

「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) 独立行政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～26 年度

1. 研究の背景とねらい

高レベル廃棄物からマイナーアクチニド (MA : Np, Am, Cm 等の核種) を分離回収して原子炉で核変換する分離変換技術の研究開発は世界中で行われてきた。

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 MA 核変換を対象とするものである。SFR は炉心の中性子エネルギーが高く、かつ余剰中性子数が多いことから、MA 核変換に適している。しかしながら、MA 核変換炉心の MA 装荷量と、ナトリウムボイド反応度 (以下、ボイド反応度) やドップラ係数等の炉心安全性に係わる反応度係数は、トレードオフの関係にあり、一般的には安全性確保のために MA 装荷量を抑制している。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、MA 核変換量、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し、MA 核変換量とその他炉心核特性の計算精度向上を図る。「もんじゅ」データ等の活用により、予測誤差の低減を図るとともに MA 核変換量等を精度よく予測するにはどのような「もんじゅ」の運転試験を実施すれば良いかを感度係数、予測誤差低減の観点から提案する。

また、過去及び今後の「もんじゅ」データの活用についての位置付けを明確にし、更に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。

MA 核変換炉心としては、MA 核変換量の増加、ナトリウムボイド反応度の低減を目指した多様な炉心概念を探り、上記した精度を向上した計算方法が、安全性特性等に対する影響を検討する。更に、MA に随伴する不純物 (希土類等) の効果について、燃料サイクル側において想定される現実的な条件あるいは不確かさを考慮に入れた検討を行うことにより影響を評価すると共に、MA 核変換炉心概念が不成立となった場合に除染係数などの要求値の提示を行う。

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 核変換炉心における MA 装荷方式の得失整理

安全性に係わるパラメータを改善する多様な炉心概念の調査結果に基づき、MA 核変換炉心における MA 装荷量上限の考えを整理した。

また、先進湿式法の実験結果に基づく現状の移行率と国の実用化研究で目標としている理想的な移行率の想定と、2 種類の軽水炉燃料取出し燃焼度・冷却期間を組み合わせた 4 ケースの MA 随伴希土類 (RE) の重量・組成を評価した。この結果に基づき、随伴する RE の中性子吸収量と等価となるように代表核種 Nd-143 を実際に炉心燃料に混入させ、かつ RE 随伴に伴う燃料体積割合減少を考慮する、MA 核変換炉心の核設計への反映方法を検討した。さらに、上記 4 ケースの随伴 RE

組成の使用が、MA 均質装荷炉心の核特性に及ぼす影響を評価して、ボイド反応度の変化が RE 随伴を 0 と仮定した場合と比べて最大で+0.03% $\Delta k/k'$ と小さいことを確認した。

(2) MA 核変換炉心概念の設計

750MWe クラスの MA 均質装荷炉心について、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炉心を検討し、ナトリウムボイド反応度を従来型炉心の半分程度まで大幅に低減できる見通しを得た。本研究では、冷却材流量喪失事象時のナトリウム密度分布をモデル化した実効的ボイド反応度という指標を新たに導入し、実効的ボイド反応度が負となる MA 含有率を 11 wt% と設定、従来型炉心の約 2 倍に及ぶ大量の MA 核変換を可能とした。炉心燃料の MA に随伴する RE の体積割合は、0.3 vol% と設定し、代表核種 Nd-143 により中性子吸収効果を考慮した。さらに、熱設計（被覆管温度評価、流量配分設定）、燃料設計（被覆管 CDF 評価）を実施し、設計成立の見通しを確認した。

MA 均質装荷炉心の検討を進展させ、MA 非均質装荷方法のサーベイ検討を実施し、内側および外側炉心の境界領域へのリング状装荷法、炉心軸方向下部への装荷法、中性子減速材付き核変換集合体の炉心外周装荷などの候補概念を明らかにした。

(3) MA 核変換量の計算システムの開発

MA 核変換プロセスに着目した核変換量計算システムを確立した。MA の核変換がどのように進展していくかのプロセスを炉物理的に把握するために、MA の全体の核変換量だけでなく個々の MA 核種の中性子反応、崩壊による MA 核変換量を計算する方法及び計算プログラムを作成した。作成したプログラムの検証を実施し、作成したプログラムと従来の計算コードの MA 核変換量とはよく一致することが分かった。また、MA 核変換用ターゲット集合体の中性子スペクトルを詳細に評価するため評価手法を調査検討し、また、キャラクタリスティクス法による集合体計算と拡散計算による炉心計算を結合した手法を考案した。

(4) 「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

MA 核変換炉心の核特性及び核変換率の精度向上に資することを目的として、英国の高速原型炉 PFR と日本の高速実験炉「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を整備した。

PFR については、既に得られている「常陽」の試験解析結果との整合性評価により、矛盾のない有用なデータを抽出することができた。BFS と FCA の MA 核分裂反応率比についても、整合した結果が得られており、Cm-244 等の核分裂断面積に関する有用なデータとなる見通しが得られた。「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ることが分かった。

(5) MA 核変換量の予測誤差評価システムの開発

燃焼感度係数の一般化摂動論に基づく計算方法および燃焼感度係数を無限希釈断面積に対して計算する方法を開発した。実効断面積に対する感度は SAGEP-FR により計算し、SLAROM を

ベースに整備したコードで自己遮蔽効果を取り入れた感度係数を計算するシステムを開発した。

更に、一般化摂動論の有効な計算手法として、拡散理論に基づく有限差分法を用いることとし MA 核変換炉を対象として、Pu-239、Np-237、Am-241、Cm-244 の数密度に対する燃焼感度計算の試計算を実施した。

(6) 「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

高速炉の核特性の解析値、測定値に含まれる可能性がある系統誤差を取り除く新たな方法を開発した。この方法は核特性に対する測定値と解析値との比であるバイアス因子を考え、このバイアス因子の 1 からの差を解析値、測定値の統計誤差、断面積による統計誤差の和から求められる不確かさと比較することにより系統誤差を求める方法である。この方法を断面積調整に取り込み断面積調整システムを作成した。

(7) 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等の核特性の解析値、測定値に含まれる可能性がある系統誤差を取り除く方法を用いて断面積調整を実施し、ロシアの高速臨界実験装置 BFS-2 で測定されたナトリウムボイド反応度解析の予測誤差を評価した。

また、ナトリウム沸騰を評価できる公開コードと比較することでナトリウム沸騰挙動評価に対して汎用多次元熱流動評価ツール (STAR-CCM+) が適用できることを確認した。また、燃料ピン上部空間に未沸騰ナトリウムは残留しないことを確認し、ナトリウムプレナムを用いたボイド反応度低減効果が有効である見通しを得た。以上に基づき STAR-CCM+を用いて、ナトリウムプレナムを対象とする事故時 (ULOF) 沸騰挙動解析を実施し、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した。熱出力、冷却材流量等をパラメータとした感度解析を実施し、各因子が沸騰特性に与える影響を評価し、今後、過渡・事故時挙動評価ツール (動特性解析コード) の炉心のモデル化 (簡易沸騰モデルの構築) に反映する。

3. 今後の展望

- ・平成 27 年度に、MA 非均質装荷炉心について、特に中性子減速材付き核変換集合体を用いる場合の RE 随伴のモデル化方法を検討する。その検討結果を踏まえ、さらに先進湿式法の実験結果に基づく、より高い RE 移行率を念頭に、必要に応じて MA 核変換炉心設計側から、MA 分離回収工程における除染係数などの要求値の提示を行う。

- ・MA 核変換炉心概念については、平成 26 年度に構築した MA 均質装荷炉心と、今年度構築する MA 非均質装荷炉心から代表炉心を選定し、項目 (7) で開発中の過渡・事故時挙動評価ツール (動特性解析コード) を用いて、ナトリウムプレナムの設置が炉心の安全性に及ぼす影響を確認する。

- ・「もんじゅ」データをはじめとする有用な MA 核変換関連測定データを集大成し、断面積調整法への適用等を通して MA に対しても効力を持つ測定データであることを示す。また、本測定データの適用を通しての MA 核変換代表炉心の核変換特性及びその予測誤差に及ぼす影響を検討する。

- ・これまでに導出した炉物理手法により、MA 核変換量を MA 均質・非均質装荷炉心に適用し、その特色を明らかにする。また系統誤差を取り除く断面積調整法による調整炉定数への影響についても検討する。

4. 参考文献

- (1) T. Takeda, et al., “Method Development and Reactor Physics Data Evaluation for Improving Prediction Accuracy of Fast Reactors’ Minor Actinides Transmutation Performance,” PHYSOR 2014, International Conference “The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future”, 28th Sep. 3rd, Oct., 2014, Kyoto, Japan.
 - (2) T. Takeda, et al., “Method Development for Calculating Minor Actinide Transmutation in a Fast Reactor,” Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal, Beyond the Fukushima Accident, Springer Open, Chapter 17, pp.179-196, 2014.
 - (3) T. Takeda, et al., “Development of a Fast Reactor for Minor Actinides Transmutation (1) -Overview and Method Development-,” GLOBAL2015, 21st International Conf., “Nuclear Fuel Cycle for a Low Carbon Future”, Sep.20-24, 2015, Paris, France.
 - (4) K. Fujimura, et al., “Development of a Fast Reactor for Minor Actinides Transmutation (2) -Study on the MA Transmutation Core Concepts-,” GLOBAL2015, 21st International Conf., “Nuclear Fuel Cycle for a Low Carbon Future”, Sep.20-24, 2015, Paris, France.
 - (5) K. Sugino and T. Takeda, “Development of a Fast Reactor for Minor Actinides Transmutation (3) -Evaluation of Measurement Data with MA Transmutation-,” GLOBAL2015, 21st International Conf., “Nuclear Fuel Cycle for a Low Carbon Future”, Sep.20-24, 2015, Paris, France.
- <口頭発表>, Paris, France.
- (6) 日本原子力学会「2014年秋の大会」シリーズ発表（2014年9月8日～10日，京都大学）
「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
L08 -(1) 研究計画と炉物理手法 -, 竹田他2名
L09 -(2) MA核変換炉心概念 -, 藤村他2名
L10 -(3) MA核変換関連測定データの体系的整備・評価-, 杉野他2名
 - (7) T. Takeda, “Detailed Calculations of Minor Actinide Transmutation in A Fast Reactor,” ICCMSE 2015, 11th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Athens, Greece (March 20～23, 2015) .
 - (8) K. Fujimura, et al., “Fast Reactor Core Concepts to Improve Transmutation Efficiency, ” ICCMSE 2015, 11th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Athens, Greece (March 20～23, 2015) .
 - (9) 日本原子力学会「2015年秋の大会」シリーズ発表（2015年9月9日～11日，静岡大学）
「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
A12 -(1) 感度係数計算法と新しい断面積調整法-, 佐野, 竹田
A13 -(2) MA均質装荷炉での核変換プロセスに着目した核種ごとのMA核変換量-, 竹田他2名
A14 -(3) MA均質装荷炉心の概念設計-, 藤村他3名
A15 -(4) MA非均質装荷法の検討-, 大釜他2名
A16 -(5) MA核変換関連測定データの体系的整備・評価(2)-, 横山他4名