

高速増殖炉サイクルの研究開発の現状とその実用化戦略

平成 11 年 10 月 25 日
核燃料サイクル開発機構

1. はじめに

高速増殖炉サイクルは、ウラン資源を有効に利用してエネルギーを再生産し、また、放射性廃棄物による環境負荷を低減できる可能性を有しており、その実用化は、我が国にとって重要な研究開発課題であると認識している。

核燃料サイクル開発機構では、高速増殖炉サイクル技術体系の確立に向けて、高い安全性の確保を前提とし、経済性の向上、資源の有効利用、放射性廃棄物による環境負荷の低減、核不拡散性の確保を開発目標に、サイクルシステム全体としての適切化に留意しながら、また、国内外の関係機関と協力しつつ、高速増殖炉とその関連する核燃料サイクルの実用化研究を進めている。

高速増殖炉の実用化を進める上で、高速増殖炉の発電炉である「もんじゅ」の設計、建設を通じて得られた知見や、今後の運転を通して得られる知見は、必要不可欠なものである。「もんじゅ」を活用し、高速増殖炉の合理的なプラント設計や運転方法を追求することによって、発電プラント技術の確立を早期に図ることが重要である。

なお、高速増殖炉サイクルの各要素である高速増殖炉、燃料製造、再処理の各選択肢の成立性を判断する上で重要な基盤技術研究や、選択肢に共通な基盤的研究についても、実用化研究と並行して進めている。また、使用済燃料から取り出された超ウラン元素(TRU)であるマイナーアクチニド(MA)の燃焼や、長半減期核分裂生成物(FP)の核変換または安定元素化による環境負荷低減をめざした研究については、大学および関係機関と協力して進めている。

2. 高速増殖炉の実用化に向けた研究開発

原子力委員会の高速増殖炉懇談会では、高速増殖炉を将来の非化石エネルギー源の一つの有力な選択肢と位置付け、柔軟な計画の下に研究開発を進めることが妥当との結論が出されている。そこでは、高速増殖炉の実用化の見通しをできるだけ早期に示すべく、効率的に研究開発を進めることが重要であるとの考え方が明らかにされている。

高速増殖炉サイクルは、ウラン資源の有効利用、環境負荷低減等に有効と考えられ、21世紀におけるエネルギー資源問題、環境問題、大量消費・大量廃棄からリサイクル社会への移行等を想定すると、将来、我が国のみならずアジアや諸外国のエネルギー問題解決に寄与できる可能性も有している。

こうした認識に立って、経済性確保を重点目標とし、かつ、高速増殖炉の魅力を最大限に引き出すことのできる高速増殖炉サイクルの具体的なシステム像を抽出し、その開発戦略を提示する目的で実用化戦略調査研究を開始した。研究を効率的に、かつ、強力に推進するため、電気事業者等との協力の下に実施している。

2.1 実用化戦略調査研究(全般的事項)

(1) 研究の目標

高速増殖炉サイクルが本来有する長所を最大限に活用した実用化システム像を抽出し、併せて、将来社会の多様なニーズに柔軟に対応できるような開発戦略を提示することにより、高速増殖炉サイクルを将来の主要なエネルギー源として確立できる見通しを立てる。

そのため、本研究を進めるに当たっては、安全確保を前提として、経済性、資源の有効利用、環境負荷低減、核不拡散性の4つの視点ごとに高度な目標を設定する(図1参照)。そして、この目標達成に向けて技術のブレークスルーを図るため、従来から進めてきた研究開発をベースにして、さらに幅広い技術選択肢を検討対象に加える。

なお、抽出した実用化システム像について、サイクル全体における整合性を含めて優劣を総合的に判断するため、上記の目標に対する達成度評価、開発費用対効果の評価、技術的実現性の評価等を組み合わせた総合的な評価方法の検討を行う。

(2) 概略実施工程(図2参照)

フェーズ1(平成11年度～平成12年度)では、まず、これまでに国内外で蓄積さ

れた研究開発の成果を活用するとともに、幅広く技術的選択肢の評価を行い、評価指標に照らして有望な高速増殖炉サイクルの実用化システム像を抽出し、その開発戦略を提示する。

フェーズ1の結果に関するチェックアンドレビューを受けた後、フェーズ2(5年程度)に入る。そこでは、工学的試験も含めて技術的成立性を確認し、高速増殖炉サイクル全体で整合性を図ったシステムを絞り込む。

(3) 実施体制

本年7月1日、サイクル機構と、電気事業者(9電力、原電、電発、電中研)及びメーカー各社との共同チームを大洗工学センターに組織した(図3参照)。これに加え、現在、原研との間で協力内容の具体化を協議中であり、オールジャパン体制で研究開発を進めることとしている。

本組織では、魅力的な実用化システム像を抽出するため、以下のような方策を採ることとしている。

- ① 単なる改良・応用のみでは実現できない高い目標を掲げ、研究開発の意識改革を図る。
- ② 多様な知見・経験を有する研究者、技術者の集合体である上記の実施体制を基に、組織の活性化を図り、新しい発想の創出に挑戦する。
- ③ 検討に資する目的で情報を得るため、メーカーにも作業の分担を願うが、その際、メーカー間の競争原理の働く自由な提案の要請と発注先の選定を行う。
- ④ 個人やグループ(社内他部門、国内、海外)からのアイデアを公募し、更に、革新的アイデアの収集に努める。

2.2 高速増殖炉の検討

(1) 技術の現状

高速増殖炉技術については、これまで、サイクル機構が中心となって、液体金属ナトリウム冷却高速中性子炉の特長を踏まえ、燃料の増殖と発電を同時に達成するプラントシステムを目指して、開発を進めてきた。実験炉「常陽」の設計、建設、運転、原型炉「もんじゅ」の設計、建設、運転、大洗工学センターでの基盤技術の開発実績により、高速増殖炉の炉心及びプラント技術は着実に進展してきた。

サイクル機構が進めてきた高速増殖炉固有の技術の研究開発と両輪を成す形で電力が進めてきた実証炉の開発研究では、原型炉までの高速増殖炉技術の実証に続き、将来的な商用発電炉としての経済性の実証を目的に、革新的な要素技術も設計に取り込んだ検討が行われてきている。実証炉設計では、軽水炉の建設コストの1.5倍以下となる設計概念は構築したが、コストダウンが進みつつある軽水炉に比

層できる商用高速増殖炉概念はまだ構築するには至っていない。

高速増殖炉技術の現状を整理して表1に示した。

(2) 検討の進め方

燃料サイクルとの整合性に留意しつつ、炉心燃料の形態(酸化物、金属、窒化物)、冷却材(ナトリウム、重金属、ガス、水等)、出力規模(大型炉、中小型モジュール炉等)について、あらためて幅広い範囲を対象に検討を進め、既存技術の改良・応用だけでなく、革新的な要素技術も取り込んで、上記の開発目標を達成できる高速増殖炉のシステム概念を検討していく。

平成 11 年度は、冷却材と燃料形態に関する特徴を把握し、それぞれの概念について、開発目標を達成するために必要な改善点、設備概念の検討を行う。

- ナトリウム冷却については、従来よりも柔軟な発想で、安全確保を前提に、経済性目標の達成(炉心性能の向上とプラントシステムの簡素化、コンパクト化)を重点的に検討するとともに、安全性向上方策、環境負荷低減、核不拡散性についても検討する。
- 重金属冷却については、炉心特性(資源の有効利用、環境負荷低減、核不拡散性)とシステム成立性見通し(安全性、構造設計、免震設計)について、ロシアでの既往研究結果、運転実績等の調査を踏まえつつ概略評価する。
- ガス、水冷却については、安全性と炉心特性について検討し、高速増殖炉としての能力を評価する。

平成 12 年度は、これらの検討結果を踏えて、冷却材、燃料形態それぞれについて開発目標を達成し得る高速増殖炉概念の検討を進め、複数の有望なシステム概念を抽出するとともに、実用化に向けた技術開発計画を作成する。

2.3 燃料サイクルの検討

(1) 技術の現状

高速増殖炉の燃料サイクル(燃料製造、再処理)技術については、これまで、サイクル機構が、湿式 PUREX 再処理及び MOX ペレット製造技術を中心に開発を進めてきた。「常陽」及び「もんじゅ」の初装荷燃料や取替燃料は、東海プルトニウム燃料製造施設で安全に製造してきている。高レベル放射性物質研究施設(CPF)では、「常陽」等の使用済燃料を使用して PUREX 法をベースとした高速炉燃料の再処理技術の開発試験を実施し、技術的な成立見通しを得ている。

これらの技術については、安全確保を前提に、実用化に向けた経済性の一層の向上や、将来の社会のニーズに対応する観点での TRU や長半減期 FP のリサイク

ルプロセスの付加など、より一層の技術の高度化が必要となっている。

また、サイクル機構は、先進的核燃料リサイクル技術として、振動充填燃料製造や窒化物燃料についても基盤的な研究を進めてきた。同時に、電中研、電気事業者は、金属燃料や窒化物燃料に対する乾式再処理法の評価・検討を進めてきた。これらの技術については、それぞれ原理的に特筆すべき長所を有しているが、今後、プラントとしての成立性を総合的に見極めていく必要がある。

燃料サイクル技術の現状を整理して表2に示した。

(2) 検討の進め方

燃料サイクル技術については、従来進めて来た幅広い技術的選択肢から成る基盤研究の成果を基に、新しい技術の基本的な成立性を要素実験や解析により確認しながら、システム研究を進めていく。

高速増殖炉の炉心では、燃料中の不純物濃度が軽水炉に比べれば相対的に高い値まで許容されることから、再処理工程で、大きな除染性能を必要としなくなる。このことからプロセスの簡素化が図られ、それに伴う経済性向上を狙うことができる。そのような観点も一選択肢に含めて、幅広い選択肢を検討対象とする。しかしながら、各形態の燃料に対する再処理能力、炉の成立性を考慮すれば、検討対象とすべき技術の組み合わせは限定されたものとなる。本研究で検討対象とする選択肢を図4に示した。

平成 11 年度は、それぞれの概念について、システム研究を行い、工程の成立性、廃棄物量の推定、建設費の推定等を概略実施することとしている。

[燃料製造]

- ペレット製造については、経済性の向上(工程の簡素化)の観点を重視して検討するとともに、除染性能を緩和し、かつ TRU を含む再処理製品を原料とする製造技術の検討を進める。
- 振動充填法については、経済性向上(簡素な顆粒製造プロセス、工程自動化)の観点を重視して検討するとともに、要求仕様(充填密度やプルトニウム分布の均一性)を満たす製造技術の検討を進める。
- 射出成型法については、経済性向上(原理的に簡素な手法)および廃棄物量の低減(鑄型=モールドの再利用等)の観点を重視して検討する。

[再処理]

- 湿式法(PUREX 法)については、経済性向上(工程の簡素化)や環境負荷低減(廃棄物量の低減、効率的な MA 回収技術)の観点を重視して検討する。

- 乾式法については、経済性向上(原理的に簡素な手法)、核不拡散性(核物質の入量計量法が課題)の観点を重視して検討する。
- 長半減期核種(MA や FP)の回収技術を付加した場合の経済性へのインパクト等について評価する。

平成12年度は、これらの検討結果を受けて、開発目標を達成し得る燃料サイクルのシステム概念について検討を進め、複数の有望なシステム概念を抽出するとともに、実用化に向けた技術開発計画を作成する。

2.4 システム概念の抽出と開発戦略の提示

高速増殖炉、燃料製造、再処理の開発は、相互に整合性をとりつつ進め、最終的には高速増殖炉サイクル全体システムとして完成させる必要がある。このような主旨から、以下のような検討を実施する。

- 2.1(1)に記した目標に照らし、高速増殖炉、再処理及び燃料製造からなる高速増殖炉サイクル全体の実用化候補概念の抽出・評価を行う。サイクル要素技術(高速増殖炉、再処理及び燃料製造)間の整合性に留意し、サイクル全体として適切化を図る。
- エネルギー市場の動向、代替エネルギーの開発動向等の高速増殖炉をめぐる境界条件を考慮した高速増殖炉サイクルの実用化シナリオを提言する。

高速増殖炉サイクルを実用化する上での重要な技術を特定し、研究開発項目の優先順位付けを行った研究開発計画を検討・策定する。この中で、基盤的研究開発の実施戦略や、「常陽」、「もんじゅ」、リサイクル機器試験施設(RETF)等大型施設をより有効に活用する戦略をまとめる。

3. 「もんじゅ」の現状と今後の役割

3.1 「もんじゅ」の技術的特徴と現状

「もんじゅ」は、大洗工学センターにおける「常陽」及び各種ナトリウム試験施設による研究開発成果を基にして設計された大型の炉心とナトリウム機器をもつ、電気出力28万kWの発電用FBRプラントであり、ループ型炉、2次冷却系配管分岐型崩壊熱除去系、より高度な高温構造設計基準に基づく設備、等の技術的特徴を有する。今後は、原型炉として、発電プラントとしての性能を確認し、大型化の実用性を評価していく。

1985年に着工して以来、原子炉容器、炉心上部機構等の高精度の加工・組立が要求される機器の製作及び据付を経て、1991年から総合機能試験、1992年から性能試験(軽水炉での起動試験に相当)を実施し、1994年4月に初臨界、1995年に初発電を達成してきた。

この総合機能試験では、約300項目の確認を行って設備機能を確認した。約8割がFBR特有の確認項目に該当する。また、性能試験では、プラント特性予備試験、臨界試験、炉物理試験、核加熱試験、出力試験の5段階に分けて実施し、142の試験項目を計画していた。しかし、1995年12月、40%出力試験の過程で2次系ナトリウム漏えい事故が発生したため、試験を中断している。

炉心試験データから、「もんじゅ」の増殖比の予備的評価値として1.18を得る等、初期炉心における炉心特性が所定の性能を有していることが確認されている。また、核加熱されたナトリウム冷却系を介して水・蒸気系へ熱を伝える状態で、出力40%において、原子炉出力制御系、主蒸気温度制御系等の定常運転性能を確認した。

なお、この間、水・蒸気系起動バイパス系のフラッシュタンク圧力低下事象、給水調節弁制御回路の不適切な制御定数設定に起因する原子炉トリップ等の不具合も経験し、改善を行ってきた。

また、設計段階から運転段階に至る「もんじゅ」技術を総合評価して、今後のFBR開発に利用できる普遍的・体系的な技術を取りまとめる作業に着手しており、予熱保温設備、ナトリウム配管、原子炉格納施設等の設計技術の集約が行われている。

3.2 今後の役割

FBRの実用化には、発電プラントとしての技術の確立が必要であり、「もんじゅ」を運転することにより、基盤となる燃料・炉心技術、プラント設計技術等の高度化及び発電プラントとしての技術の成熟化を図っていく。こうした成果を実用化像の構築や革新技术・新概念の技術評価に活用していく。

また、経済性の向上や環境負荷低減に向けた研究開発の場として活用していくとともに、実用化戦略調査研究において選択された有望技術の確証の場として利用していく。

今後の役割を段階的に大別すると、以下の3期に分類できる。なお、第2期以降は、実用化戦略調査研究の成果を踏まえ、具体的な計画を定めるものとする。

(1) 第1期：発電プラントとしての技術実証の段階

「もんじゅ」の安全・安定運転によりFBRの社会的受容性を高めるとともに、「もんじゅ」の運転実績に基づき、炉心・機器・システム等に係る設計技術の妥当性、「常陽」から大型化されたポンプ・熱交換器等の技術の実証を行う。なお、第1期は10年程度と考えているが、それ以降も、発電プラントとしての技術の成熟に向けて運転を継続し、経年特性の把握や運転データの蓄積を行う必要がある。

(2) 第2期：経済性向上に寄与する技術の確証段階

実用化戦略調査研究により経済性向上を図る技術を抽出するが、有望技術及びその基盤となる技術の中の一部については、「もんじゅ」に適用または「もんじゅ」を改造して確証することが可能である。例えば、経済性の向上に向け、炉心においては高燃焼度化し、15万 MWd/t 以上を目指す、プラント設備においては、簡素化冷却系、高度化燃料取扱系、新型炉停止系等の技術実証に供する、などが考えられる。

なお、照射施設としての能力を備えることも可能であり、新しいタイプの燃料の性能を集合体規模で確証することが期待できる。

(3) 第3期：FBR 実用化技術の確証段階

有望な技術として開発を進めた要素技術については、システム化して次期プラントに集約されることになるが、必要に応じて「もんじゅ」等で確証される。例えば、「もんじゅ」の炉心では、環境負荷低減技術に関連して、炉心規模で MA や高次化プルトニウムの燃焼等が可能である。

FBR 実用化に向けた「もんじゅ」の役割を図5に示した。

4. 高速増殖炉サイクルを支える基盤技術研究

基盤技術研究については、高速実験炉「常陽」、燃料・材料の照射後試験施設、ナ

トリウムの試験研究施設、高レベル放射性物質の研究施設等を使用して各種の試験を行うとともに、ソフト技術の高度化に努める。併せて、国内外の研究機関とも協力して、成果を高速増殖炉の技術基準、設計評価手法、データベース等にとりまとめており、それらを高速増殖炉の実用化において活用していく。

4.1 「常陽」の現状と今後の役割

(1) 「常陽」の運転実績

「常陽」は、1977 年 4 月に初臨界を達成し、熱出力 50MWt 及び 75MWt の炉心(MK-I)での性能試験と運転により、炉心やナトリウム冷却系の特性を把握した。その後、燃料・材料の照射試験用に、熱出力 100MWt の炉心(MK-II)に改造し、1982 年 11 月に臨界を達成し、運転を継続している。初臨界からの累積運転時間は、1999 年 9 月末現在、約 58000 時間である。

(2) 今後の役割

「常陽」の基本的な役割は、①高速増殖炉の運転管理技術の高度化、②高速増殖炉燃料及び材料の照射、③機器等の新技術の実証試験である。

- 運転管理技術については、「常陽」の運転保守経験をベースに、高速増殖炉の炉心管理、運転支援、保守支援システム、運転保守データベース等を開発した。これらのシステムやデータは、「もんじゅ」の運転・保守管理に反映した。
- 燃料・材料の照射試験については、燃料要素平均燃焼度 10.5 万 MWd/t を達成し、「もんじゅ」の燃料設計(9.8 万 MWd/t)に反映した。現在は、燃料の設計裕度合理化のための照射試験や今後の候補燃料である窒化物燃料等の基礎的な照射試験を実施し、高速増殖炉の実用化に必要なデータを蓄積している。
- 「常陽」は、照射能力を高めるため、熱出力 140MWt の炉心(MK-III)への改造を計画している。現在、炉心の拡張と除熱性能の向上のため、新燃料や主中間熱交換機などの機器を製作しており、改造炉心は平成 14 年度に完成する予定である。この炉心では、新型燃料(集合体平均燃焼度 15 万 MWd/t 以上、燃料寿命 5 年以上の高性能酸化物燃料や、窒化物燃料、ネプチウムなどの MA 含有燃料等)の照射試験、照射データ計測システム等の新技術の実証試験、等を計画している。

4.2 基盤技術研究の現状と今後の役割

(1) 安全研究

- 高速炉炉心の安全性に関しては、仏国等との国際協力による炉内試験を行い、燃料破損限界や炉心の異常拡大防止に関する研究を実施するとともに、自然循環除熱等の受動安全性の強化に関する研究、炉心損傷事故に関する研究等を行い、炉心安全評価手法の高度化を進めている。
- ナトリウム安全技術に関しては、大小のナトリウム漏えい燃焼試験を行い、ナトリウム漏えい安全評価手法を整備し、ナトリウム漏えい対策に反映した。蒸気発生器伝熱管破損については、破損模擬試験を行い安全裕度評価法を整備した。
- 今後は、炉心安全性に関する炉内試験やナトリウム安全技術確立のための試験を継続し、より合理的で信頼できる高速増殖炉のプラント安全技術として確立する。

(2) 炉心研究

- 炉心研究は、原研や、英国、米国の高速臨界実験装置を用いて、「常陽」、「もんじゅ」、大型炉を対象とした臨界実験を行い、非均質セル計算法、3次元輸送計算法、炉定数調整法等の炉心特性解析手法を開発した。これらの開発技術については、現在、汎用の高速増殖炉用炉心設計基本データベースとして集大成中である。
- 今後は、MA燃焼、FP消滅など、多様な炉心を精度良く解析できるよう、断面積共鳴領域を詳細に評価できる炉定数システムを開発している。

(3) 構造・材料研究

- 高温強度、ナトリウム環境効果等に関する材料強度基準、クリープ疲労に関する構造物破損防止評価手法を開発し、各種熱過渡強度試験による妥当性確認を行った上で、高速増殖炉の高温構造設計方針を策定した。
- 今後は、高温熱応力環境下での材料の経年変化の評価、機器の余寿命診断技術の開発、高温構造設計方針の合理化研究等を進める。
- 耐震研究では、地震荷重に対する構造物応答手法と健全性評価手法の開発、3次元免震システムの開発を行っている。

(4) 伝熱流動研究

- 「常陽」や「もんじゅ」の冷却系を模擬したナトリウム試験を行い、冷却系の設計手法の開発と妥当性を確認した。冷却系の設計評価を行うため、燃料集合体や冷却系全体を解析するコードシステムを開発した。
- 現在は、伝熱流動現象把握のための実験を積み重ね、計算科学的手法による数値シミュレーション技術を開発し、温度ゆらぎや温度成層化など、冷却材と構造材との間で相互に複雑に影響し合う現象を直接計算する手法の開発を進めている。

(5) 燃料製造、再処理の基盤技術研究

- プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料の製造に当たって、ペレットの焼結技術、マイクロ波加熱直接脱硝技術、燃料ピン溶接技術、加工工程の遠隔・自動化技術等の要素技術の開発を行い、「常陽」や「もんじゅ」の燃料設計や製造技術に反映した。
- 高速増殖炉燃料再処理では、湿式法をベースとして、溶解・抽出等の化学プロセス技術、前処理・化学処理等のプロセス機器技術、分析・材料・遠隔保守技術等の要素技術開発や MA リサイクル技術の研究を行ってきた。
- 高レベル放射性物質研究施設(CPF)では、「常陽」の燃料ピンを再処理し、プルトニウムを回収した。そのプルトニウムは「常陽」にリサイクルし、小規模ながら高速増殖炉の輪を閉じた。
- プロセス機器の開発を目的としたリサイクル機器試験施設(RETF)は、建設中であるが、実用化戦略調査研究の進捗状況と整合をとりつつ、計画を逐次見直していく。
- 高速増殖炉燃料の製造及び再処理は、これまで、混合酸化物燃料製造及び PUREX 法再処理を中心として研究開発を進めてきた。それを通して蓄積された知見を反映しつつ、より幅広い選択肢の検討を行い、その結果を踏まえ、より効率的な研究開発を進めていく。

5. 研究開発費

核燃料サイクル開発機構の高速増殖炉サイクルに関するこれまでの研究開発費は以下の通りである。

- 1967年から1998年までの累積額： 約1.1兆円

■ 内訳：「常陽」12%、「もんじゅ」55%、その他33%

なお、仏国では520億FF(約1.4兆円：1994年までの累積、円換算は当時の為替レートに基づく)、米国では75億\$ (約1.8兆円：1987年までの累積)が高速増殖炉の研究開発に費やされた。

研究開発の実施に当たっては、従来にも増して開発目標や方向性の明確化を図り、適宜達成度や費用対効果比を評価しつつ、実用化の観点からの優先度を考慮した柔軟な計画運用により効率化を図っていく。

表1 高速増殖炉技術の現状

	ナトリウム冷却	重金属冷却 (鉛、鉛ビスマス)	ガス冷却 (炭酸ガス、ヘリウム)	水冷却 (沸騰水及び加圧水、 超臨界圧蒸気)
利点	・出力密度を高くできる ・高い増殖性能を達成可能 ・優れた熱除去能力 ・低圧システム	・化学的に不活性 ・2次系を削除した簡素化が可能 ・低圧システム	・透明で化学的に不活性 ・2次系を削除した簡素化が可能 ・優れた保守・補修性	・実用化段階にある軽水炉技術の適用(炉心以外) ・超臨界圧蒸気を用いた高圧高効率システム
欠点	・Naは化学的に活性 ・システム構成が複雑となる	・高温鉛の構造材料との共存性と除熱特性 ・高密度冷却材の耐震・免震成立性とポンプ負荷増大 ・燃料健全性、安全性等に関する試験データの充足性	・FBRとしての炉心設計の成立性 ・稠密炉心の安全性(減圧事故時等) ・ガス炉固有の燃料形態の成立性 ・燃料サイクルとの適合性	・FBRとしての炉心設計の成立性と増殖性能 ・稠密炉心の安全性(LOCA時等) ・材料、安全試験データの充足性(超臨界圧蒸気)
開発状況	・世界各国において、酸化物燃料を用いる実験炉、原型炉の建設、運転が行われてきた。 ・米国では金属燃料の開発が行われ、実験炉での運転経験がある。 ・欧州では酸化物燃料の研究開発が行われてきた。 ・商用規模の大型炉及び中小型モジュール炉についての設計研究が実施された。 ・技術的成立性は得られているが、将来の軽水炉に比肩する経済性達成見通しを得る段階。	・ロシアの原子力潜水艦で80炉年の実績あり。 ・ロシア、米国等で中小型及び大型炉の設計研究が行われている。 ・発電プラントとして必要な耐久性を確認するとともに、技術的成立可能性、経済性の見通しについて検討している段階。	・英国の商用ガス冷却熱中性子炉の設計・運転経験を活用したFBR概念、及び、高温ガス炉の技術を適用した高温・高効率な中小型モジュール概念について、設計研究が行われている。 ・FBRシステムとしての技術的成立可能性、経済性の見通しについて検討している段階。	・BWR及びPWR技術高度化の一環として、設計研究が進められている。 ・超臨界圧蒸気冷却FBRは、大学にて設計研究が進められている。 ・FBRシステムとしての技術的成立可能性について検討している段階。

表2 燃料サイクル技術の現状

		燃料製造			再処理		
		ペレット (粉末を成型後、 焼結し、燃料ピン に加工)	振動充填 (被ふく管に振動 を付与した条件 下で、連続的に顆 粒燃料を充填)	射出成型 (溶融金属をピン 形状に射出)	湿式法 PUREX法 (TBPを用いた溶 媒抽出)	乾式法 RIAR法 (酸化物を対象と した溶融塩中で の電解法(塩素ガ ス併用))	乾式法 ANL法 (粉末を成型後、 焼結し、燃料ピン に加工)
利点		・燃料ピンの品質 管理が容易	・遠隔自動化に 適する	・ペレット法に比 べ、プロセスが 単純	・高い除染係数を 容易に実現可能 ・Np共抽出可能	・湿式法に比べ、 プロセスが単純	・湿式法に比べ、 プロセスが単純
欠点		・工程数が多い (検査工程等)	・充填密度、Pu分 布の均一性の担 保が課題	・短尺の金属燃 料しか製造実績 がない ・鑄型(ガラス製 モールド)が廃棄 物増大の要因	・相対的にプロセ スが複雑	・塩素ガス廃棄物 の処理が課題 ・核物質の入量 管理が課題	・核物質の入量 管理が課題
開発状況	酸化物	・実用段階 ・仏SPX、もんじゅ 等で採用(数10 万本の製造、照 射実績) ・軽水炉でも実績	・実証段階 ・露BOR60でフル 炉心実績(乾式 法で得られた顆 粒) ・英PFR/DFRで実 績(乾式法とゲ ル化法の顆粒) ・合計2万本以上 製造		・実用段階 ・軽水炉再処理 は商業化済み (経済性向上策 を要検討)	・試験段階 ・BOR60用に使 用済燃料を散体 処理済み	・適用可能だが 未実施 ・前処理工程と して還元、後処理 工程として酸化 が必要
	塩化物	・基礎試験段階 ・集合体規模での 照射試験が行わ れた(約200本)	・製造研究が実 施されている ・英DFRでの照射 実績あり		・適用可能だが 未実施 ・再処理製品の 塩化物への転換 が必要	・適用可能と推定 (実績なし)	・実験室規模の 研究段階
	金属		・原理提案がある が実績無し	・実証段階 ・米EBR-2でフル 炉心実績 ・合計数千本のピ ン製造	・適用可能だが 未実施 ・再処理製品の 金属への転換工 程が必要	・解体核の処理 実績あり	・試験段階 ・EBR-2使用済燃 料コンディショ ニングに適用(再 処理ではない)

安全確保を大前提として

- 軽水炉サイクルと同等以上の安全性
- 安心感の得られやすい安全確保手段の採用

4つの目標

① 経済性

- 将来の軽水炉に比肩しうる発電コスト
(プラント建設費、運転維持費、燃料費、プラントの廃止措置費を含む)

② 資源の有効利用

- 高い増殖能力を達成するとともに、
TRU (高次 Pu や MA 核種) を燃料として活用できるシステム

③ 環境負荷低減

- 長半減期核種のリサイクルの実現
例えば、
TRU リサイクル
→ TRU + 長半減期 FP リサイクル

④ 核不拡散性

- サイクル全般にわたり、
純粋な Pu が単独で存在するプロセスがないシステム

図 1 高速増殖炉サイクル開発目標の具体化

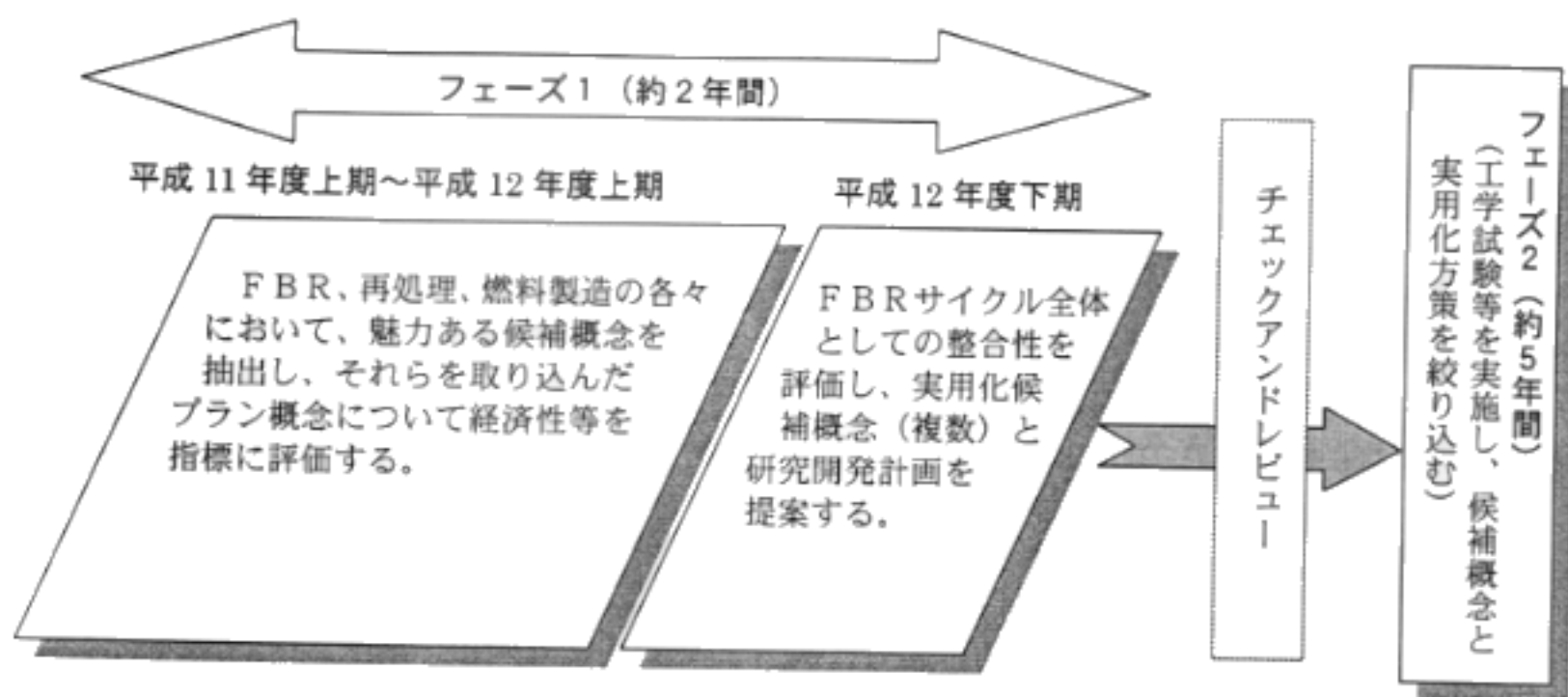


図2 実用化戦略調査研究の概略工程

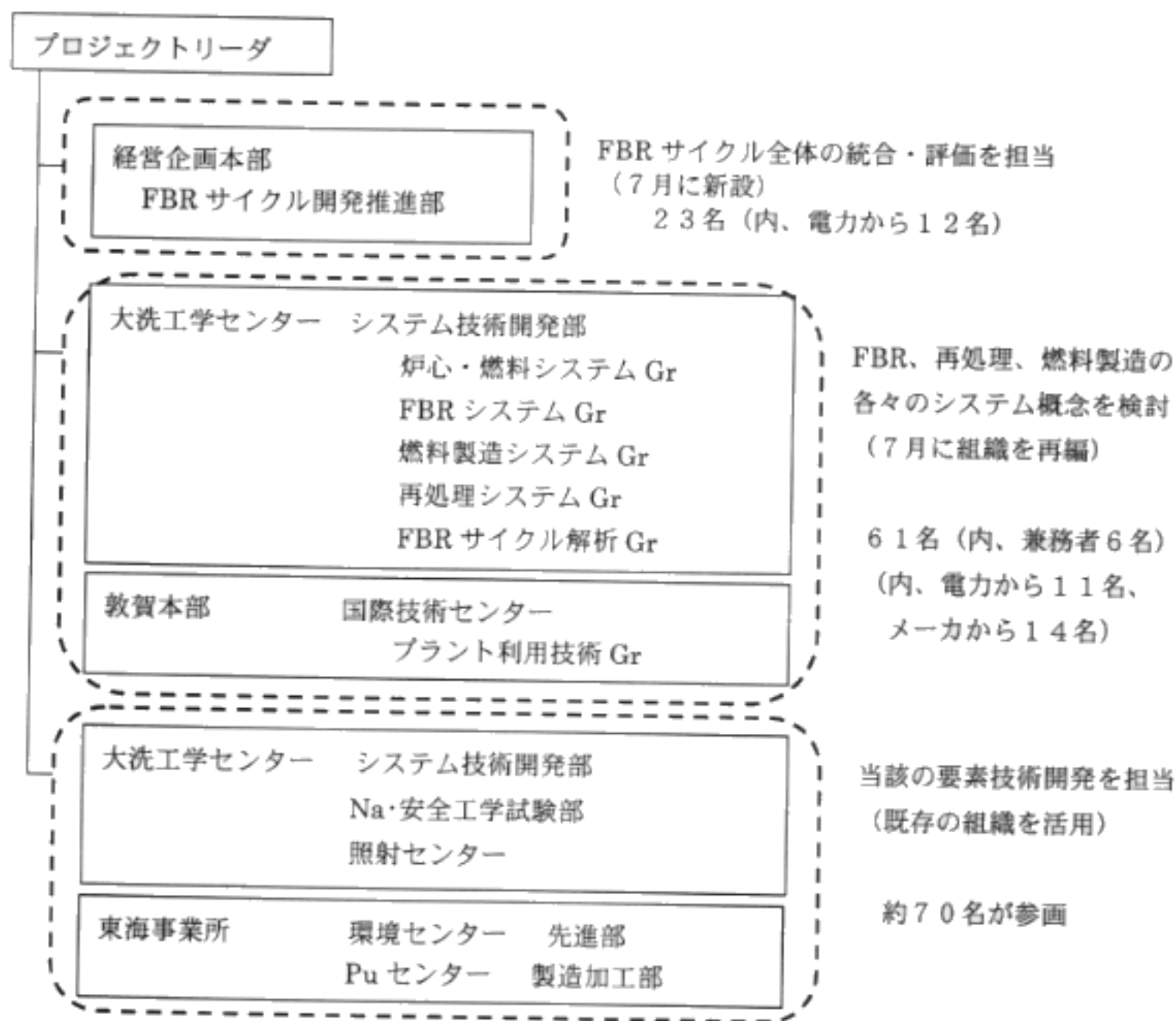


図3 実用化戦略調査研究の推進体制

燃料

再処理

燃料製造

FBRサイクル実用化時代

現行サイクル

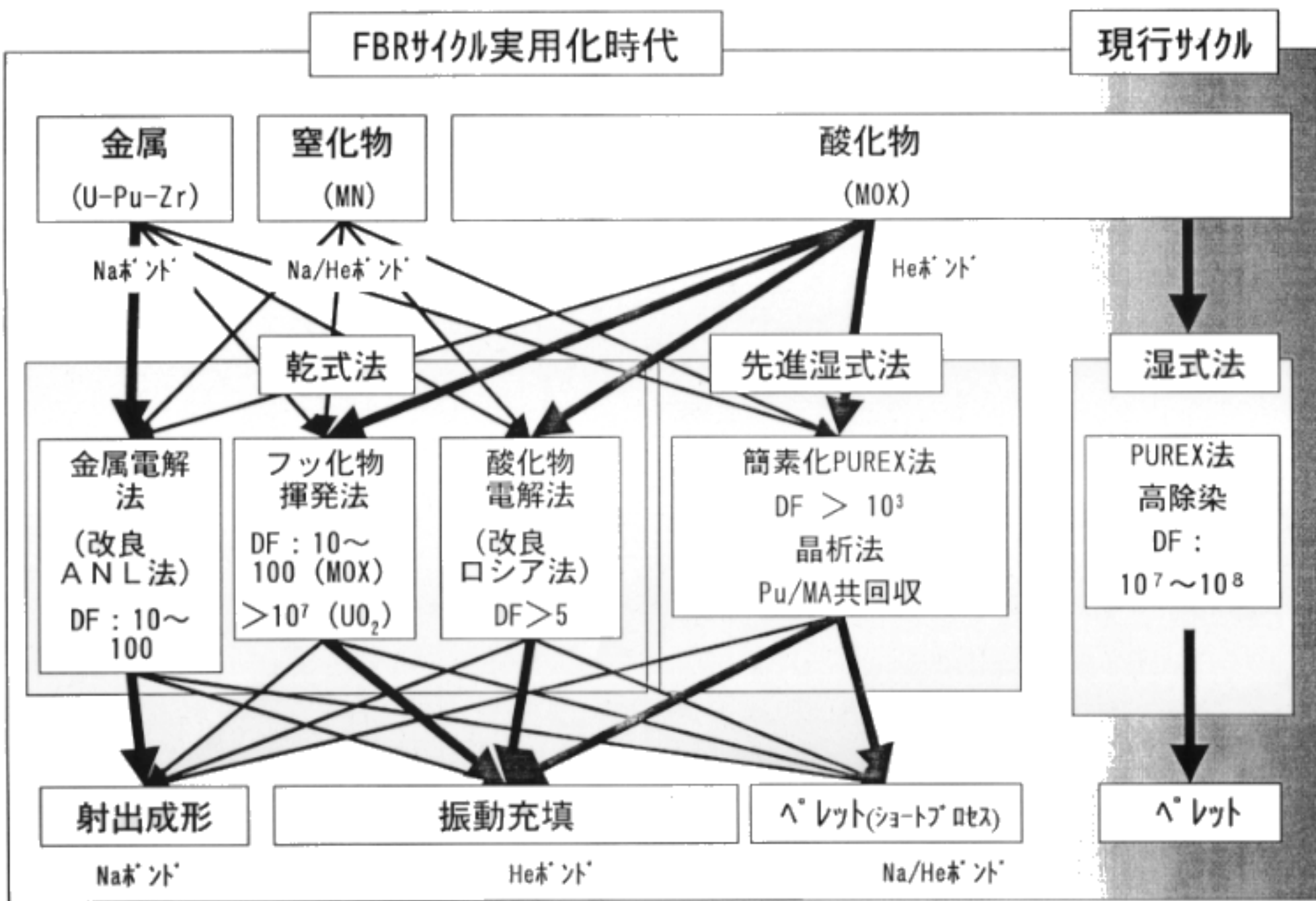


図4 燃料サイクル技術の検討対象

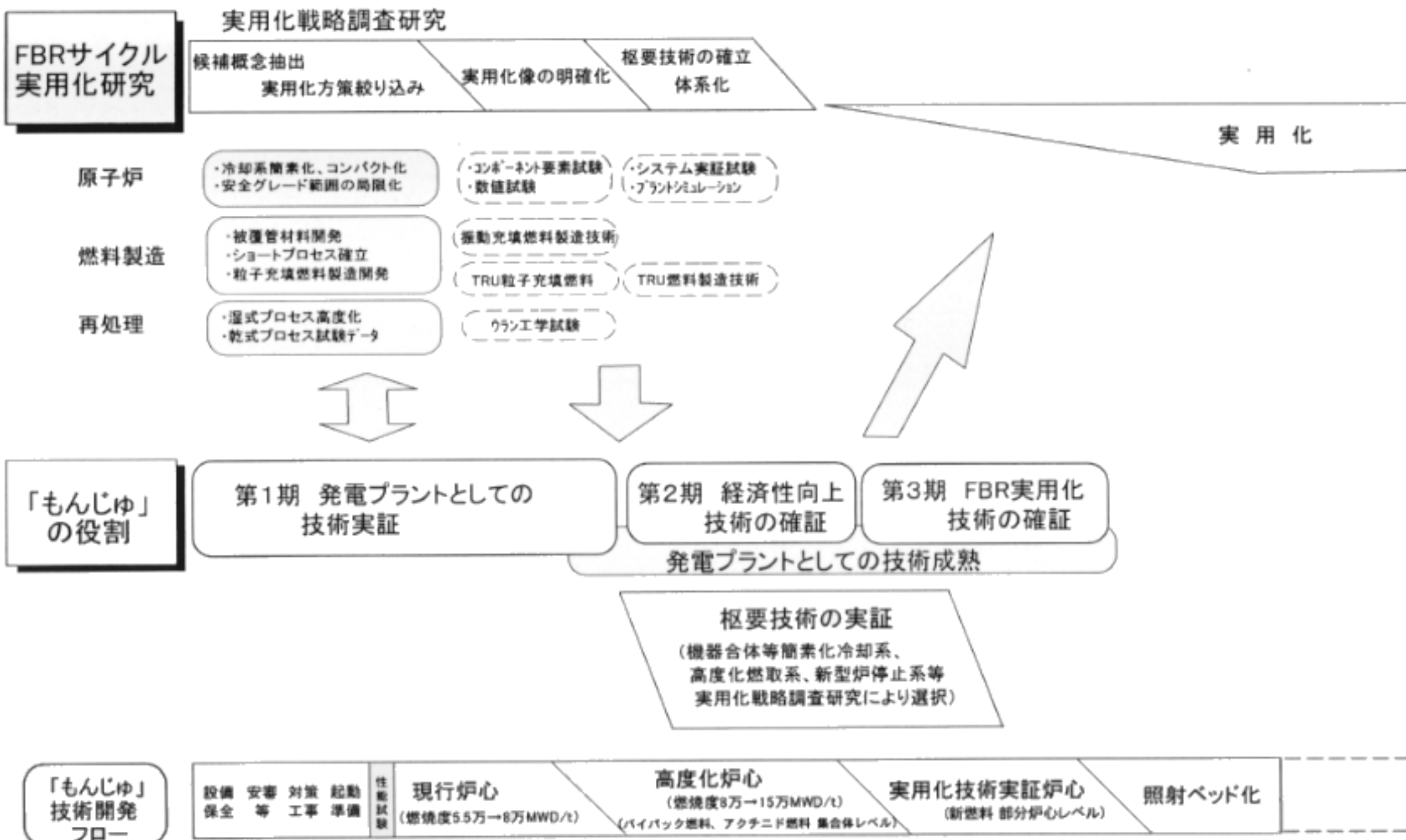


図5 FBR実用化に向けた「もんじゅ」の役割