

分離変換技術の基礎と技術動向

北村修ⁱ 溝内秀男ⁱⁱ

Technological Trend in Partitioning and Transmutation

Osamu KITAMURA Hideo MIZOUCHI

原子力発電に伴う“核のゴミ”として地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物の減容化と有害度の低減の実現に向けて、分離変換技術には長寿命核種を短寿命核種または安定核種に核変換するための重要な役割が期待されている。本報では、分離変換技術の基礎と技術動向について紹介するとともに、当部が主力の業務の一つとして取り組んでいる数値シミュレーション技術の果たす役割についても述べる。

(キーワード): 分離変換技術, 高レベル放射性廃棄物, マイナーアクチノイド, 高速炉, 加速器駆動システム

1 はじめに

東日本大震災の発生に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故から8年余りが経過した現在、日本全国で5原発9基が稼動しており¹⁾、約17,000トンを超える使用済み燃料が国内に存在している²⁾。これを再処理することで、燃料として再利用が可能なウランとプルトニウムが取り除かれるが、残った高レベル放射性廃棄物は“核のゴミ”とも呼ばれ、数百m以深の地層処分が方法論の一つとして有望視されている。将来世代にわたって負の遺産を可能な限り引き継がないためにも、廃棄物の減容化と有害度の低減は喫緊の課題である。

一方、2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され³⁾、「放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その減容化・有害度低減のための技術開発を推進する。具体的には、高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的な人的ネットワークを活用しつつ推進する。」と謳われているとおり、放射性廃棄物の減容化・有害度低減の前処理として、分離変換技術は国内外で実用化を目指して精力的に研究が進められている。

本報では、分離変換技術の基礎と技術動向について紹介するとともに、当部が主力の業務の一つとして取り組んでいる数値シミュレーション技術の果たす役割についても述べる。

2 分離変換技術とは

原子力発電においては、主にウラン(U)とプルトニウム(Pu)を主成分とした二酸化ウラン(UO₂)や混合酸化物(MOX)燃料が利用されており、使用済み燃料にはU同位体(約94%)、Pu同位体(約1%)、UやPuが核分裂して生じる核分裂生成物(FP, 約4%)、U等が中性子を捕獲して生じるNp, Am, Cmなどのマイナーアクチノイド(MA, 約0.1%)が含まれている。このうち、UとPuはエネルギーとして再利用されるが、残りのFPとMAは高レベル放射性廃棄物と呼ばれ、地層処分の対象となる。

分離変換技術は、廃棄物の減容化と有害度の低減を目的として、高レベル放射性廃棄物中に含まれる様々な核種をいくつかのグループに分離するとともに、半減期の極めて長い長寿命核種を短寿命核種もしくは安定核種に核変換することで地層処分を効率的に行うものである。

長寿命核種でかつ人体への悪影響が大きいものと

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム シニアコンサルタント 博士(工学)

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム シニアコンサルタント 博士(理学)

して、MA では ^{237}Np (半減期 214 万年), ^{241}Am (半減期 433 年), ^{243}Am (半減期 7370 年), ^{244}Cm (半減期 18 年), FP では ^{129}I (半減期 1570 万年) が主として挙げられる。このうち、MA は中性子と原子核との核反応の一つである核分裂反応により分離変換され、その有害度が低減される。さらに、この核分裂反応においては連鎖反応に伴って大きなエネルギーが発生するため、同時に発電等にエネルギーを有効利用できるメリットがあり、MA を核変換の対象とすることがエネルギー効率性の観点から非常に有効であると考えられる。

分離変換技術の有効性の示唆の一例として、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度の評価事例を以下に示す⁴⁾。「①使用済み燃料 (U, Pu, MA, FP を含む)」、この中から U と Pu を再処理により取り除いた「②高レベル放射性廃棄物 (MA, FP を含む)」、「③分離変換後の廃棄物 (FP のみ)」がそれぞれ天然ウランの潜在的有害度を下回るまでに要する期間を比較したところ、「①使用済み燃料」は約 10 万年、「②高レベル放射性廃棄物」は約 1 万年であるのに対して、「③分離変換後の廃棄物」では数百年まで短縮されることが報告されている。

代表的な分離変換システムとしては、核変換専用の小規模な燃料サイクルを用いる「階層型分離変換システム」と、核変換に発電炉そのものを利用する「発電用高速炉型分離変換システム」の 2 種類が提案されている。日本においては、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が中心となり、前者の階層型分離変換システムを主要候補概念として将来的な実用化に向けての検討を進めている。次節では、この階層型分離変換システムの概要と特徴について説明する。

3 階層型分離変換システム

図 1 に、階層型分離変換システムの概念図⁵⁾を示す。商用発電サイクルに分離プロセスと専用の核変換サイクルを付設したシステムであり、核変換には主に加速器駆動システム (ADS : Accelerator Driven System) が用いられる。

商用発電サイクル中の発電用原子炉で消費された使用済み燃料は、再処理施設の分離プロセスにおいて Pu, FP, MA にそれぞれ分離される。このうち、Pu は分離・回収した後に燃料として再利用される。また、FP と MA の一部は高レベル放射性廃棄物とし

て廃棄物処分 (地層処分) される。残りの MA は核変換サイクル中において MA 含有燃料として核変換専用システムに送られ、短寿命核種または安定核種に核変換された後に廃棄物処分されることになる。

ADS の主な特徴は、以下のとおりである。

- ・炉心を未臨界状態に保ったまま稼働させるため、加速器の運転を止めれば炉心は直ちに停止することから安全性に優れる。
- ・比較的コンパクトなサイクルに MA を閉じ込めることで、核変換を効率良く行うことができる。
- ・様々な形式の MA 含有燃料に適用できる。
- ・MA 濃度の高い燃料を使用できる可能性がある。

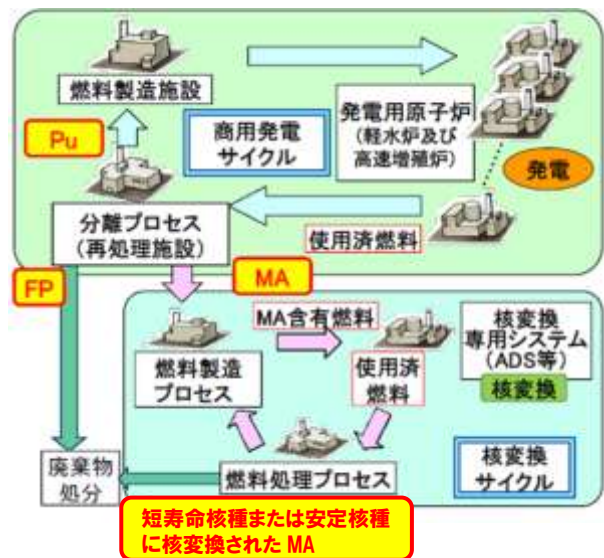


図 1 階層型分離変換システムの概念図⁵⁾

図 2 に、ADS の原理⁵⁾を示す。超伝導陽子加速器で加速された陽子は、核破砕ターゲットの重核種と核破砕反応を起こして、多くの高速中性子が周囲に放出される。これにより、燃料に含まれる MA は核分裂反応を生じて短寿命核種または安定核種に核変換されることになる。

陽子ビームのエネルギーは 1.5GeV (eV : 電子ボルト), 最大出力は 30MW であり、熱出力は 800MW が想定されている。また、核破砕ターゲットと炉心冷却材には、以下の特徴を有することを理由に鉛ビスマス共晶合金が用いられる。

- ・融点 (124°C) から沸点 (1670°C) まで幅広い温度範囲で液体であり、取り扱いが容易。
- ・化学的に不活性。
- ・入射陽子あたりの発生中性子が多い。
- ・中性子の吸収が小さい。

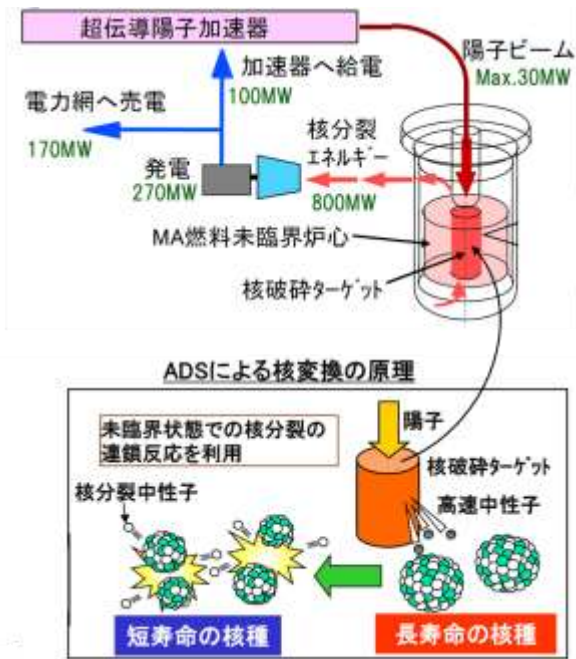


図2 加速器駆動システムの原理⁵⁾

図3に、日本原子力研究開発機構が作成したADSを用いた核変換技術のロードマップを示す²⁾。将来的には、熱出力800MWを想定した実用ADSプラントの実現を目指して、2030年代までに実用規模へ展開できる知見・経験を得ることが目標とされている。

現状では、大強度陽子加速器の開発、流動による腐食や高温等の厳しい環境下に晒される液体鉛ビスマス核破砕ターゲットの研究開発、未臨界炉心の炉心特性予測技術の開発をはじめとして、克服すべき多くの技術課題があり、主に以下のテーマに関して基礎研究段階にあるといえる。

- ・液体鉛ビスマス合金の利用に関わる基礎研究
- ・炉心解析コードの開発
- ・MA装荷未臨界炉の炉心特性の研究
- ・大強度陽子加速器の運転安定性向上の研究

また、研究レベルを基礎研究段階から工学研究段階まで引き上げるための核変換実験施設(TEF: Transmutation Experimental Facility)の建設に向けた要素技術開発が推進されている。図4に、大強度陽子加速器施設J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)と接続した核変換実験施設の概要を示す⁶⁾。当施設は、核破砕ターゲットの工学的技術課題の解決のためのADSターゲット試験施設(TEF-T: ADS Target Test Facility)と、MA装荷未臨界炉の炉心特性および予測精度を検証するための核

変換物理実験施設(TEF-P: Transmutation Physics Experimental Facility)の2つから構成されている。



図3 加速器駆動システムを用いた核変換技術のロードマップ²⁾



図4 大強度陽子加速器施設と核変換実験施設⁶⁾

4 シミュレーション技術の役割

加速器駆動システムを含めた分離変換システム的设计・開発においては、熱流動特性、炉心核特性、燃料挙動特性、腐食特性、構造健全性等を予め精度良く予測することが必要不可欠であり、数値シミュレーション技術の向上に期待が寄せられている。以下に、その代表的な事例を示す。

辻本ら⁷⁾は、加速器駆動システムにおいて核破砕ターゲットおよび冷却材として用いられる鉛ビスマス共晶合金に関する研究や、ビーム窓候補材料に対する照射試験等のデータや知見に基づき、ADS概念の成立性について検討している。炉心の核・熱設計では、運転期間中の燃料被覆管およびビーム窓の健全性評価を行い、温度、腐食、未照射条件での構造強度が高い成立性を有することを確認した。また、

材料特性に対する照射影響は ADS 使用条件下ではそれほど大きくないことを示した。ADS の安全性検討では、確率論的安全評価および基準外事象の過渡解析を行い、炉心損傷や再臨界の可能性が非常に低いことを明らかにしている。

秋本⁸⁾は、鉛ビスマス冷却加速器駆動核変換システムの熱設計解析コードを整備し、鉛ビスマス共晶合金の单相流圧力損失解析、窒化物燃料集合体の熱伝達解析、蒸気発生器熱伝達解析を行った。また、秋本ら⁹⁾は ADS の炉心部分を詳細にモデル化し、炉心内の 3 次元流体力学混合が炉心冷却に与える影響を評価している。

菅原ら^{10), 11)}は、加速器駆動未臨界システムの炉心概念の設計検討を行うため、炉心解析コードシステム ADS3D を開発した。ADS3D は、決定論に基づく 3 次元体系の中性子輸送計算、燃焼計算、さらに ADS 特有の燃料交換を考慮することが可能である。これにより、制御棒や可燃性毒物などの未臨界度制御機構を考慮した幅広い ADS 炉心概念の検討が可能となっている。

5 おわりに

以上で述べてきたように、高レベル放射性廃棄物の減容化と有害度の低減の実現に向けて、分離変換技術は長寿命核種を短寿命核種または安定核種に核変換する役割を担う重要な技術である。この分離変換システムの設計・開発においては、熱流動特性、炉心核特性、燃料挙動特性、腐食特性、構造健全性等を予め精度良く予測するための数値シミュレーション技術の向上が必要不可欠となっている。

当部では、1970 年代初めから 50 年近くにわたって培ってきた熱流体解析や構造解析の技術をベースにして、熱流動特性、炉心核特性、燃料挙動特性のそれぞれの解析を強結合した連成解析（例えば、文献¹²⁾など）や、腐食特性、構造健全性等の評価に関する数値シミュレーションの業務実績が豊富であり、当該分野の技術開発に貢献していきたいと考えている。

引用文献

- 1) 資源エネルギー庁 HP,
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf
- 2) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会, 分

- 離変換技術総論, 日本原子力学会 (2016)
- 3) 第 5 次エネルギー基本計画, 平成 30 年 7 月(2018),
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
- 4) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会, 解説シリーズ, 長寿命核種の分離変換技術の現状, 第 1 回 分離変換の意義と分離変換システム, 日本原子力学会誌, Vol.59, No.8 (2017)
- 5) 日本原子力研究開発機構, 加速器駆動核変換システム(ADS)に関する研究開発の現状と将来計画, 高エネルギー加速器科学研究奨励会第 7 回特別講演会, 平成 29 年 10 月 (2017),
<http://www.heas.jp/lecture/files/tujimoto.pdf>
- 6) 日本原子力研究開発機構, 放射性廃棄物処分に関する研究開発について, 資源・エネルギー戦略調査会 放射性廃棄物処分に関する小委員会, 2014 年 2 月 12 日 (2014), https://www.jimin.jp/policy/policy_topics/pdf/pdf145_1.pdf
- 7) 辻本ら, 鉛ビスマス冷却加速器駆動システムを用いた核変換技術の成立性検討, JAEA-Research 2010-012 (2010), 日本原子力研究開発機構
- 8) 秋本, 鉛ビスマス冷却加速器駆動核変換システム用熱設計解析コードの整備, JAEA-Data/Code 2014-031, 日本原子力研究開発機構 (2014)
- 9) 秋本, 菅原, 鉛ビスマス冷却加速器駆動システムの熱設計 (1) 定格運転条件に対する熱流動解析, JAEA-Data/Code 2016-008, 日本原子力研究開発機構 (2016)
- 10) 菅原ら, 加速器駆動核変換システム用三次元炉心解析コード ADS3D の整備, JAEA-Data/Code 2014-024 (2014), 日本原子力研究開発機構
- 11) Sugawara, T. et al.: Development of three-dimensional reactor analysis code system for accelerator-driven system, ADS3D and its application with subcriticality adjustment mechanism, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.53, No.12 (2016)
- 12) 石津ら, 高速炉炉心損傷事故解析コード ASTERIA-FBR の開発(5)ULOF 起因過程の実機解析, 原子力学会 2014 年春の年会, 東京, 2014 年 3 月 (2014)