

<研究専門委員会報告>

## 炉物理部会「次世代炉物理実験施設活用方策」検討会報告 及び「アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験施設」

東北大学／岩崎智彦

JAEA／辻本和文

### 1. はじめに

原子炉物理学や核データの研究は、原子炉・核燃料サイクルなど原子力利用の基盤を支える分野として発展してきた。これまで、軽水炉・高速炉・再処理施設の設計・安全性評価などのために臨界実験施設が建設され、多くの成果を挙げているが、これらの多くは建設されてから相当の年月を経過しており、現状のままでは今後の実験ニーズであるマイナーアクチノイド (MA) の核変換技術、プルトニウムの高度利用、高燃焼度化などの様々な概念に対応が困難なことが課題となっている。これらの新たな実験ニーズの中でも、高レベル放射性廃棄物の処分に係る負担の軽減を目的とした分離変換技術を始めとするアクチノイド・マネジメントのための技術は、原子力の持続的利用に欠かせないものであり、原子炉物理学や核データに関する着実な研究が求められている分野である。

分離変換技術の主要構成要素である核変換システムは、核変換対象元素である MA を商業用高速炉に均質に装荷する方式、MA 割合の高いターゲット燃料を非均質に装荷する方式、加速器駆動未臨界システム (ADS) で集中的に核変換する方式など、多様な方式が世界各国で検討されている。MA 核変換システムを実現するためには、原子炉物理や核データの面で基礎実験を行い、これまでに経験の乏しい MA に関するデータを蓄積する必要がある。また、プルトニウムリサイクルに伴う高次プルトニウムを含有する燃料に関する原子炉物理実験や核データ検証も今後不可欠となると考えられる。

平成 20 年度には、原子力委員会研究開発専門部会に分離変換技術検討会が設置され、前回 (平成 12 年) のオメガ計画 (郡分離・消滅処理技術研究開発長期計画) のチェック・アンド・レビュー以降の進捗と今後の研究開発の進め方に関する評価が行われた。検討会報告書 (平成 21 年 4 月) では、核変換システムの今後の研究開発のあり方として、MA を装荷した臨界実験を行う環境を既存施設や国際協力も活用しつつ、整備するべきであることが指摘された。しかしながら、MA や高次プルトニウムを含んだ燃料を用いた炉物理実験を行うには、現存する国内の炉物理実験施設では限界がある。

このような状況に鑑みて、また、学会の立場から、軽水炉・高速炉・新型炉などに必要な炉物理実験のニーズを広く調査するとともに、実験項目や測定目標精度、必要となる実験施設の仕様などについて検討することを目的とし、原子力学会「アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験施設」研究専門委員会が設置された。また、炉物理部会においても、高速炉並びに熱炉に関する次世代を担う炉物理実験装置を用いた研究の提案とともに、これを活用して炉物理の研

究・教育・普及の方策などについて幅広い研究者の意見の集約とその応用を検討する「次世代炉物理実験施設活用方策」検討会が発足し、専門委員会では検討会と合同で活動を行ってきた。

#### 専門委員会メンバー

主査：岩崎智彦（東北大）

幹事：大井川宏之（JAEA），鬼柳善明（北大），卞哲浩（京大），藤村幸治（日立）

委員：岩本修（JAEA），岡嶋成晃（JAEA），小原徹（東工大），佐々敏信（JAEA），

代谷誠治（京大），高木直行（東海大），竹田敏一（阪大），田原義壽（JST），羽様平（JAEA），

山根義宏（名大），山本章夫（名大），吉田正（武蔵工大），若林利男（東北大）

（五十音順，所属は平成 20 年度当時）

専門委員会では，以下の項目についての検討を行った。

1. アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験について，多様なニーズを調査
2. 上記の実験を行うために必要となる実験施設の仕様，性能を検討
3. 新たな炉物理実験施設が備えるべきその他の性能や拡張性等について広く検討
4. 新たな炉物理実験施設の建設時期，施設を共用する際の方法と問題点等についての検討

## 2. 炉物理実験施設に関する現状と検討課題

まず，国内外における炉物理実験施設の現状と今後の計画についてまとめ，炉物理実験の検討課題を示す様々な状況について概観する。

### （1）国内の状況

JAEA における研究開発の状況，分離変換技術の導入効果，欧州での研究動向，J-PARC の現状及びその第Ⅱ期計画である核変換実験施設の検討現状，原子力委員会の研究開発専門部に設置された「分離変換技術検討会」の状況をまとめた。今後の分離変換研究の方向性が重要であり，核変換技術研究に共通する基礎的な微分実験，積分実験が不可欠であること，本委員会ならびに検討会で積極的に勧告・提言を行っていくことが極めて重要であることが議論された。

### （2）海外の状況

欧州を中心とする OECD/NEA/NSC では，傘下には 5 つのワーキングパーティ（核データ，燃料・材料，原子炉システム，臨界安全，燃料サイクル）と 1 つのエキスパートグループ（原子力研究施設のニーズ）が設置されており，将来の高精度炉物理積分実験について，各ワーキングパーティが横断的な支援をしていく方針が示されている。マイナーアクチノイドを用いた実験に必要なアクチノイドについての調達ルート，必要量，取扱技術について議論した。

一方，米国では処分場の複数立地の回避とヤッカマウンテン処分場の効率運用を図ることを目標とし，核燃料サイクル開発，高速炉開発が 2 つのスキーム，トラック 1（産業界主導でプロト

タイプ建設を目指したもの) とトラック 2 (国立研究所による研究開発) の枠組みで米国内の Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) が推進されている。炉工学の研究開発では、積分実験のために ZPPR の再起動が可能な状態にあること、高速炉の研究に必要なインフラ整備が進めようとする動きがある。日本や欧州の原子力産業も積極的に支援しているが、最近のナショナルアカデミーのレビュー、議会の予算案において計画の見直しが勧告されている。

### (3) 検討課題のまとめ

我が国及び諸外国では、主に 1960 年代から、臨界実験装置を用いた炉物理実験が行われてきているが、今後のニーズに応えるためには、大規模な改造などの手当てが必要である。特に、MA や高次プルトニウムを多量に用いた臨界/未臨界実験を行える施設は世界的にもなく、ロシアの BFS-2 において  $^{237}\text{Np}$  の実験がなされたのみである。

最近の、原子力委員会の分離変換技術検討会や OECD/NEA 等の諸活動からも、今後の持続的な原子力利用を支える炉物理実験施設についての検討が求められている状況である。

## 3. アクチノイド・マネジメントに係わる実験のニーズ

1999 年以降継続的に収集を進めてきた J-PARC 核変換実験施設に関する実験ニーズから、軽水炉・高速炉・分離変換技術・新型炉研究など多岐にわたるニーズがあること、また加速器を接続した J-PARC 核変換実験施設独自の核破碎反応及び反応に伴って放出されるさまざまな粒子を用いた研究ニーズがある。

一方、高速炉の設計に要求される解析精度、実験精度について、実機の設計要求精度として、「もんじゅ」、「フランスの第 4 世代ナトリウム冷却高速炉 (GEN-IV SFR)」の設計要求精度とともに、常陽及び MOX 高速炉の Mockup 実験として行われた FCAV 炉心および XVII-1 炉心での実験精度及び FaCT 炉心の要求精度をレビューし、炉物理実験の手法は確立しており、実験精度を向上するには新しい機能・装置の導入とともに、解析精度を向上するための積分実験や炉定数調整等の手法が重要であることがわかった。設計要求/目標の定義及び設計要求精度の根拠については、安全評価や経済性、機器類の製作精度などの工学的判断に基づいたものであるが、設計要求を満足し、精度を向上していくには積分実験が断面積データとともに不可欠であることが明らかになった。高速炉については、現行の FCA などでも実験可能な課題もあるが、より高い実験精度を得るには実験設備の更新・増強・高度化が重要であることがわかった。

以上、本委員会において得られた新たな実験装置への要望は以下のようにまとめられる。これらの内、アクチノイド・マネジメントに関連する項目には下線を付している。

### (1) MA に関する炉物理

- ・ MA 核変換システムの模擬実験 (部分模擬)
- ・ MA 核種の反応率比測定及びサンプル反応度値測定

(2) FBR サイクル実用化のための炉物理

- ・設計の高精度化 (臨界性, 出力分布, ナトリウムボイド反応度, ドップラー反応度, 制御棒価値, 増殖比, 燃焼反応度, 炉心下部支持板照射量, 遅発中性子割合, ガンマ線発熱等)
- ・新型冷却材 (鉛ビスマス, He ガス等), 新型燃料 (金属, 窒化物等) の模擬実験
- ・ガス冷却高速炉の中性子ストリーミング及び耐高温材料の影響に関する実験
- ・内部ダクト付き燃料集合体の模擬実験
- ・反射体制御概念の模擬実験
- ・MA 添加ブランケットの核不拡散性の研究

(3) ADS に関する炉物理

- ・核破碎中性子源と高速中性子増倍体系の結合実験
- ・未臨界度モニタの開発
- ・加速器の不安定性の影響評価
- ・多領域 ADS の模擬実験

(4) 長寿命核分裂生成物 (LLFP : Long-lived Fission Product) の核変換

- ・中性子減速領域の反応率

(5) 軽水炉の高度化に関する炉物理

- ・濃縮度 5%以上の燃料, 高濃度 Gd 入り燃料, エルビア入り燃料, 高性能制御棒, 新型材料等に関する実験
- ・高燃焼/高富化度 MOX 燃料, 多様な Pu 組成, MA 添加燃料等に関する実験
- ・毒物を用いること等による燃料の稠密貯蔵に関する実験
- ・燃焼燃料の使用や Sm 等の添加による燃焼度クレジットに関する実験

(6) 革新的炉概念に関する炉物理

- ・革新的水冷却炉の模擬実験
- ・水冷却トリウム増殖炉の模擬実験

(7) 炉物理基礎実験

- ・遅発中性子割合, アクチノイド核種の捕獲反応率の測定, 反射体領域の反応率分布等のデータベース拡充
- ・高温領域を含むドップラー反応度, 捕獲反応率, サンプル反応度等の測定法の改良
- ・中性子ストリーミングの系統的实验
- ・熱中性子から MeV 領域で中性子スペクトルを系統的に変化させた断面積の積分検証

(8) 核データ測定

- ・ TOF 法による核データの微分測定

(9) 高エネルギー物理・遮蔽・安全

- ・ 高エネルギー粒子の挙動計測, ビーム輸送ラインの遮蔽性能の検証等

(10) 原子核物理

- ・ 未臨界炉起源のニュートリノ計測, 超冷中性子実験, 短寿命核の研究等

(11) 核破砕ターゲットの開発

- ・ 鉛ビスマス核破砕ターゲット用材料の照射や技術開発

(12) ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の開発と実践

- ・ ビームダンプを利用

#### 4. 実験の目標精度に関する検討

平成 20 年度に原子力委員会で行われた分離変換技術検討会において, 第 9 回検討会 (平成 21 年 3 月 30 日) の資料では MA 含有炉心の炉物理実験の必要性が紹介されている。特に高速炉の安全性に関わるパラメータの一つである冷却材ボイド反応度については, MA を添加することで値が悪化 (正の値が増加) することが知られており, その設計精度が重要とされている。

もんじゅの建設時においては, 冷却材ボイド反応度の設計余裕を 50%としていたが, その後の核設計手法進展の結果を踏まえ, 設計変更時には設計余裕を 30%とした。これは, MOZART 実験解析等の結果を踏まえたものである。現在, 大型 FBR における目標精度として暫定的に提案されている目安値は, 冷却材ボイド反応度について 20% ( $2\sigma$ ) となっているが, 大型 MOX 炉心に MA を 5%添加した概念の冷却材ボイド反応度は約 6%であり, この値に設計余裕を考慮すると, 目安値の 6%を超える可能性がある。設計余裕を合理的なものにしていくためには, 炉物理実験と解析手法の高度化により, 設計精度を向上していくことが重要である。現在進行中の FaCT プロジェクトにおける高速炉核特性の目標精度は, 臨界性 $\pm 0.3\% \Delta k$  ( $1\sigma$ ), 冷却材ボイド反応度 $\pm 20\%$  ( $2\sigma$ ), ドップラー反応度 $\pm 14\%$  ( $2\sigma$ ) などとなっている (資料 3-4)。また CEA の M. Salvatores 博士は, ナトリウム冷却型高速炉 (SFR) の核特性に対する目標精度として, 臨界性 0.3%, 反応度係数のトータルについて 7%という値を提示している。

核特性の不確かさは, 解析手法誤差と核データ起因誤差に分けることができるが, 近年の計算機の性能向上により, 解析手法誤差は大幅に減少し, 核データ起因誤差の寄与が大きくなっている。核データ起因誤差は, 核データライブラリに整備されている共分散データと対象システムの

感度係数を用いることにより計算が可能であり、定量的な議論が可能である。この手法を用い、MA 含有炉心として MA 装荷高速炉 (FR) 及び加速器駆動未臨界システム (ADS) を対象として、その核特性について核データ起因誤差 (JENDL-3.3 の共分散データに基づく) を算出したところ、MA 装荷量が大幅に異なるにも関わらず (FR : 5.0wt%, ADS : 63.7wt%), 核データ起因誤差については大きな違いが生じないという結果が得られた。また冷却材ボイド反応度とドップラー反応度については、両システムともに FaCT プロジェクトにおける高速炉核特性の目標精度を達成する結果が得られた。

MA 核種は他の核種に比べて、断面積誤差が大きいと考えられることから、特に ADS については核データ起因誤差が大きいと推測されていたが、このような結果が得られたため、これらの結果を検証するため、MCNPX コードと主要な核データライブラリ (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1) を用いた検証を行った。その結果、核データライブラリを変えた場合の核特性の差は、核データ起因誤差よりも大きい結果が得られた。例えば ADS の臨界性について、核データ起因誤差は 1.3%、核データライブラリを変えたときの実効増倍率の差は 2.9% (JEFF-3.1.1 を用いた場合) であった。

共分散データに基づく核データ起因誤差と、核データライブラリ間の差について更に検討を行った結果、MA 核種、Pu 同位体、冷却材核種 (Pb 同位体, Bi, Na) などについて、断面積のライブラリ間の差が、共分散データ中の標準偏差値よりも値が大きい核種、反応があることが示された。共分散データに基づく核特性の不確かさの議論を行うためには、実験による真値の取得を行うとともに、共分散データ自体についても更に検証と議論を行っていく必要がある。

現在、米国の主要な国立研究所が共同して ENDF/B-VII の共分散データの見直しを進めている。新しい共分散データに基づいて評価した、核変換システム解析結果に含まれる核データ起因誤差は、2008年6月の OECD/NEA NSC In Depth Discussion での M. Salvatores 氏 (CEA) の発表「Physics and Data Challenge of Minor Actinide Recycle」などで示されているが、誤差を改善するには、適切な条件下での積分実験が必須であると考えられている。米国の MA 核種の共分散データは JENDL と大きく異なっており、両者を用いた場合の核データ起因誤差に関する比較や JENDL に格納された共分散データの見直しは、今後の課題である。また、安全性に係わる炉物理パラメータの計算精度を共分散データを用いて評価する場合、データの品質保証が求められるため、積分実験による検証が不可欠であることが確認された。

## 5. 実験施設の備えるべき仕様・性能

### 5. 1 MA 積分実験の有効性

MA を用いた積分実験による核特性予測精度の向上効果について解析を行い、その有効性が確認された。この MA を用いた積分実験については、既存施設で扱いが可能と考えられる mg オーダーおよび g オーダーの MA では大幅な改善効果は見込まれず、数十 kg オーダーの MA を用いてスペクトル、物質組成を模擬することで、大幅な改善効果が期待できる。このことは、特に安

全性に大きく関わる冷却材ボイド反応度やドップラー反応度の核データ起因誤差について重要であることが示された。

以上の検討結果及び委員会での議論から、アクチノイド・マネジメントに関する炉物理試験を進めるためには、以下の2つのアプローチが有効であると考えられる。

#### 炉常数調整法

アクチノイド・マネジメントに関する炉物理研究を進めるための目標の一つは、MA 装荷体系における解析精度を向上させることにある。実験データと感度解析・共分散データを使用する炉常数調整法は、解析誤差の低減に極めて有効な方法である。しかし、炉常数調整法が有効であるためには、信頼のある共分散データと互いに独立した実験結果が必要である。MA の中でも比較的メジャーな  $^{237}\text{Np}$  や  $^{241}\text{Am}$  については、十分とはいえないが幾つかの独立した実験結果が存在する。しかし、高次プルトニウムやその他の MA 核種については、ほとんど実験データが存在しないのが現状である。従って、MA 装荷炉心の初期炉心の炉心特性だけでなく、燃焼中の炉心特性に対する解析精度を向上し、より経済性の高い炉心概念を構築するためには、二次生成核種に対する解析精度の向上も重要となる。

#### モックアップ試験

解析結果の精度を検証するためには、最終的には実験データとの比較が必要になる。炉心設計においては、実際の炉心で直接測定できない量に対しては、解析結果の精度が重要なものとなる。例えば、BFS による Np 装荷実験の結果が示すように、MA 燃料装荷体系では反応度価値が大きく変化するため、MA 装荷体系の解析精度を保証するためには、参照値となる実験データが必要になると考えられる。

以上の観点から、アクチノイド・マネジメントに必要な炉物理試験として、以下の2つの試験が重要であると考えられる。

- ◆照射炉によるサンプル照射試験
- ◆臨界集合体による MA 装荷炉心モックアップ試験

## 6. おわりに

本検討会及び専門委員会においては、軽水炉・高速炉・新型炉などに必要な炉物理実験のニーズを広く調査するとともに、実験項目や測定の目標精度、必要となる実験施設の仕様などについて検討を行った。アクチノイド・マネジメントに必要な実験施設に関しては、原子炉物理学や核データに関する研究開発を持続的に行って行く場として、今後も継続的に議論を行っていく必要があるが、本検討会報告書(今年度中に発行予定)によってこうした実験施設検討に対する一つの方向性を示すことができた。

以上