各論 第一部 高速増殖炉サイクルの技術的な検討

図1-1-1 実用化戦略調査研究の実施方針 フェーズIIでの検討対象:高速増殖炉システム

● 幅広い選択肢(冷却材と燃料形態)の組合せ(約40概念)から、今後検討すべき概念を選択

计争性街		信刑の討体	燃料形態の評価		
XJS	朱 护又14月	が主の計画	мох	窒化物	金属
	大型タンク	В			
<u> </u>	大型ループ	A	A	в	
テトリリム炉	中型モジュール	A			
	小型炉	A()*1)	В	A	
	CO2ガス炉	В*	Δ*		C
おった	Heガス炉ピン型	В*	A *	A *	J
リス炉	Heガス炉粒子型	A *	В		-
	小型炉	B*	в*	A*	_
	大型	С			
重金属炉	中型モジュール	A(¾2)	в	A	Α
	小型炉	A(※3)			
	BWR型	A()*4)	A	-	
水炉	PWR型	A(※4)	A	_	
	超臨界圧水型	A(※4)	А	-	-
溶鬲	独塩炉	С	С	[塩化物溶融均	



出典:フェーズⅡ報告書の概要

図1-1-2 実用化戦略調査研究の実施方針 フェーズIIでの検討対象 : 燃料サイクルシステム

● 幅広い選択肢(燃料形態)の組合せ(再処理システム約10概念、燃料製造システム約10概念)から、今後検討すべき概念を選択

<u>7</u>	ı—7	「Iにおける有	望概念	の抽出約	<u>洁果</u>			フェーズIIでの検討対象
対象技術	Ĵ.	燃料形態	мох	窒化物	金属			
		先進湿式	<	A(*2)	-			·先進湿式法(MOX、窒化物)
五加田		酸化物電解法		С	с			• 金属電解法(金属、酸化物、窒化物)
再処理	乾式	金属電解法		A(*2)				
		フッ化物揮発法	в	в	в			
		簡素化ペレット	A	A(*2)	-			・振動充填法
		湿式法対応	A	A(*2)	-			ー湿式対応[スフェアパック](MOX、窒化物)、
	振動充	酸化物電化法対応	A	с	-		V	ー酸化物電解対応[ハイハック](MOX) ・射出鋳造法(金属)
燃料	填	<mark>金</mark> 属電解法対応	A(*1)	A(*2)	-			
製造		フッ化物揮発法対応	в	в	-			*1 金属電解法対応振動充填法(MOX)及び金属燃料対応の遠心鋳造法は経済性の点で魅力がないことから
		射出鋳造法	_	_				フェーズII中間段階で検討対象から除外。
	鋳造	遠心鋳造法	_	_	A(*1)			*2 窒化物燃料については、主たる工程はMOX対応の 先進湿式法やペレット、振動充填法あるいは金属燃
۵: آ ۲: ۲:	別き続き板 エーズ	^{食討 Β:国内外の研究の} Ⅱ中間評価以降	_{レビュー C:} に検討を	_{データ化} 進めた主	要な組合	ť		料対応の金属電解法等の適用が可能であるため、こ れらの成果を活用して検討

出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

1. 高速増殖炉サイクル実用化概念の選択

これまでに国内外で多くの高速増殖炉サイクルの概念が提案されている。このため、原子力機構と日本原電は高速増殖炉サイクルの適切な実用化像とそこに至るための研究開発計画を2015年頃に提示することを目的に、多様な炉型、再処理法、燃料製造法を対象として「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究(FS)」実施してきた。

1999 年度から 2000 年度に実施された「FS フェーズ I」では、技術 的選択肢の幅広いサーベイを行い有望な技術が抽出された。具体的に は、図1-1-1、図1-1-2に示すように、炉型について、冷却 材や燃料形態などの組み合わせで考えられる約 40 の候補から、「ナト リウム冷却炉」、「鉛ビスマス冷却炉」、「ヘリウムガス冷却炉」及び「水 冷却炉」が選択された。また、再処理法について、約 10 の候補から「先 進湿式法」、「金属電解法」及び「酸化物電解法」が、燃料製造法につ いて、約 10 の候補から「簡素化ペレット法」、「振動充填法(スフェア パック燃料/バイパック燃料)」、「射出鋳造法」及び「被覆粒子燃料製 造法」が選択されている。

2001 年度から 2005 年度に実施された「FS フェーズII」では、「FS フェーズI」での検討結果を踏まえ、さらに、高速増殖炉サイクルの 実用化候補概念を明確化するべく検討が行われている。この結果をと りまとめた「FS フェーズII報告書」では、主概念として「ナトリウム 冷却炉、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造」が、補完概 念として「ナトリウム冷却炉、金属電解法再処理、射出鋳造法燃料製 造」及び「ヘリウムガス冷却炉、先進湿式法再処理、被覆粒子燃料製 造」を選定することが適切であるとされている。

当委員会は、このような、これまでの「高速増殖炉サイクルの実用 化戦略調査研究」の成果を踏まえ、改めて高速増殖炉サイクル実用化 概念の選択を行った。

図1-1-3 選択の考え方

(政策的な判断の視点) (技術的な判断の視点) 我が国の基幹電源として実用化できるも 原子炉、再処理、燃料製造それぞれの のであること 候補概念が、開発目標及び設計要求 原子炉、再処理、燃料製造について社会 に適合すること 的に整合性が図られていること 原子炉、再処理、燃料製造について技 ユーザーである電気事業者による選択 術的に整合性が図られていること ・ 革新的な技術の成立性が見通せること が視野に入りうること 世界標準の技術となる可能性があり、我 革新的な技術に対しては、開発リスクを が国メーカーの国際的な産業競争力の 考慮して既存技術による代替技術が用 維持・向上に資すること 意されていること

(選択目標)

- 現在の知見で実用施設として実現性が最も高いと考えられる、炉型、再処理法、燃料製造 法の組み合わせから成る実用システム概念であり、今後研究開発を特に進めるべきもの (「主概念」)を1つ選択する。
- 現在の知見で実用施設としての実現性が認められるが、社会的な視点や技術的な視点から比較的不確実性の残る炉型、再処理法、燃料製造法の組み合わせから成る実用システム概念(「副概念」)を選択する。
- 「主概念」及び「副概念」以外に係る研究については、多様な知と革新が期待されること から、原子力の裾野を広げるための基礎研究と位置付ける。

- (1) 選択にあたっての基本的な考え方
- 「選択と集中」による研究開発の効率化

我が国の経済社会状況、高速増殖炉サイクル技術の研究開発に関す る国際的な情勢を勘案すれば、限られた研究開発資源の下で、引き続 き効果的・効率的に高速増殖炉サイクルの実用化を図ることが必要で あると考える。このため、これまでの研究開発の成果を評価し、研究 開発対象を絞って集中的に研究開発資源を投資するという戦略的重点 化をさらに強力に進めるべきであると考える。

② 「柔軟性」の確保

高速増殖炉サイクルの実用化までには長期間を要することが見込ま れる。このため、研究開発にあたっては、電力需給の動向やウラン需 給状況など将来の社会的な情勢変化に対応できることが重要であると 考える。また、革新的な技術の導入にチャレンジした結果、克服困難 な課題が明らかになる場合や基礎研究から多様な知と革新がもたらさ れる場合も想定しておく必要があると考える。さらに、海外における 研究開発の進展を見極めることも重要であると考える。

従って、長期的展望を踏まえて高速増殖炉サイクル技術の研究開発 を進めるにあたっては、高速増殖炉サイクル技術が技術的多様性を備 えていることに着目し、柔軟性を持って研究開発を進めることが必要 であると考える。

③ 「選択と集中」と「柔軟性」のバランス

このように、「選択と集中」と「柔軟性」はいずれも必要であるが、 相矛盾する要求を内包している。「選択と集中」と「柔軟性」のバラン スについては、以下のような判断の視点に基づき、これまでの研究開 発の成果や技術評価を十分に踏まえ、これに柔軟性を加味し、社会的、 技術的に総合した判断を行うことが適切と考える。(図1-1-3参 照)。 (社会的な判断の視点)

- 我が国の基幹電源として実用化できるものであること
- 原子炉、再処理、燃料製造について社会的に整合性が図られていること
 (利用目的のないプルトニウムを持たないなど、我が国の原子力政策に沿ったものであることが必要)
- ユーザーである電気事業者による選択が視野に入りうること
- 世界標準の技術となる可能性があり、我が国メーカーの国際的な 産業競争力の維持・向上に資すること

(技術的な判断の視点)

- 原子炉、再処理、燃料製造それぞれの候補概念が、開発目標及び 設計要求に適合すること
- 原子炉、再処理、燃料製造について技術的に整合性が図られてい ること

(高速増殖炉の利用は、再処理施設で使用済燃料からプルトニウム やウランなどを分離、回収して再び燃料としてリサイクルするこ とを前提としており、原子炉、再処理、燃料製造をひとつのシス テムと捉えることが必要)

- 革新的な技術の成立性が十分に見通せること
- 革新的な技術に対しては、開発リスクを考慮して既存技術に基づ く代替技術が用意されていること

「FS フェーズⅡ報告書」では、主として技術的な考察から主概念を 1つ、補完概念を2つ選定している。しかし、戦略的重点化をさらに 強力に進めるべきとの考えに立ち、以下のように主概念を1つ、副概 念を1つ選定することが適切と考える。

- 現在の知見で実用施設として実現性が最も高いと考えられる、炉型、再処理法、燃料製造法の組み合わせから成る実用システム概念であり、今後研究開発を特に進めるべきもの(「主概念」)を1つ選択する。
- 現在の知見で実用施設として実現性が認められるが、社会的な視 点や技術的な視点から比較的不確実性の残る炉型、再処理法、燃料 製造法の組み合わせから成る実用システム概念(「副概念」)を1つ 選択する。
- 「主概念」及び「副概念」以外の概念に係る研究についても、多様な知と革新が期待されることから、原子力の裾野を広げるための 基礎研究と位置付ける。

なお、「選択と集中」と「柔軟性」のバランスには、適切なタイミン グでの評価の実施や資源配分への考慮が必要であり、これらの点につ いては「各論 第二部 今後の進め方」で述べる。 図1-1-4 ナトリウム冷却高速増殖炉概念図



表1-1-1 ナトリウム冷却高速増殖炉の仕様比較

	単位	Na冷却大型高速增殖炉*	「常陽」(MK-Ⅲ)	「もんじゅ」
電気出力 / 熱出力	MW	1,500 / 3,530	— / 140	280 / 714
熱効率	%	42.5	—	39
炉心高さ/炉心等価直径	mm	1,000 / 5,400	500 / 800	930 / 1,800
燃焼度(炉心燃料部平均)	万MWd/t	約15	7	8
増殖比	—	1.10 ~ 1.03	—	1.2
運転サイクル期間	日	約800(約26ヶ月)	60	148
1次系冷却材温度	Э°	395 / 550	350 / 500	397 / 529
2次系冷却材温度	Э°	335 / 520	300 / 470	325 / 505
冷却ループ数	—	2	2	3
原子炉容器高さ/内径	mm	21,200 / 10,700	10,000 / 3,600	17,800 / 7,100
1次冷却材配管内径	mm	1,238	491	788
1次冷却材流量	t/h	65,400(32,700×2)	$2,700(1,350 \times 2)$	15,300(5,100×3)
崩壊熱除去系	_	自然循環 DRACS×1+PRACS×2	強制循環 1次系補助冷却設備×1 2次系補助冷却設備×1	強制循環 2次系補助冷却設備×3
蒸気発生器	_	二重伝熱管直管型蒸気発 生器×2	_	貫流分離、ヘリカル型×3
燃料取扱系	_	単回転プラグ、マニピュ レータ方式	二重回転プラグ、垂直動 方式	単回転プラグ、固定アーム 方式

(2) 様々な候補概念の概要

FS フェーズⅡにおいて比較検討された候補概念の概要を以下に紹介 する。(詳細については、「FS フェーズⅡ報告書」を参照のこと。)

① 高速増殖炉

i. ナトリウム冷却高速増殖炉(MOX 燃料、金属燃料)

ナトリウム冷却高速増殖炉の概念図を図1-1-4に、仕様を表1-1-1に示す。

(a) プラントシステムの特徴

設計要求に掲げた建設費を満足させるため、高い安全要求を満たし つつ、プラントの物量を大幅に削減できる革新技術を採用したシステ ム概念としている。ナトリウムに固有な課題(不透明で化学的活性が 高いなど)に対しては、配管及び容器のナトリウム境界を二重化する ことにより、ナトリウム漏えいの影響範囲を限定するとともに、蒸気 発生器の伝熱管を二重管構造とすることにより、プラント寿命期間中 にナトリウムー水反応の発生可能性を著しく低下させ、プラントの運 転信頼性を向上させる設計としている。また、ナトリウムの特徴(構 造材料との共存性が良いこと、不透明であること、運転停止中も約 200 ℃という高温を保持する必要があることなど)を踏まえた供用期間中 検査の方針を検討するとともに、事故や予期せぬ重大な不具合が発生 した場合の機器の引抜き補修を含めて、保守・補修性を向上したプラ ント設計を行っている。

(b) 炉心燃料

炉心燃料設計では、MOX 燃料及び金属燃料ともに、設計要求を十 分に満足した設計であるとしている。革新的な技術として、高燃焼度 化と高出口温度化を達成可能な酸化物分散強化型(ODS)フェライト 鋼被覆管、及び炉心損傷時の再臨界を回避するため溶融燃料流出のた めの内部ダクト付き燃料集合体概念を採用している。その結果、MOX 燃料炉心、金属燃料炉心ともに設計要求を上回る性能が見通され、ナ トリウム冷却炉心の高いポテンシャルが示されたとしている。

図1-1-5 ヘリウムガス冷却高速増殖炉概念図



表1-1-2 ヘリウムガス冷却高速増殖炉の仕様比較

	単位	ヘリウムガス冷却高速増殖炉	炭酸ガス冷却高速増殖炉	HTTR(熱中性子炉)
電気出力 / 熱出力	MW	1,500 / 3,200	1,500 / 3,600	— / 30
熱効率	%	47	42	—
運転サイクル期間	B	約540(約18ヶ月)	約730(約24ヶ月)	—
炉心·燃料	_	被覆粒子型 U,Pu混合窒化物燃料	被覆管型 U,Pu混合酸化物燃料	被覆粒子型 U酸化物燃料
炉心高さ/炉心等価直径	mm	1,000 / 6,290	1,200 / 5,900	2,900 / 2,300
燃焼度(炉心燃料部平均)	万 MWd/t	約12	15.5 ~ 16	2.2
増殖比	—	1.11 ~ 1.03	1.2~ 1.03	_
平均炉心出力密度*	W/cc	103	110	3
ループ数	—	4	4	1
1次系冷却材温度	٦°	460 / 850	266 / 530	395 / 850 (高温運転時950℃)
1次系冷却材圧力	MPa	6	4.2	4
1次系ガス循環機	_	高圧コンプレッサー×4 低圧コンプレッサー×4	ガス循環機×8	ガス循環機×4
蒸気発生器	—	-	蛇行コイル貫流型×12	-
タービン	—	直接ガスタービン×4	蒸気タービン×1	-
所内負荷率	%	3.0 (44MW)	13.6 (205MW)	-
免震方式	_	三次元免震	_	_

* 平均炉心出力密度= 炉心高さ× 3.14×(炉心等価直径)²÷4

出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

(c) これまで実施された要素技術開発

採用した革新的な技術の成立性見通しを得るために、高クロム鋼の 開発、2ループ化に必要となる大口径配管の流動安定性試験、ポンプ 組込型中間熱交換器(IHX)の振動伝達試験、蒸気発生器のための二 重伝熱管試作試験、等を行っている。

ii. ヘリウムガス冷却高速増殖炉(窒化物燃料)

ヘリウムガス冷却高速増殖炉の概念図を図1-1-5に、仕様を表1 -1-2に示す。

(a) プラントシステムの特徴

発電と同時に高温熱源としても利用できる特長を活かすとともに、 コンパクトで簡素なシステム構成とすることにより、高い熱効率によ る経済性の向上を図っている。原子炉容器の回りに縦型単軸ガスター ビン(38万 kWe)を4基配置した直接サイクル発電方式(150万 kWe) とし、冷却系配管を二重管(内側配管をホットレグ、外側配管をコー ルドレグ)にした構造を採用している。減圧事故時の影響を緩和する ため、二重管の外側をさらに配管で覆った三重管構造とし、原子炉容 器からガスタービンまで内包できる大型格納容器を採用している。

(b) 炉心燃料

窒化物燃料粒子を高温強度に優れる窒化チタン(TiN)で被覆した 粒子燃料(被覆粒子燃料)とし、さらに炭化ケイ素(SiC) 母材に埋 め込んだ六角ブロック型燃料集合体を採用している。炉心設計では、 燃料の優れた高温耐性、低い炉心出力密度(約 100W/cc)、ドップラー 反応度の活用により、異常な過渡変化時のスクラム失敗事象(ATWS) やさらに減圧事故時に原子炉スクラム失敗と強制循環除熱機能喪失を 重畳した事象(AWS)を想定しても、炉心損傷に至らない可能性が示 されたとしている。

(c) これまで実施された要素技術開発

被覆燃料に関する基礎的な試験として、燃料製造に係る厚膜蒸着特 性、曲げ強度試験等を実施し、設計で想定している仕様に対して基本 的に適合できる可能性があることを確認したとしている。

図1-1-6 鉛ビスマス冷却高速増殖炉概念図



表1-1-3 鉛ビスマス冷却高速増殖炉の仕様比較

	単位	鉛ビスマス冷却高速増殖炉	ナトリウム冷却中型高速増殖炉
原子炉型式	-	強制循環冷却 タンク型	強制循環冷却 ループ型
電気出力 / 熱出力	MW	750 / 1,980	750 / 1,765
熱効率	%	38	42.5
運転サイクル期間	B	約550(約18ヶ月)	約800(約26ヶ月)
炉心·燃料	_	Pu,U混合窒化物	Pu,U混合酸化物
炉心高さ / 炉心等価直径	mm	700 / 4,430	1,000 / 3,800
燃焼度(炉心燃料部平均)	万MWd/t	約15	約15
増殖比	_	1.10 ~ 1.03	1.10 ~ 1.03
燃料バンドル部流速	m/s	2	約5
被覆管最高温度	S	570	700
1次系冷却材温度	C°	285 / 445	395 / 550
1次主循環ポンプ	_	縦置き機械式遠心ポンプ×3	縦置き機械式遠心ポンプ×2
蒸気発生器	_	ー体貫流ヘリカル型×6	二重伝熱管直管型×1
免震方式	_	三次元免震	水平免震

iii. 鉛ビスマス冷却高速増殖炉(窒化物燃料)

鉛ビスマス冷却高速増殖炉の概念図を図1-1-6に、仕様を表1-1-3に示す。

(a) プラントシステムの特徴

冷却材に鉛ビスマス (Pb-Bi)を用いることから、原子炉重量が大き くなる。このため、耐震性の検討において、3次元免震を採用しても 構造部材にかかる荷重が過大になり、大型炉の成立性を見通せなかっ たとしている。このため、中型炉規模で2次系を必要としないプール 型概念を検討し、この概念は耐震性を確保した上で建設費の目標を満 たし得ることを確認したとしている。また、材料腐食を抑制するため に被覆管最高温度や冷却材流速を制限し、窒化物燃料を採用すること で、設計要求を満たし得る炉心概念を構築することができるとしてい る。

(b) 炉心燃料

冷却材の鉛ビスマスによる材料腐食を抑制しつつコンパクトな炉心 設計を成立させるため、被覆管最高温度及び冷却材流速を制限し、酸 化物燃料よりも重金属密度の高い窒化物燃料を用いた炉心としている。 この窒化物燃料は、窒素 15 (N15) を 100%近くまで濃縮して用いる こととしており、酸化物燃料を用いた炉心よりも中性子経済が良好で あるため、径方向ブランケットを用いないで増殖比 1.1 を確保できる としている。

(c) これまで実施された要素技術開発

鉛ビスマス冷却材を利用する上で枢要な技術課題となる、鉛ビスマ スによる鋼材の腐食性に関する試験を実施し、その成果を設計に反映 している。

iv. 水冷却高速增殖炉(MOX 燃料)

水冷却高速増殖炉の概念図を図1-1-7に、仕様を表1-1-4に 示す。 図1-1-7 水冷却高速増殖炉概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-4 水冷却高速増殖炉の仕様比較

項目	単位	水冷却炉(BWR型)	ABWR(熱中性子炉)
電気出力 / 熱出力	MW	1,356 / 3,926	1,356 / 3,926
原子炉圧力	MPa	7.2	7.2
炉心外接半径	m	3.8	2.7
燃料集合体数	—	900	872
炉心部取出燃焼度* / 炉心取出燃焼度**	万MWd/t	5.4 / 4.5	4.5 / 4.5
炉心部高さ	m	0.845	3.71
炉心流量	10 ⁴ t/h	1.8	5.2
出ロクォリティ	%	51	14.5
炉心部平均ボイド率	%	69	43
炉心圧損	MPa	0.043	0.18
MOX部Pu富化度 / 炉心部Puf富化度	wt%/HM	32.0 / 9.3	- / 3.8(ウラン濃縮度)
Puf装荷量	t	15.4	—
増殖比	_	1.05	_
最大線出力密度	kW/ft	16	12
MCPR	_	1.3	1.3
ボイド反応度係数	10 ⁻⁴ ∆k/k/%void	-0.5	-8
連続運転期間	month	18	13
MOX部MA含有率	wt%/HM	2.1	_
MOX部FP含有率	wt%/HM	0.04	_

* : MOX部+内部ブランケットの平均燃焼度 ** : MOX部+全ブランケットの平均燃焼度

出典:フェーズⅡ報告書の概要

(a) プラントシステムの特徴

水冷却高速増殖炉は、既に実用化されている ABWR のプラント技術をベースとしており、数十年の商業発電実績がある軽水炉で培った 豊富な技術と経験を踏まえ運転・保守性に優れ、全般的には技術的実現性が高いとしている。炉心については、熱中性子を利用している軽水炉に対し高速中性子を利用する高速炉とするために工夫をした設計を採用している。具体的には、水により高速中性子が減速させられる効果を抑制するために冷却材のボイド率を高くしている。また、再臨界防止などの観点から炉心を扁平にしている。高ボイド率、扁平炉心に伴い冷却材流動の圧力損失が小さくなることから、インターナルポンプを削除して自然循環冷却方式を採用したシステムとしている。

(b) 炉心燃料

水冷却炉では、炉心を扁平化することにより負のボイド反応度係数 を実現している。また、燃料体の燃料ピン間ギャップを1.3mm と稠密 化するとともに、冷却材ボイド率を高く(炉心平均ボイド率70%程度) して増殖比1以上を達成できる設計としている。

(c) これまで実施された要素技術開発

被覆管候補材料として、改良ステンレス鋼及び軽水炉用燃料被覆管 (ジルコニウム合金)を選定し、国内のイオン照射研究施設で基礎的 な照射試験を実施中である。熱水力特性については、大規模バンドル の限界出力試験を実施し、稠密体系での除熱限界、並びにその燃料ピ ン間ギャップ幅の効果を明らかにしている。

図1-1-8 先進湿式法再処理の概念図



表1-1-5 先進湿式法再処理の基本仕様

	先進湿式法
受入燃料	酸化物燃料 (ペレット)
再処理製品	硝酸水溶液 (Pu富化度·MA含有率調整済)
発生廃棄物処分体 (高レベル廃棄物)	ホウケイ酸ガラス固化体
年間処理能力	200tHM/y
再処理製品へのFP混入率	0.14%以下
前処理操作	バンドルせん断(短尺)
分離操作原理と 使用媒体	溶解(硝酸水溶液) 晶析 溶媒抽出(TBP+n-ドデカン) クロマトグラフィー(シリカ担持型 CMPO/BTP吸着材)
操作温度	0∼95℃
セル雰囲気	空気雰囲気
運転·保守補修方式	連続式 自動運転(配管移送) 遠隔保守補修
臨界管理方式	形状管理(全濃度安全形状)

②再処理

i. 先進湿式法(MOX 燃料、窒化物燃料)

(a) プロセスシステムの特徴

先進湿式法(NEXT 法: New Extraction System for TRU Recovery)は、 使用済燃料を硝酸水溶液に溶かして液体状態で処理する湿式法の一つ で、原子力機構が研究開発を進めている方法である。従来の高除染(回 収する再処理製品(ウラン/プルトニウム溶液)に含まれる不純物の 割合が少ない)の湿式再処理法をベースに、ウラン/プルトニウムの 低除染・混合回収など、プロセスに工夫を加えて合理化を図り、マイ ナーアクチニド(MA)の回収を組み入れたものとなっている。先進 湿式法再処理のプラント概念図を図1-1-8に、実用プラント概念 の基本仕様を表1-1-5に示す。

具体的には、晶析工程と単サイクル共抽出工程の導入を行いつつ、 回収したウラン及びプルトニウム等の精製工程の削除、ソルトフリー 試薬(塩を含まず分解可能な試薬)の採用と廃液の二極化処理などを 合理化項目としている。高レベル放射性廃棄物への MA の移行量を減 らして環境負荷低減を図るため、単サイクル共抽出工程で回収されな いネプツニウム以外の MA(特に、アメリシウム及びキュリウム)を 抽出クロマトグラフィにより回収することとしている。

本システムは窒化物燃料にも対応可能であるが、この場合には、炉 内における長寿命の放射性炭素(C14)の生成抑制のために、普通の 窒素(N14)ではなく窒素同位体(N15)を燃料に用いる必要があり、 再処理の過程でこれを回収、リサイクル利用するため、N15の回収工 程の追加が必要であるとされている。また、被覆粒子燃料にも対応可 能であるが、被覆材等の除去工程の追加が必要であるとしている。

(b) これまで実施された要素技術開発

溶解工程については、照射済燃料を粉体化することなどにより 99% 以上の溶解率で晶析工程に適した濃度のウラン/プルトニウム溶液を 所定の時間内に得られることを、小規模ホット試験で確認している。

図1-1-9 酸化物電解法の概念図



表1-1-6 酸化物電解法の基本仕様

	酸化物電解法
受入燃料	酸化物燃料 (バイパック)
再処理製品	酸化物粉体 (Pu富化度 · MA含有率未調整)
発生廃棄物処分体 (高レベル廃棄物)	鉛リン酸ガラス固化体 フツリン酸ガラス固化体
年間処理能力	50tHM/y
再処理製品へのFP混入率	1.4wt%
前処理操作	燃料粉化(機械式)
分離操作原理と 使用媒体	塩素化溶解 電解還元(NaCl-CsCl溶融塩) 液体金属抽出(Cd) 蒸留 酸化転換
操作温度	650~1000°C
セル雰囲気	空気雰囲気、Ar雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守補修
臨界管理方式	質量管理

出典:フェーズⅡ報告書の概要

晶析工程については、使用済燃料等を用いた小規模試験においてウ ラン回収率70%以上(炉心燃料のプルトニウム富化度調整を想定した ウランの回収率目標)が得られることを確認している。一方、今後の 課題としてバリウムやセシウムなどの除染し難い元素が回収したウラ ンに随伴するため、回収ウランの取扱いを含め晶析製品の処理工程に ついて検討する必要があるとしている。また、実機形状を考慮した工 学規模のウラン試験装置を用いた試験を行い、硝酸ウラニル結晶の連 続的回収が可能であることが確認されたとしている。

遠心抽出器による単サイクル共抽出工程については、小規模ホット 試験において、ウラン及びプルトニウムは 100%近い回収率、ネプツ ニウムは 98%程度の回収率が得られている。また、工学規模の遠心抽 出器を開発し、水相と有機相の分離などの基本性能や耐久性能が確認 されたとしている。

抽出クロマトグラフィによる MA 回収については、模擬物質を用いた小規模試験結果から MA 分離の可能性が示されたとしている。

ii.酸化物電解法(MOX燃料)

(a) プロセスシステムの特徴

酸化物電解法再処理は、乾式再処理法の一種で、使用済燃料を塩素 ガスによって溶融塩(NaCl-2CsCl)中に溶解し、電気分解などによっ て酸化ウラン(UO₂)顆粒及びMOX顆粒を得る方法である。酸化物電 解法再処理のプラント概念図を図1-1-9に、実用プラント概念の 基本仕様を表1-1-6に示す。ロシアで開発された基本技術に、UO₂ 回収のための同時電解、貴金属回収電解、酸化プルトニウム(PuO₂) を単独で回収しないためのMOX共析、MA回収工程などを組み込ん でいる。MAを除去した溶融塩中の核分裂生成物(FP)はリン酸塩に より沈澱し、リン酸沈澱物や余剰塩をリン酸ガラス形状の廃棄体とす ることとしている。

(b) これまで実施された要素技術開発

MOX 共析、MA 回収及びリン酸沈澱については、ロシア原子炉科学研究所において使用済燃料を用いた試験がなされ、国内では同時電解

図1-1-10 金属電解法の概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-7 金属電解法の基本仕様

	金属電解法
受入燃料	金属(U-TRU-Zr合金)燃料
再処理製品	Zr合金インゴット (Pu富化度・MA含有率未調整)
発生廃棄物処分体 (高レベル廃棄物)	人工鉱物固化体 (ガラス結合ソーダライト)
年間処理能力	50tHM/y
再処理製品へのFP混入率	U側製品:ほぼ0% TRU側製品:約2%
前処理操作	ピンせん断(短尺) ボンドNa除去
分離操作原理と 使用媒体	電解還元(LiCl-KCl溶融塩) 液体金属抽出(Cd) 蒸留
操作温度	500~1400°C
セル雰囲気	Ar雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守補修
臨界管理方式	質量管理を基本とし、工程に応じ て化学形態管理を併用。

や貴金属 FP 分離に関するウラン試験及び材料耐食性試験などが行わ れたとしている。MOX 共析工程においては電流効率向上やプロセス 制御条件の最適化が必要であり、MA 回収については、グラファイト 陰極への析出は困難なため液体金属を用いた抽出などの検討が必要と されている。機器開発について、溶融塩による反応ルツボの耐食性が 主な課題であるとしている。材料の腐食挙動については、試験片を用 いたプルトニウム試験により確認できているものの、大型ルツボの製 作性、工学規模のルツボの耐食性など確認すべき点があるとしている。

iii. 金属電解法(金属燃料)

(a) プロセスシステムの特徴

金属電解法再処理は、乾式再処理法の一種で、500 ℃の溶融塩 (LiCl-KCl)中での電解精製によって燃料物質を回収する方法である。 金属電解法再処理のプラント概念図を図1-1-10に、実用プラン ト概念の基本仕様を表1-1-7に示す。使用済燃料を陽極とし、ウ ランの回収には鋼製の陰極を、またプルトニウムとウランの一括回収 には液体カドミウム陰極を用いている。液体カドミウム陰極にはプル トニウムとウランと同時に MA 及び少量の希土類元素が随伴するのが 本プロセスの特徴となっている。設計においては、米国で開発された フローシートをベースに経済性向上のために大型電解精製装置や連続 陰極処理装置を採用している。

(b) これまで実施された要素技術開発

ウラン、プルトニウム、MA 及び模擬 FP 元素を用いた電解精製や陰 極処理技術に関する小規模試験が原子力機構と電力中央研究所の共同 研究などによって進められ、カドミウム陰極によるウラン/プルトニ ウム共抽出や希土類 FP との分離性能が確認されたとしている。また、 MOX 還元-電解精製-陰極処理の一連の小規模試験が MOX ペレット を用いて行われ、プロセス全体の物質収支に関するデータを得るとと もに、ウランと TRU を 99%以上回収可能であるとの見通しが得られ たとしている。塩廃棄物処分体であるガラス結合ソーダライトについ ては FP 添加量が少ないため、改良や処分方法を含めた検討が必要で あるとしている。

図1-1-11 簡素化ペレット燃料製造法の概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-8 簡素化ペレット法燃料製造の基本仕様

	簡素 化ペレット法
受入原料	硝酸水溶液 (Pu富化度•MA含有率調整済)
中間製品	酸化物中空ペレット
燃料スミア密度	82%
年間処理能力	200tHM/y
製品へのFP混入率	0.14wt%
転換操作	マイクロ 波 加 熱 直 接 脱 硝 法
Pu富化度/MA添加 率調整操作	不要
O/M調整操作	H ₂ ガス還元
焼結操作	必要
使用試薬等	ステアリン酸 亜 鉛
操作温度	室温~1700℃
セル雰囲気	空気雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動 運転 (機械式移送) 遠隔保守 •補修
臨界管理方式	形状管理/質量管理/本数・体数 管理

③ 燃料製造

i. 簡素化ペレット法(MOX 燃料)

簡素化ペレット法燃料製造のプラント概念図を図1-1-11に、実 用プラント概念の基本仕様を表1-1-8に示す。

(a) プロセスシステムの特徴

簡素化ペレット法は、「常陽」及び「もんじゅ」の燃料製造技術とし て実績があるペレット法をベースとしている。プルトニウム富化度調 整を硝酸溶液段階で行うことにより、従来のペレット製造工程と比ベ プルトニウム富化度調整のための粉末混合工程を大幅に削減している。 これにより、経済性向上が期待するとともに、粉末飛散抑制に伴いプ ルトニウムの工程内滞留量低減が図られ計量管理の合理化が期待でき るとしている。ペレットの成型工程において、金型の内面に潤滑剤を 直接塗布するダイ潤滑成型法を導入することにより、粉末への潤滑剤 の添加・混合が不要となり、脱ガス工程も不要となるため、成型焼結 工程が簡素化されるとしている。

燃料製造システムでは、低除染マイナーアクチニド含有燃料を取扱 うため、遮蔽セル内での運転に適した設備とする必要があるとしてい る。このため、運転信頼性、遠隔保守補修性及び量産性に優れるター ンテーブル方式の脱硝・転換・造粒設備を導入している。また、燃料 ペレットの酸素対金属比率(O/M 比)調整のための工程を焼結工程の 後に付加している。

(b) これまで実施された要素技術開発

硝酸溶液混合によるプルトニウム富化度調整についてはモックアッ プ装置を用いた試験を、マイクロ波直接脱硝についてはビーカースケ ールでの MOX 試験を実施し、随伴する核分裂生成物(FP)の影響な どの検討が必要ではあるものの、プロセスの成立性が概略確認されて いるとしている。

粉末流動性については、造粒処理工程において顆粒調整技術を採用 し流動性を向上する試験が行われ、平均粒径 700 ~ 1000 μ m の MOX

図1-1-12 振動充填法/湿式法再処理対応(スフェアパック法) 燃料製造の概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-9 振動充填法/湿式法再処理対応(スフェアパック法) 燃料製造の基本仕様

	振動充填(スフェアパック)
受入原料	硝酸水溶液 (Pu富化度•MA含有率調整済)
中間製品	球状酸化物粒子 (80、800µm φの二種類)
燃料スミア密度	80%
年間処理能力	200tHM/y
製品へのFP混入率	0.14wt%
転換操作	外部ゲル化法+焙焼
Pu富化度/MA添加率調 整操作	不要
O/M調整操作	H ₂ ガス還元
焼結操作	必要
使用試薬等	ポリビニルアルコール テトラヒドロフルフリルアルコール イソプロピルアルコール アンモニア水溶液
操作温度	室温~1700℃
セル雰囲気	空気雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守・補修
臨界管理方式	形状管理(水溶液系は全濃度安全形 状寸法)/本数·体数管理

粉末が得られること、金型への充填性が良好であることを確認したと している。

ダイ潤滑成型に関しては、成型特性の確認、MOX ペレットの試作 などを実施するとともに、コールド雰囲気において機器開発及び模擬 粉末によるペレット試作を行い、噴霧方法の最適化や遠隔保守への対 応策の検討などが進められている。さらに、小規模での焼結試験の結 果、欠け・割れ・有意なプルトニウムスポットのない理論密度 95%以 上のペレットの製造が可能なことが確認されたとしている。また、ホ ットセル内での遠隔操作で、照射用 MA 含有 MOX ペレットの製造を 行い、ホットセル内遠隔製造の見通しが得られたとしている。

ii. 振動充填法/湿式法再処理対応(スフェアパック法)(MOX 燃料)

振動充填法/湿式法再処理対応(スフェアパック法)燃料製造のプラント概念図を図1-1-12に、実用プラント概念の基本仕様を表1-1-9に示す。

(a) プロセスシステムの特徴

先進湿式法に適合する振動充填燃料製造では、ゲル化法により大小 2種類の球形燃料粒子を製造し、重量比3:1で被覆管内に充填する としている。ゲル化法ではプルトニウム富化度調整済みのウラン/超 ウラン元素硝酸溶液をアンモニア水中に滴下し、重ウラン酸アンモニ ウム及び水酸化プルトニウムのゲル球とした後、洗浄・乾燥・ばい焼 ・還元により二酸化物粒子としている。工程上で微粉末発生が少ない ため厳重な工程内滞留対応を要せず、また、ペレット法と比較して簡 素な工程となっていること、燃料の取扱いが比較的単純な振動充填装 置など遠隔自動化に適した機器を前提とすることから、低除染 TRU 燃 料製造技術への適合性が高いとしている。

(b) これまで実施された要素技術開発

ウランや模擬 FP 元素を添加した粒子製造試験やネプツニウム含有 MOX 燃料粒子の製造によりゲル化技術の成立性が確認されたとして いる。粒子充填技術については、大小2種類の粒径の模擬粒子(ガラ ス及びハフニア)を用いた充填試験を行うとともに、ネプツニウム- 図1-1-13 振動充填法/酸化物電解法再処理対応(バイパック法) 燃料製造の概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-10 振動充填法/酸化物電解法再処理対応(バイパック法) 燃料製造の基本仕様

	振動充填(バイパック)
受入原料	酸化物粉体 (Pu富化度·MA含有率未調整)
中間製品	不規則形状酸化物粒子 (粒径に応じて5分級)
燃料スミア密度	82%
年間処理能力	50tHM/y
製品へのFP混入率	1.4wt%
転換操作	不要
Pu富化度/MA添加率調 整操作	混合調整
O/M調整操作	酸素ゲッターの添加
焼結操作	不要
使用試薬等	ウラン金属微粒子
操作温度	室温
セル雰囲気	空気雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守・補修
臨界管理方式	質量管理/本数·体数管理

MOX スフェアパック燃料を製造しオランダの高中性子束炉「HFR」での照射試験に供している。これらにより、スミア密度 80%程度の充填密度が達成可能であること、軸方向密度の偏差が許容できるレベルであることが確認されたとしている。

iii. 振動充填法/酸化物電解法再処理対応(バイパック法) (MOX 燃料)

振動充填法/酸化物電解法再処理対応(バイパック法)燃料製造のプラント概念図を図1-1-13に、実用プラント概念の基本仕様を表1-1-10に示す。

(a) プロセスシステムの特徴

酸化物電解法に適合する振動充填燃料製造では、電気分解で回収される理論密度に近い酸化ウラン析出物及び MOX 析出物を粉砕して顆粒状とし、これらを数種類の大きさに分級した後、混合して加振しながら被覆管内に充填するとしている。酸化物電解法によって得られる燃料顆粒の O/M 比は2となる。照射中の燃料被覆管内面の腐食を防止するために燃料中の O/M 比を2未満とする必要があるため、金属ウラン粒子を酸素吸収剤として添加するとしている。

(b) これまで実施された要素技術開発

使用済燃料から回収した顆粒状の酸化プルトニウムを用いて、バイ パック燃料製造試験及びその燃料の照射試験を実施し、被覆管内面腐 食や燃料/被覆管の機械的相互作用に関して、ペレット燃料と同等の性 能が期待できることが確認されたとしている。プルトニウム富化度の 軸方向のばらつきについては、ロシアの高除染 MOX 燃料製造実績か ら制限値以内にできる見通しが得られたとしている。低除染燃料のプ ルトニウム富化度分布測定法については、高放射線下で適用可能な新 たな測定法の開発が必要としている。

iv. 射出鋳造法(金属燃料)

射出鋳造法燃料製造のプラント概念図を図1-1-14に、実用プラント概念の基本仕様を表1-1-11に示す。

図1-1-14 射出鋳造法燃料製造の概念図



出典:フェーズ II 報告書の概要

表1-1-11 射出鋳造法燃料製造の基本仕様

	射出鋳造法
受入原料	U-TRU-Zr合金インゴット (Pu富化度・MA含有率未調整)
中間製品	U-TRU-Zr合金スラグ
燃料スミア密度	70/75% (内側燃料/外側燃料)
年間処理能力	50tHM/y
製品へのFP混入率	0.3wt%
転換操作	不要
Pu富化度/MA添加 率調整操作	射出鋳造工程時に混合調整
使用試薬等	Zr Na(ボンド材)
操作温度	∼1400°C
セル雰囲気	Ar雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守・補修
臨界管理方式	質量管理/本数·体数管理

(a) プロセスシステムの特徴

射出鋳造法による燃料製造法は、米国で開発され、高速実験炉「EBR-Ⅱ」のドライバー燃料製造に用いられた技術であり、簡素な工程、装 置小型化、遠隔操作への適合性の高さなどが特徴である。射出鋳造装 置内のアルゴンガス中で燃料合金を溶解し、真空引きの後、上端を閉 じた石英製のパイプ状の鋳型を溶融合金に浸漬し、再び、装置内にア ルゴンガスを導入することで、鋳型内部との差圧により溶融燃料合金 を鋳型内に射出するとしている。なお、使用済石英製鋳型は再処理廃 棄物を処理する際の原料として利用することとしている。

(b) これまで実施された要素技術開発

ウランージルコニウム合金の射出鋳造試験が電力中央研究所により 工学規模(1 バッチ約 20kg)で実施され、燃料スラグの寸法精度など 統計データが蓄積されている。原子力機構と電力中央研究所の共同研 究により「常陽」での照射試験に向けたウランープルトニウムージル コニウム合金の射出鋳造試験が進められている。また、石英鋳型の廃 棄物固化体原料としての利用などについて技術的成立性を確認するた めの小規模試験が進められている。

v. 被覆粒子燃料製造(窒化物燃料)

被覆粒子燃料製造のプラント概念図を図1-1-15に、実用プラント概念の基本仕様を表1-1-12に示す。

(a) プロセスシステムの特徴

ヘリウムガス冷却炉で用いる被覆粒子燃料を製造するためのもので あり、燃料核の製造にはゲル化法を採用している。原料硝酸溶液に予 め炭素粉末を添加し、炭素を含む MOX 粒子を窒素(N15)ガス流雰 囲気下で転換し窒化物粒子を得ている。粒子燃料の被覆には TiN を化 学蒸着により生成させている。なお、窒化物燃料の場合には、長半減 期放射性核種である炭素(C14)の生成を抑制するため、通常の大気 中での存在率が 0.37%以下の窒素同位体 N15 を 99.9%程度まで濃縮し て用いる必要があるとしている。

図1-1-15 被覆粒子燃料製造の概念図



出典:フェーズ Ⅱ報告書の概要

表1-1-12 被覆粒子燃料製造の基本仕様

	窒化物被覆粒子燃料
受入原料	硝酸水溶液 (Pu富化度・MA含有率調整済)
中間製品	TiN被覆球状窒化物粒子 $(0.86m\phi)$
燃料スミア密度	—
年間処理能力	200tHM/y
製品へのFP混入率	0.14wt%
転換操作	外部ゲル化法+焙焼 +炭素熱還元
Pu富化度/MA添加率調 整操作	不要
被覆操作	熱化学気相蒸着法
六角ブロック集合体成型	振動充填+反応焼結法
使用試薬等	ポリビニルアルコール テトラヒドロフルフリルアルコール イソプロピルアルコール アンモニア水溶液 炭素粉末 四塩化チタン
操作温度	室温~1700℃
セル雰囲気	Ar雰囲気+空気雰囲気
運転·保守補修方式	バッチ式 自動運転(機械式移送) 遠隔保守補修
臨界管理方式	形状管理(水溶液系は全濃度安全 形状寸法)/本数·体数管理

(b) これまで実施された要素技術開発

窒化物燃料の燃料核の製造には、酸化物燃料スフェアパック燃料製造と同じ技術を用いており、知見を共有することができるとしている。 窒化物燃料に共通する N15 濃縮技術については、経済性の向上が期待できる圧力スイング法 (PSA)等に関する試験が実施され、分離性能などのデータが得られつつある。