集合体について集合体検査装置を用いて、外観、全長、曲り、ねじれ及び六角対面幅の検査を行う。集合体検査後は、燃料集合体貯蔵庫に保管する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

本設備の系列数は、大型プラント、基準プラント共に内側炉心、外側炉心を合わせた炉心燃料集合体検査ラインが1系列、径方向ブランケット燃料集合体検査ラインが1系列の構成である。

(m) 分析設備

① 設備の概要

本設備では溶液、粉末及びペレットの分析を行う。各分析方法及び必要試料量及び各設備毎の分析項目を表4-2-17、18に示す。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

両者の相違はない。

(n) 貯蔵設備

① 設備の概要

本検討では受入原料貯蔵設備として原料溶液を1週間分、ペレット貯蔵設備として製品燃料ペレット及びスクラップペレットを1ヶ月分、燃料要素貯蔵設備として製品燃料要素及び不合格燃料要素を2週間分、集合体貯蔵設備として1年分、固体廃棄物貯蔵設備として1年分を設定する。

② 大型プラント(200tHM/y)と基準プラント(50tHM/y)との相違点

ペレット貯蔵容量は1ヶ月分として大型プラントで炉心燃料用を15tHM、

ブランケット燃料用を 20tHM とする。また、基準プラントではそれぞれ 4tHM、及び 5tHM とする。燃料要素貯蔵容量は 2 週間分として大型プラントで炉心燃料用を 16000 本、ブランケット燃料用を 4000 本とする。また、基準プラントではそれぞれ、4000 本及び 1000 本とする。燃料集合体貯蔵容量は 1 年分として大型プラントで炉心燃料用を 841 体、ブランケット燃料用を 289 体とする。また、基準プラントでは、炉心燃料用 211 体及びブランケット燃料用 73 体とする。

(o) DS 溶解設備（スクラップ処理設備）

① 設備の概要

成型設備及び研削設備で発生する DS の粉体は、それぞれ気送によって本設備に受け入れる。受け入れた粉体は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經由し、濃度調整槽にて U・Pu 濃度を調整後、沈殿槽に移送される。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ー状とするとともに不純物イオンを除去する。スラリー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、原料受入・富化度調整設備の富化度調整・供給槽へ払い出す。

なお、リワーク溶液受入槽のバッファ容量は、富化度調整・供給槽のロットに合わせ、3 日分とする。

② 大型プラント（200tHM/y）と基準プラント（50tHM/y）との相違点

各プラントにおける炉心燃料用 DS 溶解設備の系列数については、大型プラント及び基準プラント共に、内側炉心燃料 DS 用 1 系列、外側炉心燃料 DS 用 1 系列である。また、ブランケット燃料用 DS 溶解設備については、それぞれ 1 系列である。

(p) CS 溶解設備（スクラップ処理設備）

① 設備の概要

ペレット検査設備及び燃料要素検査設備で発生する CS ペレットは、粉碎され、粉末とした後、それぞれ気送によって本設備に受け入れる。受け入れた CS 粉末は溶解槽にて硝酸により溶解された後、DS 再溶解液と同様リワーク溶液受入槽に移送、貯留する。

② 大型プラント（200tHM/y）と基準プラント（50tHM/y）との相違点

各プラントにおける CS 溶解設備の系列数については、大型プラント及び基準

プラント共に、内側炉心燃料 DS 用 1 系列、外側炉心燃料 DS 用 1 系列及びブランケット燃料用 1 系列である。各系列毎に大型プラントでは内側炉心燃料溶解槽 4 槽、外側炉心燃料溶解槽 3 槽、基準プラントでは内側・外側炉心燃料溶解槽共に 1 槽である。

なお、リワーク溶液受槽の基数については大型プラント及び基準プラント共に 2 系列それぞれに 2 基ずつ設置している。

(v) 付帯設備設計

(a) 廃棄物処理設備

① 廃液処理設備

廃液処理設備は、2 基の廃液槽 (2 /基) と 2 基の廃液輸送ポンプからなる。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を持つ。廃液は主体工程及びオフガス処理設備から受け入れる。1 基が受け入れている間に他方の 1 基は廃液を分析し結果を確認して再処理施設へ送る。

② オフガス処理設備

オフガス処理設備は 2 基の洗浄塔、4 基の洗浄液ポンプ、1 基のオフガス冷却基 2 基のオフガスフィルタ、2 基のルテニウム吸着塔及び 2 基のオフガスフィルタからなる。オフガス処理設備は脱硝工程及びばい焼・還元工程から排出するオフガスを処理する。オフガスは、2 基の洗浄塔により洗浄し、オフガス冷却器で冷却した後オフガスフィルタ、ルテニウム吸着塔をへて、オフガスブロウによって換気系へ排出される。洗浄塔には、硝酸水溶液を循環しており硝酸、放射性物質に一部を回収している。回収液は、液面制御によって廃液処理設備に送る。

③ 固体廃棄物処理設備

本プラントの固体廃棄物処理は、減容等の処理は行わず容器に収納して貯蔵することを原則とする。プラント内に 1 年分の固体廃棄物貯蔵庫を設置する。

(b) ユーティリティ設備

① 冷却水設備

冷却水設備は、1 基の冷却塔、2 基の冷却水ポンプ、2 基の非常用冷却水ポンプ、1 基の膨張槽、1 基の防食剤タンク及び 2 基の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及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及び圧縮空気設備 (非常用) 出口の圧縮空気の冷却用に送られる。

② 冷水設備

冷水設備は、2基の冷凍機、1基の非常用冷凍機、2基の冷水ポンプ、2基の非常用冷水ポンプ、1基の補給水タンク及び1基の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）及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。

③ 圧縮空気設備（常用）

圧縮空気設備（常用）は、2基の常用圧縮機、2基の常用圧空冷却器、1基の常用空気貯槽及び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、燃料要素乾燥用及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。

④ 圧縮空気設備（非常用）

圧縮空気設備（非常用）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及び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・攪拌用及び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。

⑤ 加湿設備

加湿設備は、1基の純水槽、1基の純水ポンプ及び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・攪拌用及びエアリフトの駆動用に送られる。

⑥ 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NHガス中間槽、水素ポンプ、Arポンプ、1基のArガス中間槽及び酸素ポンプからなる。水素ガスは、窒素と混合調整（4%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（4%水素）した後、焼結工程へ送られる。酸素ガスは、DS（ダ－ティ－スクラップ）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。

⑦ 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及び2基の過酸化水素水ポンプからなる。13N及び10N硝酸は、DS（ダ－ティ－スクラップ）及びCS（クリ－ンスクラップ）の処理用に使用される。除染用硝酸は、除染用及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（ダーティスクラップ）の処理用に使用される。

⑧ 温水製造設備

温水製造設備は、1基の電気温水ボイラ、2基の温水循環ポンプ、1基の補給水タンク、2基の補給水ポンプからなる。温水は、建屋暖房に使用される。

(c) 電気設備

本燃料製造プラントは商用電力系統の154 kV送電線から受電開閉設備を通して受電し、受電変圧器にて6.9 kVに降圧した後、所内電源設備に給電する。154 kV送電線、受電開閉設備、受電変圧器は並列2系統構成とし、各系統が単独で本プラントを運転可能な送/受電容量を持つ。燃料製造関連設備電気負荷一覧表を表4-2-19、20に示す。

① 所内電源設備

6.9 kV 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、高圧負荷及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6.9 kV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。

② 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。

③ 安全上重要な施設の電気負荷

安全上重要な施設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。安全上重要な施設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、及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及び切替装置を適切に設ける。

安全上重要な電源負荷を以下に示す。

- 1) 非常用冷却水系
- 2) 非常用冷水系

- 3) 非常用圧縮空気系
- 4) 計装用圧縮空気系
- 5) セル換気空調系
- 6) 制御室換気空調系
- 7) 非常用ディーゼル発電機換気空調系
- 8) 非常用電気室換気空調系
- 9) 燃料（材料、中間製品、完成品）貯蔵設備換気空調系

(d) 建屋換気設備

低除染ペレット燃料製造プラントの建屋換気空調設備は、プラント内の負圧維持及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。

低除染ペレット燃料製造プラント換気空調系統図を図4-2-29に示す。

本換気空調設備は大別して3つの系統から構成される。

① 非管理区域（W部屋）系

本系統は非管理区域（W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）、排風機及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。

② 管理区域（G/A部屋、R系）系

本系統は管理区域（G/A、R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）、G/A部屋系排風機、R系排風機及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G/A各部屋に送風される。R系への給気はA系部屋からのトランスファにより行う。G/A部屋およびR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。又、各部屋からの放射性物質の漏洩を抑えるために通常時各部屋は負圧に維持する。

③ 非常用D/G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）、給気ファン及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。

(e) 放射線管理設備

① 設計方針

- a. 管理区域への人員出入り及び物品の搬出入に対し、出入管理、汚染管理及び被曝管理ができること。
- b. モニタリング設備、放射線サーベイ設備等の測定機器により、プラントの主要な箇所での線量当量率、空气中放射性物質濃度等を測定、監視出来ること。
- c. 気体状放射性物質の放出経路には、排気モニタ及びサンプリング設備を設置し、気体状放射性物質の濃度及び放出量が算出できること。
- d. 放射線監視設備からの主要な情報は、制御室にて集中監視できること。
- e. 事故時に必要な放射線計測器及び防護具を備えること。

② 系統構成及び主要設備

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、サーベイメータ及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、分析を行う機器及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 γ 線及び中性子線線量当量率を、ダストモニタにより同じく空气中 α 線及び $\beta \cdot \gamma$ 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、連続監視及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

α 線用サーベイメータ、 β ・ γ 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。

(vi) 配置設計

(a) 自立した燃料製造プラントのレイアウト検討

① 配置設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設は、燃料製造主要プロセスと関連する付帯設備を全て収容した主建屋の1区分とする。大型プラント（200tHM/y）の建屋鳥瞰図を図4-2-30に、セル内機器配置図を図4-2-31に、また基準プラント（50tHM/y）セル内機器配置図を図4-2-32に示す。
- ・ 燃料製造設備の主要プロセス設備とその付帯設備等を同一建屋内に合理的に配置する。
- ・ DS（ダーティスクラップ：成型時回収粉、研削時研削屑、検査時不合格ペレット）、CS（クリーンスクラップ：不合格燃料要素回収ペレット）の溶解設備を設ける。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 保守については、プラント稼働率向上、作業員の被曝低減を目的とし、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。セル内設置機器は遠隔操作とし、遮蔽窓やITVを通し、マニピュレータ、インセルクレーン等により操作可能な設計とする。

② 配置設計の概要

セル内機器配置図（図4-2-31及び図4-2-32）から、上記方針に基づいたセル容積、建屋規模及び建屋容積は、200tHM/y及び50tHM/yの主建屋についてそれぞれ下記のとおりとなった。

・大型プラント（200tHM/y）

建屋規模 138mL×106mW×30mH（地下1階、地上2階）

建屋容積 439,000m³

・基準プラント（50tHM/y）

建屋規模 90mL×74mW×30mH（地下1階、地上2階）

建屋容積 200,000m³

(b) 燃料製造／再処理一体化プラントのレイアウト検討

①配置設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設（200tHM/y）は、主に再処理／燃料製造主要プロセスと高・低放射性廃棄物を扱う主建屋、及び管理棟の2区分とする。全体機器配置平面図を図4-2-33に示す。
- ・ 再処理／燃料製造設備一体化により、主要プロセス設備とその付帯設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置する。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 保守については、プラント稼働率向上、作業員の被曝低減を目的とし、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。セル内設置機器は遠隔操作とし、遮蔽窓やITVを通し、マニピュレータ、インセルクレーン等により操作可能な設計とする。
- ・ セルの形状はMSMでの操作を考慮し、セル幅を抑えた長尺セルとする。
- ・ 各セルには隣接して保守セル又は保守セルへの搬送セルを設けており、セルとの取合は台車又はインセルクレーンにて実施する。

②配置設計の概要

全体機器配置平面図（図4-2-33）から、上記方針に基づいたセル容積、建屋規模及び建屋容積は、主建屋について下記のとおりとなった。

建屋規模	186.5mL×144mW×39mH（地下2階、地上4階）
建屋容積	1,073,000m ³

(vii) システムの特徴

(a) 低除染プラントのプロセス概念に関する事項

① 低除染ペレット燃料の製造仕様

一般的に燃料仕様は炉心性能の確保と経済性/信頼性を配慮した燃料供給（再処理/燃料製造）の観点より、両者のバランスの上に決定する必要がある。この炉心性能と燃料製造性に関連する燃料仕様の内、基本的な項目は、燃料ピン寸法（全長、被覆管外径/内径）、ペレット形状・寸法、ペレット密度、核分裂物質含有率、Pu均一性、O/M、蒸発性不純物、不純物含有量等に係わる公称値及び公差である。低除染MOXペレット燃料の製造性に関する知見は少なく現状で量産を想定した製造可能仕様の設定は困難である。今後の要素技術開発として低除染ペレットの製造試験等による製造性の確認が必要と考える。ここでは、燃料製造概念の検討に用いる燃料仕様として、不純物含有率を除き、暫定的に高除染ペレット燃料と同等の製品を製造するプラントを検討す

る。なお、今後低除染 MOX ペレット燃料の仕様を設定する際に留意すべき事項をまとめた。

従来の MOX 燃料仕様を定めるにあつては、海外の MOX ペレット仕様及び多くの照射実績に基づく UO₂ ペレットの燃料仕様をベースとして、国内での MOX 燃料製造及び照射試験の実績に照らし若干の仕様項目を変更してきている。このような燃料は健全性において高い信頼性を有するものであるが、MOX 燃料として限界設計に基づく燃料仕様ではなく、合理化の可能性を有するものと考えられる。

但し、現行の比較的照射データが蓄積されている MOX 燃料（高除染ペレット）においても、個々の燃料製造仕様項目（例えば、O/M、水分、不純物成分の被覆管内面腐食への影響等）が燃料健全性に与える定量的影響に関する知見は十分ではない。燃料仕様を合理化するためには燃料の健全性を確認するための研究開発（物性研究、照射試験等）に多大な資源と時間が必要である。低除染ペレット燃料の製造時に含有する FP 量は、短期間の照射において生成される程度のものであり、高燃焼度での健全性を担保する燃料設計が可能であれば、低除染ペレット燃料の照射健全性の保証は可能との考え方があつた。しかし、この前提として、燃料健全性に関する影響因子（スミア密度、O/M、水分等）の評価が不可欠であり、またこれらの因子の製造時の品質保証が重要となる。

② 遠隔自動化運転と遠隔保守

本検討プラントにおいては、Pu 富化度調整工程 ばい焼・還元工程までの設備を設置するセルを完全遠隔保守セルとし、設備・機器の保守及び保守用の遠隔操作機器ともに遠隔保守を実施し、作業員がセル内に進入することを想定しない。

成形工程 燃料要素端溶接工程までの放射性物質を非密封で取り扱う設備が配置するセルを遠隔・直接保守兼用セルとし、保守頻度の低い設備、機器の保守及び保守用の遠隔操作機器に対しては直接保守を実施する。

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、保守セル等を直接保守セルとし、遠隔で線源を撤去することによりセル内に作業員が立ち入り設備・機器の直接保守を行う。

③ 放射能収支

PUREX 法では Pu の放射能が律速となるが、TRUEX 法では Am, Cm の寄与が大きくなる。これは Am²⁴¹ (半減期 432 年)、Cm²⁴⁴ (半減期 18.1 年) 等が α 崩壊を行うためである。ただし以前として Pu からの放射能が過半数を占めている。TRUEX 法から出る溶液を取り扱う溶液に伴う遮蔽計算を行う場合には、FP 中に含まれている核種の γ 線の放射線、強度も検討する必要があると想定される。

④ 崩壊熱による温度変化

TRUEX 法では、発熱については Cm の寄与が重量組成が 0.4% 程度であるにもかかわらず非常に大きい。Pu/U 溶液貯槽では、発熱量 17W/tHM として冷却コイルの伝熱面積と冷水供給系の能力について設計を行っている。したがって TRUEX の場合でも十分な除熱

が可能であると考えられる。TRUEX 法では粉末系ではホッパー等で再酸化抑制温度である 70℃以上に達するため、セル内を不活性ガス雰囲気に保持する必要がある。発熱について一番厳しいと想定されるのは成形ホッパーの中心部であるため、温度は PUREX 法では 164℃、TRUEX 法では 668℃となる。

(b) 発生廃棄物に関する事項

① 固体廃棄物発生量

プラントで発生する交換頻度が高い主要固体廃棄物（可燃物、難燃物は除く）は、脱硝容器、メタルフィルタエレメント、HEPA フィルタ、溶解ろ過フィルタ、焙焼・還元炉ヒータ、焼結炉ヒータ、焼結炉耐火レンガ等である。炉心燃料系、及びブランケット燃料系の主要廃棄物の交換頻度、年間発生ドラム缶換算本数等を表 4-2-21、22 にまとめる。

② 固体廃棄物の放射能濃度について

a. 前提条件

表 4-2-21, 22 の大型プラント炉心燃料系の固体廃棄物発生量リストを基に、固体廃棄物の放射能濃度の概算結果を表 4-2-23 に示す。一日の取扱放射性物質の放射能は、放射能収支から PUREX 法では内側炉心燃料製造用： 9.61×10^{15} Bq/d、外側炉心燃料用： 8.69×10^{15} Bq/d、TRUEX 法では内側炉心燃料製造用： 1.89×10^{16} Bq/d、外側炉心燃料用： 1.57×10^{16} Bq/d である。対象容器の 1 個当りの重量を表 4-2-23 のように設定すると固体廃棄物年間発生量リストの年間総取替個数から、年間使用総重量を求めることができる。移行率については、取扱放射性物質が全体で年間 0.1%移行するものと想定し、過去の実績等を基に各対象機器に値を割り振るものとする。

b. 評価結果

除染等を行わない場合は、発生する固体廃棄物の全量が高レベル廃棄物相当の (α 放射能 10^{12} Bq/t 以上) の放射能を持っていることになる。また、ドラム缶に収納するさいにモルタル充填による希釈効果が期待できるが、希釈を考慮してもオーダーとしては高レベル廃棄物に区分されると考えられる。

(c) 計量管理及び保障措置に関する事項

本施設は、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コンタミによる組成変化がないよう、その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（ペレット成型前に粉末のロット混合を行わない）。従って、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が行われる。

表4.2.7 燃料の基本仕様

項目	炉心燃料集合体	径ブランケット燃料集合体
1. 燃料集合体		
燃料要素本数	271本	169本
燃料要素配列ピッチ	9.65mm	12.21mm
燃料要素配列ピッチ	4600mm	4600mm
ラッパ管		
材質	フェライトマルテンサイト鋼	フェライトマルテンサイト鋼
内対面幅	161.2mm	161.2mm
外対面幅	169.9mm	169.9mm
肉厚	4.35mm	4.35mm
スペーサ		
型式	ワイヤ	ワイヤ
材質	分散強化型フェライト鋼	分散強化型フェライト鋼
ワイヤ径	1.1mm	0.86mm
ワイヤ巻付ピッチ	約200mm	約160mm
2. 燃料要素		
全長	3135mm	3135mm
スタック長		
炉心燃料部	1000mm	—
ブランケット燃料部	上350/下350mm	1700mm
ガスプレナム長さ(上/下)	285/1080mm	155/1050mm
型式	一体密封型	一体密封型
3. 炉心燃料部		
型式	中空ペレット	—
材質	プルトニウム・ウラン混合酸化物	—
スミア密度	85%TD	—
中空径	φ2mm	—
Pellet-clad ギャップ	160μm	—
O/M比	1.98	—
L/D比	1.2	—
内側炉心燃料富化度	17.0%	—
外側炉心燃料富化度	26.5%	—
4. ブランケット燃料部		
型式	中空ペレット	中実ペレット
材質	二酸化ウラン	二酸化ウラン
スミア密度	85%TD	85%TD
中空径	φ2mm	—
Pellet-clad ギャップ	160μm	160μm
O/M比	2.00	2.00
L/D比	1.2	1.2
5. 被覆管		
材質	分散強化型フェライト鋼	分散強化型フェライト鋼
外径	8.5mm	11.3mm
内径	7.5mm	10.5mm
肉厚	0.5mm	0.4mm

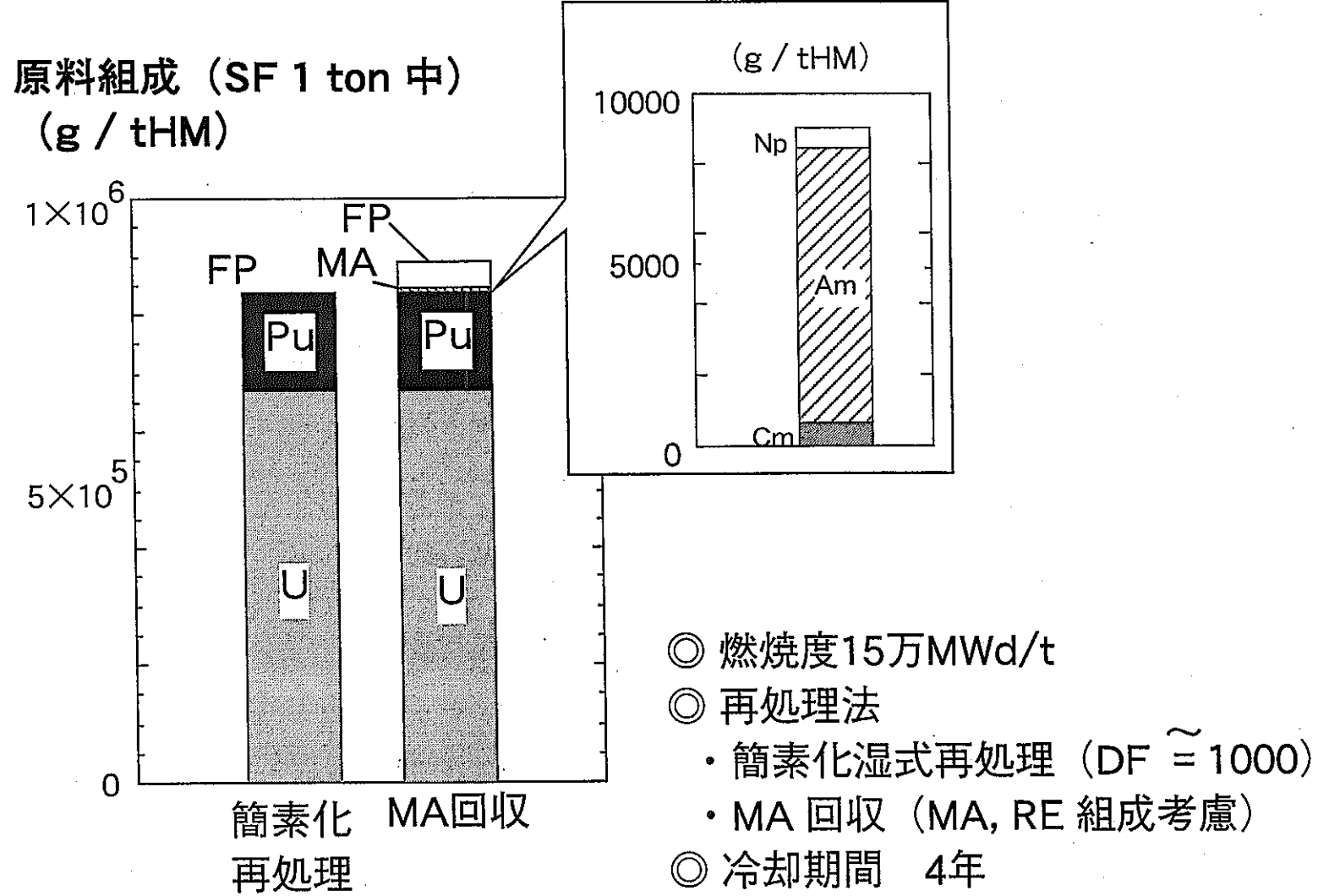


図4.2.8 FBR 使用済燃料組成

表4.2.9 バッチサイズ (200 tHM/y、50 tHM/y 共通)

(単位: kgHM)

	内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット
U/Pu脱硝設備	3.5	3.5	3.5	3.5
成型設備	14.0	14.0	14.0	14.0

*参考 (ロットサイズ)

(単位: kgHM)

	内側炉心	外側炉心	ブランケット
大型プラント(200tHM/y)	921	536	2001
基準プラント(50tHM/y)	232	134	504

表4.2.10 大型プラント生産量 (200 tHM/y)

			内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	合計
年間生産量		体	533	308	841	289	1130
	U	t-HM	43.4	22.1	57.9	56.8	180.2
	Pu	t-HM	9.0	8.2	0.0	0.0	17.2
	MA	t-HM	0.4	0.4	0.0	0.0	0.8
一日当たりの製造量	U	kgHM/d	216.9	110.6	289.4	284.1	900.9
	Pu	kgHM/d	45.1	40.8	0.0	0.0	86.0
	MA	kgHM/d	2.1	1.9	0.0	0.0	4.1
(製造歩留まり [86%] 考慮)	U	kgHM/d	252.2	128.6	336.5	330.3	1047.5
	Pu	kgHM/d	52.5	47.5	0.0	0.0	100.0
	MA	kgHM/d	2.5	2.2	0.0	0.0	4.7
	粉末	kgHM/d	307.1	178.3	336.5	330.3	1152.2
	ペレット	個/d	81957	47584	89803	34035	253379
	燃料要素	本/d	722	417	1140	244	1384

表4.2.11 基準プラント生産量 (50 tHM/y)

			内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	合計
年間生産量		体	134	77	211	73	284
	U	t-HM	10.9	5.5	14.5	14.4	45.3
	Pu	t-HM	2.3	2.0	0.0	0.0	4.3
	MA	t-HM	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2
一日当たりの製造量	U	kgHM/d	54.5	27.6	72.6	71.8	226.5
	Pu	kgHM/d	11.3	10.2	0.0	0.0	21.6
	MA	kgHM/d	0.5	0.5	0.0	0.0	1.0
(製造歩留まり [86%] 考慮)	U	kgHM/d	63.4	32.1	84.4	83.4	263.4
	Pu	kgHM/d	13.2	11.9	0.0	0.0	25.1
	MA	kgHM/d	0.6	0.6	0.0	0.0	1.2
	粉末	kgHM/d	77.2	44.6	84.4	83.4	289.6
	ペレット	個/d	20603	11903	22524	8594	63624
	燃料要素	本/d	182	104	286	62	348

表4.2.12 各核種の重量組成(燃料1t当り)

	PUREX法17%		PUREX法26.5%		TRUEX法17%		TRUEX法26.5%	
	g/tHM		g/tHM		g/tHM		g/tHM	
U	8.293E+05	82.9%	7.339E+05	73.4%	7.388E+05	73.9%	6.208E+05	62.1%
Np	5.740E+02	0.1%	8.948E+02	0.1%	3.174E+03	0.3%	3.174E+03	0.3%
Pu	1.700E+05	17.0%	2.650E+05	26.5%	1.700E+05	17.0%	2.650E+05	26.5%
Am	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	4.326E+04	4.3%	4.326E+04	4.3%
Cm	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	3.571E+03	0.4%	3.571E+03	0.4%
Ru	1.252E+01	0.0%	1.952E+01	0.0%	1.252E+01	0.0%	1.952E+01	0.0%
その他FP	1.167E+02	0.0%	1.819E+02	0.0%	4.118E+04	4.1%	6.419E+04	6.4%
合計	1.000E+06	100%	1.000E+06	100%	1.000E+06	100%	1.000E+06	100%
(Np+Am+Cm)	5.740E+02	0%	8.948E+02	0%	5.001E+04	5%	5.001E+04	5%

表4.2.13 各核種の放射能(燃料1t当り)

	PUREX法17%		PUREX法26.5%		TRUEX法17%		TRUEX法26.5%	
	Ci/tHM		Ci/tHM		Ci/tHM		Ci/tHM	
U	2.578E+00	0.0%	2.281E+00	0.0%	2.297E+00	0.0%	1.930E+00	0.0%
Np	4.048E-01	0.0%	6.310E-01	0.0%	2.238E+00	0.0%	2.238E+00	0.0%
Pu	8.401E+05	99.9%	1.309E+06	99.9%	8.401E+05	50.7%	1.309E+06	55.2%
Am	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	1.062E+05	6.4%	1.062E+05	4.5%
Cm	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	2.664E+05	16.1%	2.664E+05	11.2%
Ru	1.203E+02	0.0%	1.875E+02	0.0%	1.203E+02	0.0%	1.875E+02	0.0%
その他FP	1.132E+03	0.1%	1.765E+03	0.1%	4.436E+05	26.8%	6.914E+05	29.1%
合計	8.414E+05	100%	1.311E+06	100%	1.656E+06	100%	2.373E+06	100%
(Np+Am+Cm)	4.048E-01	0%	6.310E-01	0%	3.726E+05	22%	3.726E+05	16%

表4.2.14 各核種の発熱(燃料1t当り)

	PUREX法17%		PUREX法26.5%		TRUEX法17%		TRUEX法26.5%	
	W/tHM		W/tHM		W/tHM		W/tHM	
U	7.323E-02	0.0%	6.481E-02	0.0%	6.525E-02	0.0%	5.483E-02	0.0%
Np	1.237E-02	0.0%	1.929E-02	0.0%	6.841E-02	0.0%	6.841E-02	0.0%
Pu	2.516E+03	99.9%	3.922E+03	99.9%	2.516E+03	15.5%	3.922E+03	21.5%
Am	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	3.208E+03	19.8%	3.208E+03	17.6%
Cm	0.000E+00	0.0%	0.000E+00	0.0%	9.355E+03	57.8%	9.355E+03	51.3%
Ru	7.152E-03	0.0%	1.115E-02	0.0%	7.152E-03	0.0%	1.115E-02	0.0%
その他FP	3.042E+00	0.1%	4.742E+00	0.1%	1.112E+03	6.9%	1.733E+03	9.5%
合計	2.519E+03	100%	3.927E+03	100%	1.619E+04	100%	1.822E+04	100%
(Np+Am+Cm)	1.237E-02	0%	1.929E-02	0%	1.256E+04	78%	1.256E+04	69%

表4.2.15 系列数 (200 tHM/y)

	内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	系列数合計
原料受入設備	3		1		4
富化度調整設備	2	2	—	—	4
U/Pu脱硝設備	4	3	4	4	15
ペレット加工設備 (検査含む)	2	2	2	2	8
燃料要素組立設備	2	2	—	1	5
燃料要素検査設備	1*	1*	—	1	3
燃料集合体組立・検査設備	1		1		2

* γ-スキャン検査装置のみ2系列

表4.2.16 系列数 (50 tHM/y)

	内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	系列数合計
原料受入設備	1		1		2
富化度調整設備	2	2	—	—	4
U/Pu脱硝設備	1	1	1	1	4
ペレット加工設備 (検査含む)	1	1	1	1	4
燃料要素組立設備	1	1	—	1	3
燃料要素検査設備	1		1		2
燃料集合体組立・検査設備	1		1		2

表4.2.17 分析方法一覧表

対象	分析項目	分析方法	必要試料量	備考	
溶液	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		
	Cm	α 線スペクトル分析	約1cc		
	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	—		
	粉末	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		
平均粒径		空気透過法	約2g		
O/M		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		
ペレット		O/M	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	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	
	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4.2.18 分析項目表(200t/y) (1/4)

設備名称	サンプリング箇所	流体名称	分析項目(定常)	サンプル量	分析頻度	備考
原料受入・富化度調整設備 (Pu28%)	U/Pu溶液受入槽A～C (11-V11～11-V13)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、Am)濃度	約10cc/1サンプル	1回/7日・槽	7日はU/Pu溶液受入槽A～Cの総バッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (Pu17%)	富化度調整・供給槽A/B (11-V14/V15)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、Am)濃度、H ⁺ 、(Pu、U)同位体組成	約10cc/1サンプル	1回/3日・槽	3日は富化度調整・供給槽A/Bそれぞれのバッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (Pu26.5%)	富化度調整・供給槽C/D (11-V21/V22)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、Am)濃度、H ⁺ 、(Pu、U)同位体組成	約10cc/1サンプル	1回/3日・槽	3日は富化度調整・供給槽C/Dそれぞれのバッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (U100%)	U溶液受入槽 (11-V31)	硝酸U溶液	U濃度	約10cc/1サンプル	1回/7日・槽	7日はU溶液受入槽のバッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (U100%)	U溶液供給槽A/B (11-V32/V33)	硝酸U溶液	U濃度、U同位体組成	約10cc/1サンプル	1回/3日・槽	3日はU溶液供給槽A/Bそれぞれのバッファ容量
廃棄物処理設備	廃液槽 (91-V11/V12)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液等	(Pu、U、Am)濃度、H ⁺ 、不純物	約10cc/1サンプル	1回/1日・槽	脱硝凝縮廃液、オフガス洗浄廃液
U/Pu脱硝設備 (Pu17%)	脱硝容器 (A系列～D系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サンプル	1回/3日・4系列	3日は富化度調整・供給槽A/B/C/Dそれぞれのバッファ容量
U/Pu脱硝設備 (Pu26.5%)	脱硝容器 (E系列～G系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サンプル	1回/3日・3系列	
U/Pu脱硝設備 (U100%)	脱硝容器 (H系列～O系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サンプル	1回/3日・8系列	

表4.2.18 分析項目表(200t/y) (2/4)

設備名称	サンプリング箇所	流体名称	分析項目(定常)	サンプル量	分析頻度	備考
ペレット検査設備(Pu17%)	寸法・密度検査装置 A/B(24-X11/X12)	ペレット	(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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	3日は富化度調整・供 給槽A/B/C/Dそれぞ れのバッファ容量
ペレット検査設備 (Pu26.5%)	寸法・密度検査装置 C/D(24-X21/X22)	ペレット	(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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	
ペレット検査設備(U100%)	寸法・密度検査装置E ~H(24-X31~X34)	ペレット	(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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	
DS,CS溶解設備(Pu17%)	リワーク溶液受入槽	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	
DS,CS溶解設備(Pu26.5%)	リワーク溶液受入槽	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	
DS,CS溶解設備(U100%)	リワーク溶液受入槽	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	

表4.2.18 分析項目表(50t/y) (3/4)

設備名称	サンプリング箇所	流体名称	分析項目(定常)	サンプル量	分析頻度	備考
原料受入・富化度調整設備 (Pu28%)	U/Pu溶液受入槽 (11-V11)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、MA)濃度、	約10cc/1サン プル	1回/7日・槽	7日はU/Pu溶液受入槽 の総バッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (Pu17%)	富化度調整・供給槽 A/B (11-V12/V13)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、MA)濃度、Pu富化度、H ⁺ 、(Pu、U)同 位体組成	約10cc/1サン プル	1回/3日・槽	3日は富化度調整・供 給槽A/Bそれぞれの バッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (Pu26.5%)	富化度調整・供給槽 C/D (11-V21/V22)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液	(Pu、U、MA)濃度、Pu富化度、H ⁺ 、(Pu、U)同 位体組成	約10cc/1サン プル	1回/3日・槽	3日は富化度調整・供 給槽C/Dそれぞれの バッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (U100%)	U溶液受入槽 (11-V31)	硝酸U溶液	U濃度	約10cc/1サン プル	1回/7日・槽	7日はU溶液受入槽の バッファ容量
原料受入・富化度調整設備 (U100%)	U溶液供給槽A/B (11-V32/V33)	硝酸U溶液	U濃度、U同位体組成	約10cc/1サン プル	1回/3日・槽	3日はU溶液供給槽 A/Bそれぞれのバッ ファ容量
廃棄物処理設備	廃液槽 (91- V11/V12)	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液等	(Pu、U、Am)濃度、H ⁺ 、不純物	約10cc/1サン プル	1回/1日・槽	脱硝凝縮廃液、オフガ ス洗淨廃液
U/Pu脱硝設備 (Pu17%)	脱硝容器(A系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩 密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サン プル	1回/3日・1系列	3日は富化度調整・供 給槽A/B/C/Dそれぞ れのバッファ容量
U/Pu脱硝設備 (Pu26.5%)	脱硝容器(B系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩 密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サン プル	1回/3日・1系列	
U/Pu脱硝設備 (U100%)	脱硝容器(C/D系列)	還元粉末	比表面積、低温物理吸着法、見掛け密度、嵩 密度、平均粒径、O/M、不純物、水分	約100g/1サン プル	1回/3日・2系列	

表4.2.18 分析項目表(50t/y) (4/4)

設備名称	サンプリング箇所	流体名称	分析項目(定常)	サンプル量	分析頻度	備考
ペレット検査設備(Pu17%)	寸法・密度検査装置A (24-X11)	ペレット	(Pu, U) 同位体組成、(Pu, U, MA) 濃度、Pu富化度、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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	3日は富化度調整・供給槽A/B/C/Dそれぞれのバッファ容量
ペレット検査設備 (Pu26.5%)	寸法・密度検査装置B (24-X21)	ペレット	(Pu, U) 同位体組成、(Pu, U, MA) 濃度、Pu富化度、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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	
ペレット検査設備(U100%)	寸法・密度検査装置C ~D(24-X31/X32)	ペレット	(Pu, U) 同位体組成、(Pu, U, MA) 濃度、Pu富化度、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	約ペレット20個 /1サンプル	1回/3日・1基	
DS,CS溶解設備(Pu17%)	リワーク溶液受入槽 A/B	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	
DS,CS溶解設備(Pu26.5%)	リワーク溶液受入槽 C/D	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	
DS,CS溶解設備(U100%)	リワーク溶液受入槽 E/F	硝酸Pu溶液/ 硝酸U溶液(DS)	Pu濃度、U濃度、Pu富化度、不純物等	約10cc/1サン プル	1回/3日・2槽	

表4.2.19 燃料製造関連設備電気負荷一覧表

設備名称	200t 総容量(kW)	50t 総容量(kW)	備 考
脱硝設備	380	110	[中央監視室分含む]
焙焼・還元処理設備	290	80	
成形設備	250	130	
焼結設備	1370	690	
研削設備	180	90	
ペレット検査設備	120	60	
スタック調整設備	100	50	
燃料要素組立設備	240	150	
燃料要素検査設備	380	230	
ワイヤ巻付・洗浄装置	90	50	
集合体組立・検査設備	170	170	
スクラップ回収設備	310	210	
貯蔵設備	480	220	
メンテナンス用機器	970	590	パワーマニプレータ セル内クレーン等
合 計	5330	2830	

表4.2.20 補助／付帯設備電気負荷一覧表

設備名称	200t 総容量(kW)	50t 総容量(kW)	主な負荷	備 考
廃液処理設備	5	5	廃液移送ポンプ	
オフガス処理設備	5	5	オフガスブロワ	
冷却水設備	100	75	冷却水ポンプ	
冷水設備	1000	750	冷凍機	
圧縮空気設備(常用)	25	10	圧縮機	
圧縮空気設備(非常用)	25	15	圧縮機	
加湿設備	5	5		
ガス製造設備	5	5		
試薬供給設備	5	5		
温水製造設備	4500	3500	電気ボイラ	
換気空調設備	1300	800	給排気ファン	
直流電源／計装電源	50	30		
照明電源／雑電源	450	300	照明	
合 計	7475	5505		

表4.2.21

大型プラント炉心燃料系の固体廃棄物発生量リスト(脱硝設備～燃料集合体組立・検査設備)

対象機器	使用数量	概略寸法	主要材質	交換頻度	総個数/年	ドラム缶本数/年(200ℓドラム缶換算)	ドラム缶1本に収納出来る個数	備考
脱硝容器	28基 [※]	φ200×500	窒化珪素	1回/年	7基	2缶	5基	※:年間で、1系列に4基あるうちの1基を交換するものとした
焙焼・還元メタルフィルタエレメント	42本	φ30×500	SUS	1回/年	42本	1缶	約200本	
HEPAフィルタ(焙焼還元炉)	14個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	14個	28缶	0.5個 ^{※2}	※1:1系列×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。
溶解液ろ過フィルタ(DS)	40個	φ150×300	SUS	20回/年	40個	2缶	約20個	
気送用メタルフィルタエレメント(DS)	12本	φ30×500	SUS	1回/年	12本	1缶	約200本	
気送用メタルフィルタエレメント(OS)	42本	φ30×500	SUS	1回/年	42本	1缶	約200本	
焙焼・還元炉ヒータ	7本	φ500×700	タングステン	1回/5年	1～2本	2缶	1本	
集塵機用メタルフィルタエレメント	16本	φ30×500	SUS	1回/年	16本	1缶	約200本	
焼結炉耐火レンガ	6000個 [※]	70×120×230	アルミナ	1回/4年	1500個	19缶	約80個	3kg/個 ※:4系列分
焼結炉ヒータ	48本	700×700×50	モリブデン	1回/5年	10本	4缶	3本 [※]	※ヒータブロック2つ折りを想定
研削屑集塵用メタルフィルタエレメント	16本	φ30×500	SUS	1回/年	16本	1缶	約200本	
HEPAフィルタ(集塵機用)	16個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	16個	32缶	0.5個 ^{※2}	※1:1基×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。
HEPAフィルタ(焼結炉)	8個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	8個	16缶	0.5個 ^{※2}	※1:1基×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。

対象:交換頻度が高い、主要なもの(可燃物、難燃物は除く)

表4.2.22

大型プラントブランケット燃料系の固体廃棄物発生量リスト(脱硝設備～燃料集合体組立・検査設備)

対象機器	使用数量	概略寸法	主要材質	交換頻度	総個数/年	ドラム缶本数/年(200ℓドラム缶換算)	ドラム缶1本に収納出来る個数	備考
脱硝容器	32基 [※]	φ200×500	窒化珪素	1回/年	8基	2缶	5基	※:年間で、1系列に4基あるうちの1基を交換するものとした
焙焼・還元メタルフィルタエレメント	48本	φ30×500	SUS	1回/年	48本	1缶	約200本	
HEPAフィルタ(焙焼還元炉)	16個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	16個	32缶	0.5個 ^{※2}	※1:1系列×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。
溶解液ろ過フィルタ(DS)	20個	φ150×300	SUS	20回/年	20個	1缶	約20個	
気送メタルフィルタエレメント(DS)	6本	φ30×500	SUS	1回/年	6本	1缶	約200本	
気送メタルフィルタエレメント(CS)	6本	φ30×500	SUS	1回/年	6本	1缶	約200本	
焙焼・還元炉ヒータ	8本	φ500×700	タングステン	1回/5年	1～2本	2缶	1本	
集塵機用メタルフィルタエレメント	16本	φ30×500	SUS	1回/年	16本	1缶	約200本	
焼結炉耐火レンガ	6000個 [※]	70×120×230	アルミナ	1回/4年	1500個	19缶	約80個	3kg/個 ※:4系列分
焼結炉ヒータ	48本	700×700×50	モリブデン	1回/5年	10本	4缶	3本 [※]	※ヒータブロック2つ折りを想定
研削屑集塵機用メタルフィルタエレメント	16本	φ30×500	SUS	1回/年	16本	1缶	約200本	
HEPAフィルタ(集塵機用)	16個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	16個	32缶	0.5個 ^{※2}	※1:1基×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。
HEPAフィルタ(焼結炉)	8個 ^{※1}	600×600×300	アルミニウム	1回/年	8個	16缶	0.5個 ^{※2}	※1:1基×2個 ※2:角形容器に収納するものとする。

対象:交換頻度が高い、主要なもの(可燃物、難燃物は除く)

表4.2.23 大型プラント炉心燃料系の固体廃棄物放射能濃度

対象機器	重量(kg/個)	総個数(個/y)	総重量(kg/y)	移行率(%)	PUREX法 ^{注1)} (Bq/t)	TRUEX法 ^{注2)} (Bq/t)
脱硝容器	10	7	70	0.01	5.23E+15	9.90E+15
焙焼・還元メタルフィルタエレメント	0.5	42	21	0.01	1.74E+16	3.30E+16
HEPAフィルタ(焙焼還元炉)	5	14	70	0.01	5.23E+15	9.90E+15
溶解液濾過フィルタ(DS)	0.5	40	20	0.005	9.15E+15	1.73E+16
気送メタルフィルタエレメント(DS)	0.5	12	6	0.005	3.05E+16	5.78E+16
気送メタルフィルタエレメント(CS)	0.5	42	21	0.005	8.71E+15	1.65E+16
焙焼・還元炉ヒータ	10	2	15	0.005	1.22E+16	2.31E+16
集塵機用メタルフィルタエレメント	0.5	16	8	0.01	4.58E+16	8.66E+16
焙焼炉耐火レンガ	3	1,500	4,500	0.005	4.07E+13	7.70E+13
焼結炉ヒータ	10	10	100	0.005	1.83E+15	3.47E+15
研修屑集塵用メタルフィルタエレメント	0.5	16	8	0.01	4.58E+16	8.66E+16
HEPAフィルタ(集塵機用)	5	16	80	0.01	4.58E+15	8.66E+15
HEPAフィルタ(焼結炉)	5	8	40	0.01	9.15E+15	1.73E+16
合計	51	1,725	4,959	0.1	1.96E+17	3.70E+17

注1) PUREX法で取扱放射性物質(内側炉心燃料製造用: 9.61×10^{15} Bq/d, 外側炉心燃料製造用 8.69×10^{15} Bq/d)の0.1%が固体廃棄物に移行するものと想定する。

注2) TRUEX法で取扱放射性物質(内側炉心燃料製造用: 1.89×10^{16} Bq/d, 外側炉心燃料製造用 1.57×10^{16} Bq/d)の0.1%が固体廃棄物に移行するものと想定する。

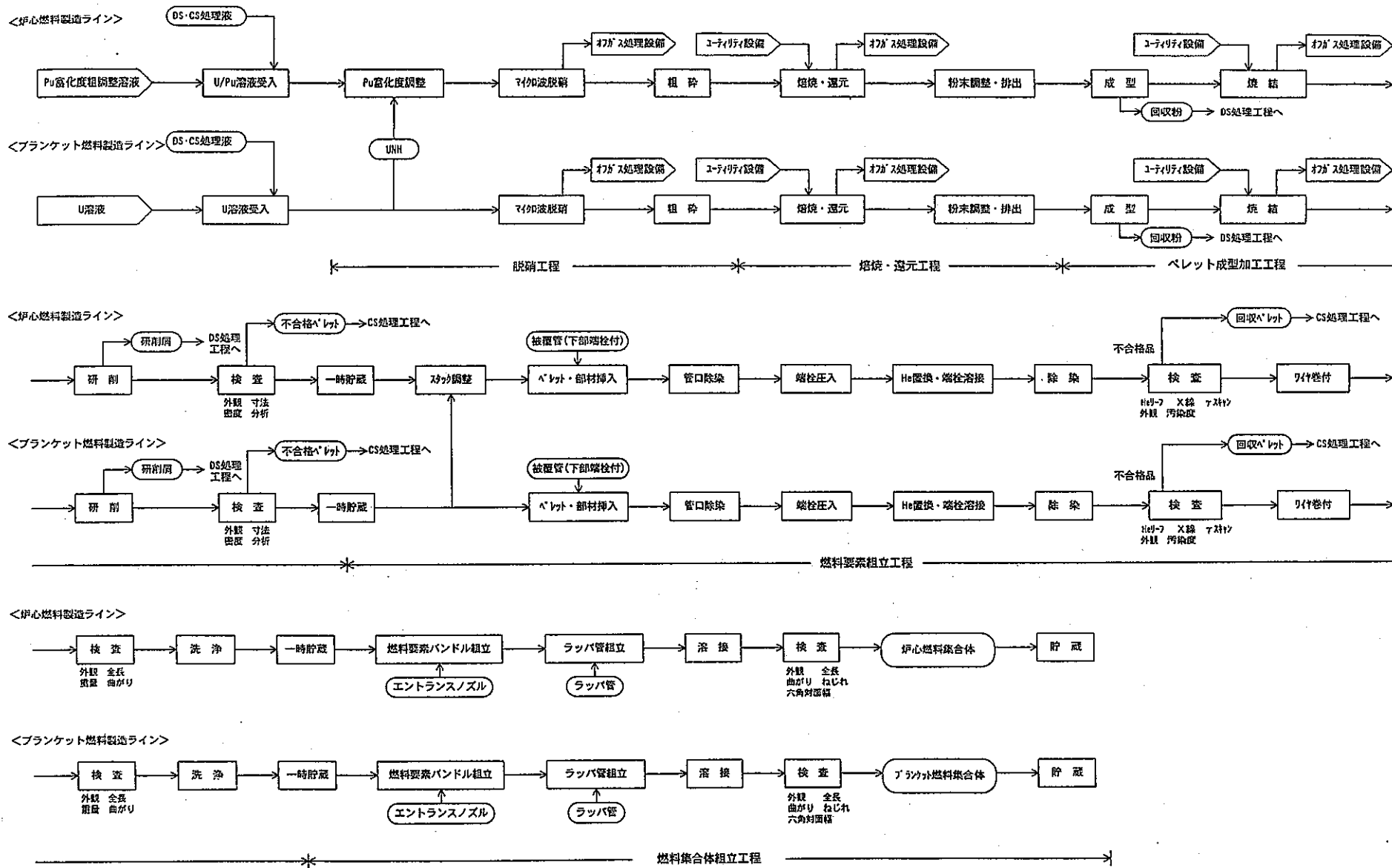
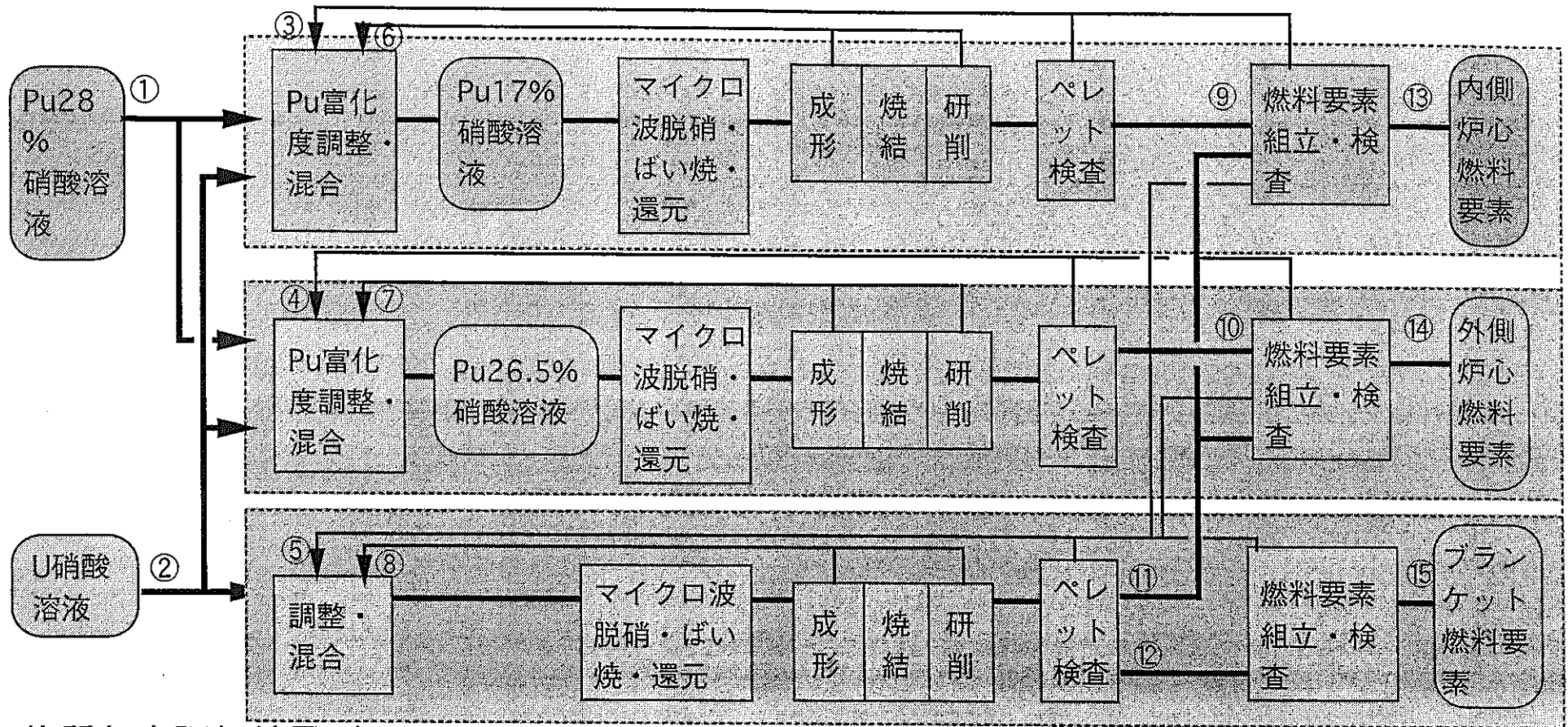


図 4.2.2 2 燃料製造工程ブロックフロー

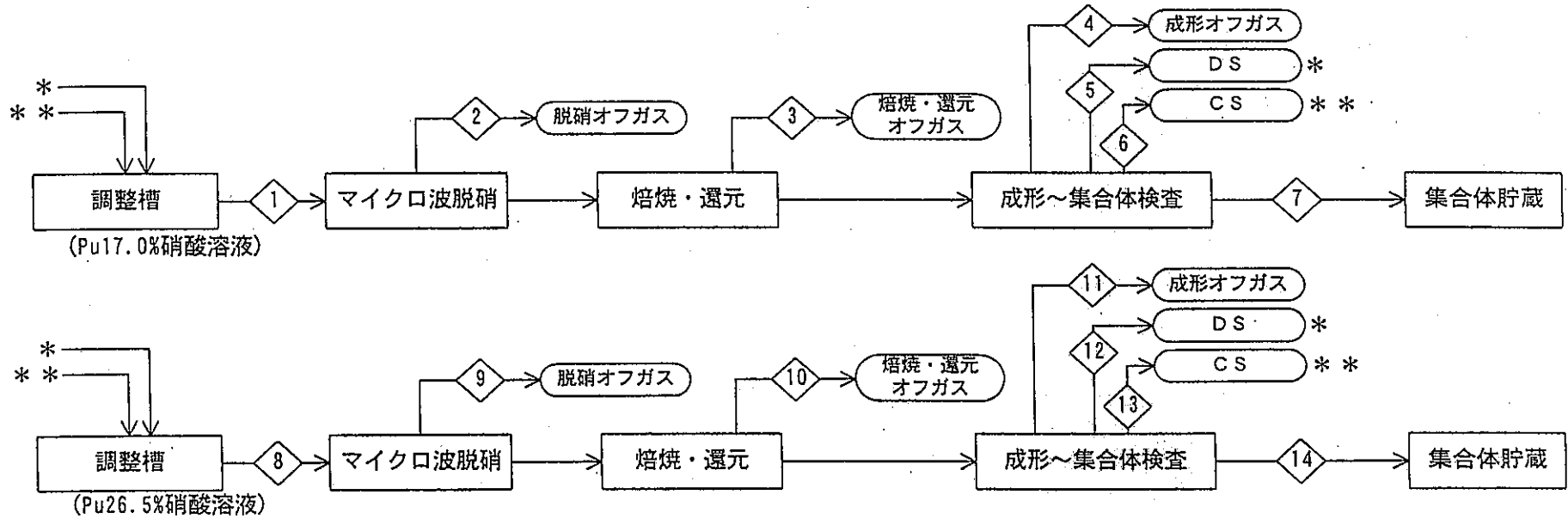


-96-

物質収支評価結果 (kgHM/d)

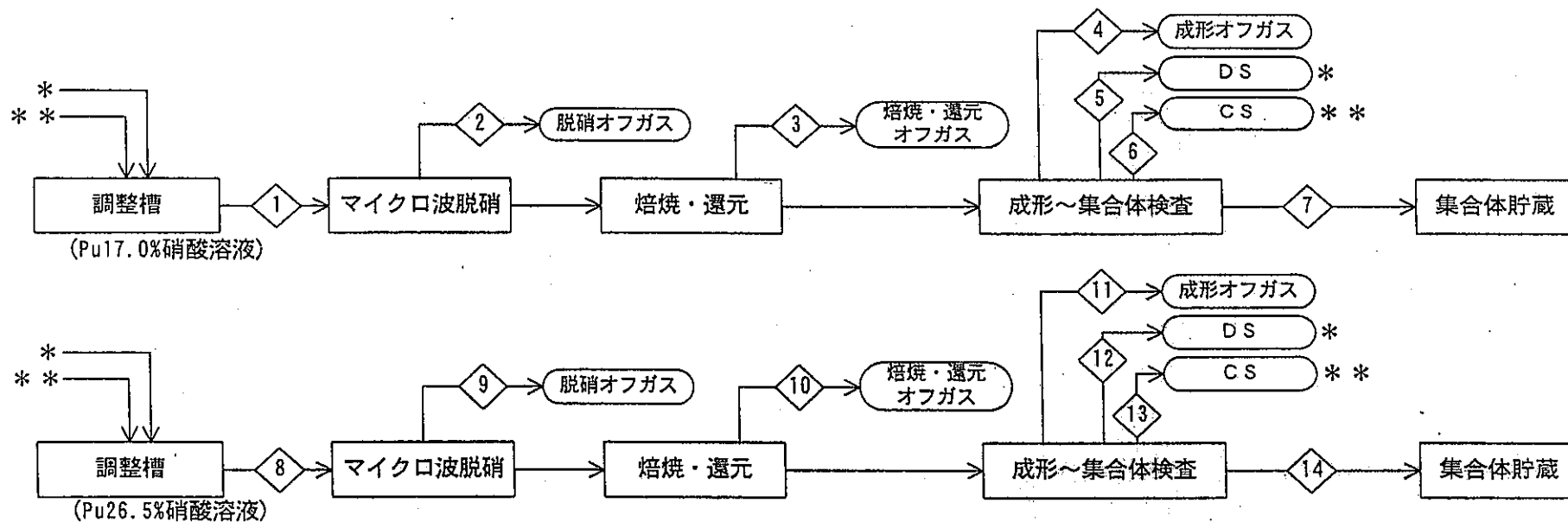
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨ ⑩	⑪ ⑫	⑬/⑭/⑮
Pu	21.6		1.58	1.42		0.26	0.237		11.6/10.4		11.3/10.2/-
U	54.1	172	7.61	3.86	20.1	1.27	0.643	3.36	55.8/28.3	74.3/73.4	101/54.3/71.8
	1.02		0.075	0.067		0.012	0.011		0.55/0.49		0.54/0.46/-

図4.2.23 プロセス検討と物質収支評価 (低除染ペレット燃料製造システム)



物流番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
物流名称		Pu17.0%硝酸溶液	脱硝オフガス	焙焼還元オフガス	成形オフガス	DS	CS	集合体貯蔵	Pu26.5%硝酸溶液	脱硝オフガス	焙焼還元オフガス	成形オフガス	DS	CS	集合体貯蔵
成分	単位														
U	Bq/d	2.95E+10	2.95E+06	2.95E+06	2.94E+06	5.89E+08	3.53E+09	2.53E+10	1.51E+10	1.51E+06	1.51E+06	1.51E+06	3.02E+08	1.81E+09	1.30E+10
Pu	Bq/d	9.60E+15	9.60E+11	9.60E+11	9.60E+11	1.92E+14	1.15E+15	8.25E+15	8.68E+15	8.68E+11	8.67E+11	8.67E+11	1.74E+14	1.04E+15	7.46E+15
Np	Bq/d	4.62E+09	4.62E+05	4.62E+05	4.62E+05	9.25E+07	5.55E+08	3.98E+09	4.18E+09	4.18E+05	4.18E+05	4.18E+05	8.36E+07	5.02E+08	3.60E+09
Am	Bq/d														
Cm	Bq/d														
Ru	Bq/d	1.37E+12	1.37E+12						1.24E+12	1.24E+12					
その他FP	Bq/d	1.29E+13	1.29E+09	1.29E+09	1.29E+09	2.59E+11	1.55E+12	1.11E+13	1.17E+13	1.17E+09	1.17E+09	1.17E+09	2.34E+11	1.40E+12	1.01E+13
合計	Bq/d	9.61E+15	2.34E+12	9.61E+11	9.61E+11	1.92E+14	1.15E+15	8.26E+15	8.69E+15	2.11E+12	8.69E+11	8.69E+11	1.74E+14	1.04E+15	7.47E+15
備考		Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン
			移行率 1.00E-04	移行率 1.00E-04	移行率 1.00E-04	2%	12%			移行率 1.00E-04	移行率 1.00E-04	移行率 1.00E-04	2%	12%	

図4.2.24 大型プラントA B S (PUREX法)



物流番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
物流名称		Pu17.0%	脱硝	焙焼還元	成形	DS	CS	集合体	Pu26.5%	脱硝	焙焼還元	成形	DS	CS	集合体
成分	単位	硝酸溶液	オフガス	オフガス	オフガス			貯蔵	硝酸溶液	オフガス	オフガス	オフガス	DS	CS	貯蔵
U	Bq/d	2.62E+10	2.62E+06	2.62E+06	2.62E+06	5.25E+08	3.15E+09	2.26E+10	1.28E+10	1.28E+06	1.28E+06	1.28E+06	2.56E+08	1.53E+09	1.10E+10
Pu	Bq/d	9.60E+15	9.60E+11	9.60E+11	9.60E+11	1.92E+14	1.15E+15	8.25E+15	8.68E+15	8.68E+11	8.67E+11	8.67E+11	1.74E+14	1.04E+15	7.46E+15
Np	Bq/d	2.56E+10	2.56E+06	2.56E+06	2.56E+06	5.11E+08	3.07E+09	2.20E+10	1.48E+10	1.48E+06	1.48E+06	1.48E+06	2.97E+08	1.78E+09	1.28E+10
Am	Bq/d	1.21E+15	1.21E+11	1.21E+11	1.21E+11	2.43E+13	1.46E+14	1.04E+15	7.04E+14	7.04E+10	7.04E+10	7.04E+10	1.41E+13	8.45E+13	6.05E+14
Cm	Bq/d	3.04E+15	3.04E+11	3.04E+11	3.04E+11	6.09E+13	3.65E+14	2.62E+15	1.77E+15	1.77E+11	1.77E+11	1.77E+11	3.53E+13	2.12E+14	1.52E+15
Ru	Bq/d	1.37E+12	1.37E+12						1.24E+12	1.24E+12					
その他FP	Bq/d	5.07E+15	5.07E+11	5.07E+11	5.07E+11	1.01E+14	6.08E+14	4.36E+15	4.58E+15	4.58E+11	4.58E+11	4.58E+11	9.16E+13	5.50E+14	3.94E+15
合計	Bq/d	1.89E+16	3.27E+12	1.89E+12	1.89E+12	3.78E+14	2.27E+15	1.63E+16	1.57E+16	2.82E+12	1.57E+12	1.57E+12	3.15E+14	1.89E+15	1.35E+16
備考		Pu17.0% 製造ライン	Pu17.0% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu17.0% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu17.0% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu17.0% 製造ライン 2%	Pu17.0% 製造ライン 12%	Pu17.0% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン	Pu26.5% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu26.5% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu26.5% 製造ライン 移行率 1.00E-04	Pu26.5% 製造ライン 2%	Pu26.5% 製造ライン 12%	Pu26.5% 製造ライン

図4.2.25 大型プラントA B S (TRUEX法)

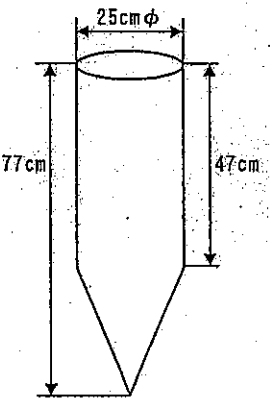
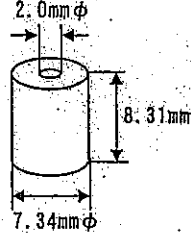
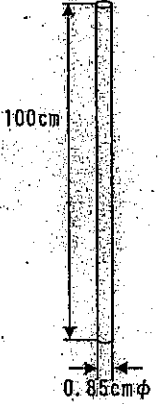
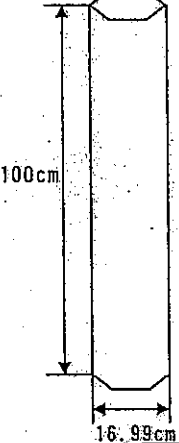
		Pu/U溶液貯槽	成形ホッパー	ペレット	燃料要素	集合体
解析体系						
解析条件		-	自然対流伝熱仮定 表面総括伝熱係数: $U=5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 取扱重量: 14kgHM 表面積 $A=5462\text{cm}^2$	自然対流伝熱仮定 表面総括伝熱係数: $U=5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 取扱重量: $3.75 \times 10^{-3}\text{kgHM}$ 表面積 $A=3.37\text{cm}^2$	自然対流伝熱仮定 表面総括伝熱係数: $U=5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 取扱重量: 0.43kgHM 表面積 $A=267\text{cm}^2$ (上下の面は含まない。)	自然対流伝熱仮定 表面総括伝熱係数: $U=5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 取扱重量: 116kgHM 表面積 $A=5097\text{cm}^2$ (上下の面は含まない。)
発熱量 q	PUREX	- (3.93W/kgHM)	$4.73 \times 10^3\text{kcal/h}$ (3.93W/kgHM)	$1.27 \times 10^{-2}\text{kcal/h}$ (3.93W/kgHM)	1.44kcal/h (3.93W/kgHM)	$3.91 \times 10^3\text{kcal/h}$ (3.93W/kgHM)
	TRUEX	- (18.22W/kgHM)	$2.19 \times 10^3\text{kcal/h}$ (18.22W/kgHM)	$5.87 \times 10^{-2}\text{kcal/h}$ (18.22W/kgHM)	6.70kcal/h (18.22W/kgHM)	$1.82 \times 10^3\text{kcal/h}$ (18.22W/kgHM)
表面温度	PUREX	-	42°C	33°C	36°C	179°C
	TRUEX	-	105°C	60°C	75°C	737°C
備考		本設計は発熱量17W/kgHMの場合の冷水供給系の能力について設計検討を行っており、TRUEXの場合でも除熱が可能であると考えられる。 室温25°Cを考慮。		室温25°Cを考慮。		室温25°Cを考慮。 集合体を横置きしたときに想定される表面温度。縦置きにすると、ラップ管の上下からの対流が期待できるため、左記の燃料要素の表面温度に近い値になるものと想定される。

図4.2.26 崩壊熱による表面温度評価結果

< 炉心燃料製造ライン >

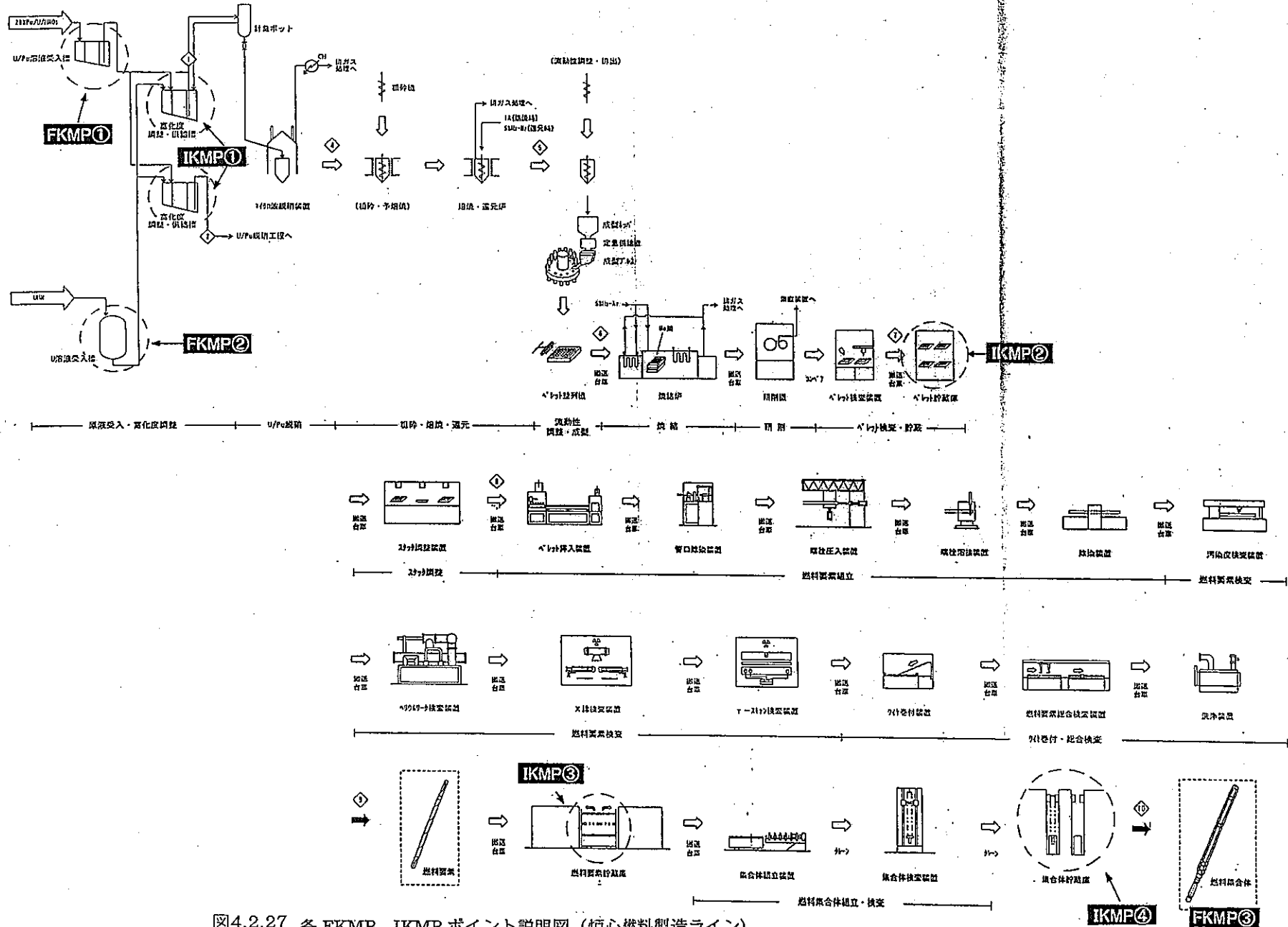


図4.2.27 各FKMP、IKMPポイント説明図(炉心燃料製造ライン)

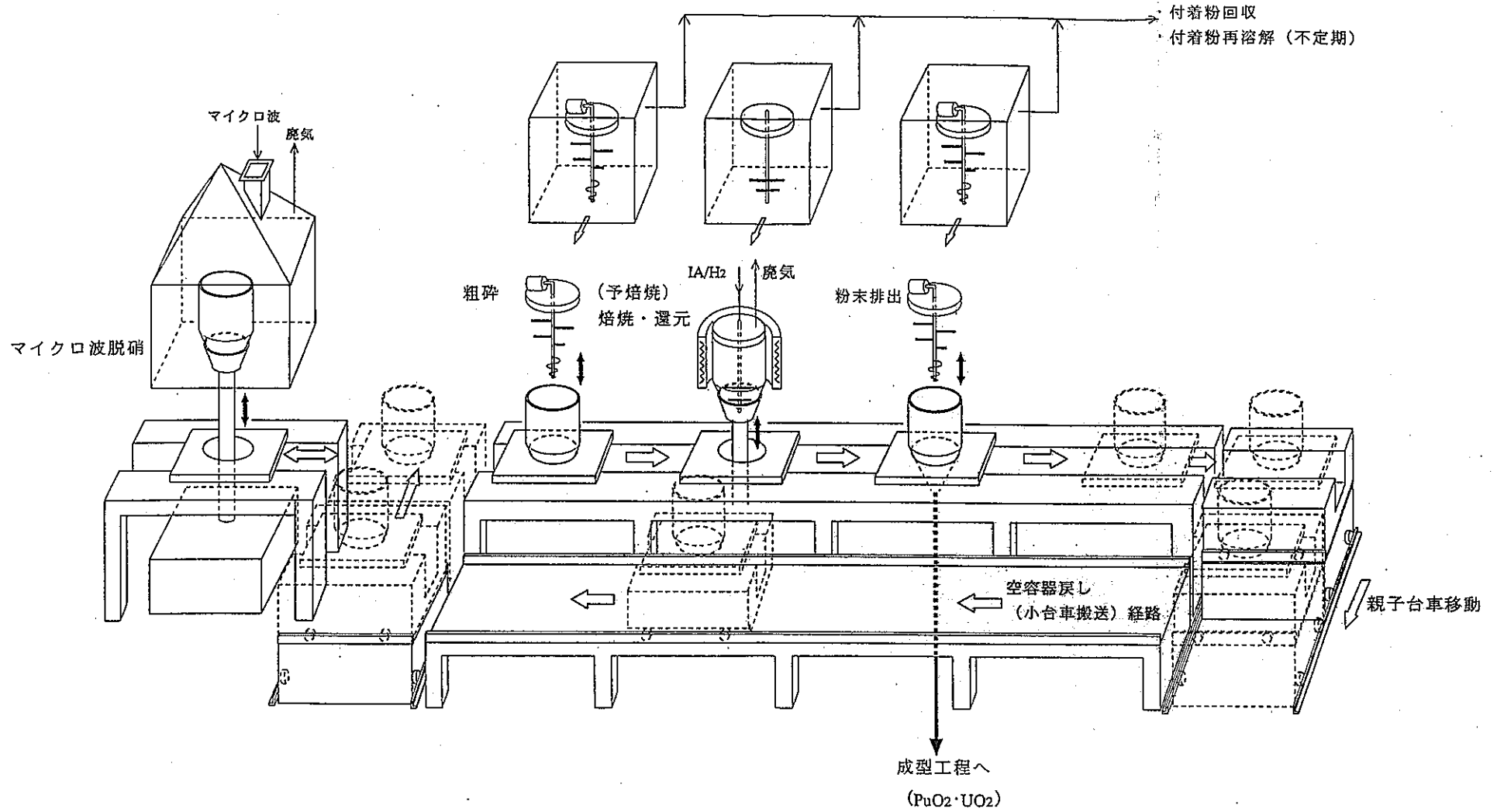
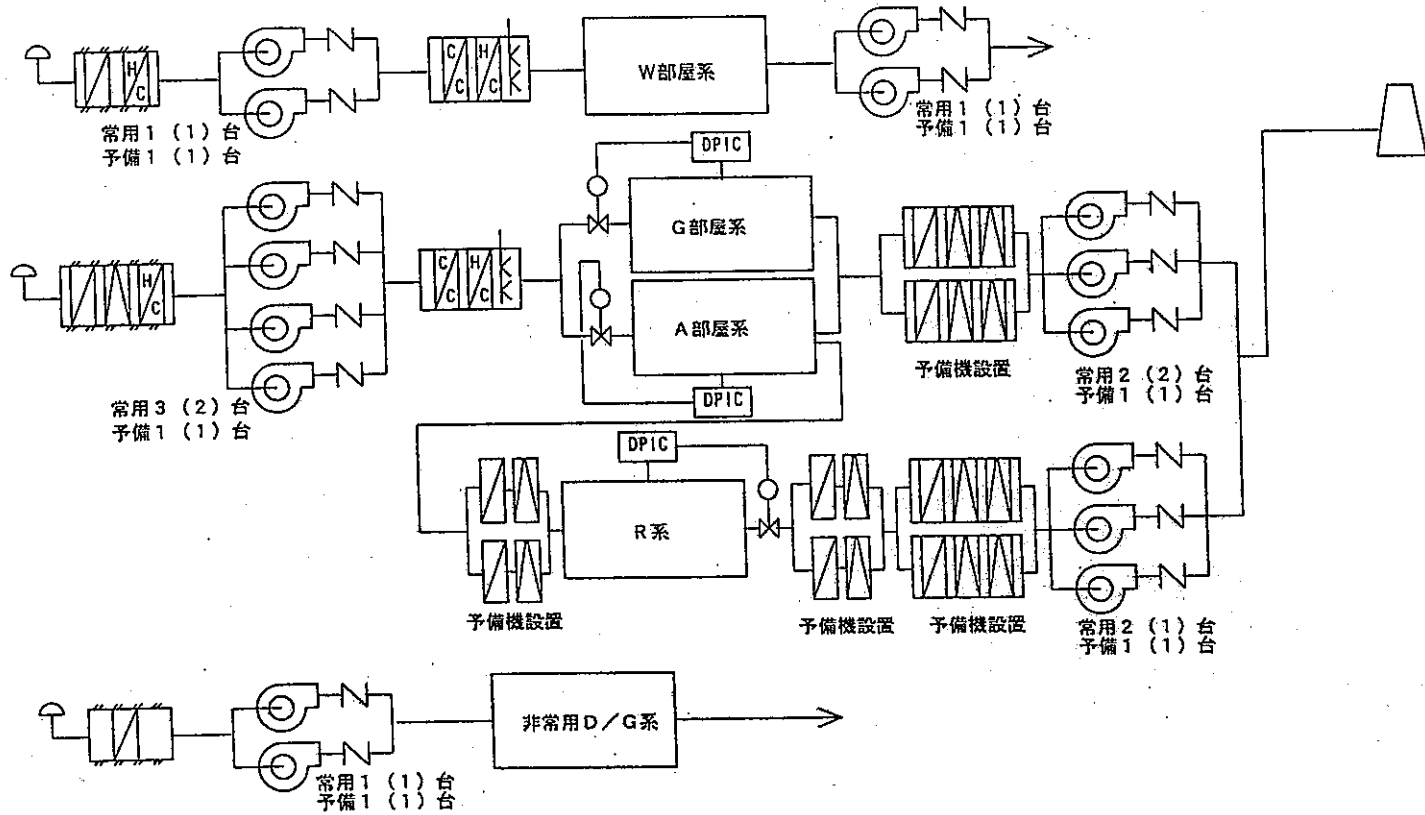


図4.2.28 U/Pu脱硝設備 (脱硝～粉末排出までの流れ)



注記：各送排風機の（ ）内に示す機器設置台数は
50tMH/y時のものである。

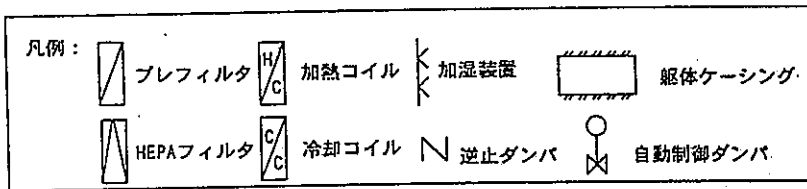


図4.2.29

低除染／ペレット燃料製造プラント
換気空調系統図

建屋断面イメージ図

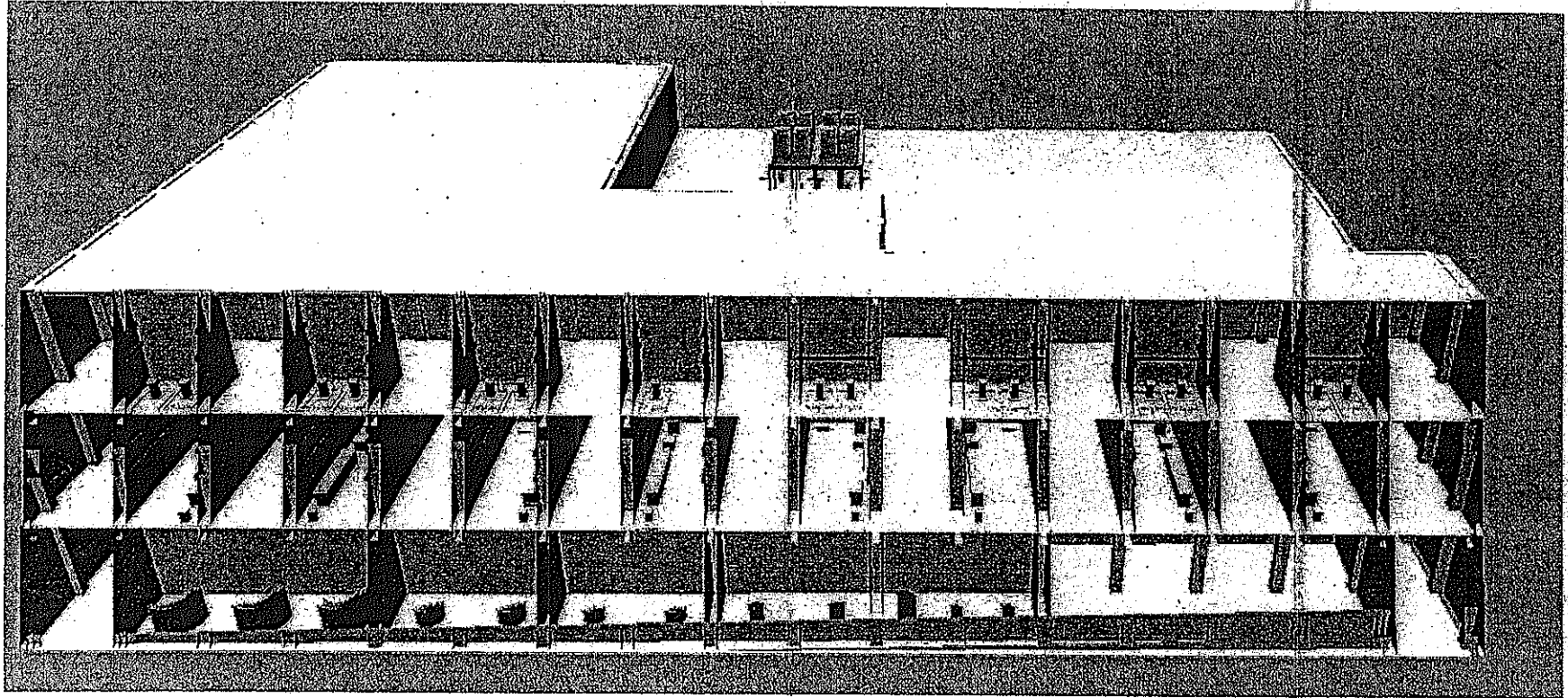


図4.2.30

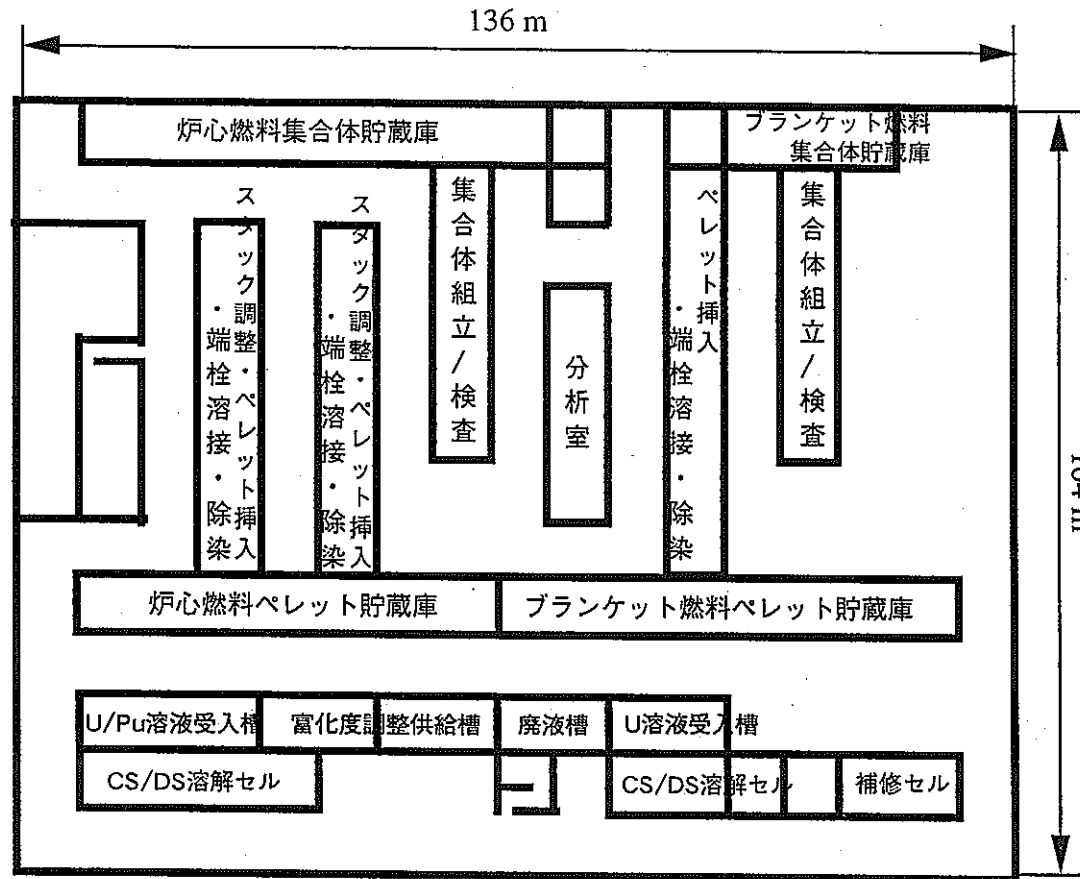


図4.2.31 低除染/ペレット燃料製造プラント セル内機器配置図 (200tHM) B1F平面

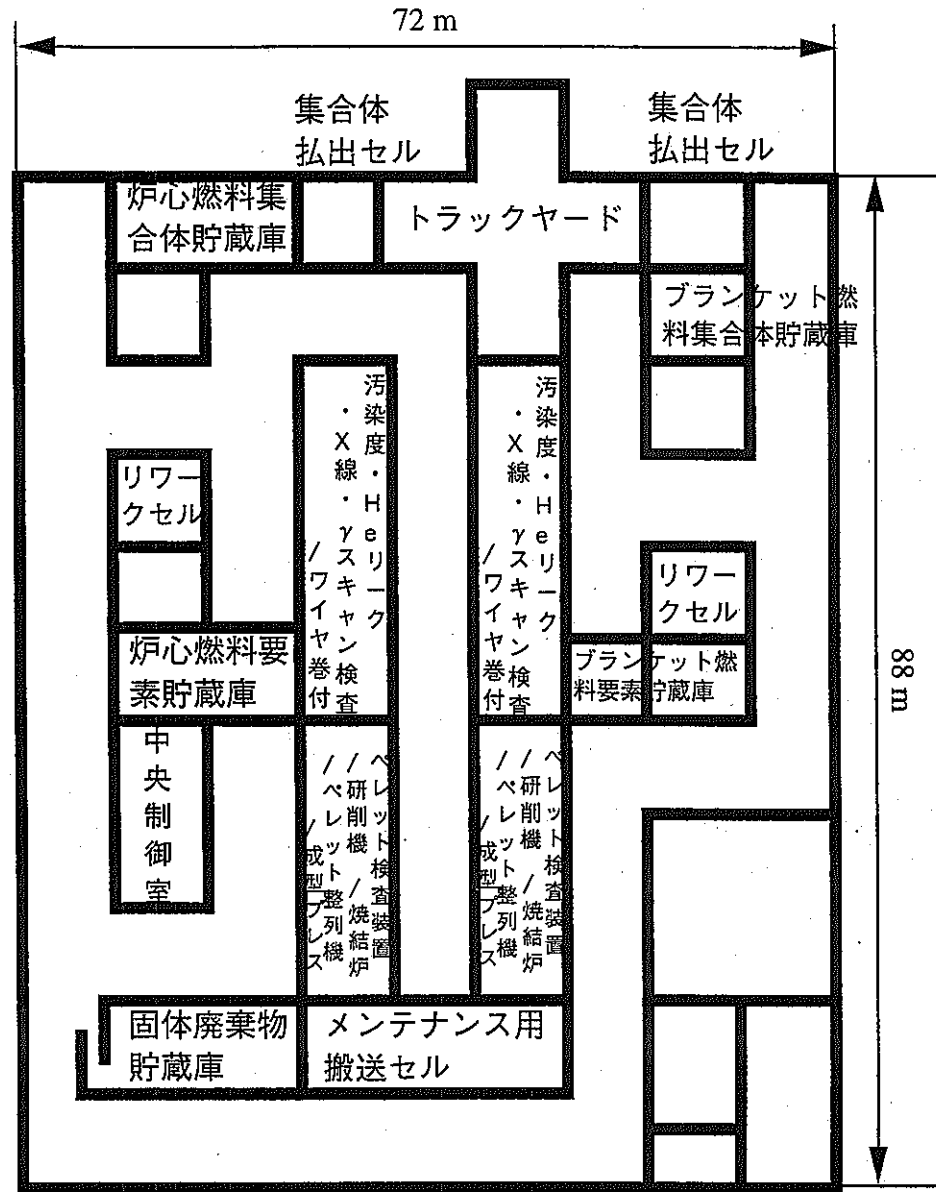


図4.2.32 低除染/ペレット燃料製造プラント セル内機器配置図 (50tHM) 1F 平面

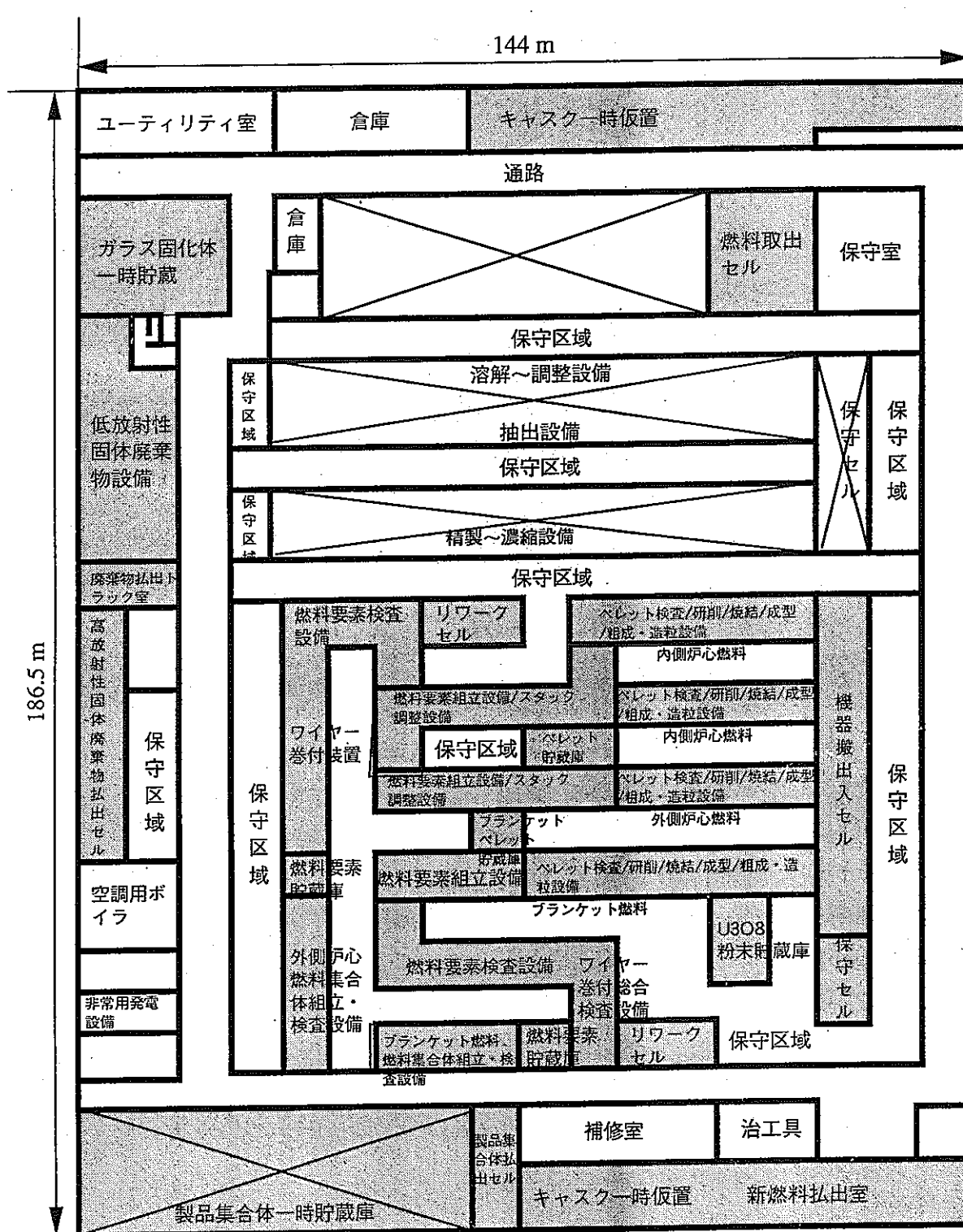


図4.2.33 Purex最適化システム (200tHM/y) 全体機器配置図 1F

4.2.2 窒化物燃料に対する各候補概念の検討状況

(1) 簡素化ペレット (グローブボックスでの製造)

(i) プロセスの概要

窒化物燃料製造プロセスには、金属を出発物質として水素化物経由で窒化させる方法と、酸化物を出発物質とする炭素熱還元法の2つがある。現時点では前者は実験室規模の試験までに限られており、量産化への適用については不明なのに対して、後者は量産用として現実的なプロセスと考えられている。炭素熱還元法は黒鉛粉末を混ぜた酸化物粉を1,500℃前後の N_2-H_2 雰囲気下で還元し窒化物へ変換する方法である。

窒化物燃料の製造試験は、PNC(動燃)時代にプルトニウム燃料第一開発室で実施(100g/バッチ程度のスケール)した経験があるものの、十分なパラメータ条件の下での製造試験を実施するまでには至っていない。図4.2.34に簡素化燃料プロセスに炭素熱還元法を適用した場合の窒化物燃料製造フローを酸化物燃料の簡素化燃料プロセスと比較して示す。図4.2.35ではペレット製造工程までの製造設備を示す。

酸化物燃料の簡素化プロセスでは、転換工程におけるPu富化度調整と高流動性粉末への転換を行うことにより、従来型プロセスにおけるボールミル粉碎工程、均一化混合工程、造粒工程を廃し、プロセスの簡略化が図られる。

一方、窒化物燃料の場合、簡素化プロセスの特徴を活かすためには、炭素熱還元で得られた焼結体を僅かに破碎しただけで焼結性と流動性に優れた顆粒が得られなければならない。しかし、炭素熱還元反応(1,500℃前後の高温下で行われる)で得られる窒化物は焼結がかなり進んだタブレットであり、このような焼結体から高密度のペレットを製造するための粉末を得るには、酸化物に比べて極めて長い(24~48時間)ボールミル粉碎が不可欠となる。さらに、長時間のボールミル粉碎を行った微粉末は流動性が悪いため、造粒工程が必要となる。結果的に、タブレットから直接再成型した際のペレット密度が低いという問題が解決されない限り、簡素化プロセスの概念を窒化物に適用した場合、転換時のPu富化度調整の部分がわずかに簡素化されるにとどまる。

ピン加工組立工程については、Naボンド型燃料を採用した場合、米国ANLのNaボンド型金属燃料で採用された概念が考えられる。あらかじめ必要重量となるように切断されたNaワイヤーと窒化物ペレットを被覆管に充填した後、250℃に温めNaを溶融させる。その後溶接工程に送られ、垂直方向の状態でも端栓溶接される。Naボンド型燃料製造の課題としては、大規模製造を想定したNaハンドリング技術やNa充填技術の複雑化(例えば、燃料ピンを温めるための巨大な加熱槽とその安全対策など)、Naと空気や水蒸気等との反応を阻止するために不活性雰囲気を保つための包蔵設備概念の構築、Na廃棄物の処理工程の追加などが挙げられる。

(ii) システムの経済性評価

窒化物燃料製造プロセスを現状のペレット製造プロセスに適用した場合の経済性に

ついて述べる。コスト評価は、過去にFBR新型燃料評価研究⁽¹⁾で実施しており、炭素熱還元工程の追加および窒化物粉末を取り扱うグローブボックスのアルゴン雰囲気化等により、窒化物燃料の加工コストは酸化物燃料の約1割高と試算している。なお、Na ボンド型燃料採用に伴うコスト増加の評価は今回行わなかった。

N-15の濃縮コストを考慮すると、さらに約1万円/kgHM（気相吸着法、3,000kg/年規模）～約16万円/kgHM（化学交換法、4,500kg/年規模）の増加分を加工コストに上乘せする必要がある。ここでは、再処理工程でのN-15の回収、再利用は考えていない。

N-15の回収、再利用を考えた場合、低濃度領域（自然同位体存在比程度）からの濃縮の必要性がないため、高濃度領域における濃縮において、比較的安定に濃縮できコストもかからないと思われる化学交換法やイオン交換法を利用することも考えられる。例えば、低濃度領域の濃縮に気相吸着法、高濃度領域の濃縮に化学交換法という2段階の濃縮システムを採用すると、再処理から回収したN-15はシステムの途中からフィードして、化学交換法により99%以上に濃縮することが考えられる。

(iii) システムの安全性評価

窒化物燃料の取り扱いに際しては、酸化に対する注意が必要である。JNCが過去に行ったウラン窒化物に係る研究では、120分間のボールミル粉碎を行った粉末が常温の空气中で発火した事例や、JNC内部で実施したUN（窒化ウラン）およびMN（Pu 富化度20%のU-Pu 窒化物）の試験では、乳鉢粉碎した粉末が常温で発火するという結果も得られている。

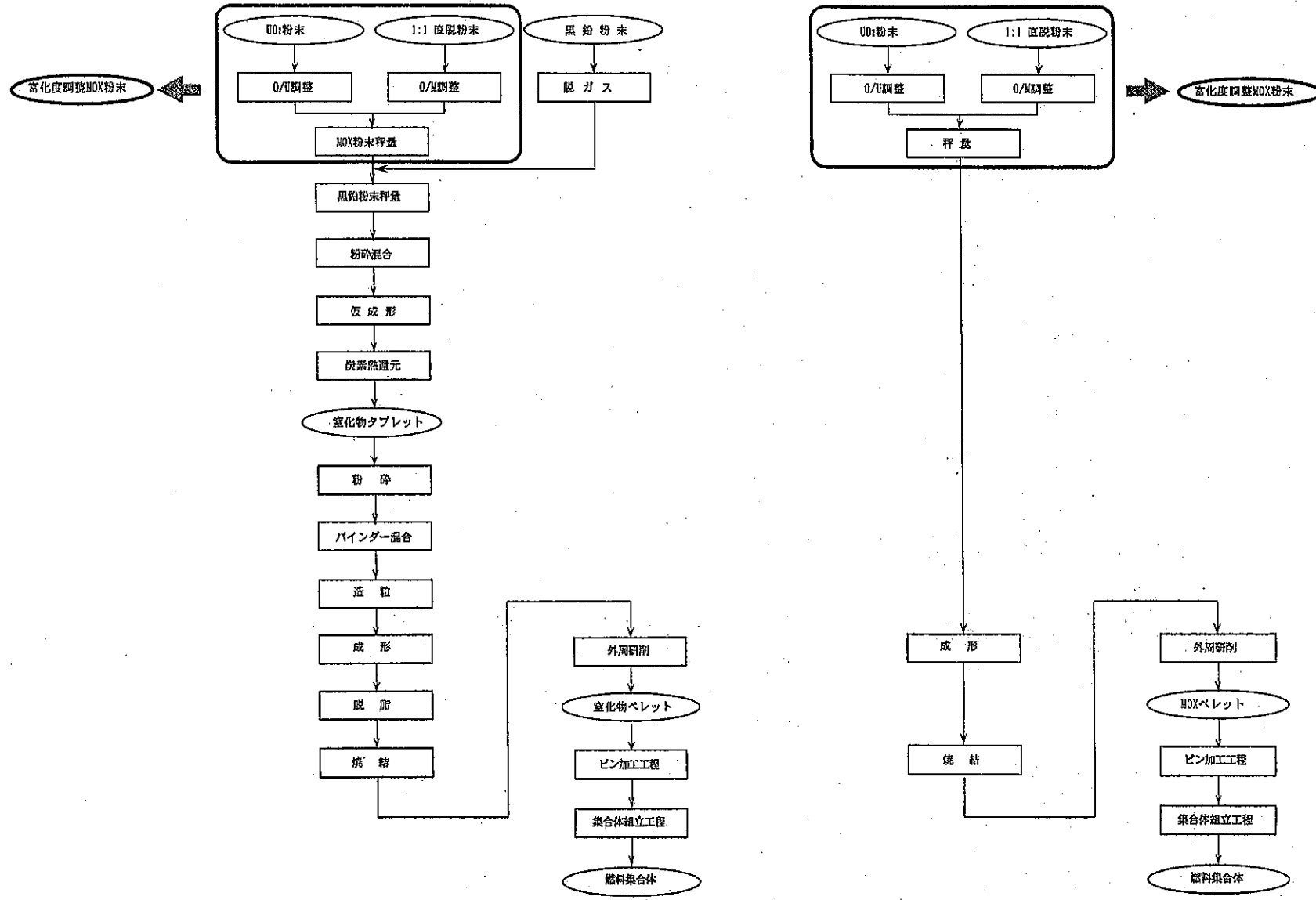
このため、粉末状態の窒化物の取り扱いに際しては常温での発火の潜在的危険性があり、これを回避するために粉末工程等の不活性雰囲気化が必要である。この場合、グローブボックスレベルの包蔵性で粉末の発火に対する安全ロジックを構築できるかどうかは課題となる。常温発火性の核物質の大量取り扱いともなれば、グローブボックスより高度な包蔵性を有するセル構造等が求められる可能性も考えられる。

一方、同じ研究によると、空气中におけるペレットの酸化開始温度が300℃以上であるとの試験結果が得られていることから、焼結ペレット以降については空气中での取り扱いが可能であると考えられる。

Na ボンドを採用した場合、Na および燃料ペレットの充填と端栓溶接は全て不活性雰囲気グローブボックスで行う必要が出てくる。粉末工程と同様、Na-空気、Na-水反応等に対する安全ロジックを構築できるかどうかは課題となる。

(iv) システムの環境負荷評価

廃棄物発生量については、炭素熱還元の前と後に、粉碎 → 混合 → 成形 → 焼成の作業が2回必要になるため、ボックス内飛散等により廃棄物系に移行する核物質の量は、単純計算して酸化物燃料の2倍になることが予想される。また、Na ボンドを採用した場合のNa 廃棄物の発生も考慮する必要がある。



(a) 窒化物燃料製造工程

(b) 酸化物燃料製造工程

図4.2.34 窒化物燃料製造プロセスフロー (酸化物燃料との比較)

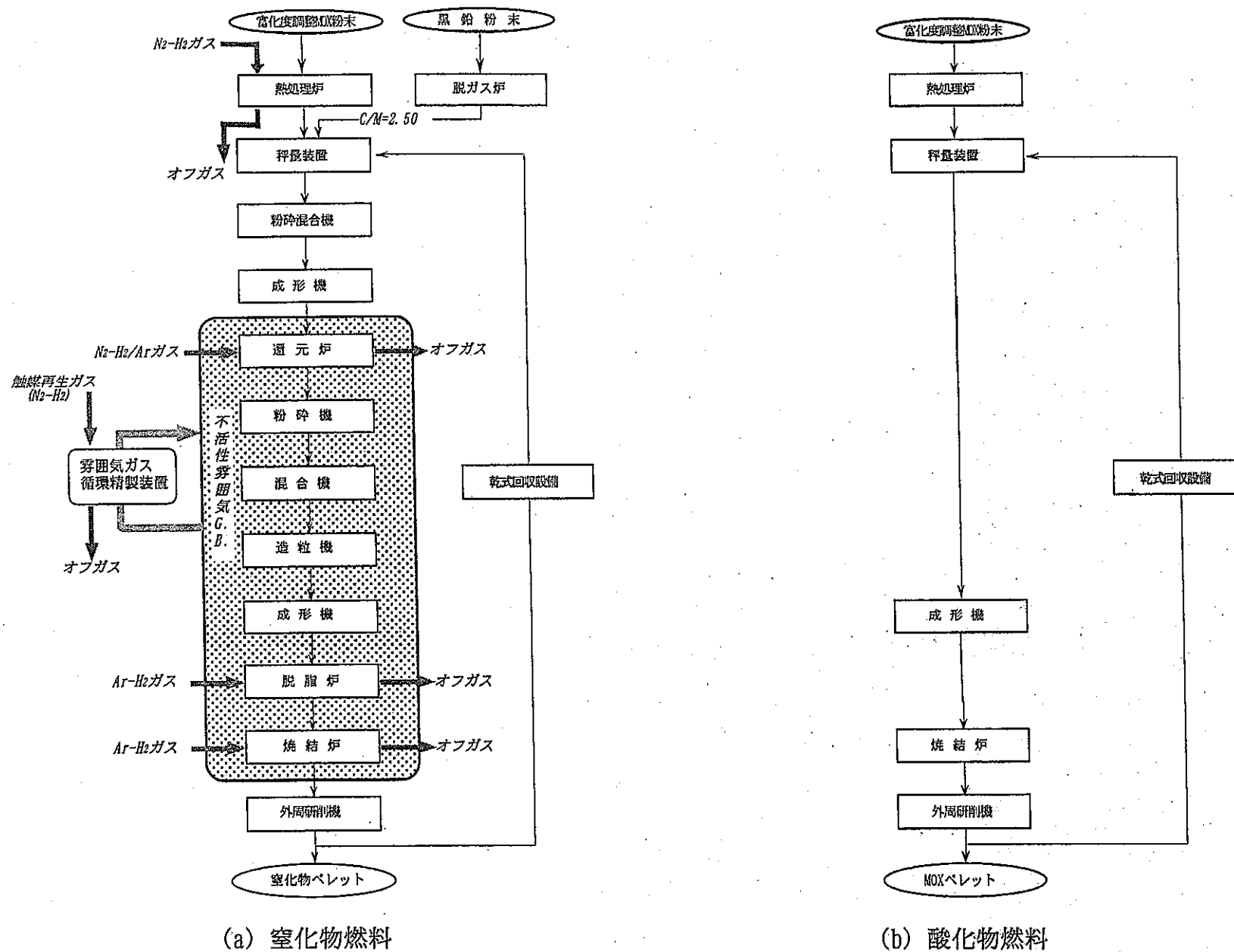


図4.2.35 窒化物燃料ペレット製造設備フロー (酸化物燃料との比較)

(2) N-15 濃縮コスト評価

(i) N-15 濃縮の必要性

窒素の安定同位体にはN-14 とN-15 があり、天然の窒素は前者が 99.634%、後者が 0.366%含まれている。しかし、N-14 はN-14 (n, p) C-14 の反応断面積が大きく、炉内における中性子経済の悪化やC-14 自体が放射性核種であるため、窒化物燃料にはN-15 濃縮窒素を使用することが望ましいと考えられている。酸化燃料の窒素不純物仕様 200ppm に相当するようにN-14 を低減させるために必要なN-15 の濃縮度としては 99.7%程度と考えられる。^[1]

窒素の濃縮 (=同位体分離) は可能であり現に工業化されているが、その需要はトレーサー等に限定されている。その生産量は高々数十kg/年程度で、価格的にも約 11 万円/g (1992 年調査結果) と極めて高価である。他方、窒化物炉心の実用化時代には、新燃料および取替燃料用に ton/年規模のN-15 が必要になると考えられ、量産の実現性とその場合の濃縮コストを評価することは極めて重要である。

一般に窒素のような軽元素の同位体分離では、化学交換法や低温蒸留法によって 1.023~1.055 程度の比較的大きな分離係数が得られる反面、遠心分離法やガス拡散法は分離係数が同位体間の質量数差に依存するため不向きである。

今回、化学交換法と気相吸着法を対象にコスト評価の結果をまとめた。

(ii) NITROX化学交換法

化学交換法の中で最も分離係数大きい一酸化窒素 - 硝酸化学交換法 (NITROX法) について、プラントの概念設計と経済性評価を行った。

NITROX法における反応は次式で示される。



PNCでは 1991~1992 年度にかけて、本法を用いたN-15 の量産プラントの概念設計とその際の量産コスト評価を実施した^[2]。図 4.2.36 にNITROX法システムの概念を示す。評価条件は、濃縮度 90%~99.7%、生産量 100 kg/年~4,500 kg/年とした。4,500 kgは 100 万 MWe 級 FBR 実証炉の窒化物炉心およそ 3 基分に相当するN-15 の量である。

評価の結果、N-15 の濃縮コストは、上記の範囲では生産量、濃縮度にほとんど依存せず約 20 ドル/g となることが分かった。NITROX法では、 HNO_3 を NO として還流するための還流剤として SO_2 を使用し、その副生成物として H_2SO_4 が発生する。この H_2SO_4 の売却益を見込む場合、濃縮コストは約 15 ドル/g に下がると予想された。量産効果がほとんど得られなかった理由は、全濃縮コストの約 40%を還流剤である SO_2 の購入費が占めているためである。また、濃縮度による差が少なかったのは、低濃縮部に比べて高濃縮部の物量が極端に減るためである。

副生成物の H_2SO_4 の売却利益を含まずかつ人件費と土地取得費を考慮した場合のN-15 の濃縮コストは、生産量 4,500 kg/年で 24 ドル/g となる。窒化物燃料 1 kg HM

当たりN-15が約60g必要であるため、窒化物燃料1kg HM当たりの単価は約16万円/kg HM (1ドル=110円)になる。

なお、4,500kg/年のN-15の生産に必要な HNO_3 、 SO_2 ならびに副生成物として発生する H_2SO_4 の量が本国内の硝酸、硫酸の年産量と同オーダーであることを考慮すると、既存のインフラに及ぼす影響が大きい。

(iii) 気相吸着法

気相吸着法とは、ゼオライトへのアンモニアの吸着において、ゼオライト格子内のガスの通り道(窓)の大きさをアンモニアの分子径(3.8Å)に近接させると、窒素14アンモニアと窒素15アンモニアの吸着速度の大きさに差が生じることを利用して、同位体分離を行うものである。さらに、高速圧カスウィング法を適用して吸着速度の大きな窒素14アンモニアがゼオライトに吸着され、カラムの塔頂からは吸着速度の遅い窒素15アンモニアが濃縮されて流出することが確認されている。吸着材の候補としては、Na-A型ゼオライトまたはNaの一部をKに置換えかつ高温で熱処理を行うことにより得られる分子ふるい型吸着材Na-K-A型ゼオライトがある。Na-K-A型ゼオライトの窓の直径は3.5~4Åに調整されている。気相吸着法の特徴としては、カスケードを組む必要がなく原理的には1段のカラムにより90~99.9%に濃縮された窒素15アンモニアを回収することができる点にある。同位体分離の原理を図4.2.37に、N-15/N-14アンモニア分離評価試験の概要を図4.2.38に示す。

気相吸着法を用いたN-15の量産プラントの概略的な量産コスト評価を実施した。^[3] 評価条件は、濃縮度90%~99.9%、生産量1,500kg/年~12,000kg/年とし、建設費および運転費の算出にはファクター法を用いた。ファクター法とは、設備を構成する主要装置類の購入・据付費を基準として、付随する設備・施設費をはじめ年間変動費や固定費について、経験的に設定した比率(ファクター)をもって概算する方法である。

評価の結果、N-15の濃縮コストは以下の通りとなった。(人件費を含むケース)

- ・濃縮度90%の場合：60円(12,000kg/年規模)~140円/g(1,500kg/年規模)
- ・濃縮度99%の場合：90円(12,000kg/年規模)~190円/g(1,500kg/年規模)
- ・濃縮度99.9%の場合：120円(12,000kg/年規模)~240円/g(1,500kg/年規模)

生産規模3,000kg/年では、100円(濃縮度90%)~180円/g(濃縮度99.9%)となり、窒化物燃料1kg HM当たりの単価は約0.6~1.1万円/kg HMになる。

原料のアンモニアの大部分は元のプラント(本N-15濃縮プラントは既存のアンモニア製造プラントに隣接する形で建設することを想定しており、ここで言う元のプラントとはアンモニア製造プラントのこと)へ戻されるため、原料費として計上するのはN-15濃縮製品として払い出されたアンモニア量のみを考えればよいことになる。原料アンモニア単価は大口需要家向け液体アンモニア価格が115~130円/kgであるの

る程度となる。

気相吸着法によるN-15濃縮コストは、NITROX法に比べ1桁程度大幅に下回ることが予想されたものの、今回の経済性評価は、50gの吸着剤を用いた小型カラム基礎試験¹⁾を根拠としており、以下の問題点がある。

- ・グラムオーダーの試験からトンオーダーのプラントの経済性を推測している
- ・濃縮度 ($^{15}\text{NO}/(^{15}\text{NO}+^{14}\text{NO})$) が2～40%と経済性評価条件 90～99.9%に比べて低い
- ・濃縮度のデータに1桁程度のばらつきがある

このため、やや精度の欠ける楽観的な評価と思われる。今後、さらに規模の大きな試験を行い、濃縮度90%以上の濃縮度を安定に生産する試験を基に経済性評価を詰めていく必要がある。

また、吸着材の品質管理や耐久性、アンモニアやヘリウムの回収系等の周辺機器など不確定な要因が数多くあり、今後さらに詳細な施設設計に基づいた経済性評価が必要な状況にある。

(参考文献)

- [1] 三島他 FBR新型燃料評価研究 (第2ステップ最終報告書)
PNC TN8410 94-201 (1994)
- [2] 遠藤他 NO-HNO₃化学交換法による窒素15濃縮コスト評価委託研究 (II)
PNC TN8410 94-003 (1994)

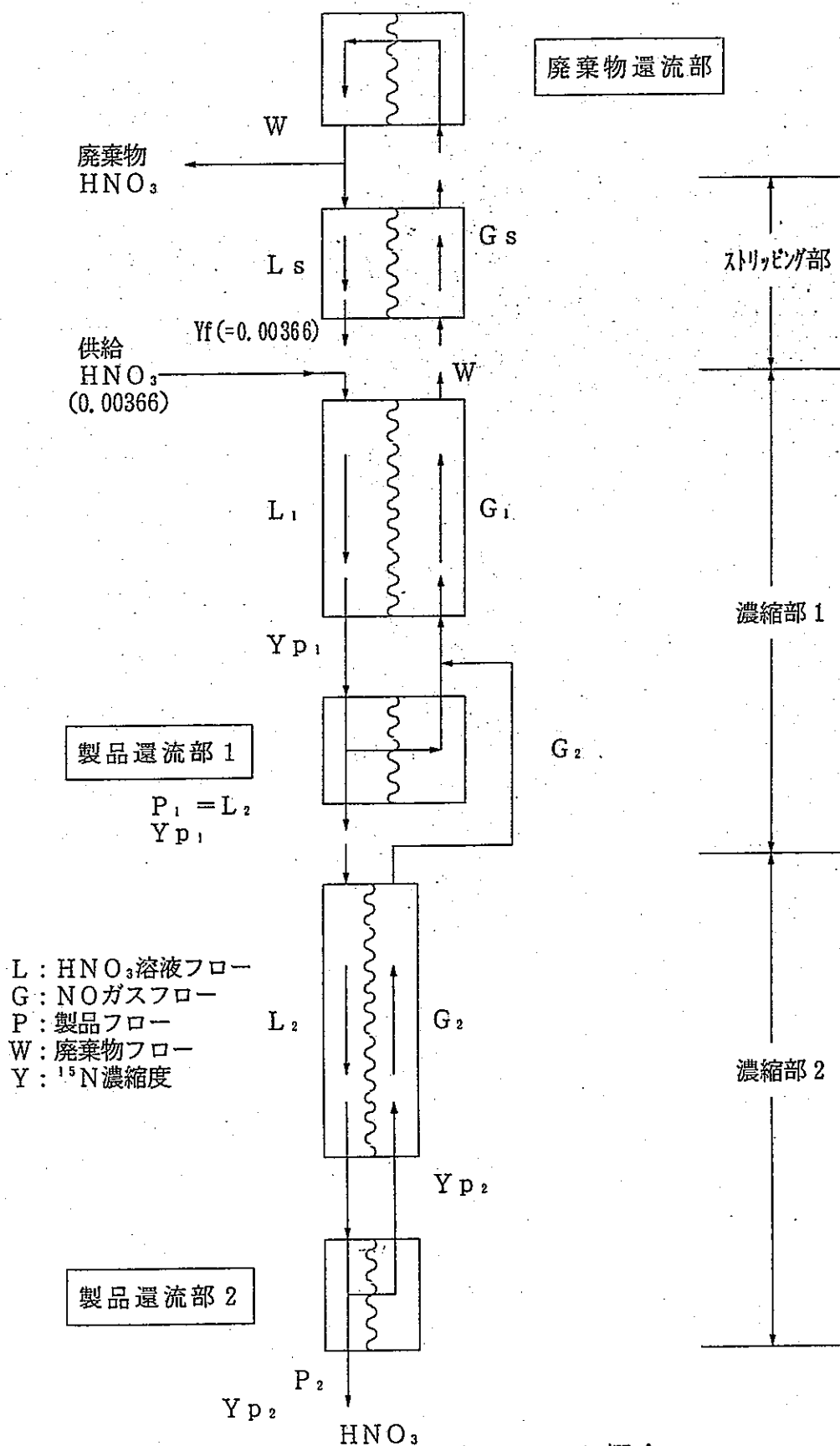
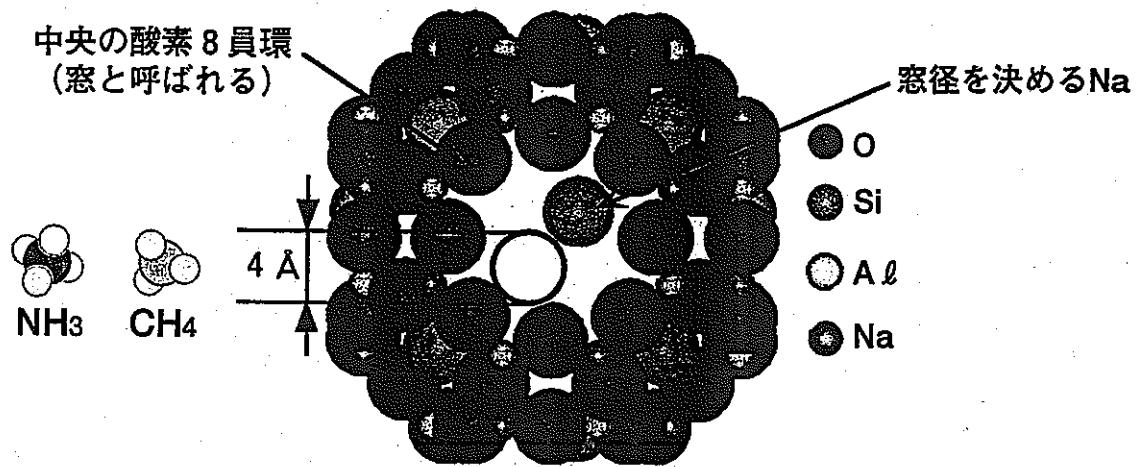


図4.2.36 Nitrox法システム概念

吸着ガスの吸着速度差を利用した同位体分離



速度分離型吸着剤の結晶構造 (Na-A型ゼオライト)

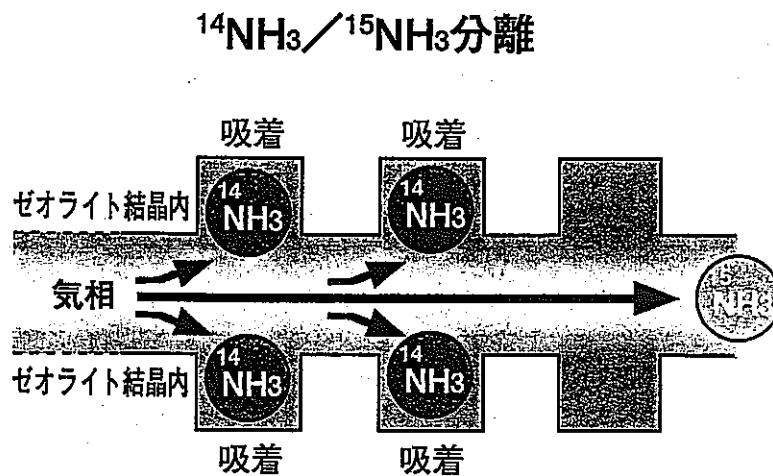


図 4. 2. 38 気相吸着法を用いた同位体分離の原理

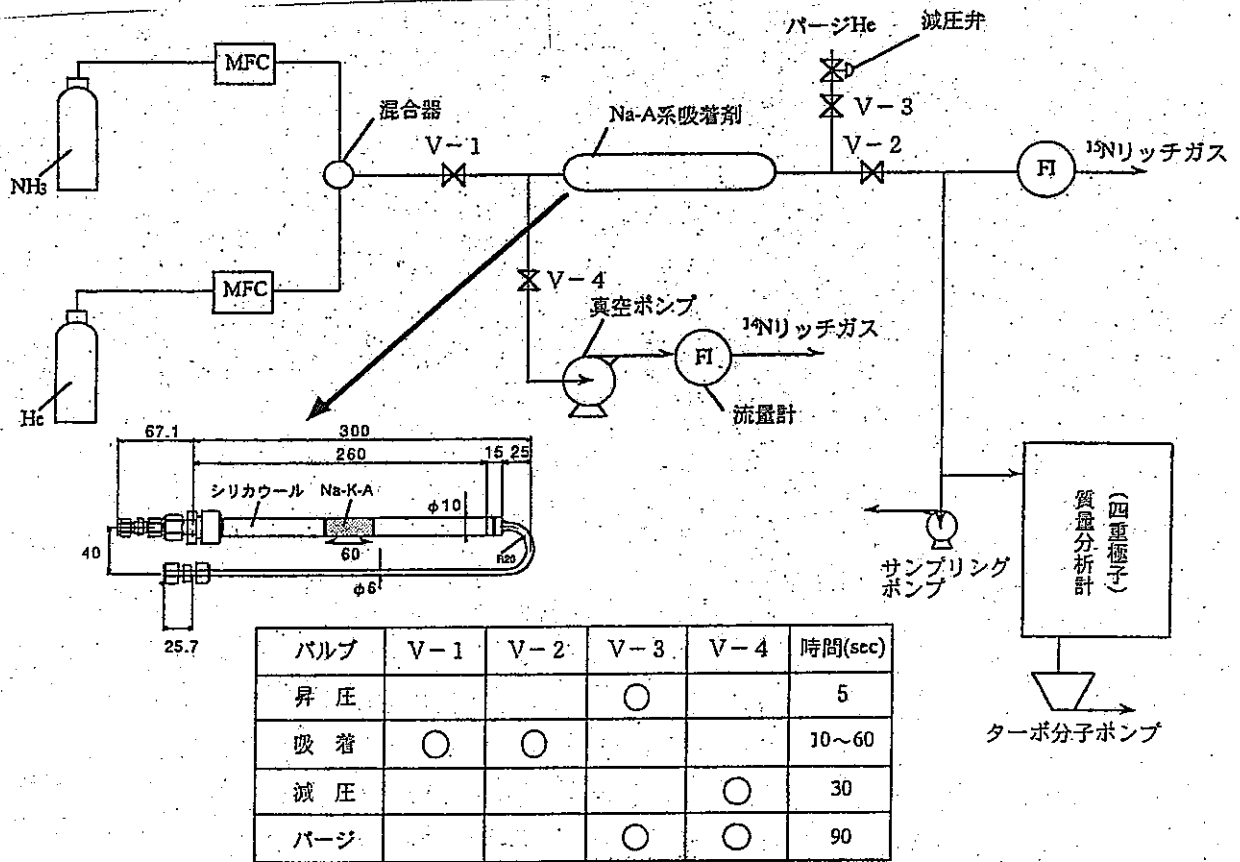


図4.2.38 N-15/N-14 アンモニア分離評価試験の概要

4-3 振動充填法の検討

4.3.1 MOX 燃料に対する各候補概念の検討状況

(1) 湿式再処理との組み合わせ

(a) 設計の前提条件と基本方針

簡素化 PUREX 再処理システムと MOX 燃料製造システムとの一体化プラントについて、経済性向上策を中心とする最適化を考慮したりサイクルシステムを設定し、設計検討を行った。

再処理システムと燃料製造システム及び共通付帯設備等は単一建屋にあるものとし、一体化によって主要プロセス設備と関係付帯設備、放射性廃棄物の処理設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置することを考慮した。

燃料製造システムの設計範囲としては、再処理工程より受け入れた U/Pu 混合溶液について、炉心燃料、ブランケット燃料のそれぞれの仕様に合致した組成になるよう、U,MA を追加して富化度調整を行い、炉心燃料は、ゾルゲル法による顆粒製造後、またブランケット燃料は脱硝、酸化転換、造粒後、振動充填燃料を製造する工程と、燃料集合体貯蔵、払い出し工程と製造工程で発生するオフガス処理工程、不良製品回収工程と再処理システムとの共通付帯設備までとした。

主要な設計条件を以下に示す。

- ①製造規模：200tHM/年
- ②燃料の基本仕様：炉心燃料集合体とブランケット燃料集合体の基本仕様と燃料要素概観図を表 4.3.1、図 4.3.1 に示す。
- ③施設運転：年間の定期検査、PIT 等による計画停止期間 80 日として運転日数を算定。ただし、施設の始動、停止、トラブル等の計画外停止期間は含まない。
- ④設備稼働率、処理能力：設備稼働率、運転計画を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。
- ⑤回収率：U,Pu の回収率は 99%以上を目標とする。有意な損失が想定される工程は、回収設備を考慮する。なお、顆粒製造工程で発生するダークスクラップは再処理の溶解工程に戻すこととする。
- ⑥貯蔵容量：燃料集合体一時貯蔵容量は、1 年分とする。
- ⑦保守：プラント稼働率向上のための保守期間の短縮、作業員の被ばく低減を目的として、保守・補修等の頻度が高く、または除染困難な機器等で、直接保守が容易でないセルは遠隔保守セルとし、遮へい窓や ITV を通してマニピュレーター、インセルクレーン等により操作可能な設計とする。

(b) プロセス設計

前記の設計の前提条件と基本方針のもとに検討した燃料製造プロセスフローダイアグラムと主要な物流を図 4.3.3 に、また各工程の基本的な仕様とその設定の考え方について以下に示す。

① 原料受け入れ/調整工程

炉心燃料は、再処理工程から Pu 富化度 26.5% の U/Pu/MA 混合溶液を受け入れ、ゾルゲル法による顆粒燃料製造に適した組成に調整する。内側/外側炉心燃料の Pu 富化度は 17%、26.5% に調整する。この調整に必要な U, MA は外部から入手し、組成調整後の混合溶液はゲル化工程へ移送する。

ブランケット燃料は、再処理からの U 濃縮液を脱硝、酸化転換を行い、これに外部から U_3O_8 を加え、組成調整のための混合を行って造粒工程へ移送する。

② 脱硝/酸化転換工程

ブランケット燃料用に、再処理からの U 濃縮液を電気ヒーターの加熱による流動床の連続脱硝処理設備で UO_3 に転換し、さらに焙焼炉で U_3O_8 にして造粒工程へ移送する。

③ ゲル化/造粒工程

炉心燃料は、ゾルゲル法で顆粒燃料を製造する。ブランケット燃料は酸化転換工程で得られた U_3O_8 を UO_2 に還元後、造粒を行い顆粒燃料を製造する。これらの顆粒は、焼結、分級工程を経て振動充填/燃料ピン加工工程へ移送する。なお、この工程で発生するダーティスクラップは再処理の溶解工程へ戻す。

④ 振動充填/燃料ピン加工工程

炉心燃料ピン加工では、下部軸ブランケット UO_2 燃料を振動充填した後に、メッシュ状の仕切り板を挿入して、MOX 燃料を振動充填し、さらに仕切り板を挿入して上部軸ブランケット UO_2 燃料を振動充填する。径ブランケット燃料ピン加工では、造粒後の UO_2 顆粒燃料を振動充填する。

これらの燃料ピンは、端栓溶接を行い、ラッピングワイヤを巻きつけた後、燃料集合体組み立て工程へ移送する。

⑤ 燃料集合体組立工程

加工された燃料ピンを燃料集合体に組み立てる。

⑥ 検査工程

顆粒燃料製造工程では、顆粒の化学成分、粒径、密度等の項目につい

て検査を実施する。

燃料ピン加工及び集合体組み立て工程では、ピンの欠陥、溶接部欠陥、充填密度、燃料ピン及び燃料集合体の表面汚染等の項目について検査を実施する。

⑦ 燃料集合体一時貯蔵、払い出し工程

製造された燃料集合体を乾式貯蔵システムで一時保管する。また、燃料集合体を一時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。

⑧ オフガス処理工程

顆粒燃料製造等で発生するオフガスを処理する。基本的には再処理施設での塔槽類オフガスと合わせて処理を行う。

⑨ 不良品回収工程

顆粒燃料製造工程でスペックアウトとなった燃料をリサイクルする。このうち、クリーンスクラップについては、乾式で工程の上流側へ、またダーティスクラップについては再処理の溶解工程へリサイクルを行う。

⑩ 再処理/燃料製造共通付帯設備

再処理と燃料製造工程から発生する中/低/極低放射性廃液及び低放射性固体廃棄物処理設備、再処理からの廃溶媒処理設備からなる。放射性廃液は性状別に分類し、それぞれに適した蒸発、分解、中和等の処理を行う。固体廃棄物処理は、焼却、溶融、固化処理を行い、処理された廃棄物は施設外へ搬出までの間、一時貯蔵する。

⑪ 建屋/ユーティリティ/共有設備

建屋には再処理主要設備/付帯設備、燃料製造設備、再処理/燃料製造共通付帯設備、ユーティリティ/共有設備を収容するものとし、単一建屋とする。ユーティリティ/共有設備としては、建屋換気設備、処理済廃液放出設備、受変電設備、非常用発電設備、中央制御設備、放射線管理設備、分析設備、試薬調整設備、用水/冷却水/蒸気/圧空/ガス類等供給設備、保守設備、消火設備、管理棟その他からなる。

(c) 設備機器設計

燃料製造プロセスにおける各工程設備機器毎に、設備機器の概要、物質収支と主要な機器リスト、設計図について以下に示す。

① 原料受け入れ/調整設備

本設備は、再処理からの U/Pu 混合溶液及び U 濃縮液を受け入れ、U/Pu 混合溶液については内側/外側炉心燃料用として各々の Pu 富化度に濃度調整してサンプリング分析を行った後に、ゲル化/造粒工程へ、また U 濃縮液

についてはサンプリング分析後にブランケット燃料用として脱硝/酸化転換工程へ送液するための設備である。

(i) 炉心燃料処理設備

再処理から送液される U/Pu 混合溶液を U/Pu 混合溶液受槽に受け入れ、外側炉心燃料はここでサンプリング分析を行い、所定の Pu 富化度 26.5wt%であることを確認後、スチームジェットにより払い出し槽へ送液する。内側炉心燃料は U/Pu 混合溶液受槽からスチームジェットで調整槽に送液し、また、Pu 富化度 17wt%に調整するため、U 溶液受槽からポンプで U 濃縮液を調整槽へ送液する。この調整槽でサンプリング分析を行い、所定の Pu 富化度 17.5wt%であることを確認してスチームジェットにより払い出し槽へ送液する。払い出し槽からは外側/内側炉心燃料ともエアリフトによりデミスタを経由してゲル化/造粒工程へ定量供給する。

(ii) 径ブランケット燃料処理設備

再処理から送液される U 濃縮液を U 濃縮受槽に受け入れ、ここでサンプリング分析を行った後、ポンプにより脱硝/酸化転換工程へ送液する。

② 脱硝/酸化転換設備

本設備は、原料受け入れ/調整設備より送液される U 濃縮液を脱硝、焙焼、還元し、 UO_2 粉末を製造する設備である。製造した UO_2 粉末は振動充填/燃料ピン加工工程へ移送する。また、脱硝時に発生するオフガスは NO_x や硝酸蒸気等を除去した後、再処理の塔槽類オフガス処理設備へ排出され、オフガス処理により発生する凝縮液は再処理の製品濃縮設備へ、洗浄廃液は再処理の酸回収設備へそれぞれ送液する。

原料受け入れ/調整設備より送液される U 濃縮液は、U 溶液受槽で貯留後、U 脱硝塔へ送液され、U 脱硝塔のノズルで約 300℃の流動床内へ噴霧され、乾燥、脱硝により UO_3 に粉末化される。加熱は電気ヒーターにより行う。

この UO_3 粉末は空気輸送によりフィルタを経て焙焼炉に移送する。焙焼炉は、ロータリーキルン式で、供給された UO_3 粉末を約 400℃に維持されたキルン内で滞留させて連続的に焙焼処理し、 U_3O_8 に転換する。加熱は電気ヒーターにより行う。転換した U_3O_8 粉末は、混合機に移送し、ここで新たに U_3O_8 粉末を加えて混合した後、空気輸送によりフィルタを経由して還元炉へ移送する。還元炉は、ロータリーキルン式で、供給された U_3O_8 粉末を約 750℃に維持され、 NH_3 ガスが供給されるキルン内で滞留させて連続的に還元処理し、 UO_2 に転換する。加熱は電気ヒーターにより行う。転換された UO_2 粉末は、U 粉末貯槽に貯留された後、空気輸送によりフィルタを

經由して振動充填/燃料ピン加工工程へ移送する。

U 脱硝塔から発生するオフガスは、フィルタを経て凝縮器で凝縮処理する。この凝縮液は凝縮液槽に貯留し、サンプリング分析を行った後、再処理の製品濃縮設備へ送液する。また、オフガスは吸収塔でNO_x除去処理を行い、焙焼炉や還元炉から発生するオフガスとともに洗浄塔へ送られ、洗浄処理されたオフガスはオフガス処理設備へ排出する。また、吸収塔及び洗浄塔で発生する廃液は、洗浄廃液槽でサンプリング分析を行った後、ポンプで再処理の酸回収設備へ排出する。

③ ゲル化/造粒設備

ゲル化/造粒設備は、炉心燃料ゲル化設備及び焼結設備と、ブランケット燃料造粒設備及び焼結設備よりなる。

(i) 炉心燃料ゲル化設備

本設備は、Pu 富化度を調整した原料液を受け入れて、ポリビニルアルコール (PVA)、テトラヒドロフルフリルアルコール (THF) の添加物を加えて滴下に適した原料液とした後、水酸化アンモニウム溶液中に滴下してゲル球を生成する設備である。

滴下液混合槽、滴下槽、ゲル球の熟成・洗浄・乾燥装置の設計図を図 4.3.4～図 4.3.6 に示す。

富化度調整された燃料原液と PVA、THF は混合器で混合水溶液となり、滴下槽へ送液される。混合水溶液は流量調整を行い、滴下槽上部の振動ノズルにより液滴となって水酸化アンモニウム溶液中に滴下し、ゲル球を生成する。所定量の滴下後は、生成したゲル球をゲル化に伴って発生する硝酸アンモニウム溶液とともに、スラブタイプの醸成・洗浄・乾燥装置へ全量を送液する。ここで一定時間、容器を回転させて硝酸アンモニウム溶液中でゲル球の熟成を行う。熟成後、硝酸アンモニウムの排出、水洗浄、熱風による乾燥を行い、乾燥ゲル球を得て、焼結設備へ移送する。なお、滴下操作においては初期の滴下槽内の水酸化アンモニウム水溶液が燃料原液の滴下により、オーバーフローするものとし、滴下途中で供給するアンモニアガスは全量がオフガスとして排出されるものとした。また、熟成・洗浄・乾燥設備では、熟成段階ですべての PVA、THF と硝酸アンモニウムが水酸化アンモニウム溶液中に溶出するものとし、アンモニアの大部分はこの段階でオフガスとして排出されるものとした。

滴下液混合器の設計では、臨界形状を考慮した充填物型円筒とし、液の粘度調整のため冷媒により冷却する構造とした。また、滴下槽は臨界形状を考慮した円環形状とし、上部には大/小粒子用の振動ノズルを配置し、水酸化アンモニウム溶液の液面まではアンモニアガスでカバーし、

水酸化アンモニウム溶液は液滴の滴下距離を一定にするため、オーバーフロー型とし、生成されたゲル球の変形を防止するために常時流動するものとした。熟成・洗浄・乾燥装置は、臨界形状を考慮したスラブ回転型とし、熟成・乾燥時に加熱出来るものとした。

また、機器配置に当たっては、滴下液混合器から滴下槽までの距離はPVAの分解等を考慮して出来る限り短くすることを考慮したが、滴下槽から熟成・洗浄・乾燥装置への輸送は、今後の課題として、スラリー輸送でかつゲル球を変形させない輸送方法を採用する必要がある。

(ii) 炉心燃料焼結設備

本設備は、乾燥ゲル球を受け入れた後、 UO_3+PuO_2 を経て $(U,Pu)O_2$ 粒子を得て、焼結・再還元後、分級を行い、所定の粒度の粒子を得る設備である。

焙焼炉・還元炉、焼結炉・再還元炉、粒径選別機的设计図を図 4.3.7～図 4.3.9 に示す。

ゲル化設備で得られたゲル球は、焙焼炉で空気雰囲気中で約 $600^{\circ}C$ の仮焼を行い、 UO_3+PuO_2 粒子とする。その後、焼結炉で焼結球とし、O/M 比を調整するために、還元炉で $5\% H_2/Ar$ 中で還元して低 O/M 比の $(U,Pu)O_2$ 粒子とする。ここで、大/小径粒子が同時に処理されるため、分級装置で分級し、所定の粒度の粒子を得て、検査を行った後に粒子保管設備で保管する。

なお、ゲル球の仮焼設備では、ゲル球からのアンモニアの脱離、 NO_2, CO_2 の発生等を考慮した。また、反応生成物は製品以外はすべてオフガス中に排出されるものとした。

加熱炉の設計では、すべて回転円筒型の連続処理方式とし、臨界管理は、炉内滞在量を管理する質量管理方式とした。分級装置は、振動ふるい型の $20kg MOX$ /バッチ処理とした。

また、機器配置に当たっては、焙焼炉及び分級装置への粒子の供給は重力落下方式とし、焙焼炉、還元炉、焼結炉間の粒子供給は取り出し供給装置による方式とした。また、処理能力の関係で設備は 2 系列とし、同時に稼働させ、各装置の臨界管理は質量管理で行い、相互干渉を考慮して配置することとした。

(iii) ブランケット燃料造粒設備

本設備は、脱硝/酸化転換設備から UO_2 粉末を受け入れ、PVA 溶液を添加して造粒する設備である。

造粒篩い分け装置の設計図を図 4.3.10 に示す。

脱硝/酸化転換設備で得られた UO_2 粉末は造粒装置へ供給し、PVA 溶液を吹き付けながら混合し、粉末同士を結合させて粒子を形成させる。その後、粒子を乾燥させ、分級装置で所定の大きさの粒子を選別する。仕様をはずれた粒子は粉碎し、原料粉末として本設備の最初の工程に戻す。

なお、分級装置は造粒装置の真下におき、燃料粒子の重力落下による移送を行う。

(iv) ブランケット燃料焼結設備

本設備は、造粒した UO_2 粒子を受け入れ、焼結還元後、分級を行い、所定の粒度の粒子を得る設備である。

焼結炉、再還元炉、焼結 UO_2 篩い分け装置の設計図を図 4.3.11～図 4.3.13 に示す。

本設備における焼結炉及び分級装置への粒子供給は重力落下方式とした。

④ 振動充填/燃料ピン加工設備

本設備は、炉心燃料/ブランケット燃料の振動充填/燃料ピン加工設備であり、2種類の粒径の粒子を振動充填により被覆管内に充填後、プレナムスプリング等の内装物の挿入を行い、さらに上部端栓の溶接、 γ 線による粒子充填状態の確認後、表面汚染検査を経て、燃料集合体組み立て設備へ送るまでの設備である。

燃料ピン振動充填装置、燃料ピン開口部除染装置、端栓溶接装置、密度測定装置の設計図を図 4.3.14～図 4.3.17 に示す。なお、本設備は1つのセル中に配置する。

炉心燃料要素の製造においては、一定量の2種類の粒子を下部軸方向ブランケット、炉心燃料、上部軸方向ブランケットの順に振動充填する。被覆管は下部端栓を溶接し、管口マスクを付けたものを2列で4本を1組としたカセットで取り扱う。また、ブランケットと炉心燃料粒子の間は仕切り板を入れるものとし、粒子充填後、開口部除染・内装物挿入装置へ搬送し、管口マスクを外し、内装物を挿入後、端栓溶接装置へ移送する。抵抗溶接法による端栓溶接では、真空引き後にHe封入を行い、溶接後、研削を行って外径測定を行う。その後、カセットを2つに分割し、 γ 線によりスミア密度を測定してから解体除染装置でカセットを解体し、燃料ピン1本ごとに除染を行った後、汚染度を測定し燃料集合体組み立て工程へ移送する。また、本設備は燃料ピンの充填から密度測定までを1単位とした質量

管理で臨界管理を行う。

⑤ 燃料集合体組立設備

本設備は、燃料要素及びエントランスノズル等の部品を用いて燃料集合体を組み立てる設備である。

燃料要素は下部端栓スリットにロックバーを取り付け、1段ごとにエントランスノズルに取り付けるものとし、取り付け後、ロックバーと組み枠を固定してバンドルとし、ハンドリングヘッド付きラッパ管へバンドルを挿入する。その後、ラッパ管とエントランスノズルを溶接し、燃料集合体とする。完成した集合体は検査後、一時貯蔵施設へ移送する。なお、本設備では燃料集合体を立てた状態で取り扱うため、天井高さは最低でも8m程度は必要となる。

⑥ 検査設備

本設備は、燃料粒子と燃料要素の検査設備からなる。燃料粒子の検査では、燃料ペレットと同様な化学的検査のほかに、粒径検査、真球度検査等を加えるものとし、燃料要素の検査では、ヘリウムリーク検査による欠陥検査、X線による溶接部やプレナム部の検査、 γ 線による炉心燃料部とブランケット部の識別検査を行うものとする。

ヘリウムリーク試験、X線検査、ワイヤー巻き付け、燃料ピン総合検査の各設備の設計図を図4.3.18～図4.3.21に示す。

粒径検査や真球度検査等は分析セルで行うものとし、本設備では設備間のバッファとして、ワイヤ巻き付け設備の前に、燃料要素一時保管庫と燃料要素保管庫を設けることとした。設備機器はすべて遠隔操作とし、機器間の移動には専用の搬送台車を用いて燃料要素は横にして取り扱うものとした。

⑦ 燃料集合体一時貯蔵、払い出し設備

本設備は、完成した燃料集合体を一時貯蔵し、また、貯蔵設備から燃料集合体を取り出し、輸送容器内に固定して輸送用トラックに積みつける設備である。

燃料集合体一時貯蔵設備の貯蔵容量は、燃料製造量の1年分の200tHMとした。これは、約1130体の燃料集合体に相当する。

燃料集合体払い出し設備においては、貯蔵施設から集合体移送クレーンによって吊り出された燃料集合体を専用輸送容器上へ移送する。輸送容器に納めた後、表面汚染、線量率等を測定確認して専用台車によりトラック

ヤードに移送し、専用トラックに積み付けて原子炉サイトに払い出す。本設備は2基の集合体梱包設備を併設する。

⑧ オフガス処理設備

本設備は、再処理と燃料製造の塔槽類オフガスを処理する設備である。処理するガスの発生源により、硝酸系、アンモニア系、乾燥系により構成される。硝酸系オフガスは、オフガス洗浄塔へ供給され水洗浄後、HEPA フィルタで微粒子を除去し、排気筒へ排出する。洗浄廃液は低放射性廃液処理設備へ移送し処理する。アンモニア系オフガスはオフガス洗浄塔へ供給後、HEPA フィルタで微粒子を除去し、排気筒へ排出する。洗浄廃液は中放射性廃液処理設備へ移送し処理する。乾燥系オフガスは HEPA フィルタによる微粒子の除去を行い、排気筒へ排出する。

⑨ 不良品回収設備

本設備は、燃料製造時に発生するスペックアウト（スクラップ）燃料を受け入れ、炉心用顆粒燃料については、再処理受け入れ基準に適合していることを確認後、再処理溶解設備に、ブランケット用顆粒燃料については、燃料製造受け入れ基準に適合していることを確認後、大粒径の燃料粒子を粉碎して造粒設備へ戻す。また、燃料ピンについては解体して粒子燃料を回収し、所定の製造設備へ戻すための設備である。再処理、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廃棄物として処理する。

本設備では、炉心/ブランケット燃料ピン解体装置、炉心燃料溶解装置、ブランケット燃料粉碎装置、不純物分析設備（燃料受け入れ時の分析設備と兼用）を配置するものとした。また、燃料粒子の不良率は約 10%、燃料ピンの不良率は約 2%としたが、本設備での処理の物量は今回は評価せず、メインプロセスでの定常的な物流のみを評価した。今後、粉末の溶解、U/Pu 濃度、酸濃度等の調整を行って燃料製造設備内のみでクローズする方式についても検討することとしている。

⑩ 再処理/燃料製造共通付帯設備

本設備は、再処理/燃料製造の各設備から発生する廃液を、中・低・極低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 α 系と β γ 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。

燃料製造設備から発生する中レベル廃液の濃縮液は、再処理の酸回収工

程へ送り、処理済液は低レベル廃液処理設備へ送る。低レベル廃液の濃縮液は、中レベル廃液処理設備へ送り、処理済液は極低レベル廃液処理設備へ送る。極低レベル廃液の濃縮液は低レベル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低放射性固体廃棄物は、 α 系、 β γ 系ともにその性状により、可燃性、難燃性、不燃性及び HEPA フィルタ類に発生元で分類し搬出する。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。

① 建屋/ユーティリティ/共有設備

1) 建屋

建屋は地下 2 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。建屋全体の外寸法は、約 120m×約 110m×高さ約 50m である。

2) 建屋換気設備

本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。

3) 処理済廃液放出設備

本設備は極低放射性廃液処理設備で処理された廃液を受け入れ、その性状が海洋放出に適合することを確認後、ポンプにより海洋へ放出する設備であり、処理済み廃液放出槽、廃液放出ポンプ、配管・弁類、計測制御機器から構成される。

4) 受電設備

プラント全体で約 30MVA 程度の電源容量を必要とする見通しのため、6.6KV 系統を 2 回線で受電するものとした。なお、重要負荷 3,500KVA×2、計装電源（UPS）30KVA×2 とした。

5) 非常用電源設備

本設備は、施設内の安全上重要な機器やそれを補助する機器に電源を供給する設備であり、3,500KVA ディーゼル発電機 2 台とその補助設備、関連設備から構成される。非常用電源設備は独立 2 系統とした。

6) 中央制御設備

再処理/燃料製造設備の運転監視システムのマンマシーンインターフェイスの中核となるのが本設備であり、オペレータコンソールや運転監視盤等から構成される。再処理と燃料製造の各設備は、制御の仕方、運転モード、計量管理等が異なるため、中央制御設備は各々について独立の設置するが、中央制御室は一箇所に統合し、省スペース化を図った。

7) 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、空気モニタリング及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、空气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。

8) 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、グローブボックス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設置し、プロセス側で要求される分析項目を考慮し、適切な分析方法を考慮して決定する。分析セル、グローブボックスから発生する廃液は、有機相、水相の別、分析試薬添加の有無により区分し、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。

9) 消火設備

消火設備は、火災の検知、警報システム、消火装置、誘導灯及び誘導標識からなる。火災の検知、警報システムは、自動火災報知設備、防災盤か

らなり、消火装置は消火器具、屋内/屋外消火設備、連結送水/散水設備等からなる。また、誘導灯及び誘導標識は、災害時における避難活動を容易にするために設置する。

10) 管理棟その他

施設全体の管理・運営を行うため、施設の運転計画、計量管理、保守補修、許認可等の技術及び支援業務、技術上位方等の試料管理、従業員の出勤管理、周辺管理等の事務的業務を管理棟で行う。また、管理棟建屋は3階建てとした。

(d) 配置設計

1) 設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設は、主に再処理/燃料製造主要プロセスと高放射性廃棄物を扱う主建屋、低放射性廃棄物を扱う副建屋、及び管理棟の3区分とする。施設全体の配置イメージを図 4.3.22、図 4.3.23 に示す。
- ・ 再処理/燃料製造設備一体化により、主要プロセス設備とその付帯設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置する。
- ・ 低放射性廃棄物の処理、貯蔵とその付帯設備は副建屋に配置する。
- ・ 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、被ばく安全上、適切な構成とゾーニングを行う。
- ・ 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。
- ・ 主建屋と副建屋間は地下連絡通路を設け、作業員、物品類とキャスクによる固体廃棄物の移動作業の向上を図る。
- ・ 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。主建屋から副建屋への廃液移送は地下に配管トレンチを設けて移送する。
- ・ 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。遠隔操作を必要とする設備はセル内配置とし、遮へい窓や ITV を通し、マニピュレータ、インセルクレーン等により操作可能な設計とする。

2) 配置設計の概要

設備機器の主建屋及び副建屋内配置の概要と配置に際しての基本方針を以下に示す。

(i) 主建屋内配置

主建屋内には、再処理主要設備、再処理付帯設備、燃料製造設備に含まれるすべての装置・機器と、再処理/燃料製造共通付帯設備の一部の装置・機器を設置する。主建屋の鳥瞰図及び主建屋内での燃料製造設備セル配置図とセル内での装置・機器の配置図を図 4.3.24～図 4.3.30 に示す。

(ii) 副建屋内配置

副建屋内には、再処理/燃料製造共通付帯設備である中/低/極低放射性廃液処理設備、廃溶媒処理設備、低放射性固体廃棄物一時貯蔵設備及び処理済廃液放出設備機器、試薬調整室、制御室、電気室を設置した。副建屋内での装置・機器の配置を図 4.3.31、図 4.3.32 に示す。

(e) システムの特徴

1) 安全性評価

MOX ペレット製造プラントの安全基準の考え方をベースに、これを適用した場合の問題点として、粒子体系、MA 混在の影響、中性子相互干渉等を考慮した臨界管理が必要と考えられる。また、MA 等の発熱への対策、遮へい設計が必要であるが、一方、振動充填燃料ピンは、ペレット燃料ピンと同様の臨界管理方法、すなわち、安全裕度をもった質量管理により、移動操作の異常を防止管理する方法が適用できると考えられる。このほか、ゲル化法では硝酸アンモニウムなど爆発性のある危険物を取り扱うため、回収、処理などの安全設備の対応が必要となる。

2) 経済性評価

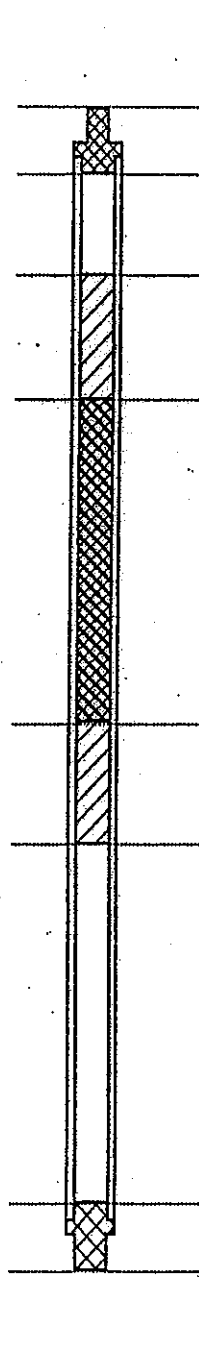
再処理との一体型プラントの燃料製造部分の建設費の概算は、プラント全体の約 2/5 となった。また、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約 3/5、ユーティリティ・共通設備が約 1/5、建屋・電気・換気設備が約 1/5 となった。

3) 核不拡散性評価

製造プロセスの各工程に、Pu が単独で存在する可能性はほとんどないと考えられる。また、ホットセル内での遠隔操作が基本となり、ハンドリングの点ではグローブボックス作業に比べて難しくなることが考えられるが、計量管理技術の点からは、基本的に従来と同等の手法が適用できると考えられる。しかし、装置に付着する粒子燃料については、計量管理上の配慮とその対策が必要である。

表4-3-1 炉心燃料集合体及び径方向ブランケット燃料集合体の基本仕様

項 目	炉心燃料集合体	径方向ブランケット燃料集合体
燃料集合体		
燃料要素本数	271本	169本
燃料要素配列ピッチ	9.65mm	12.21mm
全長	4600mm	4600mm
ラッパ管		
材質	フェライトマルテンサイト鋼	フェライトマルテンサイト鋼
内対面幅	161.2mm	161.2mm
外対面幅	169.9mm	169.9mm
肉厚	4.35mm	4.35mm
スパーサ		
型式	ワイヤ	ワイヤ
材質	分散強化型フェライト鋼	分散強化型フェライト鋼
ワイヤ径	1.1mm	0.86mm
ワイヤ巻付ピッチ	約200mm	約160mm
燃料要素		
全長	3135mm	3135mm
スタック長	1700mm	1700mm
炉心燃料	1000mm	—
軸方向ブランケット燃料(上/下)	350/350mm	—
ガスプレナム長さ(上/下)	285/1080mm	155/1080mm
型式	一体密封型	一体密封型
燃料部		
型式	振動充填	振動充填またはペレット
材質	アルミナ・ガン混合酸化物	二酸化ウラン
スミア密度	約85%TD	約85%TD
O/M比	1.98	2.00
MA/F P混入率制限値(目安値)	約2/2wt.%以下	約2/2wt.%以下
軸方向ブランケット燃料部		
型式	振動充填またはペレット	—
材質	二酸化ウラン	—
スミア密度	約85%TD	—
O/M比	2.00	—
MA/F P混入率制限値(目安値)	約2/2wt.%以下	—
被覆管		
材質	分散強化型フェライト鋼	分散強化型フェライト鋼
外径	8.5mm	11.3mm
内径	7.5mm	10.5mm
肉厚	0.5mm	0.4mm



領域名	領域長 (mm)
上部端栓	30
上部ガスプレナム	285
上部軸ブランケット	350
炉心	1000
下部軸ブランケット	350
下部ガスプレナム	1080
下部端栓	40
要素全長	3135

図4-3-1 湿式リサイクルプラント検討用燃料要素概要図

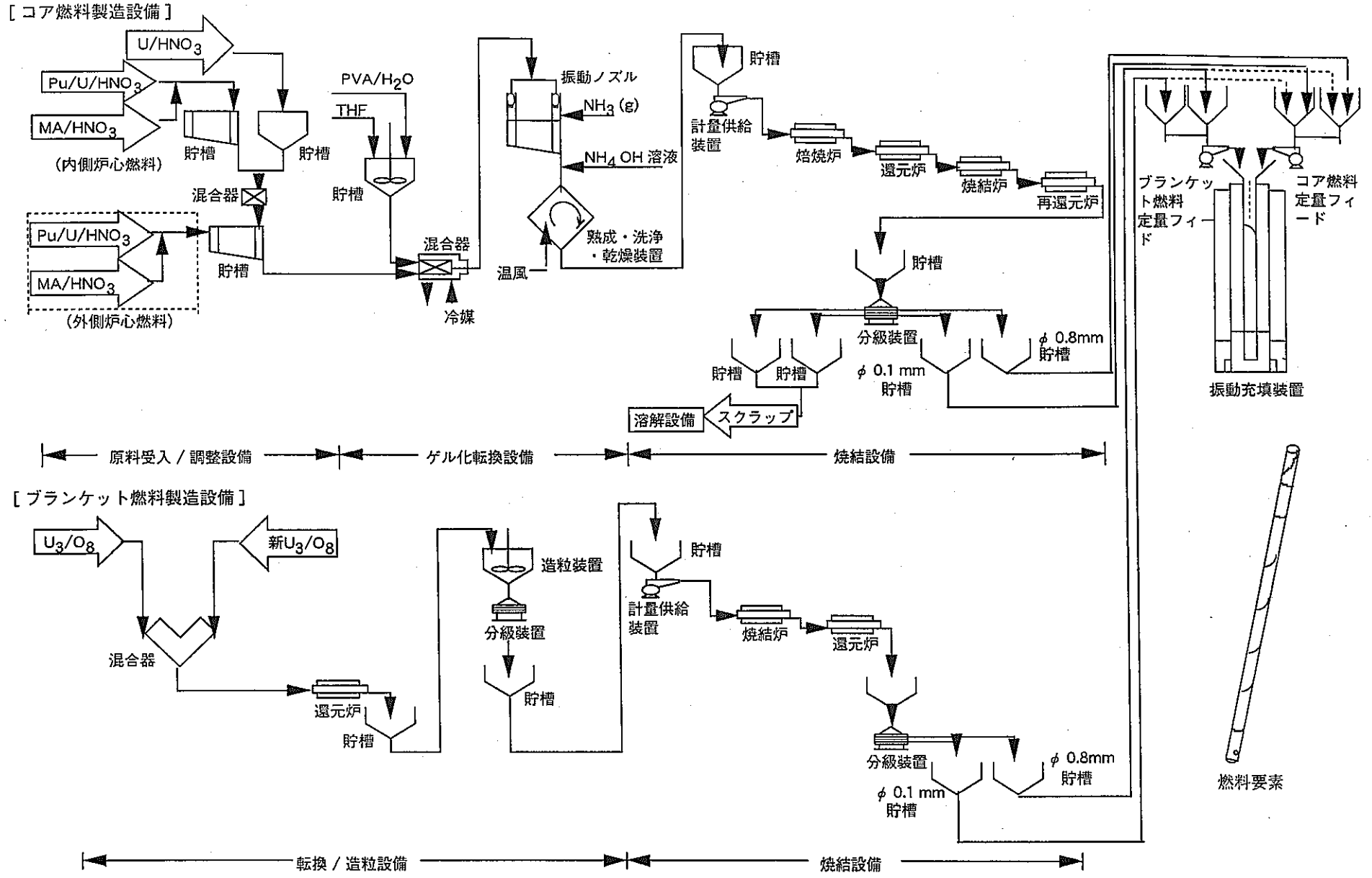
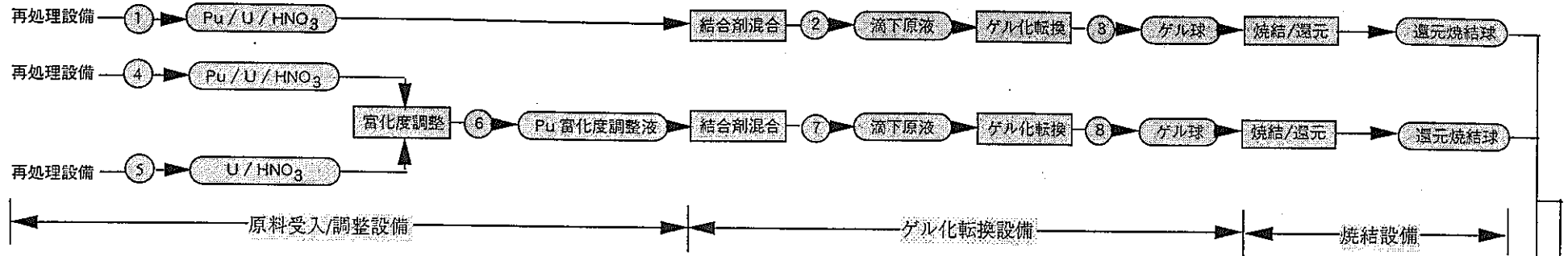
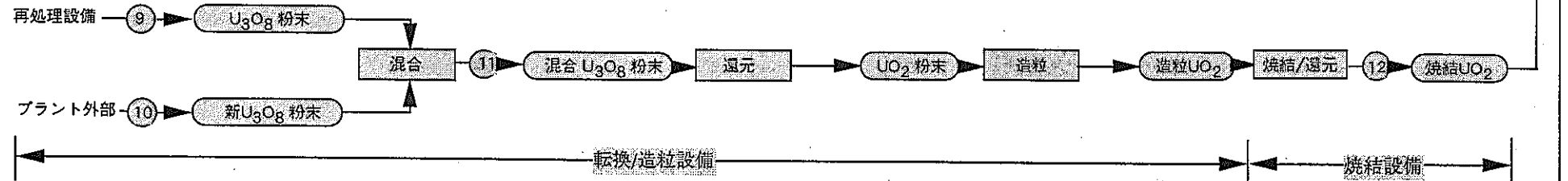


図4.3.2 湿式振動充填燃料製造プロセスフロー

[コア燃料製造設備]



[ブランケット燃料製造設備]



<主要物流一覧>

物流番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U	kg/d	112.1	112.1	112.1	124.0	94.3	218.3	218.3	218.3	499.5	84.9	584.4	584.4
Pu	kg/d	38.6	38.6	38.6	42.7	-	42.7	42.7	42.7	-	-	-	-
MA	kg/d	1.84	1.84	1.84	2.04	-	2.04	2.04	2.04	-	-	-	-
PVA	kg/d	-	5.3	-	-	-	-	9.2	-	-	-	-	-
H ₂ O (L)	Nm ³ /d	-	0.01	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-
THF	Nm ³ /d	-	0.22	118kg/d	-	-	-	0.37	203kg/d	-	-	-	-

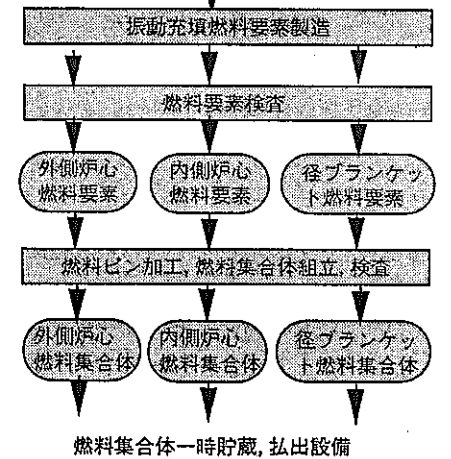


図4.3.3 プロセス検討と物質収支評価 湿式振動充填燃料製造プロセス

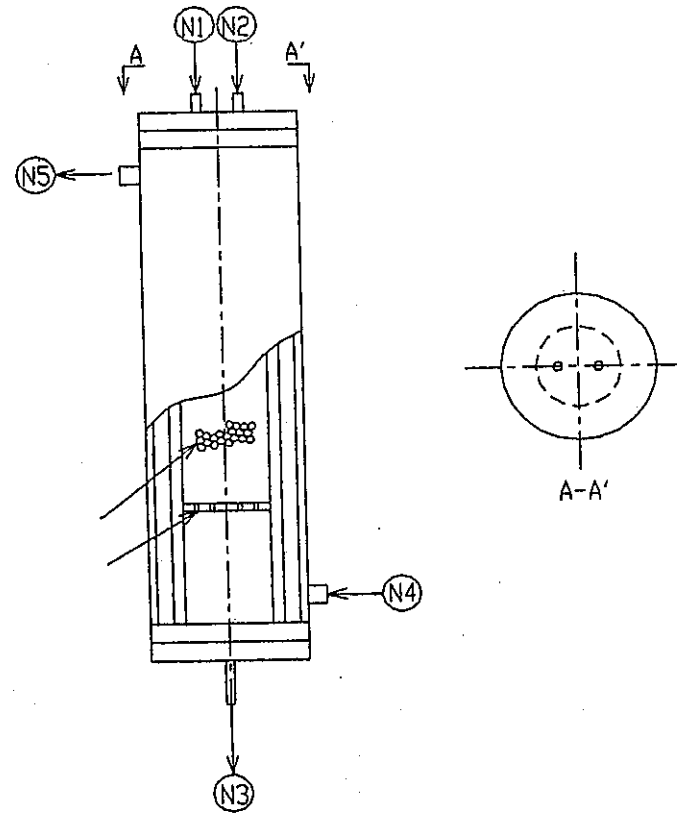


図 4-3-4 コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (滴下液混合装置)

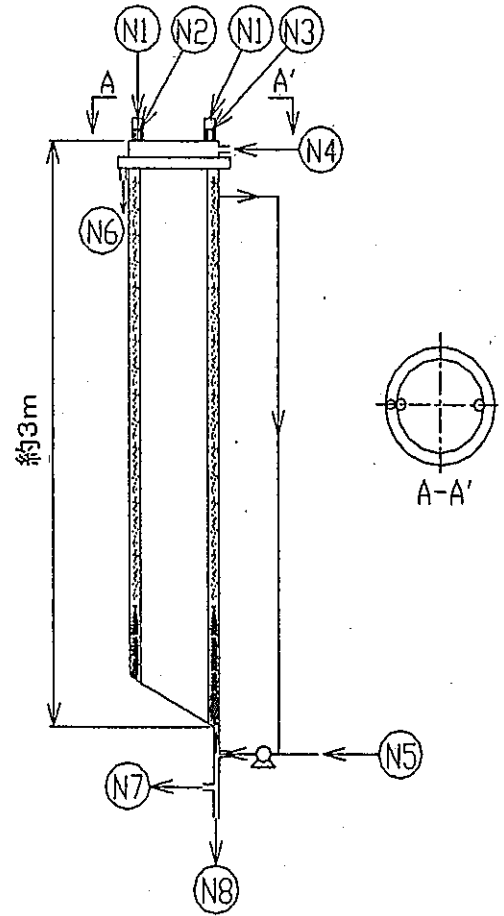


図 4-3-5 コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (滴下槽)

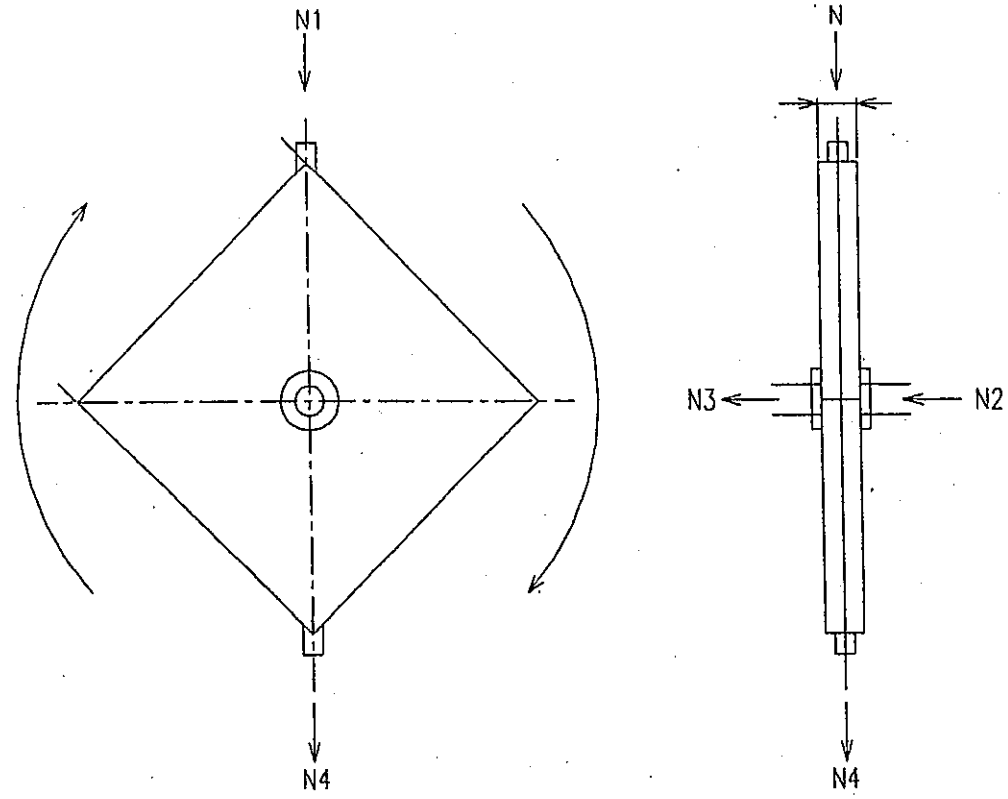


図 4-3-6 コア燃料ゲル化転換設備主要機器 (熟成、洗浄、乾燥装置)

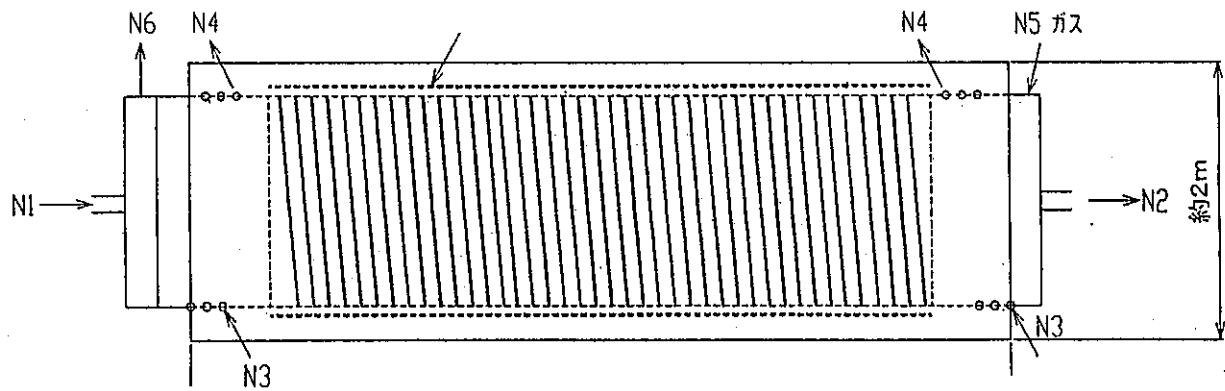


図 4-3-7 コア燃料焼結設備主要機器 (焙焼炉/還元炉)

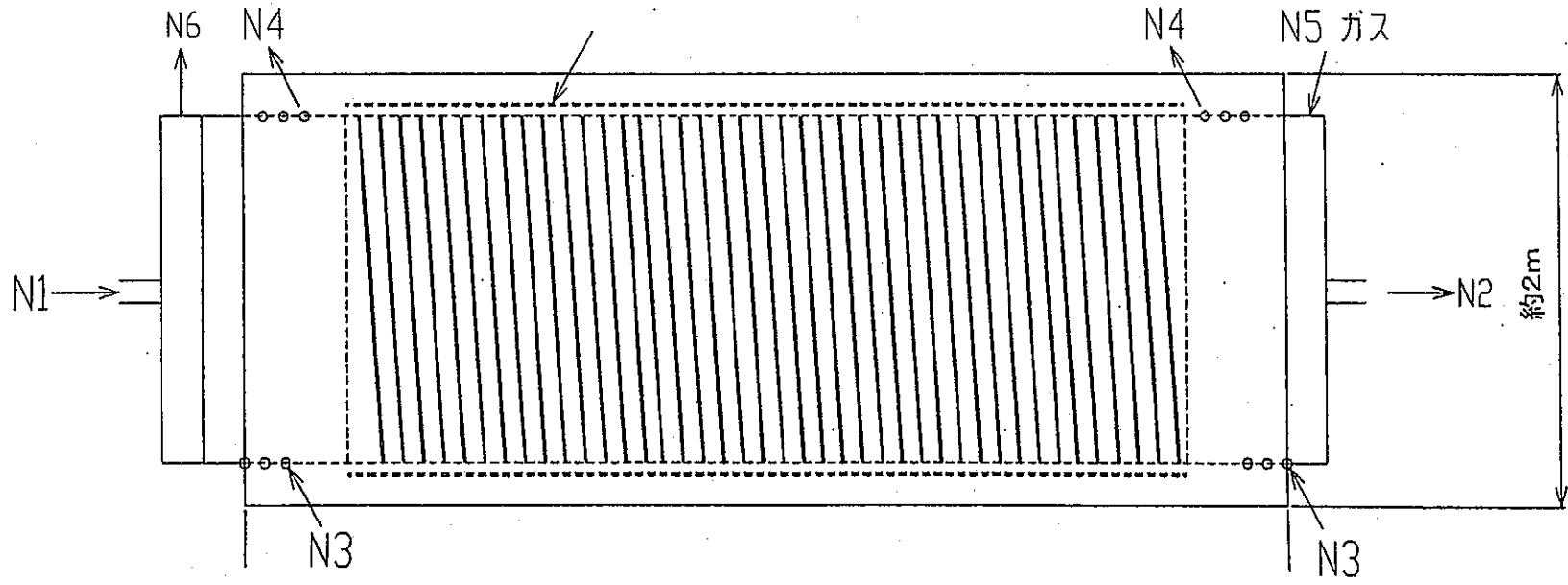


図 4-3-8 コア燃料焼結設備主要機器 (焼結炉/再還元炉)

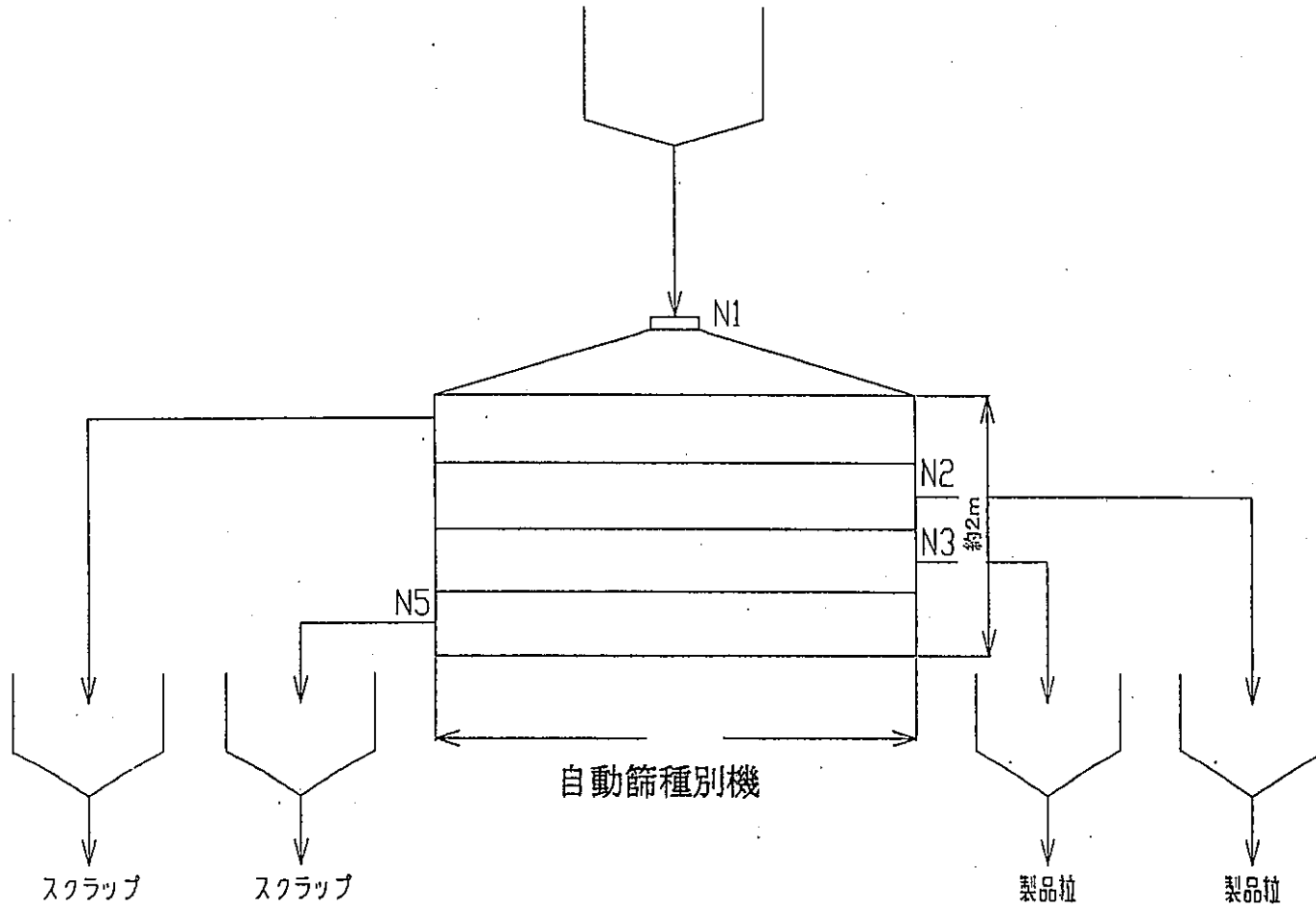


図 4-3-9 コア燃料焼結設備主要機器 (粒径選別機)

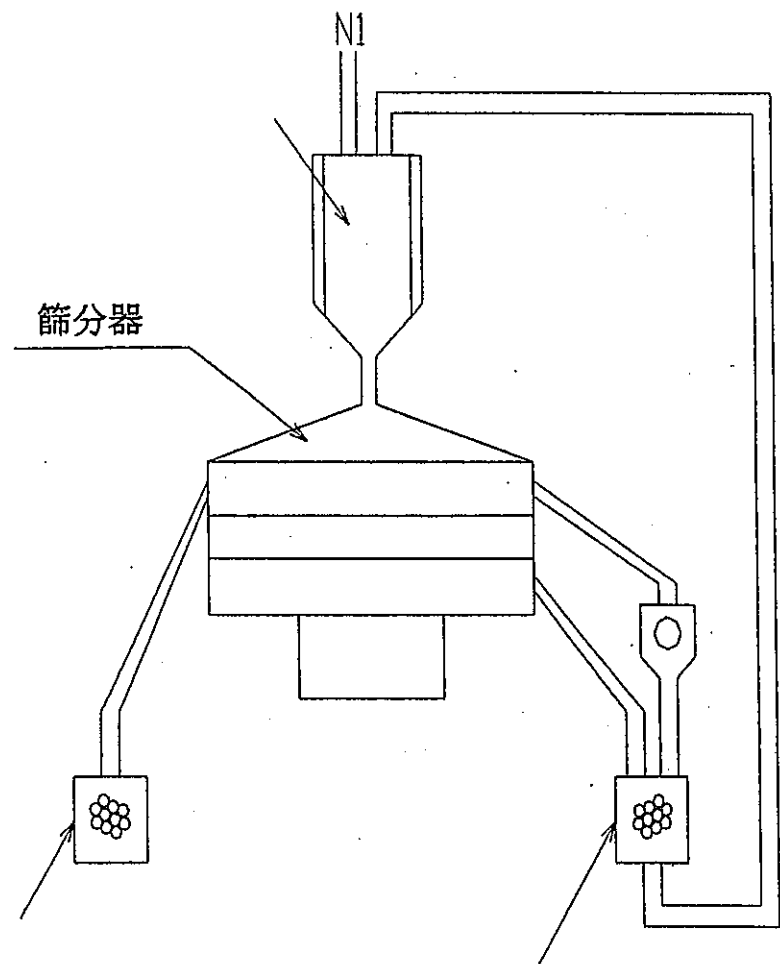


図 4-3-10 ブランケット燃料造粒設備主要機器 (造粒装置/造粒 U02 篩分装置)

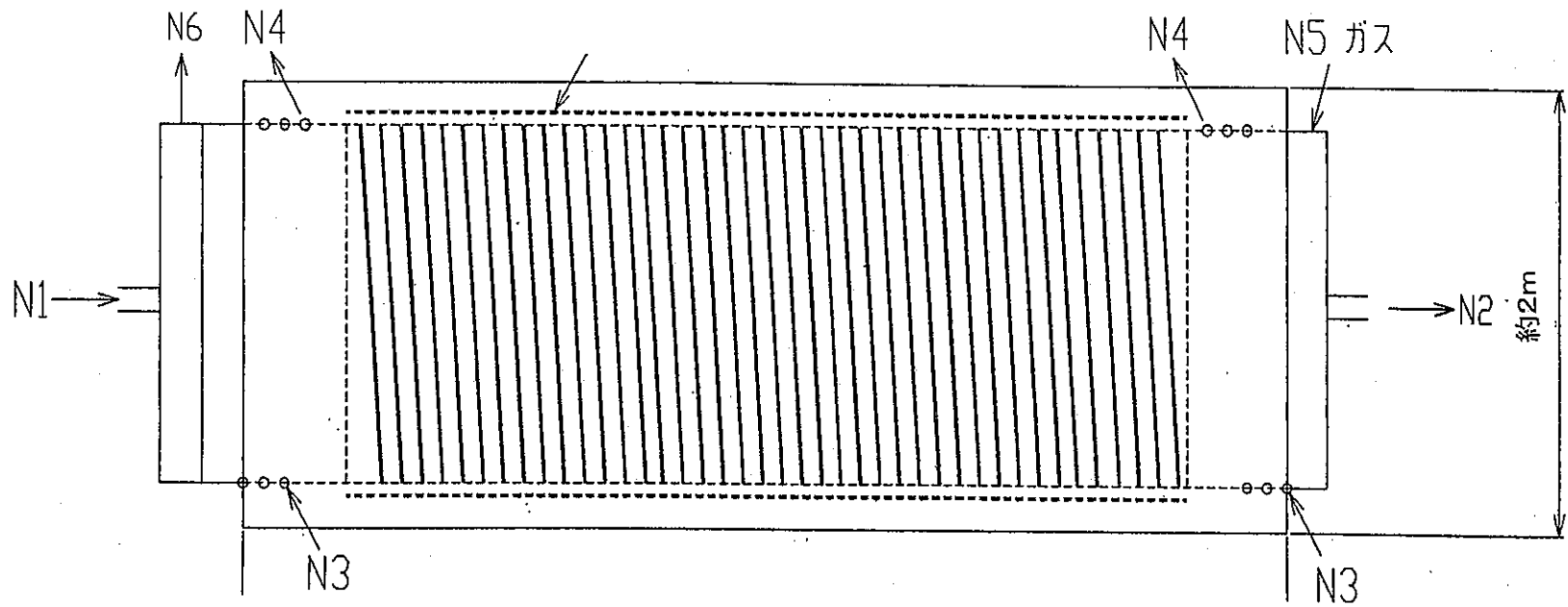


図 4-3-11 ブランケット燃料焼結設備主要機器 (焼結炉)

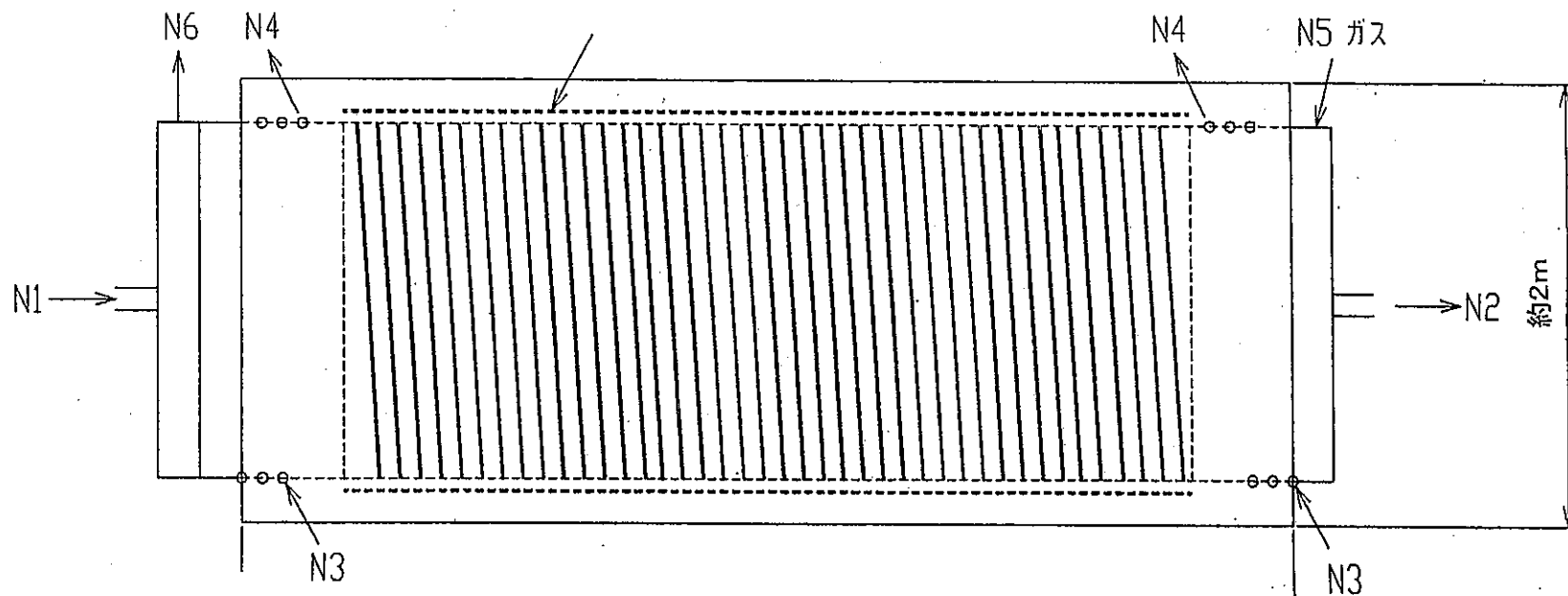


図 4-3-12 ブランケット燃料焼結設備主要機器 (再還元炉)

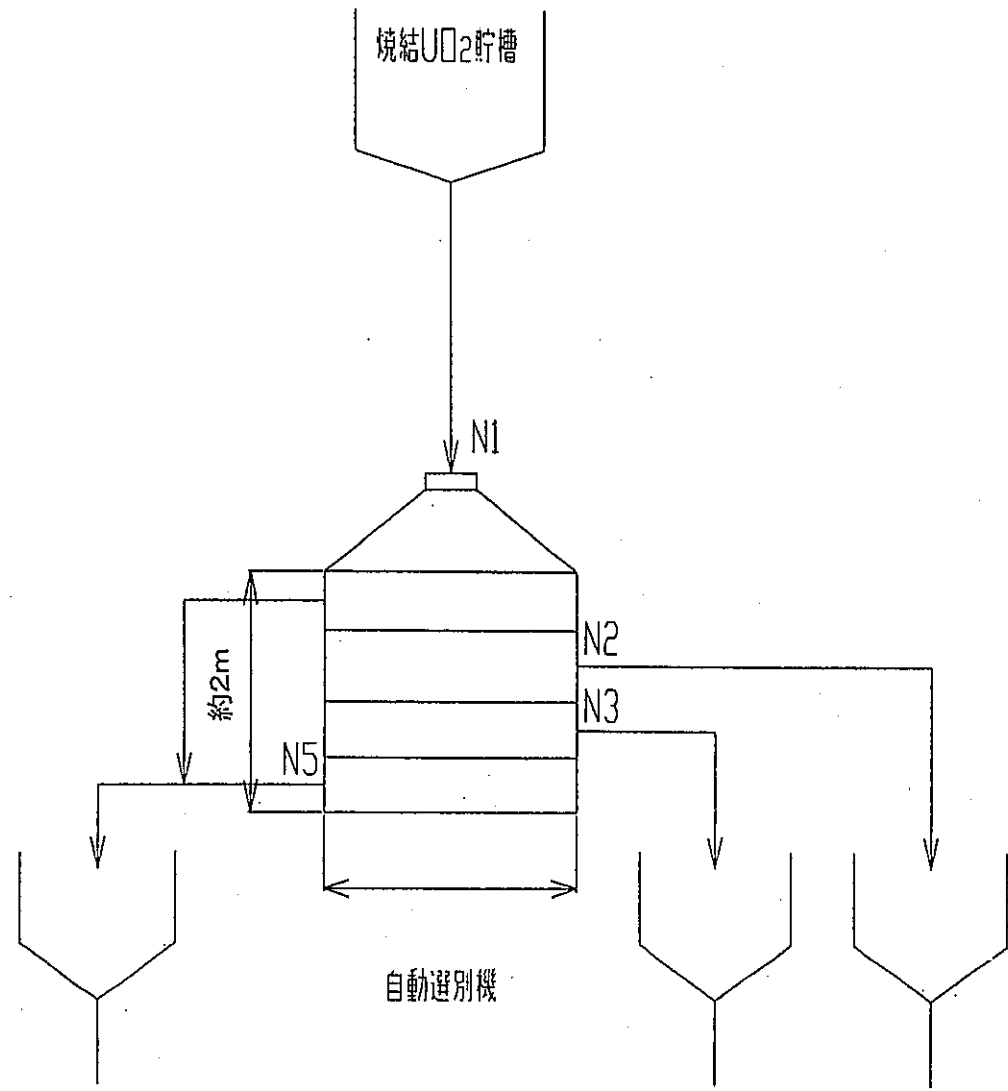


図 4-3-13 ブランケット燃料焼結設備主要機器 (焼結 UO2 篩分装置)

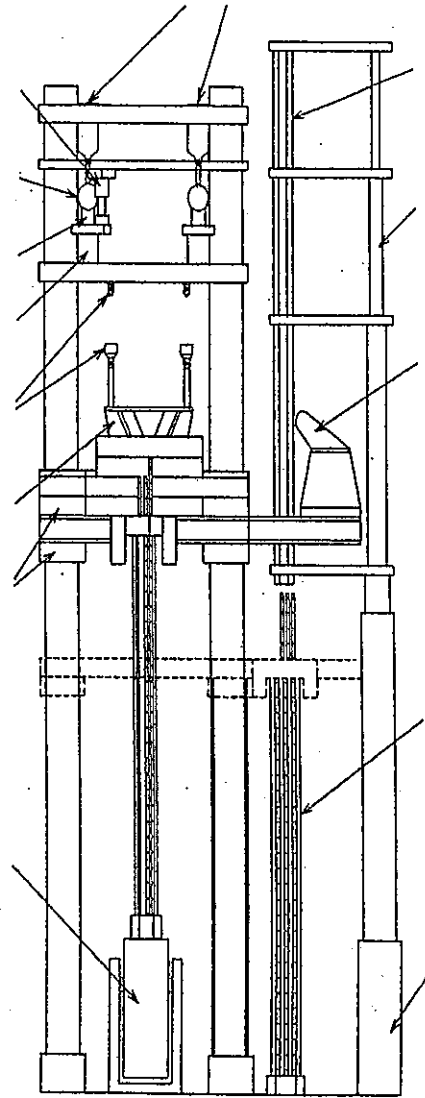


図 4-3-14 燃料ピン加工設備主要機器 (燃料要素充填装置)

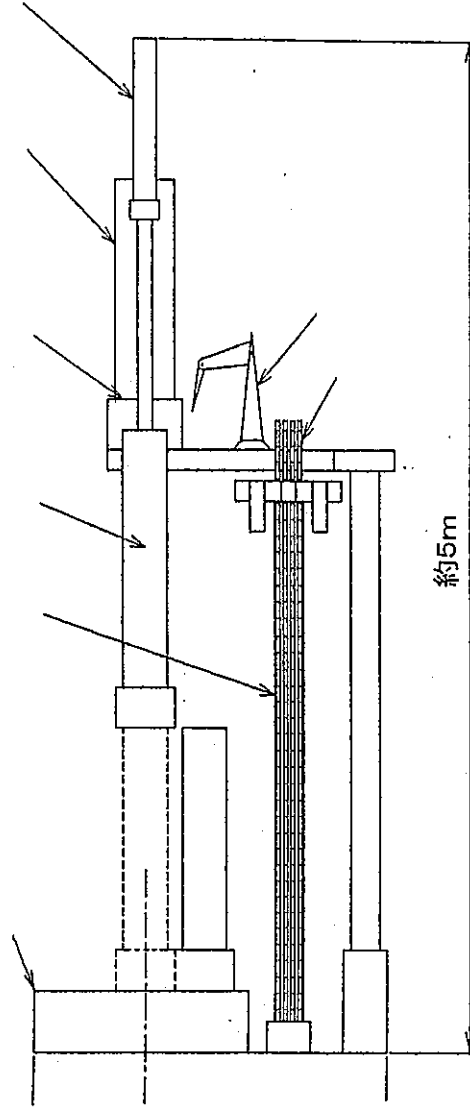


図 4-3-15 燃料ピン加工設備主要機器（開口部除染・内挿物挿入装置）

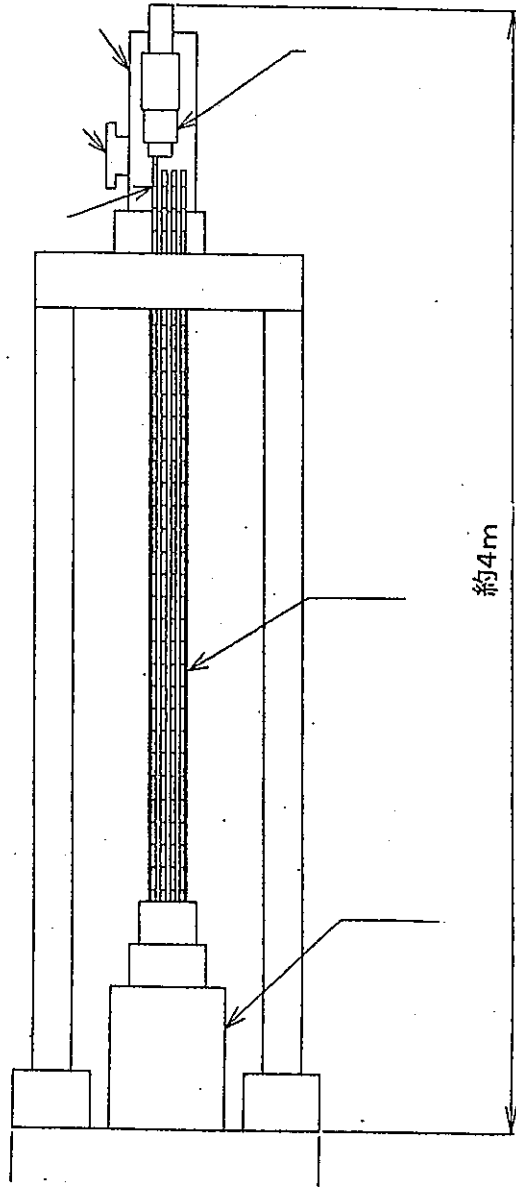


図 4-3-16 燃料ピン加工設備主要機器 (端栓溶接装置)

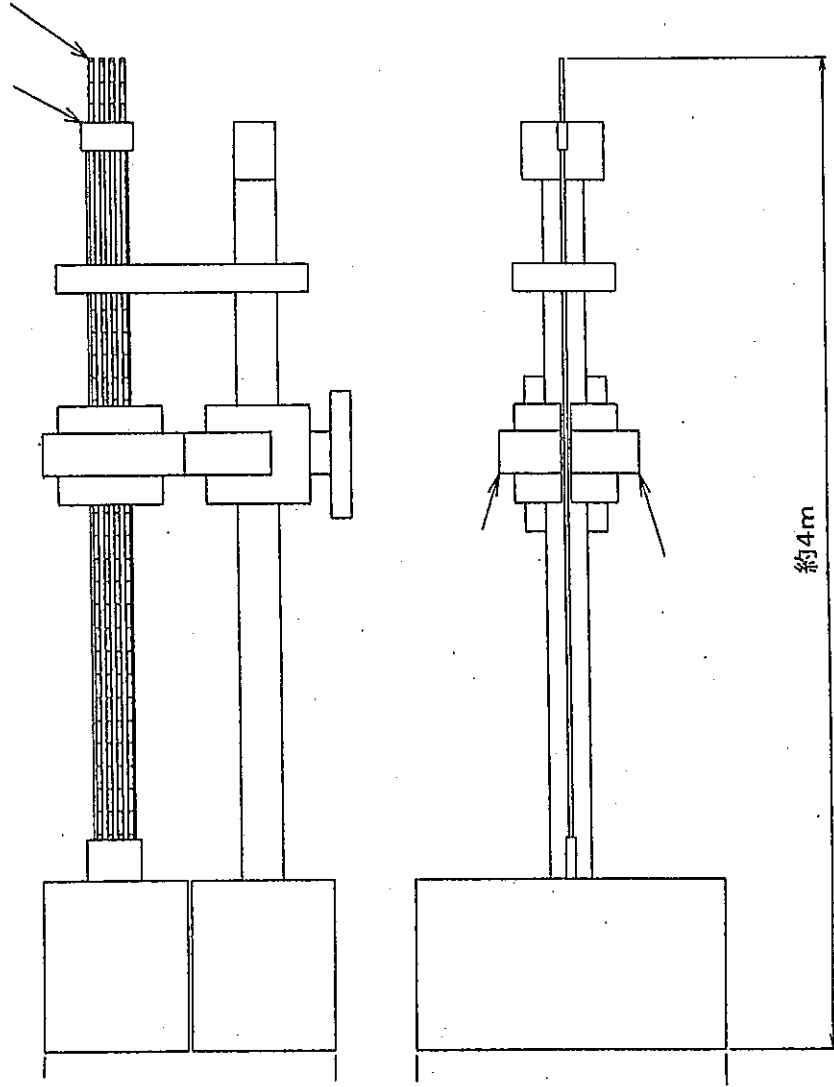


図 4-3-17 燃料ピン加工設備主要機器（密度測定装置）

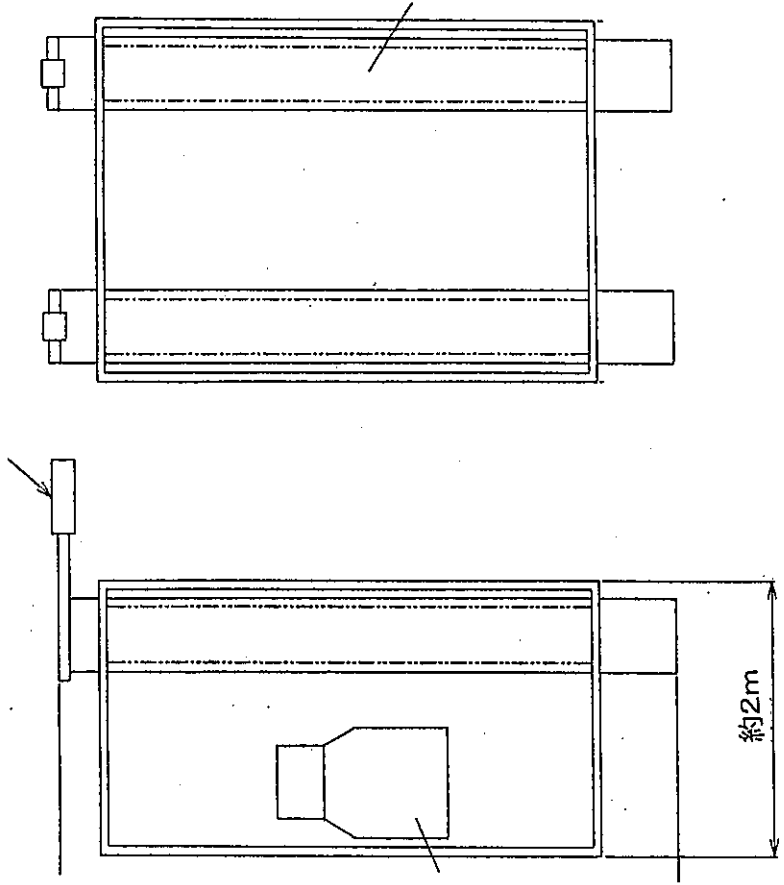


図 4-3-18 燃料検査設備主要機器 (ヘリウムリーク試験設備)

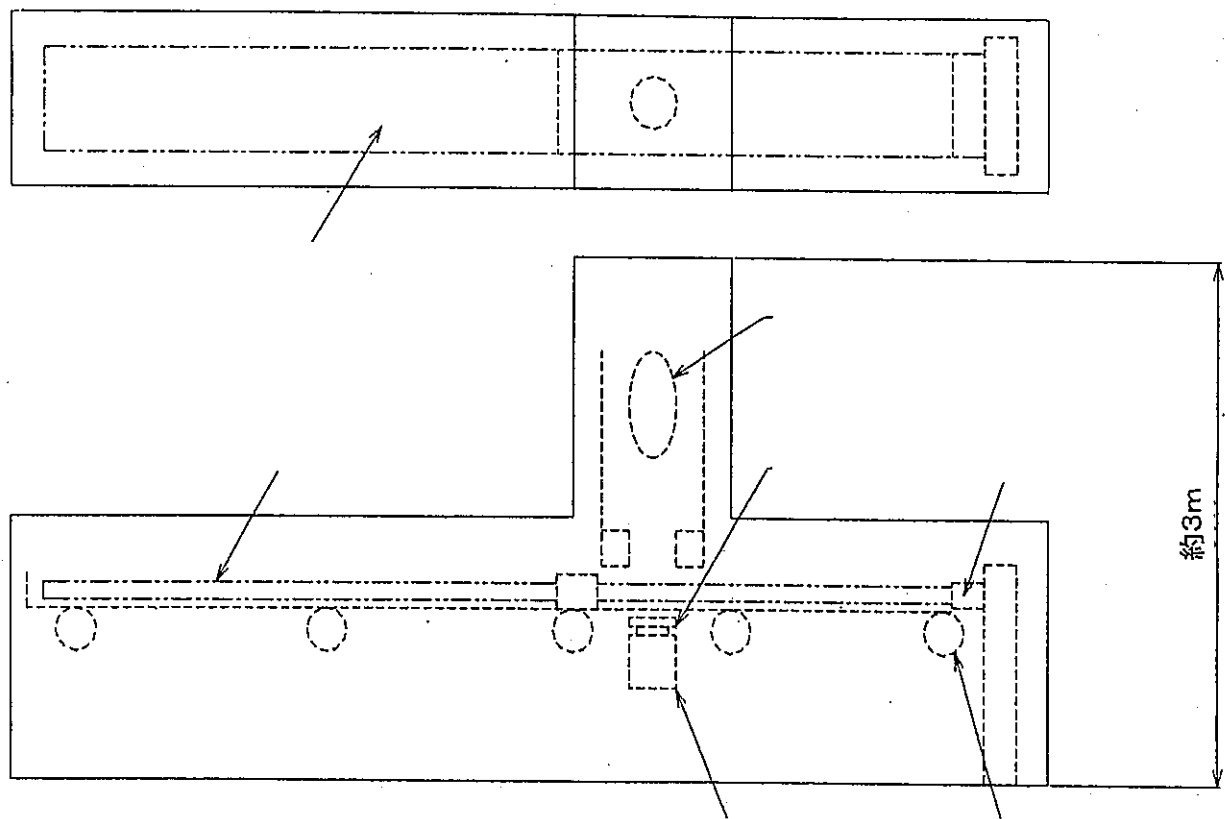


図 4-3-19 燃料検査設備主要機器 (X線検査装置)

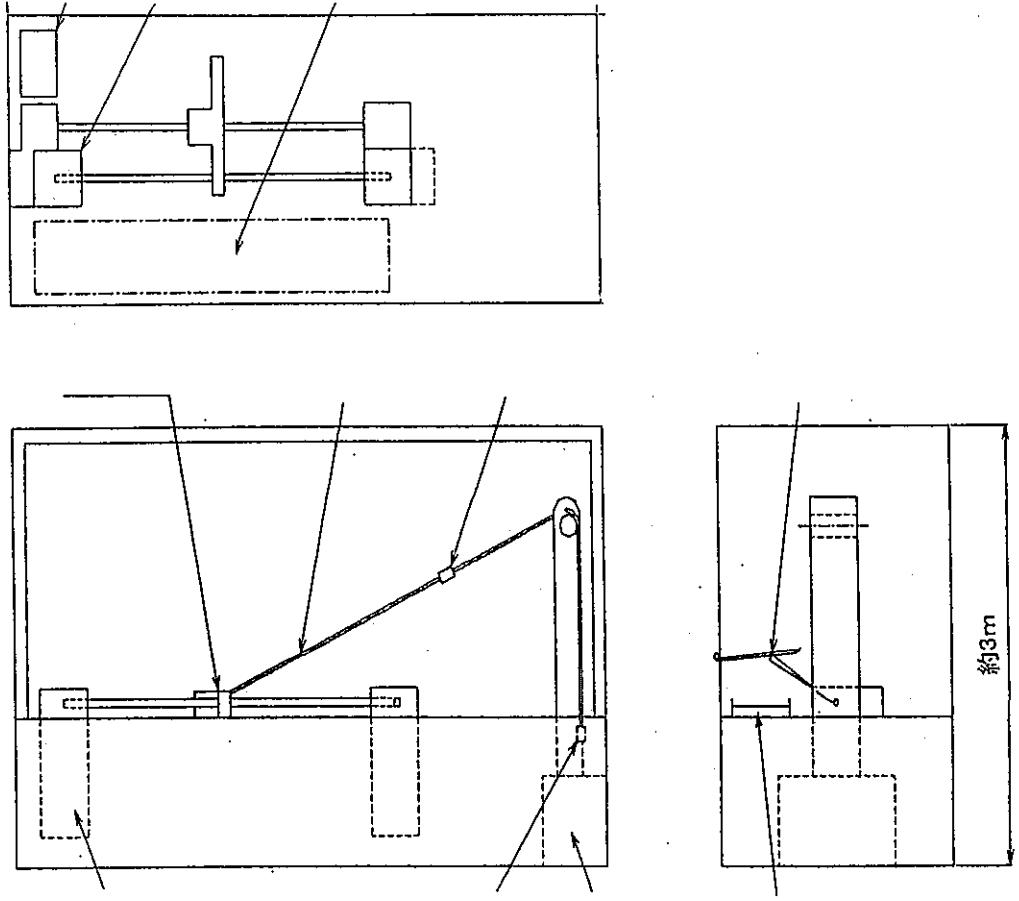


図 4-3-20 燃料検査設備主要機器 (ワイヤー巻付設備)

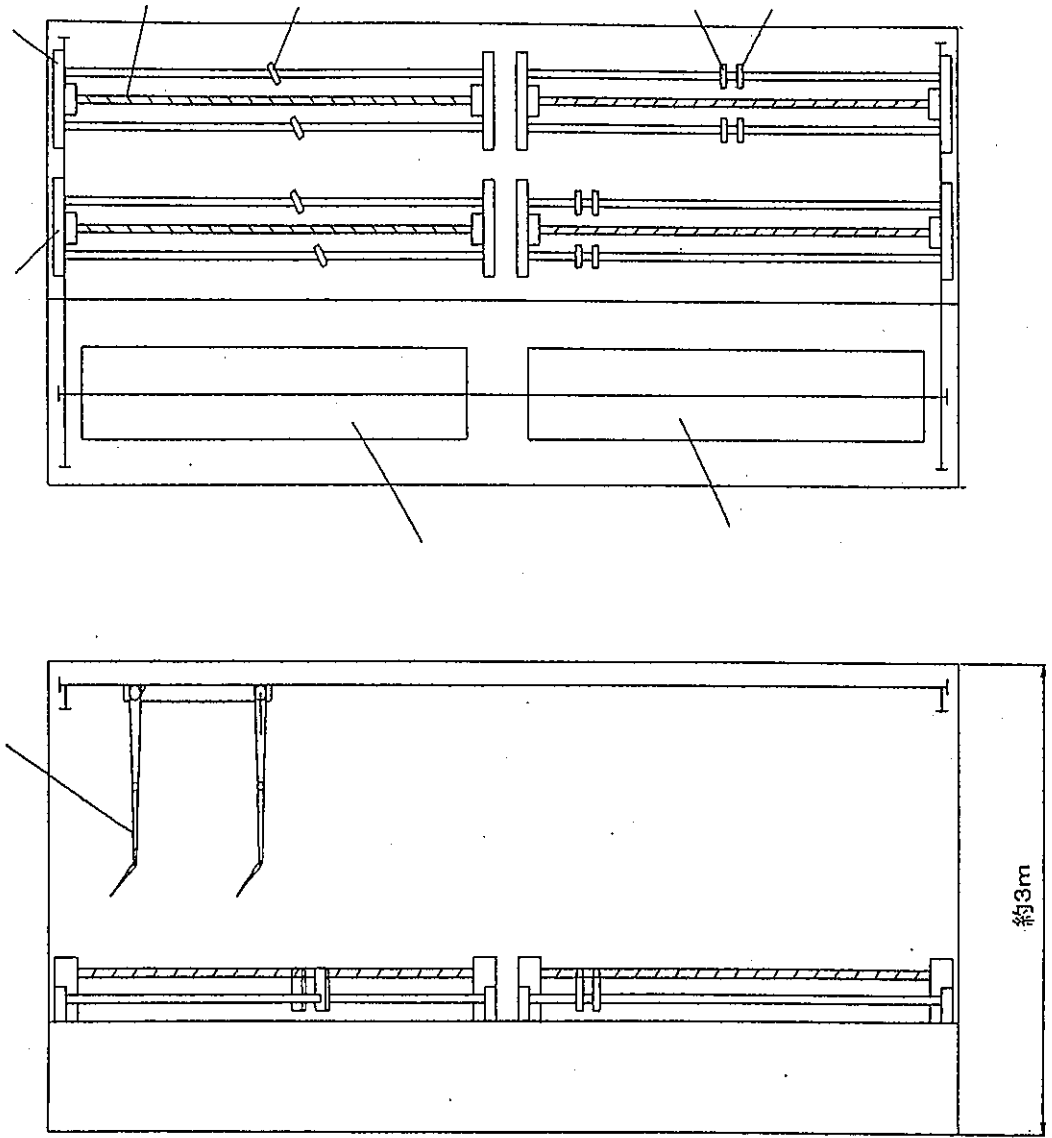


図 4-3-21 燃料検査設備主要機器 (燃料要素総合検査設備)

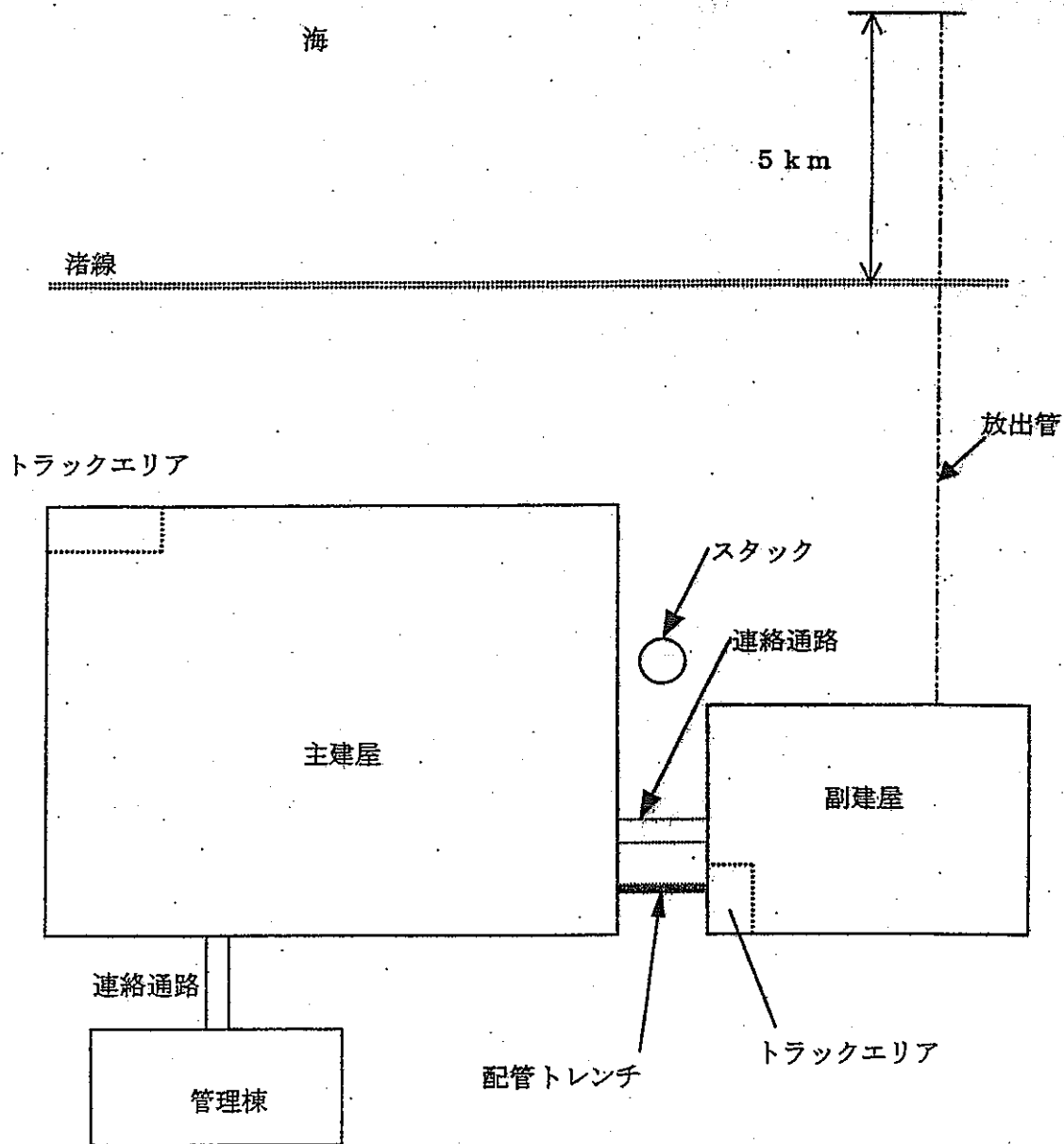


図4-3-22 施設全体配置イメージ(1)

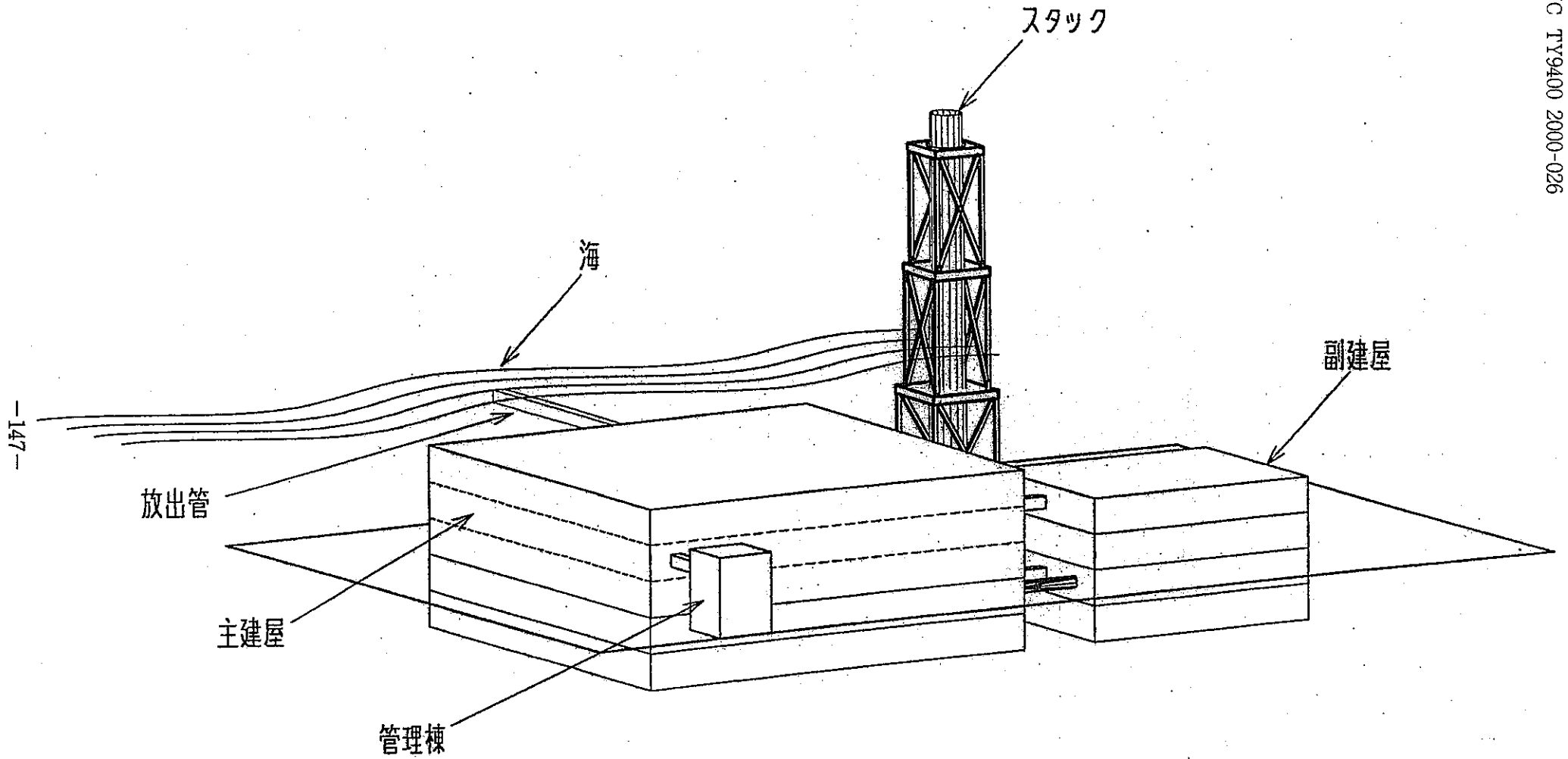


図4-3-23 施設全体配置イメージ(2)

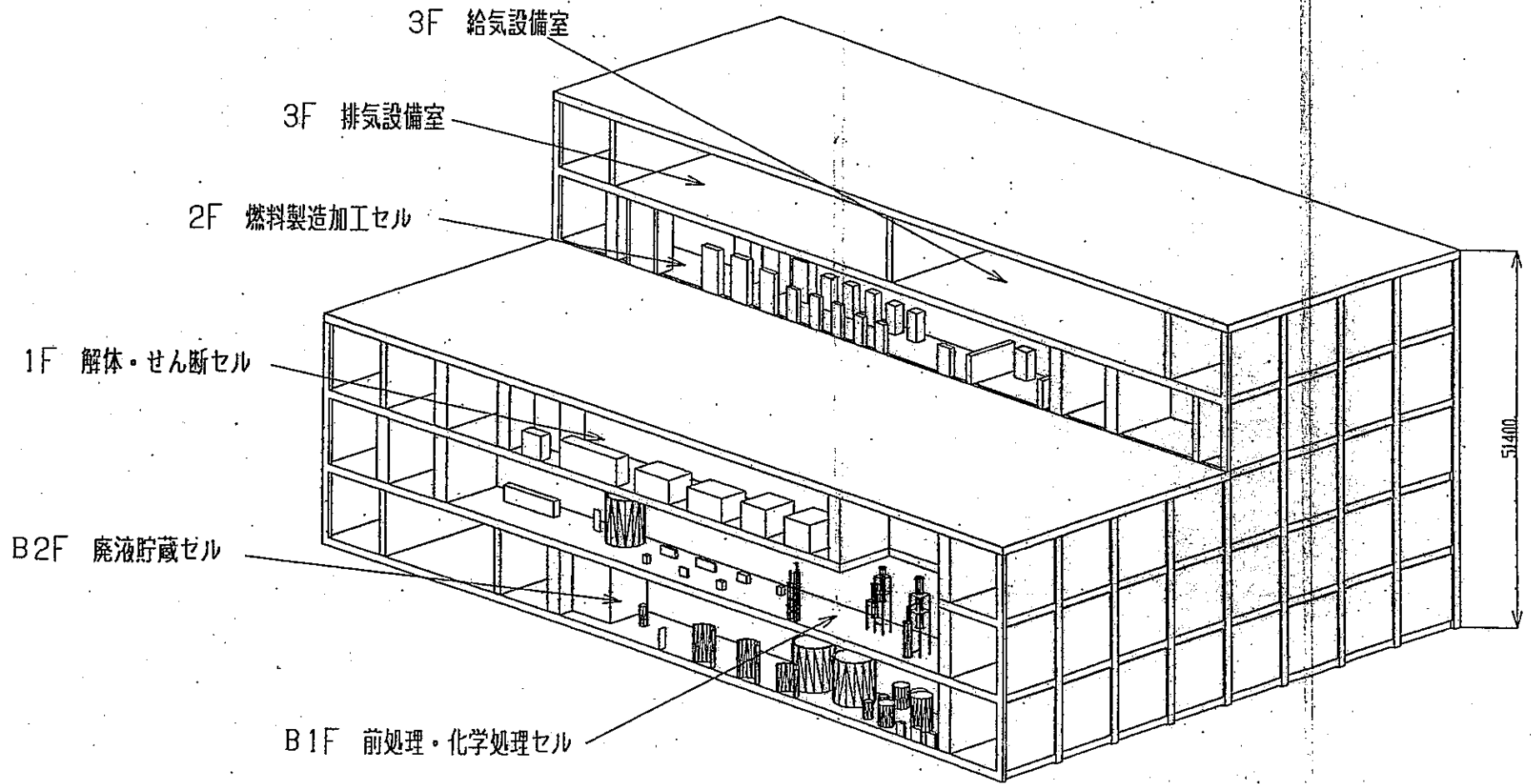


図4-3-24 建屋鳥かん図

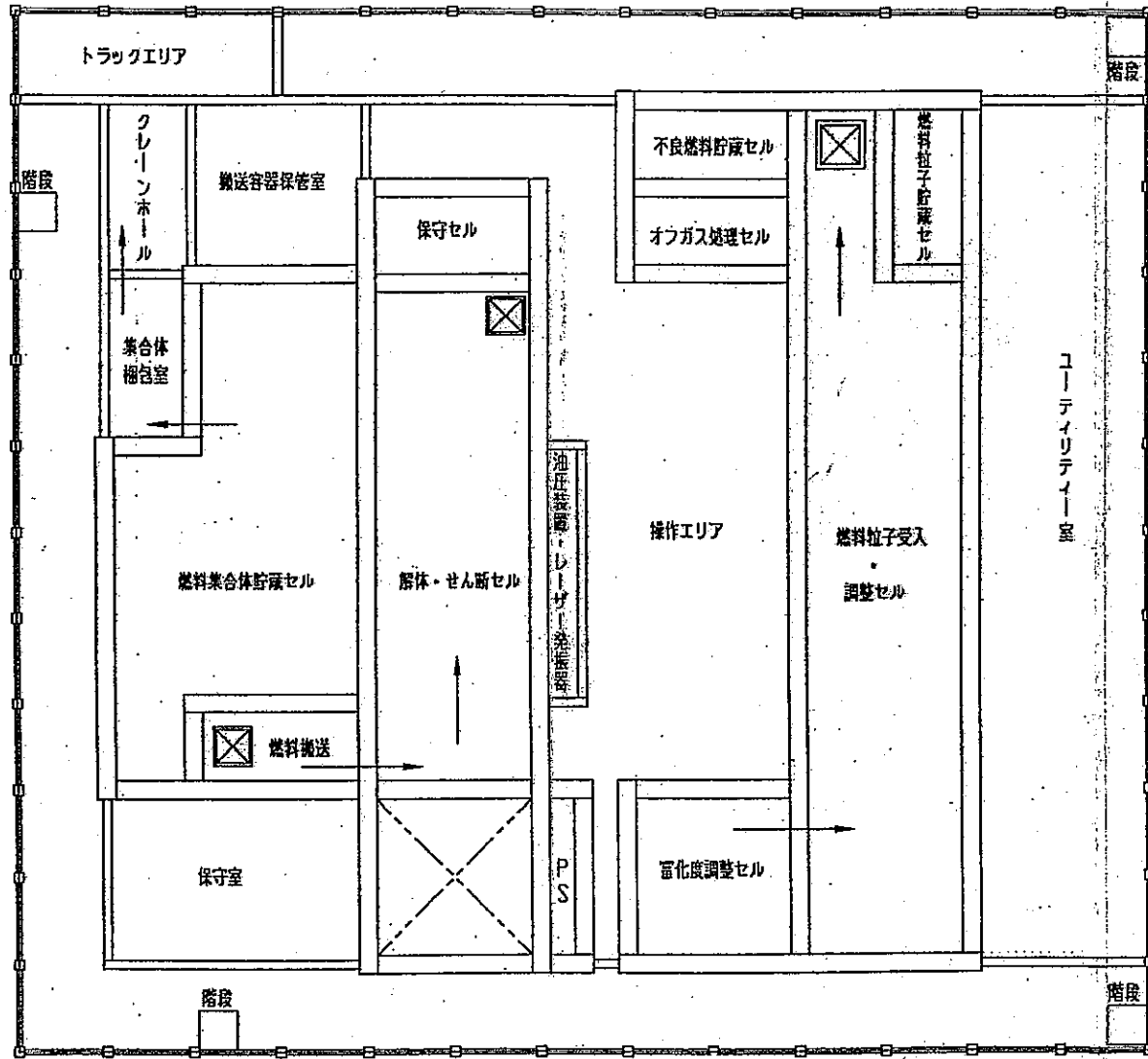


図4-3-25 主建家配置図 1F

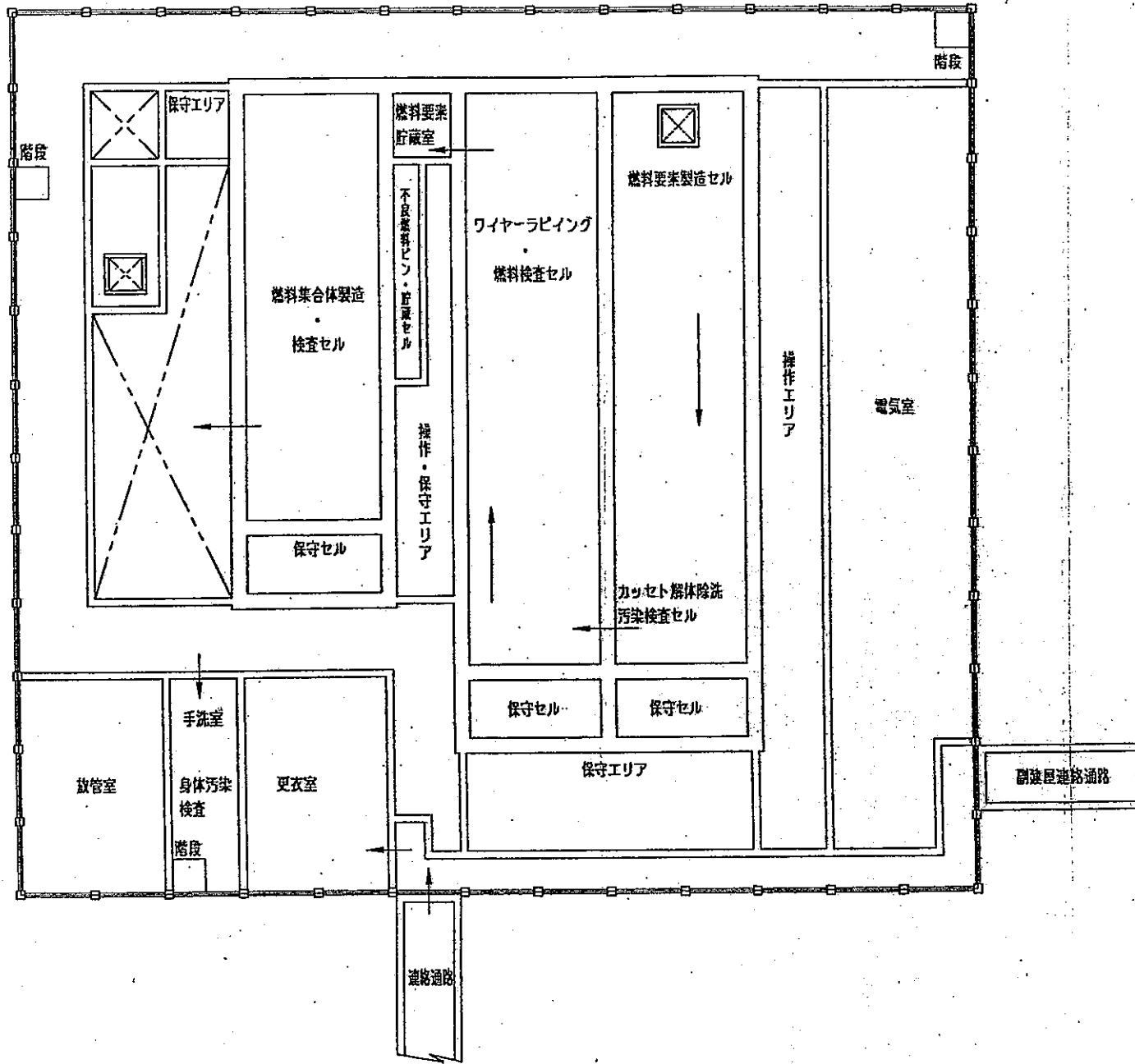


図4-3-26 主建家配置図 2F

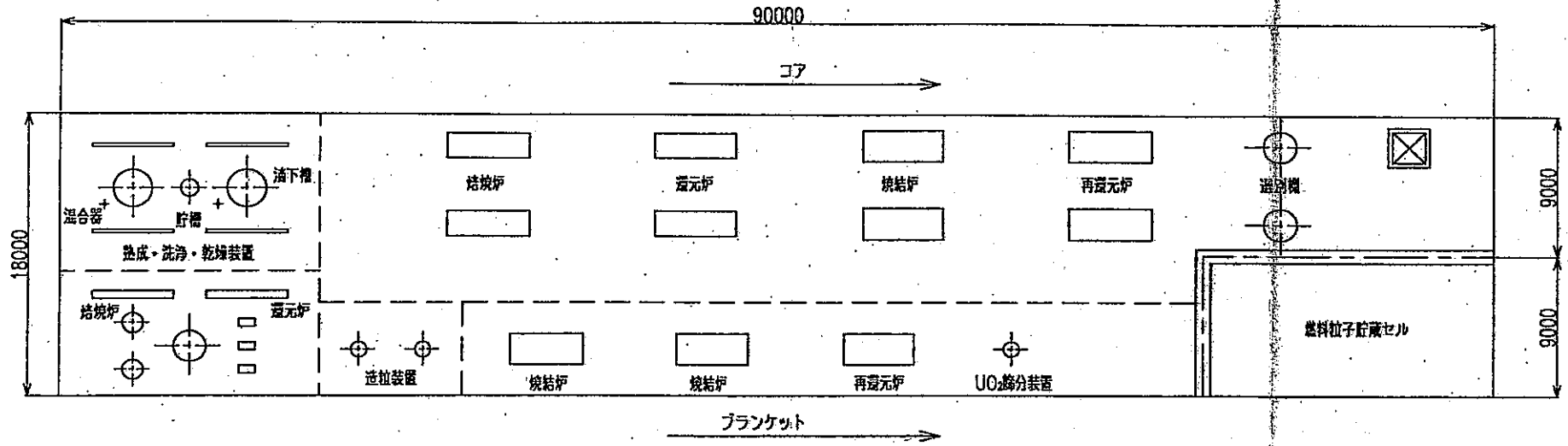


図4-3-27 燃料製造設備配置計画図

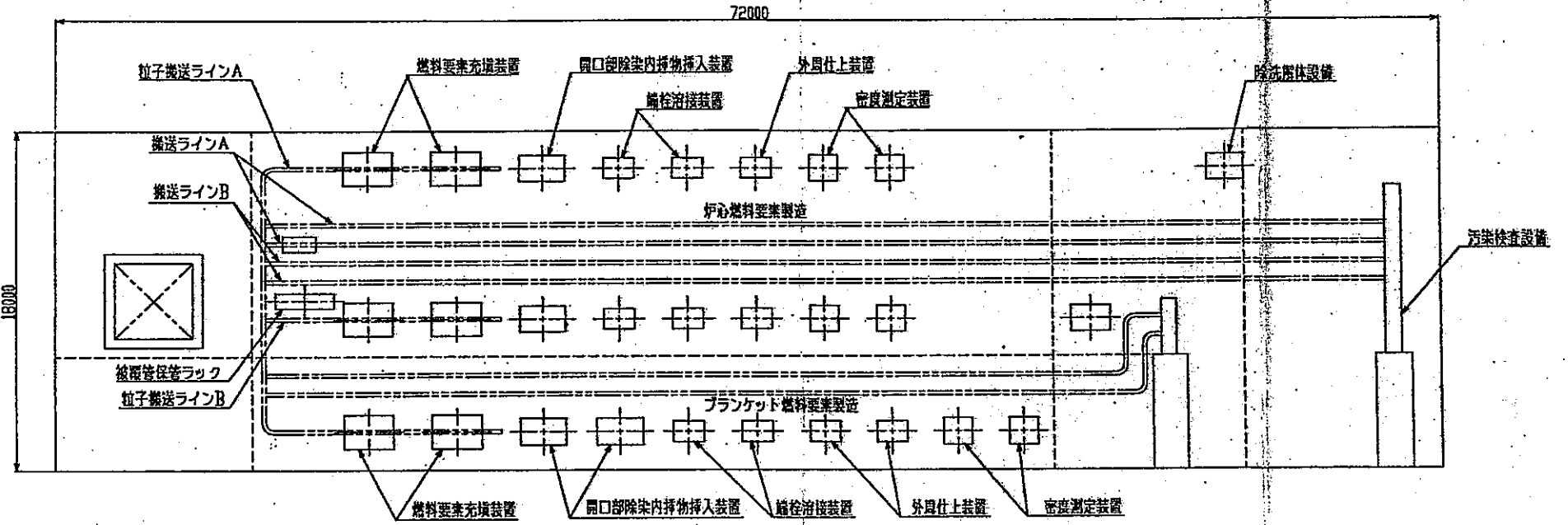


図4-3-28 燃料ピン加工設備配置計画図

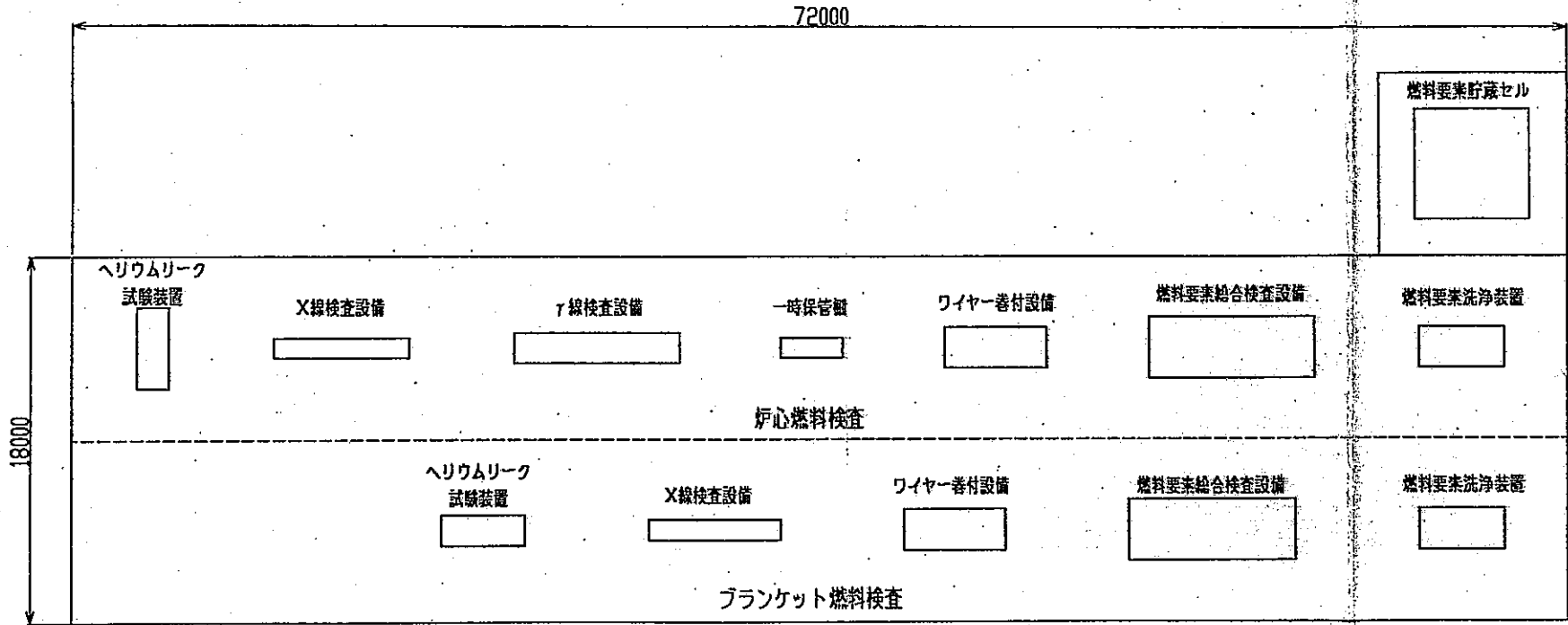


図4-3-29 燃料検査設備配置計画図

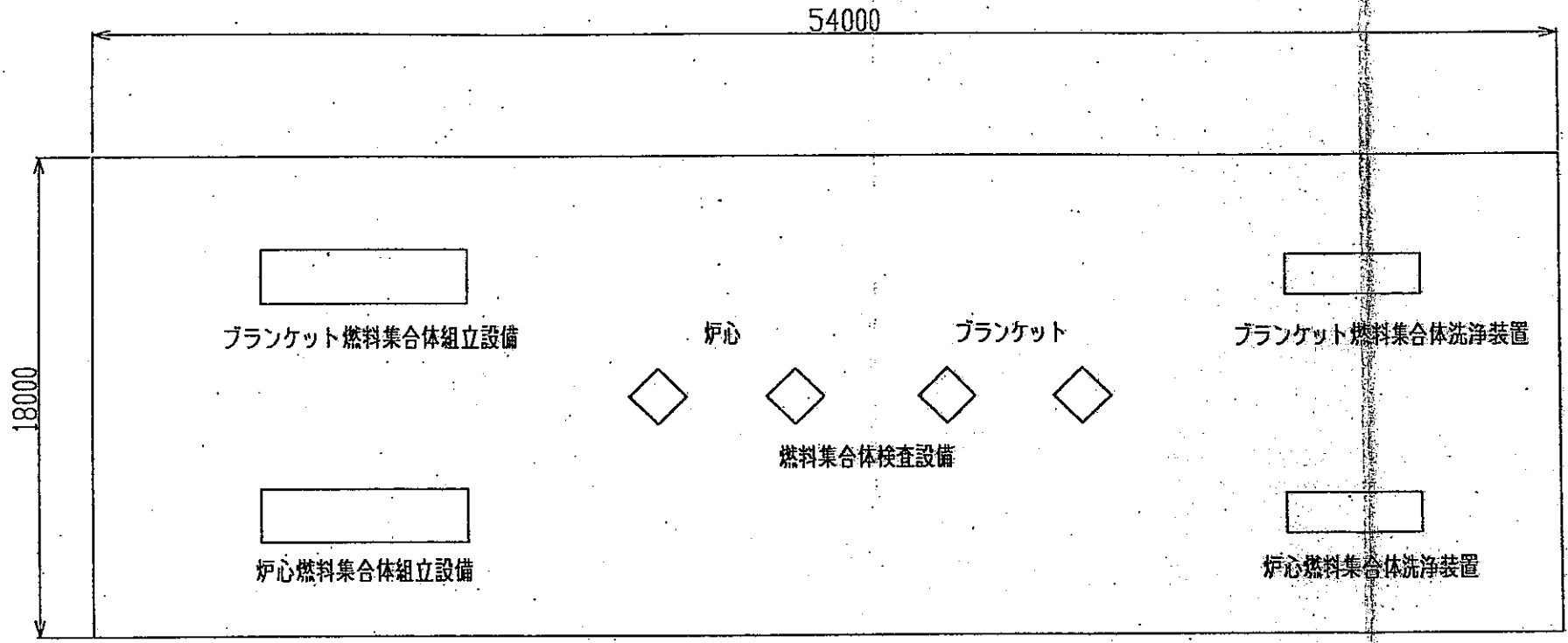
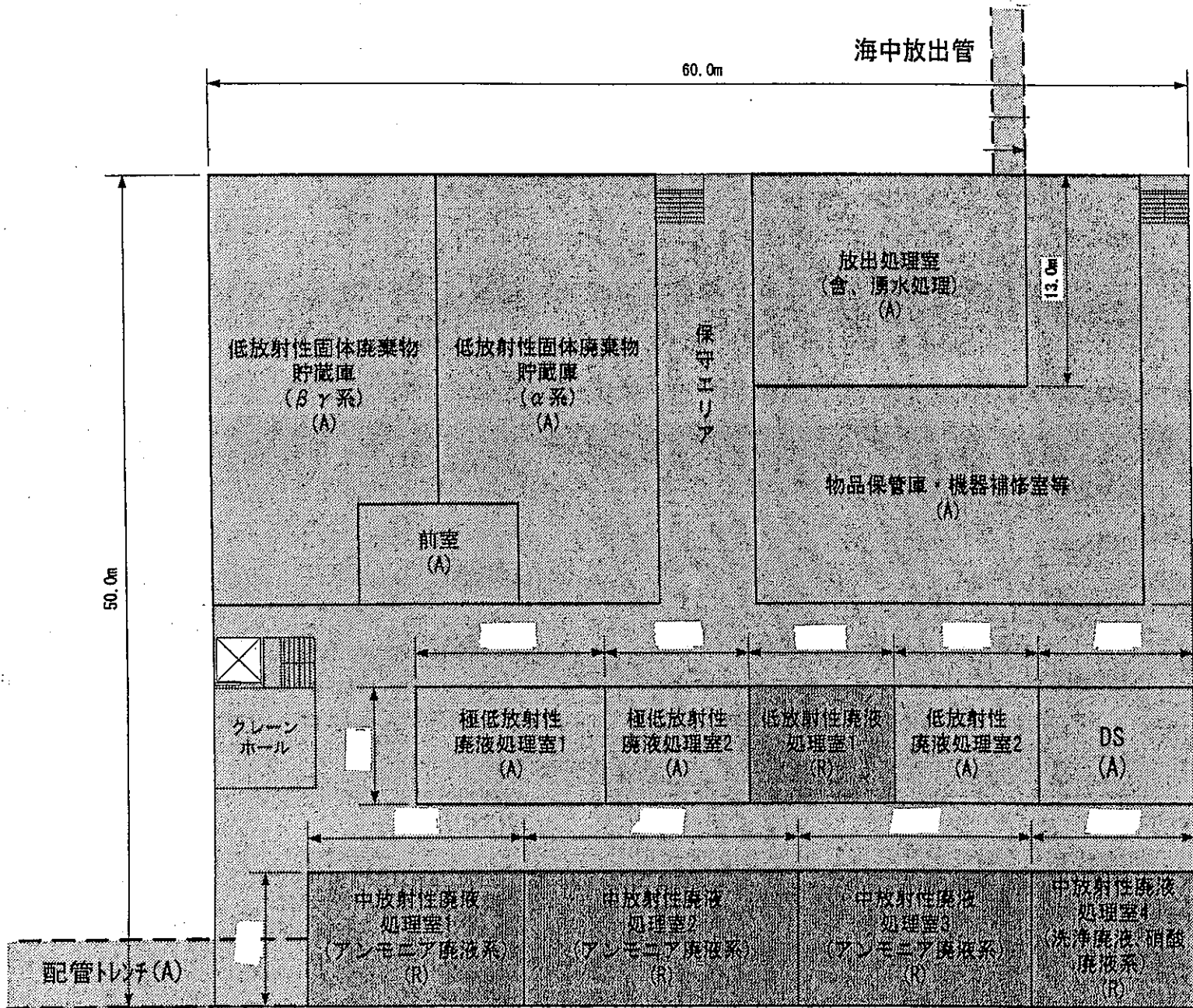


図4-3-30 燃料集合体組立，検査設備配置計画図



副建屋B2F

図4-3-31 副建屋配置図

連絡通路(G)	電気室		コールド機室		中央制御室	放射線管理室	表層計測検査室 一般検査室				検査室					2F (FL+6000)	
	クレーン ルーム	トラック ロック	エントランス ホール	物品 保管庫	放射線 管理室	放射線 検査室	放射線計測 管理室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	
連絡通路(A)	物品 保管庫		放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	1F (FL+0)
配管トレンチ	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	海中放油管
	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	放射線計測 検査室	60F (FL-14000)

副建屋断面図

図4-3-32 副建屋配置図

(2) 乾式再処理との組み合わせ

(i) 酸化物電解法

①設計の前提条件と基本方針

乾式再処理法の一つである酸化物電解法（ロシア RIAR 技術）による再処理システムと振動充填燃料製造システムとの一体化プラントについて、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を主な目的として、ロシア RIAR の再処理/燃料製造技術をベースとするリサイクルシステムを設定し、設計検討を行った。

再処理システムと燃料製造システム、高レベル放射性廃棄物処理・貯蔵設備と共通付帯設備等は同一建屋に設置するものとし、使用済み燃料/新燃料貯蔵設備と低レベル廃棄物処理・貯蔵設備は別建屋に設置するものとした。設計検討にあたっては、一体化によって主要プロセス設備と関係付帯設備、放射性廃棄物の処理設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置することを考慮した。

燃料製造システムの設計・評価範囲としては、再処理工程の電解プロセスで得られた MOX、 UO_2 、貴金属除去後の UO_2 と絞り電解による TRU 析出物を洗浄、乾燥後受け取り、分級後、サンプリングして Pu 富化度調整を行って顆粒とウランゲッターを混合し、外側/内側炉心および径ブランケット用振動充填燃料を製造する工程と、製造工程からの廃棄物発生量、燃料製造設備の経済性概略評価および今後の研究開発課題の検討までとした。

主要な設計条件を以下に示す。

- a. 製造規模：50tHM/年
- b. 製造燃料の基本仕様：再処理対象燃料は、150 万 kWe 出力の FBR 使用済み燃料とし、U,Pu 回収率は 99.9%以上、MA 回収率は基準ケースとして MA 回収工程を付加しない場合の U,Pu に随伴する量及び経済性へのインパクトが小さい範囲内での MA 回収行う場合の量を考慮した。また、FP 除染性能は多重サイクルを繰り返しても新燃料中の混入率が 2wt%/HM を上回らない程度とし、製造燃料の仕様を評価した。主要な製造燃料の仕様を表 4-3-1 に示す。外側炉心燃料は、Pu 富化度 15.02%、MA 含有率 0.31%、FP 含有率 0.6%などである。なお、燃料充填密度、密度公差、Pu 富化度の公差は各燃料共通とし、それぞれ 85%程度、 $\pm 5\%$ 以内、 $\pm 5\%$ 以内とする。
- c. 施設運転：年間の施設設備稼働率は 200 日とする。
- d. 設備稼働率、処理能力：設備稼働率、年間処理量及び設備装置の処理速度等を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。

- e.回収率：U,Pu の回収率は 99%以上を目標とする。
- f.貯蔵容量：製造した燃料集合体の貯蔵容量は、使用済み燃料と同じ 1 年分とし、基本的に使用済み燃料貯蔵建屋と同等の建屋とする。
- g.保守：機器の保守・補修は、機器の設置位置及びセル内でのメンテナンスエリアでの遠隔保守・補修を原則とし、インセルクレーンの定期検査のためのメンテナンスエリアは地上 2 階に設けるものとする。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・補修が可能なように配慮するものとし、地下 1 階の除染エリアで除染後行うものとする。

②プロセス設計

前記の設計の前提条件と基本方針のもとに検討した燃料製造プロセスフローと主要な物流をそれぞれ図 4-3-33 と図 4-3-34 に示す。各工程の基本的な仕様とその設定の考え方について以下に示す。

a. 顆粒の分級工程

再処理の電解工程で析出された MOX、 UO_2 、TRU 析出物は、粉碎、水洗・乾燥後、燃料製造設備へ受け入れられ、分級工程で 5 種類の顆粒サイズに分級される。

b. 顆粒の混合工程

分級工程で 5 種類に分級された MOX、 UO_2 、TRU 顆粒及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。

c. 振動充填/端栓溶接工程

下部端栓及びスペーサワイヤ付きの被覆管に、混合された顆粒等を振動充填するとともに、端栓を溶接して径ブランケット用、外側/内側炉心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。

d. 燃料集合体組立工程

燃料ピンを表面除染後、気密検査、燃料分布検査、寸法検査、重量検査及び外観検査を行って、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、鉛直度を測定して燃料保管場所へ払い出す。

e. 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。

f.再処理/燃料製造共通放射性廃棄物処理設備

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、高放射性廃棄物については、再処理/燃料製造建屋内の処理設備で処理を行い、低放射性廃棄物については、別建屋の設備で処理を行う。燃料製造では、燃料ピン製造及び燃料集合体組み立て工程から TRU 系不燃性廃棄物として、雑固体（消耗品）と非 TRU 系不燃性廃棄物として、雑固体（装置等）の発生が考えられるが、これらは圧縮後ドラム缶に入れ、セメントを充填する処理を行う。

g.主建屋ユーティリティ/共有設備

主建屋には再処理/燃料製造共通のユーティリティ/共有設備を収容するものとし、ユーティリティ/共有設備としては、建屋内の換気・空調、排気の浄化、空気汚染の拡大防止を行う換気・空調設備、電気制御設備、分析設備、塩素ガス除害や非常用電源を備えた非常用設備、放射線管理設備、計量管理設備その他からなる。

③設備機器設計

燃料製造プロセスにおける各工程設備機器毎に、設備機器の概要、物質収支と主要な機器リスト、設計図について以下に示す。

a.顆粒の分級設備

本設備は、燃料顆粒をサイズ別に3～6種類に分級する設備であり、分級された顆粒は混合設備に搬送され、適切な Pu 富化度に調整される。顆粒は、本設備で密・中・粗に分けたメッシュを2段設置したドラム中を通過し、5種類のサイズに分級される。設備には加振機が設置され、適切な周期でメッシュに振動を与えてメッシュの通過を促進し、目詰まりを防止する。分級の数は今後最適化が必要であるが、本設計では5種類とし、メッシュサイズは数十 μm ～約1mmで分類するものとした。

本設備機器の仕様の主要目と機器図を表4-3-2に示す。

b.顆粒の混合設備

本設備は、振動充填前に、分級した UO_2 、 PuO_2 顆粒及びウランゲッターを混合し、所定の比率にするための設備である。本設備は粉体工業分野で一般に用いられ、またペレット製造工程での粉末混合にも採用実績のある機構を採用するものとし、顆粒は調合機能をもつホッ

パーで所定の分量ずつ混合装置に投入され、混合された顆粒は顆粒容器で振動充填設備へ搬送される。

本設備機器の仕様の主要目と機器図を表 4-3-3 に示す。

c. 振動充填/端栓溶接設備

本設備は、所定の Pu 富化度に調整された顆粒を被覆管に振動充填するとともに端栓を溶接して燃料ピンを製造する設備である。混合設備で調合された顆粒を本設備のフィーダーに供給し、あらかじめ下部端栓とスペースワイヤを取り付けた被覆管をピンカートリッジで複数本を一度に搬送して設置する。なお、この方法はロシア RIAR と米国 ANL ですでに実績がある方法である。ピンカートリッジの容量は炉心燃料用が 46 ピン/カートリッジ (約 1/6 集合体分)、ブランケット用が 43 ピン/カートリッジ (約 1/4 集合体分) とした。次に被覆管を所定の位置に設置し、内部の真空引き後に He 置換を行い、フィーダーから軸ブランケット顆粒を供給し、振動充填を行う。この際、棒状の錘を被覆管内に挿入しておき、錘の降下長さで顆粒の充填率を測定する。続いて炉心燃料顆粒を振動充填して再度、軸ブランケット顆粒を充填する。この後ワイヤメッシュを円柱状に丸めた固定用スペーサーを挿入し、棒状の錘で押しつぶして固定して上部端栓を挿入し、溶接して密封する。

本設備機器の仕様の主要目と機器図を表 4-3-4、図 4-3-35 に示す。

d. 燃料集合体組立設備

本設備は、完成した燃料ピンの表面除染後、気密検査、燃料分布検査、寸法検査、重量検査及び外観検査に合格した燃料ピンを、さかさまに懸架したエントランスノズルの下でバンドルに組み立て、ラップ管に挿入し、エントランスノズルとラップ管を溶接して燃料集合体に組み立てるための設備である。

エントランスノズルはノックバーを下向きにして組み立て、設備上部に懸架した後、燃料ピンを下部端栓を上向きにして垂直に把持して下部端栓の穴がノックバーを向くように自転させて下部端栓をノックバーに差し込む。続いて同様の操作で所定の順序で燃料ピンを組み込み、バンドルが完成したら組み立て設備の下部に設置していたラップ管を持ち上げてエントランスノズルにはめ込む。組み立て設備の上部には 3 基の溶接トーチが集合体を囲むように 120° 間隔で設置されており、ラップ管を上昇させてトーチを回転させながら 3 箇所を同時

に溶接する。溶接トーチは溶接面との位置を自動的に調節しながら回転して溶接する。溶接後はカメラによる遠隔目視で外観検査を行う。燃料ピンリーク検出装置、ピン検査装置、集合体組み立て装置及び集合体検査装置の仕様の主要目と設備設計図を表 4-3-5～表 4-3-8、図 4-3-36 に示す。

e. 燃料集合体一時貯蔵、払い出し設備

本設備は、完成した燃料集合体を一時貯蔵し、また、貯蔵設備から燃料集合体を取り出し、輸送容器内に固定して輸送用トラックに積みつける設備である。

貯蔵容量は、使用済み燃料と同じ 1 年分であり、大型の乾式キャスクに収納し、自然空冷で保管する。また貯蔵建屋は、乾式キャスク 30 基分（1 基あたり 10 集合体分）の約 45m×30m の貯蔵エリアを有する。建屋概念図を図 4-3-37 に示す。

f. 再処理/燃料製造共通放射性廃棄物処理設備

本設備では、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である、TRU 系不燃性廃棄物の雑固体（消耗品）及び非 TRU 系不燃性廃棄物（装置等）を圧縮減容、セメント充填して固化処理を行う。圧縮減容装置では、現行湿式再処理プロセスで検討されている 1 軸圧縮装置で減容するものとし、非 TRU 系廃棄物を汚染しないよう、TRU 系と非 TRU 系とで別系統とし、必要台数は、再処理と合わせた 1 日あたりの廃棄物発生量がドラム缶で約 1.1 本と評価されることからそれぞれ 1 台で十分とした。また、セメント固化装置も同様に、TRU 系及び非 TRU 系廃棄物で別系統とし、必要台数は、廃棄物発生量が再処理と合わせて 1 日あたり約 0.3 本と評価されることから 1 台で十分であるとした。

g. 主建屋ユーティリティ/共有設備

主建屋には再処理/燃料製造共通のユーティリティ/共有設備として、建屋内の換気・空調、排気の浄化、空気汚染の拡大防止を行う換気・空調設備、電気制御設備、分析設備、塩素ガス除害や非常用電源を備えた非常用設備、放射線管理設備、計量管理設備が設置される。このうち換気・空調設備は、建屋内の換気・空調、排気の浄化、空気汚染の拡大防止を行う設備であり、管理区域と非管理区域はそれぞれ独立した換気・空調系設備としている。

管理区域の換気・空調系の系統構成は、汚染拡大防止の観点からワンスルーシステムとし、排気系はセル内排気を行うセル換気系とその他の排気を行う建屋換気系の2系統とした。換気回数は、グリーン区域が1回/h、アンバー・レッド区域が2回/h、セル及びセル相当室が3回/hとし、換気系は排気を排気フィルタ等で浄化できる構成とした。セル排気については、これに加えて高性能粒子フィルタを設け、セルへの給気ラインには逆流防止ダンパ、高性能粒子フィルタを設置する。

非管理区域の系統構成は再循環システムとし、給排気系統は制御室換気系とその他の区域の換気系の2系統とした。

④配置設計

a. 設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設は、主に再処理/燃料製造主要プロセスを含む主建屋、再処理/燃料製造プロセスで発生する廃棄物処理する廃棄物処理建屋、及び使用済み燃料や製造した燃料一時保管する貯蔵建屋の3区分とする。
- ・ 主建屋のプロセスセルはその壁が主建屋の外壁とならないよう、建屋中央部に配置する。その際、セル内及びセル間の物流及び建屋間の物流を考慮して配置する。
- ・ 主建屋で製造した新燃料は乾式キャスクに収納して、1年分の貯蔵容量を有する新燃料貯蔵建屋に払い出す。
- ・ 主建屋は、地下1階、地上2階建てとし、プロセスセル天井高さは9mとする。
- ・ プロセスセルを分割する場合は、プロセス処理の内容、セル間の物流、セル内の汚染の可能性等を考慮して構成する。また、計量管理しやすいようにセルの境界と物質収支区域(MBA)の境界を出来るだけ一致させるように分割する。
- ・ セル間の物質移動は容器に収納して行い、地下中1階を使用する。
- ・ 燃料製造工程から発生する廃棄物は主建屋に隣接する廃棄物建屋に地下搬送通路を通して移送する。
- ・ 地下1階には廃棄物搬送通路や燃料搬出入エリアを主体に配置する。
- ・ 機器の保守、補修は機器の設置場所及びセル内のメンテナンスエリアでの遠隔保守、補修が可能となるよう設計する。また、機器をセ

ル外に搬出し、除染後に近接保守、補修が可能となるよう設計する。
なお、近接保守、補修は地下1階の除染エリアで除染後に行う。

- ・地上1階にはプロセスセルを主体に配置する。管理区域への出入りエリアも設ける。
- ・地上2階には換気空調関連の機械室等を主体に配置し、プロセスセルのクレーンを定期検査するためのメンテナンスエリアを設ける。
- ・プロセスセル内でのマテハンは、天井走行クレーン型ロボット、軌道走行型搬送台車の軌道、専用搬送装置を単独あるいは適切に組み合わせて使用する。
- ・プロセスセル内の機器配置は、被搬送物の機器への搭載を考慮し、搬送台車の軌道を中央にとり、両側にプロセス機器を設置する。
- ・セル内での主要なマテハンの動線を短くするよう配慮する。

b. 配置設計の概要

設備機器の主建屋内配置の概要を以下に示す。

(i) 主建屋内配置

主建屋は、再処理/燃料製造工程を収納したプロセスセルとサービス系、制御室等の施設から構成した。遮へい機能はセル壁で担保するものとし、施設内のエリア区分、プロセス機器や保管場所でのインベントリーを考慮して壁厚を決定し、外壁厚は一律1500mm、管理区域と非管理区域との境界は500mm、レッドエリアと他のエリアの境界は1500mm等とした。燃料製造工程に係る建屋内配置を図4-3-38、図4-3-39に、燃料ピン製造セルと集合体組み立てセル内の製造設備機器の配置を図4-3-40、図4-3-41に示す。施設建屋は地下1階、地上2階の3階建てで、約93m×58m×高さ25mである。燃料の受け入れ払い出し及び運転員の出入りは地上1階で行う。また、集合体組み立てセルで完成した新燃料は、床ハッチに地下1階から乾式キャスクに装荷して、キャスクに収納した状態で保管し、炉サイトへ払い出す。

機器の設置場所でメンテナンス出来ない場合はセル内の鉛ガラスを設置したメンテナンスエリアに天井クレーンで移送し、マニピュレータを用いて実施する。近接保守、補修が必要な機器は機器搬出ハッチから地下1階の搬送エリアの台車上にプロセスセルの天井クレーンで吊り降ろし、除染エリアで除染後、メンテナンスを行う。廃棄物は同じ搬送エリアを経由して隣接した廃棄物処理建屋へ移送する。

⑤ システムの特徴

a.安全性評価

燃料製造設備に関する現行の安全審査指針としては、ウラン加工施設安全審査指針があるのみで、この中で事故時条件に対応する選定事象として、有機溶媒や水素ガス等の火災、爆発、燃料粉末等の飛散、漏洩、自然災害が規定されている。これらはいずれも運転時の異常な過渡変化を越える事象であるため、本評価にあたっては乾式リサイクル施設の特異性を考慮して、現行の再処理施設安全審査指針の考え方を参考にして、安全性の考え方を検討した。

燃料製造設備に関する運転時の異常な過渡変化としては、以下の項目が考えられる。

(i) 火災への拡大

空気混入による火災への波及、拡大を防止する。必要な温度・酸素濃度監視とインタロックを装備し、温度異常を防止するとともに密封機能を有する容器への収納を行う。

(ii) 臨界への拡大

核燃料物質の質量の異常増加による臨界事故への波及、拡大を防止する。ダブルバッチを考慮した保守的な臨界制限評価により、取り扱い制限を設定し、機器容量を制限することで発生を防止する。また、必要に応じて幾何的に臨界の生じない形状を採用する。

(iii) 冷却機能の低下

冷却機能の低下による燃料の温度異常上昇を防止する。電源喪失等で冷却機能が喪失しても自然冷却によりバウンダリを健全に保持できるようにする。

(iv) 外部電源喪失

外部電源が喪失した場合、各種機能の一時喪失が運転時の異常な過渡変化を越える事象に波及、拡大することを防止する。安全上重要な監視、インタロック機能は無停電電源を用いるとともに長期電源喪失が安全上問題となる設備については非常用電源を整備する。

(v) ウランゲッター使用に伴う事象

ウランゲッター使用に伴う事象としては、空気の混入等により酸素と接触して生じる火災への拡大や誤操作混合による臨界への拡大等であり、いずれも上記の (i) ~ (iv) に包絡される。

施設の耐震安全性については、現状の湿式の再処理施設安全審査指針及びそれに準拠した六ヶ所再処理・廃棄物事業所の耐震設計をベースに、ウラン燃料製造施設の耐震性の考え方も考慮に入れ、低除染燃料を取り扱う乾式リサイクル施設の特異性を考慮して耐震重要度の

考え方を検討した。顆粒分級、混合、振動充填等の燃料ピン製造セルの主要機器は、耐震性の重要度分類をBクラスに分類し、燃料ピン端栓溶接以降の燃料集合体組み立てに至るラインは密封状態で取り扱われるものについては、その機器の機能が喪失しても一般公衆に与える放射線の影響が十分小さいと考えられるため、Cクラスに分類するものとした。

b. 経済性評価

再処理との一体型プラントの燃料製造部分の建設費の概算は、プラント全体の約 1/5 となった。また、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約 1/2、ユーティリティ・共通設備が約 1/4、建屋・電気・換気設備が約 1/4 となった。

c. 核不拡散性評価

製造プロセスの各工程に、Pu が単独で存在する可能性はほとんどないと考えられる。また、計量管理技術の点からは、従来の湿式再処理プロセスと比較して、乾式再処理では燃料を均一溶解しないため分析定量が困難になることが予想されることから、乾式プロセス上の利点を失うことのない計量管理システムの検討が必要となる。そこで、本プロセスでの核物質の Pu の形態を考慮して使用済み燃料受け入れから製造した新燃料集合体の貯蔵・払い出しまでの全工程を適切と考えられる物質収支区域 (MBA) に区分し、主要測定点 (KMP) を設定し、主要測定点での計量方法を採用するものとし、燃料集合体解体工程を MBA1、ハル洗浄・燃料再処理・塩除去工程を MBA2、燃料ピン加工・集合体組み立て工程を MBA3、燃料貯蔵エリアを MBA4 とした。

d. 環境負荷低減性評価

燃料製造工程から発生する廃棄物はメンテナンス廃棄物がほとんどと考えられる。燃料ピン製造工程からの高レベル TRU 不燃性廃棄物としては、分級装置の雑固体 (消耗品) 及び雑固体 (装置等) の年間の発生量は 200l ドラム缶単位でそれぞれ 1 本ずつと評価した。発生頻度はそれぞれ 1 年、10 年とした。また、ホッパーの交換に伴って発生する高レベル TRU 不燃性廃棄物は、年間 4 本、発生頻度は 1 年と評価した。集合体組み立て工程からの高レベル TRU 不燃性廃棄物は、雑固体 (消耗品) の年間 1 本、発生頻度は 1 年とした。一方、燃料ピン製造工程からの低レベル非 TRU 不燃性廃棄物としては、燃料計量装置の雑固体 (装置等) が年間 9 本、発生頻度は 10 年と評価した。また、集合体組み立て工程からの低レベル非 TRU 不燃性廃棄物は、組み立て装置雑固体 (装置等) の年間

2本、発生頻度は10年と評価した。

e. 今後の技術開発課題

プロセス成立性に係る課題では、振動充填密度向上のためのコールド/ホット試験、照射データの取得、ウランゲッターまたは低O/M粒子の製造技術開発が重要であり、機器開発ではプロセス機器の詳細設計と稼働率向上、回収ロスの低減化、耐放射線性の向上を目指した機器の開発が重要課題である。このほか運転保守・補修性の向上のためのシミュレーションによる成立性評価を含めたマテハン技術の開発が重要課題である。

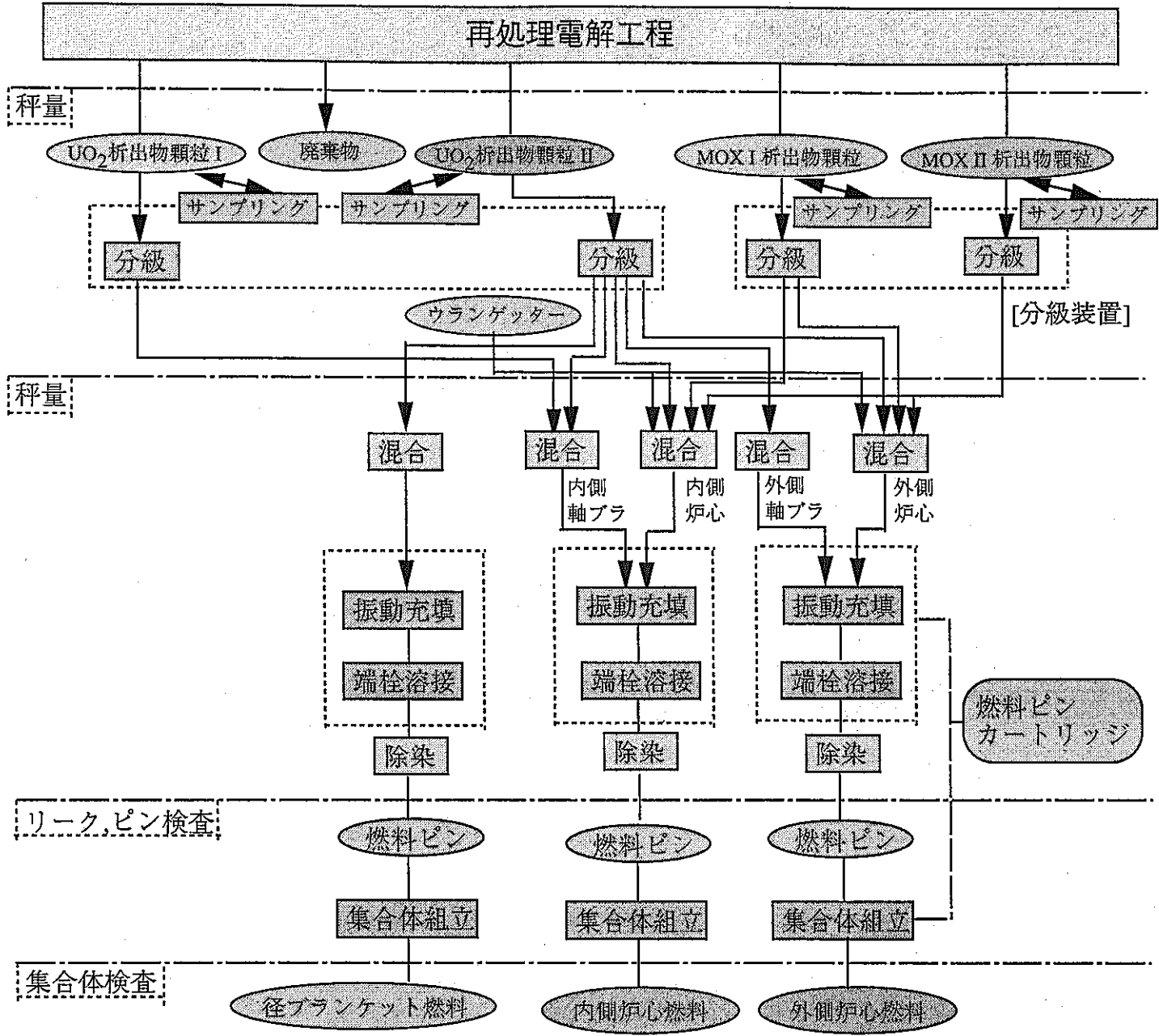
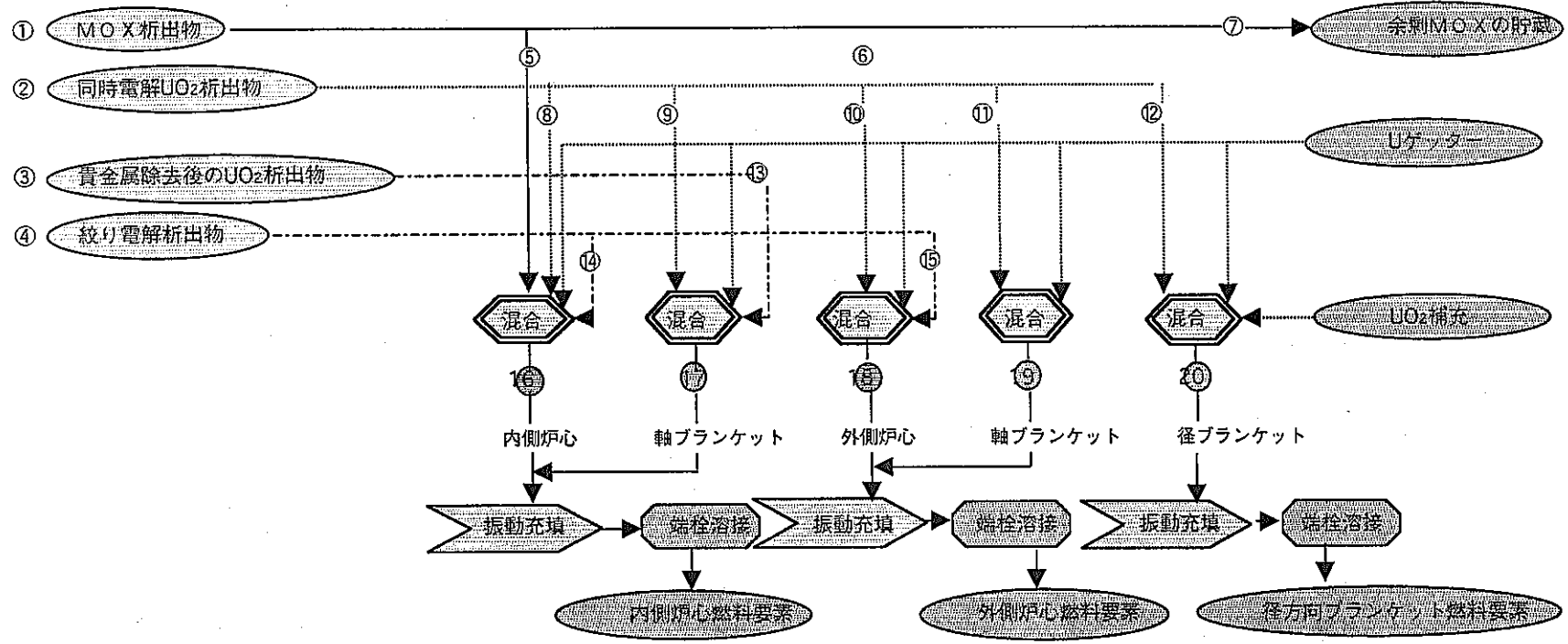
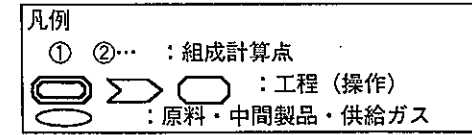


図4.3.33 酸化物電解法振動充填燃料製造プロセスフロー



物質収支評価結果

物流ポイント	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
U	45.7	148.47	12.73	0.25	49.91	42.62	25.31	24.61	58.33
Np	0.02	0.07	0.01	0	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03
Pu	23.43	0.13	0.13	0.13	10.68	0.16	9.65	0.02	0.05
Am	0.01	0.01	0.01	0.69	0.49	0.02	0.21	0	0.01
Cm	0	0	0	0.21	0.15	0.01	0.07	0	0
FP合計	0.32	0.57	0.32	0.45	0.57	0.44	0.29	0.1	0.23
Uゲッター					4.61	3.22	2.65	1.86	4.4
Pu富化度	33.90%	0.10%	1.00%	10.10%	16.20%	0.34%	25.50%	0.08%	0.08%
FP濃度	0.46%	0.38%	2.42%	25.74%	0.86%	0.95%	0.77%	0.36%	0.36%

図4.3.34 プロセス検討と物質収支評価 酸化物電解法の燃料製造プロセスフローダイアグラム (PFD)

表 4-3-2 機器リスト 分級装置

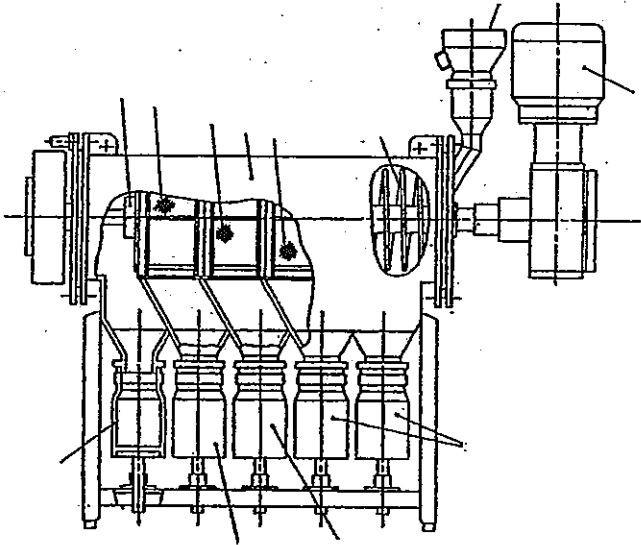
機器名称	分級装置	方式	篩い分け法
概要	<p>密・中・粗に分けたメッシュのドラム中を通過することで3種類のサイズに分級する。これを2段設置して5種類の顆粒サイズに分級する。装置には加振機を設け適切な周期でメッシュに振動を与えてメッシュの通過を促進すると共に目詰まりを防止する。</p>		
主要目	<p>(1)外形寸法 W 約 1 m×D 約 3 m×H 約 3 m (2)主要材料 構造材：SUS</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>分級装置 3種分級ユニットイメージ</p> </div>		

表 4 - 3 - 3 機器リスト 混合装置

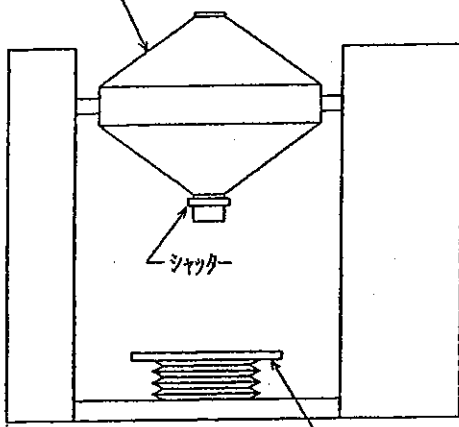
機器名称	混合装置	方式	ダブルコンカル式
概要	振動充填前に、分級した UO ₂ /Pu ₂ 顆粒及びウランゲッターを本装置で混合し所定の比率にしておく。調合機能を持つホッパで所定の分量ずつ混合機に投入し、混合する。混合した顆粒は顆粒容器で振動充填装置に搬送する。		
主要目	<p>(1)外形寸法 W 約 2 m × D 約 2 m × H 約 3 m</p> <p>(2)主要材料 構造材：SUS</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> ダブルコンカル混合部 イメージ </div>		

表 4 - 3 - 4 機器リスト 振動充填・端栓溶接装置

機器名称	振動充填・端栓溶接装置	方式	振動充填
概要	下部端栓及びスパーク付付きの被覆管にブラケットも含めて振動充填で燃料ピンを製造し、TIG 溶接で上部端栓を一度に溶かして密封する。		
主要目	(1)外形寸法 W 約 3 m×D 約 2 m×H 約 6 m (2)主要材料 構造材：SUS		
	外形図	図 4-3-35	

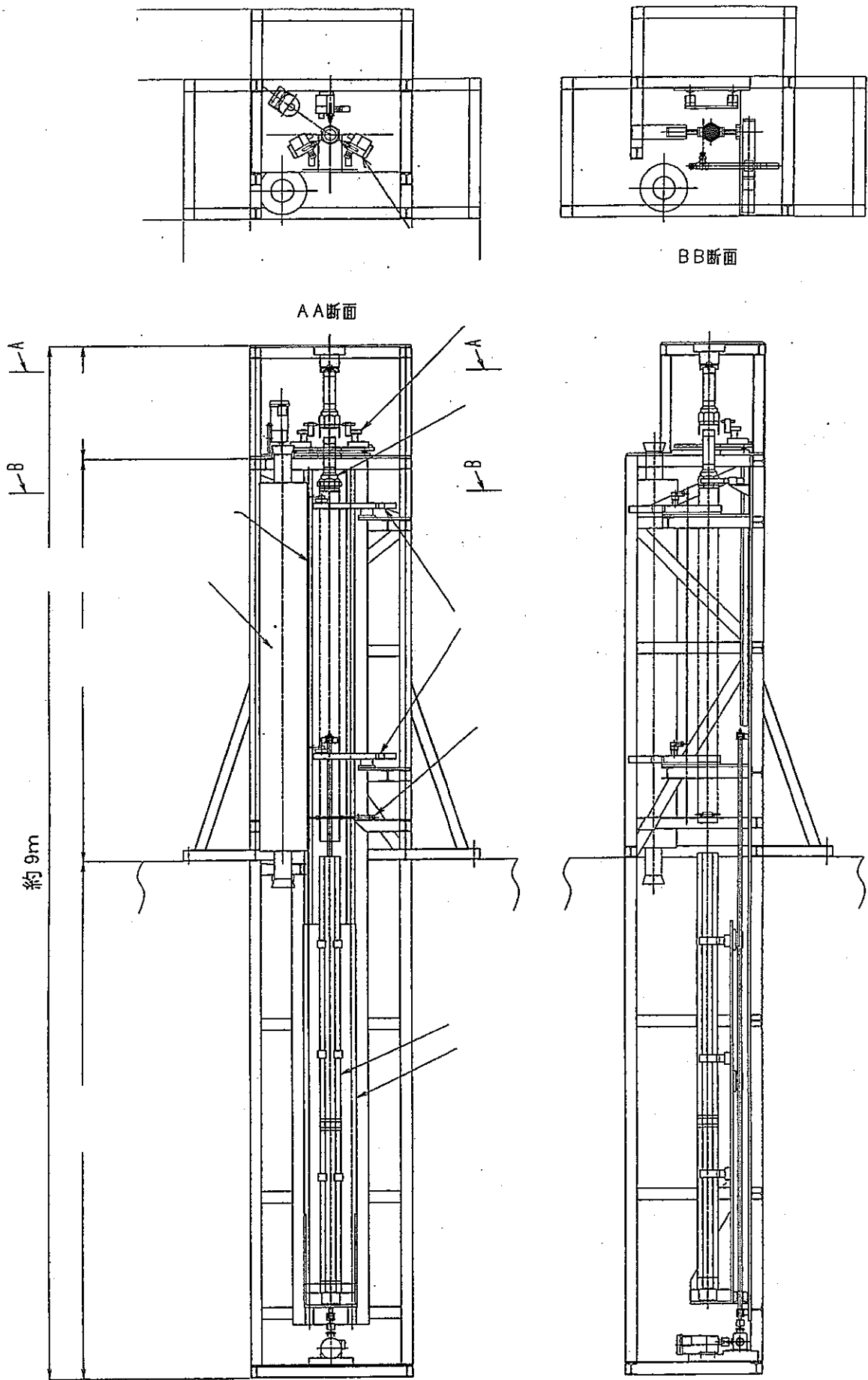


図 4-3-35 燃料集合体組立て装置

表 4-3-5 機器リスト リーク検出装置

機器名称	リーク検出装置	方式	He リーク検査方式
概要	完成した燃料ピンの表面除染後、ピンカートリッジごと密封容器に入れ、まとめて真空引きして気密性を確認する。不合格となった場合は、燃料ピンを2分しながら再検査し、不合格ピンを特定して燃料ピン製造セルへ転送する。		
主要目	(1)外形寸法 W 約 1 m×D 約 2 m×H 約 4 m (2) 主要材料 構造材：SUS		

表4-3-6 機器リスト ピン検査装置

機器名称	ピン検査装置	方式	γ線測定方式
概要	<p>燃料ピンの気密検査後、ピン検査装置で燃料の密度分布、プルトニウム濃度及び全プルトニウム量の測定を行うと共に、全長測定、重量測定及び外観検査をおこなう。</p> <p>なお、径ブランク燃料ピンについてはプルトニウム関連の検査は行わない。なお、気密試験以降はピンセットを上下反転して取り扱う。</p>		
主要目	<p>(1)外形寸法 W約1m×D約2m×H約4m</p> <p>(2)主要材料 構造材：SUS</p>		

表 4-3-7 機器リスト 燃料集合体組立て装置

機器名称	燃料集合体組立て装置	方式	縦置き懸架方式
概要	完成した燃料ピンの表面除染後、気密検査、燃料分布検査、寸法検査、重量検査及び外観検査に合格したものをを用いて、さかさまに懸架したエントランスノズルの下でバンドルに組み立て、これをラッパ管に挿入し、エントランスノズルとラッパ管を溶接して燃料集合体を完成させる。		
主要目	(1)外形寸法 W 約 3 m×D 約 2 m×H 約 9 m (2)主要材料 構造材：SUS		
	外形図	図 4-3-36	

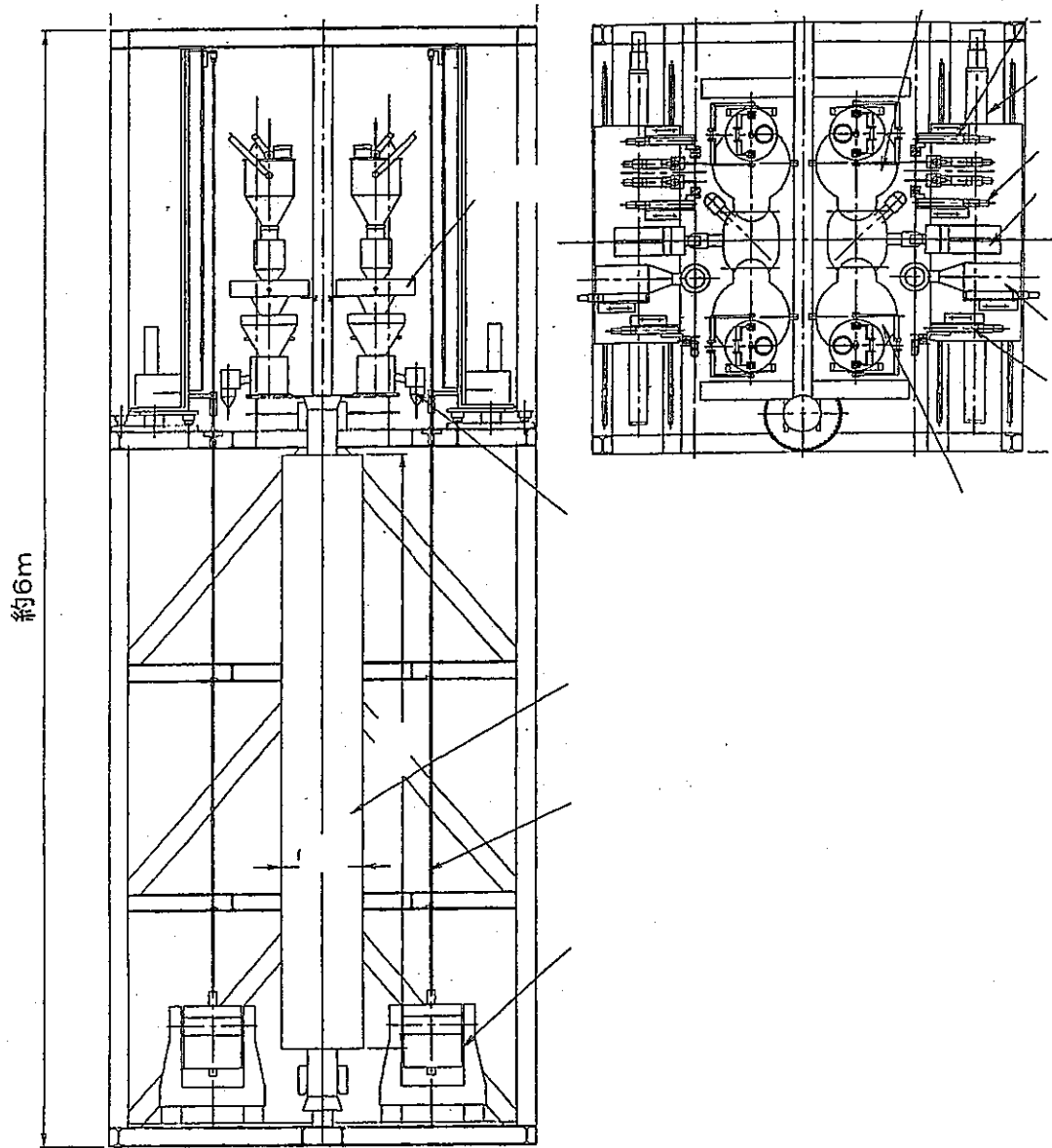


图 4-3-36 振动充填端栓溶接装置

表 4 - 3 - 8 機器リスト 燃料集合体検査装置

機器名称	集合体検査装置	方式	縦置き方式
概要	集合体が組み上がった後、集合体の各種寸法、重量、鉛直度を測定して、燃料保管所へ払い出す。		
主要目	(1)外形寸法 W 約 1 m × D 約 1 m × H 約 5 m (2)主要材料 構造材：SUS		

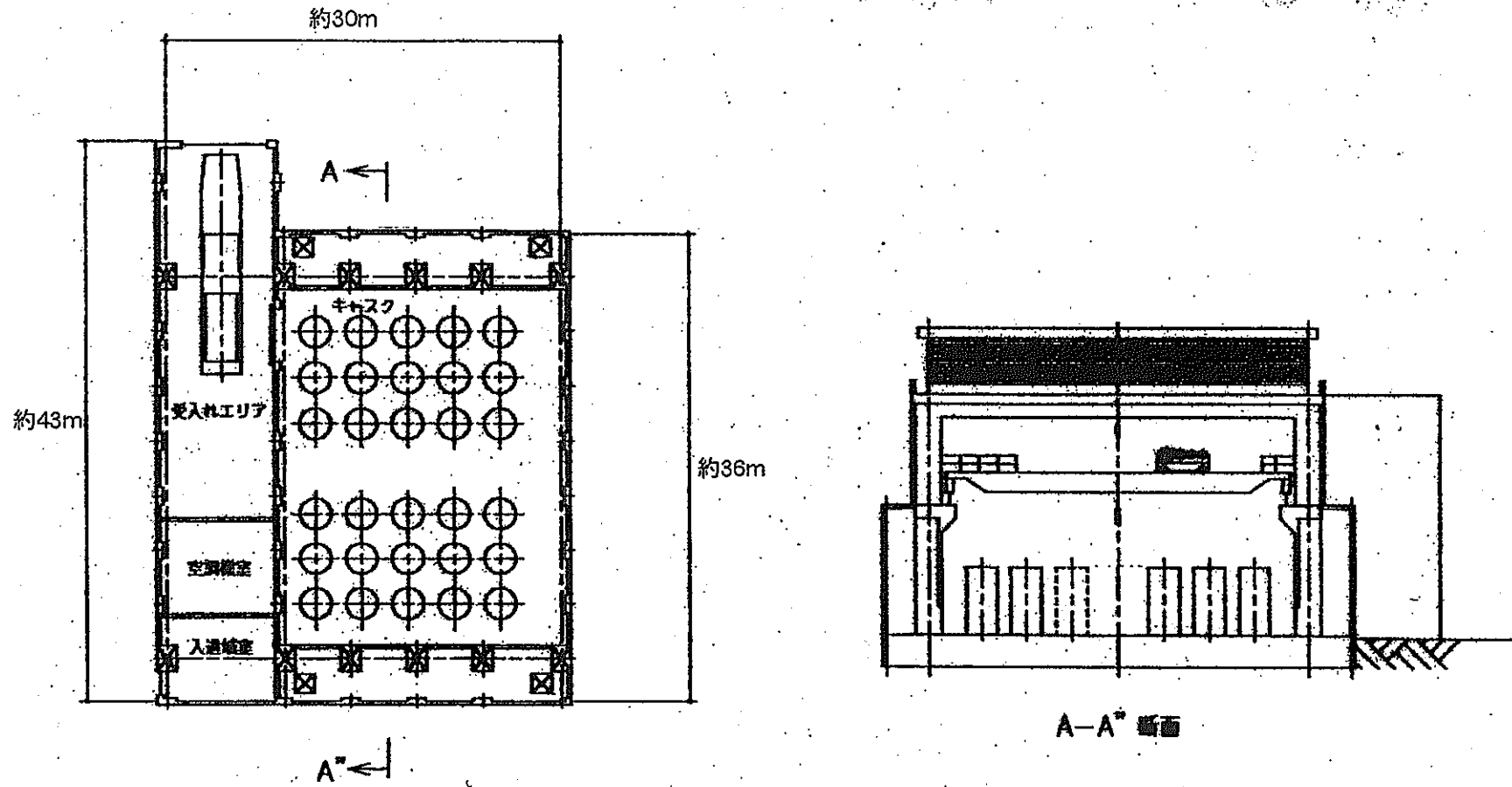


図 4-3-37 使用済み燃料貯蔵建屋 概念図

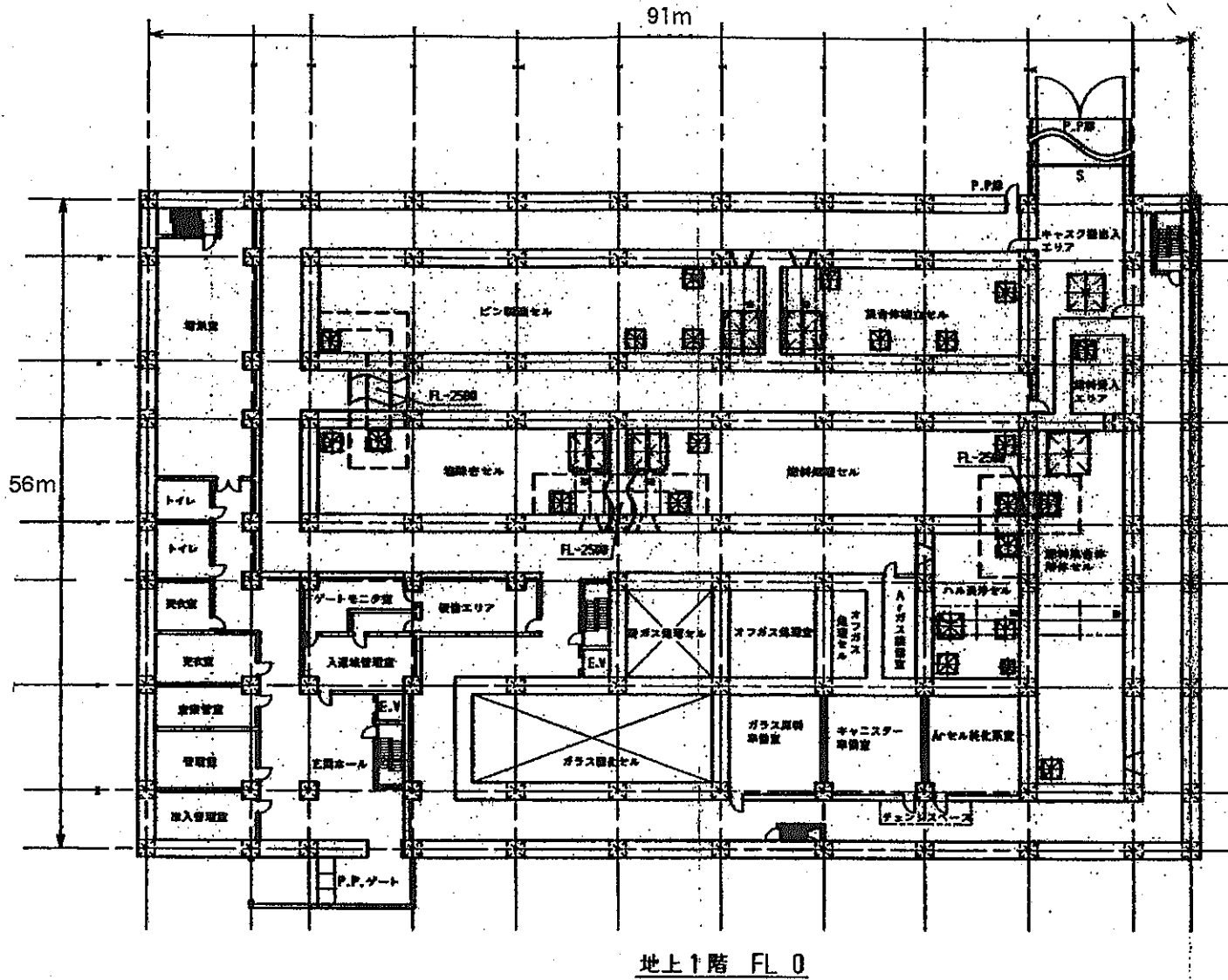


図 4-3-38 酸化物乾式再処理施設 (50t) 建屋内配置図 地上1階

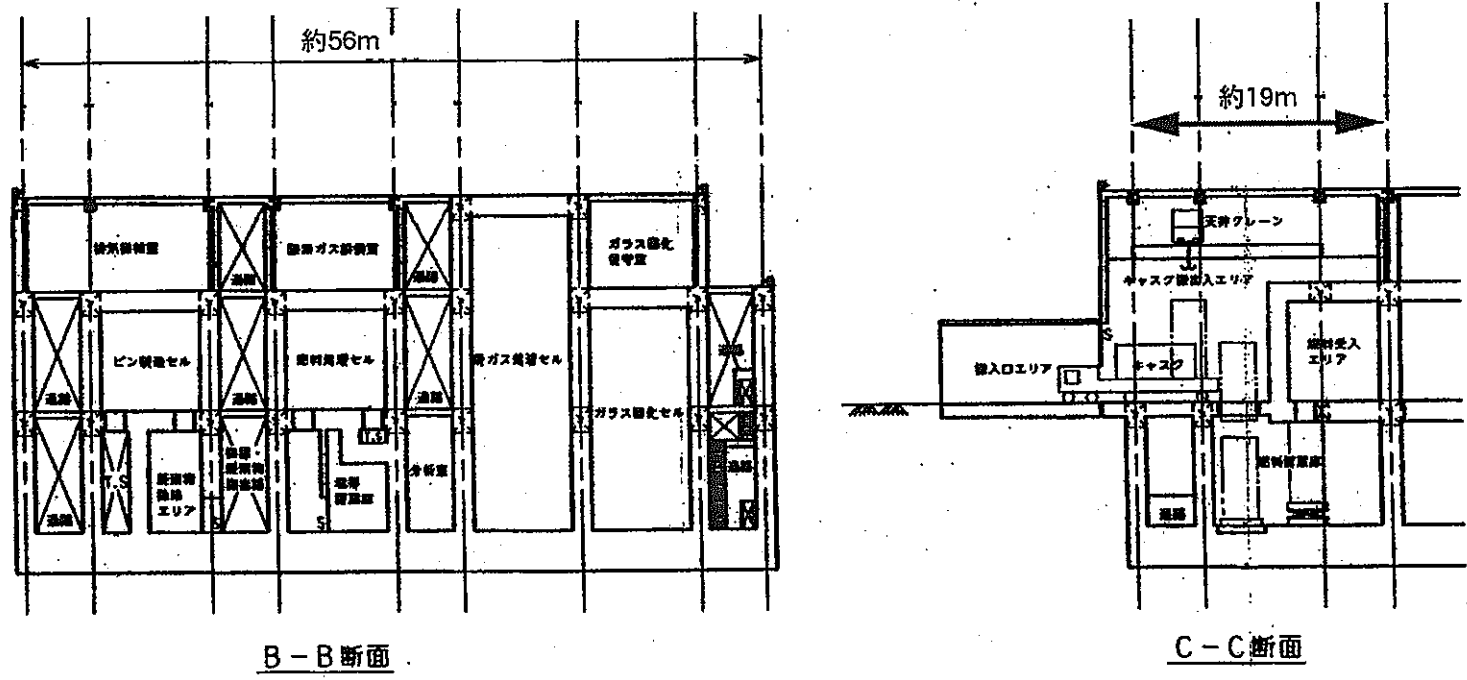
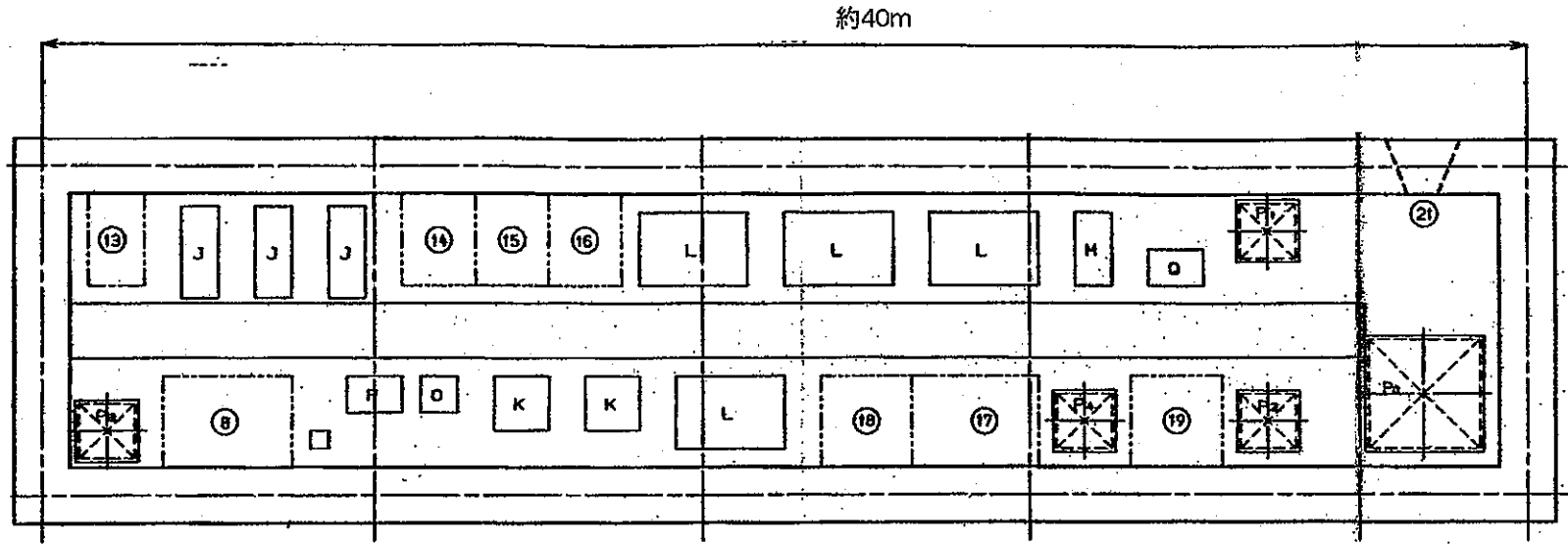


図 4-3-39 酸化物乾式再処理施設 (50t) 建屋配置図 B-B,C-C断面



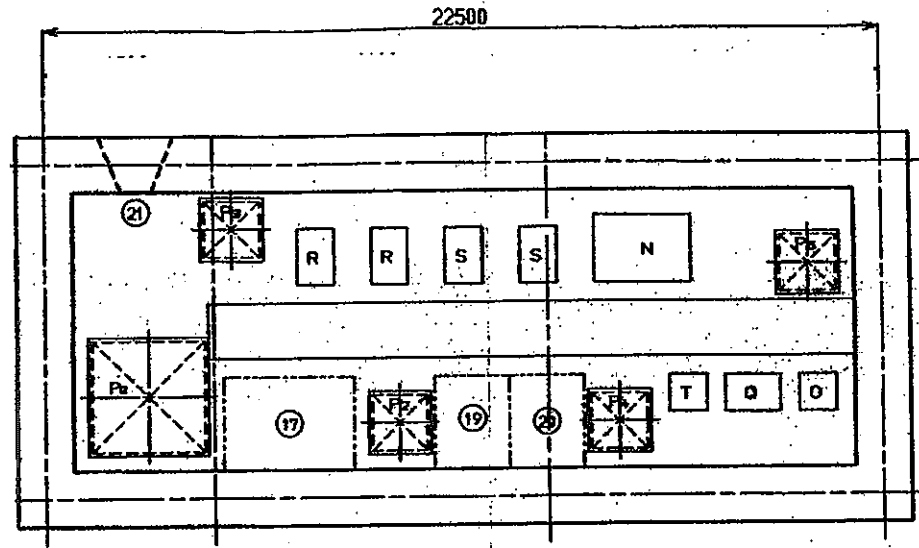
- J 分級装置
- K 混合装置
- L 振動充てん端柱溶接装置
- M 表面除染装置
- O 秤量器
- P サンプルング装置
- Q 核物質計量装置

- P₀ メンテナンスハッチ
- P₁ 生成物搬出ポート
- P₂ 廃棄物搬出ポート
- P₃ 生成物搬入ポート
- P₄ 資材搬入ポート

- Ⓑ 環状容器置場
- ⑬ 顆粒容器置場
- ⑭ 分級置き場
- ⑮ 混合顆粒容器置場
- ⑯ 混合液容器置場
- ⑰ ビンカートリッジ置場
- ⑱ 燃料ピン資材置場
- ⑲ 廃棄物容器詰めエリア
- ⑳ 鉛ガラス

ピン製造セル

図 4-3-40 ピン製造セル



- N 集合体組立装置
- R: リーク検出装置
- S: ピン検査装置
- T 集合体検査装置
- O 秤量器
- Q 核物質計量装置

- P0 メンテナンスポート
- P2 廃棄物搬出ポート
- P3 生成物搬入ポート
- P4 資材搬入ポート
- P5 集合体搬出ポート

- ⑰ ピンカードリッジ置場
- ⑱ 廃棄物容器詰めエリア
- ⑳ 集合体資材置場
- ㉑ 鉛ガラス

集合体組立セル

図 4-3-41 集合体組立セル

(ii) 金属電解法

①設計の前提条件と基本方針

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との一体化プラントについて、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、米国 ANL の金属電解法による再処理/燃料製造技術をベースとするリサイクルシステムを設定し、設計検討を行った。

再処理システムと燃料製造システム、オフガス処理設備、廃棄物処理設備、ユーティリティ設備は同一建屋に設置するものとし、使用済み燃料/新燃料貯蔵設備は別建屋に設置するものとした。設計検討にあたっては、一体化によって主要プロセス設備と関係付帯設備、放射性廃棄物の処理設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置することを考慮した。

燃料製造システムの設計・評価範囲としては、再処理工程の塩浴塩素化法及びリチウム還元法による金属電解で得られた U-Pu 合金、U-Pu-MA 合金について酸化転換後、混合して Pu 富化度調整を行い、転動造粒後、分級、焼結して顆粒とし、外側/内側炉心および軸ブランケット用振動充填燃料を製造する工程と、金属電解で得られた金属 U を酸化転換、転動造粒、分級、焼結して顆粒とし、径ブランケット用振動充填燃料を製造する工程及び再処理の脱被覆工程での径ブランケット粉体燃料を転動造粒、分級、焼結して顆粒とし、外側/内側炉心および軸ブランケット用振動充填燃料を製造する工程および燃料製造設備の経済性を中心に安全性、運転保守性、工程廃棄物発生量の概略評価と今後の研究開発課題の検討までとした。

主要な設計条件を以下に示す。

- a. 製造規模：50tHM/年
- b. 製造燃料の基本仕様：再処理対象燃料は、150 万 kWe 出力の FBR 使用済み燃料とし、U,Pu 回収率は 99.5%、MA 回収率は経済性へのインパクトが小さい範囲内での MA 回収を行う場合の量を考慮した。また、FP 除染性能は新燃料中の混入率が 2wt%/HM 程度を上回らない程度とし、製造燃料の仕様を評価した。主要な製造燃料の仕様を表 4-3-1 に示す。なお、スミア密度、密度公差、Pu 富化度の公差は、それぞれ 80~85%程度、±5%以内、±5%以内とする。
- c. 施設運転：年間の施設設備稼働率は 200 日とする。
- d. 設備稼働率、処理能力：設備稼働率、年間処理量及び設備装置の処理速度等を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。
- e. 回収率：U,Pu の回収率は 99.5%を目標とする。

f.貯蔵容量：製造した燃料集合体の貯蔵容量は、使用済み燃料と同じ1年分とし、基本的に使用済み燃料貯蔵建屋と同等の建屋とする。

g.保守：機器の保守・補修は、本施設の運転機能を正常に維持するため、機器等の故障、破損の予防策として、定期的、継続的に実施すべき予防保全としての事前保守と、設備機器に異常があった場合の機能修復のための事後保守に大別し、それぞれの保守区分の項目に対して保守方式として、遠隔保守、直接保守の2方式で対応する設計とした。また、本システムでは遠隔操作が要求されるマテハン操作が多いという特徴を考慮して、遠隔操作を定型/不定型操作の2通りに区分し、運転人員の省力化を目的とする自動化方針を検討した。

②プロセス設計

前記の設計の前提条件と基本方針のもとに検討した燃料製造プロセスフローと主要な物流を図4-3-42に示す。各工程・設備の基本的な仕様とその設定の考え方について以下に示す。

a.酸化転換工程

再処理の電解工程で析出されたU-Pu合金、U-Pu-MA合金はAr+5% O₂雰囲気中で酸化させ、UO₂,PuO₂,MAの酸化物とする。Arガスがオフガスとして発生する。金属Uも同様にAr+5% O₂雰囲気中で酸化させ、UO₂とする。この場合もArガスがオフガスとして発生する。径方向ブランケット燃料の脱被覆設備から供給されるU₃O₈,PuO₂,MAO₂,FP酸化物は、Ar+5% H₂雰囲気中でH₂によりU₃O₈をUO₂に還元する。この場合はAr,H₂Oがオフガスとして発生する。

b.Pu富化度調整工程

酸化転換により得られたUO₂,PuO₂,MAO₂粉末をボールミルを用いて所要の富化度になるような割合で混合する。

c.転動造粒工程

バインダの調整を行った後、バインダを添加しながら転動造粒機を使用して粒子径の成長（造粒）を行う。

d.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種類の粒子径に分級する。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50,100,800μmである。スペックアウトとなった過大な粒子は再度、粉碎し、脱バインダ加熱処理を行って転動造粒工程に戻す。また、過小な粒子はそのまま転動造粒工程へ戻す。

e.焼結工程

焼結炉を用いて、Ar+5% H_2 の還元雰囲気中で焼結を行う。焼結により、高密度の(U,Pu,MA) O_2 顆粒、 UO_2 顆粒、(U,Pu,MA,FP) O_2 顆粒が得られる。また、このとき Ar, H_2 , 転動造粒バインダ、FP (Cs,I,Ru) ガスがオフガスとして発生する。

f. 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。外側/内側炉心燃料、径/軸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に入れて貯蔵する。貯蔵容量はそれぞれ2日分の保管が出来るものとする。

g. 振動充填工程

あらかじめ燃料被覆管の下部端栓を溶接し、プレナム部品を挿入した燃料ピンを用意し、顆粒を振動充填し、所要の充填密度とする。顆粒燃料のホッパーは外側/内側炉心燃料、径/軸ブランケット燃料ごとに50,100,800 μm 粒子用を用意する。

h. 燃料ピン加工工程

顆粒燃料を充填した燃料ピンの上端部の端栓（小孔付き）を溶接し、燃料ピンを真空引きして被覆管内を He ガスに置換させて小孔を溶接する。その後、燃料ピンの表面除染、洗浄をダストクリーナ、回転ブラシ等により吸引除去して行う。除染後、燃料ピンにワイヤ端部を玉止め溶接し、被覆管外面にワイヤをらせん状に巻きつける。

i. 燃料ピン検査工程

ITV カメラによる外観、燃料ピンからの He リーク、燃料ピン表面のスミヤ、燃料ピン内の Pu 濃度分布、X線による内部欠陥、溶接部の健全性、 γ スキャンによる燃料部の確認、重量の各検査を行う。

j. 燃料ピン一時保管工程

検査に合格した燃料ピンの一時保管を行う。内側炉心+軸ブランケット燃料、外側炉心+軸ブランケット燃料、径ブランケット燃料について、それぞれ4日分、5日分、5日分の保管容量を持つ一時保管庫に分けて保管する。

k. 集合体組み立て工程

エントランスノズルを固定した状態でノックバーに燃料ピンを取り付け、所定数の燃料ピンが六角形の配列になるように組み立てる。その後、ハンドリングヘッドを取り付けたラッパ管に燃料ピンを挿入してラッパ管とエントランスノズル部を溶接する。

l. 集合体検査工程

ITV 及び光学変位計により、集合体外観、組み立て状態と全長、ねじれ、曲がり等の形状、寸法検査を行う。

m. 集合体払い出し工程

完成した燃料集合体の一時保管を行う。保管容量は受け入れと同じ 20 体とする。払い出しは、受け入れと同様にグリッパを装着したクレーンで燃料集合体を燃料移送用水中台車に吊り降ろし、台車を並行移動させて燃料貯蔵プールへ払い出しを行う。

n. 付帯設備

再処理/燃料製造の主要工程から発生する 1 次廃棄物やその処理に伴って生じる 2 次廃棄物の処理、貯蔵を行う。本設備はオフガス処理系、固体廃棄物処理系、液体廃棄物処理系及び廃棄物貯蔵系より構成される。

o. 共用設備

施設の運転に必要な試薬、ユーティリティ等の物資及び制御、分析、保守等のサービスを供給する設備で、試薬調整設備、計測制御設備、分析サンプリング設備、保守設備、ユーティリティ設備、建屋換気設備等から構成される。

③ 設備機器設計

燃料製造プロセスにおける各工程・設備毎に、設備機器の概要、物質収支と主要な機器リスト、設計図について以下に示す。なお、本施設での年間の製造燃料集合体数は、内側炉心燃料+軸ブランケット燃料集合体が 134 体 (134 体×271 本=36,314 本)、外側炉心燃料+軸ブランケット燃料が 77 体 (77 体×271 本=20,876 本)、径ブランケット燃料が 73 体 (73 体×169 本=12,337 本) であり、施設の年間稼働日数が 200 日として 1 日当たりの燃料ピンの製造量は、それぞれ 181.6 本/日、104.3 本/日、61.7 本/日である。また、再処理の電解工程より燃料を受け入れてから燃料ピンの製造、搬出まで仕様の異なる燃料は混入を避けるため別系統とした。

a. 酸化転換設備

本設備は、再処理の電解分離工程より供給される U-Pu 合金、U-Pu-MA 合金及び金属ウランを酸化物に転換する設備であり、プッシャー式の連続炉で Ar+5% O₂ 雰囲気、600~800℃で運転される。U-Pu 合金と U-Pu-MA 合金及び金属ウランのそれぞれを処理する設備を設けるものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-43 に示す。

b. Pu 富化度調整設備

本設備は、酸化転換により得られた UO₂, PuO₂, MAO₂ 粉末を計量式のボールミル混合機で所要の Pu 富化度に調整する設備である。外部/内部炉心燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-44 に示す。

c. 転動造粒設備

本設備は、Pu 富化度を調整した UO_2 , PuO_2 , MAO_2 混合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。外部/内部炉心燃料及び軸/径ブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-45 に示す。

d. 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 50,100,800 μm の 3 種類の粒子径に分級する設備である。

外部/内部炉心燃料及び軸/径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 20%、20%、60%とした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-46 に示す。

e. 焼結設備

本設備は、転動造粒後の粒子を、 $Ar+5\%H_2$ の還元雰囲気のパッシャー式の連続焼結炉で焼結し、(U,Pu,MA) O_2 顆粒、 UO_2 顆粒、(U,Pu,MA,FP) O_2 顆粒を得る設備である。外部/内部炉心燃料及び軸/径ブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-47 に示す。

f. 振動充填設備

本設備は、あらかじめ下部端栓を溶接し、プレナム部品を挿入した燃料被覆管に顆粒を振動充填し、所要の充填密度とするための縦型振動設備である。外部/内部炉心燃料+軸ブランケット燃料用及び径ブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-48 に示す。

g. 燃料ピン加工設備（上部端栓溶接設備）

本設備は、顆粒燃料を充填した燃料ピンの上端部の端栓（小孔付き）を溶接し、燃料ピンを真空引きして被覆管内を He ガスに置換させて小孔を溶接するヨウ素レーザー溶接設備である。外部/内部炉心燃料+軸ブランケット燃料用及び径ブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-49 に示す。

g. 燃料要素検査ユニット設備

本設備は、ITV カメラによる外観、燃料ピン表面のスミヤ、燃料ピン内の Pu 濃度分布、X線による内部欠陥、溶接部の健全性、 γ スキャンに

よる燃料部の確認、重量の各検査を行うユニット設備である。外部/内部炉心燃料+軸ブランケット燃料用及び径ブランケット燃料用にそれぞれ設置するものとした。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-50 に示す。

h. 集合体組み立て設備

本設備は、所定数の燃料ピンが六角形の配列になるように、ハンドリングヘッドを取り付けたラッパ管に燃料ピンを挿入してラッパ管とエントランスノズル部を溶接する横型の設備であり、燃料バンドル組み立て、ラッパ管組み立て、レーザー溶接等の各装置から構成される。組み立て作業はパワーマニピュレーターの遠隔操作により行う。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-51 に示す。

i. 集合体検査設備

本設備は、集合体外観、組み立て状態と全長、ねじれ、曲がり等の形状、寸法検査を行う縦型の検査設備であり、光学変位計、ITV カメラ、照明装置等から構成される。

本設備機器の機器設計図を図 4-3-52 に示す。

④配置設計

a. 設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設形状は、建屋総面積を抑える観点から、分散型とせず、使用済み燃料集合体の受け入れ、再処理/燃料製造主要設備、払い出し及び付帯設備、共用設備を主建屋とする同一建屋内に配置する方式とする。
- ・ 主建屋に隣接して、管理棟、非常用発電設備、排気筒、燃料タンクを設置する。
- ・ 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。
- ・ 主建屋内の放射性廃棄物の処理・貯蔵は1年分とする。
- ・ 主建屋は、地下1階、地上3階建てとし、プロセスセル天井高さは9mとする。(幅91m、長さ94m、高さ33m)
- ・ セルの形状は、マスタースレーブマニピュレーター (MSM) での操作性を考慮し、セル幅を抑えた長尺セルとする。
- ・ 使用済み燃料の受け入れ及び製造した新燃料の払い出しは、別建屋の

貯蔵プールにつながる主建屋の同一側の地下 2 階レベルからとする。

- ・ 主建屋内の燃料製造設備、燃料集合体組み立て・払い出し設備及び廃棄物関連設備は地下 1 階、地上 1 階に配置する。
- ・ 地上 2 階以上には、オフガス処理、ユーティリティ設備、電気盤室、空調設備を配置し、中央制御室と出入り管理室は別棟の管理棟（3 階建て）との接続から 3 階に配置する。
- ・ 各セルには保守のためにインセルクレーンとパワーマニピュレーターをセル内に設置し、遮へい壁には必要箇所にマスタースレーブマニピュレーターを設置し、保守する。
- ・ 各セルには隣接して保守セルを設け、セルとの取り合いは、セル間に遮へい扉を設け、台車またはインセルクレーンで実施する。

b. 配置設計の概要

原子炉とのコロケーション型燃料再処理/燃料製造施設と使用済み燃料/新燃料貯蔵施設（原子炉と共有のプール型）、管理棟、非常用発電設備の全体配置イメージ図の平面図と断面図を図 4-3-53、図 4-3-54 に示す。

上記の設計の基本方針に基づき、再処理/燃料製造工程及び廃棄物処理・貯蔵設備を収納した主建屋の中の燃料製造設備配置図を図 4-3-55、図 4-3-56 に示す。遮へい機能はセル壁で担保するものとし、セル壁厚は一律約 1500mm とした。施設建屋は地下 1 階、地上 3 階建てで、約 91m×94m×高さ 33m である。燃料の受け入れ及び払い出しは地上 2 階で行う。また、集合体組み立てセルで完成した新燃料は、地上 1 階の払い出し設備より別建屋の地下 2 階レベルの新燃料貯蔵施設（プール）へ払い出す。

⑤ システムの特徴

a. 安全性評価

燃料製造設備に関する現行の安全審査指針として、ウラン加工施設安全審査指針と再処理施設安全審査指針を適用した場合の問題点を中心に検討した。

燃料製造設備に関しては、基本的に現行指針の適用そのものには問題がないと考えられ、今後の設計フェイズで対応は可能と考えられる。

施設の耐震安全性については、現状の再処理施設安全審査指針に準拠するものとし、耐震設計上の重要度を地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、自ら放射性物質を内蔵している施設で、その機能喪失により外部に放散する可能性のあるものまたは放射線による

環境への影響効果のあるものをAクラス、影響、効果が比較的小さいものをBクラス、A、Bクラス以外であって一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいものをCクラスに分類して検討した。この分類の基準に基づき、燃料製造設備はAクラスに分類した。ただし、今後、各設備機器は、この分類に基づき各機器の特質に応じて設定する必要がある。また、再処理施設と燃料製造施設が同じ建屋に建設される場合、例えば同様な燃料粉体を扱うにも拘わらず、従うべき基準が異なり、設計手法も異なることは設計上も不合理であることから、今後、両施設の安全に対する考え方を統合し、新たな指針を制定する必要がある。

b. 経済性評価

再処理との一体型プラントの燃料製造部分の建設費の概算は、プラント全体の約 1/3 となった。また、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約 1/2、ユーティリティ・共通設備が約 1/10、建屋・電気・換気設備が約 2/5 となった。

c. 核不拡散性評価

金属電解法では、前記のプロセス設計で述べたように純粋な Pu として回収されることはなく、U, TRU, FP などの不純物が随伴して析出される。特に自発核分裂核種である Cm が混在するため、Pu の核分裂反応前に中性子を放出し、急激な連鎖反応を妨害することから兵器への転用は困難と考えられる。

また、本施設においては核物質がセル内で取り扱われ、放射線レベルが高く、アクセスが困難であることから核不拡散性の高い施設と考えられる。

保障措置については、本施設の物質収支区域 (MBA) を検討し、以下の3つの MBA を想定した。これらの MBA 間の移動と MBA 外への払い出しは流れの主要計測点 (FKMP) で定量され、在庫確認は MBA 内の各工程ごとの在庫の主要計測点 (IKMP) で行われる。

MBA-1 使用済み燃料受け入れと入量計量の区域

MBA-2 再処理主工程区域、燃料製造区域、廃棄物処理工程区域、分析室

MBA-3 新燃料集合体一次保管区域

以上の MBA の設定で物質収支は取れると考えられるが、保障措置上の問題点は入量管理方法であり、管理方式として、①非破壊測定方式、②燃焼計算と代表せん断サンプリング方式、③熱処理粉体サンプリング方式、④熔融塩電解槽計量方式、⑤同位体相関方式が考えられる。いずれの方式も検討、開発、実証が必要であるが、①、③、⑤の方式が比較的有望と考えられ、今後実用化までに IAEA 等を含めた検討が必要と考えられる。

d. 環境負荷低減性評価

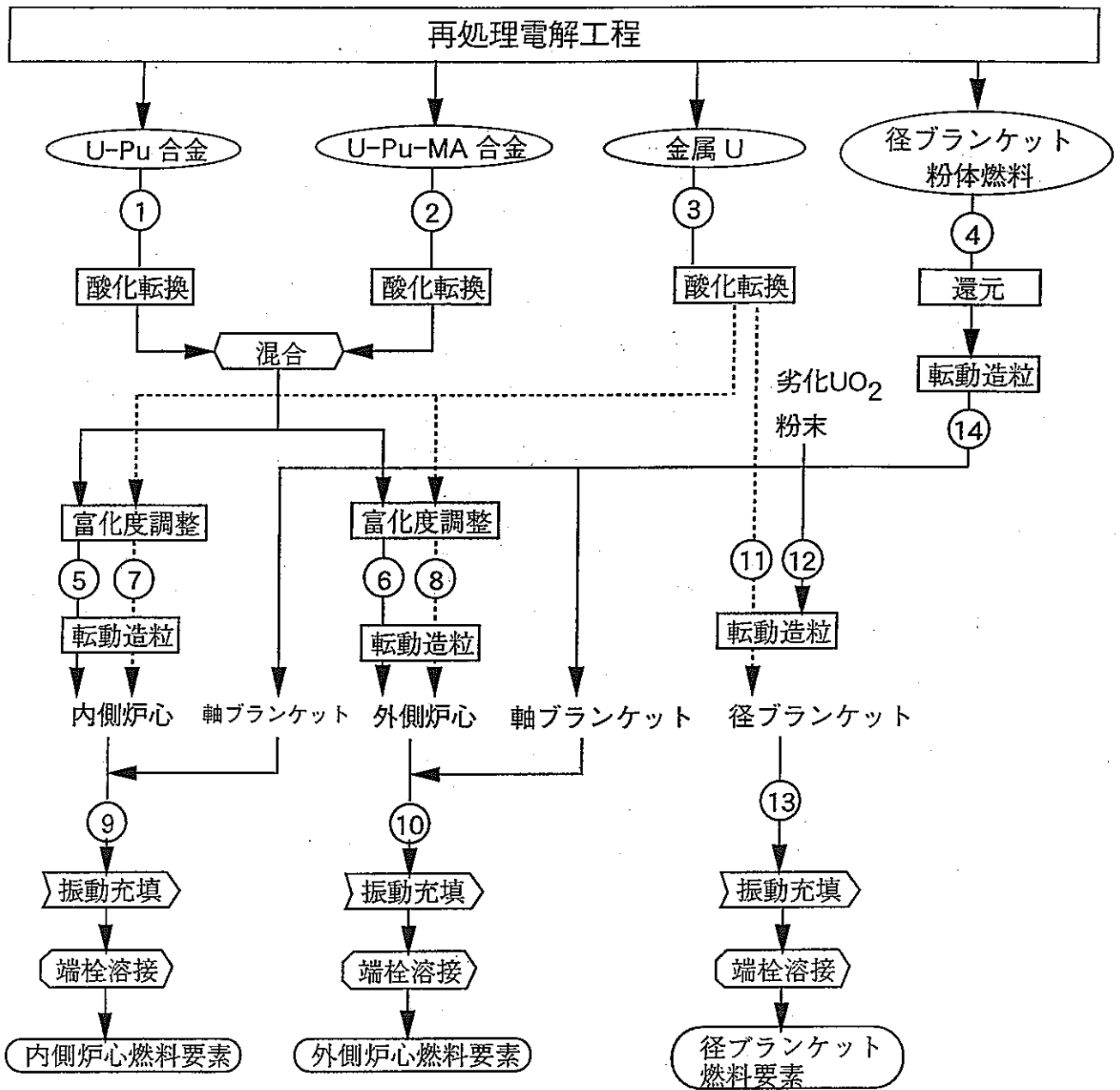
燃料製造工程から発生する廃棄物は主として、再処理の電解工程から受け入れた電解金属の酸化転換、還元、焼結工程での酸化・還元皿への付着物及びセル内への回収金属や酸化物の飛散物によるものと考えられる。酸化・還元工程と焼結工程で使用される Mo 製の皿は、それぞれ 20 回、10 回使用した後、廃棄するものとした。また、再処理工程から受け入れた燃料の 0.5% の約 225kg/年が廃棄物になるものと仮定した。

e. 技術的成立性評価と今後の技術開発課題

金属電解法（ANL 技術）による振動充填燃料製造技術の実用化に向けて必要な主要研究開発課題として以下の課題が挙げられる。

- ・ 再処理の電解分離工程から受け入れる金属インゴットの酸化転換の実規模での確認。
- ・ 粉体の代表サンプルの取得方法についての検討と基準の作成。
- ・ 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認。
- ・ 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認。

また、上記のいずれの課題についても、今後、遠隔ハンドリングを含む製造性評価試験での確認が必要である。



物質収支評価結果

(kg/y)

物流ポイント	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
U	3,811	342.2	23,140	14,190	2,113	1,897	8,942	3,741	11,000	5,610	10,460	4,462	14,900	14,010
Pu	3,834	413.2	0	210.1	2,161	1,940	0	0	2,150	1,930	0	0	0	503.9
Np	16.83	1.814	0	1.501	9.486	8.515	0	0	9.438	8.472	0	0	0	1.483
Am	133.5	14.39	0	0.379	75.26	67.56	0	0	74.88	67.22	0	0	0	0.375
Cm	42.55	4.586	0	0.0002	23.98	21.53	0	0	23.86	21.42	0	0	0	0.0002
FP合計	90.5	90.5	24.75	120	90.5	82.66	9.564	4.001	10.11	86.23	11.19	0	11.13	91.51
バインダ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,035	-	-	-	-

図4.3.42 プロセス検討と物質収支評価
金属電解法の燃料製造プロセスフローダイアグラム

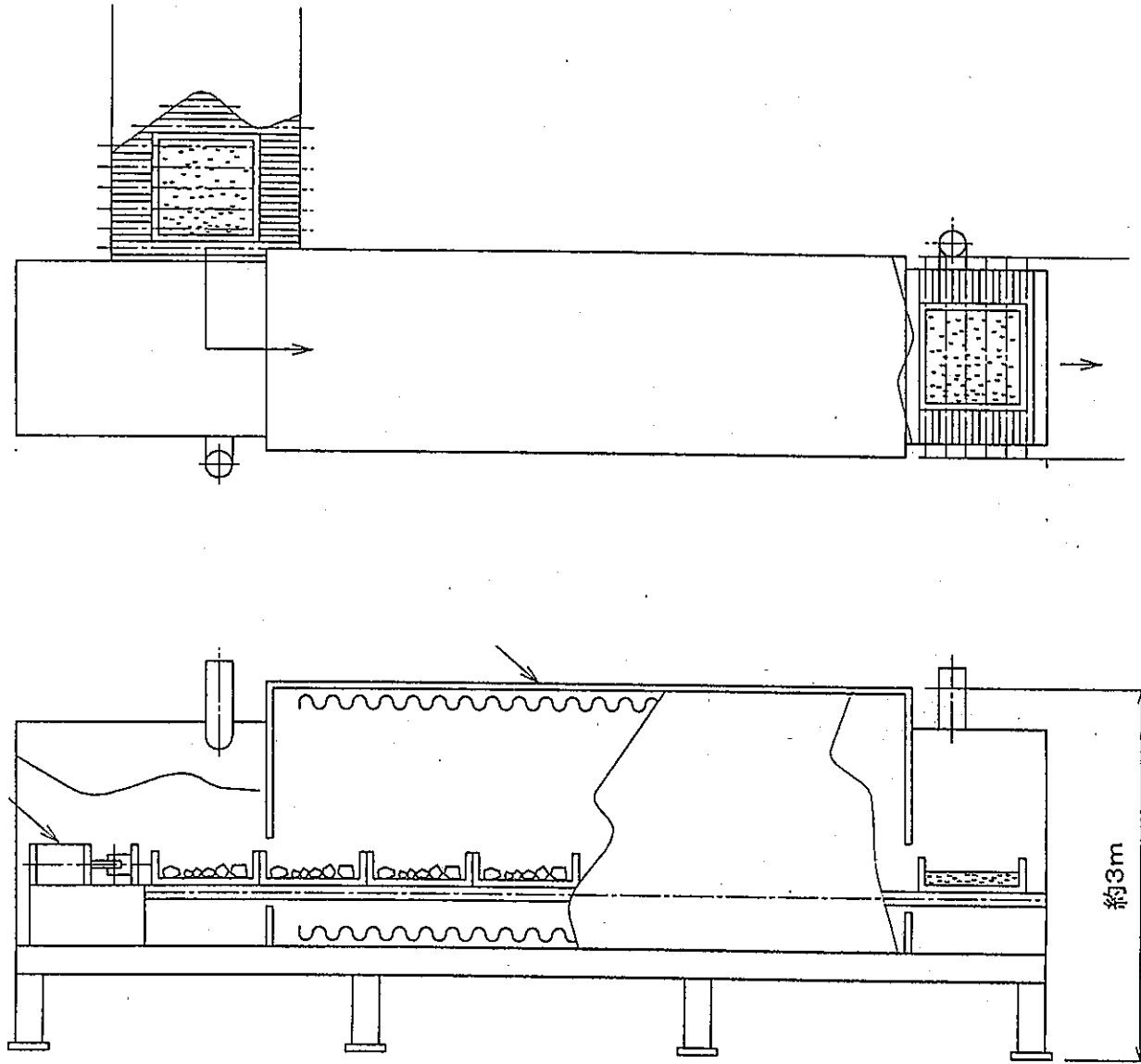


図 4-3-43 酸化轉換装置・還元装置

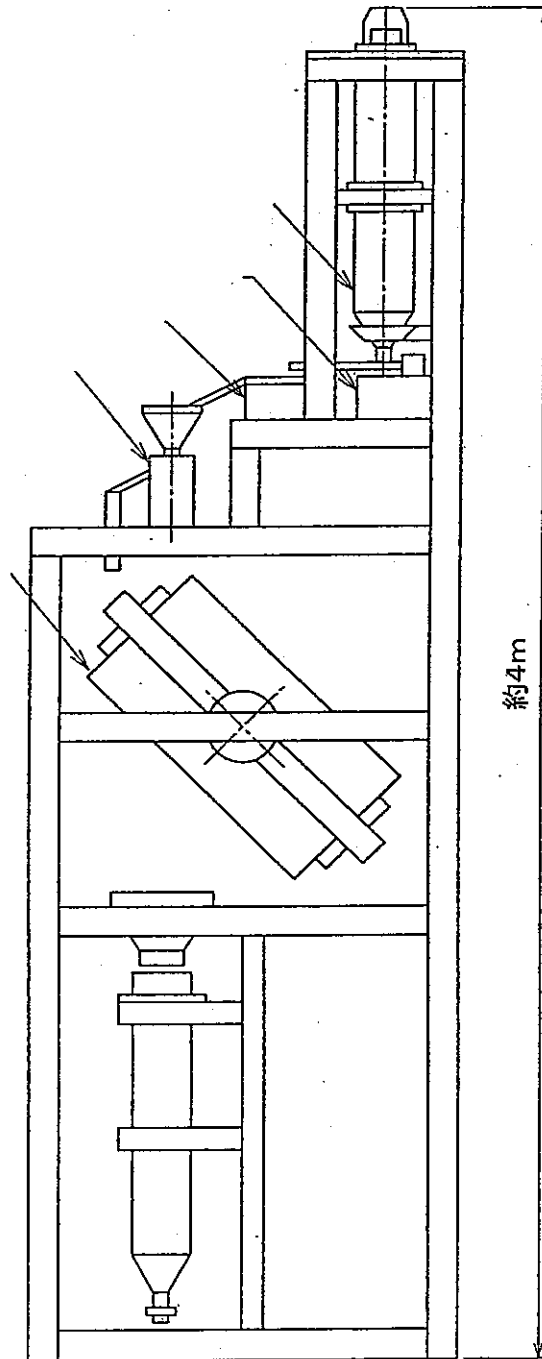
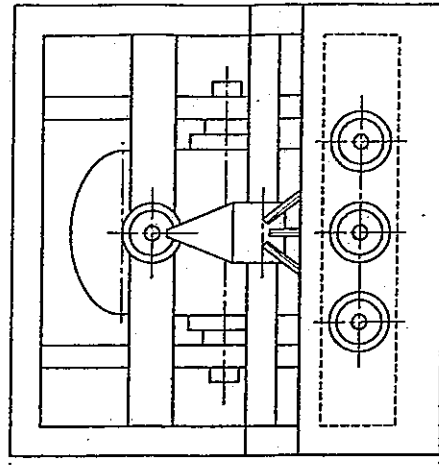


图 4-3-44 富化度調整装置

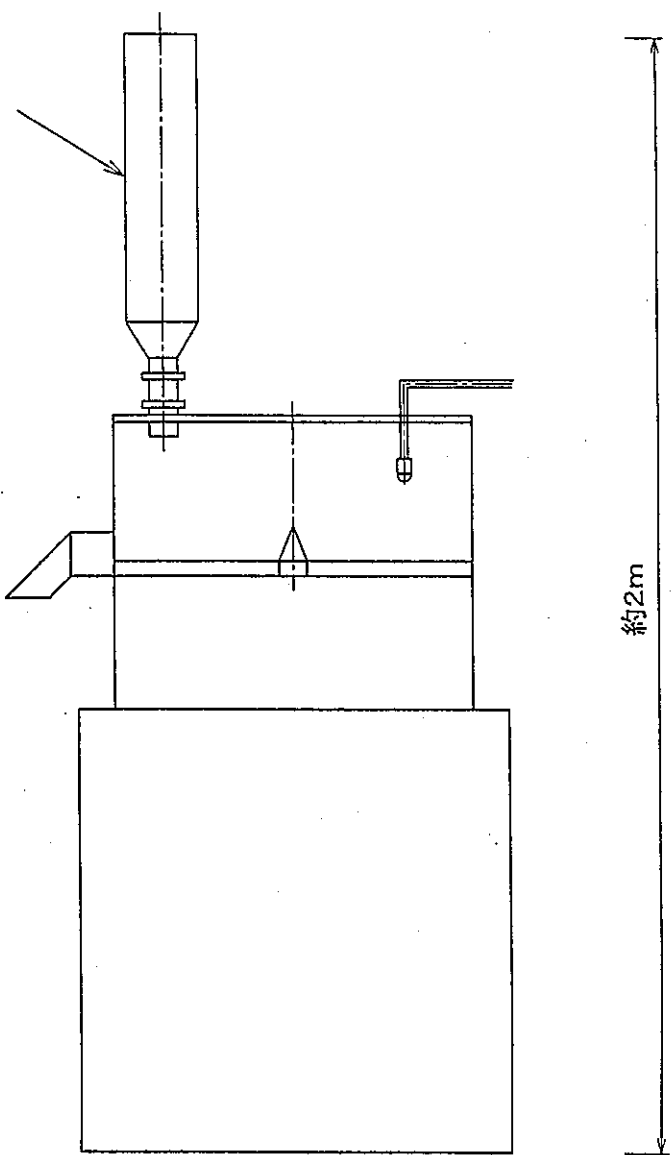


图 4-3-45 转动造粒装置

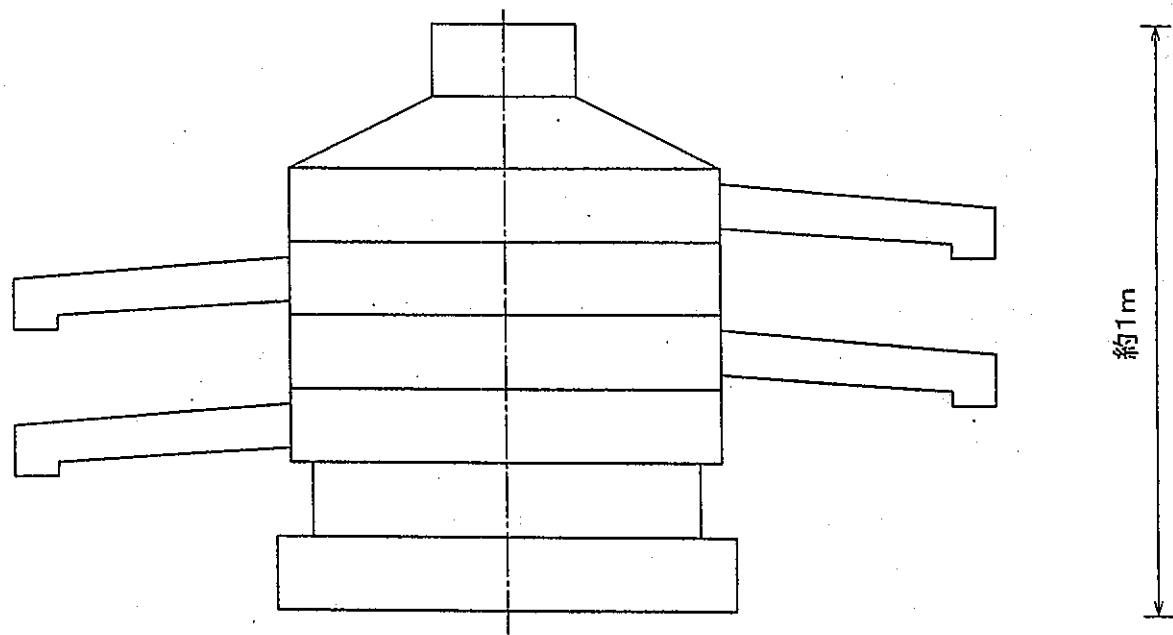


圖 4-3-46 分級裝置

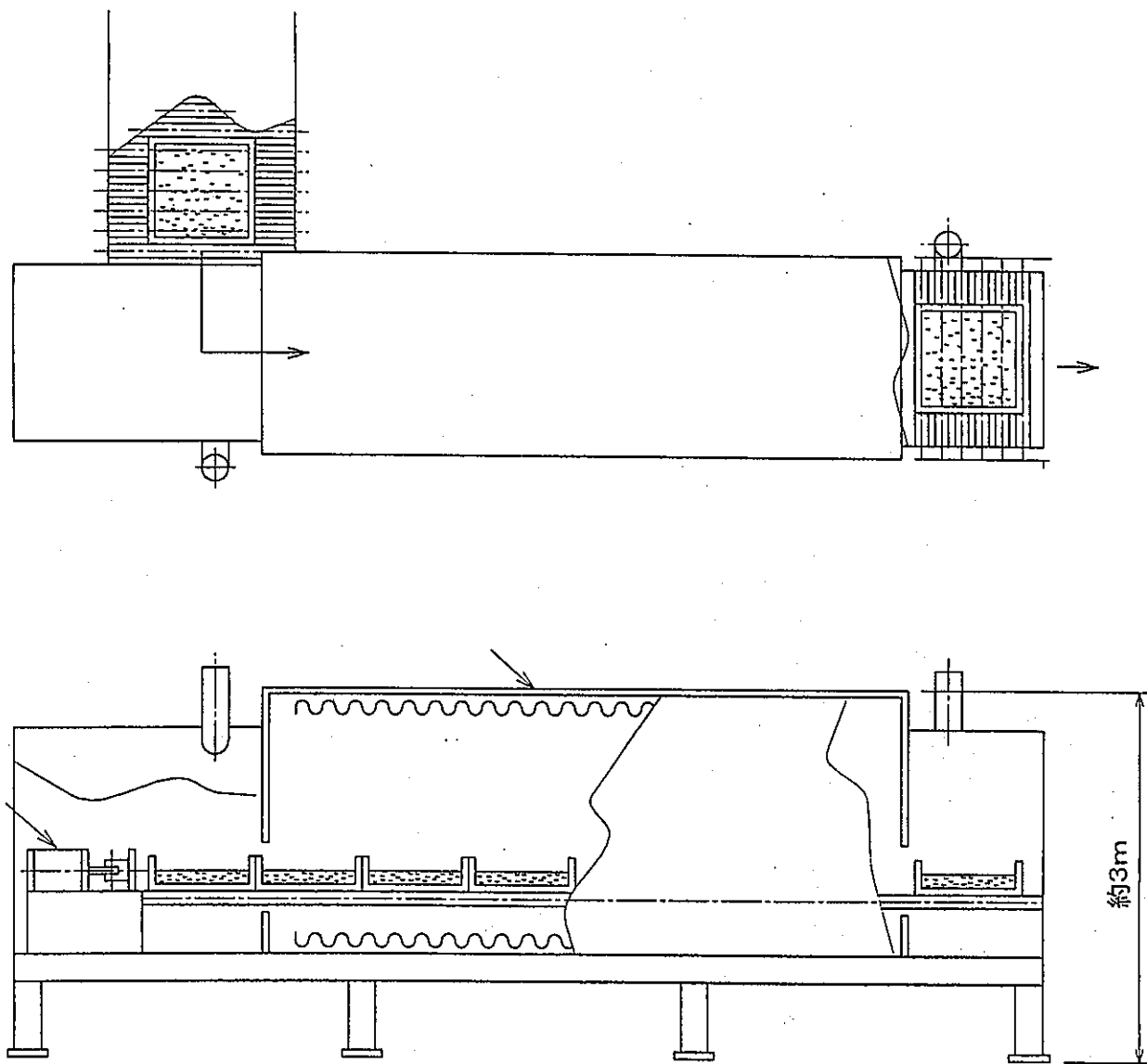


图 4-3-47 焼結炉

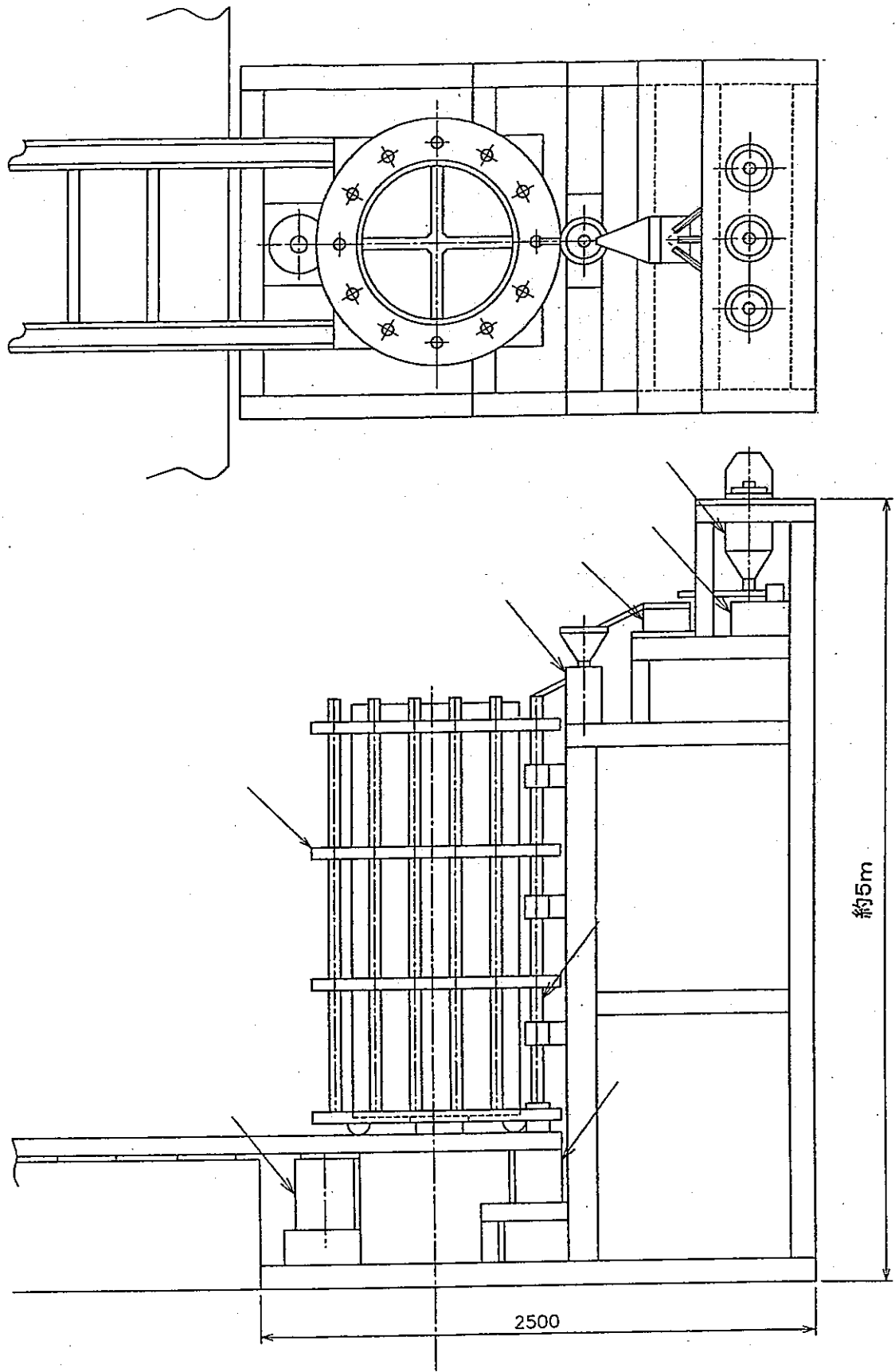


図 4-3-48 振動充填装置

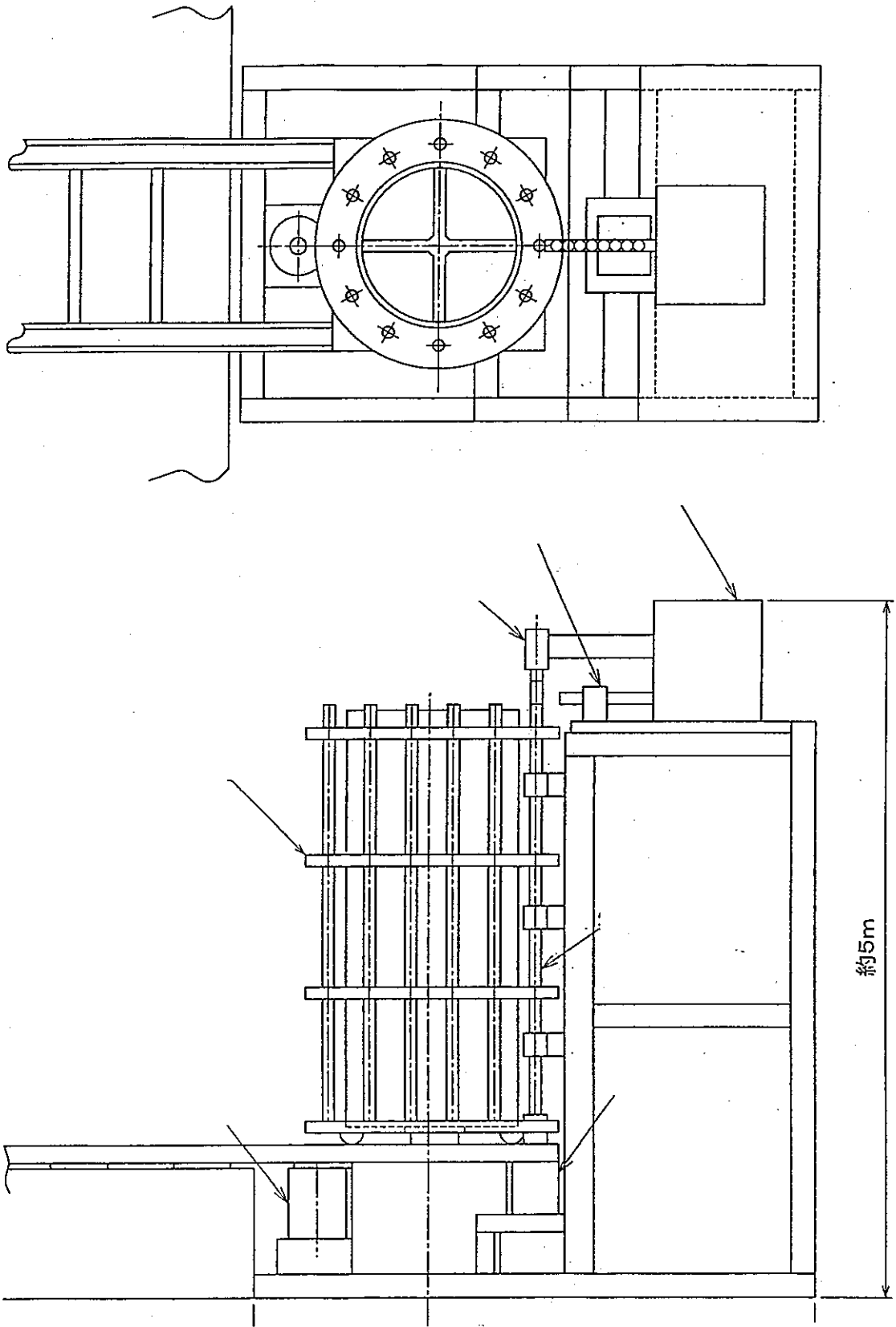


図 4-3-49 上部端栓溶接機

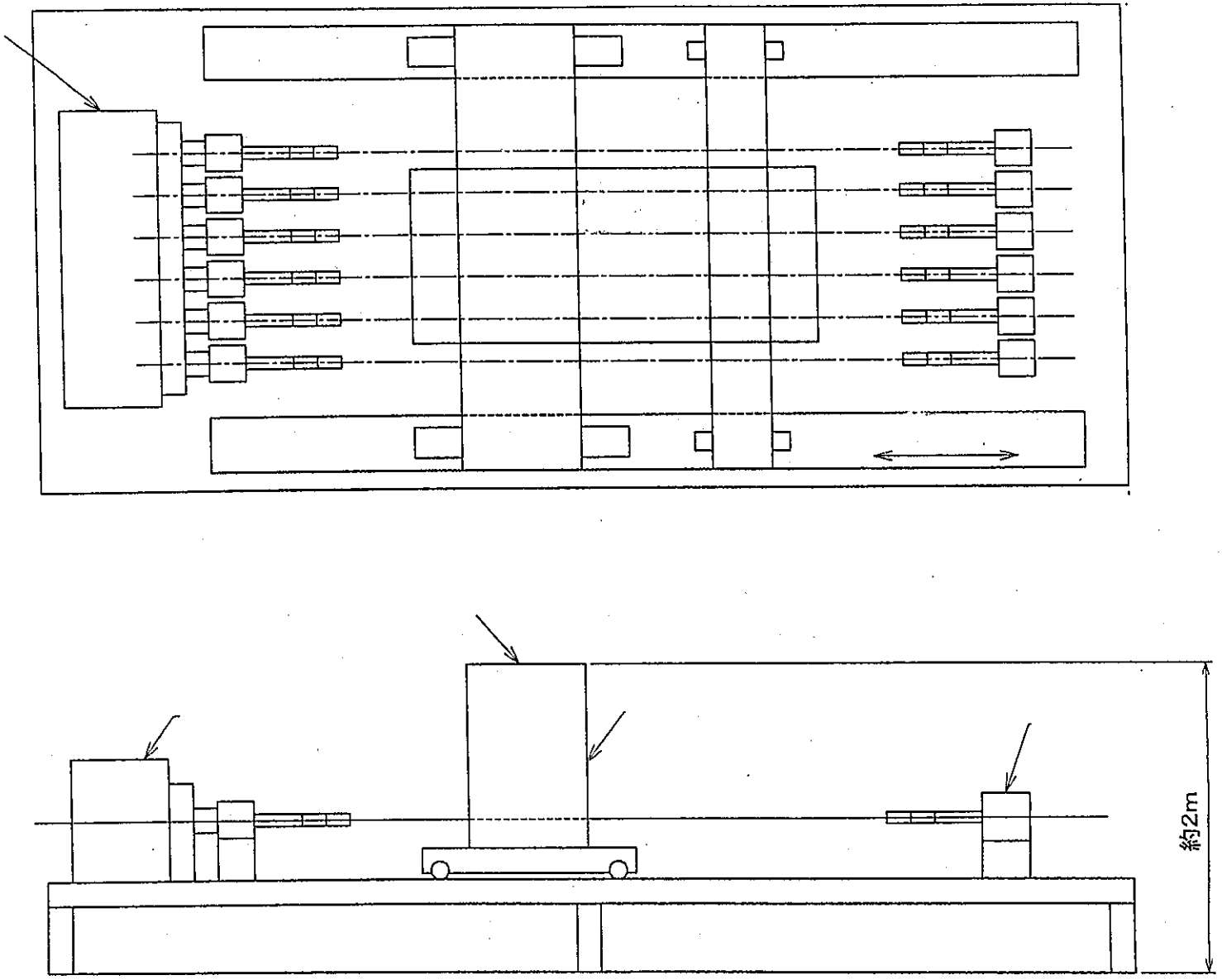


図 4-3-50 燃料要素検査ユニット

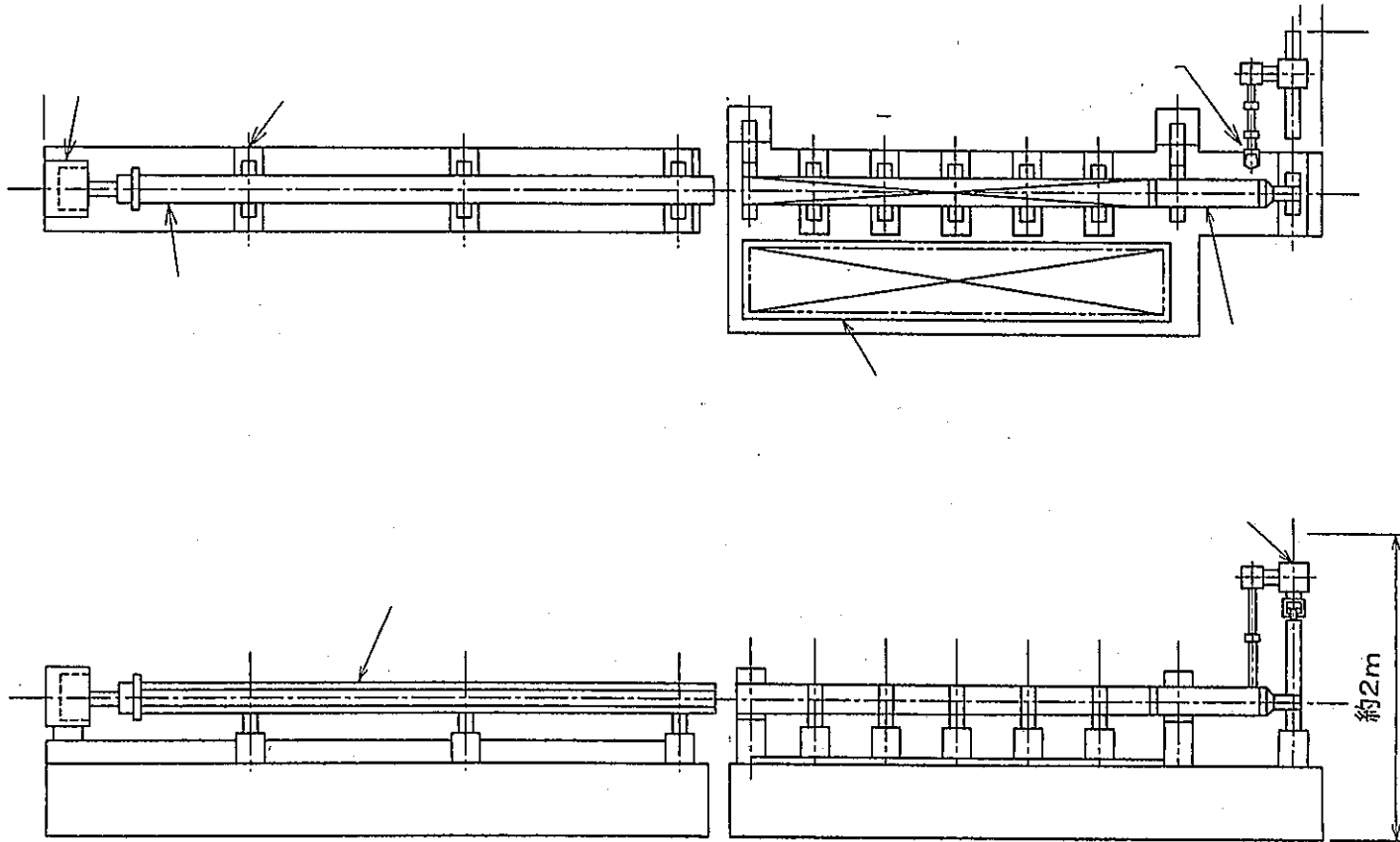


図 4-3-51 燃料集合体組立装置

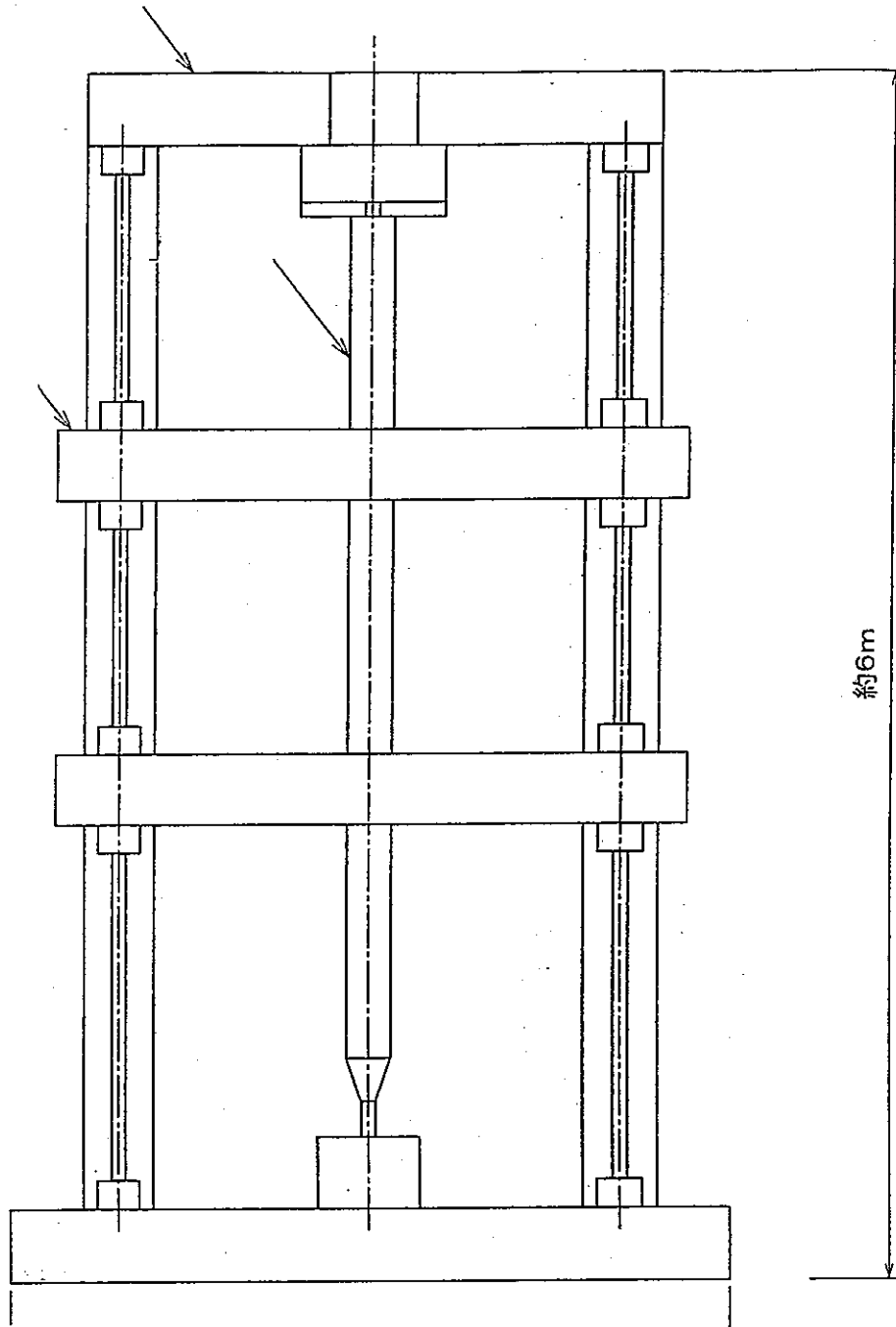
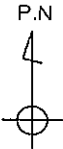


图 4-3-52 燃料集合体検査装置



同一サイトにある原子炉と共有の燃料貯蔵施設

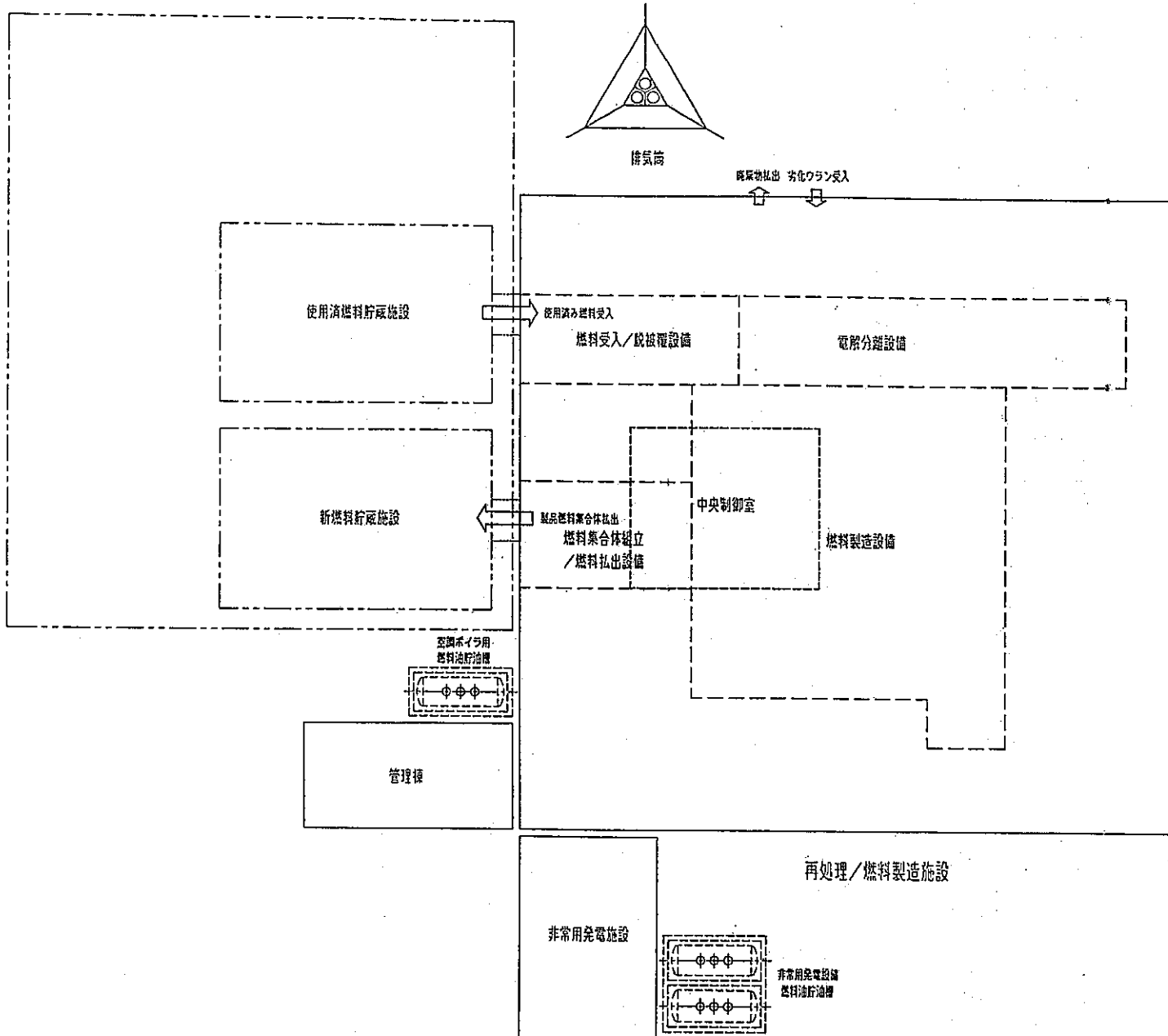


図 4-3-53

金属電解法(塩浴塩素化法) 50tHM/y

全体配置イメージ図 平面図

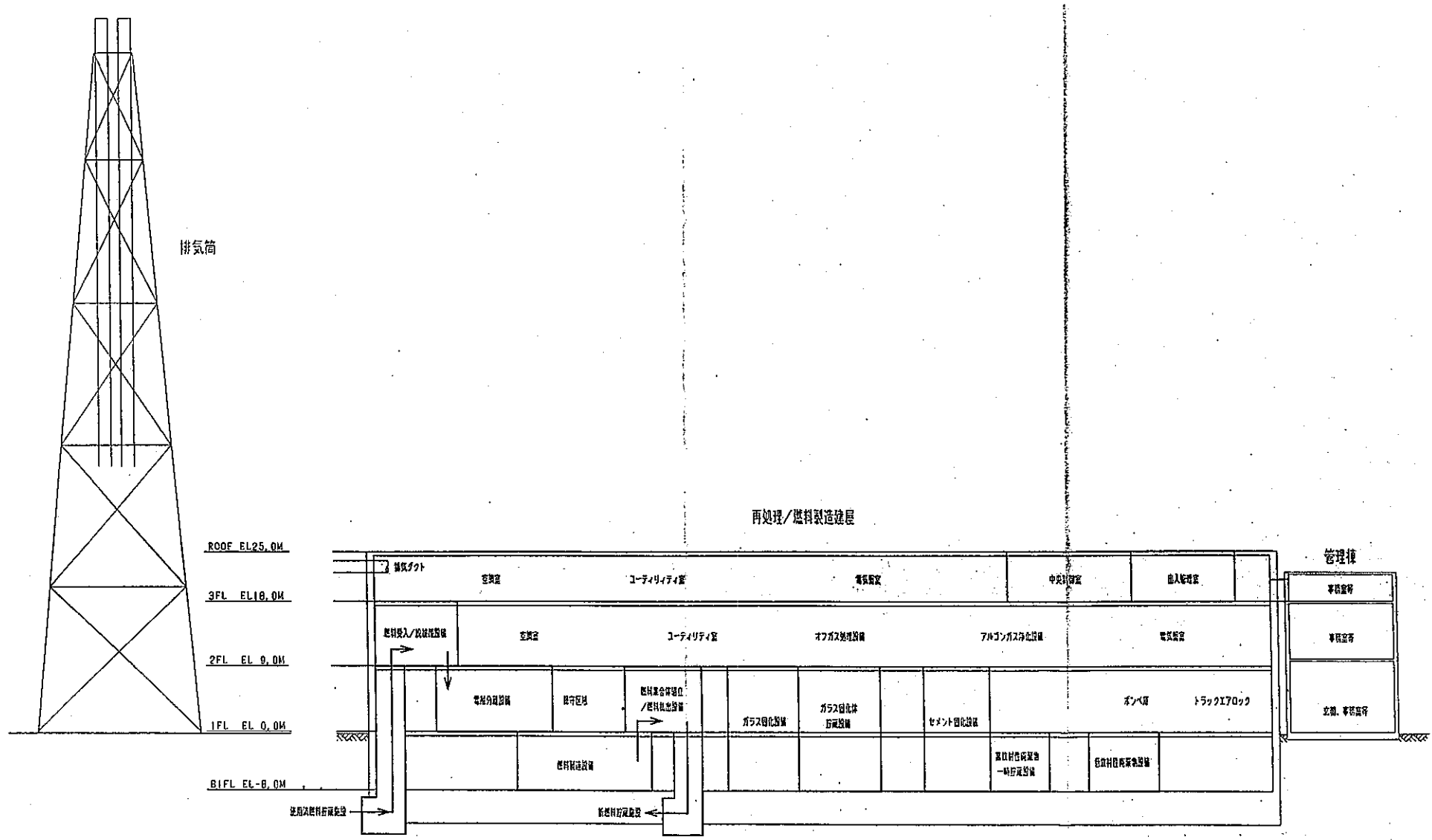


図 4-3-54

金属電解法(増倍増養化法) 50 t HM/y
 全体配置イメージ図 新面図

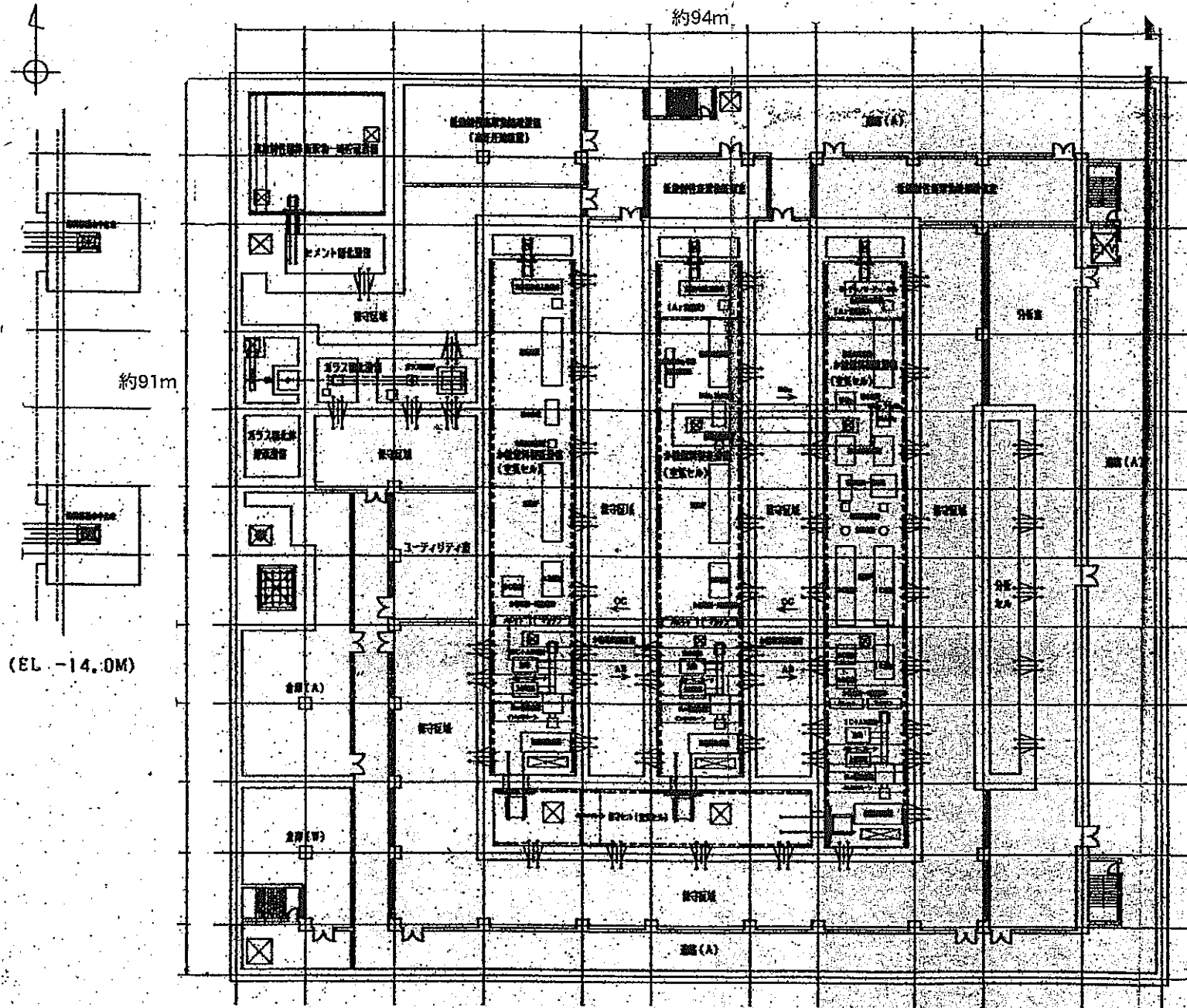


図 4-3-55 全体配置計画図 B1F

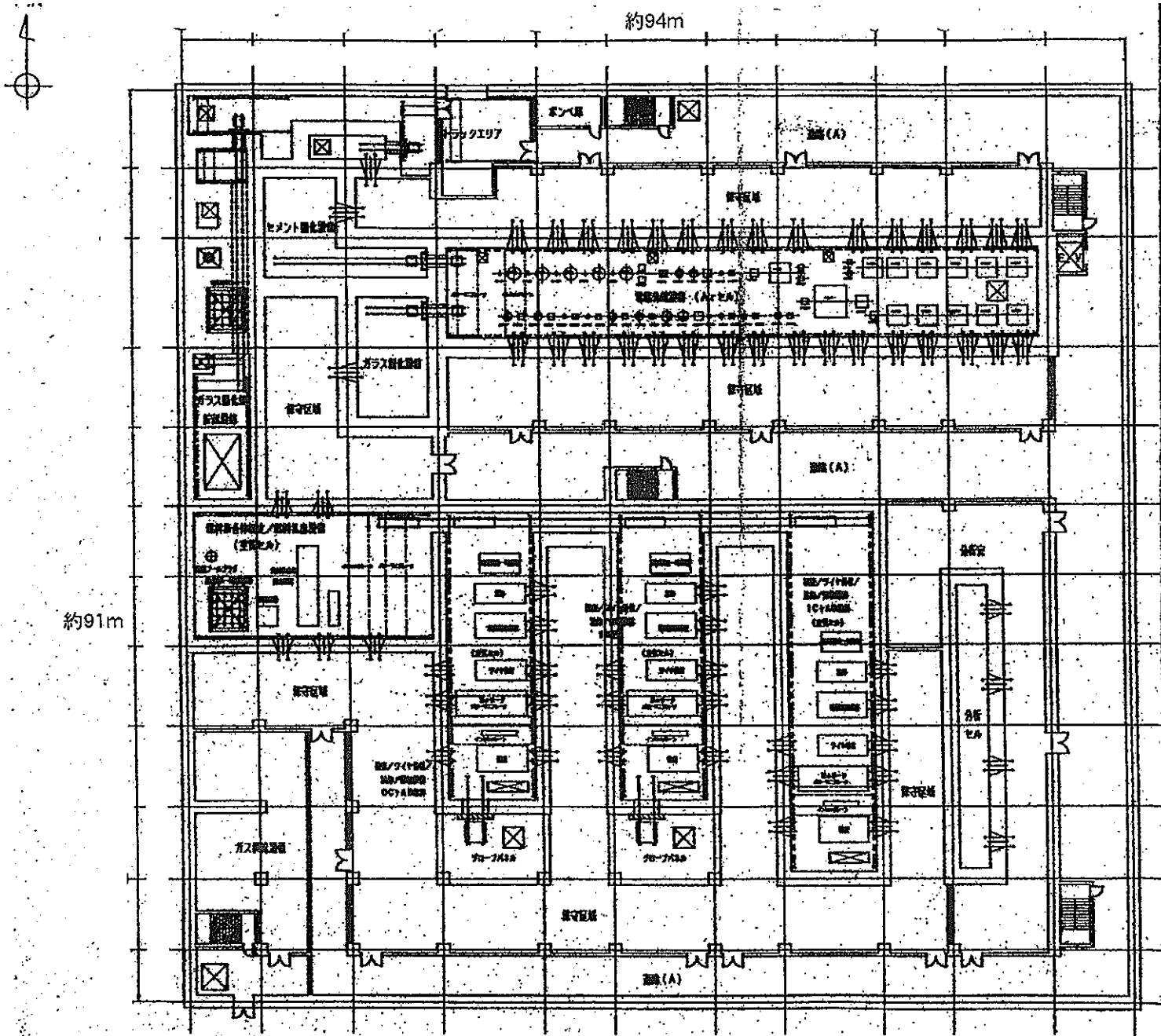


図 4-3-56 全体配置計画図 1F

(iii) フッ化物揮発法

(a) 設計の前提条件と基本方針

本サイクルシステムは、使用済燃料剪断片から AIROX 法により回収した酸化物の粉体から、第一段階のフッ化により所定のウラン量をフッ化揮発させ取り除き、これにより残ったウラン、プルトニウムが目標とするプルトニウム富化度を得る。第二段階のフッカにより除染した Pu, U の混合フッ化物を得る。このように FP 除染と Pu 富化度調整が同一工程で行われることとなる。その後、顆粒（スフェロイド）の MOX 酸化物に転換される。本システム概念は燃料製造/再処理一体化プラントとなるが、燃料製造設備は、富化度調整がなされた、MOX スフェロイドの受け入れ以降の、ピン加工（振動充填）、集合体組立工程を検討範囲とする。

燃料製造設備検討の基本条件を以下に示す。

①製造規模

小規模製造施設：50tHM/年（集合体数換算 合計 282 体）

内側炉心燃料集合体 ; 133 体

外側炉心燃料集合体 ; 77 体

径方向ブランケット燃料集合体 ; 72 体

②施設運転：200 日/年

（年間 3 キャンペーン；外側炉心、内側炉心、径ブランケット）

③燃料の基本仕様：炉心燃料集合体及びブランケット燃料集合体の基本仕様、概略図をそれぞれ表 4-3-1 及び図 4-3-1 に示す。

(b) プロセス及び機器の検討

燃料製造プロセスフローダイアグラムを図 4-3-57 に示す。燃料ピン製造能力として最大 400 本/日（公称値 382 本/日）及び燃料集合体の製造能力を 2 体/日とする。外側炉心燃料集合体、内側炉心燃料集合体及び径方向ブランケット燃料集合体の製造キャンペーン期間はそれぞれ 100 日（ $133 \text{ 体} \times 271 \text{ 本/体} \div 382 \text{ 本/日} = 95 \text{ 日}$ ）、60 日（ $77 \text{ 体} \times 271 \text{ 本/体} \div 382 \text{ 本/日} = 55 \text{ 日}$ ）、40 日（ $72 \text{ 体} \times 169 \text{ 本/体} \div 382 \text{ 本/日} = 32 \text{ 日}$ ）とする。

炉心燃料製造工程では U/Pu 酸化物転換工程で製造され、Pu 富化度等の仕様を満たすもので、2 種類の顆粒径に分級し、それぞれの U/Pu 酸化物顆粒を受け入れる。軸方向ブランケット燃料として U 酸化物転換工程で製造された仕様を満たす同様の U 酸化物顆粒を受け入れる。外部から搬入されるピン部材の装填、酸化物顆粒を振動充填し端栓溶接を行う。その後燃料ピン表面の除染、汚染度検査、ヘリウムリーク検査、X 線検査を行う。さらにスペーサワイヤ巻き付け、品質管理上の各種試験検査を実施する。燃料ピンは官庁検査のための一時保管庫及び検査終了後の保管庫に保管する。炉心燃料製造工程では内側炉心燃料及び外側炉心燃料の製造を行う。その後燃料ピンは集合体部材と共に燃料集合体に組み立てられる。さらに検査を行い集合体貯蔵庫に保管される。径方向ブランケット燃料製造工程では U 酸化物顆粒を受け入れ、前述の炉心燃料

製造工程と同様、燃料ピン、集合体の製造を行う。フッ化物揮発法の特有の燃料製造工程について概要を以下に示す。

①酸化物転換工程（顆粒成長、分級、顆粒検査を含む）

本工程は現状の区分では再処理工程としているが、燃料の品質保証上で重要なところであり工程の概要を示す。U/Pu系ではU/Pu凝縮・揮発工程よりUF₆とPuF₆を受け入れU/Pu酸化物転換塔で水素と水蒸気を作用させて高温加水分解反応によりMOX顆粒に転換する。MOX顆粒は400 μ m以上、200 400 μ m、100 200 μ m、及び100 μ m以下の4種類に分級し、400 μ m以上及び100 200 μ mの2級を検査の上燃料製造工程に払い出す。残りは酸化物転換塔に戻しさらに粒を成長させる。顆粒検査はPu富化度、顆粒密度及びフッ素濃度である。

②U酸化物顆粒、U/Pu酸化物顆粒の搬入

炉心燃料ピンの1日当たり382本製造するためには、MOX顆粒の供給量は約140kgHM (Pu+U)/d及び軸方向ブランケットとしてUO₂顆粒の供給量は約100kgHM (U)/dとなる。径方向ブランケット燃料ピンを1日当たり382本製造するためのU供給量は約460kgHM (U)/dとなる。酸化物顆粒は前工程の転換工程から搬入するが顆粒外径は2級に篩い分けされたもの（約400 μ m以上、約100 200 μ m）で、Pu富化度、密度等の燃料仕様の合格品を受け入れる。転換工程のプロセスで製造する顆粒のバッチサイズは約30kgHM（2級の合計）であり、炉心燃料製造では1日当たりMOX顆粒を5バッチ及びUO₂顆粒を4バッチが搬入される。径方向ブランケット燃料製造では16バッチが搬入される。なお、それぞれのロットは大粒径、小粒径別々に保管される。

③顆粒秤量混合、顆粒充填及び端栓溶接

所定の充填密度を得るため、大粒径と小粒径の割合を定めそれぞれの顆粒を切り出し混合する。混合された顆粒は顆粒装荷装置により、所定量が装填する。なお燃料ピンは100本単位で組み込んだ円柱状のマガジンラックに収める。所定量の顆粒を装填した燃料ピンをマガジンラックごと振動機により縦方向の振動を加え高密度に充填する。燃料ピンは上下にブランケットを持つため、秤量から振動充填までの工程は下部ブランケット燃料顆粒秤量/振動充填、炉心燃料顆粒秤量/振動充填、及び上部ブランケット燃料顆粒秤量/振動充填の3工程を3組の装置構成により連続して行う。ここで、軸方向ブランケットと炉心燃料との境界にはメッシュ状のスペーサを装填する。振動充填が終了した燃料ピンには、燃料ピン部材を装填し上部端栓を仮止めする。その後燃料ピンを1本ずつマガジンラックから取り出し、燃料ピン保持回転機構部にセット後被覆管/端栓の周溶接を行う。振動充填装置概念図を図4-3-58に示す。

④不良燃料ピンの解体

燃料製造工程の中で実施される燃料ピン検査において、不合格と判断されたものは、再処理工程の燃料剪断解体工程へ戻される。

(c) 配置設計

①配置設計検討の基本方針

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。

- ・ 施設は、再処理／燃料製造主要プロセスと新燃料貯蔵（1年分）設備、高放射性廃棄物処理・貯蔵（1年分）設備、低放射性廃棄物処理・貯蔵（1年分）設備を収容する主建屋、使用済燃料貯蔵（1年分）建屋、非常用発電建屋、管理棟の4区分とする。
- ・ 再処理／燃料製造設備一体化により、主要プロセス設備とその付帯設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置する。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 保守については、プラント稼働率向上、作業員の被曝低減を目的とし、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。遠隔保守を必要とする設備は、遮蔽窓や ITV を通し、マニピュレータ及びインセルクレーン等により操作可能な設計とする。

②配置設計の概要

上記方針に基づいたセル容積、建屋規模、建屋容積は、主建屋について下記のとおりとなった。なお、セル容積はセル遮蔽厚を2mとしてその内寸法を基準とし（柱芯寸法を基準とするセル容積も併記した）、建屋規模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1m張り出すものとした。

- ・ 主建屋 燃料製造設備主工程セル容積 10,400m³（柱芯で 18,600m³）
 付属セル（保守セル、分析セル）容積 1,400m³
 （柱芯で 3,200m³）
 セル容積合計 11,800m³（柱芯で 21,800m³）
- 建屋規模 116mL×65mW×31.5mH（地下2階、地上2階）
- 建屋容積 237,000m³

主建屋に含まれない使用済燃料一時貯蔵&新燃料一時貯蔵建屋の建屋規模は約 21.5m×73.5m×高さ 29.5m、建屋容積は 47,000m³である。主建屋と使用済燃料一時貯蔵&新燃料一時貯蔵建屋を合わせた建屋容積の合計（管理棟を除く）は主建屋内の新燃料一時貯蔵エリアの重複（-4,000m³）を見直して、280,000m³となった。燃料製造設備主工程セル配置を図 4-3-59 及び図 4-3-60 に示す。

(d) システムの特徴

①プロセス概念に関する事項

本燃料製造システムは酸化物顆粒の被覆管への振動充填を基本とする概念であり、顆

粒級の装填割合、加振条件の適正化により、80%程度のスミア密度を得ることが可能と考える。ロシアのスフェロイド UO₂ 顆粒充填例として充填スミア密度は 80.7±1.8%TD (顆粒密度約 95%TD) と報告されている。なお、本システム概念では製造工程に供給される顆粒バッチ内の顆粒間のPu富化度等の均質性については、重要な確認事項(要素技術としての R&D 項目)である。

本システムでは製造ラインを 1 系列として製造燃料体の種類により製造キャンペーンを組むことにより対応する概念である。このことは、キャンペーン間にラインをクリーンアップする必要が生じるが、高線量下でのクリーンアップの実現性及びその期間が操業日数等の適切に設定できているかの検討が必要となる。また、バッチサイズは小さく(約 30kgHM/バッチ)、分析頻度の増大、品質管理の複雑化を招き安定操業への影響が考える。

燃料の品質保証な観点で本システム検討では燃料ミート部の検査項目(特に O/M、蒸発性不純物等)が含まれていないが、燃料の品質保証の観点で今後これらの検査を考慮したシステム(設備、操業)の検討が必要と考える。

MA の燃料内への取り込みに関しては、Np の約 50%は Pu, U と共に回収でき、混合酸化物顆粒となる。残りの Np, Am, Cm については別途回収したものを酸化物に転換しこれを上記の混合酸化物と共に被覆管に充填するか又は MA 酸化物単独で燃料とすることが考えられる。燃料性能から燃料仕様(均一性等)への要求との摺り合わせが必要となる。

②発生廃棄物に関する事項

燃料製造システムからの発生廃棄物、機器のメンテナンス等により発生する二次廃棄物が主要なものである。本システムでは混合酸化物の顆粒及び粉体を取り扱うことにより、他の酸化物燃料製造システムからの二次廃棄物の発生量と大きな相違はないと考える。しかし、発生廃棄物の質的には低除染システム特有の FP または、MA リサイクルする場合は Np, Am, Cm が廃棄物側に移行することとなり、高い放射能をもつ廃棄体となる。発生量及び廃棄物の区分としては、低除染 MOX ペレット燃料製造システムの検討と同程度と考える。

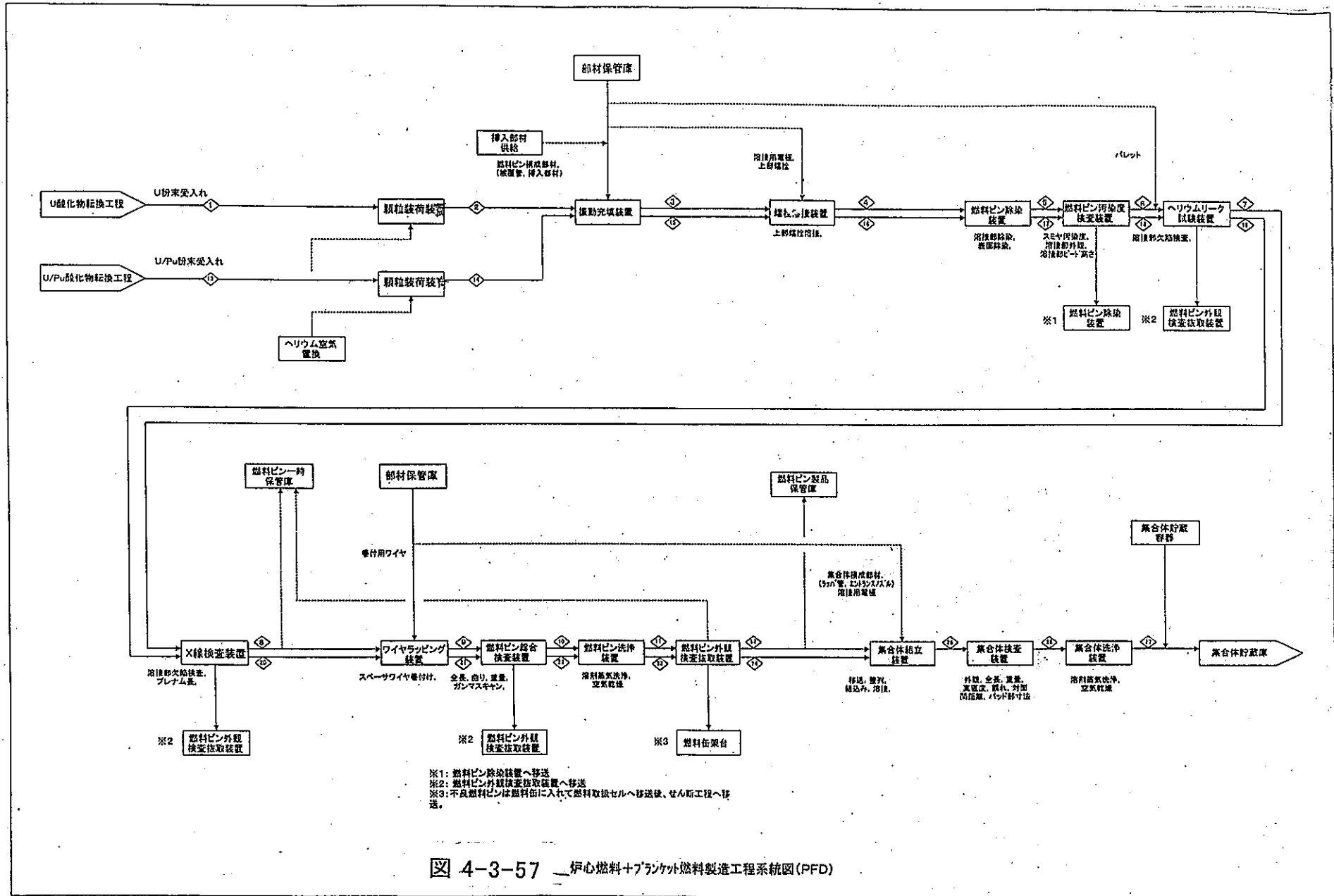


図 4-3-57 炉心燃料+ブランケット燃料製造工程系統図(PFD)

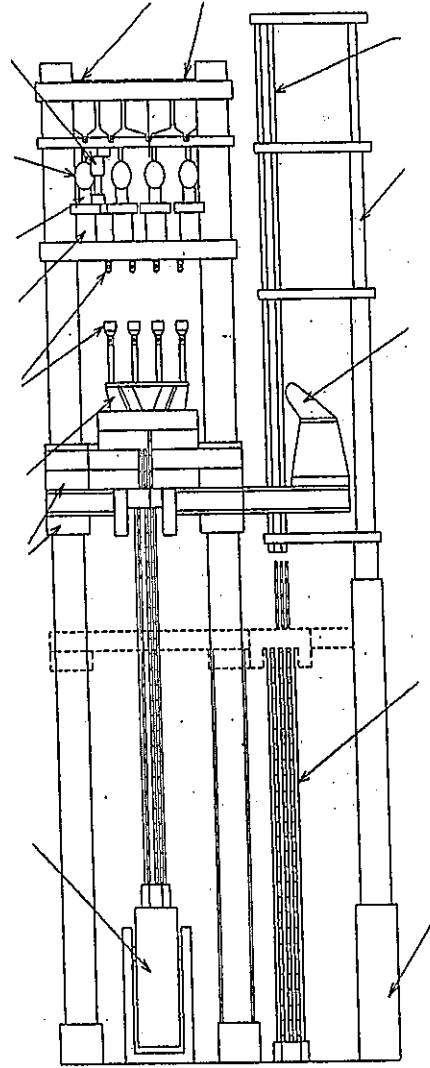


图 4-3-58 燃料要素充填装置

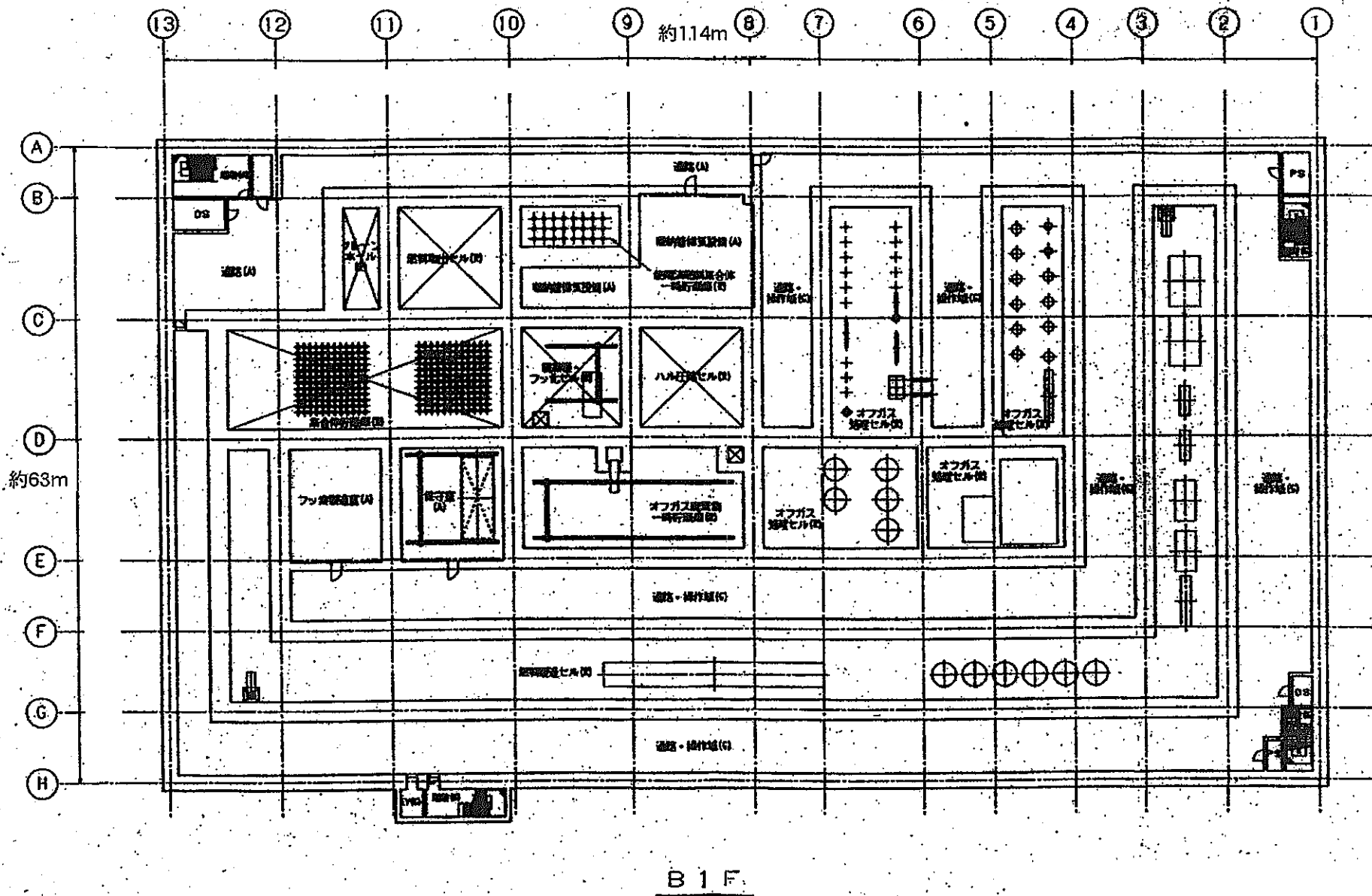


図 4-3-59 機器配置概念図

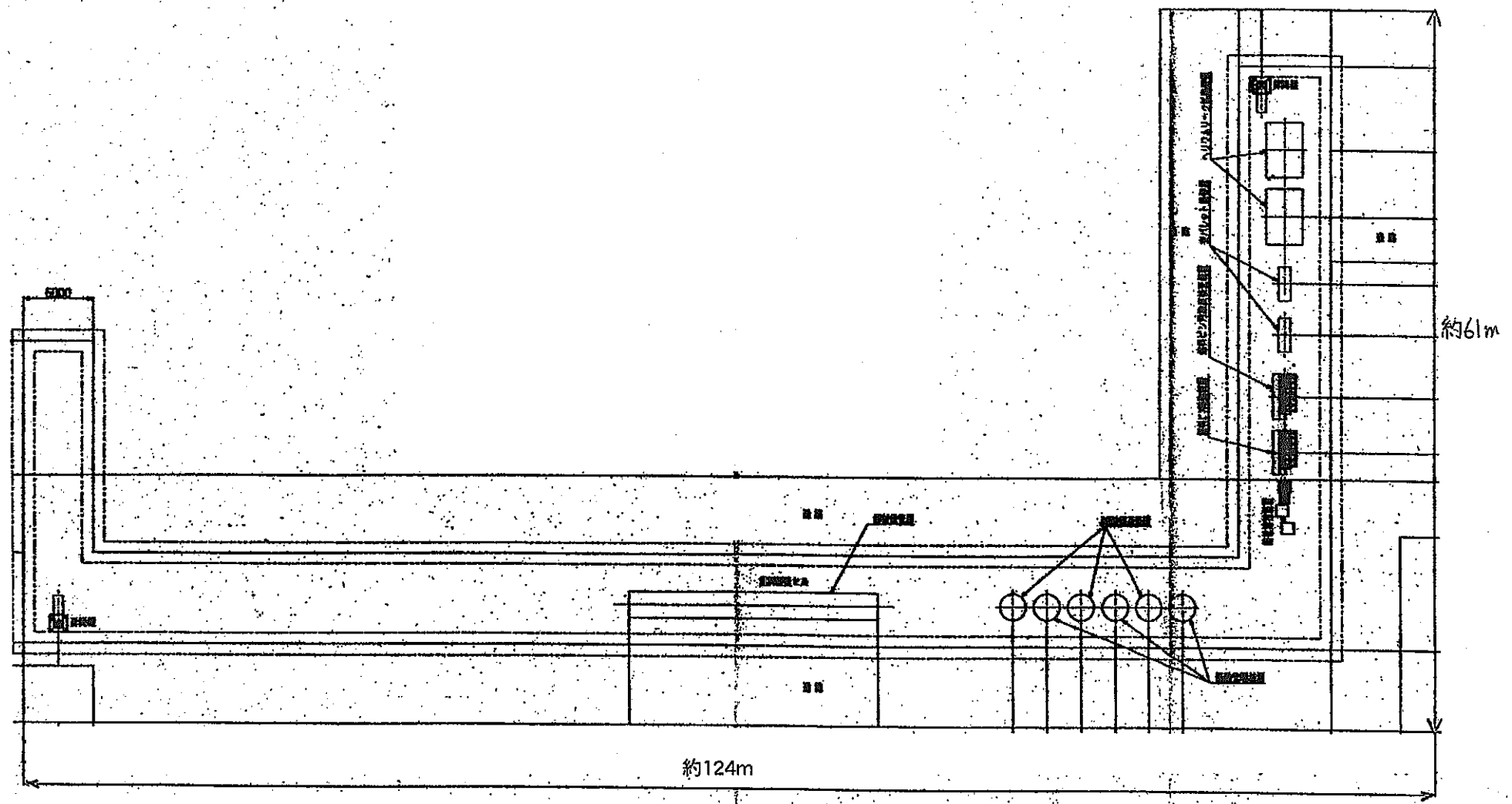


図 4-3-60 燃料製造セル配置図 (B1F)

(3) 湿式法と乾式法との比較

(i) 比較検討の目的と前提条件

将来のFBR燃料製造の候補技術の一つとして期待される振動充填燃料製造技術について、振動充填燃料製造法の今後の絞り込みのために必要なデータベースの整備と今後の設計検討課題の抽出を主な目的として、湿式/乾式再処理システムと振動充填燃料製造システムとの一体化プラントのこれまでの設計検討結果をもとに比較検討を行った。

比較検討対象とした振動充填燃料製造法は、湿式の簡素化 PUREX 再処理工程から受け入れた U/Pu/MA/FP 混合溶液のゾルゲル法による振動充填燃料製造法と乾式の再処理工程（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法）から受け入れた酸化物顆粒等による振動充填燃料製造法である。比較検討の範囲としては、湿式/乾式再処理システムとの一体化プラントとしての各振動充填燃料製造システムについて、各システムの特徴としてこれまでにとりまとめた安全性、経済性、核不拡散性、環境負荷低減性、技術成立性の観点からの比較検討と今後の設計検討課題の抽出までとした。

主要な比較検討条件を以下に示す。

- a. 製造規模：50tHM/年…乾式の酸化物電解法/金属電解法/フッ化物揮発法による振動充填燃料製造システム
200tHM/年…湿式のゾルゲル法による振動充填燃料製造システム
- b. 製造燃料の基本仕様：各燃料製造システムに共通であり、再処理対象燃料は、150万kWe出力のFBR使用済み燃料とし、U,Pu回収率は99.5%、MA回収率は経済性へのインパクトが小さい範囲内でのMA回収を行う場合の量を考慮している。また、FP除染性能は新燃料中の混入率が2wt%/HM程度を上回らない程度とし、スミア密度、密度公差、Pu富化度の公差は、それぞれ80~85%程度、±5%以内、±5%以内とする。
- c. 施設運転：年間の施設設備稼働率は200日とする。
- d. 設備稼働率、処理能力：設備稼働率、年間処理量及び設備装置の処理速度等を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。
- e. 回収率：U,Puの回収率は99%以上を目標とする。
- f. 貯蔵容量：製造した燃料集合体の貯蔵容量は、1年分とする。
- g. 保守：機器の保守・補修は、各製造プロセスでのマテリアルハンドリング等の特徴に応じて遠隔保守あるいは直接保守の2方式で対応する設計とする。

(ii) 振動充填燃料製造システム比較検討

前記の設計の前提条件と主要な比較検討条件のもとに設計検討を行った各燃料製造システムについて、主要なシステムの特徴としての比較検討結果を以下に示す。また、比較検討結果の一覧を表 4.3.9 に示す。

a. 安全性の検討

各燃料製造システムについて、燃料製造設備に関する現行の安全審査指針として、ウラン加工施設安全審査指針と再処理施設安全審査指針及びMOXペレット製造プラントの安全基準の考え方をベースに、これを適用した場合の問題点を中心に比較検討を行った。

いずれの燃料製造システムについても、基本的に現行指針の適用に大きな問題点はなく、今後の設計で各システムの特性に応じた課題への対応は可能と考えられる。耐震安全性の重要度分類については、再処理の電解工程からの金属の酸化転換工程を有する金属電解法の燃料製造システムは、機能喪失により外部に放散する可能性のあるもの等としてAクラスに分類されると考えられるが、それ以外の乾式振動充填システムでは、再処理から酸化物顆粒として製品を受け入れることにより、Bクラスに設定されると考えられる。

各システムの特性に応じた課題としては、湿式ゲル化法の燃料製造システムについては、硝安などの爆発性のある危険物の回収、処理等の対応設計とMAが混在した粒子体系、中性子相互干渉等を考慮した臨界設計の対応等が上げられる。また、乾式酸化物電解法では、ウランゲッター材の使用による火災防止への対応設計、乾式フッ化物揮発法では、プロセス中での燃料粒子と水との共存による臨界制限評価、水素とフッ素の使用による火災への対応設計等が今後の検討課題である。

b. 経済性の検討

今年度は、再処理との一体化プラントについて概略の建設コストと一部の運転コストの評価を行った。建設コストの評価にあたっては、湿式ゲル化法では、類似施設の過去の評価実績から、また乾式酸化物電解法とフッ化物揮発法については、メーカーの過去の製作・建設実績から、乾式金属電解法は、機器設備の設計結果の積み上げによっている。建設コストのうち、燃料製造設備費の占める割合は、湿式ゲル化法（溶液のPu富化度調整から集合体組立てまで）が約1/4、乾式金属電解法（金属の酸化転換から集合体組立てまで）が約1/5、乾式酸化物電解法とフッ化物揮発法（酸化物顆粒の分級から集合体組立てまで）がともに約1/8となっており、一体化プロセスにおける燃料製造工程数にほぼ対応した割合

となっている。しかし、各システムの建設コスト値は、コスト積み上げ条件に違いがあること、設備機器数や建屋面積、容積との相関性も明確でないこと等により、要因分析を含めた検討が今後必要と考えられる。

今後の課題としては、建設/運転/部材コスト見積もりのための条件を共通にそろえた上で、50,200tHM/年の各量産規模の製造システムの詳細検討を行い、スケールメリットについての評価や、機器設備の最適配置、機器設備の共用化、保守エリアの取り方、保守方法の統一等による経済性向上策の検討による比較検討を行うことが上げられる。

c.核不拡散性の検討

いずれの燃料製造システムにおいても、Puの単離プロセスがなく、低除染燃料を取り扱うことによる核兵器転用のアクセスが困難である等の特性により、核不拡散性は高いと評価される。

保障措置については、基本的には従来と同等の手法が適用可能と考えられる。また、物質収支区域(MBA)の設定については、各製造プロセスとも基本的に、使用済み燃料受け入れ工程、燃料再処理/製造工程、燃料集合体貯蔵工程の3~4区域になると考えられる。

各製造プロセス共通の今後の課題としては、製造装置機器への粒子燃料の付着による計量管理上の対策等があげられる。

d.環境負荷低減性の検討

廃棄物発生量の詳細評価は、次年度の予定であり、今年度は乾式法の振動充填燃料製造工程から発生する廃棄物の種類と概略の発生量について評価を行った。いずれの燃料製造システムについても発生する廃棄物は機器のメンテナンス等による二次廃棄物が主であり、酸化物電解法ではドラム缶単位で年間約18本、金属電解法ではメンテナンス廃棄物のほかに、再処理工程から受け入れる溶解金属の酸化転換や、セル内での取扱いにより年間約3,000kgと評価される。

e.技術的成立性の検討

湿式ゲル化法、乾式酸化物電解法及びフッ化物揮発法については、これまでにMOX燃料製造実績があり、原理的な製造技術成立性は有していると考えられるが、乾式の金属電解法は、これまでにMOX燃料の製造実績もなく、特に金属の酸化転換技術や酸化物粒子の転動造粒技術などのこれまで基礎試験レベルの新規技術が検討されているため、これらの新規技術の確証による成立性の評価が必要と考えられる。

また、実用化目標を今後達成していくための技術的成立性に係る共通の課題としては、低除染燃料の遠隔製造性の評価、高燃焼度化のための酸素ゲッター材の開発や低 O/M 比粒子燃料製造技術開発があげられる。各燃料製造システムの今後の設計検討課題については、次項に述べる。

③今後の設計検討課題とまとめ

各燃料製造システムについて、安全性、経済性、核不拡散性、環境負荷低減性、技術成立性の観点からの今後の設計検討課題を表 4.3.10 に示す。

表4.3.9 振動充填燃料製造システム比較検討結果

比較検討項目	湿式ゲル化法	乾式酸化物電解法	乾式金属電解法	乾式フッ化物揮発法
<p>1. 安全性 (現行のU加工施設、再処理施設安全審査指針とMOXペレット製造の安全基準の考え方をもとにした検討)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子体系、MA混在の影響、中性子相互干渉等を考慮した臨界設計が必要。 ・MA等の発熱、遮へい対策が必要。 ・ペレットと同様の質量臨界管理により、移動操作の異常防止管理の適用が可能。 ・特有の課題として、硝安など爆発性危険物の回収、処理の対応が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造設備の運転時の異常な過渡変化として、火災/臨界の拡大、冷却機能低下、外部電源喪失とウランゲッター使用による火災拡大等を考慮。 ・火災の拡大防止は、温度/酸素濃度監視とインタロック装備、密封容器への収納を考慮。 ・臨界の拡大防止はダブルバッチによる臨界量を考慮し、取扱制限量の設定等により対応。 ・外部電源喪失について、安全上重要な設備の監視、無停電電源によるインタロック機能、非常用電源設備により対応。 ・耐震安全性の重要度分類は、顆粒分級、混合、振動充填等の主要機器はBクラス、端栓溶接以降の組立工程では、Cクラスに設定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・基本的に現行指針の適用に問題はなく、今後の設計フェイズで対応可能と評価。 ・耐震安全性の重要度分類は、機能喪失により外部に放散する可能性のあるもの等としてAクラスに設定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造設備の運転時の異常な過渡変化として、火災/臨界の拡大、冷却機能低下、外部電源喪失等を考慮。 ・臨界の拡大防止は、プロセス中でMOX粒子と共存する水の量を考慮し、最も厳しい球形状で臨界制限量を評価し、取扱い制限量を設定して対応。 ・水素、フッ素の検知、警報、消火設備の設置、酸素との混触を避け、オフガス処理系の分離等の工程設計を考慮。 ・U/PuF₆の凝固、析出防止のための配管加熱、HF漏洩時のアルミナ吸着による局所排気設計を考慮。 ・耐震安全性の重要度分類は、放射性物質の内蔵施設で、Aクラス以外の施設としてBクラスに設定。
<p>2. 経済性 (一体化プラントについて、概略の建設コスト、運転コストを評価)</p>	<p>・200tHM/年の一体化プラント建設コストは、類似施設の過去の実績から、製造設備費は約1/4を占め、残りは再処理設備費(約1/3)、ユーティリティ・共通設備費(約5/12)。運転コストは、総額で人件費は約1/3を占め、(燃料製造は約1/4)、その他定検費、補修費、部材費に区分。</p>	<p>・50tHM/年の一体化プラント建設コストは、メーカーの過去の製作、建設実績の推定から製造設備費は約1/8を占め、残りは再処理設備費(約3/8)、共通設備費(約1/2)。運転コストは次年度評価の予定。</p>	<p>・50tHM/年の一体化プラント建設コストは、設計結果からの機器の積み上げにより、製造設備費は約1/5を占め、残りは再処理設備費(約1/5)付帯設備費(約1/5)共用設備費(約2/5)。運転コストは次年度評価の予定。</p>	<p>・50tHM/年の一体化プラント建設コストは、メーカーの過去の製作、建設実績の推定から、製造設備費は約1/8を占め、残りは再処理設備費(約3/8)、共通設備費(約1/2)。運転コストは次年度評価の予定。</p>

表4.3.9 振動充填燃料製造システム比較検討結果

比較検討項目	湿式ゲル化法	乾式酸化物電解法	乾式金属電解法	乾式フッ化物揮発法
3. 核不拡散性	<ul style="list-style-type: none"> ・Puの単離プロセスがない、低除染燃料のセル内取扱いによる転用のアクセスが困難等の特性により、核不拡散性は高いと評価。 ・保障措置は、基本的に従来と同等の手法が適用可能と評価。しかし、装置への付着粒子燃料は計量管理上の配慮と対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・Puの単離プロセスがない、低除染燃料のセル内取扱いによる転用のアクセスが困難等の特性により、核不拡散性は高いと評価。 ・保障措置は、物質収支区域(MBA)を燃料集合体解体、燃料再処理工程、燃料製造工程、燃料貯蔵区域の4区域に設定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・Cmの混在によるPuの核分裂連鎖反応の妨害、Puの単離プロセスがない、低除染燃料のセル内取扱いによる転用のアクセスが困難等の特性により、核不拡散性は高いと評価。 ・保障措置は、物質収支区域(MBA)を使用済み燃料受け入れ、製造工程等の主工程及び燃料集合体一次保管区域の3区域に設定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・核物質の全量リサイクルによる貯蔵の最小化、Puの単離プロセスがない、1,000程度の除染率による転用のアクセスが困難等の特性により、核不拡散性は高いと評価。 ・保障措置は、物質収支区域(MBA)を使用済み燃料受け入れ、製造工程等の主工程及び燃料集合体一次保管区域の3区域に設定。
4. 環境負荷低減性	<ul style="list-style-type: none"> ・今年度は一体化プラントの高/低レベルのプロセス廃棄物と雑固体廃棄物発生量の概略評価を実施。燃料製造工程からの発生量評価は次年度の予定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造工程からの廃棄物は、機器のメンテナンス等により発生する二次廃棄物が主であり、発生量は、燃料ピン製造工程から、分級装置の雑固体がドラム缶単位で約2本/年、ホッパーの交換物が約4本/年、燃料計量装置の雑固体が約9本/年と評価。集合体組立て工程から、組立て装置等の雑固体が約3本/年と評価。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造工程からの廃棄物は、電解金属の酸化転換、還元・焼結工程での酸化・還元皿への付着物やセル内での回収金属や酸化物の飛散物。発生量は酸化・還元・焼結皿が約2,700kg/年、回収金属が約200kg/年と評価。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料製造工程からの廃棄物は、機器のメンテナンス等により発生する二次廃棄物が主であり、発生量及び廃棄物区分は他の酸化物燃料製造システムの検討結果と同程度と評価。
5. 技術成立性	<ul style="list-style-type: none"> ・英国で実績のある外部ゲル化法による振動充填法を採用。BNFLは1978年に年間1t規模の製造施設建設とMOX燃料ピンを約3,700本の製造実績を有する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロシアRIARで実績のある高温電気化学法による酸化物顆粒の振動充填法を採用。RIARは燃料ピン本数で約18,000本のMOX燃料の製造実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・これまでに金属電解法による酸化物顆粒の振動充填燃料製造実績はない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロシアRICTで現在、Pu富化度5～30%のU/PuF6による酸化物転換と顆粒製造試験を実施中。U/PuO₂燃料ピン2～3本の照射実績がある。基礎研究段階。

表4.3.10 振動充填燃料製造システムの今後の設計検討課題

設計検討課題	湿式ゲル化法	乾式酸化物電解法	乾式金属電解法	乾式フッ化物揮発法
1. 安全性、保守・補修性	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子体系、MA混在の影響、中性子相互干渉等を考慮した臨界設計。 ・MA等の発熱、遮へい対策設計。 ・ペレットと同様の質量臨界管理により、移動操作の異常防止管理の適用が可能。 ・硝安など爆発性危険物の回収、処理の対応設計。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ウランゲッター使用による火災拡大防止のための設計。 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震安全性の重要度分類の検討評価。(現在、Aクラスと評価) 	<ul style="list-style-type: none"> ・水素、フッ素の酸素との混触を避けたオフガス処理系の分離等の工程設計。 ・HF漏洩時のアルミナ吸着による局所排気設計。
2. 経済性	<p>(各燃料共通)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一体化プラントにおける安全重要度機器の共用化の検討。 ・機器の保守点検頻度の設定検討。 ・遠隔自動化運転・保守機器の開発可能性設定の検討。 ・物流/運転/保守側面からの機器寸法の設定検討。 ・機器のセル内配置の物流操作、運転保守性の面からの検討。 ・主工程セルの完全遠隔セルの採用可否の検討。 ・製造ラインに対応するセル分割、統合の可否の検討。 ・除染、保守セルの合理的配置設計。 ・完全遠隔セルの場合の保守セルの配置設計。 <p>(各燃料共通)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コスト見積もり条件共通化による建設/運転/部材コスト評価。 ・一体化プラントにおける燃料搬出入頻度の検討。 ・炉側との取り合い方法の検討(プールorキャスク) ・物流の最短化設計。 ・一体化プラントにおけるキャスク、エリア等の共用可能性検討。 ・使用済みRB燃料のAB燃料への適用の可否の検討。 ・燃料製造における単位ロット容量の設定検討。 ・炉心、ブランケット等の燃料毎の取扱い機器の独立化、キャンペーン毎の系統除染の要否検討。 ・燃料検査項目と検査順序の検討。 ・炉心、ブランケット等の燃料毎の製造ライン分離の要否検討。 			

表4.3.10 振動充填燃料製造システムの今後の設計検討課題

比較検討項目	湿式ゲル化法	乾式酸化物電解法	乾式金属電解法	乾式フッ化物揮発法
3. 核不拡散性	<p>(各燃料共通)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・装置への付着粒子燃料についての計量管理上の対策設計。 			
4. 環境負荷低減性	<p>(各燃料共通)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工程内発生量廃棄物及びメンテナンス廃棄物の種類、発生量の詳細検討、評価。 			
5. 技術成立性(要素技術開発)	<ul style="list-style-type: none"> ・内部ゲル化法及び外部ゲル化法によるMA,FP模擬多成分系のゲル化確認試験。(高発熱性のゲル球製造を含む) ・均一固溶限界の確認試験。 ・均一固溶体の高温までの結晶構造安定性の評価試験。 ・廃棄物低減化のためのアンモニア、有機溶媒等のリサイクル技術開発。 ・硝安等の爆発性のある廃棄物安定化処理、発生量低減化技術開発。 	<ul style="list-style-type: none"> ・低除染模擬顆粒製造確認試験。 	<ul style="list-style-type: none"> ・転動造粒顆粒特性評価試験。 	<ul style="list-style-type: none"> ・フッ化物の酸化物転換確認試験と顆粒特性評価試験。
<p>(各燃料共通)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低除染模擬振動充填燃料遠隔製造性評価試験。 ・機器配置のコンパクト化のための遠隔保守性評価試験。 ・顆粒形状の違いによる充填密度評価と充填挙動評価解析コード整備。 ・酸素ゲッター材の開発。 ・低O/M比粒子燃料の製造技術開発。 ・低除染燃料中のPu濃度分布測定のための非破壊検査技術開発。 				

4.3.2 窒化物燃料に対する検討状況

(1) 湿式再処理との組み合わせ

(a) 設計の前提条件と基本方針

湿式再処理プロセスをベースとする窒化物燃料製造法としては、窒化物燃料を再処理 PUREX プロセスにより硝酸溶解後、炭素粉末を加えてゲル化し、炭素熱還元法により窒化物粒子燃料とする製造法がある。

この方法により、スイス PSI 研究所、原研等においては、(U,Pu) N, UN 粒子燃料製造の実績を有している。しかし、使用済み燃料から (U,Pu) N 等の窒化物粒子燃料を製造する工業的レベルあるいはそれに準ずる製造設備等の検討は、公開文献中ではこれまでに見当たらない。現在は基礎的な実験段階にあり、実現性については今後の試験研究が必要である。

今年度は、このプロセスをベースにプロセスフローを設定するとともに、今後の製造技術成立性に係る技術的課題の抽出を検討した。

設計検討の条件は、酸化物粒子燃料製造の場合と同様であるが、主要な設計条件を以下に示す。

a. 製造規模：50tHM/年

b. 製造燃料の基本仕様：再処理対象燃料は、150 万 kWe 出力の FBR 使用済み燃料とし、U, Pu 回収率は 99.5%、MA 回収率は経済性へのインパクトが小さい範囲内での MA 回収を行う場合の量を考慮している。また、FP 除染性能は新燃料中の混入率が 2wt%/HM 程度を上回らない程度とし、スミア密度、密度公差、Pu 富化度の公差は、それぞれ 80~85%程度、±5%以内、±5%以内とする。

c. 施設運転：年間の施設設備稼働率は 200 日とする。

d. 設備稼働率、処理能力：設備稼働率、年間処理量及び設備装置の処理速度等を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。

e. 回収率：U, Pu の回収率は 99%以上を目標とする。

f. 貯蔵容量：製造した燃料集合体の貯蔵容量は、1 年分とする。

g. 保守：機器の保守・補修は、各製造プロセスでのマテリアルハンドリング等の特徴に応じて遠隔保守あるいは直接保守の 2 方式で対応する設計とする。

(b) プロセス設計

前記の設計の前提条件と基本方針のもとに検討した燃料製造プロセスフローダイアグラムを図 4-3-61 に示す。

このプロセスは、再処理工程から U/Pu, U 硝酸溶液を受け入れ、Pu 富化度調整の後、炭素粉末を加えてアンモニア水中に滴下し、ゲル球として洗

浄、乾燥して仮焼した後、窒素－水素混合ガス中での炭素熱還元により窒化物粒子燃料を製造するプロセスである。製造した窒化物粒子燃料はその後、粒子分級、検査を経て振動充填を行い燃料ピンを製造する。

(c) 技術的成立性の検討

窒化物粒子燃料製造技術は、現在は実験段階にあり、これまで工業的レベルでの製造実績がないこと、及び低除染燃料の製造となることから今後の技術的成立性に係る課題としては、酸化物粒子燃料製造と同様の課題のほかに窒化物燃料特有の製造技術課題として以下の課題が上げられる。

- ・ 低除染模擬振動充填燃料遠隔製造性評価。
- ・ 機器配置のコンパクト化のための遠隔保守性評価。
- ・ 燃料ピン中の Pu 濃度分布測定のための非破壊検査技術開発。
- ・ N15 の濃縮、リサイクル技術の実証。
- ・ MA、FP 混入模擬多成分系のゲル化の確認。(高発熱性のゲル級製造を含む)
- ・ 均一固溶限界の確認。
- ・ 均一固溶体の高温までの結晶構造安定性の評価。
- ・ 廃棄物安定化のためのアンモニア、有機溶媒等のリサイクル技術開発。
- ・ 硝安等の爆発性のある廃棄物の安定化処理、廃棄物低減化技術開発。

湿式再処理 / 振動充填燃料

ゲル化法

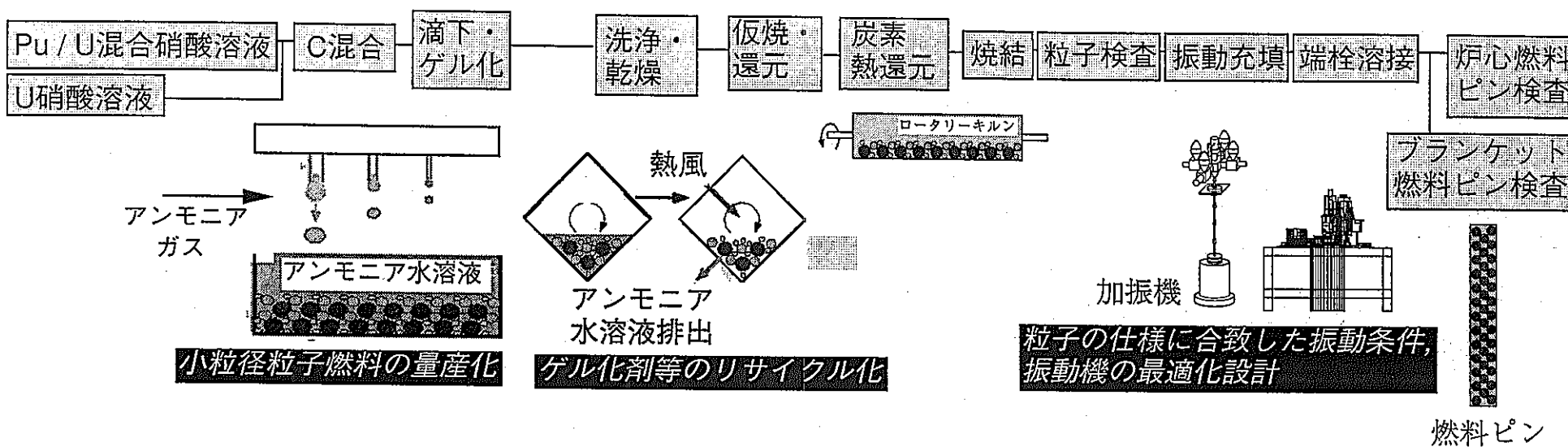


図4-3-61 窒化物燃料振動充填プロセスフロー

(2) 乾式再処理との組み合わせ

(a) 設計の前提条件と基本方針

乾式再処理プロセスをベースとする窒化物燃料製造法としては、窒化物燃料を熔融塩電解法により、金属を陰極に析出させ、Cd 中の金属に窒素ガスを吹き込み窒化させる方法と、 Li_3N を熔融塩中に添加して窒化させる方法がある。

この方法により、原研等においては、UN 燃料の生成を確認している。しかし、使用済み燃料から (U,Pu) N 等の窒化物粒子燃料を製造する工業的レベルあるいはそれに準ずる製造設備等の検討は、これまでに見当たらない。湿式法と同様、現在は基礎的な実験段階にあり、実現性については今後の試験研究が必要である。

今年度は、窒化物燃料を直接、熔融塩中の陽極で溶解/電解して金属を陰極に析出させ、その金属を窒化する方法をリファレンスプロセスとして、プロセスフローの検討、金属燃料製造工程からの変更点の検討と今後の製造技術成立性に係る技術的課題の抽出及び金属電解法による酸化物振動充填燃料製造プロセスとの機器数の概略比較の検討を行うものとし、窒化法については、二つの方法のうち、設備上シンプルとなる窒素ガスの吹き込み法を採用し、 Li_3N の添加による窒化法については今後の課題として残して検討することとした。

設計検討の条件は、酸化物粒子燃料製造の場合と同様であるが、主要な設計条件を以下に示す。

a. 製造規模：50tHM/年

b. 製造燃料の基本仕様：再処理対象燃料は、150 万 kWe 出力の FBR 使用済み燃料とし、U、Pu 回収率は 99.5%、MA 回収率は経済性へのインパクトが小さい範囲内での MA 回収を行う場合の量を考慮している。また、FP 除染性能は新燃料中の混入率が 2wt%/HM 程度を上回らない程度とし、スミア密度、密度公差、Pu 富化度の公差は、それぞれ 80~85%程度、±5%以内、±5%以内とする。

c. 施設運転：年間の施設設備稼働率は 200 日とする。

d. 設備稼働率、処理能力：設備稼働率、年間処理量及び設備装置の処理速度等を考慮し、最大処理能力、設備系統数等を設定する。

e. 回収率：U、Pu の回収率は 99%以上を目標とする。

f. 貯蔵容量：製造した燃料集合体の貯蔵容量は、1 年分とする。

g. 保守：機器の保守・補修は、各製造プロセスでのマテリアルハンドリング等の特徴に応じて遠隔保守あるいは直接保守の 2 方式で対応する設計とする。

(b) プロセス設計

前記の設計の前提条件と基本方針のもとに検討した再処理/燃料製造プロセスフローと燃料製造プロセスフローを図 4-3-62、図 4-3-63 に示す。

窒化物燃料製造工程の主な流れを以下に示す。

- ① 再処理製品である UN 粉末、(U,Pu,MA) N 粉末等の窒化物燃料について、Pu スポットの発生除去を目的として、細かく粉碎処理する。
- ② 各粉末の秤量後、所定の Pu 富化度に混合する。
- ③ 混合した粉末について不純物、Pu 富化度検査を行う。
- ④ 転動造粒により顆粒を製造する。その後、顆粒の分級を行う。スペックアウトとなった顆粒は粉碎して混合工程に戻す。分級した顆粒は焼結する。
- ⑤ 空気セルにて被覆管の下部端栓を溶接後、不活性ガスの Ar 雰囲気セルにて顆粒を振動充填し、上部端栓の溶接、被覆管内の He ガス置換を行う。
- ⑥ 溶接部の X線検査、充填密度、Pu 濃度分布を γ 線、中性子線で検査する。
- ⑦ 燃料ピンにワイヤラッピング後、燃料集合体組立てを行う。外観、寸法、曲がり検査後に払い出しを行う。

(c) 金属燃料製造工程との比較検討

図 4-3-64 に金属燃料製造プロセスフローを示す。図 4-3-63 に示した振動充填燃料製造プロセスの金属燃料製造プロセスからの主要な変更点は、顆粒製造、振動充填工程が付加され、Na 充填、Na 溶解工程が削除されることであり、追加設備の種類と主要な仕様は以下の通りである。

① 粉碎機

既存の MOX 燃料製造で使用される粉碎機と同等設備の適用が可能と考えられる。ただし、MA,FP を含むため、セル内での設置となる。

② 転動造粒機

バインダーを少量添加しながら微粒子を回転成長させる装置であり、本造粒方式では、短時間処理が可能で廃液がほとんど発生しないという特徴を有する。ただし、顆粒粒径が幅広く分布するため、振動充填に適さない粒径の粒子は再度、粉碎して燃料粉とする。

③ 焼結炉

既存の MOX 燃料製造で使用される粉碎機と同等設備の適用が可能と考えられる。

④ 充填密度、Pu 濃度分布検査装置

これまで γ 線測定法が海外で使用されてきた実績があるが、今後はより高い精度の向上のため、中性子線測定による燃料内部の充填密度や Pu 濃度分布を測定する必要がある。

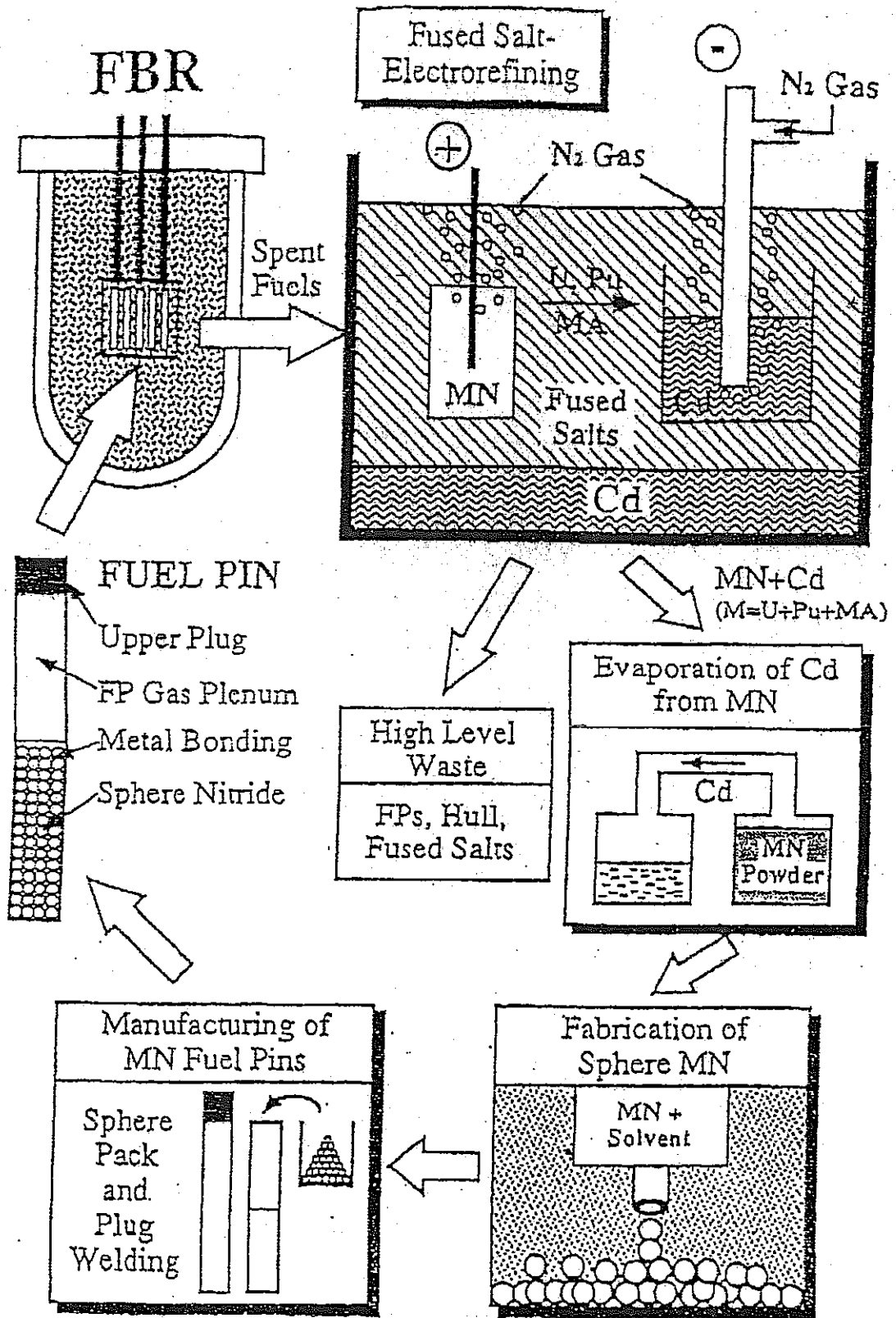
(d) 技術的成立性の検討

湿式法と同様に、窒化物粒子燃料製造技術は、現在は実験段階にあり、これまで工業的レベルでの製造実績がないこと、及び低除染燃料の製造となることから今後の技術的成立性に係る課題としては、酸化物粒子燃料製造と同様の課題のほかに窒化物燃料特有の製造技術課題として以下の課題が上げられる。

- ・ 再処理から供給される窒化物燃料の特性把握。
- ・ 低除染模擬振動充填燃料遠隔製造性評価。
- ・ 機器配置のコンパクト化のための遠隔保守性評価。
- ・ 燃料ピン中の充填密度、Pu 濃度分布測定のための非破壊検査技術開発。
- ・ N15 の濃縮、リサイクル技術の実証。
- ・ MA、FP 混入模擬多成分系のゲル化の確認。(高発熱性のゲル級製造を含む)
- ・ 均一固溶限界の確認。
- ・ 均一固溶体の高温までの結晶構造安定性の評価。
- ・ 廃棄物安定化のためのアンモニア、有機溶媒等のリサイクル技術開発。
- ・ 硝安等の爆発性のある廃棄物の安定化処理、廃棄物低減化技術開発。

(e) 金属電解法による酸化物振動充填燃料製造プロセスとの比較

上記のプロセス検討結果に基づき、金属電解法による酸化物振動充填燃料製造プロセスとの機器数の比較検討を行った。金属の酸化/窒化転換、顆粒燃料貯蔵、振動充填/燃料ピン貯蔵、集合体組立て、燃料払い出し工程で機器点数を比較すると、各プロセスとも約 96 点ずつで同等であり、セルサイズ、建屋サイズへの影響もほとんどないと考えられる。



出典；東大原子力工学研究施設弥生研究会、第5回新型燃料研究会（1994）
 窒化物燃料の高温化学再処理、半田他（原研）

図 4-3-62 窒化物燃料の乾式再処理説明図例

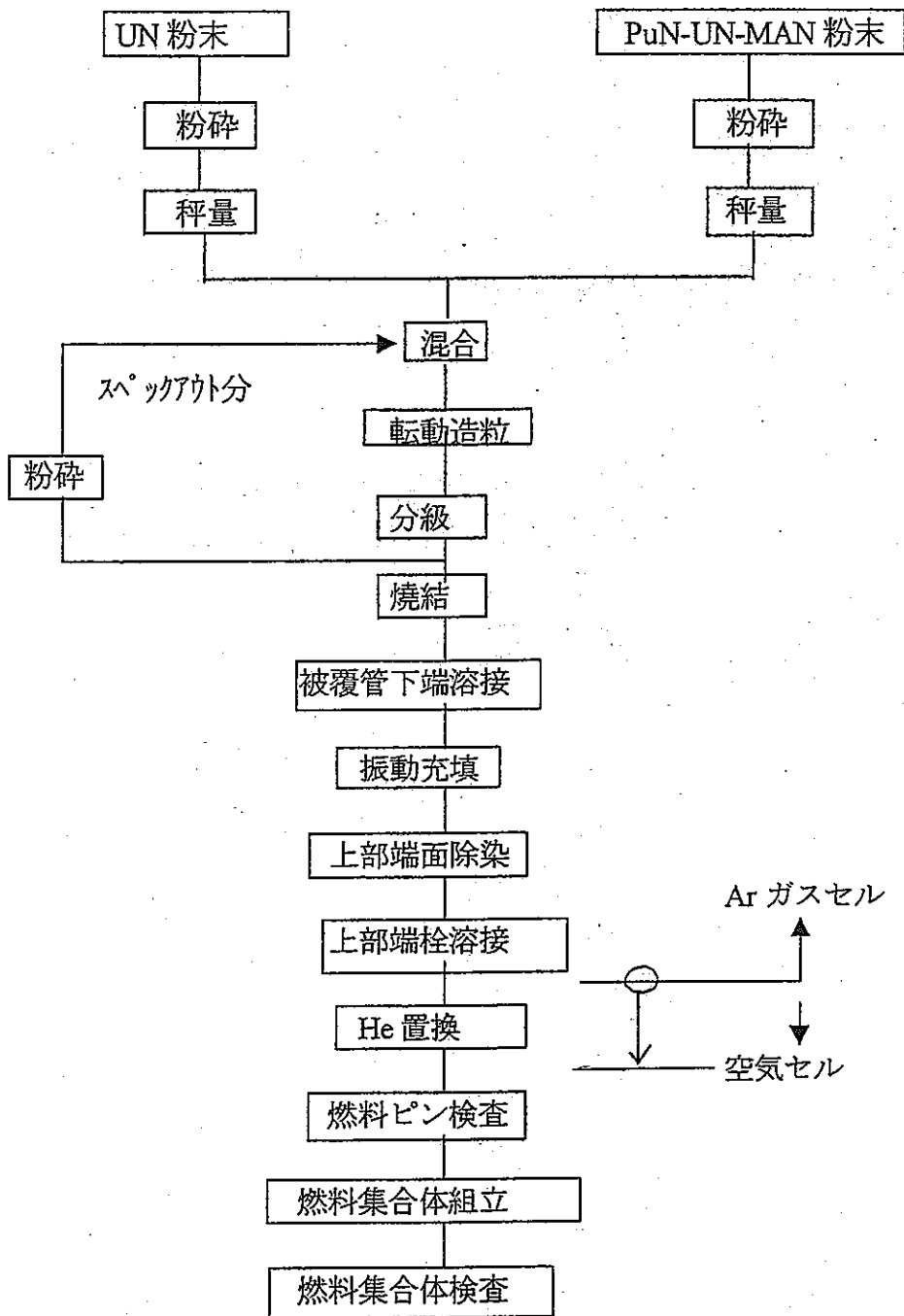


図 4-3-63 MN 振動充填燃料製造フロー

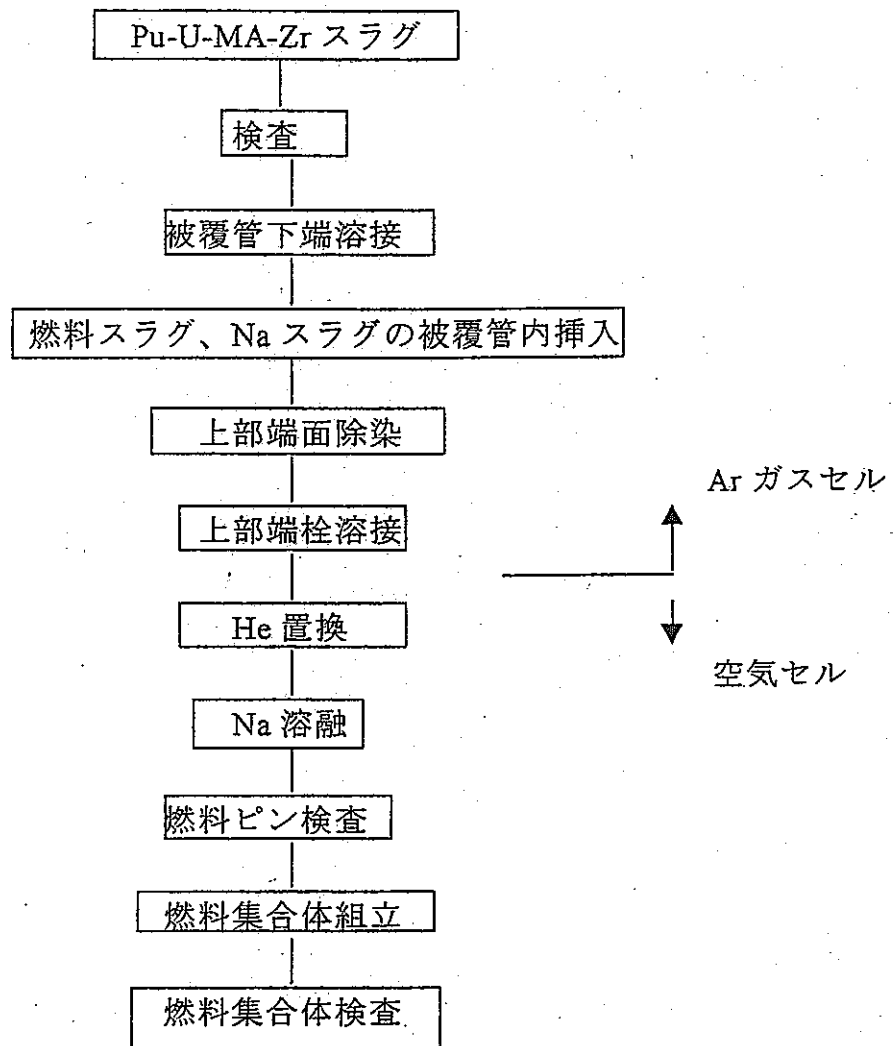


図 4-3-64 金属燃料製造フロー

4.4 鋳造法の検討

(1) 射出成型法

(i) 設計検討の基本方針 及び前提条件

本システム概念は燃料製造/再処理一体化プラントとなるが、燃料製造設備は、富化度調整工程、燃料要素加工（射出成型）、集合体組立工程を検討範囲とする。
燃料製造設備検討の基本条件を以下に示す。

(a) 燃料の基本仕様

炉心燃料集合体及びブランケット燃料集合体の基本仕様それぞれ表 4-4-1、2 に示す。炉心燃料要素のミート部は 42.5cm のスラグを 2 本で構成し、軸ブランケット燃料として、45cm のスラグを 3 等分したものをを用いる。径方向ブランケット燃料要素のミート部は 38.33cm のスラグ 3 本で構成する。

(b) 運転条件

生産規模は 50tHM/年（内側炉心燃料集合体 147 体/年、外側炉心燃料集合 74 体/年、径方向ブランケット燃料集合体 42 体/年）とする。稼働日数は 200 日/年とする

(c) バッチサイズ

本システムのロットの定義は、プルトニウム富化度調整がなされる射出成型るつばへの装荷量を単位とする。炉心燃料の場合 Pu 量として最大 4kg、ブランケット燃料は全量 50kg とする。

(d) スクラップの回収

スクラップの処理（ドロス除去）を行い富化度調整工程へのサイクルを前提とする。

(ii) プロセス設計

燃料製造工程では、U-Zr 合金塊及び U-Pu-Zr 合金塊、および燃料分を補填する U 金属、ならびに新ジルコニウムを原料として U-Pu-Zr 合金燃料（炉心燃料用）および U-Zr 合金燃料（ブランケット用）が鋳造され、ボンド Na とともに被覆管に充填する。さらに、端栓溶接後、最終的に燃料集合体の製造、保管する。プロセスフローを図 4-4-1 に示す。また燃料スラグ成形加工工程物質収支図を図 4-4-2 に示す。燃料スラグ鋳造品の歩留まり（射出成型鋳造本数に対する製品となる燃料スラグ本数の割合）は 80% に設定した。1 日当たりの燃料スラグ鋳造本数は内側炉心燃料用、外側炉心燃料用、軸方向ブランケット燃料用及び径方向ブランケット燃料用として、それぞれ 609（必要製品本数 487）本/日、306（必要製品本数 245）本/日、305（必要製品本数 244）本/日及び 100（必要製品本数 81）本/日となる。（それぞれの燃料スラグ製品の必要本数を歩留まり 0.8 で除したもの。）また、射出成型工程に投入する金属重量としては、内側炉心燃料用、外側炉心燃料用、軸方向ブランケット燃料用及び径方向ブランケット燃料用として、それぞれ 23.8（製品重量 11.8）kgPu/d、16.6（製品重量 8.3）kgPu/d、104.8（製品重量 51.3）kgHM/d 及び 110.7（製品重量 54.2）kgHM/d となる。（燃料スラグ鋳

造工程へ投入する原料金属重量は製品スラグ重量の 2.0383 倍となる。)

(iii) 設備機器概念

(a) 燃料成分調整

陰極処理によって得られた U-Zr 合金塊および U-Pu-Zr 合金塊、および燃料分を補填する U 金属、新ジルコニウム、ならびに先の成型工程で発生したヒール（射出成型時に鑄込まれずに残る分）とスクラップ（不合格品および鑄造スラグからの切断片）を、所定の組成となるように射出成型るつばに装荷する。装荷量は、炉心燃料の場合 Pu 量が 4.0 kg 以下（暫定値）、ブランケットの場合、全量が 50 kg 以下（暫定値）となるように制限する。ここでの成分調整を可能とするため、陰極処理からの製品やヒール・スクラップは適度な重量に小分けされ、各々の重量と組成は既知であるものとする。また、射出成型るつばはグラファイト製で、原料装荷前にイットリアコーティングを施すものとする。

(b) 射出成型

原料を装荷した射出成型るつばを射出成型機内へ移動、設置する。鑄型（モールド）の束を射出成型機に取付、蓋を閉じる。モールドは（長さ 55cm×肉厚 1mm の円筒）のシリカ（石英）製で、内部をジルコニアでコーティングする。プロセスセル内の雰囲気ガスの純度が悪い場合には、射出成型機の内部を高純度アルゴンガスでパージする。大気圧の高純度アルゴンガス中で、高周波誘導加熱によって原料を約 1400℃程度にまで昇温し、溶解する。電磁力による攪拌が生じるため、機械的な攪拌は行わない。溶解・攪拌完了後、ロータリーポンプで成型機内の圧力を 1torr（暫定値）程度まで下げる。モールドを熔融燃料に浸漬した後、成型機内の圧力を大気圧程度に戻し、モールドに熔融燃料を充填する。数秒後、モールドを引き上げ、冷却する。200℃（暫定値）以下までモールドを冷却した後、成型機を開け、鑄造品の入ったモールドとヒールの入ったるつばを取り出す。原料装荷から取り出しまでを、1回の射出成型（原料秤量からるつば&モールド取出しまで）に約 8 時間とし、一日に 2 バッチ/基の鑄造能力とする。射出成型装置を図 4-4-3 に示す。

①必要な射出成型機の基数

- ・内側炉心用に 4 基 > $3.0 = 23.8 \text{ kgPu/d} \div (4 \text{ kgPu/基} \times 2 \text{ バッチ/日})$
 - ・外側炉心用に 3 基 > $2.1 = 16.6 \text{ kgPu/d} \div (4 \text{ kgPu/基} \times 2 \text{ バッチ/日})$
 - ・軸ブラ用に 2 基 > $1.0 = 104.8 \text{ kgPu/d} \div (50 \text{ kgHM/基} \times 2 \text{ バッチ/日})$
 - ・径ブラ用に 2 基 > $1.1 = 110.7 \text{ kgPu/d} \div (50 \text{ kgHM/基} \times 2 \text{ バッチ/日})$
 - ・炉心燃料用予備に 1 基
- 合計 = 12 基

②射出成型機の鑄造能力

- ・炉心用射出成型機

約 80 スラグ/基・バッチ (> 77=609 スラグ/日 ÷ (4 基×2 バッチ/日))
 (> 51=306 スラグ/日 ÷ (3 基×2 バッチ/日))

・軸ブランケット用射出成型機

約 80 スラグ/基・バッチ (> 77=305 スラグ/日 ÷ (2 基×2 バッチ/日))

・径ブランケット用射出成型機

約 30 スラグ/基・バッチ (> 25=100 スラグ/日 ÷ (2 基×2 バッチ/日))

(c) モールド除去・スラグ検査

本工程では、モールド束からのモールド取り出し、鑄造品からのモールドの除去、両端の切断、検査までを1つの機器で、自動的かつ連続的に行うものとする。モールドの除去は、ロールの間を通過させることによってモールド破壊-除去を連続的に行う。モールド片、酸化物膜およびコーティング材（ドロス）の除去のため、鑄造品の表面をタワシ状のものでブラッシングする。ブラッシングによって出てくるドロスは、ヒール表面のドロスと共にドロス還元工程へ送る。鑄造品（燃料合金）の一部（射出成型るつば装荷量の 0.25%）は、破壊されたモールドとともに、廃棄物処理工程へ移行する。モールド除去後、鑄造品の長さをレーザ等で測定し、所定の長さ（両端の切り代+ α を含む）に足りない鑄造品は、秤量後不合格品として「ヒール・スクラップ貯蔵」へ送る。ある規定の長さ以上の鑄造品は、両端を剪断によって切断し、所定の長さとする。切り落とされた両端部は、秤量後「ヒール・スクラップ貯蔵」へ送る。その一部は、組成分析用のサンプルとする。この分析結果を以て、その射出成型バッチの平均組成とする。長さをそろえられた燃料スラグの全数に対して、重量、外径、長さ、曲がりの検査を行う。外径は2方向の直径をスラグ全長にわたって測定する。曲がりは所定のゲージ（管）を通過させることによってチェックする。不合格品は「ヒール・スクラップ貯蔵」へ送る。所定の量の Na 塊が装填された下部端栓溶接済みの被覆管に、燃料スラグを所定の本数挿入する。モールド除去・スラグ検査装置を図 4-4-4 に示す。

①装置基数及び能力

炉心燃料用では～915 (609+306) 本/日、軸方向ブランケット用では 306 本/日、径方向ブランケット用では 100 本/日の鑄造スラグの処理が必要である。炉心燃料用、軸方向ブランケット用及び径方向ブランケット用の鑄造スラグの処理装置基数を2基、1基及び1基とする。炉心燃料スラグの処理能力としては500本/日/基とする。

(d) ヒール・スクラップ貯蔵およびドロス除去

射出成型るつばに残ったヒールをるつばから取り出し、表面に付着している酸化物膜やコーティング材を除去する（ドロス除去）。このドロスは、モールド除去後のブラッシング時のドロスと共に「ドロス還元工程」へ送る。

(e) 端栓溶接・表面除染・リーク検査

ボンド Na と燃料スラグが装填された燃料要素の上部端栓を溶接し、除染後 30 40 本をまとめてリーク検査を行う。不合格の燃料要素は剪断工程へ送る。合格燃料要素は表面除染後、アルゴンセル外へ出す。炉心燃料用とブランケット燃料用で各 1 基とする。

(f) Na ボンディング

円筒状の炉に炉心燃料要素を約 200 本又はブランケット燃料要素を約 30 本を装荷し、200℃ないし 500℃まで昇温した後、所定の時間加振する。これにより燃料スラグを沈降させ、燃料スラグと被覆管とのギャップ部を Na で充填する。充填後は、Na 凝固時のひけ巣の発生を防止するため、燃料下端部から順に冷却するものとする。Na ボンディングには 12 時間程度要する。炉心燃料用とブランケット燃料用で各 1 基とする。Na ボンディング装置を図 4-4-5 に示す。

(g) 燃料要素検査

燃料要素の全長、外径、曲がりについて、全数検査を行う。燃料スラグが被覆管内の最下端の位置にあること、燃料スラグと被覆管との間隙に過大なボンドが含まれないこと、およびボンド Na の液面高さが所定の範囲内であること（ボンド欠陥の有無の再確認）を確認するため、燃料ピン全数に対して渦流探傷（概略チェック）および X 線観察を行う。不合格品は Na ボンディング工程あるいはピン剪断工程へまわす。

(h) ワイヤラッピング・集合体組立／検査／保管

燃料ピンのラッピングワイヤを巻き、集合体を組み立てる。集合体組立検査装置は炉心燃料用とブランケット燃料用で各 1 基とする。

(iv) 配置設計

(a) 配置設計検討の基本方針

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。

- ・施設は、コロケーションを前提とし、使用済燃料貯蔵プール／新燃料貯蔵プールに隣接して、再処理／燃料製造主要プロセス、高放射性廃棄物処理・貯蔵設備、低放射性廃棄物処理・貯蔵設備、その他の共用設備を収容する主建屋及び非常用発電建屋、管理棟の 3 区分とする。このうち燃料製造設備の配置検討図を図-4-4-6 に示す。
- ・再処理／燃料製造設備一体化により、主要プロセス設備とその付帯設備、低放射性廃棄物の処理・貯蔵とその付帯設備、それらに共通の共用設備等を統合化し、同一建屋内に合理的に配置する。
- ・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。
- ・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。

- ・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。
- ・保守については、プラント稼働率向上、作業員の被曝低減を目的とし、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。遠隔保守を必要とする設備は、遮蔽窓や ITV を通し、マニピュレータ及びインセルクレーン等により操作可能な設計とする。各セルには必要に応じて隣接して保守セルを設ける。

(b) 配置設計の概要

主建屋

建屋規模 118mL×76mW×33mH (地下1階、地上3階)

建屋容積 296,000m³

全体機器配置平面図を図 4-4-6 に示す。

(v) システムの特徴

(a) プロセス概念に関する事項

製造ロットの大きさが射出成型へ供給する金属重量 (炉心燃料の場合、約 4kgPu/バッチ) となる。現段階見積では、1 バッチ当たり 80 スラグとなり、燃料要素にして 40 本が 1 ロットとなる。即ち 1 集合体 (331 燃料要素) は、9 ロットのスラグで構成することになる。小規模のロットの場合には一般的に、検査、分析の頻度が大きくなり、円滑な製造に支障をきたす可能性がある。分析等の設備、分析の結果待ちのための燃料一時保管設備等の施設への影響評価が重要となる。

(b) 発生廃棄物に関する事項

製品の 0.5% はモールドに付着し廃棄物へ移行するとした。また消耗品として射出成型用の使用済るつぼの発生量を見積もる。

①モールド排出量

炉心燃料及び軸ブランケット燃料用スラグ鑄造に用いるモールドは 1 本当たり 34.47g (モールド長さ 550 mm×厚さ 1 mm、シリカの密度: 2.66g/cc) となる。また、径ブランケット燃料用のモールドは 62.97 g/本となる。年間のモールドの廃棄量は 9.21 トンとなる。

②グラファイトるつぼ排出量

炉心燃料製造用のるつぼの重量は 9.1 kg/個 (外径 24 cm、内径 22 cm、高さ 19 cm、内側深さ 12 cm) である。ブランケット用は 18.4 kg/個 (外径 34 cm、内径 31 cm、高さ 19 cm、内側深さ 12 cm) である。年間必要バッチ数を、炉心燃料で、軸ブラ及び径ブラでそれぞれ 2030、420 及び 440 と想定する。10 バッチに 1 回るつぼを交換すると仮定すると、炉心燃料用るつぼは年間 1.85 トン (=203 個/年)、ブラ用るつぼは年間 1.58 トン (=86 個/年)、合計は年間 3.43 トンとなる。

なお、グラファイトの密度を 2.25 g/cc とした。

(2) 遠心鑄造法

(i) 概念調査の基本方針

廃棄物発生量の低減に向けた金属燃料製造システムとして、廃棄物となる石英モールドを用いる射出成型プロセスに対し、繰り返し使用可能な金型を用いる遠心鑄造プロセスの燃料製造プラントへの適用可能性の調査を行う。この調査項目として、鑄造可能な燃料スラグ仕様、鑄造プロセス、遠心鑄造装置概念とする。

(ii) 燃料スラグ仕様に関する検討

(a) 合金組成

U、Pu、Zrの比重がそれぞれ19.05、19.86、6.44と異なるため、遠心力による重力偏析の可能性については、U-Pu-ZrもU-Zrも高温相が完全固溶体であるため偏析は起こり難いと考えられる。TiAl合金ではTiの比重が4.5、Alの比重が2.7であり、また初晶で β Tiが僅かに生成する可能性があるが、経験上特に偏析は認められなかった。

(b) 直径及び長さ

円柱形状を鑄造する場合、湯切れが起こるかは直径と長さの比が目安になると考えられ、直径が大きいほど長尺の鑄造が可能である。ANLにおけるU-Zr合金の遠心鑄造実験では直径0.185 in ϕ (4.7mm ϕ)、長さ4.25 in L (11.4cmL)のスラグを16本中15本の歩留まりが得られており、直径が6.5mm ϕ であるとすれば、より長尺の鑄造が可能と考える。

また、ウランベースのU-Pu-Zr、U-Zr合金は、金型への湯廻りに関係すると考えられる、密度、融点、比熱がU-Zr合金と概ね同じであり、熱伝導率もウランよりもむしろ低いと考えられ湯廻りに関して有利になる可能性もある。

そこで、長さとしてANLの例を参考にし、炉心燃料については150mm程度の鑄造であればほぼ可能であると考え。一方、軸方向ブランケット燃料の長さ15cmは分割なしで、径方向ブランケット燃料については直径が12.7mm ϕ と二倍太く、長さ約30cm鑄造可能と考える。

(iii) 遠心鑄造設備概念検討条件

燃料集合体仕様、運転条件及びバッチサイズは射出成型プロセス検討に準じる。但し、燃料スラグに関しては、前述の検討結果を反映して、炉心燃料要素のミート部は14.2cmのスラグを6本で構成し、軸ブランケット燃料として、15cmのスラグを用いる。また、径方向ブランケット燃料要素のミート部は28.8cmのスラグ4本で構成する。

(a) バッチ処理量

内側炉心燃料：	32.5kgHM (4kgPu)
外側炉心燃料：	23.3kgHM (4kgPu)
軸方向ブランケット燃料：	34.5kgHM
径方向ブランケット燃料：	50kgHM

(b) 処理回数

全燃料共通： 2回/日・基まで

(c) 歩留まり

全燃料共通： 装荷原料に対する鑄造スラグの歩留まり 75%
 鑄造スラグに対する製品スラグの歩留まり 66.7%
 装荷原料に対する製品スラグの歩留まり 50%
 (インダクトスカル溶解の場合も 50%と想定)

(iv) プロセス概念検討

遠心鑄造法のブロックフローを図 4-4-7 に示す。燃料スラグ鑄造品の歩留まり（鑄造本数に対する製品となる燃料スラグ本数の割合）は 66.7%に設定した。1日当たりの燃料スラグ鑄造本数は内側炉心燃料用、外側炉心燃料用、軸方向ブランケット燃料用及び径方向ブランケット燃料用として、それぞれ 2189（必要製品本数 1460）本/日、1102（必要製品本数 735）本/日、1098（必要製品本数 732）本/日及び 161（必要製品本数 107）本/日となる。

(v) 機器概念検討

金型中心を回転軸としここに湯口を設け、湯口のまわりに均等に配置された複数のキャビティに放射状の堰を通して溶融金属を加圧注入し、任意の形状の小物を製造する方法である。活性金属の製造に用いられることが多く、金属の溶解方法には真空誘導溶解（VIM）、インダクトスカル溶解（ISM）等の方法が採用される。溶解炉は金型の上方に設置され、溶融金属は溶解るつぼの傾転により回転する金型に流し込まれる。遠心鑄造装置の構成としては、溶解炉、金型、金型遠心装置、真空ポンプからなる遠心鑄造装置本体、これに金型の組立・バラシ（燃料スラグの回収作業を兼ねる）用の自動作業台、溶解炉ベルジャー・溶解るつぼ用の仮置スペース、遠心鑄造特有の鑄物の中心部の円筒部分（押し湯部分）をリサイクルするために、場合により粗粉碎用の小型クラッシャーが必要になる。また後工程において、燃料スラグ端の切断装置と、燃料スラグの真直度、寸法、内部欠陥等の検査装置が必要である。燃料スラグ製造フロー、金型遠心鑄造法装置の機器図及び構成図を図 4-4-8、図 4-4-9 及び図 4-4-10 にそれぞれ示す。遠心鑄造装置に係る、バッチ鑄造本数、金型キャビティ数と段数及び必要基数の検討結果を以下に示す

(a) 内側炉心燃料

- ・バッチ鑄造本数： 364 本 $(32.5\text{kgHM} \times 0.75 \div 66.8\text{gHM})$
- ・バッチ製品本数： 243 本 $(32.5\text{kgHM} \times 0.5 \div 66.8\text{gHM})$
- ・金型 1 段のキャビティ数： 46 個
- ・金型段数： 8 段
- ・必要基数： 4 基 $(1460\text{本/日} \div (243\text{本/回} \times 2\text{回/日} \cdot \text{基}) = 3.00\text{基})$

(b) 外側炉心燃料

- ・バッチ鑄造本数： 262 本 ($23.3\text{kgHM} \times 0.75 \div 66.8 \text{ gHM}$)
- ・バッチ製品本数： 174 本 ($23.3\text{kgHM} \times 0.5 \div 66.8 \text{ gHM}$)
- ・金型1段のキャビティ数： 44 個
- ・金型段数： 6 段
- ・必要基数： 3 基 ($735 \text{ 本/日} \div (174 \text{ 本/回} \times 2 \text{ 回/日} \cdot \text{基}) = 2.11 \text{ 基}$)

(c) 軸方向ブランケット燃料

- ・バッチ鑄造本数： 365 本 ($34.5\text{kgHM} \times 0.75 \div 70.8 \text{ gHM}$)
- ・バッチ製品本数： 243 本 ($34.5\text{kgHM} \times 0.5 \div 70.8 \text{ gHM}$)
- ・金型1段のキャビティ数： 46 個
- ・金型段数： 8 段
- ・必要基数： 2 基 ($732 \text{ 本/日} \div (243 \text{ 本/回} \times 2 \text{ 回/日} \cdot \text{基}) = 1.51 \text{ 基}$)

(d) 径方向ブランケット燃料

- ・バッチ鑄造本数： 72 本 ($50\text{kgHM} \times 0.75 \div 517.9 \text{ gHM}$)
- ・バッチ製品本数： 48 本 ($50\text{kgHM} \times 0.5 \div 517.9 \text{ gHM}$)
- ・金型1段のキャビティ数： 24 個
- ・金型段数： 3 段
- ・必要基数： 2 基 ($107 \text{ 本/日} \div (48 \text{ 本/回} \times 2 \text{ 回/日} \cdot \text{基}) = 1.11 \text{ 基}$)

(iv) 装置の配置

燃料スラグ製造装置のセル内配置概念を図 4-4-11 に示す。製造ラインは 30 40m の長さを持つ 3 ライン必要とする。

(v) システムの特徴

(a) プロセス概念に関する事項

本方法のメリットとして、遠心力によって金型への湯まわりが良くなること、金型を用いることにより冷却速度が高くなり製品の結晶粒が微細化して機械的特性が向上すること及び金型の寿命が長いことが挙げられる。また、溶解方法としてインダクトスカル溶解を仮に用いるとすると、熔融金属と溶解るつぼとの反応がなくなり溶解るつぼの寿命が長くなるとともに、製品への不純物の混入低減が期待できる。

金型を使用することにより燃料スラグは比較的短時間で低温に下がる。ホットセルの雰囲気の不活性ガス雰囲気にすることを前提とすると、装置を特に高真空にする必要がなくなり、真空ポンプが簡素になり真空引きの時間が短縮できる可能性がある。一回の鑄造で多くの燃料スラグ片を得ようとする、金型が多段積みになりやや金型の組立・バラシ作業が複雑になる傾向にあり、金型自体の組立の自動化、装置の遠隔保守の成立性検討が重要となる。

(b) 安全性に関する事項

火災・爆発の可能性としては、熔融 U-Pu-Zr と水との接触による水蒸気爆発、高温状態の U-Pu-Zr 合金との反応による水素発生と空気漏洩による火災・爆発が考えられ

る。誘導コイルの内側に水冷銅るつぼを設置するインダクトスカル溶解を採用する場合には安全対策、安全評価が必要となる。また、溶融金属が漏洩した場合も仮定し、冷却水はもちろん内部に水を含むコンクリート、湿気を含む耐火材、プラスチックのような有機化合物とも接触することがないように、U-Pu-Zr によって侵されない材質でライナまたはトレイの設置が必要となる

(c) 発生廃棄物に関する事項

金型使用の遠心鑄造法は基本的に金型の交換頻度が少なく、射出成形と比較して鑄型廃棄物の発生がなくなる点が優れている。金型使用の遠心鑄造法の主な廃棄物としては、黒鉛製の溶解るつぼ（複数回使用すると侵食して使用できなくなる可能性がある）と、後工程の燃料スラグ端切断により発生する使用済みせん断砥石が挙げられる。燃料スラグの切断粉末は回収後、原料の精製工程に戻す。一方、仮にインダクトスカル溶解を用いると、溶解るつぼが冷却された銅製るつぼとなり半永久的に使用できるため、廃棄物の発生量が著しく低減されると考えられる。本製造法で発生すると考えられる廃棄物の種類と一部の推定発生量を表 4-4-3 にまとめた。

表4.4.1 炉心燃料集合体の基本仕様

項目	仕様
燃料集合体	
燃料要素本数	331本
全長	4600mm
燃料要素	
全長	2670mm
炉心燃料	
スラグ長	850mm
スミヤ密度	75%TD
軸ブランケット燃料	
スラグ長(上/下)	150/150mm
スミヤ密度	75%TD
被覆管	
外径	8.5mm
内径	7.5mm
肉厚	0.5mm

表4.4.2 ブランケット燃料集合体の基本仕様

項目	仕様
燃料集合体	
燃料要素本数	127本
全長	4600mm
燃料要素	
全長	2670mm
径ブランケット燃料	
スラグ長	1150mm
スミヤ密度	85%TD
被覆管	
外径	14.8mm
内径	13.8mm
肉厚	0.5mm

表 4.4.3 金型使用遠心鑄造法で発生する廃棄物

廃棄物が発生する工程	廃棄物	発生量
遠心鑄造 (普通溶解るつぼ)	① 溶解るつぼ(黒鉛、BeO など)	1 個/基・10 バッチと仮定する (金属燃料と、溶解るつぼへの塗布剤または BeO との両立性等による)
	② 金型(銅、ベリリウム銅など)	1 組/基・年と仮定する (金属燃料と金型の両立性にもよるが、著しく少ないと考えられる)
	③ 真空ポンプオイル	補充分+交換分 ロータリポンプ: 10 リットル/基・年 プースタポンプ: 2.5 リットル/基・年 ディフュージョンポンプ: 5 リットル/基・年
遠心鑄造 (インダクトスカル溶解)	④ 水冷銅るつぼ	1 組/基・年と仮定する (金属燃料による水冷銅の浸食による)
	⑤ 水冷銅るつぼライナー (絶縁性セラミック)	1 組(1 るつぼ分)/基・100 バッチと仮定 (主に耐熱サイクル性による)
	⑥ 金型	普通溶解るつぼに同じ
	⑦ 真空ポンプオイル	普通溶解るつぼに同じ
切断加工	⑧ バンドソー (種類不明)	20 本/機・年と仮定する (切断による消耗程度による)
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・①、③、⑦、⑧については射出成形と同程度 ・②、④、⑥については射出成形よりも少ない ・⑤はインダクトスカル溶解特有の廃棄物 	

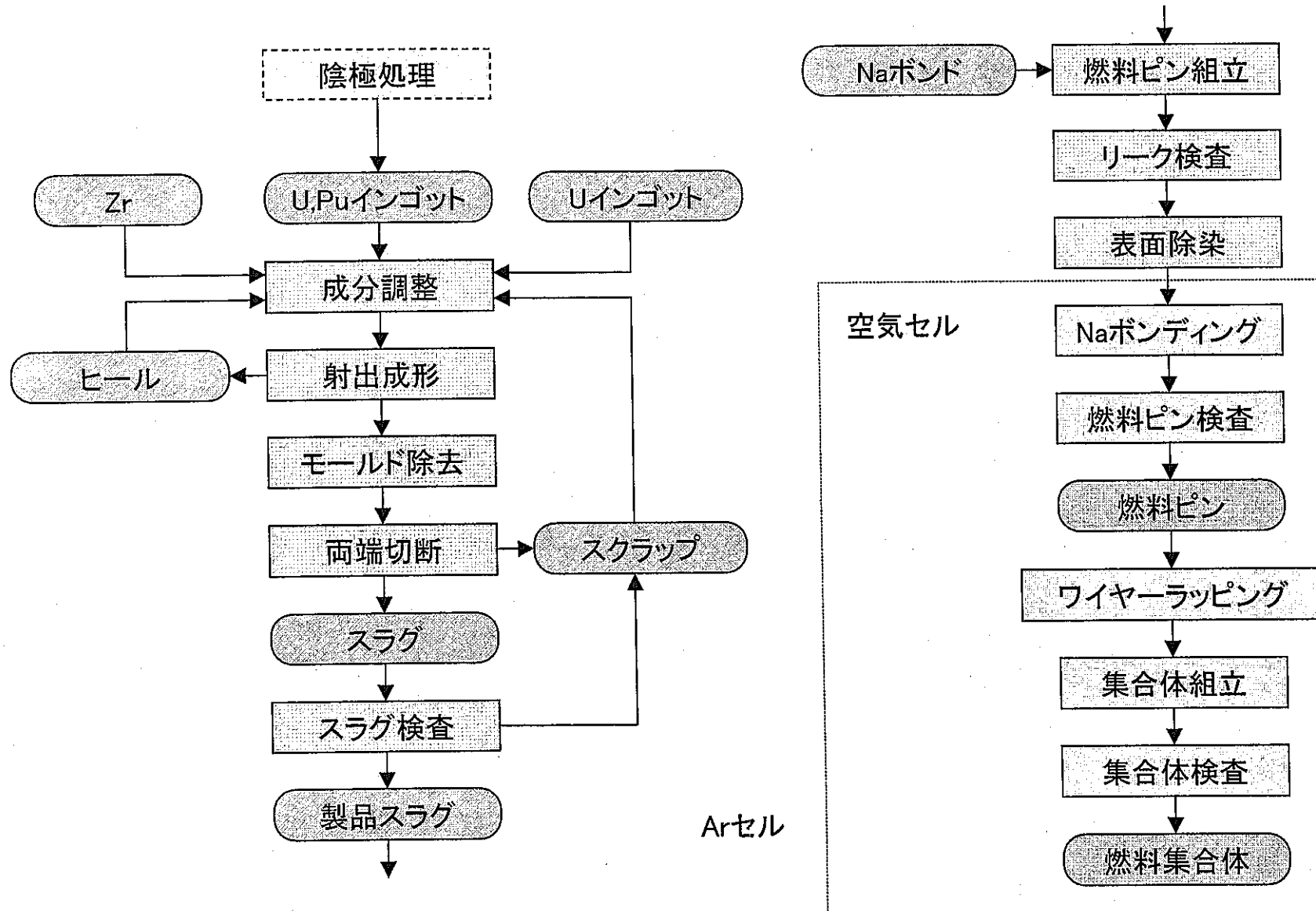


図4.4.1 射出成型加工・集合体組立プロセスフロー

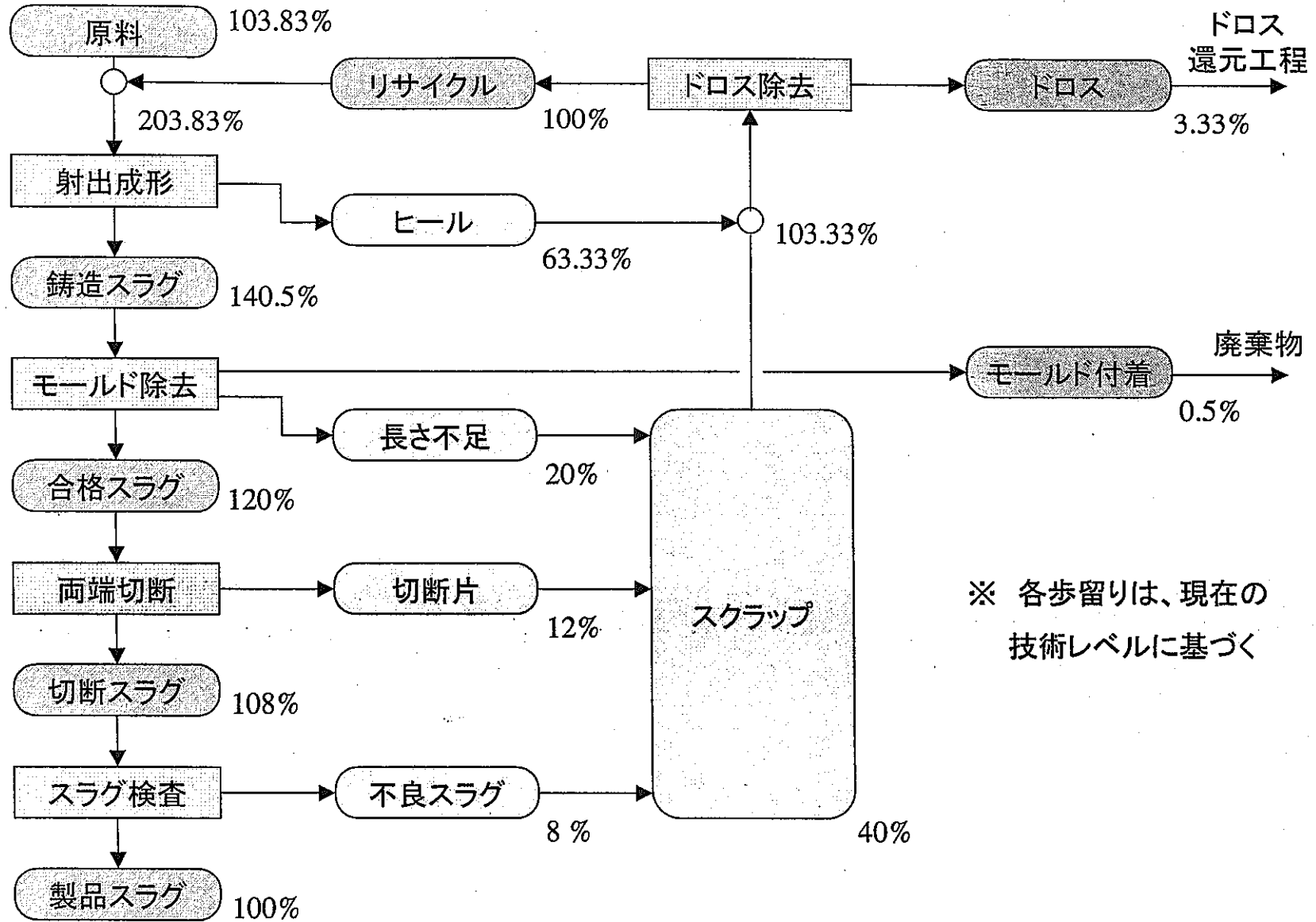


図4.4.2 燃料スラグ成型加工工程におけるHeavy Metalの物質収支

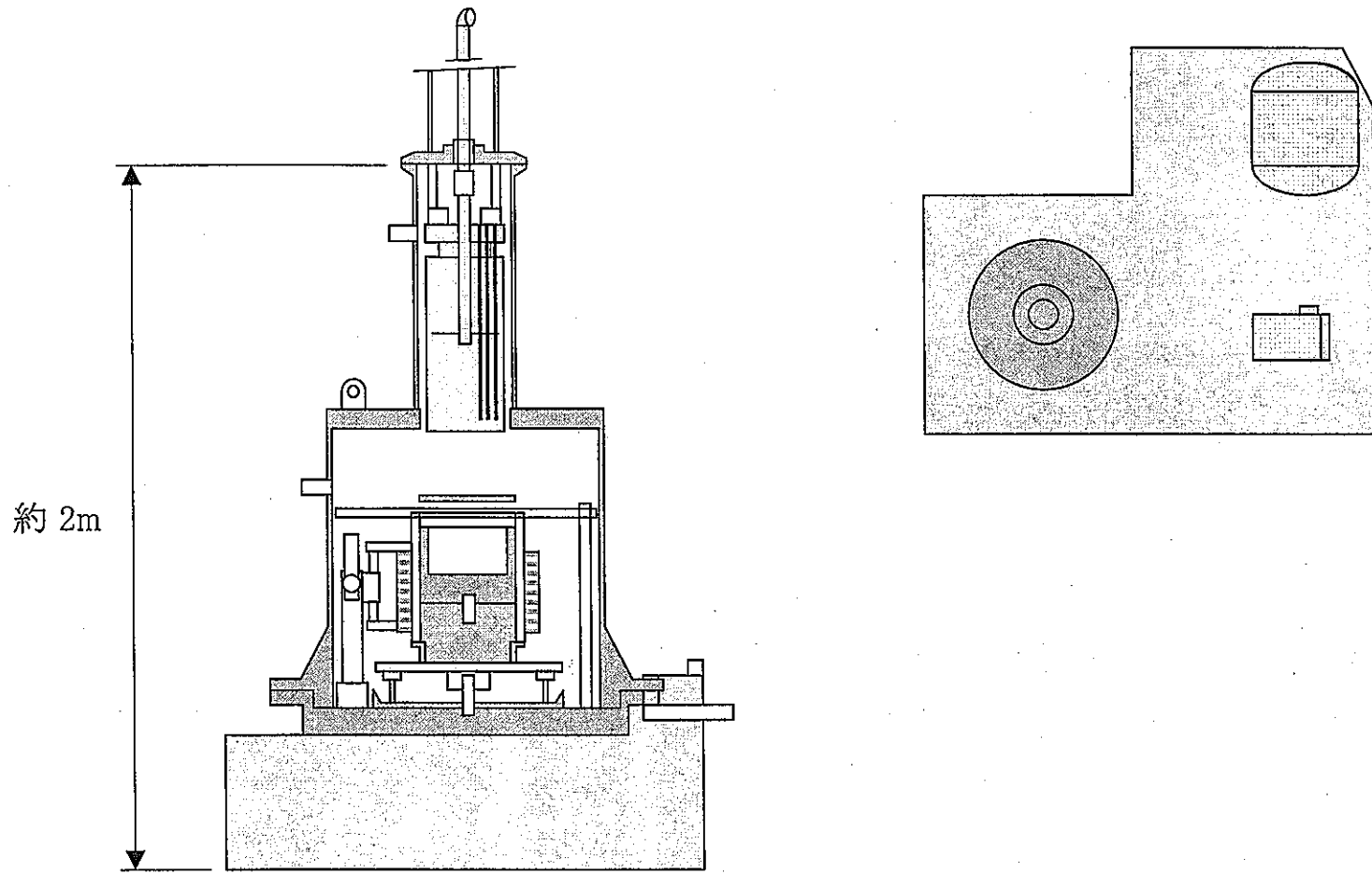


図4.4.3 射出成型装置

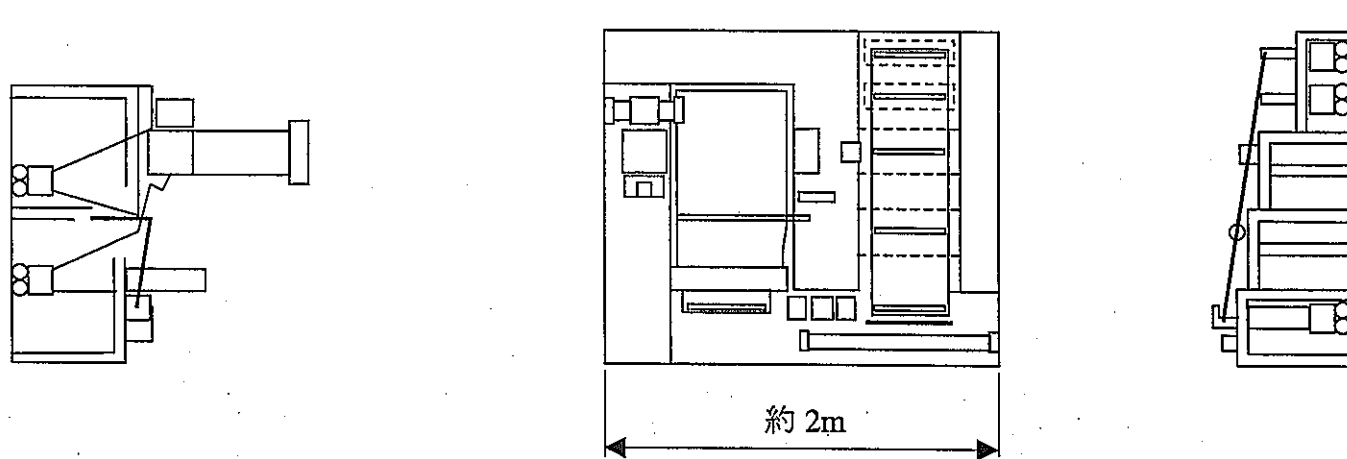


図4.4.4 モールド除去、スラグ検査装置(ピンプロセッサ)

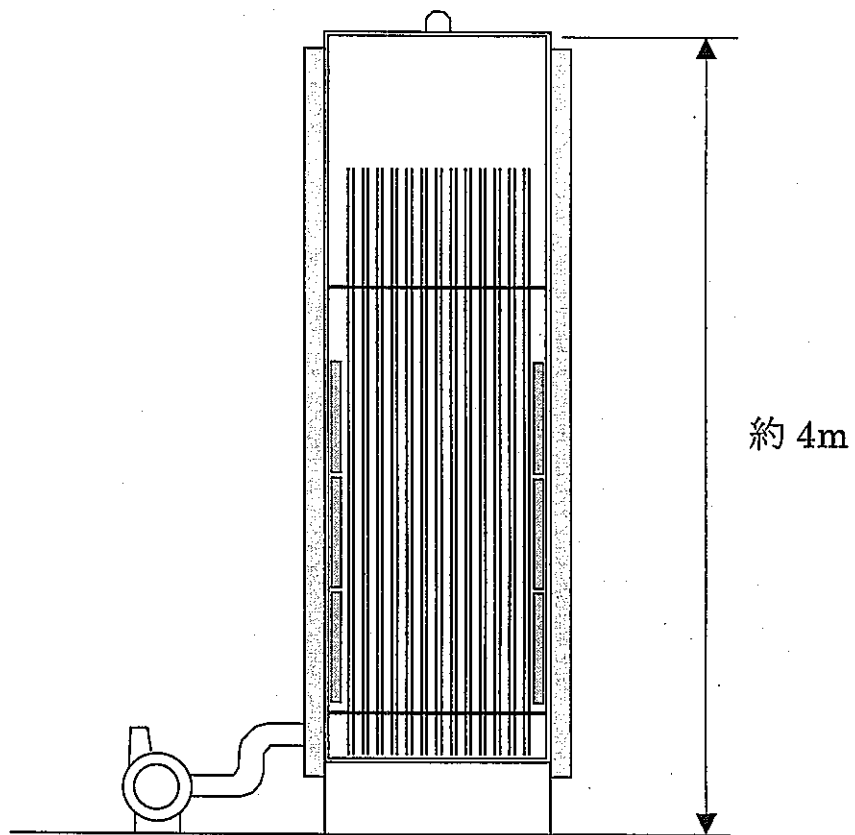


図4.4.5 Naボンディング装置(エレメントセトラ)

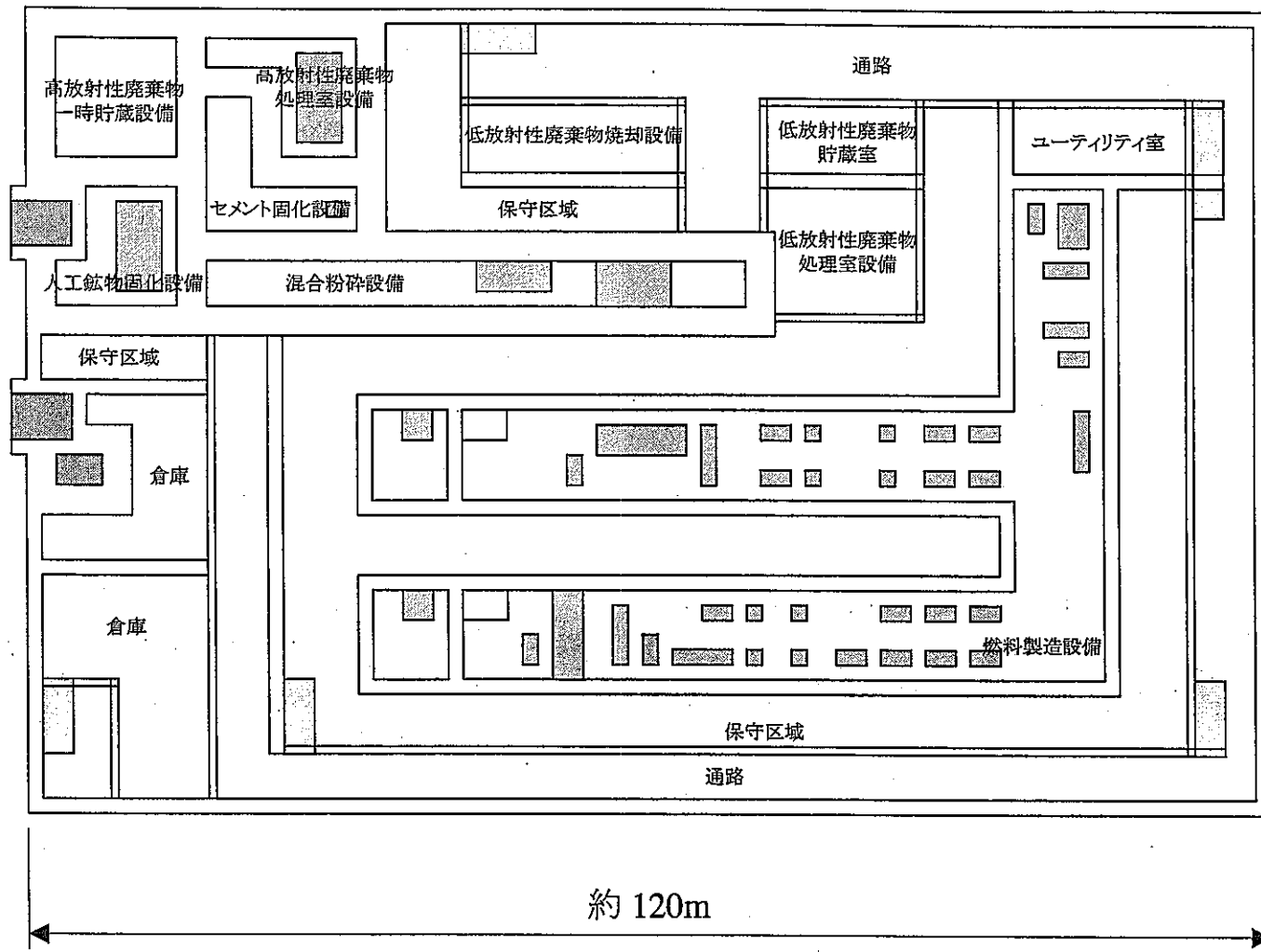


図4.4.6 全体配置計画図(B1F) (1/2)

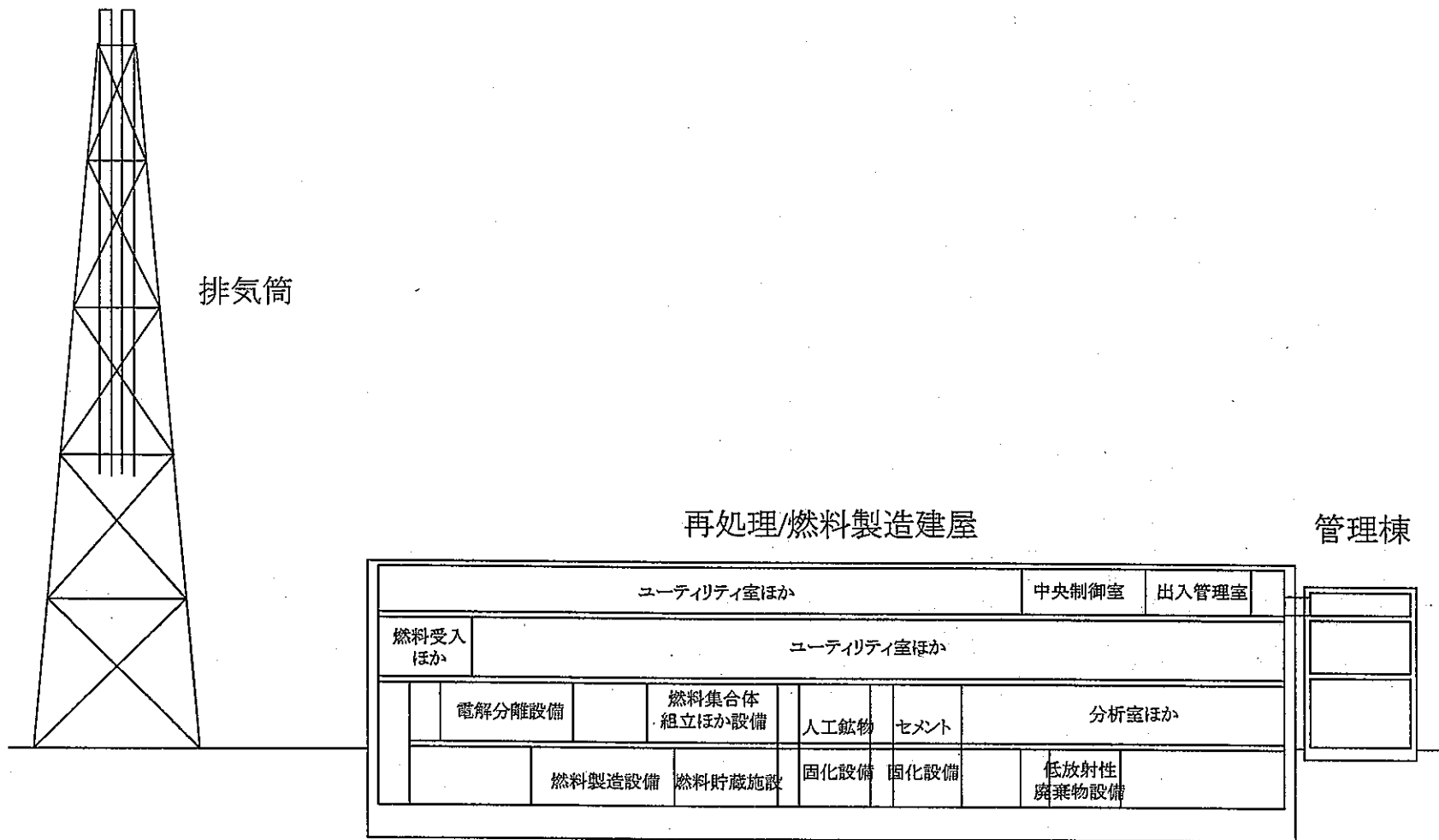


図4.4.6 全体配置イメージ図(断面図) (2/2)

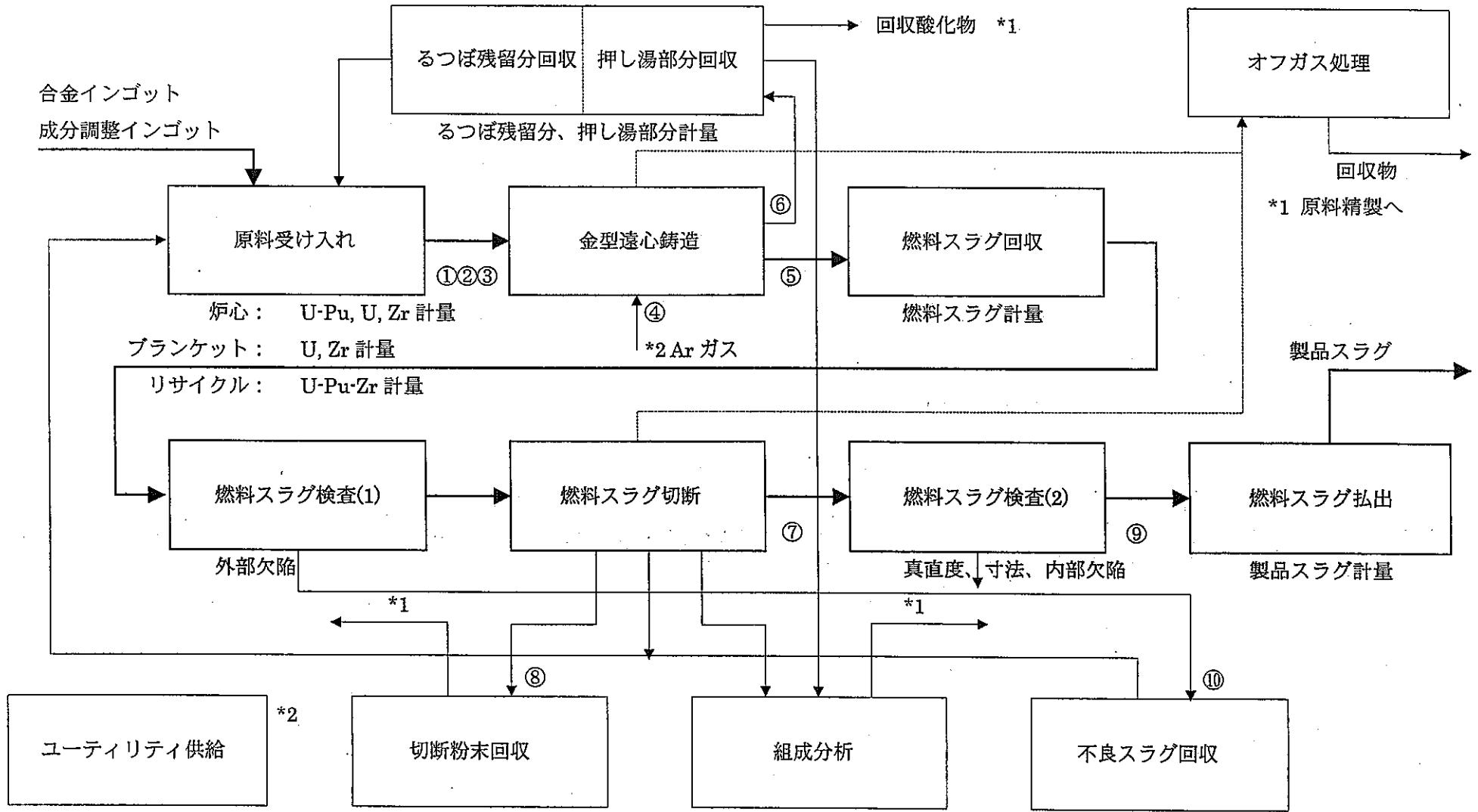
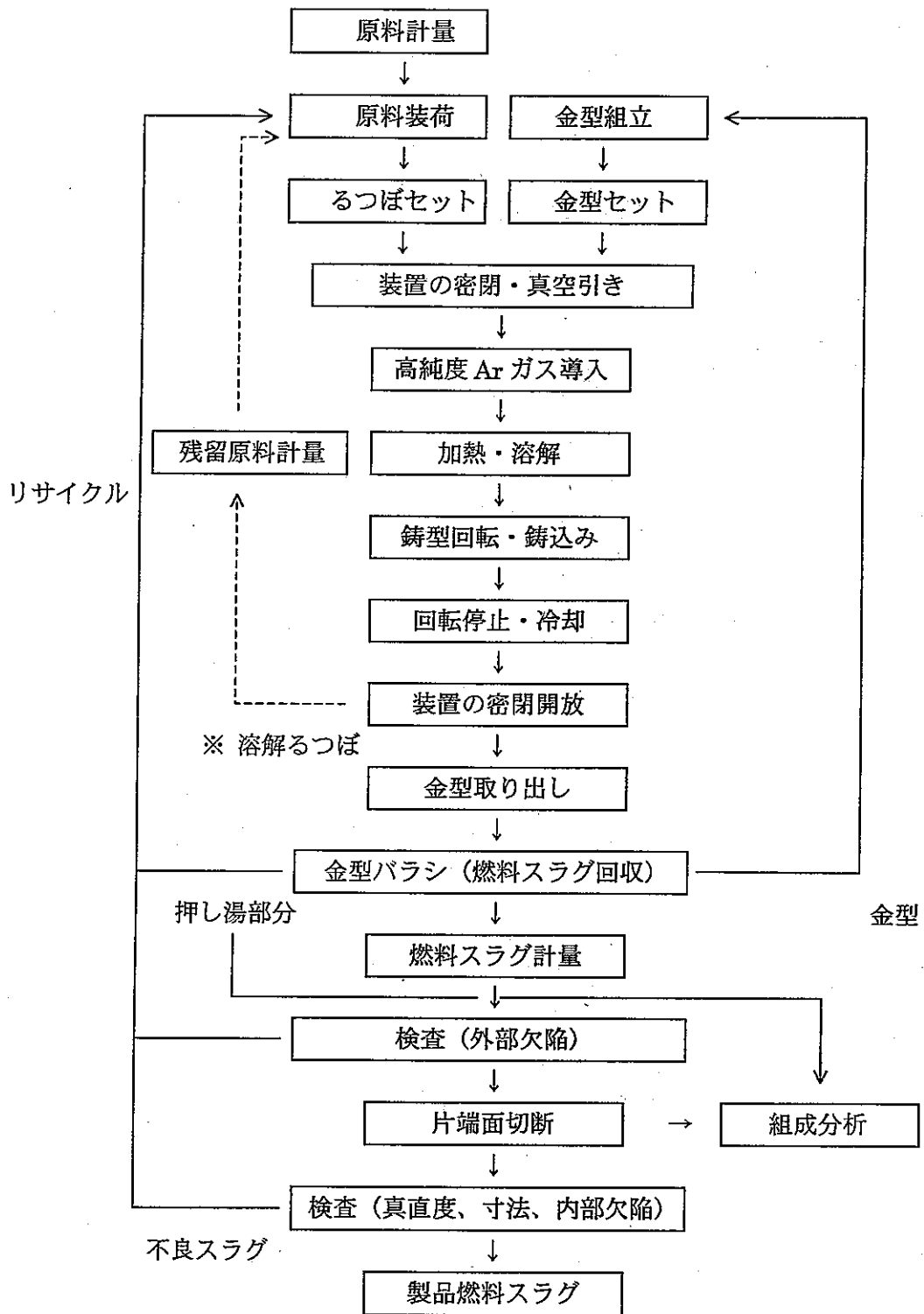


図 4.4.7 金型使用の遠心铸造法のブロックフロー図



※ インダクトスカル溶解を用いた場合溶解るつぼを毎回取り外すことは困難になる

図4.4.8 遠心鑄造による燃料スラグ製造フロー

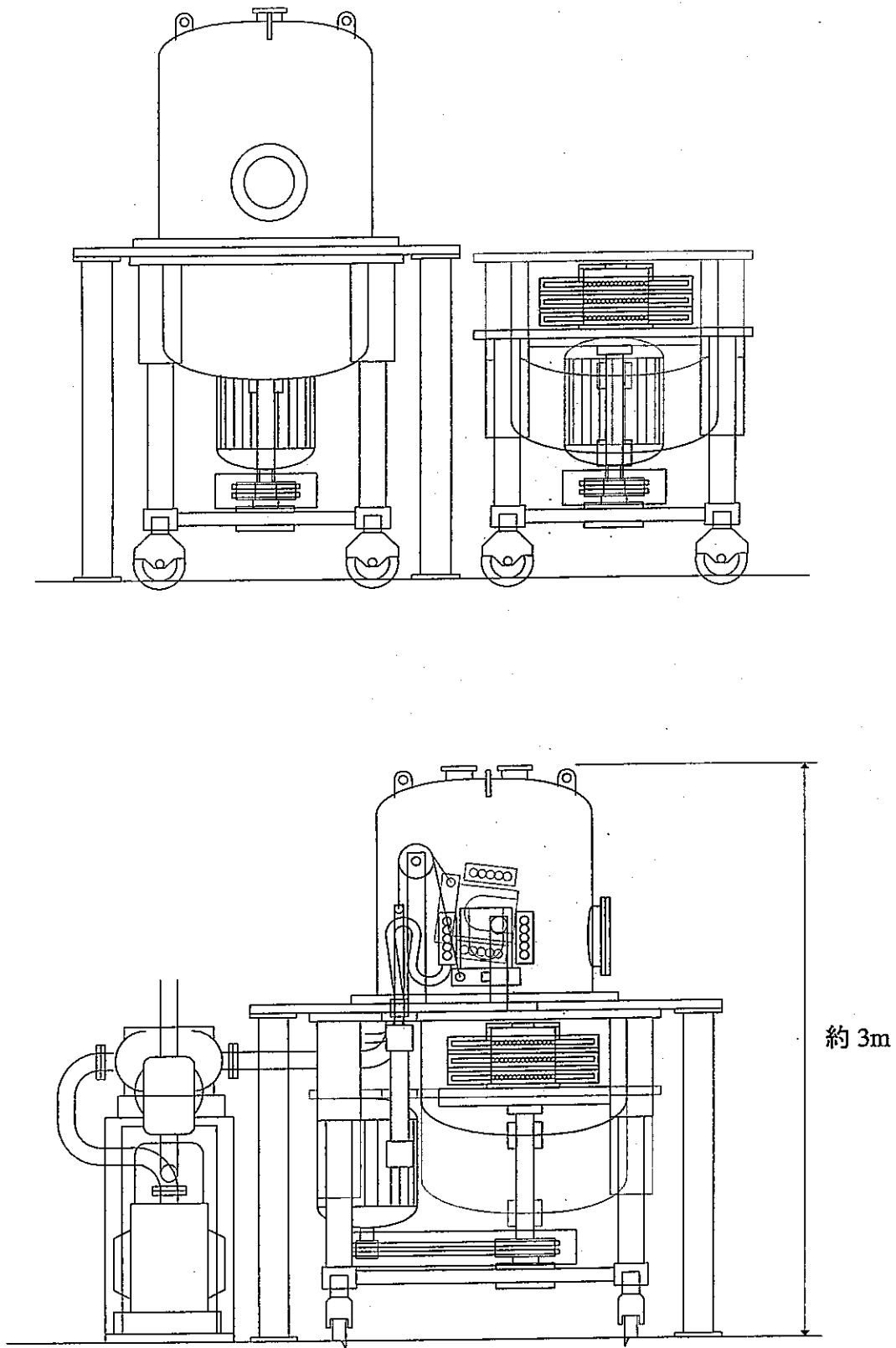


図4.4.9 金型遠心铸造装置の機器図

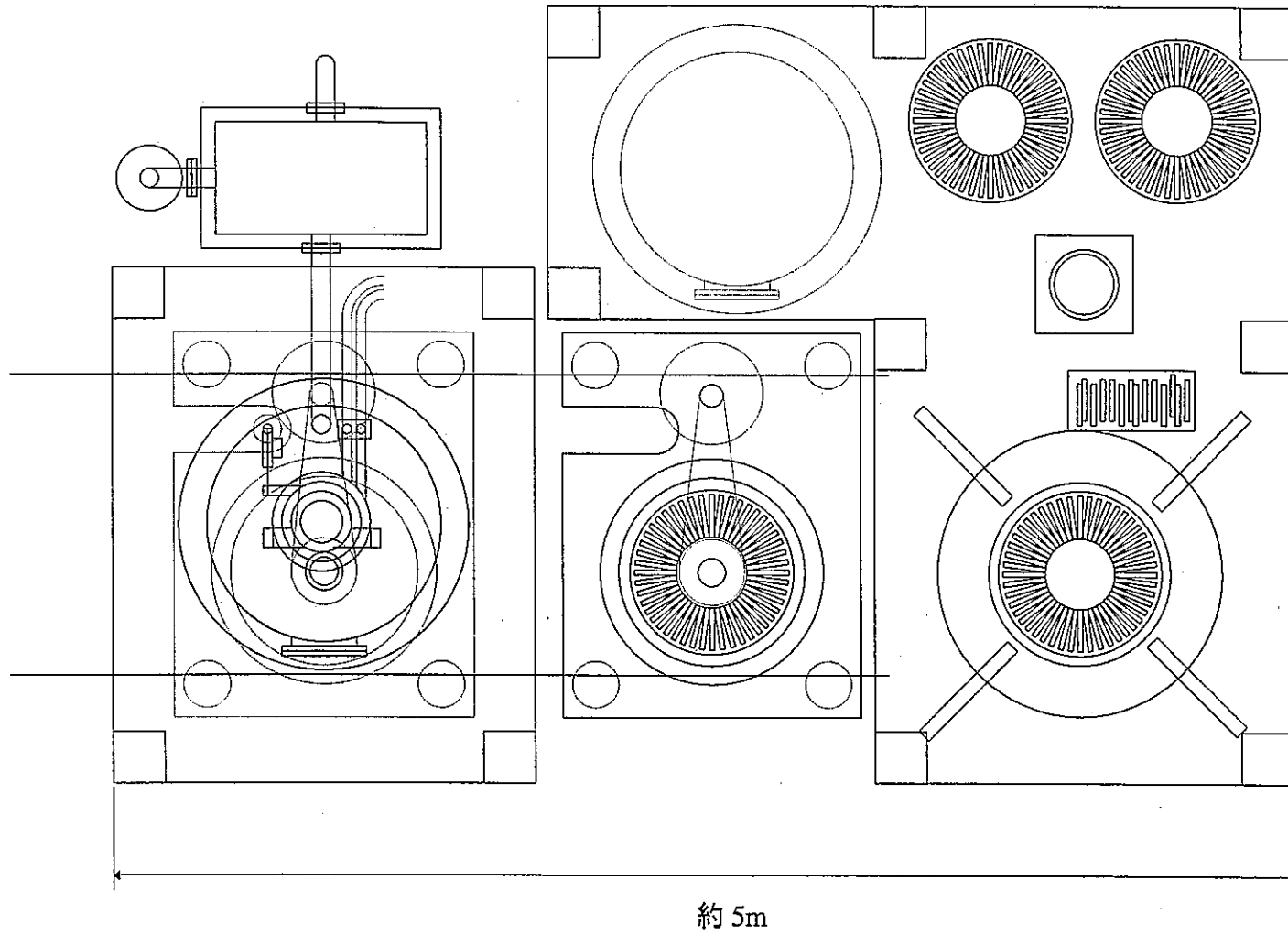
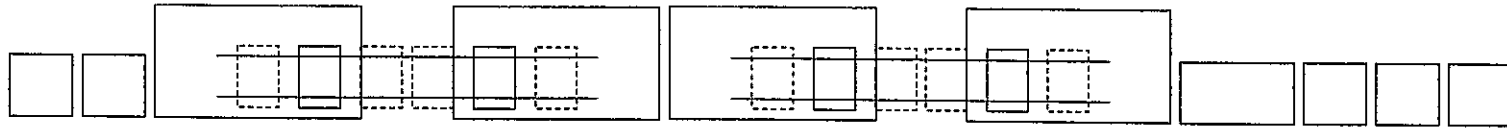
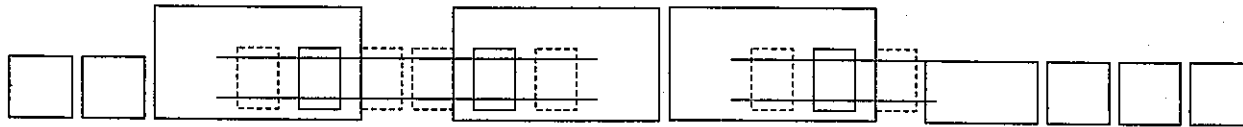


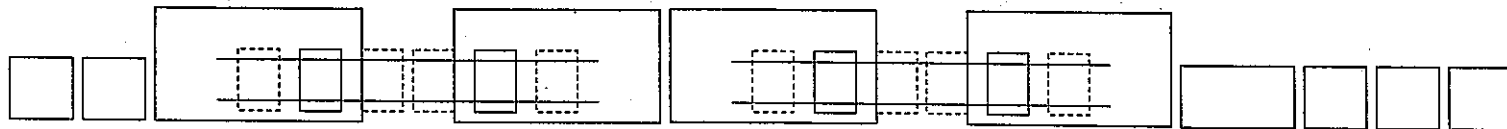
図4.4.10 金型遠心铸造装置の構成図



① 内側炉心燃料スラグ製造機器



② 外側炉心燃料スラグ製造機器



③ 軸方向、径方向ブランケット燃料スラグ製造機器

図4.4.11 金属燃料製造機器の配置図

4.5 被覆粒子法の検討

(1) 高温ガス炉用被覆粒子燃料の現状

(i) 燃料の概要

被覆粒子燃料は、燃料核と呼ばれる直径約 200～600 μm の微小なセラミック燃料球 (U、Pu、Th の酸化物や炭化物) を熱分解炭素 (PyC) や炭化ケイ素 (SiC) 等で被覆したものでできており、図 4.5.1 に示すような種類がある。代表的なのは PyC 層だけからなる 2 重被覆の B I S O 型および PyC 層と SiC 層からなる 4 重被覆の T R I S O 型であるが、現在は B I S O 型燃料はほとんど使われず T R I S O 型燃料が中心である。

T R I S O 型燃料の被覆は、内側から低密度のバッファー層 (低密度 PyC 層)、高密度の内部 PyC (IPyC 層)、SiC 層、高密度の外部 PyC (OPyC 層) で構成されている。各被覆層の機能は以下の通りである。

- ・ バッファー層

核分裂反跳により燃料核表面付近から飛び出す F P 核種による損傷から外部の被覆層を保護するほか、F P ガスのためのプレナム、燃料核のスウェリングの吸収、燃料核移動に対する緩衝帯としての機能などを有する。

- ・ 内部 PyC 層

SiC 層蒸着の際に発生する HCl や Cl_2 と燃料核が反応するのを防ぐほか、F P 放出を抑制する機能を有する。

- ・ SiC 層

F P ガスや固体 F P に対する拡散障壁であるとともに、被覆粒子全体の強度を保つ重要な役割を有している。

- ・ 外部 PyC 層

照射収縮により SiC 層に対して圧縮応力を与え、照射下の被覆粒子の強度を保つほか、F P ガスの拡散障壁の機能も有する。

(ii) 燃料製造工程の概要

被覆粒子燃料の製造工程は、主に以下の 4 つの工程に分かれる。

① 燃料核製造工程

- ① 燃料核製造工程
- ② 被覆工程
- ③ 燃料要素加工工程
- ④ 集合体組立工程

燃料核の製造方法は大きく乾式法と湿式法に分かれる。乾式法^{*1}には焼結法と熔融法があるが、現在ではほとんど採用されていない。湿式法にはゾルゲル法、外部ゲル化法、内部ゲル化法の3種類があり、これらは振動充填燃料の粒子燃料製造にも共通の技術である。

燃料核への被覆方法は、流動床と呼ばれる蒸着炉において化学蒸着(CVD)によって行われる。被覆層の材質によって、アセチレンやプロピレンなどの分解ガスを用いる。

燃料要素の加工は燃料コンパクトやボール燃料の製造を行う。燃料コンパクトの製造ではオーバコート法(原研 HTTR 用ピンインブロック型燃料)や射出成型法(米国マルチホールブロック型燃料)が、ボール燃料の製造ではオーバコート法が用いられている。

集合体組立では、燃料コンパクトの場合、さらに直接またはピン(黒鉛スリーブ)に一旦挿入し、黒鉛ブロックに装荷する。ボール燃料の場合はそのまま炉内に装荷するため、集合体組立工程は特にない。

(a) 燃料核製造工程

燃料核の製造方法は、乾式法と湿式法に大別される。

乾式法は粉末冶金法で、焼結法と熔融法があるが、現在ではほとんど採用されていない。焼結法は酸化物や炭化物の粉末を焼結材と混合し、粒状の塊とした後、高温で焼結させるものである。熔融法としては、Bed-melting法、落下熔融法、電極熔融法などがある。

湿式法には、有機溶媒で脱硝、ゲル化するゾルゲル法とアンモニアでゲル化するゲル沈殿法の2種類がある。図 4.5.2 に湿式法の基本的な製造フローを示す。

ゾルゲル法は、1960年代初頭に米国ORNLにおいて高温ガス炉用燃料粒子の製造法として開発されたもので、当時ThO₂燃料を製造していた。ThO₂は水に分解しやすくゾル状態の形成が容易であったが、UO₂やPuO₂ではpH調整等複雑な溶液調整が必要となった。UO₂用に開発されたゾルゲル法とし

ては SOLEX 法や CUSP 法がある。いずれの方法も 4 価イオンへの pH 調整を行ったゾルを含む液滴をアミン中で脱硝し、さらに有機溶媒中で脱水してゲル化させる。

ゲル沈殿法には、外部ゲル化法、内部ゲル化法の 2 種類があるが、今まで実用燃料製造に使われてきたのは、イタリアで開発された SNAM 法に代表される外部ゲル化法である。SNAM 法による UO₂ 核製造の方法を図 4.5.3 に示す。外部ゲル化法は原液を図 4.5.4 に示す装置により、原液からノズル先端に液滴を作り、先端を振動させることにより液滴を切り離し、アンモニアガス中を落下させる。アンモニアを含むゲル化媒体中に滴下した液滴は、昼夜をかけて外側からゲル化反応が進む。このようにして形成されたゲル球（重ウラン酸アンモン：ADU）は、アンモニア等を除去するために洗浄し、乾燥させる。乾燥後、450℃程度の空気中で仮焼し、ADU を UO₂ に変え、さらに還元雰囲気中にて 1300℃程度に加熱することにより高密度の焼結球が得られる。外部ゲル化法は工業化が容易であり、ドイツのAGR 燃料用の NUKEM プラントや日本の HTTR 燃料製造用の原子燃料工業の NFI プラントはこの外部ゲル化法を採用している。欠点としては外側から反応が進行するためどうしてもシェル構造になりやすく、後工程でクラックの原因となりやすい点が挙げられる。

内部ゲル化法は、アンモニア源をもともと原液中に添加し内部からゲル化させる方法である。オランダで開発された KEMA 法ではアンモニア源としてのヘキサメチレン・テトラアミン（HMTA）と尿素が加えられる。HMTA は常温でも容易にアンモニアに分解するため、原液は 10℃以下に保つ必要がある。燃料核調整法は比較的簡単で、この液滴を 90℃に加熱した流動パラフィン中に滴下させると、ゲル化が進行する。ゲル球は有機媒体中から取り出された後、外部ゲル化法と同様、洗浄、乾燥させた後、仮焼、還元雰囲気中での加熱を行う。内部ゲル化法の特徴は反応が瞬時に終了する点であるが、欠点として原液の冷却が必要でありこれが大量生産のネックとなっている。また、熱媒体としてシリコンオイルや有機媒体を用いるため、CCl₄ 等による洗浄が必要となり、これらの廃液処理が問題となる。

表 4.5.1 にゲル沈殿法の各製造法の長所短所をまとめる。

(b) 被覆工程

燃料核への被覆は流動床と呼ばれる蒸着炉において化学蒸着を応用した方法で行われる。図 4.5.5 に流動床の概念図を示す。流動層と呼ばれるところに燃料核が入り、高温に加熱された粒子流動ガス（Ar ガス）と原料ガス（アセチレンやプロピレンなど）の混合ガスが下部のノズルから吹き上げ、原料ガスの熱分解で生じた炭素が燃料核に蒸着する。生成した被膜層の構造（密度や成分）は、原料ガスの種類と分圧、流動層の温度、燃料核の量と大きさなどに影響される。TRISO 燃料の場合、バッファ層にはアセチレンを、PyC にはプロピレンを、SiC 層にはメチルトリクロロシランを原料ガスとして使う。

(c) 燃料要素加工工程および集合体組立工程

被覆粒子をそのまま燃料集合体に充填する方法、いわゆるルーズボンディング法をはじめ、円管状の燃料コンパクトやボール燃料などがある。

HTTR 用燃料コンパクトの製造方法を図 4.5.6 に示す。回転ドラムに被覆粒子燃料を入れ、あらかじめ調製していた黒鉛マトリックス粉末を加えつつ、アルコールを吹きつけながら表面に約 200 μm の厚さの黒鉛マトリックス層を付着させる。これをオーバーコート粒子と呼ぶ。オーバーコートの目的はプレスの際の破損やコンパクト燃料内に均一に分散させることにある。

オーバーコート粒子はプレス成型された後、脱ガス処理等を行って燃料コンパクトとして完成される。燃料コンパクトは外径 26mm、内径 10mm、長さ 39mm で、約 13,000 個の被覆粒子燃料が収納されている。

燃料要素は黒鉛スリーブに 14 個の燃料コンパクトを装荷し、端栓で固定したものである。その表面には黒鉛ブロックとの間に一定のギャップを確保するために、3 方向にノブが設けられている。表 4.5.2 に HTTR の初装荷燃料の仕様を示す。

ボール燃料の製造もオーバーコート粒子を作るまでは同じである。燃料領域を成型するためにオーバーコート粒子をシリコンゴム製の球状ダイスに入れ、静水圧による温間加圧が行われる。さらにシリコンゴム製ダイスで無燃料領域が表面に形成されてボール燃料が出来上がる。

(iii) 製造プラント概念の概要（原子燃料工業のプラント）

日本原子力研究所の HTTR 用ピンインブロック型のコンパクト型燃料

製造用の原子燃料工業(NFI)のプラントの工程フローを図4.5.7に示す。

プラント規模は約400kgU/年で、燃料核は外部ゲル化法により製造し、被覆工程では流動床を用いてTRISO型の4層の被覆を施す。コンパクト工程では、全自動のコンパクト成型設備を用いて、マトリックス材をオーバーコートした被覆粒子燃料を温間プレス成型後、焼成を行い燃料コンパクトを製造する。燃料コンパクトは燃料棒組み立て工程に送られ、黒鉛スリーブに挿入された後、黒鉛ブロックを用いて組み立てられる。図4.5.8に焼結炉、被覆装置(流動床)およびコンパクト成型設備の外観を示す。

NFIのプラントでは、ピンインブロック型のコンパクト型燃料の他に、ペブルベッド型球状燃料、マルチホール型棒状燃料の生産にも対応できるように配慮されている。

(2) 高速炉用被覆粒子燃料の現状

高温ガス炉用被覆粒子燃料の製造工程に関する調査結果を踏まえ、ガス冷却型高速炉用の被覆粒子燃料製造に関する適用した場合の比較、問題点の抽出を行う。

(i) 原研での研究

10数年前に高速炉用の被覆粒子燃料の設計が行われた例として、原研でTRU専焼炉としてHe冷却型高速炉(P-ABR)がある。Np、Am、Cmを含むプルトニウム窒化物燃料核と2重のTiN被覆層(内側は低密度TiN層、外側は高密度TiN層)から構成された被覆燃料粒子の直径は1.47mm、被覆の厚さは0.135mmとなっている。高速中性子を利用するため、被覆材に炭素ではなくTiNを採用しており、厚さもHTTRより薄くなっている。燃料要素は外径42mm、内径14mmの同心2重円筒状のステンレス鋼製の多孔性フリットから構成されている。被覆燃料粒子は内外フリット間の環状空間に充填され、径方向に流れるHeガスによって冷却される。燃料要素の概念図を図4.5.9に示す。現在、この専焼炉設計を活かし、被覆粒子型燃料のGCFRの設計に取り組んでいる。

窒化物被覆粒子燃料の製造工程はHTTR用のUO₂被覆粒子燃料製造と同様、燃料核製造工程と被覆工程の2つから構成される。

燃料核製造工程では、出発溶液(ウラン/プルトニウム混合硝酸溶液+添加

物)にカーボンブラックを均一に混合させたものをノズル先端から滴下させ、アンモニア溶液中でゲル化させる。ゲル球を洗浄、乾燥、ばい焼させた後、還元焼結工程に替えて炭素熱還元工程を経て窒化物燃料核を製造する。原研では実験室規模の試験を実施しており、高純度のUN粒子の製造に成功している。品質検査は不純物検査(C、O)、外観検査(直径、われ)を実施しており、ほとんどスペックアウトがなかったと報告されている。

被覆工程では、窒化物燃料核との両立性、高融点(3220K)および中性子吸収断面積の小さい点からTiNを被覆層として採用している。TiN被覆は約1000℃で化学蒸着によって製造できると考えられている。但し、高速炉では粒子燃料の被覆層を薄くする必要があり、PyC層やSiC層を持つHTTR用被覆粒子燃料以上に機械的強度を保つことが重要となってくる。TiNの欠点として、応力集中が起こりやすいとも言われている。

燃料要素の概念として採用している同心2重円筒状のステンレス鋼製の多孔性フリット(メッシュサイズが0.数mm程度)の製造性も課題の1つとして挙げられる。

窒化物被覆粒子燃料を想定した粒子核製造工程のフローを図4.5.10に示す。

(ii) 動燃での研究

5~6年前、当時の動燃において、被覆粒子燃料を想定したTiN膜の成膜実験、AlNコンパクト材の作製、模擬コンパクト燃料(TiN粒子を含むAlN焼結体)の作製を実施している。

球状粒子燃料表面への被覆層作製技術においては、TiN層を低密度で被覆する技術を中心に研究しており、静電成膜法や乾式機械的複合化技術を用いたコンセプトが提案されており、模擬コンパクト燃料の熱的特性の評価も含めて、実現性の手がかりを探っている。図4.5.11、図4.5.12に被覆粒子燃料およびコンパクト燃料の概要を示す。

(iii) その他の研究

海外ではフランスやイギリスなどで高速炉用の酸化物を燃料核とした被覆粒子燃料の設計を行った例があり、最外層のPyC層は高速中性子照射環境に耐えられない点や事故時の水蒸気還流によるPyC損傷を考慮して、削

国内のメーカーからはこの点を解決する方法として、第2層および第4層にMoやZr等の金属膜を蒸着するアイデアを提案している。

(3) 今後の検討課題

ガス冷却型高速炉ではまだ被覆粒子燃料の仕様がはっきりしない段階であるため、燃料製造プラントの全体を設計、評価するところまではいかないが、おおよそNFIのプラントが基準となると考えられる。

NFIのプラントを基準に、被覆粒子燃料の仕様（燃料の化学形状、被覆材、燃料要素および集合体の概念など）を決定した上で、以下の点を考慮したプラント設計（工程フロー、機器設計、工程設計、経済性概略評価、安全性評価など）を今後行う必要があると考えられる。

- ① プルトニウム燃料の取り扱い（グローブボックス、セル）
- ② MA燃料の取り扱い（グローブボックス、セル）
- ③ 大量生産技術
- ④ 廃棄物処理技術
- ⑤ 保証措置技術
- ⑥ 品質管理

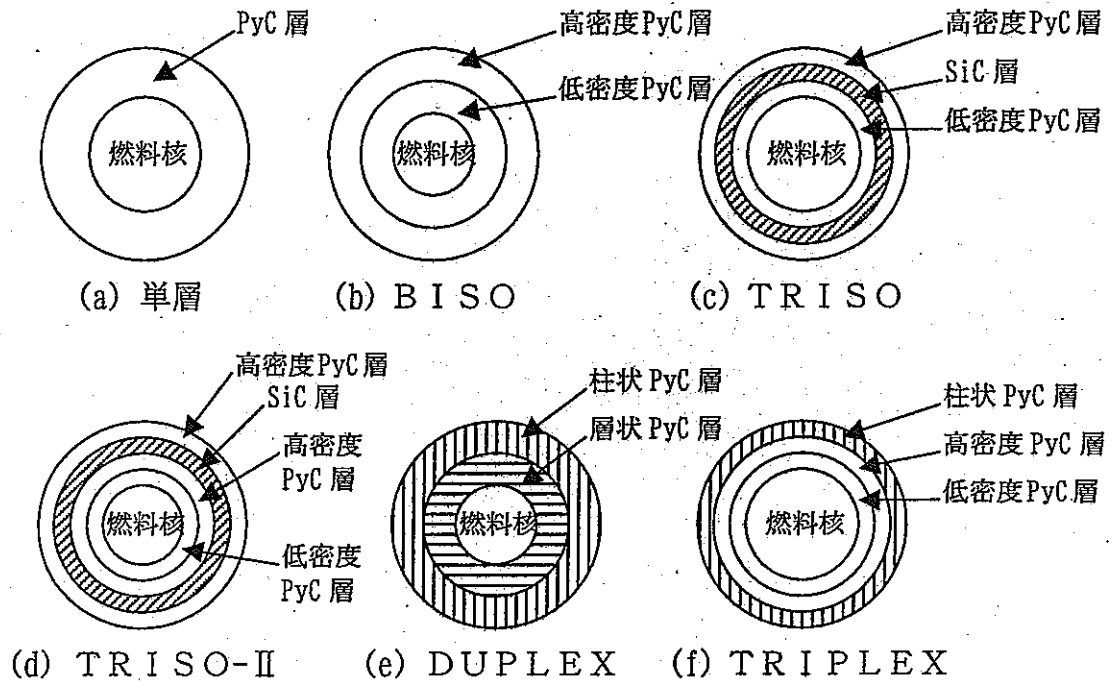


図 4.5.1 被覆粒子燃料の種類と名称

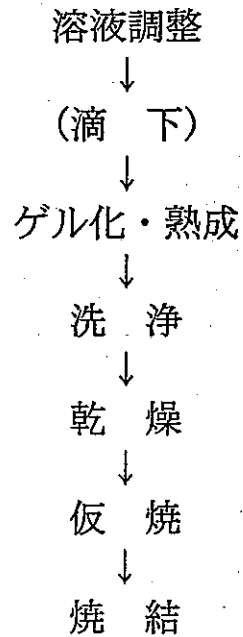


図 4.5.2 ゾル・ゲル化法による燃料核製造工程

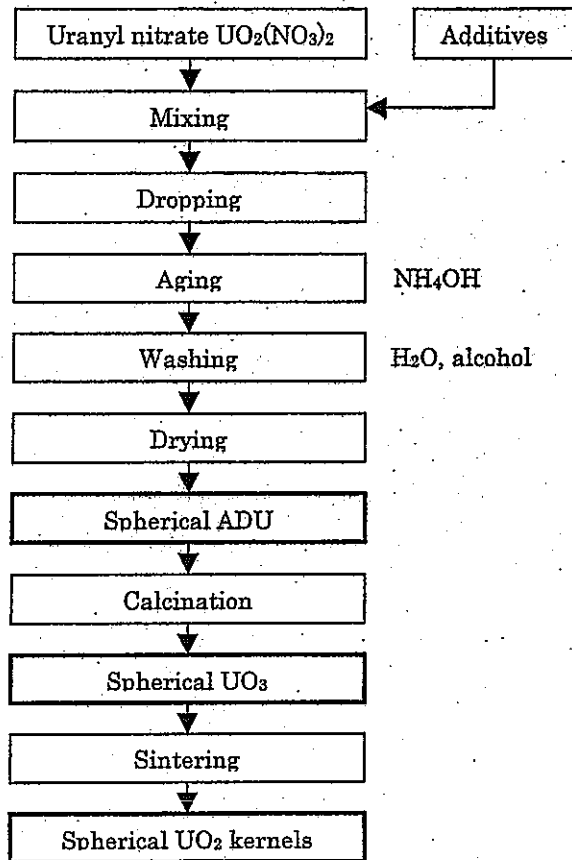


図 4.5.3 SNAM法による UO₂ 核の調製

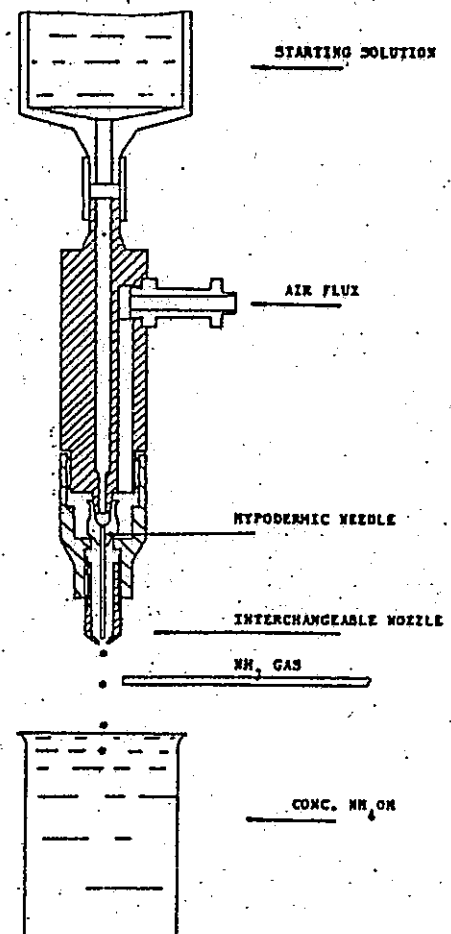


図 4.5.4 ゲル化装置の概要

表 4.5.1 ゲル沈殿法における各製造法の長所・短所

	ゾル・ゲル法	内部ゲル化法	外部ゲル化法
長所	——	<ul style="list-style-type: none"> - 生成ゲルの均質性が高い - 廃棄物量が少ない - 高速処理が可能 - 大粒径が可能 	<ul style="list-style-type: none"> - 溶液の調整が容易であり熱的にも安定→寿命が長い - 原液組成が単純→処理が容易
短所	<ul style="list-style-type: none"> - ゾル調整が煩雑 - 大粒径が困難 - 廃液が多量に発生 	<ul style="list-style-type: none"> - 溶液を冷却する必要があり不安定→寿命が短い - 溶液調整が極めて重要→処理が煩雑 - 廃棄物処理が困難 - トリクロエタンの使用 	<ul style="list-style-type: none"> - 外側から反応が進行するためシェル構造となり易い→欠陥の発生、大粒径が困難 - NH₄NO₃ が大量に発生
備考	——	マイクロ波加熱によりシリコンオイルとトリクロエタンの使用は回避可	——

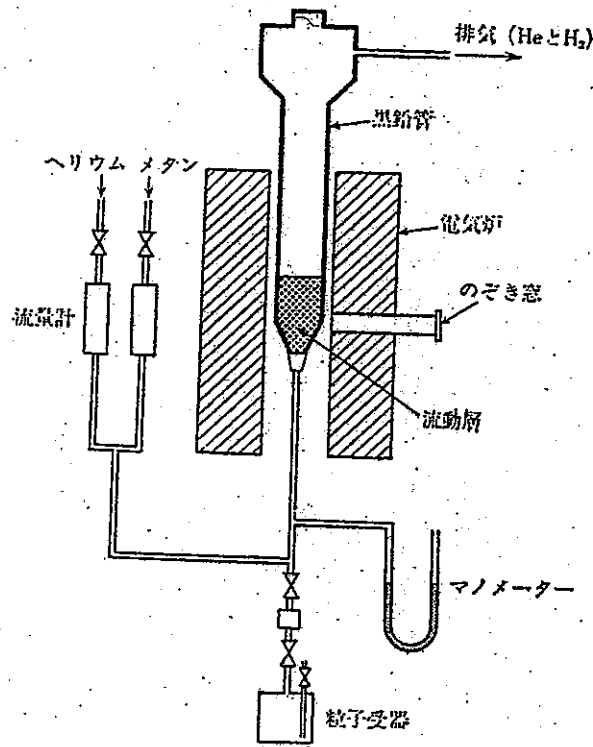


図 4. 5. 5 流動層被覆装置概念図

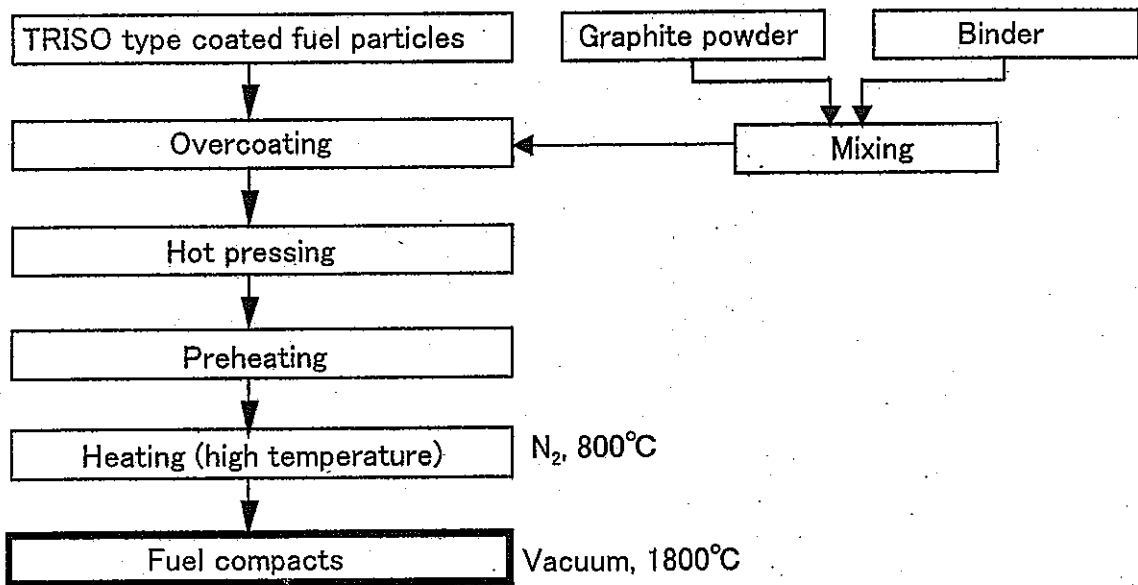


図4. 5. 6 HTTR燃料コンパクトの製造

表4.5.2 HTTR初装荷燃料仕様

【1】被覆燃料粒子	
被覆型式	4重被覆型
被覆粒子直径	920 μm
燃料核	
材質	UO ₂
密度	理論密度の95%
直径	600 μm
被覆層	
第1層	
材質	熱分解炭素 (PyC)
密度	1.1g/cm ³
直径	60 μm
第2層	
材質	熱分解炭素 (PyC)
密度	1.85g/cm ³
厚さ	30 μm
OPTAF*	1.04以下
第3層	
材質	炭化ケイ素 (SiC)
密度	3.19g/cm ³
厚さ	25 μm
第4層	
材質	熱分解炭素 (PyC)
密度	1.85g/cm ³
厚さ	45 μm
OPTAF*	1.04以下
	光学的結晶異方性
【2】燃料要素	
燃料要素型式	燃料棒
燃料部	
型式	燃料コンパクト (円環状)
燃料コンパクト数	14個/燃料棒
被覆粒子充填率	30%
黒鉛マトリックス	天然黒鉛, 人造黒鉛混合, 20%フェノール樹脂添加
寸法 外径	26mm (外径), 10mm (内径), 577mm (長さ)
被覆部	
型式	黒鉛スリーブ
寸法	34mm (外径), 26.2mm (内径), 577mm (長さ)
【3】燃料核	
燃料体型式	ピン・イン・ブロック型
燃料体	
寸法	六角柱状ブロック 360mm (対面間距離), 580mm (高さ) 41mm (燃料棒挿入孔径)
材質	黒鉛 (IG-110相当品)
燃料棒本数	33本 (燃料領域内側) 31本 (燃料領域外周部)
その他	
反応度調整材	3カ所
ダウエルピン	3カ所

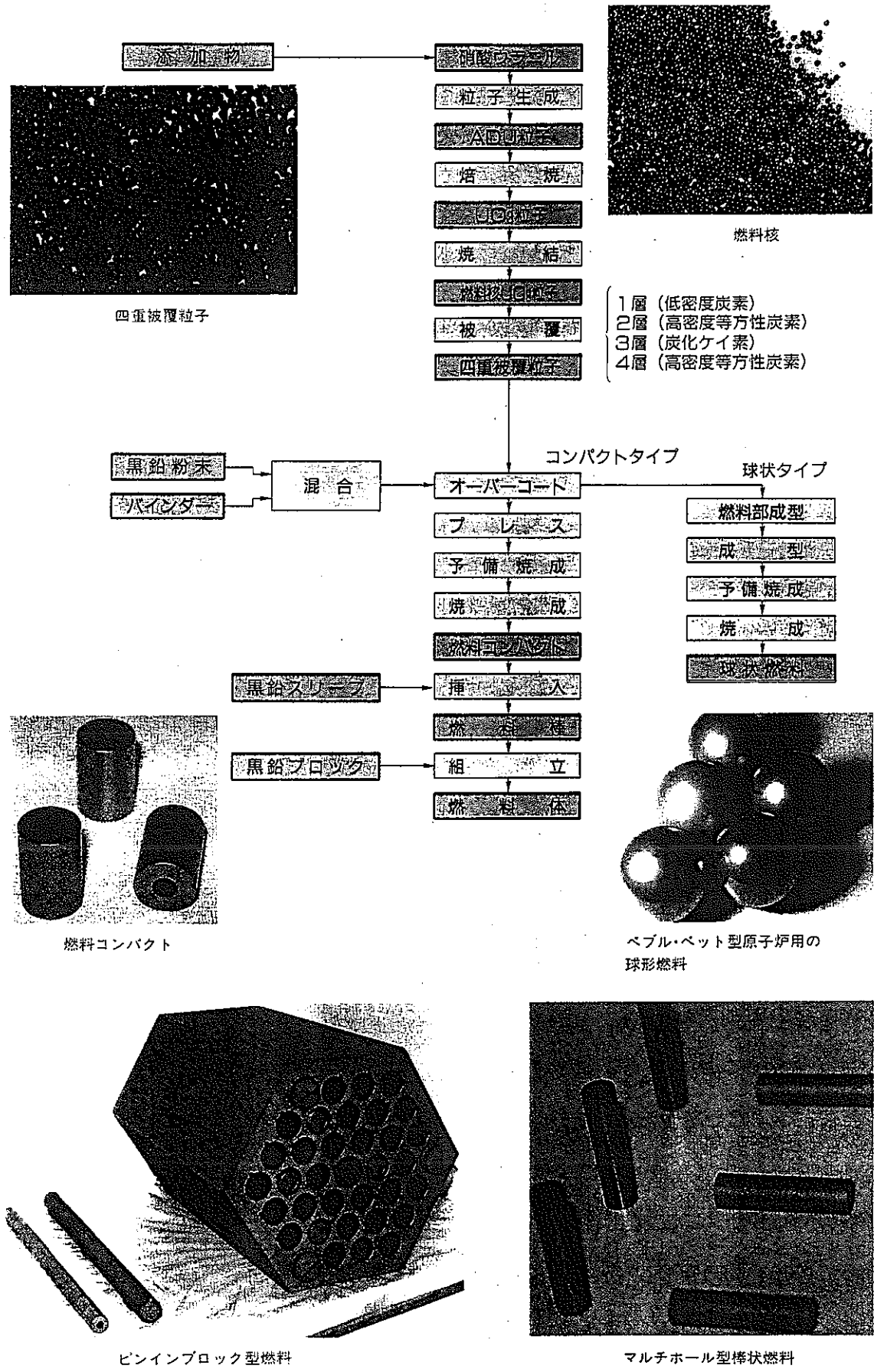
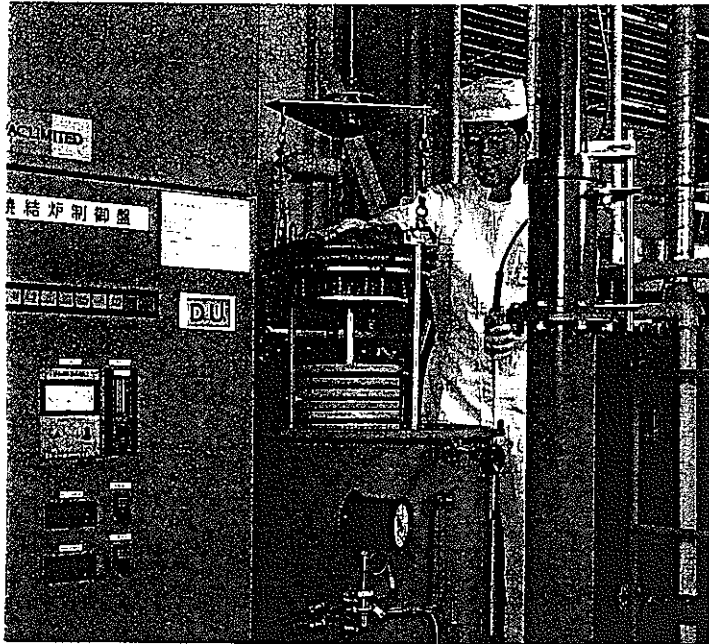
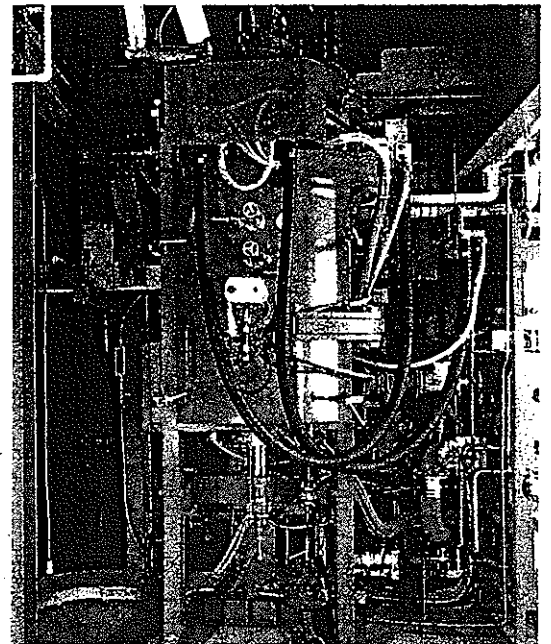


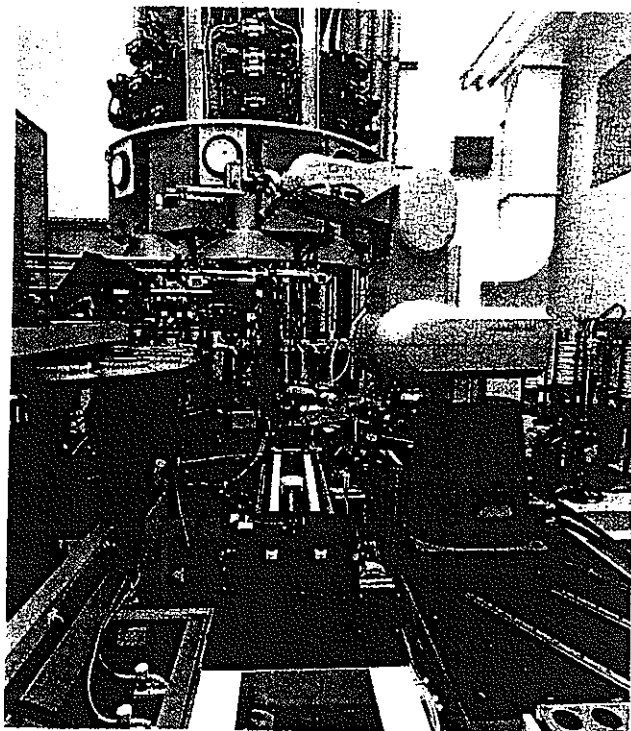
図 4.5.7 NFI プラントの工程フロー



焼結炉



被覆装置 (流動床)



全自動コンパクト成型設備

図 4.5.8 NFI プラントの各装置の外観

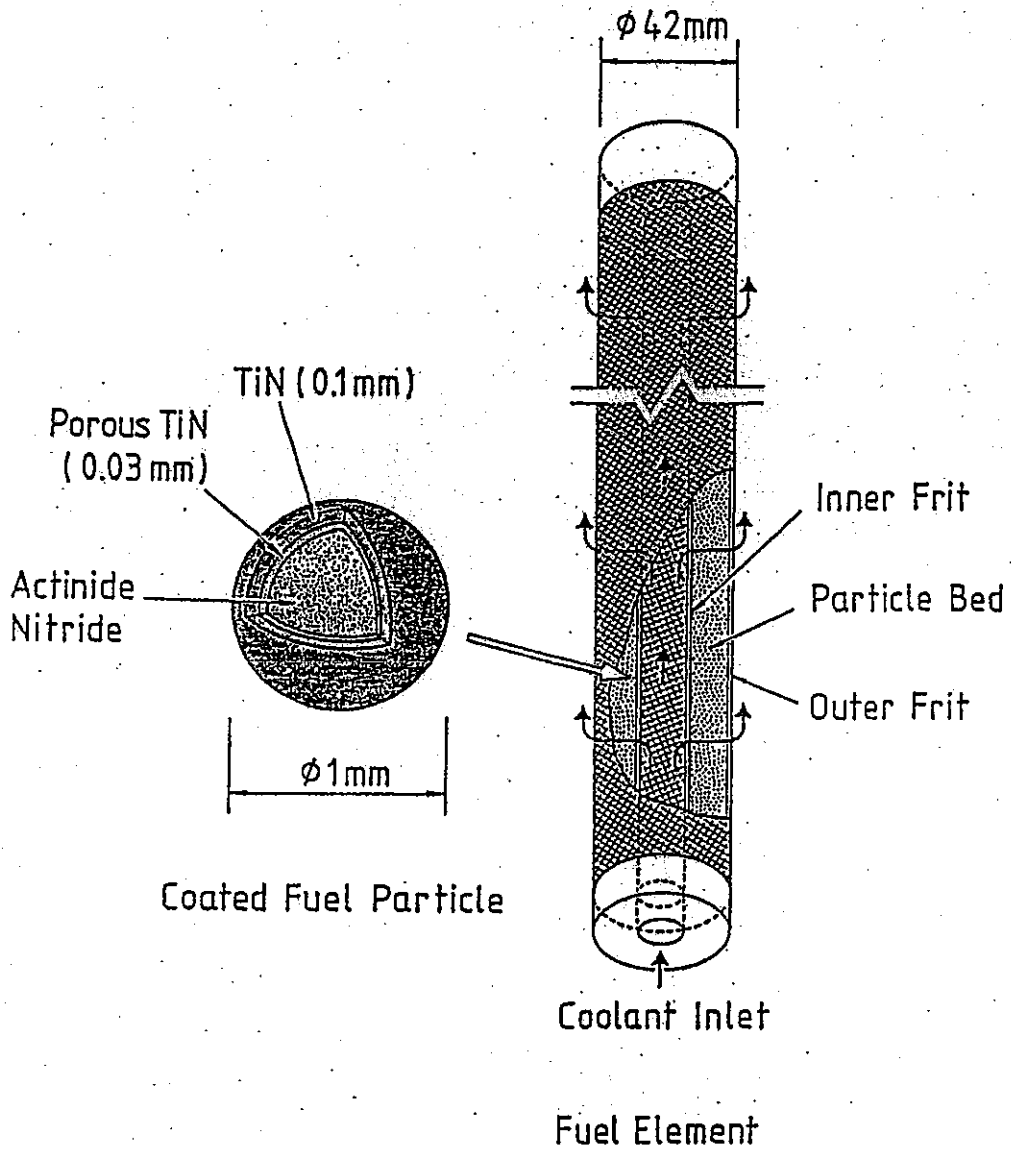


図4.5.9 He冷却粒子燃料専焼炉の燃料要素概念

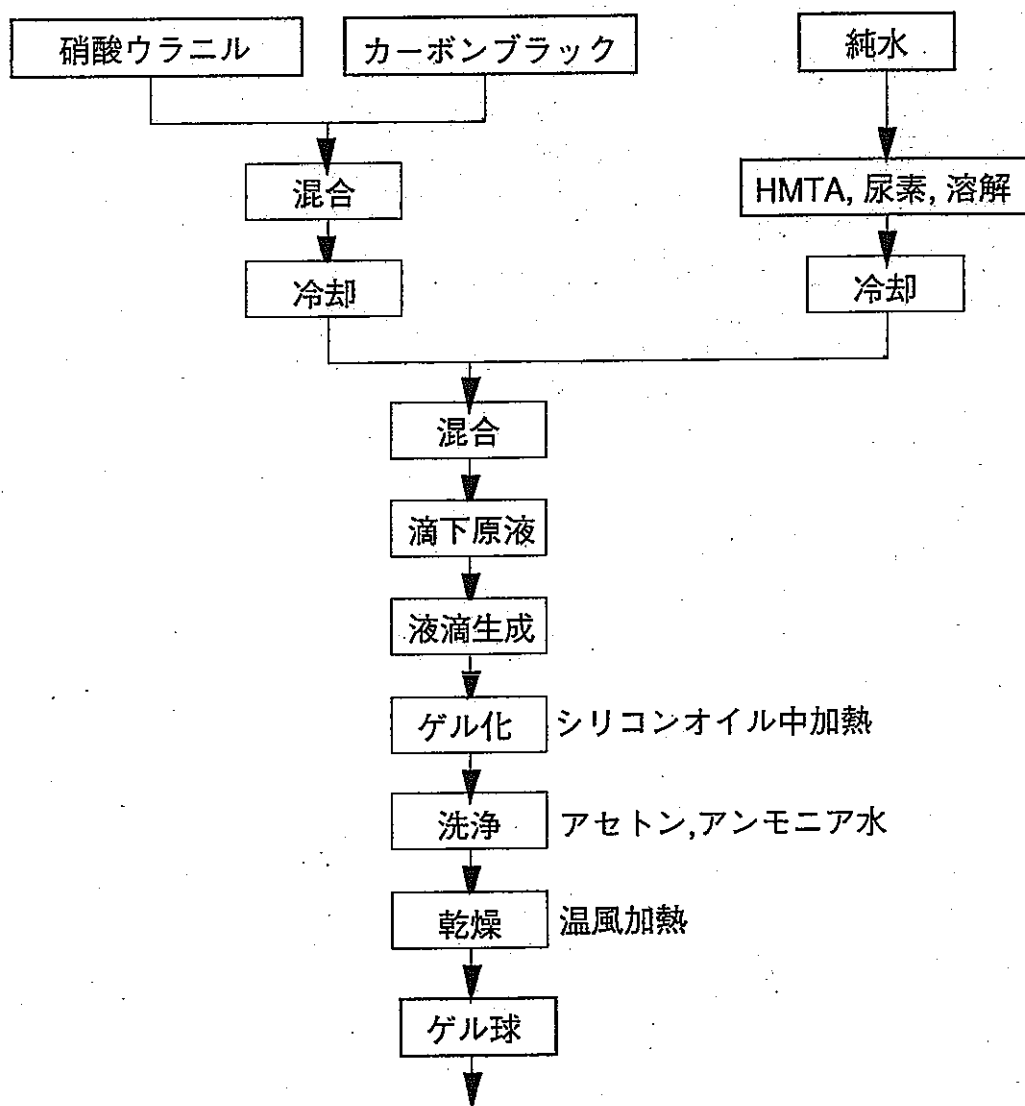


図 4.5.10 ゲル化法による窒化物粒子の製造フロー

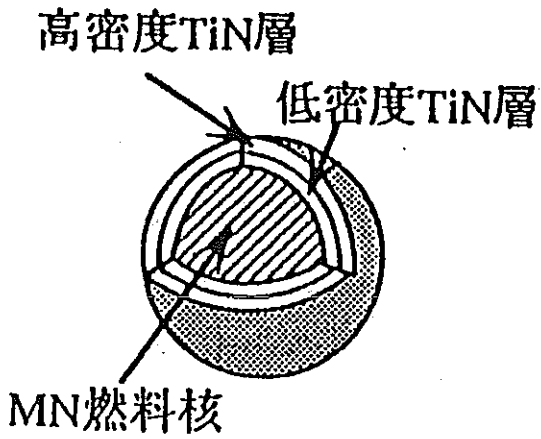


図 4.5.11 被覆粒子燃料 (窒化物)

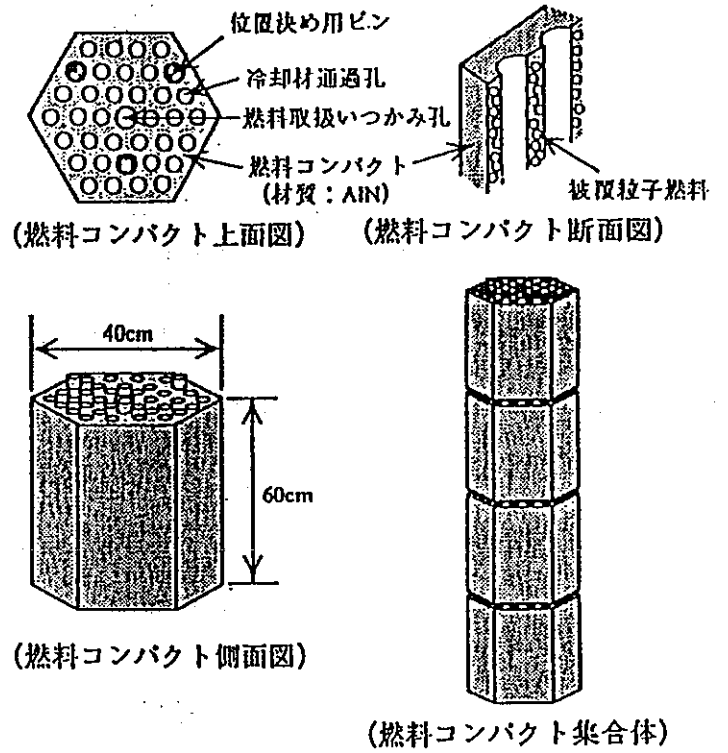


図 4.5.12 CP-GCFBR 用燃料

5. 中間評価

(1) 安全性

現行のウラン加工施設、再処理施設の安全審査指針とこれまでのMOX製造経験に基づく安全基準の考え方をベースとして検討を行った。その結果、各燃料製造システムとも、基本的に現行指針の適用に問題はなく、今後の設計フェイズで対応可能と評価されるが、湿式振動充填燃料における硝安など爆発性のある廃棄物や、金属燃料についてはさらに高温熔融金属の取扱いなど、燃料製造システム特有の課題に考慮する必要がある。

(2) 経済性

燃料製造システムの検討にあたっては、軽水炉サイクルと競合可能な経済性として単位発電量当たりの燃料サイクル費を軽水炉と同等以下とすることを目標とし、そのための燃料製造単価の目安として16万円/kgHMを設定した。

平成11年度の設計検討で得られた各燃料製造方式毎の経済性に関する成果は以下の通りである。

- ・ 簡素化ペレットGB製造 (50tMOX/y) 建設コスト、運転コスト
- ・ 簡素化ペレットセル製造 (200t/y、50t/y) 建設コスト、
- ・ 簡素化ペレットセル製造 (200t/y、一体型) 建設コスト、
- ・ 湿式振動充填法 (200t/y、一体型) 建設コスト、
- ・ 乾式振動充填法 (各50t/y、一体型) 建設コスト
- ・ 射出成型法 (50t/y、一体型) 建設コスト
- ・ 遠心鑄造法 (50t/y) 射出成型法比の物量増減

燃料製造システムの中間評価では、建設コスト、運転コストが評価され、燃料製造単価を算出することができる段階にある簡素化ペレット法 (GB製造) については目標に対する達成度の評価、遠心鑄造法については同じ鑄造法である射出成型法と物量等の比較による目標達成の可能性の検討を行うこととした。

簡素化ペレット法グローブボックス (GB) 製造プラントは、ショートプロセスの採用により、従来プロセスに比べてペレット製造工程を1/3程度に削減でき、建設費は2/3程度、運転費も2/3程度に削減できる。暫定条件による製造単価は50t/y規模で約17万円/kgHMとなる。ただし、本手法は高除染の再処理製品を原料とすることを前提としているため、経済性評価にあたっては再処理システムも含めて総合的に評価をすることが必要である。また、本検討では、製品仕様の合理化も含めた経済性向上策が提案されており、他方式との設計条件の整合は今後の課題である。

簡素化ペレット法セル製造プラントでは、燃料製造単独プラントについては200t/yの概略建設コストが50t/yの約2倍となるスケールメリットを確認した。建設コストの分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/5、建・電・換が約4/5となった。再処理との一体化プラントでは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約2/5で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/4、建・電・換が約1/4となった。

湿式再処理法振動充填一体化プラントは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約2/5で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約3/5、ユーティリティ・共通設備が約1/5、建・電・換が約1/5となった。

乾式再処理法（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法）の製品を原料とした振動充填燃料製造プラントについては、すべて再処理施設との一体型プラントとして設計された。

酸化物電解法再処理製品を原料とした振動充填法燃料製造プラントは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約1/5で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/4、建・電・換が約1/4となった。

金属電解法再処理製品を原料とした振動充填法燃料製造プラントは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約1/3で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約3/10、建・電・換が約2/10となった。

フッ化物揮発法再処理製品を原料とした振動充填法燃料製造プラントは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約1/4で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/10、建・電・換が約2/5となった。

射出成型法による金属燃料製造プラントは、燃料製造部分の概略建設コストは按分により一体化プラント全体の約1/4で、燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約3/10、建・電・換が約2/10となった。遠心鑄造法による金属燃料製造プラントは、射出成型法と比較して物量がほぼ同等と期待されそのコストもほぼ同等であると期待される。

本研究で検討した各種燃料製造システムの経済性の特徴を表5.1にまとめる。平成12年度には、平成11年度の設計研究の成果をもとに、設計研究の境界条件やコスト評価の条件を整合し、各燃料製造手法について施設の建設コスト、運転コストの評価と、燃料製造単価の算出を行う計画である。

(3) 資源有効利用性

製造工程では基本的に、燃料成分の化学変化を伴わないため、原理的には受け入れ量をほぼ燃料体に加工できると考えられる。このため、今年度の検討評価ではロス率をゼロとしてマスバランス評価を行っている。

(4) 環境負荷低減性

今年度は各燃料製造システムとも再処理との一体化プラントにおける製造工程から発生する廃棄物の種類、発生量の概略評価を行った。製造工程からの発生廃棄物は、メンテナンス等による二次廃棄物が主であると評価されるが、今後、プロセス廃棄物も含めた発生廃棄物の種類、発生量の詳細検討、評価が必要である。

(5) 核拡散抵抗性について

基本的に各燃料製造システムとも Pu の単離プロセスがなく、低除染燃料のセル内での取扱いにより、核兵器転用のアクセスが困難等の特性を有していることから核拡散抵抗性は高いと評価される。また、保障措置は基本的に従来と同等の手法により、例えば物質収支区域 (MBA) を再処理からの燃料の受け入れ、燃料製造主工程及び燃料集合体貯蔵区域等の 3~4 区域により設定する等により対応が可能と考えられるが、装置への付着燃料の計量管理上の対応など、セル内での製造に対する保障措置上の課題については、今後、ハードの設計段階で対応が必要である。

(6) 技術的成立性

各燃料製造システムについてプラント設計条件を設定し、50tHM あるいは 200tHM/年の量産プラントの設計が可能であることを示すことができた。今後、製造技術の実証に向けての共通の課題として、低除染燃料製造に伴う遠隔製造性評価、遠隔保守性評価等による低除染模擬燃料製造の確証試験が必要である。

ペレット燃料は、MOX 燃料製造で十分な実績を有しているが、今後、遠隔操作を含む TRU、FP を含有したペレット製造条件の検討が必要である。

振動充填燃料は、ロシア等で実績を有しているが、今後は充填用顆粒燃料製造や充填条件、検査方法を含む品質保証等の課題に取り組む必要がある。また、酸化物振動充填燃料では、高燃焼度化への対応として酸素ゲッター材や低 O/M 比粒子燃料製造技術の開発が必要となる。

金属燃料は、米国で射出成型法による製造の実績がある。今後は廃棄物発

生量の低減を目指した遠心鑄造法の検討が環境負荷低減の観点から期待される。

表5.1 燃料製造システムの経済性評価

主な設計要求事項		<ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉サイクルと競合可能な経済性 ・プロセスの簡素化、機器のコンパクト化による経済性向上
方式		特徴
酸化物燃料 (窒化物燃料)	湿式法	
	ペレット法 (GB製造)	ショートプロセスの採用により、従来プロセスに比べてペレット製造工程を1/3程度に削減でき、追従効果として搬送系設備の削減、粉末等の保管庫スペースの削減が図れる。その結果、建屋は従来法よりコンパクトになり、建設費は2/3程度となる。工程数の減少は運転員の削減、廃棄物発生量の低減、保守時間の削減、給排気設備の容量小型化等にも効果があり、運転費についても2/3程度まで削減できる。暫定条件による製造単価は50トン/年規模で約17万円/kgHMとなる。
	ペレット法 (セル製造)	燃料製造単独プラント200tHM/yと50tHM/yの建設費の概算コスト比は約2倍となり、プラント能力比の0.5乗に比例する暫定結果となった。建設コストの分布は、200tHM/y/50tHM/yのいずれも、燃料製造設備は約2/5、ユーティリティ・共通設備が約1/5、建屋が約2/5となった。 一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約2/5となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/4、建・電・換が約1/4となった。
	振動充填法	一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約2/5となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約3/5、ユーティリティ・共通設備が約1/5、建・電・換が約1/5となった。
乾式法	酸化物電解法 振動充填法	一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約1/4となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/3、ユーティリティ・共通設備が約1/2、建・電・換が約1/6となった。
	金属電解法 振動充填法	一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約1/3となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約3/10、建・電・換が約2/10となった。
	フッ化物揮発法 振動充填法	一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約1/4となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約1/10、建・電・換が約2/5となった。
金属燃料	射出成型法	一体型プラント200t/yの燃料製造部分の建設費の概算コストは、共通部分の按分により一体型プラント全体の約1/4となった。燃料製造部分のコスト分布は、燃料製造設備が約1/2、ユーティリティ・共通設備が約3/10、建・電・換が約2/10となった。
	遠心鑄造法	射出成型法に比べて、主要物量としては射出成型装置が遠心鑄造装置に置き換わり、その台数、機器コスト、スペース、その他についてもほぼ同等となることが期待される。
その他	被覆粒子燃料	燃料核製造工程は、振動充填法の粒子製造工程とほぼ同じ概念であるため、経済性のおおよその把握が可能であるが、被覆工程以降については、燃料仕様が未確定のため、現時点では大量生産規模（50, 200トン/年）の経済性は不明である。

6. 今後の計画

6.1 平成 12 年度の計画

(1) 候補概念の詳細検討

12 年度上半期において、11 年度の成果を踏まえて、さらに詳細な設計検討を行う。

プロセス成立性については、各設計要求を満足するために必須のものとして 11 年度に抽出された技術課題について、具体的な解決手段について検討するとともに要素技術の開発成果を反映し、より現実的なプロセス設計を行う。

安全性向上については、臨界管理制限とバッチサイズの検討、遮へい・被ばくの検討、火災・爆発可能性削減の検討、高温での取扱いの検討等を引き続き実施する。

経済性向上については、施設のコンパクト化、工程数の削減、製造ライン数の合理化、内装機器数の削減等の検討を実施し、コスト評価精度の向上に努める。また、処理規模の影響評価について、11 年度の検討結果を踏まえた検討評価を行う。

廃棄物発生量の低減については、試薬等のリサイクル、粉末飛散抑制等の検討を実施する。

機器設計については、コンパクトで遠隔操作・遠隔保守の容易な機器設計をより詳細に実施する。

運転保守性については、遠隔操作機器の配置、保守セル、保守エリアの設計を実施する。

その他、設計の合理化を実施する。

(2) 達成度評価

設計要求目標（安全性、経済性、環境負荷、資源有効利用、核不拡散性）に照らして、各システムの達成度を評価する。

(3) FBR サイクルの実用化候補概念の抽出

FBR サイクルの実用化候補概念の抽出に資するため、システム設計成果を燃料製造の観点から評価する。

- ・各燃料製造システムの特徴を把握する。
- ・再処理、炉心燃料及び FBR プラントとの関連を分析する。
- ・それぞれのシステムの利点を発揮する条件を整理する。
- ・実用化までに必要な研究開発計画案を策定する。

(4) フェーズ 2 以降の開発計画の策定

各燃料製造システムの実用化のために必要な研究開発計画案を策定し、実施内容、資金、要員、施設・設備計画の年度展開を示す。

6.2 フェーズ 2 計画案

フェーズ 2 では、実用化候補概念を絞り込むため、フェーズ 1 で抽出された概念の技術的成立性等の評価及び判断に必要となるホットの基礎試験及び重要な工程機器についての工学規模での性能確認試験等の開発成果を反映して、システム設計の詳細度、信頼度の向上を図る。そして、2015 年頃に、競争力のある FBR サイクル技術を提示するためにフェーズ 2 終了時点 (2005 年) において、実用化候補技術として再処理方式と整合する燃料製造方式を一つずつ選定し、以降の開発の重点化を図ることとする。

○再処理方式との整合を取りつつ、以下の考え方に従い開発を進めることとする。

- ・ペレット製造に関しては、簡素化ペレットプロセスの開発成果 (2002 年度の外部評価予定) を踏まえ、セル内製造への適用性を検討する。
- ・振動充填燃料製造に関しては、国内技術だけで十分に対応できないものについては、国際協力を有効に活用する。(湿式再処理法について P S I、乾式再処理法について R I A R など)
- ・金属燃料製造に関しては、電中研と共同で A N L 情報を参考にしつつ casting 技術の検討を進める。