



- 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、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、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、段階を踏んで進めることとしている。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、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（基礎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を提示することとしている。

2003年度第4四半期では、電気事業者等と協議・調整を図りつつ、フェーズの中間とりまとめ報

告書及びエグゼクティブ・サマリー（要約版）の作成を実施するとともに、原子力学会（2004年春季の年会）にその概要を報告した¹⁾。また中間取りまとめの成果について、2004年度の研究開発課題評価委員会にて審査を受けるための準備を実施している。

2. 高速増殖炉システム

炉システムに関するフェーズ研究成果の中間とりまとめとして、基幹電源としてのナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉、ヘリウムガス冷却炉、水冷却炉及び分散電源としての小型炉を対象に技術総括を行った。

ナトリウム冷却炉（図1参照）

ナトリウム冷却高速炉としては、先進ループ型炉を代表概念に選定し、中型モジュール炉（75万kWe、4モジュール）及び大型炉（150万kWe ツインプラント）について検討している。炉心燃料としては、従来から開発が進められてきた酸化物燃料と、開発要素が相対的に多いものの燃焼度の向上や燃料インベントリの低減が期待できる金属燃料を対象とした。このナトリウム冷却炉の概念は、実用化のために物量削減を実現する革新技術、高い稼働率を確保し優れたプラント信頼性・経済性を実現する技術が必要であるが、これまでの豊富な開発実績から相対的に高い確度を持って技術的実現性が見通せる概念である。ただし、ユーザーにとって使い勝手のよいシステムとしていくために、保守・補修性の向上を図ったシステム設計と、それに関連した技術開発が今後必要である。

フェーズ後半は概念検討と枢要な革新的技術の成立性を見極めるとともに、保守・補修性、高信頼性蒸気発生器等の課題解決に向けた検討を進める。また、開発の確実性を高める観点から、開発リスクのある革新技術を用いない場合の代替設

計概念の検討と、これによる性能、経済性への影響評価を実施する。

鉛ビスマス冷却炉（図1参照）

鉛ビスマス冷却高速炉は冷却材重量が過大となり、耐震性の観点からループ型及び150万kWe規模の大型炉の成立性が見通せないため、中型モジュールタンク型炉を選定した。主冷却系の循環方式については、鉛ビスマス冷却材が自然循環炉に適した特性を持つことから自然循環炉の実用化の可能性も追求したが、耐震性、経済性、炉心性能及び保守・補修性の観点で優れる強制循環炉（70万kWe級、4モジュール）を代表概念として選定した。鉛ビスマス炉では被覆管腐食制限等（温度及び流速制限）から燃料体積比が低く抑えられ、酸化物燃料では増殖比等の炉心性能の目標を達成することができない。そのため、開発に長期を要するものの炉心性能の向上が期待できる窒化物燃料と組み合わせた設計を代表概念とした。これまでの検討の結果、システムの簡素化により建設単価目標を達成可能な概念を構築した。窒化物燃料と組み合わせることで、ナトリウム冷却炉と同程度の高い炉心性能を達成可能である。ただし、材料腐食に関する見通しが得られていない状況であり、限定的な知見から暫定した腐食制限条件の下で設計した結果であることに留意する必要がある。

フェーズ 前半から実施している材料腐食試験により、設計研究開始時点で暫定した材料腐食評価式より厳しい結果が得られつつある。このため、フェーズ 後半は材料腐食試験を継続するとともに、その結果を反映した評価式に基づく経済性の評価、保守補修の考え方の整理（材料が厳しい腐食環境に晒されることを考慮）、炉心性能の評価（被覆管の腐食代等を見直した条件での評価）を実施する。

ヘリウムガス冷却炉（図1参照）

ヘリウムガス冷却高速炉としては、大型炉（約110万kWe ツインプラント）について検討を進めている。炉心燃料に関しては、被覆粒子型燃料を対象にかご型集合体構造、六角ブロック構造等の新型燃料形態についても検討を進めている。中間評価においては、フェーズ 前半の研究で最も検討が進んでいる被覆粒子燃料・横方向流冷却集合体を代表概念とした。なお、酸化物燃料では十分な性能が引き出せないことから、開発期間は長期になるものの、高い炉心性能を引き出せる窒化物

燃料を検討対象とした。これまでの検討の結果、熱効率が高く多目的利用への適用性のある概念として、炉心出口温度850℃という特長を有する概念を構築した。ただし、本概念はヘリウムガスによる冷却能力が劣るため燃料体積比や出力密度が制限され、ナトリウム冷却炉等の液体金属冷却炉と比較して炉心性能が劣る。技術実現性に関しては、鉛ビスマス冷却炉は材料開発等の研究開発、ヘリウムガス冷却炉についても炉心・燃料に関する概念構築や耐高温燃料材料等の研究開発が必要であり、両者とも実用化には基礎的なレベルからの継続的な研究開発を行う必要がある。

フェーズ 後半は検討対象としている複数の炉心・燃料概念（被覆粒子燃料・冷却材横流れ集合体型及び六角ブロック型）の技術成立性、安全性評価に係わる課題等の検討を深め、有望な炉心概念の明確化を進める。

水冷却炉（図1参照）

水冷却炉としては、フェーズ ⅠではPWR型高速炉、BWR型高速炉及び超臨界圧水冷却高速炉（SCFBR）を検討対象候補とした。フェーズ Ⅱでは、PWR型高速炉は重水を利用するため設備費が高くなること、また、SCFBRは材料開発等の基礎・基盤的研究開発が必要であること等から、水冷却炉の評価対象としては設計検討が進んでいるBWR型高速炉を選択した。水冷却炉は、炉心以外は基本的にABWRと同様であることから、プラント技術について豊富な軽水炉の設計・運転経験が活用できる。このため、プラント建設単価は将来軽水炉と同等とみなせるものの、炉心性能は、燃焼度の限界、燃料インベントリの増加等の点で他の炉型のレベルに到達しない。実用化には高速中性子・水冷却環境下における被覆管材料開発、高富化度燃料より成る炉心の損傷時の影響緩和対策に関する研究開発等が必要である。

フェーズ Ⅲ後半は、水冷却炉の技術的成立性に係る知見を得るため、研究開発成果を取り込んだ評価を行う。

小型炉

小型炉については炉システムとしてNa冷却小型炉、鉛ビスマス冷却小型炉、及び多目的利用として水素製造技術を検討対象とした。フェーズ Ⅳ前半の検討の結果、炉システムに関して20年以上の長期燃料無交換と高い受動的な安全特性を満足しながら、小型炉の特徴を活かしたコンパクトな設

● 開発目標適合性の追求 ● 革新技術の導入 ● 技術的課題の検討

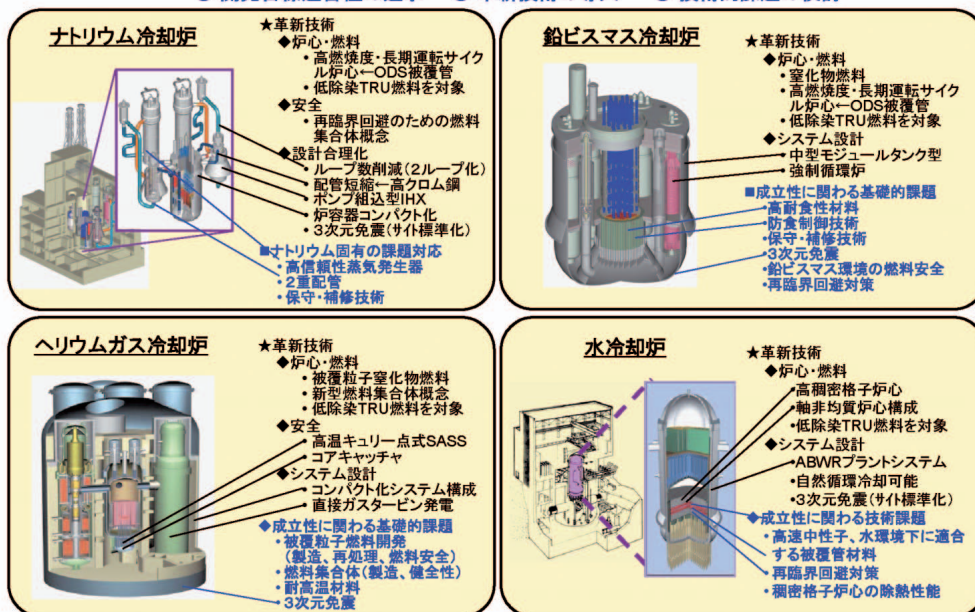


図1 各冷却材のFBRシステムのプラント概念

計を採用することによりスケールデメリットを克服する可能性を有する概念を構築した。ただし、出力密度を抑制しつつ燃料インベントリを増加させるため炉容器径が大きくなること、長期燃料無交換と現実的な定期検査頻度の整合を取る必要があること等の課題を有する。また、原子力の多目的利用として水蒸気改質法による水素製造プラント概念の構築、低温熱化学法による水素製造プラント系統概念の検討を行った。

フェーズ 後半は、これまでの検討で明確にした小型高速炉の魅力追求に係る課題、魅力追求と経済性とのトレードオフの関係等に関する知見を基に、有望なプラント像を構築する。

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概念(先進湿式法、酸化物電解法、金属電解法)及び燃料製造システム(簡素化ペレット法、振動充てん法、鋳造法)の概念ごとに、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、中間とりまとめとして各概念の技術総括を行った。

(1) 再処理システム

先進湿式法

先進湿式法は、従来の湿式法で培われた溶媒抽出法をベースに、ウラン及びプルトニウムを低除

染でマイナーアクチニド(MA)とともにリサイクルすることによる核拡散抵抗性向上、環境負荷低減性、プロセス合理化による経済性向上を狙って新たに構築された概念である。この方法は高除染体系での豊富な実績があり、技術的成立性が高く早期の実用化が期待できる。ただし、小規模施設とした場合のさらなる経済性向上を追求するため、革新的技術として超臨界直接抽出法等の技術的成立性の見通しを得ることが課題である。

酸化物電解法(乾式法)

乾式法のうち、ロシアRIAR(原子炉研究所)で開発された技術をベースとした酸化物電解法は、製品がそのまま振動充てん法燃料製造工程の燃料材となることから、簡素なシステムとなり、小規模施設では比較的経済性に期待ができる。ただし、マイナーアクチニドの回収など技術的成立性を左右する基礎的な課題が多く、それらの課題解決の見通しを得ることが必要である。

金属電解法(乾式法)

米国ANL(アルゴン国立研究所)を中心に開発された技術をベースとした金属電解法は、これまでの米国の実績や国内の試験研究により、プロセスの技術的成立性に関わる課題は多くなく、小型施設でも経済目標に対して高い適合度を有している。ただし、使用済燃料を用いてのTRU回収技術などの枢要技術確認が必要である。今後、高レベ

ル放射性物質研究施設（CPF）内の試験設備等を用いた国内での基礎試験を実施していく一方で、国際協力を活用することにより効果的な開発が可能となる。

（2）燃料製造システム

簡素化ペレット法

ペレット法燃料製造システムは、従来から酸化物燃料と窒化物燃料で適用されており、特に高除染の酸化物燃料に関しては豊富な製造実績がある。簡素化ペレット法は、成型焼結工程の大幅な簡素化等を図り、従来に比べ工程数を約1/3に削減できる可能性を有している。低除染・TRU燃料製造においては、セル内での遠隔・自動化とメンテナンスフリーを基本としており、工学規模での機器・設備の成立性の確認が必要となる。

振動充てん法

振動充てん法はペレット法に比べ微粉末が少ないこと、燃料粒子を直接被覆管に充てんすることや工程機器の動作が単純であることから、遠隔自動化に適しており低除染・TRU燃料製造技術としては魅力的な技術である。ロシアにおいて工学規模の振動充てん燃料製造法として、セル内での遠隔製造の実績があるため、基本的にはその実現性は見通せるものと考えられるが、実際の燃料を用いた粒子製造試験によってその特性を明らかにすることや、量産システムの開発が課題である。

鑄造法

金属燃料の鑄造法燃料製造システムは、米国ANLで開発された射出成型法をベースとしている。このシステムは比較的工程が簡単で、装置が小型化でき、かつ遠隔操作に向いている。米国での実績により基本プロセスは比較的高い成立性を有しているものと考えられるが、燃料の均一性等の確認や、鑄造型（石英ガラス製）の廃棄物低減（再利用）等が課題である。

4．統合評価 他

高速増殖炉システムと燃料サイクルシステムの有望な組み合わせを導出するため、炉及び燃料サイクルシステムの技術総括で抽出されたそれぞれの有望な概念について、技術的な整合性を考慮し、FBRサイクル概念を組み立て、これらについて多面的評価を実施している。

5つの開発目標（安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性）に対する適合度を、それぞれの評価指標の特性に応じた評価手法を用いて検討している。

中間評価においては開発目標に対する適合度を求め、FBRサイクル候補概念について暫定的ではあるが特徴を明らかにした。なお、開発目標に対する適合度に加えて、フェーズ最終とりまとめに向けて、技術的実現性や社会的受容性の評価を加味していく予定である。

また、高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステム各々の候補概念の研究開発の狙いを明確にした上で、現段階までに得られた技術的知見に基づいて、候補概念ごとの研究開発計画（案）を作成した。

今後、フェーズ最終とりまとめに向けて、設計研究と要素技術開発の成果を採り入れ、社会的ニーズへの適合性の高いFBRサイクル概念を明確にしていくとともに、実用化に至るまでの研究開発計画を立案していく。

参考文献

- 1) 大野他、総合講演“FBRサイクル実用化調査研究フェーズの中間評価”日本原子力学会、2004年（第42回）春の年会

（ 本社：経営企画本部
FBRサイクル開発推進部 ）