

平成11年11月11日
日本原子力研究所

日本原子力研究所における高速増殖炉関連技術分野の研究

1. はじめに

世界の安定と繁栄には、長期的に資源、環境との調和を図りながら、エネルギーの安定供給を確保することが不可欠であり、国は次世紀を超える長期にわたる展望を提示する必要がある。化石燃料の大量消費に起因する地球温暖化は、生態系のみならず、社会的及び経済的に深刻な影響をもたらす可能性があり、非化石エネルギーの利用拡大による二酸化炭素の排出削減が急務である。当面の削減目標を着実に達成することは重要であるが、さらに長期にわたって持続的、効率的に削減を実現していくためのビジョンを描き、早期から必要な措置を講じていく必要がある。

非化石エネルギーの中で自然エネルギーに関しては、今後とも開発利用のための積極的な取り組みが必要とされるが、少なくとも我が国においては化石エネルギーに対する代替と位置づけるのは、現時点では困難である。これに対して原子力エネルギーは、すでに30年余の利用実績を重ねており、原子力エネルギーを長期にわたって利用することは、地球環境保全の見地から化石エネルギーの消費低減を図る上で、最も経済的、かつ現実的な選択肢であると考えられる。

一方、原子力長期利用が国民に受容されるためには、高レベル廃棄物処分は避けて通ることのできない問題である。処分後の長期管理にかかわる制度上の課題を解決するとともに、安全性について国民の理解を得ることが必要とされる。さらに、長期管理の問題を軽減する可能性のある技術として、群分離・消滅処理技術開発を進めることは、核燃料サイクルを完結する上でも重要である。また、我が国にとって、原子力を長期的エネルギー源とするためには、プルトニウムの有効利用方法を確立することが必要であり、そのための研究開発が重要である。

2. 長期的原子力利用の推進に係る諸課題

2. 1 群分離・消滅処理技術に関する研究開発

原子力エネルギー利用の課題の一つは、放射性廃棄物低減化の努力である。高レベル放射性廃棄物に関しては、現在、ガラス固化体を深地層処分する方針で技術開発が進められている。一方、長寿命放射性廃棄物であるマイナーアクチニド（MA）と長寿命核分裂生成物（LLFP）の蓄積量を可能な限り減量し、長期的放射性毒性を低減することによって、環境への負荷を軽減することを目的として、群分離・消滅処理の研究開発が行われている。群分離・消滅処理技術開発については、オメガ計画の下で原研は加速器駆動消滅処理システムについて、サイクル機構及び電中研は先進高速炉サイクルシステムについての研究を進めてきた。

原研は、階層核燃料サイクル概念に基づく群分離・消滅処理の研究を進めている。これは、群分離・消滅処理サイクルと商用発電炉燃料サイクルからなり、2つのサイクルは互いに独立に発展することが可能な概念であるところに特徴がある。従って、群分離・消滅処理サイクルでは処分概念の単純化及び処分技術の最適化を追求でき、商用発電炉燃料サイクルでは経済性・安全性の向上及びPu利用技術の合理化を追求できる。

原研が研究を進めている群分離・消滅処理サイクルは、高レベル廃液から元素を半減期や利用目的に応じて、4つのグループ（群）に分離し、この中の超ウラン元素（MA）や長寿命核分裂生成物（LLFP）等の核種について、大強度陽子加速器を利用した核破碎中性子源と硬い中性子スペクトルを持つ未臨界炉を組み合わせたシステム「陽子加速器駆動消滅処理システム(ADS)」により核変換（消滅）処理を行う。消滅処理対象核種としては、再処理プロセスからの高レベル廃液を群分離プロセスで処理することによって得られるMA（Np, Am, Cm）及びTc-99並びに再処理プロセスで分離されたI-129とを半減期、放射性毒性、地層処分の負担軽減、工学的実現性等を考慮して選定し、これら核種について長寿命放射性廃棄物インベントリー及び放射性毒性の2桁以上の低減を目標に研究開発を進めている。

加速器駆動消滅処理システムは、軽水炉長期化シナリオにおける軽水炉、MOX利用炉等の高レベル廃液からのMA、LLFPを対象にした消滅処理の専用システムである。これまでの検討ではADS 1基により軽水炉10基分のMAを消滅処理でき、小規模の導入により軽水炉長期化に対応できるシステムである。また、将来は、先進MOX燃料高速炉システムからのAm、Cm、LLFPも対象にできる。すなわち、原子力エネルギーの長期シナリオにおいて想定される様々

なシナリオに対して柔軟に対応、共生できるシステムである。

サイクル機構及び電中研は、現行の再処理技術を改良又は乾式再処理を開発し、長寿命放射性核種を分離抽出し、これを高速炉の燃料の一部に混合して、高速炉内において核変換（消滅）処理を行う技術「先進高速炉システム」の研究開発を進めている。

先進高速炉システムは、将来、軽水炉に代わって高速炉が原子力発電の主役になることを想定したもので、先進再処理と高速炉の組み合わせにより自己生成のMA、LLFPをリサイクル消滅処理するものである。また、高レベル廃液からのMAを分離・回収して燃料へのMA混合量を増加することによって、軽水炉からのMAも消滅処理できる。

加速器駆動消滅処理システムと先進高速炉システムにおいて、群分離・消滅処理の技術開発は、原研、サイクル機構及び電中研ともに、基礎実験から実験室規模のプロセス成立性を実証する要素技術の研究開発段階にあり、今後の長期的取組みが不可欠である。したがって、研究資源の効率的活用を図るため、対象元素毎の分離・消滅処理プロセスに対する技術課題を分担するとともに、基盤的な技術開発については研究協力のより一層の推進が必要である。

なお、対象元素の分離・消滅は、将来社会のニーズ、技術的実現性、発電単価へのインパクト、原子力発電容量の伸び等を考慮して、対象核種のレベル分けを行い段階的に実現すべきと考える。

2. 2 プルトニウム有効利用方法の確立

原子力を長期エネルギー資源とするためには、プルトニウムの有効利用方法を確立することが重要である。当面は、ウラン資源の有効利用と余剰プルトニウムの解消の観点から、プルサーマル方式での利用が行われることとされているが、中長期視点からは多重リサイクルが可能で、天然ウラン消費量を大幅に低減し得る革新的な利用技術の実用化が望まれる。このため、これまではNa冷却高速増殖炉の開発に力が注がれてきたが、その実用化の展望が不透明になる中で、将来の不確実性に対して柔軟な対応を可能とするために、技術選択肢の幅を広げることが重要な課題となっている。

高速増殖炉に関しては、これまで主流であったNa冷却・MOX燃料方式に加えて、ガス冷却、窒化物燃料などに基づく新たな方式が、簡素化PUREX法、乾式再処理などの燃料サイクル新技術と併せて、幅広く検討されている。原研は、核データの整備、臨界実験、超ウラン元素の特性確認等の基礎基盤研究を進めることにより、高速増殖炉研究に資する。

一方、低減速スペクトル炉は、既に成熟の域に達した軽水炉技術に基づき、プルトニウム多重リサイクルを可能とする技術として注目され、研究開発コスト等の観点で有望と考えられている。原研は、軽水炉技術に立脚したプルトニウムリサイクルを実現するための技術オプションとして、低減速スペクトル炉の研究開発を進める。本炉は、高速増殖炉の開発動向に応じてその補完ないし代替の役割を果たし得る可能性を持っており、プルトニウム利用戦略の柔軟性を高める技術として重要である。

3. 原研の高速増殖炉関連技術分野での研究開発項目

3. 1 群分離・消滅処理技術についての研究開発

(1) 実用化のための研究開発

原研は、群分離・消滅処理技術の実用化を目指して以下の研究開発を行う。

① 群分離技術の研究開発

実プラントの1/1000規模での濃縮高レベル放射性廃液を用いた基礎試験によるプロセス成立性の確認及び廃液処理の容易なMAと希土類元素分離法の開発を実施する。また、実用化に向けては、プラントとしての成立性確認を目指し、群分離後の各群の精製及び処理に関する技術開発、抽出溶媒及び試薬の再使用技術開発試験等を進める。

② 消滅処理システムの研究開発

これまでにADSの炉概念検討、消滅処理サイクルの検討を実施して、現行軽水炉の1/4熱出力規模の消滅処理専用システム1基で年間当たり軽水炉10基分からのMAを消滅できるシステム概念を得た。また、ADSの設計に資するために、アクチニド及び高エネルギー核データの評価・整備及び設計コードシステムの開発を進めた。

今後は、消滅処理サイクルの実用化に向けて、MA-LLFP消滅炉心特性の最適化、加速器駆動未臨界炉ハイブリッドシステムの制御、ビーム窓・ターゲットの開発等に関する研究・開発を進める。

また、現在、世界最強の中性子散乱研究用の核破砕中性子源開発の一環として、出力1MW（後に7MWに増力の予定）のパルスビームを発生する加速器の開発を進めている。今後、ADS実用化に必要な数10MW規模のビーム出力を達成するために、さらなる大電流化、ビームロス低減化とともにCW（デュティ 100%）化、信頼性向上等を図る必要がある。また、ADSを使った消滅処理システムの実証に向けてADSの基礎工学的な実験並びに実験炉設計に必

要なデータ及び計算コードの整備・開発を進める。

③ 窒化物燃料の研究開発

消滅処理用の燃料としては、優れた核的熱的特性をもち、かつ、新しい再処理技術である乾式法を適用できる窒化物を第一候補に採用している。アクチノイド窒化物は、相互に良く固溶しあうので、燃料の安定性の観点からもMA消滅に適している。

窒化物燃料は、優れた特性をもつ燃料であるが、酸化物などと比べて経験が少ない。このため、原研は、窒化物燃料及び熔融塩電解を主プロセスとする乾式再処理技術に係るデータベースを拡充するとともに、Amを含むMA窒化物燃料の照射データの蓄積、MAからの放射線及び発熱を考慮した窒化物燃料製造及び取扱い技術の開発、N-15の経済的濃縮法の開発、経済性の評価等を進める。

なお、窒化物燃料は、その優れた特性を活用し、高速増殖炉用の高性能燃料として利用することも可能である。MA消滅用燃料と共通する技術基盤を有することから、MA消滅用窒化物燃料の開発で得られる成果は、高速増殖炉の燃料サイクル技術開発にも広く利用できるものと考えられる。

(2) 評価基準

群分離・消滅処理技術については、以下の評価基準を踏まえて研究開発を進める。

① 経済性

実用化には、経済性が重要な鍵になることを認識して研究開発を進める。現在の0次オーダーの経済性試算では、階層核燃料サイクルによる群分離・消滅処理導入による発電コストの上昇はおよそ5%程度となると考えられる。今後さらにコストの低減を目指した技術開発を進める。

② 資源

高レベル放射性廃棄物に含まれるU、Pu、MA(Np、Am、Cm)を分離して、核分裂反応を利用して消滅処理し、その廃熱を用いて発電することは、廃棄物のリサイクル利用と見ることができる。また、Sr-Csの熱源利用、稀少金属白金族元素の有効利用の実現性を将来課題として検討する必要がある。

③ 環境負荷低減

原子力エネルギー利用の課題の一つは、放射性廃棄物の低減化の努力であ

る。高レベル放射性廃棄物に関しては、現在、ガラス固化、深地層処分の方針で必要な技術開発が進められているが、マイナーアクチニド(MA)と長寿命核分裂生成物(LLFP)の処分に関しては、これらの蓄積量を可能な限り減用し、長期的放射性毒性を低減して環境への負荷を軽減することが必要である。

使用済み燃料の毒性指数がその燃料を製造する際に用いたのと同量の天然ウラン（燃料1トンを製造するには天然ウラン約5トンが必要）の毒性と同等になるのに要する時間は、消滅処理を行わない場合には2万年以上である。一方、消滅処理を導入することによりこの時間を大幅に短縮することができ、99.5%以上の消滅率を達成できれば数百年で天然ウラン相当の毒性に戻すことができる。また、将来の原子力発電設備の導入規模に見合った消滅処理システムを導入することによって、MAの蓄積量を抑制し一定にすることができる。

（3） 効率的な研究開発

① 実用化の見通し及びそのために解決すべき課題

群分離研究では、主工程のプロセス成立性実証の段階にあるが、プロセスの更なる効率化を図ると共に、より経済的なプロセスに改善することが重要である。実用化に向けては、プラントとしての成立性確認を目指し、群分離後の各群の精製及び処理に関する技術開発、抽出溶媒・試薬の再使用技術開発試験等を進める必要がある。

消滅処理研究では、ADSを軸とした消滅処理サイクルの実用化に向けて、サイクル機構との協力によりMA窒化物燃料及びLLFPターゲット材の照射データ蓄積、窒化物燃料製造・取り扱い技術の開発等を進める。

また、大強度陽子加速器の開発については、原研の中性子科学研究計画と高エネルギー研究機構の大型ハドロン計画との統合計画の一環として進める。

② 関連する研究分野との協力

国内ではオメガ計画の下で原研、サイクル機構及び電中研が核種分離・消滅処理の研究を分担して進めてきた。分離・消滅技術開発研究には、長期的な取り組みが必要であり、基礎・基盤的な多くの技術課題について協力して解決を図ることが肝要である。3機関での研究協力に基づき、より一層進めていくこととする。シナリオ研究と要素技術研究について、それぞれの協力の課題を以下に示す。

1) シナリオ研究

イ、分離・消滅処理導入シナリオ

- ・導入効果
- ・地層処分との整合性研究

ロ. 要素技術研究

- ・核データ、炉物理：
 - 核断面積データ、炉物理データ、燃焼データの評価・整備（共同、大学も含む）
- ・分離技術：新抽出剤(原研)、希土類分離技術(共同)、超臨界抽出技術(原研)、乾式分離技術(共同)
- ・燃料・ターゲット技術：
 - MA燃料技術(共同)、LLFPターゲット技術(原研)、物性データの評価、整備（共同、大学も含む）
- ・照射試験：MA燃料照射試験(常陽)、LLFP照射試験(JMTR、常陽)

国外でも盛んに消滅処理システムの研究が行われており、積極的に国際協力を行って効率的に進めることが必要である。

3. 2 低減速スペクトル炉の研究開発

低減速スペクトル炉については、高速増殖炉の導入計画が不透明な状況下で、既に成熟している軽水炉技術に立脚しつつ、現行ブルサーマル方式では不可能なプルトニウム多重リサイクル、ウラン資源の長期的有効利用、長期間燃料を交換しない長期サイクル運転等が実現できる可能性がある。このため、以下の研究開発を実施する。

① 炉心設計研究

安全性の確保を前提として転換比等の炉心性能の画期的向上を目指した炉心概念の創出を進めるとともに、社会的ニーズへの適合性、経済性、安全性等、広範囲な観点から総合評価し、最適概念の構築を行う。

② 設計手法の高度化

炉心設計精度を向上させるため、炉物理及び熱流動設計手法の高度化を図る。特に低減速スペクトル炉では、核設計手法の精度が成立性を支配する要因となるため、汎用的かつ高速・高精度な計算手法を開発する。また、低減速スペクトル炉のような稠密格子体系では、限界熱流束の予測が熱水力設計上の重要課題である。既存の予測モデルは主として現行炉心体系のデータに基づいて作

成されているため、稠密格子体系にそのまま適用することはできない。このため、将来の炉心形状変更等にも柔軟に対応できるように、限界熱流束の機構論的予測モデルを開発する。

③ 原子炉システムの設計研究

低減速スペクトル炉は基本的には現行軽水炉システムに準拠し、炉心の性能を向上させるものであるが、炉心の稠密化、ボイド反応度係数の相違等、炉心の熱流動的及び炉物理的特性が変化するので、通常運転時及び事故時の安全性については別途検討する必要がある。特に炉心構成上の特性から再臨界事故の可能性も考慮する必要がある。このため、安全性評価解析を行うとともに、必要に応じて安全設備の変更あるいは受動的な安全設備等の新技術採用も含めて原子炉システムの改良設計を実施する。

④ 核特性の実験的検証

低減速スペクトル炉心では、核的特性が現行軽水炉と異なるとともに、転換比、ボイド反応度係数等の設計マージンが小さいため、設計の詳細化を進めるためには臨界実験によって核的特性を検証する必要がある。このため、TCAを用いてMOX燃料による臨界実験を実施する。

⑤ 熱特性の実験的検証

低減速スペクトル炉の熱流動的成立性を確認するためには、稠密炉心形状における限界熱流束データ及び冷却材喪失事故等の事故時炉心冷却特性データの取得が必要となる。このため、既存のLSTF及び大型再冠水装置等の大型試験装置を活用した熱流動実験を実施する。

⑥ 試験炉の設計検討

低減速スペクトル炉は、燃料集合体形状、冷却条件、核的特性等、現行軽水炉とは異なる炉心特性を有するため、その実用化に際しては炉心燃焼特性データの取得が不可欠である。このため、炉心燃焼特性試験が実施できる試験炉の設計検討を行う。

⑦ 燃料サイクル全体システムの検討

低減速スペクトル炉ではMOX燃料のリサイクル利用を前提としており、その実現には、MOX燃料製造・再処理等の燃料サイクル上の技術的課題を解決することが前提となる。従って実用化の可能性を判断するためには、燃料サイ

クル全体のコスト評価を行うとともに、将来のエネルギー需要動向を考慮した導入シナリオを確立する必要がある。

3. 3 高速増殖炉開発に係る基礎基盤研究

原子力技術に対するニーズの一層の多様化や高度化に対応し、技術シーズの探索、体系的な研究開発の積み重ね等により、将来の新しい原子力技術体系を構築していくことが求められている。ウラン資源の有効利用、エネルギーセキュリティの確保の観点から、新しい原子力技術体系に占める高速増殖炉の重要性は変わらない。我が国の原子力研究の中核研究機関として、原研には、原子力技術体系の構築のため将来型原子力システムの検討を進めると共に、そのシステムの技術的成立性評価のために必要となる信頼性の高いデータベースの構築が期待されている。

信頼性の高い各種データベースの整備・拡充、また、必要な要素技術の研究開発・実証のため、核データ整備、炉物理実験、窒化物燃料開発、再処理技術開発等を進める。これらの研究は、高速炉のみならず我が国の将来の原子力技術を支える基礎・基盤研究として位置付けることができる。

(1) 評価済核データファイルの整備

核データは、核分裂炉又は核融合炉の開発・設計、遮蔽計算等、原子力開発を進める上での基礎データとしてのみならず、加速器工学、医学、宇宙工学等の広い分野での応用が期待されている。中性子、陽子、ガンマ線等と物質との各種反応断面積を評価済核データファイルJENDL（汎用及び特殊目的データファイル）として整備し有効利用を促進すると共に、核データの測定、データ処理システムの整備・充実に努めてきた。

最新の評価済みファイルJENDL3.3の作成を進める他、適用範囲の拡大を目指して、以下の特殊ファイルの整備・拡充を図り、原子炉を用いた超ウラン元素のリサイクル、或いは、加速器を用いたマイナーアクチニド核種の消滅処理システムの設計精度向上に資する。

・ JENDL高エネルギーファイル

加速器消滅処理システムの検討に必要な、高エネルギー中性子及び陽子の核データ

・ JENDLアクチニドファイル

高燃焼度化に伴い必要となる高次アクチニド核種の核データ

・ 共分散ファイルの整備

(2) 炉物理実験

Pu燃料を利用した我が国唯一の高速炉臨界実験装置（FCA）を用いて、新型燃料高速炉等の臨界実験を、国内の大学、研究開発機関、電力等との共同研究、又は、国際協力として実施してきた。炉心構成に柔軟性を持つ等の特徴から、新型炉の臨界実験、標準スペクトル場としての有効利用等が期待されている。

今後は、He冷却高速炉等の新型炉、加速器駆動未臨界炉等の炉心特性実験を進める。また、増殖性能に係わる（C8/F9）反応率比、安全性評価に係わる反応度効果（Naボイド効果、ドップラー効果）、臨界性等についての臨界実験を更に進めると共に、これまでの実験データを積分ベンチマークデータとして整備し、設計手法・核データ評価に資する。

(3) 窒化物燃料の開発

窒化物燃料は、酸化物燃料の特徴（高融点）と金属燃料の特徴（高重金属密度、高熱伝導度）とを併せ持つ将来型燃料として期待されている。

これまでに、窒化物燃料に関し、燃料製造技術として、炭素熱還元法によるU-Np-Pu系窒化物の調製法を確立した他、ゾルゲル法による高純度窒化物燃料粒子の製造に成功した。また、炭素熱還元法によるAmNの調製試験に着手した。更に、燃料特性、燃料挙動の研究を進め、窒化物が酸化物と比べて10倍程度高い熱伝導度を有すること、また、全率固溶性をもつこと等から組織安定性が高いこと等を確認した。照射安定性が期待できる熱安定型燃料ペレットの製造を行うと共に、JMTRでの照射試験によって、FPガス放出が極めて少ない等、その優れた性能を実証した。

今後の展開としては、燃料製造技術の高度化の他、事故時挙動等の評価に必要な2000K以上の超高温での窒素解離現象の測定を進めると共に、不活性マトリックス系窒化物の熱特性測定等を継続する。

(4) 乾式再処理技術の開発

各種の燃料に応用可能な技術としての柔軟性、また、コンパクトな施設設計の可能性を持つことから経済性の向上への期待、等の観点から将来技術として乾式再処理の開発を進めてきた。

グラム規模でのU-Np-Pu系窒化物の溶融塩電解によって同金属を陰極に回収することに成功し、窒化物燃料が乾式再処理に適用できることを実証した。また、溶融塩／溶融金属間の分配、アクティニドの電極反応等の乾式再処理プロセス構築と評価に必要な基礎データを蓄積した。更に、N-15濃縮窒素のり

サイクルを念頭に置いた新しい再処理概念「LINEX」を提案した。

今後の展開としては、模擬FP-U-Np-Pu系窒化物を50g(Pu量)規模で熔融塩電解し、窒化物燃料の乾式再処理への適用性を実験室規模で明らかにすると共に、乾式再処理プロセスの設計・評価に不可欠な熔融塩中でのアクティニドの挙動等に関するデータを取得していく。また、熔融塩中での窒素の挙動解明等、N-15濃縮窒素のリサイクルに係る研究として、アメリシウムの高温化学研究を進める。

4. まとめ

原子力長期利用が国民に受容されるためには、高レベル廃棄物処分の問題解決が必須である。そのため、原研は4群分離及び加速器駆動未臨界炉による消滅処理技術の研究開発を進める。

プルトニウムの有効利用方法の確立に必要な高速増殖炉研究に関しては、原研は、核データの整備、臨界実験、超ウラン元素の特性確認等の基礎基盤研究を進めることにより貢献する。

一方、軽水炉でのプルトニウムリサイクル技術として、原研は、低減速スペクトル炉の研究開発を進める。

以上の研究を、原研は産官学の諸機関と緊密な連携を図りつつ研究を進め、原子力の次世紀を超える長期利用に貢献する。