

# 平成 12 年度研究開発課題評価(中間評価)報告書

評価課題「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」

平成 12 年 8 月

核燃料サイクル開発機構  
研究開発課題評価委員会  
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

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  
してください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

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

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

平成 12 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書  
評価課題「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」

核燃料サイクル開発機構  
研究開発課題評価委員会  
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

要 旨

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は、「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」(平成9年8月7日、内閣総理大臣決定)及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法の視点に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

## 目 次

1. 概要 .....	1
2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成 .....	1
3. 審議経過 .....	2
4. 評価方法 .....	2
5. 評価結果（答申書） .....	6
（参考）高速炉・燃料サイクル課題評価委員会 各委員の評価意見.....	31

### 参考資料（核燃料サイクル開発機構）

- 参考資料 1 研究開発課題の中間評価について（諮問）
- 参考資料 2 評価結果に対する措置
- 参考資料 3 課題評価委員会委員の評価意見に対するサイクル機構の  
見解及び質問に対する回答（補足説明資料）
- 参考資料 4 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（課題説明資料）
- 参考資料 5 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（OHP資料）

## 1. 概要

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は、「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」(平成9年8月7日、内閣総理大臣決定)及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

## 2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成

本委員会は、平成11年1月に設置され、関連分野の専門家を中心として、社会科学の専門家、ジャーナリスト、ユーザーなど、幅広い分野の委員から構成されている。

委員長	岡 芳明	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授
委員	井上 正	電力中央研究所原燃サイクル部長
	小鍛治市蔵	関西電力(株)原燃サイクルグループチーフマネージャー 原子燃料部長 (平成12年7月1日から)
	近藤三津枝	ジャーナリスト
	清水 雅彦	慶應義塾大学経済学部教授、経済学部長
	鈴木 潤	未来工学研究所R&D戦略研究グループリーダー
	戸田 三朗	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻教授
	中川 正幸	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部長
	中村 雅美	日本経済新聞社編集委員
	モリス・ブレン	駐日欧州委員会一等参事官(科学技術担当)
	班目 春樹	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授
	松井 恒雄	名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻教授
	松本 史朗	埼玉大学工学部応用化学科教授
	山田 明彦	東京電力(株)原子力研究所所長 (平成12年7月1日から)
(交替した委員)		
	桑原 茂	関西電力(株)原子力・火力本部原子燃料部長 (平成12年6月30日まで)
	若林 泰夫	東京電力(株)原子力研究所所長 (平成12年6月30日まで)

### 3. 審議経過

(1)第1回目の委員会開催：平成12年6月15日

- ・評価方法の決定
- ・課題内容の説明・検討

(2)第2回目の委員会開催：平成12年7月3日

- ・補足説明、質問への回答
- ・評価内容の検討

(3)評価結果(答申書)のまとめ

上記の審議結果に基づき、委員長が評価結果をまとめ、各委員の了承を得て答申書とした。

(4)答申：平成12年8月4日

### 4. 評価方法

以下の評価作業手順及び評価項目に従い、評価を行った。

(1)評価作業手順

1)第1回目の課題評価委員会における審議（評価方法の決定、課題内容の把握・検討）

- ・評価方法を定める。
- ・サイクル機構から課題説明資料により課題内容の説明を受け、内容を把握・検討する。

なお、欠席した委員に対しては、別途、対応させる。

2)各委員の評価作業

- ・各委員は、第1回目の課題評価委員会開催後、課題説明資料及び委員会における説明を基に、評価項目に従って評価を行い、評価意見及び質問を書面で事務局に提出する。
- ・事務局は、これらを整理して、次回の課題評価委員会の検討資料を作成する。

3)第2回目の課題評価委員会における審議（課題の評価）

- ・各委員が行った評価、サイクル機構の課題説明資料及び補足説明、委員会における討論に基づき、課題評価委員会としての評価を行う。

4)評価結果(答申書)のまとめ及び答申

- ・委員長は、上記の審議結果に基づき、委員会としての評価結果をまとめ、理事

長に答申する。

- ・答申書には、次項に示す各評価項目について、委員会としての評価結果を記述する。
- ・上記と異なる意見がある場合には、答申書にその意見を併記する。

#### 5)その他

- ・評価をよりの確なものとし、また評価に対する被評価者の理解を深めるため、課題評価委員会には研究実施責任者及び担当者を出席させ、議論に参加させるものとする。

### (2)評価項目

評価項目及び評価の視点（○印）は次のとおりとする。

また、研究開発を進めていく上での提言、留意点があれば、コメントする。

#### 1)研究開発の目的・意義

- 目的・意義は明確かつ的確か。
- 重要性、緊急性が高いか。  
(長期的に見て重要性が高いものか、将来に備えて今から対応しておくべき課題か、という視点を含む。)
- 社会的・経済的ニーズ、民間ニーズはあるか。
- 国の計画・方針との整合性
- サイクル機構が実施すべき課題か。
- 関連技術動向が的確に把握されているか。

#### 2)研究開発目標

- 目標の設定・水準は適切か。
- 目的・意義達成のために十分な目標設定となっているか（実用化のための開発目標は妥当か）。
- ブレークスルーすべき点が明確か。
- 各実用化候補概念の重点検討課題は妥当か。
- 状況に応じて適切に見直しが行われているか。
- 関連技術動向が的確に反映されているか。

#### 3)研究開発計画

- 第1期と第2期の違いは明確かつ妥当か。

- 研究開発項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等は具体的に妥当なものか。
- 資金計画（予算の規模・配分）は妥当であるか。
- 研究内容は独創性、創造性に富んだものになっているか。
- 計画見直しの機動性(状況に応じて計画の見直しを適切に行っているか。第2期途上でのマイルストーンの置き方は妥当か。)
- 使用する施設・設備は妥当か。
- 関連技術動向が的確に反映されているか。
- 実用化への道筋が適切に考えられているか。

#### 4)研究実施体制

- 組織、人員・人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用、運営等は妥当なものか。
- 他機関との協力・連携（国際協力を含む）は適切か（他機関の意見をとり入れる仕組みは妥当か）。

#### 5)研究成果

##### ①得られた成果の内容

- 達成された具体的な成果について、水準、質、意義、当該分野への寄与の程度等の評価
- 計画と比較した達成度（要因分析を含む）
- 費用対効果（投入した費用に見合った成果が得られているか。）
- 第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出は妥当になされているか。
- 幅広く技術が検討されているか（アイデア公募等の妥当性）
- 今後の課題は明確にされているか。

##### ②実用化との関係

- 実用化への技術的見通し
- 実用化のために必要な技術開発課題は何か。

##### ③得られた成果の普及、公開

- 技術移転を含む成果の普及は期待できるか。
- 波及効果は期待できるか。
- 成果発表、特許出願・取得等の実績
- 広報は積極的、効果的に行われているか。



6)今後の展開

○今後の展開、進め方等に関するコメント

7)その他(上記項目に当てはめ難い評価意見)

○事前評価における措置が適切に実施されているか。

8)総合評価

○上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断


(3)評価基準

各評価項目について評価を行い、進捗状況の妥当性や、目的・目標、進め方などの見直しの必要性等を総合的に判断する。

5. 評価結果（答申書）

平成12年8月4日

核燃料サイクル開発機構  
理事長 都甲 泰正 殿

研究開発課題評価委員会  
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)  
委員長 岡 芳明 

研究開発課題の評価結果について（答申）

当委員会に諮問[12 サイクル機構（企）002]のあった下記の研究開発課題の  
中間評価について、その評価結果を別紙のとおり答申します。

記

研究開発課題「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」

以上

**高速炉・燃料サイクル課題評価委員会報告書**  
**「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」の評価結果(中間評価)**

**評価結果の概要**

「高速増殖炉（FBR）サイクルの実用化戦略調査研究」は、安全性を大前提として、軽水炉サイクル及びその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し、将来の社会の多様なニーズに柔軟に対応できるよう開発戦略を提示するとともに、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ものである。

本研究は、第1期では、革新技術を採用した幅広い技術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。その後の第2期では、工学試験も踏まえて FBR サイクル全体として整合性を図り、実用化候補概念の絞り込み（複数）を行って必須の研究テーマを特定することとしている。

本評価においては、第1期の中間成果及び第2期計画の基本的考え方とその初年度となる2001年度の研究計画について評価を行った。

本研究課題は、すでに、新原子力長期計画の策定において、第三分科会で検討され、その推進が結論されたものであり、本研究開発の目的、意義は明らかであると言える。また、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）の中長期事業計画に照らしても、重要なミッションと位置付けられるものである。FBR サイクル開発戦略の意義付けとしての「将来の多様なニーズに柔軟に対応」するためには、FBR サイクル開発を取巻く環境等本研究の目的と意義を与える前提条件自体が変化し得ることを十分留意し、研究開発を進めるべきと考える。

軽水炉サイクル及びその他の基幹電源と比肩しうる経済性を達成するFBRサイクルの実用化候補概念の抽出に向けて、国内のみならず国外からもアイデア公募を実施し、既存技術の改良及び革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の評価と経済性見通しの検討が行われている。それらを基に、各々の課題の抽出並びに研究計画が、適切に進められており、中間成果として十分評価できる。

研究開発目標は、21世紀の社会展望、エネルギー資源の動向や環境負荷低減に対するニーズの分析に基づいて、FBR サイクルの意義付けが行われ、炉心燃料、プラントシステム、燃料サイクルシステムそれぞれについての的確に設定されていると評価す

る。また、評価手法についても、定量評価と定性的な相対評価を組合せ、多面的な視点から評価する手法を検討することとしており、適切である。実用化候補概念の抽出にあたって、6つの視点で評価することは良いが、「安全性」は大前提とし、「資源有効利用性」、「環境負荷低減性」、「核拡散抵抗性」、「技術的実現性」の各視点は、「経済性」と相互に関係することを認識し、検討を進めるべきである。また、本研究では、技術開発レベルの違う幅広い技術選択肢の検討を行っており、革新技術の技術的ポテンシャルといったものも十分考慮し、総合的な評価がなされるべきである。

研究開発計画は、第1期の成果を踏まえFBRサイクル実用化に向けて、さらに検討を深めるべく作成されており、適切であると評価する。第2期の研究計画は、抽出された実用化候補概念に対し必要な工学試験を行い、具体的な技術の成立性を確認することであり、第1期と第2期の研究計画の違いは明確となっている。その点から、2001年度の本研究の進め方は妥当であると判断する。また、第2期は、5年計画とやや長期になるが、3年目に中間まとめを実施し、研究計画のチェック・アンド・レビューを行うこととなっており、適切に計画が策定されている。本研究を進めるにあたっては、FBRサイクルの有望技術を抽出した後も、内外の技術開発動向を十分に把握し、変更すべき点は速やかに変更して、決して一本道の開発にならないよう心掛けるべきである。

実施体制については、サイクル機構、電力、メーカーからなる協力体制がとられおり、望ましい。また、国内外からのアイデアの募集や国内外の主要原子力研究機関との協力もなされており、適切である。本研究において、世界が認めるFBRサイクル技術の開発が必要であり、海外との共通技術の共同開発や海外施設の有効利用を積極的に実施することが重要である。

得られた成果の情報公開については、専門家のみでなく一般の方への情報発信も重要であり、インターネットだけに限らず、発信する方法、チャンネルについても一考するべきである。

研究成果を独創性、創造性に富んだものにできるかは、我が国独自のアイデアをどこまで生かして行けるかによる。今後の調査研究の努力に期待する。

## 評価結果

### (1) 研究開発の目的・意義

- 1) 目的・意義は明確に示されており、的確であると評価する。
- 2) 今後の日本の FBR サイクルシステムの構築を全体の目的として、第 1 期として革新的な技術も含め種々の技術評価、システム評価と包括的な範囲での技術選択は適切であると考ええる。
- 3) 国の計画・方針とは長計でも述べられているように整合性はとられており、さらに本課題はサイクル機構の重要なミッションとして位置付けられているものであると考える。
- 4) 本研究は、既に 1999 年度に事前評価を行っており、研究計画が妥当であるとの評価を受けている。当時と比較してこの目的、意義が変わるような状況変化は基本的にはないと考えられるので、第 1 期計画に対する当時の評価は今も変わらないと考える。また、この間に新原子力長期計画の策定作業が進められ、最終案は未完了ではあるが高速増殖炉サイクルを検討した第三分科会は既にその最終報告書をまとめ、その中で本計画を推進することとしている。従って、本研究開発の目的は明らかであり、かつその意義も認められ、2001 年度の計画も妥当と考える。なお、第 2 期計画全体については、次年度に評価される予定なのでここでは対象と考えない。
- 5) FBR 開発戦略の意義付けとして、「将来の多様なニーズに柔軟に対応」と記述されていますが、ここでそれは何を指しているのか具体的に示されていないと、サイクルとしての目指すべき性能や比較の対象となるものが具体的に上げられないと思う。
- 6) 中間評価のための説明資料の冒頭に散見される「将来の社会の多様なニーズ」あるいは「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」の表現には、注意を要する。これらは、本調査研究の目的と意義を支える前提条件であるが、不変のものではない。第 1 期調査研究が 1 年を経過した段階で、これらの前提条件に変化はないのか、いま少し丁寧かつ詳細に展望・検討しておく

べきであると思われる。

- 7) FBR サイクルの実用化候補概念としての有望な2～3の候補への絞り込みは是非とも必要であり、実施しなければならない。ただ注意しなければならないのは、絞り込まれた「有望候補」は絞り込みに用いられた「FBR サイクルの開発目標」のもとでの有望候補であることである。例えば「高増殖として増殖比1.2程度」を目標としなければ有望候補が変わってくる可能性もある。これを忘れて絞り込んだ結果だけを一人歩きさせてしまうと、FBR サイクル開発を取り巻く環境が変化したときに開発路線の見直しを怠り、無駄な投資をする危険性がある。この点には十分留意して研究開発を続けることを望む。
- 8) 軽水炉サイクル及び他の基幹電源と比肩する経済性のある FBR サイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、第1期の中間段階では国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良及び革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を行うことが当面の目的と意義と考えていることに対しては概ね妥当と判断できるが、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対しての第1期での目的が技術選択肢の検討評価との関連でどのように位置づけられているのか。
- 9) 事前評価において目的と意義については国の基本計画の方向とさらに研究開発の実施可能性の視点からも考慮され、適切妥当であると判断されており、この中間評価においても、第1期の目標に向けて調査研究が進展し、第2期以降の2015年までの本調査の枠組みとなすべき検討評価が示され、その目的と意義はよりはっきりしたものになっていると判断され、妥当である。
- 10) 目的と意義がより明確になってきているので、長期的観点では、広い視点からの調査研究成果をFBRサイクルの研究開発計画へ段階的評価としての的確に反映させ、FBRサイクルの実用化像を示せるかどうか重要となっており、本調査研究は緊急にそのタイミングを逃すことなく提示された計画にそって進められるべきものと考えられる。将来に備えて今から対応しておくべき課題に位置付けるかどうかについては、説明資料からは明確に読み取れない。
- 11) FBR技術の多様性と幅をまず認識し、社会的・経済的ニーズ（社会情勢変化、経済

性追及等)へ対応した広い視点から調査が進められている。これらのニーズへ柔軟性のある調査データを提供できるよう、調査を進めてほしい。

- 12) 関連技術の動向について、事前評価以降の状況について具体的な内容は必ずしもはっきり示されていないが、課題の抽出と解決方策に十分反映されているものと思われる。

## (2) 研究開発目標

### <全般>

- 1) 将来の FBR サイクルとしてどのような炉、燃料形態を追求するのかを明確にしてからそれに適した再処理方式を評価、選定していくことが最適なシステムを選ぶ場合に重要と思う。またその際にはなぜそのサイクルを最適なシステムとして選んだかの根拠を明確にしておいて頂きたいと思う。
- 2) 将来の FBR システムを選定する場合には、大型炉、集中再処理方式で行くのか、中型炉（モジュールタイプも含む）－再処理一体化方式（IFR タイプのような）で行くのかも重要な要素と考えられ、それによっては適した炉や再処理方式が異なってくることも考えられる。今年度にはこのような観点からの検討も実施して頂きたいと思う。
- 3) 研究開発目標は適当な項目が挙げられている。しかし、それぞれの項目の重要度は一律ではなく、しかも需要や社会環境により変化するものである。「安全性の確保を前提として競争力のある FBR サイクル技術を提示する」ことが全体の大目標であり、各研究開発目標の上位目標として掲げると全体のまとまりがよくなると思う。
- 4) FBR サイクル実用化の第 1 期は軽水炉の使用済燃料を処理して競争力のある FBR サイクルを実現することである。燃料サイクルや開発目標の整合性は FBR が主流となる第 2 期以降において考慮すべきものとする。実用化のブレークスルー（第 1 期）をもたらすことが何よりも重要である。研究開発では本来考えられていたものとは別の方向に展開し成功するケースも多いので、整合性にとらわれて計画の硬直を招かないようにしてほしい。これらのことをより明確にするため、実用化のため

の開発目標や考え方を軽水炉と併存する第1期と FBR が主流となる第2期に分類するとよいと考えられる。

- 5) 21世紀の社会展望、エネルギー資源の動向や環境負荷低減に対するニーズの分析に基づいて FBR サイクルの意義づけが行われ、研究開発目標が立てられている。超長期で考えれば、エネルギー資源や地球環境の制約が重要であるとの分析は正しいと考えられる。しかし、その時期については不確定性が大きいと考えられ、より多面的な分析や戦略が必要と考えられる。さらに実用化戦略調査研究が長期にわたっていることを考えると、常に世界の発電市場やエネルギー資源や産業の動向について情報収集を行うとともに研究の節目ごとに分析を行い、目標を再点検する必要がある。例えば POWER-GEN/International/Europe/Asia/Africa 等の会議は世界やその地域の市場やエネルギー産業の動向を知るよい機会である。資源量(ストック)が多量にあっても供給(フロー)が絞られると化石燃料の価格は高騰するので、エネルギーセキュリティの点でも FBR サイクルの実用化が期待されている。
- 6) FBR実用化のために越えなければならない最も高いハードルは、社会的コンセンサスの形成であると考え。現実問題として、ナトリウム冷却炉は過去の数々の事故(海外を含む)から危険であるというイメージが社会的に定着していることは否めない。これを覆すには大きな困難が伴う。よって「実用化戦略研究」としては、一次・二次冷却系の種別に伴うリスク(水素爆発の可能性や腐食性等)についても客観的に比較評価し得るよう、データを整えるべきであると考え。この検討結果次第では、技術的には困難であってもガス冷却や水冷却を積極的に進める方が実用化への近道であるという議論もあり得るのではないかと考える。
- 7) 2000年度の目標は、事前評価において大部分が評価済みであると考え。1999年度の成果に基づいてより具体化した目標が設定されている。第1期は幅広く各選択肢の持つ課題を明らかにすることが重要であるので、これらの目標が達成できれば第2期計画へ進む大きなステップとなる。大型のナトリウム冷却炉については経済性向上等検討がなされているが、他の冷却方式については、検討不足の感があるものもある。
- 8) 研究開発目標は、炉心燃料、プラントシステム、燃料サイクルシステムそれぞれについての的確に設定されていると評価する。概念設計研究と並行して要素技術開発を



実施することは大切である。

- 9) FBRサイクルの開発目標は事前評価で既に済んでいるので問題はないが、第1期段階の技術選択肢の検討評価を行う上での仕様のような評価指標設定について、特に燃料サイクルシステムにおける設定が未だ定まっていない状況にある。これらは技術評価を行う上で極めて重要であると思われるので、評価手法の構築を含めて今後十分検討をして、当面の目標をしっかりと設定して進めて欲しい。なお、各実用化候補概念の重点検討課題においては各技術の開発状況に違いがあることから、技術評価手法においてそれらをどのように配慮して考えているのか。この点についても十分説明ができるような考え方を構築してほしい。
- 10) 本研究を進める上で、ある程度具体的な目標時期を設定する（競争力のあるFBRサイクル技術を2015年頃までに提示する）ことの必要性は理解できるが、目標時期を固定的に考えずに検討を進めるべきである。
- 11) FBR燃料を低除染燃料に設定し、FBRサイクル、プラントシステムにおける安全性、経済性、資源有効利用、環境負荷低減、核拡散抵抗性の広い観点からの目標の設定はおおむね適切と評価できる。炉心損傷の恐れのある事象における炉心の工夫による原子炉内での自然終息、ヒューマンエラーの徹底防止等による安全性、廃棄物量の低減最小化等、新しい技術展開を図っている。ただ、経済性の2030年頃の設定、倍増予測30年からの増殖比1.2の設定にはなお説得性のある説明が必要である。
- 12) 実用化開発のための目標設定に対する詰めはまだ検討を要するとしても、FBRサイクルシステムの設計目標は的確に設定されていると評価できる。
- 13) ブレークスルーすべき点は、全般的に明確に示されている。ただ、かなり現実性の高いと思われる検討の中で、ナトリウム炉の新発電方式の検討のように、本調査研究の期間内に技術的に限っても結論が得られるか疑問の残る部分も見受けられる。
- 14) 第1期として技術の成立性からの各実用化候補概念の重点検討課題の抽出は、妥当と判断する。ただ、燃料サイクルシステムの再処理を湿式と乾式のコンビネーションで行くことに対し、日本独自のアイデアを如何に組み入れられるか、第2期の研究に向けてさらに明確な検討が必要であると考えられる。

- 15) 関連技術は、事前評価時の内容と大幅な変化はないと思われ、その動向は、FBR サイクルの基本的な考え方の中で十分に反映されていると思うが、関連技術動向について、明確に示して頂いた方がよい。

#### <評価手法>

- 16) 評価手法について定量評価と定性的な相対評価を組み合わせ、多面的な視点から評価する手法を検討することは適切である。
- 17) 本調査研究（第1期）の開発目標は、FBR サイクルの実用化候補概念を抽出することにあるが、それに先立って実用化候補概念に関する評価方式が大きな検討課題とされている。特に評価の視点として「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」「技術的実現性」が挙げられている。それぞれに重要な視点であることはいうまでもない。しかし、中間評価にあたって、次の点を指摘しておきたい。

中間評価のための説明資料によれば、「実用化候補概念の抽出にあたって、上記6つの視点に関して評価指標を作成し、さらに個々の評価指標を統合した総合指標を作成する」とされているが、個々の評価指標はもとより総合指標の具体的な作成基準が示されていない。これは評価方式の根幹をなすものであり、本来中間段階で示されるべきものと思われる。その際、問題となるのは、個々の評価視点（事象）が完全に独立ではないということである。例えば、「経済性」は、候補（FBR サイクル）概念の発電電力単位当り建設費用を指標とするかのごとく記されているが、建設費用は「安全性」や「資源有効利用性」を向上させれば増大する性質を有している。同じ発電能力を想定した候補（FBR サイクル）概念であっても、「安全性」や「資源有効利用性」を高めれば、間接的にせよ建設費用を増大させ、「経済性」を低下させる。いわば、「経済性」指標は他の指標と負の相関関係（あるいはトレード・オフの関係）を持っているのである。このような指標を並列させて、総合指標を作成することは、実用化候補を評価する上で問題が生ずる。事前評価の際に言及したこととも関連するが、まず「安全性」「資源有効利用性」「環境負荷低減性」「核拡散抵抗性」「技術的実現性」の指標を作成し、これらの総合指標を作成すべきである。これらは、いずれも「経済性」指標に影響を与える指標であり、仮に総合指標が同一のレベルであるときに、「経済性」が実用性評価の一つの指標となると考えるべきである。

### <安全性>

18) 安全設計については燃料形態及び冷却材の特徴を考慮して行うことは妥当である。それぞれの炉や燃料の特長を生かした設計が行われ、評価に反映されることを期待する。

19) 原子炉炉心溶融事故の進展や事象の重要度は冷却材の種類によって異なるので、その考え方を炉型によって整理することがまず必要である。軽水炉の炉心溶融事故に対する考え方は日本でも整理されつつあり、それらと矛盾せず、バランスのとれた考え方をする必要がある。例えば、再臨界は軽水炉では主要な事象ではなく、溶融燃料の冷却性が重要である。原子炉停止系は多重に設ける必要があり、その全数が機能を果たさない事は極めて考えにくい。冷却材ポイド係数との関連や万一の時の放出機械エネルギーとの関連において、確率的な考察も含めて合理的な考え方がなされる必要がある。受動的原理の採用はシステムの簡素化の点で魅力的な場合があるが、その信頼性の実証は必ずしも十分になされていないことに留意するべきである。

20) 現時点では安全性についてどのような定量的比較を目標としているのか不明確である。

### <経済性>

21) 経済性の目標は、日本国内の現在の軽水炉と競争できるとの視点で設定されており、妥当である。ただし、日本の軽水炉の経済性の目標自身も市場環境等により変化していくと思われ、さらに国際的な電力市場はより厳しいので、より意欲的な目標も必要である。

22) 実現が期待される FBR サイクル開発目標と各システム設計目標が設定できているが、コスト目標については代替エネルギー資源の価格動向を把握しタイムリーに変更できる柔軟性が必要である。

### <環境負荷低減>

23) FBR サイクルの開発目標のうち「TRU (超ウラン元素) 燃焼及び長半減期 FP (核分裂生成物) の核変換」は FBR の可能性を追求するという点では適切であるが、エネルギー資源の少ない日本が FBR サイクルの実用化にまず第一に期待してきた / しているものとは異なる。この技術は TRU の取扱い量の経験や多種類の同位体分

離の複雑さ、困難さから見てもまだ極めて初期の研究段階にある。これを他の開発目標と同時に達成すべきと考えることは計画全体の達成を危なくする恐れがあり、適切ではない。環境負荷低減性の開発目標は「発生する放射性廃棄物量の低減」即ち「リサイクルの推進」に重点を置くとよいと考えられる。

24) 高速炉は、熱中性子炉に比べてマイナーアクチニド (MA) を燃焼できたり、不純物の多い燃料でも炉心性能の低下が少ないという特徴を有している。FBR サイクルの検討にあたって、その特徴を再処理等にどう生かせるかとの視点は重要であるが、「競争力のある FBR サイクルを提示する」との大目標から考えれば、FBR の設計目標における MA 混入率や FP 混入率の数値は「炉心性能の大幅な低下をもたらさない範囲において」とでもすべきであり、数値目標として最初から挙げるのは適当でない。むしろ、炉型ごとに炉心性能の劣化をもたらさない上限の数値を設計結果として示すのが適当である。

#### <核不拡散性>

25) 本検討を通じて核拡散抵抗性についての定義、要件はどのようなことかも検討してほしい。

26) 核拡散抵抗性のうち「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」との目標を掲げるのは適切だが、技術の段階的発展性を考えるとそれを実用化の第1期で達成する必要は必ずしもないように思われる。実用化し、技術に習熟すれば、遠隔自動化、遠隔保守の経験を経て第2期に進むと考える方が実現性が高いと思われる。核不拡散の点では、軍事用のプルトニウムや核兵器に関わる機密情報の管理が民生用プルトニウム利用に伴う問題よりも圧倒的に重要である。これらと民生用プルトニウム利用を混同して論じることは正しくない。核不拡散性は国際政治、核物質や情報管理でまず対応すべき問題である。核拡散抵抗性の開発目標としては「核物質防護性及び保障措置対応が良好な設計」に重点を置くことでよいと思われる。

### (3) 研究開発計画

#### <全般>

1) 国内外の幅広い技術選択肢を検討し、候補技術の整理・集約ができているが、開発

期間が長期に亘るため、今は実現が難しくても将来可能となる技術もあり、現状の整理・集約による評価結果を固定化することなく、技術情報の収集・評価を行い評価結果を見直していく必要がある。

- 2) 再処理技術のチェック・アンド・レビューでは、軽水炉燃料を処理する第二再処理工場への採用技術としての面を考慮することが必要である。
- 3) 研究開発計画は第1期の成果を踏まえ FBR サイクルの実用化に向けてさらに検討を深めるべく作られており、適切であると評価する。第1期と異なり5年計画とやや長期になることから3年目に中間まとめをすることとなっており、適切に立てられた計画である。
- 4) サイクル機構に与えられた使命は FBR サイクルの実用化であり、その範囲ではよく計画が練られているが、FBR サイクル実用化の必要性そのものに関する国民全体の合意形成についても、もっとサイクル機構が前面に立って努力されることを望む。
- 5) プラントシステムに関してはナトリウム冷却炉と他の炉型とで検討の厚さが大きく異なるが、これはこれまでの知見の蓄積状況の違いからやむを得ない。検討の遅れている炉型については、技術的成立性に係わる課題にまず絞って検討を進めるという方針を支持する。
- 6) 第1期は実用化候補概念の技術的評価で、第2期は候補概念の可能な限り定量的な比較検討ができるレベルまで設計研究を深めることにあり、その結果として実用化概念として有望な2～3の候補に絞り込むことにあることから、第1期と第2期の目標の違いは明確であると判断できる。しかし、第1期での検討で設計データ等の不足のために妥当な評価ができていないかに疑問が残る。まだまだ先のことであるので、もう少し候補概念の検討をしてからでも遅くはないと思われる。
- 7) 一方、第1期で明らかになった課題に対して第2期でどこまでやり遂げられるかも重要な課題である。それは第1期での検討結果の成果の度合いと第2期での予算及び研究開発計画と研究開発環境の整備を含めた研究開発体制にかかってくると思われる。

- 8) 研究開発（R&D）段階ではややもすると廃棄物に対する検討が甘くなることから、廃棄物評価が適切に行われるような研究開発計画を考えていくことが望まれる。その意味で第1期での候補概念の技術評価において廃棄物に対しての第2期で検討すべき重点課題の抽出は極めて重要なものになると思われる。
- 9) 中間成果の分析とそれを受けた課題の抽出がなされ、第2期への展開に重要な2000年度の計画も具体的に明らかにされており、その意味で、適切な見直しが行なわれていると判断される。
- 10) 第1期の成果を見通し、その成果を詳細に検討してFBRサイクル実用化候補概念の絞り込みを第2期に行うことが明らかにされている。その基本的な考え方と2005年までの調査研究の展開も明確になっており、妥当である。
- 11) 研究開発項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等はいずれも具体的に示されており、妥当である。資金計画(予算の規模・配分)は妥当である。第1期での燃料サイクルシステムへの投資を十分反映できる成果を出して、第2期での絞り込みに入ってもらいたい。
- 12) 研究内容を独創性、創造性に富んだものにできるかは、日本独自のアイデアをどこまで生かして行けるか、今後の調査研究の成果にかかっていると思う。
- 13) 計画の見直しへの対応とマイルストーンの置き方については妥当であるが、その時点でのチェック・アンド・レビューについて、絞り込みのための課題の評価指数等定量的な目標を的確に設定していくことが必要である。
- 14) 使用する施設・設備は、適切である。

#### <第1期>

- 15) FBRサイクルとしての技術選択肢として有望技術を抽出した後も、内外の技術開発動向を十分に把握し、変更すべき点は速やかに変更して、決して一本道の開発にならないように多岐路線を継続する必要がある。
- 16) 第1期の研究計画は、実用化候補概念の評価体系を確立し、確立された評価体系に

したがって実用化候補として複数の FBR サイクル・システム概念を抽出することである。

#### <第2期>

17) 本評価にしたがって、さらに5年間の研究を進め、そこでチェック・アンド・レビューを受けることが適切と思う。

18) 第2期の展開については「競争力のある FBR サイクル技術を提示する」との全体目標との関連で第1期の中間成果がどうまとめられたかが明確でない。実用化候補概念として絞り込みを行うことは、実用化の可能性が示される場合は必要であるが、それが十分に示されているとは言い難い。プラントシステムについては改良をさらに追求し合理化される根拠をもっと説明する必要があるように思われる。ただし、混合酸化物 (MOX) 燃料要素技術開発、再処理、燃料製造等、燃料サイクルシステムの主要要素技術のように炉型に共通な要素技術開発については第2期の計画を進めることは適切と考えられる。

19) 第2期の研究計画は、抽出された実用化候補概念を具体的な技術として実証することである。いうまでもなく、すべての実用化候補概念が実証可能ではない。その際には、改めて第1期における評価指標（特に「技術実現性」）の事前設定に立ち返るべきである。第1期と第2期の研究計画の違いは明確であるが、第2期途上で第1期の研究計画に基づく研究成果を再検討できるような柔軟性を持たせておくべきであると思われる。

20) 第2期計画では、実用化候補概念への絞り込みを、必要な試験を含めて行うとされており、2001年度の本研究の進め方としては妥当と考える。ただし、照射試験準備等も含まれているので第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるような計画を立てることが必要である。

#### (4) 研究実施体制

##### <体制、運営>

1) 実施体制については、サイクル機構、電力、メーカーからなる協力体制がとられているのは素晴らしい。国内外からのアイデアの募集や国内外の主要原子力研究機関との協

力もなされており、適切である。

- 2) この1年間に研究体制は協力機関、委員会等を含めよく準備されてきた。国内の他機関と連携を取り、密接な協力の下に進めることは、技術の継承、発展の上でも大変有益である。
- 3) 研究実施体制は適切である。人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用等、第1期の実績から運営はうまくいっているものと評価できる。今後も他機関との協力・連携に努力されたい。
- 4) 第1期での体制を第2期ではさらに強化することを考えているようである。他機関との連携強化を含めて具体的にどのような方策を考えているか。アイデア公募等による新しい芽の発掘以外にも、第1期で明らかにされた今後の検討課題に対して、必要と考えられる基礎・基盤的な研究課題を含めて研究課題への研究協力等、研究実施体制の幅広い展開も必要となると思われる。
- 5) サイクル機構内の体制、外部との連携及び委員会等の活用等妥当である。国際協力を含む他機関との協力・連携についても、強化する方針が示されている。アイデア公募等積極的な対応も進んでいる。国際協力も適切に行われている。

#### <国際協力>

- 6) 燃料サイクル技術としては、これからはわが国だけではなく、世界が認める技術の開発が必要と思う。そのための必要な要件を十分取り入れるとともに、日本ですべて技術開発をするのではなく、各国で進めているサイクルシナリオ(欧米が現在検討している分離変換も含む)の共通技術の共同開発や、海外施設の有効利用が重要なことと思う。このような形での開発シナリオの構築をお願いしたい。

#### <アイデア公募>

- 7) アイデアを国内外から集めるための第1期に行われた努力は十分であり、多くの応募があり有益であったと考える。このような公募制度はアイデア創出を刺激する効果があるので、第2期でもアイデアを公募する制度を継続させることが好ましい。その際、アイデア公募の規模や方法、アイデアの選定方法などを明らかにするべき



であるとする。他機関の意見を採り入れる努力は評価できる。

8) 公募研究も成果が出ているが、今後は段階的に課題を絞っていくことも考えられる。

## (5) 研究成果

### 5-1) 得られた成果の内容

#### <全般>

- 1) 研究実施体制・研究予算・研究成果等については、概ね妥当と思われるが、現時点で適切な中間評価を行うことは困難である。
- 2) まだ本研究は始まって1年であり、独創性のある成果を挙げられる段階ではなく、少し長い目で見ることが必要がある。研究の内容や進捗状況については、積極的に公表されているので計画は概ね達成されている。特に、ナトリウム冷却炉と再処理については、これまでの経験を生かした良い成果が出ている。
- 3) 短期間に一定の成果をあげていると評価する。第2期に進むに十分な準備がなされつつあると判断できる。実用化に向けても電力との協力体制のもとで厳しい目標設定のもと課題が整理され、その解決に向けて努力されていると評価できる。
- 4) 評価項目の研究成果の項について、1999年度の事前評価報告書において、「第1期は実用化候補概念を、従来技術にとらわれず、またデータ不足等の理由から新技術を落とすことなく複数抽出し、実用化までの開発シナリオを策定する。」となっている。この様な観点から、今回の中間評価報告書をながめた場合に、第2期に向けての検討を行う上で、現時点で候補を絞りすぎと考えられる。
- 5) 第1期の中間での成果は、計画にしたがった進展があり、十分であると評価する。費用対効果は、まだ1年の成果であり、その効果が見合ったものとなっているかどうか、まだ判断は困難である。第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出への成果は進んでいると思われる。

## <炉心燃料>

- 6) 炉心燃料に対する中間成果と課題、2000年度の計画はよく整理されているように思われる。なお、窒化物燃料の炭素14の生成は廃棄物の処理処分時の核分裂生成物の放射能やその性状、リスク評価における重要性を考慮して合理的に検討されるべきである。
- 7) FBRの燃料は、軽水炉に比べて不純物の許容量を高くとれる可能性があり、これに基づく燃料サイクルの改良方策を検討するとの視点は適切である。
- 8) 「窒化物燃料は、事故時の窒素解離問題等によりガス炉との組み合わせを前提に考える」となっているが、事故時に窒素解離圧が問題になる程、炉心温度が上昇しなければよいと考える。また、窒素が解離すると金属ウランが析出し、その金属ウランが窒素を吸収し金属/窒化物二相共存となり窒素圧は一定となることも予想される。従って窒化物燃料をガス炉に限定する必要性は時期尚早と考える。またこのような論理ならば、酸化物の酸素とナトリウムとの反応の方が事故時の挙動としては重大であり、酸化物もガス炉または水炉により適しているとも考えられないか。従って中間評価については、「窒化物燃料については、事故時のガス解離圧評価を行う研究を第2期で行う」とするのが妥当と考える。
- 9) 第1期の中間成果として幅広い候補概念技術の検討及び概略的な評価を行うことについての目標はほぼ達成されているものと思われるが、今後の課題については、技術検討会でも十分議論されることを期待する。そこでの結果を踏まえて最終的な結果としてまとめてほしい。

## <プラントシステム>

### [ナトリウム炉]

- 10) 検討対象としたFBRシステムは第1期としては包括的であり、適切である。検討結果もナトリウム冷却炉についてはよく整理されているが、ナトリウム冷却炉については過去に行われた実証炉の研究開発の成果や経験をできるだけ活用すべきであるが、それに対する言及が少ないように思われる。
- 11) コストダウン方策については、技術的な開発項目や不確実さの大小も反映して合理的に取捨選択される必要がある。ナトリウム冷却炉のループ数の削減については炉

内流動、熱応力、流量喪失時の挙動等を考慮しつつ、機器の標準化を含めて大出力炉に至る開発の考え方を整理する必要がある。液体金属冷却炉は炉心のみならず、2次系や補機系を含むプラント全体を検討する必要がある。

12) 大型ナトリウム冷却炉については次の点をさらに示す必要がある。

- a. ナトリウム冷却炉等液体金属冷却炉は燃料交換、貯蔵、カバーガス、配管の予熱系など補機系がプラントコストに占める割合が大きいとされている。これらについてどう改良がなされるのか明らかでない。炉容器と1次系の図のみならず、プラント全体についてこれらも含めた検討結果を配置図とともに示す必要がある。
- b. スーパーフェニックス、EFR（ヨーロッパ高速炉）等、欧州の大型炉のコスト分析やその結果との比較検討を行い、今回のコスト低減の程度やそれぞれの項目の寄与が合理的であることを示す必要がある。ロシアの高速炉のVVER（ロシア型PWR）との比較も参考になると思われる。
- c. 機器合体、ループ数削減、12Cr鋼、免震等の採用については、コストダウンのみならず、それぞれ機器設計や保守の複雑さ、ポンプや熱交換器の大型化、材料費、免震設備のコストなどコスト上昇要因もあると思われる。

設計から見ると、開発要素が大きいものが並んでいる。3次元免震はまだできないが、研究開発の方向としては妥当と考えられる。機器合体については無理をしている感じがある。むしろ、実証炉程度の方が設計として現実味があると思われる。いずれにしても、今回の検討で画期的な改良点が出たというわけではなく、軽水炉に優るという目標をナトリウム冷却炉で達成するのは、燃料サイクルコストを別にしても容易ではないという印象である。しかし、コストは様々な要因があり、特に開発途上にあるものは大きい誤差を伴った1つの推定あるいは期待でしかない。従って、コスト低減効果については判断し難いが、超長期エネルギーセキュリティを考えるとナトリウム冷却高速炉が必要ということ是可以する。

#### [重金属炉]

13) 重金属冷却炉については、鉛ビスマス冷却が鉛冷却に比べて優れていること、中小型炉に適しているとの中間評価結果に同意できる。

- 14) 重金属冷却炉は液体金属冷却炉の一種であり、高速炉としての炉心特性上の特徴はナトリウム冷却炉に近い。液体金属冷却炉の中ではナトリウム冷却が一番優れているように思える。ナトリウム冷却炉に比べて中間熱交換器とループが不要となる利点はあるが、それでもPWRと同じである。

#### [ガス炉]

- 15) ヘリウム冷却炉については、ガスタービンとの組合せによる経済性向上の可能性を検討するのは適切である。炉心溶融時のシナリオと対策については再臨界回避が重要かどうかも含めて設計との関連においてガス冷却炉の考え方を整理することがまず必要である。
- 16) 火力発電は燃焼でガスを加熱し、ガスタービンを回しているが、原子炉冷却材としてのガスの弱点は熱伝達特性の悪さにある。これらの点は第1期のまとめでも述べられている。ガスタービンで発電する場合は、再生熱交換器、原子炉等の寸法をあたる必要がある。出力密度が高い高速炉とガス冷却との相性、具体的には定常時、事故時の炉心冷却性も重要な検討項目である。ガス冷却で大型化によりスケールメリットを追求する場合はプレストレストコンクリート原子炉容器（PCRVC）、蒸気発生器（SG）、ガス循環器等の製作性などからくる出力の上限があり、それが第1期の検討では定量的にも定性的にも根拠をもって示されておらず、他の冷却方式と比べた相対的なメリットが不明である。熱中性子炉では、ガス冷却炉は軽水炉に比べてコストデメリットがあり、それをガス冷却高速炉がどう克服するつもりかを説明する必要がある。

#### [水炉]

- 17) FBRシステムとして狙う炉心性能を明記しながら、それを達成することが困難な水冷却炉を、この実用化戦略調査研究の中で取り上げられる理由が不明である。
- 18) 他の炉型に比して全体的に検討が不十分である。ナトリウム冷却炉に比べて増殖比が低い、異なった特徴を持っている。安全性の考え方も軽水炉のものをベースに考えるべきであり、開発目標や評価の視点が液体金属冷却炉と共通でよいかどうかやその果たせる役割が同じかどうかを再検討する必要がある。コスト評価は軽水炉等をベースにできるので、他の冷却方式より、より不確定性は小さくできると考えられる。また、軽水炉からの延長としてPA上受け入れやすい炉と考えられる。第

2期ではすべて「原研との協力の下で検討」となっているが、他に大きな技術的問題点がなければJNCにおいても水炉の諸課題を積極的に検討すべきと考える。

#### [溶融塩炉]

- 19) 溶融塩炉の評価で塩化物溶融塩炉が評価されているが、溶融塩炉としては塩化物よりもフッ化物を用いた溶融塩炉のほうが、これまでに米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)や日本において実績例や検討例が多いと思うが、なぜ選ばれたのか。

#### [モジュール炉、小型炉]

- 20) 小型モジュール炉の利点は初期投資が小さくなることであるが、最大の問題点は経済性の克服であり、小型にしても出力に比例して縮小削減できない機器やプラント設備は多い。例えば遮蔽、建屋、補機系や安全系の系統数やバランスオブプラント等である。運転・保守費についても、それが出力当りにしても削減される正当な理由を示す必要がある。工場生産は魅力的であるが、そこで作り運搬できる重量には制約がある。造船ドックを利用するバージ建造方式についても、軽水炉での検討は多くあるので、それらを踏まえた上でブレークスルーできる点を示す必要がある。モジュラー炉によるコストダウンは、他産業のモジュラー生産によるコストダウン例などをもって根拠を示す必要がある。現在の説明では、競争力のあるFBRサイクルをこれらのシステムで実現できるとの見込みや理由が根拠を持って示されていない。放射性ポロニウム生成などよりも、これらの点について前途が開ける理由をまず示す必要がある。最近よくなされる原子炉の出力の大小の議論は市場の議論であり、革新技术と直接関連しない部分も多いことに注意すべきである。また、小型炉は、中大型炉に対する補完的なFBRシステムなのか、もうひとつ別のオプションなのかも含めてその位置付けを明確にして頂きたい。

#### <燃料サイクル>

- 21) フッ化物揮発法に関しては、プラントの運転方法を変えるだけで、純粋なプルトニウムが回収されることにならないかの検討もお願いしたい。核拡散抵抗性の観点からはこのような可能性を持ったものと原理的にあるいは容易な施設の改造ではそれが不可能なものとは、世界に認知される場合に異なってくるように思う。
- 22) 酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つを検討するとなっているが、酸化物電解法はロシアとの共研でデータも入り同じバッチ式の金属電解法と共通

的検討課題も多いと考えられる。一方フッ化物法はフロー式であり、同じフロー式の湿式法との共通点も予想される。3種類から2種類を選択して第2期に実施するのではなく、湿式-乾式ハイブリッドを模索したり、バッチ式とフロー式とを比較・検討する等のために、第2期においても、技術的な差が明確でない限りあまり候補案を絞るべきではない。

## 5-2) 実用化との関連

23) この1年間は、これまで世界各国で行われた研究、開発成果のレビューを中心に行われたと考えるが、これまでに検討された概念は、実用化の可能性を持つものは、ほとんど含まれているとともに重要な技術的課題が抽出されている。もちろん、これらの課題の中には、既に認識されているものも含まれているが、それらの技術的成立性、解決可能性の評価、必要な資源や期間等の評価は、決して易しくないのもそこに今後の成果が問われることになるので、独創性を含む展開を期待する。

24) 定量的評価が比較的可能な技術的成立性は、実用化に向けてその検討の道筋が明確にされていると思われるが、経済性、環境負荷等の今後の社会情勢の変化等必ずしも定量的でないファクターをどのように考えていくのか、実用化への説得性を高める検討が必要である。

25) 現時点では、まだ、実用化への見通しについての判断はできない。実用化のために必要な技術開発課題についても、まだ実用化候補が絞られていないので、コメントできない。

## 5-3) 得られた成果の普及、公開

26) 多くの添付資料も駆使されて、きめ細やかに説明されたと思う。しかし今後の情報公開については、特殊な知識を持つ専門家に向けてだけでなく、一般の生活者への情報発信も、戦略として重要になってくる。対象をいくつか絞り、それぞれに応じた解りやすい情報提供も必要と考える。

27) 情報発信はインターネットだけに限らず、発信する方法、チャンネルにも考える余地があると思う。

28) 最近、環境教育、エネルギー教育の必要性が叫ばれている中、若年層へのアプローチも工夫してみてもどうか。

29) 成果の公表について懸命な努力をされていることは理解できるが、関係者や一部の人間を除いて関心が低いのも事実である。実用化戦略調査研究は成果が国民に理解されなければ意味がない。この努力に関しては「十分」ということはないと認識され、さらに一層努力されることを望む。

30) 技術移転を含む成果の普及の可能性は大きいと思われる。広報は積極的、効果的に行われている。

## (6) 今後の展開

### <全般>

1) 第2期においても、国内外の研究機関と協力し、有用技術があれば積極的に評価して取り込んでいくことが必要である。

2) できるだけ複数のオプションがもてるような形での検討やR&Dへ向けての方向性の提示を望む。

3) ナトリウム冷却炉-MOX燃料-湿式処理の組合せが、サイクル機構として今までも知見を集積しているところであり、このシステムについての検討が最も深くなるのはある意味で当然とも言えるが、「実用化に至る最適の組合せを探る」ためには、でき得る限り平等な条件で各組合せ間の比較ができなくてはならないと考える。その意味では、今後の検討は、従来サイクル機構が手がけてこなかったシステムについての情報収集を中心に進めていただけるようお願いしたい。

4) ナトリウム冷却炉-MOX燃料-湿式処理の組合せについては、具体的な課題や2000年度計画が細かく示されているが、それ以外のシステムについては、挙げられている課題等に具体性が乏しいとの印象を持つ。

5) 第1期については既定方針通り進めるとともに、第2期についても今回説明のあった計画・体制で実施することに賛成する。

6) 短期間で幅広い実用化候補概念の技術評価とその経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出をされていることについては申し分ないと思われるが、課題評価委員会で、成果の評価を行うことに対してのコメントを記します。課題評価委員会のメンバーは幅広い分野の専門家から構成されており、高速炉・燃料サイクルシステムの課題を個々の成果を基に総合的に評価することが主たる役割と思われる。しかるに、個々の成果についての検討評価については外部の専門家を含めた専門家グループによって予めなされたものと考えているものと思われる。今回の課題に対しては三つの技術検討会が設置されており、そこでの検討結果としての成果と受けとめることになるのか。このあたりを明確にして進めてほしい。

#### <燃料サイクル>

- 7) 乾式法に関してそれぞれの方法に利点を見出しながら、あるいは熱力学的な基礎データから達成を予想しているが、重要となるrequirementに関しては、実験での確認(できれば実燃料でそれが時間的に困難ならば模擬燃料で)が必要と思う。それを見極める前に技術選定をしてしまうと、そのrequirementが達成できない場合に、オプションがなくなってしまう。このことを十分考慮しての技術選定をお願いしたい。
- 8) 説明資料4(3)の3)の再処理システムの検討の中で、①に高レベル廃液からのTRU回収技術(SETFICS)プロセスがあるが、同様の研究はこれまでに原研でも実施されて実証試験まで行っている。新しい研究を立ち上げる前に、それらとの比較検討を経てから研究に取り掛かることが必要だと思う。
- 9) これは一つの例であるが、乾式再処理の金属電解法に関して塩素化溶解法が最初に検討されているが、米国のアルゴンヌ国立研究所(ANL)で提案のLi還元法や最近ロスアラモス国立研究所(LANL)のATWシステムでは使用済み燃料からウランだけを湿式法で回収し、その後乾式法を適用して超ウラン元素を回収する方法も提案されている。このような各要素技術を組み合わせたより効率的なシナリオ、プロセスの検討も実施されることを望む。

#### (7) その他

- 1) 第1期は、有望な実用化候補概念を抽出するのみならず、FBRサイクルの実用化技術の確立までの開発シナリオ(開発計画)を策定する期間でもある。



- 2) 情報公開にあたり、いくつかの対象レベルを設定して、広く本調査研究の成果とFBRサイクルのあるべき姿を的確に示して行ってほしい。

## (8) 総合評価

- 1) 事前評価のコメントが適切に反映されて研究が進められているとともに、第1期の中間評価として、課題の抽出、研究計画、成果、処置事項等いずれも適切に進められていると評価する。
- 2) 短い時間で幅広く炉、燃料製造、再処理まで検討されていると思う。またそれぞれについて特徴やポテンシャルの評価がされていると思う。これから5-10年でそれらを実証し、プロセス設計がなされることになると思うが、今回各技術が有すると評価されたポテンシャルの中には、模擬燃料や実燃料で実証してからでないと確認できないことがあると思うので、絞り込みだけを優先しすぎて他の有力なオプションがなくなってしまうことがないようにお願いしたい。
- 3) 本実用化戦略調査研究を通し、将来を見据えたFBRとして望ましい特性を備えたシステムが構築されることを願う。
- 4) 本研究課題は、既に新原子力長期計画の策定において第三分科会で検討され、その推進が結論されたものであるとともに、事前評価時点から重要な情勢変化はないので研究開発の目的、意義は認められる。2000年度の開発目標も、前年度の成果に基づきより具体化され、第2期計画につながる明快な目標、計画の設定となっている。
- 5) ナトリウム冷却炉、湿式再処理など経験の深いものは、良く検討が進んでおり、第2期計画での絞り込みに有意義な成果を得ている。経験の少ない重金属やガス冷却炉については、重要な課題は抽出されているが、2000年度以降のさらなる検討の進捗に期待したい。
- 6) 第2期計画では各種試験や燃材料照射が計画されているが、これらは一般に長期間要することがあるので、第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるように綿密な計画を立てるとともに、評価基準の十分な検討が必要である。

- 7) 研究実施体制については、大変良く準備され国内の関連機関との協力も進み、意見も交換できる体制が整った。公募研究も多くの応募があり、有益であったので第2期計画でも工夫を加えながら継続することを期待する。
- 8) 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究は、その第1期計画が予定の成果をあげつつあり、第2期に向けて課題を明確にしつつある。第2期計画はその目標、資金計画、実施体制が的確に考えられていること、及び第1期の実績から考えて、十分な成果を上げるであろうと考えられる。したがって予定通り第1期をまとめあげ、第2期を開始させることに賛成する。
- 9) 軽水炉サイクル及び他の基幹電源と比肩する経済性のあるFBRサイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良及び革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を基に、実用化候補概念の技術的評価と経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出を行っていることについては中間評価としては十分評価できる。なお、実用化候補概念の技術評価で第1期の残り第2期に向けての実用化候補概念の抽出に向けての検討がなされることになるが、各候補概念の技術開発状況の違いも大きいことのみならず技術評価手法の構築の考え方においても同じレベルで考えることの難しさを考えると、当初幅広く候補概念技術を検討することを考えたことから、第1期では各候補概念の今後の検討課題を明確にし、その中でデータ不足のため妥当な評価が難しい課題の抽出を行い、第2期の中間とりまとめ段階までにそれらの再検討を行い、その結果をもとに第2期での候補概念の抽出を考えてもよいのではないかとと思われる。

【意見1】

本研究は 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ており、第1期と第2期より構成されている。本評価においては第1期の中間成果及び第2期計画の基本的考え方とその初年度となる2001年の研究計画について評価を行った。

○研究開発の目的意義

第1期と第2期の研究の目的は適当である。

- 研究開発目標は適当な項目が挙げられている。しかしそれぞれの項目の重要度は一律ではなく、しかも需要や社会環境により変化するものである。「安全性の確保を前提として競争力のある FBR サイクル技術を提示する」ことが全体の大目標であり、各研究開発目標の上位目標として掲げると全体のまとまりがよくなるのではないか。

FBR サイクルの開発目標のうち「TRU 燃焼 長半減期 FP の核変換」は FBR の可能性を追求するという点では適切であるが、エネルギー資源の少ない日本が FBR サイクルの実用化にまず第一に期待してきた/しているものとは異なる。この技術は TRU の取扱い量の経験や多種類の同位体分離の複雑さ、困難さから見てもまだ極めて初期の研究段階にある。これを他の開発目標と同時に達成すべきと考えることは計画全体の達成を危なくする恐れがあり、適切ではなかろう。環境負荷抵抗性開発目標は「発生する放射性廃棄物量の低減」即ち「リサイクルの推進」に重点を置くとよいと考えられる。

高速炉は、熱中性子炉に比べて MA を燃焼できたり、不純物の多い燃料でも炉心性能の低下が少ないという特徴を有している。FBR サイクルの検討にあたって、その特徴を再処理等にどう生かせるかとの視点は重要であるが、「競争力のある FBR サイクルを提示する」との大目標から考えれば、FBR の設計目標における MA 混入率や FP 混入率の数値は「炉心性能の大幅な低下をもたらさない範囲において」とでもすべきであり、数値目標として最初から挙げるのは適当でなかろう。むしろ、炉型各に炉心性能の劣化をもたらさない上限の数値を設計結果として示すのが適当である。

核拡散抵抗性のうち「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」もこの目標を掲げるのは適切だが、技術の段階的発展性を考えるとそれを実用化の第1期で達成する必要は必ずしもないように思われる。実用化し技術に習熟すれば、遠隔自動化、遠隔保守の経験を経て第2期へ進むと考える方が実現性が

高いのではないか。核不拡散の点では、軍事用のプルトニウムや核兵器に関わる機密情報の管理が民生用プルトニウム利用に伴う問題よりも圧倒的に重要である。これらと民生用プルトニウム利用を混同して論じることは正しくない。核不拡散性は国際政治、核物質や情報管理でまず対応すべき問題である。核拡散抵抗性の開発目標としては「核物質防護性及び保障措置対応が良好な設計」に重点を置くことでよいと思われる。

FBR サイクル実用化の第1期は軽水炉の使用済燃料を処理して競争力のあるFBR サイクルを実現することである。燃料サイクルや開発目標の整合性はFBRが主流となる第2期以降において考慮すべきものとする。実用化のブレークスルー（第1期）をもたらすことが何よりも重要である。研究開発では本来考えられていたものとは別の方向に展開し成功するケースも多いので整合性にとらわれて計画の硬直を招かないようにしてほしい。

これらのことをより明確にするため、実用化のための開発目標や考え方を軽水炉と併存する第1期とFBRが主流となる第2期に分類するとよいと考えられる。

21世紀の社会展望、エネルギー資源の動向や環境負荷低減に対するニーズの分析に基づいてFBRサイクルの意義づけが行われ、研究開発目標が立てられている。超長期で考えれば、エネルギー資源や地球環境の制約が重要であるとの分析は正しいと考えられる。しかし、その時期については不確実性が大きいと考えられ、より多面的な分析や戦略が必要と考えられる。さらに実用化戦略調査研究が長期にわたっていることを考えると、常に世界の発電市場やエネルギー資源や産業の動向について情報収集を行うとともに研究の節目ごとに分析を行い、目標を再点検する必要がある。例えばPOWER-GEN/International/Europe/Asia/Africa等の会議は世界やその地域の市場やエネルギー産業の動向を知るよい機会である。資源量（ストック）が多量にあっても供給（フロー）が絞られると化石燃料の価格は高騰するので、エネルギーセキュリティの点でもFBRサイクルの実用化が期待されている。

実施体制については、サイクル機構、電力、メーカーからなる協力体制がとられているのは素晴らしい。国内外からのアイデアの募集や国内外の主要原子力研究機関との協力もなされており、適切である。

経済性の目標は、日本国内の現在の軽水炉と競争できるとの視点で設定されており、妥当である。但し、日本の軽水炉の経済性の目標自身も市場環境等により変化していくと思われ、さらに国際的な電力市場はより厳しいので、より意欲的な目標も必要ではなかろうか。

評価手法について定量評価と定性的な相対評価を組み合わせ、多面的な視点から評

価する手法を検討することは適切である。

検討対象とした FBR システムは第 1 期としては包括的であり、適切である。検討結果もナトリウム冷却炉についてはよく整理されているが、気のついた点について以下に意見を述べる。なお、ナトリウム冷却炉については過去に行われた実証炉の研究開発の成果や経験をできるだけ活用すべきであるが、それに対する言及が少ないように思われる。

安全設計については燃料形態及び冷却材の特徴を考慮して行うことは妥当である。それぞれの炉や燃料の特長を生かした設計が行われ、評価に反映されることを期待する。

原子炉炉心溶融事故の進展や事象の重要度は冷却材の種類によって異なるので、その考え方を炉型によって整理することがまず必要である。軽水炉の炉心溶融事故に対する考え方は日本でも整理されつつあり、それらと矛盾せず、バランスのとれた考え方をする必要はある。例えば、再臨界は軽水炉では主要な事象ではなく、溶融燃料の冷却性が重要である。原子炉停止系は多重に設ける必要があり、その全数が機能を果さない事は極めて考えにくい。冷却材ボイド係数との関連や万一の時の放出機械エネルギーとの関連において、確率的な考察も含めて合理的な考え方がなされる必要がある。受動的原理の採用はシステムの簡素化の点で魅力的な場合があるが、その信頼性の実証は必ずしも十分になされていないことに留意するべきである。

コストダウン方策については、技術的な開発項目や不確実さの大小も反映して合理的に取捨選択される必要がある。ナトリウム冷却炉のループ数の削減については炉内流動、熱応力、流量喪失時の挙動等を考慮しつつ、機器の標準化を含めて大出力炉に至る開発の考え方を整理する必要がある。液体金属冷却炉は炉心のみならず、2 次系や補機系を含むプラント全体を検討する必要がある。

炉心燃料に対する中間成果と課題、2000 年度の計画はよく整理されているように思われる。なお、窒化物燃料の炭素 14 の生成は廃棄物の処理処分時の核分裂生成物の放射能やその性状、リスク評価における重要性を考慮して合理的に検討されるべきである。

重金属冷却炉については、鉛ビスマス冷却が鉛冷却に比べて優れていること、中小型炉に適しているとの中間評価結果に同意できる。

ヘリウム冷却炉については、ガスタービンとの組合せによる経済性向上の可能性を検討するのは適切である。炉心溶融時のシナリオと対策については再臨界回避が重要かどうかも含めて設計との関連においてガス冷却炉の考え方を整理することが

まず必要である。水冷却炉についても同様である。

FBRの燃料は、軽水炉に比べて不純物の許容量を高くとれる可能性があり、これに基づく燃料サイクルの改良方策を検討するとの視点は適切である。

第2期の展開については「競争力のあるFBRサイクル技術を提示する」との全体目標との関連で第1期の（中間）成果がどうまとめられたかが明確でない。実用化候補概念として絞り込みを行うことは、実用化の可能性が示される場合は必要であるが、それが十分に示されているとは言い難い。プラントシステムについては改良をさらに追求し合理化される根拠をもっと説明する必要があるように思われる。但し、MOX燃料要素技術開発や再処理や燃料製造等、燃料サイクルシステムの主要要素技術のように炉型に共通な要素技術開発については第2期の計画を進めることは適切と考えられる。

プラントシステムについて検討が不十分と考える理由を以下に述べる。

- 1) 大型のナトリウム冷却炉については経済性向上の分析がなされているが、他の冷却方式についてはそれが明らかでない（理由を根拠をもって示す必要がある）。
- 2) 大型ナトリウム冷却炉については次の点をさらに示す必要がある。
  - a. ナトリウム冷却炉等液体金属冷却炉は燃料交換、貯蔵、カバーガス、配管の予熱系など補機系がプラントコストに占める割合が大きいと言われている。これらについてどう改良がなされるのか明らかでない。炉容器と1次系の図のみならず、プラント全体についてこれらも含めた検討結果を配置図とともに示す必要があるのではないか。
  - b. スーパーフェニックス、EFR等、欧州の大型炉のコスト分析やその結果との比較検討を行い、今回のコスト低減の程度やそれぞれの項目の寄与が合理的であることを示す必要がある。ロシアの高速炉のVVERとの比較も参考になろう。
  - c. 機器合体、ループ数削減、12Cr鋼、免震等の採用については、コストダウンのみならず、それぞれ機器設計や保守の複雑さ、ポンプや熱交換器の大型化、材料費、免震設備のコストなどコスト上昇要因もあるのではないか。

設計から見ると、開発要素が大きいものが並んでいる。3次元免震はまだ出来ないが、研究開発の方向としては妥当と考えられる。機器合体については無理をしている感じがある。むしろ、実証炉程度の方が設計として現実味があるのではないか。いずれにしても、今回の検討で画期的な改良点が出たというわけではなく、軽水炉に優るという目標をナトリウム冷却炉で達成するのは、燃料サイクルコストを別に

しても容易ではないという印象である。しかし、コストは様々な要因があり、特に開発途上にあるものは大きい誤差を伴った1つの推定あるいは期待でしかない。従って、コスト低減効果については判断し難いが、超長期エネルギーセキュリティを考えるとナトリウム冷却高速炉が必要ということ是可以する。

### 3) 重金属冷却炉、モジュール炉、小型炉

小型モジュール炉の利点は初期投資が小さくなることであるが、小型にしても出力に比例して縮小削減できない機器やプラント設備は多い。例えば遮蔽、建屋、補機系や安全系の系統数やバランスオブプラント等である。運転保守費についても、それが出力当りにしても削減される正当な理由を示す必要がある。工場生産は魅力的であるが、そこで作り運搬できる重量には制約がある。造船ドックを利用するバージ建造方式についても、軽水炉での検討は多くあるので、それらをふまえたうえでブレークスルーできる点を示す必要がある。モジュラー炉によるコストダウンは、他産業のモジュラー生産によるコストダウン例などをもって根拠を示す必要がある。現在の説明では、競争力のある FBR サイクルをこれらのシステムで実現できるとの見込みや理由が根拠を持って示されていない。放射性ポロニウム生成などよりも、これらの点について前途が開ける理由をまず示す必要がある。最近よくなされる原子炉の出力の大小の議論は市場の議論であり、技術（革新）と直接関連しない部分も多いことに注意すべきである。

重金属冷却炉は液体金属冷却炉の一種であり、高速炉としての炉心特性上の特徴はナトリウム冷却炉に近い。液体金属冷却炉の中ではナトリウム冷却が1番優れているように思える。ナトリウム冷却炉に比べて中間熱交換器とループが不要となる利点はあるが、それでも PWR と同じである。一般に小型炉の最大の問題点は経済性の克服であり、その可能性はまだ具体的に示されているようには思われない。

### 4) ガス冷却炉

火力発電は燃焼でガスを加熱し、ガスタービンを回しているが、原子炉冷却材としてのガスの弱点は熱伝達特性の悪さにある。これらの点は第1期のまとめでも述べられている。ガスタービンで発電する場合は、再生熱交換器、原子炉等の寸法をあたる必要がある。出力密度が高い高速炉とガス冷却との相性、具体的には定常時、事故時の炉心冷却性も重要な検討項目である。ガス冷却で大型化によりスケールメリットを追求する場合は PCRV、SG、ガス循環器等の製作性などからくる出力の上限があり、それが第1期の検討では定量的にも定性的にも根拠をもって示されおらず、他の冷却方式と比べた相対的なメリットが不明である。熱中性子炉では、ガス冷却炉は軽水炉に比べてコストデメリットがあり、それをガス冷却高速炉がど

う克服するつもりかを説明する必要がある。

#### 5) 水冷却炉

他の炉型に比して全体的に検討が不十分である。ナトリウム冷却炉に比べて増殖比が低い、異なった特徴を持っている。安全性の考え方も軽水炉のものをベースに考えるべきであり、開発目標や評価の視点が液体金属冷却炉と共通でよいかどうかやその果たせる役割が同じかどうかを再検討する必要があるだろう。コスト評価は軽水炉等をベースにできるので、他の冷却方式より、より不確定性は小さくできると考えられる。

### 【意見2】

#### ○研究の目的・意義

- ・今後の日本の FBR サイクルシステムの構築を全体の目的として、第一フェーズとして革新的な技術も含め種々の技術評価、システム評価と包括的な範囲での技術選択は適切な目的と考える。
- ・国の計画・方針とは長計でも述べられているように整合性はとられており、さらに本課題はサイクル機構の重要なミッションとして位置付けられているものだと考える。
- ・FBR 開発戦略の意義付けとして、「将来の多用なニーズに柔軟に対応」と記述されていますが、(多分環境負荷低減や核拡散抵抗性などを言っていると思いますが)、ここでそれは何を指している(他のエネルギー源と比較したエネルギー戦略上の意義なども上げられると思うか)のか具体的に示されていないと、サイクルとしての目指すべき性能や比較の対象となるものが具体的に上げられないと思う。

#### ○研究開発目標

- ・将来の FBR サイクルとしてどのような炉、燃料形態を追求するのかを明確にしてからそれに適した再処理方式を評価、選定していくことが最適なシステムを選ぶ場合に重要と思う。またその際にはなぜそのサイクルを最適なシステムとして選んだかの根拠を明確にしておいてもらいたい。
- ・将来の FBR システムを選定する場合には、大型炉、集中再処理方式で行くのか、中型炉(モジュールタイプも含む)ー再処理一体化方式(IFR タイプのような)で行くのかも重要な要素と考えられ、それによっては適した炉や再処理方式が異なってくることも考えられる。今年度にはこのような観点からの検討も実施してもらいたい。
- ・小型炉のメリットはよくわかるが、日本の FBR サイクルシステムを選定してい



く中での、小型炉の位置付けをできるだけ明確にしておいてもらいたい。中大型炉に対する補完的な FBR システムなのか、もうひとつ別のオプションなのかも含めて検討をお願いする。

- ・本検討を通じて核拡散抵抗性についての定義（定量的には難しいと思うが）、要件はどのようなことかも検討してもらいたい。

#### ○研究開発計画

- ・本評価にしたがって、さらに5年間の研究を進めそこでチェック・アンド・レビューを受けることが適切であると思う。

#### ○研究実施体制、方法

- ・燃料サイクル技術としては、これからはわが国だけではなく、世界が認める技術の開発が必要と思う。そのための必要な要件を十分取り入れるとともに、日本ですべて技術開発をするのではなく、各国で進めているサイクルシナリオ（欧米が現在検討している分離変換も含む）の共通技術の共同開発や、海外施設の有効利用（成果が共有できるため）が重要なことと思う。このような形での開発シナリオの構築をお願いする。

#### ○研究成果

- ・熔融塩炉の評価で塩化物熔融塩炉が評価されているが、なぜこれが選ばれたのか。熔融塩炉としては塩化物よりもフッ化物を用いた熔融塩炉のほうが、これまでに ORNL や日本において実績例や検討例が多いと思うが。
- ・FBR システムとして狙う炉心性能を明記しながら、それを達成することが困難な水冷却炉を、この実用化戦略調査研究の中で取り上げられる理由が不明である。
- ・フッ化物揮発法に関しては、プラントの運転方法を変えるだけで、純粋なプルトニウムが回収されることにならないかの検討もお願いする。核拡散抵抗性の観点からはこのような可能性を持ったものと原理的にあるいは容易な施設の改造ではそれが不可能なものとは、世界に認知される場合に異なってくるように思う。

#### ○今後の展開

- ・乾式法に関してそれぞれの方法に利点を見出しながら、あるいは熱力学的な基礎データから達成を予想しているが、重要となる requirement に関しては、実験での確認（できれば実燃料でそれが時間的に困難ならば模擬燃料で）が必要と思う。それを見極める前に技術選定をしてしまうと、その requirement が達成できない場合に、オプションがなくなってしまう。このことを十分考慮しての技術選定をお願いする。
- ・再処理システムの検討の中で、高レベル廃液からの TRU 回収技術(SETFICS)プ

ロセスがあるが、同様の研究はこれまでに原研でも実施されて実証試験まで行っているが、新しい研究を立ち上げる前に、それらとの比較検討を経てから研究に取り掛かることが必要であると思う。

- ・できるだけ複数のオプションがもてるような形での検討や R&D へ向けての方向性の提示をお願いしたい。

#### ○その他

- ・これはひとつの例であるが、乾式再処理の金属電解法に関して塩素化溶解法が最初に検討されているが、ANL で提案の Li 還元法や最近 LANL の ATW システムでは使用済み燃料からウランだけを湿式法で回収し、その後乾式法を適用して超ウラン元素を回収する方法も提案されている。このような各要素技術を組み合わせたより効率的なシナリオ、プロセスの検討も実施されることを希望する。

#### ○総合評価

- ・短い時間で幅広く炉、燃料製造、再処理まで検討されていると思う。またそれぞれについて特徴やポテンシャルの評価がなされていると思う。これから 5 - 10 年でそれらを実証しプロセス設計がなされることになると思うが、今回各技術が有すると評価されたポテンシャルの中には、模擬燃料や実燃料で実証してからでないこと（特に重要な requirement については）があると思うので、絞込みだけを優先しすぎて他の有力なオプションがなくなってしまうことがないようにお願いしたい。
- ・本実用化戦略調査研究を通し、将来を見据えた FBR として望ましい特性を備えたシステムが構築されることを願う。

### 【意見 3】

#### ○第 1 期の中間成果

- ・実現が期待される FBR サイクル開発目標と各システム設計目標が設定できているが、コスト目標については代替エネルギー資源の価格動向を把握しタイムリーに変更出来る柔軟性が必要である。
- ・国内外の幅広い技術選択肢を検討し候補技術の整理・集約ができているが、開発期間が長期に亘るため、今は実現が難しくても将来可能となる技術もあり、現状の整理・集約による評価結果を固定化することなく、技術情報の収集・評価を行い評価結果を見直していく必要がある。

#### ○2000年度の計画

- ・FBR サイクルとしての技術選択肢として有望技術を抽出した後も、内外の技術開

発動向を十分に把握し、変更すべき点は速やかに変更して、決して一本道の開発にならないように多岐路線を継続する必要がある。

- ・再処理技術のチェック・アンド・レビューでは、軽水炉燃料を処理する第二再処理工場への採用技術としての面を考慮することが必要である。

#### ○第2期の展望

- ・国内外の研究機関と協力し、有用技術があれば積極的に評価して取り込んでいくことが必要である。

#### 【意見4】

課題評価委員会では「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」について、多くの添付資料も駆使されて、きめ細やかに説明されたと思う。しかし今後の情報公開については、特殊な知識を持つ専門家に向けてだけでなく、一般の生活者への情報発信も、戦略として重要になってくるであろう。対象をいくつかにしぼり、それぞれに応じた解りやすい情報提供も必要ではないか。

情報発信はインターネットだけに限らず、発信する方法、チャンネルにも考える余地があるかもしれません。最近、環境教育、エネルギー教育の必要性が叫ばれている中、若年層へのアプローチも工夫してみたいかがか。

#### 【意見5】

##### ○研究開発の目的・意義

本調査研究の目的・意義については、事前評価の段階で示された内容を踏襲するものであり、特段の問題はない。ただし、中間評価のための説明資料の冒頭に散見される「将来の社会の多様なニーズ」あるいは「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」の表現には、注意を要する。これらは、本調査研究の目的と意義を支える前提条件であるが、不変のものではない。第1期調査研究が1年を経過した段階で、これらの前提条件に変化はないのか、いまま少し丁寧かつ詳細に展望・検討しておくべきであると思われる。

##### ○研究開発目標

本調査研究（第1期）の開発目標は、FBRサイクルの実用化候補概念を抽出することにあるが、それに先立って実用化候補概念に関する評価方式が大きな検討課題とされている。特に評価の視点として「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」「技術的实现性」が挙げられている。それぞれに重要な視点であることはいうまでもない。しかし、中間評価にあたって、次の点を指摘

しておきたい。

中間評価のための説明資料によれば、「実用化候補概念の抽出にあたって、上記6つの視点に関して評価指標を作成し、さらに個々の評価指標を統合した総合指標を作成する」とされているが、個々の評価指標はもとより総合指標の具体的な作成基準が示されていない。これは評価方式の根幹をなすものであり、本来中間段階で示されるべきものと思われる。その際、問題となるのは、個々の評価視点（事象）が完全に独立ではないということである。例えば、「経済性」は、候補（FBR サイクル）概念の発電電力単位当り建設費用を指標とするかのごとく記されているが、建設費用は「安全性」や「資源有効利用性」を向上させれば増大する性質を有している。同じ発電能力を想定した候補（FBR サイクル）概念であっても、「安全性」や「資源有効利用性」を高めれば、間接的にせよ建設費用を増大させ、「経済性」を低下させる。いわば、「経済性」指標は他の指標と負の相関関係（あるいはトレード・オフの関係）をもっているのである。このような指標を並列させて、総合指標を作成することは、実用化候補を評価する上で問題が生ずる。事前評価の際に言及したこととも関連するが、まず「安全性」「資源有効利用性」「環境負荷低減性」「核拡散抵抗性」「技術的実現性」の指標を作成し、これらの総合指標（\*）を作成すべきである。これらは、いずれも「経済性」指標に影響を与える指標であり、仮に総合指標（\*）が同一のレベルであるときに、「経済性」が実用性評価の一つの指標となると考えるべきであろう。

#### ○研究開発計画

第1期の研究計画は、実用化候補概念の評価体系を確立し、確立された評価体系にしたがって実用化候補として複数の FBR サイクル・システム（概念）を抽出することである。第2期の研究計画は、抽出された実用化候補概念を具体的な技術として実証することである。いうまでもなく、すべての実用化候補概念が実証可能ではない。その際には、改めて第1期における評価指標（特に「技術的実現性」）の事前設定に立ち返るべきであろう。第1期と第2期の研究計画の違いは明確であるが、第2期途上で第1期の研究計画に基づく研究成果を再検討できるような柔軟性をもたせておくべきである、と思われる。

#### ○その他

研究実施体制・研究予算・研究成果等については、おおむね妥当と思われるが、現時点で適切な中間評価を行うことは困難である。

## 【意見6】

### ○研究開発目標

FBR 実用化のために越えなければならない最も高いハードルは、社会的コンセンサスの形成であると考えます。現実問題として、ナトリウム冷却炉は過去の数々の事故（海外を含む）から危険であるというイメージが社会的に定着していることは否めない。これを覆すには大きな困難が伴う。よって「実用化戦略研究」としては、一次・二次冷却系の種別に伴うリスク（水素爆発の可能性や腐食性等）についても客観的に比較評価し得るよう、データを整えるべきであると考えます。現時点では安全性についてどのような定量的比較を目標としているのか不明確である。この検討結果次第では、技術的には困難であってもガス冷却や水冷却を積極的に進める方が実用化への近道であるという議論もあり得るのではないかと。

### ○研究実施体制

他機関との協力・連携を進める上での、アイデア公募の規模や方法、アイデアの選定方法などを明らかにするべきであると考えます。

### ○今後の展開

ナトリウム冷却炉-MOX 燃料-湿式処理の組合せが、サイクル機構として今までも知見を集積しているところであり、このシステムについての検討が最も深くなるのはある意味で当然とも言えるが、「実用化に至る最適の組合せを探る」ためには、でき得る限り平等な条件で各組合せ間の比較ができなくてはならないと考えます。その意味では、今後の検討は、従来サイクル機構が手がけてこなかったシステムについての情報収集を中心に進めていただければと思います。ナトリウム冷却炉-MOX 燃料-湿式処理の組合せについては、具体的な課題や 2000 年度計画が細かく示されているが、それ以外のシステムについては、あげられている課題等に具体性が乏しいとの印象を持つ。

## 【意見7】

### ○研究開発の目的・意義

- ・事前評価において目的と意義については国の基本計画の方向とさらに研究開発の実施可能性の視点からも考慮され、適切妥当であると判断されており、この中間評価においても、第1期の目標に向けて調査研究が進展し、第2期以降の2015年までの本調査の枠組みとなすべき検討評価が示され、その目的と意義はよりはっきりしたものになっていると判断され、妥当である。
- ・目的と意義がより明確になってきているので、長期的観点では、広い視点からの

調査研究成果を FBR サイクルの研究開発計画（見直し）へ段階的評価としての的確に反映させ、FBR サイクルの実用化像を示せるかどうかが重要となねおり、本調査研究は緊急にそのタイミングを逃すことなく提示された計画にそって進められるべきものと考えられる。将来に備えて今から対応しておくべき課題に位置づけるかどうかについては、資料からは明確に読み取れない。

- ・ FBR 技術の多様性と幅を先ず認識し、社会的・経済的ニーズ（社会情勢変化、経済性追及等）へ対応した広い視点から調査が進められている。これらのニーズへの柔軟性のある調査データを提供できるよう、調査を進めて欲しい。
- ・ 国の計画、方針がこれから明らかにされると思われるが、現状では十分にその整合性をとれるよう進められていると思われる。
- ・ 事前評価により確認された計画に沿って、サイクル機構が実施していく課題である。
- ・ 事前評価時の内容と大幅な変化はないと思われ、また FBR サイクルの基本的な考え方の中で充分になされている。

#### ○研究開発目標

- ・ FBR 燃料を低除染燃料に設定し、FBR サイクル、プラントシステムにおける安全性、経済性、資源有効利用、環境負荷低減、核拡散抵抗性の広い観点からの目標の設定はおおむね適切と評価できる。炉心損傷の恐れのある事象における炉心の工夫による原子炉内での自然終息、ヒューマンエラーの徹底防止等による安全性、廃棄物量の低減最小化等、新しい技術展開を図っている。ただ、経済性の 2030 年頃の設定、倍増予測 30 年からの増殖比 1.2 の設定にはなお説得性のある説明が必要であろう。
- ・ 前項にて述べた目標設定に対する詰めはまだ検討を要するとしても、FBR サイクルシステムの設計目標は的確に設定されていると評価できる。
- ・ プレークスルーすべき点は、全般的に明確に示されている。ただ、かなり現実性の高いと思われる検討の中で、ナトリウム炉の新発電方式の検討のように、本調査研究の期間内に技術的に限っても結論が得られるか疑問の残る部分も見受けられる。
- ・ 第 1 期として技術の成立性からの各実用化候補概念の重点検討課題の抽出は、妥当と判断されます。ただ、燃料サイクルシステムの再処理を湿式と乾式のコンビネーションで行くことに対し、日本独自のアイデアを如何に組み入れられるか、第 2 期の研究に向けてさらに明確な検討が必要であると考えます。
- ・ 中間成果の分析とそれを受けた課題の抽出がなされ、第 2 期への展開に重要な

2000年度の計画も具体的に明らかにされており、その意味で、適切な見直しがないと判断される。

- ・ 関連技術の動向について、事前評価以降の状況について具体的な内容は必ずしもはっきり示されていないが、課題の抽出と解決方策に十分反映されているものと思われる。

#### ○研究開発計画

- ・ 第1期の成果を見通し、その成果を詳細に検討して FBR サイクル実用化候補概念の絞り込みを第2期に行うことが明らかにされている。その基本的な考え方と2005年までの調査研究の展開も明確になっており、妥当である。
- ・ 研究開発項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等は、いずれも具体的に示されており、妥当である。
- ・ 資金計画(予算の規模・配分)は、妥当である。第1期での燃料サイクルシステムへの投資を十分反映出できる成果をだして、第2期での絞り込みに入ってもらいたい。
- ・ 研究内容の独創性、創造性については、日本独自のアイデアをどこまでいかしていけるか、今後の調査研究の成果にかかっていると思う。
- ・ 計画の見直しへの対応とマイルストーンの置き方については妥当であるが、その時点でのチェック・アンド・レビューについて、絞り込みのための課題の評価指数等定量的な目標を的確に設定していくことが必要であろう。
- ・ 使用する施設・設備は、適切である。
- ・ 関連技術動向については、前述のようにもっと明確に示していただいたほうが良い。
- ・ 定量的評価が比較的可能な技術的成立性は、実用化に向けてその検討の道筋が明確にされていると思われるが、経済性、環境負荷等の今後の社会情勢の変化等必ずしも定量的でないファクターをどの様に考えていくのか、実用化への説得性を高める検討が必要である。

#### ○研究実施体制

- ・ サイクル機構内の体制、および外部との連携、委員会等の活用等妥当である。
- ・ 他機関との協力・連携（国際協力を含む）については、強化する方針が示されている。アイデア公募等積極的な対応も進んである。国際協力も適切に行われている。

## ○研究成果

### ①得られた成果の内容

- ・達成された具体的な成果について、水準、質、意義、当該分野への寄与の程度等については、1期の間での成果としていずれも十分であると評価する。
- ・計画にしたがった進展があった。
- ・費用対効果（投入した費用に見合った成果が得られているか）は、まだ1年の成果であり、その効果が見合ったものとなっているかどうか、まだ判断は困難である。
- ・第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出については、複数絞り込みへの成果は進んでいると思われる。

### ②実用化との関係

- ・まだ、実用化への見通しについての判断はできない。
- ・実用化のために必要な技術開発課題については、まだ実用化候補が絞られていないので、コメントできない。

### ③得られた成果の普及、公開

- ・技術移転を含む成果の普及は期待については、可能性は大きいと思われる。
- ・波及効果の期待は、技術の詳細なデータが示されていないので、コメントできない。
- ・成果発表、特許出願・取得等の実績は、具体的なデータが示されていないので、コメントできない。
- ・広報は積極的、効果的に行われている。

## ○今後の展開

- ・今後の展開、進め方等については、第1期の中間評価の段階であるので、1年後の成果と第2期の計画の示される次の評価作業時にコメントをしたい。

## ○その他

- ・情報公開にあたり、いくつかの対象レベルを設定して、広く本調査研究の成果とFBRサイクルのあるべき姿を的確に示して行ってほしい。

## ○総合評価

第1期の中間評価としては、課題の抽出、研究計画、成果、処置事項等、いずれも適切に進められていると評価する。



## 【意見8】

### ○研究開発の目的・意義

本研究は、既に平成11年度に事前評価を行っており、研究計画が妥当であるとの評価を受けている。当時と比較してこの目的、意義が変わるような状況変化は基本的にはないと考えられるので、第1期計画に対する当時の評価は今も変わらないと考える。また、この間に新原子力長期計画の策定作業が進められ、最終案は未完了ではあるが高速増殖炉サイクルを検討した第三分科会は既にその最終報告書をまとめ、その中で本計画を推進する事としている。従って、本研究開発の目的は明かであり、且つその意義も認められ、2001年度の計画も妥当と考える。

なお、第2期計画全体については、次年度に評価される予定なのでここでは対象と考えない。

### ○研究開発目標

2000年度の目標は、事前評価において大部分が評価済みであると考えられる。1999年度の成果に基づいてより具体化した目標が設定されている。第1期は幅広く各選択肢の持つ課題を明らかにすることが重要であるので、これらの目標が達成できれば第2期計画へ進む大きなステップとなる。

部分的には目標について、検討不足の感がするものもある。(2000年度の重金属、ガス、小型の各炉型のプラントシステム)

### ○研究開発計画

第2期計画では、実用化候補概念への絞り込みを、必要な試験を含めて行う、とされており、2001年度の本研究の進め方としては妥当と考える。ただし、照射試験準備等も含まれているので第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるような計画を立てることが必要である。

### ○研究実施体制

この1年間に研究体制は協力機関、委員会等を含めよく準備されてきた。国内の他機関と連携を取り、密接な協力の下に進めることは、技術の継承、発展の上でも大変有益である。アイデア公募には多くの応募があり有益であったと考えるので、第2期でも継続することは有意義である。他機関の意見を採り入れる努力は評価できる。

### ○研究成果、今後の展開

まだ本研究は始まって1年であり、独創性のある成果を挙げられる段階ではなく、少し長い目で見ることが必要であろう。研究の内容や進捗状況については、積極的に公表されているので計画は概ね達成されている。特に、ナトリウム冷却炉と再処理につ

いては、これまでの経験を生かした良い成果が出ている。

この1年間は、これまで世界各国で行われた研究、開発成果のレビューを中心に行われたと考えるが、これまでに検討された概念は、実用化の可能性を持つものは殆ど含まれていると共に重要な技術的課題が抽出されている。もちろんこれらの課題の中には、既に認識されているものも含まれているが、それらの技術的成立性、解決可能性の評価、必要な資源や期間等の評価は、決して易しくないでそこに今後の成果が問われることになるので、独創性を含む展開を期待する。

公募研究も成果が出ているが、今後は段階的に課題を絞っていくことも考えられる。

#### ○総合評価

本研究課題は、既に新原子力長期計画の策定において第三分科会で検討され、その推進が結論されたものであると共に、事前評価時点から重要な情勢変化はないので研究開発の目的、意義は認められる。2000年度の開発目標も、前年度の成果に基づきより具体化され、第2期計画につながる明快な目標、計画の設定となっている。

ナトリウム冷却炉、湿式再処理など経験の深いものは、良く検討が進んでおり、第2期計画での絞り込みに有意義な成果を得ている。経験の少ない重金属やガス冷却炉については、重要な課題は抽出されているが2000年度以降のさらなる検討の進捗に期待したい。

第2期計画では各種試験や燃材料照射が計画されているが、これらは一般に長期間要することがあるので、第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるように綿密な計画を立てると共に評価基準の十分な検討が必要であろう。

研究実施体制については、大変良く準備され国内の関連機関との協力も進み、意見も交換できる体制が整った。公募研究も多くの応募があり、有益であったので第2期計画でも工夫を加えながら継続することを期待する。

#### 質問事項

- 1) 開発目標として増殖比 1.2 (倍增時間 30 年) としているが、これはどのような根拠から決めたのか。私見では安全性、技術的難易度や経済性が同じであれば増殖比は大きい程良いが、それがいえるのか。もしそうでない場合は日本の長期エネルギーシナリオ、ウラン資源等を考慮した上で決める必要がある。そのような検討に基づいた値か。
- 2) 径非均質炉心は、かつてジュピター実験の結果、制御性に問題があるとの結果が出たと記憶するが、それは解決可能との見通しなのか。
- 3) 重金属炉については鉛ビスマス炉のみ検討するとなっているが、事前評価時点

ではビスマス資源量の制約から鉛のみ検討するとなっていたと記憶する。これはビスマス資源量に問題がないことが明らかになったためか。

## 【意見9】

### ○研究開発の目的・意義

目的・意義は明確に示されており、的確であると評価する。

FBR サイクルの実用化候補概念としての有望な2～3の候補への絞込みは是非とも必要であり、実施しなければならない。ただ注意しなければならないのは、絞込まれた「有望候補」は絞込みに用いられた「FBR サイクルの開発目標」のもとでの有望候補であることである。例えば「高増殖として増殖比 1.2 程度」を目標としなければ有望候補が変わってくる可能性もある。これを忘れて絞り込んだ結果だけを一人歩きさせてしまうと、FBR サイクル開発を取り巻く環境が変化したときに開発路線の見直しを怠り、無駄な投資をする危険性がある。この点には十分留意して研究開発を続けることを望む。

### ○研究開発目標の設定

研究開発目標は、炉心燃料、プラントシステム、燃料サイクルシステムそれぞれについての的確に設定されていると評価する。概念設計研究と並行して要素技術開発を実施することは大切である。

プラントシステムに関してはナトリウム冷却炉と他の炉型とで検討の厚さが大きく異なるが、これはこれまでの知見の蓄積状況の違いからやむをえない。検討の遅れている炉型については、技術的成立性に係わる課題にまず絞って検討を進めるという方針を支持する。

### ○研究開発計画

研究開発計画は第1期の成果を踏まえ FBR サイクルの実用化に向けてさらに検討を深めるべく作られており、適切であると評価する。第1期と異なり5年計画とやや長期になることから3年目に中間まとめをすることとなっており、適切に立てられた計画である。

なお、サイクル機構に与えられた使命は FBR サイクルの実用化であり、その範囲ではよく計画が練られているが、FBR サイクル実用化の必要性そのものに関する国民全体の合意形成についても、もっとサイクル機構が前面に立って努力することを望む。

### ○研究実施体制

研究実施体制は適切である。

人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用等、第1期の実績から運営はうまくいっているものと評価できる。第1期に行われた、アイデアを国内外から集めるための努力も十分であったと評価する。今後も他機関との協力・連携に努力されたい。

#### ○研究成果

短期間に一定の成果をあげていると評価する。第2期に進むに十分な準備がなされつつあると判断できる。実用化に向けても電力との協力体制のもとで厳しい目標設定のもと課題が整理され、その解決に向けて努力されていると評価できる。

なお、国内外からのアイデアの公募の結果、びっくりするほど斬新なものが出てきたとは思えないが、これは誰の責任でもない。すばらしいアイデアは短期間に集まるとは限らないものである。このような公募制度はアイデア創出を刺激する効果があるので、今後も適宜アイデアを公募する制度を継続させることが好ましいと思う。

成果の公表について懸命な努力をされていることはよく理解しているが、関係者や一部の人間を除いて関心が低いのも事実である。実用化戦略調査研究は成果が国民に理解されなければ意味がない。この努力に関しては「十分」ということはないと認識され、さらに一層努力されることを望む。

#### ○今後の展開

第1期については既定方針通り進めるとともに、第2期についても今回説明のあった計画・体制で実施することに賛成する。

#### ○その他

事前評価のコメントが適切に反映されて研究が進められており、高く評価する。

#### ○総合評価

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究は、その第1期計画が予定の成果をあげつつあり、第2期に向けて課題を明確にしつつある。第2期計画はその目標、資金計画、実施体制が的確に考えられていること、及び第1期の実績から考えて、十分な成果をあげるであろうと考えられる。したがって予定通り第1期をまとめあげ、第2期を開始させることに賛成する。

### 【意見10】

評価項目の研究成果の項について、平成11年度の事前評価報告書において「(1)第1期は実用化候補概念を、従来技術にとらわれず、またデータ不足等の理由から新技術を落とすこと無く複数抽出し、実用化までの開発シナリオを策定するとなっ

ている。

(2)技術を絞り込む場合、評価基準を明確にして、技術データ、試験規模など具体的な評価の根拠を明らかにしておく必要がある。(3)長期的な境界条件の変化により耐えるようにするにはどのようにすればよいかという視点も検討に入れると良い。(4)第1期で候補をあまり絞りすぎず、第2期と合体させながら、7年で絞り込みと技術開発をフィードバックさせて、検討する場合もあり得る。(5)第1次案、第2次案というように常にバックアップ案を手元に持って絞り込み、複数候補の決定の可能性を残して欲しい」と明記してある。

この様な観点から、今回の中間評価報告書をながめた場合に、第2期に向けての検討を行う上で、現時点で候補を絞りすぎと考えられる。具体的には次の点が考えられる。

#### (1)増殖炉について

長期的視野、2種類のFBR（高転換比と低転換比のFBR炉の共存）、軽水炉からの延長としてPA上受け入れやすい炉の観点等から考えると、増殖比が液体金属冷却炉に劣るものの高転換比BWR・PWR炉型等は、是非強力に推進すべきと思われる。第2期ではすべて「原研との協力の下で検討」となっているが、他に大きな技術的問題点がなければサイクル機構においても水炉の諸課題を積極的に検討すべきと考える。

#### (2)再処理について

酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つを検討するとなっているが、酸化物電解法はロシアとの共研でデータも入り同じバッチ式の金属電解法と共通的検討課題も多いと考えられる。一方フッ化物法はフロー式であり、同じflow式の湿式法との共通点も予想される。課題説明資料とOHP集の表現が少し異っており、3種類から2種類を選択して第2期に実施するのではなく、湿式-乾式ハイブリッドを模索したり、バッチ式とフロー式とを比較・検討する等の為に、第2期においても、技術的な差が明確で無い限りあまり候補案を絞るべきではない。

#### (3)燃料について

「窒化物燃料は、事故時の窒素解離問題等によりガス炉との組み合わせを前提に考える」となっているが、事故時に窒素解離圧が問題になる程、炉心温度が上昇しなければ良いと考える。また、窒素が解離すると金属ウランが析出し、その金属ウランが窒素を吸収し金属/窒化物二相共存となり窒素圧は一定となることも予想される。従って窒化物燃料をガス炉に限定する必要性は時期尚早と考える。またこのような論理ならば、酸化物の酸素とナトリウムとの反応の方が事故時の挙動として

は重大であり、酸化物もガス炉または水炉により適しているとも考えられないか。従って中間評価については、「窒化物燃料については、事故時のガス解離圧評価を行う研究を第2期で行う」とするのが妥当と考える。

### 【意見11】

#### ○研究開発の目的・意義

軽水炉サイクルおよび他の基幹電源と比肩する経済性のある FBR サイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、第一期の中間段階では 国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良および革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を行うことが当面の目的と意義と考えていることに対しては概ね妥当と判断できるが、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対しての第1期での目的が技術選択肢の検討評価との関連でどのように位置づけられているのか。

#### ○研究開発目標

FBR サイクルの開発目標は事前評価で既に済んでいるので問題はないが、第1期段階の技術選択肢の検討評価を行う上での仕様のような評価指標設定について、特に燃料サイクルシステムにおける設定が未だ定まっていない状況にある（現状では難しいところもあると思われるが）。これらは技術評価を行う上で極めて重要であると思われるので、評価手法の構築を含めて今後十分検討をして、当面の目標をしっかりと設定して進めて欲しい。なお、各実用化候補概念の重点検討課題においては各技術の開発状況に違いがあることから、技術評価手法においてそれらをどのように配慮して考えているのか。この点についても十分説明ができるような考え方を構築してほしい。

#### ○研究開発計画

第1期は実用化候補概念の技術的評価で、第2期は候補概念の可能なかぎりの定量的な比較検討できるレベルまでの設計研究を深めることにあり、その結果として実用化概念として有望な2～3の候補に絞り込むことにあることから、第1期と第2期の目標の違いは明確であると判断できる。しかし、第1期での検討で設計データ等の不足のために妥当な評価ができていないかに疑問がのこる。。まだまだ先のことであるので、もう少し候補概念の検討をしてからでも遅くはないのではないかとと思われる。

一方、第1期で明らかになった課題に対して第2期でどこまでやり遂げられるかも重要な課題である。それは第一期での検討結果の成果の度合いと第二期での予算

および研究開発計画と研究開発環境の整備を含めた研究開発体制にかかってくると思われる。

なお、R&D 段階ではややもすると廃棄物に対する検討が甘くなることがあるから、廃棄物評価が適切に行われるような研究開発計画を考えていくことが望まれる。その意味で第1期での候補概念の技術評価において廃棄物に対しての第2期で検討すべき重点課題の抽出は極めて重要なものになると思われる。

#### ○研究実施体制

第1期での体制を第2期ではさらに強化することを考えているようである。他機関との連携強化を含めて具体的にどのような方策を考えているのでしょうか。公募等によるアイデア募集による新しい芽の発掘以外にも、第1期で明らかにされた今後の検討課題に対して、必要と考えられる基礎・基盤的な研究課題を含めて研究課題への研究協力の公募による研究実施体制への幅広い展開も必要となると思われる。

#### ○研究成果

第1期の中間成果として幅広い候補概念技術の検討および概略的な評価を行うことについての目標はほぼ達成されているものと思われるが、今後の課題については技術検討会でも十分議論されることを期待する。そこでの結果を踏まえて最終的な結果としてまとめて欲しい。なお、以下に、今後の検討へのコメントを記す。

第1期の残り第2期に向けての実用化候補概念の抽出に向けての検討がなされることになるが、各候補概念の技術開発状況の違いも大きいことのみならず技術評価手法の構築の考え方においても同じレベルで考えることの難しさを考えると、当初幅広く候補概念技術を検討することを考えたことから、第1期では各候補概念の今後の検討課題を明確にし、その中でデータ不足のため妥当な評価が難しい課題の抽出を行い、第2期の中間とりまとめ段階までにそれらの再検討を行い、その結果をもとに第2期での候補概念の抽出を考えてもよいのではないかとと思われる。

#### ○今後の展開

短期間で幅広い実用化候補概念の技術評価とその経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出をされていることについては申し分ないと思われるが、課題評価委員会で、成果の評価を行うことに対するコメントを記します。課題評価委員会のメンバーは幅広い分野の専門家から構成されており、高速炉・燃料サイクルシステムの課題を個々の成果を基に総合的に評価することが主たる役割と思われる。しかるに、個々の成果についての検討評価については外部の専門家を含めた専門家グループによって予めなされたものと考えているものと思われる。今回の課題に対しては三つの技術検討会が設置されており、そこでの検討結果としての成果と受けとめる

ことになるのか。このあたりを明確にして進めてほしい。

#### ○総合評価

軽水炉サイクルおよび他の基幹電源と比肩する経済性のある FBR サイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良および革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を基に、実用化候補概念の技術的評価と経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出を行っていることについては中間評価としては十分評価できる。なお、実用化候補概念の技術評価で第1期の残り第2期に向けての実用化候補概念の抽出に向けての検討がなされることになるが、各候補概念の技術開発状況の違いも大きいことのみならず技術評価手法の構築の考え方においても同じレベルで考えることの難しさを考えると、当初幅広く候補概念技術を検討することを考えたことから、第1期では各候補概念の今後の検討課題を明確にし、その中でデータ不足のため妥当な評価が難しい課題の抽出を行い、第2期の中間とりまとめ段階までにそれらの再検討を行い、その結果をもとに第2期での候補概念の抽出を考えてもよいのではないかと思われる。

#### 【意見12】

実施内容、資金配分共に基本的には問題ないと思うが、以下の点に留意して研究を進めてほしい。

#### ○研究開発目標

本研究を進める上で、ある程度具体的な目標時期を設定する（競争力のある FBR サイクル技術を 2015 年頃までに提示する）ことの必要性は理解できるが、目標時期を固定的に考えずに検討を進める。

#### ○今後の展開

第2期では乾式再処理について、3つの方法（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法）のそれぞれの課題を検討した上で、2つの方法について概念設計を行う計画となっているが、2つに絞り込むに当たっては根拠を明確にする。

#### ○その他

第1期は、有望な実用化候補概念を抽出するのみならず、FBR サイクルの実用化技術の確立までの開発シナリオ（開発計画）を策定する期間でもある。



# 参 考 資 料

核燃料サイクル開発機構

## 参考資料目次

参考資料 1	研究開発課題の中間評価について（諮問）	（1）
参考資料 2	評価結果に対する措置	（3）
参考資料 3	課題評価委員会委員の評価意見に対するサイクル機構の 見解及び質問に対する回答（補足説明資料）	（8）
参考資料 4	高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（課題説明資料）	（38）
	[研究開発課題説明資料本文]	（39）
	[添付図表]	（75）
	[用語の説明]	（147）
参考資料 5	高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（説明用OHP集）	（168）

## 参 考 資 料 1

研究開発課題の中間評価について（諮問）



12サイクル機構(企)002

平成12年4月24日

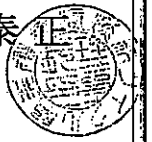
研究開発課題評価委員会

(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

委員長 岡 芳明 殿

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰正



研究開発課題の中間評価について (諮問)

研究開発外部評価規程第7条第1項に基づき、次の事項について諮問致します。

・ 諮問事項

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」に関する中間評価

以上

## 参 考 資 料 2

### 評価結果に対する措置

**研究開発課題評価委員会**  
**「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」の評価結果（中間評価）**  
**に対する措置**

平成 12 年 8 月 10 日  
核燃料サイクル開発機構

「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」のうち、今回評価の対象とした、第 1 期の中間評価及び第 2 期の基本的考え方とその初年度となる 2001 年度の研究計画について、適切であるとの評価を頂いたので、計画通り研究を継続することとします。

なお、技術的な観点での御指摘については適切に研究に反映するほか、以下のような措置をとることとします。

**1. 研究の目的・意義と開発目標**

「実用化戦略調査研究の目的、意義を支える前提条件となる将来の社会のニーズ自体が不変でないことに留意すべき」との御指摘に対し、

- ・社会のニーズ等を前提として設定している FBR サイクルの開発目標については、今後、適宜見直し、柔軟な計画運用を心がけて、研究を進めていくことといたします。

また、「開発目標の重要度は一律ではなく、安全性の確保を前提として競争力のある FBR サイクル技術を提示することを大目標とすべきである。また、TRU 燃焼、長半減期 FP の核変換はまだ極めて初期の研究段階にあり、他の開発目標との同時達成を目指すべきではない」との御指摘に対し、

- ・実用化戦略調査研究では、まず、高い経済性を有し競争力ある FBR サイクルが求められると考え、この面における研究を重点課題と位置付け、推進していくこととします。また、TRU 燃焼や長半減期 FP の核変換については、長寿命核種の分離核変換技術の研究開発と緊密な連携を取って研究を進め、段階的に実用化に取り組んでいくこととします。

## 2. FBR サイクルの実用化候補の絞り込み

「FBR サイクルの実用化候補の絞り込みに関して、第1期の検討では設計データ等の不足のために、どこまで十分な根拠を持って実用化候補概念の絞り込みが可能か懸念される。また、有望な実用化候補の絞り込みに当たっては、その前提条件を明確にすべき。さらに、有望技術を抽出した後も内外の技術開発動向を十分に把握し、変更すべき点は速やかに変更して、決して一本道の開発にならないよう心掛けるべき」とのご指摘に対し、

- ・第1期では比較評価により候補概念を安易に絞り込むことはせず、技術的な観点から実用化に向けて大きな問題がないかどうか（メンテナンス性等）を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを候補から外すこととします。また、検討対象から外すこととなった候補については、外した根拠を明確にするるとともに検討した内容はデータベースとして残し、チェック・アンド・レビュー時や将来大きな状況変化が起こった際に復活できるよう留意します。

## 3. 総合的な評価手法

実用化候補概念の絞り込みに活用する総合的な評価手法について、「安全性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、技術的実現性の各視点は経済性と相互に関係することを認識して検討を進めるべき。また、定量化が難しいファクターをどう評価するかを検討すべき。さらに、技術開発レベルの違う技術選択肢の比較を行う際には革新技術の技術的ポテンシャルも考慮して評価すべき」との御指摘に対し、

- ・6つの評価指標をどのように組み合わせて定量的に評価するか、今後検討を深めます。この評価手法については、第2期で候補概念の比較評価を行う際の一つの判断材料に使いたいと考えています。

#### 4. 第2期の研究計画の策定

第2期の研究計画の策定についての、

「FBR サイクルの実用化については、軽水炉と並存し競争力あるFBR サイクルの実現が求められる時期と、FBR が主流となる時期に分けて考える必要がある」

「第2期での実用化候補の絞り込みが巧く進む計画とすべきである。長期を要する試験についても、絞り込みに必要なものについては第2期で結論が得られるような綿密な計画が必要である。」

「できるだけ複数のオプションがもてるような開発にすべきである」

「従来知見が乏しかった候補に係わる研究を重視した検討とすべきである」

「研究開発環境を含めた体制の整備も重要な要素である」

「日本ですべての研究開発をするのではなく、各国で進めているサイクルシナリオ(欧米が現在検討している分離変換も含む)の共通技術の共同開発や、海外施設の有効利用が重要である」

「実現性の高い技術と、革新性が極めて高く実用化戦略調査研究の期間内に技術的な結論が得られがたい技術とは分けて考える必要がある」

との御指摘に対し、

- ・第1期は、有望な実用化候補概念を抽出するのみならず第2期の研究計画を立案する期間でもあるとの認識の下に、これらを十分考慮して、2000年度においては第2期の研究計画の検討を更に進めます。

#### 5. 研究実施体制

「他機関との協力・連携にさらに努力してもらいたい」との御指摘に対し、

- ・今後ともご主旨も踏まえ、研究実施体制の充実に努めてまいります。



## 6. 研究成果の独創性

「研究成果を独創性、創造性に富んだものにできるかは、我が国独自のアイデアをどこまで生かして行けるかによる」との御指摘に対し、

- ・サイクル機構では創造性を重視することを経営方針としており、この御指摘に沿った成果が上げられるようさらに努力します。

また、「第1期で実施したアイデア公募について、第2期でも工夫を加えながら継続すべき」との御指摘に対し、

- ・第1期で抽出された候補概念に対してさらに独創性、創造性に富んだ革新的技術を広く開拓する観点からアイデア公募を継続します。

## 7. 得られた成果の公開

得られた成果の情報公開については、「専門家のみでなく一般の方への情報発信も重要であり、インターネットだけに限らず、発信する方法、チャンネルについても一考し、解りやすい情報提供にすべき」との御指摘に対し、

- ・今後とも成果の進捗に合わせて、適宜、一般の方々に成果の公表や解りやすさに配慮した情報提供等を行っていきます。今後の大きな節目である第1期終了時点では、課題評価委員会等の評価を受けた上で、その結果とその後の研究の進め方をまとめ、公表いたします。

以上

## 参 考 資 料 3

課題評価委員会委員の評価意見に対する  
サイクル機構の見解及び質問に対する回答  
(補足説明資料)

中間評価課題：高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

各委員の評価意見に対する  
サイクル機構の見解及び質問に対する回答

平成12年8月

核燃料サイクル開発機構

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
(1)研究開発の目的・意義	1) 目的・意義は明確に示されており、的確であると評価する。	
	2) 今後の日本のFBRサイクルシステムの構築を全体の目的として、第1期として革新的な技術も含め種々の技術評価、システム評価と包括的な範囲での技術選択は適切であると考ええる。	
	3) 国の計画・方針とは長計でも述べられているように整合性はとられており、さらに本課題はサイクル機構の重要なミッションとして位置付けられているものであると考ええる。	
	4) 本研究は、既に1999年度に事前評価を行っており、研究計画が妥当であるとの評価を受けている。当時と比較してこの目的、意義が変わるような状況変化は基本的にはないと考えられるので、第1期計画に対する当時の評価は今も変わらないと考える。また、この間に新原子力長期計画の策定作業が進められ、最終案は未完了ではあるが高速増殖炉サイクルを検討した第三分科会は既にその最終報告書をまとめ、その中で本計画を推進することとしている。従って、本研究開発の目的は明らかであり、かつその意義も認められ、2001年度の計画も妥当と考える。なお、第2期計画全体については、次年度に評価される予定なのでここでは対象と考えない。	
	5) FBR開発戦略の意義付けとして、「将来の多様なニーズに柔軟に対応」と記述されていますが、ここでそれは何を指しているのか具体的に示されていないと、サイクルとしての目指すべき性能や比較の対象となるものが具体的に上げられないと思う。	5) 将来の多様なニーズを今の時点で予測することは困難ですが、考えられるニーズとして、安価な電源の供給、エネルギーセキュリティの確保、環境負荷の低減、核不拡散性の確保、安全性・信頼性の高い分散型電源の供給等を想定しています。
	6) 中間評価のための説明資料の冒頭に散見される「将来の社会の多様なニーズ」あるいは「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」の表現には、注意を要する。これらは、本調査研究の目的と意義を支える前提条件であるが、不変のものではない。第1期調査研究が1年を経過した段階で、これらの前提条件に変化はないのか、いまま少し丁寧かつ詳細に展望・検討しておくべきであると思われる。	6) 事前評価をお願いして、わずか1年後では、開発目標の見直しを迫られるような状況の変化は生じていないと考えます。今後、中長期的に研究開発を進めていく上では、社会のニーズ等は不変のものではないことから、これを前提条件とする開発目標についても適宜見直し、柔軟な計画で研究開発を進めるべきであると考えています。

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>7) FBRサイクルの実用化候補概念としての有望な2～3の候補への絞り込みは是非とも必要であり、実施しなければならない。ただ注意しなければならないのは、絞り込まれた「有望候補」は絞り込みに用いられた「FBRサイクルの開発目標」のもとでの有望候補であることである。例えば「高増殖として増殖比1.2程度」を目標としなければ有望候補が変わってくる可能性もある。これを忘れて絞り込んだ結果だけを一人歩きさせてしまうと、FBRサイクル開発を取り巻く環境が変化したときに開発路線の見直しを怠り、無駄な投資をする危険性がある。この点には十分留意して研究開発を続けることを望む。</p>	<p>7) 成果報告書のとりまとめや、成果の公表に当たっては、有望候補の絞り込みの前提条件とした開発目標を明示し、誤解を招かないように注意します。          なお、社会のニーズ等は不変のものではないことから、これを前提とする開発目標についても適宜見直すべきであると考えています。          また、第2期等で選定されなかった候補についても、検討した内容はデータベースとして残し、将来の状況変化によって復活できるよう留意します。</p>
	<p>8) 軽水炉サイクル及び他の基幹電源と比肩する経済性のあるFBRサイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、第1期の中間段階では国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良及び革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を行うことが当面の目的と意義と考えていることに対しては概ね妥当と判断できるが、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対しての第1期での目的が技術選択肢の検討評価との関連でどのように位置付けられているのか。</p>	<p>8) 第1期での有望な選択肢の抽出や第2期での絞り込みは、5つの開発目標に照らして行うこととしています。一方、開発目標については、時代のニーズに合わせて柔軟に設定することとしています。これにより、時代のニーズに合ったFBRサイクルの開発戦略を提示できるものと考えています。</p>
	<p>9) 事前評価において目的と意義については国の基本計画の方向とさらに研究開発の実施可能性の視点からも考慮され、適切妥当であると判断されており、この中間評価においても、第1期の目標に向けて調査研究が進展し、第2期以降の2015年までの本調査の枠組みとなすべき検討評価が示され、その目的と意義はよりはっきりしたものになっていると判断され、妥当である。</p>	
	<p>10) 目的と意義がより明確になってきているので、長期的観点では、広い視点からの調査研究成果をFBRサイクルの研究開発計画へ段階的評価としての的確に反映させ、FBRサイクルの実用化像を示せるかどうか重要となっており、本調査研究は緊急にそのタイミングを逃すことなく提示された計画にそって進められるべきものと考えられる。将来に備えて今から対応しておくべき課題に位置付けるかどうかについては、説明資料からは明確に読み取れない。</p>	<p>10) 第1期より、「FBRの実用化が早いほど、資源の有効利用性、環境負荷低減性等に係わるFBRの持つ長所を享受でき、それだけ社会にとっての便益が大きくなる。FBRサイクルを実用化するための研究開発には少なからぬ時間を要するものであることを考慮すれば、実用化の見通しを早期に付けることが望まれる。」との考えの下に緊急性が高い課題として研究を進めています。第2期も同様の理由で継続すべきと考えています。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	11) FBR技術の多様性と幅をまず認識し、社会的・経済的ニーズ（社会情勢変化、経済性追及等）へ対応した広い視点から調査が進められている。これらのニーズへ柔軟性のある調査データを提供できるよう、調査を進めてほしい。	11) 拝承
	12) 関連技術の動向について、事前評価以降の状況について具体的な内容は必ずしもはっきり示されていないが、課題の抽出と解決方策に十分反映されているものと思われる。	

(2)研究開発目標 ＜全般＞	<p>1) 将来のFBRサイクルとしてどのような炉、燃料形態を追求するのかを明確にしてからそれに適した再処理方式を評価、選定していくことが最適なシステムを選ぶ場合に重要と思う。</p> <p>・またその際にはなぜそのサイクルを最適なシステムとして選んだかの根拠を明確にしておいて頂きたいと思う。</p>	<p>1) 5つの開発目標を実現するため、炉、再処理、燃料製造の全体で整合のとれた体系が大切と考えており、第1期での有望な選択肢の抽出では、炉や燃料形態を一義的に決めずに、まず、将来の多様なニーズを見据えた導入シナリオの検討を行い、FBRを必要とする時代のニーズに合わせて有望なFBRサイクル候補概念を検討します。</p> <p>・ 拝承</p>
	<p>2) 将来のFBRシステムを選定する場合には、大型炉、集中再処理方式で行くのか、中型炉(モジュールタイプも含む)ー再処理一体化方式(IFRタイプのような)で行くのかも重要な要素と考えられ、それによっては適した炉や再処理方式が異なってくることも考えられる。今年度にはこのような観点からの検討も実施して頂きたいと思う。</p>	<p>2) 炉システムとして大型炉、中型炉及び小型炉を検討していきますが、それらと再処理、燃料製造システムを同一サイトに設けるいわゆるコロケーションについても検討します。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>3) 研究開発目標は適当な項目が挙げられている。しかし、それぞれの項目の重要度は一律ではなく、しかも需要や社会環境により変化するものである。「安全性の確保を前提として競争力のあるFBRサイクル技術を提示する」ことが全体の大目標であり、各研究開発目標の上位目標として掲げると全体のまとまりがよくなると思う。</p> <p>4) FBRサイクル実用化の第1期は軽水炉の使用済燃料を処理して競争力のあるFBRサイクルを実現することである。燃料サイクルや開発目標の整合性はFBRが主流となる第2期以降において考慮すべきものとする。実用化のブレークスルー(第1期)をもたらすことが何よりも重要である。研究開発では本来考えられていたものとは別の方向に展開し成功するケースも多いので、整合性にとらわれて計画の硬直を招かないようにしてほしい。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>これらのことをより明確にするため、実用化のための開発目標や考え方を軽水炉と併存する第1期とFBRが主流となる第2期に分類するとよいと考えられる。</li> </ul>	<p>3) ご指摘の通り、まず、「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」とすることが必要最低限の要件と考えています。併せて、社会の多様なニーズに対応できるFBRサイクルとするため、環境負荷低減等の付加価値を持たせることも重要と考えています。</p> <p>4) 実用化戦略調査研究では、まず、高い経済性を有し競争力あるFBRサイクルが求められると考えています。炉、燃料製造、再処理の整合をとることによって、FBRサイクル全体で経済性の高いシステムを構築できると考えています。また、社会情勢の変化等に応じて、開発目標を見直しながら、柔軟に研究を進めることとします。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2000年度に、FBRサイクルの導入シナリオとの関連で、必要となる増殖比の時代推移と各炉型の開発の位置付けとの関係や、環境負荷低減のニーズ等を考慮した研究計画等を整理します。</li> </ul>
	<p>5) 21世紀の社会展望、エネルギー資源の動向や環境負荷低減に対するニーズの分析に基づいてFBRサイクルの意義付けが行われ、研究開発目標が立てられている。超長期で考えれば、エネルギー資源や地球環境の制約が重要であるとの分析は正しいと考えられる。しかし、その時期については不確定性が大きいと考えられ、より多面的な分析や戦略が必要と考えられる。さらに実用化戦略調査研究が長期にわたっていることを考えると、常に世界の発電市場やエネルギー資源や産業の動向について情報収集を行うとともに研究の節目ごとに分析を行い、目標を再 例えばPOWER-GEN/International/Europe/Asia/Africa等の会議は世界やその地域の市場やエネルギー産業の動向を知るよい機会である。資源量(ストック)が多量にあっても供給(フロー)が絞られると化石燃料の価格は高騰するので、エネルギーセキュリティの点でもFBRサイクルの実用化が期待されている。</p>	<p>5) 拝承</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>6) FBR実用化のために越えなければならない最も高いハードルは、社会的コンセンサスの形成であると考えている。現実問題として、ナトリウム冷却炉は過去の数々の事故(海外を含む)から危険であるというイメージが社会的に定着していることは否めない。これを覆すには大きな困難が伴う。よって「実用化戦略研究」としては、一次・二次冷却系の種別に伴うリスク(水素爆発の可能性や腐食性等)についても客観的に比較評価し得るよう、データを整えるべきであると考えている。</p> <p>・ この検討結果次第では、技術的には困難であってもガス冷却や水冷却を積極的に進める方が実用化への近道であるという議論もあり得るのではないかと考える。</p>	<p>6) 「もんじゅ」におけるナトリウム漏洩対策は、先ほどの訴訟においても、安全審査の妥当性が認知されました。しかし、同事故が社会に与えた影響を踏まえ、ナトリウム冷却炉の検討では、ナトリウムの漏洩可能性が少ない設計としていくとともに、改善された漏洩検知・緩和方策(ナトリウム漏洩:漏洩の早期検知、迅速なドレインによる漏洩量の抑制、ナトリウム水反応:水リークの早期検出、迅速な水ブローによる漏洩量の抑制、等)を講じて今後、概念検討の具体化及び関連する試験研究の実施により、これら冷却材に固有の問題について、適切な漏洩や腐食防止、漏洩の抑制・緩和がなされていることを確認していく考えです。なお、これまでの欧米露日で設計・建設・運転されたナトリウム冷却炉において、冷却材ナトリウム自身が周辺環境等へ与えるリスク要因になったことはありません。</p> <p>・ 各冷却材を用いた炉システムの概念検討では、各冷却材に適合する燃料形態を組み合わせ、それぞれの安全上の特徴を考慮した上で、各冷却材毎の魅力を引き出しつつ、炉心安全性と冷却材漏洩に対する安全設計対策について検討しています。各炉システム概念の成立性を概略判断した上で、経済性見通し、炉心性能、必要な開発課題の解決方策と開発期間などを具体化し、総合的に評価していくことで、実用化像の有望概念が抽出できると考えています。</p>
	<p>7) 2000年度の目標は、事前評価において大部分が評価済みであると考えている。1999年度の成果に基づいてより具体化した目標が設定されている。第1期は幅広く各選択肢の持つ課題を明らかにすることが重要であるので、これらの目標が達成できれば第2期計画へ進む大きなステップとなる。大型のナトリウム冷却炉については経済性向上等検討がなされているが、他の冷却方式については、検討不足の感がするものもある。</p>	<p>7) 重金属炉及びガス炉についても経済性の分析を進めています。重金属炉においては、大型鉛炉、中型鉛ビスマス炉及び小型鉛ビスマス炉のNSSSの構材物量を比較し、自然循環冷却を採用した中型鉛ビスマス炉が経済性向上の可能性が大きいことが分かりました。ガス冷却炉においては、ピン型燃料を用いた炭酸ガス炉及び被覆粒子燃料を用いたヘリウムガス炉のNSSS構材物量を比較し、ガスタービン直接発電方式のヘリウムガス炉が経済性向上の可能性が大きいことが分かりました。したがって、今年度にそれらの概念を追求して経済性の課題を明らかにします。</p>



評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	8) 研究開発目標は、炉心燃料、プラントシステム、燃料サイクルシステムそれぞれについての的確に設定されていると評価する。概念設計研究と並行して要素技術開発を実施することは大切である。	8) 拝承
	9) FBRサイクルの開発目標は事前評価で既に済んでいるので問題はないが、第1期段階の技術選択肢の検討評価を行う上での仕様のような評価指標設定について、特に燃料サイクルシステムにおける設定が未だ定まっていない状況にある。これらは技術評価を行う上で極めて重要であると思われるので、評価手法の構築を含めて今後十分検討をして、当面の目標をしっかりと設定して進めて欲しい。なお、各実用化候補概念の重点検討課題においては各技術の開発状況に違いがあることから、技術評価手法においてそれらをどのように配慮して考えているのか。この点についても十分説明ができるような考え方を構築してほしい。	9) 第1期では、5つの開発目標に対する達成可能性を技術的に評価し、有望な候補概念を抽出することとしています。評価指標、評価手法については、第2期で候補概念の比較評価を行う際の一つの判断材料に使いたいと考えています。 また、ご指摘の通り、各技術の開発状況の違いを考慮し、開発が進んだ技術だけが優先されないよう留意し、候補概念の抽出や要素技術開発テーマの選定を行いたいと考えています。 なお、燃料サイクルシステムの設計要求に関連して、開発の基本要件はOHP12及び14に示しています。検討にあたっては低除染及びTRUのリサイクルを考慮した被曝低減対策、発熱対策などに留意しています。
	10) 本研究を進める上で、ある程度具体的な目標時期を設定する(競争力のあるFBRサイクル技術を2015年頃までに提示する)ことの必要性は理解できるが、目標時期を固定的に考えずに検討を進めるべきである。	10) 拝承
	11) FBR燃料を低除染燃料に設定し、FBRサイクル、プラントシステムにおける安全性、経済性、資源有効利用、環境負荷低減、核拡散抵抗性の広い観点からの目標の設定は概ね適切と評価できる。炉心損傷の恐れのある事象における炉心の工夫による原子炉内での自然終息、ヒューマンエラーの徹底防止等による安全性、廃棄物量の低減最小化等、新しい技術展開を図っている。ただ、経済性の2030年頃の設定、倍増予測30年からの増殖比1.2の設定にはなお説得性のある説明が必要である。	11) 経済性の達成時期2030年は、軽水炉のリプレースの時期に軽水炉に比肩する経済性を達成することを目標としたものであり、増殖比1.2は、エネルギー需給バランスの低位ケースにおいて、我が国の天然ウラン累積需要量が現実的な量に納まる条件として設定したものです。これらは、固定的に考えている数値ではなく、今後、さらに検討を加えることとしています。

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	12) 実用化開発のための目標設定に対する詰めはまだ検討を要するとしても、FBRサイクルシステムの設計目標は的確に設定されていると評価できる。	
	13) ブレークスルーすべき点は、全般的に明確に示されている。ただ、かなり現実性の高いと思われる検討の中で、ナトリウム炉の新発電方式の検討のように、本調査研究の期間内に技術的に限っても結論が得られるか疑問の残る部分も見受けられる。	13) 革新性の極めて高い技術については、実用化の可能性及び道程を明らかにしつつ検討を進めていきます。
	14) 第1期として技術の成立性からの各実用化候補概念の重点検討課題の抽出は、妥当と判断する。ただ、燃料サイクルシステムの再処理を湿式と乾式のコンビネーションで行くことに対し、日本独自のアイデアを如何に組み入れられるか、第2期の研究に向けてさらに明確な検討が必要であると考え。	14) 第1期では、それぞれの候補概念の長所を良く把握することを主眼とした検討を進め、第2期では、ご指摘の通り、ハイブリッドも含めたオリジナルなシステムの構築に力を入れたいと考えています。
	15) 関連技術は、事前評価時の内容と大幅な変化はないと思われ、その動向は、FBRサイクルの基本的な考え方の中で十分に反映されていると思うが、関連技術動向について、明確に示して頂いた方がよい。	15) 事前評価以降の関連技術動向については、国際会議、情報交換会議等を通じて的確に把握するよう努めています。例えば、GLOBALやICONE-8の国際会議、米国のNERI、GENE-IV、TOPSやANS会議、日本原子力学会、原子力平和利用フォーラム、日仏高速炉専門家会議等が挙げられます。
<評価手法>	16) 評価手法について定量評価と定性的な相対評価を組み合わせ、多面的な視点から評価する手法を検討することは適切である。	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>17) 本調査研究(第1期)の開発目標は、FBRサイクルの実用化候補概念を抽出することにあるが、それに先立って実用化候補概念に関する評価方式が大きな検討課題とされている。特に評価の視点として「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」「技術的実現性」が挙げられている。それぞれに重要な視点であることはいうまでもない。しかし、中間評価にあたって、次の点を指摘しておきたい。</p> <p>中間評価のための説明資料によれば、「実用化候補概念の抽出にあたって、上記6つの視点に関して評価指標を作成し、さらに個々の評価指標を統合した総合指標を作成する」とされているが、個々の評価指標はもとより総合指標の具体的な作成基準が示されていない。これは評価方式の根幹をなすものであり、本来中間段階で示されるべきものと思われる。その際、問題となるのは、個々の評価視点(事象)が完全に独立ではないということ。</p> <p>例えば、「経済性」は、候補(FBRサイクル)概念の発電電力単位当たり建設費用を指標とすることと記されているが、建設費用は「安全性」や「資源有効利用性」を向上させれば増大する性質を有している。同じ発電能力を想定した候補(FBRサイクル)概念であっても、「安全性」や「資源有効利用性」を高めれば、間接的にせよ建設費用を増大させ、「経済性」を低下させる。いわば、「経済性」指標は他の指標と負の相関関係(あるいはトレード・オフの関係)を持っているのである。</p> <p>このような指標を並列させて、総合指標を作成することは、実用化候補を評価する上で問題が生ずる。事前評価の際に言及したこととも関連するが、まず「安全性」「資源有効利用性」「環境負荷低減性」「核拡散抵抗性」「技術的実現性」の指標を作成し、これらの総合指標を作成すべきである。これらは、いずれも「経済性」指標に影響を与える指標であり、仮に総合指標が同一のレベルであるときに、「経済性」が実用性評価の一つの指標となると考えるべきである。</p>	<p>17) 5つの開発目標に技術的実現性を加えた6つの評価指標を用いて評価を行うことは重要だと考えています。ただ、6つの評価指標をどのように組み合わせて定量的に評価するか、その評価手法については、現在検討中です。この評価手法は、第2期で候補概念の比較評価を行う際の一つの判断材料に使いたいと考えています。第1期では、評価指標の感度解析を行い、現在検討している評価手法の適用性を確認したいと考えています。</p>
<p>&lt;安全性&gt;</p>	<p>18) 安全設計については燃料形態及び冷却材の特徴を考慮して行うことは妥当である。それぞれの炉や燃料の特長を生かした設計が行われ、評価に反映されることを期待する。</p>	<p>18) 拝承</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
＜経済性＞	<p>19) 原子炉炉心溶融事故の進展や事象の重要度は冷却材の種類によって異なるので、その考え方を炉型によって整理することがまず必要である。軽水炉の炉心溶融事故に対する考え方は日本でも整理されつつあり、それらと矛盾せず、バランスのとれた考え方をする必要はある。例えば、再臨界は軽水炉では主要な事象ではなく、溶融燃料の冷却性が重要である。原子炉停止系は多重に設ける必要があり、その全数が機能を果たさない事は極めて考えにくい。冷却材ボイド係数との関連や万一の時の放出機械エネルギーとの関連において、確率的な考察も含めて合理的な考え方がなされる必要がある。受動的原理の採用はシステムの簡素化の点で魅力的な場合があるが、その信頼性の実証は必ずしも十分になされていないことに留意するべきである。</p>	<p>19) 冷却材の違いのみならず炉心燃料の特徴及び各炉型での安全設計対策の違いも考慮して、炉心損傷事故に至る起因事象、事象推移についての考え方は、これまでに整理してきています。例えば、水冷却については、軽水炉と同じ安全上重要であるLOCA評価だけでなく、炉心損傷時の再臨界の発生可能性についても検討しています。これは軽水炉MOX燃料の核分裂性Pu富化度は3%程度ですが、水冷却高速炉では15～20%とナトリウム冷却と同様の富化度であり、炉心反応度体系が最大でなくなるためです。さらに、軽水炉と同様な安全論理の適用可能性についても、炉心損傷時の再臨界のリスクを無視できるほどに低減できる可能性があるかの検討を進めていく考えです。</p> <p>ナトリウム冷却で炉心損傷時に再臨界に至った場合には大きな機械的エネルギーが発生することから、特に大型炉の場合には原子炉容器や炉内構造物の厚肉化が必要になるとともに、格納容器の大型、高耐圧化が必要になり、経済的デメリットが大きくなります。一方、炉心で再臨界回避を図れば、炉心損傷対策に関する経済合理性と安全性の高度化がねえます。</p>
	<p>20) 現時点では安全性についてどのような定量的比較を目標としているのか不明確である。</p>	<p>20) 現在、安全性等の評価指標の定量化を検討中です。例えば、IAEAの将来炉の安全目標(炉心損傷確率: 10E-5/炉年 以下)をミニマムリクワイアメントとして要求します。</p>
	<p>21) 経済性の目標は、日本国内の現在の軽水炉と競争できるとの視点で設定されており、妥当である。ただし、日本の軽水炉の経済性の目標自身も市場環境等により変化していくと思われ、さらに国際的な電力市場はより厳しいので、より意欲的な目標も必要である。</p>	<p>21) 拝承</p>
	<p>22) 実現が期待されるFBRサイクル開発目標と各システム設計目標が設定できているが、コスト目標については代替エネルギー資源の価格動向を把握しタイムリーに変更できる柔軟性が必要である。</p>	<p>22) 今後、中長期的に研究開発を進めていく上では、社会のニーズ等は不変のものではなく、これを前提条件とする開発目標についても適宜見直し、柔軟な計画運用を心がけ研究開発を進めるべきであると考えています。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
<p>＜環境負荷低減＞</p>	<p>23) FBRサイクルの開発目標のうち「TRU(超ウラン元素)燃焼及び長半減期FP(核分裂生成物)の核変換」はFBRの可能性を追求するという点では適切であるが、エネルギー資源の少ない日本がFBRサイクルの実用化にまず第一に期待してきた/しているものとは異なる。この技術はTRUの取扱い量の経験や多種類の同位体分離の複雑さ、困難さから見てもまだ極めて初期の研究段階にある。これを他の開発目標と同時に達成すべきと考えることは計画全体の達成を危なくする恐れがあり、適切ではない。環境負荷低減性の開発目標は「発生する放射性廃棄物量の低減」即ち「リサイクルの推進」に重点を置くとよいと考えられる。</p>	<p>23) TRU燃焼や長半減期FPの核変換については、段階的に実用化に取り組んでいくべきものと考えています。TRU燃焼から始めて、技術的な成立性を見た上で、長半減期FPの核変換についても、順次、取り込んでいくこととしています。</p>
	<p>24) 高速炉は、熱中性子炉に比べてマイナーアクチニド(MA)を燃焼できたり、不純物の多い燃料でも炉心性能の低下が少ないという特徴を有している。FBRサイクルの検討にあたって、その特徴を再処理等にどう生かせるかとの視点は重要であるが、「競争力のあるFBRサイクルを提示する」との大目標から考えれば、FBRの設計目標におけるMA混入率やFP混入率の数値は「炉心性能の大幅な低下をもたらさない範囲において」とでもすべきであり、数値目標として最初から挙げるのは適当でない。むしろ、炉型ごとに炉心性能の劣化をもたらさない上限の数値を設計結果として示すのが適当である。</p>	<p>24) 設計目標として示したMA混入率、FP混入率の数値は、設計開始時点で、TRU燃料としてのリサイクル、低DF燃料のリサイクルを考慮し、炉心性能及び炉心安全性の低下をもたらさない範囲で設定しています。これらの数値については暫定値であり、2000年度の再処理や燃料製造の検討において最適化することを考えています。</p>
<p>＜核不拡散性＞</p>	<p>25) 本検討を通じて核拡散抵抗性についての定義、要件はどのようなことかも検討してほしい。</p>	<p>25) 核分裂物質の盗取の困難さや核兵器への転用性を定量的に評価すべく、2000年度に検討する予定です。なお、米国のTOPS(Technical Opportunities for Increasing Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems)のような会合にも参加し、欧米の専門家からの知見も得ながら検討を進めます。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>26) 核拡散抵抗性のうち「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」との目標を掲げるのは適切だが、技術の段階的発展性を考えるとそれを実用化の第1期で達成する必要は必ずしもないと思われる。実用化し、技術に習熟すれば、遠隔自動化、遠隔保守の経験を経て第2期で進むと考える方が実現性が高いと思われる。核不拡散の点では、軍事用のプルトニウムや核兵器に関わる機密情報の管理が民生用プルトニウム利用に伴う問題よりも圧倒的に重要である。これらと民生用プルトニウム利用を混同して論じることは正しくない。核不拡散性は国際政治、核物質や情報管理でまず対応すべき問題である。核拡散抵抗性の開発目標としては「核物質防護性及び保障措置対応が良好な設計」に重点を置くことでよいと思われる。</p>	<p>26) 従来のPUREX法は高純度のプルトニウムを単独で抽出するというニーズから開発の発想がスタートしたものであります。このPUREX法では、経済性の目標も達成できず、抜本的な見直しが必要になったと認識しています。このため、FBRの特長を活かし、U/Pu/Npの混合抽出や低除染を許容した単サイクル抽出と遠隔での燃料製造の組合せにより経済性向上を目指すとともに、この特長を核不拡散性に役立てようとの考えです。尚、AmやCmを含めたTRUのリサイクルは資源有効利用、環境負荷低減を含めた総合的な観点から目標として設定しています。</p>
<p>(3) 研究開発計画</p> <p>&lt;全般&gt;</p>	<p>1) 国内外の幅広い技術選択肢を検討し、候補技術の整理・集約ができていますが、開発期間が長期に亘るため、今は実現が難しくても将来可能となる技術もあり、現状の整理・集約による評価結果を固定化することなく、技術情報の収集・評価を行い評価結果を見直していく必要がある。</p> <p>2) 再処理技術のチェック・アンド・レビューでは、軽水炉燃料を処理する第二再処理工場への採用技術としての面を考慮することが必要である。</p> <p>3) 研究開発計画は第1期の成果を踏まえFBRサイクルの実用化に向けてさらに検討を深めるべく作られており、適切であると評価する。第1期と異なり5年計画とやや長期になることから3年目に中間まとめをすることとなっており、適切に立てられた計画である。</p> <p>4) サイクル機構に与えられた使命はFBRサイクルの実用化であり、その範囲ではよく計画が練られているが、FBRサイクル実用化の必要性そのものに関する国民全体の合意形成についても、もっとサイクル機構が前面に立って努力されることを望む。</p>	<p>1) 第2期等で選定されなかった候補についても、検討した内容はデータベースとして残し、さらに、国内外の関連情報には常に目を向け、柔軟な研究開発の進め方とします。</p> <p>2) 考慮することとしています。</p> <p>4) 拝承</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	5) プラントシステムに関してはナトリウム冷却炉と他の炉型とで検討の厚さが大きく異なるが、これはこれまでの知見の蓄積状況の違いからやむを得ない。検討の遅れている炉型については、技術的成立性に係わる課題にまず絞って検討を進めるという方針を支持する。	
	6) 第1期は実用化候補概念の技術的評価で、第2期は候補概念の可能な限り定量的な比較検討ができるレベルまで設計研究を深めることにあり、その結果として実用化概念として有望な2~3の候補に絞り込むことにあることから、第1期と第2期の目標の違いは明確であると判断できる。しかし、第1期での検討で設計データ等の不足のために妥当な評価ができていないか疑問が残る。まだまだ先のことであるので、もう少し候補概念の検討をしてからでも遅くはないと思われる。	6) 第1期では比較評価により候補概念を安易に絞り込むことはせず、技術的な観点から実用化に向けて大きな問題がないかどうか(メンテナンス性等)を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを候補から外すこととします。
	7) 一方、第1期で明らかになった課題に対して第2期でどこまでやり遂げられるかも重要な課題である。それは第1期での検討結果の成果の度合いと第2期での予算及び研究開発計画と研究開発環境の整備を含めた研究開発体制にかかってくると思われる。	7) 2000年度に第1期の成果の充実を図るとともに第2期の計画の検討を深めます。また、第2期では研究開発環境の整備にも努めます。
	8) 研究開発(R&D)段階ではややもすると廃棄物に対する検討が甘くなることから、廃棄物評価が適切に行われるような研究開発計画を考えていくことが望まれる。その意味で第1期での候補概念の技術評価において廃棄物に対しての第2期で検討すべき重点課題の抽出は極めて重要なものになると思われる。	8) サイクル技術の検討においては廃棄物発生量低減化を一つのポイントとしており、1999年度にはこの観点からの改良プロセスを提案してきました。2000年度はさらに詳細な検討を行うとともに、第2期以降の研究開発計画の具体化を図ってまいります。
	9) 中間成果の分析とそれを受けた課題の抽出がなされ、第2期への展開に重要な2000年度の計画も具体的に明らかにされており、その意味で、適切な見直しが行われていると判断される。	
	10) 第1期の成果を見直し、その成果を詳細に検討してFBRサイクル実用化候補概念の絞り込みを第2期に行うことが明らかにされている。その基本的な考え方と2005年までの調査研究の展開も明確になっており、妥当である。	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	11) 研究開発項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等はいずれも具体的に示されており、妥当である。資金計画(予算の規模・配分)は妥当である。第1期での燃料サイクルシステムへの投資を十分反映できる成果を出して、第2期での絞り込みに入ってもらいたい。	11) 拝承
	12) 研究内容を独創性、創造性に富んだものにできるかは、日本独自のアイデアをどこまで生かして行けるか、今後の調査研究の成果にかかっていると思う。	12) 拝承
	13) 計画の見直しへの対応とマイルストーンの置き方については妥当であるが、その時点でのチェック・アンド・レビューについては、絞り込みのための課題の評価指数等定量的な目標を的確に設定していく必要がある。	13) 拝承
	14) 使用する施設・設備は、適切である。	
＜第1期＞	15) FBRサイクルとしての技術選択肢として有望技術を抽出した後も、内外の技術開発動向を十分に把握し、変更すべき点は速やかに変更して、決して一本道の開発にならないように多岐路線を継続する必要がある。	15) 拝承
	16) 第1期の研究計画は、実用化候補概念の評価体系を確立し、確立された評価体系にしたがって実用化候補として複数のFBRサイクル・システム概念を抽出することである。	16) 第1期では、5つの開発目標に対する満足度及び達成可能性を技術的に評価し、有望な候補概念を抽出することとしています。評価指標、評価手法については、第1期において適用性を確認し、その後の改良を踏まえて、第2期で候補概念の比較評価を行う際の一つの判断材料に使いたいと考えています。
＜第2期＞	17) 本評価にしたがって、さらに5年間の研究を進め、そこでチェック・アンド・レビューを受けることが適切と思う。	



評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>18) 第2期の展開については「競争力のあるFBRサイクル技術を提示する」との全体目標との関連で第1期の中間成果がどうまとめられたかが明確でない。実用化候補概念として絞り込みを行うことは、実用化の可能性が示される場合は必要であるが、それが十分に示されているとは言い難い。プラントシステムについては改良をさらに追求し合理化される根拠をもっと説明する必要があるように思われる。ただし、混合酸化物(MOX)燃料要素技術開発、再処理、燃料製造等、燃料サイクルシステムの主要要素技術のように炉型に共通な要素技術開発については第2期の計画を進めることは適切と考えられる。</p>	<p>18) 第1期では、幅広くFBRサイクル技術の技術選択肢のサーベイを行い、技術的な観点から実用化に向けて大きな問題がないかどうか(メンテナンス性等)を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを候補から外すこととします。有望な概念を開発のレベルが低い、開発が難しい等の理由で落とすことのないよう留意しています。第2期では、抽出された有望な候補概念について、試験データも含めて根拠を明らかにして、開発シナリオの柔軟性を保持しつつ、絞り込みを行って実用化候補概念を選択していきます。</p>
	<p>19) 第2期の研究計画は、抽出された実用化候補概念を具体的な技術として実証することである。いうまでもなく、すべての実用化候補概念が実証可能ではない。その際には、改めて第1期における評価指標(特に「技術実現性」)の事前設定に立ち返るべきである。第1期と第2期の研究計画の違いは明確であるが、第2期途上で第1期の研究計画に基づく研究成果を再検討できるような柔軟性を持たせておくべきであると思われる。</p>	<p>19) 拝承</p>
	<p>20) 第2期計画では、実用化候補概念への絞り込みを、必要な試験を含めて行うとされており、2001年度の本研究の進め方としては妥当と考える。ただし、照射試験準備等も含まれているので第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるような計画を立てることが必要である。</p>	<p>20) 拝承</p>
<p>(4) 研究実施体制 ＜体制、運営＞</p>	<p>1) 実施体制については、サイクル機構、電力、メーカーからなる協力体制がとられているのは素晴らしい。国内外からのアイデアの募集や国内外の主要原子力研究機関との協力もなされており、適切である。</p> <p>2) この1年間に研究体制は協力機関、委員会等を含めよく準備されてきた。国内の他機関と連携を取り、密接な協力の下に進めることは、技術の継承、発展の上でも大変有益である。</p>	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
<p data-bbox="338 749 510 780">&lt;国際協力&gt;</p>	<p data-bbox="555 200 1379 330">3) 研究実施体制は適切である。人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用等、第1期の実績から運営はうまくいっているものと評価できる。今後も他機関との協力・連携に努力されたい。</p>	<p data-bbox="1417 200 1507 232">3) 拝承</p>
	<p data-bbox="555 330 1379 526">4) 第1期での体制を第2期ではさらに強化することを考えているようである。他機関との連携強化を含めて具体的にどのような方策を考えているか。アイデア公募等による新しい芽の発掘以外にも、第1期で明らかにされた今後の検討課題に対して、必要と考えられる基礎・基盤的な研究課題を含めて研究課題への研究協力等、研究実施体制の幅広い展開も必要となると思われる。</p>	<p data-bbox="1417 330 2141 495">4) 第2期で実施するアイデア公募は、第1期で抽出された候補概念に対してさらに独創性、創造性に富んだ革新的技術を広く開拓する観点から継続します。また、アイデア公募の形態に限定せず、大学、研究機関との協力を検討していきます。</p>
	<p data-bbox="555 589 1379 718">5) サイクル機構内の体制、外部との連携及び委員会等の活用等妥当である。国際協力を含む他機関との協力・連携についても、強化する方針が示されている。アイデア公募等積極的な対応も進んでいる。国際協力も適切に行われている。</p>	
	<p data-bbox="555 749 1379 976">6) 燃料サイクル技術としては、これからはわが国だけではなく、世界が認める技術の開発が必要と思う。そのための必要な要件を十分取り入れるとともに、日本ですべて技術開発をするのではなく、各国で進めているサイクルシナリオ(欧米が現在検討している分離変換も含む)の共通技術の共同開発や、海外施設の有効利用が重要なことと思う。このような形での開発シナリオの構築をお願いしたい。</p>	<p data-bbox="1417 749 1507 780">6) 拝承</p>
<p data-bbox="293 1009 510 1041">&lt;アイデア公募&gt;</p>	<p data-bbox="555 1009 1379 1237">7) アイデアを国内外から集めるための第1期に行われた努力は十分であり、多くの応募があり有益であったと考える。このような公募制度はアイデア創出を刺激する効果があるので、第2期でもアイデアを公募する制度を継続させることが好ましい。その際、アイデア公募の規模や方法、アイデアの選定方法などを明らかにするべきであると考え。他機関の意見を採り入れる努力は評価できる。</p>	<p data-bbox="1417 1009 1507 1041">7) 拝承</p> <p data-bbox="1447 1080 2141 1244">なお、第1期で実施したアイデア公募について、インターネットで公募するとともに原子力学会誌にも応募要領を公表し、また、国内はもとよりサイクル機構と交流のある海外の大学・研究機関(海外では23箇所)へも応募要領を郵送し、公募を受付けました。</p> <p data-bbox="1447 1244 2141 1370">審査に当たっては、独創性・新規性、魅力ある実用化像構築のための有効性、実用化への適用性、研究計画の妥当性の観点から評価し、選定しています。この審査の観点は応募要領に公開しています。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	8) 公募研究も成果が出ているが、今後は段階的に課題を絞っていくことも考えられる。	8) 第2期で実施するアイデア公募は、第1期で抽出された候補概念に対してさらに独創性、創造性に富んだ革新的技術を広く開拓する観点から継続します。
(5) 研究成果 5.1) 得られた成果の内容 <全般>	1) 研究実施体制・研究予算・研究成果等については、概ね妥当と思われるが、現時点で適切な中間評価を行うことは困難である。 2) まだ本研究は始まって1年であり、独創性のある成果を挙げられる段階ではなく、少し長い目で見ることが必要がある。研究の内容や進捗状況については、積極的に公表されているので計画は概ね達成されている。特に、ナトリウム冷却炉と再処理については、これまでの経験を生かした良い成果が出ている。 3) 短期間に一定の成果をあげていると評価する。第2期に進むに十分な準備がなされつつあると判断できる。実用化に向けても電力との協力体制のもとで厳しい目標設定のもと課題が整理され、その解決に向けて努力されていると評価できる。 4) 評価項目の研究成果の項について、1999年度の事前評価報告書において、「第1期は実用化候補概念を、従来技術にとらわれず、またデータ不足等の理由から新技術を落とすことなく複数抽出し、実用化までの開発シナリオを策定する。」となっている。この様な観点から、今回の中間評価報告書をながめた場合に、第2期に向けての検討を行う上で、現時点で候補を絞りすぎと考えられる。 5) 第1期の中間での成果は、計画にしたがった進展があり、十分であると評価する。費用対効果は、まだ1年の成果であり、その効果が見合ったものとなっているかどうか、まだ判断は困難である。第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出への成果は進んでいると思われる。	1) 第1期の最終的な成果については、来年度に実施する中間評価において評価していただきます。今年度は、2001年度の立ち上げの妥当性までの評価をお願いします。 4) (5)研究成果の8)、18)、22)を参照願います。 5) 今後とも、費用対効果に留意した効率的な研究に努めます。

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
<p>&lt;炉心燃料&gt;</p>	<p>6) 炉心燃料に対する中間成果と課題、2000年度の計画はよく整理されているように思われる。なお、窒化物燃料の炭素14の生成は廃棄物の処理処分時の核分裂生成物の放射能やその性状、リスク評価における重要性を考慮して合理的に検討されるべきである。</p>	<p>6) 窒化物燃料を使用した場合の炭素14の問題に関しては、再処理施設における公衆被曝への影響、炭素14を固定化することによる固体廃棄物発生量の増加、窒素15の濃縮・回収費用等を考慮して検討します。(天然窒素を使用した場合、湿式再処理法においてオフガス中に炭酸ガスの形で移行した炭素14を吸着し、水酸化カルシウム等で固定化してセメント固化すると使用済燃料(HM)1トン処理当たり約50本の固体廃棄物が発生します。)</p>
	<p>7) FBRの燃料は、軽水炉に比べて不純物の許容量を高くとれる可能性があり、これに基づく燃料サイクルの改良方策を検討するとこの視点は適切である。</p>	
	<p>8) 「窒化物燃料は、事故時の窒素解離問題等によりガス炉との組み合わせを前提に考える」となっているが、事故時に窒素解離圧が問題になる程、炉心温度が上昇しなければよいと考える。また、窒素が解離すると金属ウランが析出し、その金属ウランが窒素を吸収し金属/窒化物二相共存となり窒素圧は一定となることも予想される。従って窒化物燃料をガス炉に限定する必要性は時期尚早と考える。またこのような論理ならば、酸化物の酸素とナトリウムとの反応の方が事故時の挙動としては重大であり、酸化物もガス炉または水炉により適しているとも考えられないか。従って中間評価については、「窒化物燃料については、事故時のガス解離圧評価を行う研究を第2期で行う」とするのが妥当と考える。</p>	<p>8) 窒化物燃料については、燃料温度が融点近くまで上昇した場合には窒素解離の課題があることから、この点が問題無い状況で使おうとすると、①炉心溶融からの窒素解離を仮定しても問題にならない概念で、温度を下げず高温条件のまま使う場合には、仮に窒素解離しても1次系の圧力上昇が有意な大きさにならない、ガス冷却材(ヘリウム)と組み合わせる、②受動安全性の強化により炉心溶融を想定不要とするため、温度を下げた場合には、鉛ビスマス、ナトリウム共に適用可能ですが、窒化物燃料との相性の良い鉛ビスマス冷却材と組み合わせる、のが良いと考えられます。</p> <p>なお、ナトリウム冷却材については、溶融した高温の窒化物燃料とナトリウムとの熱的相互作用(FCI)は、これまでの試験研究によって大きな機械的エネルギー放出の原因になると考えられるので、燃料溶融を仮定する場合には好ましくないと考えられます。</p> <p>また、窒素解離はこれまでの検討から、雰囲気圧力や燃料組成などに影響され、炉心溶融時の温度上昇が抑制されれば、窒素解離の問題は有意な影響を与えない可能性があることがわかってきました。しかしこの現象を定量化していくためには2500℃以上の高温試験を実施する必要があることから、現在は上記のようなアプローチを考えておりますが、今後とも可能性を調査していきたいと考えます。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
<p data-bbox="264 446 515 509">&lt;プラントシステム&gt; [ナトリウム炉]</p>	<p data-bbox="555 227 1375 384">9) 第1期の中間成果として幅広い候補概念技術の検討及び概略的な評価を行うことについての目標はほぼ達成されているものと思われるが、今後の課題については、技術検討会でも十分議論されることを期待する。そこでの結果を踏まえて最終的な結果としてまとめてほしい。</p>	<p data-bbox="1415 227 2128 321">9) 設置した3つの技術検討会では、自由な立場で幅広い意見をもらい、それを我々の活動に反映していくこととしています。</p>
	<p data-bbox="555 478 1375 642">10) 検討対象としたFBRシステムは第1期としては包括的であり、適切である。検討結果もナトリウム冷却炉についてはよく整理されているが、ナトリウム冷却炉については過去に行われた実証炉の研究開発の成果や経験をできるだけ活用すべきであるが、それに対する言及が少ないように思われる。</p>	<p data-bbox="1415 478 2128 572">10) 実証炉の研究開発成果はナトリウム冷却炉を中心に十分活用しています。第1期の成果報告では、この点について具体的に記述することとします。</p>
	<p data-bbox="555 744 1375 964">11) コストダウン方策については、技術的な開発項目や不確実さの大小も反映して合理的に取捨選択される必要がある。ナトリウム冷却炉のループ数の削減については炉内流動、熱応力、流量喪失時の挙動等を考慮しつつ、機器の標準化を含めて大出力炉に至る開発の考え方を整理する必要がある。液体金属冷却炉は炉心のみならず、2次系や補機系を含むプラント全体を検討する必要がある。</p>	<p data-bbox="1415 744 2128 1293">11) ナトリウム冷却のコストダウン方策としては、低圧系と高温システムの特長を生かした大出力化や機器・配管の薄肉化が有効です。ループ数の削減は、この特長を最大限活用した方策です。そのため、配管口径の大型化と配管内流速の増大に伴う機器の振動防止、温度成層化による熱荷重の低減、流量喪失時の炉心安全性の確保、等の対策が重要になります。 大出力炉を開発する場合、PWRでは機器の大型化とループ数の増加を組み合わせ対応していますが、BWRでは機器の大型化で対応しています。出力に依存しない機器の標準化を達成するにはループ数の増加で対応させることも可能ですが、スケールメリット効果を生かし切れないデメリットがあります。そのため、本研究では、出力の増大に伴いループ数を増加させず、2ループ構成のままとしています。大出力炉の開発ステップの考え方については、2000年度に整理することとしています。</p>
	<p data-bbox="555 1458 1375 1481">12) 大型ナトリウム冷却炉については次の点をさらに示す必要があ</p>	<p data-bbox="1415 1458 2128 1481">12)</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>a. ナトリウム冷却炉等液体金属冷却炉は燃料交換、貯蔵、カバーガス、配管の予熱系など補機系がプラントコストに占める割合が大きいと言われている。これらについてどう改良がなされるのか明らかでない。炉容器と1次系の図のみならず、プラント全体についてこれらも含めた検討結果を配置図とともに示す必要がある。</p> <p>b. スーパーフェニックス、EFR(ヨーロッパ高速炉)等、欧州の大型炉のコスト分析やその結果との比較検討を行い、今回のコスト低減の程度やそれぞれの項目の寄与が合理的であることを示す必要がある。ロシアの高速炉のVVER(ロシア型PWR)との比較も参考になると思われる。</p> <p>c. 機器合体、ループ数削減、12Cr鋼、免震等の採用については、コストダウンのみならず、それぞれ機器設計や保守の複雑さ、ポンプや熱交換器の大型化、材料費、免震設備のコストなどコスト上昇要因もあると思われる。</p> <p>・ 設計から見ると、開発要素が大きいものが並んでいる。3次元免震はまだできないが、研究開発の方向としては妥当と考えられる。機器合体については無理をしている感じがある。むしろ、実証炉程度の方が設計として現実味があると思われる。いずれにしても、今回の検討で画期的な改良点が出たというわけではなく、軽水炉に優るという目標をナトリウム冷却炉で達成するのは、燃料サイクルコストを別にしても容易ではないという印象である。しかし、コストは様々な要因があり、特に開発途上にあるものは大きい誤差を伴った1つの推定あるいは期待でしかない。従って、コスト低減効果については判断し難いが、超長期エネルギーセキュリティを考えるとナトリウム冷却高速炉が必要ということとはできる。</p>	<p>a. BOPに関するコストダウンについても検討しています。電気計装系、タービン系、換気空調系等のBOPについて、実証炉の設計経験では建設費に占める割合が5割程度です。この割合を低下すべく実証炉のBOPのコストダウンを参考にして、EVSTの削除、ループ数削減による計装系の削減等を加えて、一層の経済性の向上を図ってきており、検討の結果を第1期の報告書に記載し</p> <p>b. 海外の経済性評価事例のレビューも行き、我々のコスト分析の確度を高めていきます。欧州のナトリウム冷却大型炉スーパーフェニックス及びEFRとの主要NSSS及び燃料取扱系の物量を比較しますと、機器・システムのコンパクト化、ループ数削減等により単位出力当たりの物量が確実に減少していることが分かります。</p> <p>c. 御指摘のコストダウン方策に伴うコストアップ要因についても検討を進めています。コストアップ要因として、機器合体においては保守・補修の複雑さ、ループ数削減においては機器の大型化による製作コスト上の課題、12Cr系鋼の採用においては熱処理及び防錆上の課題、免震構造の採用においては免震装置のコスト等について考慮しなければなりません、いずれもコストダウン効果を打ち消すほどの悪影響は及ぼさない見込みです。今後も引き続きこれらの検討を進めて第1期の報告書に反映させたいと考えています。</p> <p>・ 実用化戦略調査研究では、2015年頃の基盤技術の確立をめざして、経済性向上等に係る革新技術の採用を積極的に図っていきます。3次元免震に関しては、直接的なコストダウンも狙ってはいますが、設計の標準化による経済性向上の効果がありません。熱交換器とポンプの機器合体に関しては、実証炉では2次系に採用していたものを、1次系に採用しようとするものであり、技術的難度は高くなりますが成立性の見込みは充分あると考えています。ただし、ポンプの振動等による伝熱管のフレットング摩耗、疲労破損の防止が解決すべき課題であり、早急にモデル試験等の研究に着手し、成立性を見極めていきます。</p>
[重金属炉]	13) 重金属冷却炉については、鉛ビスマス冷却が鉛冷却に比べて優れていること、中小型炉に適しているとの中間評価結果に同意できる。	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	14) 重金属冷却炉は液体金属冷却炉の一種であり、高速炉としての炉心特性上の特徴はナトリウム冷却炉に近い。液体金属冷却炉の中ではナトリウム冷却が一番優れているように思える。ナトリウム冷却炉に比べて、中間熱交換器とループが不要となる利点はあるが、それでもPWRと同じである。	14) 鉛及び鉛ビスマスは、ナトリウムに比べ化学的に不活性であることから一般の方々に受け入れられやすい概念であると考えています。さらに鉛ビスマスを用いることにより、メンテナンス性や高融点による運転温度範囲等の制約が緩和され、完全自然循環によりシステム簡素化を狙えるポテンシャルを有していると考えられます。また、窒化物燃料を用いて、燃料溶融に至らず、CDA想定不要にできる概念を狙うことができると考えていることから、第2期でも鉛ビスマスを中心に継続して検討することとしています。
[ガス炉]	15) ヘリウム冷却炉については、ガスタービンとの組合せによる経済性向上の可能性を検討するのは適切である。炉心溶融時のシナリオと対策については再臨界回避が重要かどうかも含めて設計との関連においてガス冷却炉の考え方を整理することがまず必要である。	15) 再臨界回避の考え方については、(2)研究開発目標の19)を参照ください。 なお、ガス冷却では、通常のピン型燃料に加え、耐熱燃料(窒化物燃料ベースの被覆粒子及び耐熱被覆管)を採用して、受動的安全性を強化してCDA想定を不要とできる炉システム概念の検討を進めています。
	16) 火力発電は燃焼でガスを加熱し、ガスタービンを回しているが、原子炉冷却材としてのガスの弱点は熱伝達特性の悪さにある。これらの点は第1期のまとめでも述べられている。ガスタービンで発電する場合は、再生熱交換器、原子炉等の寸法をあたえる必要があろう。出力密度が高い高速炉とガス冷却との相性、具体的には定常時、事故時の炉心冷却性も重要な検討項目である。ガス冷却で大型化によりスケールメリットを追求する場合はプレストレストコンクリート原子炉容器(PCRV)、蒸気発生器(SG)、ガス循環器等の製作性などからくる出力の上限があり、それが第1期の検討では定量的にも定性的にも根拠をもって示されおらず、他の冷却方式と比べた相対的なメリットが不明である。熱中性子炉では、ガス冷却炉は軽水炉に比べてコストデメリットがあり、それをガス冷却高速炉がどう克服するつもりかを説明する必要がある。	16) ガス冷却炉に関しては、高温化による高熱効率化が見込まれ、経済性目標を達成し得る可能性があると考えています。窒化物燃料を用いた場合、炭酸ガス及びヘリウムガスで、減圧事故時のCDA影響を想定した格納施設の強化及び溶融燃料の長期安定冷却するコアキャッチャが必要であることから、経済性が見通しがむずかしいと考えております。しかし、窒化物燃料と耐高熱被覆材を用いたヘリウムガス冷却概念では、ガスタービンを用いることにより高熱効率化が図れ、CDA想定不要にできる概念を狙うことができると考えていることから、これを中心に第2期でも継続して検討することとしています。

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
[水炉]	<p>17) FBRシステムとして狙う炉心性能を明記しながら、それを達成することが困難な水冷却炉を、この実用化戦略調査研究の中で取り上げられる理由が不明である。</p> <p>18) 他の炉型に比べて、全体的に検討が不十分である。ナトリウム冷却炉に比べて増殖比が低いが、異なった特徴を持っている。安全性の考え方も軽水炉のものをベースに考えるべきであり、開発目標や評価の視点が液体金属冷却炉と共通でよいかどうかやその果たせる役割が同じかどうかを再検討する必要がある。コスト評価は軽水炉等をベースにできるので、他の冷却方式より、より不確定性は小さくできると考えられる。また、軽水炉からの延長としてPA上受け入れやすい炉と考えられる。第2期ではすべて「原研との協力の下で検討」となっているが、他に大きな技術的問題点がなければJNCにおいても水炉の諸課題を積極的に検討すべきと考える。</p>	<p>17) 増殖性能には、ある程度限界がありますが、既存の技術が活用できるという利点があるので、取り上げています。</p> <p>18) 水冷却炉では、プルトニウム富化度を操作することで、増殖性を期待する場合から内部転換比を通常の軽水炉よりもやや高くする概念まで考えられます。その場合、安全確保の考え方もプルトニウム富化度によって変える必要があると考えられます。そのため、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性の5つの目標を勘案しつつ、オールジャパン体制の下で水冷却炉に関し、どのような位置付けが可能かを含め、今後検討することとしますが、実用化戦略調査研究で組み上げたオールジャパン体制の中で、技術力のある機関に具体的な検討をお願いし、その成果を全体の取りまとめの中に積極的に取り入れていくが良いと考えています。</p>
[溶融塩炉]	<p>19) 溶融塩炉の評価で塩化物溶融塩炉が評価されているが、溶融塩炉としては塩化物よりもフッ化物を用いた溶融塩炉のほうが、これまでに米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)や日本において実績例や検討例が多いと思うが、なぜ選ばれたのか。</p>	<p>19) 溶融塩としては安定性に優れるフッ化物燃料が用いられてきましたが、フッ化物燃料は中性子の減速能が大きいことから、高速中性子炉としては不向きです。高速中性子炉に唯一適合するのが塩化物燃料です。</p>



評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
[モジュール炉、小型炉]	<p>20) 小型モジュール炉の利点は初期投資が小さくなることであるが、最大の問題点は経済性の克服であり、小型にしても出力に比例して縮小削減できない機器やプラント設備は多い。例えば遮蔽、建屋、補機系や安全系の系統数やバランスオブプラント等である。運転・保守費についても、それが出力当りにしても削減される正当な理由を示す必要がある。工場生産は魅力的であるが、そこで作り運搬できる重量には制約がある。造船ドックを利用するバージ建造方式についても、軽水炉での検討は多くあるので、それらを踏まえた上でブレークスルーできる点を示す必要がある。</p> <p>モジュラー炉によるコストダウンは、他産業のモジュラー生産によるコストダウン例などをもって根拠を示す必要がある。現在の説明では、競争力のあるFBRサイクルをこれらのシステムで実現できるとの見込みや理由が根拠を持って示されていない。放射性ポロニウムの生成などよりも、これらの点について前途が開ける理由をまず示す必要がある。最近よくなされる原子炉の出力の大小の議論は市場の議論であり、革新技術と直接関連しない部分も多いことに注意すべきである。また、小型炉は中大型炉に対する補完的なFBRシステムなのか、もうひとつ別のオプションなのかも含めてその位置付けを明確にして頂きたい。</p>	<p>20) 重金属炉に関しては、2次系削除による物量削減、完全自然循環によるシステム簡素化、BOPの簡素化によりコストダウンが見込まれ、スケールメリットを狙える最大規模の概念として中型モジュール炉に絞って検討することにより、経済性目標を達成しうる可能性があると考えています。そのためにはまず、技術的な成立性の確認が必要である予備的概念設計と材料の腐食性と放射化ポロニウムの挙動評価について第2期において要素研究を実施することとしています。</p> <p>小型炉に関しても、2次系削除ができることから、冷却材の伝熱性能が悪い分を差し引いてもナトリウムに準ずる経済性を確保できると考えており検討することとしております。また、ご指摘のバージ建造方式についても検討していきたいと考えております。今後、小型炉の位置付けを明確にし、小型炉の良さを追求する方向で設計研究を進めていきます。</p>
＜燃料サイクル＞	<p>21) フッ化物揮発法に関しては、プラントの運転方法を変えるだけで、純粋なプルトニウムが回収されることにならないかの検討もお願いしたい。核拡散抵抗性の観点からはこのような可能性を持ったものと原理的にあるいは容易な施設の改造ではそれが不可能なものとは、世界に認知される場合に異なってくるように思う。</p> <p>22) 酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つを検討するとなっているが、酸化物電解法はロシアとの共研でデータも入り同じバッチ式の金属電解法と共通的検討課題も多いと考えられる。一方フッ化物法はフロー式であり、同じフロー式の湿式法との共通点も予想される。3種類から2種類を選択して第2期に実施するのではなく、湿式一乾式ハイブリッドを模索したり、バッチ式とフロー式とを比較・検討する等のために、第2期においても、技術的な差が明確でない限りあまり候補案を絞るべきではない。</p>	<p>21) ご指摘の点は、核不拡散性の評価で考慮することとします。ただ、保障措置等、制度面で核不拡散性を担保する方法も重視する必要があると考えます。</p> <p>22) 第1期では比較評価により候補概念を安易に絞り込むことはせず、技術的な観点から実用化に向けて大きな問題がないかどうか(メンテナンス性等)を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを候補から外すこととします。第2期では、ハイブリッド方式の検討も視野に入れ、2つの実用化候補技術を構築して所要の検討を進めます。検討対象から外すこととなった方式についても、その検討結果をデータベースに残し、将来の状況変化によって復活させることが容易なよう留意します。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
5.2) 実用化との関連	23) この1年間は、これまで世界各国で行われた研究、開発成果のレビューを中心に行われたと考えるが、これまでに検討された概念は、実用化の可能性を持つものは、ほとんど含まれているとともに重要な技術的課題が抽出されている。もちろん、これらの課題の中には、既に認識されているものも含まれているが、それらの技術的成立性、解決可能性の評価、必要な資源や期間等の評価は、決して易しくないののでそこに今後の成果が問われることになるので、独創性を含む展開を期待する。	23) 拝承
	24) 定量的評価が比較的可能な技術的成立性は、実用化に向けてその検討の道筋が明確にされていると思われるが、経済性、環境負荷等の今後の社会情勢の変化等必ずしも定量的でないファクターをどのように考えていくのか、実用化への説得性を高める検討が必要である。	24) 拝承
	25) 現時点では、まだ、実用化への見通しについての判断はできない。実用化のために必要な技術開発課題についても、まだ実用化候補が絞られていないので、コメントできない。	
5.3) 得られた成果の普及、公開	26) 多くの添付資料も駆使されて、きめ細やかに説明されたと思う。しかし今後の情報公開については、特殊な知識を持つ専門家に向けてだけでなく、一般の生活者への情報発信も、戦略として重要になってくる。対象をいくつか絞り、それぞれに応じた解りやすい情報提供も必要と考える。	26) 今後とも成果の進捗に合わせて、適宜、解りやすさに配慮した情報提供や成果の公表等を行っていきます。今後の大きな節目である第1期終了時点では、課題評価委員会等の評価を受けた上で、その結果とその後の研究の進め方をまとめ、公表いたします。
	27) 情報発信はインターネットだけに限らず、発信する方法、チャンネルにも考える余地があると思う。	27) 拝承
	28) 最近、環境教育、エネルギー教育の必要性が叫ばれている中、若年層へのアプローチも工夫してみてはどうか。	28) 拝承
	29) 成果の公表について懸命な努力をされていることは理解できるが、関係者や一部の人間を除いて関心が低いのも事実である。実用化戦略調査研究は成果が国民に理解されなければ意味がない。この努力に関しては「十分」ということはないと認識され、さらに一層努力されることを望む。	29) 拝承
	30) 技術移転を含む成果の普及の可能性は大きいと思われる。広報は積極的、効果的に行われている。	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
(6) 今後の展開 <div style="text-align: right;">&lt;全般&gt;</div>	1) 第2期においても、国内外の研究機関と協力し、有用技術があれば積極的に評価して取り込んでいくことが必要である。	1) 拝承
	2) できるだけ複数のオプションがもてるような形での検討やR&Dへ向けての方向性の提示を望む。	2) 拝承
	3) ナトリウム冷却炉—MOX燃料—湿式処理の組合せが、サイクル機構として今までも知見を集積しているところであり、このシステムについての検討が最も深くなるのはある意味で当然とも言えるが、「実用化に至る最適の組合せを探る」ためには、でき得る限り平等な条件で各組合せ間の比較ができなくてはならないと考える。その意味では、今後の検討は、従来サイクル機構が手がけてこなかったシステムについての情報収集を中心に進めていただけるようお願いしたい。	3) 今まで知見が乏しかった重金属やガス冷却、新型燃料については、内外の先行知見を有する研究機関、大学と連携し、それぞれのプラントシステム、炉心燃料の魅力を引き出せるように国内外の機関との協力を進めています。第1期では、有望な候補概念の魅力を引き出すとともに、その成立見通しを把握できるように努力していきます。これを受け第2期では、抽出された技術について主要なデータを効率的に取得できるように、更に国内外の機関との協力を強化していく考えです。
	4) ナトリウム冷却炉—MOX燃料—湿式処理の組合せについては、具体的な課題や2000年度計画が細かく示されているが、それ以外のシステムについては、挙げられている課題等に具体性が乏しいとの印象を持つ。	4) 1999年度には、炉、燃料製造、再処理の候補概念の特徴を把握しました。これに引き続き、2000年度に、FBRサイクル全体で整合をとった組み合わせを検討します。
	5) 第1期については既定方針通り進めるとともに、第2期についても今回説明のあった計画・体制で実施することに賛成する。	
	6) 短期間で幅広い実用化候補概念の技術評価とその経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出をされていることについては申し分ないと思われるが、課題評価委員会で、成果の評価を行うことに対してのコメントを記します。課題評価委員会のメンバーは幅広い分野の専門家から構成されており、高速炉・燃料サイクルシステムの課題を個々の成果を基に総合的に評価することが主たる役割と思われる。しかるに、個々の成果についての検討評価については外部の専門家を含めた専門家グループによって予めなされたものと考えているものと思われる。今回の課題に対しては三つの技術検討会が設置されており、そこでの検討結果としての成果と受けとめることになるのか。このあたりを明確にして進めてほしい。	6) 設置した3つの技術検討会では、自由な立場で幅広い意見をもらい、それを我々の活動に反映していくこととされています。技術的な議論の場として期待していますが、我々の成果の評価の場とは位置付けていません。

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
<燃料サイクル>	7) 乾式法に関してそれぞれの方法に利点を見出しながら、あるいは熱力学的な基礎データから達成を予想しているが、重要となるrequirementに関しては、実験での確認(できれば実燃料でそれが時間的に困難ならば模擬燃料で)が必要と思う。それを見極める前に技術選定をしてしまうと、そのrequirementが達成できない場合に、オプションがなくなってしまう。このことを十分考慮しての技術選定をお願いしたい。	7) 第2期に実施する要素技術開発で試験データを取りながら、選択肢の絞込みをしていきます。第1期では、その前段階として、各候補の実用化の見通しを、達成できる性能やメンテナンス性等を総合的に判断し、魅力のある候補を抽出するようにします。
	8) 説明資料4(3)の3)の再処理システムの検討の中で、①に高レベル廃液からのTRU回収技術(SETFICS)プロセスがあるが、同様の研究はこれまでに原研でも実施されて実証試験まで行っている。新しい研究を立ち上げる前に、それらとの比較検討を経てから研究に取り掛かる必要があると思う。	8) 拝承
	9) これは一つの例であるが、乾式再処理の金属電解法に関して塩素化溶解法が最初に検討されているが、米国のアルゴンヌ国立研究所(ANL)で提案のLi還元法や最近ロスアラモス国立研究所(LANL)のATWシステムでは使用済み燃料からウランだけを湿式法で回収し、その後乾式法を適用して超ウラン元素を回収する方法も提案されている。このような各要素技術を組み合わせたより効率的なシナリオ、プロセスの検討も実施されることを望む。	9) 拝承
(7)その他	1) 第1期は、有望な実用化候補概念を抽出するのみならず、FBRサイクルの実用化技術の確立までの開発シナリオ(開発計画)を策定する期間でもある。	1) 拝承
	2) 情報公開にあたり、いくつかの対象レベルを設定して、広く本調査研究の成果とFBRサイクルのあるべき姿を的確に示して行ってほしい。	2) 拝承
(8)総合評価	1) 事前評価のコメントが適切に反映されて研究が進められているとともに、第1期の中間評価として、課題の抽出、研究計画、成果、処置事項等いずれも適切に進められていると評価する。	

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	2) 短い時間で幅広く炉、燃料製造、再処理まで検討されていると思う。またそれぞれについて特徴やポテンシャルの評価がされていると思う。これから5-10年でそれらを実証し、プロセス設計がなされることになると思うが、今回各技術が有すると評価されたポテンシャルの中には、模擬燃料や実燃料で実証してからでないで確認できないことがあると思うので、絞り込みだけを優先しすぎて他の有力なオプションがなくなってしまうことがないように願いたい。	2) 拝承
	3) 本実用化戦略調査研究を通し、将来を見据えたFBRとして望ましい特性を備えたシステムが構築されることを願う。	3) 拝承
	4) 本研究課題は、既に新原子力長期計画の策定において第三分科会で検討され、その推進が結論されたものであるとともに、事前評価時点から重要な情勢変化はないので研究開発の目的、意義は認められる。2000年度の開発目標も、前年度の成果に基づきより具体化され、第2期計画につながる明快な目標、計画の設定となっている。	
	5) ナトリウム冷却炉、湿式再処理など経験の深いものは、良く検討が進んでおり、第2期計画での絞り込みに有意義な成果を得ている。経験の少ない重金属やガス冷却炉については、重要な課題は抽出されているが、2000年度以降のさらなる検討の進捗に期待したい。	5) 拝承
	6) 第2期計画では各種試験や燃材料照射が計画されているが、これらは一般に長期間要することがあるので、第2期5年間に結論が得られ、候補の絞り込みに生かせるように綿密な計画を立てるとともに、評価基準の十分な検討が必要である。	6) 拝承
	7) 研究実施体制については、大変良く準備され国内の関連機関との協力も進み、意見も交換できる体制が整った。公募研究も多くの応募があり、有益であったので第2期計画でも工夫を加えながら継続することを期待する。	7) 拝承

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>8) 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究は、その第1期計画が予定の成果をあげつつあり、第2期に向けて課題を明確にしつつある。第2期計画はその目標、資金計画、実施体制が的確に考えられていること、及び第1期の実績から考えて、十分な成果を上げるであろうと考えられる。したがって予定通り第1期をまとめあげ、第2期を開始させることに賛成する。</p> <p>9) 軽水炉サイクル及び他の基幹電源と比肩する経済性のあるFBRサイクルの有望な実用化候補概念の抽出に向けての判断材料を整備するため、国内のみならず国外からのアイデア等を含めて既存技術の改良及び革新的技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を基に、実用化候補概念の技術的評価と経済性見通しの検討を行い、その課題の抽出を行っていることについては中間評価としては十分評価できる。</p> <p>なお、実用化候補概念の技術評価で第1期の残り第2期に向けての実用化候補概念の抽出に向けての検討がなされることになるが、各候補概念の技術開発状況の違いも大きいことのみならず技術評価手法の構築の考え方においても同じレベルで考えることの難しさを考えると、当初幅広く候補概念技術を検討することを考えたことから、第1期では各候補概念の今後の検討課題を明確にし、その中でデータ不足のため妥当な評価が難しい課題の抽出を行い、第2期の中間とりまとめ段階までにそれらの再検討を行い、その結果をもとに第2期での候補概念の抽出を考えてもよいのではないと思われる。</p>	<p>9) 2000年度において、第1期では比較評価により候補概念を安易に絞り込むことはせず、技術的な観点から実用化に向けて大きな問題がないかどうか(メンテナンス性等)を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを候補から外すこととします。検討対象から外すこととなった候補概念についても、その検討結果をデータベースに残し、将来の状況変化によって復活させることが容易なよう留意します。</p>
(9)質問事項	<p>1) 開発目標として増殖比1.2(倍增時間30年)としているが、これはどのような根拠から決めたのか。私見では安全性、技術的難易度や経済性が同じであれば増殖比は大きい程良いが、それがいえるのか。もしそうでない場合は日本の長期エネルギーシナリオ、ウラン資源等を考慮した上で決める必要がある。そのような検討に基づいた値か。</p> <p>2) 2000年度計画では、重金属炉については鉛ビスマス炉のみ検討するとなっているが、事前評価時点ではビスマス資源量の制約から鉛のみ検討するとなっていたと記憶する。これはビスマス資源量に問題がないことが明らかになったためか。</p>	<p>1) 増殖比1.2は、エネルギー需給バランスの低位ケースにおいて、我が国の天然ウラン累積需要量が現実的な量に納まる条件として設定したものです。これは、固定的に考えている数値ではなく、今後、さらに検討を加えることとしています。</p> <p>2) ビスマスの資源量については、1999年度に概略の評価をし、鉛ビスマス炉を実用化する上で問題ない資源量が存在するとの見通しを得ています。</p>

評価項目	評価意見	サイクル機構の考え方、質問に対する回答
	<p>3) 径非均質炉心は、かつてジュピター実験の結果、制御性に問題があるとの結果が出たと記憶するが、それは解決可能との見通しなのか。</p>	<p>3) ジュピター実験は日米共同の大型炉心(電気出力60～100万KW相当)臨界実験として米国ANLのZPPR装置を用いて行われたものであり、出力規模として電気出力28万KWの「もんじゅ」用の模擬臨界実験(MOZART実験)データまでしか有していなかった日本として「もんじゅ」後の炉心大型化に備えて行ったものです。</p> <p>御指摘の制御性の問題とは、いわゆる核的ディカップリングのことで、大型炉心、特に非均質炉心では中性子空間結合が弱く、制御棒誤引き抜きなどによる局所的な外乱が炉心に加わると、これが炉心全体に一律に伝播されず、中性子束の歪みが生ずる現象です。</p> <p>径方向非均質炉心では炉心が内部ブランケットによって分断される結果、中性子空間結合が均質炉心よりも弱く、制御棒操作等の局所的な反応度挿入に対する中性子束歪みが均質炉心の場合よりも相対的に大きくなることが電気出力65万KW相当の径方向非均質炉心を対象としたJUPITER-II実験でも確認されています。</p> <p>この歪みは、通常運転時の制御棒操作では、特に問題ないと考えられますが、制御棒引き抜き事故等で問題とならないようにするため、今後、FBR実証炉での中性子束歪みと過出力係数の検討経験を下に、中性子計装の配置、チャンネル数、ロジックの適切な選定、及び集合体出口温度計装の活用からなる安全保護系の高度化を図る方策について、第2期で実施する予定です。</p>

## 参 考 資 料 4

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究  
(課題説明資料)



【研究開発課題説明資料】

# 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

(中間評価)

平成12年6月

核燃料サイクル開発機構

本資料における研究の成果は、「高速増殖炉システムの実用化戦略調査研究に関する協力協定」に基づき実施した核燃料サイクル開発機構と日本原子力発電株式会社（9電力会社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社の代表）との共有成果である。

本資料における研究の成果には、「核燃料サイクル開発機構と財団法人電力中央研究所との原子力の研究開発に関する研究協力協定」に基づく共同研究の成果および財団法人電力中央研究所からの開示技術情報、ならびに、「日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構との間の高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究に関する研究協力取決め」に基づく共同検討の成果および日本原子力研究所からの開示技術情報を含む。

## 目次

1. 課題名	1
2. 概要	1
3. 研究の進め方	
(1) 研究の目的	1
(2) 第1期の研究の進め方	1
4. 第1期の中間成果と2000年度計画	
(1) 設計目標および評価手法	4
(2) FBRシステムの検討	5
(3) 燃料サイクルシステムの検討	12
5. 第2期の展開について	
(1) 第2期計画の基本的な考え方	18
(2) 2001年度の研究計画	19
(3) 第2期の実施体制	26
(4) 利用する施設・設備	27
(5) 資金計画	28
(6) 他の研究開発課題評価対象テーマとの関係	28
(7) 期待される成果と波及効果	29
6. 成果の普及、公開について	30
7. 措置事項の対応状況	30
8. その他特記すべき事項	33

## 1. 課題名

高速増殖炉（FBR）サイクル\*の実用化戦略調査研究

（\*印（初出語のみ）は「用語の説明」があります）

## 2. 概要

本研究は、2段階に分けて実施することとし、第1期については、1999年6月、研究開発課題評価委員会に事前評価の諮問をし、同年8月、評価結果の答申が示され、その措置事項を踏まえて実施している。

現在、第1期（1999年度、2000年度の2年間）の前半を終え、その中間成果と今後の進め方などについて取りまとめたところである。

本研究は段階を踏み、研究開発計画および成果についてチェックアンドレビューを受けながら進めることとしており、今回の研究開発課題評価委員会では、第1期の中間成果および第2期計画の基本的考え方とその初年度となる2001年度の研究計画について評価を受けるものである。

## 3. 研究の進め方

### （1）研究の目的

本研究は、軽水炉サイクルおよびその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得るよう、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抽出し、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する。

このため、第1期では革新技术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うえ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。第1期に引き続き、第2期では、工学的試験を踏まえて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込み（複数）を行って必須の研究テーマを特定することとしている。さらに、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年頃までに提示することを目標としている。

本研究の目的を図-1に示す。

### （2）第1期の研究の進め方

#### 1) 検討評価の進め方

第1期は、1999年度から2年間のスケジュールとし、前半の1年では、

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と各システムに対する設計目標の策定を行う。次に、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、有望な技術を抽出して FBR システム、燃料サイクルシステムの各システム技術ごとの検討評価作業を行い、中間成果の取りまとめと第2期の基本計画および2001年度の研究計画の検討を行うこととした。

後半の1年では、前半で抽出した技術課題の検討および評価指標に基づく各候補概念の比較検討ならびに FBR サイクルの整合性を図った統合・評価を行うこととしている。

このような検討評価を踏まえ、第1期終了時には、FBR サイクルの実用化候補概念の抽出と FBR サイクルの実用化に向けた研究開発計画を策定することとしている。

これらの成果は、第1期報告書としてまとめられ、研究開発課題評価委員会に報告する予定である。

第1期の検討評価の進め方を図-2に示す。

## 2) 実施体制

1999年7月、核燃料サイクル開発機構(以下、JNCという)、電気事業者(9電力会社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社)、財団法人電力中央研究所(以下、電中研という)およびメーカー各社から構成される推進組織を JNC 大洗工学センター内に発足させ、研究を本格的に開始した。これに加え、2000年1月には日本原子力研究所(以下、原研という)の参画を得て、オールジャパン体制で研究開発を進めている。

研究体制を図-3、図-4に示す。

研究の実施は、プロジェクトチーム体制の下で推進し、研究開発の内容・工程・予算等の計画的かつ効率的な管理のもと実施している。

研究を進めるに当たっては、研究対象が広範囲であること、JNC、電気事業者、原研等におけるこれまでの研究開発の蓄積の活用を図るため、JNC内に技術検討WGならびに技術連絡会を設置し、各研究機関の間での横断的な検討を行い、その結果を毎月開催するJNC内のプロジェクト会議に報告し、全体の調整とプロジェクトの円滑な進捗に努めている。さらに、多面的な検討により研究の妥当性を確認する観点から、外部の専門家・有識者とJNCで構成する「FBR システム技術検討会」、「燃料システム技術検討会」および「FBR サイクル総合評価技術検討会」を設置した。

次に、魅力的な実用化システム像を抽出するため、これまでのJNCの研究活動に加え、設計コンペ方式のメーカー提案や、国内外の研究機関、大学、

メーカー等からのアイデア公募による革新技術も取り込んで、開発目標を達成できる FBR サイクル概念を検討することとしている。

国際協力については、FBR および関連する燃料サイクルの分野において、日仏、日露等の国際協力協定の下で従来から欧州各国の関係機関と研究協力を進めており、さらに幅広く有望な技術をサーベイし取り入れていく観点から、より一層の緊密な関係を構築していくことを計画している。

技術検討 WG および技術連絡会の体制を図-5 に示す。

メーカー提案により採用した研究テーマを表-1、表-2 に示す。

アイデア公募により採用した研究テーマの一覧を表-3 に示す。

主要な国際協力における研究テーマを表-4 に示す。

#### 4. 第1期の中間成果と2000年度計画

##### (1) 設計目標および評価手法

###### 1) 設計目標の設定

21世紀のFBRサイクルを取り巻く状況およびFBRサイクルの魅力などからFBRサイクルの開発目標を図-6のとおり策定した。

FBRサイクルを構成する要素であるFBRシステム、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)の基本概念を検討する際のベースとなる設計目標については、FBRサイクルの開発目標と、FBRの特徴である「燃料の増殖」、「燃料中の不純物の許容量が高く取れること」および「TRU\*リサイクルが可能であること」等を活かした燃料サイクルの整合性を図るという基本的な考え方(図-7)に基づき、図-8のとおり設定した。

###### 2) 評価手法の検討

本研究で進めている魅力あるFBRサイクル像に対する判断材料を提供するため、開発目標として定めた「安全性」、「経済性」、「資源有効利用性」、「環境負荷低減性」および「核拡散抵抗性」の視点に「技術的実現性」を加えた6つの視点で、技術レベルの異なるFBRサイクルの特性や達成度をできるだけ客観的かつ多面的に評価する方法を検討している。

設計目標の設定から、FBRシステムおよび燃料サイクルシステムの各候補技術の概念検討、技術評価指標の検討、総合評価を経て、実用化候補概念の抽出に至る検討のフローを図-9に示す。

###### ① 評価指標の検討

技術レベルの異なる種々の要素技術を組み合わせ、整合のとれたFBRサイクル体系を構築するには、まず個々のシステム要素技術に対する設計要求を満たすことが大切であり、上記6つの視点に対する達成度を客観的に評価する必要がある。

これまでの評価指標の検討例を表-5に示す。現在、これらの評価指標を各々の要素技術に適用して、課題の抽出ならびにFBRサイクルとしての整合性を図れるものになっているかどうか等の点から検討中である。

###### ② 評価手法の検討

本研究におけるFBRサイクルの候補概念の特徴は、対象とする候補の技術レベルが、「基礎研究段階」、「工学試験段階」および「実用化段階」と多様なレベルにあることである。このため、評価値の不確定幅には大きなバラツキが存在するものと考えられる。また、評価指標についても、経済性のように定量化が可能な指標と、安全性のように定量化が困難な指標

とが混在している。

そこで、FBR サイクルとしての総合的な評価手法としては、定量評価と定性的な相対評価とを組み合わせる方法などを採用するとともに、評価の結果について対外的な理解が得られるよう、評価指標に基づいて多面的な視点から評価する手法を検討している。

### 3) 2000 年度の計画

2000 年度の前半では、各候補技術に対して評価指標を適用し、定量化に努める。次に、定量化された評価指標に基づき、6つの視点をできるだけ中立性を確保した多面的に評価できる手法を構築することとする。

2000 年度の後半では、これらの評価手法を適用して、FBR サイクルとしての技術選択肢に対する総合的な評価を実施し、有望な技術を抽出することとしている。

## (2) FBR システムの検討

### 1) 検討対象技術の選定

FBR システム（炉心燃料とプラントシステムをいう）の検討にあたっては、既往文献の調査、社内提案、メーカー提案、アイデア公募、国内研究協力、国際協力等により、国内外の FBR のこれまでの開発経験および新たな概念等を幅広く調査・分析し、冷却材および燃料形態の検討対象技術を選定した。

その結果、燃料形態としてはピン型燃料（酸化物、窒化物、金属）、ヘリウムガス冷却炉用として被覆粒子燃料（酸化物、窒化物）および熔融塩炉用として液体燃料を、冷却材としては、ナトリウム、重金属（鉛、鉛ビスマス\*合金）、ガス（炭酸ガス、ヘリウムガス）、水（軽水、重水、超臨界圧水）、熔融塩を選定した。なお、出力規模としては、大型炉および中小型炉を選定した。

FBR システムにおける燃料形態と冷却材（プラントシステム）との検討対象を表-6 に示す。

### 2) 検討の視点

#### ①安全性確保

FBR の実用化にあたっては、軽水炉と同等ないしはそれ以上の安全性を確保するものとし、IAEA（国際原子力機関）の基本安全原則はもとより、現行の軽水炉に適用される基準および指針類、「もんじゅ」の安全審査で適用された基準および指針類、実証炉の安全基準案等の考え方を参考に、燃料形態および冷却材の特徴を考慮した安全設計とすることとしている。



具体的な安全要求としては、原子炉停止系は十分信頼性の高い設計とするが、これらの安全系に期待しなくとも、炉心損傷に至らずに自然に事象が終息できるよう、受動的な原理で原子炉を停止できる能力を持たせる。あわせて、炉心冷却に関しても崩壊熱を自然循環により除去できる設計とする。また、仮想的な炉心損傷状態を仮定しても、大きな機械的エネルギー放出を伴わず原子炉内で自然に事象終息すること、例えば、このエネルギー放出の原因が排除できる炉心設計（即発臨界を超過しないこと、および熔融燃料が集中しないよう炉心外に排出させることにより再臨界を回避する炉心概念）とする。

また、機器の故障およびヒューマンエラーの影響が極力少なくなるようシステムの簡素化等を通して信頼性の確保を図るとともに、ナトリウムを使用する場合には、その化学反応の影響を緩和する設備対策にも配慮する。

## ②コストダウン方策

FBR システムの検討では、安全性の向上を図りつつ建設費のコストダウン方策についての検討を中心に進める。たとえばナトリウム冷却炉については、ループ数の削減、機器合体、新材料の採用等のシステム改善、スケールメリットの追求およびモジュール化による標準化・習熟効果等の追求により、軽水炉と比肩し得る経済性を達成できるシステム概念を追及する。

## 3) 炉心燃料の検討

燃料形態として、酸化物燃料、金属燃料\*および窒化物燃料\*を対象に、炉心燃料特性を評価するとともに、各種冷却材と炉心燃料の組合せについて評価した。

燃料形態の絞込みの考え方を図-10 に示す。

### ①酸化物燃料

酸化物燃料は、金属燃料や窒化物燃料と比べて使用実績が豊富であり技術的に成熟している。ナトリウム冷却炉の再臨界回避\*方策を考慮した炉心性能評価を行った結果、その方策を工夫することにより開発目標に適合し得る炉心性能（増殖比\*約 1.2、倍增時間約 30 年）を達成できる見通しが得られつつある（図-11）。しかし、再臨界回避方策の炉心性能へ与える影響が大きいことが判明したため、2000 年度は炉心性能への影響を緩和した再臨界回避方策の検討を行うこととしている。また、高燃焼度化（15 万 MWd/t\*）のためには、被覆管材料（ODS 鋼\*など）の開発が重要である。

重金属冷却炉およびガス冷却炉の再臨界回避方策を考慮した炉心性能

評価は、2000 年度に実施する予定であるが、重金属冷却炉は、構造材等の腐食を抑制するための流速制限により実効炉心燃料体積比\*が 25～26%程度となり、またガス冷却炉は、減圧事故時の冷却性確保等の制約条件により実効炉心燃料体積比が 22%程度となるため、炉心性能は、ナトリウム冷却炉（実効炉心燃料体積比は、再臨界回避を講じた場合でも 33～37%）と同等もしくはやや劣る見通しである。

## ②金属燃料および窒化物燃料

金属燃料および窒化物燃料は、増殖比（約 1.3）および倍增時間（約 20 年）において酸化物燃料よりも優れた特性を示している。また、金属燃料および窒化物燃料ともにナトリウムとの共存性が良いため、熱伝導性の良いナトリウムを燃料ピンのボンド材\*として使用することにより燃料温度を低く維持することが可能となる。

金属燃料は、被覆管の共晶制限から炉心出口温度が酸化物燃料より低く制限（510～530℃）され熱効率が劣ることから、更なる高温化にはジルコニウムライナー被覆管の開発等が必要となる。金属燃料を重金属冷却炉およびガス冷却炉に使用した場合には、被覆管表面と冷却材との温度差が約 50℃とナトリウム冷却炉の約 5 倍程度となるため、被覆管の共晶制限を考慮すると熱効率はナトリウム冷却炉よりも低くなると考えられる。

窒化物燃料は、ガス冷却炉以外では事故時に窒素解離\*による 1 次系の圧力上昇の可能性があること、また、ナトリウム冷却炉では事故時に高温燃料と冷却材との激しい熱的相互作用（FCI\*）があることから、ガス冷却炉に適合すると考えられる。また、窒化物燃料の導入にあたっては、天然窒素の主成分である窒素-14 から生成する炭素-14 による環境負荷増加の抑制と核特性の向上の観点から窒素-15\*を濃縮して使用した場合の経済性の検討が重要である。被覆粒子燃料は、現状では高速中性子スペクトル条件における被覆層の健全性確保の観点から燃焼度が制限（約 1 万 MWd/t）される可能性があるため、燃焼度向上のために被覆粒子構造の改善を図る等のブレークスルーが必要と考えられる。

金属および窒化物燃料においては、高速中性子フルエンスが酸化物燃料より 2 割程度増加するため、より高い耐スエリング\*特性を有する被覆管およびラッパ管の開発が求められる。また、金属および窒化物の高燃焼度燃料の照射データが乏しいため、今後、国際協力を活用した効率的な開発計画が必要である。

以上の炉心燃料の検討結果と今後の進め方をまとめると、表-7 のとおりとなる。

#### 4) プラントシステムの検討

##### ①ナトリウム冷却炉 (図-12、図-13)

ナトリウム冷却炉については、沸点が高く、低圧システムが可能であり、自然循環能力が大きい等のナトリウムの利点と、不透明で化学的に活性なナトリウムの欠点を十分認識したうえで、安全性の確保を前提に検討を行った。

大型炉については、実証炉の開発経験を活かしたループ型\*炉と欧州の設計経験を活かしたタンク型\*炉の両システム概念に対して、ループ数削減、新材料の適用によるシステムのコンパクト化等のコストダウン方策 (表-8、図-14) を適用した4概念 (図-13) について検討した結果、いずれの概念も建設コスト目標 (20 万円/kWe) を達成し得ると考えられる (図-15、図-16)。また、さらなるコストダウン方策として、不活性中間熱媒体を用いた新型蒸気発生器\*によりナトリウム-水反応を排除する概念等 (2次系簡素化概念) の検討を進めている (図-17、図-18)。ループ型炉については、ループ数削減 (2ループ化) による顕著な物量低減効果や2次系簡素化概念の導入によるさらなるコストダウンの可能性が期待できることから、2000 年度も継続して概念の具体化・詳細化を検討する。従来のタンク型炉の概念では、ループ数削減により炉内の中間熱交換器\*径が大きくなり炉容器径が増大するため、物量削減効果があまり期待できない。このため、タンク型のループ数削減概念はアイデア公募による飯盒型中間熱交換器を採用したコンパクトな2ループ概念を2000 年度に継続して検討することとし、他のタンク型概念については、安全系局限化、工期短縮等の方策によりコストダウン方策を検討していくこととする。

また、あわせて各種の2次系簡素化概念の絞込みを行うこととする。

中型モジュール炉については、米国 GE 社の S-PRISM\*は RVACS\* (原子炉容器外壁を大気 of 自然対流により冷却する方式の補助冷却系) を採用可能な範囲内でのスケールメリットの追求とモジュール効果の活用により建設コスト目標を達成し得る可能性がある。このため、2000 年度は S-PRISM 概念の分析、検討を行うとともに、新たなモジュール炉概念の検討を進めることとする。

##### ②重金属冷却炉 (図-19、図-20)

重金属冷却炉では、冷却材として鉛または鉛ビスマス合金を対象に検討を行った。

鉛は、沸点が 1750℃と高く、また、水および空気との反応性が低いことから、ナトリウム冷却炉で設けられている2次ナトリウム系に相当する

系が不要な簡素なシステムにできるとともに、ナトリウム火災対策等を不要とできる利点を有している。

一方、ナトリウムに比べ約 10 倍の密度を有するためプラント大型化と耐・免震設計および構造設計との整合性をとる必要があること、炉心の流速制限等から稠密でコンパクトな炉心にできないこと、高温鉛の構造材料等に対する防食技術が必要であり構造材料の耐久性が課題となることなど、多くの解決すべき技術課題がある。

概念検討の結果、大型炉の場合、タンク式は、工場製作性に難点があるとともに、物量が過大となるなどの問題があり、ループ式は冷却配管構造の成立性に問題があることから、いずれも技術的成立性は難しいと考えられる(図-21)。また、タンク型の中型モジュール炉概念は、大型炉における技術的成立性の課題が避けられる見通しである。鉛ビスマス炉は、鉛炉と比べて腐食対策が容易であるとみられること、融点が低くナトリウム冷却炉の保守技術が適用できること、中型モジュール炉の場合 RVACS の適用も可能であることなどから、鉛炉よりも有利と考えられる。なお、鉛ビスマスは鉛と比べてポロニウム-210 の生成が多いが、保守時の冷却材温度(鉛冷却炉で約 400℃、鉛ビスマス冷却炉で約 200℃)を考慮すれば、カバーガスへの移行量は約 10 倍程度にとどまるとみられ、冷却材選択に際しての主たる制約要因とならない見込みである。以上のことから、2000 年度は鉛ビスマス冷却タンク式中型モジュール炉について検討を進めることとする(図-21)。

### ③ガス冷却炉(図-22、図-23)

ガス冷却炉では、炭酸ガス冷却炉およびヘリウムガス冷却炉を対象に検討を行った。

ガス冷却炉の利点は、不活性で透明なガスを冷却材として利用できることから、2次系の無い簡素なシステムとなり経済性を向上できる可能性があるとともに、プラントの保守・補修、供用期間中検査が容易にできることである。炭酸ガス冷却炉については、英国の商用炉である改良型ガス冷却炉(AGR)の設計・運転経験と、ナトリウム冷却FBRの研究開発で得られた被覆管材料を活用できることから、高温化の限界があるものの開発課題は比較的少ない。一方、ヘリウム冷却炉については、ヘリウムの熱輸送能力が炭酸ガスより低いことから、システムを高圧化して熱輸送能力を高める必要がある。しかしながら、再処理\*に課題はあるものの高温に耐える被覆粒子燃料を用いて、ガスタービン発電システムにより簡素で高温・高効率を達成する可能性が考えられる。

ガスは上記のような利点がある一方で、液体金属よりも熱輸送能力が低

いため、炉心、機器、熱交換器の大型化による物量増加の可能性があること、ならびに大型 PCRV\*（プレストレストコンクリート原子炉容器）の成立性等の課題がある。また、高圧システム（炭酸ガスで4MPa、ヘリウムガスで10MPa程度）となることから、増殖比を確保するため稠密化した炉心燃料の減圧事故時冷却能力について検討する必要がある。さらに、仮想的な炉心損傷時における再臨界回避と熔融燃料の冷却等の影響緩和方策についても検討する必要がある。

概念検討の結果、ピン型燃料炭酸ガス冷却炉は、1次系主要機器がPCRV内に設置される単純な系統構成であり、AGRの経験とナトリウム冷却炉の成果が活用でき研究開発要素は少ない可能性があること、スケールメリットを追求することにより経済性目標を達成し得る可能性があること、および炉心損傷時の熔融燃料を長期安定冷却するための設備（コアキャッチャー等）の成立性がクリティカルな問題であること等が把握できたことから、2000年度は、熔融燃料の冷却性と堅牢な格納施設概念の構築を中心に検討することとする。また、ピン型燃料ヘリウムガス冷却炉についても、炭酸ガス冷却炉と同様に経済性目標を達成し得る可能性があり、2000年度は経済性と炉心安全性を中心に検討することとする。

一方、被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却炉については、被覆粒子燃料の耐高温性を生かし、過酷事象時においても大きな負のドップラ反応度\*と崩壊熱除去系（DRACS\*）による除熱に期待して、炉心熔融を回避することにより、再臨界回避対策を必要としない概念を検討中であるが、被覆粒子燃料の高速中性子スペクトル条件での高燃焼度化に係わる成立性に課題があることから、2000年度は、この点を中心に検討することとする。

ガス冷却炉の1999年度成果と今後の開発課題について図-24に示す。

#### ④水冷却炉

水冷却炉は、沸騰水型軽水炉（7.2MPa、287℃）の炉心を稠密な構成にした高速増殖炉の概念と、加圧水型炉（15.4MPa、325℃）に重水を用いた高速増殖炉の概念を検討した。また、超臨界圧水（25MPa、438～530℃）を用いたシステムでは、直接サイクル（超臨界圧蒸気タービン）を利用でき、簡素なシステム構成の増殖炉概念を検討した。水冷却炉もガス冷却炉と同様に高圧システムとなるため、事故時（配管破断時）の炉心冷却性について検討する必要がある。また、プルトニウム含有率の高い燃料を利用するため、炉心損傷時の再臨界性等の影響緩和方策について検討する必要がある。

2000年度は、炉心損傷に係わる検討を行うとともに、低除染燃料\*の使用に対する炉心性能評価を中心に検討することとする。

#### ⑤ 溶融塩炉

溶融塩炉については、塩化物溶融塩タンク型モジュール炉を中心にプラント概念を検討した。溶融塩増殖炉は系統の全燃料インベントリを小さくすることが重要であるが、遅発中性子による原子炉制御の観点から炉心部では出力密度を下げて燃料滞在時間を確保するために炉内インベントリの抑制が困難なため、炉外（1次系）インベントリを低減する必要がある。このため、中間熱交換器をコンパクトにすることが重要である。現状では、塩化物溶融塩と共存性のある材料開発等がクリティカルな課題である。

2000年度は、経済性のポテンシャル、研究開発課題とその見通しについて検討することとする。

#### ⑥ 小型炉（図-25、図-26）

小型炉に関するニーズを考慮して、安全系の作動原理を受動的なものにした簡素で信頼性の高いシステム、分散型電源と競合できる経済性、長期運転サイクル、不法な燃料取出しが困難な燃料装荷方式の採用などを開発目標として設定した。

これらの目標のもとに、ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉およびヘリウムガス冷却炉の3概念について検討中である。

ガス冷却炉については、ピン型燃料の場合、炉心損傷時におけるコアキャッチャーの設備が追加され複雑化すること、また被覆粒子燃料は高速中性子スペクトル条件での成立性に課題があることから、大型炉での検討結果を待つこととし、2000年度は、ナトリウム冷却炉および鉛ビスマス冷却炉について検討することとする。

以上のプラントシステムの検討結果と今後の進め方をまとめると、表-9のとおりとなる。

### 5) 2000年度の計画

炉心燃料については、1999年度の研究成果や海外の動向を踏まえ、JNC、電気事業者、電中研および原研間で十分協議して燃料形態を決めていくこととする。また、プラントシステムについては、1999年度に抽出した有望な概念を対象に、燃料サイクルシステム技術との整合性を取りながら検討を進めていく。

上記の検討結果ならびに燃料サイクルシステムとの整合性も含めた総合的な評価により、FBRサイクルの実用化候補概念を抽出する。

上記の第1期で抽出される実用化候補概念に対し、第2期において実施する技術的成立性等の評価および判断に必要なシステム設計ならびに要素技術の研究開発計画を策定する。

### (3) 燃料サイクルシステムの検討

#### 1) 検討対象技術の選定

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、検討対象技術の選択を行った。その結果を燃料形態とサイクル技術のマトリックスとして整理するとともに、実用化戦略調査研究における検討のポイントを含めて表-10にまとめた。

燃料形態については、酸化物、窒化物、金属を選定した。

再処理システムについては、処理媒体として水溶液を用いる湿式法と、水溶液を用いない乾式法を選定した。

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\*に対し、「先進湿式法\*」（PUREX法を大幅に見直した「簡素化溶媒抽出法\*」）と「晶析\*法」を組合せ、さらにTRU回収機能も付加）を選定した。また、その短所を補いシステムとしての性能を高度化するため、その一部を代替・補完する革新的プロセスとして「イオン交換法」、「アミン抽出法」、「超臨界流体抽出法」等を選定した。

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\*」（ロシア原子炉科学研究所（RIAR\*）で開発されたものを改良）および「金属電解法\*」（米国アルゴンヌ研究所（ANL\*）で開発されたものを改良）、なら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振動している被覆管に直接充填する「振動充填法」、低融点の金属燃料を型に鑄込む「鑄造法」、燃料粒子を直接被覆する「被覆粒子法」を、それぞれ燃料形態と組合せて選定した。

なお、3種類の燃料形態の内、酸化物燃料と窒化物燃料の再処理および燃料製造については、基本的に類似の技術が適用可能であることが調査により判明したため、まず経験の多い酸化物燃料サイクル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、それらに基づく経済性等の評価を行うとともに、その検討結果をベースに窒化物燃料サイクルについて概略評価を行うこととした。また、これと並行して金属燃料サイクルに関する検討を行うこととした。

## 2) 検討の視点

FBR の燃料は、軽水炉に比べ不純物の許容量を高くとれるという特長を有している。このため再処理の低除染\*化が可能となるため、プロセスの簡素化およびこれに基づく廃棄物発生量の低減、プラントのコンパクト化等の経済性向上や環境負荷低減に寄与し得る改良方策を検討する。また、低除染化は、核拡散抵抗性の観点からも好ましい方向となる。

安全性確保については、多量の FP を含んだプルトニウム等の TRU を非密封の形で取扱うため、臨界安全、閉じ込め機能に十分な対策を施すとともに、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を施すこととする。

技術的成立性や経済性を評価するためのシステム検討においては、再処理および燃料製造施設の処理容量として、比較的小型でかつ経済性を確保できる規模（50tHM/年）とスケールメリットが把握できる比較的大型の規模（200tHM/年）の2ケースを検討する。

燃料サイクルシステムの検討の進め方を図-27 に示す。

## 3) 再処理システムの検討

### ①湿式再処理法

「先進湿式法」は以下の主要工程からなる（図-28）。

- ・ウラン/プルトニウムの溶解度の差を利用して溶解液中に多量に存在するウランを溶媒抽出の前段で温度を下げて硝酸ウラニルの結晶として析出させる「晶析法」
- ・プルトニウムをウランおよびネプツニウムと分離せず、低除染で共回収する「簡素化溶媒抽出法」
- ・SETFICS\*法と TRUEX 法の組合せによる高レベル廃液からの「TRU 回収法」

これによりプルトニウムは単独で回収されず、また晶析法の併用により溶媒抽出プロセスでの処理量が削減されることから廃液発生量の低減が可能となる。上記の方法について、プロセスフローおよび物質収支の評価を行うとともに、遠心抽出器の採用等によりシステムの一層の小型化をねらった機器設備仕様の検討を行った。その結果から、技術的成立性の評価や経済性の評価を行った。なお、経済性評価については、乾式再処理法および燃料製造システムの検討も踏まえて後述する。

酸化物燃料に対する先進湿式法およびその代替・補完プロセスの各技術の各設計要求事項に対する適合性について、これまでの検討の結果、各技術とも実用化を進めるうえで特に問題はない。先進湿式法は軽水炉再処理



で実用化されている溶媒抽出技術をベースとしており、技術的成立性の見通しは高いが、晶析プロセスにおける温度制御性や晶析物の回収方法、TRU 回収プロセスにおける回収設備の合理化等による経済性向上などの開発課題がある。代替・補完プロセスについては、各々の特徴を考慮し、主たる溶媒抽出プロセスとの最適組合せも考慮した検討を進めていくこととする。

また、窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、燃料ピン中のナトリウムボンド材の除去等の前処理、炭素-14 および窒素-15 回収等のための機器・設備が必要となる。

## ②乾式再処理法

酸化物燃料の乾式再処理として、「酸化物電解法」、「金属電解法」および「フッ化物揮発法」の検討を行い、オリジナルのプロセスに対し、以下に示すような改良を加えたプロセスフローを考案し、より詳細な技術成立性の検討を行った。

- ・酸化物電解法では、RIAR が開発した手法に対し、同時電解による処理速度の向上・塩素使用量の低減、炉特性に悪影響を及ぼす白金族 FP の分離工程の追加、二酸化プルトニウムの単独沈殿からウラン・プルトニウム混合酸化物（酸化物）電解共析への変更、絞り電解による MA\*回収等の改良プロセスを構築した。
- ・金属電解法では、ANL が開発した手法（ウラン、プルトニウムを MA とともに回収）に対し、熱脱被覆法の採用による脱被覆工程での FP 分離、酸化物の塩素化溶解法の採用による塩廃棄物の削減、白金族 FP 分離プロセスの追加等の改良プロセスを構築した。
- ・フッ化物揮発法では、従来開発されてきたプロセスに対し、低除染酸化物としてのウランおよびプルトニウムの共回収、MA の回収等の改良プロセスを構築した。

以上のプロセスの改良点を、図-29～図-31 にフローとともに示す。

上記の各方式について、それぞれ物質収支の評価を行うとともに機器・配置設計等の概略検討を行った。

乾式再処理システム技術の各設計要求事項に対する適合性については、これまでの検討の結果、各技術とも実用化を進めるうえで特に問題はない。酸化物電解法および金属電解法は、それぞれロシアおよび米国において実験炉用燃料製造あるいは使用済燃料処理に用いられた技術をベースとしており、今後、使用済燃料を用いたデータの蓄積が必要であるが、技術的成立性の見通しは高い。フッ化物揮発法は研究開発の段階であるが、ロシ

ア等に有効な知見が存在する可能性もあり、今後の研究の進展が期待できる。

窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しである。また、金属燃料については、本来、金属電解法そのものが金属燃料を対象に開発されたものであるため、その技術的成立性を見通しは高い。

#### 4) 燃料製造システムの検討

##### ①ペレット法

酸化物ペレット燃料\*製造法について、経済性向上に向けた工程簡素化を検討した。具体的には、硝酸溶液混合時に燃料仕様に合わせたプルトニウム富化度\*調整を行い、マイクロ波加熱脱硝時にペレット成型・焼結のための粉末特性調整を行うことで、混合から造粒までの酸化物燃料粉末を取扱うプロセスを削除し合理化を図った「簡素化ペレット法」の開発、およびそれに基づくシステム設計を実施した（図-32）。

先進湿式再処理から得られる低除染の放射能強度が高い燃料原料粉を使用した酸化物ペレット燃料製造技術を確立するために、上記の簡素化ペレット法をベースに、ホットセルでの遠隔製造プラントの概念検討を行った。

グローブボックスでの簡素化ペレット製造法については、既に十分な実績がある技術の改良であり、詳細なシステム設計を行うとともに、さらに TRU 核種を含有する燃料を取り扱う際の遮へい設計等について検討を行った。今後、再処理側における溶液状態でのプルトニウム富化度調整、粉末特性調整等の技術の確立が必要である。また、ホットセルでの簡素化ペレット製造法については、製品の品質保証等セル内でのペレット製造特有の課題、TRU および FP を含有した低除染燃料ペレット製造における発熱や放射線への対応等を十分に検討する必要がある。

窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、炭素熱還元・窒化プロセスの追加および窒化物粉末を取り扱うプロセスの不活性雰囲気（アルゴン雰囲気）化等が必要である。また、窒素-15 の濃縮技術に関する検討が必要である。

##### ②振動充填法

振動充填法で用いる燃料粒子は再処理の方法に応じてその性状が異なるため、粒子仕様に合致した振動充填条件の最適化を図る必要がある。このような特徴を踏まえて被覆管に均質に燃料を充填できるシステムの検討を行った（図-33）。

先進湿式法再処理で得られる製品から酸化物燃料粒子を製造し振動充

填する方法として、添加剤を加えたウランおよびプルトニウムの硝酸溶液をノズルから液滴状に落下させアンモニアと反応させて球状のゲル\*を形成させ、それを洗浄乾燥の後、焙焼、還元焼結して燃料粒子を得る湿式ゲル化法の基本プロセスおよび振動充填条件を中心に検討してきた。また、スイスのポールシェラー研究所 (PSI\*) との共同研究の成果を利用し、検討の効率化を図っている。これらをベースに、先進湿式再処理施設と燃料製造施設を一体化し、サイクル施設間の燃料輸送の削減やユーティリティの共有化等による経済性向上を目指したプラントシステムについて、機器・配置設計等の検討を行った。

一方、乾式法で得られる製品から酸化物燃料粒子を造粒し振動充填する方法については、各乾式再処理方式と整合をとり、以下のような点に留意しつつ、プロセスフロー、物質収支、機器設備仕様の検討を行った。また、乾式再処理と燃料製造の一体化プラントシステムの概念検討を行った。

- ・酸化物電解法では、陰極に析出させた酸化物燃料の結晶を粉砕することにより高密度の燃料顆粒が得られるため、それを直接振動充填燃料として使用することが可能であるが、顆粒形状が不定形であるため、その充填特性を把握する必要がある。
- ・金属電解法で得られる酸化物は、充填性能の向上のために粒子形状を揃える工夫が必要であり、薬品製造の分野で実績のある転動造粒法\*などが候補技術となる。
- ・フッ化物揮発法では、流動床により直接燃料粒子を得られる特長を活かした振動充填プロセスの合理化を図る必要がある。

これらの技術的成立性については、振動充填燃料\*はロシアで実績があるが、充填用顆粒製造や充填条件、検査方法を含む品質保証といった課題解決に取り組む必要がある。また、高燃焼度化への対応として必要な酸素ゲッター\*の開発や、使用済燃料からリサイクルされた低除染の原料による製造の実証が必要である。

また、窒化物燃料については、酸化物燃料に対する技術が応用できる見通しであるが、ペレット法と同様の検討が必要である。

### ③ 鑄造法

金属燃料については、鑄造法（射出成型法、遠心鑄造法）を検討した。溶融した合金燃料を圧力差でパイプ状の石英ガラス製の鑄型に射出する「射出成型法」についてはシステムが簡素かつコンパクトであるものの、多量の鑄型廃棄物が発生する（図-34の左図）。一方、その改良方策の一つとして、鑄型の繰り返し使用が可能となる「遠心鑄造法」による金属燃

料製造システムの検討を行った（図-34の右図）。

技術的成立性については、射出成型法は米国で実績のある方法であるが、使用済燃料からリサイクルされた低除染の原料による製造の実証が必要である。遠心鑄造法については、合金組成の均一化、長尺燃料鑄造技術などの課題はあるが、技術的成立性を左右するものではない。

これまでの燃料サイクルシステムに関する検討を踏まえて、再処理-燃料製造一体型プラントの物量評価結果から経済性の概略評価（再処理費および燃料製造費の合計で評価）を行った結果を図-35に示す。先進湿式法プラント（処理容量200tHM/年）については、新技術の採用や工程の簡素化等により、FBR湿式の従来法と比較して大幅なプラント物量の低減が達成され、TRU回収工程を設けた場合でも経済性目標（43万円/kgHM）達成の可能性の見通しを得た。一方、乾式プラント（処理容量50tHM/年）については、酸化物燃料を基本として3種類（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法）のシステムについて評価した結果、経済性目標達成の可能性の見通しを得た。今後、さらにコストダウン方策について検討を進めることとしている。

以上の燃料サイクルシステムの検討結果と今後の課題をまとめると、表-11および表-12のとおりとなる。

## 5) 2000年度の計画

2000年度は、再処理システムおよび燃料製造システムの各候補概念について、中間評価段階では実用化を進めるうえで特に問題のないことから、1999年度に摘出した開発課題の検討、経済性の向上対策等の検討を進めるとともに、必要な要素技術開発を進める。その際、燃料仕様と炉心性能の関係などFBRシステム側との調整の必要な事項、低除染燃料の仕様（除染係数\*、不純物濃度等）など燃料サイクル内での調整の必要な項目など、FBRサイクル全体の整合性を考慮して検討を進める。

上記の検討結果ならびに炉との整合性も含めた総合的な評価により、FBRサイクルの実用化候補概念を抽出する。

上記の第1期で抽出される実用化候補概念に対し、第2期において実施する技術的成立性等の評価および判断に必要なシステム設計ならびに要素技術の研究開発計画を策定する。

## 5. 第2期の展開について

本研究を開始して、現在、約1年間が経過した段階である。現在までに得られた成果で第1期の仕上がりを見通し、今後の検討課題等を抽出したうえで、第2期計画の基本的な考え方を整理した。これを受け、第2期の立ち上げとしての2001年度の研究計画を示す。2001年度は、まず、必要性が明確な研究項目から立ち上げることにしている。

### (1) 第2期計画の基本的な考え方

#### 1) 第2期の目的 (図-36)

第2期の目的は、FBRサイクルの実用化候補概念の絞込みと、実用化に向けて必要な研究開発テーマの特定である。

第1期で抽出した炉心燃料、プラントシステム、再処理、燃料製造に関する有望概念について、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、絞込みを実施するうえで必要な要素技術開発（データを取得する試験の実施、設計評価技術の整備等）にも重点を置き、それぞれの技術選択肢について、実用化目標をクリアするために必要な技術の成立性確認、技術的に解決不可能な点の有無の確認を行う。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の候補に絞込むこととしている。

また、国内外の研究資源の有効活用方策等を検討し、2015年頃までに競争力あるFBRサイクル技術を整備することを目標とした研究開発計画（開発ロードマップ）をまとめる。

さらに、第2期では、それ以降の研究開発に向けた研究環境・インフラストラクチャの整備等にも着手する必要があると考えている。

#### 2) 第2期の研究の枠組み

第2期の研究の枠組みを図-37に示す。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必要最小限の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こととしている。3年間の成果について、研究開発課題評価委員会で中間評価を受け、その結果を踏まえて2004～2005年度の研究内容を見直し、選択肢の絞込みを進める計画とする。

炉心燃料については、高燃焼度化とTRU含有燃料の実現性の確認を重点として、酸化物燃料の研究開発から立ち上げる。新型燃料（金属燃料、窒化物燃料）の研究開発は、国内外の他機関との協力が不可欠であり、2000年度の検討の中で協力関係の具体化を進め、製造技術等の本格的な立ち上げは2002年度からにする計画である。

プラントシステムについては、第1期での有望概念の抽出を受け、ナトリ

ウム冷却炉 2 概念（大型炉と中型モジュール炉を対象に、2 次系簡素化炉を含めて検討）、ガス冷却炉 1 概念（2000 年度の検討で、ヘリウムガス炉か、炭酸ガス冷却炉のどちらか一方を選択）、重金属冷却炉 1 概念（鉛ビスマス冷却中型モジュール炉）、小型炉 2 概念（ナトリウム冷却炉と鉛ビスマス冷却炉）を対象に概念設計を進める。要素技術開発では、ナトリウム冷却炉の経済性向上と、ガス冷却炉および鉛ビスマス冷却炉の成立性確認が重要と考えている。

再処理と燃料製造については、サイクル全体で評価して有望概念を選択することとしている。再処理については、湿式法では第 1 期で提案した先進湿式法を対象に、また、乾式法では 2 概念（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法から 2 つ選定）を対象に概念設計を深める。燃料製造については、簡素化ペレット法、振動充填法、鑄造法の概念設計を深める。要素技術開発では、燃料サイクル関係全般に設計データが不十分であることから、設計を深めるために必要なデータの取得に重点をおく。なお、要素技術開発に用いるホット試験施設として、東海事業所の CPF（ホットセル）の改造を進めており、2002 年度から活用可能となる。

FBR サイクル全体では、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、リサイクル機器試験施設（RETF）等既存設備の利用計画の検討を進め、開発ロードマップを完成させることとしている。設備の利用計画を実行に移すためには、第 2 期から R & D のインフラストラクチャの整備にも着手する必要があると考えている。

## （2）2001 年度の研究計画

第 1 期の成果を見通し第 2 期での主な検討課題を特定して、2001 年度から立ち上げる第 2 期の研究計画を設定した。各分野ごとに、第 2 期の方針と 2001 年度計画を整理して表-13～表-16 に、第 2 期の研究の展開を図-38～図-49 に示す。

### 1) 炉心燃料（表-13）

第 2 期では、高燃焼度と、低除染燃料、TRU 含有燃料の実現見通しをつけることが最も重要である。この他、酸化物燃料と窒化物燃料では振動充填燃料とペレット燃料の比較評価が重要である。金属燃料固有の課題としては運転温度の高温化を可能にするため、燃料と被覆管の共晶反応\*を防ぐジルコニウムライナー等の実現性の確認が必要である。窒化物燃料固有の課題としては、ガス炉に適用した場合、被覆粒子燃料とピン型燃料の見通しをつけることが重要である。

金属燃料と窒化物燃料については、2000 年度の検討の結果により研究開

発の進め方を明確にすることとしている。これら新型燃料は、酸化物燃料と比較して燃焼挙動や燃料安全に係わるデータが限られており、研究開発計画を具体化するに当たっては、国内外の他機関との協力の在り方の検討が重要となる。金属燃料については米国との協力を、窒化物燃料についてはガス冷却炉との組み合わせについて欧州との協力を模索する。計画の具体化にある程度の時間を要することから、製造技術を中心とする要素技術開発は、2001年度は燃料物性の評価程度のレベルに留め、2002年度から本格的に立ち上げることを考える。

燃料開発において照射試験は不可欠であるが、照射のための許認可に要する期間（許認可のためのデータ取得を含む）、高燃焼度を達成する照射の期間、照射後試験の期間を考えると、照射試験のリードタイムは比較的長期間を要する。このため、第2期の期間内で照射試験に入れられないものについても、その準備を着実に進める必要があると考えている。

#### ①酸化物燃料

酸化物燃料の燃料開発に係わる第2期の展開を図-38に示した。2001年度は、高性能被覆管（ODS 鋼）の炉外での強度試験を行うとともに、照射試験の準備を進める。また、振動充填燃料や TRU 含有燃料の燃料設計手法の開発と照射試験を進めることとする。

#### 2) プラントシステム（表-14）

プラントシステムの検討に関しては、第1期では有望な候補概念を抽出する設計研究を中心に、主に、ソフト検討を進めてきた。第2期では、候補概念をより具体的なものとする概念設計を進めるが、それに加えて、候補概念の中で採用した技術の成立性を確認する要素試験、絞込みに必要なデータの採取等、ハードを伴う検討を重点的に実施することとしている。

ナトリウム冷却炉では、採用した革新的な経済性向上方策を、安全性・信頼性を担保した上で技術的に成立させることがキーポイントとなる。鉛ビスマス冷却炉では、材料腐食や放射性ポロニウムの生成といった鉛ビスマス固有の課題について、その克服策を見出すことが急務である。ガス冷却炉では、炉心性能を上げるために稠密な炉心体系とした場合でも十分な安全性を担保できることを示す必要がある。被覆粒子燃料を選択する場合には、高燃焼度を達成できる燃料被覆材の開発が根本的な課題となる。水冷却炉については、増殖炉の可能性を追求し FBR の実用化シナリオの中でどのように位置付けるべきかを検討することとしているが、原研等との協力の下での検討が前提になると考えている。また、小型炉については、社会ニーズの多様化等に対応できる概念設計を進めるが、ハードを伴う検討は、大型炉や中型モジ

ジュール炉の成果を活用できると考えている。

なお、鉛ビスマス冷却炉やガス冷却炉については、JNC のR&Dインフラストラクチャが不十分なことから、国内外の他機関との協力を重視する必要がある。

### ①ナトリウム冷却炉

ナトリウム冷却炉の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-39に示す。第2期では、経済性目標を達成するための重要技術である機器合体概念や2次系簡素化概念等に関する要素試験を実施し、その成立性を判断することとしている。2001年度は、その立ち上げとして、試験装置の設計等を実施する。

ナトリウム冷却炉の検討から抽出された課題の内、ナトリウム冷却炉に限定されない炉型に共通な主要課題を解決するための第2期の展開を図-40に示す。高性能被覆管(ODS鋼)の開発は燃料サイクル費の経済性を左右する重要な課題であるが、照射試験等、開発のリードタイムが必要である。2001年度は、炉外試験(材料強度等)を実施するとともに、照射試験の準備に着手する。CDA\*対策技術は、増殖炉の特性から重視されてきた安全上の重要技術である。炉心溶融事故時の再臨界を回避するという形での解決を目指し、カザフのIGR炉を活用した炉内試験等を実施する。また、安全性をさらに高める技術として、受動的な安全方策の採用が重要であり、受動的な炉停止機構に係わる「常陽」での炉内試験等の準備を進める。

### ②重金属冷却炉

重金属冷却炉(鉛ビスマス冷却中型モジュール炉)の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-41に示す。第2期では、鉛ビスマスの材料腐食、保守・補修の困難さ、放射性ポロニウムの生成等、鉛ビスマス冷却炉固有の課題を克服することが最も重視される。これらの基礎試験を順次実施し、課題を解決していくこととする。

なお、鉛ビスマス炉については、国内の研究機関との協力や、主として米国やロシアとの国際協力を模索しながら研究開発を進めることとしている。

### ③ガス冷却炉

ガス冷却炉の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-42に示す。2000年度の検討により、ヘリウム冷却炉または炭酸ガス冷却炉のいずれか一つを選択する予定であるが、燃料としては、被覆粒子燃料および



ピン型燃料とも高速中性子場における高燃焼度を達成できる被覆材料の開発が不可欠であり、2001年度に、その調査を実施する。また、炉心性能を高めるための稠密な炉心体系での炉心燃料の除熱性を確認する必要があり、試験の準備を進める。

なお、ガス冷却炉に関しては、国内の研究機関との協力や、欧州との協力を活用した開発を模索したいと考えている。

#### ④水冷却炉

増殖、TRU 燃焼等の性能で、ナトリウム冷却炉に及ばない水冷却炉について、さらに増殖炉としての可能性を追求し、FBR の実用化シナリオの中でどのように位置付けるかが、検討のポイントとなる。原研等のアクティビティに期待するところが大きい。

#### ⑤小型炉

小型炉（ナトリウム冷却および鉛ビスマス冷却）についての第2期の展開を図-43 に示す。将来社会の多様かつ予測が難しいニーズへ柔軟に対応できる概念が必要である。受動安全機能の導入、長期化運転、運転・保守の簡素化等の概念を取り込んだ小型炉の概念設計をまとめることとする。なお、要素技術については、大型炉、中型モジュール炉の技術を活用することを考えている。

### 3) 再処理（表-15）

再処理と燃料製造については、互いに関連させ燃料サイクル全体で評価し、有望なプロセスを選択していくことが重要である。酸化物ペレット燃料製造を除けば、我が国では燃料サイクルのシステム設計に必要なデータが絶対的に不足している。第1期では、要素試験で各プロセスの基本特性を確認しながら、既存のデータを基にシステムの概念検討を進めてきた。第2期では、各候補概念の概念設計を進めることとしているが、最初の3年間は、要素試験による設計データの拡充を重視するとともに、それぞれの概念の個別課題（保守、廃棄物処理等）について設計検討を進める。システム全体を組み上げた形での概念設計は、後半2年間で実施する予定である。また、第2期以降を見据えて、工学規模での試験を実施するための研究フィールドの整備を進める必要がある。例えば、RETF の利活用計画の検討を進めることとしている。

湿式再処理法と乾式再処理法の比較を2010年頃に実施する予定としている。これに向け、第2期では、湿式、乾式それぞれについて、高い性能が望める我が国オリジナルなプロセスを開発することが重要である。また、湿式、

乾式両者の良い点を取り込んだハイブリッドプロセスの開発を行うという視点も重要と考えている。

湿式再処理法では、先進湿式法に採用した技術（晶析、簡素化溶媒抽出、TRU 回収）の成立性確認を進めるとともに、更なる経済性向上、性能向上を目指して高度化技術（イオン交換法、アミン抽出法等）の開発を進めることが重要と考えている。

乾式再処理法では、2000 年度の検討結果に基づき、酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つの方式を選択して検討を進めることとしているが、既存概念の改良に留まることなく、我が国オリジナルな概念を産み出すという視点を大切にしながら、経済性の向上を追及していくことが重要と考えている。乾式法は、特に設計データが不足している分野であり、データの拡充にも重点をおく。JNC の R&D インフラストラクチャが限られることから、国際協力を模索する必要があると考えている。

#### ①湿式再処理法

湿式再処理法の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-44 に示す。第2期では、先進湿式法の重要技術である晶析技術、簡素化溶媒抽出技術、SETFICS プロセス等の TRU 回収技術の成立性を確認するための要素試験を実施する。2001 年度は、それらのウラン試験を実施することとしており、加えて、晶析技術については、英国 NNC\*との協力でプルトニウム試験を実施する。

また、経済性向上、性能向上を目指したシステム高度化技術については、イオン交換法、アミン抽出法、超臨界流体抽出法に係わる基礎試験を実施する。

#### ②乾式再処理法

乾式再処理法の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-45、図-46 に示す。第2期では、酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、選択された2方式について、要素試験を実施し、データを拡充することが重要である。2001 年度には、各方式の主プロセスの基本特性試験を実施するとともに、廃棄物処理技術関連のコールド試験を実施することとしている。また、乾式法に共通な主要技術（脱被覆技術、材料開発、保障措置\*技術等）の開発を進める。

なお、酸化物電解法については、日露協力の枠組みを活用して RIAR での実燃料実証試験を実施する予定である。

#### 4) 燃料製造 (表-16)

燃料製造についても、3) 再処理の項で述べたとおり、第2期の最初の3年間は要素試験による設計データの拡充を重視するとともに、各候補概念の個別課題(遠隔操作技術、保守性等)について設計検討を進める。システム全体を組み上げた形での概念設計は後半2年間で実施する予定である。

ペレット燃料製造では経済性向上の追及が最も重要であり、低除染燃料、TRU含有燃料を扱っても経済性目標を達成できることを立証する必要がある。

振動充填燃料製造では、第2期の終了時点までにペレット燃料製造との基本的な比較が可能となるよう、要素試験等(欧州、ロシアとの協力を含む)により検討を深めることが重要である。また、ロシアの解体プルトニウム処分の枠組みで実施する振動充填燃料の技術開発で得られた知見については、実用化戦略調査研究に有効に活用する。

金属燃料の製造法(鑄造法)については、米国の知見を活用しながら、その技術を廃棄物低減等の観点から最適化していく必要がある。炉心燃料に関する検討と整合をとり、2000年度に金属燃料の取扱いを検討することとしている。

##### ①ペレット燃料製造

ペレット燃料製造法の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-47に示す。簡素化ペレット法について、2002年度までに基盤技術開発の成果を取りまとめ、その後の展開を検討することとする。2001年度は、プルトニウム富化度調整や粉末流動性等に係わる基盤技術開発を進めるとともに、簡素化ペレット法によるTRU含有燃料の製造性を確認するための試験を実施する。

##### ②振動充填燃料製造

振動充填燃料製造法の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-48に示す。粒子製造法については、2003年度までに実施する湿式ゲル化法の基礎試験(ウラン試験、プルトニウム試験)、および硝酸溶液から得られた粉末の乾式造粒法の基礎試験(ウラン試験)の成果に基づく比較評価を行う。また、粒子製造法と整合をとって、粒子を振動充填する充填技術評価試験を進める。

なお、湿式ゲル化法については、スイスPSIとの共同研究を活用して粒子製造試験や照射試験等を進めることとする。また、乾式再処理法に対応する振動充填燃料の照射挙動に関しては、ロシア解体プルトニウム処分の協力に係わる技術開発での知見を活用することを予定している。

### ③ 鑄造法燃料製造

鑄造燃料製造法の主要課題に係わる研究開発の第2期の展開を図-49に示す。個別課題のソフト検討については、2001年度から実施するが、要素技術開発については、2000年度に実施する金属燃料の取扱いに関する検討の結果を受けて計画を具体化し、2002年度から本格的に展開する。

なお、2001年度についても、電中研にて、燃料製造プロセスの工学規模ウラン試験等を実施することが計画されている。

## 5) システムの統合・評価

### ① FBR サイクル全体の統合・評価

第2期の最初の3年間については、設計の詳細化に合わせて、コストやリスク等の定量的な価値指標の適用性を検討し、実用化候補概念の絞込みに資するための評価システムの改良を行う。後半2年間では、FBR サイクル全体として組み上げた実用化候補概念を構築するとともに、上記の評価システムによる候補概念の比較評価を行い、その結果を一つの判断材料としながら、FBR サイクルの候補概念の絞込みを実施する。

### ② FBR サイクル開発計画

第2期の最初の3年間で FBR サイクルの実用化に向けた大型施設等の利活用計画を検討し、後半2年間で、研究開発計画（開発ロードマップ）をまとめることとしている。実用化に向けた課題とその解決策の同定、判断すべき事項とその時期を明確にした開発スケジュール、国際協力に係わる戦略、国内外の既存施設の活用方策と試験施設新設の必要性等について整理して示すことを考える。

### ③ 実用化戦略情報管理システムの開発（図-50）

FBR サイクルの実用化候補概念の絞込みを定量的に行うため、判断材料（設計情報等）を整備し、タイムリーに提供できる技術評価データベースシステムの構築や、意思決定を支援するシステムの構築が必要不可欠となる。設計情報等を収集・入力して、データベースの整備・充実を図るとともに、Web サーバー上にデータベースシステムを展開して、ブラウザにより随時、検索および閲覧を可能とする形態を考える。これらを統合し、プロジェクトの進捗管理、情報共有、意思決定情報提供等を一元的に統括する実用化戦略情報管理システムとする。

### (3) 第2期の実施体制

#### 1) 推進組織

第2期においても、第1期の組織・体制を継続することで十分対応可能と考える。FBR サイクル開発に係わる関係機関（JNC、電気事業者、電中研、原研、メーカー）によるオールジャパン体制を維持するとともに、大学等、他の研究機関との連携強化を模索したい。

第2期では、候補概念の技術的成立性を判断するための要素技術開発に重点をおくことから、設計研究と要素技術開発との連携を第1期にも増して深める必要がある。このため、実用化戦略調査研究の担当部署である本社、大洗工学センター、東海事業所、敦賀本部の間での連携を強化して、研究を進める。

#### 2) 国際協力

##### ①国際拠点の構築

研究開発課題評価委員会の事前評価において指摘のあったR&Dのインフラストラクチャの整備の一環として、2000年度末、FBR サイクル国際研究開発センターが大洗工学センター内に竣工する予定である。これにより、先進的な情報技術を活用した研究環境が整うとともに、国内および海外からの研究者、技術者を集中配置し効率的な研究推進が可能になると期待している。このセンターを中核とした FBR サイクル研究開発の国際拠点作りを進める。

##### ②戦略的な国際協力の展開

第1期では、幅広く技術的な選択肢をサーベイする観点から、国際協力の形態は、海外の知見を調査するための海外機関への委託研究や、情報購入が主体であった。しかし、第2期では、他国が開発している分野、海外におけるR&Dのインフラストラクチャを利用できる分野等について、戦略的な国際協力を進めることとしたい。主として、以下の分野での国際協力が必要と認識している。

###### a) 炉心燃料

- ・金属燃料、窒化物燃料の開発では、海外の照射試験炉や安全性試験炉の活用が不可欠である。

###### b) プラントシステム

- ・ガス冷却炉については、開発を進めている欧州との協力を模索する必要がある。
- ・鉛ビスマス冷却炉については、開発を進めているロシアや、NERI\*、

Generation IV等のプログラムを有する米国との協力を模索する必要がある。

c) 燃料サイクルシステム

- ・乾式再処理法では、酸化物電解法についてはロシアの、金属電解法について米国の知見を有効に活用することが重要である。
- ・振動充填燃料製造では、欧州やロシアとの協力を有効に活用しながら検討を進める必要がある。
- ・燃料サイクルシステムに係わる要素試験を実施するに当たって、海外のホットラボの活用も視野に入れる必要がある。

3) アイデア公募

第1期で実施した革新的アイデアの公募を第2期でも実施する。検討対象としている概念を超える新たな概念や、対象としている概念の性能を飛躍的に向上させる新たな技術に対する提案が受けられるよう、窓を国内外の大学や研究機関に対し、常にオープンにしておくことが重要であると認識している。

(4) 利用する施設・設備

1) 第2期に利用する主な施設・設備

第2期では、主として既存の施設・設備を活用し、要素試験を実施して、重要技術の成立性を確認することとしている。

プラントシステムの要素技術開発には、主として JNC 大洗工学センターのコールド施設を有効に活用する。特に、ナトリウム冷却炉の経済性向上技術や炉型に共通な主要技術の成立性確認に活用することとなる。ナトリウム冷却炉以外の要素試験については、研究の効率性を考慮して、国内外の他機関の施設・設備も有効に活用する。

「常陽」での照射およびその後の照射後試験は、準備に期間を要するため、本格的な照射は第2期終了後となるが、第2期では、キャプセル型の照射リグを開発し、TRU 燃料、振動充填燃料等の先行照射を行う。

東海事業所の CPF (ホットセル) やウラン試験施設、コールド試験施設、プルトニウム燃料開発施設等を、先進湿式再処理法や乾式再処理法の主要な技術の成立性確認、燃料製造技術の成立性確認等のために活用する。

2) 主として第2期終了後に利用する主な施設・設備

「常陽」および照射後試験施設については、2006年以降、本格的に燃料・材料の照射に活用するが、第2期ではその準備を進める。

「もんじゅ」については、2010年以降、実用化戦略調査研究で選択した革新技術の確認や集合体規模での燃料の照射等に活用する。

RETFについては、2006年以降に、湿式再処理法、乾式再処理法両者の工学試験に活用することを考える。このため、第2期では施設設計の見直し検討を進める。

#### (5) 資金計画

第2期の資金計画を第1期の予算と比較して表-17に示す。1999年度～2000年度の予算額と、第2期の初年度である2001年度の資金計画（予算要求額）を、分野ごとに整理して示している。表から明らかなように、2001年度は要素技術開発に重点を置いた予算配分としている。第2期5年間総計では、約300億円の予算を予定している（今後の検討で見直すことも有り得る）。

#### (6) 他の研究開発課題評価対象テーマとの関係

##### 1) MOX\*ペレット燃料製造工程の簡素化（ショートプロセス）に関する研究開発（1998年度に事前評価済み）

ショートプロセス法\*に関する研究開発については、実用化戦略調査研究に着手する以前に、単独で事前評価を受けている（1998年度）。しかし、ショートプロセスは燃料製造の経済性向上に効果の大きな技術であることから、その後、実用化戦略調査研究を開始した時点で、実用化戦略調査研究の一部として実施することとした。

ショートプロセス技術は、高除染燃料を念頭に開発が進められてきたものであるが、実用化戦略調査研究では、再処理の経済性向上や、資源の有効利用、環境負荷低減の観点から、低除染燃料やTRU含有燃料を指向しており、高除染燃料を対象とした研究開発に加え、遠隔操作等の技術開発が必要になる。このため、当初のショートプロセス技術に加え、実用化戦略調査研究に必要な項目を加え、実施中である。

##### 2) ロシア解体プルトニウム処分への協力に係わる技術開発（1999年度に事前評価を実施済み）

ロシアの解体プルトニウム処分への協力は、我国の科学技術を世界平和に役立てようとの試みであり、実用戦略調査研究とは目的を異にするものである。しかし、振動充填燃料の製造技術等、そこで開発する技術には、実用化戦略調査研究で検討対象に挙げているものも含まれる。したがって、解体プルトニウム処分への協力に係わる技術開発で得られた成果は、実用化戦略調査研究で有効に活用することとしている。

### 3) 長寿命核種の分離変換技術開発 (2000 年度に事前評価を実施予定)

長寿命核種の分離変換技術の開発は、経済的に成り立つ範囲内で効果が期待できる技術から優先的に取り組むこととし、段階を踏んだ長期的な研究が必要と考えている。

実用化戦略調査研究では、現状で、経済的に実用化することが見込める技術を検討対象としている。すなわち、現時点では同位体分離を必要とせず元素分離のみで対応できる核種で環境負荷低減効果の大きいものを対象としている。

一方、「長寿命核種の分離変換技術開発」では、実用化戦略調査研究での検討に加え、より長期的な課題までを対象にしている。

### (7) 期待される成果と波及効果 (図-51)

第2期の成果は、プラント設計に基づいて目標への適合性をできるだけ定量的に評価し、また、キーポイントとなる技術の成立性を確認するためのデータを取得して絞り込んだ実用化候補概念(複数)である。また、2015年頃に競争力あるFBRサイクルの技術体系を整備すべく、研究開発計画(開発ロードマップ)をまとめることである。

これらの第2期の成果により、FBRサイクルの実用化に向けた道筋を明確にすることができる。すなわち、必要不可欠な研究開発項目を特定し、どのような施設を活用して研究開発を進めるか、国際的な役割分担を含めて明らかにすることができる。

さらに、第2期の成果は、研究開発課題評価委員会や原子力委員会等でのチェックアンドレビューを経て、国の計画に反映されるものと考えている。



## 6. 成果の普及、公開について

本研究課題の意義と重要性を広く公開するため、研究の目的・概要および成果等の情報については、研究の進捗状況に合わせ、インターネット等の各種広報媒体や国の委員会、国内外の学会発表等を通じて、表-18のとおり公表した。

## 7. 措置事項の対応状況

研究課題評価委員会の事前評価における技術的観点での指摘に対しては、拝承して計画書に反映したほか、今後、検討を深めていく等の10項目の措置をとることとした。以下にその対応状況を示す。

### 1) 課題の意義と重要性

本研究課題の意義と重要性を認識し、研究課題評価委員会の事前評価結果および措置事項を念頭に置いて研究を着実に進めている。研究の目的・概要および成果等の情報については、研究の進捗状況に合わせ、「6. 成果の普及、公開について」に示すとおり、インターネット等の各種広報媒体や国の委員会、国内外の学会発表等を通じて、積極的に公表している。

### 2) 研究開発全般の進め方

本研究は、1999年7月に電気事業者等と共同研究体制を組み、研究を本格的に開始し、2000年5月末現在、研究の推進強化のため87名の要員のもとで実施している。2000年1月には原研の参画も得てオールジャパン体制で研究を進めている。

研究はプロジェクトチーム体制とし、計画的かつ効率的に進めるよう工夫している。

さらに、公募や技術提案により、広く国内外からの新しいアイデア等の取り込みに配慮している。

国内外の学会、専門家会議等において、本研究の進捗状況および成果などを積極的に報告している。これらの学会や会議等における示唆や、国の委員会等の意見を速やかに研究計画に反映し、研究を柔軟に進められるよう、引き続き研究の進捗状況に合わせ、計画的に研究の成果を報告していくこととする。

FBR サイクルの技術情報を効率的にデータベース化するとともに、FBR

サイクルとしての統合・評価、実用化シナリオの構築等の研究開発を支援する統合情報管理支援システムを開発している。また、これとあわせて研究開発進捗管理システムを整備している。

また、大洗工学センター内に FBR サイクルの研究拠点とすべく、「FBR サイクル国際研究開発センター」を 2000 年度末竣工の予定で建設中である。

### 3) 開発シナリオの戦略としての耐性

FBR を取巻く長期的な環境の変化に対しても十分に耐性のある研究開発シナリオが策定できるよう、21 世紀の社会展望や海水からのウラン採集等も考慮したウラン資源の需給動向を含めたエネルギー資源全般にわたる需給動向、新エネルギーの開発動向、軽水炉のリプレース時期や将来型軽水炉の開発動向、ならびに環境負荷低減に関する社会ニーズの動向などを調査、検討して、柔軟な開発目標を策定することとしている。また、FBR サイクルの実用化候補概念の抽出に当たっては、多面的な評価の視点に基づき複数の概念を抽出することとしており、これらに基づいて FBR サイクルの実用化に向けた研究開発計画を検討し、実用化候補概念を実現していく上で重要な技術課題を抽出するとともに、第 2 期の開発計画を策定することとしている。

### 4) 技術評価の視点・方法

プラントシステムでは、冷却材や燃料形態の特徴と利点を、また再処理および燃料製造ではそれぞれの方式のもつ除染性能等の特徴を、それぞれ活かすとともに、短所を補うことに留意して研究開発を進めている。

また、技術的レベルの異なる種々の要素技術を組み合わせ、整合のとれた FBR サイクル体系を構築できるよう、まず個々のサイクル要素に対する設計目標を満たすことを必要条件とした上で、サイクルとしての開発目標に対する達成度を客観的に評価する方法などについて検討を進めている。

さらに、評価指標には、技術的実現性も評価の視点として加え、これらの指標をできるだけ定量化することに留意するとともに、システムの改良の効果を把握・評価できるようにしている。

このため、技術や設計の特徴を踏まえつつ、革新的技術を含む開発レベルの異なる要素技術、候補概念を多面的な視点で評価することができると考えている。

### 5) 経済性評価

経済性については、基本的に発電単価で評価することとしているが、本研究における FBR サイクルの候補概念は、それを構成する技術レベルでみた

場合、基礎研究段階、工学試験段階および実用化段階と多様であり、プラント物量等の経済性評価データの精度に大きな相違があると考えられる。したがって、総合評価において候補概念の経済性評価を行う際には、ナトリウム冷却混合酸化物燃料\*炉のように、精度よくコストを算出することが可能な候補概念から、重金属冷却炉のように評価のための根拠となるデータが非常に少なく、不確定性の幅の大きな候補概念まで含めた経済性評価を行わざるを得ない。このため評価指標には技術的実現性（開発期間、開発資金）等を加えて、技術の不確かさなどについても配慮することとした。

#### 6) 環境負荷低減性

FBR を中核とする将来の核燃料サイクルでは、天然ウランを最大限有効に利用することによりウランの利用効率を上げると同時に、放射性廃棄物をできるだけ出さないことが重要であり、実用化にあたっては環境負荷低減性に優れた FBR サイクルを確立する必要がある。

このため、FBR サイクル施設の運転・保守および廃止措置に伴い発生する廃棄物量の低減に加え、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会の報告等も考慮して TRU の燃焼ならびに長半減期 FP\* の核変換技術等による廃棄物毒性の低減などについても設計目標として設定し、積極的に取り組むこととしている。

#### 7) 安全確保

安全性の確保は、FBR サイクルの開発目標の1つとして設定し、さらに他のすべての開発目標の前提条件としている。

また、安全性を確保することは、開発段階も含めて基本的な要件であり、社会的受容性にも配慮した安心感のある、安全確保の考え方を基本とした FBR サイクルを確立することを目標とし、少なくとも軽水炉、軽水炉再処理および酸化物燃料製造施設と同等またはそれ以上の安全性を確保するものとしている。

このため、再臨界性の回避や受動的な安全機能の活用、化学的に活性な物質や毒性の強い物質の取扱いにおける安全上の配慮等のハード設計的な側面、ならびに運転・保守作業におけるヒューマンエラーの防止や保守作業量の低減、運転員・保守員の省力化、保守作業員の被ばく低減等のソフト的な側面にも留意して開発を進めることとしている。

#### 8) 実用化要素技術開発

FBR サイクルの実用化候補概念の抽出および実用化に向けた研究開発計画の策定の中で、枢要技術を摘出し、優先順位の決定を行うこととしている。

材料・構造、伝熱・流動、燃料開発等の要素技術開発や安全評価のためのデータの蓄積など長期間を要するものについては、基盤研究として長期的視野に立って実施することとしており、短期的な研究開発を取巻く状況の変化や判断によって計画が中断されることのないよう十分に考慮することとしている。

このような要素技術開発に対する考え方に基づき、本研究の第1期は、設計研究等のソフト面での検討を主としているが、第2期では、これに加えて、要素試験等のハードを伴う要素技術の開発にも重点をおくこととしている。なお、要素技術の試験研究については、各候補概念の技術的成立性や目標達成のキーポイントとなる技術のうち、ソフト検討のみでは絞込みに必須な情報が提示できず、試験研究の必要なものについて実施する予定であり、大規模な開発試験や実証試験には着手しないこととしている。

#### 9) 情報公開

本研究の成果は、ロンドンガイドライン\*等を考慮した JNC の情報公開指針に則って、公開することとしている。

なお、公開にあたっては、本研究に関する技術開発の目標や成果、安全確保の考え方などについて、一般にも分かり易い形で情報を提供することに配慮している。

#### 10) 期待される成果および波及効果

本研究においては、21 世紀のエネルギー資源全般にわたる需給動向、新エネルギーの開発動向、軽水炉のリプレース時期や将来型軽水炉の開発動向、さらに環境負荷低減に関する社会ニーズの動向などに対応できる整合の取れた FBR サイクルの実用化候補概念を提示することとしている。

これらの研究を通じて、21 世紀における原子力エネルギー開発、エネルギー資源の有効利用、TRU 燃焼、長半減期 FP の核変換技術等による環境負荷の低減等について大きな貢献ができると考えている。

### 8. その他特記すべき事項

- 1) 第2期の研究に先立ち、第1期の成果を踏まえた第2期研究開発計画を策定することとしている。

この研究開発計画については、再度、2001 年6月頃、研究開発課題評価委員会に諮問することとしている。

# 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

## 【添付図表】

## 図表一覧表

表-1	プラントシステムに関するメーカー提案の概要	添-1
表-2	燃料サイクルシステムに関するメーカー提案の概要	添-2
表-3	アイデア公募により採用した研究テーマ	添-3
表-4	実用化戦略調査研究に係わる国際協力の状況	添-4
表-5	評価指標の検討例	添-5
表-6	第1期におけるFBRシステムの検討	添-6
表-7	炉心燃料 第1期の中間成果と2000年度計画	添-7
表-8	ナトリウム冷却炉における炉心ならびにシステムの改善方策	添-8
表-9	プラントシステム 第1期の中間成果と2000年度計画	添-9
表-10	第1期における燃料サイクルシステムの検討	添-10
表-11	再処理 第1期の中間成果と2000年度計画	添-11
表-12	燃料製造 第1期の中間成果と2000年度計画	添-12
表-13	2001年度計画(炉心燃料)	添-13
表-14	2001年度計画(プラントシステム)	添-14
表-15	2001年度計画(再処理)	添-15
表-16	2001年度計画(燃料製造)	添-16
表-17	第1期および第2期の研究予算の年度展開	添-17
表-18	成果の公開・発表状況	添-18
図-1	実用化戦略調査研究の目的	添-19
図-2	第1期の検討評価の進め方	添-20
図-3	実用化戦略調査研究における協力体制	添-21
図-4	核燃料サイクル開発機構における実用化戦略調査研究の実施体制	添-22
図-5	技術検討WGおよび技術連絡会の体制	添-23
図-6	FBRサイクルの開発目標	添-24
図-7	FBRサイクルの基本的な考え方	添-25
図-8	FBRサイクルの主な設計目標	添-26
図-9	FBRサイクル技術の評価	添-27
図-10	燃料形態の絞込みの考え方	添-28
図-11	MOX炉心性能限界の検討(3800MWt、18ヶ月サイクル)	添-29
図-12	ナトリウム冷却炉の候補と検討の進め方	添-30
図-13	ナトリウム大型炉の主なプラント概念図	添-31
図-14	建設費20万円/kWeに向けてのコストダウン方策	添-32
図-15	軽水炉に比肩する経済性を目指すナトリウム炉の建設費低減方策	添-33
図-16	さらなるコストダウン(1)方策を実現する革新的技術の具体的効果	添-34

図-17	Na-水反応の排除(不活性中間媒体)による2次系簡素化アプローチ	添-35
図-18	Na-水反応の排除(新発電方式)による2次系簡素化アプローチ	添-36
図-19	重金属冷却炉の候補と検討の進め方	添-37
図-20	重金属炉のプラント概念	添-38
図-21	重金属炉の選定(出力/構造成立性の観点に基づく)	添-39
図-22	ガス冷却炉の候補と検討の進め方	添-40
図-23	ガス冷却炉のプラント概念	添-41
図-24	ガス冷却炉の開発課題について	添-42
図-25	小型炉のニーズと開発目標	添-43
図-26	小型炉の検討候補と検討の進め方	添-44
図-27	燃料サイクルシステムの検討の進め方	添-45
図-28	先進湿式法のプロセスフロー	添-46
図-29	酸化物電解法プロセスフロー(酸化物燃料への適用例) [RIAR 開発プロセスとの比較]	添-47
図-30	金属電解法のプロセスフロー[ANL 開発プロセスとの比較]	添-48
図-31	フッ化物揮発法のプロセスフロー[既往研究との比較]	添-49
図-32	簡素化プロセスのペレット製造工程[現状プロセスとの比較]	添-50
図-33	振動充填燃料製造システム(酸化物燃料への適用例)	添-51
図-34	射出成型法および遠心鑄造法による金属燃料鑄造	添-52
図-35	湿式および乾式システムの経済性試算結果	添-53
図-36	実用化戦略調査研究の第2期の目的	添-54
図-37	実用化戦略調査研究の第2期の展開	添-55
図-38	第2期の展開(MOX 燃料開発の主要なR&D)	添-56
図-39	第2期の展開(Na 冷却炉の主要なR&D)	添-57
図-40	第2期の展開(炉型に共通な要素技術開発)	添-58
図-41	第2期の展開(重金属冷却炉の主要なR&D)	添-59
図-42	第2期の展開(ガス冷却炉の主要なR&D)	添-60
図-43	第2期の展開(小型炉の主要なR&D)	添-61
図-44	第2期の展開(湿式再処理法の主要なR&D)	添-62
図-45	第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[1/2]	添-63
図-46	第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[2/2]	添-64
図-47	第2期の展開(ペレット燃料製造法の主要なR&D)	添-65
図-48	第2期の展開(振動充填燃料製造法の主要なR&D)	添-66
図-49	第2期の展開(鑄造燃料製造法の主要なR&D)	添-67
図-50	第2期の展開(実用化戦略情報管理システムの開発)	添-68
図-51	第2期の期待される成果と波及効果	添-69

表-1 プラントシステムに関するメーカー提案の概要

炉型	概念の種類		概念の特徴および新たな概念・技術	
ナトリウム炉	大型炉	ループ型	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次系機器合体・ループ数削減</li> <li>150万kWe</li> <li>機器のコンパクト化と配管短縮の徹底 回字型炉心、12Cr鋼採用、EVST削除、ループ数の削減、1次系IHX/ポンプ合体または別置</li> </ul>	
		1次系高圧型	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次系高圧化による2次系簡素化</li> </ul>	
		タンク型	<ul style="list-style-type: none"> <li>2次系機器合体・ループ数削減</li> <li>150万kWeタンク型、k<math>\infty</math>一定長期運転サイクル炉心(~37ヶ月)</li> <li>機器のコンパクト化と集中配置を追究 12Cr鋼採用、1次系IHX/PRACS合体、2次系SG/電磁ポンプ合体、EVST削除</li> </ul>	
		機器合体・集中配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>160万kWeタンク型</li> <li>機器のコンパクト化と集中配置 1次系、2次系共電磁ポンプによる機器合体、制御系合理化</li> </ul>	
	中型モジュール炉	S-PRISM		<ul style="list-style-type: none"> <li>40万kWeモジュール×4(または6)</li> <li>低温設計、受動的安全性の導入(RVACS)、ループ数最小化、2次系以降の非安全系化、ユニット間の共有</li> </ul>
		4S型		<ul style="list-style-type: none"> <li>20万kWeモジュール×8</li> <li>反射体制御方式</li> <li>RVACSによる安全系局限化、受動的安全性による安全設備の最小化</li> <li>ループ数最小化、1次系、2次系共電磁ポンプによる機器合体</li> </ul>
重金属炉	大型炉	鋼製炉容器	<ul style="list-style-type: none"> <li>150万kWe鉛冷却8ループ方式、鋼製炉容器</li> <li>2重配管、2次系削除</li> </ul>	
		ポンド型炉容器	<ul style="list-style-type: none"> <li>120万kWe鉛冷却タンク型炉、ライナーコンクリート型炉容器(ポンド型)</li> <li>2次系削除</li> </ul>	
	タンク型モジュール炉	鉛冷却	<ul style="list-style-type: none"> <li>40万kWe×4基からなるタンク型モジュール炉</li> <li>2次系削除、電磁ポンプ/SG合体</li> </ul>	
		鉛ビスマス冷却	<ul style="list-style-type: none"> <li>10万kWe鉛ビスマス冷却、鋼製炉容器、長期運転サイクル(10年間)</li> <li>2次系削除</li> </ul>	
ガス炉	炭酸ガス冷却(ピン型燃料)		<ul style="list-style-type: none"> <li>140万kWe、ライナー・コンクリート型炉容器(PCRV)</li> <li>フィン付き燃料ピンの採用</li> <li>2次系削除</li> </ul>	
	ヘリウム冷却	ピン型燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>160万kWe、窒化物燃料採用による炉心性能および安全性向上(炭酸ガス冷却炉で炉心性能と減圧事故時炉心冷却の両立性の見通しを確認してから検討)</li> </ul>	
		被覆粒子燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>85万kWe、被覆粒子燃料の採用</li> <li>高温化による熱効率向上、ガスタービンによる高効率、コンパクト化</li> </ul>	
熔融塩炉	タンク型モジュール炉		<ul style="list-style-type: none"> <li>40万kWeモジュール、40年の寿命後にU/TRU/Pu回収</li> <li>塩化物熔融塩/2次系鉛冷却、FPバッチ除去</li> </ul>	
小型炉	鉛ビスマス炉		<ul style="list-style-type: none"> <li>5万kWe鉛ビスマス冷却タンク型炉、鋼製炉容器</li> <li>反射体制御方式、長期運転サイクル、2次系削除</li> </ul>	



表一2 燃料サイクルシステムに関するメーカー提案の概要

	再処理		燃料製造	
	提案方式	特徴とねらい	提案方式	特徴とねらい
湿式法	PUREX法の簡素化	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾式熱処理による前処理、単サイクル溶媒抽出による簡素化、溶媒抽出工程に遠心抽出器採用</li> <li>超臨界直接抽出法(オプション)</li> </ul>	ペレット製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶液混合により粉末調整工程を削除</li> </ul>
	PUREX法の簡素化 またはイオン交換法	<ul style="list-style-type: none"> <li>改良溶媒(アミド抽出)</li> <li>溶媒抽出工程に遠心抽出器採用</li> <li>イオン交換樹脂を用いた再処理法</li> </ul>	振動充填燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>湿式ゲル化法によるスフェアパック燃料製造</li> </ul>
乾式法	金属電解法の改良技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾式熱処理による脱被覆塩素溶解採用による廃棄物低減、プロセスの簡素化(酸化物)</li> <li>リチウム還元装置の改善による処理速度向上</li> </ul>	振動充填燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>転動造粒法による顆粒製造</li> </ul>
	酸化物電解法の改良技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料溶解/UO<sub>2</sub>析出同時プロセスでの速度向上</li> <li>UO<sub>2</sub>の除染率向上</li> </ul>	振動充填燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>再処理製品から直接顆粒が得られる</li> </ul>
	フッ化物揮発法の改良	<ul style="list-style-type: none"> <li>フッ化物揮発法に基づくプロセス</li> <li>Puの低除染化により工程の簡素化をはかる</li> </ul>	振動充填燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>フッ化物を水蒸気で転換し顆粒を得る</li> </ul>

(注1)再処理法と燃料製造法は一体化プラントとして提案を受けている。

表-3 アイデア公募により採用した研究テーマ

応募件数(有効性、革新性および独創性のある技術)

		国内	海外	合計
プラントシステム		32	19	51
燃料サイクルシステム	再処理関係	10	4	14
	燃料製造関係	5	1	6
合計		47	24	71

採用研究テーマ

		研究テーマ	
プラントシステム	1	超臨界圧水冷却による高速炉概念の検討(大出力化、増殖性能)	
	2	液体金属2相流自然循環を利用したMHD直接発電システムの概念検討	
	3	2次系簡素化をねらいとしたIHX/SG一体化・中間媒体直管方式熱交換器の構造概念検討	
	4	欧州等の設計研究知見を踏まえたコンパクト化Na冷却大型タンク型炉の概念検討	
	5	熱電素子発電方式の高速炉への適用可能性検討	
	6	鉛および鉛ビスマス冷却炉の技術的知見・試験研究に基づくプラント概念の検討	
	7	自然循環冷却方式の鉛および鉛ビスマス冷却炉のシステム特性検討	
燃料サイクルシステム	再処理関係	8	イオン交換法によるFBR燃料再処理の研究
		9	無配管化を目指した湿式再処理プロセスの合理化検討
	燃料製造関係	10	遠心鑄造法・金属鑄型による金属燃料製造プロセスの合理化検討

表-4 実用化戦略調査研究に係わる国際協力の状況

	相手国	協力項目	相手機関	実施内容
プラントシステム	仏	欧州FBR(EFR)のコストダウン方策	ノバトム社	実用化戦略調査研究に反映するため、欧州FBR(EFR:タンク型大型ナトリウム冷却炉)で検討されたコストダウンの諸方策について調査する。
	英	PFRの運転経験に関する調査	NNC社	Na-水反応対策、制御棒寿命延長方策、燃料被覆管(PE16)、再臨界回避方策の4項目に関する英国NNCの知見について調査する。
	米	S-PRISMの炉心安全設計に関する研究	GE社	S-PRISMの燃料溶融時の再臨界回避対策を講じた場合の炉心設計上の影響を明らかにすることを目的として、集合体内ダクト概念の適用性評価と炉心損傷時の影響緩和能力評価を行う。
燃料サイクルシステム	露	サイクルプラントの高度化	RIAR	乾式再処理・振動充填燃料製造に関する設計研究およびBOR-60使用済燃料を用いた工学規模試験の実施。
	露	サイクル関連施設の運転経験	VNIINUM, RI	ロシアの湿式再処理、燃料製造施設を対象に運転経験情報を入手する。また、マイナーアクチニド、長寿命FPの分離技術等の情報を入手する。
	露	MOX振動充填燃料の照射試験および評価	RIAR	使用済燃料を乾式法で再処理し、製造したリサイクルMOX燃料を用い、低除染の振動充填燃料ピンの照射試験を行い、照射健全性を調べるとともに、リサイクル燃料による振動充填燃料製造技術に係わる最適化検討を行う。
	露	酸化燃料乾式再処理技術に関する研究	RIAR	実使用済燃料MOX燃料を乾式法で再処理し、MOXを直接電解回収するための試験情報および処理速度向上、溶解するつば長寿命化、廃棄物処理、MA回収プロセスの検討。回収したMOXを用いた燃料製造試験。
	英	振動充填燃料製造システム設計検討	BNFL	BNFLの振動充填燃料製造に関するこれまでの情報を入手する。
	スイス	内部ゲル化による振動充填燃料製造技術	PSI	PSIとの間で進めている振動充填燃料に関する共同研究を通じ、内部ゲル化及び振動充填によるNp含有振動充填燃料製造技術情報を入手し、評価する。
	仏	核種分離の高度化	CEA	TRU回収、長半減期核種回収に係わる技術について、研究員1名をCEA側に長期派遣し、情報交換を進める。
	英	晶析プロセス試験	AEA Technology, BNFL	99年度はAEAテクノロジーの、2000年度はBNFLの所有施設においてPu含有溶液を用いた晶析試験を実施し、所要のデータを取得する。
	英	乾式リサイクル技術に関する調査	BNFL	乾式リサイクルシステム検討のため、英国BNFLの知見を調査する。
	EU	乾式リサイクルプロセスのTRUを用いた小規模実証試験	TUI	以下の試験を実施し、乾式リサイクル技術のプロセス実証を行い、プロセスフローの最適化に資する。 ・TRU試料およびTRU含有金属燃料を用いた乾式再処理電解精製プロセスの実証試験 ・TRU試料および実高レベル廃液を用いた乾式分離プロセスの実証試験
	英	酸化燃料の金属への転換技術の試験	AEA Technology	使用済み酸化燃料を金属に還元する適切な方法を確立するために、リチウム等の還元剤を用いたPuやMAの還元試験を実施し、最適還元法を選定するとともに、模擬使用済みペレットを用いてプロセスの実証を行う。
	英	U-Pu-Zr合金とFe系被覆管材との共存性に係る炉外試験	AEA Technology	燃料合金と被覆管との間で生じる液相形成反応の開始温度を評価する目的で、ウランプラトニウム-ジルコニウム合金と覆管材(鉄)を用いた拡散実験、および示差熱分析等を実施する。

表-5 評価指標の検討例

評価の視点	評価指標			判断のめやす(暫定値)
	一次指標	二次指標	三次指標	
経済性	発電単価	原子炉関連費	原子炉建設費 運転維持費 稼働率 プラント効率	20万円/kWe  90%程度 軽水炉以上 (所内負荷率、熱効率) 15万MWd/t
			再処理費	燃焼度 廃止措置費 業務分担費
		燃料製造費	施設建設費 操業費 稼働率 廃止措置費	200日/年
			使用済燃料輸送費 廃棄物処分費	施設建設費 操業費 稼働率 廃止措置費
安全性	技術的安全性	再臨界回避 受動安全性 臨界安全性	核的制限 臨界検知	同時代の軽水炉サイクルと 同等またはそれ以上
				社会的安心感
資源有効利用性	ウラン利用効率	燃焼度	再処理 燃料製造	80%以上 15万MWd/t程度 (炉心燃料取り出し平均)
		製品移行率		99~99.9% 99~99.9%
	システム倍増時間	稼働率 増殖比 製品移行率 炉外サイクル時間	30~50年 90%程度 1.0~1.3 99~99.9% 5年	

評価の視点	評価指標			判断のめやす(暫定値)
	一次指標	二次指標	三次指標	
環境負荷低減性	全廃棄物発生量 原子炉 再処理	高βγ廃棄物 低レベル廃棄物	高レベル固化体 TRU深地層並 TRU高βγ並 TRU低レベル並 低レベル廃棄物	*1  *2
		燃料製造		
	全廃棄物の処分場面積 原子炉 再処理 燃料製造	*1に同じ		
		*2に同じ		
		*3に同じ		
	高レベル廃棄物特性 (TRU深地層並含む)	潜在的毒性(AI) 放射エネルギー(Ci) 被ばく量(Sv/年)		
周辺環境放出量	運転時放出放射エネルギー  有害化学物質	大気放出量 海洋放出量 NOx CO2 塩素ガス フッ素ガス 塩、重金属等		
核拡散抵抗性	核兵器転用性	取扱困難性	技術難易度	放射性及び発熱性核種の 添加(MA: 1~5wt%/HM またはFP: 2wt%/HM以内) 20W/kgHM 1mで1Sv/h程度  核分裂性Pu比率80%以下
		核物質防護		
	保障措置	査察頻度 査察期間 査察精度	計量・分析精度 接近性	
		技術的実現性		技術レベル 開発期間(年) 投資資金(円/年)

表-6 第1期におけるFBRシステムの検討

冷却材 (プラントシステム)			燃料形態	固体燃料					液体燃料
				ピン型燃料			被覆粒子燃料		(U+Pu)
				酸化物	金属	窒化物	酸化物	窒化物	
Na冷却	大型炉		○	○	○				
	中小型モジュール炉		○	○	○				
重金属冷却	大型炉(Pb)		○	○	○				
	中小型モジュール炉 (Pb、PbBi)		○	○	○				
ガス冷却	大型炉	(CO <sub>2</sub> )	蒸気タービン発電	○	○	○			
		(He)	蒸気タービン発電	○	○	○			
			ガスタービン または 複合発電	○		○	○	○	
	中小型モジュール炉(He)		○		○	○	○		
水(重水)冷却			○						
燃料による冷却								○	

(注) ○ は、検討対象を示す。

表-7 炉心燃料 第1期の中間成果と2000年度計画

	中間成果と課題	2000年度計画
酸化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>再臨界回避方策により炉心性能は低下するが、ナトリウム冷却炉で増殖比1.2程度まで可能</li> <li>金属、窒化物に比べ、炉心性能は劣る(増殖比で0.15程度)</li> <li>重金属、ガスの炉心性能は、ナトリウムに比べ、同等もしくはやや劣る</li> <li>水炉は、再臨界回避対策をとらず、高除染燃料を使用する条件では増殖比が1を越える見通しを得た</li> <li>酸化物は、実績が豊富であるが、高燃焼度(15万MWd/t)を達成するには被覆管の開発が重要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再臨界回避を満足する炉心燃料設計を進め、開発目標への適合性を見極める</li> <li>燃料サイクルとの整合性を図った炉心性能を評価する(低除染燃料の炉心性能)</li> <li>高燃焼度の被覆管材料(ODS鋼)の開発、検討</li> </ul>
金属燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心性能は酸化物より良い</li> <li>金属燃料と被覆管の共晶制限のため、ナトリウム冷却で炉心出口温度を510~530℃以下に制限</li> <li>照射実績が少ないため、開発計画の策定が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属燃料の特徴を生かしつつ、再臨界回避を満足する炉心燃料設計を進め、開発目標への適合性を見極める</li> <li>国際協力を活用した金属燃料の研究開発計画の策定(燃料製造、ピンおよび集合体照射、安全性試験を含む)</li> <li>高温化の可能性追求のため金属燃料の照射挙動解明および共晶問題を回避できる方策等の開発計画の検討</li> </ul>
窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心性能は、酸化物より良い(金属燃料とほぼ同等)</li> <li>炉心損傷時、ガス炉を除き、燃料-冷却材との間で激しい熱的相互作用および窒素解離による圧力上昇</li> <li>被覆粒子燃料では、高速中性子場での被覆層の健全性の確保が課題</li> <li>照射実績が金属燃料よりさらに少なく、開発計画の策定が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>重金属、ガス冷却炉における炉心燃料設計の検討</li> <li>国際協力を活用した窒化物燃料の研究開発計画の策定</li> <li>高速中性子場での照射影響の少ない被覆材料および構造の検討</li> </ul>

表一8 ナトリウム冷却炉における炉心ならびにシステムの改善方策

	設計要求(課題)	解決方針	課題解決方策
炉心	炉心領域全体の縮小	・炉心燃料部のみならず、その周囲を含めたコンパクト化	・高性能遮蔽体(鉛/Zr-H)による板厚削減 } による炉心のコンパクト化 ・径方向ブランケット削減(内部転換比の向上)
	炉心の圧損の低減	・燃料バンドルの流動抵抗の削減	・燃料要素の太径化 } による低圧損炉心の採用 ・富化度分布をつけ、軸方向ピーキングを低減
	再臨界回避による炉心性能低下の緩和(集合体に内部ダクトを設置)	・炉心燃料体積比の確保	・内部ダクト径の最適化、内部ダクトおよび集合体壁の薄肉化 ・炉心性能に影響が少ない他の再臨界排除方策の創出とその採用 ・重原子密度の高い新型燃料(金属、窒化物)の採用
	燃焼度の向上	・炉心材料のスエリング特性改善	・耐スエリング特性の良いODS鋼の開発(取出平均15万MWd/t達成可能) ・高速中性子フルエンス平坦化炉心の検討
	運転サイクル期間の長期化	・燃料体積比の増加による燃焼反応度の抑制	・ラッパ管および内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化(18ヶ月以上のサイクル期間達成可能) ・重原子密度の高い新型燃料の採用
	炉心出口温度の高温化	・炉心材料の高温特性改善	・高温強度に優れた材料(ODS鋼)の開発(炉心出口温度550℃達成可能) ・富化度分布をつけ、炉心内ホットスポットファクターを低減
	制御棒の長寿命化	・長寿命制御棒の開発	・Naボンド型制御棒の開発 ・軸非均質(B-10濃縮度の軸方向多領域化)制御棒の採用
	柔軟な増殖性能	・燃料体積比およびブランケット厚で調整	・ラッパ管および内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化
	TRUの受け入れ能力	・炉心反応度特性の改善	・径方向および軸方向ブランケットの調整 ・炉心型式、形状の最適化による改善
	長寿命FP各種の核変換	・FP装荷形態の最適化	・重原子密度の高い新型燃料の採用によるTRU混入制限(融点等)の改善 ・効果的な減速材配置、ターゲット材料の最適化 ・重原子密度の高い新型燃料の採用
核拡散抵抗性の確保	・核物質への接近困難性	・低DF燃料、MA混入燃料の採用	
燃料	配管引廻しの簡素化・短尺化	・熱膨張の少ない新材料の配管への適用 ・機器合体による機器を結ぶ配管の削除	・12Cr鋼の採用 } の機器合体による系統コンパクト化 ・中間熱交換器/ポンプ ・蒸気発生器/ポンプ
	ループ数の削減	・冷却系機器および配管の単基容量の増大	・ループ数の削減(4ループから2または3ループ化)
	建物物量の削減	・機器配管のコンパクト化と合理的な配置 ・地震入力への低減による建屋構造の簡素化	・冷却系統のコンパクト化と配置の最適化による建屋容積の削減 ・付帯設備(ヒータ、計測系など)の削減 ・3次元免震の採用
	構造設計裕度の拡大	・熱膨張応力発生要因の緩和 ・設計裕度の適正化	・熱膨張応力の少ない12Cr鋼の採用 ・高温構造設計(基準)の高度化
	原子炉容器の縮小	・炉容器径の縮小	・炉心コンパクト化 } による炉容器径増加の抑制 ・燃料取扱構造のコンパクト化 ・炉心支持構造の改善 ・飯盒型HXIによる炉内配置効率の向上(タンク型のみ)
	燃料取扱設備の簡素化	・燃料取扱構造のコンパクト化	・切り欠き式炉心上部機構 } による燃料取扱構造のコンパクト化 ・単回転プラグの採用
	伝熱機器、容器の縮小	・燃料取扱方法の改善と設備の簡素化	・乾式洗浄の採用と水プール冷却設備の活用によるナトリウム冷却の炉外使用済み燃料貯蔵設備の共用化または削除
	地震荷重の低減	・伝熱性能に優れた新材料による機器コンパクト化 ・低膨張材料の採用による機器合体の拡大	・中間熱交換器、蒸気発生器への12Cr鋼の採用による機器コンパクト化 ・中間熱交換器、蒸気発生器とポンプとの機器合体による系統コンパクト化
	安全性の向上	・免震の採用による機器・配管の薄肉化	・免震の採用による機器配管および支持構造の簡素化 ・サイト条件にとらわれない設計の標準化によるエンジニアリング費の合理化
	ナトリウム-水反応対策の向上	・受動的な炉停止および崩壊熱除去機能の付与	・異常高温時の制御棒自然挿入機構の採用 ・自然循環による炉心崩壊熱除去機能の向上 ・非常用電源設備の簡素化
ナトリウム機器の検査・補修能力の拡大	・ナトリウム-水反応の発生可能性の回避	・中間媒体を介したナトリウム/水熱交換器による2次系簡素化の検討	
その他	・ISi技術の高度化	・超音波探傷技術、遠隔操作技術の開発	
	・設計標準化の拡大	・設計の標準化による製作性の向上、リポート効果の追求等によるエンジニアリング費の削減 ・QA/QCの合理化による管理費の削減	

表-9 プラントシステム 第1期の中間成果と2000年度計画

	概念	中間成果と課題	2000年度計画
ナトリウム炉	大型 (ループ型、タンク型)	・コストダウン方策(ループ数削減等による物量削減)の追求により、経済性の目標を達成しうる見込み	・ループ型、タンク型の各1概念の詳細物量を評価し、目標達成度の検討
	中型	・モジュール効果を追求すれば、経済性の目標を達成しうる可能性	・モジュール化が可能な範囲でスケールメリットを追求し、さらに経済性向上の検討
	2次系簡素化概念	・中間媒体を用いたナトリウム-水反応回避等の概念を抽出	・各概念を具体化して、技術的成立性評価
重金属炉	大型	・重量過大、耐震性、技術的成立性の観点から難	・鉛ビスマス冷却の中型モジュール炉概念を検討(技術的成立性、経済性等)
	中型	・重量低減可能 ・融点が高い鉛ビスマスの方が有利	
ガス炉	炭酸ガス (ピン型燃料) ヘリウムガス(ピン型燃料) ヘリウムガス(被覆粒子燃料)	・減圧事故時の冷却性、再臨界回避対策を考慮した炉心性能評価が必要 ・被覆粒子燃料の高速中性子場での高燃焼度化に係わる課題	・抽出された課題の検討
水炉	軽水炉 重水炉 超臨界圧軽水炉	・稠密炉心を採用した増殖炉心の検討	・再臨界回避対策の必要性と具体化の検討 ・各種事故時の炉心冷却性の評価
熔融塩炉	塩化物タンク型 モジュール炉	・増殖比1以上の可能性 ・熔融塩に対する構造材料の共存性が課題	・システムの技術的成立性、経済性の検討 ・構造材料の課題の整理
小型炉	ナトリウム炉 鉛ビスマス炉 ヘリウムガス炉	・小型炉開発の開発目標を整理	・ナトリウム炉(金属燃料)、鉛ビスマス炉(窒化物燃料)を中心に概念検討



表-10 第1期における燃料サイクルシステムの検討

		酸化物	窒化物	金属	検討のポイント
再処理	湿式	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工程の簡素化</li> <li>・ TRU回収率の向上</li> <li>・ 液体廃棄物発生量の低減</li> <li>・ Pu非分離回収</li> </ul>
	乾式	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ TRU回収率の向上</li> <li>・ 塩廃棄物処理</li> <li>・ バッチ処理に伴う核物質移送技術</li> <li>・ 計量管理手法の確立</li> </ul>
燃料製造	ペレット	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工程の簡素化</li> <li>・ 低除染燃料への適用</li> <li>・ 遠隔自動化</li> </ul>
	振動充填	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 造粒工程の合理化</li> <li>・ Pu富化度、充填密度等の品質管理</li> <li>・ 廃棄物量低減</li> </ul>
	鑄造			○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鑄型廃棄物量の低減</li> <li>・ 歩留まりの向上</li> <li>・ 溶解るつぼの寿命延長</li> </ul>
	被覆粒子	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉システム、再処理との整合性</li> </ul>

(注)○は、検討対象を示す。

表-11 再処理 第1期の中間成果と2000年度計画

サイクル技術		燃料形態	中間成果と課題	2000年度計画		
				システム設計	要素技術	
湿式	先進湿式法	酸化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し</li> <li>・TRU99%以上の回収が可能</li> <li>・先進湿式プロセス(共回収、晶析、TRU回収)の確立(課題)</li> <li>・代替・補完技術によるさらなる経済性向上 等</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・単サイクルプロセス評価</li> <li>・U晶析試験</li> <li>・代替・補完技術基礎試験</li> </ul>	
	酸化物電解法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・絞り電解工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・Pu/U共析出挙動評価</li> <li>・塩廃棄物処理技術の確立</li> <li>・溶解るつぼ長寿命化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・オフガス処理リサイクル検討</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> <li>・溶解るつぼの長寿命化の検討</li> </ul>	
乾式	金属電解法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・TRU還元抽出工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・塩浴塩素化溶解挙動評価</li> <li>・製品金属の酸化転換挙動評価</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発課題の検討</li> <li>・さらなるコストダウンの追求</li> <li>・効率的なMA分離システムの追求</li> <li>・各種燃料形態への適用性評価</li> <li>・燃料サイクル技術の最適組み合わせ検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Li還元試験</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> </ul>
	フッ化物揮発法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・廃アルミナ媒体からの回収工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・MA回収挙動評価</li> <li>・Puのフッ化特性評価</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・U転換施設運転情報調査</li> <li>・セル内の遠隔操作・保守性の検討</li> </ul>
	金属電解法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・塩廃棄物処理工程での回収によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・電解処理速度確認</li> <li>・塩廃棄物処理技術実証</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・電解試験</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> </ul>

(注) 50tHM/年の小規模施設においても、湿式法と同程度の操業費割合であれば、経済性目標を達成できる見通し。

表-12 燃料製造 第1期の中間成果と2000年度計画

	サイクル技術		燃料形態	中間成果と課題	2000年度計画		
					システム設計	要素技術	
燃料製造	ペレット	簡素化ペレット法	酸化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(課題)</li> <li>・低除染燃料への適用性確認</li> <li>・セル内の遠隔操作・保守性の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発課題の検討</li> <li>・さらなるコストダウンの追求</li> <li>・MA含有低除染燃料製造システム合理化</li> <li>・各種燃料形態への適用性評価</li> <li>・燃料サイクル技術の最適組み合わせ検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製造工程確認試験</li> <li>・Np-MOX、Am-MOX製造技術開発</li> </ul>	
		湿式ゲル化法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(課題)</li> <li>・小径粒子の量産化の検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・小径粒子製造試験</li> <li>・挙動評価コード開発</li> <li>・充填挙動評価試験(振動充填共通)</li> </ul>	
		酸化物電解法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化物電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・低除染燃料に対する密度、Pu分布均一性の確認</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・低除染燃料充填特性評価</li> </ul>	
		振動充填		金属電解法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・転動造粒法における顆粒特性評価</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・転動造粒法検討</li> </ul>
		フッ化物揮発法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・フッ化物電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・顆粒間のPu富化度均一性の確認</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・U転換施設運転情報調査</li> </ul>	
	鋳造	射出成型法		金属		<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・モールド廃棄物量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウラン合金射出試験</li> <li>・工程廃棄物調査</li> </ul>
		遠心鋳造法				<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物発生量低減の可能性はありと評価(課題)</li> <li>・合金組成の均一性確認</li> <li>・燃料合金と金型の共存性確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・合金均一性、金型の共存性の検討</li> </ul>

(注) 50tHM/年の小規模施設においても、湿式法と同程度の操業費割合であれば、経済性目標を達成できる見通し。

表-13 2001年度計画(炉心燃料)

	第2期の方針	2001年度計画
酸化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度とTRU含有(低除染)燃料の実現見通しを付ける</li> <li>振動充填燃料とペレット燃料の比較で合理化を模索</li> </ul>	<p>[共通]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高性能燃料被覆管(ODS鋼)の特性試験</li> <li>照射試験の準備</li> </ul> <p>[ペレット燃料]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>TRU含有燃料の燃料設計評価技術の開発</li> <li>TRU含有燃料の照射試験の準備</li> </ul> <p>[振動充填燃料]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料設計評価技術の開発</li> <li>照射試験の準備(TRU含有燃料を含む)</li> </ul>
金属燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度とTRU含有燃料の実現可能性を検討</li> <li>高温化(Zrライナー等)の検討</li> <li>米国との協力を模索</li> </ul> <p>[2000年度の成果により、 金属燃料の取り扱いを検討]</p>	<p>2001年度の要素技術は、 燃料物性の評価程度に留める。</p>
窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペレット燃料と振動充填燃料の実現性の見通しを付ける</li> <li>高燃焼度とTRU含有燃料の実現可能性を検討</li> <li>被覆粒子燃料とピン型燃料の見通しをつける(ガス炉の場合)</li> <li>ガス炉との組み合わせを前提に開発方針を検討(欧州との協力を模索)</li> </ul> <p>[2000年度の成果により、 窒化物燃料の取り扱いを検討]</p>	

表-14 2001年度計画(プラントシステム)

	第2期の方針	2001年度計画
ナトリウム炉	<p>大型炉および中型モジュール炉を検討対象 (2次系簡素化炉を含む)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>革新的な経済性向上方策の技術的成立性確認</li> <li>革新的概念採用の下、安全性・信頼性を確認</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>機器合体の課題克服のための試験準備</li> <li>2次系簡素化概念の成立性確認試験準備</li> <li>高Cr鋼(12Cr鋼)の開発 等</li> </ul> <hr/> <p>炉型共通要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高性能被覆管(ODS鋼)の特性試験(炉外)、照射試験の準備</li> <li>再臨界回避方策(CDA対策)の原理確認試験(IGR炉での炉内試験)</li> <li>受動的炉停止機構の照射試験準備(常陽)</li> <li>免震技術開発</li> <li>高温構造設計手法の高度化 等</li> </ul>
重金属炉	<p>PbBi中型モジュール炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>PbBi固有の課題を克服できるか確認</li> <li>国内外の協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食データ調査</li> <li>放射性Po生成対策の調査 等</li> </ul>
ガス炉	<p>He冷却炉またはCO<sub>2</sub>冷却炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度化の実現見通し確認</li> <li>稠密炉心での安全性の確認</li> <li>固有の安全特性によるCDA回避の見通し確認</li> <li>国際協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>被覆材料調査</li> <li>炉心燃料の除熱性能向上試験準備 等</li> </ul>
水炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>水冷却増殖炉の可能性を追求し、FBRの実用化シナリオへの適合性検討</li> </ul>	原研等との協力の下に検討
小型炉	<p>Na冷却炉およびPbBi冷却炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>社会ニーズの多様化に対応できる概念の構築</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>大型炉、中型モジュール炉の成果を活用</li> </ul>

表－ 15 2001年度計画(再処理)

	第2期の方針	2001年度計画
湿式	<p>先進湿式法(晶析+簡素化溶媒抽出+TRU回収)を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 選択した技術の成立性を確認</li> <li>・ 革新技術の取り込みによる性能向上と経済性向上の追求</li> </ul>	<p>概念設計を実施 RETFの利用計画の検討</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 晶析技術の成立性確認試験(U、Pu試験)</li> <li>・ 簡素化溶媒抽出技術の成立性確認試験(U試験)</li> <li>・ TRU回収技術の成立性確認試験(U試験)</li> <li>・ システム高度化技術(イオン交換法、アミン抽出法等の革新的代替技術)の基礎試験等</li> </ul>
乾式	<p>酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つを検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ オリジナル概念の創出(湿式-乾式ハイブリッドを含む)</li> <li>・ 設計に必要なデータの取得</li> <li>・ 経済性向上の追及</li> <li>・ 国際協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施 RETFの利用計画の検討</p> <p>要素技術</p> <p>[酸化物電解法、金属電解法の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電解等の基礎試験(TRU、FP挙動評価)</li> <li>・ 塩廃棄物処理試験(コールド)</li> <li>・ 熔融塩中分析技術開発 等</li> </ul> <p>[フッ化物揮発法の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物・廃ガス処理技術開発 等</li> </ul> <p>[共通な要素技術]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 脱被覆技術開発試験</li> <li>・ 材料開発</li> <li>・ 保障措置技術開発 等</li> </ul>

表－16 2001年度計画(燃料製造)

	第2期の方針	2001年度計画
ペレット	<p>低DF、TRU含有燃料で経済性目標達成の立証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 簡素化ペレット法の成立性確認</li> <li>・ TRU含有(低除染)燃料の経済性向上の追求</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 簡素化ペレット法の基盤技術開発 (Pu富化度調整、粉末流動性、 ダイ潤滑型成型 等)</li> <li>・ TRU含有燃料製造試験、物性測定</li> <li>・ TRU含有燃料の照射準備</li> </ul>
振動充填	<p>ペレット燃料製造との基本的な比較を可能にする</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粉末製造、振動充填の技術的成立性確認</li> <li>・ 照射挙動の確認</li> <li>・ 国際協力の活用</li> <li>・ 解体Pu処分技術開発の知見活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粒子製造法の比較評価のための基礎試験 (湿式ゲル化法、乾式造粒法)(U、Pu試験)</li> <li>・ 充填技術評価試験</li> <li>・ 照射試験の準備(PSI共研)</li> </ul>
鑄造	<p>金属燃料製造法の最適化を検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物低減方策の見極め</li> <li>・ 米国の知見の活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p>

表-17 第1期および第2期の研究予算の年度展開

(単位:億円)

	第1期		第2期	
	1999年度	2000年度	2001年度	2001~2005年度 第2期(5年間)の総計
(単位:億円)				
FBRシステム	5	8	24	約300 <sup>*)</sup>
設計研究	5	7	10	
要素技術開発	0.1	0.4	14	
燃料サイクルシステム	13	17	25	
設計研究	3	5	5	
要素技術開発	10	12	20	
統合・評価	2	5	4	
合計	20	30	53	

\*) 今後の検討で見直しがあり得る



表-18 成果の公開・発表状況

分類	公開・発表年月	公開・発表の媒体・場所	概要
インターネット	H11.7～	JNCホームページで本研究について紹介開始	研究計画、体制、実施内容等
	H11.10、随時更新	JNCホームページに本研究専用のページを公開	同上
誌上発表	H11.12	原子力学会 核燃料部会 部会報(No.32)	研究計画の概要、実施内容等
	H11.12	原子力eye(1月号)投稿	同上
	H11.12	電気評論(新年号)投稿	同上
	H12.1	電気評論(2月号)投稿 “JNCのあゆみ”	同上
	H12.1	国際資源(2月号)投稿	同上
講演発表	H11.10.29	日本原子力産業会議 原動研・高速炉グループ	研究計画の概要、進捗状況等
	H11.10	産業創造研究所 産業技術懇談会	同上
	H12.1.17	原子力委員会 原子力利用長期計画 第三分科会(第5回)	同上
	H12.2.21、22	国際平和利用国際フォーラム	同上
	H12.3.28～30	原子力学会 春の年会	同上
	H12.4.4	ICONE-8(8th International Conference on Nuclear Engineering)、米国	同上
	H12.4.20	KAIF/KNS(韓国原産会議/原子力学会)年回、韓国	同上
	H12.4.28	原子力学会原子力システム設計研究専門委員会	同上
その他	H11.9.13	研究開発課題評価委員会プレス発表	事前評価結果
	H11.9.13	実用化戦略調査研究パンフレット作成	研究計画、体制、実施内容等

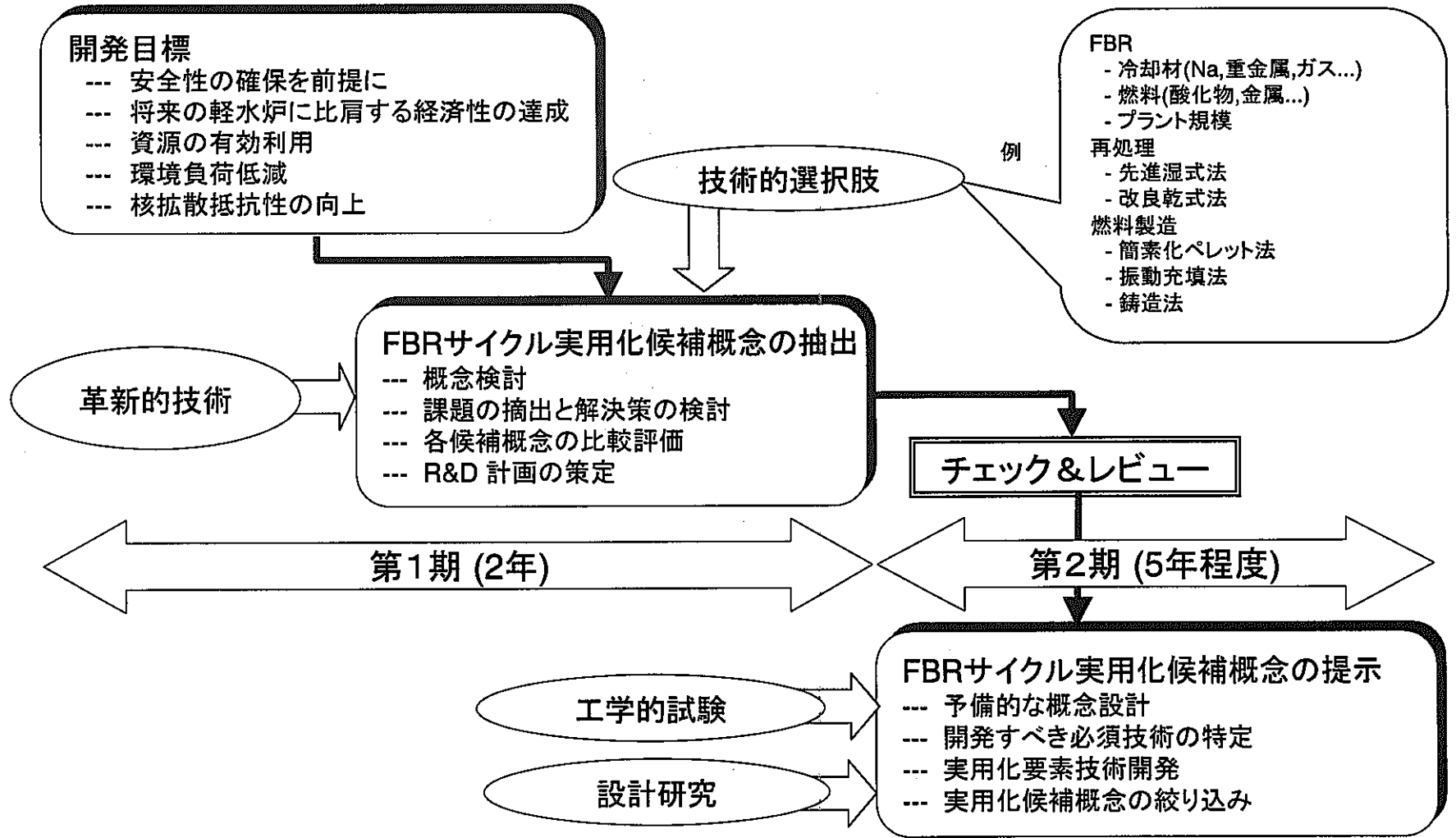


図-1 実用化戦略調査研究の目的

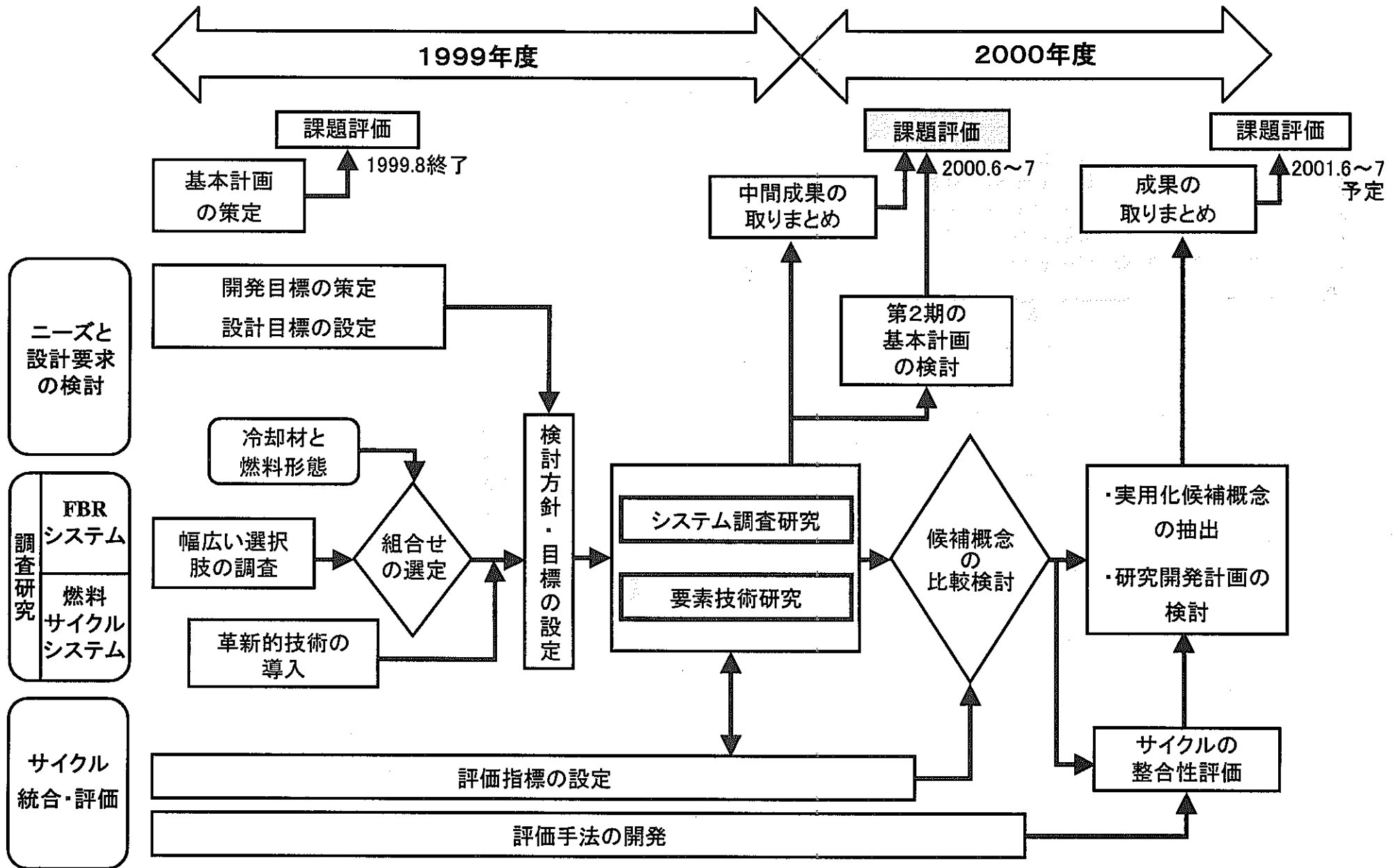


図-2 第1期の検討評価の進め方

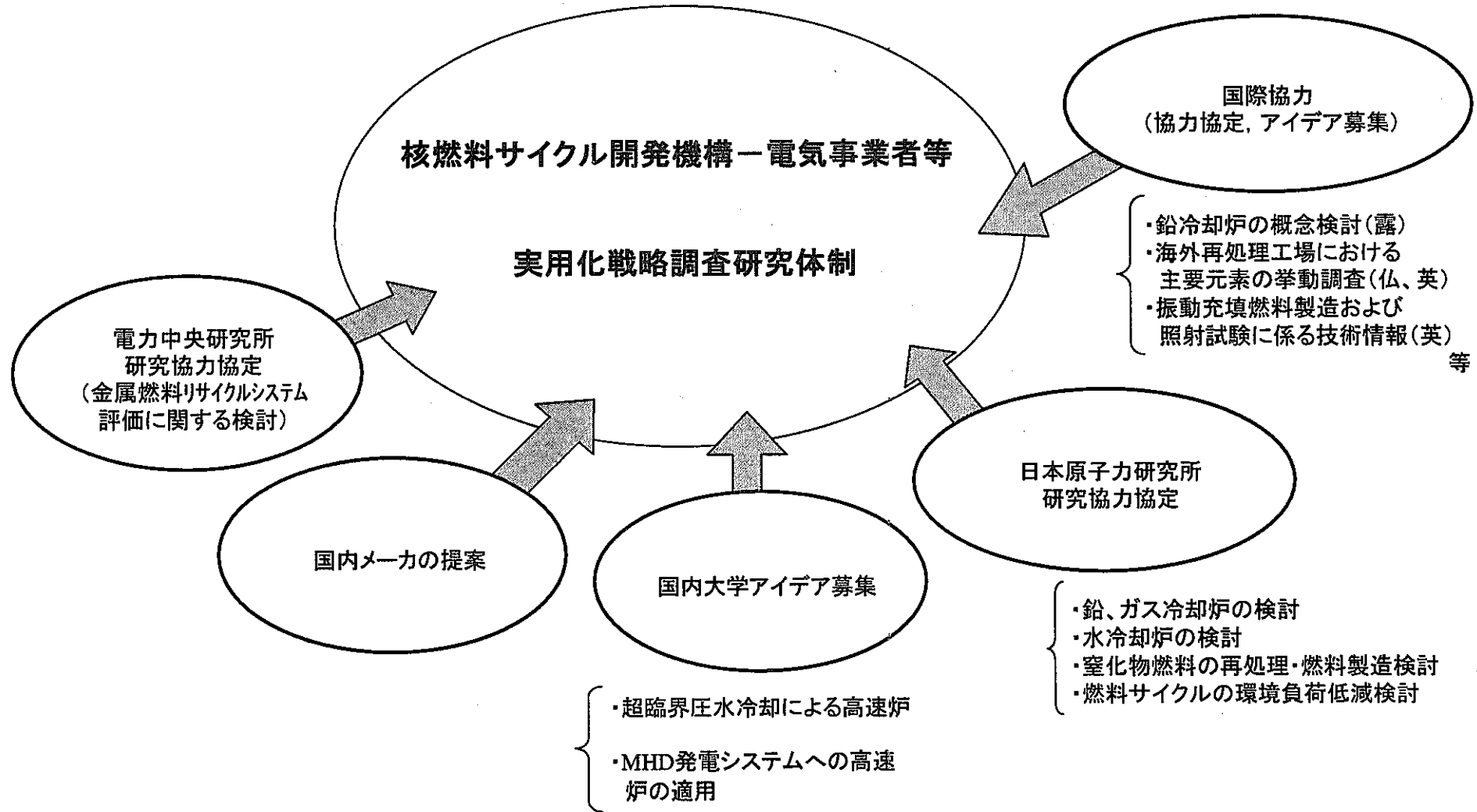


図-3 実用化戦略調査研究における協力体制

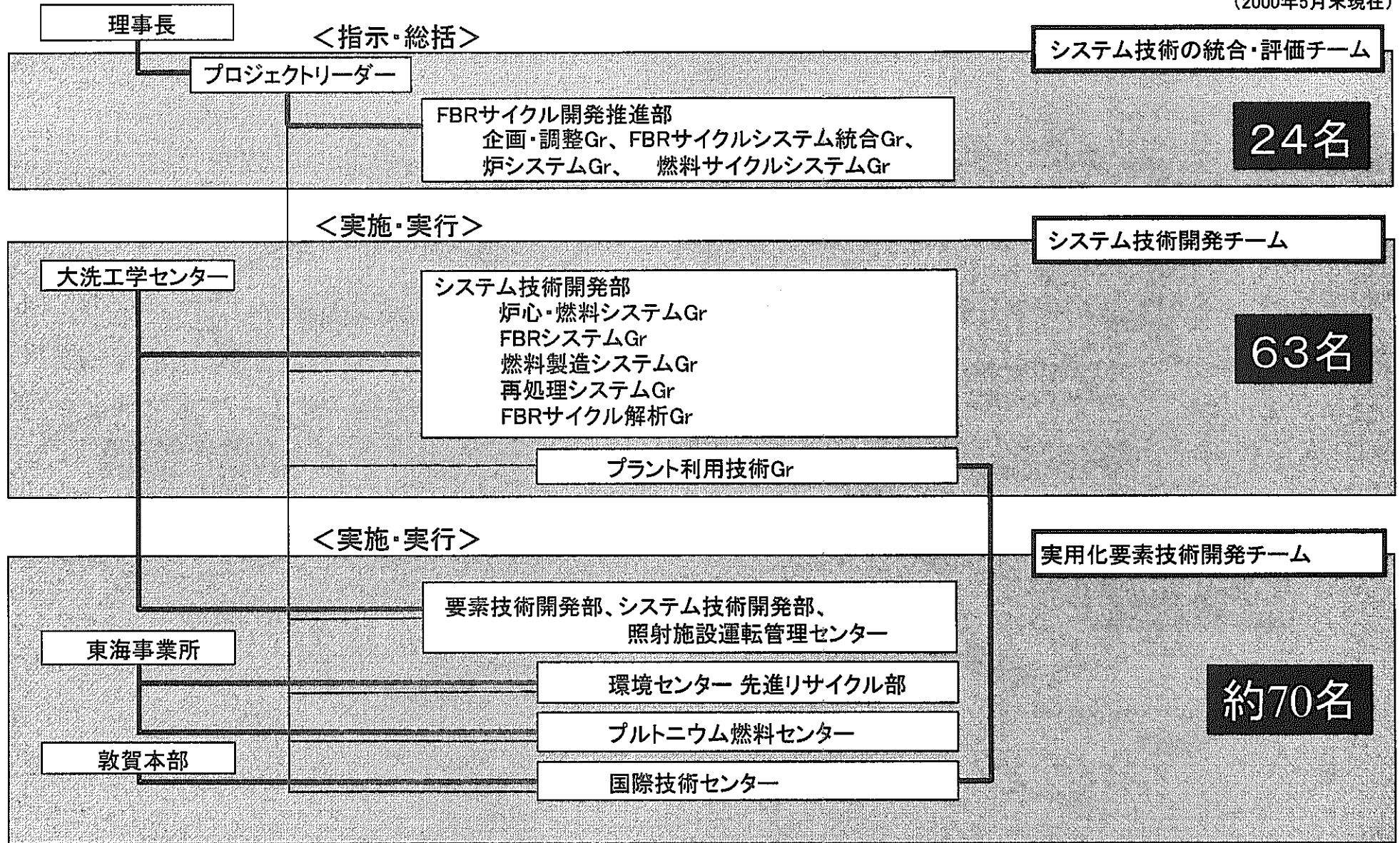
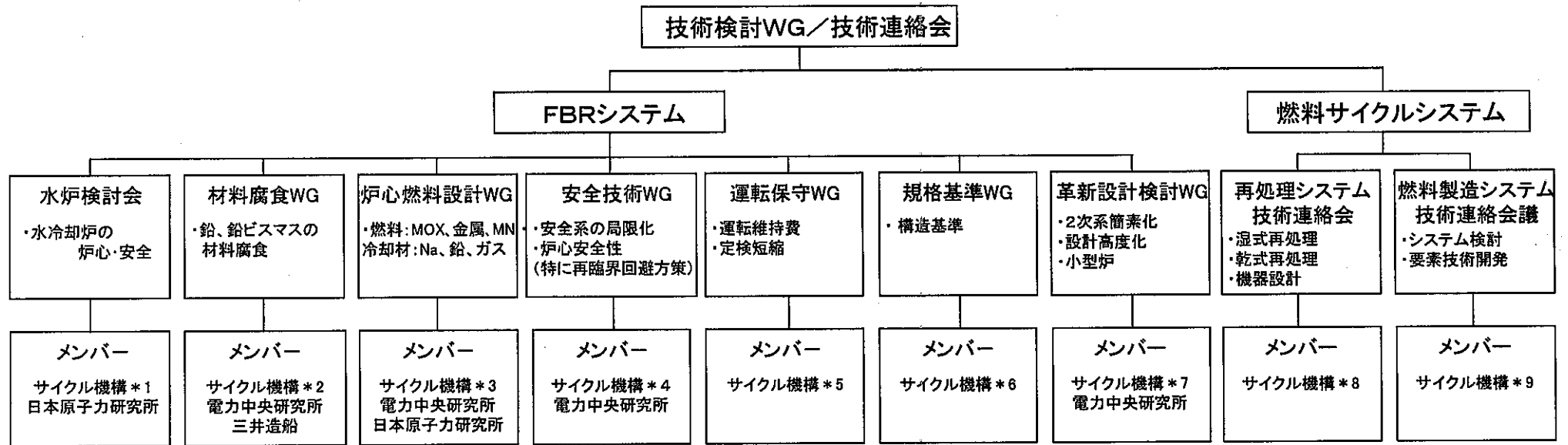


図-4 核燃料サイクル開発機構における実用化戦略調査研究の実施体制



各WG／連絡会の核燃料サイクル開発機構のメンバー

- \*1 大洗工学センター(システム技術開発部○)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*2 大洗工学センター(要素技術開発部○、システム技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*3 大洗工学センター(システム技術開発部○)、東海事業所(プルトニウム燃料センター)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*4 大洗工学センター(システム技術開発部○、要素技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*5 敦賀本部(国際技術センター○)、大洗工学センター(照射施設運転管理センター、システム技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*6 大洗工学センター(システム技術開発部○、要素技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)、敦賀本部(国際技術センター)
- \*7 大洗工学センター(システム技術開発部○)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*8 大洗工学センター(システム技術開発部○)、東海事業所(先進リサイクル部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \*9 大洗工学センター(システム技術開発部○、照射施設運転管理センター)、東海事業所(先進リサイクル部、プルトニウム燃料センター)、本社(FBRサイクル開発推進部)

(注) ○印は主査

図-5 技術検討WGおよび技術連絡会の体制

- |                |        |   |
|----------------|--------|---|
| <u>安全性</u>     | 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<br>○ 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  |
| <u>経済性</u>     |        | ○ 将来の軽水炉に比肩する経済性の達成<br>○ コスト目標 <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉の建設費：20万円/kWe</li> <li>・再処理費：27万円/kgHM</li> <li>・燃料製造費：16万円/kgHM</li> </ul> |
| <u>資源有効利用性</u> |        | ○ 高増殖から低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応<br>○ 高増殖としては、増殖比1.2程度を目標  |
| <u>環境負荷低減性</u> |        | ○ TRU燃焼および長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量等を低減<br>○ 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   |
| <u>核拡散抵抗性</u>  |        | ○ 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<br>○ 核物質防護性および保障措置性の対応が良好な設計   |

図-6 FBRサイクルの開発目標

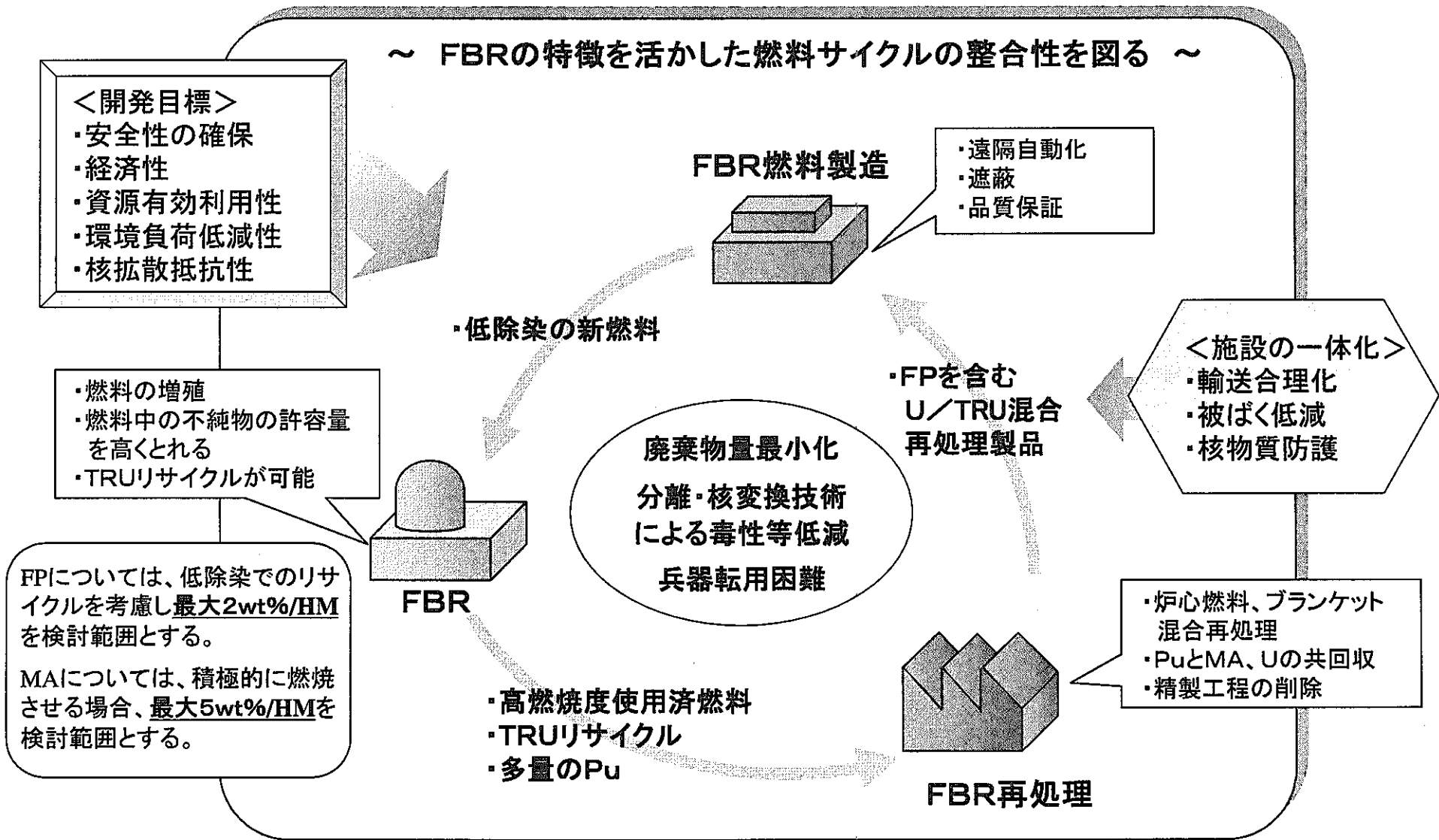


図-7 FBRサイクルの基本的な考え方



**FBRシステム**

- ◆ 建設費 : 20万円/kWe
- ◆ 運転期間 : 12~24ヶ月程度
- ◆ 稼働率 : 90%程度
- ◆ 建設工期 : 50ヶ月以内
- ◆ 燃焼度 : 15万MWd/t程度(炉心燃料取出平均)
- ◆ 増殖比 : 1.2程度
- ◆ TRU燃焼 : MA混入率1~5wt%/HM
- ◆ FP混入率 : 2wt%/HM以下
- ◆ 安全性 : 受動安全機能、再臨界回避

**燃料サイクルシステム**

- ◆ 燃料サイクル費 : 43万円/kgHM
- ◆ 処理能力 : 50および200tHM/年
- ◆ 稼働率 : 200日/年
- ◆ 燃焼度 : 15万MWd/t程度(炉心燃料取出平均)
- ◆ 回収率 : 99%以上(将来的に99.9%以上)
- ◆ 炉外サイクル時間 : 5年(冷却4年、再処理・燃料製造1年)
- ◆ MA混入率 : 1~5wt%/HM
- ◆ FP混入率 : 2wt%/HM以下
- ◆ 安全性 : 軽水炉燃料サイクルと同等

図-8 FBRサイクルの主な設計目標

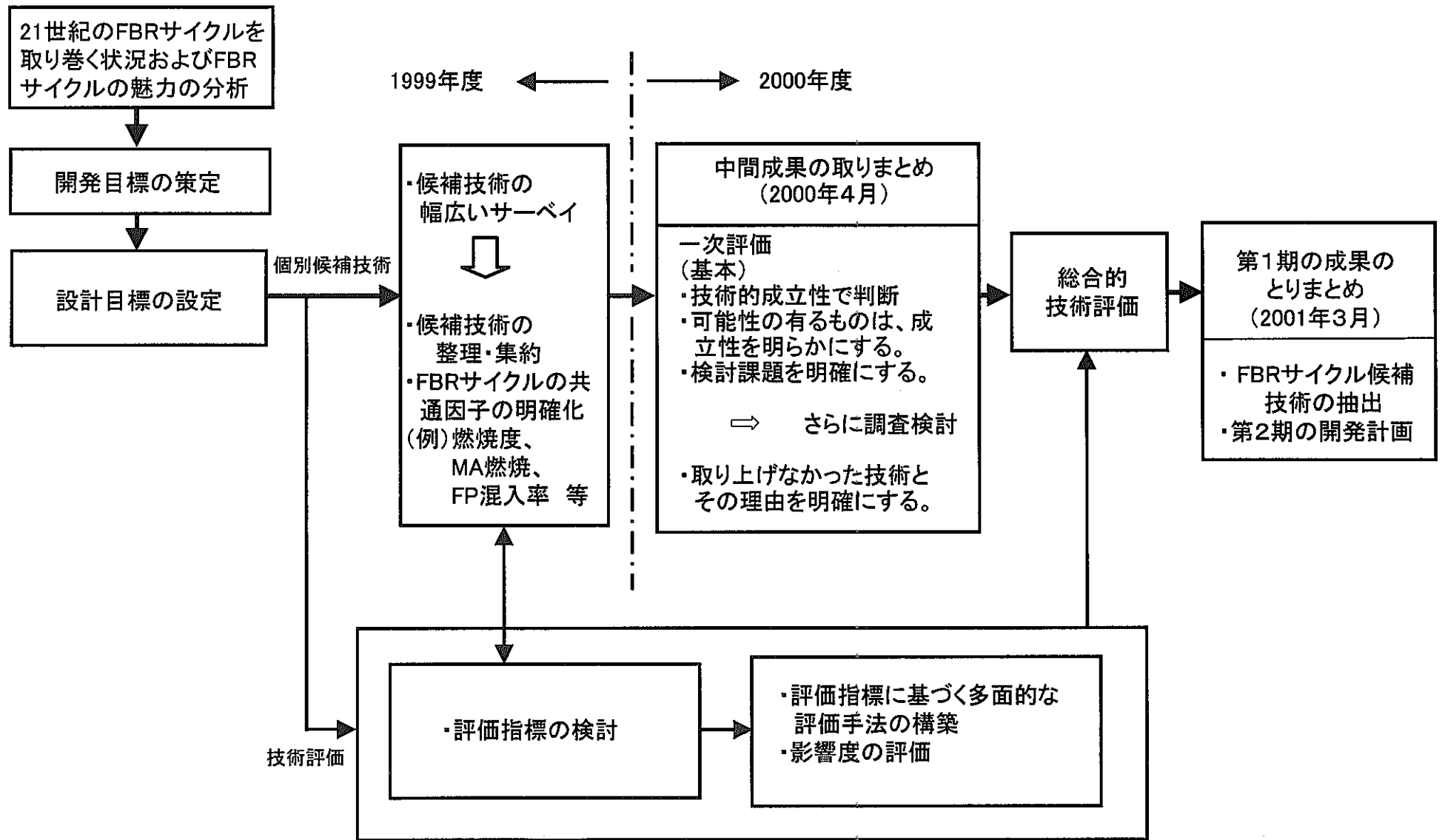


図-9 FBRサイクル技術の評価

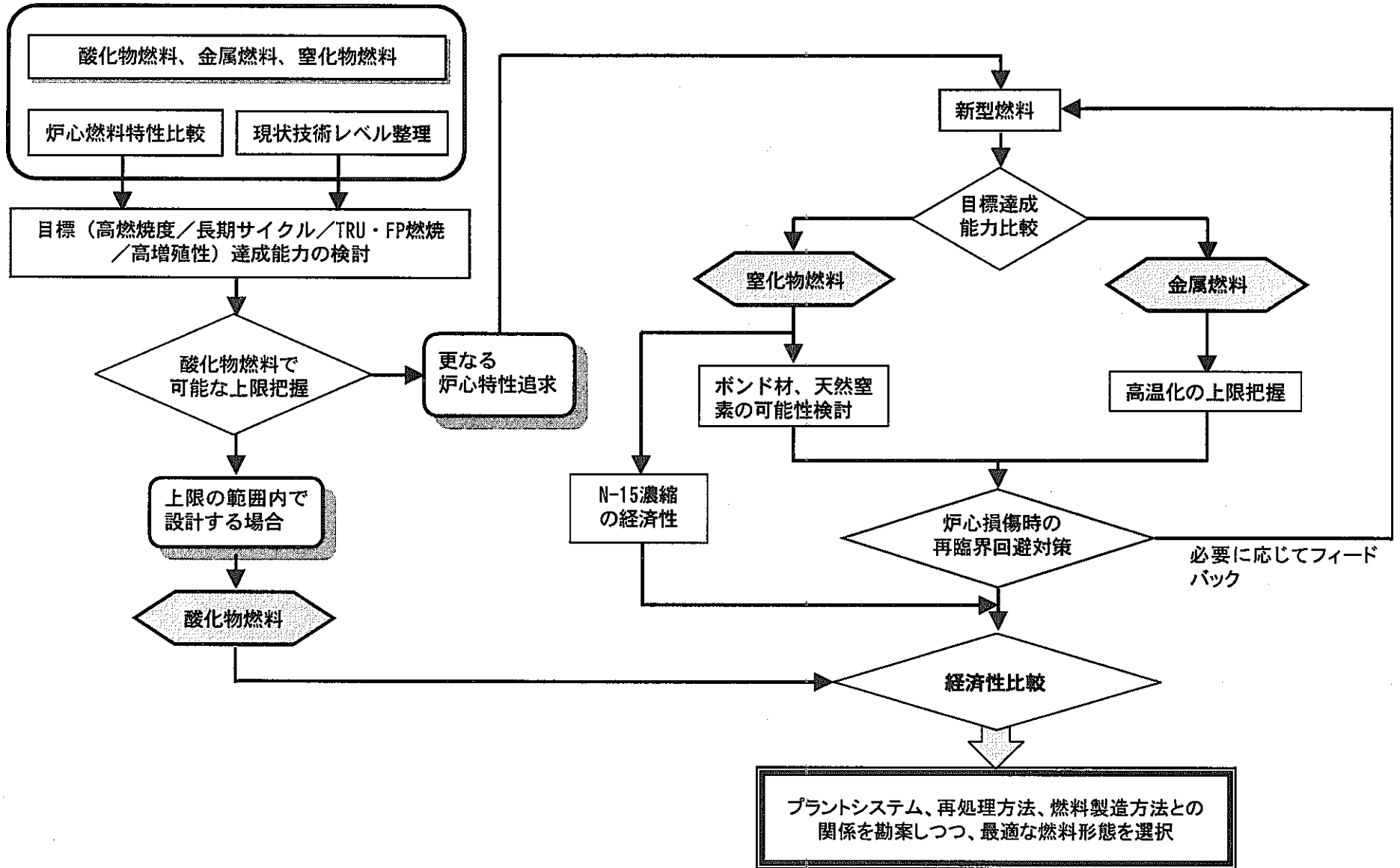
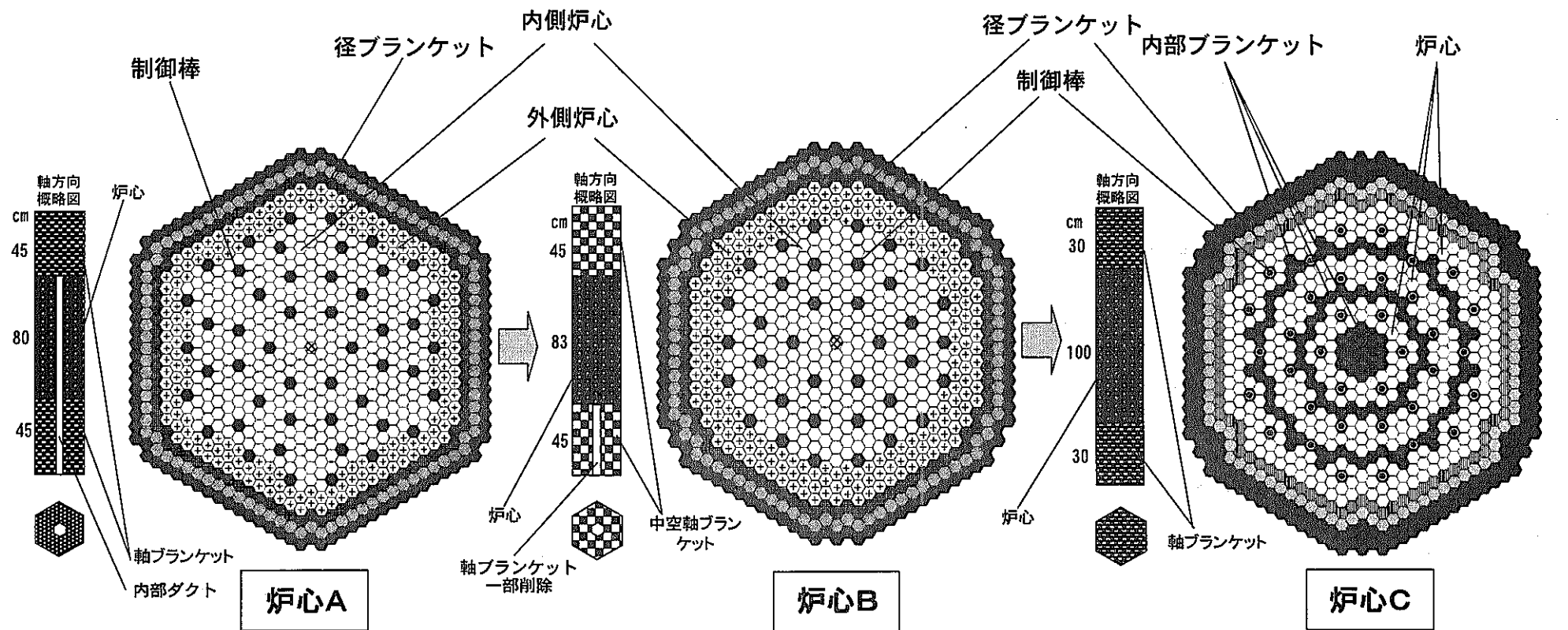


図-10 燃料形態の絞り込みの考え方



集合体内の溶融燃料が隣接集合体に溶融伝播する前に内部ダクトから下部に排出させる。

集合体内の溶融燃料が隣接集合体に溶融伝播する前に下部軸ブランケット削除領域から下部に排出させる。

内部ブランケット集合体により、仮に燃料の溶融伝播が生じても、溶融燃料プールの形成範囲を限定するとともに、溶融燃料を制御棒案内管から下部に排出させる。

基準均質炉心 (全数内部ダクト)

中空軸ブランケット、軸ブランケット一部削除

径非均質炉心

増殖比 : ~ 1.13  
 倍增時間\* : ~ 45.5年

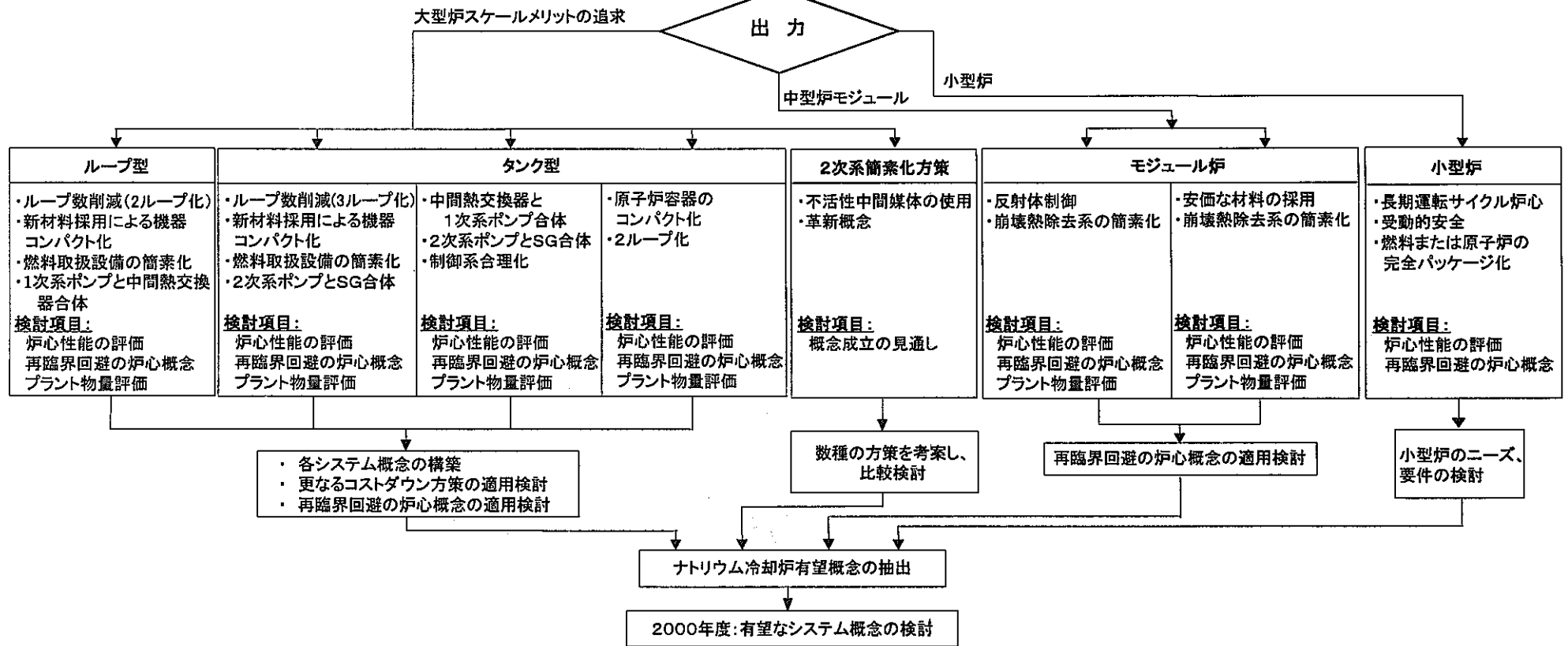
増殖比 : ~ 1.15  
 倍增時間\* : ~ 34.8年

増殖比 : ~ 1.22  
 倍增時間\* : ~ 28.0年

(注) \*複利システム倍增時間

図-11 MOX炉心性能限界の検討(3800MWt、18ヶ月サイクル)

設計経験例 (調査対象)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常陽、もんじゅ、実証炉</li> <li>・ Phenix, SPX, EBR II, PFR, EFR, PRISM</li> <li>・これまでの設計例</li> </ul>	
メーカー提案	大型炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ループ型</li> <li>・タンク型</li> </ul>
	中型炉	・モジュール炉
アイデア募集	大型炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タンク型</li> <li>・2次系簡素化(2重管他)</li> </ul>
	発電方式	・MHD、熱電変換



図—12 ナトリウム冷却炉の候補と検討の進め方

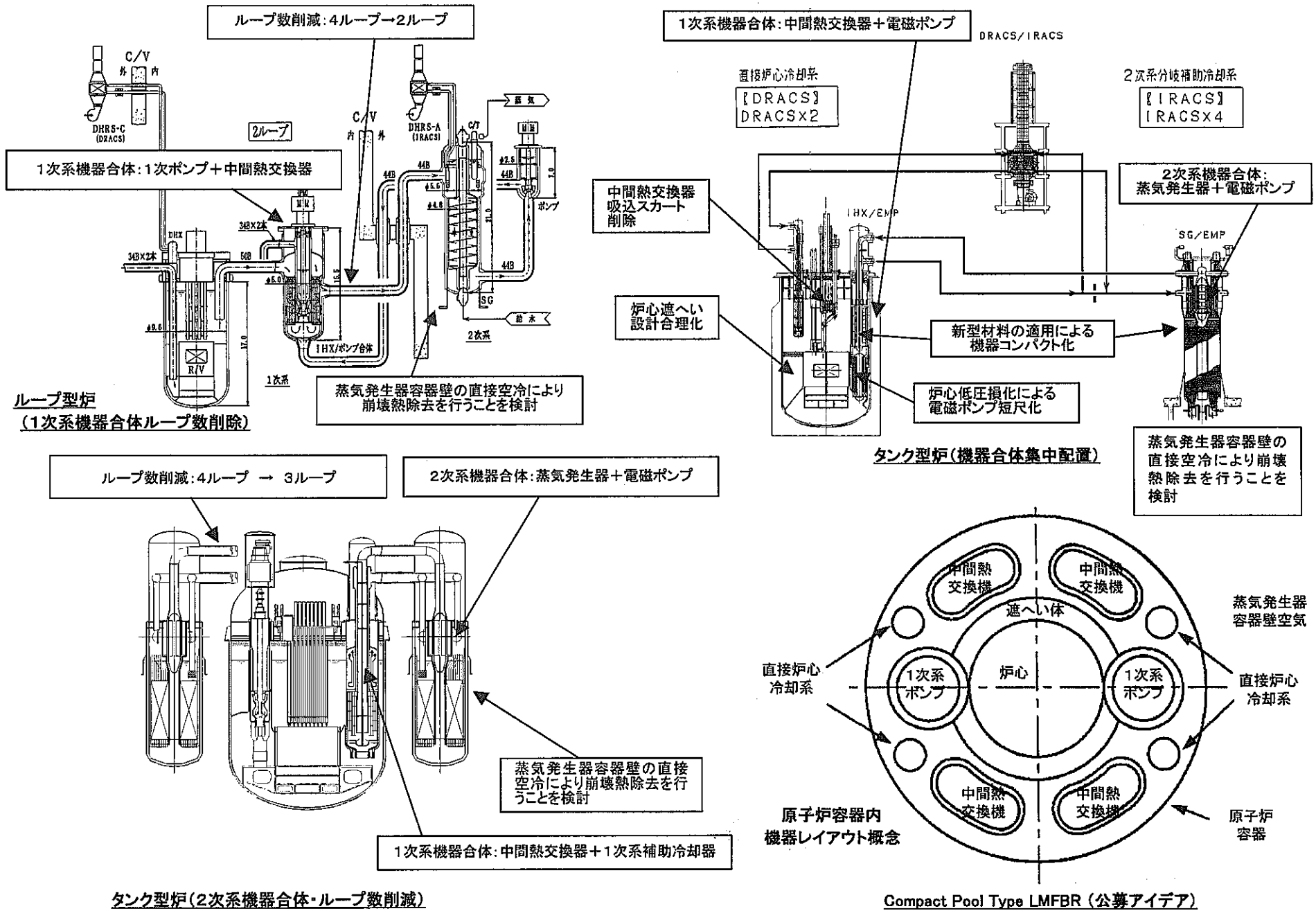


図-13 ナトリウム大型炉の主なプラント概念図

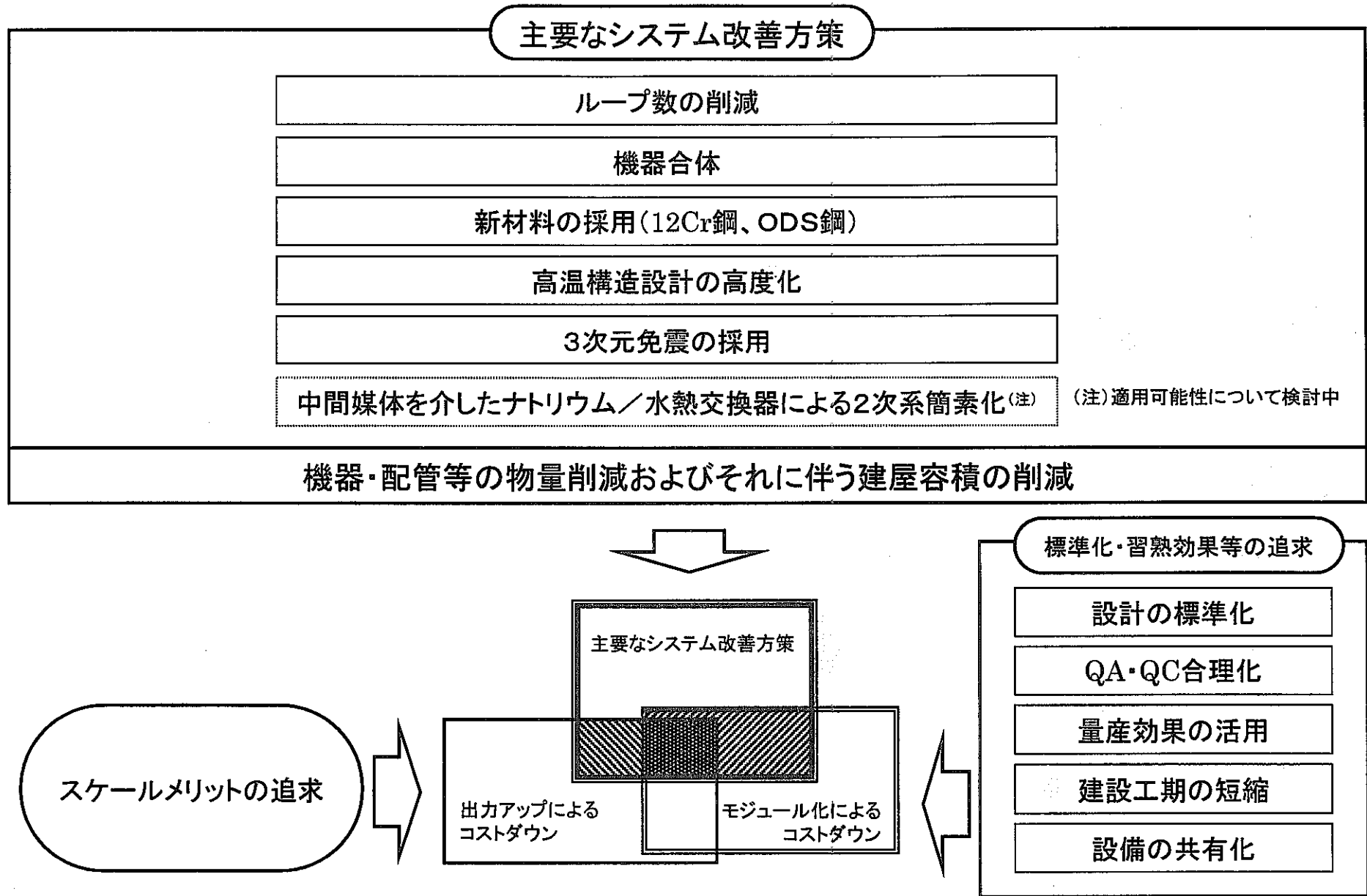
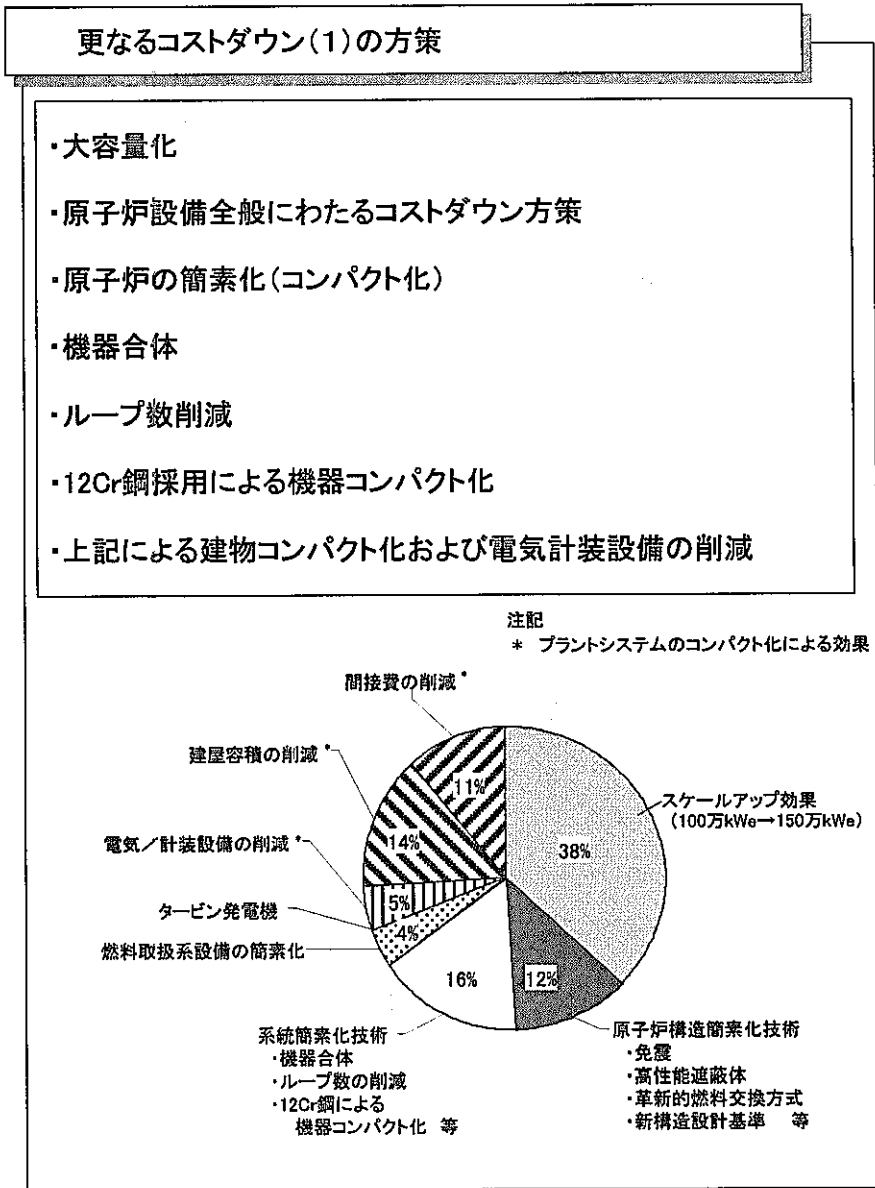
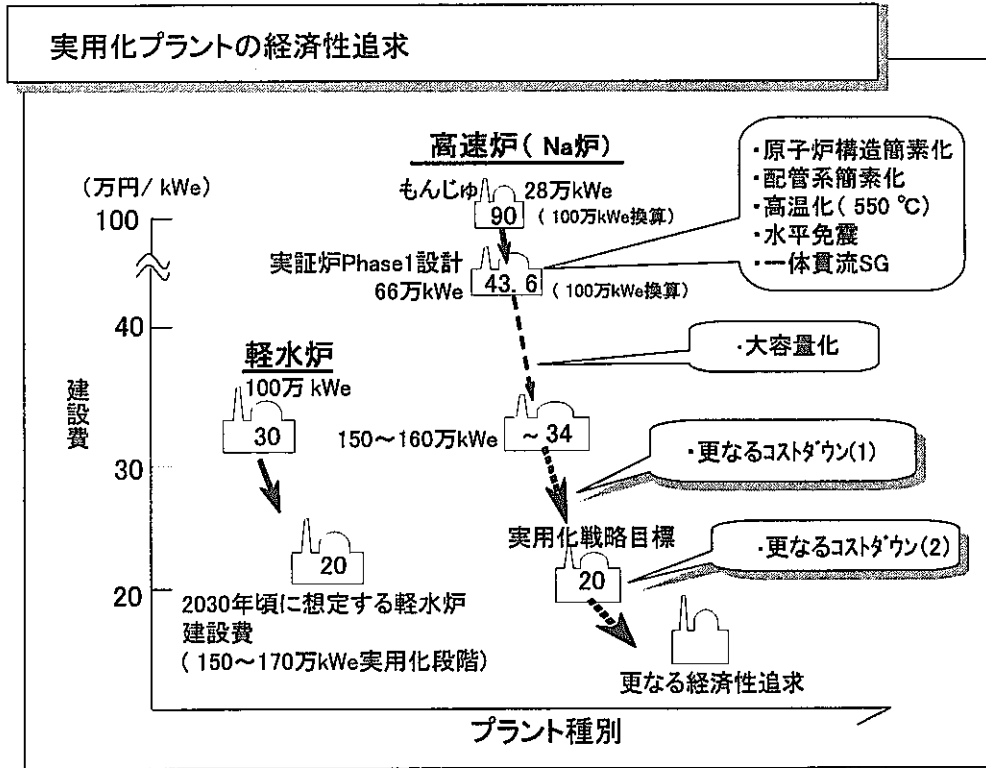


図-14 建設費20万円/kWeに向けてのコストダウン方策

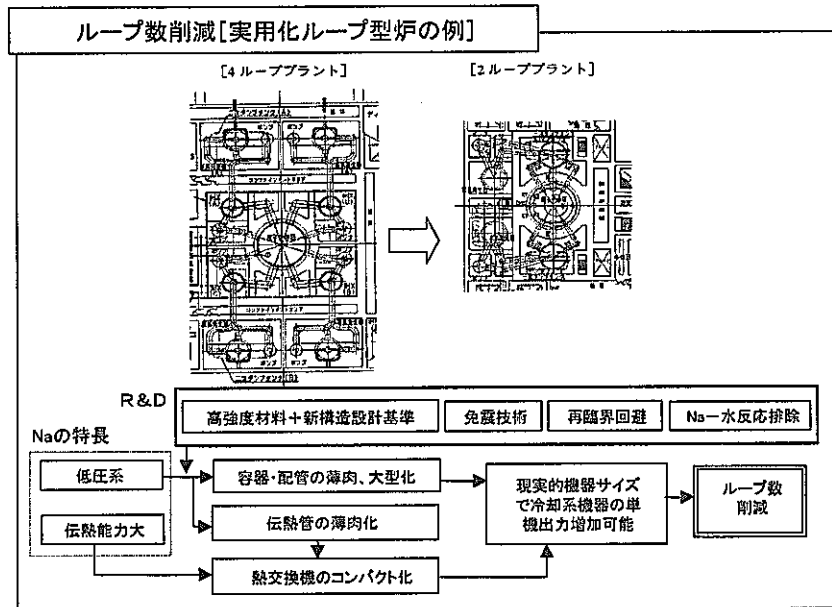
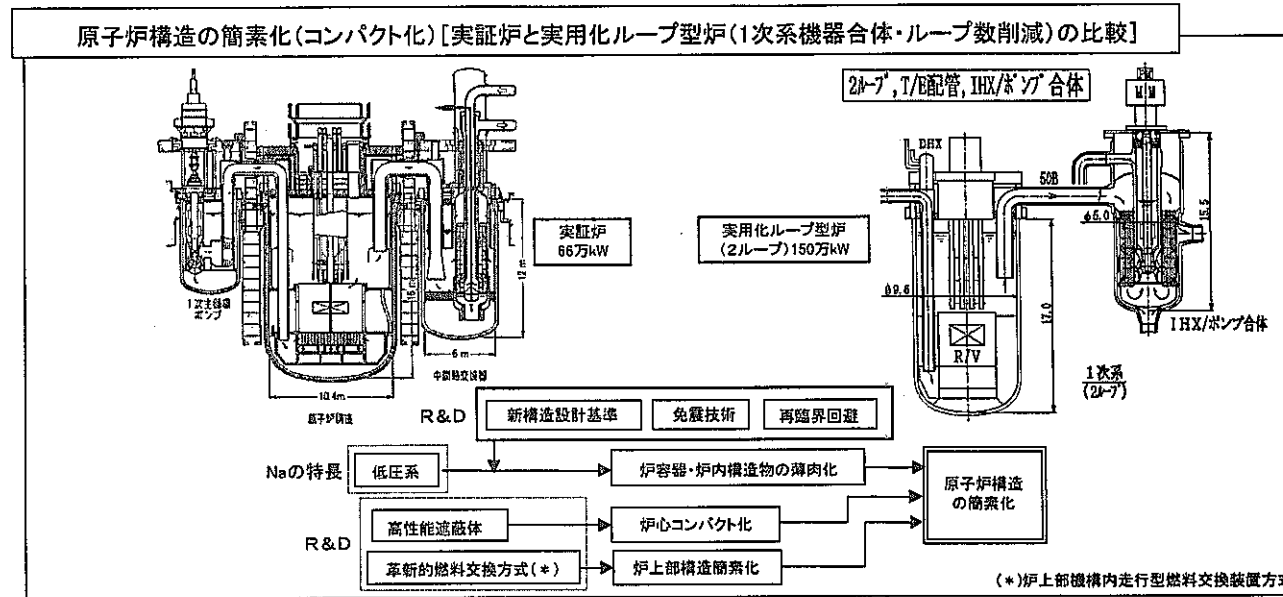


### 更なるコストダウン(2)の方策

- 革新技术を採用した2次系簡素化の追求
  - Na水反応の影響大幅緩和
  - Na水反応の回避 (不活性中間熱媒体)
- その他革新技术による経済性向上
  - 回転プラグ削除 等

図-15 軽水炉に比肩する経済性を目指すナトリウム炉の建設費低減方策





12Cr鋼の採用による機器コンパクト化[実用化ループ型炉の例]

伝熱面積の比較[m<sup>2</sup>]

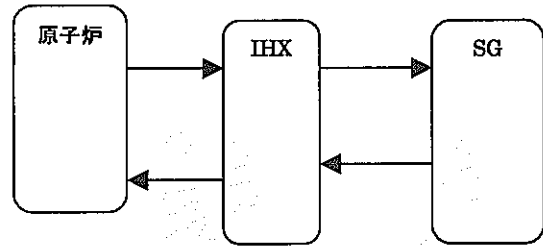
	9Cr	12Cr	削減割合
SG	20,646	15,360	約25%
IHX	10,875	8,700	約20%

(材料データ)

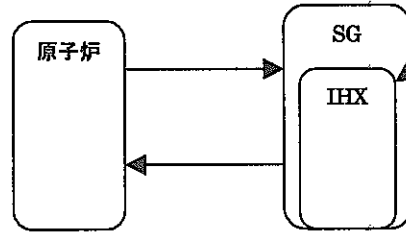
材料	短時間強度レベル Su [MPa]	熱膨張率(平均) $\alpha (\times 10^{-6})$ [mm/mm°C]	熱伝導率 [W/mK]
316FR	378	18.33	21.75
12Cr鋼(HCM12A)	403	11.35	32.3
Mod.9Cr1Mo(参考)	348	12.35	28.8

図-16 さらなるコストダウン(1)方策を実現する革新技術の具体的効果

## 2次系簡素化のアプローチ



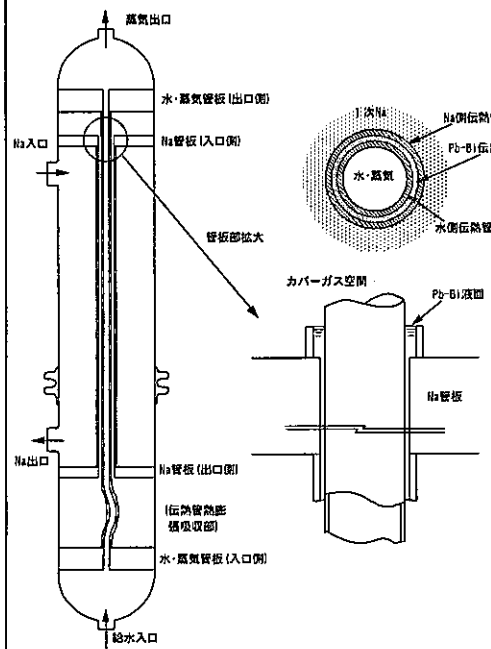
中間熱媒体により1次Naと水・蒸気伝熱管を分離・隔離  
= IHX と SG の一体化



## 中間媒体の候補

- ・液体鉛ビスマス合金
- ・固体銅

## 鉛ビスマス熱媒体蒸気発生器



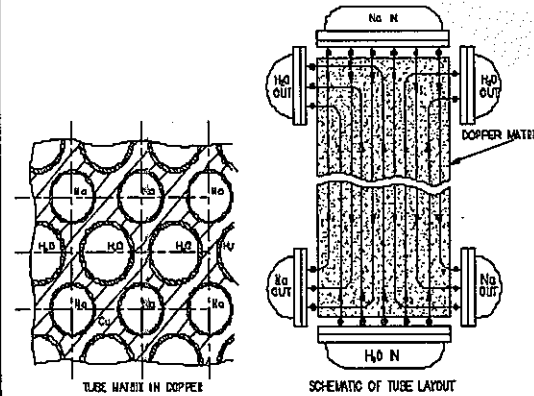
### 概念の特徴:

- ・同心円状に非接触配置した1次Naと水・蒸気伝熱管の中間層をPb-Bi層とし、Pb-Bi内の熱伝導を介してNa → 水間で熱交換する。
- ・中間熱媒体のPb-Biは水およびNaとそれぞれ不活性。
- ・左図の概念に代表されるチューブ型と、Pb-Bi層をプールとし、Na伝熱管および水・蒸気伝熱管を浸漬するタイプ(プール型)を検討。

### 課題:

- ・伝熱性能、経済性の確認
- ・Pb-Bi熱媒体の諸特性(反応性、腐食性)の確認

## 固体銅熱媒体蒸気発生器



固体銅中間熱媒体蒸気発生器概念

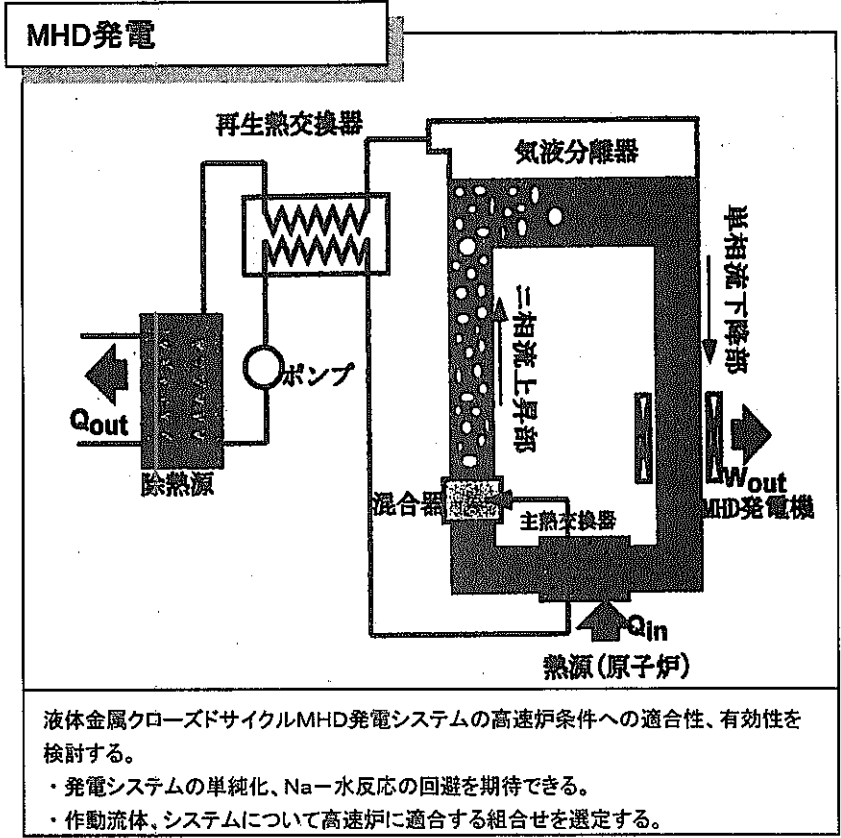
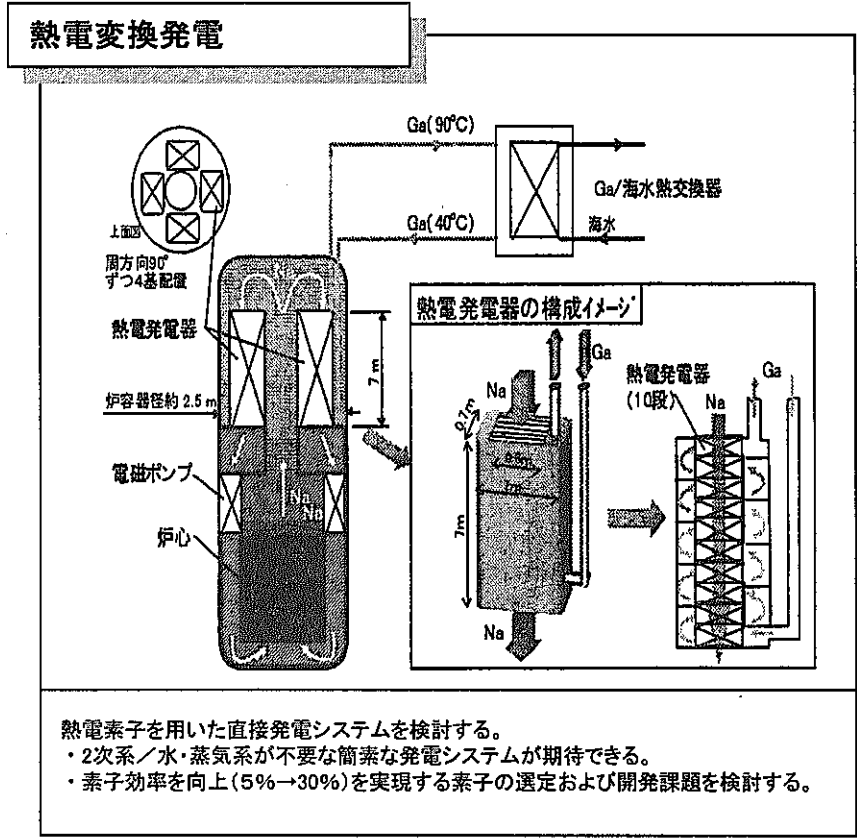
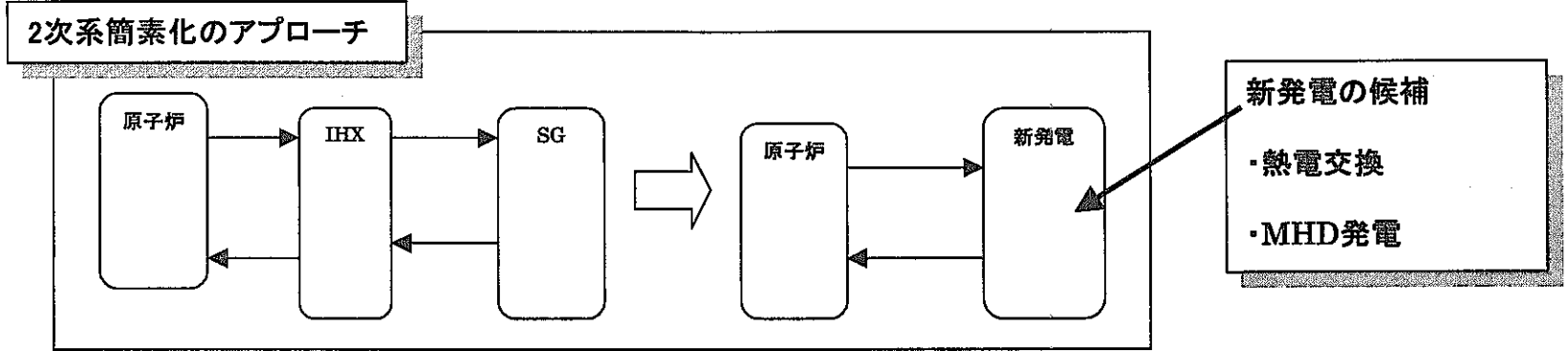
### 概念の特徴:

- ・中間熱媒体である固体銅内部に、Na側伝熱管及び水・蒸気伝熱管を近接配置し、熱交換する。
- ・Naと水の間に伝熱管(Naおよび水伝熱管)と固体銅の3重の壁があり、Na-水反応が極めて起こりにくい。

### 課題:

- ・機器サイズ及び製作コストの評価
- ・製作性からの機器容量制限の確認

図-17 Na-水反応の排除(不活性中間媒体)による2次系簡素化アプローチ



図一18 Na-水反応の排除(新発電方式)による2次系簡素化アプローチ

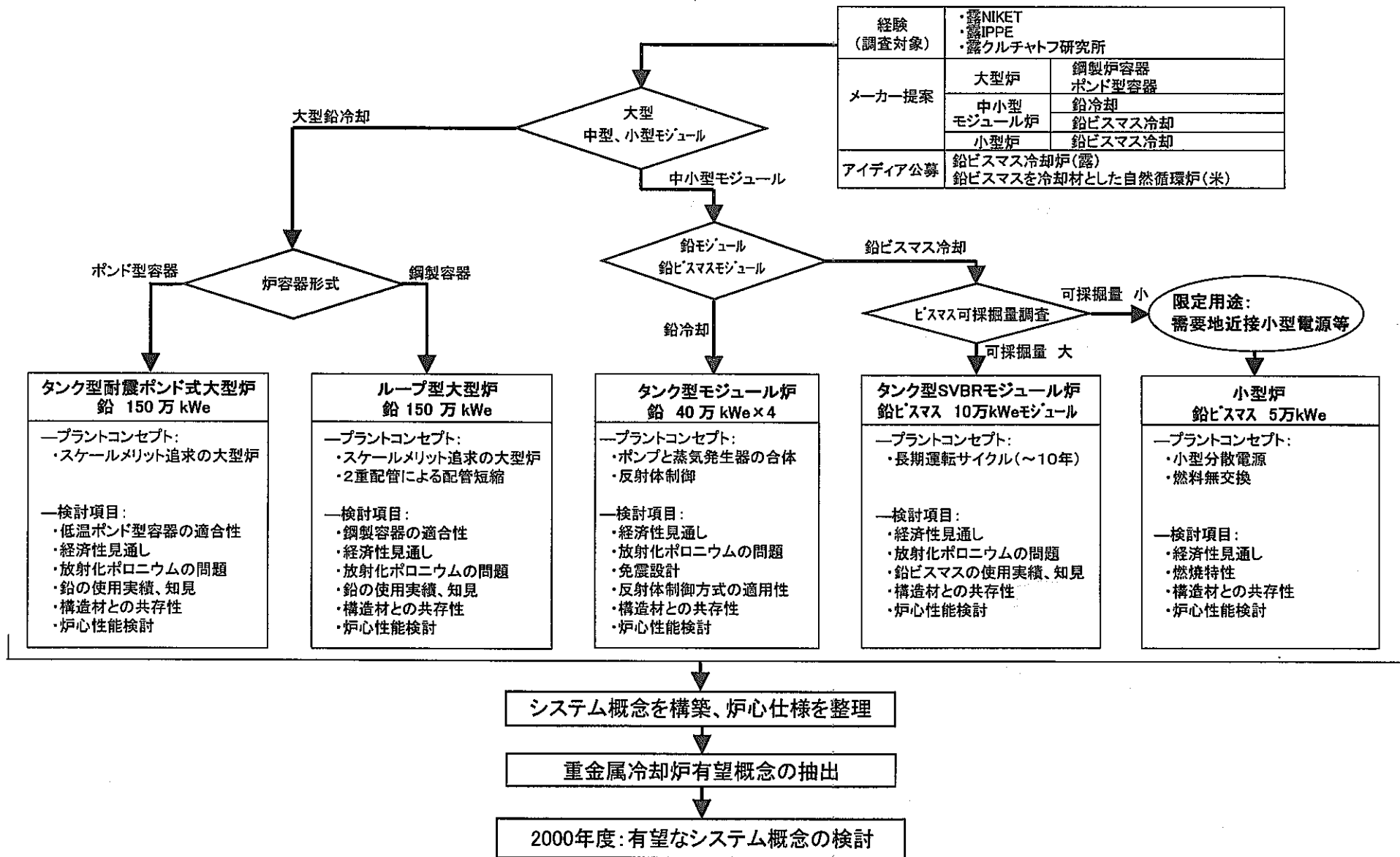
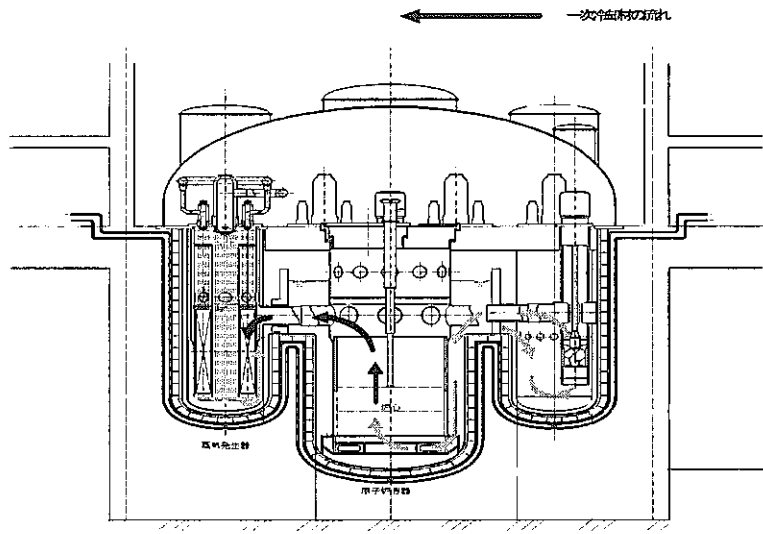
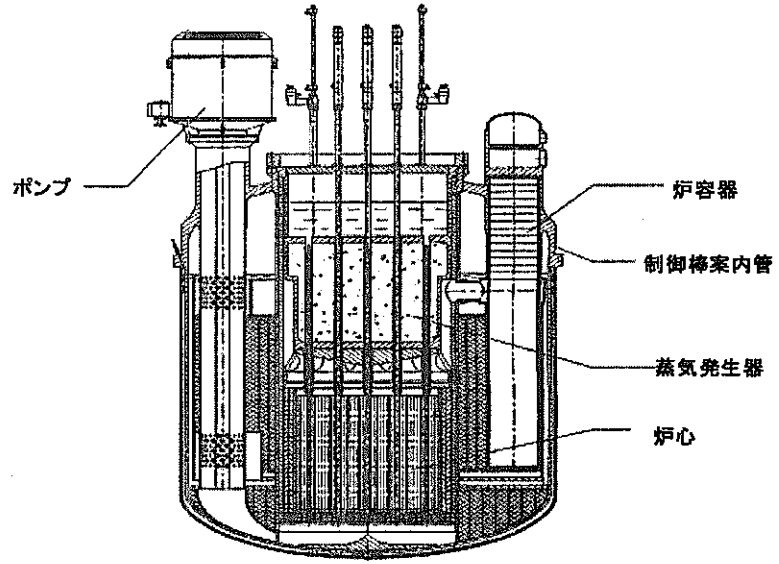


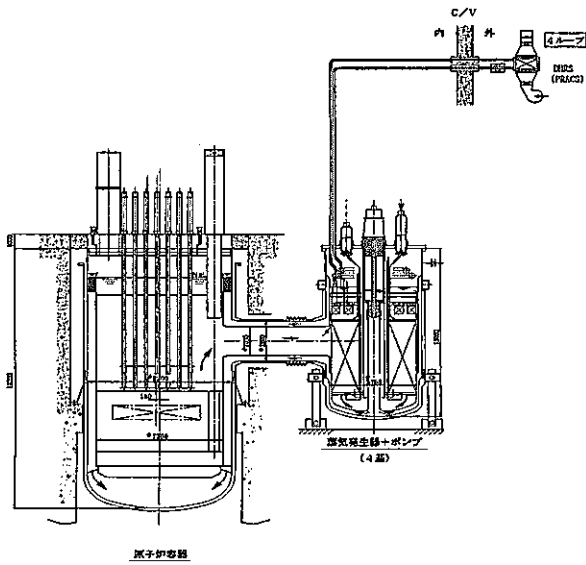
図-19 重金属冷却炉の候補と検討の進め方



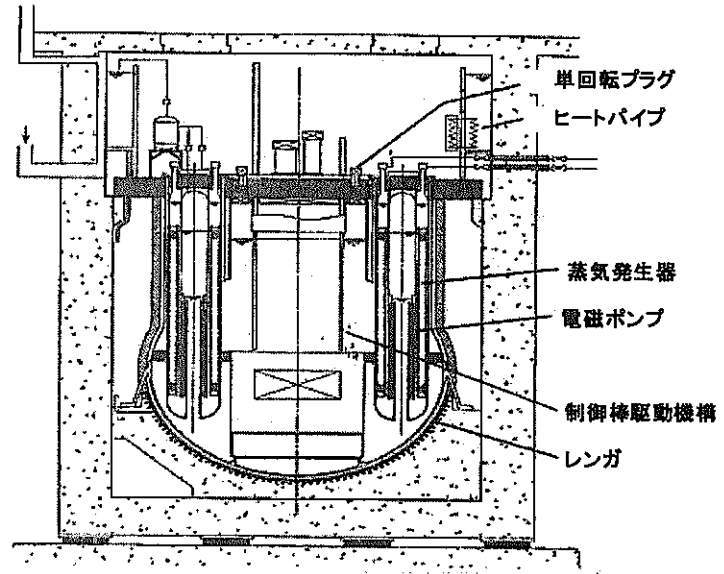
耐震ボンド式タンク型大型炉



タンク型モジュール炉 (SVBR)

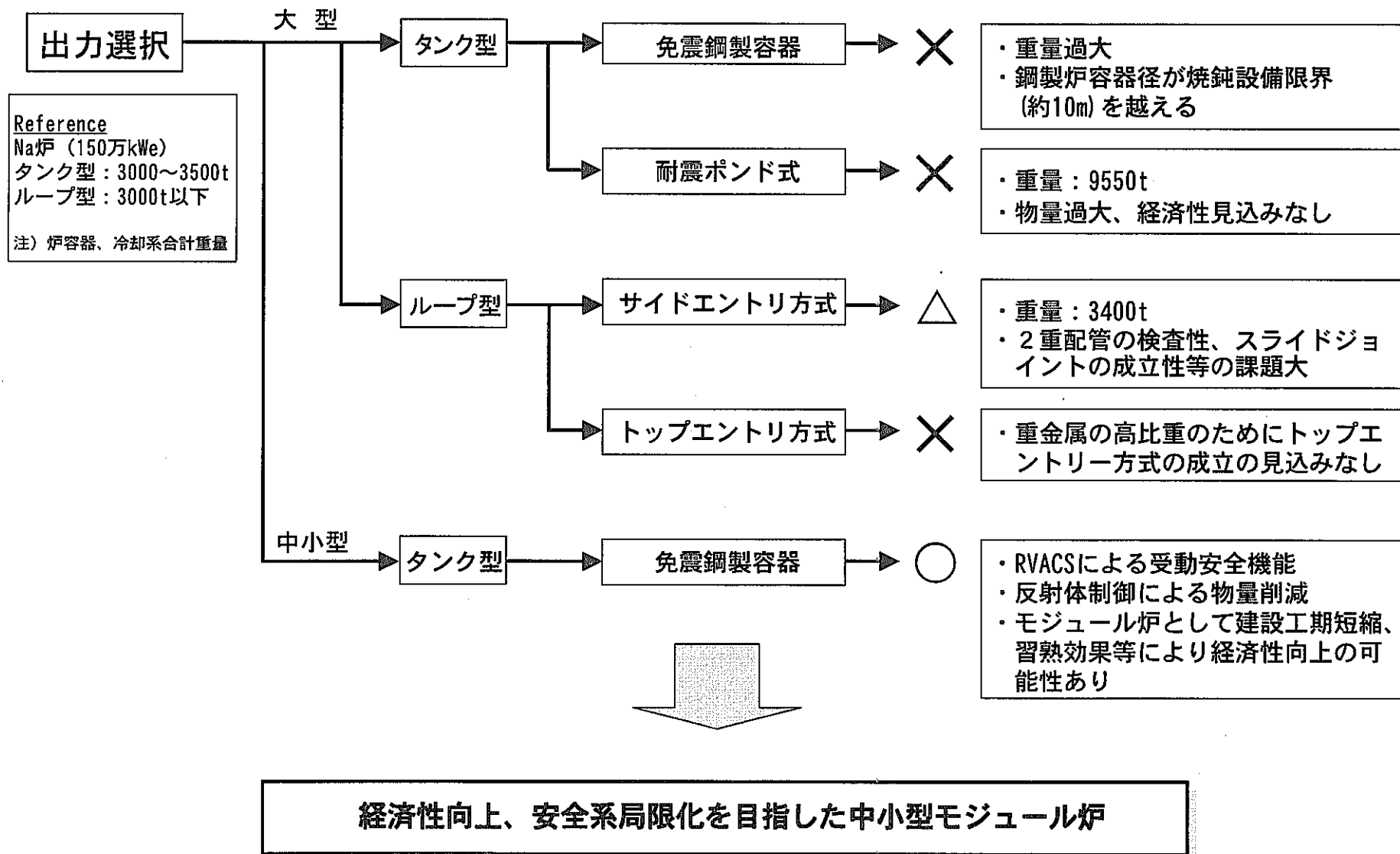


ループ型大型炉(サイドエントリー方式)



タンク型モジュール炉

図-20 重金属炉のプラント概念



図—21 重金属炉の選定(出力/構造成立性の観点に基づく)

経験 (調査対象)	・英国のAGR → 炭酸ガス冷却 ・英国のナトリウム炉 → 被覆管材への適用 ・HTGR(原研他) → He技術、窒化物燃料		
メーカー提案	ピン型燃料	炭酸ガス冷却	140万kWe、PCRIV、酸化物燃料
		ヘリウムガス冷却	160万kWe、PCRIV、窒化物燃料
	被覆粒子燃料	ヘリウムガス冷却	85万kWe、酸化物燃料
		ヘリウムガス冷却	10万kWe、酸化物燃料、窒化物燃料

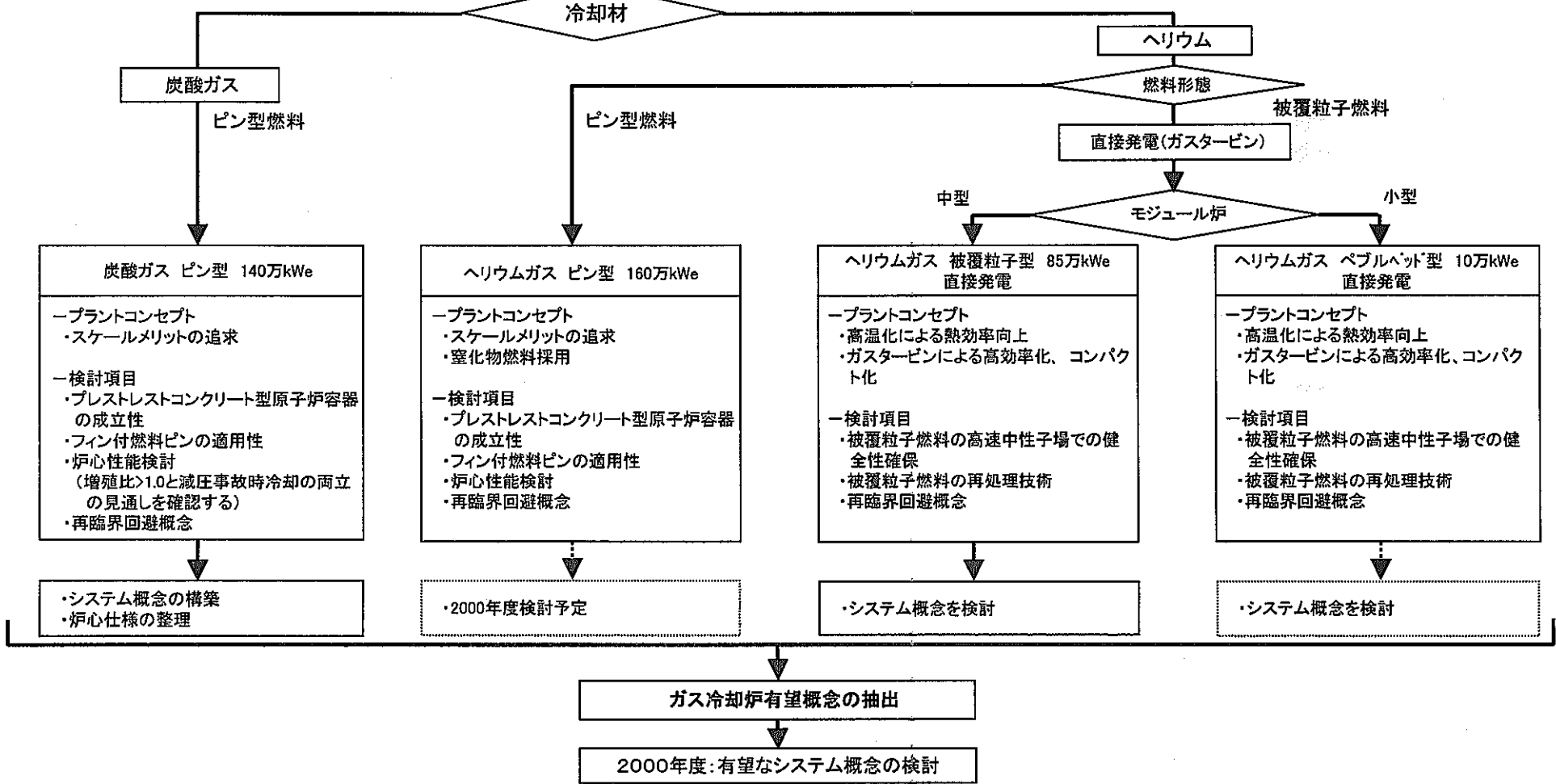
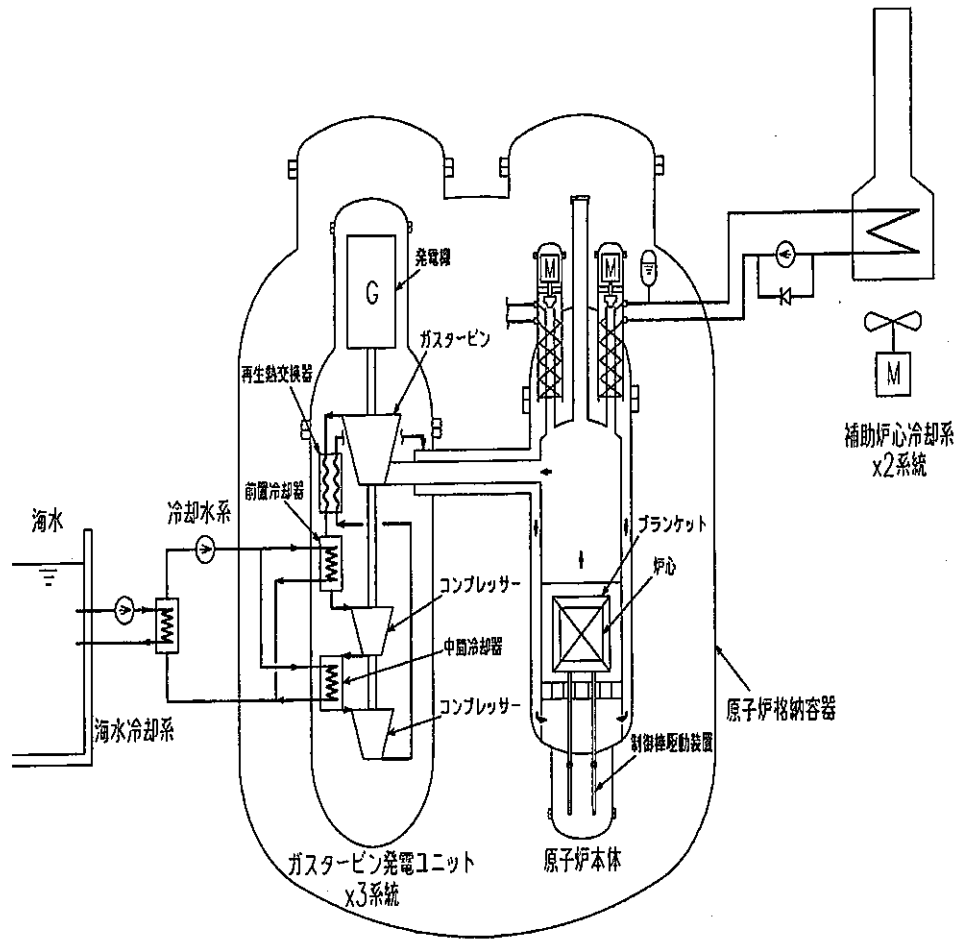
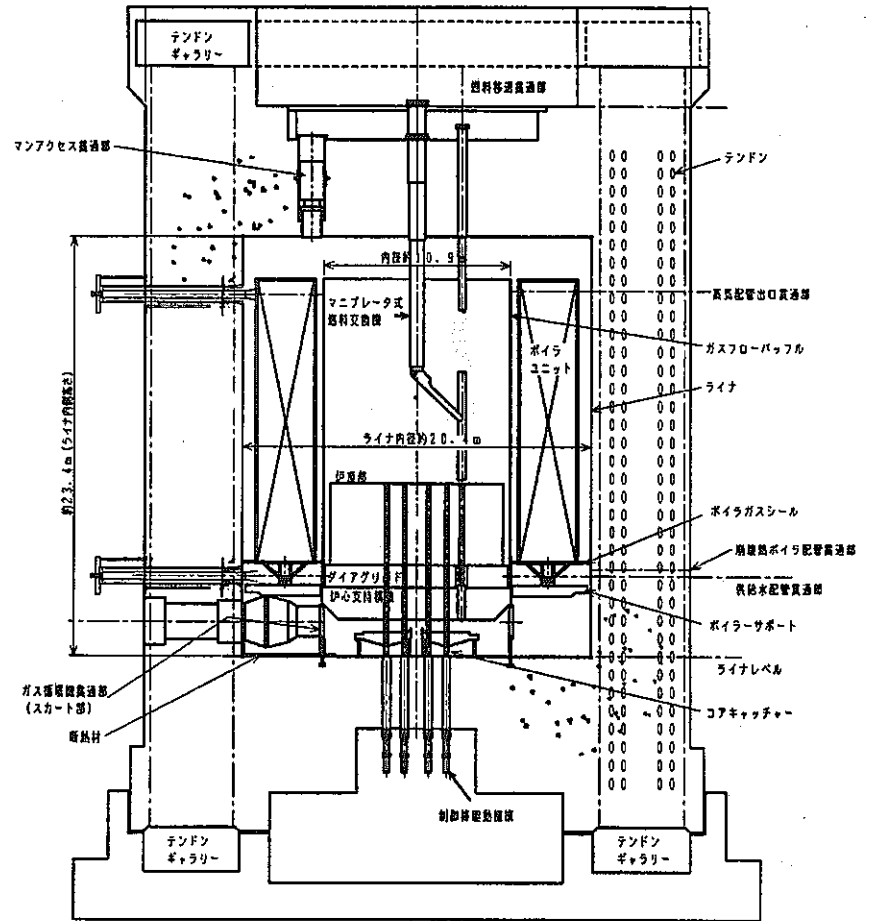


図-22 ガス冷却炉の候補と検討の進め方



被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却炉



ピン型燃料炭酸ガス冷却炉

図一23 ガス冷却炉のプラント概念



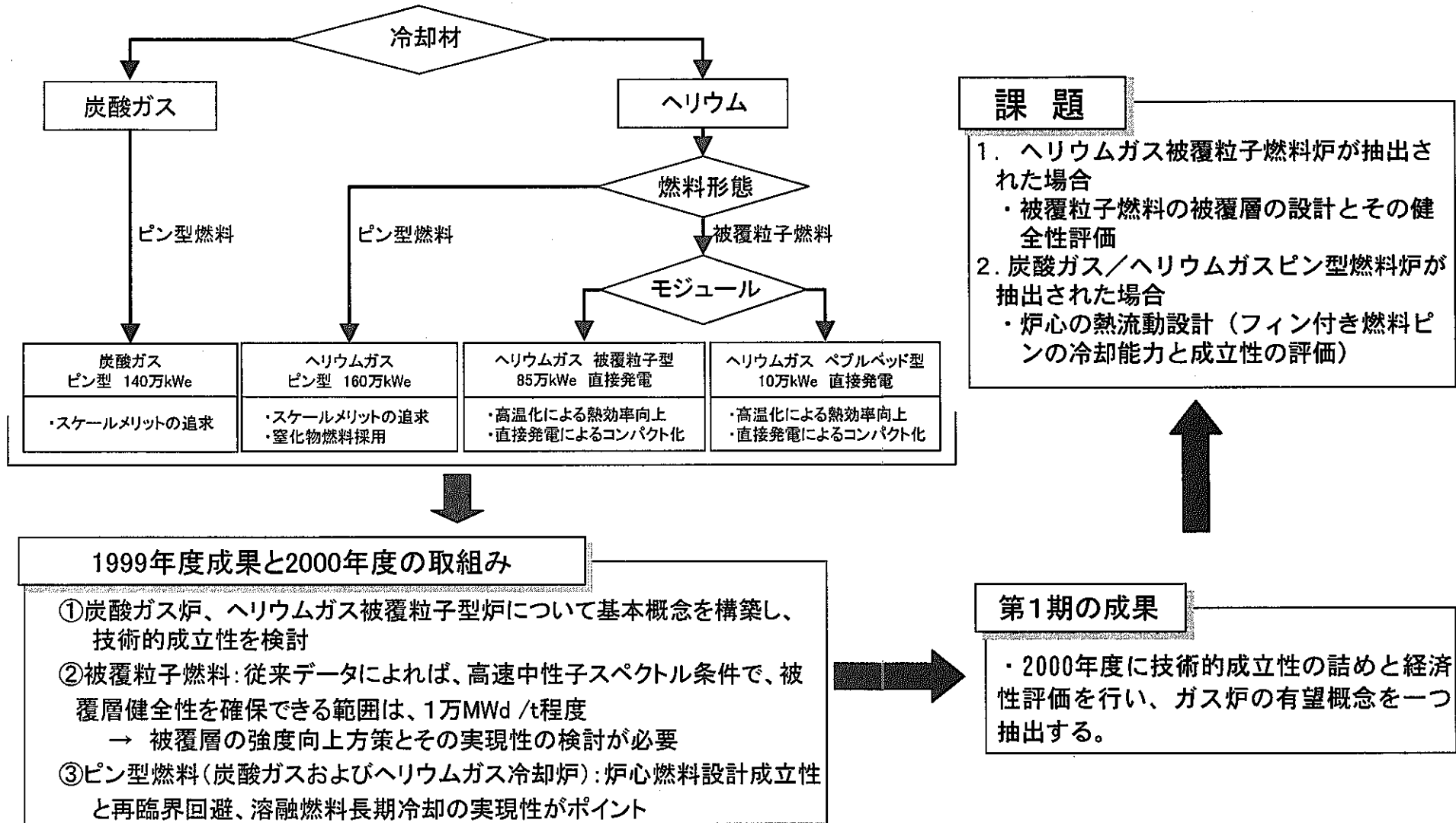
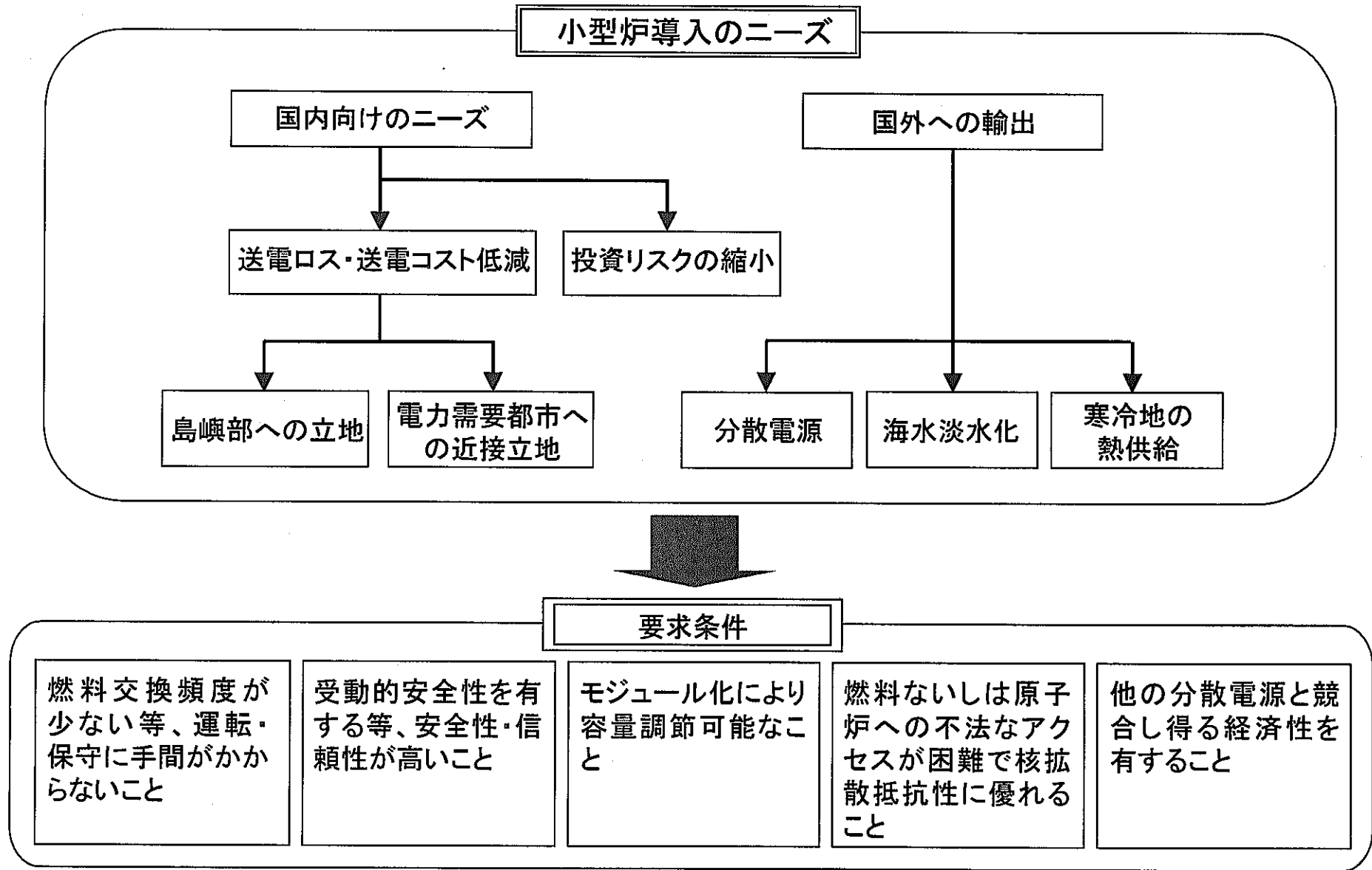


図-24 ガス冷却炉の開発課題について



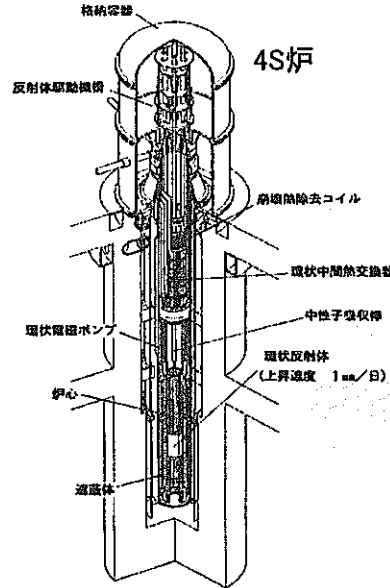
図一25 小型炉のニーズと開発目標

調査・検討対象

4S炉(ナトリウム炉)

- 重要**
- ・反射体制御方式による長期運転サイクル炉心
  - ・自然循環による崩壊熱除去
  - ・燃料パッケージ化
- 付加的**
- ・水系流量制御による運転操作簡易化
  - ・モジュール化
  - ・プレハブ工法による工期短縮

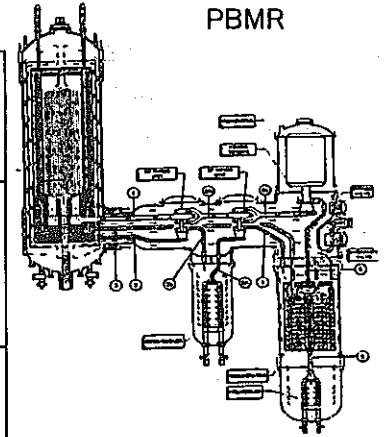
検討のポイント:  
受動的炉停止系の導入方法



PBMRをベースとした高速炉 (高温ヘリウムガス炉)

- 重要**
- ・自然循環による崩壊熱除去
  - ・モジュール化
- 付加的**
- ・プレハブ工法による工期短縮
  - ・ガスタービン発電
  - ・2次系なし

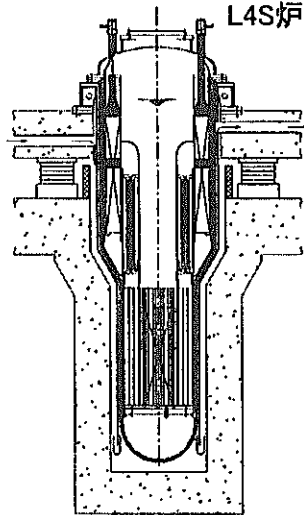
検討のポイント:  
被覆粒子燃料の高速中性子場での高燃焼度に係わる健全性



L4S炉(鉛ビスマス炉)

- 重要**
- ・反射体制御方式による長期運転サイクル炉心
  - ・自然循環による崩壊熱除去
  - ・燃料パッケージ化
- 付加的**
- ・モジュール化
  - ・プレハブ工法による工期短縮
  - ・2次系なし

検討のポイント:  
受動的炉停止系の導入方法



- その他の小型炉概念(調査済)
- ・ENHS...Encapsulated Nuclear Heat Source 原子力電池概念
  - ・USLMFBR...Ultra-Small LMFBR 都市近接立地向け超小型炉
  - ・RAPID...Refueling by All Pins Integrated Design 受動的炉停止系を有する多目的小型炉

第1期の目標

- ・ニーズに最も適合する小型炉概念の抽出
- ・開発課題の整理
- ・研究計画の策定

図一26 小型炉の検討候補と検討の進め方

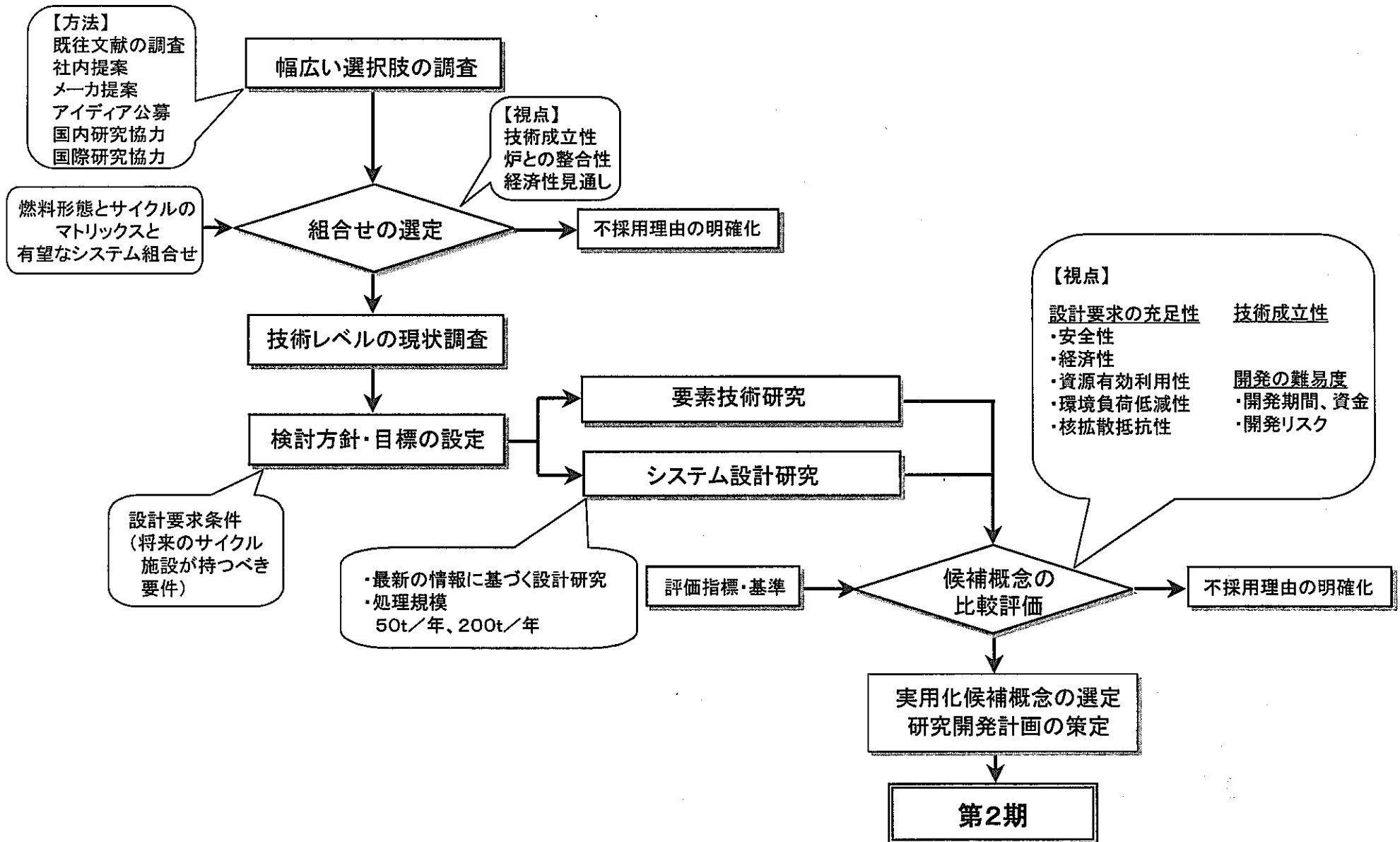


図-27 燃料サイクルシステムの検討の進め方

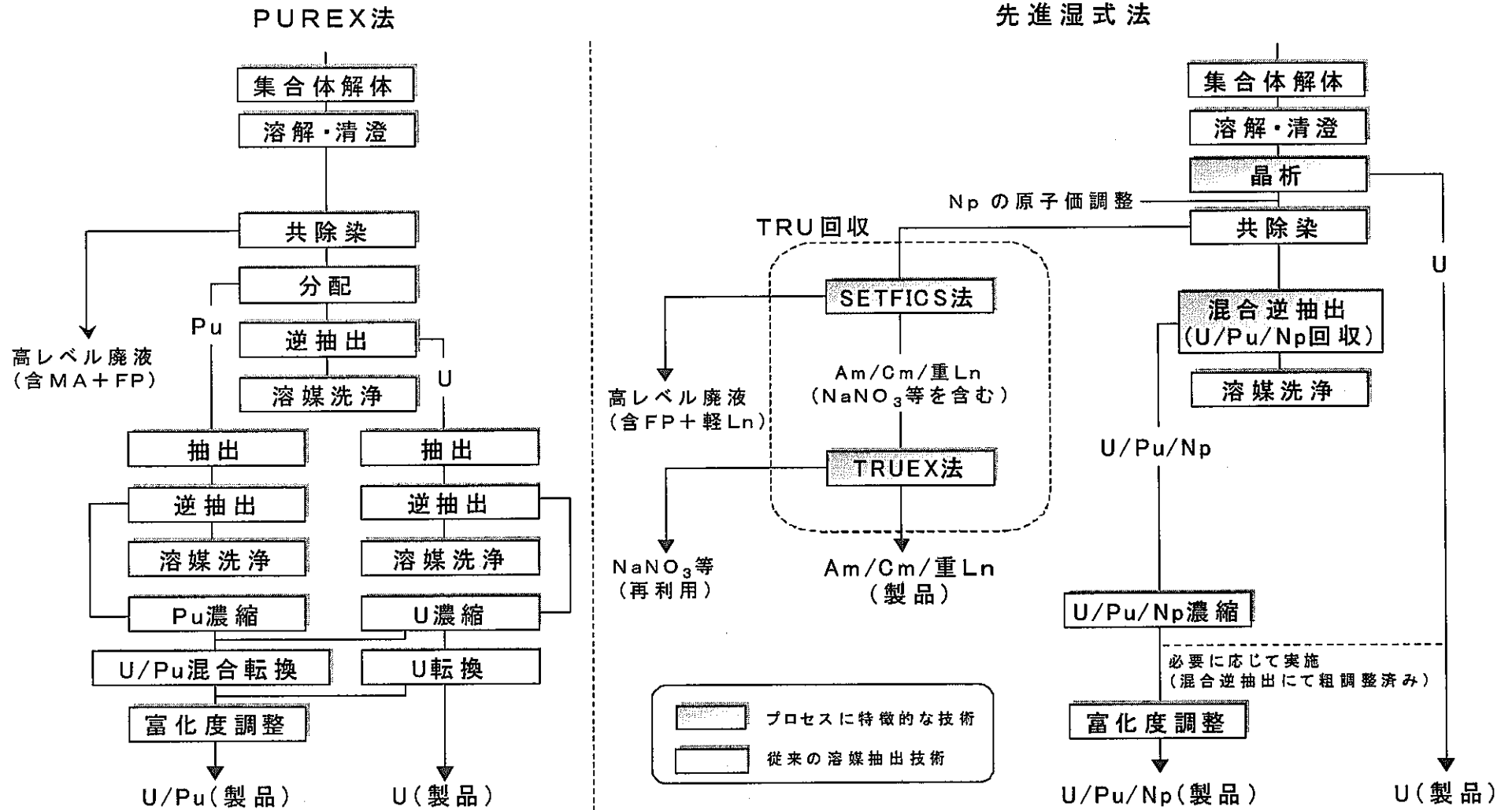
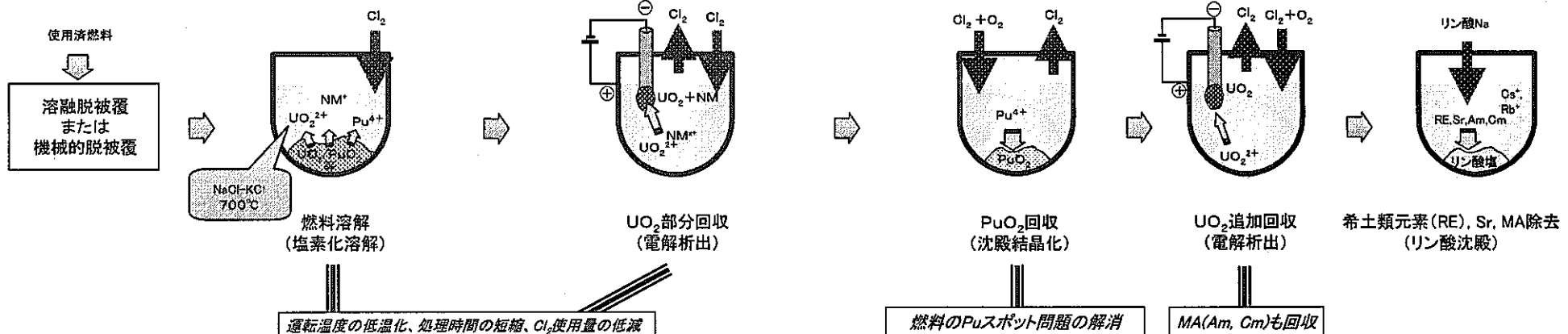


図-28 先進湿式法のプロセスフロー

酸化物電解法(ロシアRIAR開発プロセス)



酸化物電解法(改良プロセス)

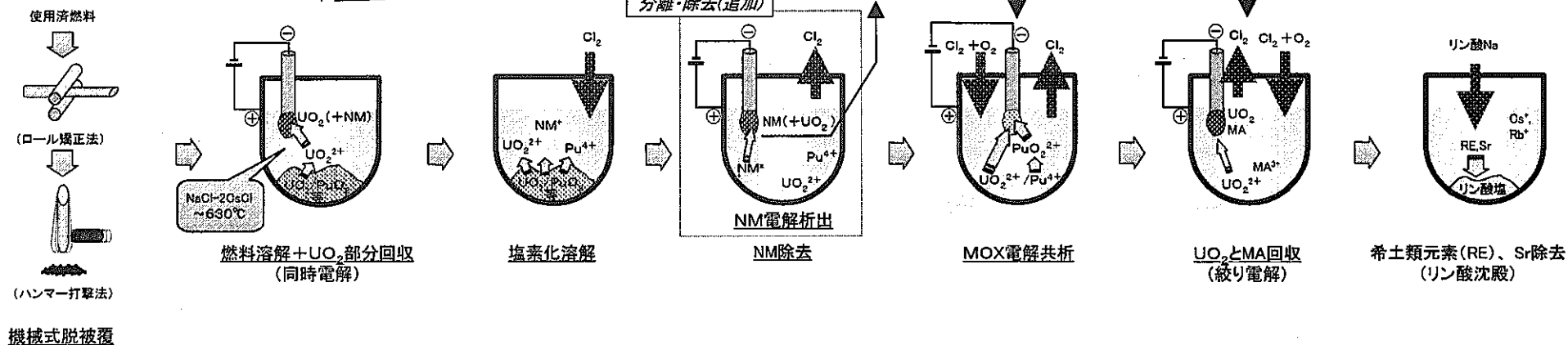
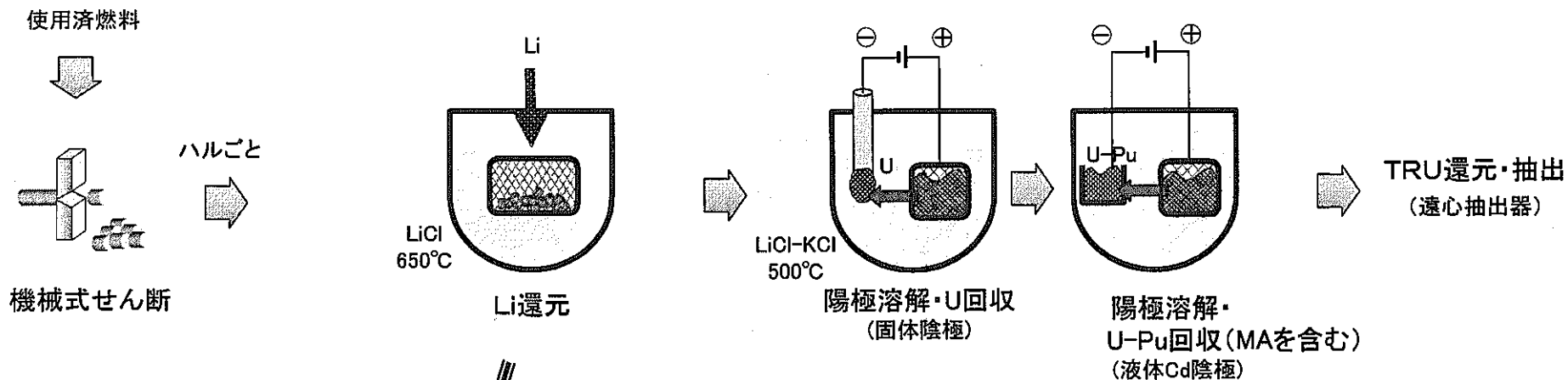


図-29 酸化物電解法プロセスフロー(酸化物燃料への適用例)

[RIAR開発プロセスとの比較]

### 金属電解法(A N L開発プロセス)



### 金属電解法(改良プロセス)

塩廃棄物の削減

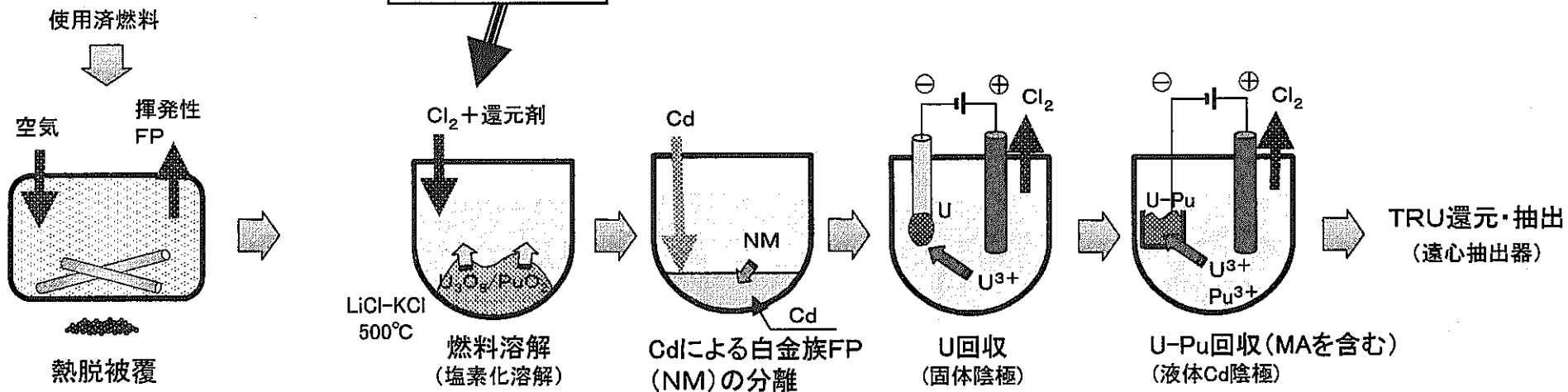
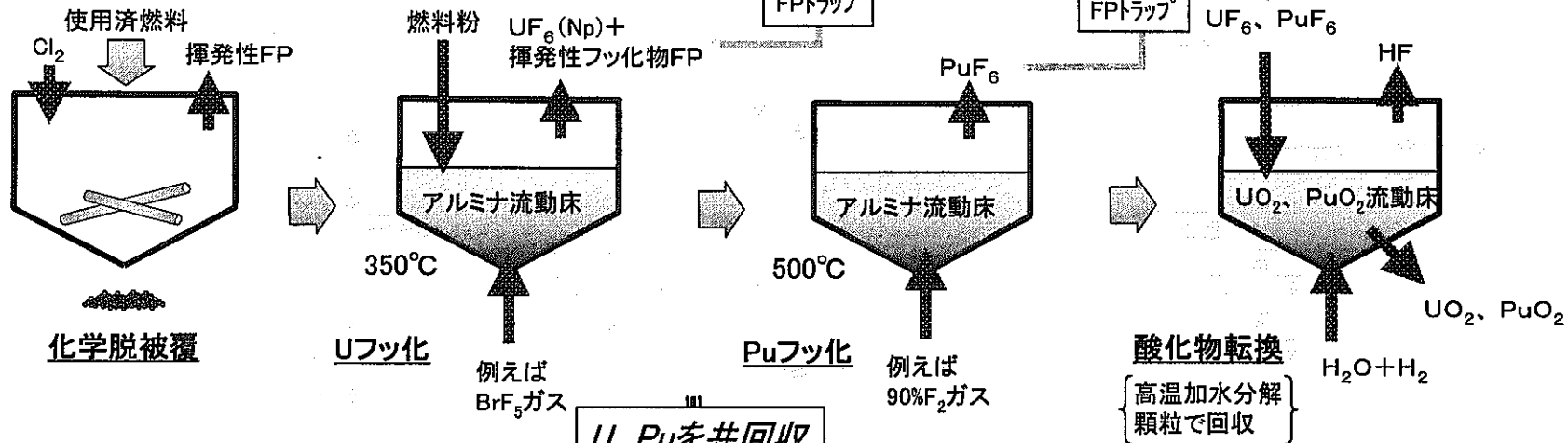


図-30 金属電解法のプロセスフロー[ANL開発プロセスとの比較]

**既往研究**

UとPuを別々に高DFで回収



U、Puを共回収  
高DFは不要

**改良プロセス**

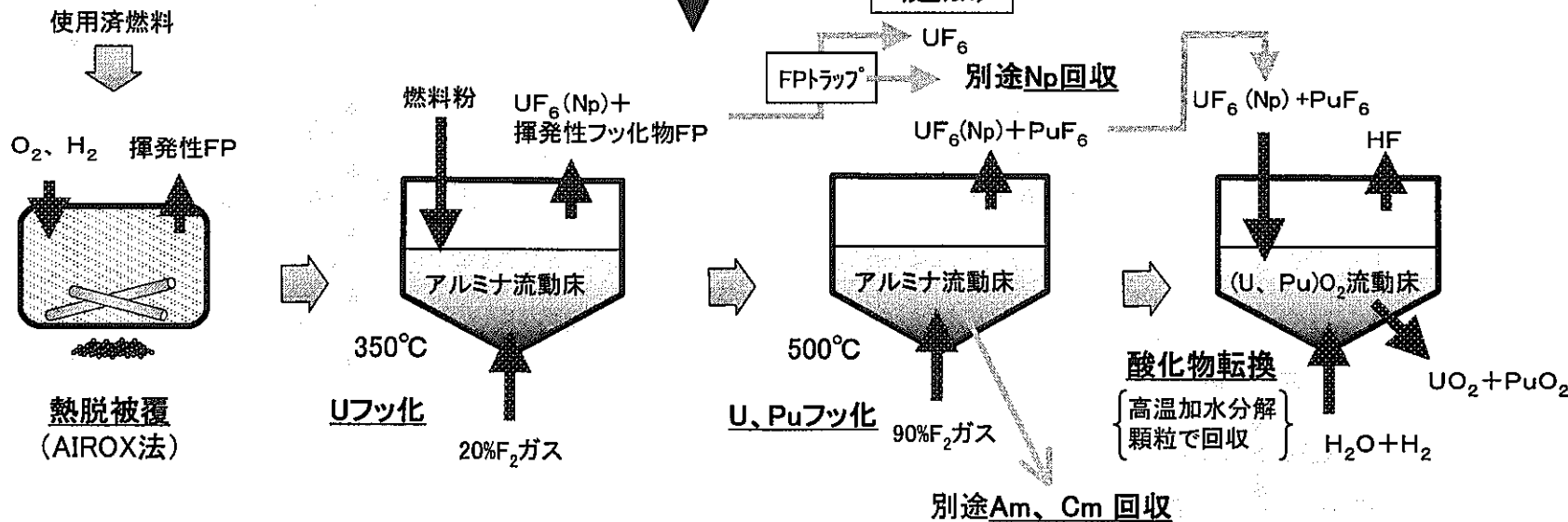


図-31 フッ化物揮発法のプロセスフロー[既往研究との比較]



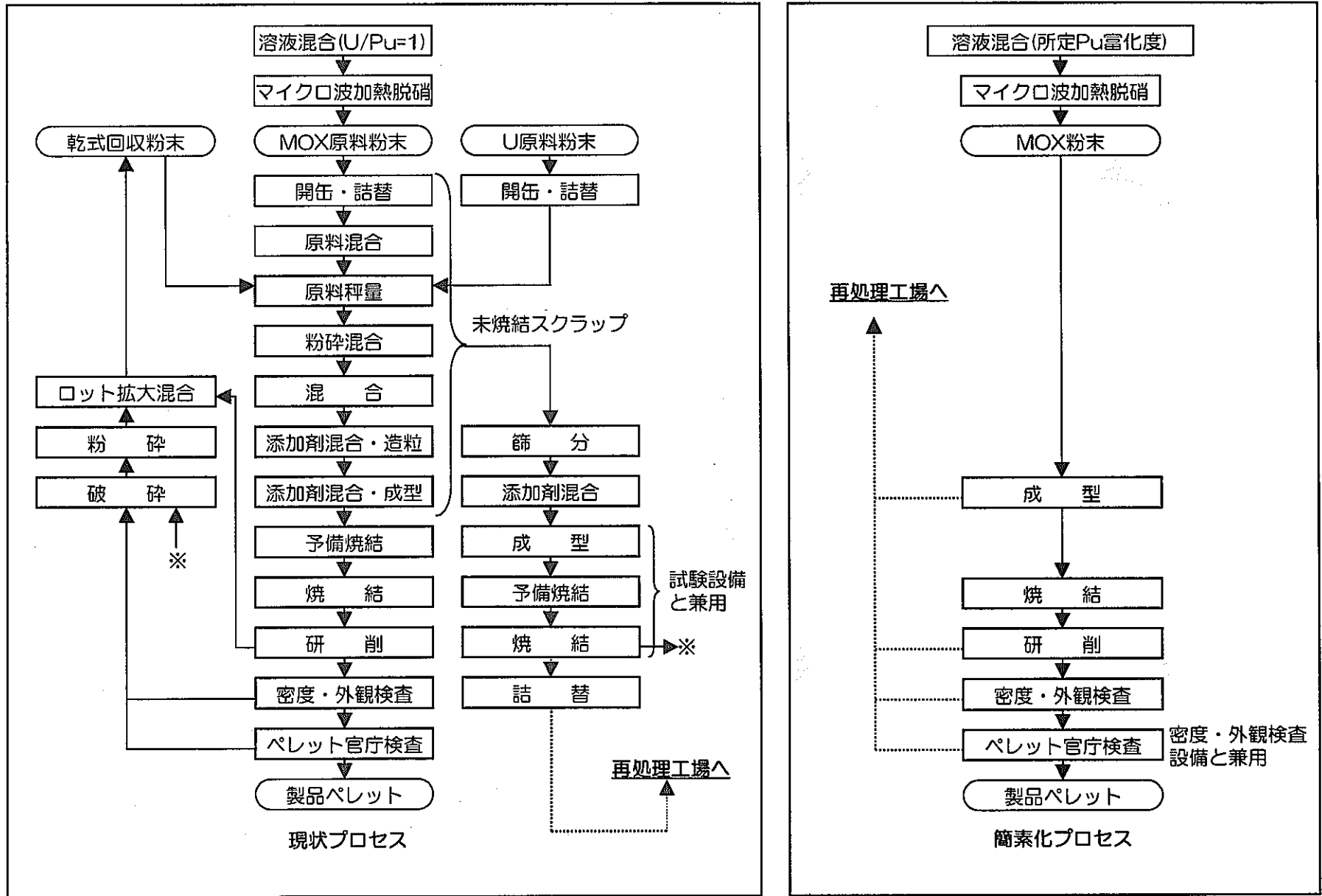
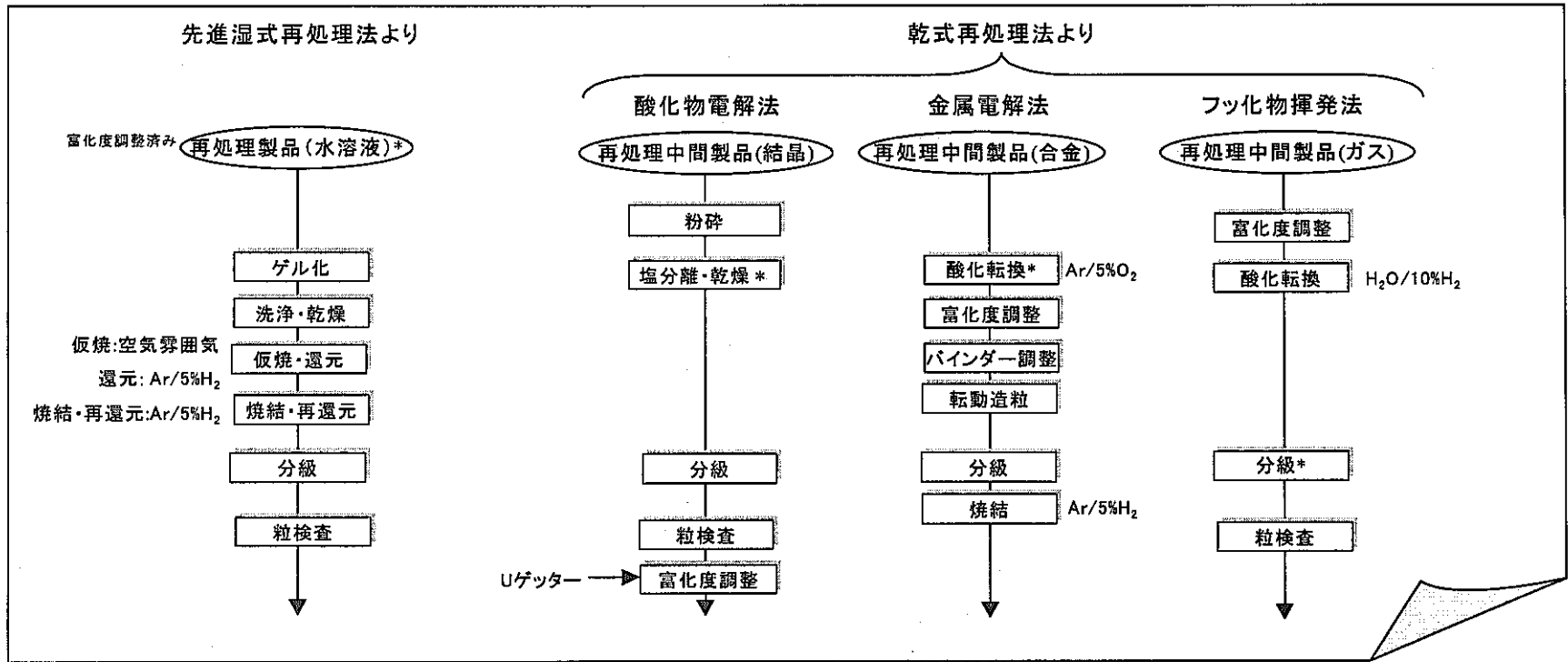


図-32 簡素化プロセスのペレット製造工程[現状プロセスとの比較]

顆粒製造工程



本研究においては、\*を付けた工程までを便宜的に再処理工程とした。

振動充填工程

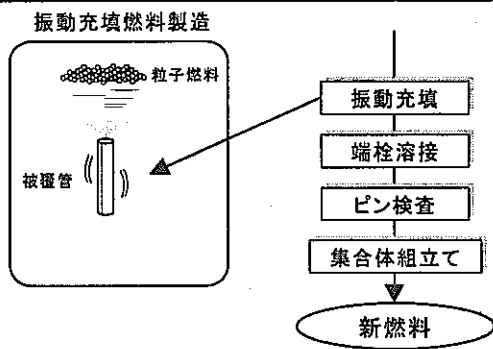
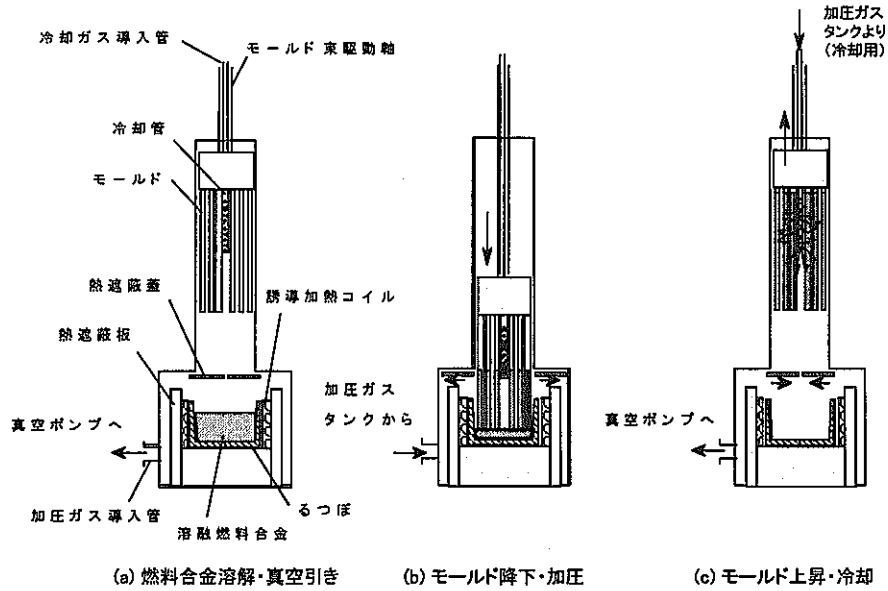
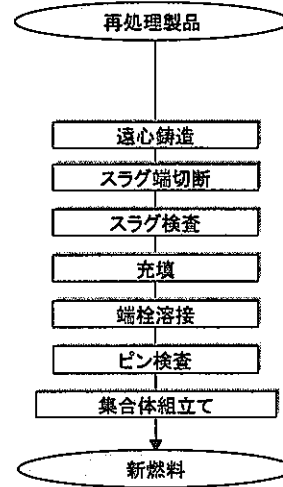


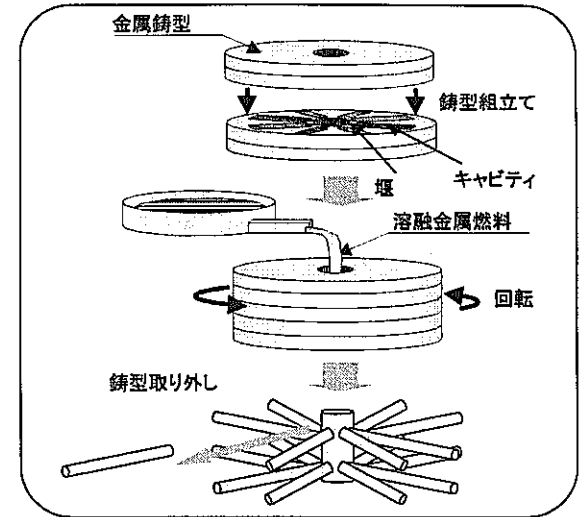
図-33 振動充填燃料製造システム(酸化物燃料への適用例)



### 射出成型法



### 遠心鑄造法



図一34 射出成型法および遠心鑄造法による金属燃料鑄造

再処理・燃料製造費  
(相対値)

燃料形態: 酸化物燃料、燃焼度: 15万MWd/t

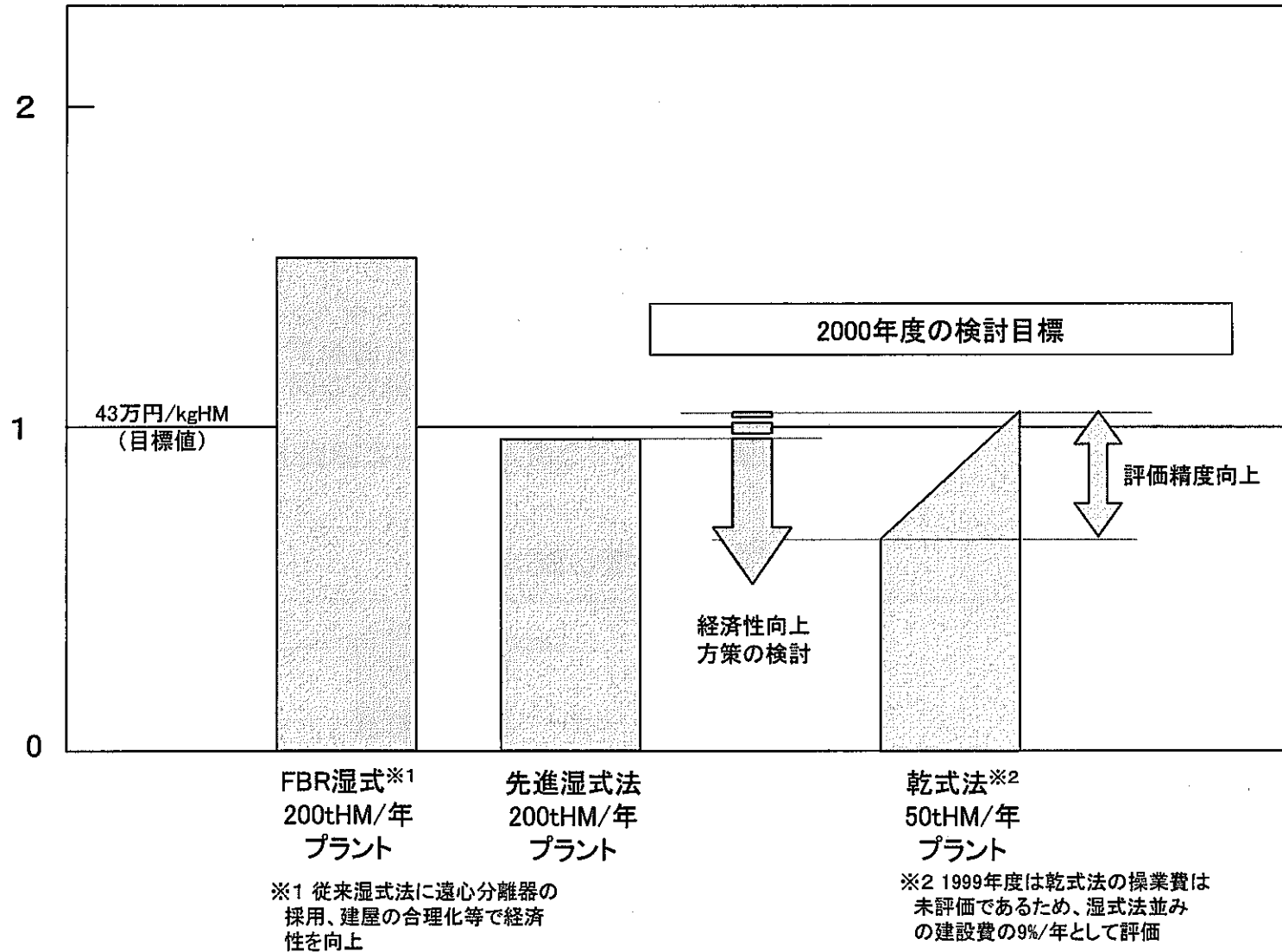


図-35 湿式および乾式システムの経済性試算結果

## 第2期の目的

- FBRサイクルの実用化候補概念の絞り込み
- 研究開発テーマの特定



## 第2期の基本的な考え方

- FBRサイクルの実用化候補概念として、有望な2～3の候補に絞り込む
  - ・ 絞り込みのための定量的な比較評価が可能となるよう概念設計を進める
  - ・ 絞り込みに必要な要素技術開発(データを取得する試験の実施、設計評価技術の整備等)にも重点を置く
  - ・ FBRシステムと燃料サイクルシステムとの整合性を図りながら研究を進める
- 競争力あるFBRサイクルの技術体系整備(目標:2015年頃)に向けた開発計画(ロードマップ)をまとめる
  - ・ 国内外の研究資源の有効活用 等の検討
- 第2期より以降のための研究環境・インフラ等の整備に着手

図一36 実用化戦略調査研究の第2期の目的

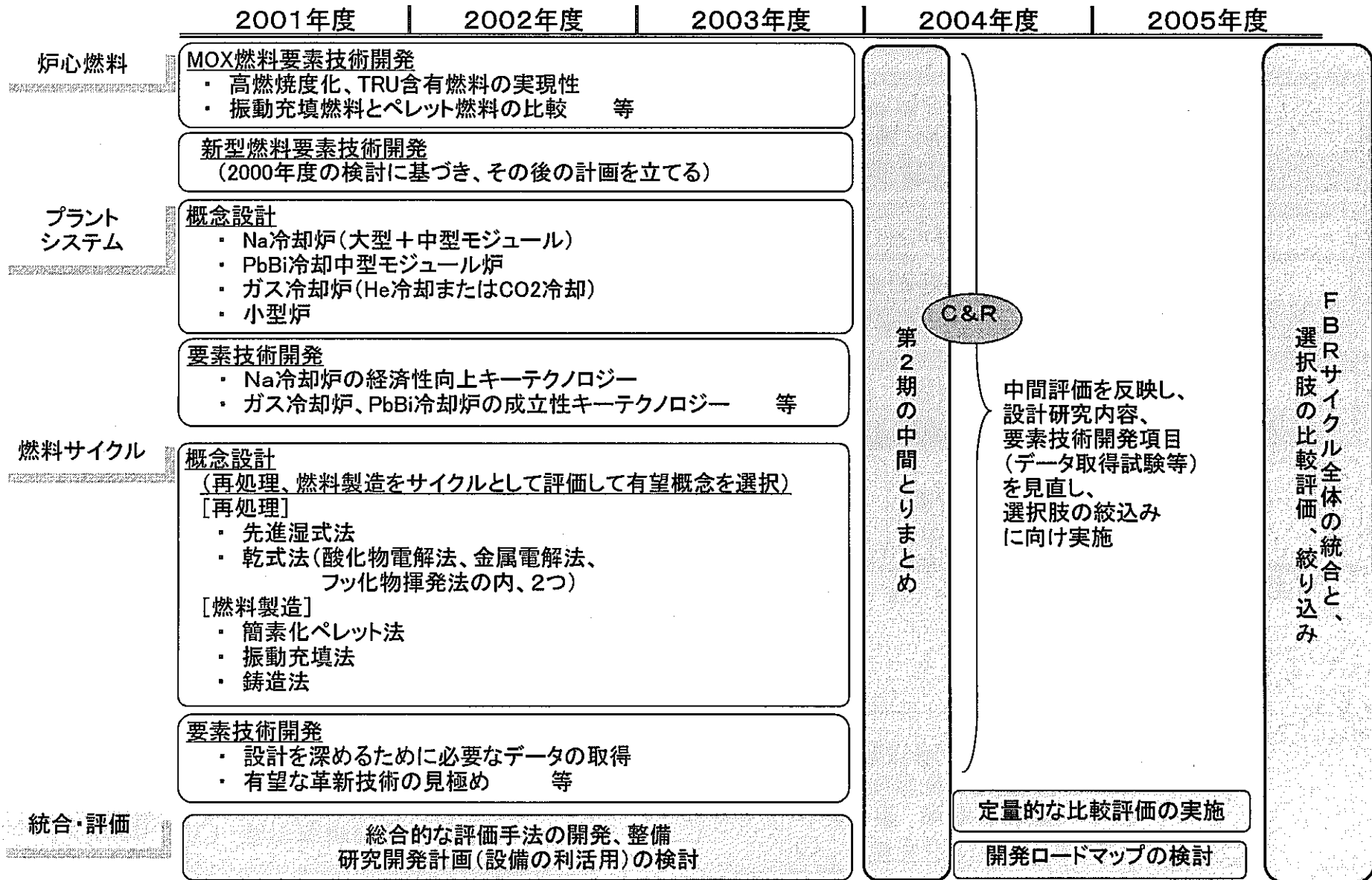
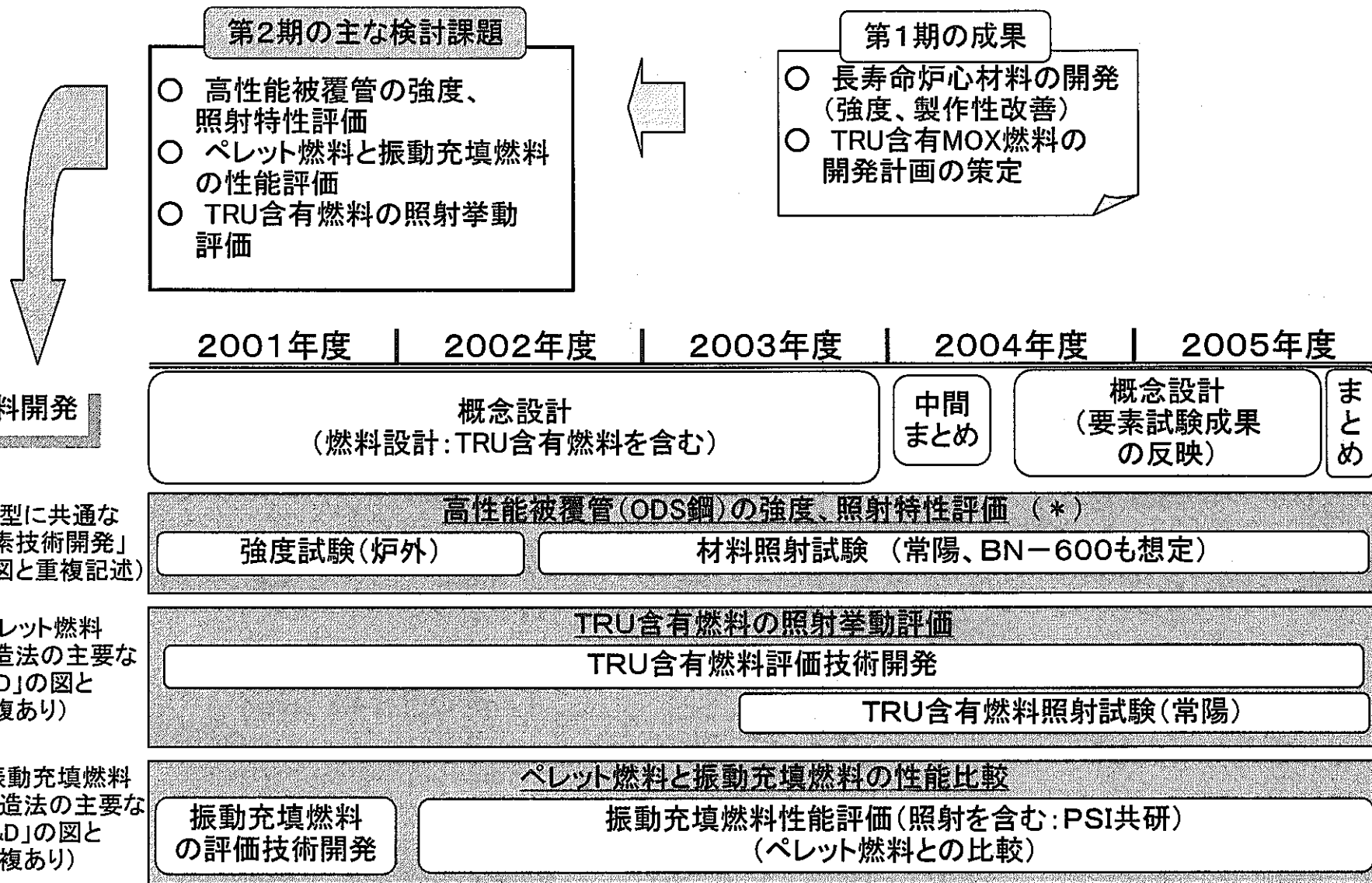


図-37 実用化戦略調査研究の第2期の展開



\* 「常陽」での燃料ピン照射に向けた準備も進める

図-38 第2期の展開(MOX燃料開発の主要なR&D)

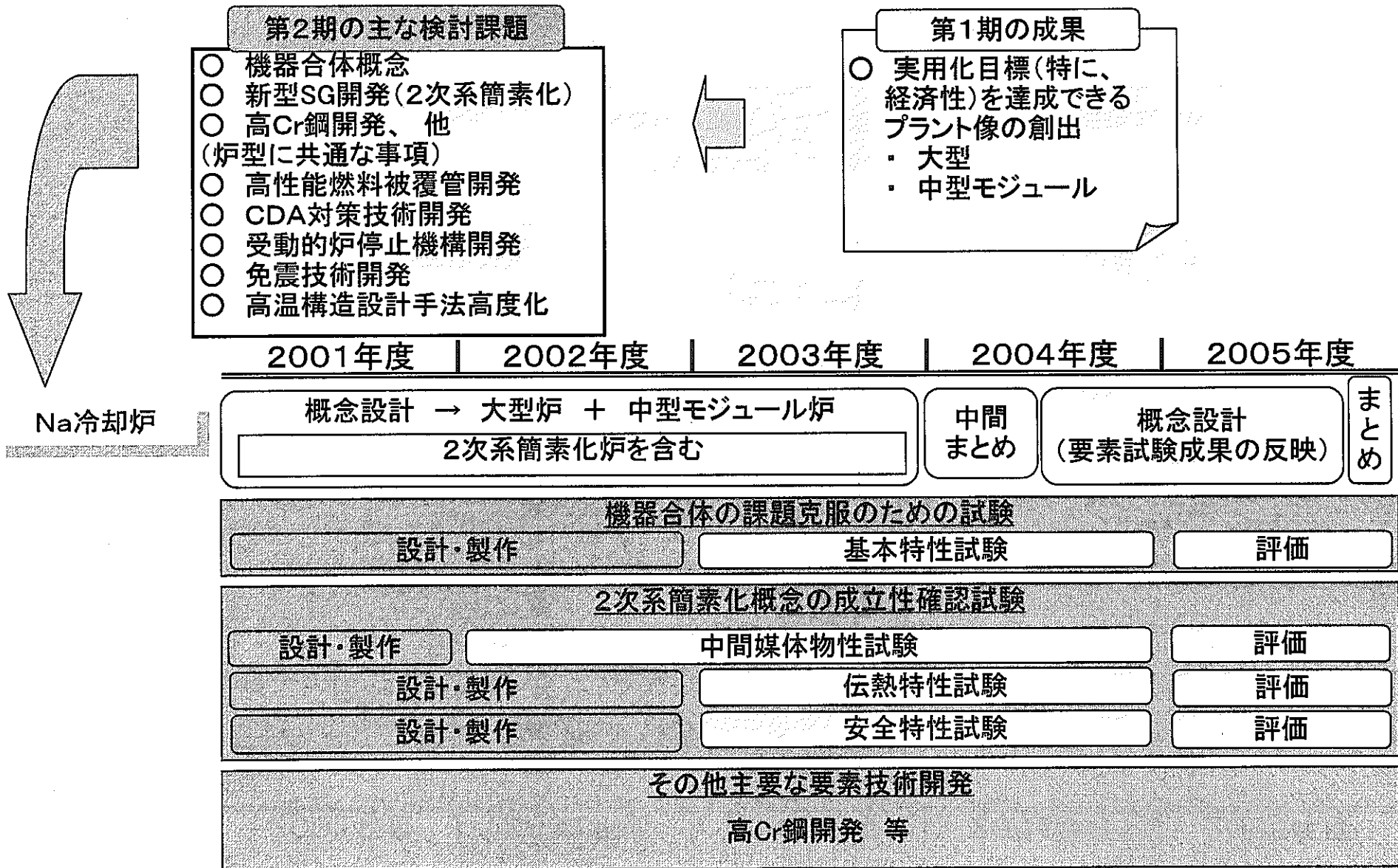


図-39 第2期の展開(ナトリウム冷却炉の主要なR&D)



炉型共通

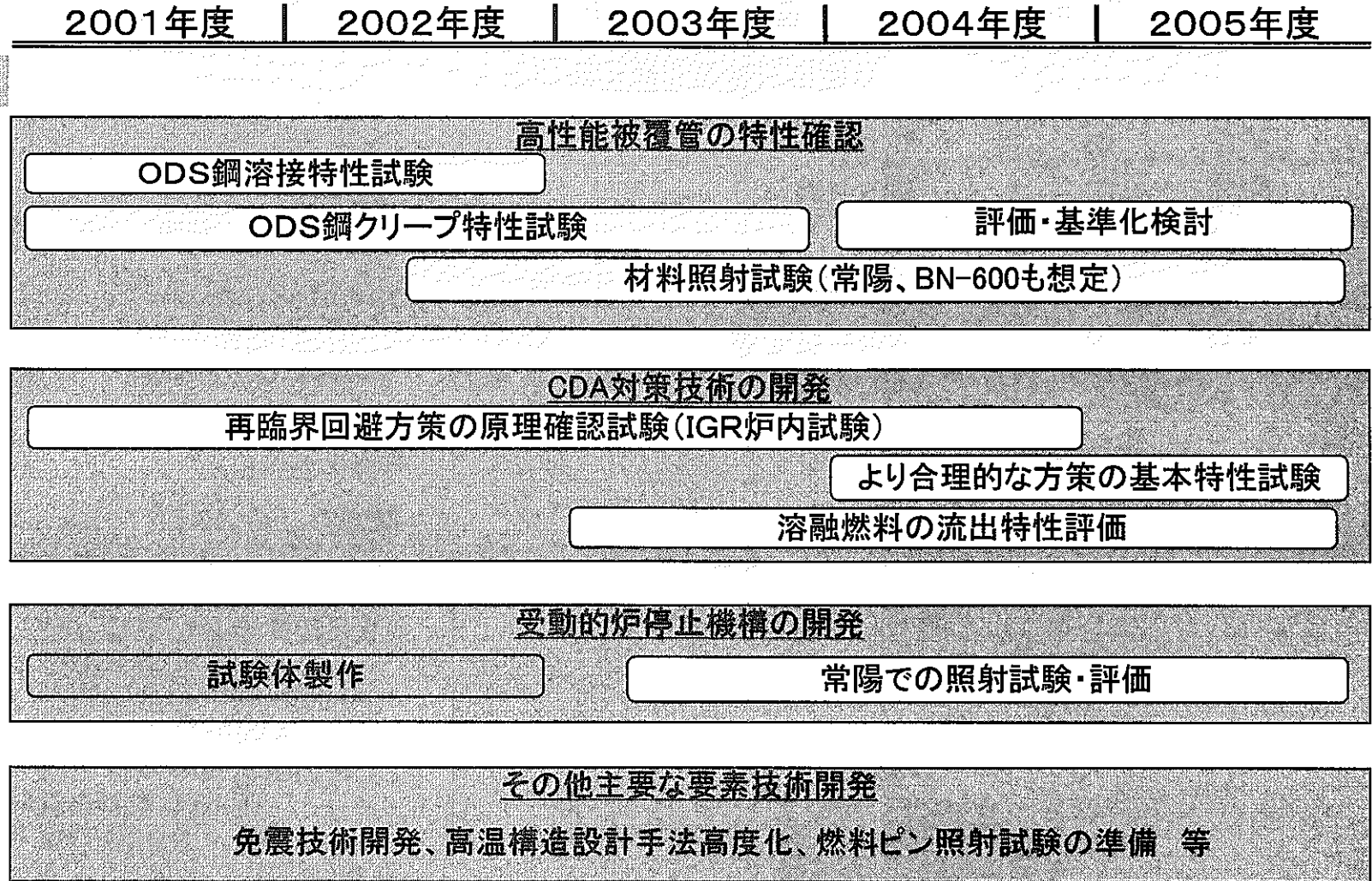
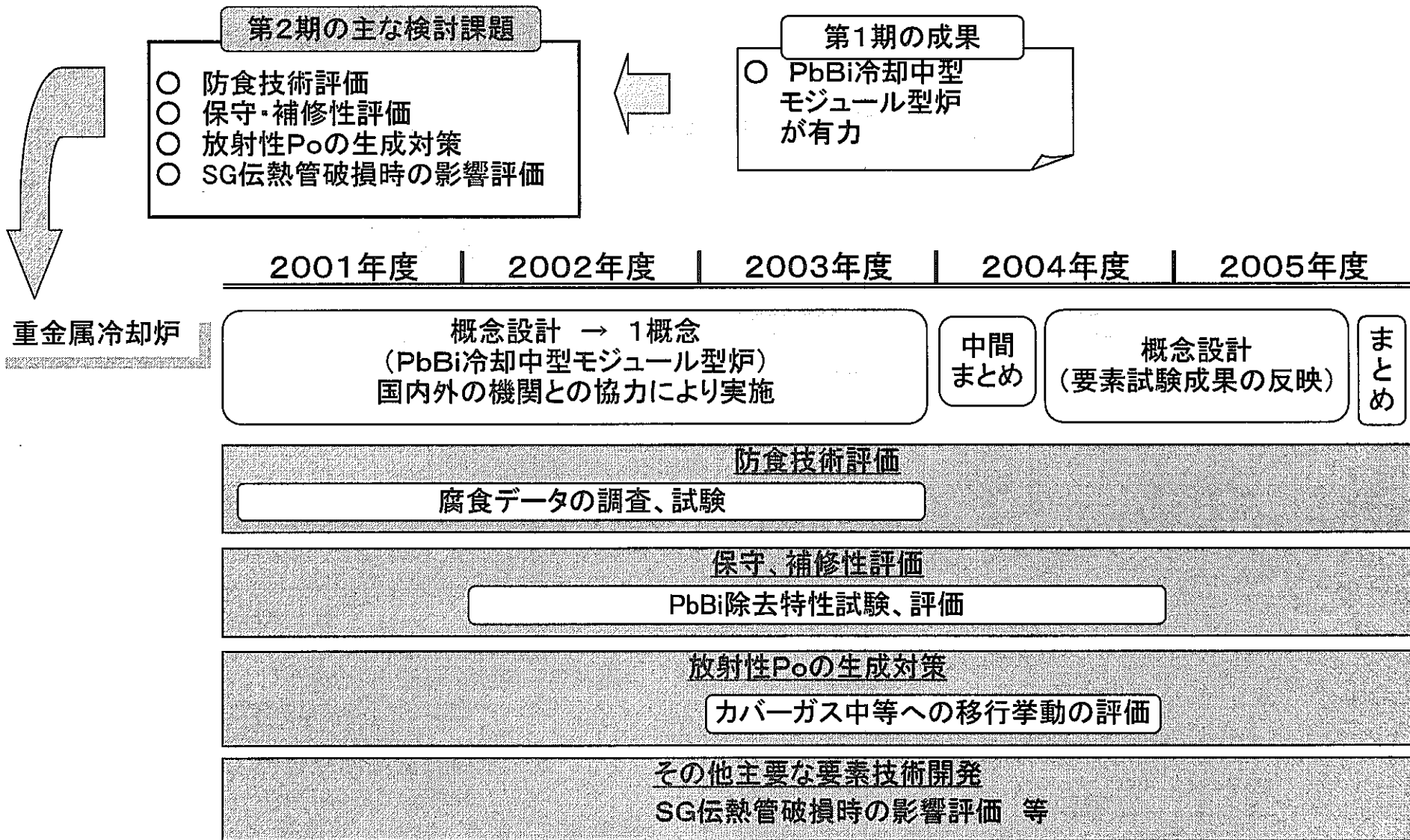
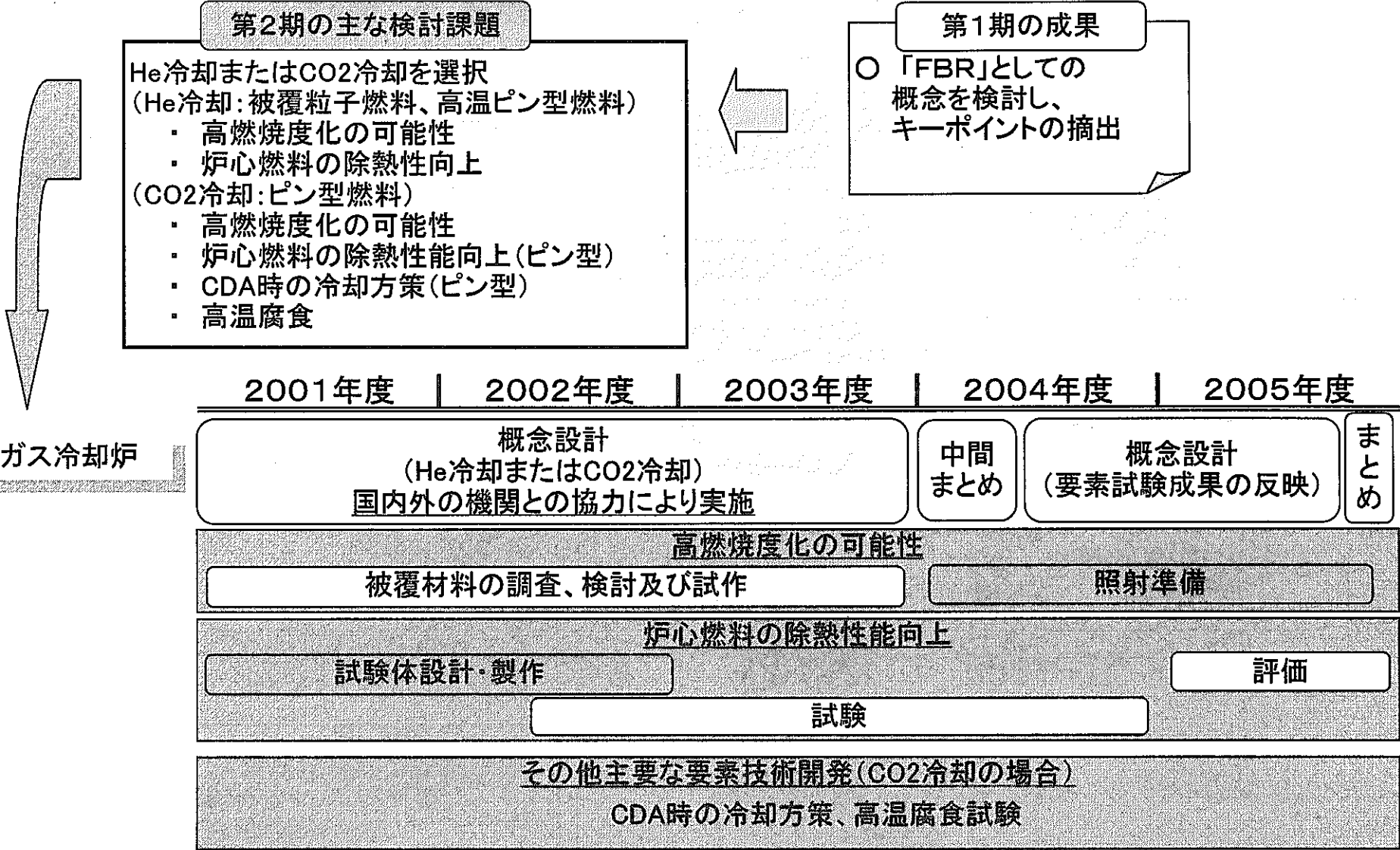


図-40 第2期の展開(炉型に共通な要素技術開発)



注) 要素技術開発についても国内外の機関との協力により実施

図-41 第2期の展開(重金屬冷却炉の主要なR&D)



注) 要素技術開発についても国内外の機関との協力により実施

図一42 第2期の展開(ガス冷却炉の主要なR&D)

第2期の主な検討課題

- 大型、中型モジュールの知見を反映した有望な炉概念の構築

第1期の成果

- ニーズの整理とそれに適合する概念の検討

2001年度

2002年度

2003年度

2004年度

2005年度

小型炉

概念設計 → 2概念  
(Na冷却炉およびPbBi冷却炉)

中間  
まとめ

概念設計  
(要素試験成果の反映)

まとめ

大型炉、中型モジュール炉の要素技術開発成果を活用

- ・ CDA対策技術開発
- ・ 高Cr鋼開発
- ・ 免震技術開発
- ・ 高温構造設計手法高度化 等

図-43 第2期の展開(小型炉の主要なR&D)

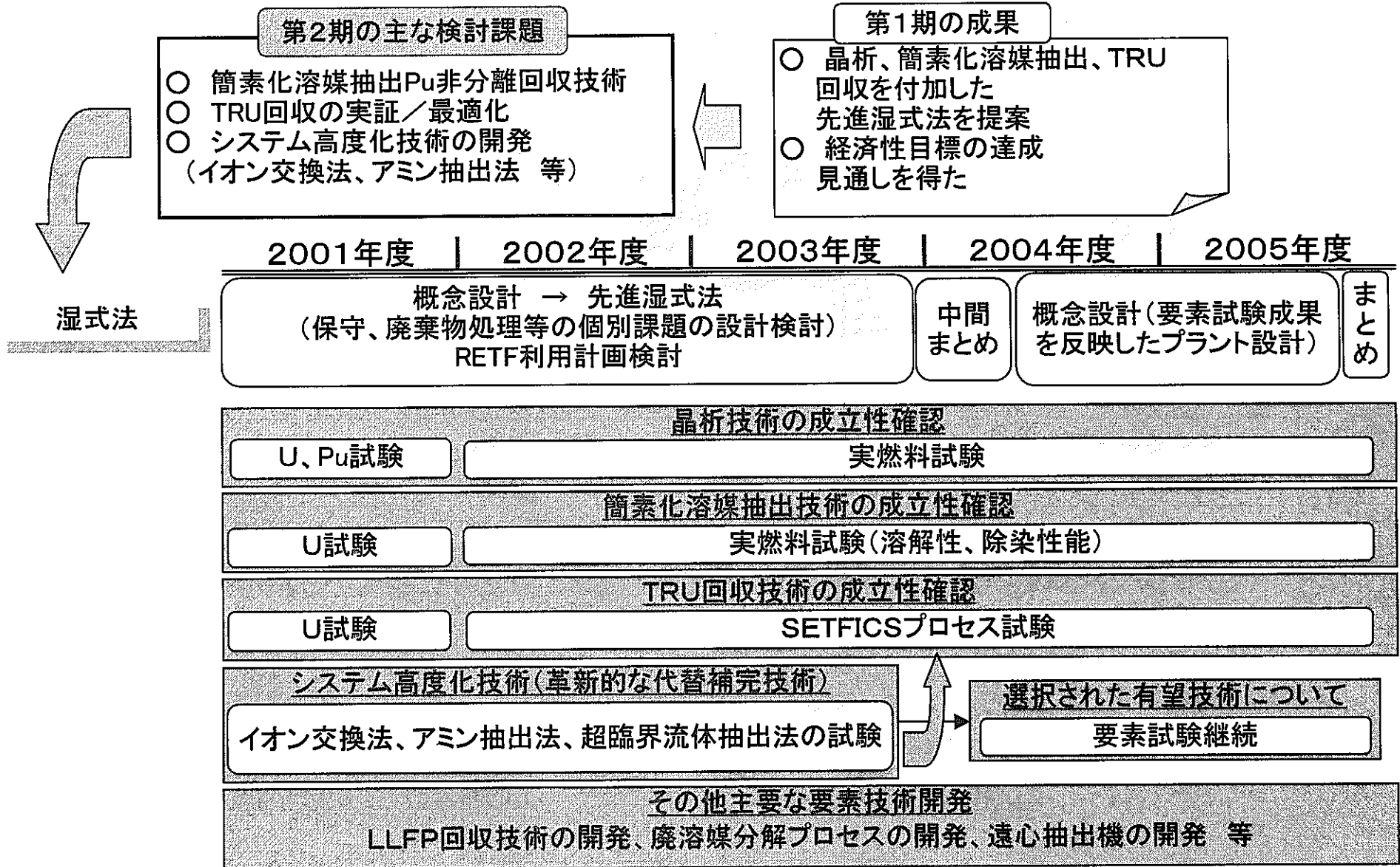


図-44 第2期の展開(湿式再処理法の主要なR&D)

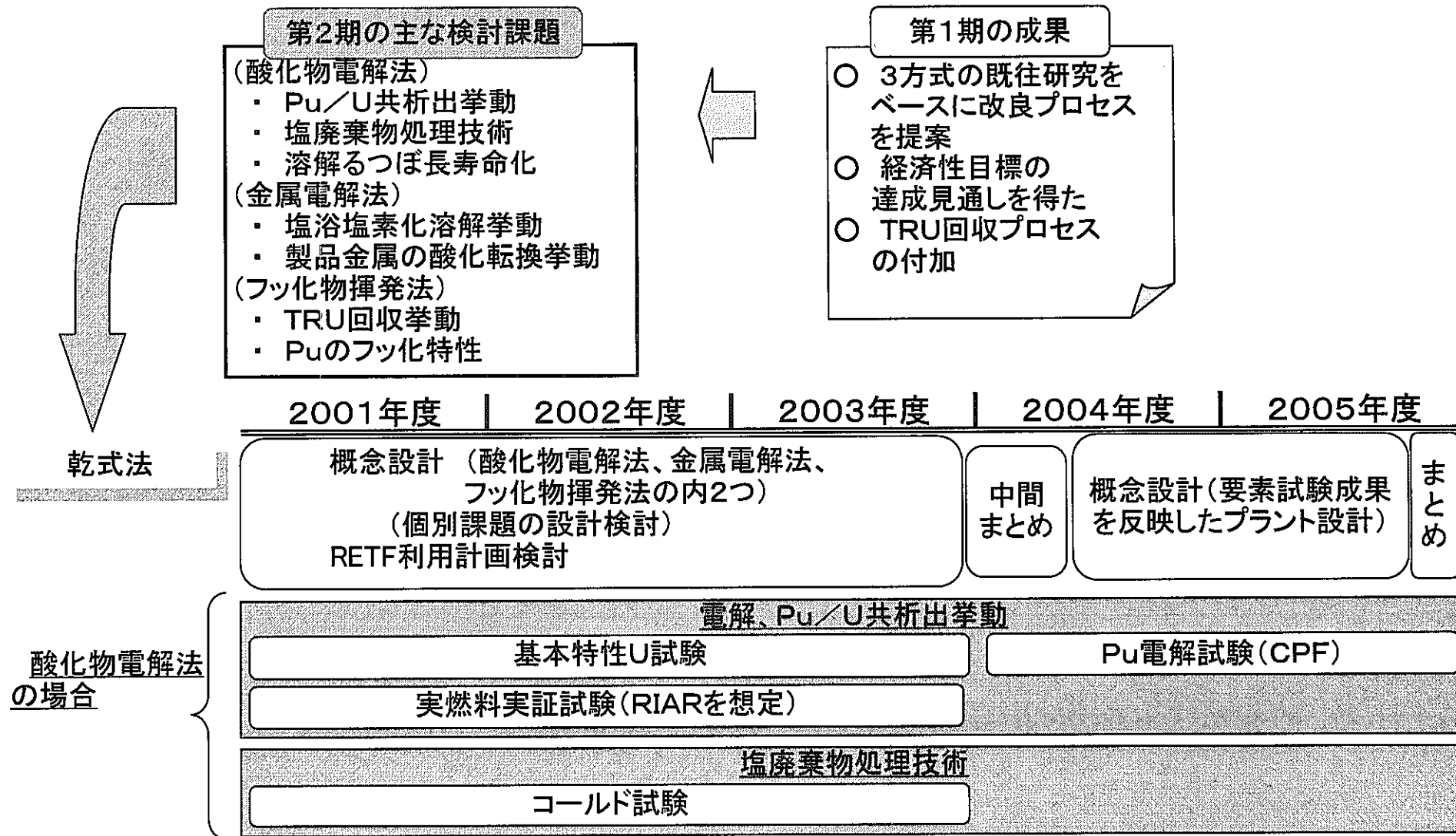


図-45 第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[1/2]

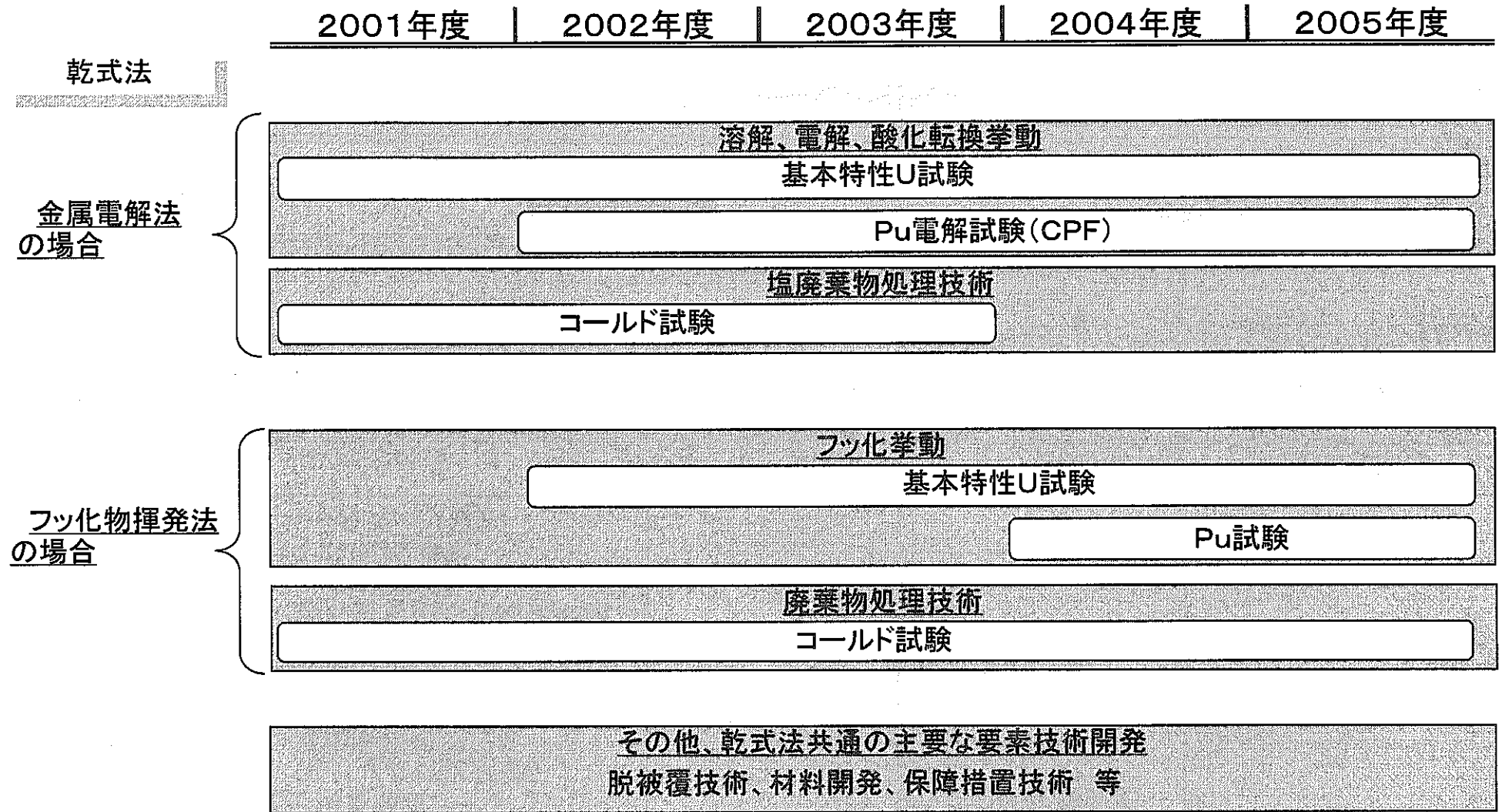
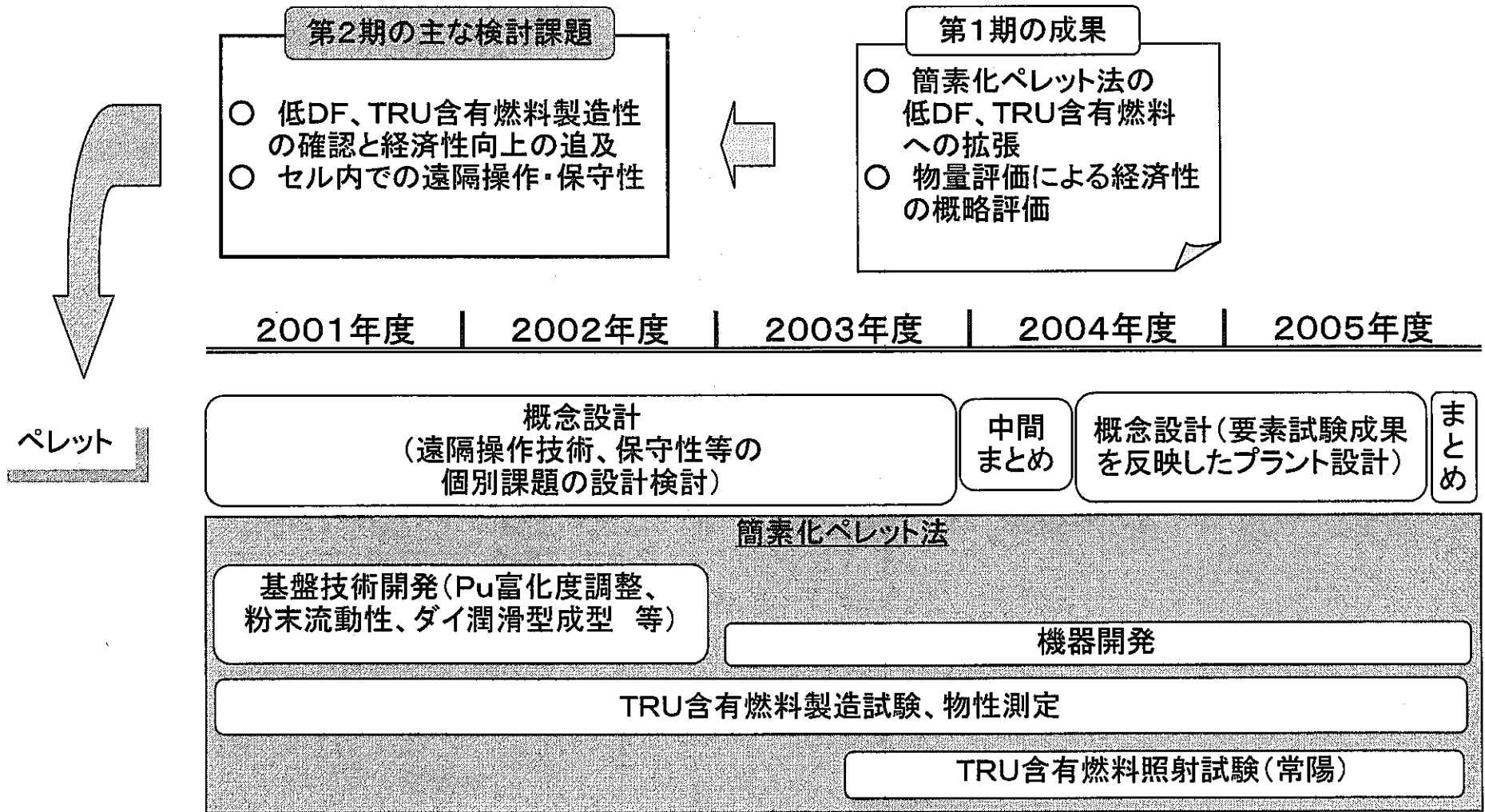


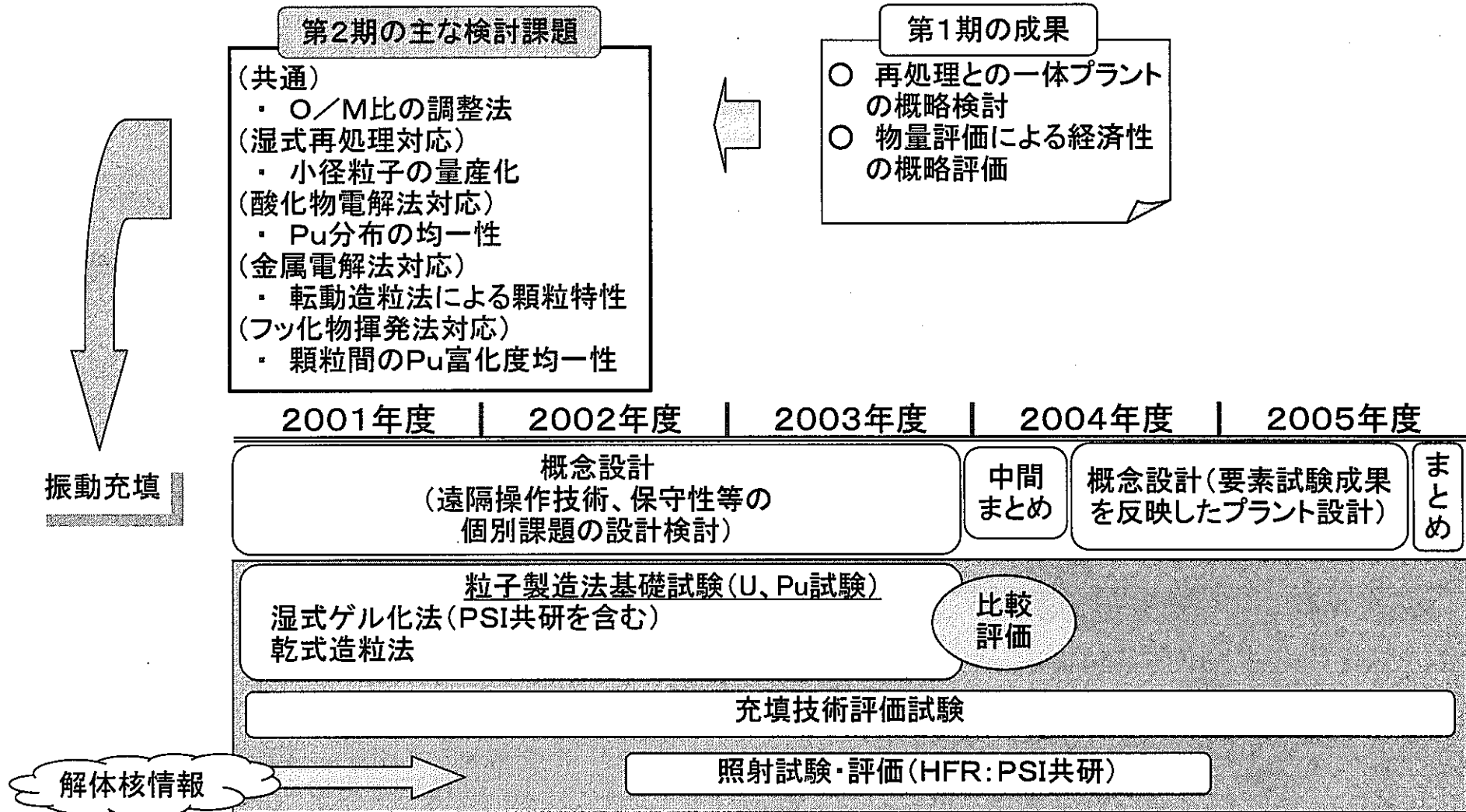
図-46 第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[2/2]



注) 燃料被覆管の開発については、「炉型に共通な要素技術開発」の図を参照

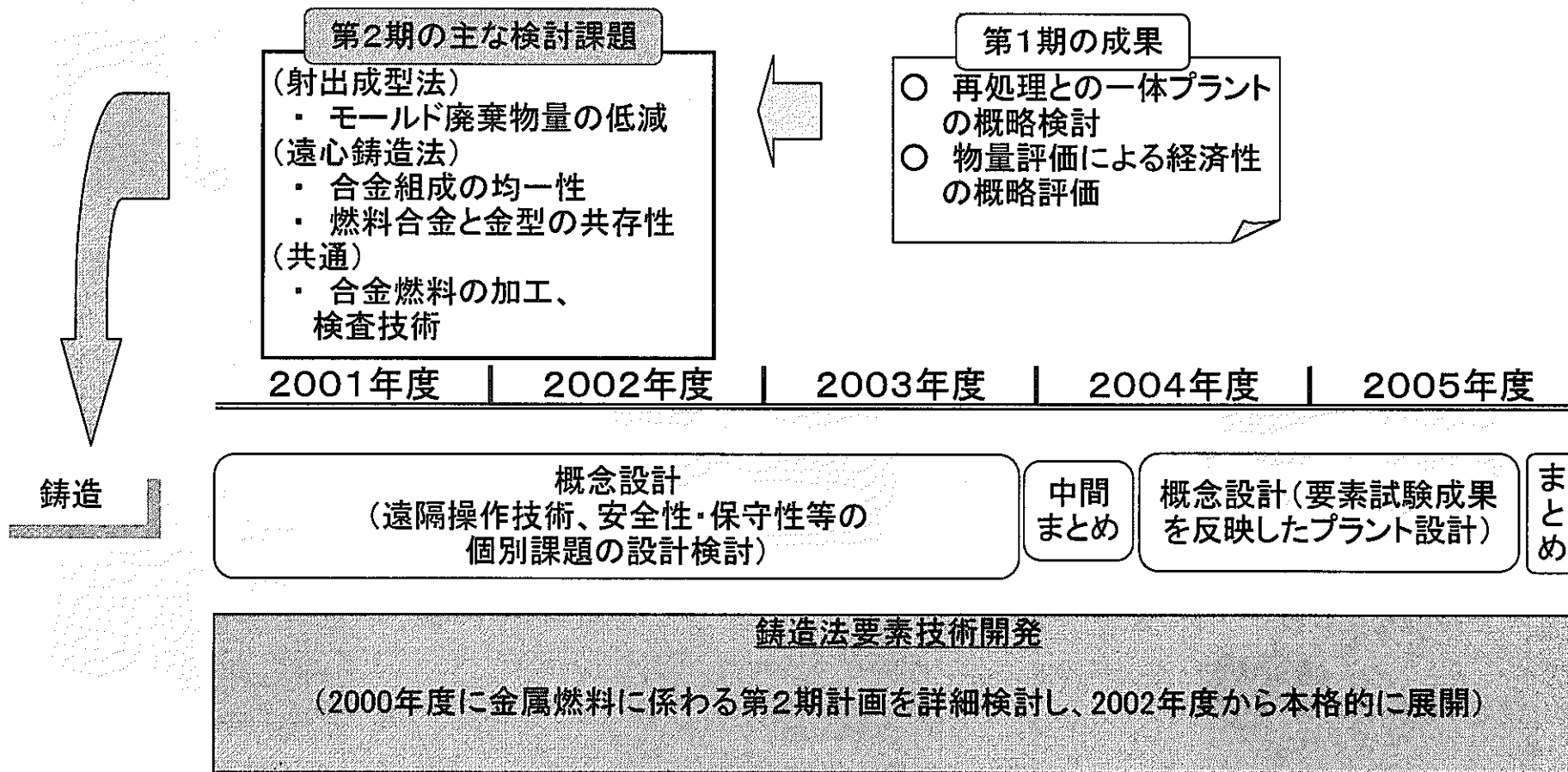
図-47 第2期の展開(ペレット燃料製造法の主要なR&D)





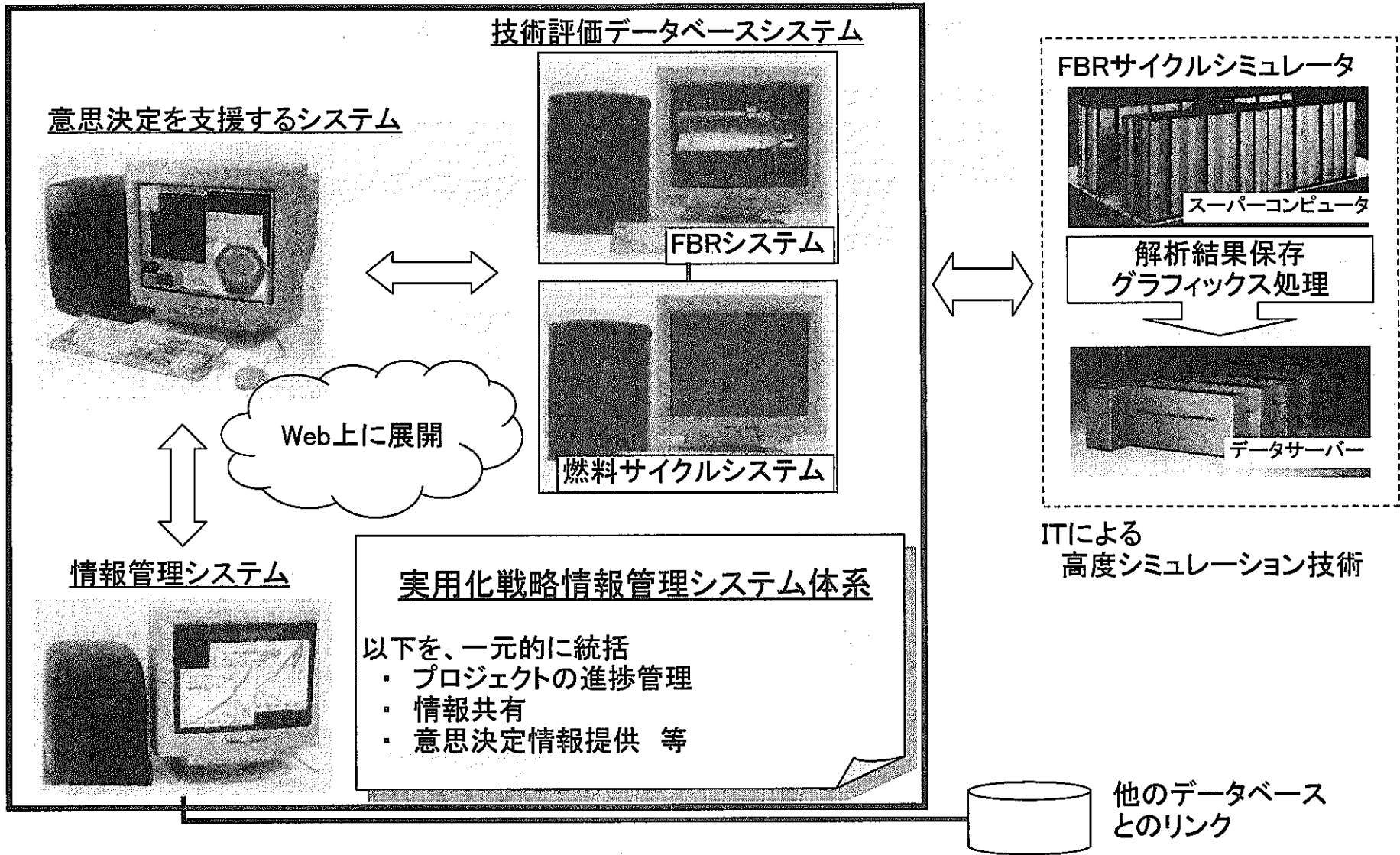
注) 乾式再処理法に対応する振動充填燃料の照射試験については、解体Pu処分協力に関する技術開発の枠組みで実施する予定

図一48 第2期の展開(振動充填燃料製造法の主要なR&D)



注) 2001年度についても、電中研にて、燃料製造プロセスの工学規模U試験等を実施する予定

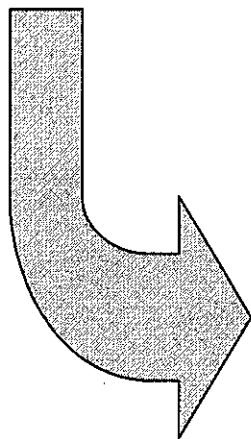
図-49 第2期の展開(鑄造燃料製造法の主要なR&D)



図—50 第2期の展開(実用化戦略情報管理システムの開発)

## 期待される成果

- 実用化候補概念の絞込み(複数)
  - 目標への適合性を定量的に示せる概念設計
  - 技術的成立性のキーポイントを示すバックデータ(要素試験と解析)
- FBRサイクルの技術体系整備(目標:2015年頃)に向けた研究開発計画 (ロードマップ)



- FBRサイクルの実用化に向けた道筋の明確化
  - R&Dの優先順位
  - R&D施設の利用計画
  - 海外との役割分担
- 研究開発課題評価委員会、原子力委員会のC&R等を経て、国の計画への反映

図-51 第2期の期待される成果と波及効果

# 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

## 【用語の説明】

#### **4S**

Super-Small, Simple and Safe。電力中央研究所で提案された小型炉のプラント概念。受動的な安全機能を持たせ炉心損傷に至りにくい炉システム概念にするとともに、長期間（10年間）、燃料交換やメンテナンス無しに運転を継続することを旨としたプラント概念。

#### **ANL（アルゴン国立研究所）**

Algonne National Laboratory。米国エネルギー省傘下の研究所。イリノイとアイダホに二つの研究所がある。基礎科学研究、科学研究施設の開発・運営、エネルギー資源開発および環境管理の4つの分野で研究開発を行っている。従業員約4500人。

#### **BNFL（英国原子燃料公社）**

British Nuclear Fuels Ltd. BNFLは1971年に英国原子力公社（UKAEA：United Kingdom Atomic Energy Authority）の生産部門が独立することによって設立され、それまでUKAEAが行っていた燃料サイクル業務を引き継ぎ、英国における転換、濃縮、成型加工、再処理といった原子燃料サイクル全般にわたる業務を行っている。

#### **CDA（炉心崩壊事故）**

Core Disruptive Accident。一般にFBRでは、プラントの安全性を評価するための事故を想定しても、炉心での冷却材沸騰や燃料破損は生じることなく、また、格納施設の健全性を損なうことはない。しかし、FBRでは、軽水炉に比べて高いプルトニウム富化度（あるいはウラン濃縮度）の燃料で炉心を構成しているという特徴を考慮して、その発生頻度が工学的に無視できるほど十分小さくとも、仮想的に炉心損傷状態を仮定して、その影響が炉容器および格納施設内で適切に緩和されることを確認している。この仮想的な安全評価事象が炉心崩壊事故である。FBRの開発当初から安全設計・評価が行われ、FBRの安全研究の中心課題となってきた。仮想的炉心崩壊事故(HCDA：Hypothetical Core Disruptive Accident)とも呼ばれる。

#### **DF（除染係数）**

Decontamination Factor。燃料サイクルにおける製品の不純物となっている放射性物質が除染処理によって除去される程度を示す指標である。通常、除染処理前の放射能濃度を処理後の放射能濃度で割った値で表す。再処理工程において

精製したウランあるいはプルトニウム製品の除染係数は、〔使用済燃料の放射能濃度〕 / 〔再処理後の製品中の放射能濃度〕 の比（ここで、放射能濃度は特定核種の濃度とする場合もある）で求められ、除染係数が高いほど、核分裂生成物などの不純物が除去されたことを意味する。

### **DRACS（直接炉心冷却系）**

Direct Reactor Auxiliary Cooling System。崩壊熱除去系の方式のひとつで、原子炉容器内に冷却コイルを設け、原子炉容器内の冷却材を介して炉心を直接冷却する方式。冷却コイルに伝えられた熱は、原子炉容器の外に設けられた空気冷却器から大気中に放熱される。

### **EVST（炉外燃料貯蔵槽）**

Ex-vessel Storage Tank。炉外燃料貯蔵槽は、炉心内で所定の燃焼期間を経て、炉心から取り出す使用済燃料集合体を、ナトリウム中で崩壊熱が十分低下する一定期間貯蔵する設備で、貯蔵容器、しゃへいプラグ、回転ラック等から構成される。

### **FBR サイクル**

FBR とその関連する核燃料サイクルのことをいう。

#### **FBR（Fast Breeder Reactor）：高速増殖炉**

使用した燃料よりもさらに多くの燃料を生み出す（増殖）原子炉。わが国には、実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」があり、実証炉の計画もある。ウラン 238 が中性子を吸収するとプルトニウムに転換することを利用した原子炉で、高速中性子でその転換率が高いので、水のような中性子の減速効果のあるものを原子炉冷却材として用いずに、ナトリウムなどを原子炉冷却材として用いる原子炉。燃料としてはプルトニウムとウランの混合体（MOX 燃料）を用いる。プルトニウムへの転換率を高めるため、炉心からもれて出る中性子をウラン 238 に吸収させるブランケット（外套部）を設けている。

軽水炉では天然ウランの 1%程度を有効に利用できるに過ぎないが、核燃料サイクルの中で FBR を有効に用いることにより、この利用できる割合は 80%以上（TRU 回収率 99%以上、燃焼度 15 万 MWd/t 程度（炉心燃料取出平均）の場合）に高まりウラン資源を十分に利用することができる。

#### **核燃料サイクル（Nuclear Fuel Cycle）**

天然に存在するウラン資源が採掘、精錬、転換、濃縮、加工されて核燃料として原子炉で使用され、さらに原子炉から取り出されたあと再

処理、再加工され再び原子炉で使用され、残りが廃棄物として処理処分されるまでの一連の循環（サイクル、最近ではサイクルをリサイクルと呼ぶことも多い。）をいう。一般に、核燃料物質の探査、採掘から始まり、採掘されたウラン鉱石からのウランの抽出、精錬、フッ化物への転換、ウラン同位体の濃縮、原子炉燃料への成型加工、原子炉装荷（燃料の燃焼）、使用済燃料の再処理（プルトニウム、ウランの回収）、放射性廃棄物の処理、処分などの過程をたどる。

**FBR サイクル**においては、原子炉の中でできたプルトニウムは一度原子炉の外に取り出され、不用の核分裂生成物などを分離した後、新しい燃料に加工される。燃料として天然ウランとプルトニウムの混合酸化物燃料を用いるのでウラン濃縮過程を必要としない。しかも、ウラン濃縮過程から発生する劣化ウランを天然ウランに代わって用いることができる。FBR での燃焼によって生成されたプルトニウムを回収して利用することが前提とされるので、リサイクル型である。

#### **FCMI（燃料 - 被覆材機械的相互作用）**

Fuel Cladding Mechanical Interaction。FCMI は燃料の温度上昇やスエリングにより膨張した燃料と被覆管内面とが接触し被覆管の変形を生じさせる現象。燃焼度が 20,000MWd/t 以上の燃料、炉の出力上昇時などに考慮される事項。

#### **FCI（燃料 - 冷却材熱的相互作用）**

Fuel-Coolant Interaction。燃料 - 冷却材相互作用ともいう。燃料が溶融、破損し冷却材と直接接触すると、溶融燃料の熱量が冷却材に急激に伝わることで溶融燃料・冷却材の機械的な相互作用が発生する。このとき発生する急激な蒸気圧力は周辺の構造物等への機械的負荷となり、同時に発生する蒸気泡は炉心反応度、出力に影響を与える可能性がある。

#### **FP（核分裂生成物）**

Fission Product。ウランやプルトニウム等の核分裂に伴って生じた核種およびその一連の放射性崩壊で生じる核種のこと。大部分が放射性であり、その半減期は 1 秒以下のものから数百万年に及ぶものまで幅広い。

#### **FP 核変換**

核反応を利用して FP を短寿命または非放射性的の核種に変換することをいう。放射性毒性が強いあるいは放射性毒性が長期にわたる放射性核種に中性子等を照射し、核変換を行い、安定あるいは、半減期の短い核種に変えてしまうこと。



### IHX (中間熱交換器)

Intermediate Heat Exchanger。ナトリウムや溶融塩などで原子炉炉心を冷却する原子炉では、熱交換器の伝熱管に欠陥が生ずる場合などの事故対策のために、二段階熱交換方式が採用される場合がある。二段階の熱交換器が用いられている場合、原子炉側からみて初段の熱交換器を中間熱交換器という。例えば、ナトリウムで原子炉炉心を冷却する高速増殖原型炉「もんじゅ」では、原子炉炉心で加熱された一次側ナトリウムの熱エネルギーを、初段の熱交換器である中間熱交換器で二次側ナトリウムに伝え、そのナトリウムと三次側の水とを二段目の熱交換器である蒸気発生器で熱交換させることで、発電用蒸気を得る二段階熱交換方式が採られている。したがって、万一蒸気発生器伝熱管に欠陥が生じナトリウムと水との反応が起こっても炉心にまで影響を及ぼすことの無いようになっている。

### LLFP (長半減期核分裂生成物)

Long-Lived Fission Product。核分裂によってできた核種、またはそのような核種から放射性の崩壊によってできた核種のうちで半減期の長いものをいう。主要なものとして、よう素-129 (半減期 1570 年)、パラジウム-107 (半減期 650 万年)、セシウム-135 (半減期 230 万年)、ジルコニウム-93 (半減期 153 万年)、テクネチウム-99 (半減期 21 万 1 千年)、すず-126 (半減期 10 万年)、セレン-79 (半減期 6 万 5 千年) 等がある。LLFP の多くは燃料再処理工程で、高レベル放射性廃棄物の放射線と崩壊熱の発生の主要な原因となる。

### MA (マイナーアクチニド)

Minor Actinide。周期律表において原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムに至る 15 の元素を総称してアクチニド元素という。原子番号 90、91、92 のトリウム、プロトアクチニウム、ウランは天然に存在するアクチニドである。93 のネプツニウム以降は人工元素であり、例えば原子炉内で核燃料物質が中性子捕獲反応と $\beta$ 壊変を繰り返すことによって生成する。したがって原子炉の使用済み燃料のなかには、原子番号 94 のプルトニウムとともに微量の他のアクチニドが含まれている。一般に長寿命の放射能を持ち、 $\alpha$ 壊変を行うが、重い元素では自発核分裂も行う。アクチニドの用途としては原子力分野が多く、核的性質が利用されるので、元素としての特性よりは、個々の同位体の性質が重要視される。使用済み燃料中でウラン、プルトニウムに比べ存在量の少ないアメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)およびネプツニウム(Np)をマイナーアクチニドと称する。

## **MHD 発電（電磁流体発電）**

Magneto Hydrodynamics。電気伝導性のある流体が磁場中を流れると「ファラデーの電磁誘導の法則（右手の法則）」に従い誘導電流が発生する。この現象を用いて、電気を取り出す発電方式を言い、直接発電の1方式である。ナトリウムは電気伝導度が高いため、ナトリウム冷却 FBR では、この方式の発電を採用できる可能性がある。ナトリウムを単相のまま磁場中を流すと、大きな電磁力がかかり大きな流体駆動力が必要となるために、窒素ガス等の不活性ガスを混合させた液体金属二相流として、ガスの熱膨張による駆動力と電気伝導度の緩和効果の双方を利用した方式が有望と考えられている。

## **MOX 燃料（混合酸化物燃料）**

Mixed Oxide。ウラン酸化物とプルトニウム酸化物を混合して作った燃料である。新型転換炉「ふげん」、高速実験炉「常陽」、高速増殖原型炉「もんじゅ」で使用されている。軽水炉での使用も開始されようとしている。

## **MWd/t**

mega-watt-day-per-ton メガワットデイパートン。燃焼度の単位。MOX 燃料の単位重量当たりが発生した熱エネルギーの総量で表したもの。原子炉の運転において、炉心に装荷された核燃料が、原子炉から取り出されるまでに中性子と NERI 追加の反応により消費された割合を示すことにもなる。

## **NERI**

原子力研究イニシアティブ（Nuclear Energy Research Initiative : NERI）計画は、米国エネルギー省（DOE）が 1999 会計年度に開始した公募型研究プログラムで、初年度には 46 課題が採択された。分野別には、原子炉技術 20 件、先進燃料 8 件、核廃棄物処理技術 5 件、原子力基礎科学 13 件である。NERI 計画は原子力分野での国際競争力を確保し、21 世紀におけるエネルギー・環境問題の主導権を確保するための長期的かつ戦略的な意図を有する計画である。DOE はこれに加えて既存プラントの価格競争力を増すための技術開発を促進する目的で、2000 会計年度から原子力エネルギープラント最適化（Nuclear Energy Plant Optimization : NEPO）計画も開始した。さらに DOE は高い経済性と核拡散抵抗性等の特徴を有する小型原子炉の研究開発を Generation IV（第4世代）として、NERI 計画と一体的に推進する意向である。

## **NNC（英国原子力会社）**

NNC Limited。原子力メーカおよび英国の原子力公社（UKAEA）の出資によって設立され、原子力発電所の設計・建設、プロジェクト管理を担当してきた。

しかし、情勢の変化に伴い、GEC 社の子会社として発足、内外に原子力業務を提供するメーカーとして再出発している。1999 年 9 月、GEC 傘下から独立。

### **ODS 鋼（酸化物分散強化型ステンレス鋼）**

Oxide Dispersion Strengthened Stainless Steel。高燃焼度までの耐照射性に優れるが高温強度が不足しているフェライト系ステンレス鋼に微細な安定酸化物粒子を材料中に分散させ高温強度を改善することをねらった材料で、高燃焼度燃料被覆管として期待され開発中である。当面は、製造技術の確立、製造コスト低減の見通しが最重要課題となっている。

### **O/M 比**

酸化物燃料の化学組成は、おおまかにはウラン、プルトニウムなどの重金属元素 1 個に対して酸素 2 個をもつ化合物と考えられるが、正確には酸素 (Oxygen) 原子数と重金属 (Metal) 原子数の比（「O/M 比」という。）は 2 からわずかにずれる。このわずかな差が原子炉中の燃料のふるまいにいろいろ影響するので、O/M 比の調整は燃料の性能を確保するうえで特に重要な項目である。

### **PbBi（鉛ビスマス）**

鉛 (Pb) とビスマス (Bi) の合金であり、鉛単体に比べ、融点が約 330℃ から約 120℃ に低下し、FBR の冷却材として扱いやすくなる。このため、冷却材を液体状態に保つための予熱系（電気ヒータ等）については、融点が約 100℃ のナトリウムのために開発した技術を適用できる利点がある。しかしながら、ビスマスが中性子を吸収すると  $\alpha$  放射線のポロニウムが生成されることから注意が必要である。

### **PBMR**

Pebble Bed Modular Reactor。1990 年代半ばから南アフリカ共和国の国営電力会社 ESKOM を中心に、ドイツのジーメンス社の協力のもとに高温ガス炉ガスタービン発電プラントの計画が進められている。プラント概念は熱中性子炉であり、単基出力は小さいが、同一設計のシリーズ生産効果により、大型軽水炉に優る経済性を有すると評価されている。

### **PCR/V（プレストレストコンクリート原子炉容器）**

Pre-stressed Concrete Reactor Vessel。コンクリートにライナの内張りをした原子炉容器で、コンクリートの中に鋼製のより線のできた緊張材が桶のたがのように容器を締め付けている。大型化が容易とされている。

## **PE16**

英国で製造・販売されているニッケルの含有率が43%程度の高ニッケル鋼で、高温強度と耐照射性に優れる。英国では燃料被覆管として中燃焼度までの使用実績が蓄積されてきている。今後、高燃焼度までの性能を評価することが必要である。

## **PRISM**

Power Reactor Innovative Small Module。米国 DOE の革新型液体金属高速炉計画 (ALMR : Advanced Liquid Metal Reactor) に参加した GE 社より提案された中小型モジュール炉概念である。RVACS と呼ばれる原子炉容器外側のガードベッセルの自然通風冷却により異常時の炉心冷却を受動的に達成するシステムを有する概念である。

## **PSI**

Paul Scherrer Institute。スイスの国立研究所。素粒子物理学、生命科学、固体物理、材料科学、原子力および非原子力のエネルギー研究、エネルギー関連のエコロジー等の研究開発を行っている。

## **Pu 富化度**

MOX 燃料中のプルトニウムの濃度のこと。

## **PUREX 法再処理**

Plutonium Reduction Extraction。使用済核燃料の再処理工程で用いられる溶媒抽出法のひとつで、現在一般的に実用化されている方法である。有機溶媒はリン酸トリブチルをドデカンで希釈したものをを用いる。使用済み燃料の硝酸溶解液を、パルスカラム、ミキサセトラ、遠心抽出器などの溶媒抽出装置を用いて有機溶媒と接触することにより、まずウランとプルトニウムだけを有機相に抽出させ、核分裂生成物を水相に残す。次にこの有機相を硝酸ヒドロキシルアミンなどの還元剤を含む水相と接触することにより、プルトニウムだけを水相に逆抽出させ、ウランと分離する。

## **RIAR**

Research Institute of Atomic Reactors。原子炉科学研究所。ロシア、デミトロフグラードにある国立研究所。原子炉材料科学、原子炉安全性、同位元素、核燃料サイクル等の分野で研究開発を行っている。

### **RVACS (原子炉容器補助冷却系)**

Reactor Vessel Auxiliary Cooling System あるいは Reactor Vessel Air Cooling System の略称。FBR の崩壊熱除去系の一種。原子炉容器外壁を大気 の自然対流で冷却する方式であり、小型～中型炉の設計で多く採用されている受動的システムである。他の崩壊熱除去系では、2次ナトリウム冷却系が必要となるが、RVACS では、容器の外表面を直接空気冷却するために、2次系を不要とでき、設備を簡素化することができる利点がある。

### **SCFBR (超臨界圧軽水冷却 FBR)**

Supercritical Pressure Light Water Fast Breeder Reactor。SCFBR は、超臨界圧水を冷却材とし、現在の火力ボイラの主流である貫流型直接サイクルを用いることにより熱効率を高めた概念である。

### **SETFICS**

Solvent Extraction for Trivalent-elements Intra-group separation in CMPO-complexant System。使用済燃料の硝酸溶解液からウランやプルトニウム等を回収した後の高酸性廃液からアメリシウム (Am) やキュリウム (Cm) を回収するために、核燃料サイクル開発機構が開発した溶媒抽出法ベースの MA 回収システム。廃液から Am、Cm を回収し FP を取除くプロセス (一部のランタニド元素は Am、Cm に随伴) と、その中間製品から前プロセスで使われる硝酸塩等の試薬を取除くプロセスで構成され、最終製品は一部のランタニド元素を含む Am、Cm である。後者のプロセスの抽出溶媒には、CMPO/TBP 混合溶媒を用いる。

### **SG (蒸気発生器)**

Steam Generator。タービンを駆動するための蒸気を発生させるための熱交換器。軽水炉の PWR では、原子炉 1 次冷却材と水蒸気側で熱交換させているが、ナトリウム冷却 FBR では、放射化されていない 2 次冷却材ナトリウムと、水・蒸気側で熱交換させている。

### **S-PRISM**

Super-Power Reactor Innovative Small Module。GE 社の約 400MWe タンク型モジュール炉で、モジュール 2 基で 1 つの発電ユニットとし、モジュール 6 基で 1 つの発電所とする。1989 年に革新型液体金属高速炉計画 (ALMR : Advanced Liquid Metal Reactor) に応募された概念をスケールアップする等改良したもので、受動的な安全性、新燃料交換方式などの新概念を盛り込み、小型化とモジュール効果等を活用して経済性向上を目指した概念。(「PRISM」参照)

### **SVBR (Svinets Vismout-Bystryi Reactor : 鉛ビスマス高速炉)**

ロシア IPPE (Institute of Physics & Power Engineering) より提案された小型のモジュールタイプ鉛ビスマス冷却炉概念。原潜用として開発されたもの。

### **TRU (超ウラン元素)**

TRansUranium。原子番号が 92 (ウラン) を超える元素をいい、アクチノイド元素に属する。いずれも人工の放射性核種であり、現在までに、ネプツニウム (Np, 93)、プルトニウム (Pu, 94)、アメリシウム (Am, 95)、キュリウム (Cm, 96)、バークリウム (Bk, 97)、カリホルニウム (Cf, 98)、アインスタイニウム (Es, 99)、フェルミウム (Fm, 100)、メンデレビウム (Md, 101)、ノーベリウム (No, 102)、ローレンシウム (Lr, 103)、および 105 番から 111 番元素まで存在が確認されている。超ウラン元素のほとんどが  $\alpha$  崩壊して  $\alpha$  線を放出する。

### **TRUEX 法**

Trans Uranium Extraction。中性の二座配位型有機リン化合物の CMPO と TBP (Tri-n-Buthyl Phosphate) との混合溶媒を用いる、TRU 分離のための新しい溶媒抽出法。1980 年代にアルゴンヌ研究所 (ANL) で開発され、1990 年代に入り旧動燃で高レベル廃液の TRU 分離法としての研究を開始した。アメリカ、日本以外でもイタリア、インド、ロシア等で研究が実施されている。MA 核種に対する抽出能が強力で被抽出液中の硝酸を希釈する必要がなく、また共通の抽出剤 (TBP) を使用するので、既往 PUREX 法との取り合いが極めて良い。また既往の抽出技術 (抽出器、移送、計測制御等) も使えるなど、多くの利点がある。

### **UIS (炉心上部機構)**

Upper Internal Structure。FBR の原子炉容器の回転プラグから炉心上部に吊り下げられ、遮蔽部、胴、整流板、熱電対支持物などで構成される構造体。制御棒の所定位置への支持や燃料集合体出口での冷却材温度検出などの機能を持つ。

あ

### **遠心抽出器**

高速回転場を利用して水相と有機相を強制混合し、ついで遠心力を利用して比重の大きい水相を回転筒の外周部に、比重の小さい有機相を回転軸の近くに

集め相分離する装置。小型化が可能、接触時間が短く溶媒の放射線損傷を低減できる、等の特長から、次世代の再処理用抽出装置として、各国で技術開発が進められている。

か

### 外部ゲル化法

硝酸ウラニルおよび硝酸プルトニウム混液をアンモニアガス雰囲気下、アンモニア水中に滴下し、液滴表面からゲル化反応を生じせしめ酸化物顆粒燃料を製造する方法。増粘剤として PVA およびその分解保護剤のアルコール (THFA) を添加する必要がある。核燃料サイクル開発機構などで開発中。硝酸アンモニウムなどの廃棄物の発生が難点である。

核分裂生成物 ⇒ 「FP」参照

### 共晶反応

1つの液相から同時に2つの固相を生じる反応。また、その反対に2つの固相が同時に熔融して液相を形成すること。金属燃料では、燃料合金中のウランまたはプルトニウムと被覆管中の鉄等が共晶反応を起こし、それぞれの融点より低い温度で液相を生じる可能性があるため問題とされる。

### 共除染

再処理工程において、プルトニウムとウランが混合されている状態 (共存している状態) で FP 等の大部分を分離すること。

### 均質炉心

FBR の炉心型式としては、均質炉心と非均質炉心とがある。均質炉心では炉心燃料が MOX のみで単純に構成され、通常炉心の周囲にウラン酸化物で作られたブランケット燃料が置かれる。炉心領域にブランケット燃料を混在させたのが非均質炉心である。「もんじゅ」は均質炉心である。

### 金属電解法

使用済燃料を熔融塩中に溶解し、酸化・還元電位差を利用して金属 U を固体陰極に析出させる。その後、熔融カドミウム陰極でプルトニウムおよび MA の析出生成自由エネルギーがウランと近接することを利用して金属プルトニウム・ウ

ラン・MA の共析出を行い、アクチニドを回収する乾式再処理法。基本プロセスは米国 ANL が開発した。

### 金属燃料

金属ウランや金属プルトニウムにジルコニウム (Zr) 等を添加して合金とした原子炉用の燃料。

### ゲル

コロイド粒子または高分子溶質が相互作用のために、独立した運動性を失って集合した構造をもち、固化した状態をゲルという。

### 径方向非均質炉心

FBR の炉心型式としては、均質炉心と非均質炉心とがある。均質炉心では炉心燃料の周囲にブランケット燃料が置かれる。炉心領域内にブランケット燃料を混在させたのが非均質炉心である。その中で、ブランケット燃料を半径方向に入れたものを、特に径方向非均質炉心と呼んでいる。非均質炉心は、ポイド反応度の低減、増殖率の向上の点で効果があるとされている。

### 高レベル放射性廃棄物

再処理の過程において使用済燃料から分離されるストロンチウム 90、セシウム 137 に代表される核分裂生成物とアメリシウム 241、ネプツニウム 237 に代表されるアクチニド (原子番号 89 番以上の元素。放射性元素である。) を含む高レベル放射性廃液、またはそれをガラス固化したもの。

### 混合酸化物燃料 ⇒ 「MOX 燃料」 参照

さ

### 再処理

原子炉で使用した燃料 (使用済燃料) の中には、燃え残りのウランや新しくできたプルトニウム等燃料として再び利用できるものと、ウラン等が分裂してできた核分裂生成物が含まれている。使用済燃料を化学的プロセスにより、再び燃料として利用できるウラン、プルトニウム等をそれ以外の物質 (高レベル放射性廃棄物) に分離する作業のこと。



## 再臨界回避

FBR の安全評価で考えられてきた仮想的な炉心損傷時には、炉心冷却材の大規模な沸騰によって反応度が増加して即発臨界を超過した場合、あるいは溶融した炉心燃料が大規模に集中して再臨界を超過した場合、溶融燃料の急激な温度上昇によって、燃料被覆管や集合体管等のスチールが蒸発・膨張して、炉心内で機械的なエネルギーを放出する可能性が考えられる。このような再臨界が発生することがないように、炉心燃料設計の段階から予め考慮し、即発臨界を超過しないこと、および、溶融燃料が集中しないよう、溶融初期に炉心外に流出するような工夫を講じることを再臨界回避方策という。

## 酸化物電解法

使用済みの酸化物燃料を溶融塩 ( $\text{LiCl}-\text{CsCl}$  等) 中で塩素ガスを吹き込みながら溶解 (塩素化溶解) し、酸化・還元電位の差を利用して、アクチニドを酸化物 (ウラン酸化物、プルトニウム酸化物) として共析出する乾式再処理法。基本プロセスはロシア RIAR が開発した。

## 酸化物分散強化型フェライト鋼 ⇒ 「ODS 鋼」参照

## 酸素ゲッター

MOX 燃料はウラン酸化物とプルトニウム酸化物 ( $(\text{Pu},\text{U})\text{O}_2$ ) で構成されているが、MOX 燃料の酸素比率を調節するために添加される成分で、金属ウラン等が用いられる。MOX 燃料は、燃焼初期のステンレス鋼被覆管との共存性は良好であるが、照射の進行に従って単体酸素濃度の増加 (核分裂に伴い、ウランやプルトニウムと結合していた酸素が解放される) と FP の蓄積により被覆管の腐食が起りやすくなる。このため、単体酸素濃度の上昇を抑制するため、金属ウラン等の酸素ゲッターを燃料に添加する。

## システム倍増時間

核燃料の増殖の効果を考える指標の一つ。燃料の増殖による核分裂性核種の増加量が、原子炉に装荷される核分裂性核種と、原子炉の外に存在するもの、すなわち、貯蔵中、再処理中、輸送中、加工中の核分裂性核種の合計量に相当する (システム全体の核分裂性核種が倍増する) のに必要な時間。

## 実効増倍率

炉心全体で単位時間に発生する中性子数 (核分裂とともに発生するもの等) と、単位時間に消費される中性子数 (核分裂に使われるもの、吸収・漏れにより失われるもの) の比。実効増倍率が 1 のとき、炉心全体の中性子の増減がない臨

界状態となる。

### 受動安全性

一般に原子炉システムは、事故等に備えて事象を安全に終息させる機能を備えている。この機能を働かせる際に、非常用ディーゼル発電機等の駆動源が必要なポンプ、ファン等の動的機器や制御系を用いる場合（工学的安全設備）と、重力、放熱等の自然の物理現象を活用する場合がある。後者のように外部からの動力や駆動信号などを必要とせず、原子炉で考えられる異常な物理現象に基づいて自然に安全を確保できることを受動安全性という。

### ショートプロセス法

酸化物燃料製造法として、旧動燃より開発している簡素化燃料製造法。転換工程でのプルトニウムの富化度調整、高流動性の MOX 粉への転換を行うほか、ペレット工程では原料秤量、均一化混合および造粒等を削除する。製品スペックアウトは乾式回収せず、転換工程で湿式回収を図る。これらの合理化により、従来工程に比べ大幅な工程数の削減が図られる。

### 蒸気発生器 ⇒ 「SG」参照

### 晶析

溶液を過飽和にして溶質を結晶として取り出す操作をいう。温度変化により溶解度変化の少ないものは蒸発濃縮により過飽和状態を作り出す。温度効果により溶解度が急激に減少するものは冷却法を用いる。溶解液からのウラン（硝酸ウラニル）の晶析は後者によるが、旧西ドイツ・カールスルーエ原子力研究所でのウラン精製への適用例を除き、世界的にも実施例がない。今後、ウラニル晶析条件の把握を始め、プルトニウムおよび核分裂生成物との分離性の確認が本法の成立性の判断に必要となる。

### 除染係数 ⇒ 「DF」参照

### 振動充填燃料

粉体燃料（球状、非球状）を振動下で充填することにより燃料ピンに加工する方法。現行の機械混合法によるペレット燃料製造と比較してプロセスが簡略化でき、粒子の取り扱いも容易なことから、遠隔技術による製造工程の実現が期待される。また自動化が容易とみられることから低除染の燃料製造法としての展開も考えられる。粉体燃料の製造には、硝酸プルトニウムおよび硝酸ウラニルの混液を出発液として、試薬中に液滴を滴下してゲル化反応により造粒し、洗浄およ

び乾燥工程を経て仮焼・還元後、焼結する湿式法、電析あるいは沈殿により製造したウラン酸化物 ( $\text{UO}_2$ )、プルトニウム酸化物 ( $\text{PuO}_2$ ) を粉碎、分級する乾式法の二法がある。

### スエリング (Swelling)

原子炉内で使用されている核燃料や被覆管等の炉心材料に発生する膨れ (体積増加) のこと。核燃料では、燃焼度の増大とともに、核分裂生成物が増加するので、固体状核分裂生成物による体積増加やガス状核分裂生成物の気泡による体積増加を生ずる。一方、炉心材料では中性子照射に伴う材料結晶格子の照射欠陥の発生、集積により、体積増加を生ずる。この際、燃料中で原子空孔が集まってポイドを形成するので、この体積増加とはポイドスエリングと呼ばれている。これらによる燃料の膨張を全体としてスエリングという。スエリングは、おおよそ固形分によるものが3分の1程度、気体状物質によるものが3分の2程度といわれている。

### スフェアパック燃料

MOX 等の小さな球状の粒子燃料を被覆管に充填した燃料ピンをスフェアパック燃料という。この際、充填密度を上げるため被覆管に振動を与えながら2~3種類 (数  $10\mu\text{m}$ ~ $1000\mu\text{m}$ ) の径の粒子を組み合わせで充填する。スフェアパック燃料製造ではペレット燃料製造工程で必要な微粉末取扱、ペレット成型等の工程が不要であり、工程の簡素化の可能性があり燃料製造コスト低減が期待できる。また遠隔製造に優れた燃料製造工程とできる可能性があり、MA、FP を同伴した燃料製造への適用が期待できる。

### 先進湿式法

軽水炉燃料の再処理法として実績のある PUREX 法をベースに、これを大幅に見直した「簡素化溶媒抽出法」 (抽出溶媒に TBP を用いるが、プルトニウムをウランおよびネプツニウムと分離せず、低除染で回収する) と「晶析法」を組合せ、さらに TRU 回収機能を付加した先進的な湿式再処理方法。

### 増殖比 (Breeding Ratio)

原子炉の運転に伴いウラン 235 やプルトニウム 239 などの核分裂性物質が核分裂等で減少する割合に対してウラン 238、プルトニウム 240 などから新たに中性子を吸収して核分裂性物質 (プルトニウム 239、プルトニウム 241 など) を生成する割合の比率をいう。特にその比が 1.0 をこえる場合を増殖比、1.0 以下の場合を転換比と呼ぶ。

た

## タンク型

tank type。FBR の炉型は原子炉冷却材等の循環系からみてループ型とタンク型に大別される。タンク型 FBR は、一次系循環ポンプや中間熱交換器を原子炉容器内に収容するので機器配置のコンパクト化を図りやすいが、大きな原子炉容器を必要とするため、その耐震性を確保することが難しいと言われている。

## 窒化物燃料

ウランの場合は UN、プルトニウムの場合は PuN である窒素化合物の燃料。熱伝導性が金属燃料並に良好であり、融点が高い特徴を有する。

## 窒素 15

天然の窒素はほとんどが窒素 14 からなるが、この窒素 14 が中性子を捕獲すると陽子を放出し長寿命核種である炭素 14 が生成され、環境に悪影響を及ぼすおそれがある。このため、窒化物燃料を使う場合には、天然の窒素に 0.37% 程度存在する窒素 15 を 99% 程度に濃縮して使用する必要がある。

## 窒素解離

窒化物燃料は、炉心溶融等で高温になると、燃料が溶融・分解して窒素ガスを放出する。これを窒素解離という。

中間熱交換器 ⇒ 「INX」参照

超ウラン元素 ⇒ 「TRU」参照

長半減期核分裂生成物、長半減期 FP ⇒ 「LLFP」参照

直接炉心冷却系 ⇒ 「DRACS」参照

## 低除染

再処理の目的は使用済燃料中の FP を除去し、所定の純度の核物質(ウラン、プルトニウム)を回収することである。再処理前後の核物質中の FP の割合の比を除染係数といい、従来の軽水炉燃料再処理では  $10^6 \sim 10^8$  が要求される。これに対し、FBR では中性子経済が良いため、軽水炉ほどの除染は必要としない。現在までの評価では、5~4000 程度を低除染の指標としている。

## 低除染燃料

FP の除染係数の低い再処理製品を原料として製造される燃料。FBR の燃料は軽水炉に比べて不純物の許容量を高くとることができるため、再処理工程での FP の除染係数を低くして再処理工程を簡素化することが可能である。

## 転動造粒法

粉末を原料として顆粒状の粒子を作る造粒法の一つ。容器の回転あるいは振動運動により粉末原料を転がし、水分により付着凝集させて凝集体を生成する。さらに単一粒子をその表面に付着させて成長させるか、あるいは小さい凝集体をいくつか会合させて大きい凝集体にするか、いずれかの過程を経て球形に近い粒形を持つ粒子を造粒する方法。

## トップエントリ方式

ループ型の一つであり、実証炉の設計で採用された。ループ型の配管系を短縮し、原子炉建物の縮小によるコストダウンを図るため、原子炉容器、中間熱交換器、一次主冷却系ポンプをそれぞれ逆 U 字型の配管で連結する方式。

## ドップラ反応度

核燃料のドップラ効果を量的に表すもので、燃料の温度が上昇したときのドップラー効果による反応度変化を表す。原子炉の出力が上昇して燃料温度が上昇すると、燃料中のウラン 238 の中性子吸収が増加し、反応度を減少させ、出力を下げる働き（ドップラ効果）をするので、炉心および安全設計上、重要な現象である。

な

## 内部ゲル化法

硝酸ウラニルおよび硝酸プルトニウム混液に、アンモニアドナーの 6 メチル 4 アミン (( $\text{CH}_2$ )<sub>6</sub> $\text{N}_4$ ) および錯化剤の尿素 ( $\text{H}_2\text{NCONH}_2$ ) を添加し調整液とする。その調整液を 114℃ - 120℃ で加温したシリコンオイル中に滴下し、液滴内部よりゲル化反応を生じせしめ酸化物顆粒燃料を製造する方法。廃棄物のシリコンオイルの処理が課題。スイス PSI で開発中。

鉛ビスマス ⇒ 「PbBi」参照

## 熱電素子発電方式

熱エネルギーを電気エネルギーへ直接変換する方式のひとつである。ゼーベック効果を原理とし、機械的駆動部を用いず半導体などの素子を用いて発電する方式を熱電素子発電と呼ぶ。熱電素子には金属系熱電素子と半導体熱電素子がある。

### ゼーベック効果

Seebeck effect. 1821年 Seebeck によって発見された熱電気効果の一つである。2種類の金属の両端をおのおの接続して閉回路をつくる。2つの接合点の間に温度差を与えるとこの回路内に電気が流れ、回路を接合点以外の点で切断すると切断した両端に電位差が生じる現象をいう。

燃料 - 被覆材機械的相互作用 ⇒ 「FCMI」参照

燃料 - 冷却材熱的相互作用 ⇒ 「FCI」参照

は

富化度 ⇒ 「Pu 富化度」参照

## フッ化物揮発法

使用済燃料をフッ化物に変換し、その蒸気圧などの物性、あるいは吸着性など化学的性質の差を利用して分離する再処理方式である。フッ化反応は高温下のアルミナ流動床等で行われるが、工学的には高放射性粉流体の取り扱い、遠隔保守の技術、プロセス化学的にはプルトニウム、MA の挙動等が新たな課題である。ロシア、米国 ANL、原研等で開発実績がある。

## ブランケット

核分裂性物質に転換する目的で、炉心内もしくはその周囲に配置される親物質をいう。プルトニウムを利用する FBR では、親物質であるウラン 238 をブランケット材とし、燃料ピンの上下端部に配置(軸方向ブランケット)する場合や、燃料集合体の外周部にブランケット材だけで集合体(ブランケット集合体)を作って配置(径方向ブランケット)する設計例が多い。ブランケット集合体を、炉心内部に、燃料集合体と交互に配置した炉心を、径方向非均質炉心という。

## ペレット燃料

ペレット(Pellet)は一般には、球状または円柱状の物体を指す。FBR では

MOX 粉末を成型し焼結してセラミックス質にした円柱状の燃料ペレットをいう。ペレットを積み重ねて燃料被覆管に挿入し燃料棒（ピン）とする。

### ポイド反応度

固体燃料と冷却材に液体を用いる原子炉の炉心内において、冷却材の沸騰あるいは気泡通過等の原因によるポイド（気泡）による炉心反応度に及ぼす効果。ナトリウムを冷却材に用いる FBR では、冷却材の沸点が炉心内では 900℃以上となり、安全評価で想定される事故事象に対しては冷却材が沸騰することはないように設計される。仮想的な炉心損傷を仮定した場合には、冷却材沸騰による正の反応度効果が炉心損傷の事象推移に影響を与えることが、炉心崩壊事故に関する研究から示されており、再臨界を回避するためには正のポイド反応度の大きさを制限する必要がある。（「CDA」、「再臨界回避」参照）

### 保障措置

原子力平和のための核物質ならびに設備、資材および情報が核兵器等へ転用ないしは利用されていないことを保証するために取られる措置。

### ボンド材

被覆管内での燃料のスエリング等による燃料と被覆管の機械的相互作用をさけるためには、被覆管と燃料とのギャップを拡大することが考えられるが、燃料と被覆管との熱伝達が悪くなることから、これを補うためギャップに金属等の熱伝導の良い物質を充填する方法が考えられる。このように燃料と被覆管の間の熱伝達性能を強めるために充填される材料をボンド材という。熱伝導率と、燃料および被覆管材料との共存性を考慮し、酸化物燃料ではヘリウムガス、金属燃料や窒化物燃料ではナトリウムが用いられる場合が多い。

ま

マイナーアクチニド ⇒ 「MA」参照

や

### 溶媒抽出法

完全には混ざり合わない二種類の液体間で、一方の液体中の特定の成分を他方の液体中に移動させるプロセスのこと。液-液抽出ともいう。核燃料再処理法において現在主流となっている PUREX 法では溶媒抽出法が用いられている。

PUREX 法では、燃料を溶解した硝酸水溶液から、ドデカン等で希釈した TBP(リン酸トリブチル：抽出剤)中にウラン、プルトニウムを抽出する。高レベル廃液の群分離工程にもこの溶媒抽出法の応用が研究されており高レベル廃液からのマイナーアクチノイドの分離回収、また、マイナーアクチノイドと希土類元素との分離のために、様々な溶媒抽出系が試されている。

ら

## ランタニド

周期律表において原子番号 57 のランタンから 71 のルテチウムまでの 15 の元素を総称してランタニド元素という。アクチニド元素およびランタニド元素は最外殻電子構造が近似しており、溶液化学的にも両者の性質にほとんど差異がないので相互分離は非常に難しい。高レベル廃液の核種分離プロセスでは、TRU 抽出の際に共抽出されるランタニド元素の分離が最重要課題の一つである。

## ループ型

loop type。FBR の炉型は原子炉冷却材等の循環系からみてループ型とタンク型に大別される。ループ型 FBR は、原子炉容器内に炉心、反射体等のみを収容し、一次系循環ポンプや中間熱交換器を原子炉容器内に入れずそれらを配管で結合する構造である。ループ型は機器の独立性が高く、保守・補修時の接近性に優れているが、冷却系配管を収納する空間が必要であり、これをコンパクトに収めることが課題となっている。

炉心上部機構 ⇒ 「UIS」参照

## 炉心燃料体積比

燃料集合体断面に対する燃料断面の割合をいう。

炉心崩壊事故 ⇒ 「CDA」参照

## ロンドンガイドライン

核不拡散への取り組みにおいては、核兵器開発に使用される可能性のある資機材・技術の輸出規制を行うことも重要である。

1974 年のインドの核実験を契機に、核不拡散の強化に向けて、我が国を含む主要原子力供給国の協議が行われ、非核兵器国への原子力資機材・技術の輸出規制枠組みとして、1977 年、いわゆるロンドンガイドラインが合意された。同ガ



イドラインでは、対象貨物・技術の輸出相手国が I A E A のフルスコープ保障措置の適用を受け入れていることなどを輸出条件としている。

さらに、1992 年には、湾岸戦争後に発覚したイラクの核開発を契機として、原子力専用品のみならず原子力関連汎用品を規制対象とする、新たな輸出規制枠組みのロンドンガイドライン・パート 2 が合意された。

## 参 考 資 料 5

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究  
(説明用OHP集)

## 参考資料目次

表紙	1
説明内容	2
研究課題の概要	3
実用化戦略調査研究の目的	4
第1期の検討評価の進め方	5
実用化戦略調査研究における協力体制	6
実用化戦略調査研究の実施体制	7
技術検討WGおよび技術連絡会の体制	8
技術検討会の構成	9
メーカー提案、アイデア公募および国際協力の現状	10
第1期の中間成果と2000年度計画	11
FBRサイクルの開発目標	12
FBRサイクルの基本的な考え方	13
FBRサイクルシステムの主な設計目標	14
FBRサイクル技術の評価	15
評価指標の検討例	16
第1期におけるFBRシステムの検討	17
燃料形態の絞り込みの考え方	18
MOX炉心性能限界の検討(3800MW t、18ヶ月サイクル)	19
炉心燃料 第1期の中間成果と2000年度計画	20
プラントシステムの検討	21
ナトリウム冷却炉の候補と検討の進め方	22
ナトリウム大型炉の主なプラント概念図	23
建設費20万円/kWeに向けてのコストダウン方策	24
ナトリウム冷却炉における炉心ならびにシステムの改善方策	25
軽水炉に比肩する経済性を目指すナトリウム炉の建設費低減方策	26
さらなるコストダウン(1)方策を実現する革新技術の具体的効果	27
Na-水反応の排除(不活性中間媒体)による2次系簡素化アプローチ	28
Na-水反応の排除(新発電方式)による2次系簡素化アプローチ	29
重金属冷却炉の候補と検討の進め方	30
重金属炉のプラント概念	31
重金属炉の選定(出力/構造成立性の観点に基づく)	32

ガス冷却炉の候補と検討の進め方	33
ガス冷却炉のプラント概念	34
ガス冷却炉の開発課題について	35
水冷却炉の候補と検討の進め方	36
小型炉のニーズと開発目標	37
小型炉の検討候補と検討の進め方	38
プラントシステム 第1期の中間成果と2000年度計画	39
第1期における燃料サイクルシステムの検討	40
FBR燃料サイクルシステム検討の視点	41
先進湿式法のプロセスフロー	42
酸化物電解法プロセスフロー(酸化物燃料への適用例)	
[R I A R 開発プロセスとの比較]	43
金属電解法のプロセスフロー[ANL開発プロセスとの比較]	44
フッ化物揮発法のプロセスフロー[既存研究との比較]	45
簡素化プロセスのペレット製造工程[現状プロセスとの比較]	46
振動充填燃料製造システム(酸化物燃料への適用例)	47
射出成型法および遠心鑄造法による金属燃料鑄造	48
燃料サイクルシステムの検討評価の進め方	49
湿式および乾式システムの経済性試算結果	50
再処理 第1期の中間成果と2000年度計画	51
燃料製造 第1期の中間成果と2000年度計画	52
第1期の中間成果のまとめ	53
第2期の展開について	54
今回の第2期計画説明の位置付け	55
実用化戦略調査研究の第2期の目的	56
実用化戦略調査研究の第2期の展開	57
2001年度計画(炉心燃料)	58
第2期の展開(MOX燃料開発の主要なR&D)	59
2001年度計画(プラントシステム)	60
第2期の展開(ナトリウム冷却炉の主要なR&D)	61
第2期の展開(炉型に共通な要素技術開発)	62
第2期の展開(重金属冷却炉の主要なR&D)	63
第2期の展開(ガス冷却炉の主要なR&D)	64
第2期の展開(小型炉の主要なR&D)	65

2001 年度計画（再処理） .....	66
第 2 期の展開（湿式再処理法の主要な R & D） .....	67
第 2 期の展開（乾式再処理法の主要な R & D） .....	68
2001 年度計画（燃料製造） .....	70
第 2 期の展開（ペレット燃料製造法の主要な R & D） .....	71
第 2 期の展開（振動充填燃料製造法の主要な R & D） .....	72
第 2 期の展開（鑄造燃料製造法の主要な R & D） .....	73
第 2 期の展開（実用化戦略情報管理システムの開発） .....	74
実用化戦略調査研究第 2 期の実施体制 .....	75
国際協力 .....	76
利用する主要な国内施設・設備 .....	77
第 1 期および第 2 期の研究予算の年度展開 .....	78
他の研究開発課題評価テーマとの関係 .....	79
第 2 期の期待される成果と波及効果 .....	80
成果の公開・発表状況 .....	81
措置事項の実施状況 .....	82

# 課題名：高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

(中間評価)

2000年8月

核燃料サイクル開発機構

## 説明内容

- 研究課題の概要
- 第1期の検討評価の進め方
- 第1期中間成果と2000年度計画
  - ◆ 開発目標の設定と技術の評価
  - ◆ FBRシステムの検討
  - ◆ 燃料サイクルシステムの検討
- 第2期の展開について
  - ◆ 第2期計画の基本的な考え方
  - ◆ 2001年度の研究計画
- 措置事項の対応状況

## 研究課題の概要

### □ 本研究は、2段階で実施

第1期: 1999年度、2000年度の2年間

第2期: 2001年度から5年程度

### □ 現在、第1期の前半を終え、中間成果等を取りまとめたところ

### □ 中間評価を受ける範囲

◆ 第1期の中間成果と2000年度の計画

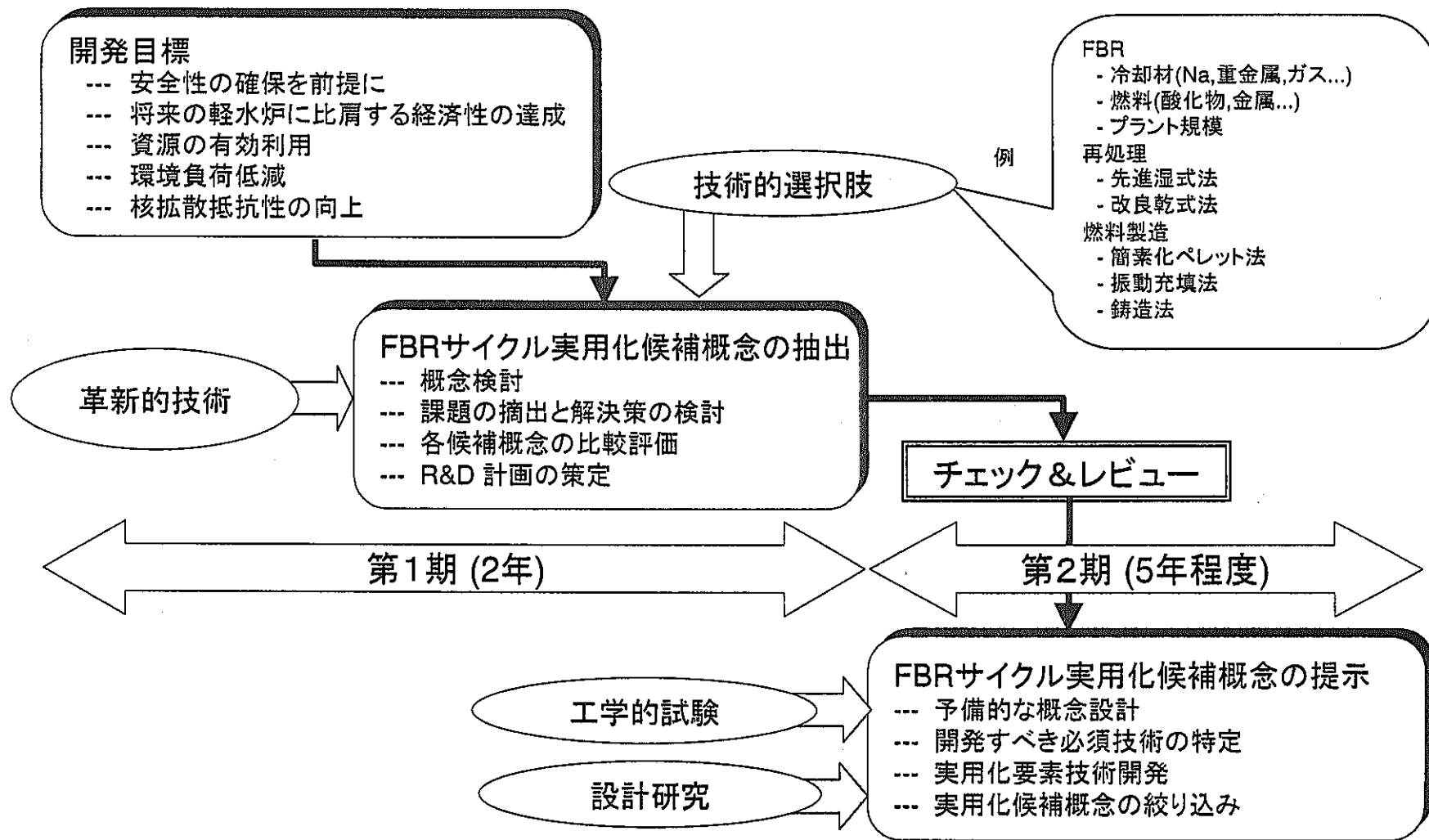
◆ 第2期の展開

◇ 第2期計画の基本的な考え方

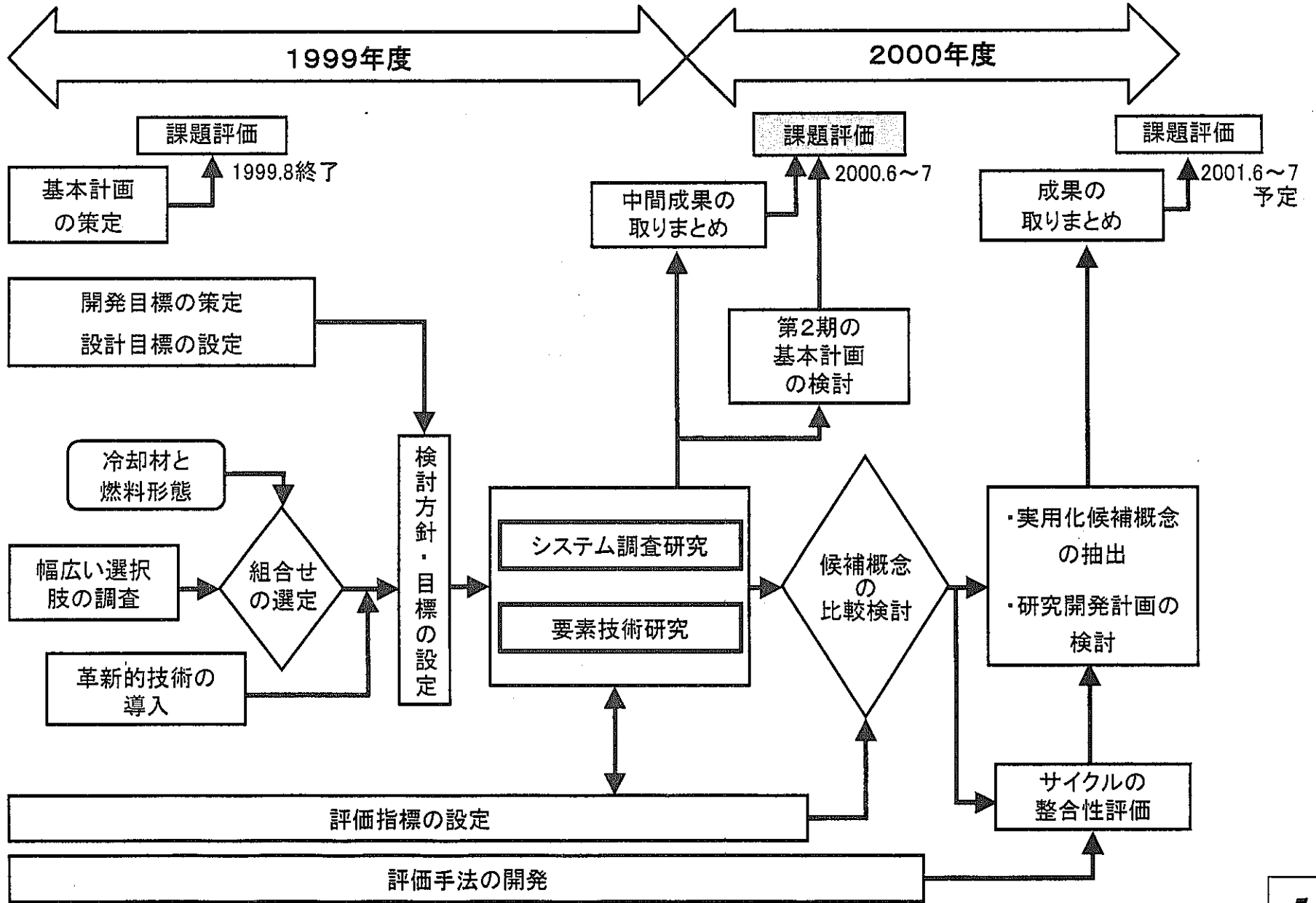
◇ 2001年度の研究計画



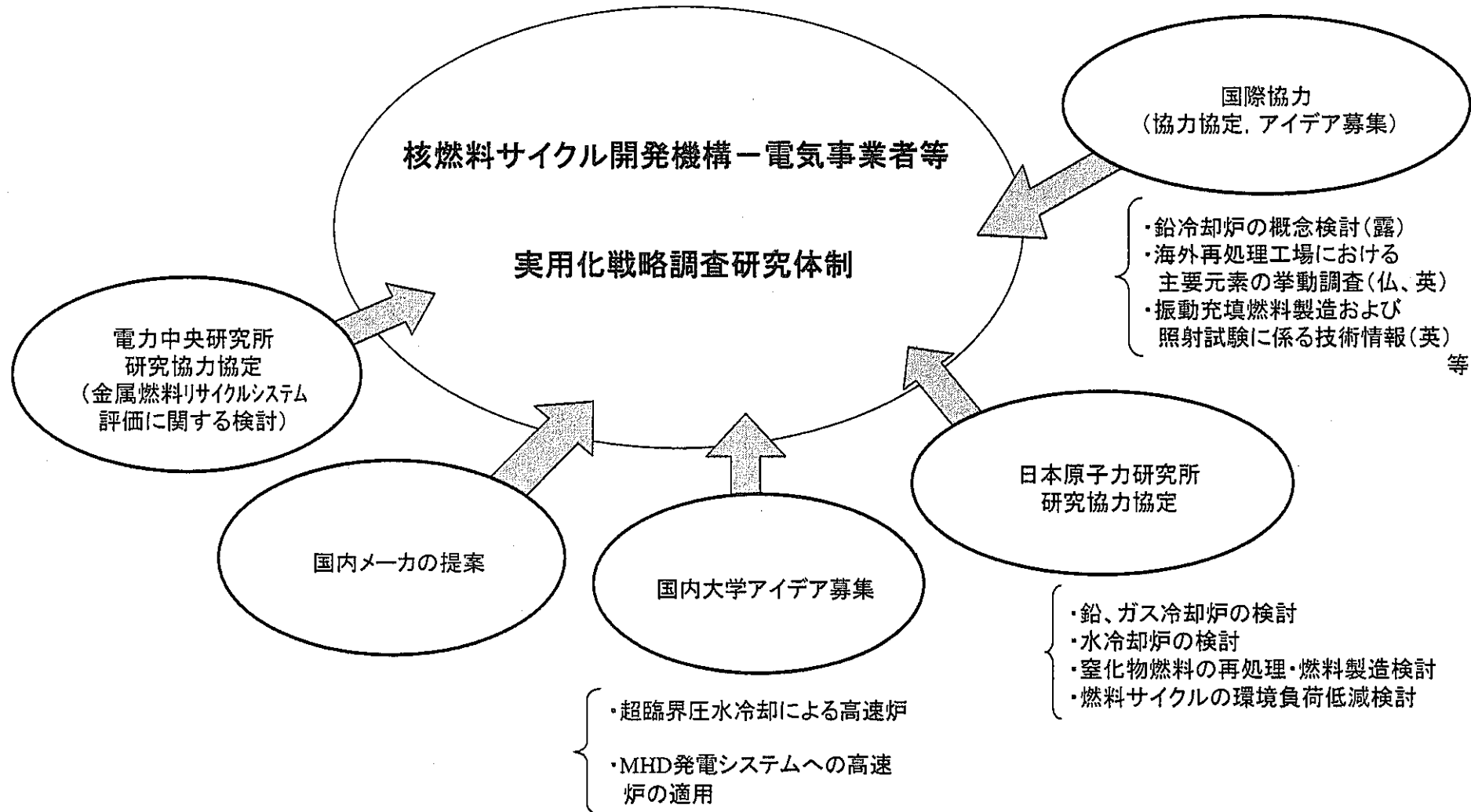
# 実用化戦略調査研究の目的



# 第1期の検討評価の進め方

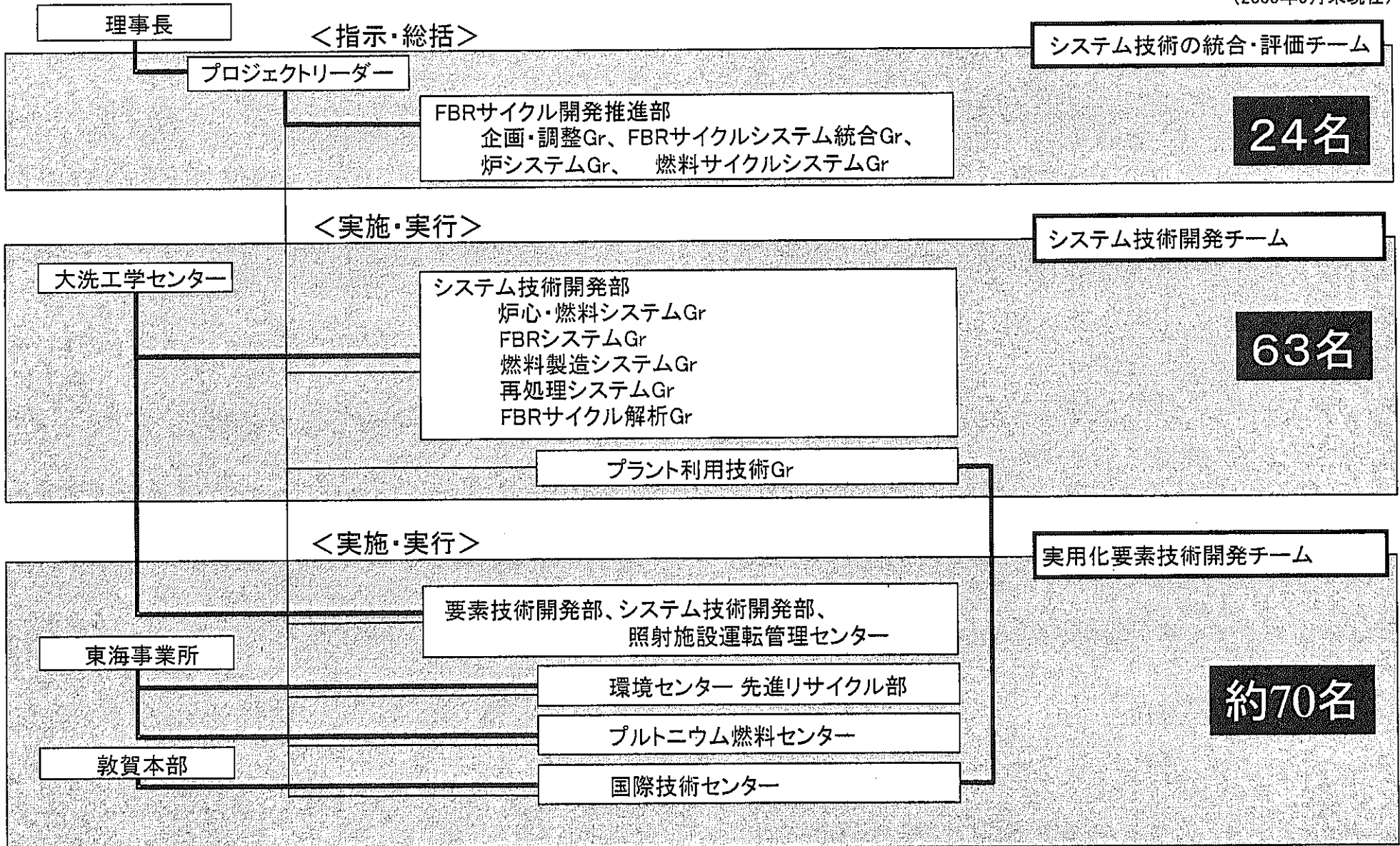


# 実用化戦略調査研究における協力体制



# 実用化戦略調査研究の実施体制

(2000年5月末現在)

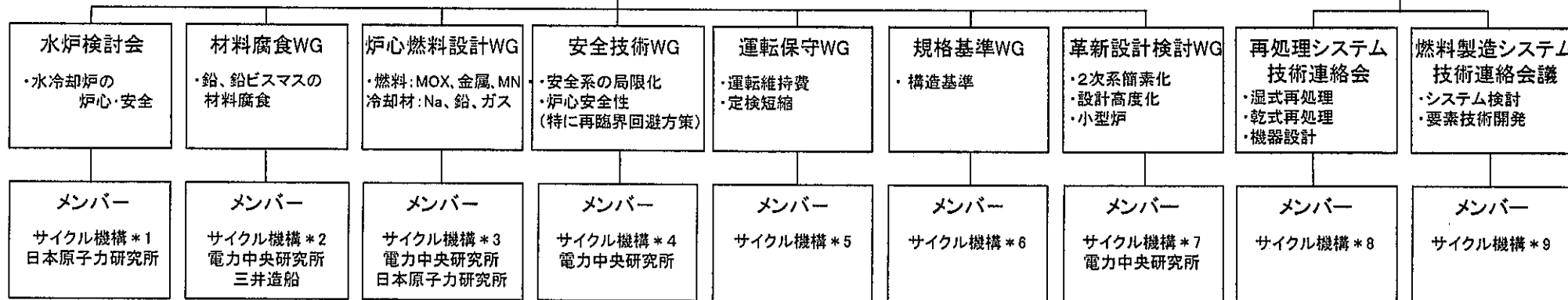


# 技術検討WGおよび技術連絡会の体制

技術検討WG／技術連絡会

FBRシステム

燃料サイクルシステム

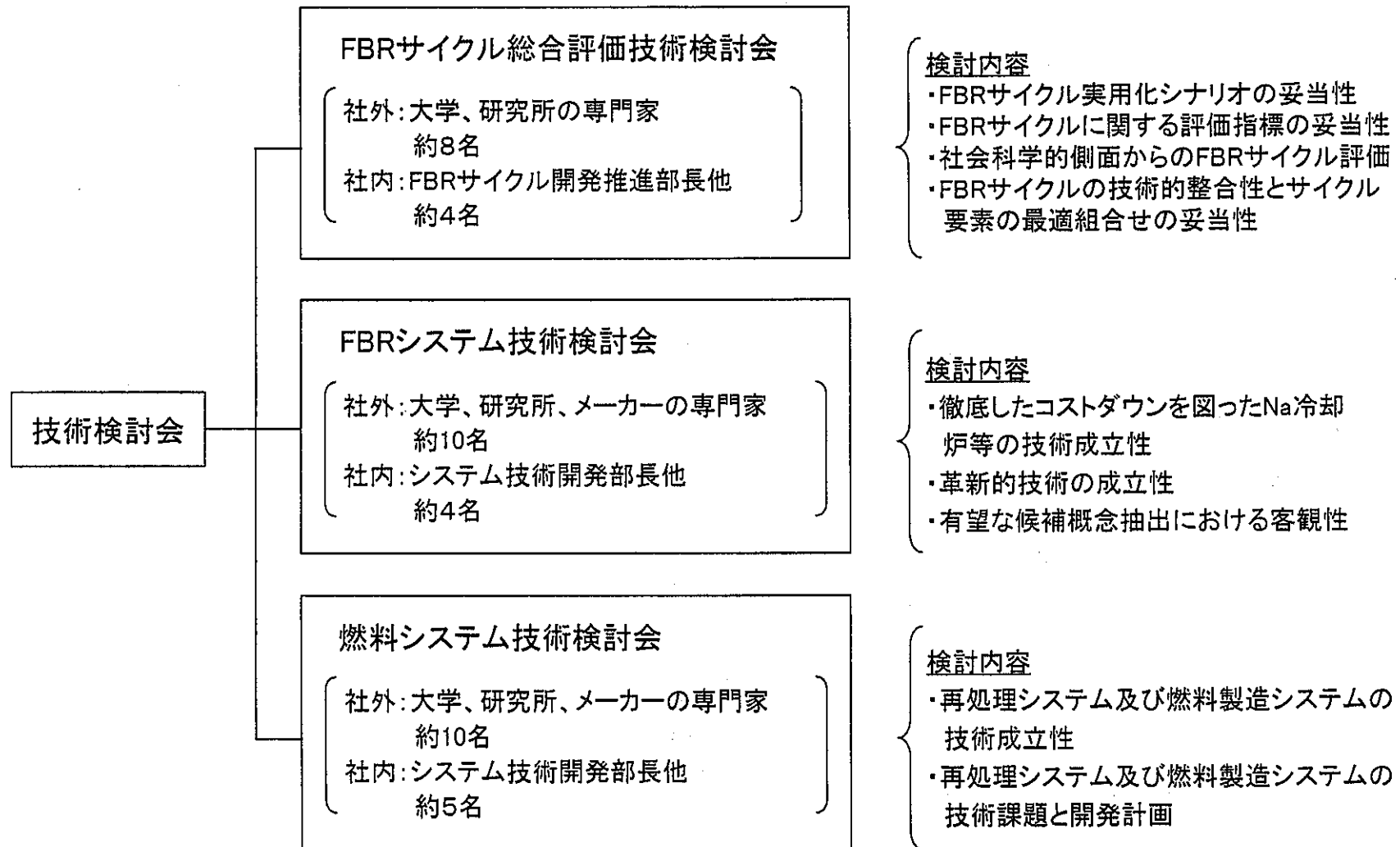


## 各WG／連絡会の核燃料サイクル開発機構のメンバー

- \* 1 大洗工学センター(システム技術開発部○)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 2 大洗工学センター(要素技術開発部○、システム技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 3 大洗工学センター(システム技術開発部○)、東海事業所(プルトニウム燃料センター)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 4 大洗工学センター(システム技術開発部○、要素技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 5 敦賀本部(国際技術センター○)、大洗工学センター(照射施設運転管理センター、システム技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 6 大洗工学センター(システム技術開発部○、要素技術開発部)、本社(FBRサイクル開発推進部)、敦賀本部(国際技術センター)
- \* 7 大洗工学センター(システム技術開発部○)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 8 大洗工学センター(システム技術開発部○)、東海事業所(先進リサイクル部)、本社(FBRサイクル開発推進部)
- \* 9 大洗工学センター(システム技術開発部○、照射施設運転管理センター)、東海事業所(先進リサイクル部、プルトニウム燃料センター)、本社(FBRサイクル開発推進部)

(注) ○印は主査

## 技術検討会の構成



## メーカー提案、アイデア公募および国際協力の現状

- メーカー提案による採用テーマ数(20件)
  - ◆ FBRシステム 15件
  - ◆ 燃料サイクルシステム(再処理・燃料製造) 5件
  
- アイデア公募により採用したテーマ数(応募総数71件、採用総数10件)
  - ◆ FBRシステム 応募 51件 採用 7件
  - ◆ 燃料サイクルシステム(再処理) 応募 14件 採用 2件
  - ◆ 同上 (燃料製造) 応募 6件 採用 1件
  
- 国際協力の現状(15件)
  - ◆ FBRシステム 3件
  - ◆ 燃料サイクルシステム(再処理、燃料製造) 12件

## 第1期の中間成果と2000年度計画

- ◆ 開発目標の設定と技術の評価
- ◆ FBRシステムの検討
- ◆ 燃料サイクルシステムの検討



## FBRサイクルの開発目標

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

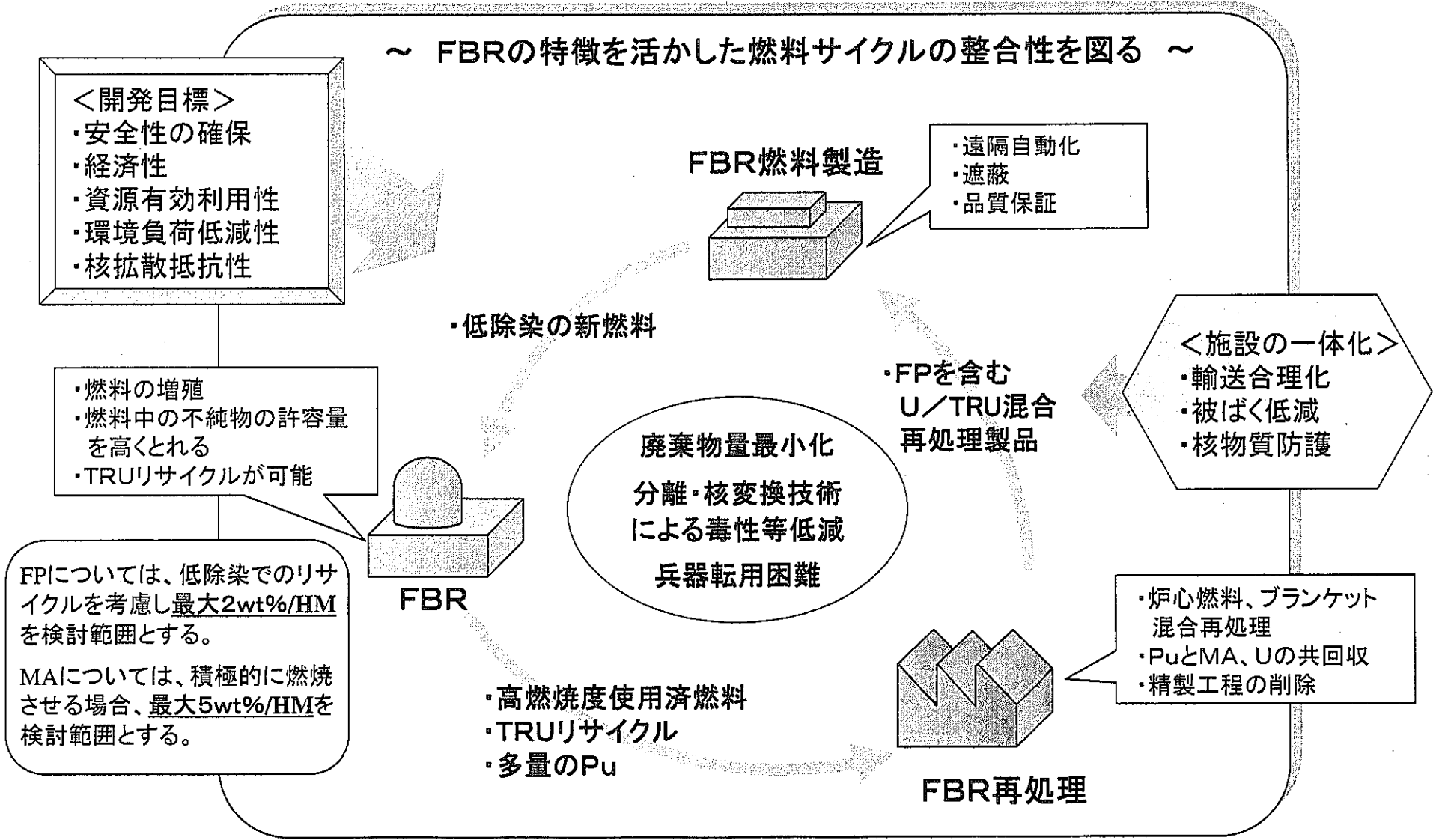
- TRU燃焼および長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量等を低減
- 施設の運転・保守および廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物量の低減

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

# FBRサイクルの基本的な考え方

～ FBRの特徴を活かした燃料サイクルの整合性を図る ～



## FBRサイクルシステムの主な設計目標

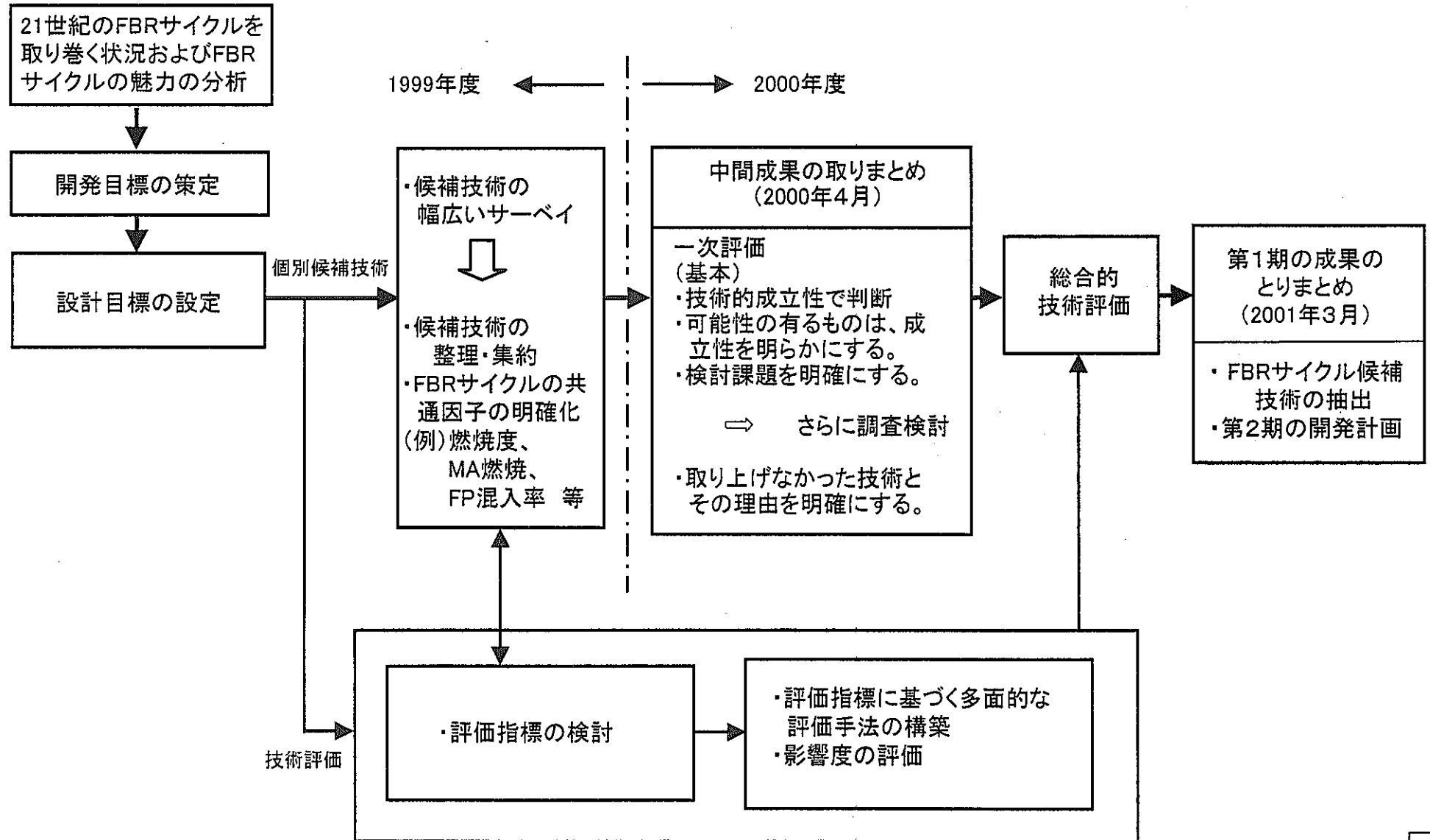
### FBRシステム

- ◆ 建設費 : 20万円/kWe
- ◆ 運転期間 : 12~24ヶ月程度
- ◆ 稼働率 : 90%程度
- ◆ 建設工期 : 50ヶ月以内
- ◆ 燃焼度 : 15万MWd/t程度(炉心燃料取出平均)
- ◆ 増殖比 : 1.2程度
- ◆ TRU燃焼 : MA混入率1~5wt%/HM
- ◆ FP混入率 : 2wt%/HM以下
- ◆ 安全性 : 受動安全機能、再臨界回避

### 燃料サイクルシステム

- ◆ 燃料サイクル費 : 43万円/kgHM
- ◆ 処理能力 : 50および200tHM/年
- ◆ 稼働率 : 200日/年
- ◆ 燃焼度 : 15万MWd/t程度(炉心燃料取出平均)
- ◆ 回収率 : 99%以上(将来的に99.9%以上)
- ◆ 炉外サイクル時間 : 5年(冷却4年、再処理・燃料製造1年)
- ◆ MA混入率 : 1~5wt%/HM
- ◆ FP混入率 : 2wt%/HM以下
- ◆ 安全性 : 軽水炉燃料サイクルと同等

# FBRサイクル技術の評価



# 評価指標の検討例

評価の視点	評価指標			判断のめやす(暫定値)
	一次指標	二次指標	三次指標	
経済性	発電単価	原子炉関連費	原子炉建設費 運転維持費 稼働率 プラント効率	20万円/kWe 90%程度 軽水炉以上 (所内負荷率、熱効率) 15万MWd/t
			再処理費	燃焼度 廃止措置費 業務分担費
		燃料製造費		施設建設費 操業費 稼働率 廃止措置費
			使用済燃料輸送費 廃棄物処分費	施設建設費 操業費 稼働率 廃止措置費
安全性	技術的安全性	再臨界回避 受動安全性 臨界安全性	核的制限 臨界検知	同時代の軽水炉サイクルと 同等またはそれ以上
	社会的安心感	安全意識 危機管理 情報公開	意識改革 教育訓練 法制整備 組織体制整備 通報避難体制確立 透明性 第三者立入検査	
資源有効利用性	ウラン利用効率	燃焼度		80%以上 15万MWd/t程度 (炉心燃料取り出し平均)
		製品移行率	再処理 燃料製造	99~99.9% 99~99.9%
	システム倍増時間	稼働率 増殖比 製品移行率 炉外サイクル時間		30~50年 90%程度 1.0~1.3 99~99.9% 5年

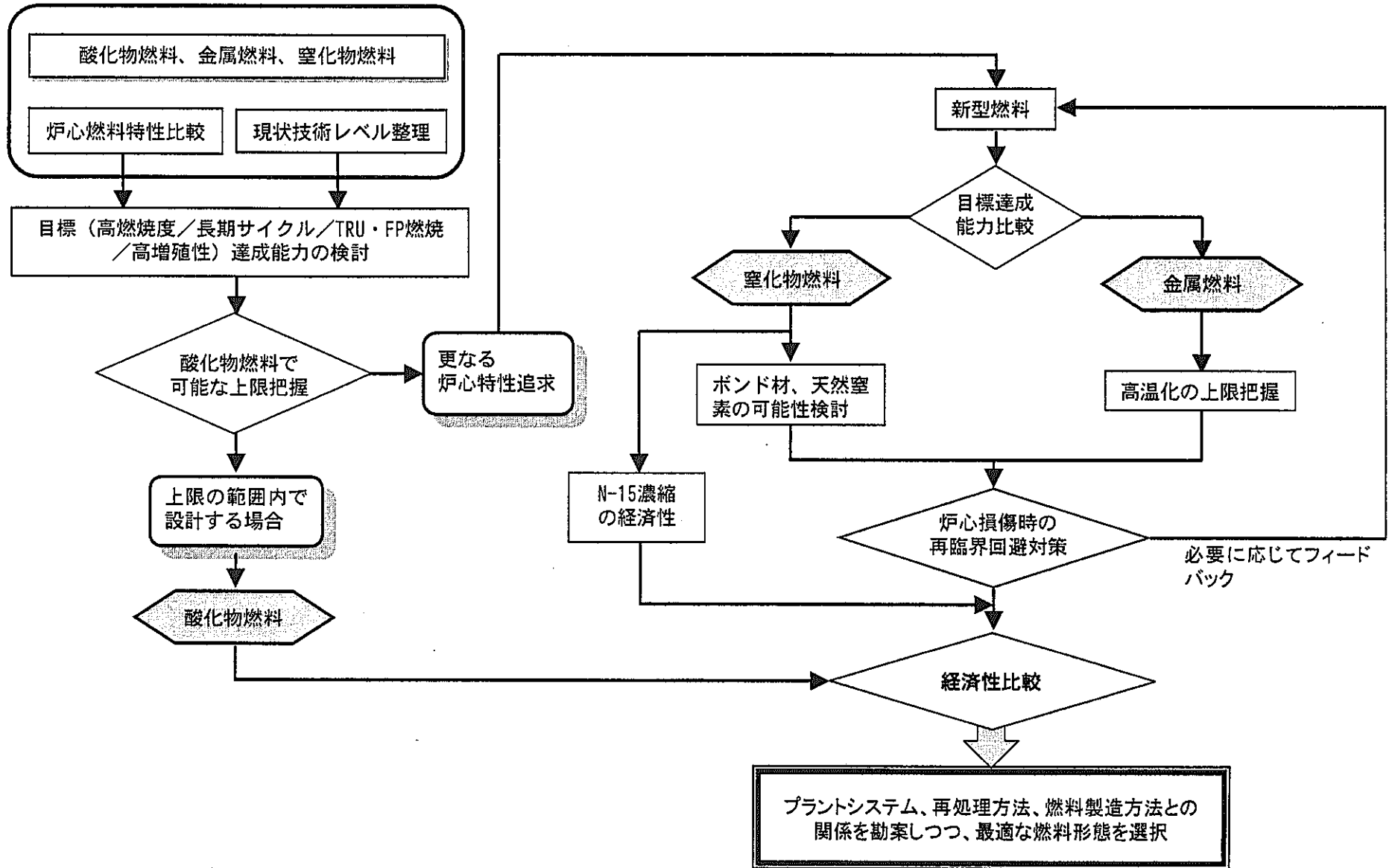
評価の視点	評価指標			判断のめやす(暫定値)
	一次指標	二次指標	三次指標	
環境負荷低減性	全廃棄物発生量 原子炉 再処理	高βγ廃棄物 }(*1) 低レベル廃棄物 }		
		高レベル固化体 }(*2) TRU深地層並 TRU高βγ並 TRU低レベル並 低レベル廃棄物 }		
	燃料製造	TRU深地層並 }(*3) TRU高βγ並 TRU低レベル並 低レベル廃棄物 }		
		全廃棄物の処分場面積 原子炉 再処理 燃料製造	*1に同じ *2に同じ *3に同じ	
	高レベル廃棄物特性 (TRU深地層並含む)	潜在的毒性(ALI) 放射能(Ci) 被ばく量(Sv/年)		
	周辺環境放出量	運転時放出放射能 有害化学物質	大気放出量 海洋放出量 NOx CO2 塩素ガス フッ素ガス 塩、重金属等	
核拡散抵抗性	核兵器転用性	取扱困難性		放射性及び発熱性核種の 添加(MA: 1~5wt%/HM またはFP: 2wt%/HM以内) 20W/kgHM 1mで1Sv/h程度
		技術難易度	発熱量 被ばく線量 難臨界性 転用時間	核分裂性Pu比率80%以下
	核物質防護	施設内防護 輸送時取扱量 輸送対策		
	保障措置	査察頻度 査察期間 査察精度	計量・分析精度 接近性	
技術的実現性	技術レベル 開発期間(年) 投資資金(円/年)			基礎研究、工学試験、実用化 実用化までに要する開発期間 年間当り研究開発予算

## 第1期におけるFBRシステムの検討

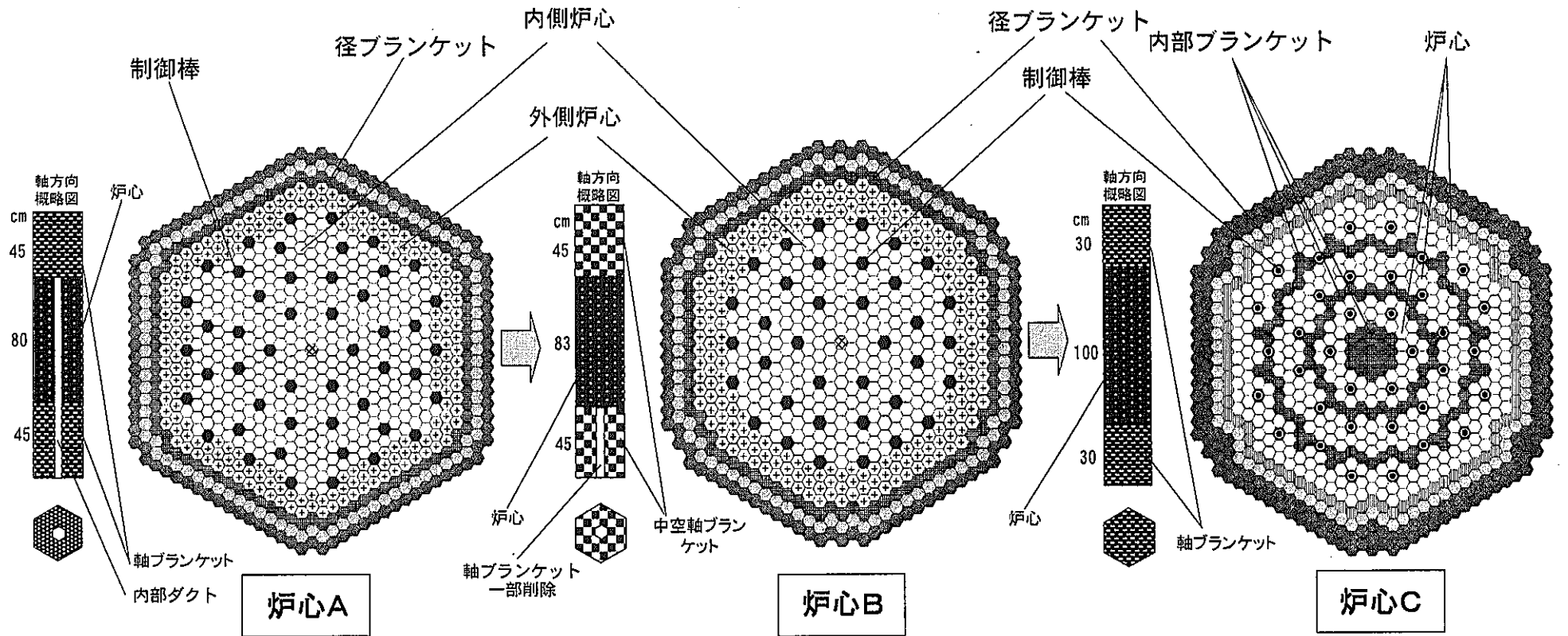
冷却材 (プラントシステム)		燃料形態		固体燃料					液体燃料
				ピン型燃料			被覆粒子燃料		(U+Pu)
				酸化物	金属	窒化物	酸化物	窒化物	
Na冷却	大型炉		○	○	○				
	中小型モジュール炉		○	○	○				
重金属冷却	大型炉(Pb)		○	○	○				
	中小型モジュール炉 (Pb、PbBi)		○	○	○				
ガス冷却	大型炉	(CO <sub>2</sub> )	蒸気タービン発電	○	○	○			
		(He)	蒸気タービン発電	○	○	○			
			ガスタービン または 複合発電	○		○	○	○	
	中小型モジュール炉(He)		○		○	○	○		
水(重水)冷却		○							
燃料による冷却								○	

(注) ○ は、検討対象を示す。

# 燃料形態の絞り込みの考え方



# MOX炉心性能限界の検討(3800MWt、18ヶ月サイクル)



集合体内の溶融燃料が隣接集合体に溶融伝播する前に内部ダクトから下部に排出させる。

集合体内の溶融燃料が隣接集合体に溶融伝播する前に下部軸ブランケット削除領域から下部に排出させる。

内部ブランケット集合体により、仮に燃料の溶融伝播が生じても、溶融燃料プールの形成範囲を限定するとともに、溶融燃料を制御棒案内管から下部に排出させる。

基準均質炉心(全数内部ダクト)

中空軸ブランケット、軸ブランケット一部削除

径非均質炉心

増殖比 : ~ 1.13  
 倍增時間\* : ~ 45.5年

増殖比 : ~ 1.15  
 倍增時間\* : ~ 34.8年

増殖比 : ~ 1.22  
 倍增時間\* : ~ 28.0年

(注) \*複利システム倍增時間



## 炉心燃料 第1期中間成果と2000年度計画

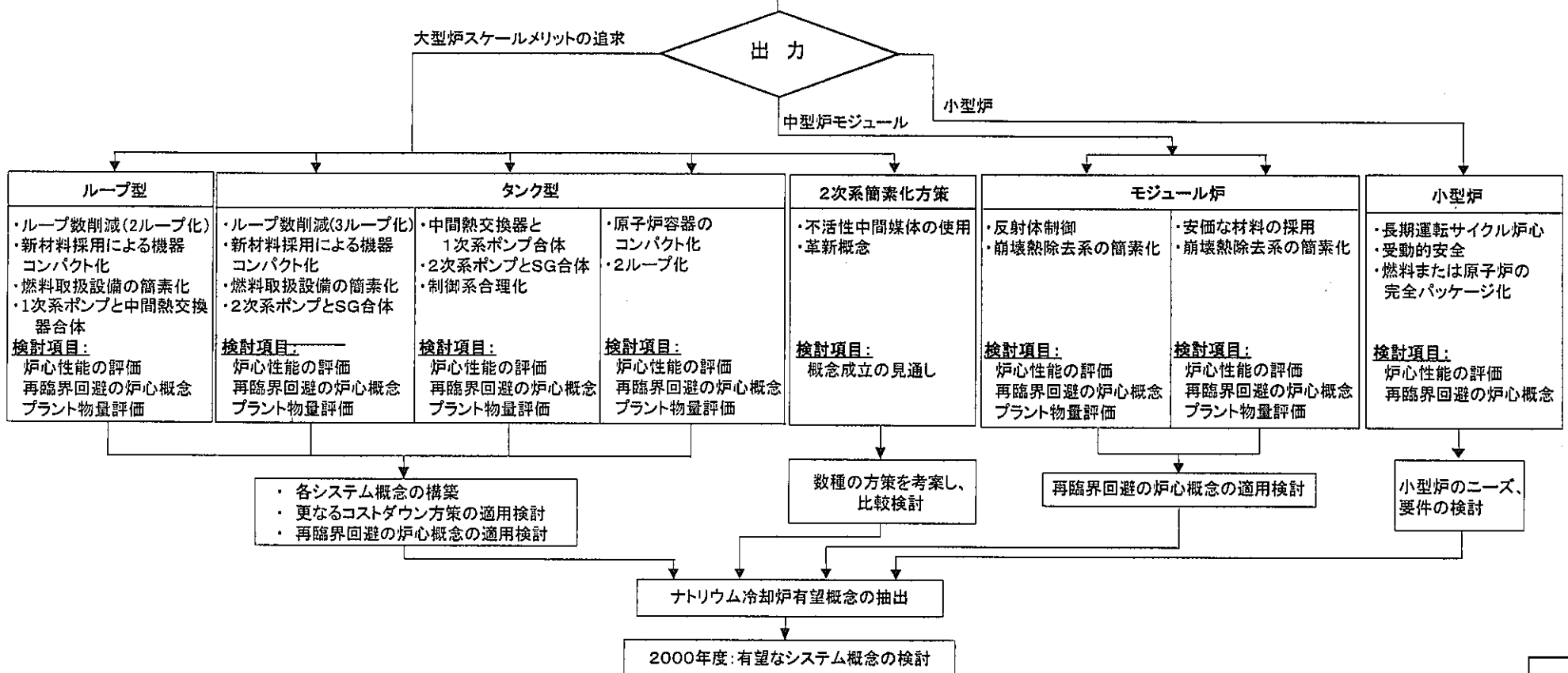
	中間成果と課題	2000年度計画
酸化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再臨界回避方策により炉心性能は低下するが、ナトリウム冷却炉で増殖比1.2程度まで可能</li> <li>・金属、窒化物に比べ、炉心性能は劣る(増殖比で0.15程度)</li> <li>・重金属、ガスの炉心性能は、ナトリウムに比べ、同等もしくはやや劣る</li> <li>・水炉は、再臨界回避対策をとらず、高除染燃料を使用する条件では増殖比が1を越える見通しを得た</li> <li>・酸化物は、実績が豊富であるが、高燃焼度(15万MWd/t)を達成するには被覆管の開発が重要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再臨界回避を満足する炉心燃料設計を進め、開発目標への適合性を見極める</li> <li>・燃料サイクルとの整合性を図った炉心性能を評価する(低除染燃料の炉心性能)</li> <li>・高燃焼度の被覆管材料(ODS鋼)の開発、検討</li> </ul>
金属燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心性能は酸化物より良い</li> <li>・金属燃料と被覆管の共晶制限のため、ナトリウム冷却で炉心出口温度を510～530℃以下に制限</li> <li>・照射実績が少ないため、開発計画の策定が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属燃料の特徴を生かしつつ、再臨界回避を満足する炉心燃料設計を進め、開発目標への適合性を見極める</li> <li>・国際協力を活用した金属燃料の研究開発計画の策定(燃料製造、ピンおよび集合体照射、安全性試験を含む)</li> <li>・高温化の可能性追求のため金属燃料の照射挙動解明および共晶問題を回避できる方策等の開発計画の検討</li> </ul>
窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心性能は、酸化物より良い(金属燃料とほぼ同等)</li> <li>・炉心損傷時、ガス炉を除き、燃料-冷却材との間で激しい熱的相互作用および窒素解離による圧力上昇</li> <li>・被覆粒子燃料では、高速中性子場での被覆層の健全性の確保が課題</li> <li>・照射実績が金属燃料よりさらに少なく、開発計画の策定が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重金属、ガス冷却炉における炉心燃料設計の検討</li> <li>・国際協力を活用した窒化物燃料の研究開発計画の策定</li> <li>・高速中性子場での照射影響の少ない被覆材料および構造の検討</li> </ul>

## プラントシステムの検討

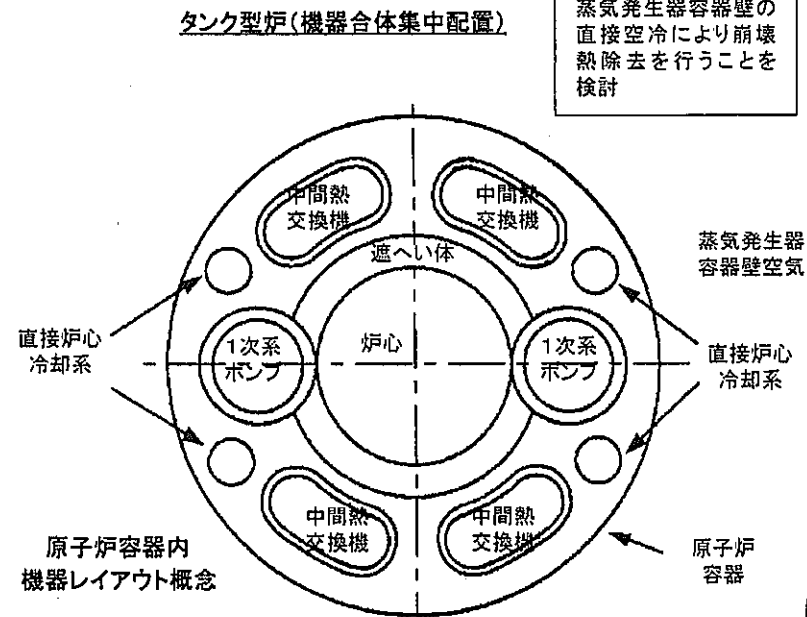
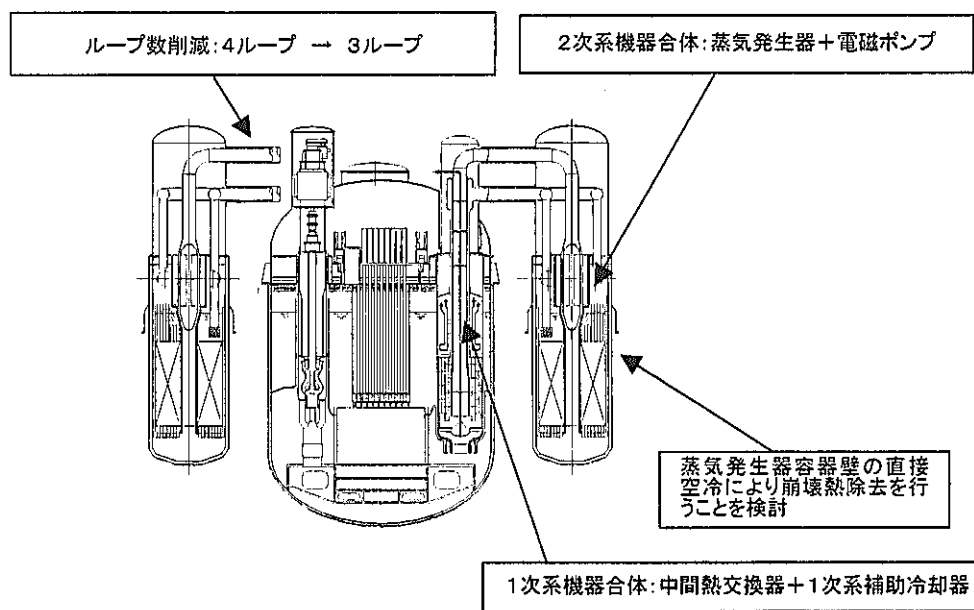
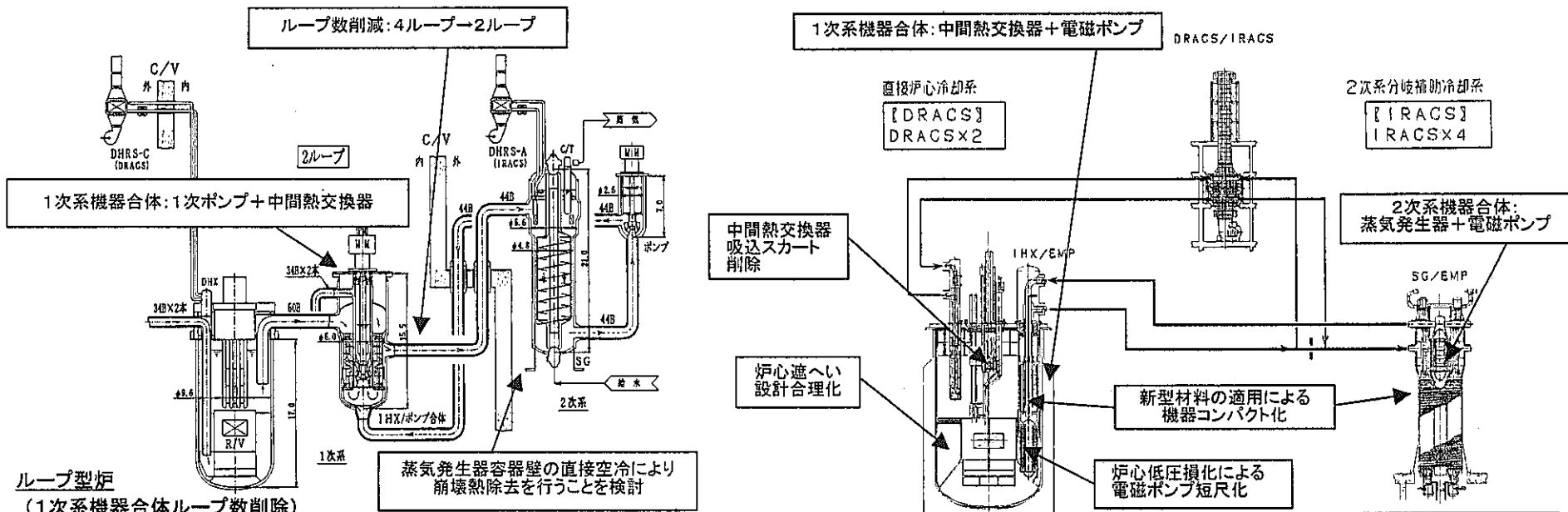
- ◆ナトリウム冷却炉 ..... ( OHP 22~29)
  - ・大型炉
  - ・中小型モジュール炉
- ◆重金属冷却炉 ..... ( OHP 30~32)
  - ・大型炉(鉛)
  - ・中小型モジュール炉(鉛、鉛ビスマス)
- ◆ガス冷却炉 ..... ( OHP 33~35)
  - ・大型炉(炭酸ガス、ヘリウム)
  - ・中小型モジュール炉(ヘリウム)
- ◆水冷却炉 ..... ( OHP 36)
  - ・軽水
  - ・重水
  - ・超臨界圧水
- ◆溶融塩炉
- ◆小型炉 ..... ( OHP 37~38)

# ナトリウム冷却炉の候補と検討の進め方

設計経験例 (調査対象)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常陽、もんじゅ、実証炉</li> <li>・ Phenix, SPX, EBR II, PFR, EFR, PRISM</li> <li>・ これまでの設計例</li> </ul>	
メーカー提案	大型炉	ループ型
	中型炉	タンク型
アイデア募集	大型炉	タンク型 2次系簡素化(2重管他)
	発電方式	MHD、熱電変換



# ナトリウム大型炉の主なプラント概念図



Compact Pool Type LMFB (公募アイデア)

# 建設費 20万円/kWeに向けてのコストダウン方策

## 主要なシステム改善方策

ループ数の削減

機器合体

新材料の採用(12Cr鋼、ODS鋼)

高温構造設計の高度化

3次元免震の採用

中間媒体を介したナトリウム/水熱交換器による2次系簡素化(注)

(注)適用可能性について検討中

機器・配管等の物量削減およびそれに伴う建屋容積の削減

## 標準化・習熟効果等の追求

設計の標準化

QA・QC合理化

量産効果の活用

建設工期の短縮

設備の共有化

スケールメリットの追求

出力アップによる  
コストダウン

モジュール化による  
コストダウン

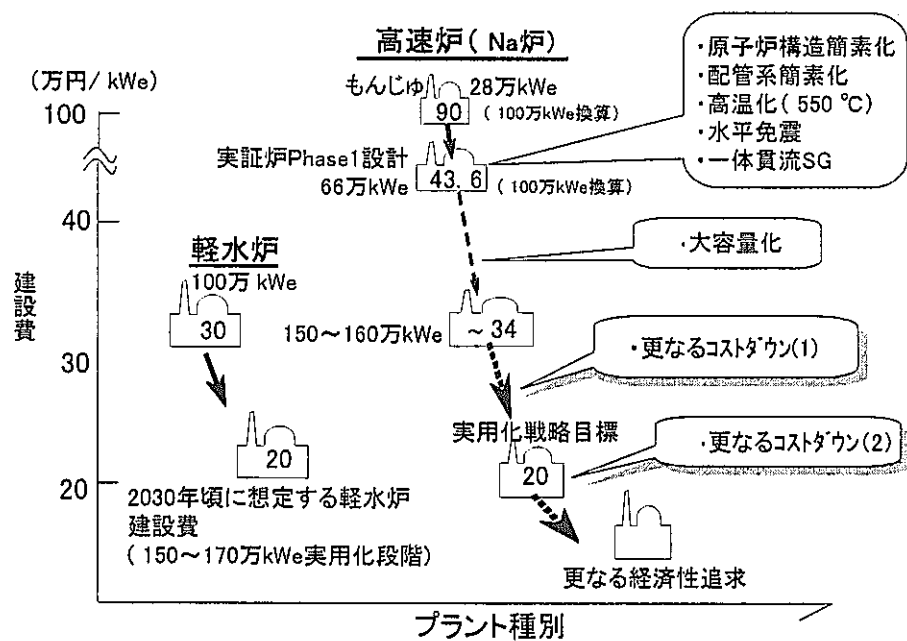
主要なシステム改善方策

# ナトリウム冷却炉における炉心ならびにシステムの改善方策

	設計要求(課題)	解決方針	課題解決方策
炉心	炉心領域全体の縮小	・炉心燃料部のみならず、その周囲を含めたコンパクト化	・高性能遮蔽体(鉛/Zr-H)による板厚削減 ・径方向ブランケット削減(内部転換比の向上) } による炉心のコンパクト化
	炉心の圧損の低減	・燃料バンドルの流動抵抗の削減	・燃料要素の太径化 } による低圧損炉心の採用
	再臨界回避による炉心性能低下の緩和(集合体に内部ダクトを設置)	・炉心燃料体積比の確保	・富化度分布をつけ、軸方向ビーキングを低減 ・内部ダクト径の最適化、内部ダクトおよび集合体壁の薄肉化
	燃焼度の向上	・炉心材料のスエリング特性改善	・炉心性能に影響が少ない他の再臨界排除方策の創出とその採用 ・重原子密度の高い新型燃料(金属、窒化物)の採用 ・耐スエリング特性の良いODS鋼の開発(取出平均15万MWd/t達成可能) ・高速中性子フルエンス平坦化炉心の検討
	運転サイクル期間の長期化	・燃料体積比の増加による燃焼反応度の抑制	・ラッパ管および内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化(18ヶ月以上のサイクル期間達成可能) ・重原子密度の高い新型燃料の採用
	炉心出口温度の高温化	・炉心材料の高温特性改善	・高温強度に優れた材料(ODS鋼)の開発(炉心出口温度550℃達成可能) ・富化度分布をつけ、炉心内ホットスポットファクターを低減
	制御棒の長寿命化	・長寿命制御棒の開発	・Naボンド型制御棒の開発 ・軸非均質(B-10濃縮度の軸方向多領域化)制御棒の採用
	柔軟な増殖性能	・燃料体積比およびブランケット厚で調整	・ラッパ管および内部ダクトの薄肉化 ・燃料要素の太径化
	TRUの受け入れ能力	・炉心反応度特性の改善	・径方向および軸方向ブランケットの調整 ・炉心型式、形状の最適化による改善 ・重原子密度の高い新型燃料の採用によるTRU混入制限(融点等)の改善
	長寿命FP各種の核変換	・FP装荷形態の最適化	・効果的な減速材配置、ターゲット材料の最適化 ・重原子密度の高い新型燃料の採用
核拡散抵抗性の確保	・核物質への接近困難性	・低DF燃料、MA混入燃料の採用	
燃料	配管引廻しの簡素化・短尺化	・熱膨張の少ない新材料の配管への適用 ・機器合体による機器を結ぶ配管の削除	・12Cr鋼の採用 ・中間熱交換器/ポンプ } の機器合体による系統コンパクト化 ・蒸気発生器/ポンプ
	ループ数の削減	・冷却系機器および配管の単基容量の増大	・ループ数の削減(4ループから2または3ループ化)
	建物物量の削減	・機器配管のコンパクト化と合理的な配置 ・地震入力への低減による建屋構造の簡素化	・冷却系統のコンパクト化と配置の最適化による建屋容積の削減 ・付帯設備(ヒータ、計測系など)の削減 ・3次元免震の採用
	構造設計裕度の拡大	・熱膨張応力発生要因の緩和 ・設計裕度の適正化	・熱膨張応力の少ない12Cr鋼の採用 ・高温構造設計(基準)の高度化
	原子炉容器の縮小	・炉容器径の縮小  ・燃料取扱構造のコンパクト化	・炉心コンパクト化 ・燃料取扱構造のコンパクト化 } による炉容器径増加の抑制 ・炉心支持構造の改善 ・飯盒型IHXによる炉内配置効率の向上(タンク型のみ)
	燃料取扱設備の簡素化	・燃料取扱方法の改善と設備の簡素化	・切り欠き式炉心上部機構 } による燃料取扱構造のコンパクト化 ・単回転プラグの採用
	伝熱機器、容器の縮小	・伝熱性能に優れた新材料による機器コンパクト化 ・低膨張材料の採用による機器合体の拡大	・乾式洗浄の採用と水プール冷却設備の活用によるナトリウム冷却の炉外使用済み燃料貯蔵設備の共用化または削除 ・中間熱交換器、蒸気発生器への12Cr鋼の採用による機器コンパクト化 ・中間熱交換器、蒸気発生器とポンプとの機器合体による系統コンパクト化
	地震荷重の低減	・免震の採用による機器・配管の薄肉化	・免震の採用による機器配管および支持構造の簡素化 ・サイト条件にとらわれない設計の標準化によるエンジニアリング費の合理化
	安全性の向上	・受動的な炉停止および崩壊熱除去機能の付与	・異常高温時の制御棒自然挿入機構の採用 ・自然循環による炉心崩壊熱除去機能の向上 ・非常用電源設備の簡素化
	ナトリウム-水反応対策の向上	・ナトリウム-水反応の発生可能性の回避	・中間媒体を介したナトリウム/水熱交換器による2次系簡素化の検討
ナトリウム機器の検査・補修能力の拡大	・ISI技術の高度化	・超音波探傷技術、遠隔操作技術の開発	
その他	・設計標準化の拡大	・設計の標準化による製作性の向上、リポート効果の追求等によるエンジニアリング費の削減 ・QA/QCの合理化による管理費の削減	

# 軽水炉に比肩する経済性を目指すナトリウム炉の建設費低減方策

## 実用化プラントの経済性追求



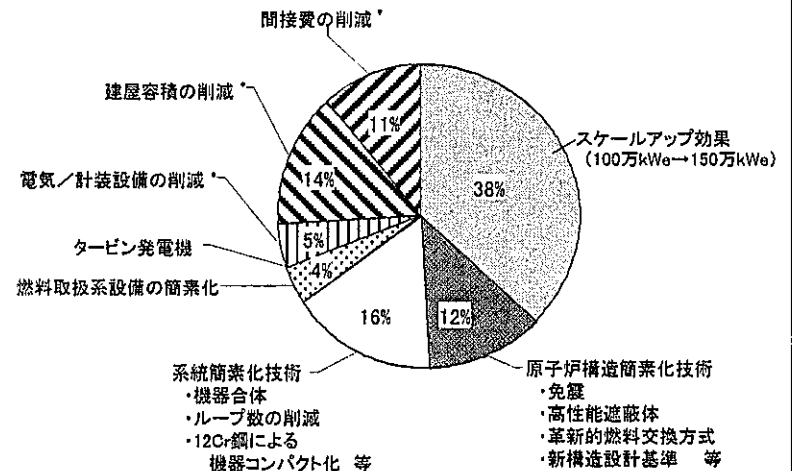
## 更なるコストダウン(1)の方策

- ・大容量化
- ・原子炉設備全般にわたるコストダウン方策
- ・原子炉の簡素化(コンパクト化)
- ・機器合体
- ・ループ数削減
- ・12Cr鋼採用による機器コンパクト化
- ・上記による建物コンパクト化および電気計装設備の削減

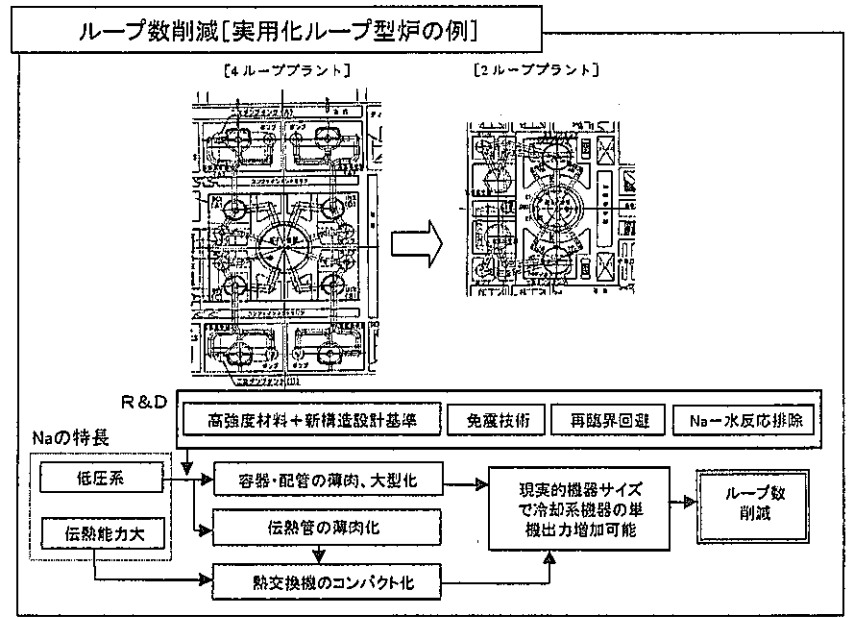
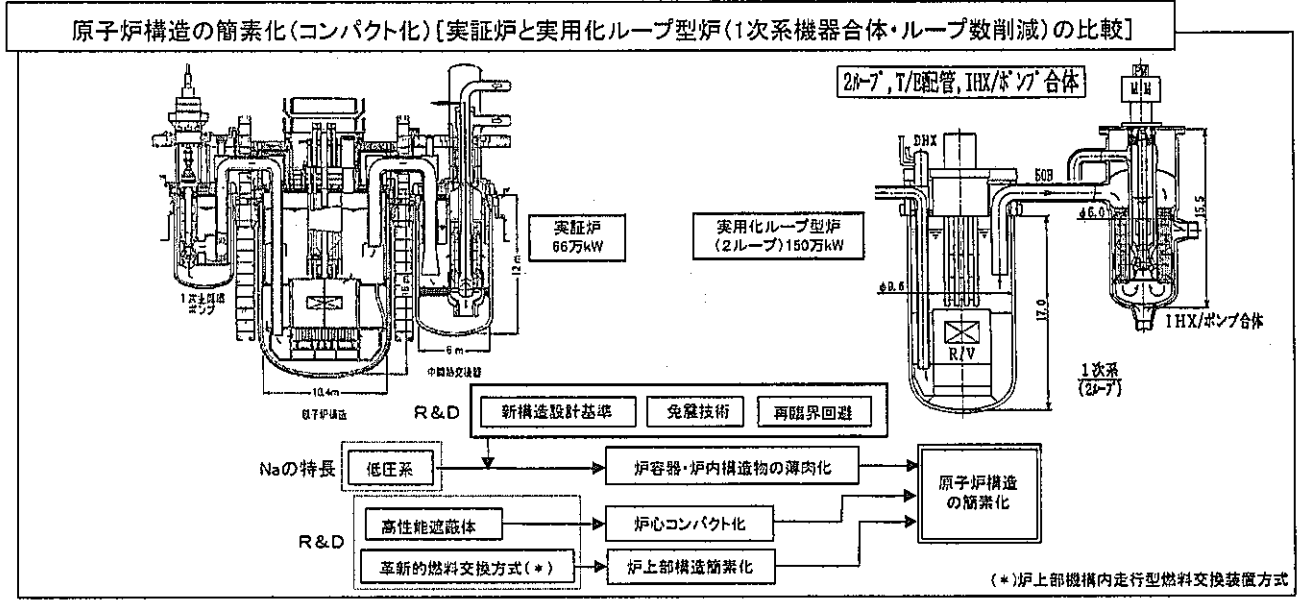
## 更なるコストダウン(2)の方策

- 革新技術を採用した2次系簡素化の追求
  - Na水反応の影響大幅緩和
  - Na水反応の回避(不活性中間熱媒体)
- その他革新技術による経済性向上
  - 回転プラグ削除 等

注記  
\* プラントシステムのコンパクト化による効果



# さらなるコストダウン(1)方策を実現する革新技術の具体的効果



12Cr鋼の採用による機器コンパクト化[実用化ループ型炉の例]

伝熱面積の比較[m<sup>2</sup>]

	9Cr	12Cr	削減割合
SG	20,646	15,360	約25%
IHX	10,875	8,700	約20%

(材料データ)

材料	短時間強度レベル Su [MPa]	熱膨張率(平均) α(×10 <sup>-6</sup> ) [mm/mm°C]	熱伝導率 [W/mK]
	550°C	550°C	550°C
316FR	378	18.33	21.75
12Cr鋼(HCM12A)	403	11.35	32.3
Mod.9Cr1Mo(参考)	348	12.35	28.8

高強度 高熱伝導率

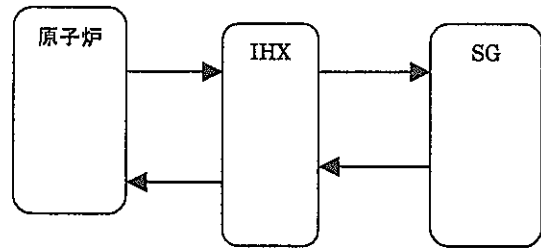
伝熱管薄肉化 伝熱面積削減

SG/IHXコンパクト化

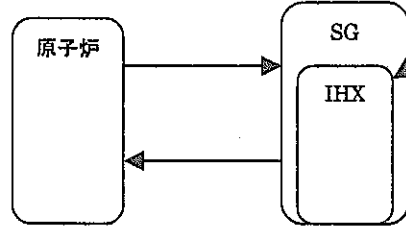


# Na-水反応の排除(不活性中間媒体)による2次系簡素化アプローチ

## 2次系簡素化のアプローチ



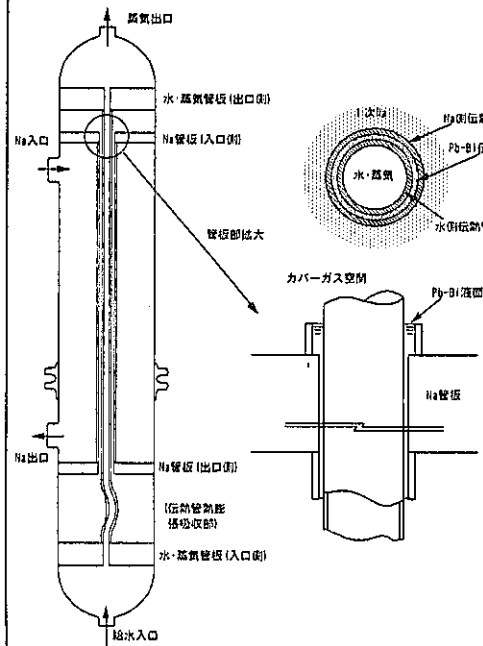
中間熱媒体により1次Naと水・蒸気伝熱管を分離・隔離 = IHX と SG の一体化



### 中間媒体の候補

- ・液体鉛ビスマス合金
- ・固体銅

## 鉛ビスマス熱媒体蒸気発生器



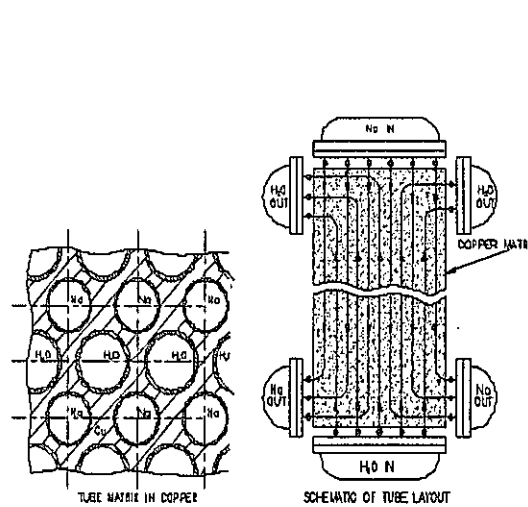
### 概念の特徴:

- ・同心円状に非接触配置した1次Naと水・蒸気伝熱管の中間層をPb-Bi層とし、Pb-Bi内の熱伝導を介してNa → 水間で熱交換する。
- ・中間熱媒体のPb-Biは水およびNaとそれぞれ不活性。
- ・左図の概念に代表されるチューブ型と、Pb-Bi層をプールとし、Na伝熱管および水・蒸気伝熱管を浸漬するタイプ(プール型)を検討。

### 課題:

- ・伝熱性能、経済性の確認
- ・Pb-Bi熱媒体の諸特性(反応性、腐食性)の確認

## 固体銅熱媒体蒸気発生器



固体銅中間熱媒体蒸気発生器概念

### 概念の特徴:

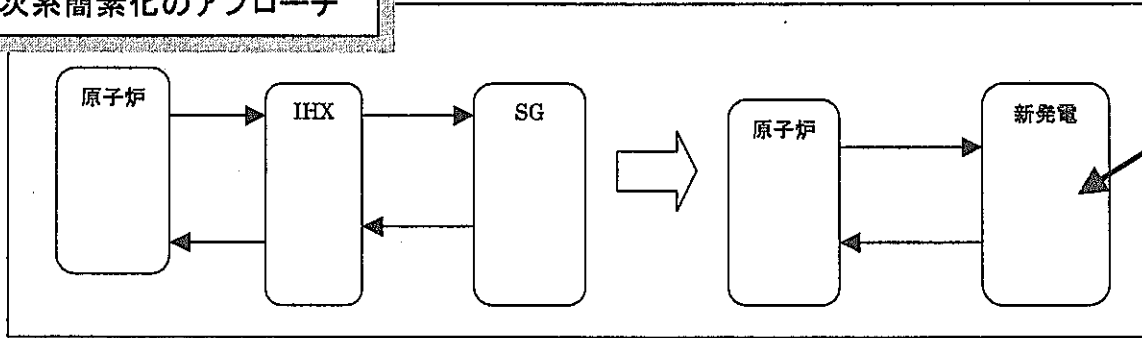
- ・中間熱媒体である固体銅内部に、Na側伝熱管及び水・蒸気伝熱管を近接配置し、熱交換する。
- Naと水の間には伝熱管(Naおよび水伝熱管)と固体銅の3重の壁があり、Na-水反応が極めて起こりにくい。

### 課題:

- ・機器サイズ及び製作コストの評価
- ・製作性からの機器容量制限の確認

# Na-水反応の排除(新発電方式)による2次系簡素化アプローチ

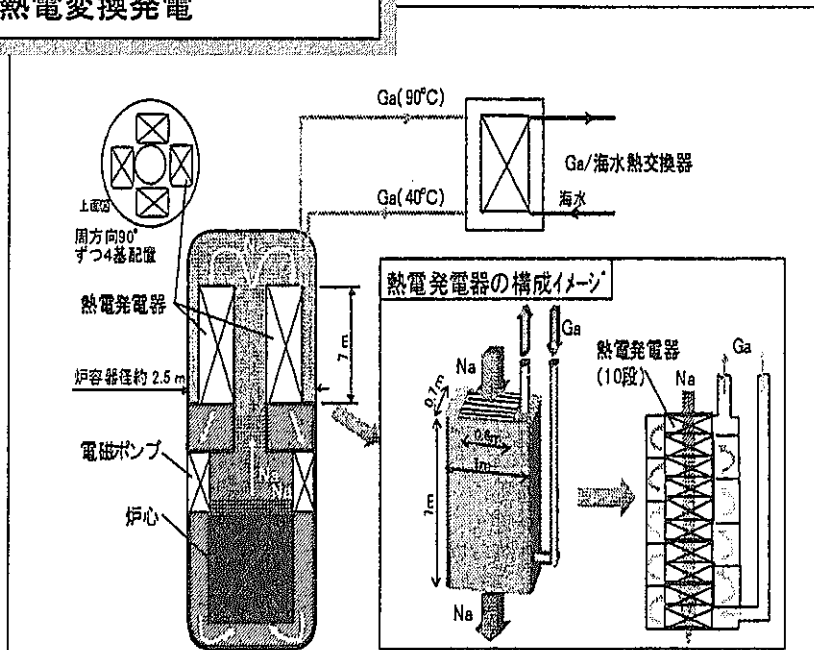
## 2次系簡素化のアプローチ



### 新発電の候補

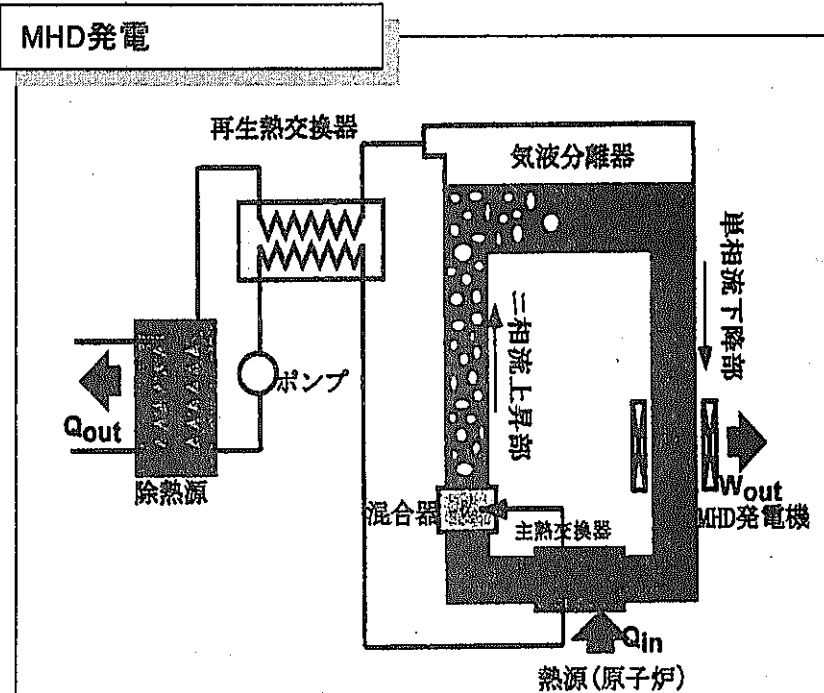
- ・熱電交換
- ・MHD発電

## 熱電変換発電



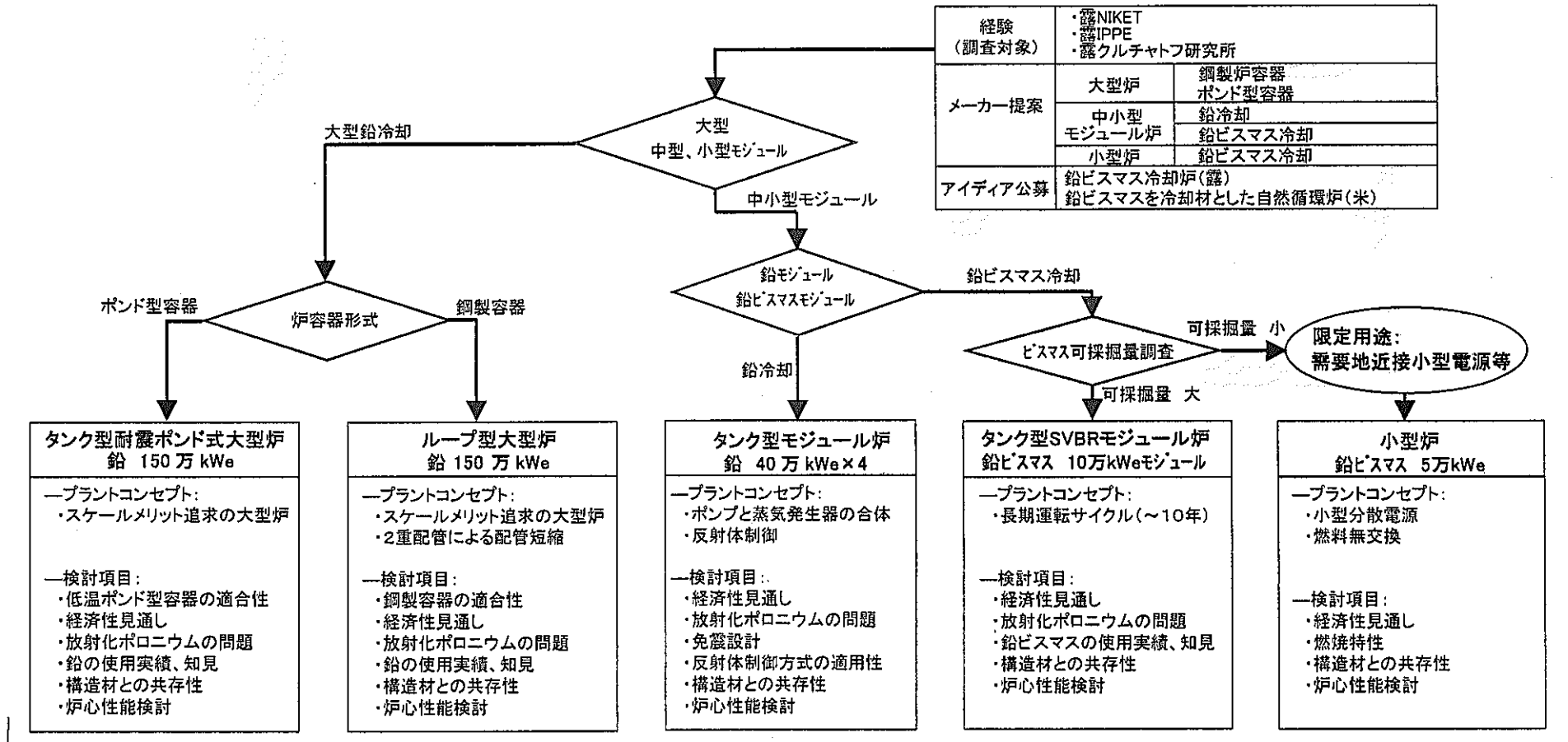
- 熱電素子を用いた直接発電システムを検討する。
- ・2次系/水・蒸気系が不要な簡素な発電システムが期待できる。
  - ・素子効率を向上(5%→30%)を実現する素子の選定および開発課題を検討する。

## MHD発電



- 液体金属クローズドサイクルMHD発電システムの高速度炉条件への適合性、有効性を検討する。
- ・発電システムの単純化、Na-水反応の回避を期待できる。
  - ・作動流体、システムについて高速度炉に適合する組合せを選定する。

# 重金属冷却炉の候補と検討の進め方

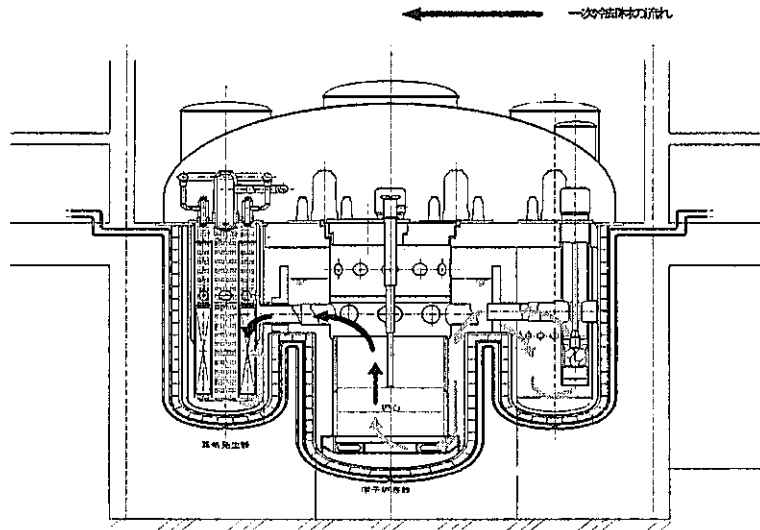


システム概念を構築、炉心仕様を整理

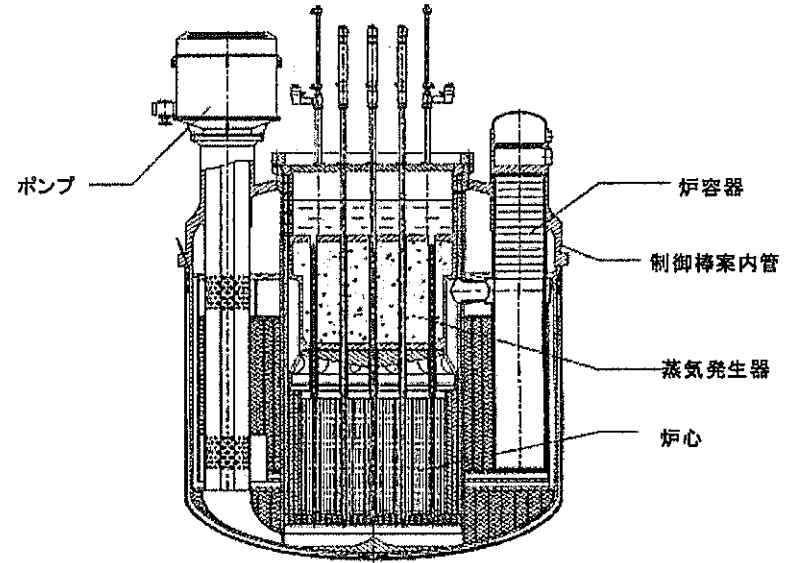
重金属冷却炉有望概念の抽出

2000年度: 有望なシステム概念の検討

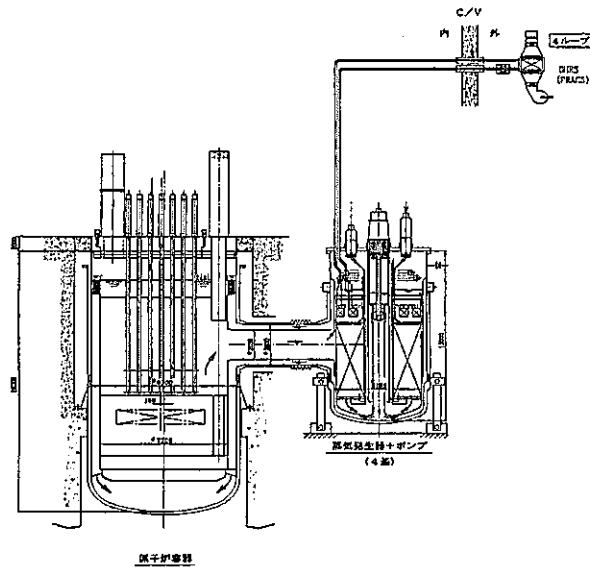
# 重金属炉のプラント概念



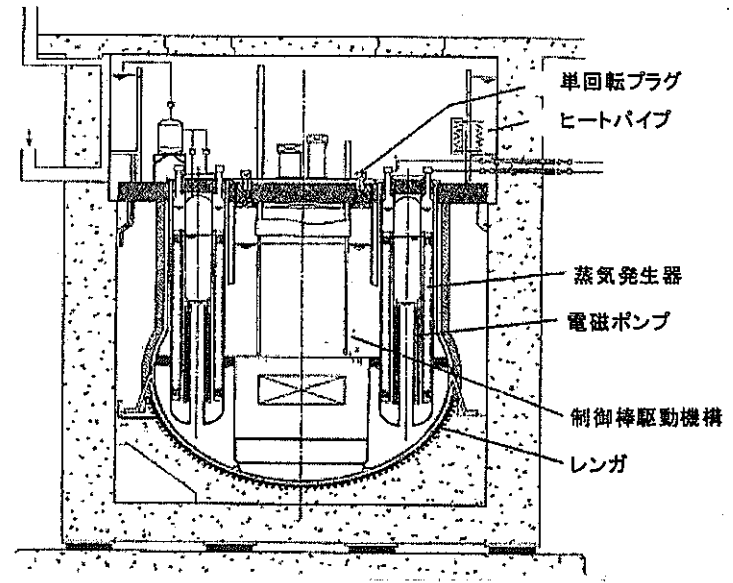
耐震ボンド式タンク型大型炉



タンク型モジュール炉 (SVBR)

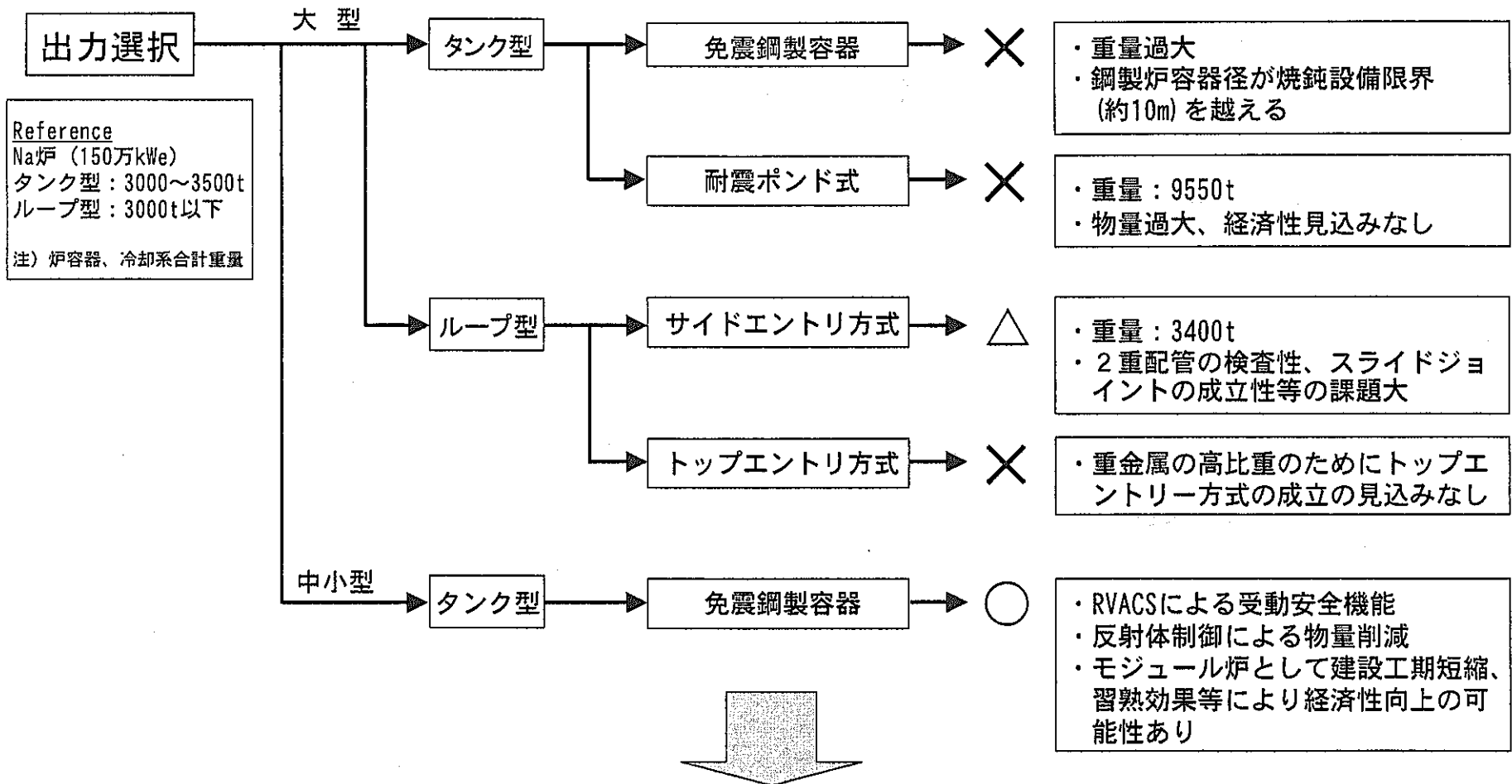


ループ型大型炉 (サイドエントリー方式)



タンク型モジュール炉

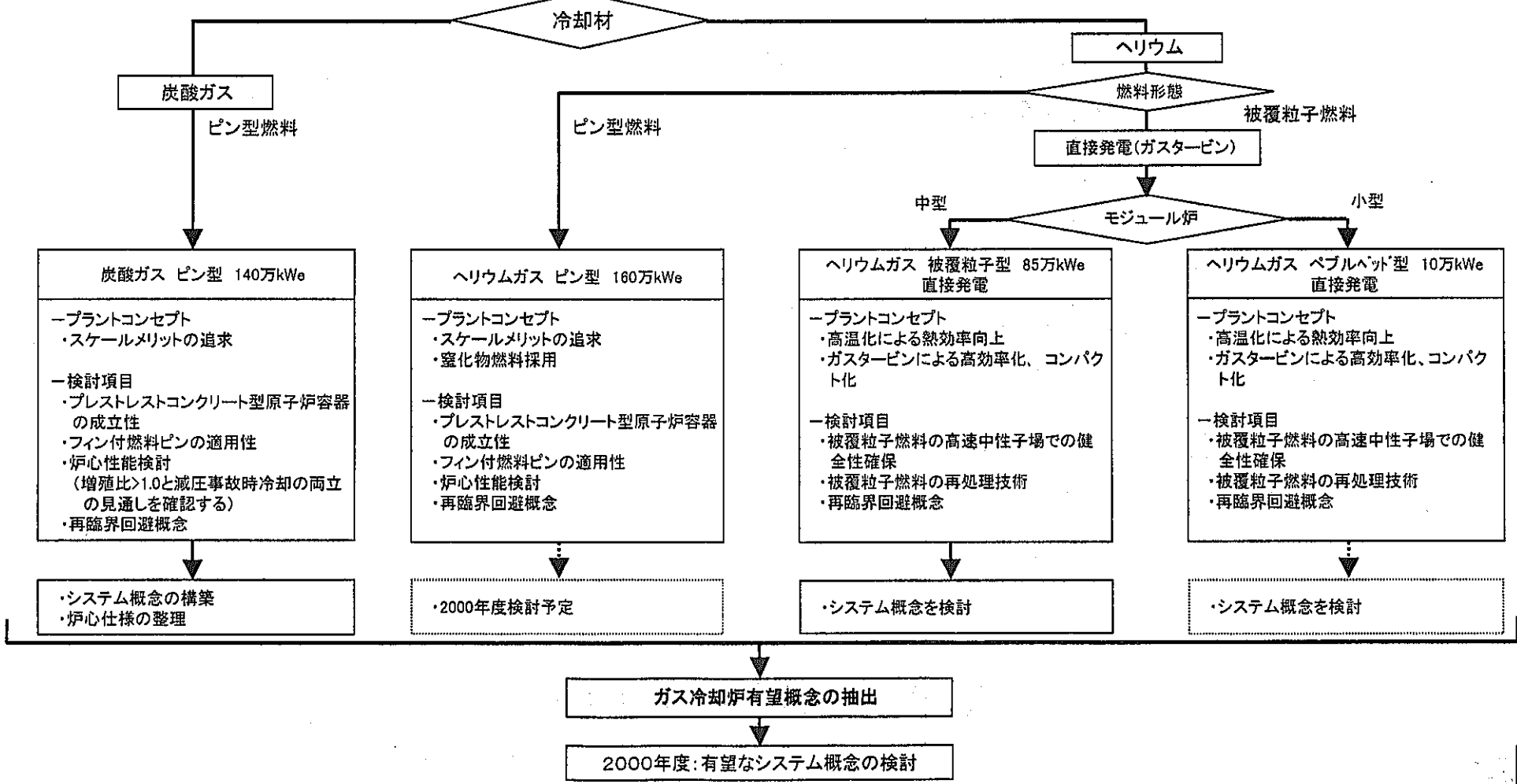
# 重金属炉の選定(出力／構造成立性の観点に基づく)



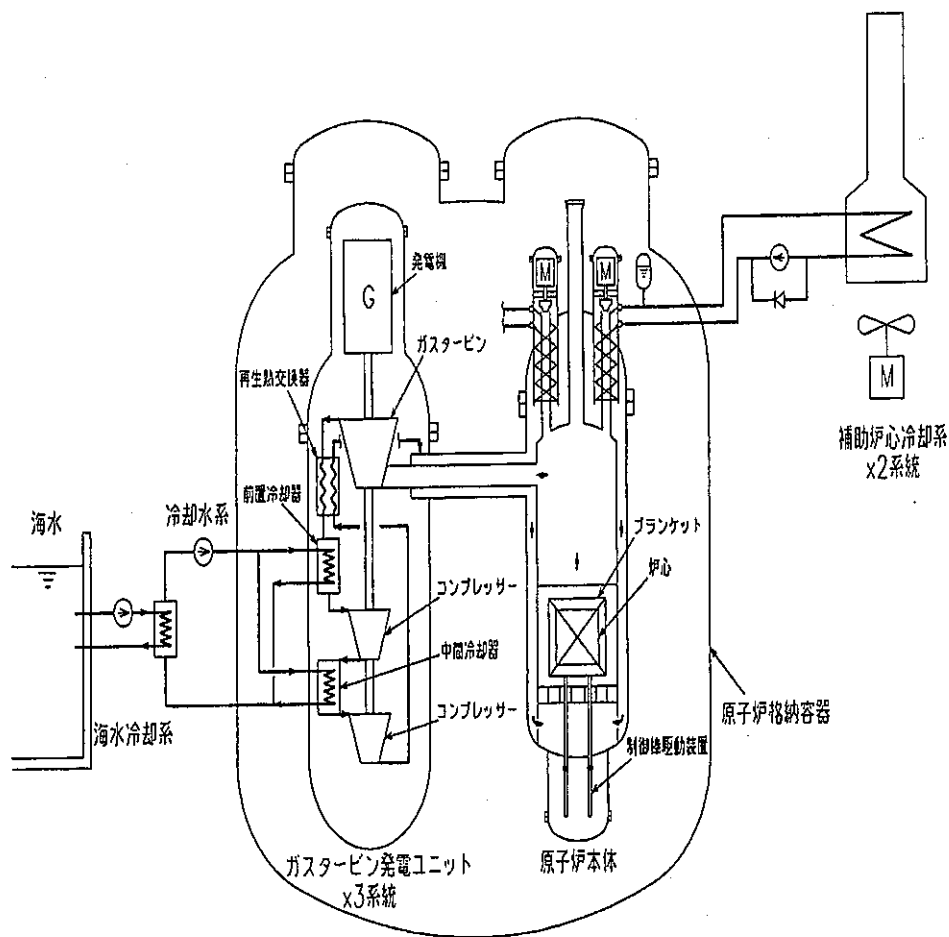
経済性向上、安全系局限化を目指した中小型モジュール炉

# ガス冷却炉の候補と検討の進め方

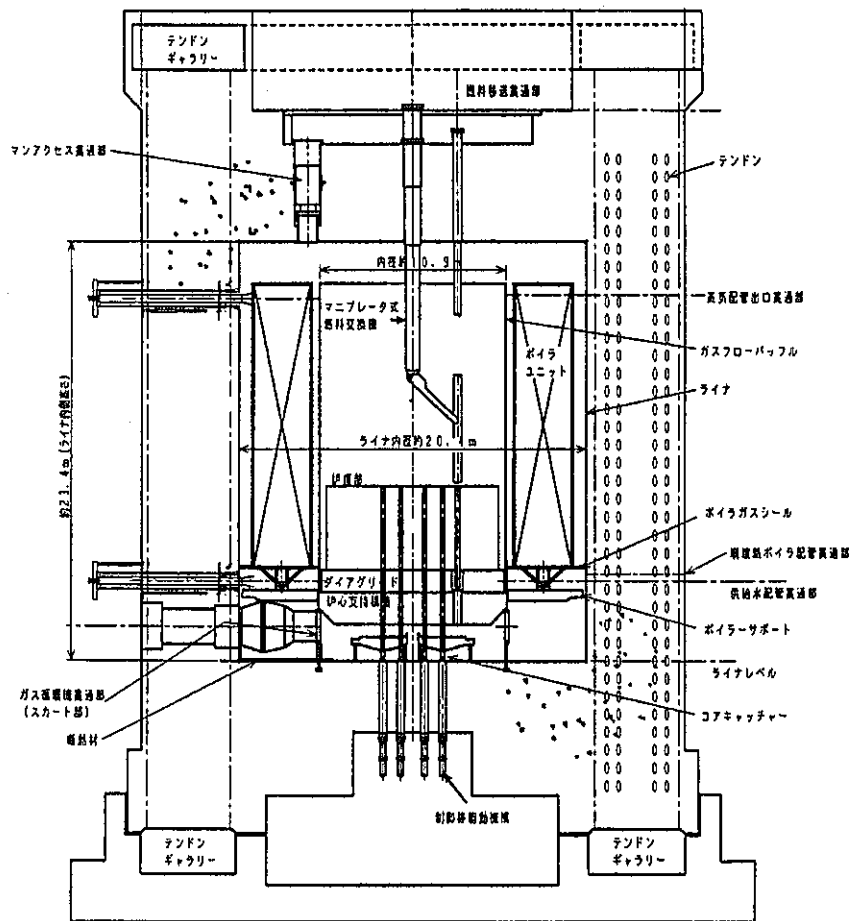
経験 (調査対象)	・英国のAGR → 炭酸ガス冷却 ・英国のナトリウム炉 → 被覆管材への適用 ・HTGR(原研他) → He技術、窒化物燃料		
メーカー提案	ピン型燃料	炭酸ガス冷却	140万kWe、PCRIV、酸化物燃料
	ピン型燃料	ヘリウムガス冷却	160万kWe、PCRIV、窒化物燃料
	被覆粒子燃料	ヘリウムガス冷却	85万kWe、酸化物燃料
		ヘリウムガス冷却	10万kWe、酸化物燃料、窒化物燃料



# ガス冷却炉のプラント概念

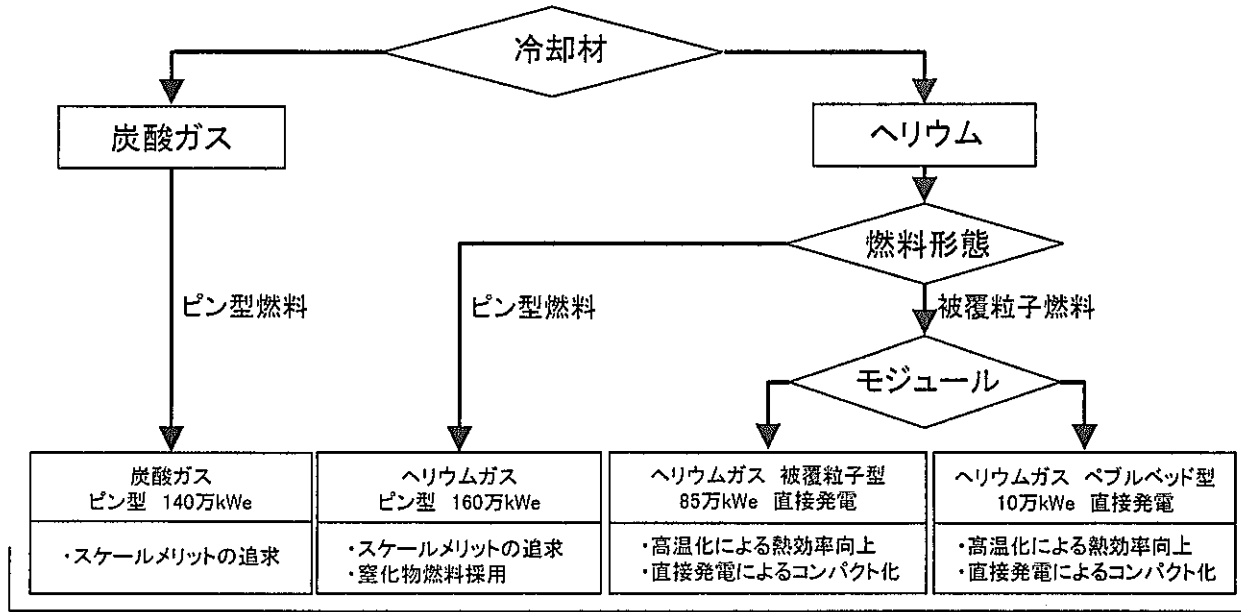


被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却炉



ピン型燃料炭酸ガス冷却炉

# ガス冷却炉の開発課題について



- 課題**
1. ヘリウムガス被覆粒子燃料炉が抽出された場合
    - ・被覆粒子燃料の被覆層の設計とその健全性評価
  2. 炭酸ガス/ヘリウムガスピン型燃料炉が抽出された場合
    - ・炉心の熱流動設計（フィン付き燃料ピンの冷却能力と成立性の評価）

- 1999年度成果と2000年度の取組み**
- ①炭酸ガス炉、ヘリウムガス被覆粒子型炉について基本概念を構築し、技術的成立性を検討
  - ②被覆粒子燃料：従来データによれば、高速中性子スペクトル条件で、被覆層健全性を確保できる範囲は、1万MWd/t程度  
→ 被覆層の強度向上方策とその実現性の検討が必要
  - ③ピン型燃料（炭酸ガスおよびヘリウムガス冷却炉）：炉心燃料設計成立性と再臨界回避、熔融燃料長期冷却の実現性がポイント

- 第1期の成果**
- ・2000年度に技術的成立性の詰めと経済性評価を行い、ガス炉の有望概念を一つ抽出する。



# 水冷却炉の候補と検討の進め方

経験 (調査対象)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高転換比BWR</li> <li>・長期サイクルBWR</li> <li>・高転換比PWR</li> </ul>
アイデア 募集	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界圧軽水冷却高速増殖炉</li> </ul>

評価のポイント:

- ・増殖比 > 1
- ・熱水力的観点からの成立性
- ・再臨界現象の有無

**高転換比BWR炉型**

プラントコンセプト:

- ・水の減速効果を低減させるために高ボイド率化
- ・電気出力 110万kWe
- ・燃焼度 4.5万MWd/t
- ・核分裂性Pu富化度 18%程度
- ・増殖比 1.06程度

検討項目:

- ・炉心性能とDBE成立性
- ・再臨界発生の有無の検討
- ・導入シナリオの検討

**高転換比PWR炉型**

プラントコンセプト:

- ・单相流のため軽水の代わりに重水を使用
- ・電気出力 100万kWe
- ・燃焼度 4.5万MWd/t
- ・核分裂性Pu富化度 15%程度
- ・増殖比 1.04程度

検討項目:

- ・炉心性能とDBE成立性
- ・再臨界発生の有無の検討
- ・導入シナリオの検討

**超臨界圧軽水冷却高速増殖炉 SCFBR**

プラントコンセプト:

- ・超臨界圧水を利用し減速材としての水密度の低減化
- ・電気出力 150万kWe
- ・運転圧力 250Bar
- ・直接サイクル熱効率 45%
- ・燃焼度 3.8万MWd/t
- ・核分裂性Pu富化度 12%程度
- ・増殖比 1.0程度

検討項目:

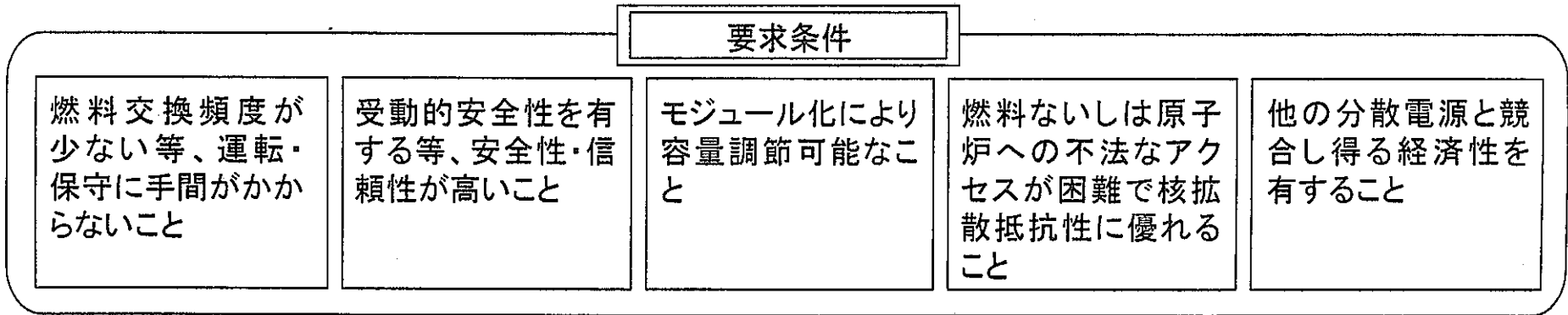
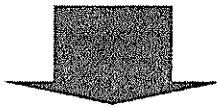
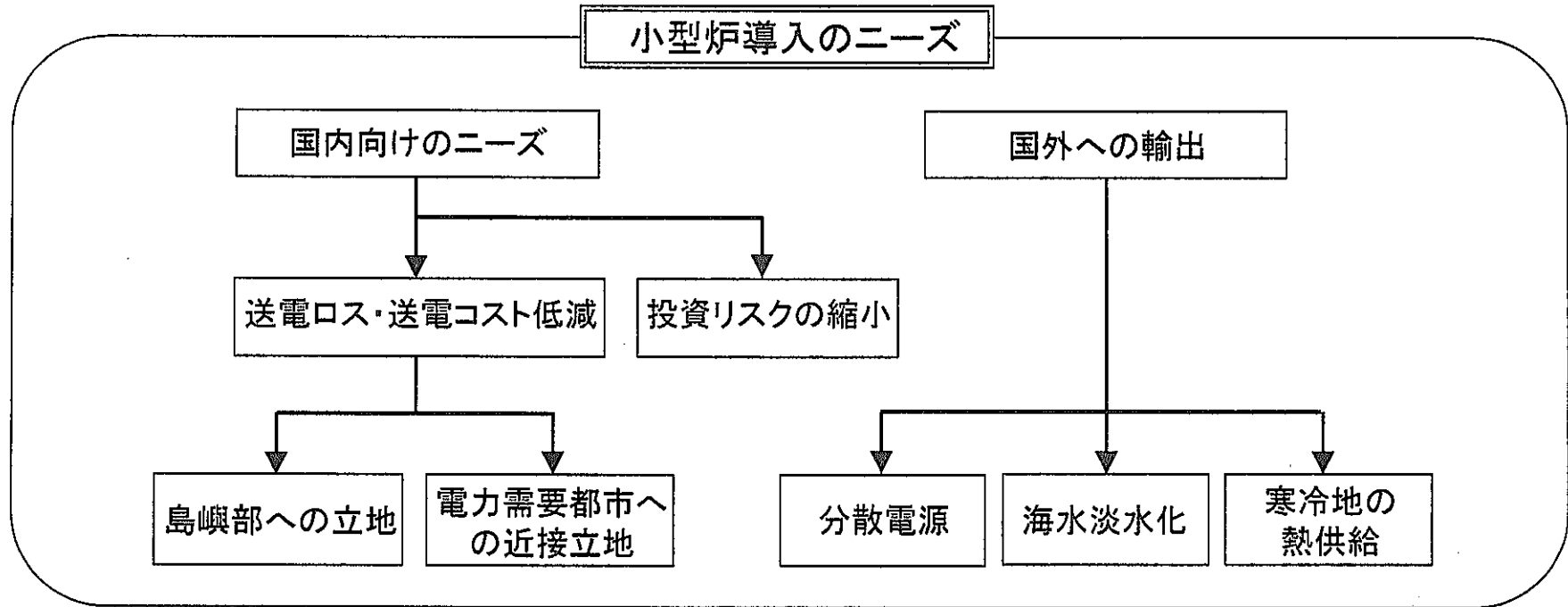
- ・炉心性能(スケールメリットの追求)

増殖比 > 1 の条件で炉心の成立性およびシステムの成立性の確認と問題点の整理

2000年度: 有望なシステム概念の検討

- ・システム概念の具体化(燃料製造、再処理との整合性)
- ・開発目標への達成度評価
- ・導入シナリオとの適合性の検討
- ・炉心損傷時の影響緩和方策の検討

# 小型炉のニーズと開発目標



# 小型炉の検討候補と検討の進め方

## 調査・検討対象

### 4S炉(ナトリウム炉)

重要

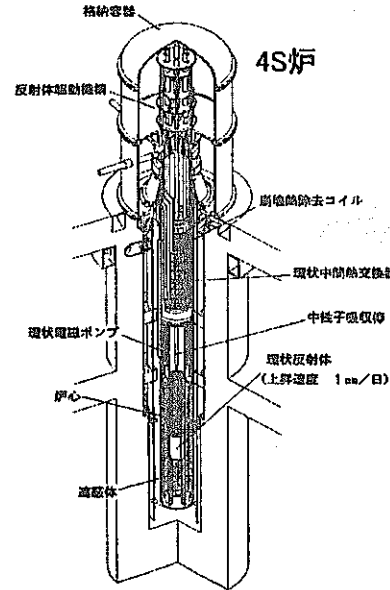
- ・反射体制御方式による長期運転サイクル炉心
- ・自然循環による崩壊熱除去
- ・燃料パッケージ化

付加的

- ・水系流量制御による運転操作簡易化
- ・モジュール化
- ・プレハブ工法による工期短縮

検討のポイント:

受動的炉停止系の導入方法



### PBMRをベースとした高速炉 (高温ヘリウムガス炉)

重要

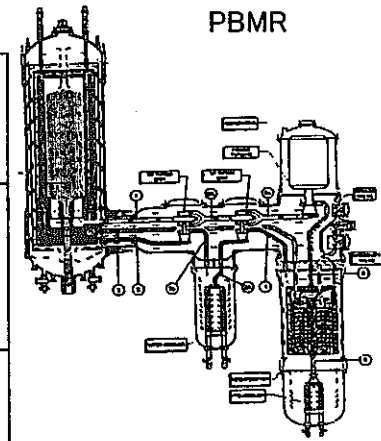
- ・自然循環による崩壊熱除去
- ・モジュール化

付加的

- ・プレハブ工法による工期短縮
- ・ガスタービン発電
- ・2次系なし

検討のポイント:

被覆粒子燃料の高速中性子場での高燃焼度に係わる健全性



### L4S炉(鉛ビスマス炉)

重要

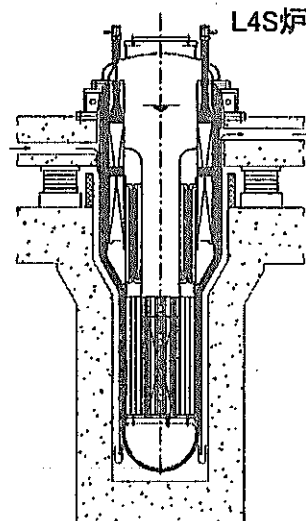
- ・反射体制御方式による長期運転サイクル炉心
- ・自然循環による崩壊熱除去
- ・燃料パッケージ化

付加的

- ・モジュール化
- ・プレハブ工法による工期短縮
- ・2次系なし

検討のポイント:

受動的炉停止系の導入方法



### その他の小型炉概念(調査済)

- ・ENHS...Encapsulated Nuclear Heat Source 原子力電池概念
- ・USLMFBR...Ultra-Small LMFBR 都市近接立地向け超小型炉
- ・RAPID...Refueling by All Pins Integrated Design 受動的炉停止系を有する多目的小型炉

### 第1期の目標

- ・ニーズに最も適合する小型炉概念の抽出
- ・開発課題の整理
- ・研究計画の策定

# プラントシステム 第1期の中間成果と2000年度計画

	概念	中間成果と課題	2000年度計画
ナトリウム炉	大型 (ループ型、タンク型)	・コストダウン方策(ループ数削減等による物量削減)の追求により、経済性の目標を達成しうる見込み	・ループ型、タンク型の各1概念の詳細物量を評価し、目標達成度の検討
	中型	・モジュール効果を追求すれば、経済性の目標を達成しうる可能性	・モジュール化が可能な範囲でスケールメリットを追求し、さらに経済性向上の検討
	2次系簡素化概念	・中間媒体を用いたナトリウム-水反応回避等の概念を抽出	・各概念を具体化して、技術的成立性評価
重金属炉	大型	・重量過大、耐震性、技術的成立性の観点から難	・鉛ビスマス冷却の中型モジュール炉概念を検討(技術的成立性、経済性等)
	中型	・重量低減可能 ・融点が低い鉛ビスマスの方が有利	
ガス炉	炭酸ガス (ピン型燃料) ヘリウムガス(ピン型燃料) ヘリウムガス(被覆粒子燃料)	・減圧事故時の冷却性、再臨界回避対策を考慮した炉心性能評価が必要 ・被覆粒子燃料の高速中性子場での高燃焼度化に係わる課題	・抽出された課題の検討
水炉	軽水炉 重水炉 超臨界圧軽水炉	・稠密炉心を採用した増殖炉心の検討	・再臨界回避対策の必要性と具体化の検討 ・各種事故時の炉心冷却性の評価
熔融塩炉	塩化物タンク型 モジュール炉	・増殖比1以上の可能性 ・熔融塩に対する構造材料の共存性が課題	・システムの技術的成立性、経済性の検討 ・構造材料の課題の整理
小型炉	ナトリウム炉 鉛ビスマス炉 ヘリウムガス炉	・小型炉開発の開発目標を整理	・ナトリウム炉(金属燃料)、鉛ビスマス炉(窒化物燃料)を中心に概念検討

## 第1期における燃料サイクルシステムの検討

		酸化物	窒化物	金属	検討のポイント
再処理	湿式	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工程の簡素化</li> <li>・ TRU回収率の向上</li> <li>・ 液体廃棄物発生量の低減</li> <li>・ Pu非分離回収</li> </ul>
	乾式	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ TRU回収率の向上</li> <li>・ 塩廃棄物処理</li> <li>・ バッチ処理に伴う核物質移送技術</li> <li>・ 計量管理手法の確立</li> </ul>
燃料製造	ペレット	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工程の簡素化</li> <li>・ 低除染燃料への適用</li> <li>・ 遠隔自動化</li> </ul>
	振動充填	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 造粒工程の合理化</li> <li>・ Pu富化度、充填密度等の品質管理</li> <li>・ 廃棄物量低減</li> </ul>
	鑄造			○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鑄型廃棄物量の低減</li> <li>・ 歩留まりの向上</li> <li>・ 溶解るつぼの寿命延長</li> </ul>
	被覆粒子	○	○		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉システム、再処理との整合性</li> </ul>

(注)○は、検討対象を示す。

## FBR燃料サイクルシステム検討の視点

### ○燃料中の不純物許容量を高くとれる



- 再処理の低除染化(精製工程の削除)
- プロセスの簡素化
- 廃棄物発生量の低減
- プラントのコンパクト化
- 核拡散抵抗性の向上

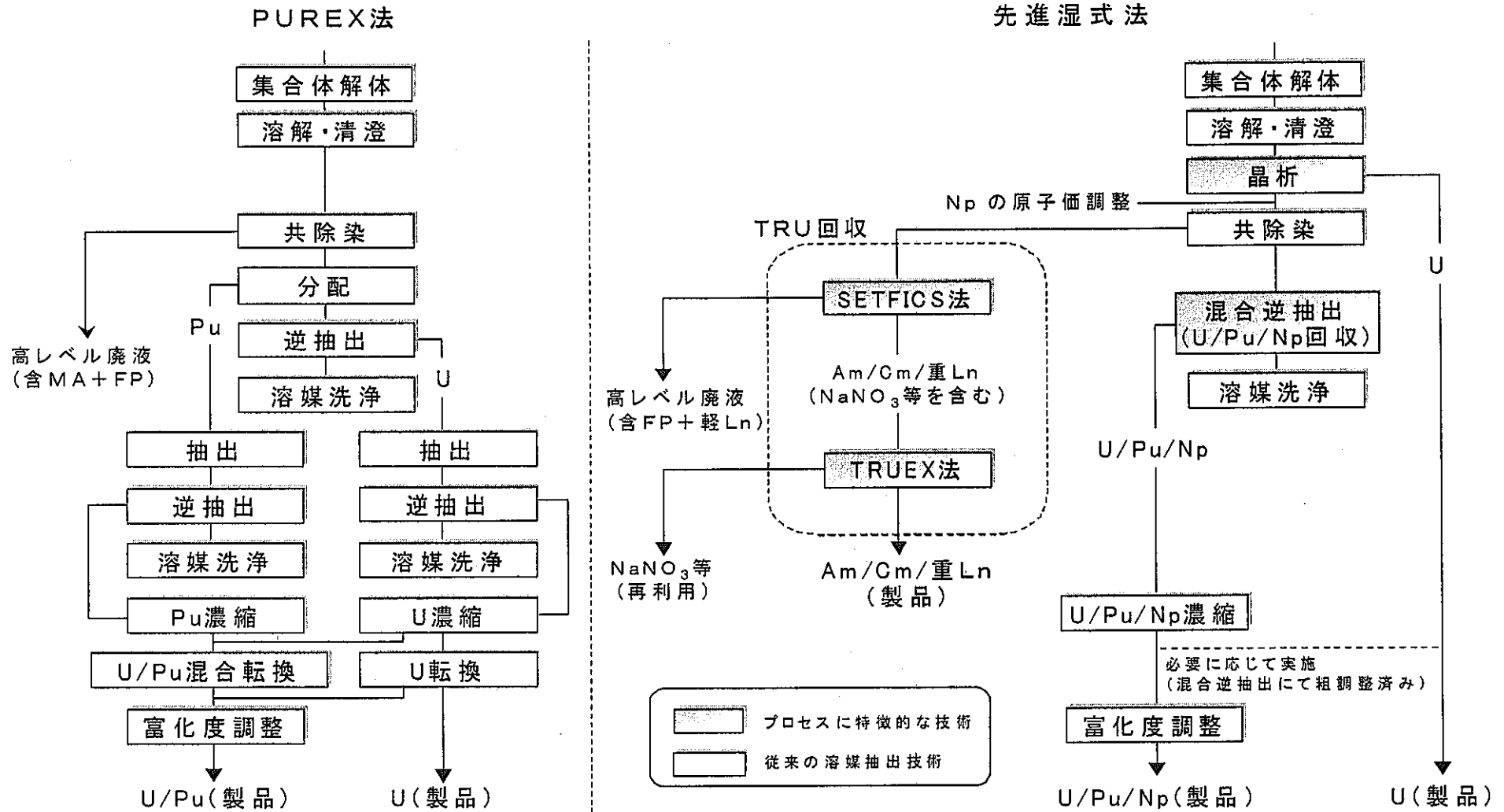
### ○多量のFPを含んだTRUの取り扱い



- 十分な安全対策
- セル内での遠隔操作・保守技術
- 臨界、閉じこめ機能、遮蔽
- 査察対応

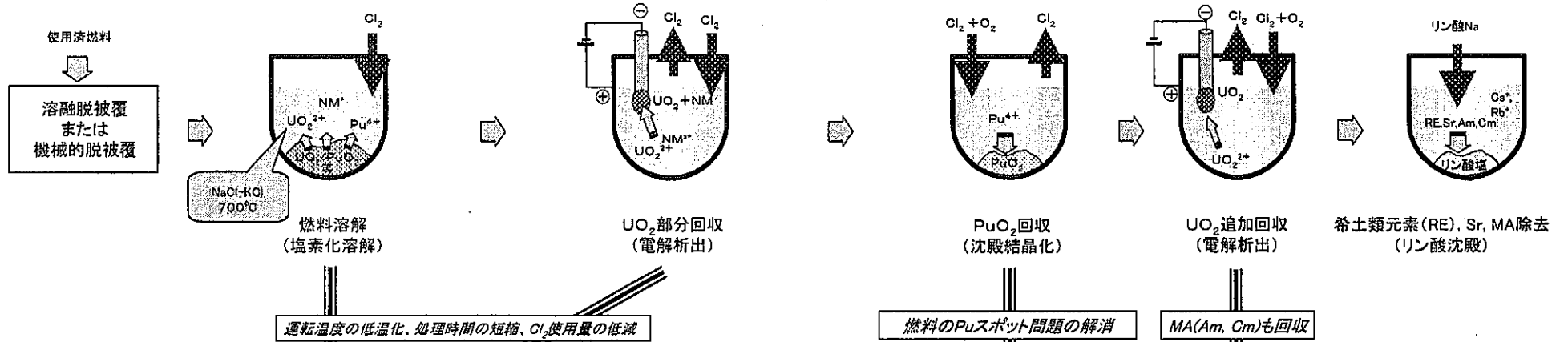
### ○施設の一体化の検討(乾式:50tHM/年、湿式:200tHM/年)

# 先進湿式法のプロセスフロー

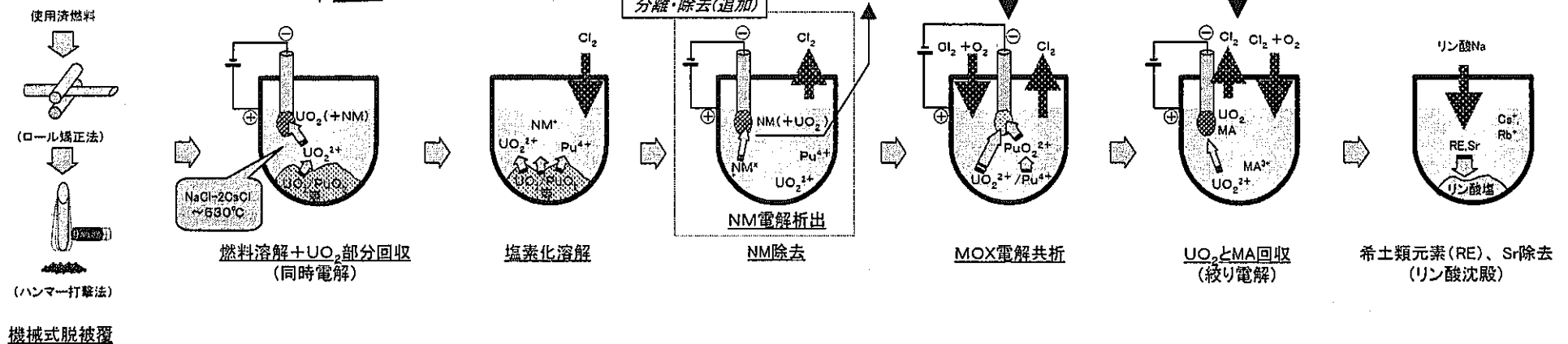


# 酸化物電解法プロセスフロー(酸化物燃料への適用例) [RIAR開発プロセスとの比較]

## 酸化物電解法(ロシアRIAR開発プロセス)



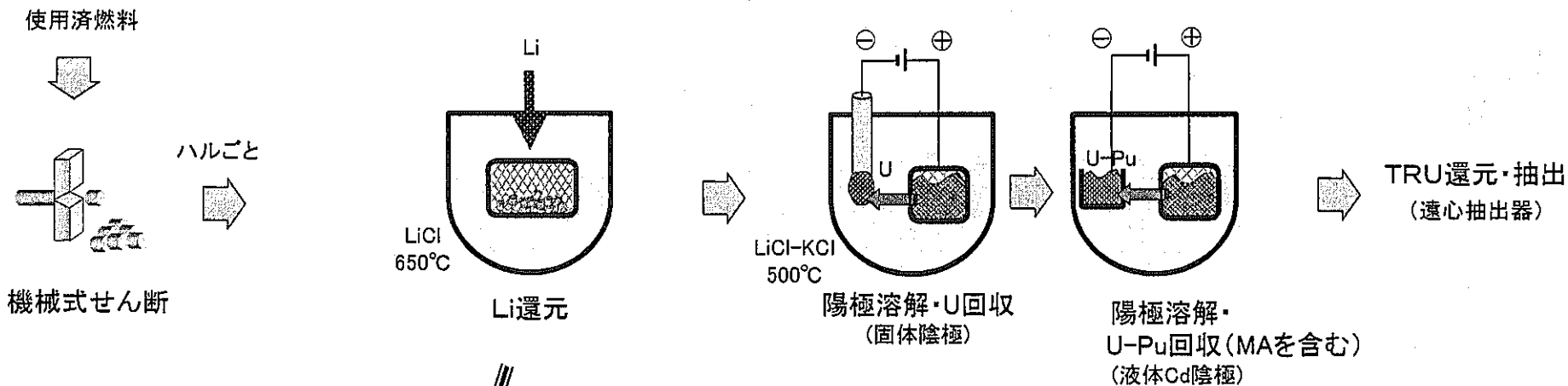
## 酸化物電解法(改良プロセス)





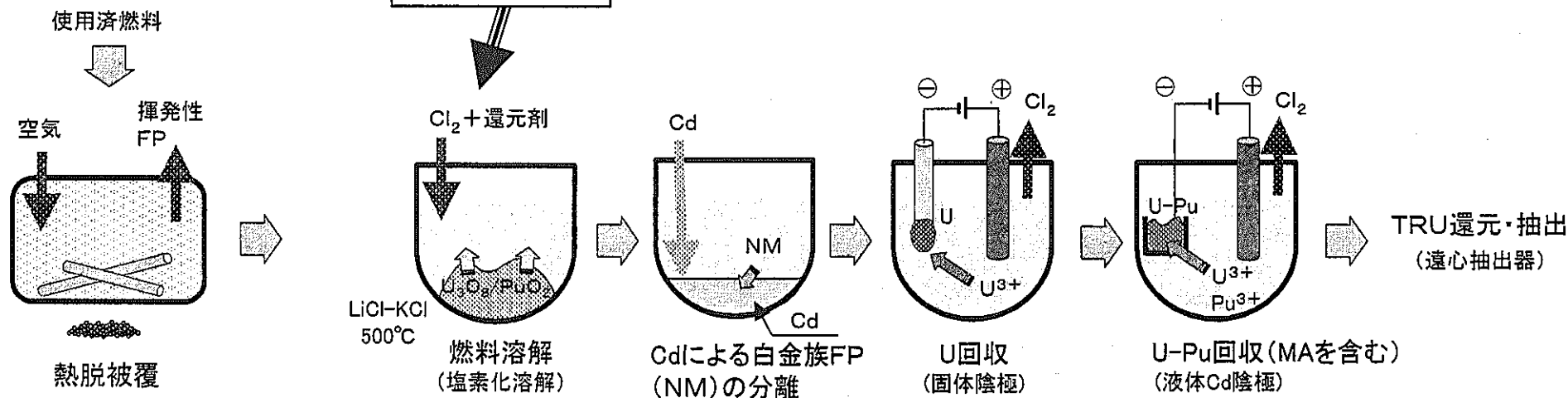
# 金属電解法のプロセスフロー [ANL開発プロセスとの比較]

## 金属電解法 (ANL開発プロセス)

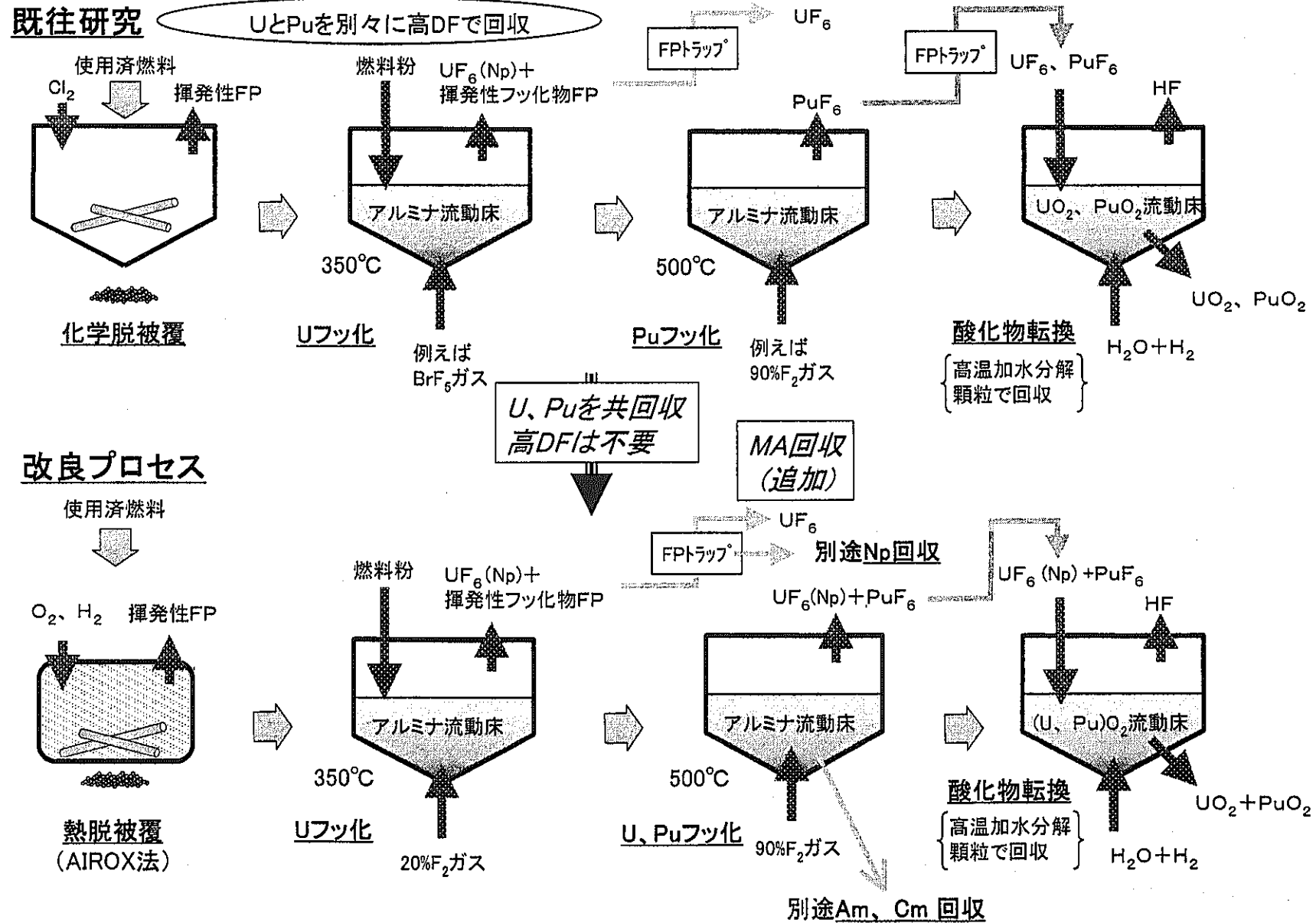


## 金属電解法 (改良プロセス)

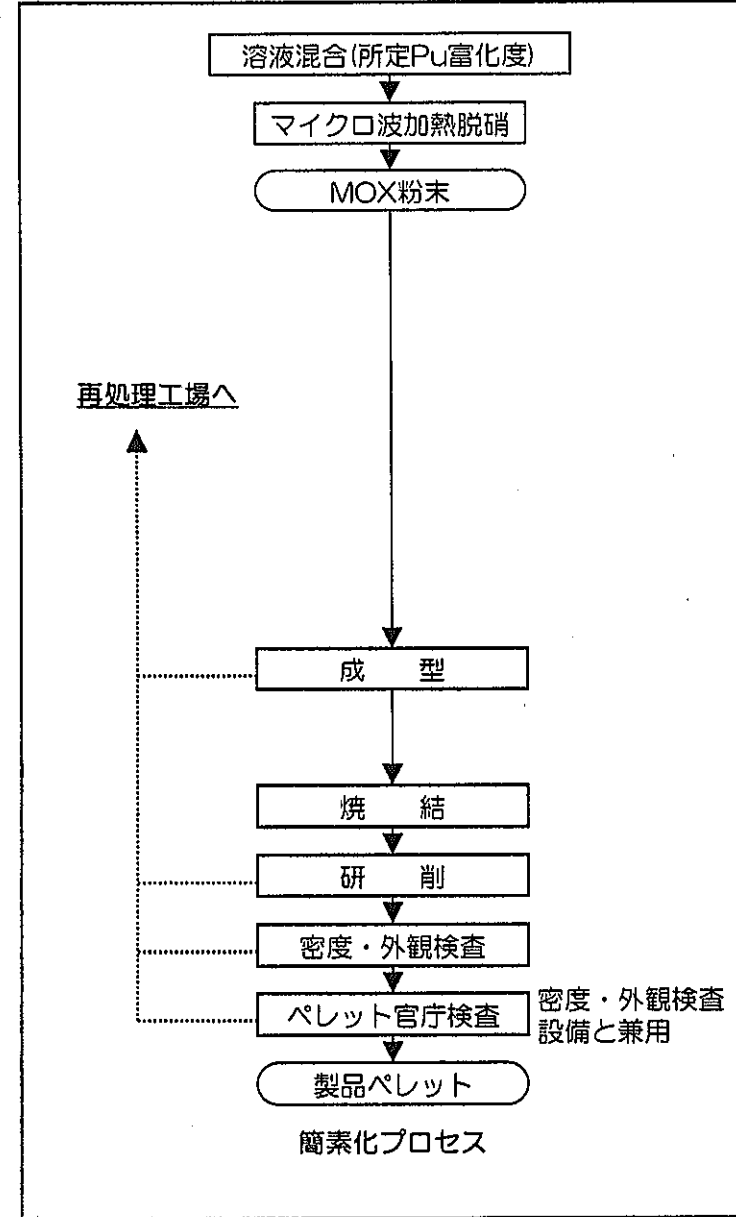
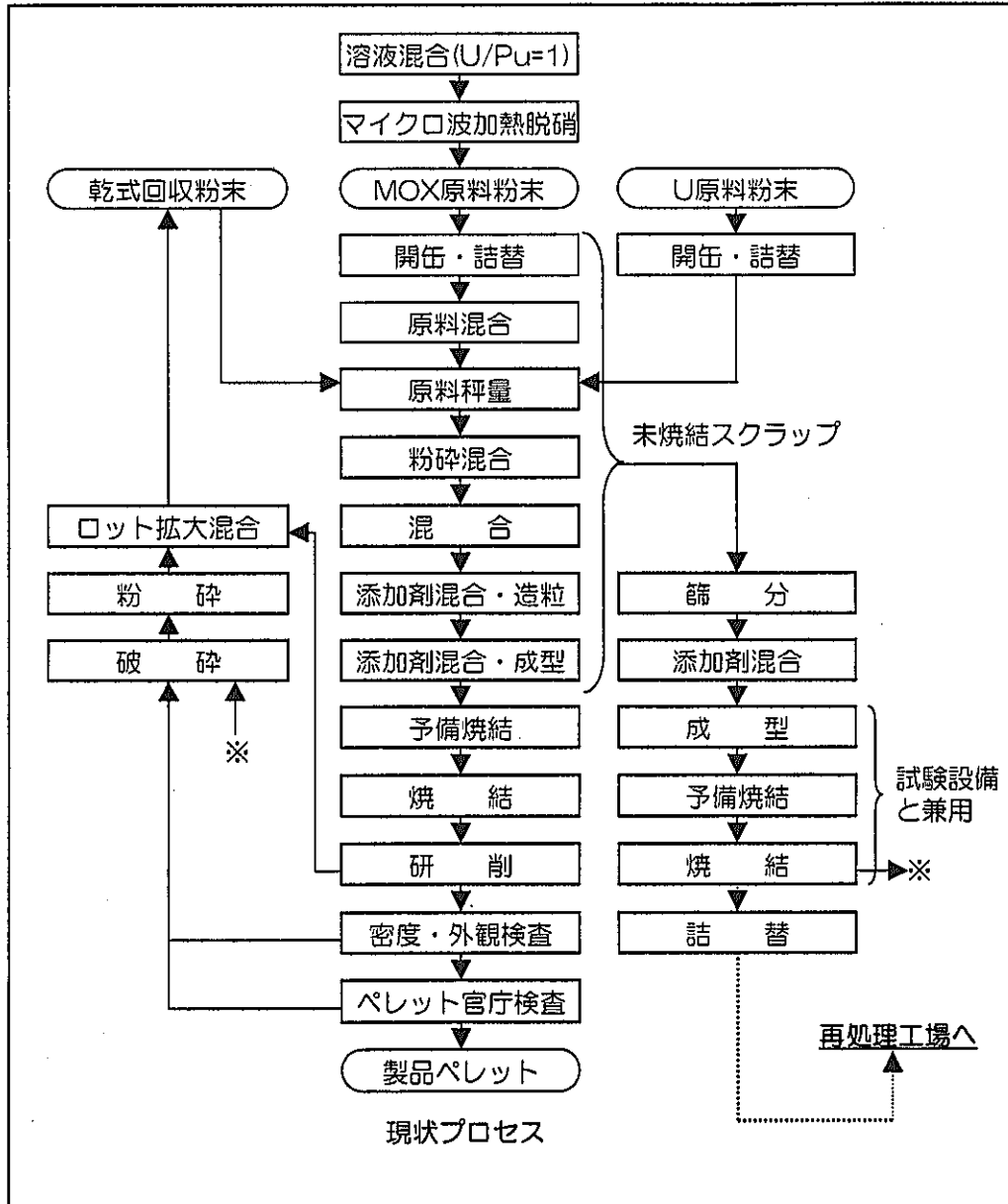
塩廃棄物の削減



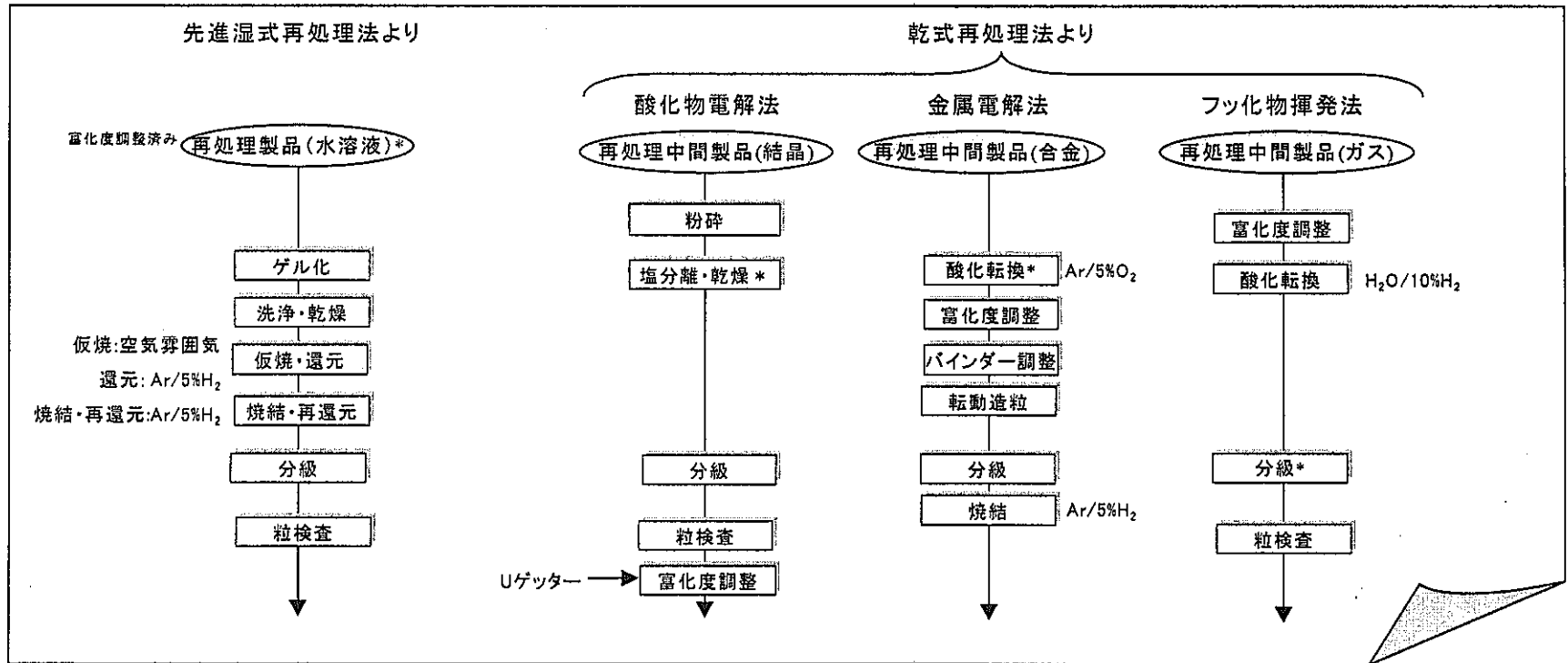
# フッ化物揮発法のプロセスフロー[既往研究との比較]



# 簡素化プロセスのペレット製造工程 [現状プロセスとの比較]

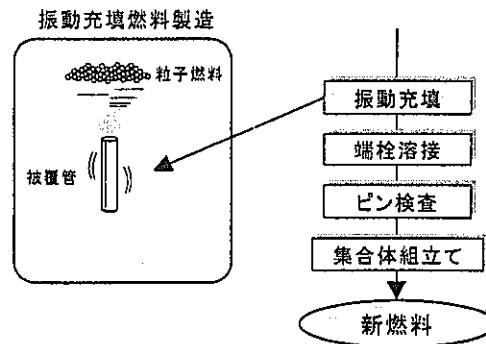


# 振動充填燃料製造システム(酸化物燃料への適用例)



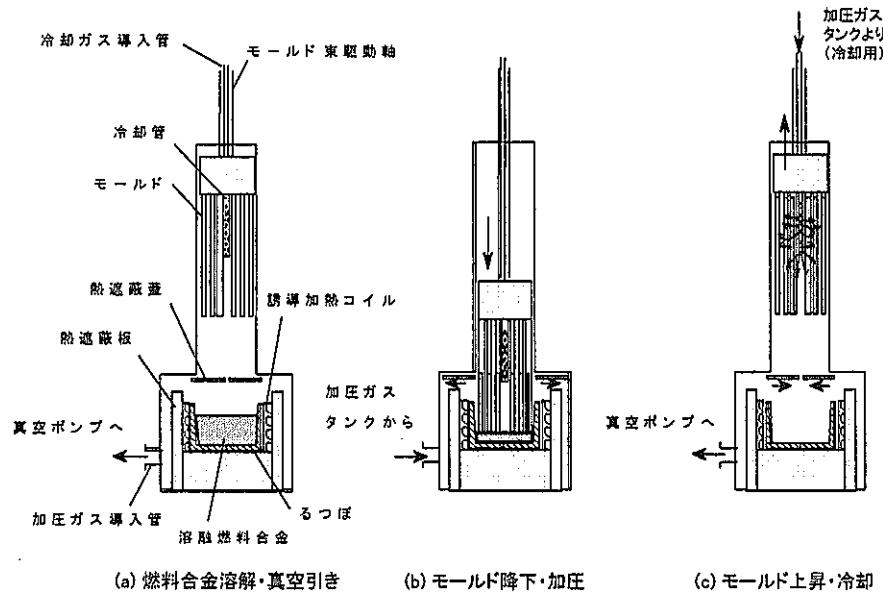
顆粒製造工程

振動充填工程

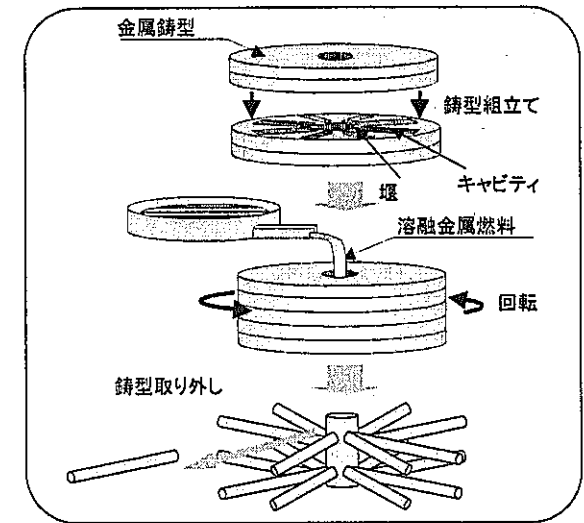
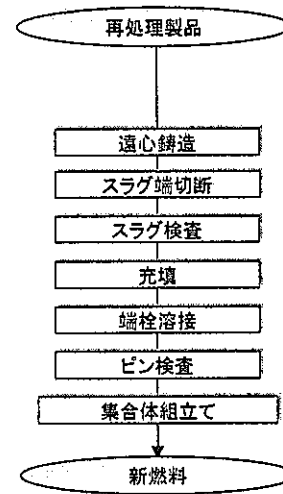


本研究においては、\*を付けた工程までを便宜的に再処理工程とした。

# 射出成型法および遠心鑄造法による金属燃料鑄造

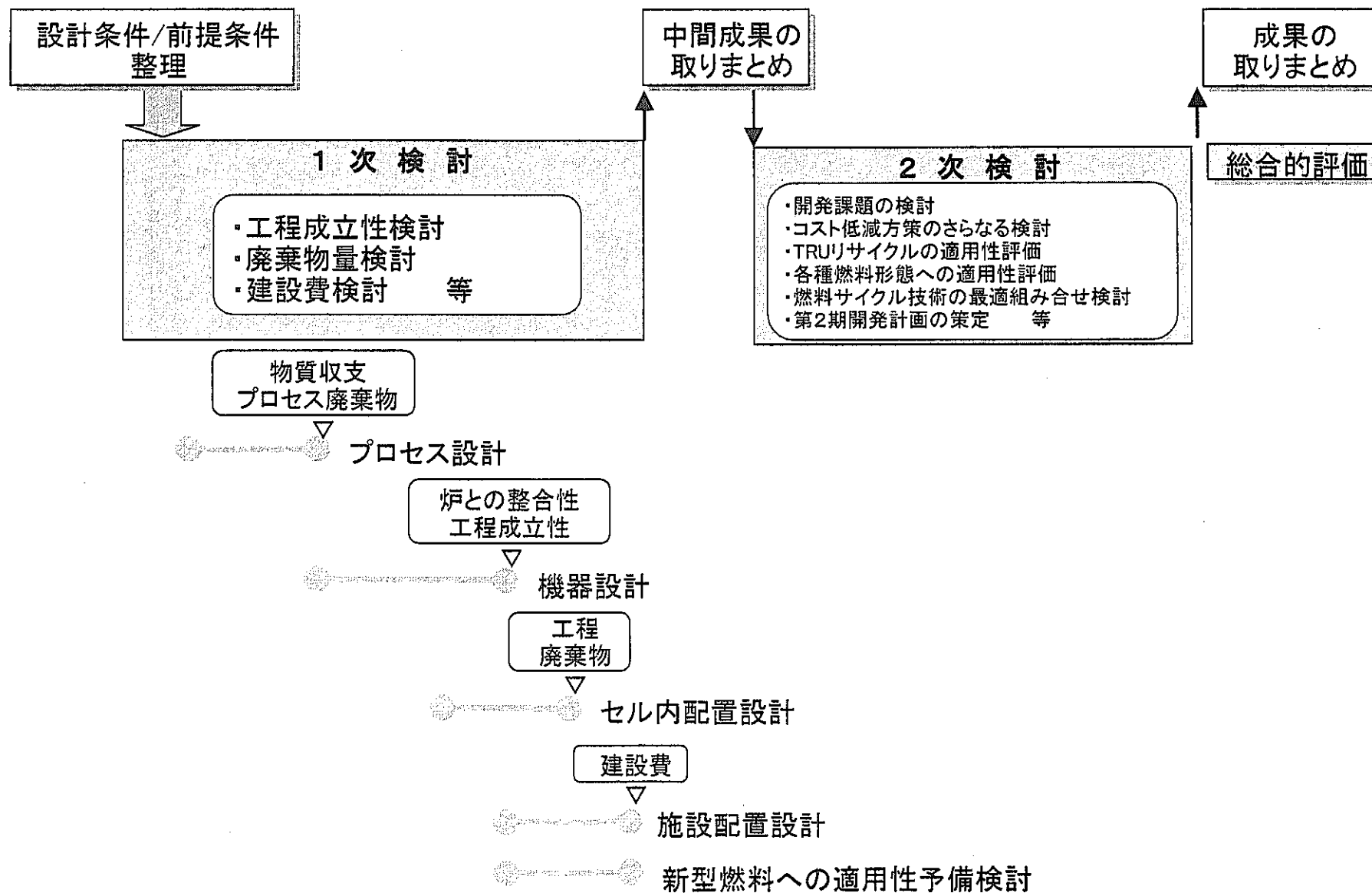


射出成型法



遠心鑄造法

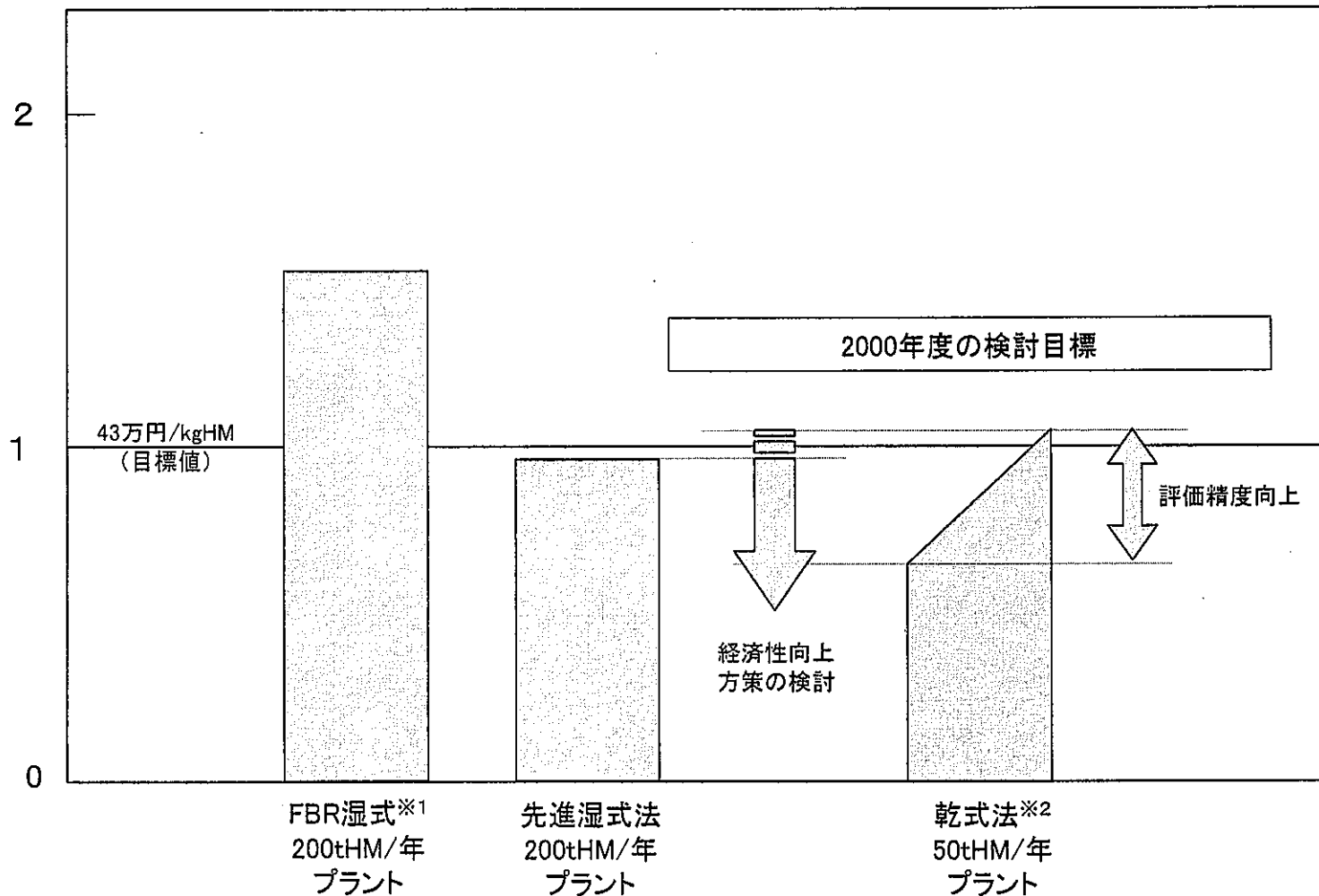
# 燃料サイクルシステムの検討評価の進め方



# 湿式および乾式システムの経済性試算結果

再処理・燃料製造費  
(相対値)

燃料形態: 酸化物燃料、燃焼度: 15万MWd/t



※1 従来湿式法に遠心分離器の採用、建屋の合理化等で経済性を向上

※2 1999年度は乾式法の操業費は未評価であるため、湿式法並みの建設費の9%/年として評価

## 再処理 第1期の中間成果と2000年度計画

サイクル技術		燃料形態	中間成果と課題	2000年度計画	
				システム設計	要素技術
湿式	先進湿式法	酸化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し</li> <li>・TRU99%以上の回収が可能</li> <li>・先進湿式プロセス(共回収、晶析、TRU回収)の確立(課題)</li> <li>・代替・補完技術によるさらなる経済性向上 等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発課題の検討</li> <li>・さらなるコストダウンの追求</li> <li>・効率的なMA分離システムの追求</li> <li>・各種燃料形態への適用性評価</li> <li>・燃料サイクル技術の最適組み合わせ検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単サイクルプロセス評価</li> <li>・U晶析試験</li> <li>・代替・補完技術基礎試験</li> </ul>
	酸化物電解法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・絞り電解工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・Pu/U共析出挙動評価</li> <li>・塩廃棄物処理技術の確立</li> <li>・溶解るつば長寿命化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・オフガス処理リサイクル検討</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> <li>・溶解るつばの長寿命化の検討</li> </ul>
	金属電解法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・TRU還元抽出工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・塩浴塩素化溶解挙動評価</li> <li>・製品金属の酸化転換挙動評価</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・Li還元試験</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> </ul>
	フッ化物揮発法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・廃アルミナ媒体からの回収工程によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・MA回収挙動評価</li> <li>・Puのフッ化特性評価</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・U転換施設運転情報調査</li> <li>・セル内の遠隔操作・保守性の検討</li> </ul>
	金属電解法	金属	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)</li> <li>・塩廃棄物処理工程での回収によりTRU99%以上の回収率確保の見通し(課題)</li> <li>・電解処理速度確認</li> <li>・塩廃棄物処理技術実証</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・電解試験</li> <li>・塩廃棄物処理法の調査</li> </ul>

(注) 50tHM/年の小規模施設においても、湿式法と同程度の操業費割合であれば、経済性目標を達成できる見通し。



# 燃料製造 第1期の中間成果と2000年度計画

サイクル技術		燃料形態	中間成果と課題	2000年度計画		
				システム設計	要素技術	
ペレット	簡素化ペレット法	酸化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(課題)</li> <li>・低除染燃料への適用性確認</li> <li>・セル内の遠隔操作・保守性の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発課題の検討</li> <li>・さらなるコストダウンの追求</li> <li>・MA含有低除染燃料製造システム合理化</li> <li>・各種燃料形態への適用性評価</li> <li>・燃料サイクル技術の最適組み合わせ検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製造工程確認試験</li> <li>・Np-MOX、Am-MOX製造技術開発</li> </ul>	
	湿式ゲル化法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済性目標を達成できる見通し(課題)</li> <li>・小径粒子の量産化の検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・小径粒子製造試験</li> <li>・挙動評価コード開発</li> <li>・充填挙動評価試験(振動充填共通)</li> </ul>	
	酸化物電解法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化物電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・低除染燃料に対する密度、Pu分布均一性の確認</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・低除染燃料充填特性評価</li> </ul>	
	振動充填		金属電解法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・転動造粒法における顆粒特性評価</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・転動造粒法検討</li> </ul>
	フッ化物揮発法対応		<ul style="list-style-type: none"> <li>・フッ化物電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・顆粒間のPu富化度均一性の確認</li> <li>・低O/M燃料のプロセスの合理化</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・U転換施設運転情報調査</li> </ul>	
鋳造	射出成型法	金属	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属電解法との一体型として検討</li> <li>・経済性目標を達成できる見通し(注)(課題)</li> <li>・モールド廃棄物量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウラン合金射出試験</li> <li>・工程廃棄物調査</li> </ul>		
	遠心鋳造法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物発生量低減の可能性はありと評価(課題)</li> <li>・合金組成の均一性確認</li> <li>・燃料合金と金型の共存性確認</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・合金均一性、金型の共存性の検討</li> </ul>	

(注)50tHM/年の小規模施設においても、湿式法と同程度の操業費割合であれば、経済性目標を達成できる見通し。

## 第1期中間成果のまとめ

### 1. 燃料形態

#### ○酸化物燃料

- ・増殖性(約1.2)、倍增時間(約30年)
- ・高燃焼度化(15万MWd/t)のための課題は、被覆管材料の開発

#### ○金属燃料、窒化物燃料

- ・増殖性(約1.3)、倍增時間(約20年)と酸化物より良い
- ・高燃焼度照射実績等のデータが少ない(国際協力を活用した開発計画の策定が必要)
- ・金属燃料は、最高使用温度制限があり、高温化のためには、ジルコニウムライナー燃料等の開発が必要
- ・窒化物燃料は、事故時の窒素解離問題等によりガス炉に適用

### 2. プラントシステム

- ・ナトリウム炉では、物量削減等のコストダウン方策の追求により経済性目標達成の見込み
- ・重金属炉では、重量過大、耐震性、技術的成立性等の観点から、鉛ビスマス冷却中型モジュール炉が有望
- ・ガス炉では、減圧事故時の冷却性、再臨界回避対策の具体化が課題
- ・水炉では稠密炉心を採用して増殖炉心を検討、熔融塩炉は構造材料の共存性が課題
- ・小型炉では、ナトリウム炉、鉛ビスマス炉を中心に、今後、概念検討

### 3. 燃料サイクルシステム

- ・再処理、燃料製造各技術とも、いずれも実用化の見通しがあり、経済性向上のための課題を抽出した
- ・先進湿式プラントではTRU回収工程を付加しても経済性目標を達成できる見通し
- ・乾式プラントについては湿式法と同程度の操業費割合であれば、経済性目標を達成できる見通し
- ・各再処理法において、TRUを99%以上回収可能

## 第2期の展開について

- ◆第2期計画の基本的な考え方
- ◆2001年度の研究計画

## 今回の第2期計画説明の位置付け

現時点で、第1期の成果を見通し、第2期に向けた課題を抽出



第2期計画の基本的な考え方

第2期の立ち上げ(2001年度計画)

## 実用化戦略調査研究の第2期の目的

### 第2期の目的

- FBRサイクルの実用化候補概念の絞り込み
- 研究開発テーマの特定



### 第2期の基本的な考え方

- FBRサイクルの実用化候補概念として、有望な2～3の候補に絞り込む
  - ・ 絞り込みのための定量的な比較評価が可能となるよう概念設計を進める
  - ・ 絞り込みに必要な要素技術開発(データを取得する試験の実施、設計評価技術の整備等)にも重点を置く
  - ・ FBRシステムと燃料サイクルシステムとの整合性を図りながら研究を進める
- 競争力あるFBRサイクルの技術体系整備(目標:2015年頃)に向けた開発計画(ロードマップ)をまとめる
  - ・ 国内外の研究資源の有効活用 等の検討
- 第2期より以降のための研究環境・インフラ等の整備に着手

# 実用化戦略調査研究の第2期の展開

	2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
炉心燃料	<b>MOX燃料要素技術開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度化、TRU含有燃料の実現性</li> <li>振動充填燃料とペレット燃料の比較 等</li> </ul>			第2期の中間とりまとめ <b>C&amp;R</b> 中間評価を反映し、設計研究内容、要素技術開発項目（データ取得試験等）を見直し、選択肢の絞り込みに向け実施	FBRサイクル全体の統合と、 選択肢の比較評価、絞り込み
	<b>新型燃料要素技術開発</b> （2000年度の検討に基づき、その後の計画を立てる）				
プラントシステム	<b>概念設計</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Na冷却炉（大型＋中型モジュール）</li> <li>PbBi冷却中型モジュール炉</li> <li>ガス冷却炉（He冷却またはCO2冷却）</li> <li>小型炉</li> </ul>				
	<b>要素技術開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Na冷却炉の経済性向上キーテクノロジー</li> <li>ガス冷却炉、PbBi冷却炉の成立性キーテクノロジー 等</li> </ul>				
燃料サイクル	<b>概念設計</b> （再処理、燃料製造をサイクルとして評価して有望概念を選択） <b>[再処理]</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>先進湿式法</li> <li>乾式法（酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つ）</li> </ul> <b>[燃料製造]</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>簡素化ペレット法</li> <li>振動充填法</li> <li>鑄造法</li> </ul>				
	<b>要素技術開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>設計を深めるために必要なデータの取得</li> <li>有望な革新技術の見極め 等</li> </ul>				
統合・評価	総合的な評価手法の開発、整備 研究開発計画（設備の利活用）の検討			<b>定量的な比較評価の実施</b>	<b>開発ロードマップの検討</b>

## 2001年度計画(炉心燃料)

	第2期の方針	2001年度計画
酸化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度とTRU含有(低除染)燃料の実現見通しを付ける</li> <li>振動充填燃料とペレット燃料の比較で合理化を模索</li> </ul>	<p>[共通]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高性能燃料被覆管(ODS鋼)の特性試験</li> <li>照射試験の準備</li> </ul> <p>[ペレット燃料]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>TRU含有燃料の燃料設計評価技術の開発</li> <li>TRU含有燃料の照射試験の準備</li> </ul> <p>[振動充填燃料]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料設計評価技術の開発</li> <li>照射試験の準備(TRU含有燃料を含む)</li> </ul>
金属燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度とTRU含有燃料の実現可能性を検討</li> <li>高温化(Zrライナー等)の検討</li> <li>米国との協力を模索</li> </ul> <p>[2000年度の成果により、 金属燃料の取り扱いを検討]</p>	<p>2001年度の要素技術は、 燃料物性の評価程度に留める。</p>
窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペレット燃料と振動充填燃料の実現性の見通しを付ける</li> <li>高燃焼度とTRU含有燃料の実現可能性を検討</li> <li>被覆粒子燃料とピン型燃料の見通しをつける(ガス炉の場合)</li> <li>ガス炉との組み合わせを前提に開発方針を検討(欧州との協力を模索)</li> </ul> <p>[2000年度の成果により、 窒化物燃料の取り扱いを検討]</p>	

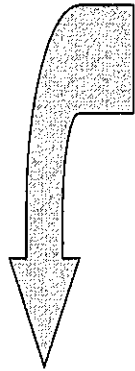
## 第2期の展開(MOX燃料開発の主要なR&D)

### 第2期の主な検討課題

- 高性能被覆管の強度、照射特性評価
- ペレット燃料と振動充填燃料の性能評価
- TRU含有燃料の照射挙動評価

### 第1期の成果

- 長寿命炉心材料の開発(強度、製作性改善)
- TRU含有MOX燃料の開発計画の策定



2001年度 | 2002年度 | 2003年度 | 2004年度 | 2005年度

### 燃料開発

概念設計  
(燃料設計:TRU含有燃料を含む)

中間  
まとめ

概念設計  
(要素試験成果  
の反映)

まとめ

(「炉型に共通な要素技術開発」の図と重複記述)

### 高性能被覆管(ODS鋼)の強度、照射特性評価 (\*)

強度試験(炉外)

材料照射試験(常陽、BN-600も想定)

(「ペレット燃料製造法の主要なR&D」の図と重複あり)

### TRU含有燃料の照射挙動評価

TRU含有燃料評価技術開発

TRU含有燃料照射試験(常陽)

(「振動充填燃料製造法の主要なR&D」の図と重複あり)

### ペレット燃料と振動充填燃料の性能比較

振動充填燃料  
の評価技術開発

振動充填燃料性能評価(照射を含む:PSI共研)  
(ペレット燃料との比較)

\* 「常陽」での燃料ピン照射に向けた準備も進める



## 2001年度計画(プラントシステム)

	第2期の方針	2001年度計画
ナトリウム炉	<p>大型炉および中型モジュール炉を検討対象 (2次系簡素化炉を含む)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>革新的な経済性向上方策の技術的成立性確認</li> <li>革新的概念採用の下、安全性・信頼性を確認</li> </ul>	<p>概念設計を実施 要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>機器合体の課題克服のための試験準備</li> <li>2次系簡素化概念の成立性確認試験準備</li> <li>高Cr鋼(12Cr鋼)の開発 等</li> </ul> <p>.....</p> <p>炉型共通要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高性能被覆管(ODS鋼)の特性試験(炉外)、照射試験の準備</li> <li>再臨界回避方策(CDA対策)の原理確認試験(IGR炉での炉内試験)</li> <li>受動的炉停止機構の照射試験準備(常陽)</li> <li>免震技術開発</li> <li>高温構造設計手法の高度化 等</li> </ul>
重金属炉	<p>PbBi中型モジュール炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>PbBi固有の課題を克服できるか確認</li> <li>国内外の協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施 要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食データ調査</li> <li>放射性Po生成対策の調査 等</li> </ul>
ガス炉	<p>He冷却炉またはCO2冷却炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高燃焼度化の実現見通し確認</li> <li>稠密炉心での安全性の確認</li> <li>固有の安全特性によるCDA回避の見通し確認</li> <li>国際協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施 要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>被覆材料調査</li> <li>炉心燃料の除熱性能向上試験準備 等</li> </ul>
水炉	<ul style="list-style-type: none"> <li>水冷却増殖炉の可能性を追求し、FBRの実用化シナリオへの適合性検討</li> </ul>	<p>原研等との協力の下に検討</p>
小型炉	<p>Na冷却炉およびPbBi冷却炉を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>社会ニーズの多様化に対応できる概念の構築</li> </ul>	<p>概念設計を実施 要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>大型炉、中型モジュール炉の成果を活用</li> </ul>

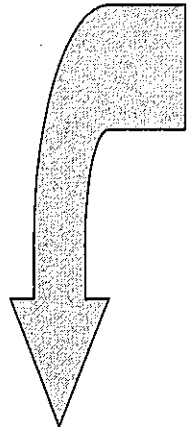
## 第2期の展開(ナトリウム冷却炉の主要なR&D)

### 第2期の主な検討課題

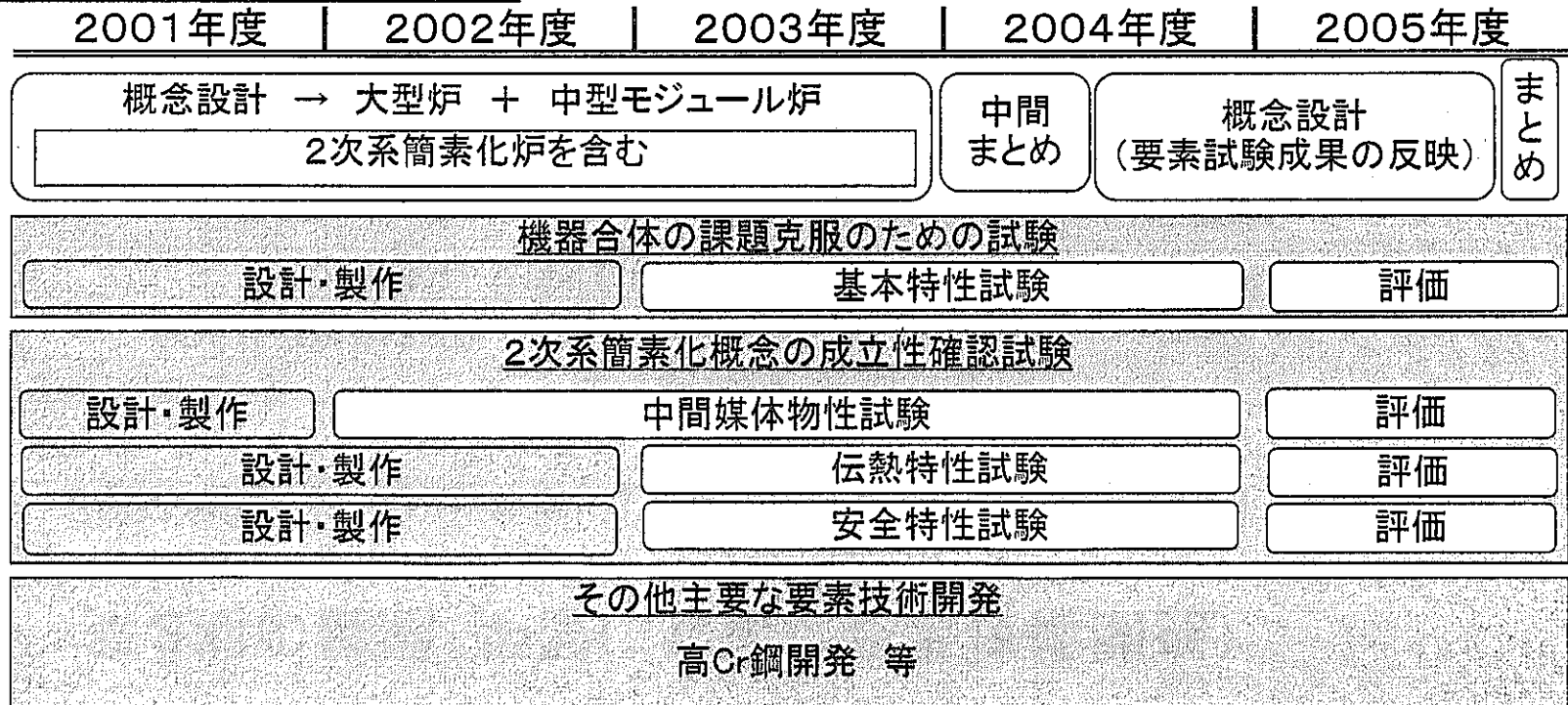
- 機器合体概念
- 新型SG開発(2次系簡素化)
- 高Cr鋼開発、他  
(炉型に共通な事項)
- 高性能燃料被覆管開発
- CDA対策技術開発
- 受動的炉停止機構開発
- 免震技術開発
- 高温構造設計手法高度化

### 第1期の成果

- 実用化目標(特に、経済性)を達成できるプラント像の創出
  - ・ 大型
  - ・ 中型モジュール



Na冷却炉



## 第2期の展開(炉型に共通な要素技術開発)

2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
--------	--------	--------	--------	--------

炉型共通

### 高性能被覆管の特性確認

ODS鋼溶接特性試験

ODS鋼クリープ特性試験

評価・基準化検討

材料照射試験(常陽、BN-600も想定)

### GDA対策技術の開発

再臨界回避方策の原理確認試験(IGR炉内試験)

より合理的な方策の基本特性試験

溶融燃料の流出特性評価

### 受動的炉停止機構の開発

試験体製作

常陽での照射試験・評価

### その他主要な要素技術開発

免震技術開発、高温構造設計手法高度化、燃料ピン照射試験の準備 等

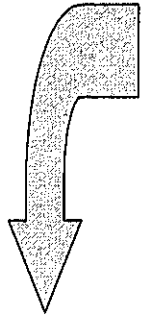
## 第2期の展開(重金属冷却炉の主要なR&D)

### 第2期の主な検討課題

- 防食技術評価
- 保守・補修性評価
- 放射性P<sub>o</sub>の生成対策
- SG伝熱管破損時の影響評価

### 第1期の成果

- PbBi冷却中型モジュール型炉が有力



重金属冷却炉

2001年度

2002年度

2003年度

2004年度

2005年度

概念設計 → 1概念  
(PbBi冷却中型モジュール型炉)  
国内外の機関との協力により実施

中間  
まとめ

概念設計  
(要素試験成果の反映)

まとめ

### 防食技術評価

腐食データの調査、試験

### 保守、補修性評価

PbBi除去特性試験、評価

### 放射性P<sub>o</sub>の生成対策

カバーガス中等への移行挙動の評価

### その他主要な要素技術開発

SG伝熱管破損時の影響評価 等

注) 要素技術開発についても国内外の機関との協力により実施

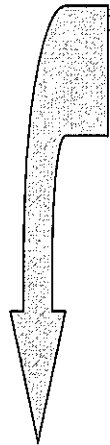
# 第2期の展開(ガス冷却炉の主要なR&D)

## 第2期の主な検討課題

- He冷却またはCO2冷却を選択  
(He冷却:被覆粒子燃料、高温ピン型燃料)
- ・ 高燃焼度化の可能性
  - ・ 炉心燃料の除熱性向上
- (CO2冷却:ピン型燃料)
- ・ 高燃焼度化の可能性
  - ・ 炉心燃料の除熱性能向上(ピン型)
  - ・ CDA時の冷却方策(ピン型)
  - ・ 高温腐食

## 第1期の成果

- 「FBR」としての概念を検討し、キーポイントの抽出

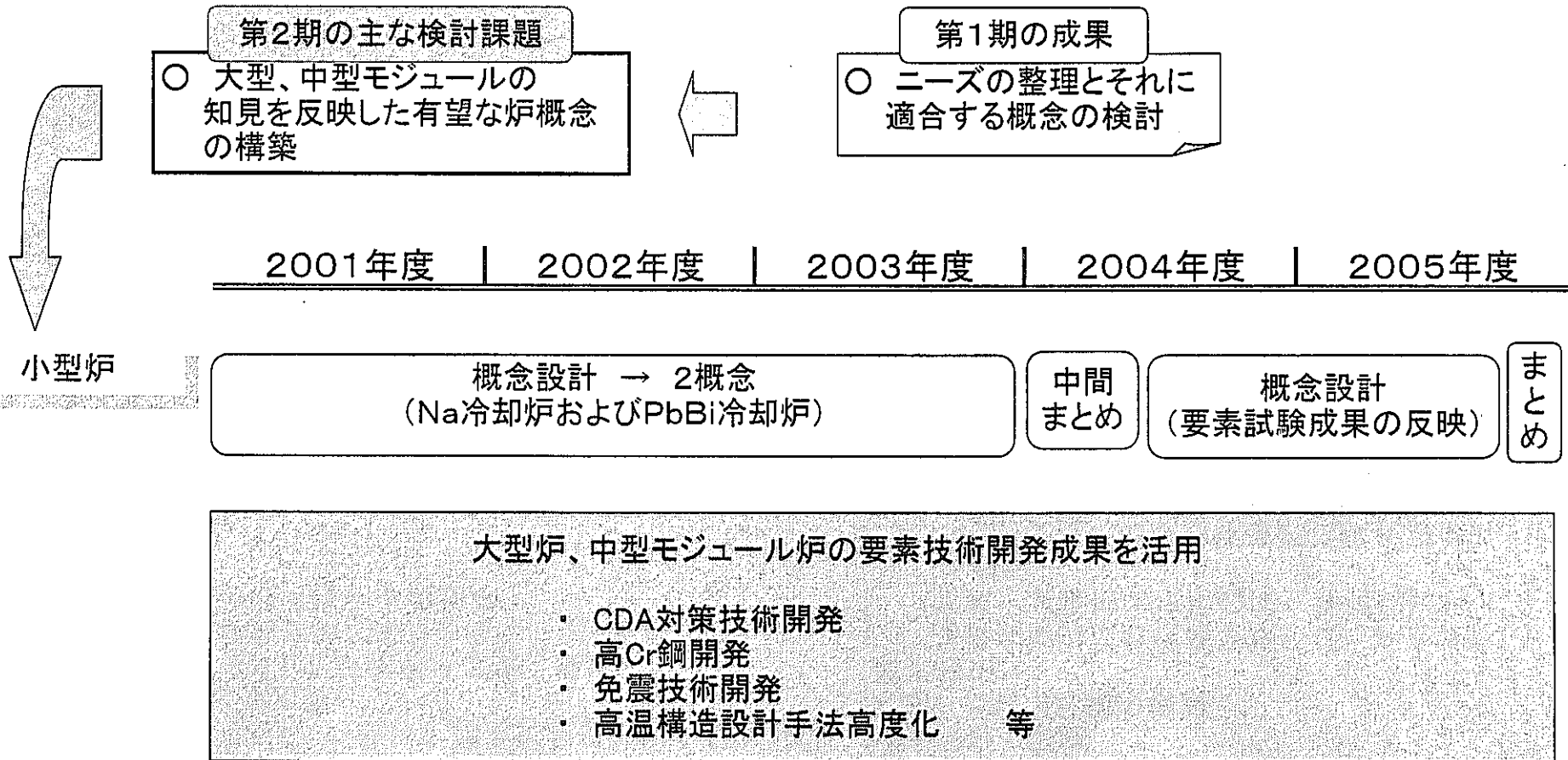


ガス冷却炉

2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
概念設計 (He冷却またはCO2冷却) 国内外の機関との協力により実施		中間 まとめ	概念設計 (要素試験成果の反映)	まとめ
高燃焼度化の可能性				
被覆材料の調査、検討及び試作			照射準備	
炉心燃料の除熱性能向上				
試験体設計・製作			評価	
試験				
その他主要な要素技術開発(CO2冷却の場合) CDA時の冷却方策、高温腐食試験				

注) 要素技術開発についても国内外の機関との協力により実施

## 第2期の展開(小型炉の主要なR&D)



## 2001年度計画(再処理)

	第2期の方針	2001年度計画
湿式	<p>先進湿式法(晶析+簡素化溶媒抽出+TRU回収)を検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 選択した技術の成立性を確認</li> <li>・ 革新技術の取り込みによる性能向上と経済性向上の追求</li> </ul>	<p>概念設計を実施 RETFの利用計画の検討</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 晶析技術の成立性確認試験(U、Pu試験)</li> <li>・ 簡素化溶媒抽出技術の成立性確認試験(U試験)</li> <li>・ TRU回収技術の成立性確認試験(U試験)</li> <li>・ システム高度化技術(イオン交換法、アミン抽出法等の革新的代替技術)の基礎試験等</li> </ul>
乾式	<p>酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法の内、2つを検討対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ オリジナル概念の創出(湿式-乾式ハイブリッドを含む)</li> <li>・ 設計に必要なデータの取得</li> <li>・ 経済性向上の追及</li> <li>・ 国際協力を活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施 RETFの利用計画の検討</p> <p>要素技術</p> <p>[酸化物電解法、金属電解法の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電解等の基礎試験(TRU、FP挙動評価)</li> <li>・ 塩廃棄物処理試験(コールド)</li> <li>・ 熔融塩中分析技術開発 等</li> </ul> <p>[フッ化物揮発法の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物・廃ガス処理技術開発 等</li> </ul> <p>[共通な要素技術]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 脱被覆技術開発試験</li> <li>・ 材料開発</li> <li>・ 保障措置技術開発 等</li> </ul>

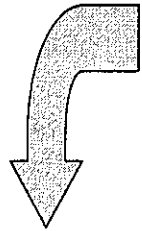
## 第2期の展開(湿式再処理法の主要なR&D)

### 第2期の主な検討課題

- 簡素化溶媒抽出Pu非分離回収技術
- TRU回収の実証/最適化
- システム高度化技術の開発  
(イオン交換法、アミン抽出法等)

### 第1期の成果

- 晶析、簡素化溶媒抽出、TRU回収を付加した先進湿式法を提案
- 経済性目標の達成見通しを得た



湿式法

2001年度 | 2002年度 | 2003年度 | 2004年度 | 2005年度

概念設計 → 先進湿式法  
(保守、廃棄物処理等の個別課題の設計検討)  
RETF利用計画検討

中間  
まとめ

概念設計(要素試験成果を反映したプラント設計)

まとめ

### 晶析技術の成立性確認

U、Pu試験

実燃料試験

### 簡素化溶媒抽出技術の成立性確認

U試験

実燃料試験(溶解性、除染性能)

### TRU回収技術の成立性確認

U試験

SETFICSプロセス試験

### システム高度化技術(革新的な代替補完技術)

イオン交換法、アミン抽出法、超臨界流体抽出法の試験

選択された有望技術について

要素試験継続

### その他主要な要素技術開発

LLFP回収技術の開発、廃溶媒分解プロセスの開発、遠心抽出機の開発 等



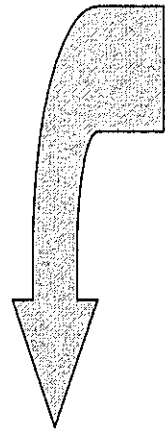
# 第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[1/2]

## 第2期の主な検討課題

- (酸化物電解法)
  - ・ Pu/U共析出挙動
  - ・ 塩廃棄物処理技術
  - ・ 溶解するつば長寿命化
- (金属電解法)
  - ・ 塩浴塩素化溶解挙動
  - ・ 製品金属の酸化転換挙動
- (フッ化物揮発法)
  - ・ TRU回収挙動
  - ・ Puのフッ化特性

## 第1期の成果

- 3方式の既往研究をベースに改良プロセスを提案
- 経済性目標の達成見通しを得た
- TRU回収プロセスの付加



2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
--------	--------	--------	--------	--------

乾式法

概念設計 (酸化物電解法、金属電解法、  
フッ化物揮発法の内2つ)  
(個別課題の設計検討)  
RETF利用計画検討

中間  
まとめ

概念設計(要素試験結果  
を反映したプラント設計)

まとめ

酸化物電解法  
の場合

### 電解、Pu/U共析出挙動

基本特性U試験

Pu電解試験(CPF)

実燃料実証試験(RIARを想定)

### 塩廃棄物処理技術

コールド試験

## 第2期の展開(乾式再処理法の主要なR&D)[2/2]

2001年度 | 2002年度 | 2003年度 | 2004年度 | 2005年度

乾式法

金属電解法  
の場合

溶解、電解、酸化転換挙動

基本特性U試験

Pu電解試験(CPF)

塩廃棄物処理技術

コールド試験

フッ化物揮発法  
の場合

フッ化挙動

基本特性U試験

Pu試験

廃棄物処理技術

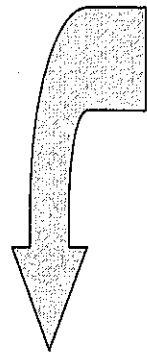
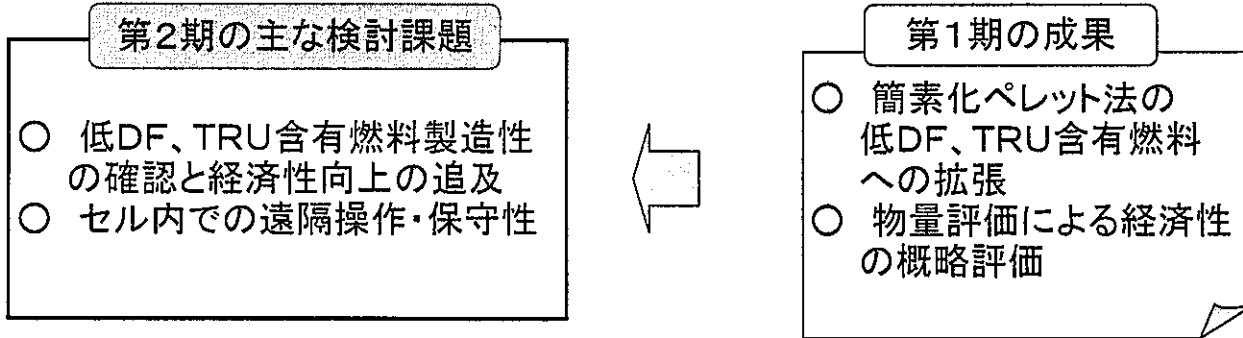
コールド試験

その他、乾式法共通の主要な要素技術開発  
脱被覆技術、材料開発、保障措置技術 等

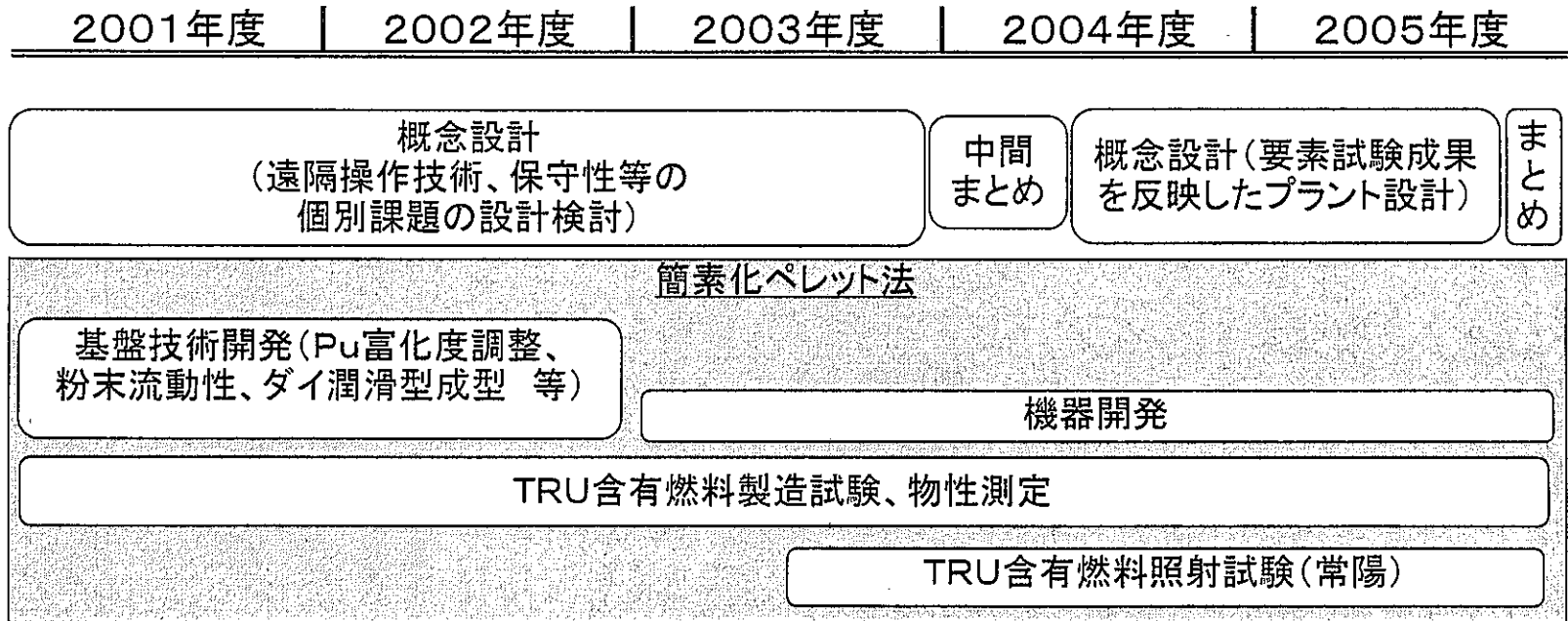
## 2001年度計画(燃料製造)

	第2期の方針	2001年度計画
ペレット	<p>低DF、TRU含有燃料で経済性目標達成の立証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 簡素化ペレット法の成立性確認</li> <li>・ TRU含有(低除染)燃料の経済性向上の追求</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 簡素化ペレット法の基盤技術開発 (Pu富化度調整、粉末流動性、 ダイ潤滑型成型 等)</li> <li>・ TRU含有燃料製造試験、物性測定</li> <li>・ TRU含有燃料の照射準備</li> </ul>
振動充填	<p>ペレット燃料製造との基本的な比較を可能にする</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粉末製造、振動充填の技術的成立性確認</li> <li>・ 照射挙動の確認</li> <li>・ 国際協力の活用</li> <li>・ 解体Pu処分技術開発の知見活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p> <p>要素技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粒子製造法の比較評価のための基礎試験 (湿式ゲル化法、乾式造粒法)(U、Pu試験)</li> <li>・ 充填技術評価試験</li> <li>・ 照射試験の準備(PSI共研)</li> </ul>
鑄造	<p>金属燃料製造法の最適化を検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物低減方策の見極め</li> <li>・ 米国の知見の活用</li> </ul>	<p>概念設計を実施</p>

## 第2期の展開(ペレット燃料製造法の主要なR&D)



ペレット



注) 燃料被覆管の開発については、「炉型に共通な要素技術開発」の図を参照

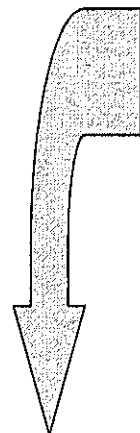
# 第2期の展開(振動充填燃料製造法の主要なR&D)

## 第2期の主な検討課題

- (共通)
  - ・ O/M比の調整法 (湿式再処理対応)
  - ・ 小径粒子の量産化 (酸化物電解法対応)
  - ・ Pu分布の均一性 (金属電解法対応)
  - ・ 転動造粒法による顆粒特性 (フッ化物揮発法対応)
  - ・ 顆粒間のPu富化度均一性

## 第1期の成果

- 再処理との一体プラントの概略検討
- 物量評価による経済性の概略評価



振動充填

2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
--------	--------	--------	--------	--------

概念設計  
(遠隔操作技術、保守性等の  
個別課題の設計検討)

中間  
まとめ

概念設計(要素試験成果  
を反映したプラント設計)

まとめ

### 粒子製造法基礎試験(U、Pu試験)

湿式ゲル化法 (PSI共研を含む)  
乾式造粒法

比較  
評価

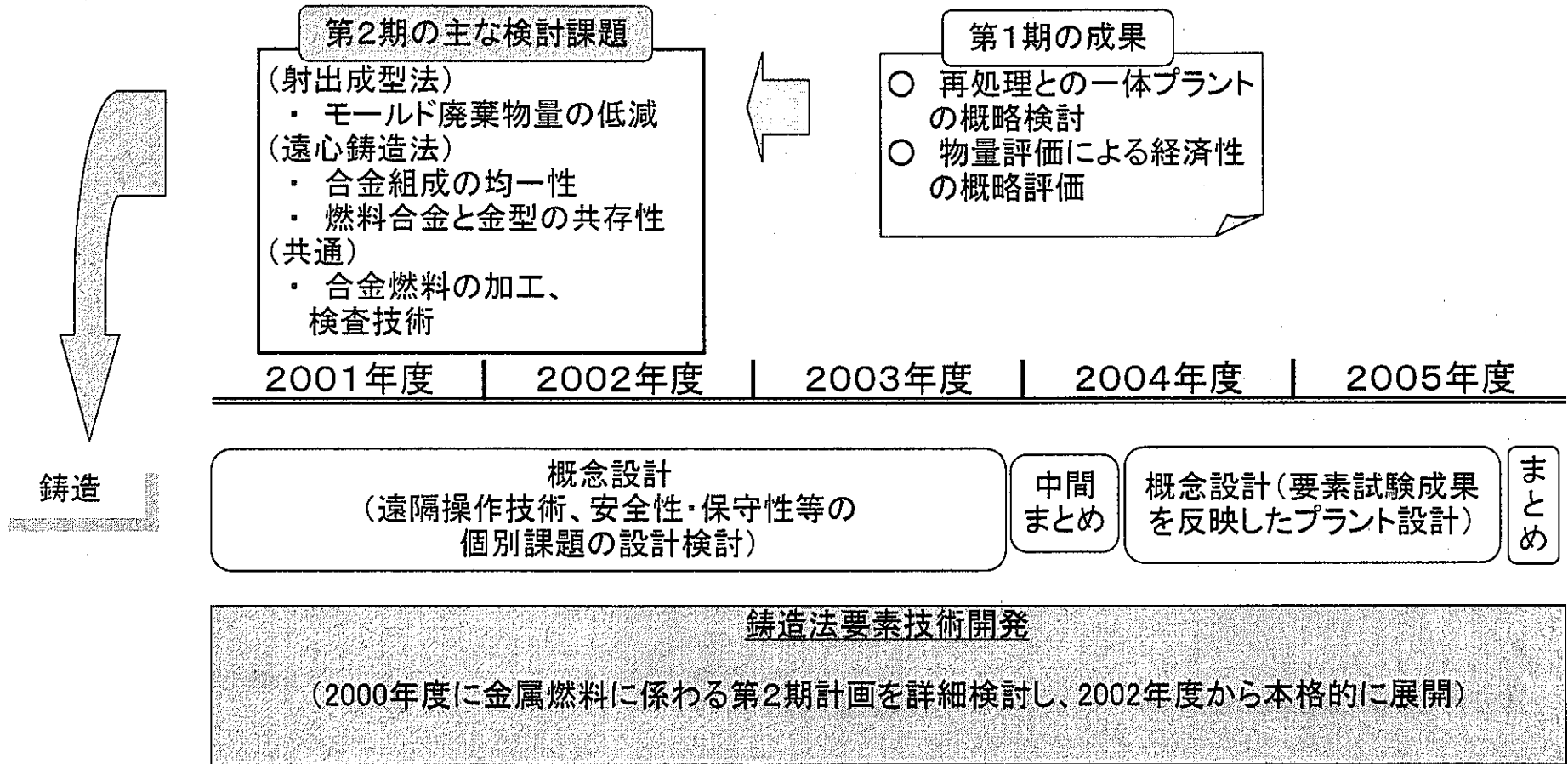
充填技術評価試験

解体核情報

照射試験・評価 (HFR: PSI共研)

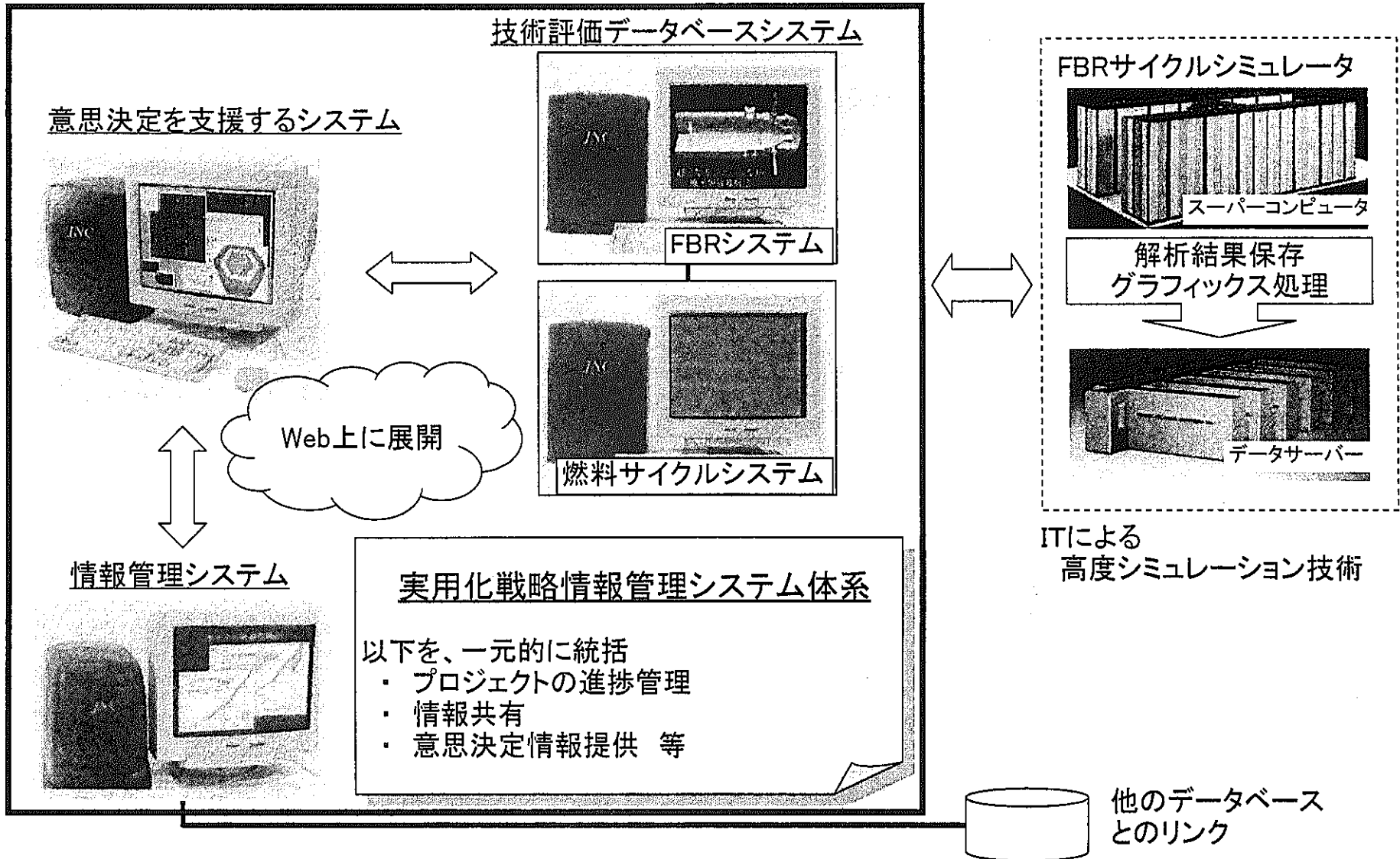
注) 乾式再処理法に対応する振動充填燃料の照射試験については、  
解体Pu処分協力に関する技術開発の枠組みで実施する予定

## 第2期の展開(鑄造燃料製造法の主要なR&D)



注) 2001年度についても、電中研にて、燃料製造プロセスの工学規模U試験等を実施する予定

# 第2期の展開(実用化戦略情報管理システムの開発)



## 実用化戦略調査研究第2期の実施体制

- 第1期の体制を継続
  - オールジャパン体制(サイクル機構、電気事業者、電中研、原研、メーカ)
  - 他研究機関、大学等との連携の強化
  
- 国際協力の強化
  
- アイデア公募の追加実施
  - 革新的な技術を取り入れる窓を、国内外の大学、研究機関に対し常にオープンに



## 国際協力

### 1、国際拠点の構築

- 「FBRサイクル国際研究開発センター  
(サイクル機構 大洗工学センター内、2000年度末竣工予定) 」  
を中心にした国際拠点の構築

### 2、戦略的な国際協力の展開

- 他国が開発している分野、海外におけるインフラを利用できる分野等について、  
戦略的な国際協力を進める。
- 主として、以下の分野で国際協力が必要と認識 : 対象一米、欧州、ロシア
  - (1) 炉心燃料  
新型燃料(金属燃料、窒化物燃料)の開発 [海外照射試験炉/安全性試験炉の活用]
  - (2) プラントシステム  
ガス冷却炉、PbBi冷却炉に係わる海外R&D施設
  - (3) 燃料サイクルシステム  
乾式再処理技術、振動充填燃料に係わる海外のR&D施設

## 利用する主要な国内施設・設備

### (1) 第2期に利用するサイクル機構の主な施設・設備

大洗工学センターのコールド施設:

Na冷却炉の経済性向上技術や炉型に共通な主要技術の成立性確認に活用

「常陽」及び照射後試験施設:

キャプセル型の照射リグを開発し、振動充填燃料等の先行照射

CPF、Pu燃料開発施設 他:

先進湿式再処理法、乾式再処理法の主要技術の成立性確認、  
燃料製造技術の成立性確認等のために活用

### (2) 主としてそれ以降に利用する主な施設・設備

「常陽」および照射後試験施設:

2006年以降の本格的な照射のため、第2期では、その準備を進める

もんじゅ: 2010年以降、実用化戦略調査研究で選択した革新技術の確認、  
集合体規模の燃料照射等に活用

RETF: 2006年以降に試験に活用するため、第2期では施設設計検討を進める

## 第1期および第2期の研究予算の年度展開

(単位:億円)

	第1期		第2期	
	1999年度	2000年度	2001年度	2001~2005年度 第2期(5年間)の総計
FBRシステム	5	8	24	約300 <sup>*)</sup>
設計研究	5	7	10	
要素技術開発	0.1	0.4	14	
燃料サイクルシステム	13	17	25	
設計研究	3	5	5	
要素技術開発	10	12	20	
統合・評価	2	5	4	
合 計	20	30	53	

\*) 今後の検討で見直しがあり得る

## 他の研究開発課題評価テーマとの関係

### (1) MOXペレット燃料製造工程の簡素化(ショートプロセス)に関する研究開発 (1998年度に事前評価を実施済み)

- 実用化戦略調査研究を開始した時点で、実用化戦略調査研究のテーマに含めた
- 高DF燃料を対象とした開発 → 低DF、TRU含有燃料製造に技術開発を拡張

### (2) ロシア解体Pu処分への協力に係わる技術開発 (1999年度に事前評価を実施済み)

- 解体Pu処分の協力で得られた成果は、実用化戦略調査研究で有効に活用
  - ・ 振動充填法燃料製造および燃料照射

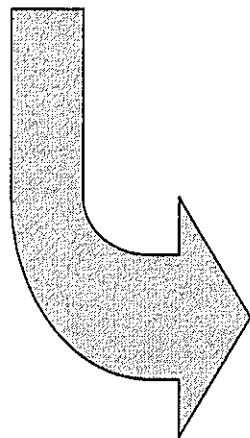
### (3) 長寿命核種の分離変換技術開発 (2000年度に事前評価を実施予定)

- 長寿命核種の分離変換技術開発は、段階を踏んだ長期的な取り組みが必要
- 実用化戦略調査研究では、現状で、経済的に実用化することが見込める範囲の技術を検討対象
- 本評価テーマでは、実用化戦略調査研究での検討に加え、より長期的な課題までを対象

## 第2期の期待される成果と波及効果

### 期待される成果

- 実用化候補概念の絞込み(複数)
  - 目標への適合性を定量的に示せる概念設計
  - 技術的成立性のキーポイントを示すバックデータ(要素試験と解析)
- FBRサイクルの技術体系整備(目標:2015年頃)に向けた研究開発計画 (ロードマップ)



- FBRサイクルの実用化に向けた道筋の明確化
  - R&Dの優先順位
  - R&D施設の利用計画
  - 海外との役割分担
- 研究開発課題評価委員会、原子力委員会のC&R等を経て、国の計画への反映

## 成果の公開・発表状況

分類	公開・発表年月	公開・発表の媒体・場所	概要
インターネット	H11.7～	JNCホームページで本研究について紹介開始	研究計画、体制、実施内容等
	H11.10、随時更新	JNCホームページに本研究専用のページを公開	同上
誌上发表	H11.12	原子力学会 核燃料部会 部会報(No.32)	研究計画の概要、実施内容等
	H11.12	原子力eye(1月号)投稿	同上
	H11.12	電気評論(新年号)投稿	同上
	H12.1	電気評論(2月号)投稿 “JNCのあゆみ”	同上
	H12.1	国際資源(2月号)投稿	同上
講演発表	H11.10.29	日本原子力産業会議 原動研・高速炉グループ	研究計画の概要、進捗状況等
	H11.10	産業創造研究所 産業技術懇談会	同上
	H12.1.17	原子力委員会 原子力利用長期計画 第三分科会(第5回)	同上
	H12.2.21、22	国際平和利用国際フォーラム	同上
	H12.3.28～30	原子力学会 春の年会	同上
	H12.4.4	ICONE-8(8th International Conference on Nuclear Engineering)、米国	同上
	H12.4.20	KAIF/KNS(韓国原産会議/原子力学会)年回、韓国	同上
	H12.4.28	原子力学会原子力システム設計研究専門委員会	同上
その他	H11.9.13	研究開発課題評価委員会プレス発表	事前評価結果
	H11.9.13	実用化戦略調査研究パンフレット作成	研究計画、体制、実施内容等

## 措置事項の実施状況

- 研究計画書に反映するとともに、研究を進めていく中で着実に実施
  - ◆ 課題の意義と重要性
  - ◆ 研究開発全般の進め方
  - ◆ 開発シナリオの戦略としての耐性
  - ◆ 技術評価の視点・方法
  - ◆ 経済性評価
  - ◆ 環境負荷低減性
  - ◆ 安全確保
  - ◆ 実用化要素技術開発
  - ◆ 情報公開
  - ◆ 期待される成果および波及効果

## 1. 課題の意義と重要性

- ◆ 研究課題の意義と重要性を十分に認識し、措置事項については、研究計画書に反映するとともに、研究を進めていく中で、着実に実施するよう努めている。
- ◆ 研究の実施状況、成果等については、進捗状況に合わせて、インターネット、各種広報媒体、国内外の学会、委員会等へ積極的に公表している。

## 2. 研究開発全般の進め方

- ◆ 実施体制
  - 1999年7月、電気事業者等と共同研究体制を組織、研究の推進強化のため87名に要員を充実(2000年5月末現在)
  - 2000年1月より日本原子力研究所の参画を得てオールジャパン体制で研究を推進
  - プロジェクトチーム体制による計画的・効率的マネジメントの実施
  - 公募、技術提案により広く国内外から革新的なアイデアを採用
- ◆ 学会、会議等での示唆、国の委員会等の意見に対して、柔軟な研究計画への反映
- ◆ インフラの整備
  - 統合情報管理支援システムの開発、技術情報のデータベース化
  - FBRサイクル国際研究開発センターの建設(2000年度末竣工予定)

## 3. 開発シナリオの戦略としての耐性

- ◆ 柔軟な開発目標の設定ための幅広い調査、検討の実施
  - 21世紀の社会展望
  - エネルギー資源全般にわたる需給動向、新エネルギーの開発動向、軽水炉のリプレース、将来型軽水炉の開発動向
  - 環境負荷低減に関する社会ニーズの動向 等
- ◆ FBRサイクルの実用化に向けた研究開発計画の検討
- ◆ 整合のとれたFBRサイクル体系の追求のための種々の評価手法の検討

## 4. 技術評価の視点・方法

- ◆ 技術や設計の特徴を踏まえた的確な研究開発の実施
- ◆ 整合のとれたFBRサイクル体系の構築の追求
  - 開発レベルの異なる要素技術、候補概念の多面的な評価の実施

## 5. 経済性評価

- ◆ 不確定性の幅の大きな候補概念まで含めた経済性評価に配慮
  - 基本的には発電単価で評価
  - 評価の視点に技術的実現性(開発期間、開発資金)等を追加



## 措置事項の実施状況(2/2)

### 6. 環境負荷低減性

- ◆ 環境負荷低減性に優れたFBRサイクルの確立を目指す
  - 施設の運転・保守、廃止措置に伴い発生する廃棄物量の低減
  - TRU燃焼、長半減期FPの核変換技術等による廃棄物毒性の低減

### 7. 安全確保

- ◆ 安全性の確保は、他の全ての開発目標の前提条件
  - 開発段階も含めて安全性の確保は基本的な要件
  - 社会的受容性にも配慮した安心感のある、安全確保が考え方の基本
- ◆ ハード設計的な側面での安全性の確保
  - 再臨界性の回避や受動的な安全機能の活用
  - 化学的に活性な物質等の取扱いにおける安全上の配慮
- ◆ ソフト的な側面にも留意した安全性の確保
  - 運転・保守作業におけるヒューマンエラーの防止
  - 運転員・保守員の省力化、保守作業量・被ばくの低減 等

### 8. 実用化要素技術開発

- ◆ 長期間を要する技術課題は、基盤研究として長期的視野に立って実施
- ◆ 短期的な研究開発を取巻く状況の変化や判断によって計画が中断されることのないよう十分に考慮
- ◆ 研究の第1期は設計研究等のソフト面での検討を主と、第2期ではこれに加えて、要素試験等のハードを伴う要素技術の開発にも重点を置く

### 9. 情報公開

- ◆ ロンドンガイドライン等を考慮したサイクル機構の情報公開指針に則る
- ◆ 一般にも分かり易い形で情報を提供することに配慮

### 10. 期待される成果および波及効果

- ◆ 21世紀の社会ニーズなどに対応できる整合の取れたFBRサイクルの実用化候補概念の提示
- ◆ 21世紀における環境負荷低減等に対する貢献