



高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ の2001年度成果

野田 宏 山下 英俊 前田二三男
佐藤和二郎 家田 芳明 船坂 英之

本社 経営企画本部 FBRサイクル開発推進部

Results of FY 2001 Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor Cycle System Phase

Hiroshi NODA Hidetoshi YAMASHITA Fumio MAEDA
Kazujiro SATO Yoshiaki IEDA Hideyuki FUNASAKA

FBR Cycle System Development Office, Executive Office for the Policy Planning and Administration,
Head Office

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ は、フェーズ で抽出したFBRシステムと燃料サイクルシステムの候補概念を複数の実用化候補概念に絞込むこと、及びフェーズ 以降の研究計画を提示することを目標として2001年度から五カ年計画で開始した。フェーズ 初年度の2001年度には、フェーズ の成果及びフェーズ 計画について研究開発課題評価委員会に諮り、目的・意義、開発目標、実施体制を含め適切との評価を受けた。FBRシステムに関しては、ナトリウム冷却中型モジュール炉及び鉛ビスマス冷却モジュール炉について、経済性目標を達成できる見通しを得ると共に、ガス冷却炉については、ヘリウム冷却炉（被覆粒子型・分散型燃料）を選定した。再処理システムに関しては、先進湿式法について、晶析技術等のプロセス成立性を確認した。また、酸化物電解法ではMOX電解共析の技術的成立性を確認すると共に、金属電解法では、液体Cd陰極へのPu回収試験によりシステム合理化の可能性を確認した。燃料製造システムに関しては、ペレット法について、低除染TRU燃料製造の遠隔操作性を確認すると共に、振動充てん法では、設計要求を満たす充てん密度を達成できる見通しを得た。また、鑄造法では、工学規模の試験により製品スラグの要求仕様を満足するための射出成型技術の操業パラメータを把握した。

Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor (FR) Cycle System Phase- were commenced on April 1, 2001, in order to select a few promising candidate concepts for commercialization from the candidate concepts of the FR system and fuel cycle system which were screened in Phase- , and to present an outline plan for Phase- onward. In FY 2001, which was the first year of Phase- , the results of Phase- and the plan for Phase- were evaluated as appropriate by The R&D Project Evaluation Committee. With regard to the sodium-cooled medium-scale modular reactor and lead-bismuth cooled modular reactor, economical targets are expected to be achieved. In terms of the gas-cooled reactor, the helium gas-cooled reactor (coated particle fuel type and dispersion fuel type) was screened as a candidate concept. For the reprocessing system, a feasibility of the process for the crystallization method on the advanced aqueous method was confirmed. With regard to the oxide electrowinning method, the technological feasibility of MOX electrowinning co-precipitation was confirmed. In terms of the metal electrowinning method, the possibility of



野田 宏

FBRサイクル開発推進部
部長
FBRサイクルの実用化戦略調査研究の取りまとめに従事



山下 英俊

FBRサイクル開発推進部
次長
FBRサイクルの実用化戦略調査研究の取りまとめに従事



前田二三男

企画・調整グループリーダー
プロジェクトの基本計画の
策定・調整、研究開発計画
の取りまとめに従事



佐藤和二郎

FBRサイクルシステム統合グループリーダー
FBRサイクルの評価基準
及び統合評価手法の検討、
実用化シナリオの検討に従事



家田 芳明

炉システムグループリーダー
炉、炉心・燃料に係るシステム
概念の検討、研究開発
計画の策定に従事



船坂 英之

燃料サイクルシステムグループリーダー
再処理、燃料製造に係るシステム
概念の検討、研究開発
計画の策定に従事
工学博士

system rationalization was confirmed by Pu recovery testing at liquid Cd cathode. For the fuel fabrication system, in terms of the pelletizing method, the ease of remote-controlled fabrication of low-decontamination TRU fuels was confirmed, and in terms of the vibration compaction method, the packing density is expected to be satisfied as regards the design requirement. With regard to the casting method, the operation parameters of the injection casting technology, which were satisfied to slug specification requirements, were grasped by engineering-scale testing.

キーワード

FBRサイクル, 実用化戦略調査研究, 開発目標, FBRシステム, 燃料サイクルシステム, 再処理システム, 燃料製造システム, 実用化候補概念, 開発ロードマップ, 新リサイクル概念 (ORIENT Cycle)

FR Cycle System, Feasibility Studies on Commercialized FR Cycle System, Development Target, FR System, Fuel Cycle System, Reprocessing System, Fuel Fabrication System, Promising FR Cycle Candidate Concepts for Commercialization, Development Plan_(Road-Map), New Recycle Concepts_(ORIENT Cycle)

1. はじめに

高速増殖炉サイクル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、併せて将来の社会の多様なニーズに柔軟に対応し得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。

本研究は、フェーズ（1999 - 2000年度）及びフェーズ（2001年度から5年間）と、段階に分けて実施することとし、1999年7月から、サイクル機構、電気事業者、電力中央研究所及び原研などから成るオールジャパン体制で研究開発を開始した。更に、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(柔軟な計画運用)により進め、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。

フェーズでは、フェーズで抽出したFBRシステム及び燃料サイクルシステムに関する有望概念について、候補概念相互について可能な限り定量的な比較評価を実施できるレベルまで設計研究を深めると共に、定量的な絞込みを実施する上で必要となる要素技術開発(データを取得する試験の実施、設計評価技術の整備)を実施し、これらの成果を基にFBRサイクル全体の整合性に配慮しながら実用化候補概念として有望な2~3の候補に絞込み、併せて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(図1)。

フェーズ初年度の2001年度には、フェーズの成果とフェーズの計画について研究開発課題

評価委員会の評価を受け、おおむね妥当との答申を得ると共に、フェーズの計画に沿って、設計研究及び要素技術開発に着手した。以下に2001年度の主な成果を示す。

2. 開発目標及び設計要求

フェーズの開発目標として、フェーズで設定した五つの開発目標(安全性、経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性)について、フェーズの進展及び国内外の原子力開発の動向を踏まえて、より高い目標を視野に入れ、経済性、環境負荷の低減及び21世紀の多様なニーズに応える多目的な利用について一部見直しを行った(図2)。

なお、開発目標は、目指す方向やねらうレベルを示すこととし、定量的な数値目標については、開発目標を受けた設計要求としてまとめた。

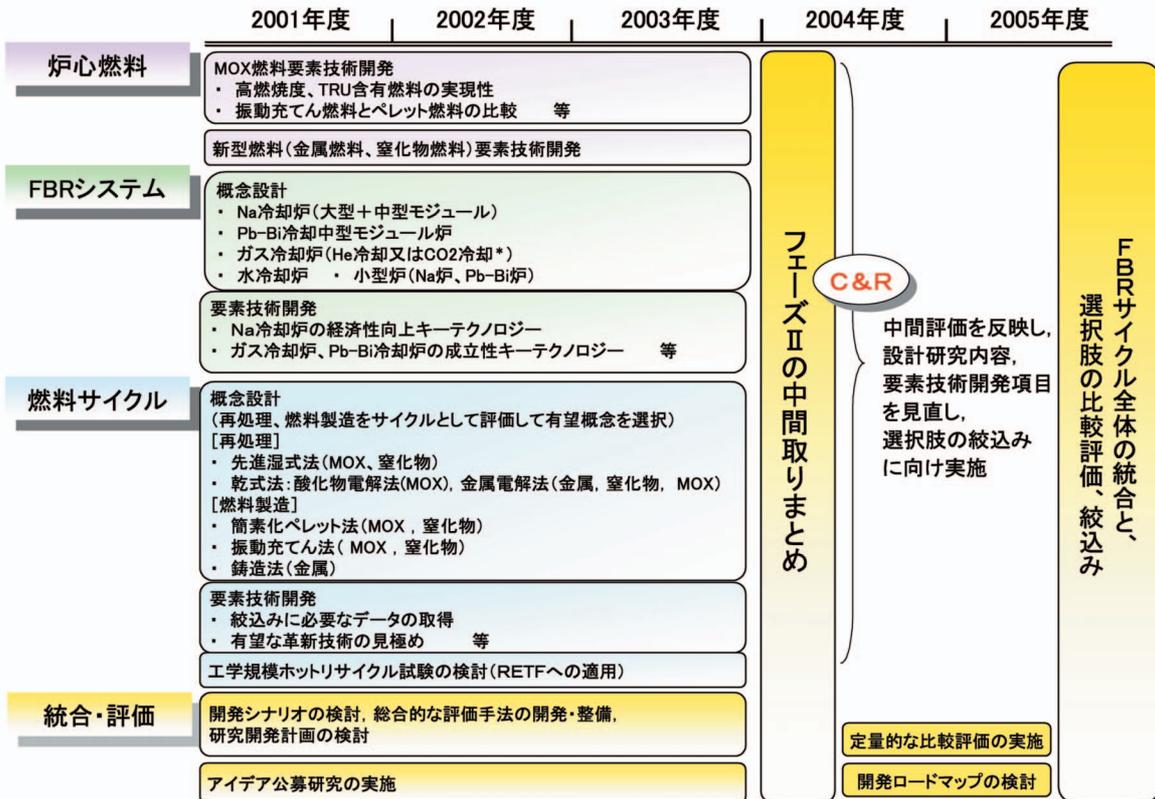
3. 高速増殖炉システム

FBRシステムについてのフェーズでの検討では、フェーズで抽出した候補概念に革新的技術を取り入れて概念設計を進めると共に、主要技術の成立見通し及び絞込みに必要な定量的データを取得するための要素技術試験を実施した(図3)。

3.1 ナトリウム冷却炉(図4)

ナトリウム冷却大型炉については、基本的な技術成立性が高く、将来の軽水炉に比肩できる経済性を達成しうる有望な概念であることから、主要革新技術の成立性を確認することが重要となる。

このため、2ループ化に伴う大口径配管の高流速条件での配管振動挙動、炉容器内の熱流動特性把握とガス巻き込み防止、合体機器の中間熱交換器(IHX)伝熱管の健全性などの成立性について



* 2001年度の検討により、He冷却を抽出した

図1 実用化戦略調査研究のフェーズの展開

- **安全性**
 - 取扱物質の特性(化学的活性度、毒性など)やプロセス条件(運転温度など)を踏まえた安全対策
 - FBRサイクルの導入リスクが、社会に既に存在するリスクに比べて十分小さい
 - 原子炉 ・ 炉心損傷に至るおそれのある事象の発生を防止すると共に、その発生をあえて仮定しても炉容器又は格納施設内で終息
 - 燃料サイクル ・ 臨界安全、閉じ込め機能の確保
- **経済性**
 - 将来の軽水炉に比肩する発電単価の達成
 - 世界に通用するコスト競争力の確保
 - ・ より一層の物量削減
- **環境負荷低減性**
 - 長寿命核種(TRU及びLLFP)の燃焼又は分離変換による地層処分への負荷軽減
 - 運転・保守及び廃止措置に伴う廃棄物の発生量低減
- **資源有効利用性**
 - 優れた中性子経済を活用し持続的に核燃料を生産
 - ・ TRU燃料の多重リサイクル
 - ・ 軽水炉TRUのリサイクル
 - エネルギー源としての多様なニーズへの対応
 - ・ 水素製造、海水淡水化、熱供給、分散電源など
- **核拡散抵抗性**
 - 核物質防護及び保障措置への負荷軽減(単体プルトニウムが純粋な状態で存在しないこと、など)
 - 核不拡散性制度の運用の効率化(遠隔保守・監視、自動化技術など)

(注)下線はフェーズⅠからの変更点

図2 実用化戦略調査研究フェーズの開発目標

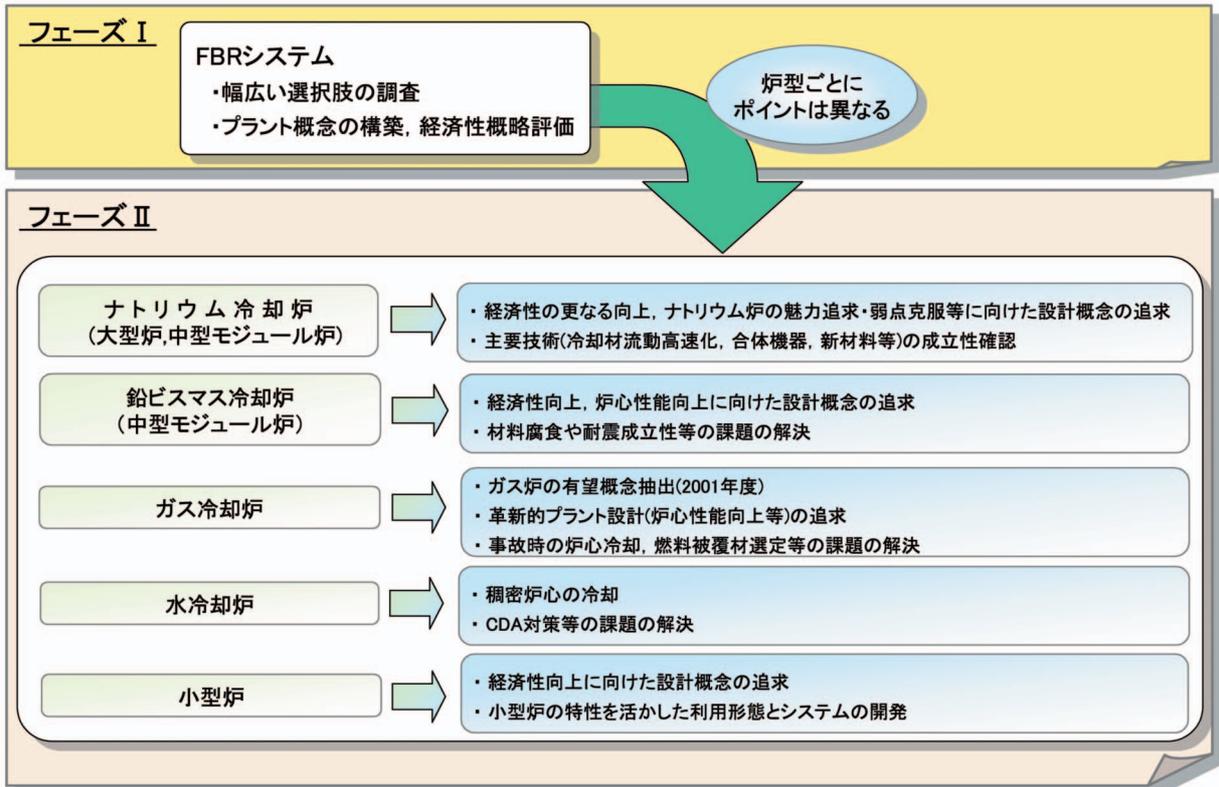


図3 フェーズにおけるFBRシステムの研究開発

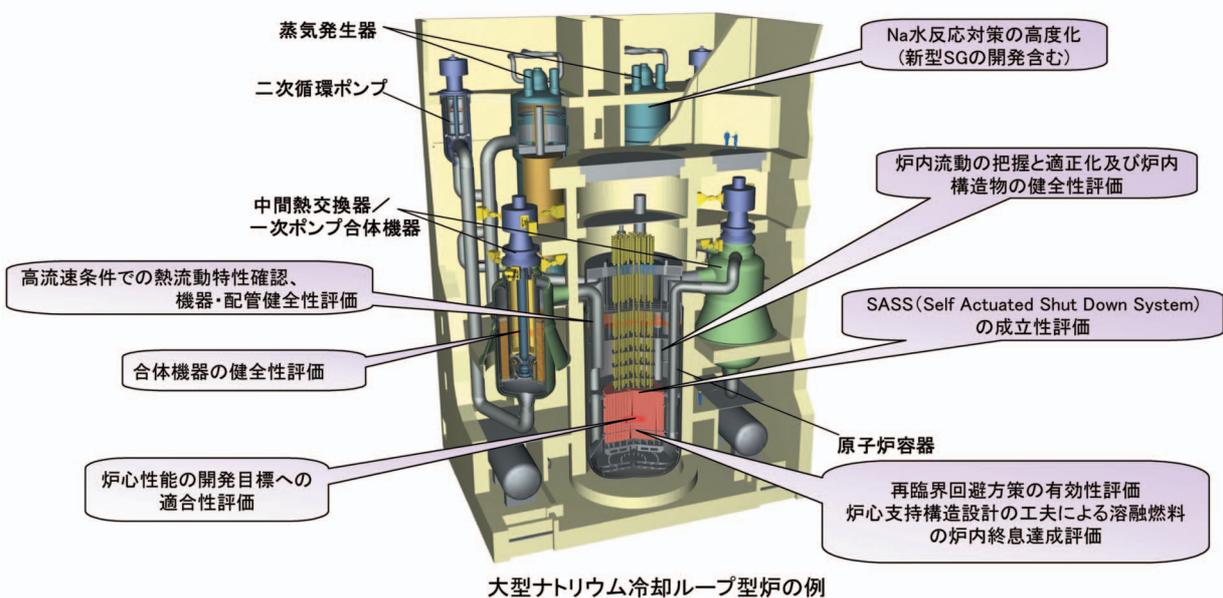


図4 ナトリウム冷却炉の主な技術開発

設計検討を進めると共に、試験準備を行った。

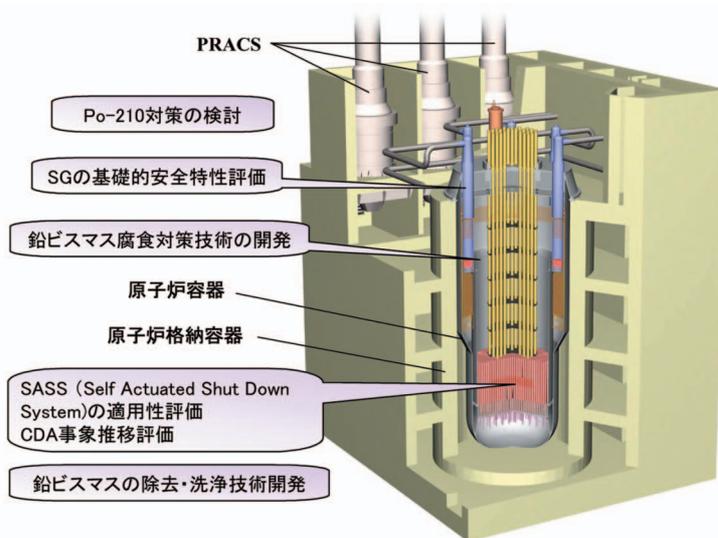
中型モジュール炉については、大型炉に比べ出力当たりの建設コストは高いが、直管型蒸気発生器(SG)の採用やBOP施設(原子炉及び主冷却設備以外の設備)の共用化拡大による物量削減を

行い、経済性目標を達成できる見通しを得た。また、ナトリウム冷却炉の魅力追求の方策として、内部転換比を向上させ、運転サイクルの長期化を目指した炉心概念を検討し、燃料サイクルコストの低減の見通しを得た。

3.2 鉛ビスマス冷却炉 (図5)

鉛ビスマス冷却モジュール炉については、フェーズの研究により、流速が低く炉心材料の腐食対策が比較的とりやすい自然循環方式を採用した40万kWeのプラント概念を構築したが、経済性目標は達成できなかった。このため、2001年度には、経済性目標達成のため、炉心性能の向上やスケールメリットの活用について検討した。その結果、自然循環方式においては、重金属燃料装荷量を削減し、燃料サイクルコストを低減すると共に、出力を55万kWeへ増大したプラント概念を構築した。また、強制循環方式による経済性の向上を目指して、ロシアの知見に基づく腐食防止のための流速制限(2m/s以下)の条件下で、原子炉容器径の製作上の目安(約10m)を維持しつつ、炉内配置の工夫を図り、出力を75万kWeへ増大したプラント概念を構築した。この結果、自然循環、強制循環のいずれの概念も経済性目標をほぼ達成できる見通しを得た。

鉛ビスマス冷却炉においては冷却材中の材料腐食の抑制が重要であることから、材料腐食の抑制限界を見極めるために、国内外の試験機関の中で適切な腐食試験設備と実績を有する独国カールスルーエ研究所(FZK)及び東工大との共同研究により炉心材料等の耐食性確認試験を開始した。この試験結果や設計研究に基づき、自然循環方式か強制循環方式かを選択することとしている。



3.3 ガス冷却炉 (図6)

2001年度には、炭酸ガス冷却炉とヘリウム冷却炉(被覆粒子燃料型及び耐熱ピン燃料型)について、フェーズに引き続いて、経済性の向上、炉心性能の向上及び安全性の向上を更に図るための検討を行い、有望な候補概念の評価を行った。

この結果、炭酸ガス炉について経済性の更なる向上のためにプラント熱効率向上方策を検討し、熱効率を約42%まで改善できる見通しを得たが、送電端出力で見た場合の発電単価としては大きな所内負荷率(約14%)を相殺するまでには至らず、出口温度高温化(約850)の追求による高熱効率化(約46%)の特性を有するヘリウム炉のほうが経済性に優れるとの結論に至った。次に、ヘリウムガス炉の燃料形態としては、被覆粒子型と耐熱ピン型の比較評価を行い、炉心特性に優れ、固有安全特性による炉心損傷防止対策が採り得る可能性がある被覆粒子型を選択した。また、FP障壁の観点から分散型燃料についても検討することとした。

燃料の要素技術開発として被覆層候補材であるTiNについて、高温加熱特性試験、高温強度特性試験を実施し、TiNの基礎的特性に関するデータを取得した。

3.4 水冷却炉

超臨界圧水冷却高速増殖炉(SCFBR)の炉心安全性については、高速炉の炉心損傷研究に豊富な

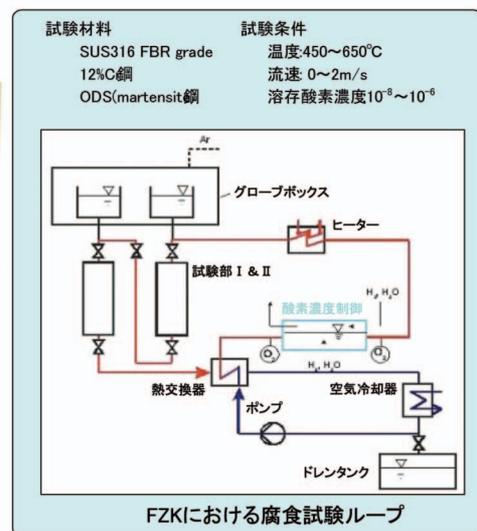


図5 鉛ビスマス冷却炉の主な技術開発

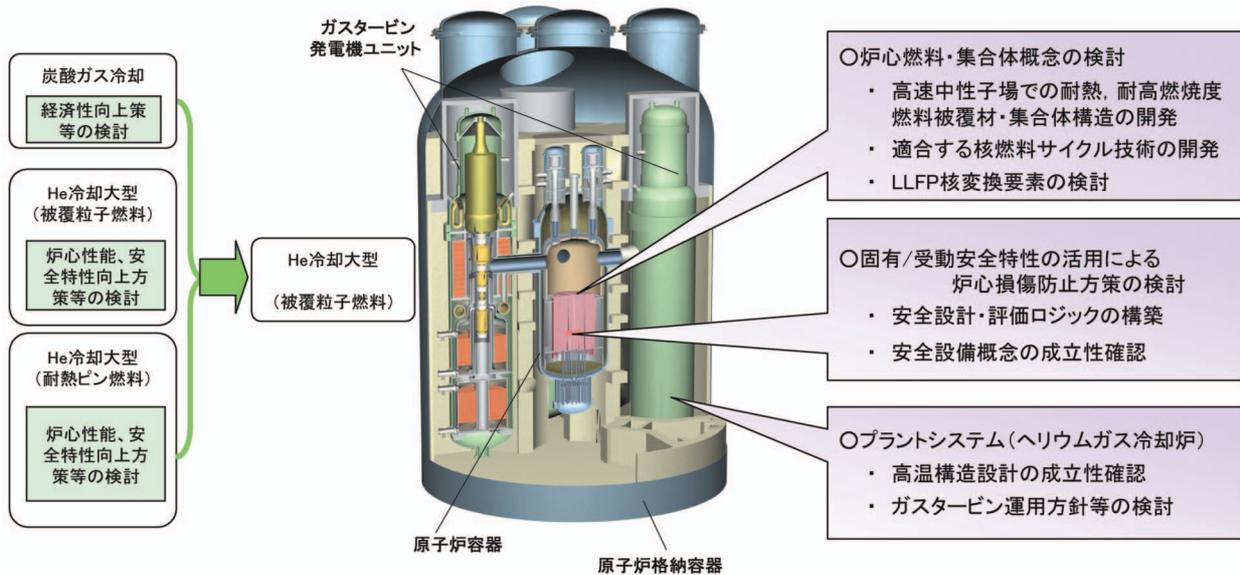


図6 ガス冷却炉の主な技術開発

実績を有するドイツFZKとの間で共同研究を実施している。

低減速スペクトル炉については日本原子力研究所と情報交換を行っており、そこで得られた炉心特性情報を基に、ウラン需要量、プルトニウム量等を検討した。その結果、軽水炉のワンス・スルーに比べて使用済み燃料の低減効果は大きいものの、水冷却炉はプルトニウム装荷量が大きく増殖比も小さいことから、ナトリウム冷却炉等と比べ軽水炉との共存期間が長期化すること、再処理設備の必要容量が大きくなることなどが分かった。

3.5 小型炉

小型炉の検討においては、エネルギー源としての多様なニーズに対応して多目的用途（分散電源、水素製造、熱供給など）への利用を図るため、燃料交換頻度が大幅に少ない長期運転サイクル（10年以上）の炉心と高い受動的安全性を実現し、かつ経済的な競争力を備えたシステムを確立することが重要となる。このため、ナトリウム炉と鉛ビスマス炉を対象としてフェーズにおいて検討した出力5万kWeをベースに、ナトリウム炉について15万kWeへの出力増大及び合理化設計等を検討し、長期運転サイクルと高い受動的安全性を備えた上で、経済性目標達成の可能性を示した。

一方、鉛ビスマス炉については、経済性を中心

に検討を行ったが、現状では、経済性目標の達成を見通すまでには至っていない。また、多目的利用として原子力水素製造プラント等の検討を行った。

3.6 その他共通要素技術開発

高性能被覆管（ODS鋼）の開発については、コスト低減を目的とした大型素管製造に関する技術開発を進めているが、2001年度においては、実用規模での製造技術条件を確認すると共に、加工性改善や強度向上に関する新たな技術を考案した。さらに、長時間クリープ試験、ナトリウム中腐食試験等の基礎試験を継続しており、ロシアBOR 60炉での照射に向けての準備も行った。

カザフスタンで燃料溶融後の再臨界回避の見通しを得るために行っているEAGLE試験については、2001年度に燃料を炉外で溶融させ、その移動挙動を分析すると共に、次年度以降の試験の準備を行った。

三次元免震技術の開発では、建屋全体三次元免震方式と建屋水平免震/機器上下免震組合せ方式の二つの方式に対して、ナトリウム冷却大型炉建屋を対象として、要求される免震性能を明らかにした。この免震性能要求に基づき、前者については、経済産業省から日本原子力発電が受託し実施している「発電用新型炉技術確証試験」において、有望概念として抽出された免震装置概念（油

庄方式と空気ばね方式)をナトリウム冷却大型炉建屋に適用した場合の課題を抽出した。後者についても、「発電用新型炉技術確証試験」の成果を活用しつつ、上下免震要素である皿ばねの設計法を検討すると共に、製造方法について調査し、製作限界寸法を明らかにした。また、機器上下免震方式に必要なコモンデッキの設計の考え方を整理し、実機を対象に試設計を行い、所要の免震性能が得られることを確認した。

4. 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をいう)におけるフェーズ I の検討では、フェーズ I で抽出した候補概念に革新的技術を取り入れて概念設計を進めると共に、主要技術の成立見通し及び絞込みに必要な定量的データを取得するための要素技術試験を実施した(図7)。

4.1 再処理システム

フェーズ I では、設計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。2001年度は、システム設計についてはフェーズ I で抽出した課題のうち機器レベルで解決可能なものを実施し、また、システム設計に反映するための要素技術開発を開始した。

(1) 先進湿式法(図8)

フェーズ I において実施した設計の中のセル容量について、セル内機器の配置と保守・補修設備(インセルクレーン、パワーマニピュレータ)の操作性の観点から評価を施し、設計したセル容量で問題ないことを確認すると共に、実際の燃料溶解処理手順を想定した設計を行うことにより、セル内機器仕様の最適化を行った。また、フェーズ I で抽出された主要課題の中の晶析技術やMA回収技術のプロセス成立性を確認した。

晶析法に関しては、英国AEA Technology(AEA T)におけるホット試験により共存元素の挙動を把握し、プロセス成立性を確認すると共に、課題を抽出した。U/Pu/Np共抽出についてもAEA Tでのホット試験により最適な抽出条件を設定できる見通しを得た。MA回収のためのSETFICS法につ

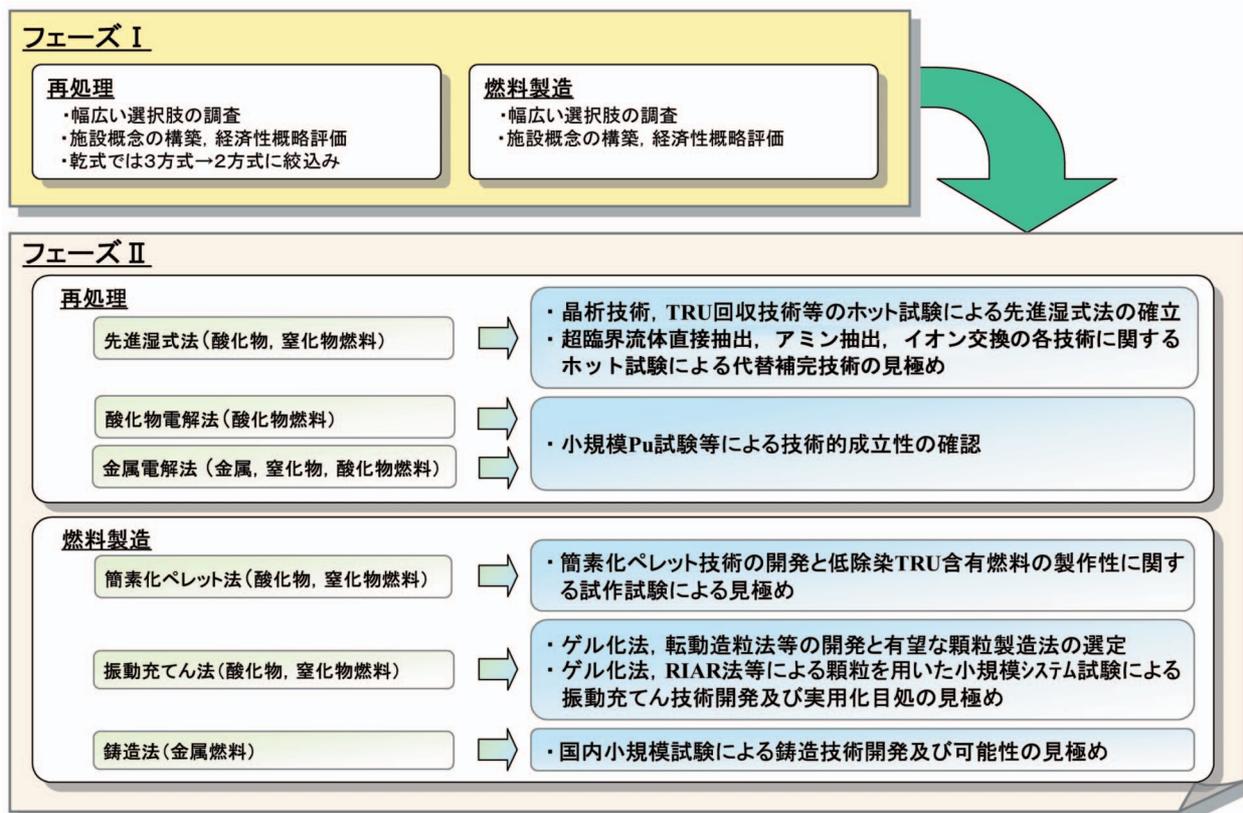


図7 フェーズ I における燃料サイクルシステムの研究開発

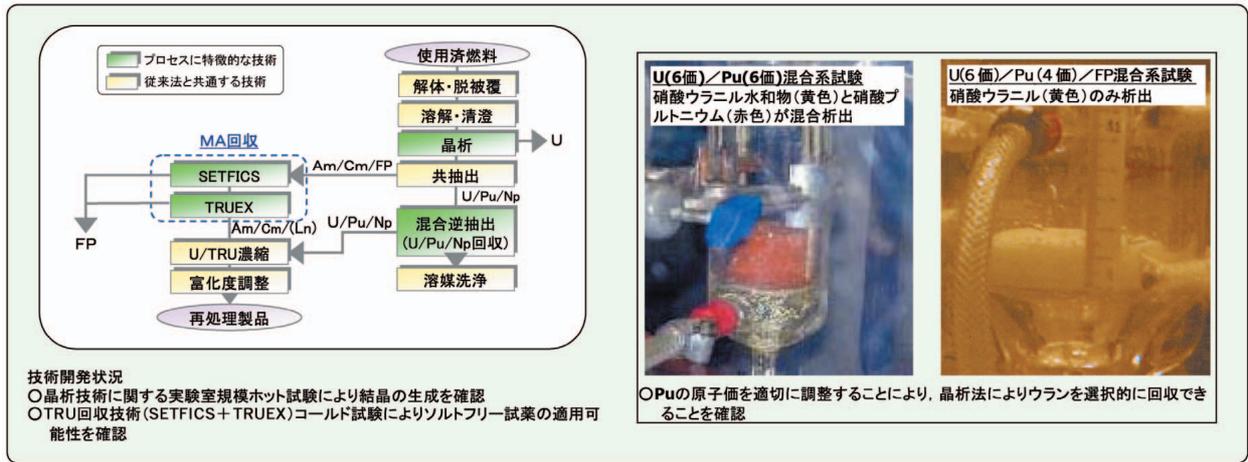


図8 先進湿式法の技術開発状況

いては、コールド試験によりソルトフリー試薬の適用可能性を評価し、プロセスのソルトフリー化の見通しを得た。

また、湿式法の代替・補完技術である超臨界流体直接抽出法、アミン抽出法、イオン交換法について、コールド試験によりプロセス成立性を見通しを得た。さらに、抽出器等の高度化を検討し、実用機器への適用の見通しを得た。また、ホットプロセス試験実施のための高レベル放射性物質研究施設 (CPF) の改造工事が完了した。

(2) 酸化物電解法 (図9)

酸化物電解法については、廃棄物プロセスの合理化、電解装置に関する事故対策の抽出等の安全設計の検討を進めると共に、主要課題の中のMOX電解共析や塩素化溶解技術について要素技術試験

を実施した。

MOX電解共析については、電力共通研究としてロシアRIARにおいて処理効率に影響を与える可能性があるCe共存下での電解共析試験を実施し、高濃度Ce条件下でも大きな影響を受けることなくU、Puを回収できることを確認し、技術的成立性を見通しを得た。塩素化溶解についても溶解を阻害する元素や白金族元素としてFe、Rh等を用いた塩素化溶解基礎試験により、適切な溶解条件を見出した。

(3) 金属電解法 (図10)

金属電解法については、Li還元法を採用することによる塩素ガス系統の削除、1基当たりの電極数の増加による処理容量の増大等により、機器設備のより一層の合理化を進めると共に、主要課題

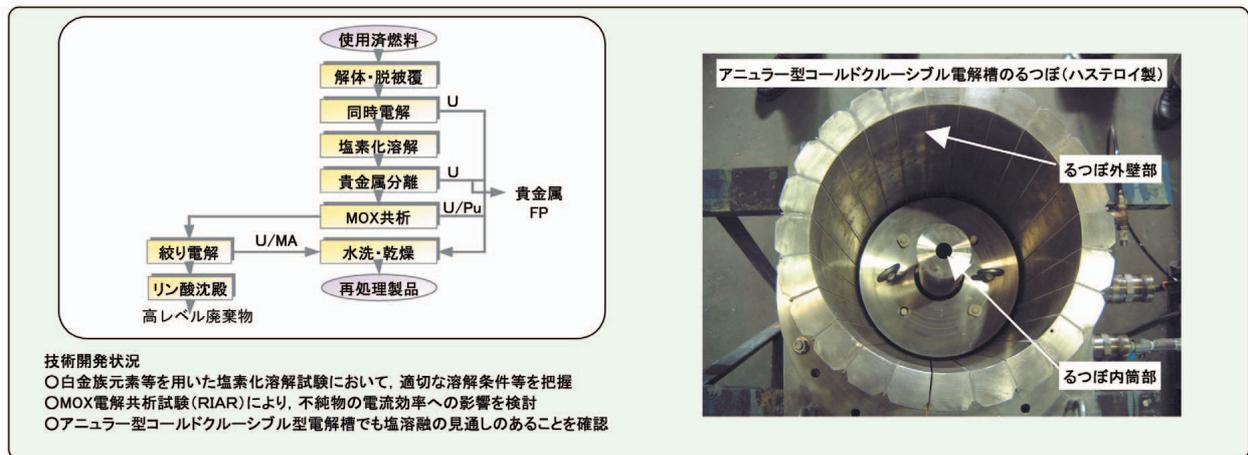


図9 酸化物電解法の技術開発状況

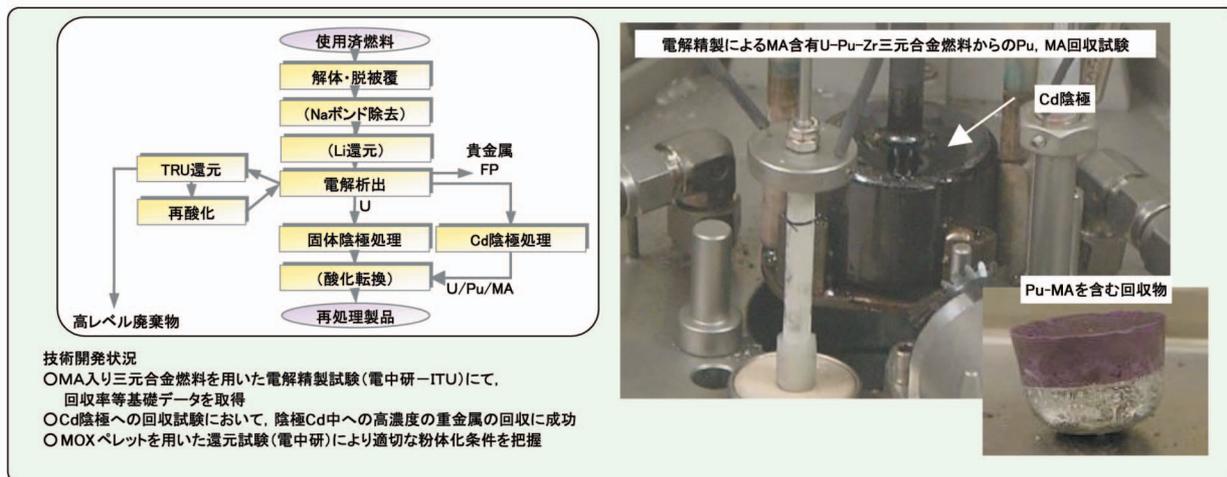


図10 金属電解法の技術開発状況

の中の電解析出やCd陰極処理について要素技術試験を実施した。

電中研がEUの超ウラン研究所(ITU)との共同研究として実施している小規模プロセス実証試験において、MA含有U-Pu-Zr三元合金燃料(未照射)の電解精製試験を行い、回収率等の基礎的データを取得した。また、塩中のU/Pu比をパラメータとした液体Cd陰極へのPu回収試験を実施し、重金属を設計値(10wt%)以上の濃度で回収できることを確認し、システムの合理化の可能性を見出した。

また、CPFへのPu試験用のグローブボックスの設置を行っている。

4.2 燃料製造システム

燃料製造システムについては、再処理システム

との整合をとりつつ、簡素化ペレット法、振動充てん法及び鑄造法について、高発熱、高放射線量の低除染TRU燃料を考慮した主要設備機器等の概念設計を進めると共に、要素技術試験を実施した。

(1) 簡素化ペレット法(図11)

湿式再処理に対応する簡素化ペレット法については、低除染TRU燃料の取扱いに伴う発熱の影響が厳しい箇所としてMOX粉末貯留ホッパを摘出し、ホッパ内部にフィンを設けることにより除熱し得ることを明らかにした。また、ターンテーブル型脱硝設備等の主要機器の設計検討を進めると共に、主要課題である成型、粉末搬送技術について要素試験を実施した。

MOX粉末を使用したダイ潤滑型成型機の潤滑性能試験を実施し、工学的規模での成型技術の成

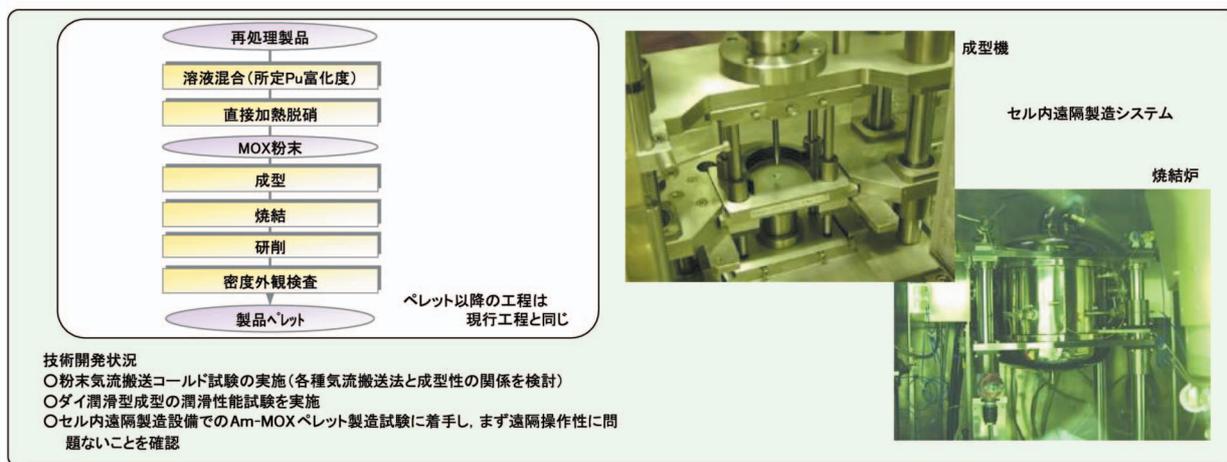


図11 簡素化ペレット法の技術開発状況

立性見通しを得た。また、粉末気流搬送方式の選定に向けコールド試験を実施し、種々の気流搬送法と搬送前後の搬送物の形状変化や成形性との関係を明らかにした。

低除染TRU燃料の製造に関して、セル内遠隔製造設備でのAm入りMOXペレット製造試験に着手し、まず、遠隔操作性に問題がないことを確認した。また、Np入りMOXの物性測定によりNpのMOX中での均一性等を確認した。

(2) 振動充てん法 (図12)

振動充てん法については、低除染TRU燃料への対応としてセル内での遠隔自動化を図った設計検討を実施し、滴下原料溶液の劣化や燃料粒子の再酸化を防止できることを明らかにした。また、主要課題である充てん率の向上のため、粒子形状因子等のパラメータと充てん密度の関係について、

模擬顆粒や電解法UO₂顆粒を用いた模擬試験を行い、設計要求である充てん密度80%を達成できる見通しを得た。

スイスポールシェラー研究所 (PSI) との共同研究では、振動充てん燃料 (湿式対応内部ゲル化法による顆粒製造) の燃料挙動確認のための照射試験の準備を進めている。外部ゲル化法については、模擬原料溶液の耐熱・耐酸・耐放射線性試験により、適切な滴下のために維持すべき原料硝酸液の温度・濃度条件を把握した。

(3) 鑄造法 (図13)

燃料の処理手順の合理化により射出成型装置の機器数を5基から4基に削減すると共に、低除染TRU燃料への対応としてセル内遠隔操作に適した射出成型装置等の設計を進めた。

射出成型技術については (財) 電力中央研究所

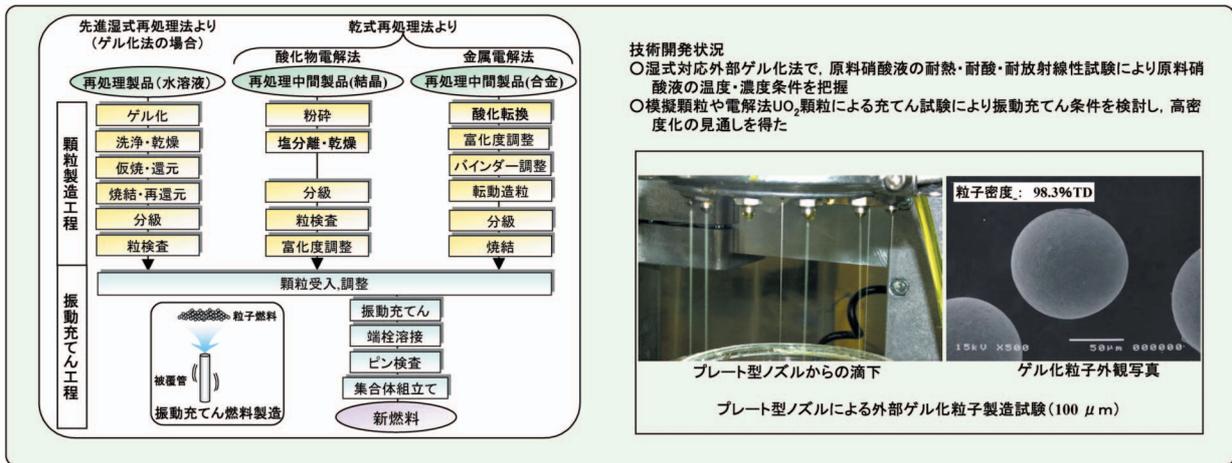


図12 振動充てん法の技術開発状況

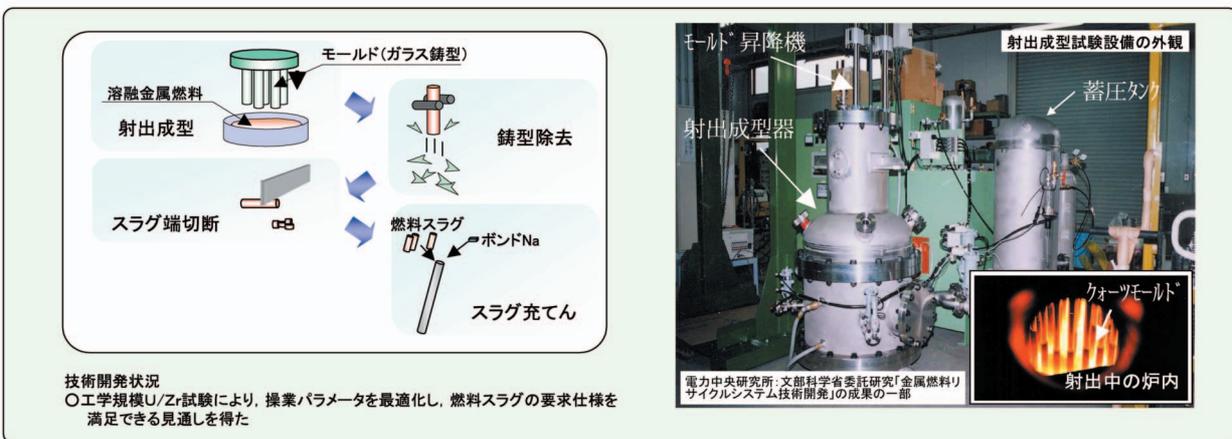


図13 鑄造法の技術開発状況

において約20kgの工学規模のU Zr射出試験(約50スラグ/射出)を実施し、製品スラグの要求仕様を満足するための操業パラメータを把握した。

4.3 新リサイクル技術の検討

従来の核燃料リサイクルの考え方から「リサイクルの障害となる不要な物質を取り除く」という考え方に発想を転換した新しいリサイクル概念(ORIENT Cycle: Optimization by Removing Impedimental Elements Cycle)を検討した(図14)。その結果、FPの6割以上を占める安定元素・準安定元素を分離することが効果的であることが分かった。更に、この概念に基づくプロセスは多重リサイクル時においても成立することを確認し、高レベル廃棄物の発生量を従来技術と比較して大幅に削減できる可能性があることを示した。

5. 総合的な評価手法

フェーズにおけるFBRサイクルの総合評価では、五つの開発目標に「技術的実現性」と「社会的受容性」を加えた七つの視点から多面的な評価を行い、FBRサイクル概念の絞込みのための判断情報を提供する。なお、「社会的受容性」はフェーズで新たに追加した視点である。

2001年度は、フェーズにおける六つの視点の評価指標の適用性検討結果を踏まえ、基幹電源としてのFBRサイクル概念を対象とした総合的な評

価手法の指標構造及び判定基準の見直しを行った。「社会的受容性」については、社会的ニーズへの適応度及び個人・地域的恩恵などによる受益感と、安全性などの科学的リスク及び恐怖性や未知性などの心理要因による損失感の評価因子を抽出した。

6. まとめ

2001年度には、実用化戦略調査研究フェーズの初年度として以下の事項を実施した。

- ① フェーズの成果と主として2002年度以降のフェーズの計画について研究開発課題評価委員会の評価を受けた。
- ② FBRシステムについては、フェーズで抽出したナトリウム冷却炉や鉛ビスマス冷却炉などの候補概念について、革新的技術を取り入れ、それぞれの魅力を最大限に引き出すとの観点から設計研究を進めた。なお、1年間検討を継続したガス冷却炉については、候補概念としてヘリウム冷却炉(被覆粒子型燃料・分散型燃料)を選定した。
- ③ 革新的技術の開発に努めると共に、主要技術の成立性見直し及び候補概念の絞込みに必要な定量的なデータ取得のための要素技術開発に着手した。

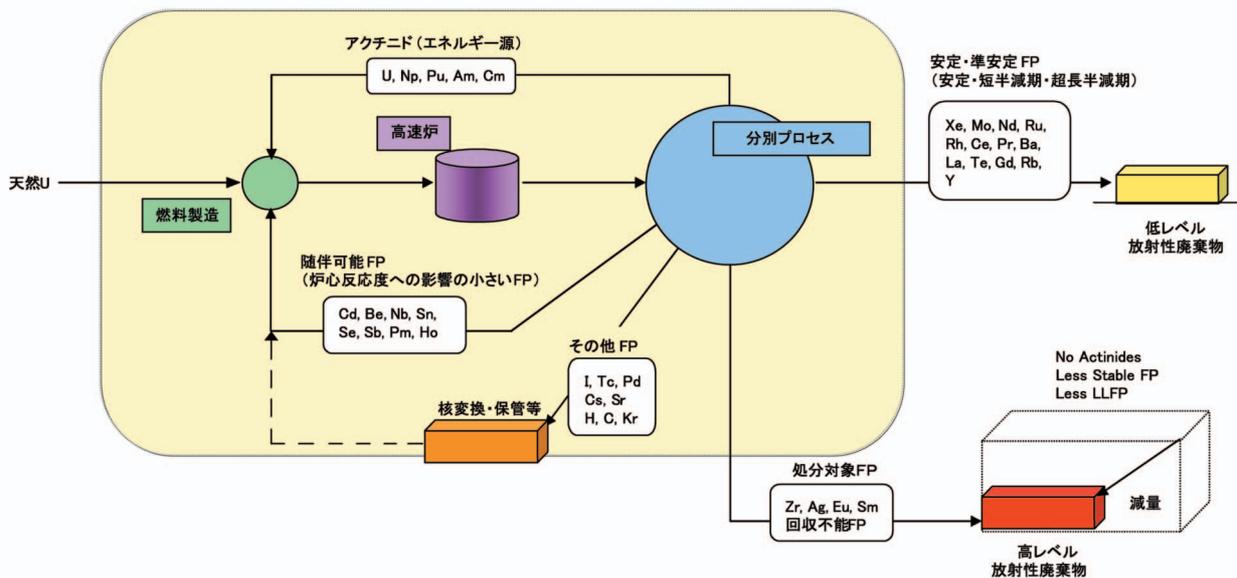


図14 新サイクル技術の概念 (ORIENT Cycle)

今後、FBRの実用化に向けて、革新的技術の導入に常に心掛け、オリジナリティの発揮を基本に置きつつ研究に取り組むこととし、要素技術開発試験データを活用して設計を深める。この結果については、FBRサイクル全体の整合性に配慮しながら総合的に評価を行い、中間取りまとめに取り

組んでいく。

参考文献

- 1) JNC TN1340 2001 008 サイクル機構技報No.12別冊：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の概要” 2001年9月20日発行