# 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ Ⅱ 中間報告

- 総合評価技術検討書 -

(研究報告)

## 2004年9月

## 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical Cooperation Section, Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute 4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

### 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ 中間報告 - 総合評価技術検討書 -

塩谷洋樹<sup>1)</sup> 大滝明<sup>1)</sup> 小野清<sup>1)</sup> 平尾和則<sup>2)</sup> 加藤篤志<sup>3)</sup> 安松直人<sup>4)</sup> 久保田貞衣<sup>4)</sup> 辺田正則<sup>4)</sup>

#### 要 旨

本報告書は、フェーズの中間とりまとめ(2001年度から2003年度の3ヶ年 を対象)における、FBRサイクル候補概念の多面的評価、導入シナリオ評価および投資対効果評価に関する手法の開発およびその評価結果について報告するものである。

多面的評価については、フェーズ で検討した安全性、経済性、環境負荷低減 性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性の各視点に加え、新たに社会 的受容性も評価視点に加えて検討した。フェーズ 以来検討している 6 評価視点 についても、評価構造の策定・改良や定量評価に向けた効用関数の整備に取り組 み、さらに重み付け手法も開発した。以上の検討を通じて合計 7 つの視点から多 面的評価を行い、FBR サイクル候補概念の特性を明らかにした。その結果、ナト リウム冷却炉を用いる FBR サイクルは概して高い評価を得た。また、今回初めて FBR と他電源との間で定量的な多面的評価も試みた。

FBR 導入シナリオ評価については、22 ケースの候補概念の中から代表的な概念 を取り上げ、軽水炉ワンススルーやプルサーマルシナリオとの比較や多様なニー ズに着目したサイクル諸量解析を通じて、FBR 導入の必要性と望ましい炉心の特 徴などを明らかにした。

投資対効果評価については、投資額に関して従来の「過去の実績を踏まえた研 究開発費用」のケースに加えてロードマップ上で評価された研究開発費用を用い た評価を試み、FBR サイクル研究開発への投資が、FBR サイクル実用化によって 研究開発費用以上の便益をもたらすという結果が得られた。

2)経営企画本部 FBR サイクル開発推進部

<sup>1)</sup>大洗工学センター システム技術開発部 FBR サイクル解析グループ

<sup>3)</sup>経営企画本部 FBR サイクル開発推進部 FBR サイクルシステム統合グループ

<sup>4)</sup>株式会社NESI

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

#### Feasibility Study on Commercialization of Fast Breeder Reactor Cycle System Interim Report of Phase II -Technical Study Report on Synthetic Evaluation for FBR cycle-

Hiroki Shiotani<sup>1</sup>), Akira Ohtaki<sup>1</sup>), Kiyoshi Ono<sup>1</sup>, Kazunori Hirao<sup>2</sup>, Atsushi Kato<sup>3</sup>, Naoto Yasumatsu<sup>4</sup>, Sadae Kubota<sup>4</sup>, Masanori Heta<sup>4</sup>

#### Abstract

This report presents the outline of the development and the results of Synthetic evaluation on the candidate Fast Reactor (FR) cycle system concepts, scenario study on FR cycle deployment and cost-benefit analysis on the candidate FR cycle system concepts in the interim evaluation (FY2001 through FY2003) of the phase II of the Japanese "Feasibility Study on Commecialization of Fast Reactor Cycle System (FS)".

The characteristic evaluation extended to evaluate a new view point of social acceptance besides the viewpoints of safety, economics, reduction of environmental burden, efficient utilization of uranium resource, proliferation resistance, and technical feasibility, which has been considered since the phase I of FS. As for the six view points, hierarchy structures and utility functions for quantitative evaluation have been developed and/or improved. Furthermore, the methodology for weighing the viewpoints, which was also developed, made it possible to examine the characteristics of the candidate concepts from all the seven viewpoints. Generally, the FR cycles with sodium-cooled FR were highly evaluated. The characteristic evaluation for altenative power supply systems was also tried in this report for the first time.

FR cycle deployment scenarios clarified the necessity of FR cycle deployment and the desirable core features, etc. through the long-term mass flow analysis, which includes comparison among other nuclear fuel cycle schemes and analysis for evalating the degree to meet future needs, on the typical FR cycle systems.

Regarding cost-benefit analysis, both the amount of the cost estimated by the past R&D and the cost in the Road map of FS are used as the investment for FR cycle research and development (R&D), the results showed that the benefit derived from the commercialization of FR cycle will be more than the investment.

1) FBR Cycle Analysis Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

4 ) NESI Inc.

<sup>2)</sup> FBR Cycle System Development Office, Exective Office for the Policy Planning and Administration

<sup>3)</sup> FBR Cycle System Integration Group, FBR Cycle System Development Office, Exective Office for the Policy Planning and Administration

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

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

### 目 次

1.	は	じめ	に	- 1
2.	評	価手	法について	- 2
	2.1	評個	面の流れ	- 2
	2.2	多面	面的評価手法	- 5
	2.2	2.1	評価視点と効用値について	- 5
	2.2	2.2	FBR サイクルシステムについて	- 10
	2.2	2.3	各評価視点に関する検討	- 15
	2.2	2.4	各評価視点間の重み付け手法	- 61
	2.3	サ1	イクル諸量評価手法	- 82
	2.3	3.1	評価手法の概要と開発整備内容	- 82
	2.3	3.2	サイクル諸量評価手法のまとめと今後の進め方	- 83
	2.4	投資	<sup></sup> 愛対効果評価手法	- 85
	2.4	4.1	投資対効果評価システムの概要	- 85
	2.4	4.2	研究開発投資額の算出	- 86
	2.4	4.3	導入効果の金銭価値換算	- 86
3.	FE	R サ	イクルの多面的評価	- 91
	3.1	評伺	Б対象とした FBR サイクル概念	- 91
	3.2	各視	見点からの評価結果	- 93
	3.2	2.1	安全性の評価結果	- 93
	3.2	2.2	経済性の評価結果	- 112
	3.2	2.3	環境負荷低減性の評価結果	- 125
	3.2	2.4	資源有効利用性の評価結果	- 135
	3.2	2.5	核拡散抵抗性の評価結果	- 143
	3.2	2.6	技術的実現性の評価結果	- 150
	3.2	2.7	社会的受容性の評価結果	- 154
	3.3	7つ	)の視点からの多面的評価結果	- 164
	3.3	3.1	各評価視点間の重み付けを行わない評価結果	- 164
	3.3	3.2	安全性を除く6評価視点を重み付けした評価結果	- 170
	3.3	3.3	経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性の4評価	
			視点を重み付けした評価結果	- 194
	3.4	他電	፪源との比較評価	- 220
	3.4	4.1	比較評価の前提	- 220
	3.4	4.2	他電源比較の評価指標	- 220
	3.4	4.3	他電源比較の評価基準	- 230
	3.4	4.4	他電源比較における入力値設定	- 234
	3.4	4.5	他電源比較の評価結果と FBR サイクルの開発と導入による効果	- 269

3.4.6	他電源比較の評価のまとめと今後の課題	277
3.5 多面	面的評価のまとめと今後の課題	280
4. FBR セ	サイクル導入シナリオ	282
4.1 将习	Rの原子力利用オプションと課題	283
4.1.1	原子力利用オプションの計算条件	283
4.1.2	原子力利用オプションの計算結果	289
4.1.3	原子力利用オプションの考察	294
4.2 FB	R サイクルの導入意義	295
4.2.1	原子力フェードアウトの影響と代替技術	295
4.2.2	原子力の可能性と FBR サイクルの導入意義	297
4.3 シナ	トリオ検討条件	300
4.3.1	シナリオ検討の基本的考え方	300
4.3.2	国内の想定条件	300
4.3.3	世界の想定条件	308
4.4 各種	重導入シナリオのサイクル諸量解析結果	312
4.4.1	国内全体を対象としたシナリオ解析結果	312
4.4.2	国内地域(コロケーションサイクル)を対象としたシナリオ解析結	
	果	338
4.4.3	_ 世界全体の解析結果	344
4.5 シラ	トリオ検討のまとめと今後の進め方	346
5. 投資対	効果に関する検討	348
5.1 フェ	┎ ーズ I 評価時からのシステムの変更点	348
5.2 解枕	斤ケース	349
5.3 解枕	斤条件	350
5.4 解枕	斤結果	359
5.4.1	年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の結果	359
5.4.2	年間 500 億円投資 LWR100%代替の結果	361
5.4.3	ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の結果 -	363
5.4.4	ロードマップ上の開発資金 LWR100%の結果	365
5.4.5	割引率 2% 年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替	
	の結果	367
5.4.6	割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭	
	10%の結果	369
5.4.7	ケース1の感度解析	371
5.5 まと	とめと今後の課題	376
6. おわり	に	379
謝辞		381

付録1 多面的評価用諸量解析ツール	付-1(1)
付録 1.1 諸量解析ツールの計算フロー	付-1(1)
付録 1.2 諸量解析ツールの修正および改良	付 - 1(8)
付録 2 シナリオ評価用サイクル諸量解析コードの	)整備 付-2(1)
付録 2.1 FAMILY-EX	付-2(1)
付録 2.2 FAMILY-21	付 - 2(19)
付録3 発電設備容量に関する考察	付-3(1)
付録 3.1 はじめに	付-3(1)
付録 3.2 国内の原子力発電設備容量に関する評	価事例 付 - 3(1)
付録 3.3 検討方法	付-3(2)
付録 3.3.1 検討手順	付-3(2)
付録 3.3.2 発電用一次エネルギーの換算方法	付 - 3(4)
付録 3.3.3 各種解析パラメータの概要	付-3(5)
付録 3.4 原子力発電設備容量の超長期解析	付 - 3(26)
付録 3.4.1 計算条件	付 - 3(26)
付録 3.4.2 計算結果	付 - 3(27)
付録 3.5 評価	付 - 3(36)
付録 3.6 考察	付 - 3(38)
付録 3.7 まとめ	付 - 3(39)
付録 4 外部コスト関連動向	付-4(1)
付録 4.1 外部性について	付 - 4(1)
付録 4.1.1 金銭価値以外の多様な価値	付 - 4(2)
付録 4.1.2 外部性の評価手法	付 - 4(4)
付録 4.1.3 外部性評価の意義について	付-4(7)
付録 4.2 ExternE について	付 - 4(8)
付録 4.2.1 さまざまな電源における外部性評	価項目 付-4(9)
付録 4.2.2 ExternE の外部性評価手法	付 - 4(11)
付録 4.3 他の外部性評価例について	付 - 4(18)
付録 4.3.1 米国の外部性評価例	付 - 4(18)
付録 4.4 外部性評価の課題	付 - 4(19)
付録5 候補概念の炉特性データ	付-5(1)

### 表 目 次

表	2.2.1	経済性の評価基準	18
表	2.2.2	発電原価の内訳、計算条件、計算方法	22
表	2.2.3	燃料費の内訳および燃料サイクル単価の設定・計算方法	23
表	2.2.4	サイクル施設の廃止時廃棄物に対する重量と体積の換算係数	24
表	2.2.5	環境パフォーマンス指標のサブ指標(その1)	26
表	2.2.6	環境パフォーマンス指標のサブ指標(その2)	27
表	2.2.7	環境パフォーマンス指標のサブ指標(その3)	28
表	2.2.8	資源有効利用性の評価基準(ケースA)	36
表	2.2.9	資源有効利用性の評価基準(ケースB)	38
表	2.2.10	核拡散抵抗性の評価基準	40
表	2.2.11	核物質形状の効用値	44
表	2.2.12	技術的実現性の評価指標	52
表	2.2.13	開発資金幅の評価基準	55
表	2.2.14	開発期間幅の評価基準	55
表	2.2.15	社会的受容性の評価基準	57
表	2.2.16	環境省が検討したシナリオ(ストーリーライン)	65
表	2.2.17	未来予測項目に基づく一対比較方針(その1)	69
表	2.2.18	未来予測項目に基づく一対比較方針(その2)	70
表	2.2.19	シナリオ①を構成する未来予測項目と、そのストーリー	71
表	2.2.20	シナリオ②を構成する未来予測項目と、そのストーリー	72
表	2.2.21	シナリオ③を構成する未来予測項目と、そのストーリー	73
表	2.2.22	シナリオ④を構成する未来予測項目と、そのストーリー	74
表	3.1.1	多面的評価の対象ケース(全22ケース)	92
表	3.2.1	ナトリウム冷却炉の安全性評価結果	94
表	3.2.2	鉛ビスマス冷却炉の安全性評価結果	96
表	3.2.3	ヘリウム冷却炉の安全性評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
表	3.2.4	水冷却炉の安全性評価結果	100
表	3.2.5	湿式燃料サイクルシステムの安全性評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	101
表	3.2.6	乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)システムの安全性評価結果	104
表	3.2.7	乾式燃料サイクル(金属電解再処理法)システムの安全性評価結果	107
表	3.4.1	他電源比較の評価対象電源	220
表	3.4.2	天然ガスの発電以外の用途	223
表	3.4.3	定量評価指標の満足値設定(大規模電源比較)	230
表	3.4.4	定量評価指標の満足値設定(小規模電源比較)	231
表	3.4.5	他電源比較の段階的(定性)評価における評価基準	233
表	3.4.6	他電源評価の対象とする FBR サイクル以外のシステム	235

表	3.4.7	定量値を入力する評価指標	236
表	3.4.8	主要発電技術等の特性データーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	238
表	3.4.9	過去のエネルギーショック時の原油、LNG および石炭価格上昇率	241
表	3.4.10	1 年ごとの LNG の CIF 価格変動幅(最高-最低)	242
表	3.4.11	必要資源量の算出	242
表	3.4.12	天然ガスのエネルギー需給バランス(2000年度)	243
表	3.4.13	エリア別の政治経済リスク指標	246
表	3.4.14	我が国のエリア別輸入依存度から見たリスクの比較	246
表	3.4.15	大気汚染物質の排出原単位	247
表	3.4.16	現行火力発電の SOx、NOx 排出原単位推定値	247
表	3.4.17	各種石炭利用発電技術の概要	249
表	3.4.18	石炭火力の必要資源賦存性設定内容	251
表	3.4.19	放射性物質の排出量	253
表	3.4.20	風力発電設備費事例	254
表	3.4.21	風力発電の資源供給性入力データーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	256
表	3.4.22	平成14年度住宅用太陽光発電導入促進事業における設置価格	257
表	3.4.23	太陽光発電システム設置費用の習熟効果算定例	257
表	3.4.24	ニューサンシャイン計画における技術開発目標(抜粋)	260
表	3.4.25	木質産業廃棄物発電コスト想定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	265
表	3.4.26	電源システムの評価基準への分類検討	267
表	4.1.1	原子力利用オプションの想定条件	284
表	4.1.2	原子炉導入条件	287
表	4.1.3	サイクル施設の導入条件	288
表	4.3.1	FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズⅡの検討概念	301
表	4.3.2	将来概念のグルーピングとシステム構成	301
表	4.3.3	国内全体のシナリオスタディにおける検討対象概念と評価視点	302
表	4.3.4	平成 15 年度の原子力開発計画	303
表	4.3.5	国内全体解析のパラメーター覧	305
表	4.3.6	世界を対象としたシナリオ解析の一覧	309
表	4.3.7	世界を対象としたシナリオ解析の前提条件	310
表	4.3.8	炉特性データ一覧	311
表	4.4.1	FAMILY-21 による計算対象アクチニド核種	312
表	5.2.1	対象 FBR サイクルシステム	349
表	5.2.2	解析条件の組み合せ	349
表	5.3.1	主要なパラメータの設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	350
表	5.3.2	FBR サイクル実用化候補概念の導入開始年	351
表	5.3.3	一次エネルギー総供給実績と予測(基準ケース)	353
表	5.3.4	設定した燃料価格初期値	353

表	5.3.5	天然ウラン資源量と生産コスト(Uranium 2001 年度版)	354
表	5.3.6	設定した FBR 非導入時の燃料価格上昇率	354
表	5.3.7	需要による価格の弾性値	354
表	5.3.8	燃料価格上限值	355
表	5.3.9	代替電源発電コスト初期値	355
表	5.3.10	発電による死亡リスク(人数/GW年)	355
表	5.3.11	設定した事故による死者数	356
表	5.3.12	電源別の CO2 排出量	356
表	5.3.13	設定した CO <sub>2</sub> 排出量	356
表	5.3.14	SO <sub>x</sub> 排出量算出に用いた値	357
表	5.3.15	設定した SO <sub>x</sub> 排出量	357
表	5.3.16	NO <sub>x</sub> 排出量算出に用いた値	357
表	5.3.17	設定した NO <sub>x</sub> 排出量	357
表	5.3.18	設定した発電効率	358
表	5.3.19	燃料の単位あたりの発熱量	358
表	5.4.1	年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益指数	359
表	5.4.2	年間 500 億円投資 LWR100%代替の利益指数	361
表	5.4.3	ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の利益指数	363
表	5.4.4	ロードマップ上の開発資金 LWR100%代替の利益指数	365
表	5.4.5	割引率 2%年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益	益
		指数	367
表	5.4.6	割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の	利
		益指数	369
表	5.4.7	感度解析のケース	371
表	5.4.8	ケース1感度解析結果(利益指数)	372

### 付録 表目次

付表	2.1.1	FAMILY-EX の開発・整備の経過	付-2(3)
付表	2.1.2	原子力発電設備容量の想定条件	付-2(13)
付表	2.1.3	原子炉想定条件	付-2(14)
付表	2.1.4	リサイクル施設想定条件	付-2(14)
付表	2.2.1	FAMILY-21の開発·整備の経過	付-2(19)
付表	2.2.2	燃焼計算で考慮するアクチノイド核種	付-2(20)
付表	2.2.3	代表的な FBR 概念の取出燃料中の <sup>239</sup> Pu 含有率の比較結果	付-2(31)
付表	3.3.1	次エネルギー換算用発電効率	付-3(5)
付表	3.4.1	原子力発電設備容量の計算条件	付-3(26)
付表	4.1.1	外部性の評価手法	付-4(5)
付表	4.1.2	外部性評価の実施例	付-4(6)
付表	4.2.1	評価の優先度が高い外部性の項目(黒丸部分)	付-4(9)
付表	4.2.2	ExternE における影響評価項目	付-4(14)
付表	4.2.3	致死性の健康被害(死亡率の増加)に対しての暴露応答係数	付-4(15)
付表	4.2.4	致死性以外の健康影響に対する暴露応答係数と損害費用	付-4(15)
付表	4.2.5	欧州における統計的生命価値(VSL)の評価例	付-4(16)
付表	4.2.6	ExternEにおける各電源の外部費用評価結果の概要	付-4(17)
付表	4.3.1	米国各州におけるさまざまな汚染物質の外部性評価値	付-4(18)
付表	5.1 修	<b>巽補概念の炉特性データ(多面的評価ケース1~4)</b>	付-5(1)
付表	5.2 修	<b>巽補概念の炉特性データ(多面的評価ケース5~8)</b>	付-5(2)
付表	5.3 修	<b>ミ補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 9 ~ 12)</b>	付-5(3)
付表	5.4 修	<b>桑補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 13~16)</b>	付-5(4)
付表	5.5 修	<b>巽補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 17~20)</b>	付-5(5)
付表	5.6 修	<b>吴補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 21~22)</b>	付-5(6)

### 図目次

义	2.1.1	有望な FBR サイクル概念明確化の検討フロー	3
义	2.1.2	総合評価の検討の流れ	4
义	2.2.1	FBR サイクル候補概念の評価指標	6
义	2.2.2	多面的評価の流れ	8
义	2.2.3	効用関数の設定例(定量評価の場合)	9
义	2.2.4	効用関数の設定例(段階的評価の場合)	10
义	2.2.5	FBR サイクルシステム内外における相互作用のイメージ	11
义	2.2.6	各時期における FBR サイクルと外部との相互作用	13
义	2.2.7	平衡期の FBR サイクルのイメージ	14
义	2.2.8	LLFP 核変換サイクルのイメージ	14
义	2.2.9	安全性の評価構造	15
义	2.2.10	経済性に関する評価構造	17
义	2.2.11	発電原価の効用関数	19
义	2.2.12	環境負荷低減性の評価構造	30
义	2.2.13	廃棄物発生量(体積)の効用関数	31
义	2.2.14	廃棄物発生量(占有面積)の効用関数	32
义	2.2.15	放射性毒性の効用関数	33
义	2.2.16	核種移行による被ばくの効用関数	34
义	2.2.17	希釈放出による被ばくの効用関数	35
义	2.2.18	資源有効利用性の評価構造	35
义	2.2.19	資源持続利用可能性の効用関数	37
义	2.2.20	資源節約性の効用関数	38
义	2.2.21	資源節約性の効用関数(B案)	39
义	2.2.22	核拡散抵抗性の評価構造	40
义	2.2.23	物質接近性の効用関数	44
义	2.2.24	必要原料量の効用関数	45
义	2.2.25	プルトニウム抽出時間の効用関数	46
义	2.2.26	プルトニウム抽出資金の効用関数	47
义	2.2.27	核兵器不適応性の効用関数	48
义	2.2.28	発熱量の効用関数	49
义	2.2.29	技術的実現性の評価構造	51
义	2.2.30	開発資金の効用関数	53
义	2.2.31	開発期間の効用関数	54
义	2.2.32	社会的受容性の評価構造	57
义	2.2.33	環境省が参考にした SRES シナリオの枠組み	65
义	2.2.34	シナリオ における各評価視点の重み付け結果	75

2.2.36 2.2.37 2.2.38 2.2.39 2.2.40 2.2.41 2.4.1 2.4.2	<ul> <li>シナリオ における各評価視点の重み付け結果</li> <li>シナリオ における各評価視点の重み付け結果</li> <li>シナリオ における4評価視点の重み付け結果</li> <li>シナリオ における4評価視点の重み付け結果</li> <li>シナリオ における4評価視点の重み付け結果</li> <li>シナリオ における4評価視点の重み付け結果</li> <li>FBR 導入時の電源構成と FBR を導入しない時の電源構成</li> </ul>	76 76 77 78 78 78
2.2.37 2.2.38 2.2.39 2.2.40 2.2.41 2.4.1 2.4.2	シナリオ における各評価視点の重み付け結果 シナリオ における 4 評価視点の重み付け結果 シナリオ における 4 評価視点の重み付け結果 シナリオ における 4 評価視点の重み付け結果 シナリオ における 4 評価視点の重み付け結果 FBR 導入時の電源構成と FBR を導入しない時の電源構成	76 77 78 78 78
2.2.38 2.2.39 2.2.40 2.2.41 2.4.1 2.4.2	シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 FBR 導入時の電源構成とFBR を導入しない時の電源構成	77 78 78 78
2.2.39 2.2.40 2.2.41 2.4.1 2.4.2	シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 FBR 導入時の電源構成とFBR を導入しない時の電源構成	78 78 78
2.2.40 2.2.41 2.4.1 2.4.2	シナリオ における4評価視点の重み付け結果 シナリオ における4評価視点の重み付け結果 FBR 導入時の電源構成とFBR を導入しない時の電源構成	78 78
2.2.41 2.4.1 2.4.2	シナリオ における4評価視点の重み付け結果 FBR 導入時の電源構成とFBR を導入しない時の電源構成	78
2.4.1 2.4.2	FBR 導入時の電源構成とFBR を導入しない時の電源構成	~ -
2.4.2		85
0 4 0	投資対効果評価システムの概略	86
2.4.3	資源枯渇抑制効果と燃料輸入削減効果	89
3.2.1	経済性の評価結果一覧	117
3.2.2	炉型および燃料形態別の経済性評価(発電原価)	118
3.2.3	炉型および燃料形態別の経済性評価(資本費)	118
3.2.4	炉型および燃料形態別の経済性評価(運転維持費)	119
3.2.5	炉型および燃料形態別の経済性評価(燃料費)	119
3.2.6	炉型および燃料形態別の経済性評価(燃料サイクル単価)	120
3.2.7	燃料サイクル技術別の経済性比較(発電原価)	120
3.2.8	燃料サイクル技術別の経済性比較(燃料費)	121
3.2.9	燃料サイクル技術別の経済性比較(燃料サイクル単価)	121
3.2.10	炉のスケール効果	122
3.2.11	資源重視型炉心サイクルと経済性重視型炉心サイクル	122
3.2.12	再処理プラントにおける機器交換費の影響	122
3.2.13	FBR プラント廃止措置費用計上方法の影響	123
3.2.14	再処理および燃料製造プラントの廃止措置費用計上方法の影響	123
3.2.15	LLFP 核変換サイクルの発電原価試算	124
3.2.16	環境負荷低減性の評価結果	129
3.2.17	廃棄物発生量(体積)の評価結果	130
3.2.18	廃棄物発生量(面積換算)	131
3.2.19	放射性毒性の評価結果	132
3.2.20	埋設処分被ば<の評価結果	133
3.2.21	希釈放出被ばくの評価結果	134
3.2.22	資源有効利用性の評価構造と主な評価条件	138
3.2.23	候補概念の資源節約性に関する評価結果(評価基準:レファレンス)	139
3.2.24	2050 年 FBR 導入開始条件による資源節約性の比較	139
3.2.25	資源節約性に関する評価基準の感度解析例(全22ケース)	140
3.2.26	資源節約性に関する評価基準の感度解析例(代表ケース)	140
3.2.27	候補概念の持続利用可能性に関する評価結果	141
3.2.28	評価ケースのシステム構成と資源有効利用性の評価結果	142
	3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6 3.2.7 3.2.8 3.2.9 3.2.10 3.2.11 3.2.12 3.2.13 3.2.14 3.2.15 3.2.16 3.2.17 3.2.16 3.2.17 3.2.18 3.2.19 3.2.20 3.2.21 3.2.22 3.2.23 3.2.24 3.2.25 3.2.26	<ul> <li>3.2.1 経済性の評価結果一覧</li></ul>

义	3.2.29	核拡散抵抗性の評価結果	145
义	3.2.30	核拡散抵抗性の評価結果(詳細)	146
义	3.2.31	接近性の評価結果	147
义	3.2.32	難取扱性の評価結果	148
义	3.2.33	難単離性の評価結果	149
义	3.2.34	冷却材(炉型)ごとの技術的実現性評価結果	150
义	3.2.35	燃料サイクルごとの技術的実現性評価結果	151
义	3.2.36	技術的実現性の評価結果一覧	153
义	3.2.37	社会的受容性の評価結果	156
义	3.2.38	社会的受容性の評価結果(詳細版)	157
义	3.2.39	導入必要インフラの評価結果	158
义	3.2.40	運転・保守・補修性の評価結果	159
义	3.2.41	研究開発柔軟性の評価結果	160
义	3.2.42	心理的受容性の評価結果	161
义	3.2.43	既知技術の評価結果	162
义	3.2.44	注目性の評価結果	163
义	3.3.1	6評価視点の重み付けを行わないときの評価結果	165
义	3.3.2	炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点で重み付けを行わない場合)	166
义	3.3.3	燃料サイクル別の評価結果(6評価視点で重み付けを行わない場合)	167
义	3.3.4	6評価視点の重み付けを行わない評価結果(ケース1~ケース12)	168
义	3.3.5	6 評価視点の重み付けを行わない評価結果(ケース13~ケース22)	169
义	3.3.6	重みを付けたレーダーチャートの見方	171
义	3.3.7	炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ1の場合)	172
义	3.3.8	燃料サイクル別の評価結果(6評価視点でシナリオ1の場合)	173
义	3.3.9	シナリオ1に基づき6評価視点を重み付けした結果	174
义	3.3.10	シナリオ1に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	175
义	3.3.11	シナリオ1に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	176
义	3.3.12	炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ2の場合)	178
义	3.3.13	燃料サイクル別の評価結果(6 評価視点でシナリオ 2 の場合)	179
义	3.3.14	シナリオ2に基づき6評価視点を重み付けした結果	180
义	3.3.15	シナリオ2に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	181
义	3.3.16	シナリオ2に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	182
义	3.3.17	炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ3の場合)	184
义	3.3.18	燃料サイクル別の評価結果(6 評価視点でシナリオ3の場合)	185
义	3.3.19	シナリオ3に基づいて6評価視点を重み付けした評価結果	186
义	3.3.20	シナリオ3に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	187
义	3.3.21	シナリオ3に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	188
义	3.3.22	炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ4の場合)	189

义	3.3.23	燃料サイクル別の評価結果(6評価視点でシナリオ4の場合)	190
义	3.3.24	シナリオ4に基づき6評価視点を重み付けした結果(全ケース)	191
义	3.3.25	シナリオ4に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	192
义	3.3.26	シナリオ4に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	193
义	3.3.27	炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ1の場合)	196
义	3.3.28	燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ1の場合)	197
义	3.3.29	シナリオ1に基づき4評価視点を重み付けした結果	198
义	3.3.30	シナリオ1に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	199
义	3.3.31	シナリオ1に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	200
义	3.3.32	炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ2の場合)	202
义	3.3.33	燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ2の場合)	203
义	3.3.34	シナリオ2に基づき4評価視点を重み付けした結果	204
义	3.3.35	シナリオ2に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	205
义	3.3.36	シナリオ2に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	206
义	3.3.37	炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ3の場合)	208
义	3.3.38	燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ3の場合)	209
义	3.3.39	シナリオ3に基づいて4評価視点を重み付けした評価結果	210
义	3.3.40	シナリオ3に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	211
义	3.3.41	シナリオ3に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	212
义	3.3.42	炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ4の場合)	213
义	3.3.43	燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 4 の場合)	215
义	3.3.44	シナリオ4に基づき4評価視点を重み付けした結果(全ケース)	216
义	3.3.45	シナリオ4に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)	217
义	3.3.46	シナリオ4に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)-	218
义	3.4.1	他電源比較の評価視点	221
义	3.4.2	経済性の評価構造	223
义	3.4.3	資源供給性の評価構造	225
义	3.4.4	環境影響低減性の評価構造	226
义	3.4.5	社会不安定影響性の評価構造	227
义	3.4.6	導入性の評価構造	228
义	3.4.7	心理的バイアス低減性の評価構造	229
义	3.4.8	電力以外発生資源の評価構造	229
义	3.4.9	LNG の CIF 価格	239
义	3.4.10	天然ガス価格見通し	239
义	3.4.11	日本の原油、LNG、一般炭輸入価格の推移	241
义	3.4.12	LNG の CIF 価格推移	242
义	3.4.13	発電以外消費割合の推移(原油、天然ガス、石炭、ウラン)	244
义	3.4.14	世界の需給バランスから見たリスクの比較	245

义	3.4.15	ライフサイクル CO2 排出量(g - CO2 / kWh)	248
义	3.4.16	石炭価格の見通し	249
义	3.4.17	太陽光発電システム設置費用の習熟効果曲線	258
义	3.4.18	LNG 火力発電の必要資源賦存性	261
义	3.4.19	木〈ず産業廃棄物燃焼施設の規模別件数	263
义	3.4.20	木 〈ず処理施設の建設単価と処理規模の関係	263
义	3.4.21	産業廃棄物中間処理受け入れ単価	264
义	3.4.22	最終処分単価平均值	264
义	3.4.23	評価視点を重み付けしないときの評価結果(大規模電源間の比較)	271
义	3.4.24	評価視点を重み付けしないときの評価結果(小規模電源)	272
义	3.4.25	シナリオごとの総合評価結果概要(大規模電源)	273
义	3.4.26	シナリオごとの総合評価結果(大規模電源)	274
义	3.4.27	シナリオごとの総合評価結果概要(小規模電源)	275
义	3.4.28	シナリオごとの総合評価結果(小規模電源)	276
义	4.1.1	将来想定される原子力利用の選択肢	284
义	4.1.2	原子力発電設備容量とリプレース計画の想定条件	285
义	4.1.3	世界の原子力発電累積電力量に占める日本の割合	286
义	4.1.4	原子力利用オプション の計算結果	289
义	4.1.5	原子力利用オプション の計算結果	290
义	4.1.6	原子力利用オプション の計算結果	291
义	4.1.7	原子力利用オプション の計算結果	291
义	4.1.8	原子力利用オプション の計算結果	292
义	4.1.9	原子力利用オプション の計算結果	293
义	4.2.1	原子力を LNG 火力で代替した場合の一次エネルギー自給率	295
义	4.2.2	原子力を LNG 火力で代替した場合の CO2 排出量	296
义	4.2.3	原子力利用を促進した場合の一次エネルギー構成	298
义	4.2.4	原子力利用を促進した場合の CO2 排出量	298
义	4.3.1	国内全体の原子力発電設備容量の想定条件	303
义	4.3.2	コロケーション型 FBR サイクルの原子力発電設備容量	307
义	4.3.3	原子炉リプレースの模式図	307
义	4.3.4	世界の原子力発電設備容量	309
义	4.4.1	環境負荷低減シナリオ解析結果(基準ケース:MA添加率上限3%)	321
义	4.4.2	環境負荷低減シナリオ解析結果(低位ケース:MA 添加率上限1%、高位	
		ケース: MA 添加率上限5%)	322
义	4.4.3	環境負荷低減シナリオにおける Sr とCs の保管・処分量ならびに LLFP 核	
		変換サイクルの代表結果	323
义	4.4.4	ウラン資源節約シナリオの標準ケースにおける FBR 導入量	324
义	4.4.5	ウラン資源節約シナリオの標準ケースにおける天然ウラン累積需要量	325

JNC TN9400 2004-052

义	4.4.6	ウラン資源節約シナリオの需要増大ケースにおける FBR 導入量と天然ウラ ン累積零要量	326
义	4.4.7	ウラン資源節約シナリオの需要節約ケースの感度解析例(ナトリウム冷却	020
汊	4.4.8	MOX 炉サイクル)	327
		属炉サイクル)	328
义	4.4.9	ウラン資源節約シナリオの需要節約ケースの感度解析例(鉛 - ビスマス冷 却窒化物炉サイクル)	329
义	4.4.10	ウラン資源節約シナリオの需要節約ケースの感度解析例(ヘリウム冷却窒	
		化物炉サイクル)	330
义	4.4.11	ウラン資源節約シナリオの需要節約ケースの感度解析例(水冷却 MOX 炉	001
জ	1 1 19	リ17ル)	331
Ы	4.4.12		332
汊	4.4.13	経済(株) (1000 (1000)) 経済性シナリオにおける FBR 導入量と使用済燃料再処理量	333
_ 汊	4.4.14	経済性シナリオにおける FBR 導入量と必要再処理量の相対比較	334
义	4.4.15	需要順応シナリオの基準ケースにおける原子力設備構成と天然ウラン累積	
		需要量	335
义	4.4.16	需要順応シナリオの拡大ケースにおける原子力設備構成と天然ウラン累積	
		需要量(水冷却炉を除く)	336
义	4.4.17	需要順応シナリオの低成長ケースにおける原子力設備構成と天然ウラン累	
		積需要	337
义	4.4.18	コロケーションサイクルの国内導入解析例(大規模サイト)	340
义	4.4.19	コロケーションサイクルの国内導入解析例(小規模サイト)	341
义	4.4.20	モデル化した大規模サイトと小規模サイトにおける発電プラントの運転開始	
		計画	342
义	4.4.21	小規模サイトにおける運転開始計画変更後の解析結果	343
义	4.4.22	世界全体を対象とした FBR サイクル導入の解析例	345
义	5.1.1	システム変更による FBR 導入時の天然ウラン価格の違い	348
义	5.3.1	FBR サイクル実用化候補概念の導入量推移	351
义	5.3.2	FBR サイクル実用化候補概念の発電コスト	352
义	5.4.1	年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益指数	359
义	5.4.2	年間 500 億円投資 LWR100%代替の利益指数	361
义	5.4.3	ロードマップ上の開発資金 LWR70% · LNG20% · 石炭 10%代替の利益指数 -	363
义	5.4.4	ロードマップ上の開発資金 LWR100%代替の利益指数	365
义	5.4.5	割引率 2%年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利	
		益指数	367

义	5.4.6	割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の	
		利益指数	369
义	5.4.7	リファレンスケースの投資対効果評価(時系列)	371
义	5.4.8	ケース1の感度解析結果	372
义	5.4.9	リファレンス(2030 年導入,500 億円/年,LWR70%・LNG20%・石炭 10%	
		代替)	373
义	5.4.10	年間 300 億円投資	373
义	5.4.11	LWR100%	373
义	5.4.12	環境プレミアム 3%	374
义	5.4.13	燃料価格上昇なし	374
义	5.4.14	2050年導入開始	374
义	5.4.15	割引率 2%	375
义	5.4.16	割引率1%	375

### 付録 図目次

付図	1.1.1	諸量評価ツール計算式の流れ(改良前)	- 付-1(7)
付図	1.2.1	諸量評価ツール計算式の流れ(改良後)	- 付-1(10)
付図	2.1.1	FAMILY-EX4.8 の入力用ワークシート"入力条件"	- 付-2(4)
付図	2.1.2	FAMILY-EX4.8の出力用ワークシート"計算結果"	- 付-2(5)
付図	2.1.3	LLFP 分離変換サイクル全体概念図	- 付-2(7)
付図	2.1.4	FAMILY-EX(LLFP)の概要	- 付-2(8)
付図	2.1.5	LLFP 炉と FBR-4(低増殖型 FBR)の同期処理方法	- 付-2(12)
付図	2.1.6	FAMILY-EX(LLFP)による試計算例1(既存機能の出力例)	- 付-2(16)
付図	2.1.7	FAMILY-EX(LLFP)による試計算例2(FP 評価機能の出力例)	- 付-2(17)
付図	2.1.8	FAMILY-EX(LLFP)による試計算例3	
		(LLFP サイクルのシステム情報)	- 付-2(18)
付図	2.2.1	再処理施設の MA 回収工程と物量フローの概念	- 付-2(22)
付図	2.2.2	炉心特性データ変更機能のアルゴリズム	- 付-2(23)
付図	2.2.3	FBR 再処理施設容量調整機能の概要	- 付-2(24)
付図	2.2.4	FBR 再処理施設容量調整機能の処理フロー	- 付-2(25)
付図	2.2.5	原子力発電設備容量の比較図	- 付-2(26)
付図	2.2.6	天然ウラン累積需要の比較図	- 付-2(27)
付図	2.2.7	燃料加工量の比較図	- 付-2(28)
付図	2.2.8	使用済燃料貯蔵量の比較図	- 付-2(29)
付図	2.2.9	使用済燃料再処理量の比較図	- 付-2(29)
付図	2.2.10	◎ 核分裂性プルトニウム貯蔵量の比較図	- 付-2(31)
付図	3.3.1	原子力発電設備容量の検討フロー	- 付-3(2)
付図	3.3.2	火力発電と原子力発電の発電効率	- 付-3(4)
付図	3.3.3	一次エネルギー換算用発電効率の違いによる影響	- 付-3(4)
付図	3.3.4	OECD 主要国の電力化率の推移	- 付-3(6)
付図	3.3.5	OECD 主要国における人口一人当りの年間電力需要量の推移	- 付-3(7)
付図	3.3.6	電力化率の実績と外部機関の予測例および想定条件	- 付-3(7)
付図	3.3.7	水力発電の実績と外部機関の予測例および想定条件	- 付-3(8)
付図	3.3.8	太陽光発電の導入実績と外部機関の予測例および想定条件	- 付-3(11)
付図	3.3.9	風力発電の導入実績と外部機関の予測例および想定条件	- 付-3(12)
付図	3.3.10	・地熱発電の導入実績と外部機関の予測例および想定条件	- 付-3(13)
付図	3.3.11	黒液・廃材等の導入実績と想定条件	- 付-3(14)
付図	3.3.12	- 一般廃棄物発電の導入実績と想定条件	- 付-3(16)
付図	3.3.13	国内換算方式による一次エネルギー投入割合	- 付-3(17)
付図	3.3.14	IEA 換算方式に準じた一次エネルギー投入割合	- 付-3(17)
付図	3.3.15	製造業における事業所当りの年間平均電力需要量	- 付-3(19)

付図	3.3.16	電力多消費産業の電力需要構成	付-3(19)
付図	3.3.17	電力寡消費産業の電力需要構成	付-3(20)
付図	3.3.18	産業用コージェネレーションの導入状況	付-3(20)
付図	3.3.19	民生用コージェネレーションの導入状況	付-3(21)
付図	3.3.20	一般電気事業者の CO2 排出実績とCO2 排出抑制目標の	
		想定条件	付-3(22)
付図	3.3.21	商業用火力と原子力の平均発電効率の想定条件	付-3(23)
付図	3.3.22	フェーズ 、フェーズ で用いた通常火力の CO2 原単位	付-3(24)
付図	3.3.23	フェーズ で用いた CO2 回収火力の CO2 原単位との比較	付-3(24)
付図	3.3.24	火力発電の燃料別発電割合に関する想定条件の代表例	付-3(25)
付図	3.4.1	CO2排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(解析1)	付-3(30)
付図	3.4.2	CO2排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(解析1:制限目標を変えた事例)	付-3(31)
付図	3.4.3	CO2排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(解析2)	付-3(32)
付図	3.4.4	CO2 排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(解析3)	付-3(33)
付図	3.4.5	CO2排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(水素製造による解析3の可能性)	付-3(34)
付図	3.4.6	CO2排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果	
		(解析4)	付-3(35)
付図	3.5.1	発電設備容量の計算結果と既往研究例	付-3(36)
付図	3.5.2	各種解析パラメータの見直しによる原子力発電設備容量への影響-	付-3(37)
付図	3.6.1	想定条件として単純化したフェーズ とフェーズ の	
		各将来予測值	付-3(38)
付図	4.1.1	経済的価値の種類	付-4(3)
付図	4.2.1	影響経路の分析	付-4(12)
付図	4.2.2	大気汚染物質の影響経路	付-4(13)

略語一覧

略語	英文表記	説明
A BWR	Advanced Boiling Water	改良型沸騰水型原子炉
	Reactor	
A PWR	Advanced Pressurized	改良型加圧水型原子炉
	Water Reactor	
AHP	Analytical Hierarchical	階層分析法
	Process	
BWR	<b>Boiling Water Reactor</b>	沸騰水型原子炉
CANDU	CANadian Deuterium	カナダが独自開発した発電用重
	Uranium	水炉(PHWR:Pressurized
		Heavy Water Reactor 加圧重水
		炉 )
CIF	cost, insurance and freight	運賃保険料込み(価格)
CITATION	CITATION	汎用拡散計算炉心解析コード
CVM	Contingent Valuation	仮想市場評価法。アンケートに
	Method	より WTA や WTP を直接あるい
		は間接的に質問することによっ
		て貨幣的評価を行う外部性評価
		手法
ECU	European Currency Unit	欧州全体の通貨バスケットによ
		る通貨単位で、EUROの前身
ExternE	External Costs of Energy	欧州委員会が行った各種電源の
		発電サイクルコストについての
FAMILY	FAMILY	核燃料サイクル諸重解析コート
FBR	Fast Breeder Reactor	尚迟瑁殂炉
FP CEN IV	Fission Product	核ガ殺生成初
GENIV	Generation IV	弗 4 世代(原ナノンステム)
IAEA	International Atomic	<b>                                    </b>
	Energy Agency	「「「「「「」」」」」「「」」」」 「「」」 「「」」 「」」 「」」 「」
IEA	A gameric	国際エネルキー機関(UECD)
	Agency	ガラル海会発電
IGUU	Combined Cycle	リス化酸ロ光电
ΠΛΩΛ	International Institute for	国際広田シュテム解析研究所
ПАЗА	Applied Systems Applysis	国际応用システム解析研究所
INECE	International Nuclear Fuel	国際核燃料サイクル評価
INFCE	Cycle Evaluation	
IPCC	Intergovernmental Panel	気候恋動に関する政府問パネル
II CC	on Climate Change	
LLFP	Long-Lived Fission	長寿命核分裂生成物
	Products	
LWR	Light Water Reactor	
MA	Minor Actinides	マイナーアクチニド
MAUA	Multi Attribute Utility	<u>、;;;;;;;</u> 多属性効用分析法
	Analysis	
	1 <i>j ~ -~</i>	

略語	英文表記	説 明
МОТ	Management of Technology	技術戦略
MOX	Mixed Oxide	混合酸化物
NEA	Nuclear Energy Agency	原子力機関(OECD)
NEDO	New Energy and Industrial	新エネルギー・産業技術総合開
	Technology Development	発機構
	Organization	
NOx	nitrogen oxide	一酸化窒素 (NO)・二酸化窒素
		(NO2)など窒素酸化物の総称
OECD	Organization for Economic	経済協力開発機構
	Co-operation and	
	Development	
ORIGEN	ORIGEN	核種生成崩壊計算コード
$PM_{10}$	Particle Matter 10	10 ミクロン以下の浮遊粒子状
		物質
ppb	particle per billion	濃度の単位。 10 億分の 1
PWR	Pressurized Water Reactor	加圧水型原子炉
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体酸化物形燃料電池
SOx	sulfur oxide	一酸化硫黄(SO)・二酸化硫黄
		(SO2)など硫黄酸化物の総称
SRES	Special Report on	排出シナリオに関する特別報告
	Emission Scenario	書
toe	ton oil equivalent	石油換算トン
		(1toe=107kcalIT)
TOPS	Technological	世界の民間原子力発電システム
	Opportunities To Increase	の核拡散批抗性強化のための技
	The Proliferation	術的な機会
	Resistance of Global	
	Civilian Nuclear Power	
VOL	Systems	
VSL	Value of Statistical Life	厄陝職美の員金やマーケット調
		宜に基づいて昇正されに統計的
		生命1  11     世界ティルギーム詳
WEC	World Energy Council	世界上イルキー会議
WIA	Willingness to Accept	谷認息忠額。人々かのる物を失う
		つことに刈して要水りる取小金
WTD		祖    士打会田苑   しんがちて物た得
WIP	willingness to Pay	又払息忠祖。人々かめる初を待
		るにのに又払のつくりる取人玉   菇
wt %	w/t %	<sup></sup>
WU./0	WU./O	圭里八一ビノト

#### 1. はじめに

1999年7月に開始した高速増殖炉(以下FBRと表記)サイクル実用化戦略調査研究 (FS)では、2001年3月までのフェーズ において多様な炉型(冷却材としてナト リウム、鉛-ビスマス、ガス、水など) 燃料形態(酸化物、窒化物、金属など) 再 処理方法(湿式法、乾式法など) 燃料製造方法(ペレット法、振動充填法、鋳造法 など)について幅広い検討を行い、各候補概念の特徴を把握した。

その後、2001 年 4 月から 5 ヵ年計画で始まったフェーズ においては、フェーズ の結果を受けて原子炉と燃料サイクルの整合性を考慮して、数多くの FBR サイク ル候補概念を対象に総合評価(多面的評価、FBR サイクル導入シナリオ評価、およ び投資対効果評価などの各特性評価から構成)を行い、2005 年度には幾つかの有望 な FBR サイクル概念を抽出することになっている。2003 年度は、フェーズ の中 間報告として、22 ケースの FBR サイクル候補概念を対象に特性評価を実施した。

本報告書は、フェーズの中間報告(2001年度から2003年度の3ヶ年を対象) における、FBR サイクル候補概念の多面的評価、導入シナリオ評価および投資対効 果評価に関する手法の開発およびその評価結果について報告するものである。

多面的評価については、フェーズ で開発した安全性、経済性、環境負荷低減性、 資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性の各視点に加え、新たに社会的受容 性の観点について指標の構造および評価方法を開発した。フェーズ で開発した 6 指標についても、評価構造の改良や定量評価に向けた効用関数の整備に取り組んだ。 以上、合計7つの視点から多面的評価を行い、FBR サイクル候補概念の特性を明ら かにした。また、今回初めてFBR と他電源との間で定量的な多面的評価も試みた。

FBR 導入シナリオ評価については、22 ケースの候補概念の中から代表的な概念を 取り上げ、軽水炉ワンススルーやプルサーマルシナリオとの比較も含めて FBR 導入 の必要性をサイクル諸量の観点から明らかにした。

投資対効果評価については、投資額に関して従来の「過去の実績を踏まえた研究 開発費用」のケースに加えて、「ロードマップ上で評価された研究開発費用」のケー スを採用した評価を試みている。

本報告書の第2章では各評価手法の内容を紹介する。第3章では多面的評価および投資対効果評価に関する結果についてとりまとめ、第4章では導入シナリオ評価の結果をとりまとめた。

#### 2. 評価手法について

実用化戦略調査研究においては、有望な FBR サイクル候補概念を明確にし、FBR 研究開発計画の策定を行うこととしている。フェーズ では、各 FBR サイクル候 補概念の特性評価を把握する観点から「多面的評価」を、FBR サイクルを実際に導 入した場合の特性、効果を把握する観点から「FBR サイクル導入シナリオ評価」お よび「投資対効果評価」の合計 3 つの評価手法を取り入れて総合評価を進めた。フェーズ 中間報告においても、これら 3 つの評価手法を基本とすることに変わりは ないが、さらに FBR サイクルと他電源(軽水炉や火力など)の多面的な比較・評価についても新たに実施することとした。

#### 2.1 評価の流れ

実用化戦略調査研究フェーズ の検討全体の流れを図 2.1.1 に、その中の総合評価の流れを図 2.1.2 に示す。

わが国の数十年後のエネルギー需給を取り巻く社会環境を考慮して、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、および核拡散抵抗性の5つの観点について、開発目標ならびに具体的な設計要求を設定する。次に、システム設計研究と要素技術開発研究を通して、原子炉プラントシステムと燃料サイクルシステムについてシステム候補技術を抽出し、個々の候補技術を対象に技術的総括(5つの観点からの設計要求に対する達成度の評価および運転・保守補修性や技術的実現性の評価)を実施する。

総合評価は、これら原子炉プラントシステムと燃料サイクルシステムについて抽 出した個々の候補技術を組み合わせて構築した代表的な22ケースの「FBRサイク ル候補概念」(3.1節参照)を対象に、多面的評価、FBR導入シナリオ評価、投資対 効果評価の3つの評価を実施する。

多面的評価では、FBR サイクル候補概念を対象に、上記5つの観点に技術的実現 性と社会的受容性の2つを加えた合計7つの視点から開発目標に対する達成度評価 を行い、実用化候補概念の特徴を明確にする。各視点は、 基準達成型評価の安全 性、 定量評価の経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、および 専門家の判 断と定量評価を組み合わせた核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性の大きく 3種類に分類され、各々最高4次までの下位指標(階層構造)を有する。定量評価 においては、効用関数を用いて最下層の指標を0~1.0の効用値に変換し適当な重み 付けを経て、比較評価する。

FBR サイクル導入シナリオ評価(サイクル諸量評価)では、代表的な FBR サイ クル候補概念を対象に、実用化後 100~200 年程度にわたって FBR およびサイクル 施設の導入戦略を構築し、天然ウラン累積需要量、使用済燃料貯蔵量などのサイク ル諸量上の特徴を把握することにより、将来社会ニーズに対する適合性を明確にす る。さらに、軽水炉シナリオとの比較や水素製造シナリオの導入も考慮するなど、 幅広い評価を実施する。

投資対効果評価は、多面的評価およびFBR サイクル導入シナリオ評価とともに、 FBR サイクル導入効果を把握する側面の一つとして実施し、総合評価の一翼を担う。 FBR サイクルよりもたらされる効果を様々な角度から経済的価値に換算し、研究開 発費との比較により投資対効果を評価するシステムを用いて、FBR サイクル候補概 念について投資対効果評価を実施する。

上記3種類の評価は、主に22 ケースの FBR サイクル候補概念間の比較が中心で あるが、さらに、他電源と比較して FBR サイクルの電源としての特徴を把握する ために、代表的な FBR サイクル候補概念と軽水炉ワンススルーや火力発電などの 各種電源との多面的な比較評価を実施する。評価は、FBR サイクル候補概念間の多 面的評価とほぼ同様の手法を用い、経済性、資源供給性、環境影響低減性、社会不 安定影響性、導入性、心理的バイアス低減性、電力以外発生資源の7つの視点から 行う。

以上、各システム候補技術を対象とした技術総括の結果および FBR サイクル候 補概念を対象とした総合評価の結果を踏まえて、有望なサイクル候補概念を明確に し、今後の FBR サイクルの研究開発計画の策定に資する。



図 2.1.1 有望な FBR サイクル概念明確化の検討フロー



図 2.1.2 総合評価の検討の流れ

2.2 多面的評価手法

実用化戦略調査研究では、研究開発計画を策定するために FBR サイクル候補概念 の特性を明確化することを目指している。このとき、FBR サイクルの総合的な性能を 定量的に検討することが求められており、それぞれの候補概念の技術的総括と併せて 多面的評価を活用して社会的ニーズへの適合性を評価することとしている。実用化戦 略調査研究では、フェーズ 開始時から複数の評価視点から FBR サイクルの候補概 念を評価することを目指して、多面的評価手法の開発を進めてきた<sup>[1][2]</sup>。

フェーズ 中間評価では、従来検討されてきた評価視点に加えて、社会的受容性を 新規の評価視点として取り上げて7つの評価視点について検討を実施した。また、そ の他の6評価視点についても、評価構造の検討・策定、効用関数の検討等を行い、FBR サイクル候補概念を7評価視点から評価することとした<sup>[3][4][5][6][7]</sup>。

2.2.1 評価視点と効用値について

FBR サイクルシステムの総合的な性能を定量的に検討するためには、様々な視点 から特徴を把握・評価することが重要である。フェーズ では、将来実用化すべき 概念の選定に資することを目的に、FBR サイクル候補概念間の比較評価、および他 の電源間も含めた比較評価を視野に入れて、以下の7つの評価視点を選定した。2.2.3 項以降、各視点の評価構造について検討を進めるが、評価指標全体を図 2.2.1 に示 す。これらは、FBR サイクルシステムの現状や課題、魅力に関するフェーズ 以来 の分析を反映したものであり、安全性から核拡散抵抗性までの5つの視点について は、視点に対応した開発目標と設計要求が設定されている。なお、社会的受容性に ついては、フェーズ において新たに選定された評価視点である。

- (1) 安全性
- (2) 経済性
- (3) 環境負荷低減性
- (4) 資源有効利用性
- (5) 核拡散抵抗性
- (6) 技術的実現性
- (7) 社会的受容性



図 2.2.1 FBR サイクル候補概念の評価指標

安全性については、あらゆるエネルギー供給システムにおいて確保することが求 められる要素であるが、特に潜在的に危険な放射性物質を大量に取り扱う原子力エ ネルギーシステムに関しては、安全性に関する論議も盛んであり、安全性を確保す ることが導入の前提条件であると考えられる。経済性については、エネルギーシス テム導入にあたって重要視される視点である。FBR サイクルの現状の性能とエネル ギー自由化など電気事業者を取り巻く状況を考慮すれば、経済性向上の追求は、さ らに重要になってくる。環境負荷低減性については、エネルギーの大量生産、大量 消費に起因する地域および地球的規模の環境問題に大きな社会的関心が集まってい ることを踏まえると、今後ますます重要となる視点である。資源有効利用性につい ては、わが国において、FBR サイクルがウラン資源制約からの解放のために検討さ れてきたものであり、経済的に利用可能なエネルギー資源に恵まれないわが国にと ってはもちろんのこと、世界的に見ても人類の持続的発展には必要な視点である。 核拡散抵抗性は、原子力特有の課題と言うことができるが、FBR サイクルシステム が、平和利用目的のみに用いられるように配慮することは重要である。技術的実現 性については、FBR サイクルの実用化への研究開発を実施していく場合には重要な 視点である。潜在的性能の優れた FBR サイクルシステムであっても、研究開発に極 めて膨大な時間や資金を要する場合や成功する可能性が非常に低いシステムは、戦 略的には不適切である。社会的受容性については、近年、重要視されている視点で ある。FBR サイクルの実用化が大規模な研究開発を伴い、国民からの税金等も投入 されること、また国民全体の生活にも影響を与えることから、FBR サイクルの開発 については、国民をはじめとする関係者の受容が必要となる。

これら各視点によって把握されるシステムの特徴は、本来、相互に影響しあって おり、また、実際の設計作業も、各評価視点のトレードオフなどについて勘案しな がら実施している。したがって、理想的には、視点間の相関を考慮した評価手法を 開発することが望ましいと考えられるが、フェーズ 中間取りまとめにおいては、 各視点をそれぞれ独立なものと取り扱うこととした。これは、おおまかにシステム を取り扱う際には、費用対効果の面から考えて適切であると考えられる。

FBR サイクル候補概念の多面的評価にあたっては、図 2.2.1 に示した経済性、環 境負荷低減性などの7つの評価視点について達成度(あるいは設計目標に対する適 合度)をできるだけ定量的に評価することとした。このために、それらを多属性効 用分析法(Multi-Attribute Utility Analysis:MAUA)および階層分析法(Analytic Hierarcy Process:AHP)を活用して評価する多面的評価手法を開発した<sup>[8][9][10]</sup>。具 体的には、以下の手順を踏んで達成度を算出する。

- (1)各評価視点を構成する属性に分解し、最終的には物理量や個別の判断項目 を最下層として階層的に組み立てられるように評価構造(数次程度)を作 成する。
- (2)上位指標に対して、そのすぐ下のレベルに位置する指標の重みを総和が1 になるように設定する。
- (3) 効用分析による定量化手法(効用関数を設定)や定性的な分析により最下 位指標の効用値を求める
- (4)下位指標の効用値から上位指標の効用値を計算する。階層構造にしたがっ てこの作業を繰り返して、最上位(評価視点)の効用値を計算する。
- (5) 各評価視点の重み付けを行い、総合的な効用値を算出して、達成度とする。

中間とりまとめで用いた多面的評価手法では、階層分析法は評価にあたって要と なる評価視点間の重み付けの設定に用いており、効用値の合成に関しては多属性効 用分析法の考え方を採用している。また、下位指標の重み付けについては、工学的 な判断により設定できる場合には、暫定的に設定して評価を進めた。この点は、最 終取りまとめに向けて検討されるべき点である。多面的評価手法の流れを図 2.2.2 に示す。



図 2.2.2 多面的評価の流れ

ここで、定量評価が可能な指標(発電原価、天然ウラン利用効率、単位発電量当 たりの放射性廃棄物発生量・・等)に対する効用値は、設定した効用関数を用いて 規格化し、0から1までの数値で表す。すなわち努力目標値(=効用値が1.0のとき の属性値)、達成目標値(=効用値が0.5のときの属性値)および許容値(=効用値が0.0、 FBRサイクルの導入意義がなくなる属性値)の3点で定義される指数関数(効用関数) を用いて効用値を算出している。定量評価が可能な指標についての効用関数の設定 例を図 2.2.3 に示す。なお、効用関数は、対象となる物理量等と効用(達成度、目 標への適合による満足度等)の関係をより適切に表現するため、最終取りまとめに 向けて検討を継続する予定である。



一方、定量評価が困難な指標(核拡散抵抗性の接近性、改造、社会的受容性の許認可容易性、理解容易度・・等)については、エキスパートジャッジメントによる 段階的な評価を行った。この場合、各段階に対して0~1で数値化した効用値を定め ておき、段階的な評価を効用値に換算して評価することとした。段階的(定性的) な評価を行なうときの効用関数の設定例を図 2.2.4 に示す。



図 2.2.4 効用関数の設定例(段階的評価の場合)

なお、安全性と核拡散抵抗性の1次指標(評価視点のすぐ下の指標)である制度 的核拡散抵抗性については基準達成型の評価を行うこととした。この場合、個別の 下位指標毎に合否判定を行い、全ての指標の評価結果が合格の場合は全体を合格と みなした。言い換えれば、下位指標のうちどれか一つでも不合格の場合は全体を不 合格とし、比較の対象から外すことになる。

2.2.2 FBR サイクルシステムについて

本項では、評価にあたってどのように FBR サイクルシステムを捉えるのかを説明 する。システムとは、「環境の中の特定のものや現象に焦点をあて、その部分だけを 外界から切り離して一つのまとまりと考える。そしてそのまとまりの内部の機能 を考え、それが環境と行う相互作用のうち、環境が に及ぼす影響を入力といい、

が環境に及ぼす影響を出力とみなす考え方である」と定義されており、その際、 そのまとまりや相互作用の一部ではなく、全体に関心が持たれる、とされている。 そうすることでシステムの持つ共通の性質を取り出し、共通の枠組みで捉えること が可能となる<sup>[11][12][13]</sup>。

従って、「FBR サイクル」を「システム」として評価する場合は、「内」と「外」 の区別を行い、全体を見渡しながら内外における相互作用について検討していく必 要がある(図 2.2.5 に FBR サイクルシステム内外における相互作用のイメージを示 す)。



図 2.2.5 FBR サイクルシステム内外における相互作用のイメージ

フェーズ 中間とりまとめ時の多面的評価にあたっては、現時点ではわが国におい て軽水炉システムが導入されているという状況を踏まえる必要がある。したがって、 FBR サイクルシステムとして、時間的には、軽水炉システムが中心である現状を出発 点として、将来 FBR サイクルが平衡に達するときの状態までを評価する必要がある が、今回は、主に平衡期の状態を対象に評価した。今後、フェーズ 後半からフェー ズ に向けて、選択された少数の FBR サイクルをより深く検討することが必要にな ってくるため、平衡期の評価に加えて開発期および移行期の評価が重要になる。

FBR サイクルシステムは、空間的には FBR サイクルの各施設を含むこととなる。 現在、設計が行われているのは、炉システムを構成する炉(プラント)および炉心燃料、燃料サイクルシステムを構成する再処理施設および加工施設である。総じてこれ らの個別のシステムに関しては、フェーズ を通じて設計が進捗してきた。他方で、 施設の立地形態(各施設のコロケーションや小型炉での僻地立地)や燃料等の輸送・ 廃棄物の処分など個別の施設を跨った FBR サイクル全体の最適化については、今後 さらに検討する課題が多い。相互作用としては、まず FBR サイクルシステムの内的 な相互作用として、施設間の取り合いがある。その際、設計している FBR サイクル 各施設を還流する燃料などの流れを把握することが重要である。

さらにシステム(全体)と外との相互作用の分析を通じて、システムとしての特性 を検討するための評価の視点が生まれてくる。特に環境負荷などを検討する場合には、 相互作用の分析にあたって、どこまでがシステム内であるのかについて明確にする必 要がある。2.2.3 では、各評価視点を評価するための手法について紹介する。

図 2.2.6 に開発期、移行期から平衡期までの FBR サイクルシステムと外部との相互 作用、さらに評価視点や評価指標との関係を示しておく。これらの相互作用が、評価 の視点および評価指標に反映されることとなる。2.2.1 で述べた各評価視点に即して 書くならば、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性の一部、核拡散抵抗 性、社会的受容性の一部については、平衡状態の FBR サイクルについて評価したと いえる。これに対して、資源有効利用性の一部、技術的実現性、社会的受容性の一部 については、現状から FBR サイクルが平衡に達するまでについて評価したものであ ると整理できる。

また、図 2.2.6 に平衡期における FBR サイクルのイメージを示す。移行期には、軽 水炉システムと密接な関係を保つ FBR サイクルシステムも、平衡期に到達すると単 純な様相に落ち着くことになる。このとき、核燃料のうち、FBR において核物質から エネルギーを取り出すために燃焼した部分が FP として FBR サイクルから環境(シス テム外)に廃棄され、逆に環境からは、廃棄された FP に相当する分が新たな燃料と して補充されればエネルギー供給を継続できる。他のエネルギーシステムと比較して、 物質の持つエネルギーを核分裂によって効率的に取り出す(化学変化を利用する場合 に比べて非常に効率が大きい)こと、また、潜在的にエネルギーを取り出せる物質で あるウラン 238 を有効利用できること(軽水炉ワンススルーなどとは異なる)が、FBR サイクルの魅力である。しかも、FBR であれば、自己リサイクルを基本とする比較的 単純な(付加的な燃料サイクル施設が少ない)エネルギー供給システムを大きな規模 で長期間実現できる点も長所である。

長寿命放射性核分裂生成物(Long-Lived Fission Products:LLFP)を分離・核変換し、発熱元素を分離・貯蔵するLLFPサイクルについては、他のFBRサイクルとは少々異なる複雑なシステムとなる。図2.2.7にそのイメージを示す。中間とりまとめ時の評価で採用したシステムでは、酸化物(MOX)燃料を用いている。主にアクチニドを含有するメインの燃料の流れとは別にI(化合物としてはCuI)とTc(Tc金属)を装荷するターゲット燃料のリサイクルが別々に行われ、また、CsとSrを貯蔵するために再処理から廃棄物処分までの廃棄物の流れが複線化していることが特徴である<sup>[14]</sup>。

以下では、こうした FBR サイクルシステム内外における物質収支の評価(諸量評価) や現金収支の評価を基にして、FBR サイクルシステムが持つ特性を評価する手法につ いて記述する。

なお、この報告書を通じ、物質収支の評価には、FBR サイクル平衡期の物質収支を 核種の燃焼や崩壊計算も含めて詳細に評価するツール(こちらが主に多面的評価では 用いられる)と、我が国全体の物質収支を時系列的に概略(一部簡易的な燃焼・崩壊 計算も含まれる)評価するツール(主に導入シナリオ検討で用いられ、多面的評価で は、資源有効利用性評価で用いられる)の両者があるので、留意されたい。主に多面 的評価に用いる、FBR 多重サイクルが平衡に達した時期の物質収支を、核種の燃焼や 崩壊計算も含めて詳細に評価するツールについては、付録1で詳述する。



図 2.2.6 各時期における FBR サイクルと外部との相互作用



図 2.2.7 平衡期の FBR サイクルのイメージ




2.2.3 各評価視点に関する検討

ここでは、安全性から社会的受容性までの7つの評価視点について順番に検討し た結果を述べる。安全性と核拡散抵抗性の一部の評価指標については、基準達成を 確認することによる合否判定を行なう。また、その他の評価指標については、定量 的に比較評価するために効用値を算出することとするが、定量的なデータから効用 関数を設定して評価する評価指標と、段階的(定性的)な判断を用いて評価する評 価指標とに大きく分かれる。

2.2.3.1 安全性に関する検討

安全性は、あらゆるエネルギーシステムに求められる視点であるが、特に原子力 は潜在的に危険な放射性物質を大量に扱うエネルギー源であるため、その安全性の 確保は重要な課題とされてきた。将来の原子力システムである FBR サイクルシステ ムを検討する際にも、安全性は大前提となる視点であるという点は変わらない。例 えば、設計を行なった結果、安全面で問題があると考えられたシステムは、他の性 能を犠牲にしても設計を変更して安全性の向上を図ることが通例である。

かかる事情を踏まえて、安全性については、評価基準を達成していることを確認 して合否判定を行なう。

図 2.2.9 が中間評価において設定した安全性の評価構造である。



図 2.2.9 安全性の評価構造

原子炉プラントシステムと燃料サイクルシステムの安全性に 2 分している点が大きな特徴である。

原子炉プラントシステムの安全性<sup>[15]</sup>においては、2次指標として設計基準事象に 関する安全性と設計基準事象を超える事象に関する安全性に分解される。

「設計基準事象に関する安全性」においては、「安全設計方針」において、安全設計方針が適切に立案されているのか確認する。「安全評価」では、安全設計の妥当性 を確認するための決定論的安全評価を行なう。中間評価では、予備的な評価として 事象当たりの被ばく線量当量が5mSvを超えないことなどを確認する。また、「設計 基準事象を超える事象に関する安全性」においては、大きく「炉心損傷防止」と「影 響緩和」に分解する。「炉心損傷防止」では、炉心損傷を防止するための方策につい て確認する。さらに、原子炉プラントシステムにおける異常事象に関する確率論的 安全評価も実施して、炉心損傷頻度が10<sup>-6</sup>/炉年を下回ることを目標とする。また、

「影響緩和」においては、炉心損傷が発生したとき、放射性物質の閉じ込め機能を 損なわないための方策について確認する。まず、「機械エネルギー発生防止」におい て、炉心が損傷して、さらに再臨界の状態になると大きなエネルギーが発生する可 能性が生じるが、機械エネルギーが発生しないようにするための方策(例えば、再 臨界を排除する方策)について確認する。さらに、「安定冷却と閉じ込め」において、 損傷した炉心の崩壊熱を除去し、格納機能を維持するための方策(例えば、炉容器 内における事象の終息を図る方策)について確認する。

燃料サイクルシステムの安全性<sup>[16]</sup>においては、「安全設計方針」と「安全評価」の 2 つの 2 次指標に大別する。「安全設計方針」では、安全設計方針が適切に立案され ているのか確認し、「安全評価」のうち、「設計基準事象に関する安全評価」におい て、安全設計の妥当性を確認すると共に「線量当量評価」を実施する。「線量当量評 価」は未だ予備的なものではあるが、代表的な異常事象を想定して評価を行い、事 象当たりの被ばく線量当量が 5mSv を超えないことを判断基準とする。もう一方の 「リスク評価」においては、一部システムに対して設計基準事象および設計基準事 象を超える事象の両者を対象とした確率論的安全評価を行なう。このときは人間の 死亡リスクを指標として、他のリスク(急性死亡に関しては、国内における不慮の 事故による死亡の年間発生確率値を小さい方に丸めた値である 10<sup>-4/</sup>(死・人・年) 晩発性死亡に関しては、国内における悪性新生物による死亡の年間発生確率値を小 さい側に丸めた値 10<sup>-3/</sup>(死・人・年))と比較して十分に低い(0.1%以下)ことを 目標とする。具体的には、急性死亡の発生頻度が 10<sup>-7/</sup>(人・年・サイト)を下回る こと、また、事象発生から 50 年間の放射線被ばくによる致死性ガンの発生頻度が 10<sup>-6/</sup>(人・年・サイト)を下回ることを目標としている。

安全性に関しては、全ての最下位指標で基準を満たすことが評価視点全体で合格 するための条件であるので、下位指標の重みを付けることはしない。

2.2.3.2 経済性に関する検討

資源、物資、労働などあらゆる資機材やサービスに価格が付けられている今日の 資本主義社会<sup>1</sup>を前提とするならば、経済性は、電力システムが効率的に電力を生産 しているのかを検討するための重要な視点である。経済性の向上は、電力自由化へ の動きが進展していることで、電力会社にとってますます重要性を増している課題 である。

<sup>1</sup> 経済外部性が存在する場合には、価格が適正に付けられないという問題が生じる。

発電については、価格と費用の問題がある。実際の売電価格は発電に要する費用 と別の要素、例えば他の発電方式や社会情勢に影響されることとなり、現時点で FBR サイクルシステムの特徴を判断する指標としては複雑すぎ、必ずしも適切でな いと考える。したがって、発電システムの経済性を検討するためには、費用すなわ ち発電原価が分かりやすい指標となる。このことは、電力自由化が進んで電力が普 通の商品に近づけば、さらに妥当なものとなる。それは、たとえ実際の売電価格が どうであろうと、原価が安い発電システムは価格競争に生き残る余力があることに なり、自由競争にさらされる電力会社にとって魅力的となるからである。

そこで、中間評価時における経済性評価に関しては、発電原価を唯一の1次指標 とする。したがって、その評価構造は図2.2.10のとおりである。発電原価は、単位 量の電力を発生するときに必要な費用(金額)を単位としている。



#### 図 2.2.10 経済性に関する評価構造

発電原価は資本費(減価償却費、廃止措置費など)運転維持費(人件費、修繕費、 業務分担費、事業税など)および燃料費(加工費、再処理費、輸送費、廃棄物処分 費など)からなる。発電に要する費用を年あたりで、関連(FBR サイクル)施設の 建設から廃止に至るまで算出した後、原子炉の運転開始時に現在価値換算し、同じ く運転開始年に現在価値換算した年の発電量で除して、上述したように単位発電量 (kWh)を生産するための原価(耐用年あるいは寿命期間平均発電原価)を算出する。

原子力発電の経済性については通産省(現経済産業省)総合エネルギー調査会(現総 合資源エネルギー調査会)原子力部会(以下原子力部会)において、平成11年12月 に現状最新軽水炉プラントを対象とした発電原価評価結果として、5.9円/kWhが報 告されている<sup>[17]</sup>。また、2004年1月には経済産業省総合エネルギー調査会電気事 業分科会コスト等検討小委員会において(以下コスト小委)、国内のバックエンド事 業全般にわたる収益に関する検討を反映した発電原価評価結果として、5.3円/kWh が報告されている<sup>[18]</sup>。これらは現状の軽水炉サイクルの経済性を示す典型例として 広く認識されており、今後原子力関連施設を導入する場合、上記報告と直接比較さ れることが予想される。 表 2.2.1 に経済性の達成基準を示す。以下の 3 点より効用関数を設定し、経済性 の視点での効用値とする。こうして算出した発電原価に関しては、以下のように効 用関数を設定して効用値を求める。

最も高い目標値である努力目標は、国際的な価格競争力を有する将来発電原価 とする。現在の発電事業において価格競争力が高いものの一つに、熱効率の向上が 著しい天然ガス火力が挙げられる。FBR サイクルの実用化時代に対応した天然ガス 火力の発電原価を予測しているデータはないが、将来の天然ガス価格は資源の消費 により上昇傾向であろうことが予想されるため、熱効率のさらなる向上を考慮して も現状の発電原価からの大幅な低下は想定し難い。そこで、努力目標として国際的 に最も低価格である現状の米国における天然ガス火力の発電原価予測(2.3~ 3.6¢/kWh)<sup>[19]</sup>の最小値を用いて 2.5 円/kWh (為替レート 108 円/\$)と設定する。

達成目標については、将来の国内 LWR に競合し得る発電原価として 4.0 円/kWh とする。なお、LWR の将来発電原価の試算値は、発電所建設単価の低減や設備利用率の向上、燃料の燃焼度向上を想定すると 4.0 円/kWh 程度となる<sup>[1]</sup>。

許容値については、LWR の発電原価の改善がなされず現状単価が続く場合を 想定し、5.3 円/kWh とする<sup>[18]</sup>。

努力目標	2.5 円/kWh	ここ 10 年の米国における天然ガス火力発電における発電原価の最安値(2.3¢/kWh)を現在の為替レ ート(108 円:2004 年3月)で換算した値(国際的な 競争力を確保)	
達成目標	4.0円/kWh	将来の軽水炉サイクルの発電原価予測4.0円/ に比肩する経済性の確保	
許容値	5.3円/kWh	現在の軽水炉サイクルの発電原価(5.3 円/kWh)以 上の経済性の確保	

表 2.2.1 経済性の評価基準

1999年の現行軽水炉 5.9円/kWh 試算を基にJNC において推定試算した将来軽 水炉の発電原価予測<sup>[1]</sup>を基にして

以上の考え方に基づいて設定した効用関数を図 2.2.11 に示す。わずかに上に凸の 関数となっている。



図 2.2.11 発電原価の効用関数

発電原価評価は原子力部会評価の手法に極力あわせ、コスト小委員会におけるバ ックエンド事業に関する検討結果を可能な限り反映することとした。発電原価は耐 用年平均の現在価値換算手法を適用し、減価償却費については定率法により算出す る<sup>[1]</sup>。また、廃止措置費用に関しては設計より得られた廃止措置時の廃棄物量を基 に、コスト小委員会の検討における廃止措置における廃棄物区分やサイクル単価等 の設定を極力利用して算出する。

表 2.2.2 に発電原価の計算方法および設定値を示す。また、表 2.2.3 に燃料費の 内訳と、対応する燃料サイクル単価の設定および計算手法を示す。資本費、運転維 持費、燃料費は原子炉運開年に現在価値換算し、割引率は原子力部会評価と同様の 3%とした。また、燃料費の算出にあたっては、各燃料バッチに着目し、燃料サイク ルステージごとの費用の発生時期を考慮して、燃料装荷時に割引率 3%で現在価値 換算する。また、各ステージにおける費用算出において用いる再処理単価および燃 料製造単価自身も、年間の支出を年間処理量で除した後、それぞれの施設の耐用年 平均単価として算出される。

#### (b)廃止措置費用の検討

フェーズ では廃止措置費用はプラント建設費の 20%と想定していたが、フェーズ では廃止時廃棄物量の設計データを基に費用を計上することとした。廃止措置 費用は解体撤去費用、解体廃棄物処理費用、処理後廃棄物輸送費用、処理後廃棄物 処分費用から構成され、それぞれの作業ステージにおける物量と単価から費用を算 出する。作業の特徴を考慮して解体撤去費用は廃棄物重量(トン)と対応する単価(円/ トン)より計上し、他の作業ステージでは廃棄物体積(m<sup>3</sup>)と対応する単価(円/ m<sup>3</sup>)よ り計上する。 FBR プラント設計においては、解体時の廃棄物量について、解体直後の廃棄物重量(トン)および想定した処理工程を経た後の廃棄物体積 (m<sup>3</sup>)について検討を行っている。評価に使用した廃棄物体積データ(m<sup>3</sup>)は、処理工程を経て、減容の効果を含んだ最終廃棄物処分体としての体積である。

解体撤去費用に関しては軽水炉を対象とした検討<sup>[20]</sup>を参考にした。解体撤去費用 計上方法は複数あり、1)個々の発電所に対してケーススタディ的に工事費用を積算 して計上する方法(個別積算法)、2)廃止措置に伴って発生する廃棄物の種類と物量か ら解体撤去費用を算定する方法(物量一次近似法)、3)発電所建設費に対する比率とし て廃止措置費用を算定する方法(建設費比率法)が主要な方法として考えられている。 2)および 3)は、ケーススタディの結果から得られる傾向を基に近似的に費用を算出 する方法である。本評価では 2)の物量一次近似法により費用を計上し、廃棄物種類 別の単価(円/トン)に関しては軽水炉における検討結果を流用した。今回、使用した 単価(円/トン)は解体廃棄物処理費用を含む。廃棄物輸送費用および処分費用に関し てはコスト小委において想定している単価(円/m<sup>3</sup>)を使用し費用を計上した。

再処理および燃料製造プラントの廃止措置費用は、設計データおよびコスト小委 の検討を参考に費用を計上した。コスト小委における検討では、解体時の廃棄物を 地層処分廃棄物、余裕深度処分廃棄物、浅地中コンクリートピット処分廃棄物、ク リアランスレベル以下の廃棄物、非放射性廃棄物に区分している。また、その検討 は六ヶ所再処理工場を対象としたケーススタディであり、工事費用を詳細に積算し て解体費用、処理費用を算出している。一方、六ヶ所再処理工場と実用化戦略調査 研究の再処理プラントについて、横軸に床面積、縦軸に廃棄物発生量をとって廃棄 物区分ごとの発生量を比較すると、同様の傾向を示す。このことから発生廃棄物の 類似性が強いと判断し、六ヶ所再処理工場における解体、処理費用と廃棄物発生量 から解体単価(円/トン)および処理単価(円/m<sup>3</sup>)を設定し、廃止措置費用算出に利用す ることとした。その際、費用は地層処分廃棄物、余裕深度処分廃棄物、浅地中コン クリートピット処分廃棄物の発生量に比例すると想定し、計上した。実用化戦略調 査研究では低除染 TRU サイクルを基本としており、燃料製造プラントにおいても セル内における遠隔操作処理を想定しているため、燃料製造プラントの廃止措置費 用を計上する際も再処理プラントと同様の方法で費用を計上した。

再処理および燃料製造プラント設計においては、解体時の廃棄物について、解体 直後の廃棄物重量(トン)について検討を実施しているが、処理方法や処分形態を考 慮した最終廃棄体の体積(m<sup>3</sup>)としての詳細評価には至っておらず、簡易的な想定 をした評価を行っているため、必要以上に廃止時の廃棄物体積を大きく見積もって いる。廃止措置費用を算出する際は、できるだけ実際の廃棄物処分形態を想定する ことが必要であるため、本評価ではコスト小委における重量と体積の関係を利用し て<sup>[21]</sup>、廃止時廃棄物重量データを最終処分体としての体積に換算した(地層処分廃棄 物、余裕深度処分廃棄物、浅地中コンクリートピット処分廃棄物)。

コスト小委における検討では、処分区分ごとに廃棄物の充填度合(kg/m<sup>3</sup>)が異なる。

また、処理が可能な廃棄物と処理不可能な廃棄物(処理設備自体を解体した際の廃棄物)別に充填度合(kg/m<sup>3</sup>)が異なる。一方実用化戦略調査研究では処分区分ごとの廃 棄物重量はあるものの、処理可能分と不可能分を区別していない。そこでコスト小 委における処理可能分の充填度合(kg/m<sup>3</sup>)と処理不可能分の充填度合(kg/m<sup>3</sup>)に対 して、それぞれの廃棄物の発生比率を考慮した加重平均値を求め、処分区分ごとの 重量と体積の換算係数を設定した。表 2.2.4 に使用した換算係数を示す。廃棄物輸 送費用および処分費用に関しては、換算した廃棄物体積データとコスト小委におい て想定している単価(円/m<sup>3</sup>)を使用し費用を計上した。なお、ここで換算した体積は ドラム缶換算の体積であり、さらに別容器に梱包することなどは想定しておらず、 費用もドラム缶換算した体積に比例してかかるものとして費用を計上した。

(c)評価の前提条件

経済性評価では、以下の前提の下に評価を実施した。

FBR プラントについて、耐用年数 60 年、償却期間 16 年とする。

サイクル施設について、耐用年数 40 年、償却期間は建屋 16 年、設備 9 年と する。

大型炉の場合 2 原子炉 2 タービンのツインプラントを基本とし、中型炉の場合 4 原子炉 2 タービンのモジュール炉構成のツインプラントとしており、初 号プラントとしてこれらツインプラントを建設する際の経済性を評価対象と する。

サイクル施設は再処理および燃料製造施設の一体化を基本としており、一体 化プラントを対象とした経済性を評価する。

廃止措置費用は設計により評価された廃止措置時廃棄物量を基に費用を計上 する。

- 高レベル廃棄物については、処分までに30年間貯蔵を想定する。
- 高レベル廃棄物以外の廃棄物について、再処理後即時処分を想定する。 割引率として 3%を採用した。

	I)	首日】	【内容】	【計算式】
	減価(	<u>;</u> ] 賞却費	定率法、償却期間16年、炉運転期間60年、残存価額割合10%。残存 価額に土地代は含まず。	[ n 年目の残存価額×減価償却率× (1+割引率 <sup>-n</sup> )]/  [En× (1+(割引率 <sup>-n</sup> )]
資本費	<b>聿</b>	₩2	残存価額に事業報酬率を乗じて算出。支払利息、社債発行差金、配当金、利益準備金等をカバーできるように報酬率を設定。平成9年の電気料金引き下げ時の算定根拠として4.4%を採用。	[ n 年目の残存価額×事業報酬率× (1+割引率 <sup>-n</sup> )]/        [En× (1+(割引率 <sup>-n</sup> )]
	固定	資産税	残存価額に固定資産税率を乗じて算出。固定資産税率1.4%。	[ n 年目の残存価額×固定資産税率×(1+割引率 <sup>- n)</sup> ]/ [En×(1+(割引率 <sup>- n</sup> )]
	廃止3	甘置費	原子炉解体費、解体廃棄物処理費、輸送費、処分費。プラント設計 より算出された解体廃棄物量を基に総費用を算出し、費用は運転期 間中に一定額ずつ積み立てる。積立利率3%。	[(解体+処理+輸送+処分費用) ×利率/(1+利率 <sup>(稍立期間)</sup> -1)]/[E]
	人件]	#cm/	運転役務要員や清掃作業員は委託費に含まれる。要員数は設計により求められ、900万円/人/年(厚生労働省発表の電気・ガス事業の全年齢平均賃金に、福利厚生などの諸経費を約2割見込んだ値)で算出。	[要員数×人件費単価]/E
	修繕	#tur.	固定資産を維持し、満足に稼動させるための修繕に要する費用。固 定資産の価額を増すことなく、当該事業年度に費用として計上され るもの。修繕費はプラント設計により算出される。施設の更新は本 来減価償却費として計上されるべきであるが、本評価では年割りに し修繕費として計上。	[建設費×修繕費率]/E
直接	驙	消耗品費	潤滑油脂費、作業服、什器用品費、事業用品、水道 費、光熱費など。	
運転		廃棄物処理費	建設費に対す 燃料サイクル施設では別途独立に計上する。	
維持費	世 行	補償費	る比率として「契約、協定、覚書等に基づいて定期的または臨時的」 計上。	1、1、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4、4
	即间	委託費 たど	エヤmagth 山区町電線下間圓は圓面沿し、漁業間圓で2ムの小価にしたがっ」没補償は建設費に含む。	【建訳質×品資≄】/E
		ゆし(賃借料	(1.5%/牛乙   + )	
		<u> </u>	した。。 設備の連転委託、点検委託、その他雑委託費用。 加速な降、 運転促降、 店之力財産促降等	
		<u> </u>	人女医院、建築医院、応丁7月81年医院守。 通信運搬費、旅費、雑費等。	
		分担費	一般管理費(本社関連費用)。平成10年度の9電力の実績を基に、全 電源の直接費に対する比率で計上し、39.2%を想定。	[(人件費+修繕費+諸費)×業務分担費率]/E
<u> </u>	事業	税	事業税以外の経費に対する比率で計上。税率1.3%。	(資本費+事業税以外の運転費+燃料費)×事業税率/(1-事業税率)
燃料費			燃料加工賃、新燃料輸送費、使用済燃料輸送費、再処理費、廃棄物 輸送・処理・貯蔵・処分費。それぞれの単価に燃料所要量、廃棄物 所要量を乗じて算出。さらに費用の支払い時期と燃料装荷時との リードラグタイムを考慮して価値換算を行う。	[燃料及び廃棄物所要量×単価×(1+割引率 <sup>-(リードラグタイム+炉内滞在期間)</sup> )]/ [m サイクル目の送電端発電量×(1+(割引率) <sup>-(mサイクル目の経過年)</sup> )]
E:年間送霍 En:n年目( )参考文献	[端発電量 の送電端 <sup>3</sup> 就[22]	:(KWh)	×24h×365日×設備利用率(%)×{1-所内負荷率(%)}) ⊦割引率"))	

-22-

表 2.2.2 発電原価の内訳、計算条件、計算方法

【燃料費内訳】	【燃料サイクル単	面】	【リードラグタイム】 燃料装荷時との差		【内容】
新燃料輸送費	新燃料輸送単価	o下日 // shw	0.5年	低除染サイクルであること	<b>ニを考慮し、新燃料および使用済燃料輸送単</b>
使用済燃料輸送費	使用済燃料輸送単価		炉内滞在時間+1年	価は軽水炉使用済燃料輸這	送単価と同等の2万円 / kgHMとした。
庅	高レベル廃棄物貯蔵単価	【内容】参照	/   炉内滞在時間+20年		⊏貯蔵単価(万円/m3)を設定。
焼폯彻肛颩頁	その他廃棄物貯蔵単価	【内容】参照	-	処理後即時処分を想定する	5°
	高レベル廃棄物輸送単価	230万円/本	炉内滞在時間+35年		
书 가 아무 분	TRU深地層処分並廃棄物輸送単価	600万円/m <sup>3</sup>		コスト小委員会資料による	5。中間貯蔵施設または再処理施設から処分
兇栗彻쀄达貨	余裕深度処分廃棄物輸送単価	600万円/m <sup>3</sup>	炉内滞在時間+5年	場までの海上輸送を想定(	<b>ノ、リードラグタイムを設定。</b>
	浅地中処分廃棄物輸送単価	100万円/m <sup>3</sup>			
	高レベル廃棄物処分単価	4200万円/本	炉内滞在時間+35年		
<b>家                                    </b>	TRU深地層処分並廃棄物処分単価	4500万円/m <sup>3</sup>		コスト小委員会資料による	5。高レベル廃棄物貯蔵期間を30年と想定
焼米彻処刀貝	余裕深度処分廃棄物処分単価	1200万円/m <sup>3</sup>	│   炉内滞在時間+5年	し、その他廃棄物は即時	<b>心分を想定し、リードラグタイムを設定。</b>
	浅地中処分廃棄物処分単価	200万円/m <sup>3</sup>			
				。 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》	定率法、償却期間(建屋40年、設備9年)、 重転期間40年、残存価額割合10%
				事業報酬	事業税率4.4%
				資本費 固定資産税 [[	<b>固定資産税率1.4%</b>
妹 北  制   生 弗					3%
※tt 表近見 および 再処理書	<b>苚処理単価および燃料</b> 製 <b>造単価</b>	万円/kgHM	燃料製造:0.5年	廃止措置費	設計による廃止措置廃棄物量を基に、コス ト小委員会の算出手法に準じて費用を計 -
廃棄物処理費用を含		設計より昇出	再处理:741闪滞住時间+4年	人件費	900万円/人/年
<del>む</del> )				修繕費	段計より
				運転 諸費 []	段計より
				維持費  業務分担費	(人件費+修繕費+諸費) × 15%/年
				事業税	全経費 × 1.3%/年
				部材費	5万円/kgHM(燃料製造に計上)
				年間処理量  小規模施設(5	0トン/年)および大規模施設(200トン/年)

<b>የの内訳および燃料サイクル単価の設定・計算方法</b>
燃料費の
2.2.3

表

換算係数
量と体積の
1に対する重
止時廃棄物
ル施設の廃
4 +15
表 2.2

【処分区分】	【換算係数(kg/m³)】	【備考】
小安。这个人,也是不是一个,	2061	六ヶ所再処理工場における地層処分対象廃棄物の機器・配管
地眉处力划家既来初	1067	の重量と体積の関係から設定
ようしょう しょうしょう しょう うちょう しょう うちょう うちょう うちょう	1906	六ヶ所再処理工場における余裕深度処分対象廃棄物の機
<b>示怕冰反处力划家既果彻</b>	7304	器・配管の重量と体積の関係から設定
、」 —    4 、 L / W 華 遒 母 枰 \7 吻 中 싺 氷	2002	☆ヶ所再処理工場におけるはつりコンクリートの重量と体
231時十分2230年(コノンシート)	7737	積の関係から設定
为此的。 1991年1917年4月19日。	1006	六ヶ所再処理工場における浅地中処分対象廃棄物の機器・配
汉地中处力23家洗米初(五周)	0201	管の重量と体積の関係から設定
	760	六ヶ所再処理工場における二次廃棄物の重量と体積の関係
——/ () () () 	BC /	から設定
:評価に使用した再処理設計データで	は、二次廃棄物は一次厚	発棄物の 50wt%発生すると想定しており、さらに内訳は可燃

50wt%、難燃 40wt%、不燃 10wt%であると想定している。換算係数を設定する際はその内訳を考慮し加重平均をとった。

経済性については、発電原価という比較的評価手法の定まった指標で検討できる と考えた。ただし、発電原価の計算手法については、最終取りまとめに向けて検討 し、よりよい手法を開発していく予定である。また、Gen IV などの場で話題となっ ている投資リスクといった概念についても今後は評価手法を検討し、必要ならば評 価指標に加えることも考えている。

#### 2.2.3.3 環境負荷低減性に関する検討

地球上の自然環境は、土壌圏、水圏、大気圏および生物圏の間を物質が循環し、 バランスを保つことで成立している。資源・エネルギー・不用物の大量採取、大量 生産、大量消費、大量廃棄が行われている現在の社会において、自然(環境)への 負荷が増大していることを考えれば、FBR サイクルの導入によって循環型社会実現 の一翼を担うことは有意義であり、環境負荷低減性はますます重要な視点になる<sup>[23]</sup>。

社会経済システムと環境問題の関わりについて記述した環境白書の平成 14 年度 版<sup>[24]</sup>によれば、二酸化炭素の排出、森林資源の過度の利用、鉱物資源採取、硫黄酸 化物や窒素酸化物の放出、捨石や土壌浸食などが環境負荷として列挙されている。

また、平成 15 年に改訂された環境パフォーマンス指標ガイドライン<sup>[25]</sup>では、ア ウトプット(排出する)に関わるコア指標(活動全般を把握できる指標)として、 温室効果ガス排出量(トン・CO<sub>2</sub>)、化学物質排出量(トン)、総製品生産量(また は総製品販売量)(トン)、廃棄物等総排出量(トン)、廃棄物最終処分量(トン)、 総排水量(m<sup>3</sup>)があげられている(注:環境パフォーマンス指標ガイドラインでは、 資源などのインプットも指標例としてあげられている)。ここで温室効果ガス排出量 については、6 種類が指定されている温暖化ガスの排出量について、地球温暖化係 数を用いて CO<sub>2</sub>に換算して評価することとなっている。指標を質的に補完するサブ 指標として、表 2.2.5~表 2.2.7 内にある指標があげられている。こうした環境へ の負荷一般を検討した指標では、水、廃棄物排出量、土砂、温室効果ガス、化学物 質、騒音、振動、悪臭、自然や生態系の破壊、製品の性質などが一般的に着目すべ き環境負荷といえる。実用化戦略調査研究のフェーズ<sup>[1]</sup>においても、一般的な環 境への影響を評価するための項目が列挙されていた。

こうした一般的な環境負荷低減性の評価に対して、FBR サイクルシステムの環境 負荷低減性の評価にあたっては、施設操業場所での有害物質放出、特に放射性物質 放出に関する評価を中心として行うこととした<sup>[26][27]</sup>。これは、FBR サイクルシス テムにおいては、システムからの排出量といっても、まだ限定されたデータしか取 られておらず、例えば、温室効果ガスの総量などは、FBR サイクル候補概念を比較 できる精度では算出されていないからである。なお、放射性物質以外の影響につい ては、現時点ではおおよそ変わらないとみなす。

分 類	指標	環境上の課題	単位	算定に当たっての 留意点	法規制等
水資源投入	事業者内部 での水の循 環的利用量	水資源は希少であ る。	立方 メートル	冷却水の循環は除 く。	
	SOx 排出量	呼吸器への健康被 害を及ぼす恐れが あり、また森林や 湖沼等に悪影響を 及ぼす酸性雨の原 因となる。	トン		大 気 汚 染 防止法
	NOx 排出量	呼吸器への健康被 害を及ぼす恐れが あり、また酸性雨 や光化学オキシダ ントの発生原因と なる。	トン		大 気 汚 染 防止法
大気への排出	<ul> <li>排出規制項目(SOx、 NOx、ばいじん、ダイオキシン類等)排出濃度</li> </ul>	人の健康への被害 や生活環境の悪化 を招く恐れがあ る。	最大濃度 (ppm、 ng-TEQ/m <sup>3</sup> N)	項目ごとに測定。	大気洗、
	指 定 物 質 (ベンゼン、トリ クロロエチレン、テト ラクロロエチレン) 排出濃度	発がん性等長期毒 性の観点から人の 健康を損なう恐れ がある。	最大濃度 (mg/m <sup>3</sup> N)	項目ごとに測定。	大 気 汚 染 防止法
	騒音、振動	人に心理的・精神 的影響を与える。	デシベル		騒 音 規 制 法、振動規 制法
	悪臭	人に心理的・精神 的影響を与える。	最大濃度 (mg/l) 又は 臭気指数		悪 臭 防 止 法
水 城への	窒素、燐	閉鎖性水域の富栄 養化の原因とな る。	トン		水 質 汚 濁 防止法

# 表 2.2.5 環境パフォーマンス指標のサブ指標(その1)<sup>[25]</sup>

## 表 2.2.6 環境パフォーマンス指標のサブ指標(その 2)<sup>[25]</sup>

分 類	指標	環境上の課題	単位	算定に当たっての 留意点	法規制等
水域への排出	排 日 (健 生 気 項 気 し、 り ( た り ( た り)) ( た の ( た の ( た の ( た)) ( た の ( た)) ( た) ( た	人の健康への被害 や生活環境の悪化 を招く恐れがあ る。	最大濃度 (mg/l、 pg-TEQ/l)	項目ごとに測定。	水 (
-	事業者内部 で再使用さ れた循環資 源の量	廃棄物等排出量を 低減する。	トン		
廃棄物の排出	事業者内部 で再生利用 された循環 資源の量	廃棄物等排出量を 低減する。	トン		
щ	事業者内部 で熱回収さ れた循環資 源の量	廃棄物等排出量を 低減する。	トン		
	製品群毎の エネルギー 消費効率	エネルギー効率の 向上は CO2の排出 抑制に資する。	省エネ法の単 位		エーのに法ネホンド用化る 法ネートでのは、 には、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、 に、
製品等	CO <sub>2</sub> 排出総 量(当年出 荷製品全体 について推 計)	エネルギー効率の 向上は CO₂の排出 抑制に資する。	トン-CO2	自社製品の使用状 況の推計方法を明 確に設定する。	
	製品群ごと の再使用・ 再生利用可 能部分の比 率	廃棄物の再使用・ 再生利用を促進す るため、製品の設 計段階で、再使 用・再生利用が可 能な部材を用いる 必要がある。	%	製品の回収及び再 使用・再生利用の ためのシステムが 社会的に存在して いることを前提と する。 熱回収可能部分が ある場合には分け て計上する。	資効の関律効症の利進る源れ後の利進る源用に法有別の(資産)の(資産)の(資産)の(11)の(11)の(11)の(11)の(11)の(11)の(11)の(1

## 表 2.2.7 環境パフォーマンス指標のサブ指標(その 3)<sup>[25]</sup>

分 類	指標	環境上の課題	単位	算定に当たっての 留意点	法規制等
	使用済み製 品、容器・ 包装の回収 量	製品等の製造、販 売等を行う事業者 には、当該製品等 を引き取り、循環 的な利用を行うこ とが求められてい る。	トン		
製品等	回収した使 用済容の る る 器 ・ し み 器 ・ の 、 、 の の 、 、 の の 、 の の 、 の の の の の の	製品等の製造、販 売等を行う事業者 には、当該製品等 を引き取り、循環 的な利用を行うこ とが求められてい る。	トン、%		
ストック汚染	土壌・地下 水・底質 (ダ イオキシン 類) 汚染状 況	土壌や地下水の汚 染により、人の健 康や生態系に影響 を及ぼす恐れがあ る。	濃度 (mg/kg、 mg/l、 pg-TEQ/g)		土 壊 汚 染 対 策 法、 ダ イ オ キ シン 類 措 置 法
土地利用	緑化・植林、 自然修復面 積	景観や生活環境の 改善、野生動植物 種の保存に資す る。	ヘクタール		
その他の環境リスク	化学物質保有量	化学物質はそれを 保有しているだけ では直ちに環境負 荷は生じないが、 事故や漏出、揮発 等により環境中へ 排出されるリスク がある。	トン 	PRTR 法が対象と する物質、有害大 気汚染物質、PCB 等。	PRTR法、 大防化のびの関律質制 での での 関律 で 都 型 制 る 学 番 製 規 す (化 査 制 と 、 と の で の の の の の の の の の の の の の の の の の

環境負荷については、実用化戦略調査研究を開始した時点では、評価を行うため に必要なデータがわずかであった。しかし、世界的に環境に対する関心が高まって いることを背景に、環境経済学といった分野でさまざまな人間活動のライフサイク ル評価が試みられている。原子力分野でも例外ではなく、わが国をはじめ、世界的 に核燃料サイクルの検討や総合評価の機運が盛り上がりを見せていることも相まっ て、従来、入手することが困難であった廃棄物に関するデータが出揃い、より本格 的な評価を実施できる土台が整備される状況にある。また、実用化戦略調査研究に おける設計活動も徐々に進捗しており、プロジェクトとしてもより詳細な廃棄物量 の評価を実施するための設計データを準備する体制が整ってきた。

フェーズ の設計においては、放射性廃棄物を、高レベル放射性廃棄物、深地中 処分廃棄物、余裕深度処分廃棄物、浅地中処分廃棄物、トレンチ処分廃棄物、クリ アランスレベル以下廃棄物、非放射性廃棄物と、基本的に処分形態別に区分して、 最大7段階に分けて考えている。しかし、FBR サイクル全体で通してみると、評価 できる放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物、深地中処分廃棄物、余裕深度処分 廃棄物、浅地中処分廃棄物の4区分の放射性廃棄物である。より低レベルの廃棄物 まで考慮することについては、最終取りまとめまでの課題であると考えているが、 埋設処分に関して中間評価時点においては、この4区分の放射性廃棄物について考 慮することとした。

図 2.2.12 が今回設定した環境負荷低減性に関する評価構造である。構造の骨組み 自身はフェーズ で検討したものから変更していない。各下位指標の重みに関して は、埋設処分する廃棄物について、廃棄物発生量と放射性毒性と被ばく影響をほぼ 同等の重みとし、体積換算した廃棄物発生量と面積換算した廃棄物発生量では、面 積換算した廃棄物発生量の方が環境負荷という面から重要であると考えて、重みを 付けることとした。さらに希釈放出に対して、埋設処分の方がかなり重要であるも のの、同じ被ばく影響を考えた場合には逆に現時点での被ばく影響である希釈放出 の方が埋設処分よりも重要であると考えることとし、希釈放出する放射性廃棄物に よる被ばく影響の重みを、埋設処分する放射性廃棄物による被ばく影響の重みに対 して相対的に決めることとした。これは、フェーズ とほとんど同じ重みであるが、 若干希釈放出の被ばく影響の重みが大きくなっている。





(1) 埋設処分する廃棄物発生量(体積)に関する検討

まず埋設処分に関する環境負荷について記述する。

2.2.2 で述べたことにならって、FBR サイクルシステムと周囲の環境との相互作 用のうち、放出される放射性物質に注目したとき、放射性廃棄物の放出量がまさに 環境負荷であると考えてよい。ここで、さまざまなシステムを比較評価するための 指標としては、FBR サイクルシステムが社会に対して便益である電力を単位量与え るとき、どの程度の量の廃棄物を社会に放出するのかを指標とすることが妥当であ る。このとき、廃棄物の発生量を体積で表すならば、単位としては(m<sup>3</sup>/kWh)と することが考えられる。発生体積で評価した廃棄物発生量に関する効用関数を図示 すると図 2.2.13 のとおりである。

この指標では、放射性廃棄物を単に発生量で積算している。放射性廃棄物の発生 量を見れば、高レベル放射性廃棄物よりも低レベル放射性廃棄物の方がずっと多く、 支配的な影響を持つ。したがって、この指標は、低レベル放射性廃棄物を重視した 考え方を示している。また、廃棄物発生量の許容値は、もんじゅ、東海および六ヶ 所の再処理施設、東海プルトニウムセンターおよび六ヶ所の MOX 燃料製造施設の 状況を参考にして、現状レベルの FBR サイクルのレベルを想定した評価を行い、仮 設定して用いることとした。これは、埋設処分に関する指標で共通である。ただし、 FBR サイクルを想定すべきなのか、それとも現状の LWR サイクルを想定すべきな のかについては、今後検討を行って最終取りまとめ評価を実施すべきである。



図 2.2.13 廃棄物発生量(体積)の効用関数

(2) 埋設処分する廃棄物発生量(占有面積換算)に関する検討

以上の点は、放射性廃棄物が等質ならば問題はないが、廃棄物の質の差に注目す ると、別の指標を考える必要がある。そもそも「放射性」廃棄物に注目するという ことが、廃棄物の質に着目していることを示している。さらに、自然に存在する水 でも放射性核種(トリチウム等)を含んでいるが、そのレベルはごく低いため放射 性物質として扱うことはないことから分かるように、放射性廃棄物の中でもその放 射能の程度が重要である。そこで、廃棄物の質の差を端的に示す方法として、埋設 処分時の処分場占有面積を考えることとした。一般に体積換算して同じ量の放射性 廃棄物であっても、放射能レベルの高い放射性廃棄物を処分するには、より広い処 分場が必要となる。したがって、放射性廃棄物の発生量を廃棄物処分場の面積に換 算して比較評価すれば、廃棄物の質の差を見込んだ評価を行うことができる。この とき、廃棄物の発生量を処分場の面積で表すならば、評価指標の単位としては (m²/kWh)が適切と考える。埋設処分場の占有面積で評価した廃棄物発生量に関 する効用関数を図示すると図 2.2.14 のとおりである。



図 2.2.14 廃棄物発生量(占有面積)の効用関数

## (3) 放射性毒性に関する検討

廃棄物処分については、時間的な問題も考慮すべきである。廃棄物発生量は、体 積換算した場合でも面積換算した場合でも廃棄物発生時(処分時)の発生量である。 実際の放射性廃棄物処分に関しては、非常に長い期間にわたって致死量をはるかに 超える放射性物質が地中に存在する。例えば、処分時には同程度の有害さであって も、少し時間がたてば無害になる廃棄物に比べて長期間そのまま有害である廃棄物 の方が、環境負荷の面からはるかに問題であると考えられる。極端な場合、処分し て即座にまったく無害となる廃棄物については、環境負荷は感じられないだろう。 そこで、環境中に長期的な影響のある有害廃棄物を放出しない FBR サイクルの方が 望ましいという観点から、将来の放射性毒性を評価指標の一つとして採用し、1000 年後の放射性廃棄物の持つ毒性評価結果を用いることとした。

これはあくまでも目安と考えられるべきであるが、サイクル機構が過去に実施し た「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究 開発第 2 次取りまとめ - 分冊 3 地層処分システムの安全評価」<sup>[28]</sup>において、高レ ベル放射性廃棄物をガラス固化した場合の安全性を評価した例では、高レベル放射 性廃棄物を固化したガラスが 1000 年後から地下水と接触すると想定した解析を行 っている。1000 年という数字は、ガラス固化体処分の安全性に十分な裕度があるこ とを示すための保守的な(つまり時期的に早い)数字であるが、中間評価でも、こ の例に倣って 1000 年を目安として、高レベル放射性廃棄物中に含まれる放射性毒 性を計算する。このとき、放射性毒性を示すため、年間摂取限度(Annual Limits on Intake: ALI)や放射能(Bq)を考えることも多い。しかし、中間評価では、線量 等量(Sv)を毒性の単位とする。これは、廃棄物を経口摂取した場合、標準的な個 人が受ける線量当量に換算することによってわかりやすく毒性を示す方法であり、 欧米ではよく用いられている。ただし、放射性毒性は、ガラス固化体中の放射性物 質を実際に経口摂取するわけではなく潜在的な危険性を示すだけなので、その点を 誤解しないよう、留意する必要がある。また、評価指標については、これまでと同 様に単位発電量あたりの放射性毒性で示すことが適当であり、単位は(Sv/kWh) となる。放射性毒性評価のために設定した効用関数を図 2.2.15 に図示する。



図 2.2.15 放射性毒性の効用関数

## (4) 埋設処分による被ばくに関する検討

被ばく線量率については、埋設処分される高レベル放射性廃棄物からの被ばく線 量率の最大値を評価指標とすることとした。無論、埋設処分される放射性廃棄物は、 高レベル放射性廃棄物だけではなく、深地中処分される放射性廃棄物や余裕深度処 分される放射性廃棄物、浅地中処分される放射性廃棄物、トレンチ処分される放射 性廃棄物と放射能レベルに応じて様々な区分があるが、中間評価時には高レベル放 射性廃棄物から周囲の環境へ移行する核種による被ばく線量率の最大値を評価する こととした。核種移行による被ばく線量率の効用関数を図 2.2.16 のとおり設定した。

今後、深地中処分する廃棄物、余裕深度処分する廃棄物、浅地中処分する廃棄物 から環境中へ移行する核種についても評価を行なう必要性と手法<sup>[29]</sup>を検討し、最終 取りまとめに向けてより適切な評価を実施することとしたい。



図 2.2.16 核種移行による被ば〈の効用関数

## (5) 希釈放出による被ばくに関する検討

これまでは、環境に影響する要素として、放射性廃棄物の埋設処分に着目してきた。しかし、操業中の原子炉プラントや核燃料サイクル施設からも放射性物質が放出されている。それらの放射性物質も環境への負荷となっており、適切に評価した上で低減することが望ましい。

原子炉プラントからの放射性物質については、原子炉プラントから放出される放 射性物質のうち、大気放出については大気中での希釈、移行を解析して、施設境界 外で最も被ばくする個人を対象に1年間で被ばくする線量を求めることとした<sup>[30]</sup>。 その際、主要な核種について外部被ばくと内部被ばくの双方を考慮して算出した。 海洋放出については、適切な評価手法がなかったので、既存プラントの評価結果を 参考にして、設計で算出された放出量に比例させて被ばく線量率を求めることとし た。しかし、結果的に中間評価時の設計データは差がないため、実質上各FBRサイ クル候補概念間で明確な差が生じなかった。

燃料サイクル施設についても、大気放出については、原子炉プラントからの被ば く線量と同様に、大気中希釈と移行を解析して、施設境界外にいる最も被ばく線量 が高い個人が1年間で被ばくする線量を求めた。FBRの年間発電量に対応する燃料 サイクル施設を各FBRサイクル候補概念に関して想定することにより、評価をおこ なった。原子炉プラントと同様に海洋放出については、詳細な被ばく評価手法がな かったので、既存施設の評価結果を参考にして、設計で算出された放出量に比例さ せて被ばく線量率を求めることとしたが、設計データについては、原子炉プラント と同様に、中間評価時の設計データの差がないために差別化できなかった。

サイクル施設の操業時の放出量は再処理施設からの放出である。燃料製造施設に ついては、施設からの物質放出は本来意図していないこと、ただし物質放出量は既 存の施設から類推できるものの、再処理施設に比べて非常に小さいと考えられるこ とから中間評価では無視した。しかし、最終取りまとめに向けて希釈放出量を算出 することは重要であると考える。

上記のデータを用いて、評価した希釈放出による被ばく線量を評価するために設 定した効用関数を図 2.2.17 に示す。



図 2.2.17 希釈放出による被ば(の効用関数)

## 2.2.3.4 資源有効利用性に関する検討

限られた資源を有効に利用できることは、将来開発すべき FBR サイクルにとって 重要な側面である。資源有効利用性については、フェーズ での検討を引き継ぎ、 図 2.2.18 のような評価構造を想定した。



## 図 2.2.18 資源有効利用性の評価構造

また、表 2.2.8 に評価基準を示す(資源節約性について、別の評価基準(ケース B)を設定するので、この評価基準を(ケースA)とする)。以下では、資源有効利 用性を2つの1次指標(最下位指標)である、資源持続利用可能性と資源節約性に 関する検討を記述する。両指標の重みについては、遠い将来にわたる資源有効利用 性に関わる資源持続利用可能性に比べて、FBR サイクル導入という比較的近い将来 の資源有効利用性に関わる資源節約性の重みを大きく取り、4分の3を占めると設 定した。

項目と重み		基準	基準の意味	備考
資源持続利用可能性 (天然ウラン利用効率) (0.25)	努力目標	100%	1人当りエネルギー消費量を現状の3倍、世界人口 が120億人と想定して、1000年間電力を供給できる	
	達成目標	30%	1人当りエネルギー消費量を現状の2倍、世界人口 が100億人と想定して、500年間電力を供給できる	
	許容値	7%	1人当りエネルギー消費量を現状と同様、世界人口 が80億人と想定して、300年間電力を供給できる	
	努力目標	20万トン	既知資源量の5%	天然ウラン既知資源量(約400万t)と将来のウラン消 費に我が国が占める割合の予測(約5%)から算出
頁源即約1注 (天然ウラン累積需要量)	達成目標	80万トン	究極資源量の5%	天然ウラン究極資源量(約1600万t)と将来のウラン 消費に我が国が占める割合の予測(約5%)から算出
(0.75)	許容値	160万トン	究極資源量の10%	天然ウラン究極資源量(約1600万t)と現在のウラン 消費に我が国が占める割合の予測(約10%)から算出

表 2.2.8 資源有効利用性の評価基準(ケースA)

## (1) 資源持続利用可能性に関する検討

資源持続利用可能性の検討においては、開発した FBR サイクル技術を利用して、 どのくらいの期間にわたって人類が持続的に電力を享受できるのかを適切に指標化 することが問われる。資源として考えられる(これは経済的に調達できることを意 味する)天然ウランの資源量は、経済協力開発機構/原子力機関(Organization for Economic Co-operation and Development : OECD / Nuclear Energy Agency : NEA)および、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)に より調査されている<sup>[31]</sup>が、これらの天然ウランの全質量が核分裂したとき発生する エネルギー総量を究極的に天然ウランが潜在的に持つエネルギー量と考えることが できる。

上記の事実を参照して検討すれば、天然ウランを FBR サイクルシステムに投入し てエネルギー源として利用するとき、実際に人類が享受できる電力量は、天然ウラ ンのうちどの程度の割合を核分裂させられるのかによって決まる。そこで、フェー ズ 中間とりまとめにおいても、フェーズ での検討を受け継ぎ、天然ウラン利用 効率を評価指標とすることとした。天然ウラン利用効率は、天然ウランの何%をエ ネルギーに変換できるのかを示す指標であるが、FBR サイクルに特徴的な増殖を伴 う多重リサイクル利用により、天然ウラン利用効率は、増殖しない場合に比べて飛 躍的に増大する。このことが FBR サイクルの本質的な魅力である。

平衡期の FBR サイクルの天然ウラン利用効率は、炉全体(炉心とブランケットを 含む)の平均燃焼度を B(%) 再処理や燃料製造の過程でのロス率を L(%)とす ると、天然ウラン利用効率は、以下の式で表される。

天然ウラン利用効率(%) = 
$$\frac{B}{B+L} \times 100$$

フェーズ 中間とりまとめ時の評価では、上記の式にしたがい、設計データを基 にして、平衡期の FBR サイクルシステムの天然ウラン効率を計算し、資源持続利用 可能性の評価を行うこととする。





図 2.2.19 資源持続利用可能性の効用関数

(2) 資源節約性に関する検討

資源節約性は、FBR サイクルの導入により、資源である天然ウランを節約できる 程度を示す指標である。LWR を利用しているときには、天然ウランは炉における燃 焼時に一部が利用されるだけで、ほとんどが廃棄物となる。したがって、発電を行 うためには、原料となる天然ウランを次々に供給していく必要がある。一方、FBR サイクルシステムについては、FBR で燃焼した部分についてのみ、新たに外部から ウランを FBR サイクルシステムに供給すればよく、資源である天然ウランを節約で きることとなる。さらに外部から供給するウランとして、例えば、濃縮工場などで 発生する劣化ウランを供給することによって、実際上は天然ウランを外部から供給 せずに発電することが可能となる。したがって、国内の原子力発電所が全て FBR に 置き換わったときには、ほとんど新たな天然ウランが消費されない原子力発電シス テムを実現できる。言い換えれば、原子力発電所が全て FBR となった後は、資源と して必要な天然ウランの累積需要量はほぼ一定となる。そこで、わが国における天 然ウランの累積需要量を算出することによって、FBR サイクル候補概念が導入され ることによる資源の節約度合いを評価することができると考えられる。

天然ウラン累積需要量は、時系列諸量評価ツールである FAMILY-21 を用いて評

価する<sup>[32][33][34]</sup>。FAMILY-21 は、導入シナリオの章において詳述されるが、現状の 原子力施設の状況等を入力すると、今後 200 年間程度のわが国全体の原子力発電所 を中心とする核燃料サイクル施設の容量や核物質の流量を概略的に評価できる機能 を持っている、また、その際に、炉内燃焼を簡易的に模擬することにより、実用化 戦略調査研究における MA を含むアクチニドをリサイクルする核燃料サイクルにお ける炉心燃料組成の時系列変化を検討することも可能となっており、天然ウラン累 積需要量を算出するには適切なツールである。

資源節約性については、今後、FBR 平衡社会に到達するまでにわが国が利用可能 な天然ウラン量を検討して、評価基準とする。この量を想定する際には、OECD/NEA と IAEA が共同で発行している「Uranium2003: Resources, Production and Demand」<sup>[31]</sup>においてわが国が占める原子力発電の割合から資源節約性の基準(ケ ースA)を設定した。このときの効用関数を図 2.2.20 に示す。



図 2.2.20 資源節約性の効用関数(ケースA)

資源有効利用性に関しては、資源節約性の評価基準について、もともと設定した 基準値の2倍を新たな基準値とした場合も評価した。このときの評価基準を(ケー スB)として表 2.2.9に示す。

表	2.2.9	資源有効利用性の評価基準(ケース B)	)
---	-------	---------------------	---

項目と重み		基準	基準の意味	備考
資源持続利用可能性 (天然ウラン利用効率) (0.25)	努力目標	100%	1人当りエネルギー消費量を現状の3倍、世界人口 が120億人と想定して、1000年間電力を供給できる	
	達成目標	30%	1人当りエネルギー消費量を現状の2倍、世界人口 が100億人と想定して、500年間電力を供給できる	
	許容値	7%	1人当りエネルギー消費量を現状と同様、世界人口 が80億人と想定して、300年間電力を供給できる	
資源節約性 (天然ウラン累積需要量) (0.75)	努力目標	40万トン	既知資源量の10%	天然ウラン既知資源量(約400万t)と将来のウラン消 費に我が国が占める割合の予測(約5%)の倍
	達成目標	160万トン	究極資源量の10%	天然ウラン究極資源量(約1600万t)と将来のウラン 消費に我が国が占める割合の予測(約5%)の倍
	許容値	320万トン	究極資源量の20%	天然ウラン究極資源量(約1600万t)と現在のウラン 消費に我が国が占める割合の予測(約10%)の倍

このときの効用関数を図 2.2.21 に示す。グラフの形はもともとの効用関数(図 2.2.20)と相似形であり、努力目標値、達成目標値、許容値などが異なる。



図 2.2.21 資源節約性の効用関数(ケースB)

### 2.2.3.5 核拡散抵抗性に関する検討

FBR サイクルシステムが実用化されれば、核兵器の原料となるプルトニウムなど を大規模に取り扱うこととなる。国際社会の一部を中心に FBR サイクルの実現に伴 う核拡散に対する懸念が表明されることがある。こうした懸念に対しては、わが国 がそもそも核拡散などを意図していないことを国際的に示し続けると共に、将来の FBR サイクルシステムとして、こうした懸念を払拭できるような特徴を持つシステ ムを実現することが望ましい。

このため、ある FBR サイクルシステムが核拡散にどれくらいつながり難いのかと いう観点から、核拡散抵抗性という評価視点を設けた。核拡散抵抗性に関しては、 これまで様々な定義が提案されてきたものの、現在もまだ議論が行われており、そ の定量的評価についても、近年国際的に作成することが試みられているものの、さ まざまな課題が指摘されている。実用化戦略調査研究で考慮するべき核拡散抵抗性 の範囲は非常に広く、国際核燃料サイクル評価(International Nuclear Fuel Cycle Evaluation: INFCE)<sup>[35]</sup>や Technological Opportunities To Increase The Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems : TOPS<sup>[36]</sup>、 さらには国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)などにお ける核拡散抵抗性の(広めの)定義に近いものである。そこには保障措置、核物質 防護、輸出管理などの核不拡散制度や技術的な特徴などの全て手段や措置を含むも のである。また、想定すべき結果事象についても、核爆発装置(いわゆる「核兵器」 と考えてよい)の製造および使用に加えて、盗取や妨害破壊行為による放射性物質 の散布(いわゆる「汚い爆弾」なども含む)なども含まれることとなる。しかし、 こうした要素を全てカバーして評価を行うことは現時点では容易ではない。フェー ズ においては、評価構造は明示せず、核拡散抵抗性の因子について定性的評価を 実施した。そこで、フェーズ 中間とりまとめにおいては、テロを想定した評価よ りも、核爆発装置の製造および使用に関する抵抗性を中心に、定性的判断を含むも のの評価構造を設定し、簡略な定量的評価を行う。

図 2.2.22 に中間とりまとめ時評価に用いた核拡散抵抗性の評価構造を、表 2.2.10 に評価基準を示す。重みについては、制度的核拡散抵抗性と技術的核拡散抵抗性の 重みを等しく設定した。技術的核拡散抵抗性に関しては、難単離性の重みを他の 2 次指標の倍として、他は同程度の重みとした。下位の指標は等しい重みとしたが、 核兵器非魅力性の下の核兵器不適応性の方を発熱よりも重視した。



## 図 2.2.22 核拡散抵抗性の評価構造

項目と重み(仮設定)		其進(仮設定)	其準の意味	
	段階評価	難(1,0) 中(0,5) 易(0)		
·····································	F27日日11四 F27時前7冊	難(1.0)、中(0.5)、見(0)		
按坦注		難(1.0)、中(0.3)、氦(0)		
改造性	段階評価	難(1.0)、 甲(0.5)、 易(0)		
物質接近性	努力目標	100Sv/h	基準値100倍(ほぼ近接作業不可能)	
	達成目標	1Sy/h	核物質防護の基準値	
	許容値	0Sr/h	接近への困難なし	
形状	段階評価	気体(1.0)、液体(0.7)、粉体(0.3)、固体(0)	持ち運び困難かどうか	
必要原料量	努力目標	100t	一連の大規模なオペレーション必要	
	達成目標	1t	チームでかつ車両等必要	
	許容値	10kg	個人運搬可能	
Pu抽出時間	努力目標	1年	U化合物並に必要	
	達成目標	1ヶ月	Pu化合物並に必要	
	許容値	1週間	週のオーダー	
Pu抽出資金	努力目標	1000億円	国が必要	
	達成目標	10億円	組織による施設建設が必要	
	許容値	1000万円	個人や小グループで可能	
核兵器不適応性	努力目標	0%	成功見込みなし	
	達成目標	50%	性能発揮するか不透明	
	許容値	100%	完全に成功	
発熱量	努力目標	10000W/kg HM	核兵器組み立て困難	
	達成目標	100W/kg HM	核兵器組み立てが困難になる程度	
	許容値	0W/kg HM	発熱なし	

## 表 2.2.10 核拡散抵抗性の評価基準

今回設定した核拡散抵抗性の評価構造においては、核拡散抵抗性を制度的な核拡 散抵抗性と技術的な核拡散抵抗性に大別している点が特徴である。核拡散抵抗性の 評価にあたっては、核拡散抵抗性の定義(範囲やその考え方)が重要であると言わ れているが、以下で評価構造を説明した後に核拡散抵抗性の定義について述べるこ ととする。

さまざまな核物質利用において、核不拡散は、IAEA保障措置<sup>[37]</sup>や核物質防護<sup>[38]</sup>、 輸出管理といった核不拡散制度を適切に運用することで担保されてきた。一方で、 取り扱う核物質の性状や施設の特徴などによって核拡散の困難さに差があるという ことも指摘されている。そこで、INFCE以来、両者を包含する形で核拡散抵抗性が 国際的に議論されてきた。評価構造では、前者を制度的核拡散抵抗性と呼び、後者 を技術的核拡散抵抗性と呼んでいる。制度的核拡散抵抗性については、従来、核物 質を扱う際に条約や国際的な意図表明とそれを担保する法令を遵守することが要求 されており、わが国の事業者や研究機関は、誠実にその義務を履行してきた。また、 今後についても核不拡散制度がなくなることは考え難い。したがって、制度的核拡 散抵抗性については、一定のレベルの基準を満たすことが期待される。個々の FBR サイクル技術について考察すれば、それらの制度を適用するための機器や労力が異 なることになるが、その違いは例えば施設の建設費や運転維持費といった形を取っ て、経済性に影響する、あるいは、労力の違いを評価できれば、運転保守補修性あ るいは簡便性に影響すると考えられる。

また核拡散抵抗性に関しては、核不拡散制度を遵守すれば国際的には必要十分で あるとみなすべきという考え方もある。この場合、技術的核拡散抵抗性は、制度の 中に反映されて初めて意味を持つこととなる。ただし、核不拡散制度を設計すると きには、技術的な核拡散抵抗性を十分に検討すべきであるが、現時点では FBR サイ クル候補概念の核不拡散制度に関わる検討が不十分なため、核拡散抵抗性を評価す るにしても核不拡散制度設計の結果を利用することはできず、別の手法を取る必要 がある。さらに、設計がある程度進捗すれば、現時点の核不拡散制度を想定して評 価することも可能となるが、現実には核不拡散制度も決して不変ではなく、核拡散 抵抗性に関する様々な状況を勘案して核不拡散制度自身も変化することに留意すべ きである。実用化戦略調査研究においては、乾式の燃料サイクルをはじめとして、 個々の FBR サイクル候補概念に対して適切な核拡散制度の適用を検討することは 今後の大きな課題である。

技術的核拡散抵抗性は、「その技術がどの程度核兵器から遠いのか」という観点から評価する。中間評価では、制度に関する部分を除外して技術的な部分を取り出して評価することとするので、核不拡散制度の影響を除いた施設や核物質を想定して 核爆発装置を作成する困難さを評価する。具体的には、FBR サイクルシステムの特定の地点(施設や工程)における核物質を用いた核拡散を検討することとなる。理 論的には、全ての可能性を考慮することが望ましいが、中間評価においては、核拡 散への脅威を想定した上で、核拡散に対して脆弱な箇所を主に施設中の核物質の特 性から特定して評価する。こうした脆弱な箇所は、脅威にとっては核拡散の起点と して最も望ましい箇所となり、この箇所の核拡散抵抗性を評価することにより、各 サイクル候補概念の核拡散抵抗性を保守的に(悪い方に)評価できる。この保守的 な評価結果は、いわば各サイクル候補概念の核拡散脅威に対する保証水準(security level:ここでは、平和利用を志向する我が国がある FBR サイクルを選択したとき に最低限得られる技術的核拡散抵抗性)<sup>[40]</sup>と見なすことができる。そこで、この評 価結果を核拡散抵抗性のレベル(あるいは指標とする値)と考えることとする。

核拡散を検討するためには、脅威を想定することが基本的な要件である。どれほ ど核拡散に対して潜在的に脆弱な核燃料サイクルが存在しても、核拡散を企図する という政治的目的を持つ脅威がなければ、核拡散は起こりえないからである。 TOPS 報告書において,核拡散抵抗性の要素を障壁(Barrier)と呼んでいるのは, 脅威にとって,それらの要素が核拡散を実行したときの障壁となることを意味して いるからと考えられる。一般に核拡散を主体的に遂行する脅威として、核兵器国の 政府(核兵器国が核拡散上の脅威となるかについては、異論も多い),非核兵器国の 政府、サブナショナルグループ(テロリスト等),施設運転者、あるいはそれらの共 謀等が考えられる。

FBR サイクル施設自身を改造・転用して核拡散を企てる場合について考えること も重要である。しかし、実用化戦略調査研究で検討している基幹電源としての FBR サイクルシステムを利用して核拡散を企図した場合には、政府をも巻き込んだ政治 的な決定が必要であろう。なぜなら、そうした核拡散の企図は大規模な計画となら ざるを得ないので、制度的な核拡散抵抗性(わが国の場合には少なくとも IAEA お よび国の保障措置)が健全ならば、必ず検知されると考えられる。次に検知された とき、政府ぐるみの計画でない場合、必ず政府によって差し止められると考えるの が自然だからである。そこで、大規模な核拡散計画は、検知されることを覚悟の上 で(あるいは明示的に)政府ぐるみで実行するしか成立し得ない。もちろんそれは 極めて異常な事態であるが、その場合、わが国において核拡散抵抗性(ここでは制 度的核拡散抵抗性も技術的核拡散抵抗性も含む)のうち制度的核拡散抵抗性は存在 せず、技術的核拡散抵抗性もほとんど障害にならない。また核拡散を本気で志向す る国家にとって、核拡散抵抗性を原子力平和利用の目標とすることは全く無意味で ある。結局、基幹電源となっているサイクル施設において核爆発装置の作成を企図 するという想定を優先する必要がないと考える。

また、完全に外部の者が核拡散を企てるということに関しては、核物質の入手に 成功すれば、内部の者が協力する場合とほぼ同様の状態となるが、それまでの困難 さが違う(外部の者だけが核拡散を企てる方が困難となる)と考えられる。 したがって、中間評価では、核拡散の脅威として FBR サイクル施設で働く技術者 を含む小集団を想定し、彼らが施設外の秘密施設に核物質を持ち出して転用を図る 場合を想定して(技術的な)核拡散抵抗性を概略評価することとした。この想定は、 さまざまな燃料サイクル施設が検討されている現状では公平な評価に近いものと考 えるが、検討の進捗に応じて最終評価時には変更することが考えられる。また、持 ち出す核物質については、上記に述べたように核爆発装置を作成するために容易な 状態のものを考える。

こうした仮定の下で、評価構造にしたがって、最下位の評価指標について効用関数を設定する。以下で核拡散抵抗性における下位指標について順次検討した結果を述べる。

#### (1) 物質接近性に関する検討

核物質に接近することによって人体が受ける被ばくは、核物質への接近を難しく して核拡散抵抗性を増大させる。そこで転用対象となる核物質からの被ばく線量率 を用いて転用対象核物質への接近の困難さを示す要素とする。ここでは、簡易的な 評価のために点線源を仮定して、1mの地点における 線による被ばく線量率を用 いることとする。こうして算出した被ばく線量率に関して、以下のように効用関数 を設定して評価することとした。

努力目標については、核物質に対して接近することが非常に困難な程度を考え て、1mにおける被ばく線量率が100 Sv/hと設定する。このとき、致死線量 を考慮すると、1m以内に接近した作業は数分間しか行うことはできないが、 このような場合には、核物質への接近はほとんど不可能であるとみなす。 達成目標については、核物質に対して接近することが困難な程度を考えて、 1mにおける被ばく線量率が1 Sv/hと設定する。これは従来、核物質防護の 基準と考えられたものと同程度である。 許容値については、1mにおける被ばく線量率が0 Sv/hと設定する。このと きは被ばくによる接近への障害はまったくないことになる。

図 2.2.23 に設定した効用関数を示す。



図 2.2.23 物質接近性の効用関数

(2) 核物質の形状(化学形態)に関する検討

核燃料サイクル施設から核物質の転用を企てる場合には、核物質の形状も転用の 難しさに影響する。特に今回の評価では、核物質の移動も想定しており、運搬の際 にどのような形状であるのかを検討することは意味がある。今回の評価で想定した 効用値(関数)を表 2.2.11 に示す。物質の形状として、固体、粉体、液体、気体の 順として段階的に評価することとした。このとき、設定した効用値については、専 門家の判断によることとした。

核物質の形状	概要	設定した効用値
気体	密度が低いため、容積が必要。タンク等の気密	1.0
	容器が必要。	
液体	密度は中程度である。通常、密閉する等により	0.7
	液体がこぼれないように配慮した容器が必要。	
粉体	密度が高いため、運搬は容易であるが、蓋をす	0.3
	る等の配慮が必要。	
固体	密度が高く、形状面では運搬が容易。	0

表 2.2.11 核物質形状の効用値

(3) 必要原料量に関する検討

核燃料サイクル施設から核物質の転用を企てる場合には、核爆発装置を作成する ために必要な核物質の量も転用の難しさに影響すると考えられる。そこで、一定の 簡易な施設を想定して、FBR サイクルから入手したプルトニウムを含む化合物を転 用する時間を算出する。こうして算出したプルトニウム抽出時間については、以下 のように目標値を考えて効用関数を設定した。

努力目標については、100tの原料が必要な場合とする。このとき、運搬や取扱いに一連の大規模な組織的活動が必要であると考えられ、必要な核物質量の 多量さのため、転用作業が困難になると考える。

達成目標については、1t の原料が必要な場合とする。このとき、少人数の人 力による運搬や取扱いが困難となり、チームを組んで車両などを用意すること が必要となると考えられ、転用作業にあたっての障壁になると考える。

許容値については、10kgの原料が必要な場合とする。この程度の重量以下ならば、特別でない個人でも運搬や取り扱いが可能であり、転用作業の障壁になっているとは考えにくい。

図 2.2.24 に設定した効用関数を示す。



図 2.2.24 必要原料量の効用関数

(4) プルトニウム抽出時間に関する検討

核拡散抵抗性の高い技術とは、一般的に核兵器の製造から遠い技術ということに なる。FBR サイクルについては、サイクル内に存在するプルトニウムを核兵器材料 であるプルトニウム金属に転用するために必要な時間は、核兵器からの遠さを考え る上で重要な観点である。また、転用に必要な時間は、保障措置の基礎となる保障 措置パラメータの一つでもある。そこで、一定の簡易な施設を想定して、FBR サイ クルから入手したプルトニウムを含む化合物を転用する時間を算出する。こうして 算出したプルトニウム抽出時間については、以下のように目標値を考えて効用関数 を設定して評価した。

努力目標については、保障措置パラメータにおいてウランの転用時間と考えら れている年のオーダーとする。1年間あれば、プルトニウムを扱わない施設に おいても査察が行われるので、保障措置を考慮しても、転用時間としては十分 に長いと考える。

達成目標については、保障措置パラメータにおいて、プルトニウムの転用時間 と考えられている月のオーダーとする。1ヶ月はプルトニウムを取り扱う施設 での適時性と考えられており、査察も実施されるため、転用するためにこの程 度の時間を要すれば保障措置は適切に機能すると考えられる。

許容値については、1週間と設定する。金属プルトニウムの転用時間が週のオ ーダーと考えられており、金属プルトニウムへの転用時間がこれ以下ならば、 核兵器材料を入手するために障壁になっているとは考えにくい。



プルトニウム抽出時間を評価するために設定した効用関数を図 2.2.25 に示す。

図 2.2.25 プルトニウム抽出時間の効用関数

(5) プルトニウム抽出資金に関する検討

プルトニウム抽出時間と同様に、プルトニウムの抽出に要する資金についても、 核兵器製造からの遠さを考える上で重要な観点である。そこで、FBR サイクルから 入手したプルトニウムを含む化合物を転用するために最低限必要な施設を想定して 必要と考えられる資金額を概算する。中間評価においては、こうして算出したプル トニウム抽出資金については、以下のように効用関数を設定して評価した。

努力目標については、1000億円とする。1000億円は、本格的な核燃料サイク ル施設を開発するレベルと考えられる(注:技術的実現性における許容値は 1000億円としている)。こうした国レベルといえるような開発が必要な場合に は、1つの核爆発装置を製造するための資金額としては非常に大きいと考えら れる。

達成目標については、10億円とする。実験施設(建物)が必要であるとき、 この程度の資金が必要となる。この場合、資金額としてはよほど豊かな個人で なければ、グループあるいは企業レベルの資金が必要となる。

許容値については、1000万円と設定する。転用にこの程度の資金しか要しな いとき、既存の広くない室内を利用して個人レベルで転用を試みることができ ると考えられる。



プルトニウム抽出資金を評価するために設定した効用関数を図 2.2.26 に示す。

図 2.2.26 プルトニウム抽出資金の効用関数

(6) 核兵器不適応性に関する検討

抽出したプルトニウムを用いて核爆発装置を作成する場合でも、プルトニウムの 同位体組成によっては核兵器としての性能を十分に発揮できない可能性がある。そ れほど精巧でない設計の場合には、プルトニウムの同位体組成によっては自発核分 裂中性子のために十分大きな威力の核爆発を起こす前に連鎖反応が開始されてしま う恐れがある。この場合、核爆発装置の原材料として魅力的でないと考えられる。 こうした観点も核拡散抵抗性を考える上で考慮されてきている。中間評価では、簡 易的に核爆発装置として性能を発揮できない可能性を核物質の組成から評価し、以 下のように効用関数を設定して評価した。

努力目標については、核爆発装置として十分に性能を発揮する可能性が0%の 場合とする。

達成目標については、核爆発装置として十分に性能を発揮する可能性が 50% とする。

許容値については、核爆発装置として十分に性能を発揮する可能性が100%と する。

以上から、核兵器不適応性を評価するために設定した効用関数を図 2.2.27 に示す。



図 2.2.27 核兵器不適応性の効用関数

### (7) 発熱量に関する検討

核兵器材料となる核物質からの発熱は核爆発装置組み立ての妨げになるとされている。 ただし、このことは、核爆発装置の組み立て時の除熱が容易となるように留 意することによって、かなり緩和可能であるとされている。そこで、核爆発装置不 適応性と比べると、核爆発装置の原材料の魅力を損なう程度は低いと判断できる。 また、発熱量については、以下のとおり、効用関数を設定することとした。

努力目標については、10kW/kgHM とする。このとき、除熱に工夫しても核 爆発装置組み立てが妨げられると考えられる。つまり、このような核物質は核 爆発装置の原材料として魅力を喪失すると考えられる。

達成目標については、100W/kgHM とする。このとき、除熱に工夫する必要 が生じ、核爆発装置の組み立てが難しくなる。したがって、核爆発装置の原材 料としての魅力は乏しくなる(特に核爆発装置製造のノウハウを持たない者に 関しては、魅力が乏しくなる)。

許容値については、OW/kgHM と設定する。このとき、発熱面からの障壁は特 になくなる。

以上の考え方にしたがって設定した効用関数を図 2.2.28 に示す。



図 2.2.28 発熱量の効用関数

### 2.2.3.6 技術的実現性に関する検討

競争力のある FBR サイクルシステムを実現するためには、現状の技術をそのまま 適用するだけでは不十分であり、今後も研究開発が必要であると考えられる。しか し、いくら有意義なシステムを構想しても、そのために無制限に社会的資源を費や すことは許されず、できる限り容易に開発できるシステムが望ましい。また、シス テムの技術開発にあたって、どの程度の不確実性があるのかを考慮しておくことが 望ましい。

この種の評価は一般的にかなり困難で、精度も低いと考えられている。従来、国 の開発においては、開発資金をチェックするために国の予算制度があるので、技術 的実現性の評価をわざわざ実施することは必要でなかったという面もある。

一方、民間においても、大幅な経済成長も期待できず、規制が緩和されて商品の 開発競争や原価削減の動きが激しくなっている。その結果、短期的な収益に結びつ かない研究開発資源は限定される傾向にあり、官民を問わず厳しい環境の中で効率 的に開発を進めねばならなくなっている。

最近、技術戦略(Management of Technology: MOT)やプロジェクトマネジメン トといった分野が注目を集めている<sup>[41][42]</sup>。わが国でも、「プロジェクト&プログラ ムマネジメント標準ガイドブック」(いわゆる「P2M」)が発行される<sup>[43]</sup>など、こう した分野で大きな進歩が見られている。それらの分野の検討は、研究開発における 研究開発投資といった面に注目し、研究開発を業務のバリューチェーン(業務の様々 な分野が連鎖的に価値を産み出すプロセス)の一部と見なして体系的に取り組む、 という目的を持っている。このとき、プロジェクト資源として、金融資源や情報資 源を考慮し、研究開発に伴うリスクを分析してマネジメントすることが求められる。

技術的実現性の検討においては、FBR サイクル実用化戦略調査研究というプロジェクト(より正確には「プログラム(注:プロジェクトが複数集合したもの)」と呼ぶべきかもしれない)のマネジメントに関わる課題、特にプロジェクト資源とリスクのマネジメントを中心とした側面を検討する。具体的には、FBR サイクルシステムを実現するために必要な資金や期間、それまでの技術的課題などについて検討する。FBR サイクルについては、これまでも大規模な投資を伴う研究開発が長期間続けられてきており、実用化戦略調査研究における FBR サイクル候補概念の検討や選択にあたっても、以上の観点を重視すべきであると考えられる。フェーズ においては、具体的な評価は行われなかったが、フェーズ 中間とりまとめにおいては、評価構造を設定した上で評価を実施することとした。

まず、開発に必要な資源量を技術的実現性の多寡を評価する基本的な指標とする。 開発に必要な資源量としては、資金と期間を取り上げた。さらに、現時点では開発 に必要な資金と期間が不明確な部分もあるとの意見を踏まえて、今後開発が必要な 技術がどの程度あるのかを指標として加えた。また、これらの技術的実現性の指標 には、それ自身不確実性が付随する。そこで、開発資金、開発期間、必要技術、お よびそれぞれの幅から開発の容易さがどの程度なのか、またそれがどの程度確から しいのかを評価することとした。評価構造では、前者を開発容易性とし、後者を開 発リスクとした。

以上のような考え方を踏まえて設定した評価構造を図 2.2.29 に示す。重みに関しては、まず開発容易性の重みを 6 割とし、開発リスクの重みを 4 割とした。さらに
開発資金、開発期間は、必要技術の倍の重みがあるとし、開発資金と開発期間は、 等しい重みを持つとした。幅についても、同様に重みを設定した。



図 2.2.29 技術的実現性の評価構造

フェーズ 中間とりまとめにおける検討では、関連文献などを調査して、評価可 能な手法の構築に努めた。技術的実現性については、通常の設計データというよう なデータが得られることはない。技術的実現性評価(場合によっては、プロジェク ト管理あるいはプロジェクトリスク分析)は社会的に大きな課題として近年注目さ れているが、その定量的な評価にあたっては、2 つの情報、即ち、技術的データと 専門家の見解が用いられる。

FBR サイクル候補概念の技術的実現性の評価に関して、利用可能な技術データと いう面から検討すると、開発に必要な資金と期間については、実用化戦略調査研究 のロードマップと開発計画作成のために検討したデータが存在する。ロードマップ 等の作成に関連して出されている開発に必要な資金と期間については、フェーズ 以来の長期間に亘って調査、検討されてきており、技術的実現性の評価にあたって も基礎となるデータであると考えられる。しかし、必ずしも全ての FBR サイクル候 補概念に関して実用化までの開発資金と開発期間が評価されているわけではない点 が課題である。また、今後開発が必要となる重要な技術がどの程度多いのか、また その幅がどの程度かといった点については、設計段階ではおおよそ把握できるもの の、明確に検討されてきてはいなかった。さらに、開発資金や開発期間の幅につい ても、ロードマップ等の検討では従来対象となっていなかった。

こうした状況を鑑みて、技術的実現性の評価では、客観的と考えられる技術的デ ータや実績を用いて評価するのが理想的であるが、中間評価においては、ロードマ ップ等におけるデータを最大限活用しつつ、もう一つの情報源として設計者の見解 を取り入れて評価することとした。現実問題として、プロジェクトのリスクなどの 分析では、ある程度の主観的推定の要素を伴うとされている。 単に通常の設計データと同様の形で技術的実現性のデータを取得した場合、ロー ドマップで検討していない種類のデータについては、設計者によって前提となる考 え方の異なる主観的なデータが集められる可能性がある。将来の開発見通しについ ては、個人によって楽観的だったり、悲観的だったりする場合があること、また、 一部の問題点に留意し過ぎてしまい、大局的な推定を誤ったりすること等が主な原 因として考えられる。また、評価者は必ずしも個々の技術に関する専門家ではない ため、専門家である設計者の意図を誤解する恐れがあること等も含めて、さまざま なバイアスが生じる恐れがある。

技術的実現性の評価にあたっては、これらのバイアスを可能な限り除くことが望ましい。そこで、中間評価では、単に設計者が設計データを評価者に提出するだけなく、その考え方や前提条件の一致を図るため、設計者へのヒアリングを実施して 技術的実現性に関するデータを取得することとした。このとき、評価者が共通の説 明を設計者に行ない、設計者の考え方も併せて評価者が知る機会を持つことで、技術の実現性に係るデータを推定する際の主観性を減らすことが期待できる。

特に設計者に、技術的実現性に関わる推定に関して共通の認識を持ってもらうた め、即ち、開発資金額や開発期間、必要技術とそれらの幅について算出するときの 考え方が統一されるように、実際のヒアリングに入る前に評価手法とヒアリングの 内容について評価者から説明を行なうことを原則とした。この事前の説明により、 技術的実現性の評価手法について共通認識が得られた設計者に対してヒアリングを 行い、ロードマップの検討を踏まえた設計者の考え方を可能な限り公正に聴取する ことが可能となる。

技術的実現性に関する評価指標を表 2.2.12 に示す。以下、各指標に関する検討に ついて詳述する。なお、開発資金幅および開発期間幅の評価については、それぞれ 表 2.2.13 および表 2.2.14 も併せて参照されたい。

項目と重み(仮設定)		基準(仮設定)	基準の意味
	努力目標	300億円	10億円×30年(新規大規模施設不要、改良程度)
開発資金(0.24)	達成目標	3000億円	100億円 × 30年(サイクルのパイロットプラントが必要な程度)
	許容値	3兆円	1000億円×30年(実験炉、原型炉、実証炉等全て必要、JNC現状予算全額)
	努力目標	10年	実用炉の改良程度の期間
開発期間(0.24)	達成目標	30年	リプレースまでに間に合う(1世代以内)
	許容値	100年	ウラン資源枯渇などが現実になる期間
必要技術(0.12)	定性評価	極少(1.0)、少(0.75)、中(0.5)、 多(0.25)、極多(0)	実用化までに必要な(重要)開発課題の量
開発資金幅(0.16)	定性評価	開発資金額とそれに対する幅(割合)で 効用値(1.0、0.75、0.5、0.25、0)を設定	解説は別表参照
開発期間幅(0.16)	定性評価	開発期間とそれに対する幅(割合)で 効用値(1.0、0.75、0.5、0.25、0)を設定	解説は別表参照
必要技術幅(0.08)	定性評価	なし(1.0)、小(0.75)、中(0.5)、 大(0.25)、極大(0)	摘出した必要技術について、その多少に幅があるのか(必要な開発課題を摘出できるのか)

表 2.2.12 技術的実現性の評価指標

(1) 開発資金に関する検討

開発資金については、以下のとおり評価基準を設定した。まず、FBR が導入され るまでの期間が 30 年程度(現状の軽水炉がリプレースされるまでの期間)と考えら れるので、この期間に間に合うことを想定する。

努力目標については、新規の大規模施設が不要であり、机上の検討と既存施設 の小規模改造程度で実用化できることを想定して 300 億円とする。なお、30 年間で実用化が可能になるとして、毎年 10 億円が必要となる

達成目標については、FBR サイクル各施設について、パイロットプラントの 建設が必要であり、要素技術開発なども実施することを想定して、3000 億円 とする。なお、30 年間で実用化が可能になるとして、毎年 100 億円程度の資 金投入で実用化が可能となる。

許容値については、研究開発を初歩から実施し、しかも、実験炉、原型炉、実 証炉、あるいはそれに相当する燃料サイクル施設が必要となることを想定して、 3兆円とする。なお、30年間、サイクル機構のおよそ全予算である1000億円 を使用する研究開発を実施する必要がある。

以上から、開発資金を評価するために設定した効用関数を図 2.2.30 に示す。



図 2.2.30 開発資金の効用関数

(2) 開発期間に関する検討

開発期間については、以下のとおり評価基準を設定した。

努力目標については、新規の大規模施設の建設等が不要であり、実用化に向け て許認可取得といったプロセスに即進むことができるといった状況を想定し て、10年とする。

達成目標については、現状の軽水炉がリプレースされるまでの期間がおよそ 30年程度と考えられるので、この時期に FBR サイクルの導入を可能とするた めに 30 年とする。

許容値については、天然ウラン資源の逼迫が目立ってくる時期や 2 回目のリ プレース時期を想定すると、100 年以内に FBR サイクルを実用化できなけれ ば、研究開発の意義を喪失すると考えて、100 年とする。

以上から、開発期間を評価するために設定した効用関数を図 2.2.31 に示す。



図 2.2.31 開発期間の効用関数

## (3) 開発資金幅と開発期間幅に関する検討

開発資金と開発期間の幅に関する技術的判断については、表 2.2.13 および表 2.2.14 に評価基準をまとめる。開発資金額はロードマップの検討等で研究開発の個 別項目が特定されており、それらに要する資金と期間が検討されてきていた。しか し、開発資金と開発期間の幅については、設計者の技術的判断を用いて評価する。

例えば、実用化に必要となる研究開発の資金額が 4000 億円と推定される FBR サ イクル候補概念があり、設計者によると、その推定値はおよそ 1000 億円程度の誤 差があると判断される場合について説明する。このとき、表 2.2.13 の左側の開発資 金額で 2000 億円 ~ 5000 億円の行に該当し、誤差である 1000 億円は 4000 億円に 対して 25%に相当するので、上側の開発資金幅(相対値)の 20% ~ 50%の列に該当 する。この結果から開発資金幅の効用値として、行と列の交点である 0.5 を入力値 として評価した。

これら開発資金幅や開発期間幅に関しては、最終取りまとめに向けて、開発期間 の幅に関するデータをより適切に取得する手法を整備することが必要である。

表	2.2.13	開発資金幅の評価基準
2	2.2.10	「川ル貝亚油>」「川四金十

	期涨资个柜动田店	開発資金幅(相対値)			
		~ 20%	20% ~ 50%	50% ~	
閉	~ 2000 億円	1.0	0.75	0.5	
R 発資	2000 億円~5000 億円	0.75	0.5	0.25	
金	5000 億円 ~	0.5	0.25	0	

表	2.2.14	開発期間	幅の評	価基準
---	--------	------	-----	-----

	問恐期問题前知道	開発期間幅(相対値)				
	用光期间幅划用恒	~ 20%	$20\% \thicksim 50\%$	50% ~		
開	~ 20 年	1.0	0.75	0.5		
Ê 発 期	20年~50年	0.75	0.5	0.25		
間	50年~	0.5	0.25	0		

(4) 必要技術と必要技術幅に関する検討

必要技術とその幅に関しては、表 2.2.12の中に示した評価基準を用いて評価した。 これらの評価指標については、開発資金幅および開発期間幅と同様に設計者の技術 的判断を用いて評価した。現時点では、候補概念の研究開発に関する経験の多寡に よって、開発に必要な枢要技術の量が必ずしも開発期間および開発資金に反映され ていないと考えられるので、これらの指標は有意義である。なお、これらの指標に ついては、最終取りまとめに向けて、技術開発の難易度が開発資金と開発期間やそ の幅の評価に十分反映されているときには、省略することを検討する。

## 2.2.3.7 社会的受容性に関する検討

たとえ、競争力のある FBR サイクルシステムを設計し、それらの技術開発が実現 できる見込みが大きかったとしても、それだけでは、FBR サイクルが実用化される 十分条件となる訳ではない。FBR サイクルの導入にあたっては、FBR サイクルの 潜在的性能(ポテンシャル)やそのシステムの研究開発が技術的に容易なのかとい った点だけでなく、社会に受容される特性を備えたシステムなのか、といった点も 重要である。FBR サイクルについては、プルトニウムを全面的に利用するシステム であり、そのために核燃料サイクル施設も不可欠になる。こうした、施設や燃料等 については、従来、社会に受容されてきた実績のある技術であるとはまだ言えない。 そこで、実用化戦略調査研究のフェーズ からは、社会的受容性という評価視点を 設け、評価構造や評価基準等を検討してきた。

社会的受容性を検討することは、専門家(開発当事者)および公衆を含む当事者 以外の関係者双方にとって有意義と考える。今後、FBR サイクル研究開発の当事者 にとっては、専門家内だけで通用する議論を行なっただけでは、説明責任を果たし たとは言えなくなっている。例えば、公衆と適切なリスクコミュニケーションを行 なっていくため(リスクコミュニケーションの改善は、社会または個人の選択を改 善する可能性がある<sup>[44]</sup> ) 社会的受容性(特にリスクの認知など)に関する検討を 行い、公衆の考え方の特徴などを知ることは専門家にとって有用である[45]。また、 開発した FBR サイクルを実際に建設、運用していくユーザー(電力事業者が考えら れる)の立場を考えることも専門家にとって有用である。さらに、今後 FBR サイク ルの導入や利用を行なっていく際に、公衆がさまざまな過程に参加していく機会が 増加していくことが考えられる。社会的受容性の検討により、公衆自身が自らの考 え方の傾向を自覚して、より良い判断を下すための材料を提供できる可能性がある。 したがって、社会的受容性について議論することは、主に研究開発当事者が関与す る技術的な特性やその選択といった検討だけではなく、全関係者からの広範な視点 から FBR サイクルのあり方を考えて、できる限り専門家の独断による「知の失敗」 を回避する契機を提供すると言える[46]。

フェーズ においては、社会的受容性についても、評価構造を設定した上で評価 を実施することとする。中間評価では暫定的な評価構造を設定し、試評価を行った。

社会的受容性に関して設定した評価指標を図 2.2.32 に示す。また、設定した評価 基準を表 2.2.15 に示す。重みに関しては、まず技術的受容性と心理的受容性は等し い重みとした。次に技術的受容性については、運転・保守・補修性が半分の重みを 占めるとし、残りの 6 割を研究開発柔軟性が占めるとした。また導入必要インフラ は 4 割とした。心理的受容性に関しては、既知性と注目性は等しい重みを持つとし た。



# 図 2.2.32 社会的受容性の評価構造

評価視点	1次指標	2次指標	3次指標	4次指標	備考	単位	分担
社会的受容性 技術的受容	技術的受容性	所的受容性 導入必要インフラ	許認可簡易性		新規許認可(安全指針整備)が容易か	易、中、難	各設計担当
			必要施設		候補概念を導入するためFBRサイクル以 外の新規インフラがどの程度必要なのか	なし、少、中、多、極多	各設計担当
		運転·保守·補修性	工事簡易性	工事許認可簡易性	施設の工事等の許認可取得が簡単か	易、中、難	各設計担当
		(簡便性)		工事期間	施設の工事に要する期間	月	各設計担当
				工事人員	施設の工事に要する人員	小、中、多	各設計担当
			操業簡易性	運転操作簡易性	運転操作が簡易なのか	易、中、難	各設計担当
				ヒューマンエラー防止	操業時のヒューマンエラーの防止が容易か	易、中、難	各設計担当
				輸送簡易性	輸送が簡易なのか	易、中、難	各設計担当
		لا	メンテナンス簡易性	メンテナンス頻度	メンテナンス頻度は多いのか	少、中、多	各設計担当
				メンテナンス期間	メンテナンス期間の長さ	短、中、長	各設計担当
				メンテナンス人員	メンテナンスの人員が多いのか	少、中、多	各設計担当
				メンテナンス手段	メンテナンスの手段があるのか	既存、要開発、難	各設計担当
				メンテナンス範囲	メンテナンスの範囲が広いのか	狭、中、広	各設計担当
				被ばく量低減	被ばく量の低減方策が容易か	易、中、難	各設計担当
			廃止措置簡易性		施設等の廃止措置が簡単なのか	易、中、難	各設計担当
		研究開発柔軟性	開発手段多様性		(代替)開発手段が多様なのか	多、中、1	各設計担当+評価担当
			サイクル変更可能性		導入後にオプション的な開発でFBRサイク ルの内容を変更できるのか	易、中、難	各設計担当+評価担当
			容量変更性		容量の変更が容易か	易、中、難	各設計担当+評価担当
	心理的受容性	既知性	既知技術		既存の実用技術の有無	有無	各設計担当+評価担当
			理解容易度		一般に理解しやすい技術を用いているのか	易、中、難	各設計担当+評価担当
		注目性(メディア評判)			メディアの評判は良いのか、悪いのか	良、中、悪	各設計担当+評価担当

#### 表 2.2.15 社会的受容性の評価基準

この社会的受容性の評価構造の特徴は、ユーザーの受容性を示す技術的受容性と 一般公衆の認識リスク等を示す心理的受容性という2つの1次指標が存在すること である。

(1) 心理的受容性に関する検討

狭義の社会的受容性は、技術的な特性をそのまま評価した結果とは異なる心理的 な受け入れやすさを示す心理的受容性である。この指標は、既知性と注目性という 2つの2次指標に分解される。

既知性は、これまで慣れ親しんだ事物等に対して、親近感を抱き受け入れやすい という点を評価する指標である。既知性は、既知技術と理解容易度に分解されてい る。「既知技術」は、FBR サイクルに用いられている技術が既に実用化されている 技術と同じかどうかを評価する指標である。また、理解容易度については、FBR サ イクルに用いられている技術が分かりやすいかどうかを評価する指標である。考え 方や原理が簡単な(既に知っているような)場合は、理解しやすくなる。

注目性は、公衆やメディアに対して、受けが良いのか、評判が良いのか、を示す 指標である。これは、何か話題になるような特徴があるのか、といった点を評価す ることになる。良い意味で注目される場合と悪い意味で注目される場合が考えられ る。

社会的受容性に深く関係するとされるリスク認知に関しては、「恐怖性」や「未知 性」といった2次元の因子で整理できるとした結果<sup>[47]</sup>がある。「未知性」は、「既知 性」の裏返しであり、中間評価指標の中で考慮しているが、「恐怖性」は考慮してい ない。通常、恐怖性においては、「災害になったときに制御可能か」、「大惨事になる 可能性があるのか」、「リスクを簡単に削減できるのか」、「リスクが自発的なものか、 それとも強制的なものなのか」といった点などを評価するものと考えられる。しか し、中間評価では、FBR サイクル候補概念間で恐怖性には大きな差がでないと考え て、その評価は行わないこととした。ただし、最終取りまとめにおいては、恐怖性 の側面も評価すべきなのかどうか、検討を継続する。また、社会的受容性について は、事業主体への信頼感にも着目すべきとも考えられる<sup>[48]</sup>ので、こうした点をどの ように考慮するのかについて、今後検討すべきであると考える。

(2) 技術的受容性に関する検討

これに対して、技術的受容性は導入必要インフラ、運転・保守・補修性、研究開 発柔軟性という3つの2次指標からなっている。これらは、フェーズ 中間とりま とめ時の評価においては、ユーザーである電力事業者の受容に関わる指標であると 見なして、広い意味での社会的受容性に含めて評価することとした。

「導入必要インフラ」は、技術開発ではなく、FBR サイクルの導入時における社 会的条件の難易性を評価する指標である。「許認可」があまりに困難なものは、例え 技術開発自身が簡単に実現でき、かつ完成したシステムとして性能がよくても、社 会に受容されにくく、FBR サイクルシステムを 2.2.2 節のように捉えれば、望まし い FBR サイクルシステムとはいえない。また、FBR サイクルシステム以外に社会 的に必要なインフラ(例えば、<sup>15</sup>N の濃縮を前提とする FBR サイクルシステムを考 えると、大規模かつ経済的な <sup>15</sup>N 同位体分離施設など)があまりに大規模な FBR サイクルシステムは、FBR サイクル自身の技術開発が容易であっても、また、その 性能がいくら良好でも、望ましい FBR サイクルシステムとは考えられない。したが って、「必要施設」を評価する意義は十分存在する。

「運転・保守・補修性」は、FBR サイクルのライフサイクルにおける人間にとっ

ての簡便さ、といった点を評価する指標である。「工事簡易性」、「操業簡易性」、「メ ンテナンス簡易性」、「廃止措置簡易性」の4つの3次指標に分解して評価すること とした。これらは、広い意味ではFBRサイクルの特性である。しかし、人間にとっ ての使いやすさ、といった観点を設計データ等で評価することは非常に難しい。そ こで、人間にとって簡便でないようなFBRサイクルは、例え、技術開発が容易であ り、かつ表面的な特性が優れていても、社会に受け入れられないと考えて、社会的 受容性に含めて評価することとした。

「研究開発柔軟性」は、社会の変化にどれだけ対応できる FBR サイクルシステム なのか、という点を評価する指標である。「研究開発柔軟性」を分解した3次指標で ある「開発手段多様性」、「サイクル変更可能性」、「容量変更性」のいずれも、他の 指標で評価される特性(技術的実現性、あるいは経済性など)について、社会状況 変化に応じて変更できる能力を評価するものである。このことは、他の視点の範囲 では、「研究開発柔軟性」に含まれる要素を評価しにくいことを示している。

現在、FBR サイクル実用化戦略調査研究では、社会状況が変化したときの FBR サイクル設計の変更といった点を包括的に検討しているわけではない。もちろん、 例えば、経済性が重視される社会ならば、炉心設計において、増殖比について1を わずかに超える程度に抑えて、高燃焼度化を図って経済性を向上させたり、天然ウ ラン資源が逼迫する恐れがあるときにブランケットを増やして、燃焼度は低くなる ものの増殖比を高めるといった検討が行われたり、あるいは軽水炉サイクルと共存 している時期に酸化物燃料の使用済燃料を FBR 金属燃料の使用済燃料再処理施設 においてどのように処理するのか、また、プルサーマル使用済燃料をどのように先 進湿式再処理施設で処理するのか、といった検討は行われている。しかし、現時点 では、社会シナリオの変化と、それに伴う FBR サイクルの研究開発内容の変更、さ らにはそれによる FBR サイクルの特性変化を全て設計評価することは無理である。 そこで、フェーズ 中間取りまとめでは、社会の変動に対応して、研究開発を柔軟 に実施できるような潜在的能力を持つ FBR サイクル候補概念は、その候補概念の範 疇内で、現在進めている標準的な社会情勢に応じた標準的な特性の FBR サイクルを 評価するだけでは評価できない魅力を持っていると考えることとし、それは、将来 社会変化と各候補概念の特性変化の関係が明瞭でない状況においては、社会への適 応しやすさ、あるいは社会への受容されやすさといった観点に含めて評価すること とした。

フェーズ 中間とりまとめ時の評価では、社会的受容性についてほとんどの指標 で段階的な評価(定性的な評価)を用いた。唯一の例外が、施設の工事期間である。 これらの定性的評価については、設計者に対してヒアリングを行うこととしたが、 基本的には技術的実現性と同様の困難が生じた。

社会的受容性については、他の指標と比較しても難しい問題が存在する。まず、 開発当事者が社会的受容性を評価し、開発する技術を選択すべきなのか、という点 である。開発当事者はそもそも「良い技術」を開発することが使命であり、良い技術を開発すれば、社会的受容性は自然に得られるという考えや、良い技術を開発し た後に社会からの受容を得られるよう努力することが本来あるべき姿であるとの考 えも存在する。

また、近年の参加型社会における意思決定の難しさについては、アローの一般不可能性定理<sup>[49]</sup>などからも類推できるが、集団による意思決定の有効性に関する亀田らの研究<sup>[50]</sup>では、合議から得られた決定の質や効率性が優秀なメンバー単独の決定よりも劣ることが多いとされており、さらに合議方式が必ずしもうまく参加メンバーの意思を反映しない点が指摘されている。同様に、公共事業の集団意思決定において、複数の代替案を絞り込んで実施していく困難が提起されている<sup>[51]</sup>。これらの難点が提示されている現状においては、社会にとって有意義な実用化戦略を立案していくために社会的受容性を積極的に評価する意義を問い続けていく必要がある。

また、社会的受容性に関しては、やはり社会に全て尋ねて評価するべきであると 考えることは自然な方向であり、当然最終取りまとめに向けて、アンケートの実施 なども考えるべきであろう。ただし、アンケートの実施によって社会的受容性の評 価を行うことはかなり難しい。その理由として以下のような点が挙げられる。

- 1. 専門家を対象とする場合ならばともかく、一般公衆を対象としてアンケート を実施するためには、FBR サイクル候補概念の選択における社会的受容性の 意味などを説明し、理解を得ねばならないこと
- アンケートの実施自体も時間と労力を要し、対象者の主体的協力が不可欠で あること、さらに、こうした協力を依頼するには、時間や予算面の制約も大 きいこと。

以上から、最終取りまとめ時の評価においてアンケートを実施するためには、インターネットや IT 技術を巧みに利用することを検討すべきではないかと考える。

また、社会的受容性については、単なる評価に留まらず、実践的活動の重要性が 叫ばれている。最近、盛んな公衆とのリスクコミュニケーション、社会的な決定や 合意形成をどのように考え、実践していけばよいのか、FBR サイクルの技術的な研 究開発や導入に関する技術的検討を越えて、人文社会科学的な検討も要求される問 題である。今後はこうした問題に対して実用化戦略調査研究にふさわしい評価と実 践が求められる。 2.2.4 各評価視点間の重み付け手法

各評価視点間の重みを付けることは、難しい問題である。経済性、環境負荷低減 性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性という質的に異 なる比較困難な各視点間でどの視点を重視するのかについての検討が必要だからで ある。

この手法としては、フェーズ 以来、意思決定手法の 1 つである階層分析法 (Analytical Hierarchical Process: AHP)を適用するという方法が提示されてき た<sup>[1][8][52]</sup>。確かに AHP を適用すれば、評価視点間の重みを付けることが可能である。 しかし、実際には AHP の適用により、各評価視点間の重みを付けることはかなり 難しい。その理由としては、社会的受容性の評価と類似した以下の点が挙げられる。

- (1) 専門家を対象とする場合ならばともかく、一般公衆を対象として AHP を実施するためには、FBR サイクル候補概念の内容とそれらの候補概念選択における各評価指標の意味などを説明し、理解を得ねばならないこと
- (2) AHP の実施自体も時間と労力を要し、対象者の主体的協力が不可欠であること、さらに、こうした協力を依頼するには、時間や予算面の制約も大きいこと。
- (3) オリジナルの AHP では、矛盾度が大きいときには評価結果を棄却することになる。このため、数視点の重みを付けるだけでも、かなり多くの評価結果を棄却せねばならないことが予想され、ますます多数のサンプルを取得することが難しいこと。

中間とりまとめ時にはこうした点を踏まえ、別の方法を模索することとした。将 来社会を確実に予測する手法はないことから、シナリオ・プランニングの手法<sup>[53]</sup>を 活用しながら将来社会のシナリオを複数個提出して、その将来社会で重視される価 値観を反映した重みを付ける方向で実施することとした。具体的には、以下の1~ 3のステップにより重み付けを実施する。

- (1) 将来のエネルギー需給や価値観などに影響を及ぼすと考えられる未来予測に ついて、文献調査等を通じて整理し、未来予測項目を列挙する。
- (2) 各未来予測項目に関して、そのような社会変化が起こったときにどの視点が 重視されるかを、一対比較により設定する。(未来予測項目ごとの視点間一対 比較)
- (3) 予測項目をいくつか組み合わせて取り上げることにより、将来の実現可能性が考えられる複数のシナリオを設定する。重み付けは、各シナリオの下で取り上げられた予測項目に対する視点間一対比較を「集団 AHP」のルールに従って取りまとめることにより決定する。

2.2.4.1 将来社会の予測調査

将来社会の予測について調査することとした。総括的な検討に加えて、特にエネ ルギーや環境などに関する最近の幅広い検討を中心にすることとした。(1)から(5) に将来社会を予測した文献の概要をまとめることとした。

(1) 21 世紀日本の構想懇談会報告<sup>[54]</sup>

21世紀日本の構想懇談会報告は、小渕元首相の委嘱による「21世紀日本の構想」 懇談会(第1~第4分科会)の10ヵ月に及ぶ集中的な論議の結果生まれたもので ある。これは来世紀に向かう日本の課題と方策を中長期の観点から整理し、広く国 民の論議に供することを意図している。主たる内容項目は以下のとおりである。

- (1) 豊かさと活力(第2分科会報告書)
   組織と人間との多様な関わり方 ガバナンスの問いかけ
   「参加し、公を担う」 社会のガバナンスを担う活力
   ・「官」の統治から自治的統治へ
  - ・社会のガバナンスを担う主体
  - ・「参加」のための条件整備
- (2) 安心とうるおいの生活(第3分科会報告書) 転換期を生かして21世紀を安心の社会に
  - ・新しい価値軸の設定
  - ・個人を活かす社会システムへの転換 社会保障(医療・介護・年金) 生き生きとした「健康長寿」の確保 ライフステージ・分散協調型ネットワーク社会を支える情報と科学技術
  - ・情報 共有とコミュニケーションにより新しいコミュニティを
  - ・科学および科学技術 自然・人間・人工の関係の再構築
- (3) 美しい国土と安全な社会(第4分科会報告書)
   開かれた社会の環境と安全の確保に向けて
   危機に強い国づくり
   ・戦略的に思考する
  - ・科学と情報を使いこなす
  - ・連携して危機を管理する
- (4) 世界に生きる日本(第1分科会報告書)開かれた国益

隣交 近隣アジアとの協調 シビリアン・パワー

(2) エネルギー基本計画[55]

エネルギー基本計画は、経済産業省資源エネルギー庁の総合資源エネルギー調査 会基本計画部会により検討され、エネルギー政策基本法(平成14年法律第71号) 第12条第4項の規定に基づき、平成15年10月に経済産業省資源エネルギー庁に より発表された。

本計画は、「安定供給の確保」、「環境への適合」、「市場原理の活用」という基本 方針から構成されており、その方針を以下に示す。

(1) 安定供給の確保

アジア地域を中心とした今後のエネルギー需要の伸びや我が国の石油の中東 依存度を踏まえ、安定供給確保のため以下の対策を推進。

- ・省エネルギー
- ・輸入エネルギー供給源の多角化や主要産出国との関係強化
- ・国産エネルギー等エネルギー源の多様化

・備蓄の確保 関東圏の電力需給問題等を踏まえ、国内供給の信頼性・安定性の確保を図る。 安全確保は安定供給の大前提。国、事業者は安全の確保に全力を挙げて取り組 む。

(2) 環境への適合

NOx 、SOx 等の低減に加え、地球温暖化問題に対応するため、以下の対策を推 進。

省エネルギー

非化石エネルギーの利用、ガス体エネルギーへの転換

化石燃料のクリーン化および高効率利用技術の開発・導入

(3) 市場原理の活用

・「安定供給の確保」、「環境への適合」を十分考慮した上で、制度改革を進める とともに、我が国の実情に適合する形での市場原理の活用策を設計。

また、"長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策"の内容項目は以下のとおりである。

(1) エネルギー需要対策の推進 省エネルギー対策の推進と資源節約型の経済・社会構造の形成

- (2) 多様なエネルギーの開発、導入および利用
   原子力の開発、導入および利用
   新エネルギーの開発、導入および利用
   ガス体エネルギーの開発、導入および利用
   石炭の開発、導入および利用
   環境に適合した利用技術(クリーン・コール・テクノロジー)の開発・普及を
   行う。
- (3) 石油の安定供給の確保等 石油は経済性・利便性の観点から今後も重要なエネルギーである。大部分を 中東に依存しており、供給構造は脆弱なため、安定供給を確保する観点から、 石油備蓄の着実な実施、産油国との関係強化等総合的な資源戦略の展開、石 油産業の強靱な経営基盤の構築を進める。
- (4) 電気事業制度・ガス事業制度の在り方
   電気事業制度:全面自由化については、十分慎重に検討する
   ガス事業制度:全面自由化については、十分慎重に検討する。
- (5) 長期的展望を踏まえた取組 10~30年以上の長期的視野の下、分散型エネルギーシステムや水素エネルギ ーシステムといった将来のエネルギーシステム実現のための取組を一層強化 する。
- (3) 環境省における検討<sup>[56]</sup>

環境省は、有識者から構成される「温室効果ガス排出量削減シナリオ策定ワーキ ンググループ」を設置し、将来の日本の社会経済の発展についてのいくつかのシナ リオ(日本国シナリオ)を作成し、日本の温室効果ガス将来排出量や対策効果量の 推計に資することを目的に検討を行った。環境省が検討したシナリオを表 2.2.16 に 示す。

日本国シナリオの作成にあたっては、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) による排出シナリオに関 する特別報告書(Special Report on Emission Scenario: SRES) シナリオを踏襲 しており、SRES シナリオの各ストーリーライン に対応する日本国シナリオのス トーリーラインを作成している。すなわち、SRES では、経済志向か環境志向(A

B)か、地球主義志向か地域主義志向か(1 - 2)という二つの軸の組合せによって4つのシナリオ(A1、A2、B1、B2)を示しており(シナリオは図 2.2.33 参照) その枠組みが踏襲されている。

シナリオ	基調をなす内容
A1	日本がグローバル経済におかれ、競争に勝ち抜くために経済的合理性を重
	視した市場中心の経済システムに移行する。
A2	従来の社会や経済の枠組みを急激に変化させることを好まず、従来の延長
	線上での経済発展を目指す。
B1	技術革新により、脱マテリアル化と経済発展の両立を目指す。
B2	個々の地域が持続可能で自立的な生産圏を保有し、個々の地域が共存する。

表 2.2.16 環境省が検討したシナリオ(ストーリーライン)



A - B 軸:経済(Economic)志向-環境(Environmental)志向 (解説)経済発展についての相対的な方向性として、経済成長を重視するのか、環境を重視するの かをあらわす軸。なお、日本国シナリオにおいては、環境志向に関して、環境に追加して福祉につ いても重視するものとする。 1 - 2 軸:地球主義(Global)志向 - 地域主義(Regional)志向 (解説)経済発展についての相対的な方向性として、地球主義的な経済発展を目指すのか、地域主 義的な経済発展を目指すのかをあらわす軸である。地球主義には、マーケットメカニズムの重視と いった概念も含まれている。

## 図 2.2.33 環境省が参考にした SRES シナリオの枠組み

## (4) OECD/NEA の報告書<sup>[57]</sup>

経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)が刊行した報告書「Nuclear Development. Society and Nuclear Energy: Towards a better understanding」の中で、エネルギー問題と経済発展、環境問題の風潮、原子力に対する世論といった

社会的な問題に対して、「原子力に影響を及ぼす社会の変化」、「環境問題に対する社 会的な認識」、「経済分野での進展」、「人工・人的資源の要件」という4つの観点に ついて述べている。

- (1) 原子力に影響を及ぼす社会の変化
   消費者の行動 / 都市化と電化
- (2) 環境問題に対する社会的な認識 原子力、環境、気候変動 / 炭素の排出量を削減するための代替オプション
- (3) 経済分野での進展 エネルギーと電力市場の規制緩和 / 燃料価格 / 環境問題という外部性の内部化
- (4) 人工・人的資源の要件 インフラ / 人的資源 / 社会と直接的に関連した原子力問題 / 放射性廃棄物 / 原 子炉安全 / 核拡散
- (5) 日本の将来推計人口(国立社会保障・人口問題研究所)<sup>[58]</sup>

国立社会保障・人口問題研究所は、平成9年1月、日本の将来推計人口を発表した。推計は平成8(1996)年~平成62(2050)年の55年間にわたる日本の人口変化をあらわしており、推計結果は年少人口(0~14歳人口)、生産年齢人口(15~64歳人口)、老年人口(65歳以上人口)の3つに区分した。高位・中位・低位の3種類の人口推計が行なわれている。

## 2.2.4.2 未来予測項目の抽出

本項では、経済、衣食住、人口、国際関係、環境・エネルギー、政治・治安という6つのカテゴリーについて、ここ30年ほどの間に起こり得るとされる予測項目のうち、一般性が高いものを抽出した。予測項目の抽出にあたっては、

電源選択に係る広く一般の価値変化を捉えることを主眼とし、特定の主体(誰) に限定する項目は除外する。

個別の法律や行政制度に関わる項目よりも、少数の主体の意思に左右されない 項目を中心に取り上げる。

ことを基本的な方針とした。

具体的な未来予測項目の抽出にあたっては、上述の抽出条件や予測項目間の相互 のバランスについて考慮してはいるものの、抽出結果は全てが相互に完全に独立し たものではなく、また、多くの予測項目は世の中に想定される様々な変化を包括す る内容となっており、その抽出の基準や境界を完全に明確にできない面もある。 例えば、上記6つのカテゴリーには含まれないものの、取り上げる必要性がある 未来予測項目として、「科学技術の進歩」があるが、中間とりまとめ時は、「技術が もたらす社会変化」を捉えるという方針の下で、高度情報化、都市化など具体的な 社会変化の事象の中で技術の進歩を捉えることとし、一般的な「科学技術の進歩」 を個々の未来予測項目には挙げていない。

また、電源選択に関わる項目として、我が国における「電力自由化の進展」も検 討すべきであるとの指摘がある。同項目は、電気事業者という特定の主体に特に強 く関わる項目であり、抽出にあたっての基本方針に照らせば未来予測項目としては 取り上げないこととなるが、ここでは、規制緩和一般を社会全体における一つの潮 流と捉え得ること、また、規制緩和の進展状況は電源選択に大きく影響すると考え られることから、経済性のカテゴリーの中に未来予測項目の一つとして取り入れる こととした。

以上のように、未来予測項目の設定においては、焦点を定めるためにも、将来社 会シナリオを作成する際、FBR サイクルを中心として軸を絞ること、未来予測の主 体(誰にとっての予測かといった点)を明確にして項目を絞り込むことが課題であ るが、その際には項目を採否するための基準や項目同士をグルーピングする方針も 明示するべきである。未来予測項目同士の連鎖を考慮した動的な予測を踏まえるこ となどが今後の長期的な課題である。

2.2.4.3 未来予測項目を基にした一対比較

2.2.4.2 で抽出した未来予測項目毎にその項目が実現した時を想定して、各評価視点 間で一対比較を行ない、各視点の重要度(重み)を設定する。ここでは、シナリオ ~ を構成する未来予測項目だけではなく、それ以外の予測項目についても一対比較 を実施した。また、安全性については、合否による評価であること、未来予測項目に よって重視度は変化しない性質を持っていることを考慮し、一対比較の対象から外し た。

表 2.2.17 および表 2.2.18 に、未来予測項目ごとの一対比較方針を示した。表中の 最左列には、経済、衣食住、人口、国際関係、環境・エネルギー、政治・治安の6つ のカテゴリーを示し、2 列目には、未来予測項目を示す。また、3 列目には、未来予 測項目に対応する社会変化を例示している。さらに、未来予測項目と社会変化が生じ たときに重視する評価視点を5 段階で分類して示している。4 列目から7 列目までで 示しており、4 列目の評価視点が最も重視され、右に移るほど重視されなくなる。た だし、影響がないと考えられる評価視点は同表への記載を省略している。

- ・ 直接的影響が大きい
- 直接的影響がある
- 間接的影響がある
- ・ 間接的影響があるが比較的小さい
- 影響はない(表への記載は省略)

表 2.2.17 未来予測項目に基づく一対比較方針(その1)

				重視	する視点		
	未来予測項目	関連する社会変化	直接的影響が 大きい	直接的影響がある	間接的影響がある	間接的影響があるが 比較的小さい	備考(主に間接的影響について)
疾 粱	構造的不況の長期化	<ul> <li>・デフレ進行</li> <li>・失業率の上昇</li> <li>・所得の低下(所得格差の拡大)</li> <li>・経済成長の低迷</li> </ul>	经济性	技術的実現性	(電力以外発生資源)		電力以外発生資源についても少しでも効率的に使おうとするマインドが高まる と想定。
	経済的合理化の成功	・高い経済成長率を達成 ・産業のサービス化 ・消費行動の活発化			資源有効利用性 環境影響低減性 核拡散抵抗性 社会的受容性		経済的な面で余裕が生じることにより、環境、資源、核拡散や事故リスクなど に関する議論がより活発化する傾向にある。
	規制緩和の進展	・電気事業やガス事業におけ る自由化の進展	経済性				
衣食住	都市化	<ul> <li>・都市化の再進展(ポロロッカ化)</li> <li>・大深度地下、起々高層ビル</li> <li>・24時間化(眠らぬ都市)</li> </ul>			環境影響低減性**	核拡散抵抗性 社会的受容性	自然との接点が失われる中で、自然回帰指向が環境に関する議論を生み出 す。また、都市犯罪増加に伴って、直接的な関係は薄いとしてもテロなどへの 関心も付随的に高まる。
	<u></u> う 耀 雄	・自給率低下 ・農地減少 ・途上国人口爆発			環境影響低減性**	資源有効利用性 核拡散抵抗性 社会的受容性	食種難の1つの要因としての農地面積減少により環境悪化への懸念が高まる ととむに、電源立地への考え方にも影響する。また、持続性指向や治安悪化 という影響も見られると考えられる。
	高度情報化	・ユビキタス化 ・SOHの進展 ・情報機器の普及進展				社会的受容性 核拡散抵抗性 環境影響低減性	個人の情報取得・意見表明機会が増し、また、IT犯罪やサイバーテロへの懸念が生じる。間接的に核拡散や立地問題への議論が高まる可能性があると想定する。また、情報化による物流増大がもたらす環境悪化の懸念が生じる可能性も考慮する。
ЧП	人口減少・人口構造変化	<ul> <li>・シ子高齢化</li> <li>・長寿命化</li> <li>・長寿命化</li> <li>・労働人口点少</li> <li>・エネルギー需要減少</li> </ul>			経済性 資源有効利用性 環境影響低減性 核拡散抵抗性 技術的実現性 社会的受容性		少子高齢化に伴う経済停滞による経済性と技術的実現性への影響、また、余剰供給力発生により選択の幅が拡大したとすれば、経済性以外の視点にも関心が寄せられる可能性があると想定。
注1)電力に 注2)他電源 注3)他電源	↓外発生資源(カッコ書き) 止較評価における資源( 比較評価では環境影響(	)は、他電源間比較評価における指 株給性は、ここでは便宜上、資源有3 氐滅性を以下のように区別。*は地現	標 効利用性で示している 家環境重視、**は地 <sup>均</sup>	)。 战環境重視、無印は標 <sup>2</sup>	準型。		

JNC TN9400 2004-052

表 2.2.18 未来予測項目に基づく一対比較方針(その2)

				重視	まる視点		
	未来予測項目	関連する 社会変化	直接的影響が大き い	直接的影響がある	間接的影響がある	間接的影響があるが 比較的小さい	備考(主に間接的影響について)
国際関係	国際代	・国際交流活性化 ・移民の増加			経済性 資源有効利用性 環境影響低減性* 核拡散抵抗性 技術的実現性		グローバルな価値観が浸透することで、世界の問題として議論され得る視点 (資源、環境、核拡散)については何らかの影響が生じると想定。また、国際社 会で生き残るための経済性追求と、それに伴う技術的実現性への関心も高ま ると想定。
	国際関係不安定化			資源有効利用性 核拡散抵抗性	社会的受容性		核拡散抵抗性への関心が高まるない中、付随的に社会的受容性への影響も 生じると想定。
環境・ エネルギー	地球環境悪化	・地球温暖化 ・オゾン層破壊 ・砂漠化	環境影響低減性*		(電力以外発生資源)	資源有効利用性	環境保全への高まりにより、付随的に資源の問題も議論される傾向があると考える。効率性重視により電力以外発生資源の利用についても議論も高まると 想定。
	地域環境悪化	・廃棄物処分問題の顕在化 ・大気汚染の進展 ・土壌、水質汚染の進展 ・環境事故の多発	環境影響低減性**		社会的受容性 (電力以外発生資源)	資源有効利用性	環境保全への高まりにより、付随的に資源の問題も議論される傾向があると想定。また、地域環境懸念は社会的受容性へも影響すると考える。効率性重視により電力以外発生資源の利用についても議論も高まると想定。
	化石燃料枯渴	・中東諸国による滅産	資源有効利用性		環境影響低減性 技術的実現性 (電力以外発生資源)		資源への関心の高まりによって、付随的に環境影響の議論もなされると想定。 また、資源論は時間軸上での議論になるため、いつまでに実現するかという論 点(技術的実現性に含まれる)も必要となる。効率性重視により電力以外発生 資源の利用についても議論も高まると想定。
政治·治安	地方分権化	・首都移転 ・市町村合併の進行(市政の大型 化)		社会的受容性	技術的実現性 (電力以外発生資源)	環境影響低減性**	エネルギー選択が地方 自治体主導になると想定すると、実績・実現性が重視される傾向が予測される。また、地域環境への関心の高まりも無視できないことが考えられる。地域社会で利用可能な電力以外発生資源についての関心も高まると想定。
	治安悪化	・犯罪の低年齢化 ・犯罪の凶悪化、無差別化 ・ハイテク犯罪の横行 ・テロの多発	核拡散抵抗性		社会的受容性		犯罪誘発により核拡散懸念が高まるのに伴って社会的受容性にも影響がある と想定。
注1)電力以 注2)他電源	以外発生資源(カッコ書き)1 比較評価における資源供	は、他電源間比較評価における指標 給性は、ここでは便宜上、資源有効	€ ●利用性で示している。				

注2)他電源比較評価における資源供給性は、ここでは便宜上、資源有効利用性で示している。 注3)他電源比較評価では環境影響低減性を以下のように区別。\*は地球環境重視、\*\*は地域環境重視、 無印は標準型。 2.2.4.4 将来社会シナリオの策定

2.2.4.2 で抽出した未来予測項目を基に、将来社会シナリオを策定した。エネルギ ーを取り巻く状況に着目し、エネルギー基本計画における「安定供給の確保」、「環境 への適合」、「市場原理の活用」にそれぞれ大きく依存するような3種類の将来社会シ ナリオと、特段エネルギーには関係なく、いわば「無色のシナリオ」として、将来日 本の社会変化を及ぼす潮流としての「ベースシナリオ」を策定した。

これは、「ベースシナリオ」が重要で他のシナリオが派生的ということではなく、 単にさまざまな状況における将来社会において、重視される要素が違うことを示して いる。

(1) シナリオ 「ベースシナリオ」

「21 世紀日本の構想」懇談会報告では、21 世紀において我が国に社会変化を及ぼ す潮流として、以下を挙げている。

・ グローバル化と、その結果としてグローバル・リテラシーの重要性の高まり

- 情報技術の革命的進歩を含めた科学技術進展
- ・ 世界のどこよりも我が国で早く進む少子高齢化

2.2.4.2 で列挙した未来予測項目のうち、これらに関連するものとして、表 2.2.19 に 示したとおり、国際化、高度情報化、人口減少・人口構造変化の3項目が挙げられる (表の2列目に示す。1列目については、社会変化の大分類を示す)。それらの組合 せをシナリオ として設定する。また表 2.2.19 には、参考までにそれらの未来予測 項目に関連する将来社会の変化を3列目に示し、それらの未来予測項目が実現した場 合の帰結を最右列に示す(以下、他のシナリオの場合も同様)。

未来	<b>长予測項目</b>	関連する 社会変化	概要
国際関係	国際化	<ul> <li>・国際交流活性化</li> <li>・移民の増加</li> </ul>	ー層の国際化が進展し、あらゆる分野での国境が希薄になる。文化的交流が進展し、日本に住む外国人が一層増加する。
衣食住	高度情報化	<ul> <li>・ユビキタス化</li> <li>・SOHO進展</li> <li>・情報機器の普及進展</li> </ul>	産業分野、経済分野のみならず、家庭生活においても情報化は加速度的に高まっ てくる。ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク技術がますます高度化し、いつで もどこでもあらゆる情報にアクセスできる環境が整い、場所を選ばずに仕事や私 生活を営むライフスタイルの転換が起こる。
人口	人口減少・人口構造変 化	<ul> <li>・少子高齢化</li> <li>・長寿命化</li> <li>・核家族化</li> <li>・労働人口減少</li> <li>・エネルギー需要減少</li> </ul>	少子化が進み、日本人の平均年齢が高齢化するとともに、人口が減少する(中位 推計で2006年ピーク、高位推計で2009年ピーク)。平均寿命も延びる。日本の高 齢化率は2015年に25.2%、2030年に28.0%、2049年に32.3%と増加する。また、一 層の核家族化が進展し、世帯数が増加する。主に人口減少の結果として、2020年 前後に日本のエネルギー需要が減少に転じる。

表 2.2.19 シナリオ①を構成する未来予測項目と、そのストーリー

注) 関連する評価視点については表 2.2.17 と表 2.2.18 を参照。

<シナリオ のストーリー>

情報技術の発達に伴って、国籍、居住地、所属などを問わずに個人や組織が自ら の意志を簡単に大量に発信できるようになるとともに、政治や行政などに関わる情 報の流れも飛躍的に大きくなる。このような高度情報化を1つの要因としながら、 国際化・グローバル化が進展し、経済・科学・学術・教育・治安維持など様々な分 野で制度や基準の汎用性と有用性が世界標準に照らされ、問われるようになる。ま た、先進諸国の多くでは少子高齢化による社会コスト上昇という課題に直面するこ とになるが、我が国は世界のどこよりも早くその傾向が顕著になり、社会の活力を いかに維持すべきなのかという観点からの議論も重要になる。 このシナリオでは、将来の社会変化として考えられる大きな事象を網羅的に取り上 げており、多様な価値観変化が概ね同等に電源選択に影響するものと考えられる。

(2) シナリオ 「安定供給重視シナリオ」

エネルギー基本計画では、"安定供給の確保"をエネルギーセキュリティ強化と省 エネルギーを柱として位置付けていると考えられる。ここでは、それらに関する懸念 となることが想定される未来予測項目を取り上げる。すなわち、エネルギーセキュリ ティ強化については、資源枯渇の懸念と国際関係悪化の懸念を、省エネルギーについ ては、「高度情報化」に起因するモノ・人の運輸需要増加を取り上げる。表 2.2.20 に シナリオ を構成する未来予測項目とそのストーリーを示す。

表 2.2.20 シナリオ②を構成する未来予測項目と、そのストーリー

未来	<del>、</del> 予測項目	関連する 社会変化	概要
環境・エネルギー	化石燃料枯渇	・中東諸国による減産	化石燃料(石油)の残存可採埋蔵量の減少による減産が始まる。多くの資源学者 は減産が始まる時期を2020年~2030年と予測している。
衣食住	高度情報化	<ul> <li>・ユビキタス化</li> <li>・SOHO進展</li> <li>・情報機器の普及進展</li> </ul>	産業分野、経済分野のみならず、家庭生活においても情報化は加速度的に高まっ てくる。ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク技術がますます高度化し、いつで もどこでもあらゆる情報にアクセスできる環境が整い、場所を選ばずに仕事や私 生活を営むライフスタイルの転換が起こる。
国際関係	国際関係不安定化		米国を中心とする国際社会がその反勢力根絶を進めるプロセスで国際関係が極めて不安定な状態になる。日本と北朝鮮の関係も不安定な状況が継続する。

注) 関連する評価視点については表 2.2.17 と表 2.2.18 を参照。

<シナリオ のストーリー>

化石燃料資源の枯渇懸念が高まり、また、それを要因の一つとして、世界的に国際関係が不安定化する。エネルギー供給構造が脆弱である我が国では、省エネルギーへの関心が高まる一方で、情報化の進展に伴う物流の増加など運輸部門を中心としたエネルギー需要増加の傾向が見られるようになる。エネルギーの安定供給を確保するために、石油等の資源輸入元の多角化や備蓄の推進とともに、代替エネルギー利用の推進が現在以上に重要視されるようになる。

(3) シナリオ 「環境重視シナリオ」

環境については、エネルギー基本計画においては、地域環境と地球環境をともに含 んでいると考えられる。ここでは、両者の悪化懸念に関する未来予測項目(地域環境 悪化、地球環境悪化)を取り上げる。

また、地域環境問題の代表である大気汚染については、運輸部門の排出についても 深刻な問題であるとされている。運輸需要を増大させる要因の一つとして情報化の進 展があり、当シナリオを構成する未来予測項目の一つとして取り上げることとする。

表 2.2.21 にシナリオ を構成する未来予測項目とそのストーリーを示す。

未来	予測項目	関連する 社会変化	概要
衣食住	高度情報化	<ul> <li>・ユビキタス化</li> <li>・SOHO進展</li> <li>・情報機器の普及進展</li> </ul>	産業分野、経済分野のみならず、家庭生活においても情報化は加速 度的に高まってくる。ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク技術が ますます高度化し、いつでもどこでもあらゆる情報にアクセスできる 環境が整い、場所を選ばずに仕事や私生活を営むライフスタイルの 転換が起こる。
環境・エネルギ-	地球環境悪化	<ul> <li>・地球温暖化</li> <li>・オゾン層破壊</li> <li>・砂漠化</li> </ul>	地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化などの地球環境問題が深刻化する。途上国の人口爆発、利己的な政策等により京都議定書等の国際 的な取り組みの実効性が損なわれ、予想以上の地球環境破壊が起 こる。
	地域環境悪化	<ul> <li>・廃棄物処分問題の顕在化</li> <li>・大気汚染の進展</li> <li>・土壌、水質汚染の進展</li> <li>・環境事故の多発</li> </ul>	局所的な大気汚染、土壌・水質汚染、埋め立て処分場の逼迫による 廃棄物処理問題など、地域の環境問題が一層深刻化する。

表 2.2.21 シナリオ③を構成する未来予測項目と、そのストーリー

注)関連する評価視点については表 2.2.17 と表 2.2.18 を参照。

<シナリオ のストーリー>

エネルギー利用に伴って生じる環境負荷低減がますます重要な課題だと広 く認識される。従来からの窒素酸化物や硫黄酸化物については、規制措置や 事業者の取り組み等の結果として排出量低減の成果が上がるものの、運輸部 門の燃料消費量増加などもあり、引き続き低減努力が求められる。大気汚染 など地域環境への影響に対する懸念の増大は社会的受容性にも影響し、立地 における受容性向上も現状と比して大きな課題となる。また、それに加え、 地球温暖化問題がさらに顕在化し、我が国としてもエネルギー起源の CO<sub>2</sub> 削 減が大きな課題となる。

(4) シナリオ 「市場原理重視シナリオ」

エネルギー基本計画においては、「安定供給の確保、環境への適合を十分考慮した上 で、制度改革を進める」こととしているが、ここでは、市場原理進展のみに視点をお き、経済性が特に重視されるシナリオを設定する。未来予測項目のうち、まず規制緩 和の進展を取り上げ、さらに、構造的不況の長期化により経済性がさらに重視される こととする。 また、構想日本による「日本のエネルギー戦略を考える」では、3つのシナリオ(国 家主導シナリオ、ビッグバンシナリオ、環境共同体シナリオ)を想定しており、その 中に市場原理が中心となる"ビッグバンシナリオ"がある<sup>[59]</sup>。同シナリオでは、CO<sub>2</sub> 排出権取引実施を想定しており、地球環境についても経済性という観点から重視され ることを示唆している。そこで、ここでは、「規制緩和進展」と「構造的不況の長期化」 に加え、「地球環境悪化」を取り上げることとする。

表 2.2.22 にシナリオ を構成する未来予測項目とそのストーリーを示す。

表 2.2.22 シナリオ④を構成する未来予測項目と、そのストーリー

未来予測項目		関連する 社会変化	概要
経済	構造的不況の長期化	<ul> <li>・デフレ進行</li> <li>・失業率の上昇</li> <li>・所得の低下(所得格差の 拡大)</li> </ul>	バブル崩壊後の構造的不況が長期化し、日本の経済成長が低迷を続ける。 デフレの進行、失業率の低下とともに平均所得が下がり、一部の裕福層とそ れ以外の所得格差が拡大していく。
	規制緩和の進展	・電気事業やガス事業にお ける自由化の進展	電力やガスなどの小売自由化範囲が広がり、多くの需要家が供給元を選択し 得るようになる。供給側は競争下に置かれ、価格低下やサービス向上といっ た努力を講ずるようになる。
環境・エネルギー	地域環境悪化	<ul> <li>・廃棄物処分問題の顕在 化</li> <li>・大気汚染の進展</li> <li>・土壌、水質汚染の進展</li> </ul>	局所的な大気汚染、土壌・水質汚染、埋め立て処分場の逼迫による廃棄物処 理問題など、地域の環境問題が一層深刻化する。

注) 関連する評価視点については表 2.2.17 と表 2.2.18 を参照。

<シナリオ のストーリー>

電力小売の自由化範囲の拡大など規制緩和が進展し、エネルギー需要家にとって は供給元の選択肢が広がる。エネルギー供給側では、コスト削減やサービス向上な ど事業者間に競争が促される。また、環境面においても、CO<sub>2</sub>排出権取引に代表さ れるような市場原理が導入され、環境負荷低減などの外部コストが内部化される傾 向が進む。一方で、我が国経済は必ずしも上向かず、製造過程、環境関連、研究開 発など、あらゆる面においてコスト意識が非常に高くなる。 2.2.4.5 6評価視点(安全性を除く)の各シナリオにおける重み

2.2.4.4 で設定したシナリオを構成する未来予測項目に関して、一対比較を試み、 その結果を幾何平均法によって集計し、シナリオごとに各評価視点(経済性、環境負 荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性)の重みを 算出した<sup>[5]</sup>。これらの重みを用いて、各 FBR サイクル候補概念に関する各評価視点の 評価結果を集約して、総合的な評価値を算出することが可能となる。

(1) シナリオ 「ベースシナリオ」

このシナリオを構成する未来予測項目(国際化、高度情報化、人口減少)のいずれ も、環境負荷低減性や核拡散抵抗性に直接または間接に影響があると想定しているこ とから、それらのウェイトがやや大きくなっているものの、将来に想定される事象を 網羅的に取り上げているシナリオであるため、各視点に概ね同等の重みがかかる結果 となっている。図 2.2.34 にシナリオ における 6 評価視点の重みを示す。



図 2.2.34 シナリオ①における各評価視点の重み付け結果

(2) シナリオ 「安定供給重視シナリオ」

安定供給を重視する観点から、資源有効利用性に大きなウェイトがついており、また、輸入に頼る資源を確保するためには国際的な協調が大切であり、核拡散抵抗性についてもやや大きなウェイトがかかっている。経済性や環境性の重みは小さくなる重み付け結果である。図 2.2.35 にシナリオ における 6 評価視点の重みを示す。



## 図 2.2.35 シナリオ②における各評価視点の重み付け結果

(3) シナリオ 「環境重視シナリオ」

文字通り、環境面を非常に重視する重み付け結果である。地域の環境負荷低減は社 会的受容性とも関連しており、社会的受容性のウェイトもやや大きくなっている。図 2.2.36 にシナリオ における 6 評価視点の重みを示す。





(4) シナリオ 「市場原理重視シナリオ」

市場原理重視によって経済性のウェイトが最大となっている。環境面のコストも内部化される傾向があるとの設定により、環境影響低減性のウェイトも大きい。また、 好景気を想定していないため、技術的実現性の高い技術が好まれる傾向にある重み付けとなっている。図 2.2.37 にシナリオ における 6 評価視点の重みを示す。



図 2.2.37 シナリオ④における各評価視点の重み付け結果

2.2.4.6 開発目標を設定した4評価視点(安全性を除く)の各シナリオにおける重み

評価基準を満たしているのかについて合否判定する安全性を除くと、経済性、環境 負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性の4評価視点については、具体的な開発 目標が設定されており、4評価視点からの多面的評価の結果をその開発目標への適合 度評価結果であると概ね解釈可能である。ここでは、2.2.4.5 と同様に2.2.4.4 で設定 したシナリオを構成する未来予測項目に関する一対比較結果を幾何平均法によって集 計し、シナリオごとに上記4評価視点の重みを算出した。重みの値は視点の数が変わ ることによって変化するが、基本的な考え方は同じであるので、全体的な傾向は6評 価視点で重み付けしたときと変わらない。

(1) シナリオ 「ベースシナリオ」

エネルギーとはやや関係が遠いが将来に想定される事象を網羅的に取り上げてい るシナリオであるため、各視点に概ね同等の重みがかかる結果となっている。ただ、 このシナリオを構成する未来予測項目(国際化、高度情報化、人口減少)のいずれも、 環境負荷低減性や核拡散抵抗性に直接または間接に影響を及ぼす変化であると想定し ていることから、それらの重みがやや大きくなっている。図 2.2.38 にシナリオ に おける4評価視点の重みを示す。



図 2.2.38 シナリオ①における4評価視点の重み付け結果

(2) シナリオ 「安定供給重視シナリオ」

安定供給を重視する観点から、資源有効利用性に大きなウェイトがついており、また、輸入に頼る資源を確保するためには国際的な協調が大切であり、核拡散抵抗性についてもやや大きなウェイトがかかっている。経済性や環境負荷低減性の重みは小さくなる結果が得られる。図 2.2.39 にシナリオ における 4 評価視点の重みを示す。



図 2.2.39 シナリオ②における4評価視点の重み付け結果

(3) シナリオ 「環境重視シナリオ」

文字通り、環境面を非常に重視する重み付け結果である。評価視点に社会的受容性 が含まれないので、その分だけ環境負荷低減性に重みがかかり、非常に環境負荷低減 性を重視することになる。図 2.2.40 にシナリオ における 4 評価視点の重みを示す。





(4) シナリオ 「市場原理重視シナリオ」

市場原理重視によって経済性のウェイトが最大となっている。環境面のコストも内 部化される傾向があるとの設定により、環境影響低減性のウェイトも大きい。なお、 重視される視点であった技術的実現性が評価視点に含まれないので、その分だけ経済 性と環境負荷低減性に重みがかかることになる。図 2.2.41 にシナリオ における 4 評価視点の重みを示す。





[参考文献]

- [1] 篠田佳彦他:総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ)成果報告
   -、JNC TN9400 2001-061、(2001)
- [2] 篠田佳彦他:高速増殖炉サイクルの特性評価、サイクル機構技報 No.12 別冊 2001.9、JNC TN1340 2001-018、(2001)
- [3] 核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電株式会社:高速増殖炉サイクルの実用 化戦略調査研究(フェーズ) 2001 年度成果報告書、JNC TN1400 2002-001、 (2002)
- [4] 核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電株式会社:高速増殖炉サイクルの実用 化戦略調査研究(フェーズ) 2002 年度成果報告書、JNC TN1400 2003-002、 (2003)
- [5] 小西康哉他:目標達成度評価システムによる評価の実施,三菱総合研究所,報告 書番号未定(2004)
- [6] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張(),三菱総合研究所,JNC TJ9400 2003-007 (2003)
- [7] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張,三菱総合研究所,JNC TJ9400 2002-003(2002)
- [8] 木下栄蔵他: AHP の理論と実際、日科技連出版、(2000)
- [9] 石谷久、石川真澄:シリーズ現代人の数理 2 社会システム工学、浅倉書店、 (1992)
- [10] 田村坦之他: 効用分析の数理と応用、コロナ社、(1992)
- [11] フォン・ベルタランフィ:一般システム理論、長野敬、太田邦昌共訳、みすず 書房、(1973)
- [12] 鈴木正之他:メカトロニクス教科書シリーズ 14 動的システム論、コロナ社 、 (2000)
- [13] 熊澤峰夫他:全地球史解読、東京大学出版会、(2002)
- [14] 「分離核変換工学」専門委員会:総説 分離変換工学、社団法人 日本原子力学 会、(2004)
- [15] 此村守他: 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ 中間報告 -原子炉プラントシステム技術検討書 - 、JNC TN9400 2004-035、(2004)
- [16] 佐藤浩司他:高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ 中間報告
   燃料サイクルシステム技術検討書 、JNC TN9400 2004-036、(2004)
- [17] 通産省: "原子力発電の経済性について"、総合エネルギー調査会原子力部会、第 70回、資料3、(1999)
- [18] 経済産業省:"バックエンド事業全般にわたるコスト構造、原子力発電全体の収益性等の分析・評価~コスト等検討小委員会から電気事業分科会への報告~"、総合エネルギー調査会電気事業分科会コスト等検討小委員会、(2004)

- [19] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) / Nuclear Energy Agency (NEA) and OECD / International Energy Agency (IEA):
   "Projected Costs of Generating Electricity Update 1998", (1998)
- [20] 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会 コスト等検討小委員会: "原子燃料サイクルのバックエンド事業コストの見積もりについて"、資料 1-2、(2004)
- [21] 電気事業連合会: "原子燃料サイクルのバックエンド事業コストの見積もりにつ いて"、資料 1-2、(2004)
- [22] 小松崎均:"わが国電気事業のコスト構造分析と今後の課題"、第 311 回定例研究 報告会、(1995)
- [23] 環境省:循環型社会白書(平成15年版) ぎょうせい、(2003)
- [24] 環境省:環境白書(平成14年版) ぎょうせい、(2002)
- [25] 環境省:環境パフォーマンス指標に関するガイドライン、(2003)
- [26] 牧隆他:環境負荷低減に関する調査、JNC TJ9440 2000-012、(2000)
- [27] 牧隆他: FBR サイクル候補概念に関するサイクル諸量計算、JNC TJ9400 2002-004、(2001)
- [28] 増田純男他:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地 層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊3 地層処分システムの安全評価、 JNC TY1400 2000-001、(2000)
- [29] 共同作業チーム(核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会): TRU 廃棄物処理 処分概念検討書、JNC TY1400 2000-001、(2000)
- [30] 栗坂健一:高速炉燃料サイクルシステムにおける環境負荷に関する検討-平常時の大気放出放射性物質による公衆被ばくの予備検討-、JNC TN9400 2004-014、(2004)
- [31] (OECD)/Nuclear Energy Agency (NEA) and International Atomic Energy Agency (IAEA): "Uranium 2003: Resources, Production and Demand", (2003)
- [32] 牧隆他:FBR サイクル候補概念に関するサイクル諸量計算、JNC TJ9400 2002-004、(2001)
- [33] 牧隆、堀内伸剛: サイクル諸量解析コードの機能拡張、JNC TJ9400 2002-006、 (2002)
- [34] 牧隆、堀内伸剛:サイクル諸量解析コードの機能拡張()、JNC TJ94002003-001、(2003)
- [35] International Atomic Energy Agency (IAEA): International Nuclear Fuel Cycle Evaluation REPROCESSING, PLUTONIUM, HANDLING, RECYCLE Report of INFCE Working Group 4, (1980)
- [36] The Tops Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee: Technological Opportunities To Increase The Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS), Department of Energy (DOE) Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC), (2000)

- [37] "核兵器の不拡散に関する条約第3条1及び4の規定の実施に関する日本国政府 と国際原子力機関との間の協定"、(1977)
- [38] International Atomic Energy Agency (IAEA): INFCIRC/225/Rev. 4, (1999)
- [39] International Atomic Energy Agency (IAEA): INFCIRC/254/Rev.4, (1999)
- [40] 岡田章:ゲーム理論、有斐閣、(1996)
- [41] 寺本義也他:最新 技術評価法、日経 BP 社、(2003)
- [42] 松島克守: MOTの経営学、日経 BP 社、(2004)
- [43] プロジェクトマネジメント導入開発委員会: P2M プロジェクト&プログラムマ ネジメント標準ガイドブック、財団法人エンジニアリング振興協会、(2001)
- [44] National Research Council: Improving Risk Communication, (1989)(和訳本)
   林 裕造、関沢 純監訳、リスクコミュニケーション 前進への提言、化学工業
   日報社、(1997)
- [45] 中谷内一也:環境リスク心理学、ナカニシヤ出版、(2003)
- [46] 松本三和夫:知の失敗と社会 科学技術はなぜ社会にとって問題か、岩波書店、 (2002)
- [47] 岡本浩一:リスク心理学入門、サイエンス社、(1992)
- [48] 山岸俊男: 信頼の構造 こころと社会の進化ゲーム 、東京大学出版会、(1998)
- [49] Arrow, K. J.: Social choice and individual values (2<sup>nd</sup> ed.), New Haven, CT, Yale University Press, (1963)
- [50] 亀田達也: 合議の知を求めて グループの意思決定、認知科学モノグラフ 3、共 立出版、(1997)
- [51] 高野伸栄: "これまでの公共事業における決め方"参加型社会の決め方 公共事業における集団意思決定 第2章、近代科学社、(2004)
- [52] 木下栄蔵:成功と失敗の科学、徳間書店、(2003)
- [53] Peter Schwartz: THE ART OF THE LONG VIEW: Planning for the Future in an Uncertain World, (1991)(和訳本) 垰本一雄訳、シナリオ・プランニングの 技法、東洋経済新報社、(2000)
- [54] 「21世紀日本の構想」懇談会:"21世紀日本の構想懇談会報告"、(2000)
- [55] 経済産業省 資源エネルギー庁: "エネルギー基本計画"、(2003)
- [56] 環境省地球環境局: "4 つの社会経済シナリオについて"、(2001)
- [57] OECD/NEA: Nuclear Development, Society and Nuclear Energy: Towards a better understanding, (日本語版) (2003)
- [58] 国立社会保障・人口問題研究所:"日本の将来人口推計(平成9年度1月推計)"、 (1997)
- [59] 構想日本資料: "第47回JIフォーラム 日本のエネルギー戦略を考える 3 つのストーリーに基づいた最小リスク戦略とは? - "、(2001)

2.3 サイクル諸量評価手法

2.3.1 評価手法の概要と開発整備内容

サイクル諸量評価はウラン需要量、プルトニウム需給量、使用済燃料貯蔵量や放射 性廃棄物発生量などのサイクル諸量を用いて、原子炉および核燃料リサイクル施設の 導入時期や運用規模などに関する炉型・サイクル戦略について検討し、将来のエネル ギー・環境政策と整合性の取れた原子力利用の道筋(シナリオ)を描くことを目的と している。このサイクル諸量評価やシナリオ検討を行うことにより、原子力利用政策 の立案、研究開発機関における技術開発方針策定、産業部門の事業計画策定、国民へ の信頼醸成策立案など、さまざまな分野やステージで行われる意思決定において、基 本的な方向づけを提供していくことも可能となる。

また、実用化戦略調査研究では、これまでに設計された複数の FBR サイクルシス テムを対象とする多面的評価(第3章)や導入シナリオ検討(第4章)において、各 設計概念の特徴やポテンシャルを定量的に評価するため、サイクル諸量解析コードに よる分析を行っている。このサイクル諸量解析コードは、原子炉システムや再処理シ ステムなどの施設運用計画に関する想定条件を基に、核燃料サイクルにおける原料あ るいは製品や廃棄物としての核燃料物質収支の時間変動を計量化する数値シミュレー ションコードである。サイクル機構では、汎用表計算ソフト(Microsoft Excel)を利 用した簡易コード FAMILY-EX、原子炉装荷燃料核種の組成変化をコード内の燃焼計 算ルーチンで詳細に解く FAMILY-21 の二つの解析コードを使用している。ここでは、 フェーズ 前半における FAMILY-EX と FAMILY-21 の機能拡張項目を紹介すること とし、詳細については付録 2 を参照されたい。

(1) FAMILY-EX の機能拡張

・LLFP 分離変換サイクル解析機能

FBR サイクル全般の FP 収支、LLFP 分離変換サイクルにおけるターゲット材の 物質収支、LLFP 核変換炉の導入規模などを計算するワークシートを追加した。

(2) FAMILY-21 の機能拡張

再処理施設におけるマイナーアクチニド回収処理機能の改良

LWR と LWR-P の各再処理計算においても、マイナーアクチニド回収処理を行う 再処理施設の規模を外部入力で予め任意に指定し、その入力条件の範囲以内でマイ ナーアクチニド回収処理が模擬できるよう改良した。

寿命期間中の FBR 炉心特性データ変更機能

余剰プルトニウム量を軽減するためにプラント寿命期間中に FBR 炉心を高増殖 タイプから低増殖タイプに変更する運用方法が想定される。本機能は、このような 炉心特性データの変更(高増殖タイプから低増殖タイプへの変更も含む)を FAMILY-21 で模擬するために追加した。

FBR 再処理設備容量調整機能

余剰プルトニウム量の軽減と計画的なFBR再処理施設の導入を目的として、FBR 再処理設備容量調整機能を追加した。

## 2.3.2 サイクル諸量評価手法のまとめと今後の進め方

#### (1) まとめ

FAMILY-EX(LLFP)の開発により、ターゲット材の物質収支計算を基に、LLFP 核 変換炉の導入量やLLFP分離核変換サイクルのシステム特性を把握することが可能と なり、LLFP 核変換シナリオの検討に使用した。一方、FAMILY-21 については、マイ ナーアクチニド回収処理機能の拡充や余剰プルトニウムを抑制するための二つの自動 計算機能の追加によって、マイナーアクチニドならびにプルトニウムの需給バランス に適した FBR 構成(高増殖、低増殖の導入割合)や FBR 再処理施設規模(高稼働率 条件)などの定量化が可能になった。また、FAMILY-EX とのベンチマークテストで は、サイクル諸量評価手法としての基本動作や計算機能の妥当性を確認した。なお、 二つのコード間で差異が見られたプルトニウム貯蔵量については、プルトニウム払出 量の算出方法の違いによるものと考えられるが、単年度あたりの差が微細であっても 200 年という計算期間で累計した場合には無視し得ない量となり得るため、今後も計 算精度の確認を継続していく必要があると考える。

(2) 今後の予定

フェーズ 最終評価では、環境負荷低減の観点から LLFP やマイナーアクチニドの リサイクルシナリオを補強する必要があると考えられるため、FAMILY-EX(LLFP)に ついては、軽水炉使用済燃料から回収されるストロンチウム、セシウム、テクネチウ ム、ヨウ素なども定量化できるよう機能拡張を行う予定である。また、FAMLIY-21 については、軽水炉プルサーマルの多重リサイクルを想定した計算機能、テイルウラ ン蓄積量の内部演算機能など、以下に示す機能追加を行う予定である。

プルトニウム富化度制限機能

軽水炉プルサーマル多重リサイクルでは、使用済燃料から回収したプルトニウム の高次化に応じて、新燃料中のプルトニウム富化度を徐々に高くして反応度補償を 行う必要がある。この高次化対策としてのプルトニウム富化度の制限条件を外部入 力で任意に変更できるように機能追加を施し、シナリオ応じた適正なプルトニウム 富化度でプルトニウム収支を計算できるようにする。

FBR 再処理施設の多様化オプション

軽水炉プルサーマル使用済燃料を FBR 再処理施設で処理する場合、回収プルト ニウムの供給優先順位を外部入力で任意に指定できるようにする。また、軽水炉濃 縮ウラン使用済燃料を FBR 再処理施設で処理する計算オプションを追加する。 FBR 導入量自動計算における重水炉と軽水炉の代替化

世界全体のシナリオ解析では、CANDU 炉に代表される重水炉が FBR あるいは 軽水炉の代替炉として、一時的に導入が加速することも想定される。そこで、FBR 導入量自動計算機能において、プルトニウム貯蔵量の制約により FBR が新設でき なかった場合、軽水炉の他に重水炉も FBR の代替炉型として取り扱えるようにす る。 2.4 投資対効果評価手法

2.4.1 投資対効果評価システムの概要

投資対効果評価システム<sup>[1]~[5]</sup>の評価手法の概略を図 2.4.1 及び図 2.4.2 に示す。 本システムでは、FBR サイクルの研究開発を実施し、FBR を導入して電力を供 給する場合と、研究開発を行わず、FBR 以外の電源構成によって電力を供給する場 合(図 2.4.1 中の電源構成例 A と B)とを比較し、その便益の差を求めることによ り FBR サイクル研究開発の投資対効果を評価する。

具体的には、まず研究開発成果として FBR サイクルが導入された場合の電源構成(図 2.4.1 中の電源構成例 A)を想定する。次に FBR サイクルが導入されない場合として、FBR 発電量分を他の電源で発電した場合の電源構成(図 2.4.1 中の電源構成例 B)を想定する。



電源構成例 A (FBR 導入)

図 2.4.1 FBR 導入時の電源構成と FBR を導入しない時の電源構成

次に FBR サイクルの研究開発投資額について割引率を考慮して累積額(図 2.4.2 中)を算出する。また、電源構成 A と B における国民全体への便益の違いを現在 価値換算したものの累積額(図 2.4.2 中)を算出する。

最後に累積投資総額に対する累積効果総額(通常、投資が行われた後に享受される効果の合計)の比である利益指数(投資対効果比)を算出する(図 2.4.2 中の右側)。



図 2.4.2 投資対効果評価システムの概略

2.4.2 研究開発投資額の算出

投資対効果評価システムを用いた評価には、効果を金銭価値換算することに加え て研究開発投資額を入力することが必要である。研究開発投資額としては、FBR サ イクル実用化までに必要な研究開発費及び実用化後の改良等の研究開発費が考え られるが、今回の解析では、FBR サイクル実用化までの研究開発費とした。

2.4.3 導入効果の金銭価値換算

FBR サイクル導入の効果として、以下の 6 種類の効果を考慮することとした。これらの効果はいずれも一定の精度で定量的評価が可能と考えられる直接的な効果である。したがって、不安感といったような金銭価値換算できない効果は評価対象とせず、オプション価値などについても考慮していない。

2.4.3.1 発電コスト削減効果

FBR の発電コストと FBR の代替として導入される他電源(代替電源)の発電コ ストの差を計上する。発電コスト削減効果は、

{(代替電源の平均発電コスト)-(FBR の発電コスト)}×(FBR による発電量)

と表される。
2.4.3.2 環境負荷低減効果

環境に負荷を与える効果については、環境に影響を与える物質の排出を考慮した。環境影響物質として、SOx、NOx、CO2を対象とした。代替電源とFBRサイクルからの発生量の差に削減価値を乗じて求める。これらの削減価値は、税あるいは排出権取引額等を参考として設定する。環境負荷低減効果は、

{(代替電源の環境影響物質発生量)-(FBR サイクルの環境影響物質発生量)} ×(環境影響物質削減価値)×(FBR による発電量)

と表される。

各環境影響物質の削減価値は、トン当たりの金額として入力する。別途年次デ ータとして入力する各電源の単位発電量当たりの排出原単位と、発電規模や設備 利用率を基に算出する発電量をこの削減価値に乗じて総排出量に対応する価値を 算出する。

2.4.3.3 生命リスク低減効果

安全面に関しては、生命リスクを低減する効果について考慮した。この効果は、代 替電源と FBR による職業人及び公衆の死亡リスクの差に(そのリスクを低減するた めに支払う金額に関するアンケート結果や生命保険等を参考にした)統計的生命の価 値を乗じて求めた。生命リスク低減効果は、

{(代替電源による死亡リスク)-(FBR サイクルによる死亡リスク)}

×(統計的生命の価値)×(FBR による発電量)

と表される。

各種電源の死亡リスクは、単位発電量当たり、あるいは 100 万 kW の発電所 1 基・ 年当たりの死亡者数を基に算出する。

2.4.3.4 エネルギーセキュリティ向上効果

エネルギーショックが発生して燃料価格が上昇した場合、FBR サイクルの導入に より燃料輸入量を削減した結果、エネルギーショックによる影響を回避できる効果、 さらに石油火力が代替電源に含まれるとき(注:今回の解析では、石油火力は代替 電源に含まれていない)には、FBR 導入分だけ石油備蓄量を低減させることができ る効果を計上する。

(エネルギーショック発生確率)×(エネルギーショック発生時の燃料価格上昇)×{(FBR サイクル を導入しない時の燃料輸入量)-(FBR サイクル導入時の燃料輸入量)}

+{(FBR サイクルを導入しない時の石油備蓄量)-(FBR サイクル導入時の石油備蓄量)}× (石油備蓄に要する費用) と表される。

エネルギーショック発生時の潜在的な燃料価格上昇は、過去の実績などを基に設 定した。

2.4.3.5 資源枯渇抑制効果

FBR サイクル導入により LNG、ウランをはじめとした輸入燃料の需給が緩和され、燃料価格を下げる効果を計上する。資源枯渇抑制効果は、

{(FBR サイクルを導入しない時の燃料価格)-(FBR サイクル導入時の燃料価格)} ×(FBR サイクルを導入しない時の燃料輸入量)

と表される。

燃料価格を下げる効果は、エネルギー価格に対するエネルギー需要の弾性値の逆数(エネルギー需要が一単位増加したときに上昇するエネルギー価格に相当)を基 に算出する。

2.4.3.6 燃料輸入削減効果

FBR サイクル導入に伴い、輸入燃料に依存しない発電が行われることにより、 国民経済的な観点から、輸入が減少する分 GDP(消費+投資+政府支出+輸出-輸入)を引き上げる効果があると考え、これを燃料輸入削減効果として計上する。 燃料輸入削減効果は、

{(FBR サイクルを導入しない時の燃料輸入量)-(FBR サイクル導入時の燃料輸入量)}× (FBR サイクル導入時の燃料価格)

と表される。

燃料輸入削減効果と資源枯渇抑制効果の関係を図 2.4.3 に示す。

また、燃料輸入削減効果と発電コスト削減効果については、2重計算している感 がある。しかし、近似的な議論ではあるが、実質的に発電する電力量が変化せず に発電コストが低下した場合には、国民経済計算上は、資源輸入を削減できる分 だけメリットが得られる。したがって、2重計算しているというわけではない。<sup>[3]</sup>



図 2.4.3 資源枯渇抑制効果と燃料輸入削減効果

[参考文献]

- [1] 塩谷洋樹他:FBR サイクル研究開発の投資対効果評価(研究報告) 核燃料サイ クル開発機構報告書、JNC TN9400 2002-048、(2002)
- [2] 篠田佳彦他:総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ)成果報告 - 、核燃料サイクル開発機構報告書、JNC TN9400 2001-061、(2001)
- [3] 芝剛史他:FBR 研究開発に関する投資対効果評価システム概念の構築、三菱総 合研究所、JNC TJ9400 99-006、(1999)
- [4] 芝剛史他:FBR 研究開発の投資対効果評価システムの詳細検討、三菱総合研究 所、JNC TJ9440 2000-011、(2000)
- [5] 芝剛史他:投資対効果評価システムの開発、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2001-018、(2001)

3. FBR サイクルの多面的評価

#### 3.1 評価対象とした FBR サイクル概念

FBR サイクルシステムを特徴付ける主な要素としては、原子炉冷却材、燃料形態、 再処理方法、および燃料製造方法がある。フェーズ 中間とりまとめで設計研究の 対象となっているのは、次の通りである。

原子炉については、出力規模の観点から大型炉(約110~150万kWe)と中型炉 (75万kWe)の2種類、冷却材の観点からナトリウム冷却、鉛ビスマス冷却、ヘ リウムガス冷却、水冷却の4種類である。

燃料形態に関しては、その化学形態から酸化物、金属、窒化物の3種類、また炉 心性能の観点から FBR 導入期を睨んだ増殖性能の高い「資源重視型炉心」と平衡 期における経済性向上を目指した「経済性重視型炉心」、さらにより高い環境負荷低 減を追求した「LLFP 核変換炉心」が対象となっている。

再処理については、湿式法として先進湿式法と超臨界直接抽出法、乾式法として 酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法である。

燃料製造については、簡素化ペレット法、振動充填法、射出成型法、および被覆 粒子法が設計の対象に取り上げられている。なお、再処理と燃料製造に関しては、 その処理規模が小規模(50 トン/年)と大規模(200 トン/年)の代表的な2ケース について設計を行っている。

原子炉、燃料、再処理、および燃料製造の数多くの組み合わせの中から、技術的 に合理性のないケース、他の代表的な組み合わせから評価結果が類推できるケース 等を除き、多面的評価の対象として 22 ケースに絞り込んだ。多面的評価の対象ケ ースを表 3.1.1 に示す。

ナトリウム炉では、フェーズ において、経済性や資源有効利用等の観点から高 い炉心性能が得られる酸化物燃料と金属燃料を選んだ。フェーズ では酸化物燃料 を対象に燃料サイクル施設の処理規模の影響を把握するため、先進湿式再処理+簡 素化ペレットについて 50 トン/年と 200 トン/年のケースを設定すると共に、50 ト ン/年でも経済性向上が期待される超臨界直接抽出法のケースおよび LLFP 核変換 炉心のケースも設定した。また、原子炉の出力規模の影響を把握するため、経済性 の異なるシングル中型炉とモジュール中型炉を対象に、超臨界直接抽出法と簡素化 ペレット法を組み合わせたケースを設定した。

鉛ビスマス炉では、冷却材の重量が重いため耐震上の理由から中型モジュール炉 を採用し、高い炉心・プラント性能が得られる強制循環方式を取り上げた。

ヘリウムガス冷却炉では、原子炉出口温度の高温化に対応できる被覆粒子窒化物 燃料サイクルを対象に選んだ。

水冷却炉では、酸化物燃料を対象に現状開発の進んでいる先進湿式再処理と簡素 化ペレット法を組み合わせたケースを設定した。

また、評価対象の 22 ケースは多面的な比較評価を行う上で、以下の観点から分 類、整理される。

・原子炉の冷却材毎の特徴を把握する

・原子炉の出力規模の影響を把握する(ナトリウム炉を対象)

- ・燃料形態の特徴を把握する(ナトリウム炉の酸化物と金属、鉛ビスマス炉の酸化物と窒化物)
- ・炉心燃料の性能毎の特徴を把握する(各炉を対象)
- ・再処理や燃料製造施設の処理規模の影響を把握する(ナトリウム炉サイクルを 対象)
- ・再処理と燃料製造の各処理方式の特徴を把握する(ナトリウム炉サイクルを対象)

h_7	后	尚井 业出		再処理		みまた (金田) (本)	たい	
- <u></u>	»/*	ንድ ተ	湿/乾	処理規模	方式	<b>※</b> 科表迫	20-10-	りイジル設定の極目
1				大規模	先進湿式	簡素化ペレット	資源 経済	MOX燃料の最も有望な湿式概念
3							LLFP	FP核変換の代表的な有望概念
4 5			湿式	(2001/y)		振動充填	資源 経済	燃料製造法の違いを評価
6 7	Na大型炉 (1500MWe)	大型炉 MOX 00MWe)	юх	小規模 (50t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	資源 経済	燃料サイクル施設規模の違いを評価
8 9	- -				超臨界	簡素化ペレット	資源 経済	小規模施設の経済性向上に有望な再処理概念
10 11			乾式	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	資源 経済	MOX燃料の最も有望な乾式概念
12 13		金属	乾式	小規模 (50t/y)	金属電解	射出成型	資源 経済	金属燃料で最も有望なサイクル概念
14 15	Na中型炉シングル (750MWe) Na中型炉モジュール (750MWe)	мох	湿式	小規模 (50t/y)	超臨界	簡素化ペレット	資源 経済	初期投資の少ない概念
16 17	Pb-Bi中型炉	窒化物	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	資源 経済	Pb-bi炉サイクルの有望概念
18 19	5虫前1/目圮 (710MWe)	мох	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	<u>資源</u> 経済	燃料の違いを評価
20 21	He大型炉 (1124MWe)	窒化物 被覆粒子	湿式	大規模 (200t/y)	脱被覆+ 先進湿式	被覆法	資源 経済	He炉サイクルの有望概念
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/v)	先進湿式	簡素化ペレット	_	水冷却炉サイクルの有望概念

表 3.1.1 多面的評価の対象ケース(全 22 ケース)

資源 : 倍増時間を短縮し、より効率的にPuを増殖させる炉心仕様。増殖比 1.1~1.2。

経済 : ピン太径化により燃料体積比を向上させ、平均燃焼度向上により燃料サイクルコストの低減を図った概念。 径ブランケット燃料無で増殖比 1.0 を僅かに上回る。

LLFP : 径ブランケット域にターゲット集合体として LLFP を装荷し、核変換することを目指した概念。

3.2 各視点からの評価結果

3.2 項では、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性、 技術的実現性、社会的受容性という 7 つの評価視点から FBR サイクル候補概念を評 価した結果について述べることとする。

3.2.1 安全性の評価結果

安全性の評価結果に関しては、FBR サイクルシステム全体で合否判定を行なうこと とするが、ここでは原子炉プラントシステムと燃料サイクルシステムに大別して評価 した結果を述べ、最後にそれらのシステムを組み合わせた FBR サイクルシステムに 関する評価結果を述べることとする。

3.2.1.1 原子炉プラントシステムの安全性評価

原子炉プラントシステムの安全性については、原子炉プラントシステム技術検討書 において検討および確認されている<sup>[1]</sup>が、以下では安全性の評価構造を参照して、炉 型別に安全性が妥当なレベルに達していることを確認した結果について述べる。

(1)ナトリウム冷却炉(ケース1~15)

ナトリウム冷却炉については、先行ナトリウム冷却炉の設計、運転経験をベー スに検討されているものの、多くの新技術を取り入れた検討途上の概念であり、 基本設計に関する情報が完全に整合がとれた形で全て揃っているわけではなく、 安全性の評価は予備的な段階である。しかし、安全性に関する評価基準への適合 性を否定する事項は今のところ発見されておらず、再臨界回避方策については、 内部ダクト設置型集合体 (Fuel Assembly with Inner Duct Structure: FAIDUS) 概念及びその改良概念等の採否を含めた、炉心およびプラント概念と整合した概 念の明確化を行うという条件付きではあるが、現時点においては合格であると考 えられる。評価構造に合わせて、安全性のレベルを確認した結果を整理した表を 表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 ナトリウム冷却炉の安全性評価結果

下位指標名	
安全設計方針	「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」(平成2年8 月 30 日原子力安全委員会決定) <sup>[2]</sup> 、「発電用軽水型原子炉施設の安全 評価に関する審査指針」(平成2年8月30日原子力安全委員会決定) <sup>[3]</sup> 、「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」(昭和55年11月6日原子 力安全委員会決定) <sup>[4]</sup> と軽水炉及び先行ナトリウム冷却炉(常陽、も んじゅ)の検討結果等に基づき、安全設計方針を暫定的に定めること が可能であり、設計活動において具体化を進めることとしている。 軽水炉および先行ナトリウム炉の検討例を参考に安全機能の重要度 分類を暫定し、高い重要度の安全機能を有する動的機器については、 それが異常発生防止系(Prevention System: PS)の場合、単一機器の 故障が炉心損傷の起因となるような厳しい外乱発生要因とならないよ うに系統構成を多重化するとともに、異常影響緩和系(Mitigation System: MS)の場合、外部電源喪失に加えて機器の単一故障を想定し てもその安全機能が果たせるよう多重性・多様性を持たせた設計とし ており設計要求を満足している。 炉停止系についても、独立した2系統の制御棒による原子炉停止系 を設置すると共に、後備系の切り離し部に、冷却材の温度上昇を感知 する合金を用いた自己作動型炉停止機構(Self Actuated Shutdown System: SASS)を設置することを予定している。また、例え、全ての 交流電源が喪失しても、冷却材の自然循環により崩壊熱の除去が可能 となる見通しを得ている。 冷却系統については、大型炉、中型炉ともに多重化と多様化を図っ た系統構成とし、各系統の空気冷却器ダンパーも多重化している。崩 壊熱除去系は動的機器に期待しない自然循環による除熱が可能として いる。上記の設計により、崩壊熱除去機能喪失による炉心損傷確率の 低減が図られるとともに、全交流電源喪失を仮定しても、冷却材の自 然循環による崩壊熱除去が可能な見通しである。
安全評価	炉心燃料の健全性確保の観点から代表的な設計基準事象を摘出し予 備評価を実施し、外部電源喪失と単一故障を想定した条件においても 炉心燃料の健全性が確保される見通しを得ており、事故時被ばく評価 についても、予備的な評価(事象当たり 5mSv 以下であることを確認 することなど)により成立性見通しを得ている。
炉心損傷防止	先行ナトリウム冷却炉の評価例を参考として、炉心損傷発生頻度を 概算した結果、10 <sup>-6</sup> / 炉年未満を達成できる見通しを得ている。特に 単管蒸気発生器を採用した場合の大型炉についても、原子炉停止後 24 時間以降直接炉心冷却系 (Direct Reactor Auxiliary Cooling System: DRACS)単独での崩壊熱除去が可能であること、ならびに DRACS および 2 次系共用型補助炉心冷却系 (Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System: IRACS)エンクロージャ内への冷却材漏洩時に当該 系統の冷却材循環機能を少なくとも 24 時間維持できることを今後の 確認することを条件として、10 <sup>-6</sup> / 炉年未満を達成できる見通しを得 ている。

	代表的な炉心損傷起因事象である流量喪失型スクラム失敗事象
	(Unprotected Loss of Flow: ULOF)に対して再臨界の回避が検討さ
	れており、今後の研究によって、その見通しを示す予定である。
	MOX 燃料炉心については、炉心損傷事象の起因事象として、ULOF
	を想定した解析評価が実施されており、設計対応により起因過程の即
₩₩₩	発臨界を回避可能な見通しを得ている。初期遷移過程における燃料排
	出については、代替方策の創出とその有効性見通しの明確化を今後行
一先生的止	っていく必要がある。
	金属燃料炉心については、ボイド反応度を 8 ドル程度に抑制した炉
	心設計とすることにより、起因過程での即発臨界を回避できる見通し
	である。遷移過程での燃料流出についても下部軸ブランケットの削除
	により対応できる可能性があるが、評価と設計対応を具体化するため
	に必要なデータベースが不足しているのが現状である。
	代表的な炉心損傷起因事象である ULOF に対して溶融炉心物質の原
	子炉容器内保持・冷却性確保が検討されており、今後の研究によって、
安定冷却と	その見通しを示す予定である。
閉じ込め	MOX 燃料炉心については、原子炉容器内での事故後の冷却保持のた
	め、原子炉容器下部プレナム体積を増加させ、多段の受け皿を設置す
	ることにより保持力向上を図っている。

(2) 鉛ビスマス冷却炉(ケース 16~19)

鉛ビスマス冷却炉については、わが国で開発経験もなく、安全性の評価は予備 的な段階である。しかし、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は 今のところ発見されておらず、特に今後の耐腐食技術の研究開発により、被覆管 と炉内構造物の健全性を確保でき、窒化物燃料を用いる概念については、炉心燃 料破損挙動データを取得するという条件付きではあるが、現時点においては合格 であると考えられる。評価構造に合わせて、安全性のレベルを確認した結果を整 理した表を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 鉛ビスマス冷却炉の安全性評価結果

下位指標名	
安全設計方針	「 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 ( 平成 2 年
	8月30日原子力安全委員会決定)[2]、「発電用軽水型原子炉施設
	の安全評価に関する審査指針」(平成2年8月30日原子力安全委
	員会決定) <sup>[3]</sup> 、「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」(昭和55年
	11月6日原子力安全委員会決定) 44と軽水炉及び先行ナトリウム
	冷却炉(常陽、もんじゅ)の検討結果等に基づき、安全設計方針
	を暫定的に定めることが可能であり、設計活動において具体化を
	進めることとしている。
	炉停止系についても、独立した2系統の制御棒による原子炉停
	止系を設置すると共に、後備系の切り離し部に SASS を設置する
	ことを予定している。また、例え、全ての交流電源が喪失しても、
	冷却材の自然循環により崩壊熱の除去が可能となる見通しを得て
	いる。
安全評価	炉心燃料の健全性確保の観点から代表的な設計基準事象を摘
	出し予備評価を実施した結果、炉心燃料の健全性が確保される見
	通しを得ており、事故時被ばく評価についても、予備的な評価(事
	象当たり 5mSv 以下であることを確認することなど)により成立
	性見通しを得ている。
炉心損傷防止	炉心損傷発生頻度も簡易な確率論的安全評価を実施した結果、
	10-6/炉年未満を達成できる見込みを得ている。
機械エネルギー発	炉心損傷事象に関して、鉛ビスマス冷却材中の破損燃料挙動に
生防止	ついては、今後、実験データを取得する予定である。
安定冷却と	炉心損傷事象に対しても、ガードベッセル機能を有する炉容器
閉じ込め	室内における崩壊熱除去系やコンクリート冷却系による崩壊熱除
	去を可能にして、事象の影響を終息させうる見通しである。

(3) ヘリウム冷却炉(ケース 20、21)

ヘリウム冷却炉については、わが国で開発経験もなく、安全性の評価は予備的 な段階である。しかし、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は今 のところ発見されておらず、SiC製の透過性2重円管内に被覆粒子燃料を充填し、 これを横方向の冷却材流れによって冷却する燃料集合体の具体化と、開発経験の ない大型かつコンプレッサと同軸の縦置きタイプのガスタービンを原子炉と直結 させた概念の具体化、に必要となる研究開発の成功という条件付きではあるが、 現時点においては合格であると考えられる。評価構造に合わせて、安全性のレベ ルを確認した結果を整理した表を表 3.2.3 に示す。

下位指標名	
安全設計方針	「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」(平成2)
	年8月30日原子力安全委員会決定)[2]、「発電用軽水型原子炉施
	設の安全評価に関する審査指針」(平成2年8月30日原子力安全)
	委員会決定) <sup>[3]</sup> 、「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」(昭和55)
	年11月6日原子力安全委員会決定)44と軽水炉及び先行ナトリウ
	ム冷却炉(常陽、もんじゅ)の検討結果等に基づき、安全設計方
	針を暫定的に定めることが可能であり、設計活動において具体化
	を進めることとしている。
	ヘリウムガスの減圧は、除熱能力の低下と正の反応度投入を兼
	ねるので厳しい条件となるが、このときも炉心冷却が可能となる
	ように設計対応がなされている。
	炉停止系についても、独立した 2 系統の制御棒による原子炉停
	止系を設置すると共に、後備系の切り離し部に SASS を設置する
	ことを予定している。また、動的機器による崩壊熱除去に加えて、
	全ての交流電源が喪失しても、冷却材の目然循環により崩壊熱の
	除去が可能となる見通しを得ている。
安全評価	少心燃料の健全性確保の観点から代表的な設計基準事家を摘出 しる供認何を応答した。 なり、ないので、 ないので、 ないので
	し予備評価を美施した結果、炉心燃料の健全性が帷保される見通した得ており、東かは地域く証券についてた。その時間であり、
	しを侍しのり、事政時彼はく評1個についしも、ア1個的な評1個(事   魚光たい 5~5~11 てでちることを疎刻することかどうにといばう
	豕ヨたり JIIISV 以下でのることで唯祕することなと)により成立  桝日涌  た得ている
心。据作时上	住兄旭して待ている。 
水心镇杨内止	「かい頃陽光土頃反し間勿る唯学調的女王計画を失心した細木、   (a) は助伯心 ふ知るのグラビティダンパの動的故陪の排除またけ
	75加圧状能での3系統による自然循環除執で炉心損傷を防止でき
	ることまたは(い高温環境でのヘリウム循環機の運転実績を蓄積
	すること等により同機器が国内軽水炉のポンプ並みの信頼度を有
	することを示すことのいずれか一方を満足することにより、10-6/
	炉年未満を達成できる見込みを得ている。
機械エネルギー発	炉心損傷事象に関して、ヘリウム冷却材中の窒化物被覆粒子燃
生防止	料破損燃料挙動については、今後、実験データを取得する予定で
	ある。
安定冷却と	炉心損傷事象に対しても、炉外コアキャッチャーによる保持と
閉じ込め	コアキャッチャー冷却系による冷却を用いた格納容器による閉じ
	<u>込めによって、事象の影響を終息させうる見通しである。</u>

表 3.2.3 ヘリウム冷却炉の安全性評価結果

(4)水冷却炉(ケース 22)

水冷却炉については、わが国でも、現行熱中性子炉において、特に能動的安全 設備に関して十分な実績があり、その評価手法も実証されている。また、蓄圧注 入系や隔離時冷却系等の安全機器についても、多くの経験がある。近年、シビア アクシデントに関しても研究が進んでおり、システムの合理的設計や事故時影響 の評価手法も確立されてきている。したがって、水冷却炉の安全性に関しては、 今後、高プルトニウム富化度、稠密炉心の除熱性能(特にスケール効果)や再臨 界性など、現行熱中性子炉と異なる特徴を中心に確認・検討する必要はあるが、 現時点で安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は発見されておらず、 合格であると考えられる。評価構造に合わせて、安全性のレベルを確認した結果 を整理した表を表 3.2.4 に示す。

# 表 3.2.4 水冷却炉の安全性評価結果

下位指標名	
安全設計方針	現行熱中性子炉と類似しているため、現行熱中性子炉と同様な
	基準、指針類を参考にすることが可能である。再臨界排除等につ
	いては、ナトリウム冷却炉(常陽、もんじゅ)、また実証炉検討結
	果に基づき、安全設計方針を暫定的に定めることが可能であり、
	設計活動において具体化を進めることとしている。
	炉停止系については、水冷却熱中性子炉における制御棒駆動機
	構及びホウ酸水注入による停止機構の両者について、高い信頼性
	と実績を有し、炉心損傷に至るまでに1時間程度の時間余裕があ
	ることから、受動的炉停止機構は不要であると考える。また、現
	行熱中性子炉における蓄圧注入系や緊急凝縮系などの実績を活用
	し、受動安全炉に関する研究成果を利用することで、全ての交流
	電源が喪失しても、冷却材の自然循環により崩壊熱の除去が可能
	となる見通しがある。
安全評価	炉心燃料の健全性確保の観点から代表的な設計基準事象を摘出
	し予備評価を実施した結果、炉心燃料の健全性が確保される見通
	しを得ており、事故時被ばく評価についても、予備的な評価(事
	象当たり 5mSv 以下であることを確認することなど) により成立
	性見通しを得ている。
炉心損傷防止	炉心損傷発生頻度は、改良沸騰水型原子炉 (Advanced Boiling
	Water Reactor: ABWR)を対象として実施した確率論的安全評価
	の結果が10 <sup>-6</sup> /炉年を大きく下回っていること、また、水冷却炉と
	ABWR における炉心損傷発生に至る挙動が同様であることから、
	水冷却炉の炉心損傷発生頻度も10 <sup>-6</sup> /炉年未満を達成できると考え
	られる。
機械エネルギー発	炉心損傷事象に対しても、再臨界が生じることを回避できるこ
生防止	とは示されていない。しかし、炉心で再臨界が生じる場合には、
	水が存在しないため機械的エネルギーが発生しない。また、下部
	プレナムに中性子吸収材を設置することにより下部プレナムに移
	行した溶融燃料が再臨界を起こすことを防ぐことが可能であり、
	さらには現行熱中性子炉のアクシデントマネジメント対策 ( デブ
	リが広がりやすい形状の採用、ホウ酸水注入、水を張っておく等)
	によって、格納容器底部における再臨界回避が可能である。
安定冷却と	炉心損傷後の融体静定、熱除去、放射性物質の閉じ込めを現行
閉じ込め	熱中性子炉のアクシデントマネジメント対策をベースにして、事
	象の影響を周辺環境に有意に及ぼさない設計が可能となる見通し
	である。

3.2.1.2 燃料サイクルシステムの安全性評価結果

燃料サイクルシステムの安全性については、燃料サイクルシステム技術検討書にお いて検討および確認されている<sup>[5]</sup>が、以下では、安全性の評価構造を参照して、それ ぞれの燃料サイクル別に安全性が妥当なレベルに達していることを確認した結果につ いて述べる。

(1)湿式燃料サイクル(先進湿式再処理法、簡素化ペレット法)システム(ケース1~

3、6、7、18、19、22)

湿式燃料サイクルシステムについては、わが国でも、いくつかの施設が操業中、 あるいは建設中である。また、表 3.2.5 に示すとおり、安全性に関する検討を実施 したところ、評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見されておらず、 合格であると考えられる。

下位指標名				
	わが国では、いくつかの核燃料施設が操業中あるいは建設中であり、 現行の「再処理施設安全審査指針 <sup>[6]</sup> 」、「ウラン・プルトニウム混合酸 化物燃料加工施設安全審査指針 <sup>[7]</sup> 」などに準拠し、また「六ヶ所再処 理事業所 再処理事業指定申請書 <sup>[8]</sup> 」などを参考に設計することが可 能である。			
	放射線防護	コンクリートセルが十分な遮蔽能力 を持つことで担保する。		
	放射性物質の閉じ込め	負圧管理を含む多重防護に基づいた 適切な閉じ込め設計を行う(抽出クロマ トグラフィーでは、高圧溶液の漏洩事象 に対するデータ取得などを行い、対策を 講じる必要はある)ことで担保する。		
安全設計方針	核燃料物質の臨界安全	全濃度安全形状による臨界安全設計 を行うことで担保する。		
	地震	既存の指針中の耐震要求と既存施設 の耐震設計をベースに設計することで 担保する。		
	沸騰の可能性がある系統や 機器における沸騰を防止す るための冷却系	短時間の外部電源喪失時においても、 機能喪失しない設計とすることで担保 する。		
	水素爆発を防止するための 水素濃度管理に加え、水素 掃気や換気系、また負圧管 理を維持するためのオフガ ス処理設備など	適切に多重性を確保する。		
システム及びプロセス 固有の危険性	水の放射線分解により発生 する水素による爆発	水素掃気により濃度管理を行なう(抽 出クロマトグラフィーでは、水素ガスに ついて溶液中への溶存状態を確認す る)。		

表 3.2.5 湿式燃料サイクルシステムの安全性評価結果

	水溶液の沸騰による放射性 物質の気相への漏洩量の増 加	安全冷却系を設け、防止を図る。
	抽出に用いる有機溶媒の火 災・爆発	着火源の排除と温度管理を行い、また 火災時には空気流入を停止できるよう にする(ただし、抽出クロマトグラフィ ーにおける吸着剤の火災に対して今後 の設計対応が必要)。
	抽出に用いる有機溶媒およ び樹脂の劣化物の急激な発 熱化学反応	特に抽出クロマトグラフィーにおけ る劣化物の洗浄操作を自動化する。
	高圧溶液を内蔵する系統及 び機器の破壊	高圧系である抽出クロマトグラフィ ー工程において、機器の破壊が生じたと きの高性能(High Efficiency Particulate Air: HEPA)フィルタへの 影響を調査し、必要な対策を講じる
	各工程における臨界 オフガス系浄化設備への沸 騰蒸気の大量流入 水素爆発	異常事象を想定した場合、動的機器の 単一故障を想定しても、左記の事象に至 ることは考えられず、確実に防止可能な ことを確認した。
設計基準事象(を含む 代表的異常事象)に関 する安全評価 (放射線被ばくリスク	プルトニウムを装荷した可 燃性有機溶媒のセル内漏洩 および火災	抽出工程内でのセル内漏洩溶媒火災 について放射性物質の異常な放出の観 点から代表的な事象として選定して被 ばく評価を行なったところ、約3.8µSv 以下となり、評価基準である事象当たり 5mSvを下回った。
の恐れのある異常事家 発生時に周辺公衆の個 人が受ける実効線量当 量の評価を含む)	その他の異常事象 (槽類の液体バウンダリ破 損によるセル内への液体放 射性物質の漏洩、水素の蓄 積および爆発、リン酸トリ ブチル(TBP)等錯体の急 激な分解反応、粉末の飛散、 装置の閉じ込め喪失、被覆 管破損)	これらの事象の影響を検討した結果、 「プルトニウムを装荷した可燃性有機 溶媒のセル内漏洩および火災」と比較し て周辺公衆に対する放射線被ばくリス クは大きくないと考えられる。
周辺に影響を与える可 能性のある代表的異常 事象(機器の多重故算 あよびヒューマンエラ の重畳した場合に買 に な量の放射性物質の 施設外放出につながる と考えられる異常事 象)のリスク評価(確 率論的安全評価)	施設内における放射性物質 を内包する全槽での冷却機 能の完全な喪失に起因する 沸騰 抽出工程における放射性物 質を同伴する可燃性有機溶 媒のセル内への漏洩及び火 災 燃料物質の分離工程におけ る分離不良に起因する下流 工程での臨界	短期の臓器被ばく線量は高々ミリシ ーベルトのオーダーと算定されたため、 周辺公衆の急性死亡リスクは無視しう るほど小さく、判断基準である 10 <sup>-7/</sup> (死・人・年・サイト)を満足する。 また、一般公衆の個人に対する致死ガ ン発生リスクについては、リスク点推定 値が約8×10 <sup>-9/</sup> (死・人・年・サイト) となったため、判断基準である 10 <sup>-6/</sup> (死・人・年・サイト)を満足する。

(2)湿式燃料サイクル(振動充填燃料製造法)システム(ケース4、5)

振動充填燃料製造法を用いる FBR サイクルシステムの安全面については、放射 線防護面や耐震面では基本的な湿式燃料サイクルシステムと同様(表 3.2.5 参照) である。なお、安全設計については、簡素化ペレット法に比べて、添加剤やゲルの 洗浄に可燃物であるアルコール類を用いることへの対策、またゲル化反応の副生成 物として硝酸アンモニウムが生成することへの対策、また金属粒子であるウランゲ ッターの火災防止などについて調査・検討を実施する必要がある。また、酸、高熱、 高放射能による滴下燃料溶液の劣化を防止できることを確認することとしている。

しかし、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見されておらず、合格であると考えられる。

(3)湿式燃料サイクル(超臨界直接抽出再処理法)システム(ケース8、9、14、15) 超臨界直接抽出再処理法を用いる FBR サイクルシステムの安全面については、 基本的に湿式燃料サイクルシステムと同様(表 3.2.5 を参照)であるが、超臨界流 体の圧力が高い(約20MPa)こと、TBP-硝酸錯体が使用済燃料粉体と直接接触す ることから、安全性の検討が必要である。

各設備、機器ごとにハザード源候補の洗い出し、起因事象及び擾乱の整理を行なって、「運転時の異常な過渡変化」および「運転時の異常な過渡変化」を超える事象の候補を選定し、「漏洩」に分類されるもののハザード源として「超臨界圧力機器からの漏洩」が、「爆発への拡大」、「外部電源喪失(超臨界流体、冷却水供給停止)」、「爆発」、「短時間の全動力電源喪失(超臨界流体供給停止)」に分類されるもののハザード源として「TBP 錯体の急激な分解反応」が洗い出された。

「超臨界圧力機器からの漏洩」については、十分なセル容積を確保することにより、通常時のセル負圧を40mmAq程度に保っていれば、配管が1破断してもセル内を正圧としない設計の可能性を確認することができた。

「TBP 錯体の急激な分解反応」については、通常運転時に急激な分解反応が発生する可能性は低いと考えられる。しかし、超臨界流体供給停止に対しては、インターロックとして抽出塔の強制冷却設備を備える必要性が示唆されたので、計測制御設備の設計に反映される予定である。

上記の検討から、今後の安全設計を行なうことが条件ではあるが、安全性に関す る評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見されておらず、合格である と考えられる。

(4)湿式燃料サイクル (窒化物燃料対応)システム (ケース 16、17)

窒化物燃料に先進湿式再処理法および簡素化ペレット燃料製造法を適用する場合の燃料サイクルシステムの安全面については、放射線防護面や耐震面では基本的な湿式燃料サイクルシステムと同様(表 3.2.5 参照)である。

なお、安全設計については、炭素の添加や窒化物となることにより臨界制限が厳 しくなることを踏まえた設計にする必要がある。また、窒化物燃料粉が酸素・水と 反応し発火する恐れがあることから、再処理の解体から酸化工程までおよび燃料製 造の炭素熱還元工程から燃料要素組立工程までをアルゴンセル内に設置すること としている。

しかし、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見さ

れておらず、合格であると考えられる。

(5)湿式燃料サイクル(窒化物燃料、脱被覆+先進湿式再処理法、被覆粒子燃料製造法) システム(ケース 20、21)

脱被覆+先進湿式再処理法では、(4)の窒化物燃料対応の先進湿式法に前処理とし て集合体の解体工程の変更、脱被覆工程および酸化工程の追加を行なう。また、被 覆粒子燃料製造法では、(2)の振動充填燃料製造法に炭素熱還元法による窒化物転 換と再還元・焼結の後に被覆相を生成させる工程の追加を行なう。

まず、燃料サイクルシステムの安全面については、放射線防護面や耐震面では基本的な湿式燃料サイクルシステムと同様(表 3.2.5 参照)である。

なお、安全設計については、(2)の振動充填燃料製造法と同様に、アルコール類 や硝酸アンモニウムによる火災・爆発の防止対策等が必要である。さらに、振動充 填燃料製造法と異なる部分を踏まえて、炭素添加や窒化物となることにより臨界制 限が厳しくなることを踏まえた設計にする必要がある。さらに(4)の窒化物燃料対 応の湿式燃料サイクルと同様に、炭素の添加や窒化物となることにより臨界制限が 厳しくなることを踏まえた設計にする必要がある。また、窒化物燃料粉が酸素・水 と反応し発火する恐れがあることから再処理の前処理工程および燃料製造の炭素 熱還元工程から被覆粒子生成工程までをアルゴンセル内に設置することとしてい る(ただし、再処理施設では別の観点から溶解工程もアルゴンセル内に設置する)。

しかし、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見されておらず、 合格であると考えられる。

(6)乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)システム(ケース 10、11)

乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)については、わが国での施設開発経験 も少なく、安全性の評価は予備的な段階である。プロセスの特徴を踏まえて、代表 的な異常事象を抽出して、事象進展シナリオを構築し、多重防護概念に基づく安全 設計の検討を実施した。

乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)システムについても、表 3.2.6 に示す とおり、リスク評価は最終取りまとめまでに実施することとなっているが、安全性 に関する評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見されておらず、現時 点では合格であると考えられる。

### 表 3.2.6 乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)システムの安全性評価結果

下位指標名		
安全設計方針	現行の「再処理施語 ウム混合酸化物燃料加 システムの特徴を勘察	没安全審査指針 <sup>60</sup> 」、「ウラン・プルトニ 加工施設安全審査指針 <sup>77</sup> 」などを参考に 案して設計することが可能である。
	放射線防護	コンクリートセルが十分な遮蔽能力 を持つことで担保する。

	放射性物質の閉じ込 め	液体状の放射性物質の閉じ込めについては、漏洩しがたい構造とし、かつ漏洩検知や容器二重化や受け皿設置などの方策を施し、また加熱停止方策を施し、異常加熱による機器破損を防止する。気体状の放射性物質の閉じ込めについては、機器レベルにおいて負圧維持による動的閉じ込め機能を備え(でき込み能力は塩素ガス、酸素ガスの吹き込み能力は高い)冷却機能を備え(できしている。また、排気系における高い)冷却機能をでシールドの健全性を保つことでいる。また、排気系におけるで、おしての設置などの設置などの発生する場合でも集塵機の設置などで対応する。
		質量管理を中心に、容積管理、濃度 管理、プルトニウム富化度管理、プル トニウム同位体管理を組み合わせて行 なう。また、隔離距離維持のための対 策や誤装荷、過装荷防止のための対策 (インタロックロジックの搬送システ ムへの組み込み)を講じる。なお、核 的制限値設定を合理化するための電解 プロセスにおける核種挙動データの取 得、臨界管理関連機器の高信頼度化な どの課題はある。
	地震	既存の指針中の耐震要求と既存施設 の耐震設計をベースにして設計する が、セルあるいは建屋レベルでの免震 技術に関する検討は今後の課題であ る。
	装置の密閉性	冷却機能損失による耐熱ゴムシール 破損防止方策(空冷除熱機器や加熱機 器の停止機構の設置)を講じる。
	セルの負圧管理と閉 じ込めの健全性を維 持するためのセル及 び建屋換気設備	適切に多重性を確保し、かつ電源を 必要とする動的機器については非常用 所内電源系統に接続されており、外部 電源の喪失に加えて動的機器の単一故 障を想定しても安全機能は維持される ようにする。
システム及びプロセス 固有の危険性	絞り電解回収物中に 含まれる TRU 合金 の火災	絞り電解工程自身が未だ検討中のプロセスであるので設計対応がなされていないが、採用されるプロセスに応じた対策を講じる。
	ハル洗浄工程で使用 する塩化ジルコニウ ムによる急激な化学 反応	ハル洗浄工程をアルゴン雰囲気の別 工程とする。

	電解プロセスで使用 する酸素ガスによる 火災	使用量を少量として深刻な火災の可 能性を少なくする。
	電解プロセスで使用 する塩素ガスの漏洩	機器レベルの負圧維持とシーリング により機器外への漏洩を防止し、漏洩 時も速やかに除去できるよう塩素ガス 除去装置を設け、かつ乾燥空気雰囲気 として腐食が生じないようにする。
	高温溶融塩の漏洩に よる設備損傷	設備の二重化や漏洩受け皿の設置な どで設備損傷を防止する。
	ハンドリングマシン の異常動作等による 設備損傷	動線が固定化されていない機器を駆 使するので、今後ハンドリングマシン の異常接近、暴走を防止するための対 策と保持物の転倒・落下防止の対策を 検討する。
	電解装置内溶融塩の 漏洩	電解装置内溶融塩の漏洩が発生した 場合の周辺公衆に対する放射線被ばく リスクを評価するために「電解装置内 溶融塩の漏洩」について被ばく評価を 行った結果、風下最大被ばく地点にお いて気象条件の不確かさを考慮に入れ ても 99%上限値で約 0.09mSv とな り、評価基準である事象当たり 5mSv を下回った
設計基準事象(を含む 代表的異常事象)に関 する安全評価 (放射線被ばくリスク の恐れのある異常事象 発生時に周辺公衆の個 人が受ける実効線量当 員の評価を含む)	( 絞り電解回収物 中 )TRU 合金の火災	TRU 合金の火災が発生した場合の 周辺公衆に対する放射線被ばくリスク を評価するために「絞り電解回収物中 TRU 金属の火災」について被ばく評価 を行った結果、風下最大被ばく地点に おいて気象条件の不確かさを考慮に入 れても99%上限値で約0.83mSv とな り、評価基準である事象当たり 5mSv を下回った。
	その他の事象 (臨界、使用済燃料 あるいは核燃料物質 の飛散・漏洩など、 経路外へのオフガス 漏洩の急激な化ジルコニ ウムの急激性ミスト の発生量増大、ウラ ンゲッターの火災)	異常事象を想定し、その異常事象を 放置した場合の影響を検討した結果、 「電解装置内溶融塩の漏洩」、「TRU 合 金の火災」と比較して周辺公衆に対す る放射線被ばくリスクは大きくないと 考えられる。
周辺に影響を与える可能性のある代表的異常事象(機器の多重故障およびヒューマンエラーの重畳した場合に異常な量の放射性物質の施設外放出につながると考えられる異常事象)のリスク評価(確率論的安全評価)	最終取りまとめに向	同けて実施する予定である。

(7)乾式燃料サイクル(金属電解再処理法)システム(ケース12、13)

乾式燃料サイクル(金属電解再処理法)については、わが国での開発経験も少 なく、安全性の評価は予備的な段階である。プロセスの特徴を踏まえて、代表的 な異常事象を抽出して、事象進展シナリオを構築し、多重防護概念に基づく安全 設計の検討を実施した。

乾式燃料サイクル(酸化物電解再処理法)システムについても、表 3.2.7 に示 すとおり、安全性に関する評価基準への適合性を否定する事項は今のところ発見 されておらず、現時点では合格であると考えられる。なお、表には明示されてい ないが、燃料製造施設では、ナトリウム金属による火災を防止するための設計対 応を取ることとしている。

### 表 3.2.7 乾式燃料サイクル(金属電解再処理法)システムの安全性評価結果

下位指標名 現行の「再処理施設安全審査指針60、「ウラン・プルト」 安全設計方針 ウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針[7]」などを参考に システムの特徴を勘案して設計することが可能である。 コンクリートセルが十分な遮蔽能力 放射線防護 を持つことで担保する。 負圧管理を含む多重防護に基づいた 適切な閉じ込め設計を行う(電解精製 槽の内部雰囲気の純度管理のためにア ルゴンセルに対して微正圧を保持する 設計としているものの、排気経路の確 放射性物質の閉じ込 保やアルゴンセル構造に放出される気 体や随伴放射性物質の抑制で対応でき め る見通しである)。 アルゴンセルについては、内部負圧 条件下で高いアルゴン雰囲気純度を維 持できるものであるので、閉じ込め性 能は高い。 質量管理を中心に、容積管理、濃度 管理、プルトニウム富化度管理、プル トニウム同位体管理を組み合わせて行 なう。 隔離距離維持のための対策や誤装 核燃料物質の臨界安 荷、過装荷防止のための対策(インタ 全 ロックロジックの搬送システムへの組 み込み)を講じる。 電解精製槽については、化学形態毎 に質量管理を行なうこととしているの で、今後信頼性の高い監視・制御技術 の開発が必要である。 既存の指針中の耐震要求と既存施設 の耐震設計をベースにして設計する 地震 が、代表的でない機器の耐震性能に関 する検討は今後の課題である。

	動的に維持される安 全上の機能	機器レベルにおいては、安全冷却系 統の設備は不要であるが、アルゴンセ ルの動的機器と安全系冷却水供給系、 また負圧管理に関わる機器について は、独立二系統とし、非常用所内電源 系統に接続されており、動的機器の単 一故障および外部電源喪失を考慮して も動的に維持される安全上の機能は喪 失しない。
システム及びプロセ ス固有の危険性	アクチニド金属、Li 金属、Cd 金属火災 高温物の漏洩による 設備損傷 ハンドリングマシン の異常動作等による 設備損傷	セル雰囲気事態を不活性のアルゴン ガスで満たし、酸素等の反応物を除外 すると共に酸素濃度計による監視を行 う。酸素濃度低下方策を採用する。 設備の二重化や漏洩受け皿の設置な どで設備損傷を防止する。 搬送機器の動線を固定化する、クレ ーン等にインターロックを設け、その 経路直下に放射性物質を内蔵する機器 を置かないこと等で対応する。
設計基準事象(を含む 代表的異常事象)に関 する安全評価 (放射線被ばくリスク の恐れのある異常事象 発生時に周辺公衆の個 人が受ける実効線量当 量の評価を含む)	臨界	臨界が発生した場合の周辺公衆に対 する放射線被ばくリスクを評価するた めに「燃料製造における成分調整工程 でのプルトニウムの過剰装荷による臨 界」について被ばく評価を行った結果、 風下最大被ばく地点において気象条件 の不確かさを考慮に入れても99%上 限値で約0.97mSv となり、評価基準 である事象当たり5mSv を下回った。
	金属火災	金属火災か生した場合の周辺公衆に 対する放射線被ばくリスクを評価する ために「アルゴンセルバウンダリ破損 に伴う空気侵入により生じる Cd 陰極 処理装置から払出されるウラン - プル トニウム合金インゴットの火災」につ いて被ばく評価を行った結果、風下最 大被ばく地点において気象条件の不確 かさを考慮に入れても 99%上限値で 約0.008mSv となり、評価基準である 事象当たり 5mSv を下回った。
	放射性溶融物・固形 物の漏洩・飛散	放射性溶融物・固形物の漏洩・飛散が 生じた場合の周辺公衆に対する放射線 被ばくリスクを評価するために「溶融 状態からの核分裂生成物及び燃料核種 を施設内で最も大量に内蔵する電解槽 からの使用済塩移送時におけるセル内 への塩全量の漏洩」について被ばく評 価を行った結果、風下最大被ばく地点 において気象条件の不確かさを考慮に 入れても99%上限値で約0.21mSv と なり、評価基準である事象当たり 5mSv を下回った。

	その他の事象 (燃料被覆管破損、 せん断片の飛散、通 常放出経路での放射 性ミスト発生量の増 加、工程停止、施設 内での線量異常)	異常事象を想定し、その異常事象を 放置した場合の影響を検討した結果、 「臨界」、「金属火災」、「放射性溶融物・ 固形物の漏洩・飛散」と比較して周辺 公衆に対する放射線被ばくリスクは大 きくないと考えられる。
周辺に影響を与える可 能性のある代表の多て、 事象(機器の多工人の 事象(どとューマンに した場合の が した場合の が た りの り た り の り ス ク に り の あ る の の あ る の ち の あ る の ち の あ る の ち の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ る 代 の あ の の の ち の り に と コ ー マ ン に 号 し た 場 の の ち の こ の ち の に り つ て と つ て し た 場 の の ち の こ の ち の こ の ち の の ち の こ の ち の の ち の に り つ て つ に り の う の う の に り の う の に り の う の の う の り に の う の に つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ	「溶製を 「 物 し が 時 の ア が り る に ち に 塩 ル リ 入 気 し ら に ち に 塩 ル リ 入 く し の お 全 ゴ 破 に の お 全 ゴ 破 に の た し の お 全 ゴ 破 に の の ち に ち に ち に し の お 全 ゴ 破 に の の ち に の の で る 済 て る 済 て る の で る 済 て る の で る の て の の の の の の の の の の の の の の の の の	短期の臓器被ばく線量は高々mSvの オーダーと算定されたため、急性死亡 リスクは無視しうるほど小さく、一般 公衆の個人に対する急性死亡について の判断基準(10 <sup>-7</sup> 死/人/年/サイト以下) を満足する。 一般公衆の個人に対する致死ガン発 生リスクについては、異常事象に起因 するリスクの点推定値が約4×10 <sup>-11</sup> 死/ 人/年/施設となった。このため、1サイ ト当たり1施設の立地を前提として致 死ガン発生リスクについての判断基準 (10 <sup>-6</sup> 死/人/年/サイト以下)を十分に 満足すると評価できる。 同リスクに支配的なシーケンスは、 成分調整工程での臨界事故が発生して オフガス系および建屋換気系が健全な シーケンスである。

3.2.1.3 FBR サイクルシステムの安全性の評価結果

FBR サイクルシステムは、原子炉プラントシステム概念と燃料サイクルシステム概念を組み合わせて作られている。したがって、フェーズ 中間評価においては、3.2.1.1 および 3.2.1.2 のとおり原子炉プラントシステム及び燃料サイクルシステムのいずれもが安全性の観点から(開発課題があるものの)合格と考えられるので、それらを組み合わせた FBR サイクル候補概念については、相応の開発課題(あるいは条件)があるものの、どの概念も合格であると考えることができる。

参考文献

- [1] 此村守他: 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ 中間報告 原子炉プラントシステム技術検討書 、JNC TN9400 2004-035、(2004)
- [2] 原子力安全委員会:発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針、(1990)
- [3] 原子力安全委員会:発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針、 (1990)
- [4] 原子力安全委員会:高速増殖炉の安全性の評価の考え方、(1980)
- [5] 佐藤浩司他:高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ 中間報告 燃料サイクルシステム技術検討書 、JNC TN9400 2004-036、(2004)
- [6] 原子力安全委員会:再処理施設安全審查指針、(1986)2001改訂版
- [7] 原子力安全委員会:ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針、 (2002)
- [8] 日本原燃 (株): 六ヶ所再処理事業所 再処理事業指定申請書、(1989) 1997 補正

3.2.2 経済性の評価結果

(1)候補概念の発電原価評価結果と目標達成度

図 3.2.1 に評価対象 22 ケースの発電原価評価結果を効用値で示す。図中の数値軸 は、経済性の達成目標である 4.0 円/kWh が効用値 0.5 となり、努力目標である 2.5 円 /kWh が効用値 1 となっている。

評価対象のほぼすべてのサイクルについて目標達成の見込みが得られた。しかし、 出力 75 万 kWe の炉一基とタービン発電機一基により構成した、単基中型 FBR プラ ントのサイクルでは、プラント出力のスケールメリット、ツインプラント化による設 備の共有化や習熟効果が見込めないために建設単価(万円/kWe)が増加し、経済性の許 容値(効用値 0:5.3 円/kWh に相当)を達成できないことがわかった。

以下では目標達成の見込みが得られた候補概念の特徴について述べる。

(2)発電原価比較の視点

(a) 炉型および燃料化学形態別の比較(経済性重視型炉心)

ここでは FBR サイクルの潜在的な経済性を比較することを目的として、経済性重 視型炉心サイクルを対象として特徴を明確にする。

図 3.2.2 に炉型および燃料化学形態別の発電原価比較を示す。ここでは冷却材とし てナトリウム(酸化物燃料)、鉛ビスマス(窒化物燃料)、ヘリウム(窒化物被覆粒子燃料)、 水(酸化物燃料)をとりあげた。再処理はいずれも大規模施設の先進湿式法であり、燃 料製造はヘリウム冷却炉で被覆粒子燃料製造法である他は簡素化ペレット法である。

いずれのサイクル概念でも経済性の目標である 4.0 円/kWh をほぼ達成できる見通しである。

【資本費】

図 3.2.3 に各ケースの資本費の内訳を示す。資本費に対する主要な影響因子は炉の 建設単価(万円/kWe)である。以下では建設中利子を含んだ建設単価を基に達成度につ いて言及する。

ナトリウム冷却炉では将来軽水炉と比較して、炉については単基出力の増加(150 万 kWe)によるスケールメリット、ツインプラント化による共用・習熟効果、プラン トコンパクト化(2 ループ化の採用、中間熱交換器とポンプを合体した機器の採用、 12Cr 鋼の採用による配管引き回しの簡素化等)などによる物量の削減が図られ、建設 単価の要求値である 20 万円/kWe に対して 93%を達成できる見込みであり、最も資 本費が安くなる概念である。

鉛ビスマス冷却炉は鉛による構造材の腐食対策として炉心被覆管温度を下げる必要があり、熱効率の低下につながり、建設単価の増加要因となる。評価対象データの 建設単価は達成目標の108%程度となる見込みであり、ナトリウム冷却炉に比べ資本 費は増加する。 ヘリウムガス冷却炉は高原子炉出口温度が可能であり、熱効率が高いものの、冷却 材密度が低いために高圧環境下での運転が必要となり、建設単価の増加要因となる。 評価対象データの建設単価は達成目標の111%程度となる見込みであり、ナトリウム 冷却炉に比べ資本費は増加する。

水冷却炉の建設単価は将来軽水炉並と想定しており、建設単価は達成目標の104% 程度になる。

#### 【運転維持費】

図 3.2.4 に各ケースの運転維持費の内訳を示す。修繕費は運転維持費において占め る割合が大きく、かつ候補毎の特徴を反映する。

経済性評価においてプラント修繕費用は定期点検期間に発生するものと想定した。 修繕費用の算出にあたっては、まず軽水炉プラントにおける定期点検費用実績を原子 炉設備における定期点検費用およびタービン設備の定期点検費用に分けて、定期点検 ー日当たりにかかる費用を各々算出する。後、原子炉設備の定期点検費用は点検日数 および原子炉モジュール数に比例すると想定し、タービン設備の点検費用はタービン 発電機の出力に比例すると想定し、軽水炉における実績費用を補正して候補概念ごと の費用を算出している。そのため、稼働率が低いほど、原子炉モジュール数が多いほ ど、修繕費は大きくなる。

稼働率は運転サイクル期間と定期点検日数により算出するが、前者は炉心設計によ り、また後者はプラント毎に工程を評価し、時間的に律束する工程をつないで定期点 検日数を評価する。評価対象データにおいて運転サイクル期間は候補毎に差があり、 そのため評価結果に差が生じている。しかし、炉心設計上はどの候補概念についても 同等の運転サイクル期間を達成できる可能性を有しており、現時点で運転維持費の差 は候補間の有意差と判断できない。

### 【燃料費】

図 3.2.5 に各ケースの燃料費の内訳を示す。再処理費、燃料加工費の占める割合が 大きく、これらは炉内の平均燃焼度および燃料サイクル単価(万円/kgHM)の影響を受 ける。図に各ケースの再処理単価および燃料製造単価を示す。

ここでとりあげたナトリウム冷却炉サイクルは、現在日本で所有する酸化物燃料の 湿式再処理およびペレット製造技術をベースとした先進湿式法および簡素化ペレッ ト法を組み合わせたサイクルであり、燃料サイクル単価は安くなる。なお、燃焼度も 108GWd/t と高い概念である。

室化物燃料を採用している鉛ビスマス冷却炉サイクルでは、<sup>15</sup>Nの濃縮・回収工程 の追加により、燃料サイクル単価は増加する傾向にある一方、燃焼度が143.1GWd/t と高いため再処理費および燃料加工費が減少する可能性がある。本評価対象データに おいては両者の効果が相殺し、酸化物燃料サイクルにおける燃料費と同等となってい る。 ヘリウム冷却炉サイクルも窒化物燃料サイクルであり、燃料サイクル単価は増加す る傾向にある。加えて被覆粒子燃料を採用しているため、再処理における脱被覆工程 などの費用の増加要因がある。また、冷却材密度が低く、横方向流れによる効果的な 除熱概念を採用しており、炉心における燃料体積比が低く、燃焼度はそれほど高くで きない。本評価対象データでは、以上の効果により燃料費は鉛ビスマス冷却炉サイク ルより高目となる。

水冷却炉サイクルの酸化物燃料炉心は他概念と比較して燃焼度が低く、再処理費、 燃料加工費が増加するため、燃料費は最も高くなる。

(b)燃料サイクル技術別の比較(経済性重視型炉心)

図 3.2.7 にナトリウム冷却ループ大型炉について、再処理及び燃料製造概念別の発 電原価を示す。大規模サイクル施設のスケールメリットにより燃料サイクル単価が減 少し、燃料費における達成度は大規模施設のほうが高くなっている。また、小規模施 設サイクル間を比較すると、どのシステムでも経済性目標達成の見込みが得られてい るが、小規模施設間で燃料費において顕著な差は認められなかった。

【燃料費】

図 3.2.6 に燃料費の内訳、再処理単価および燃料製造単価を示す。

大規模施設サイクル間を比較すると、湿式再処理に対応した振動充填法は外部ゲル 化法による粒子燃料の成型のために簡素化ペレット法に比べ前処理工程が増え、燃料 費が増加する要因となる。本評価対象設計データでも目標を達成してはいるものの、 簡素化ペレット法を使用したサイクルに比べ発電原価は高い。現段階ではシステムと しての合理化の余地が残されており、粒子燃料の顆粒運搬方法の見直し、メンテナン ス方法の見直しなどによりこの差は縮小される見通しである。

小規模施設サイクルに着目する。超臨界直接抽出法は抽出工程の削減により、小規 模施設における湿式再処理の経済性向上に有望な概念であるが、本評価対象設計デー タにおいても、再処理施設の建設費削減および運転維持費減少の効果が表れており、 小規模サイクル施設において、金属電解法に比肩する燃料サイクル単価を達成できる 可能性があることがわかった(図 3.2.9 参照)。

酸化物電解法の再処理単価はスケールデメリットを有する先進湿式再処理の再処 理単価と同程度に高いものの、高レベル廃棄物の処理において、処分体への FP 含有 率を湿式再処理に比べ高くできる処理方法を想定しているため、高レベル廃棄物発生 量が少なく、高レベル廃棄物の輸送・処分費用が低いために燃料費としては他と同等 の達成度となっている(図 3.2.8 参照)。

金属燃料サイクルは燃焼度が高く、燃料サイクル単価の達成度が高いため、加工費 および再処理費が少ない。しかし、金属電解法において高レベル廃棄物は FP 含有率 の低い人工鉱物固化体としての処理を想定しているため体積としての発生量が多く、 輸送・処分費用が増加する。 各概念における高レベル廃棄物の処分形態および発熱が、輸送、貯蔵および最終処 分場に与える影響を考慮して費用を計上する必要があるが、本評価では高レベル廃棄 物の輸送・処分費用は発生体積に比例してかかるものとして計上している。実用化戦 略調査研究の進展に伴い、金属燃料サイクル、酸化物乾式サイクルの重要性が増し、 詳細評価が必要になった場合、以上の効果を検討する必要がある。

(c) 炉のスケールの違いおよびプラント構成別の比較

図 3.2.10 にナトリウム冷却炉について、炉の出力規模の違いによる経済性の違い を示す。ここではナトリウム冷却ループ大型炉(ケース 9)及びナトリウム冷却ループ 中型炉(モジュール炉)(ケース 15)を取り上げる。いずれの燃料サイクルも酸化物燃料、 小規模処理施設(超臨界直接抽出法 + 簡素化ペレット法)である。

中型モジュールプラントでは、複数基建設による習熟効果により、スケールメリットを有する大型炉に比肩する経済性を達成できる可能性がある。

(d)資源重視型炉心と経済性重視型炉心の影響

図 3.2.11 に、資源重視型炉心と経済性重視型炉心とでサイクルを構成した際の経 済性について比較する。

図中全ケースにおいて資源炉心においても経済性目標は達成できる見込みであり、 経済性を確保したまま増殖性能に対する幅広い要求に対応できる見込みが得られた。

資源炉心は経済炉心に比べて燃焼度が低く、燃料費が増加する傾向になる。そのため、資源炉心においては燃料サイクル単価の差が顕著に表れ、候補間の結果のばらつ きは大きくなる。また、資源炉心は運転サイクル期間が経済炉心に比べ短く、年あた りの定期点検期間が多くなり、運転維持費(修繕費)が増加する傾向にある。

(e)再処理施設における修繕費の影響

図 3.2.12 に再処理における修繕費の違いが発電原価に与える影響を示す。図中で 一方は、湿式再処理施設における機器交換費を計上する際に東海再処理工場における 実績を反映した結果であり、その場合修繕費用は建設費に対して 0.3%前後となる。 もう一方は予防保全の考えにより修繕費用として建設費の 3%前後を想定した結果 である。(特に注記がない場合、報告書中の図は予防保全の考え方を採用した評価結 果である。)

本評価では予防保全を想定した場合でも目標達成の見込みが得られている。修繕費 の影響により、再処理単価にして20%程度、燃料費にして5~10%程度の費用削減 効果が期待できる。また、修繕費用の影響はスケールメリットにより既に経済性が高 い大規模施設よりも小規模施設において効果が大きく、湿式再処理施設においても小 規模施設の経済性が向上する可能性がある。 (f)廃止時の廃棄物量から廃止措置費用を算出した影響

フェーズ では既存施設の廃止実績より、各々のプラントの廃止措置費用として建 設費の 20%を想定していた。フェーズ では設計検討の進捗を踏まえ、廃止措置費 用を廃止時の廃棄物量から算出することとした。

図 3.2.13 に FBR プラントの廃止措置費用を建設費の 20%とした場合と廃棄物量 から算出した場合で比較する。ここでは炉型別の評価結果を示す。また、燃料サイク ル施設における廃止措置費用計上方法の違いを考察するため、再処理単価および燃料 製造単価を図 3.2.14 に示す。

大部分のケースについて計上方法の違いによる評価結果の違いは 10%以下となっ ている。しかし、ヘリウム冷却炉の廃止措置費用を廃棄物量から算出した場合は、建 設費の 20%として計上した場合に比べて 60%以上大きくなる。これは、ヘリウム炉 は冷却材の圧力が高いことにより原子炉構造(原子炉容器、動力変換容器)、一次系(動 力変換容器内構造物)の物量(金属)が他の炉型に比べ大きいためであり、ヘリウム冷 却炉は廃止措置費用が大きくなるということが定量的に明らかになった。

(g)長寿命核分裂生成物 (Long-Lived Fission Products: LLFP) 核変換サイクルの経 済性

長寿命核分裂生成物の核変換および発熱性核種の分離・貯蔵を実施した場合の経済 性について概略評価を実施した。

ここで想定したサイクル概念および経済性評価の前提を以下に示す。

核変換対象核種としてヨウ素およびテクネチウムを想定。

ガラス固化体の発熱制限を緩和することを目的として、セシウムおよびストロンチ ウムを再処理において分離し、硝酸溶液として減衰待ち貯蔵(50 年)後、別途処分 することを想定した。

核変換対象核種はターゲット集合体として炉内に装荷する。炉内にヨウ素(ヨウ化 銅)は48年、テクネチウム(金属)は60年装荷するとした。

また、フェーズ 中間とりまとめ時までに、再処理に関しては分離方法の検討を行 い、燃料製造に関しては、ペレット製造方法を基に燃料製造方法を検討し、製造施設 設計を概略的に行なっている。そこで、経済性評価結果に関しても、他のケースとは 異なり、再処理におけるヨウ素とテクネチウムの分離、ヨウ素とテクネチウムの(タ ーゲット)燃料の製造、これらのサイクルが付加されることによる放射性廃棄物の増 減、セシウム及びストロンチウムの貯蔵が再処理と燃料製造に対する影響を考慮して 試算した。なお、集合体当たりの新燃料輸送費は核物質と FP で同様であると想定し、 炉における使用済燃料貯蔵施設の増減、再処理、燃料製造費の増加による運転維持費 への影響などは考慮しなかった(他のケースの評価結果から全体として影響は小さい と思われる)。

試算結果では、燃料サイクル費に影響が見られるが、経済炉心を導入した効果が出

ており、資源重視型炉心と経済性重視型炉心の中間的な発電原価となった。LLFP核 変換サイクルを含むケース1~3について、試算結果を図 3.2.15に示す。

他方で、この FBR サイクルは、未だ設計が進んでいない部分がある。特に長期間 運転を達成するターゲット燃料の成立性など検証が十分ではないので、今後の検討で 設計が変更される可能性も大きい。また、再処理プロセスや燃料製造方法の検討など は行われているが、やはり今後の検討如何で変更される可能性が大きい。上に述べた 炉サイトにおける施設増加や運転維持費への影響評価、さらに、燃料輸送時の費用想 定なども最終取りまとめに向けた検討事項として残っている。したがって、中間とり まとめの評価結果は、他のケース以上に暫定的なものである。



効用値

図 3.2.1 経済性の評価結果一覧







図 3.2.3 炉型および燃料形態別の経済性評価(資本費)



図 3.2.4 炉型および燃料形態別の経済性評価(運転維持費)



図 3.2.5 炉型および燃料形態別の経済性評価(燃料費)

0 10 20 30 40 50 60 ケース2 ケース17 ケース21 ケース22

再処理単価(万円/kgHM)

#### **ケース**2

酸化物燃料/Na大型炉/ 先進湿式/簡素化ペレット(200t/y)

### **ケース**17

窒化物燃料/Pb-Bi中型炉/ 先進湿式/簡素化ペレット(200t/y)

#### **ケース**21

窒化物被覆粒子燃料/He大型炉/ 先進湿式/被覆粒子製造(200t/y)



## ケース22

酸化物燃料/水大型炉/ 先進湿式/簡素化ペレット(200t/y)

# 図 3.2.6 炉型および燃料形態別の経済性評価(燃料サイクル単価)



図 3.2.7 燃料サイクル技術別の経済性比較(発電原価)











いずれも経済性重視型炉心サイクル

図 3.2.10 炉のスケール効果



図 3.2.11 資源重視型炉心サイクルと経済性重視型炉心サイクル

### 予防保全の考え方を適用した場合







# 図 3.2.12 再処理プラントにおける機器交換費の影響

1.4

■資本費
 ■運転維持費
 ■燃料費


図 3.2.13 FBR プラント廃止措置費用計上方法の影響



図 3.2.14 再処理および燃料製造プラントの廃止措置費用計上方法の影響



## 図 3.2.15 LLFP 核変換サイクルの発電原価試算

3.2.3 環境負荷低減性の評価結果

環境負荷低減性については、各 FBR サイクル候補概念について、設定した評価構 造と評価基準にしたがって評価を行なった。環境負荷低減性全般の評価結果につい ては、図 3.2.16 に示す。

全体的な評価結果としては、各 FBR サイクル候補概念で大きな差は生じなかった といえる。また、各候補概念の設計進捗状況にも差があるという現状を踏まえると、 各候補概念に対する評価結果の小さな差を取り上げて一様に議論することは必ずし も有益ではないと考える。ただ、廃棄物発生量や放射性毒性など、現状の設計結果 に基づいて設定したデータの影響が評価結果に反映されている部分がある。これは、 評価指標を今後改良していくこと、また適切な設計の方向を示すことに役立つと考 えられる。そこで、以下では、最下位指標毎に評価結果について紹介する。

放射性廃棄物発生量を発生した体積で評価した場合の評価結果を図 3.2.17 に示 す。この指標では、単位発電量当たりの放射性廃棄物発生量(m3/kWh)を評価し ており、単位発電量当たりの発生量が大きな低レベル放射性廃棄物を重視して評価 する。各ケースでほとんど相違がない結果が得られているが、ケース 14 だけやや評 価結果が低くなっている。ケース 14 は、1 サイトに 75 万 kWe の FBR を単基建設 する概念であり、単位発電量当たりで考えると低レベルを中心に炉プラントから発 生する廃棄物が大型 FBR やモジュール型の FBR と比べて多くなる。言い換えれば、 1 種のスケールデメリットが働いた結果として、評価結果が低くなったと考えられ る。また、全体として、資源型炉心を利用する FBR サイクルよりも、経済型炉心を 利用する FBR サイクルの方が評価結果は良くなっている。このことも、操業時の放 射性廃棄物の量は、サイクル施設を還流する核物質の物量に正の相関があるが、ほ とんど同じ施設、同じ核物質の還流量から多くの電力を発生する経済型炉心の方が、 単位発電量当たりの廃棄物量が小さくなることが理由として考えられる。このこと は、環境負荷低減性の面から見た高燃焼度化のメリットであると言える。

放射性廃棄物発生量を処分場の面積に換算して評価した場合の評価結果を図 3.2.18 に示す。この指標は単位発電量当たりの放射性廃棄物発生量(m<sup>2</sup>/kWh)で 評価しているので、発熱量も大きく単位発生量当たりの占有面積が大きい高レベル 放射性廃棄物を重視して評価する。このとき、各ケース相違がない中で、ケース 12 及びケース 13(特にケース 12)だけ評価結果が低くなっている。これは、金属電 解法(ここでは射出鋳造法)再処理を行うこれらのケースでは、ゼオライト中に含 有できる FP の量が相対的に少なく、単位発電量にほぼ比例する FP の発生量あた りの高レベル放射性廃棄物(人工鉱物)の量が多くなってしまうからである。逆に、 ケース 10 及びケース 11 の酸化物電解法再処理を行うケースでは、高レベル放射性 廃棄物(鉛リン酸ガラス、フツリン酸ガラス、合金の3種が発生すると想定)に含 有できる FP の割合が相対的に大きいと設計しており、単位発電量当たりの高レベ ル放射性廃棄物の発生量は少なくなる。そのため、評価結果はよくなっている。そ の意味では、妥当な結果であると思われる。ただし、高レベル放射性廃棄物中に含 有される FP の割合については、従来、(ホウケイ酸)ガラス固化体の高減容化として、充填割合を増加させる検討が進められており、また、ホウケイ酸ガラス以外の 高レベル放射性廃棄物についても同様の検討が予定されているので、フェーズ 最 終評価までに見直される可能性が大きい。

放射性毒性については、評価手法を説明した箇所で記述したとおり、単位発電量 当たりに換算したときの、1000年後における高レベル放射性廃棄物と深地中処分放 射性廃棄物に含有される放射性廃棄物を仮に経口摂取したときの被ばく線量当量 (Sv/kWh)を指標として評価した。評価結果を図 3.2.19 に示す。放射性毒性の評 価結果については、廃棄物に移行するアクチニドの量が大きな影響を及ぼす。した がって、放射性毒性の評価結果は、再処理施設の設計への感度が大きい。そこで、 全体的に FBR サイクル候補概念は、基準 FBR サイクルに比べて、マイナーアクチ ニドまで含めたアクチニドリサイクルをめざしており、高い評価結果となっている と言うことができる。ただし、現状の設計では、再処理施設の移行率は技術的に確 定できるものではなく、未だ設計目標値といった意味合いも含まれていることから、 評価結果を基にして各 FBR サイクル候補概念の優劣を即断すべきではない。例えば、 先進湿式再処理施設の中間評価時設計では、廃棄物に移行するアクチニドを回収す るプロセスを設けている。これらの設計対応によって、放射性毒性を小さくするこ とは可能であり、その結果として先進湿式再処理法を含む FBR サイクル候補概念は 放射性毒性に関して非常に高い評価結果を得ている。これに対して、超臨界抽出再 処理法や酸化物電解法再処理を行う FBR サイクル候補概念では、廃棄物への移行率 が大きく、放射性毒性の評価結果では若干劣ることとなる。また、放射性毒性の評 価基準については、放射性毒性を低減することの社会的意味も熟慮して再検討する ことが必要である。

埋設処分する廃棄物からの被ばくに関しては、高レベル放射性廃棄物処分場から の最大被ばく線量当量率について評価することとした。評価結果は、図 3.2.20 に示 す。各 FBR サイクル候補概念から環境に出される高レベル放射性廃棄物中の放射性 核種が地下水移行し、将来の地上に暮らす人への最大被ばく線量当量率は、基準と なる FBR サイクルからの被ばく影響とほとんど変わらない。これは、ケース 3 の 分離核変換サイクルは例外であるが、各候補概念については、最大被ばく線量当量 率を与える核種(主に FP)が処分場に移行することを防ぐための特別な措置を講じ ていないことによる。したがって、各ケースでそれほど大きな差が生じることはな く、基準サイクルとの結果の違いがわずかなことを反映し、全体として低い評価結 果が得られている。評価結果のわずかな差は、主に FBR プラントの熱効率の違いが 反映されたもの(高レベル放射性廃棄物への移行量の違いなどもわずかに反映され る)であるが、問題とすべきほどではない。なお、最大被ばく線量当量率を与える 核種は<sup>135</sup>Cs であった。いずれにしても、特段の措置がなされない核燃料サイクル においては、将来において、最大被ばく線量率を与える可能性がある核種が限定さ れている。これは、本評価は、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技 術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - (いわゆる2000年レポート)」 の評価を参考にしており、また、高レベル放射性廃棄物中に含まれる FP を中心と する各核種のインベントリも2000年レポートの評価結果を覆すほどの違いがない ことから容易に想像できる。また、乾式再処理から出される高レベル放射性廃棄物 は、現在各方面で検討が行われているところであるが、中間評価では、酸化物電解 法では、鉛リン酸ガラス、フツリン酸ガラス、合金が出されるとしている。また、 金属電解法からは、ゼオライトが出されるとしている。これらの高レベル放射性廃 棄物の廃棄体を地層処分したときの性質については、よく検討されていないものが 多い。しかし、中間評価では、若干の溶解速度の差は被ばく線量当量率に対して大 きな影響を及ぼさないという検討を基にして、インベントリが変わらない場合には、 ホウケイ酸ガラスを固化したものとほぼ同様の被ばく線量当量率を与えると見なし て評価することとした。

現在までの検討では、最大被ばく線量当量率を指標としたときには、深地中処分 廃棄物からのヨウ素による被ばく影響が最も大きいとされている。このとき、ケー ス3の分離核変換サイクルでは、ヨウ素の核変換が期待されているが、この効果の 一つとして、深地中廃棄物からの被ばく線量当量率の低減が期待できる。しかし、 いわゆる深地中処分する廃棄物を含む低レベル放射性廃棄物については、平成 16 年度に再検討することが予定されており、こうした検討の進捗も勘案して最終とり まとめでより適切に評価することを課題としたい。

中間評価では、現状レベルの FBR サイクルを想定して基準値を求めて、評価を実施した。しかし、基準となるシステムを軽水炉サイクルとすべきとの考え方もある。 今後、これらの点を検討して、最終評価に反映することとしたい。

図 3.2.21 に希釈放出による単位発電量当たりの被ばく線量当量の評価結果を示 す。全体として、評価結果に大きな差は出ていない。

また、希釈放出被ばくでは、単位発電量当たりの被ばく線量当量を評価している。 したがって、施設やサイトの周辺における被ばく線量当量をそのまま評価している わけではなく、安全性の評価とは少し違った観点から FBR サイクルシステムを評価 している点にも注意されたい。

また、希釈放出被ばくについても、設計活動で被ばく低減を意識して対応するこ とによって、希釈放出される核種の量を変更して被ばく量を低減することが可能で ある。フェーズ 中間評価結果については、炉システムからの被ばくの影響が大き な割合を占めた。現時点での FBR サイクル施設からの希釈放出量に関する検討は初 期的な段階であり、炉システムについては、軽水炉やもんじゅの経験を基にして検 討が徐々に進んでいるが、サイクル施設については、検討が端緒についたばかりで ある。また、希釈放出被ばく線量率の評価手法も改良が進められているところであ る。したがって、評価手法と設計の進捗を反映しながら、フェーズ 最終評価まで に信頼性の向上を図りたい。

環境負荷低減性については、環境とは何か、といった基本的な点から始まって、

FBR サイクルが与える環境負荷あるいは環境影響をどのように捉えるかによって 評価結果が変わりうるし、設計の対応状況や定量的データの取得できる範囲とそれ に基づく評価可能な範囲によっても結果が変わるので、環境負荷低減の意味をよく 議論して、今後も最善と考えられる評価を行っていくことが必要である。



JNC TN9400 2004-052

																						C
																						1.0
X1 MOX燃料(資源)-Na)令却大型(1500MWe)- X1 H-4:日十////001/1/1 (昭主/2×11/11/0004/4)	元速速云(2001/)-陶永15~271(2001/) MOX線料(経行)-NA:今和大型(1500M/e)- ス2 MOXがいいいいいでいい、188×22×1.500M/e)-	 <b>33</b> 株式(2001/y)- 簡素化ペレット(2001/y)	<b>ス4  </b> MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 天4  先進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y)	<b>X5</b>	X6 MOX燃料(資源)-Na)冷却大型(1500MWe)- 大道 先進退式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	X7 MOX燃料(経済)-N8)や却大型(1500MWe)- 大 先進退式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	X8 MOX燃料(資源)-Na/冷却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	X9 MOX燃料(経済)-Na/冷却大型(1500MWe)- 道臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	<b>ズ10</b> MOX燃料(資源)-Na)冷却大型(1500MWe)- 酸化物電解(501/y)-振動充填(501/y)	<b>ス11  </b> MOX燃料(経済)-Na)冷却大型(1500MWe)- 第11   酸化物電解(501/y)-振動充填(501/y)	又12 金属燃料(資源)-Na)分却大型(1500MWe)- 金属電解(501/y)-射出成型(501/y)	ス13 金属燃料経済)-Na冷却大型(1500MWe)- ス13 金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	X14 MOX燃料(資源)-Na/冷却中型シングル(750MWe)- X14 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	X15 MOX燃料(経済)-Nai冷却中型モジュール(750MWe)- 【超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	<b>ス16</b> 室化物燃料(資源)-Pb-Bi)令却中型(強制循環: 710MWe)- 先進退式(2001/y)- 簡素化ペレット(2001/y)	ス17   窒化物燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MWe)-   先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	<b>ス18   MOX燃料(資源)-Pb-Bi</b> 冷却中型(強制循環: 710MWe)-   先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	X19 MOX燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MWe)- 先進湿式(2001/y)- 簡素化ペレット(2001/y)	Z20   窒化物被覆粒子燃料(資源)-He)令却大型(1124MWe)- R20   脱被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(2001/y)	Z21 21/24/24 2017/25/2017/3-He/今却大型(1124MWe)- 月脱被覆+先進湿式(2001/3)-被覆粒子製造(2001/3)	<b>X22   MOX燃料(水冷却炉)-水冷却大型-</b> 先進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	0.0

廃棄物発生量(体積)

図 3.2.17 廃棄物発生量(体積)の評価結果

□ 廃棄物発生量 (面積)																				1.00
MOX機料(資源)・Aa:冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(2011y)-簡素化ベLッド(2001y) MOX燃料(経済)-Na:分却大型(1500MWe)- 先進湿式(2011y)-簡素化ベLッド(2001y)- MOX燃料(LLFP)-Na:冷却大型(1500MWe)- MOX燃料(LLFP)-Na:冷却大型(1500MWe)-	氏連速式(2001/y)- 間素化ベレッド(2001/y)	MOX燃料(経済)-Na;冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(200t/y)-振動充填(200t/y)	MOX燃料(資源)-Na)や却大型(1500MWe)- 先進湿式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	MOX燃料(経済)- Na 冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	MOX燃料(資源)- Na)や却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	MOX燃料(経済)- Na)や却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	MOX燃料(資源)- Na)や却大型(1500MWe)	MOX燃料(経済)- Na)や却大型(1500MWe)- 酸化物電解(501/y)-振動充填(501/y)	金属燃料(資源)-Na)や却大型(1500MWe)- 金属電解(501/y)-射出成型(501/y) -	金属燃料(経済)-Na)や却大型(1500MWe)- 金属電解(501/y)-射出成型(501/y) -	MOX燃料(資源)- Na 冷却中型シングル(750MWe)- 超臨界直接抽出(50t/y)- 簡素化ペレット(50t/y)-	MOX燃料(経済)- Na 冷却中型モジュール(750MWe)- 超臨界直接抽出(50t/y)- 簡素化ペレット(50t/y)	窒化物燃料(資源)-Pb-Bl;今却中型(強制循環:710MWe)- 先進湿式(200t/y)- 簡素化ペレット(200t/y)-	窒化物燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MWe)- 先進湿式(200t/y)- 簡素化ペレット(200t/y)	MOX燃料(資源)-Pb-Bi)や却中型(強制循環:710MWe)- 先進湿式(2001/y)- 簡素化ペレット(2001/y)	MOX燃料(経済)-Pb-Bi)や却中型(強制循環:710MWe)- 先進湿式(200t/y)- 簡素化ペレット(200t/y)	窒化物被覆粒子燃料(資源)- He/冷却大型(1124MWe)	室化物被覆粒子燃料(経済)- He/冷却大型(1124MWe)	MOX燃料(水冷却炉)- 水冷却大型- 先進退式(200t/y)- 簡素化ベレット(200t/y)	0.00
r-х1 r-х2 r-z3	r-74	r-75	7- <b>д</b> 6	ד-27	r-78	r-79	r-710	r-211	r-712	ד-713	r-214	r-715	r-716	ד-217	r-318	r-719	r-720	r-721	r-722	

図 3.2.18 廃棄物発生量(面積換算)

廃棄物発生量(面積)

□ 放射性毒性																				0
																				.1
MCX燃料(電源)・Nai>和大型(1500MWe)- 先進退式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y) MCX燃料(盛予)-Nai>加大型(1500MWe)- 格量速式(2001/y)-10番素化ペルット(2001/y) MCX燃料(LLP)-Nai>超大型(1500MWe)-	<u>先進湿式(200t/y)-簡素化べレット(200t/y)</u> MOX燃料(資源)-Na.)令却大型(1500MWe)- 先進湿式(200t/v)-振動充填(200t/v)	MOX燃料(経済)-Nai今却大型(1500MWe)- 先進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y)	MOX燃料(資源)-Nai冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na)冷却大型(1200MWe)- 先進湿式(501/y)-簡素代ペレット(501/y)	MOX燃料(資源)-Nai冷却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)- 簡素代ペレット(501/y)	MOX燃料(経済)- Na)冷却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)- 簡素代ペレット(501/y)	MOX燃料(資源)-Na)冷却大型(1500MWe)- 酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na/冷却大型(1500MWe)- 酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)	金属燃料(資源)- Na)冷却大型(1500MWe)- 金属電解(501/y)-射出成型(501/y)	金属燃料(経済)- Na)冷却大型(1500MWe)- 金属電解(501/y)-射出成型(501/y)	MOX燃料(資源)-Na/今却中型シング)f/J(750MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)- 簡素代ペレット(501/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却中型モジュー)I/(750MWe)- 超臨界直接抽出(501/y)- 簡素化ペレット(501/y)	窒化物燃料(資源)- Pb-Bi冷却中型(強制循環 :710MWe)- 先進湿式(200t/v)-簡素化ペレット(200t/v)	窒化物燃料(経済)- Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MWe)- 先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	MOX燃料(資源)- Bb- Bi冷却中型(強制循環: 710MWe)- 先進湿式(2001/y)- 簡素化ペレット(2001/y)	MOX燃料(経済)- Pb- Bi冷却中型(強制循環: 710MWe)- 先進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	窒化物被覆粒子燃料(資源)-He冷却大型(1124MVe)- 脱被覆+先進退式(2001/y)-被覆粒子製造(2001/y)	室化物被覆粒子燃料(経済)-He)冷却大型(1124MWe)- 脱被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(2001/y)	MOX燃料(水)や却炉)-水冷却大型- 先進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	0.0
7-71 7-72 7-72	7-74	7-75	7-76	5-27	<del>5</del> -78	7-79	ケース10	<del>5</del> -711	<del>7 – 7</del> 12	<u> </u>	ケース14	<del>5 -</del> 715	<del>5 – 1</del> 16	<del>7</del> -717	<del>5 – 1</del> 18	ל-719	ケース20	<del>5</del> -721	7-722	

図 3.2.19 放射性毒性の評価結果

放射性毒性

0.005 0.004 0.003 0.002 0.001 0.000 ケース17 室化物解料(経済)-Pb-Biら知中型(強制循環:710MWe)
 ケース17 査進退式(2001/9)-簡素化ベリット(2001/9)
 ケース18 MuCX燃料(電源)-Pb-Biら知中型(強制循環:710MWe) ナース18 推進型式(2001/9)-簡素化ベリット(2001/9)
 ケース19 先進退式(2001/9)-簡素化ベリット(2001/9) ケース15 超限7年度サルロ型モジュール(750MWe)-ケース15 超限7年度社由1GGい)、前業パケントトラい(2) 第代7月物数式資源)-Pb-Biらお中日型(含動循環、710MWe ケース16 先進運式(2001/y)・簡素化ペレット(2001/y) 先進退式(501/y) - 簡素化イレット(501/y) MOX燃料(資源) - Na?会却大型(1500MWe)-超臨界直接抽出(501/y) - 簡素化イレット(501/y) MOX燃料(経済)-Na?約ガ大型(1500MMe)-超臨界直接油出(501/y)-簡素化ヘレット(501/y) MOX燃料(資源)-Na?約式型(1500MMe)-酸化物電解(501/y)-振動充填(501/y) **ケース14** MOX燃料(資源)-Na冷却中型シング)I/(750MWe 超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y) MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-先進湿式(2001/y)-簡素化ベレット(2001/y) MOX燃料(LLFP)-Nai冷却大型(1500MVe) 先進湿式(2001/y)-簡素化べし\*ド2004/vi MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-先進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y) ケース11 MOX燃料経済)-Ka2参却大型(1500/Web-ケース11 酸化物電解(501/19)-振動充填(500/Web-ケース12 金属燃料(資源)-Na2冷却大型(1500/Web-全属電解(501/19)-射出成型(501/19) MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe) 先進湿式(501/v)- 範考42ペリ、上に200 金属燃料(経済)-Na)冷却大型(1500MVe) 金属電解(501/y)-射出成型(501/y) MOX燃料(資源)-Na)冷却大型(1500MMe) 先進湿式(501/v)-簡素化ペレット(501/v) 诊却大型(1500M ד-210 5-213 r-74 <del>5</del>-78 **5-**79 ד-א <del>7</del>-72 <del>5</del>-73 5-75 r-76 5-27

埋設処分被ばく

## 3.2.20 埋設処分被ばくの評価結果

义





■希釈放出被ば

3.2.4 資源有効利用性の評価結果

(1)資源有効利用性に関する評価指標の概要

FBR は高速中性子を用いて <sup>238</sup>U から <sup>239</sup>Pu を生産し、原子炉内で核熱エネルギー として消費した以上のエネルギー価値をもつ核燃料物質を生み出すことができる。 FBR サイクルの特長である核燃料物質の増殖性を資源有効利用の視点から横断的に 評価するため、増殖による天然ウランの資源節約効果と利用効率に着目した二つの一 次評価指標(資源節約性、持続利用可能性)を用いて比較する。

()資源節約性について

図 3.2.22 に資源有効利用性の評価構造と評価基準を示す。一次評価指標の一つ である「資源節約性」の効用値は、サイクル諸量解析コードを用いて算出した天 然ウラン累積需要量と目標値を用いて設定する。

サイクル諸量解析コードで計算される天然ウラン累積需要量は、軽水炉サイク ルおよび FBR サイクルの各システム特性に依存するとともに、将来の原子力発電 設備容量や FBR 導入時期などの運用条件でも異なる。資源有効利用性の検討では、 図中に示した国内原子力発電設備容量(2003 年 12 月末時点の国内計画ベース) を共通条件とし、FBR サイクル導入時期については各候補概念の実用化時期(ナ トリウム冷却炉および水冷却炉:2030 年、鉛 - ビスマス冷却炉およびへリウム冷 却炉:2050 年)をそれぞれレファレンス条件としている。なお、参考までにナト リウム冷却炉および水冷却炉の導入時期を2050 年に先送りした場合の感度解析も 行った。候補概念の炉特性データについては、「付録 5 候補概念の炉特性データ」 を参照されたい。

また、効用値の計算に用いる努力目標、達成目標、許容値の評価基準はそれぞ れ 20 万トン、80 万トン、160 万トンをレファレンス条件としているが、参考評価 として評価基準をパラメータにした場合の感度解析も試みた。なお、効用関数(*U* (*x*)=*a*-*b* · *exp* (-*c* · *x*), *x*=天然ウラン累積需要量(万 t))に与える a ~ c の定数を脚 注 1 に示す。

()持続利用可能性について

もう一つの指標である「持続利用可能性」は、FBR サイクルによるウラン資源 の多重リサイクル利用を通して、天然ウランがもつ潜在的エネルギーの何%を実効 エネルギーとして利用可能かを示す指標である。同一資源量の場合、利用効率が 高いほど資源の長期利用が期待できる。このウラン利用効率は、以下の式で求め られる。

ウラン利用効率 = 平均燃焼度 / (平均燃焼度 + サイクル総ロス率) 式 3.2.4 ここで、平均燃焼度 [%]、1% 1 万 MWd/t(換算)

サイクル総ロス率〔%〕

<sup>1</sup> レファレンス条件 : a=-1.2741, b=-2.4703, c=0.0041 参考評価 : a=-1.2741, b=-2.4703, c=0.0027 ちなみに平均燃焼度 15 万 MWd/t 15%、サイクル総ロス率 3%の場合、ウラン 利用効率は約 83%となる。また、ウラン利用効率から持続利用可能性の効用値を もとめる際の評価基準を前出の図 3.2.22 に示すとともに、効用関数 (*U*(*x*)=*a*-*b*・ *exp*(-*c*・*x*), *x*=ウラン利用効率 (%)) に与える a ~ c の定数を脚注<sup>2</sup>に示す。

()重み付けについて

指標間の重みについては、資源節約性は FBR 導入開始から 100 年程度以内に発 揮される効用であるのに対し、持続利用可能性は 100 年以降の超長期に渡って得 られる効用であることから、現在価値に換算した持続利用可能性の効用は相対的 に小さくなる。そこで指標間の重み付けの設定は、割引率 1.5%を想定した 100 年 以内と 100 年以降に得られる効用の現在価値を基に、資源節約性と持続利用可能 性の比重をそれぞれ 0.75 と 0.25 としている。

## (2) 資源節約性の評価結果

()レファレンス条件による評価

評価基準にレファレンス条件(努力目標 20 万トン、達成目標 80 万トン、許容 値 160 万トン)を用いて算出した全 22 ケースの効用値を図 3.2.23 に示す。全体 的 傾 向 として は、 資 源 重 視 型 炉 心 を 採 用 した 候 補 概 念 (ケース : 1,4,6,8,10,12,14,16,18,20) ほど効用が高く、中でも炉内プルトニウムインベント リがコンパクトで、比較的早い時期に FBR 導入が見込まれるナトリウム冷却 MOX 炉 (ケース 1) とナトリウム冷却金属炉(ケース 12)効用値は 0.5 前後に位置し ている。一方、ヘリウム冷却炉と水冷却炉を採用しているケース 20 以降について は、効用値が概ね 0.1 以下を下まわる結果となった。

また、22 ケースを代表してナトリウム冷却 MOX 燃料炉(ケース1)、ナトリウ ム冷却金属燃料炉(ケース12)、水冷却 MOX 燃料炉(ケース22)の導入開始時 期を、鉛 - ビスマス冷却炉(ケース16)とヘリウム冷却炉(ケース20)の実用化 時期にあわせて 2050 年とした場合の効用値を図 3.2.24 に示す。ケース1とケー ス12 の FBR 導入開始が 2030 年から 2050 年に遅れることにより、天然ウラン累 積需要量は約 30 万トン増加し、そのため効用値は 0.2 程度下がっている。ケース 22 の水冷却炉の天然ウラン累積需要量は許容値を大幅に下回り 215 万トン程度に 増大している。

()評価基準を変えた場合の感度解析

評価基準の努力目標、達成目標、許容値をそれぞれ40万トン、160万トン、320 万トンに倍増した場合の天然ウラン累積需要量と効用値の関係を図 3.2.25 と図 3.2.26に示す。評価基準を緩めたことによって効用は全体的に0.4程度底上げされ る結果になった。効用値の底上げの程度は、採用している効用関数の特性により 天然ウラン累積需要量の増加とともに大きくなるため、ナトリウム冷却金属燃料

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ウラン利用効率の定数:a=1.0917, b=1.3155, c=0.0266

炉 (ケース 12) では 0.25 程度、水冷却炉 (ケース 22) では 0.5 程度になってい る。2050 年 FBR 導入開始の場合についても、資源重視型炉心を採用したケース 1' (2050) ~ ケース 20'(2050)の各効用値は 0.4 程度底上げされ、水冷却炉のケ ース 22'(2050)でも 0.3 程度の効用が得られる結果となった。

(3) 持続利用可能性の評価結果

持続利用可能性の評価結果として、ウラン利用効率と効用値の関係を図 3.2.27 に 示す。22 ケースのウラン利用効率は 99.5% ~ 92%の高い水準にあるため、効用値の うえでは 99.8% ~ 97.8%の高い効用が期待される。また、効用値が比較的狭い範囲に 分布していることから、持続利用可能性の視点では概念間の差は小さい。

(4) 資源有効利用の評価結果

図 3.2.28 に評価ケースのシステム構成と資源有効利用性の評価結果を示す。また、 資源有効利用性の効用値として、持続性利用可能性と資源節約性の内訳をそれぞれ示 している。資源節約性の効用値については、レファレンス条件による評価結果の他に、 効用関数の評価基準(努力目標、達成目標、許容値)を倍増した場合の効用値の底上 げ分をあわせて表示した。

22 ケースの資源有効利用性の効用を横断的に評価すると、持続利用可能性について は 22 ケース間で有意な差がみられないことから、もう一方の一次評価指標の資源節 約性が評価結果の支配因子になり得ることが分る。資源節約性の効用値の絶対量は採 用する評価基準により異なるが、相対的な大小関係は保存されており、レファレンス 条件および感度解析条件のどちらの評価基準を用いてもナトリウム冷却 MOX 炉(ケ ース 1) ナトリウム冷却金属炉(ケース 12) 鉛 - ビスマス冷却炉(ケース 16)の 効用が高い傾向を示している。

(5) 資源有効利用性のまとめ

22 ケースの FBR サイクル概念の資源有効利用性について、天然ウランの資源節約 効果と利用効率に着目した二つの一次評価指標(資源節約性、持続利用可能性)を用 いて比較評価を行った。また、資源節約性の評価基準をパラメータとする感度解析を あわせて実施し、レファレンス条件および感度解析条件のどちらの評価基準を用いて も資源有効利用性としてはナトリウム冷却 MOX 炉(ケース1)、ナトリウム冷却金属 炉(ケース12)、鉛-ビスマス冷却炉(ケース16)が高い効用を示すことが分った。









計標	<b>좥</b> 罒趧	<b>ţ</b> 準	設定理由	N° <del>7</del> ≯−\$*3
資源節約性	努力目標	20万t	1998年の世界エネルギー会議(IIASA/WEC)の推計を基に、将来の日本の原子力発 電量は世界の5%程度と仮定し、既知資源400万トンの5%を目標値に採用	40 <b>万</b> t
天然ウラン	達成目標	80万t	今後の資源開発の可能性を考慮した究極資源1600万トンの5%を目標値に採用	160 <b>万t</b>
累積需要量* <sup>1</sup>	許容値	160万t	世界全体の原子力発電量に対する現在の日本の発電割合約10%を用いて、究極資源1600万トンの10%を目標値に採用	320 <b>万</b> t
持続利用可能性	努力目標	100%	人口120億人、一人あたりのエネルギー消費量を現状の3倍、利用期間1000年と設定	
天然ウラン	達成目標	30%	人口100億人、一人あたりのエネルギー消費量を現状の2倍、利用期間500年と設定	
利用効率*2	許容値	<i>%L</i>	人口80億人、一人あたりのエネルギー消費量を現状レベル、利用期間300年と設定	

図 3.2.22 資源有効利用性の評価構造と主な評価条件

\*1 日本国内における将来の原子力発電設備容量(67.5GWe)を基準とし、日本が使用可能と考えられる天然ウラン量の割合から目標値を設定 \*2 世界人口の予測、人口あたりの最終エネルギー消費量(電力化率25%)、発電利用期間から必要とする原子力発電累積電力量(原子力発電 比40%)を算出し、それを賄うためのウラン量から目標レベルを設定(既知ウラン資源量400万tを基準とした利用率) \*3 感度解析のパラメータの一例(努力目標と達成目標は既知資源および究極資源の各10%、許容値は究極資源20%を日本で利用可能と仮定)



図 3.2.23 候補概念の資源節約性に関する評価結果(評価基準:レファレンス)



図 3.2.24 2050 年 FBR 導入開始条件による資源節約性の比較

(評価基準:レファレンス)



図 3.2.25 資源節約性に関する評価基準の感度解析例(全 22 ケース)



図 3.2.26 資源節約性に関する評価基準の感度解析例(代表ケース)



図 3.2.27 候補概念の持続利用可能性に関する評価結果





3.2.5 核拡散抵抗性の評価結果

核拡散抵抗性についても、設定した評価構造及び評価基準にしたがって、評価を行 なった。22 ケースの FBR サイクル候補概念の評価結果からは、全体として大きな差 がみられなかった。核拡散抵抗性を評価した結果全般を図 3.2.29 に示す。また、よ り詳細な評価結果を図 3.2.30 に示す。核拡散抵抗性については、全体の評価構造が 複雑であるので、以下で制度的核拡散抵抗性以外の指標については、指標別にグラフ を示すことにする。

まず、制度的核拡散抵抗性については、個別のグラフは省略するが、全ての候補概 念で目標となる基準を達成する見通しであるために差が付かない。制度的核拡散抵抗 性の範疇に入るものとして、保障措置、核物質防護、輸出管理があげられる。輸出管 理については、設計によらず、遵守されることが考えられる。中間とりまとめ時の設 計では、炉プラントシステムについては、保障措置や核物質管理について特に問題が あるとは考えられていない。他方で燃料サイクルシステムについては、湿式燃料サイ クルについては、既に保障措置設計や具体的な核物質防護手段も確定して実施した経 験があり、制度に対応できる見通しはほぼ明確である。乾式燃料サイクルについては、 核物質防護は設計が詳細になるまで進んでから具体的な適用手法を検討することにな るが、どの概念も問題があるとは考えられていない。保障措置に関しては、核物質の 分析におけるサンプルの代表性を確保する手法を検討中であり、具体的に保障措置手 法を設計するためには、今後の技術開発が必要であると考えられる。なお、保障措置 や核物質防護、輸出管理といった核不拡散制度や関連基準についても未来永劫不変で はない点には留意すべきである。現在、従来の保障措置協定に基づく保障措置から追 加議定書に規定される諸方策をも統合・最適化した統合保障措置への移行が始まろう としており、核物質防護の分野でも、INFCIRC/225Rev.4 に基づく核物質防護制度へ の移行が予定されており、輸出管理分野でも原子力供給国グループに中国が参加し、 原子力資機材の輸出許可にあたっての政府方針も国際的な輸出管理への関心の高まり に伴って変更される可能性が十分考えられる状況である。さらに、ブッシュ米大統領 やエルバラダイ事務局長などが核不拡散について新たな提案を行ったことは記憶に新 しい。したがって、乾式燃料サイクルについては、従来の湿式燃料サイクルとは異な る特徴を持っているので、こうした核不拡散関連動向も踏まえながら、技術の特徴を うまく活かせる核不拡散制度を設計していくことが望ましいと考える。ただし、核不 拡散制度(特に保障措置)は、最終的には各国および国際機関(事務局)との交渉に よって決まる面があるので、将来制度が明確になっていないうちに、将来制度案を前 提として検討することは危険であることには留意する必要がある。

いずれにせよ忘れるべきでないのは、制度的核拡散抵抗性の重みは核拡散抵抗性全体の半分を占めており、技術的特徴の細かい差に比べて、制度的核拡散抵抗性の重要 さを示すとともに、結果としても各候補概念間で大きな差がでない原因となっている 点である。

接近性については、22 ケースの FBR サイクル候補概念に対する評価結果を図 3.2.31 に示す。頑丈性、接近性、改造性については、特に各候補概念において変わらない結 果であった。特に燃料サイクルの施設は、低除染(つまり高放射線)の燃料を扱うた

めにセル構造になっており、非常に丈夫な(壁の厚さが 2m) コンクリート造りにな っており、破壊行為などに対しては強靭であると考えられる。また、核物質を直接扱 う場所への接近しやすさについても、基本的に人間が近接して作業することがほとん どないと考えられるため、例えば、グローブボックスなどを用いて作業する施設に比 べて難しいと考えられる。運転条件の改変や施設の改造などについては、これまでの 施設と同様に十分難しいと考えられる。今後は、各候補概念の設計が進捗するにした がって、こうした観点からも詳細な検討が行なわれることが期待される。核物質の性 質に基づく接近しやすさについては、転用の対象となりうる FBR サイクル内の核物質 の放射線(y線)を目安として評価することとした。おおまかに言って再処理方式に よって差が生じており、より低除染の FBR サイクルの方が評価値は高くなる。超臨界 直接抽出再処理と酸化物電解再処理の評価値が高く、先進湿式再処理はそれに続き、 金属電解再処理の評価値はやや低い結果となった。金属電解再処理に関しては、希土 類について非常に低除染であって、製品側にかなり移行するという設計結果であった。 しかし、γ線を多量に放出する核種を含む元素については、廃棄物側に移行する割合 が大きいので、評価した結果がそれほど高くならなかったと考える。以上については、 設計の進捗状況によって変わりうる結果であり、今後の検討がさらに必要である。な お、物質接近性の評価結果は、その部分だけ取り出すと候補概念間で差があるように 思われるが、核拡散抵抗性全般に占める比率は小さく、全体的な結果には大きな影響 を与えない。

難取扱性の評価結果を図 3.2.32 に示す。どの FBR サイクル候補概念もあまり大きな値にはならなかった。これは、中間評価時の考え方によれば、FBR サイクルにおける核拡散への抵抗性が主に別の要素によって担われている、とみなされる。今回の想定では、ケース1からケース11まで、またケース14からケース22までのFBR サイクル候補概念からの核兵器原材料として粉体を想定し、また、ケース12及びケース13(金属電解再処理を実施するFBR サイクル)からの核兵器原材料として金属(合金)

(金属電解特/2022を実施する)10K 9イワル)からの核兵福床内将として金属(日金) を想定した。これらの双方とも、気体や液体に比べると扱いやすい状態であり、評価 した結果は低くなっている。また、ケース 12 及びケース 13 で想定した原材料は、金 属電解再処理を行なったときの再処理製品(それぞれ、径ブランケットを処理した製 品と炉心とブランケットを混合して処理した製品)である Pu 富化度の高い金属合金で ある。この特徴が難取扱性の評価結果の違いには表れている。固体である金属を取り 扱いが粉体に比べて容易であること、さらに必要原料量については、全ての候補概念 について大量ではないために評価結果も低いが、特にケース 12 およびケース 13 では 許容値の数 10%増し程度であり、他の候補概念に比べて少量であることが、ケース 12 及びケース 13 の評価した結果が低くなっている原因である。

ただし、技術的核拡散抵抗性の影響は総じてわずかであり、全体の評価結果として は数パーセントの差しかついていない。この結果は、設計の進捗状況や想定条件の不 確実性を考慮すると問題とすべきものではないと考える。



## 図 3.2.29 核拡散抵抗性の評価結果

				 	_						_									_						_				_				_								_		
žh 🗆	■影	位在	1																																									
<u>م</u>	# 	「東北子」」			-	-						_		-						-						-				-				Ī										
5		바바 마늘 팀			-				-					-		-				-			-	-	-			-		-		-		-		-		-				-		
るい おい いっちょう うちょう うちょう しょう しょう しょう うちょう しょう うちょう うち		<u> 告付事の</u> 世の由			_				-					-		-				-				-	-	-		-		-		-				-		-				_		
基治		超大性 改计				_			-					_		-												-				-						-				_		
		-			-				-		-			_		-				-			-	_	-	-		-	-	-		-	-	╞		-	_	-				_	-	
는 뽑ん 1대 1는 사나		-			_				-	-	-			_		-				-			-	_	-	-		-		-		-	-	╞				-				_	-	
生山市 的北本 扩		-			_				-	-	-					-				-				-	-	-		-		-		-	-	-		-	-	-				_	-	
	_	-			-				-	-	-			_		-				-			-	-	-	-		-		-		-		ŀ				-				_	-	
		+			-									ł				Ť									1				-(e)		-(e)											
	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MMe)- 先進湿式(200t/V)-簡素化ペレッド(200t/V)	MOV读地/叙述-No 渔山十刑/1EDDAMe)-	MIOA※それ性が了N3かなJくて(1000MB/) 先後記式(2001/v))簡素化ペレット(2001/v)	MOX猕科(TEFP)=Na/行却/天望(1200MWe)= 牛米温北(2004.4.)-簡素/Pる1.vi P(2004.4.)		MOX燃料(貧源)-Na冷却大型(1500MWe)- * ※温光(2000 // 上型土津(2000 //	先進湿式(200t/y)一振朝先現(200t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(200t/y)-振動充填(200t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX 帙 虹( 答 酒 )—Na 冷却 大 刑( 1500 MMa )—	1402/2014年1月12011年1月11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11		MOX燃料(経済/-Na/行却/又で1200MWe)- #2階串声体地山/504 / /	には で に 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 	酸化物電解(50t/y)-振動先現(50t/y)	MOX蒸料(整済)-Na冷却大型(1500MMe)-	酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)	金属燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	金属燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却中型シングJU(750MWe)-	超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却中型モジュー)K750MWe)-	超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ベレット(50t/y)	窒化物燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MW * 光温型(2000) 、	先進述式(200t/y)-間素化ヘレット(200t/y)	窒化物燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MW * 光温光/2007 / (施ま// 2011 / 2000 / )	先進述式(200t/y)-間茶化ヘレット、200t/y)	MOX燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MWe) # 光泪术//////	<b>先速速む(200t/y)-間茶化ヘレット、200t/y)</b>	MOX燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MWe) * * * 指式2000 / ) 施 = // 2000 / )	先進湿式(200t/y)-間素化ヘレット(200t/y)	窒化物被覆粒子燃料(資源)-He冷却大型(1124MMe)- 脳研電-++ 光泪	脱做復+艽進涎式(200t/y)	窒化物被覆粒子燃料(経済)-He冷却大型(1124MMe)- 恶뇊蔷· # 鉴追才/ccci / 〉 批電點 7 割 第/ccci / `	脱做復+艽连运式(ZUUT/y)-做復私于裘垣(ZUUT/y)	MOX燃料(水冷却炉)-水冷却大型- 先進湿式(200t/y)簡素化ペレッ(、200t/y)	
	ד-או		7-72	7-73		7-74		4-75	×,	4 — 7 в	N N	, I	Y-X		7-28		7-79		7-210		7-711		4-219	11	4 + -	2141	7-714	+ <	7-715	2.4	7-216	2.4	712-4		7-718		7-719		7-720		7-721		<del>7</del> -722	Ĩ



■制度的核抗费抵抗性
■ 過大存
□ 被方体
■ 受送済格
■ 物道液合
■ 物道液合
■ Pu 抽出等置
■ Pu 抽出等面
■ Pu 抽出途
■ Pu 抽出途
■ Pu 描出途
■ Pu 描出途

											-				_				_				_				_										·	 			-	
-	-	物香菇活性	TI	-	-	-			-		-		-		-		-		_						] -	-	_				_				_				_	_		
设治体		_		-	-	-		-	-		-		-		-		-	-	-		-		-			-	_				_				_	-		-	-	-		
-		_				-																	-				-				_		-				-	-				
-		1年16州	ты	-					-				-		-		-		-		-		-				-		-		_		-		-							
-	_			-	-	-		-	-			-			-		-		-				-				_								-				-	-		
本は		-		-	-	-			-		F		-		-		-		-				-			-	-				_				-	-			-			
「西」		-		-	-	-			-		-		-		-		-		-				-			-	-				_	-			-				-	-		
L	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(200t/y)-簡素化ベレット(200t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1200MMe)- 在洋は子(2004、い-66またで1、いた(2004、い)		MOA)※#f(LLFP)=Na/売却人空(1 2004/we)=  先進混式(2004/v)=簡素化ペレット(2004/v)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(200t/y)-振動充填(200t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(201/2)-簡素化ペレット(201/2)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	先進湿式(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレッド(50t/y)	▶  MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	┛  酸化物電解(50t/y)−振動充填(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	╹  酸化物電解(50t/y)−振動充填(50t/y)	▶  金属燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-	-   金属電解(50t/y)射出成型(50t/y)	8  金属燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-	■  金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却中型シング)K(750MWe)-	<ul> <li>  超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ヘレット(50t/y)</li> </ul>	■ MOX燃料(経済)-Na冷却中型モジュー)I(750MWe)-	<ul> <li> 超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)</li> </ul>	■ [窒化物燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MWe)-	<ul> <li>「先進湿式(200t/y)-間茶化ベレット(200t/y)</li> </ul>	7   窒化物燃料(経済)		-   MOX際料(資源)-Hb-Hb/労却中空(强制循续: /10MWe)-		MOX際料(経済)~Pb-Bl/汚却甲型(强制循環: /10MWe)- り 先進湿式(200t/v)-簡素化ペレット(200t/v)	■ [ 1124MWe) [ 1124MWe) [ 1124MWe) [ 1124MWe] [ 1124WWe] [ 1124WWWe] [ 1124WWWe] [ 1124WWe] [ 112	0  脱被覆+先進湿式(200t/y)-被覆粒子製造(200t/y)  -	,   窒化物被覆粒子燃料(経済)-He冷却大型(1124MWe)-	脱被覆+先進湿式(200t/y)-被覆粒子製造(200t/y) -	一 MOX燃料(水冷却炉)−水冷却大型−	
	7-7	ŝ	7-7 2		7-73	1	7-24	;   	7-75	1 1 1	1-20	1	14-0	<u>н</u> -78	2	4-10	2 - 22	1010-4		7-71	k	7-215		4-215	~ ~ ~	7-214	k	7-715	~ ~ ~	7-216		7-217		7-71E		7-71S	1	ケースざい	1 1 2	1-22		Į



図 3.2.32 難取扱性の評価結果

□ 形状
 ■ 必要原料量

図 3.2.33 難単離性の評価結果

JNC TN9400 2004-052

3.2.6 技術的実現性の評価結果

技術的実現性については、2章の評価手法にしたがって評価を実施した。評価した 結果を図 3.2.36 に示す。全体として冷却材(炉型)が異なる FBR サイクルで違いが 出た。また、燃料サイクルによっても、炉型ほどではないが違いが出た。これは、こ れまで研究開発してきた核燃料サイクル(水冷却炉あるいはナトリウム冷却炉、MOX 燃料、湿式再処理法、ペレット燃料製造法)との違いが小さいほど、技術的実現性の 評価結果は高くなる。

もちろん、この結果は、ロードマップの作成におけるデータに設計担当者の見解を 加えた結果を基にしているため、完全に客観的ではないし、設計の進捗によって知見 が増加すれば、変わりうるものである。ただ、総体的には、中間とりまとめまでの研 究開発の進捗状況に応じた評価結果が得られたと考えられる。

技術的実現性の評価結果について支配的な影響を与えた要素は、冷却材の種類とそれによるプラントの開発期間と開発資金であった。次に燃料サイクル、燃料の差に起因する再処理方式と燃料製造方式の差が結果に影響を与えたケースもあった。これらについては、以下で説明する。まず、図 3.2.34 に冷却材ごとの技術的実現性評価結果を示す。



図 3.2.34 冷却材(炉型)ごとの技術的実現性評価結果

ケース 22 の水炉サイクル (水冷却大型炉、MOX 燃料、先進湿式再処理、簡素化ペ レット燃料製造)は、今後プラントの開発が不要である (と想定した)FBR サイクル 候補概念である。したがって、性能的な要素は犠牲にしている面があるが、技術的実 現性の高さをめざした概念である。水炉サイクルの場合は、プラントの実用化に時間 を要しないために燃料サイクル側の開発を待てばよいと想定しており、評価した結果 でも、最も技術的実現性は高いという結果が得られた。今後は、稠密な高燃焼度炉心 の材料開発などについての不確実性をよく検討することで、技術的実現性をより正確 に評価できると考える。 ケース1のナトリウム炉サイクルは、特に MOX 燃料、先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造と組合せたとき、技術的実現性が高い候補概念となる。また、ナトリウム冷却炉を大型から中型にすると、実用化までの期間を若干短縮できることが考えられる。水炉サイクルが、炉プラントシステムの開発が不要という極端な特徴を持つ FBR サイクル候補概念であることを考えると、ナトリウム炉サイクルは技術的実現性がかなり高い概念であるといえる。

わが国において既に実用化している水冷却炉、実験炉及び原型炉が完成しているナ トリウム冷却炉に比べて、未だ実験炉レベルの炉も国内に存在しない鉛ビスマス冷却 炉(ケース 16 及びケース 18)、ヘリウム冷却炉(ケース 20)については、実用化ま での時間や資金も多く必要になると考えられる。先に述べたとおり、プラントの開発 資金と開発期間の要素が支配的な影響を及ぼすので、他の冷却材の炉に比べれば技術 的実現性の評価結果は不利となる。

技術的実現性に関しては、燃料の形態とそれに起因する再処理形態といった他の要因も結果に影響する。ナトリウム冷却大型炉について、中小規模の燃料サイクルを組み合わせた各ケース、例えば、ケース6(MOX燃料、先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造)ケース8(MOX燃料、超臨界直接抽出再処理、簡素化ペレット燃料製造)ケース10(MOX燃料、酸化物電解再処理、乾式振動充填燃料製造)ケース12(金属燃料、金属電解再処理、射出成型燃料製造)について検討する。これらの4ケースの技術的実現性の評価結果を図 3.2.35 に示す。





技術的実現性全体の結果についても、湿式再処理と乾式再処理で差があるが、これ は開発容易性というより、開発リスクの差によるものである。言い換えれば、推定し た開発資金等に差があるというよりも、その幅に関する差があるということ、つまり 今後の開発如何では実用化までに必要な資源が大きくなるかもしれないことを示す。 また、超臨界直接抽出再処理と酸化物電解再処理は、技術開発に要する時間が、先進 湿式再処理や金属電解再処理よりも大きい点などが特徴である。もちろん、大きく見 ると湿式再処理に含まれる、先進湿式再処理と超臨界直接抽出再処理の間でも、開発 資金と開発期間で若干の違いがあり、先進湿式が技術的実現性にわずかに優れる結果 となっている。

技術的実現性に影響を及ぼす要因として、燃料の形態もある。鉛ビスマス冷却炉サ イクルでは、MOX 燃料を用いる候補概念(例えば、ケース18)と窒化物燃料を用い る候補概念(例えば、ケース16)が考えられている。双方とも燃料ペレットを用いる 概念であるが、窒化物燃料の実現にはやや資金も時間も要する上に、窒素同位体分離 法を開発する必要があり、その開発にどのくらいの資金を要するのかについてはかな リ不確実である。したがって、窒化物燃料の開発リスクは大きくなる。ヘリウムガス 冷却炉については、タービンの開発を含むプラント開発が必要なのに加えて、燃料も 窒化物被覆粒子であり、そのための燃料製造法の開発には大きな努力が必要であると 予想される。また、窒化物であることから、窒化物同位体分離法の開発も必要となる。 これらの要因が相まって、技術的実現性という面では、不利な結果となっている。

また、LLFP 分離核変換を意図した FBR サイクル (ケース3) については、ターゲ ット燃料の開発、I、Tc、Cs と Sr を分離する機能を持つ再処理施設の開発などの点で かなりの困難が予想される。さらに、サイクル施設に加えて、実際に LLFP サイクル を実現しようとすると、炉心燃料についても目標とした性能を発揮できるのかについ て今後検証すべき点もある。中間とりまとめ時の評価で検討した LLFP サイクルは、 技術的実現性の高いナトリウム冷却大型炉、MOX 燃料、先進湿式再処理、簡素化ペ レット燃料製造を基本としており、かなり技術的実現性の高い技術をベースにしてい る。それでも、新しい分離方法を FBR サイクルに導入することで、実用化にはかな りのハードルになるという評価結果が得られた。

フェーズ 中間取りまとめ時の評価に関しては、FBR サイクル候補概念について、 従来系統的に技術的実現性の評価がなされなかったことを考慮すれば、各候補概念に 共通の手法でデータを収集することを試み、評価結果を出していった点で大きな意義 があると考える。

しかし、技術的実現性の指標に関しては、以下のような課題が残っている。開発リ スクについては、技術開発の成功確率を評価することなどが考えられる。フェーズ 中間とりまとめ時の評価に確率を用いることも実際に検討されたが、成功確率を明示 することは困難であったが、今後、最終取りまとめに向けてその導入も検討するべき であろう。

また、開発リスクについては、FBR サイクル候補概念ごとに実用化までの開発全般 に必要な資源にどの程度幅があるのかを評価することとしたが、フェーズ 最終取り まとめでは、ロードマップ等の策定に合わせて、個別の技術開発課題から開発容易性 と開発リスクを示すことを検討すべきであろう。

技術的実現性の評価では、担当者へのヒアリング結果を用いているが、できる限り 主観的な評価を抑制できる仕組みを作っていく努力が肝要である。



3.2.7 社会的受容性の評価結果

2 章で定めた評価構造及び評価基準にしたがって、22 ケースの FBR サイクル候補 概念に関する社会的受容性に関する評価を行った。

社会的受容性の結果を 2 次指標レベルで図 3.2.37 に示す。候補概念間で設計検討 の進捗にも差があり、また、未だ設計では、ほとんど検討されていない指標もあった ので、フェーズ 最終取りまとめにおける評価までに、こうした点を改善して各候補 概念の特性をより反映できるようにすることが必要である。ただ、現時点の設計に対 しては、社会的受容性のおおよその傾向が出ているので、以下にその傾向を述べるこ ととする。なお、より詳細な指標までの評価結果を図 3.2.38 に示したので適宜参照 してほしい。

導入に必要なインフラについて評価した結果を図 3.2.39 に示す。炉プラントシス テムの面では、ナトリウム冷却、あるいは水冷却といったこれまでの研究開発と商業 利用の蓄積がある候補概念がやはり有利な結果となった。この点は、燃料システムも 同様である。湿式再処理とペレット製造を用いる候補概念がこれまでの社会インフラ を有効に活用でき、有利な結果となった。乾式、特に酸化物電解法は、やや不利な結 果となった。また、燃料の面からは、窒化物燃料は、窒素同位体分離施設なども必要 となるので、インフラ面からは不利となった。

運転・保守・補修性について評価した結果を図 3.2.40 に示す。工事、運転(操業) 保守・補修、廃止措置といった FBR サイクル利用について、ライフサイクル全般の 利用しやすさを評価する目的があるが、工事段階では、従来の経験を活かすことがで きるような FBR サイクル候補概念が若干有利であり、サイクル施設などで新規なも のは少々不利な結果となったが、大きな差はない。運転段階については、全般的に自 動化するなどの工夫がなされており、既存の軽水炉サイクルに対して若干向上するこ とが期待される。ただ、酸化物電解法の燃料製造の運転条件を調えることが難しい、 被覆粒子燃料製造の際も、条件を調えることが困難であることが予想されている。メ ンテナンス性に関しては、未だ検討が始まったばかりであり、現時点で結論を出すこ とは早計であるが、各 FBR サイクル候補概念についてほぼ現状の核燃料サイクル施 設と同等のメンテナンス性を確保することを目指しているといえよう。他方で、廃止 措置については、低除染燃料サイクルを行うことにより、特にサイクル施設の廃止措 置が従来よりも困難になる可能性が高い。

研究開発の柔軟性について評価した結果を図 3.2.41 に示す。どの FBR サイクル候 補概念も研究開発の柔軟性に関してかなりの能力を持っており、各候補概念間でそれ ほど大きな差はない。乾式サイクルシステムが燃料サイクルの変更可能性(特に高除 染化など)について、湿式よりも若干困難であるという程度である。これはもともと 乾式再処理の潜在的な分離能力が低い特性によるものであり、高除染が必須であれば 重大な欠点であるが、簡素な分離を行うことが特徴の一つとなっている実用化戦略調 査研究の FBR サイクル候補概念の場合には大きな問題にはならず、1種の柔軟性の 差と考えれば済むような特性である。

既知性及び注目性について評価した結果をまとめて図 3.2.42 に示す。既知性では、 既存の核燃料サイクルに近い候補概念に有利な結果となった(図 3.2.43 参照)。具体 的には、水冷却炉サイクル、ナトリウム冷却炉サイクル、鉛ビスマス冷却炉サイクル 及びヘリウムガス冷却炉サイクルという順番になる。これは、妥当な結果であろう。 また、燃料の面からは、MOX 燃料に対して金属燃料や窒化物燃料、さらに被覆粒子 燃料ではやはり差があるという評価結果であった。燃料サイクルの面からも、湿式サ イクルと乾式サイクルでは差があるという評価結果となった。注目性に関しては、 LLFP を核変換する FBR サイクルについては、放射性廃棄物による環境負荷を減少 させるための配慮を特別に行っていることがよい意味で注目される可能性が高いので、 評価結果がよくなった(図 3.2.44 参照)。他の新しい FBR サイクル技術については、 既存の軽水炉を中心とする核燃料サイクルに比べ、よい意味で注目されるということ が予想されないので、大きなインパクトを持っていない。ただ、冷却材としてのナト リウムは悪い意味で若干注目される可能性が高いと考えられる。同様に鉛ビスマスに ついても悪い意味で注目されるのかどうか微妙なところであったが、ナトリウムほど のインパクトはないと考えられる。また、燃料サイクルについては、湿式サイクルよ りも乾式サイクルの方がやや印象はよいという程度の差がある。

今後、社会的受容性については、アンケートの活用などを考えて、社会的受容性の 指標を改善していくことが考えられる。アンケートは、評価作業そのものに対しても 活用することができる。他方で、アンケートについては、評価指標の意味や FBR サ イクル候補概念について十分に知ってもらう必要があるので、闇雲に取ってもよい成 果を得ることは簡単ではないとの指摘もあるので、今後慎重に検討して、よい手法を 検討していくことが課題である。

	□導入インフラ	■ 運転• 保守• 補修性	□ 研究開発柔軟性 □ ㎜ == i	□以知性■次□本																		0.7
																					-	0.6
まロ火			· ·												=						-	0.5
	既知性			-	-			-						-				-				0.4
2 H 44 14				-							-		-			-		-				0.3
7 TT 140 BB 3	·補修 <mark>性</mark>			-				_	-						=	-				-		0.2
	運転·保守	-	-	-	-	-		-				-	-		-	-			-	-		0.1
、 F 撰	1 WOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MMe)- 1 先進退式2004/y)-簡素化ペリッド(2004/y)	2 MOX燃料紙泊-Na冷却大型(1500MMe)- 2 先進退式2004、外子簡素化ペリッド(2004、小)	3 [MOX燃料(LFP)-Na冷却大型(1500MMe)- 3 先進退式(2004/y)-簡素化ペリッド(2004/y)	▲ MOX燃料(資源)→Na冷却入型(1500MMe)- ▲ 先進显式(2004/y)-振動充填(2004/y)	5 MOX燃料(総治-Na-冷却大型(1500MMe)-55 先進国式(2004/y)-振動充填(2004/y)	B MOX燃料(資源)-Naが払け大型(1500MMe)- B 先進温式(502/3)-簡素化がしか(500/3)	7 [WX燃料(経済)-Naが出力型(1500MMe)- 7 先進温式(502/3)-簡素化乙少火(502/3)	B MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MMe)- B 起臨臨界直接抽出(50c,V)-簡素化とバリン(50c,V)	MOX燃料紙子-Na-h-和大型(1500MMe)- 3   起臨馬界直接抽出(50c.V)-簡素化とパッパ50c.V)	10 MOX燃料(資源)—Na冷却大型(1500MMe)—10 酸化均物電解(50-1/)-振動的均氮 20-1/)	11 MOX燃料(紙子有)-Na冷却人型(1500MMe)- 11 酸化均衡電解(504人)-振動活動(504人)	12 金属燃料(資源-Na/分却大型(1500MMe)- 12 金属電網(50-公)-射出成型(502/3)	13 金属燃料(統治-Ma/先却大型(1500MMe)	MOX燃料(資源)-Ma冷却中型シング)K750MMe)- 14  超臨界直接抽出(505.0)-簡素化とレット(505.0)	MOX燃料紙泊-Na冷却中型モジューバ750MNe)- 12 起臨線直接抽出(50c,v)-簡素化とパッド50c,v)	26 第七物燃料(資源)-Pb-Bi分却中型(強制循環:710MMe)-16 先進退式2004/y)-簡素化ペリッド	17 室化物燃料(経済)-Pb-B(冷却中型(強制循環:710MMe)-17 先進显式(2004/y)-簡素化2/JvK(2004/y)-	MOX燃料(資源) HP-Bi治却中型(強制循環: 710M/6)- 18 先進退式(2004/))-簡素化ペリッド(2004/)	MOX燃料紙子-PB-BI冷却中型(強制循環: 710M/e)- 19 先進退式2004/)「管素化ペリッドで10-2004/)」	20 誕化物成覆粒子 燃料(資源) + He/A 域入型(1124Mve)- 20 脱磷酸量、汚透過近、2004、2)、被覆散子 筆或 2004、2) 室化物液菌粒子 燃料(弦音) + He/A 加入工型(124Mve)- 21 随体感量、牛茶館日子、3004、3、上熱窒物、乙酸、2004、3)	1010X系でのためのかりがANAです。2000-00-01-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0	0.0
	۲ ۲	エズ	Ч Х	Ч-Х Х	۲ ۲	L K	Ч К	7	Ъ	۲ ۲	۲ ۲	۲ ۲	۲ ۲	۲ ۲	۲ ۲	۲ ۲	۲ ا	۲ ۲	Ι Υ	<u> </u>	トメ	

図 3.2.37 社会的受容性の評価結果



						_	_	_	_	[
ř I H	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-									
ĸ	先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)					-	-	-		
7-72	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MMe)- 在 准词十/2005 / 3)									
	先進述式(200t/y)-間紊化ヘレット(200t/y)		_	_	-	-	-	-	-	
<del>7</del> -73	MOX燃料(LLFP)-Na冷却大型(1500MWe)-  先進湯式(200t/v)-簡素化ペレット(200t/v)									
7.4	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-									
+×   -	先進湿式(200t/y)-振動充填(200t/y)			-	-	-	_			
7-75	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)-   生業得計/9004 公→									
	フロルニュール エレイトロロレ タノーが 取り フレム (くいひし) タノ	1							-	
<del>7</del> -76	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1200MMe)-  先進湿式(50t./v)-簡素化ペレッド50t./v)								-	
	MOX燃料(経済)-Na)分却大型(1500MWe)-					_	_	-	-	
7-71	先進退式(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)				-	-	-	-	-	
7-78	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MMe)-  超臨界直接抽出(50t/v)-簡素化ペレッド(50t/v)						-			
7-79	MOX燃料(経済)-Na/冷却大型(1500MVe)- #2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014 - 2014					-	-			
	超臨外直接抽出(but/y)=間紊化ヘレット、but/y)									
5−7ו0	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)-  酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)					-				
ל-711	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MVe)- 新化粧電約/20、/ 1年計大店/20、/ )									
	酸化物電阱(50t/y)一板到先現(50t/y)									
ד-7ו2	金属燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)		=							
5713	金属燃料(経済)-Na冷却大型(1200MVe)- 金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)									
<del>7</del> -714	MOX燃料(資源)-Na冷却中型シング)以720MMe)- 超臨界直接抽出(50r/y)-簡素化ペレッド(50r/y)									
7-Z15	MOX燃料(経済)-Na冷却中型モジュー)(/120MMe)- 超臨界直接曲出(501、/)-簡素化ペレッド50+/)									
7-716	窒化物燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:710MMe. 生准词式0004、(2) 簡素化例1、2000-(2)									
7-717	2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.1.1.2.2.2.2.2.2.2.2									
×	先進退式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)									
5-718	MOX燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MMe)-  先進湿式(200t/v)-簡素化ペレット(200t/v)									
7-Z19	MOX燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環: 710MMe)- 生准词式(2004.5.)-醯素北水1.2006.5.)									
7-720	れ血血がたのでが、間末に、センバスのでが、 窒化物被覆粒子燃料(資源)-He冷却大型(1124MWe)- 脱被覆+先進湿式(2004/v)-被覆粒子製造(2004/v)									
ታ-721	窒化物被覆粒子燃料(経済)-He冷却大型(1124MMe)- 脱被覆+先進退式(200七y)-被覆粒子製造(200七y)	I								
ケース22	MOX燃料(水冷却炉)-水冷却大型- 先進退式(2004/y)-簡素化ペレット(2004/y)				-	-	-		-	
	)	0.1	10 0.2	0 0.31	0 0.40	0.50	09.0	0.70	0.80	06.0






図 3.2.40 運転・保守・補修性の評価結果



図 3.2.41 研究開発柔軟性の評価結果

## ■ サイクル変更可能性

□ 既知	■ 理解	Ⅲ卅□																				
																						0.70
																						09.0
																					-	0.50
	-				-	-	-											_			-	0.40
													-	=			-	. –				0.30
	-		-	-	. =											-			1		-	0.20
	-				. –						-				-	-				_	-	0.10
													(e)-	We)-	[: 710MWe)-	E: 710MWe)-	710MWe)-	710MWe)-	24MWe)- 0t/y) -	24MWe)- 0t/y) -		00.0
MOX燃料(資源)-Na:冷却大型(1500MMe)- 先進退式(200七y)-簡素化ペレット(200七y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MMe)- 先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	MOX燃料(LLFP)-Na冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(200七y)-振動充填(200七y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(200七/y)-振動充填(200七y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(50t/y)-簡素化ペレッド50t/y)	MOX燃料(経済)-Na:冷却大型(1500MWe)- 先進湿式(50t/y)-簡素化ペレッド50t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)- 超臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	MOX燃料(資源)-Na內却大型(1500MWe)- 酸化物電解(501、/y)-振動充填(501、y)	MOX燃料(経済)-Na:A却大型(1500MWe)- 酸化物電解(50t./y)-振動充填(50t./y)	金属燃料(資源)–Na冷却大型(1500MWe)– 金属電解(50t/y)–射出成型(50t/y)	金属燃料(経済)-Na冷却大型(1500MMe)- 金属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	MOX燃料(資源)-Na冷却中型シング)K(750MMe 起臨界直接抽出(504/y)-簡素化ペレット(504/y)	MOX燃料(経済)-Na冷却中型モジュー)K/150W 超臨界直接抽出(50F/))-簡素化ペレット(50F/)、	窒化物燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環 先進退式(200七y)-簡素化ペレット(200七y)	窒化物燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環 先進退式(200七/y)-簡素化ペレット(200七y)	MOX燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:7 先進湿式(200七y)-簡素化ペレット(200七y)	MOX燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:7 先進湿式(2004/y)-簡素化ペレット(2004/y)	窒化物被覆粒子燃料(資源)-He冷却大型(112 脱被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(200	室化物被覆粒子燃料(経済)-He冷却大型(112 脱被覆+先進湿式(200±/y)-被覆粒子製造(200	MOX燃料(水冷却炉)-水冷却大型- 先進湿式(200t/y)-簡素化ペレット(200t/y)	
ד-א	7-72	7-73	ケース4	7-75	7-76	<del>7</del> -77	<del>7</del> —78	7-79	7 <b>Z</b> 10	5-711	7-7ו2	5713	ケース14	7-715	5716	ד-7ו7	ታ718	ታ—ス19	ケース20	ታ21	サース22	

-161-











JNC TN9400 2004-052



JNC TN9400 2004-052

3.3 7 つの視点からの多面的評価結果

3.3.1 各評価視点間の重み付けを行わない評価結果

安全性以外の各評価視点の重み付けを行なわないときの評価結果を棒グラフにて 図 3.3.1 に示す(重み付けしないので、このとき効用値の満点が6点になっている。)。 ただし、評価ケース全てを対象とした議論は複雑になるため、代表的なケースを取り 出して結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で200tHM/yの処理規模(大型施設)である。また、炉心燃料は全て資源重視型で比較することとした。評価結果を図3.3.2 に示す。全般的に、環境負荷低減性と核拡散抵抗性では、大きな差が生じなかった。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース1:便宜的に「 冷却炉サイクル」という呼称を以下で用いる)は全般的にバランスが取れた結果であった。特に今後の開発要素が少なくてすむので早期に導入できることが幸いして、資源有効利用性や技術的実現性などで優れている。また、経済性においても良好な結果であった。社会的受容性については、技術的な受容性に関わる部分は比較的高い評価を得たものの、心理的受容性については、ナトリウムの評判の悪さが懸念されてそれほど高い評価ではなかった。

鉛ビスマス冷却炉サイクル(ケース16)とヘリウム冷却炉サイクル(ケース20) については、双方とも窒化物燃料を用いており、経済性や資源有効利用性では、かな りの性能が期待できるものの、今後、実用化までに要する期間や資金が大きいために 技術的実現性に課題があり、資源有効利用性にもハンディが及ぶ。なお、鉛ビスマス 冷却炉サイクル(ケース16)とヘリウム冷却炉サイクル(ケース20)の評価結果に は、窒化物燃料(鉛ビスマス冷却炉サイクルについては、窒化物ペレット燃料、ヘリ ウム冷却炉サイクルについては、窒化物被覆粒子燃料)を利用することによる影響も 含まれている。もちろん、炉心燃料形態も原子炉プラントと相性がよいものが選ばれ ており、冷却材の選択は、燃料製造などの研究開発と無関係ではないが、プラントの 違い(冷却材の違い)だけが評価結果の差を説明する理由ではないことに留意すべき である。

水冷却炉サイクル (ケース 22) については、プラントの性能向上をめざした研究 開発を実施せずに現状の軽水炉プラントをそのまま用いるという FBR サイクルであ るので、技術的実現性の評価結果が高く、また軽水炉の実績などから社会的受容性も かなり高い評価となった。他方で、実用化の時期が早いにも拘らず、資源有効利用性 の評価は低く、燃焼度の向上が見込めないので経済性もあまり高い評価結果とならな かった。

	□経済性		■環境負荷低減性			口資源有効利用性		口核拡散抵抗性			■技術的実現性		■社会的受容性											
																								5.00
																								4.00
		-		-		-	-	-			-		-			-								3.00
-	_			-		-											-					-	-	2.00
_				-		-			-															1.00
	<b>X1</b>   先進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	ス2   MOX燃料(経済)- Nai冷却大型(1500MMe)- ス2   本准语式のmt/い, 瞳素ルベーットのmt/い	Juta weath y) - 同系 ID・2 / J - 「同系 ID・2 / J - 」   MOX燃料(LLFP) - Na)今却大型(1500MWe)-	★3  先進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	ス4  MOX燃料(資源)- Na冷却大型(1200M/e)- ス4  先進湿式2001/い-振動充填(2001/い)	ス5 MOX燃料(経済)-Naiや却大型(1500/We)- ス5 体策運営がの#バル-振動な増(200/We)-	ス6 MOX燃料(第)・Naや却大型(1500Me)- ス6 先進退式60(小)・簡素化イレッド(501/小)	37 MOX燃料(経済)-Na今却大型(1500MWe)- 大井 先進退式(501/y)-簡素代ペレット(501/y)	ス8 MOX燃料(資源)-Na诊却大型(1500M/e)- ス8 超臨界直接抽出(60t/y)-簡素化ペレット(50t/y)	39 MOX燃料(経済)-Na诊却大型(1500MMe)- 第1 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	ス10 MOX燃料(資源)-Na诊却大型(1500MWe)- ス10 酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)	ス11 MOX燃料(経済)-Na诊却大型(1500MWe)- ス11 酸化物電解(50t/y)-振動充填(50t/y)	ス12 金属燃料(資源)-Na)や却大型(1500MWe)- ス12 金属電解(501/y)-財出成型(501/y)	ス13 金属燃料(経済)-Na)や却大型(1500MWe)- ス13 金属電解(501/y)-財出成型(501/y)	314 MOX燃料(資源)-Nai令却中型シング)N/20MWe)- 314 超臨界直接抽出(601/y)-簡素化ペレット(501/y)	315 MOX燃料(経済)-Na/S却中型モジュール(750M/We)- 315 超臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	316 室化物燃料(資源)-Pb-Bi)谷却中型(強制循環:750MWe)- 16 先進退式2001/ハ)-簡素化ペレット(2001/ソ)	ス17 富化物燃料経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:750MMe)- ス17 先進退式(2001/))-簡素化ペレット(2001/))	ス18 MOX燃料(資源)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:750MVe)	<b>ス19 MOX燃料(経済)-Pb-Bi冷却中型(強制循環:750Mve)-</b> 大19 先進退式(2001/),-簡素化ベレット(2001/)	ス20 館化物被覆粒子燃料(資源)-He)令却大型(1124MWe)- ス20 脱被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(2001/y)	ス21 241 24MWe)-Heiの名式-Waki(経済)-Heiの会却大型(1124MWe)- ス21 脱被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(2001/y)-	32 MOX燃料(水冷却炉)-水冷却大型- 32 先進退式(2001/))-簡素化ベレット(2001/))	0.00

図 3.3.1 6評価視点の重み付けを行わないときの評価結果



## 図 3.3.2 炉型(冷却材)別の評価結果(6 評価視点で重み付けを行わない場合)

燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析を行う。プラントは、ナ トリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模)と して比較する。炉心燃料は全て資源重視型で比較することとした。再処理方式と燃料 製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース 6) 超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース 8)、酸化物電解 法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 10)、金属電解法 射出成型法(金属 燃料)の場合(ケース 12)について評価した結果を取り出した燃料サイクル別の評 価結果を図 3.3.3 に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。特に核拡散抵抗性については、大きな差がない。また、環境負荷低減性についてもわずかに超臨界直接抽出 簡素化ペレット 法がわずかに低くなっている程度である。

先進湿式 簡素化ペレット法については、経済性についてやや劣っている。先進湿 式法では、小規模では経済性を向上することがかなり難しいという検討結果が反映さ れている。一方、今後の研究開発の期間も短く、資金も少ないので、技術的実現性や 資源有効利用性においてやや優れている。超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法につ いては、先進湿式 簡素化ペレット法よりも経済性評価結果が向上するが、環境負荷 低減性や技術的実現性などでやや評価結果が低下する。酸化物電解法 振動充填法に ついては、経済性はさらに向上するが、技術的実現性と社会的受容性の評価結果が低 下する。金属電解法 射出成型法については、先進湿式 簡素化ペレット法に比べて 経済性はそれほど向上しないが、技術的実現性と社会的受容性の低下はかなり少ない。 また、資源有効利用性の向上はかなり大きくなる。上で述べたように燃料サイクルに よる候補概念間の差は大きくないが、どの評価視点を重視するのかによって望ましい 燃料サイクルが変わることが予想される。

こうした燃料サイクルの評価結果の差は、比較的小規模な燃料サイクルの場合であ り、湿式燃料サイクルでは、スケールメリットが大きいことから大規模な燃料サイク ルでは結果が異なる可能性がある。また、経済性重視型炉心とした場合には結果が微 妙に変化する。



なお、重み付けをしない評価結果を図 3.3.4 及び図 3.3.5 にレーダーチャートの形 で示す。各線の長さにより、それぞれの候補概念の全体的な特徴を知ることができる。

## 図 3.3.3 燃料サイクル別の評価結果(6 評価視点で重み付けを行わない場合)









図 3.3.4 6評価視点の重み付けを行わない評価結果(ケース1~ケース12)





ケース 16







ケース 22

図 3.3.5 6評価視点の重み付けを行わない評価結果(ケース13~ケース22)

3.3.2 安全性を除く6評価視点を重み付けした評価結果

ここでは、設定した将来シナリオに基づいて決まった重みを付けて各 FBR サイク ル候補概念を総合的に評価した結果を示す。将来シナリオの特徴としては以下のとお りである。

シナリオ1:特定の評価視点を重視する政策を取らない。

シナリオ2:資源有効利用性を重視し、核拡散抵抗性も若干重視する。

シナリオ3:環境負荷低減性を重視し、社会的受容性も若干重視する。

シナリオ4:経済性を重視し、環境負荷低減性と技術的実現性も若干重視する。

3.3.2.1 シナリオ1における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づき、棒グラフで示した評価結果を図 3.3.9 に 示す。各候補概念の評価が重みを付けられた形で示されており、グラフの長さが長い 方がよい評価となる。また、経済性、環境負荷低減性等々、各評価視点の結果も重み を付けて示されている。

重みを付けてレーダーチャートで示した評価結果を図 3.3.10 及び図 3.3.11 に示 す。各指標の長さの和が大きなケースが評価結果がよいケースである。なお、シナリ オに基づいて重みを付けたレーダーチャートの見方を図 3.3.6 に示す。



図 3.3.6 重みを付けたレーダーチャートの見方

シナリオ1は、特定の評価視点を重視する政策を取らない状況となる将来社会を想 定した場合であるので、重みも各評価視点でほぼ均等になっている。このシナリオ1 は、2章で設定したとおりベースとなるシナリオであるが、他のシナリオに比べて中 心的なシナリオという位置づけではなく、現実のエネルギー政策で何らかの措置が取 られることを考えれば、実現しやすいシナリオである、あるいは中心的なシナリオで あるとはいえない。

シナリオ1は、環境負荷低減性や核拡散抵抗性がわずかに重視されるが、ほぼ均等 に近い重みとなるシナリオである。レーダーチャートの各線の長さにより、それぞれ の候補概念の全体的な特徴を知ることができる。全評価ケースを一度に眺めて議論す るとわかりにくいので、以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で200tHM/yの処理 規模(大型施設)である。シナリオ1は、特別に重視される視点はないシナリオなの で、炉心燃料は評価結果がよい経済性重視型炉心で比較することとした。評価結果は、 図 3.3.7 に示す。全体的に冷却材が異なることによって、やや評価結果にばらつきが 生じている。環境負荷低減性や核拡散抵抗性に冷却材が異なることによる違いがないので、シナリオ1では、経済性、資源有効利用性、技術的実現性、社会的受容性の違いによって評価結果が左右されたといえる。

ナトリウム冷却炉サイクル(ケース2)は、経済性、資源有効利用性を中心として 各評価視点全般にわたって満遍なく良好な結果を得ており、総合的にも高い評価結果 となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル(ケース 17 及びケース 19)については、経済性 及び資源有効利用性に優る窒化物燃料を用いているケース 17 の方が社会的受容性等 に優る MOX 燃料を用いるケース 19 よりもわずかに良好な結果となったが、ここで 議論できるほどの差ではない。ヘリウム冷却炉サイクル(ケース 21)については、 経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性は鉛ビスマス冷却炉(MOX 燃料利用)サイクルと遜色ないものの、技術的実現性及び社会的受容性で評価結果が 低いために総合的な評価結果も低くなった。水冷却炉サイクル(ケース 22)につい ては、経済性と資源有効利用性において劣っている点を技術的実現性と社会的受容性 の高さでカバーし、ナトリウム冷却炉に次ぐ評価結果となっている。

中間とりまとめ時の設計結果では、シナリオ1のような将来社会状況を想定したとき(エネルギー関連で特段の政策措置が採られなかったとき)において、さまざまな評価視点でバランスの取れたナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっており、 次いで水冷却炉サイクルといった結果であった。



図 3.3.7 炉型(冷却材)別の評価結果(6 評価視点でシナリオ1の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ1は、特別に重視される視点はない シナリオなので、炉心燃料は評価結果がよい経済性重視型炉心で比較することとした。 再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の 場合(ケース7) 超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケー ス9) 酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース11) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース13)について評価した結果を取り出して図 3.3.8 に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視型炉心の評価結果は微妙 に異なる。また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。シナリオ1 では、各々の評価視点の結果の差が全体的な評価結果に反映される傾向が強い。結局、 経済性では、先進湿式 簡素化ペレット法がわずかに低く、金属電解法 射出成型法 がわずかに高く、環境負荷低減性では、超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法の評価 結果がやや低く、そこまででは、やや先進湿式法 簡素化ペレット法と金属電解法 射出成型法がよいものの、あまり大きな差がつかない。残った技術的実現性及び社会 的受容性については、先進湿式法 簡素化ペレット法、超臨界直接抽出法 簡素化ペ レット法、金属電解法 射出成型法、酸化物電解法 振動充填法の順になる。そこで、 全体としては、先進湿式 簡素化ペレット法、超臨界直接抽出法及び金属電解法 射 出成型法、酸化物電解法 振動充填法という順番となるが、大差はない。



図 3.3.8 燃料サイクル別の評価結果(6評価視点でシナリオ1の場合)













ケース 10 ケース 11 ケース 12 図 3.3.10 シナリオ 1 に基づき 6 評価視点を重み付けした結果 (ケース 1 ~ ケース 12)





ケース 16









図 3.3.11 シナリオ1に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)

3.3.2.2 シナリオ2における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づいて重みを付け、棒グラフで示した評価結果 を図 3.3.14 に示す。また、同様に重みを付けて評価した結果を図 3.3.15 及び図 3.3.16 にレーダーチャートの形で示す。シナリオ2は、資源有効利用性を重視し、核 拡散抵抗性も若干重視するシナリオである。各指標の長さにより、それぞれの候補概 念の全体的な特徴を知ることができる。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説 明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で 200tHM/y の処理 規模(大型施設)である。シナリオ2は、資源有効利用性が重視されるシナリオなの で、炉心燃料は全て資源有効利用性の評価結果がよい資源重視型炉心で比較すること とした。評価結果は、図 3.3.12 に示す。全体的に冷却材が異なることによって、評 価結果にばらつきが生じている。核拡散抵抗性はケースが異なっても差のない評価視 点であったので、シナリオ2では、資源有効利用性の違いによって結果が左右される。 ただ、資源有効利用性の評価結果がかなり低い鉛ビスマス冷却炉(MOX 燃料利用) へリウム冷却炉、水冷却炉については、技術的実現性や社会的受容性の評価結果が総 合的な評価結果を左右することとなる。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース1)は、各評価視点全般にわたってかなり良好 な結果を得ているが、資源有効利用性においても評価が高いので、総合的にも高い評 価結果となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル (ケース 16 及びケース 18)については、 資源有効利用性に優る窒化物燃料を用いているケース 16 の方が社会的受容性等に優 る MOX 燃料を用いるケース 18 よりも良好な結果となった。ヘリウム冷却炉サイク ル (ケース 20)については、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性は鉛ビスマ ス冷却炉 (MOX 燃料利用)サイクルと遜色ないものの、社会的受容性等で評価結果 が低いために総合的な評価結果も低くなった。水冷却炉サイクル (ケース 22)につ いては、資源有効利用性において劣っている点を技術的実現性と社会的受容性の高さ でカバーし、鉛ビスマス冷却炉と同程度の評価結果となっている。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ2のような将来社会状況において、資源有 効利用性に優れるナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっており、次いで鉛ビ スマス冷却炉サイクル及び水冷却炉サイクルといった結果であった。



図 3.3.12 炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ2の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ2は、資源有効利用性が重視される シナリオなので、炉心燃料は全て資源有効利用性の評価結果がよい資源重視型炉心で 比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレッ ト法(MOX 燃料)の場合(ケース6)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース8)酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 10)金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース12)について評価した結 果を取り出して図 3.3.13に示す。

全体として候補概念間の差は小さい。また、環境重視型炉心の評価結果は微妙に異 なる。シナリオ2では、経済性や、環境負荷低減性については、各々の影響は大きく ならない。また、重みの大きい資源有効利用性では、金属電解法 射出成型法の評価 結果がややよいが、他はほとんど変わらない。また、次いで重みの大きい核拡散抵抗 性については、わずかに金属電解法 射出成型法の評価結果が低くなっているが、結 果として資源有効利用性の差に相殺されてしまう。そこで、重みは比較的小さいもの の、社会的受容性や技術的実現性などの差が結果の差に影響することとなった。結果 として、シナリオ2については、いずれの燃料サイクルについても明確な差が生じな い。また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



図 3.3.13 燃料サイクル別の評価結果(6 評価視点でシナリオ 2 の場合)















図 3.3.16 シナリオ 2 に基づき 6 評価視点を重み付けした結果(ケース 13~ケース 22)

3.3.2.3 シナリオ3における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づいて重みを付けて、棒グラフで示した評価結 果を図 3.3.19 に示す。同様に重みを付けて評価した結果を図 3.3.20 及び図 3.3.21 にレーダーチャートの形で示す。シナリオ3は、環境負荷低減性を重視し、社会的受 容性も若干重視するシナリオである。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明 する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で200tHM/yの処理 規模(大型施設)である。シナリオ3は、環境負荷低減性が重視されるシナリオなの で、炉心燃料は全て環境負荷低減性の評価結果がよい経済性重視型炉心で比較するこ ととした。評価結果は、図3.3.17に示す。環境負荷低減性は炉型別では大きな差が 出ない評価視点であったので、シナリオ3でも、全般的には、環境負荷低減性評価結 果の差ではなく、他の評価視点の評価結果の差が全体の結果に影響していると考えら れる。特に社会的受容性の評価結果の差がやや強調されることとなる。

ナトリウム冷却炉サイクル(ケース2)は、各評価視点全般にわたって良好な結果 である。鉛ビスマス冷却炉サイクル(ケース17及びケース19)については、経済性 に優る窒化物燃料を用いているケース17と、社会的受容性等に優る MOX 燃料を用 いるケース19がほぼ同等の結果となった。ヘリウム冷却炉サイクル(ケース21)に ついては、経済性は鉛ビスマス冷却炉サイクルと遜色ないものの、社会的受容性等で 評価結果が低いことが影響して、鉛ビスマス冷却炉サイクルに比べてわずかに劣るこ ととなった。水冷却炉サイクル(ケース22)については、経済性において劣ってい る点を技術的実現性と社会的受容性の高さでカバーしているが、シナリオ3では、社 会的受容性の評価結果の高さのためにナトリウム冷却炉サイクルに迫る結果となっ ている。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ3のような将来社会状況において、ナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっており、次いで水冷却炉といった結果であった。



図 3.3.17 炉型(冷却材)別の評価結果(6評価視点でシナリオ3の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ3は、環境負荷低減性が重視される シナリオなので、炉心燃料は全て環境負荷低減性の評価結果がよい経済性重視型炉心 で比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレ ット法(MOX 燃料)の場合(ケース7)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース9)酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 11) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース13)について評価した結 果を取り出して図 3.3.18に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視型炉心の評価結果は微妙 に異なる。シナリオ3では、もともと評価結果に差がない核拡散抵抗性の重みが小さ いので、ほとんど影響しない。また、経済性や資源有効利用性、技術的実現性の評価 結果の差も重みが大きくないので、影響は小さくなる。環境負荷低減性には大きな差 がなかったが、シナリオ3では重みが大きいため、評価結果の差が大きくなる。そこ で、環境負荷低減性の評価結果が少々劣る超臨界直接抽出 簡素化ペレット法の評価 結果が低くなっている。また、社会的受容性の影響も大きいので、酸化物電解法 振 動充填法も評価結果がよくならない。環境負荷低減性と社会的受容性に優れた先進湿 式 簡素化ペレット法の評価結果が最もよく、次いで環境負荷低減性に同様に優れ、 社会的受容性(必要インフラ等)にやや劣る金属電解法 射出成型法も結果がよくな った。また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



図 3.3.18 燃料サイクル別の評価結果(6評価視点でシナリオ3の場合)







図 3.3.20 シナリオ3に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)



図 3.3.21 シナリオ3に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)

3.3.2.4 シナリオ4における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づいた重みを付けて、棒グラフで示した評価結果を図 3.3.24 に示す。また、同様に重みを付けて評価した結果を図 3.3.25 及び図 3.3.26 にレーダ ーチャートの形で示す。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料製造施 設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で200tHM/yの処理規模(大型施 設)である。シナリオ4は、経済性が重視されるシナリオ(環境負荷低減性や技術的実現性 もやや重視される)なので、炉心燃料は全て経済性重視型炉心で比較することとした。評価 結果は、図 3.3.22 に示す。全般的に、環境負荷低減性と核拡散抵抗性では、大きな差が生 じなかった。

ナトリウム冷却炉サイクルは、各評価視点全般にわたって良好な結果であるが、シナリオ 4 においては、特に経済性に優れている点が強調され、技術的実現性に優れている点もやや 強調されるので、他の炉型よりも突出した評価結果となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル(ケ ース 17 及びケース 19) については、窒化物燃料を用いているケース 17 の方に経済性向上 の効果が出ており、技術的実現性等に優る MOX 燃料を用いるケース 19 に比べて、評価結 果はよくなっている。ヘリウム冷却炉サイクル(ケース 21) については、経済性は鉛ビス マス冷却炉サイクルと遜色ないものの、技術的実現性等で評価結果が低いことが影響して、 鉛ビスマス冷却炉サイクルに比べてわずかに劣ることとなった。水冷却炉サイクル(ケース 22) については、経済性において劣っている点を技術的実現性と社会的受容性の高さでカバ ーしているが、シナリオ 4 では、鉛ビスマス冷却炉サイクルやヘリウム冷却炉サイクルと同 程度の評価結果であった。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ4のような将来社会状況において、ナトリウム冷 却炉サイクルが有利な結果となっていると考えられる。





次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、ナトリ ウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模)として比較す る。経済性重視シナリオということで、炉心燃料は全て経済性重視型炉心で比較することと した。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の 場合(ケース7)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース9) 酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース11) 金属電解法 射出成型法(金 属燃料)の場合(ケース13)について評価した結果を取り出して図 3.3.23 に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視炉心の評価結果は微妙に異なる。 ただし、特に核拡散抵抗性については、大きな差がなく、環境負荷低減性についても超臨界 直接抽出 簡素化ペレット法がわずかに低くなっている程度である。経済性に重みがかかっ た結果、経済性に優れ、技術的実現性と社会的受容性もそれほど低くない金属電解法 射出 成型法の評価がよくなっている。また、超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法も経済性の向 上の効果が出ており、評価結果も金属燃料サイクルと遜色はない。また、先進湿式 簡素化 ペレット法についても、よい評価である。酸化物電解法 振動充填法については、経済性は よい結果であるが、技術的実現性と社会的受容性の評価結果が低下しており、全体としても 若干低めの評価結果であった。また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



## 図 3.3.23 燃料サイクル別の評価結果(6評価視点でシナリオ4の場合)



図 3.3.24 シナリオ 4 に基づき 6 評価視点を重み付けした結果(全ケース)



図 3.3.25 シナリオ4に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)



図 3.3.26 シナリオ4に基づき6評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)

3.3.3 経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性の4評価視点を重み 付けした評価結果

ここでは、3.3.2 と異なり、開発目標に掲げられ、設計要求も設定された経済性、 環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性の4評価視点について、設定した将 来シナリオに基づいて決まった重みを付けて各 FBR サイクル候補概念を総合的に評 価した結果を示す。設定した将来シナリオは3.3.2 と同様であるが再掲する。

シナリオ1:特定の評価視点を重視する政策を取らない。

- シナリオ2:資源有効利用性を重視し、核拡散抵抗性も若干重視する。
- シナリオ3:環境負荷低減性を重視し、社会的受容性も若干重視する。

シナリオ4:経済性を重視し、環境負荷低減性と技術的実現性も若干重視する。
3.3.3.1 シナリオ1における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づき、重みを付けて評価してレーダーチャート で示した結果を図 3.3.10 及び図 3.3.11 に示す。各辺の長さの和が大きなケースが評 価結果がよいケースである。シナリオ 1 は、特定の評価視点を重視する政策を取らな い状況となる将来社会を想定した場合であるので、重みも各評価視点でほぼ均等にな っている。このシナリオ 1 は、ベースとなるシナリオであるが、他のシナリオに比べ て中心的なシナリオという位置づけではなく、現実のエネルギー政策で何らかの措置 が取られることを考えれば、実現しやすいシナリオである、あるいは中心的なシナリ オであるとはいえない。

設定した将来社会予測シナリオに基づき、重みを付けて評価した結果を図 3.3.10 及び図 3.3.11 にレーダーチャートの形で示す。シナリオ 1 は、環境負荷低減性や核 拡散抵抗性がわずかに重視されるが、ほぼ均等に近い重みとなるシナリオである。レ ーダーチャートの各線の長さにより、それぞれの候補概念の全体的な特徴を知ること ができる。また、棒グラフで示した評価結果を図 3.3.9 に示す。全評価ケースを一度 に眺めて議論するとわかりにくいので、以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説 明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で 200tHM/y の処 理規模(大型施設)である。シナリオ1は、特別に重視される視点はないシナリオな ので、炉心燃料は評価結果がよい経済性重視型炉心で比較することとした。評価結果 は、図 3.3.7 に示す。全体的に冷却材が異なることによって、やや評価結果にばらつ きが生じている。このばらつきは、経済性、資源有効利用性の違いによるものである。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース 2) は、経済性、資源有効利用性を中心として 各評価視点全般にわたって満遍なく良好な結果を得ており、総合的にも高い評価結果 となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル (ケース 17 及びケース 19) については、経済性 及び資源有効利用性に優る窒化物燃料を用いているケース 17 の方が社会的受容性等 に優る MOX 燃料を用いるケース 19 よりもわずかに良好な結果となったが、ここで 議論できるほどの差ではない。ヘリウム冷却炉サイクル (ケース 21) については、6 評価視点の場合と異なり、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性 に関して鉛ビスマス冷却炉 (MOX 燃料利用) サイクルと遜色ないという結果がその まま評価結果となっている(評価視点が 6 個の場合、技術的実現性と社会的受容性に おいて、鉛ビスマス冷却炉がヘリウム冷却炉に比べて優れている点が評価結果におけ る差となっていた)。水冷却炉サイクル (ケース 22) については、経済性と資源有効 利用性において劣っている点が、評価結果に反映されて、他の冷却材を用いるシステ ムに比べて劣る結果となっている。

中間とりまとめ時の設計結果では、シナリオ1のような将来社会状況を想定したとき(エネルギー関連で特段の政策措置が採られなかったとき)において、経済性と資

源有効利用性の評価結果がそのまま全体的な評価結果に反映された。具体的には、さまざまな評価視点でバランスの取れたナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となった。他については、鉛ビスマス炉(窒化物燃料) 鉛ビスマス炉(MOX 燃料)及びヘリウム冷却炉、水冷却炉といった順番であった。



図 3.3.27 炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ1の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ3は、環境負荷低減性が重視される シナリオなので、炉心燃料は全て環境負荷低減性の評価結果がよい経済性重視型炉心 で比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレ ット法(MOX 燃料)の場合(ケース7)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース9)酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 11) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース13)について評価した結 果を取り出して図 3.2.29に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視型炉心の評価結果は微妙 に異なる。また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。シナリオ1 では、各々の評価視点の結果の差が全体的な評価結果に反映される傾向が強い。結局、 経済性では、先進湿式 簡素化ペレット法がわずかに低く、金属電解法 射出成型法 がわずかに高く、環境負荷低減性では、超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法の評価 結果がやや低く、そこまででは、やや先進湿式法 簡素化ペレット法と金属電解法 射出成型法がよいものの、あまり大きな差がつかない。

6 評価視点の場合では、さらに技術的実現性と社会的受容性の評価結果が影響する が、4 評価視点の場合には、全体として、金属電解法 射出成型法、先進湿式 簡素 化ペレット法、酸化物電解法 振動充填法、及び超臨界直接抽出法という順番となる。 これは、6 評価視点の場合と少々異なるが、いずれにしても FBR サイクル候補概念 間で大差はない。



図 3.3.28 燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ1の場合)

	■ 叙述性	- - - - - - - - - - - - -	■ 環境負荷低減性		□ 資源有効利用性	□ 核抗带4 托 拾 性																	
																							0.80
																							0.70
	<u> 황하 1대 5은 Mit</u>	±17/0%1CYE		-						-					-								09.0
				_								-											0.50
百有され利田姓							-			-													0.40
Ķ		1.20	-				_			-		_											0.30
		7월 2월 1월 111 M	-			-						_			-				-		-	_	0.20
经济林												-				-			-	-			0.10
																OMWe) -	-(ayMc	We)-	We)-	Ne)-	Ne)-		00.00
	型(1500MWe)- ペレット(200t/y)	型(1500MWe)- ペレット(200t / y)	型(1500MWe)- ペレット(2001/y)	型(1500MWe)- 責(200t/y)	型(1500MWe)- 真(200t/y)	型(1500MWe)- レット(50t/y)	型(1500MWe)- レット(50t/y)	型(1500MWe)- 素化ペレット(50t/y)	型(1500MWe)- 素化ペレット(50t/y)	型(1500MWe)- 墳(50t /y)	型(1500MWe)- 填(501 /y)	型(1500MWe)- (50t / y)	型(1500MWe)- (50t / y)	型シングル(750MWe)- 素化ペレット(50t/y)	型モジュール(750MWe) 素化ペレット(50t/y)	-却中型(強制循環: 75 ペレット(2001 / y)	·却中型(強制循環: 75 ペレット(2001 / y)	1中型(強制循環:750N ペレット(2001 / y)	1中型(強制循環:750N ペレット(2001/y)	)-He冷却大型(1124M) 被覆粒子製造(2001/)	)-He冷却大型(1124M) 被覆粒子製造(2001/)	印大型- ペレット(2001 / y)	
	燃料(資源)- Na冷却大: 湿式(200t/y)-簡素化~	燃料(経済)- Na冷却大: 湿式(2001/y)-簡素化∽	燃料(LLFP)-Na冷却大 显式(2001/y)-簡素化~	燃料(資源)- Na冷却大: 湿式(2001/y)-振動充填	燃料(経済)- Na冷却大: 湿式(2001/y)-振動充填	燃料(資源) - Na冷却大 显式(50t/y)- 簡素化ペ	燃料(経済)- Na冷却大: 显式(50t/y)- 簡素化ペ)	燃料(資源)-Na冷却大 Pa直接抽出(50t/y)-簡.	燃料(経済)-Na冷却大: 界直接抽出(50t/y)-簡:	燃料(資源)-Na冷却大 吻電解(501/y)-振動充	燃料(経済)-Na冷却大 吻電解(501/y)-振動充	燃料(資源)- Na冷却大] 電解(501/y)-射出成型,	燃料(経済)-Na)冷却大] 電解(501/y)-射出成型。	燃料(資源)-Na冷却中: 界直接抽出(50t/y)-簡.	燃料(経済)-Na冷却中 君直接抽出(50t/y)-簡:	物燃料(資源)-Pb-Bi冷 湿式(2001/y)-簡素化~	物燃料(経済)-Pb-Bi冷 显式(2001/y)-簡素化~	燃料(資源) - Pb-Bi冷却 湿式(2001/y) - 簡素化∽	燃料(経済) - Pb-Bi冷却 湿式(2001/y) - 簡素化∽	物被覆粒子燃料(資源) 覆+先進湿式(200t/y)	物被覆粒子燃料(経済) 覆+先進湿式(2001/y)	燃料(水冷却炉)-水冷; 湿式(2001/y)-簡素化~	
	<b>アース1</b> MOX	<b>アース2</b> MOX	<b>7-73</b> <sup>MOX</sup>	<b>アース4</b> MOX	<b>アーズ5</b> MOX	<b>アース6</b> MOX	<b>ケース7</b> MOX 先進	<b>アース8</b> 超臨	<b>アース9</b> MOX	<b>アース10</b> 酸化	<b>アース11</b> 酸化	<b>ヶ−ス12</b> 金属	<b>ヶ−ス13</b> 金属	<b>ァース14</b> 超臨	<b>アース15 MOX</b>	<b>ァース16</b> 2010 先進	<b>ァース17</b> 2章化	<b>アース18</b> MOX	<b>アース19</b> MOX	<b>r−</b> X20 22代 開被	<b>アース21</b> 窒化	<b>ァース22</b> MOX	



JNC TN9400 2004-052









図 3.3.30 シナリオ1に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)









図 3.3.31 シナリオ1に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)

3.3.3.2 シナリオ2における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づき、重みを付けて評価した結果を図 3.3.15 及び図 3.3.16 にレーダーチャートの形で示す。シナリオ 2 は、資源有効利用性を重 視し、核拡散抵抗性も若干重視するシナリオである。また、棒グラフで示した評価結 果を図 3.3.14 に示す。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で 200tHM/y の処理 規模(大型施設)である。シナリオ2は、資源有効利用性が重視されるシナリオなの で、炉心燃料は全て資源有効利用性の評価結果がよい資源重視型炉心で比較すること とした。評価結果は、図 3.3.12 に示す。全体的に冷却材が異なることによって、評 価結果にばらつきが生じている。核拡散抵抗性はケースが異なっても差のない評価視 点であり、6評価視点の場合と異なり、技術的実現性や社会的受容性は全体の評価に 含まれないので、シナリオ2では、資源有効利用性の評価結果の違いが全体の評価結 果を左右する。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース1)は、各評価視点全般にわたってかなり良好 な結果を得ているが、資源有効利用性においても評価が高いので、総合的にも高い評 価結果となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル (ケース 16 及びケース 18)については、 資源有効利用性に優る窒化物燃料を用いているケース 16 の方が社会的受容性等に優 る MOX 燃料を用いるケース 18 よりも良好な結果となった。ヘリウム冷却炉サイク ル (ケース 20)については、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性は鉛ビスマ ス冷却炉 (MOX 燃料利用)サイクルと類似した評価結果であった。水冷却炉サイク ル (ケース 22)については、資源有効利用性において劣っている点が影響して評価 結果が低くなった。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ2のような将来社会状況において、資源有 効利用性に優れるナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっており、次いで鉛ビ スマス冷却炉サイクル、水冷却炉サイクルといった結果であった。



図 3.3.32 炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 2 の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ2は、資源有効利用性が重視される シナリオなので、炉心燃料は全て資源有効利用性の評価結果がよい資源重視型炉心で 比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレッ ト法(MOX 燃料)の場合(ケース6) 超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース8) 酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 10) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース12)について評価した結 果を取り出して図 3.3.13 に示す。

全体として候補概念間の差は小さい。また、経済性重視型炉心の評価結果は微妙に 異なる。経済性については、候補概念間で若干結果が異なるものの、シナリオ2では 重みが大きくなく、先進湿式法がわずかに劣る程度で影響は小さい。また、環境負荷 低減性については、わずかに超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)が 劣るものの、重みが大きくないので、影響は小さい。また、重みの大きい資源有効利 用性では、金属電解法 射出成型法の評価結果がややよいが、他はほとんど変わらな い。また、核拡散抵抗性の重みはかなり大きいものの、その評価結果は金属電解法 射出成型法がわずかに低くなっている程度であり、FBR サイクル候補概念間でほと んど変わらない。全体に4評価視点における候補概念間の差は非常に小さく、相互に 相殺しあうので、結果として、シナリオ2については、わずかに酸化物電解法 - 振動 充填法と金属電解法 - 射出成型法がよい程度であり、いずれの燃料サイクルについても明確な差が生じない。なお、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



図 3.3.33 燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 2 の場合)

	■経済性		■ 環境負荷低減性	口咨酒右动到田姓	HUNNUNE	□核拡散抵抗性																	
																							0.80
																							0.70
	<u> </u>						-					-											09.0
					-							-							-				0.50
日本		-	-				-										-				_		0.40
<b>咨调右动制</b> E				_	-								-	-					-		_		0.30
		1.1.1.T		-	-		-												-		_		0.20
其次				-		-	-	-	-			-			-	_			-			-	0.10
2%								(h)	(h)					We)- /y)	MWe)-	環: 750MWe)-	镮: 750MWe)-	: 750MWe) -	:750MWe)-	124MWe)-	124MWe)- 2001/y)		0.00
	OX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- :進湿式(200t /y)-簡素化ペレット(200t /y)	OX燃料(経済)-Na)令却大型(1500MWe)- :進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	OX燃料(LLFP)- Na冷却大型(1500MWe)- :進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	OX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- ;進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y)	OX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)- ;進湿式(2001/y)-振動充填(2001/y)	OX燃料(資源)-Na)今却大型(1500MWe)- :進湿式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	OX燃料(経済)-Na)や却大型(1500MWe)- :進湿式(501/y)-簡素化ペレット(501/y)	OX燃料(資源)-Na冷却大型(1500MWe)- (臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/)	OX燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)- !臨界直接抽出(50t/y)-簡素化ペレット(50t/	OX燃料(資源)-Na)冷却大型(1500MWe)- 代比物電解(501/y)-振動充填(501/y)	OX燃料(経済)-Na)冷却大型(1500MWe)- 代比物電解(501/y)-振動充填(501/y)	€属燃料資源)-Na冷却大型(1500MWe)- :属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	€属燃料(経済)-Na冷却大型(1500MWe)- :属電解(50t/y)-射出成型(50t/y)	OX燃料(資源)-Na)冷却中型シングJJ(750MV 1臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/	OX燃料(経済)-Na冷却中型モジュール(750N !臨界直接抽出(501/y)-簡素化ペレット(501/	<b>賃化物燃料(資源)-Pb-Bi)や却中型(強制循</b> 環 :進湿式(200t / y)-簡素化ペレット(200t / y)	賓化物燃料(経済)-Pb-Bi)や却中型(強制循環 :進湿式(200t /y)-簡素化ペレット(200t /y)	OX燃料(資源)-Pb-Bi)や却中型(強制循環: :進湿式(200t /y)-簡素化ペレット(200t /y)	OX燃料(経済)-Pb-Bi)や却中型(強制循環: :進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	【化物被覆粒子燃料(資源)-He/冷却大型(11 !被覆+先進湿式(2001/y)- 被覆粒子製造(20	f化物被覆粒子燃料(経済)-He)冷却大型(11) \被覆+先進湿式(2001/y)-被覆粒子製造(20	OX燃料(水冷却炉)-水冷却大型- :進湿式(2001/y)-簡素化ペレット(2001/y)	
	<del>7</del> −ス1 <sup>天</sup>	ケース2 <sup>№</sup>	ケース3 <sup>№</sup>	ケース4 <sup>№</sup>	ケース5 <sup>K</sup>	<b>ケース6</b> ☆	ケース7 <sup>№</sup>	<b>7−</b> 38 <sup>№</sup>	<b>7−</b> 39 <sup>№</sup>	<del>ケー</del> ス10 酸	ケース11 🕅	ケース12 <sup>垂</sup>	ケース13 <sup>垂</sup>	<b>ケース14</b> <sup>N</sup>	ケース15 <mark>区</mark>	ケース16 異	ケース17   葉	ケース18 <sup>区</sup>	ケース19 🕅	ケース20 照	<del>を</del> ース21 <u>騒</u>	ケース22 🕅	



JNC TN9400 2004-052



図 3.3.35 シナリオ2に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)



図 3.3.36 シナリオ 2 に基づき 4 評価視点を重み付けした結果(ケース 13~ケース 22)

3.3.3.3 シナリオ3における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づき、重みを付けて評価した結果を図 3.3.20 及び図 3.3.21 にレーダーチャートの形で示す。シナリオ 3 は、環境負荷低減性を重 視し、社会的受容性も若干重視するシナリオである。また、棒グラフで示した評価結 果を図 3.3.19 に示す。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で200tHM/yの処理 規模(大型施設)である。シナリオ3は、環境負荷低減性が重視されるシナリオなの で、炉心燃料は全て環境負荷低減性の評価結果がよい経済性重視型炉心で比較するこ ととした。評価結果は、図 3.3.17 に示す。環境負荷低減性は炉型別ではほとんど差 が出ない評価視点である。4 評価視点の場合には、シナリオ3 でも、全般的には、環 境負荷低減性の評価結果の差ではなく、経済性と資源有効利用性の差が全体の結果に 影響している。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース2)は、各評価視点共に良好な結果である。鉛 ビスマス冷却炉サイクル (ケース17及びケース19)については、経済性に優る窒化 物燃料を用いているケース17が有利な結果となった。ヘリウム冷却炉サイクル (ケ ース21)については、経済性をはじめとする評価視点で鉛ビスマス冷却炉サイクル (ケース19:MOX燃料)と同程度であった。水冷却炉サイクル (ケース22)につ いては、経済性において劣っているが、シナリオ3では、経済性の重みは小さく、あ まり大きな差とはなっていない。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ3のような将来社会状況において、全体的 な差は小さいものの、ナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっている点で傾向 は大きく変わらない。



# 図 3.3.37 炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ3の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。炉型別の比較と同様、シナリオ3は、環境負荷低減性が重視される シナリオなので、炉心燃料は全て環境負荷低減性の評価結果がよい経済性重視型炉心 で比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペレ ット法(MOX 燃料)の場合(ケース7)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース9)酸化物電解法 振動充填法(MOX 燃料)の場合(ケース 11) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース13)について評価した結 果を取り出して図 3.3.18に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視型炉心の評価結果は微妙 に異なる。シナリオ3では、もともと評価結果に差がない核拡散抵抗性の重みが小さ いので、ほとんど影響しない。また、経済性や資源有効利用性の評価結果の差も両者 の重みが大きくないので、影響は小さくなる。環境負荷低減性については、元来は評 価結果に大差は生じていなかったが、シナリオ3では重みが非常に大きいため、評価 結果の差が強調される。そこで、環境負荷低減性の評価結果が少々劣る超臨界直接抽 出 簡素化ペレット法の評価結果が低くなっている。また、次に環境負荷低減性の評 価結果が低い酸化物電解法 振動充填法も評価結果がよくならない。環境負荷低減性 及び経済性等にも優れた金属電解法 射出成型法や環境負荷低減性に同様に優れる 先進湿式 簡素化ペレット法も結果がよくなった。 ただし、いずれの燃料サイクルについても、明確な差が生じたというほどではない。 また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



# 図 3.3.38 燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 3 の場合)





JNC TN9400 2004-052



図 3.3.40 シナリオ3に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)



図 3.3.41 シナリオ 3 に基づき 4 評価視点を重み付けした結果(ケース 13~ケース 22)

3.3.3.4 シナリオ4における評価結果

設定した将来社会予測シナリオに基づき、重みを付けて評価した結果を図 3.3.25 及び図 3.3.26 にレーダーチャートの形で示す。また、棒グラフで示した評価結果を 図 3.3.24 に示す。以下で、炉型別、燃料サイクル別の結果を説明する。

大型炉サイクルで冷却材を変えたときの評価結果を検討する。再処理施設及び燃料 製造施設は、それぞれ先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造で 200tHM/y の処理 規模(大型施設)である。シナリオ4は、経済性が重視されるシナリオなので、炉心 燃料は全て経済性重視型炉心で比較することとした。評価結果は、図 3.3.22 に示す。 全般的に、環境負荷低減性と核拡散抵抗性では、大きな差が生じなかった。

ナトリウム冷却炉サイクル (ケース2)は、各評価視点全般にわたって良好な結果 であるが、シナリオ4においては、特に経済性に優れている点が強調されるので、他 の炉型よりも突出した評価結果となる。鉛ビスマス冷却炉サイクル (ケース 17 及び ケース 19)については、窒化物燃料を用いているケース 17 の方に経済性向上の効果 が出ており、MOX 燃料を用いるケース 19 に比べて、評価結果はよくなっている。 ヘリウム冷却炉サイクル (ケース 21)については、経済性は鉛ビスマス冷却炉サイ クル (ケース 17:窒化物燃料)と比較しても遜色ないものの、資源有効利用性の結 果が落ちるので、2つの鉛ビスマス冷却炉サイクルの間に位置することとなった。水 冷却炉サイクル (ケース 22)については、経済性において劣っていることが災いし て、評価結果はそれほど伸びなかった。

中間とりまとめ時の設計では、シナリオ4のような将来社会状況において、ナトリウム冷却炉サイクルが有利な結果となっていると考えられる。



図 3.3.42 炉型(冷却材)別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 4 の場合)

次に燃料サイクル施設を変更したときの評価結果について分析する。プラントは、 ナトリウム冷却大型炉を選び、サイクル施設の処理規模は全て 50tHM/y(小規模) として比較する。経済性重視シナリオということで、炉心燃料は全て経済性重視型炉 心で比較することとした。再処理方式と燃料製造方式をそれぞれ先進湿式 簡素化ペ レット法(MOX燃料)の場合(ケース7)超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法(MOX 燃料)の場合(ケース9)酸化物電解法 振動充填法(MOX燃料)の場合(ケース 11) 金属電解法 射出成型法(金属燃料)の場合(ケース13)について評価した結 果を取り出して図 3.3.23 に示す。

全体として候補概念間の差は大きくない。また、資源重視炉心の評価結果は微妙に 異なる。ただし、特に核拡散抵抗性については、もともとの評価結果に差がなく、重 みも小さいのでほとんど影響がない。また、環境負荷低減性についても超臨界直接抽 出 簡素化ペレット法がわずかに低くなっている程度である。経済性に重みがかかっ た結果、経済性に優れた金属電解法 射出成型法の評価がよくなっている。酸化物電 解法 振動充填法については、環境負荷低減性や資源有効利用性で金属電解法に及ば なかったものの、重みの大きな経済性は高い評価結果であったので、全体としても金 属電解法 射出成型法に次ぐ評価結果が得られた。また、超臨界直接抽出法 簡素化 ペレット法も経済性の向上の効果が出ておいるが、環境負荷低減性等の面でやや劣る ので、全体的な評価結果も若干低くなった。また、先進湿式 簡素化ペレット法につ いては、経済性がそれほど良くないが、環境負荷低減性などの評価結果がその分を若 干カバーしており、超臨界直接抽出法 簡素化ペレット法と同程度であった。

ただし、いずれの燃料サイクルについても、明確な差が生じたというほどではない。 また、大型サイクル施設の場合は結果が異なる可能性がある。



図 3.3.43 燃料サイクル別の評価結果(4 評価視点でシナリオ 4 の場合)







図 3.3.45 シナリオ4に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース1~ケース12)







図 3.3.46 シナリオ4に基づき4評価視点を重み付けした結果(ケース13~ケース22)

# [参考文献]

- [1] 篠田佳彦他:総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ)成果報告 、核燃料サイクル開発機構報告書、JNC TN9400 2001-061 (2001)
- [2] 此村守他:高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ 中間報告 原 子炉プラントシステム技術検討書 - 、JNC TN9400 2004-035(2004)
- [3] 佐藤浩司他:高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ 中間報告 燃料サイクルシステム技術検討書 、JNC TN9400 2004-036 (2004)

3.4 他電源との比較評価

FBR サイクルの導入にあたっては、他の電源との間で競合することが考えられる。 したがって、実用化戦略調査研究では、FBR サイクル候補概念同士だけではなく他 の電源と比較評価することが重要であると考えられる。そこで、フェーズⅡより、さ まざまな電源の特性を多面的に評価する手法を検討してきた。フェーズⅡ中間評価で は、大規模電源(FBR サイクルを含む)、小規模電源を評価することとした。<sup>[1][2][3]</sup>

3.4.1 比較評価の前提

比較検討対象とする他電源は、表 3.4.1 のとおりと設定する。また、比較評価にあたっては、以下を前提とした。

フェーズII中間評価では、各電源の特性を明確にするための評価が目的である。したがって必ずしも発電事業者が導入電源を選択する指標のための評価ではない。

太陽光発電など小規模な対象電源は"導入対象地域内で 5~20 万 kWe とする。こ れは、最終取りまとめに向けて小規模 FBR との比較を予定しているが、中間評価の 段階では設計が固まっていなかったので、評価対象から外したものの、サイクル機構 で検討している小規模 FBR が、小型電源としては比較的大型の 5~20 万 kWe 程度 を想定しており、他の対象電源についても、単機で同程度の容量を想定することにし たものである。また、評価対象とする導入規模は、大規模については 50GWe で 50 年間、小規模については、3GWe で 50 年間発電できる規模とする。

規模	評価対象電源の種類
大規模	LNG 火力、石炭火力、軽水炉(ワンススルー
(合計 50GWe)	およびプルサーマル)、FBR サイクル
小規模	風力発電、太陽光発電、廃棄物発電、燃料電池
(単機 50~200MWe、合計 3GWe)	

表 3.4.1 他電源比較の評価対象電源

#### 3.4.2 他電源比較の評価指標

一般的な電源を比較評価するためには、FBR サイクルを定量的に検討するための 指標<sup>[4]</sup>よりも、性質の大きく異なるものの特徴を把握・評価することが必要となる。 そのために抽出した評価視点を図 3.4.1 に図示する。安全性については、全電源につ いて前提条件であり、また、実際上、他電源についての安全性評価を行なうことは困 難なので評価視点から除外した。したがって、FBR サイクル候補概念と同数の 7 評 価視点について比較評価することとした。これらは、FBR サイクル候補概念間比較 に比べて、詳細ではないもののより包括的な特性について評価することとしている。 これらについては、今後さらに検討を深め、フェーズ 最終取りまとめに向けて修正 していく必要がある。



図 3.4.1 他電源比較の評価視点

- (1) 経済性
- (2) 資源供給性
- (3) 環境影響低減性
- (4) 社会不安定影響性
- (5) 導入性
- (6) 心理的バイアス低減性
- (7) 電力以外発生資源

3.4.2.1 経済性の評価指標

経済性については、相互に特性の類似した FBR サイクル候補概念間比較の経済性 とは異なり、他の電源間で比較を行うため、より幅の広い指標を含んでいる。ただし、 定量的データを取り揃えることは容易ではなく、定性的な段階評価を行う割合が増加 する。設定した経済性の評価構造を図 3.4.2 に示す。

発電原価に関しては、FBR サイクル候補概念と共通であり、細かい説明を省略す るが、様々な電源を扱うためにデータも限られており、原価計算が難しい場合がある。 このときは、公開されたデータを基にして算出した。

発電原価変動幅は、燃料原料価格が変動した際に発電原価が変動する幅(発電原価 変動幅)で捉える方法を検討する。燃料原料単価変動幅については、エネルギーショ ック時における燃料価格上昇因子とエネルギーショック時に限らず取引市場におい て価格変動する因子とを分けて考えることとする。前者は比較的長期(数10年)で、 また、後者は比較的短期(1年程度)での変動を対象となる。

エネルギーショック時の燃料価格上昇は、エネルギーショック発生確率とエネルギ ーショック発生時の燃料価格上昇率の想定を行っており、これらをもとに金額換算し て定量化する手法が考えられる。また、エネルギーショック時以外(安定供給時とす る)の変動幅の定量化手法例としては、各年における価格変動幅を過去数10年にわ たって平均化する方法などが考えられる[5][6][7][8]。

しかしながら、上述した定量化手法は必ずしも価格変動幅を十分に表しているとは 言えない。なぜなら、長期と短期と概念を分けてはいるものの、実際にはエネルギー ショックのみの短期変動の評価であり、需給による長期変動因子は含まれていないか らである。評価を運用する上でこの定量化手法が妥当でないと判断される場合には、 燃料種ごとに一対比較を行うこととなる。

ところで、燃料価格変動可能性を評価する際、変動幅そのもので評価する考え方と、 変動幅が発電原価に占める割合(発電原価の何%程度の変動があるか)で評価する考 え方とがある。ここでは、次の二つの理由により、前者を採用することとする。 燃 料価格変動幅を定量化できない場合、発電原価に占める割合よりも燃料価格変動その ものを評価したほうが、一対比較が容易であると思われる。 発電原価が高いものほ ど評価結果が有利となる。つまり、同じ燃料種を用いていても発電原価が高いシステ ムで用いる場合のほうが、"燃料価格変動可能性"が小さいと評価されることになり、 結果の解釈が難しくなる恐れがある。

なお、エネルギーショック発生確率など、発電単価変動幅の下位指標に現れる項目 は、資源の種類ごとに異なる。そこで、これらの項目は資源供給性の下位指標として 評価すべきという考え方もある。しかし、ここでは、資源の性質のうち経済性(発電 原価)に及ぼす部分のみを取り上げていると考えて、経済性の一部に含めた。

投資回収性は、投資リスクなどに関する評価指標である。特に大規模発電所に対す る設備投資は、 投資回収に長期を要する、 投資の絶対額が大きい、という特徴が ある。このようなシステムに対する投資は、特に民間の事業主体にとっては受容しに くいものとなる。投資回収期間は、設備投資の採算性を評価する際にしばしば用いら れており、発電所に関するキャッシュフローを計算する以外に、設備投資額を年あた りのキャッシュフローで割ったり、より簡便には減価償却する期間を用いたり、とい った評価手法が考えられる。中間評価時では、キャッシュフローの想定が困難であっ たので、減価償却する期間を評価に用いることとした。最終評価に向け、改めて発電 システムの技術的特性をよりよく評価できる手法を検討したい。また、投資回収期間 のみでは投資総額を陽に評価できないので、投資回収期間と並列して1基あたりの投 資総額を指標に加える。今後、リードタイム(例えば地点公表から運転開始までの期 間、あるいは工事期間など)が長い電源は、立地計画の意思決定時点において、より 遠い将来を想定(すなわちより大きな不確実性を想定)して投資回収計画を立てなけ ればならないことになる。したがって、投資回収性に影響を及ぼす因子となる可能性 が考えられるので、今後検討を進めたい。

発電出力変動の大きさや負荷追従の容易性などは、電源導入の目的によっては重要 な指標となる。特に、自然エネルギーを利用する場合にはこの視点を欠いた評価で高 得点を得ても実際に利用可能であるとは言えなくなる。ここでは、これら指標を電力 品質として評価することを考える。この構造案では、通常運転時の品質のみではなく、 メンテナンスや燃料交換等によるシステム停止頻度も、電力品質に関わる指標である として取り上げている。

また中間評価では、簡便性を小規模電源のみに関する評価指標とし、予備調査や廃 止措置の困難さを指標とした。例えば、大規模電源でも評価すべきであるとか、操業 時などの簡便性も含めるべきとの意見もあり、最終取りまとめに向けて検討すべき点 である。



#### 3.4.2.2 資源供給性の評価指標

資源供給性についても、FBR サイクル候補概念間比較における資源有効利用性に 類似した評価視点である。しかし、相互に特性の類似した FBR サイクル候補概念間 比較の資源有効利用性とは異なり、より幅の広い指標を含んでいる。

一次指標として、まず、単位発電量あたりの資源量を比較することとする(kWh あたり資源量)。これを算出するに当たって、システム発電効率や燃焼度(軽水炉、 FBR)、転換(増殖)比等のパラメータが考慮される。なお、いくつかの異なる種類 の資源(天然ウラン、天然ガス、石炭)で比較するため、単位を統一する必要がある。

発電用燃料としての資源を節約するのであれば、発電以外の用途にも幅広く利用で きる資源を節約したほうが資源有効利用性は高いと言えよう。例えば、発電以外にも 表 3.4.2 のような用途が考えられる天然ガスと、ウラン資源とでは、天然ガスを節約 するほうが"有効"であると考えることができる。また、他用途にも使用可能な資源 のほうが、そうでない資源と比較して価格変動要因が大きい可能性も考えられる。

## 表 3.4.2 天然ガスの発電以外の用途

エネルギー利用	都市ガス、天然ガス自動車燃料、燃料電池原燃料、等
合成ガス製造	水素、一酸化炭素、メタノール、ジメチルエーテル、等

各資源が持つ性質として、確認可採埋蔵量などその資源の埋蔵量に関わる事項も評価指標となり得る。資源の埋蔵量は、可採年数(確認可採埋蔵量/年間生産量)で評

価されることが多いが、技術革新などにより変化し得るものであるため、今後は究極 埋蔵量なども指標に含めるべきであるか検討する。

既にエネルギーショック発生による経済性への影響については、経済性評価におい て検討した。その影響が同程度の場合には、資源の備蓄が容易であればリスクは軽減 されるので、資源の備蓄性という指標を評価することが妥当と考えられる。資源の備 蓄性についても、備蓄費用として経済性に含めるという考え方もあるが、中間評価で は、その資源固有の性質として捉えて資源有効利用性の下位指標に含めた。

資源調達元政治的安定性は、エネルギー安全保障について評価するもので、世界の 需給バランス安定性と我が国輸入先としての安定性という下位指標からなっている。 総合資源エネルギー調査会総合部会エネルギーセキュリティワーキンググループで は、石油、石炭、天然ガス、ウランについて、供給削減等のリスクを比較するための 定量化試算例を提示している<sup>[9]</sup>。このとき、2つの要素(世界の需給バランスに関す るリスク、輸入相手国に関するリスク)を設定している。中間評価では、この検討に 倣って資源調達元政治的安定性を評価することとしたので、以下で説明する。

世界の需給バランス安定性については、世界の総供給量に対する特定エリアの域外 輸出量をリスク指標とし、"エリア間の取引度要因"と"特定エリアの輸出集中要因" の積として表している。世界を7つのエリア(北米、中南米、ヨーロッパ、旧ソ連、 中東、アフリカ、アジア太平洋)に分け、各エリアに対する下式のばらつき(標準 偏差)を用いてリスクの程度を比較している。その結果、石油の標準偏差が8.0と最 も大きく、天然ガス、石炭はそれぞれ1.7、0.9と評価されている。なお、原子力は、 1.0となっているが、濃縮ウランの生産能力を用いているため、天然ウランとして評 価すれば結果は異なることになる。

世界の需給バランスから見たリスク

= エリア間の取引度要因 × 特定エリアの輸出集中要因 ここで、

エリア間の取引度要因 = 世界の域外輸出量 / 世界の総供給量 特定エリアへの輸出集中要因 = 特定エリアの域外輸出量 / 世界の域外輸出量

我が国輸入先としての安定性については、もともと、2つの要素(輸入相手依存度、 輸入先の政治的・経済的不安定度)により評価される。前者は、各資源のエリア別輸 入偏在度を用い、後者には、Euromoney誌に掲載される"Country Risk"を加工(国 別の数値をエリアごとに集計)したものを用いている。資源別、エリア別の各要素に ついて両者の積を求めたマトリックスより資源ごとに算出した分散をリスクの大き さを表す指標として比較している。結果として、天然ガスは石油の2倍程度のリスク を持つ一方、石炭、原子力はリスクが小さくなった。中間評価では、我が国輸入先の 安定性として、まとめて最下位指標として評価することとした。

なお、資源性の下位指標に導入限界量の概念を盛り込む議論もなされたが、LNG

および石炭火力、原子力(LWR、FBR)等について、物理的な導入限界量は想定す る導入量よりも十分に大きいとし、ここでは評価指標に含めないものとする。

最下位指標に対しては、必ずしも定量的な入力データが得られるとは限らず、理論 上は効用関数設定が可能であっても一対比較によって評価を行う指標もあり得る。ま た、比較対象電源間での排出量(入力データ)を基にして評価基準を設定することも あるが、この点については、3.4.3 節で記述する。



図 3.4.3 資源供給性の評価構造

## 3.4.2.3 環境影響低減性の評価指標

環境影響低減性は、FBR サイクル候補概念間比較における環境負荷低減性に対応 する評価視点である。FBR サイクルでは、放射性廃棄物を中心として評価構造を作 成したが、他電源との比較では、放射性物質以外にも注目する必要が生じる。したが って、評価構造でも、放射性物質に加えて、他の環境に影響を与える物質などを評価 する。このとき、環境に影響を及ぼす物質の放出という観点が強調されることから、 他電源比較においては、評価視点の名称を環境影響低減性とすることとした。

環境影響低減性の評価構造については、当初、非常に幅が広いものが考えられた。 そこでは、排出物質による影響だけでなく騒音・振動・景観といった項目まで網羅的 に取り込み得る。評価にあたっては以下の点に留意する。

- 1. 各電源のライフサイクルにおける物質放出量(発生量ではない)を評価する。
- 2. 定量化不可能な項目は一対比較により評価する。

環境影響物質については、評価対象となる量が発生量なのか放出量なのかを明確に する必要がある。ある環境影響物質が発生したとしても、それを放出しなければ環境 影響があるとは必ずしも言えないからである。したがって、環境影響物質に関しては、 放出量を評価することを基本的な方針とする。放出量に関しては、ここでは通常運転 時(資源採鉱時、建設時、操業時を含む)のみを対象とし、事故時の影響は安全性に

含める。また、放出量は、各電源システムのライフサイクルで評価する。すなわち、 環境影響物質の放出については、燃料採鉱から発電所建設・運転・廃炉までの各過程 における放出量を評価する。騒音、振動等は、電源システム立地地点での影響を評価 対象とする。中間評価では、データ収集範囲の特定が困難であることから、燃料採鉱 時の騒音や振動、さらに景観影響などは取り扱わないこととする。上記の観点から設 定した評価構造を図 3.4.4 に示す。

環境影響項目に関する"制限値"には、環境基本法等に基づく「環境基準」や、条 例に基づく「規制基準」がある。発電所の立地にあたっての環境影響評価では、「規 制基準」がある場合には「規制基準」を、ない場合には「環境基準」の値を基準とし て、その数値を上回らないかどうかを測定・評価し、上回る場合にはその対策を講じ ることとなっている。

最下位指標に対して、実際の運用にあたっては必ずしも定量的な入力データが得ら れるとは限らず、理論上は効用関数設定が可能であっても一対比較によって評価を行 う指標もあり得る。また、比較対象電源間での排出量(入力データ)を基にして評価 基準を設定することもあるが、この点については、3.4.3 節で記述する。

なお、環境影響物質が発生しただけでは、直接的に環境への影響があるとは言えな いものの、発生があるよりは発生がないほうが好ましいとする考え方もある。これを 環境影響とするのか、それとも、発生量の評価は、環境影響低減性よりもむしろ社会 的受容性の評価因子の1つとしても捉えるべきなのか議論がある。なお、事故時と通 常運転時を統合して考えることにより、環境影響低減性と安全性を1つの構造にまと め得る可能性も考えられる。これらを今後の検討課題としてあげておく。



#### 3.4.2.4 社会不安定影響性の評価指標

社会不安定影響性は、FBR サイクル候補概念間比較における核拡散抵抗性を拡張 した評価視点である。中間評価において、核拡散抵抗性では詳細な評価構造を設定し たが、より多様な電源を比較するにあたって、社会秩序への悪影響一般を評価するこ とを明確にするために、社会不安定影響性として他電源比較に取り入れることとした。 ただし、評価構造としては、電源の悪用(転用等)の容易さとその結果の程度で評価

するという簡易で一般的なものとなった。社会不安定影響性の評価構造を図 3.4.5 に 示す。

ただし、実際には、原子力の悪用は想定しやすいものの、他の電源ではテロに巻き 込まれるといったこと以外に大きな悪用の対象として考えにくい面があるので、今後 評価構造なども改良していく。



図 3.4.5 社会不安定影響性の評価構造

3.4.2.5 導入性の評価指標

評価対象とする他エネルギー源、特に小規模電源には、いわゆる新エネルギーと呼 ばれるものが含まれている。それらエネルギー源の特徴を評価するにあたり、導入の 可能性(技術的な実現性など)は、重要な視点の1つになると考えられる。中間評価 時に設定した評価構造を図 3.4.6 に示す。導入性は、技術的実現性と研究開発受容性、 研究開発柔軟性から構成される。

技術的実現性に関しては、FBR サイクル候補概念間比較で評価視点の1つとなっ ており、ここでも同様の趣旨で評価する。しかし、設計を実施している FBR サイク ル候補概念間比較においても、幅に関するデータを得ることは難しいが、特に新エネ ルギーをはじめとして、他電源比較においては、開発期間や資金などの幅に関するデ ータを得ることは容易でない。したがって、中間評価時には、開発期間や開発資金、 開発することが必要な技術を評価することとした。

研究開発受容性は、研究開発という活動がどのくらい社会的に受け入れられている のかを評価する指標である。このような指標の評価は難しいが、研究に従事している 研究者数と研究に配賦されている予算規模が目安になると考え、評価指標とした。

研究開発柔軟性は、研究開発にあたって状況の変化に応じてどの位、柔軟に研究開 発内容を変更できるのかを評価する指標である。

なお、導入環境の実現しやすさといった面を評価することも考えられたが、これは 電源ごとの特徴というよりは、むしろ電源が導入される環境を評価すると考えられる。 そこで、電源の特徴に焦点を絞って評価するため、中間評価では評価しないこととし た。



図 3.4.6 導入性の評価構造

3.4.2.6 心理的バイアス低減性の評価指標

心理的バイアス低減性は、電源に対する公衆の捉え方を評価するための指標である。 FBR サイクル候補概念間比較の場合と同様に、この意味では、全ての指標が心理的 バイアス低減性に係るとも考えられる。しかし、中間評価では、技術的評価と心理的 評価のズレを表現するための指標であると考えて整理することとした。

当初、さまざまなリスク認知研究などの結果を活用して、心理的バイアス低減性の 評価構造を検討したが、必ずしも発電システムに対する指標だけではなく、様々な科 学技術やその応用製品に対して一般的に適用され得る指標も含まれた。中間評価では、 電源を比較評価する目的に絞った構造に整理するために、いくつかの指標を除外する こととした。例えば、被害者身元判明可否(未知性の下位指標)は、事故等の被害者 が見分けられるか否かという指標として想定したが、事故の性質や規模によりケー ス・バイ・ケースであると考えられることから、電源システムに対する定量評価およ び一対比較ともに困難であり、中間評価時の評価指標からは除外した。同様の理由で、 構造中に含まれる可逆性(恐怖性の下位指標)も除外することを検討したが、この指 標については、各電源に対して最悪の事故やトラブルを想定した場合の可逆性を判断 することで指標構造に含めた。

このような検討を経て中間とりまとめ時評価にあたって設定した評価構造を図 3.4.7 に示す。

心理的バイアス低減性には、さまざまな観点が含まれている。恐怖性や未知性は、 リスク認知に関する大きな要因とされており、それらを構成する要素も、大差はない ものの、研究者によっていろいろなものが提案されている。

その他事項では、リスクというよりも便益などに関連する指標である。便益が直接的だったり、明確だったりすれば、心理的にはその便益を大きく感じるとされている。

不利益性はリスクの属性というより、評価者とリスクとの関わりを評価する指標で ある。例えば、評価者が制御できるリスクに関しては、より安心しやすいと考えられ ている。

事業主体特性は、主体の信頼に関する指標である。心理的バイアスを低減するには、

事業主体を信頼できるのか否かという観点が非常に重要であるとされている。原子力 分野で不祥事などがあったときには、事業主体への信頼の喪失といったことが言われ ており、そうした観点を評価構造に入れておくことは重要である。



## 図 3.4.7 心理的バイアス低減性の評価構造

3.4.2.7 電力以外発生資源の評価指標

多目的利用に代表される電力以外の副産物があれば、そうした電源は社会的により 望ましいと考えられる。中間評価では、まず、電源から発生する様々な副産物を列挙 した。次にそれらの副産物のうち立地地点の状況に依存する度合いが強いものを除外 して評価することとした。設定した評価構造を図 3.4.8 に示す。

1次指標である「電力外エネルギー」の評価は、立地地点の特徴の影響を受けにく いと考えられる熱や水素から判断する。また、雇用効果や産業育成といったソフト資 源発生も、立地地点の特徴による影響は小さいと考えられる。よって、それらは評価 構造に含めることもできる。また、熱や水素、ソフト資源にようにさまざまな電源に 共通していない副生資源を別途設定した「副生資源」として、1次指標として取り入 れる。



## 図 3.4.8 電力以外発生資源の評価構造

3.4.3 他電源比較の評価基準

これまで、検討した評価構造に対して、以下のとおり評価の基準を設定した。中間 評価までに定量的データを得ることが困難な指標は、段階的評価を行なうこととした。

3.4.3.1 定量評価基準

効用関数は、満足値(最大満足値:効用値=1.0、中間満足値:効用値=0.5、最低 満足値:効用値=0)を定めることにより設定する。他電源比較における満足値は、 "電源間の差を十分に表す"ことを念頭におき、以下の方針に従って設定した。大 規模電源に関する設定内容は表 3.4.3のとおり。また、小規模電源に関する設定内 容は、表 3.4.4のとおりである。

- (1) 最大満足値、最低満足値:それぞれ、評価対象電源のうち最も優れた値、 最も劣った値を設定する。
- (2) 中間満足値:指標ごとに検討。表 3.4.3 および表 3.4.4 の備考欄を参照。

なお、評価対象とする電源の間で、優劣の差がつかない指標(大気汚染物質の一部)については、効用関数の設定内容が評価結果に影響しないため、ここでは満足 値を与えていない。

視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考
() ON (		発電単価	2.8	4.0	5.8	将来ベース電源の基準レベルを4円/kWhと想定
	<b>必</b> 同份/ <b>西</b> 亦動幅	エネルギーショック時	0.0	0.4	1.0	4円/kWhの10%程度
経済性	光电半侧反動幅	安定供給時	0.0	0.2	0.4	4円/kWhの5%程度
	也沒同収姓	k₩あたり初期投資額	110,000	200,000	250,000	現行火力発電所レベル
	投員凹以注	投資回収期間	15.0	15.6	16.0	比較対象電源の平均レベル
視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考
		システム発電効率	65	40	34.5	現行火力発電所レベル
		必要資源賦存性	0.07%	4.42%	12.00%	比較対象電源の平均レベル
资酒供给牌	他田注州	発電以外利用割合	0%	18%	60%	比較対象電源の平均レベル
貝尔沃加住	他用些注	運輸・民生部門消費割合	0%	12%	60%	比較対象電源の平均レベル
	資源調達元	世界需給バランス安定性	0.00	0.52	1.70	比較対象電源の平均レベル
	政治的安定性	我が国輸入先としての安定性	0.00	0.46	1.94	比較対象電源の平均レベル
視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考
	放射性物質	高レベル	0.00	4.1E-10	4.1E-09	最低満足値の1/10
		地層処分低レベル	0.00	1.6E-10	1.6E-09	最低満足値の1/10
		余裕深度処分	0.00	4.2E-10	4.2E-09	最低満足値の1/10
		浅地中処分	0.00	3.3E-09	3.3E-08	最低満足値の1/10
		硫黄酸化物	0.000	0.010	0.100	最低満足値の1/10
		窒素酸化物	0.000	0.022	0.224	最低満足値の1/10
環境影響		浮遊粒子状物質		電源	間で差がつい	ていないため設定せず
低減性		石炭粉塵	無し		有り	有無の評価(中間満足値設定せず)
	大気汚染物質	粉塵等	0.00		0.005	
		一酸化炭素		電源	間で差がつい	ていないため設定せず
		光化学オキシダント		電源	間で差がつい	ていないため設定せず
		炭化水素		電源	間で差がつい	ていないため設定せず
		有害物質等		電源	間で差がつい	ていないため設定せす
	地球温暖化物質	CO₂等	11	78	780	最低満足値の1/10

## 表 3.4.3 定量評価指標の満足値設定(大規模電源比較)
視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考		
		発電単価	5.8	10.0	29.4	商用電力としての基準レベルを10円/kWhと想定		
	発電単価変動幅	エネルギーショック時	0.0	0.5	1.0	10円/kWhの5%程度		
経済性		安定供給時	0.0	0.25	0.5	10円/kWhの2.5%程度		
	<b>坍浴回</b> 112性	k₩あたり初期投資額	130,000	200,000	500,000	現行火力発電所レベル		
	10 g E W E	投資回収期間	15	19	20	比較対象電源の平均レベル		
視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考		
		システム発電効率	70	40	15	現行火力発電所レベル		
		必要資源賦存性	0.00%	1.12%	4.00%	比較対象電源の平均レベル		
资源供给供	他田冷姓	発電以外利用割合	0%	21%	54%	比較対象電源の平均レベル		
貝瓜供加注	他用返住	運輸・民生部門消費割合	0%	15%	60%	比較対象電源の平均レベル		
	資源調達元 政治的安定性	世界需給バランス安定性	0.00	0.43	1.70	比較対象電源の平均レベル		
		我が国輸入先としての安定性	0.00	0.48	1.93	比較対象電源の平均レベル		
視点		項目	最大満足値	中間満足値	最低満足値	備考		
		高レベル	電源間で差がついていないため設定せず					
	故时州物辉	低レベル(地層処分)	電源間で差がついていないため設定せず					
	//X オ) 1エ10) 員	低レベル(余裕深度処分)	電源間で差がついていないため設定せず					
		低レベル(浅地中処分)	電源間で差がついていないため設定せず					
		硫黄酸化物		電	源間で差がつい	ていないため設定せず		
		窒素酸化物	0.00	0.0084	0.0840	最低満足値の1/10		
環境影響		浮遊粒子状物質		電	源間で差がつい	ていないため設定せず		
低减性		石炭粉塵	無し		有り	有無の評価(中間満足値設定せず)		
	大気汚染物質	粉塵等	電源間で差がついていないため設定せず					
		一酸化炭素	電源間で差がついていないため設定せず					
		光化学オキシダント			源間で差がつい	ていないため設定せす		
		炭化水素			源間で差がつい	ていないため設定せす		
		有害物質等		電	<b>源間で差がつ</b> し	ていないたの設定せす		
	地球温暖化物質	CU2寺	0	44.5	445	最低満足値の1/10		

# 表 3.4.4 定量評価指標の満足値設定(小規模電源比較)

3.4.3.2 段階的(定性)評価基準

他電源との評価は、FBR サイクル候補概念間の比較評価に比べてデータの入手が 難しい。評価基準を作成でき、かつ定量的なデータを得られる指標に関しては、3.4.3.1 で記述したように定量的に評価を実施するが、そのためのデータが存在しない評価指 標に関しては、段階的(定性)評価を実施する。そのときは、評価指標項目ごとに3 段階(一部2段階)の基準を設けて評価する。設定した評価基準を表 3.4.5 に示す。 また、基準ごとに与える効用値は、以下の考え方によって設定している。

- (1) 3 段階の最低基準の効用値を 0 とする
- (2) 3 段階の最高基準の効用値を1とする
- (3)中間に位置する基準については、その内容が最低基準に近いと思われる場合は0.25(下記例 参照)最高基準に近いと思われる場合は0.75(下記例 参照)どちらともいえない場合は0.5(下記例 参照)を設定する。

< 中間に位置する基準の効用値設定例 >

経済性-簡便性-予備調査

「予備調査の必要はあるが1年以下程度」という中間基準は、期間は短くても"必要がある"という意味で、「必要ない」という最高基準よりも、「1年以上の調査が必要」という最低基準により近いと判断し、効用値を0.25とした。

経済性-電力品質-出力変動性

「燃料の不均一性による出力変動程度」は、"動いたり止まったり"するわけでは なく、「変動が非常に大きい」とする最低基準よりも「安定出力」である最高基準に より近いと判断し、効用値を 0.75 とした。

経済性-電力品質-不可追従性

負荷追従性の「中間程度」という基準は、最高基準、最低基準のどちらに近いとも 判断し難いと考え、効用値を 0.5 とした。

視点	項目		基準1(満足度低)	基準1(満足度中)	基準1(満足度高)
		出力峦動性	変動が非常に大きい	燃料の熱量不均一性による変 動程度	安定出力
	電力品質	田乃交勤正	0	0.75	1
		負荷追従性	出力制御は全くできない	その中間レベル	負荷変動に合わせた運転が可能
			0	0.5	1
		システム停止頻度	3回以上/年	1~2回/年程度	1回/年未満
経済性			0	0.5	1
<i></i>		予備調査	1年以上の調査が必要	必要はあるが1年以下程度	必要なし 
			0	0.25	1
	簡便性	メンテナンス	難	中	易
			0	0.5	1
		廃止	難 	中	易
			0	0.5	1
資源供給性	備蓄	・貯蔵容易性	貯蔵する燃料が特殊な特徴を持 つ	貯蔵の必要あり(燃料を使 用)	貯蔵の必要なし ( 燃料を使用し ない )
			0	0.25	1
				騒音要因が問題になる可能性	RATOWAN
		騒音	騒首要因かある 	あり	騒首要因かない
		振動	0	0.25	1
	大気等他 の影響		特に問題になる可能性あり	機械的な発電	化学的な発電
環境影響			0	0.25 地球电流路生产系统蛋白蛋白	1
化动成生		<sup>5影響</sup> 悪臭 低周波空気振動	排ガスに悪臭要因が含まれる	排刀人寺先生9 るか悪臭安囚   は少ない	排ガス等の発生なし
			0	0.25	1
			被害の可能性大	発生源あり	発生源なし
			0	0.25	1
	兵器・テロへの悪用性		王田田公はるの古代地方の	具体的想定はできないが可能	
			悪用用途やその可能性めり	性は考えるべき	思用用述か想正でさない
社会小女正 影響性			0 相定亜田田途のインパクトが大	0.5	1 相定亜田田途のインパクトが小
	悪用のインパクト		きい	中間	さい
			0	0.5	1
		盟丞扣問	長い(~2030年)	中間程度	短い(~2010年程度)
		-1676761	0	0.5	1
	技術的実	開発資金	国家レベルの大規模な開発資金 が必要	大規模ではないが助成が必要	商業ベースでの開発が可能
	現性		0	0.25	1
		未開発必要技術	3	中	少
<b>344 X 1</b> /1			0	0.5	1
導入性		予算規模	政府による予算はほとんどなし	政府による予算はあるが大規 模ではない	政府による予算が大きい
	研究開発			0.5	1
	受容性	研究開発者	個人の意思よりも、所属企業の  戦略等によって担当している研  究者が多い	その中程度	大学等で志す学生が多い
			0	0.5	1
	研究	2開発柔軟性	容量等スペックの変更が困難		容量等スペックの変更が容易
			0	0.5	1

# 表 3.4.5 他電源比較の段階的(定性)評価における評価基準

(続く)

視点	項目		基準1(満足度低)	基準1 (満足度中)	基準1(満足度高)
		災害の大きさ	事故の想定最大被害は大き いと思われる(核燃料を使 用)	事故の想定最大被害は中間 程度と思われる(可燃性燃 料を使用)	事故の想定最大被害は小さ いと思われる
			0	0.5	1
		個人による制御可 能性	大規模事業者による設置の みを想定	中小規模事業者による設置 も可能	家庭用など個人の意思によ る設置を想定
		HEIL	0	0.5	1
		同一便益を得る代 替手段の有無	想定する「便益」は電力です	あるため、電源間で差がつかれ	ないと考える
		リスクテイク拒否 可能性の有無	大規模事業者による設置の みを想定	中小規模事業者による設置 も可能	家庭用など個人の意思によ る設置を想定
	恐怖性		0	0.5	1
		子供・子孫への影 響	化字的・生物的に影響かあ る、または、物理的影響が 長期にわたる	物理的に影響有り(処理が 困難、など)	影響無し
			0	0.75	1
		事故歴	将来技術については想定でき	きないため、評価指標から除	くこととする。
		公平さ	大規模事業者による設置の みを想定	中小規模事業者による設置 も可能	家庭用など個人の意思によ る設置を想定
			0	0.5	1
心理的		可逆性	最大想定事故の影響回復に 時間がかかる	最大想定事故の影響回復に かかる時間は中間程度	最大想定事故の影響回復に 時間がかからない
バイアス			0	0.75	1
低减性	未知性	周知度	なじみのない原理を利用	中程度	同一原理の民生用製品あり
			0	0.25	1
		理解度	原理を理解困難	中程度	原理を理解容易
			0	0.5	1
		影響発現遅延性	放射線のみに特化した指標で 響を含めた評価をしているた	ごあり、子供・子孫への影響∣ とめ、ここでは除くこととす	こおいて、化字的・生物的影 る。
	その他事 項	報道機関の注目度	悪い意味で注目されている	注目されていない、どちら ともいえない	良い意味で注目されている
		他事 頁 便益の直接性		0.75	
			生用利用が困難	どちらともいえない	用利用可能
			0	0.5	1
		便益の明瞭性	想定する「便益」は	電力であるため、電源間で著	きがつかないと考える
		事故時不利益の大きさ	大きい	中間程度	小さい
	不利益性		0	0.5	1
	1 13	事故時不利益の制	大規模事業者による設置の みを想定	中小規模事業者による設置  も可能	家庭用など個人の意思によ る設置を想定
		御り能性	0	0.5	1
	事業主体 の特性	メディアの評判	今回評価では、具体的事業目	E体を想定しないため、電源	間で差がつかない。
Г		[ ]	[		
	電力以外	熱	発生しない	発生するが温度がやや低い	発生する
	エネル		U	0.75	1
雷力以外	+-	水素	発生しない		発生する
発生資源		l		0.5	
	2	ノフト資源	地域への影響はない	技術者の往来がある	地域産業発展に貢献がある
			0	0.5	1
		副生資源	無		有
			0		1

# 3.4.4 他電源比較における入力値設定

ここでは、他電源比較評価における入力値を設定する。例えば、燃料電池などでも、 複数の方式が考えられているのでより具体的なシステムを確定する必要があるが、表 3.4.6の方式を比較評価の対象となる発電システムとする。FBR サイクルについては、 候補概念で最も性能の高かったケース 2(ナトリウム冷却炉、MOX 燃料、大規模 (200tHM/y)先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造)のデータを入力する。

対象発電システム	選定理由等
LNG 複合サイクル発電	在来型と比較し、今後導入される LNG 火力発電の主
	流になると想定
石炭ガス化複合発電	在来型と比較し、今後導入される石炭火力発電の主
	流になると想定
軽水炉(ワンススルー、MOX 利用)	現状導入(予定)の最新スペックを想定
風力発電	1000k₩ 級の風車を 20 基程度以上設置するウィンド
	ファーム的な導入を想定
太陽光発電	各種(全結晶、単結晶、多結晶、アモルファス)ス
	ペックの平均的な値を比較対象とする
木質系産業廃棄物発電	廃棄物発電のうち、バイオマス系であるものを取り
	上げることとし、なかでも賦存量 / コスト的に有望
	と考えられる
固体酸化物型燃料電池(SOFC)	コンバインドサイクルにより比較的高い発電効率
	が得られると考えられる SOFC を取り上げる。

## 表 3.4.6 他電源比較の対象とする FBR サイクル以外のシステム

他電源比較評価では、定量値を入力して効用関数により評価する指標と、3段階な いし5段階で段階(定性)的に評価する評価指標とがある。以下では、定量的な入力 データを収集する指標について情報整理を行い、入力値を設定する。定量値を入力す る評価指標を(網掛け部分以外の指標に対して定量的な値を入力する)表 3.4.7 に示 す。

視点		項目	単位等
		発電単価	[円/kWh]
	<b>恣</b> 雪畄価変動幅	エネルギーショック時	[円/kWh]
	元电中间及助幅	安定供給時	[円/kWh]
	投资同应性	k₩あたり初期投資額	[円/kWh]
	议員回收任	投資回収期間	減価償却期間で評価 [年]
経済性		出力変動性	予期せぬ出力変動の有無や大きさについて定性評価
	電力品質	負荷追従性	負荷追従の容易性について定性評価
		システム停止頻度	メンテナンス等による停止頻度を定性評価
		予備調査	
	簡便性	メンテナンス	定性評価
		廃止	
視点		項目	単位等
	ŝ	レステム発電効率	[%]
		必要資源賦存性	必要資源量/確認可採埋蔵量
	仙田冷林	燃焼以外利用割合	[%]
資源供給性	他用述性	運輸・民生部門消費割合	[%]
	(	莆蓄・貯蔵容易性	備蓄・貯蔵費用を試算しながら、備蓄容易性を定性評価
	資源調達元	世界需給バランス安定性	エネルギーセキュリティWGデータ使用
	政治的安定性	我が国輸入先としての安定性	エネルギーセキュリティWGデータ使用

# 表 3.4.7 定量値を入力する評価指標

視点	項目		単位等
		高レベル	$[m^{3/}kWh]$
	长舟州州加厉	低レベル(地層処分)	$[m^{3/}kWh]$
	成初1±10頁	低レベル (余裕深度処分)	$[m^{3/}kWh]$
		低レベル(浅地中処分)	$[m^{3/}kWh]$
		硫黄酸化物	g/kWh
		窒素酸化物	g/kWh
	大気汚染物質	浮遊粒子状物質	$[mg/m^3]$
		石炭粉塵	有・無
<b></b> 境影響		粉塵等	[g/m3]
低减性		一酸化炭素	[mqq]
		光化学オキシダント	
		反化水素	有・無
		有害物質等	有・無
		<u>減育</u> 拒許	
	大気等他の影響	(放到) 軍 自	
		恋天 任国波穴复指動	
	地球泪座儿脑所	20 年	
	地球温暖化物質	002守	Lg-U/KWNJ

3.4.4.1 LNG 火力(複合サイクル)

- (1) 経済性
- 1) 固定費関連

平成11年12月総合エネルギー調査会第70回原子力部会の経済性試算<sup>[10]</sup>における LNG 火力のモデルプラントは、全てコンバインドサイクルであり、その建設単価は、 203,000円/kW とされているが、電力会社の近年の設置事例では以下のように安価 なものがある<sup>[1]</sup>。

·東京電力株式会社[11] [12]

富津火力 3 号 152 万 kW(×2 系列) 総工費約 1,700 億円(約 11 万円/kW) 千葉 1・2 号 144 万 kW×2 系列 総工事費 3,400 億円(約 12 万円/kW) また、他の発電コスト想定事例として、国際応用システム研究所(International Institute for Applied System Analysis: IIASA)のもとで日本原子力研究所が参加 して実施された長期エネルギーシステムの最適化モデル MARKAL を用いた解析で 設定した発電技術特性データを表 3.4.8 に示す<sup>[13]</sup>。ここでは、建設費として 25.6 万 円 / kW という設定になっている。

以上の資料より、中間評価時に用いる LNG 火力発電の建設単価および運転費について、以下のように設定する。なお、建設単価については、上記事例のうち最も安い水準を想定している。

建設単価 : 11 万円 / kW 1 年あたり運転費 : 8,000 円 / kW (建設単価の 4%)

- 237 -

発電	年代	耐用年	稼働率 上限 (%)	彩電动玄	建設費	運転約	隹持費
システム	410	数(年)		光电刈平	(円/W)	固定費 (円/W)	可変費 (円/MJ)
石油火力 (事業用)	2000 ~ 2050	30	50	42.0	202	8.65	0.0628
石炭火力 (IGCC)	2020 ~ 2050	30	70	49.0	314	13.1	0.212
LNG 複合 サイクル 火力	2050	30	65	61.1	256	10.9	-
軽水炉	1995 ~ 2050	30	80	化石エネル ギー換算で 与える	328	15.0	0.123
太陽光 (低費用)	2050	20	12.5	化石エネル ギー換算で 与える	303	6.05	-
風力	2030	20	24	化石エネル ギー換算で 与える	320	13.3	-
燃料電池 (PAFC <sup>(注)</sup> )	2010 ~ 2050	20	70	電気 43.3 熱 27.8	276	10.9	0.170
燃料電池 (MCFC <sup>(注)</sup> )	2050	20	70	電気 59.0 熱 29.5	331	13.1	0.204

表 3.4.8 主要発電技術等の特性データ

(注: PAFC は、リン酸型燃料電池、MCFC は、溶融炭酸塩型燃料電池を示す)

## 2) 変動費(燃料費)関連

LNG の我が国 CIF 価格を図 3.4.9 に示す<sup>[1][14]</sup>。また、World Energy Outlook 2002 による天然ガス価格長期見通しを図 3.4.10 に示す<sup>[15]</sup>。天然ガスの価格は長期的に上 昇傾向にあると見通されてはいるものの、その上昇幅は大きくない。また、我が国輸 入価格には、運搬費や保険料も含まれており、さらに、為替レートの影響も直接受け る。そのため、燃料価格の将来予測は非常に困難であり、入力値設定としては、過去 10 年の平均値的な価格として、23,000 円 / トン(一定)を 2004 年における値とし、 価格上昇率 0.27% / 年 を用いて 2030 年における価格を算出すると、24,670 円 / ト ンとなる<sup>[16]</sup>。

また、燃料加工費を 1.1 円 / kWh と置く<sup>[3]</sup>。



図 3.4.9 LNG の CIF 価格



注) cft: cubic feet 1000cft = 約 0.02 トン

図 3.4.10 天然ガス価格見通し

## 3) 発電原価

以上の想定をもとに発電原価を年経費率法により算出すると、以下のようになる<sup>[1]</sup>。

- ・ 建設単価:110,000円/kW
- ・ 金利 : 3%
- 耐用年数(償却期間):15年
- ・ 年経費率 : 0.077
- ・ 運転費(1年あたり): 8,000円/kW
- 稼働率:80%
- ・ LNG 価格: 24,670 円 / t

- ・ LNG 発熱量: 13,300kcal/kg
- ・ 発電効率:65%
- ・ 燃料加工費:6,500円/t

資本費 = 2.35円/kWh

燃料費 = 3.36円/kWh

合計 = 5.71円/kWh

4) 燃料価格変動幅

エネルギーショック時

我が国の原油、LNG、一般炭輸入価格推移を図 3.4.11 に示す<sup>[1][17]</sup>。LNG 輸入価格は 1972 年までは固定価格であり、その後、原油輸入価格にリンクした価格フォー ミュラによるものへと移行した(ただし、価格フォーミュラは LNG 売買契約ごとに 異なり、公表されたものはほとんどない)。中間評価においては、今後も原油輸入価格とリンクし続けるという仮定のもとに、LNG 価格変動に関する各パラメータを設 定することとする。

従って、LNG に関するエネルギーショック発生確率は、原油価格に影響するエネ ルギーショック発生確率として設定する。図 3.4.11 によれば、原油価格の急激な上 昇は以下に記すように 1965~2003 年で 4 回(2003 年イラク戦争を含めれば 5 回) 見られている<sup>[3][5][6]</sup>。

- ・ 第一次オイルショック(1972~1974年)
- ・ 第二次オイルショック(1979~1980年)
- · 湾岸戦争 (1990年)
- ・ OPEC による減産(1999~2000年)
- ・ (イラク戦争(2003年))

OPEC 減産による原油価格上昇はオイルショックとは区別されることもあるが、価格を急上昇させる要因であるため、ここではエネルギーショックの1つとして取り上 げることとする。一方、イラク戦争時の原油価格上昇は、数ヶ月間にわたって徐々に 上昇するものであったため、ここでは、エネルギーショックには含めないで考えるこ とにする。以上より、エネルギーショック発生確率は、35 年間で4回、すなわち1 年間に約11%の確率であると考える。



図 3.4.11 日本の原油、LNG、一般炭輸入価格の推移

エネルギーショック発生時の原油価格上昇率を、過去のエネルギーショック時の大まかな原油価格上昇実績値を用いてその平均値をとることにより想定する<sup>[3][5][6]</sup>。表 3.4.9 によれば、上に記した4回のエネルギーショック時における原油、LNG及び石炭(一般炭)価格の大まかな上昇率は以下のようである。4回の平均値を求めると、原油、LNG それぞれ約160%、約110%の上昇率である。

事象	大まかな価格変化(円/Mcal)			
第一次オイルショック	原油	0.54(1972)	2.32(1974)	約330%
	LNG	0.66(1972)	1.70 (1974)	約160%
	一般炭		-	
第二次オイルショック	原油	1.93 (1978)	5.22(1980)	約170%
	LNG	1.89(1978)	5.56(1980)	約190%
	一般炭	1.20(1978)	2.52(1980)	約110%
湾岸戦争	原油	1.75(1989)	2.23 (1990)	約30%
	LNG	1.85(1989)	2.16(1990)	約20%
	一般炭	1.12(1989)	1.13 (1990)	ほぼ0%
OPEC減産	原油	1.13(1998)	2.15 (2000)	約120%
	LNG	1.42(1998)	2.08 (2000)	約70%
	一般炭	0.79(1998)	0.60 (2000)	0%
			原油平均	約160%
			LNG平均	約110%
			一般炭平均	約30%

表 3.4.9 過去のエネルギーショック時の原油、LNG および石炭価格上昇率

## 安定供給時

財務省貿易統計により月ごとの LNG 輸入数量や CIF 単価が発表されている<sup>[18]</sup>。 ここでは、1998年1月から 2003年6月までの LNG 価格推移(図 3.4.12)から、1 年間の LNG 価格変動幅を設定する。1年ごとに CIF 価格の最高と最低の差を求める と表 3.4.10 のようになる。また、図 3.4.12 に示した各月データの標準偏差を求める と、約 4,450 円 / トンとなっている。ここでは、この標準偏差(=4,450 円 / トン) を、LNG 価格変動幅として設定し、1kWh あたりに換算すると、約 0.44 円 / kWh と設定した。





表 3.4.10 1 年ごとの LNG の CIF 価格変動幅(最高一最低)

年	最高 - 最低 ( 円 / トン )
平成10年	7,285
平成11年	4,748
平成12年	6,585
平成13年	2,885
平成14年	2,533
平成15年	1,115
平均	4,192

- (2) 資源供給性
- 1) システム発電効率

LNG コンバインドサイクルの発電効率は 65%を達成すると想定する。

2) 必要資源賦存性

この指標は、ある導入規模である年数を運転したときに必要となる資源の量を算出 し、確認可採埋蔵量との比で表される量とする。

まず、必要となる資源量を、以下のように算出する。

表 3.4.11 必要資源量の算出

導入規模	50 GW	
運転年数	50 年	_
発電効率	65 %	
運転年数	50 年	
稼働率	80 %	

	50年間の発電量	17,520,000	GWh
		1,742,880,278	トン
	必要となるLNG量	2,440,032,389	千m3
7		86,133,143,320	Ŧcf

ただし、LNG発熱量: 13,300kcal/kg LNG1トン = 天然ガス1,400m3を用いた。 また、1kWh=約860kcal、1m3 = 約35.3cf

天然ガスの確認可採埋蔵量は、オイル&ガスジャーナル 2000 年 12 月号によれば、 5,278,484[十億 cf]である<sup>[19]</sup>。上で算出した LNG 必要資源量との比をとると、 93,311[十億 cf] / 5,278,484 [十億 cf] = 約 1.6%

となる。この値を、必要資源賦存性の設定値として使用する。

3) 発電以外に消費する割合

総合エネルギー統計<sup>[20]</sup>によれば、天然ガスまたは LNG の一次エネルギー供給量の うち、発電以外の目的に消費される割合は、表 3.4.12 の天然ガス・LNG のエネルギ ー転換および最終エネルギー消費において、電気事業者による以外の消費量の割合と して表すことができ、その値は表中右に記した数字を用いて、

( - - )/( + )

となり、その値は約 30%である。今後もこの傾向にあると仮定して(図 3.4.13) 30%を設定値とする。

			単位:×1015J
		天然ガス LNG	都市ガス
_	国内エネルギー生産	102	
次	輸入	2,970	
エ	一次エネルギー総供給	3,072	
イル	輸出		
Ŧ	在庫変動	0	
I	一次エネルギー国内供給計	3,073	
I	電気事業者	-2,129	
「転」	熱供給事業者		- 16
り 換 ギ	都市ガス	- 859	1,061
i	自家消費・ロス	-19	- 13
	統計誤差	-45	0
	最終エネルギー消費計	21	1,032
	産業部門計	20	386
	民生部門計	0	646
	運輸部門計		

表 3.4.12 天然ガスのエネルギー需給バランス(2000年度)



図 3.4.13 発電以外消費割合の推移(原油、天然ガス、石炭、ウラン)

4) 運輸・民生部門消費割合

ー次エネルギーの運輸・民生部門消費割合についても、総合エネルギー統計を参照 して値を設定する<sup>[20]</sup>。表 3.4.12 に示された天然ガス・LNG および都市ガスの最終 エネルギー消費における民生・運輸部門の割合は、

646 / (21 + 1032) = 61%

である。この値を設定値として用いることとする。

5) 世界需給バランス安定性

総合資源エネルギー調査会総合部会エネルギーセキュリティワーキンググループ では、石油、石炭、天然ガス、ウランに関する供給削減等のリスク比較定量化が検討 されている<sup>[9]</sup>。そこで使用されている二つの指標(世界の需給バランスに関するリス ク、輸入相手国に関するリスク)のうち前者を、ここで設定する値として使用する。 世界の総供給量に対する特定エリアの域外輸出量をリスク指標とし、"エリア間の 取引度要因"と"特定エリアの輸出集中要因"の積として表している。世界を7つの エリア(北米、中南米、ヨーロッパ、旧ソ連、中東、アフリカ、アジア太平洋)に分 け、各エリアに対する下式のばらつき(標準偏差)を世界の需給バランスに関する リスクの大きさを表す指標としている。図 3.4.14 に算出結果を再掲した。 7つのエリアについて 式を算出し、その標準偏差をリスク指標の大きさと考える。

世界の需給バランスから見たリスク = エリア間の取引度要因 × 特定エリアの輸出集中要因

エリア間の取引度要因 = 世界の域外輸出量 / 世界の総供給量

特定エリアへの輸出集中要因 = 特定エリアの域外輸出量 / 世界の域外輸出量



図 3.4.14 世界の需給バランスから見たリスクの比較

## 6) 我が国輸入先としての安定性

この指標についても、総合資源エネルギー調査会総合部会エネルギーセキュリティ ワーキンググループの検討結果を援用する<sup>[9]</sup>。「我が国の輸入相手エリアに関するリ スク」と表現されたこの指標は、二つの下位指標(輸入相手依存度、輸入先の政治的・ 経済的不安定度)により評価している。前者は、各資源のエリア別輸入偏在度を用い、 後者には、Euromoney誌に掲載される"Country Risk"を加工(国別の数値をエリア ごとに集計)したものを用いている(表 3.4.13 参照)。資源別、エリア別の各要素に ついて両者の積を求めたマトリックスより資源ごとに算出した分散をリスクの大き さを表す指標として比較している。結果を見ると(表 3.4.14 参照)、天然ガスは石油 の2倍程度のリスクを持つ一方、石炭、原子力はリスクが小さくなっている。

	石油	天然ガス	石炭	原子力
北米	0.00	0.06	0.09	0.06
中南米	0.00	0.00	0.00	0.00
ヨーロッパ	0.00	0.00	0.00	0.08
旧ソ連	0.00	0.00	0.70	0.00
中東	0.32	0.27	0.00	0.00
アフリカ	0.00	0.00	0.44	0.00
アジア太平洋	0.52	0.47	0.22	0.00

表 3.4.13 エリア別の政治経済リスク指標

注)総合資源エネルギー調査会総合部会エネルギーセキュリティワーキンググループ において、Euromoney誌 "Country Risk "より作成。国別の指標を基に、輸入量を ウェイトにして加重平均。大きいほどリスクが大きいことを示す。

表 3.4.14 我が国のエリア別輸入依存度から見たリスクの比較

石油	天然ガス	石炭	原子力		
1.0	1.94	0.32	0.03		

注)石油を1とする。

(3) 環境影響低減性

1) 放射性廃棄物

通常運転時に放射性廃棄物が発生することも考えられるが、フェーズ 中間評価で は発生量をゼロと設定する。

2) 大気汚染物質

窒素酸化物、硫黄酸化物の排出量に関して電力会社から実績値が報告されている事 例があるが、火力発電所平均とした値となっており、燃料種別に分類した公表はなさ れていない。そこで、現行火力発電所からの窒素酸化物、硫黄酸化物の排出量を推定 した上で、発電効率向上分等を考慮して入力値を設定する。 現行の排出量は、東京電力における核燃料からの SO<sub>X</sub>、NOx 排出原単位と発電電力 量費率から燃料別の排出原単位を推定する。排出原単位として使用した数値を表 3.4.15 に示す<sup>[21][22][23]</sup>。

	石炭	石油	LNG
SOx 排出原単位 ( g/kWh , 2003 年 ) 1)	/kWh,2003年)1) 0.17(火力発電所平均)		
NOx 排出原単位 ( g/kWh , 2003 年 ) 1)	0.21 (火力発電所平均)		
SOx 発生量 (石炭を 100 とする)2)	100	65	0
NOx 発生量 (石炭を 100 とする)2)	100	75	45
電力量 ( 億 kWh 、 2002 年 ) 3)	2,911	1,453	2,446

表 3.4.15 大気汚染物質の排出原単位

1) 東京電力: "数表で見る東京電力", (2004年)より

2) OECD: "EMISSION CONTROLS", (1988年)より

3) OECD: "ENERGY BALANCES", (2004年)より

排出原単位は、燃料やプラントの仕様により異なるが、ここでは以下のように仮定 して算出する。すなわち、石炭、石油、LNG による SOx 排出原単位(SOx石炭、SOx 石油、SOx LNG)と各発電電力量(電力量石炭,電力量石油,電力量 LNG)は次の 関係を満たすとする。

電力量石炭·SO<sub>X</sub>石炭 + 電力量石油·SO<sub>X</sub>石油 + 電力量 LNG·SO<sub>X</sub> LNG

= 0.17\*全電力量

 $SO_X$ 石炭:  $SO_X$ 石油:  $SO_XLNG = 100:65:0$ 

NOx 排出原単位についても、同様の関係式が成り立つとする。以上から、排出原 単位が表 3.4.16のように推定される。

	石炭	石油	LNG
SOx 排出原単位(g/kWh)	0.30	0.20	0
NOx 排出原単位(g/kWh)	0.28	0.21	0.13

表 3.4.16 現行火力発電の SOx、NOx 排出原単位推定値

この推定は、2003年における東京電力発表の値<sup>[21]</sup>を用いており、対象となる LNG 火力の平均発電効率は約42%程度であったと考える。ここで、想定する LNG コンバ インドサイクルシステムの発電効率は65%であることから、排出原単位は、表 3.4.16 の値の45/65 倍程度になると想定し、窒素酸化物排出原単位を、0.13×42/65=0.08 とする。

## 3) 地球温暖化物質

地球温暖化物質としては、CO<sub>2</sub>のみを考え、数値としては、本藤・内山(電力中央研究所)らのデータ(図 3.4.15 参照)を使用する<sup>[24]</sup>。



電力中央研究所:電中研ニュース No.338(2004)[24]より



3.4.4.2 石炭火力(IGCC)

- (1) 経済性
- 1) 固定費関連

中間評価で対象とする石炭火力は、石炭ガス化複合発電(IGCC)を想定しており、 各種石炭利用発電技術におけるその位置付けは表 3.4.17 のようになる<sup>[1]</sup>。IGCC の 建設費として、「23 万円 / kW(微粉炭火力)よりやや増加」とある。そこで、中間 評価における入力値としては、kW あたり 25 万円を用いることとする。

比較項	目	微粉炭火力	改良型 微粉炭火力	加圧流動床燃焼複合 (PFBC)	石炭ガス化 複合発電(IGCC)	トリプル複合発電 (IGFC)
<ol> <li>1.燃料特性</li> </ol>	温度	1.400度以下	1.400度以下	850度	1.300度以上	1.500~1.800度以上
		,	,	(灰の流動占以下)	(灰の流動占以上)	(灰の流動占以上)
	谪田岃秝	高灰流動占炭	高灰流動占炭	高灰流動占炭	低灰融占炭(融占降下	低灰融占炭(融占降下
						割)
					AJ )	Au )
2 . 運転特性			負荷変化率:3~5%/分、	最低負荷:30%		不明
3 . 環境特性	SOx	50 ~ 100ppm	50 ~ 100ppm	50 ~ 100ppm	20ppm	1ppm>
		(90~95% 湿式脱硫)	(90~95% 湿式脱硫)	(90~95% 炉内脱硫)	(燃料ガスの段階で脱	(燃料ガスの段階で脱
					硫)	硫)
	NOx	60ppm ( 脱硝装置付 )	60ppm ( 脱硝装置付 )	60ppm ( 脱硝装置付 )	60ppm ( 脱硝装置付 )	不明
	煤塵	10mg / Nm <sup>3</sup> 以下	10mg / Nm <sup>3</sup> 以下	5mg/Nm <sup>3</sup> 以下	5mg/Nm <sup>3</sup> 以下	5mg/Nm <sup>3</sup> 以下
友 友奶理	溶出性	あり	あり	あり	なし	<u> なし</u>
	推出	×-7	3~5%程度減	約1.5倍	ベーフに同じ	ベーフに同じ
	111-111	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	2.504至度减	約1.5百		
	14F LL1		3~ 5% 程度减			
灰酸刀人		ペース (kWh 当たりの	3~5%程度减	ペースとはは同寺	5~15%减(	17~23%减(効率上昇
		排出量)				分)
4. 効率		37 ~ 38%	39~40%	40 ~ 42%	40~43%	IGMCFC : 59.6%
(送電端)		(100万kW)	(100万k₩)	(35万kW級)	(35万kW級)	IGSOFC : 60.3
					セラミックガスタービン	(60万kW級)
					Ø	
5 . 設置スペ-	-ス	ベース	ベースに同じ	70%程度	ベースに同じ	不明
(機械装置のみ	ሁ)	(100万k\\\級)	(100万kW級)	(35万kW級×3)	(35万kW級×3)	
6.経済性 3	建設費	23万円 / kW	微粉炭火力より	微粉炭火力を	微粉炭火力より	不明
			やや増加	やや下回る	やや増加	

# 表 3.4.17 各種石炭利用発電技術の概要

# 2) 燃料費

石炭の価格については、図 3.4.11 に示したように、過去数年ほぼ一定水準で推移している。World Energy Outlook2002 による石炭価格の将来見通しは、図 3.4.16 のとおりである<sup>[15]</sup>。ここでは、LNG 価格想定と同様に総合エネルギー調査会における想定<sup>[16]</sup>を参考にし、現状価格(約 5,000 円 / トン)から、上昇率 0.77%を仮定して 2030 年における燃料価格を算出する。



## 図 3.4.16 石炭価格の見通し

### 3) 発電原価

以上の想定のほかを、上記 LNG 火力における設定値と同様として、発電原価を年 経費率法により算出すると、以下のようになる<sup>[1]</sup>。

- ・ 建設単価: 250,000 円 / kW
- ・ 金利 : 3%
- 耐用年数(償却期間):15年
- ・ 年経費率 : 0.077
- ・ 運転費(1年あたり):8,000円/kW
- 稼働率:80%
- ・ 石炭価格: 6,100 円 / t
- ・ 諸掛:2,000円/t
- ・ 石炭発熱量: 6,354kcal/kg
- ・ 発電効率:55%

固定費 =	3.89 円	/ kWh
-------	--------	-------

- 燃料費 = 2.10円/kWh
- 合計 = 6.00円/kWh
- 4) 燃料価格変動幅

エネルギーショック時

LNG 火力における設定と同様に、過去 38 年におけるエネルギーショックを 4 回 と考え、エネルギーショック発生確率を 0.11 回 / 年、また、エネルギーショック時 燃料価格上昇幅を表 3.4.9 より約 30%と想定する。kWh あたりに直すと、約 0.4 円 / kWh となる。

安定供給時

LNG における設定と同様に、1998 年 1 月から 2003 年 6 月までの財務省貿易統計 における各月の一般炭輸入価格から算出した標準偏差(約 613 円 / トン) を安定供 給時の価格変動幅の指標とする。kWh あたりに換算すると、約 0.15 円 / kWh であ る。

- (2) 資源供給性
- システム発電効率

石炭 IGCC の発電効率は 55%を達成すると仮定する。

## 2) 必要資源賦存性

必要資源賦存性(必要量/埋蔵量)の設定内容は表 3.4.18のとおり。 0.43%と設定する。

導入規模	50 GW		50年間の発電量	17,520,000	GWh
<u>運転年数</u> 発電効率	<u>50</u> 年 55%		必要となる石炭量	4,192,670,507	トン
稼働率	80 %		(1000)		
ににし、石灰	沃 新 重 : 6,534KCal/K	g 1kw	n=xJ860kcal		

## 表 3.4.18 石炭火力の必要資源賦存性設定内容

可採埋蔵量	984,211 百万トン
	(BP統計)
必要量 / 埋蔵量	0.43%

3) 他用途性

発電以外に消費する割合:図 3.4.13より、60%を設定値とする。 運輸・民生部門消費割合:ほぼゼロとする。

4) 資源輸入元政治的安定性

図 3.4.14、表 3.4.13 に示された石炭に対する値を用いる。

- (3) 環境影響低減性
- 1) 放射性廃棄物

通常運転時に放射性廃棄物が発生することも考えられるが、中間とりまとめ時評価 では発生量をゼロとする。

2) 大気汚染物質

表 3.4.17 によれば、IGCC の硫黄酸化物・窒素酸化物排出濃度は、現行技術(微 粉炭火力発電)の、それぞれ、1/3 程度、8 割程度、と見通されている。そこで、 入力値としては、表 3.4.16 に示した現行値のそれぞれ、1/3、8 割を用いて、以下 のように設定する。

硫黄酸化物排出量: 0.30×1/3 = 0.10g/kWh 窒素酸化物排出量: 0.28×0.8 = 0.22g/kWh

また、煤塵濃度についても表 3.4.17 の値を用いて、5g/m<sup>3</sup> と設定する。その他物 質については、排出なしとして扱うこととする。

#### 3) 地球温暖化物質

図 3.4.15 によれば、現行石炭火力のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量は 975g-CO<sub>2</sub>/kWh と算出されている。ここでは、発電効率の上昇により単位発電量当たりの排出量が約 2 割改善されると仮定して、975×0.8=780g-CO<sub>2</sub>/kWh と設定する。 3.4.4.3 軽水炉(ワンススルー、再処理あり)

- (1) 経済性
- 1) 発電原価等

発電原価としては、以下の値を想定する。また、建設単価は、20万円/kWを想定 値とする。これらは、核燃料サイクル開発機構における想定値、あるいは試算値であ る。

**ワンススルー** : 3.5 円/kWh 再処理あり : 4.0 円/kWh

2) 発電原価変動幅

経済協力開発機構/原子力機関(Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency)および国際原子力機関(International Atomic Energy Agency)がウランの価格推移をまとめている<sup>[25]</sup>が、ウラン価格は 1970年代後半に高騰してはいるものの以降は継続的な低落傾向にあり、表 3.4.9 に 示したエネルギーショック時の明らかな価格上昇は見られない(注:1990年代後半 にウラン価格は若干上昇しているが、時期的にはエネルギーショックと連動している とは考え難い)。また、ウランの輸入は財務省貿易統計<sup>[18]</sup>では明らかになっていない (企業間の契約による)が、長期契約に基づく輸入が多くを占めると考え、短期的な 価格変動も無視しうると考える。よって、発電原価変動幅はゼロを入力値とする。

- (2) 資源有効利用性
- 1) システム発電効率

34.5%と設定する。

2) 必要資源賦存性

中間評価では、天然ウラン利用効率を考慮して、軽水炉(ワンススルー)の資源賦 存性は 0.12、再処理ありの場合は、0.08 とする。

3) 他用途性

他用途性については、発電以外の利用、民生・運輸部門での利用はそれぞれ想定し ないこととし、ともにゼロを入力値とする。

- (3) 環境影響低減性
- 加加
   加加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加
   加</li

放射性物質排出量の想定値は表 3.4.19のとおりとする。

## 表 3.4.19 放射性物質の排出量

]	項目	単位	軽水炉(ワンススルー)	軽水炉(再処理あり)
放射性物質	高レベル	m³/kWh	$4.1 \times 10^{-9}$	$5.5  imes 10^{-10}$
	深地中処分	m³/kWh	$4.1 \times 10^{-10}$	$1.6  imes 10^{-9}$
	余裕深度処分	m³/kWh	$2.9 \times 10^{-9}$	$4.2 \times 10^{-9}$
	低レベル	m³/kWh	$2.8 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-8}$

2) その他物質

大気汚染物質については、それぞれ排出量ゼロとし、CO<sub>2</sub>排出量は、図 3.4.15 より、それぞれ 28g-CO<sub>2</sub>/kWh とする。

3.4.4.4 風力発電

風力発電については、1000kW級の風車を20基程度以上設置するウィンドファーム的な導入を想定し、各種入力値を想定する。

(1) 経済性

我が国に導入された風力発電の建設コスト(設備費+設置費)事例を表 3.4.20 に 示す<sup>[1]</sup>。KW あたり 15 万円程度から 60 万円以上まで大きな隔たりがあるが、近年導 入されたものは概ね 20~30 万円 / kW 程度となっている。新エネルギー財団によれ ば、風力発電の設備投資額を 23 万円 / kW としている(2001 年 11 月)。さらに、大 規模ウィンドファームでは 23 万円 / kW よりもう少し安いとの見方もある<sup>[1]</sup>。

また、関(東海大学)によれば、風車の大型化(~1,000kW)により、設備設置コ ストは kW あたり 11~15万円程度と想定されており、さらに、欧州のウィンドファ ームなどでは、600kW 級風車でも約 13万円 / kW で建設されるとの試算を示してい る<sup>[26]</sup>。

設置主体	場所	設置目的	設置時期	機種	定格出力	建設コスト
九州電力	鹿児島上甑島	試験研究	1990年	国産	250k\# × 1	48万円/kW
瀬戸町	愛媛県瀬戸町	農業公園への 電力供給	1990年	国産	1000kw × 1	150万円/kW
東北電力(1~5号機)	青森県東津軽郡竜飛崎	研究開発	1992年	国産	275kw×5	63.6万円/kW
松任市	石川県松任市	公園内施設用電源、 余剰電力は売電	1993年	輸入	1000kw × 2	134万円/kW
山形県立川町	山形県立川町	公共施設利用	1993年	輸入	100kw × 3	60万円/k₩
北海道電力	北海道泊村	試験研究	1993年	国産	250kW × 1、 275kW × 1、 300kW × 1	91万円/kW
東京電力	千葉県富津市	試験研究	1993年	国産	300kw × 1	60万円/kW
関東国際高等学校	千葉県勝浦市	施設用電源、 余剰電力は売電	1994年	輸入	250kW×1、 275kW×1、 300kW×1	40万円/kW
高知県企業局	高知県野市町	売電事業	1994年	輸入	250kw × 1	72万円/kW
東北電力(6~10号機)	青森県東津軽郡竜飛崎	研究開発	1995年	国産	300kw × 5	61.8万円/kW
山形風力発電研究所	山形県立川町	売電事業	1996年	輸入	400kw × 2	25万円/kW
エコロシ゛ー・コーホ゜レーション			1997年	輸入	400kw × 1	25~35万円/k₩
NEDO/宮崎県北方町	宮崎県ETOランド	試験研究及び公園内 施設用電源	1999年	輸入	750kw × 1	24万円/kW
NEDO/青森県深浦町	青森県深浦	試験研究及び白神エナ ジーパーク施設用電源	1999年	輸入	750kw × 1	25.3万円/kW
NEDO/熊本県五和町	熊本県五和町	試験研究及び町営施 設用電源	1999年	国産	300kw × 1	40.7万円/kW
エコ・ワールドくずまき風力 発電(株)	岩手県岩手郡葛巻町	売電事業	1999年	輸入	400kw×3	29.0万円/kW
三重県久居市	三重県久居市榊原町	売電事業	1999年	輸入	750kw × 4	29.5万円/kW
NEDO/和歌山県吉備町	和歌山県吉備町	観光事業用	2000年	輸入	400kw × 1	37.5万円/kW
壱岐クリーンエネルギー(株) (芦辺町、中原建設(株))	壱岐芦辺町箱崎諸津	売電事業	2000年	輸入	750kw×2	29.3万円/kW
滋賀県草津市	滋賀県草津市	観光事業用	2001年		1500kw × 1	15.3万円/kW
	高知県大豊市			輸入	750kw × 2	25万円/k₩
	三陸町越喜来夏虫山				1000kw × 10	30.0万円/kW
	京都府与謝郡伊根町太鼓山			輸入	750kw × 6	32.8万円/k₩

# 表 3.4.20 風力発電設備費事例

これらのデータを参考とし、1000kW 級風車を 20 基程度以上設置するウィンドフ ァームにおける、将来的な設置費用として、13 万円 / kW を用いることとする。そ の他、発電コスト算定に必要な各設定は以下のように設定する<sup>[1]</sup>。

1年間あたり運転費: 設置費用の2%

設備利用率: 20% (年平均風速 6m とした場合の標準的な設備利用率)

金利:3%

年経費率 : 0.077(風力発電設備の法定耐用年数は17年だが、NEDO等での 試算では15年としている)

以上の設定より、風力発電コストとして、

発電コスト = (設置費用×年経費率 + 運転費) / 年間発電電力量 = 約 5.75 円/kWh

を想定する。

(2) 資源供給性

国内で得られる自然エネルギーを資源とする風力発電については、資源供給性に関わる各指標のうち、備蓄・貯蔵簡易性、および、資源調達元政治的安定性は明らかに最大評価値(:効用値=1)が与えられる。また、他用途性についても、風を発電に用いることが"もったいない"という考え方が一般的になるとは想定し難い以上、最大評価値が与えられる。

発電効率については、風力エネルギーのうち何%が電力に変換されるかという考え 方に基づいて考えることが可能である。風力エネルギーの電力への最大変換効率は約 59 % (ベッツの限界)である。実際の風車の出力係数は、空気の抵抗や粘性による 損失のため、プロペラ型の場合で最大 45%程度である。この他に増速機などの機械 系伝達効率(95%程度)や発電機の効率(90%程度)などにより、最終的に得られる 電気エネルギーは風力エネルギーの約 35 %程度となるとされる。ここでは将来想定 として、40%を用いることとする。

資源賦存性は、必要とされる資源量/埋蔵量で評価されるものであるが、風力発電 については、想定導入量(kW)/導入限界量(kW)で評価することとする。風力の 導入限界量は、NEDOなどで調査が実施されており、以下のように評価されている<sup>[27]</sup>。

•	風力エネルギー潜在量	: 35,000MW
うち、	現実的に設置可能な量	: 5,000MW

さらに、景観等を考慮した場合 : 2,500MW

ここでは、"現実的に設置可能な量"を採用し、

必要資源賦存性 = 200MW / 5,000MW = 0.04

とする。設定した資源供給性の入力データを表 3.4.21 に示す。

視点		項目		単位等
	シ	·ステム発電効率	40	[%]
	ļ	必要資源賦存性	0.04	想定導入量 / 導入限界量
資源供給性	他用途性	燃焼以外利用割合	-	[%]
		運輸・民生部門消費割合	-	[%]
	備	i蓄・貯蔵容易性	-	
	資源調達元	世界需給バランス安定性	-	
	政治的安定性	対治的安定性 我が国輸入先としての安定性		

## 表 3.4.21 風力発電の資源供給性入力データ

(3) 環境影響低減性

風力発電の運転中に、いわゆる環境影響物質(大気汚染物質、地球温暖化物質)は 放出されない。しかし、建設等も含めたライフサイクルで考えれば CO<sub>2</sub> の放出があ り、また、窒素酸化物等の放出もゼロであるとすることはできない。しかしながら、 CO<sub>2</sub>以外の環境影響物質についてライフサイクルで評価した事例は少ないため、ここ では CO<sub>2</sub>のみを取り上げ、他物質については放出なしとして取り扱うこととする。

大気等他の影響に関する指標のうち、騒音については風力発電設置の際の要調査項 目として挙げられている<sup>[28]</sup>が、その他指標に関する項目は挙がっていない。そこで、 騒音以外の項目は「問題になる可能性はほとんどなし」とし、騒音については「問題 になる可能性あり」と設定する。参考までに、NEDO による風力発電ガイドによれ ば、一般に風車から 200m 離れれば 45 デシベルに減衰するとされている<sup>[28]</sup>。

3.4.4.5 太陽光発電

(1) 経済性

新エネルギー財団によれば、太陽光発電システムの kW 単価で表した設置価格は表 3.4.22 のとおりであり<sup>[1]</sup>、 kW あたり 50 万円を下回るものも現れている。太陽光発

電コスト入力値は、これら現状値を基にして、普及による習熟効果を見込んで、50 万円 / kW を想定値とする。その際、参考にした設置費用の習熟効果算定例と習熟効 果曲線をそれぞれ表 3.4.23 および図 3.4.17 に示す。また、習熟効果を示す近似式を 数式 3.4.1 に示す。

表 3.4.22 平成14年度住宅用太陽光発電導入促進事業における設置価格

					単位	拉(万円/k₩)
		システム	全結晶	単結晶	多結晶	アモルファス
	平均設置価格( ~	)	72.7	81.3	70.7	83.9
	太陽電池価格		46.8	54.1	45.1	54.2
	付属機器等費用		17.6	18.2	17.5	17.5
	設置工事費用		8.3	9	8.1	12.2
•	最高設置価格		135	135	123.3	
•	最低設置価格		39.9	50.3	39.9	

注:データ件数1,025(単結晶:195件、多結晶:829件、アモルファス:1件)

表 3.4.23 太陽光発電システム設置費用の習熟効果算定例

項目	設定値	備考
設備設置コスト初期値		新エネルギー財団資料より設定
(2000年)		(平均)
基準普及規模	45220MW	ギェマルギー 財団姿料 トロシウ
(2000年)	AJ3ZUWW	新エネルキー 別凹員科より 設定
33 南 亿米6日	0.00	エネルギー総合推進委員会
百愁咏奴「	0.00	(1998)



図 3.4.17 太陽光発電システム設置費用の習熟効果曲線

 $Cp_x = Cp_0 \times ((X+X_0)/(2 \times X_0)) - \beta_p$  (数式 3.4.1)

 Cpx
 : ある時点における設備コスト

 Cp0
 : 設備コスト初期値

 X、X0
 : 普及数

 Fp
 : 普及量が2倍になった時の設備コストの低減率。

 過去の普及数と価格低下の傾向を参考にエネルギー毎に想定する。

 p
 : p= -1 × log Fp / log 2

将来の設備設置費用として 50 万円 / kW を用いて、kWh あたりの発電コストを以下の条件のもとに年経費率法にて算出する。

- 耐用年数:20年
- ・ 金利:3%
- 年あたり修繕保守費:建設費総額の1%
- 用地費、人件費、一般管理費、等: 無しとする
- ・ システム利用率:15%(後述)

年経費率 = 金利 / (1 - (1 + 金利) - (耐用年数))

= 0.067

発電コスト = (設備設置費×年経費率 + 運転費 )/年間発電量 = 29.4円/kWh (2) 資源供給性

太陽光発電についても、資源供給性に関わる各指標のうち、備蓄・貯蔵簡易性、お よび、資源調達元政治的安定性は明らかに最大評価値(:効用値=1)が与えられる ものとする。

発電効率としては、経済性入力値設定で想定した 15%を用いる。これは、NEDO ニューサンシャイン計画において、単結晶・多結晶・アモルファス系モジュールに関 する平成 16 年度開発目標として掲げられている数値である(表 3.4.24 参照)<sup>[29]</sup>。

他用途性に関する設定は、太陽光発電と太陽熱利用の比率から想定する。それぞれの2010年度目標現行対策維持ケース(総合エネルギー調査会総合部会答申2001年7月)は、原油換算で、62万kl(太陽光発電)、72万kl(太陽熱利用)となっている<sup>[30]</sup>。これらの値から発電以外利用割合を算出した。

分野	平成12年度目標	平成16年度モジュール目標
アモルファスシリコン	140円/W以下(100MW/年)	
モジュール	変換効率:10%以上	
	サイズ:90cm×90cm以上(ガラス基板)、	
	40cm×80cm以上(フレキシブル)	-
薄膜多結晶シリコン	140円/W以下(100MW/年)	100円/W以下(100MW/年)、
モジュール	変換効率:15%以上	140円/W以下(10~30MW/年)
	サイズ:30cm×30cm以上	変換効率:15%以上
		サイズ : 30cm × 30cm以上
アモルファスシリコン/	変換効率:14%以上	100円/W以下(100MW/年)、
薄膜多結晶シリコン	サイズ:5cm×5cm以上	140円/W以下(10~30MW/年)
モジュール		変換効率:15%以上
		サイズ : 30cm × 30cm以上
	変換効率:16%以上(セル)	100円/W以下(100MW/年)、
新型単結晶シリコン	サイズ:10cm×10cm以上	140円/W以下(10~30MW/年)
		変換効率:15%以上
		サイズ : 40cm × 90cm以上

## 表 3.4.24 ニューサンシャイン計画における技術開発目標(抜粋)

新エネルギー・産業技術総合開発機構:ニューサンシャイン計画における太陽光発電技術開発の今後の進め方(1997)<sup>[29]</sup>より抜粋

#### (3) 環境影響低減性

太陽光発電運用時には、環境影響物質(大気汚染物質、地球温暖化物質)は放出されない。しかし、建設等も含めたライフサイクルで考えれば CO<sub>2</sub> の放出があり、また、窒素酸化物等の放出もゼロではない。しかしながら、CO<sub>2</sub> 以外の環境影響物質についてライフサイクルで評価した事例は少ないため、ここでは CO<sub>2</sub> のみを取り上げ、他物質については放出無しとして取り扱うこととする。CO<sub>2</sub> 排出量は図 3.4.15 より、53g-CO<sub>2</sub>/kWh と想定する。

騒音や振動などの影響についても、問題になったという事例は一般にはないと考え られ、「ほとんど無し」と設定する。

3.4.4.6 燃料電池(SOFC)

- (1) 経済性
- 1) kW あたりコスト

ここでは、高い発電効率が得られるという観点から、固体酸化物型燃料電池 (SOFC)+ガスタービン・コンバインドサイクルを想定する。SOFCの開発は国内 外で行われているが、現在、最も大きな規模のモジュールを開発しているのは、シー メンス・ウェスティングハウス社であり、200kW以上規模の円筒形モジュールの実 証試験実績を持っている。同社では、コンバインドサイクルによって、発電出力58 ~70%、熱も含めた総合効率で80%を達成し、SOFCの普及段階では約2,500~3,000 ドル/kW程度までコストが低減されると予想している<sup>[31]</sup>。中間評価では、この値を 参考に設定値として用いることとする。すなわち、1ドル=110円程度と考えて、kW あたり30万円程度を設定値とする。 2) kWh あたりコスト

燃料費やその他費用を、大まかではあるが、以下のように設定し、kWh あたりの 発電原価を算出する。

- ・ 設備単価:300,000円/kW
- ・ 金利 : 3%
- 耐用年数(償却期間):15年
- ・ 年経費率 : 0.077
- ・ 運転費(1年あたり): 12,000円/kW
- 稼働率:80%
- ・ 天然ガス価格: 23,000 円 / t
- ・ 天然ガス発熱量:13,300kcal/kg
- ・ 発電効率:70%
- ・ 燃料加工費等諸掛:1.1円/kWh
- ・ 資本費 = 5.0円/kWh
- ・ 燃料費 = 3.2円/kWh
- ・ 合計 = 8.2円/kWh
- (2) 資源供給性

燃料として天然ガスを想定するため、LNG 火力発電に関する設定と同様とする。 ただし、発電効率を 70%とすることによる効果を考慮する (LNG 火力発電では発電 効率 60%と設定)。また、必要資源賦存性については、導入規模設定が 3GW・50 年 であることを考慮して必要資源量を算出する。設定した必要資源賦存性を図 3.4.18 に示す。

導入規模	3 GW	]	50年間の発電量	1,051,200	GWh
運転年数	50 年		心西となる王ダガフ昌	07 102 220	<b>۲</b>
発電効率	70 %		必要となる人然力入重	97,103,330	1-2
稼働率	80 %				

ただし、天然ガス発熱量:13,300kcal/kg 、1kWh=約860kcal

可採埋蔵量	984,211 百万トン
	(BP統計)
必要量 / 埋蔵量	約0.01%

図 3.4.18 LNG 火力発電の必要資源賦存性

- (3) 環境影響低減性
- 1) 放射性廃棄物

通常運転時に放射性廃棄物が発生することも考えられるが、フェーズ 中間評価で は発生量をゼロと設定する。 2) 大気汚染物質

燃料として天然ガスを用いており、LNG 火力の場合と同様に硫黄酸化物の排出は ゼロとする(表 3.4.16 参照)。窒素酸化物については、動作温度が 1,000 程度であ ることから、必ずしもゼロとはいえず、シーメンス・ウェスティングハウス社によれ ば排出濃度として 0.5ppm 程度であるとしている<sup>[31]</sup>。この値は、現行の LNG 火力発 電の 1/10~1/100 程度である。ここでは、LNG 火力に対する設定値の 1/30 程度とし て、0.004g/kWh と設定する。その他の排出物はゼロとする。

3) 地球温暖化物質

ライフサイクル CO<sub>2</sub>発生量研究報告(図 3.4.15 参照)には、燃料電池に対する試 算結果が含まれていない。そこで、ここでは、LNG 火力発電に対して設定した値を もとに想定した値を用いることとする。すなわち、発電効率設定値(燃料電池:70%、 LNG 火力:60%)を考慮し、

SOFC 設定値 = 519 g-CO<sub>2</sub>/kWh (LNG 火力設定値) × 60% / 70% = 445 g-CO<sub>2</sub>/kWh

とする。ライフサイクルでは、発電所建設段階等における発生量もカウントしているため、LNG 火力発電の値をそのまま用いることは必ずしも正確ではないが、天然ガスを燃料とする発電システムからの CO2 の大部分が、発電過程で発生すると仮定して設定する。

3.4.4.7 木質系廃棄物発電

(1) 経済性

廃棄物発電としては、木くず(建設廃材等)による産業廃棄物発電を想定する。す なわち、燃料を木質系産業廃棄物として調達している(燃料費は逆有償、事業者が燃 料費を支払うのではなく、木くずの引き取り代金を受け取る)と考え、いくつかのモ デルプラントを想定して発電コスト想定を行う。

出力規模の想定

木くずを含め、産業廃棄物処理処分事業者の規模(一日あたり処理能力(t/d)で 比較する)は、図 3.4.19に示すとおり、大規模なもの(200t/d以上)から小規模な もの(数 t/d 程度)まで広く分布している<sup>[32]</sup>。このうち、発電事業者としてコスト面 で競争力を有するのは大規模な事業者であると考え、ここでは、200t/d 程度の処理規 模をもつ大規模事業者を想定する。なお、木くずの発熱量を 3,000kcal/kg、発電効率 25%とし、処理される木くずからの発熱を全て発電に利用すると考えると、200t/d の処理能力に対して発電容量は約 7,000 k Wと想定される。



新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー導入ガイドブック(2003)<sup>[32]</sup>より

図 3.4.19 木〈ず産業廃棄物燃焼施設の規模別件数

建設単価については、NEDO 文献による廃棄物処理規模との関係を図 3.4.20 に示 す<sup>[32]</sup>。想定する処理規模(=200t/d)における現状の最安値を用いることとし、約 10百万円 / (t/d)とする。

200t/d の木くず処理能力を持つ施設に対して想定される発電設備容量は約 7,000kWであるから、建設単価としては、約28万円/kWとなる。



新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー導入ガイドブック(2003)<sup>[32]</sup>より

図 3.4.20 木〈ず処理施設の建設単価と処理規模の関係

## 3) 燃料費

燃料となる木くずは、産業廃棄物として逆有償で受け入れることを想定する。現状の、産業廃棄物中間処理業者の受け入れ単価を見ると、図 3.4.21 に示すように非常にバラツキが大きくなっている<sup>[32]</sup>。ここでは、木くずの概ねの平均値である 10,000円/t を試算に用いることとする。また、灰処分などの費用については、図 3.4.22 に示す産業廃棄物最終処分費用の平均値を用いることとする<sup>[32]</sup>。木くずの場合は、約

# 6,000円/tとなっている。



新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー導入ガイドブック(2003)<sup>[32]</sup>より



## 図 3.4.21 産業廃棄物中間処理受け入れ単価

新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー導入ガイドブック(2003)<sup>[32]</sup>より

#### 図 3.4.22 最終処分単価平均値

## 4) 発電コスト想定

上記想定値のほか、NEDO の想定にしたがって、人件費、メンテナンス費、一般 管理費率等を設定し<sup>[1][32]</sup>、下表の諸元に基づいて発電コストを算出すると表 3.4.25 のようになる。木くず産業廃棄物発電の発電コストとして、5.9円/kWhを想定する。 なお、この値は、木くず流通費用に依存する燃料コストに大きく依存するものであり、 その単価が 1,000 円 / t 程度であれば発電原価は 10 円 / kWh 近く(他の条件は同じ とする)になり、30,000 円 / t を越えれば、その利益で発電コストを賄えるほどとな る。

処理能力	200 t/d		
発電出力	7,000 kW		
所内動力	1,000 kW		
発熱量	3,000 kcal/kg		
稼働率	80 %		
減価償却	15 年		
金利	3%		
施設建設費	10,000,000 円/t		
人件費・諸経費率	600万円×14人		
メンテナンス比率	3.0%		
一般管理費	16%		
その他灰処理費など	6,000 円/t		
燃料コスト	-10.000 円/t		

表 3.4.25 木質産業廃棄物発電コスト想定

費目	費用		備考
減価償却費	120,000,000	円/年	定額法
人件費	84,000,000	円/年	
修繕費	60,000,000	円/年	初期費用×修繕費率
一般管理費	13,440,000	円/年	人件費×一般管理費率
その他	96,000,000	円/年	
燃料費	-160,000,000	円/年	
利子	34,199,828	円/年	元利均等方式
年間費用合計	247,639,828	円/年	
kWhあたり	5.9	円/kWh	

- (2) 資源供給性
- 1) システム発電効率

一般的な火力発電所の発電効率が 40~45%であるのに対し、廃棄物発電の発電効率は低いレベル(10~15%程度)にとどまっている。廃棄物発電の効率向上検討は、 平成3年より NEDO によって実施されており、耐食性の高い材料開発を中心とした 研究がなされている。それら研究開発成果とともに、実機においてより高効率化を目 指したプラントの採用が増加している。ここでは、発電効率として 20%を設定する こととする。

### 2) 必要資源賦存性

木質系産業廃棄物発電の燃料となる木質バイオマス、いわゆる木くずの賦存量は、 木くずとして含める範囲(林地残材など林業系由来、建設廃材、など)によっていく つかの試算がなされているが、例えば、環境省の地球温暖化対策技術検討会で配布さ れた資料では、年間約 0.5億トンの発生量があるとしている<sup>[33]</sup>。一方で、合計 3GW の発電設備を1年間稼動するために必要な資源量は、発熱量を2,000kcal/kg、発電効率20%、稼働率80%とすれば、約900万トンとなる。よって、木質系バイオマス資源の賦存性は十分であり、必要資源賦存性(必要資源量/賦存量)としては、ゼロを設定する。

3) 他用途性

燃料として用いる木質系バイオマスは、マテリアル・リサイクルが十分になされた 後の木くず、すなわち、木材のカスケード利用が十分になされ、燃焼以外の用途が無 くなったものを想定する。従って、他用途性の2指標については、ともに満点に相当 する設定値(0%)を設定する。
3.4.4.8 各電源の段階(定性)評価における入力値設定

ここでは、定性評価を行う評価指標について、3.4.3.2 小節での検討結果を踏まえ て、評価対象の電源システムが、各評価指標のどの段階に分類されるかを検討した。 段階的評価における各電源の分類を表 3.4.26 に示す。ある電源システムの分類先に 与えられた効用値が、段階的評価におけるその電源の入力値となる<sup>[1]</sup>。

視点	項目		基準1(満足度低)	基準1(満足度中)	基準1(満足度高)
				www.a.\$1月了4月,44月上了太影切应	
		出力変動性	変動が非常に入さい	燃料の熱重不均一性による変動程度	
			風力発電、太陽光発電	廃棄物発電	LNG火力、石灰火力、軽小炉、FBR、燃料 電池
		A # A//	出力制御は全くできない	その中間レベル	負荷変動に合わせた運転が可能
	電力而買	貝何追従性	風力発電、太陽光発電	石炭火力、廃棄物発電、軽水炉、FBR、燃 料電池	LNG火力
		システム停止頻	3回以上/年	1~2回/年程度	1回/年未満
经这种		度		FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力、 廃棄物発電	風力発電、太陽光発電、燃料電池
≌/A IE		7,#****	1年以上の調査が必要	必要はあるが1年以下程度	必要なし
		<b>予</b> 何 詞	風力発電	FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力、 廃棄物発電	燃料電池、太陽光発電
	<b>**</b> / <b>=</b> 14		難	中	易
	間便性	メソテナンス		FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力、 廃棄物発電、燃料電池	太陽光発電、風力発電
		廃止	難	中	易
			FBR,軽水炉	LNG火力、石炭火力、廃棄物発電、風力発 電	太陽光発電、燃料電池
資源供給性	備蓄	・貯蔵容易性	貯蔵する燃料が特殊な特徴を持つ 	貯蔵の必要あり(燃料を使用)	貯蔵の必要なし(燃料を使用しない)
2 C #3 / D C #44 ( 11			FBR,軽水炉	LNG火力、燃料電池、石炭火力、廃棄物発 電	風力発電、太陽光発電
		騷音	段立西田おちて	段支売日が明時にたって他生い	現立市中よれい
	大気等他		騒百安囚かめる	離百安囚か同題になる可能性のリ	融百安因かない
			風力発電	LNG火刀、石炭火刀、FBR、軽水炉、廃棄 物発電	太陽光発電、燃料電池
		振動	特に問題になる可能性あり	機械的な発電	化学的な発電
環境影響				LNG火力、石炭火力、FBR、軽水炉、 廃棄物発電、風力発電	太陽光発電、燃料電池
低減性	の影響	<b></b>	排ガスに悪臭要因が含まれる	排ガス等発生するが悪臭要因は少ない	排ガス等の発生なし
		悉臭		LNG火力、石炭火力、FBR、軽水炉、 廃棄物発電、燃料電池	太陽光発電、風力発電
			被害の可能性大	発生源あり	発生源なし
		低周波空気振動		LNG火力、石炭火力、FBR、軽水炉、 廃棄物発電、風力発電	太陽光発電、燃料電池
				目体的相定けできないが可能性け考える	
	兵器・	テロへの悪用性	悪用用途やその可能性あり 		悪用用途が想定できない
社会不安定			FBR、軽水炉	LNG火刀、右炭火力、廃棄物発電、燃料電 池	風力発電、太陽光発電
影窖性	=	ワインパクト	想定悪用用途のインパクトが大きい	中間	想定悪用用途のインパクトが小さい
	志用の1 ンハクト		FBR、軽水炉	LNG火力、石炭火力	風力発電、太陽光発電、燃料電池、 廃棄物発電

# 表 3.4.26 電源システムの評価基準への分類検討

(続く)

		開発期間							
			長い(~2030年)	中間程度	短い(~2010年程度)				
			FBR	太陽光発電、燃料電池、廃棄物発電	LNG火力、石炭火力、軽水炉、風力発電				
	技術的実	開発資金	国家レベルの大規模な開発資金が必要	大規模ではないが助成が必要	商業ベースでの開発が可能				
	現性		FBR、軽水炉	燃料電池、石炭火刀、廃棄物発電、太陽 光発電	LNG火力、風力発電				
		未聞発必要技術	3	中	少				
道入性		不用无必安汉阳	FBR,太陽光発電、燃料電池	石炭火力、軽水炉	LNG火力、風力発電、廃棄物発電				
47(L		予算規模	政府による予算はほとんどなし	政府による予算はあるが大規模ではない	政府による予算が大きい				
	研究開発		石炭火力、LNG火力、軽水炉	風力発電、廃棄物発電	燃料電池、太陽光発電、FBR				
	受容性	西索眼袋李	個人の意思よりも、所属企業の戦略等によって 担当している研究者が多い	その中程度	大学等で志す学生が多い				
		刘九州无百	石炭火力、LNG火力、軽水炉	太陽光発電、FBR、風力発電	燃料電池、廃棄物発電				
	шŵ	眼惑矛动州	容量等スペックの変更が困難	0	容量等スペックの変更が容易				
	<b>研</b> 究開充柔軟性				風力発電、燃料電池、太陽光発電、廃棄物発 電、LNG火力、石炭火力、軽水炉				
			事故の想定最大被害は大きいと思われる	事故の想定最大被害は中間程度と思われ					
		災害の大きさ	(核燃料を使用)	る(可燃性燃料を使用) LNG火力,石炭火力,廃棄物発雷,燃料雷	事故の想定最大被害は小さいと思われる				
			FBR,軽水炉	上的())() 日()()()()()()()()()()()()()()()()(	風刀発電、太陽光発電				
		個人による制御 可能性	大規模事業者による設置のみを想定 	中小規模事業者による設置も可能	家庭用など個人の意思による設置を想定				
		.1817	FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力	風力発電、廃棄物発電	太陽光発電、燃料電池				
	恐怖性	同一便益を得る 代替手段の有無	想定する「便益」は電力であるため、電源	「」」」「「「」」は電力であるため、電源間で差がつかないと考える					
		リスクテイク拒 否可能性の有無	大規模事業者による設置のみを想定	中小規模事業者による設置も可能	家庭用など個人の意思による設置を想定				
			FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力	風力発電、廃棄物発電	太陽光発電、燃料電池				
		子供・子孫への 影響	化学的・生物的に影響がある、または、 物理的影響が長期にわたる	物理的に影響有り(処理が困難、など)	影響無し				
			FBR、軽水炉	石炭火力、LNG火力	太陽光発電、風力発電、燃料電池、 座棄物発雷				
		事故歴	将来技術については想定できないため、評価指標から除くこととする。						
		公平さ	大規模事業者による設置のみを想定	中小規模事業者による設置も可能	家庭用など個人の意思による設置を想定				
			FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力	風力発電、廃棄物発電	太陽光発電、燃料電池				
		可逆性	最大想定事故の影響回復に時間がかかる	最大想定事故の影響回復にかかる時間は 中間程度	最大想定事故の影響回復に時間がかから ない				
心理的		可逆性	FBR、軽水炉	石炭火力、LNG火力、廃棄物発電	太陽光発電、風力発電、燃料電池				
バイアス 低減性		用知度	なじみのない原理を利用	中程度	同一原理の民生用製品あり				
		周知度	FBR、軽水炉、燃料電池	LNG火力、石炭火力、廃棄物発電	風力発電、太陽光発電				
	未知性		原理を理解困難	中程度	原理を理解容易				
		理解度	FBR、軽水炉、燃料電池	太陽光発電	風力発電、石炭火力、LNG火力、廃棄物発 雷				
		影響発現遅延性	放射線のみに特化した指標であり、子供・ は除くこととする	ー 子孫への影響において、化学的・生物的影	って。 響を含めた評価をしているため、ここで				
		お茶様間の注口	悪い意味で注目されている	注目されていない、どちらともいえない	良い意味で注目されている				
		報道機関の注目 度		LNG火力、石炭火力、廃棄物発電	太陽光発電、風力発電、燃料電池				
	その他事		発生電力の発生場所での民生用利用が困	どちらともいえない	発生電力を発生場所で民生用利用可能				
	項	便益の直接性	<sup>難</sup> FBR 軽水炉 ING火力 石炭火力	 座奎物举雷	大陽光発雷 風力発雷 燃料雷池				
		<b>使关系的</b> 中的							
		使金の明瞭性	想定する「便	:益」は電力でのるにの、電源間で差かつか 	はいこ考える				
		事故時不利益の	大きい		小さい				
	不利益性	~~č č	FBR,軽水炉	LNo欠刀、石灰欠刀、廃乗物発電、燃料電 池	風力発電、太陽光発電				
		事故時不利益の	大規模事業者による設置のみを想定	中小規模事業者による設置も可能	家庭用など個人の意思による設置を想定				
		制御可能性	FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力	風力発電、廃棄物発電	太陽光発電、燃料電池				
	事業主体の 特性	メディアの評判	今回評価では、具体的事業主体を想定しな	今回評価では、具体的事業主体を想定しないため、電源間で差がつかない。					



電力以外 発生資源		熱	発生しない	発生するが温度がやや低い	発生する
	電力以外		風力発電、太陽光発電	廃棄物発電	FBR、LNG火力、石炭火力、燃料電池
	ギー	水素	発生しない		発生する
			全対象電源		
	N	フレ姿活	地域への影響はない	技術者の往来がある	地域産業発展に貢献がある
	シンド員称		太陽光発電	燃料電池、風力発電	FBR、軽水炉、LNG火力、石炭火力、 廃棄物発電
	-	三十资资	無		有
	E	的土貝瓜	FBR、軽水炉、風力発電、 燃料電池、太陽光発電		石炭火力、LNG火力、廃棄物発電

注記)

(1) 経済性について

- ・ 風力と太陽光以外の電源について、負荷追従性を、ピーク運転可能なもの(負 荷追従運転可能)、ベース運転可能なもの(その中間レベル)として分類した。
- 予備調査については、環境アセスメントが必要となるものは「1 年以下」とした。

(2) 資源供給性について

- 石炭、天然ガス等の専門家ヒアリングを参考にして設定。
   (3) 導入性について
- 研究開発者については、現役大学院生へのヒアリングを参考にして設定。
   (4)電力以外発生資源について
- ・ 副生資源については、石炭火力(石炭灰など) LNG 火力(LNG 冷熱) 廃
   棄物(灰、炭など)を想定。

3.4.5 他電源比較の評価結果と FBR サイクルの開発と導入による効果

3.4.5.1 評価視点ごとの評価結果

他電源比較評価についても、各ケースの特徴を見るために、評価視点ごとの評価値 を(重みを乗ずる前の値として)レーダーチャートにまとめたものを図 3.4.23、図 3.4.24 に示す。

大規模電源比較評価における評価対象である FBR サイクル、石炭火力、LNG 火力、 軽水炉ワンススルー及び軽水炉(再処理あり)は、いずれも実用レベルにある(2030 年を想定)。経済性については、火力発電に比べて原子力の評価がやや高くなってい る。資源供給性では、軽水炉(ワンススルー及び再処理あり)の得点が低くなってい る。また、社会不安定影響低減性、心理的バイアス低減性といった評価視点では、原 子力発電は総じて得点が得られていない。各電源の特性を以下にまとめる。

FBR サイクルは、経済性、資源供給性、環境影響低減性に非常に優れている。また、電力以外発生資源もかなり良好な結果である、ただし、社会不安定影響性、導入性、心理的バイアス低減性については、不利な結果である。

軽水炉の両者は、再処理ありケースの場合でも、FBR サイクルを導入しない想定 の下で評価としたので、ほぼ類似した特性を持つこととなったが、環境負荷低減性は 良好であり、経済性及び導入性もかなり良好である。ただし、電力以外発生資源は、 それほど良好ではないし、資源供給性は FBR 導入を考えなければ必要資源賦存性の 評価結果が低くなるので課題が残る。一般的な可採年数としては天然ガスなどと同程 度(数十年程度)とされているが、埋蔵量の絶対量としては、他の用途にも使用され る天然ガスのほうが大きいため、"発電に必要な資源量/埋蔵量"として算出する本 評価では、評価結果に差が現れている。また、社会不安定影響性と心理的バイアス低 減性は FBR と同様に課題がある。

火力発電の両者も全体として類似した結果となっており、経済性はそれほど良好で ないが、資源供給性、社会不安定影響性、導入性、心理的バイアス低減性は良好であ る。経済性はそれほど良好でないものの、環境負荷低減性の面で課題がある。火力両 者の違いとして、LNG 火力は石炭火力に比べて、資源供給性でやや劣るものの、経 済性、環境負荷低減性と導入性でやや劣るという結果となった。ただし、経済性や導 入性の結果は入力データとして選択したシステムの影響が大きいので、今後調査を継 続する必要がある。

中間評価の段階では、軽水炉システムと FBR サイクルシステムに対する評価結果 を分析することにより、FBR サイクル研究開発と導入による影響を総合的に考察す ることができる。FBR サイクルの開発を行うことは、それなりの物的及び人的資源 を要するので、導入性の面を犠牲にすることになる。しかし、資源供給性を飛躍的に 改善し、研究開発の結果として経済性もかなり改善される。また、環境負荷低減性や 電力以外発生資源の面は若干改善される。他方で、社会不安定影響低減性や心理的バ イアス低減性については、大きな変化はないだろうということになる。火力発電の特 性も併せて考えると、FBR サイクルは、他電源に対して軽水炉単独では劣っている 可能性もある資源供給性を逆転し、環境影響低減性や経済性などの面でもさらに有利 となる可能性を持っているように思われる。この点は、3.4.5.2 で各評価視点を評価 することによって確認したい。また、火力発電の特性と FBR サイクルの特性が異な ることで、両者をミックスすることでより多様な将来社会のニーズに対応できる電源 構成を形作ることが期待できる。

小規模電源比較評価においては、全体として風力発電と廃棄物発電の評価結果が良 好であった。太陽光発電と燃料電池については、今後の開発が必要と考えており、導 入性に課題がある。太陽光発電の経済性評価が他と比較して特に低くなっている。発 電原価の効用関数設定において、他と比較して著しく大きい値を持つ太陽光発電を最 低満足度レベルと設定しており、それによって、他の電源では経済性の得点に差が現 れにくくなっている。また、太陽光発電の電力外発生資源についても、低くなってい る。なお、風力発電の資源供給性は、我が国への導入限界量を考慮した評価となって いる点に留意を要する。



図 3.4.23 評価視点を重み付けしないときの評価結果(大規模電源間の比較)



### 図 3.4.24 評価視点を重み付けしないときの評価結果(小規模電源)

3.4.5.2 各評価視点の重みを付けた評価結果

(1)大規模電源の総合評価結果

想定した将来社会シナリオから各評価視点の重みを付け、大規模電源の総合評価結 果の概要を図 3.4.25 に示す。シナリオごとの評価結果(詳細)を図 3.4.26 に棒グラ フで示す。大規模電源では、軽水炉ワンススルー利用及び軽水炉(再処理あり)が、 安定供給を重視した際(シナリオ )に他シナリオと比較して評価値が小さくなって いる。この結果については、特に軽水炉(再処理あり)の場合でも FBR 導入を考慮 しないため、資源供給性の評価結果が低いこと、また、社会不安定影響性、導入性、 心理的バイアス低減性で不利なことも相まって良い結果が得られていないと解釈で きる。また、石炭火力については、環境を重視するシナリオ において評価値がやや 小さくなっている。FBR サイクルは全般的に優れた結果であるが、環境を重視する 場合(シナリオ )と経済性を重視する場合(シナリオ )では特に良好な評価結果 が得られた。LNG 火力は、平均してかなり良好な結果であり、シナリオに対する依 存性は大きくない。 (2)FBR サイクルの導入効果

3.4.5.1 では、各評価視点の重みを付けない評価結果を用いて各電源の特性について考察したが、シナリオを想定して各評価視点の重みを付けたときの評価結果を用いて、FBR サイクル研究開発と導入による効果を確認したい。

まず、シナリオ に注目したい。このシナリオは、資源供給性を重視している。こ のとき、FBR サイクル導入のない軽水炉単独では資源供給性の面でかなり不利な点 が評価結果に反映される。しかし、FBR サイクルの開発と導入を想定すると、導入 性のマイナス分が経済性や環境影響低減性、電力以外発生資源などの向上でカバーさ れる。さらに、資源供給性が飛躍的に改善されることで火力発電の評価結果と遜色な いレベルまで評価結果が伸びている。シナリオ (環境影響低減性重視)やシナリオ

(経済性重視)では、FBR サイクルの開発と導入による総合評価結果の伸びはシ ナリオ に及ばないものの、元々軽水炉単独でも火力発電と同程度の評価結果を得て いたため、総合評価結果は優れたものとなっている。また、全体的に見て FBR サイ クルを火力発電と組み合せることで、から という多様な将来社会シナリオ(ニー ズ)により適切に対応できる基幹電源構成を期待できることが図 3.4.25 から分かる。

中間評価の段階では、データには不確実性がかなりあるものの、いくつかのシナリ オを考慮して評価した結果として、FBR サイクルは、比較的大規模で長期の研究開 発を要することによる導入性のマイナス分を考慮しても、原子力の劣った特性のかな りの部分を補完し、原子力の優れた特性を伸ばす効果を持つと要約できる。したがっ て、将来社会の不確実性を考慮しても、研究開発を継続して実用化を目指す価値が十 分にあると考える。



### 図 3.4.25 シナリオごとの総合評価結果概要(大規模電源)





#### シナリオ :安定供給重視シナリオ







シナリオ :市場原理重視シナリオ



# 図 3.4.26 シナリオごとの総合評価結果(大規模電源)

(2)小規模電源の総合評価結果

想定した将来社会シナリオから各評価視点の重みを付け、小規模電源の総合評価結 果の概要を図 3.4.27 に示す。シナリオごとの評価結果を図 3.4.28 に棒グラフで示す。 以下で簡単に各発電システムの特性に触れる。

小規模電源では、現状で商業的に実用化段階(またはそれに近い段階)にあるとい える風力発電と廃棄物発電は、今後の性能向上も見込んで高い評価結果を得ているこ とがわかる。ただし、風力発電については、その不安定性のために、安定供給を重視 するシナリオ において評価がやや低めになっている。

太陽光発電と燃料電池は今後の開発が必要であり、導入性などでもやや低めの評価 である。特に太陽光発電にはシナリオへの依存性が見られ、経済性を重視するシナリ オ において評価が大きく下がっている。これは、発電原価がかなり高いことに起因 すると考えられる。燃料電池については、資源供給性に優れる(シナリオ の評価結 果が相対的に良好)ものの、環境影響低減性にも少々課題があり(シナリオ の評価 結果が芳しくない)、他の電源と比較してそれほど良好な結果ではないが、シナリオ 依存性はあまりない。なお、燃料電池については、火力発電と共に用いられることを 想定しており、他の小規模電源と完全に同列で論じられない面も持っている。



# 図 3.4.27 シナリオごとの総合評価結果概要(小規模電源)







シナリオ :市場原理重視シナリオ





3.4.6 他電源比較の評価のまとめと今後の課題

フェーズ 中間評価では、FBR サイクルの導入にあたって、他の電源との競合な どを考える必要があり、FBR サイクルと他の電源の特性を評価することとした。

中間評価では、他電源の比較に関しては、FBR サイクル候補概念よりも広範囲で あるが、それほど詳細ではない評価構造を作成して評価した。また、サイクル機構で 設計を行なっていない電源の評価を実施することから、データの入手なども難しく、 定量的評価よりも段階的(定性的)評価を中心とした試算を実施した。

大規模電源間で比較した対象である FBR サイクル、石炭火力、LNG 火力、軽水炉 ワンススルー及び軽水炉(再処理あり)については、大規模電源比較評価における評 価対象である FBR サイクル、石炭火力、LNG 火力、軽水炉ワンススルー及び軽水炉 (再処理あり)は、いずれも実用レベルにあるものであり、経済性については概ね同 等の得点となっている。資源供給性では、軽水炉(ワンススルー及び再処理あり)の 得点が突出して低くなっている。また、社会不安定影響低減性、心理的バイアス低減 性といった評価視点では、原子力発電は総じて評価結果が芳しくない。

また、大規模電源間比較評価結果を用いて、FBR サイクル研究開発と導入による 影響を総合的に考察した。FBR サイクルの開発を行うことは、それなりの資源を要 して、導入性の面を犠牲にすることになる。しかし、複数の将来社会シナリオを想定 して評価したとき、軽水炉単独では火力発電に比べて劣っていた資源供給性を FBR サイクルの開発・導入によって逆転し、もともと原子力が優れている環境影響低減性 や経済性などの面でも、さらに良好な結果が得られた。また、電力以外発生資源の面 でも火力発電の優れた性能に迫る可能性も持っており、FBR サイクルは、比較的大 規模で長期の研究開発を要する点を差し引いても、原子力の劣った特性のかなりの部 分を補完し、原子力の優れた特性を伸ばす効果を持つ電源であると要約できる。さら に FBR サイクルを火力発電と組み合せることで、多様な将来社会によりよく対応可 能な基幹電源を構成できる可能性も大きくなる。したがって、FBR サイクルは、将 来社会の不確実性を考慮しても、研究開発を継続して実用化する価値を持っている。

小規模電源間で比較した結果、廃棄物発電と風力発電の結果が良好だったが、この 両者は、ほぼ実用段階に到達しており、全ての評価視点でまんべんなく高評価を得て いる発電システムであったためと考えられる。太陽光発電には経済性、導入性、電力 以外発生資源に課題があり、燃料電池については、環境影響低減性、導入性に課題が ある。ただし、燃料電池については、火力発電と共に用いられることを想定しており、 他の小規模電源と同列で論じにくい面もあった。

今後は、より適切な比較を実施できるように、必要な指標の付加および不要な指標 の削除等を実施することで評価構造の整理・改良などを行いたい。設計の進捗状況を 勘案して、中小規模 FBR を比較対象にすることも検討する。また、軽水炉と FBR サイクルは一連の電源として比較すべきであるという議論、あるいは、比較対象とし て他のエネルギー源も対象とすべきという議論もあるので、比較対象をよく吟味した 上で、フェーズ 最終評価を実施したい。また、評価用データの精度の向上が必要な ので、エネルギー関連動向の収集を継続してデータを見直していきたい。 [参考文献]

- [1] 小西康哉他:目標達成度評価システムによる評価の実施、三菱総合研究 所、報告書番号未定(2004)
- [2] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張()、三菱総合研究所、 JNC TJ9400 2003-007 (2003)
- [3] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2002-003 (2002)
- [4] 篠田佳彦他:総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ)
   成果報告 、核燃料サイクル開発機構報告書、JNC TN9400 2001-061
   (2001)
- [5] 芝剛史他:FBR 研究開発に関する投資対効果評価システム概念の構築、 三菱総合研究所、JNC TJ9400 99-006(1999)
- [6] 芝剛史他: FBR 研究開発の投資対効果評価システムの詳細検討、三菱 総合研究所、JNC TJ9440 2000-011 (2000)
- [7] 芝剛史他:投資対効果評価システムの開発、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2001-018 (2001)
- [8] 塩谷洋樹他:FBR サイクル研究開発の投資対効果評価(研究報告)、核 燃料サイクル開発機構報告書、JNC TN9400 2002-048(2002)
- [9] 総合資源エネルギー調査会 総合部会:エネルギーセキュリティワーキ ンググループ報告書、(2001)
- [10] 通産省: "原子力発電の経済性について"、総合エネルギー調査会原子力 部会、第70回、資料3、(1999)
- [11] 東京電力株式会社: "TEPCO: プレスリリース | 富津火力発電所 3 号 系列(第4軸)の営業運転開始について ~世界最高水準の熱効率 50% を実現するとともに、 建設費の約3割のコストダウンを達成"、東京電 カホームページ、(http://www.tepco.co.jp/cc/press/01070901-j.html)、 (2001)
- [12] 東京電力株式会社: "TEPCO: プレスリリース | 千葉火力発電所 1・2
   号系列の完成について 世界最高水準の熱効率 49%を実現するとと
   もに、発電所全体で大幅なコストダウンを達成 "、東京電力ホームページ、(http://www.tepco.co.jp/cc/press/00061501-j.html)、(2000)
- [13] 佐藤治他:我が国における二酸化炭素削減戦略と原子力の役割、 JAERI-Research99-015、(1999)
- [14] 石油連盟:石油資料月報(1990~2004)
- [15] IEA: World Energy Outlook: 2002, (2003)
- [16] 経済産業省:"バックエンド事業全般にわたるコスト構造、原子力発電 全体の収益性等の分析・評価~コスト等検討小委員会から電気事業分科 会への報告~"、総合エネルギー調査会電気事業分科会コスト等検討小 委員会、(2004)
- [17] (財)省エネルギーセンター:エネルギー・経済統計要覧 2002、(2003)
- [18] 財務省: 財務省貿易統計、(1998~2004)
- [19] オイル&ガスジャーナル 2000 年 12 月号、(2000)

- [20] 資源エネルギー庁長官官房総合政策課編:総合エネルギー統計平成 13 年度版、(2000)
- [21] 東京電力株式会社: 数表で見る東京電力、(2004)
- [22] OECD: "EMISSION CONTROLS", (1988)
- [23] OECD: "ENERGY BALANCES", (2004)
- [24] 電力中央研究所:電中研ニュース No.338、(2004)
- [25] OECD/NEA and IAEA: "Uranium 2003: Resources, Production and Demand", (2004)
- [26] 関 和市:風力発電の現状と課題、(2000)
- [27] 新エネルギー・産業技術総合開発機構:大型風力発電システムの開発(風 況観測)、(1993)
- [28] 新エネルギー・産業技術総合開発機構:風力発電導入ガイドブック、 (1998)
- [29] 産業技術審議会エネルギー・環境技術開発部会太陽エネルギー分科会中 間報告(新エネルギー・産業技術総合開発機構作成): ニューサンシャ イン計画における太陽光発電技術開発の今後の進め方、(1997)
- [30] 総合資源エネルギー調査会 総合部会:報告書、(2001)
- [31] シーメンス・ウェスティングハウス社ホームページ (http://www.siemensewestinghouse.com/en/fuelcells/benefits/index .cfm)
- [32] 新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー導入ガイ ドブック、(2003)
- [33] 環境省:平成 16 年度第 3 回地球温暖化対策技術検討会、資料 1、(2004)

#### 3.5 多面的評価のまとめと今後の課題

将来、我が国が実用化すべき有望な FBR サイクル候補概念を明確化するために、 多面的な視点から FBR サイクルシステムの特性を評価した結果について説明した。 特に候補概念間を比較評価する場合と FBR サイクルシステムと他の電源システムを 比較評価することも試み、中間評価では、開発した評価手法を用いて評価した。

FBR サイクル候補概念間比較に関しては、安全性、経済性、環境負荷低減性、資源 有効利用性、核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性という7つの評価視点から 特性を評価した。また、将来の我が国の基幹電源として、必要なニーズを満たすとい う観点から将来の社会シナリオを想定し、その社会シナリオを基にして評価視点の重 みを付け、フェーズ 中間とりまとめ時における各 FBR サイクル候補概念を総合的 に比較検討した。

原子炉プラントシステムを変えたときの結果は以下のとおりである。ナトリウム冷 却炉を用いる FBR サイクルは、各評価視点での評価結果が良好であり、評価視点の 重みを付けて総合的に評価しても、やはり良好な結果が得られている。鉛ビスマス冷 却炉を用いる FBR サイクルは、技術的実現性と社会的受容性の面で課題があるもの の、経済性については良好であり、資源有効利用性もかなり良い性能を持っている。 ヘリウム冷却炉を用いる FBR サイクルも、鉛ビスマス冷却炉を用いる FBR サイクル と類似した特性を有しており、技術的実現性や社会的受容性の面では課題があるもの の、経済性や資源有効利用性でカバーする結果となった。逆に水冷却炉を用いる FBR サイクルは、経済性と資源有効利用性の面では課題があるが、技術的実現性と社会的 受容性の良さがカバーしている。

燃料サイクルシステムを変えたときの結果には、炉型を変えたときほどの差が出な かったが、規模の経済効果により小規模システムと大規模システムの間で差が生じた。 全てナトリウム冷却炉で処理量を小規模(50tHM/y)にしたとき、MOX 燃料を先進 湿式で再処理し、簡素化ペレット法で製造する場合には、経済性の面では若干課題が あるものの、技術的実現性の面で良好であることが特徴である。同じく MOX 燃料を 超臨界直接抽出再処理し、簡素化ペレット法を製造する場合には、技術的実現性や環 境負荷低減性の面で少々悪化するものの、経済性の面が改善されることになる。また、 MOX 燃料を酸化物電解法で再処理し、振動充填法で燃料製造する場合には、技術的 実現性と社会的受容性の面で課題があるが、さらに経済性を改善できる可能性がある。 金属燃料を金属電解法で再処理し、射出成型法で製造する場合には、それほど技術的 実現性と社会的受容性が悪化せずに経済性がかなり良好となる。また、資源有効利用 性の面はよい結果となる。

FBR サイクルシステムと他電源システムとの特性比較にあたっては、FBR サイク ル候補概念間の比較と異なり、より多様なシステムの特性を評価する必要がある。そ のため、評価視点を(より広範な意味での)経済性、資源供給性、環境影響低減性、 社会不安定影響性、導入性、心理的バイアス低減性、電力以外発生資源と変更して、 データの定量性を犠牲にする面はあるものの、質的な違いを広範な観点から比べられ る評価手法を策定した。

他電源との比較に関しては、FBR サイクル候補概念間の比較と同様、将来社会のニ ーズを端的に示すことができるように将来社会シナリオを4つ想定し、各評価視点の 重みを付けて総合的に比較した。大規模基幹電源同士の結果からは、FBR サイクルは 火力発電や LWR サイクルなどの他の基幹電源と比較しても、心理的バイアス低減性 や社会不安定影響性などで課題があるものの、環境影響低減性、資源供給性や経済性 で優れていること、その結果として、将来社会の想定によって総合的な評価結果には 若干の変化が見られるものの、競争力のある発電システムと考えられることが示され た。中小規模電源については、設計の進捗状況から FBR サイクルを中間評価の評価 対象に含めなかった。しかし、フェーズ 最終評価に向けて、基幹電源とは社会の中 で求められる役割が異なることを勘案し、基幹電源用の評価手法(評価構造や評価基 準)を変更することにより、中小規模電源の特性を評価する手法を構築した。

これまでの作業により、将来社会のニーズを考慮して FBR サイクルの特性を多面 的に評価する手法の原型が整い、実際に多面的評価を実施できることが示された。多 面的評価を実施することは、事前の準備・検討を行った上で多量のデータを必要とす るので、決して簡単ではない。しかし、現在のように公共事業(科学技術政策に関す る事業を含む)が社会に多様な影響を及ぼし、その事業を一面的な基準で設計して判 断することが適切ではなくなっている時代において、多面的評価は、FBR サイクルの 研究開発戦略策定へ適用するだけに留まらず、さまざまな社会的意思決定への応用可 能性を有していると考える。

多面的評価に関する今後の課題として、中間評価では、資源有効利用性や技術的実 現性などを例外として平衡サイクル期の性能を中心に FBR サイクルの特性を評価し たが、研究開発から導入、そして平衡多重サイクルの実現といった FBR サイクルに 関連する全ての側面を考慮した評価を行い、最終評価において、有望な FBR サイク ル候補概念を示していくことを目指したい。具体的には、導入シナリオに合わせた FBR サイクル特性の明示化と評価、社会のニーズを踏まえた評価視点の重み付け手法 を洗練することなどが重要であると考える。さらに、各評価指標の評価手法について も、改良することを検討する。経済性における投資リスクの取り込みや感度解析、技 術的実現性及び社会的受容性の評価構造や評価指標では、人文・社会科学分野知見を 取り入れて評価に取り組む予定である。また、他電源比較評価手法の整備も進めて、 多様な電源と比較しながら社会における FBR サイクルの意義を多面的に示すことと したい。特に小規模電源については、具体的な FBR サイクルシステムと他の小規模 電源との比較評価を試みる予定である。 4. FBR サイクル導入シナリオ

原子力は、化石燃料資源の温存や地球温暖化の抑制およびエネルギー安全保障 の確立などに効果的な技術選択肢である。このような特長をもつ原子力の長期利 用を目指した FBR サイクル実用化戦略調査研究では、安全性・経済性・環境負荷 低減性・資源有効利用性・核拡散抵抗性についてそれぞれ開発目標と設計要求を 設定し、フェーズ 中間評価までに 22 ケースの FBR サイクル候補概念について 検討を行ってきた。各候補概念独自の潜在的ポテンシャルや開発目標に対する 個々の達成度については、第3章で述べたとおりである。本章では、原子炉およ びサイクル施設の将来計画に関するシナリオを描き、フェーズ 前半までに検討 された FBR サイクル候補概念を対象としたサイクル諸量解析を行い、各シナリオ の核物質や廃棄物の物質収支から将来課題や FBR サイクルの役割、有望概念の導 入方策や運用方法などについて提案する。

なお、本章における検討手順を以下に示す。

- (1) 原子力利用の将来課題を抽出し、課題回避あるいは影響緩和に適した核燃料サ イクル全体像と FBR サイクルに期待される役割を明らかにする。
- (2) また、各 FBR サイクル候補概念の特徴を踏まえた核燃料サイクルの将来シナ リオを描き、国内全体や国内地域別、世界全体といった想定規模が異なるサイ クル諸量解析を行い、原子力の持続的かつ効果的な利用につながる導入方策や 運用方法を検討・評価する。

4.1 将来の原子力利用オプションと課題

原子力の長期利用を目指すうえで、燃料資源の持続的安定供給と放射性廃棄物な どの環境負荷対策の両輪が有効に機能するシステム概念が望まれる。

原子力で消費している天然ウラン資源は化石燃料と同様有限であり、OECD/NEA の報告によれば陸上の天然ウラン究極資源量は未発見資源を含め約1,620万トンU とされている<sup>[1]</sup>。この陸上ウラン資源の需要量や供給見通しについて小野ら<sup>[2]</sup>や市村 ら<sup>[3]</sup>は世界規模のサイクル諸量解析を行い、IIASA/WEC(1998)の原子力発電予測ベ ースで軽水炉利用が続いた場合には世界の天然ウラン累積需要量は21世紀後半に 究極資源量を上回ると評価し、その影響緩和のためには今世紀前半にFBRの導入が 必要であると提案している。また、海水ウラン利用を提案する須郷ら<sup>[4]</sup>は、海水中 の溶存ウラン捕集技術が低コスト化すれば軽水炉燃料の国産化や長期安定供給が期 待できるとしている。一方、使用済燃料貯蔵施設や放射性廃棄物最終処分場が確保 できない場合には発電規模の縮小や運用期間の短縮につながり得るため、使用済燃 料や放射性廃棄物を安全かつ効率的に収容する貯蔵・処分技術の導入が不可欠であ る。

この 4.1 節では、将来選択し得る原子力利用オプションの課題をサイクル諸量解 析の視点からクローズアップする。

4.1.1 原子力利用オプションの計算条件

(1) 将来の原子力利用オプション

図 4.1.1 は、将来選択し得る原子力利用の道筋を6つの原子力利用オプションに 大別した例である。また、表 4.1.1 は各原子力利用オプションの炉型・フロントエ ンド・バックエンドに関する想定条件である。ちなみにオプション は陸上ウラン のみで軽水炉を運用し、使用済燃料は直接処分する想定である。オプション は陸 上ウランが枯渇した後も海水ウランを用いて軽水炉をワンススルーで運用し続ける。 オプション と では軽水炉と軽水炉プルサーマルを併用し、混合酸化物使用済燃 料は直接処分する。オプション と では FBR を導入し、FBR 使用済燃料ととも に軽水炉の濃縮ウラン使用済燃料と混合酸化物使用済燃料の多重リサイクルを行う。 なお、オプション の FBR 導入開始時期は 2050 年とし、その間に軽水炉使用済燃 料から回収された Pu は軽水炉プルサーマルで消費する。一方、オプション では FBR 導入開始時期を 2030 年とし、軽水炉使用済燃料から回収した Pu は全て FBR の初装荷燃料や取替燃料に用いるため、軽水炉プルサーマルを濃縮ウラン燃料に戻 すことを想定している。



### 図 4.1.1 将来想定される原子力利用の選択肢

オプション	炉型・フロントエンド	バックエンド
	軽水炉&陸上ウラン利用	直接処分
	軽水炉&海水ウラン利用	直接処分
	軽水炉&陸上ウラン利用 プルトニウム利用	モノリサイクル (残りは直接処分)
	軽水炉&海水ウラン利用 プルトニウム利用	モノリサイクル (残りは直接処分)
	軽水炉&プルトニウム利用 FBR 導入(2050 年~)	多重リサイクル
	軽水炉&プルトニウム利用 FBR 導入(2030 年~)	多重リサイクル

表 4.1.1 原子力利用オプションの想定条件

### (2) 計算方法

()解析コード

サイクル諸量解析に使用する FAMILY-21 は、任意に設定した原子力発電設備 計画を基に核燃料サイクル内の物質収支(天然ウラン需要量、プルトニウム需給 量、マイナーアクチニド量、炉型別使用済燃料の発生量や再処理量など)の年度 展開を 2000 年から 2200 年までの 200 年間に渡って計算するサイクル諸量評価 コードである。この FAMILY-21 の特徴は、中性子照射や崩壊による核燃料物質 の組成変化をプログラム内部で適宜計算しているため、多重サイクルにおける TRU 組成変動の影響を考慮したうえで核燃料サイクルの導入計画や運用方法が シミュレートできる。なお、FAMILY-21の詳細については前記 2.4 節のサイクル 諸量評価手法を参照されたい。

()想定条件

(a)原子力発電設備容量

原子力発電設備容量の想定条件を図 4.1.2 に示す。図 4.1.2 は、平成 15 年度 電力供給計画として資源エネルギー庁が昨年4月に公表した原子力開発計画<sup>[5]</sup>を ベースに、その後の計画凍結(巻1号機、珠洲1・2号機)や計画変更(大間、 島根3号機の運開延期)を反映している。また、2020年以降の単位設備容量は大 型化を視野に入れて 1,500MWe/基と仮定し、第一世代のリプレースが完了する 2080年以降の総設備容量は 67.5GWe 一定とした。

なお、第1サイクルにおける設備容量の変動は、2020年以降の単位設備容量を 1,500MWe/基としたため廃止容量と新設容量のミスマッチによって生じた。さら に FBR の導入を想定したオプション と では、前述の原子力開発計画に「も んじゅ」(280MWe)とパイロットプラント(500MWe)を考慮する。



図 4.1.2 原子力発電設備容量とリプレース計画の想定条件

(b)ウラン資源制約

ウラン資源制約は、海水ウランを軽水炉燃料に使用するオプション と では 考慮しないが、陸上ウランのみを軽水炉燃料とするオプション と で用いる。 このウラン資源制約の想定条件については、わが国で将来利用可能な陸上ウラン 資源割合は『世界の原子力発電累積電力量に占める日本の割合に比例する』もの と仮定し、IIASA/WEC(1998)の原子力発電予測に基づく図 4.1.3 より 1990 年~ 2030年までは約10%、1990年~2080年頃までは約5%と外挿した。これらから、 わが国で利用可能な陸上ウラン資源量を2030年頃は既知資源の10%(約39万 トンU) 2070年~2090年頃は究極資源の5%(約81万トンU)と仮定した。



図 4.1.3 世界の原子力発電累積電力量に占める日本の割合

(c)原子炉およびサイクル施設の導入条件

原子炉導入条件

原子炉導入条件を表 4.1.2 に示す。2019 年以前に運転開始予定の軽水炉の炉心 取出燃料の平均燃焼度は、現行プラントを基に 4.5 万 MWd/t(BWR)~4.9 万 MWd/t(PWR)と想定した。また、2020 年以降に運転を開始する軽水炉は高燃 焼度タイプ(燃焼度6万 MWd/t)の ABWR と APWR を想定した。軽水炉のプ ルサーマル利用は 2010 年度までに 16 基~18 基で実施するものとし、2010 年度 以降については核分裂性プルトニウム貯蔵量に留意しながら導入規模を調整する。 軽水炉の設備利用率については、現行プラントは 80%、2020 年以降に運転を開 始する ABWR と APWR は 90%とした。

一方、FBR については、実用化戦略調査研究のフェーズ 前半に検討されたナ トリウム冷却大型 MOX 炉心(燃焼度約 15 万 MWd/t、増殖比 1.16 程度、設備利 用率 93%)を代表例とした。「もんじゅ」は燃焼度 8 万 MWd/t、設備利用率 71% としている。 原子炉耐用年数は、高経年化対策の実施により長寿命化が図られるものと仮定 し、炉型を問わず一律 60 年とした。耐用年数が経過した軽水炉は、原子力利用 オプションに応じてリプレースの想定条件が異なる。すなわち原子力利用のフェ ードアウトを想定したオプション と では、陸上ウランを消費し尽した時点で 全ての軽水炉が寿命廃止に至るようリプレースを制限し、海水ウランを利用する オプション と では、耐用年数が経過した軽水炉は廃止され、随時新たな軽水 炉としてリプレースされる。また、FBRを導入するオプション と については、 FBR の本格導入開始後に廃止される軽水炉は、FBR の初装荷用炉心燃料と交換 用炉心燃料に用いる核分裂性プルトニウムの貯蔵量に応じて、FBR もしくは軽水 炉のどちらかがリプレースの対象になる。

	軽水炉	FBR		
BWR	燃焼度 4.5 万 MWd/t BWR 設備利用率 80% 2019 年以前運開		燃焼度8万 MWd/t、設備利用率71% ナトリウム冷却MOX 燃料炉心、増殖比1.22 2005 年運転~2045 年廃止	
PWR	燃焼度 4.9 万 MWd/t 設備利用率 80% 2019 年以前運開	パ <sup>°</sup> イロットプ <sup>°</sup> ラント 500MWe	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.16 2018 年運転開始(オプション ) 2030 年運転開始(オプション))	
ABWR、 APWR	燃焼度 6.0 万 MWd/t 設備利用率 90% 2020 年以降運開	実用炉 (高増殖型)	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心、増殖比1.16 2030 年導入(オ <sup>プ</sup> ション ) 2050 年導入(オ <sup>プ</sup> ション )	
1/3MOX 炉心	燃焼度 U02 炉心と同じ 設備利用率 同上 2007 年導入(オプション ~ )	実用炉 (低増殖型)	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心、増殖比1.04 プ ルトニウム需給バランスに応じて適宜導入	
<b>フル</b> MOX 炉心 1,383MWe	燃焼度 4.5 万 MWd/t 設備利用率 90% 2012 年運開(オプション ~ )	【備考】	軽水炉プルサーマルの導入規模は、核分 裂性プルトニウム貯蔵量に応じて調整。 商業炉の耐用年数は全て 60 年と仮定。	

表 4.1.2 原子炉導入条件

### サイクル施設の導入条件

サイクル諸量解析におけるリサイクル施設の導入条件を表 4.1.3 に示す。サイ クル諸量解析では、原子炉から取り出された使用済燃料が再処理施設や燃料加工 施設を経て再び原子炉へ装荷されるまでの所要時間を炉外サイクル時間と称し、 各施設で核燃料物質が減損する割合を工程ロス率(以後、「ロス率」という)と呼 ぶ。炉外サイクル時間とロス率は、再処理施設の設備容量(使用済燃料年間処理 量)と並んで Pu の増殖性に影響を及ぼす主要な計算条件である。

軽水炉サイクルの炉外サイクル時間は、原子炉取出燃料の冷却4年、再処理1 年、燃料加工1年の合計6年とし、FBRサイクルの炉外サイクル時間は、原子炉 取出燃料の冷却3年、再処理と燃料加工がそれぞれ1年で合計5年としている。 ロス率については、軽水炉サイクルはOECD/NEAの公表値<sup>[6]</sup>を参考にして再処 理 2.0%、転換 0.5%および燃料加工 1.0%とし、FBR サイクルは実用化戦略調査 研究フェーズ 前半の検討結果を踏まえて再処理 0.3%、燃料加工 0.1%とした。

再処理施設の年間処理容量については、軽水炉再処理は六ヶ所再処理施設 800 トン/年の後継施設として同一処理量の第2軽水炉再処理施設(オプションの 場合は1200トン/年)を想定した。一方、FBR 再処理施設の初号機では軽水炉 MOX 燃料を並行的に再処理するため処理量 200トン/年としている。

なお、再処理施設の耐用年数は軽水炉サイクルおよび FBR サイクルとも 40 年 とし、燃料加工施設など他のサイクル施設には制限を設けない。

項目	対象	想定条件							
帅从#771时期	軽水炉サイクル	6年(原子炉取出 再処理4年、再処理 Pu 貯蔵1年、加工 装荷1年)							
※ シドリインル中子目	FBR サイクル	5年(原子炉取出 再処理3年、再処理 Pu 貯蔵1年、加工 装荷1年)							
丁印ロフ安	軽水炉サイクル	燃料加工 1.0%、再処理 2.0%、転換 0.5%							
上住ロス学	FBR サイクル	燃料加工 0.1%、再処理 0.3%、転換 -							
	サイクリ機構市海	2001 年 ~ 2010 年の年間処理量 90t /y							
	リイクル機構束海	2011 年廃止(オプション 、 の場合は 2004 年廃止)							
		2005年210 t/y、2006年360 t/y、2007年480 t/y、							
軽水炉再処理	六ヶ所再処理施設	2008 年 640 t/y、2009 年以降 800 t/y、2046 年廃止							
		(オプションとの場合は運転凍結)							
	笠っ起水炉市加田佐設	2046 年運開、MA 分離工程有							
	第2 輕小炉再処理爬設	処理規模 1200 t /y(オプション , ),800 t /y(オプション )							
	軽水炉 MOX 燃料再処理	FBR 再処理施設の余剰力で再処理する。							
CDD 市加田		2050 年運開(オプション )) 2030 年運開(オプション )							
FDK 丹処理	FBR 使用済燃料再処理	初期設備容量は軽水炉 MOX の混合再処理を考慮し 200 tHM/y。							
		その後は先進湿式再処理ユニット 50t/y で処理量増加を図る。							

表 4.1.3 サイクル施設の導入条件

4.1.2 原子力利用オプションの計算結果

(1) オプション

図 4.1.4 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

ウラン資源制約(究極資源5%、約81万トンU)の下で陸上ウランのみを軽 水炉ワンススルーで利用する場合は、2044年からリプレースを伴わない廃止措置 が相次ぐため徐々に減少し、2102年に全ての軽水炉が寿命廃止となる。

() 天然ウラン累積需要量

2001年を起点とする天然ウラン累積需要量は 2030年頃に既知資源の 10%(約 39万トンU)を超え、今世紀末に究極資源の 5%(約 81万トンU)に達する。

( )使用済燃料貯蔵量
 軽水炉使用済燃料貯蔵量は約半世紀後に米国のユッカマウンテン(貯蔵量約7
 万トン)規模相当に増大し、軽水炉がフェードアウトする 2100 年頃には9万4
 千トン程度になる。



図 4.1.4 原子力利用オプション①の計算結果

(2)オプション

図 4.1.5 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

海水ウランを用いるオプション ではウラン資源制約を受けないため、軽水炉 ワンススルーによる原子力利用が来世紀以降も期待できる。

() 天然ウラン累積需要量

軽水炉をワンススルーで利用し続けた場合の天然ウラン累積需要量は、オプション と同様 2030 年頃に既知資源の 10%(約 39 万トン U)を超え、その後も 停滞することなく増え続けて 2070 年頃に究極資源の 5%(約 81 万トン U)に達 し、2100 年には約 130 万トン U、2200 年では約 270 万トン U にのぼる。 ()使用済燃料貯蔵量

軽水炉ワンススルーにおける使用済燃料貯蔵量は、約半世紀後に米国のユッカ マウンテン(貯蔵量約7万トン)規模相当に達した後も増え続け、2100年頃には 約12万トン、2200年頃には約24万トンに到達する。





(3) オプション

図 4.1.6 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

海水ウランを利用しない点はオプション と同じであるが、オプション では 六ヶ所再処理施設の回収 Pu による軽水炉プルサーマル運転を想定している。

回収 Pu を利用した場合の原子力利用の延長年数はプルサーマル運転時の総発 電設備容量で異なるが、今回の想定条件では6年程度(設備容量換算で約 400GWe・年)の利用延長が期待される。

() 天然ウラン累積需要量

天然ウラン累積需要量の全体傾向は概ねオプション と同様であるが、既知資源 10%(約39万トンU)あるいは究極資源5%(約81万トンU)への到達時期 がそれぞれ5年程度延びている。

()使用済燃料貯蔵量

再処理施設運用期間中の増加量は年間平均350トンに抑えられているが、再処理施設廃止後は年間平均700トン程度の規模で増加し、軽水炉フェードアウト後の使用済燃料貯蔵量は軽水炉MOX燃料を含め約6万9千トンと見込まれる。

なお、オプションの軽水炉ワンススルーとの比較では、軽水炉再処理により約2万5千トンの使用済燃料貯蔵量の削減が期待される。



図 4.1.6 原子力利用オプション③の計算結果

(4) **オプション** 

図 4.1.7 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

オプション では海水ウラン利用と回収 Pu 利用を併用しており、第2 軽水炉 再処理施設(年間処理量 1200 トン)の回収 Pu による軽水炉プルサーマル規模は 22GWe 程度と見込まれる。

() 天然ウラン累積需要量

オプション では、軽水炉プルサーマルの導入効果によって既知資源 10%(約 39 万トン U)および究極資源 5 %(約 81 万トン U)の到達時期がオプション よりもそれぞれ 5 年~10 年程度延び、さらに 2200 年時点の天然ウラン累積需要 量を比べると約 55 万トンの資源節約につながっている。

()使用済燃料貯蔵量

濃縮ウラン使用燃料貯蔵量(グラフ中の LWR-UOX)は、第2軽水炉再処理施 設の年間処理量を1200トンに増強しているため2050年頃をピーク(約2万2 千トン)に徐々に減少し、来世紀末には1000トン台を下回ると見られる。一方、 軽水炉プルサーマルから排出される混合酸化物燃料(グラフ中のLWR-MOX)の 貯蔵量は2100年時点で約1万トン、2200年時点で約2万3千トンに達する。





(5) オプション

図 4.1.8 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

2050 年に FBR を導入するオプション では、六ヶ所再処理施設の回収 Pu に よる軽水炉プルサーマル運転を 2044 年まで継続する。その後、軽水炉再処理施 設から回収した Pu は FBR の炉心燃料加工に供する。本解析では、高増殖型 FBR (資源重視型炉心)を優先的に導入しているが、2075 年頃から低増殖型 FBR(経 済性重視型炉心)が加わりはじめ、2090 年以降に導入する FBR は概ね低増殖型 が占める。

なお、本解析では第2軽水炉再処理施設の年間処理量をオプション と同じく 1200トンに増強しているため、軽水炉からFBRへの円滑な移行や低増殖型FBR の早期導入につながった。

() 天然ウラン累積需要量

天然ウラン累積需要量は、軽水炉から FBR への移行期間が比較的短かったた め約85万トンUにとどまり、ウラン資源制約(究極資源5%、約81万トンU) との差は約5%増に抑えられている。ちなみに第2軽水炉再処理施設の年間処理 量を六ヶ所再処理施設と同じく800トンとした場合、天然ウラン累積需要量は97 万トンに増大する。

()使用済燃料貯蔵量

濃縮ウラン使用済燃料貯蔵量は、年間処理量 1200 トンの第2 軽水炉再処理施 設の採用や軽水炉から FBR へのリプレースによって最大時でも約2万3 千トン にとどまる。また、年間 1200 トンで再処理し続けた場合、来世紀初頭には全て 処理を終える。一方、軽水炉混合酸化物燃料は FBR 再処理施設で 2070 年頃まで に全て処理される。参考までに、第2 軽水炉再処理施設の年間処理量を六ヶ所再 処理施設と同じく 800 トンとした場合、濃縮ウラン使用済燃料の再処理完了時期 は 2150 年頃に延びる。





(6) オプション

図 4.1.9 にオプション の原子力発電設備容量、天然ウラン累積需要量、使用済 燃料貯蔵量を示す。

()原子力発電設備容量

オプション では、2030年に FBR を導入するため軽水炉プルサーマルの運用 は 2024年までとし、その後、六ヶ所再処理施設で回収した Pu は FBR の炉心燃 料加工に供する。FBR 導入開始から約 60 年間は高増殖型 FBR が主体となり、 2090年頃から低増殖型 FBR に移行しはじめる。本解析では、第2軽水炉再処理 施設の年間処理量を六ヶ所再処理施設と同じく 800トンとしているが、ちなみに 年間処理量を 1200トンに増強すると 2070年頃から低増殖型 FBR が加わり、2110 年頃には全て FBR に置き換わる。

- () 天然ウラン累積需要量
   天然ウラン累積需要量は、ウラン資源制約を約 10 万トン U 下回る約 71 万トン U が見込まれる。
- ()使用済燃料貯蔵量

六ヶ所再処理施設および第2軽水炉再処理施設を年間処理量800トンで運用し 続けた場合、濃縮ウラン使用済燃料貯蔵量は2060年頃をピーク(約2万5千トン)に徐々に減少し、2120年頃には全て再処理される。



図 4.1.9 原子カ利用オプション⑥の計算結果

4.1.3 原子力利用オプションの考察

- (1) 軽水炉使用済燃料直接処分(オプション、同)
  - ウラン資源制約を究極資源5%(81万トンU)とした場合、陸上ウランのみ を利用するオプション は2100年頃に原子力発電が全廃となり、しかも米国 ユッカマウンテン処分場の約 1.3 倍程度の使用済燃料直接処分場が必要にな る。
  - 海水ウランを利用するオプションは、基本的にウラン資源制約を受けないため原子力の長期利用が期待できるものの、使用済燃料直接処分場の規模が2100年に約12万トン、2200年では約24万トンに達するため、直接処分場の確保が原子力利用を継続するうえでの課題となる。
- (2) 軽水炉プルサーマル導入(オプション、同)
  - ウラン資源制約の下で陸上ウランと回収 Pu を併用するオプション では、軽水炉の利用期間はプルサーマルの導入によって 10 年程度延びるが、来世紀初頭には全廃となる。また、米国のユッカマウンテン処分場相当の使用済燃料直接処分場が必要になる。
  - 海水ウランと軽水炉プルサーマルを併用するオプション では、軽水炉再処理 とプルサーマル導入を積極的に進めることで、濃縮ウラン使用済燃料貯蔵量や 海水ウラン採取量の削減が期待できる。しかし、プルサーマル使用済燃料貯蔵 量は2100年で約1万トン、2200年には約2万3千トンに及ぶため、この直 接処分場の確保が将来課題として想定される。
  - また、陸上ウランが枯渇した後、全ての軽水炉を海水ウランと回収 Pu で賄う 場合のウラン需要量は年平均 1.1 万トン U と見込まれる。この需要に見合う 海水ウラン生産用海洋施設面積を東京電力の概念設計<sup>[7]</sup>に基づいて試算する と約 110 k m<sup>2</sup>になり、これは茨城県大洗町から同県波崎町に至る海岸線(距離 約 95km)の沿岸から沖合 1.2km までの海域に概ね相当する。海水ウラン利 用の課題はコスト低減と並んで、長大な海洋施設が海上交通・沿岸漁業・観光 産業などに及ぼす影響についても考慮する必要がある。

(3) FBR 導入 (オプション 、同 )

- FBR 導入開始が 2050 年のオプション、同じく 2030 年のオプションの天然ウラン累積需要量は概ねウラン資源制約を満たす。
- また、軽水炉使用済燃料中間貯蔵量のピークは、それぞれ2万3千トンと2 万5千トンと見込まれるが、年間800トン~1200トンで再処理し続けた場合には来世紀初頭に全て処理される。

4.2 FBR サイクルの導入意義

冒頭で原子力は化石燃料資源の温存や地球温暖化抑制およびエネルギー安全保障 の確立などに効果的な技術選択肢であると述べた。ここでは原子力がフェードアウト した場合の影響を直近のエネルギー統計データ(2000年度)に基づいて考察し、その 後、原子力を積極的に活用した場合の可能性と FBR サイクルの導入意義について述 べる。

4.2.1 原子力フェードアウトの影響と代替技術

(1) 原子力廃止による一次エネルギー自給率低下と CO<sub>2</sub> 排出量増加

わが国の 2000 年度における一次エネルギー自給率は約 19%であり、そのうち準 国産エネルギーに位置付けられている原子力の割合は約 13%(約 69 百万 toe 1)で 自給率全体の約 6 割を占める。また、原子力は発電部門全体の一次エネルギー供給 量約 230 百万 toe の約 30%を占める。仮に原子力発電を LNG 火力で代替した場合、 発電部門の天然ガス消費量は約 37 百万トンから約 90 百万トンに倍増し、天然ガス 輸入量は 2000 年時点で輸入量世界第一位の米国(約 75 百万トン)を凌ぐ規模とな り、一次エネルギーの海外依存度がより一層高くなる。一方、電気事業者の CO<sub>2</sub> 排出量は約 86 百万トン-C(2000 年度実績)から約 125 百万トン・C に増加し、国 内全体の CO<sub>2</sub> 排出量も 317 百万トン・C(2000 年度実績)から約 355 百万トン・C に 増え、COP3 で目標としている 1990 年度水準 287 百万トン・C との格差がさらに拡 がる。図 4.2.1、図 4.2.2 に一次エネルギー構成および CO<sub>2</sub> 排出量の 2000 年度国 内実績と、原子力を LNG 火力で代替した場合の計算結果をそれぞれ示す。



図 4.2.1 原子力をLNG 火力で代替した場合の一次エネルギー自給率

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> toe:石油換算トン ton of oil equivalent. 1toe=10<sup>7</sup>kcalırとして計算.



図 4.2.2 原子力を LNG 火力で代替した場合の CO2 排出量

(2) LNG 火力発電の展望

現在運転中あるいは建設計画中の原子力発電所が寿命を迎え、資源制約により全 て廃止に至るまでは一世紀程度の猶予がある。しかし、電気事業者が今日の電力需 要の低迷や近い時期に完全実施が見込まれる電力自由化を睨んで初期投資や廃止 措置費の負担が少ない火力発電を代替電源として志向した場合、原子力発電のフェ ードアウトが早まる公算が大きい。とくに現在の最新鋭火力の発電効率は LNG 複 合発電で約51%、加圧流動床複合石炭火力発電では約44%と向上しており、さらな る高効率化技術として2030年~2040年頃には LNG 燃料電池複合発電(熱効率約 65%)や石炭ガス化燃料電池複合発電(熱効率約60%)の実用化が期待されている。

(3) CO2 回収・固定化技術

また、当面の温室効果ガス抑制策として CO<sub>2</sub>の回収・固定化技術が注目されてい る。CO<sub>2</sub>の回収・固定化は、ノルウェーの Sleipner ガス田やカナダと米国が共同で 進めている Weyburn CO<sub>2</sub> Monitoring Project などで研究開発と並行的に商業利用 が行われている。国内では新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を中心 に電力やメーカーが調査研究を進めており、CO<sub>2</sub>回収・固定化技術は既に事業化レ ベルにあると言われている。ちなみに国内の枯渇油田やガス田、陸地および海洋を 利用した温室効果ガスの貯留可能量は1990年度の温室効果ガス排出量の約75年分 と推定されており、実用化課題としては CO<sub>2</sub> 固定メカニズムや環境影響の解明、コ スト低減などとされている。 (4) 原子力代替技術の評価

火力発電による原子力の代替や CO<sub>2</sub> 回収・固定化技術の導入は、競争経済におい て利益追求を重視する企業戦略としては一応理解し得る。しかしながら、国内エネ ルギー政策との整合性の観点では、一次エネルギー自給率の低下や一次エネルギー 資源確保の困窮などエネルギー安全保障機能の脆弱化につながるとともに、環境面 では温室効果ガス排出量の増加ならびに固定 CO<sub>2</sub> の再放出とそれに伴う二次的な 環境影響が懸念される。

- 4.2.2 原子力の可能性と FBR サイクルの導入意義
- (1) 原子力の新たな展開の可能性について

原子力は、将来のエネルギーキャリアとして有望視されている水素をカーボンフ リー条件で大量生産可能なことから、これまでの電力生産に加えて水素製造という 新たな役割が期待されている。とくに自動車産業では、ガソリンや軽油に代わるク リーンエネルギーとして早くから水素に注目しており、既に水素燃料電池や水素エ ンジンを搭載した車両を開発し、試験走行を行っている。ちなみにガソリン車や軽 油自動車が全て水素自動車に置き換わった場合の石油資源節約量と CO<sub>2</sub> 削減量を 2000 年度の運輸データに基づいて試算すると、約 79 百万 toe(国内一次エネルギ ー供給量の約 14%)の石油資源節約と約 60 百万トン-C(国内総排出量の約 19%) の CO<sub>2</sub> 削減が見込まれる。

また、電力・水素併給形の原子力プラントを導入した場合、電気事業者は非電力 系のエネルギー市場に対する競争力をこれまで以上に発揮し得るとともに、季節や 時間に応じて変動する電力需要に対して効率的な設備運用が期待できる。現行の電 源運用では、ミドル負荷 ~ ピーク負荷は主に火力発電の起動・停止あるいは出力変 更で対応しているため、火力発電の設備利用率低下や収益性低下の要因になってい る。電力・水素併給原子力プラントでは、電力需要が低い場合は水素製造量を増加 させ、ミドル負荷やピーク負荷は水素製造量を抑えて電力供給主体の運用に切り替 えて電力需要に対応できるため、原子炉出力を変えることなく負荷追従が可能にな る。仮に石炭・石油火力を原子力に置き換えた場合、約 60 百万 toe の一次エネル ギー輸入量と約 57 百万トン・C の CO2 排出量の削減が見込まれる。

現在、原子力は輸入ウランに依存しているが、海水ウランや回収プルトニウムの 利用を図ることで純国産エネルギー資源の長期安定供給が見込まれ、積極的な原子 力活用を通して一次エネルギー自給率の大幅な改善が望めるとともに、原子力水素 製造をインフラストラクチャーとする水素自動車社会では CO<sub>2</sub> 排出量の著しい削 減が期待できる。図 4.2.3 と図 4.2.4 は、原子力の利用促進を想定した場合の一次 エネルギー構成と CO<sub>2</sub> 排出量の試計算結果である。



図 4.2.3 原子力利用を促進した場合の一次エネルギー構成



図 4.2.4 原子力利用を促進した場合の CO<sub>2</sub>排出量

### (2) FBR サイクルの導入意義について

火力発電に比べ原子力は短期的な収益性の観点では劣るが、海水ウランや回収プ ルトニウムの利用を図ることで純国産エネルギー資源の長期安定供給が期待され、 一次エネルギー自給率の改善と CO2 排出量の削減が見込まれる。しかしながら、海 水ウランによる原子力の長期利用は、使用済燃料のみならずウラン濃縮工程の残渣 として増大する濃縮テイルウランの貯蔵管理や最終処分が課題として加わってく るため、これらのリサイクル化が行われない場合には国内最終処分場の有無やその 収容規模が原子力利用の制約因子になり得る。

一方、軽水炉に比べ中性子経済性に優れた高速炉を利用した FBR サイクルでは、 軽水炉サイクルの廃棄物からエネルギーを効率的に再生産し、併せて最終処分を行 う廃棄物については毒性低減や減容化といった多面的な環境影響対策が期待でき る。つまり、FBR サイクルはウラン資源を使い尽くし、廃棄物を大量発生させる消 費型システムではなく、今日の潮流である「省資源」や「リサイクル」、「環境」を 基調とする再生型システムに他ならない。FBR サイクルの導入意義をまとめると以 下のようになる。 軽水炉サイクルで最終処分されるプルサーマル使用済燃料中の高次化プルト ニウムや軽水炉使用済燃料中のTRUを、燃料資源として有効利用できる。 高レベル廃棄物中のTRUやLLFPに起因する毒性を軽水炉使用済燃料の直接 処分に比べ大幅に低減できる。

単位発電量当りの高レベル廃棄物量が減少し、かつ高レベル廃棄物の発熱制限 などが緩和できるため、最終処分場の効率的利用が可能になる。 限られた陸上ウラン資源の有効利用が期待できる。 4.3 シナリオ検討条件

本節では、FBR 導入シナリオの検討条件として、シナリオ検討の基本的考え方、国内および世界を対象とした想定条件について述べる。

4.3.1 シナリオ検討の基本的考え方

シナリオ検討では、原子力利用に対する国内世論は、地球温暖化対策や化石燃料 資源の温存、エネルギー安全保障の形成において実効的な技術選択肢であるとの理 解が得られているものと仮定する。また、軽水炉から FBR への移行を促進するドラ イビングフォースとしては、経済性を見通した FBR サイクル技術体系の確立ととも に、使用済燃料貯蔵量や高レベル廃棄物量の削減、核燃料資源の有効利用と持続的 安定供給といったニーズを想定する。さらに導入シナリオの対象地域は、国内全体 の原子力発電施設を検討対象とした国内全体、国内のある特定地域へのコロケーシ ョン型 FBR サイクルの導入を検討対象とした国内地域レベル、IIASA/WEC(1998) の原子力発電予測に基づいた世界全体の三つの視点とし、それぞれの視点からフェ ーズ で検討した候補概念の適応性や導入効果などについて検討・評価する。

4.3.2 国内の想定条件

(1) 国内全体のシナリオスタディ

()将来概念のグルーピングと評価の視点

FBR サイクル実用化戦略調査研究では、フェーズ 中間評価までに表 4.3.1 に 示した 22 ケースの FBR サイクル概念を検討している。国内全体を視野に入れた シナリオ検討では、この 22 ケースを FBR システムの冷却材と燃料の違いに着目 して5つのグループに大別し、表 4.3.2 に示したそれぞれのグループを1つの将 来概念として扱うこととした。なお、各概念の炉特性データについては、「付録5 候補概念の炉特性データ」を参照されたい。増殖比が異なる原子炉システムを同 じ将来概念とした理由については、FBR 導入の標準的なスキームを考えた場合、 導入開始段階は Pu 供給を主目的とする高増殖型 FBR(本研究では「資源重視型 FBR」という)が指向され、Pu 需給が安定化した FBR 導入後期や軽水炉から FBR への移行完了後には低増殖型 FBR(本研究では「経済性重視型 FBR」とい う)あるいは LLFP 核変換炉が主流になると想定される。このように増殖比への ニーズは時間の経過とともに変化すると考えられることから、将来概念の中では 増殖比を選択オプションとして位置付けている。

また、本調査研究で掲げる開発目標のうち、サイクル諸量解析を通して直接的 あるいは間接的に評価し得る項目は環境負荷低減性、資源有効利用性、経済性の 三点に絞られる。そこで、各将来概念の FBR 導入シナリオは、前述の開発目標 に対応させる形で環境負荷低減、天然ウラン節約、経済性優先の観点から検討す ることとし、さらに将来の原子力発電設備容量の不確かさを考慮して、感度解析 による需要変動への順応性についても評価する。国内全体を導入シナリオの対象 地域とした場合の検討対象概念と評価視点の対応を表 4.3.3 に示す。

<b>4</b> -7	水白	<b>肉末</b> 半3	再処理		<b>树羽制</b> 法	心心	サイクル設定の報告		
9-2	×-	አልተት	湿/乾	処理規模	方式	※ 种表 但	N	シーアル設定」陸自	
1				大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	 資源 経済	MOX燃料の最も有望な湿式概念	
3							LLFP	FP核変換の代表的な有望概念	
4 5			湿式			振動充填	資源 経済	燃料製造法の違いを評価	
6 7	N a大型炉 (1500MWe)	MOX		小規模	小規模先進湿式	簡素化ペレット	資源 経済	燃料サイクル施設規模D違いを評価	
8 9				(50t/y)	超臨界	簡素化ペレット	資源 経済	小規模施設の経済性向上に有望な再処理概念	
10 11			乾式	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	資源 経済	MOX燃料の最も有望な乾式概念	
12 13		金属	乾式	小規模 (50t/y)	金属電解	射出成型	資源 経済	金属燃料で最も有望なサイクル概念	
14	Na中型炉シングル (750MWe)	мох	湿式	小規模	招臨界	簡素化ペレット	資源	初期投資の少ない概念	
15	Na中型炉モジュール (750MWe)		/==+	(50t/y)			経済		
16 17	Pb-Bi中型炉	窒化物	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	 資源 経済	Pb-bi炉サイクルの有望概念	
18 19	39年前11月12 (750MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	資源 経済	燃料の違いを評価	
20 21	H e大型炉 (1124MWe)	窒化物 被覆粒子	湿式	大規模 (200t/y)	脱被覆 + 先進湿式	被覆法	資源 経済	He炉サイクルの有望概念	
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	-	水冷却炉サイクルの有望概念	

表 4.3.1 FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズ の検討概念

# 表 4.3.2 将来概念のグルーピングとシステム構成

	グループ					
炉型		Na冷却大型炉	Na冷却大型炉	Pb-Bi冷却中型炉	He冷却大型炉	水冷却大型炉
燃料		混合酸化物	金属	窒化物	窒化物被覆粒子	混合酸化物
増殖比	資源重視型	1.16	1.16	1.15	1.17	1.03
	経済性重視型	1.04	1.04	1.04	1.03	1.00
	LLFP核変換型	1.03	-	-	-	-
燃料製造施設	製造方式	簡素化ペレット	射出成型	簡素化ペレット	被覆法(振動充填)	簡素化ペレット
	加工ロス(%)	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
FBR再処理施設	再処理方式	先進湿式	金属電解	先進湿式	先進湿式	先進湿式
	再処理ロス率(%)	0.1 <sup>4)</sup>	0.5	0.1 <sup>4)</sup>	0.1 <sup>4)</sup>	0.1 <sup>4)</sup>
	L-MOX再処理の適否	適	不適1)	不適1)	不適1)	適
	L-MOX再処理ロス(%)	FBR燃料に同じ	-	-	-	FBR燃料に同じ
	初号機年間処理量	<b>200</b> t/y	<b>50</b> t/y	50t/y <sup>2)</sup>	50t/y <sup>2)</sup>	<b>200</b> t/y
導入開始時期		2030年	2030年	2050年	2050年	2030年
L-MOX再処理施設	年間処理量	-	50t / y <sup>3)</sup>	50t/y <sup>3)</sup>	50t / y <sup>3)</sup>	-
	運開開始年	-	2030年	2050年	2050年	-
備考		1)再処理システム設計部門によれば、L-MOX処理用の分離工程追加によって再処理プロセスの複雑化と大幅なコスト増加が 生じ得るため、現時点の検討では1つの施設でL-MOX使用済燃料の混合処理は不適当とのこと。 2)設計の年間処理量は2001//であるが、L-MOX使用済燃料を処理しないため設備利用率の著しい悪化が予想される。導入シ ナリオでは、初号機のFBR-風処理施設の年間処理量は501/yとする。 3)L-MOX使用済燃料はブルサーマル専用再処理施設で処理されるものとする。L-MOX再処理施設の運開時期はFBR導入時 期にあわせる。また、年間処理量は501/y程度とする。 4)再処理のロス率については、例えばグループ では分離等のメイン工程で0.004%のロス率であるが、その他せん断工程等も 含めて含計0.1%と仮定した。				

候補概念		環境負荷低減 (MA添加率)	ウラン資源節約 (FBR導入開始年)	経済性優先 <sup>2</sup> (初期導入炉形)	需要変動 (発電設備容量)	
	Na冷却大型MOX 簡素化ペレット 先進湿式再処理	1%、3%、5% (LLFP核変換)	2030年、2050年 他、感度解析 <sup>1</sup>	【資源型2030年】 経済型 資源型 水炉 資源型	標準( 67GWe) 拡大( 115GWe) 低成長(80GWe)	
	Na冷却大型金属 射出成型 金属電解再処理	3%	2030年、2050年	【資源型2030年】	標準 拡大 低成長	
	Pb-Bi冷却中型窒化物 簡素化ペレット 先進湿式再処理	3%	2030年、2050年	【資源型2030年】	標準 拡大 低成長	
	He冷却大型窒化物 被覆粒子 先進湿式再処理	3%	2030年、2050年	【資源型2030年】	標準 拡大 低成長	
	水冷却大型MOX 簡素化ペレット 先進湿式再処理	1%、3%、5%	2030年	【資源型2030年】	標準 低成長	
備考		1:第二軽水炉再処理施設の年間処理量(800tHM/y,1200tHM/y)、プルサーマル運転 期間等をパラメータとする感度解析を実施。 2:標準的には資源型を先行導入し、プルトニウム需給状況に応じて経済型を順次導入 するが、経済性優先の場合にはコスト的に有利な経済型を先行的に導入し、2050年頃か ら資源型の本格導入を行う。				

表 4.3.3 国内全体のシナリオスタディにおける検討対象概念と評価視点

# ()原子力発電設備容量

原子力発電設備容量の想定条件を図 4.3.1 に示す。基準ケースの設備容量は、 資源エネルギー庁が平成 15 年 3 月末に公表した原子力開発計画<sup>[5]</sup>をベースとし、 その後 12 月末までの間に明らかになった建設計画凍結(巻1号機、珠洲1・2 号 機)や計画変更(大間、島根3号機の運開延期)を踏まえて 67.5GWe(原子炉数 45 基)を目安とした。2030 年から 2090 年までの第一世代のリプレース期間に 現れている設備容量の変動は、2030 年以降に新設する原子力発電プラントー基あ たりの設備容量を 1.5GWe と仮定していることから廃止容量と新設容量の不整合 によって生じており、全てのプラントが 1.5GWe/基に規格化された後では現れ ない。なお、参考までに平成 15 年度当初と平成 15 年 12 月末時点の原子力開発 計画を表 4.3.4 に示す。

需要拡大ケースは将来の水素社会を想定しており、基準ケース相当の電力生産 能力に加えて、水素搭載型燃料電池自動車で消費する全ての水素を原子力で賄う 場合の水素製造能力を見込んでいる。2070年以降の設備容量低下の原因は、将来 社会の課題の一つである人口減少により国内自動車保有台数が減少し、その結果、 燃料電池自動車の水素消費量も減るためである<sup>[8]</sup>。

一方、低成長ケースは一次電力化率が今後約 100 年の間に 42%から 45%まで 緩やかに成長し、同時に CO<sub>2</sub> 排出制約(1990 年水準維持)の下で火力発電の高 効率化や再生可能エネルギー発電の将来見通しを踏まえて推計した設備容量であ る。本ケースの推計条件については、「付録3発電設備容量に関する考察」を参照 されたい。


図 4.3.1 国内全体の原子力発電設備容量の想定条件

西暦	平成 15 年	F度当初計	画 (GWe)	平成 15 年	F12 月末時	序点(GWe)	(世 支
(年)	運開	廃止	累計	運開	廃止	累計	加药
2005	2.480		48.217	2.480		48.217	建設中:東通1、浜岡5
2006	1.358		49.575	1.358		49.575	建設中:志賀2
2007	0.000		49.575	0.000		49.575	
2008	0.000		49.575	0.000		49.575	
2009	2.292		51.867	2.292		51.867	
2010	4.136	0.357	55.646	2.753	0.357	54.263	廃止:敦賀1、 計画遅延:大間
2011	5.846		61.492	5.846		60.109	
2012	3. 583		65.075	4.141		64.250	計画凍結:巻1、計画変更:大間
2013	0.000		65.075	0.000		64.250	
2014	3.525		68.600	0.825		65.075	計画凍結:珠洲1、2号
2015	1.373		69.973	1.373		66.448	2074 年迄≒67.5GWe,2075 年以降 67.5 GWe

表 4.3.4 平成 15 年度の原子力開発計画

()解析条件の概要

国内全体解析の原子炉導入条件やサイクル施設の運用条件は、前出の表 4.1.2 および表 4.1.3 に概ね準ずる。しかし、5 つのグループに分けた候補概念は FBR 実用化時期、FBR 再処理施設による軽水炉 MOX 使用済燃料処理の可否、FBR 再処理施設の単位設備容量などがそれぞれ異なることから、開発目標との整合性 や候補概念の相互比較においては、表 4.3.5 に示したパラメータ解析を行い評価 することとした。具体的には、開発目標を評価視点とする 環境負荷低減シナリ オ(環境負荷低減性) ウラン節約シナリオ(資源有効利用性) 経済性シナ リオ(経済性) さらに将来の原子力発電設備容量の不確かさを考慮した 需要順 応シナリオごとに複数ケースの感度解析を実施し、各シナリオにおける候補概念 の適性や相互比較を行った。評価視点と解析ケースの対応を以下に記す。

<u>環境負荷低減シナリオ</u>

<u> 城坑只凹 110/1%ノノ</u>	<u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>					
(MA添加率とMA削減	量の関	係、LLF	P 核変	換炉に	よるTc、	Iの削減量)
標準ケース	- 0、	- 0、	- 1、	- 1、	- 0 ( M.	A 最大 3%添加)
低ケース	- 4、	- 4 ( M.	A 最大	1%添加	)	
高ケース	- 5、	- 5 ( M.	A 最大	5%添加	)	
LLFP 核変換ケース	-0(佃	・増殖炉と	: LLFF	? 核変換	炉の並行	導入)

<u>ウラン節約シナリオ</u>

(FBR 導入開始時期、	LWR 再:	処理規	模をパ	ラメー	タとする	5感度詞	平価)		
標準ケース	- 0、	- 0、	- 1、	- 1、	- 0(0	: 2030 <b>4</b>	∓導入,1	: 2050 <sup>소</sup>	∓導入)
需要増大ケース	- 1(導	拿入遅延	) - 2 (	(Puサ-	-マル長期	期化)	- 3 ( L-N	/IOX 処理	里遅延)
需要節約ケース	- 6、	- 7、	- 1、	- 7、	- 1、	- 6、	- 1、	- 6、	- 7

<u>経済性シナリオ</u>

標準ケース	- 1 (資源型 2050 年導入)
経済型先行ケース	- 10 ( 経済型 2030 年導入、資源型 2050 年導入 )
水冷却炉先行ケース	- 11 ( 水冷却炉 2030 年導入、資源型 2050 年導入 )

<u>需要順応シナリオ</u>

標準ケース	- 0、	- 0、	- 1、	- 1、	- 0	(成15年12月末計画容量)
拡大ケース	- 8、	- 8、	- 8、	- 8		(電力生産と水素生産利用)
低成長ケース	- 9、	- 9、	- 9、	- 9、	- 9	(2100 年まで低成長持続)

	LLFP	核変換	⊲																																
苘低減		5%						•																								•			
環境負	MA添加率	3%	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	
		1%					•																								•				
理施設	規模	50tHM/y				•									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
FBR再処	初号機	200tHM/y	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0																0	0	0	0	0	
	<b>u理規</b> 模	1200tU/y							•	•	•						•	•				•	•				•	•					•		
処理	第二民間久	800tU/y	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0			0	0	0			0	0	0			0	0	0	0		0	
LWR再	燃料再処理	L-MOX専用				•									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
	L-MOX使用済	FBR再処理	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0																0	0	0	0	0	
後の	ナーマル	運転継続			•																														
FBR導入	軽水炉プル+	IO <sub>2</sub> 燃料転換	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
74 EE		2050年 し		•					•				0	0		•					0	0	0	0		0	0	0	0						
L 2003		2030年	0		0	0	0	0		0	0	0	経済型	大石	0		0	0	0	•					•					0	0	0	0	0	
		氏率連続成長										•							•					•					•					•	
雪い進会量	RX 베 七 또	需要拡大 (									•							•					•					•							
		基準	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0			0	0	0			0	0	0			0	0	0	0		
	解析 No.		I -0	I - 1	I –2	I –3	I -4	I -5	I –6	1 – 7	I -8	6- I	I -10	I -11	0-I	П-1	Π-7	П-8	6-I	0-田	П-1	9-Ш	Ш-8	6-Ⅲ	IV-0	IV-1	IV-6	IV-8	IV-9	0-V	V-4	V-5	V-7	0-V	
	候補概念							Na冷却大型MOX炉 施まルるLint	国来にくした							Na冷却大型金属炉	射出成型	金属電解再処理			Pb-Bi冷却中型窒化物	簡素化ペレット	先進湿式再処理			He冷却大型窒化物	被覆粒子(振動充填)	先進湿式再処理			大ふ也行	簡素化ペレット	先進湿式再処理		

表 4.3.5 国内全体解析のパラメーター覧

枝番0 FBR本格導入開始2030年のレファレンスケース:FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収Pult全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。

技番2 軽水炉ブルサーマルとFBRの併用ケース:FBR本格導入開始は2030年とするが、J-MOX加工施設(運開2009年計画)の寿命廃止2050年まで軽水炉ブルサーマルを継続する。導入初期のFBR用Puは主にL-MOX使用済燃料をFBR再処理で 技番1 FBR本格導入開始2050年のレファレンスケース :FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収pulは全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。

処理して供給する。

技番3 サイクルスキーム 1 ケース: FBR本格導入開始2030年。FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収pult全でFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料は第2民間再処理で混合処理を行う。FBR再処理施設初号機は、 FBR導入開始から4年後にS0tHM/年で操業開始を開始する。

枝番4 FBR本格導入開始2030年のレファレンスケースにおけるMA添加率1%の感度解析:FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収Puは全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。また、環 境負荷低減効果への影響としてLWR回収MA蓄積量を把握するため、MA添加率の上限を3%→1%に下げる。

技番5 FBR本格導入開始2030年のレファレンスケースにおけるMA添加率5%の感度解析:FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収Puは全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。また、環 境負荷低減効果への影響としてLWR回収MA蓄積量を把握するため、MA添加率の上限を3%→5%15/16。

検番6 FBR本格導入開始2050年のレファレンスケースにおけるLWR再処理容量拡大効果:FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LWR再処理の回収pulは全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。また、第2 民間再処理容量を1200U/ソに拡大した場合のFBR導入促進効果ならびに天然ウラン資源節約効果を把握する。

FBR本格導入開始2030年のレファレンスケースにおけるLwR再処理容量拡大効果;FBR導入前に軽水炉ブルサーマルを終え、LwR再処理の回収Pult全てFBR燃料加工に払出す。L-MOX使用済燃料はFBR再処理にて処理する。とくICPu 生産性が劣る水炉を対象とし、第2民間再処理容量を12000U/IC拡大した場合のFBR導入促進効果ならびに天然ウラン資源節約効果を把握する。 枝番7

電力水素併給ケース;原子力利用拡大を想定し、技審のの原子力発電設備容量に水素製造設備容量を加える。原子力設備容量の増大により軽水炉使用済燃料発生量の増加が予想されるため、第2民間処理容量を1200tU/yとする。なお、 その他の条件は枝番0のレファレンス条件と同じとする。 枝番8

枝番9 電気事業起源CoZのCoP3批准ケース:将来の電力需要をはじめ、自然エネルギー発電の導入成長やLNG火力および石炭火力の熱効率向上を考慮し、その上で電気事業者のCO2排出量が1990年水準で維持し得るために必要な原子力 発電設備容量を評価対象とした。その他の想定条件は枝番ののレフテレンスケースと同じ。

枝番10 2050年のFBR本格導入開始本格導入前に経済型炉心を導入する。なお、その他の条件は枝番ののレフテレンス条件と同じとする。 枝番11 2050年のFBR本格導入開始本格導入前に水冷却炉を導入する。なお、その他の条件は枝番0のレフテレンス条件と同じとする。

- (2) 国内地域レベルのシナリオスタディ
  - ()対象概念と評価の視点

国内の特定地域に絞ったシナリオスタディでは、コロケーション型 FBR サイ クルを既存の原子力発電サイトに導入した場合の各種諸量や施設規模などについ て評価する。コロケーション型 FBR サイクルのシステム概念は、ナトリウム冷 却 MOX 炉 - 先進湿式再処理 - 簡素化ペレット燃料の組み合わせを代表例とし、 この FBR 再処理施設では当該サイトから発生した軽水炉プルサーマル使用済燃 料の再処理も行うこととする。また、FBR1基あたりの電気出力については、大 規模サイトの場合は 1.5GWe(大型炉)、小規模サイトの場合は 0.75GWe(中型 炉)と想定する。

()原子力発電設備容量

国内におけるコロケーション型 FBR サイクルの導入は、建設用地の新規取得 が一段と難しさを増し大規模集中方式よる原子力開発のスローダウンや、初期投 資軽減の観点から既存サイトの効率的な利用を重視した事業経営の対応策として 考えられる。そこで、コロケーション型 FBR サイクルのシナリオスタディでは、 原子力開発計画がさほど進展しない将来社会を想定し、国内全体の原子力発電設 備容量は 2010 年の計画容量約 54GWe を上限として仮定する。

また、コロケーション型 FBR サイクルを導入する大規模サイトと小規模サイトの発電設備容量は、国内の代表的な原子力発電サイトをモデルにして、それぞれ 7.5GWe(1.5GWe×5基)、3GWe(0.75GWe×4基)と設定した。ちなみに国内の原子力発電所は同一サイトで発電規模が異なる複数の原子炉システムを稼動している場合が多いため、原子炉システム1基あたりの出力を 1.5GWe あるいは 0.75 GWe に規格化した FBR で軽水炉のリプレースを行うと、廃止側と新設側の出力差により発電設備容量が著しく増減する可能性がある。図 4.3.2-2 はモデルにした大規模サイト(7.4GWe)と小規模サイト(2.9GWe)の発電設備容量の想定条件あるが、2030 年以降の原子炉リプレースでは発電設備容量が一時的に上方に突出しないよう考慮している。なお、原子炉リプレースの考え方については、次項の解析条件で後述する。



図 4.3.2 コロケーション型 FBR サイクルの原子力発電設備容量

()解析条件の概要

原子炉リプレースの基本的考え方

発電設備容量の想定では、大規模サイトと小規模サイトに、それぞれ 7.4GWe と 2.9GWe の国内サイトを選定し、原子炉の寿命廃止と更新による自然増(上 限は各々7.5GWe と 3 GWe)を許容することとした。また、発電設備容量が一 時的に上方に突出する凸状の原子炉更新は、送配電系統の設備変更を必要とす る可能性があるため許容しないこととし、原子炉の廃止容量が新設容量 (1.5GWe/基あるいは 0.75GWe/基)の1/2を下回る場合は廃止のみ行い、 それに代わる原子炉新設は次の原子炉廃止まで保留することとした。原子炉リ プレースの基本的考え方を図 4.3.3 に模式図で示す。



図 4.3.3 原子炉リプレースの模式図

LWR 再処理施設

第二 LWR 再処理施設は、六ケ所再処理工場に準じて大規模集中方式とし、 使用済燃料の年間処理能力も 800 トンとする。各サイトが搬出した使用済燃料 の年間処理量は、国内全体の原子力発電設備容量に対する各サイトの発電設備 容量の割合に比例すると仮定し、大規模サイトの場合は約 110 トン/年、小規 模サイトの場合は約 44 トン/年とした。なお、海外再処理による返還プルト ニウム量は、大規模サイトで 3.7 トン-Puf、小規模サイトで 2.2 トン-Puf とし、 これらは LWR プルサーマルで使用する MOX 燃料に加工されるものとする。 LWR プルサーマル利用

諸量解析では、海外返還プルトニウムおよび国内再処理施設からの回収プル トニウムによる LWR プルサーマル利用を想定する。

FBR 導入条件

FBR の導入開始は 2030 年以降とし、高増殖タイプの資源重視型炉心を先行 的に導入し、プルトニウム需給バランスに応じて低増殖タイプの経済性重視型 炉心に移行していくものとする。

FBR 再処理

FBR 再処理施設初号機の年間処理量は 50 トンとし、必要に応じて年間処理 能力を 25 トン幅で増加していくものとする。FBR 再処理設備の寿命は LWR 再処理と同様 40 年とする。なお、FBR 再処理設備では、サイトで発生した LWR プルサーマル使用済燃料再処理も行うこととする。

その他

原子炉導入条件ならびにサイクル施設の想定条件については、前出の表 4.1.2 および表 4.1.3、同じく表 4.3.2 を参照されたい。

4.3.3 世界の想定条件

(1) 対象概念と評価の視点

FBR サイクル実用化戦略調査研究で検討している将来概念は、国内ニーズを満た すと同時に、国際標準を目指すうえでは世界規模のニーズにも対応し得ることが望 ましい。本研究で開発目標に掲げる安全性・核拡散抵抗性・環境負荷低減性につい ては、人命や社会生活への脅威を取り除く意味で国際的に共通した技術目標の下で 対応可能と考えられるが、資源有効利用性としての増殖性能は各々の国の原子力事 情に適応した技術目標が存在する。ここでは、前述の5つの候補概念のうち 2030 年頃に早期実用化が期待される候補概念 (ナトリウム冷却大型 MOX 炉 - 先進湿 式再処理 - 簡素化ペレット燃料)、候補概念 (ナトリウム冷却大型金属炉 - 金属 電解再処理 - 射出成型燃料)を世界規模で導入した場合の資源有効利用性に対する 効果を評価する。

(2) 原子力発電設備容量

世界を対象とする FBR 導入シナリオ解析は、IIASA/WEC が 1998 年に公表した B ケース(最も現実的とされる中位シナリオ)<sup>[9]</sup>の原子力発電電力量に基づいて行 う。図 4.3.4 に示した原子力発電設備容量は、原子炉稼働率を 70%として IIASA/WEC(1998) B ケースの原子力発電電力量から換算したものである。



# 図 4.3.4 世界の原子力発電設備容量

(IIASA/WEC(1998)<sup>[9]</sup>の B ケースに基づく換算値)

(3) 解析条件の概要

世界を対象とした FBR 導入シナリオ解析では、候補概念 と候補概念 の導入 開始時期をパラメータ(2030年導入、2050年導入)とする感度解析を行う。 なお、表 4.3.6 に解析ケースの一覧を、表 4.3.7 に諸量解析の前提条件をそれぞれ 示す。また、本解析に使用した FAMILY-EX 用の炉特性データー覧を表 4.3.8 に示 す。

表 4.3.6 世界を対象としたシナリオ解析の一覧

シナリオ	プルサーマル	FBR 導入開始	FBR1 (資源重視型)	稼働率	炉外サイクル 時間	再処理	FBR サイクル ロス率	<sup>241</sup> Pu 崩壊 の考慮
- 0	FBR 導入 まで有り	2030 年	ナトリウム 冷却大型炉 MOX 燃料 (増殖比 1.16)	70%	LWR6 年 FBR5 年	HWR を除いて 最終的に 全量再処理	加工 0.1% 再処理 0%	有り
- 1	同上	2050 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上
- 0	同上	2030 年	ナトリウム 冷却大型炉 金属燃料 (増殖比 1.16)	同上	同上	同上	加工 0.5% 再処理 0.5%	同上
- 1	同上	2050 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上

HWR: Heavy Water Reactor (重水冷却炉)

		設定値	備考
発電設備容量		IIASA/WECのBケースの発電電力量(TWh)を稼働率70%で換算して発電設備容量を算出する。 (但し、2002年までは実績に基づいて設定。)(図4.3.3-1)	<sup>I</sup> Global Energy Perspectives」,IIASA/WEC,1998 (2002年までの実績値は、日本原子力産業会議「世界の原子力 発電開発の動向2002年次報告-2002年12月31日現在-」より引用
炉外サイクル時間	LWR、HWR系 FBR系	6年(燃料加工1年、取出燃料の冷却4年、再処理1年) 5年(燃料加工1年,取出燃料の冷却3年,再処理1年)	
炉寿命		全炉型60年	「Gen-4 Fuel Crosscut Group」Chapter3を参考にした。
炉特性データ	BWR	2019年まで新設 燃焼度4.5万MWD/t. 所内率3.5%	炉特性データについては表4.3.3-3参照。
	A-BWR	2020年以降導入、燃焼度6万MWD/t、所内率4.5%	FBRは実用化戦略調査研究フェーズで設計した。
	PWR	2019年まで新設、燃焼度4.9万MWD/t、所内率3.5%	Na冷却大型炉MOX燃料の資源重視型(03NOHL-R1(W))データ
	A-PWR	2020年以降導入、燃焼度6万MWD/t、所内率4.5%	Ł,
	HWR	燃焼度8,330MWD/t(CANDU[天然ウラン])、所内率5.8%	Na冷却大型炉金属燃料の資源重視型(03NMHL-R2(D)データ。
	FBR	-0、1ケース:Na冷却大型炉MOX燃料、増殖比1.16、燃焼度15万MWD/t(炉心)、所内率4.7% -0、1ケース:Na冷却大型炉金属燃料、増殖比1.16、燃焼度15万MWD/t(炉心)、所内率5.4%	
炉の稼働率		70%	発電電力量(kWh)を稼働率70%で換算して発電設備容量を算出
濃縮施設		処理能力の制限なし	
燃料加工施設		処理能力の制限なし	
再処理施設	LWR	2029年まで:計画値(~2004年:4,100:/年、2005~2009年:4,500:/年、2010~2029年:4,900:/年) 2030年以降:冷却後全量再処理(但し全量再処理開始初期時はそれまでのSF貯蔵量を全て処理 することによるビークを発生させない程度に数千トン×約20~40年の規模で導入)	2029年までのLWR再処理は <sup>1</sup> Nuclear Energy Data 2003」 OECD/NEAを元に設定。
	LWRブルサーマル	FBR導入開始年以降20~40年間で処理する。	
	HWR	なし	
	FBR	冷却後全量再処理	
ロス率	LWR, HWR	濃縮0%、転換0.5%、加工1.0%、再処理2.0%	LWRとHWRは、「The Economics of the Nuclear Fuel Cycle」
	FBR	-0、1ケース:加工0.1%、再処理0.1% -0、1ケース:加工0.5%、再処理0.5%	OECD/NEA 1994より引用。 FBRは、実用化戦略調査研究フェーズ の設計データ。
テイル濃度		0.30%	
回収ウラン利用		有	
計算開始年以前の使用 済燃料量		19万トンHM (BWR:3.8万トンHM, PWR:13.3万トンHM, HWR:1.9万トンHM)	出典: <sup>r</sup> World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium 1992」
計算開始年以前の核兵 器解体プルトニウム		95ŀንPuf	核兵器の解体から発生するプルトニウム100トンPu(fissilel率95%) より
計算開始年以前のテイ ルウラン量		134.7万トン(1997年末現在)	米国原子力情報サービス 1999年6月(No.225) .余剰濃縮設 備を活用した劣化ウラン利用の可能性
高濃縮ウラン(HEU)		天然ウラン換算:17.1万 tU 計算の都合上、天然ウランの節約分として取り扱う	米国原子力情報サービス 1999年2月(No.221) .2020年まで の世界のウラン供給二次供給への依存が続く見通し
計算開始年稼動炉の炉 型割合及び廃止年		計算開始年稼動炉(約350GWe)の炉型割合は、BWR:PWR:HWR=2:7:1とし、廃止までの寿命は、0 ~40年で一様に分布しているものとする。	炉型割合は、IAEAのKey Issue Paper-1、廃止までの寿命は「 Gen-4 Fuel Crosscut Group」報告書Chapter3を参考にした。
新設炉型割合	BWR PWR HWR FBR	FBRを除いた20% FBRを除いた70% FBRを除いた10% Puパランスに基づいて導入	International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy: Adjusting to New Realities, IAEA, (1997.6)の'Key Issue Paper-1,を参考 ガス炉等その他の炉型は無視する。
プルサーマル導入量		2000年までは実績、それ以降は2000年のBWRとPWRの割合(1:9)でPuバランスに基づいて導入。FBR導入開始時までブルサーマルを実施。	2002年までの実績は、日本原子力産業会議「世界の原子力発電 開発の動向2002年次報告-2002年12月31日現在-」より引用
対象期間		2000年~2100年	

# 表 4.3.7 世界を対象としたシナリオ解析の前提条件

データー覧
炉特性う
4.3.8
表

項目	BWR	PWR	A-BWR	A-PWR	ר ש ל ל	R 1 2 1, 2	שר = שר =	2     	– H-BV م الر	VR - ح ال		د ح ار	HWR (NII)	E e	R(MOX) 8E=1 16)		E e	3R(金属) 3R=1 16)	
データ出典	(1)	(2)	(1)	(3)	(1)	,	(3)		(1)		(3)		(4)	j	2011	l	>	10	
電気出力(MW)	1000	1000	1000	1000	100	0	100	0	100		1000		1000		1000			1000	
熱効率(%)	34.5	34.4	34.5	34.4															
燃焼度(MWd/t)	45000	49000	60000	60000	450(	8	4900	0	6000	0	60000	_	8330	-	48,000			152,500	
稼働率(%)/所内負荷率(%)	70/3.5	70/4.5	70/3.5	70/4.5	20/3	3.5	70/4	.5	70/3	.5	70/4.5		70/5.8		70/4.1			70/5.4	
プラント寿命(年)	60	60	60	60									60		60			60	
					MOX	U02	MOX	U02	MOX	U02	MOX	U02		炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ
初装荷燃料																			
重金属(トン)	115.9	80.7	115.9	80.7									134.6	33.2	28.0	26.3	38.2	21.6	29.7
<b>ひ し ソ (ト ン)</b>	115.9	80.7	115.9	80.7									134.6	25.3	28.0	26.3	31.9	21.6	29.7
プルトニウム (トン)	0.00	00.0	0.00	0.00									0.00	7.54	0.00	0.00	6.04	0.00	0.00
核分裂性プル(トン)	0.00	0.00	0.00	0.00									0.00	4.61	0.00	0.00	4.26	0.00	0.00
ウラン濃縮度(%)	3.4	3.2	4.5	3.8									0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
平衡装荷燃料																			
重金属(トン/年)	17.0	15.8	12.8	13.0	5.7	11.3	5.3	10.6	4.3	8.5	4.3	8.6	103.4	3.9	3.3	3.1	4.0	2.3	3.1
ウラン(トン/年)	17.0	15.8	12.8	13.0	5.3	11.3	5.0	10.6	3.9	8.5	4.0	8.6	96.5	2.9	3.3	3.1	3.3	2.3	3.1
プルトニウム(トン/年)	0.00	00.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.31	0.00	0.36	0.00	0.31	0.00	0.00	0.88	00.0	0.00	0.63	0.00	0.00
核分裂性プル(トン/年)	00.0	00.0	0.00	0.00	0.23	00.0	0.21	0.00	0.22	0.00	0.21	0.00	00.0	0.54	00.0	0.00	0.45	0.00	0.00
ウラン濃縮度(%)	3.8	4.6	4.9	5.3	1.3	3.8	0.2	4.6	1.3	4.9	0.2	5.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
初期取出																			
重金属(トン/年)	19.4	15.3	14.7	12.4									95.7	3.7	3.3	3.1	3.8	2.3	3.1
<b>ウラン(トン/年)</b>	19.2	15.2	14.6	12.3									95.3	2.8	3.2	3.0	3.2	2.2	3.1
プルトニウム(トン/年)	0.17	0.15	0.15	0.12									0.37	0.85	0.04	0.02	0.62	0.02	0.02
核分裂性プル(トン/年)	0.11	0.11	0.09	0.09									0.24	0.51	0.04	0.01	0.43	0.02	0.02
<b>ウラン濃縮度(%)</b>	0.7	0.9	0.8	0.9									0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
平衡取出燃料																			
重金属(トン/年)	16.2	15.1	12.0	12.2	5.4	10.8	5.0	10.1	4.0	8.0	4.1	8.1	95.7	3.3	3.2	3.1	3.4	2.2	3.1
<b>ウラン(トン/年)</b>	16.0	14.9	11.8	12.0	5.1	10.7	4.8	9.9	3.7	7.9	3.9	8.0	95.3	2.5	3.1	3.0	2.8	2.1	3.0
プルトニウム(トン/年)	0.16	0.17	0.13	0.14	0.26	0.10	0.22	0.11	0.25	0.09	0.17	0.09	0.37	0.75	0.15	0.06	0.57	0.10	0.08
核分裂性プル(トン/年)	0.09	0.12	0.08	0.09	0.12	0.06	0.13	0.08	0.11	0.05	0.08	0.06	0.25	0.43	0.14	0.06	0.38	0.09	0.07
ウラン濃縮度(%)	0.6	1.1	0.6	1.0	0.6	0.6	0.1	1.1	0.5	0.6	0.1	1.0	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2
廃炉取出燃料																			
重金属(トン)	112.9	78.2	111.9	77.6									134.0	29.9	27.8	26.2	34.4	21.4	29.6
<b>ウラン(</b> トン)	112.1	77.5	111.0	76.9									133.6	22.8	26.9	25.9	28.5	20.8	29.1
プルトニウム (トン)	0.75	0.66	0.87	0.67									0.35	6.80	0.87	0.35	5.67	0.64	0.48
核分裂性プル(トン)	0.54	0.48	0.61	0.49									0.28	3.99	0.82	0.34	3.85	0.60	0.47
ウラン濃縮度(%)	1.7	2.0	2.0	2.1									0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
					1/3MOX	-	/3MOX	-	/3MOX	<u> </u>	/3MOX	0 O	ANDU F	//S71–ک°I (W)	I :03NOH	<u>ц</u>	:/S71-7°	II :03NMF	IL-R2(D]
* 冬子—々け設備利田率	犁 末 な	+++.07	5 <b>4</b> 2																
	「高し」で、					 	1	I	< 41 mm -										

(1)JNC TJ9440 2000-007[Pu利用技術に関する調査(5)」(2000年3月)日本ニュークリア・フュエル株式会社 (2)JNC TJ9440 99-014 「プルトニウム利用技術に関する調査検討(3)」(1999年3月)新型炉技術開発株式会社 (3)サイクル機構調べ
(4)OECD/NEA, "The Economics of the Nuclear FuelL Cycle", (1994年)

JNC TN9400 2004-052

4.4 各種導入シナリオのサイクル諸量解析結果

4.4.1 国内全体を対象としたシナリオ解析結果

(1) 環境負荷低減シナリオ

ここでは、第2軽水炉再処理施設以降で回収した軽水炉起源の MA および FBR 起源の MA を、それぞれ FBR 燃料としてリサイクルした場合の MA 低減効果に関 するパラメータ解析結果について述べる。また、核分裂生成物(以後、「FP」とい う)の分離・変換は、ガラス固化体製作時の発熱制限の緩和や高レベル廃棄物処分 における放射性毒性リスクのさらなる低減策として注目されており、ここでは Sr と Cs の回収量や減衰待貯蔵量、Tc および I を核変換対象核種とした LLFP 核変換 サイクルの諸量解析例を述べる。

()MA 低減効果について

計算に使用したサイクル諸量解析コード FAMILY-21 は、表 4.4.1 に示したア クチニド核種について燃焼計算を行うとともに、サイクル内の MA 収支計算では 太字で示した 10 核種を評価対象とし、使用済燃料(炉外冷却中の使用済燃料を 除く)高レベル廃棄物、Pu 貯蔵設備および MA 貯蔵設備の観測箇所で MA 蓄積 量を集計している。MA 低減効果の感度解析では、FBR 炉心燃料に装荷する MA 添加率(炉心燃料の重金属量に対する MA 装荷量を重量パーセントで表示)をパ ラメータとし、標準ケース(上限3%)低ケース(上限1%)高ケース(上限 5%)の MA 添加率でリサイクルした場合の MA 蓄積量をそれぞれ評価した。

元 素	核 種				
U	232U, $233$ U, $234$ U, $235$ U, $236$ U, $238$ U, $239$ U				
Np	<sup>236</sup> Np、 <u><b>237Np</b></u> , <sup>238</sup> Np、 <sup>239</sup> Np				
Pu	<sup>236</sup> Pu, <sup>237</sup> Pu, <sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu, <sup>240</sup> Pu, <sup>241</sup> Pu, <sup>242</sup> Pu, <sup>243</sup> Pu, <sup>244</sup> Pu				
Am	241Am, 242mAm, 242Am, 243Am				
Cm	<i>242 Cm</i> , <i>243 Cm</i> , <i>244 Cm</i> , <i>245 Cm</i> , <i>246 Cm</i> , <sup>247</sup> Cm, <sup>248</sup> Cm				
Bk	<sup>249</sup> Bk、 <sup>250</sup> Bk、 <sup>251</sup> Bk				
Cf	<sup>249</sup> Cf、 <sup>250</sup> Cf、 <sup>251</sup> Cf、 <sup>252</sup> Cf				

表 4.4.1 FAMILY-21 による計算対象アクチニド核種

(注) 燃焼計算以外の物量フローでは、下線で示す核種について収支計 算を行っている。

#### 基準ケースの結果

MA添加率の上限を3%で計算した標準ケースのMA蓄積量を図 4.4.1 に示 す。六ヶ所再処理施設が廃止するまでの間にHLWとして処分されるMA量は、 概ね60トン程度と見積もられる。5つの候補概念のうちナトリウム冷却炉(ケ ース、ケース)と水冷却炉(ケース)の導入開始時期は2030年とし、 鉛-ビスマス冷却窒化物炉(ケース)とヘリウム冷却窒化物炉(ケース)

については 2050 年導入としているため、回収 Pu に混入する MA および高レ ベル廃液から回収した MA(以後、「分離 MA」と総称する)がサイクル内に蓄 積し始めるタイミングが異なる。前者の3ケースでは FBR 再処理施設の運転 開始(2030 年)を起点として主にプルサーマル使用済燃料から回収した MA が蓄積し始め、後者の2ケースでは第2軽水炉再処理施設の運転開始(2046) 年)を起点に濃縮ウラン使用済燃料の再処理廃液から分離した MA が蓄積しは じめている。この貯蔵設備内の MA 蓄積量、さらに使用済燃料中の MA 蓄積量 は FBR 導入ペースと反比例の関係にあり、軽水炉から FBR への移行期間が短 の順に MA 蓄積量が多くなる傾向を示す。FBR いケース、、、、、 導入ペースと MA 蓄積量の関係が反比例する理由は二つの要因による。 要因の 一つは軽水炉と FBR の共存期間であり、共存期間が長い場合には、再処理待 ちの軽水炉使用済燃料が長期間に渡って発生し続けることから、使用済燃料中 の MA 蓄積量が解消されるまで長期化する。二つめの要因は MA 需給バランス のミスマッチによるもので、FBR 導入ペースが遅い場合には軽水炉再処理廃液 からの MA 分離量よりも FBR 燃料としての MA 消費量が少ないため、その差 分が長期に渡って蓄積し続ける。したがって、軽水炉および FBR から発生し た MA を効率的にリサイクルする場合は、軽水炉から FBR への移行特性に優 れた炉システム、すなわち高増殖、コンパクト炉心といった概念がふさわしい といえる。

低ケースと高ケースの結果

ナトリウム冷却 MOX 炉(ケース )と水冷却炉(ケース )を代表例として、MA 添加率の上限を1%(低ケース)および5%(高ケース)でリサイク ルした場合の MA 蓄積量を図 4.4.2 に示す。また、同図には比較のため前出の 基準ケースの計算結果も示している。

先ずナトリウム冷却 MOX 炉を見ると、MA 添加率の上限を1%としたケース -4 ではほぼ自己リサイクル分の MA が消費され、軽水炉起源の MA は消費されずに残るため分離 MA の蓄積量が 2130 年頃まで増加し続け、軽水炉使用済燃料を全て再処理し終えた約 2130 年以降は 300 トン程度で推移している。また、MA 添加率の上限を5%としたケース -5の MA 蓄積量は、ケース -0(MA 添加率の上限3%)とほとんど変わらない傾向を示している。これは、高レベル廃液から回収した MA は添加率の上限を3%としたケース -0でほぼ全て消費されるため、ケース -5では MA 添加率の上限を5%に引き上げても実質的な MA 装荷量がケース -0(MA 添加率の上限3%)と同程度にとどまり、分離 MA の蓄積量もケース -0とほぼ等しくなる。

一方、ナトリウム冷却炉に比べ FBR 導入ペースが遅く、2200 年以降も軽水 炉利用が継続する水冷却炉では、MA 添加率の上限を5%に高めたケース - 5 でようやく他の炉型並みに安定する。 ()LLFP 低減効果

FBR サイクル実用化戦略調査研究で検討中の LLFP 分離変換サイクル概念で は、炉心燃料およびブランケット燃料から回収した発熱性の Sr と Cs は回収年度 ごとに硝酸溶液として保管し、発熱量の減衰を待って 50 年後に処分することと している。また、Tc と I はターゲット集合体として LLFP 核変換炉内で長期間照 射(Tc 集合体 60 年、I 集合体 48 年)を行い、各ターゲット集合体取出時の核変 換量( $^{99}$ Tc $\rightarrow^{100}$ Ru、 $^{129}$ I $\rightarrow^{130}$ Xe)と LLFP 核変換炉の寿命期間中に炉心燃料領域 で生じる Tc および I の生成量が同等になるシステムを検討している。

LLFP 分離変換サイクル概念図、FAMILY-EX(LLFP)(付録2に記載)を用いた計算例としてFBR使用済燃料から回収したSr およびCsの分離保管・処分量、 LLFP 核変換サイクルにおけるTcとIの回収・貯蔵量を図 4.4.3 にそれぞれ示す。 計算結果をまとめると以下のとおりとなる。

### SrとCsの分離保管特性

ケース - 0 (ナトリウム冷却 MOX 炉、先進湿式再処理、2030 年導入)を ベースにした LLFP 分離変換サイクルの場合、低増殖炉(経済性重視型 FBR) に移行し終えた 2130 年以降に着目すると、Sr は年間約 0.7 トンのペースで回 収され、減衰待ち貯蔵量は約 30 トンで概ね安定する。貯蔵期間が経過して 50 年後に最終処分される Sr の合計量は、2085 年から 2200 年までの累計で約 26 トンと見込まれる。同じく Cs は年間約 6 トンのペースで回収され、減衰待ち 貯蔵量は約 270 トンで概ね安定し、貯蔵から 50 年後に最終処分される Cs の合 計量は 2085 年から 2200 年までの累計で約 300 トンと見込まれる。Sr ならび に Cs が回収されずに HLW へ移行する量は各積算保管量の 1/100 程度であり、 分離貯蔵プロセスを設けない場合には積算保管量相当の Sr や Cs を HLW とし て処分することになる。サイクル諸量解析によるこれらの結果を基に、ガラス 固化体製作時の熱的影響や HLW の収納率などを評価することで Sr と Cs の分 離保管効果がより明確化する。

LLFP 核変換サイクル特性

LLFP 核変換サイクルの導入時期については FP 分離技術や核変換技術の開 発期間を考慮に入れ、FBR サイクルの主目的が Pu 生産から TRU 燃焼に移行 するタイミングが合理的であると考える。前出の図 4.4.3 では、LLFP 核変換 炉の導入は低増殖炉(経済性重視型 FBR)の導入と同期を図っており、2070 年頃に初号機が導入され、その後、5年~10年に1基程度の導入ペースで新設 が進み、2200年時点では FBR 全体の約 40%(発電設備容量 27GWe)を占め る。この期間のターゲット材の分離貯蔵量は、Tc が約 10 トン~20 トン、I が 10 トン前後に維持され、それぞれの回収量と貯蔵量の差が原子炉内で管理され ている。ちなみに FBR 全体に占める LLFP 核変換炉の導入割合を高めるには、 LLFP 核変換炉1基あたりのターゲット材の装荷量を少なくし、より多くの FBR で分散的に LLFP 核変換を行う方法が考えられる。

なお、LLFP 核変換サイクルを導入せずに Te や I を従来どおり HLW として 処分する場合、その廃棄量は概ね回収量相当になる。

(2) ウラン資源節約シナリオ

ウラン資源節約シナリオの計算結果として、5 つのグループに分けた FBR サイク ル候補概念の標準的な導入条件下での天然ウラン需要量、ナトリウム冷却 MOX 炉 (ケース)を代表とした天然ウラン需要量の増大要因に関する感度評価例、軽水 炉サイクルと連携を図った天然ウラン節約効果を以下に述べる。

()標準ケースの天然ウラン需要量

図 4.4.4 に各 FBR サイクル候補概念の標準ケースにおける FBR 導入量を示す。 グラフ中の資源重視型 FBR の導入ペースおよび経済性重視型 FBR の導入時期は、 核分裂性 Pu 貯蔵量を最少化するようサイクル諸量解析コードが自動計算した結 果である。また、標準ケースにおける軽水炉再処理施設の年間処理容量は第2再 処理施設以降についても 800 トンとしている。

各ケースの天然ウラン累積需要量を図 4.4.5 に示す。5 つのグループに分けた FBR サイクル候補概念の導入開始時期はケースによって異なるが、天然ウラン資 源節約性は、MA 低減効果と同様に高増殖かつコンパクト炉心をもつ候補概念が 優れている。

()需要増大ケースの感度解析例

ケース (ナトリウム冷却 MOX 炉、先進湿式再処理)の候補概念を代表例と して、ウラン資源の需要増大につながると考えられる(FBR 導入の遅延、 軽水 炉プルサーマル利用の長期化、 軽水炉 MOX 使用済燃料再処理の先送りを想定 した感度解析を実施した。図 4.4.6 に、それぞれのウラン資源増大要因に対する FBR 導入量と天然ウラン需要量を示す。FBR 導入開始を 2050 年としたケース -1の天然ウラン累積需要量は、標準的なケースI-0(2030年導入)よりも約 25 万トン増えて 103 万トン程度になり、OECD/NEA が公表している究極資源量 1620万トンの約6%に相当する。また、軽水炉プルサーマルの長期利用を想定し たケース -2 では、六ヶ所再処理施設で回収した Pu は主に軽水炉プルサーマ ルで消費し、これと並行的に FBR 再処理施設で軽水炉 MOX 使用済燃料から回 収した Pu を導入初期の FBR に供給する。このケース - 2の FBR 導入量は 2050 年時点で5GWe程度であるが、天然ウラン累積需要量はケース -1よりも約4 万トンの削減が見込まれる。一方、軽水炉 MOX 使用済燃料を第2軽水炉再処理 施設で処理するケース - 3 の場合、軽水炉 MOX 使用済燃料を FBR 再処理施設 で処理する標準ケース - 0 よりも約1万トンの天然ウラン需要量の削減が見込

まれる。このケース -3の天然ウラン需要量が少ない理由として Pu 組成の影響が考えられる。一般的な濃縮ウラン使用済燃料に比べ軽水炉 MOX 使用済燃料 から回収した Pu 同位体は <sup>239</sup>Pu の比率が低下し、<sup>240</sup>Pu や <sup>242</sup>Pu など質量数の大 きい偶数同位体が多く含まれる。この高次化した Pu を FBR 燃料加工施設で用い る場合は Pu 富化度調整によって出力あたりの Pu 需要量が多くなるため、製造 可能な FBR 炉心燃料は濃縮ウラン使用済燃料から回収した同一量の Pu を優先的 に使用する場合(例えばケース -3)よりも少なくなる。このことから、軽水 炉 MOX 使用済燃料再処理の先送りは、FBR 導入量の抑制ならびに天然ウラン需 要量の増加にはさほど影響しないといえる。

()需要節約ケースの天然ウラン需要量

前項までの天然ウラン累積需要量や FBR 導入量は、軽水炉再処理施設の年間 処理容量を 800 トンー定で計算した結果である。ここでは軽水炉サイクルとの協 調による天然ウラン節約効果として、第2軽水炉再処理施設以降の年間処理容量 を 1200 トンに増強した場合の FBR 導入量および天然ウラン累積需要量について 述べる。ちなみに第2軽水炉再処理施設の年間処理量 1200 トンは、六ヶ所再処 理施設の年間処理容量 800 トンに対し、将来の原子力発電設備容量と現在の原子 力発電設備容量の比 1.5(=将来の発電設備容量約 67.5GWe/現在の発電設備容 量約 45GWe)を掛けて設定した。

5 つのグループに大別した各 FBR サイクル候補概念について、第2 軽水炉再処 理施設以降の年間処理容量を 1200 トンに増強した計算結果を図 4.4.7~図 4.4.11 に示す。

図 4.4.7 は、ナトリウム冷却 MOX 炉心・先進湿式再処理の FBR サイクル概 念(ケース )を 2030 年および 2050 年から導入した場合の軽水炉再処理容量、 発電設備構成、天然ウラン累積需要量である。軽水炉再処理施設の年間処理量は 2100 年前後に著しく減少しているが、第 2 軽水炉再処理施設の後継施設の年間処 理容量を 400 トン程度に減らすことにより稼働率向上が期待できる。軽水炉再処 理施設の年間処理量を 1200 トンから 400 トンに変更した場合の影響として、FBR 導入ペースの鈍化とそれにともなう天然ウラン需要量の増加が想定されるが、 2100 年前後の発電設備構成を見ると既に半分以上が資源重視型 FBR に置き換わ り、経済性重視型 FBR も導入されていることから、資源重視型 FBR に置き換わ り、経済性重視型 FBR も導入されていることから、資源重視型 FBR と経済性重 視型 FBR の導入比率が変わる程度の影響にとどまり、FBR 導入ペースや天然ウ ラン需要量への影響はないと考える。また、天然ウラン累積需要量は、ケース - 7 と標準的なケース - 0(図 4.4.5 中)との比較では約 10 万トンの節約が見 込まれ、2050 年導入のケース - 6 とケース - 1(図 4.4.6 中)との比較では 約 12 万トンの節約により究極資源 5%を概ね達成し得る。

図 4.4.8 はナトリウム冷却金属燃料炉心・酸化物電解再処理(ケース)の標 準ケースとの比較であるが、そもそも本概念は軽水炉から FBR への移行特性が 優れているため天然ウラン累積需要量が少ないことから、その節約量は約4万ト ンにとどまる。

図 4.4.9 は鉛 - ビスマス冷却窒化物炉・先進湿式再処理(ケース) 図 4.4.10 はヘリウム冷却窒化物炉・先進湿式再処理(ケース) 図 4.4.11 は水冷却 MOX 炉・先進湿式再処理(ケース)の各標準ケースとの比較結果である。この3つ の候補概念の天然ウラン累積需要量は、導入開始時期の遅れ、単位出力あたりの 炉内 Pu インベントリーが大きいことや増殖性能が低いためナトリウム冷却炉よ りも多くなるが、その差は第2軽水炉再処理施設以降の年間再処理を増加するこ とによって幾分軽減する。

## (3) 経済性シナリオ

()低増殖 FBR の先行導入効果

FBR 導入時の初期投資を軽減する方策として、径方向ブランケット燃料集合体 を使用しない低増殖タイプの経済性重視型 FBR あるいは水冷却炉の先行導入が 考えられる。低増殖タイプの FBR を先行導入することにより、燃料加工施設お よび再処理施設では径方向ブランケット燃料集合体のプロセスを炉心燃料集合体 に振り分けることができるため、単位設備容量あたりの FBR サポート数が増大 し、リサイクル施設の増設抑制につながると思われる。そこでナトリウム冷却 MOX 炉心・先進湿式再処理の FBR サイクル概念(ケース )を代表例として、 資源重視型 FBR を 2050 年に導入するケース - 1、2030 年に経済性重視型 FBR あるいは水冷却炉を先行導入し、2050 年から資源重視型 FBR を導入するケース

- 10 とケース - 11 について比較計算を行った。

図 4.4.12 に各ケースの原子力発電設備容量の内訳と天然ウラン累積需要量、 軽水炉使用済燃料貯蔵量の計算結果をそれぞれ示す。2030 年に経済性重視型 FBRを導入するケース - 10 では、2050 年までに約 16GWe の導入量が見込ま れ、2030 年に水冷却炉を導入するケース - 11 では、2050 年までに約 6 GWe の導入量が見込まれる。軽水炉から FBR に全て置き換わる時期は 3 ケースとも 2130 年頃で大差なく、その間の天然ウラン累積需要量はケース - 10 が約 89 万トン、ケース - 11 が約 97 万トン、ケース - 1 が約 103 万トンと見込まれ る。また、軽水炉使用済燃料貯蔵量は、ケース - 1 のピーク量約 3 万 2 千トン に対してケース - 10 では約 6 千トン少ない約 2 万 6 千トン、同じくケース -11 は約 2 千トン少ない約 3 万トンになる。仮に 2030 年頃に経済性重視型 FBR システムの経済性が成立すれば、低増殖タイプの FBR でもウラン資源の節約や 軽水炉使用済燃料中間貯蔵量の削減、それに関連する経済的負担の軽減が期待さ れる。 () 核燃料サイクルのスリム効果

核燃料サイクルの経済性は一般的に建設コストや発電原価などの指標を用いて 表すが、軽水炉サイクルと FBR サイクルの共存期間の短縮やリサイクル施設の 小規模化は、核燃料サイクル全体のスリム化やコスト低減に寄与すると考えられ るため、ここでは軽水炉から FBR への移行期間やリサイクル施設の必要規模に 着目してサイクル諸量の観点より経済性に関する考察を試みた。

5 つのグループに大別した候補概念を 2030 年から導入した場合の FBR 導入量 と使用済燃料再処理量(濃縮ウラン燃料、プルサーマル燃料、FBR 燃料)を図 4.4.13 に示す。ケース ~ の候補概念は 2120 年~2130 年に軽水炉から FBR への移行を終えているが、それらに比べ単位出力あたりの炉内 Pu インベントリ ーが大きいケース の移行完了は来世紀末までずれ込む。さらに炉内 Pu インベ ントリーが大きくかつ低増殖タイプのケース の FBR 導入量は 2200 年時点で 43.5GWe にとどまる。また、核燃料サイクル全体の再処理量は、軽水炉から FBR への移行期間が長いケースほど多く必要とすることがわかる。図 4.4.14 はケー ス ~ の FBR 導入量と必要再処理量を、ケース の計算結果を用いて相対化 したものであるが、5 つの候補概念の中でケース ~ は軽水炉サイクルと FBR サイクルの共存期間の短縮やリサイクル施設の小規模化が期待される。

- (4) 需要順応シナリオ
  - ()基準ケース

将来の原子力発電設備容量に平成 15 年 12 月末時点の原子力開発計画を用いた 基準ケースの結果を図 4.4.15 に示す。天然ウラン累積需要は、2120 年~2130 年に概ね FBR に移行し終えるケース ~ の候補概念では究極資源の4%~ 6%程度にとどまるが、軽水炉から FBR への移行完了が来世紀末になるケース では究極資源の約8%、FBR 導入量が 43.5GWe のケース では 2200 年時点 で約 11%を超えてなおも増加する傾向にある。

() 拡大ケース

原子力水素製造を想定した拡大ケースの計算結果を図 4.4.16 に示す。拡大ケ ースでは第2軽水炉再処理施設の年間処理量を 1200 トンに増強しているため回 収 Pu 量の増加によって FBR の導入ペースが促進され、2030 年 FBR 導入開始の ケース の FBR 移行完了時期や天然ウラン累積需要量はケース とほぼ同程度 になる。一方、2050 年 FBR 導入開始のケース とケース では FBR の導入ペ ースの改善はあまり期待できず、それぞれの FBR 移行完了時期は来世紀後半に ずれ込み、天然ウラン累積需要量も究極資源の 10%を超える。

原子力水素製造については、日本に比べ運輸部門のエネルギー消費量が多い欧 米ではエネルギー自給率の向上と大気汚染物質放出量の削減の観点から関心が高 く、今後15年~30年の間に技術的課題や経済性を改善すべく開発を進めており、 将来的には原子力利用の新たなオプションとして加わる可能性を秘めている。仮 に原子力水素製造が世界規模で本格化した場合には、将来の原子力設備容量は発 電用以上に増加すると考えられることから、ウラン資源問題が切迫する事態も生 じ得る。

()低成長ケース

低成長ケースの計算結果を図 4.4.17 に示す。原子力発電設備容量が 2100 年に 80GWe まで緩やかに成長し続ける低成長ケースでは、軽水炉の寿命廃止を待た ずに FBR の新設が可能になることから、全体的に FBR の導入ペースが促進され ている。とくに 2030 年 FBR 導入開始ではその傾向がウラン資源節約効果として 顕著に現われており、基準ケース(67.5GWe)の天然ウラン累積需要量に対して ケース - 9 は約 2 万トンの節約、ケース - 9 は約 3 万トンの増加にとどまる。 ちなみにケース - 9、ケース - 9、ケース - 9 における天然ウラン累積需要 量はそれぞれ約 12 万トン、約 14 万トン、約 24 万トンの増加が見込まれる。

(5) 国内全体解析の考察

FBRサイクル実用化戦略調査研究フェーズの中間評価で提案された22候補 概念を5つのグループに大別し、各グループの環境負荷低減性・資源節約性・経 済性・需要変動への柔軟性に対するシステム特性を、国内全体を検討対象範囲と するパラメータ解析により定量評価した。この国内全体解析の評価結果をまとめ ると以下のようになる。

環境負荷低減性

軽水炉およびFBRから発生したMAを効率的にリサイクルする場合は、軽水炉 からFBRへの移行特性に優れた炉システム(高増殖、炉内Puインベントリがコン パクト)がふさわしく、グループ別ではケース (ナトリウム冷却金属炉)、ケ ース (ナトリウム冷却MOX炉)、ケース (鉛 - ビスマス冷却炉)、ケース (ヘリウム冷却炉)、ケース (水冷却炉)の順であった。また、軽水炉から回 収したMAをFBR燃料に均質装荷する場合のMA添加率は、ケース ~ では約 3%を目安とし、ケース では5%程度に高めるとMA蓄積量が他のケース並みに 軽減する。

資源節約性

天然ウランの資源節約性に優れたFBRサイクル概念は、環境負荷低減性と同様 に高増殖かつ炉内Puインベントリがコンパクトなナトリウム冷却金属炉、ナトリ ウム冷却MOX炉、鉛-ビスマス冷却炉、ヘリウム冷却炉、水冷却炉の順であり、 天然ウラン累積需要量が究極資源5%(約81万トン)を下回る候補概念はナトリ ウム冷却炉の二つに限られる。仮にナトリウム冷却MOX炉の本格導入開始が鉛-ビスマス冷却炉やヘリウム冷却炉の実用化時期として見込んでいる2050年頃に ずれ込んだ場合でも、第2軽水炉再処理施設の年間処理規模を1200トンに増強し てFBR導入ペースの改善を図ることにより、天然ウラン累積需要量(約87万トン) を概ね究極資源5%にとどめることができる。

経済性

FBRの初期導入炉型として、2030年頃に低増殖タイプの経済性重視型FBRある いは水冷却炉を導入し、2050年から高増殖タイプの資源重視型FBRに切り替える ケースと、資源重視型FBRを初期導入炉型として2050年から導入を開始するケー スを比較した結果、2030年に経済性重視型FBRシステムが成立すれば低増殖タイ プのFBRでもウラン資源の節約と軽水炉使用済燃料中間貯蔵量の削減、それに関 する経済的負担の軽減が期待されることが分かった。また、5つのグループに大 別した候補概念のFBR移行期間や必要再処理規模を比較した結果、ナトリウム冷 却MOX炉、ナトリウム冷却金属炉、鉛 - ビスマス冷却炉は軽水炉サイクルとFBR サイクルの共存期間の短縮化やリサイクル施設の小規模化が期待できるため、核 燃料サイクル全体のスリム化による経済的効果が見込まれる。

需要変動への柔軟性

5 グループに大別した候補概念の FBR 移行特性を 3 ケースの設備容量(標準: 67.5GWe、拡大:ピーク時 113GWe、低成長:2100 年 80GWe)で比較した結果、 ナトリウム冷却 MOX 炉およびナトリウム冷却金属炉を採用した FBR サイクル 概念は、他の候補概念よりも軽水炉から FBR への移行期間が短く、天然ウラン 累積需要量も少ない特徴をもつ。また、3 ケースの設備容量間の比較については、 2015 年以降の原子力発電設備容量を 67.5GWe 一定とした標準ケースでは、FBR の導入は軽水炉あるいは FBR の寿命廃止によるリプレース時に限定される。一 方、FBR の導入期間に原子力発電設備容量が増大する拡大ケースや低成長ケース では、Pu 需要条件を満たせば FBR の新設で原子力発電設備容量の増加が可能で あり、FBR 新設の機会は、原子力発電容量が 2050 年ごろにピークを迎える拡大 ケースよりも 2100 年まで連続的に増加する低成長ケースのほうが多いため、軽 水炉と FBR の共存期間短縮に有利といえる。視点を変えれば、連続的に増加す る需要変動は、軽水炉の他に FBR を新設炉の候補として導入し得る柔軟性をも ち、その柔軟性に応えられ候補概念は天然ウラン累積需要量を目安とした場合に はナトリウム冷却 MOX 炉とナトリウム冷却金属炉があげられる。







図 4.4.2 環境負荷低減シナリオ解析結果(低位ケース:MA 添加率上限1%、高位ケース:MA 添加率上限5%)



-323-





2200

2150

2100

2050

2000

2200

2150

2100

2050

2000

西暦(年) ケース -1

Ŷ

ケース

西暦(年)







ウラン資源節約シナリオの需要増大ケースにおける FBR 導入量と天然ウラン累積需要量 4.4.6 义







4.4.8 ウラン資源節約シナリオの需要節約ケースの感度解析例(ナトリウム冷却金属炉サイクル) X

























		_		_	
導入開始 (年)	2030	2030	2030	2030	2030
システム構成(炉、再処理)	Na冷却MOX炉、先進湿式	Na冷却金属炉、酸化物電解	Pb-Bi冷却窒化物炉、先進湿式	He冷却窒化物炉、先進湿式	水冷却MOX炉、先進湿式
ケース	Ŷ	<b>-</b>	<b>0</b> -	٩	Ŷ









**需要順応シナリオの拡大ケースにおける原子力設備構成と天然ウラン累積需要量(水冷却炉を除く)** 4.4.16 刻



4.4.17 需要順応シナリオの低成長ケースにおける原子力設備構成と天然ウラン累積需要 义

4.4.2 国内地域(コロケーションサイクル)を対象としたシナリオ解析結果

コロケーションサイクルの国内導入解析結果として、軽水炉発電プラント7~8 基程度の大規模サイト(設備容量 7.5GWe)と軽水炉発電プラント3~4基程度の 小規模サイト(設備容量 3GWe)における FBR 移行特性について述べる。なお、発 電プラント1基あたりの設備容量は 4.3.2 小節の(2)項で既述したとおり、大規模サ イトでは 1.5GWe/基とし、小規模サイトでは 0.75 GWe/基と想定した。

#### (1) 大規模サイト

図 4.4.18 に大規模サイトのサイクル諸量解析結果を示す。本ケースの場合は 2036 年に FBR (資源重視型ナトリウム冷却 MOX 炉)の本格導入を開始し、概ね 60 年後の 2099 年に軽水炉から FBR への移行を終えている。この間の天然ウラン 累積需要量は 8.3 万トンとなり、仮に国内全体の設備容量が 67.5GWe で資源制約 量を 81 万トンとした場合には設備容量で比例配分した資源制約目標の9万トンを 下回る。このように軽水炉から FBR への移行が比較的短期間で済み、資源制約目 標を下回った理由としては、大規模サイトでは軽水炉使用済燃料起源の回収 Pu を 大量に供給可能なことに起因している。軽水炉使用済燃料の中間貯蔵量は 2045 年 頃の約 2100 トンをピークに徐々に減少し、FBR 移行完了とほぼ同時期の 2100 年 頃には再処理を終えている。

一方、FBR 再処理施設については、初号機の年間処理量は軽水炉プルサーマル使 用燃料の再処理を見込んでも 25 トン程度でよく、初号機が寿命を終えてリプレー スする際に年間処理量を 50 トンに増強し、その後については年間処理量 25 トンの ユニットで拡充するのが望ましい。また、2030 年から 2200 年までの FBR 再処理 施設の平均設備利用率は 91%と計算された。

なお、諸量解析では平衡装荷燃料および初装荷燃料の必要量を1年で製造すると 仮定していることから、燃料加工量ならびに分離 Pu 貯蔵量がパルス状に変動して いるが、実際のプロセスでは計画的な燃料加工により平坦化できるものと考える。 (2) 小規模サイト

図 4.4.19 に小規模サイトのサイクル諸量解析結果を示す。小規模サイトの場合 も FBR 導入開始は 2036 年であるが、初号機から後続機の立ち上げまで約一世代程 度の時間を要しているため、軽水炉から FBR への移行完了は 2110 年頃になってい る。FBR 移行期間が長期化したことにより、天然ウラン累積需要量は資源制約目標 (大規模サイトと同様の考え方)を約1割程度上回る4万トンになり、FBR 再処理 施設の平均設備利用率は FBR 導入量が少ないため約 61%にとどまる。小規模サイ トの FBR 移行特性が低迷した理由として、二つの原因が考えられる。一つは、軽 水炉回収 Pu を軽水炉プルサーマルに用いたため分離 Pu 貯蔵量が不足したこと。 二つめは図 4.4.20 に対策前として示したとおり、小規模サイトの原子炉運転開始 間隔が不均一であったことがあげられる。大規模サイトの原子炉運転開始は約 30 年でほぼ等間隔を成しているが、小規模サイトの原子炉運転開始が約 15 年の間に
集中していることから、FBR を立ち上げる場合には短期間に大量の Pu 備蓄が必要 になる。そこで、小規模サイトの Pu 需給を平準化する対策として、 軽水炉回収 Pu はプルサーマルに使用せず FBR パイロットプラント(2020 年導入)へ供給し、

軽水炉寿命廃止後の代替機の運転開始を先送りして原子炉運転開始間隔の均等 化を図る。

Pu 需給の平準化対策を施した計算結果を図 4.4.21 に示す。原子炉運転開始間隔 を調整したため原子力発電設備容量の減少期間は対策前よりも 25 年程度長くなる が、FBR の導入ペースおよび累積導入量が格段に改善されている。また、天然ウラ ン累積需要量は対策前よりも 40%以上の節約が見込まれ、FBR 再処理施設の年間 平均設備利用率も約 81%に改善されている。さらに、軽水炉使用済燃料の中間貯蔵 量は 2040 年頃の約 1000 トンをピークに急速に減少し、2080 年頃には中間貯蔵の 管理から開放される。一方、分離 Pu 貯蔵量のピークも約半分程度に減少し、200 年間の平均 Pu 貯蔵量は6 トン程度にとどまる。

小規模サイトを想定した Pu 需給の平準化対策は、検討対象範囲を国内全体に拡大した場合の FBR サイクル導入助長策としても機能すると考えられことから、考察を以下にまとめる。

FBR 導入においては、次のような運転条件ならびに原子炉運転計画を適切にする ことで FBR 移行特性さらには資源節約が見込まれる。

軽水炉プルサーマル利用期間を短縮し、FBR 導入用核分裂性 Pu の確保を図る。 小型 FBR の先行導入を図り、FBR 本格導入用の核分裂性 Pu の供給支援に努め る。

原子炉の運開 / 廃止計画を調整し、リプレース間隔の均等化を図る。



図 4.4.18 コロケーションサイクルの国内導入解析例(大規模サイト)









新設量(MWe)

500

0

2000



図 4.4.21 小規模サイトにおける運転開始計画変更後の解析結果

#### 4.4.3 世界全体の解析結果

世界全体を検討対象範囲にした FBR 導入解析では、国内全体解析で採用した候補 概念 (ナトリウム冷却大型 MOX 炉 - 先進湿式再処理 - 簡素化ペレット燃料)と 候補概念 (ナトリウム冷却大型金属炉 - 金属電解再処理 - 射出成型燃料)を評価 対象とし、各候補概念とも 2030 年および 2050 年に導入を開始する計4ケースのサ イクル諸量計算を行った。ここでは4ケースの中で FBR 導入量が最も多かったケー ス - 0(ナトリウム冷却大型金属炉 2030 年導入開始)と、逆に FBR 導入量が最 も少なかったケース - 1(ナトリウム冷却 MOX 炉 2050 年導入開始)の計算結果 を述べる。

なお、FBR 導入量が最少ケースの - 1 については、その有効性を否定するものではないことを予め言及しておく。

図 4.4.22 に世界全体解析として実施したケース - 1とケース - 0の計算結 果を示す。2050 年導入開始のケース - 1では、2100 年時点の FBR 導入量は約 2700GWe となり、IIASA/WEC が最も現実的としている中位シナリオの 46%程度 にとどまり、2030 年導入開始のケース - 0は同じく 53%、約 3100GWe の FBR 導入量であった。グラフ上から分かるように、両ケースとも軽水炉使用済燃料の再 処理を積極的に行い、回収した分離 Pu をもれなく利用しても全ての炉型が FBR に 置き換わるまでにはさらに半世紀程度を要すると考えられる。この間、天然ウラン 累積需要量は 2070 年~2080 年頃に究極資源量 1620 万トンを超え、2100 年時点で は究極資源の約 1.7 倍~2 倍程度の需要に上るとみられる。

将来の原子力設備容量が2000年時点の1.5倍~2.5倍程度と予想される国内需要 に対し、世界全体の原子力需要は2050年で2000年の約5倍(1940GWe)2100 年には同じく16倍程度(5810GWe)に急成長するとも考えられていることから、 世界規模のニーズを考慮に入れた場合には、フェーズ中間評価で検討した資源重 視型 FBR サイクル概念の増殖性能をさらに強化したオプションが必要になる。ちな みに増殖性能の強化としては、増殖比を1.3程度に高めたFBRやプルトニウム生産 のタイムラグを軽減するために炉外サイクル時間の短縮化(例えば現行設計では燃 料集合体の炉外冷却-再処理-加工-炉内装荷の一巡時間を5年としているところ を3年とか)を図ったリサイクルシステムの採用などが考えられる。



図 4.4.22 世界全体を対象とした FBR サイクル導入の解析例

4.5 シナリオ検討のまとめと今後の進め方

FBR サイクル導入シナリオとして、将来の原子力利用オプションと課題の検討、 FBR サイクルの導入意義に関する検討・考察、国内全体および国内地域別、世界全体の検討対象範囲とするサイクル諸量解析とシステム特性評価を行った。

検討結果の詳細は各小節の考察を参照して頂き、結果のアウトラインのみを以下に まとめる。

原子力利用の将来課題として、原子力エネルギーの持続的安定供給を目指すうえで、 陸上ウランに代わる資源確保が肝要であり、海水ウランによる軽水炉ワンススルー 利用は、使用済燃料直接処分場や濃縮テイルウランの貯蔵・処分場の確保、海洋構 造物の建設などの課題が想定される。

新たな資源開発を必要としない FBR サイクルは、エネルギー需要に応じて軽水炉 使用済燃料中の TRU を再利用する再生型システムであり、軽水炉起源の廃棄物削 減に寄与する。

環境負荷低減、ウラン資源節約、経済性、需要変動への柔軟性に着目したシナリオ 解析により、将来のFBR サイクルではMA添加率は3%程度を目安とし、炉内プ ルトニウムインベントリが小さく、ブランケット領域の運用により資源重視型炉心、 経済性重視型炉心、LLFP核変換型炉心間の切り替えが可能であることが望しい。 世界規模のニーズを考慮した場合には、フェーズ 中間評価で検討した資源重視型 FBR サイクル概念の増殖性能をさらに強化したオプションが必要になる。

今後は、シナリオ検討結果ならびにシステム特性の分析結果をフェーズ 後半で進める FBR サイクルの概念設計に反映するとともに、原子力利用の持続化や多様化に むけた将来シナリオを具体的に提示していく予定である。 [参考文献]

- OECD NEA/IAEA, "Uranium 2001:Resources, Production and Demand " ( 2002).
- [2] 小野清他,「FBR サイクル導入シナリオの検討 (). サイクル諸量の観点からの FBR 導入シナリオの評価 - 」,JNC TN9400 2003-061 (2003.7).
- [3] 市村鋭一他,「21 世紀の原子力発電の持続的安定供給と地球温暖化抑制効果の分析」,火力原子力発電 Vol.54 No.12,(2003.12).
- [4] 須郷高信他,「海水ウラン捕集のコスト評価と実用化に向けての技術課題」,原子力 学会誌 Vol.43 No.10,(2000.10).
- [5] 成田達治,「平成 15 年度電力供給計画の概要」,電機,(2003.7).
- [6] OECD/NEA, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, (1994).
- [7] 中島拓男,「海水ウラン回収プラントの概念設計」,原子力 eye Vol.45
  No.8,(1999.8).
- [8] 篠田佳彦他,「総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ).成果報告 書 - 」,JNC TN9400 2001-061(2001.3).

5. 投資対効果に関する検討

この章では、FBRサイクル研究開発の投資対効果評価システム<sup>[1][2][3][4]</sup>を用いて、 各FBRサイクル候補概念の研究開発について投資対効果を検討する。

5.1 フェーズ I 評価時からのシステムの変更点

実用化戦略調査研究フェーズ II の中間評価を行うにあたり、FBR 導入時の天然 ウラン価格の算出方法を、フェーズ I 評価<sup>[5]</sup>時に使用していた「需要による価格の 弾性値」<sup>[2]</sup>を用いて求める方法から、天然ウランの需要量とコスト区分の関係から 天然ウランの価格上昇率を求める方法に変更した。図 5.1.1 に需要とコスト区分か ら求めた天然ウラン価格と、需要による価格の弾性値から求めた天然ウラン価格の 比較を示す。



図 5.1.1 システム変更による FBR 導入時の天然ウラン価格の違い

算出方法を変更した結果、需要とコスト区分から求めた FBR 導入時の天然ウラン価格は、弾性値を使用して求めた場合に比べて高く、FBR 非導入時の天然ウラン価格とほとんど変わらない価格となった。これは、天然ウランの需要量の設定に用いる原子力の発電設備容量が、世界全体では約6700GWe(2110年時点。IIASA/WECBケース<sup>[6]</sup>を元に設定)であるのに対し、日本のみでは約100分の1の67.5GWと非常に小さく、FBR を日本のみに導入したとしても、世界全体の天然ウランの需要量にはあまり影響を与えないためと考えられる。

なお、LNG・石炭の FBR 導入時の燃料価格の算出方法に関しては、LNG および 石炭の国内外の需要量の予測・生産コスト区分に関する情報を入手することが難し いことから、前回の解析時と同様の「需要による価格の弾性値」から算出すること とした。

### 5.2 解析ケース

解析対象とする FBR サイクルシステムは、表 5.2.1 に示す FBR サイクル実用化 候補概念の 22 ケースとし、研究開発投資額、代替電源構成、割引率を、表 5.2.2 に示す組み合せで変更して解析を行った。

ケース	炉	树料		再処理	<u></u>		炉心	サイクル設定の趣旨
	N	7700 111	湿/乾	処理規模	方式		, .D.	
1							資源	MOX燃料の是ま有望な混式概今
2				十扫描		簡素化ペレット	経済	間の人際科切取も月至な地比喩心
3				入況候 (200t/v)	先進湿式		LLFP	FP核変換の代表的な有望概念
4				(2001/9)		拒新去捕	資源	産業また。おうなど、
5			湿式			掀到尤填	経済	燃料表垣法の建いを計画
6	Na大型炉	MOX			生准识式	節麦化ペレット	資源	燃料サイクル施設相構の違いた評価
7	(1500MWe)			小規模	九進州山		経済	が行うしているように
8				(50t/y)	招防贯	簡表化ペレット	資源	小相横施設の経済性向上に右胡な再加理概会
9					ル旦ビロックト	間系にハレット	経済	小規模施設の経済性内工に有重な再処理概念
10			あざ	小規模	敵化物電解	垢動女埴	資源	MOX燃料の是ま右胡たち式概今
11			¥21V	(50t/y)	取10170电肿		経済	間の人際科切取し月至な投上が減必
12		全屋	おざ	小規模	全层電磁	时中马里	資源	全屋桝料で早ま右胡たサイカル椰舎
13		立周	早乙エレ	(50t/y)	立周电胜	别山成堂	経済	並属燃料で取り有重なサイブル概念
14	Na中型炉シングル						資源	
· · ·	(750MWe)	МОХ	湿式	小規模	超臨界	簡素化ペレット	<i>吴</i> //小	初期投資の少ない概念
15	Na中型炉モシュール (750MWo)			(5017y)			経済	
16	(7300000)			大相榵			咨讵	
17	Pb-Bi中型炉	窒化物	湿式	(200t/v)	先進湿式	簡素化ペレット	经济	Pb-bi炉サイクルの有望概念
18	強制循環			大扫樟			咨源	
19	(710MWe)	MOX	湿式	(200t/y)	先進湿式	簡素化ペレット	経済	燃料の違いを評価
20	He大型炉	窒化物	30十	大規模	脱被覆+	<b>地</b> 要计	資源	
21	(1124MWe)	被覆粒子	運式	(200t/y)	先進湿式	饭復広	経済	
22	水冷却炉	MOX	湿式	大規模	先進湿式	簡素化ペレット	-	水冷却炉サイクルの有望概念

表 5.2.1 対象 FBR サイクルシステム

資源 : 倍増時間を短縮し、より効率的に Puを増殖させる炉心仕様。増殖比 1.1~1.2。

経済 : ピン太径化により燃料体積比を向上させ、平均燃焼度向上により燃料サイクルコストの低減を図った概念。 径ブランケット燃料無で増殖比 1.0 を僅かに上回る。

LLFP : 径ブランケット域にターゲット集合体として LLFP を装荷し、核変換することを目指した概念。

表 5.2.2 解析条件の組み合せ

研究開発投資額	代替電源構成	割引率		
年間 500 倍田	LWR70%、LNG 火力 20%、石炭火力 10%			
中间 500 億円	LWR100%	20/		
ロードフップトの研究問惑毒	LWR70%、LNG 火力 20%、石炭火力 10%	3/0		
ロートマッノエの研究開究員	LWR100% LWR100%			
年間 500 億円	LWR70%、LNG 火力 20%、石炭火力 10%	<b>0</b> 0/		
ロードマップ上の研究開発費	LWR70%、LNG 火力 20%、石炭火力 10%	∠%		

#### 5.3 解析条件

解析に用いた主な条件を表 5.3.1 に示す。

表	5.3.1	主要なノ	ペラメー	-9(	の設定
---	-------	------	------	-----	-----

項目		設定値	備考
解析期間		2003 年 ~ 2200 年	
社会的割引率		3%	
研究開発投資開始時	期	2003 年	
FBR 導入開始時期		2030,2050 年	
FBR 導入規模		67.5GW	導入量が 67.5GW に達した後は一定
FBR 研究開発費		500億円/年,ロードマップ	割引後一定 FBR 導入後なし
代替電源シナリオ	LWR	70%	
	LNG 火力	20%	
	石炭火力	10%	
発電効率	LWR	34.5%	将来の発電(熱)効率を想定
	LNG 火力	65%	
	石炭火力	60%	
燃料価格	ウラン	3,368 円/kgU	年間 2.74%上昇
	LNG	28.09 円/kg	年間 0.27% 上昇
	石炭	4.33 円/kg	年間 0.77% 上昇
エネルギーショック	発生確率	0.1 回/年	10年に1回
	燃料価格上昇率	143%	燃料価格が平常時の 2.43 倍
CO <sub>2</sub> 削減価值		0.0024 円/g C	
SO <sub>x</sub> 削減価值		0.192 円/g SOx	
NO <sub>x</sub> 削減価值		0.6 円/g NOx	
CO2発生量	FBR	2.2g-c/kWh	
	LWR	2.54g-c/kWh	
	LNG 火力	142g-c/kWh	
	石炭火力	266g-c/kWh	
SOx 発生量	FBR	0g/kWh	
	LWR	0g/kWh	
	LNG 火力	0g/kWh	
	白炭火刀	0.46g/kWh	
NOX 発生重	FBR	0g/kWh	
		0g/kWh	
	LNG 火刀	0.14g/kWh	
体制的生态压住		0.42g/kWh	
		31,000 万円/人	
事故による死亡率	I FBK		
	LING 火力   テェルキ		
1	勹灰火刀	4.76 人 · GW/年	

## 解析期間

FBR サイクルの研究開発への投資期間は、投資対効果の評価時点の 2003 年か ら、FBR サイクルが完成し本格導入を開始するまで(2030 年・2050 年)とした。 また、FBR サイクルの導入による効果の計測期間は、FBR サイクルの本格導入 開始時点から、FBR の導入シナリオ検討において標準的な解析期間としている 2200 年までを対象とした。2200 年までには、ほとんどの FBR サイクル候補概念 について LWR から完全に置き換わることとなる。 社会的割引率

割引率は、長期の費用便益分析を行なう際には、設定値により結果を大きく左右 するため、他の長期の費用便益分析における事例を考慮した3%のケースと、長期 的な低成長・低インフレが今後も継続すると予測した2%のケースを設定した。

FBR 導入開始年

FBR サイクルの実用化戦略調査研究のロードマップに従い、表 5.3.2 に示すように、FBR サイクル候補概念によって 2030 年または 2050 年に設定した。

表 5.3.2 FBR サイクル実用化候補概念の導入開始年

FBR 導入開始年	該当ケース
2030 年	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,22
2050 年	16,17,18,19,20,21

<u>FBR 導入量(kWh)</u>

実用化戦略調査研究の中で別途作業が行われている導入シナリオの検討の解析 結果にあわせ、原子力発電の最大設備容量を 67.5GWe とし、FBR システム候補 概念毎に、諸量解析ツール「FAMILY-21」にて算出した FBR の設備容量(GWe 単位)を発電電力量(kWh単位)に換算して使用した。

各 FBR システム候補概念の FBR 導入量の推移を図 5.3.1 に示す。



図 5.3.1 FBR サイクル実用化候補概念の導入量推移

### <u>FBR 発電コスト(円/kWh)</u>

FBR サイクル実用化候補概念の設計値より算出した値を使用した。用いた FBR サイクルの発電コストを図 5.3.2 に示す。



図 5.3.2 FBR サイクル実用化候補概念の発電コスト

#### 研究開発投資

近年のサイクル機構の予算等からおおよその値として算出した金額である年間 500億円(実質)を、計算開始年から FBR システムの実用化(FBR の導入開始年 の前年)まで計上することとした。

また、ロードマップなどを参考にして実用化戦略調査研究において候補概念ごと に算出した金額(本社経費などが含まれないので金額的には少ない)を用いた感度 解析も行った。

<u>代替割合(%)</u>

FBR を代替する電源の割合は、FBR の導入は LWR のリプレイスであると考えた LWR100%のケースと、環境への影響や資源量等の観点から今後も導入が増えると思われる LNG・石炭を含めた LWR70%、LNG20%、石炭 10%としたケースを設定する。

なお、新エネルギーに関しては、現時点において将来の発電コストおよび導入量 の予測データに不確実性が高いことから、今回の解析対象から除いた。

<u>国内燃料需要量(kg)</u>

天然ウラン

FBR の実用化候補概念毎に諸量計算コード「FAMILY-21」にて算出した天然ウ

ラン累積需要量を使用する。

LNG・石炭

2030年以降の国内の燃料需要量の予測値として、今回調査した予測値の中で最 新のデータで 2020年までの予測がある、日本エネルギー経済研究所の第 374 回定 例研究会<sup>[7]</sup>で発表された表 5.3.3 に示す値を使用した。

#### 表 5.3.3 一次エネルギー総供給実績と予測(基準ケース)

	( 石沺換算白万トン )					
	1990	2000	2010	2020		
石炭	81	100	108	111		
LNG	49	73	86	93		

日本エネルギー経済研究所 第374回定例研究会「わが国の長期エネルギー需給展望」(2002年)

なお、2021~2200 年までの値については、2020 年の値をそのまま使用するこ ととした。

#### 燃料価格初期値(円/kg)

#### 天然ウラン

Nuclear Fuel 誌<sup>[8]</sup>に掲載されている 2002 年の天然ウラン価格(TradeTech 社の 長期契約価格)を平均した 10.62\$/IbU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>を円/kgU に換算。(2002 年の平均為替 レート = 121.98 円/\$)

#### LNG・石炭

経済産業省の総合エネルギー調査会・電気事業分科会・コスト等検討小委員会に おいて配布された発電コスト試算に関する資料<sup>19</sup>の値を使用した。

設定した燃料価格初期値を表 5.3.4 に示す。

表 5	.3.4	設定	した燃料	価格	初期	直
-----	------	----	------	----	----	---

	天然ウラン	LNG	石炭
2002 年の価格	3368 円/kgU 1	28.09 円/kg 2	4.33 円/kg 2
1 Nuclear Fu	uel Vol.27 No.2~Vol	.28 No.4 , (2002~200	03)

2 電気事業連合会,モデル試算による各電源の発電コスト比較,(2004)

#### 燃料価格上昇率(%/年)

## 天然ウラン価格(FBR 非導入時)

天然ウラン価格の上昇率を予測した文献は短期的な予測が多く、2200 年までという超 長期的な予測をした文献が見当たらないことから、OESD/NEA, IAEA による 「Uranium2001」<sup>[10]</sup>(通称レッドブック)にて報告されている天然ウランの資源 量と生産コストの関係と、IIASA/WEC による世界のエネルギー需給予測の発電電 力量を基に FAMILY-EX の解析で求めた WEC-B ケースにおける天然ウラン需要 量から、2002 年~2068 年(究極資源量到達年)までの上昇率を算出した。 算出に使用した天然ウラン資源量と生産コストの関係を表 5.3.5 に、天然ウラン需要 量と生産コスト区分を元に算出した天然ウラン価格の上昇率を表 5.3.6 に示す。

表 5.3.5 天然ウラン資源量と生産コスト(Uranium 2001 年度版)

生産コスト ( / kgU )	\$40 以下	\$80 以下	\$130 以下	区分なし	合計
下段(/IbU <sub>3</sub> 0 <sub>8</sub> )	\$15 以下	\$31 以下	\$50 以下		
確認資源	169	252	318		318
推定追加資源-1	61	95	121		121
推定追加資源-2		148	233		233
期待資源			444	994	994
合計	230	495	1116		1666

OESD/NEA, IAEA 「Uranium 2001」のデータより作成

LNG・石炭価格(FBR 非導入時)

経済産業省の総合エネルギー調査会・電気事業分科会・コスト等検討小委員会に おいて配布された発電コスト試算に関する資料<sup>[9]</sup>の値を使用した。

表 5.3.6 設定した FBR 非導入時の燃料価格上昇率

	天然ウラン	LNG	石炭	
FBR 非導入時価格上昇率	2.74%	0.27%	0.77%	

電気事業連合会,モデル試算による各電源の発電コスト比較,(2004)

天然ウラン価格(FBR 導入時)

FBR 非導入時と同様の方法で、FBR 非導入時の上昇率算出時に使用した天然ウ ラン需要量から FBR を LWR が代替する分の需要量を差し引いた値を用いて FBR 導入時の上昇率を算出する。

天然ウラン価格は、FBR 導入時の上昇率は、FBR の種類によって LWR が代替 する天然ウラン需要量が変わるため、計算ケース毎に異なる。

LNG・石炭価格(FBR 導入時)

表 5.3.7 に示す、エネルギー需要によるエネルギー価格の弾性値<sup>[2]</sup>(エネルギー 需要が一単位増加したときに上昇するエネルギー価格に相当)を基に算出する。

LNG・石炭の価格は、FBR の種類によって、LNG および石炭火力が代替する 分の燃料需要量が変わるため、計算ケース毎に異なる。

	LNG	石炭
需要による価格の弾性値	2.5	2.5

表 5.3.7 需要による価格の弾性値

#### 燃料価格上限値

天然ウランの燃料価格上昇率を西暦 2200 年まで適用させた場合、西暦 2200 年 の天然ウラン価格は 70 万円/kgU 以上に上昇することになり、LWR の発電原価は 30 円/kWh 以上となる。

しかし、日本原子力研究所等で研究が進められている、海水からウランを収集す る技術が確立した場合、天然ウラン価格が無制限に上昇することは考えにくい。

そこで、Gen-IV における検討<sup>[11]</sup>を参考にして、海水ウランの収集コストに対応 したウラン価格をウラン価格上限値として設定することとした。

各電源の燃料価格上限値を表 5.3.8 に示す。

表 5.3.8 燃料価格上限値

	天然ウラン	LNG	石炭
燃料価格上限値	24,000 円/kgU	設定なし	設定なし

#### <u>代替電源発電コスト(円/kWh)</u>

FBR の発電コストに関しては、実用化戦略調査研究において検討された設計デ ータから算出したもので、多面的評価の中で経済性評価に用いた値と同じである。 代替電源の発電コストに関しては、毎年の燃料価格を FCC-EX に入力し、毎年 の発電コストを算出する。算出に使用する LWR の炉特性データは、「FBR サイク ル導入シナリオの検討 (IV)」<sup>[12]</sup>で使用された APWR 燃焼度 6 万 MWd/t の値を 使用した。

各電源の発電コスト初期値を示す。

表 5.3.9 代替電源発電コスト初期値

	LWR	LNG	石炭
代替電源発電コスト初期値	3.37円/k\h	5.31円/kWh	4.35円/kWh

#### <u>事故による死者数(人/GW年)</u>

ウィリアム・D・ノードハウスは、「原子力と環境の経済学」<sup>[13]</sup>の中で、各電源 における安全性に関わる外部コストを見積もる上で、A.F.Fritzsche 氏の試算結果 を紹介している。石炭火力、石油火力、LNG 火力、および LWR による死亡リス クは表 5.3.10 のようになる。ここでは、発電量 1GW 年あたりの死亡者数で表さ れており、燃料の採取・輸送から発電所運転までのサイクルで試算している。

電源	就業上の危険	用地外での危険 (公衆の危険)
石炭火力	0.2 4.3	2.1 7.0
石油火力	0.2 1.4	2.0 6.1
LNG 火力	0.1 1.0	0.2 0.4
LWR	0.1 0.9	0.006 0.2

表 5.3.10 発電による死亡リスク(人数/GW年)

表 5.3.10 の値の対数平均をとり、職業上の死亡リスクと公衆の死亡リスクを合 計して、各電源の事故による死者数(死亡リスク)とした。 設定した事故による死者数を表 5.3.11 に示す、

表 5.3.11 設定した事故による死者数

	FBR	LWR	LNG	石炭
事故による死者数	0.33人/GW年	0.33人/GW年	0.60人/GW年	4.76 人/GW 年

#### CO<sub>2</sub>排出量(g/kWh)

FBR および LWR の CO<sub>2</sub> 排出量は、電力中央研究所の論文<sup>[14]</sup>を参考に、LNG と石炭の値に関しては、同じく電力中央研究所より発行されている電中研ニュース No.338<sup>[15]</sup>で発表された値を元に、g-CO<sub>2</sub>/kWh をg-C/kWh に換算して用いた。 発表されている g-CO2/kWh の値とg-C/kWh に換算した値を表 5.3.12 に示す。

表 5.3.12 電源別の CO, 排出量

	FBR	LWR	LNG ( 複合 )	石炭
g-CO <sub>2</sub> /kWh	8.1	9.3	519	975
g-C/kWh	2.20	2.54	142	266

LWR の値に関しては、論文中に複数のケースが想定されているが、これらの中 で、比較的将来軽水炉の条件(設備利用率 90%、燃焼度 6 万 MWd/t)に近い、設 備利用率 88%、燃焼度 4.5MWd/t、プルサーマル、遠心分離のケースの値を使用す ることとした。また、LNG 火力の値に関しては、比較対象が 2030 年以降を想定 していることから、将来、導入が進むと思われる複合ガスタービン発電を想定した 値を使用することとした。

設定した CO2 排出量を表 5.3.13 に示す。

表 5.3.13 設定した CO, 排出量

	FBR	LWR	LNG	石炭
CO₂排出量	2.2 g/kWh	2.54 g/kWh	142 g/kWh	266 g/kWh

SOx 排出量(g/kWh)

硫黄酸化物排出量については、火力発電平均として電力会社により示されている が、燃料別の値は公表されていない。そこで、各燃料からの SOx、NOx 発生量(抑 制対策を施さない場合に排出される量)と発電電力量比率から、燃料別の排出原単 位を想定する。使用する数値を表 5.3.14 に示す。

	石炭	石油	LNG	
S0x 排出原単位(g/k\\h , 2001 年) 1	0.21(火力発電所 10 社平均)			
S0x 発生量(石炭を 100 とする) 2	100	65	0	
電力量(億 k\\h 、2001 年) 3	1,894	594	2,500	

表 5.3.14 SO<sub>x</sub> 排出量算出に用いた値

1 東京電力, "TEPCO環境行動レポート 2003"(2003 年 7 月)より抜粋<sup>[16]</sup>

2 OECD, "EMISSION CONTROLS" (1988)より作成<sup>[17]</sup>

3 東京電力,"数表で見る東京電力"(2003年12月)より抜粋<sup>[18]</sup>

排出原単位は、燃料やプラントの仕様により異なるが、ここでは以下のように仮 定して算出する。すなわち、石炭、石油、LNG による SOx 排出原単位(mg\_s\_col, mg\_s\_oil, mg\_s\_lng)と各発電電力量(PA\_col, PA\_oil, PA\_lng)は次の関係を満 たすとする。

 $PA\_col \cdot mg\_s\_col + PA\_col \cdot mg\_s\_oil + PA\_col \cdot mg\_s\_lng = 0.21 \times (PA\_col+PA\_oil+PA\_lng)$ mg\\_s\\_col : mg\\_s\\_oil : mg\\_s\\_lng = 100 : 65 : 0

以上から、排出原単位が表 5.3.15 のように求められる。

表 5.3.15 設定した SO, 排出量

	FBR	LWR	LNG	石炭
S0x 排出量	0	0	0	0.46

## <u>NOx 排出量(g/kWh)</u>

SOx 排出量と同様に、表 5.3.16 に示す 2003 年に発行された資料の数値を用いて各電源の NOx 排出量を算出した。

算出した NOx 排出量を表 5.3.17 に示す。

表 5.3.16 NO<sub>x</sub>排出量算出に用いた値

	石炭	石油	LNG	
N0x 排出原単位(g/k\\h,2001 年) 1	0.27 (火力発電所 10 社平均)			
N0x 発生量(石炭を 100 とする) 2	100	75	45	
電力量(億 k\\h 、2001 年) 3	1,894	594	2,500	

1 東京電力, "TEPCO環境行動レポート 2003" (2003 年 7 月)より抜粋<sup>[16]</sup>

2 OECD, "EMISSION CONTROLS" (1988)より作成<sup>[17]</sup>

3 東京電力,"数表で見る東京電力"(2003年12月)より抜粋<sup>[18]</sup>

## 表 5.3.17 設定した NO<sub>x</sub> 排出量

	FBR	LWR	LNG	石炭
NOx 排出量	0	0	0.14	0.42

### 発電効率(%)

LWR の発電効率に関しては、サイクル機構で検討した「FBR サイクル導入シナ リオの検討(IV)」<sup>[12]</sup>で使用されている APWR の値を使用した。また、LNG・石 炭に関しては、導入シナリオの検討の章で使用されているものと同じ値を使用した。 設定した各電源の発電効率を表 5.3.18 に示す。

表 5.3.18 設定した発電効率

	LWR	LNG	石炭				
発電効率	34.5% 1	65.0% 2	60.0% 2				
1 FBR サイクル導入シナリオの検討(IV)より							

2 火力原子力発電 2003 年 10 月号 No.565 Vol.54 より[19]

<u>燃料の発熱量(cal/kg)</u>

代替電源の燃料使用量を算出する際に使用する燃料の単位あたりの発熱量は、エネルギー・経済統計要覧<sup>[20]</sup>に掲載されている各種エネルギーの発熱量を参考に、表 5.3.19 に示す値を使用した。

## 表 5.3.19 燃料の単位あたりの発熱量

LNG	石炭			
13000 cal/kg	7000 cal/kg			

5.4 解析結果

#### 5.4.1 年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の結果

LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の条件において、FBR 導入開始まで年間 500 億円を投資した場合の結果を表 5.4.1 および図 5.4.1 に示す。

表 5.4.1 年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益指数

ケース	炉	燃料	湿/乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心	導入開始	発電原価 (円/kWh)	<b>効果金額</b> (兆円)	投資額 (兆円)	利益指数												
1					L +0 +#	節志//	資源	2030年	3.21	11.33	1.35	8.4												
2				+ 18 #		間糸11 ペレット	経済	2030年	2.76	10.02	1.35	7.4												
3				入 况 候 (200t/v)	先進湿式	1071	LLFP	2030年	3.18	9.72	1.35	7.2												
4				(2000) 3)		垢動女植	資源	2030年	3.26	10.82	1.35	8.0												
5			湿式		加加加加快	経済	2030年	2.84	9.39	1.35	7.0													
6	Na大型炉	当炉 MOX		失進混式	簡素化	資源	2030年	4.10	8.73	1.35	6.5													
7	(1500MWe)			小規模	九進加五	ペレット	経済	2030年	3.22	8.97	1.35	6.6												
8				(50t/y)	招吃男	簡素化	資源	2030年	3.97	9.01	1.35	6.7												
9						ペレット	経済	2030年	3.15	9.01	1.35	6.7												
10		故式	小規模	敵化物電磁	振動女憤	資源	2030年	3.59	10.06	1.35	7.5													
11		¥21V	(50t/y)	12110111111111111111111111111111111111	経済	2030年	3.07	8.59	1.35	6.4														
12		全届		小規模 (50t/y) 金属電解	小規模	射出成刑	資源	2030年	3.96	10.99	1.35	8.1												
13		亚屿	∓C1V		(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	(50t/y)	亚周电肿	初山城王	経済	2030年	3.03	10.69	1.35
14	Na中型炉シングル (750MWe)	ΜΟΥ	调计	小規模	招吃男	簡素化	資源	2030年	5.51	4.19	1.35	3.1												
15	Na中型炉モジュール (750MWe)		<u>₩</u> I/	(50t/y) <sup>起磁济</sup>	(50t/y)	化旦ビ加クト	化旦ビロリット			ルロビ師う下	) 心口记前5个	(50t/y) <sup>起出面齐</sup>	ペレット	経済	2030年	3.31	8.29	1.35	6.1					
16	마. 마. 슈퍼바스	穷化物	调书	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.52	5.97	2.35	2.5												
17	PD-BI中空炉 送到循環	主1010	74177	(200t/y)	九進加五	ペレット	経済	2050年	3.36	5.48	2.35	2.3												
18	(710MWe)	MOX	调书	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.90	3.80	2.35	1.6												
19		(200t/y)	九進加五	ペレット	経済	2050年	3.61	3.74	2.35	1.6														
20	He大型炉	窒化物	油斗	大規模	脱被覆+	加霑注	資源	2050年	3.72	3.77	2.35	1.6												
21	(1124MWe)	被覆粒子	117	(200t/y)	先進湿式	7汉1复/云	経済	2050年	3.40	3.51	2.35	1.5												
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化 ペレット	-	2030年	3.95	3.21	1.35	2.4												



図 5.4.1 年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益指数

研究開発投資額を 500 億円/年とし、代替電源を LWR70%・LNG20%・石炭 10% とした場合、Na 炉タイプが 6.5~9.1 倍と最も利益指数が大きく、ついで Pb-Bi 炉が 1.7~2.5 倍、水冷却炉が 2.4 倍と続き、他の FBR サイクルに比べ発電コスト が高く LWR から FBR への置き換えが遅い He 炉が 1.5~1.7 倍と、最も利益指数 が低くなった。こうした結果は、得られる効果のうち、発電コスト削減と燃料輸入 削減の効果が大部分を占めている。そのため、発電コストが安い FBR サイクル候 補概念 (ケース 1 = Na 炉 MOX) や、導入時期が早く増殖性能も高い(代替電源 の燃料の使用が少なく済む) FBR サイクル候補概念 (ケース 12 = Na 炉金属)の 利益指数が高くなるといった点が特徴である。ここで、各ケースの発電原価につい ては、表 5.4.1 中の発電原価の値を参照、また各ケースの導入量推移については、 図 5.3.1 を参照ありたい。逆に言えば、発電原価が安く、導入量が大きくなるよう な FBR サイクルを開発することが、投資対効果を上げる鍵であるといえる。なお、 「導入量の大きい」ということには、導入時期が早いことと、一旦導入されたら置 き換わりが速やかであること、という 2 つの要素がある。

今回の解析では、発電原価の差が結果に表れているケース(例えば、ケース 14 などは発電原価が高く、その結果として利益指数が小さくなっている。),導入時期 の差が結果に表れているケース(例えば、ケース 16 などは、ケース 6 やケース 8 と比べて発電原価もそれほど高くなく、置き換わりの速さもそれほど遅くないが、 導入時期が 2050 年としており、その結果として利益指数が小さくなっている)置 き換わりの速度が結果に表れているケース(ケース 22 は、ケース 6 と比較して発 電原価や導入時期に関しては遜色ないが、置き換わりの速度は遅く、その結果とし て利益指数が小さくなっている)、などの特徴ある結果が出ている。

投資対効果の評価結果については、代替される電源の構成も重要な要素である。 今回はリファレンス的なケースにおいて、FBR が導入されないとき、LWR を中心 として一部火力発電で必要な発電量を賄うと想定して計算したが、これを全て LWR で代替されるとした場合についても、感度解析を行うこととした。

また、投資額を抑制することも、投資対効果を上げる鍵であるが、ここでの評価 は、実用化に要する年数がそのまま開発投資額に比例するとしており、22の候補 概念のうち、冷却材が Na と水の場合については 2030 年に実用化でき、Pb-Bi と He の場合については 2050 年に実用化できるとしたので、それが投資額の多寡と 投資対効果の評価結果に影響している。

また、今回は割引率として 3%を用いた。3%という数字は、最近の検討などか らは超長期の解析を実施する際にはやや大きめの値と考えられるので、割引率を 2%とした場合について感度解析を行うこととした。

## 5.4.2 年間 500 億円投資 LWR100%代替の結果

LWR100%代替の条件において、FBR 導入開始まで年間 500 億円を投資した場合の結果を表 5.4.2 および図 5.4.2 に示す。

## 表 5.4.2 年間 500 億円投資 LWR100%代替の利益指数

ケース	炉	燃料	湿 / 乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心	導入開始	発電原価 (円/kWh)	効果金額 (兆円)	投資額 (兆円)	利益指数
1						統まル	資源	2030年	3.21	7.31	1.35	5.4
2				上+B+#		間糸11 ペレット	経済	2030年	2.76	6.80	1.35	5.0
3				入税候 (200t/v)	先進湿式	ועשי	LLFP	2030年	3.18	6.26	1.35	4.6
4				(2001/ 9)		振動女植	資源	2030年	3.26	6.92	1.35	5.1
5			湿式			加加加州	経済	2030年	2.84	6.32	1.35	4.7
6	Na大型炉	MOX			失准混式	簡素化	資源	2030年	4.10	4.71	1.35	3.5
7	(1500MWe)			小規模		ペレット	経済	2030年	3.22	5.74	1.35	4.3
8				(50t/y)	招吃男	簡素化 ペレット	資源	2030年	3.97	5.02	1.35	3.7
9					ルロビ南クト		経済	2030年	3.15	5.83	1.35	4.3
10			おざ	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	資源	2030年	3.59	6.09	1.35	4.5
11			¥21V				経済	2030年	3.07	5.62	1.35	4.2
12		金属	乾式	小規模 (50t/y)	金属電解	射出成型	資源	2030年	3.96	6.18	1.35	4.6
13							経済	2030年	3.03	7.04	1.35	5.2
14	Na中型炉シングル (750MWe)	MOX	温式	小規模 (50t/y)	模 y) 超臨界	招臨界 簡素化	資源	2030年	5.51	0.54	1.35	0.4
15	Na中型炉モジュール (750MWe)	MIC X	717.77			ペレット	経済	2030年	3.31	5.23	1.35	3.9
16		穷化物	通井	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.52	3.69	2.35	1.6
17	PD-DI中空炉 路制循環	主1019	146.7.0	(200t/y)	200t/y)	ペレット	経済	2050年	3.36	3.46	2.35	1.5
18	短前////////////////////////////////////	MOX	通井	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.90	2.18	2.35	0.9
19		IVIOX	小豆工	(200t/y)		ペレット	経済	2050年	3.61	2.27	2.35	1.0
20	He大型炉	窒化物	通社	大規模	脱被覆+	<b>汝</b> 覆注	資源	2050年	3.72	2.23	2.35	1.0
21	(1124MWe)	被覆粒子	\\\L\	° (200t/y)	先進湿式	7汉1复/云	経済	2050年	3.40	2.20	2.35	0.9
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/v)	先進湿式	簡素化 ペレット	-	2030年	3.95	1.78	1.35	1.3



# 図 5.4.2 年間 500 億円投資 LWR100%代替の利益指数

代替電源として LWR100%とした場合についても、代替電源として LWR70%・ LNG20%・石炭 10%とした場合と各ケースの評価結果の全体的な傾向は大きく変 化しない。しかし、化石燃料の輸入を抑制することに起因する効果や環境に負荷を 与える NOx、SOx、CO2の放出量を低減する効果は、代替電源として火力発電が 含まれないので小さくなる。したがって、発電コストを削減する効果が大きく、ま た燃料輸入削減効果はそれよりも小さくなる。また、エネルギーセキュリティ効果 は小さい。さらにそれ以外の効果については、非常に小さな値になっている。こう した変化を受けて、全体の利益指数は若干低下することとなった。

ケース14については、モジュール化が考えられている中型炉(例えばケース15 の場合)を単基にするというやや極端な想定を行った場合であり、FBR による発 電原価が LWR の発電原価より相対的に高くなっている(LWR の発電原価は天然 ウラン価格上昇による影響を受けるので時期によって異なるが)。その結果、発電 コスト削減効果はマイナスとなり、全ての効果を合計しても利益指数で1 を下回 る結果が得られた。このケースも含め、いくつかのケースでは計算した利益指数が 1 を下回った。このことは、投資対効果の観点からは、現在価値に換算した投資額 の方が同じく現在価値に換算した効果額よりも大きいため、投資すべきプロジェク トではないことを示している。 5.4.3 ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の結果

LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の条件において、ロードマップ上の開発資金を投資額とした結果を表 5.4.3 および図 5.4.3 に示す。

発電原価 効果金額 投資額 ケース 炉 燃料 湿/乾 処理規模 再処理 燃料製造 炉心 導入開始 利益指数 (円/kWh) (兆円) (兆円) 1 資源 2030年 3.21 11.33 0.29 39.1 簡素化 10.02 2 経済 2030年 2.76 0.29 34.6 大規模 ペレット 先進湿式 3 3.18 0.44 LLFP 2030年 9.72 21.9 (200t/v)4 咨源 2030年 3 26 10.82 0.30 36.1 振動充填 湿式 5 経済 2030年 2.84 9.39 0.30 31.3 6 MOX 簡素化 資源 2030年 4.10 8.73 0.29 30.1 Na大型炉 先谁湿式 ペレット 7 (1500MWe) 小規模 経済 2030年 3.22 8.97 0.29 30.9 (50t/y) 8 簡素化 ペレット 資源 2030年 3.97 9.01 0.34 26.5 超臨界 9 経済 2030年 3 15 9.01 0.34 26.5 10 小規模 資源 2030年 3.59 10.06 0.34 29.6 乾式 酸化物電解 振動充填 11 (50t/y) 経済 2030年 3.07 8.59 0.34 25.3 小規模 12 資源 2030年 3.96 10.99 0.29 37.8 乾式 全属雷解 全属 射出成型 (50t/y) 13 経済 2030年 3.03 10.69 0.29 36.8 Na中型炉シングル 14 資源 2030年 5.51 4.19 0.34 12.5 (750MWe) 小規模 簡素化 мох 湿式 超臨界 Na中型炉モジュール (50t/y) ペレット 15 経済 2030年 3.31 8.29 0.34 24.7 (750MWe) 16 大規模 資源 2050年 3.52 5.97 0.55 簡素化 10.9 窒化物 湿式 先進湿式 Pb-Bi中型炉 (200t/y) ペレット 17 経済 2050年 3.36 5.48 0.55 10.0 強制循環 18 大規模 簡素化 資源 2050年 3.90 3.80 0.49 7.8 (710MWe) мох 湿式 先進湿式 19 (200t/y) ペレット 経済 2050年 3.61 3.74 0.49 7.7 20 He大型炉 窒化物 大規模 脱被覆+ 資源 2050年 3.72 3.77 0.62 6.1 湿式 被覆法 (1124MWe) 被覆粒子 (200t/v)先進湿式 21 3.40 3.51 0.62 5.7 経済 2050年 水冷却炉 簡素化 大規模 先進湿式 22 湿式 3.95 3.21 14.9 MOX 0.22 2030年 -(1356MWe) (200t/y) ペレット

表 5.4.3 ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の利益指数



図 5.4.3 ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の利益指数

開発資金について検討中のロードマップ等を参考に求めた場合については、開発 資金を年間 500 億円とした場合に比べて、おおよそ投資額が 5 分の 1 強であるた め、結果を利益指数で表すと 5~40 程度となって 5 倍近くの値が得られる。この ときは、開発資金が概念別にできる範囲で積み上げて評価されており、候補概念比 較を行うためには望ましい形である。しかし、これらの資金額には、本社経費等の 間接費などは含まれておらず、もんじゅの経費などについても含まれていないとい った点に留意する必要がある。そして、今後より適切な開発資金を評価できるよう 検討が必要である。

ただし、効果に関しては開発資金を年間 500 億円とした場合と条件が変わらな いので、効果額を見ても、内訳で大きな部分を占める発電コスト削減効果と燃料輸 入削減効果をはじめ全て同じであり、ここで特筆すべき点はない。

## 5.4.4 ロードマップ上の開発資金 LWR100%の結果

LWR100%代替の条件において、ロードマップ上の開発資金を投資額とした結果 を表 5.4.4 および図 5.4.4 に示す。

# 表 5.4.4 ロードマップ上の開発資金 LWR100%代替の利益指数

ケース	炉	燃料	湿/乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心	導入開始	発電原価 (円/kWh)	効果金額 (兆円)	投資額 (兆円)	利益指数
1						施士ル	資源	2030年	3.21	7.31	0.29	25.2
2				+0.4#		間系1七 ペレット	経済	2030年	2.76	6.80	0.29	23.5
3				入 况 候 (200 t / \/)	先進湿式	1071	LLFP	2030年	3.18	6.26	0.44	14.1
4				(2001/y)		拒動女技	資源	2030年	3.26	6.92	0.30	23.1
5			湿式			掀到兀坞	経済	2030年	2.84	6.32	0.30	21.1
6	Na大型炉	MOX			生准泪士	簡素化	資源	2030年	4.10	4.71	0.29	16.2
7	(1500MWe)			小規模	九進並14	ペレット	経済	2030年	3.22	5.74	0.29	19.8
8				(50t/y)	超臨界	簡素化 ペレット	資源	2030年	3.97	5.02	0.34	14.8
9							経済	2030年	3.15	5.83	0.34	17.2
10			おざ	小規模	酸化物電解	振動充填	資源	2030年	3.59	6.09	0.34	17.9
11			±C10	(50t/y)			経済	2030年	3.07	5.62	0.34	16.5
12		金属	乾式	小規模 (50t/y)	金属電解	射出成型	資源	2030年	3.96	6.18	0.29	21.3
13							経済	2030年	3.03	7.04	0.29	24.2
14	Na中型炉シングル (750MWe)	ΜΟΥ	词书	小規模	超臨界	福界 簡素化 ペレット	資源	2030年	5.51	0.54	0.34	1.6
15	Na中型炉モジュール (750MWe)	IVI O A	∧ ₩1/	(50t/y)			経済	2030年	3.31	5.23	0.34	15.6
16		穷化物	温力	大規模	失進混式	簡素化 ペレット	資源	2050年	3.52	3.69	0.55	6.7
17	PD-BI中型炉 強制循環	主1010	711/1	(200t/y)	元進湴式		経済	2050年	3.36	3.46	0.55	6.3
18	5 5 年前11月 坂 (710 MWe)	MOX	词	大規模	生進泪式	簡素化	資源	2050年	3.90	2.18	0.49	4.5
19		IVIOX	運式	(200t/y)	尤進湿式	ペレット	経済	2050年	3.61	2.27	0.49	4.6
20	He大型炉	窒化物	温式	大規模	脱被覆+	被覆法	資源	2050年	3.72	2.23	0.62	3.6
21	(1124MWe)	被覆粒子	141/1	(200t/y)	先進湿式	7汉1夏/云	経済	2050年	3.40	2.20	0.62	3.6
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/v)	先進湿式	簡素化 ペレット	-	2030年	3.95	1.78	0.22	8.2



図 5.4.4 ロードマップ上の開発資金 LWR100%代替の利益指数

開発資金について検討中のロードマップ等を参考に求めた場合については、開発 資金を年間 500 億円とした場合に比べて、おおよそ投資額が 5 分の 1 強であるた め、結果を利益指数で表すと 3~30 程度となって 5 倍近くの値が得られる。また、 効果に関しては開発資金を年間 500 億円とした場合と条件が変わらないので、効 果額を見ても、内訳で大きな部分を占める発電コスト削減効果と燃料輸入削減効果 をはじめ全て同じであり、ここで特筆すべき点はない。 5.4.5 割引率 2% 年間 500 億円投資 LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の結果

割引率を 2%とし、LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の条件において、年間 500 億円を投資した場合の結果を表 5.4.5 および図 5.4.5 に示す。

表 5.4.5 割引率 2%年間 500 億円投資 LWR70% · LNG20% · 石炭 10%代替の利益指数

ケース	炉	燃料	湿/乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心	導入開始	発電原価 (円/kWh)	効果金額 (兆円)	投資額 (兆円)	利益指数		
1				1 40 1#		節書化	資源	2030年	3.21	28.07	1.35	20.8		
2						間糸化ペレット	経済	2030年	2.76	25.34	1.35	18.8		
3				入 况 候 (200t / v)	先進湿式		LLFP	2030年	3.18	24.46	1.35	18.1		
4				(2001/ y)		乍动方坊	資源	2030年	3.26	26.92	1.35	19.9		
5			湿式			掀到兀坞	経済	2030年	2.84	23.53	1.35	17.4		
6	Na大型炉	MOX			生准泪式	簡素化	資源	2030年	4.10	21.96	1.35	16.3		
7	(1500MWe)			小規模	元進座式	ペレット	経済	2030年	3.22	22.80	1.35	16.9		
8				(50t/y)	超臨界	簡素化 ペレット	資源	2030年	3.97	22.63	1.35	16.8		
9							経済	2030年	3.15	22.83	1.35	16.9		
10			乾式	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	資源	2030年	3.59	25.10	1.35	18.6		
11							経済	2030年	3.07	21.80	1.35	16.1		
12		全屋	あざ	小規模	金属電解	时七马里	資源	2030年	3.96	26.80	1.35	19.9		
13		五周	¥2⊥V	(50t/y)		亚周电胜	亚周电肝	初山城王	経済	2030年	3.03	26.87	1.35	19.9
14	Na中型炉シングル (750MWe)	ΜΟΧ	温井	小規模		超臨史 簡素化	資源	2030年	5.51	11.40	1.35	8.4		
15	Na中型炉モジュール (750MWe)	WICK	700 2.0	(50t/y)		ペレット	経済	2030年	3.31	21.01	1.35	15.6		
16		穷化物	温式	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.52	17.62	2.35	7.5		
17	PD-BI中空炉 強制循環	主1010	10110	(200t/y)	九進並式	ペレット	経済	2050年	3.36	16.03	2.35	6.8		
18	) 313 町1/目 現 (710 MWe)	MOX	温式	大規模	失進混式	簡素化 ペレット	資源	2050年	3.90	11.70	2.35	5.0		
19	(1.1011110)	IVIOX	極い	(200t/y)	九進並以		経済	2050年	3.61	11.39	2.35	4.8		
20	He大型炉	窒化物	温式	大規模	脱被覆+	加霑注	資源	2050年	3.72	11.55	2.35	4.9		
21	(1124MWe)	被覆粒子	711/	(200t/y)	先進湿式	7/X1复/厶	経済	2050年	3.40	10.38	2.35	4.4		
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化 ペレット	-	2030年	3.95	8.63	1.35	6.4		



図 5.4.5 割引率 2%年間 500 億円投資 LWR70% · LNG20% · 石炭 10%代替の利益指数

発電原価を評価する際に割引率を2%とした場合(計算に用いたサイクル単価に ついては割引率3%の場合と同様とした)では、割引率を3%とした場合に比べて、 将来の価値が大きく現在価値に換算される。したがって、導入後に効果が生じる FBR サイクルについては、現在価値に換算した効果額及び利益指数が大きくなる。 候補概念間で比べると全体の傾向はほとんど変わらないが、注意深く図 5.4.5 を眺めると導入の遅いケース(ケース16~21)について若干効果額と利益指数の 増加割合が他のケースより大きくなっていることがわかる。 5.4.6 割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の結果

割引率を 2%、LWR70%・LNG20%・石炭 10%代替の条件にて、ロードマップ 上の開発資金を投資した結果を表 5.4.6 および図 5.4.6 に示す。

表 5.4.6 割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の利益指数

ケース	炉	燃料	湿 / 乾	処理規模	再処理	燃料製造	炉心	導入開始	発電原価 (円/kWh)	<b>効果金額</b> (兆円)	投資額 (兆円)	利益指数
1				大規模		節事/ル	資源	2030年	3.21	28.07	0.29	96.8
2						間糸11 ペレット	経済	2030年	2.76	25.34	0.29	87.4
3					先進湿式		LLFP	2030年	3.18	24.46	0.44	55.2
4				(2001/9)		垢動女植	資源	2030年	3.26	26.92	0.30	89.7
5			湿式			加出几乎具	経済	2030年	2.84	23.53	0.30	78.4
6	Na大型炉	MOX			失進混式	簡素化	資源	2030年	4.10	21.96	0.29	75.7
7	(1500MWe)			小規模	九连座八	ペレット	経済	2030年	3.22	22.80	0.29	78.6
8				(50t/y)	招陪田	簡素化 ペレット	資源	2030年	3.97	22.63	0.34	66.6
9					た日本町うた		経済	2030年	3.15	22.83	0.34	67.2
10			乾式	小規模 (50t/y)	酸化物電解	振動充填	資源	2030年	3.59	25.10	0.34	73.8
11							経済	2030年	3.07	21.80	0.34	64.1
12		全层	あざ	小規模	金属電解	射出成型	資源	2030年	3.96	26.80	0.29	92.3
13		五周	¥21V	(50t/y)			経済	2030年	3.03	26.87	0.29	92.5
14	Na中型炉シングル (750MWe)	ΜΟΧ	调计	小規模 (50t/y)	超臨界	界間素化ペレット	資源	2030年	5.51	11.40	0.34	34.0
15	Na中型炉モジュール (750MWe)	WIO X	<u>74</u> 25				経済	2030年	3.31	21.01	0.34	62.7
16	ᇝᇝᆑᇓᄻ	穷化物	调式	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.52	17.62	0.55	32.1
17	PD-BI中空炉 油制循環	主1010	742-16	(200t/y)	九進加以	ペレット	経済	2050年	3.36	16.03	0.55	29.2
18	5虫巾/伯坂 (710MWe)	MOX	调式	大規模	失進混式	簡素化	資源	2050年	3.90	11.70	0.49	24.0
19	(		711/1	(200t/y)		ペレット	経済	2050年	3.61	11.39	0.49	23.3
20	He大型炉	窒化物	调式	大規模	脱被覆+	<b>油</b> 覆注	資源	2050年	3.72	11.55	0.62	18.7
21	(1124MWe)	被覆粒子	711/1	(200t/y)	先進湿式	11次1复/ム	経済	2050年	3.40	10.38	0.62	16.8
22	水冷却炉 (1356MWe)	MOX	湿式	大規模 (200t/y)	先進湿式	簡素化 ペレット	-	2030年	3.95	8.63	0.22	40.0



図 5.4.6 割引率 2%ロードマップ上の開発資金 LWR70%・LNG20%・石炭 10%の利益指数

発電原価を評価する際に割引率を2%とした場合(この場合も計算に用いたサイ クル単価については割引率3%の場合と同様とした)では、割引率を3%とした場 合に比べて、将来の価値が大きく現在価値に換算される。さらにこの場合には、開 発資金が小さいため、利益指数も非常に大きくなる。効果額については、全体の傾 向については、割引率2%として、年間500億円を投資し、代替電源として LWR70%・LNG20%・石炭10%とした場合と効果の値は変わらないので、傾向も 変化しない。 5.4.7 ケース1の感度解析

ケース1(Na 冷却大型炉 - MOX 燃料(資源) - 先進湿式(200 t/y) - 簡素化 ペレット)について、パラメータを振って感度解析を行った結果を以下に示す。

感度解析として表 5.4.7 のケースを採り上げた。既に 5.4.1 項で述べたケース 1 をリファレンスケースとして、これまで説明したケースと若干重複しているケース もあるが、投資額を 300 億円とした場合、代替電源構成を LWR100%とした場合、 環境プレミアムを考慮した(将来、環境負荷低減の価値が増大する)場合、燃料価 格上昇率が 0 の場合、FBR 導入開始年を 2050 年とした場合、割引率を 2%とした 場合、及び 1%とした場合を解析した。

感度解析ケース名	概要
リファレンス	ケース1 研究開発投資 500 億円/年、LWR70%・LNG20%・
	石炭 10%代替、割引率 3%のケース
投資額 300 億円/年	研究開発費を年間 300 億円と設定したケース
LWR100%	代替電源構成を LWR100%としたケース
環境プレミアム 3%	将来、環境負荷を低減することの価値が増大すると考え、環
	境負荷低減効果を年 3%上昇させたケース
燃料価格上昇率 0%	西暦 2200 年まで、燃料価格が上昇しないとしたケース
FBR2050 年導入	FBR の導入開始年を 2050 年としたケース
割引率 2%・1%	社会的割引率を 2%と 1%に設定したケース

表 5.4.7 感度解析のケース

図 5.4.7 にリファレンスケースの投資対効果評価の結果を時系列的に示した。 FBR サイクルの研究開発中は投資額のみが計上されており、FBR の実用化後は、 導入が進むにしたがって効果が増加していく。ただし、遠い将来については、割引 の影響によって効果は減少していくことが示されている。効果の内訳では、発電コ スト削減効果と燃料輸入削減効果が大きな割合を占めることがわかる。



図 5.4.7 リファレンスケースの投資対効果評価(時系列)

ケース1について、感度解析を行った結果を表 5.4.8 と図 5.4.8 に示す。投資 額が少なければ、その分だけ利益指数は大きくなる。また、代替電源が変わるとそ れに応じて、効果の内訳・合計が変わるのは、図 5.4.2 に述べたとおりである。ま た、将来環境面を重視するとした環境プレミアムケースでは、リファレンスケース ではそれほど目立たなかった環境影響低減効果が、効果全体のうちで大きな部分を 占める。燃料価格が全く上昇しない場合には、環境負荷低減効果以外の効果が小さ くなる。FBR サイクル導入開始を 2050 年とした場合には、その分だけ開発投資 額が大きくなるとしており、かつ効果もより遠い将来から生じることとなり、それ らの両者の影響から利益指数では小さくなる。割引率を小さくした 2 つのケース では、5.4.5 において説明したように、遠い将来の影響が相対的に大きくなる。し たがって、今回の解析では効果が投資より遠い将来に生じていることから、効果が 非常に大きくなり、その結果として利益指数も大きくなる。特に割引率が1%では その影響は非常に大きい。

	研究開発投資 (億円)	利益指数	発電コスト 削減効果	環境影響 低減効果	燃料輸入 削減効果	エネルギー セキュリティ	生命リスク 低減効果	資源枯渇 抑制効果
リファレンス	13,500	8.4	4.6	0.4	2.8	0.4	0.0	0.1
年間300億円投資	8,100	14.0	7.7	0.7	4.7	0.7	0.1	0.2
LWR100%代替	13,500	5.4	3.9	0.0	1.3	0.2	0.0	0.0
環境プレミアム3%	13,500	16.7	4.6	8.7	2.8	0.4	0.0	0.1
燃料価格上昇率0%	13,500	5.1	2.8	0.4	1.6	0.2	0.0	0.1
2050年導入開始	23,500	2.6	1.4	0.1	0.9	0.1	0.0	0.0
割引率2%	13,500	20.8	11.5	0.9	7.0	1.0	0.1	0.3
割引率1%	13,500	61.2	33.7	2.6	20.9	3.0	0.3	0.8

表 5.4.8 ケース1感度解析結果(利益指数)





図 5.4.9 から図 5.4.16 にケース1の感度解析を行った結果について時系列的に 示す。環境プレミアムを考慮した場合には遠い将来になるほど環境影響低減効果の 割合が増大することや代替電源として LWR100%とした場合、また燃料価格上昇 がない場合には、時系列的に見ると効果が異なる点などがわかる。



図 5.4.9 リファレンス(2030年導入,500億円/年,LWR70%・LNG20%・石炭10%代替)



# 図 5.4.10 年間 300 億円投資







図 5.4.12 環境プレミアム 3%







図 5.4.14 2050 年導入開始


各年の効果金額

累積金額

図 5.4.16 割引率 1%

## 5.5 まとめと今後の課題

投資対効果評価の解析結果の全般的な傾向として、得られる効果のうち、発電コスト削減と燃料輸入削減の効果が大部分を占めている。そのため、発電コストが安い FBR サイクル候補概念(ケース1=Na 炉 MOX)や、導入時期が早く増殖性能も高い(代替電源の燃料の使用が少なく済む)FBR サイクル候補概念(ケース12=Na 炉金属)の利益指数が高くなった。

研究開発投資額を 500 億円/年とした場合、冷却材別に検討すると、Na 炉タイ プが 6.3~8.4 倍と最も利益指数が大きく、ついで Pb-Bi 炉と水冷却炉がそれぞれ 1.6~2.5 倍、2.4 倍と続き、他の FBR サイクルに比べ発電コストが高く LWR か ら FBR への置き換えが遅い He 炉が 1.5~1.6 倍と、最も利益指数が低くなった。 ここで、Pb-Bi 炉と He 炉は導入開始時期が遅く、水冷却炉と He 炉は置き換わり が遅い。また、発電原価も Na 炉が安い傾向があり、ついで Pb-Bi 炉、それから水 冷却炉と He 炉といった傾向がある。

また、代替電源を LWR100%としたときには効果額は少なくなり、Pb-Bi 炉と He 炉では、投資額に比べて効果額がほぼ同程度からやや下回る可能性も生じる。

投資額をロードマップ上の開発資金とした場合は、He 炉を除いて利益指数は軒 並み 10 倍以上となった。ケース別に見ると、Na 炉タイプが最も大きく 25~39 倍となり、ついで水冷却炉の 15 倍、 Pb-Bi 炉の 6~11 倍となり、最も低い He 炉でも約6倍の利益指数となった。

また、FBR の導入開始が 20 年遅れる 2050 年導入のケースでは、利益指数が約 3分の1となり、できるだけ早い時期に FBR を導入した方が利益指数は高くなる 結果となった。したがって、発電コストを削減可能な FBR サイクルを開発できる 場合、早期に FBR を導入することが重要になる。

また、Pb-Bi 炉 MOX 燃料(ケース 16)と水冷却炉 MOX 燃料(ケース 22)に ついては、研究開発投資額を 500 億円/年とした場合には Pb-Bi 炉 MOX 燃料(ケ ース 16)の利益指数が高いのに対し、ロードマップ上の開発資金の場合には水冷 却炉 MOX 燃料(ケース 22)の利益指数が高くなった。これは、同じ投資額とな る 500 億円/年の場合に対し、ロードマップ上で設定した開発資金では、ケース 16 よりケース 22 の方が少なく設定されているためで、投資対効果評価を行う際には、 適切に FBR サイクルの開発資金の設定を行うことが重要となる例である。

感度解析の結果については、割引率や環境プレミアムの影響が大きいことがわかる。特に割引率は、約200年間という超長期に亘る評価のため、設定値を3%から2%に変更するだけでケース1の場合、利益指数が8.4から20.8へと2倍以上、1%に変更した場合は61.2と7倍以上高くなる結果となった。

今回の評価では、より現実的な FBR サイクル導入シナリオ(例えば、資源重視型炉心の後に経済重視型炉心を導入する等)に沿った評価を実施せず、各候補概念の投資対効果面からの特徴を明確にするために、同じ FBR サイクルを導入し続けると想定した諸量解析を行っている。

開発を行った投資対効果評価システムにおいては、発電コストが安い、且つ、 FBR 導入時期が早く LWR からの置き換わりが速やかな FBR サイクル実用化候補 概念の利益指数が高くなることがわかった。

ただし、評価条件においては不確実性を有するものの、おおよそどの FBR サイクル実用化候補概念についても、FBR サイクルの導入により投じた研究開発費以上の効果が得られる可能性が高いこともわかった。

今後、現実的な FBR サイクル導入シナリオ (資源型の後に経済型を導入)に沿った評価を実施すると共に、最近の外部コスト検討結果を取り入れることにより、 さらに多様な効果を金銭価値換算して取り込む等、手法の改良を進める。

# [参考文献]

- [1] 芝剛史他: "FBR 研究開発に関する投資対効果評価システム概念の構築"、三菱総 合研究所、JNC TJ9400 99-006、(1999)
- [2] 芝剛史他: "FBR 研究開発の投資対効果評価システムの詳細検討"、三菱総合研究 所, JNC TJ9440 2000-011、(2000)
- [3] 芝剛史他:"投資対効果評価システムの開発"、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2001-018、(2001)
- [4] 塩谷洋樹他: "FBR サイクル研究開発の投資対効果評価"、JNC TN9400 2002-048、 (2002)
- [5] 篠田佳彦他: "総合評価技術検討書—実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告 —"、JNC TN9400 2001-061、(2001)
- [6] "Uranium" OECD/NEA IAEA、 (2001)
- [7] 伊藤浩吉: "わが国の長期エネルギー需給展望"、日本エネルギー経済研究所、第 374 回定例研究会、(2002 年)
- [8] Platts:Nuclear Fuel, Vol.27 No.2~Vol.28 No.4, (2001~2003)
- [9] 電気事業連合会:モデル試算による各電源の発電コスト比較、(2004)
- [10]WEC/IIASA: Global Energy Perspective, (1998)
- [11]小野清他: "FBR 導入シナリオの検討(IV)"、JNC TN9400 2003-061、(2003)
- [12]Generation-IV Fuel Cycle Cross Cut Group: "Generation-IV Roadmap Report of the Fuel Cycle Crosscut Group", (2001)
- [13]ウィリアム・D・ノードハウス:原子力と環境の経済学、電力新報社、(1998)
- [14]内山洋司・横山速一:"原子力発電新技術のライフサイクル分析"、電力経済研究 No.37、(1996)
- [15] 電中研: "CO<sub>2</sub> 排出に関する発電方式の LCA"、電中研レビュー No.45、(2001)
- [16] 東京電力: TEPCO環境行動レポート 2003、(2003年)
- [17] OECD: EMISSION CONTROLS, (1988)
- [18] 東京電力: 数表で見る東京電力、(2003年12月)
- [19] 三巻利夫他: "火力発電所の熱効率向上"、火力原子力発電、2003年10月号 No.565 Vol.54、(2003)
- [20] 日本エネルギー経済研究所:エネルギー・経済統計要覧 2002 年版、財団法人 省エネルギーセンター(2002)

6 おわりに

高速炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズの前半(2001年度~2003年度)に おいて、原子炉と燃料サイクルの整合性を考慮して組み合わせた22ケースのFBRサ イクル候補概念を対象に、多面的評価、FBR導入シナリオ評価、および投資対効果評 価を行った。

多面的評価においては、まず、評価指標の構造の構築、評価基準の設定、視点間や 指標間の重み付けの設定など評価手法の開発に取り組んだ。FBR サイクル候補概念を 対象とした多面的評価では、開発目標ならびに具体的な設計要求を設定した「安全性」、 「経済性」、「環境負荷低減性」、「資源有効利用性」、および「核拡散抵抗性」の5つの 視点に、「技術的実現性」と「社会的受容性」の2つの視点を加えて、合計7つの視点 から開発目標に対する達成度評価を実施した。各視点間の重みは、ほぼ均等な重みの ベースシナリオ、資源有効利用重視シナリオ、環境重視シナリオ、経済性重視シナリ オの代表的な4つの将来社会を想定し、設定した。

評価の結果、炉型別で比較した場合、全てのシナリオにおいて、各視点でバランス 良く平均点の高いナトリウム冷却炉サイクルが高い評価を受けることが分かった。次 いで、鉛ビスマス炉サイクル、ヘリウム冷却炉サイクルと続く。技術的実現性と社会 的受容性に優れる水冷却炉サイクルは、経済性や資源有効利用性で劣る部分をカバー し、鉛ビスマス炉サイクルに匹敵する評価が得られることが分かった。また、全ての シナリオにおいて、燃料サイクルの影響はそれほど大きくなかったが、経済性につい ては規模の経済効果により小規模システムと大規模システムの間で差が生じ、技術的 実現性と社会的受容性については、湿式と乾式など燃料サイクルシステムによって研 究開発レベルや未知性(慣れ)に違いがあることから差が生じた。今後は、投資リス クの考慮や技術的実現性や社会的受容性の評価方法の向上など個々の指標の改良に加 え、導入シナリオ全体を通しての多面的評価手法の開発に取り組む。

一方、FBR サイクルの電源としての特徴を把握するために、代表的な FBR サイク ル候補概念と軽水炉ワンススルーや火力発電などの他電源との多面的評価を実施した。 評価は、FBR サイクル候補概念間の多面的評価とほぼ同様の手法を用い、「経済性」、 「資源供給性」、「環境影響低減性」、「社会不安定影響性」、「導入性」、「心理的バイア ス低減性」、「電力以外発生資源」の7つの視点から行った。資源有効利用性を重視し たシナリオで軽水炉(ワンススルー及び再処理あり)の評価点が低めであり、環境負 荷低減性や経済性を重視したシナリオでは、FBR サイクルの評価点が高めとなった。 また、FBR サイクルの導入により、資源有効利用性、環境負荷低減性などの観点を改 善できることが示された。より定量的な評価を目指して、今後評価方法を改良してい く。

FBR サイクル導入シナリオ評価では、フェーズ で新たに開発した FAMILY-21 コ ードを用いて将来の様々な原子力利用オプションを検討し、FBR サイクルの導入意義 を明確にした。また、代表的な5つの FBR サイクル候補概念(主に炉型別概念)を 対象に、国内(全体、地域)および世界全体を対象としたサイクル諸量解析を行った。

様々な原子力利用オプションの検討では、原子力エネルギーの持続的安定供給を目 指す場合、陸上ウランに代わる資源確保が肝要であり、海水ウランによる軽水炉ワン ススルー利用は、使用済燃料直接処分場や濃縮テイルウランの貯蔵・処分場の確保、 海洋構造物の建設などの課題が想定される。新たな資源開発を必要としない FBR サ イクルは、エネルギー需要に応じて軽水炉使用済燃料中の TRU を再利用する再生型 システムであり、軽水炉起源の廃棄物削減に寄与する。

代表的な FBR サイクル候補概念を対象に「環境負荷低減(MA 蓄積量削減)」、「ウ ラン資源節約」、「経済性」、「需要変動への柔軟性」を追求した各種シナリオ解析では、 将来の FBR サイクルでは MA 添加率は3%程度を目安とし、炉内プルトニウムイン ベントリが小さく、ブランケット領域の運用により資源重視型炉心、経済性重視型炉 心、LLFP 核変換型炉心間の切り替えが可能であることが望しいことが分かった。サ イクル諸量評価上、総じてナトリウム冷却炉サイクル(MOX 燃料、金属燃料)の性 能が良いことが分かった。また、世界規模のニーズを考慮した場合には、フェーズ 中間評価で検討した資源重視型 FBR サイクル概念の増殖性能をさらに強化したオプ ションが必要となる。

今後は、シナリオ検討結果ならびにシステム特性の分析結果をフェーズ 後半で進める FBR サイクルの概念設計に反映するとともに、原子力利用の持続化や多様化に 向けた将来シナリオを具体的に提示していく予定である。

投資対効果評価では、過去に開発した投資対効果評価システムを用い、22 ケースの FBR サイクル候補概念を対象に評価を実施した。評価条件においては不確実性を有す るものの、今後の投資額をこれまでの FBR 研究開発予算と同程度の規模と想定した 場合、投じた研究開発費以上の効果が得られることを確認した。炉型別では、発電コ ストの安いナトリウム冷却炉サイクルが最も利益指数(効果/投資)が大きく、次いで 鉛ビスマス冷却炉サイクルと水冷却炉サイクルが続く。比較的発電コストが高く軽水 炉から高速炉への置き換えが遅いヘリウム冷却炉サイクルの利益指数は最も小さくな ることが分かった。一方、ロードマップ上で評価した開発資金を想定した場合、利益 指数は過去の投資額を基準としたケースに比べて各候補概念とも 5 倍程度向上する。 今後、外部コストの取り込みによる多様な効果の金銭価値換算手法の開発やより精細 な開発資金の推定を行なうと共に、より現実的な FBR サイクル導入シナリオに沿っ た評価を実施する予定である。

フェーズ の後半(2004 年度~2005 年度)では、さらに原子炉と燃料サイクルの 設計を進め、将来の社会ニーズに適合したより完成度の高い FBR サイクル候補概念 を構築し、多面的評価や導入シナリオ評価等を通じて、2005 年度には幾つかの有望な FBR サイクル概念を抽出する予定である。

# 謝辞

実用化戦略調査研究における総合評価を進めるにあたり御協力いただいた(株)三 菱総合研究所、(株)富士総合研究所および三菱マテリアル(株)に深く感謝致します。

さらに、評価手法開発のさまざまな局面でご協力・ご支援をいただいた本社国際・ 核物質管理部、東海事業所リスクコミュニケーション研究班、放射線安全部、環境保 全・研究開発センター環境保全部、同処分研究部、同先進リサイクル部、再処理セン ター技術部、同環境保全部、プルトニウム燃料センター技術部、同製造加工部、大洗 工学センター安全管理部及び照射施設運転管理センターの方々に深く感謝いたします。

また、フェーズの評価手法検討作業に加わってご尽力された篠田佳彦氏に深く御 礼申し上げます。

本書の構成等にご指導いただいた FBR サイクル開発推進部の方々、また本書の作 成にあたり記述方針、内容の整合性等の検討を詳細に行っていただいた技術検討書検 討 WG の井上明氏、堀切守人氏、栗坂健一氏、田中俊彦氏、岡野靖氏、川口浩一氏、 大木繁夫氏及び小沢正基氏に深く感謝致します。 付録1 多面的評価用諸量解析ツール

実用化戦略調査研究フェーズの中間評価で使用する解析コード(以下「諸量評価ツール」) は、再処理や燃料製造における燃料サイクル施設の設計も考慮し、ORIGEN-2.1と等価フィ ッサイル法を用いて多重サイクル計算を実施し、解析対象となる高速炉について平衡燃料組 成を自動的に算出するものである。

また、ORIGEN-2.1 で計算された平衡取出燃料組成をもとに、ガラス固化体発生量や放射 性毒性についても評価を行うことが可能である。

付録1.1. 諸量解析ツールの計算フロー

諸量評価ツールの計算フローを付図 1.1.1 に示す。以下に各工程の評価式について説明 する。

(1) 記号の定義

ある燃料中に含まれる核種の量(質量)を成分としたベクトルwを次のように定義する。

	$\begin{bmatrix} w_1 \\ w \end{bmatrix}$	
<b>w</b> = {	$  \frac{w_2}{\vdots}$	~(式1)
	$\left[w_{N+M}\right]$	

ここで、成分 $w_i$ は、核種 jの量を示す。

*j*=1...*n* までをウランの同位体核種、 *j*=*n*+1...*N* までを TRU の同位体核種、 *j*=*N*+1...*N*+*M* までを FP 元素の同位体核種とすると、アクチニド(ここでは HM と同 義)核種は、

<b>v</b> = <	$ \begin{cases} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{cases} $	$\rightarrow$	$ \begin{cases} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{cases} $	}(式2)
--------------	---	---------------	---	-------

と表される。さらに、ウラン同位体のみに対しては、

	<i>w</i> <sub>1</sub>		$ u_1 $	
<b>u</b> = {	<i>w</i> <sub>2</sub> ∶	$\rightarrow$	$u_2$ :	~(式3)
	$W_n$		$u_n$	

Np、Pu、Am、Cm 他を並べた TRU の同位体核種では、

t = <	$ \begin{pmatrix} w_{n+1} \\ w_{n+2} \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix} $	} <b>→</b>	$ \begin{cases} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N-n} \end{cases} $	{(式4)
-------	---	------------	---	-------

となる。FP 核種では、

となる。

また、ベクトルの成分の総和をとる関数 $S(\mathbf{x})$ を定義する。成分数をmとすれば、

$$S(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{m} x_j \quad \dots \quad ( \ \vec{z} \mathbf{\zeta} \ \mathbf{6} \ )$$

成分の和で正規化したベクトルを家と定義し、次式で表す。

$$\overline{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x}}{S(\mathbf{x})} \dots (\vec{\mathbf{x}} 7)$$

上付きの - は正規化を表す。さらに、ベクトルの各成分をそれぞれの核種の質量数で除したベクトルを下付きの - を用いて<u>x</u>と定義し、次式で表す。

$$\underline{\mathbf{x}} = \begin{cases} x_1 / Mass_1 \\ x_2 / Mass_2 \\ \vdots \\ x_3 / Mass_3 \end{cases} \quad \dots \qquad ( \ \vec{\mathbf{x}} \ 8 \ )$$

式中*Mass*<sub>i</sub>は核種 j の質量数を示す。

成分数(次元)が同一のベクトル同士の演算子として、

を定義する。この演算子は、交換、結合法則を満足する。すなわち、

 $\mathbf{x} * \mathbf{y} = \mathbf{y} * \mathbf{x}$  (式 10)

 $(\mathbf{x} * \mathbf{y}) * \mathbf{z} = \mathbf{x} * (\mathbf{y} * \mathbf{z})$  ..... (式 11)

が成立する。この演算子は、核種量ベクトル(小文字で表示)と同成分数で核種iの等価フィッサイル係数や核種移行率等を成分としたベクトル(大文字で表示)との演算に用いる。

(2) 標準燃料

炉心設計等で用いられた対象高速炉の炉心域燃料の標準燃料組成を

とする。対象炉型の炉心域で照射した場合の組成を $\hat{\mathbf{w}}^0$ とする。

(3) 等価フィッサイル係数の定義

対象とする高速炉の炉心1 群断面積から得られる核種 j の等価フィッサイル係数を次式 で定義する。これらの値は Pu239 の値を基準に正規化する。

$$F_{j} = y_{j} / y_{Pu239}$$

$$y_{j} = v_{j} \sigma_{f,j} - \sigma_{a,j}$$
( I 13)

 $\sigma_{f,j}$ ,  $\sigma_{a,j}$ ,  $v_j$ はそれぞれ核種 j の微視的核分裂断面積、微視的中性子吸収断面積、核分裂あたりの中性子放出数(率)である。諸量評価ツールでは、 $v_j$ は ORIGEN-2.1 が内蔵する高速中性子に対する値を用いる。また、 $\sigma_{f,j}$ ,  $\sigma_{a,j}$ は対象高速炉の1群断面積を用いて次式を用いて求める。

 $\sigma_{f,j} = (N, FISS)$  $\sigma_{a,j} = (N, GAMMA) + (N, FISS)$ .....(式 14)

#### (4) 等価フィッサイル富化度の定義

等価フィッサイル係数 $F_i$ を成分としたベクトルFを

と定義する。ここで、 $\mathbf{F}^{A}$ はアクチニド核種の等価フィッサイル係数を、 $\mathbf{F}^{F}$ は FP 核種 の等価フィッサイル係数を、 $\mathbf{F}^{U}$ , $\mathbf{F}^{T}$ はそれぞれウラン核種及び TRU 核種の等価フィッサ イル係数を指す。標準燃料中の、g-atoms に変換された核種量と等価フィッサイル係数の 積の和を

$$\overline{F}is^{0} = \sum_{j=1}^{N+M} F_{j} \frac{w_{j}^{0}}{Mass_{j}} = \mathbf{F} \bullet \underline{\mathbf{w}}^{0} = S(\mathbf{F} \ast \underline{\mathbf{w}}^{0}) \dots (\mathbf{\vec{x}} \mathbf{16})$$

とする。ここで、 $\mathbf{F} \bullet \underline{\mathbf{w}}^{0}$ は、 $\mathbf{F} \succeq \underline{\mathbf{w}}^{0}$ の内積である。この値を単位 HM 量あたりの値に 正規化したものを等価フィッサイル富化度とし、以下に記述する高速炉の多重サイクルに おける燃料調整をこの値を基準として実施する。

$$\overline{Fis}^{0} = \frac{Fis^{0}}{S(\mathbf{v}^{0})} \cdots (\vec{\mathbf{z}} \ 17)$$

(5) 平衡サイクル計算

上述した等価フィッサイル富化度を用いた平衡サイクル計算における富化度調整の手順 を以下に示す。

対象とした高速炉に装荷する炉心、軸ブランケット、径ブランケット、内部ブランケットの燃料をそれぞれ、 $\mathbf{w}^{C}$ ,  $\mathbf{w}^{A}$ ,  $\mathbf{w}^{R}$ ,  $\mathbf{w}^{IN}$ とする。照射した直後の核種量をそれぞれ、 $\hat{\mathbf{w}}^{C}$ ,  $\hat{\mathbf{w}}^{A}$ ,  $\hat{\mathbf{w}}^{R}$ ,  $\hat{\mathbf{w}}^{IN}$ とする。上付きの ^ は照射直後の核種量を示す。諸量評価ツールでは燃焼(照射)・冷却計算を ORIGEN-2.1 (使用できるライブラリを JNC で拡張したもの)

を用いて実施する。

(i) 使用済燃料の取出し

炉取出し後再処理までに $\delta$ 年冷却した場合の各領域の使用済燃料組成を $\hat{\mathbf{w}}^{C\delta}$ , $\hat{\mathbf{w}}^{A\delta}$ ,  $\hat{\mathbf{w}}^{R\delta}$ , $\hat{\mathbf{w}}^{IN\delta}$ とする。これらの核種組成は各領域の使用済燃料発生量を考量して算出する。 各領域の使用済燃料組成の算出式を以下に示す。ここでは炉心域のバッチ数を基準に算出 する。

 $\hat{w}_{j}^{i\delta} = SF \_ORIGEN_{i,j} \times Weight_{i} \times \frac{NB_{CORE}}{NB_{i}} \dots ( \ddagger 18)$ 

 $\hat{w}_{i}^{i\delta}$ :領域 i、核種 j の使用済燃料組成(g)

ベクトルの各成分

- *i* :領域
- CORE:炉心、
- AXBL:軸ブランケット、
- RDBL:径ブランケット、
- INBL:内部ブランケット
- *j* :核種
- *SF\_ORIGEN*<sub>*i*,*j*</sub>: ORIGEN-2.1 の出力から得られる、各領域(*i*) の使用済燃料中の核種 *j* の組成(g/tHM)。
- Weight, : 領域 i の装荷重量(tHM)
- *NB*, :領域*i*のバッチ数

したがって、混合した使用済燃料組成w<sup>i</sup>は

 $\mathbf{w}^{I} = \hat{\mathbf{w}}^{C\delta} + \hat{\mathbf{w}}^{A\delta} + \hat{\mathbf{w}}^{R\delta} + \hat{\mathbf{w}}^{IN\delta}$  .....(式19) となる。

(ii) 再処理・燃料製造

諸量評価ツールにおける再処理及び燃料製造計算では、計算過程を簡素化するために、 再処理工程における物質移行計算と次サイクルの燃料富化度調整計算を同時に実施する。 以下に手順を示す。

ここでは、まず使用済燃料をウラン製品及び TRU 製品に移行する部分と廃棄物及びロス(大気放出等)として移行する部分に分割する。このときの核種 jの製品側移行率を $R_j$ とし、そのベクトルを  $\mathbf{R}$ とすれば、製品側へ移行する物質は、

となる。

次に、製品側へ移行した物質をブランケットに装荷するウラン製品と炉心域に装荷する TRU 製品に分ける。 $w^{P}$ を分ける比率をB (以下「TRU 分岐率」と呼ぶ)とすると、TRU 製品として抜き出されるものは $B*w^{P}$ 、ウラン製品は $(1-B)*w^{P}$ となる。ここで1はBと 同次元で、成分がすべて1のベクトルを表す。 燃料製造時のロスを考慮して燃料製造における製品移行率を $\mathbf{R}^{c}$ とすると、最終的に得られる炉心域燃料は、

$$\widetilde{\mathbf{w}}^{C} = \mathbf{R}^{C} * \mathbf{B} * \mathbf{w}^{P} \dots ( \overrightarrow{\mathbf{x}} 21 )$$

となる。ここで冷却期間を考慮した増殖比を次のように定義する。

(iii) TRU 分岐率(B)の算出

富化度調整では、製品側へ移行した物質  $\mathbf{w}^{P}$ をウラン製品と TRU 製品に分ける TRU 分 岐率  $\mathbf{B}$ を決定する。諸量評価ツールでは簡易化のため、ウラン製品にはウラン以外の核種 が随伴しないと仮定する。したがって、TRU 分岐率は、

 $\mathbf{B} = \begin{cases} B_1 = b \\ \vdots \\ B_n = b \\ B_{n+1} = 1 \\ \vdots \\ B_N = 1 \\ B_{N+1} = fp_1 \\ \vdots \\ B_{N+M} = fp_M \end{cases}$ ....(式 23)

となる。ここで0 < b < 1である。また、 $fp_M$  は製品側へ移行した FP 核種が、TRU 製品 に移行する割合で、この値は核種毎に予め与えられるものである。この割合を次式のよう に定義する。

	$fp_1$	
<b>fp</b> = {	:	~(式24)
	$fp_M$	

最終的な TRU 製品  $\tilde{\mathbf{w}}^{C}$  を

 $\mathbf{w}^{q} = \mathbf{R}^{C} * \mathbf{R} * \mathbf{w}^{I} \dots (\vec{\mathbf{z}} \ 26)$ 

である。このベクトルをウラン核種、TRU 核種、FP 核種に分解して記述すると次のようになる。

 $\mathbf{w}^{q} = \begin{cases} \mathbf{u}^{q} \\ \mathbf{t}^{q} \\ \mathbf{f}^{q} \end{cases} \qquad (\vec{\mathbf{z}} \ 27)$ 

よって、炉心燃料は

となる。体積の反応度と体積の HM 量を保存することにより、TRU 燃料の単位 HM あたりフィッサイル和と先に算出した等価フィッサイル富化度が等しくなるから、

$$\overline{F}is^{0} = \frac{\mathbf{F} \bullet (\mathbf{B} \ast \mathbf{w}^{q})}{bS(\mathbf{u}^{q}) + S(\mathbf{t}^{q})} = \frac{b\mathbf{F}^{U} \bullet \mathbf{u}^{q} + \mathbf{F}^{T} \bullet \mathbf{t}^{q} + \mathbf{F}^{F} \bullet (\mathbf{f}\mathbf{p} \ast \mathbf{f}^{q})}{bS(\mathbf{u}^{q}) + S(\mathbf{t}^{q})} \dots \dots \quad ( \ \exists \ \mathbf{C} \ \mathbf{$$

が成立する。したがって、

$$b = \frac{\mathbf{F}^{T} \bullet \mathbf{t}^{q} + \mathbf{F}^{F} \bullet (\mathbf{f}\mathbf{p} * \mathbf{f}^{q}) - S(\mathbf{t}^{q})\overline{F}is^{0}}{\overline{F}is^{0}S(\mathbf{u}^{q}) - \mathbf{F}^{U} \bullet \mathbf{u}^{q}} \dots ( \vec{\mathbf{x}} 30 )$$

からbが算出され、TRU 分岐率が決定する。

以上の手順で決定した製品分岐率を用いて富化度調整を実施し、平衡燃料組成を算出する。なお、ブランケット燃料の組成はTRU分岐率を用いて次のように表される。

 $\widetilde{\mathbf{w}}^{BL} = \mathbf{R}^{C} * (\mathbf{1} - \mathbf{B}) * \mathbf{R} * \mathbf{w}^{I} + \mathbf{w}^{s} \dots ( \vec{\mathbf{z}} 31 )$ 

ここで、 **w**<sup>S</sup> は外部供給ウランであり、ブランケット燃料製造において U が不足する場合に外部より供給される。



付図 1.1.1 諸量評価ツール計算式の流れ(改良前)

付録1.2. 諸量解析ツールの修正および改良

平衡期の FBR サイクルの諸量を評価する諸量評価ツールにおいて、実用化戦略調査研究 フェーズの中間評価を行う際に以下に示す修正および改良を行った。

まず1つ目の修正箇所は「計算実行時の中断」である。パソコンで動作する諸量評価ツ ールではORIGEN-2.1 コードを用いた燃焼または崩壊計算を行う際に、メインプログラム とは別にプログラムを起動させて計算する仕組みになっており、計算機環境上、二つのプ ログラムが同時に実行される。メインプログラムは、このORIGEN-2.1 計算が終了するま で待たなければ、次の処理に計算結果を反映することができないため、待ち時間調整が必 要になる。この部分で作成時に用いたハードウェアより処理能力が向上したために既存の 設定値では対応できなくなり、計算実行時の中断を引き起こしていたと考えられる。その ため、待ち時間を調整するパラメータに試行錯誤した結果得られた適切な値を設定するこ とで正常かつ安定的に動作させることが可能となった。

次に、2 つ目の修正および改良箇所は「誤った炉心燃料組成の算出」である。これは再 処理時の移行率とウランの外部供給の2つに関係している。前者は諸量評価ツールと入力 される再処理移行率の関係に不整合が発生し、誤った炉心燃料組成を算出することがあっ た。また後者では、等価フィッサイル法を用いて炉心に装荷する燃料の組成を算出してい るが、ウランの外部供給はプランケット部分に限られており、プランケット量が極端に少 ない場合に次サイクルの炉心燃料における富化度調整ができず、前者と同様に誤った炉心 燃料組成を算出することがあった。

したがって、再処理時の製品側移行率の算出方法を変更すると共に、ブランケットの多 少に拘らない適正な外部ウラン供給量と炉心燃料組成を算出できるようにアルゴリズムを 改良した。その結果、入力される再処理移行率に影響されることもなく、また非常にブラ ンケット量の少ない評価ケースにおいても、富化度調整が行える範囲において FBR サイ クルの平衡燃料組成を算出することが可能となった。

最後に3つ目の修正箇所は「ガラス固化体発生量の過大評価」である。これは使用済燃 料ミートと被覆管などのそれ以外の元素を合わせて高レベル放射性廃棄物に移行する量を 算出しているが、燃料ミート外元素量の算出過程で天然存在比の取扱いに誤りがあり、ガ ラス固化体発生量を過大に評価していた。そのため、同位体元素の天然存在比の取扱いを 修正することで、設計どおりのガラス固化体発生量を算出することが可能となった。

また、従来、放射能を単位発電量当たり年摂取限度に換算して評価していた放射性毒性 を、単位発電量当たり実効線量当量(Sv/kWh)に変更して評価したり、通常時(希釈放 出)被ばく評価に用いる炉心燃料インベントリを多重サイクル計算ツールの結果を基に算 出できるように諸量評価ツールを改良した。

さらに、燃焼計算を行う ORIGEN-2.1 コード部を JENDL-3.2 ベースの軽水炉および高 速炉の一群断面積ライブラリー(ORLIBJ32)が整備されたものに置き換える改良も併せ て行った。 (1) 炉心外部供給U量の算出

前述の計算フローで示した「(iii) TRU 分岐率(B)の算出」において、ブランケットがな い場合やブランケット量が極端に少ない場合は、TRU 分岐率 B が 1 となり、外部供給 U を用いなければ炉心燃料の富化度調整が行えない状況が発生する。

 $B = \begin{cases} B_{1} = 1 \\ \vdots \\ B_{n} = 1 \\ B_{n+1} = 1 \\ \vdots \\ B_{N} = 1 \\ B_{N+1} = fp_{1} \\ \vdots \\ B_{N+M} = fp_{M} \end{cases}$ .... (  $\vec{x}$  32 )

そこで外部供給 U 量を A、ウラン燃料組成をu<sup>q'</sup>(ここでは 0.3wt%の濃縮テイルを想定) とすると、等価フィッサイル富化度が等しくなることから、

$$\overline{F}is^{0} = \frac{\mathbf{F}^{U} \bullet \left(\mathbf{u}^{q} + A\mathbf{u}^{q'}\right) + \mathbf{F}^{T} \bullet \mathbf{t}^{q} + \mathbf{F}^{F} \bullet \left(\mathbf{fp} * \mathbf{f}^{q}\right)}{S\left(\mathbf{u}^{q} + A\mathbf{u}^{q'}\right) + S\left(\mathbf{t}^{q}\right)}$$

$$A = \frac{\mathbf{F}^{T} \bullet \mathbf{t}^{q} + \mathbf{F}^{F} \bullet \left(\mathbf{fp} * \mathbf{f}^{q}\right) - \overline{F}is^{0}S\left(\mathbf{t}^{q}\right) - \overline{F}is^{0}S\left(\mathbf{u}^{q}\right) + \mathbf{F}^{U} \bullet \mathbf{u}^{q}}{\overline{F}is^{0}S\left(\mathbf{u}^{q'}\right) - \mathbf{F}^{U} \bullet \mathbf{u}^{q'}} \dots (\ \overline{\mathtt{rt}} \ 33)$$

からAが算出され、炉心の外部供給U量が決定する。 なお、炉心燃料の組成はTRU分岐率Bを用いて次のように表される。

 $\mathbf{w}_{C}^{S} = A \mathbf{u}^{q'}$  (式 35)

ここで、TRU 分岐率 B は1 となり、上記の手順で決定した外部供給 U 量( $\mathbf{w}_C^S$ )を用いて富化度調整を実施し、平衡燃料組成を算出する。





付録2 シナリオ評価用サイクル諸量解析コードの整備

付録2.1 FAMILY-EX

(1) 開発・整備の経過

FAMILY-EX は、サイクル諸量評価における解析ニーズの多様化に対して、簡便 かつ迅速に応える目的で開発した。開発コンセプトは、 スタンドアローン方式に よる計算処理、 パーソナルコンピュータの機種依存性がない、 計算条件の設定 や変更が容易である、 特別な操作知識を要せずに自動計算できる、 計算とグラ フ表示が一括処理される、 プログラム言語を知らないユーザーでも機能拡張がで きることとし、既に普及が進んでいた汎用表計算ソフト Excel をプラットホームに 用いたプロトタイプを 1999 年に作成した<sup>[1]</sup>。その後、実用化戦略調査研究の解析 ニーズにあわせて取扱炉型数の増強、計算対象期間の延長、FBR 導入量の自動設定 や <sup>241</sup>Pu 崩壊計算などの機能追加、さらには計算機能を特化した簡易版をはじめ、 MA 収支計算や LLFP 収支計算に対応したラインナップの整備も進めてきた<sup>[2],[3]</sup>。

このように機能拡張を重ねてきた FAMILY-EX は、核燃料サイクルの運用の在り 方を様々な視点から解析できる柔軟性を持つと共に、各種計算機能の自動化により 再現性や計算精度の向上が図られ、実用化戦略調査研究における解析評価<sup>[4],[5]</sup>、サ イクル機構内外の解説資料作成などに活用されている。この FAMILY-EX の開発か ら現在までの整備の経過を付表 2.1.1 に示す。

(2) 基本仕様と主な計算機能

FAMILY-EX4.8の基本仕様と主な計算機能は以下のとおりである。

動作環境 Microsoft Excel'98 以上

(Office2002 以上では、マクロのセキュリティレベルを中以下に設定する) ファイル容量 10.7M<sub>B</sub>

- ワークシートの構成
- ・入力条件 ユーザー入力用 ( 付図 2.1.1 参照 )
- ・計算結果 グラフ出力用(付図 2.1.2 参照)
- ・設備容量原子炉の新設・廃止、燃料交換モード計算用
- ・炉特性 100万 kWe 当りの原子炉特性データへの換算用
- ・ 炉外時間 炉外サイクル時間のテーブル化
- ・ロス率等 燃料加工・再処理・濃縮・転換施設の原料払出係数等の設定
- ・加工量 初装荷燃料と平衡装荷燃料の必要量(=加工量)の計算
- ・NU リードタイムを考慮した天然ウラン需要量の計算
- ・TU・濃縮 濃縮分離作業量、テイルウラン発生量の計算
- ・SF 発生量 各炉型の使用済燃料発生量の計算
- ・再処理工場 使用済燃料の再処理量、貯蔵量、ガラス固化体発生量の計算
- ・回収 U 回収ウラン需給量の計算
- ・Pu量再処理施設の回収量、加工施設への払出量、貯蔵量の計算

- マクロ機能 言語 Microsoft 社 Visual Basic for Application
- ・FBR 新設量の自動算定機能
- ・低増殖型 FBR の新設時期判定機能
- 計算機能
- ・評価対象期間 1997 年~2210 年 (グラフ表示は 2000 年~2200 年)
- ・炉型 BWR×2、PWR×2、プルサーマル(BWR×2、PWR×
- 2)
- ATR×1、FBR×4の最大 13 炉型
- ・再処理施設 LWR、プルサーマル、ATR、FBR 毎に設定。なお、軽水炉 プルサーマル使用済燃料については、LWR あるいは FBR の 各再処理施設で処理すること可能。
- ・出力項目
   発電設備容量(LWR、プルサーマル、ATR、FBR)
   燃料加工量(LWR 濃縮ウラン燃料、同 MOX 燃料、ATR、 FBR の炉心・軸ブランケット・径ブランケットの各燃料)
   天然ウラン累積需要量、再処理量(LWR、プルサーマル、ATR、 FBR 毎)各炉型の使用済燃料貯蔵量(再処理待ち)分離プ ルトニウム貯蔵量、ウラン濃縮役務量、テイルウラン貯蔵量、 ガラス固化体累積発生本数(LWR、プルサーマル、ATR、

FBR )

・計算時間 マクロ機能利用時約5分(使用計算機:内部クロック3GHz、 RAM1GB、OS Windows-XP)

年度	バージョン	主な機能
	Ver1.0	・評価対象は最大 10 炉型(PWR×2, PWR プルサーマル×2, BWR×2,BWR プ
1000 <b>F</b>	(ブロトタイブ)	ルサーマル×2, ATR×1, FBR×1)、評価期間 2000 年~2100 年の 100 年間。
1999年		・FBRの炉型数を4炉型に増強した。また、軽水炉プルサーマル使用
	Ver4.3.x	済燃料の再処理施設が異なるラインナップ(x:0=プルサーマル専用施
		設、0L=軽水炉再処理施設、0F=FBR 再処理施設)を作成した。
		・プルサーマル使用済燃料再処理施設が異なる 3 つのラインナップを
	Ver4.4	統合し、プルサーマル再処理の施設指定を入力方式に変更した。また、
		FBR 使用済燃料の炉外冷却期間を単年度毎に変更可能とした。
		・評価期間の延長(2000 年~2200 年の 200 年間)とファイル容量の
	Ver4.5	コンパクト化 ( 9.7MB 8.2MB ) を図った。また、FBR 新設量の自動
		算定機能を付加した。
		・ <sup>241</sup> Pu から <sup>241</sup> Am への崩壊による Pu 収支変化を模擬する計算オプシ
2000年	Ver4.6	ョンを追加した。この他、濃縮分離作業量、テイルウラン貯蔵量の各
		計算機能を付加した。
		・FBR サイクルにおける Pu 需給ポテンシャルの支配因子を客観的に
	Mini-FAMILY	評価するため、解析体系の簡素化(LWR×1,FBR×1)を図ると共に、
		FBR 移行期間最適化機能をもつ簡易ツールを作成した。
		・ORIGEN2 コードで計算した核種量や組成比率を基に、FBR サイク
	МА	┃ ┃ル内の MA 生成量、MA 消滅量、MA 蓄積量などを近似的に算出する。
		本バージョンは、Ver4.6 と MA 計算用ワークシートから成る。
<b>.</b> .	Ver4.7	・多重リサイクル型軽水炉の導入を想定し、Ver4.6 の炉型数を 13 か
2001年		ら 14 に拡張した。
		・241Puの崩壊計算に使用する原子炉取出から再処理までの使用済燃料
		平均貯蔵年数の計算方法を改良し、核分裂性 Pu 収支の計算精度を改善
2002年	Ver4.8	した。また、使用済燃料再処理量からガラス固化体発生量を近似的に
		求める計算機能、核分裂性 Pu の余剰生産を回避するために低増殖型
		FBR の新設時期判定機能を、それぞれ付加した。
		・本 FAMILY-EX(LLFP)は、TRU 収支の他に FBR サイクル内の FP
		┃ 収支、LLFP 分離・変換サイクル併設による Tc とⅠの廃棄量削減効果
		を分析する目的で FAMILY-EX4.8 を機能拡張したものである。
2003年	LLFP	・TRU 収支計算は FAMILY-EX4.8 と共通のワークシートで行い、FP
		収支計算および LLFP 分離・変換サイクルの諸量計算は LLFP 用とし
		て新設したワークシートで行っている。

付表 2.1.1 FAMILY-EX の開発・整備の経過



付図 2.1.1 FAMILY-EX4.8 の入力用ワークシート"入力条件"





(3) 平成 15 年度の改良・整備

実用化戦略調査研究フェーズ では、中性子経済に優れた FBR の将来ニーズの ーつとして LLFP 核変換に目が向けられ、既に安全レベルにある地層処分の被ばく 線量や被爆リスクのさらなる低減策として、FBR サイクルによる LLFP の分離・ 変換が環境負荷低減性の観点から開発目標に新たに加えられた<sup>[6]</sup>。また、LLFP 分 離変換サイクルに対する設計要求については、リサイクル対象元素はヨウ素(I) テクネチウム(Tc) セシウム(Cs) ストロンチウム(Sr)とされ、放射性廃棄物 への移行率の目標は Iと Tc については 1%~0.1%、Cs と Sr については 1%を目指 すとしている。一方、LLFP 分離変換サイクルの研究開発は、各元素の分離技術や LLFP 変換用ターゲット集合体製造技術などを具体化する要素技術研究、LLFP 核 変換炉心の検討などを進めるシステム設計研究に区分されており、このシステム設 計研究では LLFP 分離変換サイクルの導入規模やシステム特性などの定量評価が求 められているため、サイクル諸量評価手法の整備と適用解析を行うこととなった。

以上のような背景から、LLFP 分離変換サイクルの諸量評価については機能拡張 が容易な FAMILY-EX4.8 で対応することとし、次の基本概念に基づいて追加機能の 検討や改良・整備を実施した。

> LLFP 分離変換サイクルは TRU サイクルと並列運用されるものとする。 (付図 2.1.3)。

LLFP 核変換炉の導入時期は経済性重視型 FBR(低増殖型 FBR)の運用 期間とする。

ただし、装荷する FP の分離回収は FBR 再処理施設の初号機から行われ るものとする。

FP 回収量は装荷・取出燃料の重金属量差、回収ロス率、再処理量などで 近似する。

分離保管中の Sr と Cs については <sup>90</sup>Sr→<sup>90</sup>Y、<sup>137</sup>Cs→<sup>137m</sup>Ba の崩壊を各々 考慮する。

分離後の不純物として Tc の場合は Pd と Ru、I の場合は Br と Zn の混入 を考慮する。



付図 2.1.3 LLFP 分離変換サイクル全体概念図

()LLFP 分離変換サイクル解析機能の概要

FAMILY-EX4.8 と LLFP 分離変換サイクル解析用に追加した新規ワークシートの相関を付図 2.1.4 に示す。この FAMILY-EX(LLFP)では、TRU サイクルの物質収支や FBR 導入量などの時間変動は従来とおり FAMILY-EX4.8 で計算し、その計算結果を基に新規ワークシートで FBR サイクル全般の FP 収支、LLFP 分離変換サイクルにおけるターゲット充填材の物質収支、LLFP 核変換炉(以後、「LLFP 炉」という)の導入規模などを算出する。



付図 2.1.4 FAMILY-EX(LLFP)の概要

### ()計算機能

(a) FP 分離回収量(ワークシート名: FP 分離回収)

#### 概要

FBR 炉心特性データ、FP 組成率、分離・回収ロス率、各年の FBR 使用済燃 料再処理量などを基に、FBR 使用済燃料から分離される全 FP 量、発熱負荷が 高い Sr と Cs の回収量、LLFP 炉でターゲットに使用される Tc と I の回収量お よび不純物量(Pd、Ru、Br、Zn)を、それぞれ一年毎に算出する。

なお、崩壊を考慮した Sr と Cs の保管量や処分量、ターゲット集合体の加工 と再処理に伴う Tc および I の収支や保管量については、別途 Sr 収支・Cs 収支・ LLFP 炉の各ワークシートで計算する。 入力条件

・FBR 炉心特性データ (入力条件シートから): 装荷・取出燃料の重金属量

・FBR 使用済燃料処理量(再処理工場シートから): 炉型、領域毎の処理量

・FP 組成率 (直接入力): CITATION コードによる計算結果

・回収率、加工ロス率、不純物移行率(直接入力): 試計算では設計値を採用 FP 量の計算方法

FP は、装荷燃料が炉内で燃焼することによって生成されるため、入力条件として与える炉心特性データの装荷重金属量と取出重金属量の差を FP 生成量と仮定した。単位重量あたりの FP 生成量は次式で与えるものとする。 単位燃料あたりの FP 生成量

炉型iの単位燃料あたりのFP生成量(Vi) =  $\frac{平衡装荷重金属量i[t/y]}{平衡取出重金属量i[t/y]}$  - 1.0 式(2.4.2-1)

n年の年間 FP 分離量

n年のFP分離量(Wn) = 
$$\sum_{\substack{i=FBR1, FBR2, \\ FBR3, FBR4}} \{V_i \times S_{in} \times (1-\varepsilon_s)\}$$
 式(2.4.2-2)

ここで、*i*:FBR炉型(FBR1,FBR2,FBR3,FBR4) S<sub>in</sub>:n年における炉型iの使用済燃料再処理量(tHM)

 $\varepsilon_{:}$ : 再処理回収ロス率(-)

ターゲット材と一時保管核種 m の回収量

核種mの回収量( $W_{nm}$ ) =  $W_n \times e_m$  式(2.4.2-3) ここで、 $W_n : n$ 年のFP分離量

 $e_m$ : 全FPに対するターゲット材と一時保管核種mの組成率(-)

不純物核種 / のターゲット材移行量

不純物核種lのターゲット材移行量 ( $W_{nl}$ ) =  $W_n \times e_l \times \varepsilon_l$  式 (2.4.2-4) ここで、 $W_n : n$ 年の*FP*分離量

*e<sub>i</sub>*: 全*FP*に対する不純物核種 *l*の組成率(-)

 $\varepsilon_l$ : 不純物核種lのターゲット材への移行率(-)

n 年の FP 廃棄処分量 (Sr と Cs を除く)

n年のFP廃棄処分量(
$$W_{nw}$$
) =  $\frac{W_n}{(1.0 - \varepsilon_r)} - (W_{nm} + W_{nl})$ 式(2.4.2-5)  
ここで、 $W_n : n$ 年のFP分離量  
 $W_{nm} : n$ 年のターゲット材と一時保管核種 $m$ の回収量  
 $W_{nl} : n$ 年の不純物核種 $l$ のターゲット材移行量

 $\varepsilon_r$ :再処理回収ロス率(-)

(b) Sr・Cs 収支 (ワークシート名: Sr 収支、Cs 収支)

概要

半減期 28.7 年の <sup>90</sup>Sr および半減期 30 年の <sup>137</sup>Cs の崩壊を考慮して一時保管 中の Sr と Cs の貯蔵量を算出する。また、保管期間が経過した処分量を計算す る。

入力条件

- ・ Sr と Cs の同位体組成率 (直接入力): CITATION コードによる計算結果
- 各年の Sr と Cs の取出量 (FP 分離回収シートから):式 2.4.2-3 による結果
- ・一時保管年数 (直接入力): デフォルトでは 50 年としている
- Sr と Cs の収支計算方法 (Sr を代表例として説明)

n年に分離したSrの分離経過年数T年後の貯蔵量の内訳

*t*年後の<sup>90</sup>*Sr*貯蔵量 = *n*年に分離した*Sr*量×
$$e_{Sr90}$$
× $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{28.7}}$ 式(2.4.2-7)

ここで、e<sub>Sr90</sub>:<sup>90</sup>Srの同位体組成率(-)

(c) LLFP 炉導入量 (ワークシート名: LLFP 炉)

概要

実用化戦略調査研究で検討している LLFP 炉(基準炉心:ナトリウム冷却大型 MOX 炉、増殖比 1.04)では、<sup>99</sup>Tc および <sup>129</sup>I を核変換対象核種とし、これらの同位体を含む Tc と I の二元素を個別に充填した 2 種類のターゲット集合体を径方向ブランケットに配置する。ターゲット集合体の炉内滞在期間は 60 年~48 年程度とされ、この間に炉心部で生成される量とほぼ同程度の <sup>99</sup>Tc と <sup>129</sup>I が核変換可能と見込まれている。本ワークシートは、この LLFP 炉の導入量や Tc と I の分離保管量を計算する。

入力条件

- ・低増殖炉型 FBR の導入量(入力シートから): FBR-4 のマクロ計算結果
- ・ 各年の Tc と I の回収量 (FP 分離回収シートから):式 2.4.2-3 による結果
- ・ ターゲット集合体の Tc と I の装荷データ (直接入力): 設計データに基づく
- ・ ターゲット集合体の Tc と I の取出データ (直接入力): 設計データに基づく
- ・ ターゲット集合体の再処理、加工などの炉外時間(直接入力): FBR に準拠

LLFP 炉の導入量および Tc と I の収支計算方法

LLFP 炉は、FBR の用途が Pu 生産から環境負荷低減へとシフトしていく段 階で導入されるものと考え、コード上では低増殖型 FBR に割り当てた FBR-4 の内数として扱っている。LLFP 炉の導入量は、I よりも Tc のほうが単位燃料 あたりの FP 生成量や LLFP 炉一基あたりのターゲット装荷量が多いため、Tc の分離保管量を基に算定している。また、Tc と I の収支計算は、ターゲット集 合体の再処理施設と加工施設を想定した炉外時間およびロス率に基づいて行っ ている。

LLFP 導入量の初期計算

FP 分離回収シートで計算した Tc 累積回収量から LLFP 炉の累積導入量、 各年の LLFP 炉導入量を次式により算出する。初期計算では、FBR-4 との同 期やターゲット集合体からの Tc・I の分離・回収は考慮していない。

FBR-4 との同期処理

LLFP 炉の新設量は、FBR-4の年間新設量(リプレース分を含む)を超え ないものとして、付図 2.1.5 に示す方法で計算している。



付図 2.1.5 LLFP 炉と FBR-4(低増殖型 FBR)の同期処理方法

n 年の LLFP 炉の積算導入量 Asa から炉寿命分遡った年の LLFP 炉新設量 F<sub>Sn-使寿命</sub>を廃止量 D<sub>Sn</sub>として差し引くと、n 年に稼動している LLFP 炉の累 積量 T<sub>Sn</sub>となる。

ターゲット集合体からの回収 FP による LLFP 炉の追加導入

LLFP 炉の導入開始時期や新設年を FBR-4 の導入条件に同期させた後、各 年のLLFP 炉新設量 Fsn とLLFP 炉廃止量 Dsn を用いてターゲット材の払出 量、回収量、分離保管量を再計算し、次式にて Tc の分離保管量から LLFP 炉の追加導入量を計算する。

n年までの*LLFP*炉追加導入量 ( $a_{s_n}$ ) =  $\frac{n$ 年までの*Tc*分離保管量 単位容量あたりの*Tc*払出量 式 (2.4.2-10) 式(2.4.2-11)

n年のLLFP炉追加導入量( $l_{s_n}$ ) =  $a_{s_n}$  -  $a_{s_{n-1}}$ 

ターゲット材の収支計算に用いる代表値(Tcを代表例とする)

・単位容量あたりの払出量(原子炉寿命中の総量)

 $=\frac{1 rac{1}{2} r{1}{2} rac{1}{2} rac{1}{2} rac{1}{2} r{r}{rac{1}{2} rac}{2} rac{1}{2} rac{1}{2} rac{1}{2} rac{1}{2} rac{1}{2}$ 

(1.0 - 加工ロス率)×設計スケール比 炉内滞在年数

式(2.4.2-12)

・単位容量あたりの回収量(原子炉寿命中の総量)

_1 炉心あたりのターゲット集合体Tc取出量×回収率	<sub>~</sub> 原子炉寿命
 設計スケール比	~ 炉内滞在年数

式(2.4.2-13)

・n年の分離貯蔵量

= *n* – 1 年の*Tc*貯蔵量 + *n*年の*Tc*回収量 - *n*年の*Tc*払出量 式(2.4.2-14) ()試計算例

ここでは、LLFP 分離変換サイクルの諸量評価を想定した前提条件と、 FAMILY-EX(LLFP)を用いた試計算結果について例示する。

(a) 前提条件

## 原子力発電設備容量

商業プラントの開発計画は 2003 年 3 月に資源エネルギー庁から平成 15 年度 電力供給計画として公表された。その後、大間発電所(電源開発)の計画変更、 珠洲発電所(北陸電力、中部電力、関西電力の共同開発)や巻発電所(東北電力) の計画凍結が表明されたため、試計算では付表 2.1.2 に示す原子力発電設備容量 を用いた。なお、2016 年以降のリプレース計画では、1 基当りの出力を 1.5GWe に規格化し、2074 年までは 67.5 ± 0.75 GWe、それ以降は 67.5 GWe 一定とし た。

西暦	平成 15 年度当初計画(GWe)			平成 15 年 12 月末時点(GWe)			供老
(年)	運開	廃止	累計	運開	廃止	累計	涌ち
2005	2.480		48.217	2.480		48.217	建設中:東通 1、浜岡 5
2006	1.358		49.575	1.358		49.575	建設中:志賀2
2007	0.000		49.575	0.000		49.575	
2008	0.000		49.575	0.000		49.575	
2009	2.292		51.867	2.292		51.867	
2010	4.136	0.357	55.646	2.753	0.357	54.263	廃止:敦賀 1、 計画遅延:大間
2011	5.846		61.492	5.846		60.109	
2012	3.583		65.075	4.141		64.250	計画凍結:巻 1、計画変更:大間
2013	0.000		65.075	0.000		64.250	
2014	3.525		68.600	0.825		65.075	計画凍結:珠洲1、2号
2015	1.373		69.973	1.373		66.448	2074年迄 67.5GWe, 2075年以降 67.5 GWe

付表 2.1.2 原子力発電設備容量の想定条件

### 原子炉導入条件

軽水炉および FBR の想定条件を付表 2.1.3 に示す。本計算では、資源重視型 FBR(高増殖タイプ)の導入開始を 2030 年とし、プルトニウム需給バランスに 応じて経済性重視型 FBR(低増殖タイプ)に移行していくものとする。また、 LLFP 炉は経済性重視型 FBR と並行的に導入するものとしている。

	軽水炉	FBR		
BWR	燃焼度 4.5 万 MWd/t 設備利用率 80% 2019 年以前運開	「もんじゅ」 280MWe	燃焼度 8 万 MWd/t、設備利用率 71% Na 冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.22 2005 年運転~ 2045 年廃止	
PWR	燃焼度 4.9 万 MWd/t 設備利用率 80% 2019 年以前運開	パ イロットプ ラント 420MWe	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% Na 冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.16 2018 年運転~2078 年廃止	
ABWR, APWR	燃焼度 6.0 万 MWd/t 設備利用率 90% 2020 年以降運開	実用炉 (資源重視型)	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% Na 冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.16 2030 年導入	
1/3MOX 炉心	燃焼度 UO2 炉心と同じ 設備利用率 同上 2007 年導入	実用炉 (経済性重視型)	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% Na 冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.04 プ ルトニウム需給バランスに応じて適宜導入	
71/ MOX 炉心 1,383MWe	燃焼度 4.5 万 MWd/t 設備利用率 90% 2012 年運開 2031 年 UO2 炉心移行	実用炉 (LLFP 核変換炉)	燃焼度 15 万 MWd/t、設備利用率 93% Na 冷却 MOX 燃料炉心、増殖比 1.03 経済型と並行的に Tc 貯蔵量に応じて導入	

付表 2.1.3 原子炉想定条件

リサイクル施設導入条件

リサイクル施設の想定条件を付表 2.1.4 に示す。軽水炉再処理施設では濃縮ウ ラン使用済燃料のみを処理し、軽水炉プルサーマルで使用した混合酸化物燃料 (以後、「MOX」という)は FBR 再処理施設の余剰能力を利用して処理する。 一方、LLFP 炉のターゲット集合体は、寿命廃止から4年間冷却した後に全量再 処理が行われるものとする。なお、FBR 使用済燃料再処理およびターゲット集 合体再処理からの FP 回収率は、それぞれの設計目標値の 99%を採用する。

付表 2.1.4 リサイクル施設想定条件

項目	対象	想定条件
/的从# <i>4</i> 加時間	軽水炉サイクル	6 年(原子炉取出 再処理 4 年、再処理 Pu 貯蔵 1 年、加工 装荷 1 年)
X-21-0-12100号[6]	FBR サイクル	5 年(原子炉取出 再処理 4 年、再処理 Pu 貯蔵 0 年、加工 装荷 1 年)
工程ロフ変	軽水炉サイクル	燃料加工 1.0%、再処理 2.0%、転換 0.5%
工作ロス学	FBR サイクル	燃料加工 0.1%、再処理 0.3%、転換 -
	サイクル機構東海	2001 年 ~ 2010 年の年間処理量 90tHM/y 、2011 年廃止
<b>赵水</b> 炉再 <b>机</b> 理	六ヶ所再処理施設	2005 年 210 tU/y、2006 年 360 tU/y、2007 年 480 tU/y、
<b>莊小水 丹</b> 処理		2008 年 640 tU/y、2009 年以降 800 tU/y、2046 年廃止
	第2再処理施設	2046 年運開、再処理規模 800 t U/y
		先進湿式再処理 2035 年 200tHM/y、2055 年 400tHM/y、2075 年以
	FBR 再机理施設	降 600tHM/y 一定。 初号期では軽水炉 MOX の混合再処理を想定。
FBR 再机理	T DIN +5 2012 // III N	2035 年から高レベル廃棄物の FP を分離・回収し、Sr と Cs は 50 年
T DIL H 2014		の一時保管を経て最終処分される。TcとIはターゲット材として貯蔵。
	ターゲット集合体	炉外冷却(4年)後、全量再処理が行われるものとする。
	再処理施設	回収率は 99%とする。

(b) 従来機能の計算例

FAMILY-EX4.8 の従来機能による計算結果を付図 2.1.6 に示す。TRU サイク ルの計算結果は、発電設備容量、燃料加工量、天然ウラン累積需要量、再処理量、 使用済燃料貯蔵量(炉外冷却中の使用済燃料は除く)分離プルトニウム貯蔵量と してグラフ形式で出力される。 本試計算では、2030 年から軽水炉を高増殖タイプ(増殖比 1.16)の FBR にリ プレースしているが、2070 年ごろから徐々に低増殖タイプ(増殖比 1.04)の FBR が導入され、軽水炉が全て FBR に移行し終える 2114 年には低増殖タイプが 70% を占め、その約 10 年後には全て低増殖タイプの FBR に置き換わる。LLFP 炉は、 この低増殖タイプの内数としてカウントされており、その導入規模については次 項で後述する。

FBR 移行後の燃料加工施設ならびに再処理施設の年間処理量は、それぞれ平均 600 トン / 年程度である。また、軽水炉使用済燃料は、六ヶ所再処理工場の処理 規模で操業し続けると、2125 年頃に全て処理し終える見通しである。 (c) FP 評価機能の計算例

FAMILY-EX(LLFP)による計算結果を付図 2.1.7 と付図 2.1.8 に示す。

付図 2.1.7 の各種グラフは、FBR の炉心とブランケットに含まれる FP 全般の 分離量をはじめ、LLFP 炉のターゲット材(Tc、I)およびターゲット材に随伴す る不純物(Pd、Ru、Br、Zn)の回収量、発熱負荷を緩和するため特定期間保管 される Sr と Cs の分離保管量ならびに処分量をまとめたものである。FBR 使用 済燃料に占める FP の重量割合は、装荷領域(炉心、軸・径方向ブランケット) 運転モード(初期取出、平衡取出、廃止取出)および炉心設計などで異なるが、 概ね 10%程度と見積もることができる。また、Sr と Cs は FP 全体の約 10%を占 め、分離後の一時保管量は最大で Sr が約 30 トン、Cs が約 270 トンと見込まれ る。一方、ターゲット材とそれに随伴する不純物の回収量は、FP 全体の5%程度 である。

付図 2.1.8 は LLFP 炉の導入量、ターゲット材の分離貯蔵量、ターゲット集合体の加工および再処理による Tc と I の回収・払出量などを、それぞれグラフにまとめたものである。LLFP 炉は 2070 年ごろに初号機が導入され、その後、5 年~10 年に1 基程度の導入ペースで新設が進み、2200 年時点では FBR 全体の約 40%(発電設備容量 27GWe)を占める。この期間のターゲット材の分離貯蔵量は、Tc が約 10 トン~20 トン、I が 10 トン前後に維持され、各回収量との差が原子炉内で管理されている。

(4) 今後の予定

実用化戦略調査研究フェーズの最終とりまとめでは、核燃料サイクル全体の LLFP 分離変換効果や LLFP 分離核変換サイクルの運用方法について検討・評価を 行うことを予定しており、それに向けて軽水炉使用済燃料を起源とする Sr、Cs、 Tc、I なども定量化できるよう FAMILY-EX(LLFP)の FP 評価機能を拡張する計画 である。







付図 5.1.7 FAMILY-EX(LLFP)による試計算例2(FP 評価機能の出力例)



付図 2.1.8 FAMILY-EX(LLFP)による試計算例3(LLFP サイクルのシステム情報)

付録2.2 FAMILY-21

(1) 開発・整備の経過

核燃料物質の多重リサイクル利用においては、TRU 同位体組成が与える影響について考慮する必要がある。例えば、Pu のリサイクル回数や燃焼度が増すと Pu 同位体組成の高次化が進み、核分裂性 Pu 割合が減少することから、高次化した Pu を用いて標準組成燃料と同一燃焼度を得るためには Pu 富化度を増加させる措置が必要となり、それにともなって燃料加工や再処理に対しても発熱制限、遮蔽措置、物質収支などの観点で影響を与える。とくに実用化戦略調査研究の FBR サイクル概念は低除染燃料や MA 装荷燃料を採用していることから、U・Pu の他に混入 FP やMA 組成変化による炉心特性への影響を考慮するには、核燃料物質としての取り扱い元素や核種の拡充を図る必要があった。また、炉内照射や崩壊による核種レベルの物質量変化を詳細に解き、あわせて TRU 装荷量を等価フィッサイル法 1で求める詳細コードが不可欠となり、FAMILY-21 として 2000 年度から開発に着手した[2],[7],[8],[9]。

付表 2.2.1 に FAMILY-21 の開発・整備の経過を示す。

実施年度	主な追加機能	概要
2000 年度 (平成 12 年度)	<ul> <li>・単基多重サイクル解析機能 の作成</li> <li>・時系列解析機能の作成 (FAMILY-21 Ver.0.0)</li> </ul>	<ul> <li>・FBR -基で多重リサイクルを行った場合の TRUや FP 等の移行量、高レベル廃棄物施設 における潜在的毒性や放射能等を計算する。</li> <li>・LWR×9 炉型(1/3MOX,Full-MOX 含む)、FBR ×1 炉型(フェース・概念 10 炉型をデフォル トとし、計算時に1つの概念を選択)のサイク ル諸量を、2000年~2200年までの期間に渡っ て計算する。</li> </ul>
2001 年度 ( 平成 13 年度 )	<ul> <li>FAMILY-21 Ver.1.0</li> <li>・LWR-MOX 燃料再処理計算 機能の追加</li> <li>・回収ウラン収支計算機能の 追加</li> <li>・FBR 取扱炉型の複数化</li> <li>・物流フローの見直し</li> </ul>	<ul> <li>・軽水炉プルサーマル使用済燃料を再処理した場合の物質収支を計算できるよう、LWR 再処理 および FBR 再処理と独立した軽水炉プルサーマル MOX 再処理施設をモデル化した。</li> <li>・軽水炉回収ウランを LWR-UO2 燃料あるいは LWR-MOX 燃料母材として再利用した場合や、FBR 回収ウランを炉心燃料、プランケット燃料の母材として再利用した場合の回収ウラン収支を計算できるようにした。</li> <li>・同時に計算できる FBR 炉型と再処理方式の組み合わせを1 概念から5 概念に増強した。</li> <li>・上記改良に伴い Pu、母材用ウラン、燃料用ウランの各物流フローを燃料サイクル全体に渡って見直した。</li> </ul>
2002 年度 (平成 14 年度)	FAMILY-21 Ver.2.0 ・LWR 回収 MA の FBR 受入 オプションの追加 ・FBR 導入量の自動調整機能 の追加	<ul> <li>LWR 再処理から回収した MA を FBR 燃料加 工施設に払い出し、FBR 燃料として利用する 計算機能を追加した。</li> <li>計算過程の Pu 貯蔵量を基に FBR 導入量を自 動計算する機能を追加した。</li> </ul>

付表 2.2.1 FAMILY-21 の開発・整備の経過

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> <sup>239</sup>Pu の炉心反応度に対する効果を 1.0 として、他のアクチニド核種の相対的な反応度効 果を定義し(これを等価フィッサイル係数という) 炉心反応度への効果を、各核種の構成比 率に等価フィッサイル係数を乗じたものの和として表す方法。
(2) FAMILY-21 の特徴

FAMILY-21の特徴として代表的な機能を以下に示す。

() 簡易燃焼計算機能

FAMILY-21 では、燃焼後のアクチニド核種重量は、装荷燃料の核種重量を成分とするベクトルと、各親核種から娘核種への変換率を表した行列との積で求める。

- この行列(以後、「燃焼遷移行列」という)は、炉型および燃料領域ごとに予め 用意 1しておくもので、その算出方法は次の通りである。
  - 炉心設計に基づいた平衡装荷燃料の燃料組成をベースとして、 ORIGEN-2.1 コードを用いた1サイクルの燃焼計算を行う。
    - の燃焼過程における中性子束を制約として、核種毎に ORIGEN-2.1 コードを用いた 1 サイクルの燃焼計算によって変換率を算出する。
- なお、炉内滞在期間の区分を n サイクルとした場合、炉内滞在期間経過後のア クチニド核種重量は、燃焼遷移行列の n 乗によって計算する。
  - 1 FBR:炉心、軸ブランケット、径ブランケット、内部ブランケットの 4 領 域
    - LWR:UO<sub>2</sub>燃料1領域

LWR **プルサーマル**炉: UO<sub>2</sub> 燃料領域、MOX 燃料領域の 2 領域

()燃焼計算対象アクチニド核種

燃焼計算の対象核種は、付表 2.2.2 のとおりである。

付表 2.2.2 燃焼計算で考慮するアクチノイド核種

元 素	核 種
U	232U, $233$ U, $234$ U, $235$ U, $236$ U, $238$ U, $239$ U
Np	<sup>236</sup> Np、 <u><sup>237</sup>Np</u> 、 <u><sup>238</sup>Np</u> 、 <sup>239</sup> Np
Pu	$^{236}$ Pu, $^{237}$ Pu, $^{238}$ Pu, $^{239}$ Pu, $^{240}$ Pu, $^{241}$ Pu, $^{242}$ Pu, $^{243}$ Pu, $^{244}$ Pu
Am	$\frac{241}{\text{Am}}$ , $\frac{242\text{m}}{\text{Am}}$ , $\frac{242}{\text{Am}}$ , $\frac{243}{\text{Am}}$
Cm	$\frac{242}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{243}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{244}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{245}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{246}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{247}{\mathrm{Cm}}$ , $\frac{248}{\mathrm{Cm}}$
Bk	<sup>249</sup> Bk, <sup>250</sup> Bk, <sup>251</sup> Bk
Cf	<sup>249</sup> Cf、 <sup>250</sup> Cf、 <sup>251</sup> Cf、 <sup>252</sup> Cf

(注) 燃焼計算以外の物量フローでは、下線で示す核種について収支計 算を行う。

()等価フィッサイル法による TRU 富化度調整機能

回収TRUによる新燃料の組成変化は、等価フィッサイル法を用いて考慮する。 FBR およびプルサーマル MOX 燃料の場合、()で記した標準燃料組成のフィ ッサイル合計値(核種ごとの<sup>239</sup>Pu 等価フィッサイル係数×存在量)を保存する ように、TRU 富化度を決定する。軽水炉回収 MA の添加を考慮する場合も同様 に、外部入力する MA 添加率を条件として TRU 富化度を決定する。

また、軽水炉の場合、標準燃料組成のフィッサイル合計値を保存するように、

U濃縮度を調整する。その際、<sup>236</sup>U までの軽い核種(<sup>233</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U、<sup>236</sup>U) は濃縮され、<sup>238</sup>Uより重い核種(<sup>238</sup>U含む)は希釈され、双方の<sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U に 対する比率は濃縮による影響を受けないものとしている。

- (3) 平成 15 年度の改良・整備
  - ()改良・整備の概要
    - (a) 再処理施設における MA 回収処理機能の改良

将来の核燃料サイクルでは、LWR、軽水炉プルサーマル(以後、「LWR-P」という) FBR の各再処理施設から排出される高レベル放射性廃棄物(以後、「HLW」という)の減容化ならびに TRU の有効利用を図るため、HLW 廃液中に含まれる MA の回収を段階的に進めていくことが考えられる。

この MA 回収処理と FBR 燃料加工施設への払い出しを FAMILY-21 で模擬す るための計算機能を平成 14 年度に付加した。しかし、LWR 再処理施設における MA 回収処理は、現在、建設・試運転が進められている六ヶ所再処理工場では計 画されておらず、MA 回収処理の本格的な導入は第二民間 LWR 再処理施設以降 で順次導入していくことが想定される。そこで、本 FAMILY-21 の LWR と LWR-P の各再処理計算においても、MA 回収処理を行う再処理施設の規模を外部入力で 予め任意に指定し、その入力条件の範囲以内で MA 回収処理が模擬できるよう改 良した。付図 2.2.1 に再処理施設の MA 回収工程と物量フローの考え方を示す。

- また、MA 回収機能の主な入力条件を以下に示す。
- ・MA 回収対象の再処理施設容量(施設割合)
- ・MA回収処理の実施可否の指定
- ・MA 回収処理期間



付図 2.2.1 再処理施設の MA 回収工程と物量フローの概念

(b) 寿命期間中の FBR 炉心特性データ変更機能

高増殖タイプの FBR を導入し続けた場合、LWR から FBR への移行末期にな ると余剰 Pu が生じる。この余剰 Pu 量を軽減するためにプラント寿命期間中に FBR 炉心を高増殖タイプから低増殖タイプに変更する運用方法が想定される。本 機能は、このような炉心特性データの変更(高増殖タイプから低増殖タイプへの 変更も含む)を FAMILY-21 で模擬するために追加した。

本機能では、高増殖タイプから低増殖タイプへ変更年をプログラム内部で自動 計算し、炉心データの変更により余剰 Pu 量の最小化を図る。この自動計算なら びに余剰 Pu 量最小化に関するアルゴリズム付図 2.2.2 に示す。



付図 2.2.2 炉心特性データ変更機能のアルゴリズム

(c) FBR 再処理設備容量調整機能

余剰 Pu 量の軽減と計画的な FBR 再処理施設の導入を目的として、FBR 再処 理設備容量調整機能を追加した。本機能は、FBR 導入量自動調整機能を用いて FBR 新設量を算出した後に、FBR 再処理容量を単位設備容量と耐用年数を基に 規格化し、FBR の新設を妨げない範囲で FBR 再処理設備用量を調整して余剰 Pu 量を軽減機能である。

付図 2.2.3 に FBR 再処理施設容量調整機能の概要を示す。また、付図 2.2.4 に FBR 再処理施設容量調整機能の処理フローを示す。

本機能における主な処理内容は次のとおりである。

- ・FBR 導入量自動調整機能で計算した FBR 再処理容量を、単位設備容量および耐用年数を用いて規格化する。
- ・外部入力で与えられた FBR 再処理施設の新設間隔に基づいて、再処理施設の新設を行う。
- ・FBR 再処理容量の規格化の際には、余剰 Pu の軽減を目的として、FBR 再処 理容量を減らし、FBR 使用済燃料の再処理を遅らせる。

ここで、単位設備容量は FBR 再処理施設の設計設備容量を、耐用年数は FBR 再処理施設の設計寿命を表す。これらの値は外部入力で与える。また、規格化における再処理容量の最小単位は、(単位設備容量)×(耐用年数)としている。



図 a)n 年の FBR 再処理容量 capacity(n)の決定 図 b) capacity(n)候補の設定処理

付図 2.2.3 FBR 再処理施設容量調整機能の概要



# 付図 2.2.4 FBR 再処理施設容量調整機能の処理フロー

()試計算結果

これまで述べたとおり、FAMILY-21 と FAMILY-EX4.8(以後、「FAMILY-EX」 という)は同じサイクル諸量解析コードであるが、装荷・取出燃料組成の計算方 法や評価対象核種の詳細度が大きく異なる。ここでは試計算結果として、 FAMILY-21 と FAMILY-EX のベンチマークテストの結果について概括する。

(a) 計算条件

核燃料サイクルシステムの想定条件

原子力発電設備容量の想定条件は前出の付表 2.1.2 を参照されたい。原子炉想 定条件は概ね付表 2.1.3 に示すとおりであるが、LLFP 核変換炉については想定 外としている。また、リサイクル施設の想定条件は表 2.4.2-4 をベースとし、軽 水炉プルサーマル使用済燃料の再処理施設と FBR 再処理設備容量を次のように 変更した。

・軽水炉プルサーマル使用済燃料再処理:FBR 再処理施設 <u>LWR 再処理施設</u>

・FBR 再処理設備容量: 2030 年~2039 年 50tHM/y

2040年~2049年200tHM/y

2050 年 ~ 2000tHM/y(冷却後全量再処理想定)

境界条件

ベンチマークテストの境界条件は FBR 導入量とし、予め FAMILY-EX で計算 した高増殖 FBR と低増殖 FBR の各導入量の時系列データを、FAMILY-21 およ び FAMILY-EX に外部入力で与えた。境界条件として与えた FBR 導入量ならび に各コード再計算した原子力発電設備容量を付図 2.2.5 に示す。



付図 2.2.5 原子力発電設備容量の比較図

# (b) ベンチマークテスト結果

天然ウラン累積需要量

付図 2.2.6 に天然ウラン累積需要量を示す。FAMILY-EX と FAMILY-21 の計 算結果はよく一致しており、その差は 0.7 万 t-U 程度(約 0.8%)である。



付図 2.2.6 天然ウラン累積需要の比較図

# 燃料加工量

付図 2.2.7 に燃料加工量の計算結果を示す。FAMILY-EX と FAMILY-21 の計 算結果は、2011 年の LWR プルサーマル燃料加工量および 2024 年の LWR 燃料 加工量を除けば二つのコードの計算結果はよく一致しており、その平均誤差は LWR 燃料加工量では6トン/年程度、FBR 燃料加工量では0.2トン/年程度、 LWR プルサーマル燃料加工量については2トン/年程度であった。ちなみに 2011 年の差は、FAMILY-EX では LWR プルサーマルのフル MOX 炉心を便宜的 に 1/3MOX 炉心で模擬し、FAMILY-21 ではフル MOX 炉心特性データに基基づ いて初装荷用燃料加工量を計算していることから、取り扱い炉型の詳細性の違い で差異が生じている。また、2024 年の LWR-UOX 燃料加工量の差は、フル MOX 炉心から UOX 炉心への移行条件の違いによるもので、FAMILY-EX では複数年 かけて UOX 平衡燃料に切り替えるのに対し、FAMILY-21 では一旦全ての燃料要 素を UOX 初装荷燃料に置換える方法で移行を模擬しているため、一時的に単年 度の燃料加工量に差が生じた。



付図 2.2.7 燃料加工量の比較図

使用済燃料貯蔵量

付図 2.2.8 に使用済燃料貯蔵量の計算結果を示す。FBR 使用済燃料貯蔵量は比較的よく一致しているが、LWR 使用済燃料貯蔵量については 2060 年 ~ 2075 年のピーク時に最大で約 700tHM の差が生じている。これは、FAMILY-21 の平衡取出燃料量が FAMILY-EX よりも年間平均 6 トン程度高めに計算されるためであり、単位設備容量あたりの装荷・取出燃料重量を外部入力で与える FAMILY-EX に対し、装荷・取出燃料重量を等価フィッサイル法による富化度調整や簡易燃焼計算機能で随時計算する FAMILY-21 との計算方法の違いに起因している。

再処理量

付図 2.2.9 に再処理量の計算結果を示す。両コードで計算した FBR 使用済燃 料再処理量は比較的よく一致している。LWR については、FAMILY-21 の LWR 使用済燃料取出量がわずかに多いため、その分、再処理期間が1年(LWR 再処 理容量 800t/y の場合)長く要している。









# 核分裂性プルトニウム貯蔵量

FAMILY-21 による燃料組成計算は、2.4.3(2)項で既述したように ORIGEN-2.1 コードで事前に算出した核変換率を用いて行っている。70 群の実効断面積を予め 1 群断面積に縮約して燃焼計算を行う ORIGEN-2.1 コードと、炉心設計に用いた CITATION コード等では解析モデルの詳細性が計算結果に差異をもたらす原因 となり得るため、今回は、その対応方策として設計情報の燃料組成を基に核変換 率を補正している。付表 2.2.3 は、設計情報および FAMILY-21 の簡易燃焼計算 機能で算出した代表的な FBR 炉心の取出燃料中の <sup>239</sup>Pu 含有率であるが、炉心領 域の <sup>239</sup>Pu 含有率は設計情報と FAMILY-21 で概ね一致している。なお、今回行 った核変換率の補正は、燃焼解析モデルの詳細性の相違が計算結果に与える影響 の回避方策の一例であり、今後核変換率の算出方法の見直し等が必要になると考 える。

付図 2.2.10 に核分裂性プルトニウム貯蔵量(以後、「Pu 貯蔵量」という)の 計算結果を示す。FAMILY-21 の Pu 貯蔵量は高増殖 FBR の本格導入直後から緩 やかに増加し、FAMILY-EX との差は 2100 年以降わずかずつ拡大している。ニ つのコード間の差はプルトニウム払出量の算出方法の違いに起因している。 FAMILY-EX では新の燃料加工に必要な核分裂性プルトニウム量(<sup>239</sup>Pu と <sup>241</sup>Pu の合計量)に基づいて払出量を計算し、FAMILY-21 では新燃料の反応度に合わ せた等価フィッサイルを基にプルトニウム払出量を算出しているため、後者の方 法では所定のフィッサイルが確保できない場合には燃料加工への払出が行われな い。具体的には軽水炉 MOX 使用済燃料から回収した高次化プルトニウムを他の プルトニウムと混合しないで多重リサイクルしようとしても、所定の等価フィッ サイルを満たすことができないため付図 2.2.10 のように貯蔵に回され、 FAMILY-21 と FAMILY-EX の間で差異が生じている。なお、高次化プルトニウ ム貯蔵量については、FBR 使用済燃料あるいは LWR-UOX 使用済燃料から回収 したプルトニウムとの混合利用により軽減可能であることから、FAMILY-21 で は高次化プルトニウム利用に係る機能拡張を進めている。

		領域ごとの取出燃料中の <sup>239</sup> Pu 含有率(%)			
	項目	ナトリウム冷却	ナトリウム冷	鉛 - ビスマス冷	い。ガフン灸却士刑
領域		大型	却大型	却中型	Hell Xiz如人王
	(%)				空化物做料料心心。
		MOX 燃料炉心	金属燃料炉心	窒化物燃料炉心	至111初燃剂₩™
	設計情報	11.7	10.5	10.3	11.4
炉心	FAMILY-21	11.7	10.4	10.2	11.2
	対設計誤差	(0.59)	(1.18)	(1.15)	(1.40)
軸方向	設計情報	4.34	4.12	5.50	3.94
	FAMILY-21	4.38	4.16	5.50	3.98
ブランケット	対設計誤差	(-0.92)	(-0.77)	(0.07)	(-0.94)
径方向	設計情報	1.96	2.42	-	2.28
	FAMILY-21	1.96	2.43	-	2.29
ブランケット	対設計誤差	(0.07)	(-0.40)	( - )	(-0.60)

付表 2.2.3 代表的な FBR 概念の取出燃料中の <sup>239</sup>Pu 含有率の比較結果



付図 2.2.10 核分裂性プルトニウム貯蔵量の比較図

(c) 考察

FAMILY-EX とのベンチマークテストでは、サイクル諸量評価手法としての FAMILY-21 の基本動作や計算機能の妥当性を確認した。とくに二つのコード間 で計算結果に差異が見られた Pu 貯蔵量については、Pu 払出量の算出方法の違い によるものと考えられるが、単年度あたりの差が微細であっても 200 年という計 算期間で累計した場合には無視し得ない量となるため、高次化プルトニウム利用 を想定した機能拡張等を図りつつ、今後も計算精度の確認を継続していく必要が あると思われる。

(4) 今後の予定

FAMLIY-21 については、軽水炉プルサーマルの多重リサイクルやバックエンド 評価等を想定した計算機能を追加する予定である。主な追加機能を以下に示す。

・Pu 富化度制限機能

例えば軽水炉プルサーマル多重リサイクルでは、高次化 Pu により装荷燃料 の Pu 富化度が徐々に高くなることから、外部入力で任意変更可能な Pu 富化 度制限値を設け、装荷燃料の Pu 富化度を現実的な範囲に保つようにする。

・FBR 再処理施設の多様化オプション

軽水炉プルサーマル使用済燃料を FBR 再処理施設で処理する場合の優先順 位を外部入力で指定できるようにする。また、軽水炉濃縮ウラン使用済燃料を FBR 再処理施設で処理する計算オプションを追加する。

・FBR 導入量自動計算における HLW と LWR の代替対象化

世界を対象とした解析に対応させるため、FBR 導入量自動計算機能において、 Puの貯蔵制約により FBR が新設できなかった場合の代替炉型として、LWR の他に HWR も対象炉型として取り扱えるようにする。

・テイルウラン蓄積量の計算機能の追加

テイルウランの発生およびプルサーマルまたは FBR での使用量から、テイ ルウラン蓄積量を定量化する。 [参考文献]

- [1] 大滝明他: "核燃料サイクルにおける物質収支解析手法の機能拡張", JNC TN9410 2000-006(2000.4).
- [2] 篠田佳彦他:"総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ).成果 報告書 - ",JNC TN9400 2001-061(2001.3).
- [3] 小野清他: "FBR サイクル導入シナリオの検討(). サイクル諸量の観点からのFBR 導入シナリオの評価 ",JNC TN9400 2001-061(2003.7).
- [4] 小野清他: "FBR 導入シナリオの検討", JNC TN9400 2001-036(2000.12).
- [5] 小野清他: "高次化 Pu 及び MA 蓄積の観点からの高速炉導入シナリオの検討", JNC W9404 2001-061(原子力学会 2001 年春の年会, 2001.3.27).
- [6] 核燃料サイクル開発機構,日本原子力発電株式会社,「高速増殖炉サイクルの実用 化戦略調査研究(フェーズ). 2002 年度成果報告書」,JNC TN1400 2003-002 (2003.6).
- [7] 牧隆他: "FBR サイクル候補概念に関するサイクル諸量計算",JNC TJ9400
   2002-004 (2001.2),三菱マテリアル株式会社
- [8] 牧隆,堀内伸剛:"サイクル諸量解析コードの機能拡張",JNC TJ9400 2002-006 (2002.1),三菱マテリアル株式会社
- [9] 牧隆,堀内伸剛: "サイクル諸量解析コードの機能拡張().",JNC TJ9400 2003-001 (2003.1),三菱マテリアル株式会社

付録3発電設備容量に関する考察

付録3.1 はじめに

国内の電力需要は、高齢化社会や非素材系産業の拡大に伴って今後も連続的に増加し続けるものと考えられる。

また、今後の電源構成については、環境問題ならびに省エネルギーへの国民的関 心が高まっていることから、太陽光や風力等を利用した再生可能エネルギー発電、 あるいはマイクロガスタービンや燃料電池を用いたコージェネレーション等の シェア拡大が予想される。一方、火力発電に比べ初期投資が大きい原子力発電は、 エネルギーセキュリティーの確保や二酸化炭素削減のうえで公益的期待が大きい 反面、従来からの立地問題や安全性への不信に加えて、電力市場の全面自由化にお いては新規参入者との競争で不利になるとの見方もあり、建設計画に遅れが生じて きている。

FBR サイクル実用戦略調査研究では、実用化段階の FBR サイクルシステムに期 待される基本性能およびその導入シナリオの定量的検討に資する目的で、将来のエ ネルギー需給量や電源構成について調査・分析を行っている。とくに我々が注目し ている原子力発電設備容量は、電力需要の成長と共に立地問題・財政問題・環境問 題・資源問題等の社会的条件に影響されるが、フェーズ における検討では電力需 給確保と二酸化炭素削減の観点から将来の必要規模を定量化した<sup>[1]</sup>。引き続き フェーズ では、導入成長が著しい太陽光発電や風力発電、一般廃棄物発電の将来 導入見通しを精査すると共に、二酸化炭素排出原単位(以後「CO<sub>2</sub>原単位」とい う)および非火力発電の一次エネルギー換算方法を見直したうえで、フェーズ と 同様に電力需給確保と二酸化炭素削減の両面から将来の原子力発電設備容量を検 討・考察した。

本付録3では、国内原子力発電設備容量の評価事例(付3.2)検討方法(付3.3) 原子力発電設備容量の国内解析(付3.4)考察とまとめ(付3.5、付3.6)につい て述べる。

付録3.2 国内の原子力発電設備容量に関する評価事例

21 世紀末までの日本の原子力発電規模を評価した研究例として、日本エネル ギー経済研究所の湯浅<sup>[2]</sup>、東京電力の山澤ら<sup>[3]</sup>の論文がある。湯浅はシナリオ的手 法により 2100 年の原子力発電規模を 114~305GWe 程度とし、同じく山澤らは 150~320GWe 程度と予測している。また、前出の WEC が公表した将来のエネル ギー需給見通し<sup>[4]</sup>によれば、日本が含まれる太平洋 OECD 地域(日本、オースト ラリア、ニュージーランド)の 2100 年時点の原子力発電電力量は、A2 ケースが 約 1,300TWh、B ケースが約 660TWh、C2 ケースが約 225TWh と見込まれてお り、これを基に原子力発電設備容量を計算すると設備利用率 70%では各々212GWe、 108 GWe、37GWe となり、同じく設備利用率 90%では各々165GWe、84 GWe、 29GWe と見積もられる。なお、太平洋 OECD 地域のオーストラリアとニュージー ランドでは原子力発電所の建設計画がないことから、同地域の原子力発電電力量は 日本を想定した評価として扱うことができる。

21 世紀の日本の原子力発電設備容量は、WEC のように現状より縮小する見方 もあるが、外部機関による評価を参考にすれば現状規模を上回ると想定するが妥当 と考えられる。しかしながら、これらの既往研究例では詳細な前提条件が不明なこ とから、独自に将来の原子力発電設備容量を検討した。

付録3.3 検討方法

将来の原子力発電設備容量を検討するうえで考慮すべき影響因子として、電力化 率(一次エネルギーに占める発電用投入エネルギーの割合)、二酸化炭素削減目標、 再生可能エネルギー導入量、火力発電の燃料別発電割合等が挙げられる。これらの 影響因子については将来の不確かさを考慮して、解析パラメータとして扱った。

ここでは検討手順の概要、発電用一次エネルギー換算係数、各種解析パラメータの想定値、解析条件について述べる。なお、二酸化炭素については、以後 CO<sub>2</sub> と 表記する。

付録3.3.1 検討手順

原子力発電設備容量は、付図 3.3.1 に示す検討手順で推計した。

先ず、付録2で既述した国内一次エネルギー需給量と電力化率にて発電用一次エ ネルギー投入量を計算した。一般電気事業者が火力発電と原子力発電に投入する一 次エネルギー量は、この発電用一次エネルギー投入量から再生可能エネルギー(水 力、地熱、太陽光、風力、黒液・廃材、一般廃棄物)と自家用発電で賄う分を差し 引いて求めた。





また、一般電気事業者が供給する電力量のうち、火力発電による供給分について は CO<sub>2</sub> 排出量を制約条件として付 3.1 式より火力発電電力量 Q を求め、火力分を 差し引いた残りを原子力発電が負担する電力量とした。

$$Q = \frac{W_{T}}{(C_{1} \times F_{1} + C_{2} \times F_{2} + C_{3} \times F_{3}) \times 10^{3}}$$
 (付 3.1)

ここで、Q:火力発電電力量(TWh)
 W<sub>T</sub>:事業用火力発電CO<sub>2</sub>排出制限量〔t - C]
 C<sub>1</sub>~C<sub>3</sub>:CO<sub>2</sub>原単位(g/kWh)
 1:石炭、2:石油、3:LNG
 F<sub>1</sub>~F<sub>3</sub>:発電割合(-)
 1:石炭、2:石油、3:LNG

なお、発電用一次エネルギー投入量と CO<sub>2</sub> 排出量の計算方法については、次項 以降で詳細に述べるが、以下に示す基本的考え方に基づいて算定した。

(1)発電用一次エネルギー投入量

国内の総合エネルギー統計<sup>[5]</sup>では、再生可能エネルギーや原子力等の非火力発電 の一次エネルギー投入量は火力発電効率を用いて換算している。しかし、本検討で は将来の火力発電効率向上に伴う一次エネルギー投入量の誤算を軽減するため、一 次電力別の発電効率を用いる国際エネルギー機関(以後「IEA」という)の換算方 法に準じる。ちなみに IEA では、水力・太陽光・風力については発電量 = 投入量 すなわち発電効率 100%、地熱と原子力については当該設備の発電効率を用いて一 次エネルギー投入量の計算を行っている。

(2) CO<sub>2</sub> 排出量

火力や原子力、再生可能エネルギーの環境特性を説明する際に、各種電源につい ての単位発電量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を比較例に挙げることがある。例えば、日本 原子力文化振興財団が発行している原子力図面集では、ライフサイクルアセスメン ト(以後「LCA」という)分析に基づいて算定した CO<sub>2</sub> 排出量を用いていること から、発電用燃料に起因する CO<sub>2</sub> の他に、建設・輸送・保守等で消費される全て のエネルギーから発生する CO<sub>2</sub> が比較対象になっている<sup>[6]</sup>。

一方、電気事業者等が環境行動計画の一環として公表している CO<sub>2</sub> 排出量は発 電に用いる燃料起源の CO<sub>2</sub> を算定対象としており、水力・太陽光・風力・原子力 等の非火力発電の建設や保守に伴って発生する CO<sub>2</sub> は含んでいない。よって フェーズ では、一般電気事業者による CO<sub>2</sub> 排出源は石炭、石油、LNG を燃料と する各火力発電のみとし、CO<sub>2</sub> 排出量は電気事業者と同様に環境省が公表<sup>[7]</sup>してい る CO<sub>2</sub> 原単位を発電効率で補正したうえで評価した。 付録3.3.2 発電用一次エネルギーの換算方法

発電用一次エネルギーの換算方法は、前節で述べたとおり IEA 方式に準じる。 国内の総合エネルギー統計では、再生可能エネルギーや原子力の一次エネルギー 投入量は、各発電電力量と火力発電平均発電効率で換算している。しかしながら、 わが国では火力発電効率が年々向上しているため原子力発電効率との格差が拡大 してきており、さらに原子力発電の比重が比較的大きい今日では一次エネルギー投 入量の誤差も大きくなっている。付図 3.3.2 に火力発電効率の実績と将来見通し、 および統計上の火力発電効率と IEA が採用している軽水炉の発電効率を示す。ま た、原子力発電電力量の実績(2000年以降は約300TWh一定と仮定)および原子 力と火力の各発電効率で換算した一次エネルギー投入量を付図 3.3.3 に示す。

今後も現行とおりの換算方法を継続した場合、付図 3.3.2 のように火力発電の効率向上により原子力発電との格差拡大(軽水炉 33%、将来火力 54%) さらには 付図 3.3.3 のように一次エネルギー投入量の誤差増大(約 1,500 万 toe 1 から約 3,000 万 toe)は否めないことから、本検討では一次電力別の発電効率を用いる IEA 方式に準じて付表 3.3.1 の発電効率を採用した。



付図 3.3.2 火力発電と原子力発電の発電効率



付図 3.3.3 一次エネルギー換算用発電効率の違いによる影響

<sup>1</sup> toe:石油換算トン ton oil equivalent. 1toe=10<sup>7</sup>kcalmとして計算.

一次電力別発電効率(%)		—————————————————————————————————————	
IEA	本検討	佣方	
火力固有値	火力平均值	付図 3.3.2 中の実績と将来見通しを適用	
33	33~40	軽水炉 33%、高速炉 40%、移行期は線形近似	
100	89.2	揚水式発電との加重平均にて設定	
100	100	IEA の発電量=一次エネルギーの考え適用	
10	15	上の岱地熱発電所の発電効率約 15%を採用	
_	39.98	総合エネルギー統計上の火力発電効率適用	
_	30	新エネルギー大辞典、工業調査会 2002 参照	
	<ul> <li>一次電力別务</li> <li>IEA</li> <li>火力固有値</li> <li>33</li> <li>100</li> <li>100</li> <li>100</li> <li>10</li> <li>-</li> <li>-</li> <li>-</li> <li>-</li> </ul>	一次電力別 ・ IEA本検討火力固有値火力平均値3333~4010089.21001001039.98-30	

付表 3.3.1 一次エネルギー換算用発電効率

付録3.3.3 各種解析パラメータの概要

将来の電源構成ならびに原子力発電設備容量の影響因子として、 電力化率、 再生可能エネルギー導入量、 自家用発電割合、 CO<sub>2</sub> 削減目標、 原子力およ び火力の発電効率と設備利用率、 CO<sub>2</sub> 原単位、 火力発電の燃料別発電割合等 が挙げられる。

これらの影響因子については将来の不確かさを考慮して、解析パラメータとして 扱った。ここでは各解析パラメータに関する既往の検討例や想定条件について述べ る。

(1)電力化率

電力化率とは、一次エネルギー総供給量に占める発電用一次エネルギー投入量の 割合を表す指標である。OECD 主要国の電力化率と人口一人当りの年間電力需要 量を付図 3.3.4 および付図 3.3.5 に示す。OECD 主要国における電力化率の成長 は、直近の 10 年間はやや停滞気味であるが、過去 30 年間では約 1.5 倍に成長し ている。とくに、2000 年の電力化率が 45%を超える仏国とスウェーデン(瑞典) では、1970 年代後半から 1990 年にかけて急成長を見せており、両国とも総発電 量に占める原子力発電のシェア(2000 年)がそれぞれ約 76%と約 39%で抜群に 高い共通性をもつ<sup>[6],[8]</sup>。将来、水素利用が本格化した場合には、各国の電力化率は 現状よりも高くなると想定される。一方、OECD 主要国の人口一人当りの年間電 力需要量は、加国・スウェーデン・米国が他の国よりも突出しており、1999 年の 消費量は日本の 1.7 倍~2.3 倍にも及ぶ。日本の人口一人当りの年間電力需要量は、 民生部門や非素材系産業の需要増加によって連続的に伸びており、今後も高齢化社 会や産業構造変化の拡大に伴って成長し続けるものと考えられる。

また、日本の電力化率の推移と外部機関による将来予測例<sup>[8]~[11]</sup>、内部検討による想定条件を付図 3.3.6 に示す。電力化率の将来見通しについては、調査した予測例は全て上昇傾向を示していることから、今後も伸びていくと想定するのが一般的な考え方とみなせる。そこで、将来の化石燃料消費構造の変化と電力化率との対応

# について、次のような仮定を設定した。

- ・ 低成長電力シフト2100 年に 45%まで直線的に増加
- 緩やかな電力シフト 2100 年に 50%まで直線的に増加
- 標準的な電力シフト 2100 年に 60%まで直線的に増加
- 急速な電力シフト 2050 年に 60%まで直線的に増加し、その後 60%で飽和
- 大規模な電力シフト 2100 年に 70%まで直線的に増加

なお、付図 3.3.6 の LL・L・M・H・HH は、それぞれ低成長電力シフト、緩や かな電力シフト、標準的な電力シフト、急速な電力シフト、大規模な電力シフトに 対応している。将来、電力化率が 60%あるいは 70%にまで成長する要因として、 電力貯蔵や化石代替燃料としての水素利用(水電気分解製造による)の普及が考え られる。



(出所)日本エネルギー経済研究所エネルギー・経済統計要覧 2003 年版他 (備考)瑞典:スウェーデン

# 付図 3.3.4 OECD 主要国の電力化率の推移



付図 3.3.5 OECD 主要国における人口一人当りの年間電力需要量の推移

(出所)日本エネルギー経済研究所エネルギー・経済統計要覧 2003 年版他 (備考)瑞典:スウェーデン



付図 3.3.6 電力化率の実績と外部機関の予測例および想定条件

実績:日本エネルギー経済研究所エネルギー・経済統計要覧 2003 年版他 予測1:21世紀の技術とエネルギー委員会編著「2050 年への挑戦」電力新報社、1993 年 予測2:松井堅一著「新エネルギーデータの読み方使い方」電力新報社、1994 年 予測3:電力中央研究所「2010 年までの経済・エネルギーの中期展望」 原子力 eye,1998 年 12 月号

(2)再生可能エネルギー導入量

ここでは、水力、太陽光、風力、地熱、黒液・廃材、一般廃棄物を対象とする再 生可能エネルギー発電の想定条件について述べる。 水力

水力発電の導入規模は、2009 年までは電源開発計画<sup>[12]</sup>の計画容量を適用した。 2010年以降については、元電中研の内山<sup>[13]</sup>が評価した経済的に開発可能なポテン シャル量(25.1GWe)と技術的に開発可能なポテンシャル量(32.8GWe)を各々 2100年時点の設備容量と仮定し、その間の設備容量は線形近似で与えた。この二 つの導入ケース(低位・高位)から得られる想定電力量を付図 3.3.7 に示す。また、 付図 3.3.7 には、経済産業省総合資源エネルギー調査会の供給目標値(#0)<sup>[14]</sup>、 日本エネルギー経済研究所の推計値(#1~#4)<sup>[13]</sup>、21世紀の技術とエネルギー委 員会による将来見通し(#5、#6)<sup>[9]</sup>を参考までに併記した。



### 付図 3.3.7 水力発電の実績と外部機関の予測例および想定条件

(出所) #0:総合エネルギー調査会需給部会目標(中間報告書、平成 10年6月)

#1~#4:日本エネルギー経済研究所(EDMC ニュースレターNo.8、平成 10 年 10 月)

#5、#6:「2050年への挑戦」、1993年、電力新報社

#7:電源開発計画平成10年度版に基づくサイクル機構の試算

太陽光

国内の太陽光発電導入量は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(以後「NEDO」という)の住宅用太陽光発電システム導入促進事業(1994年度開始) に代表される国や地方自治体による補助金制度をはじめ、太陽光発電システムの価 格低下(住宅用3kWシステム販売価格:1994年度600万円、2000年度260万円) によって年々増加しており、2000年度末時点の累計で317MWとされている。

将来の導入規模については、経済産業省総合資源エネルギー調査会がまとめた 2010 年度の導入目標では、現行対策維持ケースで 2,540MW、目標ケースで 4,820MW を目指している<sup>[15]</sup>。また、NEDO が進めているニューサンシャイン計 画の導入目標は、2000 年 360MW、2010 年 5,000MW とされている。さらに長期 的な国内の将来予測としては、立命大総合情報センター長の濱川が 2030 年の設置 目標を 5 万 MWe (50GWe) ~ 50 万 MWe (500 GWe) 程度と予測している<sup>[16]</sup>。

一方、太陽光発電の国内潜在量は、総合エネルギー調査会新エネルギー部会資料 (平成12年1月)によると物理的限界潜在量が17万3千 MWe(173GWe) 実際的潜在量が8万6千 MWe(86GWe:物理的限界値の50%)と4万2千 MWe (42GWe:物理的限界値の25%)とされている<sup>[17]</sup>。

化石資源や天然ウラン等を燃料に用いる発電システムを消費型とすれば、太陽光 発電や風力発電等は未利用エネルギーを活用可能にする意味で開発型と言い換え ることができる。この開発型システムの導入規模は潜在量の大小よりも、システム 自体の購買力(価格)と供給力(生産力)のバランスがキーを握ると考える。現に 太陽光発電の導入が急速に拡大した要因として、価格低下の一方で国や地方自治体 による補助金制度の存在が大きく、仮に各種促進事業を廃止しても補助金相当分の 価格低下が図られれば購入費は相殺され、導入ペースの大幅なスローダウンには繋 がらないものと思われる。また、価格改善の見通しが立ってもシステムを安定的に 供給する能力、すなわち生産力が需要に追従しなければ価格低下や飛躍的な導入拡 大は厳しいと見る。よって、太陽光発電の導入量については、これまでの導入実績 や導入目標、国内潜在量にとらわれずに生産力の観点より仮定を行うこととした。 a)太陽光発電システムの国内生産量の算定方法

太陽光発電システムの国内生産量は、先ず世界全体の太陽光セル用シリコン 生産量を調査・仮定し、その需要量から世界全体の太陽光セル生産量を求め、 さらに国内メーカの生産シェアを仮定し国内生産量を算定した。計算上の想定 条件は以下のとおりとした。

ァ)太陽光セル用シリコン生産量(世界全体)

ロシアのヴィノグラードフ記念地球化学研究所による公開情報によれば、2006 年の世界市場における太陽光セル用シリコンの需要は1万トン、その後は10年間 で10倍に伸びるとされている。この需要見通しをベースに、太陽光セルに用いる シリコン生産量を2006年1万トン、2020年10万トンと仮定した。また、2001 年から2005年まで、2007年から2019年までの各期間のシリコン生産量は線形近 似にて設定し、2021年以降については10万トン一定とした。

ィ)太陽光セル1MWe 当りのシリコン消費量

太陽光セル1 MWe 当りのシリコン消費量は、三菱総合研究所の公開資料を基に 2000 年の太陽光セルの全結晶生産量約 257MWe とシリコン消費量約 3,860 トン から 15 トン / MWe と仮定した<sup>[18]</sup>。

ゥ)国内メーカの生産シェアと太陽光セルの国内生産量

国内メーカの生産シェアは、2000年度の実績を参考にして40%一定とした。太陽光セルの国内生産量は、先ず世界全体の太陽光セル生産量を前記の太陽光セル用シリコン生産量と太陽光セル1MWe当りのシリコン消費量より求め、それに国内メーカの生産シェア40%を掛けて算出した。

b)太陽光発電システムの導入規模の算定

太陽光発電システムの国内導入量は、次の仮定に基づいて算定した。

ア)国内需要の飽和条件

家電製品や自動車等の普及事例では、導入初期は加速度的に伸びる国内需要に応 じて生産力を増強し、ある程度普及が進むと次第に国内の需要成長が飽和するため に新たな市場を海外に求める傾向が見られる。太陽光発電システムも同様の需給傾 向をたどる可能性が高いため、国内需要の飽和を考慮に入れ、単年度当たりの国内 導入量の飽和条件を以下のとおり仮定した。

なお、国内生産量が各々の飽和条件に到達するまでは、国内生産された全ての太 陽光セルは国内導入されるものと仮定した。

<国内導入量の飽和条件>

- ・低位ケース 300MWe / 年(国内生産量の約 10%)
- ・中位ケース 750MWe / 年(国内生産量の約 30%)
- ・高位ケース 1,500MWe / 年(国内生産量の約 60%)

ィ)太陽光発電システムの寿命

太陽光発電システムの期待寿命については、一般的に太陽電池モジュール(太陽 光セル)は20年以上、その他機器(インバーターや充電設備等)は10年程度と されている。ここでは、その多くが住宅用として設置されていることから国内住宅 の平均寿命26年(平成9年度建設白書)を基に25年とし、発電設備容量の計算 上では新設から25年経過した設備は廃止扱いとした<sup>[19]</sup>。

c) 太陽光発電の想定条件

付図 3.3.8 に太陽光発電の導入実績、前述の仮定に基づく3ケースの計算結果(低位・中位・高位)総合資源エネルギー調査会による 2010 年の目標値(現 行対策維持ケース・目標ケース)ニューサンシャイン計画の目標値(2000 年・ 2010 年) 立命大・濱川による長期予測(シナリオ1~3)を示す。

なお、原子力発電設備容量の検討では、低位ケース(2100年:7,500MWe) と高位ケース(2100年:3万7,500MWe)を想定条件として用いることとした。



### 付図 3.3.8 太陽光発電の導入実績と外部機関の予測例および想定条件

 (出所)物理的限界潜在量、実際的潜在量:総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会資料(平成12年2月) ジナリオ1~3、ニュ-サンシャイン計画:濱川圭弘「21世紀文明と再生可能エネルギー 太陽光発電の最近の進歩と 将来展望」、月刊エネルギーVol.35,No.6,2002年6月号,P.48-55 目標ケース、維持ケース:総合資源エネルギー調査会「今後のエネルギー政策について」(平成13年7月)

風力

太陽光発電と同様に風力発電の導入量も近年目覚しく伸びており、2001年末時 点の導入量は累計で250MWeとされ、総合資源エネルギー調査会による2010年 度の導入目標780MWe(現行対策維持ケース)に迫る勢いで増えている。また、 同調査会では目標ケースの導入量を累計で3,000MWe(2010年度)としており、 陸上設置が可能な物理的限界潜在量は3万5千 MWe(35GWe) 実際的潜在量は 5,000MWe(条件A)と2,500MWe(条件B)と見込んでいる<sup>[17]</sup>。

一方、風力発電に関する長期導入見通しについては、産業技術総合研究所の松宮 によれば、ヨーロッパ風力エネルギー協会が公表した"Wind Force 12"による開 発シナリオを参考にすると、2040年頃に3万MWe(30GWe)が見込まれるとし ている<sup>[20]</sup>。

a) 風力発電システムの将来導入規模の算定

風力発電は太陽光発電と同様に開発型システムと考え、その累積導入量は国 内潜在量の大小よりも国内需要の飽和条件(年間導入量)と発電システムの寿 命に着目して算定した。 ア)国内需要の飽和条件

<国内導入量の飽和条件>

- ・低位ケース ~ 2100 年: 50MWe / 年
- ・高位ケース ~ 2019 年: 100MWe / 年、2020 年~: 150MWe / 年

ィ)風力発電システムの寿命

風力発電の設計寿命は、2001年に制定された「風力発電システム-第1部:安 全要件(JIS C 1400-1)」によれば20年以上とされているため、ここでは風力発電 システムの寿命を20年とし、発電設備容量の計算上では新設から20年を経過し た設備は廃止扱いとした。

b) 風力発電の想定条件

付図 3.3.9 に風力発電の導入実績、前述の仮定に基づく2ケースの計算結果 (低位・高位) 総合資源エネルギー調査会による 2010 年度の導入目標(現行 対策維持ケース・目標ケース) "Wind Force 12"における導入成長率(2002 年~2007年25%、2008年~2012年20%、2013年以降15%、2016年以降10%、 2021年以降0%)で計算される設備容量(システム寿命20年と仮定)を示す。

なお、原子力発電設備容量の検討では、低位ケース(2100年:1,000MWe) と高位ケース(2100年:3,000MWe)を想定条件として用いることとした。



# 付図 3.3.9 風力発電の導入実績と外部機関の予測例および想定条件

(出所)物理的限界潜在量、実際的潜在量:総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会資料(平成 12 年 2 月)
 Wind Force 21:松宮煇「風力発電の技術動向と開発の現状」季報エネルギー総合工学 Vol.26,No.1,、2003.4,P.30
 ~P.44

目標ケース、維持ケース:総合資源エネルギー調査会「今後のエネルギー政策について」(平成 13 年 7 月)

地熱

総合資源エネルギー調査会第2回新エネルギー部会資料「地熱発電の現状と課題」によると、2000年末現在の国内の地熱発電所数は17地点で合計533MWとされている<sup>[21]</sup>。また、同資料によれば開発可能な資源量は2,470MWとされている。地熱発電の将来導入量については、2100年に2,470MW全てを開発する高位ケースと、2100年に開発可能資源量の約半分の1,240MWを開発する低位ケースの二つのケースを仮定した。

この高位ケースと低ケースにおける一次エネルギー投入量(石油換算量)を付図 3.3.10 に示す。両ケースの一次エネルギー投入量は、上の岱地熱発電所の運転実 績を参考に発電効率15%、設備利用率70%として算出した<sup>[21]</sup>。また、付図 3.3.10 に示す総合資源エネルギー調査会の目標値(印)<sup>[15]</sup>、日本エネルギー経済研究 所による推計値(#1~#6)<sup>[13]</sup>、21世紀の技術とエネルギー委員会による将来見 通し(#7、#8)<sup>[9]</sup>についても、火力発電平均効率を地熱発電効率15%で割って 求めた係数(1999年以前の予測については2.54、2000年以降の予測については 2.67)を掛けて補正している。





 <sup>(</sup>出所) 目標ケ-ス:総合資源エネルギー調査会「今後のエネルギー政策について」(平成 13 年 7 月) #1~#4:日本エネルギー経済研究所(EDMC ニュースレターNo.8,平成 10 年 10 月)
 #5,#6:「わが国の長期エネルギー需給見通しと課題」エネルギー経済,第 25 巻,第 2 号(1999 年 2 月) p.76
 #7,#8:21 世紀の技術とエネルギー委員会編著,「2050 年への挑戦」,電力新報社、1993 年

## 黒液・廃材

黒液・廃材等による一次エネルギー投入量(石油換算量)の実績とフェーズ で 求めた将来見通しの仮定を付図 3.3.11 に示す。黒液・廃材等による一次エネルギー 投入量の将来見通しは、日本国勢図会<sup>[22]</sup>や総合エネルギー統計<sup>[5]</sup>におけるパルプや チップの消費量、紙生産量および黒液・廃材等のエネルギー利用量が国内総 GDP に概ね比例していることに着目し、国内総 GDP の伸び率をベースに黒液・廃材等 の一次エネルギー利用量を近似した。また、付図 3.3.11 に示した総合資源エネル ギー調査会による 2010 年度の導入目標(現行対策維持ケース 479 万 k0、目標ケー ス 494 万 k0)は 2000 年(実績 490 万 k0)に概ね達成されているが、今後につい ても GDP に比例して紙・パルプの需要増加や黒液回収率の改善に応じて微増して いくものと考えられる。



付図 3.3.11 黒液・廃材等の導入実績と想定条件

(出所)

現行対策維持ケース、目標ケース:総合資源エネルギー調査会「今後のエネルギー政策について」(平成 13 年 7 月)

一般廃棄物

一般廃棄物発電の将来導入量の算定は、環境白書(平成 12~14 年度)<sup>[23]~[25]</sup> や旧厚生省による一般廃棄物処理調査(平成 11、12 年度)<sup>[26],[27]</sup>を基に一般廃棄 物発電資源量、ごみ焼却施設への発電設備普及率等を以下のとおり仮定して行った。 a) 一般廃棄物発電の資源量

一般廃棄物発電の資源量については、国民一人当りの一日の排出量から一般 廃棄物の国内年間総排出量を求め、さらに廃棄物発電に寄与しない再資源廃棄 物量(集団回収量・直接資源化量)、自家処分量、直接最終処分量を以下の仮定 に基づいて算定し、これらを差し引いた残りの廃棄物が発電に供給されるもの とした。

ア)一般廃棄物の国民一人当りの排出量と国内年間総排出量

2001年以降の国民一人当りの一般廃棄物排出量は、1990年から 2000年までの 一人一日当りの一般廃棄物排出量を平均し 1.16kg/人・日と仮定した。

また、各年度の一般廃棄物の国内年間総排出量は、前記の一人一日当りの一般廃 棄物排出量 1.16kg/人・日に、国立社会保障・人口問題研究所による推計人口<sup>[28]</sup> と 365 日 / 年を掛けて算定した。

ィ)リサイクル量と自家処理量

ー般廃棄物のリサイクル量と自家処理量は、リサイクル率および自家処理割合を 以下の通り仮定して求めた。

回収された一般廃棄物のリサイクル率は年々上昇しており、2000 年度の実績は 14.3%(平成14年度環境白書)とされている。このリサイクル率は、環境・資源 問題を背景として今後も上昇していくと考えられることから、一般廃棄物に占める 容器包装廃棄物(ペットボトル・ビン・トレイ等の再資源利用可能廃棄物)の重量 比23.7%(平成14年度環境白書)を上限とし、2011年までに連続的に伸びてい くものと仮定した。また、一般廃棄物の一部は自家処理が行われているため、この 割合については直近5年間で最低だった1999年度の実績値0.55%を用いた。

なお、リサイクル量は国内年間総排出量にリサイクル率を掛けて求め、このうち 集団回収分は過去10年間の統計データに基づく回帰式で近似し、中間処理過程に おける直接資源化量はリサイクル量の34%(2000年度実績)を占めるものとし、 残りを中間処理再生利用量として仮定した。一方、自家処分量は国内年間総排出量 からリサイクル量を差し引いた残りに自家処理割合を掛けて算定した。

**ウ**)直接最終処分量

直接最終処分割合(焼却等の減容処理が行われずに直接最終処分される割合)は リサイクル率に概ね反比例していたことから、過去10年間の統計データを基に回 帰式で近似した。また、直接最終処分量は、国内年間総排出量から自家処理量を差 し引いた残りに直接最終処分割合を掛けて求めた。

ェ)直接焼却処理量

一般廃棄物発電の熱源となる直接焼却処理量の計算では、先ず一般廃棄物総排出量から集団回収量と自家処理量を差し引いて計画処理量を求める。次に計画処理量から直接資源化量と直接最終処分量を差し引いた中間処理量に直接焼却率86.2%
 (2000年度実績)を掛けて直接焼却処理量を算出した。なお、この中間処理過程で発生する再資源量が中間処理再生利用量に該当する。

b) 一般廃棄物発電導入量の仮定

一般廃棄物発電施設は、直接焼却処理される廃棄物の単位発熱量 2,000kca/kg、発電効率30%、設備利用率85%と仮定した。また、一般廃棄物 発電設備の導入伸び率には直近10年間の平均伸び率10%を採用し、全ての一 般廃棄物処理施設に発電設備が普及する高位ケースと、発電設備の普及率が全 施設の50%で飽和する低位ケースを想定した。一般廃棄物発電導入量の実績と 低位・高位ケースの想定条件を付図3.3.12に示す。一般廃棄物発電の導入量 は、高位ケースの場合には国内の人口減少(平成9年度中位推計では2007年 度が人口ピーク)により2020年で頭打ちとなり、その後は国内人口にほぼ比 例して減少し続ける。また、発電設備の普及率が50%で飽和する低位ケースで は、2010年に現在の約2倍にまで規模が拡大し、その後は人口減少により低下 し続け、2100年時点では現在規模とほぼ同程度と見込まれる。



付図 3.3.12 一般廃棄物発電の導入実績と想定条件

再生可能エネルギーの一次エネルギー投入量

ここでは、再生可能エネルギーの一次エネルギー投入量を換算する際に、付 3.3.2 項で既述した従来の国内換算方法と IEA 方式に準じて換算した場合の傾向の違い を紹介する。従来の国内換算方式で一次エネルギー投入量を求めたグラフを付図 3.3.13 に示す。また、IEA 方式に準じて一次エネルギー投入量を算出したグラフ を付図 3.3.14 に示す。各グラフの 2010 年以降の一次エネルギー投入量に着目す ると、同じ発電量でも IEA 方式に比べ国内換算方式の一次エネルギー投入量が高 めに計算されている。更に、付図 3.3.13 では太陽光発電の一次エネルギー投入量 が再生可能エネルギー全体の約半分近くを占めているが、付図 3.3.14の IEA 方式 では発電量 = 一次エネルギー投入量としているため低く抑えられ、発電効率が最も 低い地熱発電の一次エネルギー投入割合が拡大している。

この二つのグラフから、IEA 方式による換算は、従来の国内換算方式よりも各 発電設備について正味の一次エネルギー需給量を表しているものと判断される。



付図 3.3.13 国内換算方式による一次エネルギー投入割合



付図 3.3.14 IEA 換算方式に準じた一次エネルギー投入割合

(3) 自家用発電の導入状況と一次エネルギー供給割合

これまで自家用発電設備は主に産業分野で製造部門に導入されてきたが、今日で はコージェネレーションとして店舗・ホテル・病院等の民生部門でも普及しつつあ る。ここでは、電力用一次エネルギー需給量に占める自家用発電の供給割合を検討 するにあたり、現在の自家用発電の導入状況について概括する。

産業分野(製造部門)

素材系産業にあたる鉄鋼、紙・パルプ、化学工業、窯業・土石、石油・石炭製品の 業種は電力多消費産業に位置付けられており、各事業所当りの年間平均電力需要量 は非素材系産業(食料品、繊維工業、ゴム製品、非鉄金属、機械器具、その他)と 比べ格段に多い(付図 3.3.15)。この電力多消費産業では、旧来よりオフガスや残 渣油、黒液・廃材等を燃料に用いた自家用発電を積極的に導入しており、1980年 以降に生じた産業構造の高度化や製造設備の電力化においても自家発電割合を一 層強化した対策が取られている(付図 3.3.16)。一方、かつては電力寡消費産業と されていた非素材系産業では、1980年代前半から電力需要が急増し、1980年代末 以降の電力需要量は素材系産業の外部供給電力(一般電気事業者からの購入電力) を上回っている(付図 3.3.17)。付図 3.3.18 に産業分野のコージェネレーション 導入量を示す。コージェネレーションの導入量は1980年代半ばより急速に増加し、 1998年度時点で約3,750MWe に及び、今後も連続的に増えていくものと予想され る。

なお、コージェネレーションとしての内燃機関はディーゼルエンジンとガスター ビンに概ね二分され、その平均発電容量は一件当たり 3.3MWe 程度である。 民生部門

付図 3.3.19 に民生部門のコージェネレーション導入量を示す。民生部門におけるコージェネレーションの導入量は、概ね産業分野と同様に 1980 年代末より増加している。1998 年時点の導入規模は 882MWe で、平均発電容量は一件当たり 0.5MWe 程度である。また、日本コージェネレーションセンター調べによる 2001 年 3 月末時点の導入規模は、設置件数 2,036 件、発電容量 1,115MWe とされており、この 2 年間で発電容量が 230MWe 程度伸びていることから、今後も需要増加が予想される。

自家用発電設備の一次エネルギー供給割合

コージェネレーションとしての自家用発電設備の導入規模拡大に伴い、一次エネ ルギー供給量の増加が考えられる。一方、自家用発電設備については発電効率の向 上や省エネルギー技術の導入も予想されることから、発電用一次エネルギー需給量 に占める自家用発電設備の一次エネルギー供給割合は、フェーズ 時点の検討結果 10.48%(過去 30年間の平均値)を使用する。



付図 3.3.15 製造業における事業所当りの年間平均電力需要量



# 付図 3.3.16 電力多消費産業の電力需要構成

(鉄鋼、紙・パルプ、化学工業、窯業・土石、石油・石炭製品)







日本エネルギー経済研究所エネルギー・経済統計要覧 2003 年版

付図 3.3.18 産業用コージェネレーションの導入状況



日本エネルギー経済研究所エネルギー・経済統計要覧 2003 年版

付図 3.3.19 民生用コージェネレーションの導入状況

(4) CO<sub>2</sub> 排出抑制目標の想定条件

付図 3.3.20 は、一般電気事業者の CO<sub>2</sub> 排出実績(1990 年~2000 年)と CO<sub>2</sub> 排出抑制目標の想定条件である。CO<sub>2</sub> 排出抑制目標は、2010 年に 1990 年水準を 達成するよう 2001 年から一定率で CO<sub>2</sub> 排出量を削減し、2010 年以降も 1990 年 水準を目標とする継続ケースと、先進国は 2010 年以降もさらなる削減に向けて努 力を続けるだろうと考える国立環境研究所・森田のシナリオ<sup>[29]</sup>を参考にして、2010 年以降も引き続き同じ削減率で CO<sub>2</sub> 排出量の抑制を図る強化ケースの二つのケー スを想定した。



付図 3.3.20 一般電気事業者の CO2 排出実績と CO2 排出抑制目標の想定条件

(5)火力および原子力の発電効率

商業用火力の平均発電効率は、化石燃料資源の有効利用や CO<sub>2</sub> に代表される環 境影響物質の大気放出量削減のために今後も改善が進むと考えられることから、付 図 3.3.21 に示す将来見通しを仮定した。また、原子力の将来見通しについては、 現在の主力である軽水炉が高速増殖炉(以後「FBR」という)に移行した場合の 発電効率は約 33%から約 40%へと改善されるため、ここでは FBR 導入開始目標の 2030 年から陸上のウラン資源が利用し尽されると予想される 2080 年にかけて、 付図 3.3.21 に示す想定条件を設定した。

なお、原子力発電の設備利用率は、保守点検の効率化や高燃焼度化により段階的 に向上いていくと考えられるため、2000 年~2010 年の期間は 81.7%(実績)か ら 83%へ連続的に成長し、2010 年~2020 年の期間については 83%一定、2020 年 ~2050 年の期間については 83%から 90%へ連続的に伸びていくものとし、2050 年以降については 90%一定と仮定した。


付図 3.3.21 商業用火力と原子力の平均発電効率の想定条件

(6) CO<sub>2</sub> 原単位

フェーズ における発電設備容量の検討では、電中研・内山の LCA 分析による CO<sub>2</sub> 原単位を用いて再生可能エネルギー、火力、原子力の各 CO<sub>2</sub> 排出量を評価した<sup>[30]</sup>。

しかし、電気事業者等が環境行動計画の一環として公表している CO<sub>2</sub> 排出量は 発電に用いる燃料起源の CO<sub>2</sub> を評価対象としており、水力・太陽光・風力・原子 力等の非火力発電の建設や保守に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は含まれない。よってフェーズ

では、一般電気事業者の CO<sub>2</sub>排出源は火力発電のみとし、CO<sub>2</sub>排出量は電気事 業者と同様に環境省が公表<sup>[7]</sup>している CO<sub>2</sub>原単位を発電効率(付図 3.3.21を参照) で補正したうえで評価することとした。また、フェーズ では CO<sub>2</sub>回収火力(石 炭・LNG)も評価対象としていたが、フェーズ では CO<sub>2</sub>の回収・固定化に要す エネルギー損失やコスト、環境課題の面で CO<sub>2</sub>回収火力の導入は程遠いと考え評 価対象外とした。フェーズ ・ で採用した火力発電の CO<sub>2</sub>原単位を付図 3.3.22、 付図 3.3.23 に示す。

<sup>(</sup>参考)・エネルギー・経済統計要覧 2003 年版、日本エネルギー経済研究所 ・次世代エネルギー構想、P.114、電力中央研究所編著、電力新報社(1998)



付図 3.3.22 フェーズ 、フェーズ で用いた通常火力の CO2 原単位



付図 3.3.23 フェーズ で用いた CO, 回収火力の CO, 原単位との比較

(7)火力発電の燃料別発電割合

商業用火力の燃料別発電割合は、この 10 年間で石油火力が約 45%から約 17% に大幅に減少し、一方で石炭火力が約 17%から約 34%へ、LNG 火力が約 38%から 49%へそれぞれ増加しており、石炭や LNG による石油の代替化は今後もさらに進むとみられる。

そこで、将来の火力発電の燃料別発電割合については、2020年までに石油火力 が全て廃止されるものと仮定し、2020年以降の石炭・LNGについては経済性を重 視し全て石炭火力に移行するケース(経済ケース)環境面から全てLNG火力に 移行するケース(環境ケース)現在の石炭火力とLNG火力の発電割合が今後も 維持されるケース(維持ケース)石炭火力とLNG火力の発電割合が各々50%で 推移するケースを想定した(共存ケース)。ここでは代表例として、維持ケースと 共存ケースを付図 3.3.24 に示す。



付図 3.3.24 火力発電の燃料別発電割合に関する想定条件の代表例

付録3.4 原子力発電設備容量の超長期解析

前節では、フェーズ 以降に見直した非火力発電の一次エネルギー換算方法をは じめ、太陽光発電・風力発電・一般廃棄物発電等の再生可能エネルギーの将来導入 見通し、CO<sub>2</sub> 原単位等の各種解析パラメータの想定条件について述べた。フェー ズ では、これらの解析パラメータをフェーズ と同様に組み合わせ、電力需給確 保と CO<sub>2</sub> 削減の両面から必要とされる原子力発電設備容量を推計した。ここでは、 計算条件ならびに計算結果、フェーズ における計算結果との比較評価について述 べる。

付録3.4.1 計算条件

フェーズ では再生可能エネルギーの将来導入量や CO<sub>2</sub> 排出源および CO<sub>2</sub> 原単 位等の解析パラメータの想定条件を改訂したが、計算条件としての各種解析パラ メータの組み合わせは、フェーズ にほぼ準じて付表 3.4.1 に示すとおりとした。 なお、付表 3.4.1 にはフェーズ の計算条件も参考表示している。

		電力化率	再生可能 エネルギー	CO <sub>2</sub> 制約	火力発電 構成	CO₂回収 火力導入 の有無
		(竹図 3.3.6)	(川凶 3.3.14)	(19区 3.3.20)	(19区 3.3.24)	
	解析1	低成長電力シフト	高位	継続		導入無し
フェーズⅡ	解析2	緩やかな電力シフト	高位	継続	2020 年以降、 五炭火力 50%	導入無し
	解析3	急速な電力シフト	低位	継続	石炭ヘカ 50% LNG 火力 50%	導入無し
	解析4	大規模な電力シフト	低位	強化		導入無し
Ţ	低位	緩やかな電力シフト	高位	継続	2020 年以降、	導入有り
   ズ	中位	急速な電力シフト	低位	継続	石炭火力 50%	導入有り
Î	高位	大規模な電力シフト	低位	強化	LNG 火力 50%	導入無し

付表 3.4.1 原子力発電設備容量の計算条件

(備考) フェーズ I では、2100 年における原子力発電設備容量は低位ケース 70GWe、中位ケース 120 GWe、高位ケース 200Gwe であった。

付録3.4.2 計算結果

前記の計算条件に基づく計算結果と追加計算結果を付図 3.4.1~付図 3.4.6 に 示す。各図には、下記項目毎の実績(1990年~2000年)と2100年までの長期見 通しを時系列グラフで表示している。また、各計算結果の特徴を次項以降に記す。

- ・ 電気事業用発電の CO<sub>2</sub> 排出量と発電部門の一次エネルギー供給量
- ・ 自家用発電や事業用発電および再生可能エネルギーによる電力供給量
- ・ CO<sub>2</sub> 排出量抑制のうえで必要な原子力発電設備容量
- 一次エネルギー投入量に換算した再生可能エネルギー導入量
- 人口一人当りの年間消費電力量(参考として先進主要国の消費量も掲載)

解析1 (付図 3.4.1)および解析1'(付図 3.4.2)

電力化率の伸びが 100 年で約 4%の低成長にとどまり、なお且つ水力発電を含め た再生可能エネルギーの導入量が現在の 2 倍程度に増えた場合、一般電気事業用発 電の CO<sub>2</sub> 排出量を 1990 年水準(約 7,500 万 t-C)で維持するために必要な原子力 発電設備容量は 2010 年時点で約 55GWe、2100 年時点で約 79GWe とみられる。 また、このように電力化率が低成長を続けたとしても、国民一人当りの年間電力消 費量は人口減少の影響で大幅に増加し、2100 年度の消費量は 2000 年度比で約 3 倍となり、電力消費が多い北米地域(IIASA/WEC の B ケース参照)との格差は、 2000 年度の約 2 倍から 2100 年度には 0.85 倍程度に縮むと予想される(付図 3.4.1)。

国内全体の CO<sub>2</sub>排出量は 1990 年度が 2 億 8,700 万 t-C 程度、2000 年度は 3 億 1,700 万 t-C 程度で 1990 年度よりも約 3,000 万 t-C 増加している。このうち一般 電気事業者による 2000 年度の CO<sub>2</sub>排出量は 8,500 万 t-C 程度であり、1990 年度 比で約 1,000 万 t-C 増加している。仮に一般電気事業者が自社分も含め 2000 年度 時点の国内全体の増加分約 3,000 万 t-C を削減し、2001 年度以降については各産 業部門が 2000 年水準を維持するとした場合、一般電気事業者の 2010 年度の CO<sub>2</sub> 排出制限目標は 5,500 万 t-C 程度になり、目標達成に必要な原子力発電設備容量は 2010 年が 67.5 GWe 程度、2100 年で約 93 GWe 程度と見込まれた( 付図 3.4.2 )。

解析2(付図 3.4.3)

解析2はフェーズの低位ケースと同様に2100年時点の電力化率を50%とし、 その間の電力化率は一定率で成長すると仮定した計算である。フェーズの低位 ケースと解析2の計算条件が異なる点は CO2 回収火力の想定にあり、解析2では CO2 回収火力の導入を想定していないことから、とくに CO2 原単位が大きい石炭 火力を継続導入する場合は原子力発電の導入割合が大きくなる。この低位ケースと 解析2の計算条件の違いと計算結果への影響については、次節の評価で述べる。

1990 年から 2000 年までの 10 年間で電力化率が約 2%成長していることを考え

れば、前述の電力化率の仮定(100年間で約10%)は決して大きいものではない。 また、2100年度の電力化率についても現在の仏国やスウェーデンと同程度であり、 現実的な範囲といえる。このような電力化率の成長において、一般電気事業者が自 社分のCO<sub>2</sub>排出量を2010年度以降も1990年度水準で維持するために必要な原子 力発電設備容量は、2010年に約56GWe、2045年が現行計画容量に等しい約 70GWe、2100年では約95GWeと見込まれる。一方、国民一人当りの年間電力消 費量は、2100年には2000年度比の3.1倍となり、電力消費が多い北米地域との 格差はほとんど無くなるものと予想される(付図 3.4.3)。

解析3(付図 3.4.4、付図 3.4.5)

解析3はフェーズ の中位ケースと同様に2050年の電力化率を60%とし、それ までの期間の電力化率は一定率で成長し、2050年以降は60%で推移するものと仮 定した。本仮定による電力化率の伸び率は過去10年間の実績(平均約0.2%/年) の約2倍に相当する。このような電力化率の急成長への対応と、一般電気事業者が 自社分の CO<sub>2</sub>排出量を2010年度以降も1990年度水準で維持するために必要な原 子力発電設備容量は、2010年に約66GWe、その後2050年の約123GWeまで年 間1.4GWe程度ずつの増設、2050年から2100年にかけては50年間で14GWe程 度の増設が必要となる。また、国民一人当りの年間電力消費量は、2100年には2000 年度比の約3.6倍、2.7万kWh/年・人程度にまで増大するとみられる(付図 3.4.4)。

なお、将来の電力化率が 60%~70%にまで成長する要因として、電力貯蔵や化 石代替燃料としての水素利用の普及が考えられる。水を水素と酸素に電気分解する 水電解法は、技術的実現性が高く、環境面でもクリーンな水素製造方法の一つとし て有望視されており、この水電解法で消費する電力供給を原子力発電が担った場合 の発電設備容量と、水素製造による電力化率の増分量を付図 3.4.5 に示す。付図 3.4.5 の電灯・電力用の原子力発電設備容量ならびに電力化率は解析 2 の計算条件 (2100 年の電力化率 50%)による結果である。一方、水素製造用原子力設備容量 ならびに電力化率は、国内の運輸部門における自動車(乗用車・貨物車・バス)が 2055 年頃に全て水素搭載型燃料電池自動車に移行した場合の水素需要量に基づい て計算した結果<sup>[31]</sup>であり、それぞれ解析 3 の計算結果と概ね一致している。した がって、電力化率が 60%を越える想定は、現在利用しているエネルギー構成およ び電力生産に限定した原子力利用を念頭に置いた場合には実現性が薄い印象を与 えるが、運輸部門における石油利用から水素利用へのエネルギー転換を視野に入れ た場合には可能性をもつと考える。

解析4(付図 3.4.6)

付図 3.4.6 に示す解析4は、CO<sub>2</sub>制約が現在よりもさらに厳しい将来社会を想定した場合の計算結果である。仮に 2010年以降も引き続き同じ削減率で CO<sub>2</sub>排出量を低減させるためには、一般電気事業用の主力電源は火力から原子力へとシフ

トせざる負えないことが分かる。世界全体がこのような状況に至れば軽水炉燃料としての天然ウランの大量消費、需給確保の困難化、使用済み燃料の大量発生等の諸 問題が顕在化するものと予想される。



付図 3.4.1 CO<sub>2</sub>排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果(解析1)







# 付図 3.4.3 CO<sub>2</sub>排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果(解析2)



# 付図 3.4.4 CO<sub>2</sub>排出量制約条件下における発電設備容量の計算結果(解析3)









付録3.5 評価

(1) 既往評価事例との比較

付図 3.5.1 は、国内の原子力発電設備容量に関する評価事例として 前節付 3.2 で述べた湯浅と IIASA/WEC の各評価結果、ならびに前述の 解析 1 ~解析 4 による計算結果を対比したグラフである。付図 3.5.1 における最大規模は、湯浅が環境制約を重視した # 1 であり、2100 年 に 305GWe 程度の原子力発電設備容量を見込んでいる。

一方、解析4の原子力発電設備容量は、CO2排出規制を一層強化し、 電力シフトが大幅に進む場合においても最大で200GWe 程度(解析4 の2100年時点)にとどまる。また、2100年時点の電力化率を50%と 仮定した解析2と、湯浅の#4(一人当りのエネルギー需要が2100時 点で2倍に成長する想定条件)および IIASA/WEC の B ケース(最も 現実的なシナリオとされるケース)については、設備容量の増加傾向や 2100年時点の到達容量が概ね一致している。同様に2050年以降の電 力化率を60%一定とした解析3は、湯浅の#2(電力需要の増加分を 全て原子力で賄う想定条件)および#3(一人当りのエネルギー需要が 2100年時点で3倍に成長する想定条件)に比較的近い結果を示してい る。





 (参考) #1~#4:湯浅、「2100 年に至る超長期エネルギー需給展望」、エネルギーフォーラム 1995 年3月号(1995)
 A2,B,C2:IIASA/WEC,「Global Energy Perspectives」(1998)に基づくサイクル機構試算(設備利用率 80%) (2) フェーズ 条件との比較

フェーズ における低位・中位・高位の各計算結果とフェーズ で実施した解析1~解析4の計算結果を付図 3.5.2 に示す。フェーズ とフェーズ の計算結果を比較すると、解析1~解析4では2001年から2050年前後までの再生可能エネルギー導入量をフェーズ よりも多めに見込んでいるため。同期間の原子力発電設備容量が抑えられている。 一方、2050年以降に見られる解析2・3と低位・中位ケースの差は、 CO2 回収火力導入条件の違いによるものであり、解析2・3では CO2 回収火力の導入を想定していないため原子力発電設備容量が20GWe程度多めに計算されている。なお、CO2 回収火力を導入していない解析





(備考)フェーズⅠ:低位・中位・高位、フェーズⅡ:解析 1~4

付録3.6 考察

本検討では、2100年時点の電力化率を 50%とする解析 2 が最も現実 的なケースと考えられ、原子力が水素製造の中核を担う場合の電力化率 はさらに 10%程度高くなり約 60%に成長すると推計され、ほぼ解析 3 の想定条件に匹敵することが判った。

この解析 2 と解析 3 は、フェーズ の低位ケースと中位ケースにそれ ぞれ相当するが、再生可能エネルギーや CO<sub>2</sub>回収火力の導入条件の違 いにより 2050 年までの導入率と 2100 年時点の設備容量に差異が見ら れるため、フェーズ 後半で行う FBR 導入シナリオの定量分析等に用 いる場合には想定条件としての妥当性についてさらに吟味が必要と判 断される。なお、CO<sub>2</sub>制約が現在よりもさらに厳しい将来社会を想定 した高位ケース(フェーズ)と解析 4 (フェーズ)についても同様 の吟味を行う予定である。

フェーズ およびフェーズ 前半の FBR 導入シナリオの定量分析や サイクル諸量解析等に用いた原子力発電設備容量の想定条件(低位・中 位・高位ケース)と、解析 2 ~ 解析 4 の計算結果を想定条件として単純 化した図を付図 3.6.1 に示す。



### 付図 3.6.1 想定条件として単純化したフェーズⅠとフェーズⅡの各将来予測値

(備考) フェーズ :低位・中位・高位、フェーズ :解析 1~4 現行計画: 資源エネルギー庁、平成 15 年度電力供給計画、平成 15 年 3 月 31 日公表 付録3.7 まとめ

フェーズ では、導入成長が著しい太陽光発電や風力発電、一般廃棄 物発電の将来導入見通しを精査すると共に、CO2 原単位および非火力 発電の一次エネルギー換算方法を見直したうえで、フェーズ と同様に 電力需給確保と二酸化炭素削減の両面から将来の原子力発電設備容量 を検討・考察した。また、検討結果については、外部機関が過去に評価 した国内の原子力発電設備容量やフェーズ で検討した将来見通しと の比較評価を行い、現実的な範囲にあることを確認した。

今後は、フェーズ 後半で行う FBR サイクルシステムの基本性能お よびその導入シナリオの定量的検討、サイクル諸量解析等に用いるため に、将来の原子力発電設備容量の想定条件としての妥当性についてさら に吟味を行う予定である。

[参考文献]

- [1]小野清他: "FBR 導入シナリオの検討", JNC TN9400 2001-036, 2000.12 (1999).
- [2] 湯浅俊昭: "2100 年に至る超長期の世界エネルギー需給展望",エネルギー フォーラム 1995.3, p.40~43 (1995).
- [3] 山澤正俊他:"地球温暖化防止と原子力発電の持続的安定供給に関する長期分析",火力原子力発電 1998.7,p.76~82(1998).
- [4] IIASA/WEC: "Global Energy Perspectives", 1998 年報告書, (1998).
- [5] 総合エネルギー統計平成 13 年度版,エネルギー庁長官官房企画調査課 編, (2002).
- [6] 原子力図面集 2002 年版,日本原子力文化振興財団, (2002).
- [7] 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果総括報告書,環境省,平成 14
   年8月,(2002).
- [8] エネルギー・経済統計要覧 2003 年版,日本エネルギー経済研究所, (2003).
- [9] 21 世紀の技術とエネルギー委員会編著,「2050 年への挑戦」,電力新報 社,(1993).
- [10] 松井堅一:"エネルギーデータの読み方使い方",電力新報社,P.22 (1994).
- [11] 電力中央研究所: "2010 年までの経済・エネルギーの中期展望",
   原子力 eye Vol.44 12 月号, (1998).
- [12] 電源開発の概要,平成 10 年度版,通産省資源エネルギー庁公益事業 部編, (1998).
- [13] EDMCニュースレター 8,1998 年 10 月, (1998).
- [14] 通産省総合エネルギー調査会・需給部会 中間報告,平成 10 年 6 月
   11 日付, (1998).

- [15] 経済産業省総合資源エネルギー調査会: "今後のエネルギー政策に ついて",平成13年7月, (2001).
- [16] 濱川圭弘: "21世紀文明と再生可能エネルギー 太陽光発電の最近 の進歩と将来展望",月刊エネルギーVol.35,No.6,2002年6月号(2002).
- [17] 通産省総合エネルギー調査会・新エネルギー部会資料:"新エネル ギーの潜在性と経済性",平成12年1月27日,(2000).
- [18] 三菱総合研究所:"太陽光発電技術周辺動向調査",第2回「エネル ギー使用合理化シリコン製造プロセス開発」(事後評価).分科会資料,平 成13年12月21日,(2001).
- [19] 建設省: "平成9年度建設白書", (1997).
- [20] 松宮煇: "風力発電の技術動向と開発の現状",季報エネルギー総合 工学 Vol.26,No.1,2003 年 4 月号, (2003).
- [21] 経済産業省総合資源エネルギー調査会・新エネルギー部会資料:"地 熱発電の現状と課題",平成13年2月27日,(2001).
- [22] 日本国勢図会 2003/04 年度版,第 61 版,矢野恒太記念会編集・発行, (2003).
- [23] 環境庁: "平成 12 年度環境白書", (2000).
- [24] 環境省: "平成 13 年度環境白書", (2001).
- [25] 環境省: "平成 14 年度環境白書", (2002).
- [26] 厚生省: "平成 11 年度一般廃棄物処理調査", (1999).
- [27] 厚生省:"平成 12 年度一般廃棄物処理調査」(2000).
- [28] 国立社会保障・人口問題研究所:"日本の将来人口推計(平成9年 度1月推計).",(1997).
- [29] 森田恒幸:"地球温暖化問題とその対応",国立環境研究所,第 37 回 原子力総合シンポジウム予稿集,(1999.5).
- [30] 内山洋司:"発電システムのライフサイクル分析",電力中央研究所, (1995.3).
- [31] 篠田佳彦他:"総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ).成果報告書 ",JNC TN9400 2001-061,2001 年 3 月, (2001)

付録4 外部コスト関連動向

付録4.1 外部性について

FBR サイクルや他の電源の経済性について検討する際、通常の経済性の みを考慮すればよいとは言い切れない。投資対効果評価の場合でも、他の 電源に対して発電コストを低減させる効果だけではなく、他の効果を考慮 する必要があった。例えば、生命へのリスクを低減する効果、ウラン資源 枯渇を抑制する効果、二酸化炭素等の環境影響物質の排出を抑制する効果 などが考えられた<sup>[1]~[5]</sup>。そこで、投資対効果を評価するためには、広い 範囲の価値に関わる効果の評価手法を検討する必要が生じる。

実用化戦略調査研究もフェーズ になり、多面的評価のさまざまな評価 視点を外部性という観点から考慮する可能性も検討されてきた<sup>[6]~[8]</sup>。こ れまでは、金銭価値に換算できなかった影響や効果を金銭価値に換算でき れば、経済性という統一的な指標で比較できるという利点がある。

こうした多様な価値に関わる効果は、「外部性」と呼ばれることが多い。 外部性とは、特定のグループが事業に必要な投資を行った結果、そのグ ループ自身以外(例えば、住民など)の第3者グループへの影響のことで ある。具体的な例として、公害が考えられる。公害の影響が公害対策費と いう形で製品の製造費用に含まれず、かつ企業外の住民への補償が行われ ないような場合には、狭義の経済性には優れていても、社会的には問題が あるといえる。また、逆に例えばリサイクル活動などを行った結果として 企業外に好ましい影響がある場合でも、製品が安価にならず経済的優位に 結びつかない場合などでは、逆に社会的には促進したい活動でも、自発的 には拡大していかない恐れがある。このように外部性については、当事者 以外のグループに損害などの否定的な影響が生じる場合には、それを広義 の費用と考えて、「外部コスト(費用)」と呼び、逆に肯定的な影響が生じ る場合、「外部効果(便益)」ということが多い<sup>[9]</sup>(注:付録4では外部コ ストを中心に述べることとする)。

民間企業が行っている事業で外部性がある場合、市場原理に基づく競争 だけによっては、最適規模とならないことが指摘されている。そこで、外 部性が存在することは、規制や課税及び公的資金投入という手段を通じて、 政府等の公的機関が関与する理由と考えられる。

現在のところ、金銭的利益以外の広い範囲の効果をわかりやすく定量的 に評価するために理想的な方法は、これを金銭価値に換算することにより 広義の便益に含めて費用便益分析を行うことである。しかし、この手法は、 効果がどのような価値に関わるのかによって、金銭価値への換算にあたっ て市場価値を利用できないために実施困難な場合も多い。通常の財の場合 は、市場価格によって価値付けは行われているが、外部性については、い わゆる「市場の失敗」という事態が発生し、その価値付けは難しくなる。 しかし、1970年代以降、環境への関心が世界的に高まるにつれて、民間 企業の事業による環境への悪影響や環境保全効果を評価すること等を中 心に、費用便益分析の適用範囲の拡張が試みられ、さらに 1980年代以降 は、こうした外部性の評価手法が盛んに改良されてきた。そこで、FBR サ イクルや他の電源による様々な効果を検討するにあたって、外部性評価手 法を学ぶことは有用である。

付録4.1.1 金銭価値以外の多様な価値

多様な価値を金銭価値に換算するには、何について、どのようなタイ プの価値があるのかを整理することが有用である。各電源のもたらす外 部性が何に関するコストや効果なのか(例えば経済的価値なのか環境へ の価値なのかという点)については後で述べるので、この節では、どの ようなタイプの価値があるのかについてまとめる。

費用便益分析で評価対象となる価値のタイプについては、さまざまな 方法が提案されているが、利用価値と非利用価値に大別する方法などが ある<sup>[10]</sup>。既述したように、近年、費用便益分析を環境問題に適用する試 みがなされており、この節では環境問題を例に取って価値の種類を説明 する。付図 4.1.1 に経済的価値の分類を示す。付図 4.1.1 では、価値全 体を自分が利用できるか否かによって大きく利用価値と非利用価値に大 別している。

利用価値とは、環境を実際に利用していることに由来する価値であり、 直接利用価値、間接利用価値及びオプション価値の3種類に分類される。 直接利用価値とは、森林や土壌が適切に保護されることによって、木材 生産、食料生産等の便益を直接得ることができるという環境の価値を示 す。また、景勝地にお金と時間をかけて楽しみに来る人は、景観という 環境の価値を利用し、そこから直接に便益を得ていると考える事ができ る。間接利用価値とは、環境変化に対応した土壌防御費用や温暖化対策 費用等の環境に対する間接的な費用(便益)を示すものである。オプショ ン価値は、実際には利用されていないが、将来の利用権利という潜在的 便益としての環境の価値である。将来その環境を利用したくなったとき、 その環境が保全されていなければ利用できないので、将来の選択肢を確 保しておくために、今、支払ってもよいと思われる金額で計測される。 オプション価値は、実際の利用に伴う価値ではないが、将来の利用に関 わる価値であるという意味では、広い意味での利用価値の範疇に入る(既 述した通り、この分類法には異論もある)。

非利用価値とは、自分が現在及び将来に利用することがない場合でも、 その環境を保全しておくことに対応する価値である。非利用価値は、要 求価値と存在価値に分けられる。また、要求価値をさらに代位価値と贈 与価値に細かく分類する場合もある。代位価値は自分以外の同世代の他 人が利用することによる価値であり、贈与価値は将来世代が利用するこ とによる価値であり、狭義に捉えたときの要求価値に相当する。存在価 値は良好な環境が存在すること自身に対する悦びの価値である。

付図 4.1.1 に示すように、実際の利用価値に加えて、オプション価値

や非利用価値を経済的価値の一部として計上することは、経済的価値と して実際の利用価値しか考えない場合に比べて、その環境を保全するこ との便益を大きくすることになる。つまり、経済的価値の範囲をオプショ ン価値や非利用価値にまで広げることによって、効率性の観点からも望 ましいという結論を得る可能性が高まる。しかし、オプション価値や非 利用価値は、有形でない環境資産であり、価値換算は困難である。しか し、現在、生態系の価値を金銭価値換算するために仮想市場法を適用す る等の試みが行われてきている<sup>[11]</sup>。

特に要求価値に関しては、補償ルールとの関係から費用便益分析を適 用する際に問題が生じる。例えば、核燃料サイクルから生じる廃棄物の 問題がある。これらの廃棄物は現在世代に原子力発電による便益を与え た結果として、将来世代に廃棄物管理費用あるいは廃棄物によるリスク をもたらすことになる。しかし、現在世代は将来世代に補償することは 困難であり、補償原理が成り立つとは言い切れない。こうした問題につ いては、将来世代の管理費用を現在世代の費用として考え、効果の部分 はリスク削減の効果であると見なせば、費用便益分析と類似の手法で検 討できるという見方もある(いわゆる費用比較法と類似しているが、費 用効果分析と呼ばれる。)が、未だ統一的な考え方はない。

また、存在価値(例えば生態系の存在価値)については、もともと人間への利益を想定していないものである。したがって、存在価値について妥当な価値評価を行うことは極めて難しいことが予想される。



付図 4.1.1 経済的価値の種類

付録4.1.2 外部性の評価手法

通常、財や経済状態の便益は人々がそれらを得るために支払おうとす る最大金額(支払意思額、WTP: Willingness to Pay)やそれらを失うこ とに対して要求する最小金額(容認意思額、WTA: Willingness to Accept) によって測定される。ある商品やサービスに値段が付いて市場で売られ ているものについては、市場価格がWTPやWTAを表していると考えら れる。しかし、市場価格のないものについては、それらを求めることが 困難である<sup>[12]</sup>。

WTP や WTA の評価手法を評価内容で分類すると、個別計測法と総合 計測法に大別される。

個別計測法は、間接効果が相互に打ち消しあう点を考慮して、各項目 の直接効果を個別に金銭価値に換算して、それらを合計して全体の金銭 価値を算出する手法である。個別計測法の長所は、非常に具体的であり 説得力がある点である。短所は、二重計測や計測漏れが生じる恐れがあ る点である。

総合計測法は、各項目の直接効果だけでなく、間接効果も計測する方 法である。長所は、計測の範囲において、二重計測や計測漏れが生じな いことであるが、評価に影響する項目を具体的に示すことが困難な点が 短所である。

次に WTP や WTA の評価手法を方法論的に分類すると、顕示選好法と 表明選好法に大別される。以下に両者とそれぞれに分類される外部性評 価手法について簡単に説明を加える。

顕示選好法とは、個人の行動結果から選好を分析する手法である。間 接市場法とほぼ同義に用いられ、市場では直接取引されない便益につい て、その便益を属性として持つ財やサービス(これらは市場で取引され る)の市場価格から評価する方法である。間接市場法にはヘドニック価 格法、トラベルコスト法、一般均衡分析などがある。ヘドニック価格法 とは、例えば道路の騒音の大きい地点の価格よりも静かな土地の価格が 高い場合、その価格差が騒音削減の価値を示している、とする手法であ る。トラベルコスト法は、例えばある国立公園を訪問した人が支払った 交通費統計から、その国立公園の環境保護の価値を算出する手法である。 応用一般均衡分析は、ある経済的変化が、土地利用、生産性、物流など に影響し、それらが市場メカニズムを経て、地域社会や国民の効用水準 変化に及ぶという分析である。間接市場法の手法の長所は、市場のデー タをもとに便益を評価するので客観性が高く、また「ただ乗り」問題が 回避されるということである。逆に便益を測定するために利用する財や サービスを見つけることが難しく、また見つけた場合でもその財を通じ て間接的にしか便益の価値を測定できないことが短所である。

これに対して表明選好法とは、アンケート等で個人の選好を直接尋ね る方法であり、仮想市場法とほぼ同義に用いられている。この方法は、 任意の属性を評価できるという長所を持つが、データ入手に時間も手間 もかかり、また質問のやり方によってバイアスが生じるという短所を持 つ。表明選好法には、コンジョイント分析、仮想市場評価法(Contingent Valuation Method: CVM)などがある。コンジョイント分析は、アンケー トを行い、いくつかの政策や商品の中から好ましい順番に並べてもらう という方法である。仮想市場評価法は、「よい変化を得るためにどの程度 の出費なら支払うつもりがあるか」について、あるいは逆に「どの程度 の補償金をもらえれば悪い変化を受け入れるか」について、質問を行い、 回答を得て便益の価値を測定する。

以上に説明した例も含めて、付表 4.1.1 に外部性の評価手法を分類した。また、付表 4.1.2 に外部性評価の実施例を示す。

	顕示選好法(間接市場法)	表明選好法
個別計測法	直接支出法	コンジョイント分析
	(防止支出法、再生支出法)	旅行費用法
	消費者余剰分析(旅行費用法)	
	裁判分析	
総合計測法	ヘドニック価格法	仮想市場評価法
	消費者余剰分析	( CVM )
	応用一般均衡分析	

付表 4.1.1 外部性の評価手法

# 付表 4.1.2 外部性評価の実施例

	分析手法	大気汚染	騷音	温暖化
	直接支出法	<ul> <li>・洗濯代、ペンキ塗替</li> <li>え費用、医療費等の</li> <li>家計支出の増加分</li> <li>・ゴム製品、金属製品</li> <li>の腐食による取替</li> <li>え費用の増加</li> <li>・レクリエーション支</li> <li>出。</li> </ul>	・防音装置費 用 ・移転費用 ・医療支出	・海面上昇被害 ・電力(冷房) ・移住、台風、水 供給
個	ヘドニック法	・農作物被害 ・健康を損なうことに よる収入の低下	健康を損なう ことによる収 入の低下	・林業被害 ・余暇活動(収入 被害)
別計測法	消費者余剰分 析 (旅行費用 法)	レクリエーション価 値の低下	なし	農業被害
	価値意識法 (CVM の1種)	健康を損なう不安感 のコスト	騒音による不 快感の費用の 測定	海面上昇被害
	意見聴取 (CVM の1種)	・レクリエーション価 値の低下 ・審美的価値の低下	騒音の耐苦コ スト	・稀少種喪失 ・人命損失
	裁判分析	・農作物被害 ・健康被害 ・価値低下など	航空機騒音補 償など	なし
総	ヘドニック法	住宅資産価値	住宅資産価値	なし
合 的 計	消費者余剰分 析	なし	なし	海 面 上 昇 の 被 害 全体を計測 (森杉等)
測 法	応用一般均衡 分析	なし	なし	温 暖 化 被 害 全 体 を計測

付録4.1.3 外部性評価の意義について

谷口は、外部性評価研究の意義と活用に関して、(1)エネルギー・電源 開発利用の包括的な政策・計画、(2)外部コスト内部化方策の検討、(3)エ ネルギー環境問題に関する理解促進、(4)環境影響評価手法の高度化、(5) 費用便益分析における基盤情報の提供、(6)自然科学・社会科学における 重点課題の同定といった点をあげている<sup>[13]</sup>。

FBR サイクルの研究開発に関連して、今後、放射性物質の環境影響評価手法の高度化をさらに進めること、また、非放射性物質の環境影響評価手法を高度化、普遍化して、FBR サイクルとその他の電源などと比較評価し、さらに外部性のより低い FBR サイクル研究開発に資することとしたい。また、エネルギーセキュリティや核拡散、テロリズムの外部性評価などを実施することが、今後の研究開発の方向性を検討するために有用であると考える。

付録4.2 ExternE について

欧州では、政策決定者にエネルギー、輸送及び環境分野における意思 決定に関する科学的な情報を提供することを目的として、エネルギー分 野における社会・経済研究が行われている。1990年代に入り、欧州にお いて、ExternE (External Costs of Energy) European Research Network により、各種のエネルギー源の外部性評価に関する広範な研究が開始さ れた<sup>[14][15]</sup>。

歴史的に見て ExternE プロジェクトは 3 つのフェーズに分けることが できる。開始当初のフェーズ (1991 年~1992 年)は欧州委員会と米国 エネルギー省の共同研究である。ここでの目的は 8 つの燃料(石炭、石 油、天然ガス、原子力、太陽光、風力、バイオマス、小規模水力)及び 4 つの省エネルギー技術を評価することであった。

この研究を引き継ぐ形で、欧州でフェーズ (1993年~1995年)研究 が続けられ、プロジェクト名も ExternE とされた。ここでは、フェーズ

で開発された方法論やデータベースを活用し、「概要」「方法論」「石油 とガス」「石炭」「原子力」「水力と風力」に関する6冊の報告書が発行さ れた。

さらに、フェーズ (1996年~1998年)では、欧州 15ヶ国が参加し、 約5M ECU(注:「ECU: European Currency Unit」は欧州全体の通貨バ スケットによる通貨単位で、1999年に導入された EUROの前身である) の予算規模で研究が続行され、各国の発電に係る外部コスト(単位発電 量当たりの外部コスト:mECU / kWh)が評価された。フェーズ の結 果は、フェーズ の4冊の報告書(「方法論(改訂版)」、「地球温暖化」、 「エンドユース、輸送、廃棄に係る外部性」、「国別評価のまとめ」)及び 各国の外部コスト報告書によって公開されている。

ExternE による外部コストの評価結果としては、石炭火力(特に旧東 欧地域)の外部コストが最も高く、原子力及び新エネルギーの外部コス トは低い値(発電コストの数%以下)となっている。 付録4.2.1 さまざまな電源における外部性評価項目

付表 4.1.1 に、各発電システムにおいて評価の優先度が高い外部性項 目を示す。本節では、燃料サイクルごとに重要評価項目をまとめる。現 時点では、各電源の外部性評価は負の効果、つまり外部コスト評価が中 心である。

付表 4.2.1 評価の優先度が高い外部性の項目(黒丸部分)

L L L L L L L L L L L L L L L L L L L	히바ㅎ편ㅁ		<b>T</b> \		テフト	1.1		ᇢᆂ
5	や部性の項目	白灰火刀	白沺火刀	大怒刀人	原子刀	水刀	太陽光	風刀
	健康影響(公衆)							
	建築素材							
	穀物							
大気汚染	森林							
	淡水魚類							
	野生生態系							
	視界影響							
温室効果ガス	地球温暖化							
化学物質	健康影響(職業人)							
排水	生態系							
十十十十十	野生生態系							
工地利用	農業,森林,水資源							
放射性物質	健康影響(職業人,公衆)							
事故	職業人,公衆影響							
騒音	健康影響							
採掘処理輸送	個別特有の影響	採掘						

(1) 化石燃料サイクル

以下に、化石燃料サイクルにおける重要評価項目を示す。

大気汚染による人間の健康被害に対する影響 事故が労働者及び公衆に及ぼす影響 大気汚染が建築素材に及ぼす影響 大気汚染が農作物に及ぼす影響 大気汚染が森林に及ぼす影響 大気汚染が淡水漁業に及ぼす影響 大気汚染が管理できない生態系に及ぼす影響 温暖化の影響 騒音の影響 上述の影響に加え以下の燃料依存による影響がある。 石炭・褐炭の採鉱による地面及び地表の水に対する影響 石炭採掘による建物、建築工事に対する影響 褐炭採掘時における立ち退き / 再定住 石油流出事故が海洋生物に与える影響 石油、天然ガス井戸の探査、開発、抽出による定期的な汚染物質 排出による影響

ExternE における外部コストの評価結果(後述)では、特に の大気

汚染による人間の健康被害及び の温暖化の影響が大きいようである。 また、 ~ の項目は、主に燃料採掘に係る項目であり、自国内で燃料 採掘している国では外部コストの評価対象となっている。 ~ の外部 コストは、基本的に各発電サイトからの大気汚染物質(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、粒径 10 ミクロン以下の浮遊粒子状物質: PM(Particle Matter)<sub>10</sub>)の放出量か ら影響経路法によって評価される。ただし、温暖化の影響に関しては、 欧州域内の温暖化影響モデルによって評価された外部コストが一律に適 用されている。

(2) バイオマス発電

バイオマス発電における重要評価項目は、化石燃料サイクルとほぼ同様である。ただし、燃焼過程で放出される CO<sub>2</sub> は植物の成長過程での固定により相殺されるとの仮定に基づき考慮されていない。また、植物中の硫黄含有量が微量のため、SO<sub>2</sub> 排出量は化石燃料に比べて無視できるほど小さい。このため、バイオマス発電において最も重要な大気汚染物質は NO<sub>x</sub> である。また、発電段階以外の評価項目としては、バイオマスの輸送に係る外部コスト及びバイオマスの伐採に伴う生態系への影響などがある。

(3) 原子力発電

原子力発電(発電以外の段階も含めて)における重要評価項目として は、一般公衆への放射線による健康影響(通常運転時の微量な放出と、 偶発事故時の大量放出を含む)が考慮されており、放射性核種以外に排 出される化学物質の影響は無視できると仮定されている。また、放射性 及び非放射性物質による職業人の健康被害についても優先度は低いとさ れている。地球温暖化への影響は、ライフサイクル的なアプローチによ る CO2 排出量に基づいて定量化されている。

発電段階以外(採掘、再処理、廃棄物処理等)の環境影響については、 評価実施国の国情を反映して大きく取り扱いが異なる。

その他に、原子力発電の環境影響の大きな特徴として、放出された放 射性核種が健康影響を与える期間(~10万年)が非常に長いため、現時 点での社会システムを前提とした評価値は大きな不確実さを持つ。

(4) 水力発電

水力発電の燃料サイクルは、発電段階よりも建設や廃棄の段階におけ る外部コストがより重要であるため、ライフサイクルアプローチが採用 される。水力の外部性は不の側面だけでなく、洪水防止・河川の移送を制 御、灌漑や国内の安定した水の提供等、プラスの側面を持ちあわせるこ とも留意すべき点として挙げられている。

水力の燃料サイクルの負荷は、河川の水流システム・その地域の植物相、 動物相の変化による河川生態系への影響など、ほとんどがローカルな環 境に対しての損害である。また、ランドスケープやリクリエーション活 動の変化によるアメニティー損失、巨大ダム建設時における河川の流れ の変化による渇水リスクの上昇なども重要な見地である。燃料サイクル の上流では、素材加工や発電所建設時における汚染物質の負の影響が大 きい。 (5) 風力発電

風力発電の燃料サイクルは、風車の建造と操業の2つの段階に要約され、水力と同じ理由でライフサイクルコストが採用されている。風車製造時において生み出される間接的な汚染物質が風力発電の外部コストの中では高位の損害になりうるが、他の燃料サイクルと比較すると無視可能とみなせるほど小さい。また、操業段階における騒音や視界への影響は非常にサイト依存性が強く、立地場所によっては風力発電の外部コストに大きく影響する。

(6) 太陽光発電

現段階では、ドイツにおいてのみ実施されており、二種類の発電機の 評価がなされている。モジュールの生産から設置に至るまでの大気汚染 物質の放出に加えて、太陽光発電モジュールの生産工程で環境に放出さ れる物質(微粒物質、シリコン、銅などの特定の素材)が外部性評価項 目として取り上げられている。

(7) ごみ発電

最も重要な負荷は、発電段階における大気汚染物質の排出であり、主要な大気汚染物質としては、NO<sub>x</sub>、煤塵、ダイオキシンなどが考慮される。他の発電プラントに比べて人口密集地域に立地されているため、影響を受ける受容者数が多く、一般的に外部コストが高くなる傾向にある。 発電段階以外では、ごみがプラントまでかなりの距離を運ばれてくるため、道路損害や事故も重要なインパクト項目となりうる。

### 付録4.2.2 ExternEの外部性評価手法

ExternE では、環境及び健康影響の金銭価値換算する手法、つまり外部コストを内部化するためには、燃料と技術によって引き起こされた外部コストに従って環境税を課する方法や費用便益分析において外部コスト評価を取り入れる方法など、いくつかの方法があるとしている。

ExternEにおいて、考慮された外部性は以下の7種類の影響である。

- ・人間の健康 死亡(寿命短縮)
- ・人間の健康 疾病への罹患
- ·建築材料
- ・農作物
- 地球温暖化
- ・アメニティ(快適さ)の損失
- ・生態系

こうした各種影響の評価のために ExternE モデルが作成されたが、その特徴は、詳細なボトムアップ的な手法が用いられていることで、これは外部コストが場所に大きく依存し、平均コストではなく限界費用を計算する必要があるために必要となる。

エネルギー技術の外部性評価に際し、ExternE プロジェクトでは全体

として、付図 4.2.1 に示すような「影響経路分析」(Impact Pathway) と呼ばれるアプローチを採用している。基本的には、EMISSIONS(環境 負荷排出量評価)、DISPERSION(汚染移送モデル)、IMPACT(インパ クト評価)及び COST(貨幣価値換算)4つの段階からなっている。以下 では、大気汚染を例にとって、ExternEの評価手法を説明する。



付図 4.2.1 影響経路の分析

(1) 環境負荷排出量評価

以下に、ExternE で考慮される環境負荷排出の項目及びその排出量の 算出方法の特徴を示す。

- 1) ボトムアップ的手法
- 2) 燃料チェーンに着目した排出量の積み上げ(発電所のタービンを生産する際に発生するような間接的な排出量は除外(ライフサイクルアセスメントよりも評価範囲は小さい))
- 汚染物質発生の地域性を重視(汚染物質がどこ地域で、どの程度発 生するかを明示的に考慮)
- 4) 汚染物質としては、固形廃棄物、液体廃棄物、ガス状または粒子状の大気汚染物質(NOx、SO2、NH3、CO、オゾン、窒化物エアロゾル、粒子状物質)、放射性物質、事故の危険、職業人の健康、騒音、その他(電磁波、廃熱)等を考慮

- 5) 燃料チェーンとしては、燃料採掘、燃料輸送、プラント建設、プラ ント運用(発電) 廃棄物処理、プラント廃棄などを考慮
- 6) 放射性廃棄物については、100、000年にわたる環境影響を評価

(2) 汚染移送モデル

汚染移送モデルは、各発生源から人間や自然環境、農地などの受容者 までの汚染物質の拡散をモデル化したものである。ExternE で最も重要 な汚染移送モデルは汚染物質の大気拡散に関するものである。これらは 風による汚染物質の物理的な移送のみならず、化学変化に関しても対応 している。これらは、すべて欧州全土を 10km 四方のマス目に分割した ユーログリッドの各セルに関しての輸送を考慮している。

比較的化学的に安定で、拡散の範囲が比較的小さい汚染物質の拡散に は、ガウス・プルーム・モデル(Gaussian Plume Model)や統計データ に基づく風況モデルが用いられている。

拡散の範囲が広く、さらに化学反応を伴う移送モデルには、オイラー・ グリッド・モデル(Eulerian Grid Model)、ラグランジュ・モデル (Lagrange Trajectory Model)、ハーウェル・モデル(Harwell Trajectory Model)などが用途に応じて、適宜援用されている。これらは主に、NOx、 SO2、及び NH3 が大気中で HNO3、H2SO4、アンモニアなどに反応し、 拡散する様子をモデル化するものである。

大気汚染物質に関する影響経路を付図 4.2.2 に示す。



## 付図 4.2.2 大気汚染物質の影響経路

汚染移送モデルによって、各地域別の汚染発生源から、化学反応を含め、どの地域にどのような汚染物質が移送されるかを特定化した後、その物理的影響を評価するのがインパクト評価である。付表 4.2.2 に、 ExternEにおける主要なインパクト評価項目とその概要を示す。

竹表 4.2.2 Externe における影響評価	項	偭	Ľ (	評	響	9	Ľ	3	ł	け	お	E	ernE	Exte	.2	ł.2.	Ł	ト表	何
---------------------------	---	---	-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------	------	----	------	---	----	---

評価項目	評価の概要
	・ 非発癌性物質による健康影響
	・放射性物質による発癌性
公衆健康	・ダイオキシン及び重金属による発癌性
	・業務上の健康障害
	<ul> <li>・事故による被害</li> </ul>
<b>开能</b> 玄	・発電所設置、石炭・石灰の採掘・廃棄、酸性雨及びオゾ
土 恐 尔	ンの森林及び魚業への影響
	・酸性土壌、土壌汚染による収穫高の低下
農作物	・暴露応答関数に非線形性を導入することによりプラ
	ス影響も考慮(少量の NOx は、土壌にプラス影響)
	・大気汚染物質による建築物の建材への侵食・腐食影響
建築物	(コンクリート、アルミニウム、亜鉛、塗料等の素材
	ごとに汚染物質の暴露応答関数が推定)
	・海岸、湿地、乾燥地の喪失、人間の移動、冷暖房エネ
	ルギー、自然災害、疫病などの地球温暖化影響の評価
+h tù 讵 哏 4/	(既往の気候変動モデル(MAGICC、FUND モデル)
ᅸᅸᇧᄺᇾᅟ	による評価結果を引用、温室効果ガスについては、汚
	染移送が考慮されず各燃料チェーンからの排出量のみ
	に基づいて算出)
その他	騒音及び美観に関しては直接価値換算

(3) インパクト評価

インパクトは、さまざまな汚染物質によるさまざまなレセプターの暴露応答関数(Dose-Response Function)によって分析される。

また、暴露応答関数を用いて算出される暴露応答係数は、例えば大気 汚染による健康被害の場合、汚染物質 1 単位当りの年死亡率(致死性の 疾病の場合)の変化で定義される。たとえば、オゾンに対する暴露応答 係数を 0.01% / ppb(particle per billion)、統計的生命価値を 30、000 万 円とすると、火力発電によってオゾン濃度が 1、000ppb 増加した場合の 損害額は、30、000 万円×(0.0001/ppb)×1000ppb×(対象地域の人口) となる。付表 4.2.3 に ExternE で標準的に使用されている暴露応答係数 を示す。ExternE では、大気汚染物質による健康影響被害に対して、線 形の暴露応答関数が採用されており、その傾きである暴露応答係数は主 に米国や英国での過去の研究例を参考にして決定されている。

また、付表 4.2.4 に致死性以外の健康影響に対する暴露応答係数及び 損害費用を示す。

付表 4.2.3 致死性の健康被害(死亡率の増加)に対しての暴露応答係数

粒子の種類	急性疾患(%/(µg/m³))	慢性疾患( % / ( µ g / m ³ ))
硝酸系化合物	0.040	0.39
硫酸系化合物	0.068	0.64
PM10(煤塵)	0.040	0.39
SO <sub>2</sub>	0.072	-
O3	0.059	-

# 付表 4.2.4 致死性以外の健康影響に対する暴露応答係数と損害費用

損害の種類(曝露応答係数の単位)	疾患	曝露応答係数	損害費用 (1995年価格,ECU)
ᄦᅋᄜᅎᆕᇛᇵᅀᆞᇛᇪᇵᆂᆂᇗᇨ	呼吸器系感染症(肺炎等)	РМ <sub>10</sub> :0.187人/(µg/m <sup>3</sup> ) О <sub>3</sub> :0.303人/ppb	
呼吸器系病院への入院(10万人のにり年 間入院患者数)	慢性閉塞性肺疾患(COPD)	PM <sub>10</sub> :0.227人/(µg/m <sup>3</sup> ) O <sub>3</sub> :0.220人/ppb	7,870
	喘息	O <sub>3</sub> :0.571人 / ppb	
	慢性閉塞性肺疾患(COPD)	PM <sub>10</sub> :0.72回 / (μg/m <sup>3</sup> )	
緊急救命室の利用(10万人あたり年間利 用回数)	喘息	PM <sub>10</sub> :1.29回/(µg/m <sup>3</sup> ) O <sub>3</sub> :2.63回/ppb	223
	子供の喉頭炎	PM <sub>10</sub> :2.91回 / (μg/m <sup>3</sup> )	
制限された活動日数(成人1,000人あたり) 年間日数)		PM <sub>10</sub> :49.9日 / (µg/m <sup>3</sup> ) O <sub>3</sub> :15.6日 / ppb	75
喘息による息切れ・発作(喘息患者一人あ たり年間日数)		PM <sub>10</sub> :0.14日 / (µg/m <sup>3</sup> ) O <sub>3</sub> :0.582日 / ppb	37
兆候日数(年間1,000人あたり日数)		PM <sub>10</sub> :465日 / (µg/m <sup>3</sup> ) O <sub>3</sub> :52.8日 / ppb	7.5
成人の慢性疾患(成人10万人あたり年間)	気管支炎	PM <sub>10</sub> :70人/(µg/m <sup>3</sup> )	105 000
患者数)	呼吸器系疾患	PM <sub>10</sub> :95人/(µg/m <sup>3</sup> )	105,000
子供の慢性疾患(子供10万人あたり年間	気管支炎	PM <sub>10</sub> :161人 / (µg/m <sup>3</sup> )	225
患者数)	咳	PM <sub>10</sub> :207人 / (µg/m <sup>3</sup> )	225

(4) 貨幣価値換算

環境外部性の貨幣価値換算に関する経済学的手法は、大きく分けてア ンケートによる方法、ヘドニック価格法(土地価格等から環境価値を推 定する方法)旅行費用法(公園への入場料等から環境価値を推定する方 法)があるが、ExternEでは、主にアンケートによる方法を用いている。 アンケート手法は、特に CVM などと呼ばれるが、そのアプローチは基 本的にアンケートに基づいて環境損害や便益に対する個人の WTP もし くは WTA を定量化することである。ただし、ExternE では全て WTP が 用いられている。

1) 致死性の健康影響

CVM による評価を基本としているが、危険職業の賃金やマーケット調査(保険等)に基づいて算定された統計的生命価値(Value of Statistical Life: VSL)も参照されている。具体的には、欧州における様々な研究(主に、英国)で評価されている VSL(付表 4.2.5 参照)を参照しながら、CVM による評価研究から極端に高い値が示されている 2 つの研究例を除外した CVM 平均値(2.6~3.6MECU:平均 3.1MECU)が使用されている。

評価手法	E	研究	年度	10 <sup>6</sup> ECU (1995)
	英国	Melinek	74	0.8
	英国	Veljanovski	78	8.4 - 11.8
<b>6                                    </b>	英国	Needlman	79	0.4
心 茨 戦 未 貞		Mairn and		
	英国	Psacharopoulo	82	3.7 - 4.2
		S		
		3.4 - 4.3		
	英国	Melinek	73	0.5
	英国	Jones-Lee	76	15.5 - 19.2
	英国	Maclean	79	5.2
	英国	Frankel	79	5.2 - 21.0
CVM	英国	Jones-Lee	85	1.3 - 5.8
	スウェーデ ン	Persson	89	2.6 - 3.2
	オーストリ ア	Mainer	89	3.2
		2.6 - 3.6		
	英国	Melinek	74	0.4 - 0.8
	英国	Ghosh	75	0.8
市場価値	英国	Jones-Lee	77	1.0 - 11.0
	英国	Blomquist	79	1.0 - 3.5
		0.8 - 4.1		

付表 4.2.5 欧州における統計的生命価値(VSL)の評価例

(5) 各電源の外部コスト

ここでは、ExternE における各電源の外部コスト算出結果概要を林 部<sup>[16]</sup>、勝木<sup>[17]</sup>、西村<sup>[18]</sup>がまとめた結果を基に発電段階と発電以外の段階 に分けて付表 4.2.6 に記す。ばらつきは非常に大きいものの、化石燃料 による発電と原子力及び再生可能エネルギーとの差が大きいことがわかる。また、この結果では、外部性の評価値はかなり大きいこともわかる。 欧州の各国別に外部コストが算定されており、前提条件や手法について 国ごとに違いがあるので、詳細は ExternE 報告書等を参照されたい。

付表 4.2.6 ExternE における各電源の外部コスト評価結果の概要

発電システム	外部コスト (発電段階) (mECU/kWh)	外部コスト (発電以外) (mECU/kWh)	合計 (mECU/kWh)
石炭燃料サイクル	3.7 ~ 232	2.0 ~ 20.2	$6 \sim 240$
ガス燃料サイクル	1.8 ~ 67.6	0.01 ~ 15	2 ~ 80
原子力発電システム	0 ~ 0.75	2.1 ~ 7.2	2.2 ~ 7.3
水力発電	8(便益) <sup>(注)</sup> ~6.0	0.01 ~ 1	8(便益)~7.2
太陽光発電			0.6 ~ 7.6
風力発電	0.013 ~ 1.3	0.34 ~ 3.5	$0.37 \sim 3.6$
ごみ発電	24 ~ 405	1.6 ~ 3.6	26~405
バイオマス発電	1.0 ~ 124	ほぼ 0 ~ 6.6	1 ~ 127

(注)水力発電は、コストではなく便益が生じるという結果も得られた

付録4.3 他の外部性評価例について

ExternE 以外にも以下のような外部性評価に関連した検討<sup>[15]</sup>が行われた。その概要を以下に示す。

付録4.3.1 米国の外部性評価例

米国では、各州別に外部性を評価している。それらの結果をエネルギー 省がまとめた報告<sup>[15]</sup>では、概要以下のとおり、欧州に比べて外部性評価 結果のインパクトは大きくなかった。

「ウィスコンシン州、マサチューセッツ州、カリフォルニア州のいず れの州においても、外部性価値を用いた解析の結果として、いかなる再 生エネルギーも選択されなかった」

「需要側で経営判断を行った結果として利用可能となった電源は、外 部性を考慮しても大きな影響は受けなかった」

オークリッジ国立研究所が行った評価では、新(再生可能)エネルギー 「外部性を決定に関する要素として含めても、再生可能エネルギーのプ ロジェクトは選ばれなかった」

また、付表 4.3.1 に米国各州におけるさまざまな汚染物質の外部性評価値を示す。

## 付表 4.3.1 米国各州におけるさまざまな汚染物質の外部性評価値

		汚染物質								
4bl 57	SO-	NO	浮遊	揮発性	CO	CO				
	$30_{2}$	NOx	物質	化合物	$CO_2$	0				
カリフォルニア	4486	9120	4608	4236	9	-				
マサチューセッツ	1700	7200	4400	5900	24	960				
ミネソタ	150	850	1274	1190	9.8	-				
ネバダ	1716	7480	4598	1012	24	1012				
ニューヨーク	1437	1897	333	-	1	-				
オレゴン	0	3500	3000	-	25	-				
ウィスコンシン	-	-	-	-	15	-				

単位(ドル(1992 年現在) / トン)
付録4.4 外部性評価の課題

谷口は、我が国における外部性評価の課題として、(1)環境・健康リス クの分析に係る課題(複数の環境媒体(大気や水等のこと)を評価でき る複数環境媒体モデルの開発など)、(2)生命・健康影響や環境影響の経済 的価値付けに係る課題(影響の経済的価値付けなど)、(3)非環境外部性に 係る課題(市場の失敗など)をあげている<sup>[13]</sup>。

今後、これらの諸点について検討が進んでいくと期待されているが、 特に非環境外部性に関してエネルギーセキュリティの外部性評価を進め、 FBR サイクル導入によるエネルギーセキュリティの向上などを定量的に 議論できれば有用であり、今後評価手法の開発が課題であると考えてい る。また、放射性物質の環境外部性については、評価手法を高度化し、 適切な結果を得られるようにすることは、FBR サイクルの受容に重要に なると考える。 [参考文献]

- [1] 芝剛史他:FBR研究開発に関する投資対効果評価システム概念の構築、 三菱総合研究所、JNC TJ9400 99-006、(1999)
- [2] 芝剛史他: FBR 研究開発の投資対効果評価システムの詳細検討、三菱 総合研究所、JNC TJ9440 2000-011、(2000)
- [3] 芝剛史他:投資対効果評価システムの開発、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2001-018、(2001)
- [4] 塩谷洋樹他: FBR サイクル研究開発の投資対効果評価(研究報告), JNC TN9400 2002-048、(2002)
- [5] 篠田佳彦他:総合評価技術検討書 実用化戦略調査研究(フェーズ) 成果報告 - 、JNC TN9400 2001-061、(2001)
- [6] 小西康哉他:目標達成度評価システムによる評価の実施、三菱総合研究 所、報告書番号未定、(2004)
- [7] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張()、三菱総合研究所、 JNC TJ9400 2003-007、(2003)
- [8] 芝剛史他:目標達成度評価システムの機能拡張、三菱総合研究所、JNC TJ9400 2002-003、(2002)
- [9] J・E・スティグリッツ:スティグリッツ公共経済学(上)、東洋経済新 報社、(1996)
- [10] 大野栄治:環境経済評価の実務、勁草書房、(2000)
- [11] 栗山浩一:環境の価値と評価手法 CVM による経済評価 、北海道大 学図書刊行会、(1998)
- [12] 岡敏弘:厚生経済学と環境政策、岩波書店、(1997)
- [13] 谷口武俊: "わが国における発電システムの外部性評価の実施に向けて"、 エネルギー・資源 第 21 巻 6 号、p44 - p48、(2000)
- [14] P. Mayerhofer, W. Krewitt, R. Friedrich, IER: "Extension of the Accounting Framework Final Report", (1997)
- [15] European Commission: External Cost Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport, (2003)
- [16] 林部尚:"各発電システムの外部費用:化石燃料"、エネルギー・資源 第 21巻6号、p30-p32、(2000)
- [17] 勝木知里:"各発電システムの外部費用:原子力発電システム"、エネル ギー・資源 第 21 巻 6 号、p33 - p35、(2000)
- [18] 西村一彦:" 各発電システムの外部費用: 再生可能発電システム"、エネ ルギー・資源 第 21 巻 6 号、p36 - p38、(2000)
- [19] Energy Information Administration: "Electricity Generation and Environmental Externalities: Case Studies", (1995)

#### 付録5 候補概念の炉特性データ

資源有効利用性に関する検討(3.2.4節)および導入シナリオ評価(4 章)で使用した候補概念の炉特性データを付表 5.1~付表 5.6に示す。

付表 5.1 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース1~4)

多面的評価ケース	ケース1		ケース2			ケース3			ケース4				
炉/燃料	Na冷却大型炉MOX燃料		Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料				
再処理	先進湿式			先進湿式			先進湿式			先進湿式			
燃料製造	簡素化ペレット			簡素化ペレット			簡素化ペレット			振動充填			
炉心		資源重視型		経済性重視型			LLFP核変換型			資源重視型			
電気出力(万kWe)		100		100			100			100			
熱出力(MWth)		2380			2380	l		2380		2380			
増殖比		1.16			1.04	l		1.03		1.10			
炉心燃焼度(MWd/t)		148,000			151,000	l		150,000			154,000		
連転/定検(月)		18/1.4			26.5/1.5	l		18/1.4		18/1.4			
稼働率(%)/川内貝何平(%)	后心	92.//4./ 動ブニ	タブニ	唐心	94.5/4./	タブニ	后心	92.//4./ 動ブニ	タブニ	后心	92.1/4./ 動づら	タブニ	
<u></u>	경막신	キロノノ	怪ノノ	경막신	キャンプ	「狂ノノ	경막신	軸ノノ	「住ノノ	` <i>\</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	軸ノノ		
重金属(トン)	33 157	27 996	26 256	50 295	24 444	0 000	33 168	27 996	0 000	32 189	24 153	23 404	
ウラン(トン)	25.265	27.996	26.256	39.691	24.444	0.000	25.008	27.996	0.000	24.318	24,153	23.404	
プルトニウム(トン)	7.537	0.000	0.000	10.127	0.000	0.000	7.793	0.000	0.000	7.516	0.000	0.000	
核分裂性プル(トン)	4.609	0.000	0.000	6.193	0.000	0.000	4.765	0.000	0.000	4.596	0.000	0.000	
MA(トン)	0.355	0.000	0.000	0.477	0.000	0.000	0.367	0.000	0.000	0.355	0.000	0.000	
<u>ウラン濃縮度(%)</u>	0.300	0.300	0.299	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.300	
平衡装荷燃料													
重金属(トン/年)	5.119	4.323	4.054	5.380	2.615	0.000	5.121	4.323	0.000	4.970	3.729	3.614	
ウラン(トン/年)	3.901	4.323	4.054	4.246	2.615	0.000	3.861	4.323	0.000	3.755	3.729	3.614	
プルトニウム(トン/年)	1.164	0.000	0.000	1.083	0.000	0.000	1.203	0.000	0.000	1.160	0.000	0.000	
核分裂性ブル(トン/年)	0.712	0.000	0.000	0.662	0.000	0.000	0.736	0.000	0.000	0.710	0.000	0.000	
MA(トン)	0.055	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000	
<u>ウラン</u> 濃縮度(%)	0.300	0.300	0.299	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.300	
初期取出燃料	4 0 0 0	4 000	4.051	E 1 7 1	0.000	0.000	4 0 0 0	4.000	0.000	4 7 7 0	0.710	0.010	
里金馮(トノ/ 年)	4.920	4.308	4.051	5.171	2.602	0.000	4.920	4.308	0.000	4.//8	3./13	3.610	
	3./52	4.25/	4.030	4.000	2.565	0.000	3./15	4.258	0.000	3.611	3.666	3.591	
ノルトーワム(トノ/ 年)	1.120	0.051	0.021	1.052	0.037	0.000	1.134	0.050	0.000	1.113	0.047	0.020	
核分裂性ノル(FJ/平) MA(い)	0.073	0.040	0.020	0.050	0.034	0.000	0.090	0.040	0.000	0.670	0.043	0.019	
	0.054	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.050	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	
シリン辰祖这(の) 立衛取出燃料	0.233	0.275	0.200	0.250	0.270	0.000	0.255	0.275	0.000	0.255	0.273	0.200	
	4 348	4 263	4 040	4 5 4 2	2 564	0 000	4 339	4 263	0 000	4 200	3 665	3 601	
<u>キッパマン</u> ウラン(トン/年)	3.306	4.061	3.957	3.527	2.415	0.000	3.278	4.063	0.000	3.178	3.476	3.522	
プルトニウム(トン/年)	0.989	0.202	0.083	0.959	0.148	0.000	1.007	0.199	0.000	0.969	0.189	0.078	
核分裂性プル(トン/年)	0.567	0.186	0.079	0.563	0.135	0.000	0.574	0.183	0.000	0.553	0.173	0.075	
MA(トン)	0.053	0.000	0.000	0.056	0.001	0.000	0.055	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	
ウラン濃縮度(%)	0.112	0.195	0.251	0.100	0.174	0.000	0.115	0.195	0.000	0.111	0.186	0.249	
廃炉取出燃料													
重金属(トン)	29.949	27.789	26.207	45.306	24.194	0.000	29.907	27.786	0.000	28.988	23.937	23.357	
ウラン(トン)	22.797	26.917	25.859	35.381	23.266	0.000	22.582	26.926	0.000	21.930	23.120	23.031	
ブルトニウム(トン)	6.803	0.870	0.348	9.408	0.924	0.000	6.964	0.858	0.000	6.704	0.813	0.325	
核分裂性ブル(トン)	3.986	0.818	0.337	5.607	0.860	0.000	4.063	0.805	0.000	3.914	0.759	0.315	
MA(トン) エニン連約店(W)	0.349	0.002	0.000	0.516	0.004	0.000	0.362	0.002	0.000	0.354	0.004	0.001	
ワラン涙稲度(%)	0.168		0.268 -₩ara	0.159	0.216	0.000 E 細合 T	0.170	0.230	0.000	0.168	0.224	0.267	
偏ろ	国内導入ン	<u>/ナリオ評価</u>	て   て	国内導入ン	<u>ノナリオ 評価</u>	11 【版記】	国内得入ン	<u>/ ナリオ 評価</u>	』灯豕				

多面的評価ケース	ケース5		ケース6			ケース7			ケース8			
炉/燃料	Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料		
再処理	先進湿式			先進湿式			先進湿式			超臨界		
燃料型造	振動充填			簡素化ヘルット			簡素化ヘルルト			簡素化ペレット		
后心	级这种舌姐刑			咨证重组刑			「「「「「」」「「」」「「」」「」「」「」」「」「」」「」」「」」「」」「」」			<b>沓</b> 酒 重 相 型		
から 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	ψ <u>⊐</u>	100	£	<u>貝/// 貝/// 里/// 里</u>			<i>π</i> 2	100	£	<u>員你主代主</u> 100		
		100			100			100		100		
熟出刀(MWth)		2380			2380			2380		2380		
<b>増</b> 殖比		1.01			1.16			1.04		1.16		
炉心燃焼度(MWd/t)		156,000			148,000			151,000		148,000		
運転/定検(月)		26.5/1.5			18/1.4			26.5/1.5		18/1.4		
稼働率(%)/所内負荷率(%)		94.5/4.7			92.7/4.7			94.5/4.7			92.7/4.7	
	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ
初装荷燃料												
重金属(トン)	48 780	21 089	0 000	33 157	27 996	26 256	50 295	24 444	0 000	33 157	27 996	26 256
三面にい	38 204	21.000	0.000	25 265	27.000	26.256	30 601	24 444	0.000	25 265	27.000	26.256
プリレームノ(い)	10.000	21.005	0.000	25.205	27.330	20.230	10 107	0.000	0.000	25.205	27.330	20.230
フルトー・フム(トノ) た八列州プリ(い)	10.099	0.000	0.000	1.007	0.000	0.000	10.127	0.000	0.000	7.037	0.000	0.000
核方裂性ノル(トノ)	0.175	0.000	0.000	4.609	0.000	0.000	0.193	0.000	0.000	4.609	0.000	0.000
MA(F2)	0.477	0.000	0.000	0.355	0.000	0.000	0.477	0.000	0.000	0.355	0.000	0.000
<u>ウラン</u> 濃縮度(%)	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.299	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.299
平衡装荷燃料												
重金属(トン/年)	5.218	2.256	0.000	5.119	4.323	4.054	5.380	2.615	0.000	5.119	4.323	4.054
ウラン(トン/年)	4.087	2.256	0.000	3.901	4.323	4.054	4.246	2.615	0.000	3.901	4.323	4.054
プルトニウム(トン/年)	1.080	0.000	0.000	1.164	0.000	0.000	1.083	0.000	0.000	1.164	0.000	0.000
核分裂性プル(トン/年)	0.661	0.000	0.000	0.712	0.000	0.000	0.662	0.000	0.000	0.712	0.000	0.000
MA(F2)	0.051	0,000	0.000	0.055	0,000	0,000	0.051	0,000	0,000	0.055	0,000	0.000
ウラン濃縮度(%)	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
加期取出機制	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200
が対象山燃料 まる屋(い)(左)	5 010	2 2 4 4	0.000	4 0 2 6	4 200	4 05 1	5 1 7 1	2 602	0.000	4 0 2 6	4 200	4.051
	5.010	2.244	0.000	4.920	4.308	4.001	J.1/1	2.002	0.000	4.920	4.308	4.001
	3.913	2.209	0.000	3.752	4.257	4.030	4.066	2.565	0.000	3.752	4.257	4.030
ノルトニワム(トン/年)	1.045	0.035	0.000	1.120	0.051	0.021	1.052	0.037	0.000	1.120	0.051	0.021
核分裂性フル(トン/年)	0.633	0.031	0.000	0.675	0.046	0.020	0.638	0.034	0.000	0.675	0.046	0.020
MA(トン)	0.052	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000
ウラン濃縮度(%)	0.256	0.269	0.000	0.259	0.275	0.288	0.256	0.270	0.000	0.259	0.275	0.288
平衡取出燃料												
重金属(トン/年)	4.386	2.207	0.000	4.348	4.263	4.040	4.542	2.564	0.000	4.348	4.263	4.040
ウラン(トン/年)	3.390	2.067	0.000	3.306	4.061	3.957	3.527	2.415	0.000	3.306	4.061	3.957
プルトニウム(トン/年)	0 940	0 139	0 000	0 989	0 202	0.083	0 959	0 148	0 000	0 989	0 202	0.083
核分裂性プル(トン/年)	0 549	0 1 2 5	0.000	0.567	0 186	0.079	0.563	0 135	0.000	0 567	0 186	0.079
	0.010	0.001	0.000	0.067	0.000	0.000	0.056	0.001	0.000	0.052	0,000	0.000
MA(12) 占二、連續産(4)	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
ラフン展相及(物)	0.100	0.107	0.000	0.112	0.195	0.251	0.100	0.174	0.000	0.112	0.195	0.251
<u>免炉取田燃料</u>	40.000	00.050			07 700		45 000				07 700	~~~~
里金属(トン)	43.823	20.853	0.000	29.949	27.789	26.207	45.306	24.194	0.000	29.949	27.789	26.207
ワラン(トン)	34.036	19.984	0.000	22./97	26.917	25.859	35.381	23.266	0.000	22./97	26.917	25.859
ブルトニウム(トン)	9.270	0.864	0.000	6.803	0.870	0.348	9.408	0.924	0.000	6.803	0.870	0.348
核分裂性プル(トン)	5.504	0.799	0.000	3.986	0.818	0.337	5.607	0.860	0.000	3.986	0.818	0.337
MA(トン)	0.517	0.005	0.000	0.349	0.002	0.000	0.516	0.004	0.000	0.349	0.002	0.000
ウラン濃縮度(%)	0.158	0.211	0.000	0.168	0.230	0.268	0.159	0.216	0.000	0.168	0.230	0.268
備者												
MM 14												

付表 5.2 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 5~8)

多面的評価ケース	ケース9		ケース10			ケース11			ケース12			
炉/燃料	Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉MOX燃料			Na冷却大型炉金属燃料		
再処理	超臨界			酸化物電解			酸化物電解			金属電解		
燃料製造	簡素化ペレット			振動充填			振動充填				射出成型	
炉心	経済性重視型			資源重視型			経済性重視型			資源重視型		
m 電気出力(万kWe)		100	_		100			100	_	100		
執出力(MWth)		2380			2380			2380		2500		
增殖比		1 04			1 1 2			1.02		1 16		
恒心燃焼度(MWd/t)		151 000			153 000			156 000		152 500		
運転/定检(日)		26 5/1 5			18/14			265/15		20 1/1 4		
定备本(%)/所内自益本(%)		945/47			027/17			Q4 5 / 4 7			033/5/	
称画平(初) 加円頁向平(初)	恒心	54.5/4.7	径ブラ	恒心	52.7/4.7	径ブラ	恒心	54.5/4.7	径ブラ	恒心	55.5/ 5.4	径ブラ
加生荷燃料	,	+	도기기	N	+щ > )	도기기	<u>м</u> С-	+	도 / /	N	+477	도기기
の表向燃料 重全屋(い)	50 295	24 444	0.000	32 1 80	24 757	24 867	48 780	21.616	0.000	38 166	21 6 1 1	20.652
主立病(ワ)	30.601	24.444	0.000	2/ 318	24.757	24.007	38 204	21.010	0.000	31 944	21.011	29.052
プルトーウム(い)	10 107	0.000	0.000	7516	0.000	0.000	10 000	0.000	0.000	6 0 2 5	0.000	0.000
ケルトニウム(トク)	6 102	0.000	0.000	1.510	0.000	0.000	6 175	0.000	0.000	4 256	0.000	0.000
	0.193	0.000	0.000	4.090	0.000	0.000	0.175	0.000	0.000	4.200	0.000	0.000
MA(F2) 占二、連約産(#)	0.477	0.000	0.000	0.300	0.000	0.000	0.477	0.000	0.000	0.180	0.000	0.000
ブノノ辰相及(加)	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.299	0.300	0.299	0.000	0.300	0.300	0.300
十閑表何燃料 手会民(い)(左)	F 200	0.015	0.000	4.070	2 0 0 0	2 0 2 0	F 010	0.010	0.000	5 205	2.015	4 1 0 7
里 並 周(トノ/ 牛)	5.380	2.015	0.000	4.970	3.822	3.839	0.218	2.312	0.000	0.320	3.015	4.137
リフン(トノ/ 年)	4.240	2.015	0.000	3./00	3.822	3.839	4.087	2.312	0.000	4.437	3.015	4.137
ノルトー・ノム(トノ/ 年)	1.083	0.000	0.000	1.100	0.000	0.000	1.080	0.000	0.000	0.842	0.000	0.000
核分裂性ノル(トリ/平)	0.662	0.000	0.000	0.710	0.000	0.000	0.661	0.000	0.000	0.594	0.000	0.000
	0.051	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.026	0.000	0.000
リフン辰稲度(%)	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.299	0.300	0.299	0.000	0.300	0.300	0.300
初期取田燃料	E 171	0.000	0.000	4 7 7 0	0.000	0.000	5 010	0.000	0.000	5 1 1 0	0.000	4 1 0 1
里 金 周(トン/ 年)	5.171	2.602	0.000	4.778	3.806	3.836	5.010	2.300	0.000	5.118	3.003	4.131
	4.066	2.565	0.000	3.611	3.757	3.815	3.913	2.264	0.000	4.272	2.969	4.105
ノルトニワム(トン/年)	1.052	0.037	0.000	1.113	0.049	0.021	1.045	0.036	0.000	0.821	0.033	0.026
核分裂性フル(トン/年)	0.638	0.034	0.000	0.670	0.044	0.020	0.633	0.032	0.000	0.571	0.031	0.025
MA(トン) エート 連続点(パ)	0.052	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.026	0.000	0.000
	0.256	0.270	0.000	0.259	0.273	0.287	0.256	0.268	0.000	0.254	0.275	0.285
半衡取出燃料	4 5 40	0.504			0 7 5 7		1			4 407		
里金禹(h)/年)	4.542	2.564	0.000	4.200	3.757	3.826	4.386	2.262	0.000	4.497	2.964	4.113
ワラン(トン/年)	3.527	2.415	0.000	3.178	3.562	3./43	3.390	2.119	0.000	3.716	2.831	4.010
フルトニワム(トン/年)	0.959	0.148	0.000	0.969	0.194	0.083	0.940	0.143	0.000	0.757	0.133	0.103
核分裂性ブル(トン/年)	0.563	0.135	0.000	0.553	0.177	0.080	0.549	0.128	0.000	0.503	0.123	0.100
MA(トン)	0.056	0.001	0.000	0.053	0.000	0.000	0.056	0.001	0.000	0.024	0.000	0.000
<u>ウラン濃縮度(%)</u>	0.100	0.174	0.000	0.111	0.187	0.248	0.100	0.167	0.000	0.091	0.196	0.238
廃炉取出燃料												
重金属(トン)	45.306	24.194	0.000	28.988	24.535	24.817	43.823	21.374	0.000	34.386	21.414	29.558
ウラン(トン)	35.381	23.266	0.000	21.930	23.698	24.471	34.036	20.483	0.000	28.540	20.771	29.074
ブルトニウム(トン)	9.408	0.924	0.000	6.704	0.833	0.345	9.270	0.886	0.000	5.668	0.641	0.484
核分裂性ブル(トン)	5.607	0.860	0.000	3.914	0.778	0.334	5.504	0.819	0.000	3.850	0.605	0.471
MA(トン)	0.516	0.004	0.000	0.354	0.004	0.001	0.517	0.005	0.000	0.178	0.001	0.001
<u>ウラン濃縮度(%)</u>	0.159	0.216	0.000	0.168	0.224	0.267	0.158	0.211	0.000	0.151	0.230	0.260
備考										国内導入シ	ィナリオ 評価	Б概念Ⅱ

#### 付表 5.3 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 9~12)

多面的評価ケース	ケース13		ケース14			ケース15			ケース16			
炉/燃料	Na冷却大型炉金属燃料		Na冷却中型炉MOX燃料			Na冷却中型炉MOX燃料			Pb-Bi冷却中型炉窒化物燃料			
再処理	金属電解			超臨界			超臨界			先進湿式		
燃料製造	射出成型			簡素化ペレット			簡素化ペレット			î	商麦化ヘル	
后心				咨疽重相刑			経済性重相刑			資源重視型		
(1) 10 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	45	100	E.	<u>員际主代生</u> 100			100			<u>員祢主仇王</u> 100		
		100			100			100		100		
設出力(WWUN)		2380			2380			2380		2500		
'''''''''''''''''''''''''''''''''''''		1.04			1.15			1.04		1.15		
炉心燃焼度(MWd/t)		152,000			147,100			149,000		156,500		
運転/定検(月)		27/1.5			17.8/1.2			26/1.2		18/1.3		
稼働率(%)/所内負荷率(%)		94.6/4.7			93.8/5.4			95.6/5			93.4/3.4	
	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ	炉心	軸ブラ	径ブラ
初装荷燃料												
重金属(トン)	65.569	10.531	0.000	32.984	27.821	40.329	50.188	28.096	0.000	59.063	35.782	0.000
ウラン(トン)	56.782	10.531	0.000	24.459	27.821	40.329	39.294	28.096	0.000	48.781	35.782	0.000
プルトニウム(トン)	8.524	0.000	0.000	8,142	0.000	0.000	10,403	0.000	0.000	9,819	0.000	0.000
核分裂性プル(トン)	6.005	0.000	0.000	4,979	0.000	0.000	6.362	0.000	0.000	6.005	0.000	0.000
MA(ky)	0.263	0,000	0,000	0.384	0,000	0.000	0.490	0,000	0.000	0.463	0.000	0.000
<b>占与</b> 、連線産(%)	0.200	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000
- ノノン版相及(加)	0.500	0.233	0.000	0.233	0.500	0.500	0.500	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000
十関表何添料 香々屋(い/左)	5 5 1 4	0 006	0.000	5 2 2 5	4 407	6 200	E E 20	2 100	0 000	E 0E1	2 1 0 1	0.000
	0.014	0.000	0.000	0.220	4.407	0.369	0.000	3.100	0.000	5.251	3.101	0.000
	4.775	0.886	0.000	3.875	4.407	6.389	4.336	3.100	0.000	4.337	3.181	0.000
ノルトニワム(トン/年)	0.717	0.000	0.000	1.290	0.000	0.000	1.148	0.000	0.000	0.873	0.000	0.000
核分裂性ブル(トン/年)	0.505	0.000	0.000	0.789	0.000	0.000	0.702	0.000	0.000	0.534	0.000	0.000
MA(トン)	0.022	0.000	0.000	0.061	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	0.041	0.000	0.000
ウラン濃縮度(%)	0.300	0.299	0.000	0.299	0.300	0.300	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.000
初期取出燃料												
重金属(トン/年)	5.340	0.881	0.000	5.027	4.394	6.383	5.322	3.088	0.000	5.128	3.173	0.000
ウラン(トン/年)	4.601	0.871	0.000	3.733	4.345	6.351	4.155	3.049	0.000	4.225	3.146	0.000
プルトニウム(トン/年)	0.716	0.010	0.000	1.234	0.048	0.032	1.113	0.040	0.000	0.862	0.027	0.000
核分裂性プル(トン/年)	0.501	0.010	0.000	0.742	0.044	0.031	0.673	0.036	0.000	0.527	0.025	0.000
MA(トン)	0 0 2 3	0 000	0 000	0 060	0 000	0 000	0 055	0 000	0 000	0 0 4 2	0 000	0 000
ウラン濃縮度(%)	0.263	0 272	0.000	0 259	0 2 7 6	0.288	0 256	0 273	0,000	0 2 7 4	0 282	0,000
平衡取出燃料	0.200	0.272	0.000	0.200	0.270	0.200	0.200	0.270	0.000	0.271	0.202	0.000
「 国本田川川 一 重全居(ト)/年)	4 6 4 1	0.864	0.000	1 1 3 3	1 352	6 367	4 6 7 6	3 053	0 000	1 302	3 1 2 1	0.000
重亚病(12/ 牛) 古二、(い/左)	2.005	0.004	0.000	2 200	4.552	6.007	2,611	2 004	0.000	9.552	2.025	0.000
	0.710	0.011	0.000	1.066	4.135	0.237	1.006	2.054	0.000	0.706	2.555	0.000
ノルトニ・ノム(トノ/牛) な八刻姓プリ(い)(左)	0.710	0.052	0.000	1.000	0.193	0.130	1.000	0.136	0.000	0.790	0.100	0.000
核方裂性ノル(トノ/牛)	0.485	0.049	0.000	0.603	0.178	0.125	0.587	0.145	0.000	0.488	0.172	0.000
MA(F2)	0.025	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	0.045	0.001	0.000
ワフン濃縮度(%)	0.082	0.156	0.000	0.119	0.202	0.250	0.099	0.188	0.000	0.083	0.168	0.000
廃炉取出燃料												
重金属(トン)	59.298	10.404	0.000	29.761	27.632	40.250	45.243	27.878	0.000	53.442	35.490	0.000
ウラン(トン)	50.402	10.003	0.000	22.168	26.825	39.719	35.113	26.949	0.000	43.563	34.255	0.000
プルトニウム(トン)	8.605	0.399	0.000	7.216	0.806	0.530	9.606	0.927	0.000	9.381	1.230	0.000
核分裂性プル(トン)	5.970	0.378	0.000	4.189	0.760	0.514	5.698	0.869	0.000	5.775	1.168	0.000
MA(トン)	0.291	0.002	0.000	0.378	0.001	0.001	0.525	0.002	0.000	0.499	0.005	0.000
<b>ウラン濃縮度(%</b> )	0.148	0.208	0.000	0.173	0.234	0.268	0.160	0.227	0.000	0.155	0.223	0.000
備老	国内道入	ノナリオ証価	5.000	0.170	0.204	0.200	0.100	0.227	0.000	国内道入	ノナリオ証研	5.000 「概念Ⅲ
D												

## 付表 5.4 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 13~16)

多面的評価ケース	ケース1/		ケース18			ケース19			ケース20			
炉/燃料	Pb-Bi冷却中型炉窒化物燃料		Pb-Bi冷却中型炉MOX燃料			Pb-Bi冷却中型炉MOX燃料			He冷却大型炉窒化物被覆粒子燃料			
再処理	先進湿式			先進湿式			先進湿式			脱被覆+先進湿式		
燃料制造	節表化人心小			簡素化ヘルト			簡素化ヘルルト			被覆法		
后心	国来に、レバーの文法の法律			咨酒香相刑			「「「「「」」「「」」「「」」「」「」「」」「」「」」「」」「」」「」」「」」			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		
	<u>ф</u>	100	Ĕ	員線里祝空			在消让里悦空			<u>員線主抗主</u> 100		
电式口J(JKWe)		100			100			100		100		
熱出刀(MWth)		2500			2500			2500		2135		
増殖比		1.04			1.10			1.04		1.17		
炉心燃焼度(MWd/t)		159,200			151,400			150,700		118,938		
運転/定検(月)		18/1.3			17.5/1.3			17.5/1.3		19.7/1.4		
稼働率(%)/所内負荷率(%)		93.4/3.4			93.2/3.4			93.2/3.4			93.3/2.8	
	恒心	軸ブラ	径ブラ	炬心	軸ブラ	径ブラ	炬心	軸ブラ	径ブラ	恒心	軸ブラ	径ブラ
初牲荷燃料	<i>N</i> .0	TH 2 2	11 2 2	<i>.</i>	TH 2 2		,, ·U	τω / /		77 .0		11 2 2
ある国家(い)	50.062	10 222	0 000	51 702	27 022	11 200	51 770	24 1 22	19516	70 200	42 5 2 7	62 1 2 2
生 立 高(12)	39.003	10.223	0.000	31.783	37.922	44.300	20 700	24.132	10.510	78.290	42.327	02.122
	49.047	10.223	0.000	39.630	37.922	44.388	39.729	24.132	18.516	61.343	42.527	62.122
フルトニウム(トン)	9.565	0.000	0.000	11.605	0.000	0.000	11.506	0.000	0.000	16.184	0.000	0.000
核分裂性ブル(トン)	5.849	0.000	0.000	7.097	0.000	0.000	7.036	0.000	0.000	9.897	0.000	0.000
MA(トン)	0.451	0.000	0.000	0.547	0.000	0.000	0.543	0.000	0.000	0.762	0.000	0.000
ウラン濃縮度(%)	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.299
平衡装荷燃料												
重金属(トン/年)	5.251	0.909	0.000	5.517	4.040	4,729	5.516	2.571	1.973	5.555	3.018	4,408
ウラン(トン/年)	4 360	0 909	0,000	4 222	4 040	4 729	4 233	2 5 7 1	1 973	4 353	3 0 1 8	4 408
プルトーウム(トン/年)	0.850	0.000	0.000	1 2 3 6	0.000	0.000	1 226	0.000	0.000	1 1 / 9	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.750	0.000	0.000	0.750	0.000	0.000	0.700	0.000	0.000
	0.520	0.000	0.000	0.750	0.000	0.000	0.750	0.000	0.000	0.702	0.000	0.000
	0.040	0.000	0.000	0.058	0.000	0.000	0.058	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000
	0.300	0.300	0.000	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.299
初期取出燃料												
重金属(トン/年)	5.126	0.902	0.000	5.372	4.035	4.726	5.372	2.565	1.970	5.470	3.011	4.404
ウラン(トン/年)	4.244	0.891	0.000	4.109	4.009	4.709	4.119	2.543	1.959	4.277	2.995	4.391
プルトニウム(トン/年)	0.841	0.011	0.000	1.204	0.026	0.018	1.194	0.023	0.012	1.138	0.017	0.014
核分裂性プル(トン/年)	0.515	0.010	0.000	0.730	0.025	0.017	0.724	0.021	0.011	0.690	0.015	0.013
MA(トン)	0.041	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000
ウラン濃縮度(%)	0 274	0 2 7 5	0 000	0 271	0 287	0 292	0 271	0 282	0 288	0 280	0 285	0 289
<b>亚衡取出燃料</b>	0.271	0.270	0.000	0.271	0.207	0.202	0.271	0.202	0.200	0.200	0.200	0.200
「 因 な 田 が 行	1 370	0.862	0.000	1 6 4 5	4 0 1 2	4713	4 6 4 8	2 5 3 7	1 9 5 8	4 874	2 968	1 370
<u>重亚両(12/ 牛)</u> 古二、(1)(左)	4.575	0.002	0.000	9.040	2.012	4.713	9.040	2.007	1.000	4.074	2.300	4.070
	3.040	0.763	0.000	3.042	3.630	4.000	3.000	2.400	1.009	3.747	2.034	4.270
ノルトニウム(トノ/年)	0.787	0.079	0.000	1.040	0.150	0.106	1.035	0.130	0.069	1.064	0.132	0.109
核分裂性ノル(トン/年)	0.486	0.068	0.000	0.597	0.148	0.103	0.596	0.126	0.066	0.608	0.119	0.101
MA(トン)	0.043	0.000	0.000	0.063	0.000	0.000	0.063	0.000	0.000	0.063	0.001	0.000
<u>ウラン濃縮度(%)</u>	0.079	0.102	0.000	0.101	0.217	0.252	0.101	0.186	0.224	0.119	0.174	0.215
廃炉取出燃料												
重金属(トン)	53.388	9.984	0.000	46.926	37.802	44.318	46.938	23.989	18.452	72.823	42.192	61.929
ウラン(トン)	43.665	9.416	0.000	35.847	36.947	43.734	35.926	23.227	18.065	56.438	41.049	61.011
プルトニウム(トン)	9.237	0.565	0.000	10,492	0.852	0.582	10,430	0.759	0,385	15.543	1,138	0.916
核分裂性プル(トッ)	5 715	0 513	0,000	6 1 7 0	0.822	0.568	6 1 4 1	0 720	0 372	9 1 4 8	1 056	0.868
MA(k)	0.485	0.003	0.000	0.587	0.003	0.002	0.582	0.003	0.002	0.842	0.005	0.003
(MA(12)) 古马ン漕綻産(@)	0.403	0.003	0.000	0.007	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.042	0.000	0.003
リノノ 辰 福 長 (%)	0.103	し.1/4	0.000	0.170	0.202	0.272	0.170	0.232	0.200	0.180	し.223	U.23U 5-皿合π7
Ш 有	国内特人ン	イノウオ 計加	1 吼 忍 皿							<b>国内导入</b> :	イノウオ 計加	ITKI 芯 IV

# 付表 5.5 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 17~20)

多面的評価ケース		ケース21		ケース22					
炉/燃料	He冷却大型	炉窒化物被	覆粒子燃料	水冷却炉MOX燃料					
再処理	脱袖	皮覆+先進潛	显式	先進湿式					
燃料製造		被覆法		簡素化ペレット					
炉心	糸	<b>济性重視</b>	型						
m 雷気出力(万kWe)		100			100				
執出力(MWth)		2135							
增殖比		1.03			1.03				
「「「」」 「「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「		118 938			87.000				
運転/定检(日)		19/14			18/13				
定量。 按価率(%)/正内自荷率(%)		031/28			03/35				
称画牛(加) 加利夏阿牛(加)	后心。	あづう	<b>尽ブニ</b>	店心、	あづら	尽ブニ			
如壮苻傲羽	87°0°	キロノノ	住ノノ	<u>ארי</u> ני	キロノノ	住ノノ			
初表的燃料 まや屋(い)	79 200	40 602	0.000	65 140	44 710	61 106			
	/0.290	40.003	0.000	45.010	44./19	61 107			
	01.343	48.003	0.000	40.318	44.700	01.13/			
ノルトーワム(トン)	10.184	0.000	0.000	19.040	0.000	0.000			
核方衆性ノル(トン)	9.897	0.000	0.000	11.38/	0.000	0.000			
	0.762	0.000	0.000	0.199	0.000	0.000			
ワラン濃縮度(%)	0.300	0.300	0.000	0.200	0.200	0.200			
半衡装荷燃料									
重金属(h)/年)	5.746	3.567	0.000	8.448	5.837	7.972			
ワラン(トン/年)	4.502	3.567	0.000	5.541	5.825	7.956			
ブルトニウム(トン/年)	1.188	0.000	0.000	2.723	0.000	0.000			
核分裂性ブル(トン/年)	0.726	0.000	0.000	1.527	0.000	0.000			
MA(トン)	0.056	0.000	0.000	0.174	0.000	0.000			
ウラン濃縮度(%)	0.300	0.300	0.000	0.200	0.200	0.200			
初期取出燃料									
重金属(トン/年)	5.658	3.560	0.000	0.000	0.000	0.000			
ウラン(トン/年)	4.424	3.540	0.000	0.000	0.000	0.000			
プルトニウム(トン/年)	1.177	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000			
核分裂性プル(トン/年)	0.714	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000			
MA(トン)	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
ウラン濃縮度(%)	0.280	0.285	0.000	0.000	0.000	0.000			
平衡取出燃料									
重金属(トン/年)	5.042	3.508	0.000	7.706	5.693	7.802			
ウラン(トン/年)	3.876	3.351	0.000	5.257	5.493	7.530			
プルトニウム(トン/年)	1.101	0.157	0.000	2.330	0.191	0.261			
核分裂性プル(トン/年)	0.629	0.141	0.000	1.187	0.163	0.223			
MA(トン)	0.065	0.001	0.000	0.159	0.003	0.005			
ウラン濃縮度(%)	0.119	0.174	0.000	0.140	0.068	0.067			
廃炉取出燃料									
重金属(トン)	72.823	48.219	0.000	61.501	44.147	60.353			
ウラン(トン)	56.438	46.913	0.000	41.267	43.178	58.997			
プルトニウム(トン)	15.543	1.301	0.000	18,952	0,978	1.337			
核分裂性プル(トン)	9,148	1.207	0.000	10.011	0.856	1,169			
ΜΔ(ト')	0.842	0.005	0.000	1 279	0.014	0.019			
ウラン濃縮度(%)	0 1 86	0.223	0.000	0 1 70	0 100	0 100			
	国内道入:	シークション シーン シーン シーン シーン シーン シーン シーン シーン シーン シー	5.000	国内道 入 ミ	マナリオ 証何	T.HTC			
	「「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」	・ ノ フ コ 百丁 世	1 1M2 102 1 V	国内導人シナリオ評価概念Ⅴ					

## 付表 5.6 候補概念の炉特性データ(多面的評価ケース 21~22)