



- 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提案し、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，(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ともに，定量的な絞り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の候補に絞り込み，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。

フェーズⅡの2年目にあたる2002年度第2四半期では，2001年度の研究成果について関係部署に説明を行うとともに，報告書を社内外の関係者に

配布した。

2. 高速増殖炉システム

2002年度第2四半期は，2003年度に予定されている中間取りまとめに向けて，各炉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) ナトリウム冷却炉

プラント設計では，建設コスト低減のために電気出力を50万kWeから75万kWeに増加させた中型炉概念の検討を進めるとともに，大型炉概念の成立性評価を進めた。

炉心燃料設計では，MOX燃料炉心についてブランケット量を削減した上で，ブランケットを含めた平均燃焼度を高めることを目標に炉心設計を進めた。また，金属燃料炉心は高燃焼度・高照射量における燃料ピンや集合体の照射変形評価を取り入れた燃料仕様設定作業を進めた。

大型及び中型に共通な課題として，ナトリウム冷却に固有の課題に対する対応策の強化として，ナトリウム水反応の発生可能性や影響を大幅に低減できる2重管SGや単管SGの概念検討，ISI & R（供用中検査・補修）方針の検討，燃料取り扱い設備の概念検討を進めた。ISI & Rについては，ナトリウム冷却炉のプラント設計の特徴を考慮し，安全性及び経済性の2つの観点から，早期に異常を発見することが合理的と考えられる部位を抽出した。主要な部位に適合した検査方針，検査機器への要求条件を明確にし，主要機器の開発計画を立案するための準備として他の技術分野で利用されている技術調査を行なった。燃料取り扱い設備については，想定される故障，事故モードの分析を行い，実用化時代に求められる稼働率向上のために燃料交換期間を短縮できる概念の構築を進め，開発課題を抽出するとともに，具体的な解決方策

について検討した。

要素技術開発では、炉内流動の適正化に向け、大型炉の上部プレナムを模擬した縮尺装置を用いた流動試験を開始し、プレナム内の流況を定量的に把握するとともに、流動適正化を図る構造物の効果について検討を進めている。

高流速大口径配管については、大型炉のホットレグ配管を模擬した1/3縮尺水流動・振動試験装置の亚克力製可視化試験体とステンレス鋼製振動試験体の製作設計を実施している。

物量低減に向けた1次冷却材ポンプと中間熱交換器の合体機器開発については、詳細振動解析モデル(3次元モデル)を用いて、従来よりも精度の高い伝熱管摩耗量評価手法の開発を進めている。なお、1/4スケールモデル試験の実施に向け、振動試験装置の設計を進めている。

(2) 鉛ビスマス冷却炉

鉛ビスマス冷却中型モジュール炉の2002年度における設計検討については、2001年度検討で構築した自然循環及び強制循環方式のプラント概念について、成立性を見通す上で必要な枢要課題に対する検討を進めるとともに、原子炉構造、BOP(原子炉及び主冷却設備以外の設備)等の具体化、運転制御性等について、より詳細な検討を進めている。

鉛ビスマスはナトリウムに比べ約10倍の比重を有し、系統全体の重量が大きくなることから、鉛ビスマス冷却炉の成立性を左右する上で重要な耐震性について検討を進めた結果、地震時におけるUIS(炉心上部機構)と炉心との相対変位が大きく、制御棒の挿入性を確保できない可能性があるとの検討結果を得た。このため、今後、挿入性確保のための方策について検討を進めていく。

また、制御棒及び駆動機構の具体化検討や自然循環概念における運転制御性の検討等、プラント概念の具体化及び成立性確認に向けた検討を進めている。

要素技術開発では、2001年度よりドイツ・カールスルーエ研究所(FZK)との共同研究として開始した炉心材料等の耐食性確認試験について、停留環境下での耐食性確認試験を継続実施中であり、現在は5,000時間の試験を終了し、試料分析を開始した。なお、2002年度後半には、温度550℃、酸素濃度制御環境(10⁻⁶wt.%)の流動条件下における試験を予定しており、試験開始に向けた準備

を進めている。

(3) ガス冷却炉

2001年度に今後の検討対象として抽出した被覆粒子燃料型ヘリウムガス冷却炉の設計研究を行っている。これまで検討を進めてきた被覆粒子型炉心(横方向流・被覆層表面直接冷却型)については、燃焼度や燃料体積比の向上等、炉心性能向上に向けた検討、制御棒やSASS(自己作動型炉停止系)概念の具体化等の設計研究を進めている。本炉心概念では製造時欠陥等による燃料被覆層破損割合を十分に低く保つことができなければ冷却系統内部の汚染が問題となる可能性もあることから、対応方策の1つとして被覆層の外側にもう1層のパウダリを有するような代替炉心概念の検討も進めている。検討対象としては冷却チャンネルを有する六角ブロック型容器内に被覆燃料粒子を充てんし燃料粒子間を2次粒子充てん又は固相マトリックスとする燃料集合体概念を選択し、パラメータ解析評価により除熱性からの設計成立範囲や核特性の概略見通しを評価した。プラントの系統・設備概念についても、ヘリウムガス冷却炉の高温構造健全性等に着目した設計研究を進めている。

(4) 小型炉

小型炉については、ナトリウム冷却小型炉及び鉛ビスマス冷却小型炉のシステム設計、並びに多目的利用に関する検討を継続して実施した。ナトリウム冷却小型炉については、反射体制御方式の成立性、保守補修性を考慮した炉内構造の見直しなど技術課題の検討を継続し、検討の方向性を明らかにした。また、出力15万kWe、金属燃料炉心を採用した反射体制御・強制循環方式、制御棒制御の強制循環方式、並びに自然循環方式の3概念について、ヒートマスマランスの検討をもとに、炉心仕様の検討を行った。鉛ビスマス冷却小型炉については、制御棒本数など炉心仕様変更による安全性の見通しを把握するために、安全解析の準備を行った。多目的利用に関する検討については、メタンガスの水蒸気改質法による原子力水素プラントを対象として、発電と併用した系統構成の具体化、水蒸気改質器での伝熱管破損対応などの検討を継続した。

(5) 炉型に共通な技術開発課題

炉型に共通な技術開発の主要な課題の一つとして、金属燃料について燃料ピン径や被覆管温度等

の設計制限因子に関する検討を行い、設計研究に適用するための暫定案を設定した。

高性能被覆管（ODS鋼）の開発では、マルテンサイト系ODS鋼を対象として熱間等方加圧（HIP）処理 - 熱間押し出しプロセスと中空キャプセル熱間押し出しの2種類の製造方法により大型素管を製造し、実用製造技術としての適用性評価を行っている。また、これらの大型素管を用いた長尺被覆管の製造試験を実施している。ロシアBOR60炉での照射試験に関する契約を締結し、被覆管端栓溶接方法の検討等、照射用ODS鋼被覆燃料ピンの設計・製造に向けた準備を進めた。「常陽」での照射試験については、2007年にODS燃料ピンキャプセル照射試験を開始する予定であり準備を進めている。

再臨界回避概念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）については、炉外試験の枢要技術である高周波誘導加熱による融体生成技術検討を進めるとともに、炉内試験体構造概念の具体化を進めた。

12Cr鋼開発については、火力で実績のある12Cr鋼を対象に高温延性やクリープ疲労強度改善を目的に熱処理条件を変更した材料に関して、特性改善の評価のための材料実験を継続している。また、ナトリウム中試験用の特殊試験片の製作を終えた。

免震技術については、機器免震に適用する減衰装置の試設計を実施するとともに、試験体設計と試験条件の検討を実施した。

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の進捗状況を概説する。

(1) 再処理システム

システム技術開発では、フェーズⅠの成果及び昨年度の機器・設備概略検討結果、燃料組成変動に対する運転モード検討結果等を基に、プラント全体の操業性を考慮したシステムフローの検討を進めた。

先進湿式法

先進湿式法の基準プロセスを代替・補完する技術（イオン交換法、超臨界流体直接抽出法等）に関し、技術の特徴の確認や課題解決の見通しについて技術的成立性や開発目標の観点に沿って整理し、経済性を指標として評価することにより技術

の採否を判断する手法の検討を行った。

高レベル放射性物質研究施設（CPF）において10月から実施を予定しているホットプロセス試験のための準備作業（施設内点検作業等）や試験計画の検討を実施した。

乾式法（酸化物電解法、金属電解法）

乾式法の共通技術開発については、東海事業所において今秋からウラン試験を開始すべく、コールド試験等の準備を進めている。また、酸化物電解法については、複数のFPイオンがMOX電解共析に及ぼす影響を評価するための電共研によるロシア原子炉科学研究所（RIAR）での試験の準備を行い、9月より開始した試験への立会いを実施している。

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Pu試験用設備の試験開始に向けての準備を行った。また、電中研では、EU超ウラン元素研究所（ITU）で継続実施している電解精製試験より、陰極へのPu、Uの析出挙動及びZrの影響に関するデータを得た。さらに、電中研と原研との共同研究の枠組みの下、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を用いて、Cd陰極中へのPu、U及びAmの共析試験を継続実施し、塩中Pu/U比や陰極攪拌の効果を調べると共に、Cd陰極インゴットを対象とした陰極回収金属試験のための蒸留装置を製作し、昇温性能などを確認した。

(2) 燃料製造システム

システム技術開発では、セル内配置設計方針の具体化と、主要設備に対する機器概念、マテリアルハンドリング設備、ライン構成の検討及びセル内配置設計を実施している。また、発熱元素の遅延リサイクルによる製造設備への影響を評価した。

簡素化ペレット法

ショートプロセス製造技術の外部評価に向けてこれまでの要素試験成果をまとめる作業を進めるとともに、コールド試験を中心に継続実施した。低除染のMA含有燃料については、物性測定・分析試験の準備を進めるとともに、セル内での遠隔操作により3%のAmを含有するMOXペレットを試作し、製品品質の評価を実施している。

振動充てん法

ノズル径、原料溶液組成等をパラメータとしてゲル化によるUO₂粒子製造試験を実施し、真球度の高い粒子を得た。振動充てん試験では、実際の

燃料ピン構造に準じた最適振動条件の検討や、充てん密度に及ぼす表面形状の影響の検討を行っている。

またスイス・ポールシェラー研究所 (PSI) との共同研究で、PSIにおいて燃料の製造試験を実施し、オランダHFR炉での照射試験の準備を進めている。

鑄造法

電中研 原研共同研究で予定しているU Pu Zr単スラグ作成試験用に設計・試作した射出成型装置を用い、Cu Zr等の模擬物質による射出成型試験を行い、操業条件等を評価した。

(3) その他

新リサイクル技術 (ORIENT cycle) の検討については、分離核変換技術に関する東工大 / サイクル機構共催セミナーで報告するとともに、秋の原子力学会において3件の発表を行った。

4. 統合評価

2001年度設計の炉心を対象とした経済性及びサイクル諸量評価 (再処理量、ウラン累積需要量等) を行い、燃料サイクル費に対する内部転換型炉心^{*1}の効果などを確認した。また、金属燃料サイクル導入シナリオの検討を実施した。これらの成果は、今後の炉心設計の改良に反映される。原子力の多目的利用の一環として、水電解水素製造法の経済性に関する情報収集等、水素製造シナリオの検討を進めている。

社会的受容性については、電気事業者と協力し

て社会的受容性検討準備会を立ち上げ、これまでの活動状況や課題、関連研究の現状、FBRサイクルの導入意義などの検討を進める計画としている。

環境負荷低減については、乾式再処理プロセスの環境への負荷特性と達成レベルの見通し、TRU燃料開発における部門間の連携と役割分担、FP分離変換に係るシステム検討の進め方など、これまでに抽出された課題に対する方策について検討を進めている。

FBRサイクル技術情報データベース、投資対効果評価法、多面的評価手法などの評価手法の開発・整備については、改良項目やモデル化手法などの具体化を実施し作業に着手した。

燃料サイクル施設のリスク特性把握については、乾式燃料サイクル施設のリスク源分析、放射性物質放出事象の健康影響リスク分析を進めている。また、FBRサイクルについては、ガス冷却炉の炉心損傷頻度について設計要求達成の見通しを得るため、イベントツリー^{*2}構築などの予備的な確率論的安全評価 (PSA) 検討を進め、安全設計上の課題抽出を実施している。

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)

* 1) 内部転換型炉心：低出力密度で炉心燃料部分の転換比 (原子炉内で、「中性子の吸収によって親物質から生成された核分裂性物質質量」の「核分裂するために消費された核分裂性物質質量」に対する割合) を向上させ、長期運転サイクルを目指した炉心。
* 2) イベントツリー：起因事象発生時にその拡大を防止するためにあらかじめ設けられている安全機能のうち、どれが成功しどれが失敗したかの組み合わせを考えて、事故の進展ケースを分類するための系統図。