平成13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13年10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ください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）
2001

JNC TN1440 2001-006
２００１年１０月

平成13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…… 29

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）

[研究開発課題説明資料(本文)]

[添付図表]

[用語の説明]

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）

[説明用 OHP 集]

[説明用 OHP 集別冊　評価手法の適用性検討]

参考資料６　高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（FBR サイクルシステムプラント概念図集）

参考資料７　高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究（第２期計画　R&D5ヶ年展開表）

1．概要

核燃料サイクル開発機構(以下、「サイクル機構」という。)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	電力中央研究所狛江研究所 金属燃料・乾式リサイクルプロジェクトリーダー
	大杉　俊隆	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部次長
	小鍛治市造	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
	近藤三津枝	ジャーナリスト
	清水　雅彦	慶應義塾大学　常任理事
	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

3．審議経過

(1)第１回目の委員会開催：　平成 13 年 7 月 9 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 8 月 27 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 13 年 10 月 9 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。

5)その他

・評価をより的確なものとし、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２期の研究開発計画は、第１期の成果に基づいて適切かつ妥当に設定されているか。

○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で妥当なものか。
○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（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･設備は適当か。
○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
○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)

○ 中間評価（平成 12 年度実施）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１３年１０月９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[13 ｻｲｸﾙ機構（企）022]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を図り、実用化候補概念の絞り込み（複数）を行うとともに、このために必要な研究開発計画（ロードマップ）を提示することとしている。

本評価においては、第１期の成果と第２期の研究開発計画等について評価を行った。

本研究開発の目的・意義は、原子力長期計画でもその必要性が明示された研究課題であり、明確である。FBR サイクルの実用化は、日本のエネルギーセキュリティの確保にとって長期的で重要性の高いものであり、社会的、経済的ニーズがある。また、幅広く国内外の知見・技術を総結集して進めるべきものであることから、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）がプロジェクトの主体となって進めていくことは適切であると考える。

なお、このような長期的なプロジェクトの遂行にあたっては、世の中の動きに敏感であり、広い視野を持ち、柔軟な計画運営に心掛けるべきである。

研究開発目標として、FBR サイクルの実用化のために考慮すべき視点として、持続的かつ恒久的エネルギー源を確保するための「資源有効利用性」、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」及び核物質の核兵器への転用疑惑を払拭するための「核拡散抵抗性」の三つが重要であるとしているのは適切である。「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提である。さらに我が国において FBR サイクルが導入されうる必要条件としては、その「経済性」の克服が第一の要点としているのも適切である。これらの視点に、さらに「技術成立性」と「運転・保守補修性」を加えた７つの指標により、各概念の達成度の評価検討を行う

ことは適切であり、妥当である。また、FBR システムの本来有する特徴を FBR 燃料サイクルに整合させる基本概念は、研究開発の基軸の概念として適切であり、それに基づく FBR サイクルの設計要求仕様は、ブレークスルーすべき点が明確にされており、適切である。

なお、現時点では適切と考えられる目標ではあるが、その見直しも随時行い、社会のニーズとの整合性が失われることのないように努力されたい。

オールジャパンの研究実施体制における組織人員、人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用及び運営等は適切であり、他機関との連携、協力も適切に行われている。

なお、研究開発費も潤沢でない現状から、役割分担を明確にして効率的な研究の推進に努めるべきである。また、研究開発の進展に合わせて、より高い成果を目指した研究実施体制となることを期待する。

第１期の成果については、公募も含めて抽出された多くの選択肢について設計研究と要素実験により検討がなされ、FBR システムと燃料サイクルシステムについての知見がよく整理され、当初の計画通り十分な成果が得られたものと評価できる。ＦＢＲシステムについては、基幹電源システムの候補となる大型炉と中型炉のシステム概念を検討するとともに、分散電源への対応として小型炉概念を検討したのは妥当である。なお、ガス炉では炉心燃料に対する検討をもう１年続けることとしているが、拙速に絞り込みをするのではなく、あくまできちんとしたデータに基づいて評価していくという姿勢は正しいものと認める。

燃料サイクルシステムについても、FBR システムの検討と同様、幅広く技術の調査・分析を行い、有力な実用化候補概念の抽出検討を行っている。

また、第１期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決法、開発工程等に大きな問題がないか等を評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針としているのは適切である。

なお、環境負荷評価ではいわゆる外部コストの評価（環境に与えるリスクのようにこれまでコストとして算入されていなかったものに対する経済性評価）も含めて、あり方を検討することが望ましい。また、成果の普及・公開が積極的に行われていることはよく理解するが、第１期の研究成果の普及により、これからのプロジェクトを国として進めていくことについての国民の理解促進のため、一層の努力を期待したい。

第2期では、第1期で抽出された有望な実用化候補概念について、設計研究や要素技術

の基礎的な試験等を実施し、そのデータに基づいて5つの開発目標と技術的成立性、運転・保守補修性に関する可能な限り客観的な判断根拠を整備し、FBRサイクル全体として最適化、実用化を念頭に置きつつ各候補概念の総合的な比較検討を行うとともに、FBRシステムと燃料サイクルシステムとの整合性のみならず、放射性廃棄物の処理処分との整合性も考えて、実用化候補の絞り込みを行うとしているのは適切である。また、第2期におけるチェックアンドレビュー等のマイルストーンの置き方も妥当である。

FBRシステムの検討において、炉心燃料については、酸化物燃料と新型燃料との互換性に配慮しつつ設計研究を進めて炉心概念を具体化し、候補となるプラントシステムとの適合性及び燃料サイクル技術との整合性を明確にした形で、目標性能の達成見通しを示すとしていることは適切である。

また、プラントシステムの検討においては、経済性や安全性を向上するために取入れた革新的な技術を成立させる上で鍵を握る分野や、設計研究のベースとなる設計・評価手法、設計基準類の整備に向けた優先課題を中心に取り組んでいくとしているのは適切である。これらの計画においては、「常陽」における照射試験や国際協力に基づく海外の施設の活用する計画としており適切である。なお「もんじゅ」の運転再開による運転データの取得そのものが高速炉の設計の検討とその進展にとって必要不可欠であることは述べるまでもない。

また、小型炉については、原子力技術やシナリオを多様化していく可能性を与えるものとして考えられるが、ニーズや社会的受容性の面から、その位置付けを明確に分析することが望ましい。

燃料サイクルシステムの検討においては、廃棄物発生量の少ないプロセス、Puを単離（元素単体の形で分離）しないシステム等、環境負荷低減性や核拡散抵抗性の向上を期待できる技術課題に着目して取り組んでいくとしているのは適切である。また低除染燃料サイクルでは、特に燃料製造における被ばく低減対策という新たな負担が生じるが、製造工程の簡素化、適切な遮蔽を設けた運転の自動化及び遠隔保守化等の技術開発により対処するとしているのは適切である。これらの計画においても、東海事業所の高レベル放射性物質研究施設（CPF）の改造、大洗工学センターの照射燃料試験施設や海外の施設を活用する計画としており、またリサイクル機器試験施設（RFTF）活用計画の取りまとめも2003年度を目標に行われようとしており、いずれも適切である。

なお、各候補技術に柔軟性がどの程度あるかは、大きなシステムの開発においては極めて大切な視点であり、特に廃棄物への対応を今後考えていく上で重要ではあるが、最優先の開発目標は経済性のあるFBRサイクル像を提示することであり、環境負荷低減においてTRU燃焼とLLFPの核変換は、コスト及び社会的ニーズの兼ね合いを見ながら

評価し、実用化を目指して長期的なスコープで段階的に進めるべきである。

要素技術開発については、できるだけ定量的に、実験の成果等に基づいて成立性等を評価することが大切と考える。実験は波及効果まで考えて最適な計画を立て、実施することを希望する。また、本研究のような大きいプロジェクトでは、水素製造等のシナリオで示されているような、それから生まれるスピンオフにも期待したい。

FBR サイクルの実用化候補の絞り込みを行っていくにあたって、検討対象から外すこととなった候補について、外した根拠を明確にするとともに、検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるように留意したことは評価できる。なお、実用化候補概念の絞り込みを行う際の判断材料として活用するとしている総合的な評価手法については、その積極的な開発が望まれる。評価指標についても、今後の絞り込みが客観的に進められるよう十分に配慮しておく必要がある。特に、環境負荷低減性や安全性等については、十分な検討と一般の人々に対する理解促進が必要である。

FBR サイクルの実用化をもたらすためには技術的な問題のみならず、原子力の非技術問題にも適切に対処していく必要がある。原子力の専門家はこれまで以上に社会的受容性への配慮も心がけるべきである。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)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 サイクルの将来の主要なエネルギー供給源として確立することを目的とする」という目的意義は明確である。

日本は化石燃料を殆ど100％輸入しており、特に石油は輸入量の86％を政治的に不安定な中東に依存している。その輸入ルートの安全確保はシーレーン防衛問題として政治の重要な項目でもある。中国をはじめとするアジア各国の経済発展により近い将来日本を含むアジア地域で石油をはじめとする化石燃料の奪い合いが生じるという予想もある。原子力は発電に伴って地球温暖化ガスを放出しない。これらの点を考えると FBR サイクルの実用化は日本のエネルギーセキュリティの確保にとって長期的に重要性が高く社会的、経済的ニーズがある。

2) 将来のあるべき FBR とそのサイクル像を国（サイクル機構で代表される）―電力が一体となって選定していく目的、意義は明確であり、サイクル機構が実施していく課題である。

今後21世紀を見通した場合、原子力の必要性は不可避なものであり、国、電力供給者の責任として近未来に備えておく重要な課題と考える。

3) 将来の主要なエネルギー供給源としてFBRサイクルの技術体系確立を目指す本実用化戦略調査研究は、第１期で５つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行って、実用化戦略の有望な候補概念を提示し、引き続く第２期での実用化候補概念の絞り込みによる特定研究テーマの設定につなげるものであり、第１期の研究の目的・意義は明確であり適切である。

4)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サイクルの長所を活かした実用化像の抽出、ニーズに柔軟に対応できる開発戦略の提示、ＦＢＲサイクル確立のための技術体系の整備は是非とも必要であり、今後も継続して努力されたい。

5)このような長期プロジェクト遂行にあたっては、世の中の動きに敏感であってほしい。たとえば今、プルサーマル問題が世間の関心を集めているが、それと本プロジェクトの関係をもっと積極的に説明していく姿勢がほしい。プルサーマルは一例で、ほかにもアメリカの原子力開発への積極姿勢の影響などいろいろある。本プロジェクトの推進者は狭い意味での目的だけに閉じこもらず、目的をなるべく広げてほしい。そうで

ないと目的の陳腐化を招く恐れがある。

6)社会に受け入れやすい炉という評価の観点から、鉛・ビスマス炉、水炉、He 冷却ガス炉の検討が入っており、望ましい。

7)サイクル機構公募研究、エネ総研公募研究等の研究課題の結果を、本戦略調査研究に組み入れ、柔軟な計画へとして欲しい。

8)すでにこのことについては評価がなされており、適宜見直しの前提条件となる社会情勢等の変化に対応する状況にはないと思われるので、前回の評価と同じと判断される。

9)本研究開発に関する目的、意義は、安全性を大前提とし、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、将来の多様なニーズへの柔軟性を保持しながらも、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ための技術体系を整備することであり、この目的、意義は今日においても変更はなく、妥当である。

海外に対し、我が国が組織的、体系的に FBR サイクル開発に取り組んでいる状況を発信する上でも、時宜を得たものであると考える。

10) FBR こそ実用化時点においては、炉とサイクルが連携されたものであること、すなわち極端に言えば同一サイトで全て対応は無理としても、各システムが集中化されて然るべきものであることから、本研究で各システムを並行して、かつ有機的にステップバイステップで検討していくという基本的な考え方は適切と考える。

11)国の計画すなわち原子力長計でも本研究の必要性は明確であり、かつ長期的に見て本研究の重要性は高く、社会的ニーズ・民間ニーズにも合致しているものと考える。

12)目的として、経済性を達成しうる実用化像の抽出と技術体系の確立を挙げており、明確かつ的確である。意義も十分認められる。

また、環境との調和を図った経済の発展を目指して、エネルギー源選択肢の評価、特に原子力の役割、とりわけ高速炉システムの評価は重要かつ緊急な課題となっている。社会的・経済的ニーズ、民間ニーズも高い。

13)高速炉システムは、エネルギー源を海外に頼らざるを得ない日本の国情に適したエネルギーシステムであり、これまでの国の計画・方針との整合性は高い。また、これまでの実績を考慮して、サイクル機構が主体となって実施すべき課題である。

（2）研究開発目標

14) 21世紀の社会においては20世紀の資源浪費型の社会から脱却し、持続可能な文明社会を実現するため、資源のリサイクルや、環境保全への強い指向などが必要となるもの

と考えられる。FBRサイクルの実用化のために考慮すべき視点として、持続的かつ恒久的エネルギー源を確保するための「資源有効利用性」、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」及びエネルギーキャリアーである核物質の核兵器への転用疑惑を払拭するための「核拡散抵抗性」の三つが重要であるとしているのは適切である。「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提である。さらに我が国においてFBRサイクルが導入されうる必要条件としては、導入時点において他のエネルギー源とのコスト競争に打ち勝つことであり、「経済性」の克服が第一の要点としているのも適切である。

15)個別の開発目標に関する意見はすでに第1期の評価意見として述べているのでここでは繰り返さない。FBR サイクルシステムのコスト目標の具体的な数値については国内市場を目標とした場合はほぼ妥当と思われるが、本来目標値自身が市場に合わせて変化する性格のものであり、国際市場においてはさらに様々な要因が関係するので、これらの数値は固定したものではないとの認識の下で開発が行われる事を期待したい。

16)大きな前提として将来の FBR サイクルとしてふさわしいシステムは何かを、炉、燃料、燃料サイクルで整合性をもったシナリオを選定することにあると考える。

開発目標にあるグローバルスタンダードとはどのような観点から目指すのか。具体的、定量的な分析のもと明確にすることが必要である。

17)有望なFBR候補概念を抽出するために5つの視点から検討を加えており、特に21世紀へのエネルギー資源および環境負荷低減の社会的ニーズを戦略に組み込む開発目標を設定している。FBRシステムの燃料中の高い不純物許容、TRUリサイクルの特徴を燃料サイクルシステムに整合させる基本概念は、研究開発の基軸の概念として適切であり、それに基づくFBRサイクルの設計要求仕様は、ブレークスルーすべき点が明確にされており、先の評価に応える適切な見直しによって、5つの視点に、技術成立性と運転・保守補修を加えた7つの指標により、各概念の達成度の評価検討を行っていることは適切であり、妥当である

18)安全性を大前提に、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性を十分考慮した上での FBR サイクルの経済性克服を目指すという研究開発目標を、基本的に支持する。これらの目標はそれぞれ具体的に明示されており、適切であると評価する。

19)現時点では適切と考えられる目標ではあるが、その見直しも随時行い、社会のニーズとの整合性が失われることのないように努力されたい。

20)研究開発目標については国民のコンセンサスとしていく努力も必要である。その意味で、本プロジェクトが目指すものを国民に幅広く知らせるべく、なお一層の努力を期待したい。

21)安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性等の個別に目標を定め、基本的な設計要求値を具体的に定めたことは妥当である。

22)安全性、経済性、資源有効利用性、及び環境負荷低減性に関しては、設定は適切である。安全性を大前提、経済性を第一要件としており、このために、建設費、燃料サイクル費等に具体的な数値を与えている。これらの達成に必要な技術開発がブレークスルーすべき点と言え、明確となっている。また、各実用化候補概念の重点検討課題についても妥当である。

23)経済性の目標については、検討の進捗度合および社会情勢を踏まえて、都度変えることは構わないが、目標設定の考え方は明確にしておくべき。

炉の建設費の目標を……、サイクルコストの目標を……というような考え方でなく、将来の軽水炉発電コスト（プルサーマル採用ベース）と比肩ないしは凌駕できるレベルとして……という目標が適切と考える。

24)増殖比の要求は、かなり弾力性を持たし、計画に幅を持たせていることは望ましい。増殖比を1.2程度と固定化せず、軽水炉と併立時期（移行時期）も視野に入れて、より柔軟な多様性を持たせるべきであろう。

25)核拡散抵抗性については、政策との関連が強く、特に定量的評価（目標達成度の評価）が難しく、水準（どの程度で可とするか）を定めるのに困難が伴う。候補概念の絞り込みに対する説明責任の重要性を考慮すると、目標として適切であったかどうか疑問である。

26)今後、電力の需給の見通し、電力自由化、原子炉輸送等も考え、是非、小型炉の成立性を重要検討項目に入れて欲しい。

27)目標とシナリオは、関連があるので、付言すると、資料 1-3 の 49 頁に水素製造シナリオがあるが、図 85 のように他のケースと同等に水素製造を置いてよいのか、議論が必要ではないか。

28)FBR サイクルの実用化候補の絞り込みを行っていくことから、検討対象から外すこととなった候補について、外した根拠を明確にするとともに、検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるように留意したことは評価できる。

今後も、絞り込みの際、外した候補のその後の外部での研究開発状況をウオッチングしていって、復活の可能性を検討して欲しい。

29)実用化候補概念の絞り込みを行う際の判断材料として活用するとしている総合的な評価手法の開発が当初から挙げられているが、その開発状況が伺い知ることができない。次の絞り込みの際には評価手法の確立が必要と思われるので、その積極的な開発を期待する。

（3）研究実施体制

30)国－電力が一体となった研究実施体制は適当と考える。他機関との連携、協力は適切に行われていると考える。

縦組織だけでなく、横断的な検討会を設けるなど、常に全体を考えながら実施していく体制は必要と考える。

31)本研究の目標・内容は幅広く、かつ既存の知見・技術を総結集して進めるべきものであることから、サイクル機構が本プロジェクトの主体として、関係各箇所の参加・支援を得て進めていくという体制も適切と考える。

32)本研究はサイクル機構が中心となって実施し、オールジャパンの研究体制が組まれていることは適切である。

33)提案の計画に対して、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、運営等は適切である。

ただ、開発研究の戦略の在り方に関連して先に意見を出させていただいたが、開発研究の進展に合わせて、自己点検および区切りのチェックアンドレビュー時点でより高い成果を目指した研究実施体制となるよう期待したい。

34)研究開発費も潤沢でない現状から、効率的な推進は最重要な前提であり、それに沿って、研究開発を実施していることと理解しているが、これまでの説明、資料等からは大洗と敦賀の分担などについてはあまり明確な内容のものはなかったと思う。

35)研究実施体制は適切であると評価する。第２期は５ヵ年計画であるが、３年終了時にチェックアンドレビューをすることとなっており、マイルストーンの置き方も妥当である。

36)オールジャパン体制で第１期で開始され、引き続き第２期に入るが、今後も、関係者が一丸となって推進することを是非、堅持してもらいたい。

（4）研究成果（第1期の成果）

37)第1期は公募も含めて集めた多くの選択肢を設計研究と要素実験によって検討している。既往研究、シーズ技術の調査結果をもとに、冷却材については、ナトリウム、重金属（鉛及び鉛ビスマス合金）、ガス（炭酸ガスとヘリウム）、水（軽水沸騰、重水加圧、超臨界圧水）、溶融塩の5種類を、燃料形態については、酸化物、金属燃料、窒化物の3種類を選定している。ヘリウムガス冷却炉についてはピン型燃料に加え被覆粒子燃料（酸化物、窒化物）も評価の対象としている。なお流体燃料については塩化物の溶融塩燃料も検討している。全体としてこれまでの知見がよく整理されていると評価できる。

プラントシステムについてはその出力規模として、基幹電源システムの候補となる大型炉と、中型炉を想定して、冷却材の特徴を反映したシステム概念を検討するとともに、分散電源への対応として、5万kWe程度の小型炉概念を検討したのは妥当である。

38)ナトリウム冷却炉では、これまでの開発経験によって技術的基盤はほぼ確立されていることから、蓄積された技術知見に加えて新しい技術を取入れ、これまでに開発において重要な課題となっていた経済性に対して、大幅な向上効果が期待できる概念の構築を第一着目点として検討を行っているのは適切である。

検討の結果、大型炉については、ループ炉型とタンク型炉の両者間において、経済性、安全性等の観点では有意な差は見当たらないものの、保守補修性に優れるループ型炉が有望な概念であるとの見通しを得ている。中型モジュール炉については6基の原子炉と2つの蒸気タービンの組合せを提起しており中型のコストデメリットの克服に工夫が見られる。ナトリウム冷却炉の概念についての検討を進めていく上での課題としては、革新技術（三次元免震、構造基準高度化、12クロム系鋼）の開発を始め、大容量でコンパクトな2ループシステムにおける流動特性、機器合体、大口径配管等の機器・構造の成立性、ナトリウム-水反応の早期検出方策の検討が必要であるとしているのは適切である。

39)鉛及び鉛ビスマスを対象とする重金属冷却炉では、冷却材が化学的に不活性であること及び低圧系にできることから、2次冷却系を削除したシステム構成とし、燃料被覆管や冷却材の構造性に対する腐食防止に留意して検討しているのは妥当である。

炉型については、ループ型炉は高比重及び腐食性のため配管の熱応力緩和方策が技術的に難しいため、タンク型炉を選択し、出力規模については、大型炉は重量過大で経済性の見込みが厳しいため、中型炉を選択している。また、冷却材については、鉛冷却炉は高融点のため高温でのメインテナンスが必要なこと、防食に対して運転範囲が狭いこと等から鉛ビスマス冷却を選択しているのは適切である。

今後の課題として、保守・補修性、材料腐食対策、鉛ビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被曝管理等の課題について検討を進める必要があるのは適切である。鉛ビスマス冷却自然循環炉については流路面積が広く必要で増殖比が低くなることを見出している。

40)ガス冷却炉では、除熱能力を確保するために冷却材を加圧し、FBR としての特性を引きだすために稠密な炉心構成とする必要があるが、配管破損等から減圧事故時の冷却性確保のために炉心の稠密化に限界がある。このため、燃料形態との組合せにより、炉心性能と安全性が整合する条件を把握するとともに、受動的な安全機能を考慮し炉心損傷の防止能力を高め、大規模な炉心損傷に至らない概念についても検討している。

ガス冷却炉については、炭酸ガスを用いた従来型の蒸気タービン発電方式とヘリウムガスを用いた直接ガスタービン方式を検討している。被覆粒子燃料は、これまでに熱中性子高温ガス炉用燃料として、酸化物燃料を高密度黒鉛層やSiC層等で多層被覆した球状粒子（TRISO型被覆粒子燃料）を使用して、燃料粒子に大きな熱容量と強固な被覆層を持たせた概念が実用化されているが、高速中性子環境での照射耐性の点は1万MWd/tに満たない燃焼度で被覆層が損傷するとの試験データがあることから、高速中性子に対する照射特性、熱的特性、機械的特性等の視点から材料構成を変更した被覆粒子型燃料候補概念を選定したのは適切である。

今後の課題として、現在候補としている燃料被覆材の物性等の基礎的な試験データの蓄積、燃料集合体及びコンパートメントの成立性、減圧事故時の冷却性能の維持、格納容器内での核分裂生成物の閉じ込め性能向上方策の検討が必要であるとしているのは妥当である。

41)第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出は概ね妥当。但し、ヘリウム冷却燃料ピン型炉で、蒸気タービン方式は考えられないか。熱効率をNa冷却と同等にするため、出口温度を若干高く設定する必要はあるが、耐熱被覆管材料への要求条件は緩和可能と思われる。増殖性能の向上が期待できる。

42)ガス炉に関する評価が予定通り終わらなかったと報告されている。これは予想外の評価困難性が存在したためとの説明があったが、期限内に結果が出せなかったという意味からは評価は厳しい内容とせざるを得ないと考える。今後、このような予想外の事態が発生したときに、（他部門からの一時的な応援をたのんで担当者を補強するなど）どのようにして柔軟に対処するのかを示して、再発防止に努める必要があると思う。

43)水冷却炉では、改良型BWR(ABWR)をベースとした沸騰水冷却炉と、PWR概念の発展形で炉心性能を向上させた重水冷却炉、高温・高効率の直接サイクルを目指した超臨界圧水冷却炉の3概念を検討の対象としている。これらも、ガス冷却と同様に高圧系となることから、稠密炉心における冷却材喪失事故時の冷却可能性と炉心性能の見通しを把握することを中心に検討したのは妥当である。

44)小型炉については、分散型電源として、多様な用途に対応するため、高速炉の特長を活かした炉心寿命の長期化と受動的な安全機能の向上を目指したプラントシステム概念の概略検討を行っているのは適切である。

45)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）の検討は、FBRシステムの検討と同様、幅広く技術の調査・分析を行い、第2期において研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出検討を行っている。再処理システムについては、超ウラン元素（TRU）含有低除染の再処理製品を前提として、ペレット法、振動充填法及び

鋳造法を検討対象としている。FBRは軽水炉に比べ、中性子経済が良好のため、燃料中の不純物の許容量を多く取れる。言い換えれば、必ずしも除染係数の高い再処理を必要としない燃料をリサイクルできるという特長がある。したがって、低除染燃料サイクルを適用することにより、従来高除染化に難があるとされていた乾式法等の再処理法の適用が可能となるとともに高除染係数が得られる湿式法においてもプロセスの簡素化が可能となり、その結果、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性に寄与する改良方策等の幅広い技術の検討が可能となるとしている。また、U/Pu共回収のような、Puを単離（元素単体の形で分離）しないシステムを導入することにより、核拡散抵抗性の向上が期待できる。一方、低除染燃料サイクルでは、燃料製造における被ばく低減対策という新たな負担が生じるため、製造工程の簡素化、適切な遮蔽を隔てた運転の自動化及び遠隔保守化が必須となるとしているのは適切である。

46)湿式再処理法については、「先進湿式法」を検討対象としている。更なる経済性の向上や廃棄物量の低減の観点から、その一部を代為・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」、「超臨界流体直接抽出法」等についても検討している。

先進湿式法の各設備の検討にあたっては、臨界制限、保守・補修性等の機器設計上の制約、予備系列の要否等の条件を踏まえた設備容量を選定している。その結果、晶析工程が追加されたものの、下流工程の流量減少により機器容量の低減やU濃縮設備の削除等ができることを示している。また、遠心抽出器の採用により、溶解液と溶媒の接触時間を大幅に短縮できることから、放射線劣化により発生する廃溶媒量を低減できることを明らかにしている。

乾式再処理法については、「酸化物電解法」、「金属電解法」及び「フッ化物揮発法」を対象とし、酸化物燃料への適用性を検討した後、新型燃料への適用性を評価している。ロシア RIAR の技術をベースとした酸化物電解法の最大の特長は、溶融塩を利用して電解により電極に酸化物を析出させるプロセスが、再処理の基本プロセスを構成すると同時に、振動充填燃料用の高密度顆粒製造プロセスも兼ねているところにあるとしている。RIAR で開発した手法に対して、処理速度の向上・塩素使用量の低減のための UO2 同時溶解析出プロセスを採用するとともに、白金族 FP の分離工程の追加、U と Pu を同時回収するための共析出工程を採用している。

ペレット燃料製造については、「簡素化ペレット法」を検討対象としている。振動充填燃料製造法については、湿式再処理及び乾式再処理にそれぞれ対応した振動充填を検討しており、いずれも適切である。

47)第1期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決法、開発工程等に大きな問題がないか等を評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針としているのは適切である。

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」及び「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について検討を進めている。

以上より第1期についてはFBRシステムと燃料サイクルシステムについての知見がよく整理されていると評価できる。

48)第1期では短期間でこれまでの技術を網羅的に分析できたことは評価したい。独創的な技術の発掘、各システムの利点を組み合わせたよりコンパクトなシステムなどは第2期に期待したい。

実用化への見通し、実用化のための技術開発課題の選定などの実用化に向けた計画策定は第2期の重要な役割と考える。

49)第1期の成果として、炉・燃料・サイクル各候補概念について有望な概念の複数抽出、重点検討課題の摘出等当初の目標は充分な成果が得られたものと考える。

50)現時点にて収集可能な情報について幅広く考慮されており、検討も進んでいる。

51)FBR システムの検討においては、適切な評価基準を策定し、有力候補概念の絞り込みができている。ガス炉では評価が遅れているが、拙速に絞り込みをするのではなく、あくまできちんとしたデータに基づいて評価していくという姿勢は正しいものと認める。

絞り込みの結果は本プロジェクト開始以前の時点で予想されたものと大幅な違いはないが、多くの候補概念を同じ指標のもとに整理した結果は今後の FBR システムの開発の基礎を支えるものとして有用であると考える。

52)再処理、燃料製造についても、FBR システムと同様、今後の研究開発に必要な知見の整理がきちんとできており、高く評価する。

53)妥当なものと判断される

54)第1期で、FBR サイクルに含まれる広範囲な技術を、共通の土俵上で比較、検討できたことは多いに評価できる。

ただ、まとめる段階で、第1期での作業により、これまで判らなかったことで、新しく判明したこと等の新知見などについて、もっとメリハリをつけるようにして欲し

い。

また、各候補とも、今後の課題が述べられているが、それらの課題が第 2 期でどのように研究開発の中で取り上げられていくのかを、分かり易く説明していくことが望まれる。

55)経済性評価で、炉の建設費評価に米国コードの活用の話を伺ったが、FBRシステム全体としての経済性評価や環境負荷評価等についても有効な手法を確立してほしい。なお環境負荷評価ではいわゆる外部コスト評価も含めてあり方を検討してほしい。

56)第 1 期の段階なのでまだ技術の実用化について具体的な意見はないが、候補概念が絞られると、多くの未経験の要素技術の基盤研究が必要になると思われ、本調査研究はその戦略をできるだけ速やかに示す必要が有る。例えばナトリウム冷却炉が改めて候補となれば、もんじゅの活用が遅滞なく開発研究計画に組み込めるのでは、等々である。

57)実用化への技術的見通しについては、現時点では余り強くこだわる必要は無いと考える。燃料サイクルの選択肢を広げるため、幅広く概念を検討し、それらの実用化への開発課題を明確にし、解決への道筋(必要な期間を含む)、開発コストを明確にすべき。実用化に対する具体的・詳細な検討は、次期の課題と考える。

58)技術移転を含む成果の普及については、大いに期待できる。他のシステムの評価に対しても、成果の波及が可能なような方法論の確立をも期待する。

59)得られた成果の普及、公開に対しては、よくなされていると思う。

60)本プロジェクトの結果得られた新しい知見について、専門化向け・一般向けに分けて、もう少し分かりやすい形の整理があればなお望ましいと感じる。それがないと、形式的な作業に終わったとの誤解を受ける恐れがある。

また、成果の普及・公開を積極的にされていることはよく理解するが、さらに一層の努力を期待したい。第1期の成果の普及により、これからのプロジェクトを国として進めていくことについての国民のコンセンサスが形成される必要がある。それにはまだ至っていないことを自覚し、一層努められたい。

(5) 今後の展開(今後の計画、第2期計画)

61)第2期では設計研究や要素技術の基礎的な試験等を実施し、そのデータに基づいて、FBRサイクル全体として最適化、実用化を念頭に置きつつ総合的に評価を行い、実用化候補の絞り込みを行うとしているのは適切である。

FBRシステムについては第2期では、第1期で抽出された有望な実用化候補概念に

ついて、プラントシステムの設計検討を深めるとしている。また、５つの開発目標と技術的実現性に関する主要な技術について、基礎的な試験を含めた研究開発を行うとしている。これらにより、可能なかぎり客観的な判断根拠を整備し、各候補概念の総合的な比較検討を行って候補を絞り込むとしている。

炉心燃料については、酸化物燃料と新型燃料との互換性に配慮しつつ設計研究を進めて炉心概念を具体化し、候補となるプラントシステムとの適合性及び燃料サイクル技術との整合性を明確にした形で、目標性能の達成見通しを示すとするとしている。これらはいずれも適切である。

プラントシステムの検討においては、経済性や安全性を向上するために取入れた革新的な技術を成立させる上で鍵を握る分野や、設計研究のベースとなる設計・評価手法、設計基準類の整備に向けた優先課題を中心に取り組んでいくとしているのは適切である。これらの計画において「常陽」における照射試験や海外の施設の活用が図られている。

燃料サイクルシステムの計画でも東海事業所のCPFの改造や大洗工学センターの照射燃料試験施設や海外の施設の活用が計画されておりリサイクル機器試験施設（RFTF）活用計画の取りまとめも2003年度を目標に行われようとしておりいずれも適切である。

62)各要素技術、システムの比較評価において、明確な基準のもと同一の考え方で候補技術の絞込みを行われたい。要素技術開発については、できるだけ定量的に、実験（要素技術確証試験、工学試験などによる）成果に基づいて成立性等を評価することが大切と考える。また、最適な正、副のシナリオを選定する場合には、明確な根拠を提示することが必要である。

63)3年間で有効な実験的成果が得られないものもあると見られる。必要な課題は、5ヵ年かかっても適切な評価を行うことが望まれる。3年目の中間評価と5年目の最終評価の夫々の位置付けを明確に願いたい。

64)各システムの候補概念の重点検討課題は第1期で抽出されており、第2期の計画は全般的に妥当と考える。

65)第1期の評価では有望な候補として、炉はナトリウム炉のループ型大型炉＆中型モジュール炉、燃料がMOX燃料、再処理が先進湿式が挙げられているが、これらは既存の実用技術の延長線上にあるものから、現時点としては当然予想される結果である。第2期では、あまり第1期の結果に捕らわれることなく、代替技術について今後どれが有望なものであるかについてを主眼とした検討を望みたい。

66)第1期での比較評価にあたっては、各候補概念によって検討評価のベースの知見レベルに相当の粗密があったものと推測する。そのような観点から第2期でもあまり候補を絞らないで、上記計画の項で述べた希望意見も含めて、更に様々な観点から検討していくことが重要と考える。

67)第1期では、FBRシステムを5種類の冷却材による炉型分類をベースに、大型炉、中小型モジュール炉、及びガス炉ではガス種と接続発電サイクルの組み合わせによる視点も加味し、最終的に10種類の炉型を選定し、これに対して、固体燃料での3種類の被覆管とHe冷却炉での2種類の被覆粒子、及び液体燃料を考え、検討対象のマトリックスを設定しFBRサイクルを総合的に検討している。実にに膨大な量の項目についての検討結果は、それぞれ単独に、あるいは相互に比較されて適切にまとめられており、いずれの炉型概念が有望であるか展望できる状況に導びけていると判断する。

68)候補概念の絞り込みは第2期の主要テーマとされているが、第1期において提示された候補概念の多くは炉型評価A（ガス炉でのA*も含めて）とされ、ほとんどが有望との判断から絞り込みへの判断を次期に委ねられ、研究開発計画が示されている。しかし、その多くの全ての候補に対して、第2期当初の2年(3年の区切りを考え)ほどの期間内に2　3の候補へ絞り込みに足る十分な革新的技術開発や設計研究の成果を期待できるのか、心配である。A評価を再評価しその数をもっと絞り、それによって開発研究を集約して深い成果を期待することはできないだろうか。例えば、図-79にまとめられているBRおよびダブリングタイムのデータを見ると、一部の炉型や水炉は対象外にできるように思える。

あるいは、各炉型に必要な第2期での開発研究の課題をもっと細部まで詰めてそれぞれにタイムリミットをおき、3年の区切りにはその成果を明らかにし、及ばないものは切り捨てるなどの英断を加えて、候補炉型の絞り込みとその開発計画を次のフェーズにつなげる、開発計画もありうる。

要は、途中まで多くの課題を抱えた計画を如何に早く絞れる体制に持って行くか、あるいは当初より課題を集約したスリムな形で、効率良く開発研究に人的資源とバジェットを注げないか、と言う考えである。

69)第1期で得られた成果の内容に対しては、幅広い技術が検討されたが、「整理番号68」で述べているように、第2期に向けて、実用化概念候補の複数抽出については、多くが第2期に委ねられる結果となっている。第2期で本当にその数を絞れるのか、気掛かりである。

70)計画通りに展開することに賛成する。特段のコメントはない。

71)2005年に第２期のまとめを行うのは重要ではあるが、適宜社会状況を反映させるため、第２期計画の中間に早めに中間評価を実施し、2005年のまとめのやり方を議論する機会を設けて欲しい。

72)第２期では、予備的概念設計の実施と伴に、候補概念の絞り込みに必要な試験を実施することになっている。ここで、各炉型候補の主たる目標は相違しており、Na 炉は経済性追求、重金属炉、ガス炉は技術的成立性となっているが、各炉型の技術的成熟度が異なるのでやむを得ないことであるものの、絞り込みの段階でなるべく、公平な比較、判断が出来るように今後も研究開発計画の細部の立案、実施に当たっては細心の注意をしてもらいたい。その観点から、資金計画、配分計画がこれまでの説明、資料等からは読みとれなかった。

73)炉型の中で、小型炉を、Na 炉、重金属炉等と並列に扱う理由を明確にする必要がある。

74)ガス炉に関して、再処理法の扱いを触れる必要がある。

75)全体的には妥当である。但し、窒化物燃料について、「15N 濃縮の経済性向上、炉心損傷時の燃料—冷却材相互作用(FCI)や窒素乖離による圧力発生の可能性について広範な試験データによる確認が必要である」との理由で第２期の検討から外したのは疑問である。試験データを得るのに必要な、時間・コストを評価して示すべき。コスト的に妥当で、システムの評価に必要ならば、これらの要素技術開発の実施も、メインの計画とは別個にしても以降の計画に含めるべき、と考える。重要でありながら、未検討の課題を後に残すべきでないと考える。

76)ここでは地元に配慮して述べられなかったのかもしれないが、将来における「もんじゅ」の活用も視点にいれて検討するべきではなかろうか。他産業では実用化と研究開発は一体でありここで提案されている様々なアイデアの検討のために「もんじゅ」を活用することが必要である。なおもんじゅの運転再開による運転データの取得そのものが高速炉の設計の検討とその進展にとって必要不可欠であることは述べるまでもない。

77)研究開発で一番重要で、過去の経験から考えて最も困難なのは、実用炉の建設の投資を得るところである。この点で実用の発電所を建設するのは研究用の研究炉や加速器を作るのと異なる。投資が得られるかどうかは最も厳しい評価であり、実用化戦略調査研究においてもその初期からこのことを意識し、戦略をたて、工夫を案出されることに期待したい。

78)原子力技術やシナリオを多様化していくことは、その発展のため重要なことと考える。小型炉はその可能性を与えるものと考えるが、ニーズや社会的受容性の面から、①小

型炉にしかできないこと、②小型炉が中型炉より有利な点、③大型炉の先行例としての有効性、等小型炉の位置付けを明確に分析してもらいたい。

79)多用なニーズに対応した設計要求の設定のところでは小型炉の範囲で熱供給、水素製造、海水淡水化が述べられている。熱供給は熱の輸送距離に限界があり需要の点で小型炉が適していると思われるが、水素製造や海水淡水化は必ずしもそうではなかろう。特にエネルギーキャリアとしての水素の製造は世界の一次エネルギーの需要の約1/3を占める輸送分野への応用として注目される。世界の一次エネルギーの90%が化石燃料でまかなわれており、原子力は発電分野のみに現在は使われているだけであり、地球温暖化防止の点では発電以外の分野への応用が極めて重要である。

80)実用化戦略調査研究のような大きいプロジェクトにはそれから生まれるスピンオフにも期待したい。

81)本タスクを実施する上からRETF計画の提示を2003年目途としている根拠は何か。2005年に複数選定される燃料サイクルの実用化計画全体(開発計画、施設計画)の中で利用する施設の一つと捕らえるべきではないか。その場合、前にも述べたように国内外の能力、施設の効率的利用という考えのもとに策定することが重要と考える。

82)最も技術が進んでいるMOX燃料でも、最終的に選定した製造技術による燃料の照射試験結果が得られるのは2020年頃であり、金属燃料、窒化物燃料は更に長期間を要する。このような状況を考慮して研究計画を立案すべきである。

もんじゅでの照射試験が可能となる時期は2016年以降であり、フェニックス炉は2004年までの運転計画である。国外の試験炉を維持できるか不確実性が大きいことに配慮する必要がある。

米国の新エネルギー政策で乾式処理（金属）が復活する可能性があり、日米協力の可否を含め米国の動向を注視する必要がある。

83)第2期の大きな目的のひとつは、第3期のR&D計画を策定することと実用化への道のりを提示することと考える。その場合、国内外の施設を有効に利用した効率的な計画(これまでのように高価にならないような方策を探索して)策定することが必要である。

84)研究開発計画は第1期の成果を踏まえた適切かつ妥当なものとなっていると評価する。

第2期においては要素技術開発として実験が数多く実施される。実験においては、プロジェクトの目的との整合性を重視して内容を絞り込みすぎると、波及効果として得られる貴重な知見を捨てることになる。実験は波及効果まで考えて最適な計画を立

て、実施することを希望する。

85)ある程度の要素技術開発を実施して、FBRと燃料サイクルの整合性のみならず放射性廃棄物の処理処分との整合性をも考えて、実用化候補概念をさらに絞り込むことが第２期の大きな目標に対して、開発シナリオの検討、総合的な評価手法の開発、整備についての研究開発計画の検討がうたわれているが、その概要が見えない。このことについて今後十分検討してもらいたい。

86)本研究の対象が広範囲なことから、ロードマップの整備が極めて重要。また今後国際協力を進めていくに当たり、米国や仏国の状況と協調したロードマップ作りをして、わが国のレベルが逐次把握できるようにしてほしい。

87)各実用化候補概念の研究開発状態の違いを考慮して実用化候補概念の絞り込みをして行かなければならない。また、研究開発が長期にわたって継続される必要性があることから、開発目標として挙げている安全性の確保、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性以外に、実用化候補技術として具備すべき新たな視点を考える必要があるのではないか。

最終的には廃棄物を考慮したFBRサイクルシステムとして考える必要があり、各実用化候補技術はシステムの構成要素であることから、各実用化候補技術はFBRサイクルシステムの最適化への対応ができなければならない。したがって、候補技術に柔軟性がどの程度あるかは大きなシステムの開発においては極めて大切な視点であると思う。特に、廃棄物への対応を今後考えて行く上で重要と思われる。

88)社会的、経済的、民間ニーズについては、社会－R&D 実施者・事業者の双方向で常に理解を深めていく努力が必要である。その場合、環境問題へのしっかりした対応、放射線に対する畏怖の解消(軽減)、ならびに効率的な R&D 方策と経済的なシステムが見出せるかが重要と考える。

89)第1期が技術論的検討を共通ベースとして進めたものを、第2期の展開として、重要視点を多様化させることは非常に有意義である。

しかし例えば環境負荷低減とか社会的受容性という視点からの検討は、目標の具体化の過程で相当困難を伴うものと推測する。第２期ではあまり欲張らずに、特徴的なメリット・デメリットを見いだすことと、第３期への絞り込みの目安をたてる段階まで進めれば充分と考える。

90)絞り込みにあたっての判断基準の設定も重要であり、その考え方の整理も必要と考える。

91)実用化候補概念の絞り込みに必要な総合的な評価手法については、第2期の早期に、早急にその評価指標の具体化を図るべき。その際、前提条件となるべき目標(安全性、

資源有効利用性、環境負荷低減性、等）については設計要件として設計自身に取り込み、定量的評価が可能な経済性に重点をおいて総合評価すべき、と考える。現時点で定量的評価が困難なものに関しては、その旨付記し、今後の検討にゆだねることとする。

92) 2期において複数の候補を絞り込んでいく際に、数多くの評価指標をどのように重み付けして総合評価とするのかが非常に難しい問題であると思う。経済性を最重点で評価するのか、経済性を多少犠牲にしても安全性（確率？）に重きをおいて評価するのか、あるいは将来的な経済性達成の可能性を評価するのか、etc.これらの重み付けにこそ国民のコンセンサスが必要であると考える。これをないがしろにして結論を出すと、後々まで尾を引くことが懸念される。コンセンサス形成の部分は原子力委員会や円卓会議などにゲタを預けるなり、サイクル機構で責任を持って新たな試みとしてコンセンサス形成にまで踏み込むなり、進め方を考えておいた方がよいと思う。

93)経済性評価は最終的な数値を得ることのみがその役割ではない。評価の過程で得られる知見を活用し、何が求められているか、何が壁になっているかに関する情報を広く共有しその解決に向かって知恵を絞ることを期待したい。そこから生み出されるアイデアやノウハウを特許等に結実させることが日本の原子力の国際的な展開の戦略の１つとして求められている。本研究の成果に多いに期待したい。

94)最優先の開発目標は経済性のあるFBRサイクル像を提示することにある筈であり、環境負荷低減においてTRU燃焼とLLFPの核変換は、コスト並びに社会的ニーズの兼ね合いから評価すべきである。最初から、すべてを狙うのではなく、コスト、ニーズと技術的可能性の兼ね合いから、第1段階、第2段階と目標を定めることが必要ではないか。目標にしたいレベルと技術的(経済性を考慮して)にできるレベルの間には、ギャップが存在すると考える。両側面からこの5ヵ年で当面どこまで狙うかを明確にすることが必要である。

95)技術論だけでなく、社会的受容性の向上を図るためにはどうすることが大切なのか、多面的な取り組み、分析を行う必要があると考える。折角技術的には良いものを提供しながら、社会的に受け入れられないようなケースにならないように留意願いたい。

（6）その他

96)西側の原子力発電所の放射線による事故で死亡した公衆は一人もいないにもかかわらず、大部分の一般公衆は原子力を極めて危険なものと考えている。これが発電所トラブル時の運転再開や新規計画に対する地元との合意形成の困難さなどを招いている原因の一つではなかろうか。FBRサイクルの実用化をもたらすためには技術的な問題のみならず、こうした原子力の非技術問題に適切に対処する必要がある。原子力の

専門家はこれまで以上にリスクの社会心理的側面を認識配慮しつつ研究開発に携わることが必要ではなかろうか。低線量放射線の人体影響のように専門家が無意識のうちに作り出してしまった問題もあるのではないか。

97)第2期で総合的な評価手法として、FBRサイクルに対する多様なニーズを多面的な視点から評価する手法の検討は、社会的受容性への配慮の項目が考えられているが、着眼点は良いが、内容、検討の枠組みなどについては、もう少し、検討が必要ではないか。

98)措置事項の対応状況は概ね妥当である。

（7）総合評価

99)本実用化戦略調査研究では、第１期で５つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行い、実用化戦略の有望な候補概念の評価結果を示し、引き続く第２期での実用化候補概念の絞り込みによる開発研究計画を提示している。第１期及び第２期の研究の目的・意義は明確であり適切であると評価する。

100)当調査研究の第１期については一部、計画通りに進まなかった要検討課題も残されているが、全般的には幅広く多くの調査と検討を行い、有用な情報が蓄積されつつあるものと評価できる。

102)なお、本研究はサイクル機構が中心となって実施していくことは適切であり、またオールジャパンの研究体制を更に進めてほしい。

103)今後は、予想外の困難性が発生した際に対処するための体制の整備や、最終的な実用化候補の絞り込みにつなげていくための進め方の明確化が必要であると考えられる。

104)今後国の予算・電力等の研究費ともに厳しい状況になっていくことが充分予想されることに鑑み、毎年度の研究計画は都度柔軟性を持たせるべきであるとともに、特に国内でのホットの研究開発には制約が多いことから、国際協力による技術・成果の収集に積極的に取り組んでほしい。

105)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たと評価する。第２期も適切に計画されており、十分な成果をあげと期待される。

106)全般に渡って、第１期の成果を明らかにし、且つ第２期計画の位置付け、目標ともに明確であり、妥当なものであると判断できる。

107)将来の FBR に求められる要件を整理し、短期間に国内外のほとんどの技術評価、分析を行い、第２期への道のりをつけたことは評価したい。

夫々の技術レベルの違いも明らかとなり、第 2 期では異なったレベルの技術を、当初設けた要件を条件としてしっかりした根拠をもとに評価し、第 3 期に向けて実

用化のための工程を示すことが重要と考える。

また、今後原子力開発においては国際的な協力、共同も不可欠の要因であり、そこでは経済性のみならずその他の要件においても国際的に通用するシステムが求められると考える。このような観点から、今までの経験は大切にしながら、固定観念にとらわれず、合理的な原子力システムとそのための効率的な開発方策を希求してもらいたい。

108)第 1 期での候補の評価をもっと厳しくしてその数を減らす努力があって良かったのではなかろうか。中間評価までの成果は、広範囲での検討であり致し方ないとしてしまうと、その結論は従来より我々が予想したものとあまり変わらない極めて常識的評価に留まっていると言わざるを得ない。第 2 期では是非加速する努力を期待したい。

109)前回中間報告の措置事項実施状況は逐次実行されているが、これらの課題は継続的にトライされていくべきものと考える。

(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

【意見１】

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の第１期（1999年度と2000年度）の成果と第２期（2001年度より５年間）に研究開発計画等について評価を行った。

(1)研究開発の目的・意義

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サイクルの将来の主要なエネルギー供給源として確立することを目的とする」という目的意義は明確である。

日本は化石燃料を殆ど100％輸入しており、特に石油は輸入量の86％を政治的に不安定な中東に依存している。その輸入ルートの安全確保はシーレーン防衛問題として政治の重要な項目でもある。中国をはじめとするアジア各国の経済発展により近い将来日本を含むアジア地域で石油をはじめとする化石燃料の奪い合いが生じるという予想もある。原子力は発電に伴って地球温暖化ガスを放出しない。これらの点を考えるとFBRサイクルの実用化は日本のエネルギーセキュリティの確保にとって長期的に重要性が高く社会的、経済的ニーズがある。

(2)開発目標

21世紀の社会においては20世紀の資源浪費型の社会から脱却し、持続可能な文明社会を実現するため、資源のリサイクルや、環境保全への強い指向などが必要となるものと考えられる。FBRサイクルの実用化のために考慮すべき視点として、持続的かつ恒久的エネルギー源を確保するための「資源有効利用性」、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」及びエネルギーキャリアーである核物質の核兵器への転用疑惑を払拭するための「核拡散抵抗性」の三つが重要であるとしているのは適切である。「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提である。さらに我が国においてＦＢＲサイクルが導入されうる必要条件としては、導入時点において他のエネルギー源とのコスト競争に打ち勝つことであり、「経済性」の克服が第一の要点としているのも適切である。

なお個別の開発目標に関する意見はすでに第１期の評価意見として述べているのでここでは繰り返さない。FBRサイクルシステムのコスト目標の具体的な数値については国内市場を目標とした場合はほぼ妥当と思われるが、本来目標値自身が市場に合わせて変化する性格のものであり、国際市場においてはさらに様々な要因が関係するので、これらの数値

は固定したものではないとの認識の下で開発が行われる事を期待したい。

(4)第１期の成果

第1期は公募も含めて集めた多くの選択肢を設計研究と要素実験によって検討している。既往研究、シーズ技術の調査結果をもとに、冷却材については、ナトリウム、重金属（鉛及び鉛ビスマス合金）、ガス（炭酸ガスとヘリウム）、水（軽水沸騰、重水加圧、超臨界圧水）、溶融塩の5種類を、燃料形態については、酸化物、金属燃料、窒化物の3種類を選定している。ヘリウムガス冷却炉についてはピン型燃料に加え被覆粒子燃料（酸化物、窒化物）も評価の対象としている。なお流体燃料については塩化物の溶融塩燃料も検討している。全体としてこれまでの知見がよく整理されていると評価できる。

プラントシステムについてはその出力規模として、基幹電源システムの候補となる大型炉と、中型炉を想定して、冷却材の特徴を反映したシステム概念を検討するとともに、分散電源への対応として、５万 kWe 程度の小型炉概念を検討したのは妥当である。

ナトリウム冷却炉では、これまでの開発経験によって技術的基盤はほぼ確立されていることから、蓄積された技術知見に加えて新しい技術を取入れ、これまでに開発において重要な課題となっていた経済性に対して、大幅な向上効果が期待できる概念の構築を第一着目点として検討を行っているのは適切である。検討の結果、大型炉については、ループ炉型とタンク型炉の両者間において、経済性、安全性等の観点では有意な差は見当たらないものの、保守補修性に優れるループ型炉が有望な概念であるとの見通しを得ている。中型モジュール炉については６基の原子炉と２つの蒸気タービンの組合せを提起しており中型のコストデメリットの克服に工夫が見られる。ナトリウム冷却炉の概念についての検討を進めていく上での課題としては、革新技術（三次元免震、構造基準高度化、12 クロム系鋼）の開発を始め、大容量でコンパクトな２ループシステムにおける流動特性、機器合体、大口径配管等の機器・構造の成立性、ナトリウム-水反応の早期検出方策の検討が必要であるとしているのは適切である。

鉛及び鉛ビスマスを対象とする重金属冷却炉では、冷却材が化学的に不活性であること及び低圧系にできることから、2次冷却系を削除したシステム構成とし、燃料被覆管や冷却材の構造性に対する腐食防止に留意して検討しているのは妥当である。

炉型については、ループ型炉は高比重及び腐食性のため配管の熱応力緩和方策が技術的に難しいため、タンク型炉を選択し、出力規模については、大型炉は重量過大で経済性の見込みが厳しいため、中型炉を選択している。また、冷却材については、鉛冷却炉は高融点のため高温でのメインテナンスが必要なこと、防食に対して運転範囲が狭いこと等から鉛ビスマス冷却を選択しているのは適切である。今後の課題として、保守・補修性、材料腐食対策、鉛ビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被曝管理等の課題について検討を

進める必要があるのは適切である。鉛ビスマス冷却自然循環炉については流路面積が広く必要で増殖比が低くなることを見出している。

ガス冷却炉では、除熱能力を確保するために冷却材を加圧し、FBR としての特性を引きだすために稠密な炉心構成とする必要があるが、配管破損等から減圧事故時の冷却性確保のために炉心の稠密化に限界がある。このため、燃料形態との組合せにより、炉心性能と安全性が整合する条件を把握するとともに、受動的な安全機能を考慮し炉心損傷の防止能力を高め、大規模な炉心損傷に至らない概念についても検討している。ガス冷却炉については、炭酸ガスを用いた従来型の蒸気タービン発電方式とヘリウムガスを用いた直接ガスタービン方式を検討している。被覆粒子燃料は、これまでに熱中性子高温ガス炉用燃料として、酸化物燃料を高密度黒鉛層や SiC 層等で多層被覆した球状粒子（TRISO 型被覆粒子燃料）を使用して、燃料粒子に大きな熱容量と強固な被覆層を持たせた概念が実用化されているが、高速中性子環境での照射耐性の点は１万 MWd/t に満たない燃焼度で被覆層が損傷するとの試験データがあることから、高速中性子に対する照射特性、熱的特性、機械的特性等の視点から材料構成を変更した被覆粒子型燃料候補概念を選定したのは適切である。今後の課題として、現在候補としている燃料被覆材の物性等の基礎的な試験データの蓄積、燃料集合体及びコンパートメントの成立性、減圧事故時の冷却性能の維持、格納容器内での核分裂生成物の閉じ込め性能向上方策の検討が必要であるとしているのは妥当である。

水冷却炉では、改良型 BWR(ABWR)をベースとした沸騰水冷却炉と、PWR 概念の発展形で炉心性能を向上させた重水冷却炉、高温・高効率の直接サイクルを目指した超臨界圧水冷却炉の３概念を検討の対象としている。これらも、ガス冷却と同様に高圧系となることから、稠密炉心における冷却材喪失事故時の冷却可能性と炉心性能の見通しを把握することを中心に検討したのは妥当である。

小型炉については、分散型電源として、多様な用途に対応するため、高速炉の特長を活かした炉心寿命の長期化と受動的な安全機能の向上を目指したプラントシステム概念の概略検討を行っているのは適切である。

≪燃料サイクルシステム≫

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）の検討は、FBR システムの検討と同様、幅広く技術の調査・分析を行い、第２期において研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出検討を行っている。再処理システムについては、超ウラン元素（TRU）含有低除染の再処理製品を前提として、ペレット法、振動充填法及び鋳造法を検討対象としている。FBR は軽水炉に比べ、中性子経済が良好のため、燃料中の不純物の許容量を多く取れる。言い換えれば、必ずしも除染係数の高い再処理を必要としない燃料を

リサイクルできるという特長がある。したがって、低除染燃料サイクルを適用することにより、従来高除染化に難があるとされていた乾式法等の再処理法の適用が可能となるとともに高除染係数が得られる湿式法においてもプロセスの簡素化が可能となり、その結果、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性に寄与する改良方策等の幅広い技術の検討が可能となるとしている。また、U/Pu 共回収のような、Pu を単離（元素単体の形で分離）しないシステムを導入することにより、核拡散抵抗性の向上が期待できる。一方、低除染燃料サイクルでは、燃料製造における被ばく低減対策という新たな負担が生じるため、製造工程の簡素化、適切な遮蔽を隔てた運転の自動化及び遠隔保守化が必須となるとしているのは適切である。

湿式再処理法については、「先進湿式法」を検討対象としている。更なる経済性の向上や廃棄物量の低減の観点から、その一部を代為・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」、「超臨界流体直接抽出法」等についても検討している。

先進湿式法の各設備の検討にあたっては、臨界制限、保守・補修性等の機器設計上の制約、予備系列の要否等の条件を踏まえた設備容量を選定している。その結果、晶析工程が追加されたものの、下流工程の流量減少により機器容量の低減やU濃縮設備の削除等ができることを示している。また、遠心抽出器の採用により、溶解液と溶媒の接触時間を大幅に短縮できることから、放射線劣化により発生する廃溶媒量を低減できることを明らかにしている。

乾式再処理法については、「酸化物電解法」、「金属電解法」及び「フッ化物揮発法」を対象とし、酸化物燃料への適用性を検討した後、新型燃料への適用性を評価している。ロシア RIAR の技術をベースとした酸化物電解法の最大の特長は、溶融塩を利用して電解により電極に酸化物を析出させるプロセスが、再処理の基本プロセスを構成すると同時に、振動充填燃料用の高密度顆粒製造プロセスも兼ねているところにあるとしている。RIAR で開発した手法に対して、処理速度の向上・塩素使用量の低減のための UO2 同時溶解析出プロセスを採用するとともに、白金族 FP の分離工程の追加、U と Pu を同時回収するための共析出工程を採用している。

ペレット燃料製造については、「簡素化ペレット法」を検討対象としている。振動充填燃料製造法については、湿式再処理及び乾式再処理にそれぞれ対応した振動充填を検討しており、いずれも適切である。

第1期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決法、開発工程等に大きな問題がないか等を評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針としているのは適切である。

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」及び「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について検討を進めている。
以上より第1期についてはFBRシステムと燃料サイクルシステムについての知見がよく整理されていると評価できる。

(5)今後の計画、第2期計画

第2期では設計研究や要素技術の基礎的な試験等を実施し、そのデータに基づいて、FBRサイクル全体として最適化、実用化を念頭に置きつつ総合的に評価を行い、実用化候補の絞り込みを行うとしているのは適切である。

FBRシステムについては第2期では、第1期で抽出された有望な実用化候補概念について、プラントシステムの設計検討を深めるとしている。また、5つの開発目標と技術的実現性に関する主要な技術について、基礎的な試験を含めた研究開発を行うとしている。これらにより、可能なかぎり客観的な判断根拠を整備し、各候補概念の総合的な比較検討を行って候補を絞り込むとしている。

炉心燃料については、酸化物燃料と新型燃料との互換性に配慮しつつ設計研究を進めて炉心概念を具体化し、候補となるプラントシステムとの適合性及び燃料サイクル技術との整合性を明確にした形で、目標性能の達成見通しを示すとするとしている。これらはいずれも適切である。

プラントシステムの検討においては、経済性や安全性を向上するために取入れた革新的な技術を成立させる上で鍵を握る分野や、設計研究のベースとなる設計・評価手法、設計基準類の整備に向けた優先課題を中心に取り組んでいくとしているのは適切である。これらの計画において「常陽」における照射試験や海外の施設の活用が図られている。
燃料サイクルシステムの計画でも東海事業所のCPFの改造や大洗工学センターの照射燃料試験施設や海外の施設の活用が計画されておりリサイクル機器試験施設（RFTF）活用計画の取りまとめも2003年度を目標に行われようとしておりいずれも適切である。

ここでは地元に配慮して述べられなかったのかもしれないが、将来における「もんじゅ」の活用も視点にいれて検討するべきではなかろうか。他産業では実用化と研究開発は一体でありここで提案されている様々なアイデアの検討のために「もんじゅ」を活用することが必要である。なおもんじゅの運転再開による運転データの取得そのものが高速炉の設計の検討とその進展にとって必要不可欠であることは述べるまでもない。

多用なニーズに対応した設計要求の設定のところでは小型炉の範囲で熱供給、水素製造、

海水淡水化が述べられている。熱供給は熱の輸送距離に限界があり需要の点で小型炉が適していると思われるが、水素製造や海水淡水化は必ずしもそうではなかろう。特にエネルギーキャリアとしての水素の製造は世界の一次エネルギーの需要の約 1／3 を占める輸送分野への応用として注目される。世界の一次エネルギーの 90％が化石燃料でまかなわれており、原子力は発電分野のみに現在は使われているだけであり、地球温暖化防止の点では発電以外の分野への応用が極めて重要である。実用化戦略調査研究のような大きいプロジェクトにはそれから生まれるスピンオフにも期待したい。

経済性評価は最終的な数値を得ることのみがその役割ではない。評価の過程で得られる知見を活用し、何が求められているか、何が壁になっているかに関する情報を広く共有しその解決に向かって知恵を絞ることを期待したい。そこから生み出されるアイデアやノウハウを特許等に結実させることが日本の原子力の国際的な展開の戦略の１つとして求められている。本研究の成果に多いに期待したい。

研究開発で一番重要で、過去の経験から考えて最も困難なのは、実用炉の建設の投資を得るところである。この点で実用の発電所を建設するのは研究用の研究炉や加速器を作るのと異なる。投資が得られるかどうかは最も厳しい評価であり、実用化戦略調査研究においてもその初期からこのことを意識し、戦略をたて、工夫を案出されることに期待したい。

西側の原子力発電所の放射線による事故で死亡した公衆は一人もいないにもかかわらず、大部分の一般公衆は原子力を極めて危険なものと考えている。これが発電所トラブル時の運転再開や新規計画に対する地元との合意形成の困難さなどを招いている原因の一つではなかろうか。FBR サイクルの実用化をもたらすためには技術的な問題のみならず、こうした原子力の非技術問題に適切に対処する必要がある。原子力の専門家はこれまで以上にリスクの社会心理的側面を認識配慮しつつ研究開発に携わることが必要ではなかろうか。低線量放射線の人体影響のように専門家が無意識のうちに作り出してしまった問題もあるのではないか。

【意見２】

(1) 研究開発の目的・意義

・将来のあるべき FBR とそのサイクル像を国（サイクル機構で代表される）―電力が一体となって選定していく目的、意義は明確であり、サイクル機構が実施していく課題である。

・今後 21 世紀を見通した場合、原子力の必要性は不可避なものであり、国、電力供給者の責任として近未来に備えておく重要な課題と考える。

・社会的、経済的、民間ニーズについては、社会－R&D 実施者・事業者の双方向で常に理

解を深めていく努力が必要である。その場合、環境問題へのしっかりした対応、放射線に対する畏怖の解消(軽減)、ならびに効率的なR&D方策と経済的なシステムが見出せるかが重要と考える。

・フェーズ2の大きな目的のひとつは、フェーズ3のR&D計画を策定することと実用化への道のりを提示すること考える。その場合、国内外の施設を有効に利用した効率的な計画(これまでのように高価にならないような方策を探索して)策定することが必要である。

(2)研究開発目標

・大きな前提として将来のFBRサイクルとしてふさわしいシステムは何かを、炉、燃料、燃料サイクルで整合性をもったシナリオを選定することにあると考える。

・開発目標にあるグローバルスタンダードとはどのような観点から目指すのか。具体的、定量的な分析のもと明確にすることが必要である。

(3)研究開発計画

・各要素技術、システムの比較評価において、明確な基準のもと同一の考え方で候補技術の絞込みを行われたい。要素技術開発については、できるだけ定量的に、実験（要素技術確証試験、工学試験などによる）成果に基づいて成立性等を評価することが大切と考える。また、最適な正、副のシナリオを選定する場合には、明確な根拠を提示することが必要である。

・そのようなもとで考えると、3年間で有効な実験的成果が得られないものもあると見られる。必要な課題は、5ヵ年かかっても適切な評価を行うことが望まれる。3年目の中間評価と5年目の最終評価の夫々の位置付けを明確に願いたい。

・最優先の開発目標は経済性のあるFBRサイクル像を提示することにある筈であり、環境負荷低減においてTRU燃焼とLLFPの核変換は、コスト並びに社会的ニーズの兼ね合いから評価すべきである。最初から、すべてを狙うのではなく、コスト、ニーズと技術的可能性の兼ね合いから、第1段階、第2段階と目標を定めることが必要ではないか。目標にしたいレベルと技術的(経済性を考慮して)にできるレベルの間には、ギャップが存在すると考える。両側面からこの5ヵ年で当面どこまで狙うかを明確にすることが必要である。

・原子力技術やシナリオを多様化していくことは、その発展のため重要なことと考える。小型炉はその可能性を与えるものと考えるが、ニーズや社会的受容性の面から、①小型炉にしかできないこと、②小型炉が中型炉より有利な点、③大型炉の先行例としての有効性、等小型炉の位置付けを明確に分析してもらいたい。

・本タスク（将来のFBRサイクル像の構築とR&D計画の策定）において、水炉の位置付けはどう考えるのか。

・本タスクを実施する上から RETF 計画の提示を 2003 年目途としている根拠は何か。2005 年に複数選定される燃料サイクルの実用化計画全体(開発計画、施設計画)の中で利用する施設の一つと捕らえるべきではないか。その場合、前にも述べたように国内外の能力、施設の効率的利用という考えのもとに策定することが重要と考える。
・技術論だけでなく、社会的受容性の向上を図るためにはどうすることが大切なのか、多面的な取り組み、分析を行う必要があると考える。折角技術的には良いものを提供しながら、社会的に受け入れられないようなケースにならないように留意願いたい。

(4)研究実施体制

・国ー電力が一体となった研究実施体制は適当と考える。縦組織だけでなく、横断的な検討会を設けるなど、常に全体を考えながら実施していく体制は必要と考える。
・他機関との連携、協力は適切に行われていると考える。国際協力の面においては、GENERATION-IV との関係、連携、成果の反映などについては如何に考えているのか。

(5)研究成果

・第1期では短期間でこれまでの技術を網羅的に分析できたことは評価したい。独創的な技術の発掘、各システムの利点を組み合わせたよりコンパクトなシステムなどは第 2 期に期待したい。
・実用化への見通し、実用化のための技術開発課題の選定などの実用化に向けた計画策定は第2期の重要な役割と考える。

(6)総合評価

・将来の FBR に求められる要件を整理し、短期間に国内外のほとんどの技術評価、分析を行い、第2期への道のりをつけたことは評価したい。夫々の技術レベルの違いも明らかとなり、第2期では異なったレベルの技術を、当初設けた要件を条件としてしっかりした根拠をもとに評価し、第3期に向けて実用化のための工程を示すことが重要と考える。また、今後原子力開発においては国際的な協力、共同も不可欠の要因であり、そこでは経済性のみならずその他の要件においても国際的に通用するシステムが求められると考える。このような観点から、今までの経験は大切にしながら、固定観念にとらわれず、合理的な原子力システムとそのための効率的な開発方策を希求してもらいたい。

【意見3】

(1)研究開発の目的・意義

○目的・意義は明確かつ的確か

目的として、経済性を達成しうる実用化像の抽出と技術体系の確立を挙げており、明確かつ的確である。意義も十分認められる。

○重要性、緊急性が高いか

環境との調和を図った経済の発展を目指して、エネルギー源選択肢の評価、特に原子力の役割、とりわけ高速炉システムの評価は重要かつ緊急な課題となっている。

○社会的・経済的ニーズ、民間ニーズはあるか

上に同じ。ニーズは高い。

○国の計画・方針との整合性

高速炉システムは、エネルギー源を海外に頼らざるを得ない日本の国情に適したエネルギーシステムであり、これまでの国の計画・方針との整合性は高い。

○サイクル機構が実施すべき課題か

これまでの実績を考慮して、サイクル機構が主体となって実施すべき課題である。

(2) 研究開発目標

○目標の設定・水準は適切か

安全性、経済性、資源有効利用性、及び環境負荷低減性に関しては、設定は適切である。核拡散抵抗性については、政策との関連が強く、特に定量的評価(目標達成度の評価)が難しく、水準(どの程度で可とするか)を定めるのに困難が伴う。候補概念の絞り込みに対する説明責任の重要性を考慮すると、目標として適切であったかどうか疑問である。

○目的・意義達成のために十分な目標設定となっているか

上に同じ。

○ブレークスルーすべき点が明確か

安全性を大前提、経済性を第一要件としており、このために、建設費、燃料サイクル費等に具体的な数値を与えている。これらの達成に必要な技術開発がブレークスルーすべき点と言え、明確となっている。

○各実用化候補概念の重点検討課題は妥当か

妥当である。

(3) 研究開発計画

○第2期の研究開発計画は、第1期の成果に基づいて適切かつ妥当に設定されているか

全体的には妥当である。但し、窒化物燃料について、「^{15}N 濃縮の経済性向上、炉心損傷時の燃料—冷却材相互作用(FCI)や窒素乖離による圧力発生の可能性について広範な試験データによる確認が必要である」との理由で第2期の検討から外したのは疑問である。試験データを得るのに必要な、時間・コストを評価して示すべき。コスト的に妥当で、システムの評価に必要ならば、これらの要素技術開発の実施も、メインの計画とは別個にしても以降の計画に含めるべき、と考える。

○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具体的で妥当なものか

上に同じ。重要でありながら、未検討の課題を後に残すべきでないと考える。

(5) 研究成果

①得られた成果の内容

○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

概ね妥当。但し、ヘリウム冷却燃料ピン型炉で、蒸気タービン方式は考えられないか。熱効率を Na 冷却と同等にするため、出口温度を若干高く設定する必要はあるが、耐熱被覆管材料への要求条件は緩和可能と思われる。増殖性能の向上が期待できる。

○幅広く技術が検討されているか

現時点にて収集可能な情報について幅広く考慮されており、検討も進んでいる。

②実用化との関係

○実用化への技術的見通し

現時点では余り強くこだわる必要は無いと考える。燃料サイクルの選択肢を広げるため、幅広く概念を検討し、それらの実用化への開発課題を明確にし、解決への道筋(必要な期間を含む)、開発コストを明確にすべき。実用化に対する具体的・詳細な検討は、次期の課題と考える。

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

大いに期待できる。他のシステムの評価に対しても、成果の波及が可能なような方法論の確立をも期待する。

○波及効果は期待できるか

上に同じ。

(6) 今後の展開

○今後の展開、進め方に関するコメント

実用化候補概念の絞り込みに必要な総合的な評価手法については、第 2 期の早期に、早急にその評価指標の具体化を図るべき。その際、前提条件となるべき目標(安全性、資源有効利用性、環境負荷低減性、等)については設計要件として設計自身に取り込み、定量的評価が可能な経済性に重点をおいて総合評価すべき、と考える。現時点で定量的評価が困難なものに関しては、その旨付記し、今後の検討にゆだねることとする。

(8) 総合評価

○上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断

当初の目的に基づき、目標の達成に向け、着実に研究が進められていると判断される。

【意見４】

(1)研究開発の目的・意義・目標

・FBR こそ実用化時点においては、炉とサイクルが連携されたものであること、すなわち極端に言えば同一サイトで全て対応は無理としても、各システムが集中化されて然るべきものであることから、本研究で各システムを並行して、かつ有機的にステップバイステップで検討していくという基本的な考え方は適切と考える。

・国の計画すなわち原子力長計でも本研究の必要性は明確であり、かつ長期的に見て本研究の重要性は高く、社会的ニーズ・民間ニーズにも合致しているものと考える。

　また本研究の目標・内容は幅広く、かつ既存の知見・技術を総結集して進めるべきものであることから、サイクル機構が本プロジェクトの主体として、関係各箇所の参加・支援を得て進めていくという体制も適切と考える。

・経済性の目標については、検討の進捗度合および社会情勢を踏まえて、都度変えることは構わないが、目標設定の考え方は明確にしておくべき。

　炉の建設費の目標を……、サイクルコストの目標を……というような考え方でなく、将来の軽水炉発電コスト（プルサーマル採用ベース）と比肩ないしは凌駕できるレベルとして……という目標が適切と考える。

(2)研究開発計画

・各システムの候補概念の重点検討課題は第１期で抽出されており、第２期の計画は全般的に妥当と考える。

・フ第１期が技術論的検討を共通ベースとして進めたものを、第２期の展開として、重要視点を多様化させることは非常に有意義である。しかし、例えば環境負荷低減とか社会的受容性という視点からの検討は、目標の具体化の過程で相当困難を伴うものと推測する。第２期ではあまり欲張らずに、特徴的なメリット・デメリットを見いだすことと、第３期への絞り込みの目安をたてる段階まで進めれば充分と考える。また絞り込みにあたっての判断基準の設定も重要であり、その考え方の整理も必要と考える。

・第１期の評価では有望な候補として、炉はナトリウム炉のループ型大型炉＆中型モジュール炉、燃料が MOX 燃料、再処理が先進湿式が挙げられているが、これらは既存の実用技術の延長線上にあるものから、現時点としては当然予想される結果である。第２期では、あまり第１期の結果に捕らわれることなく、代替技術について今後どれが有望なものであるかについてを主眼とした検討を望みたい。

・本研究の対象が広範囲なことから、ロードマップの整備が極めて重要。また今後国際協力を進めていくに当たり、米国や仏国の状況と協調したロードマップ作りをして、わが国のレベルが逐次把握できるようにしてほしい。

(3)研究成果

・第１期の成果として、炉・燃料・サイクル各候補概念について有望な概念の複数抽出、重点検討課題の摘出等当初の目標は充分な成果が得られたものと考える。

しかし、第１期での比較評価にあたっては、各候補概念によって検討評価のベースの知見レベルに相当の粗密があったものと推測する。

そのような観点から第２期でもあまり候補を絞らないで、上記計画の項で述べた希望意見も含めて、更に様々な観点から検討していくことが重要と考える。

・また経済性評価で、炉の建設費評価に米国コードの活用の話を伺ったが、FBR システム全体としての経済性評価や環境負荷評価等についても有効な手法を確立してほしい。なお環境負荷評価ではいわゆる外部コスト評価も含めてあり方を検討してほしい。

(4) 総合評価

・上述の希望・感想は、実はほとんどが前回（H12）中間評価レポートと重複しているものと認識。前回中間報告の措置事項実施状況は逐次実行されているが、これらの課題は継続的にトライされていくべきものと考える。

・今後国の予算・電力等の研究費ともに厳しい状況になっていくことが充分予想されることに鑑み、毎年度の研究計画は都度柔軟性を持たせるべきであるとともに、特に国内でのホットの研究開発には制約が多いことから、国際協力による技術・成果の収集に積極的に取り組んでほしい。

【意見５】

(1)研究開発の目的・意義

当調査研究の目的について、基本的な疑問がある。この調査研究は最終的に実証炉の設計候補を抽出するのが目的なのか（資料 1-3 の図７からはそのように読める）。そうであるとすると、実証炉の炉型としては既に原型炉ができているループ型ナトリウム炉以外は非現実的なのではないか。ただし、再び実験炉や原型炉の研究開発から始めることも視野に含めるのであれば、その他の炉型も検討に値すると思う。それとも、実験炉→原型炉→実証炉→商用炉という開発方式そのものを見直すのか。これらの点が不明確なまま「正・副」などの呼称が説明なしに出てくるのには違和感がある。

この点について、「先行実用化を目指す実証炉候補がループ型ナトリウム炉であり、この炉型については、実証炉の概念設計段階に入る前に経済性を事前評価している。その他の炉型については将来的なループ型ナトリウム炉の代替を視野に入れて、実験炉の設計へと進める価値があるかどうかを評価している。」というようなかたちで整理する方が良いのではないかと考えるが如何がか。

(2)研究開発目標

資料 1-3、p4「4.1　開発目標及び設計要求」において、「安全性は・・・・大前提である」と記述され、図４においても開発目標のトップに位置づけられているにもかかわらず、各炉型の安全性を具体的にどのように評価したのか、また第２期においてもどのように評価するのかが不明確であるとの印象を受ける。資料 1-3 のｐ46 や図 83 には安全性の評価構造と検討結果が示されていますが、「安全性判断基準を満足する」という定性的な結果しか示されていない。

例えば、ループ型かタンク型かという選択の際に、物量や保守性などの経済性の定量的評価指標に加えて、安全性の視点からの定量的評価指標を比較することも必要ではないか。

(5)研究成果

①得られた成果の内容

ガス炉に関する評価が予定通り終わらなかったと報告されている。これは予想外の評価困難性が存在したためとの説明があったが、期限内に結果が出せなかったという意味からは評価は厳しい内容とせざるを得ないと考える。今後、このような予想外の事態が発生したときに、（他部門からの一時的な応援をたのんで担当者を補強するなど）どのようにして柔軟に対処するのかを示して、再発防止に努める必要があると思う。

(6)今後の展開

２期において複数の候補を絞り込んでいく際に、数多くの評価指標をどのように重み付けして総合評価とするのかが非常に難しい問題であると思う。経済性を最重点で評価するのか、経済性を多少犠牲にしても安全性（確率？）に重きをおいて評価するのか、あるいは将来的な経済性達成の可能性を評価するのか、…etc。

これらの重み付けにこそ国民のコンセンサスが必要であると考える。これをないがしろにして結論を出すと、後々まで尾を引くことが懸念される。コンセンサス形成の部分は原子力委員会や円卓会議などにゲタを預けるなり、サイクル機構で責任を持って新たな試みとしてコンセンサス形成にまで踏み込むなり、進め方を考えておいた方がよいと思う。

(8)総合評価

当調査研究の第１期については一部、計画通りに進まなかった要検討課題も残されているが、全般的には幅広く多くの調査と検討を行い、有用な情報が蓄積されつつあるものと評価できる。今後は、予想外の困難性が発生した際に対処するための体制の整備や、最終的な実用化候補の絞り込みにつなげていくための進め方の明確化が必要であると考えられる。

【意見６】

(1)研究開発の目的・意義

将来の主要なエネルギー供給源として FBR サイクルの技術体系確立を目指す本実用化戦略調査研究は、第１期で５つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行って、実用化戦略の有望な候補概念を提示し、引き続く第２期での実用化候補概念の絞り込みによる特定研究テーマの設定につなげるものであり、第１期の研究の目的・意義は明確であり適切である。また、本研究はサイクル機構が中心となって実施し、オールジャパンの研究体制が組まれていることは適切である。

(2)研究開発目標

有望な FBR 候補概念を抽出するために５つの視点から検討を加えており、特に 21 世紀へのエネルギー資源および環境負荷低減の社会的ニーズを戦略に組み込む開発目標を設定している。FBR システムの燃料中の高い不純物許容、TRU リサイクルの特徴を燃料サイクルシステムに整合させる基本概念は、研究開発の基軸の概念として適切であり、それに基づく FBR サイクルの設計要求仕様は、ブレークスルーすべき点が明確にされており、先の評価に応える適切な見直しによって、５つ視点に、技術成立性と運転・保守補修を加えた７つの指標により、各概念の達成度の評価検討を行っていることは適切であり、妥当である。

(3)研究開発計画

第 1 期では、FBR システムを 5 種類の冷却材による炉型分類をベースに、大型炉、中小型モジュール炉、及びガス炉ではガス種と接続発電サイクルの組み合わせによる視点も加味し、最終的に 10 種類の炉型を選定し、これに対して、固体燃料での 3 種類の被覆管と He 冷却炉での 2 種類の被覆粒子、及び液体燃料を考え、検討対象のマトリックスを設定し FBR サイクルを総合的に検討している。実にに膨大な量の項目についての検討結果は、それぞれ単独に、あるいは相互に比較されて適切にまとめられており、いずれの炉型概念が有望であるか展望できる状況に導びけていると判断する。

候補概念の絞り込みは第２期の主要テーマとされているが、第１期において提示された候補概念の多くは炉型評価 A（ガス炉での A*も含めて）とされ、ほとんどが有望との判断から絞り込みへの判断を次期に委ねられ、研究開発計画が示されている。しかし、その多くの全ての候補に対して、第２期当初の２年(3 年の区切りを考え)ほどの期間内に２−３の候補へ絞り込みに足る十分な革新的技術開発や設計研究の成果を期待できるのか、心配である。A 評価を再評価しその数をもっと絞り、それによって開発研究を集約して深い成果を期待することはできないだろうか。例えば、図-79 にまとめられている BR およびダブリングタイムのデータを見ると、一部の炉型や水炉は対象外にできるように思える。

あるいは、各炉型に必要な第２期での開発研究の課題をもっと細部まで詰めてそれぞれにタイムリミットをおき、３年の区切りにはその成果を明らかにし、及ばないものは切り捨てるなどの英断を加えて、候補炉型の絞り込みとその開発計画を次のフェーズにつなげる、開発計画もありうる。

要は、途中まで多くの課題を抱えた計画を如何に早く絞れる体制に持って行くか、あるいは当初より課題を集約したスリムな形で、効率良く開発研究に人的資源とバジェットを注げないか、と言う考えである。

(4)研究実施体制

提案の計画に対して、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、運営等は適切である。ただ、開発研究の戦略の在り方に関連して先に意見を出させていただいたが、開発研究の進展に合わせて、自己点検および区切りのチェックアンドレビュー時点でより高い成果を目指した研究実施体制となるよう期待したい。

(5) 研究成果

①得られた成果の内容

幅広い技術が検討されたが、、第２期に向けて、実用化概念候補の複数抽出については、多くが第２期に委ねられる結果となっている。第２期で本当にその数を絞れるのか、気掛かりである。

②実用化との関係

第１期の段階なのでまだ技術の実用化について具体的な意見はないが、候補概念が絞られると、多くの未経験の要素技術の基盤研究が必要になると思われ、本調査研究はその戦略をできるだけ速やかに示す必要が有る。例えばナトリウム冷却炉が改めて候補となれば、もんじゅの活用が遅滞なく開発研究計画に組み込めるのでは、等々である。

③得られた成果の普及、公開

よくなされていると思う。

(6) 今後の展開

(3)に述べたとおりである。

(7) その他

特になし。

(8) 総合評価

本実用化戦略調査研究では、第１期で５つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行い、実用化戦略の有望な候補概念の評価結果を示し、引き続く第２期での実用化候補概念の絞り込みによる開発研究計画を提示している。、第１期及び第２期の研究の目的・意義は明確であり適切であると評価する。しかし、第１期での候補

の評価をもっと厳しくしてその数を減らす努力があって良かったのではなかろうか。中間評価までの成果は、広範囲での検討であり致し方ないとしてしまうと、その結論は従来より我々が予想したものとあまり変わらない極めて常識的評価に留まっていると言わざるを得ない。第2期では是非加速する努力を期待したい。なお、本研究はサイクル機構が中心となって実施していくことは適切であり、またオールジャパンの研究体制を更に進めてほしい。

【意見7】

(1) 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サイクルの長所を活かした実用化像の抽出、ニーズに柔軟に対応できる開発戦略の提示、FBRサイクル確立のための技術体系の整備は是非とも必要であり、今後も継続して努力されたい。

なお、このような長期プロジェクト遂行にあたっては、世の中の動きに敏感であってほしい。たとえば今、プルサーマル問題が世間の関心を集めているが、それと本プロジェクトの関係をもっと積極的に説明していく姿勢がほしい。すなわち、プルサーマルの実用化延期が本プロジェクトにどのような影響を与えるのか、定量的に示してほしい。プルサーマルは一例で、ほかにもアメリカの原子力開発への積極姿勢の影響などいろいろある。本プロジェクトの推進者は狭い意味での目的だけに閉じこもらず、目的をなるべく広げてほしい。そうでないと目的の陳腐化を招く恐れがある。

(2) 研究開発目標の設定

安全性を大前提に、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性を十分考慮した上でのFBRサイクルの経済性克服を目指すという研究開発目標を、基本的に支持する。これらの目標はそれぞれ具体的に明示されており、適切であると評価する。

なお、現時点では適切と考えられる目標ではあるが、その見直しも随時行い、社会のニーズとの整合性が失われることのないように努力されたい。また、研究開発目標については国民のコンセンサスとしていく努力も必要である。その意味で、本プロジェクトが目指すものを国民に幅広く知らせるべく、なお一層の努力を期待したい。

(3) 研究開発計画

研究開発計画は第1期の成果を踏まえた適切かつ妥当なものとなっていると評価する。第2期においては要素技術開発として実験が数多く実施される。実験においては、プロジェクトの目的との整合性を重視して内容を絞り込みすぎると、波及効果として得られる貴重な知見を捨てることになる。実験は波及効果まで考えて最適な計画を立て、実施することを希望する。

(4) 研究実施体制

研究実施体制は適切であると評価する。第２期は５ヵ年計画であるが、３年終了時にチェックアンドレビューをすることとなっており、マイルストーンの置き方も妥当である。

(5) 研究成果

FBR システムの検討においては、適切な評価基準を策定し、有力候補概念の絞り込みができている。ガス炉では評価が遅れているが、拙速に絞り込みをするのではなく、あくまできちんとしたデータに基づいて評価していくという姿勢は正しいものと認める。絞り込みの結果は本プロジェクト開始以前の時点で予想されたものと大幅な違いはないが、多くの候補概念を同じ指標のもとに整理した結果は今後の FBR システムの開発の基礎を支えるものとして有用であると考える。

なお、本プロジェクトの結果得られた新しい知見について、専門化向け・一般向けに分けて、もう少し分かりやすい形の整理があればなお望ましいと感じる。それがないと、形式的な作業に終わったとの誤解を受ける恐れがある。

再処理、燃料製造についても、FBR システムと同様、今後の研究開発に必要な知見の整理がきちんとできており、高く評価する。

また、成果の普及・公開を積極的にされていることはよく理解するが、さらに一層の努力を期待したい。第１期の成果の普及により、これからのプロジェクトを国として進めていくことについての国民のコンセンサスが形成される必要がある。それにはまだ至っていないことを自覚し、一層努められたい。

(6) 今後の展開

計画通りに展開することに賛成する。特段のコメントはない。

(7) その他

特になし。

(8) 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たと評価する。第２期も適切に計画されており、十分な成果をあげと期待される。

【意見８】

1)2005 年に第２期のまとめを行うのは重要ではあるが、適宜社会状況を反映させるため、第２期計画の中間に早めに中間評価を実施し、2005 年のまとめのやり方を議論する機会を設けて欲しい。

2)増殖比の要求は、かなり弾力性を持たし、計画に幅を持たせていることは望ましい。増殖比を 1.2 程度と固定化せず、軽水炉と併立時期（移行時期）も視野に入れて、より柔

軟な多様性を持たせるべきであろう。

3)今後、電力の需給の見通し、電力自由化、原子炉輸送等も考え、是非、小型炉の成立性を需要検討項目に入れて欲しい。

4)社会に受け入れやすい炉という評価の観点から、鉛・ビスマス炉、水炉、He 冷却ガス炉の検討が入っており、望ましい。

5)サイクル機構公募研究、エネ総研公募研究等の研究課題の結果を、本戦略調査研究に組み入れ、柔軟な計画へとして欲しい。

6)全般に渡って、第１期の成果を明らかにし、且つ第２期計画の位置付け、目標ともに明確であり、妥当なものであると判断できる。

【意見９】

(1)研究開発の目的・意義

すでにこのとについては評価がなされており、適宜見直しの前提条件となる社会情勢等の変化に対応する状況にはないと思われるので、前回の評価と同じと判断される。

(2)研究開発目標

FBR サイクルの実用化候補の絞り込みを行っていくことから、検討対象から外すこととなった候補について、外した根拠を明確にするとともに、検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるように留意したことは評価できる。今後も、絞り込みの際、外した候補のその後の外部での研究開発状況をウオッチングしていって、復活の可能性を検討して欲しい。

なお、実用化候補概念の絞り込みを行う際の判断材料として活用するとしている総合的な評価手法の開発が当初から挙げられているが、その開発状況が伺い知ることができない。次の絞り込みの際には評価手法の確立が必要と思われるので、その積極的な開発を期待する。

(3)研究開発計画

ある程度の要素技術開発を実施して、FBR と燃料サイクルの整合性のみならず放射性廃棄物の処理処分との整合性をも考えて、実用化候補概念をさらに絞り込むことが第２期の大きな目標に対して、開発シナリオの検討、総合的な評価手法の開発、整備についての研究開発計画の検討がうたわれているが、その概要が見えない。このことについて今後十分検討してもらいたい。

(4)研究実施体制

とくになし

(5)研究成果

妥当なものと判断される

(6)今後の展開

各実用化候補概念の研究開発状態の違いを考慮して実用化候補概念の絞り込みをして行かなければならない。また、研究開発が長期にわたって継続される必要性があることから、開発目標として挙げている安全性の確保、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性以外に、実用化候補技術として具備すべき新たな視点を考える必要があるのではないか。最終的には廃棄物を考慮したFBRサイクルシステムとして考える必要があり、各実用化候補技術はシステムの構成要素であることから、各実用化候補技術はFBRサイクルシステムの最適化への対応ができなければならない。したがって、候補技術に柔軟性がどの程度あるかは大きなシステムの開発においては極めて大切な視点であると思う。特に、廃棄物への対応を今後考えて行く上で重要と思われる。

【意見10】

(1)研究開発の目的、意義

本研究開発に関する目的、意義は、安全性を大前提とし、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、将来の多様なニーズへの柔軟性を保持しながらも、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ための技術体系を整備することであり、この目的、意義は今日においても変更はなく、妥当である。

海外に対し、我が国が組織的、体系的にFBRサイクル開発に取り組んでいる状況を発信する上でも、時宜を得たものであると考える。

(2)研究開発目標

安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性等の個別に目標を定め、基本的な設計要求値を具体的に定めたことは妥当である。但し、資料1-3、P-46頁⑥技術的実現性の具体的内容が不明なので、説明してもらいしたい。

目標とシナリオは、関連があるので、付言すると、資料1-3、P-49頁に水素製造シナリオがあるが、図85のように他のケースと同等に水素製造を置いてよいのか、議論が必要ではないか。

(3)研究開発計画

第2期では、予備的概念設計の実施と伴に、候補概念の絞り込みに必要な試験を実施することになっている。ここで、各炉型候補の主たる目標は相違しており、Na炉は経済性追求、重金属炉、ガス炉は技術的成立性となっているが、各炉型の技術的成熟度が異なるのでやむを得ないことであるものの、絞り込みの段階でなるべく、公平な比較、判断が出

来るように今後も研究開発計画の細部の立案、実施に当たっては細心の注意をお願いしたい。

その観点から、資金計画、配分計画がこれまでの説明、資料等からは読みとれなかった。

・炉型の中で、小型炉を、Na 炉、重金属炉等と並列に扱う理由を明確にする必要がある。

・ガス炉に関して、再処理法の扱いを触れる必要がある。

・資料 1-3、図 29 のガス冷却炉の検討の流れで、ガスタービンのところに、He か CO2 かの選択を入れる必要があるのではないか。

(4) 研究実施体制

オールジャパン体制で第１期で開始され、引き続き第２期に入るが、今後も、関係者が一丸となって推進することを是非、堅持してもらいたい。

研究開発費も潤沢でない現状から、効率的な推進は最重要な前提であり、それに沿って、研究開発を実施していることと理解しているが、これまでの説明、資料等からは大洗と敦賀の分担などについてはあまり明確な内容のものはなかったと思う。

(5)研究成果

第１期で、FBR サイクルに含まれる広範囲な技術を、共通の土俵上で比較、検討できたことは多いに評価できる。

ただ、まとめる段階で、第１期での作業により、これまで判らなかったことで、新しく判明したこと等の新知見などについて、もっとメリハリをつけるようにして欲しい。

また、各候補とも、今後の課題が述べられているが、それらの課題が第２期でどのように研究開発の中で取り上げられていくのかを、分かり易く説明していくことが望まれる。

・Na 炉の経済性向上策として、２ループ化が選定されているが、ループ数の削減により機器、配管等の単基当たりの容量は増大することになるが、技術的に問題はないのか。

・燃料の中に MA を約 5%添加した場合は、燃料集合体表面の温度が約 490 度になると言うが、燃料として扱えるのか。

(5) 今後の展開

・最も技術が進んでいる MOX 燃料でも、最終的に選定した製造技術による燃料の照射試験結果が得られるのは 2020 年頃であり、金属燃料、窒化物燃料は更に長期間を要する。このような状況を考慮して研究計画を立案すべきである。

・もんじゅでの照射試験が可能となる時期は 2016 年以降であり、フェニックス炉は 2004 年までの運転計画である。国外の試験炉を維持できるか不確実性が大きいことに配慮する必要がある。

・米国の新エネルギー政策で乾式処理（金属）が復活する可能性があり、日米協力の可否を含め米国の動向を注視する必要がある。

(6) その他

措置事項の対応状況は概ね妥当である。

第２期で総合的な評価手法として、FBR サイクルに対する多様なニーズを多面的な視点から評価する手法の検討は、社会的受容性への配慮の項目が考えられているが、着眼点は良いが、内容、検討の枠組みなどについては、もう少し、検討が必要ではないか。

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……(7)

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）……(37)
［研究開発課題説明資料(本文)］……(38)
［添付図表］……(124)
［用語の説明］……(264)

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）……(289)
［説明用 OHP 集］……(293)
［説明用 OHP 集別冊　評価手法の適用性検討］……(393)

参考資料６　高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究
（FBR サイクルシステムプラント概念図集）…… (408)

参考資料７　高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究
（第２期計画　R&D5ヶ年計画）…… (422)

参 考 資 料 1

研究開発課題の中間評価について（諮問）

13ｻｲｸﾙ機構（企）022
平成１３年５月７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。

なお、検討結果については、平成１３年９月中旬までに答申を示されたく申し添えます。

・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１３年１０月１８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期の成果及び第２期の研究開発計画等について、概ね適切であるとの評価を頂きましたので、計画通り研究を継続して実施することとします。

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

「このような長期的なプロジェクトの遂行にあたっては、世の中の動きに敏感であり、広い視野を持ち、柔軟な計画運営に心掛けるべき」、「現時点では適切と考えられる目標ではあるが、その見直しも随時行い、社会のニーズとの整合性が失われることのないように努力されたい」とのこれらの御指摘に対し、

・　本研究の目的、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し、常にエネルギーシステム開発に係わる国内外の動向を把握するとともに、得られた情報を常にプロジェクトの推進に反映するなど、柔軟な計画運用に心掛けて研究を進めていくこととといたします。

また、FBRサイクルの開発目標については、必要があれば第２期の期間中においても見直しを行い、社会のニーズとの整合性が損なわれることのないよう努めて参ります。

２．第１期の成果

「成果の普及・公開が積極的に行われていることはよく理解するが、第１期の研究成果の普及により、これからのプロジェクトを国として進めていくことについての理解促進のため、一層の努力を期待したい」との御指摘に対し、

・　インターネットのホームページはもとより、展示施設における分かりやすい展示解説、フォーラム等での成果報告、新聞や雑誌への記事の掲載並びに分かりやすい冊子の作成・配布などにより、本研究の成果を分かりやすく幅広く公開するとともに、より効果的な広報活動方法についても検討し、本プロジェクトを進めていくことについて、一般の人々のより一層の理解促進に努めて参ります。

3．第2期の研究計画

「小型炉については、原子力技術やシナリオを多様化していく可能性を与えるものとして考えられるが、ニーズや社会的受容性の面から、その位置付けを明確に分析することが望ましい」、

「各候補技術に柔軟性がどの程度あるかは、大きなシステムの開発においては極めて大切な視点であり、特に廃棄物への対応を今後考えていく上で重要ではあるが、最優先の開発目標は経済性のあるFBRサイクル像を提示することであり、環境負荷低減においてTRU燃焼とLLFPの核変換は、コスト及び社会的ニーズの兼ね合いを見ながら評価し、実用化を目指して長期的なスコープで段階的に進めるべきである」、

「要素技術開発については、できるだけ定量的に、実験の成果等に基づいて成立性等を評価することが大切と考える。また、実験は波及効果まで考えて最適な計画を立て、実施することを希望する。本研究のような大きいプロジェクトでは、水素製造等のシナリオで示されているような、それから生まれるスピンオフにも期待したい」とのこれらの御指摘に対し、

・　小型炉についてはその研究開発の位置付けを明確にしながら概念検討を進めることといたします。

環境負荷低減における TRU 燃焼と LLFP の核変換については、コストと社会的なニーズの兼ね合いに留意して、長期的なスコープで段階的に実用化に取り組んでいくこととします。

また、要素技術開発については、御指摘の点に留意しつつ、できるだけ定量的に成立性等の評価が行えるよう実施して参ります。

4．研究実施体制

「研究開発費も潤沢でない現状から、役割分担を明確にして効率的な研究の推進に努めるべきである。また、研究開発の進展に合わせて、より高い成果を目指した研究実施体制となることを期待する」との御指摘に対し、

・　今後ともご主旨も踏まえて、研究開発の進展に合わせて、これまで協力して研究を進めてきた研究機関等を含め、それぞれの特長を活かし、適宜、役割分担等の見直しを行うなど、効率的なプロジェクト運営に心がけ、研究実施体制の充実に努めて参ります。

5．総合的な評価手法

「実用化候補概念の絞り込みを行う際の判断材料として活用することとしている総合的な評価手法については、その積極的な開発が望まれる」、

「評価指標についても、今後の絞り込みが客観的に進められるよう十分に配慮しておく必要がある。特に、環境負荷低減性や安全性等については、十分な検討と一般の人々に対する理解促進の努力が必要である」、

「環境負荷評価では、いわゆる外部コストの評価（環境に与えるリスクのようにこれまでコストとして算入されていなかったものに対する経済性評価）も含めて、あり方を検討することが望ましい」、

「FBR サイクルの実用化をもたらすためには技術的な問題のみならず、原子力の非技術問題にも適切に対処していく必要がある。原子力の専門家はこれまで以上に社会的受容性への配慮も心掛けるべき」とのこれらの御指摘に対し、

・　絞り込みを行う際の判断材料として活用する総合的な評価手法については、早期に開発を進め、絞り込みを行う前に多方面のメンバーからなる委員会において、その適用性等について確認することといたします。また、この評価手法に基づく評価結果については、分かりやすく幅広く公開し、その理解促進に努めて参ります。

・　評価指標については、開発目標に対してできるだけ定量化することに留意して、様々な観点から検討を行うこととします。また、社会的受容性については、様々な人々の意見を伺いながら、取り組んでいくこととといたします。

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）

【補足説明資料】

本資料は、課題評価委員会の評価意見により改定したものである。

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13年8月

（平成13年10月改定）

核燃料サイクル開発機構

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
(1)研究開発の目的・意義	1) 「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サイクルの将来の主要なエネルギー供給源として確立することを目的とする」という目的意義は明確である。 日本は化石燃料を殆ど100%輸入しており、特に石油は輸入量の86%を政治的に不安定な中東に依存している。その輸入ルートの安全確保はシーレーン防衛問題として政治の重要な項目でもある。中国をはじめとするアジア各国の経済発展により近い将来日本を含むアジア地域で石油をはじめとする化石燃料の奪い合いが生じるという予想もある。原子力は発電に伴って地球温暖化ガスを放出しない。これらの点を考えるとFBRサイクルの実用化は日本のエネルギーセキュリティの確保にとって長期的に重要性が高く社会的、経済的ニーズがある。	1) 拝承。
	2) 将来のあるべきFBRとそのサイクル像を国(サイクル機構で代表される)—電力が一体となって選定していく目的、意義は明確であり、サイクル機構が実施していく課題である。今後21世紀を見通した場合、原子力の必要性は不可避なものであり、国、電力供給者の責任として近未来に備えておく重要な課題と考える。	2) 拝承。
	3) 将来の主要なエネルギー供給源としてFBRサイクルの技術体系確立を目指す本実用化戦略調査研究は、第1期で5つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行って、実用化戦略の有望な候補概念を提示し、引き続く第2期での実用化候補概念の絞り込みによる特定研究テーマの設定につなげるものであり、第1期の研究の目的・意義は明確であり適切である。	3) 拝承。
	4) 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サイクルの長所を活かした実用化像の抽出、ニーズに柔軟に対応できる開発戦略の提示、FBRサイクル確立のための技術体系の整備は是非とも必要であり、今後も継続して努力されたい。	4) 拝承。
	5) このような長期プロジェクト遂行にあたっては、世の中の動きに敏感であってほしい。たとえば今、プルサーマル問題が世間の関心を集めているが、それと本プロジェクトの関係をもっと積極的に説明していく姿勢がほしい。プルサーマルは一例で、ほかにもアメリカの原子力開発への積極姿勢の影響などいろいろある。本プロジェクトの推進者は狭い意味での目的だけに閉じこもらず、目的をなるべく広げてほしい。そうでないと目的の陳腐化を招く恐れがある。	5) ご指摘の点については、FBRサイクルの社会的な意義として重要と認識しております。現在、次世代の原子炉を検討する国際的な会合(Gen－Ⅳ等)に参加しておりますが、今後とも常に国内外の動向を把握し、プロジェクトの推進に反映していきたいと考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	6) 社会に受け入れやすい炉という評価の観点から、鉛・ビスマス炉、水炉、He冷却ガス炉の検討が入っており、望ましい。	6) 拝承。
	7) サイクル機構公募研究、エネ総研公募研究等の研究課題の結果を、本戦略調査研究に組み入れ、柔軟な計画へとして欲しい。	7) 拝承。
	8) すでにこのことについては評価がなされており、適宜見直しの前提条件となる社会情勢等の変化に対応する状況にはないと思われるので、前回の評価と同じと判断される。	8) 拝承。
	9) 本研究開発に関する目的、意義は、安全性を大前提とし、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、将来の多様なニーズへの柔軟性を保持しながらも、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ための技術体系を整備することであり、この目的、意義は今日においても変更はなく、妥当である。海外に対し、我が国が組織的、体系的にFBRサイクル開発に取り組んでいる状況を発信する上でも、時宜を得たものであると考える。	9) 拝承。
	10) FBRこそ実用化時点においては、炉とサイクルが連携されたものであること、すなわち極端に言えば同一サイトで全て対応は無理としても、各システムが集中化されて然るべきものであることから、本研究で各システムを並行して、かつ有機的にステップバイステップで検討していくという基本的な考え方は適切と考える。	10) 拝承。
	11) 国の計画すなわち原子力長計でも本研究の必要性は明確であり、かつ長期的に見て本研究の重要性は高く、社会的ニーズ・民間ニーズにも合致しているものと考える。	11) 拝承。
	12) 目的として、経済性を達成しうる実用化像の抽出と技術体系の確立を挙げており、明確かつ的確である。意義も十分認められる。 また、環境との調和を図った経済の発展を目指して、エネルギー源選択肢の評価、特に原子力の役割、とりわけ高速炉システムの評価は重要かつ緊急な課題となっている。社会的・経済的ニーズ、民間ニーズも高い。	12) 拝承。
	13) 高速炉システムは、エネルギー源を海外に頼らざるを得ない日本の国情に適したエネルギーシステムであり、これまでの国の計画・方針との整合性は高い。また、これまでの実績を考慮して、サイクル機構が主体となって実施すべき課題である。	13) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
(2)開発目標	14) 21世紀の社会においては20世紀の資源浪費型の社会から脱却し、持続可能な文明社会を実現するため、資源のリサイクルや、環境保全への強い指向などが必要となるものと考えられる。FBRサイクルの実用化のために考慮すべき視点として、持続的かつ恒久的エネルギー源を確保するための「資源有効利用性」、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」及びエネルギーキャリアーである核物質の核兵器への転用疑惑を払拭するための「核拡散抵抗性」の三つが重要であるとしているのは適切である。「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提である。さらに我が国においてFBRサイクルが導入されうる必要条件としては、導入時点において他のエネルギー源とのコスト競争に打ち勝つことであり、「経済性」の克服が第一の要点としているのも適切である。	14) 拝承。
	15) 個別の開発目標に関する意見はすでに第1期の評価意見として述べているのでここでは繰り返さない。FBRサイクルシステムのコスト目標の具体的な数値については国内市場を目標とした場合はほぼ妥当と思われるが、本来目標値自身が市場に合わせて変化する性格のものであり、国際市場においてはさらに様々な要因が関係するので、これらの数値は固定したものではないとの認識の下で開発が行われる事を期待したい。	15) 本研究における開発目標に対しては、社会のニーズとの整合性が損なわれることのないよう、適宜、見直すこととしています。具体的には、第1期の研究成果を踏まえ、第2期でも開発目標を見直すこととしており、今後とも必要に応じて柔軟に見直していくこととしています。
	16) 大きな前提として将来の FBR サイクルとしてふさわしいシステムは何かを、炉、燃料、燃料サイクルで整合性をもったシナリオを選定することにあると考える。開発目標にあるグローバルスタンダードとはどのような観点から目指すのか。具体的、定量的な分析のもと明確にすることが必要である。	16) 拝承。
	17) 有望なFBR候補概念を抽出するために5つの視点から検討を加えており、特に21世紀へのエネルギー資源および環境負荷低減の社会的ニーズを戦略に組み込む開発目標を設定している。FBR システムの燃料中の高い不純物許容、TRUリサイクルの特徴を燃料サイクルシステムに整合させる基本概念は、研究開発の基軸の概念として適切であり、それに基づく FBR サイクルの設計要求仕様は、ブレークスルーすべき点が明確にされており、先の評価に応える適切な見直しによって、5つの視点に、技術成立性と運転・保守補修を加えた7つの指標により、各概念の達成度の評価検討を行っていることは適切であり、妥当である。	17) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	18) 安全性を大前提に、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性を十分考慮した上でのFBRサイクルの経済性克服を目指すという研究開発目標を、基本的に支持する。これらの目標はそれぞれ具体的に明示されており、適切だと評価する。	18) 拝承。
	19) 現時点では適切と考えられる目標ではあるが、その見直しも随時行い、社会のニーズとの整合性が失われることのないように努力されたい。	19) 拝承。開発目標については、必要があれば第 2 期の期間中においても見直しを行い、社会のニーズとの整合性が損なわれることのないように努めたいと考えています。
	20) 研究開発目標については国民のコンセンサスとしていく努力も必要である。その意味で、本プロジェクトが目指すものを国民に幅広く知らせるべく、なお一層の努力を期待したい。	20) 開発目標や研究開発の成果については、雑誌への掲載、学会での発表、パンフレットの配付等を通じて、広く国民のコンセンサスを得るよう努力したいと考えています。また、情報公開の考え方については「整理番号 60」を参照願います。
	21) 安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性等の個別に目標を定め、基本的な設計要求値を具体的に定めたことは妥当である。	21) 拝承。開発目標については、シナリオに拘わらず FBR が導入されうる共通の目標としてとりまとめております。ご指摘のように、設計要求の数値目標についてはシナリオに応じて変り得ますので、第2期ではシナリオを念頭において、ある程度幅を設けた数値目標を設定したいと考えています。
	22) 安全性、経済性、資源有効利用性、及び環境負荷低減性に関しては、設定は適切である。安全性を大前提、経済性を第一要件としており、このために、建設費、燃料サイクル費等に具体的な数値を与えている。これらの達成に必要な技術開発がブレークスルーすべき点と言え、明確となっている。また、各実用化候補概念の重点検討課題についても妥当である。	22) 拝承。
	23) 経済性の目標については、検討の進捗度合および社会情勢を踏まえて、都度変えることは構わないが、目標設定の考え方は明確にしておくべき。炉の建設費の目標を……、サイクルコストの目標を……というような考え方でなく、将来の軽水炉発電コスト(プルサーマル採用ベース)と比肩ないしは凌駕できるレベルとして……という目標が適切と考える。	23) 経済性目標の考え方については「整理番号 15」を参照願います。
	24) 増殖比の要求は、かなり弾力性を持たし、計画に幅を持たせていることは望ましい。増殖比を1．2程度と固定化せず、軽水炉と併立時期(移行時期)も視野に入れて、より柔軟な多様性を持たせるべきであろう。	24) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	25) 核拡散抵抗性については、政策との関連が強く、特に定量的評価(目標達成度の評価)が難しく、水準(どの程度で可とするか)を定めるのに困難が伴う。候補概念の絞り込みに対する説明責任の重要性を考慮すると、目標として適切であったかどうか疑問である。	25) 核拡散抵抗性については、査察などの政策との関連が強い外部要因と、純粋Puへの転換時間、Pu組成、モニターする時間や精度などの技術的な要件としての内部要因とが絡むため、それらのコンビネーションを考慮して総合的に判断する必要があります。ご指摘のように、核拡散抵抗性の取扱いについては判断基準の設定に課題があると考えます。実用化戦略調査研究で選定される実用化時代のFBRサイクル概念は、国際的な視野の下で、原子力の平和利用を国際的に容易かつ明確に示すことが不可欠であり、少なくとも現状の軽水炉や六ヶ所の再処理プラントと比較して、総合的には同等以上の核拡散抵抗性を有することを示す必要があるため、評価の困難さは伴いますが、目標としては必要不可欠と考えています。なお、候補概念の絞り込みに対してどの程度の重要度にあるかについては、第2期の中で検討したいと考えております。
	26) 今後、電力の需給の見通し、電力自由化、原子炉輸送等も考え、是非、小型炉の成立性を重要検討項目に入れて欲しい。	26) 拝承。ご指摘の点も踏まえて、小型炉のニーズ分析に基づき、小型炉の特性を活かした導入シナリオの検討を行います。
	27) 目標とシナリオは、関連があるので、付言すると、資料1－3の49頁に水素製造シナリオがあるが、図85のように他のケースと同等に水素製造を置いてよいのか、議論が必要ではないか。	27) 水素製造については、その他の熱利用(産業用、地域冷暖房、海水淡水化等)と合わせて、多目的利用シナリオの一つとして位置づけることとします。
	28) FBR サイクルの実用化候補の絞り込みを行っていくことから、検討対象から外すこととなった候補について、外した根拠を明確にするとともに、検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるように留意したことは評価できる。今後も、絞り込みの際、外した候補のその後の外部での研究開発状況をウォッチングしていってもらい、復活の可能性を検討して欲しい。	28) 拝承。
	29) 実用化候補概念の絞り込みを行う際の判断材料として活用するとしている総合的な評価手法の開発が当初から挙げられているが、その開発状況が伺い知ることができない。次の絞り込みの際には評価手法の確立が必要と思われるので、その積極的な開発を期待する。	29) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
(3)実施体制	30)　国－電力が一体となった研究実施体制は適当と考える。他機関との連携、協力は適切に行われていると考える。縦組織だけでなく、横断的な検討会を設けるなど、常に全体を考えながら実施していく体制は必要と考える。	30)　拝承。事業所間、部門間にまたがる開発計画の調整、成果の評価を横断的に行うため、プロジェクト会議の下に、新たに炉・燃料サイクル調整会議、炉システム会議及び燃料サイクル会議を設置して、研究開発を進めることとしました。今後も、研究開発の進展に合わせて適宜体制を見直し、研究開発を進めることとします。
	31)　本研究の目標・内容は幅広く、かつ既存の知見・技術を総結集して進めるべきものであることから、サイクル機構が本プロジェクトの主体として、関係各箇所の参加・支援を得て進めていくという体制も適切と考える。	31)　拝承。
	32)　本研究はサイクル機構が中心となって実施し、オールジャパンの研究体制が組まれていることは適切である。	32)　拝承。
	33)　提案の計画に対して、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、運営等は適切である。ただ、開発研究の戦略の在り方に関連して先に意見を出させていただいたが、開発研究の進展に合わせて、自己点検および区切りのチェックアンドレビュー時点でより高い成果を目指した研究実施体制となるよう期待したい。	33)　拝承。
	34)　研究開発費も潤沢でない現状から、効率的な推進は最重要な前提であり、それに沿って、研究開発を実施していることと理解しているが、これまでの説明、資料等からは大洗と敦賀の分担などについてはあまり明確な内容のものはなかったと思う。	34)　敦賀本部の役割は、大洗工学センターから提示された設計情報に基づいて、以下に示すようなプラント利用技術を検討し、その検討結果を大洗工学センターの設計研究に反映させることで、点検・保守、補修性に優れたプラント概念の構築に資することです。 ①「もんじゅ」での実プラントの経験に基づき、以下の検討を行い、大洗工学センターで実施するプラント設計に反映。 ・供用期間中検査、保守・補修技術 ・定期検査の内容・工程（ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉） ②FBRサイクルの実用化に向けた「もんじゅ」の利活用方策の検討。 ・実用化燃料の実証照射試験 ・MA燃焼、FP核変換の実証 ・革新技術の実証　等

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	35) 研究実施体制は適切であると評価する。第2期は5ヵ年計画であるが、3年終了時にチェックアンドレビューをすることとなっており、マイルストーンの置き方も妥当である。	35) 拝承。
	36) オールジャパン体制で第1期で開始され、引き続き第2期に入るが、今後も、関係者が一丸となって推進することを是非、堅持して頂きたい。	36) 拝承。
(4)第1期の成果	37) 第1期は公募も含めて集めた多くの選択肢を設計研究と要素実験によって検討している。既往研究、シーズ技術の調査結果をもとに、冷却材については、ナトリウム、重金属(鉛及び鉛ビスマス合金)、ガス(炭酸ガスとヘリウム)、水(軽水沸騰、重水加圧、超臨界圧水)、溶融塩の5種類を、燃料形態については、酸化物、金属燃料、窒化物の3種類を選定している。ヘリウムガス冷却炉についてはピン型燃料に加え被覆粒子燃料(酸化物、窒化物)も評価の対象としている。なお流体燃料については塩化物の溶融塩燃料も検討している。全体としてこれまでの知見がよく整理されていると評価できる。 プラントシステムについてはその出力規模として、基幹電源システムの候補となる大型炉と、中型炉を想定して、冷却材の特徴を反映したシステム概念を検討するとともに、分散電源への対応として、5万 kWe 程度の小型炉概念を検討したのは妥当である。	37) 拝承。
	38) ナトリウム冷却炉では、これまでの開発経験によって技術的基盤はほぼ確立されていることから、蓄積された技術知見に加えて新しい技術を取入れ、これまでに開発において重要な課題となっていた経済性に対して、大幅な向上効果が期待できる概念の構築を第一着目点として検討を行っているのは適切である。 検討の結果、大型炉については、ループ炉型とタンク型炉の両者間において、経済性、安全性等の観点では有意な差は見当たらないものの、保守補修性に優れるループ型炉が有望な概念であるとの見通しを得ている。中型モジュール炉については6基の原子炉と2つの蒸気タービンの組合せを提起しており中型のコストデメリットの克服に工夫が見られる。ナトリウム冷却炉の概念についての検討を進めていく上での課題としては、革新技術(三次元免震、構造基準高度化、12 クロム系鋼)の開発を始め、大容量でコンパクトな 2 ループシステムにおける流動特性、機器合体、大口径配管等の機器・構造の成立性、ナトリウム-水反応の早期検出方策の検討が必要であるとしているのは適切である。	38) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	39) 鉛及び鉛ビスマスを対象とする重金属冷却炉では、冷却材が化学的に不活性であること及び低圧系にできることから、2次冷却系を削除したシステム構成とし、燃料被覆管や冷却材の構造性に対する腐食防止に留意して検討しているのは妥当である。 炉型については、ループ型炉は高比重及び腐食性のため配管の熱応力緩和方策が技術的に難しいため、タンク型炉を選択し、出力規模については、大型炉は重量過大で経済性の見込みが厳しいため、中型炉を選択している。また、冷却材については、鉛冷却炉は高融点のため高温でのメインテナンスが必要なこと、防食に対して運転範囲が狭いこと等から鉛ビスマス冷却を選択しているのは適切である。今後の課題として、保守・補修性、材料腐食対策、鉛ビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被曝管理等の課題について検討を進める必要があるのは適切である。鉛ビスマス冷却自然循環炉については流路面積が広く必要で増殖比が低くなることを見出している。	39) 拝承。
	40) ガス冷却炉では、除熱能力を確保するために冷却材を加圧し、FBRとしての特性を引きだすために稠密な炉心構成とする必要があるが、配管破損等から減圧事故時の冷却性確保のために炉心の稠密化に限界がある。このため、燃料形態との組合せにより、炉心性能と安全性が整合する条件を把握するとともに、受動的な安全機能を考慮し炉心損傷の防止能力を高め、大規模な炉心損傷に至らない概念についても検討している。ガス冷却炉については、炭酸ガスを用いた従来型の蒸気タービン発電方式とヘリウムガスを用いた直接ガスタービン方式を検討している。被覆粒子燃料は、これまでに熱中性子高温ガス炉用燃料として、酸化物燃料を高密度黒鉛層や SiC 層等で多層被覆した球状粒子(TRISO 型被覆粒子燃料)を使用して、燃料粒子に大きな熱容量と強固な被覆層を持たせた概念が実用化されているが、高速中性子環境での照射耐性の点は1万 MWd/t に満たない燃焼度で被覆層が損傷するとの試験データがあることから、高速中性子に対する照射特性、熱的特性、機械的特性等の視点から材料構成を変更した被覆粒子型燃料候補概念を選定したのは適切である。 今後の課題として、現在候補としている燃料被覆材の物性等の基礎的な試験データの蓄積、燃料集合体及びコンパートメントの成立性、減圧事故時の冷却性能の維持、格納容器内での核分裂生成物の閉じ込め性能向上方策の検討が必要であるとしているのは妥当である。	40) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	41) 第2期に向けての実用化候補概念の複数抽出は概ね妥当。但し、ヘリウム冷却燃料ピン型炉で、蒸気タービン方式は考えられないか。熱効率をNa冷却と同等にするため、出口温度を若干高く設定する必要はあるが、耐熱被覆管材料への要求条件は緩和可能と思われる。増殖性能の向上が期待できる。	41) 蒸気タービン発電方式のヘリウム冷却炉については、予備的な検討を行いました。その結果、ヘリウムの小さい熱輸送能力を補うためには、冷却材圧力を高める必要があり(約12Mpaとして検討を実施)、そうすると厚肉のプレストレスコンクリート製圧力容器が必要となり、物量が増加します。このため、同じ蒸気タービン発電方式である炭酸ガス冷却炉を経済性で上回ることが困難と判断し、検討対象から外しました。
	42) ガス炉に関する評価が予定通り終わらなかったと報告されている。これは予想外の評価困難性が存在したためとの説明があったが、期限内に結果が出せなかったという意味からは評価は厳しい内容とせざるを得ないと考える。今後、このような予想外の事態が発生したときに、(他部門からの一時的な応援をたのんで担当者を補強するなど)どのようにして柔軟に対処するのかを示して、再発防止に努める必要があると思う。	42) ガス炉に関する評価を更に延長した理由は、マンパワー等が足りなかったために研究が進まなかったということではなく、今回遭遇した新たな問題は、新しい材料を開発し、それを採用することによりガス炉の性能を更に向上させることが望ましいと判断したためです。そのため、1年程度検討を継続することとしました。 この判断を行うにあたっては、サイクル機構のみならず原研の応援を得るとともに、海外の知見も踏まえて検討を行いました。今後とも，同様の課題に直面した場合は、国内外の応援を得て、対処していく考えです。
	43) 水冷却炉では、改良型 BWR(ABWR)をベースとした沸騰水冷却炉と、PWR 概念の発展形で炉心性能を向上させた重水冷却炉、高温・高効率の直接サイクルを目指した超臨界圧水冷却炉の3概念を検討の対象としている。これらも、ガス冷却と同様に高圧系となることから、稠密炉心における冷却材喪失事故時の冷却可能性と炉心性能の見通しを把握することを中心に検討したのは妥当である。	43) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	44) 小型炉については、分散型電源として、多様な用途に対応するため、高速炉の特長を活かした炉心寿命の長期化と受動的な安全機能の向上を目指したプラントシステム概念の概略検討を行っているのは適切である。	44) 拝承。
	45) 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)の検討は、FBR システムの検討と同様、幅広く技術の調査・分析を行い、第2期において研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出検討を行っている。再処理システムについては、超ウラン元素(TRU)含有低除染の再処理製品を前提として、ペレット法、振動充填法及び鋳造法を検討対象としている。FBR は軽水炉に比べ、中性子経済が良好のため、燃料中の不純物の許容量を多く取れる。言い換えれば、必ずしも除染係数の高い再処理を必要としない燃料をリサイクルできるという特長がある。したがって、低除染燃料サイクルを適用することにより、従来高除染化に難があるとされていた乾式法等の再処理法の適用が可能となるとともに高除染係数が得られる湿式法においてもプロセスの簡素化が可能となり、その結果、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性に寄与する改良方策等の幅広い技術の検討が可能となるとしている。また、U/Pu 共回収のような、Pu を単離(元素単体の形で分離)しないシステムを導入することにより、核拡散抵抗性の向上が期待できる。一方、低除染燃料サイクルでは、燃料製造における被ばく低減対策という新たな負担が生じるため、製造工程の簡素化、適切な遮蔽を隔てた運転の自動化及び遠隔保守化が必須となるとしているのは適切である。	45) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	46) 湿式再処理法については、「先進湿式法」を検討対象としている。更なる経済性の向上や廃棄物量の低減の観点から、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」、「超臨界流体直接抽出法」等についても検討している。先進湿式法の各設備の検討にあたっては、臨界制限、保守・補修性等の機器設計上の制約、予備系列の要否等の条件を踏まえた設備容量を選定している。その結果、晶析工程が追加されたものの、下流工程の流量減少により機器容量の低減やU濃縮設備の削除等ができることを示している。また、遠心抽出器の採用により、溶解液と溶媒の接触時間を大幅に短縮できることから、放射線劣化により発生する廃溶媒量を低減できることを明らかにしている。乾式再処理法については、「酸化物電解法」、「金属電解法」及び「フッ化物揮発法」を対象とし、酸化物燃料への適用性を検討した後、新型燃料への適用性を評価している。ロシアRIARの技術をベースとした酸化物電解法の最大の特長は、溶融塩を利用して電解により電極に酸化物を析出させるプロセスが、再処理の基本プロセスを構成すると同時に、振動充填燃料用の高密度顆粒製造プロセスも兼ねているところにあるとしている。RIARで開発した手法に対して、処理速度の向上・塩素使用量の低減のためのUO_2同時溶解析出プロセスを採用するとともに、白金族FPの分離工程の追加、UとPuを同時回収するための共析出工程を採用している。 ペレット燃料製造については、「簡素化ペレット法」を検討対象としている。振動充填燃料製造法については、湿式再処理及び乾式再処理にそれぞれ対応した振動充填を検討しており、いずれも適切である。	46) 拝承。
	47) 第1期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決法、開発工程等に大きな問題がないか等を評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針としているのは適切である。 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」及び「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について検討を進めている。以上より第 1 期については FBR システムと燃料サイクルシステムについての知見がよく整理されていると評価できる。	47) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	48) 第1期では短期間でこれまでの技術を網羅的に分析できたことは評価したい。独創的な技術の発掘、各システムの利点を組み合わせたよりコンパクトなシステムなどは第2期に期待したい。 実用化への見通し、実用化のための技術開発課題の選定などの実用化に向けた計画策定は第2期の重要な役割と考える。	48) 拝承。
	49) 第1期の成果として、炉・燃料・サイクル各候補概念について有望な概念の複数抽出、重点検討課題の摘出等当初の目標は充分な成果が得られたものと考える。	49) 拝承。
	50) 現時点にて収集可能な情報について幅広く考慮されており、検討も進んでいる。	50) 拝承。
	51) FBRシステムの検討においては、適切な評価基準を策定し、有力候補概念の絞り込みができている。ガス炉では評価が遅れているが、拙速に絞り込みをするのではなく、あくまできちんとしたデータに基づいて評価していくという姿勢は正しいものと認める。絞り込みの結果は本プロジェクト開始以前の時点で予想されたものと大幅な違いはないが、多くの候補概念を同じ指標のもとに整理した結果は今後のFBRシステムの開発の基礎を支えるものとして有用であると考える。	51) 拝承。
	52) 再処理、燃料製造についても、FBRシステムと同様、今後の研究開発に必要な知見の整理がきちんとできており、高く評価する。	52) 拝承。
	53) 妥当なものと判断される。	53) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	54) 第 1 期で、FBRサイクルに含まれる広範囲な技術を、共通の土俵上で比較、検討できたことは多いに評価できる。ただ、まとめる段階で、第 1 期での作業により、これまで判らなかったことで、新しく判明したこと等の新知見などについて、もっとメリハリをつけるようにして欲しい。また、各候補とも、今後の課題が述べられているが、それらの課題が第 2 期でどのように研究開発の中で取り上げられていくのかを、分かり易く説明していくことが望まれる。	54) 拝承。第1期の検討により判明した主な新知見には、次のようなものがありますが、詳しくは説明資料や OHP 資料集等にまとめてあります。 ・ 環境負荷低減性に優れる低除染 TRU 含有燃料を採用した条件で、安全性、経済性、資源有効利用性にも優れた炉心が成立することを示した。 ・ ナトリウム大型炉で、2 ループ化、高Cr鋼等の採用により、大幅な経済性向上を実現するプラントが成立する可能性を示した。 ・ 低除染 TRU 含有燃料をリサイクルできるという FBR の特長を活かした燃料サイクルシステムを構築し、湿式法と乾式法のいずれにおいても軽水炉燃料サイクルに比肩する経済性を達成する見通しのあることを示した。 また、第 2 期の研究開発計画における各候補概念の課題を解決するためのR＆Dの展開については、各候補概念における要素技術開発の着眼点については第1回委員会資料 1-4 に、また第 2 期における課題の 5 カ年の展開並びに工程については資料 1-7 に整理してまとめてあります。
	55) 経済性評価で、炉の建設費評価に米国コードの活用の話を伺ったが、FBRシステム全体としての経済性評価や環境負荷評価等についても有効な手法を確立してほしい。なお、環境負荷評価ではいわゆる外部コスト評価も含めてあり方を検討してほしい。	55) 拝承。外部コスト評価については、ExternE(注)など海外で実施されている試算結果も参考にして、検討を行いたいと考えています。 (注)ExternE:Externalities of Energy、ヨーロッパで行われた電力の外部性評価に関するプロジェクト。
	56) 実用化との関係では、第1期の段階なのでまだ技術の実用化について具体的な意見はないが、候補概念が絞られると、多くの未経験の要素技術の基盤研究が必要になると思われ、本調査研究はその戦略をできるだけ速やかに示す必要が有る。例えばナトリウム冷却炉が改めて候補となれば、もんじゅの活用が遅滞なく開発研究計画に組み込めるのでは、等々である。	56) 実用化候補概念の検討にあたっては、概念の構築に係る要素技術開発の必要性についても合わせて検討を行って研究開発計画を策定し、研究開発を進めることとしています。 第 2 期についても同様に候補概念の検討と要素技術開発をセットで検討を進めることとしており、実用化候補概念を絞り込むとともに、実用化に向けて必須な技術開発テーマを特定するとともに、ご指摘のように「もんじゅ」の活用なども組み込んだ研究開発計画(ロードマップ)を整備できると考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	57) 実用化への技術的見通しについては、現時点では余り強くこだわる必要は無いと考える。燃料サイクルの選択肢を広げるため、幅広く概念を検討し、それらの実用化への開発課題を明確にし、解決への道筋（必要な期間を含む）、開発コストを明確にすべき。実用化に対する具体的・詳細な検討は、次期の課題と考える。	57) 第1期の目的は、有望な実用化概念の抽出であり、ご指摘の点は第 2 期で実施する研究開発計画（ロードマップ）の策定の中で検討することとしております
	58) 技術移転を含む成果の普及については、大いに期待できる。他のシステムの評価に対しても、成果の波及が可能なような方法論の確立をも期待する。	58) 拝承。
	59) 得られた成果の普及、公開に対しては、よくなされていると思う。	59) 拝承。
	60) 本プロジェクトの結果得られた新しい知見について、専門化向け・一般向けに分けて、もう少し分かりやすい形の整理があればなお望ましいと感じる。それがないと、形式的な作業に終わったとの誤解を受ける恐れがある。また成果の普及・公開を積極的にされていることはよく理解するが、さらに一層の努力を期待したい。第1期の成果の普及により、これからのプロジェクトを国として進めていくことについての国民のコンセンサスが形成される必要がある。それにはまだ至っていないことを自覚し、一層努められたい。	60) 拝承。御指摘のように、サイクル機構の研究開発業務について、その必要性や重要性を国民に十分理解していただくためには、積極的な情報公開により、自らの業務に対する説明責任を果たしていくことが必要不可欠であると認識しています。 今後とも、専門家向けとして専門誌への掲載、学会での発表を行うばかりでなく、原子力委員会をはじめとする国の委員会や専門家会議等を通じて成果の普及に努めるとともに、インターネットのホームページはもとより、展示施設やパンフレットにおいても研究の成果について分かりやすい紹介を行って行くこととします。なお、一般向けのパンフレットについては現在作成中です。 また、「サイクル機構の業務の報告」と「一般の方々のご意見・ご質問を承る」場として毎年開催している『サイクル機構シンポジウム』、あるいはサイクル機構以外の団体等が主催するフォーラムなどにも可能な限り参加して、本研究の成果を紹介するとともに、これらの場を通じて頂戴したご意見は真摯に受け止め、必要に応じて今後の研究に反映させていきたいと考えております。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
(5)今後の計画、第2期計画	61) 第2期では設計研究や要素技術の基礎的な試験等を実施し、そのデータに基づいて、FBRサイクル全体として最適化、実用化を念頭に置きつつ総合的に評価を行い、実用化候補の絞り込みを行うとしているのは適切である。 FBRシステムについては第2期では、第1期で抽出された有望な実用化候補概念について、プラントシステムの設計検討を深めるとしている。また、5つの開発目標と技術的実現性に関する主要な技術について、基礎的な試験を含めた研究開発を行うとしている。これらにより、可能なかぎり客観的な判断根拠を整備し、各候補概念の総合的な比較検討を行って候補を絞り込むとしている。 炉心燃料については、酸化物燃料と新型燃料との互換性に配慮しつつ設計研究を進めて炉心概念を具体化し、候補となるプラントシステムとの適合性及び燃料サイクル技術との整合性を明確にした形で、目標性能の達成見通しを示すとするとしている。これらはいずれも適切である。 プラントシステムの検討においては、経済性や安全性を向上するために取入れた革新的な技術を成立させる上で鍵を握る分野や、設計研究のベースとなる設計・評価手法、設計基準類の整備に向けた優先課題を中心に取り組んでいくとしているのは適切である。これらの計画において「常陽」における照射試験や海外の施設の活用が図られている。 燃料サイクルシステムの計画でも東海事業所のCPFの改造や大洗工学センターの照射燃料試験施設や海外の施設の活用が計画されておりリサイクル機器試験施設(RFTF)活用計画の取りまとめも 2003 年度を目標に行われようとしておりいずれも適切である。	61) 拝承。
	62) 各要素技術、システムの比較評価において、明確な基準のもと同一の考え方で候補技術の絞込みを行われたい。要素技術開発については、できるだけ定量的に、実験(要素技術確証試験、工学試験などによる)成果に基づいて成立性等を評価することが大切と考える。また、最適な正、副のシナリオを選定する場合には、明確な根拠を提示することが必要である。	62) 拝承。
	63) 3年間で有効な実験的成果が得られないものもあると見られる。必要な課題は、5 ヵ年かかっても適切な評価を行うことが望まれる。3 年目の中間評価と5年目の最終評価の夫々の位置付けを明確に願いたい。	63) 3 年目の中間評価は、第 2 期の 5 年間を柔軟に進め、効率的な成果を上げるためのマイルストーンとして設定したものであり、第 2 期の中間段階で研究の進捗状況等をチェックし、研究開発計画の見直しの要否を確認することとしています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	64) システムの候補概念の重点検討課題は第1期で抽出されており、第2期の計画は全般的に妥当と考える。	64) 拝承。
	65) 第1期評価では有望な候補として、炉はナトリウム炉のループ型大型炉＆中型モジュール炉、燃料がMOX燃料、再処理が先進湿式が挙げられているが、これらは既存の実用技術の延長線上にあるものから、現時点としては当然予想される結果である。第2期では、あまり第1期の結果に捕らわれることなく、代替技術について今後どれが有望なものであるかについてを主眼とした検討を望みたい。	65) 第1期では、過去の研究開発の知見を踏まえつつも、それに囚われることなく、幅広い技術選択肢を対象に検討を行い、有望な候補概念を複数抽出しました。検討対象とする技術に十分な幅を持たせる工夫として、国内外からのアイデア公募も実施しています。第2期では、このような検討の結果として第1期で抽出された候補概念を対象に検討を進めることとしています。
	66) 第1期での比較評価にあたっては、各候補概念によって検討評価のベースの知見レベルに相当の粗密があったものと推測する。そのような観点から第2期でもあまり候補を絞らないで、上記計画の項で述べた希望意見も含めて、更に様々な観点から検討していくことが重要と考える。	66) 本プロジェクトのような長期的な研究開発を進める上で重要なことは、資源(人，資金)に限りがあるので、対象技術の工学的レベルをより高めていくためには、候補を絞り込んで検討することが必要です。しかし、抽出しなかった技術についても再評価して落ちのないように進めていくこととしています。 このため、本研究の第2期では、第1期で抽出された有望な候補概念について、要素試験結果を踏まえた定量的な比較評価を実施し、実用化候補概念(複数)の絞り込みを行うこととしています。
	67) 第1期では、FBRシステムを5種類の冷却材による炉型分類をベースに、大型炉、中小型モジュール炉、及びガス炉ではガス種と接続発電サイクルの組み合わせによる視点も加味し、最終的に10種類の炉型を選定し、これに対して、固体燃料での3種類の被覆管とHe冷却炉での2種類の被覆粒子、及び液体燃料を考え、検討対象のマトリックスを設定しFBRサイクルを総合的に検討している。実にに膨大な量の項目についての検討結果は、それぞれ単独に、あるいは相互に比較されて適切にまとめられており、いずれの炉型概念が有望であるか展望できる状況に導びけていると判断する。	67) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	68) 候補概念の絞り込みは第2期の主要テーマとされているが、第1期において提示された候補概念の多くは炉型評価 A(ガス炉での A*も含めて)とされ、ほとんどが有望との判断から絞り込みへの判断を次期に委ねられ、研究開発計画が示されている。しかし、その多くの全ての候補に対して、第 2 期当初の 2 年(3 年の区切りを考え)ほどの期間内に 2･3 の候補へ絞り込みに足る十分な革新的技術開発や設計研究の成果を期待できるのか、心配である。A 評価を再評価しその数をもっと絞り、それによって開発研究を集約して深い成果を期待することはできないだろうか。例えば、図-79 にまとめられている BR およびダブリングタイムのデータを見ると、一部の炉型や水炉は対象外にできるように思える。あるいは、各炉型に必要な第 2 期での開発研究の課題をもっと細部まで詰めてそれぞれにタイムリミットをおき、3 年の区切りにはその成果を明らかにし、及ばないものは切り捨てるなどの英断を加えて、候補炉型の絞り込みとその開発計画を次のフェーズにつなげる、開発計画もありうる。 要は、途中まで多くの課題を抱えた計画を如何に早く絞れる体制に持って行くか、あるいは当初より課題を集約したスリムな形で、効率良く開発研究に人的資源とバジェットを注げないか、と言う考えである。	68) 研究対象の中には3年で終わるのではなく5年を要する研究も入っていますが、第2期の3年目で当初の計画に対する進捗状況や得られた成果をとりまとめ、5 年目までに計画通りの成果が得られるかどうかその妥当性を評価し、第2期終了時点の5年目に必要なデータ、情報を揃えることができるよう努めます。 第2期においては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、定量的に絞り込みを実施する上で必要となる要素技術開発についても実施し、FBR 全体の整合性にも配慮しながら、実用化候補概念として有望な2～3の候補に絞り込むこととしています。
	69) 第 1 期で得られた成果の内容に対しては、幅広い技術が検討されたが、「整理番号68」で述べるように、第2期に向けて、実用化概念候補の複数抽出については、多くが第2期に委ねられる結果となっている。第2期で本当にその数を絞れるのか、気掛かりである。	69) 第2期においては、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、また、必要となる要素技術開発についても実施し、FBR 全体の整合性にも配慮しながら、実用化候補概念として2～3の有望な候補に絞り込めるよう努めます。
	70) 計画通りに展開することに賛成する。特段のコメントはない。	70) 拝承。
	71) 2005年に第2期のまとめを行うのは重要ではあるが、適宜社会状況を反映させる為、第2期計画の中間に早めに中間評価を実施し、2005年のまとめのやり方を議論する機会を設けて欲しい。	71) 第2期の期間は 2003 年度までの3年間を一つの区切りと考え、中間的な報告と最終報告のまとめ方を提示し、その結果を中間評価として研究開発評価委員会で審議していただくこととしています。また、その結果を踏まえて、2004～2005年度の研究内容を見直し、選択肢の絞込みを行う計画としています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	72) 第 2 期では、予備的概念設計の実施と伴に、候補概念の絞り込みに必要な試験を実施することになっている。ここで、各炉型候補の主たる目標は相違しており、Na炉は経済性追求、重金属炉、ガス炉は技術的成立性となっているが、各炉型の技術的成熟度が異なるのでやむを得ないことであるものの、絞り込みの段階でなるべく、公平な比較、判断が出来るように今後も研究開発計画の細部の立案、実施に当たっては細心の注意をお願いしたい。その観点から、資金計画、配分計画がこれまでの説明、資料等からは読みとれなかった。	72) 比較・判断をする上で優先度の高い事項から試験等を実施する計画としていますが、第 2 期の最終段階で公平な比較・評価が実施できるよう、研究開発計画を策定するよう努めます。
	73) 炉型の中で、小型炉を、Na炉、重金属炉等と並列に扱う理由を明確にする必要がある。	73) 大型・中型炉を基幹電源用と位置付けているのに対し、小型炉は、大型炉と経済性で競合することは難しいと考えられますが、分散電源や多目的用途と位置付けて検討を行っています。
	74) ガス炉に関して、再処理法の扱いを触れる必要がある。	74) ガス炉に関しては使用する燃料や被覆の形態により再処理技術の選択が異なります。このため、まず炉側で燃料形態の検討を行い、その後、燃料サイクルシステムとしての検討を行うことにより、全体の整合を図ることとしています。
	75) 全体的には妥当である。但し、窒化物燃料について、「15N 濃縮の経済性向上、炉心損傷時の燃料—冷却材相互作用(FCI)や窒素乖離による圧力発生の可能性について広範な試験データによる確認が必要である」との理由で第2期の検討から外したのは疑問である。試験データを得るのに必要な、時間・コストを評価して示すべき。コスト的に妥当で、システムの評価に必要ならば、これらの要素技術開発の実施も、メインの計画とは別個にしても以降の計画に含めるべき、と考える。重要でありながら、未検討の課題を後に残すべきでないと考える。	75) 第 2 期の検討に残す燃料形態は、炉の冷却材との組合せで抽出しました。ナトリウム冷却炉に関しては、ご指摘の通り、窒化物燃料の場合、炉心損傷時の燃料－冷却材相互作用(FCI)及び窒素乖離による圧力上昇の懸念があることから、新型燃料としては金属燃料との組合せを抽出しました。しかし、重金属冷却炉、ガス冷却炉との組合せでは、窒化物燃料を抽出しており、15N 濃縮等の要素技術開発を継続します。 ナトリウム冷却炉についても、必要に応じて、これらの要素技術開発の成果や、その他、国内外の研究の進捗状況をレビューし、窒化物燃料を採用するか否かを第 2 期の絞り込み段階で再評価することとしています。
	76) ここでは地元に配慮して述べられなかったのかもしれないが、将来における「もんじゅ」の活用も視点にいれて検討するべきではなかろうか。他産業では実用化と研究開発は一体でありここで提案されている様々なアイデアの検討のために「もんじゅ」を活用することが必要である。なおもんじゅの運転再開による運転データの取得そのものが高速炉の設計の検討とその進展にとって必要不可欠であることは述べるまでもない。	76) ご指摘の通り、「もんじゅ」は、FBR サイクルの実用化に向けた研究開発の場として、重要な施設であると考えています。資料 1-4 のページ 90 に示す通り、実用化戦略調査研究で見出した経済性向上技術の確証や実用化に向けた燃料照射の場として活用することを考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	77) 研究開発で一番重要で、過去の経験から考えて最も困難なのは、実用炉の建設の投資を得るところである。この点で実用の発電所を建設するのは研究用の研究炉や加速器を作るのと異なる。投資が得られるかどうかは最も厳しい評価であり、実用化戦略調査研究においてもその初期からこのことを意識し、戦略をたて、工夫を案出されることに期待したい。	77) ご指摘のように、実用炉の建設は、研究開発からプラントの運転開始までに長期間を要し、投資した資本が回収できるかどうかが重要なファクタとなっております。このため第2期では、投資対効果の分析や投資リスクなども考慮した評価手法の検討を行いたいと考えています。
	78) 原子力技術やシナリオを多様化していくことは、その発展のため重要なことと考える。小型炉はその可能性を与えるものと考えるが、ニーズや社会的受容性の面から、①小型炉にしかできないこと、②小型炉が中型炉より有利な点、③大型炉の先行例としての有効性、等小型炉の位置付けを明確に分析してもらいたい。	78) 拝承。ご指摘の通り、小型炉については、その位置付けの分析が重要だと認識しています。第2期では、位置付けを明確にしながら概念検討を進めることとしています。
	79) 多用なニーズに対応した設計要求の設定のところでは小型炉の範囲で熱供給、水素製造、海水淡水化が述べられている。熱供給は熱の輸送距離に限界があり需要の点で小型炉が適していると思われるが、水素製造や海水淡水化は必ずしもそうではなかろう。特にエネルギーキャリアとしての水素の製造は世界の一次エネルギーの需要の約 1／3 を占める輸送分野への応用として注目される。世界の一次エネルギーの 90%が化石燃料でまかなわれており、原子力は発電分野のみに現在は使われているだけであり、地球温暖化防止の点では発電以外の分野への応用が極めて重要である。	79) ご指摘のように、水素製造や海水淡水化については小型炉に限定せず、原子力利用の拡大といった視点で検討していきたいと思います。水素製造については今後の普及が予測される燃料電池自動車のエネルギー源としての利用に加えて、地球温暖化や排気ガスによる公害問題の解決に貢献し得るものとして検討したいと考えています。そのため資料 1-4 のページ 59 の大・中型炉のシナリオの中に「水素製造等のシナリオ」を追記させていただきます。
	80) 実用化戦略調査研究のような大きいプロジェクトにはそれから生まれるスピンオフにも期待したい。	80) 拝承。
	81) 本タスクを実施する上から RETF 計画の提示を 2003 年目途としている根拠は何か。2005 年に複数選定される燃料サイクルの実用化計画全体(開発計画、施設計画)の中で利用する施設の一つと捕らえるべきではないか。その場合、前にも述べたように国内外の能力、施設の効率的利用という考えのもとに策定することが重要と考える。	81) RETF では燃料サイクルの工学規模のホット試験を計画しています。 実用化戦略調査研究では、幅広い技術選択肢を絞りこみながら実用化技術を体系的に整備していくため、施設整備においても節目をもった計画立案が必要であり、RETF については、ホット工学試験の計画と、その実施のためのリードタイムを考慮し、2003 年を計画提示時期としています。 また、ホット工学試験の計画策定にあたっては、合理的に試験を遂行するため、国内外の施設利用も考慮し、RETF の利用計画を検討することとしています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	82) 最も技術が進んでいるMOX燃料でも、最終的に選定した製造技術による燃料の照射試験結果が得られるのは2020年頃であり、金属燃料、窒化物燃料は更に長期間を要する。このような状況を考慮して研究計画を立案すべきである。 もんじゅでの照射試験が可能となる時期は2016年以降であり、フェニックス炉は2004年までの運転計画である。国外の試験炉を維持できるか不確実性が大きいことに配慮する必要がある。 米国の新エネルギー政策で乾式処理(金属)が復活する可能性があり、日米協力の可否を含め米国の動向を注視する必要がある。	82) 本研究では5年程度の区切りをもって、チェックアンドレビューを行いながら研究開発計画を遂行していきます。このため、10年オーダの長期を要する照射試験については、第2期の期間で最終的な成果を得られない試験を含めて、第3期以降におけるデータの必要性に見通しを付けた上で順次着手することとしています。これらを考慮したロードマップを作成しています。 照射場については、世界的な課題であると認識しており、海外炉の利用と国内炉の運用を勘案し、効率的な照射試験計画を策定していきます。 国際協力による研究の効率化は重要であると認識しております。ご指摘の点については、FBRサイクルの社会的な意義として重要と認識しております。現在、Gen－Ⅳ等に参加しておりますが、今後とも常に国内や米国、IAEA等の海外の動向を把握し、プロジェクトの推進に反映していきたいと考えています。
	83) 第2期の大きな目的のひとつは、第3期のR&D計画を策定することと実用化への道のりを提示すること考える。その場合、国内外の施設を有効に利用した効率的な計画(これまでのように高価にならないような方策を探索して)策定することが必要である。	83) 拝承。)「整理番号82」を参照願います。
	84) 研究開発計画は第1期の成果を踏まえた適切かつ妥当なものとなっていると評価する。第2期においては要素技術開発として実験が数多く実施される。実験においては、プロジェクトの目的との整合性を重視して内容を絞り込みすぎると、波及効果として得られる貴重な知見を捨てることになる。実験は波及効果まで考えて最適な計画を立て、実施することを希望する。	84) 拝承。要素技術開発として実験を実施するに当たっては、特定の設計に合わせて実験体系、実験条件を絞り込みすぎることなく、研究資源(予算、要員)の許す範囲で、できるだけ条件を広げて実施するよう努力したいと考えます。また、ご指摘の点を十分認識し、実験の成果は、できるだけ広く活用できるよう努力します。
	85) ある程度の要素技術開発を実施して、FBRと燃料サイクルの整合性のみならず放射性廃棄物の処理処分との整合性をも考えて、実用化候補概念をさらに絞り込むことが第2期の大きな目標に対して、開発シナリオの検討、総合的な評価手法の開発、整備についての研究開発計画の検討がうたわれているが、その概要が見えない。このことについて今後十分検討していただきたい。	85) 「整理番号63」を参照願います。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	86)　本研究の対象が広範囲なことから、ロードマップの整備が極めて重要。また今後国際協力を進めていくに当たり、米国や仏国の状況と協調したロードマップ作りをして、わが国のレベルが逐次把握できるようにしてほしい。	86)　ご指摘の通り、広範囲な研究を進める上では、ロードマップの整備が重要であると考え、既に第2期計画を策定するために実用化の見通しを選るまでの研究開発の道筋を描くロードマップを作成しています。 ロードマップの作成には、マイルストーンを示し、実用化を実現する上でのクリティカルパスを明確にしています。さらに、海外における研究開発の進捗状況等についても逐次把握し、各国の進捗状況と整合を図って、適宜柔軟に見直しを行い、より充実したロードマップとしていきたいと考えています。
	87)　各実用化候補概念の研究開発状態の違いを考慮して実用化候補概念の絞り込みをして行かなければならない。また、研究開発が長期にわたって継続される必要性があることから、開発目標として挙げている安全性の確保、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性以外に、実用化候補技術として具備すべき新たな視点を考える必要があるのではないか。 最終的には廃棄物を考慮したFBRサイクルシステムとして考える必要があり、各実用化候補技術はシステムの構成要素であることから、各実用化候補技術はFBRサイクルシステムの最適化への対応ができなければならない。したがって、候補技術に柔軟性がどの程度あるかは大きなシステムの開発においては極めて大切な視点であると思う。特に、廃棄物への対応を今後考えて行く上で重要と思われる。	87)　拝承。第1期では、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」及び「核拡散抵抗性」の5つの開発目標に加えて、「技術的実現性」並びに「保守補修性」を考慮して、有望なサイクル概念の抽出を行いました。第2期では、国際的に通用するグローバルスタンダードとして、より高い目標も設定するとともに、「社会的受容性」にも配慮することとしています。 ご指摘の通り、「環境負荷低減性」の開発目標に対しては様々な視点が考えられますが、その視点の一つの大きな指標として廃棄物量の低減があると考えます。その目標を達成する手段の一つとして廃棄物量の発生量の少ないプロセスが望ましいと考え、そのようなシステムの検討を行うとともに、さらにMA燃焼やLLFP核変換等についての検討も進めることとしています。
	88)　社会的、経済的、民間ニーズについては、社会－R&D実施者・事業者の双方向で常に理解を深めていく努力が必要である。その場合、環境問題へのしっかりした対応、放射線に対する畏怖の解消(軽減)、ならびに効率的なR&D方策と経済的なシステムが見出せるかが重要と考える。	88)　拝承。
	89)　第1期が技術論的検討を共通ベースとして進めたものを、第2期の展開として、重要視点を多様化させることは非常に有意義である。 しかし例えば環境負荷低減とか社会的受容性という視点からの検討は、目標の具体化の過程で相当困難を伴うものと推測する。第2期ではあまり欲張らずに、特徴的なメリット・デメリットを見いだすことと、第3期への絞り込みの目安をたてる段階まで進めれば充分と考える。	89)　第1期では、各候補概念について共通条件での比較による特長把握から、メリット・デメリットの整理を行いました。第2期では、第1期での成果を踏まえて、各システムの特長活かしたFBRサイクルシステムの検討を進めるとともに、候補概念の絞込みにあたっては、極力定量的な判断基準で絞り込んでいきたいと考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	90) 絞り込みにあたっての判断基準の設定も重要であり、その考え方の整理も必要と考える。	89) 拝承。
	91) 実用化候補概念の絞り込みに必要な総合的な評価手法については、第2期の早期に、早急にその評価指標の具体化を図るべき。その際、前提条件となるべき目標(安全性、資源有効利用性、環境負荷低減性、等)については設計要件として設計自身に取り込み、定量的評価が可能な経済性に重点をおいて総合評価すべき、と考える。現時点で定量的評価が困難なものに関しては、その旨付記し、今後の検討にゆだねることとする。	91) 第2期の検討では、同一の条件による各候補概念の特徴把握だけでは、システムの有する特長を積極的に活かすことができないので、設計要件(目標)として一律の共通する目標を設定するのではなく、候補概念の特長を活かした概念設計を行うこととしています。このため、経済性のみでなく、環境負荷低減性や資源有効利用性にある程度の幅を許容した上で検討を進め、経済性に及ぼす影響を把握したいと考えています。なお、定量的評価が困難なものについては、相対的な評価を行うなど、第2期の計画の中で検討したいと考えております。
	92) 第2期において複数の候補を絞り込んでいく際に、数多くの評価指標をどのように重み付けして総合評価とするのかが非常に難しい問題であると思う。経済性を最重点で評価するのか、経済性を多少犠牲にしても安全性(確率)に重きをおいて評価するのか、あるいは将来的な経済性達成の可能性を評価するのか、etc.これらの重み付けにこそ国民のコンセンサスが必要であると考える。これをないがしろにして結論を出すと、後々まで尾を引くことが懸念される。コンセンサス形成の部分は原子力委員会や円卓会議などにゲタを預けるなり、サイクル機構で責任を持って新たな試みとしてコンセンサス形成にまで踏み込むなり、進め方を考えておいた方がよいと思う。	92) 評価指標をどのように重み付けして総合評価するかについては、ご指摘のとおり難しい問題であると認識しております。 第2期では、様々なバリエーションをもって重み付けを行い、多面的な検討の下で総合評価を行います。さらにその結果は外部の有識者等がコンセンサス形成等の場で有効に使えるよう積極的に提示して行きます。
	93) 経済性評価は最終的な数値を得ることのみがその役割ではない。評価の過程で得られる知見を活用し、何が求められているか、何が壁になっているかに関する情報を広く共有しその解決に向かって知恵を絞ることを期待したい。そこから生み出されるアイデアやノウハウを特許等に結実させることが日本の原子力の国際的な展開の戦略の1つとして求められている。本研究の成果に多いに期待したい。	93) 拝承。第1期で実施した評価手法の適用性評価(経済性評価、等)では、ご指摘の通り、課題の摘出が大きな成果となり、摘出された課題は第2期計画の検討へ反映しています。第2期においては、評価結果の数値のみにとらわれることなく、評価の過程で得られた知見を国際的な場で議論するなどして、課題の解決に向けて研究開発を進めたいと考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	94) 最優先の開発目標は経済性のあるFBRサイクル像を提示することにある筈であり、環境負荷低減においてTRU燃焼とLLFPの核変換は、コスト並びに社会的ニーズの兼ね合いから評価すべきである。最初から、すべてを狙うのではなく、コスト、ニーズと技術的可能性の兼ね合いから、第1段階、第2段階と目標を定めることが必要ではないか。目標にしたいレベルと技術的(経済性を考慮して)にできるレベルの間には、ギャップが存在すると考える。両側面からこの5ヵ年で当面どこまで狙うかを明確にすることが必要である。	94) 拝承。ご指摘の通り、TRU燃焼とLLFPの核変換については、同時に達成することを目指しているのではなく、実用化を目指して長期的なスコープで段階的に進めることとしています。
	95) 技術論だけでなく、社会的受容性の向上を図るためにはどうすることが大切なのか、多面的な取り組み、分析を行う必要があると考える。折角技術的には良いものを提供しながら、社会的に受け入れられないようなケースにならないように留意願いたい。	95) 拝承。
(6)その他の意見	96) 西側の原子力発電所の放射線による事故で死亡した公衆は一人もいないにもかかわらず、大部分の一般公衆は原子力を極めて危険なものと考えている。これが発電所トラブル時の運転再開や新規計画に対する地元との合意形成の困難さなどを招いている原因の一つではなかろうか。FBRサイクルの実用化をもたらすためには技術的な問題のみならず、こうした原子力の非技術問題に適切に対処する必要がある。原子力の専門家はこれまで以上にリスクの社会心理的側面を認識配慮しつつ研究開発に携わることが必要ではなかろうか。低線量放射線の人体影響のように専門家が無意識のうちに作り出してしまった問題もあるのではないか。	96) 拝承。ご指摘のとおり、FBRサイクルの実用化について一般の方々のご理解を得るためには、技術的安全性に加えて社会的受容性にも配慮して研究開発を進める必要があると認識しています。社会的受容性については、FBRサイクルに限らず原子力全体に係る問題であり、より広いフレームワークの中での検討を要することから、色々な方々の意見を聴取しながら、第2期での課題として取り組んでいきたいと考えています。
	97) 第2期で総合的な評価手法として、FBRサイクルに対する多様なニーズを多面的な視点から評価する手法の検討は、社会的受容性への配慮の項目が考えられているが、着眼点は良いが、内容、検討の枠組みなどについては、もう少し、検討が必要ではないか。	97) 「整理番号96」を参照願います。
	98) 措置事項の対応状況は概ね妥当である。	98) 拝承。
(7)総合評価	99) 本実用化戦略調査研究では、第1期で5つの開発目標に対し革新技術を積極的に取り入れたサーベイと評価検討を行い、実用化戦略の有望な候補概念の評価結果を示し、引き続く第2期での実用化候補概念の絞り込みによる開発研究計画を提示している。第1期及び第2期の研究の目的・意義は明確であり適切であると評価する。	99) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	100) 当調査研究の第1期については一部、計画通りに進まなかった要検討課題も残されているが、全般的には幅広く多くの調査と検討を行い、有用な情報が蓄積されつつあるものと評価できる。	100) 拝承。
	101) 当初の目的に基づき、目標の達成に向け、着実に研究が進められていると判断される。	101) 拝承。
	102) なお、本研究はサイクル機構が中心となって実施していくことは適切であり、またオールジャパンの研究体制を更に進めてほしい。	102) 拝承。
	103) 今後は、予想外の困難性が発生した際に対処するための体制の整備や、最終的な実用化候補の絞り込みにつなげていくための進め方の明確化が必要であると考えられる。	103) 「整理番号 42」を参照下さい。
	104) 今後国の予算・電力等の研究費ともに厳しい状況になっていくことが充分予想されることに鑑み、毎年度の研究計画は都度柔軟性を持たせるべきであるとともに、特に国内でのホットの研究開発には制約が多いことから、国際協力による技術・成果の収集に積極的に取り組んでほしい。	104) 本研究は、研究開発のロードマップを遵守し、具体的な個々の研究開発に関する実施計画については毎年度策定しながら着実に進めていくものとします。ただし、計画の遂行に困難が生じた場合は、適宜計画を柔軟に見直すとともに、チェックアンドレビューの場でその理由等を説明したいと考えています。
	105) 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たと評価する。第2期も適切に計画されており、十分な成果をあげると期待される。	105) 拝承。
	106) 全般に渡って、第1期の成果を明らかにし、且つ第2期計画の位置付け、目標ともに明確であり、妥当なものであると判断できる。	106) 拝承。
	107) 将来のFBRに求められる要件を整理し、短期間に国内外のほとんどの技術評価、分析を行い、第2期への道のりをつけたことは評価したい。 夫々の技術レベルの違いも明らかとなり、第 2 期では異なったレベルの技術を、当初設けた要件を条件としてしっかりした根拠をもとに評価し、第 3 期に向けて実用化のための工程を示すことが重要と考える。 また、今後原子力開発においては国際的な協力、共同も不可欠の要因であり、そこでは経済性のみならずその他の要件においても国際的に通用するシステムが求められると考える。このような観点から、今までの経験は大切にしながら、固定観念にとらわれず、合理的な原子力システムとそのための効率的な開発方策を希求してもらいたい。	107) 拝承。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	108)　第１期での候補の評価をもっと厳しくしてその数を減らす努力があって良かったのではなかろうか。中間評価までの成果は、広範囲での検討であり致し方ないとしてしまうと、その結論は従来より我々が予想したものとあまり変わらない極めて常識的評価に留まっていると言わざるを得ない。第２期では是非加速する努力を期待したい。	108)　第1期においては、「本研究を進めるにあたっては、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。」とのご指摘を頂いており、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を評価し、実用化目標の達成見通しが乏しい技術のみを外すこととしました。 第2期においては、魅力ある実用化像を構築した上で、FBRサイクル全体としての総合的な評価を実施し、実用化候補概念として有望な2～3の候補に絞り込むこととします。
	109)　前回中間報告の措置事項実施状況は逐次実行されているが、これらの課題は継続的にトライされていくべきものと考える。	109)　拝承。
(8)質問	110)　当調査研究の目的について、基本的な疑問がある。この調査研究は最終的に実証炉の設計候補を抽出するのが目的なのか（資料1－3の図7からはそのように読める）。そうであるとすると、実証炉の炉型としては既に原型炉ができているループ型ナトリウム炉以外は非現実的なのではないか。ただし、再び実験炉や原型炉の研究開発から始めることも視野に含めるのであれば、その他の炉型も検討に値すると思う。 それとも、実験炉→原型炉→実証炉→商用炉という開発方式そのものを見直すのか。これらの点が不明確なまま「正・副」などの呼称が説明無しに出てくるのには違和感がある。 この点について、「先行実用化を目指す実証炉候補がループ型ナトリウム炉であり、この炉型については、実証炉の概念設計段階に入る前に経済性を事前評価している。その他の炉型については将来的なループ型ナトリウム炉の代替を視野に入れて、実験炉の設計へと進める価値があるかどうかを評価している。」というようなかたちで整理する方が良いのではないかと考えるが如何か。	110)　本研究の目的は、実証炉を対象としたものではなく、FBRサイクルの実用化を目指した開発目標を設定し、これを満足する魅力的な実用化概念を見出すことです。 どのような開発方式が望ましいかについては、その技術的な知見が揃ったところで、国際的なアプローチも視野に入れて検討することとします。このため、その開発の道筋は、これまでのような実験炉に始まって商用炉に至るという一本道であるとは限らず、様々な方法を検討していきたいと考えています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	111) プルサーマルの実用化延期が本プロジェクトにどのような影響を与えるのか、定量的に示してほしい。	111) プルサーマルによるプルトニウム消費量は、100 万kWe級軽水炉 1 基当たり年間 0.3～0.4t 程度ですが、FBR では Na 冷却大型炉を例に取ると初期プルトニウムインベントリは 7～9t 程度で、プルサーマル 30 基分程度に相当します。 FBRサイクルでは、プルサーマル使用済燃料からの高次プルトニウムの燃焼も可能となります。また、LWR サイクルからの高レベル放射性廃棄物中に残留する長半減期の MA の燃焼も可能となります。燃焼できる MA 量は、100 万kWe 級 Na 冷却大型炉を例に取ると年間 120kg 程度（MA 添加割合 5wt%の場合）であり、同じ出力の燃焼度 4～6 万 MWd/t の軽水炉6～8基分の生成量に相当します。
	112) 資料1－3、p4「4.1 開発目標及び設計要求」において、「安全性は・・・・大前提である」と記述され、図4においても開発目標のトップに位置づけられているにもかかわらず、各炉型の安全性を具体的にどのように評価したのか、また第2期においてもどのように評価するのかが不明確であるとの印象を受ける。資料1－3のp46や図83には安全性の評価構造と検討結果が示されているが、「安全性判断基準を満足する」という定性的な結果しか示されていない。 例えば、ループ型かタンク型かという選択の際に、物量や保守性などの経済性の定量的評価指標に加えて、安全性の視点からの定量的評価指標を比較することも必要ではないか。	112) 各炉の安全性評価については、想定される代表的な異常事象（設計基準事象）に対して、軽水炉と同様に各炉の安全上の特徴を踏まえて事象経過を解析評価し、放射線被ばく線量が問題とならないことを確認しました。 また、発生頻度が小さく、設計基準を越える事象（多重故障、等）を想定し、各炉の特徴を踏まえた対応策を検討しました。設計基準を越える事象では、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するような設計方針で検討を行いました。
	113) Na炉の経済性向上策として、2ループ化が選定されているが、ループ数の削減により機器、配管等の単基当たりの容量は増大することになるが、技術的に問題はないのか。	113) 2ループ等を特徴とする第 1 期で抽出したナトリウム冷却炉の概念については、「もんじゅ」、実証炉の設計等に係わった経験者の方々にお集まりいただいてご説明し、「開発は可能であろう」とのご判断を頂きました。併せて、開発課題を摘出願いましたので、第 2 期では、その課題を解決する計画としています。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	114) 燃料の中にMAを約5%添加した場合は、燃料集合体表面の温度が約490度になると言うが、燃料として扱えるのか。	114) ご指摘のとおり、燃料集合体表面温度約 490℃という条件で燃料製造することは考えておりません。 この温度は、燃料集合体を自然対流条件下に放置した場合に想定される温度であり、実際に燃料製造システムを検討する場合には、適切な冷却設備を設置すること等の方策により、取り扱い可能な温度まで冷却することを考えています。 また、使用済燃料の中間貯蔵により主な発熱源であるCmを崩壊させてから、軽水炉サイクルからのMA添加を行う方策や、再処理においてCm等の発熱性核種を別途分離する技術等も検討しています。
	115) 本タスク(将来のFBRサイクル像の構築とR&D計画の策定)において、水炉の位置付けはどう考えるのか。	115) 第2期では、水炉に限らず各炉の性能、特性をできるだけ定量的に見極め、有望な正副の実用化候補を絞り込むことにしています。絞込みに当たっては、各炉の性能、特性に応じて、FBR サイクル実用化の中での各炉の導入シナリオとの位置付けについても検討する必要があると考えています。
	116) 資料1－3図29のガス冷却炉の検討の流れで、ガスタービンのところに、Heか CO_2かの選択を入れる必要があるのではないか。	116) AGR の経験から判断すると、CO_2 冷却炉では、高温(850℃程度)にすると燃料材料や構造材の腐食の問題で成立性が望めません。一方、850℃を下回るような条件では、ガスタービンは熱効率の問題があるため、ガスタービン方式の場合、CO_2冷却を最初から選択肢には含めていません。

評価項目	評価意見	評価意見に対するJNCの見解及び質問回答
	117)　資料1－3P46頁⑥技術的実現性の具体的内容が不明なので、説明をしてもらいたい。	117)　一般的に基本原理が未確認の技術は、工学開発から実用化開発へとステップアップするために多くの資金と労力を要し、成功に対する困難度が増すと考えられ、現状の技術レベルが高く(開発リスクが小さく)、今後の研究開発費が少ないものほど技術的実現性は高まると考えられます。 そこで、第1期ではFBRサイクルを構成する要素技術の課題を分析し、実用化に至るまでの技術開発項目、期間、必要資金などを考慮し、FBR サイクル技術のレベルを「科学・工学・実用」の 3 つのランクに分類するとともに、開発計画より2015 年頃まで期間における投資資金を「大・中・小」に大まかにランク分けしてポートフォリオ図に整理することにより、技術的実現性を概略評価しました。なお、第 2 期の要素実験などで革新的な技術に対する見通しや新たな知見が得られれば、それによって技術的実現性の評価結果も変わりうるものと考えられます。 技術的実現性の評価には、より多くの情報に基づいて総合的に判断することが不可欠であることから、第 2 期では評価構造の見直しを検討したいと考えております。
	118)　国際協力の面においては、GENERATION-IV との関係、連携、成果の反映などについては如何に考えているのか。	118)　本研究は GEN-IV プログラムの下で進めているのではなく、FBR サイクルの実用化を見通すためにオールジャパン体制で実施しているものです。 それに対して、GEN-IV プログラムおける開発目標ができた際に、本研究と共通の開発目標を目指していることが確認できたため、本研究で実施しているFBRサイクルに関連する分野の先行する活動を紹介するために、GEN-IV ロードマップ作成WGへ、我が国の研究開発機関の1つとして専門家を派遣し、議論に参加することとしています。

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】

本資料は、課題評価委員会の評価意見により改訂したものである。

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 13 年 7 月 9 日

（平成 13 年 10 月改訂）

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

ページ

1. 課題名 ---- 1

2. 概要 ---- 1

3. 研究の進め方
3.1 研究の目的 ---- 1
3.2 第１期の研究体制等 ---- 2

4. FBR サイクルシステムの検討
4.1 開発目標及び設計要求 ---- 4
4.2 FBR システムの検討 ---- 5
4.2.1 検討の進め方 ---- 5
4.2.2 冷却材ごとの FBR システム検討 ---- 7
4.3 燃料サイクルシステムの検討 ---- 25
4.3.1 検討の進め方 ---- 25
4.3.2 再処理システムの検討 ---- 26
4.3.3 燃料製造システムの検討 ---- 31
4.3.4 燃料サイクルシステムの経済性について ---- 35
4.3.5 低除染 TRU 燃料の製造性について ---- 36
4.4 有望な実用化候補概念の抽出 ---- 37

5. 評価手法の適用性検討
5.1 評価手法の検討 ---- 42
5.2 評価手法の適用性検討 ---- 43

6. FBR サイクルの技術体系整備に向けた展開及び第２期の研究開発計画
6.1 FBR サイクルの技術体系整備に向けた展開 ---- 51
6.2 第２期の研究開発計画 ---- 57
6.3 第２期の実施体制と国際協力の展開 ---- 73
6.4 資金計画 ---- 80

7. 成果の普及、公開について ---- 81

8. 措置事項の対応状況 ---- 81

9. その他特記すべき事項 ---- 83

【用語集】

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

本研究の第1期（1999年度、2000年度の2年間）については、研究開発課題評価委員会に対して、1999年6月に事前評価、2000年6月に中間評価（第1期の中間成果と第2期の基本計画並びに2001年度の研究計画について）を諮問し、その答申及び措置事項を踏まえて研究開発を進め、現在、第1期を終え、その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。

また、2000年11月に原子力委員会で決定された「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」には、「サイクル機構において実施している実用化戦略調査研究等を引続き推進する」旨が記載され、本研究の重要性が認められている。

今回の研究開発課題評価委員会では、第1期の成果及び第2期の研究開発計画等について評価を受けるものである。

3. 研究の進め方

3. 1 研究の目的

本研究は、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5つの開発目標（安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性）を設定し、革新技術を採用した技術的選択肢の幅広いサーベイと検討評価を行い、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期に続き、第2期では、候補概念の成立性に関わる基礎的試験の成果を踏まえて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、その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。本研究の開発ステップを図-1に示す。

3．2　第1期の研究体制等

(1) 検討評価の進め方

第1期の研究は、1999年度から2年間実施した。前半の1年では、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要求の策定を行った。設計要求については、FBRサイクルの開発目標とFBR*の特徴等を生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に基づき設定した。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の検討評価作業を行うとともに、第2期の基本計画及び2001年度の研究計画の検討を実施した。

その後、これらの中間成果を研究開発課題評価委員会に対して諮問し、その評価結果並びに措置事項を踏まえて研究開発を実施した。

後半の1年では、前半の1年で摘出した技術課題の検討及び評価指標*の適用性検討並びにFBRサイクルの整合性に関する評価を行い、これらの検討評価を踏まえて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の策定を行った。

これらの成果は、研究開発課題評価委員会にその概要を報告した後、評価結果を反映し、第1期の最終成果としてまとめ、一般に公開する予定である。第1期の検討の進め方を図-2に示す。

(2) 実施体制

本研究は、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、電源開発株式会社及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）及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きた。

研究の実施は、研究開発を計画的かつ効率的に進めるため、プロジェクトチーム体制を構築してその推進を図るとともに、各研究機関を横断する技術検討WG、技術連絡会や、多面的な検討により研究の妥当性を確認する外部の専門家・有識者で構成する技術検討会を設置した。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、広く国内外からのアイデア公募や技術提案の受入れを行うとともに、FBR及び関連する燃料サイクルの分

野における国際的な研究協力を計画的に進め、特にキーとなる重要な課題については、鉛ビスマス*国際セミナー等のワークショップを開催した。本研究における研究実施体制の概略を図-3 に示す。

4. FBR サイクルシステムの検討

4. 1　開発目標及び設計要求

21 世紀の社会においては、20 世紀の資源浪費型の社会から脱却し、持続可能な文明社会を実現するため、資源のリサイクルや、環境保全への強い指向などが必要となるものと考えられる。一方、FBR サイクルには、「燃料の増殖」、「燃料中の不純物の許容量が高く取れる」及び「TRU*リサイクルが可能である」などが特徴として挙げられる。

これらの21世紀のエネルギー需給を取り巻く社会状況及びFBRサイクルの魅力の分析から、FBR サイクルの実用化のために考慮すべき視点として、持続的かつ恒久的エネルギー源を確保するための「資源有効利用性」、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」及びエネルギーキャリアーである核物質の核兵器への転用疑義を払拭するための「核拡散抵抗性」の 3 つが重要であることが分かる。また、「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提である。さらに、我が国においてFBR サイクルが導入されうる必要条件としては、導入時点において他エネルギー源とのコスト競争に打ち勝つことであり、「経済性」の克服が第一の要点となる。これらの視点から、FBR サイクルの開発目標を図-4 のとおり策定した。

また、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要求については、FBR サイクルの開発目標をもとに、前述のFBR サイクルの特徴を活かしてFBR サイクル全体として整合性を図るという基本的な考え方（図-5）に基づき、図-6 のとおり設定した。

4. 2 FBR システムの検討

4.2.1 検討の進め方

既往研究、シーズ技術の調査結果をもとに、冷却材については、ナトリウム、重金属(鉛及び鉛ビスマス合金)、ガス(炭酸ガスとヘリウム)、水(軽水沸騰、重水加圧、超臨界圧水*)、溶融塩の5種類を、燃料形態については、酸化物、金属燃料*、窒化物の3種類を選定し、検討するべき組合せ対象を表-1のように整理した。ヘリウムガス冷却炉については、ピン型燃料に加え被覆粒子燃料*（酸化物、窒化物)も評価の対象とした。なお、流体燃料については、気体燃料、液体燃料、溶融塩等があるが、Pu-U サイクルの高速炉を対象とし、塩化物の溶融塩を選定した。

(1) 炉心燃料

炉心燃料については、上記5種類の冷却材ごとに、本研究の開発目標である安全性、経済性、資源有効利用、環境負荷低減、核拡散抵抗性の観点から検討した。炉心概念の検討では、再処理における FP 除染及び MA*分離等の工程の軽減、FBR 炉内での MA の変換・燃焼機能の積極的活用を図ることを考慮し、FP 除染率が低く（最大 2wt%程度の FP 混入率まで想定)、MA（最大 5wt%程度まで想定）を含む低除染*TRU 燃料を炉内に装荷することを検討の基本条件とした。このようなリサイクルを想定した各炉心の性能評価は、TRU 燃料全体の核分裂核種を対象とした増殖比及びサイクル全体の工程や複利効果を考慮した複利システム倍増時間*を用いて評価した。

酸化物燃料のボンド材*は、酸化物燃料とナトリウムの共存性が良くないことから、使用実績から共存性の良好なヘリウムガスを対象とすることとした。金属燃料に関しては、米国における照射実績等から、燃料の種類として、燃料と被覆管の共晶反応*を緩和できる U-Pu-Zr 三元合金を検討対象とし、ボンド材としては、熱伝導性が高く燃料温度を下げることができるナトリウムを用いることとした。

窒化物燃料については、試験燃料として僅かではあるが照射経験のあるヘリウムボンドとナトリウムボンドの2種類を対象とし、窒化物燃料炉心の評価にあたっては、C-14 生成による環境負荷の増加抑制と核特性の両面から、N-15 を 100%濃縮した燃料（天然での窒素の存在比は N-14:99.632%, N-15:0.368%）を検討対象とした。

(2) プラントシステム

プラントシステムについては、その出力規模として、基幹電源システムの

候補となる大型炉（100万kWe程度以上）、中型炉（20万kWe程度以上、モジュール効果の活用）を想定して、冷却材の特徴を反映したシステム概念を検討するとともに、分散電源への対応として、5万kWe程度の小型炉概念を検討した。

ナトリウム冷却炉では、ナトリウムの優れた熱伝達・熱輸送能力を活かしたコンパクトなシステム概念（新材料の採用、機器合体等による機器・システムのコンパクト化、ループ数の最小化によるシステム簡素化、BOP設計の合理化等）を主な検討対象とし、ナトリウムの化学活性による影響を低減するための漏洩対策及び新型SG*の導入による2次冷却系の簡素化概念についても検討した。また、炉心損傷の代表的な事象に対して受動的な安全機能により炉心損傷の防止能力を高める方策及び炉心損傷に至ることを想定した場合においても、溶融燃料の流出促進等により再臨界を回避する方策を講じるとともに、溶融した燃料を炉内で安定に保持・冷却可能な概念を検討した。

鉛及び鉛ビスマスを対象とする重金属冷却炉では、冷却材が化学的に不活性であること及び低圧系にできることから、2次冷却系を削除したシステム構成とし、冷却材の燃料被覆管や構造材に対する腐食防止に留意して検討した。

ガス冷却炉では、重金属冷却と同様に化学的に不活性であることから、2次冷却系を削除した簡素なシステムを狙いとするが、除熱能力を確保するために冷却材を加圧する必要がある。また、FBRとしての特性を引き出すために稠密な炉心構成とする必要があるが、配管破損等からの減圧事故時の冷却性確保のために炉心の稠密化に限界がある。このため、燃料形態との組合せにより、炉心性能と安全性が整合する条件を把握するとともに、受動的な安全機能を考慮し炉心損傷の防止能力を高め、大規模な炉心損傷に至らない概念についても検討した。

水冷却炉では、改良型BWR（ABWR）をベースとした沸騰水冷却と、PWR概念の発展形で炉心性能を向上させた重水冷却、高温・高効率の直接サイクルを目指した超臨界圧水冷却の3概念を検討の対象とした。これらも、ガス冷却炉と同様に高圧系となることから、稠密炉心における冷却材喪失事故時の冷却可能性と炉心性能の見通しを把握することを中心に検討した。また、炉心損傷を想定した場合の炉心損傷挙動の概略特性の評価及び炉心燃料の富化度が軽水炉条件よりも増加することを踏まえ、炉心損傷時の再臨界の可能

性等について検討した。

液体燃料を用いたFBR概念については、U-Puサイクルにおける利用を対象に、増殖炉としてのポテンシャルを有する塩化物溶融塩炉を検討対象とし、既存の研究を参考に、システム概念の概略検討を行った。

小型炉については、分散電源として、多様な用途に対応するため、高速炉の特長を活かした炉心寿命の長期化と受動的な安全機能の向上を目指したプラントシステム概念の概略検討を行った。

4.2.2 冷却材ごとのFBRシステム検討

冷却材ごとにプラントシステム概念の評価と炉心燃料形態の適用性の評価結果を示す。

(1) ナトリウム冷却炉

(i) プラントシステム

ナトリウム冷却炉では、これまでの開発経験によって技術的基盤はほぼ確立されていることから、蓄積された技術知見に加えて新しい技術を取り入れ、これまでの開発において重要な課題となっていた経済性に対して大幅な向上効果が期待できる概念の構築を第一の着目点として検討を行った。なお、プラント規模に関しては、スケールメリットを追求した大型炉として150万kWeクラス、標準化、習熟効果等を追及した中型モジュール炉として50万kWeクラスを対象とした。

経済性(建設費)目標については、将来の軽水炉に比肩する経済性を有することとし、20万円/kWeに設定しており、「もんじゅ」、実証炉設計研究のみならず、海外のFBR（PFR、スーパーフェニックス等）の設計も視野に入れつつ、コストダウンに向けた課題の摘出と課題に対する改善方策の洗い出しを行った。(表-2) また、上記の経済性目標に対し、スケールメリット及びモジュール・標準化・習熟効果等を経済性を追求した考え方を図-7に示す。

大型炉、中型炉ともに、ループ数の削減や中間熱交換器*（IHX）と一次ポンプ等主要機器の合体による物量削減、12Crl鋼等の新材料採用、高温構造設計の高度化、免震技術の採用などによる先進的な技術を取り入れたループ型及びタンク型*のシステム概念を構築し、開発目標である経済性、安全性及び設計要求として設定した構造健全性、製作及び建設性、さらに運転・

保守補修性の観点から評価を行った。

(a) 大型炉

大型炉の検討の流れを図-8に、具体的なプラント概念での検討の着眼点を図-9に示す。図に示すとおりループ型炉については、2ループ方式のアドバンスト・ループ型炉を、タンク型炉については、2次系機器合体、1次系・2次系ともに機器合体、湾曲長円型中間熱交換器採用による原子炉構造のコンパクト化を図った3概念の予備的な検討結果をもとに一層の経済性向上を図った新たなアドバンスト・タンク型炉概念を構築し、両者で比較評価を行った。

検討の結果、大型炉については、ループ(アドバンスト・ループ)型炉とタンク(アドバンスト・タンク)型炉の両者間において、経済性、安全性等の観点では有意な差は見当たらないものの、保守補修性及び更なる経済性向上方策（2次系簡素化用の新型SG）の適用性に優れるループ型炉が有望な概念であるとの見通しを得た。ループ(アドバンスト・ループ)型炉の概念図を図-10に示す。経済性向上の効果については、図-11に示されるように、革新性を高めたシステムとした結果、電気出力当たりのNSSS*物量を大型のループ型炉及びタンク型炉ともに、現行のPWRの約60%程度に低減することができる見通しである。大型ループ型炉設計概念の建屋内配置と冷却系の鳥瞰図を図-12に示す。

また、SG伝熱管の水リークが生じても、ナトリウム-水反応が発生しにくい新型蒸気発生器を採用することにより、二次ナトリウム冷却系を削除し、経済性の向上を図ることが期待できる。こうした考えに基づき、有望な二次系簡素化概念の検討を行った。そのアプローチを図-13に、具体的な概念の抽出結果を図-14に示す。

(b) 中型炉

中型炉の検討の流れを図-15に、具体的なプラント概念での検討の着眼点を図-16に示す。中型炉の検討にあたっては、標準化によるモジュール効果が発揮でき、しかもその中で、スケールメリットが望める出力規模を見極め、ループ数の削減、原子炉容器の縮小化等による物量低減、崩壊熱除去系の簡素化、タービン発電機等の機器の共用化、建設工法へのモジュール工法の適用、建設期間の短縮等の観点からコストダウン方策を検討した。

中型ループ型炉（1次系：2ループ、2次系：1ループ）と中型タンク型炉（1次系：3ループ、2次系：1ループ）の比較評価を行った。また、2次系簡素化の概念は、大型炉で行った検討を活用することとした。

検討の結果、両者間で、経済性、安全性等に関して有意な差は見当たらないが、大型炉と同様に保守補修性及び更なる経済性向上方策の適用性（2次系簡素化用の新型SG）が優れていること、また、単基出力の増大によるスケールメリットが比較的容易であることから総合的にループ型モジュール炉が有望であるとの見通しが得られた。中型ループ型モジュール炉の建屋内配置の鳥瞰図を図-17に示す。

(c) 今後の課題

有望なナトリウム冷却炉の概念についての検討を進めていく上での課題としては、革新技術(三次元免震、構造基準高度化、12Cr系鋼)の開発を始め、大容量でコンパクトな2ループシステムにおける流動特性（炉容器内、配管内)、機器・構造（機器合体、大口径配管等）の成立性、ナトリウム-水反応の早期検出方策の検討が必要である。また、更なる経済性向上の方策としては、大型炉、中型炉ともに新型SGの導入による2次系簡素化の可能性を検討することが有効と考えられる。

(ii) 炉心燃料

ナトリウム冷却炉に適用する酸化物、金属及び窒化物の各炉心燃料形態の検討にあたっては、まず開発実績が豊富な酸化物燃料にて炉心性能上の上限を把握し、さらなる炉心性能追求のため、新型燃料として金属燃料、窒化物燃料での評価を進めることとした。(図-18) また、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性の各開発目標に対する評価を行った。特に、安全性の観点から、設計基準を超えた多重故障条件でも受動的な安全機能を活用して炉心損傷を防止する能力を確保できること、また、仮想的な炉心損傷時にも再臨界を回避できるよう最新の知見に照らした炉心燃料設計上の工夫を行うこととした。具体的には、仮想的な炉心損傷時の再臨界回避*方策として、正のボイド反応度*を一定値以下とすることにより、正のボイド反応度に起因する即発臨界に至らないようにするとともに、溶融燃料の炉心外への流出を促進できる炉心燃料集合体を用いた炉心設計（内部ダクト付き集合体(FAIDUS炉心)及び軸ブラケット一部削除集合体(ABLE*炉心)）を行った。(図-19)

(a) 大型炉心

酸化物燃料炉心として、図-20 に示すように、炉心構成上、均質 2 領域炉心、径方向非均質炉心*の 2 種類を、また、再臨界回避方策として、上述の FAIDUS 炉心、ABLE 炉心の 2 種類を組合せた 4 種類の炉心を検討・評価した。なお、炉心設計にあたっては、安全要求（受動的安全機能と炉心損傷時の再臨界回避）を満たし、プラント及び燃料サイクルの経済性の向上（コンパクトな炉心形状で炉心圧損*の低減、高燃焼度、長期運転サイクル、低除染 TRU 燃料の受入）を前提条件とした。

金属燃料炉心として、図-21 に示すように、均質 2 領域炉心、径方向非均質炉心（ともに、ABLE 炉心）の 2 種類を評価した。

検討の結果、炉心性能の目標達成の実現性及び今後の開発見通しの明確さの観点からは、酸化物燃料炉心が有力であり、炉心性能を更に向上させる観点では開発課題が多いものの金属燃料炉心が有望であると考えられる。

窒化物燃料炉心については金属燃料炉心とほぼ同等の性能が期待できる可能性があるが、^{15}N濃縮の経済性向上、炉心損傷時の燃料－冷却材相互作用（FCI）*や窒素解離による圧力発生の可能性について広範な試験データによる確認が必要である。このため、ナトリウム冷却炉心に適用する窒化物燃料の適合性は他の燃料形態に比べて劣るものと考えられる。

低除染燃料*による炉心特性への影響について、酸化物燃料ベースに以下の条件にて評価した。FP*含有率については、酸化物燃料で想定される再処理方式のうち最も FP 含有率が高くなる酸化物電解法で随伴する FP 含有率 1.3wt%を用いた。また、MA 混入率は、FBR サイクルの実用化時代に想定される FBR 取り出し燃料で想定される約 1wt%（FBR 多重リサイクル取り出し）を基本に、

・高燃焼度ウラン燃料軽水炉取出（燃焼度約 6 万 MWd/t*、冷却期間 5 年）
・高燃焼度 MOX 軽水炉取出（燃焼度約 6 万 MWd/t、冷却期間 5 年）
・中燃焼度ウラン燃料軽水炉取出（燃焼度約 5 万 MWd/t、冷却期間 10 年）
・同燃料に高燃焼度ウラン燃料軽水炉取出した MA を 5wt%添加

ケースを対象に、それぞれで想定される MA 組成及びその混入率（各々 3.3wt%、3.0wt%、0.3wt%、5.3wt%）を用いた。その結果、図-22 に示すとおり、FP 混入により、炉心特性は多少悪化（増殖比の低下、ボイド反応度及び燃料反応度の増加）するが、設計で許容できる範囲であると考えられる。

(b) 中型炉心

中型炉心の検討については、酸化物燃料炉心で、均質2領域炉心、径方向非均質炉心（ともにABLE炉心）の2種類を、金属燃料炉心では均質2領域炉心（ABLE炉心）の1種類を検討した。

検討の結果、図-23に示すとおり、大型炉心と同様に、酸化物燃料炉心が炉心性能の目標達成の実現性及び今後の開発見通しの明確さの観点から有力であるとともに、新型燃料については、窒化物燃料炉心のFCIや窒素解離問題の可能性から、金属燃料炉心が有望であると考えられる。

(c) 今後の課題

炉心燃料に関する課題としては、高燃焼度達成のための耐照射性に優れた被覆管及び集合体構造材の開発と、これらの材料及び振動充填酸化物燃料の照射試験による特性確認、炉心損傷時の再臨界回避方策（炉心燃料の流出機能）の試験による挙動確認及び溶融燃料の炉内保持冷却機能の有効性の確認等の具体化が今後重要となる。金属燃料炉心に関しては、これらの課題に加えて、燃料の高温化に対する特性把握と過渡時の高温挙動に関する試験確認等が必要である。

(2) 重金属冷却炉

(i) プラントシステム

重金属冷却炉は、ロシアでの原子力潜水艦への適用を除くと、世界的に見ても近年検討が本格化した比較的新しいプラント概念であるため、本研究においては、ロシア等諸外国の先行検討例を参考にし、重金属冷却炉の検討を進めた。検討にあたっては、炉型として、タンク型、ループ型を、出力規模として、大型炉（150万kWeクラス）、中型モジュール炉を、重金属冷却材として鉛及び鉛ビスマスを対象に設計検討を行った。

図-24に示すとおり、炉型については、ループ型炉は高比重及び腐食性のため配管の熱応力緩和方策が技術的に難しいため、タンク型炉を選択し、出力規模については、大型炉は重量過大で経済性の見込みが厳しいため、中型炉を抽出した。また、冷却材については、鉛炉は高融点のため高温での保守点検が必要なこと、防食に対する運転範囲が狭いこと等から鉛ビスマス冷却を選択した。なお、炉心冷却方式については、高流速下での炉心材料等の腐食、物量等の経済的観点で有利な自然循環方式を選択した。以上、抽出した自然循環方式中型鉛ビスマス冷却モジュール炉（40万kWe×8モジュール）

の概念図を図-25 に示すとともにその建屋内配置と原子炉容器の鳥瞰図を図-26 に示す。

今後の課題として、保守補修性、材料腐食対策、鉛及びビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被ばく上の管理等の課題について検討を進める必要がある。また、中型モジュール炉の出力規模については、原子炉容器製作の経済性(大型鍛造材の熱処理)及び建設時の主要機器のクレーン一体吊り込み重量の観点から余裕を持たせて 40 万 kWe としたが、さらにスケール効果により経済性を高める観点からモジュール炉しての出力を 55 万 kWe 程度に高める検討を行う予定である。また、今後、炉心性能向上の観点から強制循環方式についても検討を行う予定である。

(ii) 炉心燃料

鉛ビスマス冷却炉の炉心燃料の検討の進め方を図-27 に示す。自然循環方式を前提とすると、冷却材流路面積を拡大かつ炉心高さを低くして、炉心圧損を 0.01MPa（ナトリウム冷却炉で 0.2MPa 程度）に低減する必要がある。その結果、炉心の燃料体積比が小さくなるため、酸化物燃料炉心では高燃焼度と高い増殖性能を同時に達成することは困難であり、炉心性能を確保するためには重元素密度の高い金属燃料または窒化物燃料を用いる必要がある。窒化物燃料を適用した炉心構成の例を図-28 に示す。

金属燃料及び窒化物燃料の場合でも、自然循環方式の採用により、増殖比等の炉心性能を維持するため燃料インベントリがナトリウム冷却炉に比べて増大し、複利システム倍増時間が長くなるものの、安全性や増殖・燃焼に関する開発目標の達成は可能であると考えられる。

今後の課題としては、現在の自然循環方式においては、炉心性能のポテンシャルを十分に引き出していないと考えられるため、炉心性能の改善を目指したシステム概念の可能性を追求すること、また、鉛ビスマス炉の自然循環除熱能力を活かしつつ、強制循環力の活用も視野に入れた強制循環方式でのシステム概念を検討することが必要であると考えられる。

炉心燃料に窒化物燃料を適用する場合は、燃料の照射試験による基礎データの取得、^{15}N 濃縮の経済性向上及び窒素解離挙動等の過渡特性を含めた高温特性の把握が重要な課題となる。

(3) ガス冷却炉

ガス冷却炉については、炭酸ガスを用いた従来型の蒸気タービン発電方式とヘリウムガスを用いた直接ガスタービン発電方式の２つの概念を対象に以下の３種の大型炉概念を検討した。(図-29)

①大型炭酸ガス冷却炉（蒸気タービン発電方式）

②大型ヘリウムガス冷却耐熱燃料ピン型炉（ガスタービン発電方式）

③大型ヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉（ガスタービン発電方式）

なお、蒸気タービン発電方式のヘリウムガス冷却炉については、事前検討の結果、小さな熱輸送能力を補うため冷却材圧力を高め、厚肉のプレストレストコンクリート製圧力容器(PCRV*)が必要になることから物量が増加し、炭酸ガス冷却炉を経済的に上回ることが困難と思われるため、検討対象外とした。また、炭酸ガス冷却炉で炉心出口温度850℃となるガスタービン発電については、構造材料の腐食問題を考慮すると実用化は困難であると考えられる。

(i)　炭酸ガス冷却炉

炭酸ガス冷却炉については、英国「AGR」の運転経験及びナトリウム冷却炉の炉心燃料技術を活用し、PCRV内に蒸気ボイラやガス循環機をコンパクトに収納した概念を検討した。(図-30）また、炉容器内には、ナトリウム冷却炉等と同様に炉心損傷時の溶融燃料を保持冷却するための設備（コアキャッチャー*）を設置する。炭酸ガス冷却炉の概念は、既存技術の活用のため、開発要素は少なく、また、基本的な安全性確保の見通しは得られたが、経済性に関しては、物量が他のガス冷却炉に比べて多くなることから建設コストがやや高く、さらに大容量ガス循環機等により所内負荷率がナトリウム冷却炉の4%程度に対し、14%程度と高く送電端での発電単価を押し上げている。

今後の課題は、更なるコストダウン方策として、ボイラ等の主要機器のコンパクト化、低負荷大容量ガス循環機の開発のほか、炉心損傷の影響を炉容器内で緩和できる長期安定冷却能力を持つコアキャッチャーの成立性の確認が必要となる。

炉心燃料については、原子炉出口温度530℃を達成するためには、炉心内の被覆管最高温度は730℃程度となり、今後炉心設計の最適化により最高温度については、被覆管最高温度目安値である700℃までの低減が可能と考えられるが、金属燃料については、今後の研究開発を見込んだ被覆管制限温度と考えられる670℃を有意に超えるため、酸化物燃料と窒化物燃料を抽出した。(図-31)

酸化物燃料炉心(炭酸ガス冷却大型炉)(図-32)では、均質2領域大型炉心を検討し、増殖比は、1.2を達成できるものの、炉心及び径のブランケット*のインベントリが多いため、複利システム倍増時間は57年と長くなる。また、重元素密度の高い窒化物燃料炉心では、ナトリウム冷却金属燃料炉心よりも高い増殖比（^{15}Nの100%濃縮で1.38）と短い複利システム倍増時間(同条件で23年)の達成が可能であり、両炉心燃料形態ともに開発目標を概ね達成可能と考えられる。

今後は、炉心設計の見直しにより炉心内最高温度の低減方策をさらに検討すること、炉心損傷事故時、溶融燃料が現在のピンピッチ間隔で炉心外へ流出されることの確認及び窒化物燃料については、^{15}N濃縮の経済性向上及び窒化物燃料の高温特性（窒素解離挙動）等の検討が必要である。

(ii)　ヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉

被覆粒子型燃料を用いたヘリウムガス冷却炉については、高温のヘリウムガス(炉心出口温度850℃)をガスタービンに導く直接サイクルの適用により、コンパクトで高効率のシステム構成概念を検討した。(図-33) なお、出力については、現在、高温ガス炉に代表されるヘリウムガスタービン発電の検討例等を参考に単基容量28万kWeのガスタービン発電機を用い、これを4ループ(4基)で構成する約110万kWeのプラントシステムとした。ガスタービン設備は、動力変換容器に内蔵してモジュール化することにより、工場製作、現地据付性を向上されるとともに、これを鋼製格納容器内に設置してタービン建屋を排除できるため経済性の向上が図られる。本概念の建屋内配置及びプラントの鳥瞰図を図-34に示す。

今後の課題としては、大型の縦置きガスタービンの実績がないことから、軸受けや熱交換器等の製作性の検討が必要である。

炉心燃料については、燃料表面温度が1000℃程度となるため、温度制限がある金属燃料は適用外であり、酸化物燃料、窒化物燃料を検討対象とした。これらの炉心燃料についての検討の流れを図-35に示す。

被覆粒子型燃料は、これまでに熱中性子高温ガス炉用燃料として、酸化物燃料を高密度黒鉛層やSiC層等で多層被覆した球状粒子（TRISO*型被覆粒子燃料）を使用して、燃料粒子に大きな熱容量と強固な被覆層を持たせた概念が実用化されているが、高速中性子環境での照射耐性は1万MWd/tに満

たない燃焼度で被覆層が損傷するとの試験データがあることから、高速中性子に対する照射特性、熱的特性、機械的特性等の観点から下記の材料構成に変更した被覆粒子型燃料候補概念を選定した。

	高速炉		熱中性子炉
	窒化物燃料	酸化物燃料	
第1層(バッファ層)	低密度 TiN	低密度 PyC*	低密度 PyC
第2層(強度層)	高密度 TiN	高密度 PyC	高密度 PyC
		SiC (内側に ZrC 層付)	SiC
第3層(保護層)	W(暫定)	W(暫定)	高密度 PyC*

*強度層を兼ねる

炉心構造は、被覆粒子燃料を、コンパートメントと称するメッシュで囲われた「かご」状構造物に充填して燃料集合体中に装荷し、コンパートメント内の主要な流動抵抗を均一に与える構造とし、コンパートメント内に均一なヘリウム径方向流れを発生させる設計とした。この炉心概念を、図-36 の左に示す。

炉心の安全性については、想定する減圧事故時に対し、主配管に漏洩流出抑制機構を設置することにより流出速度を緩和し、ヘリウムガスの高温安定性、被覆粒子の熱容量と大きな伝熱面積による除熱性の確保のほか、事故後の自然循環による炉心冷却確保のため、出力密度を 30W/cc 程度（ナトリウム冷却炉の約 1/8 程度）と大幅に低減させることにより、炉心損傷に対する高い耐性を期待できるものとした。

炉心性能については、窒化物燃料の場合でも、炉心燃料体積比が 10％未満（ナトリウム冷却炉では、30～35％程度）と低いことに加え、被覆層材料 TiN の中性子吸収断面積が大きいことから増殖性は制限されるため、取出平均燃焼度を 10 万 MWd/t 程度としても、増殖比 1.09 程度、複利システム倍増時間 116 年と低い増殖性能となる見通しである。また、酸化物燃料炉心では、被覆燃料粒子コンパートメントでの充填部体積比を、窒化物燃料で想定した 33%から 50%まで向上させ炉心性能向上を図った場合でも、増殖比は 1.0 程度にしかならず、酸化物燃料では高速増殖炉としての炉心性能を発揮することは困難な見通しである。

今後の課題として、現在候補としている燃料被覆材の物性等の基礎的な試験データの蓄積、燃料集合体及びコンパートメントの成立性、減圧事故時の冷却性能の維持、格納容器内での核分裂生成物*の閉じ込め性能向上方策の検討が必要である。また、炉心性能を向上できる耐高温被覆材料の検討が必要である。

(iii) ヘリウムガス冷却耐熱燃料ピン型炉

耐熱燃料ピンを用いたヘリウムガス冷却炉は、被覆粒子燃料型炉と同様に高温のヘリウムガスによる直接ガスタービン発電方式であり、燃料については一般の燃料と同様に金属製の被覆管を用いることにより、被覆粒子燃料に比べ炉心燃料体積比を増大(30%程度)させ、炉心性能の向上を図った概念として検討した。(図-37)

出力密度の増大に加え、耐熱燃料ピンは被覆粒子燃料に比べて熱容量、伝熱面積が小さく、炉心損傷事象に対して被覆粒子燃料と同程度の高い耐性を期待することが困難なことから、炭酸ガス冷却炉等と同様に鋼製炉容器内に溶融燃料を保持冷却するコアキャッチャーを設置している。なお、炉心出口温度850℃の場合、被覆管最高温度は1,100～1,200℃となることから、このような高温で使用する被覆管材料として米国の宇宙炉計画である「SP-100」計画で被覆管として照射実績もある耐熱合金（Nb-1%Zr-C）を当面の設計検討における対象候補材として選択した。

今後の課題としては、炉心損傷時の影響を炉容器内で終息させるために鋼製炉容器の下部に設置したポット型コアキャッチャーの成立性、耐熱被覆管材料の検討及びヘリウムガスタービンの大型化に伴う軸受けや熱交換器等の製作性の確認が必要となる。

炉心燃料については、他のガス冷却炉同様、温度制限上、金属燃料は適用外となるため、酸化物燃料及び窒化物燃料を検討対象とした。検討の流れを被覆粒子型燃料とともに、図-35に示す。

炉心性能については、ピン型燃料では、被覆粒子燃料と比較して炉心内の燃料体積比を大幅に向上(約10%→30%)しているため、窒化物燃料の場合、増殖比1.20、複利システム倍増時間約68年となる。増殖比はナトリウム冷却酸化物燃料炉心とほぼ同等となるが、複利システム倍増時間は、燃料インベントリが増加するため約2倍程度と長くなる。同じピン型燃料を用いる炭酸ガス冷却の窒化物燃料炉心（増殖比1.38、複利システム倍増時間23年）

より劣った理由は、耐熱被覆管材料の中性子吸収断面積がフェライト系被覆管材料より1桁程度大きいことが主な理由である。この炉心概念を、図-36の右に示す。

酸化物燃料炉心においても、耐熱被覆管材料による中性子吸収効果が大きいために、炭酸ガス冷却炉心(炉心燃料体積比約25%)よりもやや高い炉心燃料体積比（同約30%）を確保した炉心形状であるにも拘わらず、増殖比1.0程度が限界と考えられる。

今後の課題として、耐熱被覆管の成立性、炉心損傷時の被覆管溶融移動の反応度効果による再臨界発生の可能性、冷却材流路からの溶融燃料の排出可能性、炉容器内に収納できるコアキャッチャーの構造成立性及び有効性評価等について検討を行う必要がある。

(vi) 2001年度における概念抽出

炭酸ガス冷却炉については、大容量のガス循環機等により所内負荷率が高く、ボイラ等主要機器の物量が多く、さらにコアキャッチャー等安全系の付加により、現状の設計概念では、経済性の観点からの魅力が少ないことから、今後1年程度をかけて、さらなる経済性の向上の検討を行う。炉心性能上については、ボイド反応度制限がなく、炉心燃料高さを高く取れ、酸化物燃料、窒化物燃料ともに、高い炉心性能を達成可能な見通しである。

ヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉については、減圧事故時にも、被覆粒子燃料の高温特性を活かした負のドップラー反応度の効果、自然循環での崩壊熱除去が可能となるような低出力密度、低圧損とすることにより、炉心損傷の発生を防止しやすくなると考えられる。ただし、被覆粒子燃料では、炉心内の燃料体積比が小さく、重元素密度の高い窒化物燃料でも開発目標に適合する炉心性能を引き出せるに至っていない。したがって、今後、さらに1年程度をかけて、窒化物燃料を中心に、安全要求を満たしつつ最大の炉心性能を引き出す設計検討、燃料被覆層とコンパートメントの成立性について検討を継続する。

ヘリウムガス冷却耐熱燃料ピン型炉についても、今後1年かけて、炉心損傷時の溶融燃料の保持冷却設備(コアキャッチャー)の成立性、さらなる経済性向上方策の検討及び耐熱被覆管材料の選択を含め、窒化物燃料を中心に炉心性能向上の検討を行う。

以上のように、上記3種類のガス冷却炉について、さらに1年間継続検討を行い、2001年度末に有望な候補概念の評価、抽出を行う計画である。

(4) 水冷却炉

水冷却炉については、豊富な実績を有する軽水炉をベースに高転換比達成（増殖性能の確保）を目指した2つの設計概念（BWR型FBR、PWR型FBR）と簡素なシステムで高熱効率を狙った超臨界圧水冷却高速増殖炉についての概念検討を実施した。

検討にあたっては、現行の軽水炉のシステムを適用することを基本としつつも、水冷却の減速効果を抑制するため、炉心燃料を稠密配置する必要があるが、稠密炉心においても軽水炉と同様に負のボイド反応度係数を有していること、また、非常用炉心冷却系（ECCS系）などのプラント構成については基本的に既存の軽水炉を踏襲して、軽水炉と同程度の安全性を確保する設計を目指した。ただし、増殖比を確保するため、高富化度のプルトニウム燃料の使用に伴って、炉心損傷時には再臨界の発生の可能性があるため、その回避方策等について検討が必要である。燃料形態は、金属燃料と窒化物燃料は、水との共存性に問題があることから、軽水炉において豊富な実績がある酸化物燃料を対象とした。（図-38）

(i) BWR型高速増殖炉(高転換比BWR)

ABWRをベースに炉心の稠密化、高ボイド率化により燃料体積比を高め、増殖性確保を図った概念である。(図-39) 炉心部の平均ボイド率が、ABWRの38%から70%に増加していること、寿命期間中に負のボイド反応度係数を達成できる設計とするため扁平な炉心とすること等により炉心圧損が小さく、自然循環による炉心流量が確保可能となるため、ABWRの再循環ポンプが削除できると考える。経済性については、再循環系の削除、格納容器容積低減等により、ABWRと同等あるいはやや優れるものと考えられる。ABWRの設計基準事象を参考に、事故事象を評価した結果、安全性が成立する見通しを得たが、事故時の炉心冷却性の確認及び炉心損傷時の事象推移と溶融燃料移行挙動を含む再臨界性及び再臨界時の格納機能についての検討・評価が今後必要である。

炉心燃料としては、燃料ピン中央部に内部ブランケット、その上下に炉心燃料、さらにそれらの上下に軸ブランケットを配置し、扁平な軸方向非均質炉心を構成し、高除染燃料炉心でのPu残存比1.05程度を達成できる見通し

である。ただし、複利システム倍増時間は、プルトニウムインベントリが大きく、190 年程度と大きい。(図-40)

今後は、稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認及び炉心損傷時の安全特性の把握とともに、安全確保を前提にした低除染 TRU 燃料の燃焼能力、増殖比の向上と倍増時間の短縮可能性等を中心に検討していくことが重要と考えられる。

(ii) PWR 型高速増殖炉(高転換比 PWR)

PWR をベースに炉心の稠密化により燃料体積比を高めるとともに、吸収断面積の小さい重水を冷却材に用いることによって 増殖性確保を図った概念である。(図-41) PWR に設置されている化学体積制御系は、中性子スペクトルの硬化に伴い反応度効果が小さくなるため削除した。また、重水を用いるため、トリチウム生成量は PWR の 3 倍程度と推定され、トリチウム除去装置が必要となる。経済性については、重水の使用に伴う設備増加が必要となるが、それ以外は PWR と同等と考えられる。PWR の設計基準事象を参考に、事故事象の評価を行った結果、安全性が確保される見通しを得たが、BWR 型 FBR と同様に、事故時の炉心冷却性の確認及び炉心損傷時の事象推移と溶融燃料移行挙動を含む再臨界性及び再臨界時の格納機能の検討・評価が今後必要である。

炉心は内部ブランケットと軸方向ブランケットを有する燃料集合体、軸ブランケットのみを有する燃料集合体及びブランケット集合体から構成されており、これらの集合体を交互に配置するとともに各集合体中の燃料長さ、ブランケット長さを調整することにより、負のボイド反応度係数と増殖性を確保している。高除染燃料炉心での Pu 残存比 1.07 程度を達成できる見通しである。ただし、複利システム倍増時間は、約 100 年程度となる。(図-42)

今後は、稠密炉心における熱水力特性、機械的特性の確認、安全確保を前提にした低除染 TRU 燃料の燃焼能力及び増殖比の向上と倍増時間の短縮可能性等を中心に検討していくことが重要と考えられる。

(iii) 超臨界圧水冷却高速増殖炉

ABWR をベースに炉心を稠密化するとともに、冷却材密度の小さい超臨界圧水(25MPa 程度)を用いることにより増殖性の確保と高熱効率を図った概念である。(図-43)

経済性については、貫流型直接サイクルの適用による設備簡素化及びコンパクト化が可能であり、高い熱効率の達成により、既存軽水炉に比べ同等以上の経済性が期待できると考えられる。

炉心燃料としては、増殖性能の向上を図るため燃料ピンを太径化するとともに、ブランケット燃料は装荷量の増大のため、練炭型を用いる。炉心径は3.5m、炉心高さは既存軽水炉と同程度の約3.3m、上下に軸ブランケット燃料を20cm設置する。炉心は、3領域(内・中・外)の炉心と各領域間にブランケット燃料を装荷した径方向非均質炉心である。図-44に示すように燃料集合体とブランケット燃料集合体境界部に水素化ジルコニウム層を設け、ボイド発生時の高速中性子を減速してブランケット燃料に吸収させ、負のボイド反応度係数を得る設計としている。高除染燃料炉心でのPu残存比1.03程度、複利システム倍増時間は、約100年程度となる見通しである。

今後は、稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認、超臨界圧水条件下で耐食性を有する燃料被覆管の材料開発、事故時の炉心冷却性の確認、炉心損傷時の事象推移と溶融燃料移行挙動を含む再臨界性及び再臨界時の格納機能に関する検討・評価が今後必要と考えられる。

(5) 溶融塩炉

高速中性子炉に適合する溶融塩燃料として、軽水炉とも整合性のあるU-Puサイクルへの適用を前提として塩化物を検討対象とし、タンク型モジュールプラントを候補概念として検討を行った。溶融塩炉の検討の流れ及び検討したプラント概念を図-45及び図-46に示す。

本プラント概念では、原子炉と再処理が一体となり、燃料成型・交換・輸送が不要のため燃料費が低減できるとともに、高温システムのため高い熱効率が期待できるが、原子炉物量が出力換算でナトリウム冷却炉大型炉の約4倍に達する見込みであり、仮に燃料費が著しく低減しても発電コスト全体として経済性目標を満たすことは困難と考えられる。また、2次冷却材として鉛系冷却材を選定しているが、中間熱交換器伝熱管は溶融塩と鉛の厳しい環境条件となり、現状では双方と共存性のある材料の見通しがない。また、高温での保守・補修技術の開発が必要である。

炉心燃料としては、プルトニウム及びウランの三塩化物で、増殖比は1.0を超える可能性があり、また、固定ブランケットの使用により増殖比を大きく

することが可能な見通しであるが、出力に比べ燃料インベントリが大きいためシステムの倍増時間が長期化することになる。

以上のことから、塩化物溶融塩炉は、経済性、炉心性能等の開発目標に対する達成度が充分ではなく、また構造材料等の基礎的な研究開発の段階にあるものと考えられることから、今後第2期での具体的な概念検討の対象外とし、内外の動向を把握していくこととした。

(6) 小型炉

小型炉の検討においては、分散型電源として多様なニーズに対応するため、基幹電源用の原子炉に比べて燃料交換頻度が大幅に少ない長寿命(10年以上)の炉心とすること及び受動的な安全機能を高めた信頼性の高いシステムとすることを優先的な目標として、ナトリウム冷却及び鉛ビスマス冷却による5万kWeクラスの小型高速炉概念を検討した。小型炉のニーズと要求事項を図-47に、小型炉概念の検討の流れを図-48に示す。なお、ガス冷却炉については、被覆粒子燃料を用いたヘリウムガス冷却炉（ガスタービン発電）が検討の候補となるが、大型炉での被覆粒子燃料の成立性を検討中のためその結果を待って対応することとした。

ナトリウム冷却小型炉については、電力中央研究所で開発中の4S炉を出発点として、概念検討を進め、一部改良を図った。主な改良点としては、4S炉の細長炉心に対し、炉心高さと炉心径の比を1に近い体系として、中性子の漏れ、吸収を極力減らした設計とするとともに、燃焼が進むにつれ、4S炉では軸方向に反応度制御により燃料領域を移動していくのに対し、図-49に示すように、本概念では、燃焼領域が径方向に自然に移動する「高富化度差径方向2領域炉心（炉心の内側領域と外側領域の富化度の差が大きな炉心）」とすることにより長寿命化を図っている。また、4S炉が、強制循環方式としているのに対し、流量喪失事故（ULOF*）の発生要因を排除した自然循環方式にてシステムの簡素化を追求した小型ナトリウム冷却自然循環タンク型炉とともに、自然循環能力を確保しつつ強制循環方式を取り入れた小型ナトリウム冷却準強制循環ループ型炉（通常時；強制循環力8割、自然循環力2割、崩壊熱除去運転時；自然循環力10割）の概念を検討した。
自然循環タンク型炉の概念図を図-50に、準強制循環ループ型炉の概念図を図-51に示す。

鉛ビスマス冷却小型炉についても、同じく自然循環とし、高富化度差2領

域炉心を採用した小型鉛ビスマス冷却自然循環タンク型炉を検討した。概念図を図-52 に、建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図を図-53 に示す。

検討の結果、炉心燃料として、まずは、金属燃料(ナトリウム冷却炉)及び窒化物燃料（鉛ビスマス冷却炉）を用い高速炉としての高い内部転換能力を十分に引き出す炉心構成とすることにより、燃焼反応度が小さく炉心寿命の長い(10～30 年)炉心構築が可能であることがわかった。また、自然循環能力と低い燃焼反応度条件を活かして、スクラム失敗時の過渡変化（ATWS）時にもドップラー効果等の炉心固有の機能によって炉心損傷に至らず整定すること等、受動安全機能の高い小型プラントが可能な見通しであり、各概念は小型炉の基本的な開発目標を充たす可能性があると考えられる。ただし、これらの小型炉概念の経済性については、大型ナトリウム冷却炉等の基幹電源用のシステムと比べて出力あたりの物量が数倍程度となるため、今後は受動的な安全確保の特徴を維持しながら、出力の最適化、さらなる物量削減等による経済性の追求の検討が必要である。

(7) 炉心燃料

第 1 期の炉心検討では、すべての冷却材の炉型に対し、増殖比等の共通の炉心性能の目標を掲げ、設計を行った。今後は、それぞれの冷却材の特徴を活かした炉心設計の最適化を図る必要があるが、酸化物、金属、窒化物燃料において、以下の開発課題の検討が必要である。

燃料共通の課題としては、

①高燃焼度燃料達成のため、高温・高耐照射性の被覆管（ODS 鋼*等）、燃料集合体材料の開発及び照射試験

②炉心コンパクト化及び長期サイクル運転に必要な高性能反射体及び長寿命制御棒の開発

③鉛ビスマス、ガス冷却炉における核特性評価手法の開発及び定常時、過度時の伝熱特性評価方法の開発が挙げられる。

酸化物燃料においては、ナトリウム冷却炉で、概ね目標性能を達成可能であるが、再臨界回避方策の有効性及び径方向非均質炉心の流量配分，熱設計合理化、サーマルストライピング*対策の検討が重要である。

金属燃料においては、被覆材との共晶現象の把握、異常時及び事故時の金属燃料の挙動、熱効率向上のための炉心出口温度の高温化方策、再臨界回避

方策の確認が重要である。

窒化物燃料においては、再処理プロセスでの環境負荷低減の観点から、C-14 生成量の抑制、さらに炉心性能の改善のため、N-15 濃縮（開発目標：99.9%程度）が必要であり、現在ゼオライト吸着剤を用いた気相吸着法を検討中で、第 1 期の結果として約 4%程度まで濃縮の確認ができた。今後、さらなる高濃縮達成の確認及び他の方法と組合せたハイブリットシステムの経済性評価の検討が必要である。（図-54）さらに、炉心損傷事故時の窒素解離や FCI の挙動評価、また、ガス冷却炉の場合、被覆粒子燃料及び耐熱被覆管燃料ともに、被覆層や耐熱被覆管の開発、高温照射挙動及び燃料の破損限界とその後の挙動把握が重要である。

(8) 評価のまとめ

以上のように、ナトリウム、重金属(鉛、鉛ビスマス)、ガス(炭酸ガス、ヘリウムガス)、水(軽水、重水、超臨界圧水)、溶融塩の各冷却炉及び小型炉を対象に開発目標の達成度と技術的成立性を中心に検討評価した。その結果、ナトリウム冷却炉では、大型ナトリウム冷却ループ型炉、中型ナトリウム冷却ループ型モジュール炉、重金属冷却炉では、中型鉛ビスマス冷却モジュール炉、水冷却炉では、BWR 型、PWR 型、超臨界圧型炉、小型炉では、ナトリウム冷却炉及び鉛ビスマス冷却炉が有望なシステム概念の候補とであるとの見通しを得た。なお、ガス冷却炉については、炭酸ガス及びヘリウムガス冷却炉の 2001 年度の検討結果をもとに候補概念を選定する計画である。

また、各種冷却材に適用した炉心燃料については、酸化物、金属、窒化物の 3 燃料形態の特徴を反映した主要性能の検討評価から、以下の組合せが有望であるとの見通しを得た。

・ナトリウム冷却炉：酸化物及び金属燃料
・鉛ビスマス冷却炉：窒化物及び金属燃料
・ガス冷却炉：酸化物及び窒化物燃料
・水冷却炉：酸化物燃料
・小型炉(ナトリウム及び鉛ビスマス冷却)：窒化物及び金属燃料

各冷却炉における代表的なプラント概念の経済性について、それぞれのシステム概念の特徴と建設コストの関係を概略的に把握するために、物量を基本としたコスト評価を行った。建設コストの算定方法、各炉概念における主要物量の比較を図-55、図-56 に示す。また、各概念の電気出力（発電端）当

たりの建設コストの相対評価を図-57 に示す。建設コストについては、物量評価の傾向を反映して、大型ナトリウム冷却ループ型炉が目標値に対し約85%、中型ナトリウム冷却ループ型モジュール炉で約 95%、中型鉛ビスマス冷却モジュール炉で約 120%、大型炭酸ガス冷却炉で約 110%、大型ヘリウムガス冷却炉(被覆粒子燃料型)で約 105%と評価された。なお、炭酸ガス冷却炉は、他の冷却炉の所内負荷率が 4%程度に対し、14%と高いことにより、送電端で比較した場合の建設コストは鉛ビスマス冷却炉と同等以上となることが示された。したがって、鉛ビスマス冷却炉及びガス冷却炉については、今後さらなる経済性向上の検討が必要である。

4.3 燃料サイクルシステムの検討

4.3.1 検討の進め方

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)の検討は、FBR システムの検討と同様、幅広く技術の調査・分析を行い、第2期において研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出検討を行った。再処理システムについては、湿式法と乾式法*を、燃料製造システムについては、超ウラン元素*（TRU）含有低除染の再処理製品を前提として、ペレット法、振動充填法及び鋳造法を検討対象とした。また燃料形態については、酸化物燃料、窒化物燃料及び金属燃料を選定した。

FBR は、軽水炉に比べ中性子経済が良好のため、燃料中の不純物の許容量を多くとれる。言い換えれば、必ずしも除染係数*の高い再処理を必要としないで燃料をリサイクルできるという特徴がある。したがって、低除染燃料サイクルを適用することにより、従来高除染化に難があるとされていた乾式法などの再処理法の適用が可能となるとともに高除染係数が得られる湿式法においてもプロセスの簡素化が可能となり、その結果、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性に寄与する改良方策等の幅広い技術の検討が可能となる。また、U／Pu 共回収のような Pu を単離*（元素単体の形で分離）しないシステムを導入することにより、核拡散抵抗性の向上が期待できる。一方、低除染燃料サイクルでは、燃料製造における被ばく低減対策という新たな負担が生じるため、製造工程の簡素化、適切な遮蔽を隔てた運転の自動化及び遠隔保守化が必須となる。

検討を進めるにあたっては、3つの燃料形態に応じた再処理・燃料製造方法の適切な組合せ方が考えられる。事前検討の結果、酸化物燃料と窒化物燃料*の再処理及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明らかとなった。そこで、始めに経験の多い酸化物燃料サイクルについての検討を行い、その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。具体的には、まず事前検討で指摘された課題に対するプロセスの改良方策を検討し、それに基づく物質収支、設備機器の仕様の概念検討を進めた。その後、施設内の概略の配置計画を行い、施設全体の物量を把握した上で経済性等の評価を行った。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。

経済性等に及ぼす施設規模の効果も評価するため、システム設計における施設規模としては、炉心燃料及びブランケット燃料を合わせた処理量として50tHM/年及び200tHM/年の2ケースとした。また、建屋、ユーティリティ、電気設備などの共用化による経済性の向上を図るため、再処理／燃料製造一体化施設を基本に検討した。

最後に、設計要求に対する各概念の達成度を比較評価する観点から、技術的成立性、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、運転・保守補修性等の観点から評価のまとめを行った。

検討対象技術と検討のポイント及び検討の視点について図-58に示す。また、第1期の検討の進め方を図-59に示す。

4.3.2 再処理システムの検討

(1) 湿式再処理法

湿式再処理法については、「先進湿式法*」を検討対象とした。また、更なる経済性の向上や廃棄物量の低減の観点から、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*直接抽出法」等について検討した。

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（PUREX*法）を大幅に見直した「簡素化溶媒抽出法*」に「晶析法*」を組合せ、さらにMA（Np、Am、Cm）回収機能も付加した技術である。低除染化及びTRUリサイクル概念の導入により、従来の長い溶媒抽出工程、Puの単独回収概念に対し、1回だけの溶媒抽出サイクルとU／Pu／Npが共回収できる条件を設定した。高レベル廃液から残りのMAを回収するプロセスは、SETFICS*法とTRUEX*法の組合せによる工程とした。また、核拡散抵抗性向上の観点からブランケット燃料と炉心燃料を混合処理するため、新たな炉心燃料の製造のためには余剰となるUを回収する晶析工程を、溶媒抽出の前に付加した。ここで新しく採用した簡素化溶媒抽出法と晶析法の技術的成立性については、前者はCPFでのホット試験実績があり、また後者についても国内外のU試験実績がある。今後の課題として、プロセス条件の最適化等があるものの、CPF等による試験遂行が可能であることから、問題ないと判断した。

各設備の検討にあたっては、臨界制限、保守・補修性等の機器設計上の制約、予備系列の要否等の条件を踏まえた設備容量を選定した。その結果、晶析工程が追加されたものの、下流工程の流量減少により機器容量の低減やU濃縮設備の削除等ができた。また、遠心抽出器*の採用により、溶解液と溶媒の接触時間を大幅に短縮できることから、放射線劣化により発生する廃溶媒量を低減できた。

先進湿式法を用いた再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-60に示す。

評価の結果、経済性は50t/年では未達成だがスケール効果により200t/年規模で十分に達成できる見通しを得た。また、安全性その他の事項については要求条件をほぼ全面的に満たしていることが分かった。

さらに、先進湿式法の一部をイオン交換法、アミン抽出法及び超臨界流体抽出法で代替・補完すること、あるいはパイプレスプラント化により抜本的にシステムを改良することによる更なる経済性向上、廃棄物発生量低減等についての検討結果を以下に示す。

① イオン交換法

国内で開発されたイオン交換体を適用することにより、機器のコンパクト化が可能となり、溶媒を用いないため廃溶媒の発生も無くなる。一方で、廃イオン交換体の発生、低濃度溶液の多量使用による廃液発生量の増加により、廃棄物処理設備が増大する。一方、MA 回収設備をイオン交換法に代替することで MA 回収工程を縮小できる。したがって、プラント全体としての経済性向上の見込みがある。しかし、イオン交換体の安定性やニトロ化の問題といった安全性確認のための課題がある。また、硝酸や放射線に対するイオン交換体への影響等、再処理技術特有の課題への対応が必要である。

② アミン抽出法

トリオクチルアミン(TOA*)と TBP の混合溶媒を採用した再処理法は、比較的高い除染性能を有し、U／TRU を一括して回収するとともにプロセス流量の低減が可能であり、廃棄物発生量を低減できる。アミン抽出法の採用により MA 回収工程が不要となり、大幅な経済性向上ができる見通しである。しかし、抽出溶媒への TOA の適用には技術課題も多く、還元剤の製品への混入、材料腐食対策及び劣化生成物の安定性確認等の技術開発が必要である。

③ 超臨界流体直接抽出法

超臨界流体直接抽出法による溶解工程から共除染*工程の一体化により、システムの簡素化、廃液発生量の低減及び廃棄物処理設備の合理化が可能となり、大幅な経済性向上が期待できる。しかし、セル内での約 12MPa での操作に対する安全性確認や入量計量の困難性等の技術開発課題がある。

④ パイプレスプラント(過酸化物沈殿法との組合せ)

パイプレスプラントは、工程の機能を局所化・独立化し、無配管化を指向するプラント概念であり、いわゆるバッチプロセス*に相当する。そこで、有機溶媒を用いず、工程全体の必要液量が少なく、廃棄物発生量の少ない過酸化物沈澱法とパイプレスプラントの組合せについて概念検討を行った。パイプレスプラントは、配管が削減できるものの、反応槽の移動時の安全性の確保等の課題がある。また、必要とする多数の動的機器に対するマテリアル

ハンドリング等の技術開発等の課題がある。一方、過酸化物沈殿法ではMAを回収できないため、溶媒抽出法*との併用が必要である。したがって、先進湿式法に対しパイプレスプラントを過酸化物沈殿法と組合せた場合には、配管系の削除と高価な設備機器が相殺して大幅な経済性の向上は期待できないことがわかった。

検討した代替・補完技術のプラント適用概念の検討結果を図-61に示す。

先進湿式法については代替・補完技術との組合せも含め、今後更なるコスト低減の可能性の検討を進め、それに基づき目標を満たす最小処理容量を明らかにしていく。先進湿式法や各代替・補完技術にはそれぞれ固有の開発課題と、両者に共通した課題として、例えば経済性向上に寄与する連続溶解槽や小型遠心抽出機等の高性能の機器開発といったものがある。また、プロセス上の課題についてはCPFホット基礎試験により、安全上の問題についてはシステム検討とホット基礎試験データ等に基づく適切な安全ロジックの検討により、実用化技術として採用できるかどうかの判断が可能になるものと考える。

次に、先進湿式法による窒化物燃料の再処理については、前処理、オフガス処理、製品の窒化転換などの工程において新たな設備対応が必要となるが、基本的に酸化物燃料の再処理技術と同等であり、技術的には特に問題はない。特に注意すべき点として、窒化物を硝酸に直接溶解すると窒化物燃料と硝酸との化学反応により、各々の構成元素であるN-15と天然窒素N-14との結合反応等が生じN-15濃縮度が著しく低下する。このため、溶解工程の前段階で酸化転換等の処理により、燃料中からN-15を回収する工程を追加する必要がある。また、窒化物燃料の再処理に対しては、主たる工程は酸化物燃料処理と同様である。

(2) 乾式再処理法

乾式再処理法については、「酸化物電解法*」、「金属電解法*」及び「フッ化物揮発法*」を対象とし、酸化物燃料への適用性を検討した後、新型燃料への適用性を評価した。

① 酸化物電解法

ロシアRIAR*の技術をベースとした酸化物電解法の最大の特徴は、溶融塩を利用して電解により電極に酸化物を析出させるプロセスが、再処理の基本プロセスを構成すると同時に、振動充填燃料*用の高密度顆粒製造プロセス

も兼ねているところにある。したがって、酸化物燃料を対象とした場合、再処理と燃料製造の整合性のよいコンパクトな一体化が可能となる。RIAR で開発した手法に対して、処理速度の向上・塩素使用量の低減のため UO_2 同時溶解析出プロセスを採用するとともに、白金族 FP の分離工程の追加、U と Pu を同時回収するための共析出工程の採用及び MA 回収率向上のための絞り電解工程の付加等の改良を図った。

酸化物電解法を用いた再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-62 に示す。

次に、本技術の金属燃料及び窒化物燃料への適用性を概略検討した。

その結果、前処理としての金属の酸化転換、後処理としての回収された酸化物の金属への Li 還元*等の課題が解決できれば、金属燃料に対しても成立するプロセスではあるが、酸化と還元を電解処理の前後に付加する等工程が複雑化するため、元来金属燃料処理用に開発された金属電解法等に対してメリットを見出せないことがわかった。

また、窒化物燃料に対しては、前処理として酸化工程を、後処理として窒化工程を付加することでプロセスは成立するものの、一旦ほぼ理論密度に近い緻密な酸化物粒子を得てから、これを窒化物に転換するために過大な時間を要するなど、効率的でないと評価した。

② 金属電解法

米国 ANL*で開発した手法に対して、燃料の粉体化と脱被覆工程での揮発性 FP*分離のために熱脱被覆法を採用し、還元工程での廃棄物発生量低減のために塩浴塩素化法*を採用した。また、安全性確保のため、回収された金属の酸化転換を $Ar+O_2$ 雰囲気下で行うとともに、腐食性・毒性の塩素ガスに対するセル内取扱設備を付加した。

金属電解法を用いた再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-63 に示す。塩浴塩素化法により高レベル廃棄体量は従来の Li 還元法と比較して約 1／3 になると試算されたが、塩素ガス使用に伴う工学的な課題がある。

次に、本技術の金属燃料及び窒化物燃料への適用性を概略検討した。

金属燃料に対しては、本技術が元々金属燃料再処理のために開発されたものではあるが、さらに廃棄物発生量の低減等のプロセスの改良を図った（図-64）。

また、窒化物燃料への適用については、使用済み燃料を直接溶解できるため、塩素化溶解工程が不要になるが、窒素ガスが発生するため、N-15 濃縮窒素を回収する設備を付加する必要がある。このためオフガス処理設備の窒

素回収装置等の追加や、Ar セル冷却浄化設備の容量増加が必要ではあるが、電解精製関係の主要な機器はほぼ同等である。

③ フッ化物揮発法

フッ化物揮発法は、工程が比較的簡素、連続処理が可能、処理速度が速く、ガス状態での富化度調製が可能、廃棄物量の発生が少ない等、経済性等の向上が期待できる。一方、PuF_6 の不安定性により高純度の Pu の安定回収が困難であること等により開発が中断されていた。しかし、FBR では必ずしも高い除染係数の燃料サイクルシステムを必要としないことから、本技術も候補概念の一つとして対象とした。ANL、原研等で研究開発された流動床を用いた U/Pu フッ化物揮発法をベースに、熱脱被覆法による燃料の粉体化と脱被覆工程での揮発性 FP 分離、余剰 U のフッ化後に低除染の U、Pu の六フッ化物を共回収、ガス状態での Pu 富化度調整、廃アルミナ媒体からの不揮発性 Am、Cm 及び残留 Pu 等の回収プロセスの付加等の改良を図った。さらに、PuF_6 の不安定性対策として、配管長の短縮化、配管・反応容器等の適切な温度制御、生成した PuF_6 の急冷等の徹底を適用した。

フッ化物揮発法を用いた再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-65 に示す。

次に、フッ化物揮発法の金属燃料への適用については、当初高濃縮の U-Zr 合金燃料等の再処理を対象として開発されていた技術でもあり、基本的に問題はない。また、窒化物燃料への適用についても、フッ化時の発熱が酸化物燃料より大きいため、フッ化反応はより容易に進むと考えられるが、N-15 回収設備等の付加が必要である。

以上の酸化物電解法、金属電解法及びフッ化物揮発法に対する酸化物燃料を対象とした概念設計結果について評価した結果、いずれも技術的成立性、安全性、経済性等の設計要求を満足するとともに、それぞれ有意な差はほとんどないことを確認した。また、乾式再処理システムと燃料製造システムとの一体化プラント(200tHM/年及び 50tHM/年)の経済性評価結果によれば、いずれの方式とも、200tHM/年プラントでは経済性目標を達成し得る可能性の見通しが得られた。さらに、50tHM/年プラントについても、今後の経済性向上に関わる技術開発成果に期待する部分はあるものの、経済性目標を達成できる見通しが得られた。

一方、各候補技術の成立性に係わる技術開発課題があり、その解決のための方策において違いのあることが明らかとなった。酸化物電解法及び金属電解法については海外に雛型となる Pu 及び使用済み燃料を用いた試験施設が

存在する。ここでの主要機器については実用化規模を見通せるものであり、一定の試験実績を有している。このような施設や経験を活用しての開発により、プロセスの改良や高度化と言った今後の課題への対応が可能である。フッ化物揮発法については照射済み燃料を用いた試験結果の報告がある。その中で指摘されたPuF_6の安定性に関連してはフッ素濃度と温度条件の制御で回避できる見通しであるが、工学規模でその対策の有効性を確認していく必要があり、このような規模の試験を展開するための試験フィールドが未整備のため、大きな投資が必要となる。

新型燃料への適用性については、酸化物電解法ではプロセスの複雑化（金属燃料対応）や窒化物転換の非効率さ（窒化物燃料対応）等の問題点のあることが分かった。一方、金属電解法やフッ化物揮発法では、いずれの燃料形態に対しても工程が付加されることとなるが、対応可能であることが分かった。

また、3つの乾式再処理技術について摘出された開発課題について検討を行った結果、各乾式再処理技術に共通な課題（例；粉体化を可能とする前処理工程技術、保障措置*概念の構築、高温でのマテリアルハンドリングなど）と固有の課題とがあり、今後より詳細なシステム検討を進めるためには、これらの解決が必要であることが分かった。

以上、再処理システムの第1期における検討結果と課題のまとめを表-3に示す。

4.3.3 燃料製造システムの検討

(1) ペレット法

ペレット燃料*製造法については、「簡素化ペレット法」を検討対象とした。

「簡素化ペレット法」は、高除染の燃料製造法として既に確立されたペレット燃料製造法の工程を大幅に簡素化したもので、これを放射線量が高いTRU含有低除染燃料のセル内製造に適用すべく燃料製造設備を完全自動化するとともに、遠隔での運転・保守補修性を考慮して、脱硝・ばい焼・還元設備や燃料粉末のダイスへの充填方法、クレーン保守方法等の工夫を行った。

簡素化ペレット法を用いた再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-66に示す。

経済性目標は50tHM/年では未達成だが、スケール効果により200tHM/年規模で十分に達成できる。TRU取り扱いに係る発熱対策等の課題を除けばその他の設計要求を十分に満たしている。

次に、簡素化ペレット法の窒化物燃料ペレット製造への適用性について概略検討を行った。その結果、潜在的な危険性として考えられる窒化物粉末の常温での発火を防止するためにアルゴン雰囲気セル内に炭素熱還元*工程から燃料要素組立工程までを設置する必要があることが分かった。また、環境負荷低減（C-14 の発生量抑制）と炉心の核特性を改善するためには、N-15 濃縮窒素を使う必要がある。また、N-15 の回収、再濃縮の必要がある。各種の N-15 濃縮技術について、これまでに行われた経済性に係わる検討結果を含めて、その適用性を検討した。これらによると、化学交換法（ナイトロックス法、イオン交換法）については比較的安価に高濃縮の N-15 を得ることができるものの、副産物処理等の課題があることが指摘されている。一方、気相吸着法を用いた基礎試験結果では、簡単な装置で N-15 を濃縮できる可能性が示唆されており、この技術を実用化に供することが確認できれば、大幅なコスト低減の可能性があることが認められた。

以上の検討の結果、簡素化ペレット製造法の基本工程成立性確認と合わせ、他の燃料製造技術にも共通する課題として低除染 TRU 含有燃料取扱に伴う製品の品質保証、遠隔保守化、発熱対策等の他の方式にも共通する開発課題はあるが、ペレット法として簡素化ペレット法（燃料形態は MOX、窒化物燃料）が有望な概念であると評価した。なお、ペレットの寸法や許容公差などの仕様は炉心設計と歩調を合わせ最適化を図っていく必要がある。また、窒化物燃料の開発にあたっては、安価な N-15 濃縮技術の確立が不可欠である。

(2) 振動充填燃料製造法

振動充填燃料製造法については、湿式再処理及び 3 方式の乾式再処理にそれぞれ対応した振動充填法を検討した。

1) 粒子製造

① 湿式再処理との組合せ

スフェアパック燃料*は、充填型燃料の一種であり、均一な 2～3 種類の粒径をもつ球状粒子を充填するものである。このような球状の粒子は、燃料の硝酸溶液を出発物質としてゲル化*法(内部ゲル化法*あるいは外部ゲル化法)で直接製造できるため、先進湿式法との適合性に優れる。スフェアパック燃料製造は、粉末工程を含まないためプロセスが単純であり、微粉の飛散も生じないことから工程の遠隔自動化が容易である。このため、低除染燃料の製造法として有利である。これらの方法は均一な組成の溶液を出発物質としているため、顆粒中の Pu の分布はほぼ均一である特徴を有する。また、顆粒焼結雰囲気の制御で適切な O/M*を得ることができることは乾式再処理から

の製品と異なる点である。内部ゲル化法についてはPSI*との共研でNp入りMOX顆粒を製造し照射試験に入る計画があり、Np顆粒製造の予備試験は既に実施済みである。外部ゲル化法についてはU試験に着手するとともに課題の一つであった硝酸アンモニウム廃液処理の方策の見通しを得ることもできた。

湿式再処理・ゲル化法による粒子製造法を適用した再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-67に示す。なお、外部ゲル化法と内部ゲル化法の間には施設設計上に差は認められなかった。

次に、湿式ゲル化法の窒化物燃料への適合性については、その製造工程が基本的に酸化物燃料と同一であり、特に問題はないと評価した。しかし、窒化物の酸素及び水との反応性及び炭素熱還元反応に必要なグラファイトの使用を考慮して、燃料製造セルをAr雰囲気として火災及び爆発の対策を講じた。

以上の検討の結果、湿式ゲル化法については、炉心特性から要求される充填密度等に対応できる顆粒性状（密度、形状、粒径分布等）を安定的に確保する造粒条件の最適化の必要がある。

② 乾式再処理との組合せ

酸化物電解法では、基本的にロシアRIAR技術をベースに検討を進めた。O/Mが高いことに対しては金属Uによる酸素ゲッター*の使用により対応可能である。

金属電解法では、充填性能の向上のために粒子形状を揃え、密度を上げ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*を候補として検討した。転動造粒法は湿式再処理との組合せでも利用しうる技術であり、汎用性が高い。

フッ化物揮発法では、転換塔で加水分解により酸化物に転換すると同時に燃料顆粒が作られる。一方で均一なPuの分布となるような顆粒製造条件の確立が必要となるが、再処理の項で指摘したように、工学規模の試験を展開するための試験フィールドの整備が必要となる。

酸化物電解法、金属電解法及びフッ化物揮発法による粒子製造法を適用した再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-68に示す。

次に、上記3つの乾式再処理法を窒化物燃料に適用した際の粒子製造法について検討した。酸化物電解法及びフッ化物揮発法では一旦酸化物を得た後、グラファイトを混合し、炭素熱還元法により窒化物粉末を得る設計とした。しかしながら、酸化物電解法では、電極に析出した緻密な酸化物粒子を窒化物に転換するには長時間を要し、困難であることがわかった。一方、金属電

解法では、陰極に回収した金属あるいは合金を液体 Cd 中で窒素ガスと直接反応させ、Cd を蒸留除去して窒化物粉末を得る設計を採用できることがわかった。

以上の検討の結果、乾式再処理と整合する顆粒製造技術についても、低除染 TRU 体系での取扱いのため、ペレット製造と同様に遮蔽、除熱対策が共通課題として抽出された。なお、RIAR で使用されている U 金属による酸素ゲッターの製造についてはノウハウとして公開されていない部分があるため、代替法を含めて検討が必要である。

2) 振動充填工程（湿式・乾式共通技術）

湿式再処理あるいは乾式再処理から得られた顆粒を、被覆管に詰める共通の工程である振動充填工程について評価した（図-67、図-68）。酸化物燃料については RIAR の例を見れば振動充填法のプロセスの成立性は示されている。十分な充填密度が得られるかどうかについては顆粒の性状（密度、形状、粒径の分布等）が影響する。酸化物電解法以外の方法においても製造条件や振動条件の最適化を図り、さらに U 金属による酸素ゲッターの使用等により炉側からの要求条件を満たすことが可能であると判断する。経済性については、再処理システムとの適切な組合せを考慮すれば、今後の技術開発により乾式再処理・振動充填燃料製造一体型であれば、50tHM/年規模でも目標達成が可能であるとの見通しを得た。PSI との共研とともに、別途進められている「ロシアの余剰核兵器解体プルトニウム処分」に関するプログラムとも連携を密にとり、振動充填燃料開発を進めていく必要がある。

本技術は窒化物燃料にも適用可能であるが、炉システムの検討と整合をとり、窒化物燃料と振動充填との組合せを評価する必要がある。

以上の検討の結果、いずれの振動充填方式とも技術的成立性や設計要求に対する評価では有意差はほとんどないことを確認した。このため、再処理システムと整合をとり、先進湿式法対応（燃料形態は MOX、窒化物燃料）、酸化物電解法対応（燃料形態は MOX 燃料*）及び金属電解法対応（燃料形態は MOX、窒化物燃料）の振動充填法が有望な概念であると評価した。なお、フッ化物揮発法対応の振動充填法については、UF_6/PuF_6 混合気体から均一な MOX 顆粒を得る方法について実験的に成果が出ているが、実用化の点では詳細検討が必要であると評価した。

(3) 鋳造燃料製造法

鋳造燃料製造法については、「射出成型法」及び「遠心鋳造法」を検討対

象とした。米国 ANL で開発され、ホットで実績のある射出成型法では、石英ガラス鋳型が使い捨てのため廃棄物発生量が多くなるとされているため、廃石英ガラス鋳型を塩廃棄物*に添加し、安定な固化体とする利用方策を検討した。一方、遠心鋳造法を核燃料製造に適用するには、廃棄物発生量は低減するが、装置が大型化するといった課題がある。いずれの方法も歩留まりについて改良すべき課題があるが、その他の設計要求は概ね満足しているものと判断する。

鋳造燃料製造法による再処理・燃料製造一体化プラントの概念検討結果を図-69 に示す。なお、射出成型法及び遠心鋳造法の主工程セル容積、建屋容積は、ほぼ同等である。また、工程廃棄物については、遠心鋳造法は、金属鋳型の寿命の評価は難しいが、石英モールドが毎回廃棄物となる射出成型法と比較すると大幅な低減が可能であると評価した。

以上の検討の結果、これまでに十分な実績のある射出成型法での廃棄物発生量を低減する方策を開発中であること、また、遠心鋳造法は装置大型化のため製造コストは約 5%増加するが、廃棄物量は射出成型法に比べて約 20%低減されるとの試算もあることから、射出成型法及び遠心鋳造法（燃料形態はいずれも金属燃料）は、有望な概念であると評価した。

(4) 被覆粒子燃料

被覆粒子燃料については、炉心性能の観点から窒化物燃料が有望視されているが、TiN 被覆では N-15 濃縮窒素を使用したとしても、Ti の中性子吸収断面積が比較的大きいことから、他の代替被覆材料の検討が必要である。また、被覆材にも濃縮 N-15 が必要となり経済性を圧迫する要因となる。このため、安価な N-15 濃縮技術の確立が課題である。現状では被覆粒子燃料の仕様が詳細に詰まっていないため、製造プロセスや再処理上の具体的な課題摘出に至っていない。

以上、燃料製造システムの第 1 期における検討結果と課題のまとめを表-4 に示す。

4.3.4 燃料サイクルシステムの経済性について

再処理システムの検討にあたっては、軽水炉サイクルと競合可能な経済性として単位発電量当たりの燃料サイクル費を軽水炉と同等以下とすることを目標とし、再処理単価の目安として軽水炉燃料との燃焼度の違い等を考慮して 27 万円/kgHM を設定した。また、再処理プラントと燃料製造プラントの一体型プラントにおいては、燃料製造単価の目安を 16 万円/kgHM とし、そ

れを合計した43万円/kgHMを目標達成の目安に設定した。

燃料サイクル単価は、炉システムと同様、プラント設備の物量をベースにプラント建設費を算出し、これに操業費等の各種経費を総合して求めた。燃料サイクルシステムの各方法に対して、今後の経済性向上に係わる技術開発課題を達成した場合の経済性評価結果を図-70に示す。

その結果、200tHM／年プラントでは先進湿式法、乾式法いずれも経済性目標を達成する見込みが得られた。50tHM／年プラントでは乾式法は経済性目標を達成する可能性を見込めるものの、先進湿式法では経済性目標の達成が厳しい見込みであると評価された。

なお、今後の経済性向上に係わる技術開発課題に対するコストダウン方策は、「プロセス・システムの改良」、「運転・保守の改善」及び「標準化等の追求」の3つの観点から検討した（図-71）。「プロセス・システムの改良」の観点からは、要素技術開発によりプロセスデータを充実し過剰な設計余裕をなくすこと、MA回収プロセスの合理化、臨界管理*手法の合理化や高機能材料の適用、新概念機器の開発などによる機器の大型化・高性能化等が検討のポイントとなる。「運転・保守の改善」の観点からは、自動運転・遠隔保守のための機器開発により運転保守の要員数を削減すること、定期点検や査察対応の考え方を具体化しその合理化を図ること、「標準化等の追求」の観点からは、機器設計を詳細化し部品レベルでの標準化を図ること、一体化やコロケーションによる設備共有の徹底を図ることなどが経済性向上のための検討のポイントである。

4.3.5 低除染TRU燃料の製造性について

再処理の低除染化やTRUリサイクルにより、燃料製造で取扱う燃料中の放射能量や発熱量が増大するため、燃料製造性及び燃料の性能保証の観点からの検討が必要である。

そこで、放射線、発熱、固体物理的影響等について検討し、それらを踏まえてFP及びTRUの混入の上限について評価した。想定されるMA混入量は、「FBR燃焼－再処理」の多重サイクルを繰り返した場合、環境負荷低減等の観点からTRUをすべてリサイクルすると仮定すると、図-72に示すように、HM当たり約1.2%のMAが新燃料中には混入することとなる（FBR平衡リサイクル燃料）。また、別途軽水炉再処理から回収したMAをFBRで燃焼する場合（LWRからのMAをFBR平衡リサイクル燃料に添加し、計2%、5%MAを含有する燃料）についても検討した。

(1) 放射線の影響

FP、MA からの中性子及びγ放射線による線量当量率を図-73 上段に示す。

燃料集合体表面線量率は、高除染の現行燃料に比べ、最大で約 10,000 倍（5%MA 添加燃料）に増大する。線量当量率を下げるためには、γ線に着目した遮蔽強化が必要であり、いずれの燃料製造法においても十分な遮蔽厚さをもつコンクリート壁及びセル窓の設計とすることで、放射線作業従事者の被ばく対策上は特に問題ないと評価した。さらに機器・設備の放射線損傷の低減対策、あるいは MA 回収時に付随する FP 量の低減が必要となる。ただし、この場合、完全自動運転・遠隔保守方式の採用等が必要となる。

(2) 発熱の影響

燃料集合体を空気中に縦置きした場合の自然冷却下の温度計算結果例を図-73 下段に示す。燃料の発熱量は、Pu の寄与を除けば Cm-244 の寄与が支配的であり、集合体表面温度は FBR 平衡リサイクル燃料では約 220℃に、LWR からの MA 添加燃料（FBR 平衡＋LWR4%MA 添加の場合）では約 490℃に達する。このため、燃料健全性の維持、製造設備・機器の耐高温性、製造性、検査性等の観点から、高温にさらされる製造設備・機器に対する適切な冷却設備、耐熱対策等が必要であることがわかった。また、粉末取扱設備では燃料粉の酸化防止の観点から不活性ガス雰囲気での取り扱いと冷却設備が必要であることがわかった。

(3) 固体物理的影響

FP、TRU 混入量（成分比）や高発熱が影響するものとして、粉末特性、焼結特性、結晶組織等の燃料製造上の基本的特性が考えられる。また、燃料性能維持の観点から燃料の均一固溶性の確保が必要となる。このような固体物理的影響に対しては、今後データを取得し、成分比毎の成型・焼結時の各種条件の細かい調整、あるいは遠隔製造に適した不純物仕様を含む燃料仕様の緩和や検査工程の合理化が必要と考えられる。低除染 TRU 燃料のリサイクルの課題と検討方針について図-74 に示す。

4.4 有望な実用化候補概念の抽出

第 1 期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決方法、開発工程等に大きな問題がないかなどを評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針としている。

したがって、FBR システム及び燃料サイクルシステムの抽出評価では、各

技術に関して、実用化の観点から、技術的成立性及び開発目標に照らした設計要求に対する適合性の評価、FBR サイクルとしての整合性、国際協力の可能性等を総合的に勘案して、以下に示す A～C の 3 つのランクに分類した。

A： 第 2 期で検討を行う技術
B： 第 2 期では国内外で実施される実用化戦略調査研究以外の研究の進捗状況をレビューするとともに、第 2 期の絞り込み段階で再評価する技術
C： 第 1 期での検討対象技術のうち、A 及び B 以外の技術

(1) FBR サイクルとしての整合性検討

① FBR サイクルの整合性

実用化戦略調査研究では、FBR と燃料サイクル（再処理、燃料製造）とを一つのシステムとして捉え、それらを構成するシステム技術間で技術的な整合性を図り、一貫性のあるシステム概念を構築することとしている。FBR サイクルのシステムとしての成立性について、FBR、再処理及び燃料製造の各システム間の整合性を図る観点から検討が必要な項目としては、燃焼度、MA リサイクル、FP 混入率、Pu 富化度、増殖比*などが挙げられる。

第 1 期においては、その出発点における取り合い条件として、設計要求に対する目安値を設定して検討を進めた。FBR と燃料サイクルとの整合性については、相互の設計情報をフィードバックしつつ検討を進める必要がある。しかし、実用化に向けた種々の候補概念については、現段階では技術レベルの差や設計の詳細度に粗密があるため、本格的な整合性の検討は、試験研究を含めて全体的な技術のレベル合わせが行われる第 2 期で行うことを予定している。表-5 に第 1 期段階における FBR サイクルの整合性に関する検討結果を示す。この結果によれば、FBR サイクルの整合性の観点から、「4.2　FBR システムの検討」及び「4.3　燃料サイクルシステムの検討」における検討結果に大きな問題点はないことを確認した。

② コロケーションの検討

コロケーションは FBR と燃料サイクル施設を同じサイト内に立地することから、設備の共用化・合理化やサイト間の核物質輸送により、経済性及び核拡散抵抗性の向上が期待できる。コロケーションの持つ特長を活かすためには、基本的にサイト外との核燃料物質のやり取りがないことが核拡散抵抗性などの観点から有効であり、このためには設置する FBR の総出力と燃料サイクル施設の処理能力について整合性を図る必要がある。

このため、総出力 600 万 kWe の FBR（金属燃料炉心のナトリウム冷却ル

ープ型*中型モジュール炉50万kWe×6モジュール×2)及び処理量50tHM/年の燃料サイクル施設（金属電解法再処理－射出成型法燃料製造）をコロケーションのベースとして検討した。コロケーションプラントの概念図を図-75に示す。

(2) FBRシステムの抽出評価

冷却材として、ナトリウム、重金属、ガス、水等を対象に、炉心燃料として、酸化物、窒化物、金属の各燃料形態を組合せたFBRシステムについて、幅広く技術を調査・分析して概念検討を行い、第2期において研究対象とすべき有力な実用化候補概念の抽出評価を行った。

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

これらの評価をもとに総合的に検討した結果を以下に記載するとともに、FBRシステムに関する抽出結果を表-6に示す。

○ ナトリウム冷却大型炉及び中型モジュール炉については、いずれも技術的成立性が高く、将来軽水炉に比肩できる経済性が達成できる可能性がある有望な概念として、もんじゅと同様でかつ先進技術を導入したアドバンストループ型炉を抽出した。炉心燃料としては、開発目標に対する達成度をほぼ満足し開発課題の少ないMOX燃料と、開発課題は多いものの開発目標に対する達成度が高い金属燃料を抽出した。窒化物燃料は、炉心損傷時の燃料－冷却材相互作用（FCI）及び窒素解離*による圧力上昇の懸念があるため、今後の国内外の研究の進捗状況をレビューし、第2期の絞込み段階で再評価することとする。

○ 重金属冷却炉については、技術的成立性、耐腐食性及び経済性の観点から、鉛ビスマス冷却中型モジュール炉を抽出した。炉心燃料としては、MOX燃料は増殖比等の開発目標の達成が困難であるため、窒化物及び金属燃料を抽出した。

○ ガス冷却炉については、炭酸ガス冷却とヘリウムガス冷却の蒸気タービン方式、並びに、燃料として、耐熱ピン型と被覆粒子型の直接ガスタービン方式の4概念に対する比較評価を実施した。この結果、ガスタービン方式のうち、耐熱ピン燃料については炉心溶融事故時の対策設備等の評価検討が、また 、被覆粒子燃料型については、被覆材料の選定、炉心性能の更なる向上が必要であり、更に1年間程度検討を継続することが望ましいと判断した。炉心燃料としては、MOX及び窒化物燃料を抽出した。なお、金属燃料は温度制限があるため、ガス炉には適用しない。

窒化物燃料は、窒素解離が発生しても著しい１次系圧力上昇にならない。

○ BWR 型 FBR、超臨界圧水冷却 FBR 等の水冷却大型炉については、増殖比は1.0～1.05程度となり資源有効利用性の面で更なる検討が必要であることが分かった。今後、原研等の研究成果をフォローするとともに、安全性等の検討を進めながら FBR サイクルの導入シナリオとの関連について検討を進め、第２期の絞り込み段階で総合的に判断することとする。

○ 溶融塩炉については、U/Pu サイクルを可能とする塩化物溶融塩を用いた概念を検討した結果、原子炉設備の物量が Na 冷却炉に比べ４倍程度となるとともに、耐食性の観点から高価な構造材料を使用する必要があるなど、経済性目標を達成することは難しい見通しであるとともに、多くの開発課題がある。このため、第２期で検討する実用化候補概念としては抽出しないこととした。

○ 小型炉については、中・大型炉と導入ニーズが異なることから、FBR の特徴を生かし、燃料取替間隔が長く核拡散抵抗性等に優れた炉として、ナトリウム冷却炉及び鉛ビスマス冷却炉の２概念を抽出した。炉心燃料としては、両炉とも長期運転の観点から、MOX 燃料は適用せず、金属及び窒化物燃料を抽出した。また、ガス冷却炉については、大型炉の検討結果を待って判断することとする。

(3) 燃料サイクルシステムの抽出評価

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

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

○ 再処理システムについては、湿式法としては、軽水炉燃料の再処理法として実績のある PUREX 法を改良した「先進湿式法」を、また、乾式法としては、溶融塩中での電解を利用した「酸化物電解法」 及び「金属電解法」、並びにフッ化物気体の生成し易さの違い等により燃料と FP を分離する「フッ化物揮発法」を検討対象とした。

○ 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鋳込む「鋳造法」を、それぞれ燃料形態と組合せて検討対象とし

た。

○ 再処理及び燃料製造システムに対して、200tHM／年、50tHM／年規模でのプロセスフロー、物質収支、設備機器仕様等の概念検討を進めた上で、再処理と燃料製造の一体化プラントとしての設計検討を行い、建設費及び操業費を評価するとともに、開発目標に照らしたシステムとしての評価を実施した。

これらの評価をもとに総合的に検討した結果を以下に記載するとともに、燃料サイクルシステムに関する抽出結果を表-7 に示す。

○ 再処理システムについては、技術的成立性が高く経済性で大規模施設に有利な先進湿式法、技術的成立性の上で固有の開発課題は存在するものの小規模施設でも経済性が良くなる可能性がある乾式法（酸化物電解法、金属電解法）を有望な概念として抽出した。

○ 燃料製造システムについては、酸化物燃料用として技術的にほぼ確立されているペレット法、実績は少ないものの工程が簡素化でき経済性の向上が期待できる振動充填法、また、金属燃料用としての鋳造法を有望な概念として抽出した。

○ なお、再処理システムのうち、フッ化物揮発法については、フッ化物の安定性確認等の課題があり、そのための国内インフラが未整備である。このため、当面ロシア等における軽水炉再処理への適用性検討等の動向をフォローし、第２期の絞り込み段階で再評価することとする。
また、酸化物電解法については、窒化物燃料を処理するには、一旦ほぼ理論密度に近い緻密な酸化物粒子を得てから窒化物に転換するため効率的でないこと、また、金属燃料を処理するには、一旦酸化物に転換して電解処理した酸化物粒子を金属に還元するという複雑な工程をとることなどから、酸化物燃料にのみ適用し、窒化物及び金属燃料に適用する組合せは抽出しないこととした。

5. 評価手法の適用性検討

5.1 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」及び「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について検討を進めている。

開発目標の策定から実用化候補概念の抽出に至る第1期の検討フローにおける総合評価の内容と第2期への展開を図-76に示す。第1期では概念検討で抽出された候補技術を工学的観点から比較するため、サイクル技術の組合せ、多面的評価手法の開発、サイクル諸量評価、評価指標の相関及び感度評価などを実施し、総合評価手法を第2期における絞り込みの判断材料の一つとして活用するための今後の改良点を摘出した。

(1) 評価指標の検討

FBRサイクルを構成するFBR、再処理及び燃料製造の各システム技術は、開発目標を念頭において、各システムに対する設計要求をできるだけ満たすべく検討されている。ここでは、各システム技術を組合せたFBRサイクルが、開発目標に対してどの程度達成されたかを判定する評価指標を設定した。評価指標の設定においては、現状の検討レベルの深さに依存して限界はあるものの、できるだけ定量化に留意するとともに、評価指標を「一次指標」から「三次指標」にまで階層化し、指標と設計要求との関連を明示することを心掛けた。第1期において設定した評価指標を表-8に示す。

(2) 評価手法の検討

FBRサイクル評価のために設定した評価指標には、経済性、資源有効利用性及び環境負荷低減性のように定量化が可能な指標と、核拡散抵抗性、安全性及び技術的実現性のように定量化が困難な指標とがある。また、対象とする候補の技術レベルにかなりの差があるので、評価値の不確定幅に大きなバラツキが存在するものと考えられる。したがって、第1期では6つの各視点に対する評価手法の適用性の確認と課題の整理に主眼をおいて検討した。各評価指標に対する評価手法と判断のめやすを表-9に示す。

5.2　評価手法の適用性検討

本節では、FBR サイクルの各システム技術の組合せに関する技術情報を取りまとめるとともに、4.2 及び 4.3 で検討された FBR、再処理及び燃料製造技術を組合せた代表的な FBR サイクル概念を設定する。また、それらの FBR サイクルを対象として、第 1 期で設定した評価指標の評価値や設計データに対する感度を算出し、評価指標の適用性検討並びに第 2 期に向けた改善項目の摘出及び分析を行う。

(1) FBR サイクル技術の組合せ

FBR サイクルのシステム技術の組合せにおいては、設計作業の実施単位である原子炉、炉心、再処理及び燃料製造の 4 つのシステムに係る設計情報を組合せて、FBR サイクルのプラント概念を具体化する。組合せとしての合理性やサイクル特性の類似性を考慮して、評価手法の適用性検討の評価対象として選定した FBR サイクルの主な組合せと関連する設計情報を表-10 に示す。

(2) 開発目標に対する適用性評価

① 経済性

FBR サイクルに対する発電単価の試算例として、炉型の違いによる影響や炉心構成の影響について整理した結果を、将来 LWR 発電単価の試算結果を基準とした相対値で図-77、図-78 に示す。これにより、炉型や炉心構成の違いによる経済性への影響が発電単価で評価できることを確認した。

また、第 1 期では増殖比に対して 1.2 程度という目標値を設定したが、これを達成するためブランケット燃料量を多く装荷する傾向となり、炉心インベントリの増加と平均燃焼度の低下（表-10 参照）を招き、燃料費が増大するとともに複利システム倍増時間が増加する（図-79 参照）結果となった。このため、経済性と炉心性能とのバランスを取った炉心設計が今後の課題となると考えられる。

発電単価に対する入力値の感度分析を行った結果を図-80 に示す。発電単価への影響が大きい項目としては、資本費では減価償却費、運転費では修繕費、諸費などの直接費、燃料費では燃料製造費、再処理費及び炉心 HM 量、その他全体に係わる項目として設備利用率が挙げられる。このうち FBR 建設費については、直接的には減価償却費に関係しているが、間接的には FBR 物量、廃止措置費、修繕費が関連しており、発電単価の低減には FBR の物量削減による建設単価の低減が最も効果的である。加えて、運転サイクル期間の長期化と定検期間の短縮による設備利用率の向上も、発電単価の低減に効果的である。また、燃料費については、HM 量の低減効果が大きいことから、他の視点とバランスをとりつつ装荷燃料量が少なく、できるだけコンパ

クトな炉心を検討することも必要と考えられる。さらに、再処理費及び燃料製造費も燃料費の主要な部分を占めているので、再処理及び燃料製造単価の低減に向けて引き続き検討する必要がある。

② 資源有効利用性

FBR は天然ウラン（U-238）を最大限有効に使い得る特長を有していることから、資源有効利用性の評価指標をウラン資源節約性とウラン資源活用性に展開し、それぞれの特性をウラン累積需要量とウラン利用率で表した。ウラン累積需要量の試算結果を図-81 に示す。

ナトリウム冷却炉の低位（70GWe 一定）ケースでは、FBR の導入ペースが緩やかであるため、ほぼ究極資源量の 5%（将来の全世界の累積原子力発電電力量に対する我が国の割合の予測値に相当）程度となっているが、酸化物燃料と比べて金属燃料は初装荷 Puf 量が小さく増殖比が大きいため、ウラン累積需要量は小さくなっている。

一方、鉛ビスマス冷却中型炉で自然循環方式を採用した場合には、初装荷 Puf 量が他の炉型に比して大きいため、炉の導入が遅れてウラン累積需要量が大きくなる。ヘリウムガス炉については、現状の設計では初装荷 Puf 量が大きいため、累積需要量が比較的大きくなっている。

中位（120GWe）ケースでは、いずれの場合も上記の傾向がより顕著に表れるのに加えて、究極資源量の 5%を超える結果となっている。

③ 環境負荷低減性

環境負荷低減性の一次指標である廃棄物発生量（m^3/kWh）及び固化体の潜在的放射性毒性（Bq/ALI/kWh）の試算を行った。試算結果を図-82 に示す。

単位発電量当たりの放射性廃棄物発生量については、総量は発生量の多い低レベル廃棄物が支配的であり、占有面積換算値は高レベル廃棄物が支配的となる。廃棄物発生量は主として再処理方式に依存しており、炉型による差異はほとんどない結果となっている。また、低除染 TRU 含有燃料のリサイクルを目指した FBR サイクルでは、ソルトフリー法*を導入すれば、廃棄物発生量は従来湿式法に比べ大幅に改善される見込みである。

潜在的毒性*低減については、MA 分離を採用する効果が定量的に確認された。第 1 期の設計条件では、MA 分離による潜在的毒性の低減と廃棄物発生量の増大には相関性がない。Pu については、インベントリが大きく、毒性インパクトが大きいので、毒性低減並びに被ばく低減の観点からその挙動については十分留意すべきである。

施設の廃止措置にともなう放射性廃棄物については、今回は対象としていないが、例えば、重金属として毒性の高い鉛ビスマスなどは、「環境に負荷を与えず経済的に過大な負担とならないか」が廃炉時の処分における課題なので、環境負荷低減性の指標として検討する必要があると考えられる。また、点検保守などで非定常的に発生する低レベル固体廃棄物については、発生量が多いにもかかわらず信頼できる精度の高い評価が困難であるので、その低減努力とともに、発生量に関するより精度の高い見積りが必要である。

④ 核拡散抵抗性

内在因子の一つである使用済燃料組成については、FBR のブランケット燃料（4 年冷却）中の Pu は 95%以上の高フィッサイル率であるが、放射能、発熱量、被ばく量及び放射性毒性ともに十分高く、取り扱いや接近の困難性から高い核拡散抵抗性を有する。特に、1m の距離における被ばく量は、IAEA が目安としている 1Sv/hr と比べ、2 桁以上上回っている。

また、最も核兵器に近い純粋な Pu 金属は、どの再処理システムでも存在しない。しかしながら、再処理システムに固有な FP 除染能力及び MA 分離方式の違いから相対的な差異が生ずる。金属電解法については除染能力が低く、Pu は常に MA と共存し、Pu が単体で存在することはないので核拡散抵抗性は他に比べて高いと判断される。

外在因子については、核物質管理を支える技術のレベルによりその評価が定まる。湿式法についてはプラント工学的に成熟し、実績も豊富であるため、核物質管理に関する技術の信頼性も高い。一方、乾式法については総じて初期の工学レベルにあり、湿式の計量管理やモニター技術を必ずしも転用できないので、方式に応じた技術開発が必要と考えられる。

⑤ 安全性

安全性の評価構造と検討結果の概略を図-83 に示す。

FBR システムの安全性については、ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉、炭酸ガス冷却炉及びヘリウムガス冷却炉とも、過出力型事象、除熱低下型事象、漏えい冷却材の影響、受動的炉停止能力、全交流電源喪失時の炉心冷却能力などの設計基準事象について安全性判断基準を満足する見通しである。また、周辺公衆との離隔を判断するための事故時の被ばく線量についても、原子炉立地審査指針のめやす線量を十分下回る見通しである。

ただし、鉛ビスマス冷却炉では受動的炉停止能力について、制御棒浮上り防止機構の耐久性などの成立性の確認、炭酸ガス冷却炉及びヘリウムガス冷却炉では減圧事故対策が課題であり、今後も引き続き検討が必要である。

FBR システムの設計基準を超える事象については、FBR 炉心では溶融燃料の集中にともなう再臨界のポテンシャルを有することが特徴であり、FBR ではこのことに着目した評価を行う。評価対象となるプラントの特性を考慮して、「炉心損傷防止」特性が残留リスク領域まで低減されるか、あるいは炉心損傷時の「再臨界回避」方策及び「事故後の安定冷却・閉じ込め」が可能であることが設計要求を満足するための条件となる。炉心安全性については、各候補概念とも代表的な炉心損傷起因事象に対して、炉心損傷発生頻度を工学的に無視できる程度（10^{-6}/炉年以下）に低減できるとともに、再臨界回避能力が確保される見通しである。

燃料サイクル施設についても、臨界、火災・爆発、漏洩などの設計基準事象への対策がとられており、想定される同時代の LWR 燃料サイクル施設と同程度の安全性は確保できる見通しである。

⑥ 技術的実現性

技術的実現性は有望概念の絞り込みの判断に重要であるが、第 1 期段階では評価または判断に必要な情報が不足している。したがって、ここでは技術的実現性の一次指標である技術レベルを「科学研究レベル」、「工学開発レベル」及び「実用化レベル」、投資資金を大、中及び小の 3 段階にそれぞれ分類し、代表的な FBR サイクルに当てはめて、ポートフォリオ図のイメージの具体化により示すこととした。

技術的実現性は、ある技術が実用化されたときの効能の大きさ（独創性、競争性、外部へのインパクト、波及効果）が動機となって、技術レベル（技術の達成度）、技術的ハードルの高さ（困難度）、開発に対する投入資金量、投入人工数、研究者・技術者の資質・やる気、技術的ブレークスルーの可能性、開発に許容される時間などと関連している。技術的実現性については、より多くの情報に基づいて総合的に判断することが不可欠なので、今後改善が必要である。

(3) 評価指標に対する評価

経済性、資源有効利用性及び環境負荷低減性の評価指標については、第 1 期段階で定量化を試みそれらの適用性を検討した。評価手法を適用する際には、それぞれの指標の評価値に、全体の中でどの程度重要なのかを考慮する重みを掛けて、指標値を足し合わせることにより総合評価値が得られる。各指標の評価値がそれぞれ相関性を持たず独立であるならば、評価値の重みは評価者の判断やアンケート調査などに基づいて、システム外から与えることができる。一方、指標間の独立性が担保できない場合は、指標間の従属性を

念頭において、ダブルカウントをできるだけ排除する工夫が必要である。そこで、ここでは定量化した指標に対して、指標間の相互相関の有無を調べるため、指標間の従属性検定を行い指標としての独立性を検討した。

経済性、資源有効利用性及び環境負荷低減性に関する7つの指標間の相関係数を求めた結果を表-11に示す。表によれば、経済性指標の発電単価と資源有効利用性指標のウラン累積需要量、ウラン利用率と廃棄物発生量及び潜在毒性、環境負荷低減指標の廃棄物発生量と潜在毒性との間には比較的大きな相関が認められるが、その他の指標間の相関性は小さく、独立性が担保できることが分かる。第1期では、経済性に大きな負荷を与えない範囲で環境負荷低減性を考慮することとしていたため、経済性と環境負荷低減性との間に独立性が認められる結果となっている。しかし、長寿命FP*の核変換を設計上考慮するような場合には、経済性と環境負荷低減性との間はトレードオフの関係となり、今回とは逆に独立性が担保できなくなることも考えられる。

経済性の評価には様々な要素が含まれているので、他の指標との独立性は基本的に成立しないことは容易に推定されるが、そのことが今回の従属性検定からも確認できた。相関の度合いは評価対象群により異なるので、評価結果に対して従属性検定や相対的な感度を調べ、適切な重み付けにより、従属性に対する補正を考える必要がある。

もう一方の重み付けの根拠となる重要度判定は、評価者のバックグランドにより系統的な違いがでるので、本質的に一意には決まらない種類のものである。したがって、多面的評価における総合評価値は、評価者のバックグランドによるクラス分けなどによるケーススタディを考える必要がある。

(4) サイクル諸量評価

増殖比、炉心インベントリ、ウラン回収率などが異なるFBRサイクルに対して、ある一定の想定条件の下でサイクル諸量計算を行い、FBRサイクルの相対的な特性比較を行った。ここでの諸量計算は2000～2200年の200年間を対象とし、発電設備容量については2020年に70GWeに達した後、そのレベルで一定に推移すると想定（低位ケース）する。FBRは2040年から導入開始と想定する。LWR燃料の再処理は使用済燃料の発生量及び再処理工場の稼働率を考慮した上で、天然ウラン累積需要量が極力低く抑えられるよう最適に設定し、FBRの使用済燃料は4年冷却後に全量再処理する。炉外サイクル時間はLWR再処理では6年、FBR再処理では5年とする。炉寿命は炉型によらず60年とし、ロス率は燃料サイクルの設計条件（表-10）を用いる。プルサーマルについては、プルトニウムバランスを考慮して導入する。

これらの諸量計算結果から、それぞれのFBRサイクルを分析すると以下

のような特徴が示された。

- ナトリウム冷却炉の場合は、導入後約 80 年間で LWR とのリプレイスを完了し、天然ウラン累積需要量は約 80 万 ton-U となり、究極資源の 5%（約 77 万 ton-U）程度となる。
- 炭酸ガス炉とヘリウムガス炉の場合の天然ウラン累積需要量は 100～110 万 ton-U となり、ナトリウム炉の 2～3 割増程度である。一方、第 1 期の鉛ビスマス炉では約 130 万 ton-U（ナトリウム炉の約 1.6 倍）、水炉では 22 世紀を過ぎても飽和値に達せず 2200 年時点で約 180 万 ton-U（ナトリウム炉の約 2 倍）となる。
- 炭酸ガス炉とヘリウムガス炉の複利システム倍増時間が、ナトリウム炉の 33 年に比べて 2 倍程度も長いにも拘わらず、ほとんど同じペースで FBR の導入が可能で、ウラン累積需要量も 2～3 割増程度で収まるのは、発電設備容量が 70GWe と比較的低位を想定しているため、LWR の炉寿命が 60 年と長いことにより、FBR の導入（すなわち LWR とのリプレイス）において、あまり高い増殖比は必要とされないことによるものと考えられる。
- 鉛ビスマス炉の複利システム倍増時間は 65 年と、ガス炉とほぼ同じにも拘わらずウラン累積需要量が増加するのは、初装荷の核分裂性 Pu のインベントリが大きいことが原因と考えられる。これは、LWR からの Pu 供給が支配的な FBR 導入初期において、核分裂性 Pu のインベントリが大きい炉型の場合、新規の FBR の導入が制限されることによる。
- 水炉の場合は増殖比が 1.05 程度とそもそも低く、複利システム倍増時間が約 190 年と長いうえに、初装荷の核分裂性 Pu インベントリも大きいことが、ウラン累積需要量の増加につながっている。
- MA 蓄積量の観点からは、ナトリウム冷却炉において FBR 自身から回収した MA をリサイクルした場合、しない場合に比べて 2200 年時点で MA 蓄積量を約 4 割減らすことができる。さらに、LWR から回収した MA も FBR でリサイクルした場合には、2120 年頃には MA 蓄積量をゼロにすることが可能である。
- コロケーションを想定して中型モジュール炉を導入した場合、大型炉と比較して天然ウラン累積需要量及び MA 蓄積量の傾向はほとんど変わらないが、炉特性（金属燃料）に起因して平衡燃料の年間取扱量が少なくなる分、燃料加工量と再処理量が 2 割程度減少する。

(5) FBR サイクルの導入シナリオの検討

FBR サイクルには、前述のとおり、燃料の増殖、燃料中の不純物の許容量

が高く取れること、TRU リサイクルが可能であることなどが特徴として挙げられる。これらの FBR サイクルの魅力と 21 世紀社会の展望の分析を踏まえて、FBR サイクルが我が国のエネルギー源として導入される条件をケーススタディにより検討した結果を図-84 及び図-85 に示す。それぞれのシナリオの概要は以下の通りである。

経済性向上シナリオ

炭酸ガス税などの規制により他電源に比べて原子力の経済性が相対的に向上し、FBR においても将来の LWR 並の経済性が達成された場合、基盤電源として FBR サイクルの導入が進むシナリオ

環境負荷低減シナリオ

高レベル放射性廃棄物*の処分場負荷低減や毒性低減を目指して、効率的な MA の燃焼や FP の分離・核変換が可能な FBR サイクルの導入が進むシナリオ

エネルギーセキュリティシナリオ

今後の大きなエネルギー需要が予測されるアジア地域を念頭において、石油や天然ウランなどのエネルギー資源への域外依存度を減らす観点から FBR の導入を進め、我が国のエネルギー戦略上、石油やウラン資源の需給の逼迫によるエネルギー危機が生じた場合でも、柔軟に対応できるエネルギー技術を確保しておくシナリオ

天然ウラン資源制約シナリオ

世界的なエネルギーの需要増と炭酸ガス規制で、脱化石燃料の傾向と原子力発電の比率増加により、21 世紀中頃までに天然ウラン量が不足し FBR サイクルを導入する必要性が生じるシナリオ

多目的利用シナリオ

以下に示す多様なニーズに対応したシナリオ

- 内陸部の都市や離島など、送電費用が高くなる地域で電力の安定供給が望まれる場合、付加価値の高い分散エネルギー源として、運転・保守に手間のかからない長寿命炉心の小型 FBR を導入するシナリオ
- 運輸部門の燃料電池自動車の普及に合わせて、その燃料を原子力による水素製造でまかない、原子力の利用拡大と炭酸ガスや排気ガスの排出抑制を実現するシナリオ（図-86 参照）
- 水資源の少ない乾燥地域で海水の淡水化が望まれる場合、寒冷地で熱の供給が望まれる場合などのニーズに対応して、FBR の導入が進むシナリオ

上記のようにFBRサイクルの導入条件としては種々のシナリオが考えられるが、現実的なFBR導入シナリオは、社会的背景、ニーズ、技術の進展などに依存して複雑に変化するものと考えられる。FBRサイクルを取り巻く状況を考慮し、経済性や環境負荷低減性などの視点に対してバランスの取れたエネルギーシステムを目指すFBRサイクルの方向性を図-87に示す。我が国のエネルギー戦略としては、リスクに対する柔軟性を確保するため、原子力を含めた多様なエネルギー源のベストミックスを図るとともに、FBRサイクルの特長を活かして、ウラン資源節約、MA燃焼、長寿命FP核変換*、水素製造など、環境に対する負荷が少なく、長期に亘り安定供給が可能なクリーンエネルギー源として利用拡大を図る必要がある。

以上に述べたように、第1期においては、21世紀社会の展望とFBRサイクルの特徴を考慮した種々のFBR導入シナリオの検討を行った。第2期においては、第1期において抽出されたFBRサイクルの実用化候補概念の絞り込みを行うが、この際、各候補概念の特徴を活かし、FBR導入シナリオと関連付けながらFBRサイクルの実用化戦略を立案することとする。

6. FBR サイクルの技術体系整備に向けた展開及び第 2 期の研究開発計画

前回の研究開発課題評価委員会において、既に、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、評価を受けた。前回の説明内容と今回の説明内容との関係を整理すると以下の通りである。

- 2001 年度については、前回の評価結果を反映し、研究を開始している。
- 第 2 期の基本的な進め方については、計画の具体化に当たって見直しが必要となった以下の点を除き、前回の説明内容から変更は無い。
  - 第 2 期の開始時点における重要課題として、下記をポイントとする開発目標の見直しを行う。
    - FBR サイクルの実用化に対する理念（目指す方向性、狙うレベル）を示す。
    - 世界に通用するグローバルスタンダードを目指した開発目標とする。
    - 21 世紀の社会の多様なニーズに対応するため、各候補概念の特長を生かし得る目標設定とする。例えば、基幹電源としての目標のみでなく、小型炉等への適用も考慮した目標とする。
  - ガス冷却炉について、燃料形態と安全性を中心に、1 年間検討を継続し、2001 年度末に炭酸ガス冷却又はヘリウムガス冷却の内の一つの有望な概念を抽出する。
  - 2003 年度末を目途に、RETF 計画をまとめる。
- 今回、第 2 期の 5 ヵ年計画を平成 14 年度以降について具体化を図った。

この章では、FBR サイクルの技術体系整備に向けた展開における第 2 期の位置付けと、第 2 期の研究開発計画について説明する。

6.1 FBR サイクルの技術体系整備に向けた展開

サイクル機構は、FBR システム（炉システム）とその燃料サイクルシステムを統合した FBR サイクルシステムの競争力ある技術体系を、2015 年頃を目標に整備することとしている。実用化戦略調査研究では、それに向けた研究開発計画（ロードマップ）を、第 2 期終了時点で、まとめることとしている。しかし、第 2 期の研究開発計画は、「実用化の見通しを得る」までの開発ステップを見据えたものとする必要があることから、今の時点で 2015 年頃までの各ステップの研究開発の基本的な枠組みを想定し、第 2 期の役割を明確にしておく必要がある。

サイクル機構の中長期事業計画により、FBR サイクルの研究開発は、2015

年頃までを5年程度ごとに分割し、ステップごとにチェック・アンド・レビューを受けつつ、社会的状況の変化に応じ柔軟に進めることとしている。各ステップの研究開発目標及び研究開発内容は概ね表-12 の通りと考えている。また、各ステップで得られる成果を整理すると表-13 のようになる。

- 第1期では、FBR サイクルの実用化候補概念について、幅広く技術的選択肢の評価を行い、実用化目標の達成の見通しが乏しい技術を落とし、有望な技術を抽出した。
- 第2期では、設計研究や要素技術の基礎的な試験等を実施し、そのデータに基づいて、FBR サイクル全体としての最適化、実用化を念頭に置きつつ総合的に評価を行い、実用化候補（2～3）の絞り込みを行う。すなわち、FBR システムでは、正と副の候補概念を決め、燃料サイクルシステムでは、湿式再処理と乾式再処理それぞれで一つの候補に絞るとともに、湿式法と乾式法等の要素技術を適切に組合せたハイブリッド法の検討を行い、それぞれに対応する燃料製造法を絞り込む。また、FBR サイクルの実用化に向けて、競争力ある技術の実現にとって必須の技術開発テーマを特定し、研究開発計画を整備する。
- 第3期では、特定した必須技術について、試験及び解析により実用化のための技術の整備を行い、FBR サイクル実用化像の見通しを明らかにする。第3期の最終段階では、FBR サイクル全体として、正と副の候補概念を決めることになる。
- 第4期では、絞り込まれた実用化プラント像と必須技術について、工学規模の実験や解析的検討等の研究開発を経て技術の確証を行うとともに、実用化に向けた設計技術及びシステム技術としての FBR サイクル技術の体系化と技術根拠の整備を図る（ただし、選定される実用化候補概念によって技術体系整備に要する期間が多少異なり、未知の課題の多い技術が選定された場合は 2015 年以降にずれ込むこともある）。

(1) FBR システムの研究開発に係る各ステップの展開

FBR システムについて、第1期から第4期にかけて、実用化に向けた候補概念を絞り込みつつ技術レベルを向上していく過程を、図-88、図-89 に概念図にして示した。

- 第1期では、各種冷却材を対象に有望なシステム及び要素技術について実用化候補を抽出した。
- 第2期では、実用化候補概念の選定（主概念と副概念）を行うために、冷却材ごとに、その設計検討を深めるとともに、その成立見通しを得る

ために必要な要素技術開発を実施し、候補概念について成立性の見極めを行う。第2期終了時には、FBRシステムの実用化候補概念について主概念と副概念を選定する予定である。

- 第3期では、第2期で選定された実用化候補概念（主概念と副概念）の本格的な開発に移行するため、概念設計研究を行うとともに第2期で成立性の見通しが得られた要素技術について本格的な確証(開発)試験を行う。
- 第4期では、確証(開発)試験、実証試験により実用化プラントの基本設計に資するデータの蓄積を図り、魅力ある実用化プラントの基本設計図書としてとりまとめる。すなわち、設置許可申請書の安全設計と安全評価（添付書類八及び十）の内、サイトに依存しない部分を作成できる程度の技術体系を整備する。

(2) 燃料サイクルシステムの研究開発に係る各ステップの展開

燃料サイクルシステムについて、第1期から第4期にかけて、実用化に向けた候補概念を絞り込みつつ技術レベルを向上していく過程を、図-90、図-91に概念図にして示した。

- 第1期では、再処理、燃料製造それぞれの候補技術についてシステム設計成果に基づき、燃料形態や燃料サイクルとしての整合性を考慮しつつ、有望な概念を抽出した。
- 第2期では、第1期で抽出された概念について、設計の精度を高めるために必要な要素試験を進め、それに基づくシステム設計を実施する。小規模ホット試験により候補プロセスに関する情報を蓄積する。2005年度末までに乾式再処理、燃料製造の分野では候補技術間の比較評価を行い、実用化概念の絞込みを行う。なお、2003年度頃を目途にRETF利用計画をまとめる。
- 第3期では、技術成立性を左右する枢要技術について工学規模ホット試験を遂行し、そのデータに基づくシステム設計成果により実用化技術（正概念）を選定する。ただし、開発リスクの低減と計画の柔軟性を確保するために、副概念を残し開発を継続する。
- 第4期では、選定された実用化技術について、工学規模ホット試験を進め、実用化プラントの基本設計に資するデータの蓄積を図り、魅力ある実用化プラントの基本設計図書としてとりまとめる。すなわち、設置許可（承認）申請書の安全設計と安全評価（再処理では設置承認申請書の添付書類六及び八、燃料製造では設置許可申請書の添付書類五及び

七）の内、サイトに依存しない部分を作成できる程度の技術体系を整備する。

(3) 燃料開発に係る各ステップの展開

燃料開発については、概ね、以下のような展開を考えている。

- 第1期では、燃料形態に関する幅広い技術選択肢の調査を行い、燃料形態と冷却材の組合せで評価して、有望な選択肢を抽出した。
- 第2期では、その終了時点で新型燃料の絞り込みが可能となるよう、知見の収集に努める。金属燃料に関しては、照射試験のための供試体製作のフェーズに入る。MOX燃料に関しては、TRU含有燃料、高燃焼度化といった高性能化を目指した研究開発を行う。
- 第3期では、第2期での絞り込み結果に基づき、新型燃料の中長期的な開発を着実に進める。燃料照射試験に関しては、ピン照射による性能確認のステップとなる。これにより、MOX燃料に関しては開発の見通しが明らかとなる。
- 第4期では、燃料照射試験に関しては、集合体照射による性能確認のステップとなる。これにより、MOX燃料に関しては技術体系の整備が概ね完了する。新型燃料の中長期的な開発を継続する。

(4) LLFP*等の分離変換に係る研究開発について

実用化戦略調査研究においては、経済的なリサイクル技術（分離、加工、核変換、保管）の確立を目標とすることから当面は、元素分離の範囲で行える分離変換技術開発を重点的に取組むこととし、核分裂生成物として、I、Tc、Cs、 Srの4元素を主対象に、検討を行う。実用化候補概念として採用するかどうかは、その効果と経済性を評価して判断する。また、その開発計画は、再処理方式の絞込み時期などにも配慮し、柔軟に進めることとする。

- 第1期では、大型MOXナトリウム冷却炉心を対象に、I、Tc、Cs、Srについて、その核変換特性（核変換率、核変換量等）を概略評価するとともに、LLFP回収率をパラメータとして分離変換によるLLFP等の廃棄物低減効果を評価した。なお、Srについては、吸収断面積が小さく核変換は不可能であると判断し、基礎的な分離回収技術候補について調査した。
- 第2期では、第1期で抽出した実用化候補概念に対するI、Tcの核変換特性を評価し、化学的安定性を含め望ましいターゲット候補材の化学

形態を評価、選定する。Csについては、元素分離範囲での核変換の有効性をさらに検討し判断する。Cs、Srについては、発熱体元素であるため、冷却貯蔵期間の短縮、処分面積の低減の観点から、分離保管と一括廃棄処分との経済性比較を行う。分離回収については、湿式再処理法を中心に技術開発を行う。その際、ターゲット材の有望な化学形態を念頭に開発を進める。第2期終了時点にて、各LLFPの分離変換の技術的成立性、経済性評価を実施し、開発継続の可否を判断する。

- 第3期では、第2期で絞り込まれたFBRシステム、燃料形態を対象に、有望な核変換炉心設計を評価し、ターゲット材の化学形態を決定する。絞り込まれた再処理技術ごとに、要素試験を実施し分離回収技術を特定する。
- 第4期では、分離回収からターゲット製造試験までの小規模ホット試験を行い、必要な照射試験の準備を行う。

(5) FBRサイクルの統合・評価に係る各ステップの展開

FBRサイクルの統合・評価では、炉、再処理及び燃料製造の各システム技術に係る技術的評価結果を踏まえ、FBRサイクルとしての整合性を念頭において、サイクル技術の組合せ及び多面的な観点からの「総合評価」を行う。また、研究開発の効率的な推進を支援する「戦略情報管理システムの構築」を行うため、設計情報及び技術資料のデータベース化を行うとともに、ネットワーク環境下に分散して存在する各種データベースや評価システムを、相互の連携をもって運用する分散協調型の総合評価システムを構築する。各フェーズの展開は以下の通りである。

① 総合評価

- 第1期では、5つの開発目標に技術的実現性を加えた6つの視点に対する評価指標を設定するとともに、それらに基づいた多面的評価手法の開発を行った。評価指標及び多面的評価手法については、第1期段階ではそれらの適用性の検討を行った。また、FBRサイクルの導入条件とその効果を含む将来像について分析・整理した。
- 第2期では、評価指標及び多面的評価手法を整備し、それらを中間評価段階の絞り込みに適用する。また、社会的受容性、外部コスト等の分析、他電源との比較評価(投資対効果評価手法の適用)をベースとして、FBRサイクルの将来像及び魅力を提示する。
- 第3期では、上記の各種データベース、評価指標、外部コスト、投資

対効果等を連携した総合評価システムを構築するとともに、関連する設計データ、技術情報、社会情勢等の情報収集を行い、FBR サイクルの概念設計に対する評価を行う。

・ 第 4 期では、社会的ニーズや設計の進捗に対応して総合評価システムを更新するとともに、設計データ、技術情報、社会情勢等の情報収集を継続し、FBR サイクルの基本設計に対する評価を行う。

② 戦略情報管理システムの構築

・ 第 1 期では、設計情報及び技術資料のデータベース化、プロジェクト進捗状況共有化環境の整備を行った。

・ 第 2 期では、データベース及び情報共有化環境の運用を継続するとともに、ネットワーク環境下の各種データベースや評価システムの統合環境（戦略情報管理システム）を開発する。

・ 第 3 期では、データベース及び情報共有化環境の改良・整備を行うとともに、戦略情報管理システムの運用を継続する。

・ 第 4 期では、データベース、情報共有化環境及び戦略情報管理システムを運用する。なお、技術の進捗に対応したシステム更新については適宜実施する。

6.2 第2期の研究開発計画

(1) 第2期の目的

第2期の目的は、FBRサイクルの実用化候補概念の絞り込みと、実用化に向けて必要な研究開発テーマの特定と実用化プロセスの明確化である。

第1期で抽出した炉心燃料、FBRシステム、再処理、燃料製造に関する有望概念について、候補概念相互の比較評価を、可能な限り定量的に実施できるレベルまで、設計研究を深める。また、絞り込みを実施する上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、実用化目標を達成するために必要な技術の成立性確認、技術的に課題の難易度評価を行う。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の候補に絞り込むこととする。

また、国内外の研究開発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（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・研究設備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-92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絞り込みの要点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する。3年間の成果について、研究開発課題評価委員会等で中間評価を受け、その結果を踏まえて2004～2005年度の研究内容を見直し、選択肢の絞り込みを進める計画とする。

(3) 第2期計画策定上の留意点

第2期の計画を作成するにあたっては、以下の点に留意して取りまとめを行った。

- FBRサイクル全体を一つのシステムとして組み上げることを念頭に置いた計画とするため、開発スケジュールについても、炉、再処理、燃料製造間で整合のとれたものとする。
- 第2期の期間は5年としているが、3年目にマイルストーンを設け、中間評価を行うこととしている。したがって、第2期の計画は、3年目、5年目に必要なデータ、情報を揃えることができるようにする。

・ 限られた研究資源（予算、要員）の下で効率的な研究開発を遂行し、第2期の終了時点で適切な絞り込みが実施できるよう、重点指向の研究開発計画とする。以下のように、各候補の最重点課題から着手する方法をとるため、各候補概念に対する研究資源は等分にはならず、差が生じてくることとなる。

（FBR システム）

- ナトリウム冷却炉：経済性の追求が最優先。経済性目標達成のための主要技術（炉容器・配管システムのコンパクト化、機器合体、2ループ化等）の成立見通しを示すバックデータを揃える。
- ガス冷却炉：高温、高燃焼度を達成できる燃料の開発、事故時の炉心冷却性確保が主要課題。燃料開発は、燃料被覆（被覆管または被覆粒子燃料の被覆材）の有望な材料と構造の選定を重点に検討する。炉心冷却性について見通しをつける。
- 鉛ビスマス冷却炉：冷却材中の材料腐食の抑制が、実用化の実現見通し判断の上で重要。国内外の施設を活用し、材料腐食の抑制限界を見極める。
- 水冷却炉：高出力条件での炉心熱流動と、炉心損傷事故への対応が重要。また、FBR 導入シナリオにおける位置付けの検討を行う。
- 小型炉：長寿命で受動的安全性の高い炉心の成立性の確認とあわせて、大型炉・中型炉向けと兼用で実施する要素技術開発により、除熱系の成立性や、鉛ビスマス中での材料腐食の抑制限界を見極め、出力規模の最適化等による経済性向上を図る。また、分散電源の役割と併せて、小型高速炉の特長を生かした他の用途への利用についても検討を進める。

（再処理）

- 先進湿式再処理：経済性の追求と、環境負荷低減に係わるプロセス開発が重要。経済性向上に向けた技術（高効率溶解、晶析、超臨界抽出、等）の成立性見通しをつける。環境負荷低減では、TRU 回収法、LLFP 分離法を選定し、その基本性能を見極めるとともに、経済性に与える影響を評価する。
- 乾式再処理：酸化物電解法及び金属電解法の枢要技術について、小規模プルトニウム試験等により、その成立性を見極める。（前処理技術、遠隔運転技術、廃棄物処理技術、保障措置技術、電解回収技術、TRU 回収技術、等）また、乾式法、湿式法等の要素技術を適切に組合せたハイブリッド法についての検討を進める。

（燃料製造）

- 簡素化ペレット燃料製造：ショートプロセス法*による経済性向上効果、低除染 TRU 含有燃料の製作性を、試作試験により確認する。
- 振動充填燃料製造：試作試験により、有望な顆粒製造法を選定する。小規模システム試験により充填技術を開発する。低除染 TRU 含有燃料の製造性を湿式再処理の製品を用いた基礎試験で確認する。
- 鋳造燃料製造：燃料製造の枢要なプロセスについて、国内で小規模な試験を実施し、技術力を蓄積する。

(4) 各分野の第 2 期研究計画

この項では、FBR システム、燃料サイクルシステム、燃料開発、環境負荷低減に係る分離・核変換、FBR サイクルの統合・評価それぞれについて、第 2 期の研究計画を示す。

前項（3）で述べたとおり、第 2 期の終了時点で、技術の絞り込みを行うことを念頭に置いた、重点指向の計画とする。ただし、燃料開発については、照射試験に長期間を要することから、第 2 期終了時点で成果が得られない研究についても、重要性の高いものから先行して実施する計画とする。

なお、この項で示す研究開発の年度展開は、第 2 期開始時点で設定したものであるが、研究開発の進捗により、適宜、見直す。

① FBR システム

第 2 期では、第 1 期で抽出された有望な実用化候補概念について、プラントシステムの設計検討を深める。また、5 つの開発目標と技術的実現性に関する主要な技術について、基礎的な試験を含めた研究開発を行う。これらにより、可能な限り客観的な判断根拠を整備し、各候補概念の総合的な比較検討を行って候補を絞り込むこととする。

炉心燃料については、酸化物燃料と新型燃料との互換性に配慮しつつ設計研究を進めて炉心概念を具体化し、候補となるプラントシステムとの適合性及び燃料サイクル技術との整合性を明確にした形で、目標性能の達成見通しを示すこととする。

また、これらの活動の成果に基づき、第 2 期後の研究開発の展開を具体化

するとともに、中長期の開発課題と所要期間・研究資源等の展望を明らかにしていくこととする。

以下では、第１期で抽出された炉概念の研究開発計画につき、対応する冷却材ごとに進め方の主要点を述べる。

(i)　ナトリウム冷却炉の技術開発

システム設計に関しては、第１期で摘出された課題についての検討と、予備的な概念設計を進め、３年間で中間とりまとめを行って、開発目標に対する達成度を評価する。特に、ナトリウム冷却炉の経済性を向上させるための革新的概念を支える系統・機器等の成立性は、プラントの出力規模に依存する可能性があることから、これらの成立限界を見極めることが重要である。その後の２年間では、並行して進める要素技術開発の３年間の成果を踏まえて設計の見直しを行い、燃料サイクルとの整合性を含めた総合的な評価を実施する。

安全性については、仮想的な炉心損傷事故に対する対策が重要で、溶融燃料の流出促進機構の有効性と炉心下部構造での融体の保持・冷却能力が再臨界回避の成否を握っている。これらの構造仕様等は、一方では、増殖性能や、炉心と炉容器の大きさに影響を持つため、設計を具体化し、再臨界回避機能の確認を行って、増殖性能、経済性との両立条件を見極めていくことが必要である。

また、受動的な安全性の強化が重要課題であり、自己作動型炉停止機構*（SASS*）の適用性を炉外試験及び「常陽」での照射試験により確認する。自然循環による崩壊熱除去に関する解析を行い、その知見を設計に反映する。

さらに、ナトリウム冷却炉特有の課題であるナトリウム－水反応については、蒸気発生器（SG）の大型化に対する安全裕度の確保・向上の観点から、水リークの早期検知システムを導入し、早期事象終息を可能とする設計概念を構築する。なお、２次系簡素化を目的とした新型SGについては、従来型のSGと比較し、システム概念の絞り込みを行うとともに、基礎的な要素試験を開始し、成立性の見通しをつける。

経済性向上のため、２ループ構成で、かつ、原子炉容器、配管系等の大幅な物量削減を図った設計を指向しており、高流速条件での流動と構造負荷や、除熱性能に係わる課題の解決が重要である。基礎的な試験等を実施し、システム成立の範囲と設計上の改善点等を早期に明らかにする。

また、物量削減のための合体機器の成立性の確認（伝熱管の振動・磨耗の抑制）が必要である。これらについては、基礎的な部分モデル試験から開始し、成立性の可否を方向付ける主要な課題から順次解決する。

さらに、大幅な配管の短縮や機器・構造の簡素化を実現するためには、新たな高性能材料（12Cr 系鋼等）の導入や 3 次元免震技術の採用が前提となるため、これらの技術開発と、それに関連する構造・材料基準類の整備が重要である。

ナトリウム冷却炉に係る第 2 期の 5 ヵ年計画を、図-93～図-95 に示す。なお、再臨界回避対策、構造設計、免震技術、等に係わる要素技術開発は、(vi) に炉型共通の要素技術開発としてまとめている。

(ii)　重金属冷却炉の技術開発

鉛ビスマス冷却炉では、材料腐食について、使用材料の温度制限条件及び流速制限条件を見極めていくことが、コンパクトな原子炉・冷却系統を実現する上で、最も重要である。これまでの鉛ビスマス冷却炉の検討は、自然循環型を中心に行ってきたが、鉛ビスマスの流速を高めた強制循環型のプラントシステムについても、炉心性能向上の観点から有効となる可能性があるため、第 2 期においては、自然循環型と対比しつつ検討を進める。

システム設計では、まず、強制循環型と自然循環型の比較・検討を行い、選定された概念について 3 年間で設計検討を深める。その後の 2 年間では、並行して進める要素技術開発（特に、鉛ビスマス中の材料腐食）の 3 年間の成果を踏まえて設計の見直しを行い、燃料サイクルとの整合性を含めた総合的な評価を実施する。

要素技術開発では、鉛ビスマス冷却炉の成立性に決定的な影響を持つ課題解決を最優先に実施する。鉛ビスマスの材料腐食特性に関しては、国産材による特性試験を行い、海外の既存データも参照して、材料の使用限界（温度・流速）を明確にするとともに、腐食機構の解明を図り、防食技術及び新たな材料開発の可能性に見通しを得ることとする。

また、鉛ビスマスの使用に伴う Po-210 発生については、その影響の把握とともに濃度制御技術の開発について検討を行う必要がある。Po-210 の炉内挙動や濃度制御技術の評価及び基礎試験を行い、Po 除去設備の必要性について検討するとともに、必要な場合は、その容量を明確にし、システム設計に反映する。

さらに、使用済み燃料等に付着した鉛ビスマスの除去・洗浄方策について、文献調査や基礎的な試験を行い、成立性を評価する。

システムの簡素化の柱となっている炉容器一体型蒸気発生器については、伝熱管の構造健全性や漏洩時の炉心への影響防止対策及び異常・事故時の除熱機能について、成立性の確認が必要であり、基礎的な安全特性評価を実施する。その他、炉心損傷防止機能の成立性評価、受動的炉停止機構の適用性評価等が、主要な要素技術開発として挙げられる。

鉛ビスマス冷却炉に係る第2期の5ヵ年計画を、図-96に示す。なお、自然循環崩壊熱除去能力の評価等に係わる要素技術開発は、(vi)に炉型共通の要素技術開発としてまとめている。

(iii) ガス冷却炉の技術開発

ガス冷却炉においては、高温高圧システムの成立性と、炉心安全性の確認が共通の重要課題である。

システム設計では、ヘリウムガス冷却炉（被覆粒子燃料型及び耐熱ピン燃料型）について、炉心損傷時の安全確保方策の具体化及び炉心性能向上の検討を行い、炭酸ガス冷却炉については、経済性の向上方策の検討を行った上で、2001年度に、ガス冷却炉として最も有望な候補概念の抽出を行う。2002年度からは、抽出した候補概念を対象に、その特性に応じた課題検討とプラントの予備的概念設計を進め、5つの開発目標の達成度を明確にする。

2002年度以降に実施する要素技術開発の具体的な計画は、抽出された概念固有の系統構成や設備機器に依存する。ガス冷却炉に共通するものとして、受動的炉停止機構の適用性を評価した上で、必要な要素技術開発を行う。また、炭酸ガス冷却炉と耐熱燃料ピン型のヘリウム冷却炉では、炉心損傷時においても炉内に溶融燃料を閉じ込めるため、コアキャッチャーの成立性見通しを得るための要素技術開発を実施する。ここでの安定冷却を達成するには、炉心の溶融落下時に未臨界を維持する形状の確保とともに、長期の冷却を果たすための除熱設備の検討が重要である。

ヘリウム冷却炉に関しては、特に、燃料要素（被覆燃料粒子型及び耐熱被覆管型）の開発が成立性の鍵を握っており、高温・高燃焼度条件に耐える燃料要素、燃料集合体の材料、形状及び炉心の構造の具体化を図るとともに、炉心性能及び除熱限界の評価・確認が重要となる。燃料被覆材の材料及び形

状の選定のための検討を行うとともに、候補材の炉外での高温試験等によって基本的な特性を把握する。

また、ヘリウム冷却炉の主要機器である高温ガスタービンの開発動向の調査や、減圧事故時の漏洩流量制限機構のプラントへの適用性評価等を実施する。

ガス冷却炉に係る第2期の5ヵ年計画を、図-97～図-98に示す。なお、再臨界回避方策の検討等に係わる要素技術開発は、(vi)に炉型共通の要素技術開発としてまとめている。

(iv) 水冷却炉の技術開発

水冷却炉に関しては、プラントの基本構成については軽水炉の技術を踏襲するため、主要な課題としては性能の達成要件となる稠密な炉心の成立性、とりわけ高出力条件下での熱流動特性についての試験データによる成立見通しの確認及び炉心損傷時の再臨界特性とその回避方策に関する検討が重要と考えられる。

第2期では、日本原子力研究所において進められている低減速スペクトル炉*の設計研究及び高転換型稠密炉心を対象とした熱流動試験等の成果を参照し、増殖炉としての成立性やFBR導入シナリオにおける位置付け等を検討していく。

また、超臨界圧軽水冷却増殖炉（SCFBR*）における炉心損傷の推移特性を把握する等、水冷却炉の安全確保方策についても検討する予定である。

水冷却炉に係る第2期の5ヵ年計画を、図-99に示す。

(v) 小型炉の技術開発

小型炉に関しては、鉛ビスマス冷却炉とナトリウム冷却炉を対象に、システム設計を3年間実施し、その結果を基に有望な概念を選定する。その後2年間は、選定した概念を対象にして、大型炉や中型モジュール炉の要素技術開発結果（冷却性能や構造設計に係わる課題、2次系の簡素化方策、等）を反映した設計の見直しを行い、経済性等の総合的な評価を行う。

炉心設計では、小型高速炉概念として最も特徴的な性能である長寿命炉心と高い受動的安全性*を同時に実現できるよう、プルトニウム富化度の差を大きくとった径方向2領域炉心の設計研究と、反応度制御機構の具体化を含

めた受動安全機能の有効性検討を進める。

また、プラント設計では、他の競合分散電源との経済的な競争力を高めるために、出力規模の増大によるスケールメリットの活用及びシステムの簡素化を目指した改善検討（ナトリウム冷却炉については準強制循環型炉の具体化及び12Cr系鋼の採用等）を進める。さらに、これらと並行して、電源以外の他目的利用における小型炉システムの適用性についても検討を行う予定である。

小型炉に係る第2期の5ヵ年計画を、図-100に示す。

(vi) 炉型共通の要素技術開発

各炉型の成立性及び経済性向上を中心とする目標達成の見通しの判断に必要な共通の技術課題に関し、以下の技術分野を重点に検討を行い、各炉の概念検討及び判断に反映する。

(a) 炉心燃料の技術開発

炉心燃料の技術開発については、適用するプラント概念の検討の進展に合わせて、炉心性能の確保・向上と経済性向上に有効な技術開発を重点に、検討を進めていく。第2期の5ヵ年計画を、図-101～図-103に示す。

MOX燃料については、低除染TRU含有燃料の採用と燃料の高燃焼度化が主要な課題である。これらに係わる燃料設計・評価技術を、従来技術を基に整備し、炉型毎の燃料設計を進める。また、新型燃料（金属燃料、窒化物燃料）に関しても、燃料設計・評価技術の開発を進め、各炉型に適合した燃料設計を行う。特に、窒化物燃料については、ガス炉の候補概念選定と合わせて、開発対象とする燃料形態を2001年度に選定する。

MOX燃料に係わる要素技術開発では、低除染TRU含有燃料の設計に必要な物性データを取得するとともに、「常陽」での照射試験を、順次開始する。また、TRU燃焼を意図した炉心設計で必要となる解析評価手法については、TRUの照射データに基づき整備する。さらに、BOR-60での照射試験のデータやスイスPSIとの共同研究で実施している照射試験のデータに基づき、振動充填燃料の性能評価手法を整備する。

新型燃料の内、金属燃料については、定常照射データは比較的揃っているものの、過渡事象における高温挙動と基本特性の確認が必要であるため、米

国 ANL の TREAT*炉を用いた炉内試験の準備を進める。窒化物燃料に関しては、炉型に適合した形態の燃料について、燃料製造法や脱被覆*法等の基礎調査から開始する。

高性能炉心材料の開発では、高燃焼度（炉心取出し平均 15 万 MWd/t）達成の鍵となる ODS 鋼被覆管について、実用規模製造の見通しをつけるとともに、材料強度基準の整備、溶接技術の整備を進め、また、材料照射試験による健全性評価に着手する。ODS 鋼の代替材と位置付けている PE16*については、既照射材の照射後試験（PIE）を行って、早期に実用化被覆管としての適用性を判断する。一方、高性能ラッパ管（PNC-FMS）については、課題である異材溶接の技術開発を進める。さらに、炉心性能と経済性の向上のため、高性能反射体（反射体厚さ低減）の開発及び炉心構成要素（制御棒等）の長寿命化の検討を進め、加速照射（常陽）の準備を開始する。

上記以外の主要な要素技術開発としては、径方向非均質炉心に関する臨界実験結果の総括的な評価等を行う。

(b)　プラントシステムの技術開発

プラントシステムの検討においては、経済性や安全性を向上するために取り入れた革新的な技術を成立させる上で鍵を握る技術分野や、設計研究のベースとなる設計・評価手法、設計基準類の整備に向けた優先課題を中心に取り組んでいく。第 2 期の 5 ヵ年計画を、図-104～図-106 に示す。

安全性に関しては、仮想的な炉心損傷事故の防止能力を高めるための受動的安全性の適用と、炉心損傷時の再臨界回避方策について、各炉型の特徴を考慮して具体化する。また、カザフスタンの IGR*炉を用いた EAGLE 試験研究により燃料流出の原理確認を、MELT-Ⅱ炉外試験により融体挙動の機構解明を進めて、再臨界回避及び炉内の事故終息についての成立条件を具体化する。

プラントの経済性向上を達成するための中核的技術である構造・材料の分野については、12Cr 系鋼の適用性評価と材料強度基準等の整備、3 次元免震実現のための免震構造概念の具体化と免震要素等の開発、破断前漏洩(LBB)成立条件の確認、構造健全性に関する解析評価技術の整備、高温構造材料の長時間健全性維持技術の開発等を行う。

伝熱流動の分野では、自然循環崩壊熱除去運転条件での炉内の熱流動現象等、受動的な安全機能の成立性を左右する現象を評価する手法の整備が最も重要である。全炉心の熱流動評価手法を、試験データを用いた検証を行いながら完成させる。また、従来から開発を進めている熱流動評価手法を、各種冷却材や高燃焼度燃料集合体に適用できるよう整備する。

プラント利用技術については、蒸気発生器*伝熱管等の探傷技術の高度化、遠隔検査・補修技術等の開発を進めるとともに、実用化燃料（高燃焼度燃料、低除染TRU含有燃料、新型燃料）の照射実証に有効な炉心概念の検討を進めて、「もんじゅ」による実用化燃料の効果的照射方策についての見通しをつける。

② 燃料サイクルシステム

燃料サイクルシステムに係る研究開発の第2期の5ヵ年計画を、図-107～図-115に示す。

(i) 再処理技術

(a) 湿式再処理法（図-107～図-108）

第1期では晶析技術、簡素化溶媒抽出技術及びTRU回収技術を組合せた先進湿式法を提案し、200t／年規模の大型プラントで経済性目標の達成見通しを得た。また更なる経済性向上の可能性のある代替補完技術を提案した。

第2期においては東海事業所内CPFの所要の改造を2001年度中に終了させ、2002年度よりホット基礎試験に供するものとする。改造後の施設を活用して先進湿式法の実証を進め、また代替補完技術の成立性を見極める。特に代替補完技術については2003年度末までに技術成立性の評価、期待される効果の定量化を行い、新たな湿式プロセスの構築に資する。

このような技術開発成果も踏まえ、湿式法による開発目標充足性をより詳細に評価するとともに、とくに経済性に関しては目標を達成しうる最小処理規模を明確にする。

(b) 乾式再処理法（図-109～図-112）

第1期では酸化物電解法、金属電解法及びフッ化物揮発法の3方式について既往研究をベースにTRU回収工程の付加等の改良プロセスを提案し、経済性目標を含む開発目標を充足しうることを示した。

第2期の展開においては、フッ化物揮発法については開発基盤が整備され

ていないことから国内外の実用化戦略調査研究以外の開発動向を調査し、2003年度末までにその後の対応方針を決定する。酸化物電解法及び金属電解法については国内関係機関との役割分担を明確にした上で、海外施設を有効に活用（共同研究、委託研究その他）して実使用済み燃料を用いた基礎試験を進めるとともに、CPF内へのプルトニウム挙動評価用の設備の設置等、国内での開発基盤を整備し、所要の試験を展開する。このような成果を踏まえ、機器概念の詳細化や安全設計を進め、第2期終了時までに施設概念を見直すとともに、より精度よい経済性評価を行う。

第2期終了時においては、それまでの技術開発やシステム設計成果に基づき、乾式再処理技術についての第3期以降の開発展開を決定する。炉心設計との関係も考慮したトータルのFBRサイクルとして開発目標充足性を評価していく。

(ii) 燃料製造技術

(a) ペレット燃料製造法（図-113）

第1期では簡素化ペレット製造法の基本工程に関する開発を進め、それに基づき、低除染TRU含有燃料製造への拡張を検討した。その結果、セル構造での自動化製造・遠隔保守概念により、技術成立性を含む開発目標を充足しうることを示した。

第2期では簡素化ペレット製造法の基本工程の成立性を確認するとともに低除染・TRU含有燃料製造性の確認を進め、燃料性能評価の一貫としての照射試験に着手する。並行してセル内製造を実現するためのシステム設計及び必要な装置概念の検討を進める。開発基盤としてはサイクル機構内の各種施設（大洗工学センター照射燃料試験施設（AGF）など）の有効活用を図る。またセル構造での製造を前提とした機器及び施設概念の検討を進め、より精度よい経済性評価を行う。

なお、第2期終了時においては、湿式再処理法と整合する燃料製造技術として、ペレット法と後述する振動充填法との比較評価を行い、第3期以降の開発展開を決定する。この際には単に製造技術だけの評価（例えば経済性の比較）でなく、燃料性能や炉心設計も考慮したFBRサイクル全体で評価していく。

(b) 振動充填燃料製造法（図-114）

第1期では再処理法に適合した方法で得られた顆粒を用いた振動充填燃料製造システムの検討を進め、経済性目標の達成見通しを得るとともに、必要な開発課題を示した。

第2期においては再処理との整合を考えた顆粒製造条件の最適化の開発に取り組むとともに照射試験に着手する。

湿式再処理法に適合する顆粒製造法については海外共研も活用して湿式ゲル化法（内部ゲル化、外部ゲル化）及び乾式造粒法についての基礎試験を進め、2003年度末に比較評価を行い、方式を絞り込む。さらに機器や施設概念の検討を行い、経済性評価に資する。後述する充填技術に関する開発成果と合わせてペレット法との比較を第2期終了時までに行う。

酸化物電解法への対応としてはCPFやRIARの施設を利用して顆粒中のプルトニウム分布の均一性等の確認を進めていく。金属電解法では転換粉の造粒法として湿式再処理からの製品にも適用可能な転動造粒法についてのウランを用いた試験（国内メーカの施設での実施を想定）を進める。得られた粒子を充填する技術及び燃料照射挙動については顆粒製造法によらず共通する部分があり、これらについてはPSIとの共研や解体プルトニウム処分協力に関する枠組みも活用して情報の体系化に努める。このような技術開発成果に基づき機器及び施設の概念検討を深める。乾式再処理技術の評価と合わせて第3期以降の開発展開を決定する。

(c)　鋳造燃料製造法（図-115）

第1期の評価により金属燃料は金属電解法で再処理し、射出成型法あるいは遠心鋳造法で燃料に加工するシステムの検討を進め、経済性目標達成見通しを得るとともに、必要な開発課題を示した。

第2期においては主に電中研による開発として、射出成型法については国内メーカの施設を利用した工学規模試験を進め、また3元系合金の熱力学や照射挙動評価に資する試料作成を目的とした小規模プルトニウム試験を原研の施設を利用して進める。遠心鋳造法については共通課題としてあげた金属鋳型と核物質との共存性に着目した評価を進め、2003年度末までにその後の開発展開を決定する。

③ 燃料開発

燃料開発においてはトータルのFBRサイクルとして開発目標が適切に達成されるよう、炉や燃料サイクルとの取り合い条件の最適化を図っていくべきである。

第1期の検討においては、燃焼度は15万MWd/t及び増殖比は1.2程度を目標とし、TRU燃焼やLLFPの核変換にも柔軟に対応する、との開発目標

に対し、

- 金属燃料及び窒化物燃料（以下、新型燃料）の開発の必要性
- 低除染 TRU 含有燃料の開発
- 製造方法の違いの評価
- LLFP の核変換炉心の検討

などが第 2 期以降も引き続き検討すべき課題として摘出した。

第 2 期以降の展開については現実的な開発リソースも考え、適切なチェック・アンド・レビューにより段階的に絞り込んでいくことを基本とする。

新型燃料としての金属/窒化物については FBR システムの検討と整合をとって絞り込むこととしており、その時期は 2005 年度末を計画している。その後、必要とする増殖比等の要求から酸化物/新型燃料の比較評価が行われる。

酸化物に対するペレット燃料と振動充填燃料については、上述の通り、第 2 期の終了までに、サイクル技術としての成立性のみならず、トータルの FBR サイクルの性能の観点も踏まえて評価を行う。

燃料性能を評価する上で不可欠な照射及び照射後試験については合理的な開発展開を図るべきである。すなわち、高除染 MOX ペレットについてのデータが充実してきている現状を踏まえ、他の仕様の燃料については以下に示す考え方に基づいた開発展開を図ることが妥当と考える。

燃料開発については、照射試験等、長期間を要するものであることから、第 2 期の 5 年間よりも長い期間を見込んだ開発計画が必要である。図-116 に 2015 年頃までの照射試験の考え方を示した。

(a)　高除染燃料

簡素化ペレットを含むペレット燃料により（ウラン、プルトニウム）燃料の高燃焼度照射データを、第 4 期の終了時点頃までに取得する。被覆管開発とも整合をとり、また振動充填燃料や低除染 TRU 含有燃料の先行試験として位置付ける。

(b)　TRU 含有 MOX 燃料

TRU 含有燃料の加速照射を行い、高除染 MOX 燃料との組合せで、第 3 期の冒頭頃までに、TRU 含有燃料の技術的見通しを得る。

(c)　低除染 TRU 含有 MOX 燃料

ペレット燃料ピン加速照射により高燃焼度（250GWd/t）までの照射挙動を、第 4 期の終了時点頃までに確認する。「許認可対応レベル」（低除染 TRU

含有燃料実証照射）のデータは2015年を越えて順次取得する。

(d)　製造法の違い

「簡素化ペレット」MOX燃料については、高除染MOXでバンドル規模で実機並みの長期照射を行う。MOX燃料におけるペレット、振動充填の違いについては、カプセル照射を含む少数のピン照射にて確認する。低除染TRU含有燃料（従来ペレット）と簡素化ペレットの製造工程の違いについては、先行する簡素化ペレットと従来ペレットの照射挙動の比較によりクリティカルな相違がないことを確認する。ただし、燃料サイクル側での不純物管理が高／低除染で同じであることを前提とする。

(e)　金属燃料

電中研の協力の下に進める。国産金属燃料については、カプセル照射にてANLで実施されていない照射条件を中心に挙動を確認しつつ、バンドル照射にて多数本の照射データを取得する。

(f)　窒化物燃料

FBRシステムの検討と整合をとり、検討を進める。ガス冷却及び鉛ビスマス冷却炉用の燃料仕様の概略は2001年度末までに決定し、2003年度まで設計検討を進め、被覆材の開発及び照射試験についての計画を具体化する。N-15*濃縮技術開発が当面の課題であり、2003年度末までに成立性の見通しを得る。なお、燃料要素の開発、再処理技術の検討については原研協力を活用していく。

(g)　被覆管材料等　（FBRシステムの「炉型共通の要素技術開発」と重複）

ODS被覆管、PNC-FMSラッパ管の性能実証を早期に進める観点から上記「(a)　簡素化ペレット」との組合せで照射試験を行う。

以上の展開を図る上では他機関との協力が不可欠である。具体的には金属燃料開発に関しては電中研及び原研、窒化物燃料開発に関しては原研との適切なる役割分担が必要である。

④ LLFP等の分離変換技術

LLFP等の分離変換技術に係る研究開発の第2期の5ヵ年計画を、図-117に示す。

核変換については、I、Tcに対し、第1期で抽出した実用化候補概念につ

いて核変換特性を評価し、化学的安定性を含め望ましいターゲット候補材の化学形態を評価、選定する。そのため、LLFP 化合物の基礎物性調査及び試験、核変換率向上のための減速材を含めたターゲットの具体化等の検討及び特性試験を行うとともに、核分裂生成物ターゲットの核変換特性評価を行う。

Cs に対しては、元素分離の範囲では、炉心での Cs-135 存在量を減少させる程度の核変換効果は期待できない状況であるが、さらに核変換効率改善のための高効率核変換集合体概念の検討を行い、環境負荷低減効果の有効性の可否を判断する。

また、Cs-137、Sr-90 は、分離保管した場合と一括廃棄処分との経済性比較を行う。

分離回収については、湿式再処理法を中心に、I に対しては、オフガスからの回収方法、Tc に対しては、溶解工程の不溶解残さ*、抽出残液からの回収方法、Cs、Sr に対しては、高放射性廃液からの回収プロセスの調査研究を行う。検討にあたっては、ターゲット材の有望な化学形態を念頭に技術開発を行う。

第 2 期終了時点にて、各核分裂生成物の分離変換の技術的成立性、経済性評価を実施し、開発継続の可否を判断する。

⑤ FBR サイクルの統合・評価

FBR サイクルシステム技術の統合・評価に係る第 2 期計画の年度展開を図-118 に示す。総合評価に関しては下記の（a）～（d）の 4 項目、戦略情報管理システムの構築に関しては下記の（e）～（f）の項目等を計画しており、各実施項目の概要は以下の通りである。

(a)　FBR サイクル戦略シナリオの検討

各種発電システムの技術的動向の進展調査及び社会・エネルギー情勢の変化に関する調査・研究を実施し、幅広い原子力の利用可能性を考慮した視点からの FBR 導入シナリオを構築し、FBR 導入の意義及び目標設定に資する。また、第 2 期における各候補概念の設計状況の進捗を受けて、各概念の導入シナリオを明確にする。

(b)　投資対効果評価法の開発・整備

各種電源導入量予測や環境影響評価を行うエネルギーモデルに関する調査を行い、投資対効果評価システムの入力情報の精緻化を図るとともに、諸量評価手法、多面的評価手法との連携を図り、将来の FBR 導入シナリオに応じた多面的な視点からの FBR 導入効果を定量的に算出する手法（総合評

価システム）を検討する。

(c)　FBR サイクルの達成度評価

FBR サイクルシステムの総合的な達成度を評価するため、物質収支の定量化とともに経済性、環境負荷等の幅広い視点で特性評価が可能な諸量評価解析コードシステムの開発・改良を実施するとともに、他電源との比較評価への適用の観点から評価指標の見直しを行う。

(d)　多面的評価法の開発・整備

達成度評価を判断する多面的評価法の改良を図るとともに、外部コスト、リスク評価等の調査を行い、価値、恩恵及び損失を物理的な次元に換算して評価する方法について検討し、第 2 期における中間及び最終評価に反映する。

(e)　FBR サイクルデータベースの開発整備

他電源の技術動向や経済性、環境問題関連の文献情報を集約する FBR サイクルデータベースの運用・改良を行いつつ、随時最新情報を収集・登録し、戦略シナリオ検討に資すると同時に、Web での運用による情報共有、経済性関連のコスト情報をとりまとめた経済性データベース等の他データベースとの連携を図る。

(f)　戦略情報管理システムの開発・整備

炉心・燃料、原子炉、再処理、燃料製造の設計情報を円滑に伝達するデータフローシステム（新概念検討支援システム）、ネットワーク環境下の情報サーバに直接アクセスして、サイクルの物質収支、目標達成度、開発シナリオ等の評価データをオンライン収集するとともに、経済／環境／社会的なニーズ及び情勢を勘案したサイクルの実現性を検討し、意思決定のための判断材料を提供するシステム（立証性検討支援システム）を構築する。

6.3 第2期の実施体制と国際協力の展開

(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）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を強化する。

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) 第2期で利用する施設・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。

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。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」での照射及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。

(3) 国際協力の展開と今後に向けた研究開発施設等の整備計画

① 第2期の方針

(i) 国際協力

海外が知見を有する分野、研究開発を行っている分野（加速器駆動炉での鉛ビスマス冷却等、FBRサイクルの分野でなくとも我が国の活動と共通な技術開発を行っている場合を含む）について、我が国にメリットがある場合は、積極的に協力を進める。

我が国はFBRサイクル開発のトップランナーとなることを目指しているが、燃料・材料照射、過渡試験等を行う研究用原子炉や、再処理、燃料製造

等の研究開発を行うホットセルが不十分である。しかし、施設の整備に大きな予算と長い期間を割くことは困難であり、前述の通り、限定した整備に留める必要がある。したがって、海外に既存施設がある場合には、これらを有効に活用する方策を検討する必要がある。具体的には、燃料安全（燃料過渡挙動）や炉心安全（再臨界回避概念等）に係わる試験を行う安全性試験炉に関しては、海外の施設を有効に活用していくことが重要である。

仏国とはJNC/CEA間の先進技術協力の枠組みでの協力を、米国とはJNC/DOE間の原子力技術協力に関する取り決めの枠組みでの協力を、ロシアとは日露FBRサイクル協力の枠組みでの協力を継続するとともに、その他、必要に応じて個別の契約を締結し、協力を進める。

また、Gene-Ⅳ等への協力を通して、FBRサイクルの実現に向けての基礎作りを進める。

(ii) 研究開発施設等の整備

近年、海外のFBRサイクルの研究開発活動が停滞していることから国際協力に多くを期待することは難しく、基本的には我が国での研究開発を基本にした計画とする必要がある。また、FBRサイクルの実用化に当たっては、実験データに基づき、革新技術の成立性を着実に確認するとともに、製作技術を確立する過程が必要となる。したがって、必要最低限の国内研究開発施設の整備が不可欠である。FBRサイクルの研究開発に割ける予算が限定されることに考慮すると、以下のいずれかの条件を満足する施設についてのみ整備することが望ましい。

- 国内で技術蓄積を行うことが不可欠な分野
- 実用化候補概念の成立性を決する課題で海外施設を活用した研究開発が困難な分野

なお、施設の整備には、予備的な検討期間を含めて長期にわたる時間を要することから、リサイクル機器試験施設（RETF）の活用計画等について、第2期の段階から検討を進め、2003年頃を目途にまとめる。

② 第2期で実施する各分野の国際協力及び研究開発施設の整備

(i) FBRシステム

FBRシステムの技術開発に関しては、これまでの技術開発により我が国には高速炉の基本的な技術ノウハウは他国と比較しても相当に高いレベルの蓄積がなされてきており、今後の技術開発はこれらの国内の技術力と研究開発施設を駆使しつつ国際協力を戦略的に活用して、技術・情報の共有化や研究開発協力による補完効果を高めることが肝要である。

また、現在の国際的な高速炉開発の環境は必ずしも活発ではないため、今後は具体的な交流・協力レベルで段階的に開発の分野と土俵を広げ、相互の関係技術の開発の方向性を共通化することによって、実質的な協力のメリットを拡大していくことが重要である。

以上のような観点から、本研究の第2期においては、国際協力の進め方として、

- 本研究において導入または開発の対象となる新技術や機器開発に関する課題
- 海外の既存施設を利用することによって、早く成果が得ることができるか、あるいは、将来的に長期の共同利用が期待できる試験研究や照射試験
- 特定の技術経験やノウハウ補完に有効な課題研究開発
- 高速炉開発戦略の共有化に効果的な協力

を基本的な狙いとして、以下の分野について技術交流及び研究協力を推進あるいは検討していく予定である。

(a) 炉心燃料の開発

炉心燃料の高燃焼度達成の早期確認を目的にロシアの高速炉BOR-60によるODS被覆管の燃料要素（MOX振動充填燃料）の照射試験を開始する。本試験によって、高燃焼度化に伴う被覆管の内面腐食等のデータを得、国内で実施する炉外の材料強度試験及び「常陽」での被覆管材料照射の結果と併せて、総合的な燃焼挙動と材料の成立性を早期に見通すことが可能となる。

また、新型燃料（金属及び窒化物燃料）については、炉心性能及び安全性向上に期待される基本特性の確認が概念の有効性判断にクリティカルな課題のひとつであり、海外の炉内試験施設を用いた燃料要素レベルの過渡照射試験の実施方策について検討を行う。海外候補施設としては米国のTREAT炉等を対象に今後試験計画及び研究協力の検討と交渉を進める予定である。

また、過渡試験炉を利用する炉内試験は、システム概念の設計の進捗段階に応じて今後中長期的に必要度を増していくため、海外施設の利用については、国際的な研究開発施設の観点から中長期的な利用を視野に開発計画に取り入れる。

(b) 安全性に関する技術開発

ナトリウム冷却炉及び共通の技術開発として、カザフスタンのIGR試験炉を用いた燃料溶融・流出移行の炉内試験を実施し、大型高速炉における再臨界回避機能の原理確認を行う。この試験結果は、国内における炉外試験

（MELT-Ⅱ）による融体挙動に関する基礎データと併せて、ナトリウム冷却炉の炉心損傷事象の炉内終息の成立条件の判断材料とするとともに、他の冷却材システムにおける安全機能との対比や第2期後に必要となる試験課題の優先度判断に役立てる。

(c) 重金属冷却炉の技術開発

重金属炉の技術開発については、鉛及び鉛ビスマスを用いた原子炉としてはロシアの高速炉開発を始め、欧米において発電炉のみならず廃棄物変換用の加速器ハイブリッド型炉を含めて多様なニーズに対応した開発検討が進められつつあるため、欧州、ロシア、米国との国際的な情報交流を重点的に行うことが有効と考えられる。ただし、それぞれの開発状況と技術的な狙いは必ずしも一様ではないため、ロシアのBREST高速炉開発、欧米のADS・ATW技術の進展動向を見定めつつ、本研究推進のメリットとなる材料腐食対策や伝熱流動等を重点とする研究協力を進める。また、システム評価に係わる情報交換、要素技術の共同開発の可能性及び鉛類を原子炉に適用する場合の安全性や環境対策に関する考え方の共有化等の可能性についても検討を進めていく。

(d) ガス冷却炉の技術開発

ガス冷却高速炉に関しては、仏国を中心に欧州においても概念検討や技術開発が始められているため、今後の検討においては、仏国（CEA）と開発戦略や評価技術及び新型の燃料（被覆粒子型燃料等）の開発についての研究協力の可能性を含めて情報交換及び技術交流を進めていく。

(e) その他技術交流等

小型炉の技術開発については、海外において水やガス冷却による熱炉を中心に開発研究が進められているため、新型炉開発に関する国際会議等の機会を利用して情報交換を行うとともに、海外の主要な研究開発機関との交流チャンネルを通じて高速炉開発に有望な技術については常に最新の情報把握に努める。また、GEN-IV等の国際的な活動に関しては、新型炉技術の情報交流及び、関係機関の高速炉サイクル技術のインセンティブ拡大に繋げる場として活用していく。

研究開発施設の整備に関しては、第2期においては国内外の関係機関のものを含めて既存施設を最大限に利用する範囲において基礎的な試験及び解析データに基づき候補概念の成立性や狙いとする性能を引き出すための基本特性の確認に重点を置く。このため、本研究に必要とする新たな試験について

は小規模な改造程度に留め、機動的な施設運用とデータの早期取得に努めるため、特段の新規の研究開発施設の建設整備は考えない。

一方、第3期以降においては、絞り込んだシステム概念についての本格的な試験実施が必要となると考えられるため、第2期においては2003年の中間評価の結果を吟味しつつ2003年以降は主に第3期以降の計画について具体的な検討を行い、重点実施課題を明確にするとともに、燃料の照射試験、安全性試験、構造・流動の工学試験等の長期開発展開を含めて施設の利用及び整備計画を第2期末に検討成果と併せて提案する。

(ii) 燃料サイクルシステム

(a) 再処理技術

湿式再処理法

東海事業所内CPFは従来より継続していた改造が2001年度末までに終了し、先進湿式法のホット基礎試験を行うエリアとして活用できる。このため、海外に研究開発の場を求める必要性は小さくなる。

乾式再処理法

酸化物電解法についてはMOX共析を含む技術成立性の確認が最優先課題である。このためRIAR施設の有効活用が必須であるが、RIAR側の都合から2001～2002年度はプルトニウムを用いた模擬試験を行い、その後ホット基礎試験を実施していくことが考えられる。この展開に関してはJNCと電気事業者との役割を明確にして取り組んでいく。一方、並行してCPFにプルトニウム試験を遂行するためのグローブボックスを設置し、2003年度以降、RIARで得られた情報を参考にしつつ、基礎データの充実に向けた試験に供する。

金属電解法については電中研が進めているITUとの共同研究を活用するとともに、2001年度中にCPFにプルトニウム試験用グローブボックスを設置し、2002年度以降、基礎試験を進める。

フッ化物揮発法については、ロシアの開発状況を的確にとらえ、2003年度末を目途に開発展開を決めることとし、当面、インフラ整備は行わない。

RETF利用計画検討

実用化技術の絞り込みには工学規模の試験が必要である。2003年度頃を目途に以下の基本方針のもとにRETF利用計画をとりまとめ、関係機関のレビューを受ける。

・ 乾式法及び湿式法による2方式のリサイクル技術に関する工学規模

の試験を実施する。
- 技術の絞り込みや改良に必要となるデータを得るための試験設備の設置に関する検討を行う。

(b) 燃料製造技術

ペレット燃料製造法

基本的にサイクル機構内の施設の活用により開発を進める。低除染－TRU含有燃料の製造条件の確認及び物性測定等はホットラボ内で行うため、大洗工学センター照射燃料試験施設（AGF）に所要の試験装置を整備する。

振動充填燃料製造法

第1期よりスイスPSI及びオランダNRGとの共同研究として、ゲル化による顆粒製造及び振動充填試験並びに得られた燃料ピンの照射/照射後試験に関するプログラムが2004年度末までの計画で展開されている。Np-MOX系も試験対象となっており、湿式再処理と整合する製造技術に関する知見が得られる。一方、国内においてはウラン試験により工業規模での顆粒製造に関する知見を得るための装置開発を進める。

酸化物電解法に適合する振動充填技術の開発については、電気事業者による委託試験や解体プルトニウム処分計画等の枠組みも利用して進めることとする。前者では2003年度までの計画としてリサイクルされたMOX燃料の照射試験をBOR-60で進めており、また後者では今後、BN-600等での照射データが得られる。

鋳造燃料製造法

射出成型法については電中研との協力を基本とし、再処理技術（金属電解法）と歩調を合わせ、原研施設の利用も視野に入れて、開発を進める。遠心鋳造法については2003年度末までに開発展開を決めることとし、当面、インフラ整備は行わない。

(iii) 燃料開発

燃料開発に必要なインフラとしては燃料製造施設、照射施設、照射後試験施設が上げられる。

燃料製造に関しては上述のとおりである。

照射施設としては、「常陽」の活用が必須であり、また将来的には照射試験体の規模の増大とも関連して「もんじゅ」の利活用を模索していく。一方、燃料サイクル技術との関連で海外の照射施設を利用することも必要となる。

ロシアのBOR-60やBN-600、オランダのHFR等の利用を考えている。

またフランスCEAとの協力を活用して先進燃料（マイナーアクチニド*入り、窒化物燃料等）やLLFPの分離核変換、ODS鋼の照射特性などについての試験研究を進める。

(4) アイデア公募

第1期同様、第2期の調査研究実施にあたっても、柔軟な発想に基づく独創性、創造性に富んだ革新的概念を創出する観点から、大学を始めとする研究者から広く革新的技術アイデアを募集する。FBRサイクルに関するシステム技術または要素技術に関連し、公募対象は以下の分野としている。

① 第1期で抽出された炉、燃料サイクルの実用化候補概念（以下、第1期抽出概念）について、さらに、独創性、創造性に富み、ブレークスルーが図られる革新的技術であり、開発目標である安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性の観点から有効なもの。

② もしくは、第1期抽出概念を、上記開発目標に照らし凌駕可能と思われる革新的技術。

6.4 資金計画

第2期の資金計画を表-14に示す。第2期の初年度である2001年度の認可予算額、2002年度の資金計画（予定額）を、分野ごとに整理して示している。2001年度以降は、第1期と比較して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290億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）。

7. 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、研究の進捗に合わせてインターネットを含む各種広報媒体や国の委員会及び国内外の専門家会議や学会発表等を通じて、図-119 のとおり公表した。

また、特許については、表-15 に示すように現在 17 件の登録の申請又は計画をしているところである。

8. 措置事項の対応状況

2000 年度の課題評価(中間評価)の際に頂いた技術的観点での指摘に対しては、計画書に反映したほか、今後、研究計画を進めていく上で考慮すべき 7 項目の措置をとることとした。

(1) 研究の目的・意義と開発目標

21 世紀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、本研究の目的、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し、今後、これらの情勢が変化することになれば、適宜目標の見直しを行い、柔軟な計画運用を心がけて研究を進めることとしている。

また、「安全性」は原子力システムのみならず全ての工学システムが成立し、受容されるための大前提であるとともに、我が国において FBR サイクルが導入されうる必要条件としては、導入時点において他エネルギー源とのコスト競争に打ち勝つことであり、「経済性」の克服が第一の要点と考えて本研究を進めてきた。さらに、将来社会の FBR サイクルを取り巻く状況並びに FBR サイクルの魅力の分析から、その実用化のために考慮すべき視点として、地球生態環境との一層の調和を図るための「環境負荷低減性」などが重要であり、TRU 燃焼や長半減期 FP*の核変換については要素技術開発と連携をとりながら段階的に実用化に取り組んでいくこととしている。

(2) FBR サイクルの実用化候補の絞り込み

第 1 期における実用化候補概念の技術抽出に当たっては、比較評価により候補技術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の開発課題の解決方法、開発工程等に大きな問題がないかなどを評価し、開発目標の達成の見通しが乏しい技術のみを候補から外すことを基本方針とした。

したがって、FBR システム及び燃料サイクルシステムの概念検討では、各技術に関して技術的成立性及び設計要求に対する適合性の評価を行い、さらに FBR サイクルとしての整合性、国際協力の可能性等を総合的に勘案して、

第2期で検討を行う技術の抽出を行った。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とともに検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるよう留意した。

(3) 総合的な評価手法

第1期では、総合評価手法開発の第一段階として、抽出されたFBRサイクル概念を比較するための指標を設定し、各候補技術に対して指標に対する達成度を算出することにより、評価指標の適用性や相互関係を確認した。

第2期では、経済性、資源有効利用性及び環境負荷低減性について定量評価を行う際の満足度や影響度等の設定値の充実を図るとともに、核拡散抵抗性については定量化方法の検討や技術的実現性について開発リスクの評価や投資対効果評価手法の導入を検討する。また、FBRサイクルに対する多様なニーズを多面的な視点から評価する手法を検討するなど評価手法の開発を継続し、実用化候補概念の絞り込みを行う際の1つの判断材料として活用することとする。

(4) 第2期の研究計画の策定

FBRサイクル実用化に向けた技術体系の整備を進める上での第2期の位置付けを設定し、第2期の終了時点及び第2期途中のマイルストーンとしている3年目で得るべき成果を明確にした上で、第2期の研究計画の検討を深めた。

(5) 研究実施体制

第2期では、第1期で抽出した有望概念あるいは技術選択肢の比較評価を定量的に実施できるレベルまで設計研究等を深め、成立性評価に必要な要素技術開発を進めることに重点をおいている。このため、プロジェクト会議の下に、新たに炉・燃料サイクル調整会議、炉システム会議及び燃料サイクル会議を設置し、事業所間、部門間にまたがる開発計画の調整、成果の評価を横断的に行うこととする。また、炉システム及び燃料サイクルシステム開発に関しては、その主要な技術選択肢毎に検討会を設置し、関係部門の専門家が総力を挙げてプロジェクト的に取り組むこととしている。

(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とすべく、設計にあたっては、既存設計からの飛躍的な向上を期すため、従前の知見にとらわれることなく、アイデア公募やメーカ提案等の新規情報を積極的に活用するとともに、サイ

クル機構の経営方針に則り、自らの創意工夫を最大限発揮し、わが国独自のアイデアを生かし、ブレークスルーを図ることに努めている。

また、第２期においても、第１期と同様、独創性、創造性に富んだ革新的アイデアを広く開拓する観点から、国内外の大学、研究機関を対象にアイデア公募を実施している。(2001年５月案内の送付並びにインターネットにより募集開始、８月中に募集結果の公表予定)

(7) 得られた成果の公開

第１期の終了並びに第２期の開始にあたって、本研究の目的や実施内容及び第１期の成果や第２期の研究計画の概要等について、一般の方々を対象としたパンフレットを作成するとともに、広報用のスライドビデオや第２期におけるアイデア公募のための英文パンフレット等を作成、配布した。

また、第１期の最終報告書につきましては、今回の研究開発課題評価委員会の評価結果を反映した上で公表すべく、準備中であり、合わせてインターネットでの成果の公開並びに一般の方々を対象とした、分かり易さに配慮した小冊子等を準備している。

9. その他特記すべき事項

(1) 本研究開発計画については、再度、2003年頃、研究開発課題評価委員会に、第２期の中間評価として、諮問することとしている。

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究

【添付図表】

図表一覧表

表-1　FBR システムの検討対象----------添- 1
表-2　ナトリウム冷却炉におけるシステム改善策----------添- 2
表-3　再処理　第１期の成果と課題----------添- 3
表-4　燃料製造　第１期の成果と課題----------添- 4
表-5　FBR サイクルの主な整合性検討結果----------添- 5
表-6　FBR システム技術の評価結果----------添- 6
表-7　燃料サイクルシステム技術の評価結果----------添- 7
表-8　第１期の評価指標----------添- 8
表-9　評価手法と判断のめやす----------添- 9
表-10　FBR サイクルの主な組合せと設計情報----------添- 10
表-11　評価指標の相互相関----------添- 11
表-12　各ステップの研究開発目標と研究内容----------添- 12
表-13　各ステップにおける主要な研究開発成果----------添- 13
表-14　第２期の資金計画----------添- 14
表-15　特許出願状況----------添- 15
図-1　FBR サイクル実用化戦略調査研究の研究開発ステップ----------添- 16
図-2　第１期の検討の進め方----------添- 17
図-3　実用化戦略調査研究における研究実施体制----------添- 18
図-4　FBR サイクルの開発目標----------添- 19
図-5　FBR サイクルの整合性に関する基本的な考え方----------添- 20
図-6　FBR サイクルの主な設計要求----------添- 21
図-7　ナトリウム炉の経済性追求概要----------添- 22
図-8　ナトリウム冷却大型炉の検討の流れ----------添- 23
図-9　ナトリウム冷却大型炉の検討の進め方----------添- 24
図-10　大型ナトリウム冷却ループ型炉（アドバンスト・ループ型炉）
の検討結果----------添- 25
図-11　ナトリウム冷却大型炉の主要機器物量の比較----------添- 26
図-12　ナトリウム冷却ループ型炉の建屋内配置
及び冷却系の鳥瞰図-----添- 27
図-13　ナトリウム－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- 28
図-14　二次系簡素化概念の検討結果----------添- 29
図-15　ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討の流れ----------添- 30
図-16　ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討の進め方----------添- 31

図-17　ナトリウム冷却中型ループ型モジュール炉の
建屋内配置鳥瞰図 --------添- 32
図-18　ナトリウム冷却炉心の検討の流れ----------添- 33
図-19　ナトリウム冷却における有望な再臨界回避方策----------添- 34
図-20　ナトリウム酸化物燃料大型炉炉心（酸化物燃料）----------添- 35
図-21　ナトリウム冷却大型炉心（金属燃料）----------添- 36
図-22　TRU の燃焼と炉心性能の関係
（ナトリウム冷却酸化物燃料大型炉心）-----添- 37
図-23　ナトリウム冷却中型炉心----------添- 38
図-24　重金属冷却炉の検討の流れ----------添- 39
図-25　鉛ビスマス冷却自然循環炉概念図----------添- 40
図-26　鉛ビスマス冷却中型タンク型モジュール炉の建屋内配置
及び冷却系の鳥瞰図 -----添- 41
図-27　鉛ビスマス冷却炉心の検討の流れ----------添- 42
図-28　鉛ビスマス冷却中型自然循環炉心
（窒化物燃料）の炉心仕様 -----添- 43
図-29　ガス冷却炉の検討の流れ----------添- 44
図-30　炭酸ガス冷却炉検討結果----------添- 45
図-31　炭酸ガス冷却炉心の検討の流れ----------添- 46
図-32　炭酸ガス冷却大型炉の炉心仕様（酸化物燃料）----------添- 47
図-33　ヘリウムガス冷却型炉（被覆粒子型燃料）検討結果----------添- 48
図-34　ヘリウムガス冷却炉（被覆粒子型燃料）の建屋内配置
及び冷却系の鳥瞰図 --------添- 49
図-35　He ガス冷却炉心の検討の流れ----------添- 50
図-36　ヘリウムガス冷却高速炉炉心の炉心仕様（窒化物燃料）----------添- 51
図-37　ヘリウムガス冷却炉（耐熱被覆管型燃料）の検討結果----------添- 52
図-38　水冷却炉の検討の流れ----------添- 53
図-39　BWR 型 FBR（高転換比 BWR 型炉）の検討結果----------添- 54
図-40　BWR 型 FBR の炉心・燃料集合体概念図----------添- 55
図-41　PWR 型 FBR（高転換比 PWR 型炉）の原子炉構造----------添- 56
図-42　PWR 型 FBR の炉心仕様・燃焼特性----------添- 57
図-43　超臨界圧水冷却高速増殖炉の検討結果----------添- 58
図-44　超臨界圧水冷却高速増殖炉の炉心配置図
及び燃料集合体断面図 --------添- 59
図-45　溶融塩炉の検討の流れ----------添- 60
図-46　塩化物溶融塩炉検討結果----------添- 61

図-47　小型炉の導入のニーズと設計要求----------添- 62
図-48　小型炉概念の検討の流れ----------添- 63
図-49　小型炉の炉心特性「高富化度差二領域炉心」の特徴----------添- 64
図-50　ナトリウム冷却小型タンク型自然循環炉の概念----------添- 65
図-51　ナトリウム冷却小型ループ型準強制循環炉の概念----------添- 66
図-52　鉛ビスマス冷却小型タンク型自然循環炉の概念----------添- 67
図-53　鉛ビスマス冷却小型炉の建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図----------添- 68
図-54　気相吸着法による窒素同位体濃縮----------添- 69
図-55　建設コスト算定の考え方----------添- 70
図-56　各炉概念における主要物量の比較----------添- 71
図-57　各炉概念における概略建設コストの比較----------添- 72
図-58　燃料サイクルシステムの検討の視点----------添- 73
図-59　燃料サイクルシステムの検討評価の進め方----------添- 74
図-60　先進湿式法（酸化物燃料）プラント概念検討結果----------添- 75
図-61　湿式法代替補完技術（酸化物燃料）プラント概念検討結果 ------添- 76
図-62　酸化物電解法（酸化物燃料）プラント概念検討結果----------添- 77
図-63　金属電解法（酸化物燃料）プラント概念検討結果----------添- 78
図-64　金属電解法（金属燃料）プラント概念検討結果----------添- 79
図-65　フッ化物揮発法（酸化物燃料）プラント概念検討結果----------添- 80
図-66　簡素化ペレット法（酸化物燃料）プラント概念検討結果----------添- 81
図-67　振動充填法（湿式再処理と整合する粒子製造）
プラント概念検討結果 -----添- 82
図-68　振動充填法（乾式再処理と整合する粒子製造）
プラント概念検討結果 -----添- 83
図-69　鋳造法（金属燃料）プラント概念検討結果----------添- 84
図-70　経済性評価結果----------添- 85
図-71　燃料サイクルシステムのコストダウンへのアプローチ----------添- 86
図-72　TRU リサイクルの考え方と組成----------添- 87
図-73　低除染燃料製造上の影響----------添- 88
図-74　低除染 TRU リサイクルの課題と対応方策----------添- 89
図-75　コロケーションプラントの概念図----------添- 90
図-76　FBR サイクル技術の総合評価----------添- 91
図-77　経済性　[発電単価に対する炉型の影響]に関する試算結果--------添- 92
図-78　経済性　[発電単価に対する炉心構成の影響]に関する試算結果 -添- 93
図-79　各炉型における増殖比とシステム倍増時間の関係----------添- 94
図-80　発電単価に対する入力値の感度----------添- 95

図-81　資源有効利用性に関する試算結果----------添- 96
図-82　環境負荷低減性に関する試算結果----------添- 97
図-83　安全性の評価構造と検討結果----------添- 98
図-84　21 世紀社会の展望と FBR 導入シナリオ----------添- 99
図-85　FBR の導入に関するケーススタディ----------添-100
図-86　FBR による水素製造利用の検討----------添-101
図-87　FBR サイクル開発の方向性----------添-102
図-88　FBR システム開発のフェーズ毎の展開----------添-103
図-89　FBR システム技術の絞込みと技術レベルの向上----------添-104
図-90　燃料サイクルシステム開発のフェーズ毎の展開----------添-105
図-91　燃料サイクル技術の絞込みと技術レベルの向上----------添-106
図-92　実用化戦略調査研究の第 2 期の展開----------添-107
図-93　第 2 期計画　[ナトリウム冷却炉の主要な R&D]（1/3）---------添-108
図-94　第 2 期計画　[ナトリウム冷却炉の主要な R&D]（2/3）---------添-109
図-95　第 2 期計画　[ナトリウム冷却炉の主要な R&D]（3/3）---------添-110
図-96　第 2 期計画　[鉛ビスマス冷却炉の主要な R&D]----------添-111
図-97　第 2 期計画　[ガス冷却炉の主要な R&D]（1/2）----------添-112
図-98　第 2 期計画　[ガス冷却炉の主要な R&D]（2/2）----------添-113
図-99　第 2 期計画　[水冷却炉の主要な R&D]----------添-114
図-100 第 2 期計画　[小型炉の主要な R&D]----------添-115
図-101 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（炉心・燃料）の主要な R&D]（1/3）----------添-116
図-102 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（炉心・燃料）の主要な R&D]（2/3）----------添-117
図-103 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（炉心・燃料）の主要な R&D]（3/3）----------添-118
図-104 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（プラントシステム）の主要な R&D]（1/3）---添-119
図-105 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（プラントシステム）の主要な R&D]（2/3）---添-120
図-106 第 2 期計画
　　[炉型共通技術（プラントシステム）の主要な R&D]（3/3）---添-121
図-107 第 2 期計画　[先進湿式法再処理の主要な R&D]（1/2）----------添-122
図-108 第 2 期計画　[先進湿式法再処理の主要な R&D]（2/2）----------添-123
図-109 第 2 期計画　[酸化物電解法再処理の主要な R&D]（1/2）-------添-124
図-110 第 2 期計画　[酸化物電解法再処理の主要な R&D]（2/2）-------添-125

図-111 第2期計画 [金属電解法再処理の主要なR&D]（1/2） ----------添-126
図-112 第2期計画 [金属電解法再処理の主要なR&D]（2/2） ----------添-127
図-113 第2期計画 [ペレット法燃料製造の主要なR&D]----------添-128
図-114 第2期計画 [振動充填法燃料製造の主要なR&D]----------添-129
図-115 第2期計画 [鋳造法燃料製造の主要なR&D]----------添-130
図-116 照射試験の考え方----------添-131
図-117 第2期計画 [LLFP分離・核変換の主要なR&D]----------添-132
図-118 第2期計画 [システム技術の統合・評価]----------添-133
図-119 成果の公開・発表状況----------添-134

表-1 FBRシステムの検討対象

原子炉型＼燃料形態				固体燃料					液体燃料
				被覆管燃料			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, Pb-Bi)			○	○	○			
ガス冷却	大型炉	(CO_2)	蒸気タービン発電	○	○	○			
		(He)	蒸気タービン発電	○	○	○			
			ガスタービン発電	○		○	○	○	
	中小型モジュール炉(He)			○		○	○	○	
水(重水)冷却				○					
液体燃料による冷却									○

(注) ○は、検討対象を示す

表-2 ナトリウム冷却炉におけるシステム改善策

設計要求(課題)	解決方針	課題解決方策
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 ・蒸気発生器/ポンプ の機器合体による系統コンパクト化
ループ数の削減	・冷却系機器及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 ・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IHXによる炉内配置効率の向上(タンク型のみ) 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	・切り欠き式炉心上部機構 ・単回転プラグの採用 による燃料取扱構造のコンパクト化
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	・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
伝熱機器、容器の縮小	・伝熱性能に優れる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
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及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	・受動的な炉停止及び崩壊熱除去 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
ナトリウムー水反応対策の向上	・ナトリウムー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,リピ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-3 再処理 第1期の成果と課題

サイクル技術		成果	課題
湿式	先進湿式法	○200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し ○実験室規模のホットデータから99%以上のTRU回収率確保を確認 ○先進湿式プロセス(簡素化溶媒抽出法、晶析、TRU回収)の技術的成立性を評価 ○代替・補完法による定量的なコストダウン効果を評価 ・超臨界流体直接抽出法による一部代替で一層の経済性向上の見通し ・アミン抽出法、イオン交換法によるMA回収工程の簡略化の可能性 ○窒化物燃料に対しては酸化転換等、新たな設備対応が必要なものの、主工程は酸化物燃料と同等であると評価	○プロセス上の課題に対するCPFホット基礎試験による確認 ○代替・補完技術の組合せも含め、更なるコスト低減の可能性の追求と最小処理容量の評価 ○代替・補完技術の安全上の課題に対するシステム上の対応策の検討 ・超臨界流体直接抽出法におけるセル内高圧操作 ・アミン抽出法における原子価調整法の最適化 ・イオン交換法における樹脂の安定性、ニトロ化 ○経済性向上に寄与する高性能機器の開発
乾式	酸化物電解法	○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○RIARでのホット試験データと電解の理論計算により99%以上のTRU回収率を確保可能 ○RIARの試験施設における主要機器については、実用化規模を見通せる試験実績を確認し、今後のプロセスの改良・高度化等の課題に対応可能であると評価 ○新型燃料への適用性について、プロセスの複雑化、窒化転換の困難さ等の問題点があると評価	○摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○MOX電解共析技術へのFP影響の要素試験による確認 ○電解によるMA回収等の要素試験による確認 ○溶解るつぼ(約1000時間と評価)の更なる寿命延長 ○リン酸ガラス固化体、白金族合金廃棄体等の新形態HLW処分に向けた検討 ○高温(～650℃)・バッチ操作に伴う容器開放操作等に対するバウンダリ確保方策の検討
	金属電解法	○200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○ANLでのホット試験データと還元抽出工程の付加により99%以上のTRU回収率を確保可能 ○ANLの試験施設における主要機器については、実用化規模を見通せる試験実績を確認し、今後のプロセスの改良・高度化等の課題に対応可能であると評価 ○窒化物燃料に対しても、元来金属燃料用に開発されたプロセスであり、工程を付加することにより対応可能であると評価 ○金属燃料へ適用した場合、50tHM/年、200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し	○摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○塩浴塩素化法、Li還元法に対する実証試験による確認 ○白金族合金廃棄体、人口鉱物固化体等の新形態HLW処分に向けた検討 ○高温(電解～500℃、塩蒸留～900℃)・バッチ操作等に伴う容器開放操作に対するバウンダリ確保方策の検討
	フッ化物揮発法	○50tHM/年、200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し ○ANL、原研等でのホット試験とMA回収の理論的検討により、99%以上のTRU回収率を確保可能と評価 ○PuF6の分解回避方策案を摘出 ○新型燃料への適用性について、工程の付加が必要であるが対応可能であることを確認	○摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○ PuF6の分解回避対策の工学規模での確認(なお、国内外における試験フィールドが未整備) ○MA回収試験による成立性確認 ○MA回収時の蓋開放操作に対するバウンダリ確保方策の検討

表-4 燃料製造 第1期の成果と課題

サイクル技術		成果	課題
ペレット	簡素化ペレット法	○200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し ○低除染燃料での遮蔽、発熱対策は、セル内配置及び冷却設備設置により対応可能であることを確認 ○窒化物燃料炭素熱還元後の粉砕・造粒工程が不可能となるため、簡素化ペレット法の工程簡素化の特徴を活かすことができない	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○低除染燃料集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発 ○窒化物燃料製造におけるN-15濃縮技術の検討
振動充填	湿式ゲル化法	○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○炭素熱還元することにより窒化物燃料が得られることを確認	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○低除染燃料集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発
	酸化物電解法対応	○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○RIARで、リサイクル燃料も含めての多数の製造・照射実績があり、技術的成立性が高いと評価 ○窒化物燃料への適用は、プロセスが複雑になり、困難であると評価	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○酸素ゲッターあるいはそれに変わる技術の開発 ○低除染燃料集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発
	金属電解法対応	○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○金属電解法を酸化物燃料のリサイクルに適用したプロセスの成立性の見込みを得た ○陰極に生成した金属燃料に窒素ガスを直接吹き込むことで窒化物粉末を直接得られることを確認	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○転動造粒法による高密度顆粒製造条件の確認 ○低O／M比燃料製造技術の開発 ○低除染燃料集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発
	フッ化物揮発法対応	○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○U、Pu混合フッ化物から十分な密度の顆粒が得られることを確認 ○炭素熱還元することにより窒化物燃料が得られることを確認	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○均一なPu分布を得る顆粒製造条件確立の検討（なお、国内外における試験フィールドが未整備） ○低除染燃料集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発
鋳造	射出成型法	○ANLでの製造実績があり技術的成立性は確認済み ○ 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○鋳型廃棄物の再利用によるHLW廃棄固化体の製造試験の実施 ○低除染燃料製造における遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発
	遠心鋳造法	○200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出 ○ 2元系でのPuと鋳型材料の共存性について問題ないことを確認	○経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求 ○臨界安全性、装置の回転安全性等大型化に対する課題の解決方策の検討 ○ 3元系でのPuと鋳型材料の共存性の確認 ○低除染燃料製造における遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発

表-5　FBRサイクルの主な整合性検討結果

項目	第１期での検討結果
燃焼度	○高燃焼度化（炉心平均で15万MWd/t程度）を達成するには、高燃焼度・高照射量に耐える被覆管（ODSフェライト鋼）の開発、燃料照射データの蓄積、燃料安全性試験データの取得など、燃料自体の開発に係る多くの課題がある。 ○再処理では高燃焼度にともなう溶媒や溶融塩の耐久性低下やPu富化度の増大による不溶解残渣の発生、燃料製造では前述の被覆管材料の開発に加えて、燃料被覆管の酸化腐食対策としてのO/Mの低減が主な整合性判断のポイントとなる。
冷却期間	○冷却期間（4年）の短縮は放射線強度の大きな短寿命FPの自然崩壊を待たないため放射線量や発熱量が大きくなり、組立工程などでの燃料集合体の取り扱いの困難性や強制冷却対策の必要性が生じる。 ○また、自然崩壊があまり期待できないことによる実質的な除染係数の低下により、多重サイクルの平衡状態においてFP混入量が設計目標値（2wt%）を越える可能性も考えられ、これを再処理及び燃料製造施設の遮へいや発熱対策の強化で補うとすれば、建設費並びに操業費の増加要因となる。
MAリサイクル	○MA混入率（1～5wt%/HMと設定）については、特に、燃料製造に対するインパクトが大きく、従来の高除染MOX燃料に比べて、混入率1.2wt%/HMで約4倍（縦置き、自然冷却の条件での概略試算値で集合体表面温度220℃程度）、5wt%/HMで約7倍（同左490℃程度）の発熱量（Cmが支配的）となるので、強制冷却、発熱元素を分離保管する遅延サイクルなどの設計対策やサイクル全体としての整合性検討が必要と考えられる。
FP混入率	○FP混入率2wt%/HM程度であれば、燃焼度や増殖比に対する影響は数%以下、燃焼反応度に対して10%程度と、いずれも炉心設計の工夫で吸収可能な範囲であり、炉心特性に及ぼす影響は小さい。 ○また、燃料サイクルに対する放射線量や発熱量への影響は、前述のMA混入率の影響が支配的であり、低除染TRU燃料ではFP混入の影響は顕在化しないことが確認できた。
充填密度	○MOX炉心の設計条件として、炉心燃料に対してスミヤ密度が82%以上、ブランケット燃料に対して90%以上とした。 ○充填密度は燃料製造技術に依存してそれぞれの限界値が存在し、ペレット燃料製造では上記のスミヤ密度を満足できる見通しが得られているが、ゲル化法による振動充填法の実績では80%程度（2成分系）が上限といわれている。また、乾式再処理に対応した振動充填法については、高密度の燃料顆粒（98%TD程度）が得られる酸化物電解法及びフッ化物揮発法では82%程度は達成可能との見通しであるが、充填密度の軸方向分布などの不確かさを考慮すると条件的に厳しくなるので、充填密度の達成度や分布を実験により確認する必要がある。金属電解法に対応する転動造粒法では顆粒密度が95%TD程度なので、現状の充填密度（スミヤ密度）の実績としては78%程度が得られている。 ○充填密度については、O/M調整のための酸素ゲッターの添加等により向上することが期待されるので、今後の研究開発により確認する必要がある。 ○炉心設計における検討によれば、スミヤ密度が80%程度まで低下すると、増殖比の低下（0.05程度）や運転サイクルの短縮など、炉心性能に及ぼす影響が大きくなる。したがって、78%程度までのスミヤ密度を視野に入れて、炉心設計と燃料製造との整合性検討が必要となる。
Pu富化度	○運転サイクルや増殖比などについて所定の炉心性能を確保するには、核分裂性Puの原子数密度を大きくすること、すなわちPu富化度をある程度大きく設定することが避けられない。 ○酸化物燃料のPu富化度については、高Pu富化度燃料の硝酸溶解性や熱脱被覆時の粉砕性から、30wt%を上限として炉心設計しており、大型MOX炉心では28wt%程度と上限値を下回る結果が得られている。 ○Pu富化度については、今後の炉心設計の見直しにより上限値に対する余裕が小さくなる可能性があること、20～30wt%範囲の粉砕条件が未確認であることから、設定した上限値の妥当性を実験的に確認するとともに、富化度に対する余裕を確保した設計が望ましい。
増殖比及び増倍時間	○酸化物燃料炉心に比べ、窒化物及び金属燃料炉心は、重金属密度が高く、中性子スペクトルが硬くなるため、増殖比で約0.1～0.15増加し、それに対応して複利システム倍増時間も短くなる。 ○冷却材については、ナトリウム冷却炉に比べ、鉛ビスマス冷却炉は中性子スペクトルが硬いため、増殖比などの炉心特性上のメリットとなる。しかし、第１期では冷却系物量低減の観点から自然循環冷却方式を採用し、炉心圧力損失の低減を図るため流路面積を強制循環方式に比べ広くしているため、実効燃料体積比は強制循環方式の35%程度から20%程度に低下している。このため、重金属密度が高い窒化物燃料を採用しても複利システム倍増時間はナトリウム炉の2倍程度となった。ガス冷却炉は熱輸送能力が低いため、液体金属のような稠密な燃料ピン配置はできず、炭酸ガス冷却炉及びヘリウムガス冷却炉で、実効燃料体積比はそれぞれ25%及び30%程度となり、炉心特性はナトリウム冷却炉と大差ないものとなっている。また、被覆粒子型ヘリウムガス冷却炉では、実効燃料体積比はさらに小さく10%未満となるので第１期の開発目標とした増殖性能の達成は困難である。 ○燃料サイクルの観点からは、同じ増殖比であっても実効燃料体積比（出力密度）が小さいと炉心インベントリが増加する（すなわち、複利システム倍増時間が増加する）。このため、燃料サイクルの処理量が増加し、結果として燃料サイクル費や発電単価の増大につながる。 ○第１期では増殖比に対して1.2程度という目標値を設定したが、これを達成するためブランケット燃料量を多く装荷する傾向となり、炉心インベントリの増加と平均燃焼度の低下を招き、経済性に対しては燃料サイクル費の増大（発電単価の増加）、資源有効利用性に対しては複利システム倍増時間の増加（天然ウラン累積需要量の増加）となった。

表-6 FBRシステム技術の評価結果

A: 第2期で検討する技術、 B: 第2期では実用化戦略調査研究以外の国内外の研究をレビューし、再評価する技術、
C: A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術、－: 第1期での検討対象外の技術

対象技術		炉型評価結果	燃料形態の評価結果		
			MOX	窒化物	金属
Na炉	大型炉タンク型	B	A	B	A
	大型炉ループ型	A			
	中型モジュール炉	A			
重金属炉	大型炉	C	B	A	A
	中型モジュール炉	A			
ガス炉	CO_2ガス炉(ピン型)	A*	A*	A*	C
	Heガス炉(ピン型)	A*	A*	A*	C
	Heガス炉(被覆粒子型)	A*	B	A*	—
水炉	BWR型FBR	A	A	—	—
	PWR型FBR	A	A	—	—
	超臨界圧水型FBR	A	A	—	—
溶融塩炉		C	C [塩化物溶融塩]		
小型炉	Na炉	A	B	A	A
	重金属炉	A	B	A	A
	ガス炉	A*	A*	A*	—

＊ 2001年度にさらに検討の上、有望な実用化候補技術を抽出する予定。

表-7 燃料サイクルシステム技術の評価結果

A: 第2期で検討する技術、 B: 第2期では実用化戦略調査研究以外の国内外の研究をレビューするとともに他の技術とのハイブリッド化の可能性を検討し、再評価する技術、C: A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術、ー: 第1期での検討対象外の技術

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

表-8 第1期の評価指標

評価の視点	評価指標		
	一次指標	二次指標	三次指標
経済性	発電単価	資本費	減価償却費 事業報酬 固定資産税 廃止措置費
		運転維持費	人件費 修繕費 諸費 関連費
		燃料サイクル費	燃料製造費 燃料輸送費 再処理費 廃棄物処分費
		年間発電量	電気出力(送電端) 設備利用率
		耐用年数	
資源有効利用性	資源節約性	ウラン累積需要量	TRUインベントリー TRU利得 炉外滞在時間
	資源活用性	ウラン利用率	増殖比 燃焼度 ロス率
環境負荷低減性	固化・隔離	発生量	高レベル廃棄物 TRU深地中廃棄物 高βγ廃棄物 低レベル廃棄物
		放射性毒性	
	希釈放出	周辺被ばく線量	大気放出 海洋放出

評価の視点	評価指標		
	一次指標	二次指標	三次指標
核拡散抵抗性	内部因子	使用済燃料組成	放射能量 発熱量 核分裂性Pu比率
		Puの存在形態 Pu同位体組成 Pu製品混合性状 プロセス転用障壁 Pu持出容易性	
	外部因子	在庫管理容易性 在庫計量容易性 在庫確認容易性 核物質防護	
安全性	プラント安全性(設計基準事象の安全性)	安全設計方針 安全評価	
	炉心安全性(上記を超える事象の安全性)	炉心損傷防止 再臨界回避 事故後安定冷却・閉じ込め	
技術的実現性	成立性	技術レベル	
	開発投資	投資資金	

表-9　評価手法と判断のめやす

評価指標	評価手法と判断のめやす
経済性	発電単価は、資本費、運転維持費及び燃料サイクル費から構成される。それぞれ年あたり（あるいは1サイクルあたり）の発電経費を算出した後、原子炉の運開年に現在価値換算・合計し、同じく運開年に現在価値換算・合計した発電量で除して、発電量（kWh）あたりの発電単価（耐用年平均発電単価）を算出する。実用化戦略調査研究では、炉建設費として20万円/kWe、再処理単価として27万円/kgHM、燃料製造単価として16万円/kgHMをめやす値とし、発電単価については将来の軽水炉と同等の発電単価として4.3円/kWhをめやす値とする。
資源有効利用性	資源節約性は、我が国における原子力電力需要を想定して算出する、FBR導入による天然ウランの累積需要量と、我が国が利用可能な既知資源量または究極資源量の割合から求める。既知資源量については、現在の全世界の原子力発電設備容量に対する我が国の割合として10%（約40万ton）、究極資源量については、将来の全世界の累積原子力発電電力量に対する我が国の割合の予測値5%（約80万ton）をめやす値とする。 資源活用性は、全世界で想定される原子力発電電力量を賄うために必要なウラン量と既知資源量の割合から求められ、既知資源の何%を核分裂利用すれば想定電力を賄えるかを判断のめやすとする。
環境負荷低減性	固化・隔離については、廃棄物処分体発生量、廃棄物潜在毒性、処分場周辺被ばくについて、原子炉、再処理及び燃料製造からなるサイクル全体としての評価値を単位発電量当たりに換算し、それらの相互比較により行う。また、希釈放出については、原子炉、再処理及び燃料製造施設から環境への放出量による周辺被ばく線量を単位発電量当たりに換算し、これとLWR直接処分との比較により行う。
核拡散抵抗性	核兵器転用性については、判断のための定量的なしきい値は存在しないこと、低除染サイクルや乾式再処理については実績がないことから、核兵器への転用を意図しないサイクルの要件をリストアップし、チェックシートにより概略評価する。
安全性	プラント安全性については、安全設計方針に基づいた設備設計が行われるとともに、設計基準事象に対する評価結果が判断基準に適合していることが必須要件であることから、基準への適合性により判断する。 炉心安全性については、評価対象となるプラントの特性を考慮して、炉心損傷防止特性が残存リスク領域まで低減されるか、あるいは炉心損傷時の再臨界回避方策及び事故後安定冷却・閉じ込めが可能であることが設計要求を満足するための要件であり、これに対する適合性により判断する。
技術的実現性	一般的には、基本原理が未確認の技術は、工学開発から実用化開発へとステップアップするために多くの資金と労力を要し、成功に対する困難度が増すと考えられる。したがって、現状の技術レベルが高く（開発リスクが小さく）、今後の研究開発費が少ないものほど技術的実現性は高まると考えられる。そこで、第１期の技術的実現性の検討においては、FBRサイクルを構成する要素技術の課題を分析し、実用化に至るまでの技術開発項目、期間、必要資金などを考慮し、FBRサイクル技術のレベルを「科学・工学・実用」の3つのランクに分類するとともに、限られた期間（2015年頃まで）の投資資金を「大・中・小」に大まかにランク分けしてポートフォリオ図に整理する。

表-10 FBRサイクルの主な組合せと設計情報

組合せ				設計情報												
炉型	燃料形態	再処理	燃料製造	電気出力 (MWe)	熱効率 (%)	所内負荷率 (%)	炉心燃焼度 (MWd/t)	平均燃焼度 (MWd/t)	増殖比	倍増時間 (年)	初装荷Puf量 (kg/MWe)	バッチ当りHM量 (kg/MWe)	Pu回収率 (%)	Am回収率 (%)	除染係数	ロス率 (%)
Na大型	酸化物*1	先進湿式	ペレット	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.7	99.8	1000	0.4
		酸化物電解	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.9	98.9	10	0.2
		金属電解	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.3	99.2	11	0.8
		フッ化物揮発	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.8	99.2	19	0.3
	酸化物*2	先進湿式	ペレット	1500	42	4.1	149,000	63,100	1.17	41	4.1	19.5	99.7	99.8	1000	0.4
	金属*2	金属電解	射出成型	1500	38.5	4.1	150,000	68,000	1.29	17	3.3	21.9	99.8	99.4	10	0.7
Na中型 (モジュール)	酸化物*1	先進湿式	ペレット	500×3	42	4.5	150,000	50,000	1.23	35	5.4	30.3	99.7	99.8	1000	0.4
	金属*2	金属電解	射出成型	500×3	38.5	4.5	149,000	60,000	1.2	33	4.6	23.4	99.8	99.4	10	0.7
Pb－Bi中型 (モジュール)	窒化物*2	先進湿式	ペレット	400×4	38	2.8	153,000	39,200	1.19	65	12.7	30.2	99.7	99.8	1000	0.4
		金属電解	振動充填	400×4	38	2.8	153,000	39,200	1.19	65	12.7	30.2	99.3	99.2	11	0.8
CO_2大型	酸化物*2	先進湿式	ペレット	1370	38	13.9	155,000	66,000	1.20	57	7.7	29.0	99.7	99.8	1000	0.4
	窒化物*2			1370	38	13.9	159,000	69,000	1.38	23	7.3	39.6	99.7	99.8	1000	0.4
He大型	窒化物*2	先進湿式	ペレット	1120	47	2.4	137,000	483,00	1.20	68	7.0	27.0	99.7	99.8	1000	0.4

*1 径方向非均質炉心、*2 均質炉心

表-11 評価指標の相互相関

	発電単価	ウラン利用率	ウラン累積需要量	廃棄物発生量（総量）	廃棄物発生量（面積換算）	潜在毒性	放射線被ばく
発電単価	1.0						
ウラン利用率	0.04	1.0					
ウラン累積需要量	0.84	0.06	1.0				
廃棄物発生量（総量）	-0.23	-0.44	-0.03	1.0			
廃棄物発生量（面積換算）	-0.17	-0.85	-0.18	0.70	1.0		
潜在毒性	-0.13	-0.92	-0.08	0.71	0.90	1.0	
放射線被ばく	-0.10	0.23	-0.14	-0.27	-0.14	-0.13	1.0

表-12 各ステップの研究開発目標と研究内容

年度		1999 2000	2001 2005	2006 2010	2011 ～2015
開発目標		有望候補概念の抽出 ▽	FBRサイクル全体での実用化候補概念の絞り込み、開発対象選定 ▽	FBRサイクル全体での正副絞り込み FBRサイクル全体での整合をとった実用化見通しの提示 ▽	実用化技術体系の整備 ▽
ステップ		実用化戦略調査研究 第1期	第2期	第3期	第4期
主要実施内容	FBRシステム	・幅広い選択肢の調査 ・施設概念の構築、経済性の概略評価	正と副候補を選定 ・予備的な概念設計 ・抽出した候補概念の絞り込みに必要な、定量的に比較可能なデータ取得のための基礎試験及び技術成立性確認試験	開発目標達成の見通し ・概念設計 ・概念設計に必要なデータ取得のための確証試験 ・設計手法の高度化・基準策定(改訂)等に必要なデータ取得	開発目標達成 ・基本設計 ・設計に必要なデータ取得のための確証試験 ・実証試験 ・設置許可申請書の安全設計、安全評価が作成できる程度の技術体系の整備
	燃料サイクルシステム	乾式抽出 3方式→2 ・幅広い選択肢の調査 ・施設概念の構築、経済性の概略評価	乾式の絞り込み (2方式→1) 湿式再処理に対応するものとして、振動充填とペレットの絞り込み 湿式再処理法の内、代替補完技術の絞り込み ・予備的な概念設計 ・先進湿式枢要技術に関する小規模ホット試験及び代替補完技術の基本特性試験 ・乾式2方式の定量評価が可能となる要素技術試験(主にPu基礎試験)	再処理技術としての絞り込み ・概念設計 ・乾式と先進湿式の比較が可能となる試験(主に工学規模ホット試験)	開発目標達成 ・基本設計 ・工学規模ホット試験 ・設置許可(承認)申請書の安全設計、安全評価が作成できる程度の技術体系の整備
	燃料形態	・幅広い選択肢の調査 ・燃料形態と冷却材の組合せ評価と、有望な組合せの抽出 ・金属燃料小規模U試験	新型燃料の絞り込み ・MOX燃料の高性能化研究開発(TRU含有燃料、高燃焼度化) ・新型燃料の絞込みが可能となる知見の収集 ・金属燃料小規模Pu試験	MOX燃料の開発見通し ・新型燃料の中長期的開発 ・燃料照射試験による性能確認(ピン照射)	MOX燃料技術の整備 ・燃料照射試験による性能確認(集合体照射)

表-13 各ステップにおける主要な研究開発成果

年度		1999 2000	2001 2005	2006 2010	2011 ～2015
ステップ		第1期	第2期	第3期	第4期
得られる成果	全般	FBRサイクル全体で整合をとった技術抽出。	FBRサイクル全体の実用化システム概念(2～3概念)、開発シナリオ、研究開発計画(ロードマップ)の提示。総合的な評価手法の確立。検討に当たっては、常に技術のブレークスルーを目指し、革新的技術の開発を心掛ける。 なお、第2期の開始に当たっては、開発目標を再検討(具体化、観点の追加)。	実用化システム概念(正・副)のFBRサイクル全体での技術的成立見通し提示。	実用化システム概念のFBRサイクル全体での技術体系整備。
	FBRシステム	幅広い選択肢の評価を行って、FBRプラントの有望な実用化候補概念を創出するとともに、その経済性評価結果を提示。 要素技術開発としては、高燃焼度被覆管であるODS鋼の工学レベルでの製作性を、最優先課題として見極める。	選定に必要な定量データと予備的な概念設計の結果を揃えるが、候補概念ごとに現状の技術レベル、優先課題が異なるため、R&Dの進め方、成果も異なる。 **ナトリウム冷却炉**:経済性の追求が最優先。経済性目標達成のための主要技術(機器合体、2ループ化等)の成立見通しを示すバックデータを揃える。 **ガス冷却炉**:高温、高燃焼度を達成できる燃料の開発、事故時の炉心冷却性確保が主要課題。燃料開発は、有望な燃料被覆(被覆管又は被覆粒子燃料の被覆材)を炉外試験、文献調査ベースで見つけ出す。炉心冷却性について見通しをつける。なお、まず、2001年度に有望な炉型を抽出。 **鉛ビスマス冷却炉**:冷却材中の材料腐食の抑制が、実用化の実現見通し判断の上で重要。国内外の施設を活用し、材料腐食の抑制限界を見極める。 **水冷却炉**:事故時の除熱特性等の検討を進めるとともに、FBR導入シナリオの検討とあわせて、その有効性を評価する。 **小型炉**:多目的利用のニーズを見据え、炉型の特長を生かしたプラント概念を構築。大型炉・中型炉向けと兼用で実施する要素技術開発により、成立性を評価する。	第2期で選定した実用化システム概念を対象に、要素技術の確証データを得るとともに、概念設計結果を提示する。	第3期に引き続き、要素技術の確証試験等を実施し、得られたデータを実用化に向けた技術体系として整備する(詳細設計や許認可手続きに活用可能な形態)。また、基本設計の結果を提示する。
	燃料サイクルシステム	幅広い選択肢の評価を行って、再処理、燃料製造プラントの有望な実用化候補概念を創出するとともに、その経済性評価結果を提示。 ホット試験は準備に長時間を要するため、実用化候補概念の絞込みに向け、各候補の主要な要素技術開発に着手。 ・先進湿式再処理 ・乾式再処理 ・簡素化ペレット燃料製造 ・振動充填燃料製造 ・鋳造燃料製造	第2期での乾式再処理法の絞込み、ペレット法と振動充填法の比較、第3期での乾式再処理法と湿式再処理法の比較に必要な定量データを取得するとともに、予備的な概念設計の結果を提示する。 **先進湿式再処理**:経済性の追求と、環境負荷低減に係わるプロセス開発が重 要。経済性向上に向けた技術(高効率溶解、晶析、超臨界抽出、等)の成立 性見通しをつける。環境負荷低減では、TRU回収法、LLFP分離法を選定 し、その基本性能を見極めるとともに、経済性に与える影響を評価する。 **乾式再処理**:酸化物電解法、金属電解法と、組合せによるハイブリッド法の枢 要技術について、小規模Pu試験等により、その成立性を見極める。(前処理 技術、遠隔運転技術、廃棄物処理技術、保障措置技術、電解回収技術、 TRU回収技術、等) **簡素化ペレット燃料製造**:ショートプロセス法による経済性向上効果、低除染 TRU含有燃料の製作性を、試作試験により見極める。 **振動動充填燃料製造**:試作試験により、有望な顆粒製造法を選定する。小規 模システム試験により充填技術を開発する。低除染TRU燃料の製造性を湿 式再処理の製品を用いた基礎試験で見極める。 **鋳造燃料製造**:燃料製造の枢要なプロセスについて、国内で小規模な試験を 実施し、ノウハウを獲得する。	工学規模ホット試験により、枢要技術の成立性を確証するとともに概念設計結果を提示し、それに基づき実用化技術を選定する。	第3期で選定した技術を対象に工学規模ホット試験を継続し、得られたデータを実用化に向けた技術体系として整備する(詳細設計や許認可手続きに活用可能な形態)。また、基本設計の結果を提示する。
	燃料形態	各燃料形態(MOX、窒化物、金属)の特性把握とR&D計画の提示。 照射試験は準備に長時間を要するため、主要な燃料・材料の照射試験に可能なものから着手。 ・振動充填燃料(BOR-60)	新型燃料について、R&Dを継続する燃料形態を選択する。R&Dには国際協力の活用が不可欠であり、相手国と調整し国際協力の実現に目途をつけ、中長期的なR&D計画を策定。 高燃焼度被覆管(ODS鋼等)や、新たに開発する燃料(低除染・TRU燃料、振動充填燃料、金属燃料、等)の照射を開始する。カプセル照射等の先行照射の成果が一部得られる。(ODS鋼、TRU含有ペレット燃料、内部ゲル化法振動充填燃料、等)	MOX燃料は、実用化の見通しを付ける。新型燃料は本格的なR&Dを開始。 高燃焼度被覆管や、新たに開発する燃料について、先行的な照射試験の結果が概ね出揃う。	MOX燃料に関しては、得られたデータを実用化に向けた技術体系として整備する。 実用化目標条件(15万MWd/t)までの照射データを整えるまでには、更に5～10年間が必要となる。

表-14 第2期の資金計画

(単位:億円)	第1期の実績		第2期(5ヶ年計画)		
	1999年度	2000年度	2001年度(認可予算額)	2002年度(予定額)	2003～2005年度の合計(予定額)
炉心・FBRプラント	5	8	15	27	約100
設計研究	5	7	8	10	
要素技術開発	0.1	0.4	6	17	
燃料サイクル	13	17	21	23	約90
設計研究	3	5	3	3	
要素技術開発	10	12	18	21	
統合・評価	2	5	3	4	約10
合計	20	30	39	54	約200
			約290		

2001年6月現在の推計額

表-15 特許出願状況

	件名	状況	申請機関	内容
1	ナトリウム冷却高速炉(鉛反射体及び反応度制御機構)	特願2000-185303	JNC	これまでのナトリウム冷却高速炉では、中性子反射体をSUSを用いている。本発明は、これを鉛からなる構成とし、炉心の燃料富化度を低減し、出力分布を平坦化し、内部転換比を増加させるものである。また、当該鉛反射体は受動的炉停止装置として用いることも可能である。
2	高速炉用非均質燃料集合体	特願2000-252819	JNC	高Pu富化度の炉心燃料ピン束部を隔壁で仕切り、劣化ウランからなるブランケット燃料ピンが取り囲む構造を有する燃料集合体。増殖性の向上と安全性向上、燃料寿命の延長が同時に達成できる。また、ブランケット燃料集合体を使用しない炉心と出来るので、核拡散抵抗性の観点から望ましい概念。
3	液体金属冷却高速炉用の炉心燃料集合体(炉心燃料ピン束部にボイド管を有する燃料集合体)	特許出願中	JNC	燃料集合体中の一部にガスで満たした密封管を配置し、この結果挿入される正の反応度分だけプルトニウム富化度及び燃焼反応度を低減し、転換率(増殖率)を高める。仮に、ガス注入密封管が破損し、冷却材が密封間に浸入しても、負の反応度挿入現象であり、安全性上問題とならない。
4	隔壁管分離・直管型熱交換器	出願準備中	JNC	伝熱管破損時等の影響緩和対策として、直管伝熱管と隔壁構造の配置・構造に関する考案。
5	隔壁管分離・ヘリカル型熱交換器	出願準備中	JNC	伝熱管破損時等の影響緩和対策として、ヘリカル伝熱管と隔壁構造の配置・構造に関する考案。
6	伝熱管検査装置	出願準備中	JNC	SG等の伝熱管のトモグラフィ技術を応用した検査装置の考案。
7	ポンプ合体熱交換器(仮名)	出願準備中	JNC	EMPとIHX及びSG等の合体構造の考案。
8	アクティブ温度制御による原子炉容器の熱荷重緩和装置	出願準備中	JNC	原子炉容器液面近傍の温度分布を制御することによって，熱応力を緩和する装置。
9	核燃料製造プロセスの簡素化	申請中	JNC	所定のPu富化度調整した粉末を、気流搬送システムにより成型機に導入し、バインダー等の添加剤無しで直接ペレットを作製し、焼結工程を経て、製品ペレットを得る。その際の不良品を再溶解させ、リサイクルして製品ペレットを作製するプロセスである。
10	ターンテーブル式核燃料粉末製造装置及びターンテーブル式核 燃料粉末製造装置を収めるセル	申請中	JNC、三菱マテリアル、ソアテックの共同	溶液用を保持する容器同士が干渉することを防止しながら確実に移動させることができるとともに、保守作業の容易化を図ったターンテーブル式核燃料粉末製造装置及びこれらの装置を収めるセルに関するもの。
11	内圧クリープ破断検出法	出願準備中	JNC	MARICO-2(H16から照射を開始)に装荷するクリープ試験試料の破断検出法を改良するもの。
12	使用済核燃料の前処理方法および前処理装置	申請中 平成12年7月28日 特願2000-228794	JNC	使用済核燃料棒を被覆管ごと粒状または粉状に粉砕し、粉砕物から被覆管粉砕物を磁気的に捕集除去して使用済核燃料粉砕物を分離した後、分離した使用済核燃料粉砕物を硝酸溶解槽または溶融塩電解槽に移送して処理する前処理方法及び前処理装置。
13	使用済核燃料の乾式再処理法及び乾式再処理法に用いる誘導加熱装置	申請中 平成13年5月25日 特願2001-157410	JNC	使用済核燃料をるつぼ内の溶融塩中に溶融させて核燃料を析出させる乾式再処理法において、るつぼを誘導加熱するとともに、冷却媒体を供給して冷却し、加熱と冷却のバランスにより、溶融塩槽を保持しつつ、るつぼ内壁面に塩凝固層を生成するようにした使用済核燃料の乾式再処理法及び乾式再処理法に用いる誘導加熱装置。
14	溶融塩電解を利用した使用済核燃料の再処理装置	申請中 平成13年4月9日 出願依頼書提出	JNC	溶融塩電解を利用した使用済核燃料の再処理装置において陰極のまわりを陽極で囲んだ電極モジュールとし、処理速度を向上し、装置をコンパクト化した。
15	溶媒中イオン濃度のその場測定法	申請中 平成13年6月15日 出願依頼書提出	JNC	減衰全内反射法(ATR法)の原理を応用し、石英製プローブ(例:石英製光ファイバのコア部分)を用いて、腐食性溶液又は高温の溶融塩に溶存するイオン濃度を光学的にその場測定することを可能にした。
16	使用済み燃料の再処理方法	計画中 平成13年度申請予定	JNC	酸化物燃料を硝酸を含むTBP溶媒と接触して直接 U 及び Pu を抽出する方法。
17	高速炉用燃料集合体	申請中 平成12年 特願2000-241040	JNC、電力の共同	炉心損傷時の再臨界の発生を回避する目的で、燃料集合体内の中央部に、下部軸ブランケットを削除した複数本(例えば37本)の燃料ピンを配置し、燃料溶融・破損時に 炉心部からの溶融燃料の流出を促進させる構造としたもの。

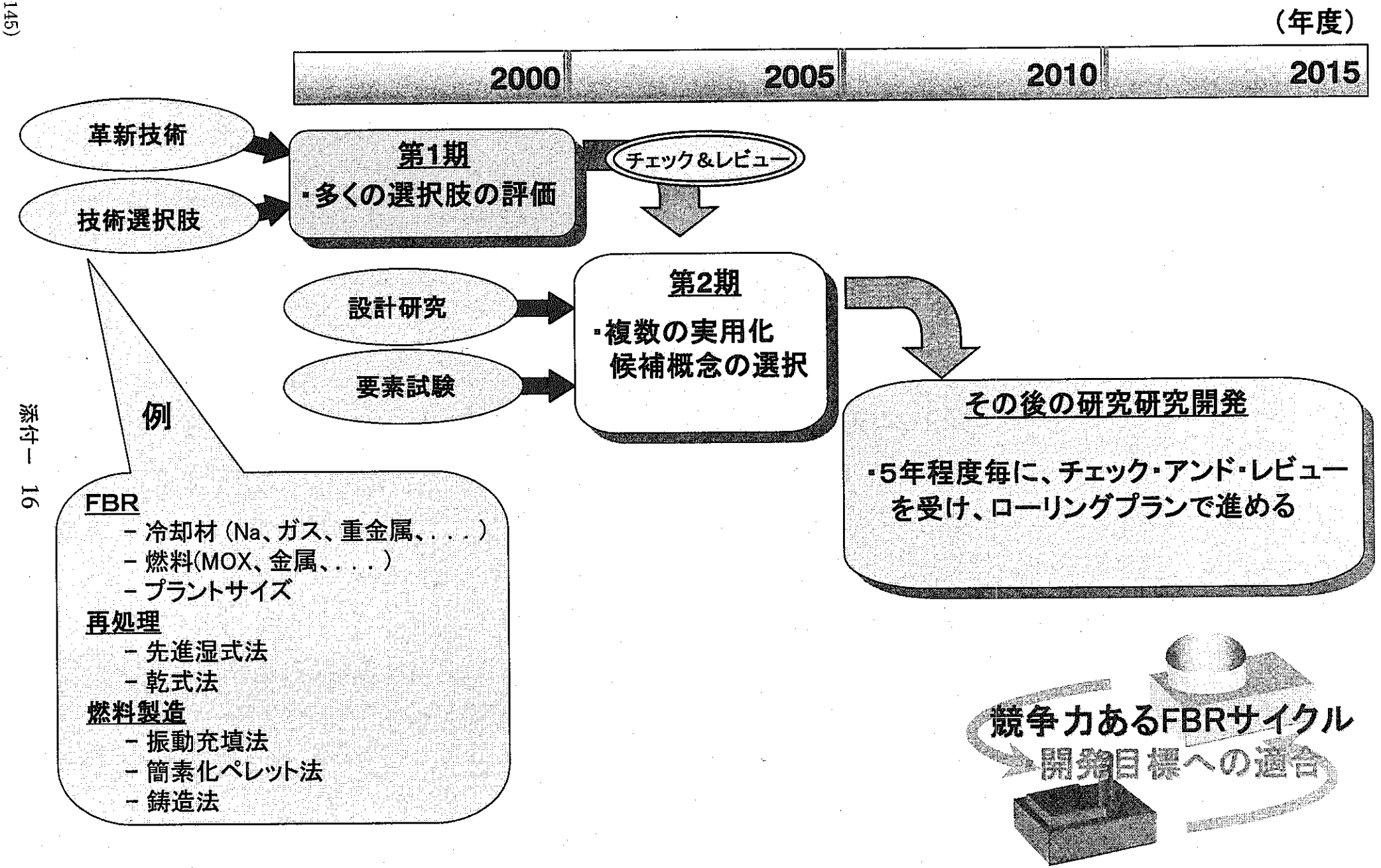


図-1　FBRサイクル実用化戦略調査研究の研究開発ステップ

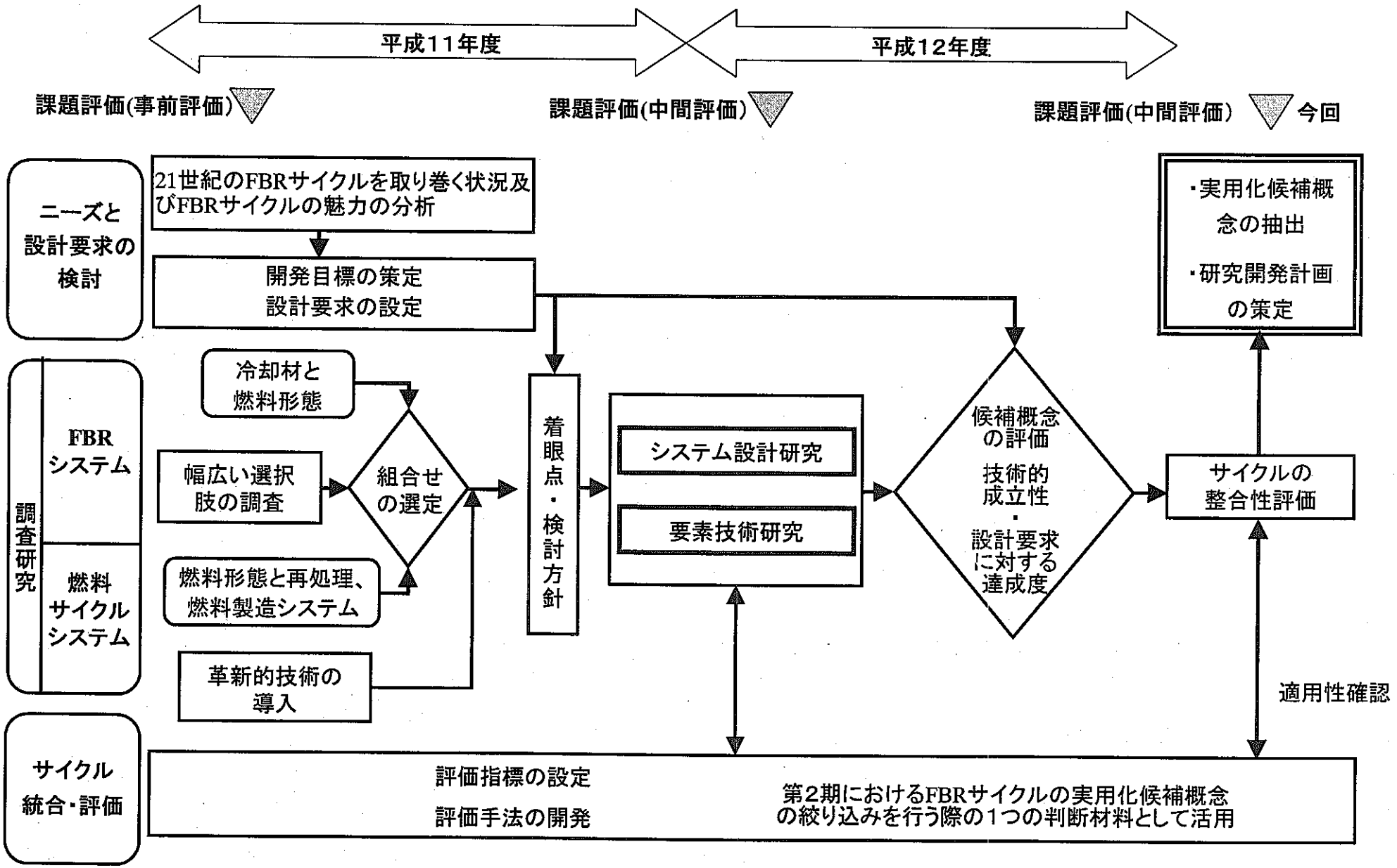


図-2　第1期の検討の進め方

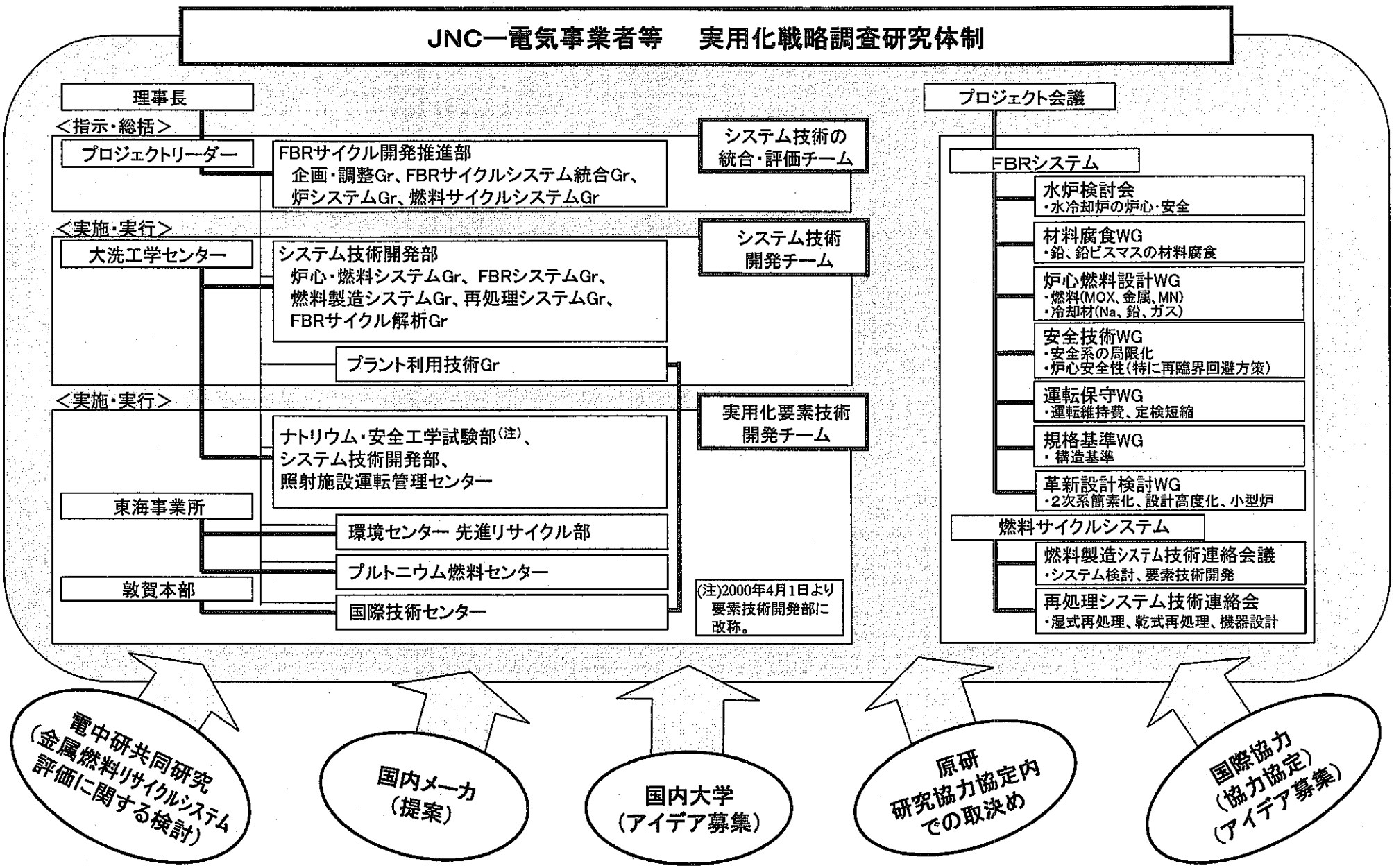


図-3　実用化戦略調査研究における研究実施体制

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		○ 同時代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燃焼及び長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量等を低減
		○ 運転・保守及び廃止措置に伴う放射性廃棄物発生量を低減
核拡散抵抗性		○ 純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと
		○ 核物質防護及び保障措置上の対応が良好な設計

図-4 FBRサイクルの開発目標

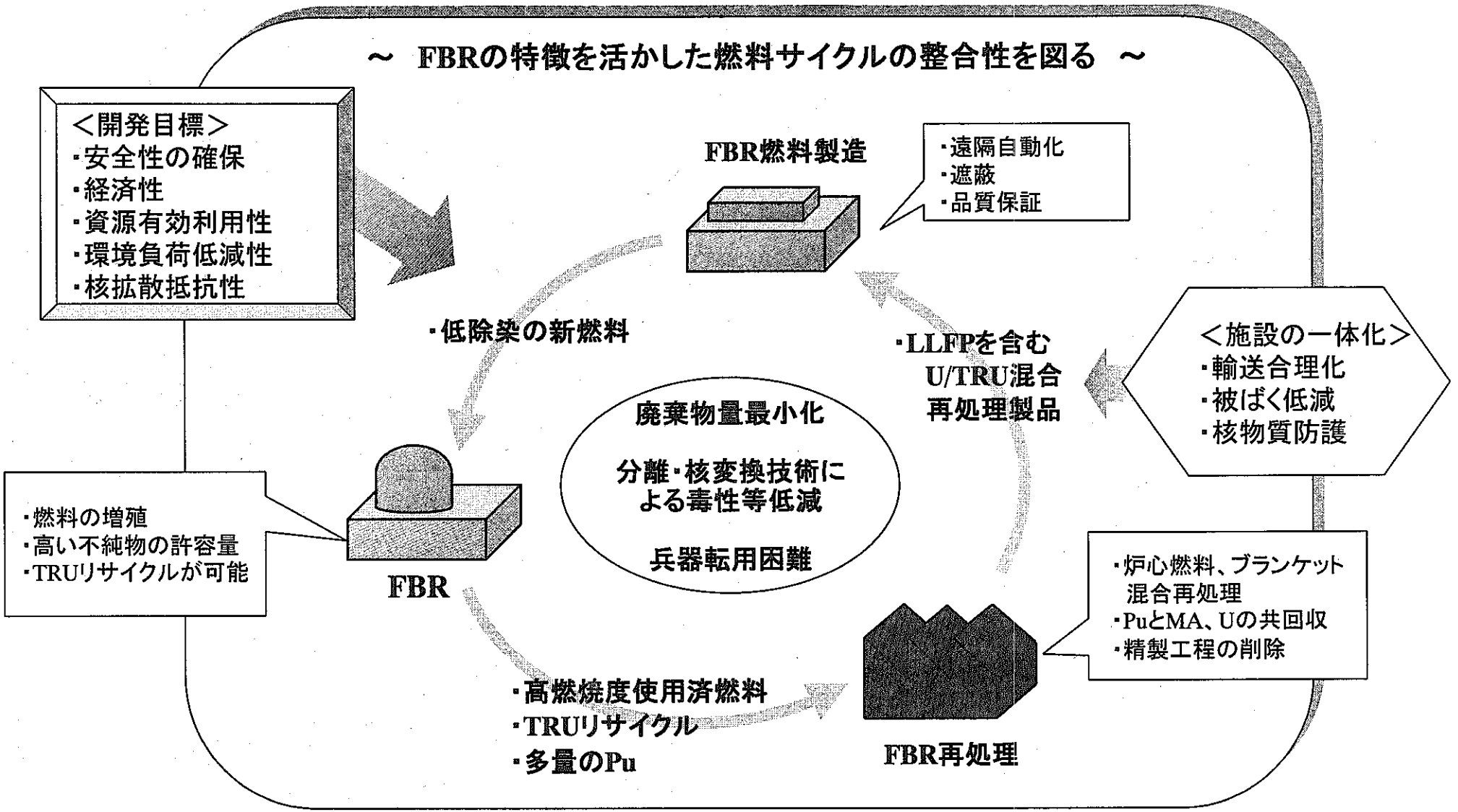


図-5 FBRサイクルの整合性に関する基本的な考え方

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（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及び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-6 FBRサイクルの主な設計要求

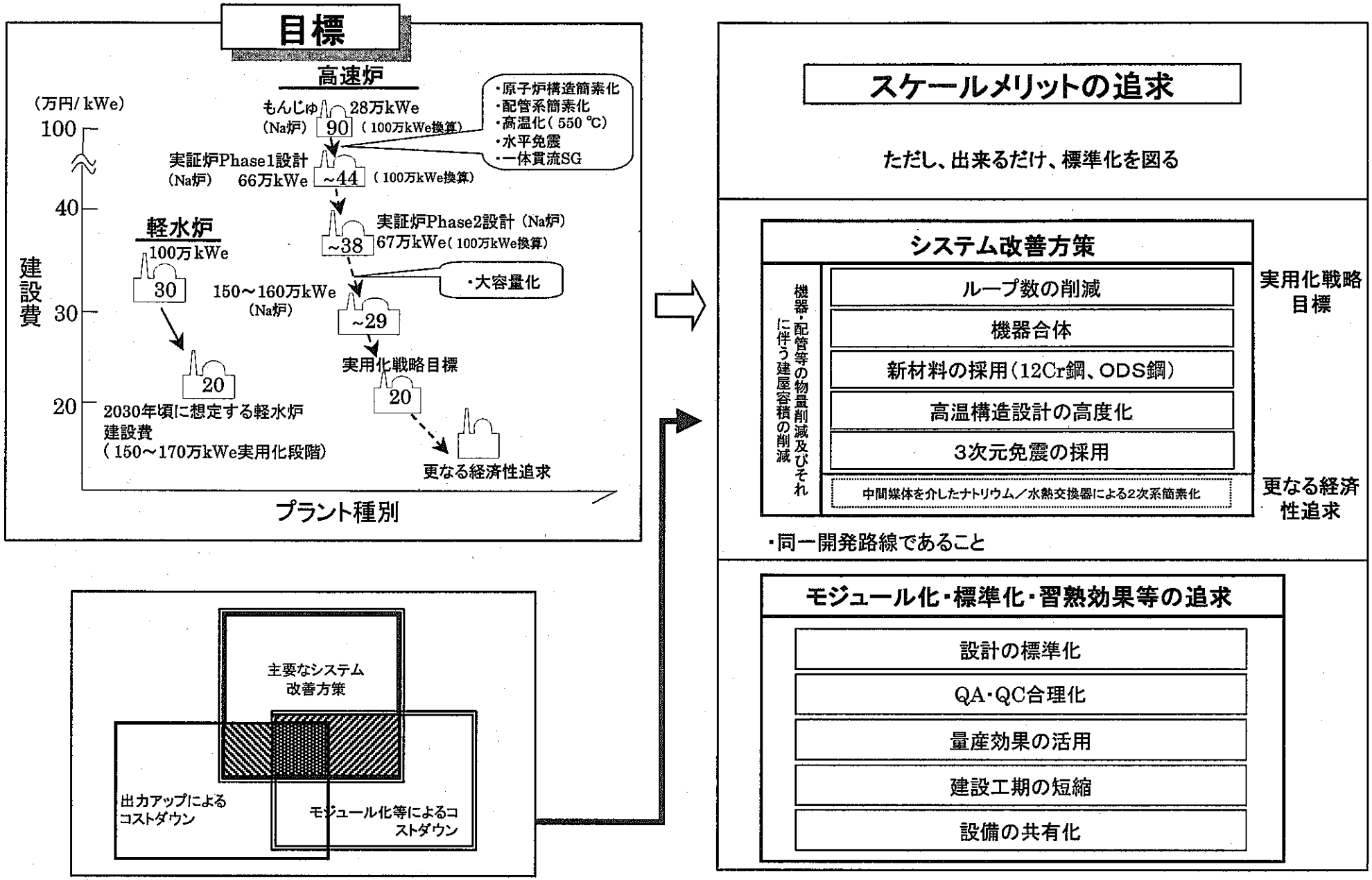


図-7　ナトリウム炉の経済性追求概要

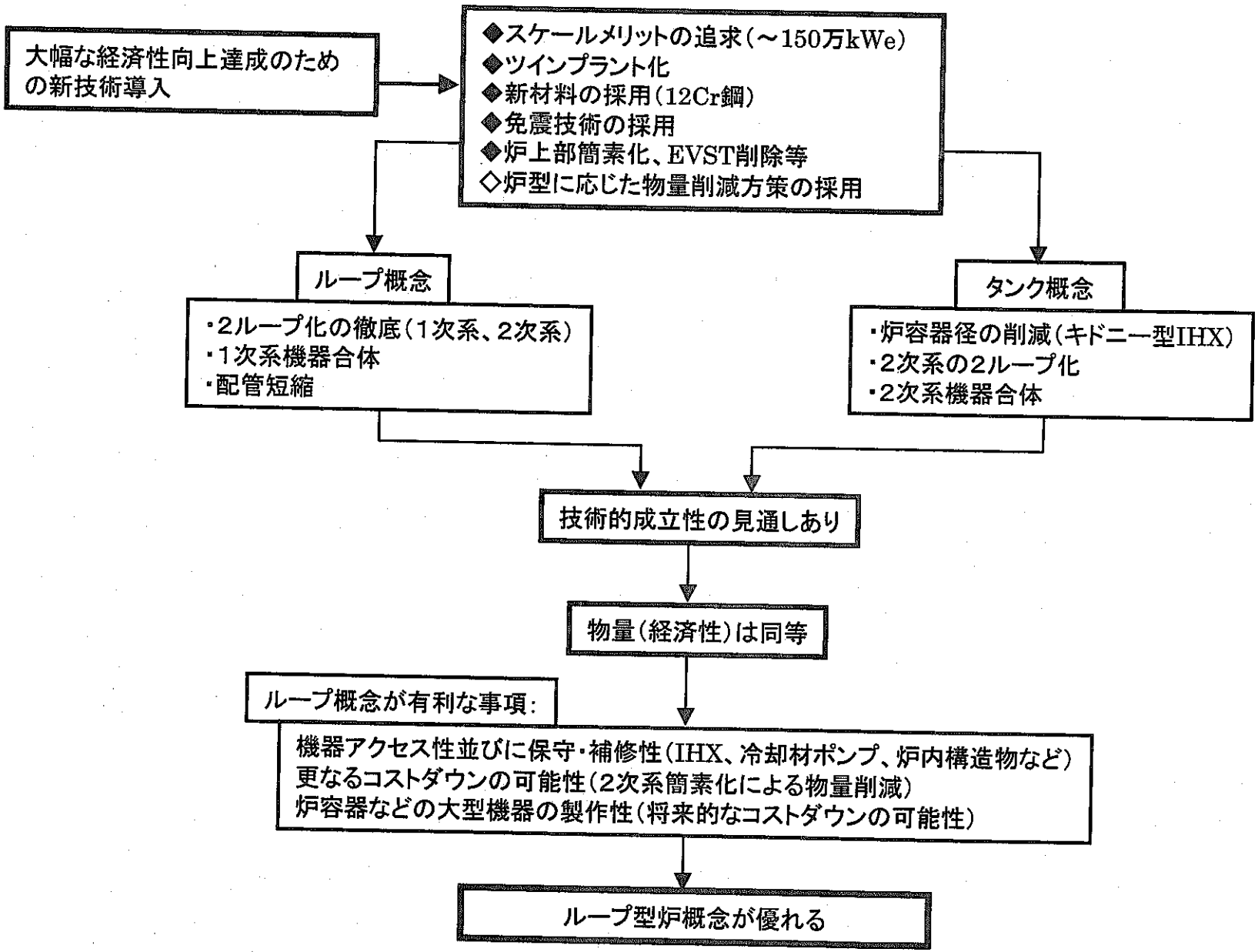
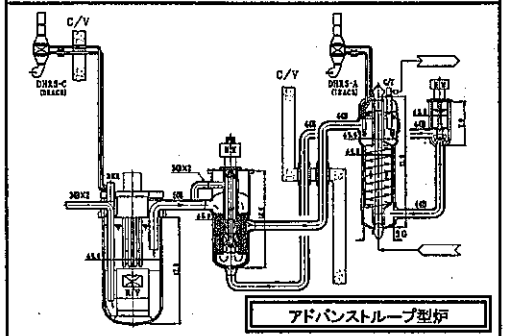


図-8 ナトリウム冷却大型炉の検討の流れ

スケールメリットを追求したNa冷却大型炉の候補概念

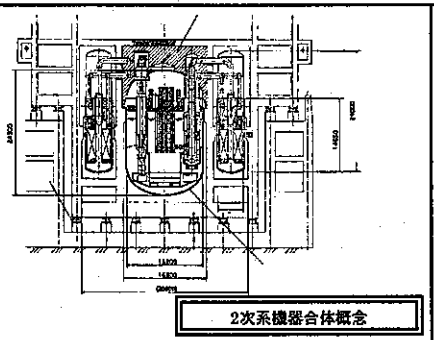
ループ型



主なコストダウン方策
- ○ 原子炉構造コンパクト化
- ○ 配管短縮化
- ○ ループ数削減 （2ループ化）
- ○ 機器合体 （1次ポンプ＋IHX）
- ○ 燃料取扱設備簡素化 （EVST削除）

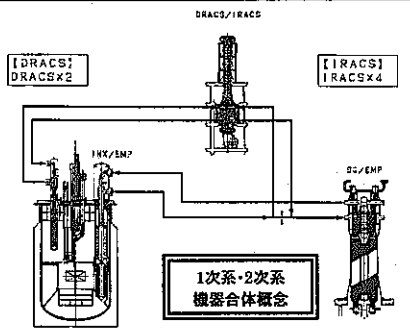
物量評価（当初評価値）
- ○ NSSS重量 :約 2580t
- ○ 原子炉建屋容積 :約 11.5万m³/基

タンク型



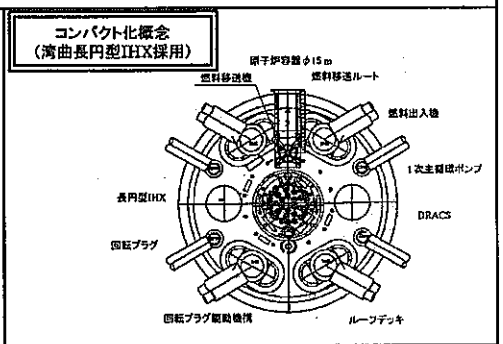
主なコストダウン方策
- ○ 原子炉構造コンパクト化 （φ15.2m）
- ○ ループ数削減 （3ループ化）
- ○ 機器合体 （2次系電磁ポンプ＋SG）
- ○ 燃料取扱設備簡素化 （EVST削除）

物量評価
- ○ NSSS重量 :約 3190t
- ○ 原子炉建屋容積 :約 14.8万m³/基



主なコストダウン方策
- ○ 原子炉構造コンパクト化 （φ11.0m）
- ○ 機器合体 （1次系電磁ポンプ＋IHX、2次系電磁ポンプ＋SG）

物量評価
- ○ NSSS重量 :約 3320t
- ○ 原子炉建屋容積 :約 12.0万m³/基



主なコストダウン方策
- ○ 原子炉構造コンパクト化 （φ15.0m）
- ○ ループ数削減 （2ループ化）

物量評価
詳細は未検討。

検討方針
- ○ 経済性目標をクリアできる有望なプラント候補概念として検討。
- ○ 技術的成立性に関する検討を進め、主要な技術課題の解決の見通しと必要なR&D課題を明らかにする。
- ○ 物量データベースを整備し、経済性評価を行う。

検討方針
- ○ 互いの長所を取り入れること等によりタンク型概念を統合する。
- ○ 物量データベースを整備し、経済性評価を行う。

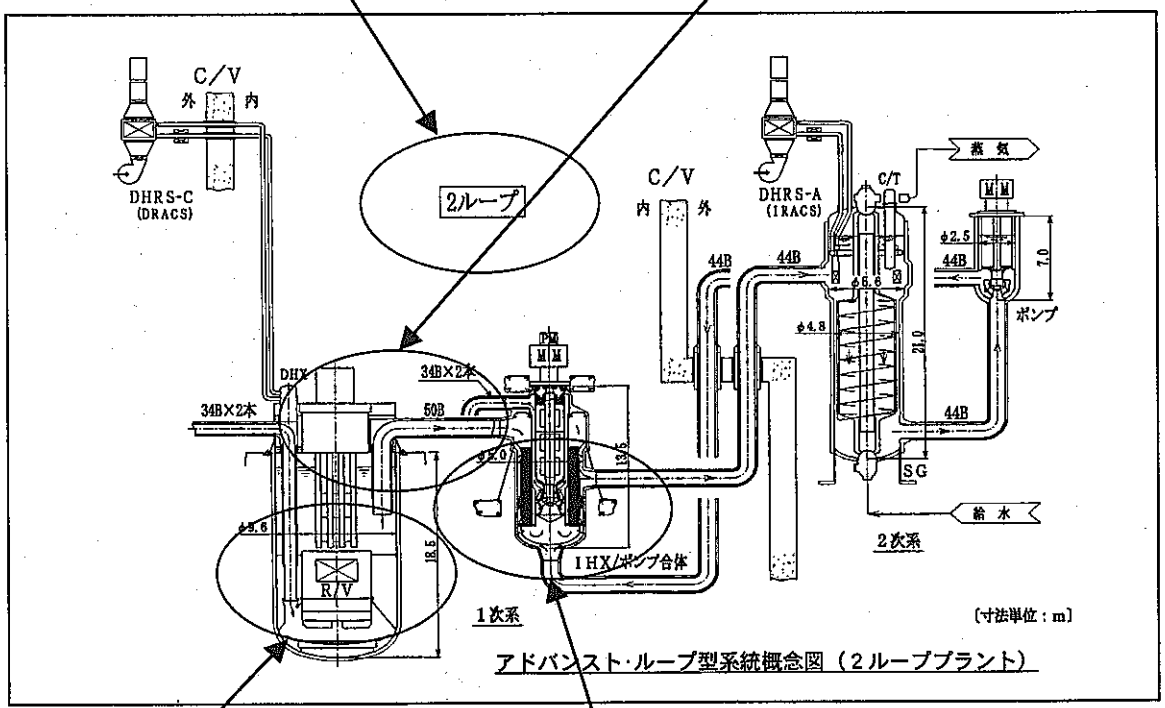
ナトリウム冷却大型炉抽出

図-9 ナトリウム冷却大型炉の検討の進め方

主要プラント仕様
- 電気出力　1,500 MWe　・熱出力　3,570 MWt
- ループ数　2ループ　・プラント熱効率　約42 %
- IHX/1次主循環ポンプ合体

ループ数削減（2ループ化）

配管短縮化



アドバンスト・ループ型系統概念図（2ループプラント）

原子炉構造のコンパクト化

機器合体（1次ポンプ＋IHX）

燃料取扱設備簡素化（EVST削除等）

第1期成果

- 2ループ構成により、建設コストの目標を達成できる可能性を有する。（目標値の約85%、NSSS物量17.5t/万kWe）
- 安全性については、炉心冷却が最も厳しい流量喪失型事象に対しても、被覆管最高温度も制限値に抑えられる見通しを得た。また、全電源交流喪失時にも自然循環のみによる崩壊熱除熱能力がある。
- 炉容器径9.6mは、既存製造設備の範囲内である。構造健全性、製作建設性上大きな問題はない見通しである。

今後の課題

- 大容量コンパクトな2ループシステムにおける流動特性（炉容器内、配管内）
- 機器・構造（合体機器、大口径配管等）の健全性
- 革新技術の開発（新材料（12Cr系鋼）開発、構造基準高度化、三次元免震技術）
- 再臨界回避方策（内部ダクト付き、軸ブラケット一部削除燃料集合体等）の有効性確認
- 2次系簡素化のための新型SGの開発

図-10　ナトリウム冷却大型ループ型炉(アドバンスト・ループ型炉)の検討結果

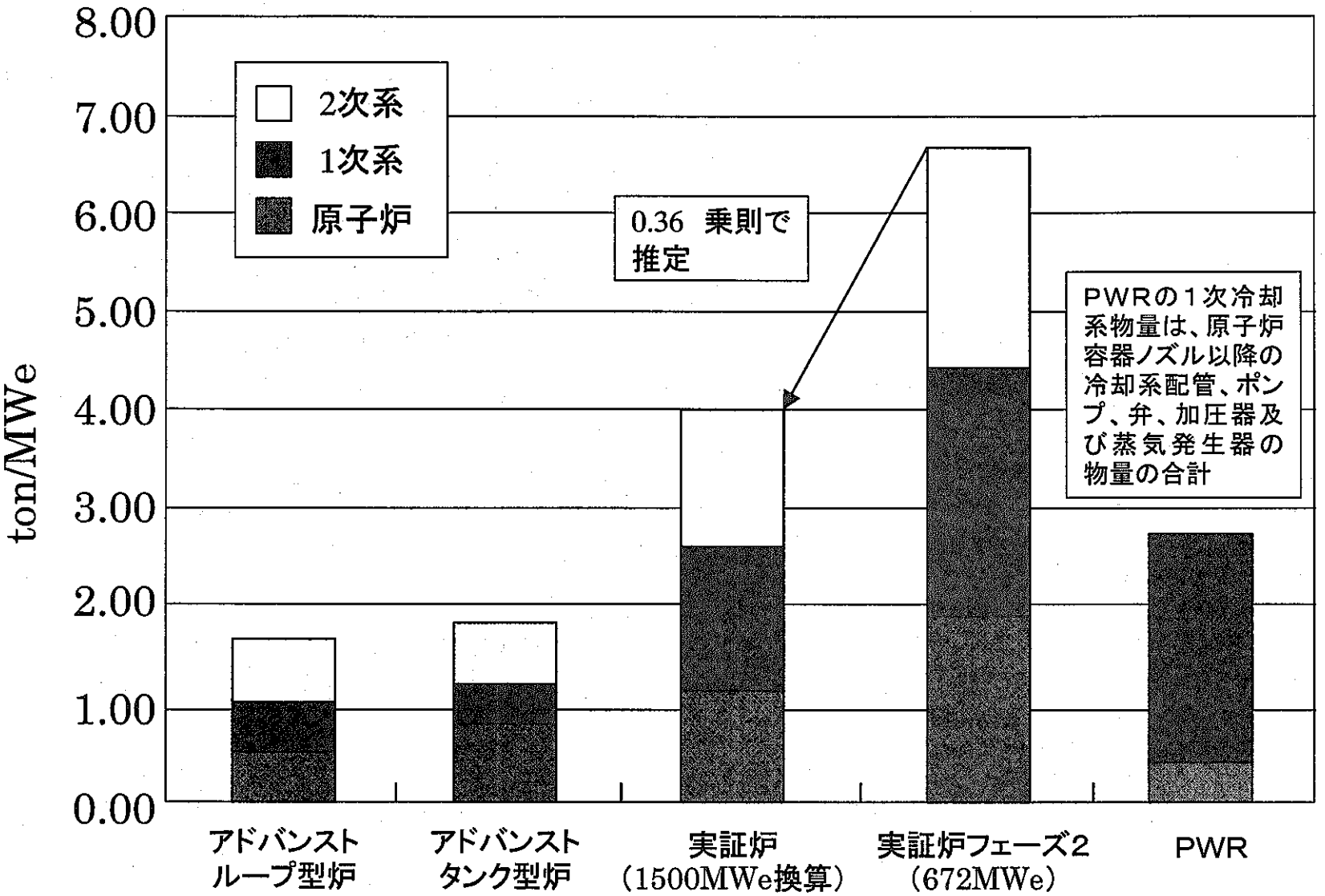
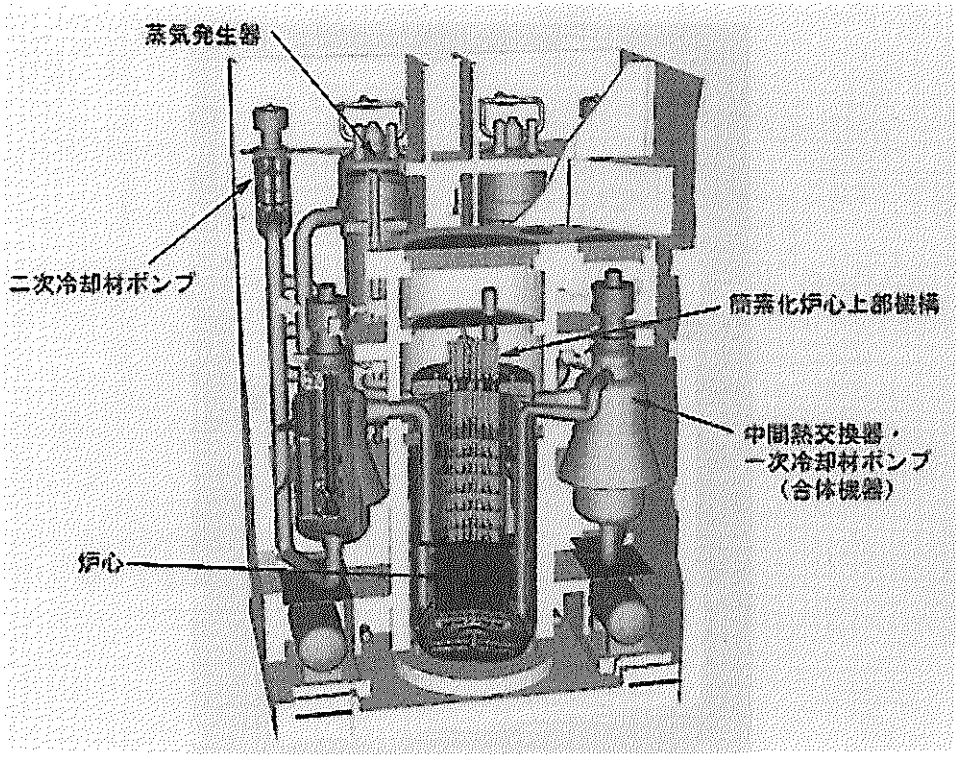


図-11 ナトリウム冷却大型炉の主要機器物量の比較



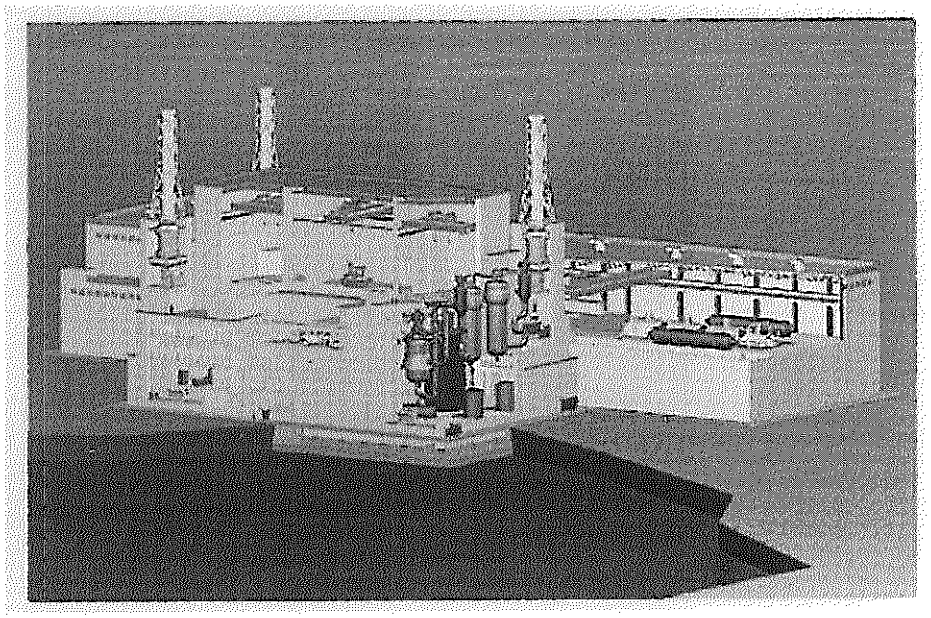
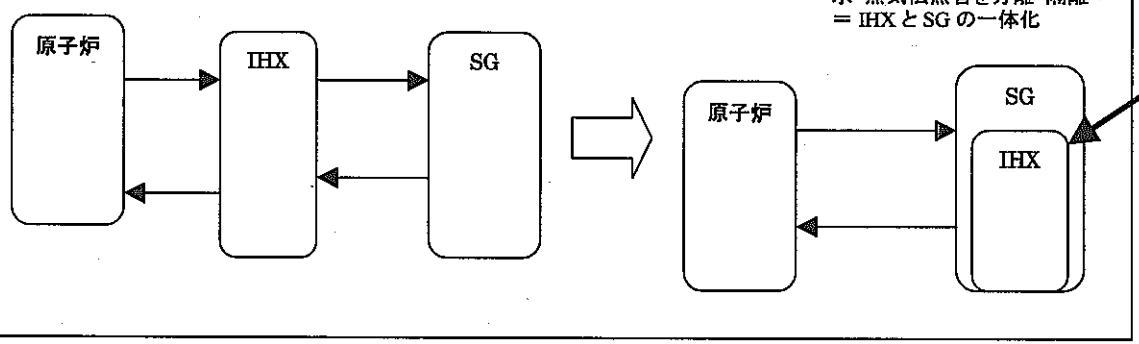


図-12　ナトリウム冷却ループ型炉の建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図

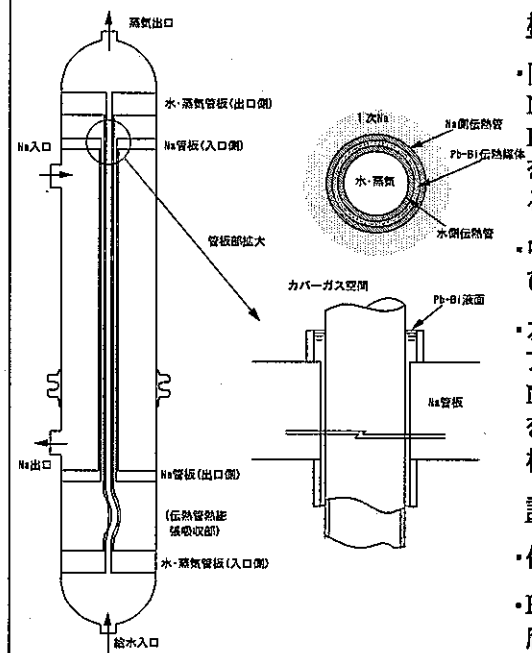
2次系簡素化のアプローチ



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



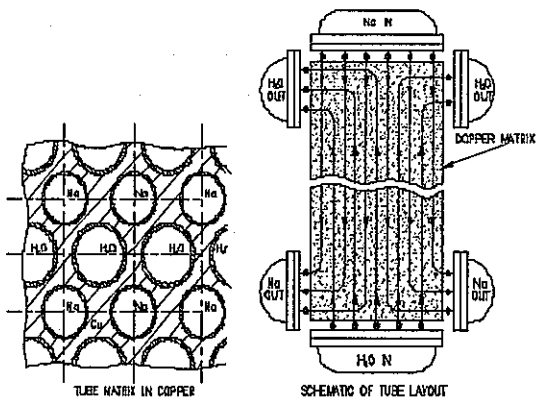
概念の特徴：

- 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・蒸気伝熱管を侵漬するタイプ(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

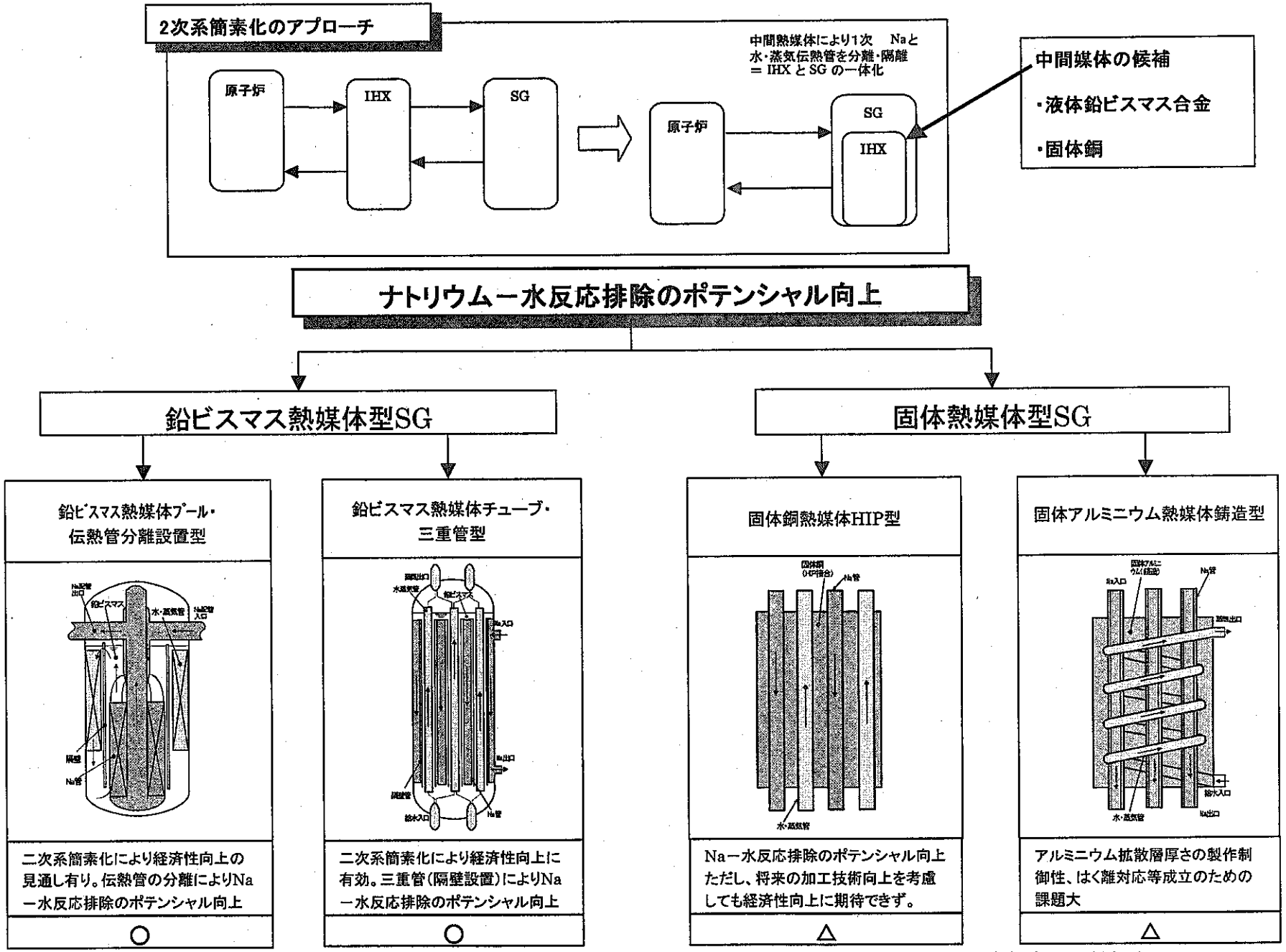
概念の特徴：

- 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-13 ナトリウム－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



注)○:第2期検討対象概念 △:対象外

図-14 二次系簡素化概念の検討結果

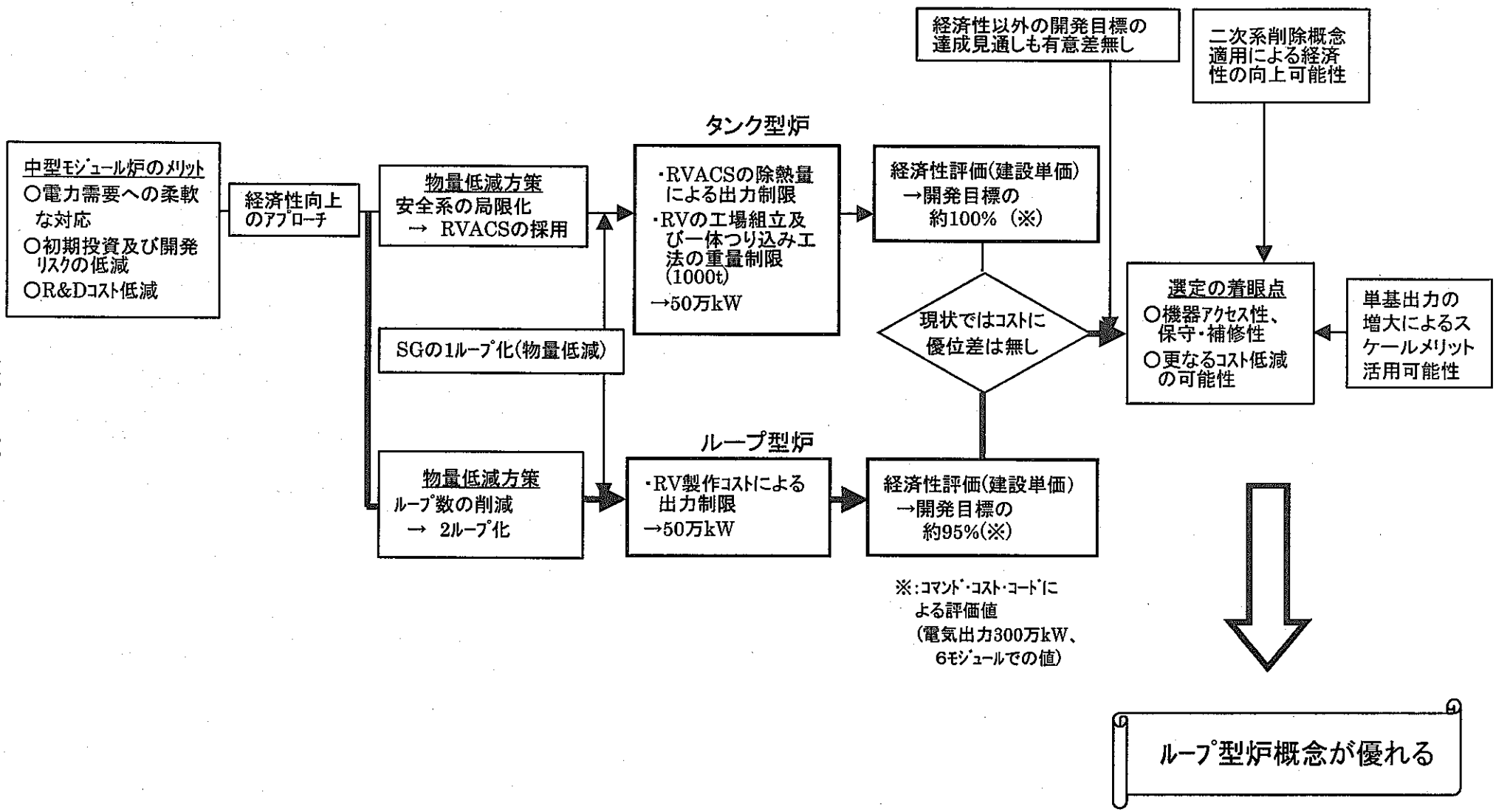


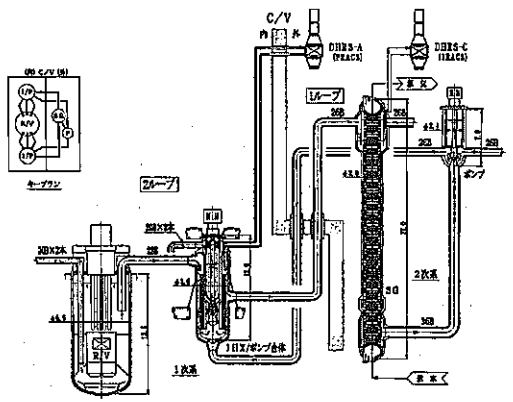
図-15 ナトリウム冷却中型ﾓｼﾞｭｰﾙ炉の検討の流れ

検討方針

・中型モジュール炉のコストダウン方策に基づいて、大型炉（ループ型・タンク型）の検討成果も活用し、有望な中型炉概念を追及する。

検討のポイント
- ・モジュール部分の共用部分の最大化　・出力の増加（500MWe）
- ・RVACS及び自然循環崩壊熱除去系　・建設工期短縮化工法の具体化
- ・比較的小容量機器の特性を活かした製造コスト低減策の導入・炉心安全性（再臨界回避）の検討

ループ型



500MWe/SG、1500MWe/TG　炉心出口温度550℃

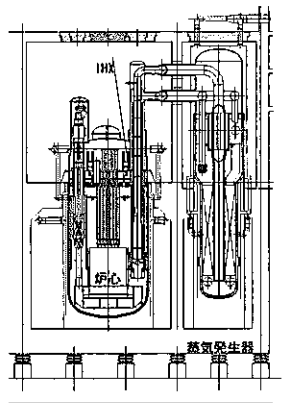
主なコストダウン方策
- ○ 機内鍛造品が適用可能となるφ6m台の原子炉容器の採用
- ○ 1炉心あたりSG1基（直管型SG）
- ○ PRACS×2＋IRACS×1（自然循環3系統）
- ○ 1500MWeTGの共用
- ○ 大型ユニット工法による建設工期短縮（33ヶ月）

物量評価
- ○NSSS物量：1198t/ 500MWe(24.0t/kWe)
- ○原子炉建屋容積：約25万m^3/3000MWe (830m^3/万kWe)

コストダウン着目点

原子炉容器の縮小
2次系機器数の削減
崩壊熱除去系の簡素化
TG基数の削減
建設工法の簡素化
建設期間の短縮
モジュール効果の定量化

タンク型



500MWe/SG、1500MWe/TG　炉心出口温度550℃

主なコストダウン方策
- ○ 湾曲長円型IHXの採用によりφ9.3m（機外鍛造or板溶接）
- ○ 1炉心あたりSG1基
- ○ RVACS＋SG-ACS（強制循環2系統）
- ○ 1500MWeTGの共用
- ○ 船殻構造による建設工期短縮（40ヶ月）

物量評価
- ○NSSS物量：1530t/ 500MWe(30.6t/kWe)
- ○原子炉建屋容積：約36万m^3/3000MWe (1190m^3/万kWe)

図−16　ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討の進め方

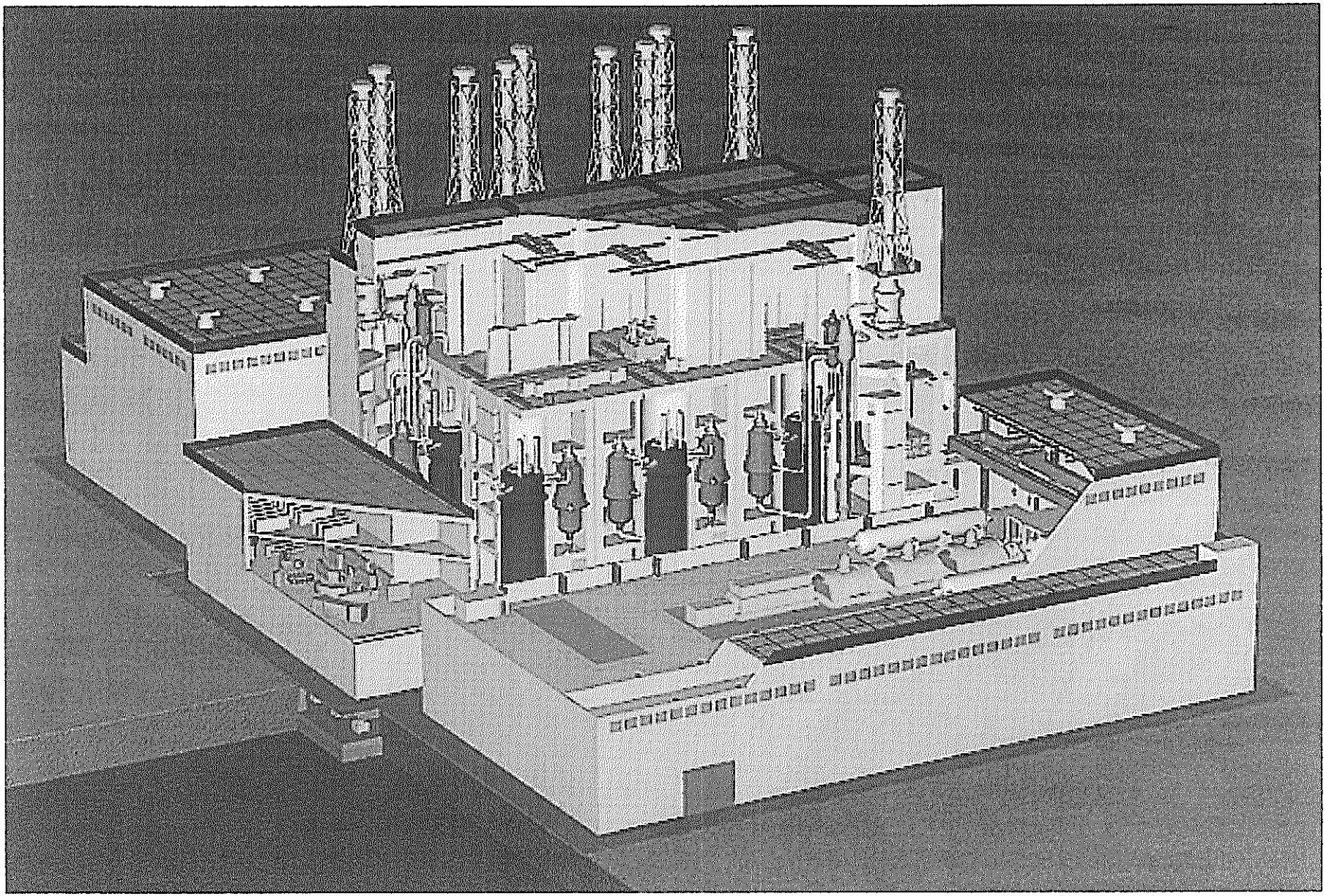


図-17 ナトリウム冷却中型ループ型モジュール炉の建屋内配置鳥瞰図

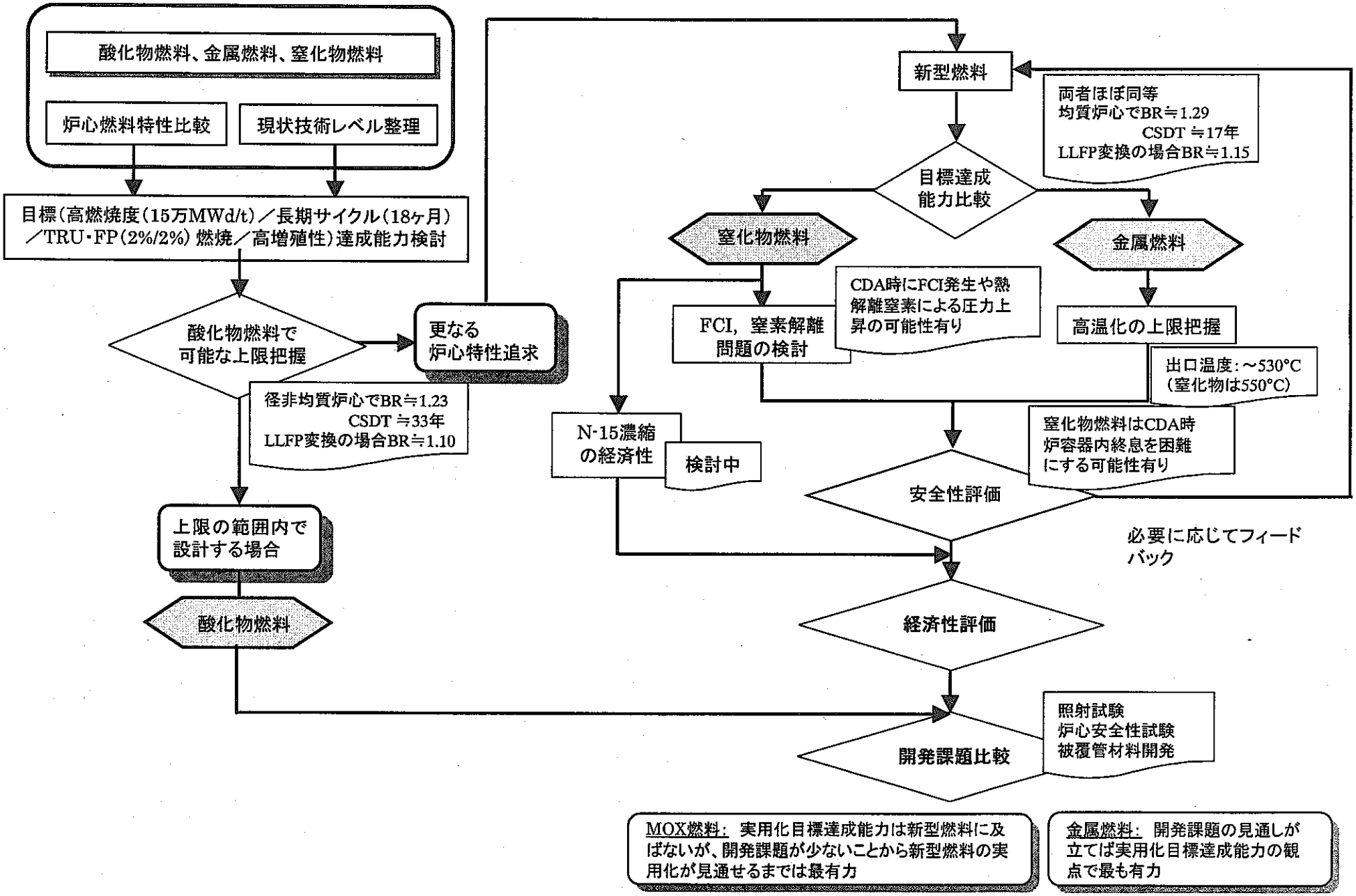
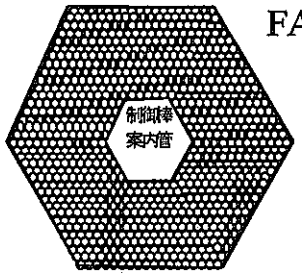
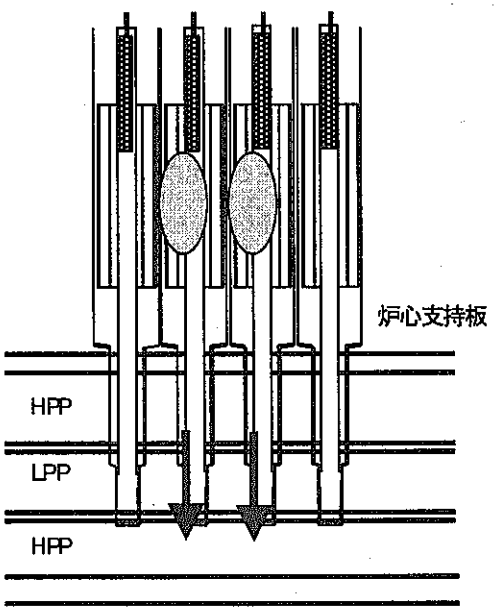


図-18 ナトリウム冷却炉心の検討の流れ

内部ダクト付き集合体 → **軸ブラ一部削除概念** → **径方向非均質＋内部ダクトor軸ブラ削概念**

FAIDUS型

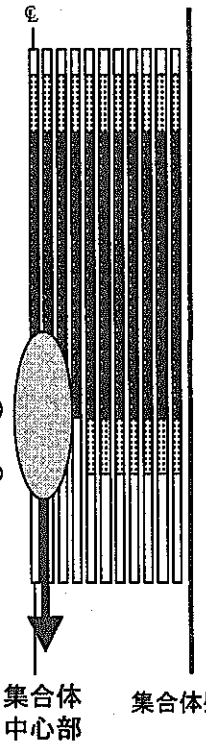




◆集合体内での溶融燃料を隣接集合体に溶融伝播する前に内部ダクトから下部に流出させる
- ・準1次元的挙動
- ・試験よる原理確認が可能

◆一部の内部ダクトを制御棒案内管として利用

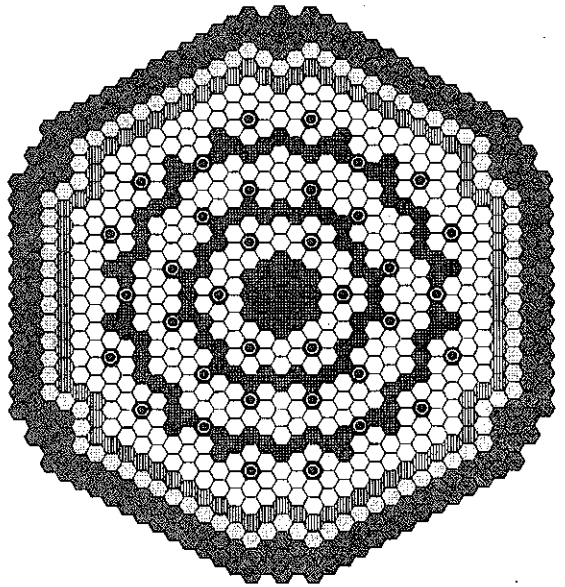
ABLE型



軸ブランケット領域の一部（37ピン）のブランケットを削除し、熱容量の小さい被覆管構造とし、そこを排出経路とする方策

◆3000℃を越える溶融燃料は熱容量が少ない融点1400℃の下部被覆管構造部分が選択的に溶融浸食され、溶融燃料の排出経路を形成し、隣接集合体へ破損伝播する前に溶融燃料を下方に流出させる方策
- ・準1次元的挙動
- ・試験よる原理確認が可能
- ・被覆管構造の溶融浸食による速やかな排出経路の形成が必要

◆上部軸ブラも同様に削除し、炉心上方への溶融燃料の排出を促進する方策も考えられる。その有効性については更なる検討が必要



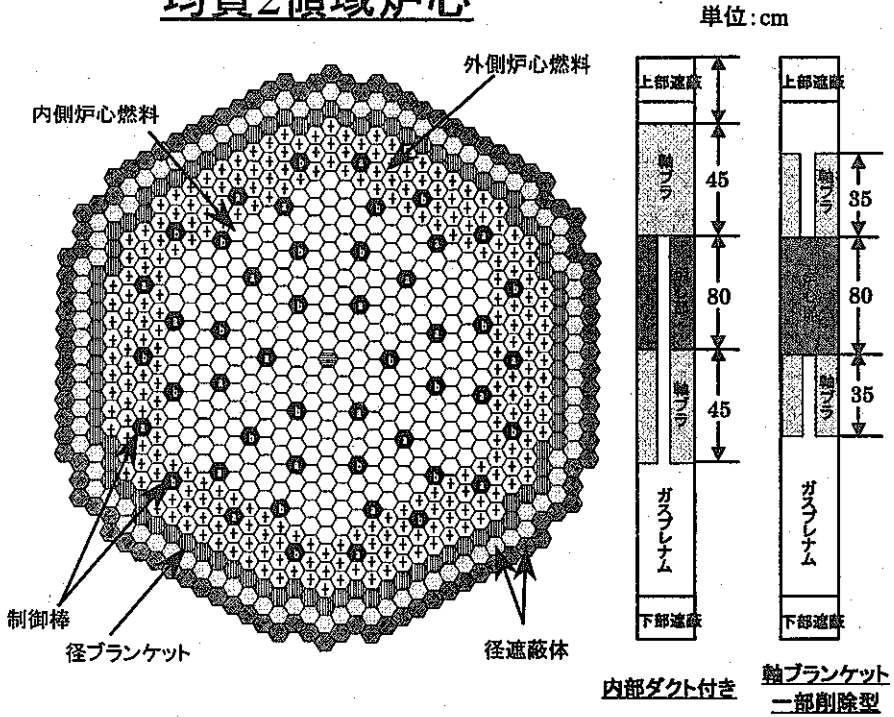
◆非均質炉心により炉心高さを大きくしてもボイド反応度の増加を抑制する。

◆「内部ダクト付き」あるいは「軸ブランケット削除」集合体を配置して溶融燃料の排出を促進する。

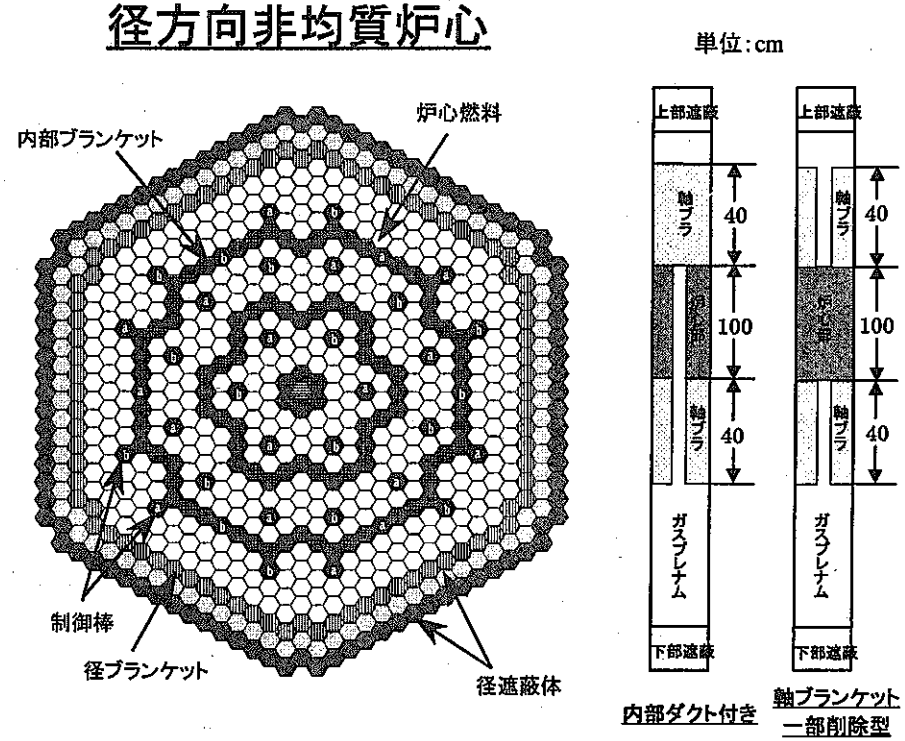
◆内部ブランケット集合体により、仮に複数の集合体間に及ぶ破損伝播が生じても溶融燃料プールの形成範囲を限定できる。（許容される溶融プール規模の明確化が必要）
- ・試験よる原理確認には工夫が必要
- ・解析コードの高度化が必要

図-19 ナトリウム冷却における有望な再臨界回避方策

均質2領域炉心



径方向非均質炉心

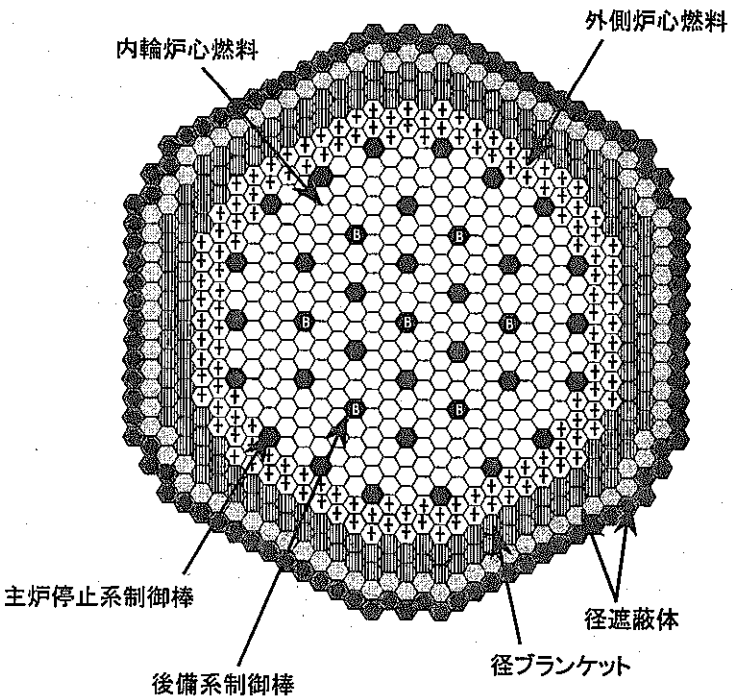


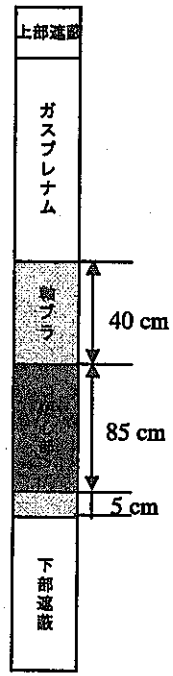
	均質2領域炉心（内部ダクト付き）	従来型均質2領域炉心（軸ブランケット一部削除型）
・炉心出力	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,570MWt
・運転サイクル	:約18ヶ月	:約17ヶ月
・炉心等価直径	:約5.1m	:約4.8m
・増殖比	:1.13	:1.17
・複利システム倍増時間	:56年	:41年
・ボイド反応度	:5.8$	:5.7$

	径方向非均質炉心（内部ダクト付き）	径方向非均質炉心（軸ブランケット一部削除型）
・炉心出力	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,570MWt
・運転サイクル	:約17.5ヶ月	:約19ヶ月
・炉心等価直径	:約4.9m	:約4.9m
・増殖比	:1.22	:1.24
・複利システム倍増時間	:36年	:33年
・ボイド反応度	:4.6$	:5.0$

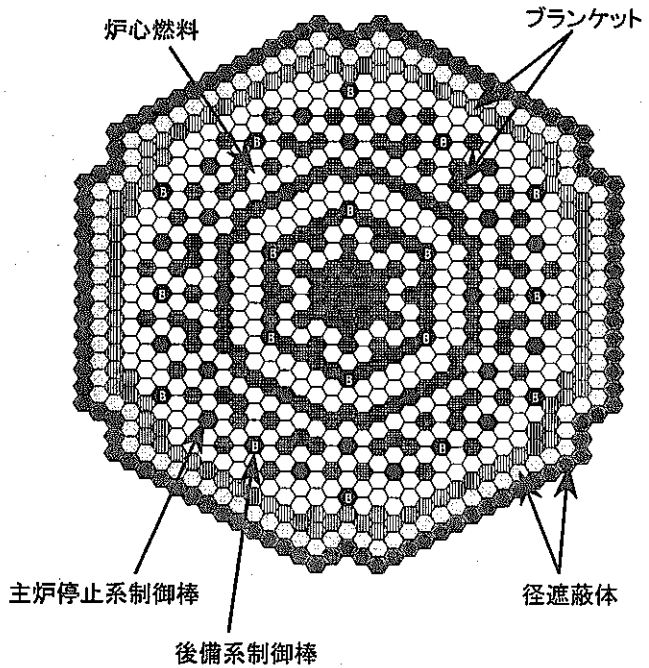
図-20 ナトリウム酸化物燃料大型炉炉心（酸化物燃料）

均質2領域炉心





径方向非均質炉心



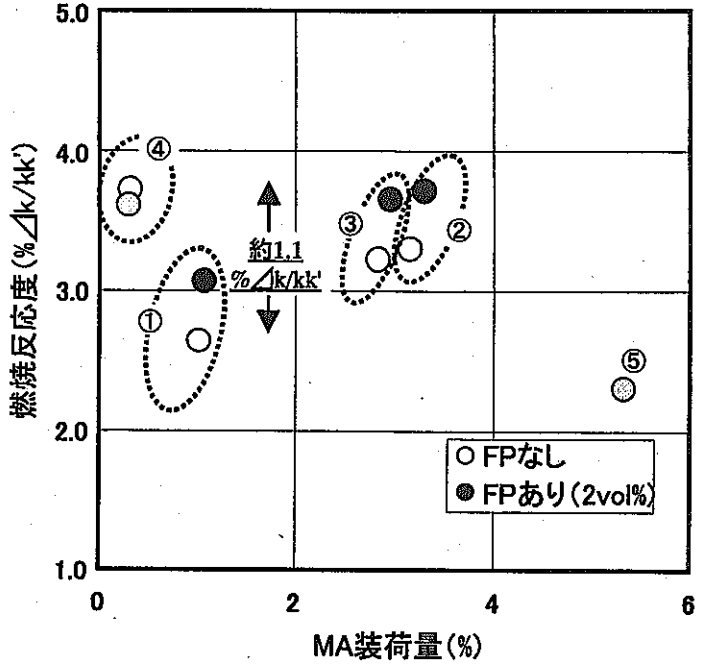
均質2領域炉心
（軸ブランケット一部削除型）

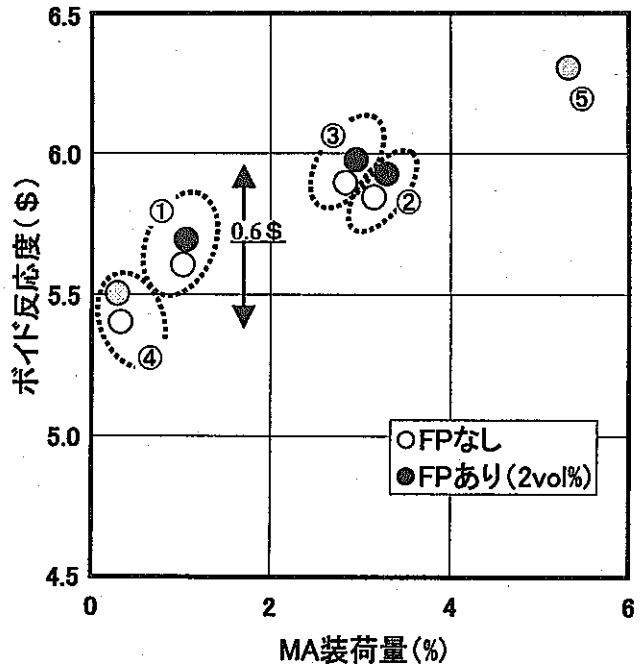
・炉心出力	:1,500MWe / 3,900MWt
・運転サイクル	:約19ヶ月
・炉心等価直径	:約4.4m
・増殖比	:1.29
・複利システム倍増時間	:17年
・ボイド反応度	:8.7$

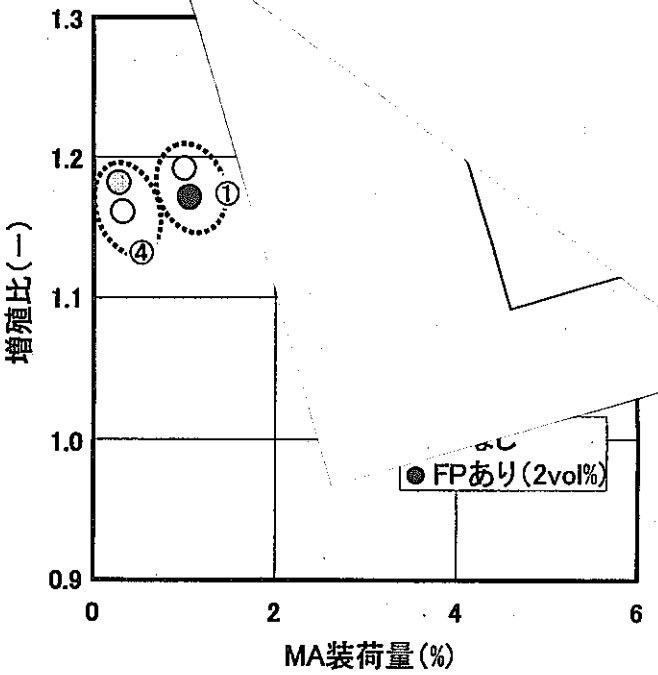
径方向均質炉心
（軸ブランケット一部削除型）

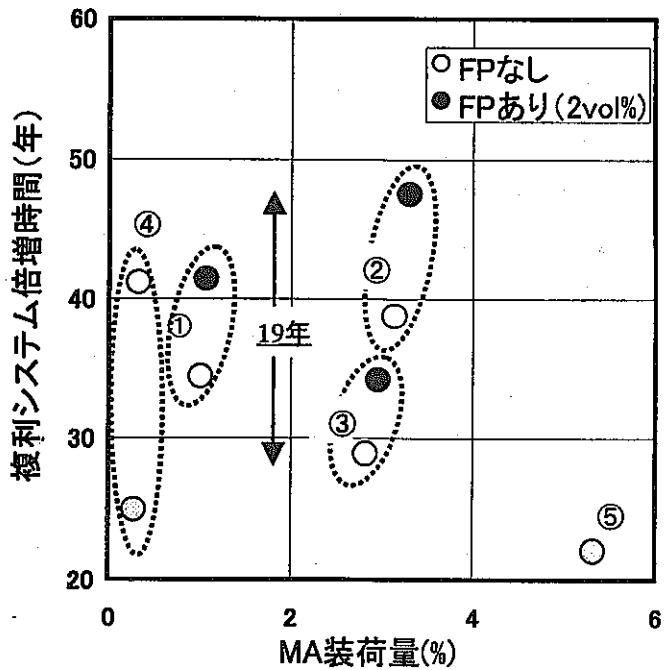
・炉心出力	:1,500MWe / 3,900MWt
・運転サイクル	:約20ヶ月
・炉心等価直径	:約5.1m
・増殖比	:1.32
・複利システム倍増時間	:21年
・ボイド反応度	:5.5$

図-21　ナトリウム冷却大型炉心（金属燃料）









注)○ は12ヶ月×5バッチの出力3,800MWth炉心によるFP混入なしでの結果、
○及び●は17ヶ月×4バッチの出力3,570MWth炉心の結果

＜燃料組成＞

① 高速炉多重リサイクル時のTRU組成(4年冷却)

② 高燃焼度ウラン燃料軽水炉からの取出しTRU組成(5年冷却)

③ 高燃焼度MOX燃料軽水炉からの取出しTRU組成(5年冷却)

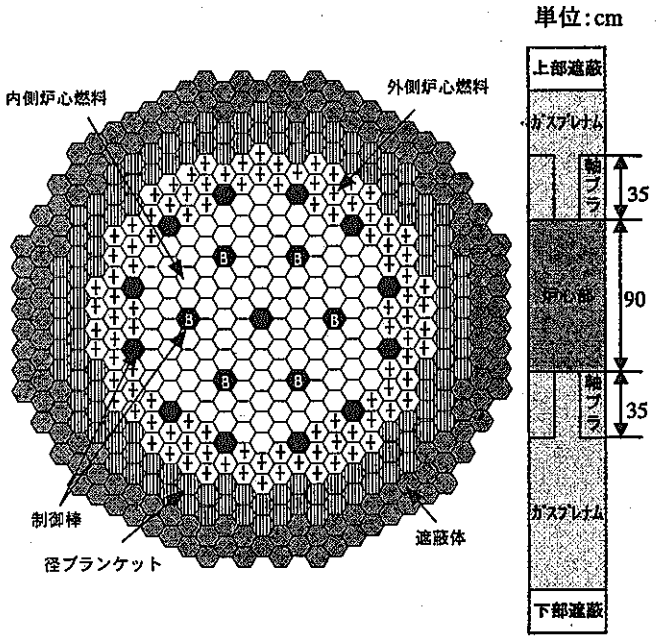
④ 中燃焼度ウラン燃料軽水炉からの取出しPu組成(10年冷却)

⑤ 中燃焼度ウラン燃料軽水炉からの取出しPu組成(10年冷却)＋MA*5wt%

*②のTRU(Np,Am,Cm)組成5%を添加

図−22 TRUの燃焼と炉心性能の関係(ナトリウム冷却酸化物燃料大型炉心)

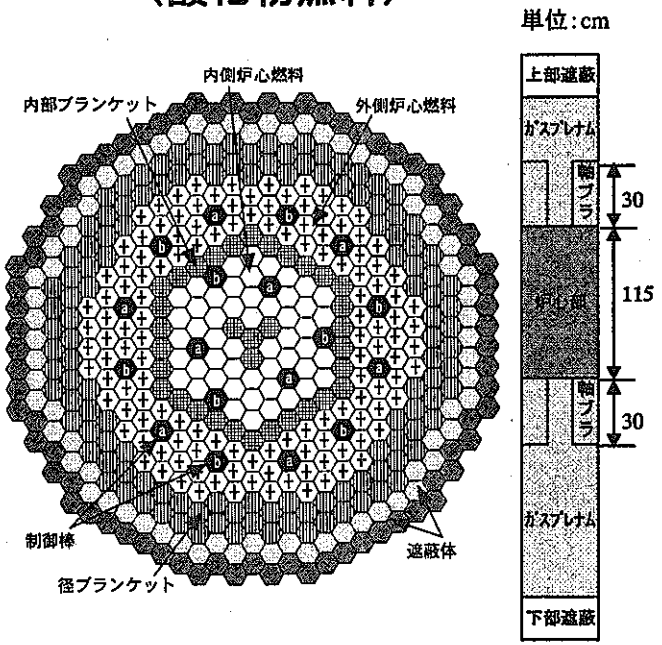
均質炉心（酸化物燃料）



均質酸化物燃料炉心

・炉心出力	:500MWe/1,190MWt
・運転サイクル	:約17ヶ月
・炉心等価直径	:約2.6m
・増殖比	:1.20
・複利システム倍増時間	:38年
・ボイド反応度	:5.1$

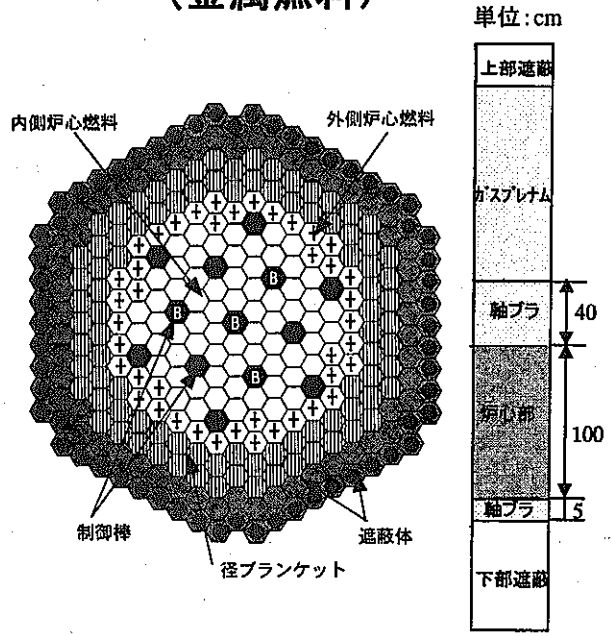
径方向非均質炉心（酸化物燃料）



径方向非均質酸化物燃料炉心

・炉心出力	:500MWe/1,190MWt
・運転サイクル	:約20ヶ月
・炉心等価直径	:約2.6m
・増殖比	:1. 23
・複利システム倍増時間	:35年
・ボイド反応度	:5.0$

均質炉心（金属燃料）



均質金属燃料炉心

・炉心出力	:300MWe/800MWt
・運転サイクル	:約19ヶ月
・炉心等価直径	:約2.5m
・増殖比	:1.22
・複利システム倍増時間	:33年
・ボイド反応度	:約7.5$

図-23 ナトリウム冷却中型炉心

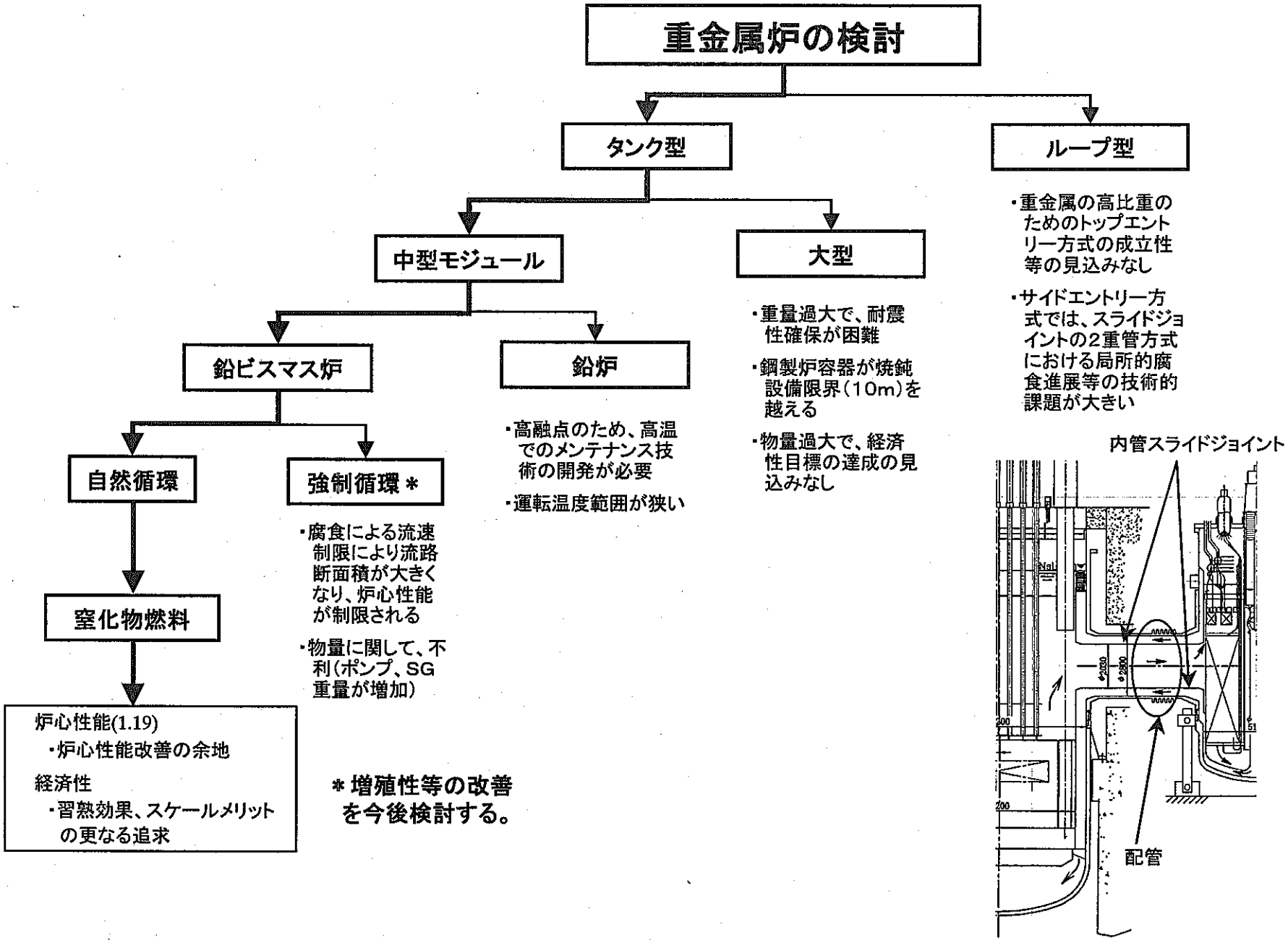
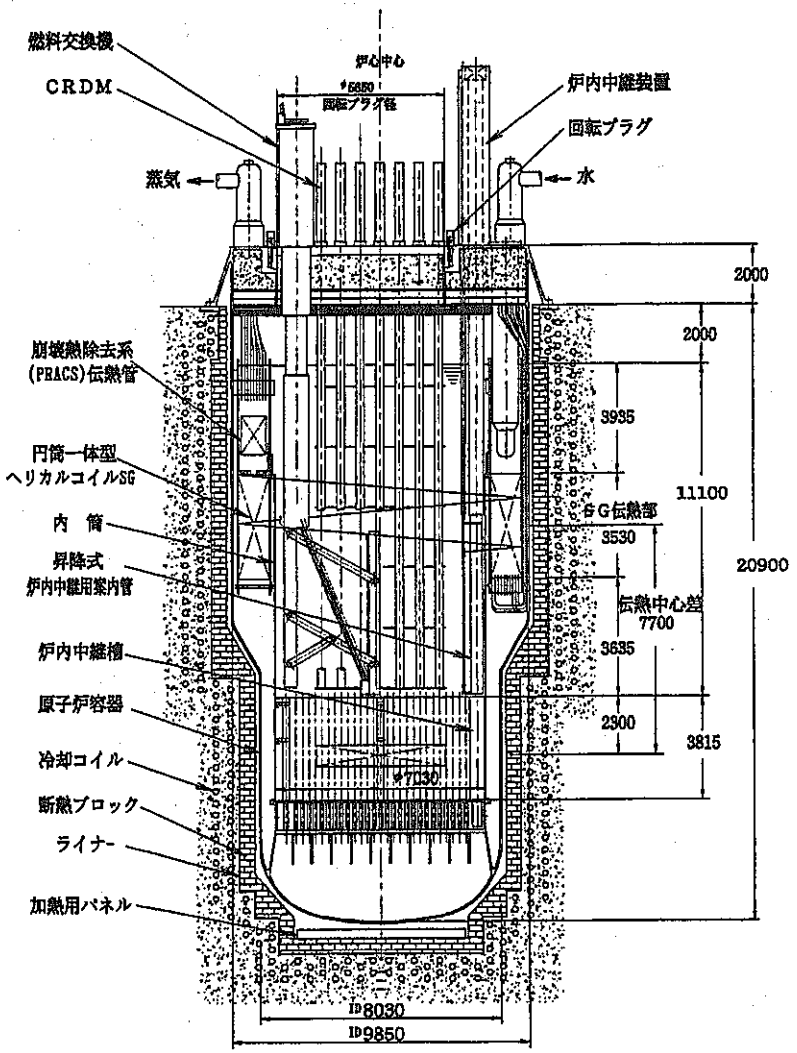


図-24 重金属冷却炉の検討の流れ

主要なプラント仕様

・電気出力　400MWe　・熱出力　1,053MWt
・プラント熱効率　38%　・蒸気発生器　ヘリカルコイル型(1基)



第1期成果

・建設コストは、現状では目標を達成していない。
（目標値の約120%、NSSS物量23.3 t/万kWe）

・安全性については、炉心冷却が最も厳しい制御棒誤引抜き事象等反応度挿入型事象に対して、自己作動型炉停止機構(SASS)の機能と合わせ、炉心の大規模な損傷を防止可能な見通しである。また、全電源交流喪失時にも自然循環のみによる崩壊熱除去能力がある。

・冷却材との共存性から炉容器は、フェライト系（12Cr系鋼）とし、溶接後の熱処理が必要であるが、炉容器径9.85mは、現有施設で処理可能な範囲であり、製作建設性上大きな問題はない見通しである。

今後の課題

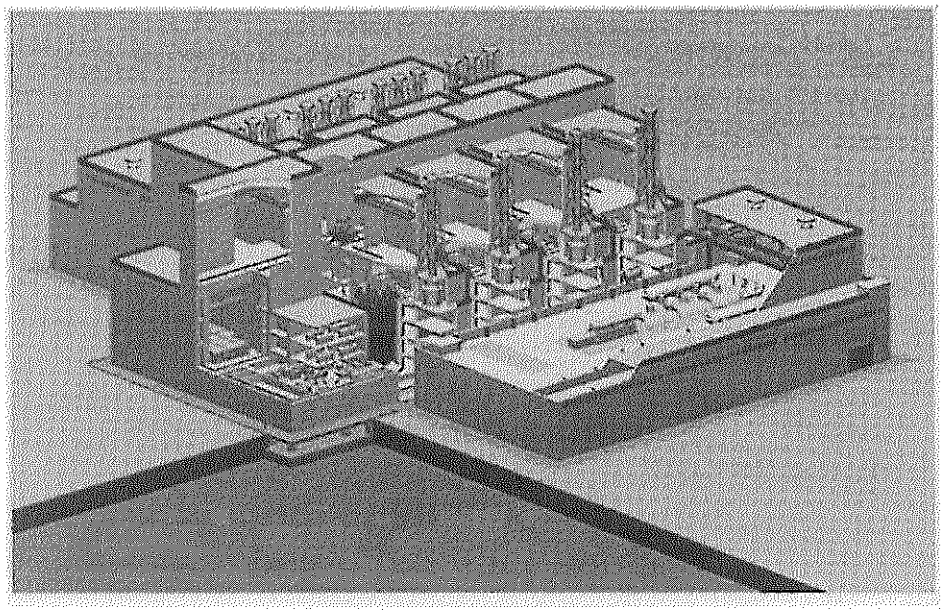
・経済性向上のため、 原子炉容器製作性、建設時のクレーン一体吊り込み重量を配慮し、さらにスケール効果を追求した出力アップ（55　万kWe程度）の検討。

・炉心性能のポテンシャルをさらに引き出すため、自然循環除熱能力を活かしつつ,強制循環力の活用を視野に入れたシステム概念を追及。

・燃料被覆管、構造材料の腐食性確認及び防食技術の検討。

・鉛及びビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被ばく上の管理

図-25　鉛ビスマス冷却自然循環炉概念図



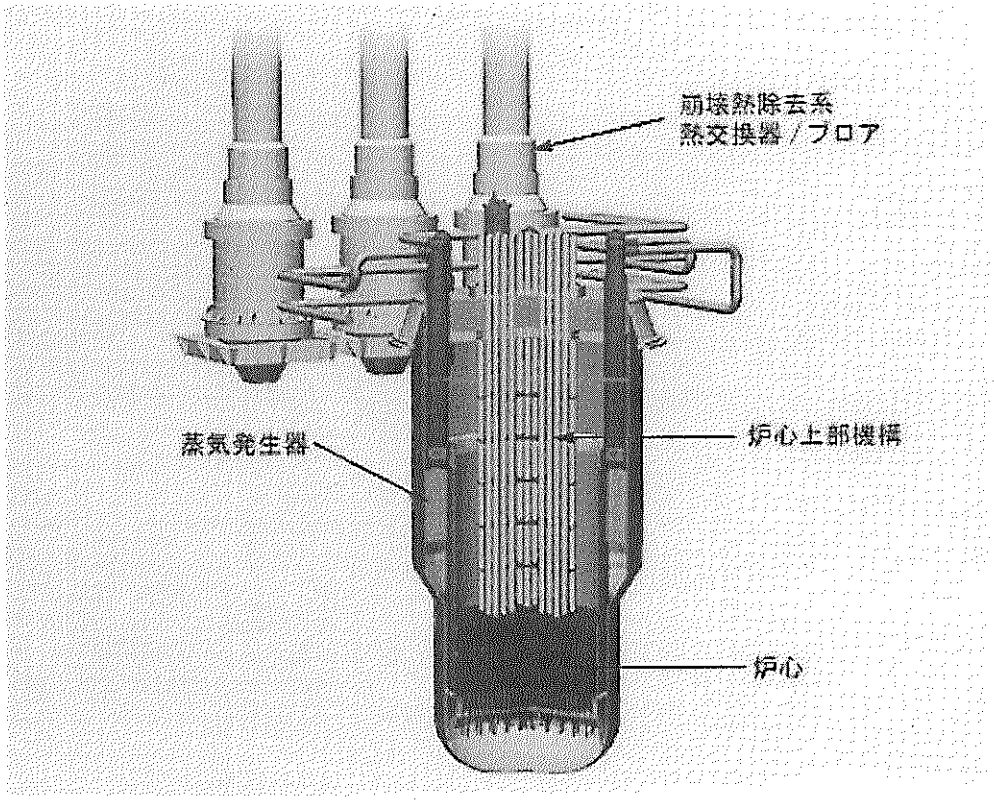


図-26　鉛ビスマス冷却中型タンク型モジュール炉の建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図

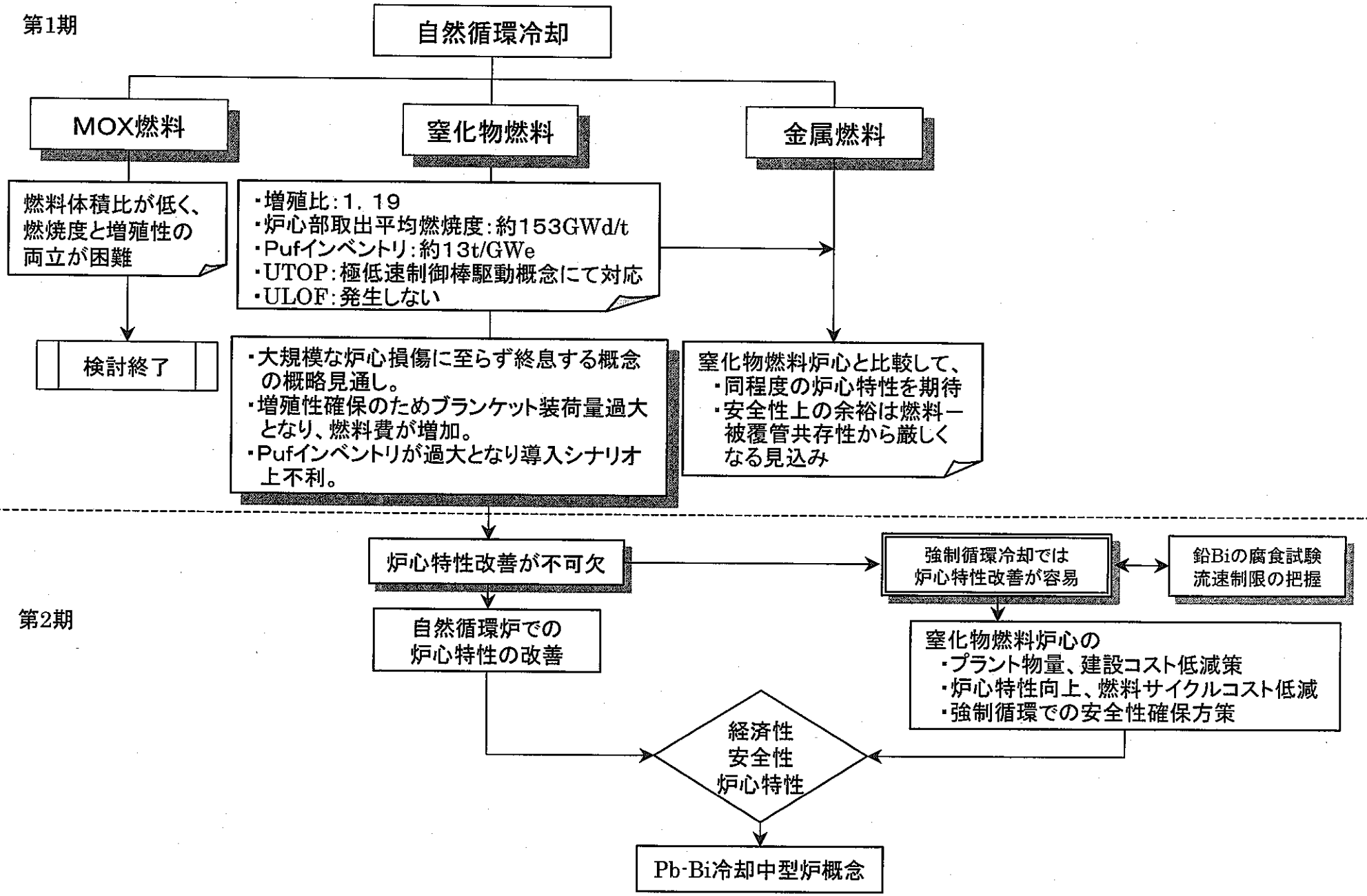
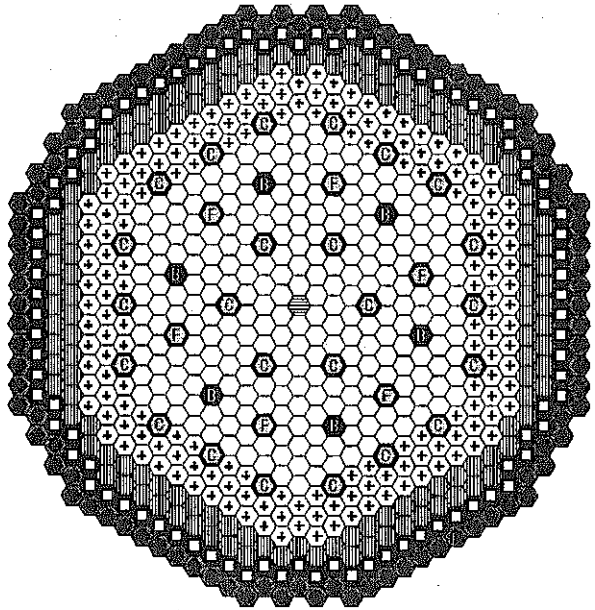
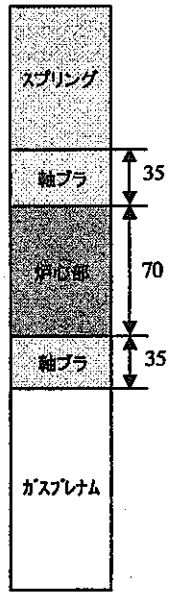


図-27　鉛ビスマス冷却炉心の検討の流れ

均質2領域炉心（窒化物燃料）





均質2領域炉心（窒化物燃料）	
・炉心出力	:400MWe / 1,053MWt
・運転サイクル	:19ヶ月
・炉心等価直径	:4.9m
・増殖比	:1.19
・複利システム倍増時間	:65年
・ボイド反応度	:6.5$

図−28　鉛ビスマス冷却中型自然循環炉心（窒化物燃料）の炉心仕様

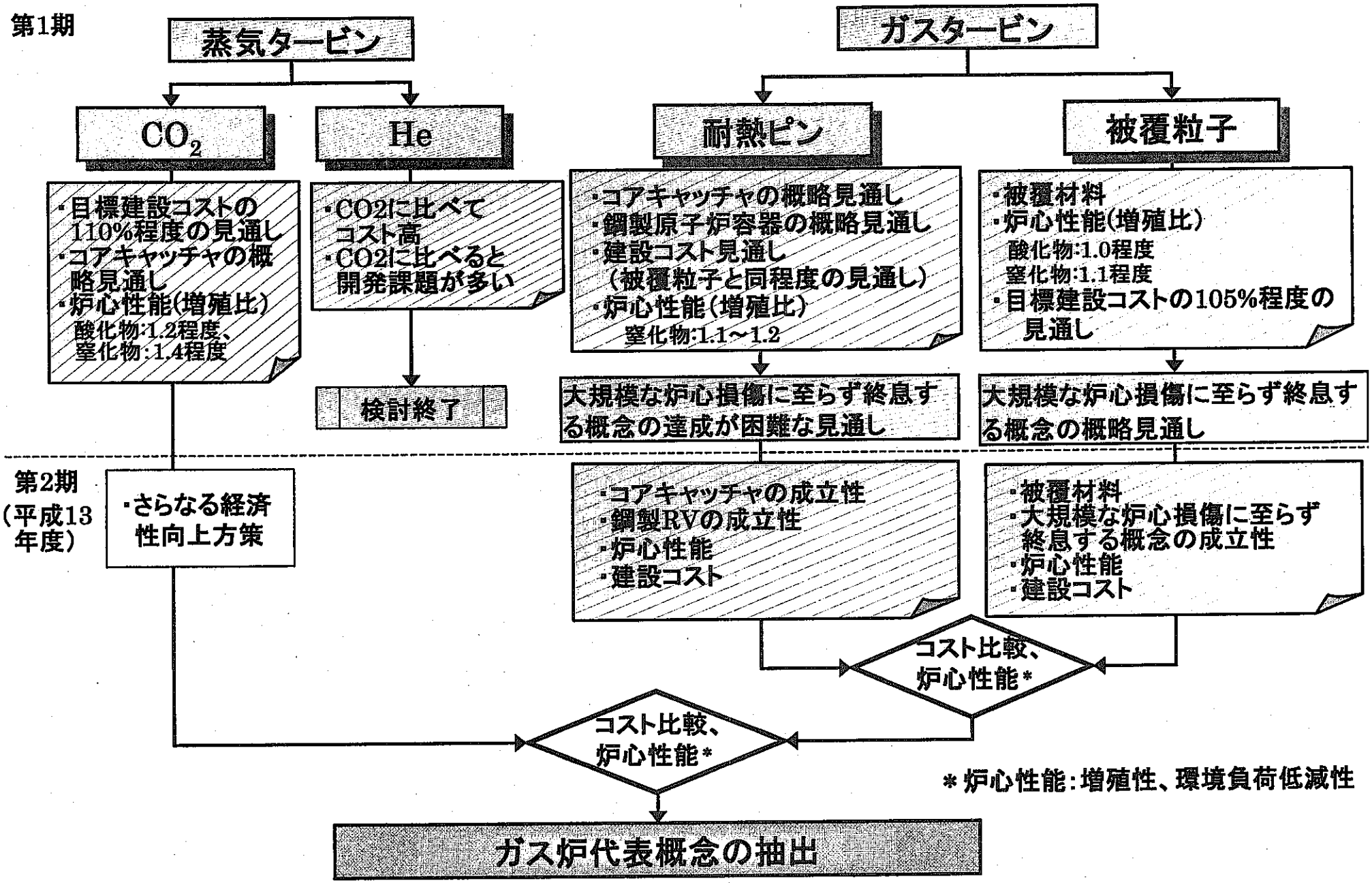
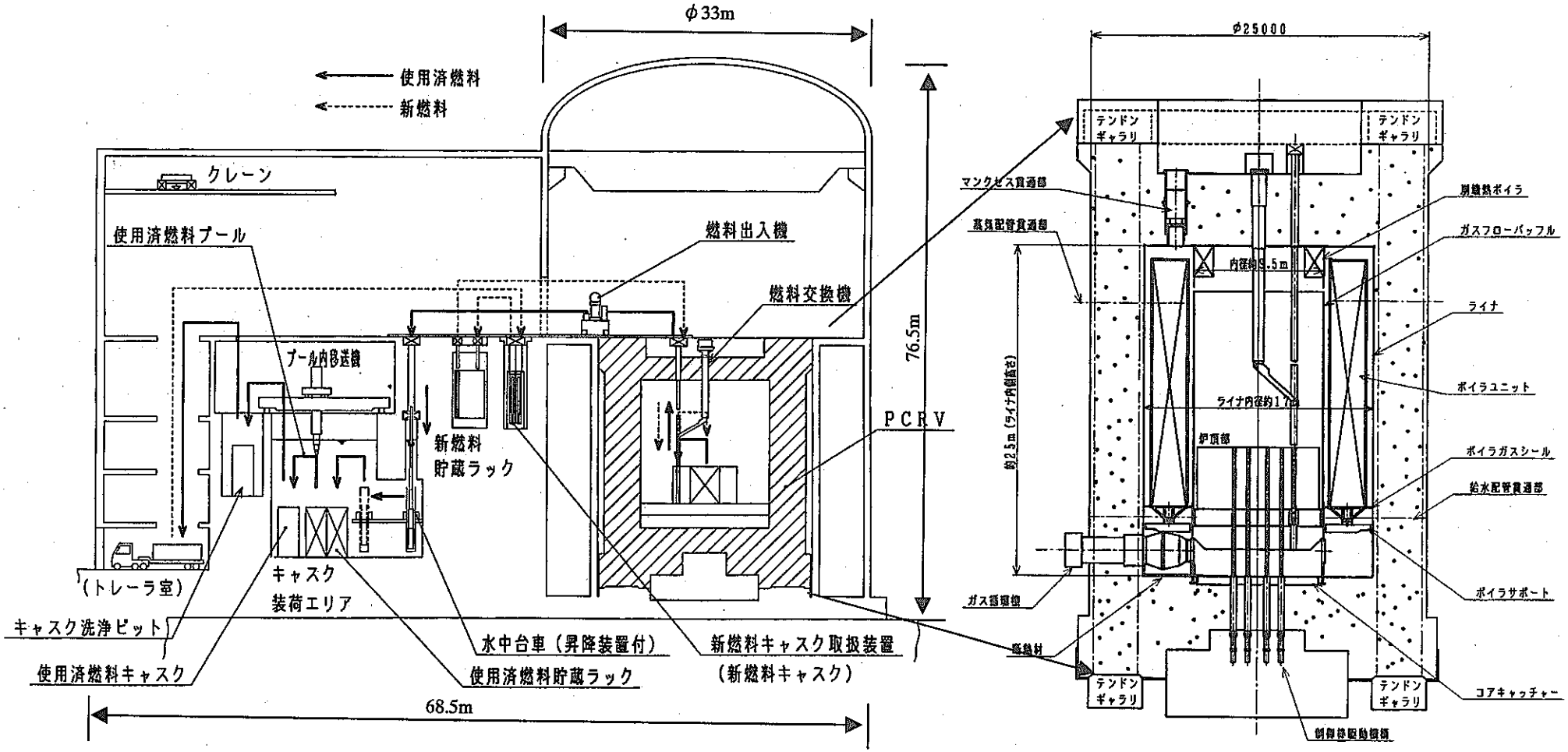


図-29 ガス冷却炉の検討の流れ



第1期成果

・建設コストは、現状では目標を達成していない。（目標値の約110%、所内負荷率が高いため送電端出力で125%、NSSS物量28.4 t/万kWe）

・安全性については、減圧事故時対策が重要であり、圧力バウンダリー破損時の放出量を制限するため流量制限機構を設置する。また、炉心損傷の影響を炉容器内で終息させるため、炉心下部にコアキャッチャーを設置し、排出された溶融燃料を安定に冷却する必要がある。

・PCRVは、「AGR」とほぼ同様であり、構造上の課題は少ないと考えられるが、高速中性子フルエンス条件下での影響評価が必要である。

今後の課題

・機器・冷却系統等の合理化により、さらなる経済性の向上　　・コアキャッチャー冷却性能の確証と受動的炉停止系の改善

図-30　炭酸ガス冷却炉検討結果

	MOX 燃料	金属燃料	窒化物燃料
炭酸ガス冷却材への適用性	特に大きな課題無し	被覆管の共晶制限により設計ウインドウは狭小となる。 被覆管温度　CO2冷却：730℃ （金属燃料上限被覆管温度：670℃）	FCI発生の可能性は無く、窒素解離が発生したとしても自由空間が大きいため致命的課題にはならない可能性あり。
	○	×	○

実用化調査研究の目標（高燃焼度/長期サイクル/TRU・FP変換/高増殖）達成能力検討

MOX燃料で可能な上限把握

取出平均燃焼度：15万MWd/t
サイクル長：24ヶ月
MA/FP含有率：1%/2%
増殖比：1.20
複利システム倍増時間：57年

窒化物燃料による性能向上度把握

取出平均燃焼度：15万MWd/t
サイクル長：34ヶ月
MA/FP含有率：1%/2%
増殖比：1.38
複利システム倍増時間：23年

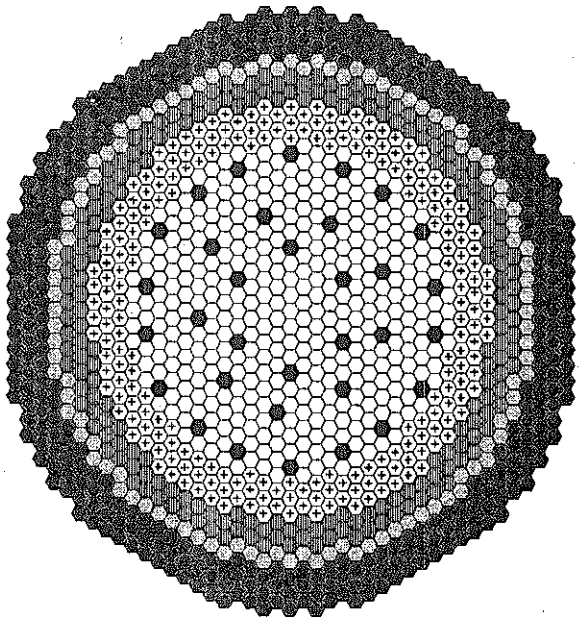
開発課題比較
・照射試験
・安全性試験
・N-15濃縮

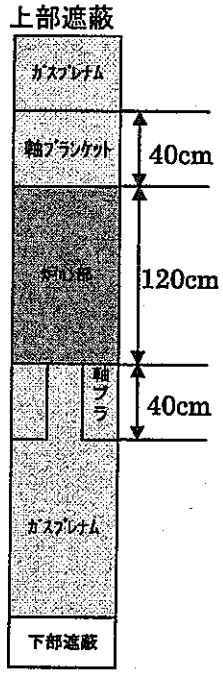
MOX燃料：実用化目標達成能力は窒化物燃料に及ばないが、開発課題が少ないことから窒化物燃料の実用化が見通せるまでは最有力

窒化物燃料：開発課題の見通しが立てば実用化目標達成能力の観点で最も有力

図-31　炭酸ガス冷却炉心の検討の流れ

均質2領域炉心（酸化物燃料）

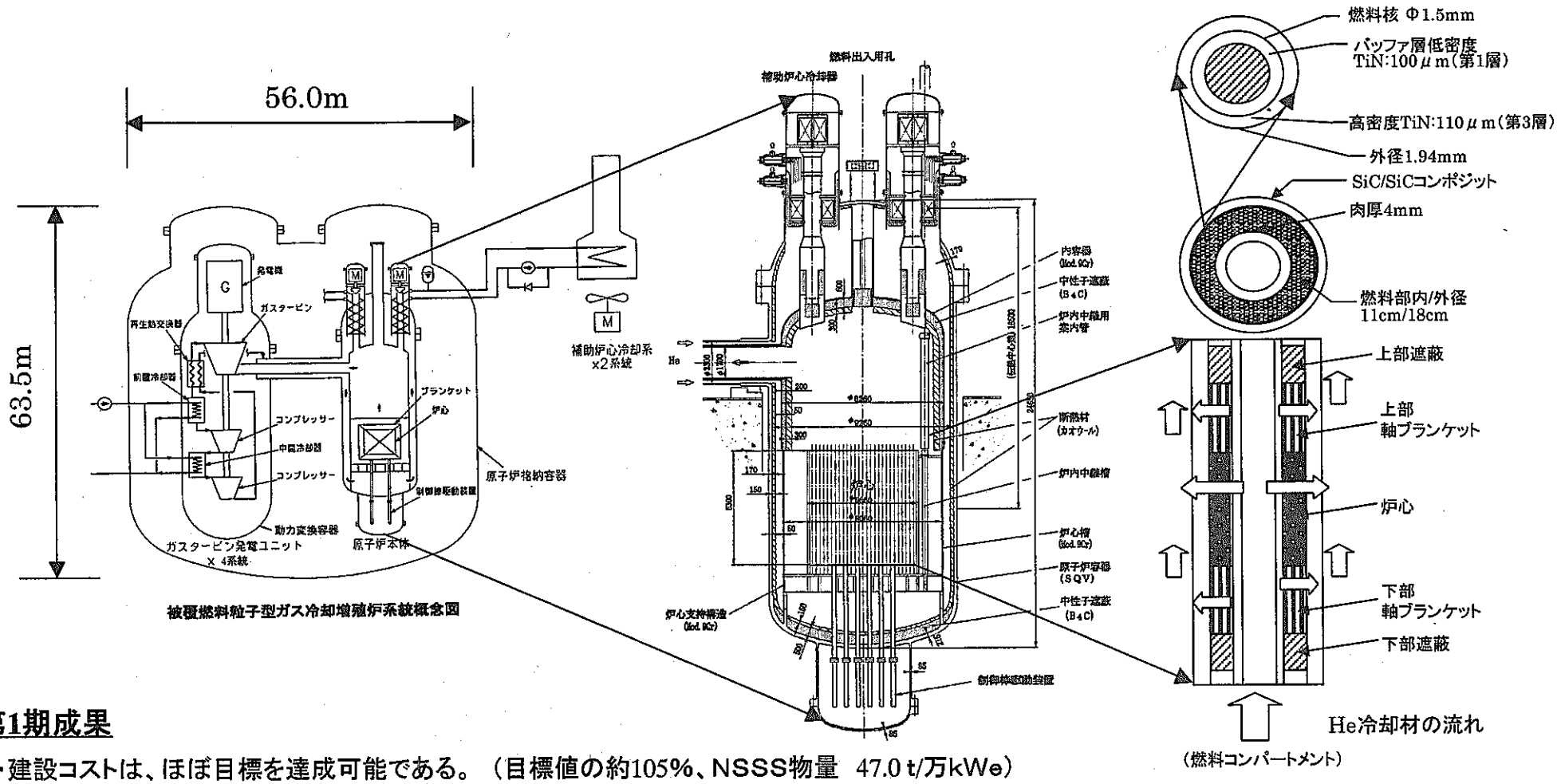




均質2領域炉心（酸化物燃料）

・炉心出力	: 1,369MWe / 3,600MWt
・運転サイクル	:24ヶ月
・炉心等価直径	:約5.9m
・増殖比	:1.2
・複利システム倍増時間	:約57年

図-32 炭酸ガス冷却大型炉の炉心仕様（酸化物燃料）



第1期成果

・建設コストは、ほぼ目標を達成可能である。（目標値の約105%、NSSS物量 47.0 t/万kWe）

・事故後の自然循環による炉心冷却確保のため低出力化して炉心損傷に対する高い耐性を有している。このため、減圧事故時にスクラム失敗を想定しても、負のドップラー反応度、被覆粒子の耐熱性等により炉心損傷の発生を防止できる可能性がある。

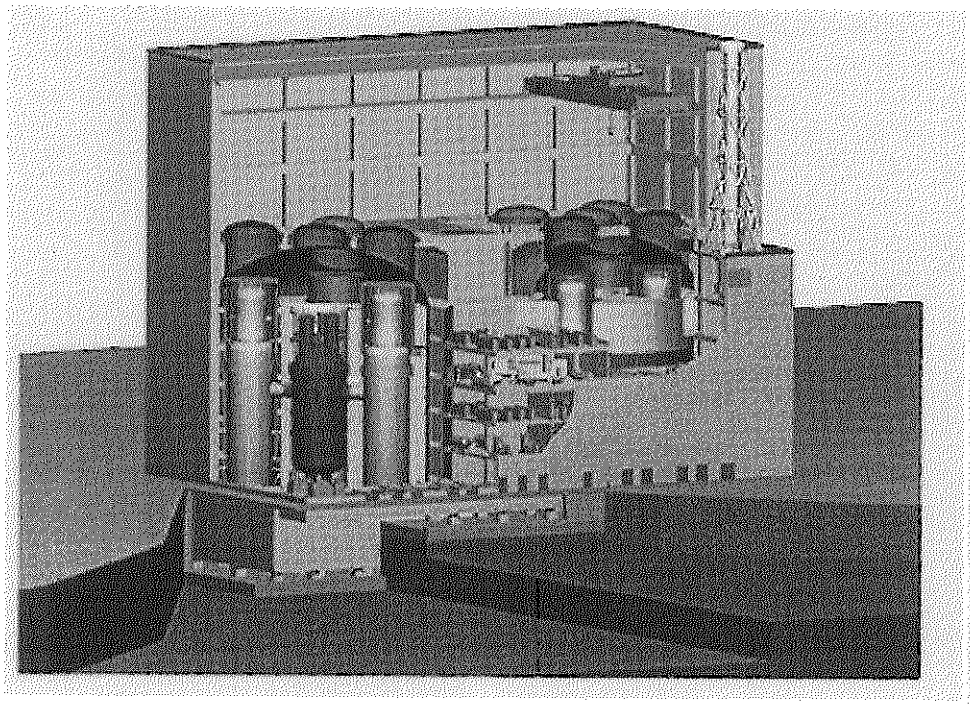
今後の課題

・高速中性子下で耐えられ、炉心性能を確保可能な被覆粒子材料の開発

・被覆粒子燃料集合体（セラミック複合材料）の構造健全性の確認

・ガスタービンユニットを収納する大型鋼製格納容器の製作性および大型の縦型ガスタービンの軸受、熱交換器の製作性の確認。

図-33 ヘリウムガス冷却型炉（被覆粒子型燃料）検討結果



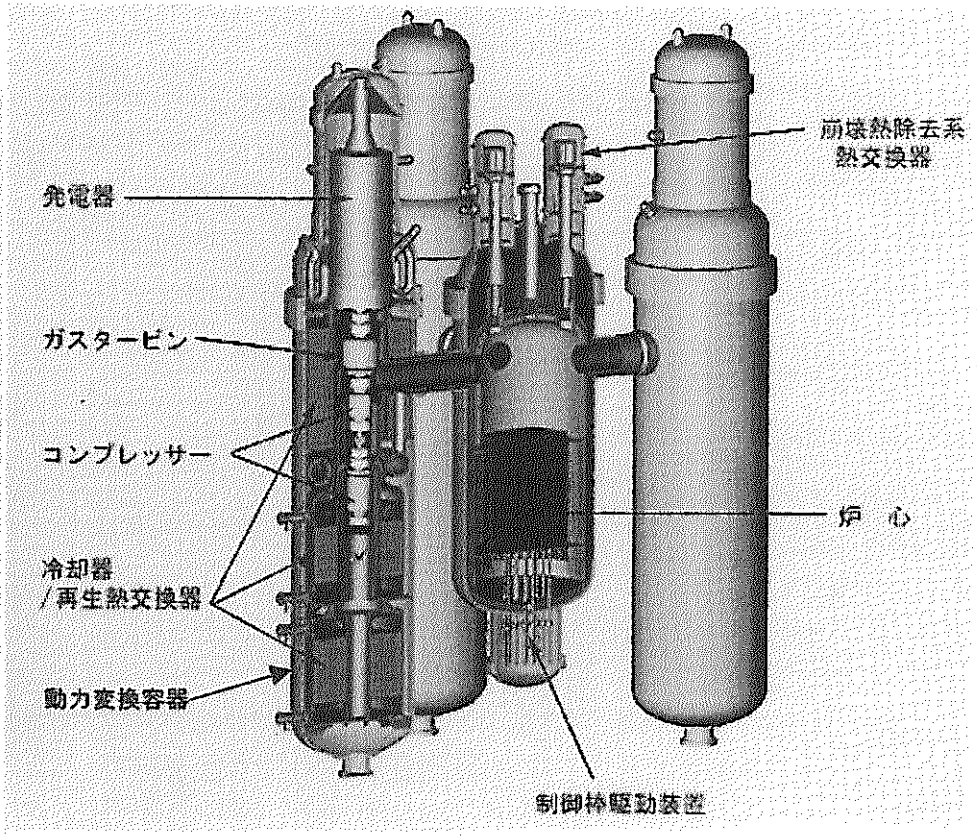


図-34　ヘリウムガス冷却炉(被覆粒子型燃料)の建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図

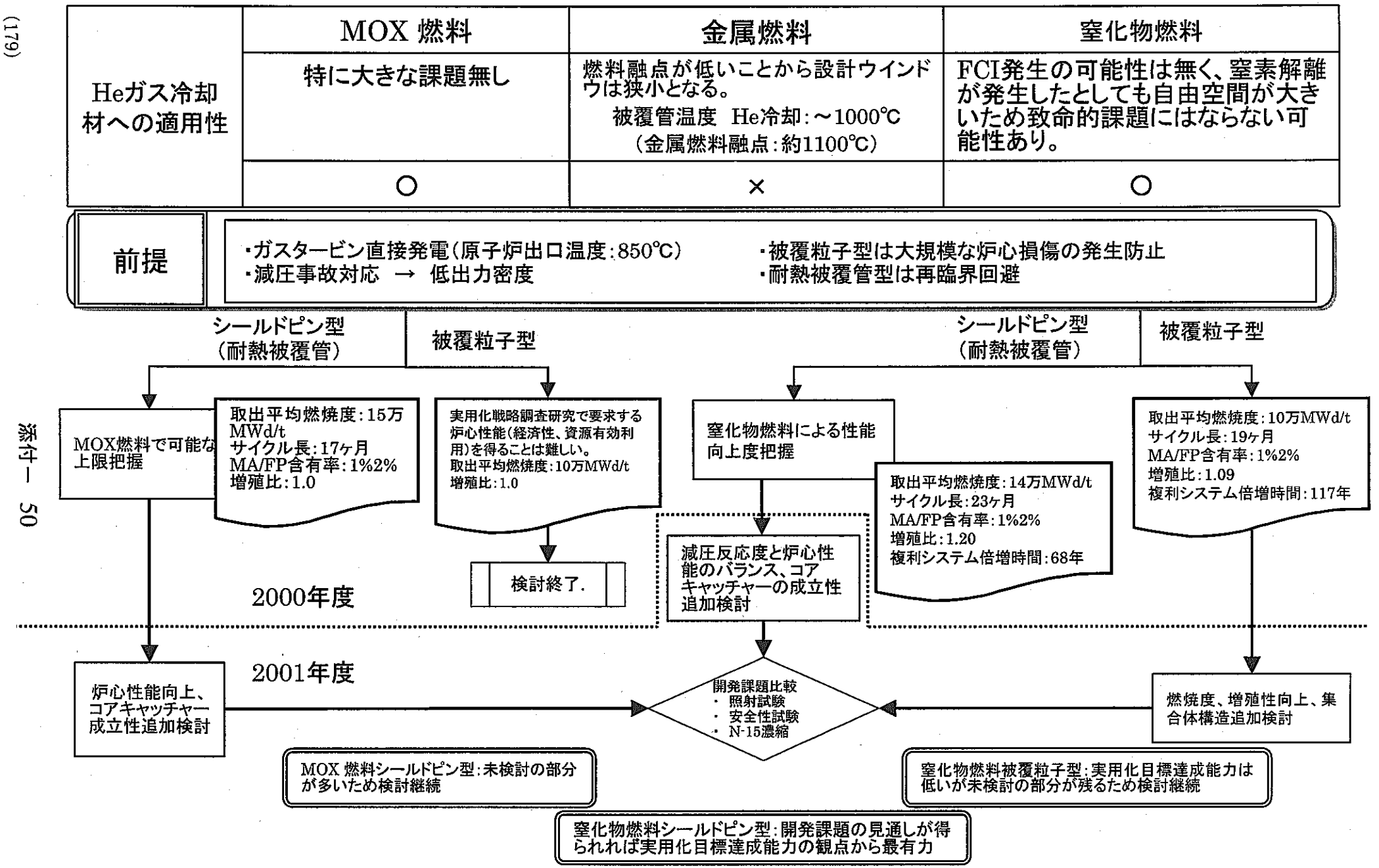
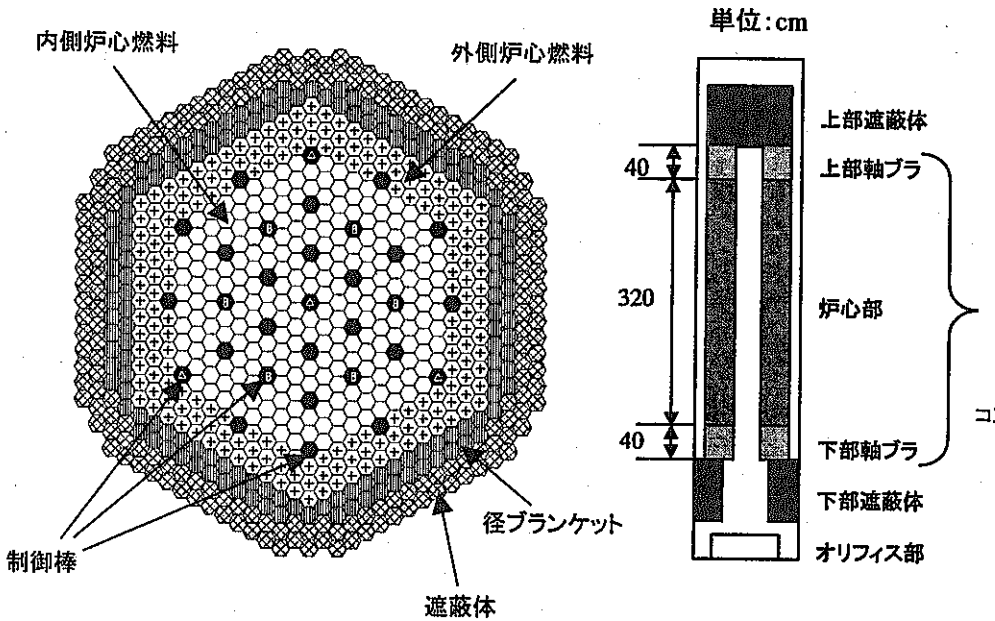
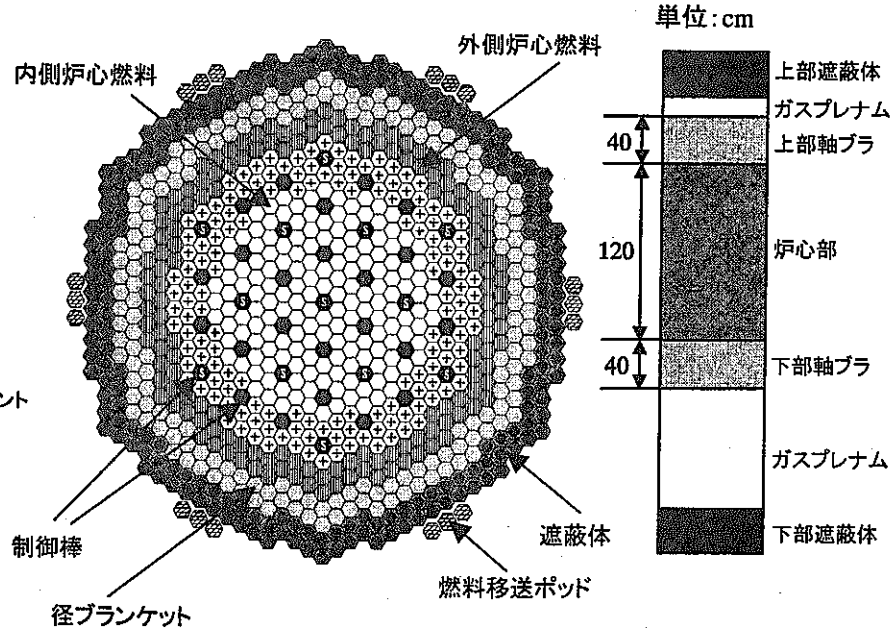


図-35 ヘリウムガス冷却炉心の検討の流れ

被覆粒子燃料He冷却炉(窒化物燃料)



耐熱被覆管型燃料He冷却炉(窒化物燃料)



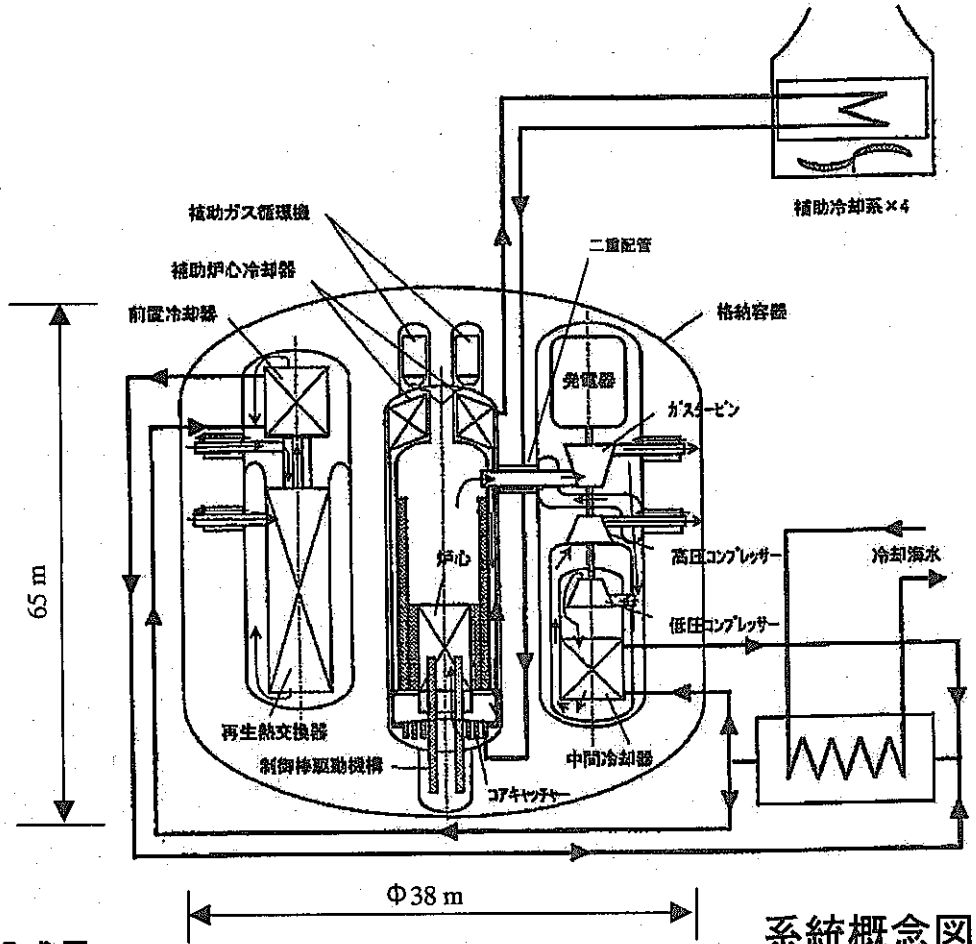
被覆粒子燃料He冷却炉

- 炉心出力 :2,400MWt/1,124MWe
- 運転サイクル :18.7ヶ月
- 炉心等価直径 :5.62m
- 増殖比 :1.09
- 複利システム倍増時間 :116年

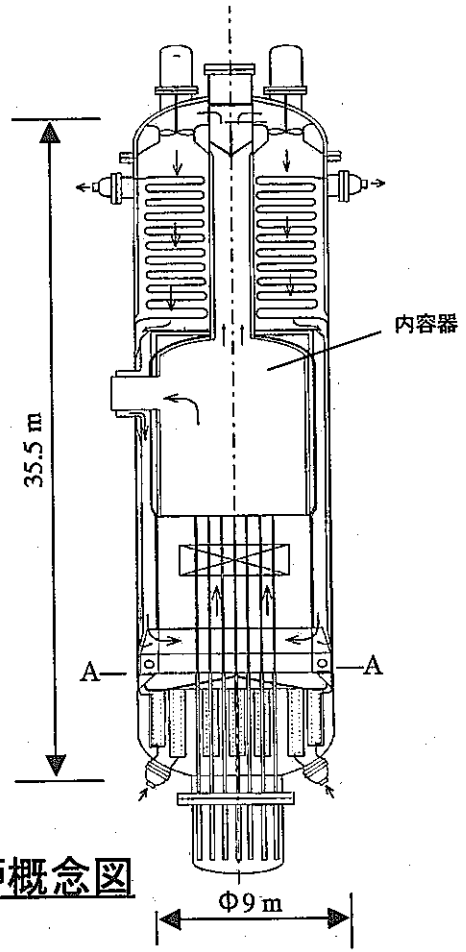
耐熱被覆管型燃料He冷却炉

- 炉心出力 :2,400MWt/1,080MWe
- 運転サイクル :23.1ヶ月
- 炉心等価直径 :4.89m
- 増殖比 :1.20
- 複利システム倍増時間 :68年

図-36 ヘリウムガス冷却高速炉炉心の炉心仕様(窒化物燃料)



系統概念図



原子炉概念図

第1期成果

・建設コストは、現状では目標を達成していない。（目標値の約115%、NSSS物量　61 t/万kWe）

・減圧事故時、流量制限機構と補助炉心冷却系による強制循環冷却により、また、全電源喪失事故時は、自然循環冷却により燃料被覆管温度を制限値温度以下とできる見通しである。

今後の課題

・炉心損傷時の影響を炉容器内で終息させるために鋼製炉容器の下部に設置したコアキャッチャーの成立性確認

・ガスタービンユニットを収納する大型鋼製格納容器の製作性及び大型の縦型ガスタービンの軸受、熱交換器の製作性の確認。

・炉心性能を向上し得る耐熱被覆管材料の開発

図-37　ヘリウムガス冷却炉（耐熱被覆管型燃料）の検討結果

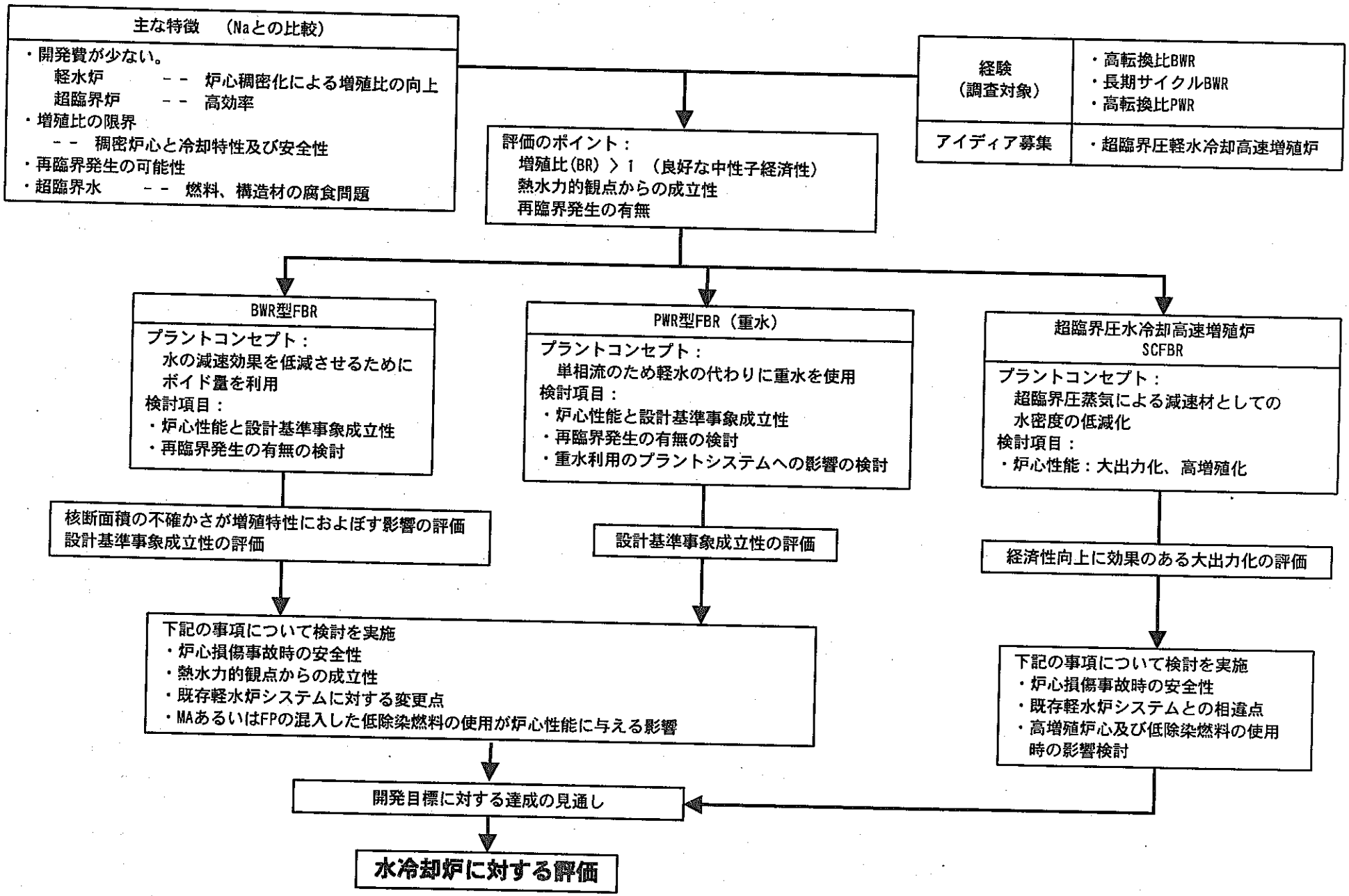


図-38　水冷却炉の検討の流れ

主要プラント仕様
- ・電気出力　1,356MWe
- ・熱出力　3,926MWt
- ・プラント熱効率　約35%

第1期成果

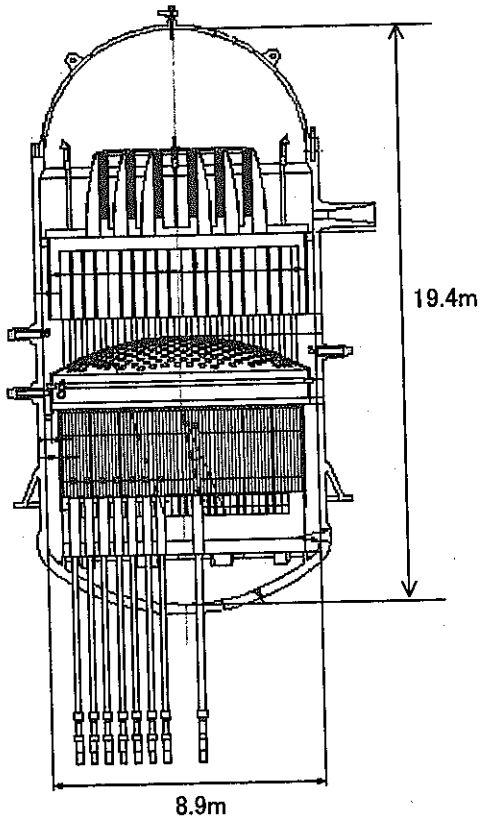
・ABWRをベースに炉心の稠密化、高ボイド率化により燃料体積比を高め、増殖性確保を図った。寿命期間中に負のボイド反応度係数を達成できる設計とするため扁平な炉心とすること等により炉心圧損が小さく、自然循環による炉心流量が確保可能となり、ABWRの再循環ポンプが削除可能。

・経済性については、再循環系の削除、格納容器容積低減等により、ABWRと同等あるいはやや優れるものと考える。

・炉心燃料としては、扁平な軸方向非均質炉心を構成し、高除染燃料炉心でのPu残存比は1.05程度、複利システム倍増時間は190年程度を達成できる見通しである。

今後の課題

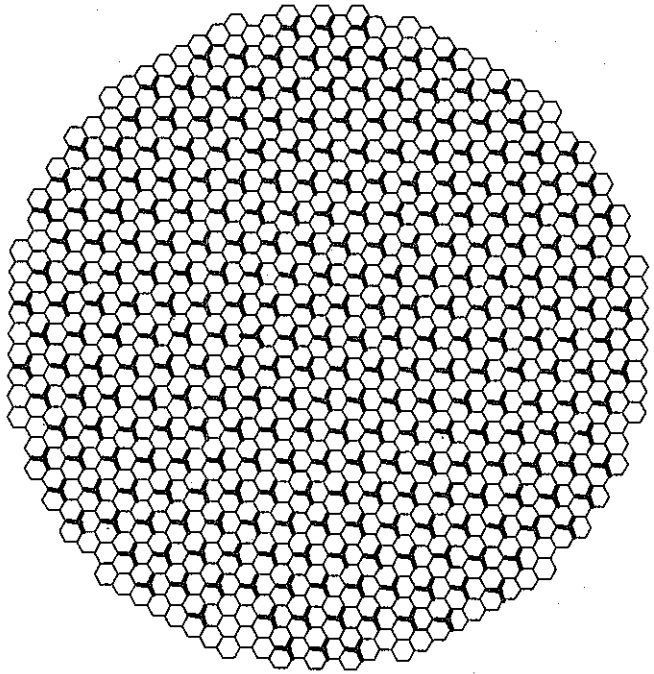
・稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認及び炉心損傷時の安全特性の把握とともに、安全確保を前提にした低除染TRU燃料の燃焼能力、増殖比の向上と倍増時間の短縮可能性等の検討が重要。



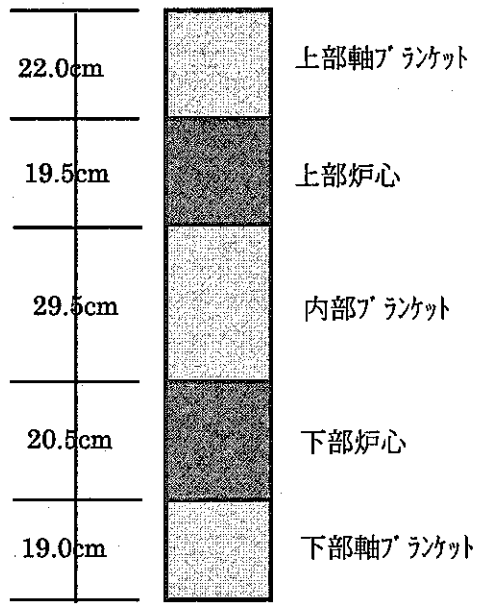
BWR型FBR

図-39　BWR型FBR(高転換比BWR型炉)の検討結果

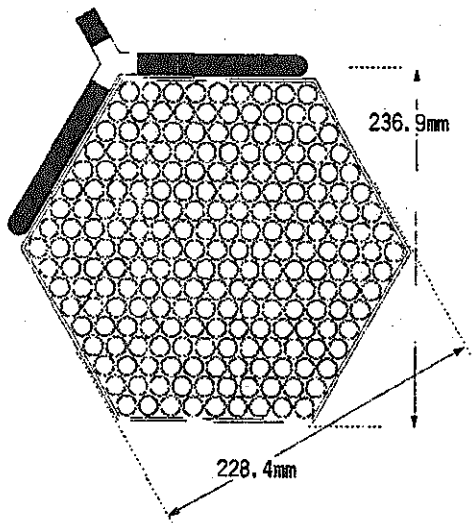
(1)炉心断面図
(基準炉心)



(2)炉心縦断面
(基準炉心)



(3)集合体断面図



(4)溶融燃料排出ダクト付
燃料集合体(FAIDUS)

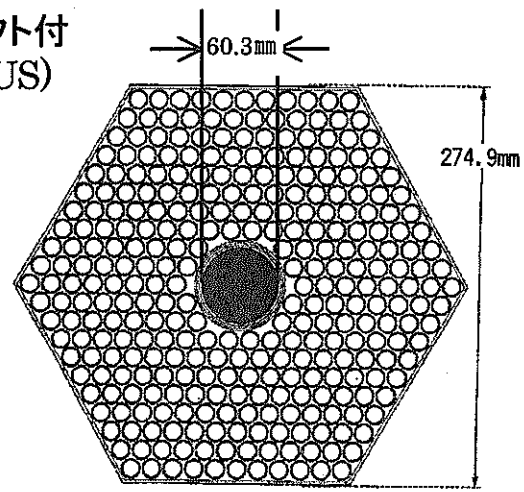


図-40　BWR型FBRの炉心・燃料集合体概念図

主要なプラント仕様

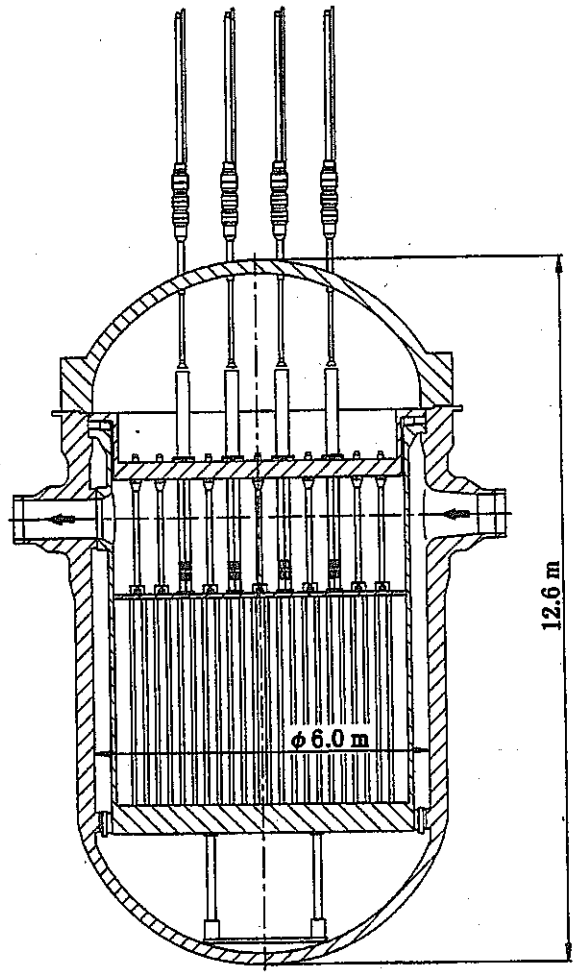
- 電気出力　1,200MWe
- 熱出力　3,480MWt
- プラント熱効率　約34%

第1期成果

- PWRをベースに炉心の稠密化により燃料体積比を高めるとともに、吸収断面積の小さい重水を冷却材に用いることによって 増殖性確保を図った。PWRに設置されている化学体積制御系は、中性子スペクトルの硬化に伴い反応度効果が小さくなるため削除。
- 経済性については、重水の使用に伴う設備増加が必要となるが、それ以外はPWRと同等と考えられる。
- 炉心は、負のボイド反応度係数と増殖性を確保。高除染燃料炉心でのPu残存比1.07程度、複利システム倍増時間は、約100年程度となる。

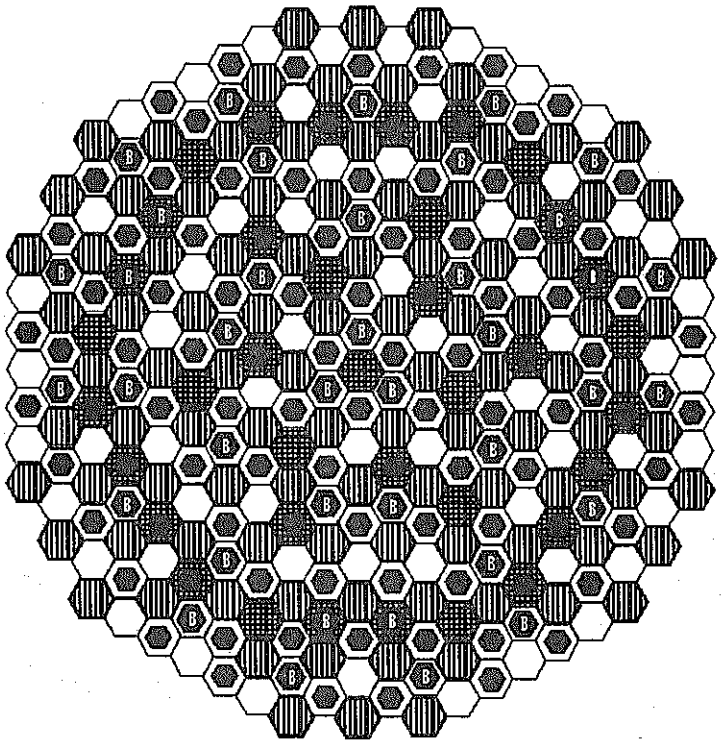
今後の課題

- 稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認及び安全確保を前提にした低除染TRU燃料の燃焼能力、増殖比の向上と倍増時間の短縮可能性等の検討が重要。

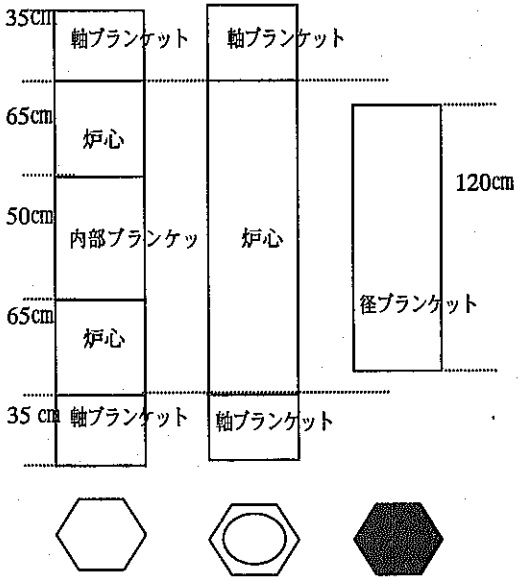


高転換比 PWR

図-41　PWR型FBR(高転換比PWR型炉)の原子炉構造

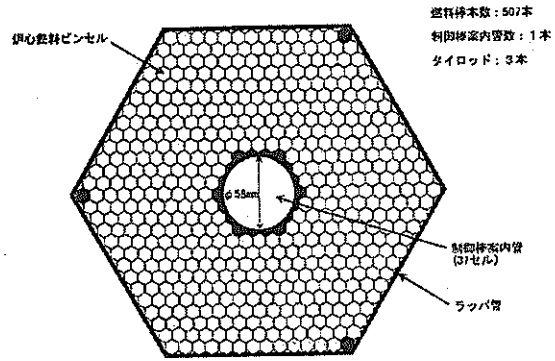


⬡	内側炉心燃料集合体（内部ブランケット付き）	１７４体
⬡	内側炉心燃料集合体（内部ブランケット無し）	３６体
⬡	径方向ブランケット	１０３体
⬡	主系制御棒	（４０体）
⬡	後備系制御棒	（１５体）
	合　計	３１３体



(2) 炉心縦断面図

(3) 集合体断面図
(基準炉心)



(4) 集合体断面図
(FAIDUS)

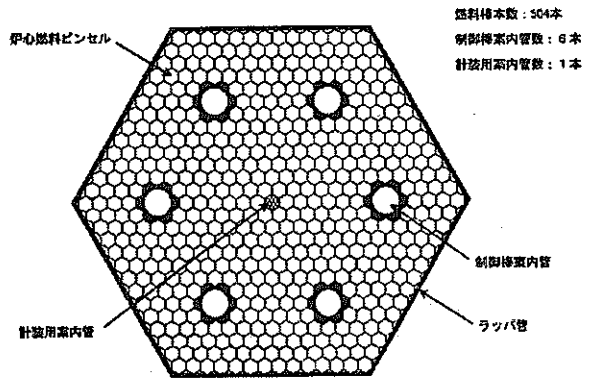
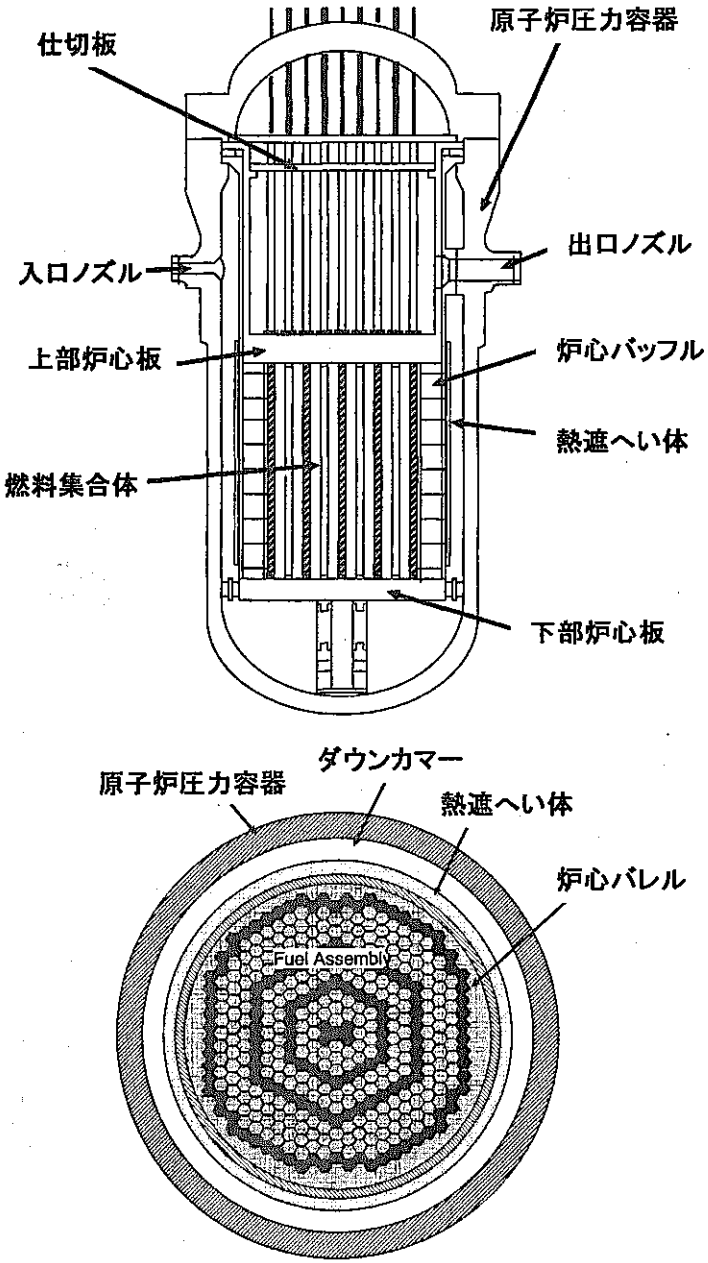


図-42 PWR型FBRの炉心仕様・燃焼特性

主要プラント仕様	
・電気出力	1,698MWe
・熱出力	3,832MWt
・プラント熱効率	約44.3%



第1期成果

・ABWRをベースに炉心を稠密化するとともに、冷却材密度の小さい超臨界圧水(25MPa程度)を用い、増殖性の確保と高熱効率を図った。

・経済性については、貫流型直接サイクルの適用による設備簡素化およびコンパクト化が可能であり、高い熱効率の達成により、既存軽水炉に比べ同等以上の経済性が期待できると考えられる。

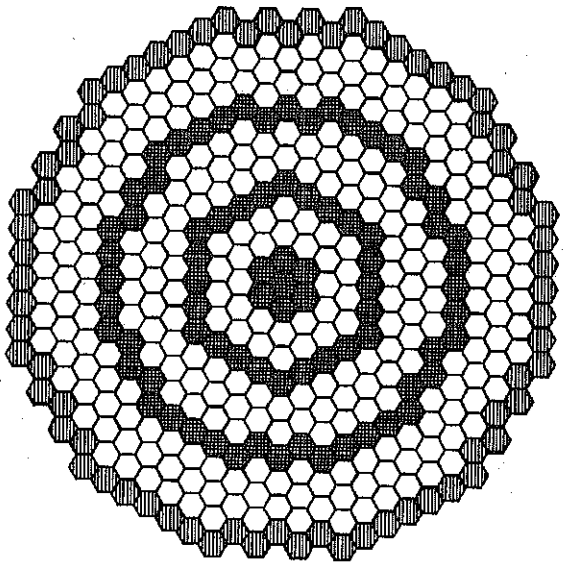
・炉心は、３領域(内・中・外)の炉心と各領域間にブランケット燃料を装荷した径方向非均質炉心である。高除染燃料炉心でのPu残存比は1.03程度、複利システム倍増時間は、約100年程度となる見通しである。

今後の課題

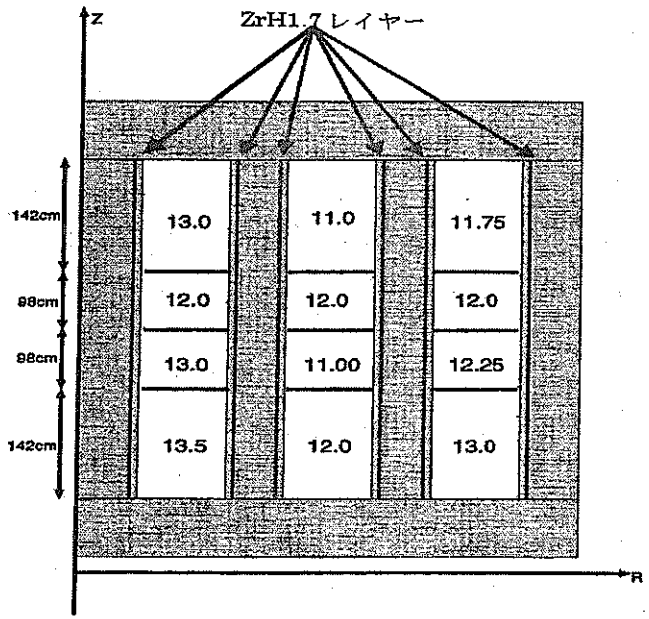
・稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認、超臨界圧水条件下で耐食性を有する燃料被覆管の材料開発、事故時の炉心冷却性の確認、並びに炉心損傷時の事象推移と溶融燃料移行挙動を含む再臨界性及び再臨界時の格納機能に関する検討が重要。

図-43 超臨界圧水冷却高速増殖炉の検討結果

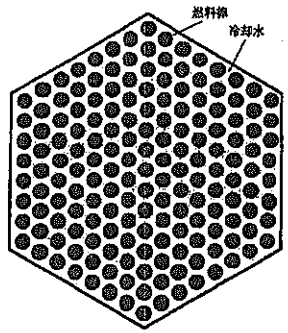
(1)炉心断面図



(2)炉心立断面図



(3)炉心燃料



(4)ブランケット燃料

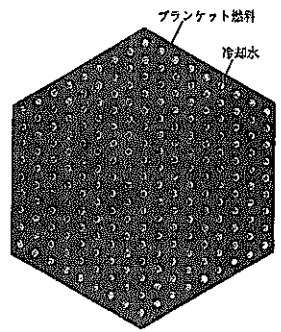


図-44　超臨界圧水冷却高速増殖炉の炉心配置図及び燃料集合体断面図

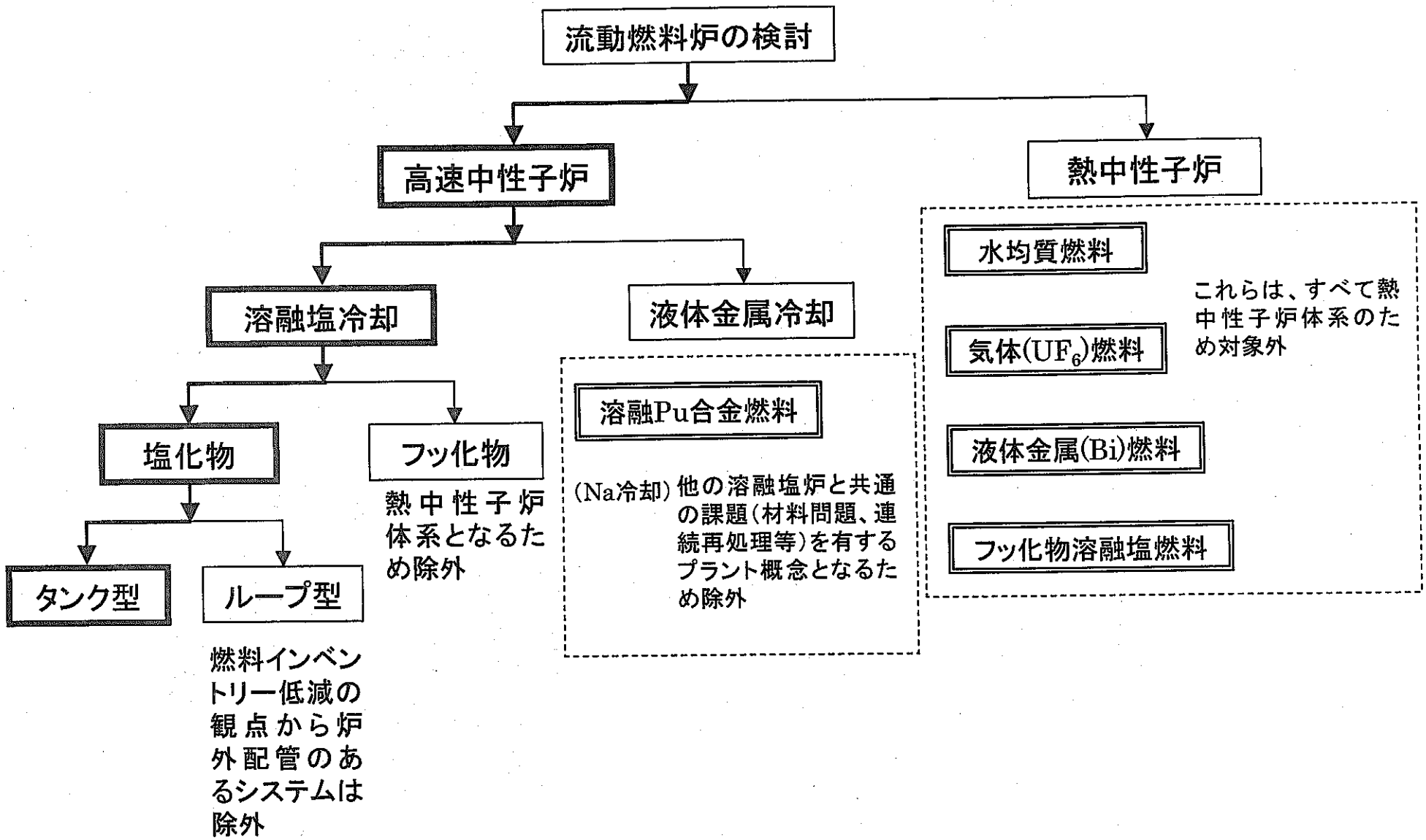
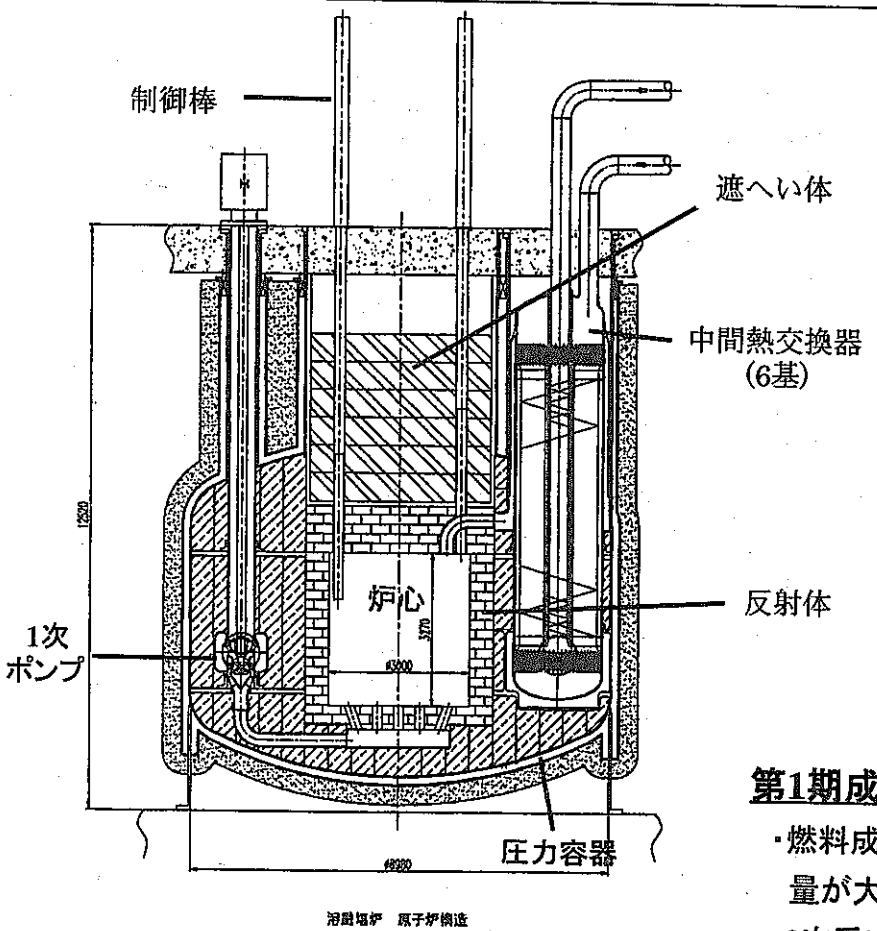


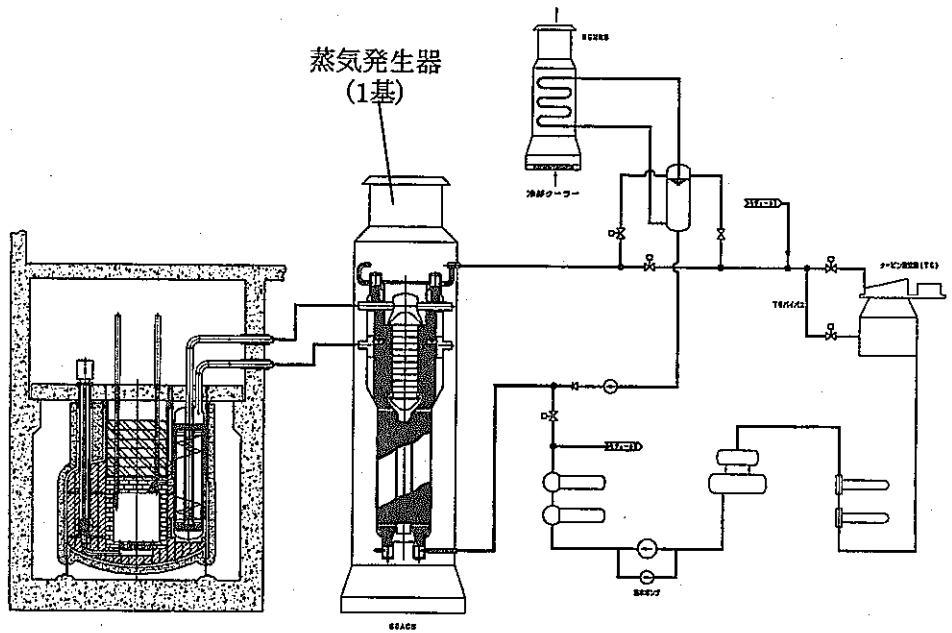
図-45　溶融塩炉の検討の流れ

主要プラント仕様

- 電気出力　420MWe　・熱出力　1,000MWt　・燃料種類　三塩化物（$10NaCl\text{-}20UCl_3\text{-}2.5PuCl_3$）
- 出力密度：40W/cc　・運転期間：40年連続運転　・燃焼度：約5万MWd/t
- 増殖費：1.03（ブランケットなしの場合）　・プラント熱効率　約42%



塩化物溶融塩炉原子炉概念



塩化物溶融塩プラント基本系統図

第1期成果

- 燃料成型加工、燃料交換、輸送が不要なため燃料費が低減できるが、原子炉物量が大きく（ナトリウム冷却炉の約4倍）に達する見込み。
- 2次系冷却材に鉛系冷却材を選定しているが、中間熱交換器伝熱管は溶融塩と鉛の厳しい環境条件下であり、双方と共存性のある材料は見出せない。
- 増殖比は、1.0程度でさらに上げる場合には、燃料インベントリーが増大し、システム倍増時間が長期化する。

図-46　塩化物溶融塩炉検討結果

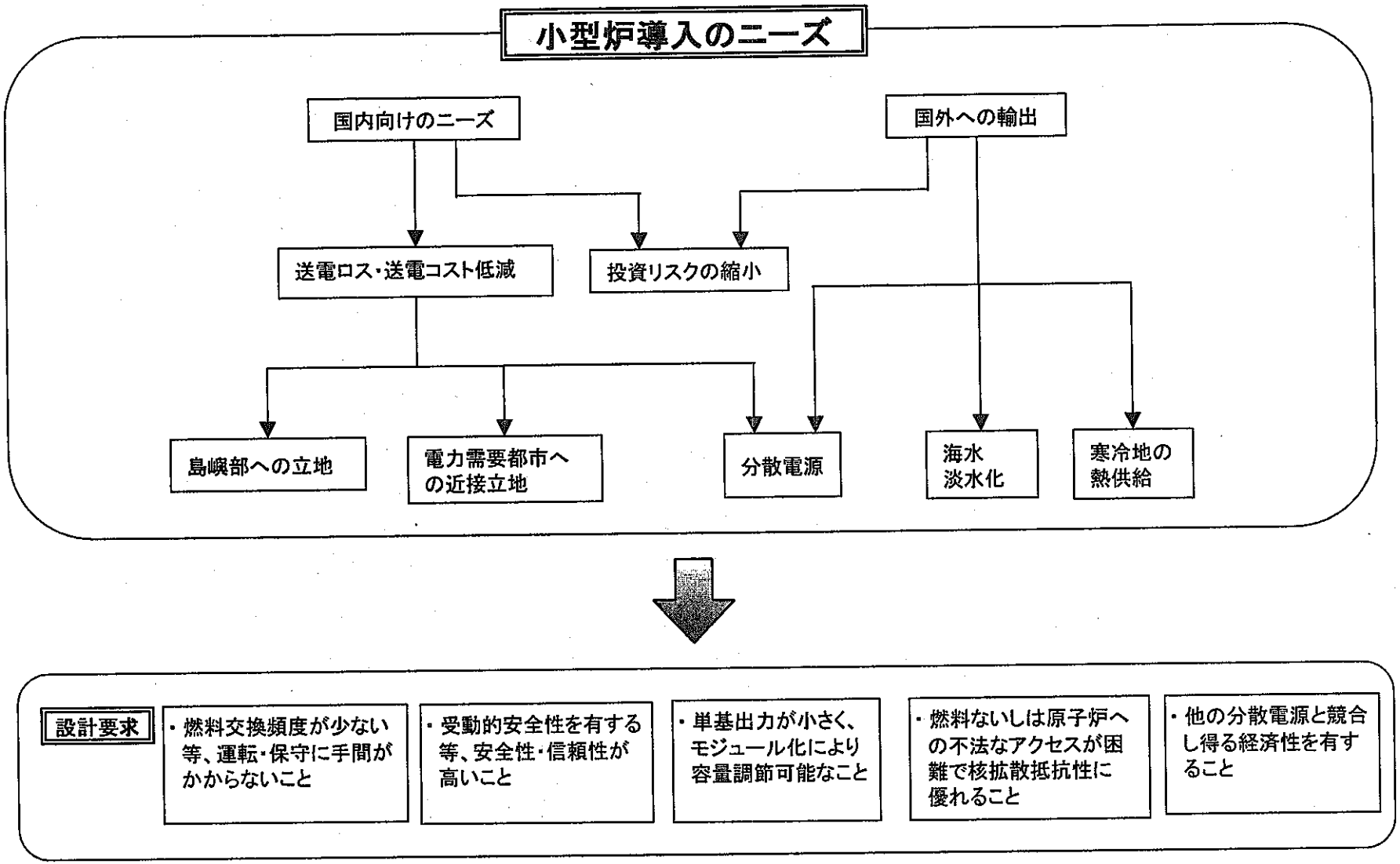


図-47 小型炉の導入のニーズと設計要求

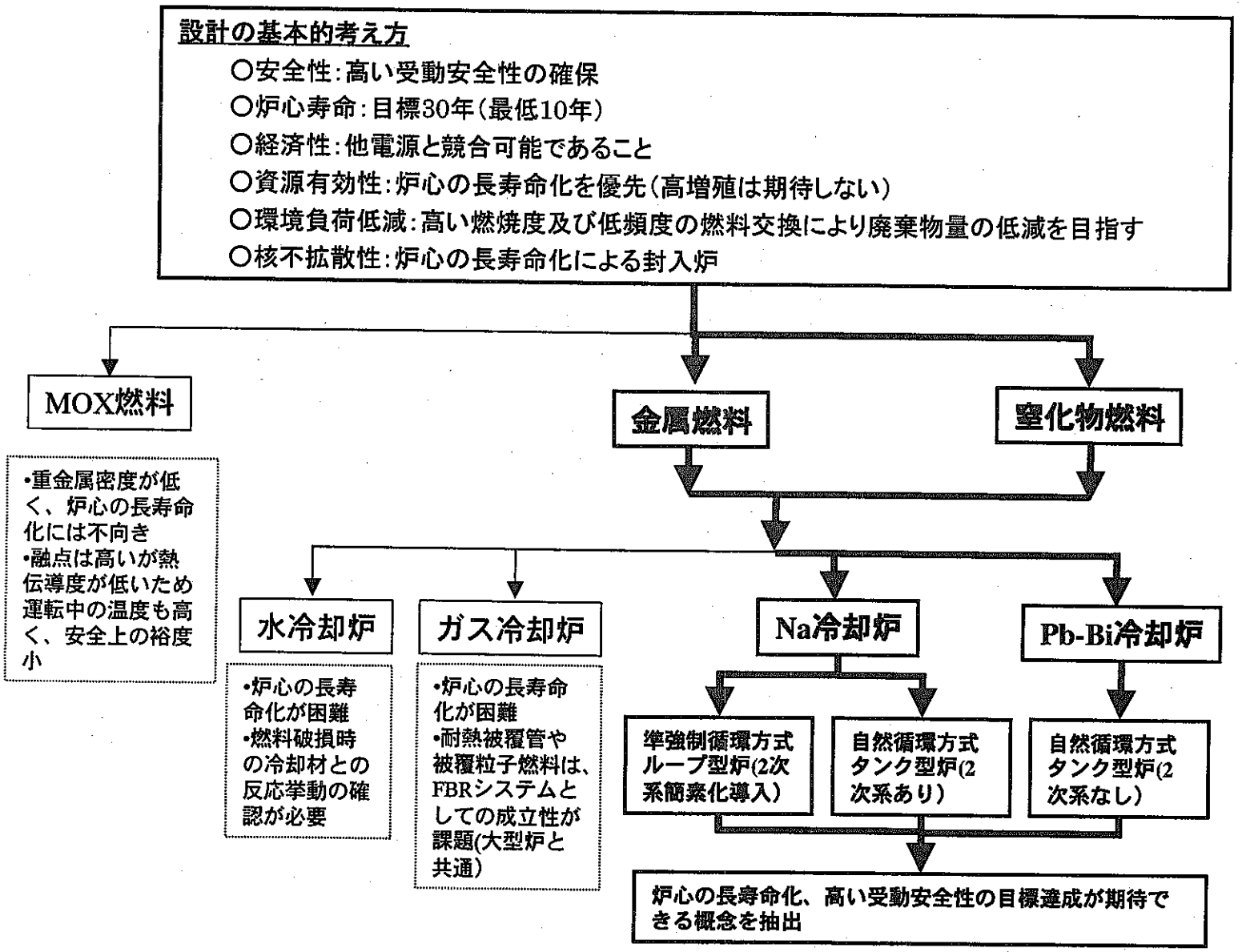
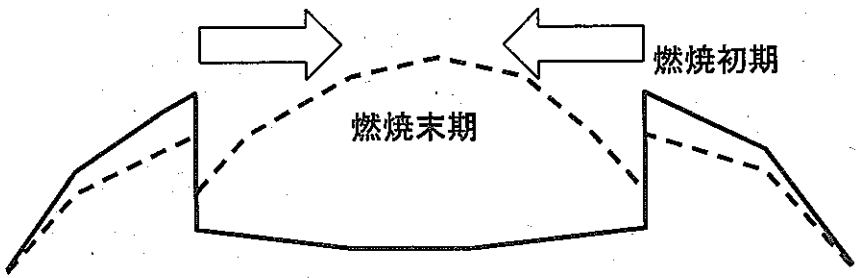


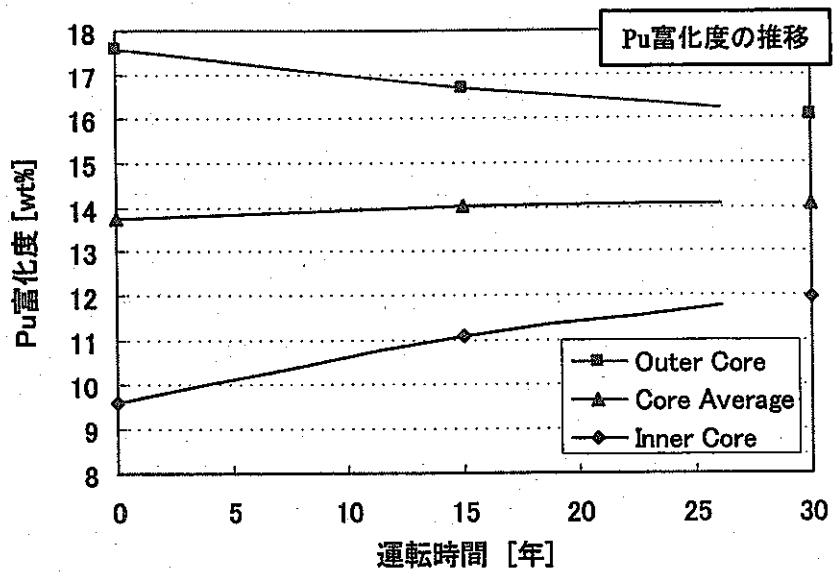
図-48 小型炉概念の検討の流れ

○ 内側炉心、外側炉心のPu富化度が異なる炉

→ 燃焼に伴って外側炉心から内側炉心へ出力分布が自然に移動し、燃焼反応度を小さく抑える



高富化度差二領域炉心の出力分布変化
（炉周辺から中央へ）



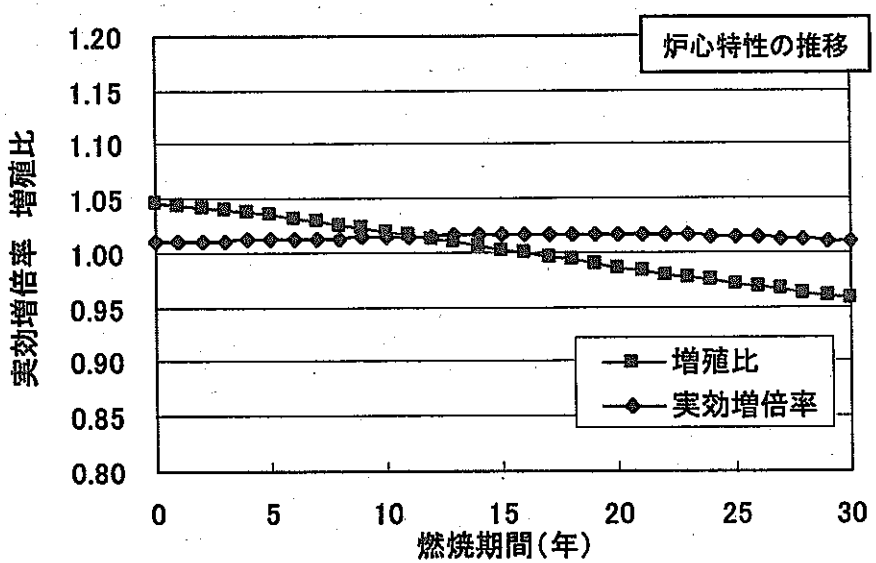


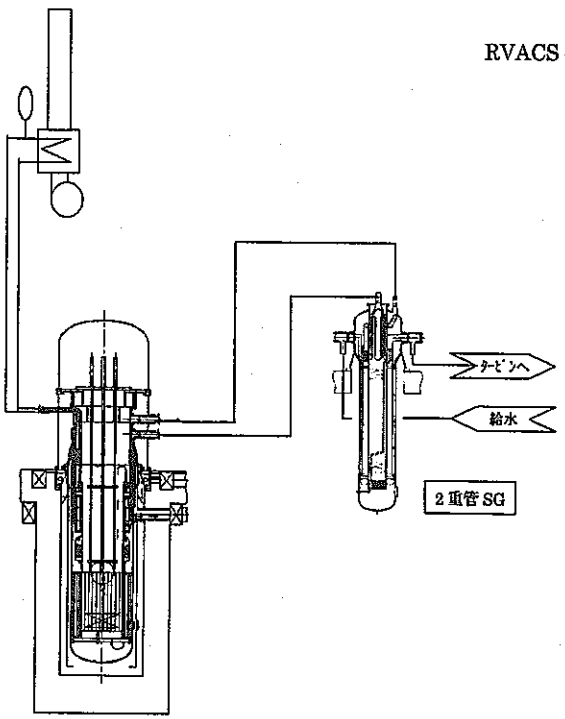
図-49 小型炉の炉心特性「高富化度差二領域炉心」の特徴

設計の基本的考え方
- ○安全性：高い受動安全の確保
- ○炉心寿命：目標30年（最低10年）
- ○経済性：他電源と競合可能であること
- ○資源有効性：炉心の長寿命化を優先（高増殖は期待しない）
- ○環境負荷低減：高い燃焼度及び低頻度の燃料交換により廃棄物量の低減を目指す
- ○核不拡散性：炉心の長寿命化による封入炉
- ○出力：約50MWe（出力の最適化は今後の検討の進捗による）

概念の特徴
- ・1次系を完全自然循環とし、LOF型事象に対する受動安全性向上
- ・崩壊熱除去系（RVACS＋PRACS）に動的機器を排除したシステムを採用
- ・2重管SG適用によるNa-水反応低減対策（2次系あり）
- ・金属燃料採用により燃焼反応度が小さく、炉心寿命30年を達成

（プラント仕様）
- 原子炉型式：タンク型(2次系あり)
- 電気出力：5万KWe
- 冷却系ループ数：1
- 冷却材循環方式：自然循環
- 燃料交換頻度：30年1バッチ方式
- 蒸気発生器方式：電磁ポンプ内臓ヘリカルコイル2重管SG

（炉心仕様）
- 炉心燃料：金属燃料
- 燃料体積比Vf=50%
- 線出力=150W/cm
- 燃焼反応度=0.4%dk/kk'
- 燃焼度=58GWd/t
- 増殖比：約1.0



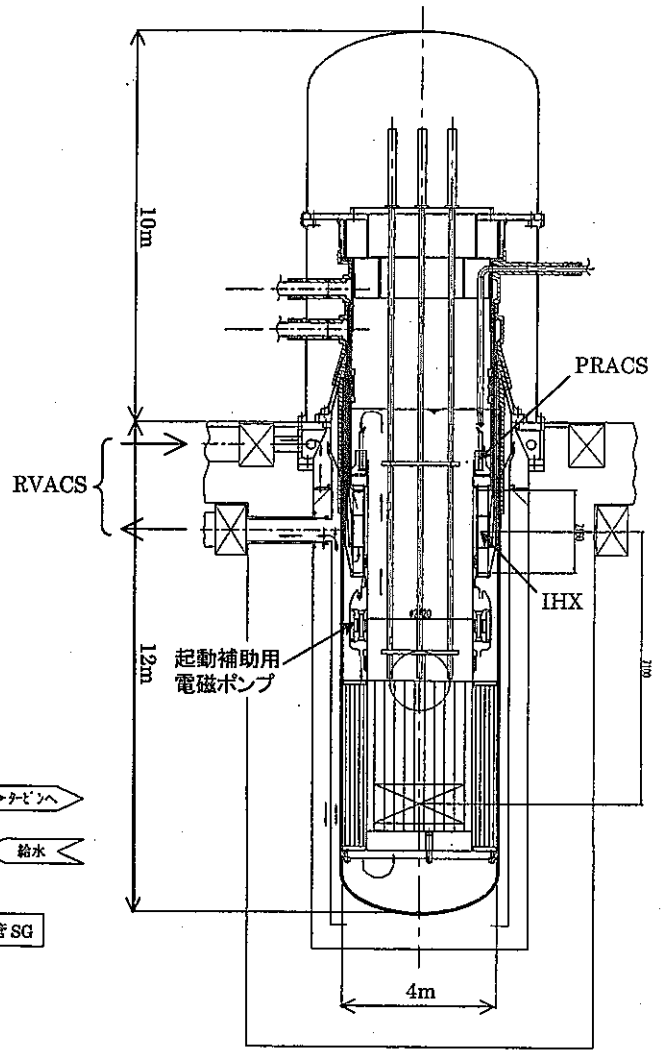


図-50 ナトリウム冷却小型タンク型自然循環炉の概念

設計の基本的考え方
- ○安全性：高い受動安全の確保
- ○炉心寿命：目標30年（最低10年）
- ○経済性：他電源と競合可能であること
- ○資源有効性：炉心の長寿命化を優先（高増殖は期待しない）
- ○環境負荷低減：高い燃焼度及び低頻度の燃料交換により廃棄物量の低減を目指す
- ○核不拡散性：炉心の長寿命化による封入炉
- ○出力：約5万KWe（出力の最適化は今後の検討の進捗による）

概念の特徴
- ・1次系の自然循環力を向上させ、LOF型事象に対する受動安全性向上
- ・崩壊熱除去系（RVACS＋PRACS）に動的機器を排除したシステムを採用
- ・新型SG適用による2次系簡素化
- ・金属燃料採用により燃焼反応度が小さく、炉心寿命30年を達成

（プラント仕様）
- 原子炉型式：ループ型(2次系簡素化)
- 電気出力：5万KWe
- 冷却系ループ数：1
- 1次系ナトリウム温度：510℃/355℃
- 2次系冷却材(鉛ビスマス)温度：475℃/310℃
- 冷却材循環方式：強制循環方式(電磁ポンプ)＋自然循環強化
- 崩壊熱除去方式：PRACS＋RVACS
- 燃料交換頻度：30年1バッチ方式
- 蒸気発生器方式：2次系簡素化SG
- 免震：建屋3次元免震

（炉心仕様）
- 炉心高さ=150cm、炉心等価直径=142cm
- 炉心燃料：金属燃料
- 燃料体積比Vf=55.5%
- 内外Pu富化度=10%/15%
- 線出力=250W/cm
- 燃焼反応度=0.9%dk/kk'
- 燃焼度=90GWd/t
- 増殖比：約1.0

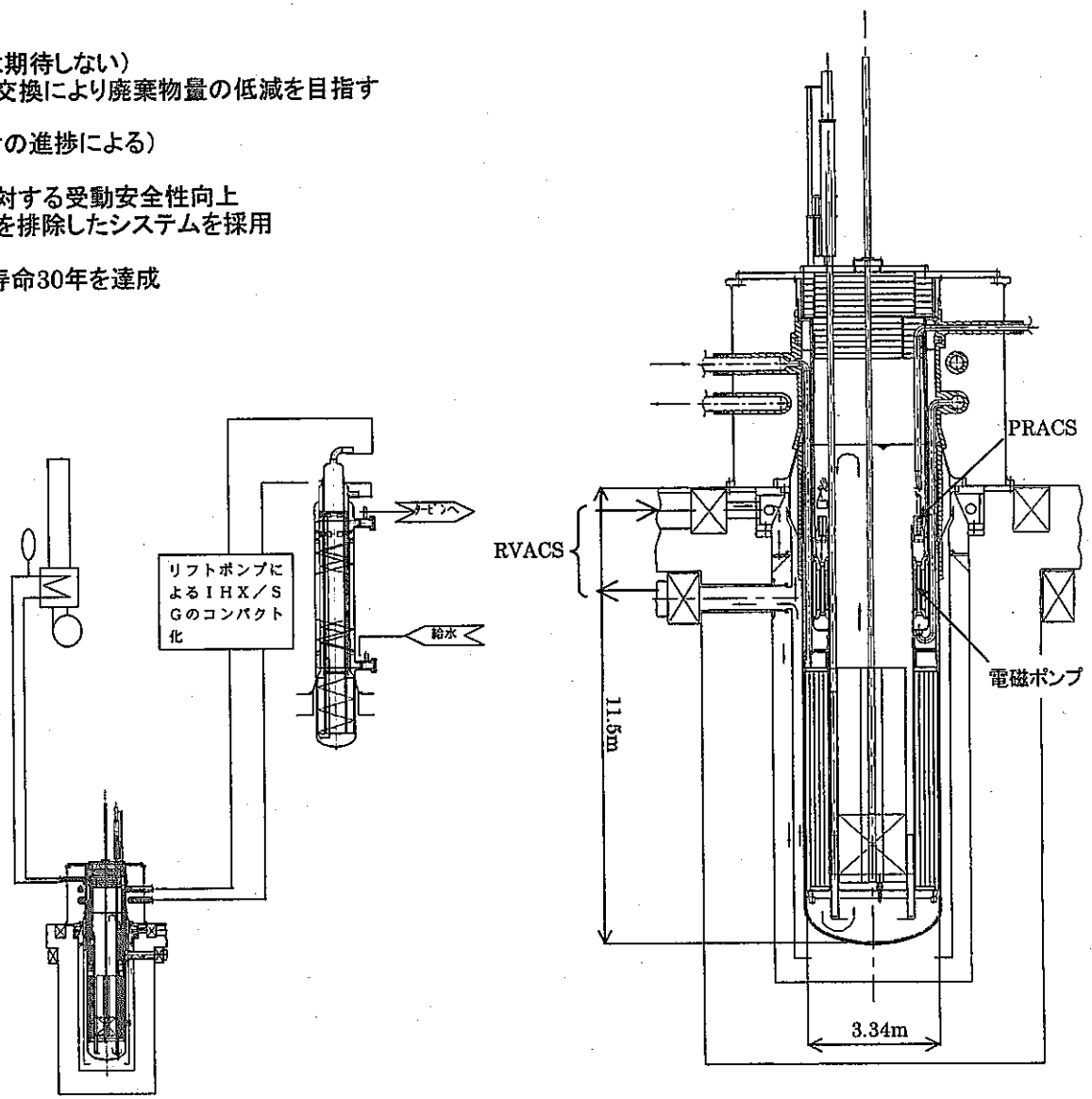


図-51 ナトリウム冷却小型ループ型準強制循環炉の概念

設計の基本的考え方

○安全性：高い受動安全の確保
○炉心寿命：目標30年（最低10年）
○経済性：他電源と競合可能であること
○資源有効性：炉心の長寿命化を優先（高増殖は期待しない）
○環境負荷低減：高い燃焼度及び低頻度の燃料交換により廃棄物量の低減を目指す
○核不拡散性：炉心の長寿命化による封入炉
○出力：約50MWe（出力の最適化は今後の検討の進捗による）

概念の特徴

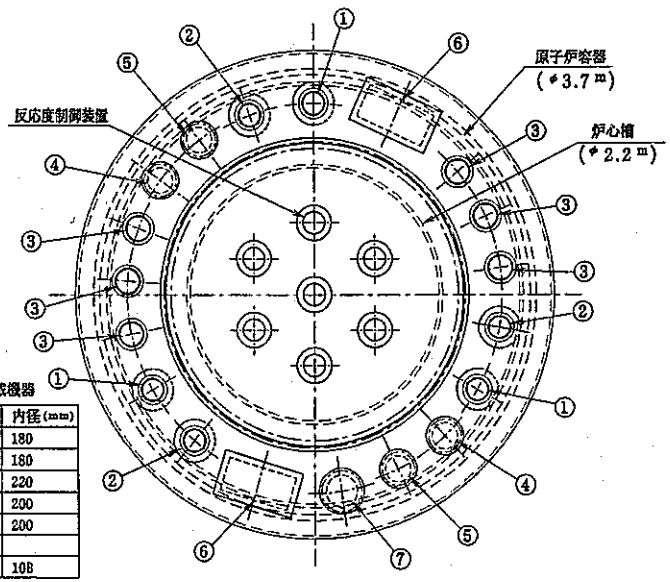
・1次系を自然循環とし、1次系ポンプを排除することで所内負荷率を低減
・崩壊熱除去系にRVACSをはじめとして動的機器を排除したシステムを採用
・冷却材に鉛ビスマスを用いた低圧システムで、上記の特徴とあわせて高い受動安全性を実現
・窒化物燃料採用により燃焼反応度が小さく、炉心寿命30年を達成

（プラント仕様）

- 原子炉型式：タンク型(2次系削除)
- 電気出力：5万KWe
- 冷却系ループ数：1
- 冷却材循環方式：自然循環方式
- 燃料交換頻度：30年1バッチ方式
- 蒸気発生器方式：一体貫流環状ヘリカルコイルSG

（炉心仕様）

- 炉心燃料：窒化物燃料
- 燃料体積比Vf=43.0%
- 平均線出力密度=114W/cm
- 燃焼反応度=0.6%dk/kk'
- 燃焼度=83GWd/t
- 増殖比：約1.0



原子炉構造上部搭載機器

符号	名称	員数	内径(mm)
①	SG給水	3	180
②	SG蒸気	3	180
③	PRACS	6	220
④	酸素濃度管理装置	2	200
⑤	腐食生成物管理装置	2	200
⑥	メンテナンスホール	2	
⑦	水蒸気放出ライン	1	108

図　Pb-Bi炉 原子炉構造（平面図）概念

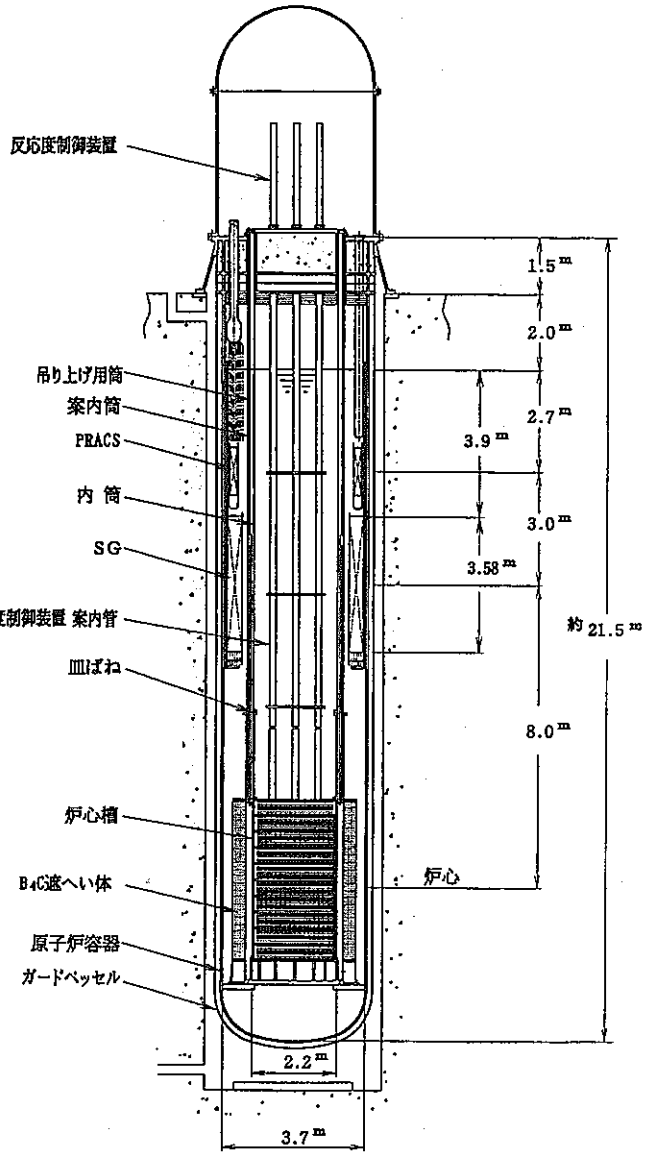
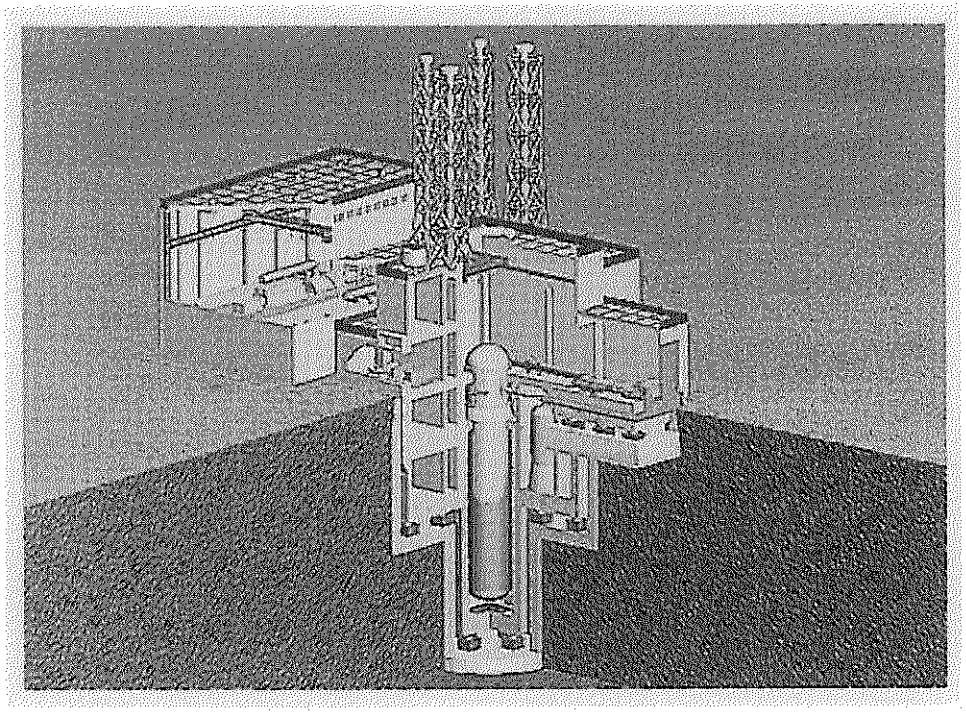


図　Pb-Bi炉 原子炉構造（立面図）概念

図-52 鉛ビスマス冷却小型タンク型自然循環炉の概念



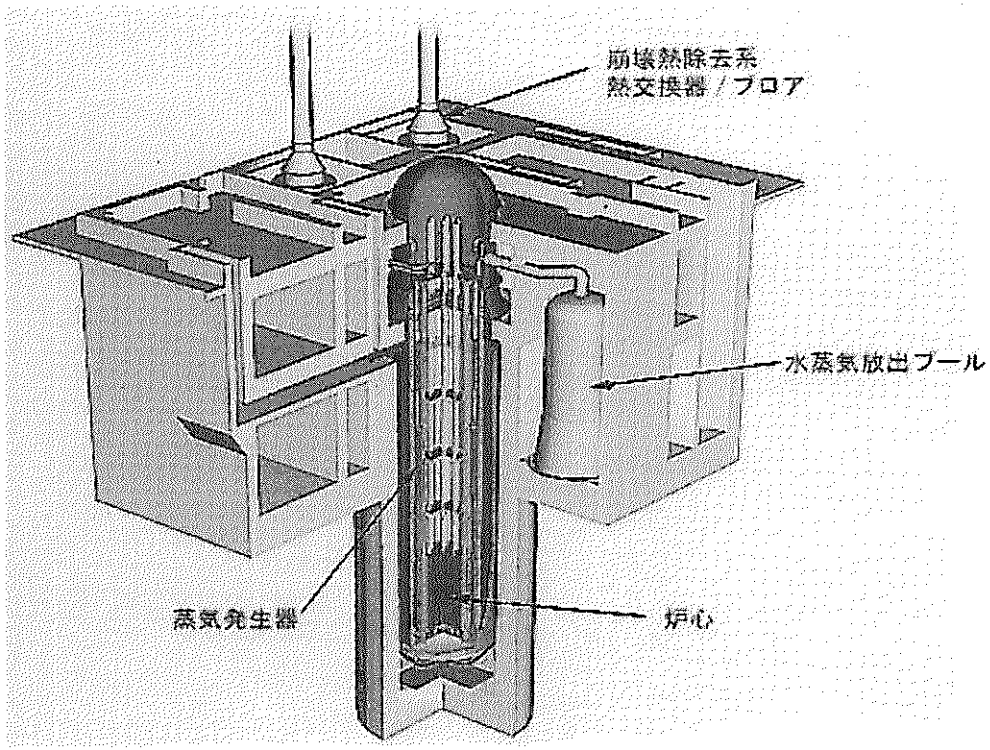


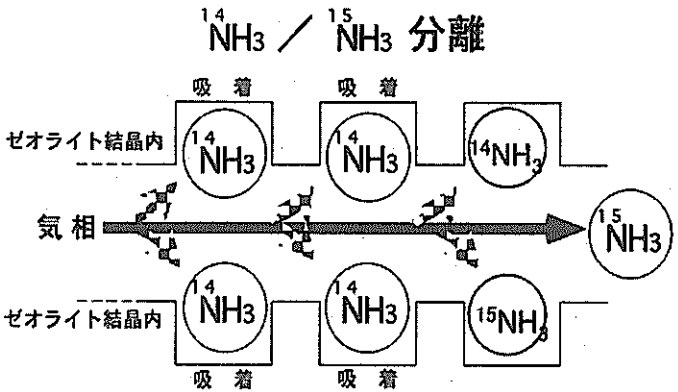
図-53　鉛ビスマス冷却小型炉の建屋内配置及び冷却系の鳥瞰図

＜^{15}N濃縮の必要性＞

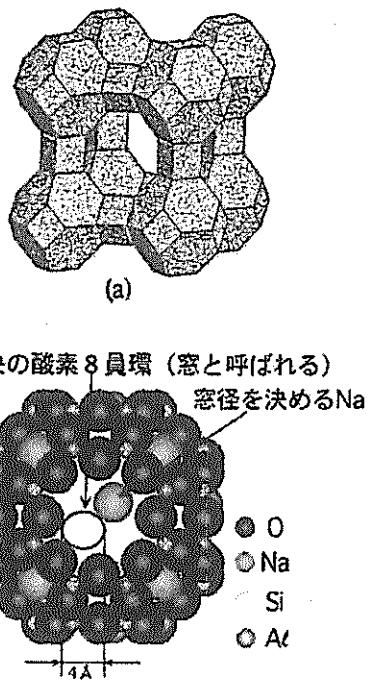
- ^{14}N (n,p) ^{14}Cの生成量の抑制 （^{14}C：半減期5370年のβ崩壊）
- 炉心の核特性改善 （^{14}Nの中性子吸収断面積は ^{15}Nより約3桁大きい）

＜気相吸着法による窒素同位体濃縮の原理＞

ゼオライトの格子内のガスの通り道(窓)の大きさをアンモニアの分子径に接近させると、吸着速度の大きい$^{14}NH_3$がゼオライトに吸着されて、吸着速度の小さい$^{15}NH_3$が濃縮されて塔頂から流出する現象を利用



$^{14}NH_3$の吸着速度＞$^{15}NH_3$の吸着速度
（NH_3分子径：0.38nm）



ゼオライト吸着剤

＜第1期成果のまとめ＞

○気相吸着法（ゼオライト20g）を用いた^{15}N濃縮試験により、^{15}Nを天然窒素中の濃度レベルから約4%程度まで濃縮できることを確認した。

○気相吸着法により^{15}Nの高濃縮が可能とすれば、工業規模の^{15}N濃縮プラントにより、現行の^{15}N濃縮コストを低減できる可能性が高い。

＜今後の課題＞

1. 気相吸着法による窒素同位体分離（濃縮）メカニズムの解明
2. 気相吸着法による^{15}N高濃縮達成確認試験
3. 気相吸着法による^{15}N濃縮の量産実現性の評価
4. 気相吸着法と化学交換法等を組合わせたハイブリッドシステムの経済性評価
5. 再処理時の^{15}N回収・再濃縮技術開発

図-54 気相吸着法による窒素同位体濃縮

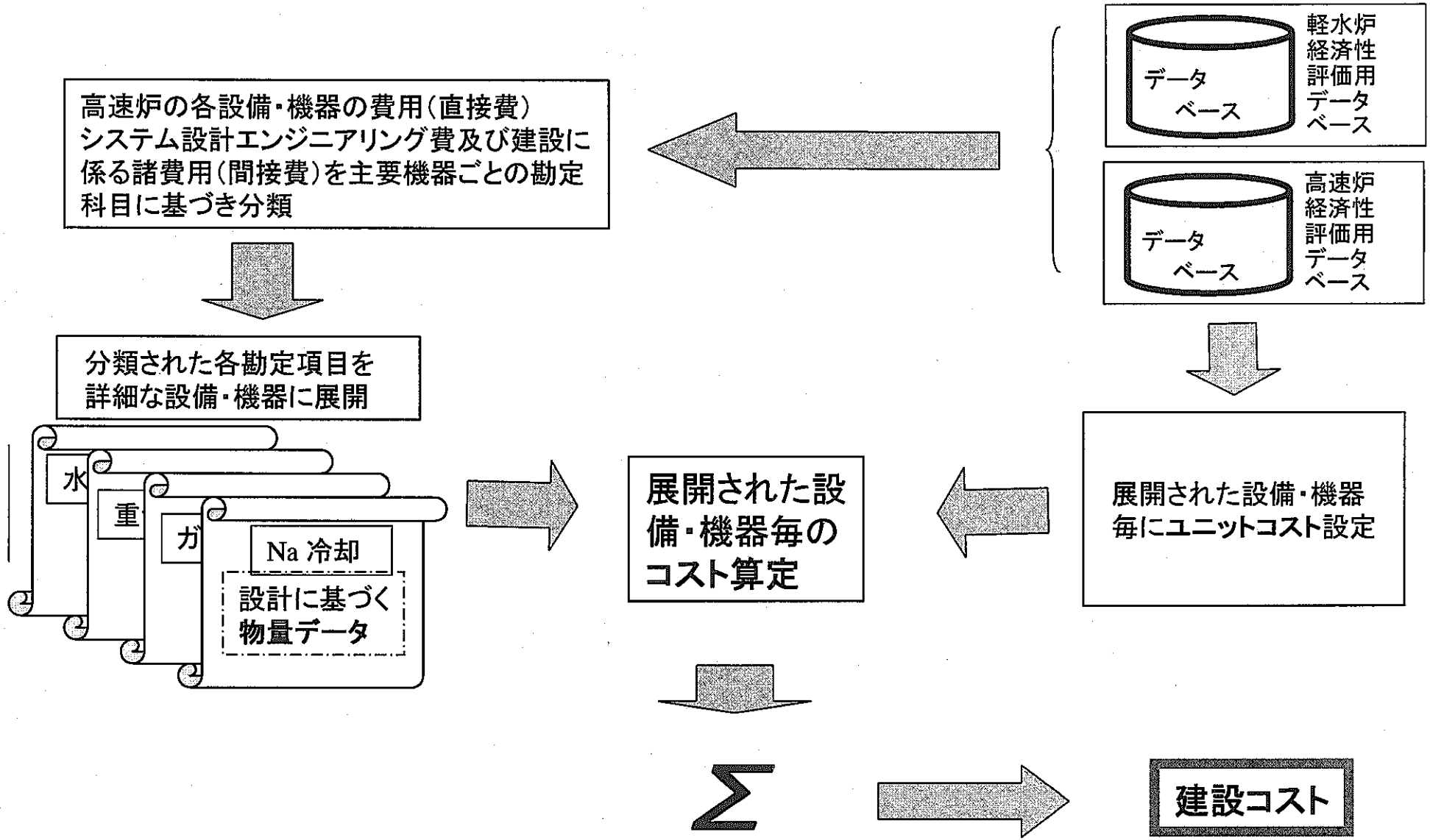


図-55　建設コスト算定の考え方

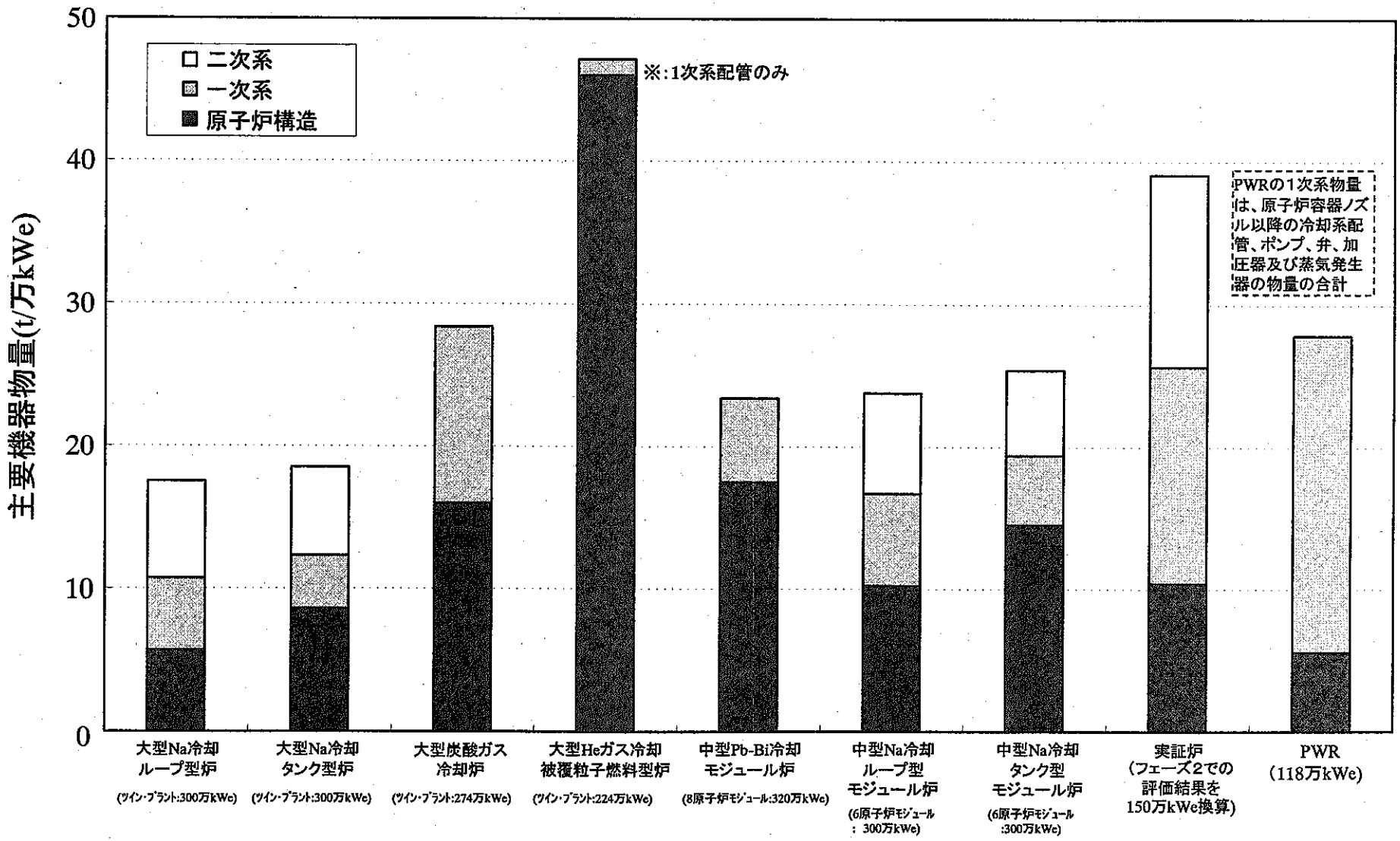


図-56 各炉概念における主要物量の比較

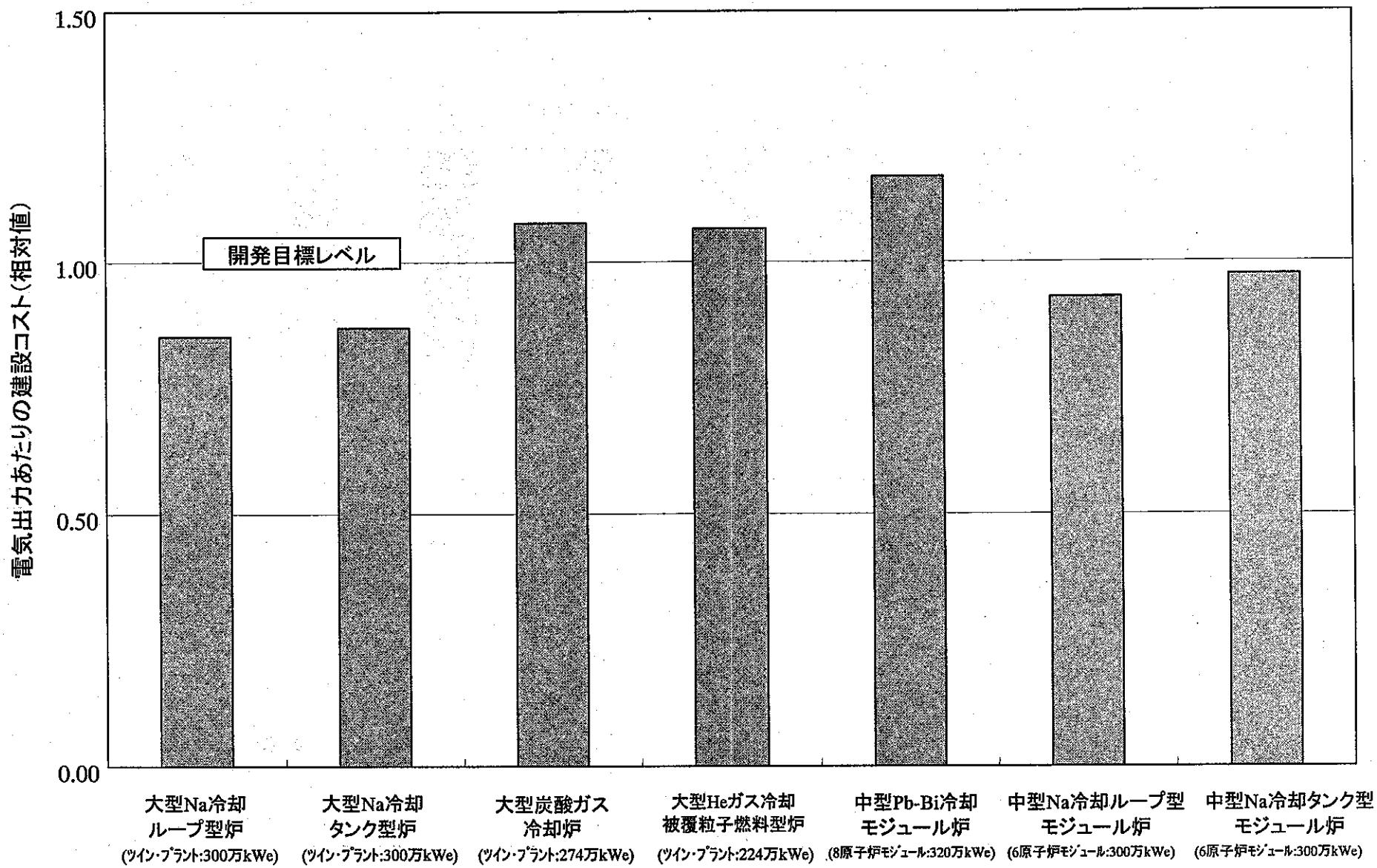


図-57 各炉概念における概略建設コストの比較

FBR燃料サイクルシステムの検討対象

		酸化物	窒化物	金属	検討のポイント
再処理	湿　式	○	○		・工程の簡素化 ・TRU回収率の向上 ・液体廃棄物発生量の低減 ・Pu非分離回収
	乾　式	○	○	○	・TRU回収率の向上 ・塩廃棄物処理 ・バッチ処理に伴う核物質移送技術 ・計量管理手法の確立
燃料製造	ペレット	○	○		・工程の簡素化 ・低除染燃料への適用 ・遠隔自動化
	振動充填	○	○		・造粒工程の合理化 ・Pu富化度、充填密度等の品質管理 ・廃棄物量低減
	鋳　造			○	・鋳型廃棄物量の低減 ・歩留まりの向上 ・溶解るつぼの寿命延長
	被覆粒子	○	○		・炉システム、再処理との整合性

（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

○施設の一体化の検討
（50tHM/年、200tHM/年）

図-58　燃料サイクルシステムの検討の視点

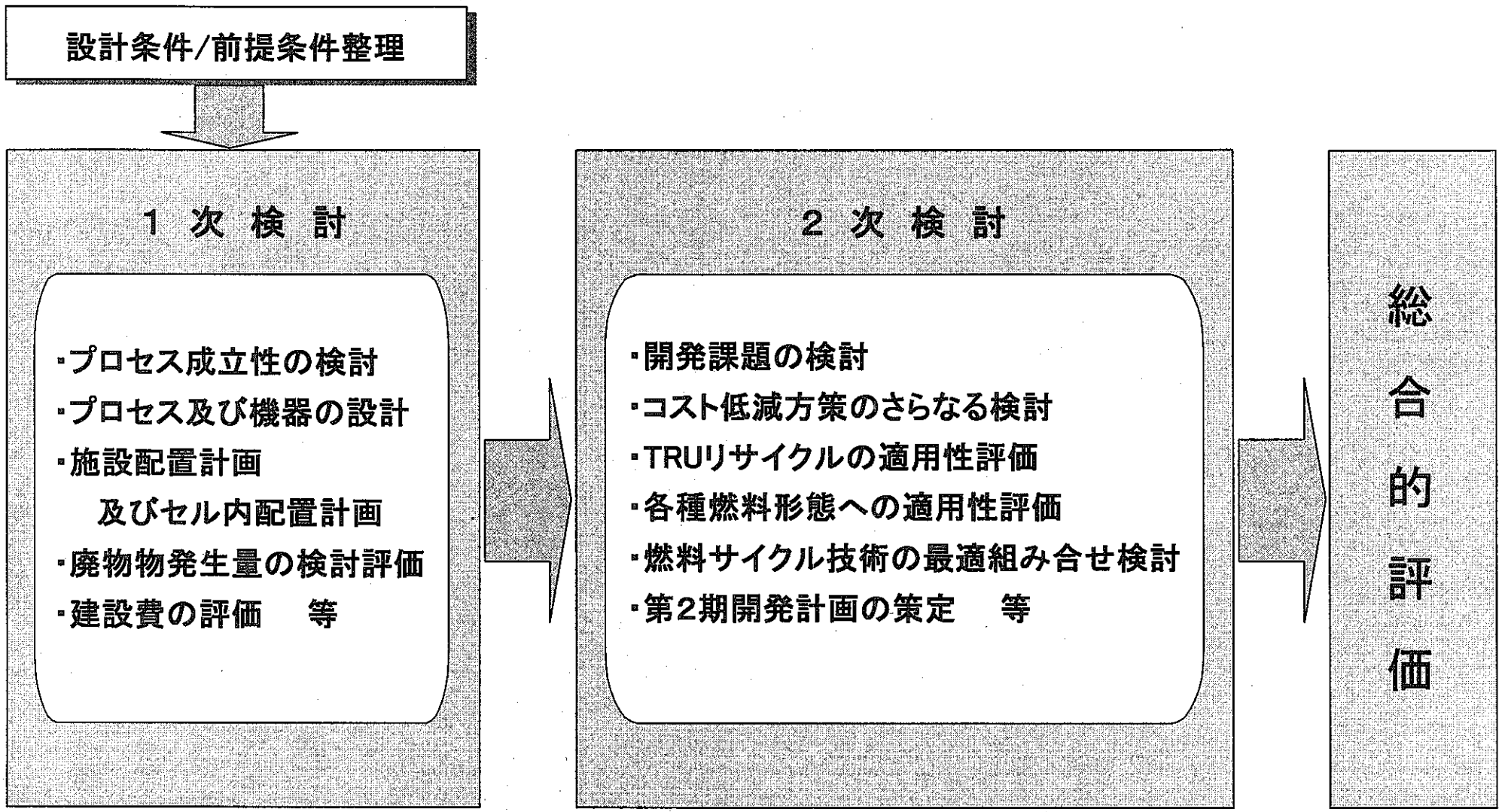
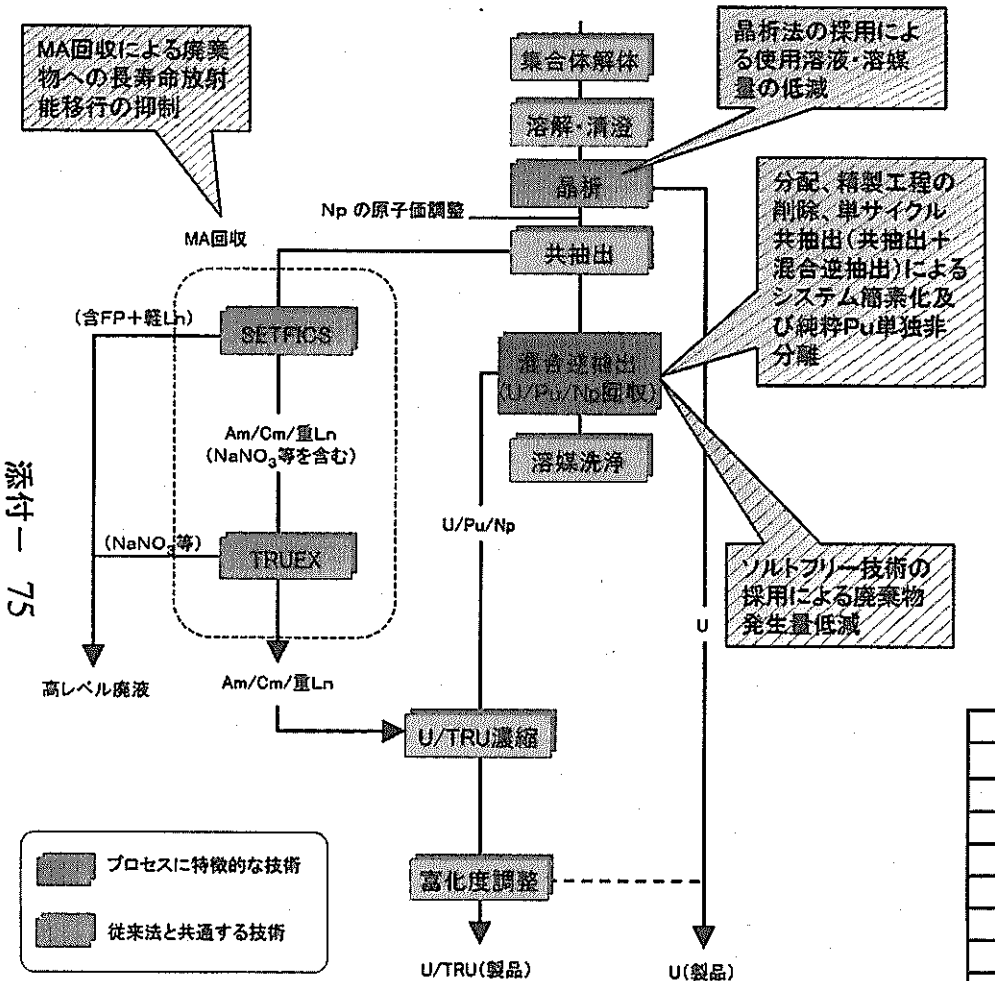
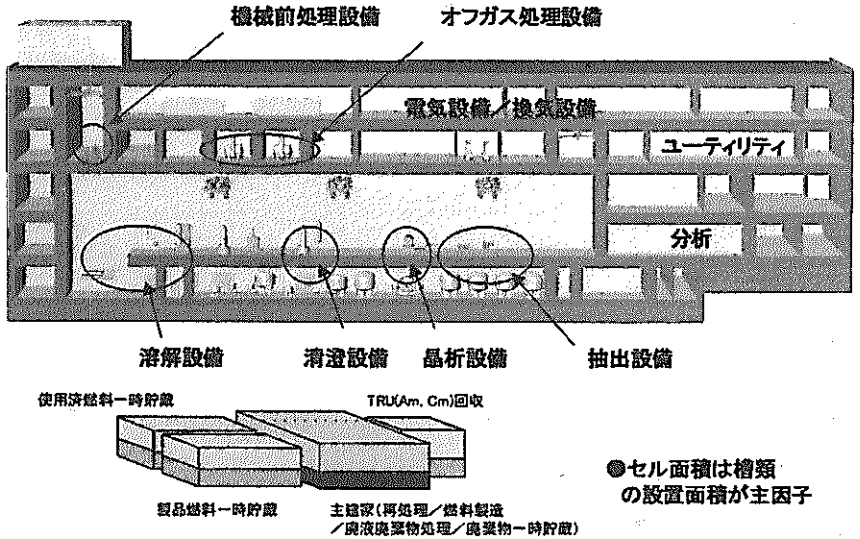


図-59 燃料サイクルシステムの検討評価の進め方

先進湿式法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ



主要機器数

設備項目	50tHM/年	200tHM/年
主要槽類	113基(約120m³)	113基(約470m³)
解体/せん断機	1	1
溶解槽	1	2
清澄機	1	1
硝析装置	1	1
抽出器	17	17
脱硝装置	4	10
破砕装置	4	10
蒸発缶類	8	8
塔槽類、電解槽等	148	144
その他	1系列	溶解設備は2系列、他は1系列

セル・建屋容積(m3)

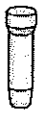
設備項目	50tHM/年	200tHM/年
使用済燃料一時貯蔵建屋	120,000	180,000
主建屋	510,000	660,000
(再処理部分)	(330,000)	(430,000)
MA回収建屋	67,000	77,000
再処理セル	90,000	130,000

図-60 先進湿式法(酸化物燃料)プラント概念検討結果

先進湿式法のプロセスフロー及び特徴

超臨界流体直接抽出法

硝酸を配位したTBPとCO_2超臨界流体の混合溶媒を使用済み燃料に接触させることで、燃料を溶解することなく、UやPu等を抽出できる。使用する溶液・溶媒量が低減できるほか、抽出後の廃液が発生しないので廃液処理工程の負担(濃縮操作)が軽減される。



直接抽出塔の例

アミン抽出法

TRUを高濃度で抽出可能なアミン系溶媒を用いることで、使用溶液・溶媒量を低減するとともにTRUを一括回収できる。

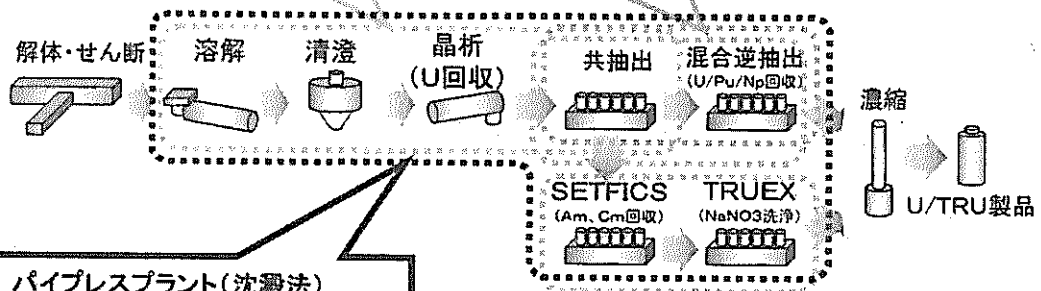


高濃度TRU取扱いによる抽出段数減

U/Pu/Np回収工程 + Am/Cm回収工程

U/TRU回収工程

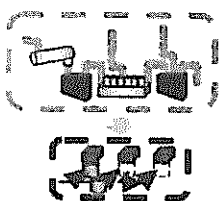
アミン系溶媒によるTRU一括回収



注意:図中の機器はイメージである。

パイプレスプラント(沈澱法)

一つの容器(移動槽)を各工程機能をもつステーションに順次移動させることで、配管を大幅に削減したバッチプラント。プロセスとシステムの相性より除染・抽出設備に沈澱法を選択。



機能集中による設備規模縮小

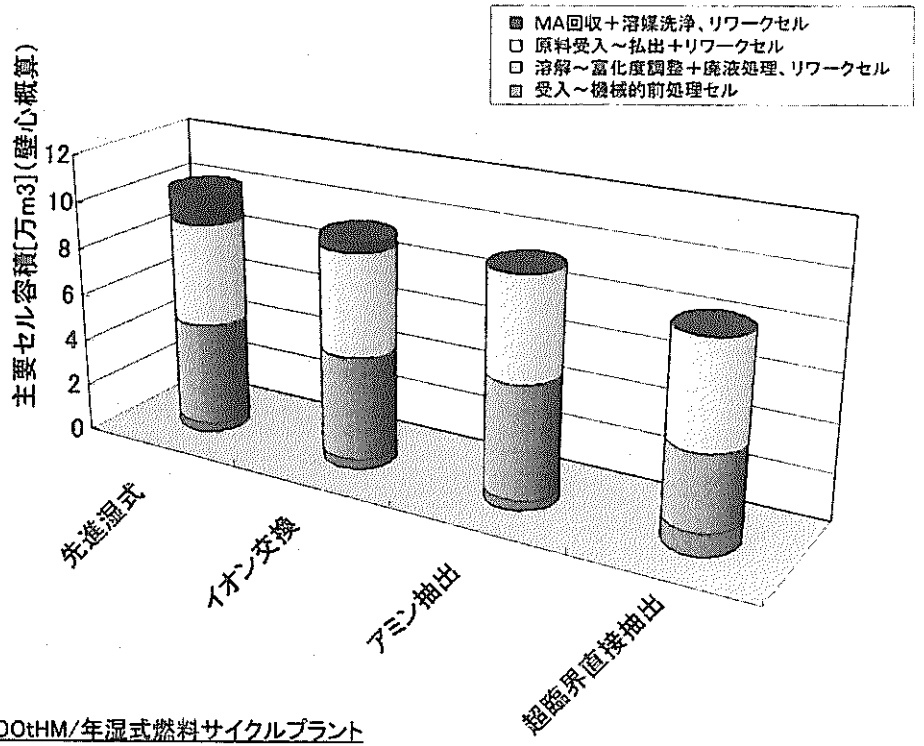
イオン交換法

バッチ方式であるため配管等が削減可能であり、特にMA回収機器の容量が大幅に削減できる。主分離工程に有機溶媒を用いないアイデアがある。イオン交換の技術は古くから存在し、再処理以外の分野では豊富な経験がある。



抽出器をイオン交換塔に代替

主要設計データ

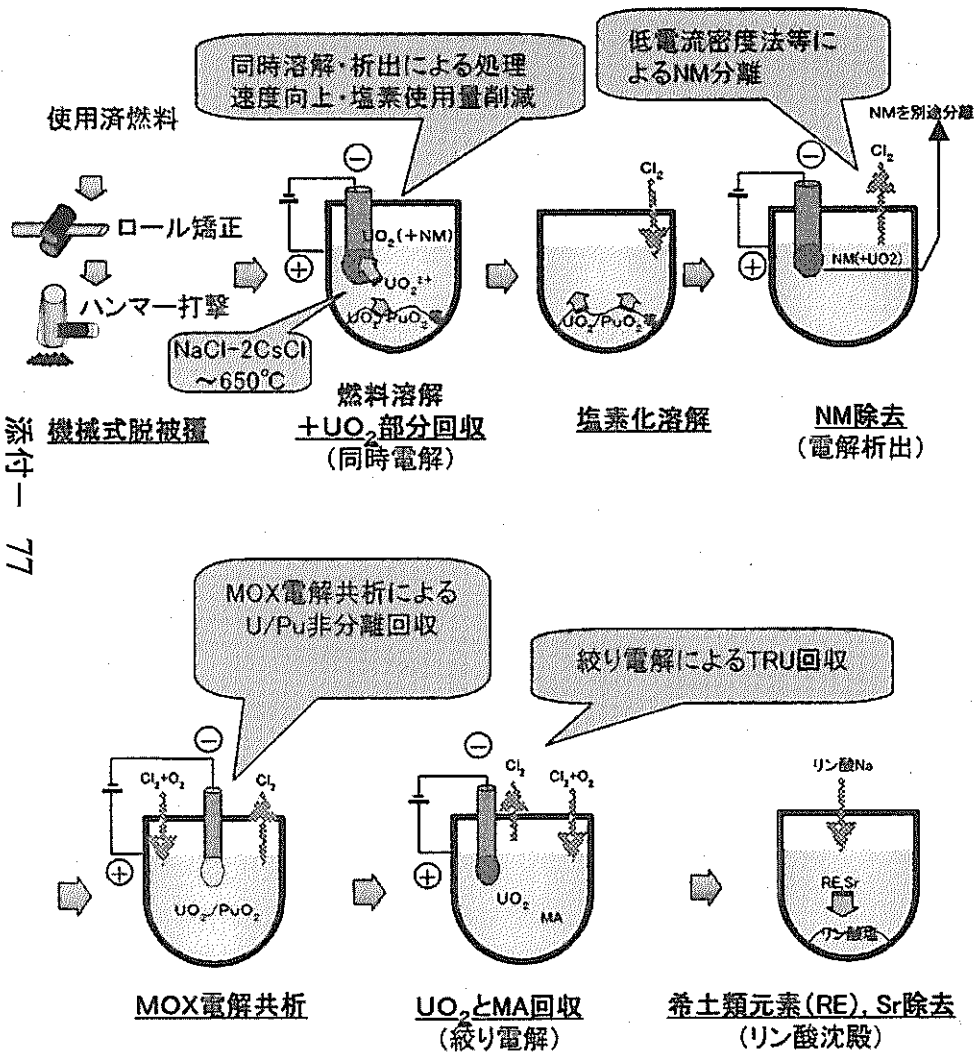


200tHM/年湿式燃料サイクルプラント
建屋/セル容積の概略

建屋容積(万m^3)	先進湿式	イオン交換	アミン抽出	超臨界流体直接抽出
使用済燃料一時貯蔵建屋	18	18	18	18
再処理/燃料製造建屋のうち再処理部分	43	46	43	34
MA回収建屋	7.7			
製品集合体一時貯蔵建屋	18	18	18	18

図-61 湿式法代替補完技術(酸化物燃料)プラント概念検討結果

酸化物電解法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ

主要機器数

	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体装置	1	2
脱被覆装置	1	2
電解装置	7	26
析出物粉砕装置	2	4
塩分離装置	2	8
白金族FP分離装置	1	2
ガラス溶融炉	1	2
合計	15	46

セル・建屋容積(m^3)

工程	50tHN/年	200tHM/年
集合体解体・脱被覆セル	4,700	9410
燃料処理セル	4,030	13,440
ハル洗浄セル	1,620	2,240
塩除去セル	2,910	7,840
主要セル合計	18,470	40,660
建屋容積合計 (燃料製造含む)	520,000	1,030,000

施設総容積
50t/yプラント: 52万m^3
200t/yプラント: 103万m^3

建屋:B1F~3F

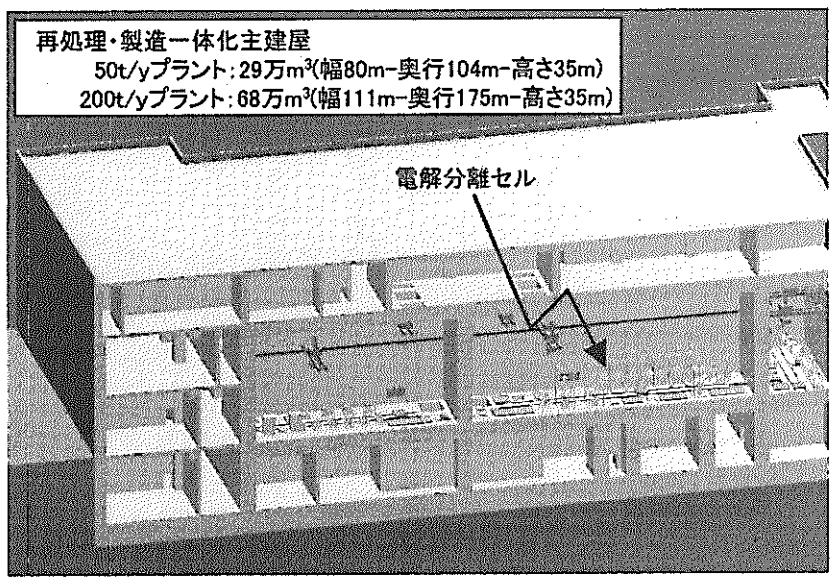
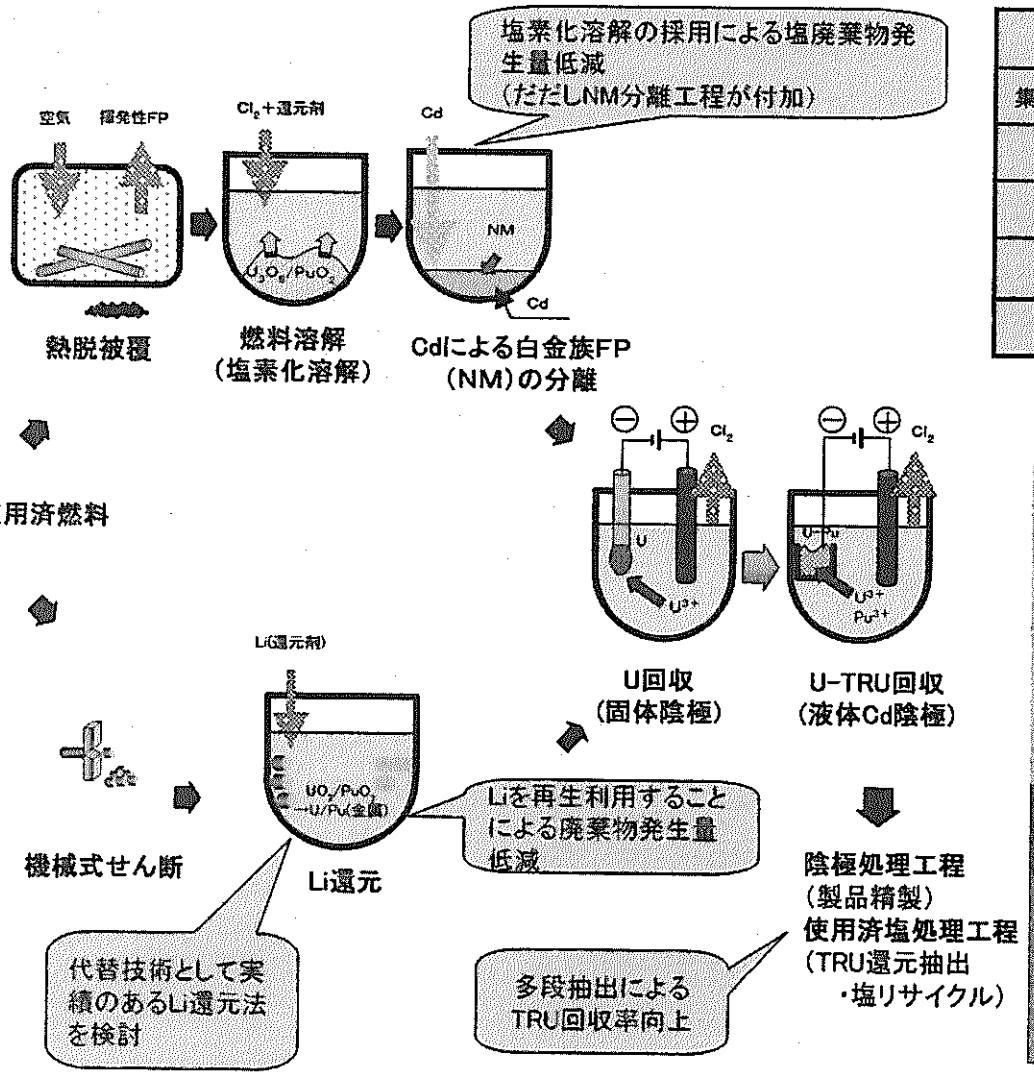


図-62 酸化物電解法(酸化物燃料)プラント概念検討結果

金属電解法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体・脱被覆	4	10
電解分離	5	20
陰極処理	9	36
使用済塩処理	4	13
合計	22	79

セル・建屋体積（m^3）

工程	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体・脱被覆セル	1,800	4,220
電解分離セル	4,030	14,100
酸化転換・還元セル	2,920	6,160
ガラス固化セル	2,150	2,670
主要セル合計	10,900	27,150
建屋容積合計（燃料製造含む）	410,000	730,000

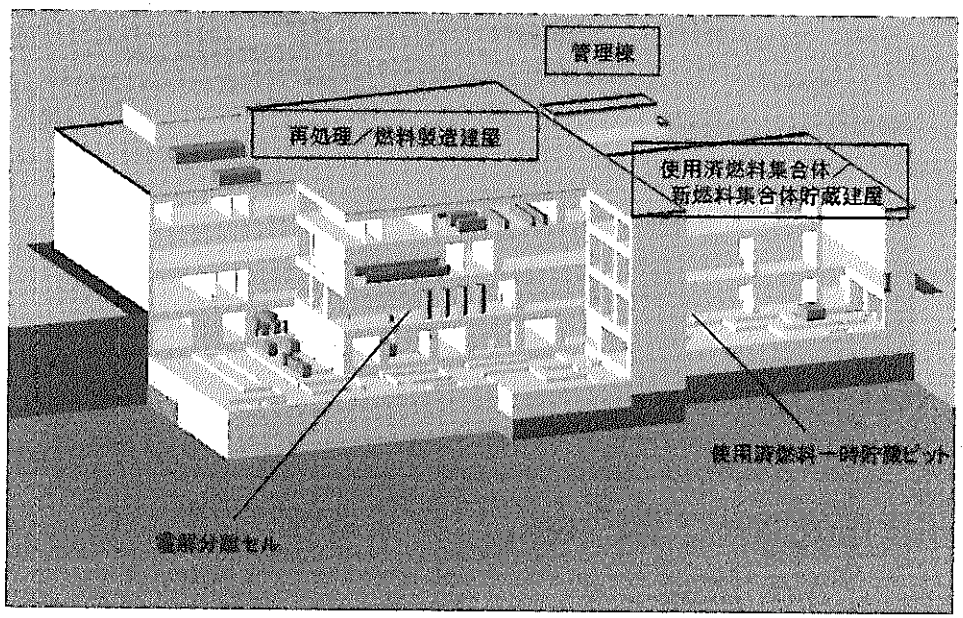
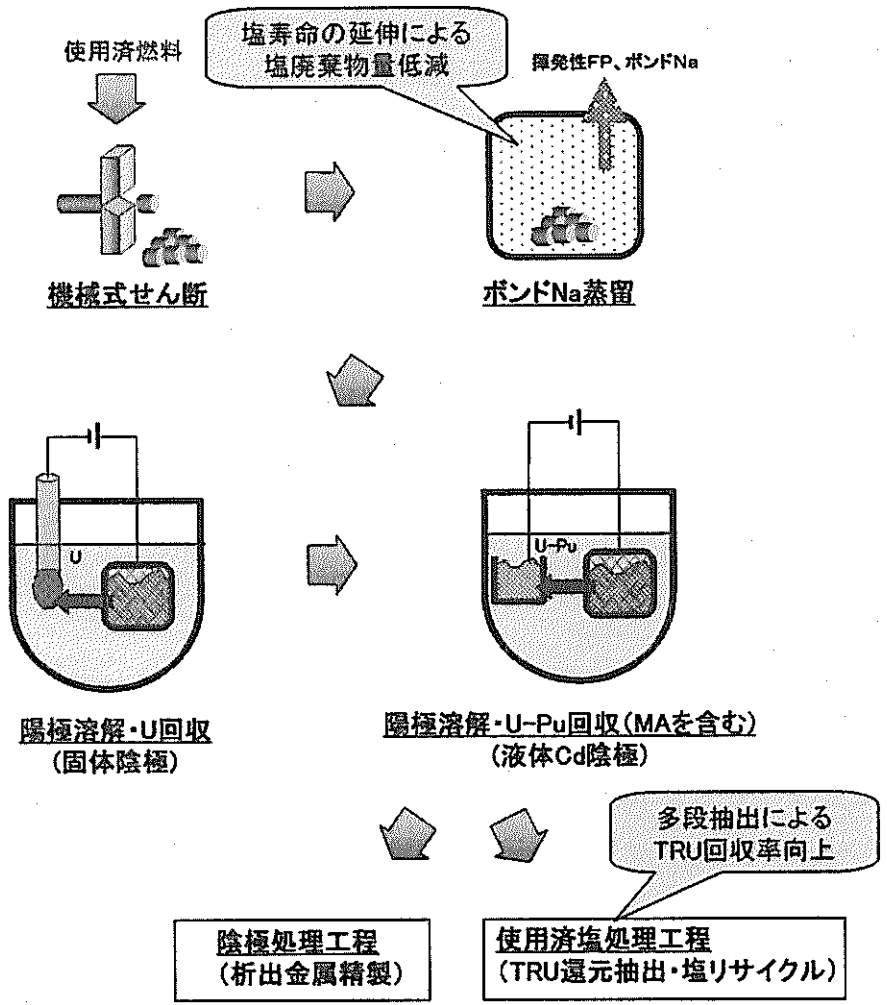


図-63 金属電解法（酸化物燃料）プラント概念検討結果

金属電解法のプロセスフロー及び特徴



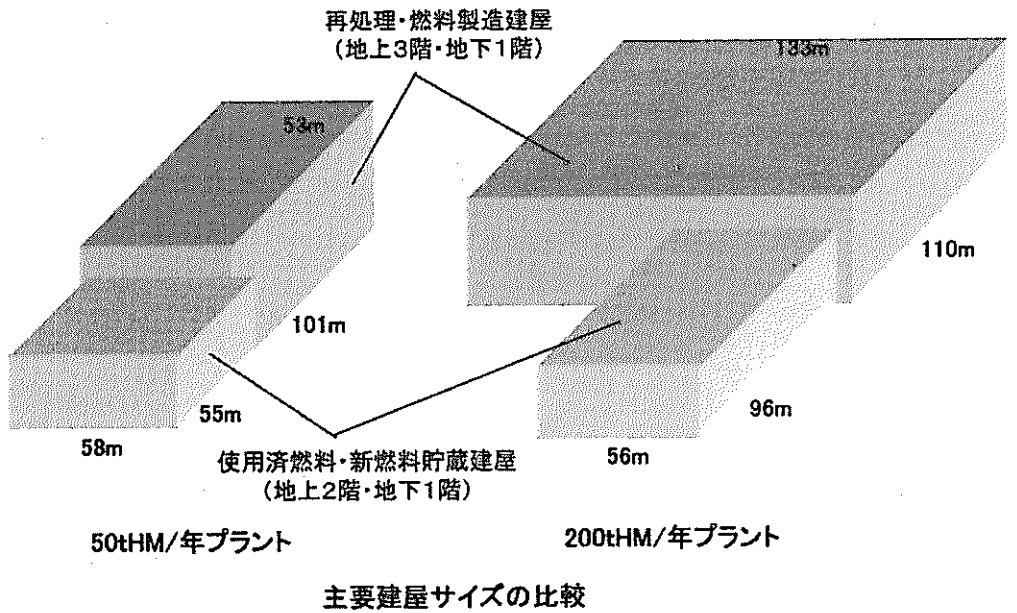
主要設計データ

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体・脱被覆	3	5
電解分離	9	36
陰極処理	10	40
使用済塩処理	2	8
合計	24	89

セル・建屋体積(m^3)

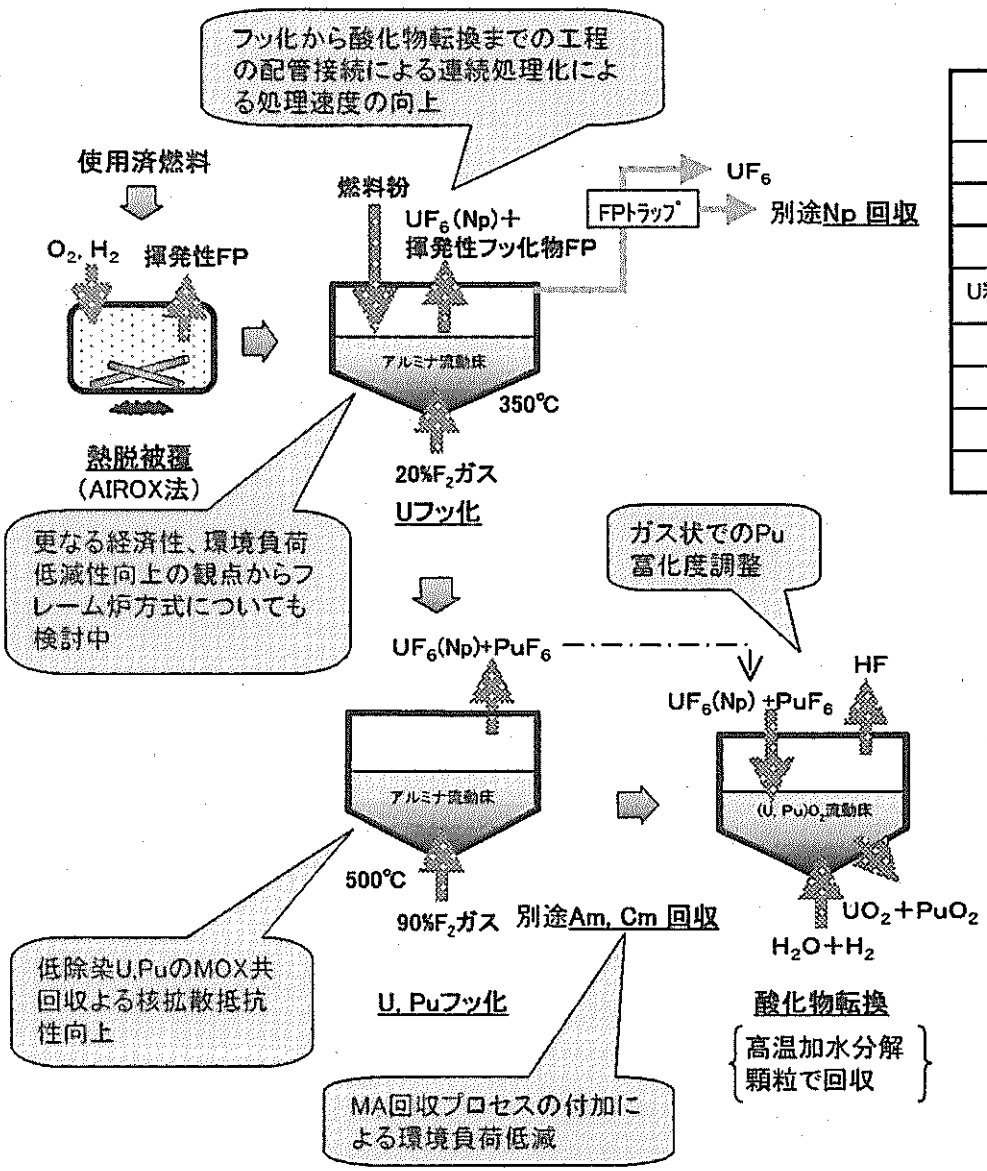
工程	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体・脱被覆セル	2,420	8,960
電解分離セル	5,300	21,060
主要セル合計	7,720	30,020
建屋容積合計 (燃料製造含む)	250,000	570,000



主要建屋サイズの比較

図-64 金属電解法(金属燃料)プラント概念検討結果

フッ化物揮発法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ

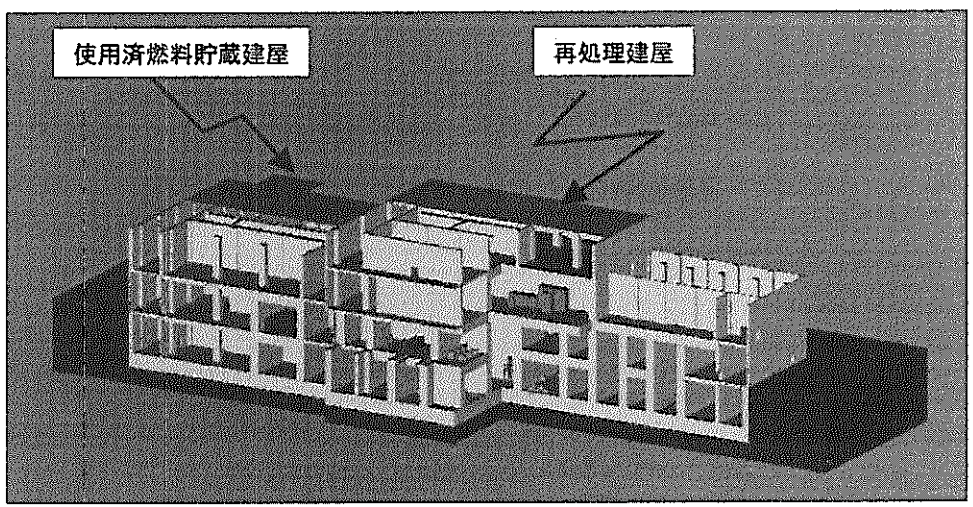
主要機器数

機器名	50tHM/年	200tHM/年
集合体解体	1	4
脱被覆	1	4
フッ化	1	4
U精製・凝縮・揮発	5	20
ガスブレンダ	1	4
酸化転換	2	8
MA回収	3	6
合計	14	50

セル・建屋容積(m^3)

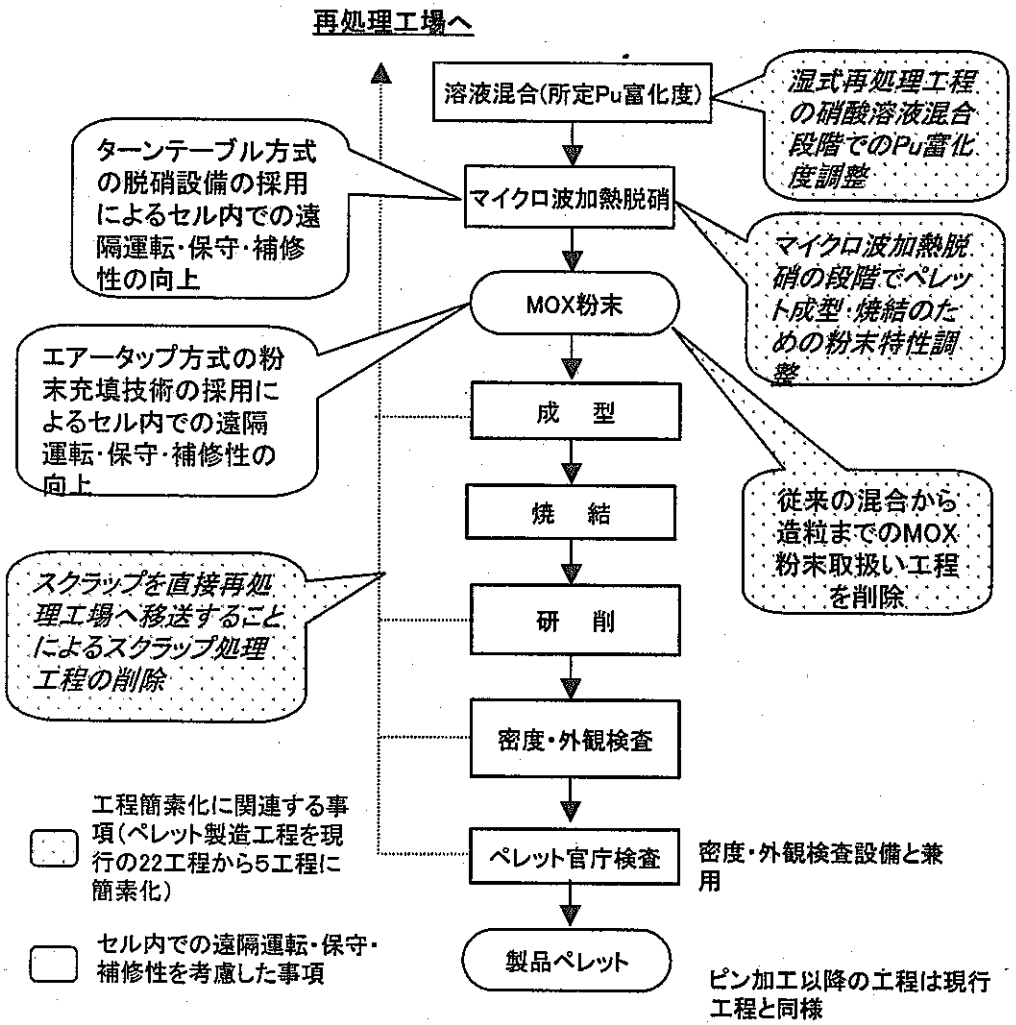
セル名	50tHM/年	200tHM/年
解体・せん断セル	2,050	4,130
脱被覆・フッ化セル	1,500	3,000
U精製・凝縮・揮発セル	980	4,580
酸化転換セル	650	2,600
MA回収セル	650	1,950
主要セル合計	5,820	16,250
建屋体積	200,000	410,000
使用済燃料貯蔵建屋	90,000	160,000

再処理施設
50t/yプラント： 20万m^3（幅68m−奥行98m−高さ35m）
200t/yプラント： 41万m^3（幅76m−奥行132m−高さ43m）



図−65 フッ化物揮発法（酸化物燃料）プラント概念検討結果

簡素化ペレット法のプロセスフロー及び特徴



簡素化ペレット製造フロー

主要設計データ

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
脱硝工程	3	9
ペレット加工・検査設備	4	5
燃料要素組立設備	3	5
ワイヤー巻付設備	2	7
燃料要素検査設備	2	3
燃料集合体組立・検査設備	2	2
合計	16	31

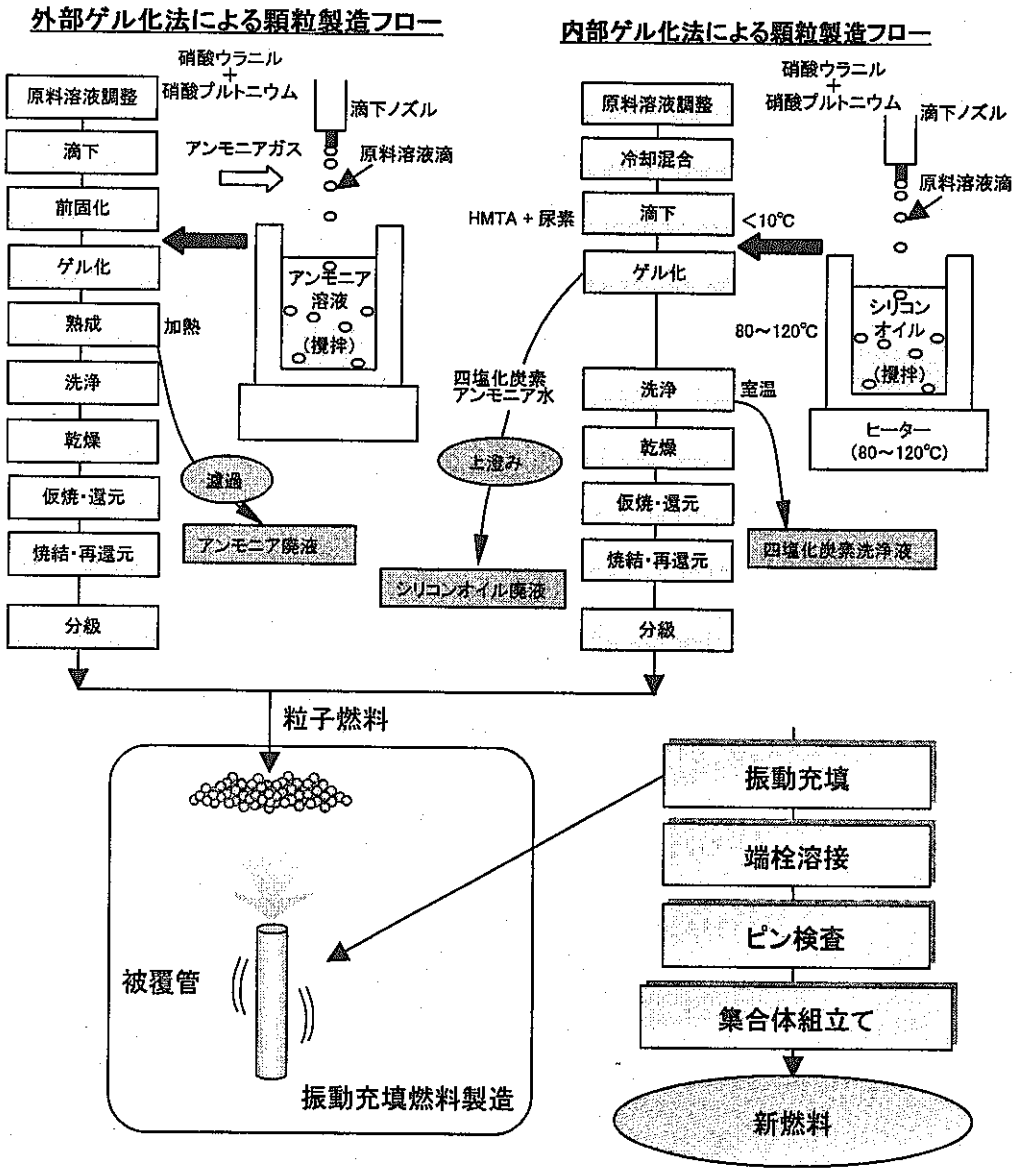
セル・建屋体積(m^3)

工程	50tHM/年	200tHM/年
主工程セル	13,000	20,000
保守・分析セル	5,000	7,000
主要セル合計	18,000	27,000
主建屋容積 (再処理/燃料製造一体化施設＊)	490,000	660,000
新燃料貯蔵建屋	127,000	187,000

＊廃棄物処理・貯蔵設備を含む(MA回収建屋を除く)

図-66　簡素化ペレット法(酸化物燃料)プラント概念検討結果

振動充填法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ

湿式ゲル化法主要機器数

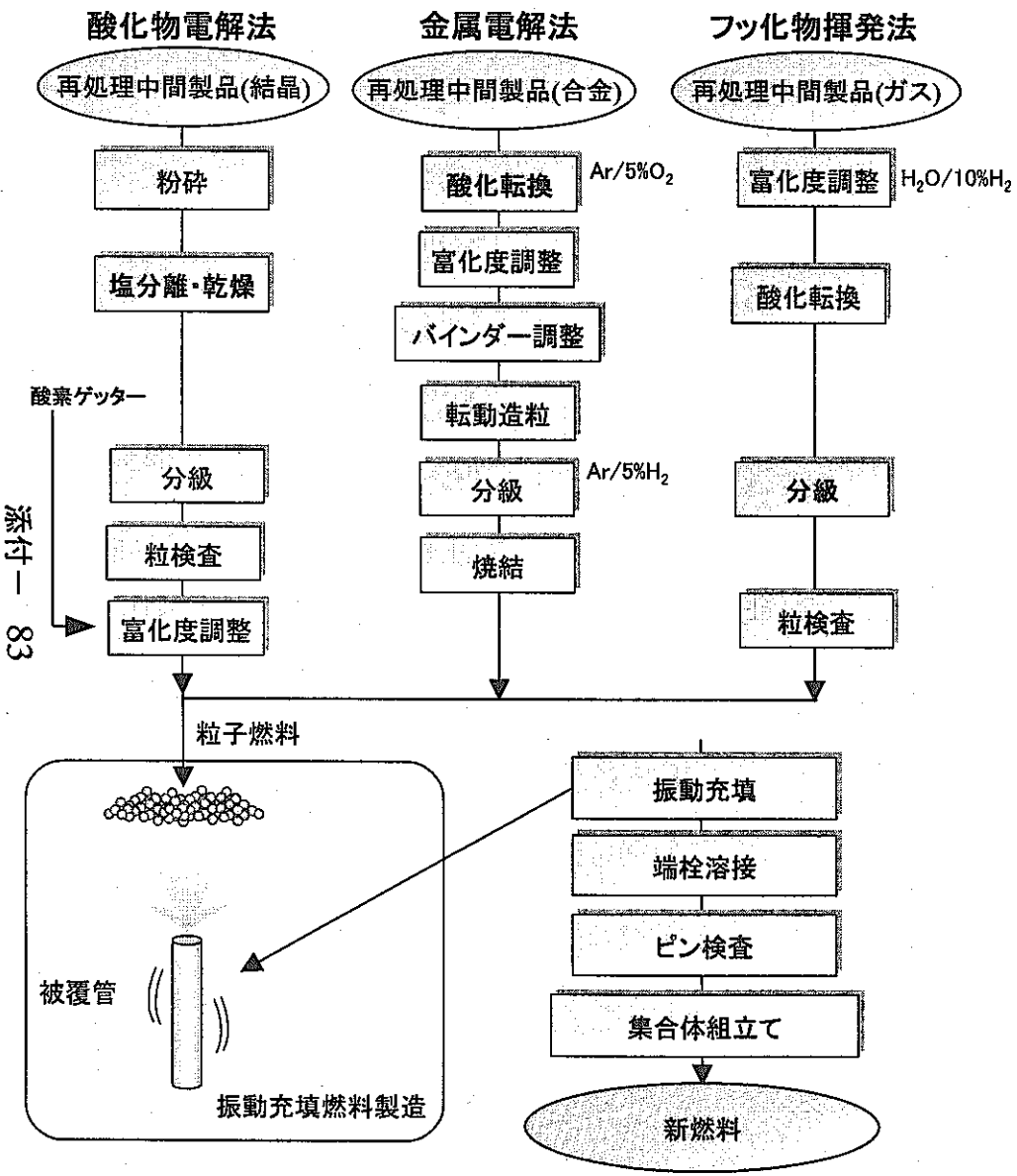
工程	50tHM/年	200tHM/年
ピン加工	8	15
ピン検査	14	24
集合体組立	2	3
集合体検査	3	3
その他	7	8
合計	34	53

セル・建屋体積(m^3)

工程	50tHM/年	200tHM/年
主工程セル	20,000	24,000
保守・分析セル	4,200	4,200
主要セル合計	24,200	28、200
主建屋容積	204,000	215,000
新燃料貯蔵建屋	77,000	143,000
廃棄物貯蔵建屋	46,000	77,000
原料貯蔵建屋	60,000	60,000
燃料製造建屋総建屋容積	387,000	495,000

図-67 振動充填法(湿式再処理と整合する粒子製造)プラント概念検討結果

振動充填法のプロセスフロー及び特徴



主要設計データ

酸化物電解法

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
原料受入	—	—
ピン加工	8	15
ピン検査	14	24
集合体組立	2	3
集合体検査	3	3
その他	7	8
合計	34	53

セル・建屋体積(m^3)

工程	50tHM/年	200tHM/年
主工程セル	10,000	25,000
保守・分析セル	1,500	1,500
主要セル合計	11,500	26,500
一体化施設総合建屋容積	520,000	1,030,000

金属電解法

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
原料受入	3	6
ピン加工	9	18
ピン検査	14	24
集合体組立	2	3
集合体検査	3	3
その他	7	8
合計	38	62

セル・建屋体積(m^3)

工程	50tHM/年	200tHM/年
主工程セル	20,000	39,000
保守・分析セル	1,400	2,600
主要セル合計	21,400	41、600
一体化施設総合建屋容積	411,000	730,000

フッ化物揮発法

主要機器数

工程	50tHM/年	200tHM/年
原料受入	—	—
ピン加工	8	15
ピン検査	14	24
集合体組立	2	3
集合体検査	3	3
その他	7	8
合計	34	53

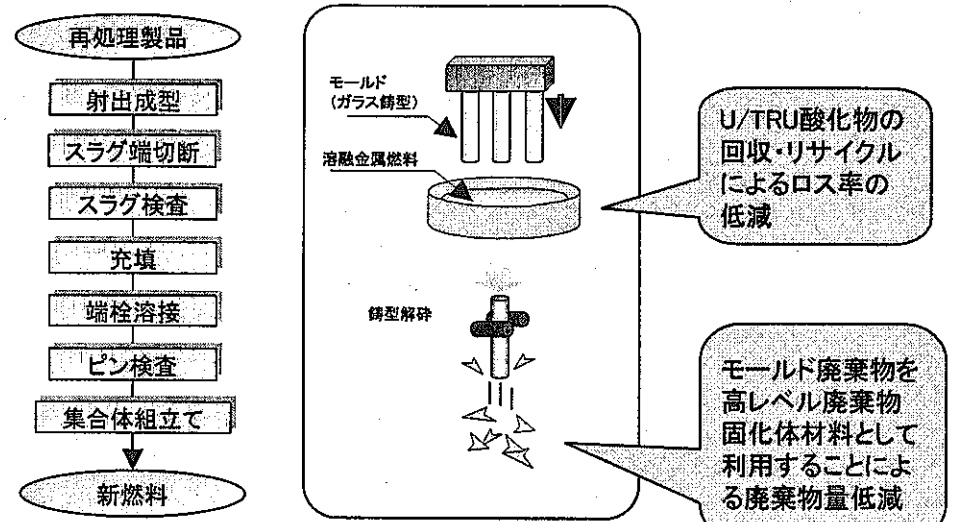
セル・建屋体積(m^3)

工程	50tHM/年	200tHM/年
主工程セル	14,000	19,000
保守・分析セル	—	—
主要セル合計	14,000	19,000
燃料製造建屋(独立建屋)	118,000	156,000
その他付属建屋容積	90,000	160,000

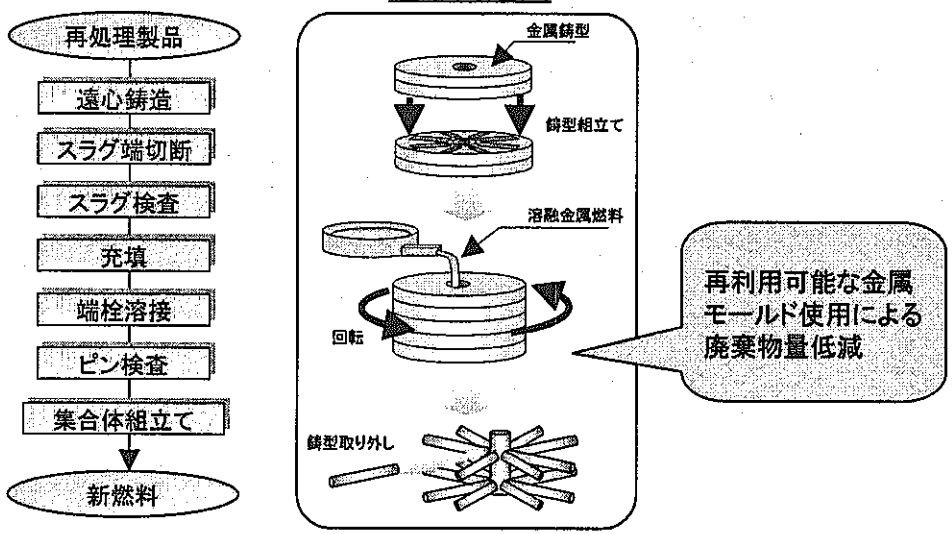
図-68 振動充填法(乾式再処理と整合する粒子製造)プラント概念検討結果

鋳造法のプロセスフロー及び特徴

射出成型法



遠心鋳造法

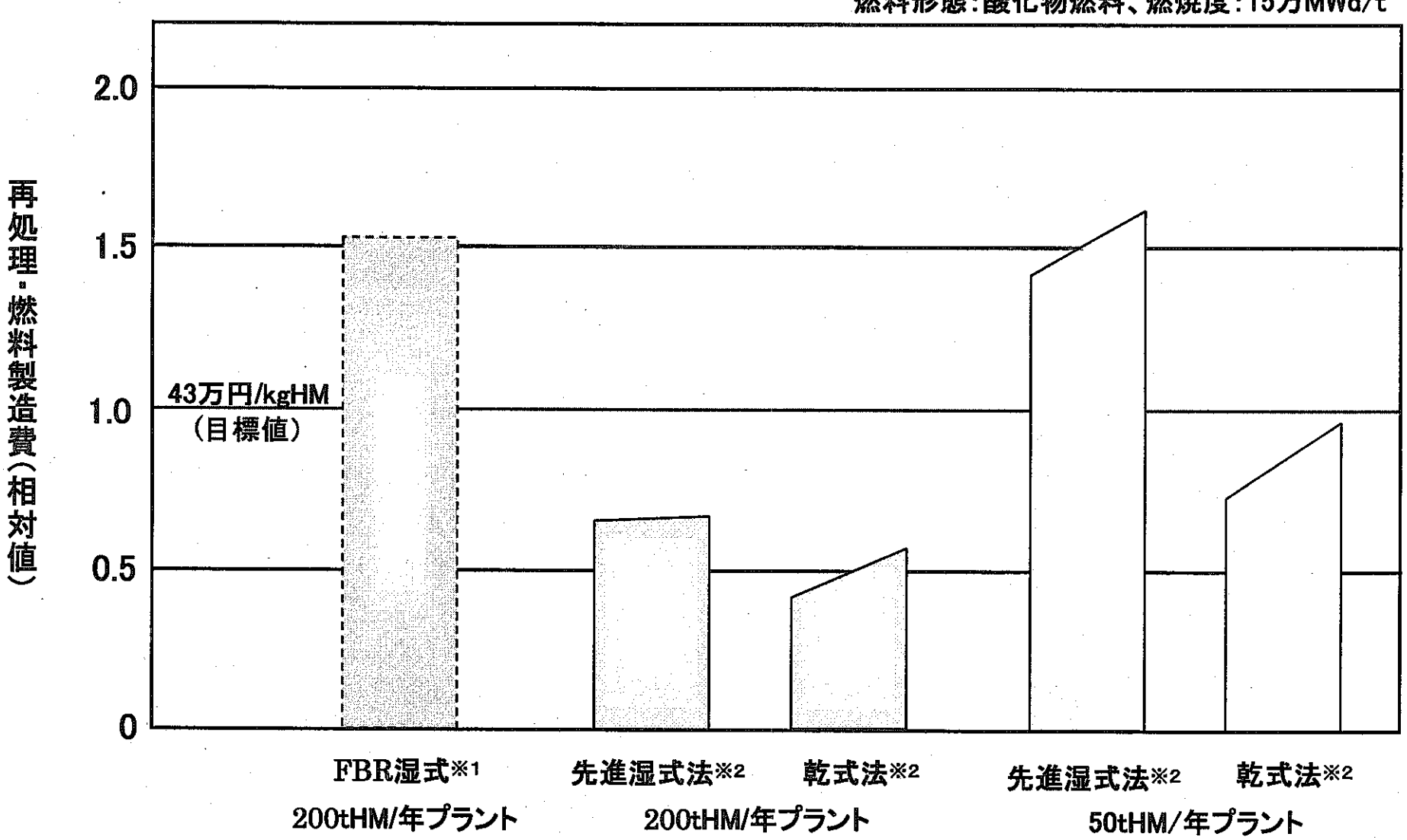


主要設計データ

主要機器数

工程	射出成型法		遠心鋳造法	
	50tHM/年	200tHM/年	50tHM/年	200tHM/年
原料受入・調整	2	8	2	4
鋳造・スラグ検査	7	28	13	44
ピン組立	3	12	3	12
ピン検査	5	20	5	20
集合体組立	1	2	1	2
集合体検査	2	2	2	2
その他	6	20	6	20
合計	26	92	32	104

図-69　鋳造法(金属燃料)プラント概念検討結果



※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 各方式において、今後開発課題を達成した時の予想値

図-70 経済性評価結果

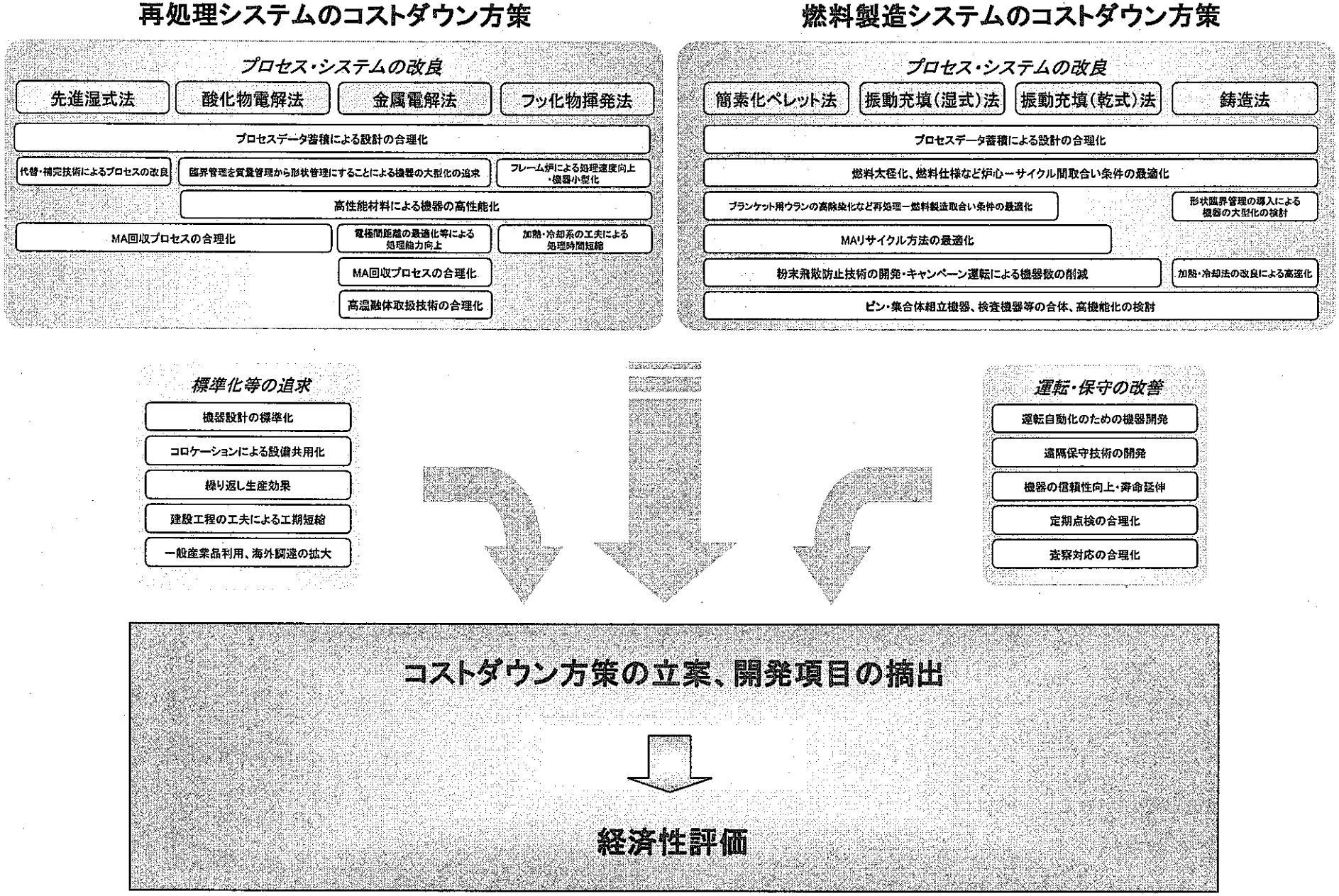
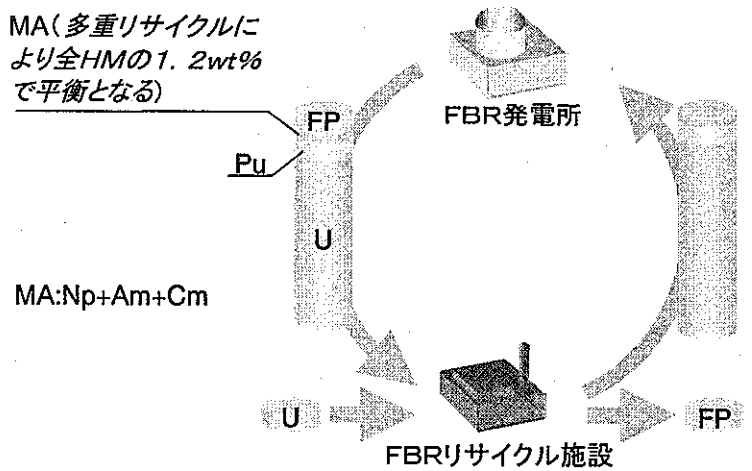


図-71　燃料サイクルシステムのコストダウンへのアプローチ

ケースA：FBR平衡リサイクル

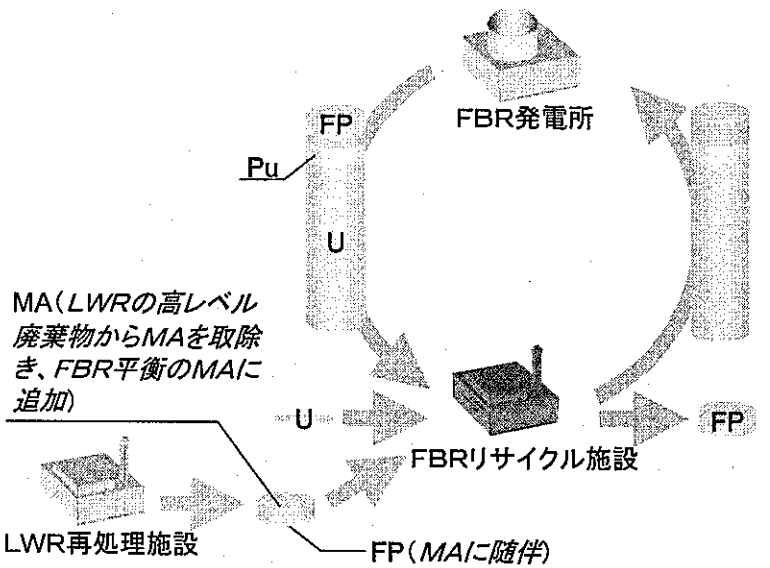


単位：wt%HM

	先進湿式	簡素化PUREX*1	PUREX*1	酸化物電解	金属電解*2	フッ化物揮発
TRU	27．4	26．6	26．5	27．4	27．4	27．4
Pu	26．2	26．5	26．5	26．2	26．2	26．2
Np	0．11	0．1	0．0	0．11	0．11	0．11
Am	0．82	0．0	0．0	0．82	0．82	0．82
Cm	0．26	0．0	0．0	0．26	0．26	0．26
FP	0．47	0．02	0．0	1．8	1．5	0．5
RE	0．46	0．0	0．0			

＊1　Pu／（U＋Pu）＝26．5wt%HMと仮定
＊2　Li還元法

ケースB：ケースA＋LWR再処理からのMA添加



ケースB（LWR条件　燃焼度60GWd/t（PWR－UO_2燃料）、5年冷却）

単位：wt%HM

	2%MA FBR平衡MA*3 ＋ 1wt%LWR取出しMA*4	5%MA FBR平衡MA*3 ＋ 4wt%LWR取出しMA*4	FBR平衡MA*3
TRU	28．0	30．2	27．4
Pu	26．0	25．2	26．2
Np	0．53	2．06	0．11
Am	1．16	2．42	0．82
Cm	0．32	0．52	0．26
FP	1．23	4．03	0．47
RE	1．22	4．03	0．46

＊3　先進湿式法によりリサイクル（上記ケースA）
＊4　LWR再処理廃液よりSETFICS法＋TRUEX法で回収したMAを添加し、所定のMA重量比となるよう調整したもの

図-72　TRUリサイクルの考え方と組成

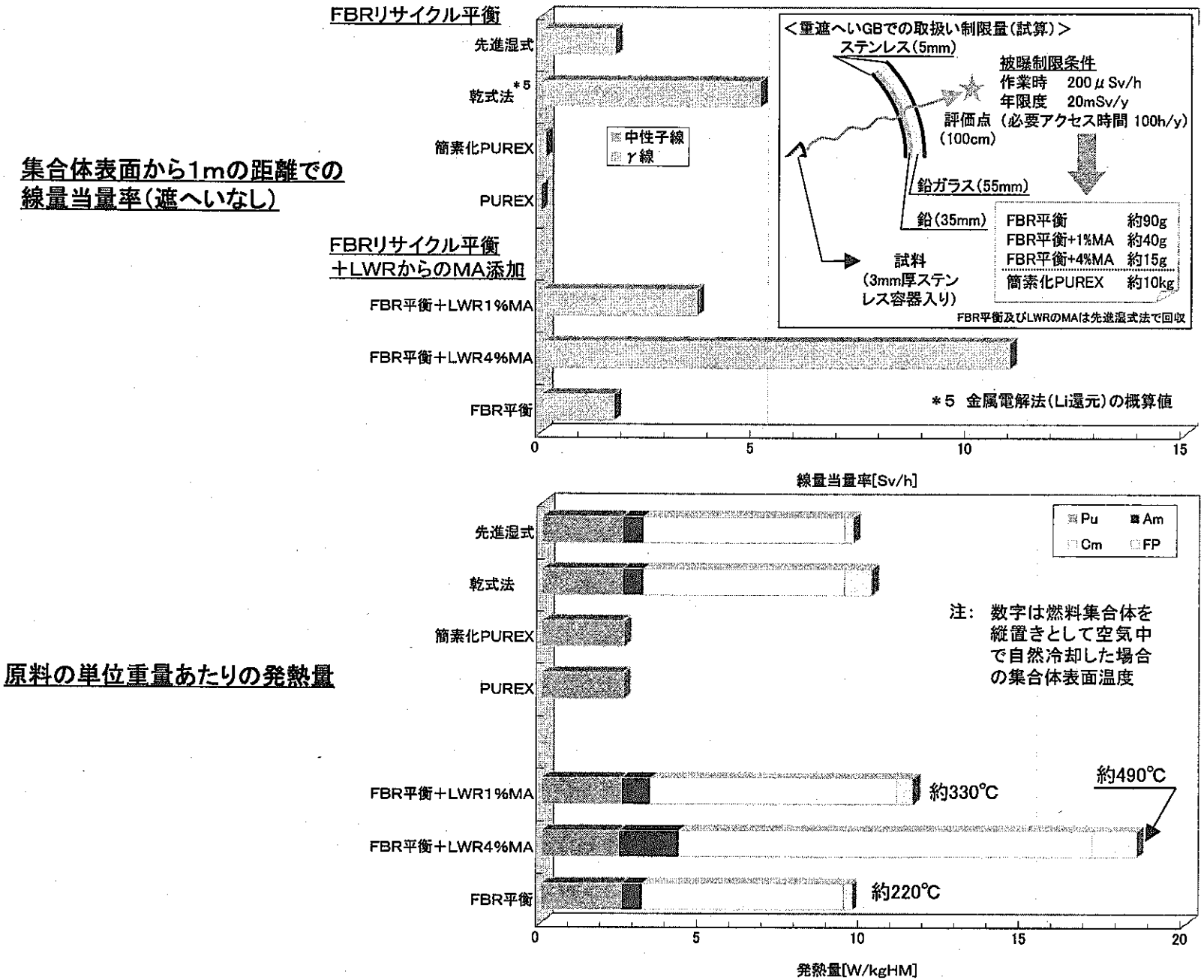


図-73 低除染燃料製造上の影響

比較的半減期が短く、高エネルギーの放射線を放出する核種の存在

高エネルギーβ・γ
Ba-137m,Y-90,
Eu-152,Eu-154等

α、自発核分裂
Cm-244,Cm-243等

熱物性、構造等の
物理化学的影響あり

従来燃料の仕様と比較して不純物量が増加

高放射線、高発熱の
原料・製品の取扱い

施設・設備への対応方策
- ○遮へい(遠隔製造)
- ○除熱(強制冷却等)
- ○除染(工程内拡散防止)
- ○検査(接近性確保)

従来と異なる仕様の
燃料の品質保証

燃料性能への対応方策
- ○製造技術(条件最適化)
- ○燃料性能
  - 最大線出力、
  - 中性子経済、
  - 動特性等

対応策	高放射線	高発熱
遮へい強化	遠隔自動化技術、小バッチ処理技術、耐放射性材などの開発が必要	
強制冷却		ホッパ冷却技術、小バッチ処理技術、燃料集合体座屈防止策、酸化防止策などの開発が必要
減衰待ち(遅延サイクル)	高放射線、高発熱物質保管技術などの開発が必要(発熱に大きく寄与するCmや高エネルギーβ線源となるEuの減衰待ちにより右記の効果が期待できる)	
高除染回収	湿式のMA回収工程、乾式のTRU回収工程について、安価かつFPの除染性能を高めたTRUリサイクル技術の開発が必要	
非均質炉心	MA燃料開発が必要(MA燃料取扱いの局所化によるサイクル技術への負担軽減が期待できる)	

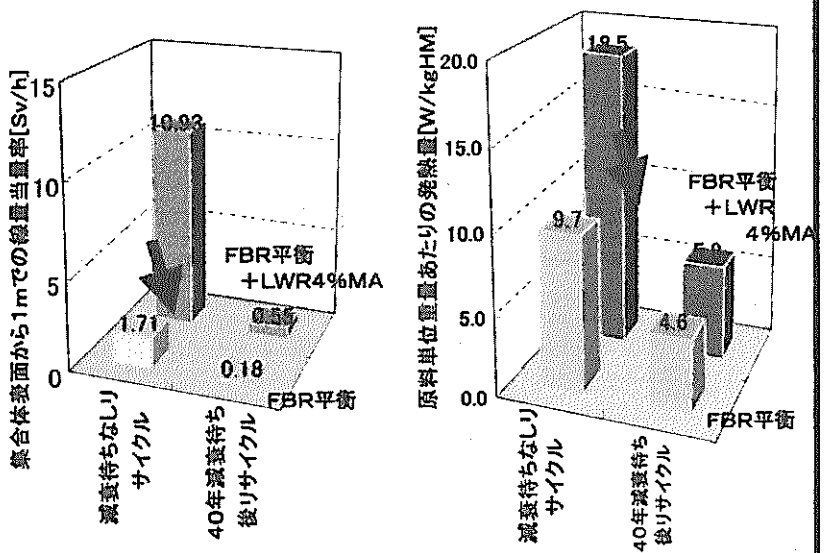
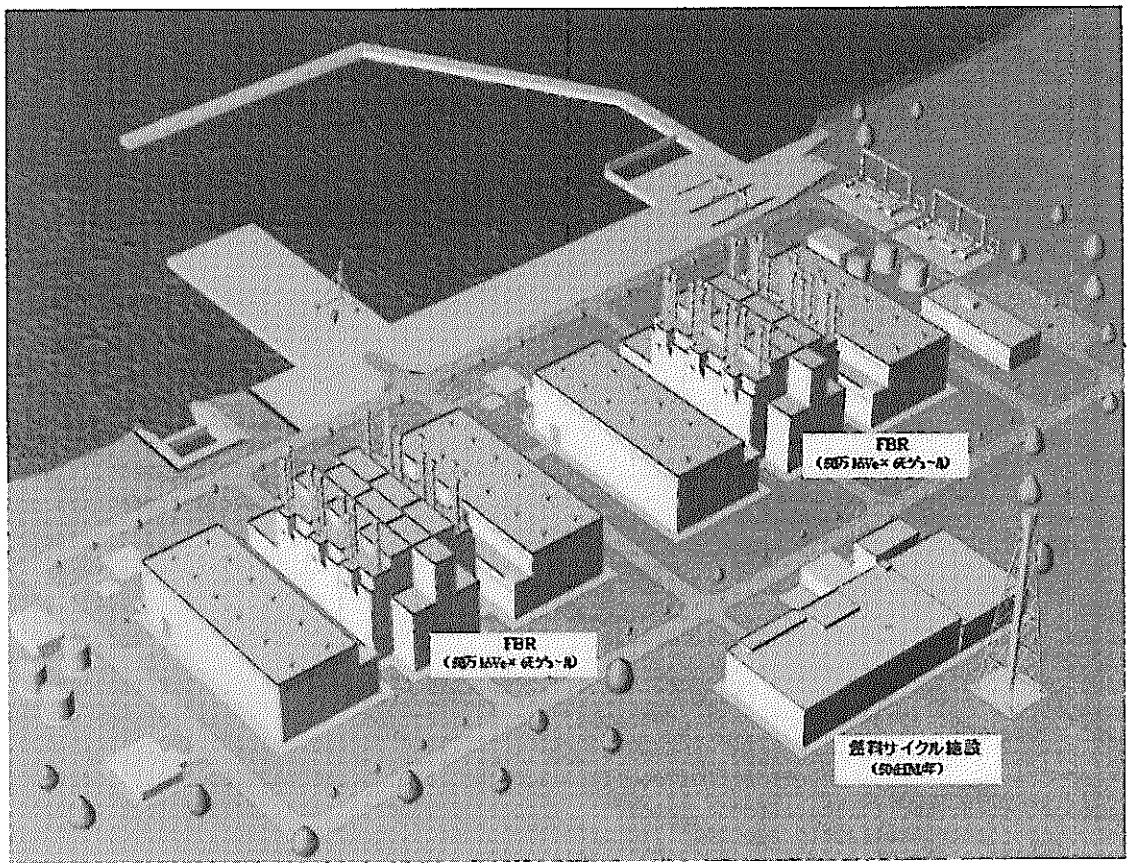
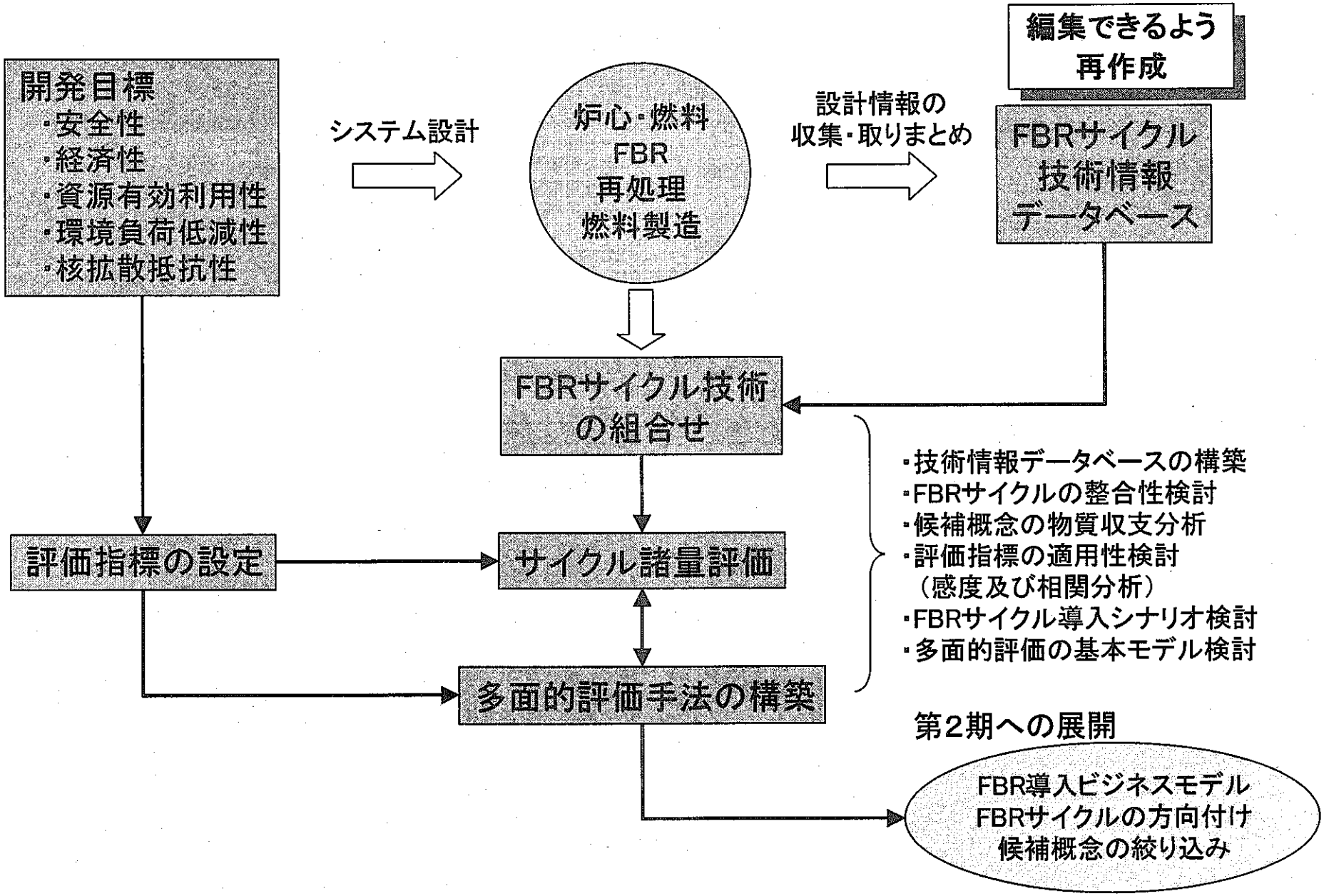


図-74 低除染TRUリサイクルの課題と対応方策

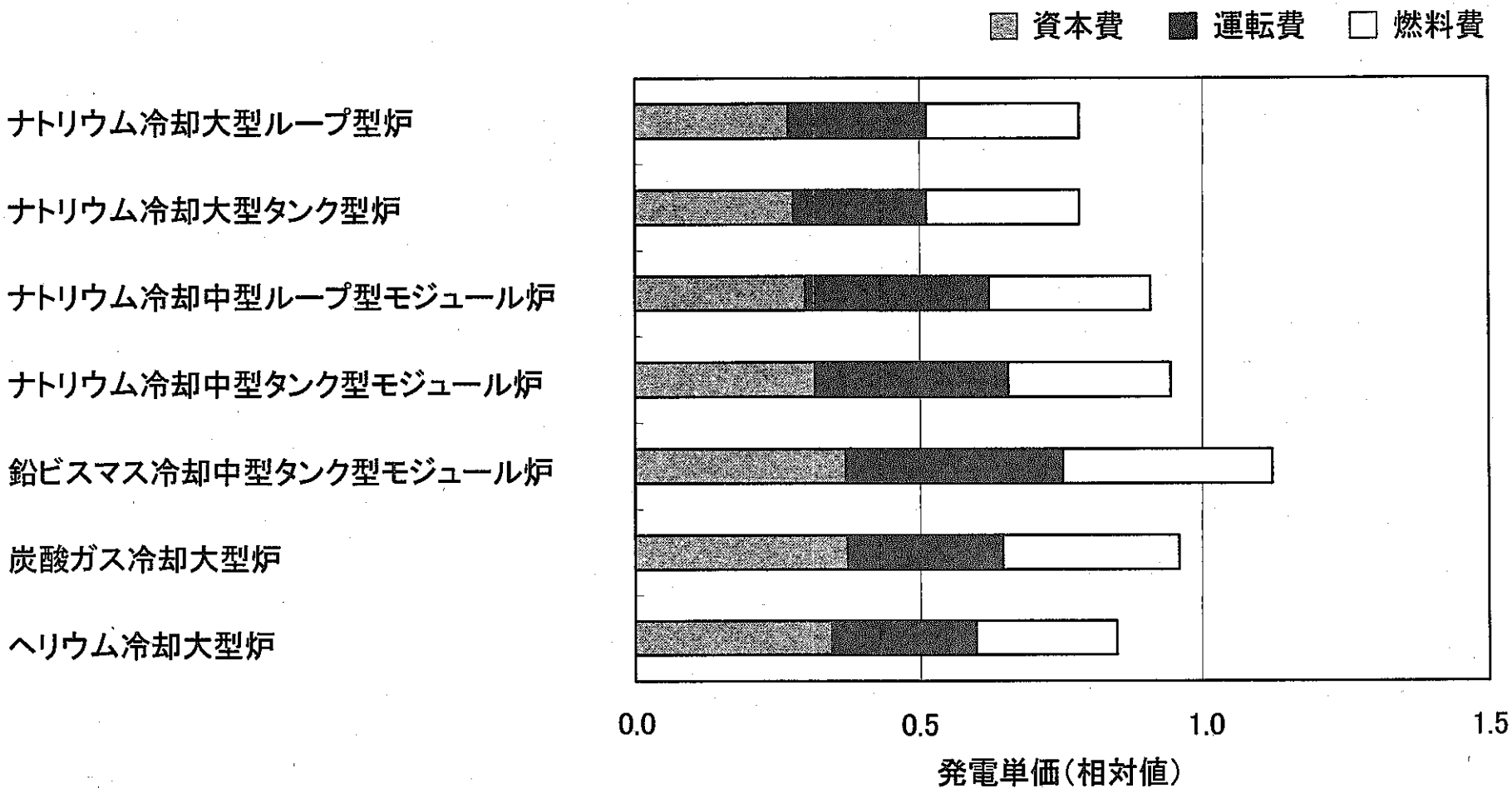


項目		条件
FBR	炉型	ナトリウム冷却中型ループ型モジュール炉
	総出力	600万kWe ([50万kWe×6モジュール]×2プラント)
炉心	炉心型式	金属燃料均質炉心 (低除染、TRU燃焼、高速炉多重サイクル)
	燃焼度	15万MWd/t
	使用済燃料発生量	約82tHM/年 評価条件検討時の使用済燃料の想定発生量は約52tHM/年で、燃料サイクルシステムのプラント規模とほぼ整合が取れていたが、最新の炉心特性データに基づき見直した結果、発生量が約1.5倍に増加した。
燃料サイクル	再処理	金属電解法
	燃料製造	射出成型法
	処理能力	50tHM/年のプラント設計をベース 使用済燃料発生量は約82tHM/年であるが、50tHM/年のプラント設計をベースとし、設備仕様の見直しはしない。また、再処理・燃料製造単価についても50tHM/年と同一とした。
その他	SF冷却期間	4年
	燃料受渡方式	炉とサイクル施設との間はキャスク輸送

図-75 コロケーションプラントの概念図

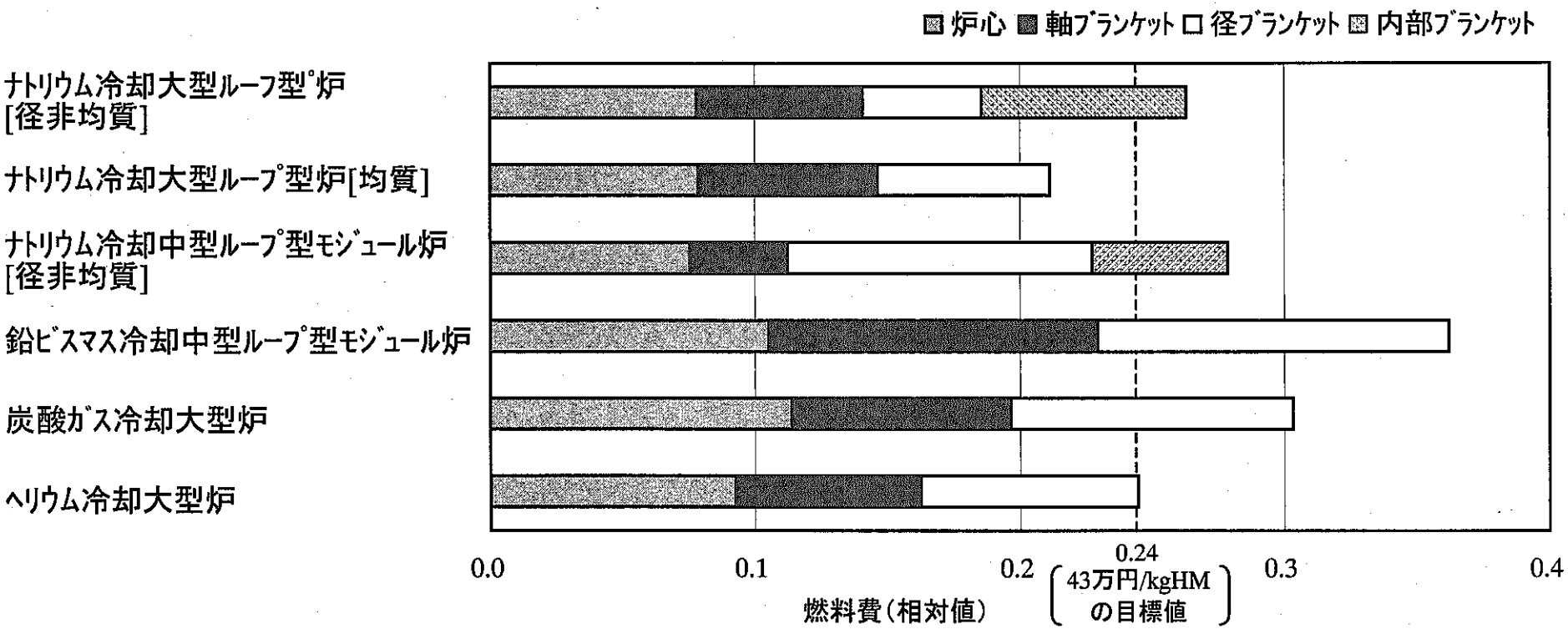


図−76　FBRサイクル技術の総合評価



注1) ナトリウム炉は酸化物燃料非均質炉心、その他の炉は窒化物燃料均質炉心
注2) 再処理は先進湿式法、燃料製造は簡素化ペレット法(200tHM/年)
注3) 将来LWRの発電単価を基準

図-77 経済性 [発電単価に対する炉型の影響]に関する試算結果



注1) ナトリウム炉は酸化物燃料、その他の炉は窒化物燃料
注2) 再処理は先進湿式法、燃料製造は簡素化ペレット法(200tHM/年)
注3) 将来LWRの発電単価を基準

図-78 経済性 [発電単価に対する炉心構成の影響]に関する試算結果

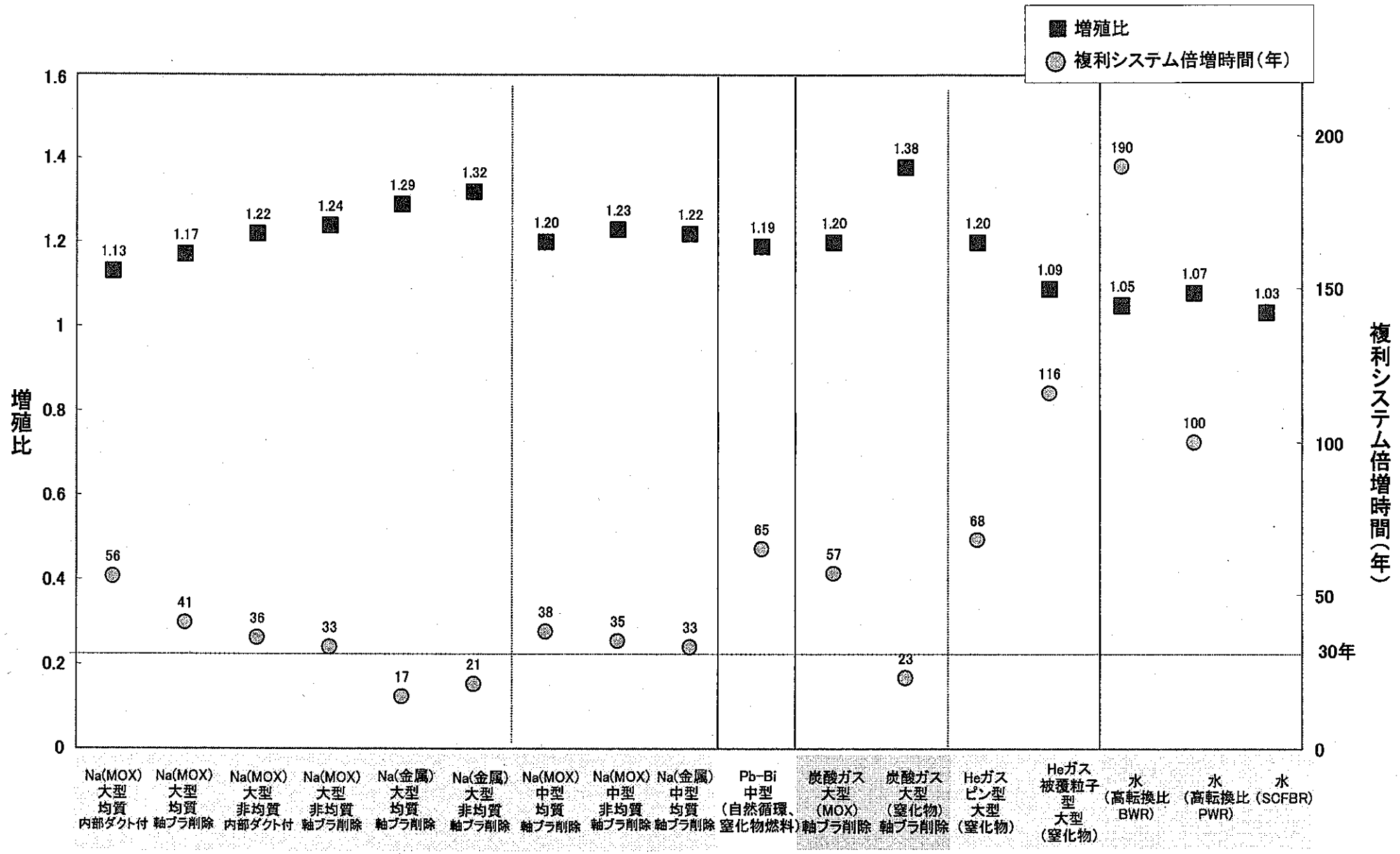
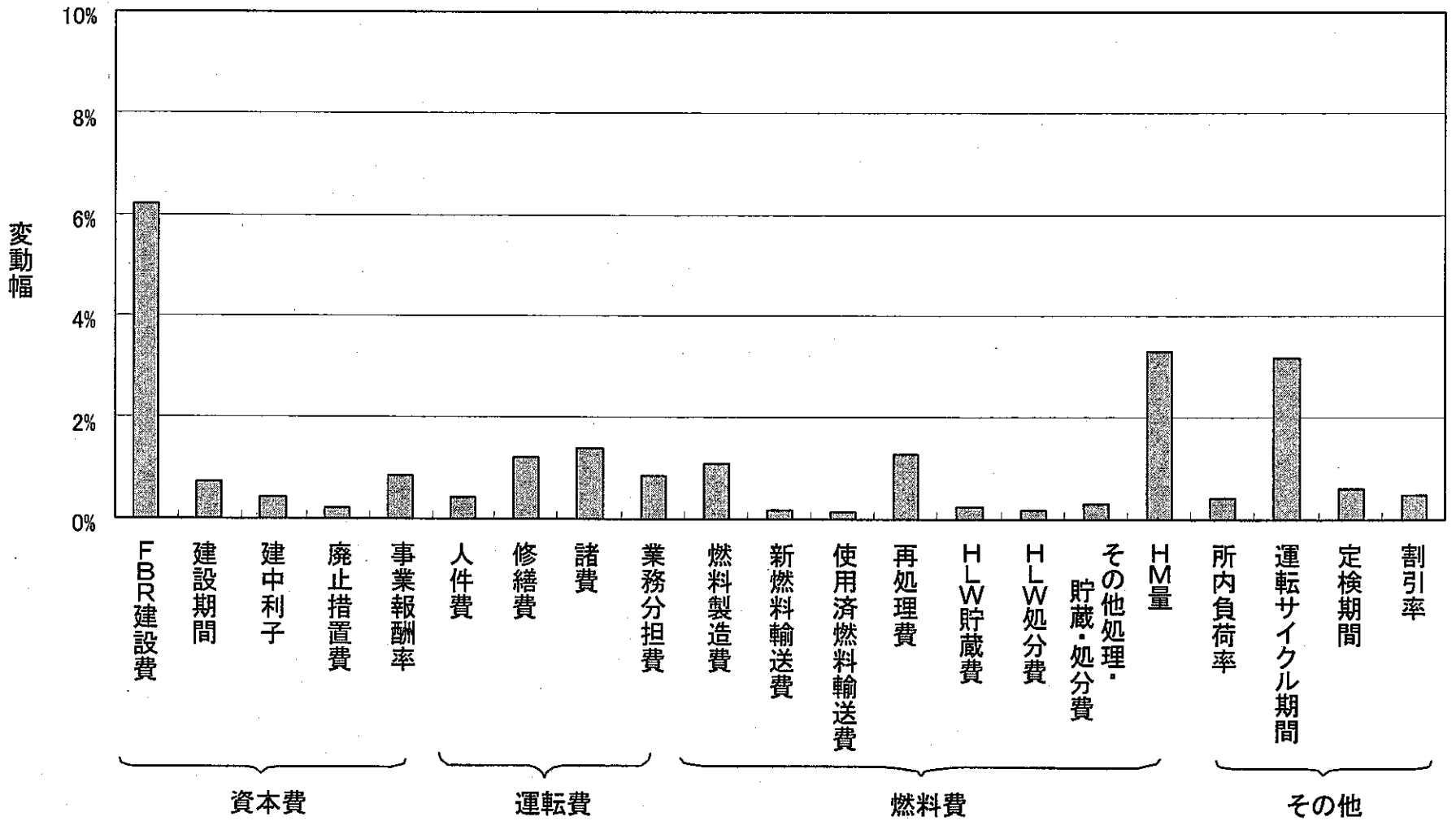


図-79 各炉型における増殖比と複利システム倍増時間の関係



(注1) A-1ケースについて入力値を10%変動させたときの発電単価の変動幅を示す。
(注2) 燃料製造費、再処理費の変動幅うち、建設費の割合はそれぞれ約5割及び約4割である。

図-80 発電単価に対する入力値の感度

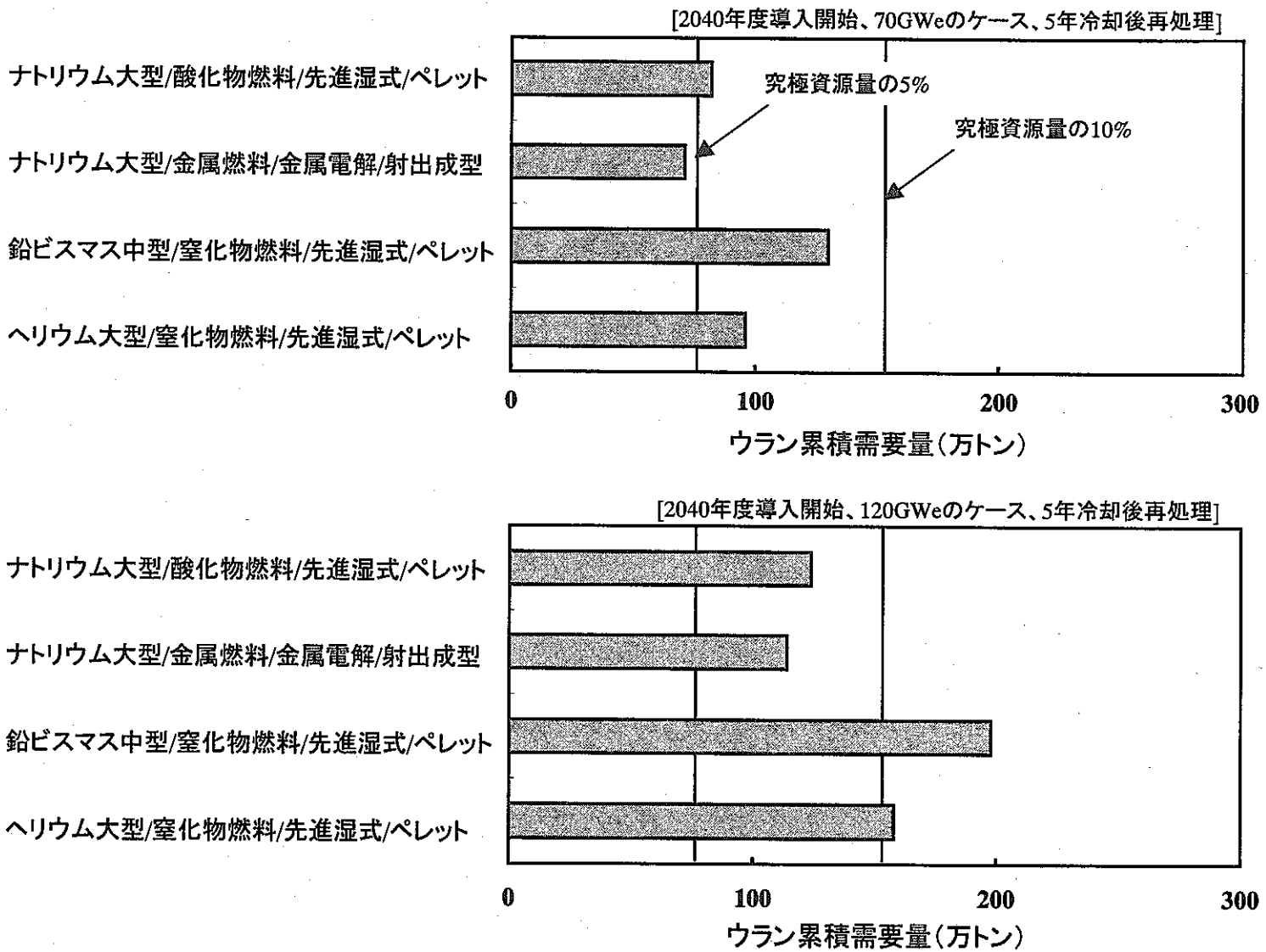
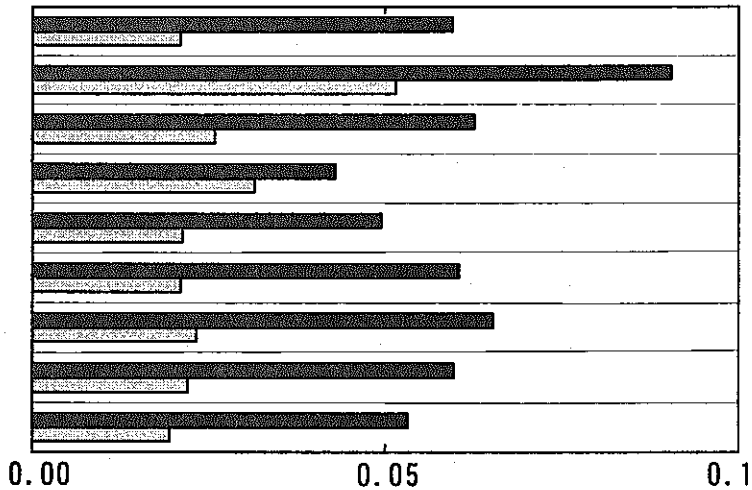


図-81　資源有効利用性に関する試算結果

廃棄物発生量

炉型	燃料	炉心	再処理	燃料製造
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	従来湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	酸化物電解法*	顆粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	金属電解法*	転動造粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	フッ化物揮発法*	流動床振動充填法*
Na冷却ループ中型モジュール	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Pb-Bi冷却タンク中型モジュール	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
炭酸ガス冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
ヘリウム冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法

＊ 50t/y

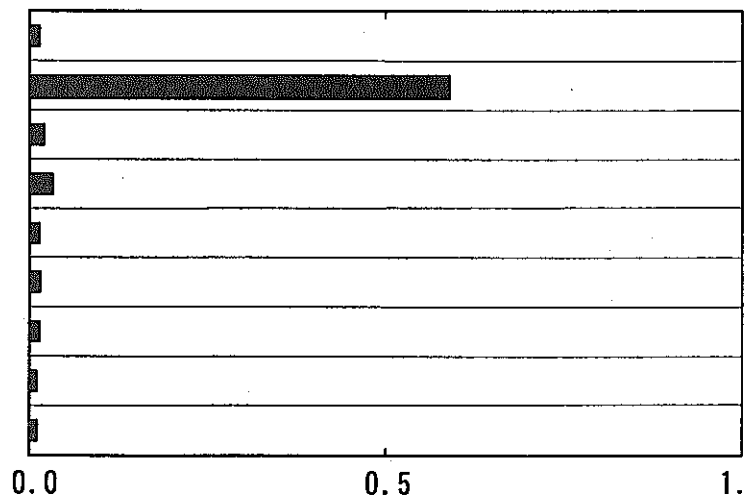


LWR直接処分の発生量基準（相対値）　黒：廃棄物総量　灰：占有面積換算

廃棄物潜在的毒性（1000年後）

炉型	燃料	炉心	再処理	燃料製造
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	従来湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	酸化物電解法*	顆粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	金属電解法*	転動造粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	フッ化物揮発法*	流動床振動充填法*
Na冷却ループ中型モジュール	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Pb-Bi冷却タンク中型モジュール	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
炭酸ガス冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
ヘリウム冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法

＊ 50t/y



LWR直接処分の使用済燃料中の潜在毒性基準（相対値）

図-82　環境負荷低減性に関する試算結果

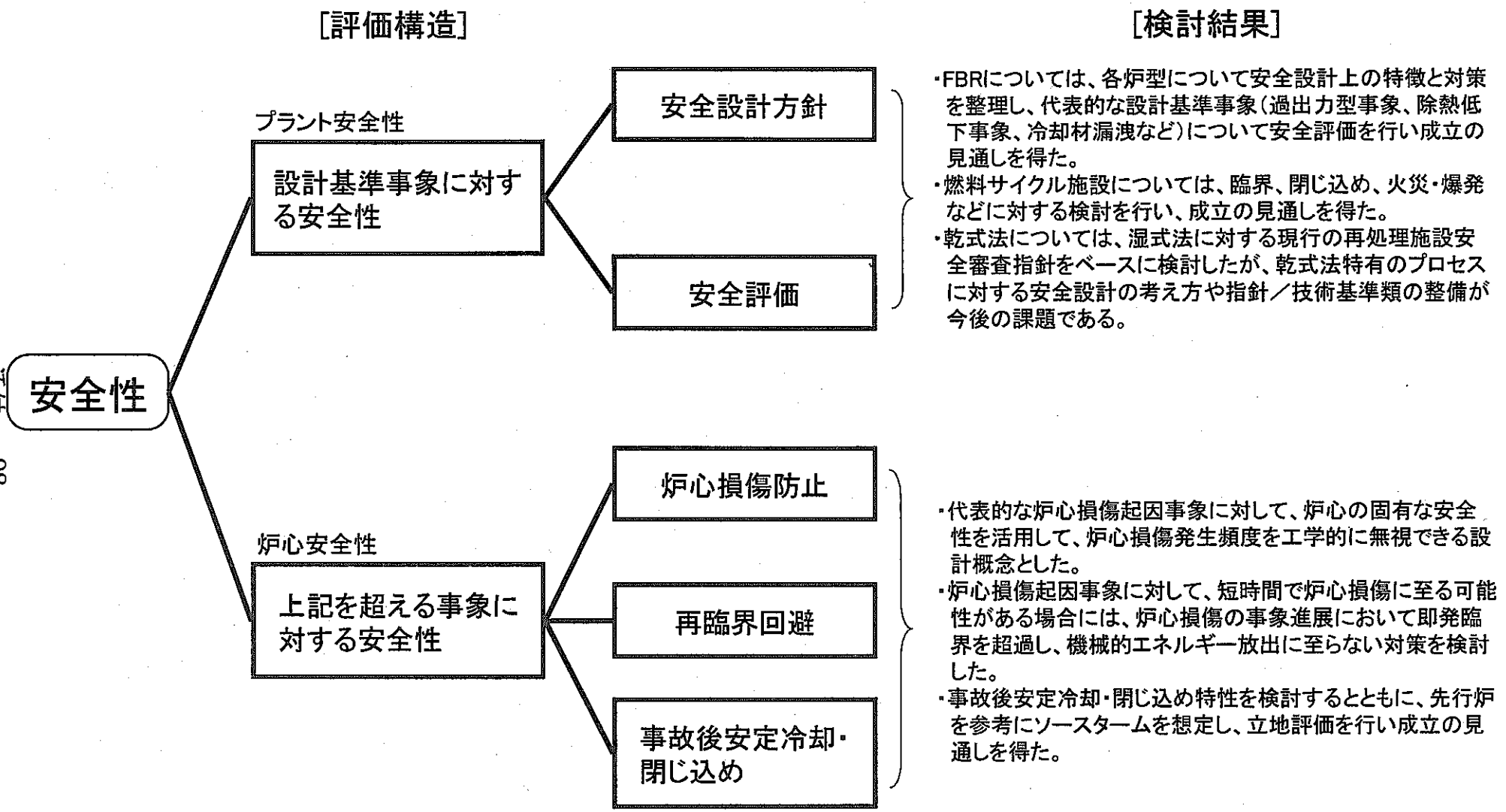


図-83　安全性の評価構造と検討結果

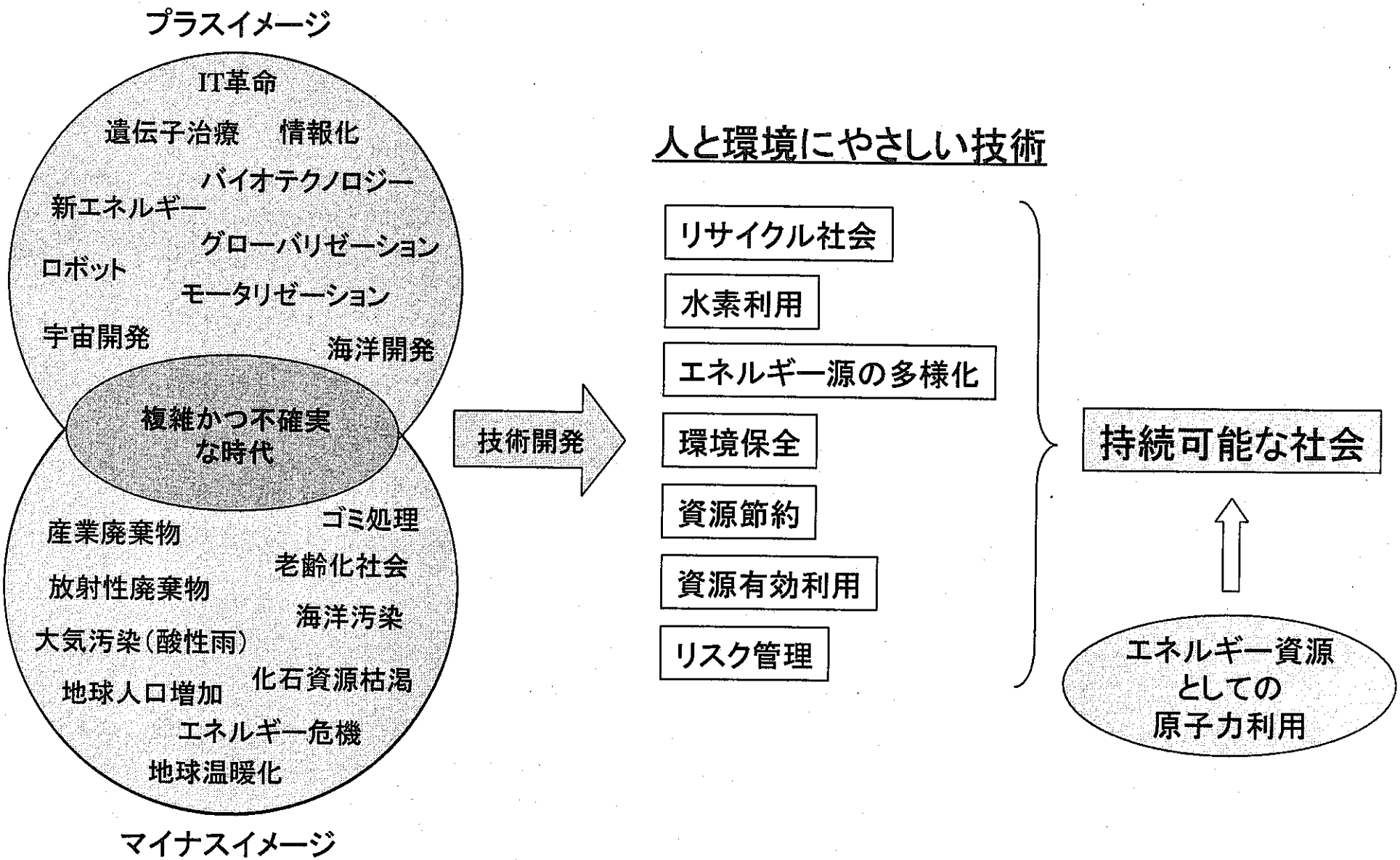


図-84 21世紀社会の展望とFBR導入シナリオ

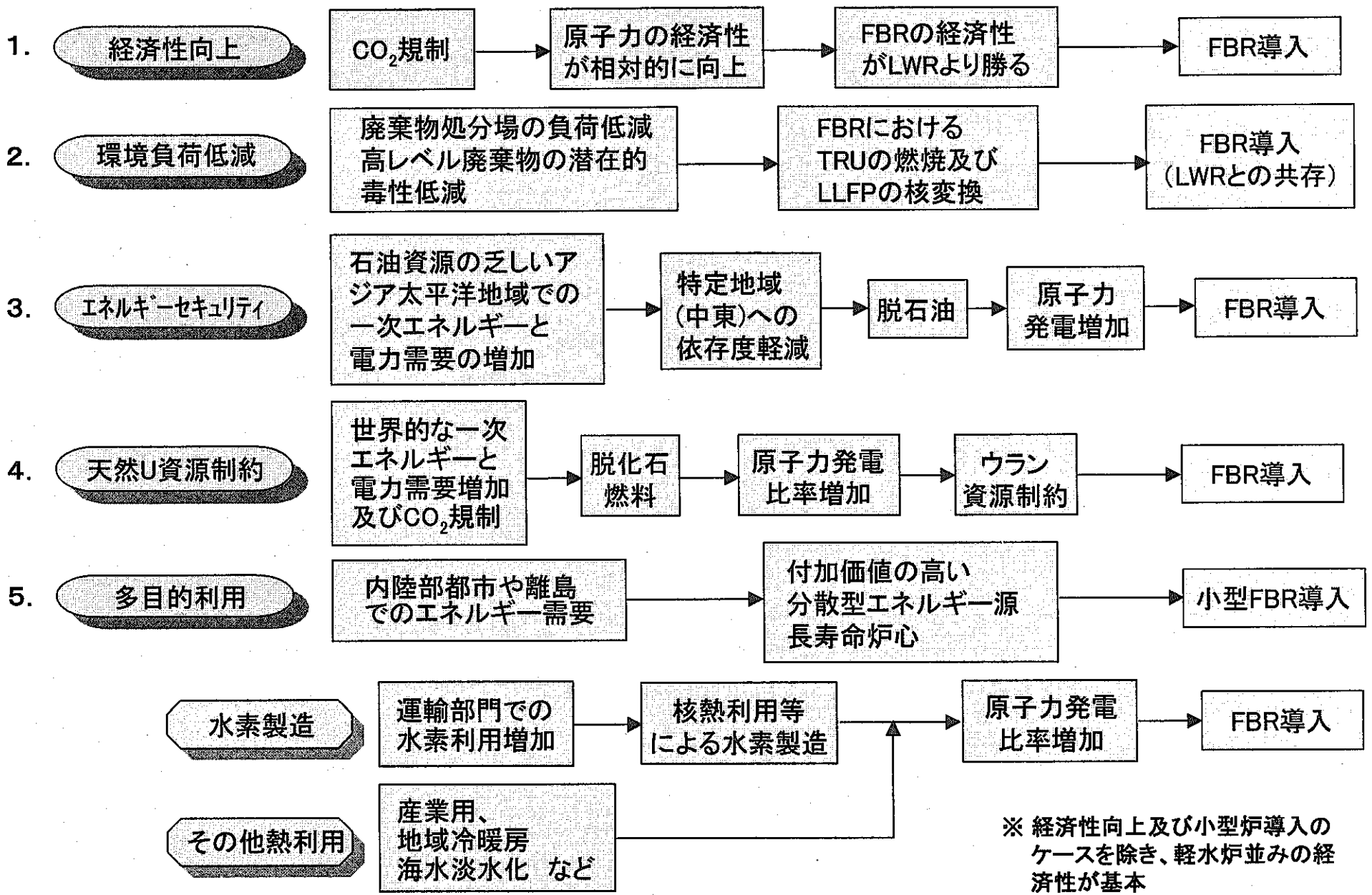
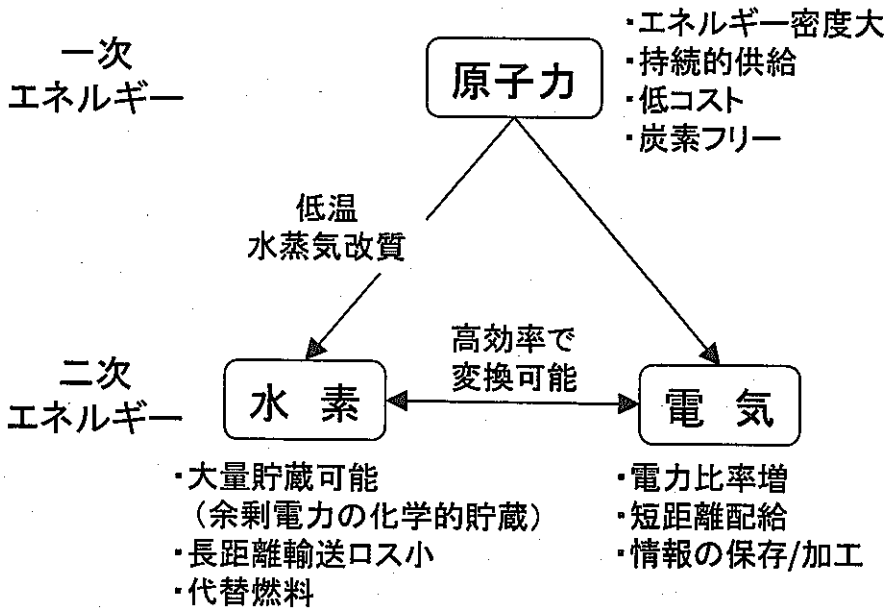


図-85　FBRの導入に関するケーススタディ

次世代エネルギー供給システム



運輸部門での原子力利用ポテンシャルの検討
－燃料電池自動車による水素利用－

想定条件
- 2030年以降は生産年齢人口の現象にともない徐々に減少
  - 2030年：9000万台程度
  - 2100年：7000万台程度（現状レベル）
- 2060年頃に全車両が燃料電池自動車に置換

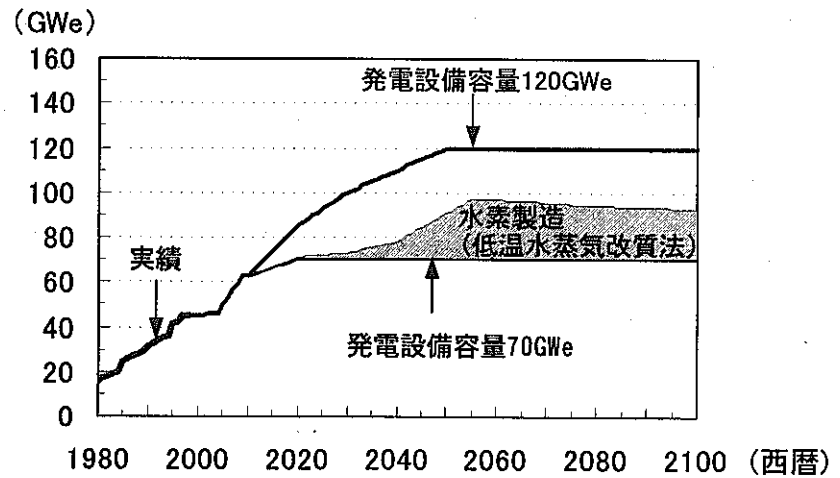


図-86　FBRによる水素製造利用の検討

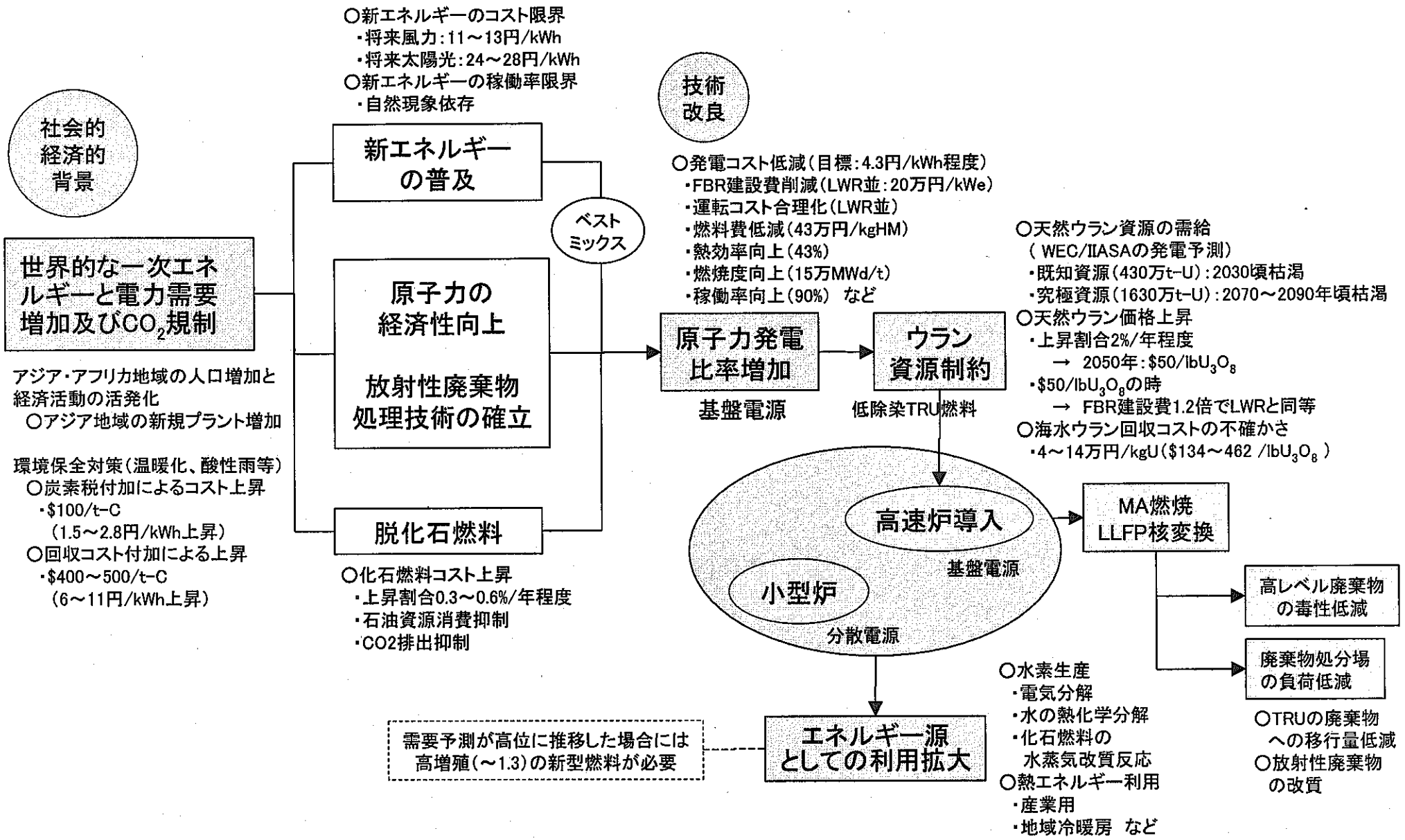


図-87 FBRサイクル開発の方向性

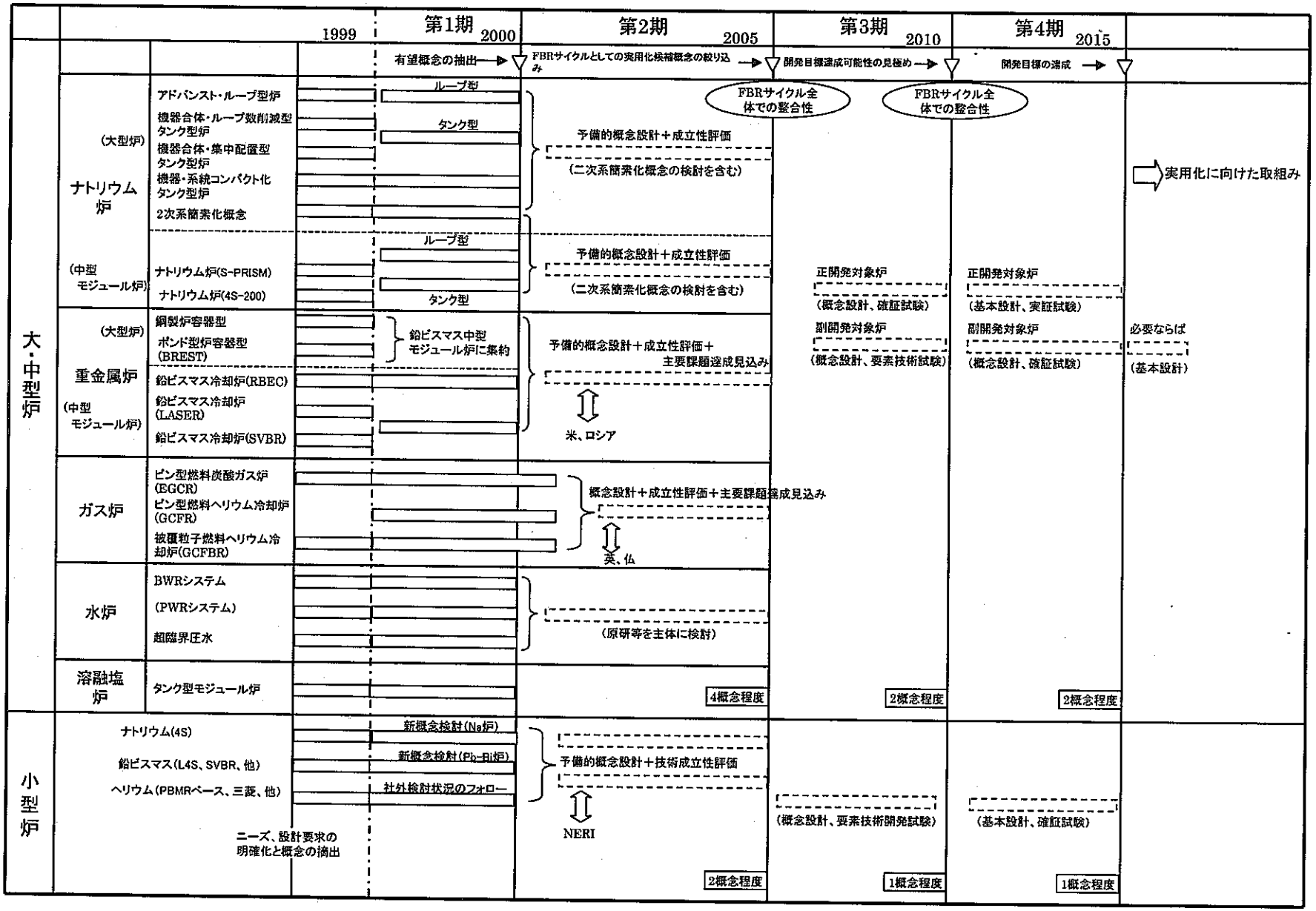


図-88 FBRシステム開発のフェーズ毎の展開

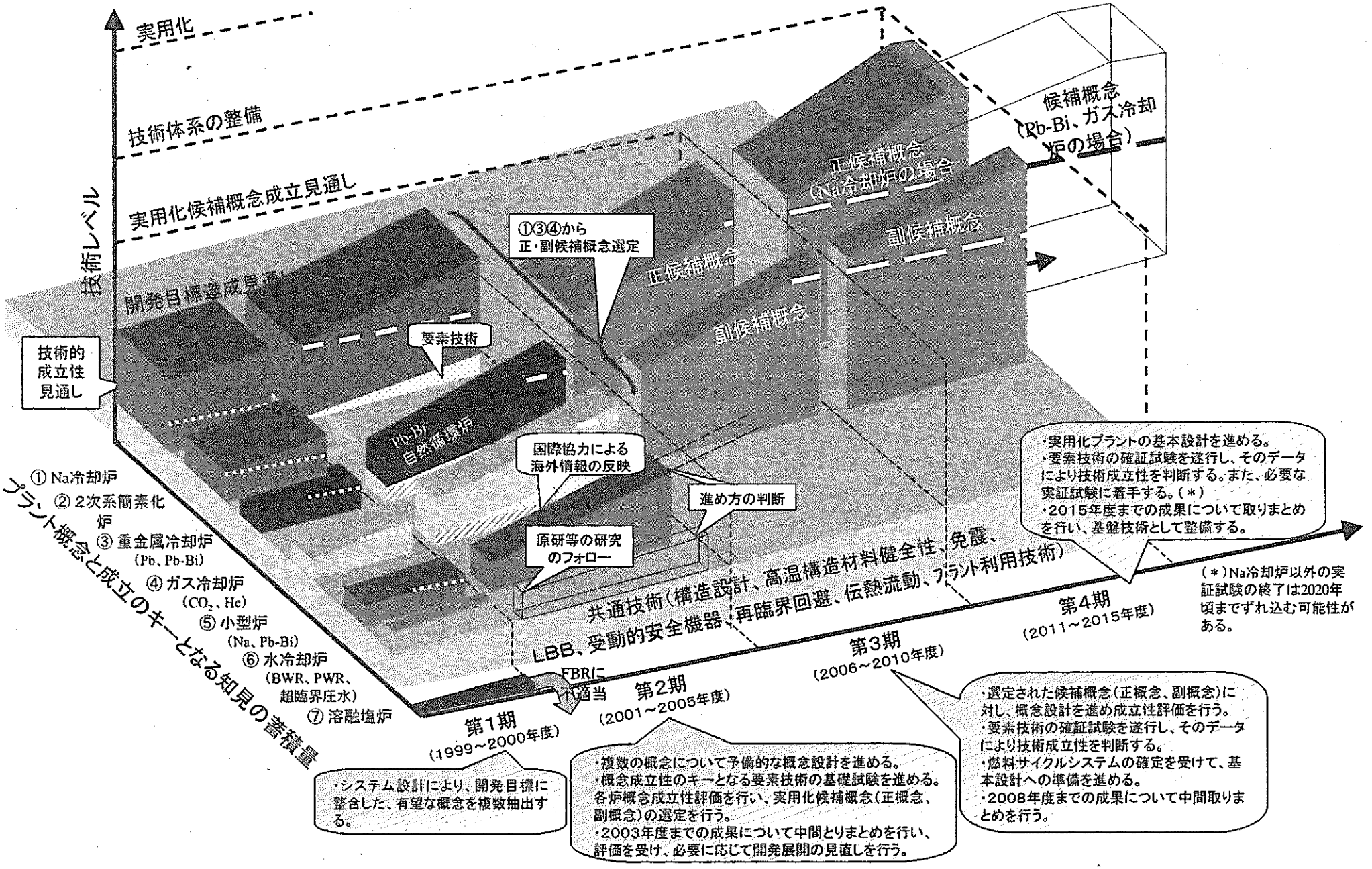


図-89 FBRシステム技術の絞込みと技術レベルの向上

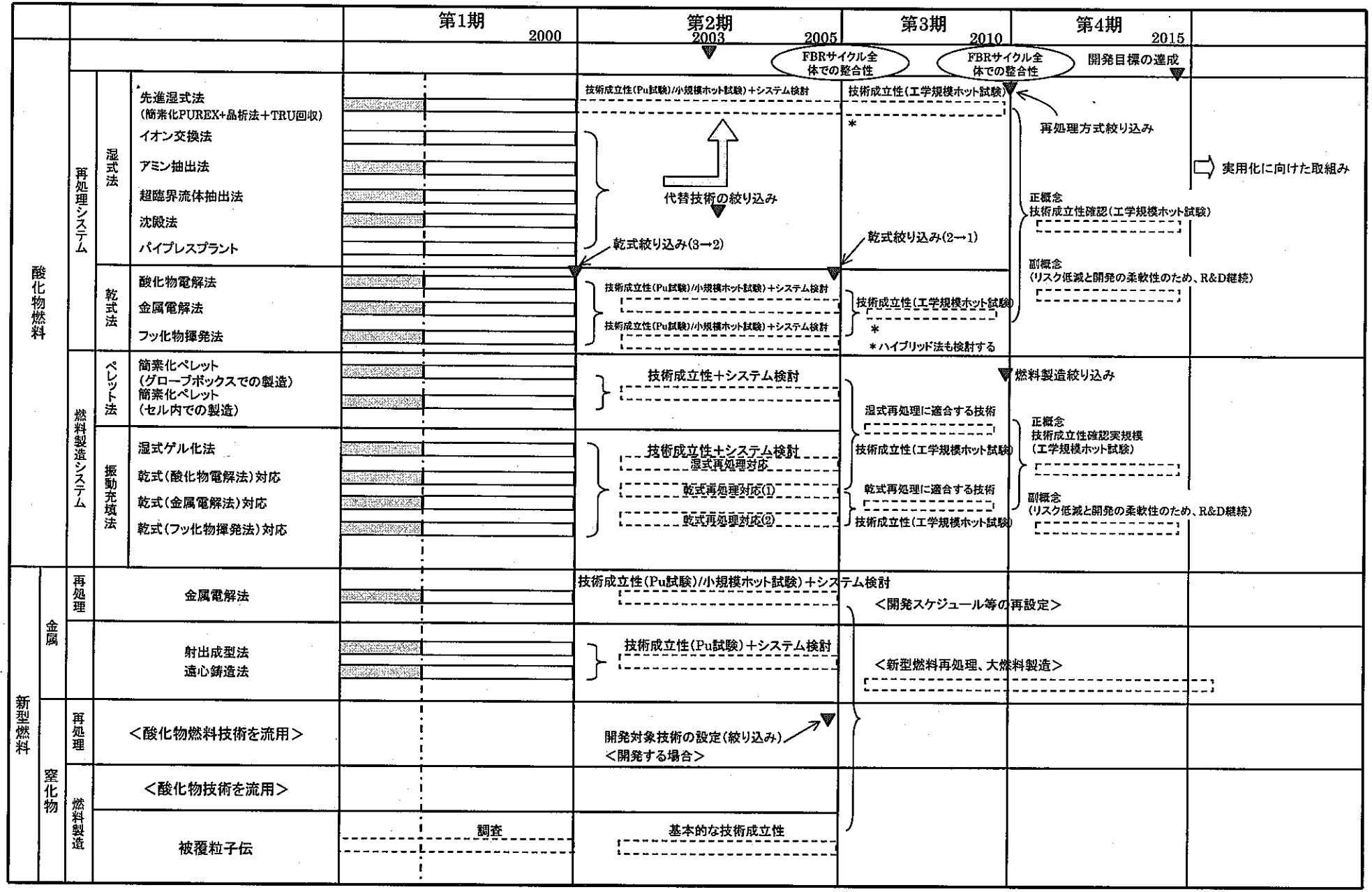
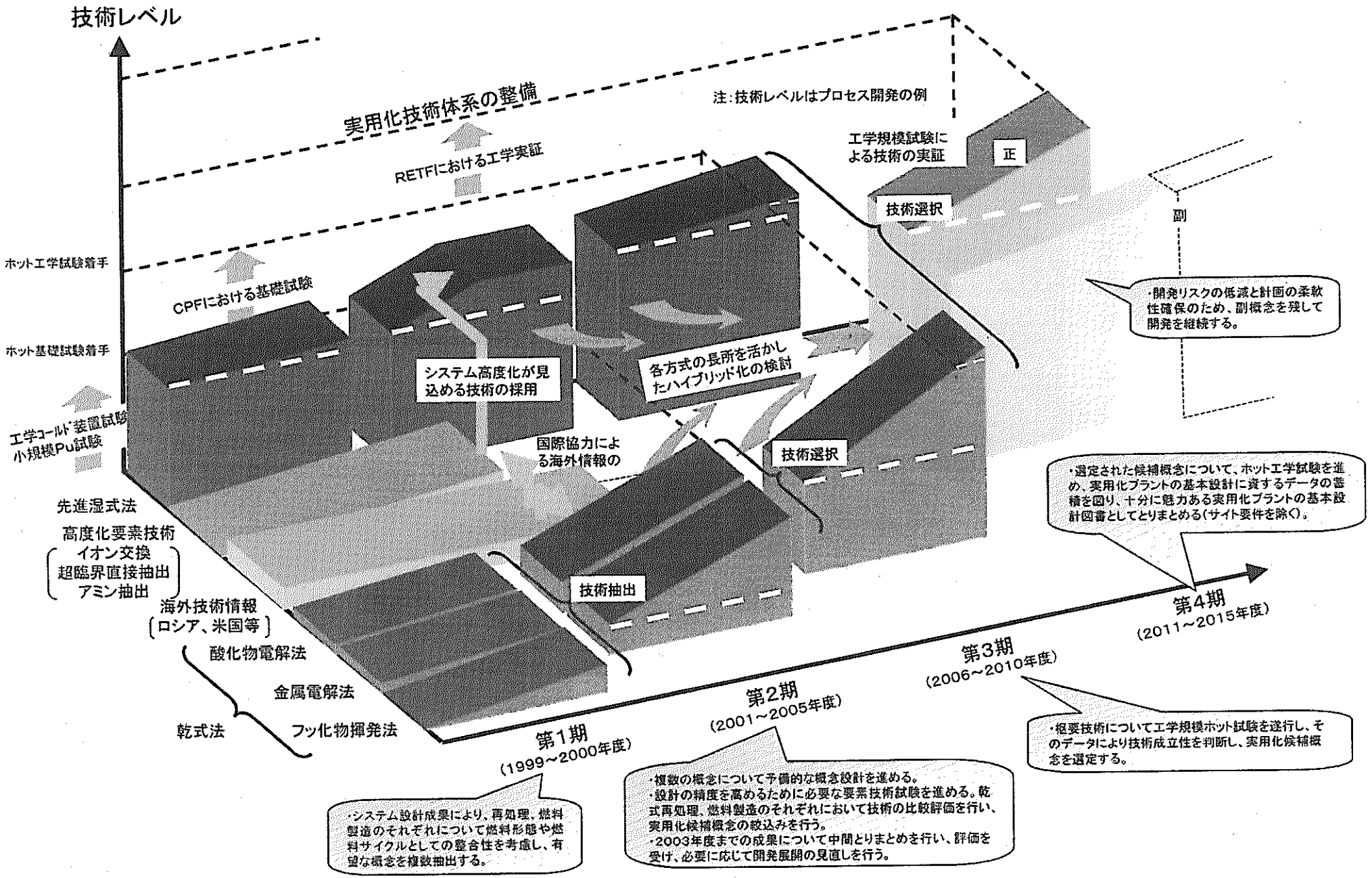


図-90 燃料サイクルシステム開発のフェーズ毎の展開



図－91　燃料サイクル技術の絞込みと技術レベルの向上

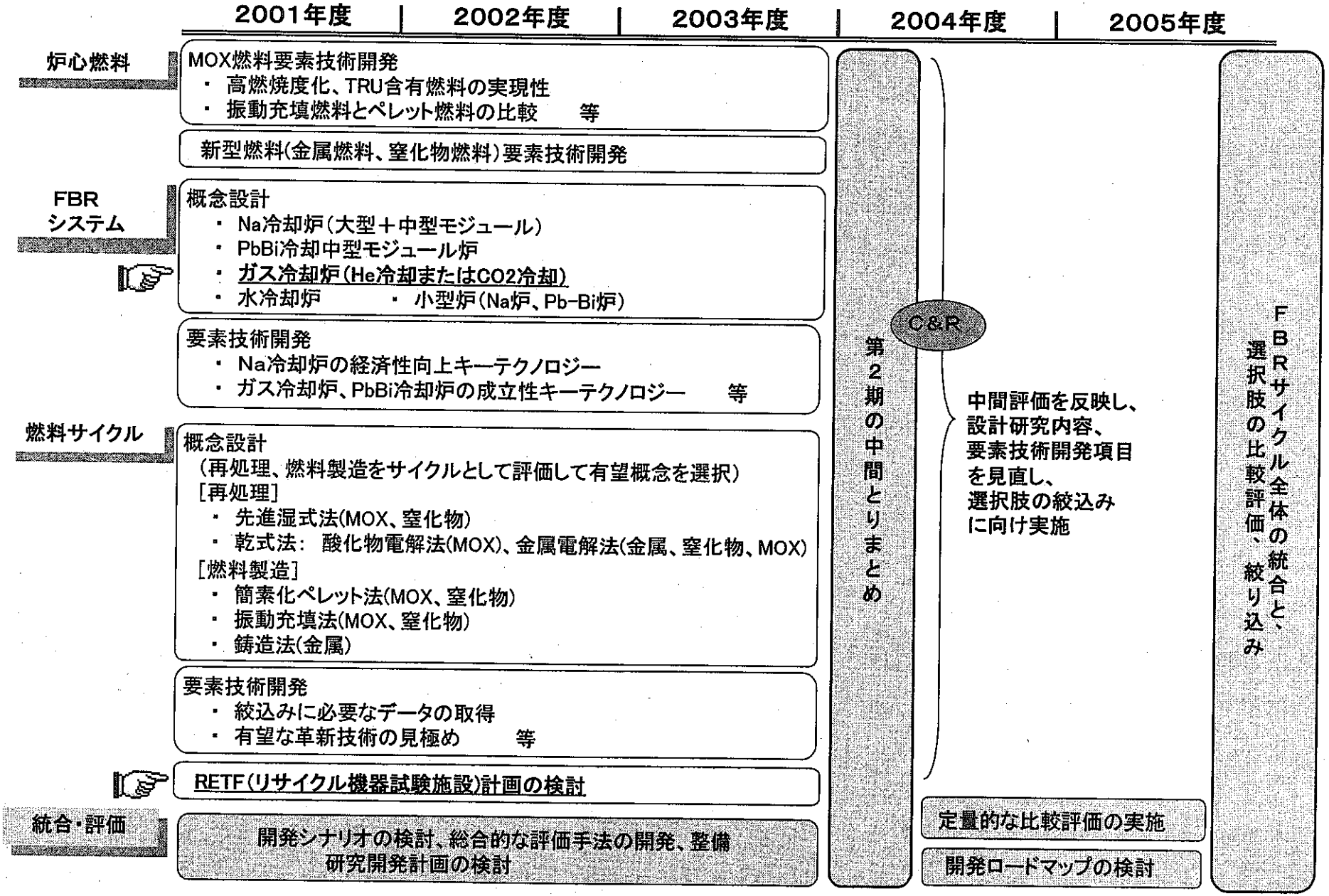


図-92　実用化戦略調査研究の第2期の展開

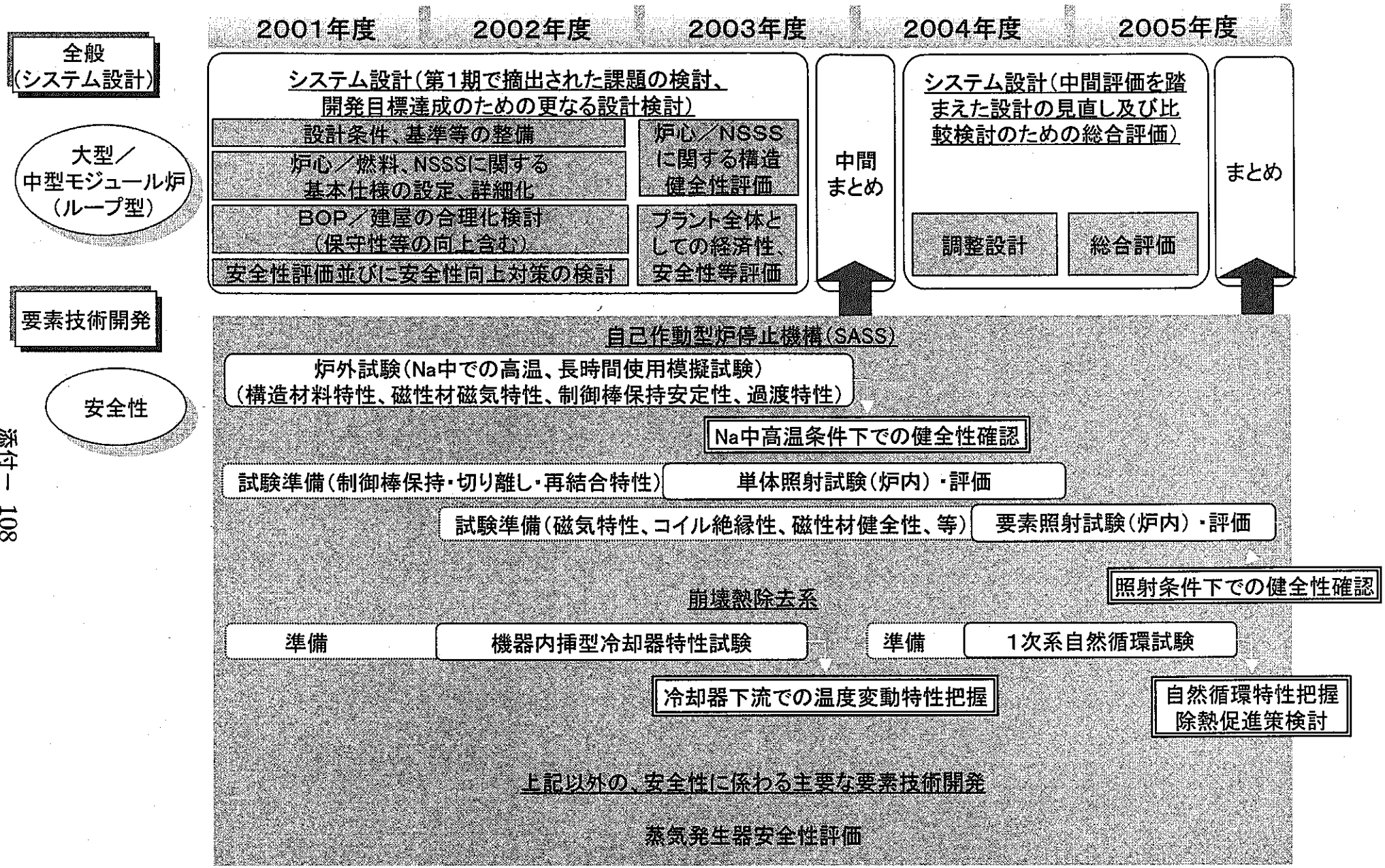


図-93 第2期計画 [ナトリウム冷却炉の主要なR&D] (1／3)

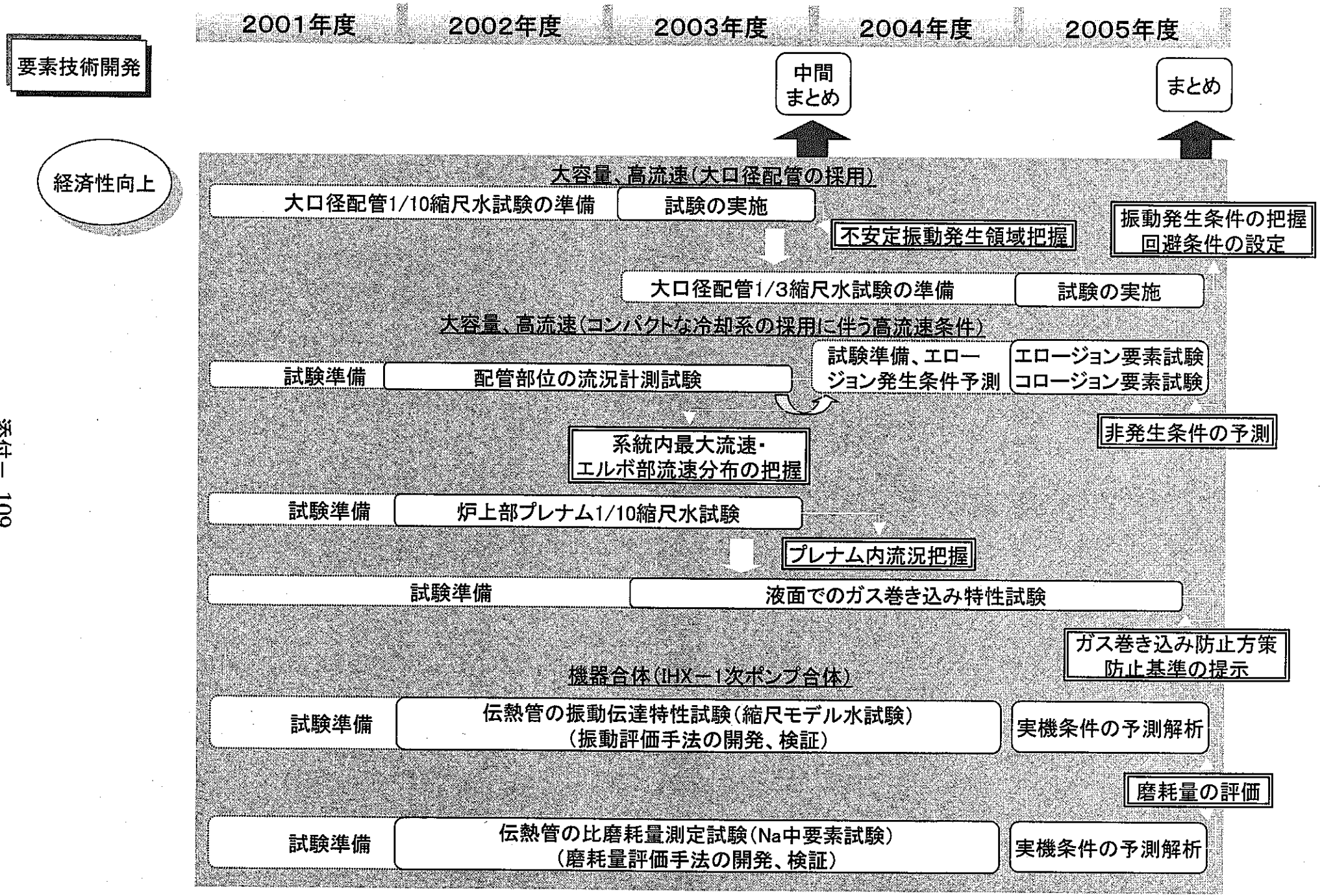


図-94 第2期計画 [ナトリウム冷却炉の主要なR&D] (2／3)

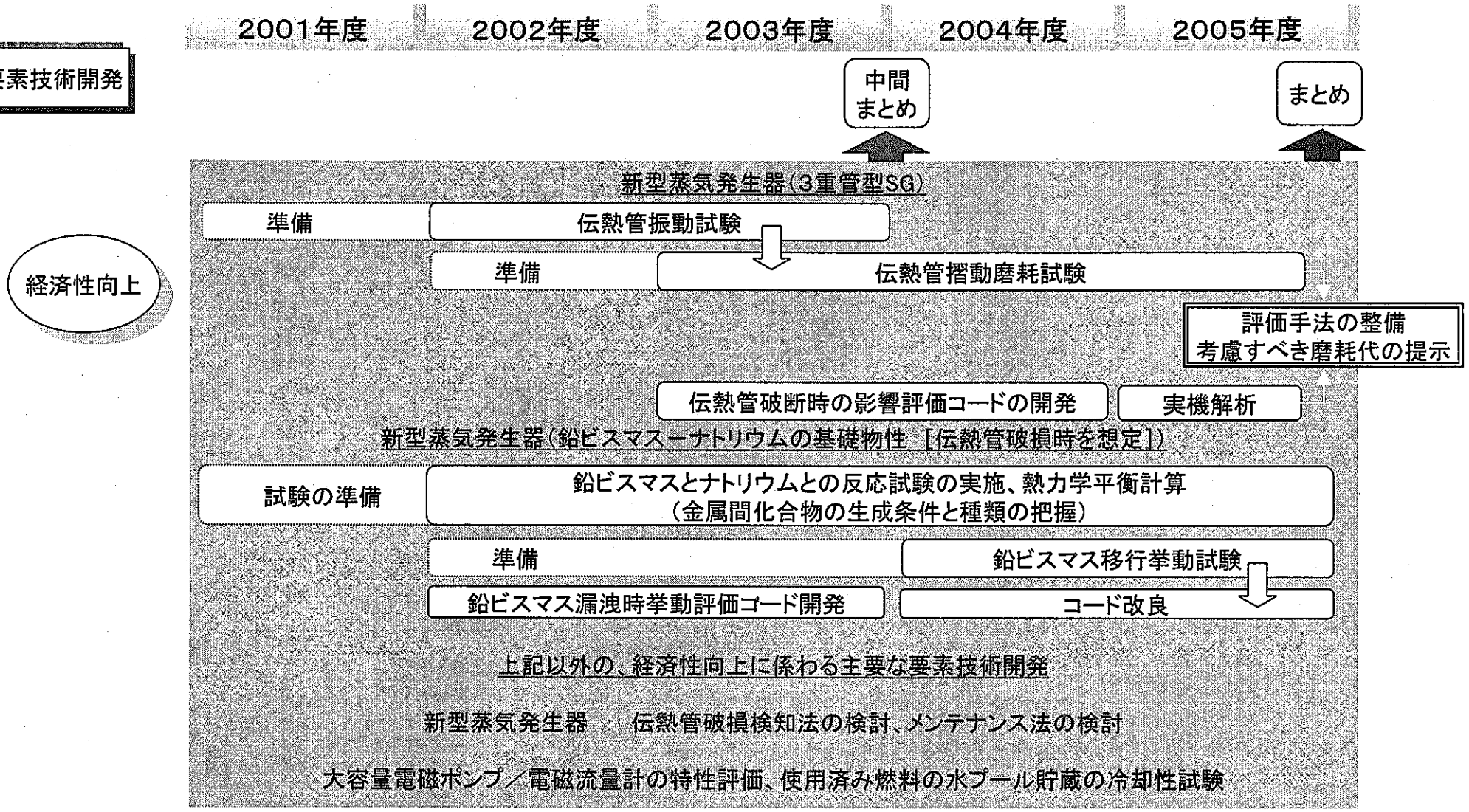


図-95 第2期計画 [ナトリウム冷却炉の主要なR&D] (3/3)

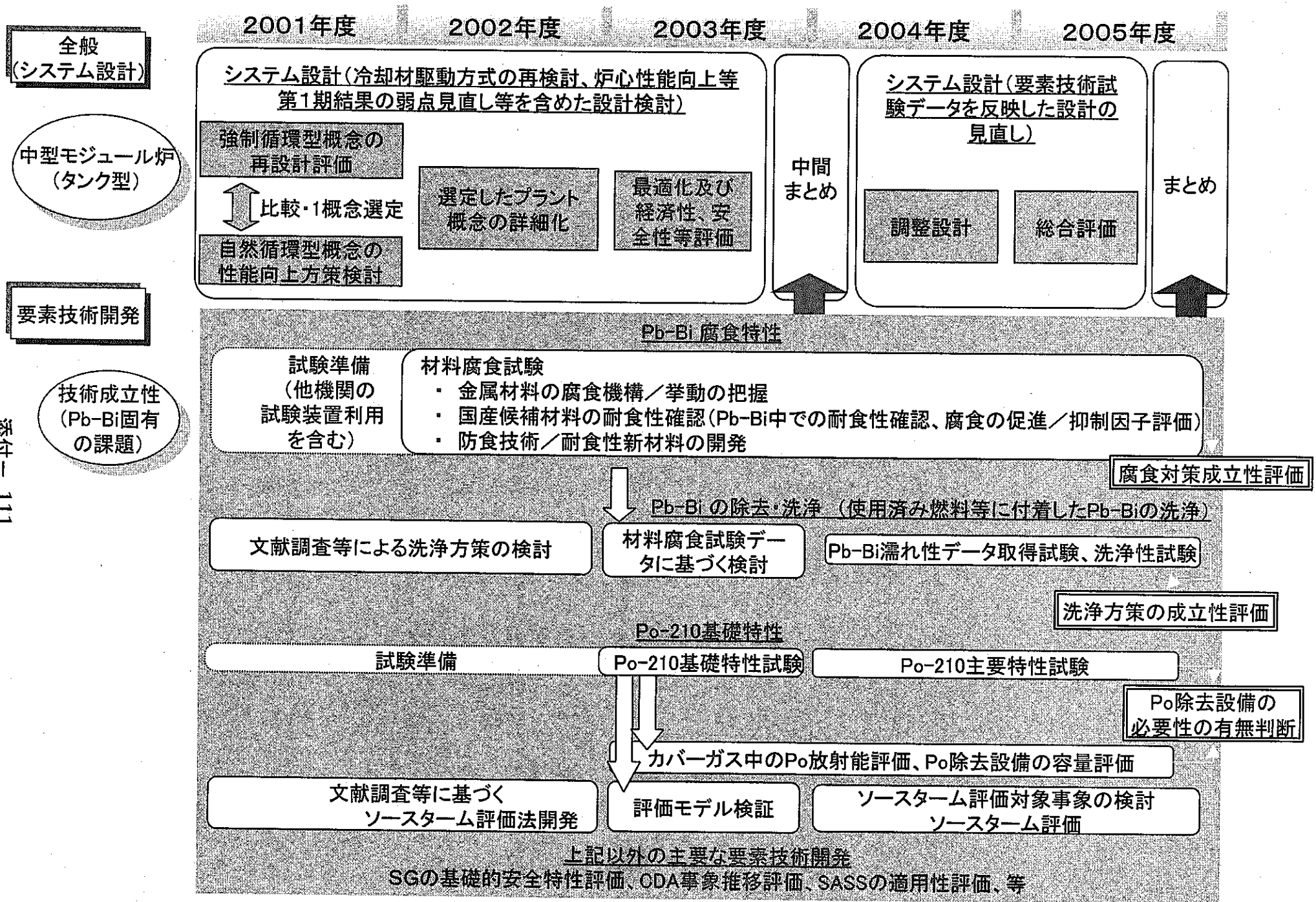


図-96 第2期計画 [鉛ビスマス冷却炉の主要なR&D]

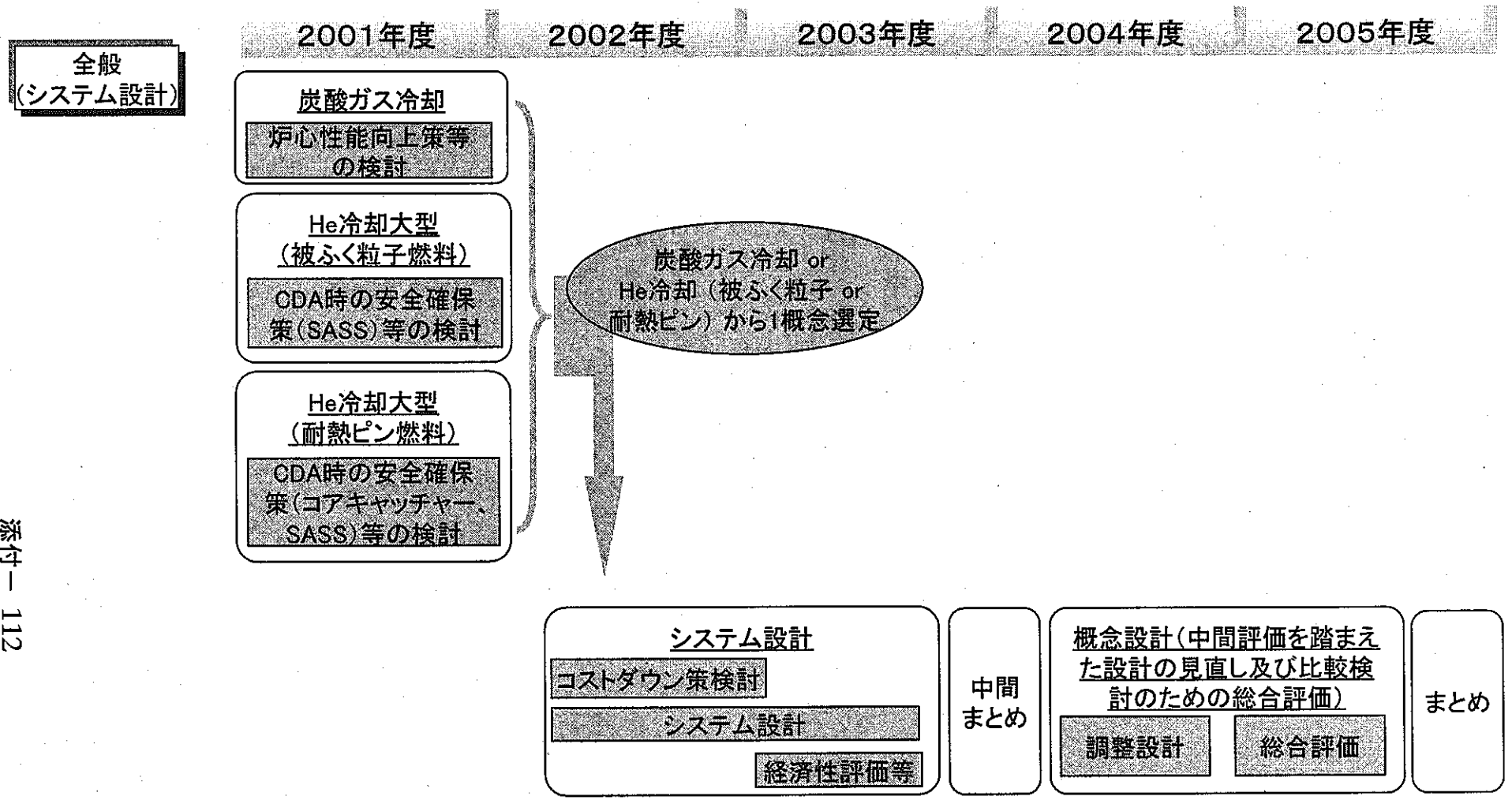


図-97 第2期計画 [ガス冷却炉の主要なR&D] (1／2)

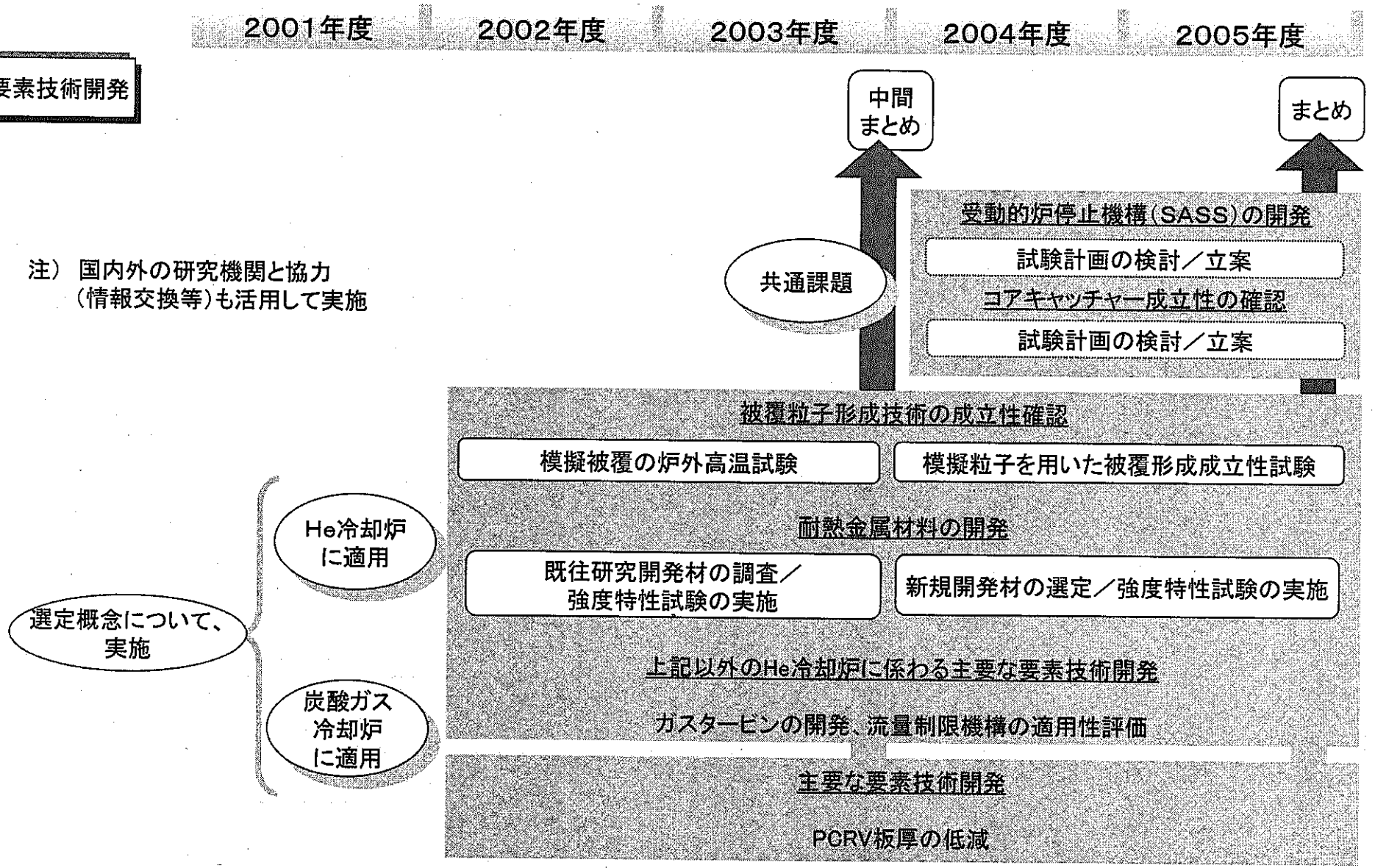


図-98 第2期計画 [ガス冷却炉の主要なR&D] (2／2)

全般
(システム設計)

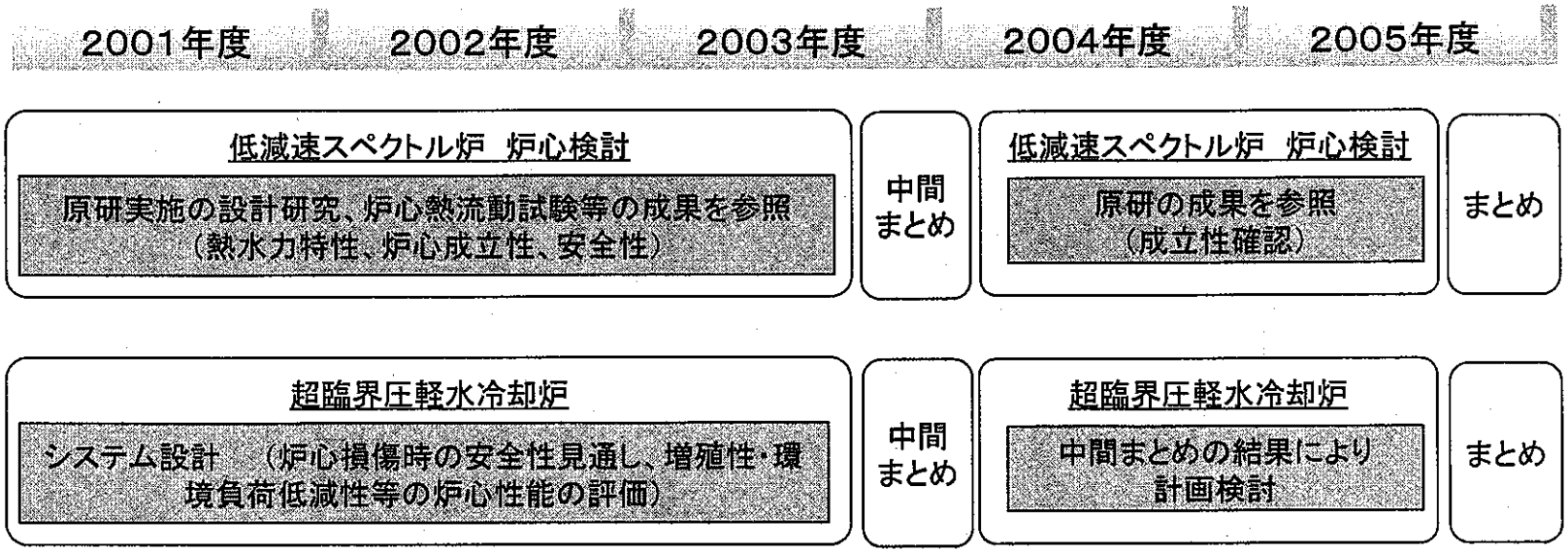


図-99　第2期計画　[水冷却炉の主要なR&D]

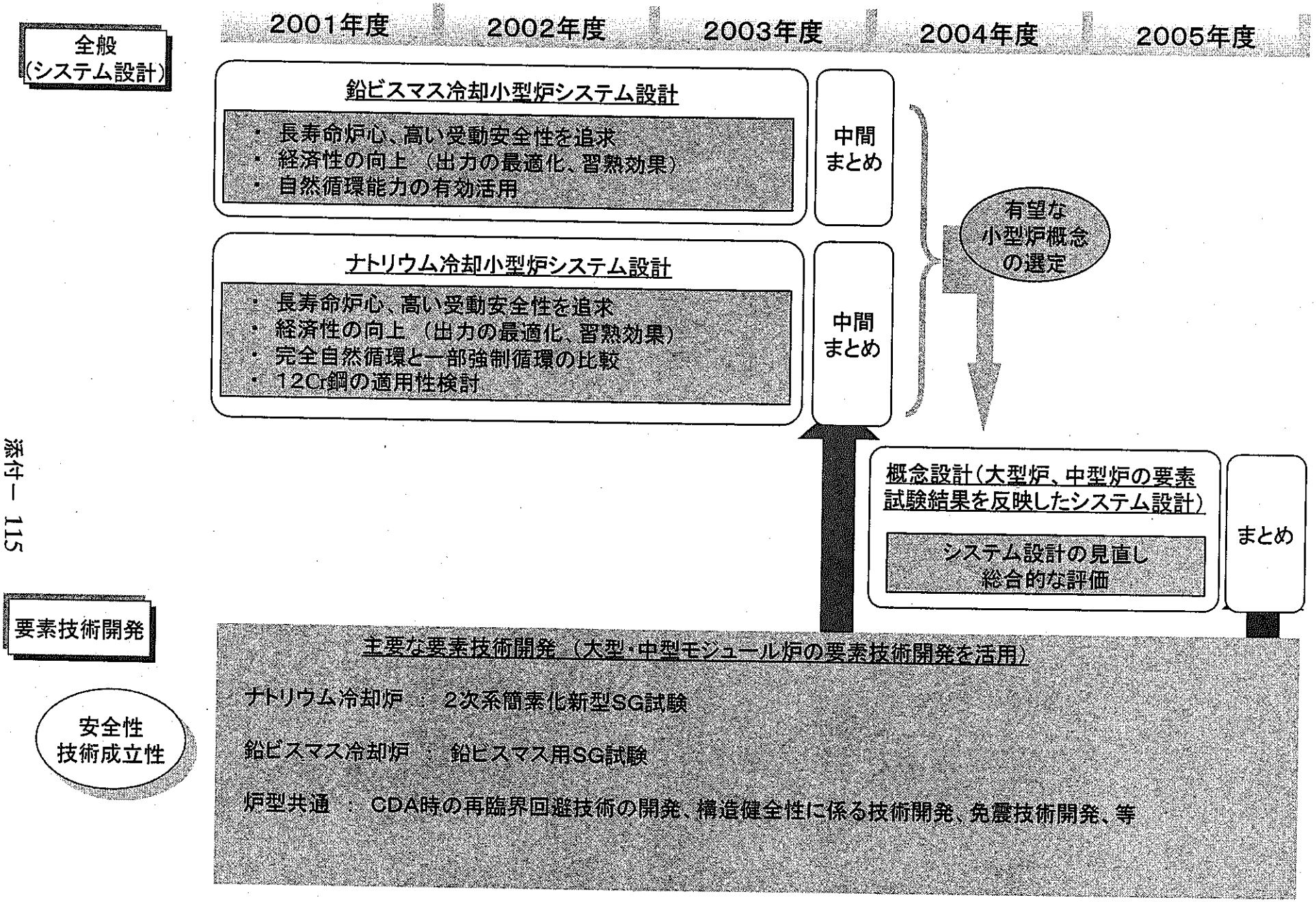
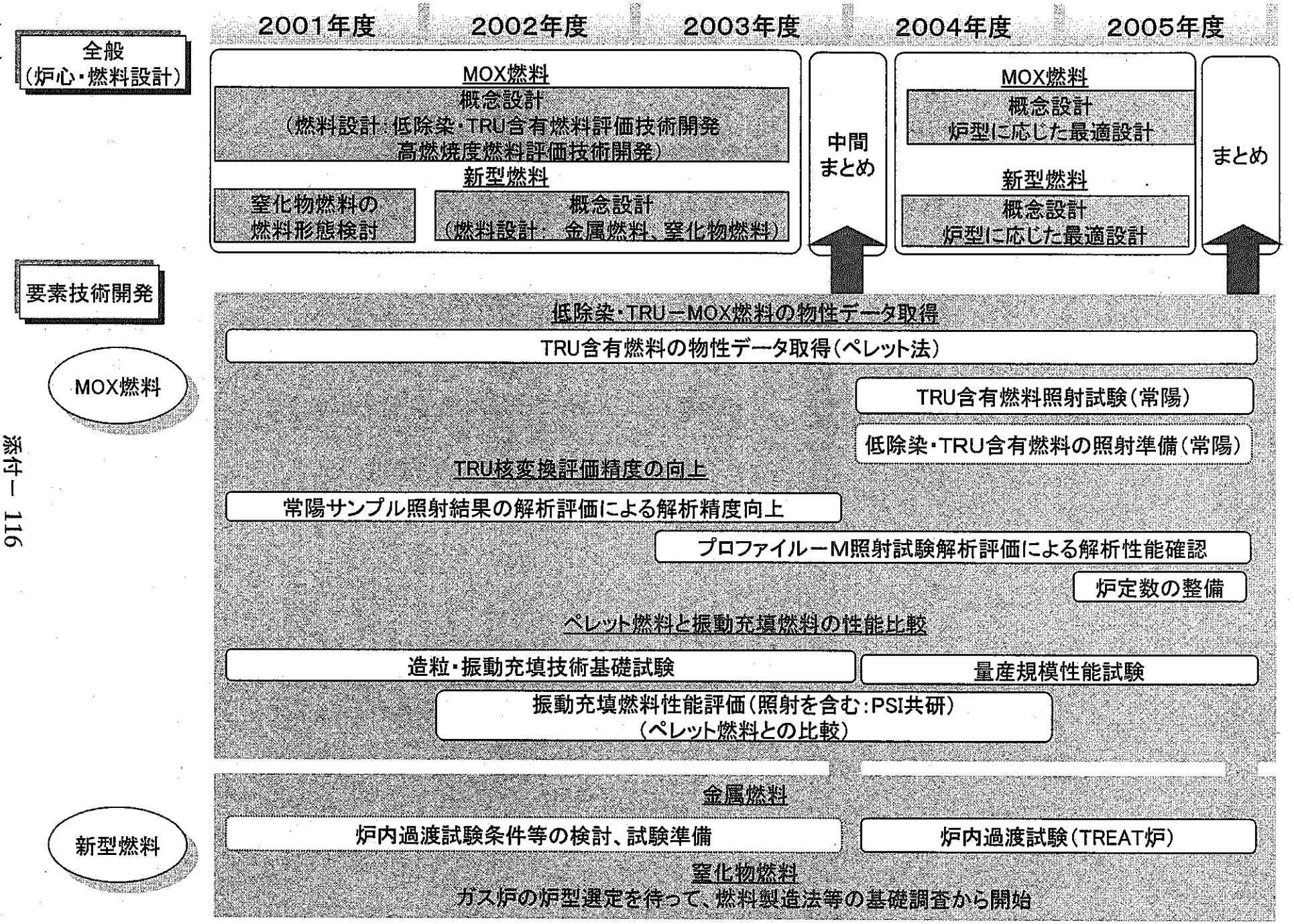


図-100 第2期計画 [小型炉の主要なR&D]



図−101 第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (1／3)

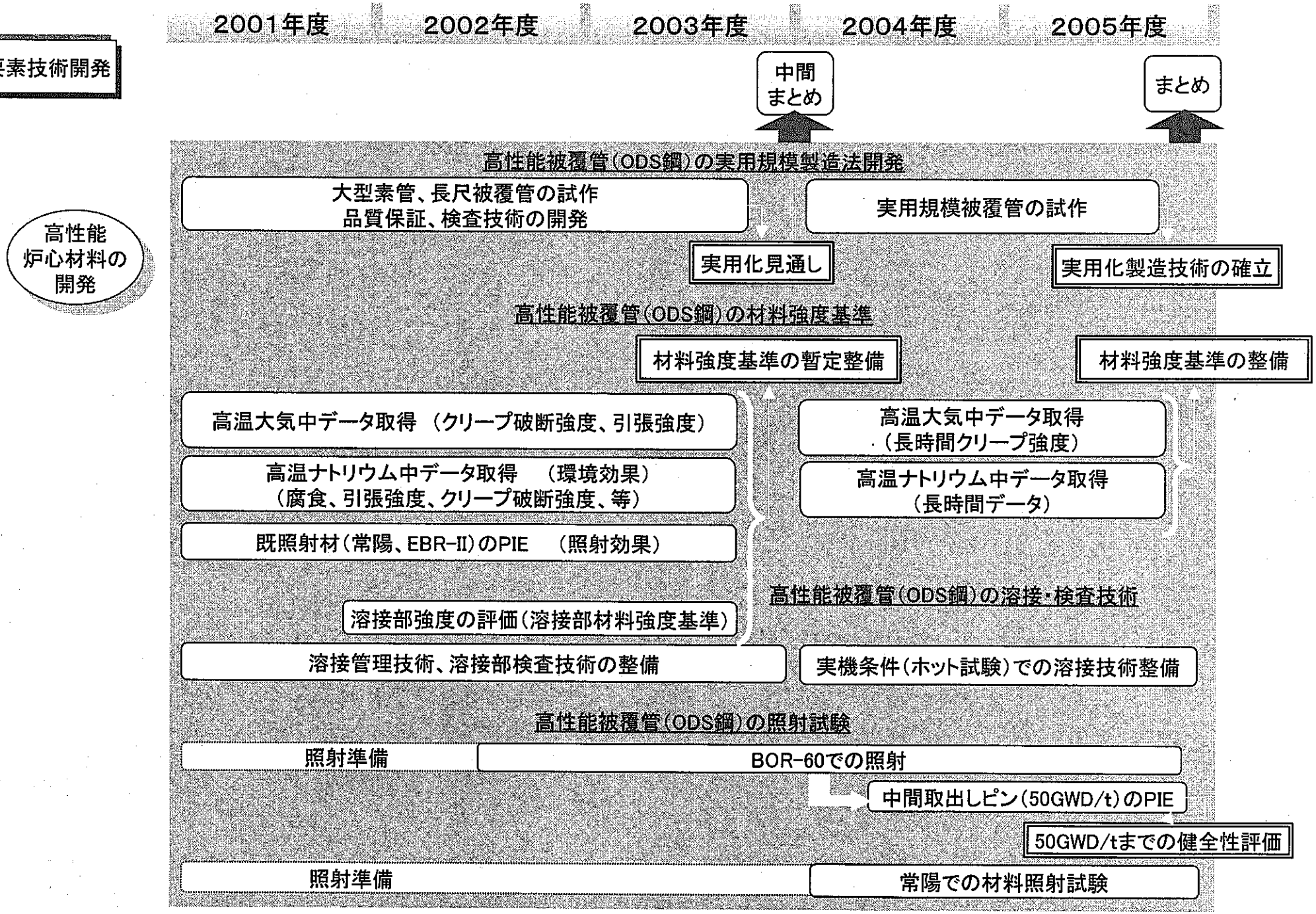


図-102 第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (2/3)

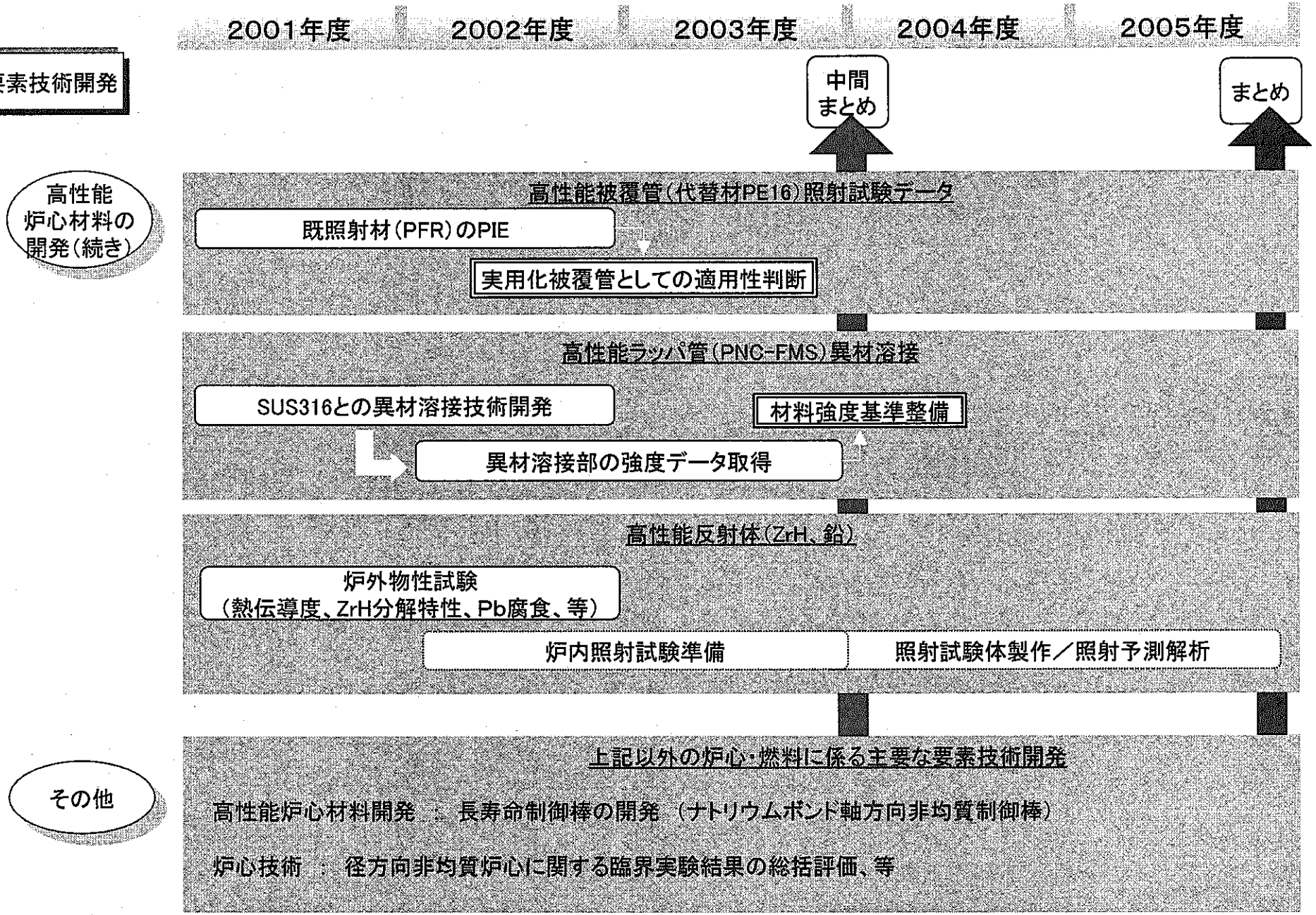


図-103 第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (3／3)

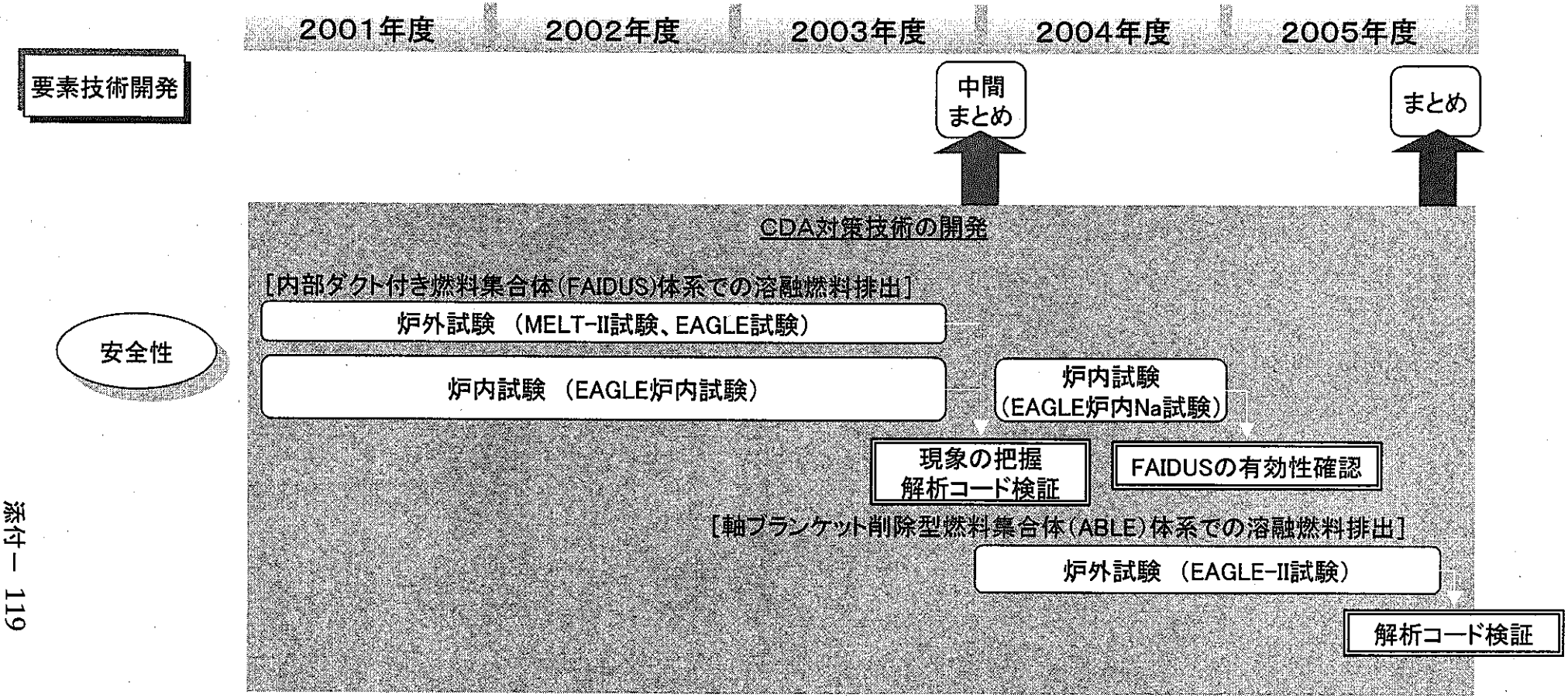


図-104 第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (1／3)

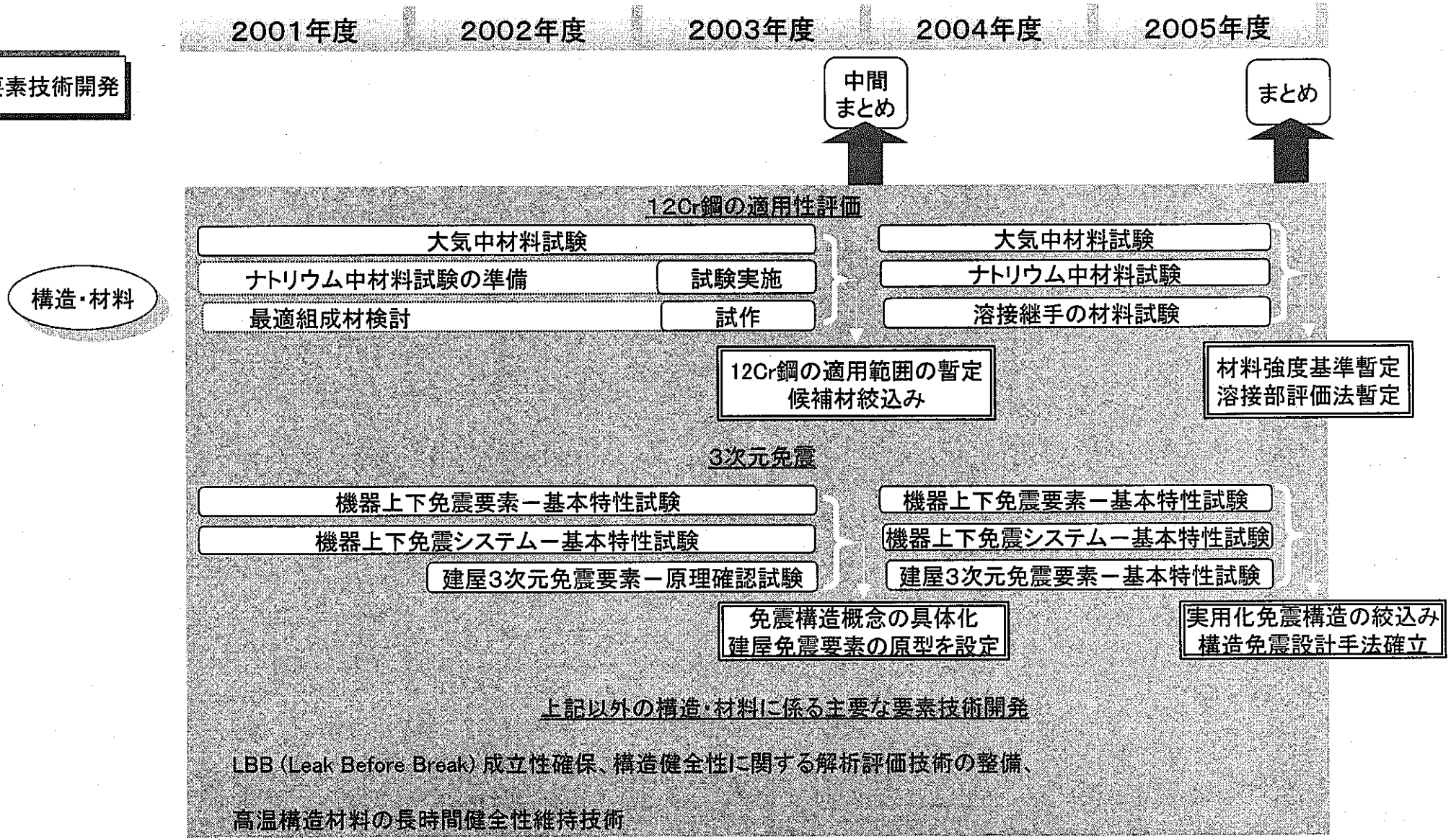


図-105 第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (2／3)

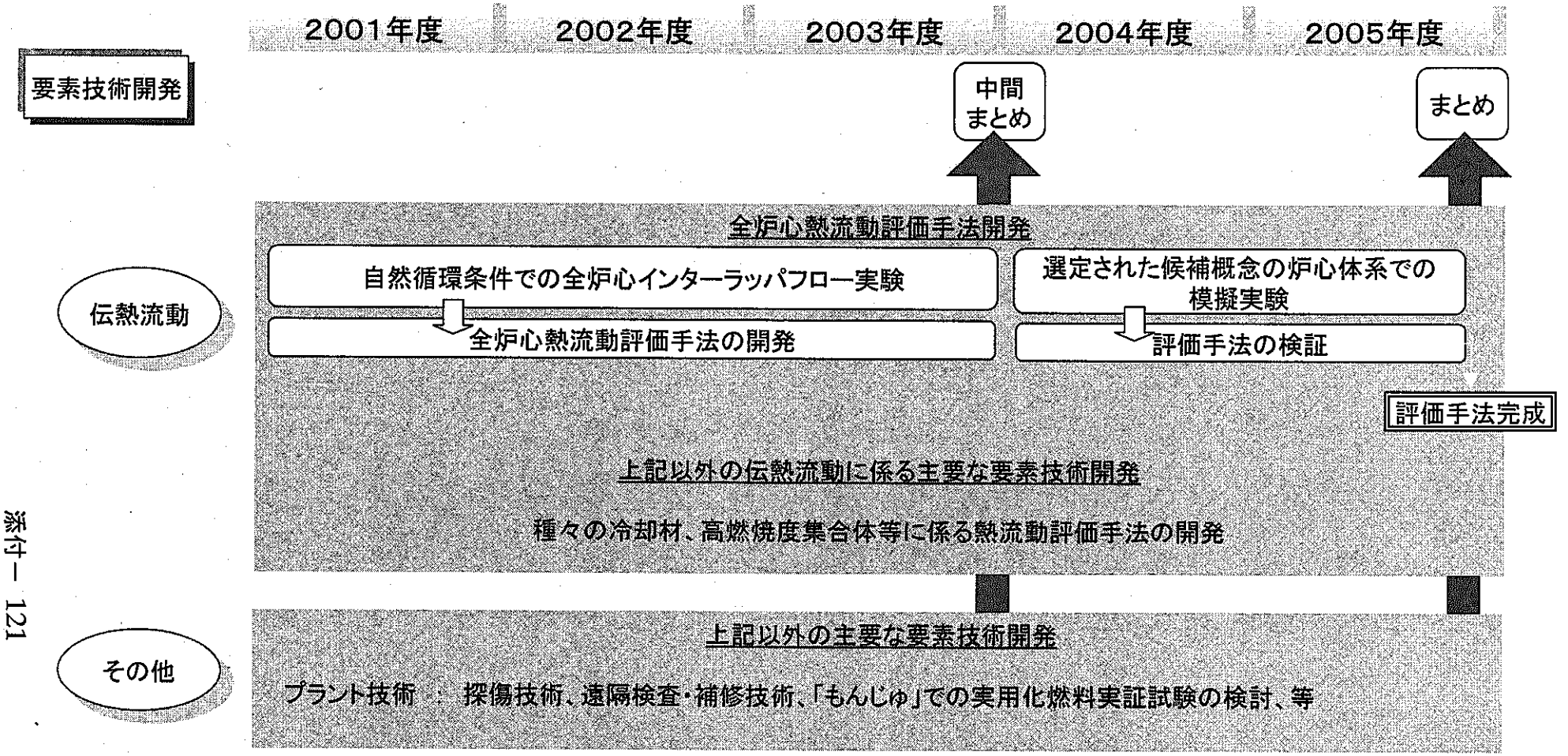


図-106 第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (3／3)

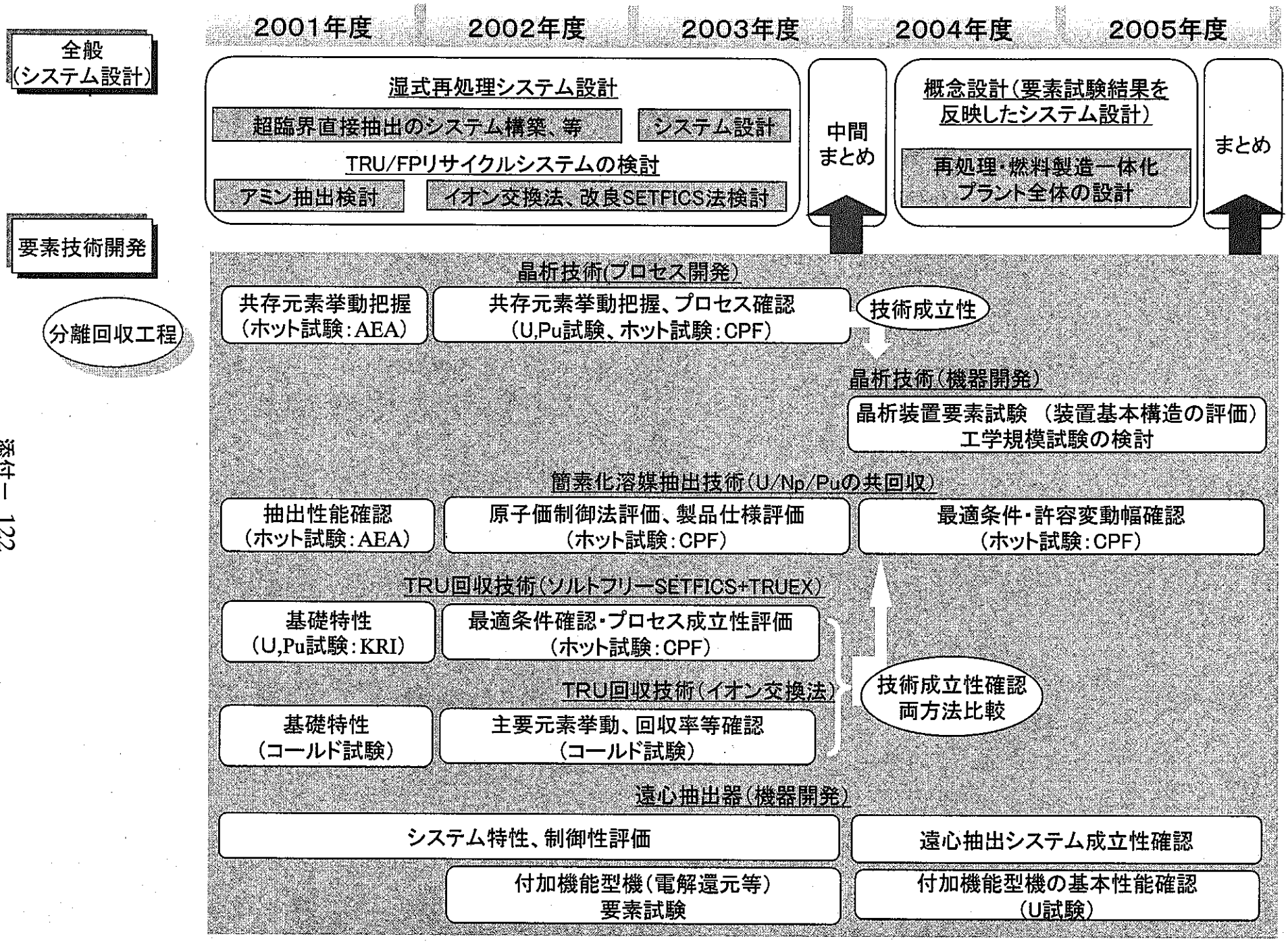


図-107 第2期計画[先進湿式法再処理の主要なR&D] (1/2)

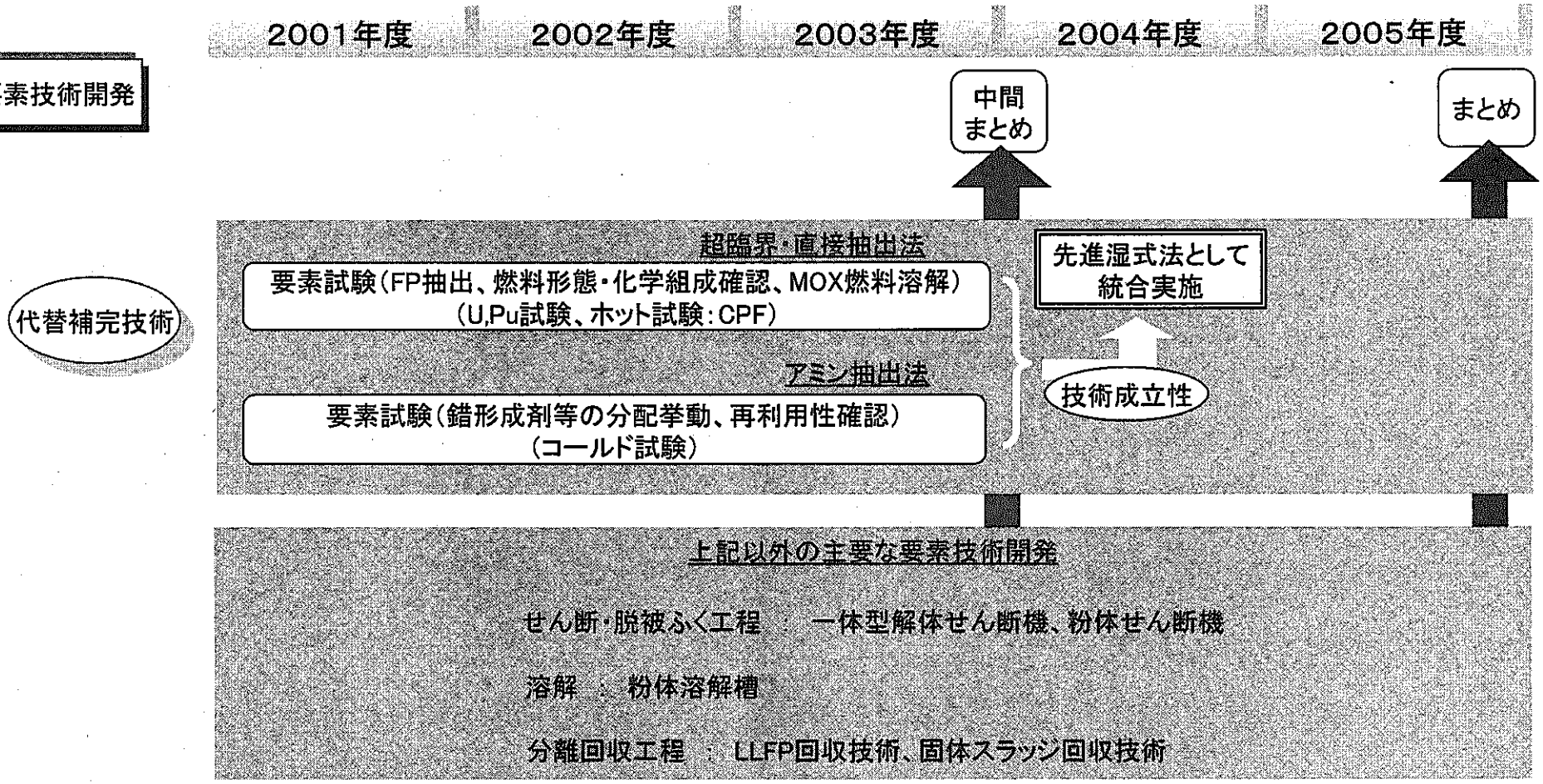


図-108 第2期計画[先進湿式法再処理の主要なR&D] (2／2)

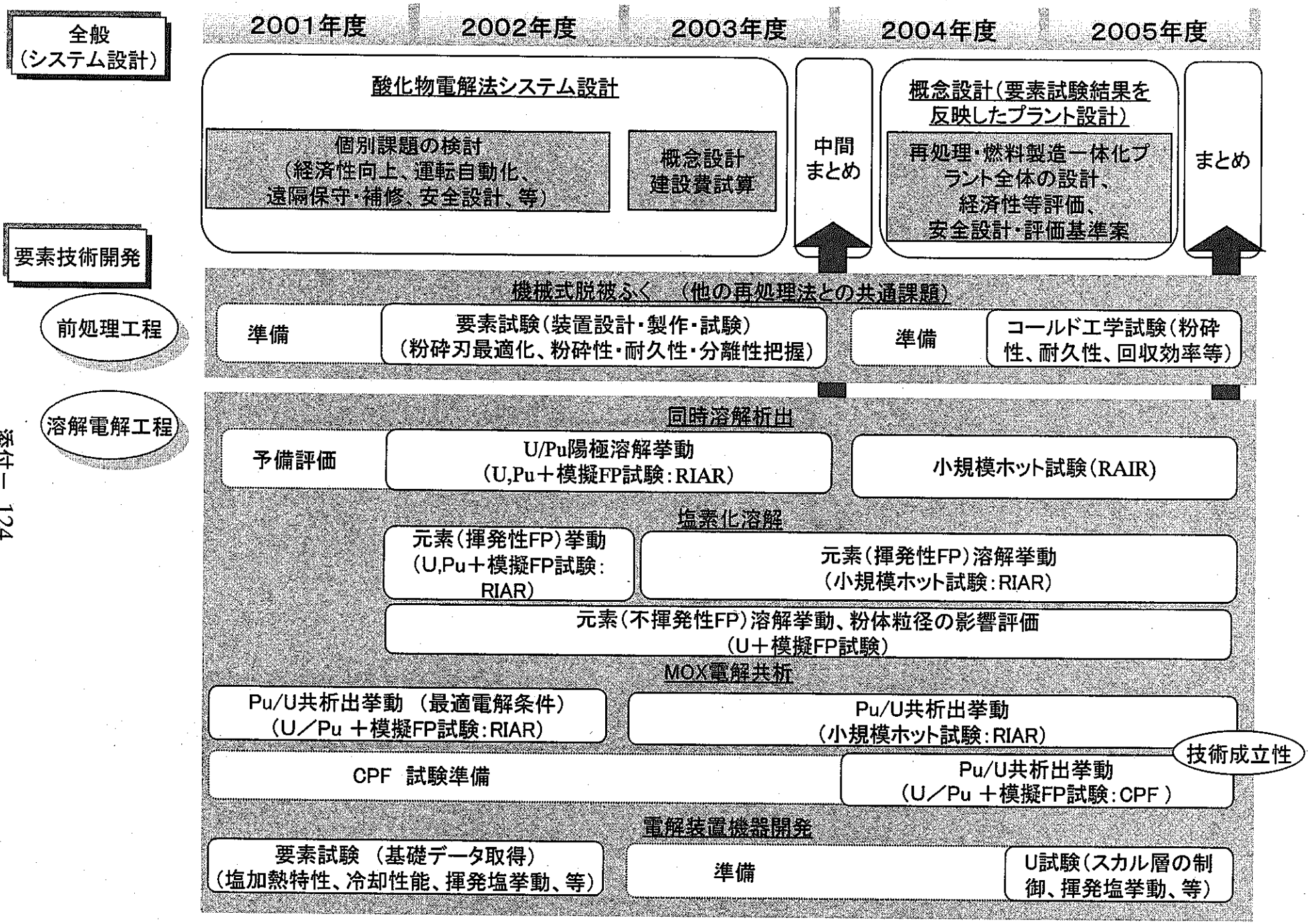


図-109 第2期計画[酸化物電解法再処理の主要なR&D] (1/2)

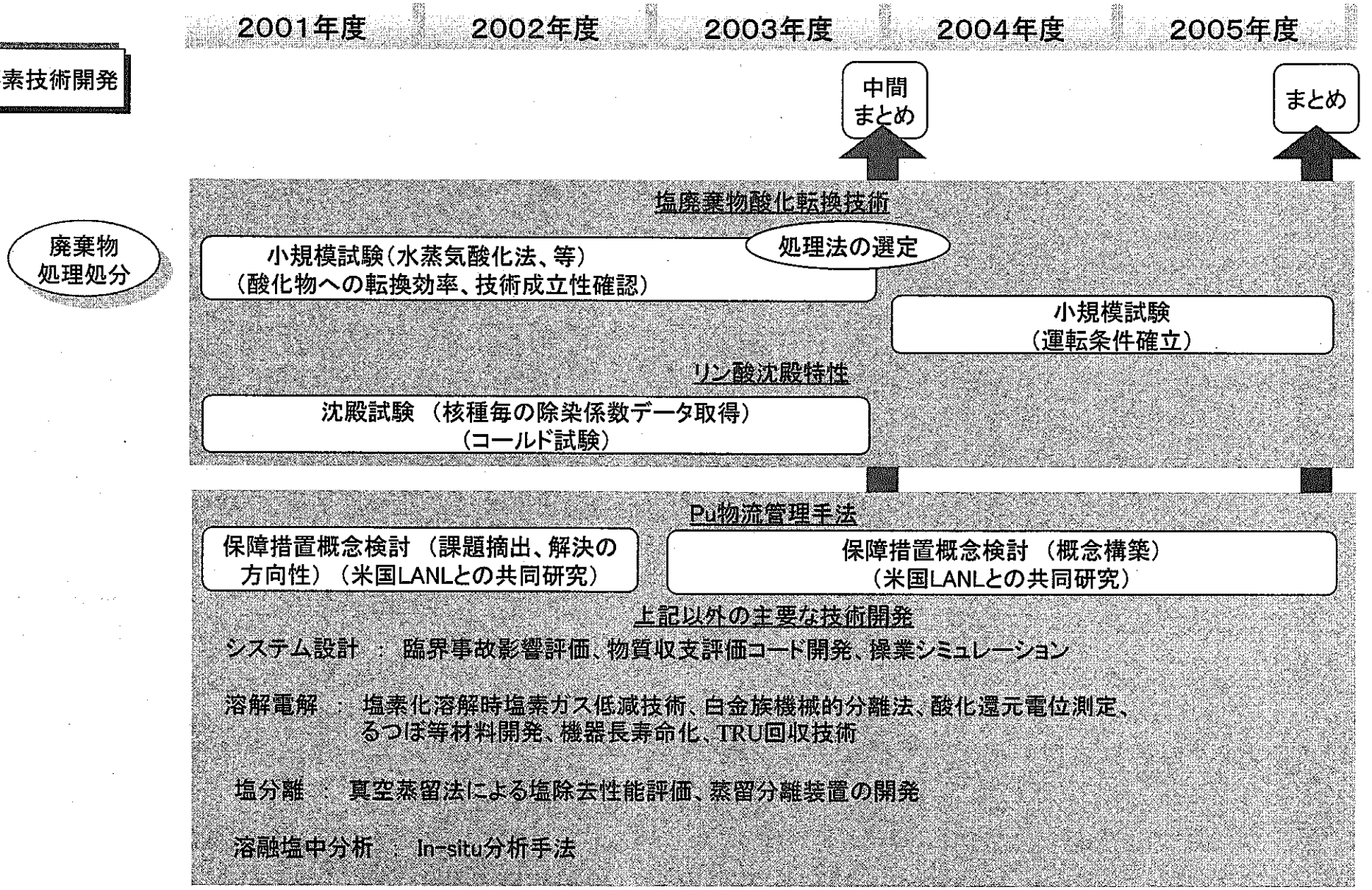


図-110 第2期計画[酸化物電解法再処理の主要なR&D] (2／2)

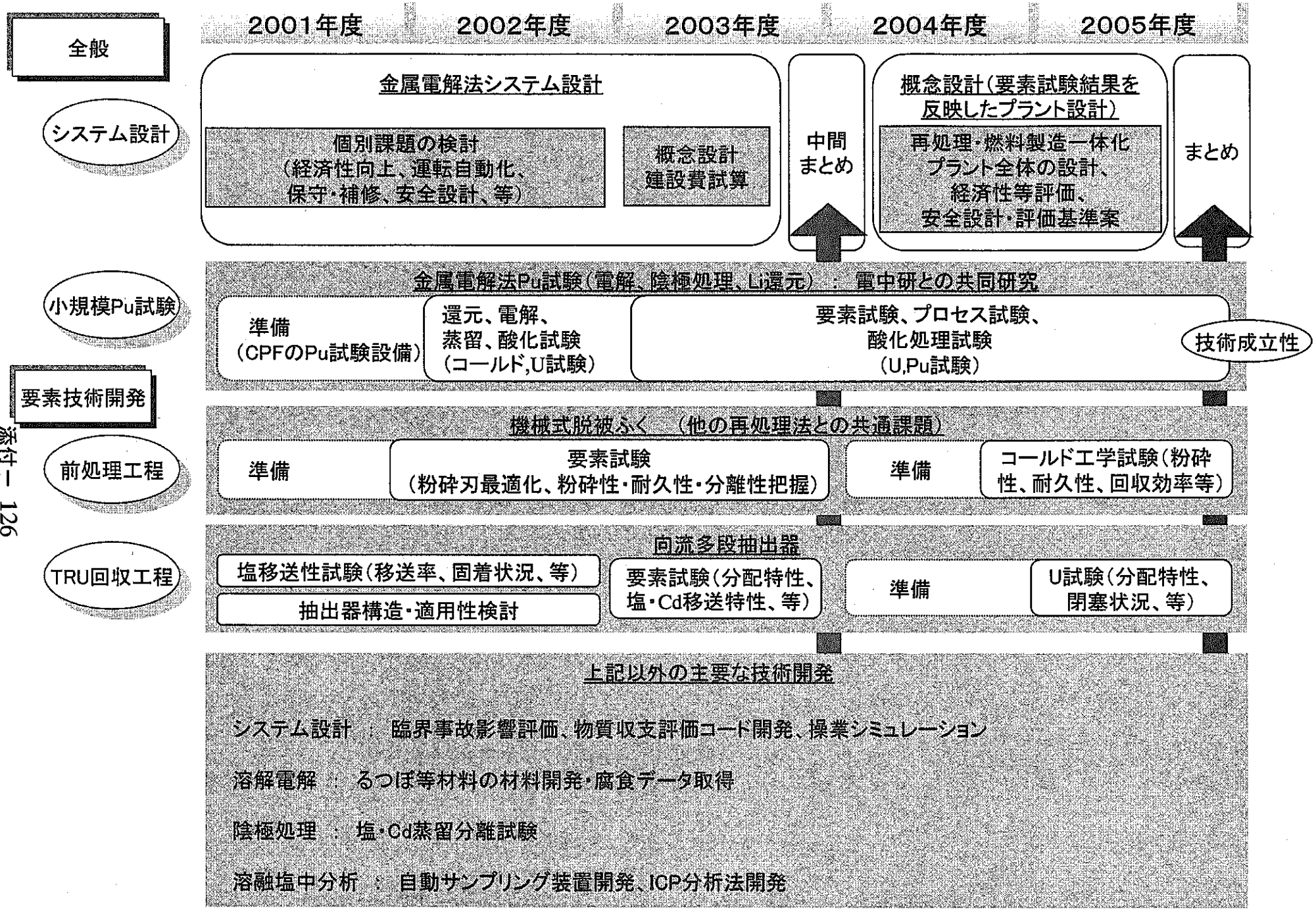


図-111　第2期計画[金属電解法再処理の主要なR&D]（1／2）

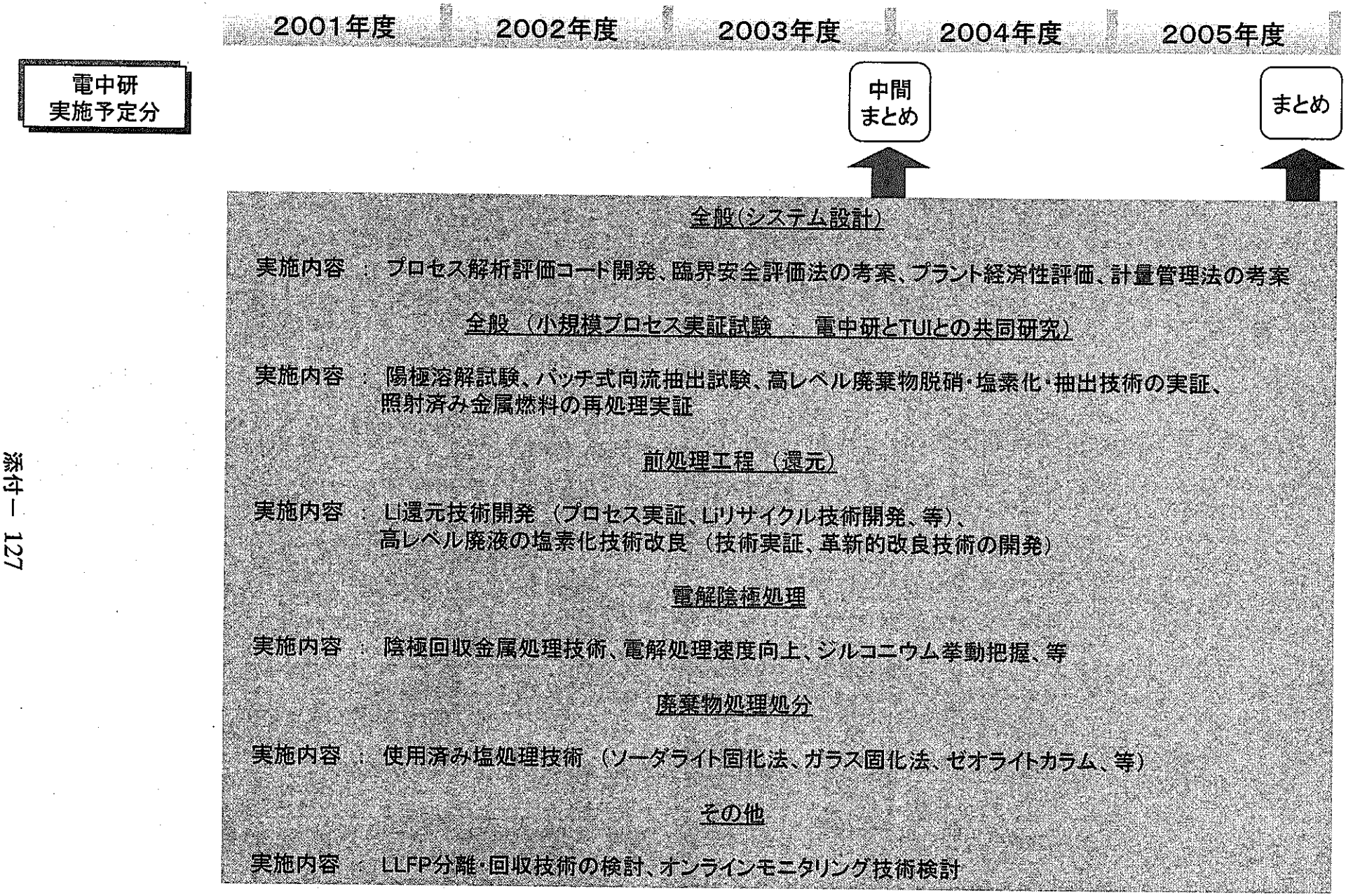


図-112 第2期計画[金属電解法再処理の主要なR&D] (2／2)

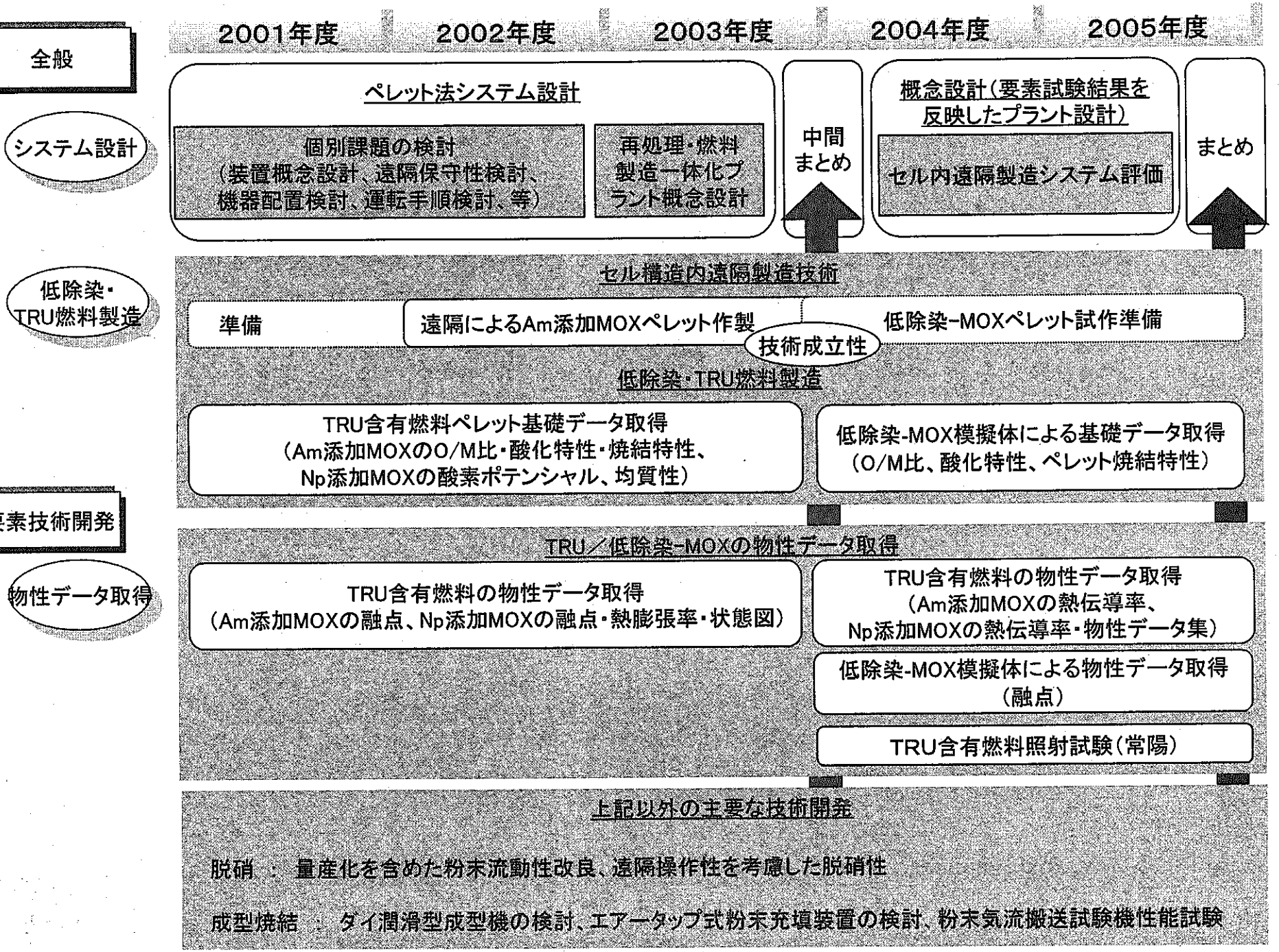


図-113 第2期計画[ペレット法燃料製造の主要なR&D]

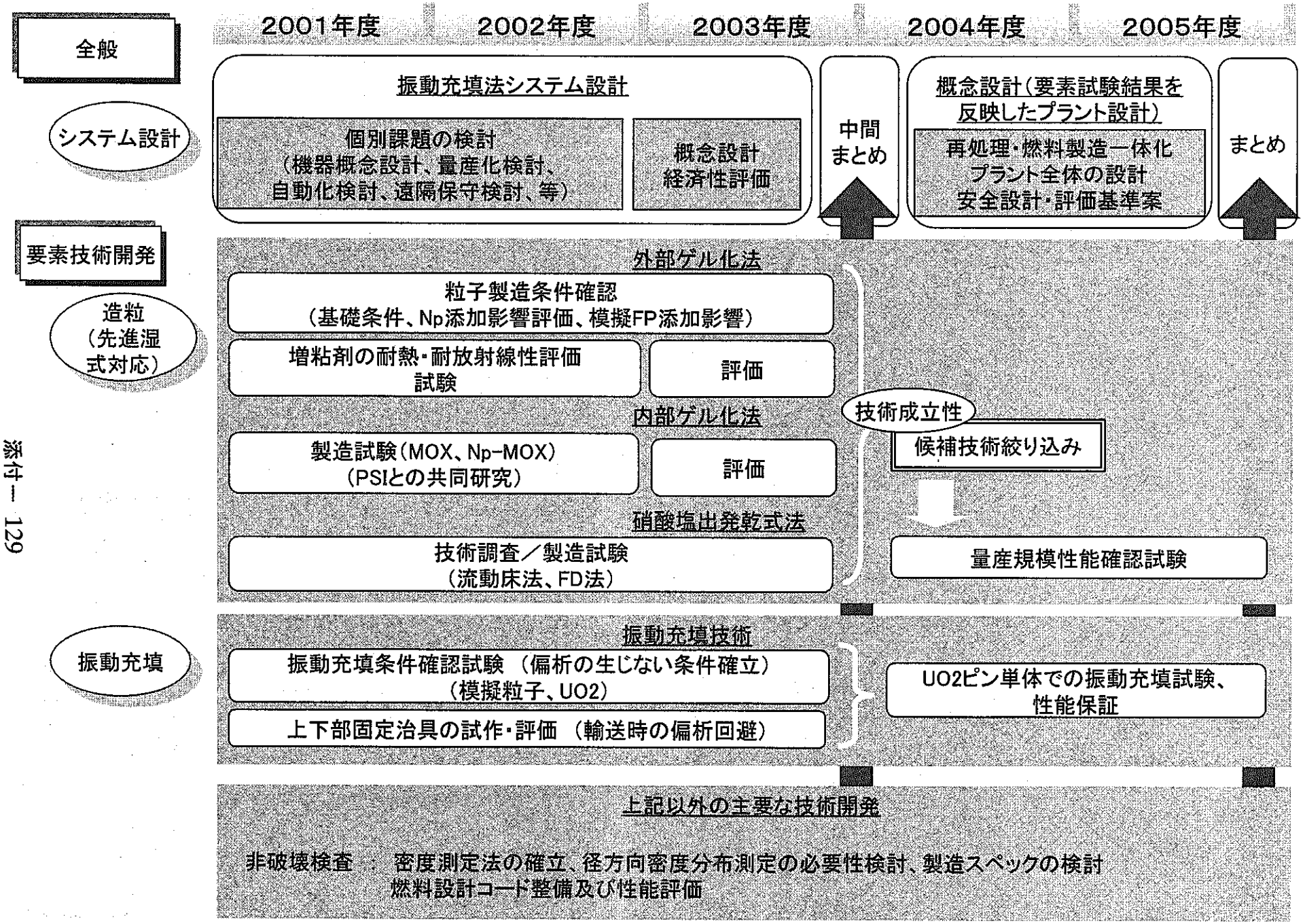


図-114 第2期計画[振動充填法燃料製造の主要なR&D]

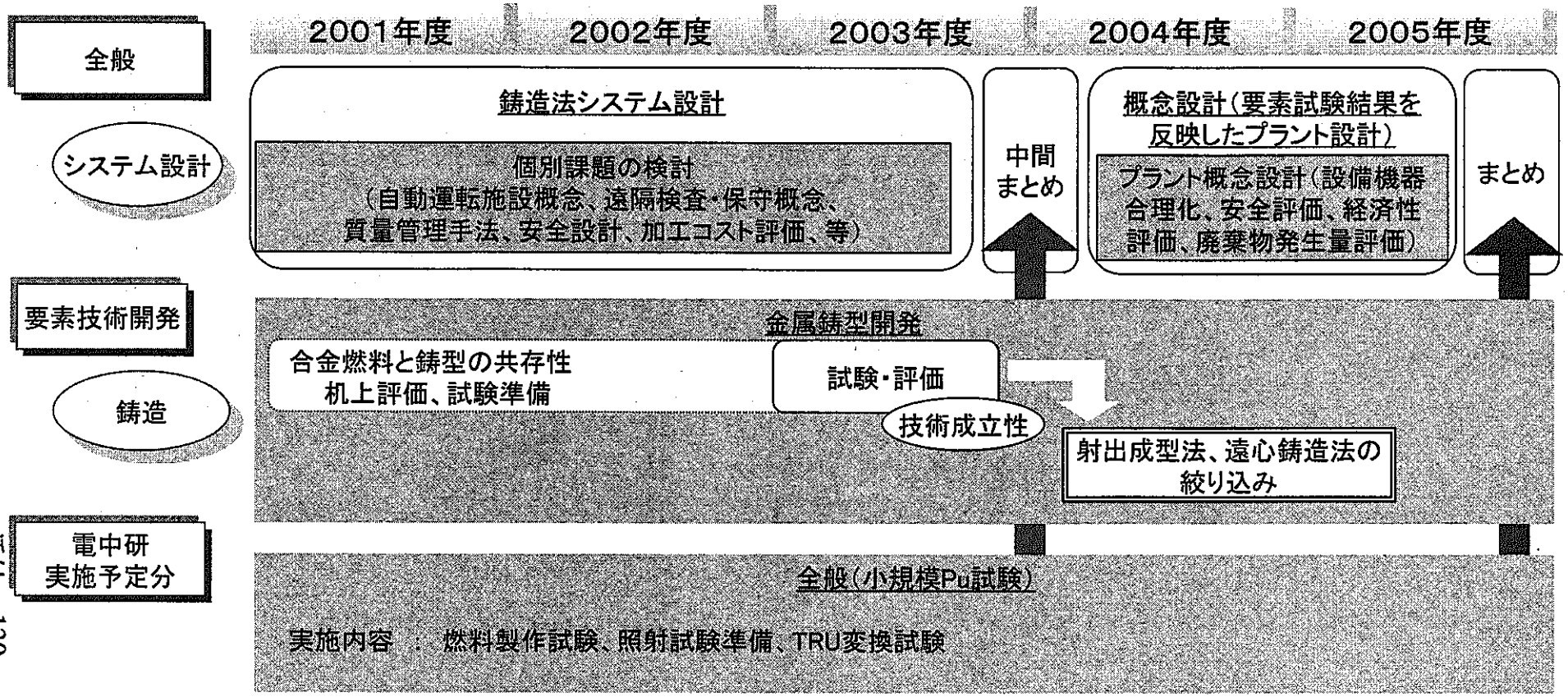


図-115 第2期計画[鋳造法燃料製造の主要なR&D]

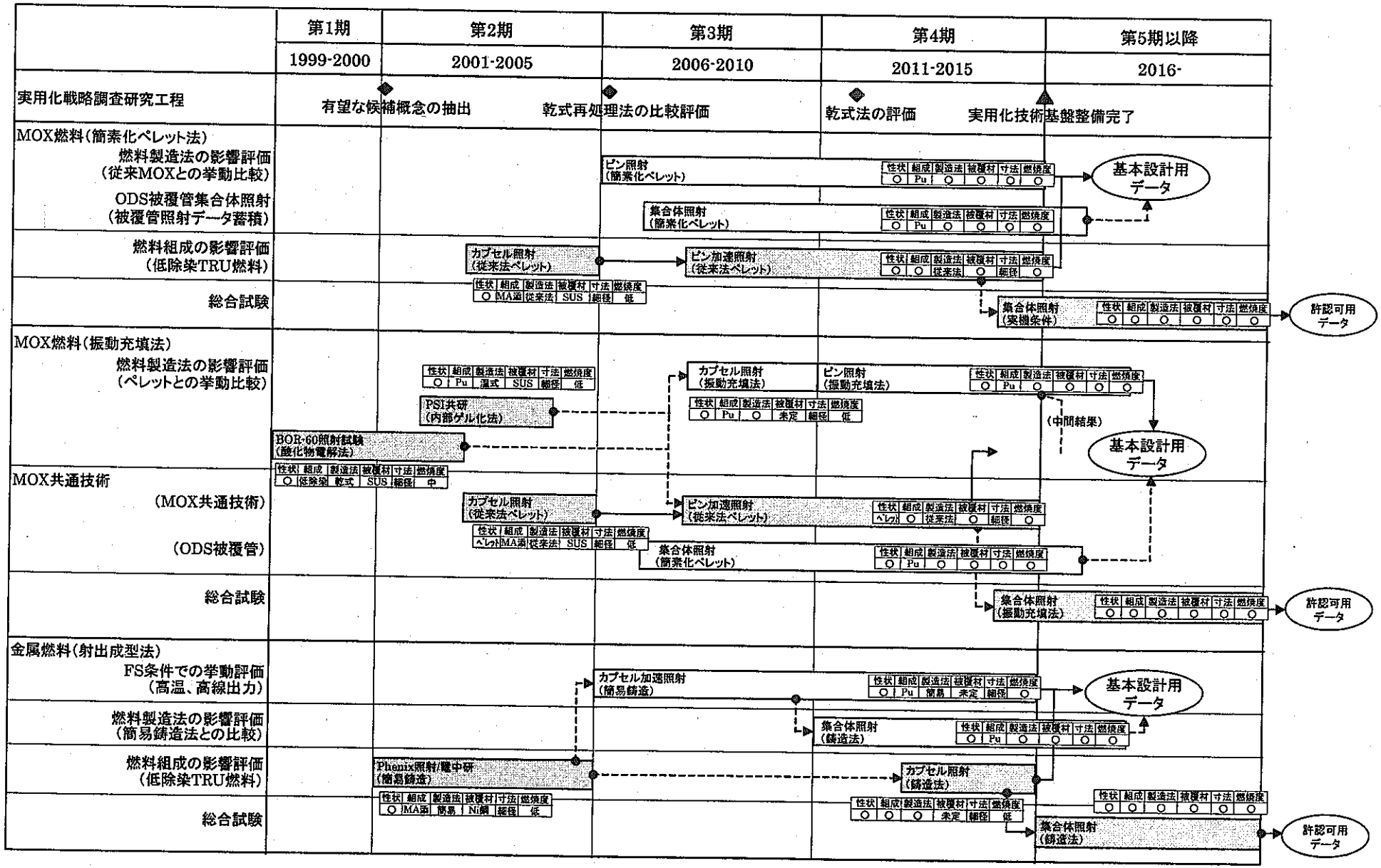


図-116 照射試験の考え方

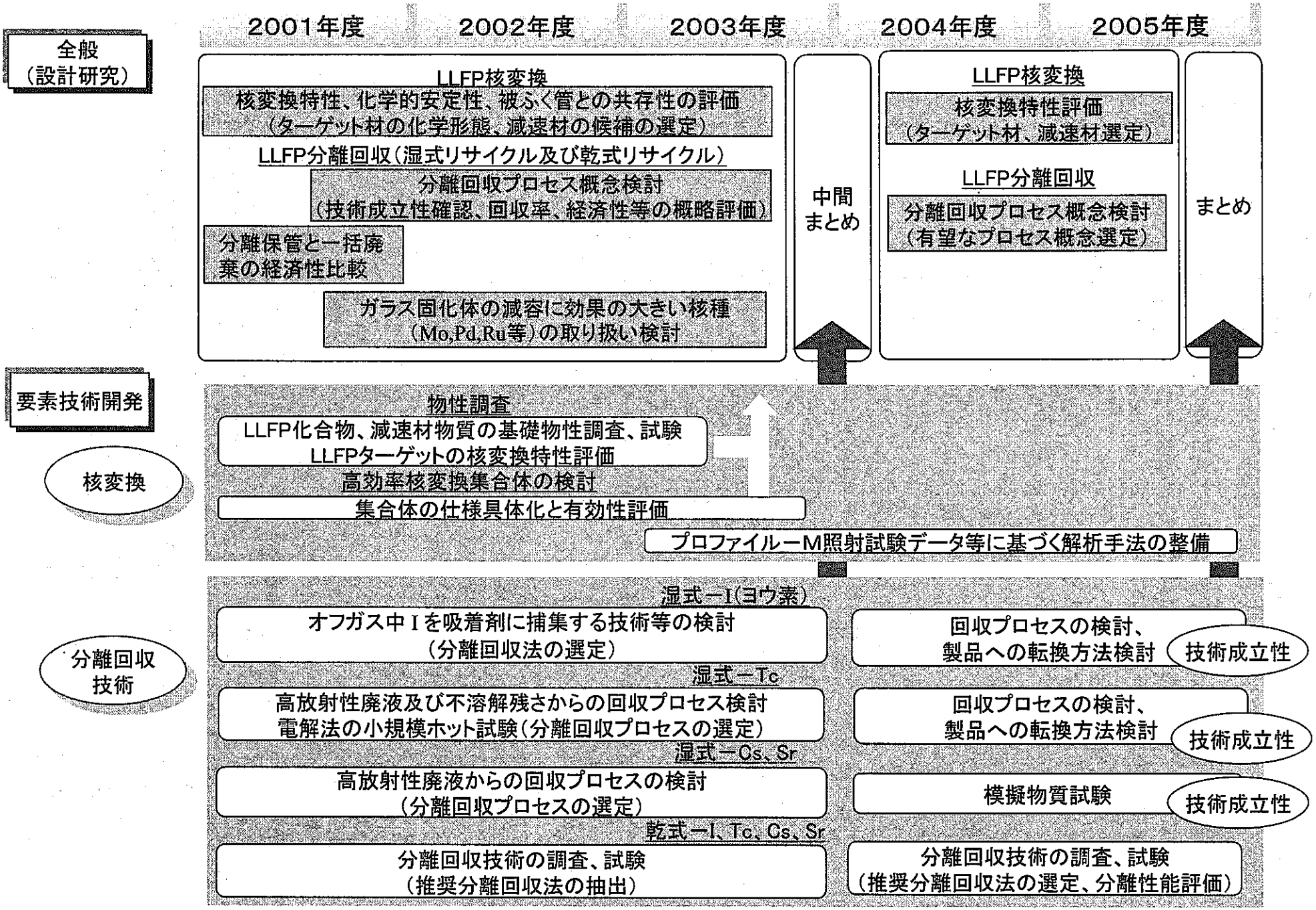


図-117　第2期計画　[LLFP分離・核変換の主要なR&D]

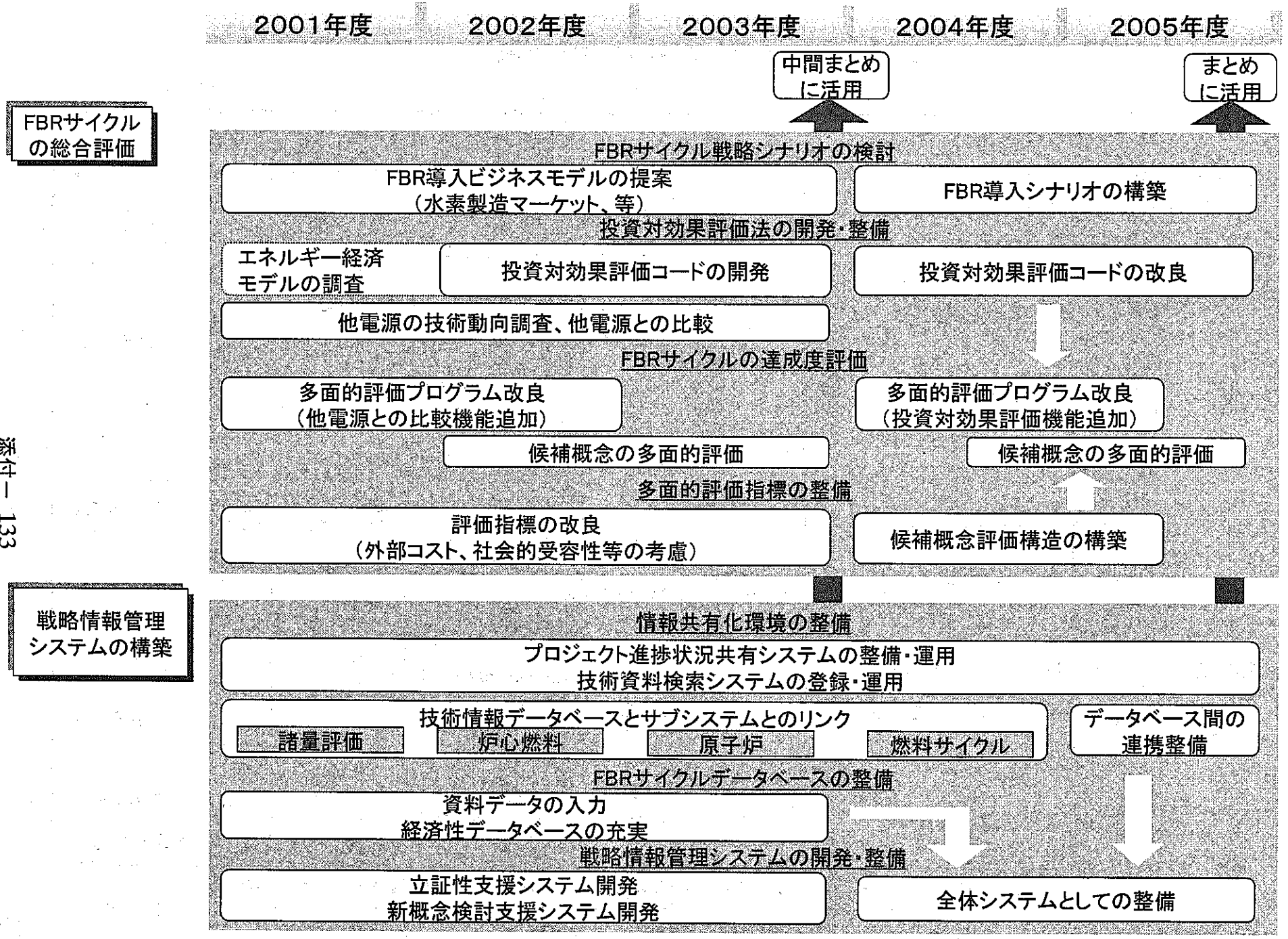


図-118　第2期計画　[システム技術の統合・評価]

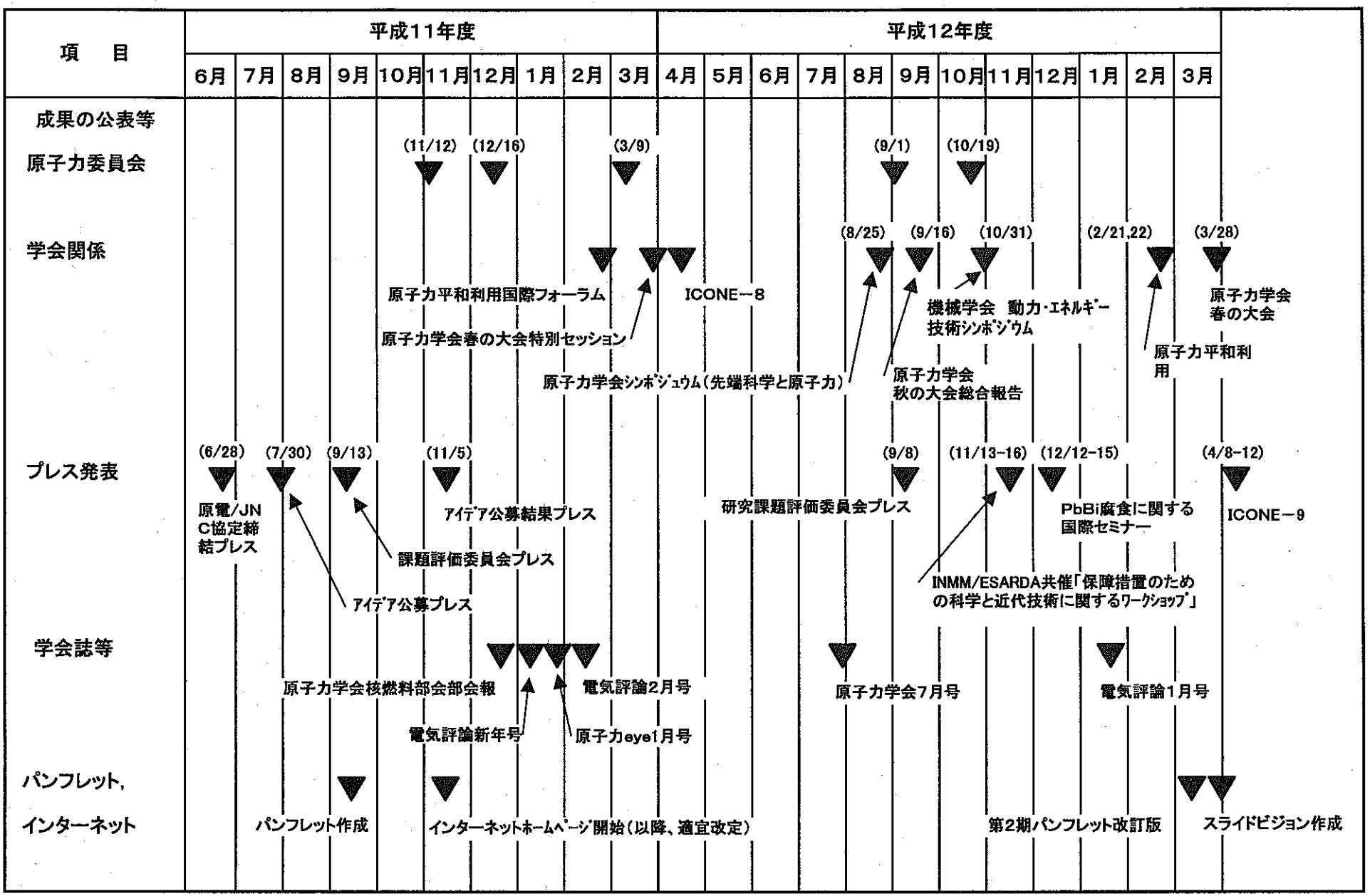


図-119　成果の公開・発表状況

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究

【用語の説明】

用 語 解 説

略語、英名はアルファベット順，和名はあいうえお順

A

ABLE［Axial Blanket Elimination］型（軸ブランケット削除型燃料集合体）

炉心損傷事故時の再臨界事象を回避するための方策の一つ。予め燃料集合体の中央部約 37 ピン程度の下部軸ブランケット燃料、あるいは上部軸ブランケット燃料も併せて削除しておく構造。これによって当該部分の熱容量を低減しておき、溶融燃料が被覆材のみを溶融させることによって燃料の炉心部からの流出を早期化することを狙う。内部ダクト付き燃料集合体に比べて燃料の流出には時間を要するものの、炉心部分の燃料割合は従来型集合体と変わらないために炉心性能への影響は小さくできる概念として提案された。

ANL（Argonne National Laboratory、アルゴンヌ国立研究所）

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及び環境管理の 4 つの分野で研究開発を行っている。従業員約 4500 人。

B

BN-350, 600, 800

BN-350 はロシアの発電と海水脱塩の 2 重目的をもつ世界最初の高速増殖原型炉（350MWe 相当のループ型炉）であり、1973 年 7 月に運転を開始した。もう一つの原型炉 BN-600（600MWe タンク型炉）は 1981 年 12 月に定格出力に達した。実証炉 BN-800（800MWe タンク型炉）は、経済的理由で建設が中断している。

C

CDA（Core Disruptive Accident、炉心崩壊事故）

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、その影響が炉容器及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 の安全研究の重要課題の１つとなってきている。仮想的炉心崩壊事故(HCDA：Hypothetical Core Disruptive Accident)とも呼ばれる。

D

DF (Decontamination Factor、除染係数)

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。

DUPIC （Direct Use of Spent PWR-Fuel in CANDU）

PWR3 基から取り出した使用済燃料ペレットを再加工し、CANDU1 基分の燃料を供給する燃料サイクルの構想で、韓国がカナダ・米国との協力により開発している。

F

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核分裂性のプルトニウムに転換され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。

FBR サイクル

FBR とその関連する核燃料サイクルのことを言う。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、不要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え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。

FCI（Fuel-Coolant Interaction、燃料－冷却材熱的相互作用）

燃料 - 冷却材相互作用とも言う。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によって溶融燃料・冷却材の熱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（Fission Product、核分裂生成物）

ウランやプルトニウム等の核分裂に伴って生じた核種及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。

I

IFR（Integral Fast Reactor）

一体型高速炉として米国の ANL が提唱した高速増殖炉と再処理施設を一体化した総合的なシステム概念であり、アメリカで IFR を含む ALMR

（Advanced Liquid Metal Reactor）計画という国家プロジェクトとして実施された。IFR の特徴は金属燃料を用いることと、再処理に乾式再処理技術を適用することであり、金属燃料サイクル（MFC）と呼ばれている。

IGR（Impulse Graphite Reactor）

カザフスタン共和国にある安全性試験炉（黒鉛減速熱中性子パルス型炉）。旧ソ連時代から軽水炉及び高速炉燃料の破損限界や燃料挙動を測定するために活用されてきている。試験燃料を装荷する試験孔の直径は約 20cm と大きく、最大約 10ｋｇの燃料を溶融させる能力を有する。

L

Li 還元

Li を還元剤として酸化物燃料を金属に還元する方法。

LLFP（Long-Lived Fission Product、長半減期 FP または長寿命 FP）

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 1,570 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）、スズ-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。

M

MA（Minor Actinide、マイナーアクチニド）

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β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、α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)及びネプツニウム(Np)をマイナーアクチニドと称する。

MELT-II

炉心溶融時における高温融体の移行挙動を解明することを目的としたJNC 大洗工学センター所有の炉外試験装置。アルミナなどの模擬物質を使用した試験を行う。装置は溶融部と試験部に大別されており、溶融部にて高周波誘導加熱を用いて融体を生成した後、試験部に移送して所定の試験を行う。試験目的に合わせて柔軟に設定できる。アルミナ 20kg 程度を昇温・溶融させる能力を有する。

MOX 燃料（混合酸化物燃料）

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。我が国では新型転換炉「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。軽水炉では「プルサーマル」と呼ばれて、仏、独等で 2000 体を超える実績があり、我が国で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に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の反応により消費された割合を示すことにもなる。

N

NSSS（Nuclear Steam Supply System、原子炉蒸気発生設備）

高温高圧の蒸気をタービンに供給するシステム。原子炉プラントのうち、原子炉及び一次冷却系設備から構成される部分を指す。

O

ODS 鋼（Oxide Dispersion Strengthened Stainless Steel、酸化物分散強化型ステンレス鋼）

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

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」と言う。）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の調整は燃料の性能を確保する上で特に重要な項目である。

P

Pb-Bi → 鉛ビスマス

PCRV（Pre-stressed Concrete Reactor Vessel、プレストレストコンクリート原子炉容器）

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で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。

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、原子力及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。

PUREX （Plutonium Reduction Extraction）法

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。

PyC（パイロカーボン）

熱分解黒鉛。メタンやプロパンなどの炭化水素が1400℃～2000℃の温度で熱分解によって気相で炭素を生成し、それが黒鉛等の基材表面上に化学蒸着したものであり、蒸着温度によって性質が異なる。高速中性子照射によって、構造、寸法、性質が大きく異なってくる性質がある。パイログラファイトともいう。

R

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。

S

SASS（Self Actuated Shut Down System、自己作動型炉停止機構）

制御棒は、制御棒駆動機構と電磁石で接続されているが、この接続部分に高温になると磁性を失う熱感知合金を用いることにより、電磁石に電流が流れている状態でも、炉内の温度上昇により自動的に制御棒を切り離す受動的安全装置。

SCFBR（Supercritical Pressure Light Water Fast Breeder Reactor、超臨界圧軽水冷却高速炉）

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高速増殖炉概念である。

SETFICS（Solvent Extraction for Trivarent-f-elements Intra-groupseparation in CMPO-comlexant 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（Steam Generator、蒸気発生器）

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。

T

TOA（トリオクチルアミン）

湿式再処理法の代替・補完技術の1つであるアミン抽出法で用いられる溶媒。高飽和状態の溶液を使用でき、比較的高い除染性能が期待できるため、廃棄物量低減が可能。

TREAT（Transient Reactor Test Facility、出力過渡試験炉）

米国ANL-West（アイダホ州）にある安全性試験炉（黒鉛減速空気冷却均質型熱中性子炉）。構造材の照射、過渡条件下の燃料破損挙動及び破損後挙動の解明等に用いられている。

TRISO型被覆粒子燃料

被覆粒子燃料は、燃料核（UO_2、ThO_2）、低密度炭素（PyC）バッファ層、シール層（BISO粒子のみ；バッファ層）、高密度炭素（PyC）内層、炭化ケイ素層（SiC）及び高密度炭素（PyC）外層で構成される。基本的構成は英国／OECDのドラゴン炉設計の際開発された。燃料核から核分裂生成物（FP）拡散の障壁の役目をする被覆層が三重であることからTRISO型被覆粒子燃料と呼ばれている。

TRU (Trans Uranium、超ウラン元素)

原子番号が92（ウラン）を超える元素をいい、アクチニド元素に属する。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）及び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α崩壊してα線を放出する。

TRUEX （Trans Uranium Extraction）法

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。

U

ULOF（Unprotected Loss of Flow、流量喪失時スクラム失敗事象）

外部電源喪失等により1次冷却系ポンプがコーストダウンする過渡変化が生じた際に、原子炉停止系の作動に失敗することを重ね合わせた事故事象。一般には流量喪失により炉心燃料温度が短時間で上昇し、炉心損傷に至る。高速炉では、一般に独立2系統の原子炉停止系が装備されるため、このような事象の発生する確率は10-6/ry以下であり、技術的には発生するとは考えられない事象である。ULOFは、短時間に大規模な炉心損傷に至る事象であり、従来から、その事象推移の不確かさを考慮して幅広い事象シナリオが検討され、高速炉の炉心崩壊事象の代表的事象とされてきている。

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。

塩廃棄物

電解工程の廃溶媒など、化学形態が塩である廃棄物。

塩浴塩素化法

酸化物燃料を金属電解法で処理するための酸化物の金属への還元方法の一つ。溶融塩中で塩素ガスの直接吹き込むことにより、金属を経由することなく酸化物燃料を直接イオン化する方法。米国ANLが開発したLi還元法と比較して塩廃棄物が少なくなるという特徴があるが、塩素ガスの取扱が課題となる。

オフガス系

揮発性核種を多量に含む使用済燃料の剪断・溶解工程において、放出される廃気を処理し、揮発性核種を除去する系統。

か

外部ゲル化法

硝酸ウラニル及び硝酸プルトニウム混液をアンモニアガス雰囲気下で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(PVA)及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。JNC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

乾式法

塩化リチウム(LiCl)や塩化カリウム(KCl)の溶融塩やカドミウム(Cd)、ビス

マス(Bi)、鉛(Pb)等の液体金属を溶媒とした再処理法の一種。(「酸化物電解法」、「金属電解法」及び「フッ化物揮発法」参照)

簡素化溶媒抽出法

PUREX 法のように Pu を単独で分離せず、単サイクルで U/Pu/Np を共回収し、回収品の精製を行わない湿式再処理法。簡素化溶媒抽出法は、抽出条件の最適化を除けば、従来の知見を流用できる部分がかなり多い。(「先進湿式法」参照)

揮発性 FP

核分裂生成物(FP)のうちのうち蒸気圧が高いもの。

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 つの固相が反応して液相を形成すること。金属燃料では、燃料合金中の U と被覆管中の鉄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。「常陽」、「もんじゅ」は均質炉心である。

金属電解法

使用済燃料を溶融塩中に溶解し、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、溶融カドミウム陰極でプルトニウム及び 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。

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。非均質炉心は、ボイド反応度の低減、増殖率の向上の点で効果があるとされている。

計量管理手法

経理、運転管理、安全管理、法規制等に対応するため、ウラン、プルトニウムの存在を施設の境界での出入り、施設内での所在について数量的、連続的に把握すること。

ゲル化

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。

減圧事故

原子炉において、原子炉冷却材圧力が減少する事故。軽水炉において安全評価上厳しいとされ、また安全評価の対象となる事象としては、加圧水型炉の加圧器逃し弁の誤全開による一次系圧力の異常な減圧等。高温ガス炉では、一次冷却材の減圧事故が最も厳しい炉心昇温事故と想定されている。

コアキャッチャー

原子炉の炉心損傷事故時に、格納施設の健全性を保持し放射性物質の放散を抑制する目的で、溶融燃料及び構造材等の混合物を冷却保持するために、炉容器内、あるいは炉容器外の炉心下方に設置される装置。溶融物質を固定化し、崩壊熱を除去して除熱源へ輸送する機能が要求される。高速炉用にはさらに臨界防止体系とする必要がある。

高レベル放射性廃棄物　⇒　「HLW」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、核分裂性ガスや冷却材蒸気の膨張、燃料被覆管や集合体管等のスチール並びに燃料自身が蒸発・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及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言う。

サーマルストライピング

配管合流部や原子炉炉心上部のような、温度差が大きいナトリウムが流入する場所では、熱応力の繰返しによる高サイクル疲労により構造物を破損させる場合が生じる。高温液体と低温液体が混合する場所における温度ゆらぎ現象をサーマルストライピングと呼ぶ。

酸化物電解法

使用済みの酸化物燃料を溶融塩（LiCl-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（$(Pu,U)O_2$）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、照射の進行にしたが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。

自己作動型炉停止機構　⇒　「SASS」参照

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燃料の増加量が、原子炉に装荷される核燃料と、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、加工中の核燃料の合計量に等しくなる(システム全体の核燃料が倍増する)のに必要な時間。

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、異常時に原子炉で生じる物理現象に基づいて自然に安全を確保できる特性を受動安全性という。

蒸気発生器　⇒　「SG」参照

晶析法

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、プルトニウム及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。

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、均一化混合及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。

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見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、硝酸プルトニウム及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、洗浄及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（UO_2）、プルトニウム酸化物（PuO_2）を粉砕、分級する乾式法の二法がある。

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 10μm～1000μm)の径の粒子を組合せて充填する。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を実現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。

スラグ

金属等の小さな塊。

潜在的毒性

放射性核種の人体への影響度の尺度。核種ごとに定められている放射性物質の体内摂取の年間許容限度(年摂取限度)でその核種の放射能量を除した値。

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及びネプツニウムと分離せず、低除染で共回収する)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。

ソルトフリー法

溶媒抽出法による再処理主分離工程(分離、精製、溶媒再生)の各ステップにおいて、分解してガス化する化学試薬による反応操作とその廃試薬を電気分解により処理する方法、あるいは化学試薬を用いず直接(in situ)、電気化学を適用して反応を操作する方法をいい、それらを包括的に組合せることによって、工程操作に伴う塩を完全に排除することが可能となる。この結果、放射性廃液の高濃縮・高減容が可能となることから、処分の合理化が図られる。

た

脱被覆

再処理の前処理として燃料被覆管を除去すること。

タンク型（tank type）

FBRの炉型は原子炉冷却材等の循環系から見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。

炭素熱還元

酸化物燃料を炭化物または窒化物燃料に転換する方法。炭素熱還元法では、酸化物と炭素の混合物を、それぞれ真空中あるいは窒素ガス気流中で約1500℃に加熱することにより、残量酸素量が0.1％以下の炭化物や窒化物を製造することができる。

単離

元素単体の形で分離すること。

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。

窒素解離

窒化物燃料は、約2000K以上の高温において、重金属と窒素ガスに分解して窒素ガスを放出する。これを窒素解離という。

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。

中間熱交換器 ⇒ 「IHX」参照

超ウラン元素 ⇒ 「TRU」参照

長寿命FP ⇒ 「LLFP」参照

長半減期FP ⇒ 「LLFP」参照

超臨界圧水

軽水（通常の水）は、圧力22.1MPaが以上になると、液体と気体との明確な区別がなくなり、温度の上昇に伴って連続的に密度が変化し、沸騰現象を起こさない。このような状態の水を超臨界圧水と称し、このような状態となる最小の圧力（軽水では22.1MPa）を臨界圧力と呼ぶ。

超臨界流体

気体と液体が共存できる限界の温度・圧力（臨界点）を超えた状態にあり、通常の気体、液体とは異なる性質を示す流体。超臨界流体は、気体の性質（拡散性）と、液体の性質（溶解性）を持ち、かつその密度を連続して大幅に変化できる特長がある。

直接炉心冷却系　⇒　「DRACS」参照

低減速スペクトル炉

H/HM（水素原子数／重金属原子数比）が既存軽水炉（PWR：約 4.0、BWR：約 4.9）より小さい水冷却 MOX 燃料炉心を称する。この他、低減速 MOX 炉心、高転換型軽水炉等の別称がある。特に、日本原子力研究所が主体となって研究している水冷却増殖炉を、低減速スペクトル炉と呼ぶことがある。燃料に対し、減速材でもある水の割合を減少させることにより、中性子の減速を抑制し、燃料の転換（増殖）性を向上させる目的の炉心概念である。

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 10^6～10^8 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。

な

内部ゲル化法

硝酸ウラニル及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（$(CH_2)_6N_4$）及び錯化剤の尿素（H_2NCONH_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。

内部ダクト付き燃料集合体（FAIDUS［Fuel Assembly with Inner Duct Structure］型）

炉心損傷事故時の再臨界事象を回避するための方策の一つ。予め燃料集合体の内部に溶融燃料排出用ダクトを設けた燃料集合体の構造。集合体中央部の 37 ピン程度を六角のダクトで置換し、下部を高圧または低圧プレナムへ接続して溶融燃料の流出経路とする。全ての燃料集合体に内部ダクトを設けた場合には炉心性能の低下をもたらすものの、炉心損傷の拡大開始以前に燃料流出によって再臨界の可能性を回避することを比較的容易に示すことができる概念として提案された。

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α放射性のポロニウムが生成されることから注意が必要である。

は

白金属元素

ルテニウム、ロジウム、パラジウム、オスミウム、イリジウム及び白金の 6 元素の総称。代表的な貴金属で、酸・アルカリに侵されにくく、また、融点が高く、比重が大きい。

バッチプロセス

連続処理するプロセスではなく、一定量ずつに分けて処理するプロセスのこと。

非均質炉心 ⇒ 「径方向非均質炉心」参照

被覆管型燃料

ジルコニウムや SUS 等の材料でできた円柱形の密封中空管（被覆管）に

燃料（ペレット燃料、振動充填による粉体燃料）を納めたもの。燃料の燃焼とともに放出されるFPガスを蓄えるためのガスプレナムが、燃料の上部または上下部に設置する。通常被覆管の内部には、冷却材との圧力バランスの調整と冷却材への熱伝達をよくするため、ボンド材と称する不活性なヘリウムガスまたはナトリウムを充填する。

被覆粒子燃料（BISO型、TRISO型）

被覆粒子燃料は、燃料核と呼ばれる直径数百μm～1mm程度の燃料核（酸化物燃料または窒化物燃料）を、核分裂生成物（FP）の緩衝や障壁機能をもつ複数層で被覆したもので、被覆層数によりBISO型、TRISO型がある。酸化物燃料の場合には、内側から低密度の熱分解炭素（PyC）、高密度炭素（PyC）、炭化ケイ素層（SiC）等で被覆される。窒化物燃料の被覆については、TiN等について検討中である。（「TRISO型被覆粒子燃料」参照）

評価指標

評価の視点での優劣を指し示す値。本報告書では、「経済性」、「資源有効利用性」、「環境負荷低減性」、「核拡散抵抗性」、「安全性」及び「技術的実現性」の6つの視点に対して、FBRサイクルが開発目標に対してどの程度達成されたかを判定するための指標として、一次指標から三次指標まで階層化し、設計要求との関連を明示することを心掛けた。

複利システム倍増時間

増殖の速さを表わす尺度を核燃料の倍増時間という。核燃料は、加工、再処理されてはじめて使用できるので、原子炉のみを考えるのは実際的ではなく、核燃料サイクル全般を考えるべきである。倍増時間とは燃料の増殖による核燃料の増加量が、原子炉に装荷される核燃料と、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、加工中の核燃料の合計量に等しくなるのに必要な時間である。したがって、核燃料サイクル全体を考える場合には倍増時間は原子炉のみを対象とする場合より、当然ある程度長くなる。この場合をインベントリ倍増時間とよぶ。また、高速増殖炉が多数ある場合には、1基のみの場合に比べて倍増時間は短くなる。その理由は、多数基あれば、複利的効果があるからである。これを複利システム倍増時間という。

不溶解残さ

再処理の溶解工程において一部溶媒に溶解せずに固体のまま残る成分。モ

リブデン、テクニチウム、ルテニウム、ロジウム、パラジウム等の元素の一部が、単体または合金状等の不溶解固体粒子として溶解液中に分散して存在する。

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言う。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、炉心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する炉心設計を、非均質炉心と言う。

プレストレストコンクリート原子炉容器　⇒　「PCRV」参照

分散強化型フェライト鋼　⇒　「ODS 鋼」参照

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。

ボイド反応度

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ボイド（気泡）化による炉心反応度に及ぼす核的な反応度効果。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（ボイド化）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ボイド反応度の大きさを制限する必要がある。本報告書においては、ダクトーダクト間、内部ダクト内のナトリウム（冷却材）を残し、炉心部の燃料棒部分（軸方向非均質炉心の場合には、内部ブランケット高さ部分も含む）のナトリウム（冷却材）を100%除去したときの全投入反応度を指す。（「CDA」、「再臨界回避」参照）

ホウケイ酸ガラス

ホウ酸(B_2O_3)とケイ酸(SiO_2)を主成分として含むガラス。ホウケイ酸ガラスの化学構造は、主にケイ酸とホウ酸が網目構造を形成するので結晶質の構造とは違い、イオン半径が異なる多種類の放射性物質は網目の中に入り、均質で安定な一体化した物質になる。放射性物質はガラスと混ざるのではなく、色ガラスと同様、ガラス成分の一つとしてガラスそのものになる。したがって、割れても放射性物質は、ガラスと一体になっていて移行しにくい。高レベル放射性廃液のガラス固化には、主にこのガラスが用いられる。

保障措置

原子力平和のための核物質並びに設備、資材及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。

ホットセル

高放射性物質を取り扱えるように十分な遮蔽を施した実験室等の一区画をいう。遮蔽壁の外側からマニピュレータなどの遠隔操作器具により、自由に安全に実験が行えるようになっている。

ボンド材

被覆管内での燃料のスウェリング等による燃料と被覆管の機械的相互作用を避けるためには、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、この代替として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、燃料及び被覆管材料との共存性とを考慮し、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-液抽出とも言う。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

流量喪失型スクラム失敗事象　⇒　「ULOF」参照

理論密度

燃料物質の結晶の格子定数から計算される理論的な密度。ペレット燃料などの焼結燃料の密度は理論密度より低くなるため、密度を理論密度に対する比として表すことが多い。

臨界管理

燃料サイクル施設において臨界事故の発生を防止するために核燃料物質を管理すること。取扱う容器の形状により臨界を防止する形状管理と、取扱う量そのものを制限する質量管理、取扱い時の濃度により管理する濃度管理などの方法がある。

ループ型（loop type）

FBRの炉型は原子炉冷却材等の循環系から見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物量が大きくなる傾向がある。

炉心圧損

冷却材が、炉心入口と出口の間で炉心構造物との流動摩擦等により失う圧力のこと。圧損とは、圧力損失の略称である。

炉心取出平均燃焼度

燃料交換時に取り出される燃料集合体に対する平均燃焼度を指す。すなわち、取り出されるすべての燃料集合体の燃焼度の和をとり、燃料集合体体数で割った平均値である。

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）

OHP集 目 次

説明内容…… 1
ＦＢＲサイクル実用化戦略調査研究の研究開発ステップ…… 2
第１期の概要と今回課題評価を受ける範囲…… 3
ＦＢＲサイクルの開発目標…… 4
ＦＢＲサイクルの基本的な考え方…… 5
ＦＢＲサイクルシステムの主な設計要求…… 6
ＦＢＲシステムの検討対象…… 7
ナトリウム炉の経済性追求概要…… 8
ナトリウム冷却大型炉の検討の流れ…… 9
大型ナトリウム冷却ループ（アドバンスト・ループ）型炉の検討結果……10
ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討の流れ……11
ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討結果……12
２次系簡素化概念の検討結果……13
重金属冷却炉の検討の流れ……14
鉛ビスマス冷却自然循環炉概念図……15
ガス冷却炉の検討の流れ……16
炭酸ガス冷却炉検討結果……17
ヘリウム冷却被覆粒子燃料型炉検討結果……18
耐熱被覆管燃料ヘリウム冷却ガス炉の検討結果……19
水冷却炉の検討の流れ……20
BWR型FBR（高転換比BWR型炉）の検討結果……21
超臨界圧水冷却高速増殖炉の検討結果……22
溶融塩炉の検討の流れ……23
塩化物溶融炉検討結果……24
小型概念炉の検討の流れ……25
小型炉の炉心特性……26
小型炉の検討結果……27
建設コスト算定の考え方……28
各炉概念における主要物量の比較……29
各炉概念における概略建設コストの比較……30
各炉型における炉心燃料の検討の流れ……31
ナトリウム冷却炉の炉心燃料評価結果……32

中型鉛ビスマス冷却モジュール炉（自然循環型）の炉心燃料評価結果……33
大型炭酸ガス冷却炉の炉心燃料評価結果……34
大型ヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉の炉心燃料評価結果……35
大型ナトリウム冷却炉心の検討結果（酸化物、金属燃料）……36
鉛ビスマス、炭酸ガス、ヘリウムガス冷却炉心の検討結果……37
燃料サイクルシステムの検討の対象と視点……38
燃料サイクルシステムの検討評価の進め方……39
先進湿式法（酸化物燃料）の概念検討結果の概要……40
酸化物電解法（酸化物燃料）の概念検討結果の概要……41
金属電解法（酸化物燃料）の概念検討結果の概要……42
フッ化物揮発法（酸化物燃料）の概念検討結果の概要……43
簡素化ペレット法（酸化物燃料）の概念検討結果の概要……44
振動充填法（乾式・湿式再処理対応）の概念検討結果の概要……45
鋳造法の概念検討結果の概要……46
経済性評価結果……47
有望な実用化候補概念の抽出……48
実用化候補概念の抽出（ＦＢＲシステム）……49
ＦＢＲシステム技術の評価結果……50
実用化候補概念の抽出（燃料サイクルシステム）……51
燃料サイクルシステム技術の評価結果……52
第２期の進め方……53
はじめに……54
開発目標、設計要求に係る問題……55
開発目標の見直し方針……56
設計要求の見直し方針……57
多様なニーズに対応した設計要求の設定……58
炉の特性を踏まえた炉心設計の見直し……59
各炉型における増殖比と複利システム倍増時間の関係……60
環境負荷低減への取り組み……61
社会的受容性への配慮……62
ＦＢＲｻｲｸﾙｼｽﾃﾑの技術体系整備に向けた展開における第２期の位置付け……63
ＦＢＲサイクル開発の展開（案）……64
第２期の研究開発計画……65
実用化戦略調査研究の第２期の目的……66
実用化戦略調査研究の第２期の展開……67

第2期における炉システムの研究開発……68
ナトリウム冷却炉の第2期の主な要素技術開発……69
鉛ビスマス冷却炉の第2期の主な要素技術開発……70
ガス冷却炉の第2期の主な要素技術開発……71
水冷却炉の第2期の主な要素技術開発……72
小型炉の第2期の主な要素技術開発（大・中型炉と共通に実施）……73
第2期における再処理システムの研究開発……74
先進湿式法再処理の流れと第2期の主な要素技術開発……75
湿式代替補完技術の流れと第2期の主な要素技術開発……76
酸化物電解法再処理の流れと第2期の主な要素技術開発……77
金属電解法再処理（酸化物燃料）の流れと第2期の主な要素技術開発……78
金属電解法再処理（金属燃料）の流れと第2期の主な要素技術開発……79
第2期における燃料製造システムの研究開発……80
簡素化ペレット法（酸化物燃料）の流れと第2期の主な要素技術開発……81
振動充填法の流れと第2期の主な要素技術開発……82
鋳造法の流れと第2期の主な要素技術開発……83
第2期計画［システム技術の統合・評価］……84
実用化戦略調査研究第2期の実施体制……85
実用化戦略調査研究の体制（JNC内）……86
国際協力……87
利用する主要な国内施設・設備……88
高速増殖原型炉「もんじゅ」の使命……89
RETF（リサイクル機器試験施設）計画の検討……90
第2期の資金計画……91
他の研究開発課題評価テーマとの関係……92
第2期の期待される成果と波及効果……93
その他事項……94
特許出願状況……95
成果の公開・発表状況……96
措置事項の実施状況……97
措置事項の実施状況（1／2）……98
措置事項の実施状況（2／2）……99

研究開発課題評価委員会

【説明用OHP集】

本資料は、課題評価委員会の評価意見により改訂したものである。

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）

平成13年7月9日
（平成13年10月改訂）

核燃料サイクル開発機構

説明内容

- 研究課題の概要
- FBRサイクルシステムの第1期の研究成果
  - FBRシステムの検討
  - 燃料サイクルシステムの検討
  - 有望な実用化候補概念の抽出
- 第2期の進め方
  - FBRサイクルの技術体系整備に向けた展開における第2期の位置付け
  - 第2期の研究開発計画
- 措置事項の対応状況

FBRサイクル実用化戦略調査研究の研究開発ステップ

（年度）

2000 | 2005 | 2010 | 2015

革新技術

技術選択肢

第1期
・多くの選択肢の評価

チェック＆レビュー

設計研究

要素試験

第2期
・複数の実用化候補概念の選択

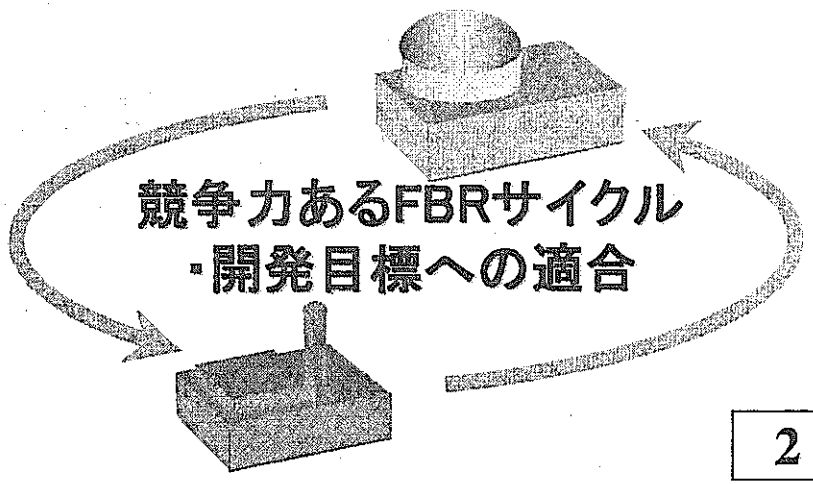
その後の研究研究開発
・5年程度毎に、チェック・アンド・レビューを受け、ローリングプランで進める

例

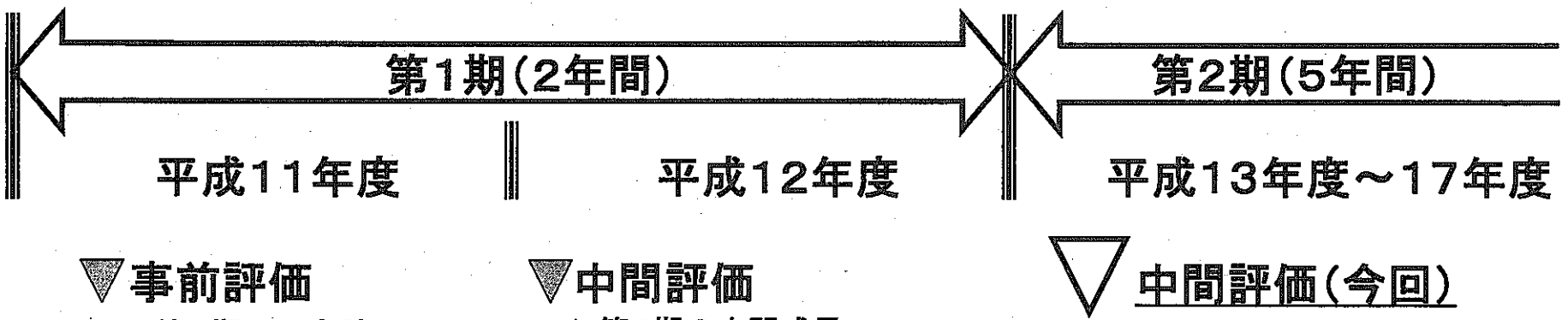
FBR
- 冷却材（Na、ガス、重金属、．．．）
- 燃料(MOX、金属、．．．）
- プラントサイズ

再処理
- 先進湿式法
- 乾式法

燃料製造
- 振動充填法
- 簡素化ペレット法
- 鋳造法



第1期の概要と今回課題評価を受ける範囲



今回、中間評価を受ける範囲

- ◆ 第1期の成果
- ◆ 第2期の展開
  - ➢ FBRサイクルの技術体系整備に向けた展開における第2期の位置付け
  - ➢ 第2期の研究開発計画（H14～H17）

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
- ○ 同時代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

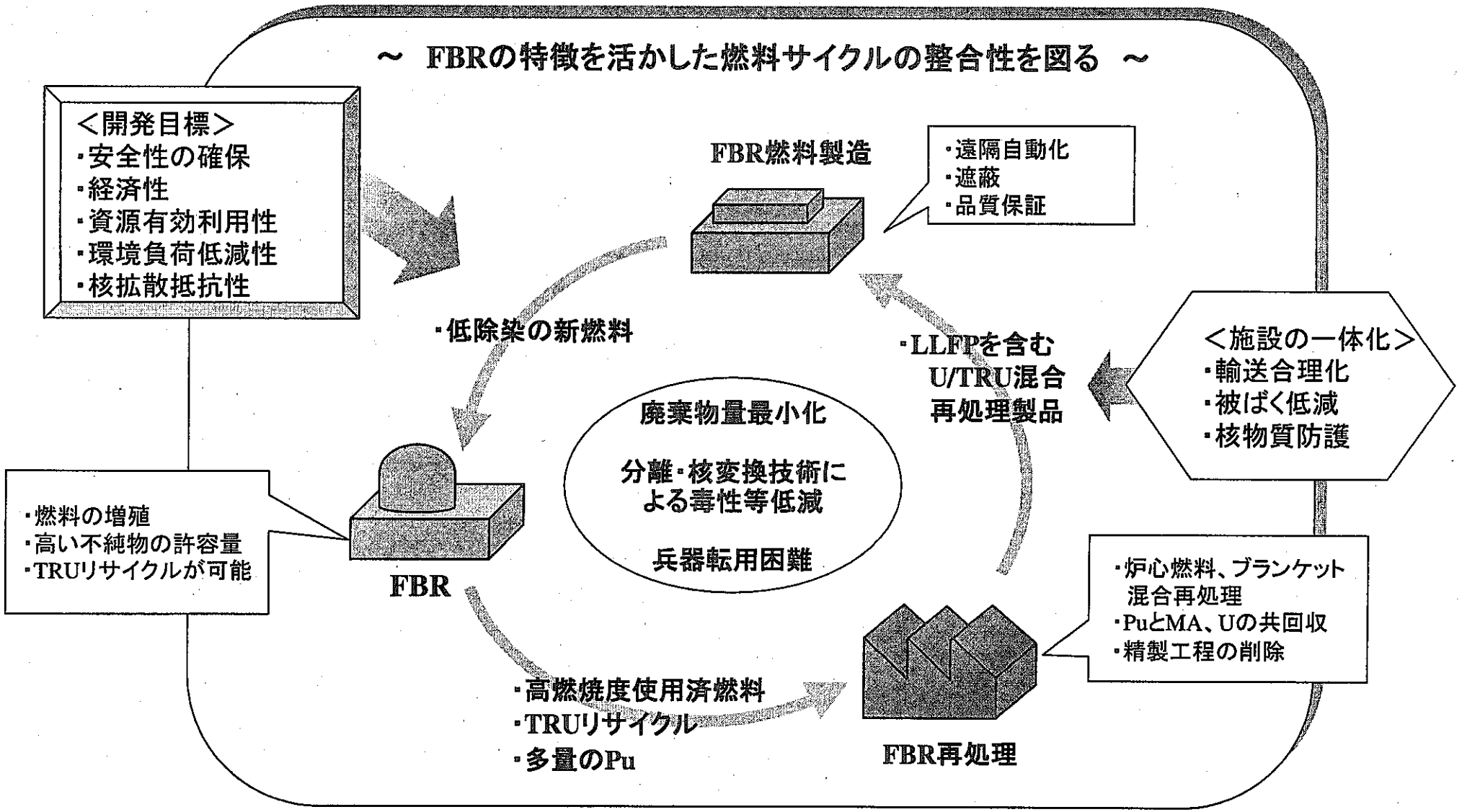
資源有効利用性
- ○ 高増殖から低増殖、TRU燃焼まで柔軟に対応

（ 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燃焼及び長半減期FPの核変換により、放射性廃棄物量等を低減
- ○ 運転・保守及び廃止措置に伴う放射性廃棄物発生量を低減

核拡散抵抗性
- ○ 純粋なプルトニウムが単独で存在しないこと
- ○ 核物質防護及び保障措置上の対応が良好な設計

FBRサイクルの基本的な考え方



FBRサイクルシステムの主な設計要求

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及び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

↓

第1期の抽出評価	
技術的成立性	環境負荷低減性
安全性	核拡散抵抗性
経済性	運転・保守・補修性
資源有効利用性	

FBRシステムの検討対象

JNC

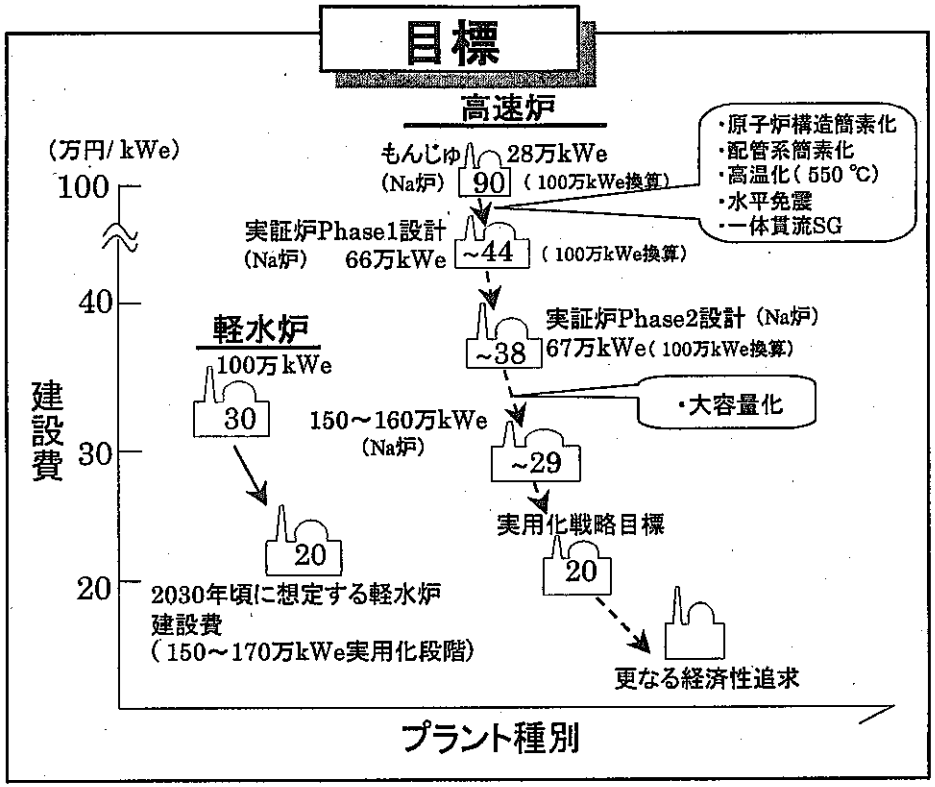
原子炉型＼燃料形態				固体燃料					液体燃料
				被覆管燃料			被覆粒子燃料		(U+Pu)
				酸化物	金属	窒化物	酸化物	窒化物	
Na冷却	大型炉			○	○	○			
	中小型モジュール炉			○	○	○			
重金属冷却	大型炉(Pb)			○	○	○			
	中小型モジュール炉 (Pb, Pb-Bi)			○	○	○			
ガス冷却	大型炉	(CO_2)	蒸気タービン発電	○	○	○			
		(He)	蒸気タービン発電	○	○	○			
			ガスタービン発電	○		○	○	○	
	中小型モジュール炉 (He)			○		○	○	○	
水(重水)冷却				○					
液体燃料による冷却									○

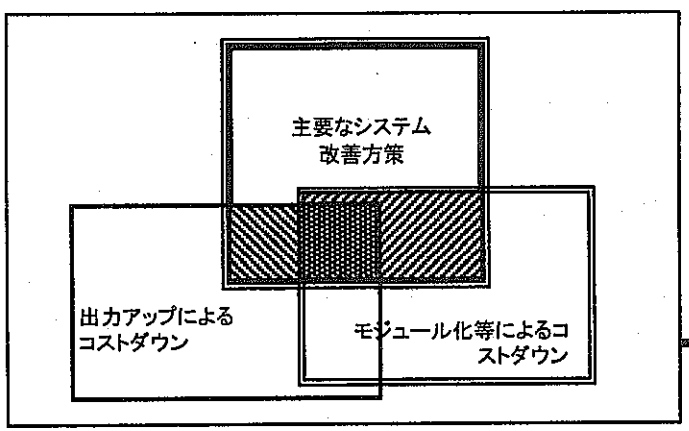
(注) ○は、検討対象を示す

JNC

ナトリウム炉の経済性追求概要

目標





スケールメリットの追求

ただし、出来るだけ、標準化を図る

システム改善方策

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

- 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

実用化戦略目標

- 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

更なる経済性追求

・同一開発路線であること

モジュール化・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

ナトリウム冷却大型炉の検討の流れ

大幅な経済性向上達成のための新技術導入

- ◆スケールメリットの追求（～150万kWe）
- ◆ツインプラント化
- ◆新材料の採用（12Cr鋼）
- ◆免震技術の採用
- ◆炉上部簡素化、EVST削除等
- ◆炉型に応じた物量削減方策の採用

ループ概念

- ・2ループ化の徹底（1次系、2次系）
- ・1次系機器合体
- ・配管短縮

タンク概念

- ・炉容器径の削減（キドニー型IHX）
- ・2次系の2ループ化
- ・2次系機器合体

技術的成立性の見通しあり

物量（経済性）は同等

ループ概念が有利な事項：

- 機器アクセス性並びに保守・補修性（IHX、冷却材ポンプ、炉内構造物など）
- 更なるコストダウンの可能性（2次系簡素化による物量削減）
- 炉容器などの大型機器の製作性（将来的なコストダウンの可能性）

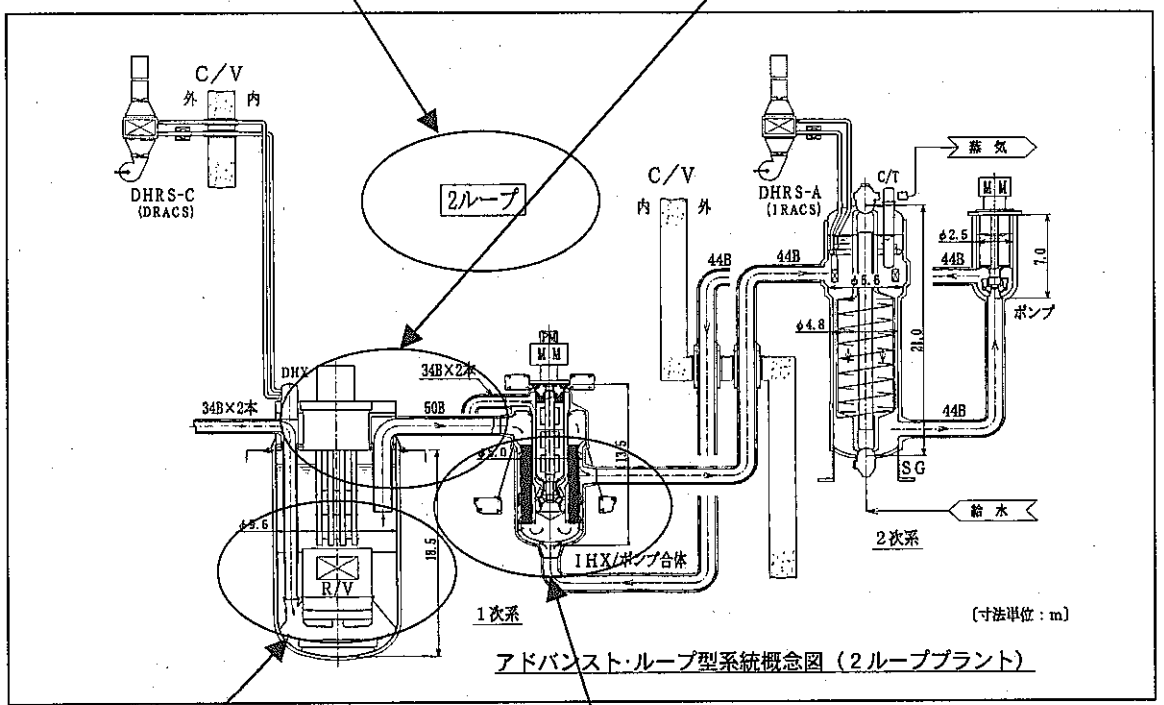
ループ型炉概念が優れる

大型ナトリウム冷却ループ(アドバンスト・ループ)型炉の検討結果

主要プラント仕様
- ・電気出力 1,500 MWe　・熱出力 3,570 MWt
- ・ループ数 2ループ　・プラント熱効率 約42 %
- ・IHX/1次主循環ポンプ合体

ループ数削減
(2ループ化)

配管短縮化



アドバンスト・ループ型系統概念図（2ループプラント）

原子炉構造の
コンパクト化

機器合体
(1次ポンプ+IHX)

燃料取扱設備簡素化
(EVST削除等)

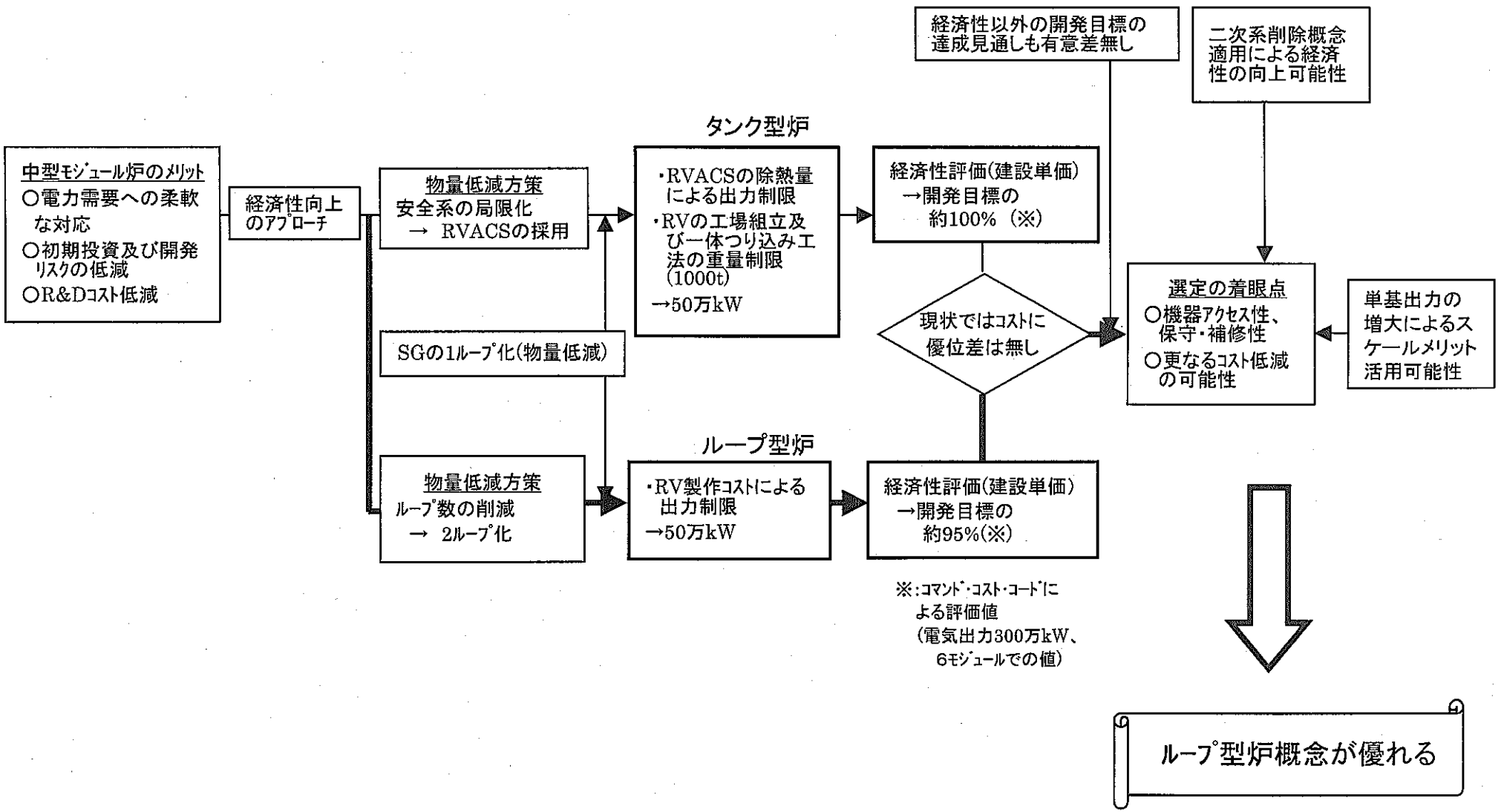
第1期成果

- ・2ループ構成により、建設コストの目標を達成できる可能性を有する。(目標値の約85%、NSSS物量17.5t/万kWe)
- ・安全性については、炉心冷却が最も厳しい流量喪失型事象に対しても、被覆管最高温度も制限値に抑えられる見通しを得た。また、全電源交流喪失時にも自然循環のみによる崩壊熱除熱能力がある。
- ・炉容器径9.6mは、既存製造設備の範囲内である。構造健全性、製作建設性上大きな問題はない見通しである。

今後の課題

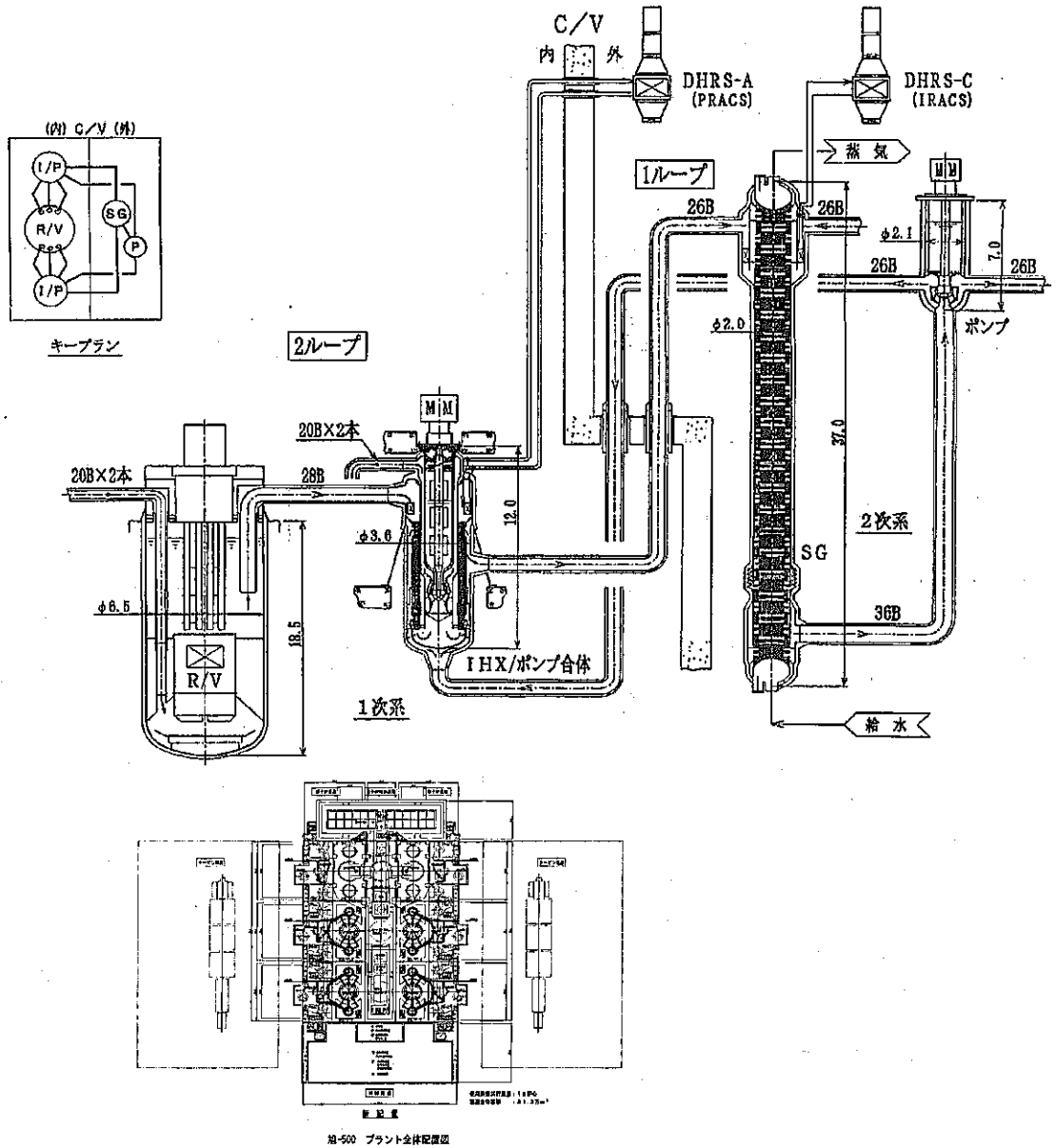
- ・大容量コンパクトな2ループシステムにおける流動特性(炉容器内、配管内)
- ・機器・構造(合体機器、大口径配管等)の健全性
- ・革新技術の開発(新材料(12Cr系鋼)開発、構造基準高度化、三次元免震技術)
- ・再臨界回避方策(内部ダクト付き、軸ブラケット一部削除燃料集合体等)の有効性確認
- ・2次系簡素化のための新型SGの開発

Na冷却中型ﾓｼﾞｭｰﾙ炉の検討の流れ



ナトリウム冷却中型モジュール炉の検討結果

主要プラント仕様
・電気出力　500 MWe　・熱出力　1,190 MWt　・ループ数　2ループ　・プラント熱効率　約42 %　・IHX/1次主循環ポンプ合体



第1期成果

・2ループ構成による物量削減、習熟効果の追求により、建設コストの目標を達成できる可能性を有する。(目標値の約95%、NSSS物量23.7t/万kWe)

・安全性については、大型ナトリウムループ炉同様、炉心冷却が最も厳しい流量喪失型事象に対して、被覆管最高温度も制限値に抑えられる見通しを得た。また、全電源交流喪失時にも自然循環のみによる崩壊熱除去能力がある。

・炉容器径6.6mは、軽水炉設備を流用したコストの低い機内鍛造材が適用可能である。構造健全性、製作建設性上大きな問題はない見通しである。

今後の課題

・大容量コンパクトな2ループシステムにおける流動特性(炉容器内、配管内)

・機器・構造(合体機器、大口径配管等)の健全性

・革新技術の開発(新材料(12Cr系鋼)開発、構造基準高度化、三次元免震技術)

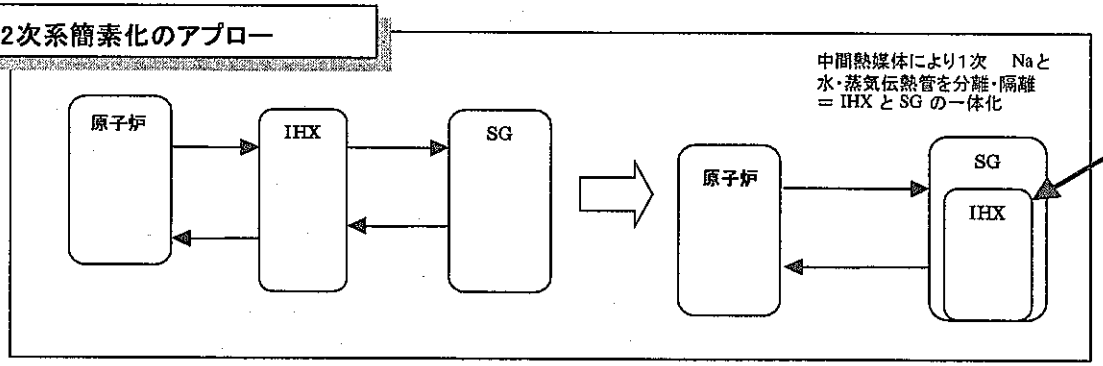
・再臨界回避方策(内部ダクト付き、軸ブラケット一部削除燃料集合体等)の有効性確認

・2次系簡素化のための新型SGの開発

二次系簡素化概念の検討結果

JNC

2次系簡素化のアプロー



中間媒体の候

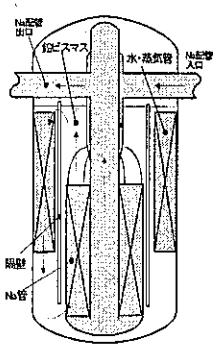
・液体鉛ビスマス合

・固体

ナトリウムー水反応排除のポテンシャル向上

鉛ビスマス熱媒体型SG

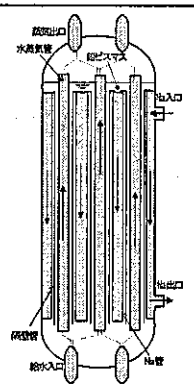
鉛ﾋﾞｽﾏｽ熱媒体ﾌﾟｰﾙ・伝熱管分離設置型



二次系簡素化により経済性向上の見通し有り。伝熱管の分離によりNaー水反応排除のポテンシャル向上

○

鉛ビスマス熱媒体チューブ・三重管型

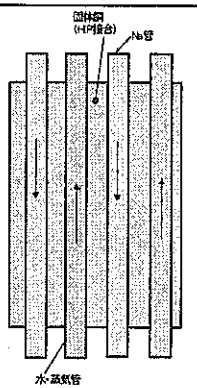


二次系簡素化により経済性向上に有効。三重管(隔壁設置)によりNaー水反応排除のポテンシャル向上

○

固体熱媒体型SG

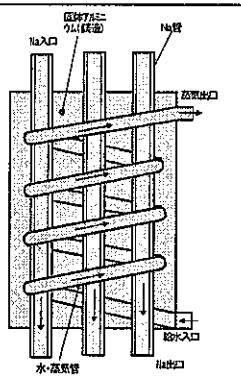
固体銅熱媒体HIP型



Na－水反応排除のポテンシャル向上ただし、将来の加工技術向上を考慮しても経済性向上に期待できず。

△

固体アルミニウム熱媒体鋳造型



アルミニウム拡散層厚さの製作制御性、はく離対応等成立のための課題大

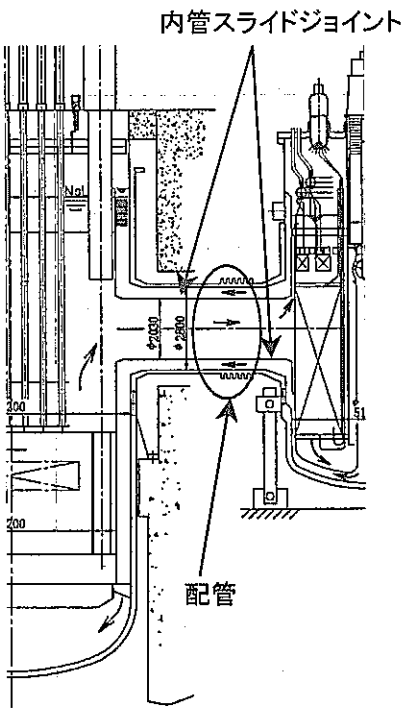
△

注)○:第2期検討対象概念　△:対象外

重金属冷却炉の検討の流れ

- 重金属炉の検討
  - タンク型
    - 中型モジュール
      - 鉛ビスマス炉
        - 自然循環
          - 窒化物燃料
            - 炉心性能(1.19)
              - ・炉心性能改善の余地
            - 経済性
              - ・習熟効果、スケールメリットの更なる追求
        - 強制循環＊
          - ・腐食による流速制限により流路断面積が大きくなり、炉心性能が制限される
          - ・物量に関して、不利（ポンプ、SG重量が増加）
      - 鉛炉
        - ・高融点のため、高温でのメンテナンス技術の開発が必要
        - ・運転温度範囲が狭い
    - 大型
      - ・重量過大で、耐震性確保が困難
      - ・鋼製炉容器が焼鈍設備限界（10m）を越える
      - ・物量過大で、経済性目標の達成の見込みなし
  - ループ型
    - ・重金属の高比重のためのトップエントリー方式の成立性等の見込みなし
    - ・サイドエントリー方式では、スライドジョイントの2重管方式における局所的腐食進展等の技術的課題が大きい

＊増殖性等の改善を今後検討する。

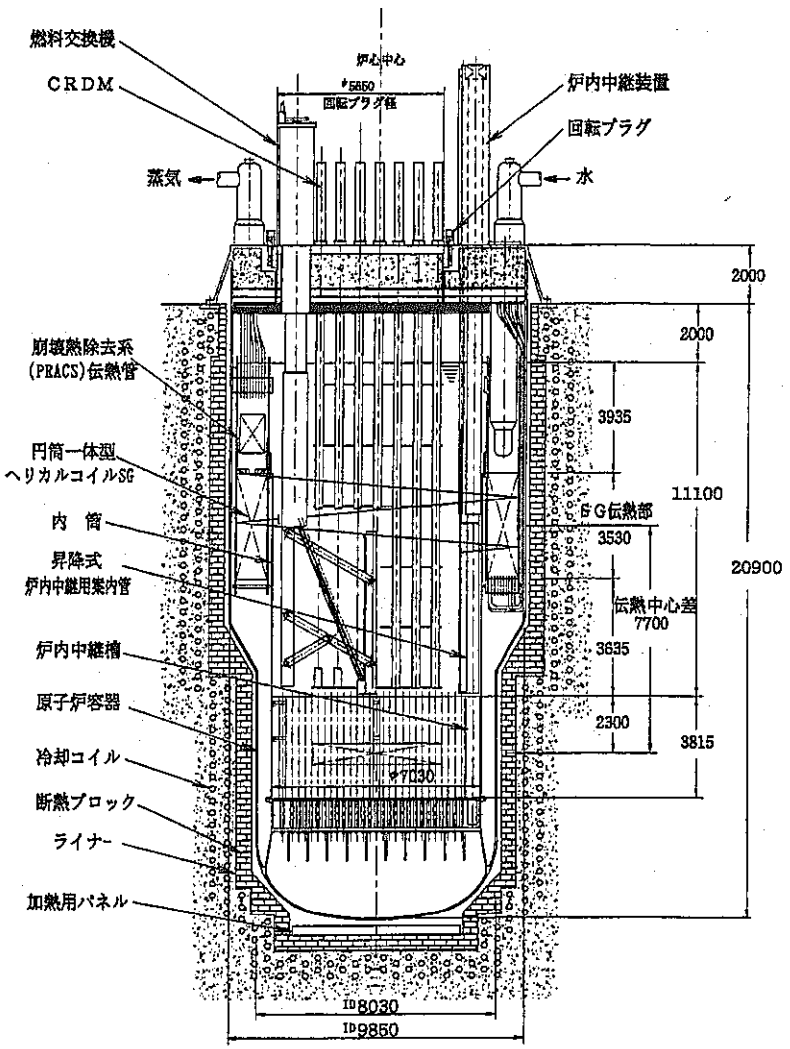


鉛ビスマス冷却自然循環炉概念図

JNC

主要なプラント仕様

- ・電気出力　400MWe　・熱出力　1,053MWt
- ・プラント熱効率　38%　・蒸気発生器　ヘリカルコイル型(1基)



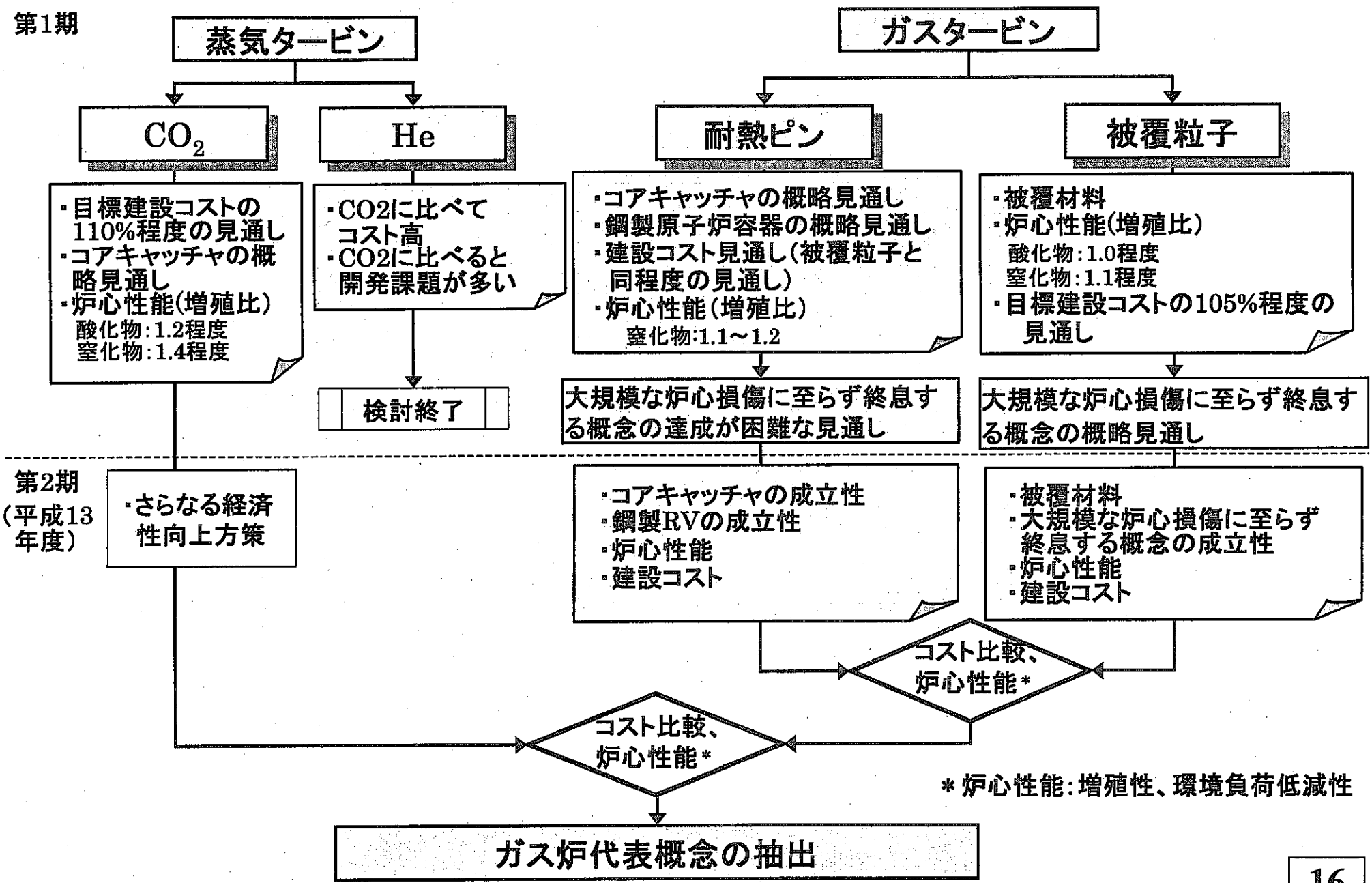
第1期成果

- ・建設コストは、現状では目標を達成していない。(目標値の約120%、NSSS物量23.3 t/万kWe)
- ・安全性については、炉心冷却が最も厳しい制御棒誤引抜き事象等反応度挿入型事象に対して、自己作動型炉停止機構(SASS)の機能と合わせ、炉心の大規模な損傷を防止可能な見通しである。また、全電源交流喪失時にも自然循環のみによる崩壊熱除去能力がある。
- ・冷却材との共存性から炉容器は、フェライト系(12Cr系鋼)とし、溶接後の熱処理が必要であるが、炉容器径9.85mは、現有施設で処理可能な範囲であり、製作建設性上大きな問題はない見通しである。

今後の課題

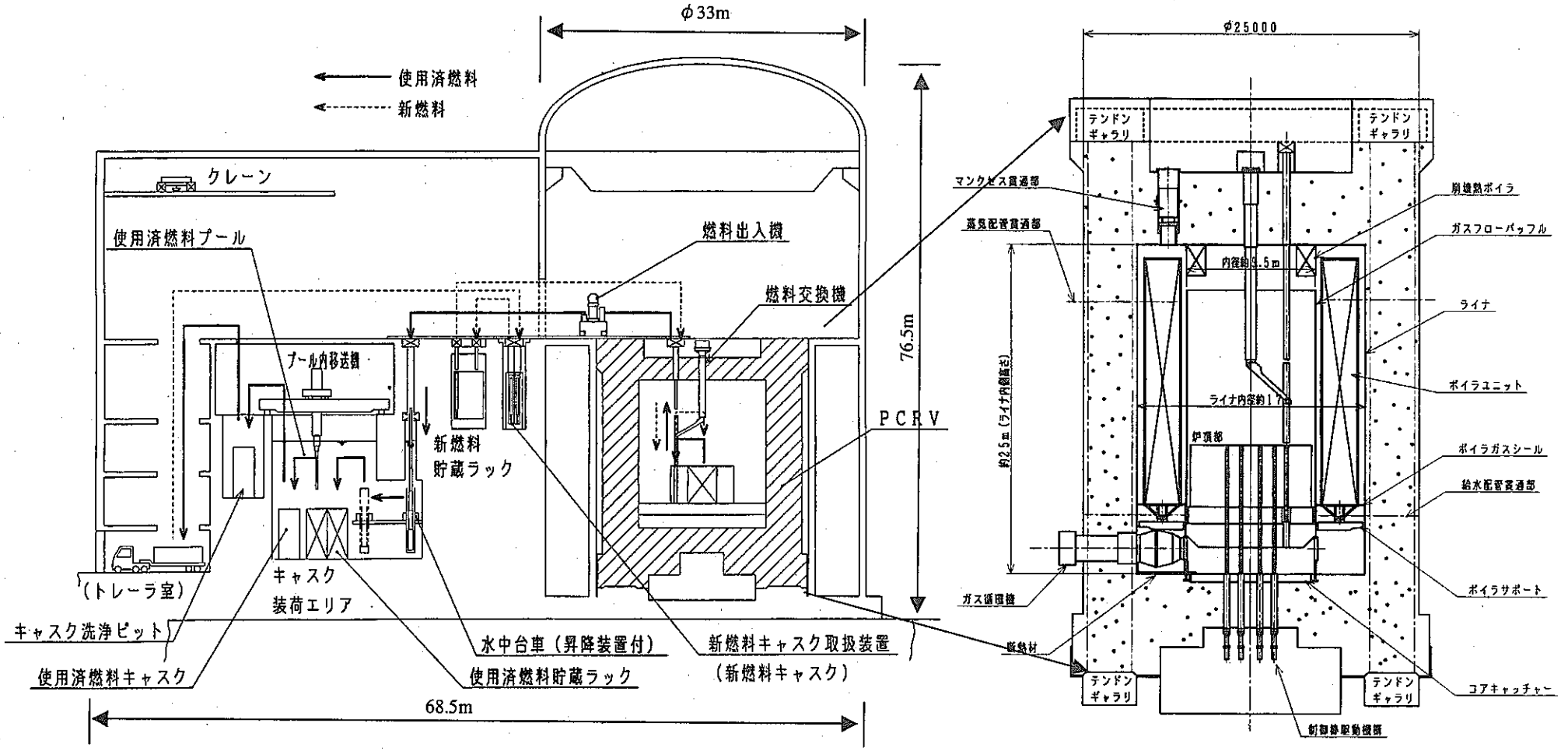
- ・経済性向上のため、 原子炉容器製作性、建設時のクレーン一体吊り込み重量を配慮し、さらにスケール効果を追求した出力アップ(55　万kWe程度)の検討。
- ・炉心性能のポテンシャルをさらに引き出すため、自然循環除熱能力を活かしつつ,強制循環力の活用を視野に入れたシステム概念を追及。
- ・燃料被覆管、構造材料の腐食性確認および防食技術の検討。
- ・鉛およびビスマスからの放射化ポロニウムの生成、被曝上の管理

ガス冷却炉の検討の流れ



炭酸ガス冷却炉検討結果

JNC



第1期成果

・建設コストは、現状では目標を達成していない。（目標値の約110%、所内負荷率が高いため送電端出力で125%、NSSS物量28.4 t/万kWe）

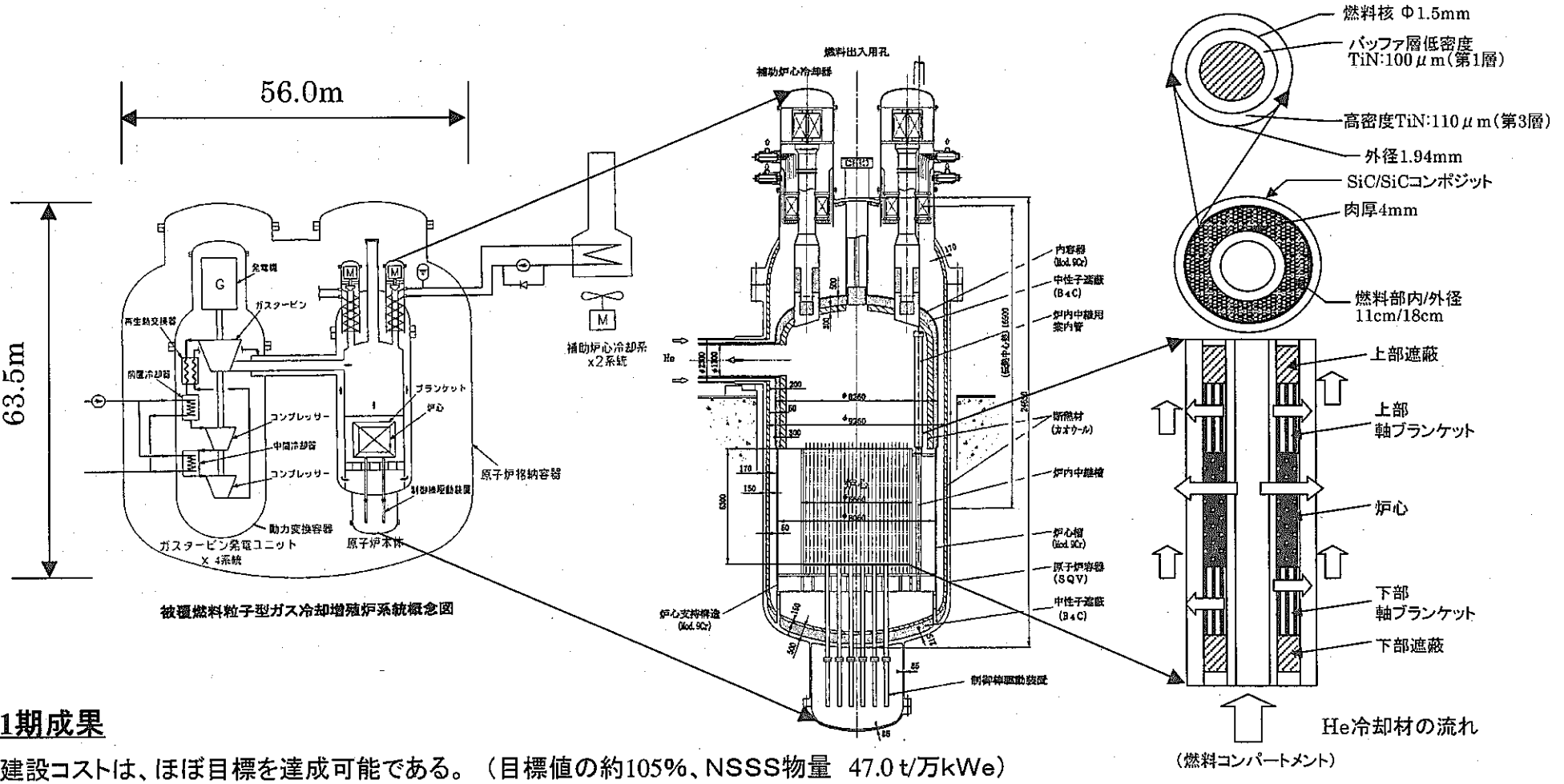
・安全性については、減圧事故時対策が重要であり、圧力バウンダリー破損時の放出量を制限するため流量制限機構を設置する。また、炉心損傷の影響を炉容器内で終息させるため、炉心下部にコアキャッチャーを設置し、排出された溶融燃料を安定に冷却する必要がある。

・PCRVは、「AGR」とほぼ同様であり、構造上の課題は少ないと考えられるが、高速中性子フルエンス条件下での影響評価が必要である。

今後の課題

・機器・冷却系統等の合理化により、さらなる経済性の向上　　・コアキャッチャー冷却性能の確証と受動的炉停止系の改善

ヘリウム冷却被覆粒子燃料型炉検討結果



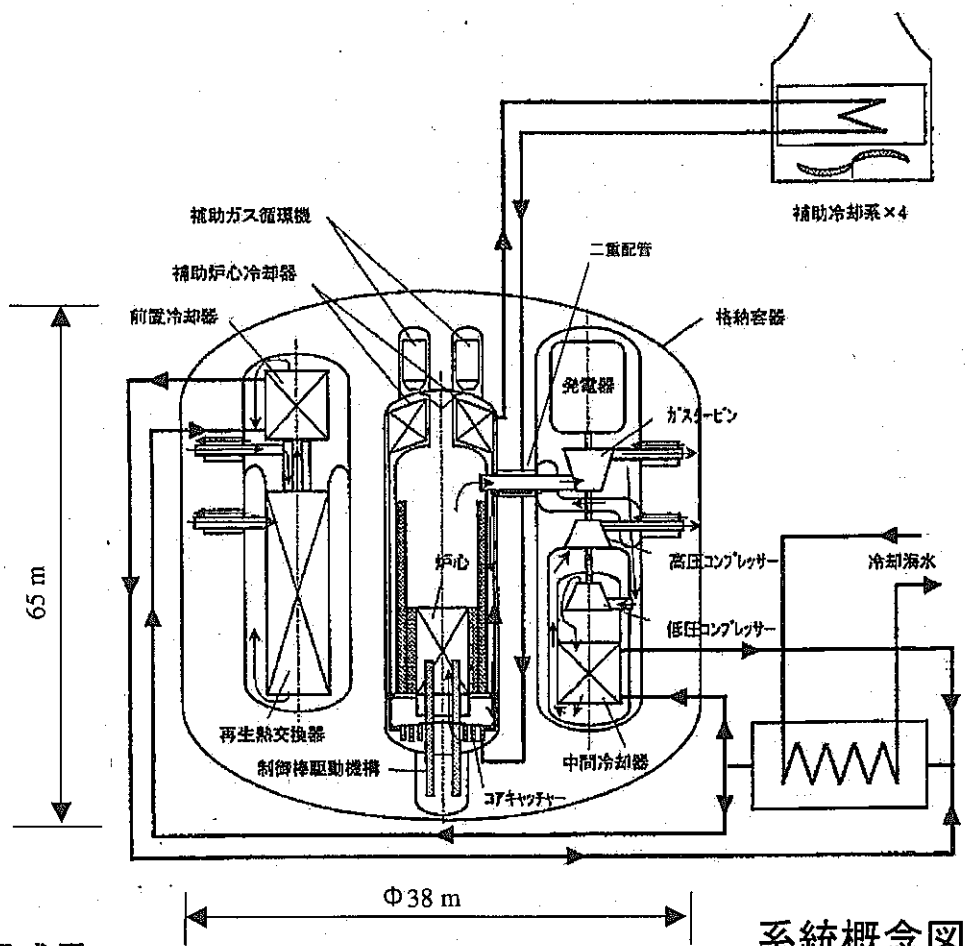
第1期成果

- 建設コストは、ほぼ目標を達成可能である。（目標値の約105%、NSSS物量 47.0 t/万kWe）
- 事故後の自然循環による炉心冷却確保のため低出力化して炉心損傷に対する高い耐性を有している。このため、減圧事故時にスクラム失敗を想定しても、負のドップラー反応度、被覆粒子の耐熱性等により炉心損傷の発生を防止できる可能性がある。

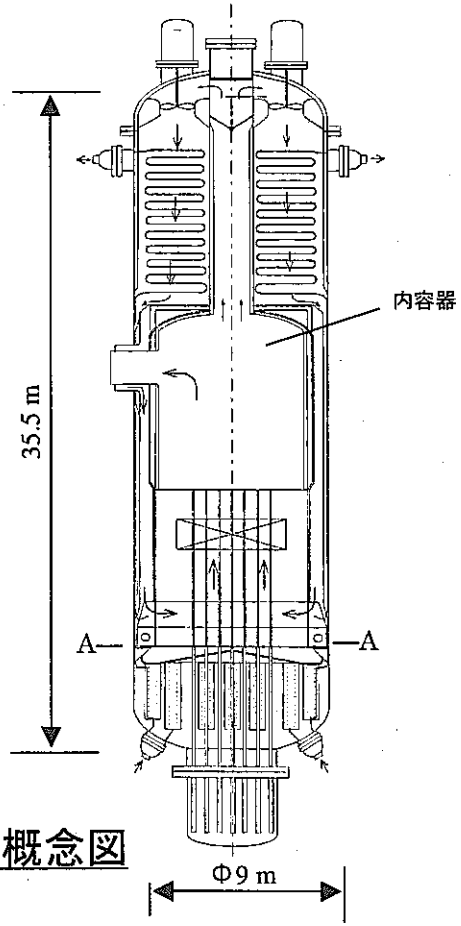
今後の課題

- 高速中性子下で耐えられ、炉心性能を確保可能な被覆粒子材料の開発
- 被覆粒子燃料集合体（セラミック複合材料）の構造健全性の確認
- ガスタービンユニットを収納する大型鋼製格納容器の製作性および大型の縦型ガスタービンの軸受、熱交換器の製作性の確認。

耐熱被覆管燃料ヘリウム冷却ガス炉の検討結果



系統概念図



原子炉概念図

第1期成果

・建設コストは、現状では目標を達成していない。（目標値の約115%、NSSS物量　61 t/万kWe）

・減圧事故時、流量制限機構と補助炉心冷却系による強制循環冷却により、また、全電源喪失事故時は、自然循環冷却により燃料被覆管温度を制限値温度以下とできる見通しである。

今後の課題

・炉心損傷時の影響を炉容器内で終息させるために鋼製炉容器の下部に設置したコアキャッチャーの成立性確認

・ガスタービンユニットを収納する大型鋼製格納容器の製作性および大型の縦型ガスタービンの軸受、熱交換器の製作性の確認。

・炉心性能を向上し得る耐熱被覆管材料の開発

水冷却炉の検討の流れ

主な特徴　(Naとの比較)

・開発費が少ない。
　軽水炉　　－－　炉心稠密化による増殖比の向上
　超臨界炉　　－－　高効率
・増殖比の限界
　－－　稠密炉心と冷却特性及び安全性
・再臨界発生の可能性
・超臨界水　　－－　燃料、構造材の腐食問題

経験（調査対象）	・高転換比BWR ・長期サイクルBWR ・高転換比PWR
アイディア募集	・超臨界圧軽水冷却高速増殖炉

評価のポイント：
増殖比 (BR) ＞1　(良好な中性子経済性)
熱水力的観点からの成立性
再臨界発生の有無

BWR型FBR

プラントコンセプト：
水の減速効果を低減させるために
ボイド量を利用
検討項目：
・炉心性能と設計基準事象成立性
・再臨界発生の有無の検討

核断面積の不確かさが増殖特性におよぼす影響の評価
設計基準事象成立性の評価

PWR型FBR（重水）

プラントコンセプト：
単相流のため軽水の代わりに重水を使用
検討項目：
・炉心性能と設計基準事象成立性
・再臨界発生の有無の検討
・重水利用のプラントシステムへの影響の検討

設計基準事象成立性の評価

超臨界圧水冷却高速増殖炉 SCFBR

プラントコンセプト：
超臨界圧蒸気による減速材としての
水密度の低減化
検討項目：
・炉心性能：大出力化、高増殖化

経済性向上に効果のある大出力化の評価

下記の事項について検討を実施
・炉心損傷事故時の安全性
・熱水力的観点からの成立性
・既存軽水炉システムに対する変更点
・MAあるいはFPの混入した低除染燃料の使用が炉心性能に与える影響

下記の事項について検討を実施
・炉心損傷事故時の安全性
・既存軽水炉システムとの相違点
・高増殖炉心及び低除染燃料の使用
時の影響検討

開発目標に対する達成の見通し

水冷却炉に対する評価

BWR型FBR(高転換比BWR型炉)の検討結果

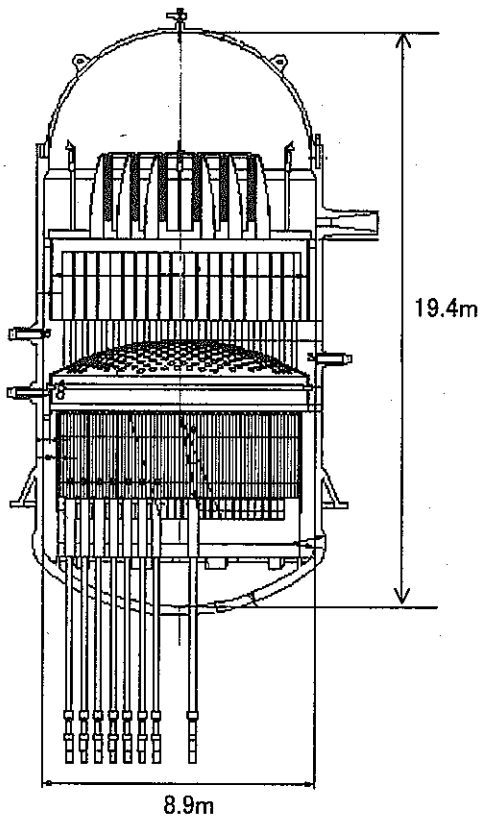
主要プラント仕様
- 電気出力　1,356MWe
- 熱出力　3,926MWt
- プラント熱効率　約35%

第1期成果

- ABWRをベースに炉心の稠密化、高ボイド率化により燃料体積比を高め、増殖性確保を図った。寿命期間中に負のボイド反応度係数を達成できる設計とするため扁平な炉心とすること等により炉心圧損が小さく、自然循環による炉心流量が確保可能となり、ABWRの再循環ポンプが削除可能。
- 経済性については、再循環系の削除、格納容器容積低減等により、ABWRと同等あるいはやや優れるものと考える。
- 炉心燃料としては、扁平な軸方向非均質炉心を構成し、高除染燃料炉心でのPu残存比は1.05程度、複利システム倍増時間は190年程度を達成できる見通しである。

今後の課題

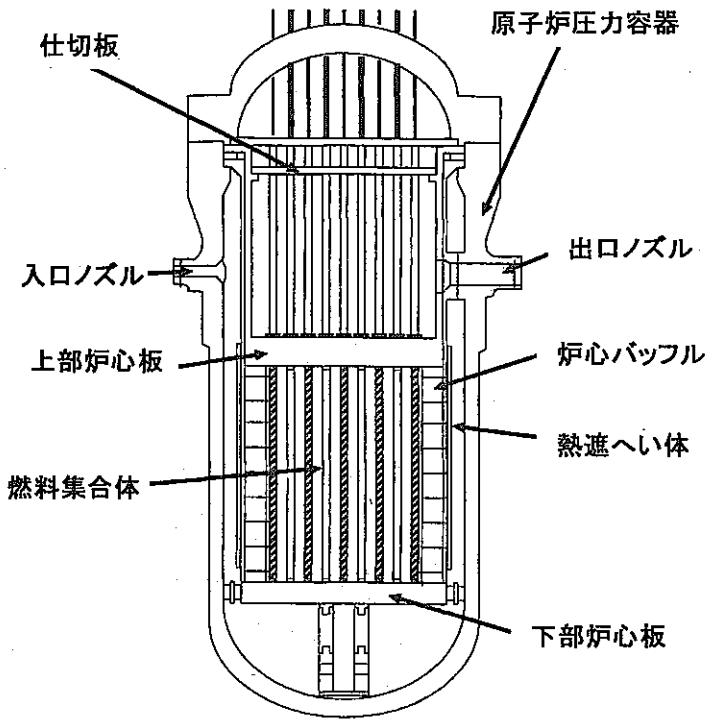
- 稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認及び炉心損傷時の安全特性の把握とともに、安全確保を前提にした低除染TRU燃料の燃焼能力、増殖比の向上と倍増時間の短縮可能性等の検討が重要。



BWR型FBR

超臨界圧水冷却高速増殖炉の検討結果

主要プラント仕様	
・電気出力	1,698MWe
・熱出力	3,832MWt
・プラント熱効率	約44.3%

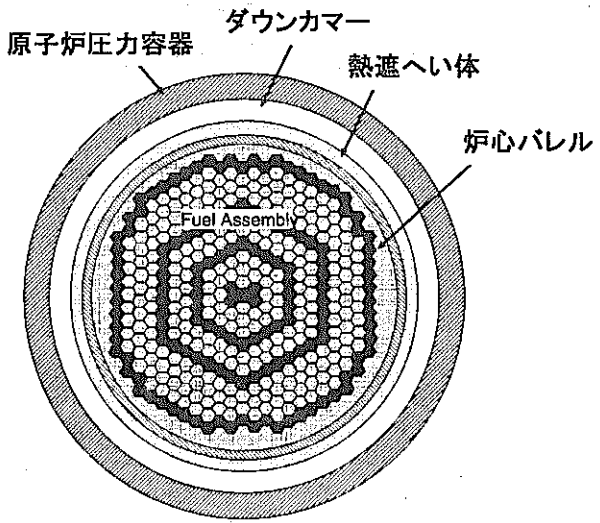


第1期成果

・ABWRをベースに炉心を稠密化するとともに、冷却材密度の小さい超臨界圧水(25MPa程度)を用い、増殖性の確保と高熱効率を図った。

・経済性については、貫流型直接サイクルの適用による設備簡素化およびコンパクト化が可能であり、高い熱効率の達成により、既存軽水炉に比べ同等以上の経済性が期待できると考えられる。

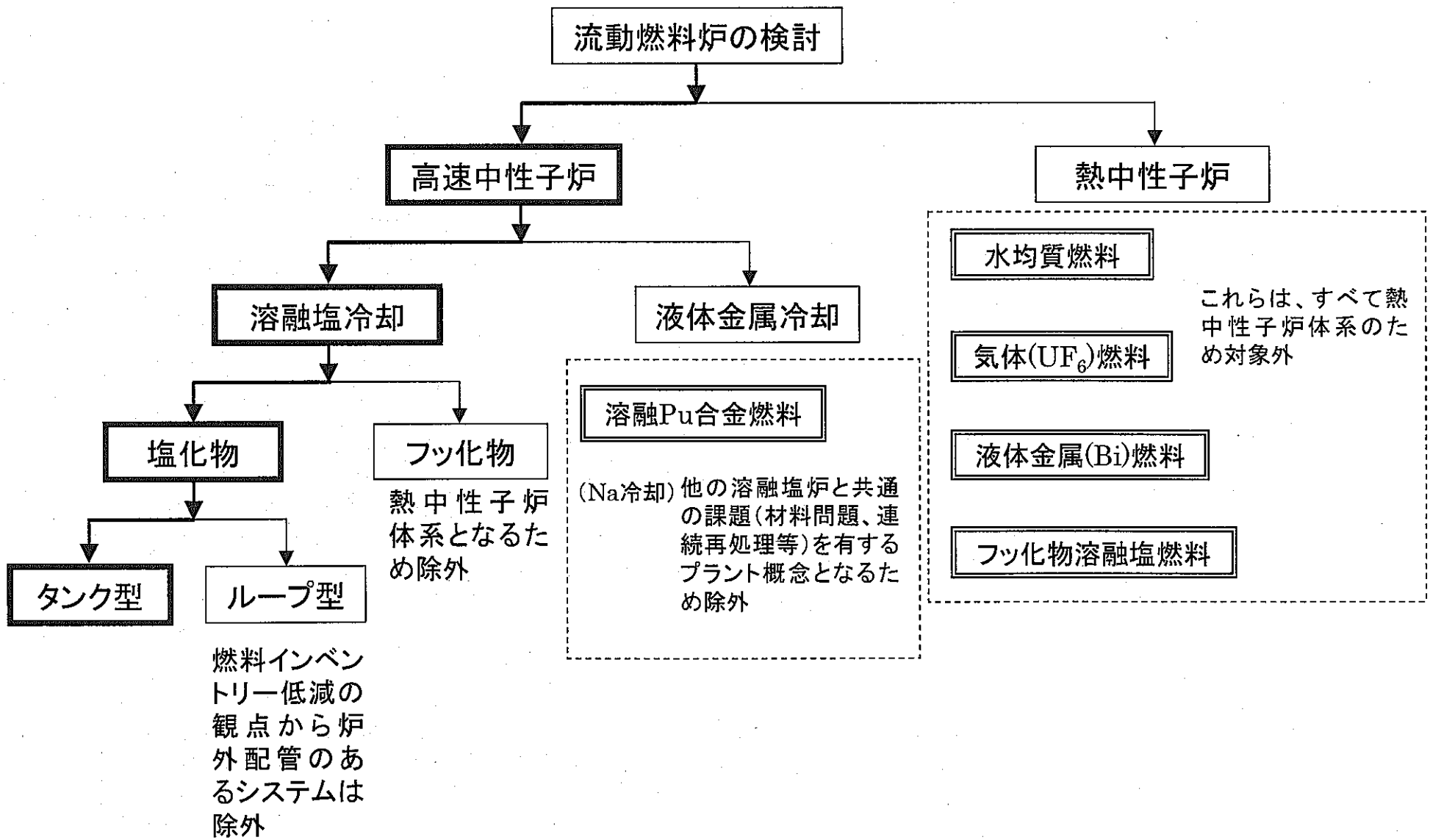
・炉心は、３領域(内・中・外)の炉心と各領域間にブランケット燃料を装荷した径方向非均質炉心である。高除染燃料炉心でのPu残存比は1.03程度、複利システム倍増時間は、約100年程度となる見通しである。



今後の課題

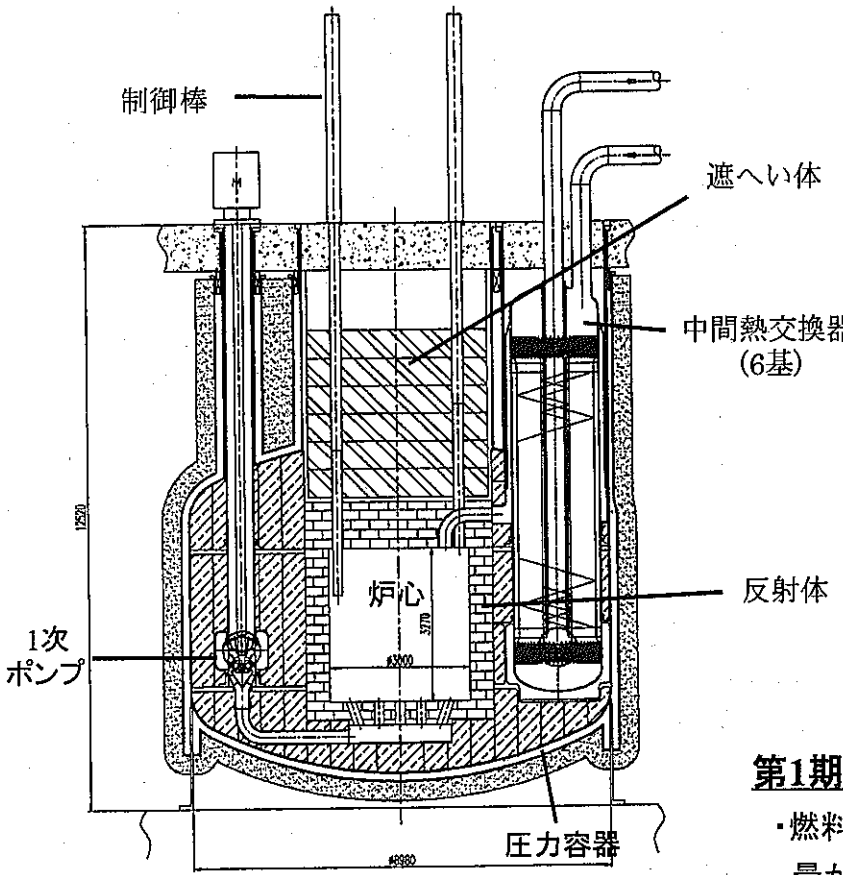
・稠密炉心における熱水力特性、機械的的特性の確認、超臨界圧水条件下で耐食性を有する燃料被覆管の材料開発、事故時の炉心冷却性の確認、並びに炉心損傷時の事象推移と溶融燃料移行挙動を含む再臨界性および再臨界時の格納機能に関する検討が重要。

溶融塩炉の検討の流れ

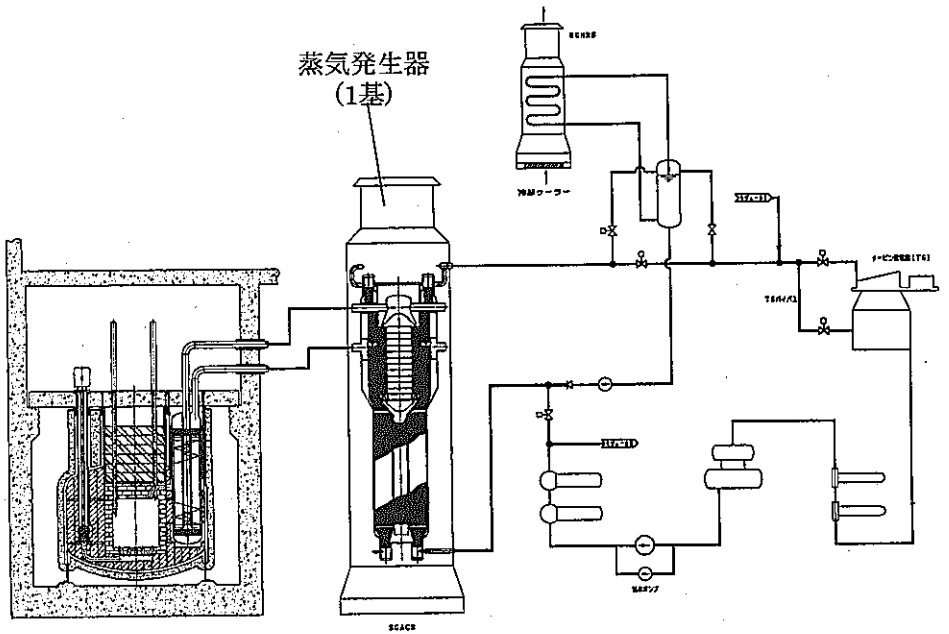

流動燃料炉の検討
高速中性子炉
熱中性子炉
溶融塩冷却
液体金属冷却
水均質燃料
気体(UF_6)燃料
液体金属(Bi)燃料
フッ化物溶融塩燃料
これらは、すべて熱中性子炉体系のため対象外
塩化物
フッ化物
熱中性子炉体系となるため除外
溶融Pu合金燃料
(Na冷却) 他の溶融塩炉と共通の課題(材料問題、連続再処理等)を有するプラント概念となるため除外
タンク型
ループ型
燃料インベントリー低減の観点から炉外配管のあるシステムは除外

塩化物溶融塩炉検討結果

主要プラント仕様
- 電気出力　420MWe　・熱出力　1,000MWt　・燃料種類　三塩化物（$10NaCl\text{-}20UCl_3\text{-}2.5PuCl_3$）
- 出力密度：40W/cc　・運転期間：40年連続運転　・燃焼度：約5万MWd/t
- 増殖費：1.03（ブランケットなしの場合）　・プラント熱効率　約42%



塩化物溶融塩炉原子炉概念



塩化物溶融塩プラント基本系統図

第1期成果

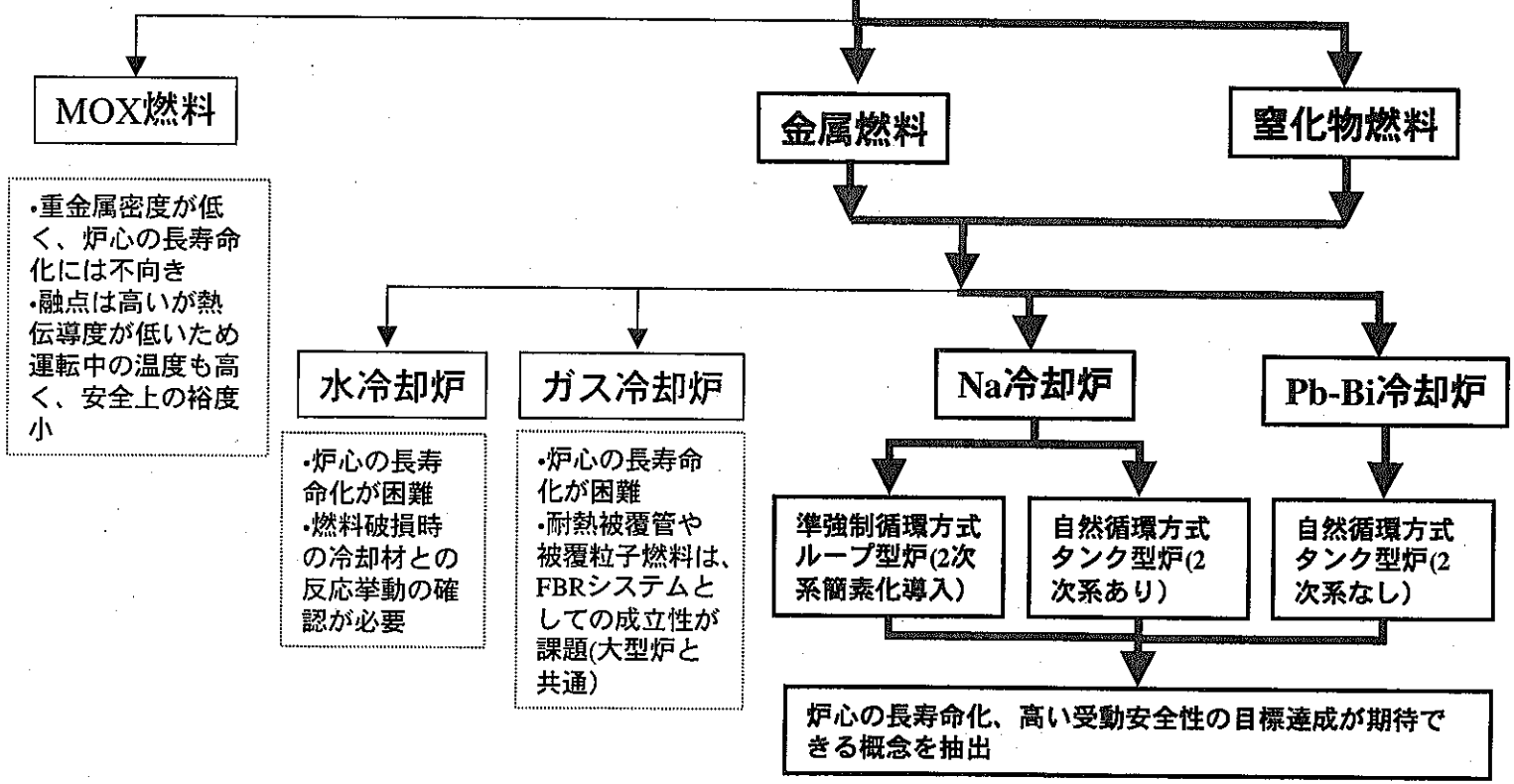
- 燃料成型加工、燃料交換、輸送が不要なため燃料費が低減できるが、原子炉物量が大きく（ナトリウム冷却炉の約4倍）に達する見込み。
- 2次系冷却材に鉛系冷却材を選定しているが、中間熱交換器伝熱管は溶融塩と鉛の厳しい環境条件下であり、双方と共存性のある材料は見出せない。
- 増殖比は、1.0程度でさらに上げる場合には、燃料インベントリーが増大し、システム倍増時間が長期化する。

小型炉概念の検討の流れ

JNC

設計の基本的考え方

- ○安全性：高い受動安全性の確保
- ○炉心寿命：目標30年（最低10年）
- ○経済性：他電源と競合可能であること
- ○資源有効性：炉心の長寿命化を優先（高増殖は期待しない）
- ○環境負荷低減：高い燃焼度及び低頻度の燃料交換により廃棄物量の低減を目指す
- ○核不拡散性：炉心の長寿命化による封入炉

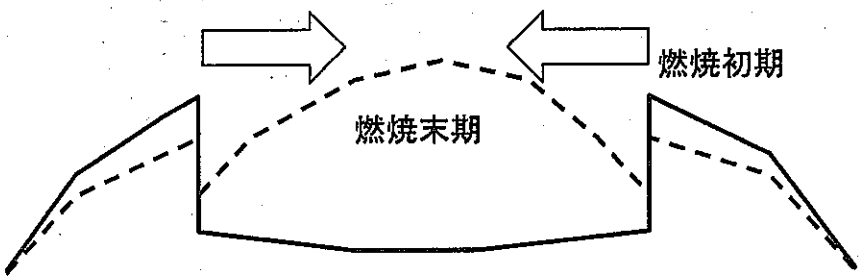


小型炉の炉心特性

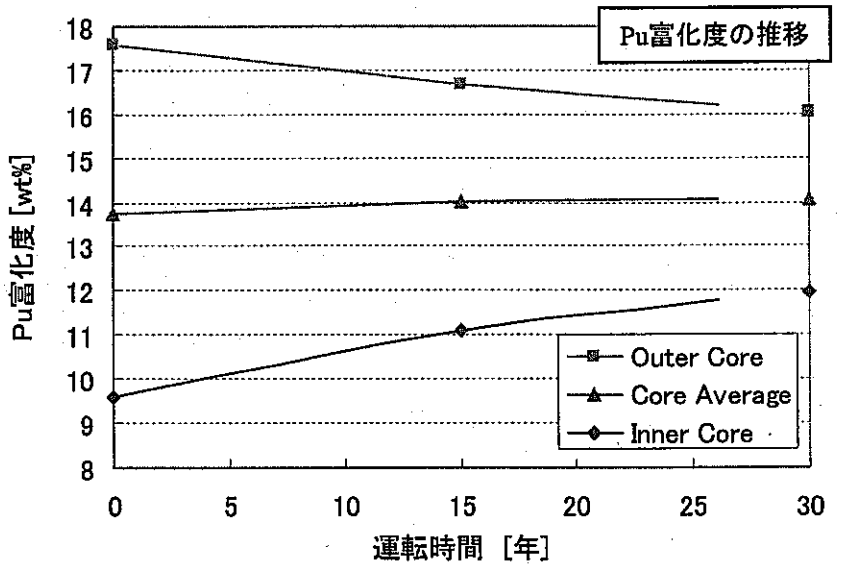
「高富化度差二領域炉心」の特徴

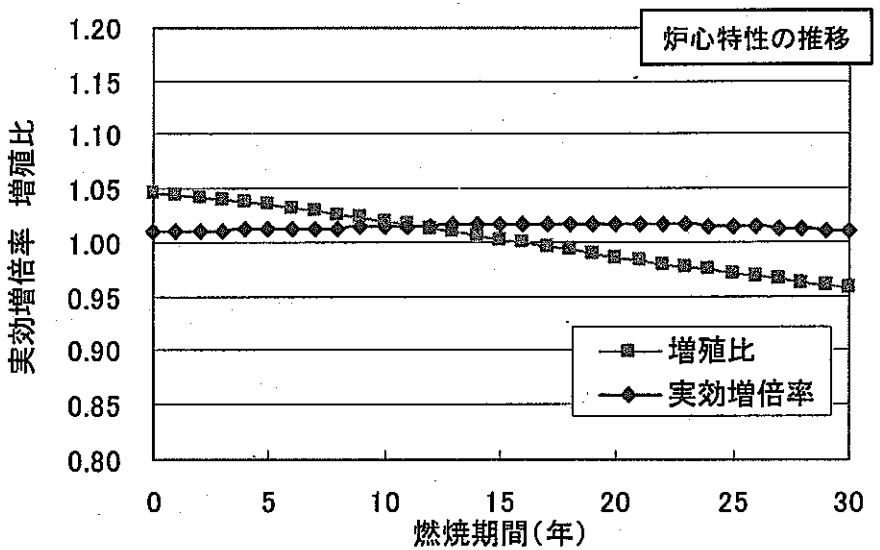
○ 内側炉心、外側炉心のPu富化度が異なる炉

→ 燃焼に伴って外側炉心から内側炉心へ出力分布が自然に移動し、燃焼反応度を小さく抑える

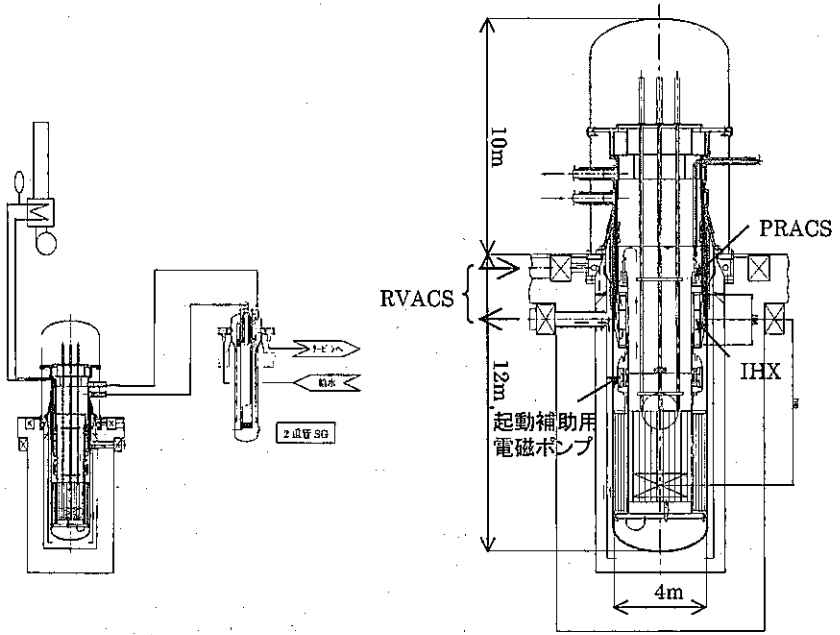


高富化度差二領域炉心の出力分布変化
（炉周辺から中央へ）

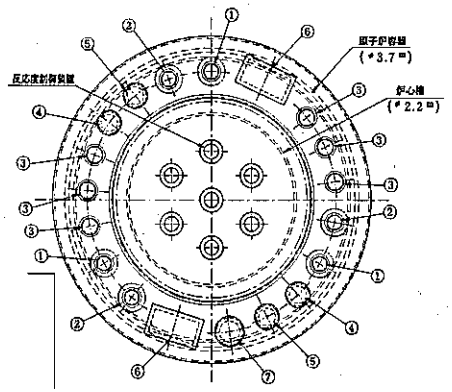




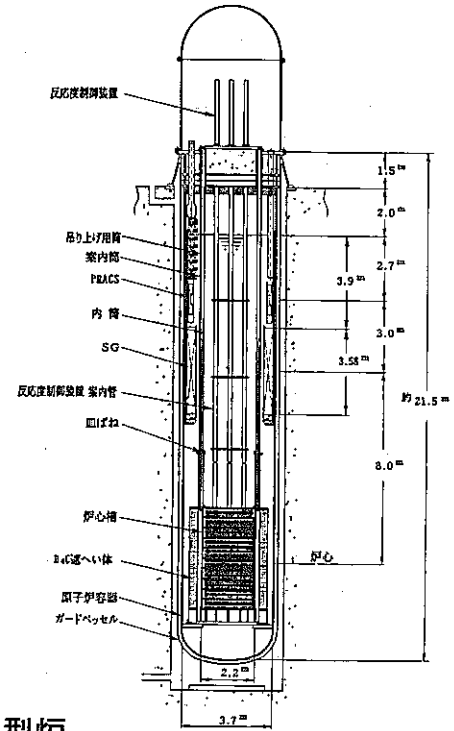
小型炉の検討結果



小型ナトリウム冷却自然循環タンク型炉



原子炉構造(平面図)



原子炉構造(立面図)

小型鉛ビスマス冷却自然循環タンク型炉

第1期成果

・小型炉の単位出力あたりの物量は、大型炉に比べ数倍程度多くなる。
（小型ナトリウム冷却自然循環タンク型炉：約80t/万kWe、小型鉛ビスマス冷却自然循環タンク型炉：約77t/万kWe）

・スクラム失敗を想定した反応度挿入型事象に対しても、炉の負の反応度フィードバックにより高温静定が可能な見通しである。
また、全交流電源喪失時にも、自然循環による崩壊熱除去能力がある。

・構造健全性については、特に問題はない見通しである。ただし、鉛ビスマス冷却炉については、中型炉同様の腐食に対する対応が必要である。

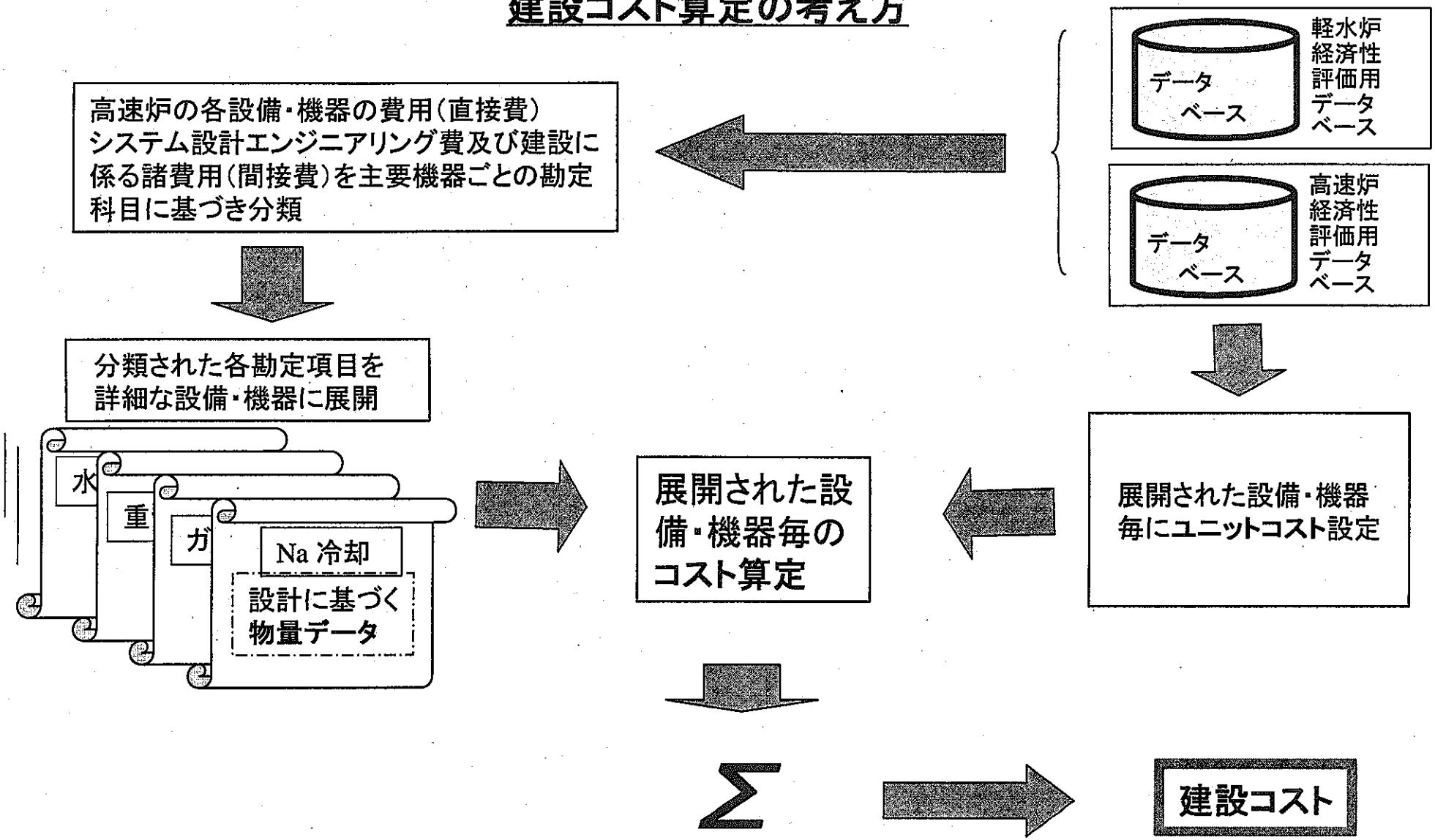
今後の課題

・小型炉においても、経済性向上のため、さらなる物量削減の追求が必要である。

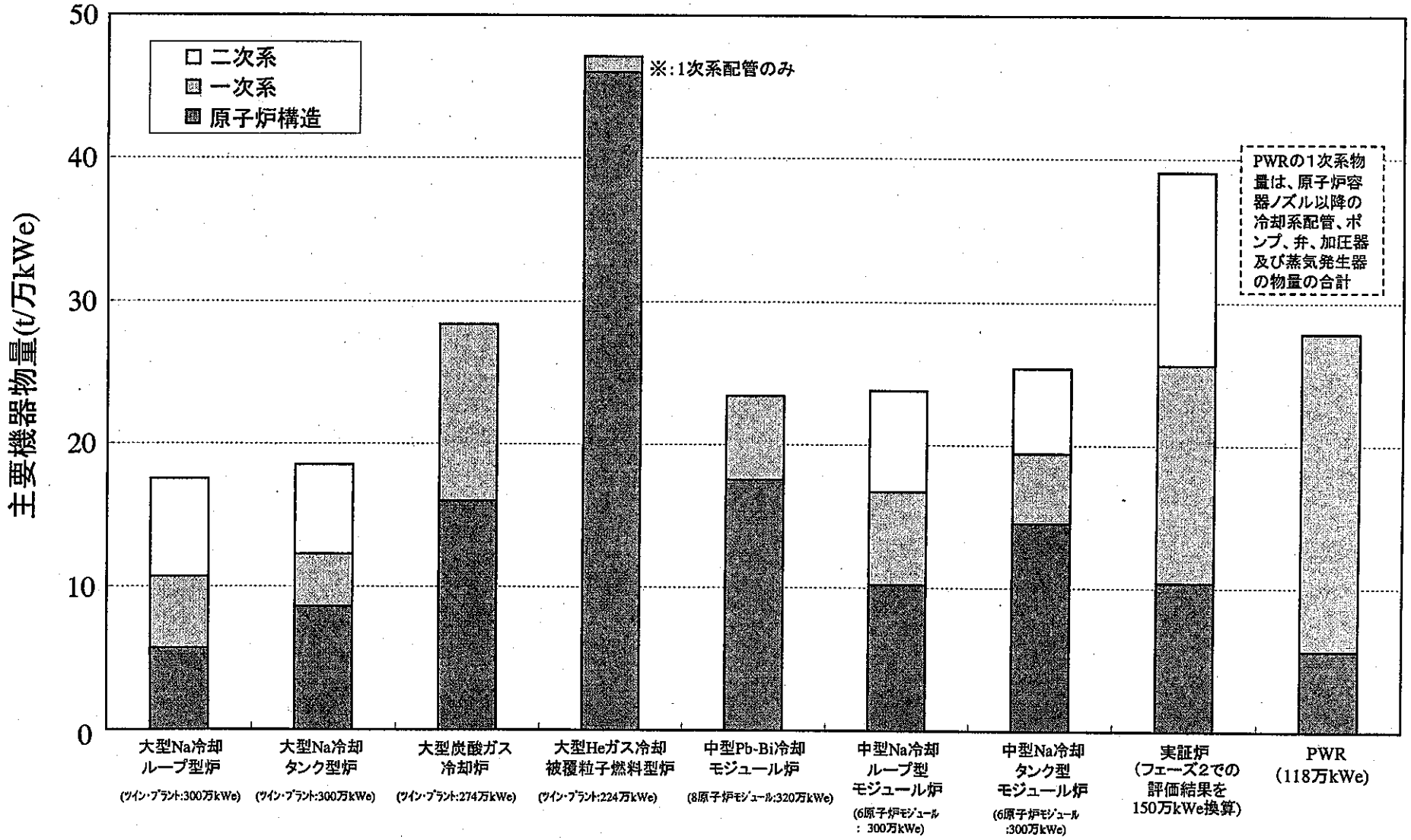
・長寿命炉心の達成や受動的な機能による安全確保の小型炉としての特徴を活かす範囲でスケール効果を見込んだ出力の最適化が必要である。

・自然循環炉を基軸に、準強制循環方式の適用も併せて検討する。

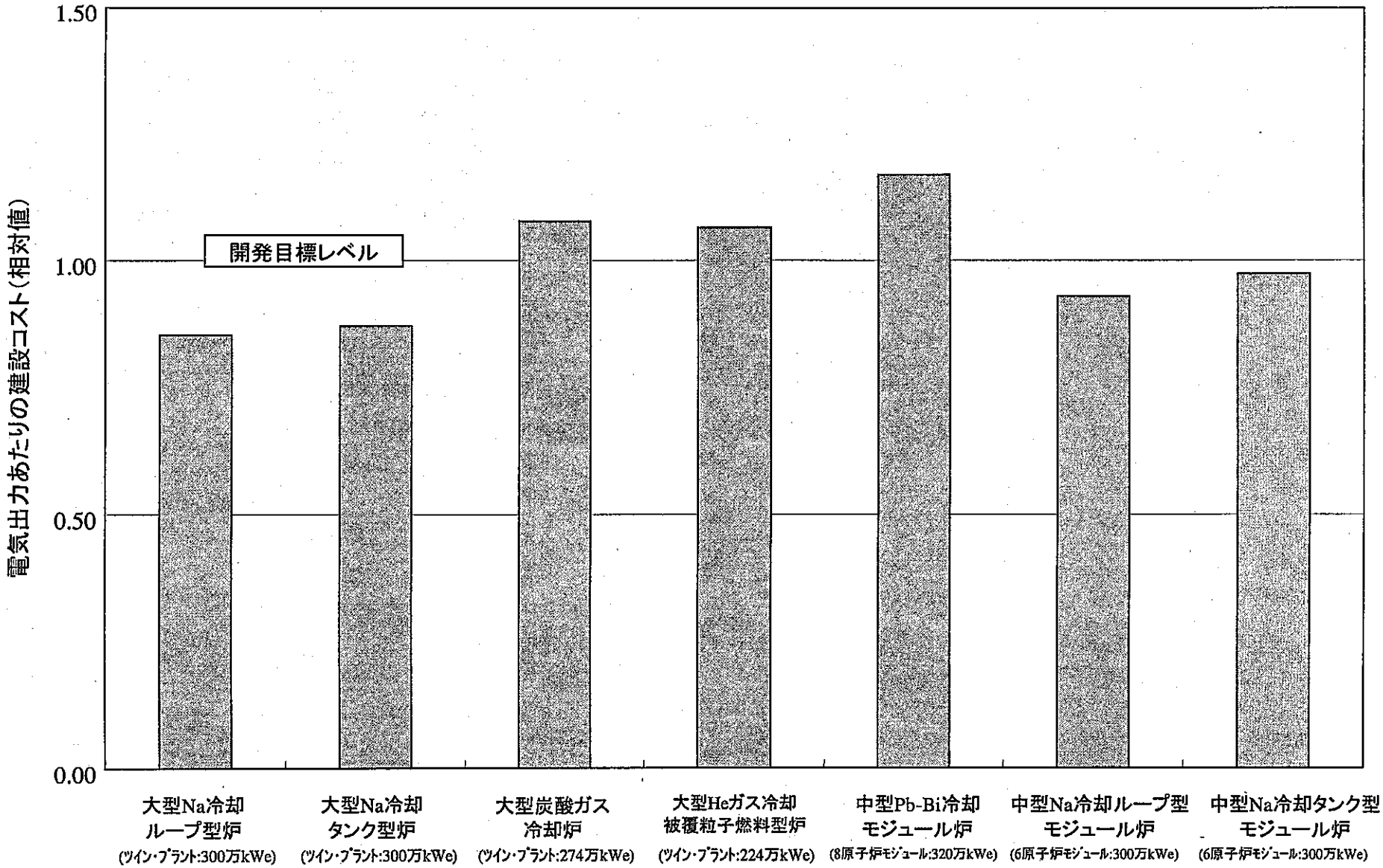
建設コスト算定の考え方



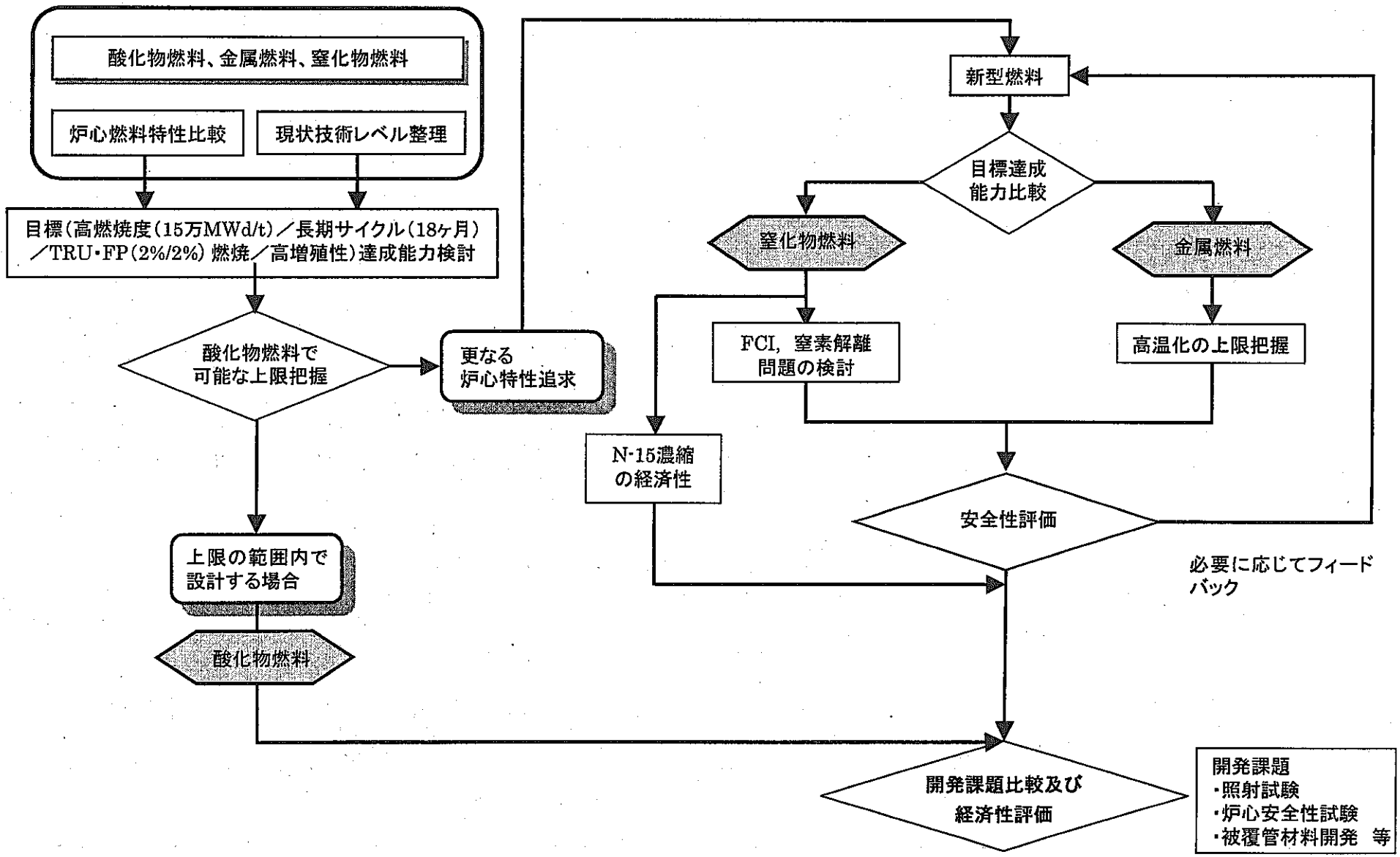
各炉概念における主要物量の比較



各炉概念における概略建設コストの比較



各炉型における炉心燃料の検討の流れ



ナトリウム冷却炉の炉心燃料評価結果

	酸化物燃料	金属燃料	窒化物燃料
安全性	・炉心損傷事故に対して，ボイド反応度を抑えることとし、溶融燃料排出機構を採用し、再臨界を防止する。	同　左	・ナトリウムとの激しい燃料－冷却材相互作用、熱解離窒素による圧力上昇より、ナトリウムには不適である。
経済性	・炉心取出平均燃焼度：15万MWd/t ・運転サイクル：約18ヶ月 ・原子炉出口温度：550℃ （熱効率　約42%）	同　左 ・被覆管との共晶制限により、原子炉出口温度530℃以下（熱効率　約38%）	・酸化物燃料と同じ
資源有効性	・増殖比；1.1～1.2 ・複利システム倍増時間；30～40年 ・低除染TRU燃料の受入可能	・増殖比；1.2～1.3 ・複利システム倍増時間；30年未満 ・同　左	・金属燃料と同じ
環境負荷低減性	・LLFPターゲットの装荷により可能	同　左	同　左
核不拡散性	・炉心燃料には低除染燃料を使用し、径ブランケット燃料取り出し時には燃焼に伴なう放射化によりアクセス困難	同　左	同　左
開発課題	・溶融燃料排出機構の有効性の確認 ・高燃焼度ODS鋼の開発 ・径非均質炉心の場合には、被覆管最高温度の低減対策が必要	同　左 ・被覆管との共晶制限により原子炉出口温度の向上	同　左 ・燃料－冷却材相互作用、熱解離窒素挙動の確認 ・N-15濃縮法の開発
評価	目標達成能力は新型燃料に及ばないが、開発課題が少ないことから新型燃料の実用化が見通せるまでは最有力	開発課題解決の見通しが立てば目標達成度の観点で最も有望	目標達成能力は有するが、熱解離窒素等安全性および開発課題（照射実績、N-15濃縮等）の点で困難

中型鉛ビスマス冷却モジュール炉(自然循環型)の炉心燃料評価結果

JNC

	酸化物燃料	金属燃料	窒化物燃料
安全性	自然循環炉のため、冷却材流路面積が広く、設計基準を超えた多重故障条件に対しても、炉心温度が緩慢で受動的な炉停止機能と併せて炉心損傷の防止能力が向上。	同　左 燃料融点が低いため、UTOP時の成立性が窒化物燃料炉心よりも厳しくなる可能性有り。	同　左
経済性	炉心取出平均燃焼度15万MWd/tとする場合は、増殖比1.03程度	窒化物燃料と同じ。	炉心平均燃焼度:約15万MWd/t 運転サイクル:約19ヶ月 炉心出口温度:492℃(熱効率 38%)
資源有効性	増殖比:1.03 複利システム倍増時間:約400年	窒化物燃料と同じ。	増殖比:1.2 複利システム倍増時間:約65年 低除染TRU燃料の燃焼可能
環境負荷低減性	LLFPターゲットを径ブランケット領域へ装荷した場合、増殖性を確保できない可能性がある。	窒化物燃料と同じ。	LLFPターゲットの炉心外周部への装荷により可能な見通し。
核不拡散性	炉心燃料には低除染燃料を使用し、径ブランケット燃料取り出しには燃焼による放射化によりアクセス困難。	同　左	同　左
開発課題	・自然循環時の流量分布、除熱特性、及び運転制御性の確認 ・自然循環冷却下での安全シナリオの評価・確認 ・耐腐食性を有した被覆管材の開発(強制循環による炉心性能向上も含む。)	同　左	同　左 ・N-15濃縮技術開発、FCI及び熱解離挙動の確認
評価	経済性、資源有効利用性において目標達成が困難	目標をほぼ達成可能な見通し。 UTOP時の成立性見通しが得られれば有力	目標をほぼ達成可能な見通し。 開発課題は多いが最有力候補

大型炭酸ガス冷却炉の炉心燃料評価結果

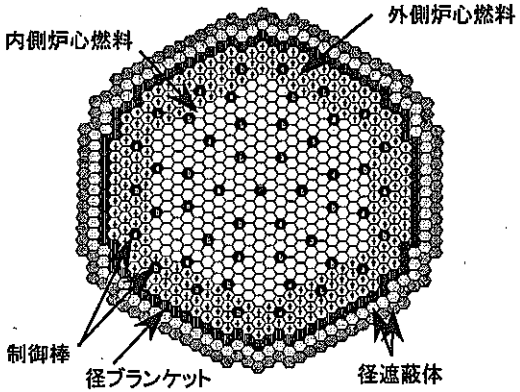
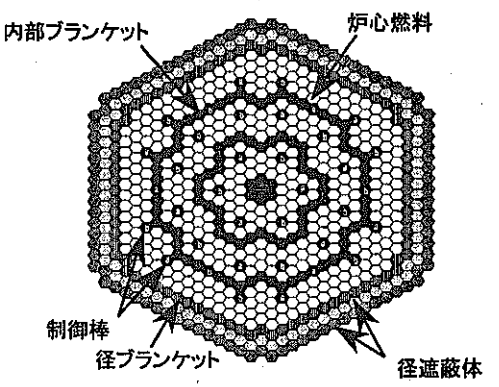
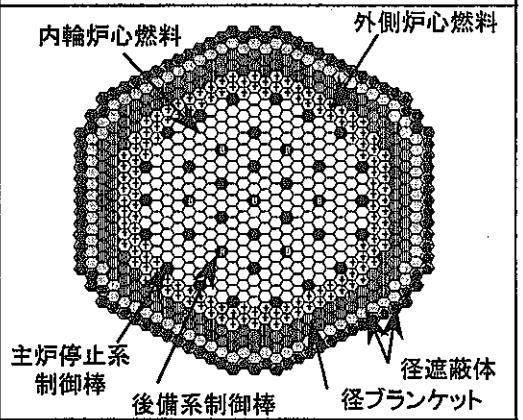
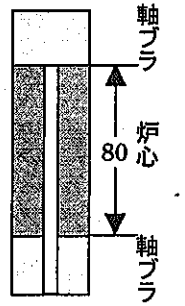
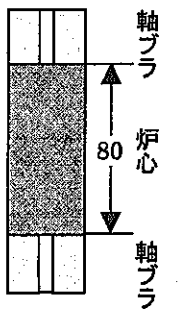
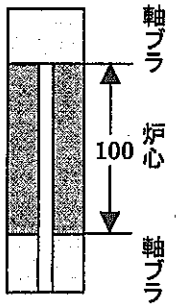
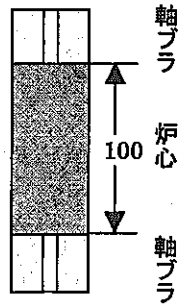
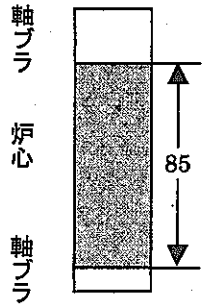
	酸化物燃料	金属燃料	窒化物燃料
安全性	・減圧事故に対し、漏洩流出制限機構により、反応度投入率を抑え、即発臨界を防止。 ・仮想的な炉心損傷時は、大きいピン間ギャップ,下部軸ブランケット一部削除による溶融燃料排出。	金属燃料と被覆管の共晶制限である被覆管上限温度(約670℃)を有意に超えるため適合性に乏しい。 (被覆管最高温度: 730℃)	酸化物燃料と同じ FCI発生の可能性は無く、窒素解離が発生したとしても自由空間が大きいため問題ない。
経済性	炉心平均燃焼度:約16万MWd/t 運転サイクル:約24ヶ月 炉心出口温度:530℃(熱効率 約38%)		炉心平均燃焼度:約16万MWd/t 運転サイクル:約34ヶ月 炉心出口温度:530℃(熱効率 約38%)
資源有効性	増殖比:1.20 複利システム倍増時間:約57年 低除染TRU燃料の受入可能		増殖比:1.38 複利システム倍増時間:約23年 低除染TRU燃料の受入可能
環境負荷低減性	LLFPターゲットの装荷により可能。		LLFPターゲットの装荷により可能。
核不拡散性	炉心燃料には低除染燃料を使用し、径ブランケット燃料取り出しには燃焼による放射化によりアクセス困難。		酸化物燃料と同じ
開発課題	・溶融燃料排出挙動の確認、 溶融燃料の長期安定冷却能力を持つコアキャッチャーの評価 ・炉心設計を最適化し、被覆管最高温度の低減化を図る。		酸化物燃料と同じ ・N-15濃縮技術開発、熱解離挙動の確認
評価	目標達成能力は窒化物燃料に及ばないが、開発課題が少ないことから窒化物燃料の実用化が見通せるまでは有力	上記の理由により検討対象外	目標達成能力の観点からも最も有力

大型ヘリウムガス冷却被覆粒子燃料型炉の炉心燃料評価結果

JNC

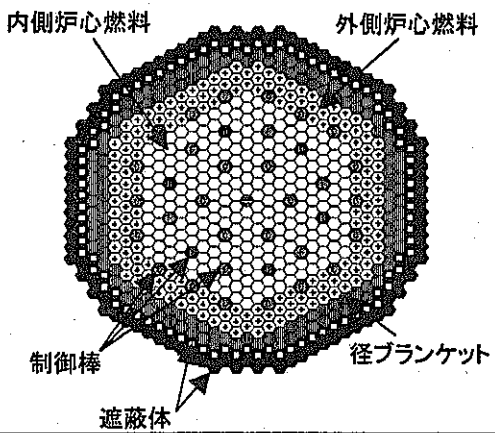
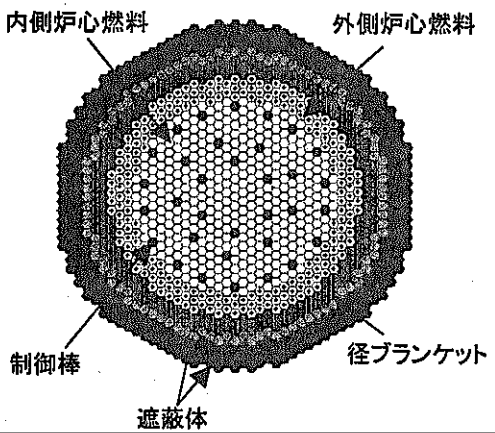
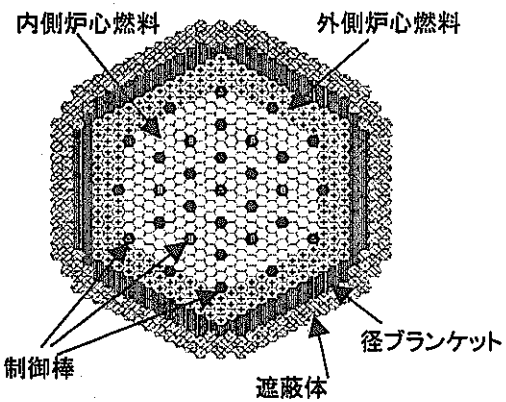
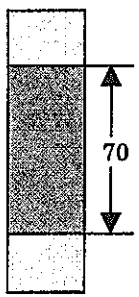
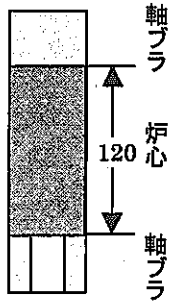
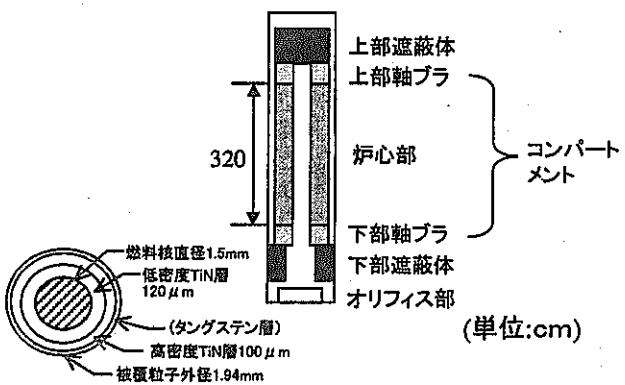
	酸化物燃料	金属燃料	窒化物燃料
安全性	・「減圧事故＋スクラム失敗＋自然循環除熱」に対し、負のドップラー反応度、被覆粒子の熱容量と相まって受動的炉停止機構により大規模な炉心溶融の発生可能性を大幅に低減できる。	金属燃料と被覆管の共晶制限である被覆管上限温度（約670℃）を超えるため適合性に乏しい。 （被覆管最高温度：1,000℃）	・事故時の炉心溶融発生の可能性低減は、酸化物と同様
経済性	炉心平均燃焼度：約10万MWd/t 炉心出口温度：850℃(熱効率 約47%)		炉心平均燃焼度：約10万MWd/t 運転サイクル：約19ヶ月 炉心出口温度：850℃(熱効率 約47%)
資源有効性	窒化物と同一の燃料体積比では、増殖性の確保は不可能。		増殖比：1.09 複利システム倍増時間：約116年 低除染TRU燃料の受入可能
環境負荷低減性	LLFPターゲットを径ブランケット領域へ装荷した場合、増殖性を確保することは困難。		LLFPターゲットの装荷により可能。
核不拡散性	炉心燃料には低除染燃料を使用し、径ブランケット燃料取り出しには燃焼による放射化によりアクセス困難。		酸化物燃料と同じ
開発課題	・炉心安全性の評価、確認 ・被覆粒子燃料材料開発 ・燃料集合体（セラミック複合材料）の構造成立性の検討		酸化物燃料と同じ ・N-15濃縮技術開発、熱解離挙動の確認
評価	増殖性の確保が不可能な見通しであることから、MOX燃料の採用は困難	上記の理由により検討対象外	多くの開発課題を有するものの、目標を達成可能

大型ナトリウム冷却炉心の検討結果（酸化物、金属燃料）

燃料形態	酸化物燃料				金属燃料
炉心構成	均質炉心		径方向非均質炉心		均質炉心
炉心平面図					
炉心断面図	 内部ダクト付き	 軸ブランケット 一部削除型	 内部ダクト付き	 軸ブランケット 一部削除型	 軸ブランケット 一部削除型
・炉心出力	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,570MWt	:1,500MWe/3,900MWt
・運転サイクル	:約18ヶ月	:約17ヶ月	:約17.5ヶ月	:約19ヶ月	:約19ヶ月
・炉心等価直径	:約5.1m	:約4.8m	:約4.9m	:約4.9m	:約4.4m
・増殖比	:1.13	:1.17	:1.22	:1.24	:1.29
・複利システム倍増時間	:56年	:41年	:36年	:33年	:17年
・ボイド反応度	:5.8$	:5.7$	:4.6$	:5.0$	:8.7$

鉛ビスマス、炭酸ガス、ヘリウムガス冷却炉心の検討結果

JNC

炉型	中型鉛ビスマス冷却 自然循環炉心	大型炭酸ガス冷却炉	大型ヘリウムガス冷却 被覆粒子燃料型炉心
燃料形態	窒化物燃料	酸化物燃料	窒化物燃料
炉心 平面図			
炉心 断面図	 (単位:cm)	 軸ブランケット 一部削除型 (単位:cm)	 (単位:cm)
・炉心出力	:400MWe / 1053MWt	:1,369MWe / 3,600MWt	:1,124MWe / 2,400MWt
・運転サイクル	:19ヶ月	:24ヶ月	:19ヶ月
・炉心等価直径	:約4.9m	:約5.9m	:5.62m
・増殖比	:1.19	:1.2　(窒化物:1.38)	:1.09
・複利システム倍増時間	:65年	:約57年 (窒化物:約23年)	:116年
・ボイド反応度	:6.5$	:約1.2$	:2.5$ (ヘリウム減圧反応度)

燃料サイクルシステムの検討の対象と視点

FBR燃料サイクルシステムの検討対象

		酸化物	窒化物	金属	検討のポイント
再処理	湿　式	○	○		・工程の簡素化 ・TRU回収率の向上 ・液体廃棄物発生量の低減 ・Pu非分離回収
	乾　式	○	○	○	・TRU回収率の向上 ・塩廃棄物処理 ・バッチ処理に伴う核物質移送技術 ・計量管理手法の確立
燃料製造	ペレット	○	○		・工程の簡素化 ・低除染燃料への適用 ・遠隔自動化
	振動充填	○	○		・造粒工程の合理化 ・Pu富化度、充填密度等の品質管理 ・廃棄物量低減
	鋳　造			○	・鋳型廃棄物量の低減 ・歩留まりの向上 ・溶解るつぼの寿命延長
	被覆粒子	○	○		・炉システム、再処理との整合性

(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(50tHM/年、200tHM/年)

- スケールメリットが期待できる湿式法では200tHM/年を中心に検討
- 系列化で対応する乾式法では50tHM/年を中心に検討

燃料サイクルシステムの検討評価の進め方

設計条件/前提条件整理

１次検討

- プロセス成立性の検討
- プロセス及び機器の設計
- 施設配置計画
  及びセル内配置計画
- 廃物物発生量の検討評価
- 建設費の評価　等

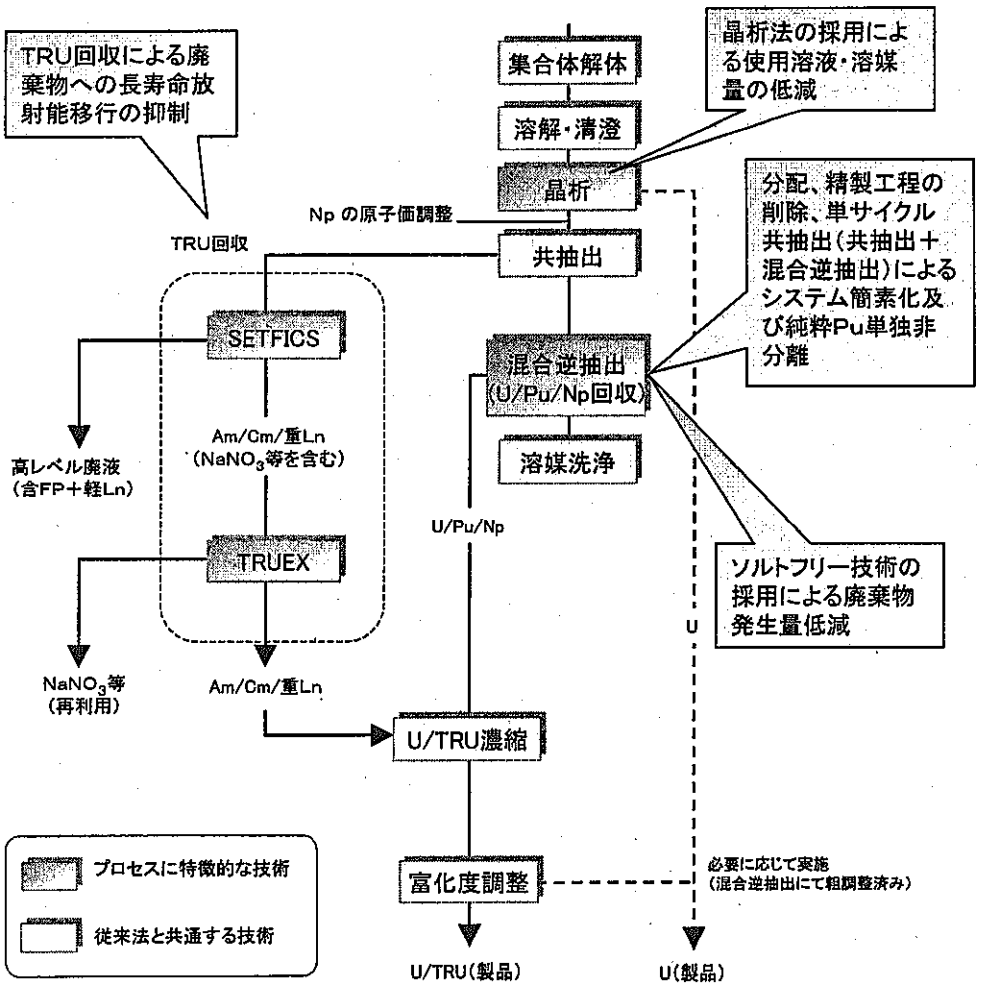
２次検討

- 開発課題の検討
- コスト低減方策のさらなる検討
- TRUリサイクルの適用性評価
- 各種燃料形態への適用性評価
- 燃料サイクル技術の最適組み合せ検討
- 第2期の開発計画の策定　等

総合的評価

先進湿式法(酸化物燃料)の概念検討結果の概要

先進湿式法のプロセスフロー及び特徴



第1期の成果と課題

成果

- 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し
- 実験室規模のホットデータから99%以上のTRU回収率確保を確認
- 先進湿式プロセス(簡素化溶媒抽出法、晶析、TRU回収)の技術的成立性を評価

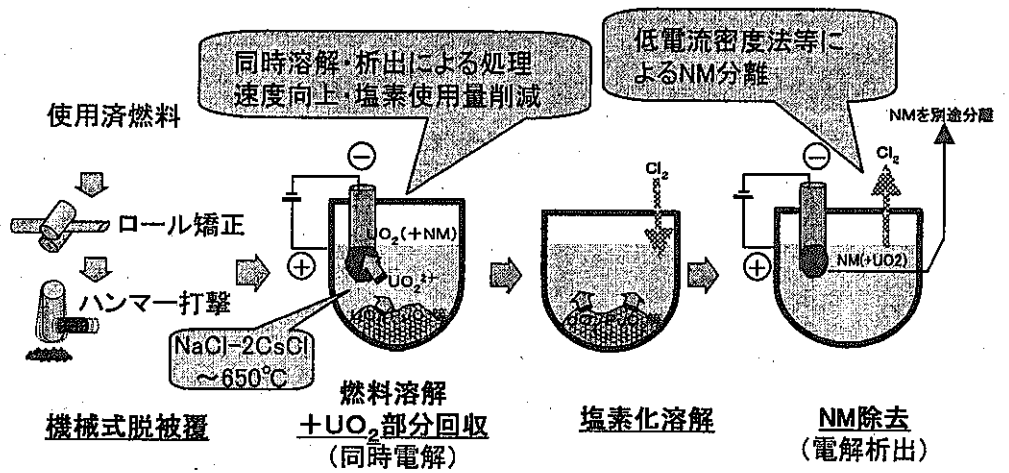
課題

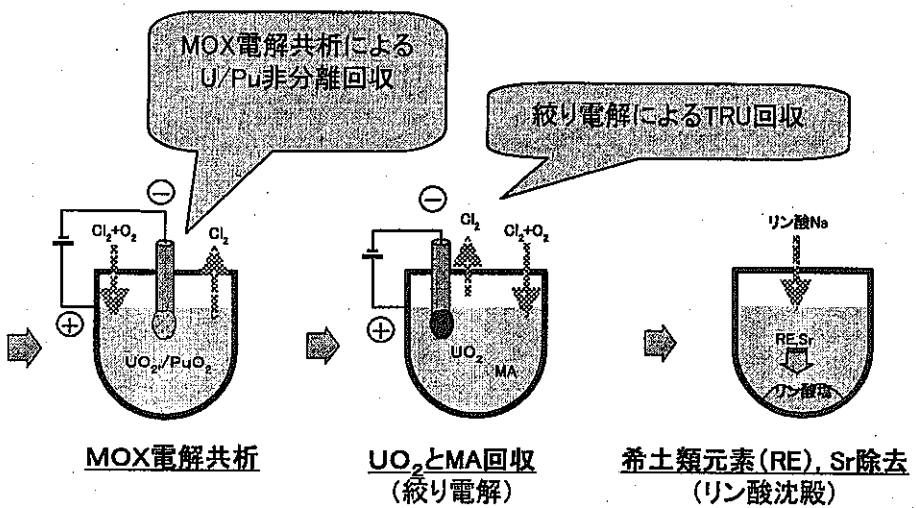
- プロセス上の課題に対するCPFホット基礎試験による確認とプロセスの最適化
- 代替・補完技術との組合せも含め、更なるコスト低減の追求と最小処理容量の評価

酸化物電解法(酸化物燃料)の概念検討結果の概要

JNC

酸化物電解法のプロセスフロー及び特徴





第1期の成果と課題

成果

- 200tHM/年プラントでは、経済性目標達成の見通し
- 50tHM/年プラントでは、経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出
- RIARでのホット試験データと電解の理論計算により、99%以上のTRU回収率を確保可能
- 主要機器は、実用化が見通せることを確認し、今後の改良・高度化に対応可能であると評価

課題

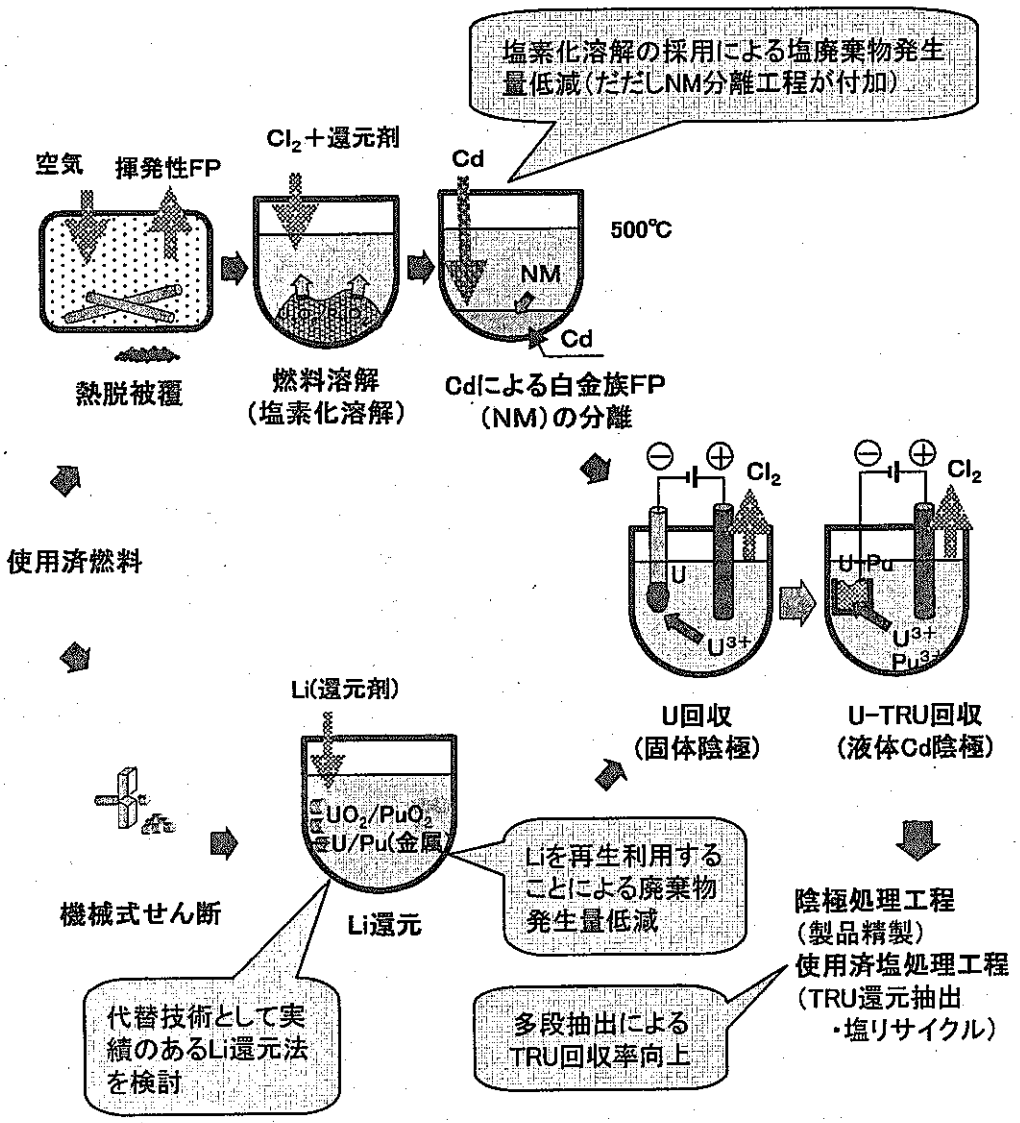
- MOX電解共析技術へのFP影響、絞り電解によるMA回収等の要素試験による確認が必要
- リン酸ガラス固化体、白金族合金廃棄体等の新形態HLW処分に向けた検討
- 溶解るつぼの更なる寿命延長

(乾式法共通課題)

- 摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- 高温・バッチ操作に伴う容器開放操作等に対するバウンダリ確保方策の検討

金属電解法(酸化物燃料の概念検討結果の概要

金属電解法のプロセスフロー及び特徴



第1期の成果と課題

成果

- 200tHM/年プラントでは、経済性目標達成の見通し
- 50tHM/年プラントでは、経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出
- ANLでのホット試験データと還元抽出工程の付加により99%以上のTRU回収率を確保可能
- 主要機器は、実用化が見通せることを確認し、今後の改良・高度化に対応可能であると評価

課題

- 要素試験による電解精製、陰極処理等の条件把握
- 塩浴塩素化法、Li還元法に対する要素試験による確認
- 溶解るつぼの更なる寿命延長
- 人工鉱物固化体等の新形態HLW処分に向けた検討

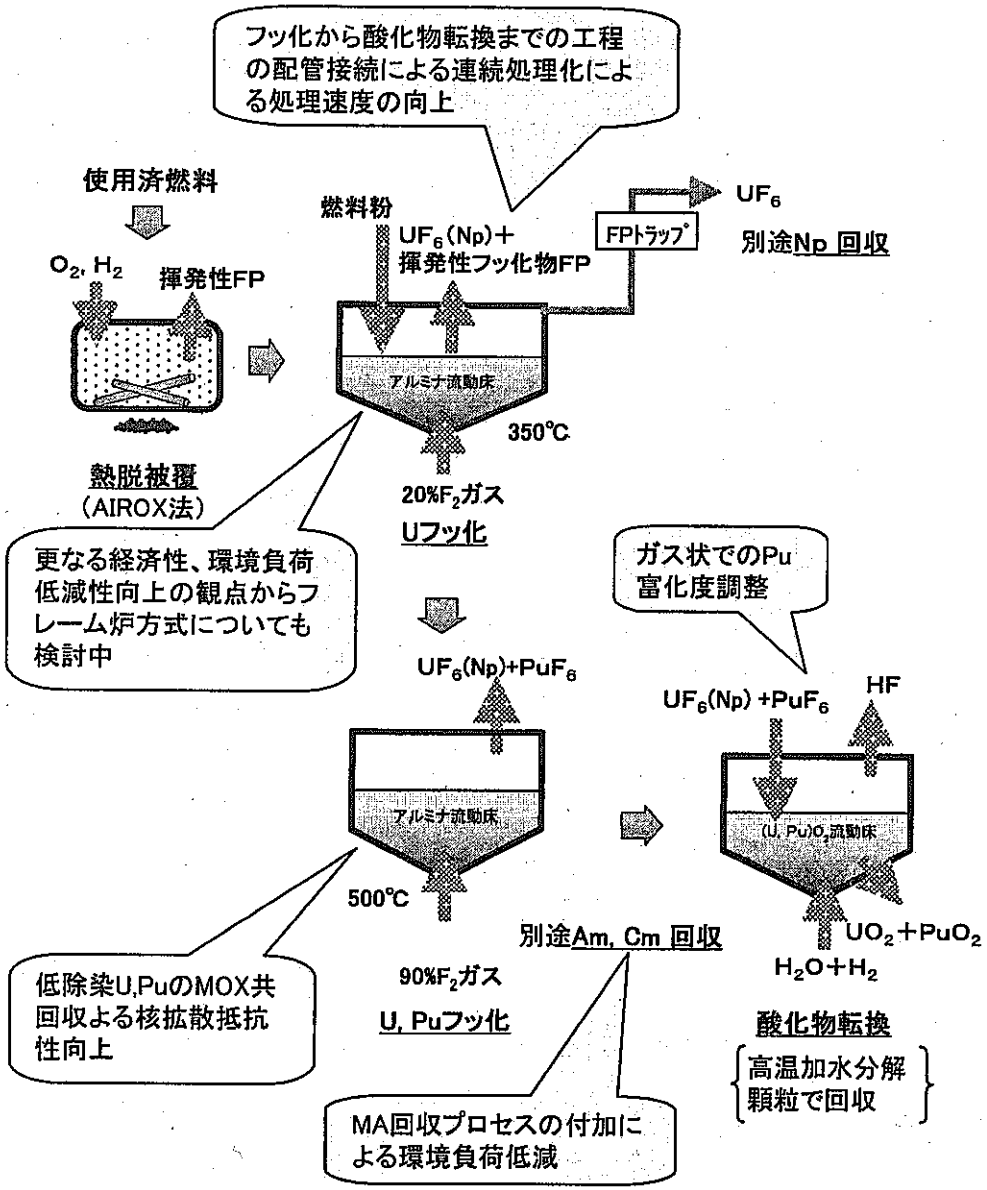
(乾式法共通課題)

- 摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- 高温・バッチ操作に伴う容器開放操作等に対するバウンダリ確保方策の検討

フッ化物揮発法(酸化物燃料の概念検討結果の概要

JNC

フッ化物揮発法のプロセスフロー及び特徴



第1期の成果と課題

成果

- 50tHM/年、200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し
- ANL等のホット試験とMA回収の理論的検討により、99%以上のTRU回収率を確保可能
- PuF6の分解回避方策案を摘出

課題

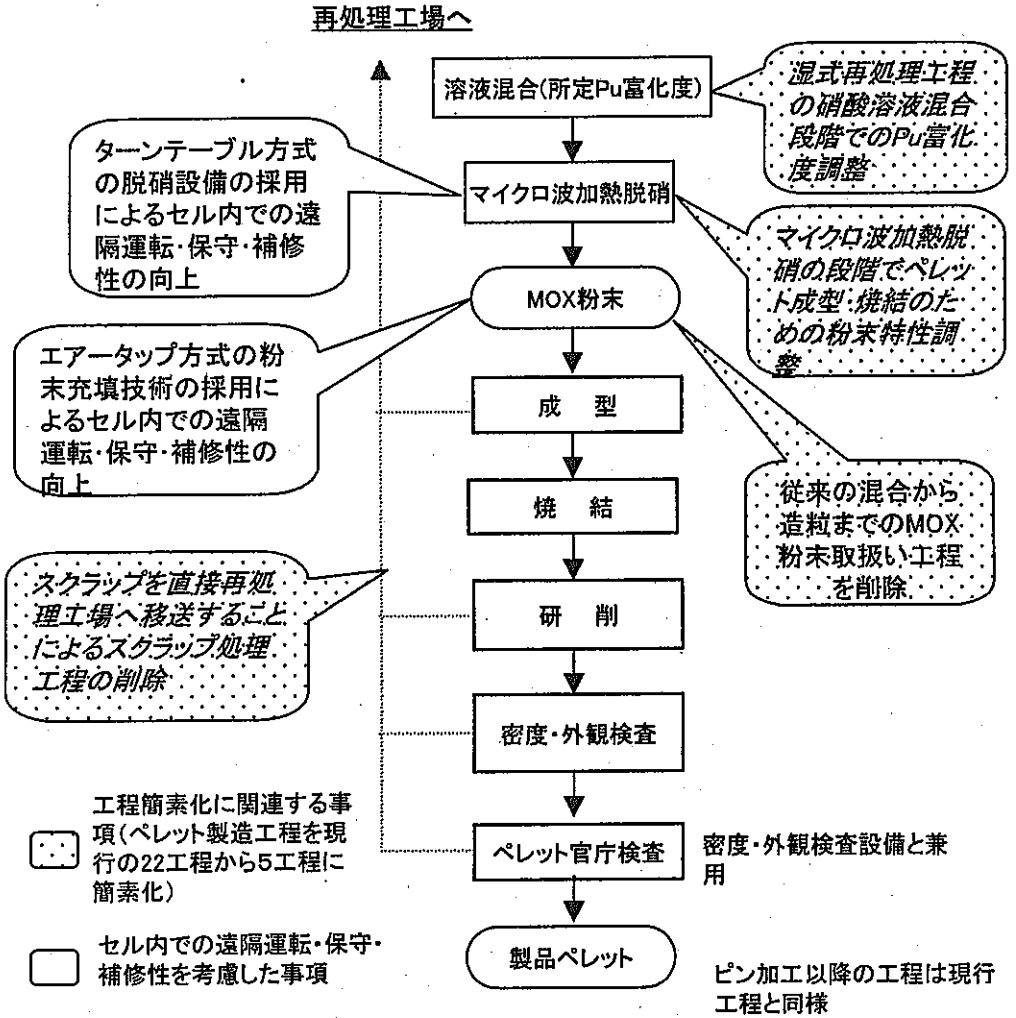
- PuF6の分解回避方策案に対する工学規模での確認が必要(国内外の試験フィールドが未整備)

(乾式法共通課題)

- 摘出された経済性向上に係わる技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- MA回収時の容器開放操作に対するバウンダリ確保方策の検討

簡素化ペレット法(酸化物燃料)の概念検討結果の概要

簡素化ペレット法のプロセスフロー及び特徴



簡素化ペレット製造フロー

第1期の成果と課題

成果

- 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し
- 50tHM/年プラントでは、経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出
- 既に確認された高除染体系でのMOXペレット製造の抜本的簡素化を目標に、要素技術開発を踏まえ2002年度末までに、技術成成立性の判断に必要なデータが得られる見通し

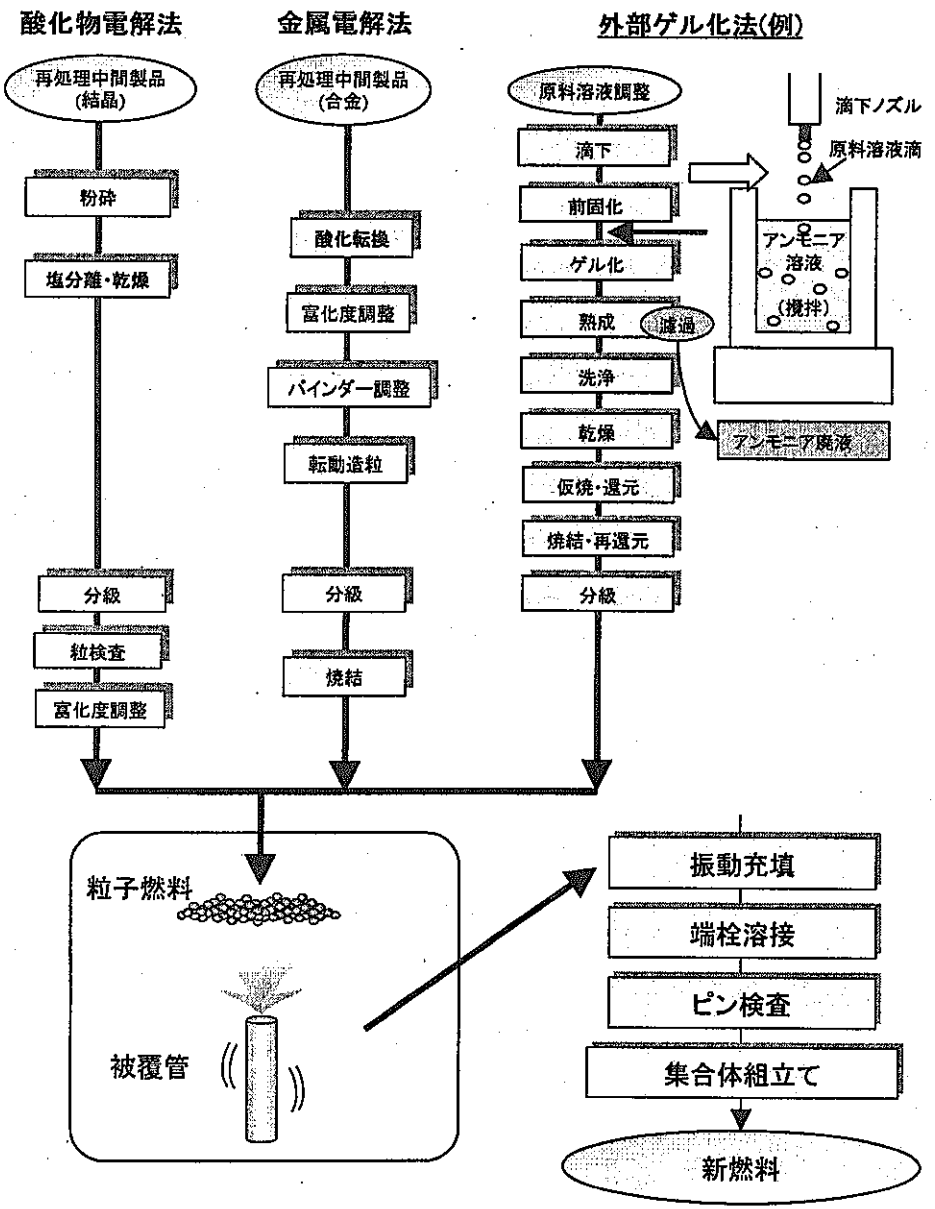
課題

- 経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- 低除染燃料集合体組立工程等での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発

振動充填法(乾式・湿式再処理対応)の概念検討結果の概要

JNC

振動充填法のプロセスフロー及び特徴



第1期の成果と課題

- 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し
- 50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出

【酸化物電解法対応】

- RIARで、リサイクル燃料も含めての多数の製造・照射実績があり、技術的成立性が高い。

課題

- 酸素ゲッターあるいはそれに変わる技術の開発が必要

【金属電解法対応】

- 金属電解法を酸化物燃料のリサイクルに適用したプロセスが成立の見込み

課題

- 転動造粒法による高密度顆粒製造条件の確認が必要
- 低O／M比燃料製造技術の開発が必要

【外部ゲル化法対応】

- PSI共同研究を通して、ゲル化で得られたNp入り顆粒を用いた充填燃料を製造し、照射試験を実施する段階

課題

- 発熱等によるゲル化の限界確認、及びその場合の酸化物脱硝後乾式造粒法の検討が必要

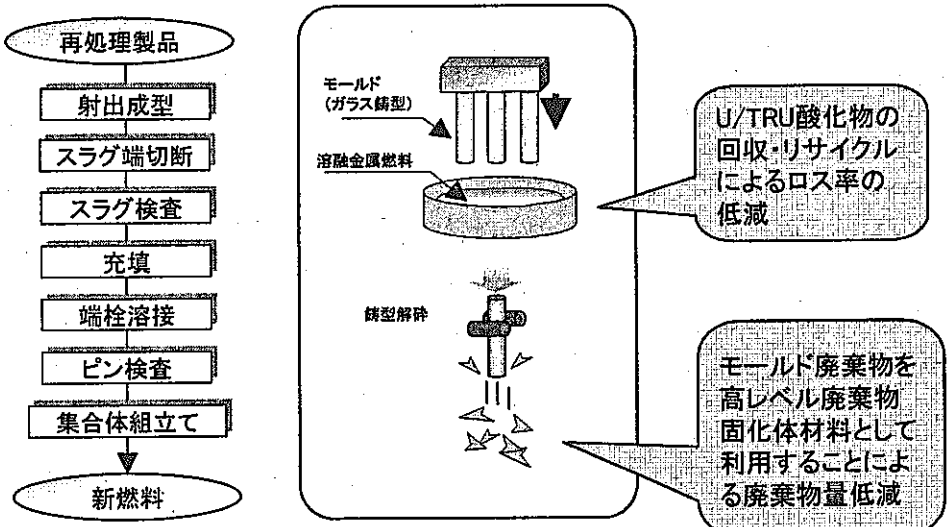
(振動充填法共通課題)

- 経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- TRU低除染燃料製造において、集合体組立工程での適切な発熱対策の検討、遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発

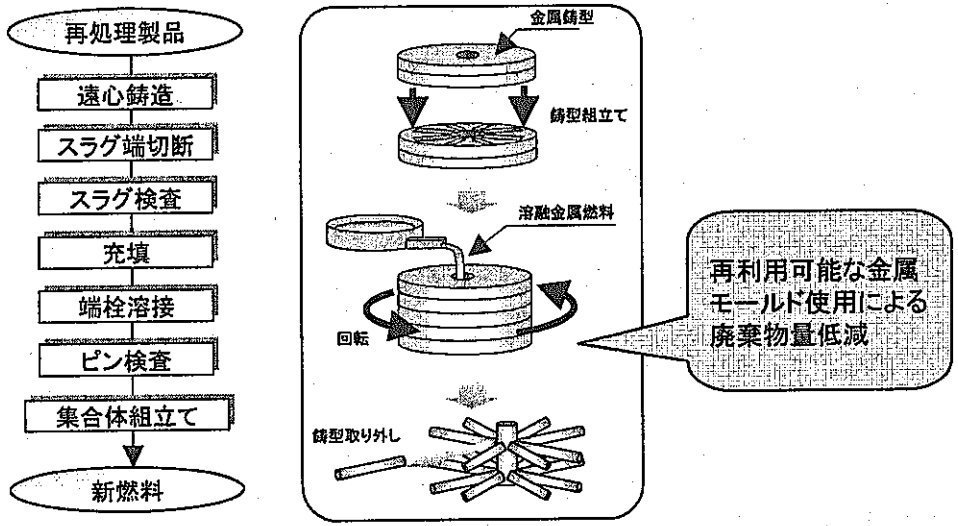
鋳造法の概念検討結果の概要

鋳造法のプロセスフロー及び特徴

射出成型法



遠心鋳造法



第1期の成果と課題

- 200tHM/年プラントで経済性目標達成の見通し
- 50tHM/年プラントでも経済性目標達成を見込める技術開発課題を摘出

【射出成型法】

- ANLでの製造実績があり技術的成立性は確認済み

課題

- 鋳型廃棄物の再利用によるHLW廃棄固化体の製造試験の実施

【遠心鋳造法】

- 2元系(Zr、U)での鋳型材料の共存性について、問題ないことを評価

課題

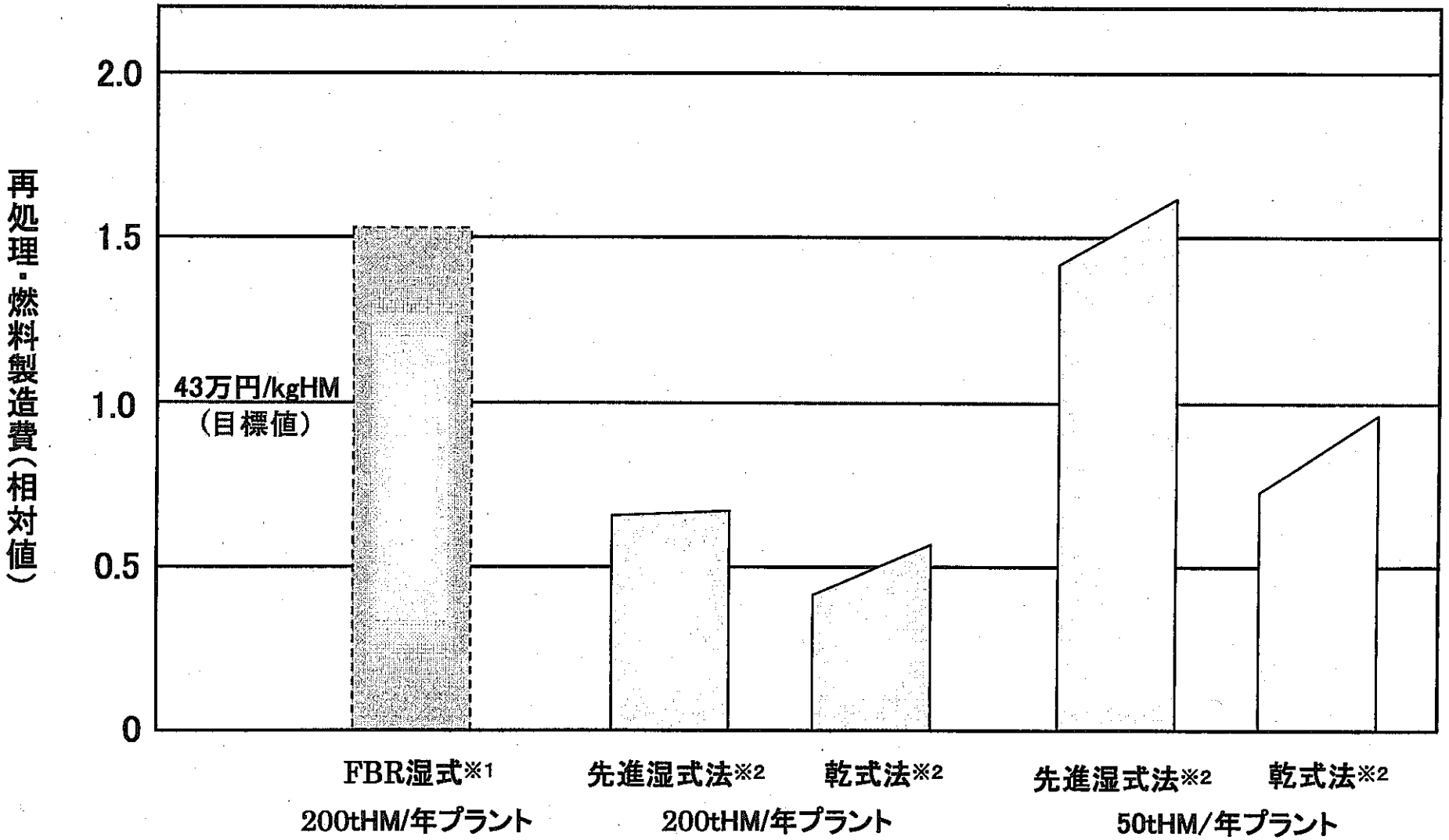
- 臨界安全性、装置の回転安全性等大型化に対する課題の解決方策の検討
- 3元系(Zr、UとPu)での鋳型材料の共存性の評価

(鋳造法共通課題)

- 経済性向上に係る技術開発課題の追求等、更なるコスト低減の可能性の追求
- 低除染燃料製造における遠隔製造技術、遠隔保守技術の開発

経済性評価結果

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 各方式において、今後開発課題を達成した時の予想値

有望な実用化候補概念の抽出

実用化候補概念の抽出(FBRシステム)

JNC

基幹電源用の中、大型炉、及び多目的利用の小型炉の概念検討を行い、以下の有望な実用化候補概念を抽出した。

(中、大型炉)

- ナトリウム冷却炉

  大型、中型モジュール炉ともに、将来の軽水炉に比肩できる経済性が達成できる可能性がある、もんじゅと同様な型式のアドバンストループ型炉を抽出した。炉心燃料については、課題が少ないMOX燃料と、課題は多いものの開発目標達成度が高い金属燃料を抽出した。

- 重金属冷却炉

  融点と、防食に対する許容運転温度範囲の観点から、冷却材として鉛—ビスマスを選定した。大型炉は耐震性確保が困難なこと等から、中型で腐食対応の容易な自然循環型のタンク型炉を抽出した。炉心燃料については、増殖比等の観点から、窒化物及び金属燃料を抽出した。

- ガス炉

  ガスタービン方式の内、耐熱ピン型燃料については炉心溶融事故時の対策検討が、また、被覆粒子型燃料については、被覆材料、炉心性能の更なる向上が必要である。炉心燃料については、MOX及び窒化物燃料を抽出した。

- 水炉

  増殖比は1.0～1.05程度で、資源有効利用性の面で更なる検討が必要である。今後、安全性等の検討を進めながら導入シナリオとの関連について検討を進め、第2期の絞込み段階で総合的に判断する。

- 溶融塩炉

  物量がNa冷却炉の4倍程度となり、高価な耐食性構造材料が必要なこと等から経済性目標を達成することは難しい。

(小型炉)

FBRの特徴を生かし、燃料取替間隔が長く、核拡散抵抗性等に優れた炉として、ナトリウム冷却炉、鉛—ビスマス冷却炉の2概念を抽出した。炉心燃料については、長期運転の観点から金属及び窒化物燃料を抽出した。

FBRシステム技術の評価結果

A: 第2期で検討する技術、 B: 第2期では実用化戦略調査研究以外の国内外の研究をレビューし、再評価する技術、
C: A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術、ー: 第1期での検討対象外の技術

対象技術		炉型評価結果	燃料形態の評価結果		
			MOX	窒化物	金属
Na炉	大型炉タンク型	B	A	B	A
	大型炉ループ型	A			
	中型モジュール炉	A			
重金属炉	大型炉	C	B	A	A
	中型モジュール炉	A			
ガス炉	CO_2ガス炉(ピン型)	A*	A*	A*	C
	Heガス炉(ピン型)	A*	A*	A*	C
	Heガス炉(被覆粒子型)	A*	B	A*	—
水炉	BWR型FBR	A	A	—	—
	PWR型FBR	A	A	—	—
	超臨界圧水型FBR	A	A	—	—
溶融塩炉		C	C [塩化物溶融塩]		
小型炉	Na炉	A	B	A	A
	重金属炉	A	B	A	A
	ガス炉	A*	A*	A*	—

＊ 2001年度にさらに検討の上、有望な実用化候補技術を抽出する予定。

実用化候補概念の抽出(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の一体化プラントの経済性評価を実施した結果、200tHM/年処理プラントについては先進湿式法、乾式法(酸化物電解法、金属電解法、フッ化物揮発法)いずれも今後の研究開発により、経済性目標を達成しえる。一方、50tHM/年の小規模処理プラントについては乾式のみが、経済性目標を達成する可能性がある。

- 技術成立性、及び経済性を除く設計目標に対する評価では、優位差はほとんどないことが解った。

- フッ化物揮発法については、フッ化物の安定性確認等の課題がある。当面、ロシア等における軽水炉再処理への適用性検討をフォローし、第2期の絞込み段階で再評価する。

- 酸化物電解法については、窒化物燃料の場合、窒化物→酸化物→窒化物という付加的な転換工程が、また、金属燃料の場合には酸化・還元工程が必要となり、効率的でないこと等から、酸化物燃料のみに適用する。

- 先進湿式法、酸化物電解法、金属電解法、及びそれと整合性をとった燃料製造システムを有望な実用化候補概念として抽出した。

燃料サイクルシステム技術の評価結果

A: 第2期で検討する技術、 B: 第2期では実用化戦略調査研究以外の国内外の研究をレビューするとともに他の技術とのハイブリッド化の可能性を検討し、再評価する技術、C: A及びB以外の技術で検討結果をデータベースとして残す技術、ー: 第1期での検討対象外の技術

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

第2期の進め方

◆FBRサイクルの技術体系整備に向けた展開における
第2期の位置付け

◆第2期の研究開発計画

はじめに

（前回課題評価委員会での説明内容と今回の説明内容との関係）

- 前回の評価結果を反映し、2001年度の研究を開始した。
- 第２期の基本的な進め方は、以下の点を除き、変更無し。
  - 第１期の検討結果に基づく開発目標の見直し
  - ガス冷却炉の燃料形態とその安全性を中心に、1年間検討を継続し、2001年度末に有望概念を抽出。
  - 2003年度末を目途に、RETF＊計画を提示。
- 第２期の５ヵ年計画を、2002年度以降について、より具体化した。

＊ RETF:リサイクル機器試験施設(Recycle Equipment Test Facility)

開発目標、設計要求に係わる課題

- ◆ 視野をさらに広げた開発を指向

  （世界への発信、多様なニーズへの積極的対応）

- ◆ 新概念創出へのチャレンジ精神、開発意欲を常に刺激

- ◆ 同一条件での比較による各候補の特徴把握から、システムの特長を積極的に生かす
  - ● 経済性のみでなく、資源有効利用性及び環境負荷低減性での相違を明確に

- ◆ FBRサイクルに関する技術論的検討のみでなく、社会的な受容性の検討

開発目標の見直し方針

◆ 開発目標全般

- FBRサイクルの実用化に対する理念を示す （目指す方向、狙うレベル）
- 世界に通用するグローバルスタンダード
- 21世紀社会の多様なニーズに対応するため、各候補概念の特長を生かし得る目標設定

[例： 基幹電源（中・大型炉）としての目標のみでなく、
小型炉等への適用も考慮した目標]

◆ 個別の開発目標

- 経済性 ：国内目標に加え、さらなるステップアップとしてグローバルスタンダードとしての目標にも言及
- 環境負荷低減 ：TRUリサイクルやLLFP核変換に係わる理念と実用化に向けてのアプローチを記述
- 資源有効利用性 ：エネルギーセキュリティ等から導入シナリオの検討

- 具体的な数値目標は設計要求に記載

設計要求の見直し方針

- 開発目標の見直しに対応した具体的な数値目標の設定
- 第1期の成果に基づいた見直し
- 第2期の重点課題に対する対応

第1期の成果
（技術論的検討）

設計目標を同じにして
共通ベースの比較

第2期の重点

多様なニーズへの対応

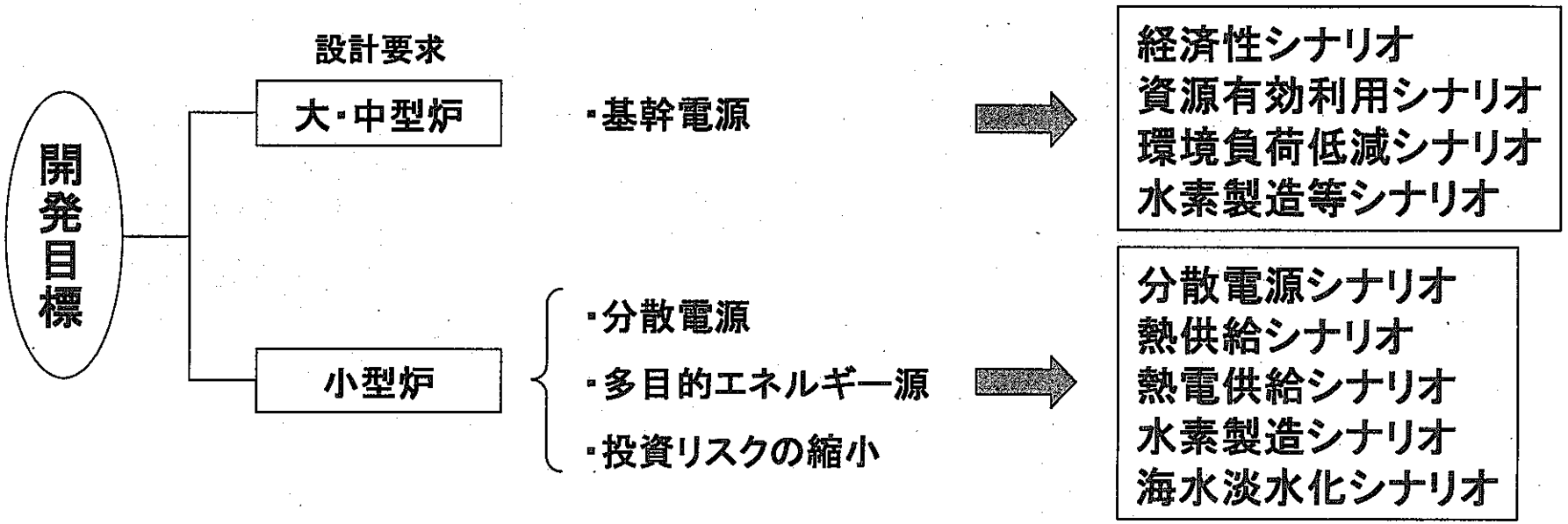
炉心設計の見直し
（コスト影響評価を含む）

環境負荷低減への取り組み
（コスト影響評価を含む）

社会的受容性への配慮

多様なニーズに対応した設計要求の設定

○ 開発目標に対応した世界に通用する数値目標の設定



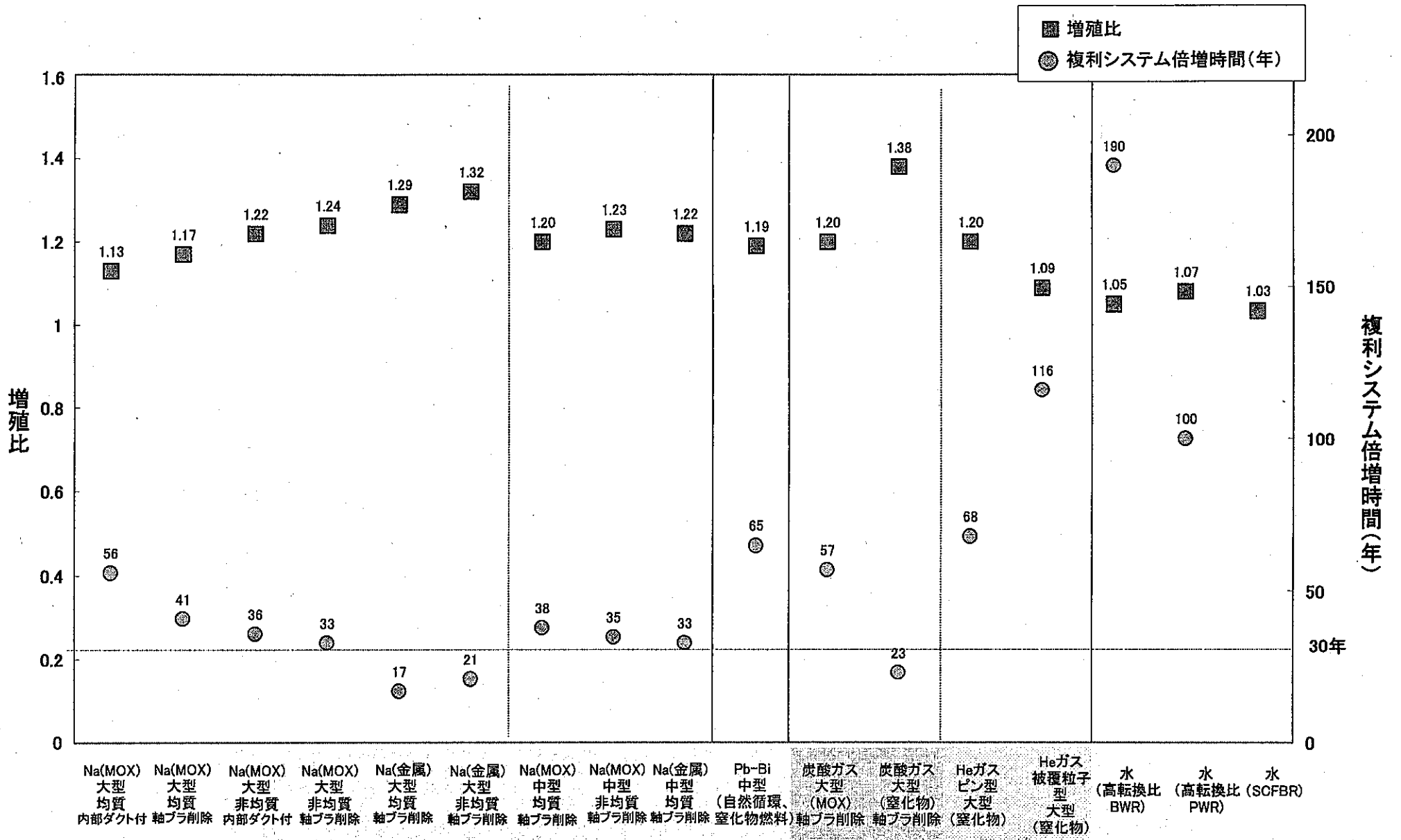
数値目標の例
経済性
第1段階の目標(将来の国内軽水炉に比肩): 発電単価4円／kWh
第2段階の目標(国際競争力を目指した努力目標): 発電単価3￠／kWh

炉の特性を踏まえた炉心設計の見直し

FBRの候補概念は以下のような炉心特性を有しており、第2期では多様なニーズに対応して、効果的に炉心性能を引き出す観点から、炉心設計の見直しを行うとともに、導入シナリオとの対応を検討

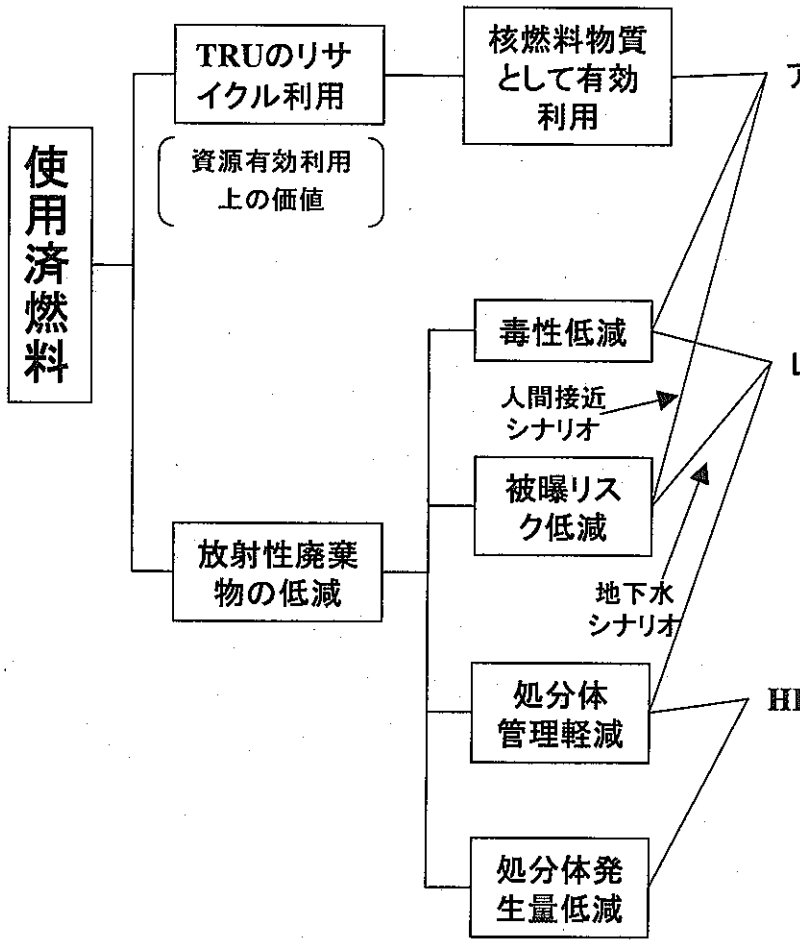
炉型／燃料	増殖比	システム倍増時間（年）	平均燃焼度（万MWd/t）	ﾊﾞｯﾁ当りHM量（kg/MWe）	炉心特性
Na冷却（MOX）	1.13～1.24	33～56	5.0～6.3	19.5～27.5	増殖比、複利システム倍増時間等について優れた特性を有する。
Na冷却（金属）	1.22～1.32	17～33	5.3～6.8	21.9～23.4	重金属密度が高く、MOXより増殖比で約0.1～0.15増加し、それに対応して複利システム倍増時間も短い。
Pb-Bi冷却（MN）	～1.19	～65	～3.9	～30.2	自然循環のため、重金属密度が高い窒化物燃料を採用しても複利システム倍増時間はナトリウム炉の2倍程度となる。
炭酸ガス冷却（MN）	～1.38	～23	～6.9	～39.6	熱輸送能力が低いため、液体金属のような稠密な燃料ピン配置はできず、炉心インベントリが大きい。炉心特性はナトリウム冷却炉と大差ない 。
Heガス冷却（MN）	～1.20	～68	～4.8	～27.0	同じ増殖比であっても、実効燃料体積比（出力密度）が小さく炉心インベントリが増加し、複利システム倍増時間が増加する。
水冷却（MOX）	1.0～1.07	100～190	2.7～4.5	46.7～48.3	複利システム倍増時間が長く、資源有効利用性の面で更なる検討が必要であるが、導入シナリオの想定によっては有効となる可能性もある。

各炉型における増殖比と複利システム倍増時間の関係



環境負荷低減への取り組み

・第1期ではLLFP(I, Tc, Cs, Sr)分離変換技術について検討
・第2期ではLLFP分離変換について引き続き検討を進めるとともに、アクチニドリサイクル及びHLW高減容プロセスの検討
・その他の同位体分離が必要な長寿命核種(Se-79, Zr-93, Sn-126など)については、基礎・基盤研究の進捗を受けて適宜判断



アクチニドリサイクル

リサイクル形態	毒性低減効果
U, Pu : 98.5%, MA : 0%	(現行LWRサイクル)
U, Pu : 99%, MA : 99%	毒性が1桁減少
U, Pu : 99.9%、Np, Am, Cm : 99.9%	毒性が2桁減少

LLFP分離変換

対象核種	効　果
I-129, Tc-99 Cs-135	Tcは5万年後あたりのガラス固化体の支配核種であり、よう素は溶解度が高く地層への吸着も小さいので、核変換すれば処分に対する安心感を高めることが可能、セシウムは同位体分離が必要
Sr-90, Cs-137 (発熱核種)	ガラス固化体の主要な発熱源であり、Cs, Srを90%以上除去することにより、固化後200年に亘り1桁程度放射能が低下、発熱量は約1/3に低下

HLW高減容プロセス

対象元素	特　徴	廃棄物低減効果
Mo	相分離物(水溶性の高いMoが主成分)による化学的耐久性の低下	・高減容プロセスによる減要効果は約1/2 ・ガラス固化体の廃棄物含有率:現状25%→45%程度
Pd, Ru	電気伝導度の高い白金族元素濃度の増大により直接通電加熱炉の運転に影響	
Sr-90, Cs-137 (発熱核種)	ガラス固化体の温度上昇に起因する結晶化による化学的耐久性の低下	

社会的受容性への配慮

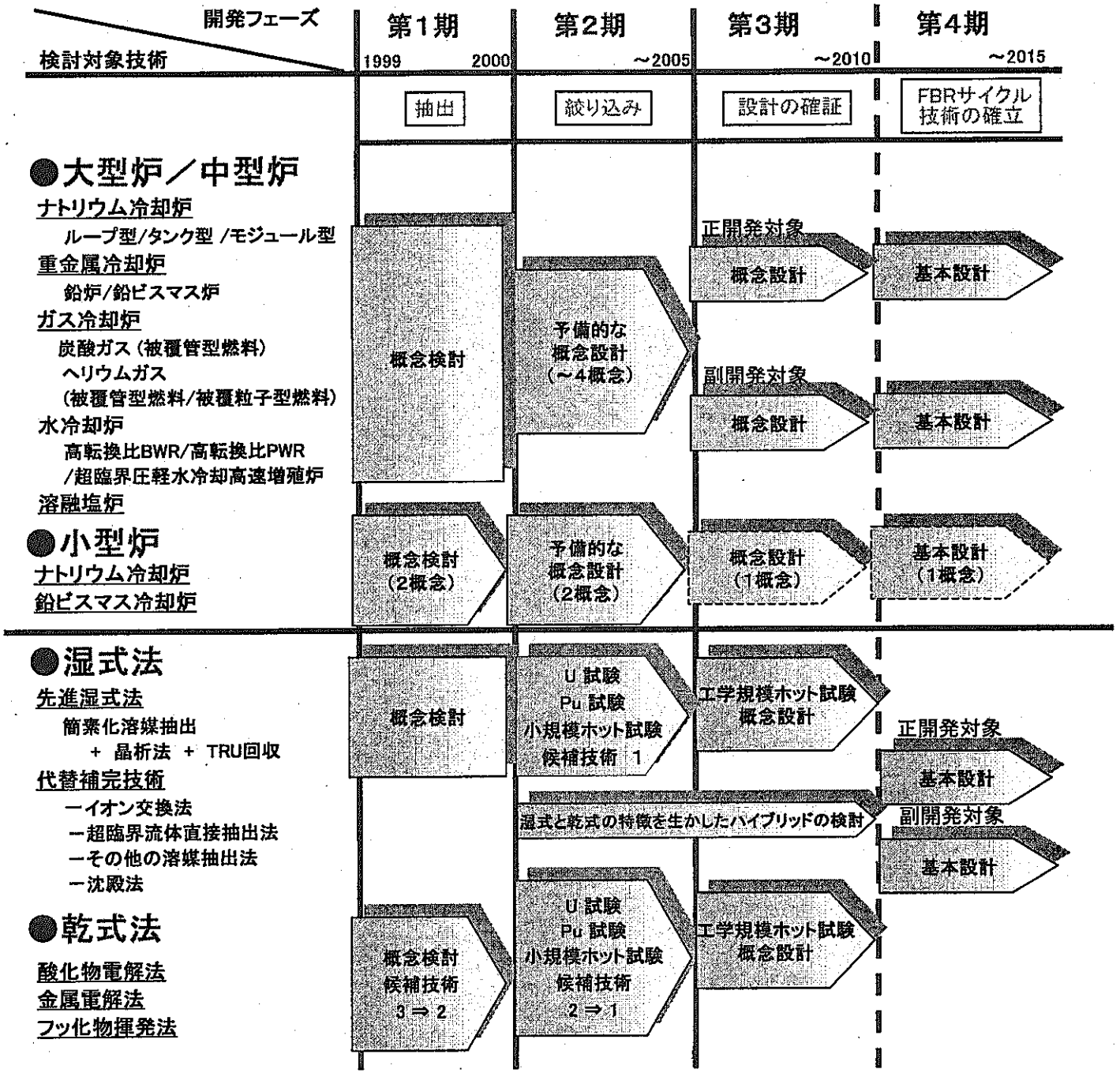
■関心の高い項目の摘出
- ◆エネルギー供給の持続性
  - ✓Pu利用（含むPuサーマル）
- ◆環境への影響
  - ✓放射性廃棄物
  - ✓重金属の毒性
  - ・
  - ・
- ◆化学的反応
  - ✓爆発
  - ✓ナトリウム火災
- ・
- ・

■FBRサイクルの特徴と効用に対する分かり易い説明

評価者	関心事項
FBRサイクル施設の立地住民	・重大事故の発生確率 ・重大事故発生時の周辺への影響、影響減衰期間、次世代への影響 ・軽微事故やトラブルの発生確率、被害状況、時間的影響 ・危険物質の存在及び取扱量 ・ランドマーク性（地域のシンボル、見学の容易性） ・情報開示の透明性、容易性 ・雇用及び経済波及効果 ・排熱利用の容易性
国民	・エネルギーや電源としての経済性 ・新エネルギー投資と比較したときの効果 ・技術的実現性、実現時期 ・国民経済への波及効果 ・技術波及効果
電力会社	・廃棄物等の時間的な管理の長さ ・廃棄物管理の容易性 ・初期投資金額（投資リスクの大きさ） ・プラントとしての制御及びメンテナンスの容易性 ・軽微なトラブルを含めて、事故による停止頻度及び復旧期間 ・燃料の調達や貯蔵の容易性 ・技術としての新規性、エネルギーとしてのイメージ
政府	・エネルギーセキュリティの確保への貢献 ・技術的実現性 ・国民的理解を得る上での容易性

FBRサイクルの技術体系整備に向けた展開における第2期の位置付け

FBRサイクル開発の展開(案)



第２期の研究開発計画

実用化戦略調査研究の第2期の目的

第2期の目的

- 実用化候補概念の絞り込み
- 研究開発テーマの抽出

第2期の基本的な考え方

○ 実用化候補概念として、有望な2～3の候補に絞り込む
- 比較評価が可能となるよう概念設計を進める
- 要素技術開発(試験の実施、設計評価技術の整備等)を実施する
- FBRと燃料サイクルとの整合性を図る
- 放射性廃棄物の処理処分との整合性を図る

○ 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、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

○ GEN-IV等への協力を通して、FBRサイクルの実現に向けての基礎作り

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	MOX燃料要素技術開発 ・ 高燃焼度化、TRU含有燃料の実現性 ・ 振動充填燃料とペレット燃料の比較　等				
	新型燃料(金属燃料、窒化物燃料)要素技術開発				
FBRシステム	概念設計 ・ Na冷却炉(大型＋中型モジュール) ・ PbBi冷却中型モジュール炉 ・ ガス冷却炉(He冷却またはCO2冷却) ・ 水冷却炉　・ 小型炉(Na炉、Pb-Bi炉)				
	要素技術開発 ・ Na冷却炉の経済性向上キーテクノロジー ・ ガス冷却炉、PbBi冷却炉の成立性キーテクノロジー　等				
燃料サイクル	概念設計 (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) [再処理] ・ 先進湿式法(MOX、窒化物) ・ 乾式法：酸化物電解法(MOX)、金属電解法(金属、窒化物、MOX) [燃料製造] ・ 簡素化ペレット法(MOX、窒化物) ・ 振動充填法(MOX、窒化物) ・ 鋳造法(金属)				
	要素技術開発 ・ 絞込みに必要なデータの取得 ・ 有望な革新技術の見極め　等				
	RETF(リサイクル機器試験施設)計画の検討				
統合・評価	開発シナリオの検討、総合的な評価手法の開発、整備 研究開発計画の検討			定量的な比較評価の実施 開発ロードマップの検討	

第2期の中間とりまとめ

C&R

中間評価を反映し、設計研究内容、要素技術開発項目を見直し、選択肢の絞込みに向け実施

FBRサイクル全体の統合と、選択肢の比較評価、絞り込み

第2期における炉システムの研究開発

第2期では

ソフト
- 予備的概念設計

ハード
- 要素試験

炉型毎にポイントは異なる

小型炉（ナトリウム、鉛ビスマス）
- 多目的利用を念頭においたプラント設計

大・中型炉

第1期

ナトリウム冷却炉
- 目標を概ね達成見通し。
- 技術成立性については、知見が十分。
- 経済性向上方策等に革新技術を採用。

その他の炉型
- 全体概要を把握した。
- 基本的な成立性に係る課題を摘出した。

第2期

経済性向上、資源有効利用、環境負荷低減等に向けた主要技術の成立性を確認
魅力あるプラントに仕上げるべく概念を詳細化

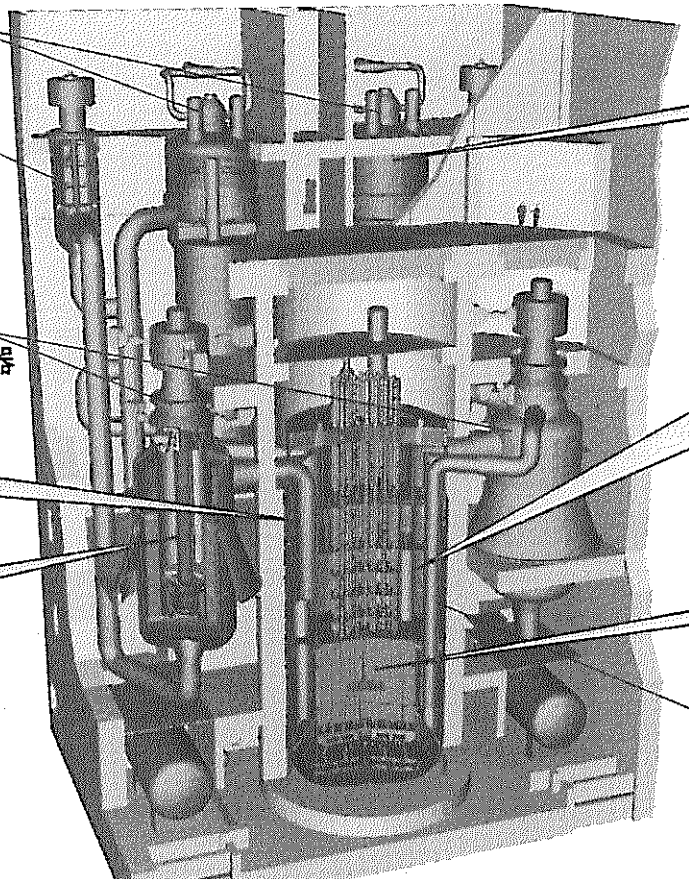
ガス冷却炉
目標達成のため、革新的プラント設計を追求
耐高温被ふく材、CDA対策等の課題の解決

重金属冷却炉
目標達成のため、革新的プラント設計を追求
材料腐食対策等の課題の解決

水冷却炉
稠密炉心の冷却、CDA対策等の成立性確認

ナトリウム冷却炉の第2期の主な要素技術開発

JNC



大型ナトリウム冷却ループ型炉の例

炉型に共通な要素技術開発

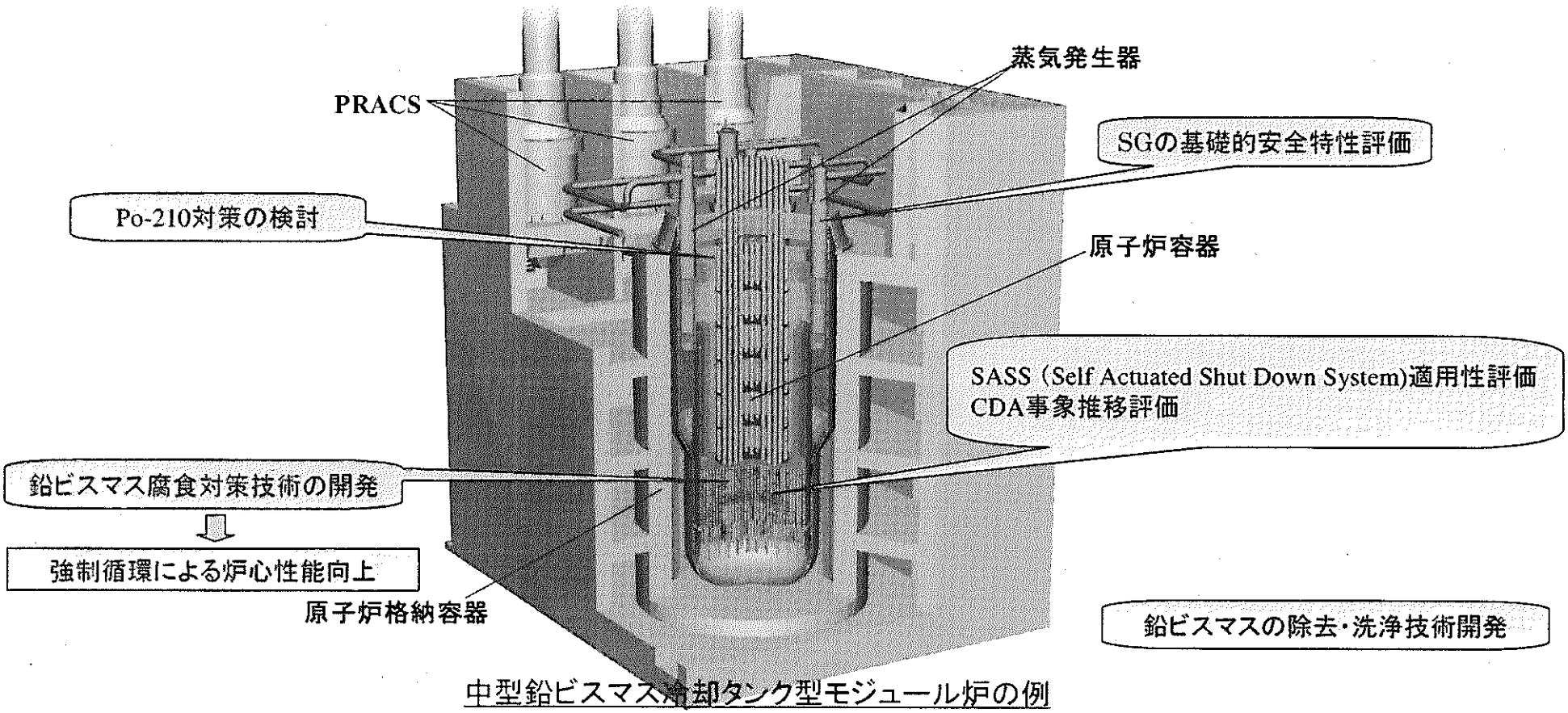
炉心・燃料

- 低除染-TRU含有燃料の物性データ取得
- 高性能反射体の開発
- ODS鋼の開発、代替材（PE16）の適用性判断
- 高性能ラッパ管（PNC-FMS）の開発
- 金属燃料の炉内過渡試験の準備

プラントシステム

- 再臨界回避概念の有効性確認
- 3次元免震技術の開発
- LBB成立性の評価
- 全炉心熱流動評価手法の整備
- 12Cr鋼の適用性評価

鉛ビスマス冷却炉の第2期の主な要素技術開発



中型鉛ビスマス冷却タンク型モジュール炉の例

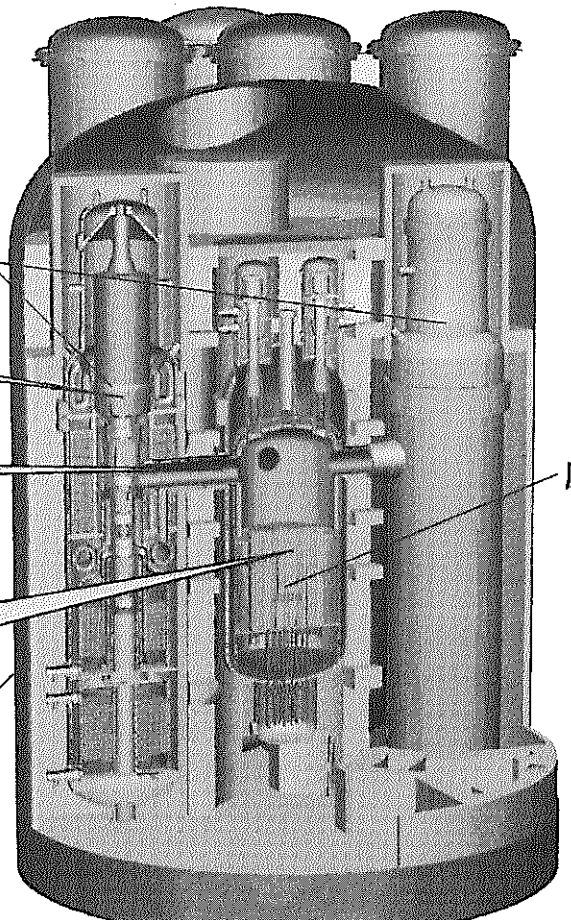
炉型に共通な要素技術開発

炉心・燃料
- 低除染-TRU含有燃料の物性データ取得
- ODS鋼の開発、代替材（PE16）の適用性判断
- 高性能ラッパ管（PNC-FMS）の開発
- 金属燃料の炉内過渡試験の準備

プラントシステム
- 再臨界回避概念の有効性確認
- 3次元免震技術の開発
- 全炉心熱流動評価手法の整備
- 12Cr鋼の適用性評価

ガス冷却炉の第2期の主な要素技術開発

JNC



ヘリウムガス冷却炉（被覆粒子燃料型）の例

ヘリウム冷却炉（耐熱ピン燃料型）
- コアキャッチャー成立性確認

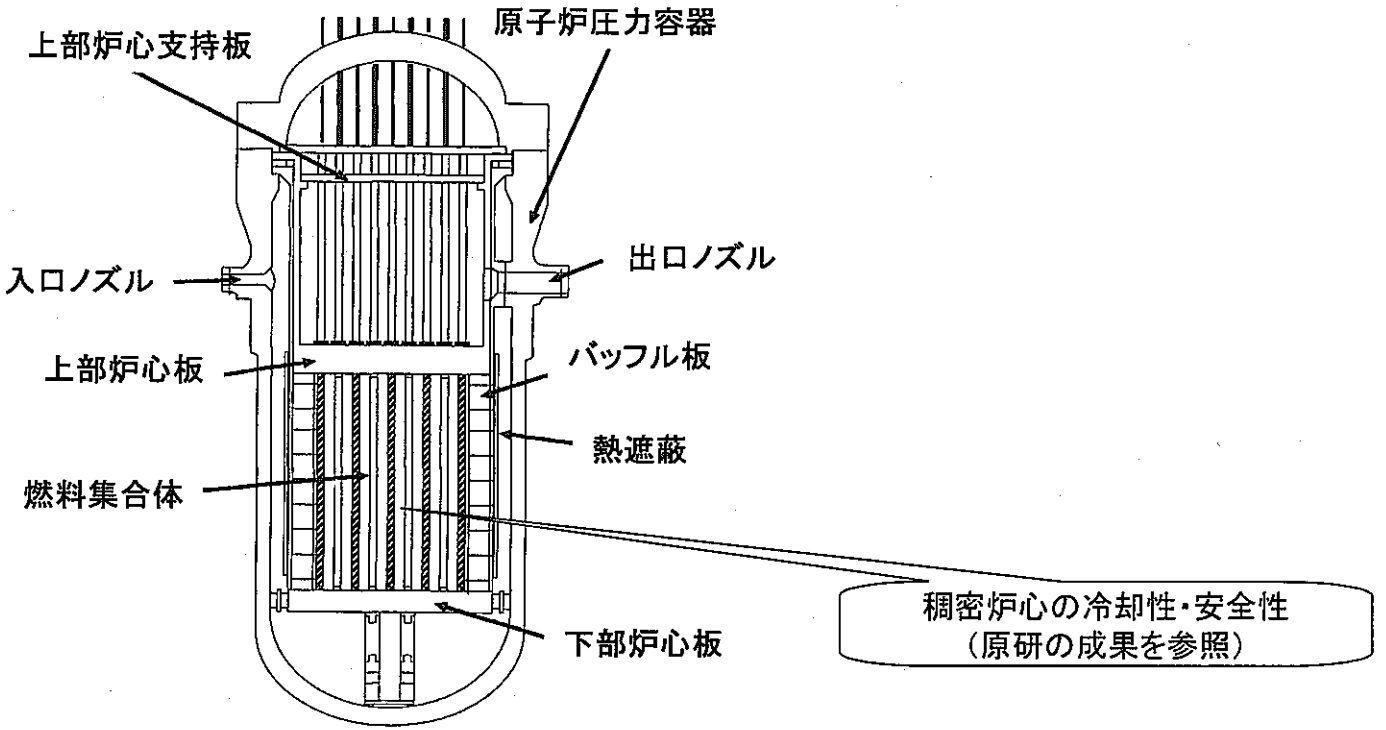
炭酸ガス冷却炉
- SASS（Self Actuated Shut Down System)の開発
- コアキャッチャー成立性確認
- PCRVの板厚低減

炉型に共通な要素技術開発

炉心・燃料
- 低除染-TRU含有燃料の物性データ取得

プラントシステム
- 再臨界回避概念の有効性確認
- 3次元免震技術の開発
- LBB成立性の評価

水冷却炉の第2期の主な要素技術開発



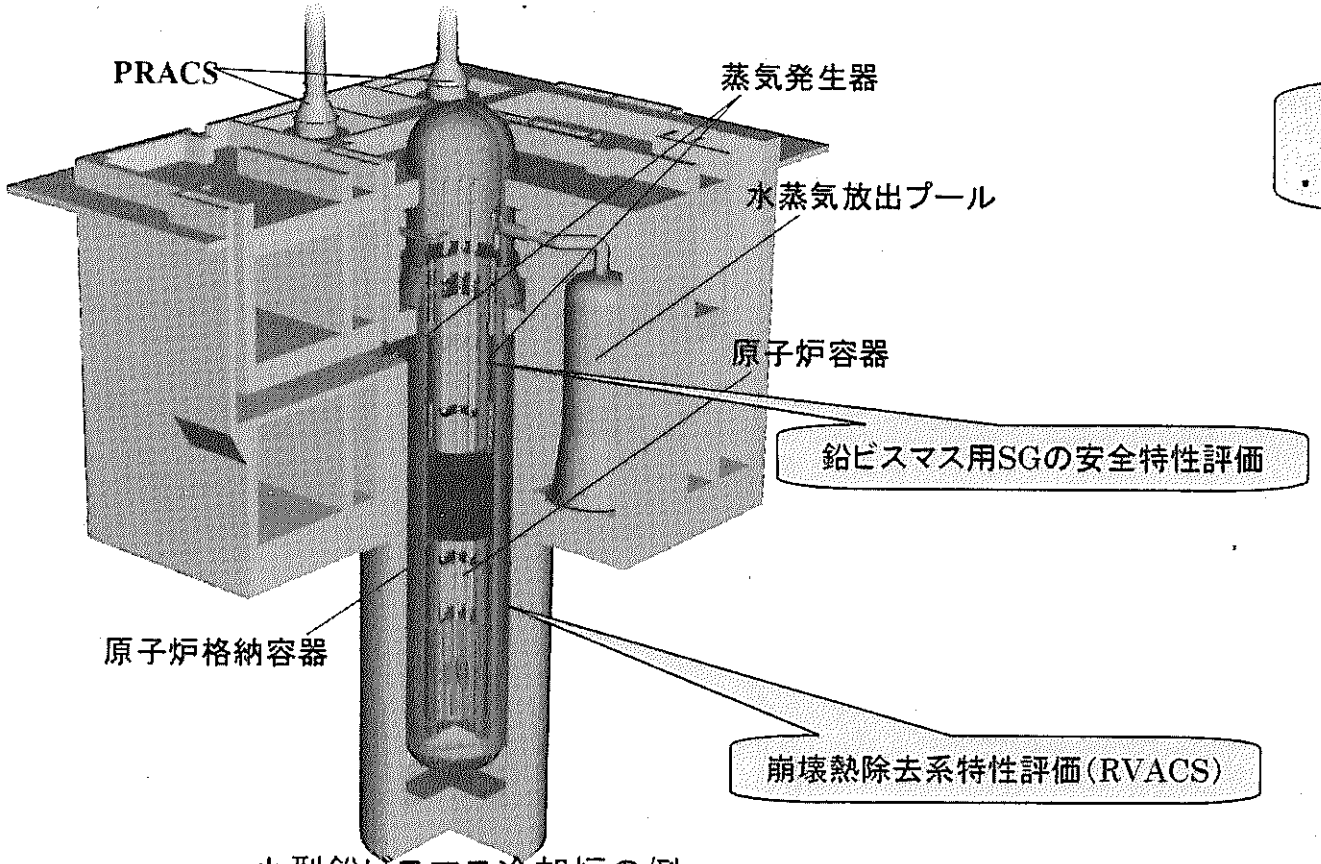
超臨界圧水冷却炉の例

炉型に共通な要素技術開発

炉心・燃料
- 低除染-TRU含有燃料の物性データ取得
- 高性能反射体の開発

プラントシステム
- 再臨界回避概念の有効性確認
- 3次元免震技術の開発
- LBB成立性の評価
- 全炉心熱流動評価手法の整備

小型炉の第2期の主な要素技術開発(大・中型炉と共通に実施)



小型鉛ビスマス冷却炉の例

小型ナトリウム冷却炉

- 2次系簡素化のための新型SG開発

鉛ビスマス用SGの安全特性評価

崩壊熱除去系特性評価(RVACS)

炉型に共通な要素技術開発

炉心・燃料

- 低除染-TRU含有燃料の物性データ取得
- ODS鋼の開発、代替材(PE16)の適用性判断
- 高性能ラッパ管(PNC-FMS)の開発
- 金属燃料の炉内過渡試験の準備

プラントシステム

- 再臨界回避概念の有効性確認
- 3次元免震技術の開発
- LBB成立性の評価
- 全炉心熱流動評価手法の整備
- 12Cr鋼の適用性評価

第2期における再処理システムの研究開発

第1期(結果)

湿式
- 先進湿式法
- プロセスの一部を代替補完する革新技術

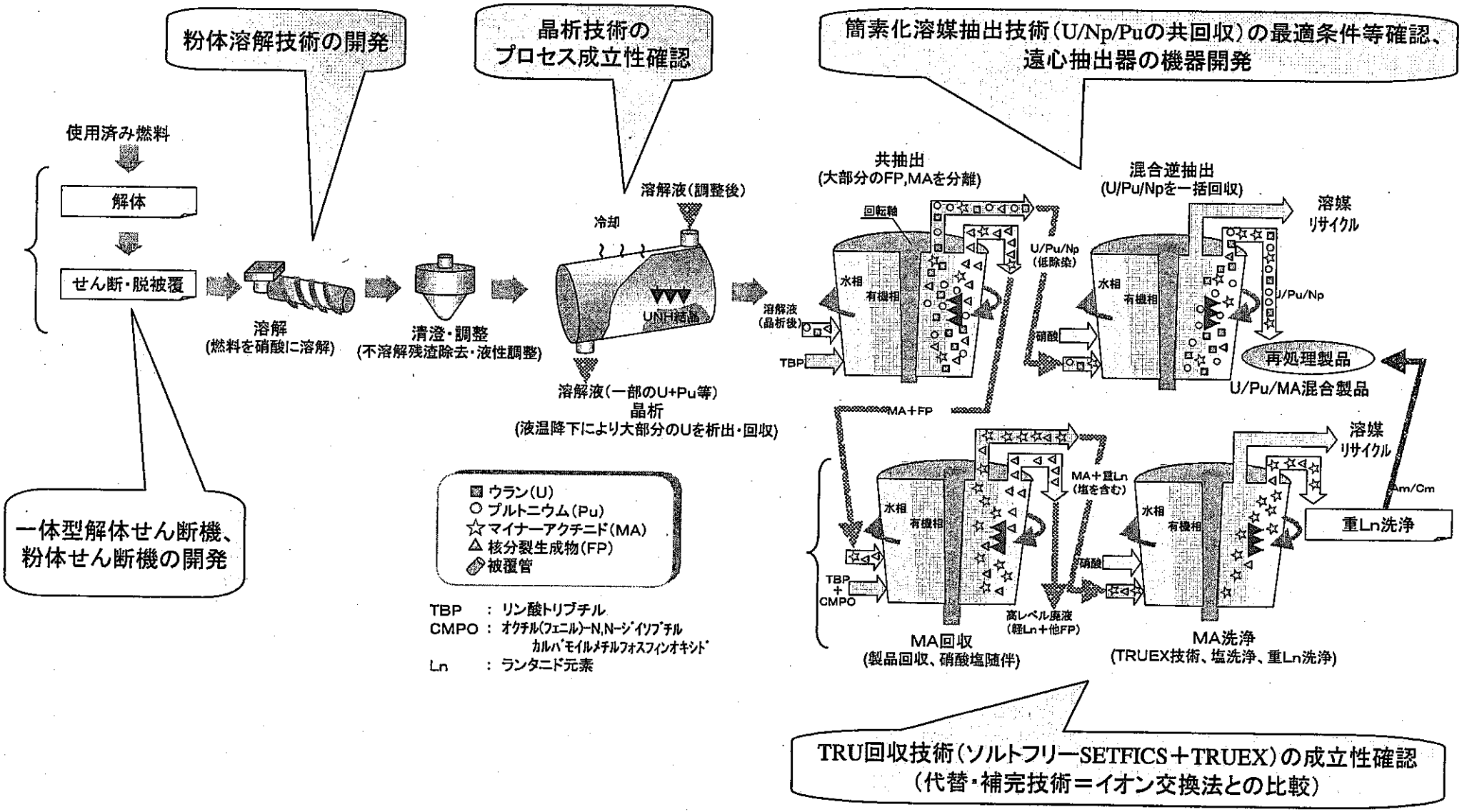
乾式
- 酸化物電解法
- 金属電解法

第2期

先進湿式法(対象燃料:酸化物、窒化物) ・ CPF *での主要技術の成立性確認 ・ 代替補完技術の成立性評価	⇒ 経済性、環境負荷低減性に優れた新プロセス(代替補完技術を付加)について、技術成立性を確認し、概念構築
酸化物電解法(対象燃料:酸化物) ・ ロシアRIARでのPu及び使用済燃料による試験結果に着目 ・ CPF *でのPu試験 (2004年度から)	⇒ 経済性、環境負荷低減性に優れた改良プロセスについて、Pu試験データに基づき技術成立性を確認し、概念構築
金属電解法(対象燃料:金属、窒化物、酸化物) ・ CPF *でのPu試験 (2002年度から)	⇒ 経済性、環境負荷低減性に優れた改良プロセスについて、Pu試験データに基づき技術成立性を確認し、概念構築

＊ CPF:高レベル放射性物質研究施設

先進湿式法再処理の流れと第2期の主な要素技術開発



湿式代替補完技術の流れと第2期の主な要素技術開発

全般

各代替補完技術の
技術的成立性を確認した上で、
先進湿式法として統合

超臨界流体直接抽出法

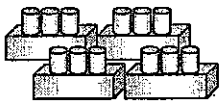
硝酸を配位したTBPとCO_2超臨界流体の混合溶媒を使用済み燃料に接触させ、燃料を溶解することなく、UやPu等を抽出。



直接抽出塔の例

アミン抽出法

TRUを高濃度で抽出可能なアミン系溶媒を用いる。

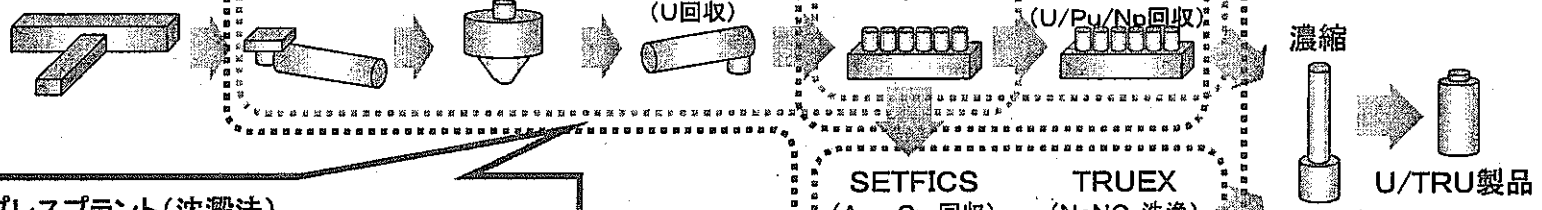


高濃度TRU取扱いによる抽出段数減

U/Pu/Np回収工程 ＋ Am/Cm回収工程

U/TRU回収工程

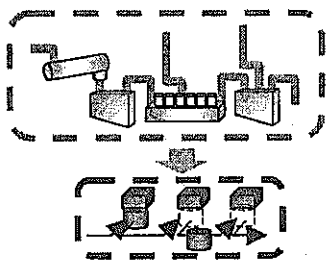
アミン系溶媒によるTRU一括回収



注意：図中の機器サイズは実際と異なる

パイプレスプラント(沈澱法)

一つの容器を各工程機能をもつステーションに順次移動させることで、配管を大幅に削減。



機能集中による設備規模縮小

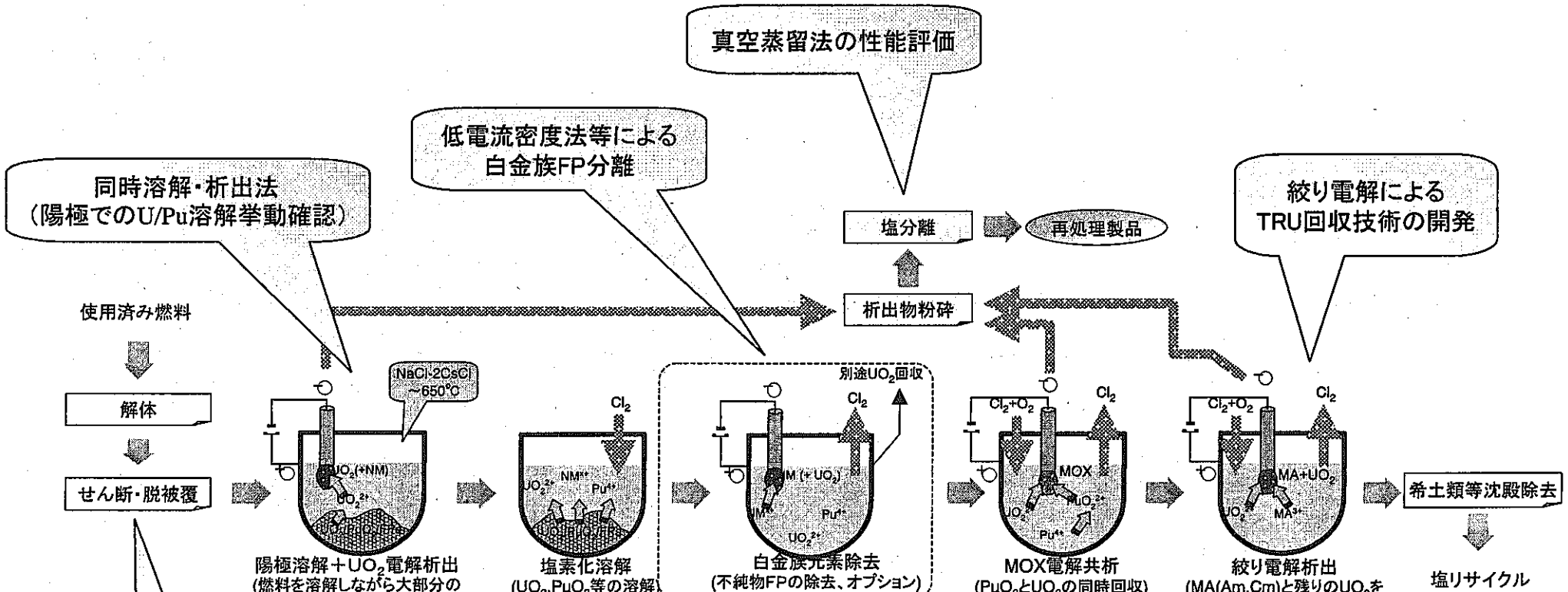
イオン交換法

特にMA回収機器の容量が大幅に削減できる。

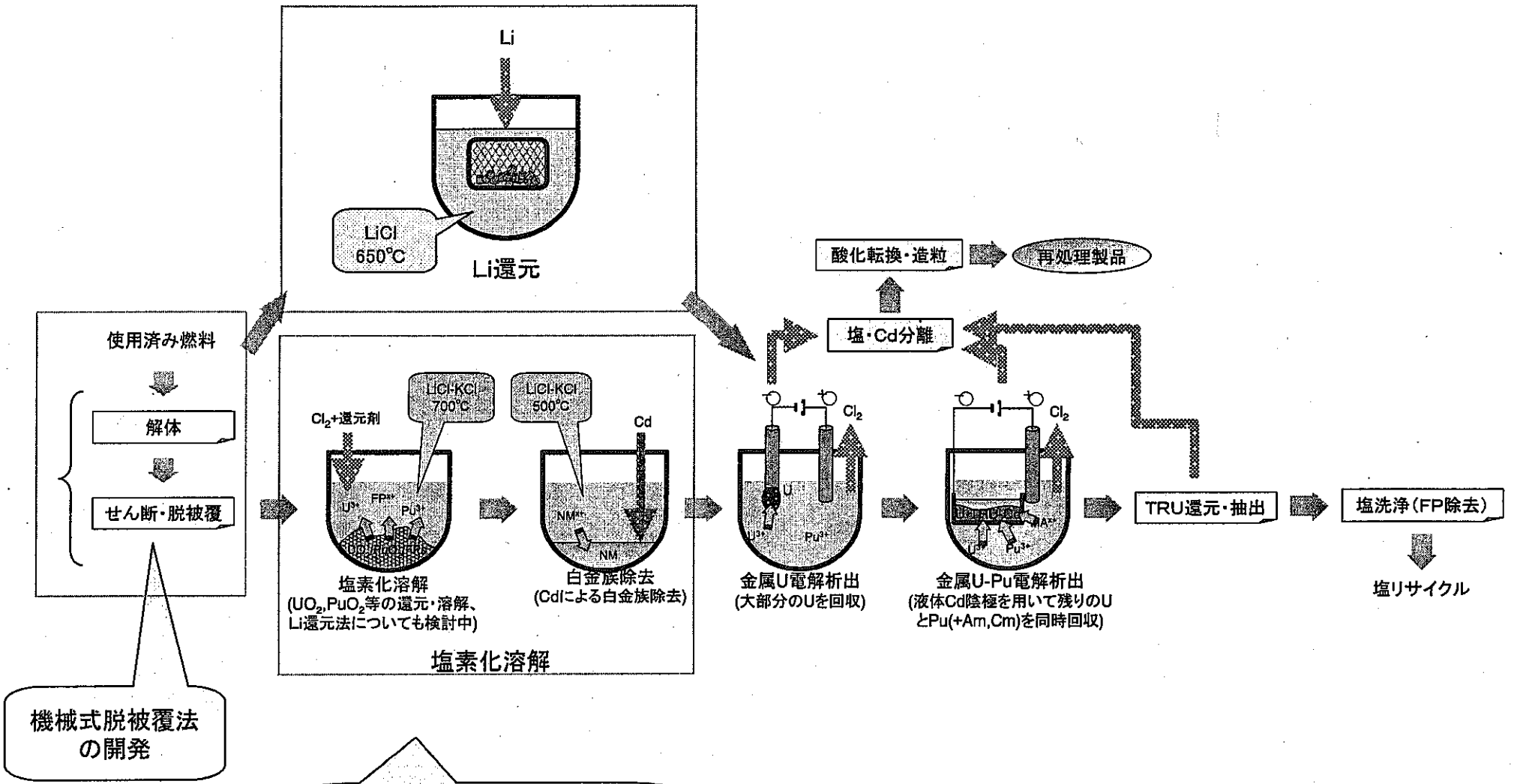


抽出器をイオン交換塔に代替

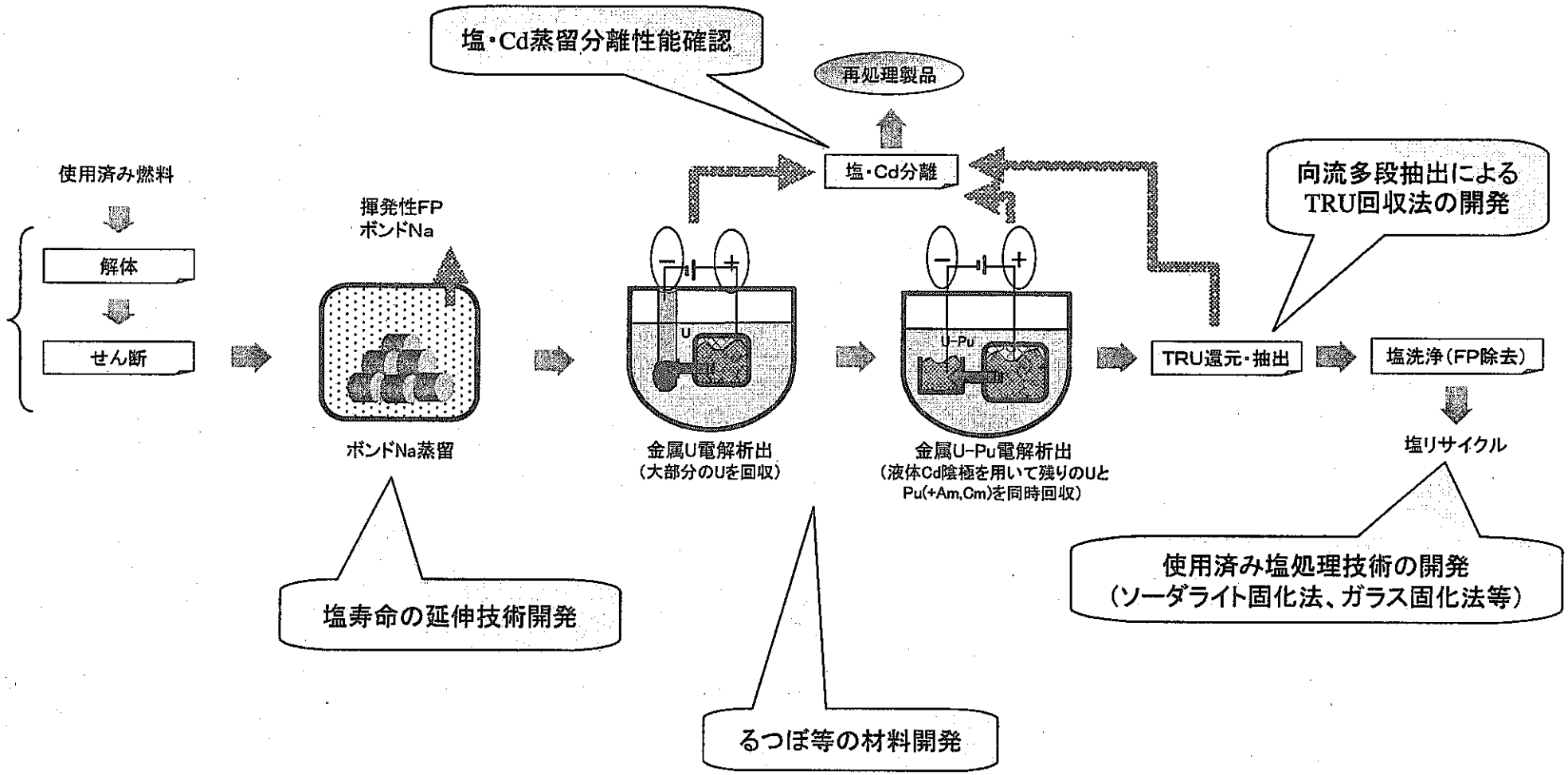
酸化物電解法再処理の流れと第2期の主な要素技術開発



金属電解法再処理(酸化物燃料)の流れと第2期の主な要素技術開発



金属電解法再処理(金属燃料)の流れと第2期の主な要素技術開発



第2期における燃料製造システムの研究開発

第1期(結果)

ペレット
簡素化ペレット法
(低除染、TRU含有燃料製造へ拡張)

振動充填
湿式法対応、酸化物電解法対応、金属電解法対応

鋳造
射出成型法
遠心鋳造法

第2期

ペレット法(対象燃料:酸化物、窒化物)
- 簡素化ペレット法の基盤技術開発
- TRU含有燃料の試作試験、照射試験

⇒ 再処理プロセスと整合のとれた経済性に優れるプロセスについて、TRU含有体系での技術成立性を確認し、概念構築

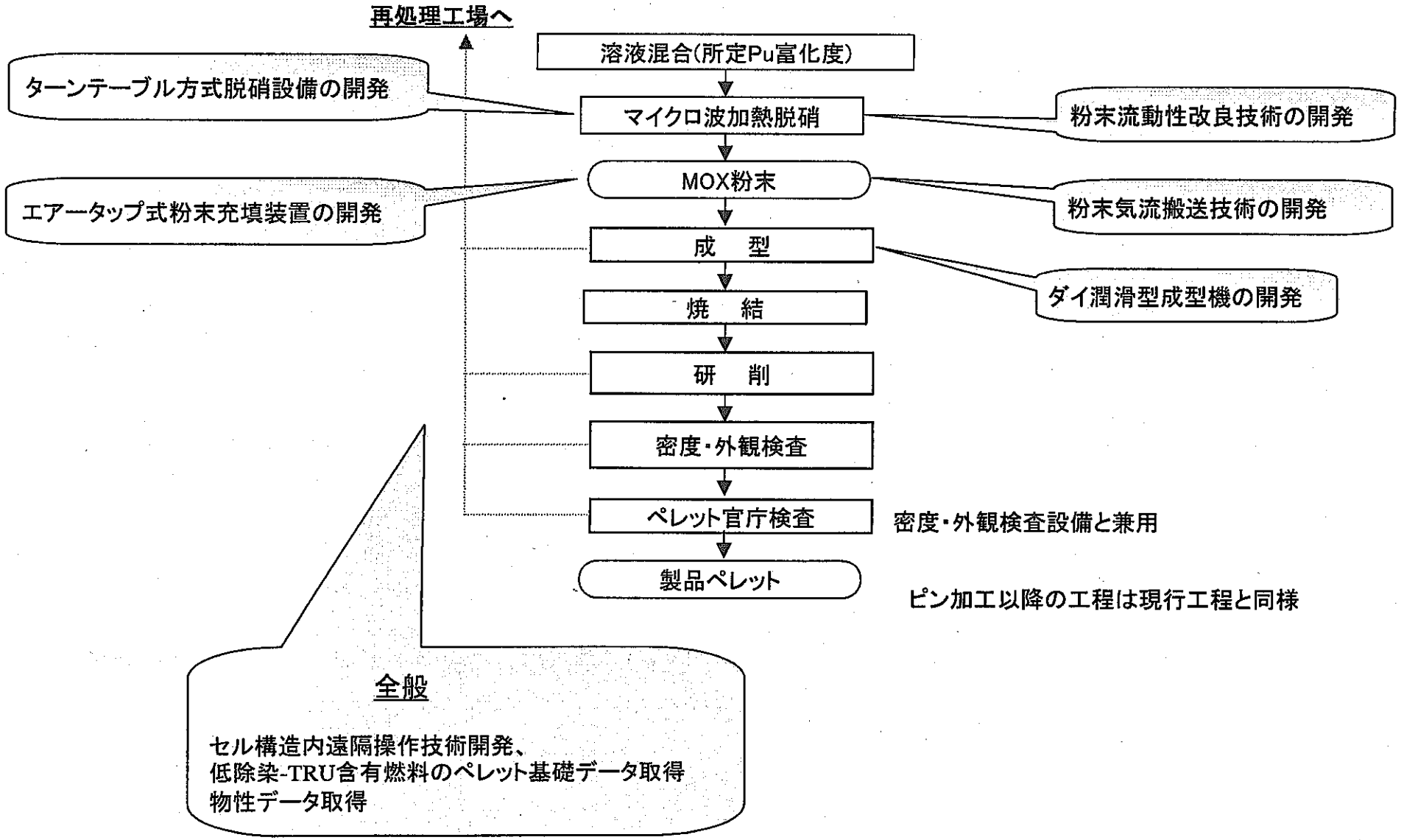
振動充填法(対象燃料:酸化物、窒化物)
- 湿式法対応の粒子製造法基礎試験
- 乾式再処理対応については解体核等の枠組みも活用

⇒ 再処理プロセスと整合のとれた経済性に優れるプロセスについて、技術成立性を確認し、概念構築

鋳造法(対象燃料:金属)
- 遠心鋳造法は当面システム検討が中心

⇒ 経済性、環境負荷低減性に優れるプロセスについて、射出成型法と比較・選択を行い、鋳造法の技術成立性を確認して、概念構築

簡素化ペレット法(酸化物燃料)の流れと第2期の主な要素技術開発



振動充填製造法の流れと第2期の主な要素技術開発

顆粒製造工程

非破壊検査法の開発、
製造スペックの検討

候補技術の絞り込み
（外部ゲル化法、
内部ゲル化法、
硝酸出発乾式法
から選定）

先進湿式再処理法より

再処理製品（水溶液）

ゲル化

洗浄・乾燥

仮焼:空気雰囲気

仮焼・還元

還元: Ar/5%H_2

焼結・再還元:Ar/5%H_2

分級

粒検査

乾式再処理法より

酸化物電解法

再処理中間製品(結晶)

粉砕

塩分離・乾燥

分級

粒検査

酸素ゲッター

富化度調整

金属電解法

再処理中間製品(合金)

酸化転換 Ar/5%O_2

富化度調整

バインダー調整

転動造粒

分級

焼結 Ar/5%H_2

振動充填工程

振動充填燃料製造

粒子燃料

被覆管

振動充填

端栓溶接

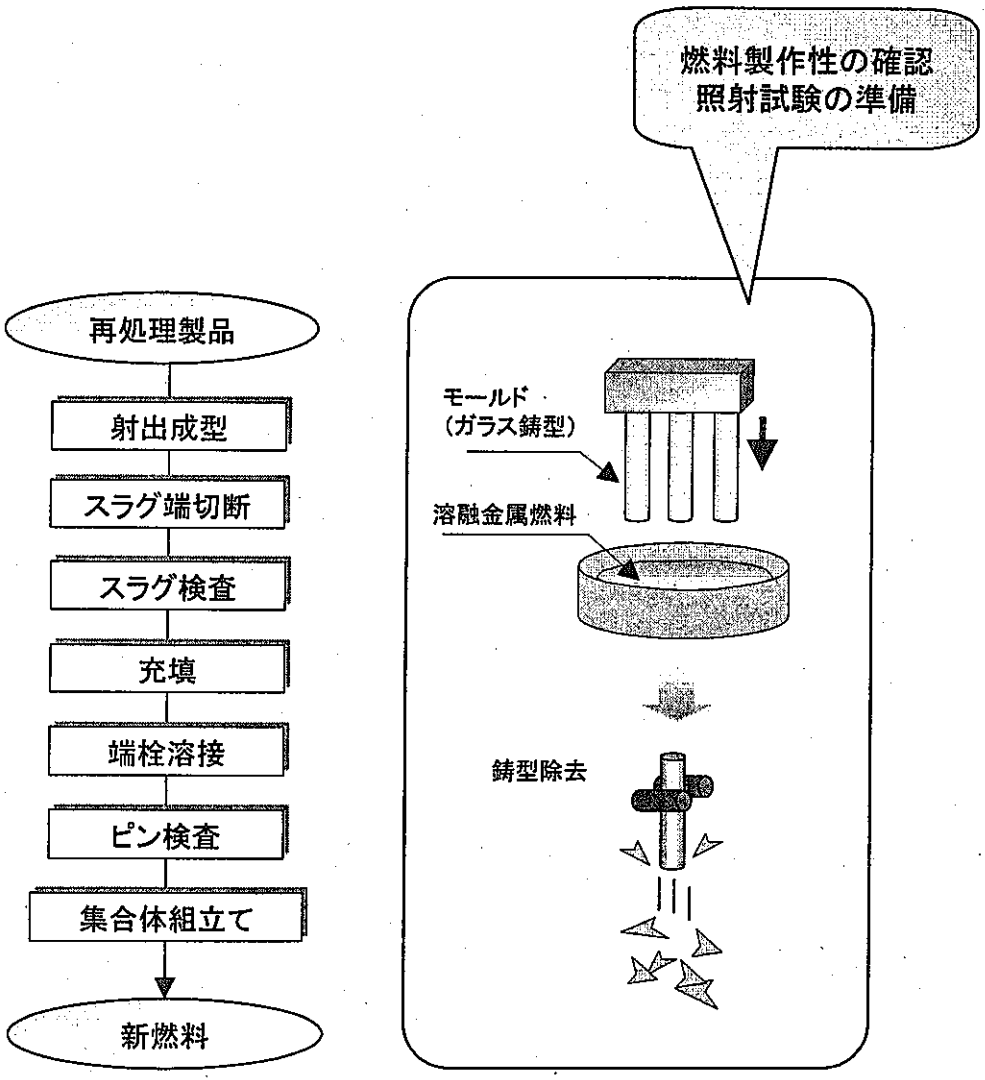
ピン検査

集合体組立て

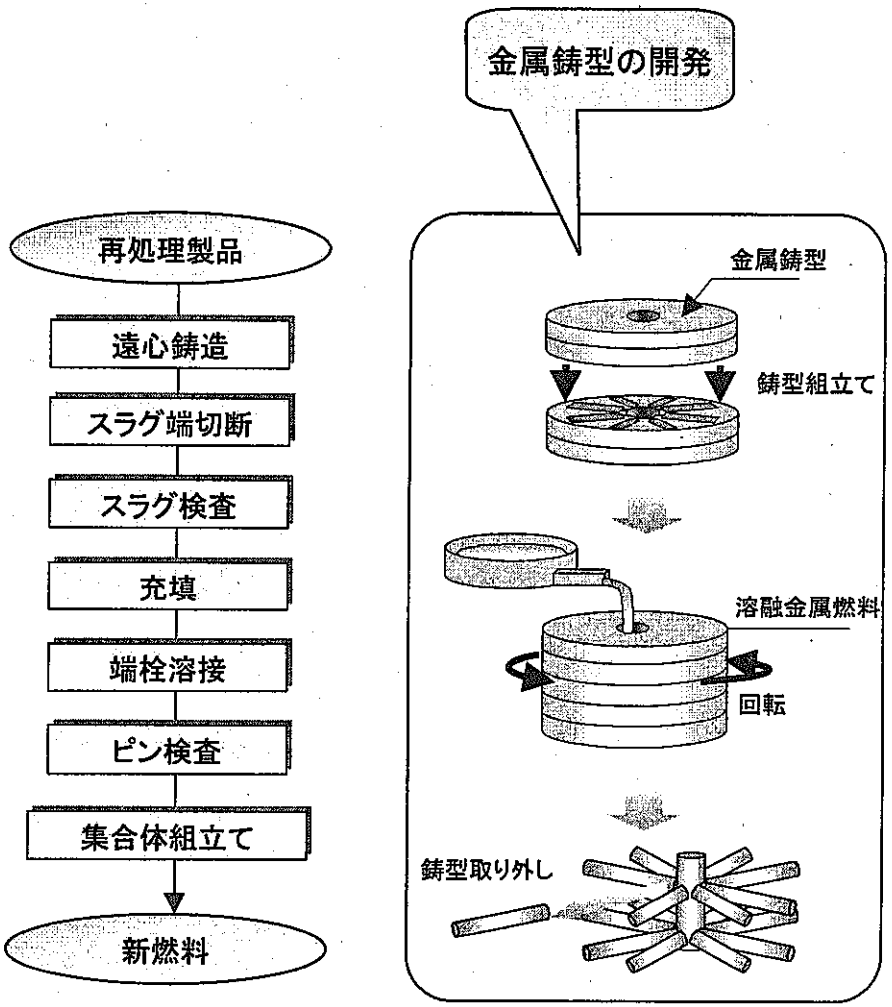
新燃料

振動充填条件の確認、
輸送時の偏析回避のための治具開発

鋳造法の流れと第2期の主な要素技術開発

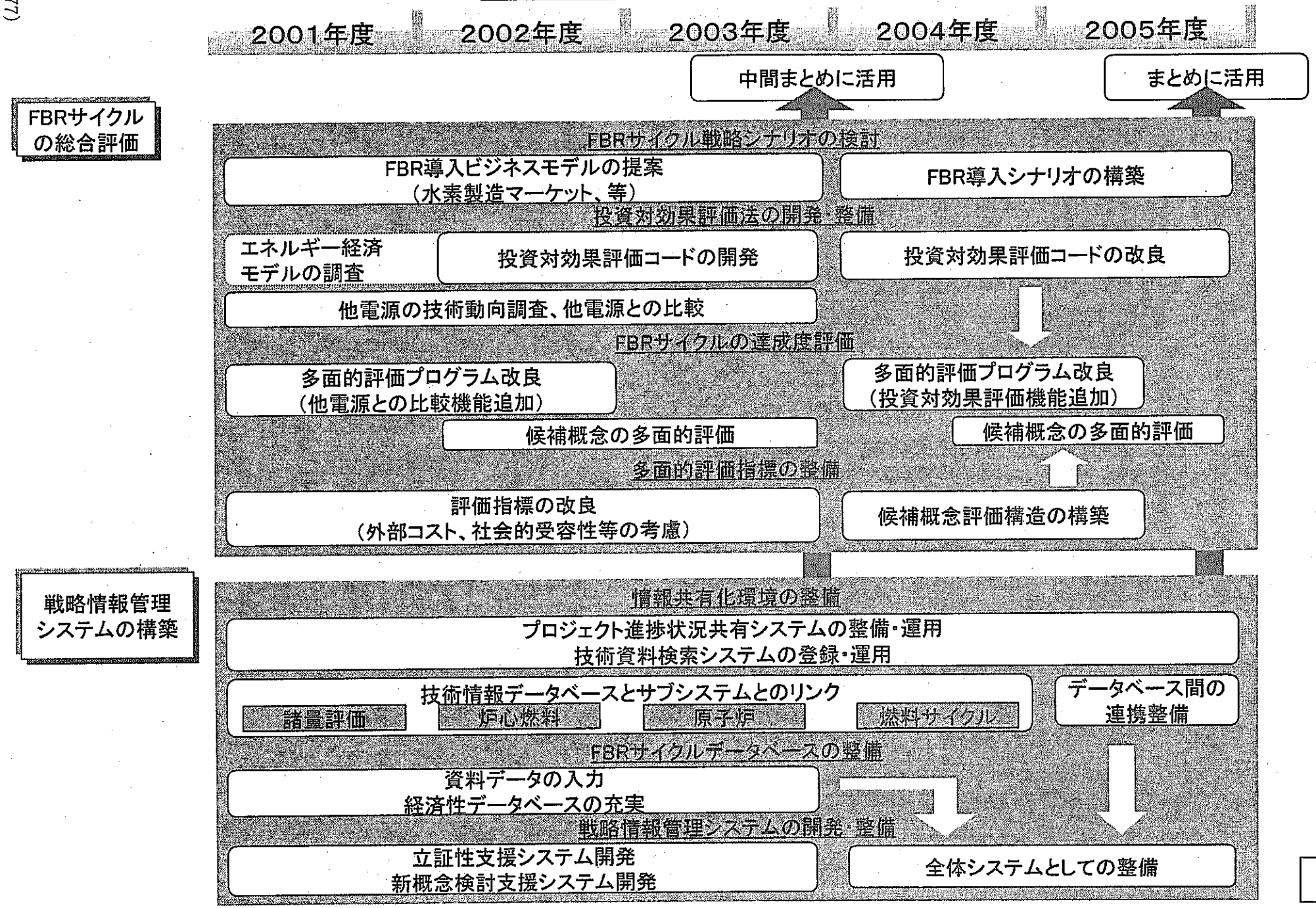


射出成型法



遠心鋳造法

第2期計画 [システム技術の統合・評価]



実用化戦略調査研究第２期の実施体制

○ 第１期の体制を基本的には継続

- オールジャパン体制の維持
  （サイクル機構、電気事業者、電中研、原研、メーカ）
- 要素技術の開発部門の参画拡大
- 新たな会議体構成を導入し、プロジェクトを遂行
  （候補概念のアイデア出し、競争原理）
- 他研究機関、大学等との連携の強化
- 国際協力の強化

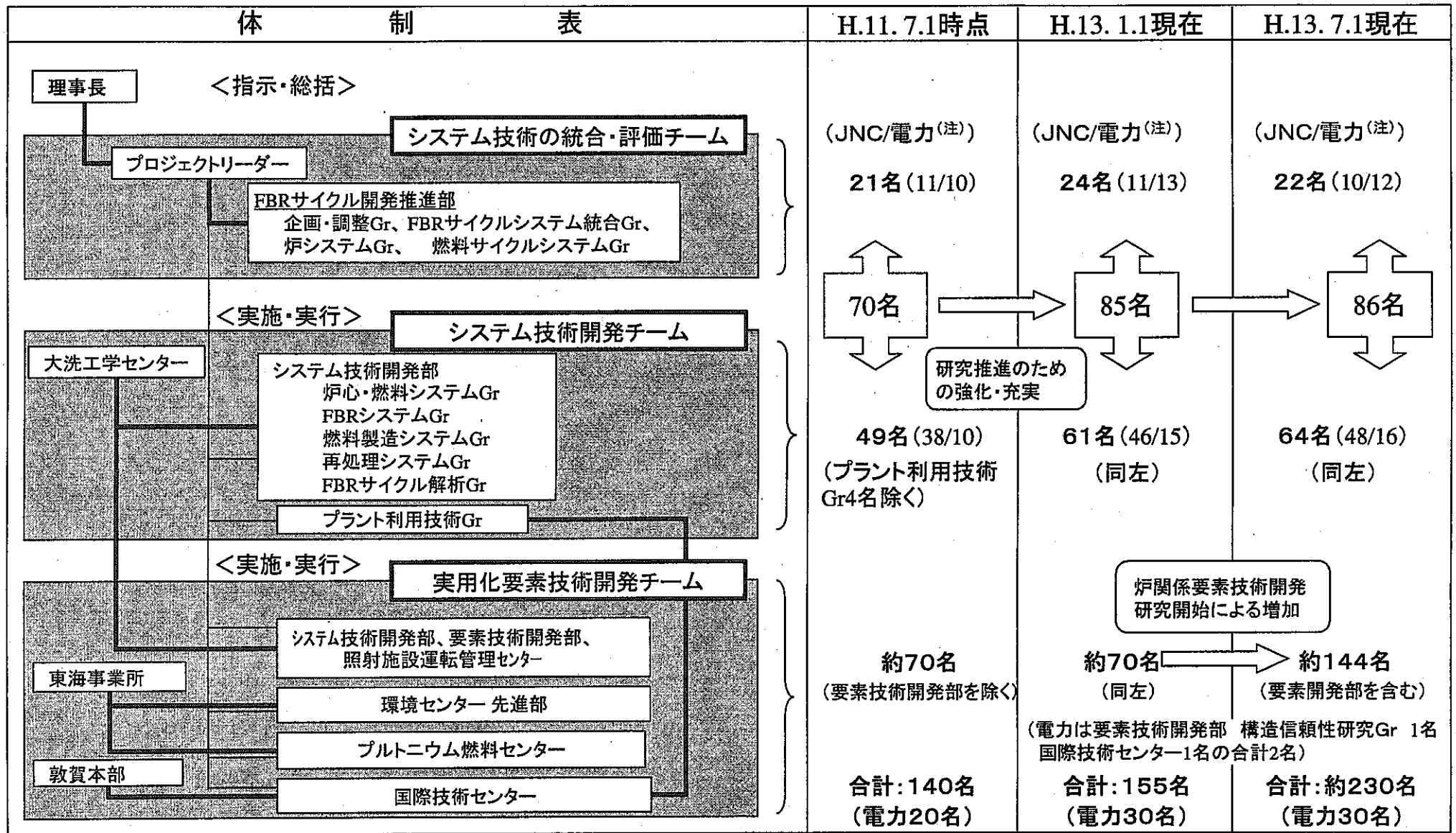
○ アイデア公募の継続実施

- 独創性、創造性に富んだ革新的概念を創出する観点から、大学を始めとする研究者から広く革新的技術アイデアを募集
  - ✧ 第1期で抽出された候補概念について、さらにブレークスルーが図られる革新的技術
  - ✧ 第1期で抽出された概念を凌駕可能と思われる革新的技術

実用化戦略調査研究の体制(JNC内)

平成11年7月1日 電力より約20名が参加し、実用化戦略調査研究体制が発足

(注)電力 : 9電力、原電、電発、電中研、メーカ



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」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。

○ 実施予定の国際協力 ： 対象ー米、欧州、露、カザフ

(1) 炉心燃料
新型燃料(金属燃料、窒化物燃料)、被覆管の開発
[海外照射試験炉(露BOR-60炉、等)／過渡試験炉(米TREAT炉)の活用]
再臨界回避の原理確認 [安全性試験炉(カザフIGR炉)の活用]

(2) プラントシステム
ガス冷却炉の概念検討 [仏CEA]
PbBi冷却炉に係わる材料腐食試験 [独FZK]

(3) 燃料サイクルシステム
乾式再処理技術 [露RAIRの施設、等]、
振動充填燃料製造技術 [スイスPSI＋蘭NRG]

○ GEN-IV等への協力を通して、FBRサイクルの実現に向けての基礎作り

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で、TRU燃料、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。

もんじゅ:
FBR発電炉としての運転、保守等のプラント技術に係る知見を取得し、経済性向上等へ反映

(2) 主としてそれ以降に利用するサイクル機構の主な施設・設備

「常陽」及び照射後試験施設:
2006年以降の本格的な照射のための準備を進める。

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:　2003年度末を目途に計画をまとめる。

高速増殖原型炉「もんじゅ」の使命

もんじゅの役割

2000～2015
発電プラントとしてのFBR技術実証

2010～
経済性向上技術の確証

燃料照射等の活用

発電プラントとしての技術成熟

FBRサイクル技術の開発のために必要なもんじゅの運転保守データ

FBRサイクル実用化の要素技術

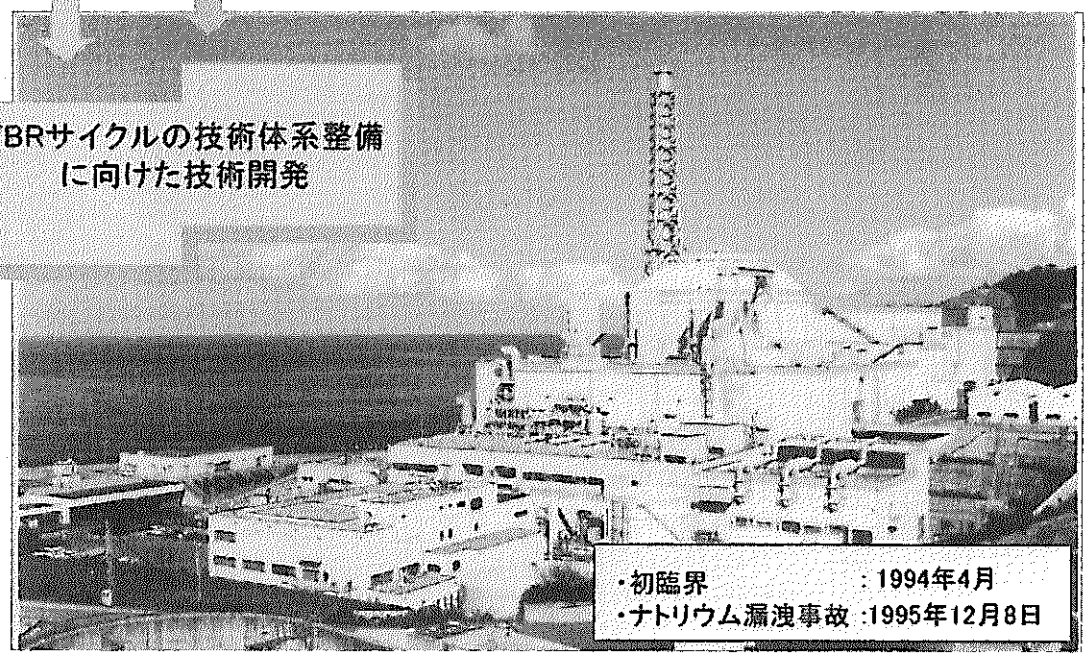
設計要求 等

実用化戦略調査研究

第1期

第2期

FBRサイクルの技術体系整備に向けた技術開発



・初臨界　　：1994年4月
・ナトリウム漏洩事故：1995年12月8日

RETF(リサイクル機器試験施設)計画の検討

先進湿式法

乾式法

RETFで
工学確証すべき
技術項目の摘出

燃料製造試験
も視野に入れる。

試験規模、試験フィールド等、
複数ケースのケーススタディ



RETFの
ユーティリティ設備、換
気設備、分析設備、等
の対応可能性評価

比較・評価
・ 得られる成果、
・ 技術的成立性、
・ 改造費、 等

2003年度末頃

先進湿式法、乾式法両方に
活用できるRETF計画の提示
(燃料製造試験の
実施可能性検討を含む)

第2期の資金計画

2001年6月現在の推計額

（単位：億円）	第1期の実績		第2期（5ヶ年計画）		
	1999年度	2000年度	2001年度（認可予算額）	2002年度（予定額）	2003～2005年度の合計（予定額）
炉心・FBRプラント	5	8	15	27	約100
設計研究	5	7	8	10	
要素技術開発	0.1	0.4	6	17	
燃料サイクル	13	17	21	23	約90
設計研究	3	5	3	3	
要素技術開発	10	12	18	21	
統合・評価	2	5	3	4	約10
合計	20	30	39	54	約200
			約290		

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及び燃料照射

(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済み)
○ 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

(4) 高速増殖炉の安全研究(基盤研究開発)
(2001年度に中間評価を実施済み)
○ 個々の専門的技術分野の研究であり、実用化戦略調査研究を支援する役割
○ 長期的、基礎的な研究

第2期の期待される成果と波及効果

JNC

期待される成果

○ FBRサイクルの実用化候補概念の絞込み(複数)

・ 定量的な概念設計結果、技術的成立性のバックデータに基づく絞り込み

炉

ナトリウム冷却炉 ： 経済性、環境負荷低減性等の目標達成のための主要技術の成立見通しを評価し、概念を確立。

ガス冷却炉 ： 高温、高燃焼度を達成できる有望な燃料被覆(被覆管または被覆粒子燃料の被覆材)を炉外試験、文献調査ベースで選定。事故時の炉心冷却性等について見通しを評価し、概念を確立。

鉛ビスマス冷却炉 ： 国内外の施設を活用し、冷却材中の材料腐食の抑制限界を見極め、概念を確立。

水冷却炉 ： 稠密炉心の除熱特性、炉心安全性等を評価し、概念を確立。

小型炉 ： 大型炉・中型炉向けと兼用で実施する要素技術開発により、成立性を評価し、概念を確立。

再処理

先進湿式 ： 経済性向上技術の成立性見通しを評価し、概念を確立。また、環境負荷低減のTRU回収法、LLFP分離法を選定し、その基本性能確認を確認するとともに、経済性への影響を評価し、概念への組み込み。

乾式 ： 酸化物電解法、金属電解法の枢要技術について、小規模Pu試験等により、成立性を見極め、概念を確立。

ハイブリッド ： 湿式、乾式双方の特長を生かした概念の構築。

燃料製造

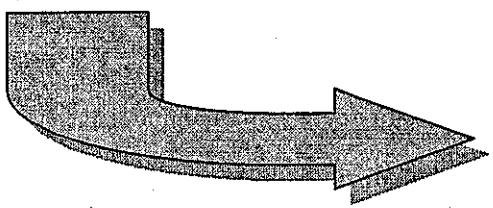
ペレット ： 簡素化ペレット法による経済性向上効果、低除染TRU含有燃料の製作性を、試作試験により見極め、概念を確立。

振動動充填 ： 試作試験により、有望な顆粒製造法を選定するとともに、小規模システム試験により充填技術を開発し、また低除染TRU燃料の製造性を基礎試験で見極め、概念を確立。

鋳造 ： 枢要なプロセスについて、国内で小規模な試験を実施し、ノウハウを獲得するとともに、概念を確立。

○ 社会の多様なニーズへの対応に配慮したFBRサイクルの導入シナリオ

○ 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)



○ 研究開発課題評価委員会、原子力委員会の評価結果を反映した上で、国の計画へ反映

その他事項

◆成果の公開･発表状況

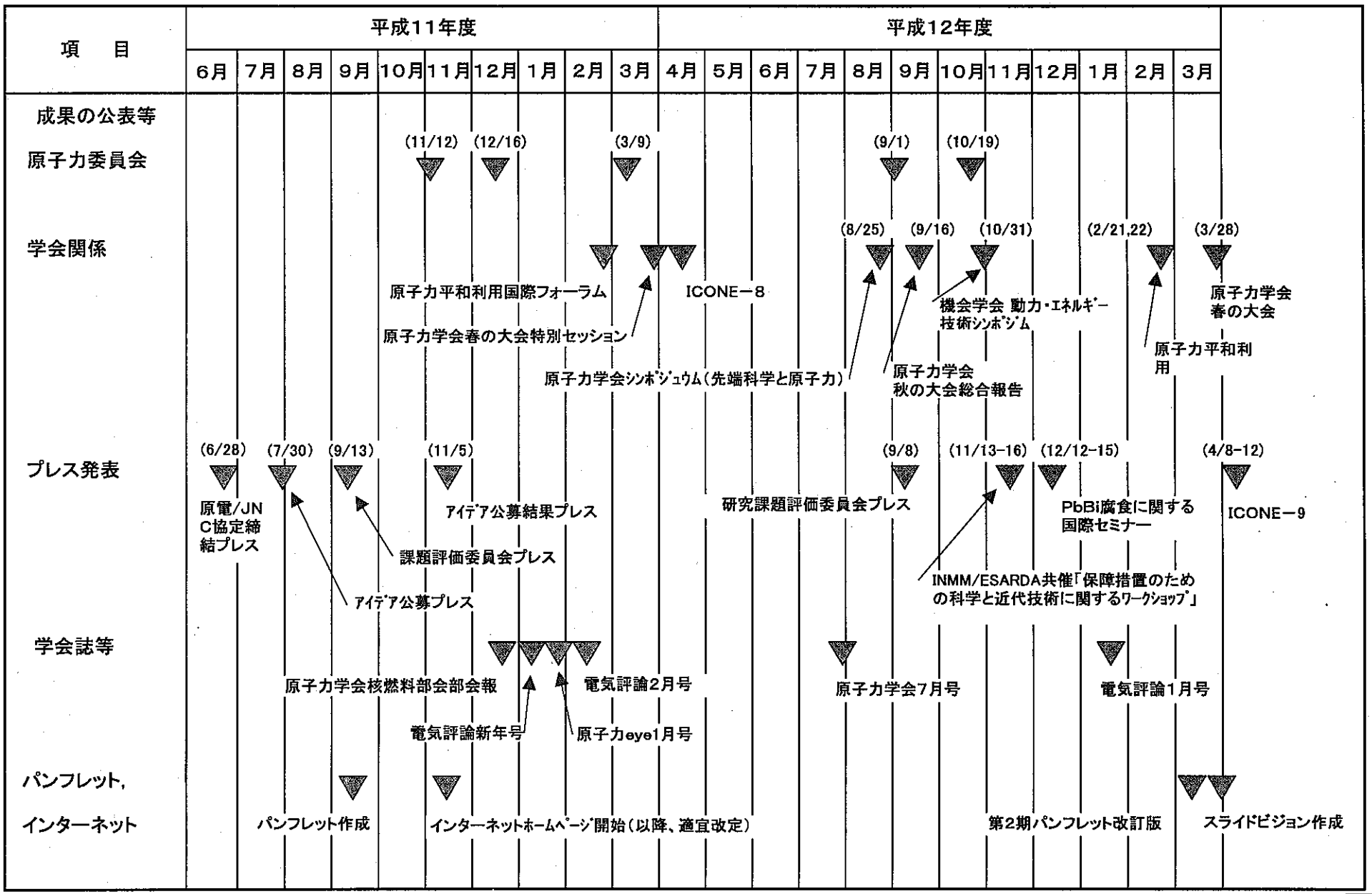
◆措置事項の実施状況

特許出願状況

JNC

	件名	状況	申請機関	内容
1	ナトリウム冷却高速炉(鉛反射体及び反応度制御機構)	特願2000-185303	JNC	これまでのナトリウム冷却高速炉では、中性子反射体をSUSを用いている。本発明は、これを鉛からなる構成とし、炉心の燃料富化度を低減し、出力分布を平坦化し、内部転換比を増加させるものである。また、当該鉛反射体は受動的炉停止装置として用いることも可能である。
2	高速炉用非均質燃料集合体	特願2000-252819	JNC	高Pu富化度の炉心燃料ピン束部を隔壁で仕切り、劣化ウランからなるブランケット燃料ピンが取り囲む構造を有する燃料集合体。増殖性の向上と安全性向上、燃料寿命の延長が同時に達成できる。また、ブランケット燃料集合体を使用しない炉心と出来るので、核拡散抵抗性の観点から望ましい概念。
3	液体金属冷却高速炉用の炉心燃料集合体(炉心燃料ピン束部にボイド管を有する燃料集合体)	特許出願中	JNC	燃料集合体中の一部にガスで満たした密封管を配置し、この結果挿入される正の反応度分だけプルトニウム富化度及び燃焼反応度を低減し、転換率(増殖率)を高める。仮に、ガス注入密封管が破損し、冷却材が密封間に浸入しても、負の反応度挿入現象であり、安全性上問題とならない。
4	隔壁管分離・直管型熱交換器	出願準備中	JNC	伝熱管破損時等の影響緩和対策として、直管伝熱管と隔壁構造の配置・構造に関する考案。
5	隔壁管分離・ヘリカル型熱交換器	出願準備中	JNC	伝熱管破損時等の影響緩和対策として、ヘリカル伝熱管と隔壁構造の配置・構造に関する考案。
6	伝熱管検査装置	出願準備中	JNC	SG等の伝熱管のトモグラフィ技術を応用した検査装置の考案。
7	ポンプ合体熱交換器(仮名)	出願準備中	JNC	EMPとIHX及びSG等の合体構造の考案。
8	アクティブ温度制御による原子炉容器の熱荷重緩和装置	出願準備中	JNC	原子炉容器液面近傍の温度分布を制御することによって，熱応力を緩和する装置。
9	核燃料製造プロセスの簡素化	申請中	JNC	所定のPu富化度調整した粉末を、気流搬送システムにより成型機に導入し、バインダー等の添加剤無しで直接ペレットを作製し、焼結工程を経て、製品ペレットを得る。その際の不良品を再溶解させ、リサイクルして製品ペレットを作製するプロセスである。
10	ターンテーブル式核燃料粉末製造装置及びターンテーブル式核 燃料粉末製造装置を収めるセル	申請中	JNC、三菱マテリアル、ソアテックの共同	溶液用を保持する容器同士が干渉することを防止しながら確実に移動させることができるとともに、保守作業の容易化を図ったターンテーブル式核燃料粉末製造装置及びこれらの装置を収めるセルに関するもの。
11	内圧クリープ破断検出法	出願準備中	JNC	MARICO-2(H16から照射を開始)に装荷するクリープ試験試料の破断検出法を改良するもの。
12	使用済核燃料の前処理方法および前処理装置	申請中 平成12年7月28日 特願2000-228794	JNC	使用済核燃料棒を被覆管ごと粒状または粉状に粉砕し、粉砕物から被覆管粉砕物を磁気的に捕集除去して使用済核燃料粉砕物を分離した後、分離した使用済核燃料粉砕物を硝酸溶解槽または溶融塩電解槽に移送して処理する前処理方法及び前処理装置。
13	使用済核燃料の乾式再処理法及び乾式再処理法に用いる誘導加熱装置	申請中 平成13年5月25日 特願2001-157410	JNC	使用済核燃料をるつぼ内の溶融塩中に溶融させて核燃料を析出させる乾式再処理法において、るつぼを誘導加熱するとともに、冷却媒体を供給して冷却し、加熱と冷却のバランスにより、溶融塩槽を保持しつつ、るつぼ内壁面に塩凝固層を生成するようにした使用済核燃料の乾式再処理法及び乾式再処理法に用いる誘導加熱装置。
14	溶融塩電解を利用した使用済核燃料の再処理装置	申請中 平成13年4月9日 出願依頼書提出	JNC	溶融塩電解を利用した使用済核燃料の再処理装置において陰極のまわりを陽極で囲んだ電極モジュールとし、処理速度を向上し、装置をコンパクト化した。
15	溶媒中イオン濃度のその場測定法	申請中 平成13年6月15日 出願依頼書提出	JNC	減衰全内反射法(ATR法)の原理を応用し、石英製プローブ(例:石英製光ファイバのコア部分)を用いて、腐食性溶液又は高温の溶融塩に溶存するイオン濃度を光学的にその場測定することを可能にした。
16	使用済み燃料の再処理方法	計画中 平成13年度申請予定	JNC	酸化物燃料を硝酸を含むTBP溶媒と接触して直接 U 及び Pu を抽出する方法。
17	高速炉用燃料集合体	申請中 平成12年 特願2000-241040	JNC、電力の共同	炉心損傷時の再臨界の発生を回避する目的で、燃料集合体内の中央部に、下部軸ブランケットを削除した複数本(例えば37本)の燃料ピンを配置し、燃料溶融・破損時に 炉心部からの溶融燃料の流出を促進させる構造としたもの。

成果の公開・発表状況


項　目
平成11年度
平成12年度
6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月
成果の公表等
原子力委員会
(11/12)
(12/16)
(3/9)
(9/1)
(10/19)
学会関係
(8/25)
(9/16)
(10/31)
(2/21,22)
(3/28)
原子力平和利用国際フォーラム
原子力学会春の大会特別セッション
原子力学会ｼﾝﾎﾟｼﾞｭｳﾑ（先端科学と原子力）
ICONE－8
機会学会 動力・ｴﾈﾙｷﾞｰ技術ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ
原子力学会秋の大会総合報告
原子力平和利用
原子力学会春の大会
プレス発表
(6/28)
(7/30)
(9/13)
(11/5)
(9/8)
(11/13−16)
(12/12−15)
(4/8−12)
原電/JNC協定締結プレス
ｱｲﾃﾞｱ公募プレス
課題評価委員会プレス
ｱｲﾃﾞｱ公募結果プレス
研究課題評価委員会プレス
INMM/ESARDA共催「保障措置のための科学と近代技術に関するﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ」
PbBi腐食に関する国際セミナー
ICONE－9
学会誌等
原子力学会核燃料部会部会報
電気評論新年号
電気評論2月号
原子力eye1月号
原子力学会7月号
電気評論1月号
パンフレット，インターネット
パンフレット作成
インターネットﾎｰﾑﾍﾟｰｼﾞ開始（以降、適宜改定）
第2期パンフレット改訂版
スライドビジョン作成

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フォローするとともに、今後の研究開発計画の策定の中に反映

- 研究の目的･意義と開発目標
- FBRサイクルの実用化候補の絞込み
- 総合的な評価手法
- 第2期の研究開発計画の策定
- 研究実施体制
- 研究成果の独創性
- 得られた成果の公開

措置事項の実施状況（1／2）

1. 研究の目的･意義と開発目標

- ✓ 本研究の目的、意義を支える前提条件となる将来の社会情勢が変化することになれば、適宜目標の見直しを行い、柔軟な計画を心がけて研究を進めることとしている。
- ✓ 安全性はFBRサイクルが受容されるための大前提として、また経済性の克服がFBRサイクル導入の第一の要点と考えて本研究を進めている。
- ✓ 地球生態環境との一層の調和を図るため、環境負荷の低減に重要性をおき、TRU燃焼や超半減期FPの核変換については要素技術開発と連携を取りながら段階的に取り組んでいくこととしている。

2. FBRサイクルの実用化候補の絞込み

- ✓ 各システムの概念検討では、技術的成立性及び設計要求に対する適合性の評価を行い、さらにFBRサイクルとしての整合性、国際協力の可能性等を総合的に勘案して、第2期で検討を行う技術の抽出を行った。
- ✓ 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とともに、検討した内容はデータベースとして残し、いつでも復活できるよう留意した。

3. 総合的な評価手法

- ✓ 第1期では評価指標の適用性や相互関係を確認した。
- ✓ 第2期では、各開発目標を定量的に評価する際の影響度等の設定値の充実を図るとともに、評価手法の開発を継続し、実用化候補概念の絞込みを行う際の判断材料として活用することとしている。

4. 第2期の研究開発計画の策定

- ✓ FBRサイクル実用化に向けた技術体系の整備を進める上での第2期の位置付けを設定し、第2期のマイルストーンと、マイルストーン毎に得るべき成果を明確にした。

措置事項の実施状況（2／2）

5. 研究実施体制

- ✓ プロジェクト会議の下に、新たに炉・燃料サイクル調整会議、炉システム会議及び燃料サイクル会議を設置し、事業所間、部門間にまたがる開発計画の調整、成果の評価を横断的に行うこととした。
- ✓ 炉システム及び燃料サイクルシステム開発に関しては、その主要な技術選択肢毎に検討会を設置し、関係部門の専門家が総力を挙げてプロジェクト的に取り組むこととしている。

6. 研究成果の独創性

- ✓ 第2期においても、第1期と同様、独創性、創造性に富んだ革新的アイデアを広く開発する観点から、国内外の大学、研究機関を対象にアイデア公募を実施している。

7. 得られた成果の公開

- ✓ 第1期の終了並びに第2期の開始にあたって、第1期の成果や第2期の研究開発計画について、一般の方を対象としたパンフレットや、スライドビデオを作製、配布した。
- ✓ 第1期の最終報告書については、今回の研究開発課題評価委員会の評価結果を反映した上で、公表することとしている。
- ✓ さらに、分かり易さに配慮した小冊子やインターネットによる情報の公開を準備している。

説明用OHP別冊

本資料は、課題評価委員会の評価意見により改訂したものである。

評価手法の適用性検討

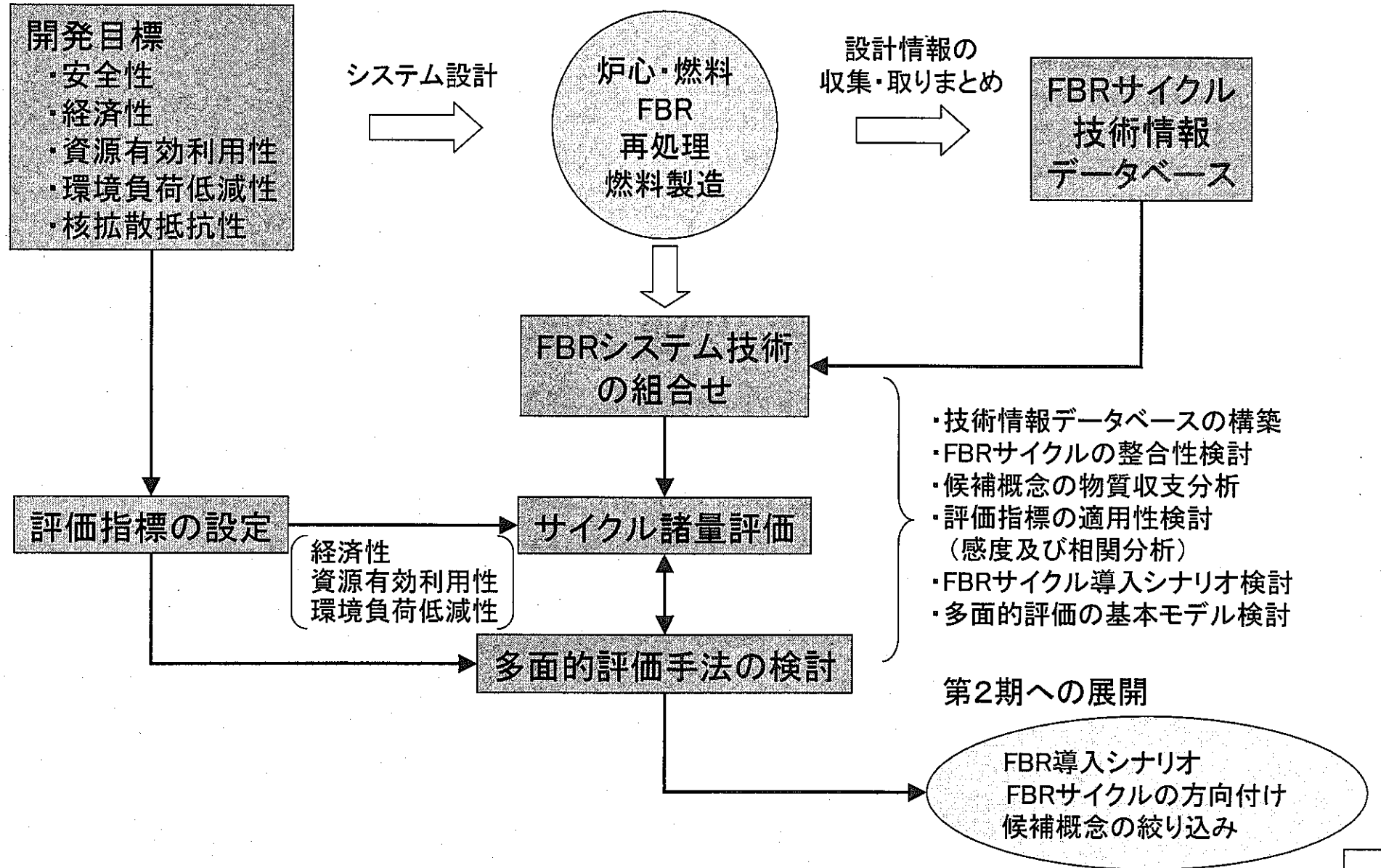
◆ 評価手法の検討

◆ 評価手法の適用性検討

平成13年7月9日
（平成13年10月改訂）

核燃料サイクル開発機構

FBRサイクルの総合評価



第1期の評価指標

評価の視点	評価指標		
	一次指標	二次指標	三次指標
経済性	発電単価	資本費	減価償却費 事業報酬 固定資産税 廃止措置費
		運転維持費	人件費 修繕費 諸費 関連費
		燃料サイクル費	燃料製造費 燃料輸送費 再処理費 廃棄物処分費
		年間発電量	電気出力(送電端) 設備利用率
		耐用年数	
資源有効利用性	資源節約性	ウラン累積需要量	TRUインベントリー TRU利得 炉外滞在時間
	資源活用性	ウラン利用率	増殖比 燃焼度 ロス率
環境負荷低減性	固化・隔離	発生量	高レベル廃棄物 TRU深地中廃棄物 高$\beta\gamma$廃棄物 低レベル廃棄物
		放射性毒性	
	希釈放出	周辺被ばく線量	大気放出 海洋放出

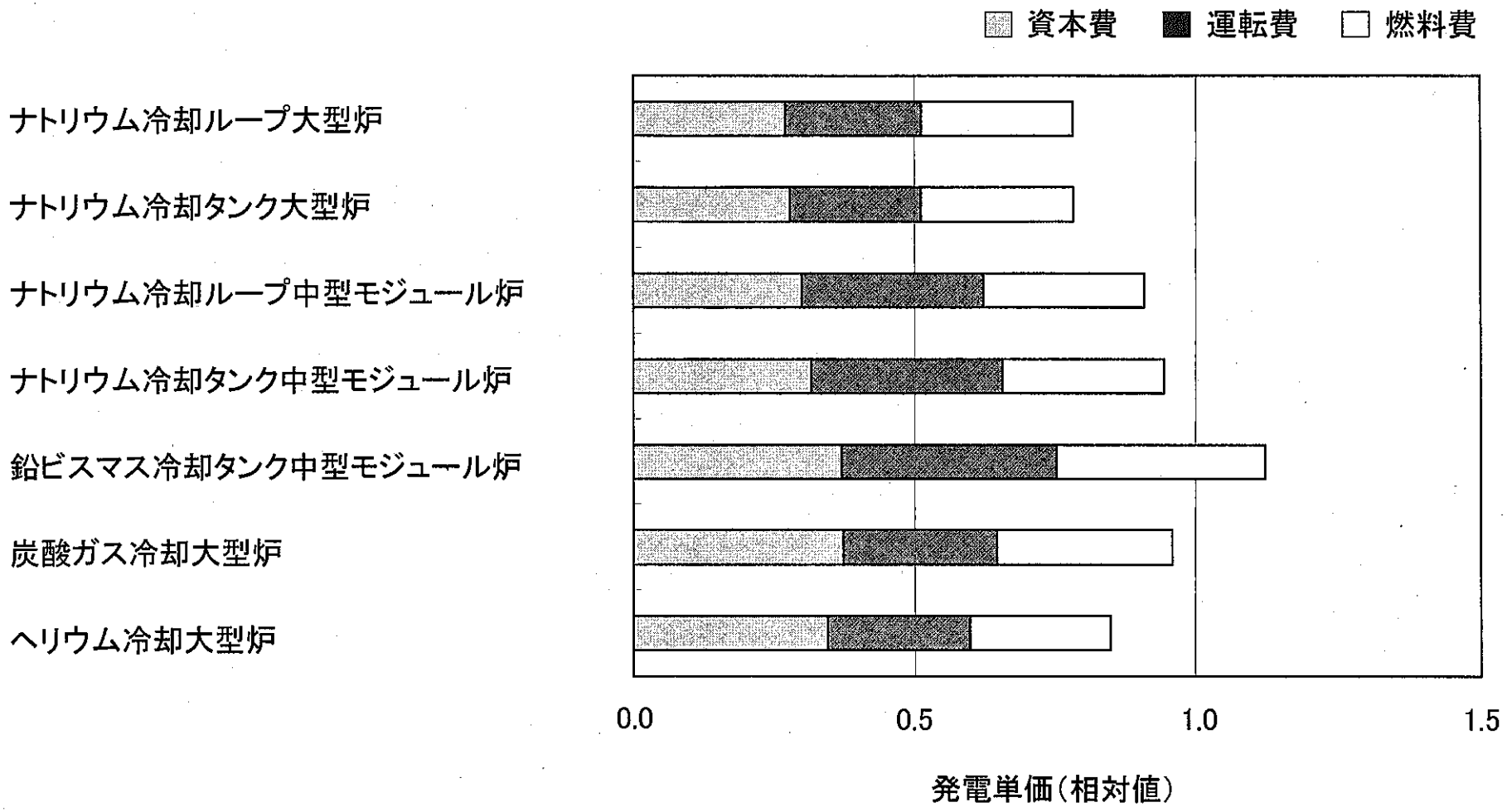
評価の視点	評価指標		
	一次指標	二次指標	三次指標
核拡散抵抗性	内部因子	使用済燃料組成	放射能量 発熱量 核分裂性Pu比率
		Puの存在形態 Pu同位体組成 Pu製品混合性状 プロセス転用障壁 Pu持出容易性	
	外部因子	在庫管理容易性 在庫計量容易性 在庫確認容易性 核物質防護	
安全性	プラント安全性(設計基準事象の安全性)	安全設計方針 安全評価	
	炉心安全性(上記を超える事象の安全性)	炉心損傷防止 再臨界回避 事故後安定冷却・閉じ込め	
技術的実現性	成立性	技術レベル	
	開発投資	投資資金	

FBRサイクルの主な組合せと設計情報

組合せ				設計情報												
炉型	燃料形態	再処理	燃料製造	電気出力 (MWe)	熱効率 (%)	所内負荷率 (%)	炉心燃焼度 (MWd/t)	平均燃焼度 (MWd/t)	増殖比	倍増時間 (年)	初装荷Puf量 (kg/MWe)	ﾊﾞｯﾁ当りHM量 (kg/MWe)	Pu回収率 (%)	Am回収率 (%)	除染係数	ロス率 (%)
Na大型	酸化物*1	先進湿式	ペレット	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.7	99.8	1000	0.4
		酸化物電解	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.9	98.9	10	0.2
		金属電解	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.3	99.2	11	0.8
		フッ化物揮発	振動充填	1500	42	4.1	146,800	56,300	1.24	33	5.0	27.5	99.8	99.2	19	0.3
	酸化物*2	先進湿式	ペレット	1500	42	4.1	149,000	63,100	1.17	41	4.1	19.5	99.7	99.8	1000	0.4
	金属*2	金属電解	射出成型	1500	38.5	4.1	150,000	68,000	1.29	17	3.3	21.9	99.8	99.4	10	0.7
Na中型 (モジュール)	酸化物*1	先進湿式	ペレット	500×3	42	4.5	150,000	50,000	1.23	35	5.4	30.3	99.7	99,8	1000	0.4
	金属*2	金属電解	射出成型	500×3	38.5	4.5	149,000	60,000	1.2	33	4.6	23.4	99.8	99.4	10	0.7
Pb－Bi中型 (モジュール)	窒化物*2	先進湿式	ペレット	400×4	38	2.8	153,000	39,200	1.19	65	12.7	30.2	99.7	99.8	1000	0.4
		金属電解	振動充填	400×4	38	2.8	153,000	39,200	1.19	65	12.7	30.2	99.3	99.2	11	0.8
CO_2大型	酸化物*2	先進湿式	ペレット	1370	38	13.9	155,000	66,000	1.20	57	7.7	29.0	99.7	99.8	1000	0.4
	窒化物*2			1370	38	13.9	159,000	69,000	1.38	23	7.3	39.6	99.7	99.8	1000	0.4
He大型	窒化物*2	先進湿式	ペレット	1120	47	2.4	137,000	483,00	1.20	68	7.0	27.0	99.7	99.8	1000	0.4

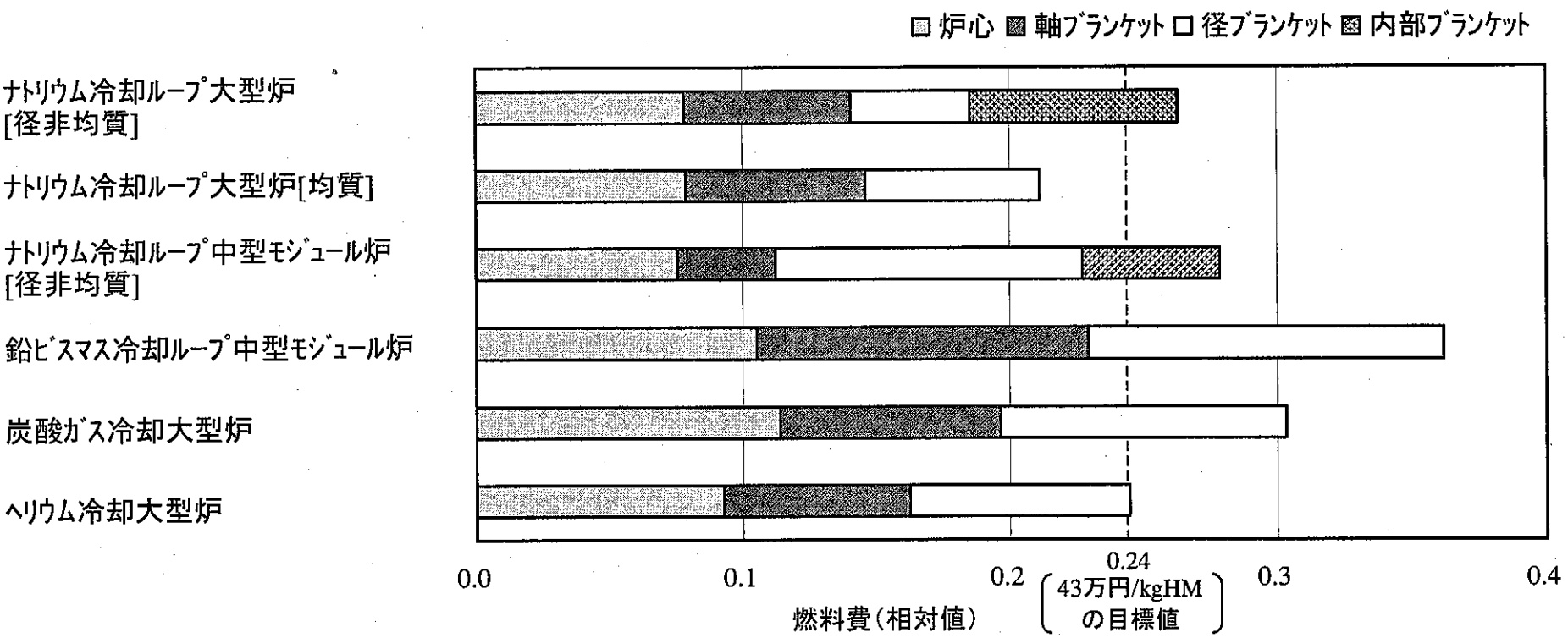
*1 径方向非均質炉心、*2 均質炉心

経済性 [発電単価に対する炉型の影響]に関する試算結果



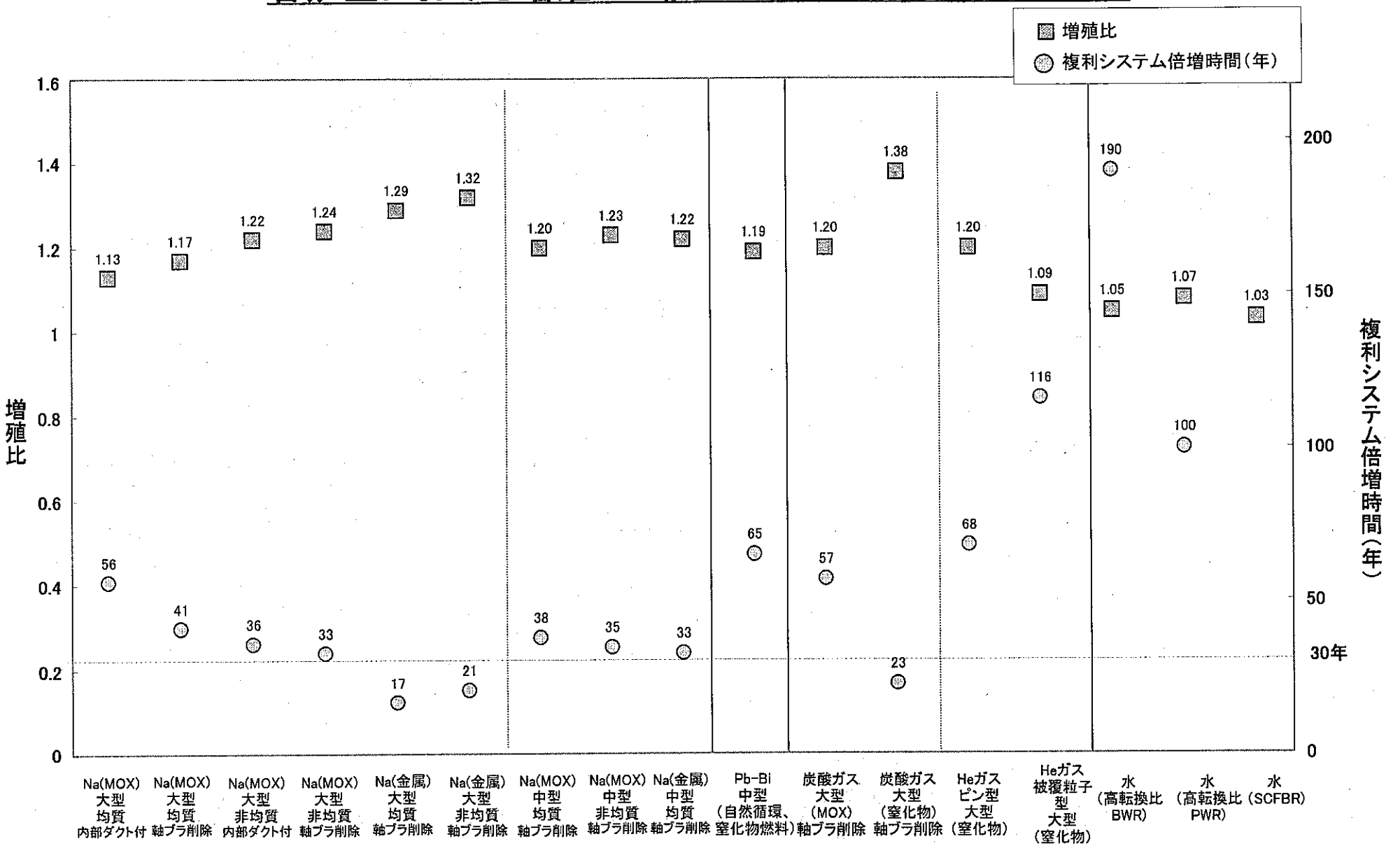
注1) ナトリウム炉は酸化物燃料非均質炉心、その他の炉は窒化物燃料均質炉心
注2) 再処理は先進湿式法、燃料製造は簡素化ペレット法(200tHM/年)
注3) 将来LWRの発電単価を基準

経済性 [発電単価に対する炉心構成の影響]に関する試算結果

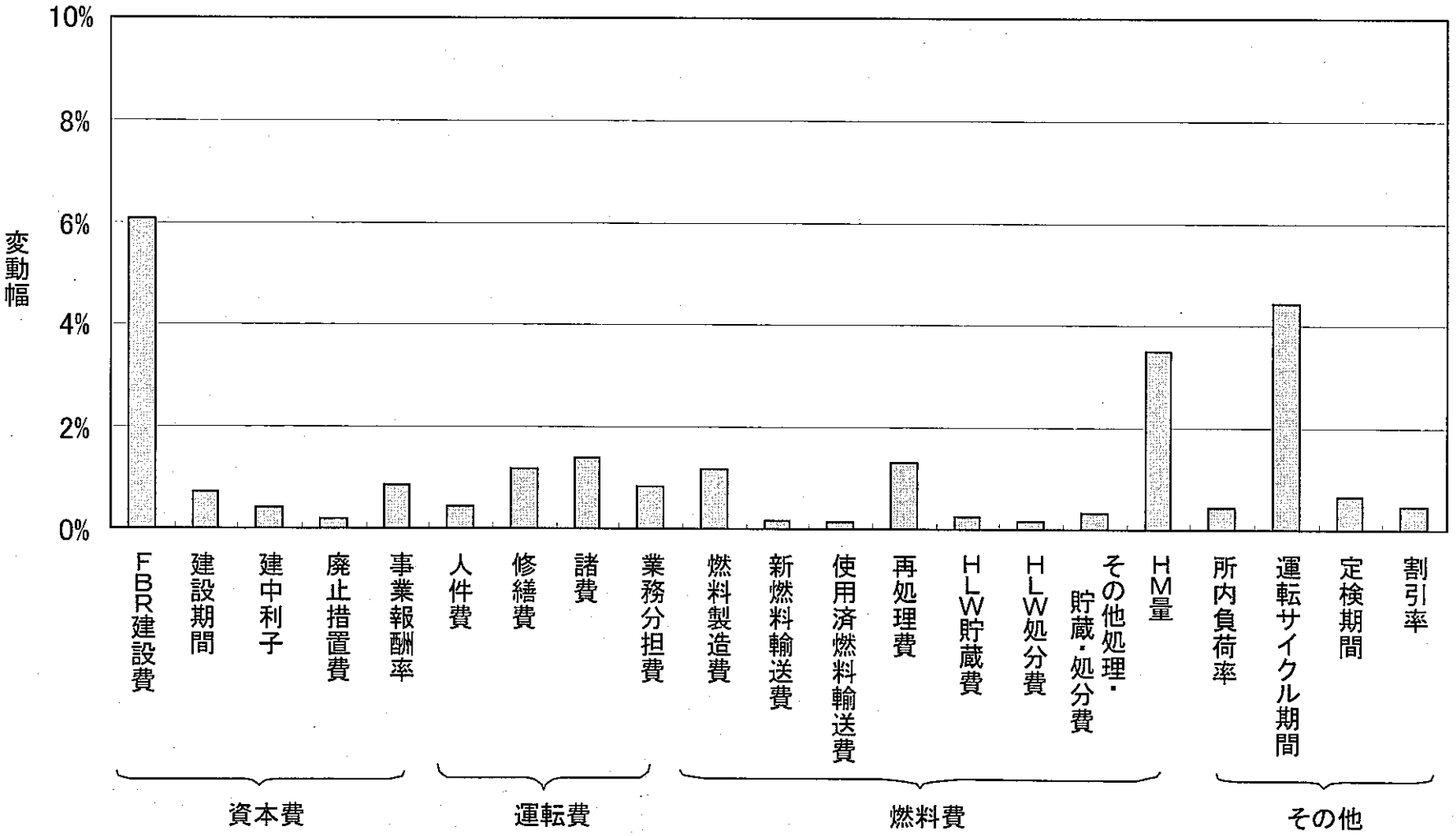


注1) ナトリウム炉は酸化物燃料、その他の炉は窒化物燃料
注2) 再処理は先進湿式法、燃料製造は簡素化ペレット法(200tHM/年)
注3) 将来LWRの発電単価を基準

各炉型における増殖比と複利システム倍増時間の関係



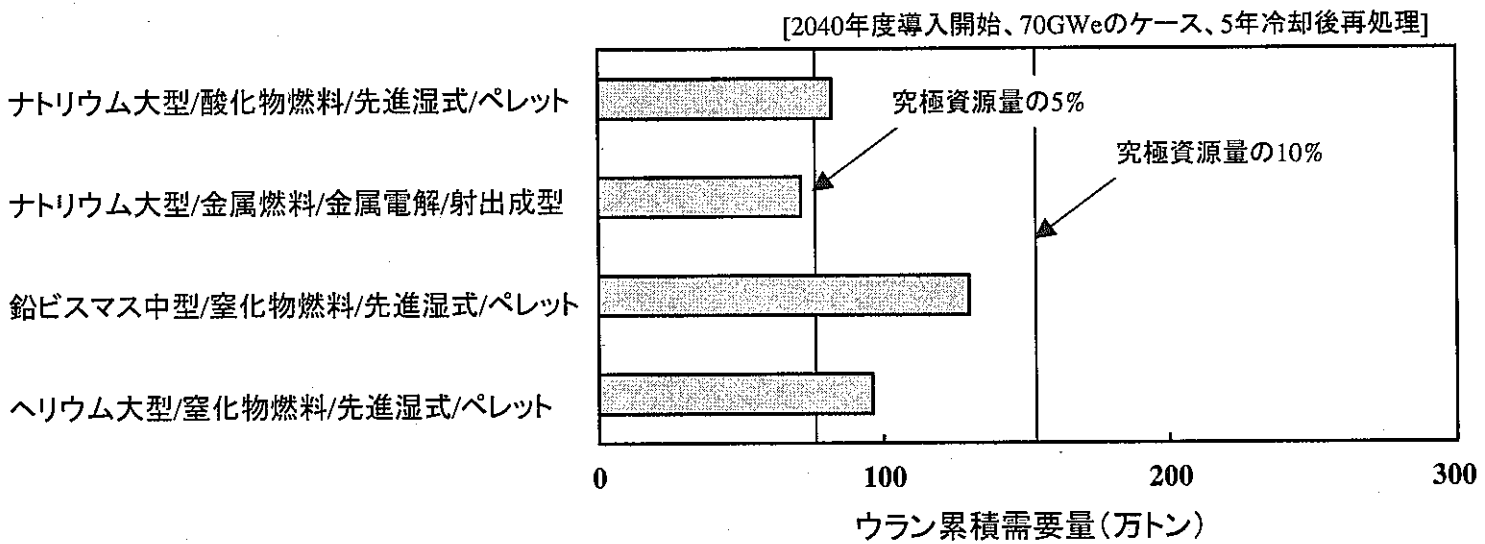
発電単価に対する入力値の感度

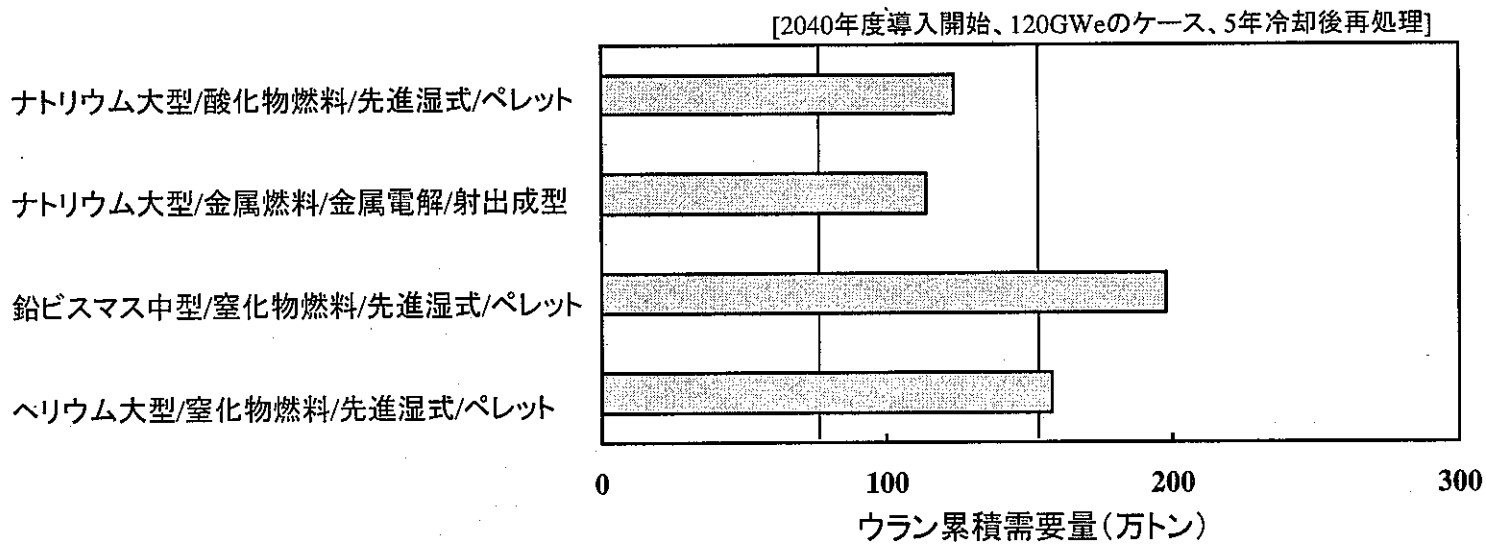


注1) Na冷却大型炉/先進湿式/ペレットのケースについて入力値を10%変動させたときの発電単価の変動幅
注2) 燃料製造費、再処理費の変動幅うち、建設費の割合はそれぞれ約5割及び約4割

資源有効利用性に関する試算結果

資源節約性(ウラン累積需要量)



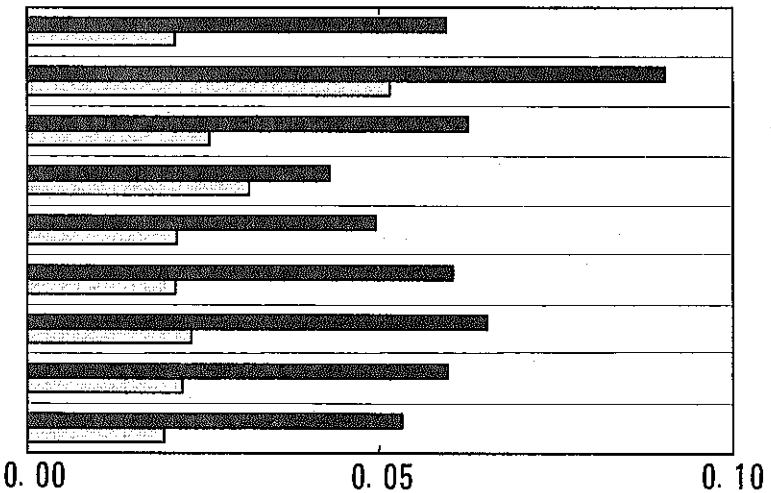


環境負荷低減性に関する試算結果

廃棄物発生量

炉型	燃料	炉心	再処理	燃料製造
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	従来湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	酸化物電解法*	顆粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	金属電解法*	転動造粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	フッ化物揮発法*	流動床振動充填法*
Na冷却ループ中型モジュール	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Pb-Bi冷却タンク中型モジュール	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
炭酸ガス冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
ヘリウム冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法

＊ 50t/y

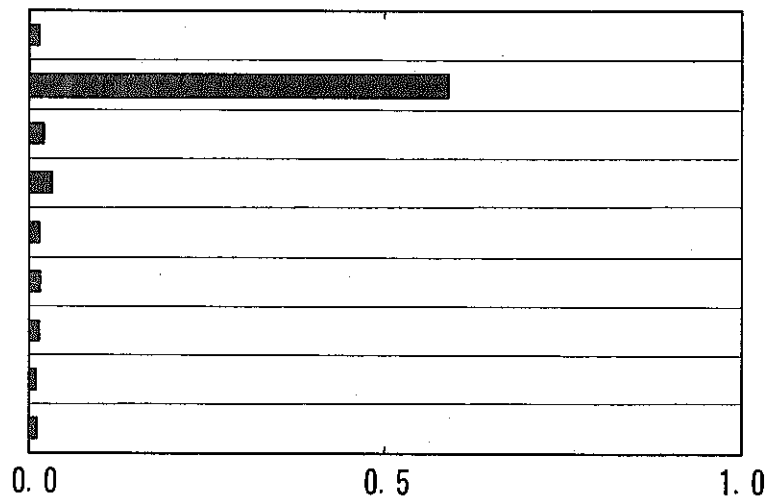


LWR直接処分の発生量基準（相対値）　黒：廃棄物総量
灰：占有面積換算

廃棄物潜在的毒性（1000年後）

炉型	燃料	炉心	再処理	燃料製造
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	従来湿式法	簡素化ペレット法
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	酸化物電解法*	顆粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	金属電解法*	転動造粒振動充填法*
Na冷却ループ大型	酸化物	径方向非均質	フッ化物揮発法*	流動床振動充填法*
Na冷却ループ中型モジュール	酸化物	径方向非均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
Pb-Bi冷却タンク中型モジュール	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
炭酸ガス冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法
ヘリウム冷却大型	窒化物	均質	先進湿式法	簡素化ペレット法

＊ 50t/y



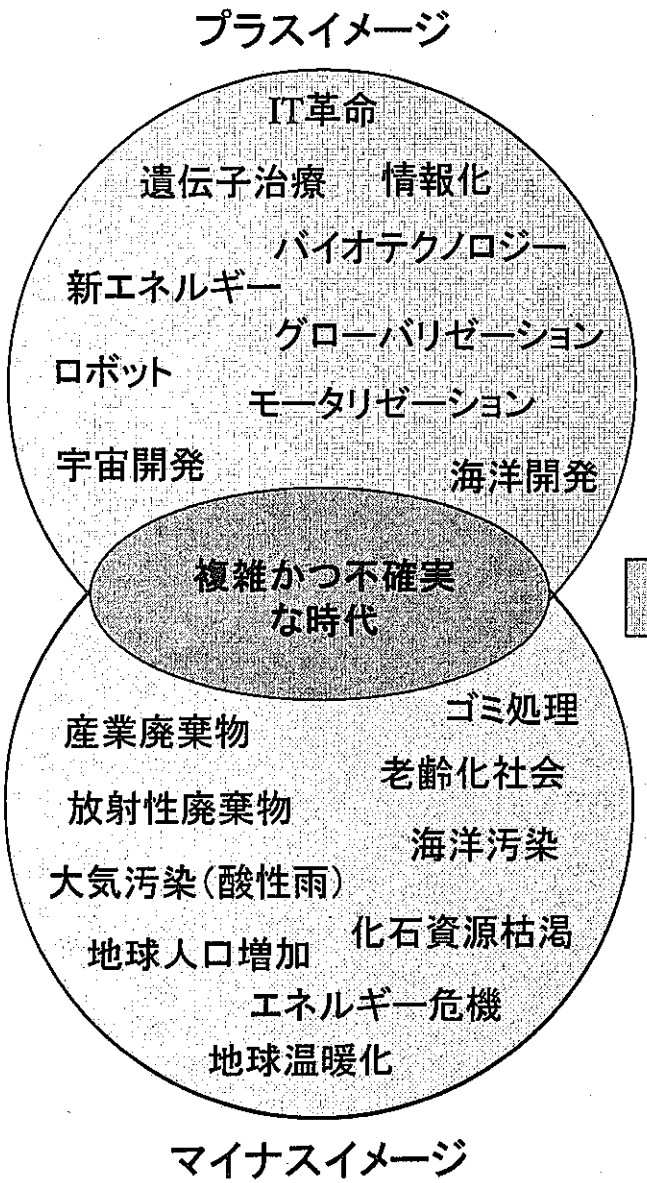
LWR直接処分の使用済燃料中の潜在毒性基準（相対値）

評価手法の検討に関する第1期のまとめ

第1期では、同一の開発目標、設計要求の下で、炉・再処理・燃料製造システムの概念検討を実施し、評価手法の適用性を検討

- 経済性目標に対する定量化が可能
- 経済性と炉心性能とのバランスを取った炉心設計が今後の課題
  - 平均燃焼度と出力密度への配慮が必要
- 経済性に関する感度分析
  - FBR建設費、運転サイクル期間の長期化、点検期間の短縮、HMインベントリなどの影響が比較的大きい
- 湿式(200tHM/年)と乾式(50tHM/年)プラントはほぼ同等の経済性達成可能な見通し
  - 湿式では代替補完技術、ハイブリッド技術の採用などにより、一層のコストダウンが必要
  - 乾式では工学的成立性に係る実験的検証が不可欠
- 廃棄物の発生量や潜在毒性などは再処理技術が支配的
  - 再処理の回収率向上、二次廃棄物の低減が必要

21世紀社会の展望とFBR導入シナリオ



技術開発

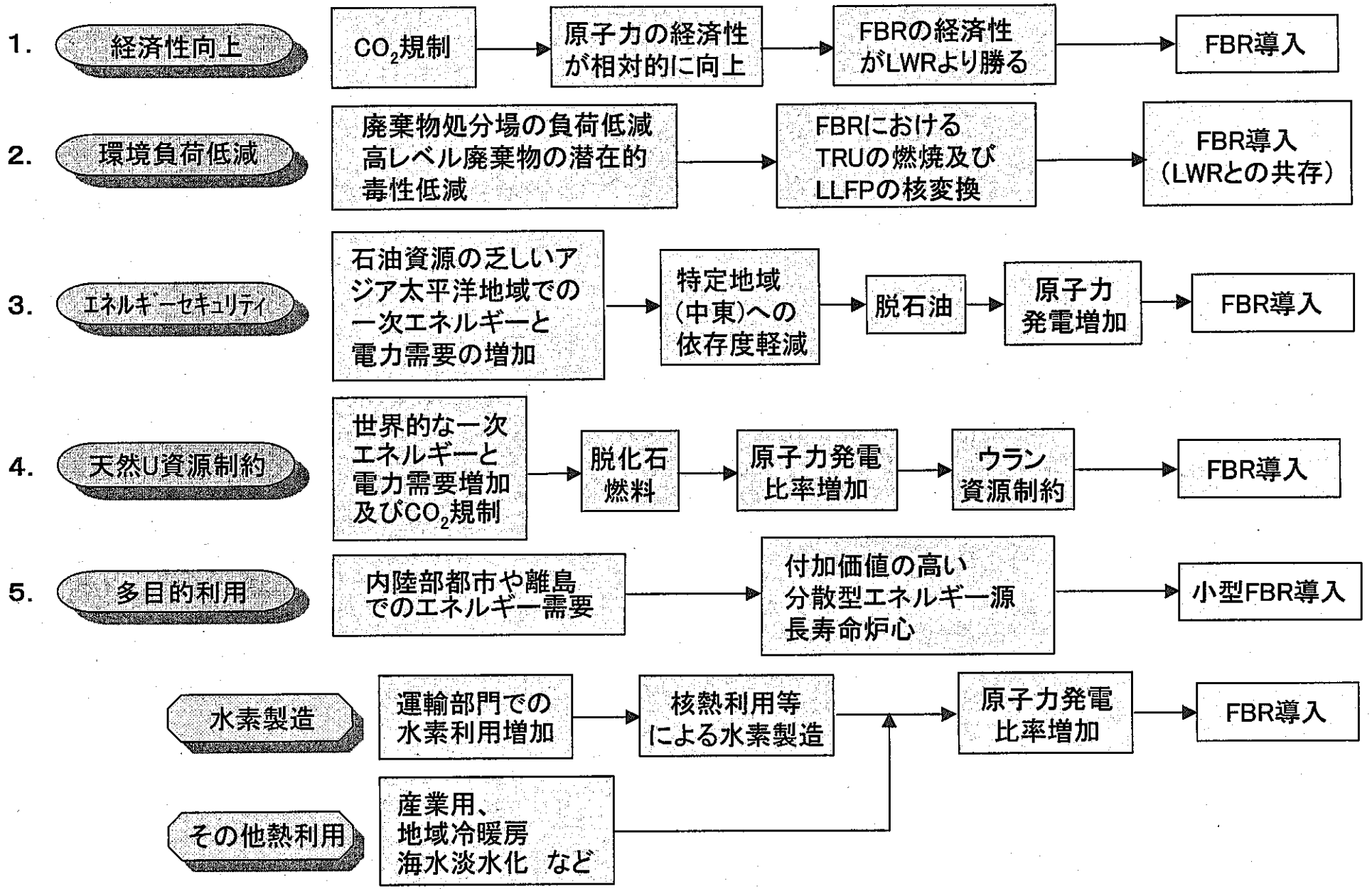
人と環境にやさしい技術

- リサイクル社会
- 水素利用
- エネルギー源の多様化
- 環境保全
- 資源節約
- 資源有効利用
- リスク管理

持続可能な社会

エネルギー資源としての原子力利用

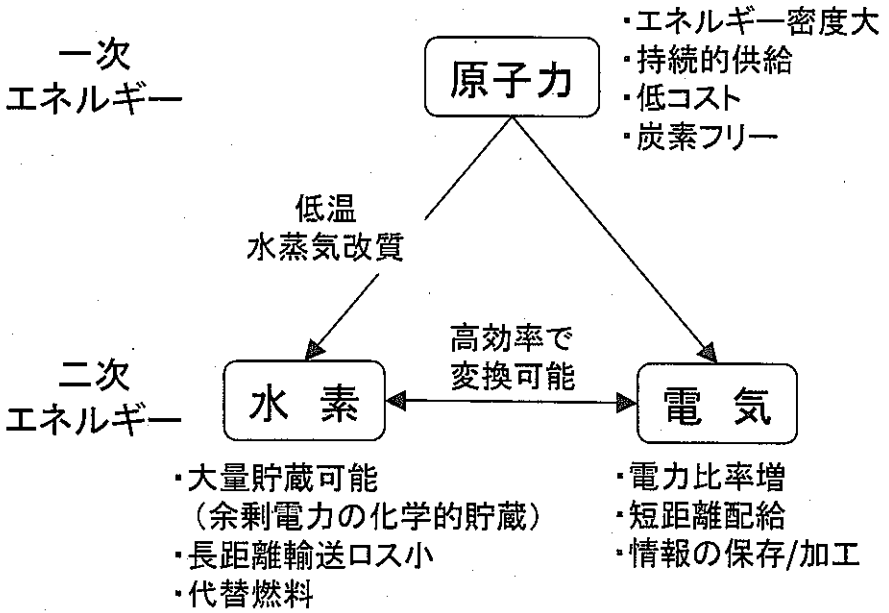
FBRの導入に関するケーススタディ



※ 小型炉導入のケースを除き、いずれのケースでも軽水炉並みの経済性が基本

FBRによる水素製造利用の検討

次世代エネルギー供給システム

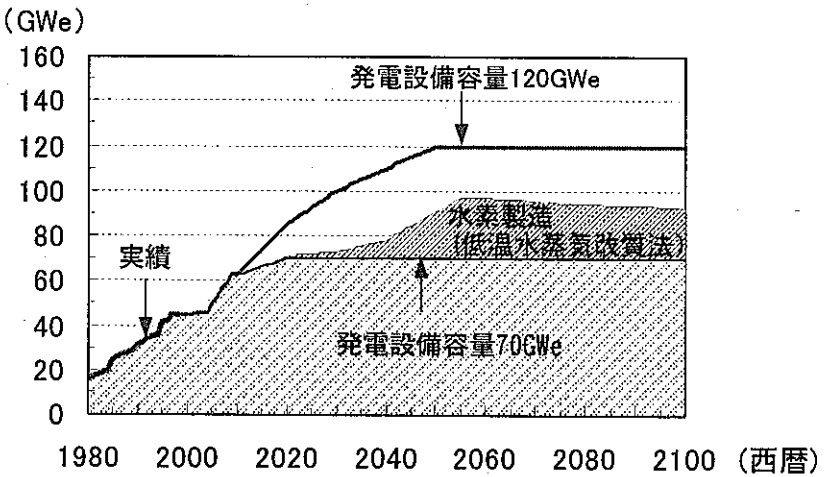


運輸部門での原子力利用ポテンシャルの検討

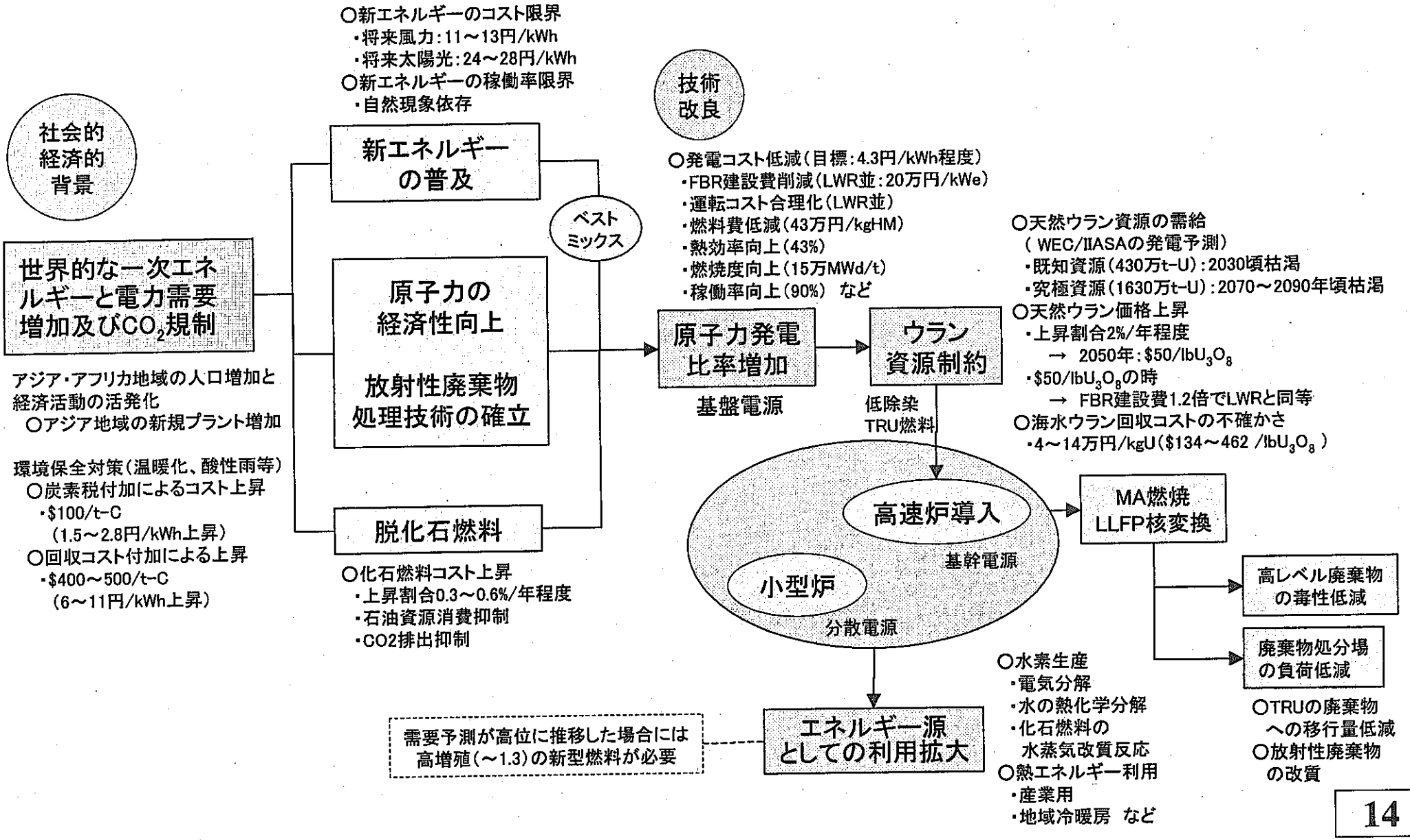
－ 燃料電池自動車による水素利用 －

想定条件

- 2030年以降は生産年齢人口の現象にともない徐々に減少
  - 2030年：9000万台程度
  - 2100年：7000万台程度（現状レベル）
- 2060年頃に全車両が燃料電池自動車に置換



FBRサイクル開発シナリオ



参 考 資 料 6

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

(FBR サイクルシステムプラント概念図集)

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

FBRサイクルシステムプラント概念図集

（注意）

本資料集に収めた概念図は、「FBRサイクルの実用化戦略調査研究」の第1期におけるFBRシステム及び燃料サイクルシステムの技術情報を参考として、それらを組合せたFBRサイクルシステムの3Dイメージや、プラント敷地をイメージさせるユーティリティ設備と樹木、道路などの背景イメージを合成して、全体プラント概念図を作成したものであり、実用化候補概念の検討に資することを目的としたものである。

平成13年7月9日

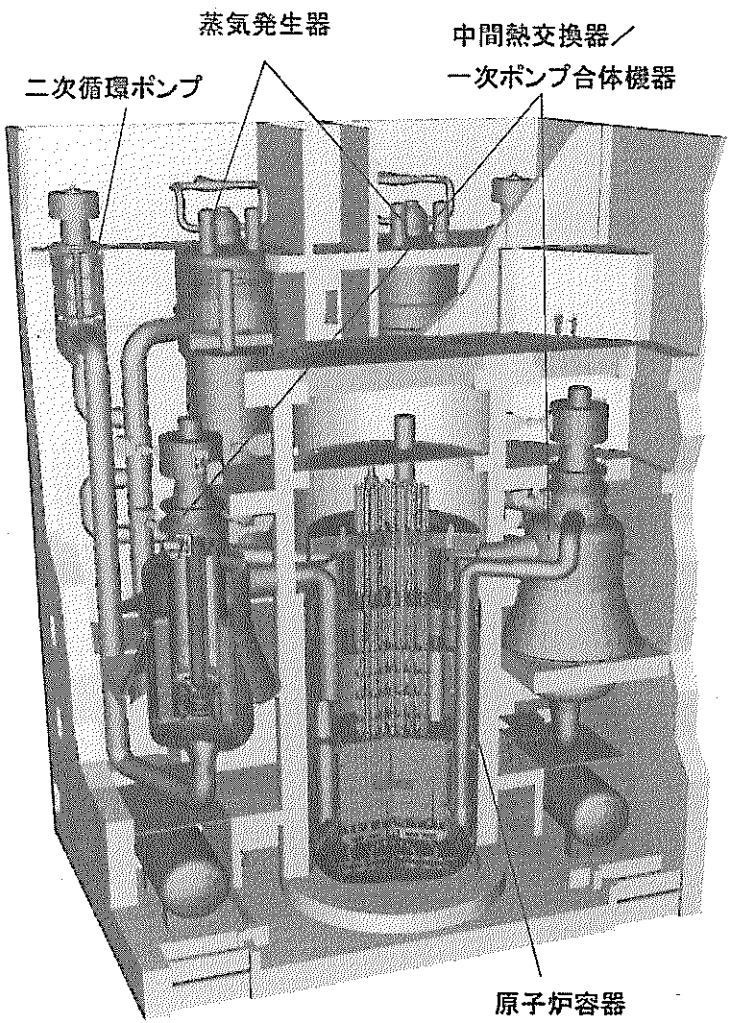
核燃料サイクル開発機構

目　　次

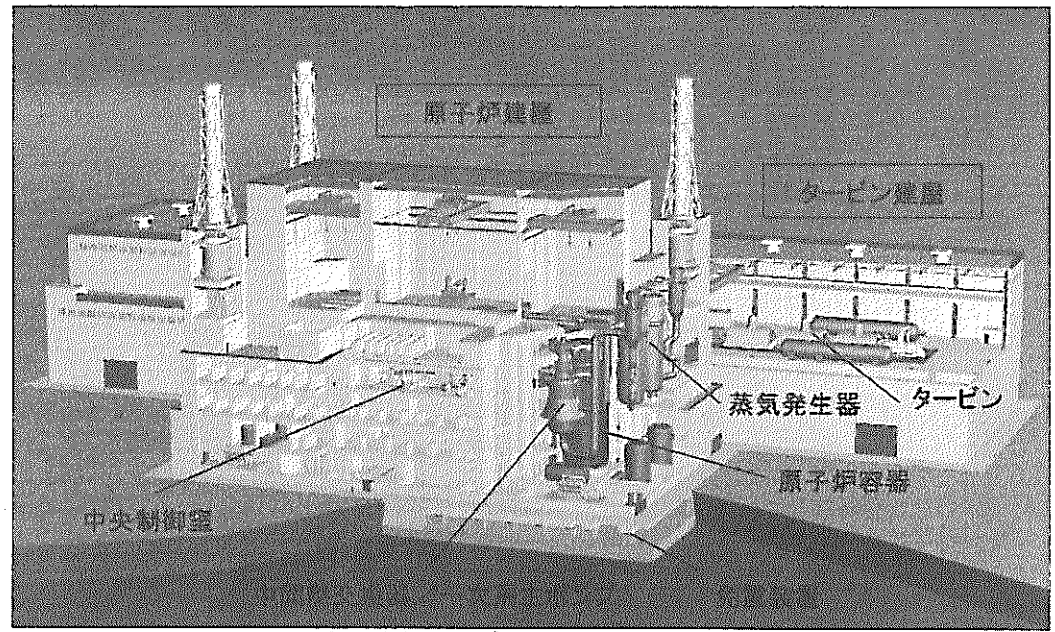
- ナトリウム冷却ループ型大型炉概念図　1
- ナトリウム冷却ループ型モジュール炉概念図　2
- 鉛ビスマス冷却中型モジュール炉概念図　3
- 鉛ビスマス冷却小型炉概念図　4
- ヘリウムガス冷却大型炉概念図　5
- 先進湿式法・簡素化ペレット法　燃料サイクル施設概念図　6
- 酸化物電解法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図　7
- 金属電解法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図　8
- フッ化物揮発法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図　9
- 金属電解法・射出成型法　燃料サイクル施設概念図　10
- コロケーションプラント概念図（ナトリウム冷却ループ中型モジュール炉）　11

ナトリウム冷却ループ型大型炉概念図

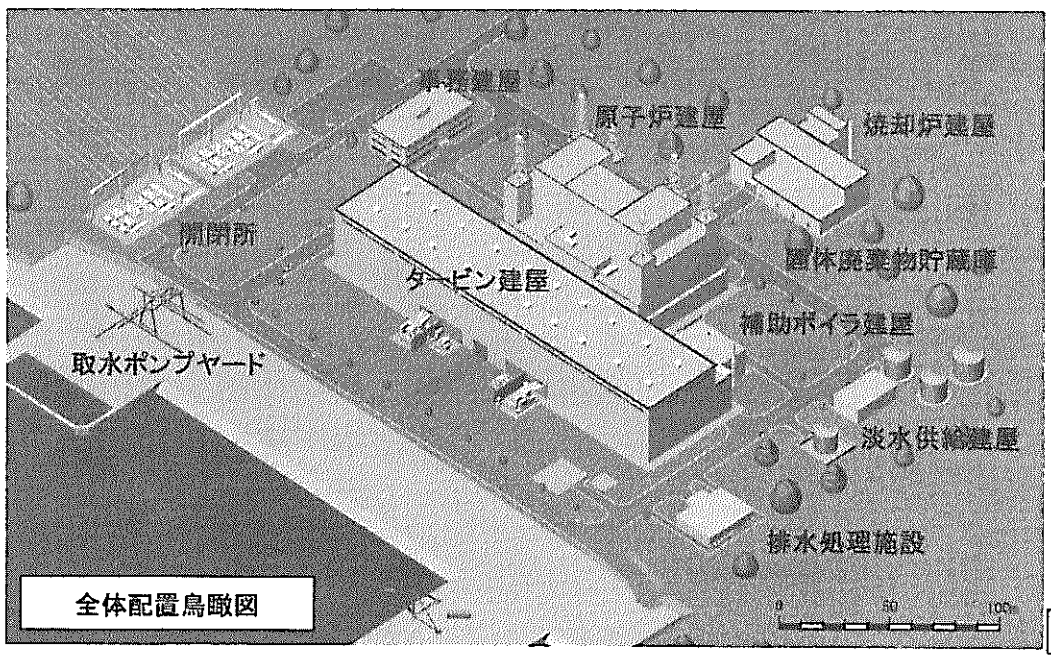
JNC



ナトリウム冷却ループ大型炉　冷却系全体鳥瞰図



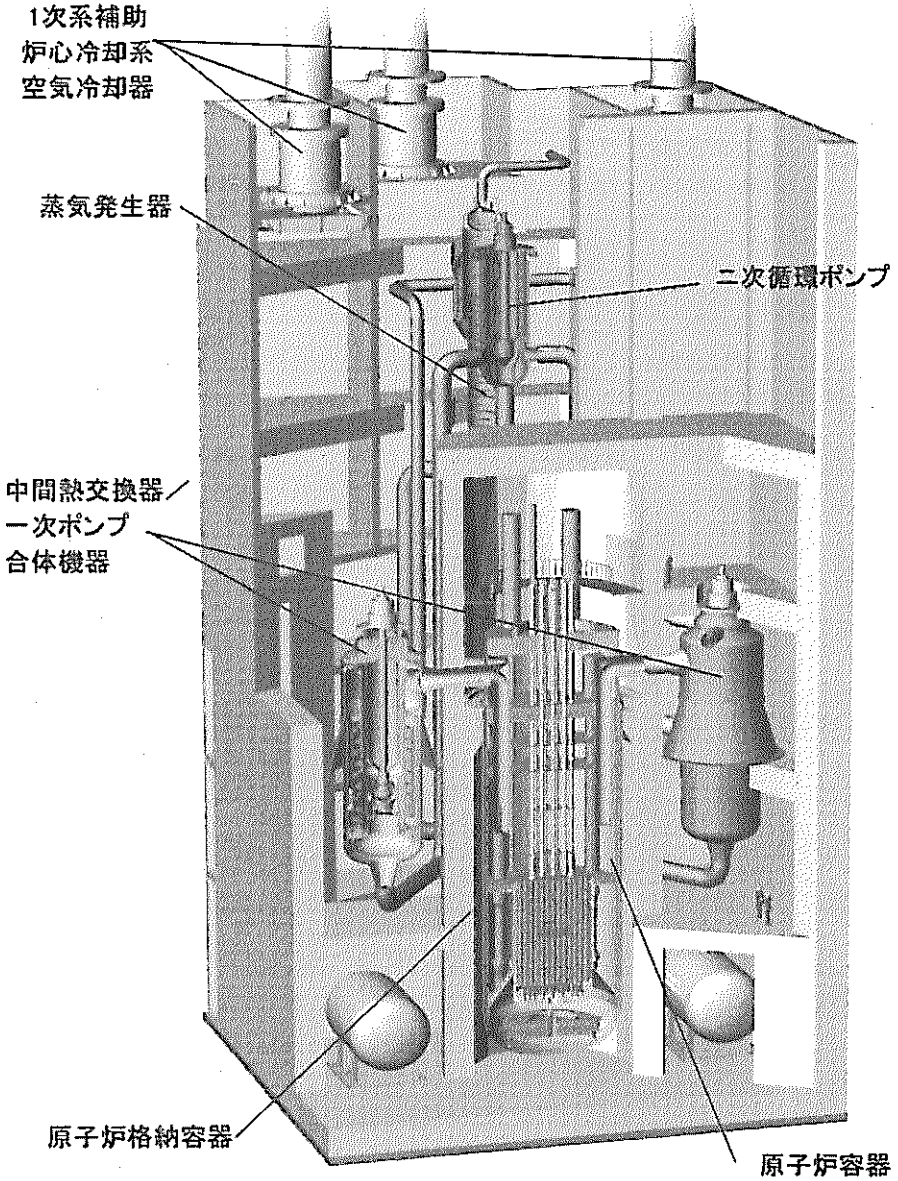
ナトリウム冷却ループ大型炉 建屋内配置鳥瞰図



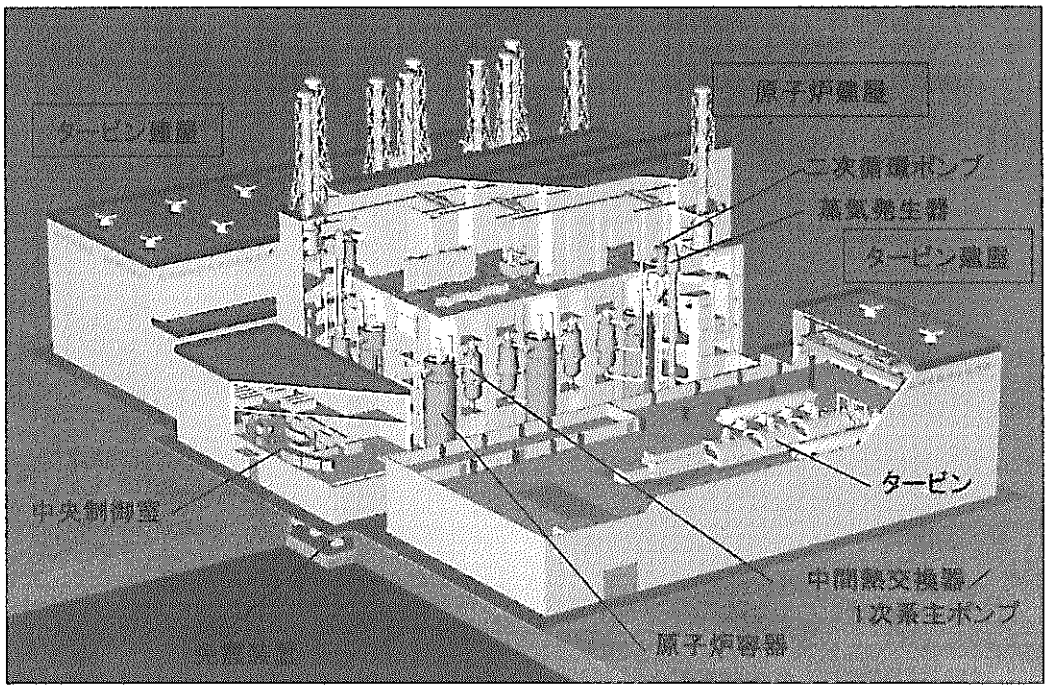
原子炉型式：ナトリウム冷却ループ型炉、混合酸化物燃料
電気出力：3,000MWe（1,500MWe ×2）　熱出力：3,570MWt／基
原子炉出口温度：550℃　プラント熱効率：約42%
特徴：2ループ／炉、IHX・1次主循環ポンプ合体、ツインプラント

ナトリウム冷却ループ型モジュール炉概念図

JNC



ナトリウム冷却ループ中型モジュール炉 冷却系全体鳥瞰図

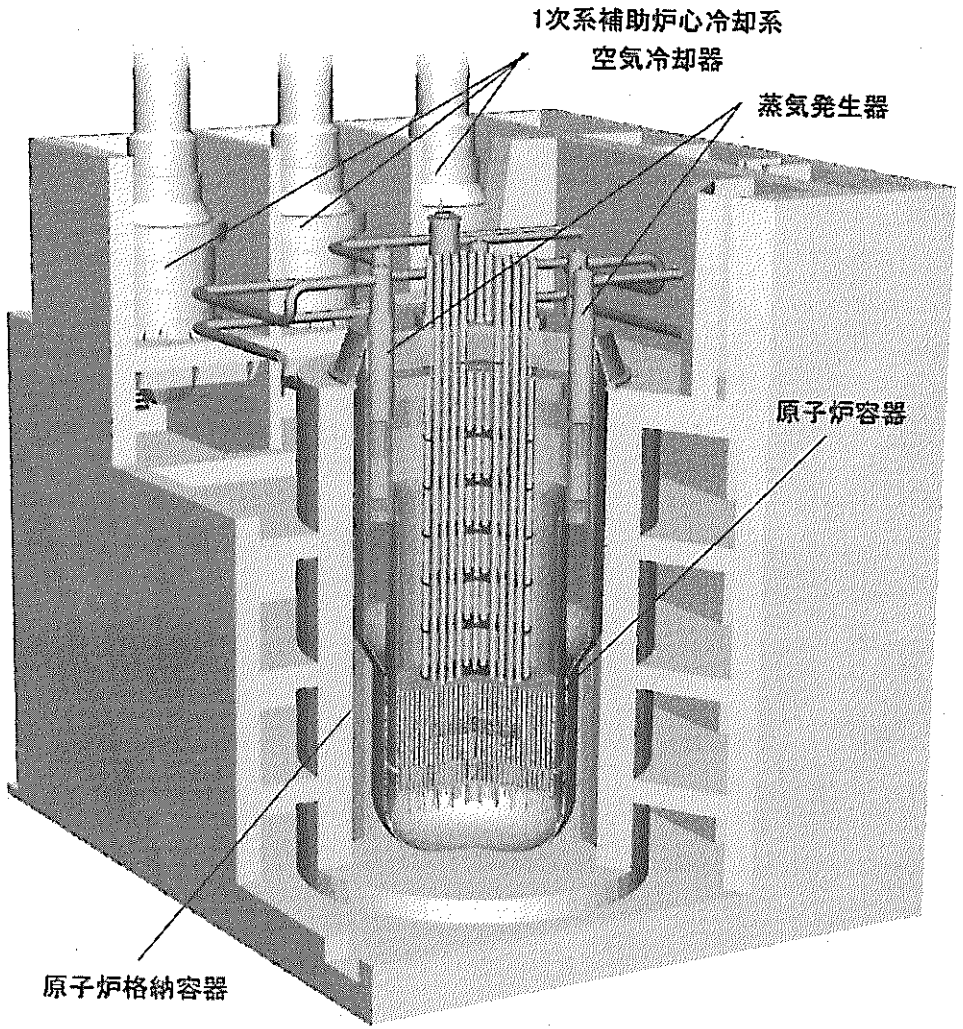


ナトリウム冷却ループ中型モジュール炉 建屋内配置鳥瞰図

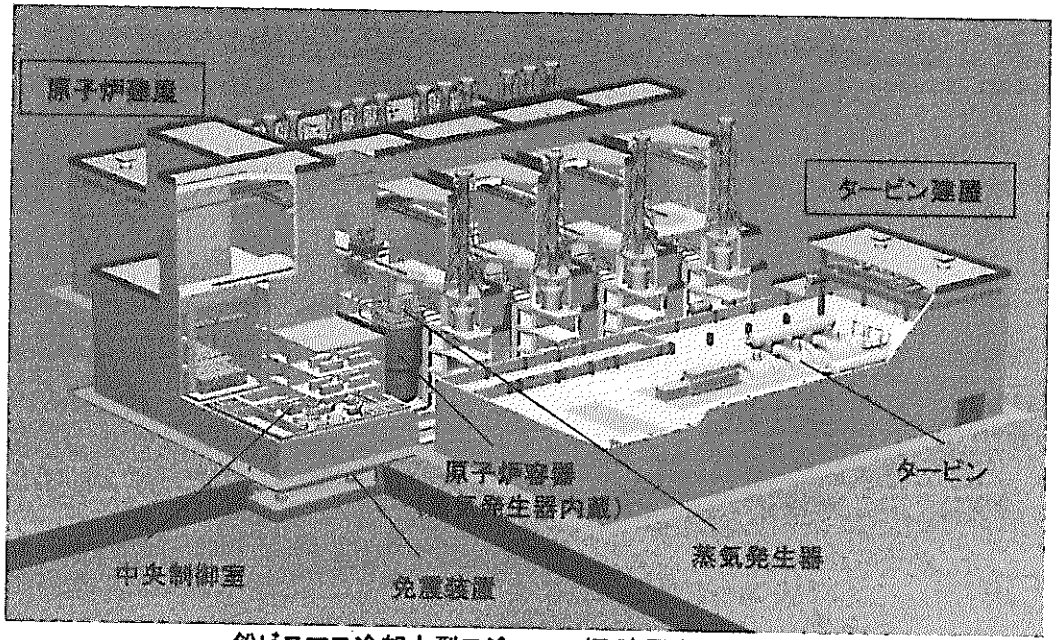
原子炉型式：ナトリウム冷却ループ型炉、混合酸化物燃料
電気出力：3,000MWe（500MWe×6）　熱出力：1,190MWt／モジュール
原子炉出口温度：550℃　プラント熱効率：約42%
特徴：6モジュール、2ループ／炉、IHX・1次主循環ポンプ合体
2タービン発電機／プラント

鉛ビスマス冷却中型モジュール炉概念図

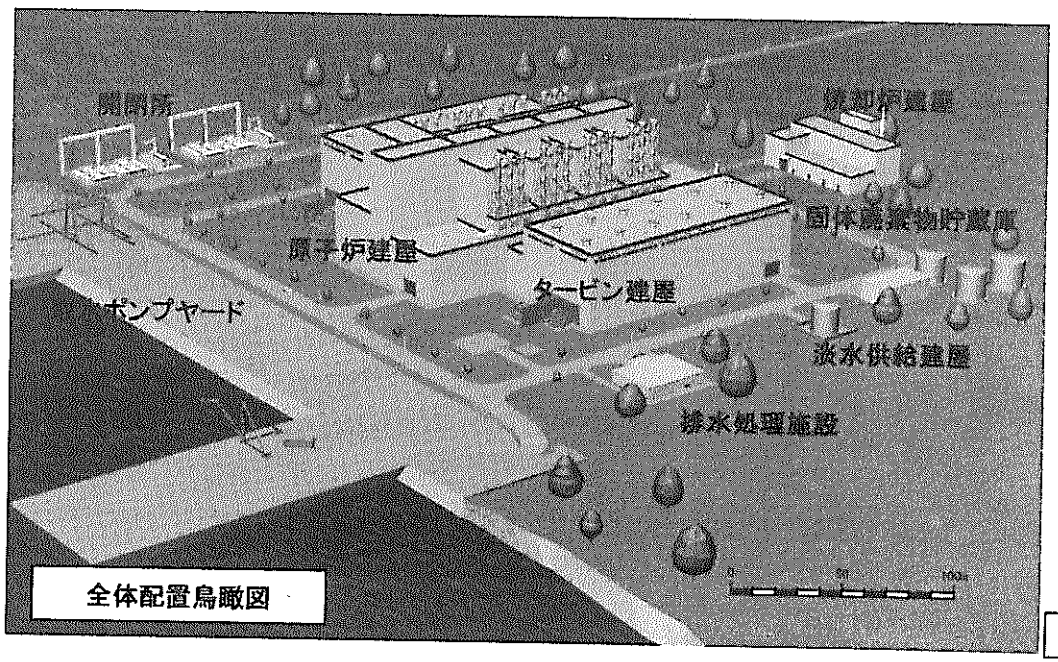
JNC



鉛ビスマス冷却中型モジュール炉　冷却系全体鳥瞰図



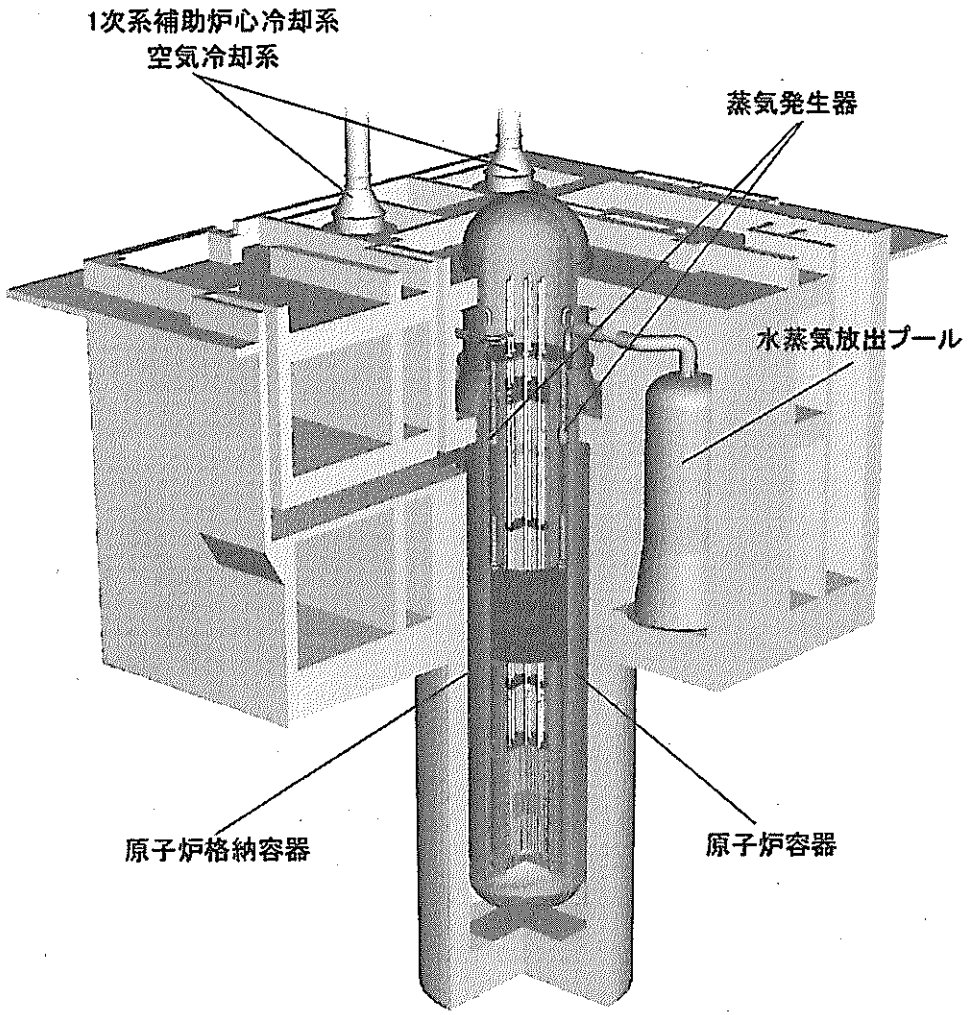
鉛ビスマス冷却中型モジュール炉 建屋内配置鳥瞰図



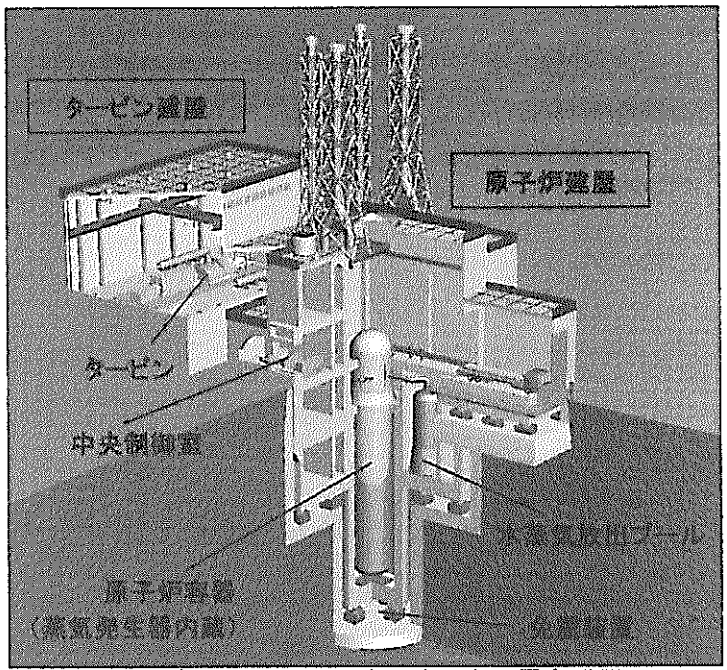
原子炉型式：自然循環冷却タンク型、混合窒化物燃料	
電気出力：3,200MWe（400MWe×8）	熱出力：1,053MWt／モジュール
原子炉出口温度：492℃	プラント熱効率：約38%
特徴：8モジュール、ヘリカルコイル型SG、タービン発電機　2基／プラント	

鉛ビスマス冷却小型炉概念図

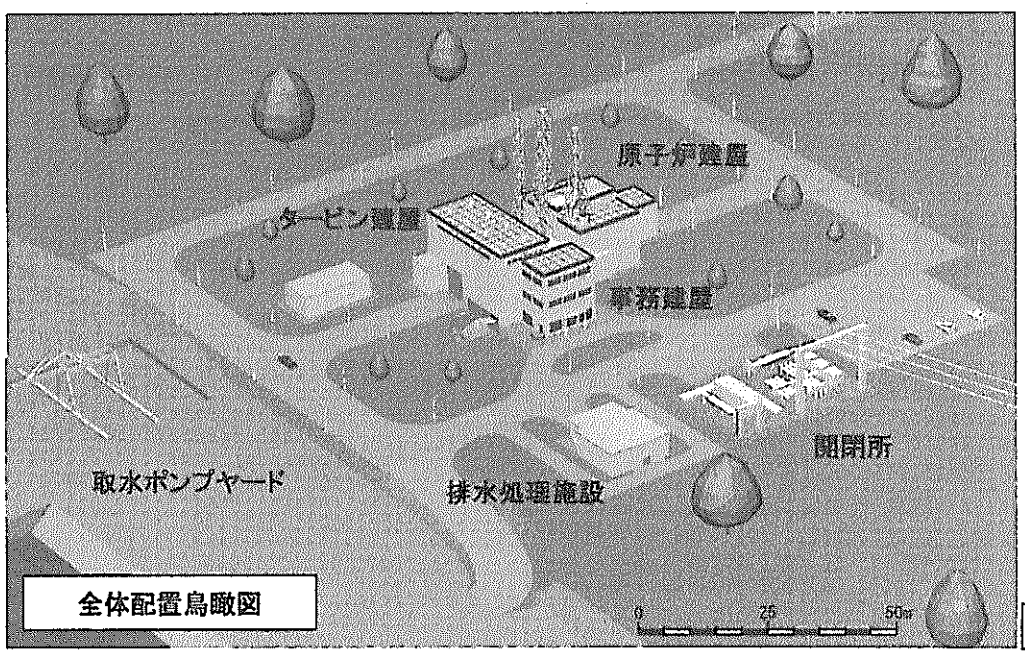
JNC



鉛ビスマス冷却小型炉　冷却系全体鳥瞰図



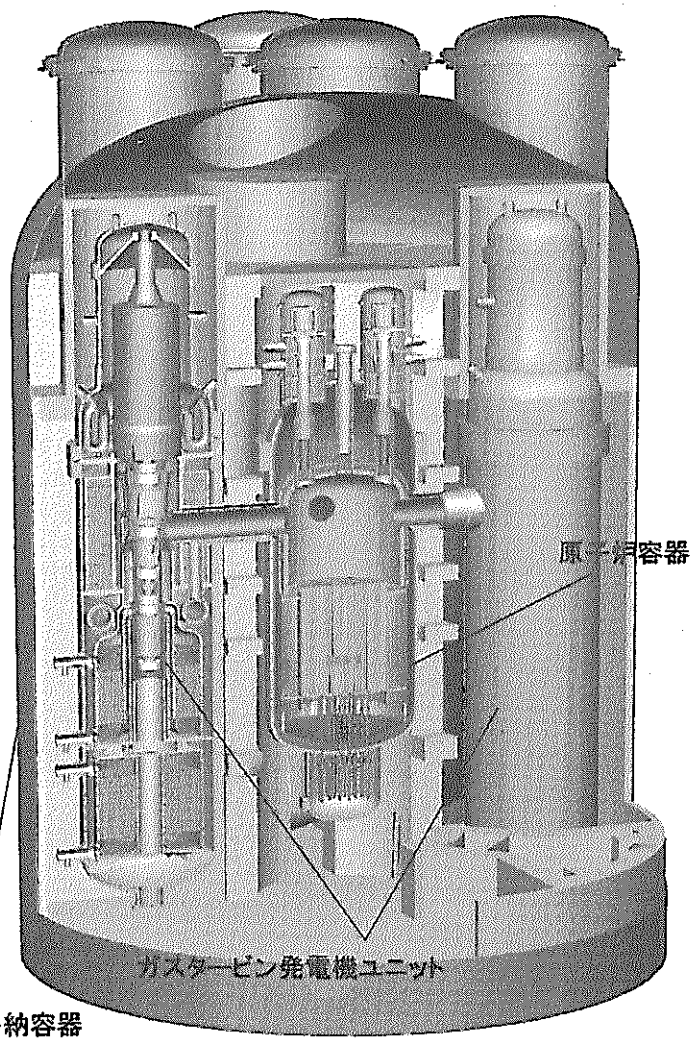
鉛ビスマス冷却小型炉　建屋内配置鳥瞰図



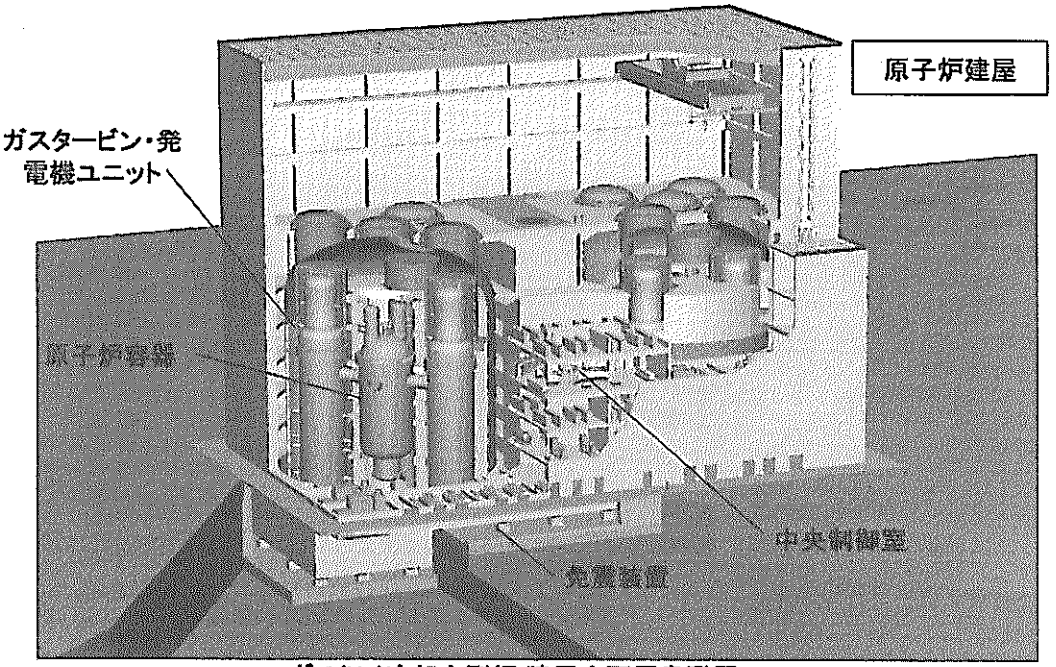
原子炉型式：自然循環冷却タンク型、混合窒化物燃料	
電気出力：50MWe	熱出力：13.2MWt
原子炉出口温度：492℃	プラント熱効率：約38%
特徴：ヘリカルコイル型SG	

ヘリウムガス冷却大型炉概念図

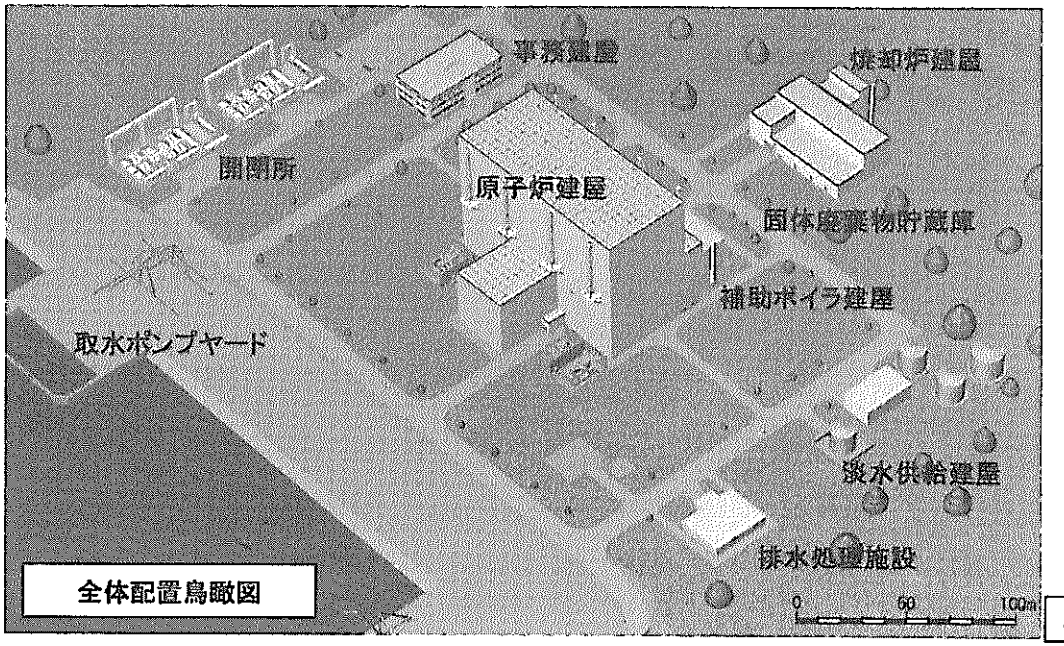
JNC



ガス(He)冷却大型炉　冷却系全体鳥瞰図

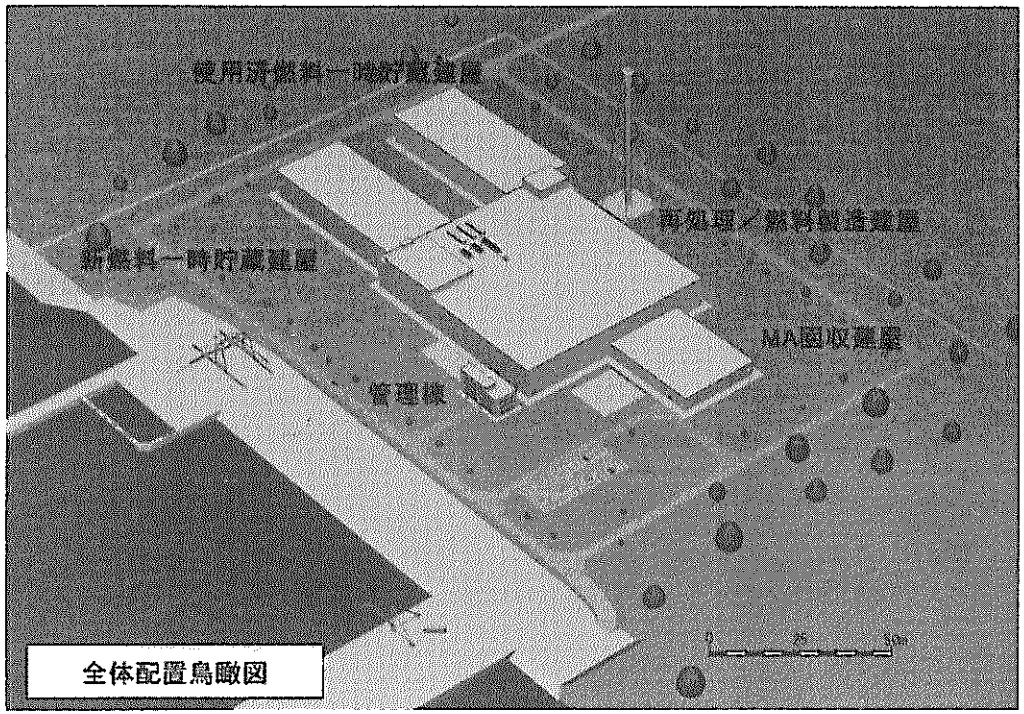


ガス(He)冷却大型炉 建屋内配置鳥瞰図

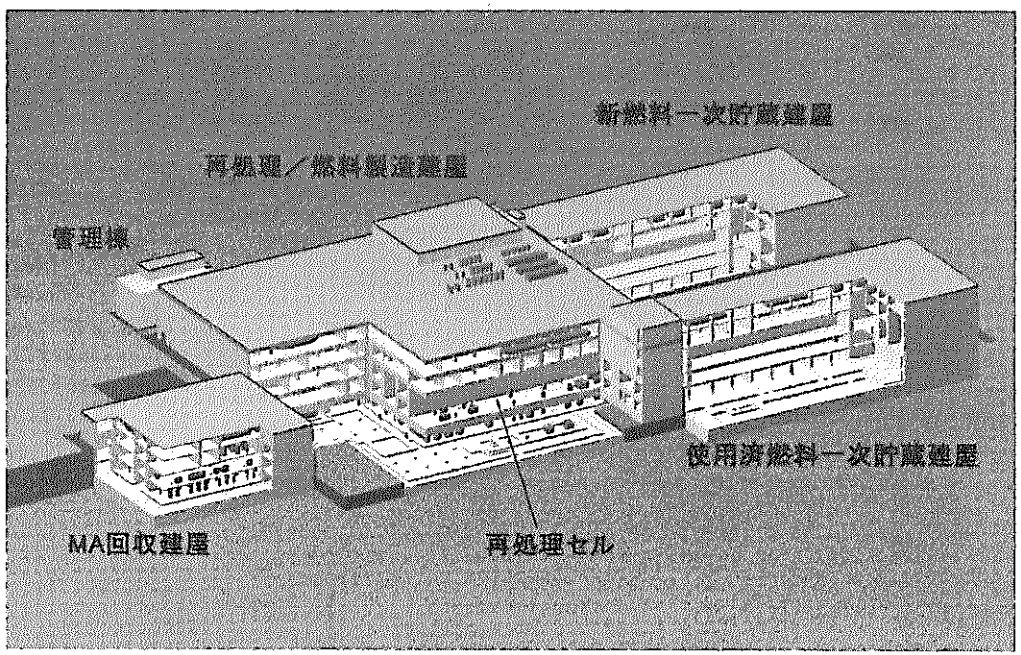


原子炉型式：ヘリウムガス冷却炉、被覆粒子燃料	
電気出力：2,240MWe（1,120MWe ×2）	熱出力：2,400MWt／基
原子炉出口温度：850℃	プラント熱効率：約47%
特徴：格納容器内臓ガスタービン発電機　4基／プラント、ツインプラント	

先進湿式法・簡素化ペレット法　燃料サイクル施設概念図



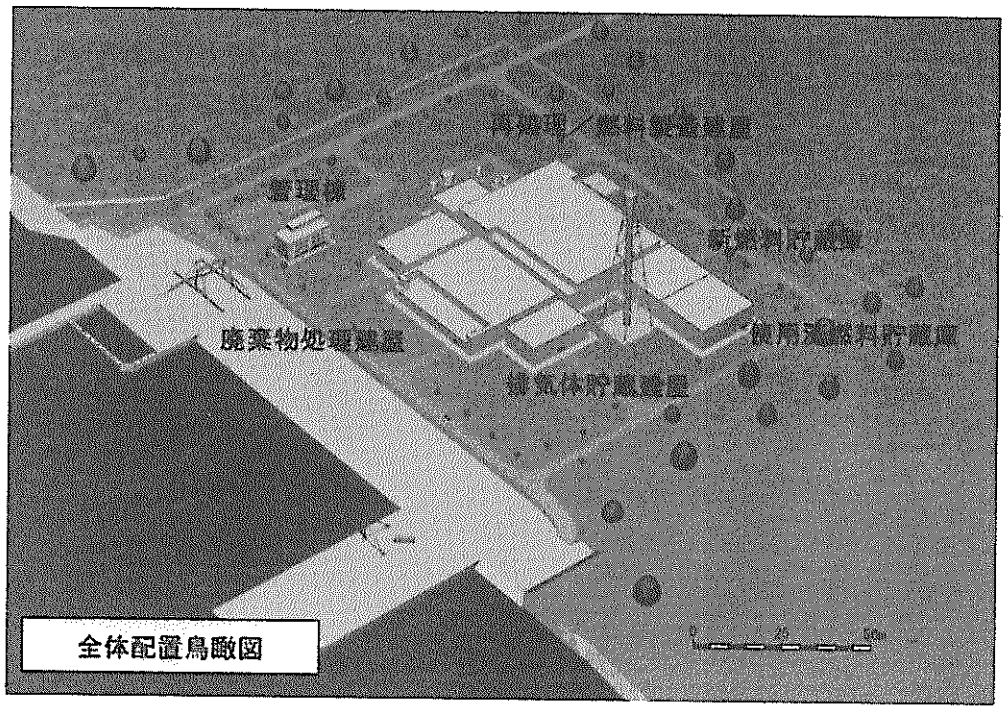
処理量：200tHM／年



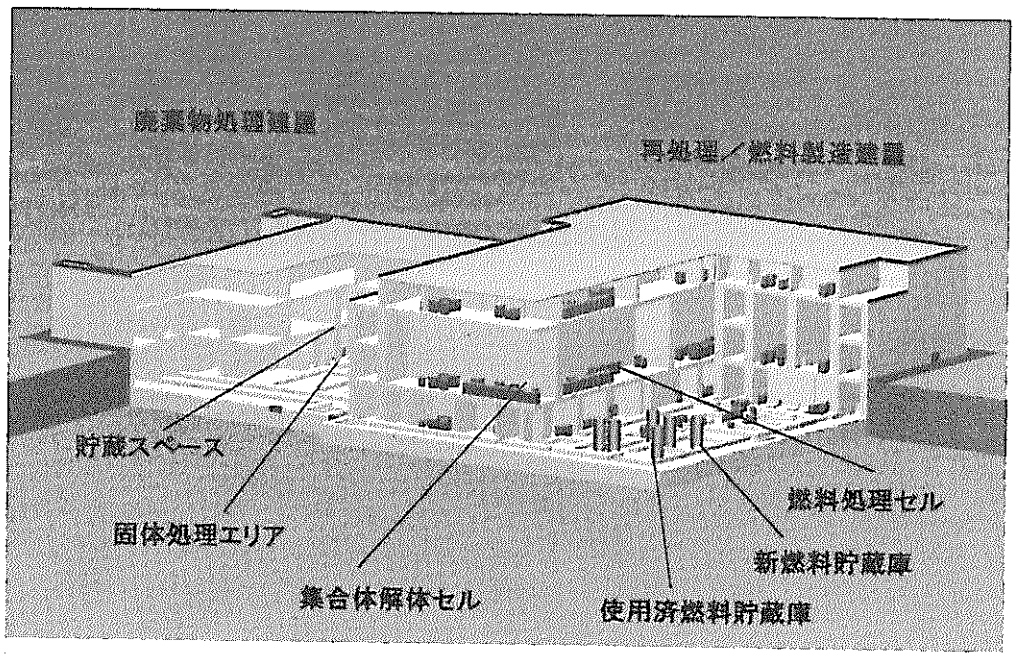
先進湿式法・簡素化ペレット法　建屋内配置鳥瞰図

酸化物電解法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図

JNC

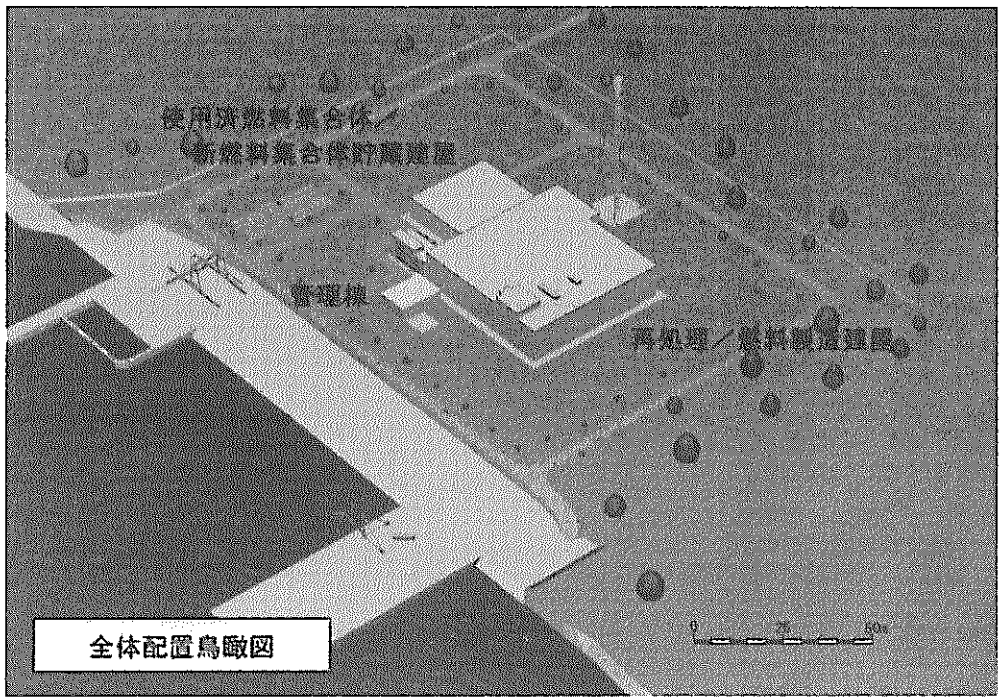


処理量：50tHM／年

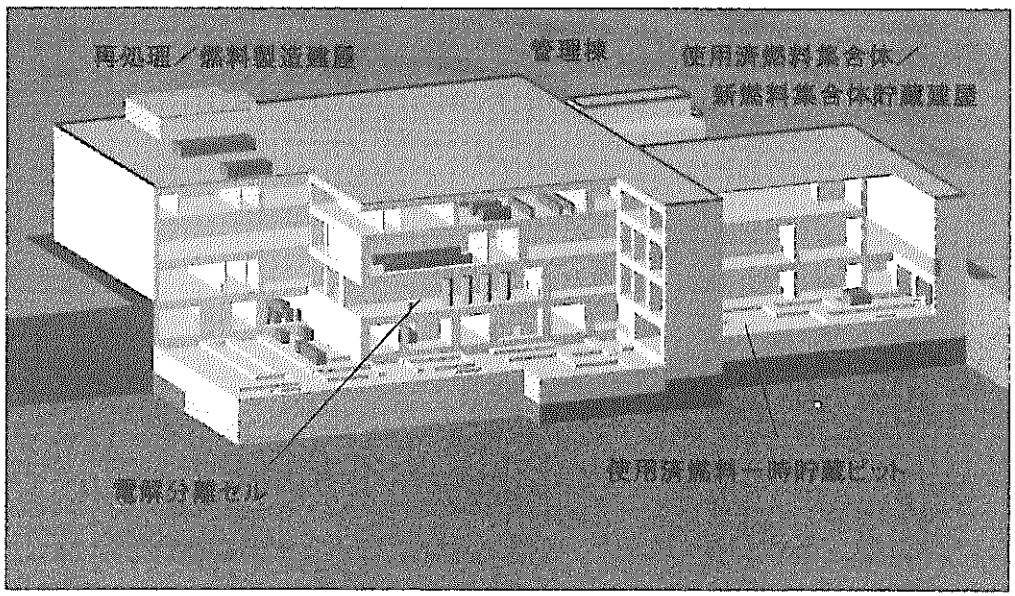


酸化物電解法・振動充填法　建屋内配置鳥瞰図

金属電解法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図

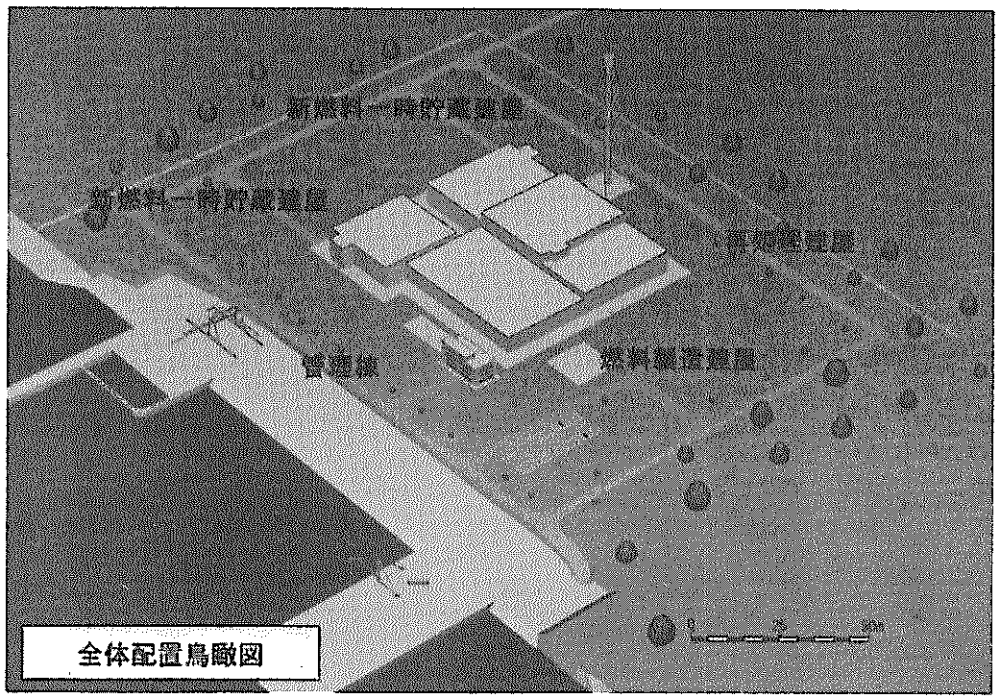


処理量：50tHM／年

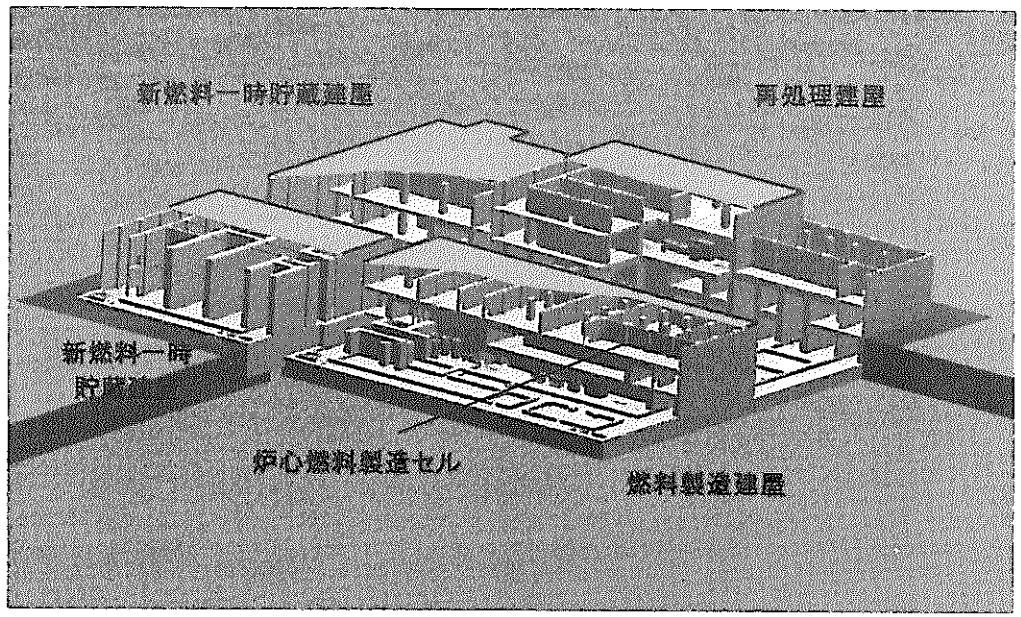


金属電解法・振動充填法　建屋内配置鳥瞰図

フッ化物揮発法・振動充填法　燃料サイクル施設概念図



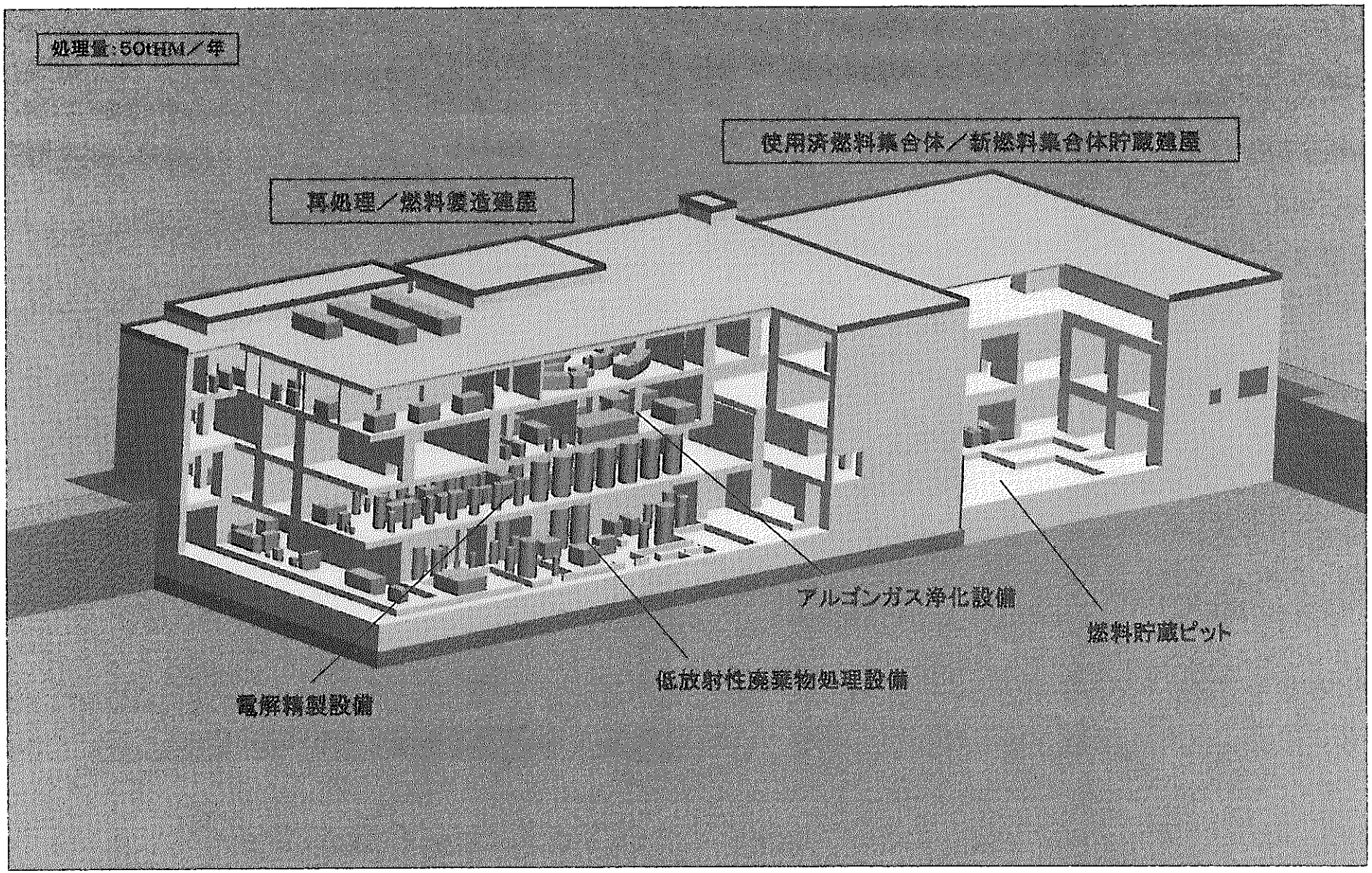
処理量：50tHM／年



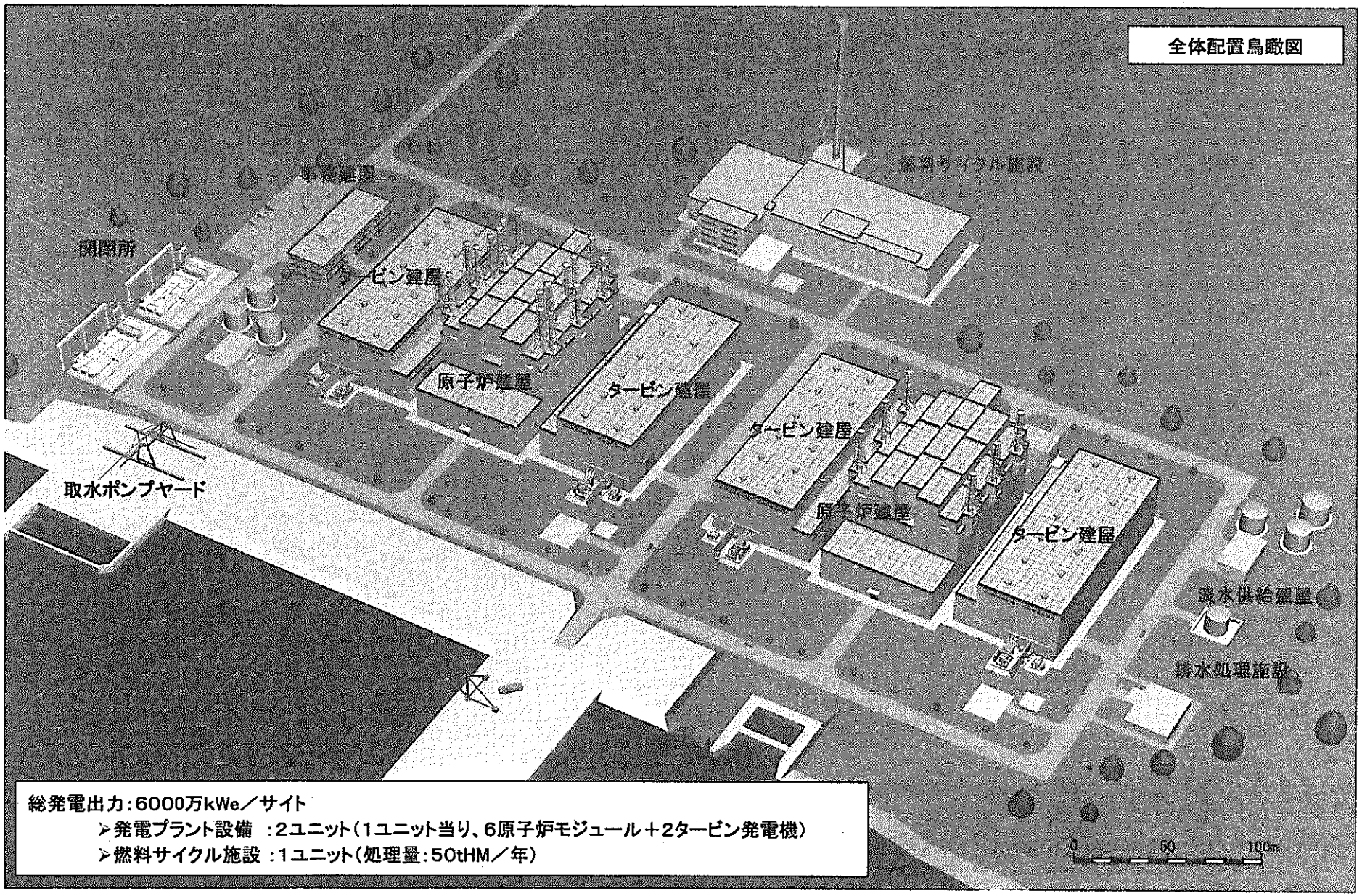
フッ化物揮発法・振動充填法　建屋内配置鳥瞰図

JNC

金属電解法・射出成型法　燃料サイクル施設概念図



コロケーションプラント概念図（ナトリウム冷却ループ中型モジュール炉）



総発電出力：6000万kWe／サイト
- 発電プラント設備　：2ユニット（1ユニット当り、6原子炉モジュール＋2タービン発電機）
- 燃料サイクル施設：1ユニット（処理量：50tHM／年）

参 考 資 料 7

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究
(第２期計画　R&D5ヶ年展開表)

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

第2期計画　R&D5カ年展開表

平成13年7月9日

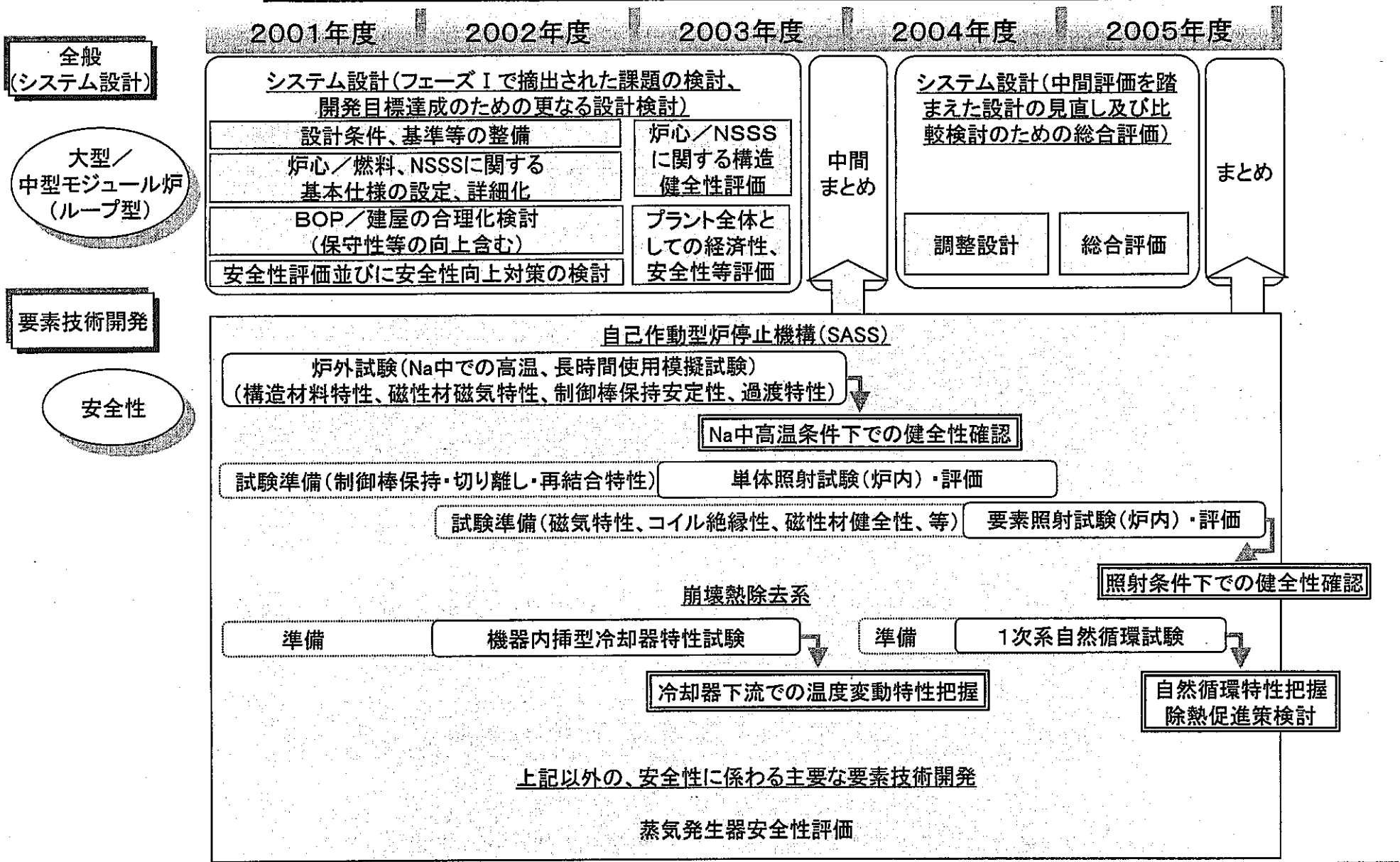
核燃料サイクル開発機構

目 次

	ページ
• ナトリウム冷却炉の主要なR&D	2
• 鉛ビスマス炉の主要なR&D	5
• ガス冷却炉の主要なR&D	6
• 水冷却炉の主要なR&D	8
• 小型炉の主要なR&D	9
• 炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D	10
• 炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D	13
• 先進湿式法再処理の主要なR&D	16
• 酸化物電解法再処理の主要なR&D	18
• 金属電解法再処理の主要なR&D	20
• ペレット法燃料製造の主要なR&D	22
• 振動充填法燃料製造の主要なR&D	23
• 鋳造法燃料製造の主要なR&D	24
• LLFP分離・核変換の主要なR&D	25
• システム技術の統合・評価	26

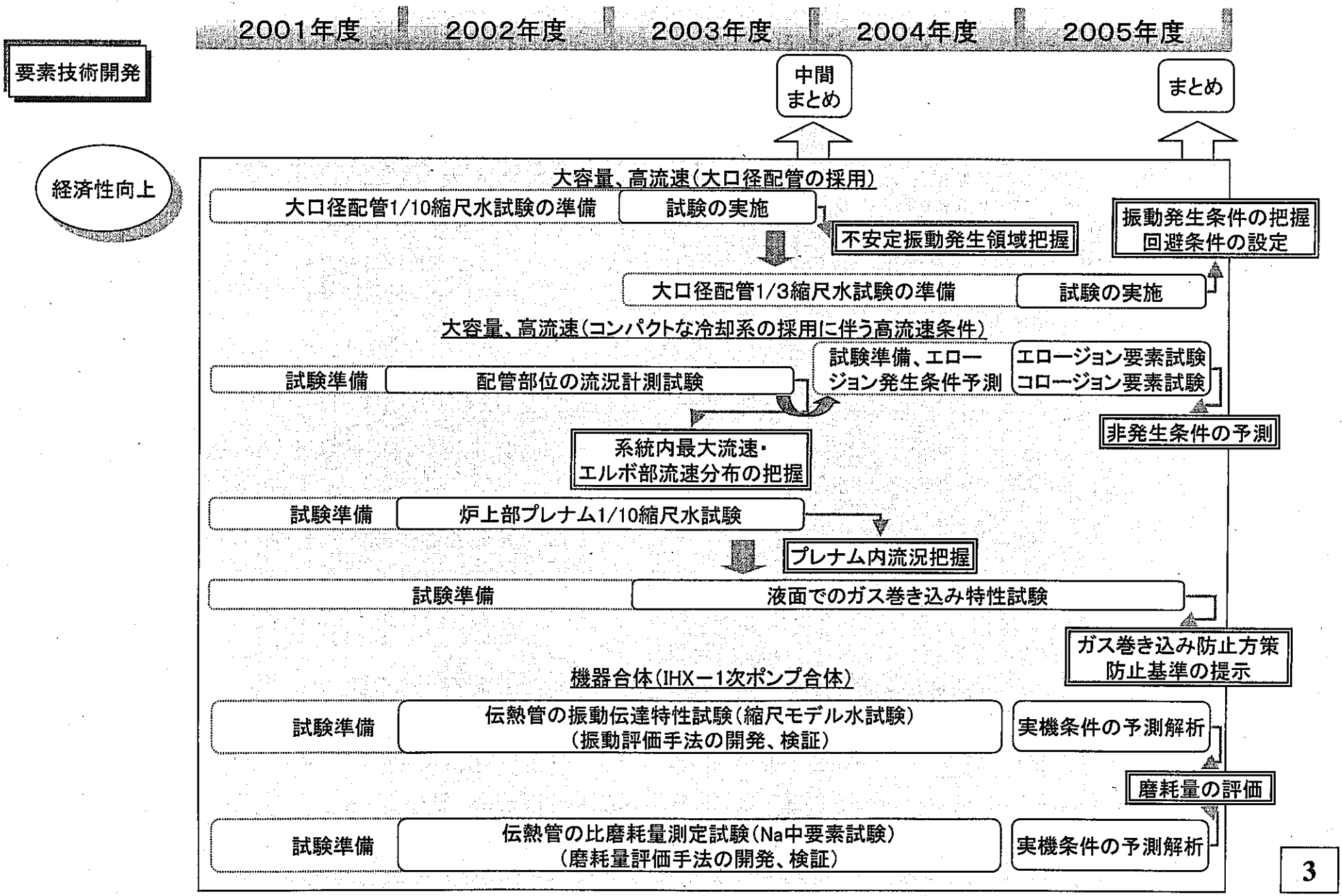
JNC

第2期計画 [ナトリウム冷却炉の主要なR&D] (1/3)



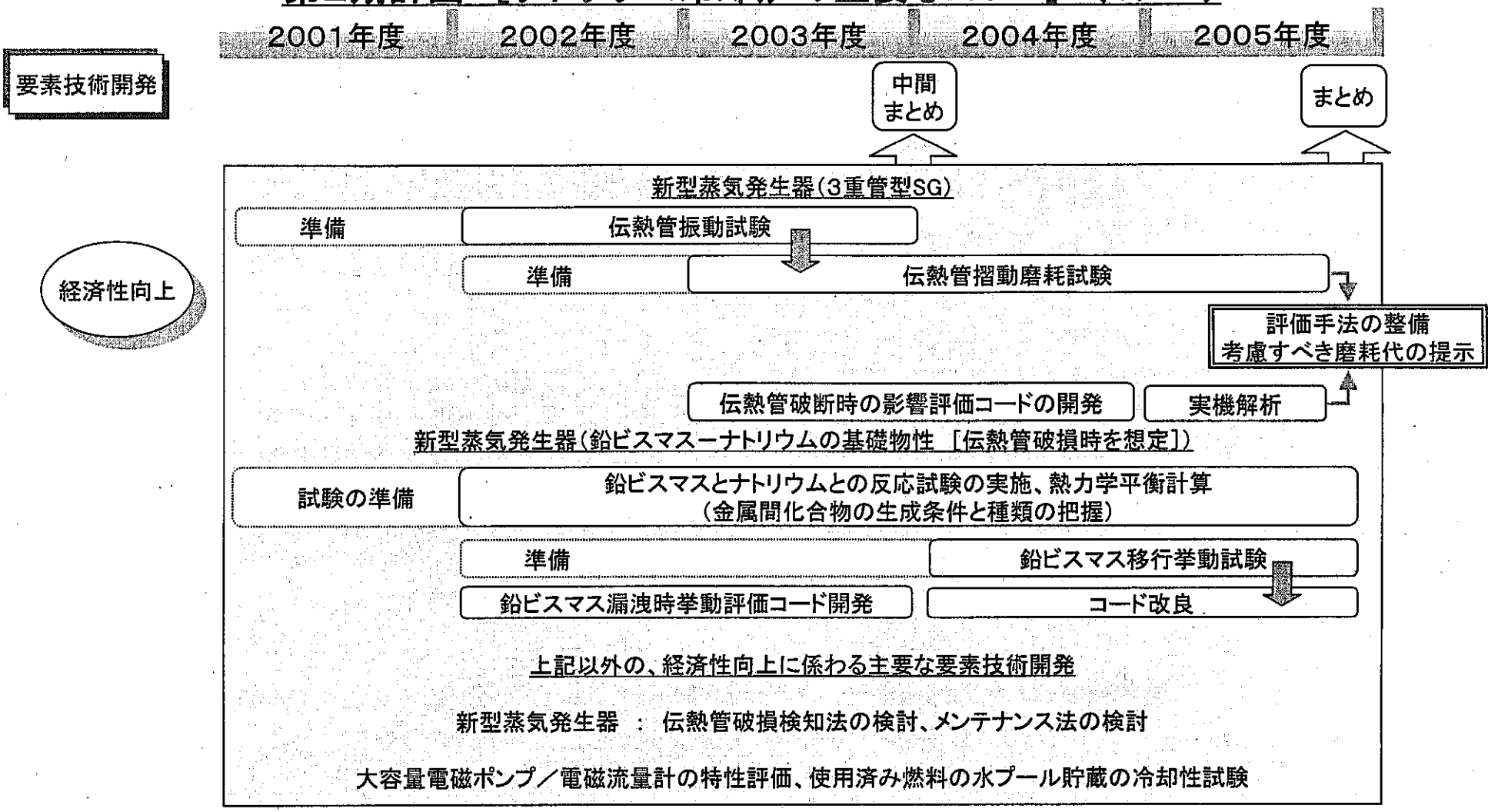
第2期計画 ［ナトリウム冷却炉の主要なR&D］（2／3）

JNC



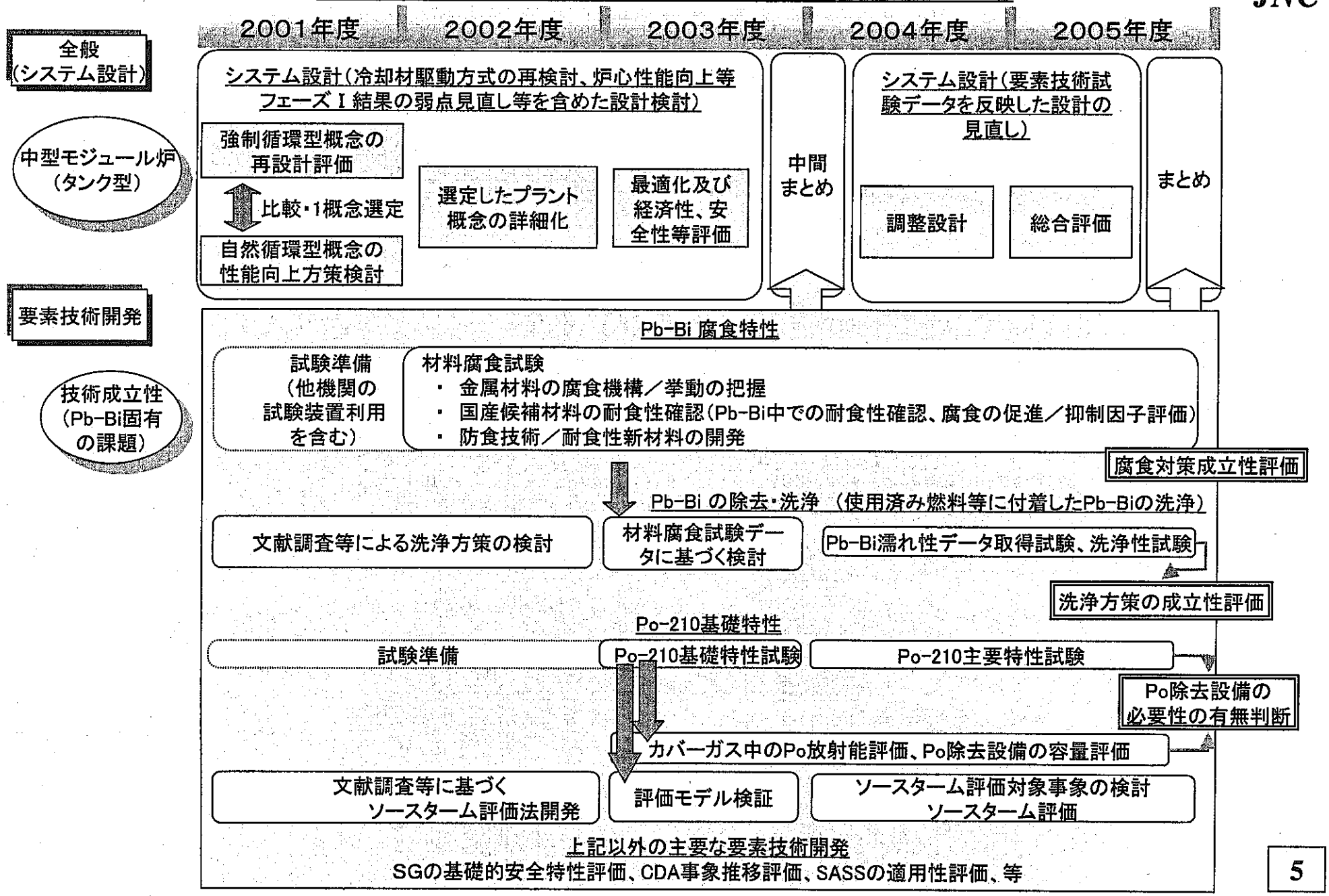
JNC

第2期計画［ナトリウム冷却炉の主要なR&D］（3／3）



第2期計画 ［鉛ビスマス冷却炉の主要なR&D］

JNC



第2期計画 [ガス冷却炉の主要なR&D] (1／2)

全般
(システム設計)

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

炭酸ガス冷却
炉心性能向上策等の検討

He冷却大型
(被ふく粒子燃料)
CDA時の安全確保策(SASS)等の検討

He冷却大型
(耐熱ピン燃料)
CDA時の安全確保策(コアキャッチャー、SASS)等の検討

炭酸ガス冷却 or He冷却 (被ふく粒子 or 耐熱ピン) から1概念選定

システム設計
コストダウン策検討
システム設計
経済性評価等

中間まとめ

概念設計(中間評価を踏まえた設計の見直し及び比較検討のための総合評価)
調整設計
総合評価

まとめ

第2期計画 [ガス冷却炉の主要なR&D] (2／2)

JNC

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

要素技術開発

注) 国内外の研究機関と協力
(情報交換等)も活用して実施

選定概念について、実施

- He冷却炉に適用
- 炭酸ガス冷却炉に適用

共通課題

中間まとめ

まとめ

受動的炉停止機構(SASS)の開発
- 試験計画の検討／立案

コアキャッチャー成立性の確認
- 試験計画の検討／立案

被覆粒子形成技術の成立性確認
- 模擬被覆の炉外高温試験
- 模擬粒子を用いた被覆形成成立性試験

耐熱金属材料の開発
- 既往研究開発材の調査／強度特性試験の実施
- 新規開発材の選定／強度特性試験の実施

上記以外のHe冷却炉に係わる主要な要素技術開発

ガスタービンの開発、流量制限機構の適用性評価

主要な要素技術開発

PCRV板厚の低減

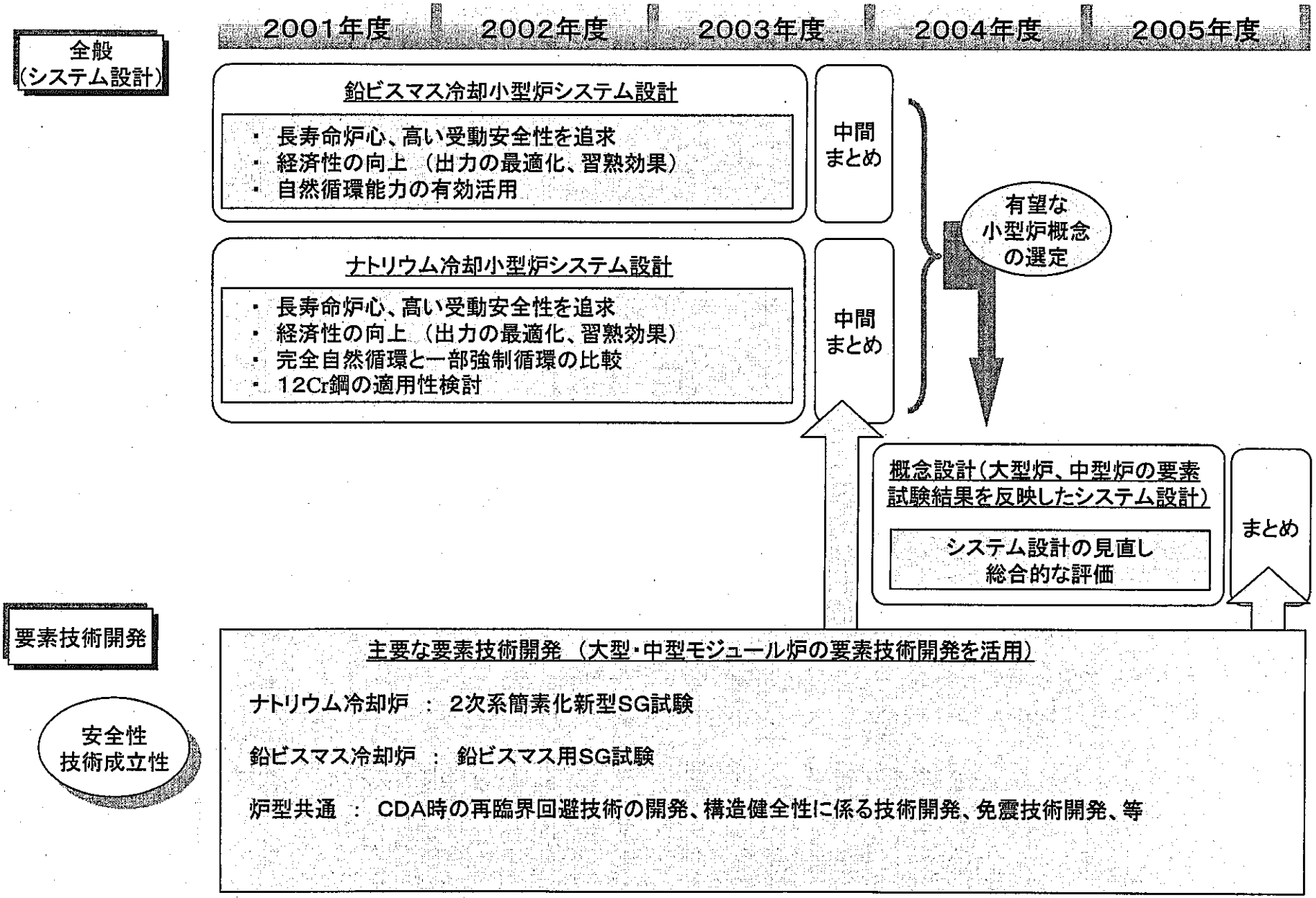
第2期計画 [水冷却炉の主要なR&D]

全般
(システム設計)

2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度
低減速スペクトル炉 炉心検討 原研実施の設計研究、炉心熱流動試験等の成果を参照 (熱水力特性、炉心成立性、安全性)		中間まとめ	低減速スペクトル炉 炉心検討 原研の成果を参照 (成立性確認)	まとめ
超臨界圧軽水冷却炉 システム設計 (炉心損傷時の安全性見通し、増殖性・環境負荷低減性等の炉心性能の評価)		中間まとめ	超臨界圧軽水冷却炉 中間まとめの結果により計画検討	まとめ

第2期計画 [小型炉の主要なR&D]

JNC



第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (1/3)

JNC

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

全般(炉心・燃料設計)

MOX燃料
概念設計
(燃料設計:低除染・TRU含有燃料評価技術開発
高燃焼度燃料評価技術開発)

新型燃料
窒化物燃料の燃料形態検討
概念設計
(燃料設計: 金属燃料、窒化物燃料)

中間まとめ

MOX燃料
概念設計
炉型に応じた最適設計

新型燃料
概念設計
炉型に応じた最適設計

まとめ

要素技術開発

MOX燃料

低除染・TRU一MOX燃料の物性データ取得
TRU含有燃料の物性データ取得(ペレット法)
TRU含有燃料照射試験(常陽)
低除染・TRU含有燃料の照射準備(常陽)

TRU核変換評価精度の向上
常陽サンプル照射結果の解析評価による解析精度向上
プロファイルーM照射試験解析評価による解析性能確認
炉定数の整備

ペレット燃料と振動充填燃料の性能比較
造粒・振動充填技術基礎試験
量産規模性能試験
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)

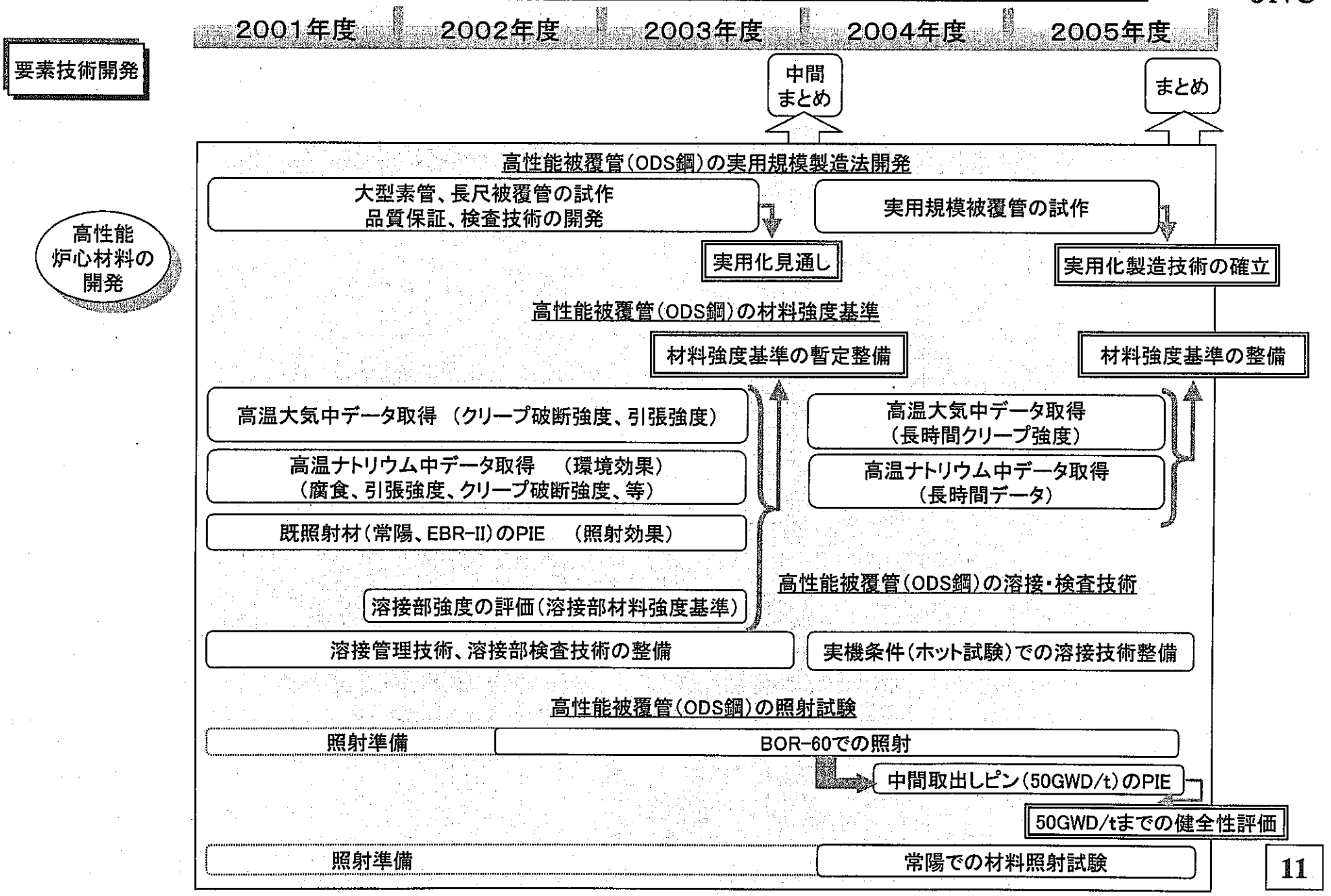
新型燃料

金属燃料
炉内過渡試験条件等の検討、試験準備
炉内過渡試験(TREAT炉)

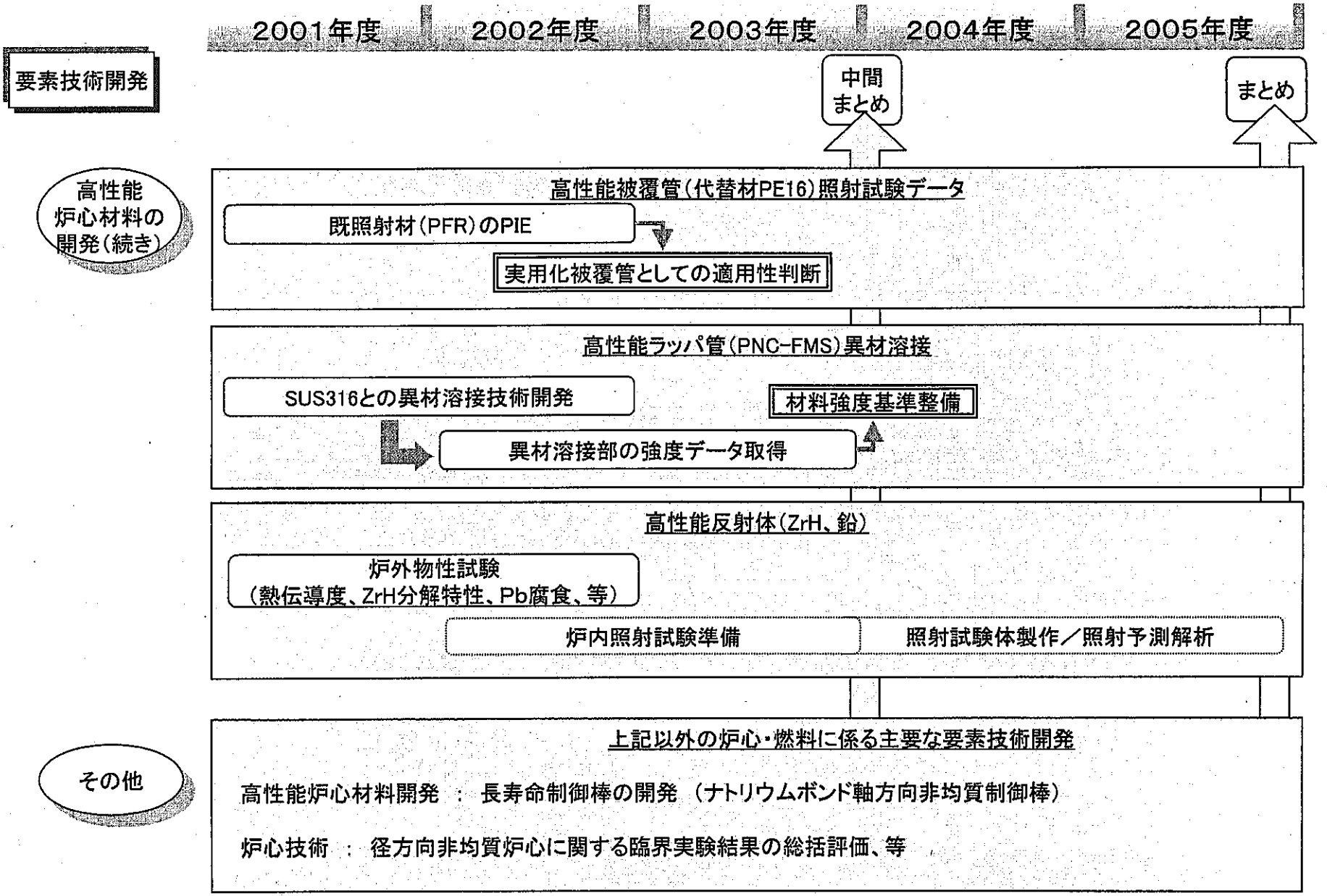
窒化物燃料
ガス炉の炉型選定を待って、燃料製造法等の基礎調査から開始

第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (2/3)

JNC

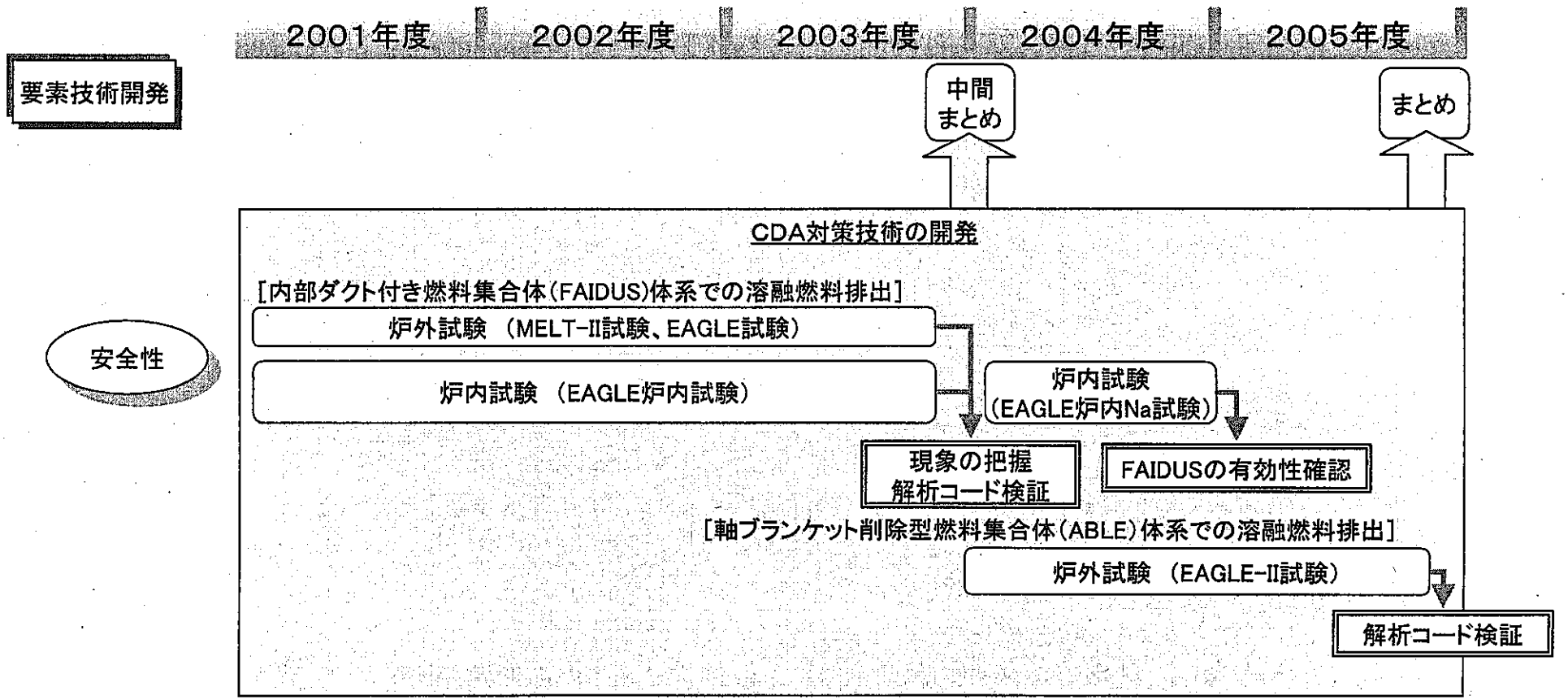


第2期計画 [炉型共通技術(炉心・燃料)の主要なR&D] (3／3)



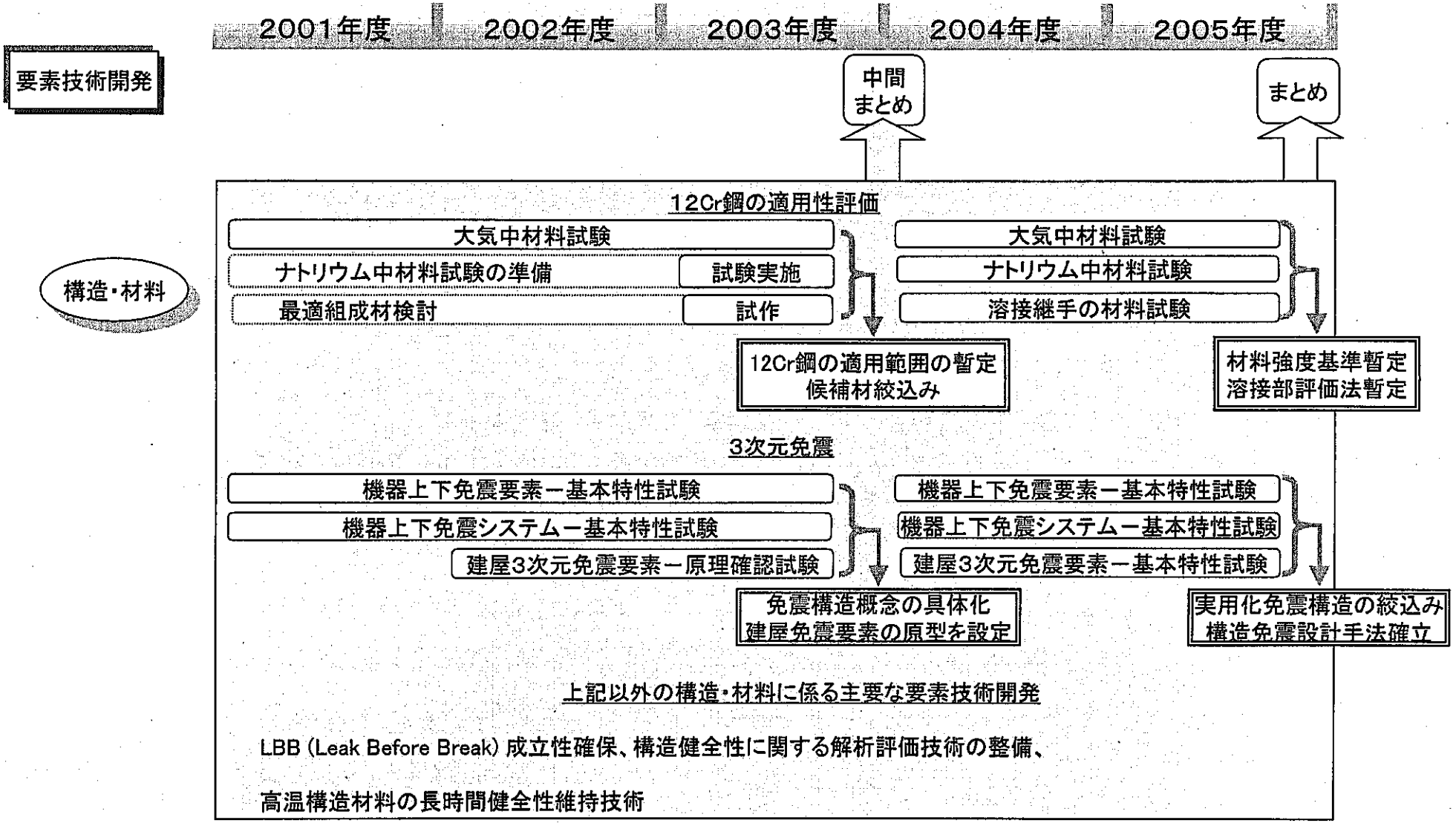
第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (1/3)

JNC

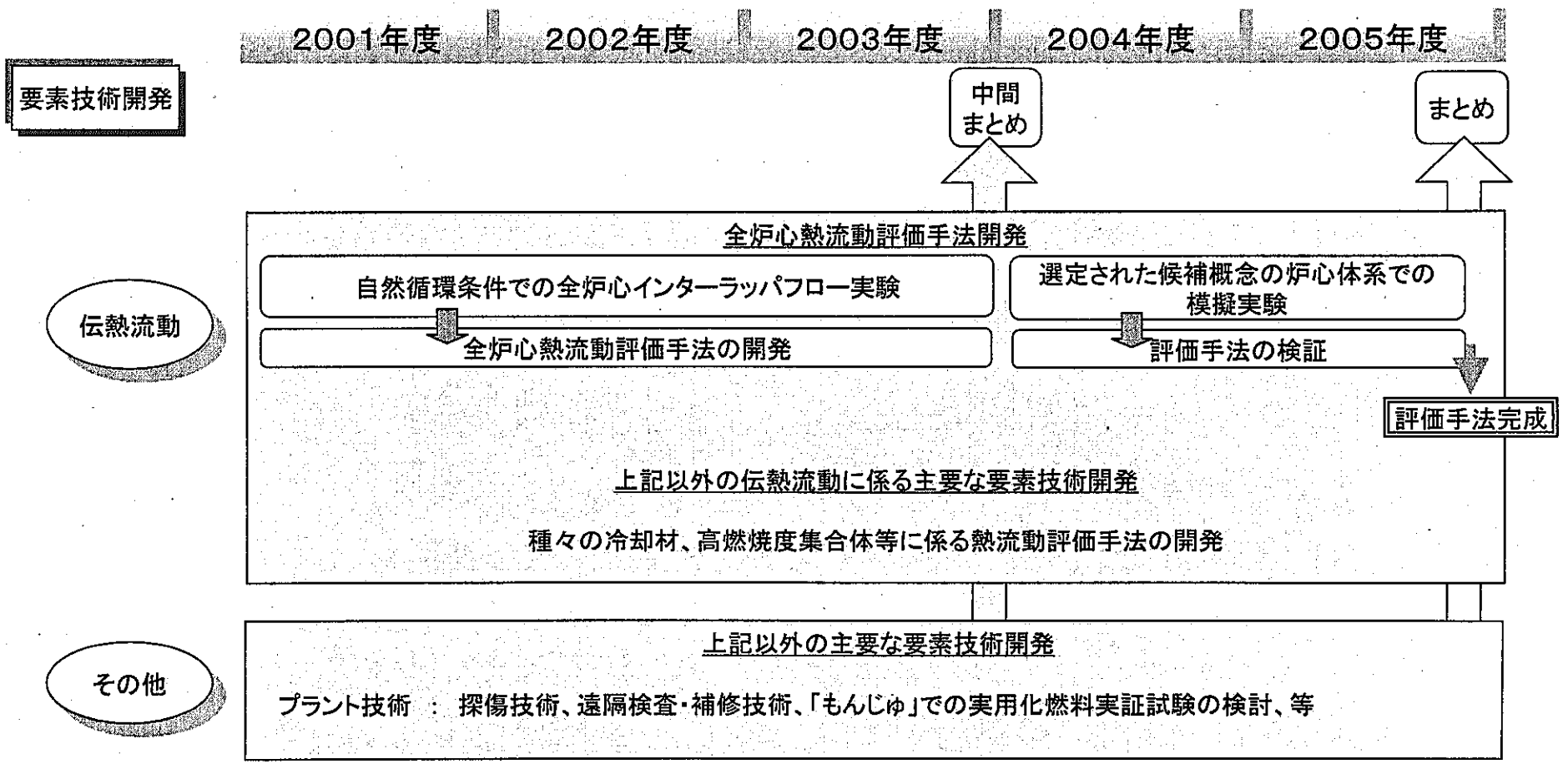


第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (2/3)

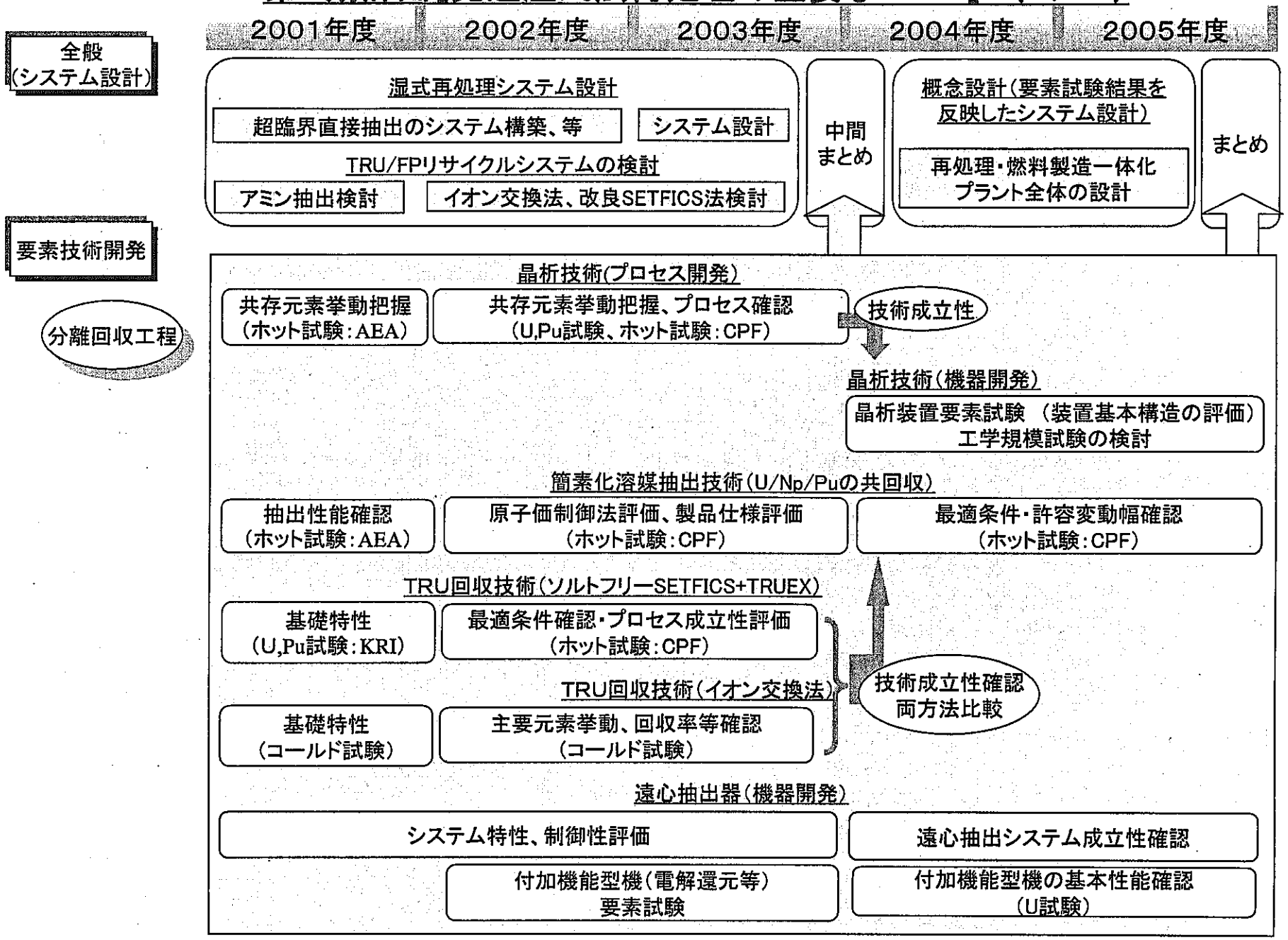
JNC



第2期計画 [炉型共通技術(プラントシステム)の主要なR&D] (3/3)

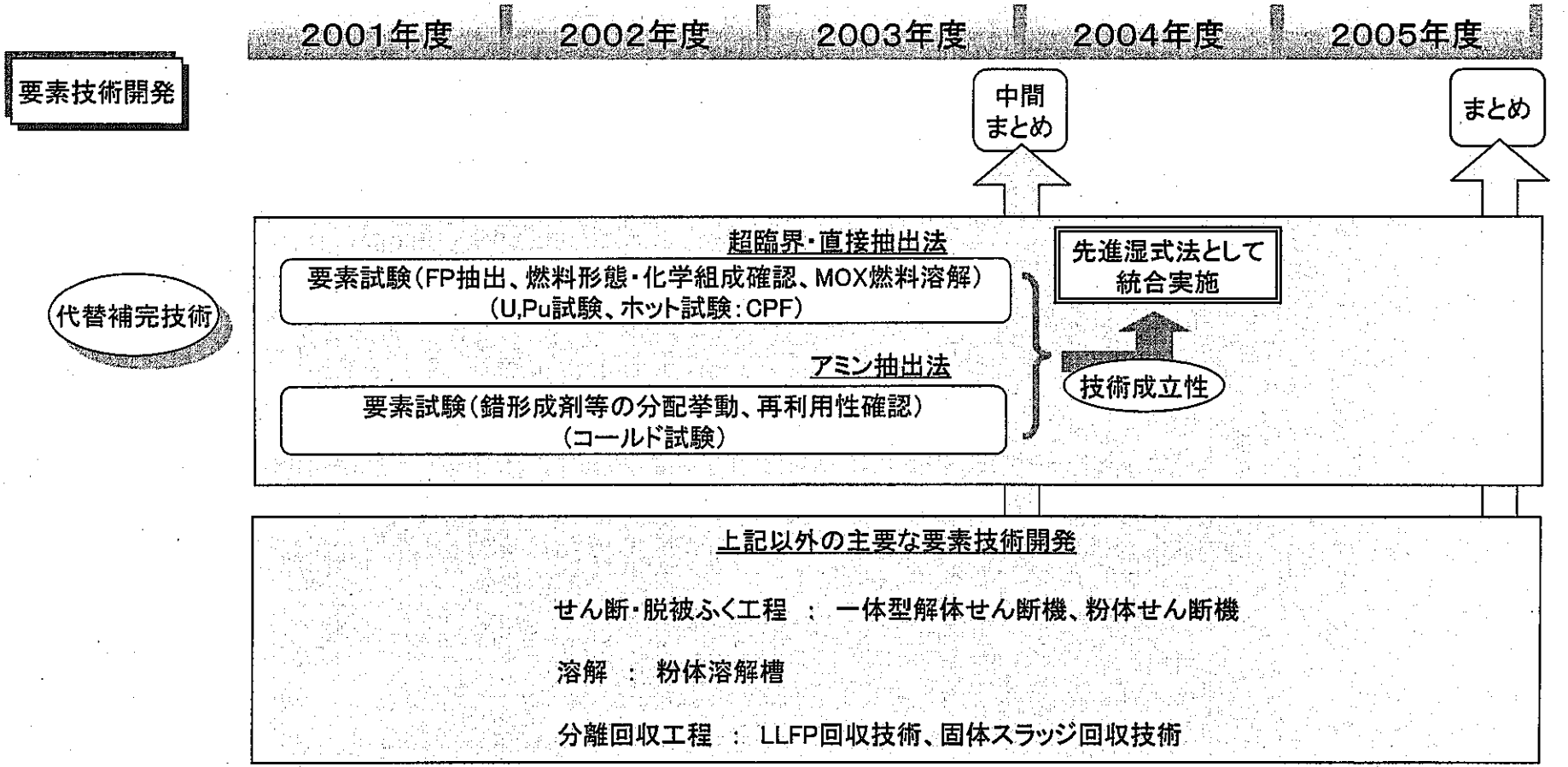


第2期計画[先進湿式法再処理の主要なR&D] (1／2)



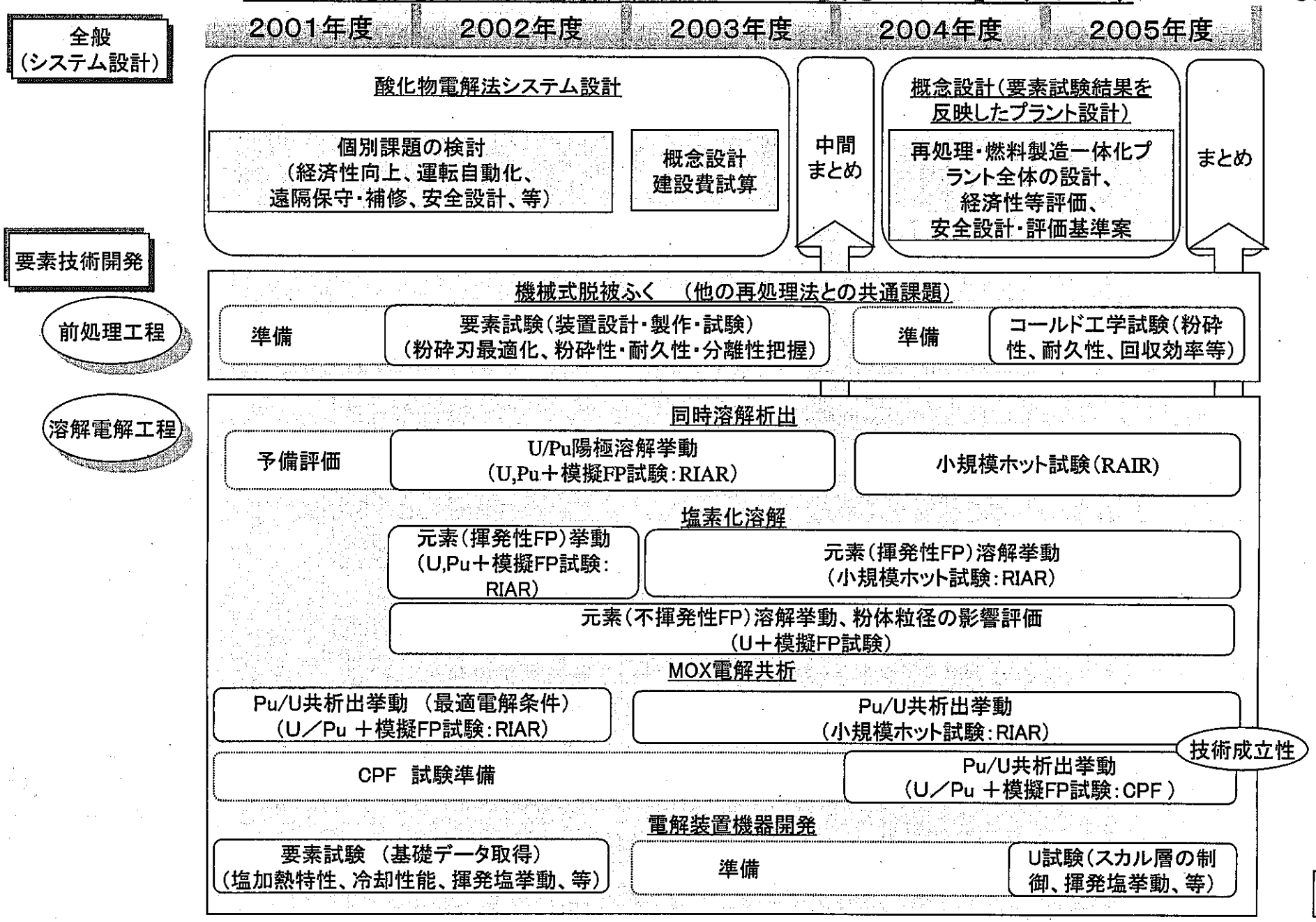
第2期計画[先進湿式法再処理の主要なR&D] (2／2)

JNC



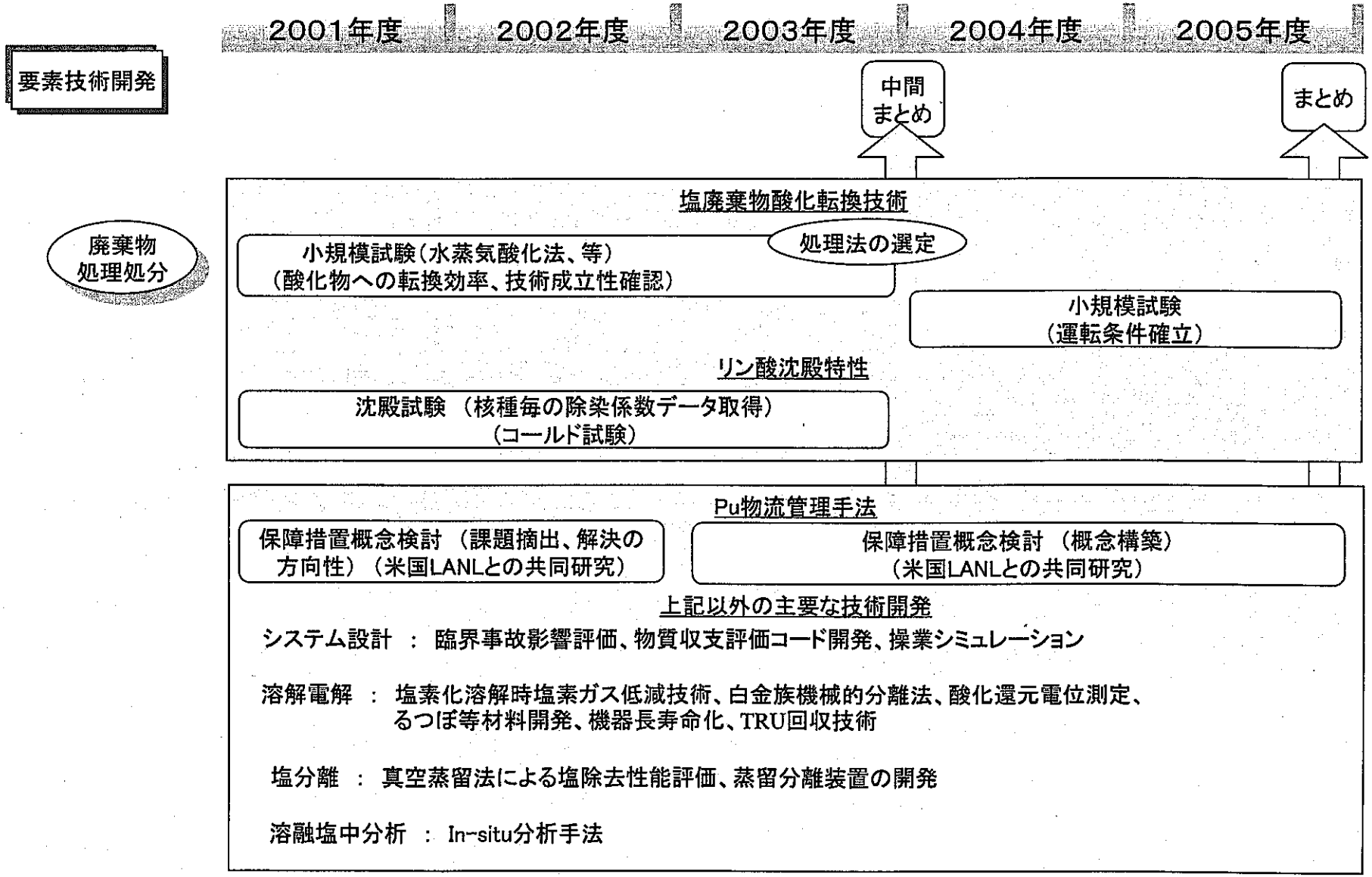
第2期計画[酸化物電解法再処理の主要なR&D] (1／2)

JNC



第2期計画[酸化物電解法再処理の主要なR&D] (2／2)

JNC



第2期計画[金属電解法再処理の主要なR&D] (1／2)

JNC

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

全般

システム設計

金属電解法システム設計

- 個別課題の検討（経済性向上、運転自動化、保守・補修、安全設計、等）
- 概念設計 建設費試算

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)

- 再処理・燃料製造一体化プラント全体の設計、経済性等評価、安全設計・評価基準案

まとめ

要素技術開発

小規模Pu試験

金属電解法Pu試験(電解、陰極処理、Li還元) ： 電中研との共同研究

- 準備（CPFのPu試験設備）
- 還元、電解、蒸留、酸化試験（コールド,U試験）
- 要素試験、プロセス試験、酸化処理試験（U,Pu試験）

技術成立性

前処理工程

機械式脱被ふく （他の再処理法との共通課題）

- 準備
- 要素試験（粉砕刃最適化、粉砕性・耐久性・分離性把握）
- 準備
- コールド工学試験(粉砕性、耐久性、回収効率等)

TRU回収工程

向流多段抽出器

- 塩移送性試験(移送率、固着状況、等)
- 抽出器構造・適用性検討
- 要素試験(分配特性、塩・Cd移送特性、等)
- 準備
- U試験(分配特性、閉塞状況、等)

上記以外の主要な技術開発

システム設計 ： 臨界事故影響評価、物質収支評価コード開発、操業シミュレーション

溶解電解 ： るつぼ等材料の材料開発・腐食データ取得

陰極処理 ： 塩・Cd蒸留分離試験

溶融塩中分析 ： 自動サンプリング装置開発、ICP分析法開発

第2期計画[金属電解法再処理の主要なR&D] (2／2)

JNC

電中研
実施予定分

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

中間まとめ

まとめ

全般(システム設計)

実施内容 ： プロセス解析評価コード開発、臨界安全評価法の考案、プラント経済性評価、計量管理法の考案

全般 (小規模プロセス実証試験 ： 電中研とTUIとの共同研究)

実施内容 ： 陽極溶解試験、バッチ式向流抽出試験、高レベル廃棄物脱硝・塩素化・抽出技術の実証、
照射済み金属燃料の再処理実証

前処理工程 (還元)

実施内容 ： Li還元技術開発 (プロセス実証、Liリサイクル技術開発、等)、
高レベル廃液の塩素化技術改良 (技術実証、革新的改良技術の開発)

電解陰極処理

実施内容 ： 陰極回収金属処理技術、電解処理速度向上、ジルコニウム挙動把握、等

廃棄物処理処分

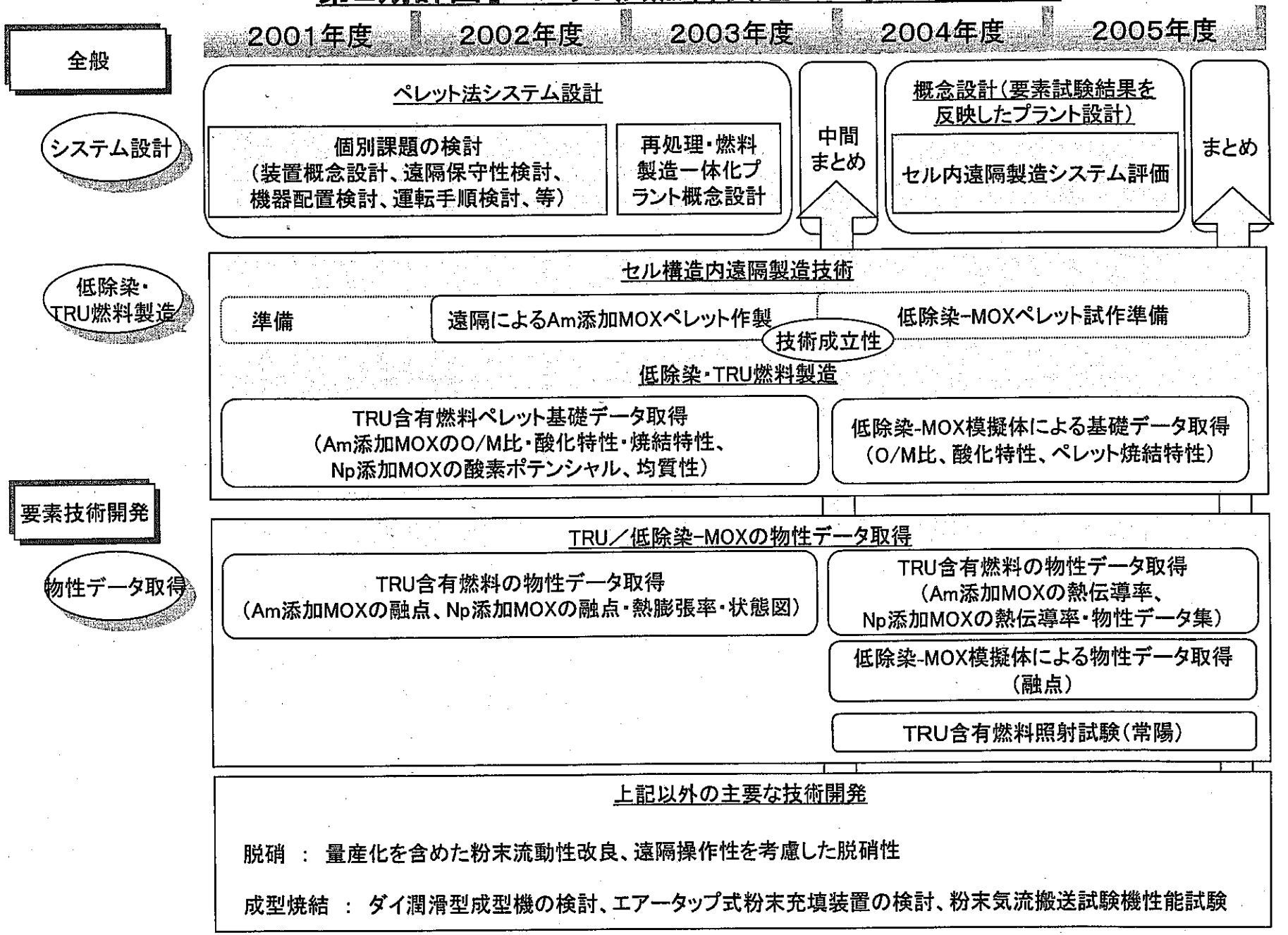
実施内容 ： 使用済み塩処理技術 (ソーダライト固化法、ガラス固化法、ゼオライトカラム、等)

その他

実施内容 ： LLFP分離・回収技術の検討、オンラインモニタリング技術検討

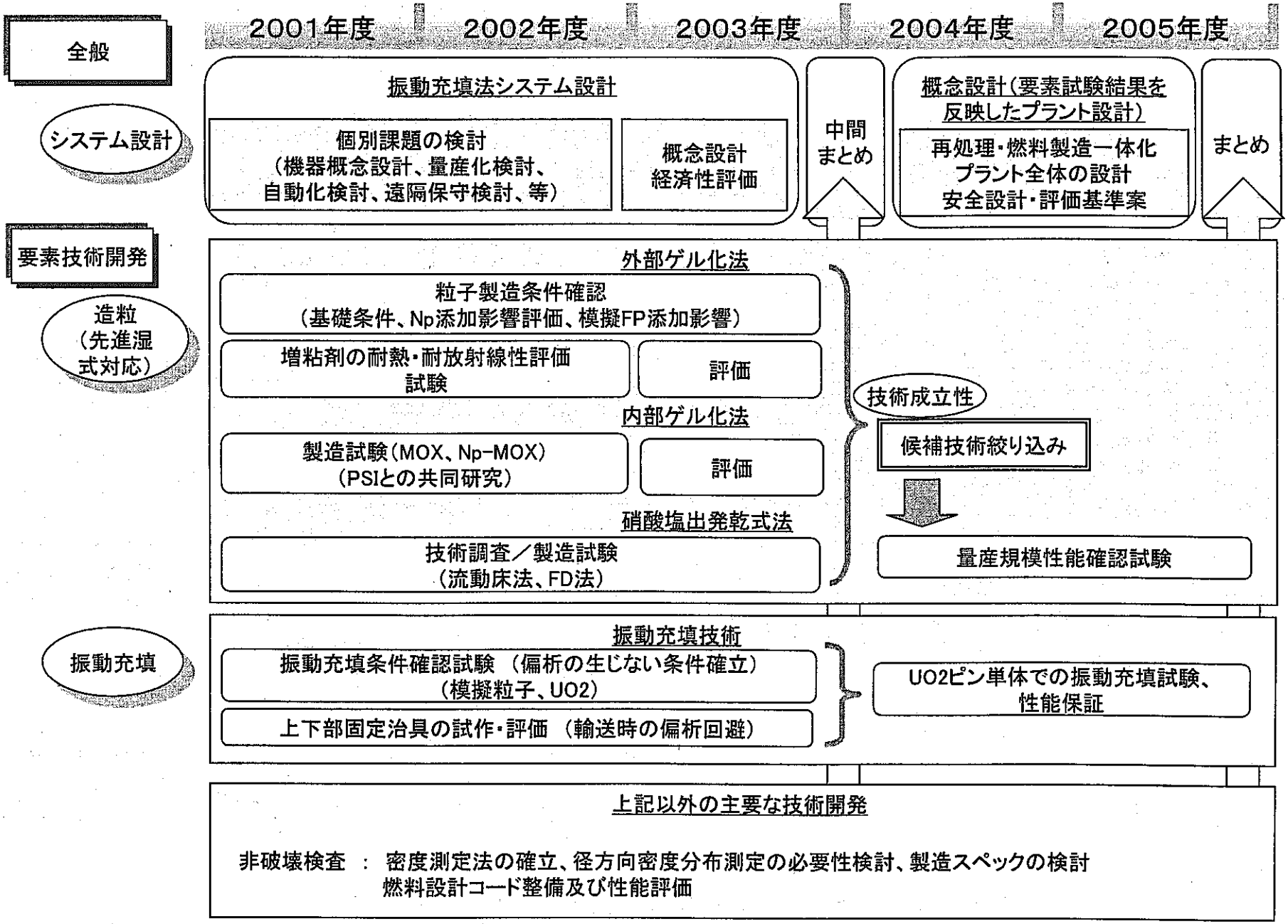
第2期計画[ペレット法燃料製造の主要なR&D]

JNC



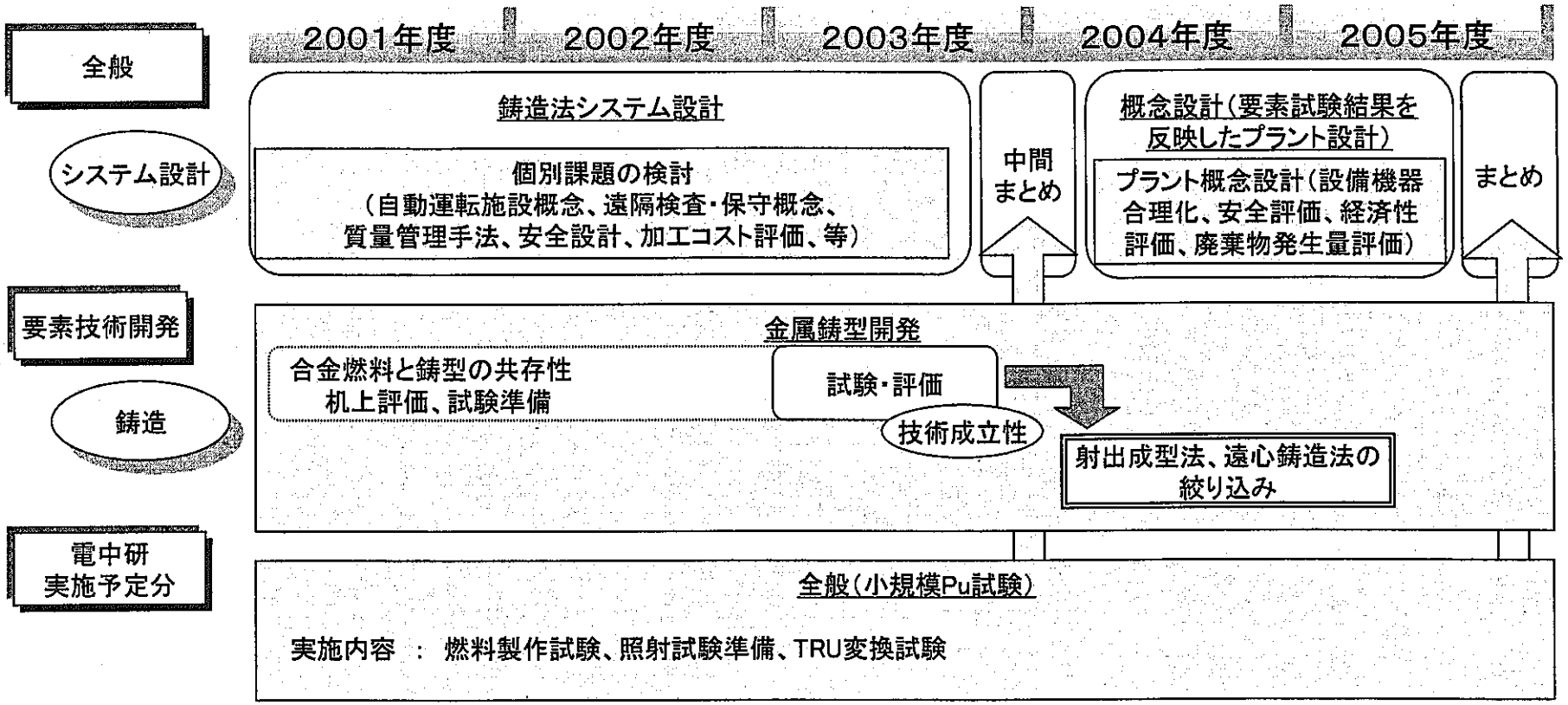
第2期計画[振動充填法燃料製造の主要なR&D]

JNC



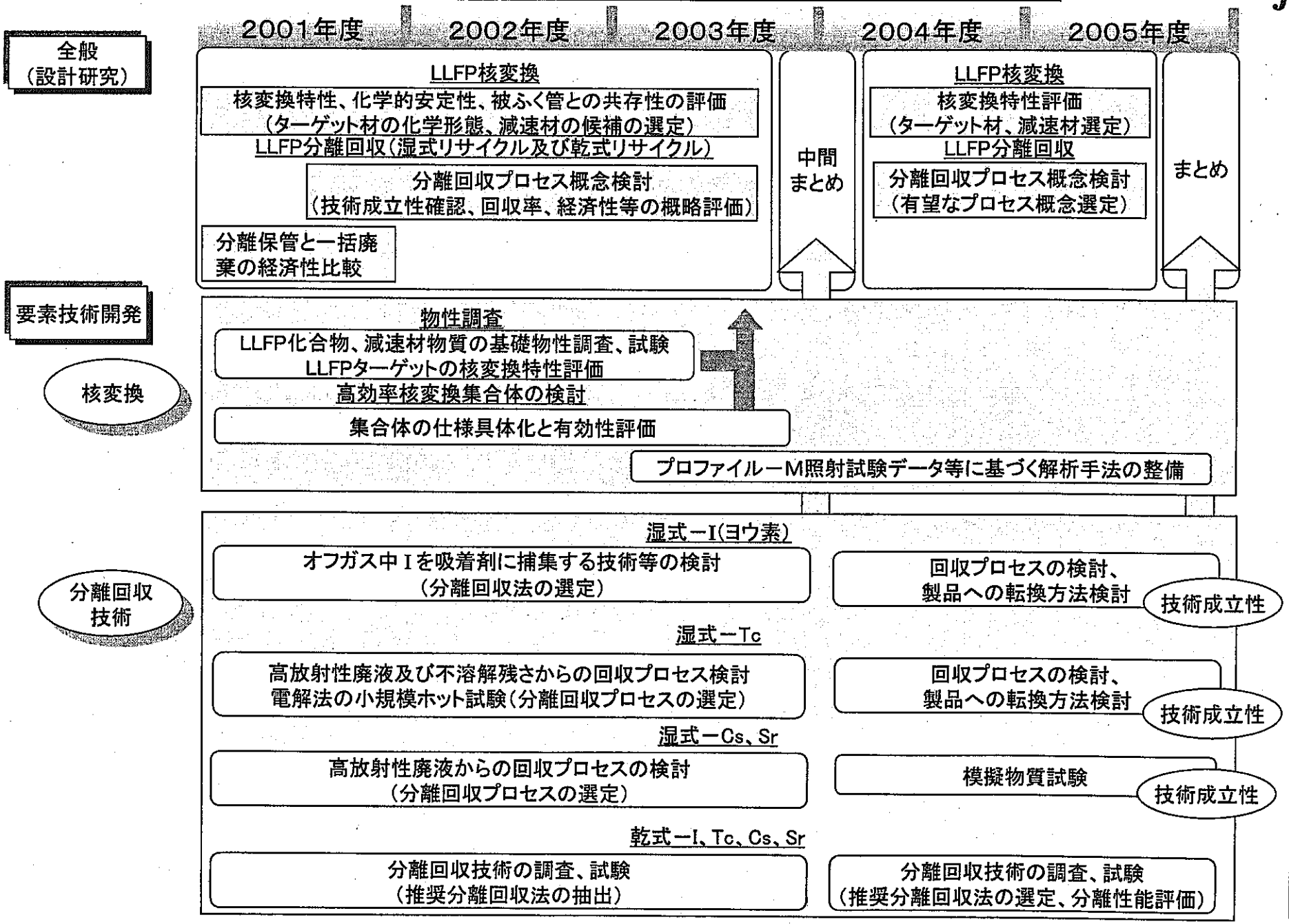
第2期計画[鋳造法燃料製造の主要なR&D]

JNC



第2期計画 [LLFP分離・核変換の主要なR&D]

JNC



第2期計画 [システム技術の統合・評価]

JNC

