



## - 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（1999年度、2000年度）及びフェーズ（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・レビューを受けながら、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1では、フェーズ1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、可能な限りの定量的な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候補（複数）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2の中間とりまとめを行う2003年度の第3四半期では、中間とりまとめに向けて、技術

検討書の取りまとめを行うとともに、電気事業者等と協議・調整を図りつつ、報告書及びエグゼクティブ・サマリー（要約版）の執筆に着手した。

### 2. 高速増殖炉システム

2003年度第3四半期は、本年度に実施する中間とりまとめに向けて、各炉概念の設計研究と要素技術開発を着実に進展させた。以下に、炉概念ごとに進捗状況を概説する。

#### ① ナトリウム（Na）冷却炉

プラント設計では、中間評価に向け、これまでの設計検討の結果を踏まえた大型炉及び中型炉の経済性評価を実施した。中型炉設計検討では、超音波流量計、破損燃料検出器（FFD）等のプロセス計装の具体化、中間熱交換器（IHX）上部プレナムでの1次系共用型炉心冷却系（PRACS）による自然循環除熱特性解析等を実施し、成立性を見通した。炉心概念については、混合酸化物（MOX）燃料炉心では、中間とりまとめに向けた総合評価に必要な炉心データをとりまとめて提示した。金属燃料炉心では、炉心出口温度の高度化（550℃）に対応した炉心仕様を設定するためのパラメータサーベイを進め、概略仕様を絞り込んだ。

Na冷却炉固有の課題への対応としては、2重管蒸気発生器（SG）について、安全性の考え方や2重伝熱管破損時の補修方法等について検討・評価した。供用期間中検査及び補修（ISI & R）については、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ISI & R方針及びプラント設計への反映策の検討を継続している。

要素技術開発では、原子炉容器のコンパクト化に関する技術開発として、1/18スケール液面部分モデル試験を実施している。これにより、2重ディッププレート（D/P）体系では、D/P間の流れにより上段D/Pを通過する鉛直方向流速が緩和

され、ガス巻き込みが抑制されることを確認した。また、気泡を伴う渦の発生条件のカバーガス圧力依存性を明らかにするため水中渦基礎試験を実施し、気泡を伴う渦の発生条件の流体圧力依存性を把握した。ループ数削減・大流量化に係わる構造・材料の健全性評価については、1/3縮尺水流動・振動試験装置の製作・据付を完了し、データ取得に向けた準備作業を進めている。また、今年度後半に実施するエルボ部可視化試験については、試験体製作を進めている。1次冷却系ポンプを組み込んだIHXの開発については、加振器振動試験を終了し、結果を分析中である。また、振動試験結果による解析モデルの検証を実施している。自己作動型炉停止機構(SASS)の炉外試験については、SASS動作時の熱衝撃に対する健全性を確認するため、耐熱試験後の過渡試験を実施した。なお、「常陽」での炉内試験については、要素照射試験体の製作を継続して実施している。

## ② 鉛ビスマス冷却炉

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。

第3四半期のシステム設計としては、中間評価に向け、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見直したプラント概念について経済性評価を実施した。また、技術的成立性を評価し、開発課題を抽出した。炉心設計では、炉外腐食試験の中間知見から、鉄鋼材料の酸化形態に基づき暫定した被覆管最高温度570を採用した場合(従来は650)の炉心について炉心特性の評価を実施し、概略評価の妥当性を確認した。また、総合評価用に高燃焼度・高フルエンス炉心の設計データをとりまとめて提示した。

要素技術開発では、FZKとの協力で実施している国産材の流動鉛ビスマス中腐食試験を実施している。また、これまでに実施してきた停留(流れのない)鉛ビスマス中での腐食試験や高温鉛ビスマス中腐食試験(電中研との共同研究)材の材料分析を継続して実施している。上記試験研究を始め、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ている。

## ③ ガス冷却炉

2003年度の設計研究では、炉心形態として横方向流冷却概念を中間評価で用いる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、増殖比を抑えて燃料サイクルの経済性向上を狙った高内部転換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。また、中間とりまとめに向け、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。

第3四半期においては、システム設計として、プラント起動・停止計画、原子炉格納施設を具体化した。炉心設計では、横方向流冷却概念基準炉心(取出燃焼度120GWd/t)の仕様を設定し炉心特性解析を行うとともに、設計基準内事象過渡解析を行い、設計目標を満足する見通しを得た。

被覆粒子燃料に関しては、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注目してTiNの基礎特性調査を進めている。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。

## ④ 小型炉

小型炉についてはNa冷却小型炉、鉛ビスマス冷却小型炉の設計研究、及び多目的利用として水素製造に関する検討を継続して実施している。

Na冷却小型炉では、長期燃料無交換、運転保守補修の簡素化、多目的利用など高速炉特有のアピールポイントを幅広く追及し、魅力的な小型炉概念を提示する計画である。炉心燃料設計では、金属燃料でZr密度3領域化により出口温度550を達成するとともにコンパクト化と長寿命化(20年燃料無交換)を両立させる炉心としてポイド反応度<sup>\*</sup>6ドル及び8ドルに相当する炉心・燃料仕様を設定した。ポイド反応度6ドルの炉心についての安全解析の結果、異常な過渡変化時のスクラム不作動事象(ATWS)でも、燃料健全性を維持

\*ポイド反応度：固体燃料と冷却材に液体を用いる原子炉の炉心内において、冷却材の沸騰あるいは気泡通過等の原因によるポイド(気泡)化が炉心反応度に及ぼす核的な反応度効果。

できる見通しを得た。現在、ボイド反応度 8 ドルの炉心の ATWS 解析を進めており、今後、安全上の特徴を把握する。プラントシステム設計では、原子炉容器軸長短縮により更なる物量低減が可能なことや ATWS 発生時に炉心・制御棒相対変位反応度を有効活用できることから、検討対象概念として選定した「コンパクト化タンク型炉」についてプラント概念の構築を行った。また、長尺炉容器に懸念される上部炉内構造物の耐震性及び制御棒挿入性について検討し、その成立性を確認した。

鉛ピスマス冷却小型炉では、20年及び30年寿命炉心の仕様設定が終了し、プラント概念図の作成を行うとともに、30年寿命炉心の安全解析を行い ATWS 時に燃料健全性を維持できる見通しを得た。

水素製造については、二酸化炭素を発生しない低温熱化学法を用いた原子力水素プラントについて、構造材料調査、原子炉 2 次冷却系基本構成の検討、原子炉冷却系機器物量のパラメータサーベイを実施し、プラントの基本構成に係わる検討を継続している。

#### ⑤ 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を製造し、特性評価を進めている。また、ロシア BOR 60 炉での ODS 鋼燃料ピン先行照射試験を継続実施している。

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、炉内試験に関し中規模試験用のモックアップ試験体を用いて、核加熱や予熱・冷却に関する技術確認を実施するとともに、本試験に向けて試験容器と試験燃料の入手・許認可手続きを継続した。炉外試験については、燃料模擬物質の最終選定に向けた試験を実施し、アルミナを燃料模擬物質とした試験技術を確立した。一方、その後の Na 試験については、Na 及び Na 機器類、洗浄機器類の準備を進めた。

構造設計手法の開発では、実用化構造設計基準(FDS)策定に向け、非弾性設計解析指針及び熱荷重設定指針の検討を継続した。また、2重管SGの

球形管板の 3 次元構造解析法を開発した。システム化規格については、信頼性評価手法及び設計・検査等の部分基準間の裕度交換手法に関して、例題を通じた検討を進めた。

高クロム鋼(12Cr 鋼)の開発では、FBR 候補熱処理材の大気中試験と Na 中試験を継続した。また、V、Nb 成分調整材の衝撃試験及び引張試験、長時間靱性を低下させる主要因として Laves 相に着目した組織観察及び定量分析等により FBR 用 12Cr 鋼の熱処理及び FBR 候補組成の検討を実施している。

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」の開発を継続している。「建屋全体 3次元免震方式」の開発では、空気バネと油圧装置を組み合わせたハイブリッド型を選定し、本免震システムの設計検討を実施している。「建屋水平免震+機器上下免震組合せ方式」の開発では、皿バネと組み合わせて使用する水平荷重支持構造について検討を進めるとともに、免震構造設計手法について中間とりまとめを実施中である。

### 3. 燃料サイクルシステム

フェーズ において選定した再処理システム及び燃料製造システム概念毎に、これまでの要素技術開発成果を踏まえ、設計の合理化・詳細化を図るとともに、中間とりまとめを実施している。

#### (1) 再処理システム

##### ① 先進湿式法

システム技術開発では、要素開発側との意見交換を踏まえ、技術的成立性及び経済性を中心に、設計検討結果の精査を実施した。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。

高レベル放射性物質研究施設(CPF)においては、本年度の第 2 キャンペーンとして、実使用済燃料を用いた粉体溶解試験、晶析試験及び単サイクル共抽出試験を実施し、採取した試料の分析を進めている。

##### ② 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、主要技術である MOX 電解共析に関して、国内では、今年度実施するウラン(U)による電解試験の準備を終え試験に着手した。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、最適な電解条件の把握のため実際の使用済燃料の処理を想定して複数の核分裂生成物 (FP) イオンを溶融塩中に添加して実施する電解試験を計画しており、今期はMOX試験を継続して行った。

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 (Pu) 試験用設備において、Uを用いた試験を開始し、酸化物Uの金属への還元、電解槽での金属Uの回収 (図1) 回収されたUの蒸留精製の一連の試験を行った。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、照射用U Pu Zrの3元合金照射ピン製造に用いる金属Puを製造するための試験を行った。

## (2) 燃料製造システム

### ① 簡素化ペレット法

システム技術開発では、要素開発側との意見交換を踏まえ、技術的成立性及び経済性を中心に、設計検討結果の精査を実施した。

ショートプロセス製造技術については、外部識者による課題評価でのコメントを含め、次ステップの燃料製造要素技術開発計画と照射燃料の供給に向けた準備を継続している。低除染のTRUを含有する燃料製造技術開発については、Amを含有する高除染MOX燃料試作ペレットの分析を進めている。Am/Npと模擬FPを添加したペレット燃料について、物性測定及び評価を継続するとともに、具体的な照射条件の検討を行っている。

### ② 振動充てん法

今後の振動充てん法の評価に向けた小規模ウラン試験の準備を完了し、試験を開始した。

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、搬入を完了したピンを照射リグに組立て、次期の第1回照射に向けた準備を継続している。

### ③ 鑄造法

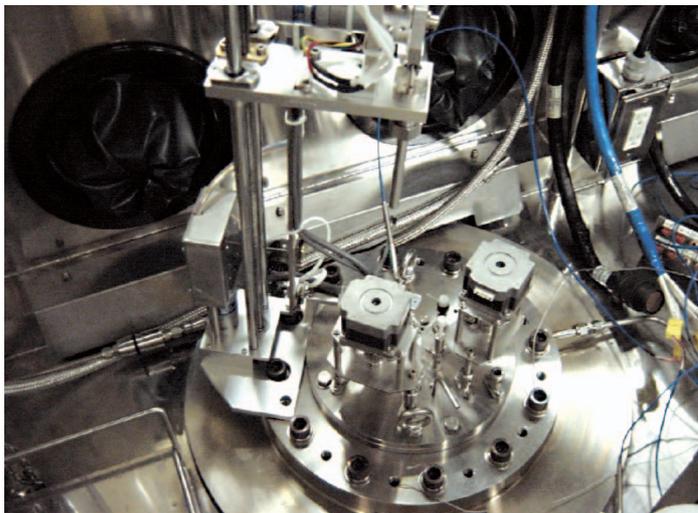
電中研 - 原研共同研究において、常陽照射用金属燃料ピン作成試験に向けて、グローブボックスの設置を行った。グローブボックス内に設置する射出成型装置については、コールド試験用装置の設計経験を基に、U Pu Zrの3元合金製造装置を設計した。

### (3) その他

新リサイクル技術 (ORIENT cycle)<sup>3)</sup> については、分離技術者のみならず廃棄物等幅広い分野のメンバーによる検討を踏まえ、革新的分離技術について、経済性等の観点も踏まえて分離技術を組み合わせ、新たな分離スキーム案を構築するとともに、その評価を継続している。

## 4. 総合評価

有望なFBRサイクル概念を明確化するため、候補概念に関する多面的評価を進めている。定量的な評価指標である経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性については評価構造を設定し、評価対



金属電解試験装置



回収した金属ウラン

図1 CPFにおけるウランを用いた金属電解法試験

象とするFBRサイクル候補概念についてデータを設計部署より収集しデータベースに登録した。核拡散抵抗性・技術的実現性・社会的受容性の定性的な評価指標については、担当者からのヒアリングを実施し評価用データを収集している。各評価指標の統合化を行う「重み」については、有識者の意見聴取等を行いつつ検討を進めた。具体的には、今後の電力、エネルギー市場に影響を及ぼすマクロな社会的要因を念頭に置き、将来社会の価値観を表す複数のシナリオを準備し、各シナリオにおいて視点間で一対比較する方法を用いて安全性を除く6つの指標（経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、技術的実現性、社会的受容性）の重みを設定することとした。

また、FBR以外の他エネルギー源との比較評価に関しても、各評価指標を定量化するためのデータ収集を進めた。

各FBRサイクル候補概念を導入した場合のシナリオを想定し、軽水炉からFBRへの移行状況、ウラン累積需要量、使用済燃料貯蔵量の推移などの燃料サイクル収支を予備的に評価した。FBRサイクル候補間で導入可能時期や炉心性能の違いによる資源的観点と環境負荷の観点からみた各候補概念の特性を把握した。

諸量解析コードについては、長寿命核分裂生成物（LLFP）分離・変換サイクルの諸量解析機能を追加し、試算を実施した。

FBRサイクルデータベースについては、各データベースの検索・表示機能の改良を行うとともに、データベースの情報登録を継続的に実施した。

FBRサイクルの社会的受容性向上の検討については、訴求対象、FBRサイクルが有する強み・弱み・機会・脅威を整理した上で、取り組みスケジュール及び目標達成のために達成すべき要件を明

らかにし、今後のアクションプランの検討を行っている。検討にあたっては、有識者の意見聴取を実施し参考としている。

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の見通しを判断するため、代表的な湿式システムと乾式システムを対象として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た。その結果、両システムともに、放射線被ばくによる急性死亡リスクは無視でき、個人の致死ガンリスクについても、判断基準の目安値である $10^{-6}$ ガン死亡/人/年/サイト（1年間に日本で個人が悪性新生物により死亡する確率値の約0.1%に相当）を下回る見通しを得た。炉システムについては、Na冷却、鉛ビスマス冷却及びヘリウムガス冷却の代表概念について安全設計概念のレビュー及び予備的な安全解析結果に基づく安全設計要求の充足見通しについて検討し、その結果を技術検討書ドラフトにまとめた。

また、総合評価用の22ケースについて炉システム及び燃料サイクル施設を対象とした平常時における周辺公衆の放射線被ばく（環境負荷低減性の指標のひとつの評価尺度）について検討した。設計概念によっては、放出挙動についての基礎データの取得が必要であるが、全ケースとも設計要求への充足性を満足する見通しである。

#### 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）