

FBRサイクルの実用化戦略調査研究（フェーズⅠ）の成果について

平成13年5月15日
核燃料サイクル開発機構

本研究（フェーズⅠ）は、将来社会の多様なニーズに柔軟に対応できる有望なFBRサイクルの実用化候補概念を抽出し、併せてフェーズⅡの研究計画を策定することを目的として、1999年7月から、電気事業者等の参画を得てオール・ジャパン体制で検討を開始し、本年3月に成果をとりまとめ、4月から新たにフェーズⅡに入りました。

以下にフェーズⅠの成果概要を報告致します。

1. はじめに

本研究は、安全性の確保を前提に、軽水炉サイクル及びその他の電源と比肩する経済性を達成し得るよう、FBRサイクルが本来有する長所を最大限に活用した実用化像を創出し、あわせて将来の社会の多様なニーズに柔軟に対応できる開発戦略を提示することにより、FBRサイクルを将来の主要なエネルギー供給源として確立する技術体系を整備することを目的とし、電気事業者、電中研、原研等の関係機関の参画・協力を得て、オール・ジャパン体制で、1999年7月から開始した。

研究は段階に分けて実施することとし、革新技術を採用した幅広い技術的選択肢の検討評価を行い、実用化戦略を明確にする上で必要となる判断材料を整備し、有望な実用化候補概念を抽出するフェーズⅠ（約2年間）と、引き続き、工学的試験等を踏まえてFBRサイクル全体としての整合性を図り、実用化候補概念の絞り込み（複数）を行って、実用化に向けて今後開発すべき技術に対する必須の研究テーマを特定するフェーズⅡ（5年間程度）で構成される。

本調査研究終了後の研究開発については、5年程度ごとにチェックアンドレビューを受け、ローリングプランで進め、安全性の確保を前提として競争力のあるFBRサイクル技術を2015年頃を目途に提示することを目標としている。本研究の進め方を図-1に示す。

2. 有望な実用化候補概念の抽出

はじめに、21世紀の社会展望、エネルギー資源の需給動向や環境負荷低減に対するニーズ等の検討に基づき、FBRサイクルに対する開発目標（図-2）と各システムに対する設計要求の策定を行うとともに、これまでの国内外の研究開発の蓄積を活用した技術的選択肢の幅広いサーベイと革新的技術の導入を図り、FBRシステム及び燃料サイクルシステム（再処理システムと燃料製造システムをいう）の概念検討を行い、以下のとおり、有望な実用化候補概念を抽出した。

なお、FBRサイクルを構成する要素であるFBRシステム及び燃料サイクルシステムの基本概念を検討する際のベースとなる設計要求については、FBRサイクルの開発目標をもとに、FBRシステムの特徴である「燃料の増殖」、「燃料中の不純物の

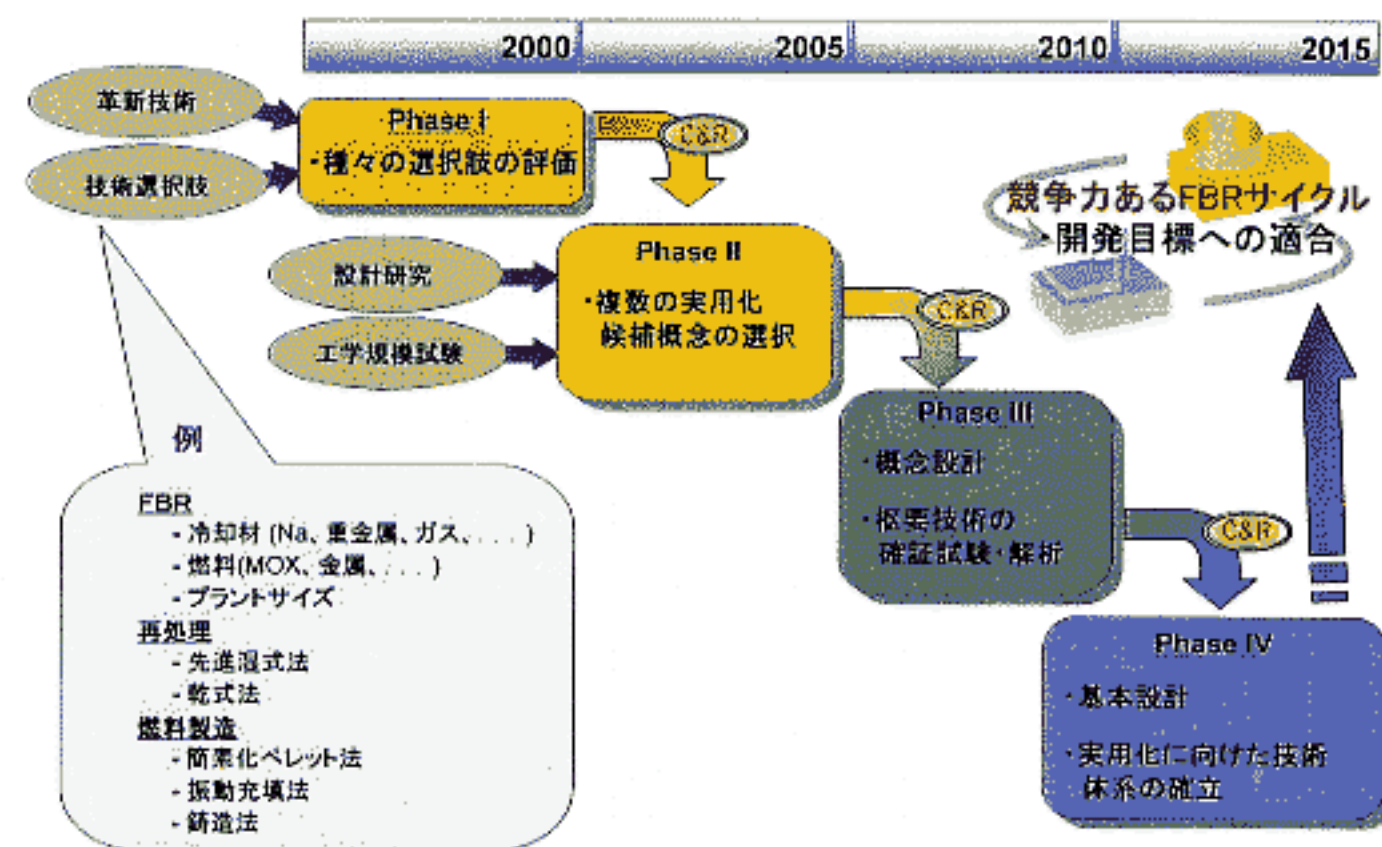


図-1 実用化戦略調査研究の進め方

安全性	炉	○ 炉心損傷に至る恐れのある事象の発生を防止するとともに、その発生を仮定しても原子炉内で自然に終息
	燃料サイクル	○ 臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施す ○ 取扱物質の特性(化学的活性度、毒性等)やプロセス条件(運転温度等)を踏まえた安全対策
経済性		○ 将来の軽水炉に比肩する経済性の達成 ○ コスト目標 ・炉の建設費: 20万円/kWe ・再処理費: 27万円/kgHM ・燃料製造費: 16万円/kgHM
資源有効利用性		○ 高増殖から低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応 ○ 高増殖としては、増殖比1.2程度を目標
環境負荷低減性		○ TRU燃焼および長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量を低減 ○ 施設の運転・保守および廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減
核拡散抵抗性		○ FBRサイクルの中で純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと ○ 核物質防護性および保障措置性の対応が良好な設計

図-2 FBRサイクルの開発目標

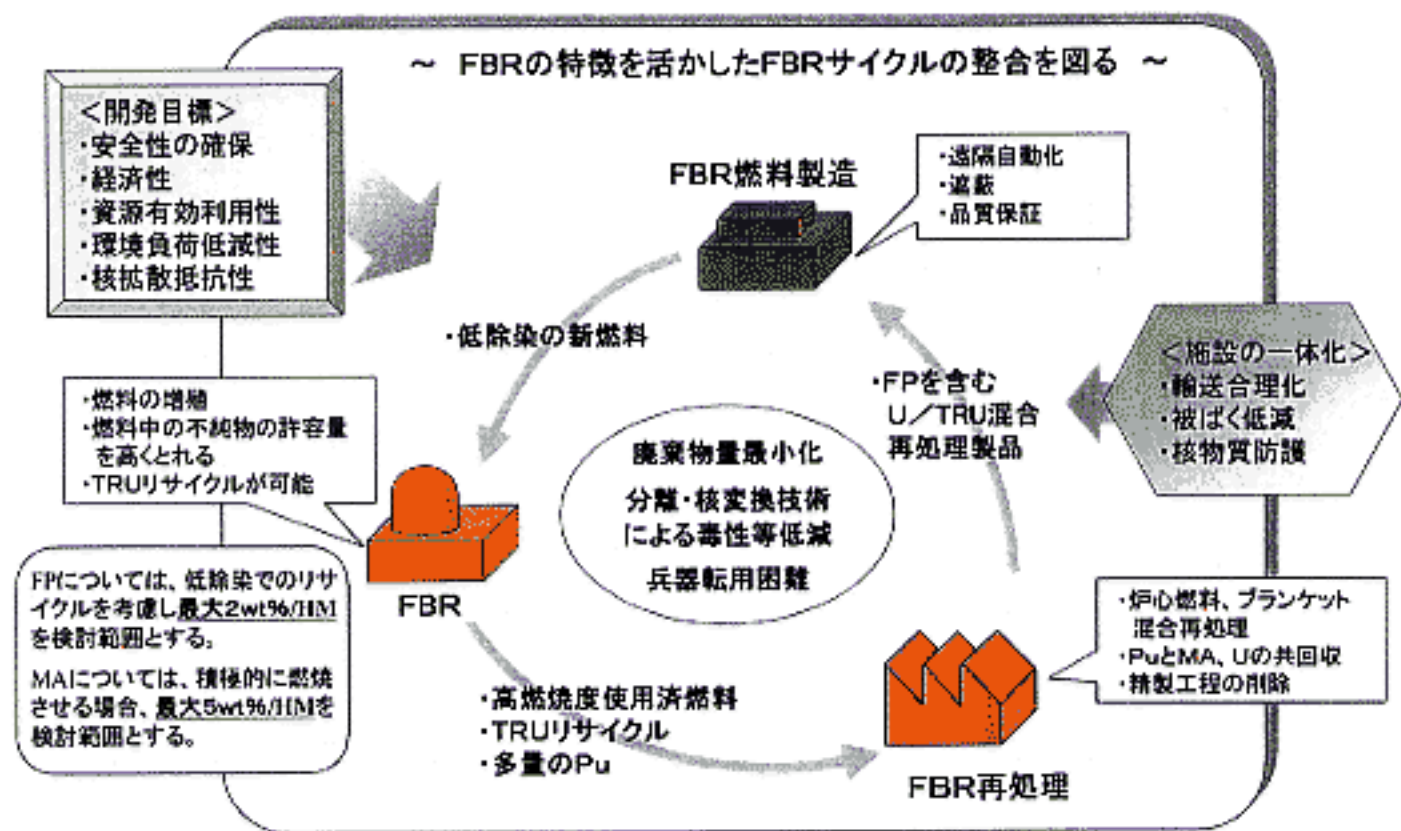


図-3 FBRサイクルの基本的な考え方

許容量が高く取れること」及び「TRU リサイクルが可能であること」等を活かして燃料サイクルシステムとの整合を図るという基本的な考え方（図-3）に基づき、設定することとした。

(1) FBR システム

冷却材として、ナトリウム、重金属、ガス、水等を対象に、炉心燃料として、酸化燃料、窒化物、金属の各燃料形態を組み合わせた FBR システム（表-1）について、幅広く技術を調査・分析して概念検討を行い、フェーズⅡにおいて研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出評価を行った。

評価にあたっては、設計要求に対する各概念の達成度を評価する観点から、炉心設計を含むプラント設計において、技術的成立性、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性及び運転・保守補修性の7つの指標を用いて検討を行った。

これらの評価をもとに総合的に検討した結果、FBR システムに関して以下のような技術が抽出された。

- ナトリウム冷却大型炉及び中型モジュール炉については、いずれも技術成立性が高く、将来軽水炉に比肩できる経済性が達成できる可能性がある有望な概念として、もんじゅと同様でかつ先進技術を導入したアドバンストループ型炉を抽出した（図-4、5）。炉心燃料としては、開発目標に対する達成度をほぼ満足し開発課題の少ない MOX 燃料と、開発課題は多いものの開発目標に対する達成度が高い金属燃料を抽出した。窒化物燃料は、炉心溶融事故(CDA)時の

表-1 FBR システムの検討対象技術と抽出評価結果

対象技術	炉型評価	燃料形態評価		
		MOX	窒化物	金属
Na 炉	大型炉タンク型	B	A	A
	大型炉ループ型	A		
	中型モジュール炉	A		
重金属炉	大型炉	C	B	A
	中型モジュール炉	A		
ガス炉	CO ₂ ガス炉ピン型	A	A	C
	He ガス炉ピン型	A	A	C
	He ガス炉微粒子型	A	A	-
水炉	BWR 型 FBR	A	-	-
	PWR 型 FBR	A	-	-
	SCFBR	A	-	-
溶融塩炉		C	C [塩化物溶融塩]	
小型炉	Na 炉	A	B	A
	重金属炉	A	B	A
	ガス炉	A	A	-

【検討対象】：フェーズⅠでの検討対象技術。-：フェーズⅠでの検討対象外の技術
 【抽出評価】：実用化の観点から、各項目を以下の3段階で評価する。
 A：フェーズⅡで検討する技術。 B：フェーズⅡでは国内外で実施される実用化戦略調査研究以外の研究の進捗状況をレビューし、再評価する技術。 C：フェーズⅠでの検討対象技術のうち、A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術

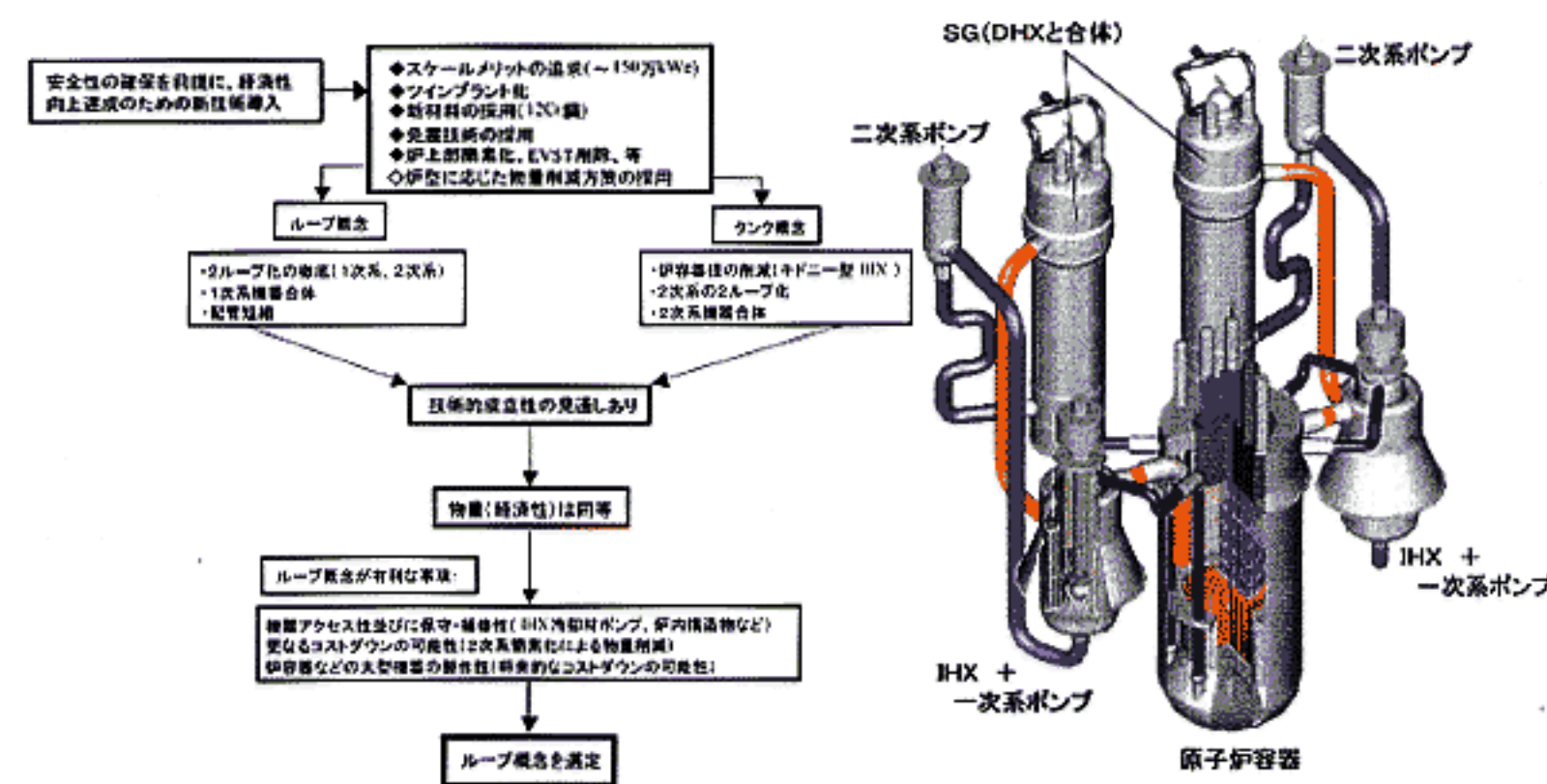


図-4 ナトリウム冷却大型炉抽出の考え方(図はアドバンストループ型炉の鳥瞰図)

燃料-冷却材相互作用（FCI）及び窒素解離による圧力上昇の懸念があるため抽出しない。

- 重金属冷却炉については、技術成立性、耐腐食性及び経済性の観点から、鉛ビスマス冷却中型モジュール炉を抽出した（図-6）。炉心燃料としては、MOX燃料は増殖比等の開発目標の達成が困難であるため、窒化物及び金属燃料を抽出した。
 - ガス冷却炉については、炭酸ガス冷却とヘリウムガス冷却の蒸気タービン方式、並びに、燃料として、耐熱ピン型と被覆粒子型の直接ガスタービン方式の4概念に対する比較評価を実施した。この結果、直接ガスタービン方式の方が開発目標に照らしてポテンシャルが高いことが解った。しかし、耐熱ピン燃料型については炉心溶融事故時の対策設備等の評価検討が、また、被覆粒子燃料型については、被覆材料の選定、炉心性能の更なる向上が必要であり、更に1年間程度検討を継続し、有望な概念を見極めることが望ましいと判断した（図-7）。炉心燃料としては、MOX及び窒化物燃料を抽出した。なお、金属燃料は温度制限があるため、ガス炉には適用しない。窒化物燃料は、窒素解離が発生しても著しい1次系圧力上昇にならない。
 - 高転換比BWR、超臨界圧軽水冷却FBR等の水冷却大型炉については、増殖比は1.0~1.05程度となり資源有効利用性の面で更なる検討が必要であることが解った。今後、原研等の研究成果をフォローするとともに、FBRの導入シナリオと併せて検討を進め、フェーズIIの絞り込み段階で総合的に判断することとする。
 - 小型炉については、中・大型炉と導入ニーズが異なることから、FBRの特徴を生かし、燃料取替間隔が長く核拡散抵抗性等に優れた炉として、ナトリウム冷却炉及び鉛ビスマス冷却炉の2概念を抽出した。炉心燃料としては、両炉とも長期運転の観点から、MOX燃料は適用せず、金属及び窒化物燃料を抽出した。また、ガス冷却炉については、大型炉の検討結果を待って判断することとする。
- 以上をまとめると、表-1の通りとなる。

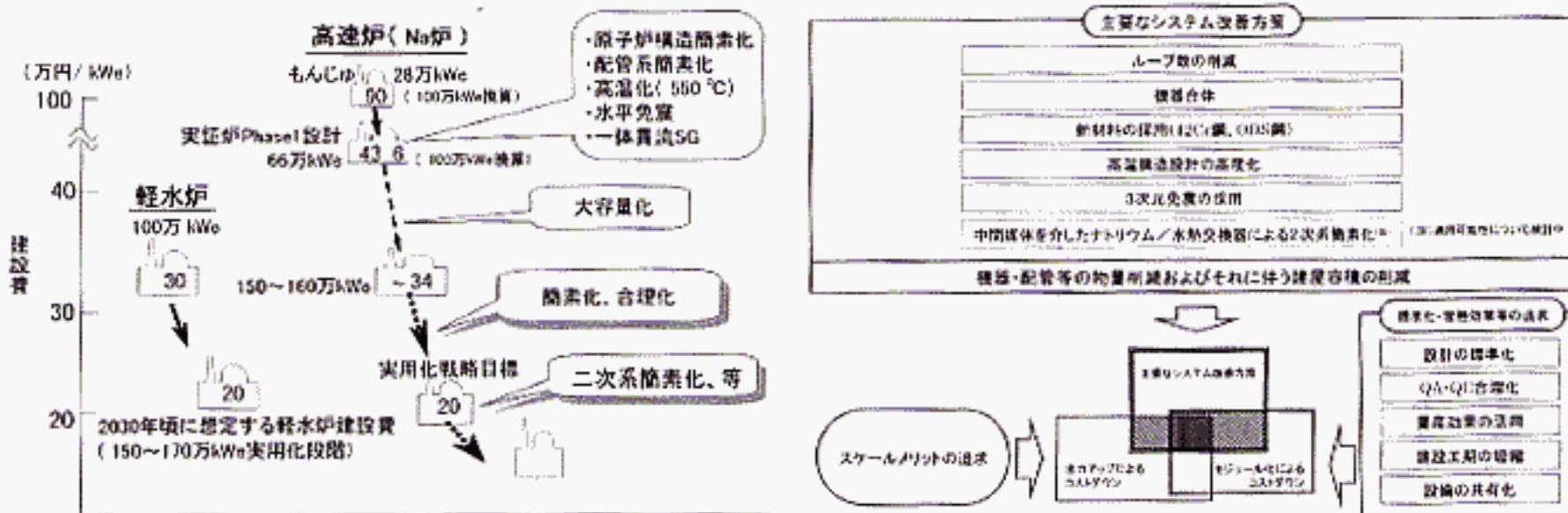


図-5 ナトリウム冷却炉のコストダウンの考え方

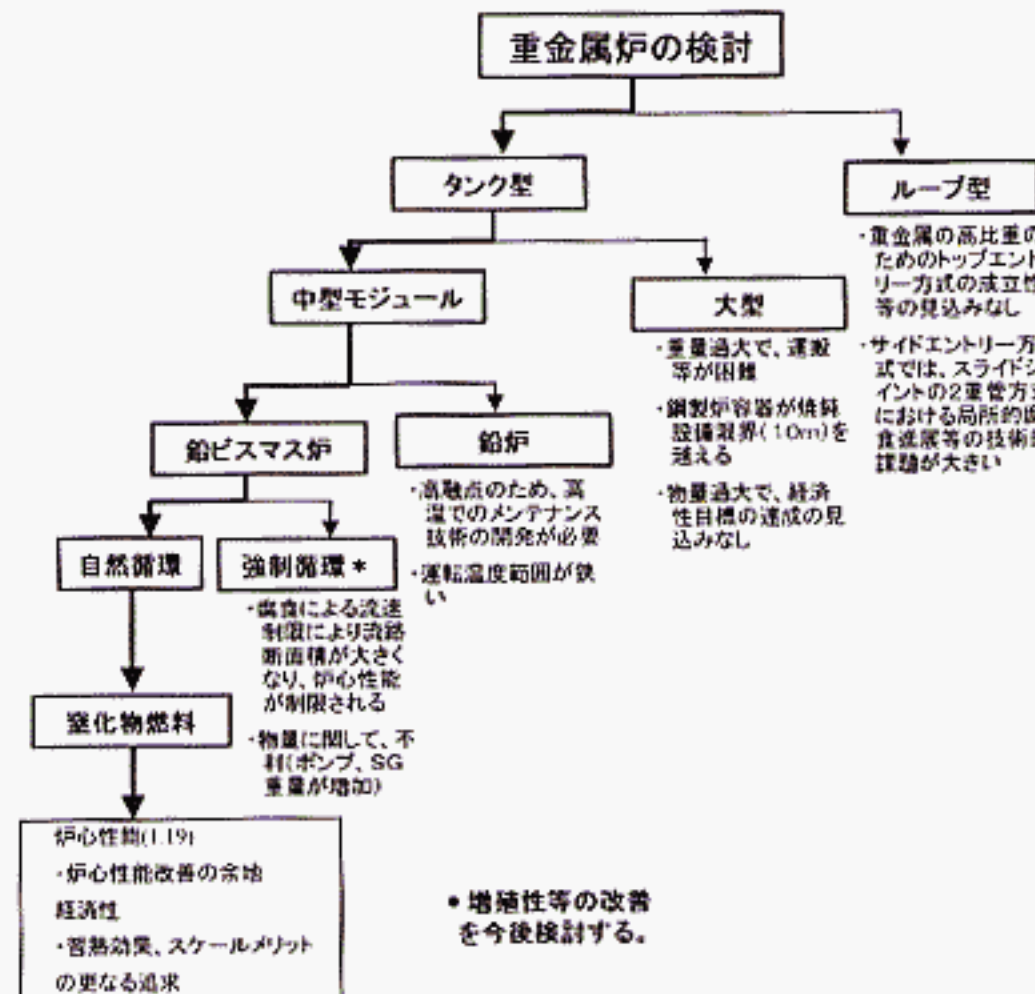


図-6 重金属冷却炉の抽出の流れ（図は鉛ビスマス冷却中型モジュール炉の鳥瞰図）

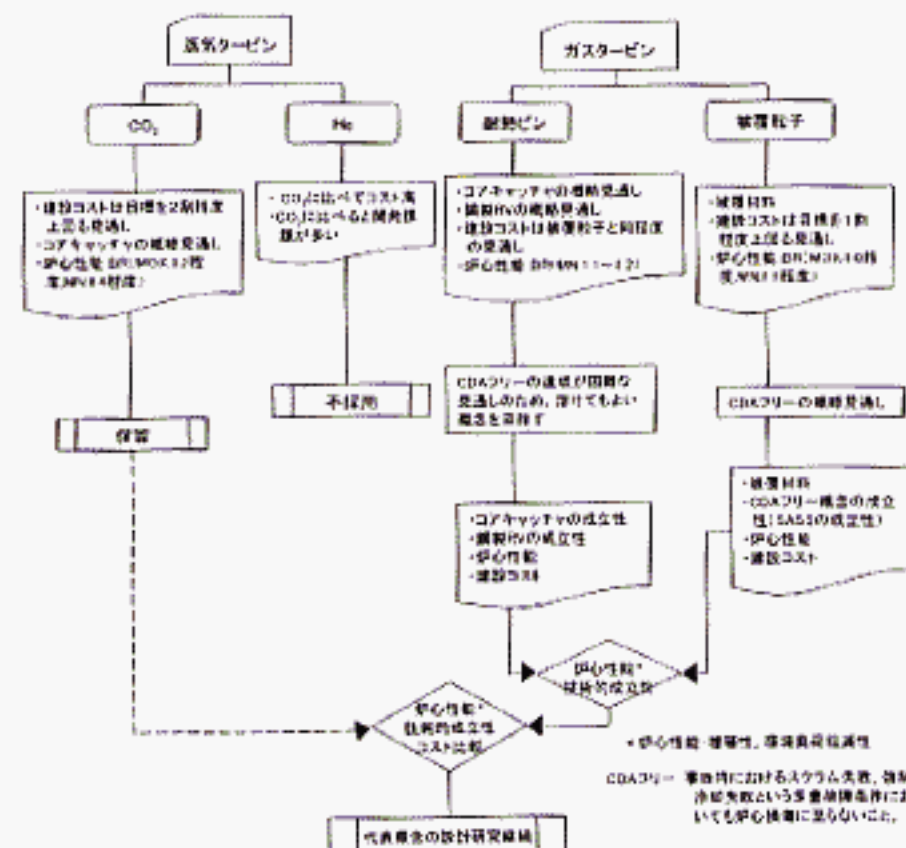
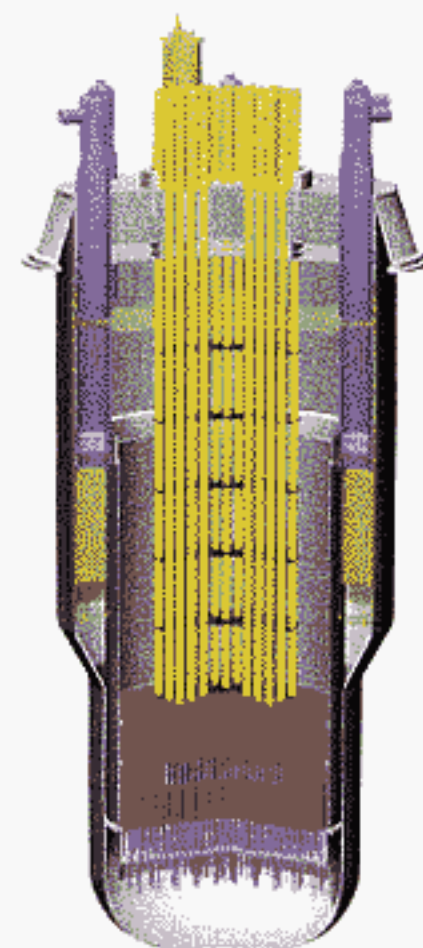
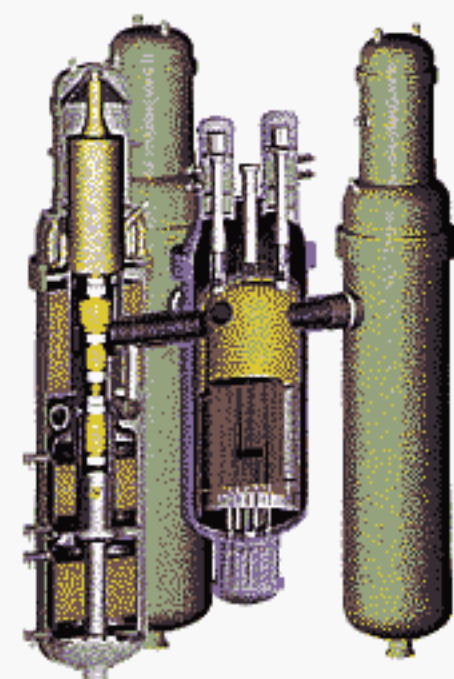


図-7 ガス冷却炉の検討の流れ（図は被覆粒子燃料型ヘリウムガス冷却炉の鳥瞰図）



(2) 燃料サイクルシステム

燃料サイクルシステムの検討も、前述の FBR システムの検討と同様に幅広く技術
を調査・分析して概念検討を行い、実用化候補概念の抽出評価を行った（表-2）。

評価にあたっては、設計要求に対する各概念の達成度を評価する観点から、技術的成立性、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性及び運転・保守補修性の7つの指標を用いて、以下のとおり検討を行った。

- 再処理システムについては、湿式法としては、軽水炉燃料の再処理法として実績のある PUREX 法を改良した「先進湿式法」を、また、乾式法としては、熔融塩中での電解を利用した「酸化物電解法」及び「金属電解法」、並びにフッ化物気体の生成し易さの違い等により燃料と FP を分離する「フッ化物揮発法」を検討対象として選定した。
- 燃料製造システムについては、「ペレット法」、粒径の異なる燃料粒子を被覆管に装荷し、振動により高密度に充填する「振動充填法」、低融点の金属燃料を型に鑄込む「鑄造法」を、それぞれ燃料形態と組み合わせて検討対象として選定した。
- 再処理及び燃料製造システムに対して、プロセスフロー、物質収支、設備機器仕様等の概念検討を進めた上で、200tHM/年、50tHM/年規模の再処理と燃料製造の一体化プラント（図－8）としての設計検討を行い、建設費及び操業費を評価するとともに、開発目標に照らしたシステムとしての評価を実施した。

これらの評価をもとに総合的に検討した結果、燃料サイクルシステムに関して以下のような技術が抽出された。

- 再処理については、技術成立性が高く、経済性で大規模施設に有利な先進湿式法、小規模施設でも経済性が良くなる可能性がある乾式法（酸化物電解法、金属電解法）を有望な概念として抽出した。また、燃料製造については、酸化物燃料用として技術的にほぼ確立されているペレット法、実績は少ないものの工程が簡素化でき、経済性の向上が期待できる振動充填法、また、金属燃料用としての鋳造法を有望な概念として抽出した。
- フッ化物揮発法については、フッ化物の安定性確認等の課題があり、そのための国内インフラが未整備である。このため、当面ロシアにおける軽水炉再処理への適用性検討等の動向をフォローし、フェーズⅡの絞込み段階で再評価することとする。
- 酸化物電解法については、窒化物燃料を処理するには、一旦ほぼ理論密度に近い緻密な酸化物粒子を得てから窒化物に転換するため効率的でないこと、また、金属燃料を処理するには、一旦酸化物に転換して電解処理した酸化物粒子を金属に還元するという複雑な工程をとることなどから、窒化物及び金属燃料に適用する組み合わせは抽出しない。

以上をまとめると、表-2の通りとなる。

表-2 燃料サイクルシステムの検討対象技術と抽出評価結果

対象技術			燃料形態	MOX	窒化物	金属
再処理	湿式法			A	A	—
	乾式	酸化物電解法		A	C	C
		金属電解法		A	A	A
		フッ化物揮発法		B	B	B
燃料製造	ペレット			A	A	—
	振動 充填	湿式法対応		A	A	—
		酸化物電解法対応		A	C	—
		金属電解法対応		A	A	—
		フッ化物揮発法対応		B	B	—
	鑄造	射出成型法		—	—	A
		遠心鑄造法		—	—	A

【検討対象】 : フェーズ1での検討対象技術、 : フェーズ1での検討対象外の技術

【抽出評価】 実用化の観点から、各項目を以下の3段階で評価する。

A：フェーズ2で検討する技術、 B：フェーズ2では国内外で実施される実用化戦略調査研究以外の研究の進捗状況をレビューするとともに他の技術とのハイブリッド化の可能性を検討し、再評価する技術、 C：フェーズ1での検討対象技術のうち、A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術

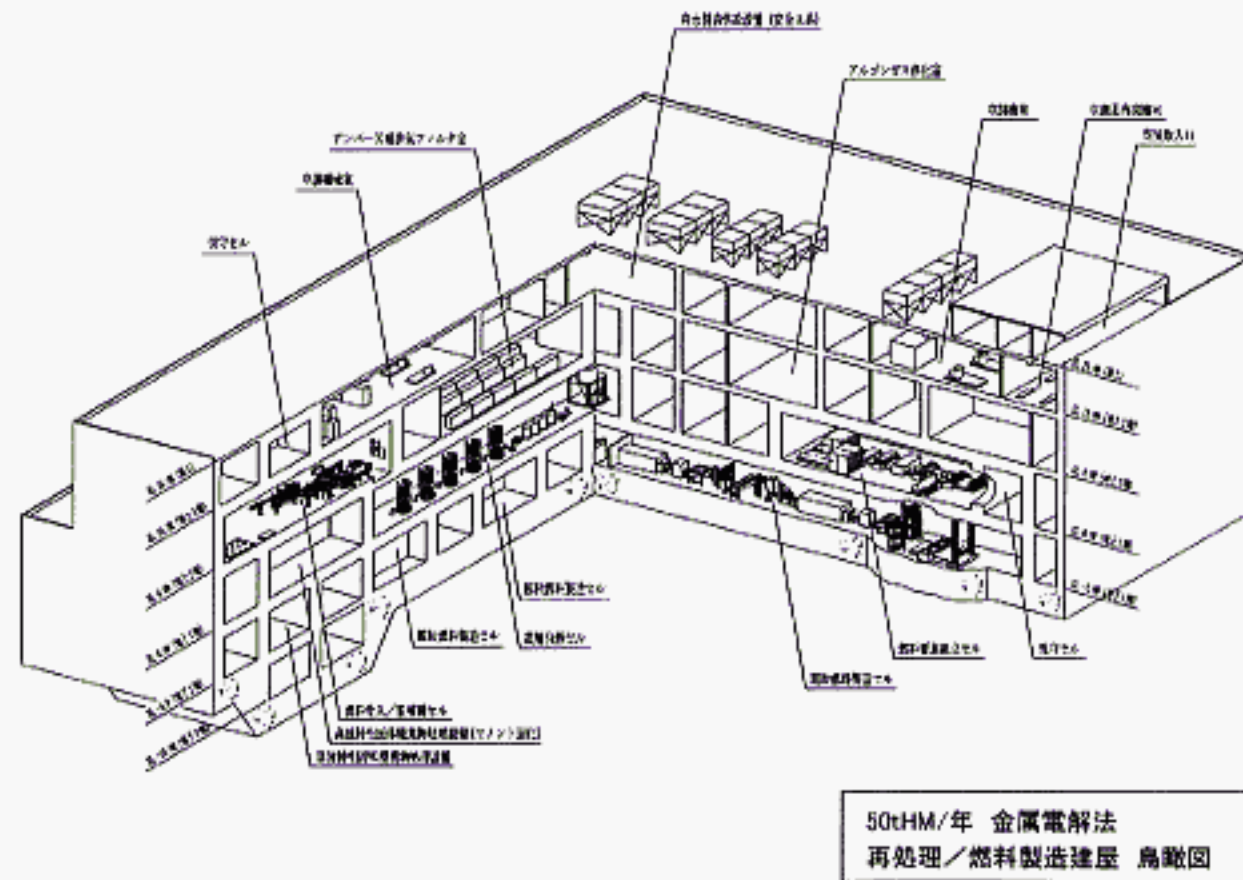


図-8 再処理・燃料製造一体型燃料サイクルプラントの概念図(例)

3. フェーズⅡ計画

フェーズⅠで抽出した FBR システム及び燃料サイクルシステムに関する有望概念について、フェーズⅡの5年間をかけて候補概念相互の可能な限り定量的な比較評価を実施できるレベルまで設計研究を深める。また、定量的に絞り込みを実施する上で必要となる要素技術開発（データを取得する試験の実施、設計評価技術の整備等）についても実施する。

これらの成果を基に、FBR サイクル全体の整合性に十分配慮しながら、実用化候補概念として、有望な2～3の候補に絞り込む。

なお、フェーズⅠで抽出された候補概念の検討にあたっては、内外の技術開発動向を十分に把握し、アイデア公募を継続するなど、さらに独創性、創造性に富んだ革新的技術を開拓し、魅力ある実用化概念を構築することに留意する。

フェーズⅡの研究の枠組みとしては、2003年度までの3年間を一つの区切りと考え、各候補概念の設計研究やキーポイントとなる要素試験等を実施し中間的な取りまとめを行う。3年間の成果について、チェックアンドレビューを受け、その結果を踏まえて2004～2005年度の研究内容を見直し、選択肢の絞り込みを進める計画とする（図-9）。フェーズⅡにおける主な研究内容は以下のとおり。

- 炉心燃料については、MOX 燃料の主要技術である高燃焼度化、TRU 含有燃料の実現性を確認するための要素技術開発等を行う。
- ナトリウム冷却炉については概念設計を深めるとともに、経済性向上を達成するための機器合体、2次系簡素化等の要素技術開発を行う。
- 重金属冷却炉については国際協力等によって具体的な展開を図ることとするが、冷却材中の材料腐食の抑制限界を把握するための試験等を行い、技術的成立性を見極める。
- ガス冷却炉については今年度1年間程度をかけ、ヘリウムガス冷却の直接ガスタービン方式に対する設計研究を炉心燃料を中心に進め、開発目標に照らして有望な実用化候補概念を抽出する。その後、国際協力等によって具体的な展開を図ることとするが、高温、高燃焼度を達成できる燃料開発等を行い、技術的成立性を見極める。
- 再処理システムについては概念設計を深めるとともに、設計に必要なデータを取得するための要素技術開発として、先進湿式法については経済性の追求と環境負荷低減に係るプロセスに関する開発を行い、また、乾式法（酸化物電解法及び金属電解法）では小規模プラウトニウム試験を実施する。さらに、実用化にあたっては工学的規模試験が必須なことからリサイクル機器試験施設(RETf)の整備計画を2003年度を目途にまとめ、呈示することとする。
- 燃料製造システムについては概念設計を深めるとともに、設計に必要なデータを取得するための要素技術開発として、簡素化ペレット法では経済性向上と低

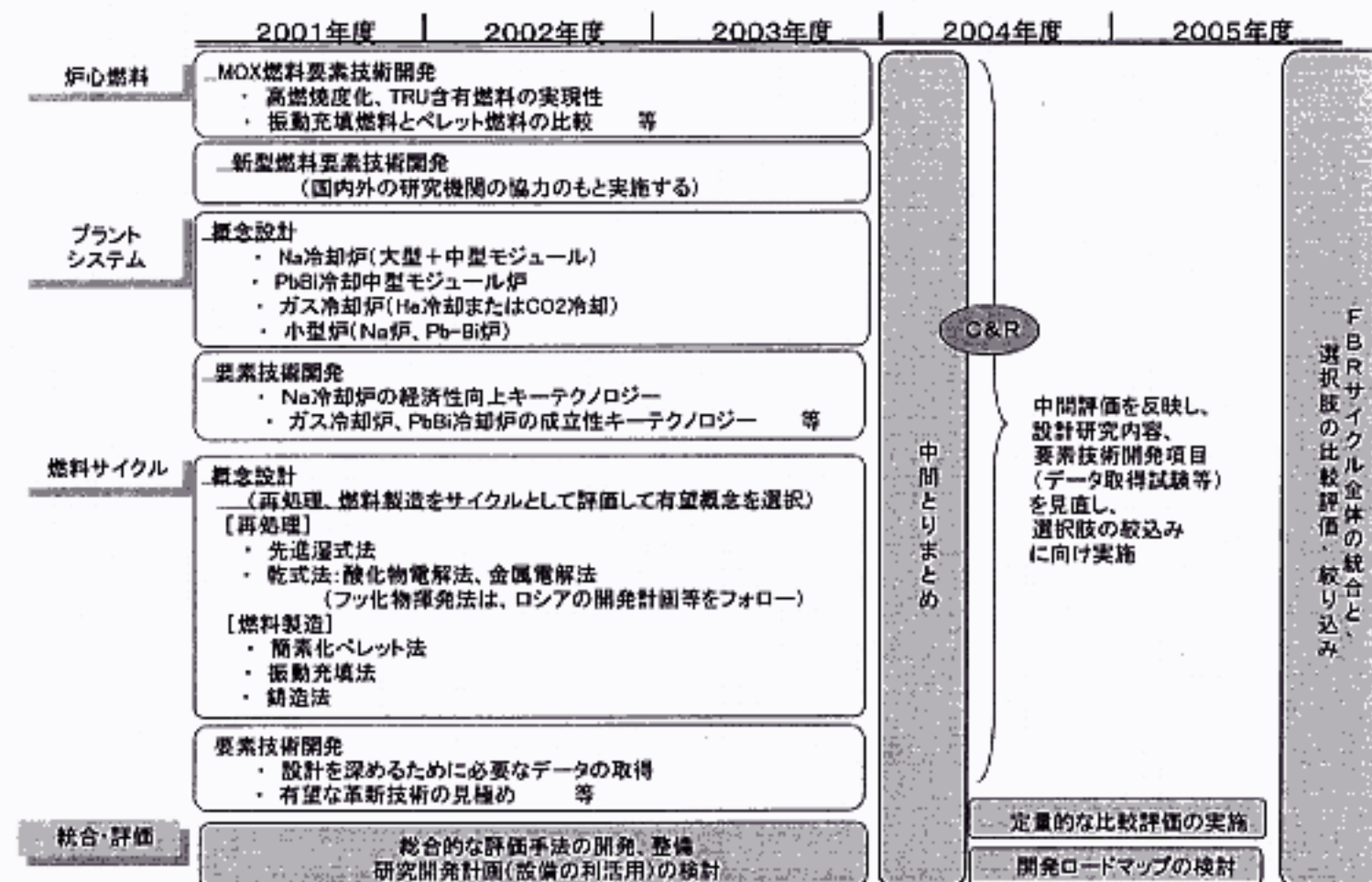


図-9 実用化戦略調査研究のフェーズⅡの展開

除染-TRU 含有燃料の製作性等に関する試験、振動充填法では充填技術等に関する小規模システム試験、また、鋳造法では主要なプロセスの小規模試験をそれぞれ実施する。

また、総合的な評価手法の開発・整備を進め、選択肢の定量的な比較評価を可能にするとともに、既存の施設・設備等の利用計画をまとめる

4. まとめ

実用化戦略調査研究フェーズⅠでは、5つの開発目標（安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性）を定めて調査研究を進め、FBR システム及び燃料サイクルシステムに関する有望な実用化候補概念を抽出した。

フェーズⅡでは、抽出された候補概念の検討にあたり、国内外の技術開発動向を充分把握し、アイデア公募を継続するなど、さらに独創的、創造性に富んだ革新的技術を開拓し、魅力ある実用化像を構築した上で、FBR システムと燃料サイクルシステムの整合を図った FBR サイクルとしての総合的な評価を実施し、実用化候補概念として有望な2～3の候補に絞り込むとともに、フェーズⅢ以降の開発計画を作成する計画である。

以上