

令和元年6月7日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17663

研究課題名(和文)既存原子炉および次世代原子炉の安全性向上を目指したMA遅発中性子の影響解明

研究課題名(英文) Study of MA delayed neutrons aiming at improving the safety of present and next-generation nuclear reactors

研究代表者

湊 太志 (Minato, Futoshi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職

研究者番号：00554065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実験で測定が難しいマイナーアクチニド(MA)の核分裂片から放出される遅発中性子の数を導出するため、核理論モデルに基づく新しい数値計算コードの開発を行った。遅発中性子が放出される要因である核分裂片の崩壊を、従来モデルよりも高い予測精度で再現できるように、有限レンジ対相関や崩壊の第一禁止遷移、変形度の導入など様々な工夫を行った。その結果、崩壊計算において、第一禁止遷移、アイソスピン $T=0$ 有限レンジ対相関、変形度の3つの特徴と遅発中性子を理論予測できる崩壊計算コードを世界で初めて開発した。これにより、崩壊と遅発中性子を従来モデルより高精度に予測することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核分裂によって生み出される核分裂生成物から放出される放射線を、実験で全て測定することは現状難しいことが知られている。本研究の成果は、その放射線を、最新の理論モデルを用いて求めることを可能にしたことである。このことにより、原子炉の稼働で生成される副産物であるマイナーアクチニド(MA)から放出される遅発中性子の量を、予測するための基礎を構築することができた。原子炉の安全運転に重要な遅発中性子を理論的に予測する重要な成果である。

また本成果は、使用済核燃料から放出される崩壊熱の高精度予測や、宇宙における重元素合成など、原子炉の安全性向上以外の研究においても、今後応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a new numerical calculation code based on nuclear theoretical models to derive the number of delayed neutrons emitted from fission fragments of minor actinides (MA), which are difficult to measure experimentally. In order to predict nuclear beta-decays, which trigger the delayed neutron emission from fission fragments, in a high accuracy, we introduced the first forbidden transitions, isospin  $T=0$  finite-range pairing, and nuclear deformation into our model. As a result, we could develop new code capable of calculating delayed neutrons considering aforementioned three characteristics. This is the world's first achievement in terms of beta-decay calculations. This product enables us to calculate beta-decay and delayed neutron in a higher accuracy than conventional models calculating beta-decay.

研究分野：原子核物理

キーワード：遅発中性子 崩壊 原子核構造 核分裂片

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

世界のエネルギー需要と福島事故後に原発に向けられる人々の思いを鑑みるに、より安全の視点に立った原子炉の研究開発が不可欠である。原子炉の開発要素として、炉内の中性子数の時間変化を定量的に理解することが求められる。その中で、核分裂後に放出される遅発中性子の情報は、原子炉の制御に非常に重要である。これまでの原子炉設計には、約 50 年前に測定された遅発中性子の積分データが主に使われてきた。しかし、このデータは、ウランとプルトニウムから測定データしかない。実際の原子炉では、ウランやプルトニウムに加えて、マイナーアクチニド (MA) と呼ばれるウランより重い原子核が作られており、MAの核分裂から発生する遅発中性子が、原子炉の安定した運転に不定性を与えていることが考えられる。そのため、MAの遅発中性子データを新たに取得することで、既存の原子炉をより安定に制御できるだけでなく、従来よりも安全を担保した原子炉設計が可能になる。そこで、MAの核分裂片である個々の中性子過剰核の遅発中性子を調べ、総和計算を行うことで、MAの遅発中性子を予測する方法が提案されている。しかし、現在の最新の実験手法によっても、遅発中性子を放出する核種の約半分しか測定することができない。そのため、実用的な遅発中性子データを完備するためには、実験と相補的に、理論的なアプローチを導入する必要がある。

### 2. 研究の目的

実験で測定することが難しい遅発中性子の情報に理論予測値を与え、安全な原子炉設計に資する遅発中性子データベースを築くことが目的である。本研究で明らかにすること（本研究のアウトプット）は、以下の通りである。

- (1) 理論計算コードを用いて、実験で測定されていない遅発中性子放出率と放出スペクトルに理論予測値を与える。
- (2) 既存の遅発中性子実験データ、理論予測値、そして核分裂収率データを利用して総和計算を行い、MA遅発中性子データベースを開発する。
- (3) 原子炉物理の専門家と協力して、MA遅発中性子データベースを用いた原子炉シミュレーションを実行し、炉内の中性子数と炉特性に与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

$\beta$ 崩壊の計算には、研究代表者が開発してきた QRPA 計算コードを用い、得られた離散準位から放出される遅発中性子の放出率と放出スペクトルを導出する。理論計算の予測精度を評価するために実験データとの比較検証を行い、適切な核子間相互作用パラメータを決定する。決定された核子間相互作用パラメータを用いて、遅発中性子の放出率と放出スペクトルをまとめ、遅発中性子データベースを作成する。得られた遅発中性子データベースから、原子炉シミュレーションに必要な遅発中性子のインプットデータを作成する。核分裂後に放出される遅発中性子の総和計算で必要となる核分裂収率データは、原子力機構の核データ研究グループが管理している JENDL 核分裂収率ライブラリ (JENDL/FPY-2011) を利用する。

### 4. 研究成果

研究代表者が開発した QRPA 計算コードを用いて得られたカドミウム同位体の  $\beta$ 崩壊の半減期の結果を、実験データと比較して、図 1 に示す。適切な核子間相互作用パラメータとして、粒子空孔状態には  $Sk0'$  力を用いている。また、本研究の特色は、対相関力のアイソスピン  $T=0$  の項には、従来型のゼロレンジ相互作用ではなく、有限レンジ相互作用を採用している。また、有限レンジ相互作用に加えて、 $\beta$ 崩壊の第一禁止遷移の効果と原子核の変形効果を考慮してい

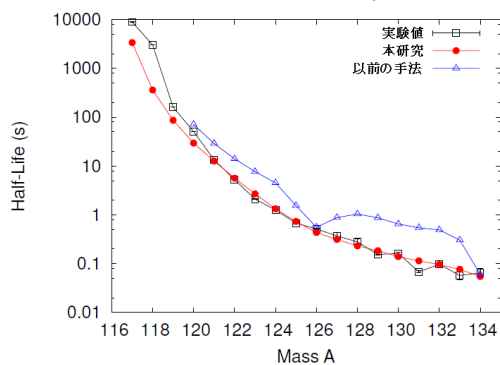


図 1: カドミウム同位体の半減期の実験データ (□) と本研究における理論計算結果 (●)、および以前の手法による結果 (△)

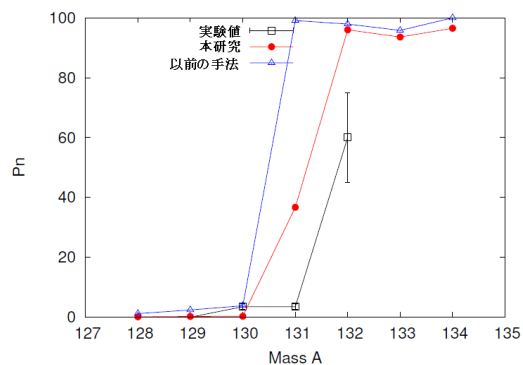


図 2: カドミウム同位体の遅発中性子放出分岐比 ( $P_n$ ) の実験データ (□) と理論計算結果 (●)、および以前の手法による結果 (△)

る点も、本研究に用いた計算コードの特色である。下の図1は、カドミウム同位体の理論計算結果を、実験データと比較したものである。本研究で行った理論計算値は、以前の手法（有限レンジ相互作用と第一禁止遷移を導入していない計算手法）よりも実験データをよく再現していることが分かる。図2は、カドミウム同位体の遅発中性子分岐比を示している。実験データはA=130, 131, 132にしかないが、本研究で行った理論計算は、以前の手法よりも実験データの傾向をつかんでいる。また、この計算では、A=133, 134において、遅発中性子分岐比がそれぞれ94、97になることを予測している。

また本研究では、核分裂後に放出される遅発中性子の総量（遅発中性子収率）についても調べた。特に、遅発中性子収率の入射中性子エネルギー依存性に着目して、その評価を実施した。入射中性子エネルギー依存性は、核分裂収率に現れるため、エネルギー依存性をもたせたパラメータを、新たに核分裂収率の理論モデルに導入し、遅発中性子収率の計算を行った。図3は、熱中性子を照射した後のプルトニウム239 (Pu-239) から放出される遅発中性子収率の時間変化を示している。実験データとして、Keepinらによるデータを同時にプロットしている。本研究で得られた結果を、従来の核分裂収率を用いた計算(JENDL/FPY-2011(MODIFY))と比較すると、実験データにより近い結果を示していることが分かる。この研究で得られた知見は、MAから放出される遅発中性子収率の導出に資するものである。また、原子炉シミュレーションによって炉内の中性子数と炉特性に与える影響を明らかにする際には、この手法を通して得られた群定数が必要となる。

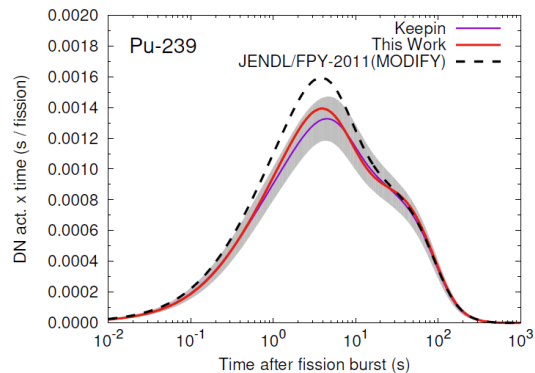


図3：熱中性子を照射後の U-235 から放出される遅発中性子収率の時間変化。

また、原子炉シミュレーションによって炉内の中性子数と炉特性に与える影響を明らかにする際には、この手法を通して得られた群定数が必要となる。

研究計画中に研究目的②に記載した MA 遅発中性子データベースを完成させることはできなかったが、2019 年度中に論文を投稿し、得られた結果を収録したデータベースを日本原子力研究開発機構核データ研究グループのウェブサイト上に公開できる見通しである。③についても、MA 遅発中性子データベースを完成させたあと、上記の遅発中性子収率のエネルギー依存性の研究に用いた手法を通して、研究を継続する予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Futoshi Minato, “Neutron energy dependence of delayed neutron yields and its assessments”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 査読有、Vol. 55, p.1054 (2018).  
Doi: 10.1080/00223131.2018.1470947
- ② Futoshi Minato, “Proton-neutron random phase approximation studied by the Lipkin-Meshkov-Glick model in the SU(2) x SU(2) group,” *Acta Physica Polonica B; Proceedings Supplement*, 査読有、Vol. 10 p.131 (2017).  
Doi: 10.5506/APhysPolBSupp.10.131
- ③ Futoshi Minato, “Estimation of a 2p2h effect on Gamow-Teller transitions within the second Tamm-Dancoff approximation,” *Physical Review C*, 査読有、Vol. 93, 044319 (2016).
- ④ Futoshi Minato, “Calculation of beta decay half-lives and delayed neutron branching ratios of fission fragments with Skyrme-QRPA,” *EPJ Web of Conference*, 査読有、Vol.122, p.10001 (2016).

[学会発表] (計 9 件)

- ① 湊太志, “微視的モデルによる系統的  $\beta$  崩壊計算と今後の課題”、核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会、2019 年 3 月、北海道大学、札幌
- ② 湊太志, “コアの偏極効果を取り入れた  $\beta$  崩壊と遅発中性子の研究”、5<sup>th</sup> Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Hawaii 2018)、2018 年 10 月、ハワイ州、米国
- ③ 湊太志, “最新の評価済崩壊データを用いた遅発中性子収率の入射中性子エネルギー依存性”、日本原子力学会 2018 年秋の大会、2018 年 9 月、岡山大学、岡山
- ④ 湊太志, “応用に向けた微視的核構造モデルによるベータ崩壊と遅発中性子研究”、理化学研究所研究会「重力波観測時代の r プロセスと不安定核」、2018 年 6 月、理研、和光
- ⑤ 湊太志, “奇奇核における三体模型；コア励起は何を変えたのか？”、Recent Progress of

Nuclear Structure and Reaction Theory、2018年4月、東北大学、仙台

- ⑥ 湊太志、” Second proton-neutron random phase approximation studied by the Lipkin model in SU(4) basis,” First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of Nuclear Structure and Dynamics, 2016年12月15日、筑波大学、つくば
- ⑦ F. Minato, “Second proton-neutron Random Phase Approximation Studied by the Lipkin Model in the SU(4) basis,” XXIII Nuclear Physics Workshop, 2016年9月28日、Kazimierz-Dolny, Poland
- ⑧ 湊太志、“準粒子乱雑位相近似法を適用したベータ崩壊データベースの作成”、日本原子力学会2016年春の大会、2016年3月28日、東北大学、仙台
- ⑨ 湊太志、“ガモフテラー遷移とテンソル相関”、高エネルギー加速器研究機構理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の理論的課題と将来」、2015年11月25日、高エネルギー加速器研究機構、つくば

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

原子力機構 核データ研究グループ [https://www.ndc.jaea.go.jp/index\\_J.html](https://www.ndc.jaea.go.jp/index_J.html) にて  
公開予定

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：長家康展

ローマ字氏名：Yasunobu Nagaya

研究協力者氏名：Paraskevi Demetriou

ローマ字氏名：Paraskevi Demetriou

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。