

# 「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～28 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。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。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。

本研究で設定した軽水炉取出し (燃焼度 60Gwd/t、冷却期間 30 年) の MA 燃料組成を表 1 に示す。

表 1 MAの組成

核種	組成(wt%)
Np237	19.99
Am241	64.78
Am242M	0.06
Am243	12.44
Cm243	0.03
Cm244	2.12
Cm245	0.52
Cm246	0.07
合計	100.00

## 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

#### ① MA 核変換炉心の予備核設計

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、750MWe クラス MA 非均質装荷核変換炉心の詳細パラメータについて解析を行った。減速材の使用や MA 核変換集合体 (ターゲット) の炉内滞在期間の最適化といった MA 核変換量に対する改善方策を取り入れた MA 非均質装荷核変換炉心 (図

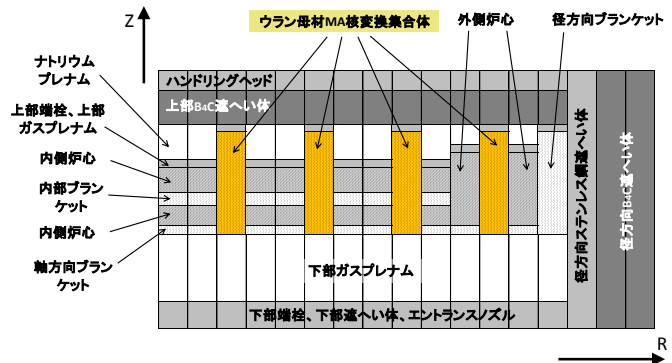


図 1 MA 非均質装荷核変換炉心の RZ 体系図

1 参照) の代表的な炉心仕様を設定し、予備核設計を完了した。また、本研究で設定した MA 均質装荷炉心と MA 非均質装荷炉心を対象に、希土類分離性能緩和と炉心性能低下の関係を整理した。その結果、炉心部取出平均燃焼度の下限目標値を満足する範囲で現状の希土類移行率を 2～3 倍程度に緩和できる見通しが得られた。

## ② MA 核変換炉心の概念設計

MA 核変換炉心については、MA 非均質装荷炉心について、核変換用ターゲット集合体に減速材を用いた場合の核変換量の向上とドップラ係数の改善効果の評価するとともに、使用済みターゲット集合体の崩壊熱や中性子発生数など、取り扱いに及ぼす影響についても検討した。使用済みターゲット集合体の崩壊熱や中性子発生数は従来型炉心を上回り、JSFR と同等の燃料取扱設備で取扱うことは難しいことが分かった。

MA 非均質装荷炉心の概念設計として、ウラン母材ターゲット集合体を炉内に分散装荷する炉心概念を構築し、熱設計解析、燃料設計解析を行った。JSFR と同じ原子炉出入口温度とした場合には、一次系冷却材流量が 12%不足するとの結果を得た。対応策を検討し、原子炉出口温度を 510℃、入口温度を 355℃とすれば成立が見込めるとの結果を得た。さらに MA 核変換炉心の代表炉心の選定としては上記の MA 非均質装荷炉心と平成 26 年度までに構築した MA 均質装荷炉心の得失を評価して、MA 核変換性能が良好で、総合的に特性悪化・開発課題が少ない MA 均質装荷炉心を代表炉心に選定した。

## (2) MA 核変換量の計算システムの開発

### ① MA 核変換プロセスに着目した核変換量計算システムの確立

平成 26 年度までに開発・検証した核変換量計算システムを用いて、MA 均質装荷炉心及び MA 非均質装荷炉心の核変換量を評価し以下の成果を得た。

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寄与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。

MA 非均質装荷炉心の核変換の結果に対しては、ブランケット領域の MA 含有率が 20%と大きい場合、MA 核変換量は 9 年燃焼の場合 1.1 トンと大きくなるが、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。また MA 核変換量及び核変換率に占める核分裂の寄与は 13%と小さかった。

### ② MA 核変換用ターゲット集合体の中性子スペクトル詳細評価方法の開発

平成 26 年度に引き続き詳細燃焼計算評価システムを構築し、構築したシステムを用いて試計算を実施した。MA 核変換用ターゲット燃料集合体内の詳細な中性子スペクトルを、集合体均質炉心計算結果と集合体非均質の集合体計算結果を合成して再現する中性子スペクトル再構築法について検討した。結果として、炉心内の中性子束の傾きが最大となる方向を軸とすることで、集合体内スペクトルの空間依存性を再現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。具体的には、平成 26 年度までに収集した実験データに加えて、新たに「弥生」の Np-237 反応率のデータ収集を行い、これまでに構築した「常陽」と PFR のデータと整合する有益なデータであることが分かった。

#### (4) MA 核変換量の予測誤差評価システムの開発

##### ① MA 燃焼感度係数の計算システムの確立

###### i) 計算システム構成の構築

平成 26 年度までに構築した MA 燃焼感度係数計算コードの検証及び主要 MA 核種の MA 核変換量の感度解析を行った。MA 燃焼感度係数計算コードの検証のため、直接計算による感度係数の参照解と比較した。その差はほぼ 5%以内であり、MA 燃焼感度係数計算コードは十分な精度を有していることが分かった。さらに、MA 核変換量の計算結果に対する不確かさを評価し、MA の不確かさは数%程度となることが分かった。

###### ii) 一般化摂動理論の計算手法の決定

平成 26 年度までに作成した MA 燃焼感度係数計算コードの検証を福井大学とは異なる断面積に対した実施した。京都大学では燃焼後の MA 核種の原子数密度の Pu-238、Np-237、Am-241 の捕獲及び核分裂断面積に対する感度係数を直接計算により求め MA 燃焼感度係数計算コードの結果との比較を行ない、その差は 5%以内であることが分かった。

##### ② MA 核変換量の予測誤差評価 1

上記①で整備された計算システム等を用いて、これまでに構築された 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た。これらの燃焼感度係数（通常感度係数を含む）と JENDL-4.0 の核データ共分散ファイルを用いて、上記の燃焼核特性を含む、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。

##### ③ MA 核変換量の予測誤差評価 2

「(1)②MA 核変換炉心の概念設計」で設計・評価する MA 核変換炉心の核変換量の予測誤差を評価し、MA 含有率 11wt%の MA 均質装荷炉心の、MA 核変換量の断面積に起因する不確かさは約 3.8%となることを示した。

#### (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

##### ① 燃焼感度係数と「もんじゅ」データ等を用いた断面積調整システムの確立

平成 26 年度までに開発した断面積調整コードの検証を行い、断面積調整システムを確立した。断面積調整コードの検証のため系統誤差が少ない場合の断面積調整結果と従来の計算結果を比較した。両結果は完全に一致し断面積調整コードが妥当であることを確かめた。

##### ② 臨界集合体データ等を用いた断面積調整

平成 26 年度までに構築された臨界実験データベースや MA 照射データベース等に加えて、既存の MA 以外の一般核特性の臨界実験データを使って断面積調整計算を行った。この断面積調整計算は、MA 関連測定データだけでなく MA を含まない炉心の臨界性等の一般核特性の臨界実験データも同時に改善していることが分かった。

##### ③ 「もんじゅ」等の MA 核変換関連データを追加した断面積調整

上記②の断面積調整計算に対して、「もんじゅ」研究計画に示されている試験・運転で取得できるデータを追加した、予備的な断面積調整計算を行った。この断面積調整計算結果を用いて、実験の測定精度が解析の予測精度向上に与える影響を整理し、追加する実験の測定精度が良くなるにつれて解析の予測精度が向上することが分かった。

#### (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

##### ① ナトリウムボイド反応度の予測誤差評価手法の開発

平成 26 年度までに開発した予測誤差解析コードによるナトリウムボイド反応度の誤差評価を行った。このため BFS 炉心等で測定されたナトリウムボイド反応度等の誤差評価を行い、さらに、断面積調整システムを用い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予測誤差をより低減できることが分かった。

##### ② 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

平成 26 年度の評価を踏まえ、沸騰モデル（簡易的なナトリウム沸騰挙動の計算機能及び核特性計算へのフィードバック機能）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構築した。また、沸騰モデルを有するプラント動特性解析プログラムを作成し、750MWe クラス MA 核変換炉心で代表性の高い事象（ULOF 事象）に試適用して、ナトリウムプレナムの有無が動特性挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、集合体の発熱部出口位置で冷却材温度が沸騰温度に到達して負のボイド反応度が挿入され炉心出力は低下に転ずることが分かった。

#### (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

##### ① 「もんじゅ」で得られる測定データとその精度の予測誤差低減への寄与把握

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」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、「もんじゅ」で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」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。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た。

##### ② 「もんじゅ」等に望まれる MA 核変換関連測定、実験の具体化

「もんじゅ」を用いた MA サンプルあるいは MA 含有燃料の照射試験は、「常陽」と PFR だけでは不十分であった 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。

### 3. 今後の研究（25年度～27年度採択課題の場合）

・平成 27 年度に 750MWe クラスの MA 核変換炉心の代表炉心に選定した MA 均質装荷炉心の過渡時の挙動を、平成 27 年度作成したプラント動特性解析プログラムで評価し、その結果を反映して MA 核変換炉心の炉心仕様を見直す。

・MA 核変換量の予測誤差評価システムについては、平成 27 年度に計算精度の検証を実施したシステムを用いて、MA 非均質炉心における着目する MA の核変換量に対する燃焼感度解析を実施すると共に、MA 均質装荷炉心での MA 核変換量予測誤差を検討し、予測誤差に寄与する主な断面積を特定する。

・「もんじゅ」で得られる測定データとその精度の予測誤差低減への寄与把握では「もんじゅ」で得られる今後の測定データを加えた場合の MA 核変換量の誤差低減を定量的に解析し、測定データの要求精度を明らかにする。

・平成 27 年度に作成したプラント動特性解析プログラムを、代表炉心に選定した MA 均質装荷炉心に適用し、代表性の高い事象である ULOF 事象を評価する。

#### 4. 参考文献

- (1) Toshikazu TAKEDA, Koji FUJIMURA, Kazuteru SUGINO, “Development of a Fast Reactor for Minor Actinides Transmutation (1)～(3), GLOBAL2015, Paris Congress Center, Paris, France
- (2) 日本原子力学会「2015年秋の大会」シリーズ発表 5件 (A12～A16)  
(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(4)～(8)
- (3) 日本原子力学会「2016年春の大会」シリーズ発表 3件(20 18～20)  
(2016年3月26日～28日, 東北大学)  
「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(9)～(11)