

# 「もんじゅ」データを活用したマイナーアクチニド核変換の研究

(受託者) 国立大学法人福井大学

(研究代表者) 竹田敏一 福井大学附属国際原子力工学研究所

(再委託先) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、日立GEニュークリアエナジー、  
国立大学法人大阪大学、国立大学法人京都大学

(研究期間) 平成 25 年度～28 年度

## 1. 研究の背景とねらい

本研究はナトリウム冷却高速炉 (SFR : 「もんじゅ」と同型の炉) によるマイナーアクチニド (MA : Np, Am, Cm 等の核種) の核変換を対象とするものである。今後、一層の MA 核変換量や炉心安全性向上を目指そうとすれば、MA 核変換量と炉心安全性との新たな調和点の追求、例えば、MA 核変換量向上を目指しつつ反応度係数の改善を図ることのできる炉心概念の追求が必要となる。同時に、MA 核変換量やその他の核特性の解析精度の向上が極めて重要である。

そこで本研究では、核変換量向上と反応度係数の改善の両立を図る MA 核変換炉心概念を開発すると共に、ナトリウムボイド反応度等の炉物理特性を精度よく計算する方法を新たに提案する。

また、過去の「もんじゅ」データおよび今後の高速炉での測定データの活用についての位置付けを明確にし、両方のデータの活用により、MA 核変換量等の計算精度の一層の向上について評価する。

## 2. これまでの研究成果

研究開発効果について項目別に述べる。

### (1) MA 核変換炉心概念の設計

最初に以下に示す予備核設計を実施した。核変換量と安全性に係わる反応度係数の調和を考慮した最適化炉心の設計を目指して、電気出力 75 万 kW クラスの MA 核変換炉心の核的サーベイ解析を行った。上部ナトリウムプレナム、階段型、軸方向非均質といった特徴をそなえた低ボイド反応度型の炉心を構築し、MA の均質装荷や非均質装荷方法をサーベイした (参考文献 1)。その結果、均質装荷、非均質装荷双方について、実効的なボイド反応度を 0 以下としながら、従来型炉心を大幅に上回る MA 核変換が可能となった。MA 核変換性能や開発課題等の観点から候補概念間の得失評価を行い、性能のバランスが良く開発課題の比較的小さい MA 均質装荷炉心概念を代表炉心に選定した。

上記炉心検討において、MA に随伴する希土類元素の現状移行率より、燃料中の希土類体積割合を 0.3vol%と設定し、代表核種により中性子吸収効果を考慮した。さらに、希土類分離性能緩和と炉心性能低下の関係を整理し、炉心部取出平均燃焼度の目標値を満足する範囲で希土類移行率を 2~3 倍程度に緩和しても、下記 MA 核変換量がほぼ達成できることが分かった。

予備核設計で代表炉心として選定した、電気出力 75 万 kW クラスの MA 均質装荷炉心概念の核設計を行い、MA 含有率を、実効的ボイド反応度が負となる 11wt%と設定した。更に、増殖比を目標の 1.03 とした炉心・燃料仕様にに基づき、熱設計解析 (被覆管温度評価、流量配分設定)、燃料設計解析 (被覆管 CDF 評価) を実施して、設計成立性を見通しを得た (図 1、参考文献 2 参照)。MA 核変換量は 212kg/GWe-y で、従来研究の約 2 倍と高い。

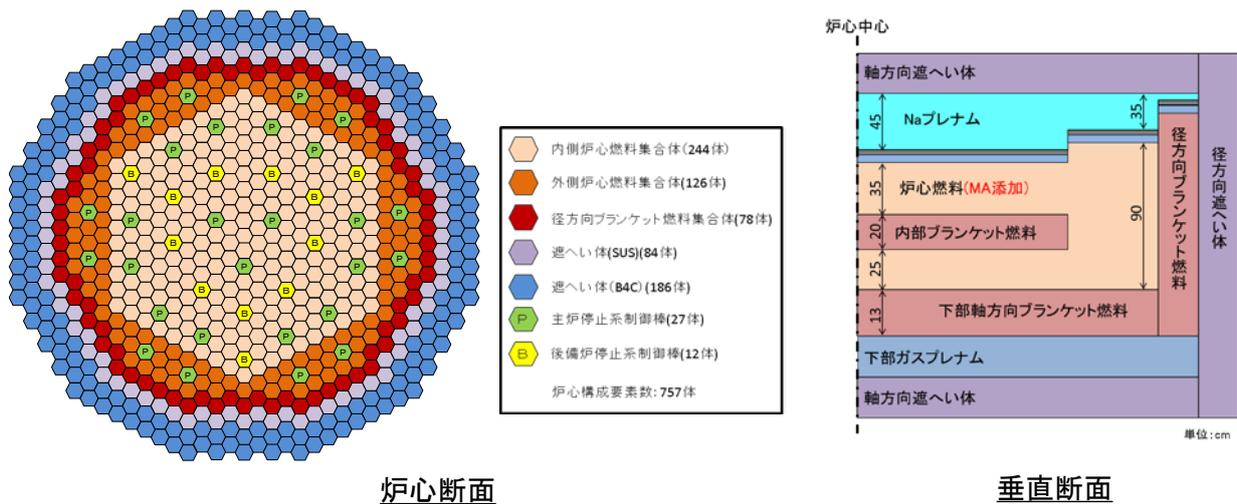


図1 MA均質装荷炉心の炉心配置

(2) MA核変換量の計算システムの開発

まず、各MA核種の核変換量を核変換プロセスをフォローして計算する手法を開発し、MA均質装荷炉心及びMA非均質装荷炉心に適用し、核変換量を評価した。

MA均質装荷炉心に対してはMA核変換量はほぼ燃焼期間に比例し、MA核変換率は年間7%程度となった。9年以上では少し飽和傾向が見られた。また核変換量のうち核分裂に起因する割合は燃焼期間が1年、6年、9年の場合39%、49%、60%と増加することが分かった(参考文献3)。MA非均質装荷方式でブランケットにMAを装荷した炉心の核変換の結果を評価した。ブランケット領域のMA含有率が20%と大きいため、MA核変換量は9年燃焼の場合1.1トンと大きくなり、核変換率にするとMA均質装荷炉心とほぼ同程度であった。ただし、MA核変換量に占める核分裂の寄与は13%と小さかった。

また、MA非均質装荷炉心におけるMA変換率を正確に計算するため、集合体計算と炉心計算の結果を結合した中性子スペクトル詳細燃焼計算評価手法を開発し、当該評価システムを構築した。構築したシステムにより、局所中性子スペクトルを高い精度で得られることを確認した。また、構築したシステムにより、MA核変換量を高い精度で評価できることが分かった。

(3) 「もんじゅ」データをはじめとするMA核変換関連測定データの体系的整備及び評価

炉心核設計に反映可能なMA積分実験データベースの構築のために、国内外のMA核変換に関連する最新の測定データ及び解析データを収集した(参考文献4)。具体的には、英国の高速原型炉PFR、日本の高速実験炉「常陽」におけるMAサンプル照射試験データ、ロシアの高速臨界実験装置BFSと日本の高速臨界実験装置FCAにおけるMA核分裂反応率比データ、日本の高速増殖原型炉「もんじゅ」とBFSのMA含有炉心における測定データ、「弥生」のNp-237反応率のデータ収集を行った。「もんじゅ」については、Am含有率の異なる1994年時点と2010年時点の炉心の測定データを組み合わせることにより、Am-241捕獲断面積の誤差低減に有効活用できた。

(4) MA核変換量の予測誤差評価システムの開発

一般化摂動論に基づく燃焼感度係数を無限希釈断面積に対して計算する手法を導出し、計算システムを開発した。計算コードの検証を実施すると共に、JENDL-4.0の核データ共分散ファイルを用いて、MA均質装荷炉心およびMA非均質装荷炉心のMA核変換量の不確かさを評価した。不確かさは両炉心とも同程度で、約3%程度と小さいことが分かった(参考文献5)。断面積調

整結果を用いて MA 均質装荷炉心の MA 核変換量の予測誤差を評価して、JENDL-4.0 を用いた場合と比べて、約 50%減少し、断面積調整によって改善されることが分かった。

また、上記(3)で整備した MA 核変換関連測定データの燃焼核特性に対して燃焼感度係数を計算し、すべての MA 核変換関連測定データに対して、核データに起因する予測誤差を定量的に評価した。その結果、例えば、常陽や PFR の燃焼後の組成比に対する Pu-238、Cm-244、Cm-245 の核データに起因する予測誤差が特に大きくなること等が分かった。

(5) 「もんじゅ」データ等による MA 核変換量の予測誤差低減システムの開発

高速炉の核特性の計算値、測定値に含まれる系統誤差を取り除く新たな手法を導出し、この手法を取り入れた新しい断面積調整システムを開発した。589 個の測定データに対して、本断面積調整システムを適用し、断面積調整後の計算値は従来の断面積調整システムに比べ測定値により近くなることが分かった（参考文献 6）。

上記(3)で整備した「もんじゅ」等の MA 核変換関連測定データを本断面積調整システムに適用した。系統誤差を取り除く際の信頼度  $c$  をパラメータとして断面積調整計算を行い、 $c$  を小さくするにつれて断面積調整量が小さくなることを確認した。また、断面積調整には炉心部と軸ブランケット部のように感度係数のエネルギー依存性の異なる試験データを加えることにより、MA 断面積の不確かさの低減が促進されることが分かった。

(6) 予測誤差低減による各種炉心の静特性、動特性への影響の評価

まず、ナトリウムボイド反応度の予測誤差低減について検討するため、開発した予測誤差解析コードによりナトリウムボイド反応度の誤差評価を行った。ZPPR, ZEBRA, BFS, MASURUCA 臨界実験および「常陽」炉物理性能試験で測定されたナトリウムボイド反応度等の誤差評価および予測誤差低減について検討した。その結果、開発した予測誤差解析コードを用いると一般的に断面積調整後の計算値は測定値とより一致する方向となり、予測誤差低減に有効であることが分かった。

次に、ナトリウムボイド反応度の変化による過渡・事故時挙動への影響評価について検討した。初めに、ナトリウム沸騰を評価できる公開コードとの比較から汎用多次元熱流動評価ツール (STAR-CCM+) がナトリウム沸騰挙動評価に対して適用できることを確認し、次に集合体規模のナトリウムプレナムを対象とした事故時 (ULOF) 沸騰挙動解析を実施して、燃料集合体の周辺流れがナトリウムボイドの成長に影響することを明らかにすると共に、熱出力、冷却材流量等の各因子が沸騰特性に与える影響を評価した。さらに、核特性計算へフィードバックできる簡易的なナトリウム沸騰挙動の計算モデルを作成し、SFR 向けのプラント動特性解析プログラムへ追加する手法を開発した。開発した解析手法を用いて、選定した 75 万 kWe クラスの MA 核変換代表炉心の

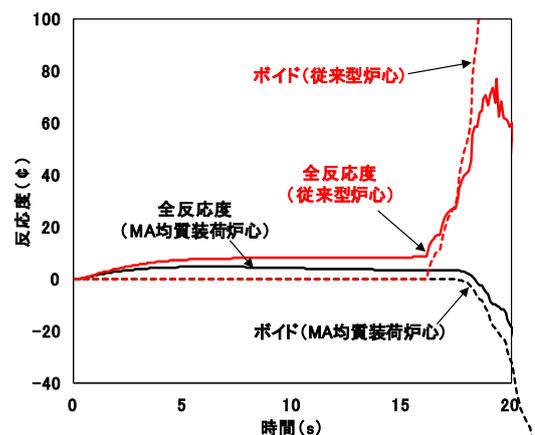


図 2 MA 均質装荷炉心の ULOF 時の反応度推移

ULOF 事象を評価した。その結果、一部の燃料ピンの健全性が課題となるが、ナトリウムプレナムにより ULOF 事象が終息できる見通しを得、ナトリウムプレナム付き MA 核変換炉心の安全性

に対する有効性を確認した（図 2, 参考文献 2 参照）。

#### (7) 今後の「もんじゅ」等に望まれる MA 核変換関連測定、実験の具体化

MA 核変換炉心の核特性を精度よく評価するために、今後、「もんじゅ」等で測定すべき測定データとその測定精度に対する提案を行った。まず、追加すべき測定項目が MA 核変換炉の核特性の精度向上にどれだけ寄与するかを定量的に評価する方法を確立した。この方法に基づき、「もんじゅ」等で追加すべき測定項目として Np-237 のフォイル照射等を提案した。核変換量の内、Cm-244 の蓄積量の不確かさは JENDL-4.0 を用いると約 10%あったが、この予測誤差が 1%程度に減少することが分かった。また、MA サンプルあるいは MA 含有燃料の照射試験は、Pu-238、Cm-242、Cm-245、Cm-246 の捕獲反応断面積に対する感度を有する測定データを取得できることから、非常に有用であることが分かった。

さらに、MA 核特性を比較検討するためのベンチマーク問題を作成し、ベンチマーク問題を公開する方式について提案した。

### 3. 今後の展望

本研究では、安全性確保と MA 核変換を両立できる MA 核変換高速炉の概念設計を実施した。MA 均質装荷炉心概念は電気出力 100 万 kW 換算で、年間約 200kg の MA を核変換でき、MA 核変換には非常に有望と考えられる。この MA 核変換高速炉を実現するには、11wt%と高い割合で MA を含有する燃料の製作、使用済み燃料の処理方式について検討する必要がある。本成果をフランスやロシア等の海外と協議し、MA 核変換研究の国際協力を進めることも高速炉開発にとって重要である。

### 4. 参考文献

- 1) 藤村幸治, 大木繁夫, 他「もんじゅ」データを活用したマイナーアクチニド核変換の研究 - (11)UO<sub>2</sub> 母材 MA ターゲット燃料を分散装荷する非均質装荷炉心-, 日本原子力学会「2016 年春の大会」2020.
- 2) Koji Fujimura, Satoshi Itooka, Shigeo Ohki and Toshikazu Takeda, “CORE CONCEPT OF MINOR ACTINIDES TRANSMUTATION FAST REACTOR WITH IMPROVED SAFETY” ICAPP2017, The International Congress on Advances in Nuclear Power Plants”, Fukui and Kyoto (Japan), April 24-28, 2017.
- 3) Toshikazu Takeda, “Minor actinides transmutation performance in a fast reactor”, Annals of Nuclear Energy 95(2016)48-53, 2016.
- 4) Kenji YOKOYAMA, Shuhei MARUYAMA, et al. (3)Development of a Fast Reactor for Minor Actinides Transmutation-Improvement of Prediction Accuracy for MA-related Nuclear Parameters based on Cross-section Adjustment Technique-, PHYSOR 2016, International Conference “Unifying Theory and Experiments in the 21<sup>st</sup> Century” May 1-5, 2016, Sun Valley, Idaho, USA.
- 5) Toshikazu Takeda, Koji Fujimura, Tadafumi Sano, Basma Fouad, “Uncertainty analysis of minor actinides transmutation in fast reactor cores”, Annals of Nuclear Energy 101, March 2017, 591-599, 2017.
- 6) Toshikazu TAKEDA, Kenji YOKOYAMA and Kazuteru SUGINO, “A New Cross Section Adjustment Method of Removing Systematic Errors in Fast Reactors”, Annals of Nuclear Energy 109, (2017) 698-704, 2017.