

# 核種分離・核変換を中心とする放射性廃棄物の 資源利用と環境負荷低減技術に関する調査

(財) 原子力研究バックエンド推進センター 前田 充

## 1 調査の概要

### (1) 調査の目的

核種分離・核変換 (P-T) 技術について、近年、関心が急速に高まっている。我が国における大強度陽子加速器施設計画 (J-PARC 計画)、FBR サイクル実用化戦略調査計画において主要研究テーマとして取り上げられている。世界的にも米国の G-NEP 計画、ロシアの提唱に始まる国際原子力機関 (IAEA) の INPRO 計画等においても同様の概念が目標課題の一つに取り上げられている。このような背景を踏まえ、本調査では、P-T 技術について、技術の概要、研究開発の現状、技術の意義、実用化上の課題と実用化の見通し等について調査を行ったものである。

### (2) 調査項目

主たる調査項目は、①高レベル廃棄物を中心とする放射性廃棄物の資源利用の調査、② P-T 技術の概要と研究開発の現状と動向の調査、③ P-T 技術の分析等及び④技術開発の進め方に関する提言である。①の高レベル放射性廃棄物の資源利用では、高レベル廃液中含まれる主要な放射性同位元素に関する線源、熱源等の各種の利用例、材料資源等の今後の利用の考え方についてとりまとめた。②～④では、分離、燃料、核変換の要素技術及び P-T システムについて技術全般を整理分析した後、国内外における研究開発の現状及び動向についても調査した。また、加速器駆動システム (ADS) を中心とする階層型燃料サイクルに焦点を当てながら、P-T 技術の意義及び実用化上の課題と課題克服の見通しについて専門家の意見を聴取した。それらをもとに P-T 技術の実用化に向けた研究開発の進め方について提言をまとめた。

### (3) 調査の進め方

調査は、これまで P-T 関連研究に携わってきた日本原子力機構 (JAEA)、特に旧日本原子力研究所の現役研究者及び OB 研究者の指導と協力を得ながら進めた。このため専門委員会を設け、意見交換や討論を行いながら調査を進めた。P-T 技術の実用化上の課題と課題克服の見通しでは専門家としての率直な意見を調査した。研究調査者は、それらの結果を基に主要な調査結果に関する評価分析と動向等の調査を行うとともに研究開発の進め方に関する提言を行った。

## 2 調査結果

### (1) P-T 技術の概要

核変換システムとして、①軽水炉系から高速炉 (FBR) の段階的導入を前提に発電用高速炉において行う先進的高速炉リサイクルシステムと、②軽水炉、高速炉を含む発電炉用システムとは別の核変換専用のシステムにおいて行う階層型燃料サイクルの二つの概念が

提案されている。

核種分離の主な対象は、長寿命のマイナーアクチニド(MA)元素及び核分裂生成物(LLFP)、及び Sr、Cs 等の発熱性核分裂生成物であり、高レベル廃液に対する湿式分離技術、使用済燃料に対するピュレックス再処理法改良技術及びピュレックス法以外の湿式再処理技術、また核変換後の使用済燃料等に対しては乾式分離技術について研究開発が行われている。

核変換燃料として酸化物、金属、窒化物等が検討されており、高 MA 添加率の燃料の他、新たな MA の生成を抑制するイナータマトリックス燃料、LLFP の核変換のためのターゲット燃料のような新たな燃料概念についても研究開発が行われている。なお ADS を中心とする階層型燃料サイクルに関連して MA 添加率の高い不均質燃料の研究が行われている。

## (2) 研究開発の現状と動向

P-T 研究への関心、研究層は世界的規模で確実に増加している。P-T 技術に対する認識は、15 年前の消極的な受け止め方から、より積極的な評価に変わってきている。また P-T 技術は新たなエネルギー政策や巨大科学技術計画において主要な研究開発項目として積極的に取り上げられている。

研究開発の進捗度は分野間で不均衡であり、核種分離>核変換>核変換燃料となっている。核種分離では湿式技術を中心とした MA の分離プロセスが研究開発の大半を占めている。核変換における FBR と ADS の位置付けは目標とする P-T の実用化時期に対応しており、早期の実用化を目指す場合には FBR への期待が大きくなっている。核変換燃料研究の進捗は限られたレベルにとどまっており、MA 燃料科学の基礎データ及び照射実績の不足がネックとされている。核変換燃料のリサイクルは P-T 技術実用化上不可欠であるにも関わらず、核変換燃料サイクルに関する研究は極端に不足している。

## (3) P-T の意義・効果

P-T 技術に対して、①地層処分に関する意義、②バックエンドオプション多様化等のその他の技術的意義及び③放射性廃棄物処分に係る倫理的・社会的意義などに大別される多くの期待が示されている。①には廃棄物量の削減、潜在的放射能毒性の低下と毒性継続時間の短縮化、被ばく線量や被ばくリスク低減の可能性等が含まれる。最近では、発熱性の Sr や Cs の分離による処分場面積の有効利用や処分場利用期間の延長効果を強調する意見も多くなっている。

なお、MA のリサイクルによる資源節約効果は 1%程度に留まる。一方、経済的影響については、発電コストの増加は数%程度に留まるとする試算結果があり、また発電用高速炉での核変換シナリオと階層型サイクルでの ADS 核変換シナリオとの比較では両者の発電コストの差は小さく、更にワンスルーシナリオやプルサーマルシナリオに比べても大きな遜色はないとする経済協力開発機構(OECD)の検討結果がある。

## (4) 実用化のための課題と見通し

高レベル廃液や酸化物燃料からの分離については、回収率、除染係数、溶媒のアルファ線損傷、抽出容量の大きな抽出剤の開発等の課題はあるが基本的に湿式法により克服可能

であり、最大の課題は経済性を念頭においた分離システムの最適化である。乾式分離法は、溶媒損傷、臨界管理等の面で湿式法にない特徴を有しているが、主分離工程を中心とする基礎研究段階にとどまっており、実用化性を評価するには余りにもデータや実績が不足している。

ADS は、加速器と未臨界原子炉を結合させる革新的な原子力システムであり、加速器、核破砕ターゲット、未臨界炉心の他、安全性や経済性等に係る総合的な課題等、多くの技術的課題が存在する。しかし、これら課題解決のための提案もまた数多く成されており、実験を経た基礎データの取得や経験の蓄積によってその技術的見通しを更に深めることが期待できる。

核変換燃料及び核変換燃料サイクルについても多くの課題が残されており、その多くが極めて基礎的な検討段階に留まっている。燃料サイクル共通の課題としてキュリウム(Cm)等に係る中性子放出、発熱、アメリシウムの揮発性等に係る技術的課題を克服する必要がある。高 MA 含有燃料に関する課題としてはヘリウム(He)によるスウエリング、He 放出、酸素ポテンシアル仕様の最適化などがある。また不活性マトリックス燃料の特異な照射挙動の把握も重要となる。しかし、酸化物燃料を除いて、燃料物性、照射試験データは極めて限られている。

核変換燃料サイクルについては、再処理、再加工及び廃棄物処理処分の見通しを得る必要があるが、再処理を除いて、殆ど未検討であり、課題の抽出やその克服の可能性を検討できる段階にはない。再処理についても、高温冶金法について、準工学規模でのウラン回収の見通しが得られているが、プルトニウム、MA の分離回収については、実験室規模での原理実証に留まっている。

以上のように P-T システムの要素技術の多くは基礎研究段階にあり、克服すべき課題が数多く残されている。実用化の見通し時期について、2003 年の IAEA の評価報告書では、分離：5-10 年（湿式技術）、10-15 年（乾式技術）、燃料及びターゲット製造：10-15 年、変換炉への装荷：20-25 年（高速炉）、25-40 年(ADS)と想定している。また、仏国国家評価委員会(CNE)の報告書では、工業化は今世紀半ば以降としている。

## 6.3 今後の研究開発について

### (1) 長期的取り組みの必要性

P-T 技術は原子力エネルギー利用の根本的課題の一つを解決できる可能性を有し、放射性廃棄物による環境負荷を低減する切り札となり得る。しかし、実用化には核種分離、核変換燃料製造及び核変換に関連する多種多様な技術的課題を解決する必要がある、その多くが大きな技術的ブレイクスルーを前提としている。限られた変換効率から核変換燃料のリサイクルは不可欠であり、しかも P-T 実用化において最も高い障壁が予想され分野であり、その見通しなしには P-T 技術の実用化が達成できるとはいえない。個別の要素技術の開発に加え、システムとしての成立性を重視した長期的取り組みが不可欠であり、実用化目標時期を適切に設定して着実に取り組むことが重要と考える。

## (2) ADS を中心とする階層型燃料サイクルの研究推進とシステム分析の検討

発電炉用システムとは別の核変換専用のシステムにおいて核変換を行う階層型燃料サイクルは多くの優れた特徴を有する。発電炉用システムと独立に MA 等を限定されたシステム内だけで取り扱うことは、経済性等の発電システムとしての要求条件や変動要素等の影響を回避できる可能性があり、また MA 等が多数の炉や燃料サイクル内に拡散することがないことから燃料及び廃棄物の最終管理、安全確保、核拡散防止等の観点から多くの利点が期待される。また ADS 核変換は、MA 燃料の装荷率、核変換効率、安全性等から原理的、本質的に優れた革新的技術である。

幅広い観点からシステム分析と比較研究を行い、長短所を定量的に示すとともに、システム及び ADS としての要件と課題の抽出を行い、定量的な目標を示す必要がある。そのためには、実用規模を想定した概念設計検討が極めて有効な手段となる。また、システム分析を通じ、核変換と核変換燃料サイクルとの調和（最適化）の観点から、目標条件を見直すことも重要である。

## (3) 乾式分離技術及び燃料再加工技術の評価と戦略的な研究展開

候補技術の選定自体が困難な開発段階にある核変換使用済燃料の再処理、核変換燃料再加工についても、上と同様の取り組みが重要と考える。複数のケーススタディ的概念設計研究を行って、課題の抽出や候補技術に求められる要件を定量化する必要がある。候補技術は、乾式技術を中心に、中性子等の高い放射線下で毒性の高い発熱性物質を取り扱うことを念頭において、除染係数よりも回収率に力点を置いた、また遠隔操作に適した、簡素な再処理、確実な再加工技術が求められるべきである。

## (4) 核変換と核種分離とのデカップリングを想定した取り組みの検討

OECD/NEA や IAEA の専門家も指摘しているが、核種分離と核変換とをデカップリングして考えることにより、多様な P-T システム、新たな放射性廃棄物管理方策への道が拓かれる期待がある。

燃料としての安定な化学形を見出し難いヨウ素( $^{129}\text{I}$ )、核変換燃料とするために同位体濃縮( $^{135}\text{Cs}$ )が必要なセシウム、核変換燃料サイクルでの取り扱いが困難な Cm を核変換する是非について十分に吟味する必要がある。

## (5) 不可欠な国際協力による取り組み

既に実施されているが、P-T の取り組みにおいて国際協力、国際共同研究は不可欠である。欧州原子力共同体(EURATOM)のプロジェクトでは、EU 諸国を中心する共同プログラムとして、広範囲の P-T 共同研究が数次年度にわたって推進されてきており、大きな成果を上げつつある。より幅広い協力として全世界的な共同研究プログラムを立ち上げることを強く期待したい。