

# 高燃焼度原子炉動特性評価のための遅発中性子収率高精度化に関する研究開発

研究代表者 千葉 敏 国立大学法人東京工業大学原子炉工学研究所  
参画機関 国立大学法人東京工業大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構  
研究開発期間 平成24年度～27年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

### 1. 1 背景

原子力は中性子が重い原子核に入射して起こる核分裂の連鎖に伴う原子核の変化からエネルギーを安定的に取り出す技術であり、核反応と原子核崩壊がその根底を支える物理現象である。本来、 $10^{-18}$ 秒程度の時間スケールを有する核反応の連鎖を安定して制御できる根本的理由は遅発中性子の存在であり、ウランを燃料とする原子炉では遅発中性子割合が例外的に大きいという特殊事情によって人類による原子力エネルギー利用が可能になったと言っても過言では無い。そのため、遅発中性子の測定は原子力の黎明期に主要な核分裂性核種に対して行われた(例えば(1))が、燃焼に伴って生成する高次 MA(マイナーアクチノイド)に対する直接測定は実現していない。また、主要核種に対してさえも、核分裂片の性質の積み上げから計算を行う総和計算<sup>(2)</sup>は現状では測定値を再現できないことが知られている。また、本来、総和計算は崩壊熱と遅発中性子放出の両方を統一的に扱うべきであるが、それも成功していない。

福島事故後、使用済み核燃料の処理・処分が世界的な課題となっており、我が国においても学会が放射性廃棄物の安定化の方策を重要課題として指摘している。さらにエネルギー・環境会議においても専焼炉の開発を推進するべきという提言が行われた。それを実現する方法として、MAの専焼炉ではドップラー反応度と遅発中性子割合が小さいことから来る制御上の問題、すなわち反応度挿入事故への対応が大変厳しいことが知られている。一方、加速器駆動システム(ADS)においては、系を適切な値での未臨界状態に保つ必要があるが、それを検証するための反応度決定のためには高精度の遅発中性子データが不可欠である。しかし、遅発中性子割合やそのスペクトルの決定には必然的に不安定な原子核である核分裂片、すなわち多数の中性子過剰核を取り扱うことが必要となり、実験的にも理論的にも困難を伴う。

本課題では原子核物理実験及び理論の手法を高度に組織化して、使用済み核燃料中のマイナーアクチノイドの燃焼を行う高速炉、加速器駆動核変換システム、高燃焼軽水炉などを想定し、問題となるウラン、プルトニウム、高次マイナーアクチノイドの核分裂現象に伴う物理量の中で原子炉の動特性を決定する要因である遅発中性子割合を系統的に高精度化し、革新的原子力システムと既存軽水炉に共通な安全基盤技術の確立を行うことを目的とする。同時に原子力の基礎となる核分裂現象を理解するための理論模型の開発と人材育成も行う。

### 1. 2 本事業の目的

マイナーアクチノイドが蓄積する高燃焼軽水炉及び革新炉の動特性予測精度の高精度化を以下の方法により行う。

- ① 代理反応による核分裂収率の系統的測定技術の開発と核分裂片質量数分布の測定を  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{248}\text{Cm}$ 、 $^{237}\text{Np}$  を標的として行い、 $^{240}\text{U}$ 、 $^{241}\text{Np}$ 、 $^{243}\text{Pu}$  等これまで測定されなかった核種の核分

裂収率データを取得する。

- ②  $\beta$ 崩壊の大局的理論による核分裂生成物核種の $\beta$ 崩壊半減期、崩壊熱及び遅発中性子数を統一的に予測する手法を作成する。
- ③ 代理反応データを検証対象として動力学模型による核分裂片独立収率を決定する理論計算手法を作成する。
- ④ これらを統合してアクチノイド、マイナーアクチノイドの遅発中性子割合の総和計算を可能とする計算体系及びデータベースを構築し、積分体系における遅発中性子及び崩壊熱関連データの再現性を向上させる

## 2. 研究開発成果

### 2. 1 代理反応による核分裂片質量数分布の系統的測定

本事業では $^{18}\text{O}$ ビームを用いる代理反応（核子移行反応）により様々な複合核を生成し、その分裂片のエネルギーと運動量を測定することにより質量数分布を求めめるための装置の開発を行った。図1に、開発した核分裂片質量測定装置の概要を示す。本装置は入射ビームと標的核の反応により生成した荷電粒子を測定するためのシリコン $\Delta E$ - $E$ 検出器、それと同期する核分裂片測定用の多芯線比例計数管（MWPC）4台、標的、及び真空散乱槽からなる。図1左に示すのが配置の概要で、4台のMWPCが標的を取り囲む構造で高立体角をカバーできる。

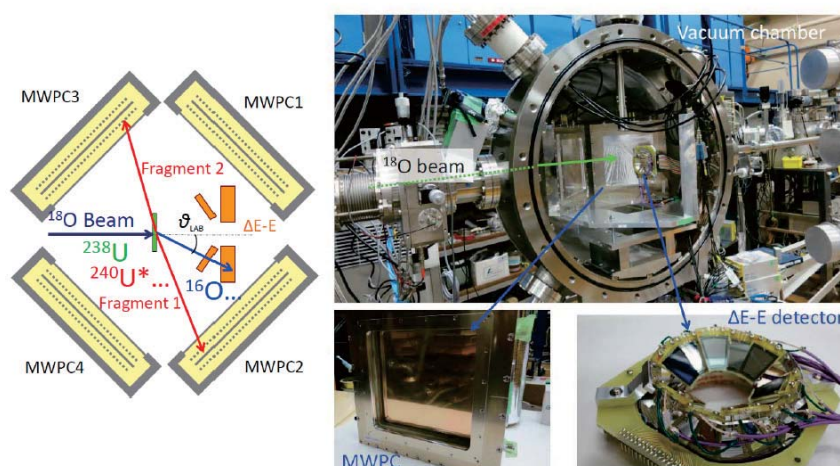


図1 代理反応による核分裂片質量数分布測定装置の概要

平成24年度は $^{238}\text{U}$ を標的とした実験を行った。その予備的な結果を図2に示す。この結果から、すでいくつかの原子核に対して初の質量数分布の結果が得られたことがわかる。

### 2. 2 核分裂片の崩壊熱と遅発中性子収率の研究

核分裂片の崩壊熱及び遅発中性子収率の計算精度を高めるため、核分裂生成核種の $\beta$ 崩壊半減期、 $\beta$ 線・ $\gamma$ 線のエネルギー分布、遅発中性子放出率の既往の実験データを収集してデータベース化するとともに、 $\beta$ 崩壊半減期の大局的理論<sup>(3)</sup>計算値と実験データとの比較を行うことにより現状の大局的理論予測計算の問題点抽出を行った。大局的理論はこれまでも $\beta$ 崩壊半減期及び崩壊熱の計算に適用され、大きな成功を収めてきたが、今回は娘核の高励起状態への遷移に対応する遅発中性子放出過程に適用することを目的として強度関数の形及びパラメータを修正する。

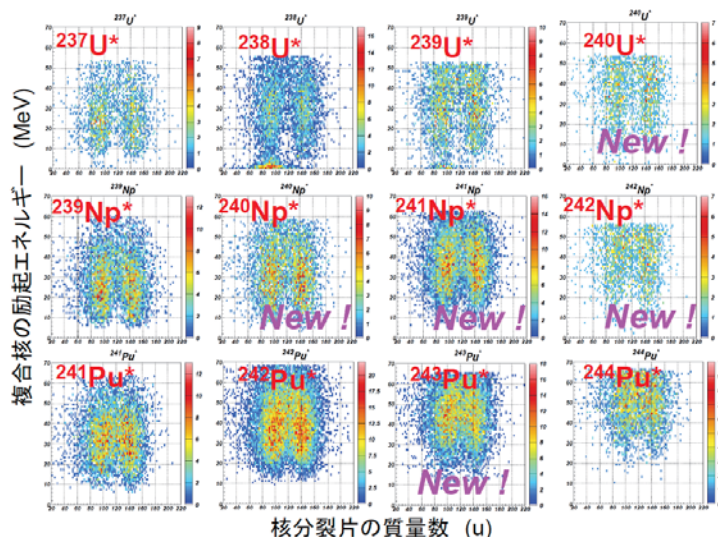


図2  $^{18}\text{O}+^{238}\text{U}$  代理反応によって得られた様々な複合核からの核分裂片の質量数分布の励起エネルギー依存性（予備的な結果）。各パネルにおいて、横軸が核分裂片の質量数、縦軸が励起エネルギー (MeV)。New!は本手法で初めて得られたデータ。

図3左に $\beta$ 崩壊半減期の大局的理論による計算値( $T_{th}$ )と実験値( $T_{exp}$ )の比の対数を $\beta$ 崩壊のQ値の関数として示す。Q値の大きい場合はある程度の収束が見られるが小さい所でばらつきが大きくなっている。しかしある程度の偶奇性が見られ、殻補正エネルギーなどとも対エネルギーの関数としての調整可能性を示唆している。また図3右には $\beta$ 遅延中性子放出率を $\beta$ 崩壊率 $\lambda$ で除した値の理論値と計算値の比を示す。いくつかの領域で系統的な過大評価となっており、今後、 $\beta$ 崩壊強度関数の修正により予測精度を向上させることを検討している。

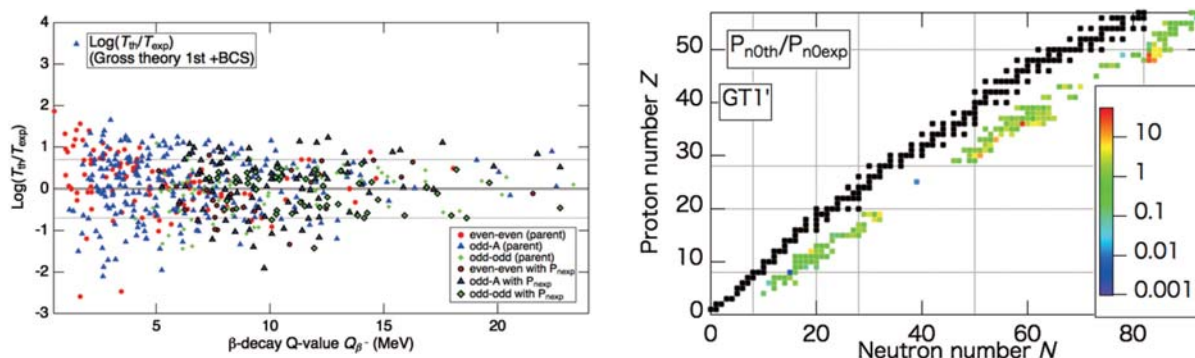


図3 左： $\beta$ 崩壊半減期の理論値と実験値の比の対数。右： $\beta$ 遅延中性子放出率/ $\lambda$ の理論値と実験値の比

### 2. 3 核分裂片独立収率計算手法の開発

核分裂をブラウン運動と見なし原子核形状の時間発展から核分裂片の同位体分布（一次収率）を計算する手法を開発する。そのために必要な多次元のポテンシャルエネルギーを2中心殻模型で、原子核形状の時間発展を多次元ランジュバン方程式により求め、同時に核分裂片間での核子移行を計算するための最初の定式化及びコード化を行った<sup>(4)</sup>。その結果の例を図4に示す。核分裂の動的計算でこれだけ高精度で核分裂片質量数分布のデータを再現できた例はこれまでに無い。

しかし、質量数分布における重い核分裂片のピークは良く再現しているが軽い核分裂片のピークが重い方にずれている。実際には、計算と実験を比較するためには計算値に即発中性子放出の補正を施すことが必要であり、これを核データ評価 (2.4) として行っている。この他に核分裂片の全運動エネルギー分布はデータと良く一致していることを確認した。今後、代理反応で得られた MA の質量数分布を再現するよう計算手法を高度化して行く。

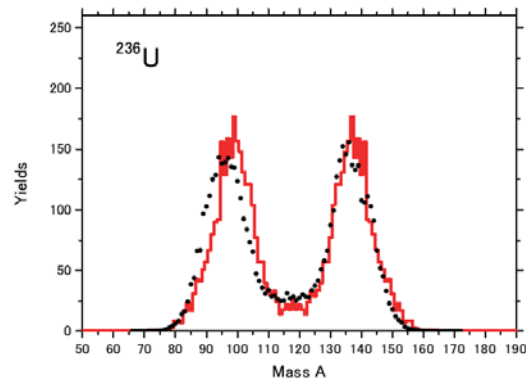


図4 本手法により計算された核分裂片の質量数分布（赤のヒストグラム、核分裂直後の一次収率分布）と実験データ（黒丸=JENDL-4の核分裂収率データ:独立収率分布）

## 2. 4 核データ及び原子炉動特性の評価

核データ評価においては即発中性子放出の補正を行って核分裂独立収率に変換した動力学模型の結果及び代理反応の結果を用いて核分裂収率に関するデータ評価を行うために、図4のデータを用いるデータ補正及び ENDF 形式での出力プログラムの開発を行った。

原子炉動特性の評価においては遅発中性子に関する積分評価が可能な臨界実験データを収集する。このために積分評価用データの収集と活用可能なデータのレビュー、データ収集のための文献、データベースの調査を行った。また積分評価のための入力データを整備した。

## 3. 今後の展望

代理反応においては標的を変えた測定を継続し、より多くの核分裂収率データ（その中の多数が世界初の予定）を取得する。β崩壊の大局的理論計算及び核分裂収率のランジュバン計算においてはモデルの高度化を推進し定量性を高める。またデータ評価においてはこれらの研究により得られた成果のベンチマークを行うための準備を継続して行う予定である。

## 4. 参考文献

- (1) Keepin, G. R. et al., “Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium, and Thorium”, Phys. Rev. 107, 1044(1957).
- (2) Brady, M. C. and England, T. R., “Delayed neutron data and group parameters for 43 fissioning systems”, Nucl. Sci. Eng. 103, p.129(1989).
- (3) Takahashi, K. and Yamada, M., ” Gross Theory of Nuclear  $\beta$ -Decay”, Prog. Theor. Phys. 41, 1470 (1969).
- (4) Aritomo, Y. and Chiba, S., “Fission process of low excited nuclei with Langevin approach”, Phys. Rev. C 88, 044614(2013).