



- 高速増殖炉サイクルの研究開発 - 高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究

1. はじめに

高速増殖炉（FBR）サイクル実用化戦略調査研究は、安全性を大前提とした上で、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資源有効利用、環境負荷低減等の長所を最大限に活用した実用化像を提案する。併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ための技術体系を整備することを目的としている。

本研究は、フェーズⅠ（1999年度、2000年度）及びフェーズⅡ（2001年度から5年間）と、段階を踏んで実施することとし、1999年7月から、サイクル機構、電気事業者（財）電力中央研究所（電中研）及び日本原子力研究所（原研）などからなるオールジャパン体制で研究開発を開始した。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、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Ⅱでは、フェーズⅠで抽出したFBRシステム及び燃料サイクルシステムに関する有望概念について、候補概念相互の可能な限りの定量的な比較評価が実施できるレベルまで設計研究を深めるとともに、技術的選択の根拠を示す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、設計評価のための解析技術の整備等）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の候補を選定し、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。

フェーズⅡの中間とりまとめを実施する2003年度第1四半期では、2002年度の研究成果を報告書として取りまとめた。それに基づいて、サイクル

機構内の各事業所（東海、敦賀、大洗）で報告会を実施し、関係部署との情報共有を図るとともに、プロジェクトの推進状況を確認した。また、フェーズⅢ以降の研究開発計画の検討を進めている。

2. 高速増殖炉システム

2003年度第1四半期は、2002年度の成果の取りまとめを行うとともに、2003年度の中間とりまとめに向けて今年度の計画を具体化した。

ナトリウム（Na）冷却炉

2002年度は中型モジュール炉の概念の具体化を行い、経済性及びシステムの成立性を見通しを得た。

2003年度は、これまでの研究成果を基に大型炉及び中型モジュール炉のシステム設計と炉心設計をさらに進める。また、Na冷却炉固有の課題克服に向けた研究開発を続ける。要素技術開発についても、縮尺モデル試験によるガス巻込み防止策の提案や、合体機器の振動伝達特性の把握等に努める。

設計研究では、大型炉及び中型モジュール炉について、要素技術開発試験結果の予備的な反映（原子炉容器上部プレナムの流動安定化、高流速大口径配管での流動状況・流力振動、合体機器等）を行うとともに、炉心とプラントとの整合性（高内部転換型炉心と整合するプラント概念等）を図り、プラント概念を固めて、安全性、構造健全性等の成立性を確認する。炉心概念については、炉心の柔軟性を示すための種々の概念を整理・具体化し、炉心損傷事象の影響緩和対策を含めた成立性を確認する。また、炉心性能、燃料サイクルに係る諸量、プラント物量、廃棄物発生量等に係るデータを取りまとめ、開発目標への適合性を評価する。

Na冷却炉固有の課題への対応に関連して、2重管蒸気発生器の概念を具体化することにより、Na漏えい対策の課題を明確にする。また、Na冷却炉の特徴を反映しつつ軽水炉と同等の運転・保守性

を確保するための供用期間中検査及び補修(ISI & R)方針を提案し、プラント設計への反映策を検討する。第1四半期では、炉心設計として2003年中間とりまとめの対象炉心の絞込みを行い、MOX大型炉心、金属大型炉心などの解析作業に着手した。システム設計として、中間とりまとめに必要な炉型との組み合わせを検討するとともに、評価作業に着手した。

要素技術開発については、原子炉容器上部プレナムの縮尺モデル水流動試験を継続実施し、設計研究と連携して、ガス巻き込み現象を適切に抑制する方策を提案する。第1四半期では炉内流動の適正化に向け、大型炉の原子炉容器上部プレナムの液面近傍を模擬した部分縮尺装置を用いた流動試験を開始した。今後、液面でのガス巻き込み現象の発生条件やディッププレートの構造がガス巻き込み現象に及ぼす影響を把握する予定である。また、高流速大口径配管における流動状況及び流力振動を調べる縮尺モデル水流動試験装置の製作を完了させ、流動状況確認試験を開始する。第1四半期では、大型炉のホットレグ配管を模擬した1/3縮尺水流動・振動試験設備の製作・据付、及び今年度後半に実施するエルボ部可視化試験の準備を実施した。1次冷却系ポンプと中間熱交換器との合体機器における伝熱管単体の振動特性を調べる縮尺モデル試験については、加振機で振動を励起する試験を実施し、伝熱管への振動伝達の基本特性を把握して暫定的な設計評価を行う。第1四半期では試験準備として、振動伝達や流体連成の効果を把握するため、試験パラメーターとして径の異なるシールリングや内筒の製作等を実施した。自己作動型炉停止機構(SASS)の開発では、炉外試験でのNa中耐久性確認を完了し、「常陽」で試験片を照射するための試験体を完成させる予定である。

鉛ビスマス冷却炉

2002年度の設計研究では、鉛ビスマス炉固有の枢要課題についての検討を実施し、耐震成立性及び自然循環炉の運転成立性の概略見通しを得た。また、炉心関連では燃料集合体ダクト間の相互作用(DDI)防止の観点からダクト肉厚等の炉心仕様見直しを実施した。

2003年度の設計研究では、保守補修性向上の観点からプラント概念の見直しを行うとともに、総合評価に必要なデータを整備し、開発目標へ

の適合性を評価する。また、ドイツ・カールスルーエ研究所(FZK)を中心に進めている腐食特性に関する試験を継続して実施する。

システム設計では、主要機器の引き抜き補修の考慮等、保守補修性向上の観点からプラント概念の見直しを実施し、ユーザ要求への適合性向上を図る。また、炉心性能、燃料サイクルに係る諸量、プラント物量、廃棄物発生量等に係るデータを取りまとめる。第1四半期においては、システム設計としては運転保守・補修性も考慮した検討を行い、どこまで補修可能と設計しておくかという補修性の考え方を取りまとめた。また、炉心設計として腐食を考慮して被覆管温度制約条件をより厳しくした場合の影響評価に着手した。

要素技術開発では、FZKとの協力で実施してきた停留(流れの無い)環境における腐食特性試験結果を取りまとめる。また、2002年度から開始した流動条件下での腐食特性試験をはじめ、腐食に係る研究を継続して実施し、鉛ビスマス冷却炉の基本的な成立見通しを得るための知見の整備を進める。

ガス冷却炉

2002年度は、被覆粒子燃料型ヘリウムガス冷却炉についての設計研究を継続して進めた。炉心概念としては2001年度から進めてきた横方向流冷却概念(被覆層表面直接冷却型)について継続して検討を行った。また、この炉心概念では製造時欠陥等による燃料被覆層の初期欠陥等の割合を十分に低く抑制することができなければ、1次冷却系内部の汚染が問題となる可能性がある。このため、燃料被覆層の外側にさらにもう1層のパウダリを備えた2重包蔵構造とすることが可能な炉心概念(六角ブロック概念)の検討も併せて実施した。

2003年度は、中間取りまとめに向けてリファレンスとなる炉心・プラント概念の構築を進め、評価のための定量的データの整備を図る。

設計研究では、炉心形態として横方向流冷却概念を暫定的な代表概念と位置づけ、本炉心概念に適合するシステム、設備、機器などの仕様設定及び系統設備配置設定を行う。また、設計基準事象や設計基準外事象を対象として、安全上重要な事象の評価及び被ばく評価等を実施する。炉心設計では、2002年度に引き続き横方向流冷却概念炉心の高燃焼度化の検討を進めるとともに、導入シナリオ上でのFBR平衡期に対応する炉心概念の構築や超ウラン元素(TRU)組成対応の柔軟性の評価、

炉心周りの遮蔽設計を含めた炉心構成要素の設計等を進める。オプションとして位置づけられる六角ブロック概念については、安全特性の向上等を主眼に検討を行う。これらの成果を基に、炉心性能、燃料サイクルに係る諸量、プラント物量、廃棄物発生量等に係るデータを取りまとめて、開発目標への適合性を評価する。第1四半期では、炉心設計として横方向流冷却概念について取出平均燃焼度を120GWd/tとする炉心仕様の検討に着手した。システム設計としては研究開発計画の検討を開始するとともに、高温ライナーに係わる熱過渡の影響、計装設備の考え方、運転保守性等の検討を開始した。

要素技術開発については、被覆粒子燃料の被覆層候補材の一つであるTiNを対象に、これまでに強度特性、高温特性及び厚膜形成技術等に目撃してTiNの基礎特性調査を勧めている。これらの結果の整理を通じて、今後の被覆層材の材料研究開発計画、スケジュールを再検討する。

小型炉

2002年度は、Na冷却炉と鉛ビスマス冷却炉の概念検討を進めるとともに、小型炉の多目的利用に関する調査として、水素製造システムの付加に関する検討を行った。

2003年度は、2002年度までに実施してきた種々の概念検討結果を踏まえ、FBRの特長である増殖性及び装荷燃料に対する柔軟性、受動的安全性、他の小型炉に比肩する経済性、10年以上の長期連続運転、運転・保守の簡素化等のFBR小型炉概念の魅力を持つNa冷却炉と鉛ビスマス冷却炉の概念を実用化戦略調査研究として提案する。

Na冷却炉では、2002年度に抽出した1次系電磁ポンプのフローコストダウン時間の延伸等の有望な受動的な安全機構を取り込んだ金属燃料炉心、制御棒制御、強制循環方式の炉心及びプラント概念を構築し、安全解析を行う。また、小型炉の特長を活かした運転保守の考え方を整理する。

鉛ビスマス冷却炉では、優れた核特性や自然循環能力を活用して構築した窒化物燃料炉心の自然循環方式のプラント概念（5万kWe）に対して、一層の経済性向上等を目標に、出力増加によるスケール効果を活用したプラント概念並びに燃料交換間隔を10年間としたプラント概念を構築する。

小型炉の多目的利用として、2002年度に水素製造システムを付加したプラント概念を構築してお

り、2003年度は水素製造設備の安全性を更に高める検討を実施する。また、水素製造以外の多目的利用についても整理し、小型炉のニーズ対応への柔軟性についての検討方策を取りまとめる。

第1四半期では、Na冷却小型炉の魅力アピールするための検討を開始した。炉心設計として、金属燃料で出口温度550℃を達成するとともにコンパクト化と長寿命化（20～30年燃料無交換）を両立させる炉心のパラメータサーベイに着手した。システム設計として、長寿命炉心、簡素な運転保守・補修、水素製造を小型炉の三大魅力として検討を進めるとの方向性を定めた。

炉型に共通な技術開発課題

FBRシステムに係わる炉型に共通な要素技術開発については、炉内試験等を必要とする比較的長期の開発期間を要するものが多いが、フェーズⅡの最終とりまとめ（2005年度末）に焦点を合わせ、順次成果を出すことに留意しながら進めている。

高性能被覆管（ODS鋼）の開発では、2002年度の成果に基づいて改良したプロセスによる中空キャプセル大型素管製造と実用規模長尺被覆管製造試験を行い、その成果を中間評価として取りまとめる。また、2003年度までに取得した炉外試験データ等に基づき、溶接部の強度特性及びNa環境効果を評価して材料強度基準（案）を取りまとめる。ロシアBOR 60炉でのODS鋼燃料ピン先行照射試験については、2003年6月26日から照射を開始した。

再臨界回避概念の成立性を見通すためにカザフスタンで実施している試験研究（EAGLEプロジェクト）においては、Naを用いた炉外試験並びにIGR（黒鉛減速パルス出力炉）を用いた中規模炉内試験、Naを用いない大規模炉内試験を実施する。第1四半期では、今年度下期実施予定のNaを用いた試験準備の一環として、カザフスタンの技術者を招き、試験後の解体洗浄技術を含むNa取扱い技術に関する研修及び技術検討を実施した。また、炉外、炉内の両試験シリーズについて試験施設の調整、部材調達等次の試験実施に向けての準備を進めた。

構造設計手法については、実用化構造設計基準（FDS）策定に向けた破損クライテリア、非弾性設計解析指針及び熱荷重設定指針の検討を進めるとともに、システム化規格体系の構築を引き続き行う。第1四半期ではFDS策定に関する作業として、ラチェット疲労試験の試験条件の決定、軽水炉と共通のサーマルストライピング評価体系の提案及

び原子炉容器の下部構造に非弾性設計解析指針案を適用するための解析準備を開始した。また、システム化規格に関して多数の設計要因に対する安全裕度の新しい定量化手法の提案を行った。

高クロム鋼（12Cr鋼）の開発では、材料試験、溶接技術開発等を継続するとともに、2003年度までに得られる成果に基づき、高速炉用候補材の仕様を暫定的に定め材料強度基準の試案の提示を行う。また、破損前漏えい検出（LBB）の成立性に関する概略の見通しを示す。第1四半期では前期から開始したクリープ疲労試験を継続して実施するとともに、引張試験、衝撃試験等の準備を行った。

3次元免震技術の開発では、「建屋全体3次元免震方式」及び「建屋水平免震+機器上下免震組合せ方式」の開発を継続する。「建屋全体3次元免震方式」の開発では、有望3概念の縮小試験体による性能試験を行い、開発候補の絞込みの準備を行う。「建屋水平免震+機器上下免震組合せ方式」の開発では、1/2縮小試験体による皿ばねの力学特性試験及び減衰装置の静的試験を行い、2004年度の皿ばねと減衰装置の組合せ試験、2005年度の振動台での確認試験に向けた単体データを取得する。

3. 燃料サイクルシステム

再処理システム及び燃料製造システムの概念ごとのシステム設計研究及び要素技術開発については、フェーズⅠにおいて選定した検討対象システムについて、これを合理化・詳細化し基本的なシステム設計結果として中間とりまとめを実施する予定である。また、要素技術開発では、設計に欠かせない重要な技術的知見の取得を進めている。

(1) 再処理システム

先進湿式法

システム技術開発では、再処理コストに大きく影響する施設操業費に着目し、運転操作・保守・補修等に係る検討を実施している。また、FBR導入期に要求される経済性や軽水炉からのマイナーアクチニド（MA）のリサイクル等、システムの運用シナリオに係る検討を実施している。さらに、中間評価に向けてフェーズⅡでの設計検討に係る技術情報を整理している。

高レベル放射性物質研究施設（CPF）においては、実使用済燃料を用いた直接抽出試験及び未照射MOXを用いた晶析試験等を実施し、プロセス条件の確認等を実施している。また、実使用済燃料

を用いた粉化溶解試験、晶析試験、単サイクル共抽出試験等の準備を進めている。

乾式法（酸化物電解法、金属電解法）

酸化物電解法については、概要技術であるMOX燃料電解共析に関して、国内では、今年度開始する予定の模擬の核分裂生成物（FP）を添加したウランによる電解試験の準備を進めている。また海外機関を利用した研究開発では、ロシア・原子炉科学研究所（RIAR）において、実際の使用済燃料の処理を想定して複数のFPイオンを溶融塩中に添加して実施する電共研試験の試験条件設定への協力を行った。今年度の試験では、昨年度までのデータの評価結果を踏まえ、最適な電解条件の把握を進める。

金属電解法については、電中研との共同研究に基づきCPFに設置したプルトニウム試験用設備における放射性物質を用いないコールド試験を継続し、試験装置の性能を確認した。また、アクチニドを用いる実験のための安全作業基準を作成し、承認を受けた。電中研と原研との共同研究においては、原研大洗研究所のアルゴン雰囲気グローブボックス内に設置した小規模電解槽及び蒸留試験装置で、Pu、U及びAmを含むCd陰極インゴットの蒸留処理試験を行った。

(2) 燃料製造システム

簡素化ペレット法

システム技術開発に関しては、量産・遠隔操作に対応した機器・設備概念及び製造ラインの構成検討結果に基づき、機器の運転・保守・補修性や安全性の評価を実施している。さらに、中間とりまとめに向けてフェーズⅡでの設計検討に係る技術情報を整理している。

ショートプロセス製造技術については、基礎試験の結果について外部評価（研究開発課題評価委員会）を受けた。また、「常陽」でのODS鋼ピン照射試験に供するショートプロセス燃料の製造に向けた準備を開始した。低除染TRU燃料開発については、Amを含有する高除染MOX燃料ペレット照射条件と燃料仕様を検討するとともに、Am/Npと模擬FPを添加したペレット燃料について、焼結特性の評価を実施している。

振動充てん法

今後の振動充てん法の評価に向けたゲル化試験や振動充てんに関する小規模ウラン試験を実施するため、東海事業所の応用試験棟に設置したウラン試験設備の調整と規定類の整備を行い、試験の

準備を進めている。

また、スイス・ポールシェラー研究所 (PSI) との共同研究において、オランダ HFR 炉で今年度から振動充てん燃料照射試験を実施する計画である。今期は PSI において照射燃料ピンの製造を終了し、近日 輸送許可を取得できる見通しとなった。

鑄造法

電中研 原研共同研究で、原研大洗研究所に設置する U-Pu-Zr ピン製造試験装置については、設計を完了し、製作を発注した。また、製造したピンを用いた「常陽」照射及び照射後試験に関して、JNC 電中研の共同研究計画案を作成した。

(3) その他

新リサイクル技術 (ORIENT cycle)³⁾ については、昨年度の検討の詳細化及び革新プロセスの創成に向けての分離技術開発に関するアクションプラン策定をワーキング・グループ形式で検討している。ORIENT cycle は核燃料サイクル全体を見渡して分離スキームを最適化する概念であるので、ワーキング・グループは分離技術者のみならず廃棄物等幅広い分野のメンバーが集まっているのが特徴である。今期は、ORIENT cycle に適合する革新的な分離技術の調査を行った。

4. 総合評価

原研との研究協力「核燃料サイクルに係わる環境負荷低減に関する検討」については、2002年度活動報告と2003年度計画書をコーディネータ会議で審議し、承認された。環境負荷低減の目標設定とシステム候補概念の具体化に関する情報交換を行い、候補となるシステム・技術について、環境負荷低減効果と工学的実現性の観点から分析・検討する。

FBRサイクルの導入シナリオの検討の一環として21世紀の世界及び日本の情勢分析を行い、社会的ニーズを満足しうる選択肢としてのFBRサイクルの必要性について資料として取りまとめた。

国内の原子力発電の設備容量の時間推移の再計算を実施し、中間とりまとめに向けてFBRサイクル導入シナリオの詳細解析の条件整備を行った。

FBRサイクル総合評価支援システムについては、解析コードとのインターフェースの強化及び解析者のエンジニアリング検討支援機能の改良に着手した。FBRサイクルデータベースについては、各データベースの連携策を検討するとともに、データベースの情報登録を継続的に実施した。諸

量解析コードについては、MA回収機能、再処理施設規模設定機能、炉心特性データ変更機能などの改良を行っている。

FBRサイクル候補概念の多面的評価に関して、予備的な評価を実施することとし、4ケースについてデータを収集し、FBRサイクル総合評価支援システムに登録した。これらのデータに基づき、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性の定量的な評価指標について多面的評価を実施した。また、中間評価に向けて核拡散抵抗性、技術的实现性などの定性的な評価手法の評価構造の見直し、評価方法の検討を行っている。さらに、他エネルギー源との比較評価手法についても、検討を行っている。

FBRサイクルの社会的受容性向上の検討については、電気事業者との協力のもとに社会的受容性検討準備会において意識調査に基づく社会的認知レベルの現状分析を行い、社会的受容性向上に係る課題、受容性向上のためのコミュニケーション素材などをまとめた。今年度は将来社会の外部要因の不確実さを考慮したシナリオ分析に沿ってFBRサイクルの強み・弱みの分析を掘り下げるとともに、課題解決に向けて具体策の検討を行うこととした。

燃料サイクル施設を対象とした安全性のリスク特性把握については、設計要求に対する充足性を見通しを判断するため、施設外への放射性物質放出リスク及び放出放射能による公衆の健康影響リスクの推定を行っている。中間とりまとめに向けて代表的な湿式再処理システムと乾式再処理システムを対象とした放射性物質放出リスクの試算を実施した。なお、乾式再処理システムにおいては、通常時及び異常時の放射性物質の移行挙動や、臨界事故時の核分裂総数、周辺設備に及ぼす損傷の程度等を評価するための知見が不足しているため、異常の影響を湿式再処理システムと同様とみなす場合をリファレンスとした感度解析に留め、効果的なリスク低減に向けた異常発生防止策の検討を進めている。

参考文献

- 1) 野田 宏, 山下英俊, 他: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡの2001年度成果”, サイクル機構技報, No. 16, 16-1 (2002)。

(本社：経営企画本部
FBRサイクル開発推進部)