

▲▼ 会議のトピックス(III) ▼▲

## β 遅延中性子放出のための参照データベースに関する 第二回研究協力会議参加報告

2nd RCM on "Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission Evaluation"

日本原子力研究開発機構

湊 太志

[minato.futoshi@jaea.go.jp](mailto:minato.futoshi@jaea.go.jp)

東京工業大学

千葉 敏

[chiba.satoshi@nr.titech.ac.jp](mailto:chiba.satoshi@nr.titech.ac.jp)

---

### 1. はじめに

標記会合が 2015 年 3 月 23 日から 27 日にかけてウィーンの IAEA 本部において開催された。本会合は 2013 年 8 月 26~30 日に行われた第 1 回に続くものであり、その時のレポートは核データニュース、No.107(2014)を参照されたい。コーディネーターは初回と同様に NDS の Paraskevi Dimitriou 氏である。国内からは前回と同様に東工大の千葉、原子力機構の湊が参加した。

### 2. 会議の概要

本会議では、2013 年に開催された第一回会合で各出席者に設定された研究課題の成果報告と、以下に紹介するウェブ上で利用可能な遅発中性子データベース公開へ向け、各参加者に再度必要な作業の確認が行われた。

会議の前半 2 日間は、出席者による研究課題の成果や遅発中性子に関する進展について報告がなされた。この中で、この CRP の目的の一つである遅発中性子データベースの概要と試験版が、会期中に Dimitriou 氏と NDS の Verpelli 氏により説明された。このデータベースには、これまでの各国の遅発中性子に関するレポートとともに、本 CRP で各参加者の行った研究成果が採録される。核反応・核データ評価に用いられる基本データを集合した RIPL のように、IAEA のウェブ上で公開される予定である。後半の 3 日間は、出席者間でこれまでの研究成果に対する議論を行うとともに、遅発中性子データベースの完成に向け、各参加者の課題設定が再度検討され、次回までの宿題となった。なお、今回

の会議で発表者が使用したプレゼンテーションファイルは以下の URL より参照することができる。

[https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index\\_2rcm.html](https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index_2rcm.html)

### 3. 会議内容

初日は、ベータ遅発中性子の理論研究の成果報告から始まった。発表は千葉と湊、ロシアの Borzov 氏（クルチャトフ研究所国立研究センター）、そしてクロアチアの Marketin 氏（ザグレブ大学）によって行われた。千葉は代理反応実験で得られた核分裂片の実験データについて紹介するとともに、改良された大局的理論で導出されたベータ遅発中性子放出分岐比による総和計算の結果を報告した。湊は、1) 中性子誘起核分裂におけるベータ遅発中性子の入射中性子エネルギー依存性の計算結果、2) 微視的理論と統計理論を用いたベータ遅発中性子放出分岐比の計算結果、3) アクチノイド核の核分裂によって生成される総遅発中性子量の遅発中性子分岐比に対する感度計算と重要となる遅発中性子先行核のリスト作成、4) r-process 元素合成過程の元素量の遅発中性子分岐比に対する感度計算、の報告を行った。ちなみに JENDL/FPY-2011 を使った  $^{235}\text{U}$  の感度計算では  $^{86}\text{Ge}$  が収率に対して強い感度を示す結果が得られる。しかし、この結果は正確ではない可能性がある。なぜならば、JENDL-4.0 および JENDL/FPY-2011 の  $^{86}\text{Ge}$  の収率が核図表近傍の核種と比較して非常に大きいという問題が、以前より指摘されているためである。JENDL-4.0 および JENDL/FPY-2011 が基としている ENDF にも同様の収率が見られる。これに関連して、近いうちに  $^{86}\text{Ge}$  の収率を修正した JENDL/FPY-2011 収率ファイルが核データ研究グループの JENDL 特殊目的ファイルの場所にアップデートされる予定である。それを利用した遅発中性子に対する感度解析も実行しており、 $^{86}\text{Ge}$  の影響は収率に対しても遅発中性子分岐比に対しても小さい事が分かっている。また、4) の仕事は国立天文台の梶野准教授と大学院生の柴垣氏の協力による成果である。Borzov 氏は、Density Functional + 準粒子乱雑位相近似 (QRPA) 法による  $^{78}\text{Ni}$  近傍の半減期と遅発中性子放出分岐比の計算結果を紹介した。氏の計算モデルでは許容転移だけではなく第一禁止遷移も含まれ、球形核を仮定しているが一つのパラメーターセットで広い範囲の核種の計算が可能である。ただし遅発中性子の放出率は中性子閾値以上で 1 と近似しており遅発中性子スペクトルを計算することはできない。これを発展させるには、Hauser-Feshbach 統計モデルなどと合わせて計算する必要がある。Marketin 氏は相対論的 Hartree-Bogoliubov (RHB) + QRPA による半減期と遅発中性子放出分岐比の系統的な計算結果について紹介した。氏の計算モデルでは、Borzov 氏同様に許容転移と第一禁止遷移も含まれているが、変形した原子核の取り扱いも可能としている。ただし、遅発中性子の放出率は中性子閾値以上で 1 と近似し、中性子スペクトルなどを計算することができない。私的なことだが、Borzov 氏は長い間ベータ崩壊の研究に携わっている人物で、本 CRP を通して知り合えたことは大

きい収穫である。また Marketin 氏も旧知の仲であり、湊が学生時代にイタリアの ECT\*で 3 か月滞在中に同じドミトリーで過ごしたことがあったので、このように同じプロジェクトで仕事をする事ができて光栄であった。午後は実験グループの報告が行われ、米国の Rykaczewski 氏 (オークリッジ国立研究所) は、新しく測定された遅発中性子先行核の実験データと Effective Density Model という現象論的なモデルを用いた遅発多重中性子の研究について報告を行った。その他、BRIKEN プロジェクトの現状や MTAS という、ORNL の mass separator (OLTF) に接続した 1 トンの NaI(Tl)検出器を用いる TAGS 測定の結果を示し、 $^{89}\text{Kr}$  と  $^{139}\text{Xe}$  の崩壊が原子炉反ニュートリノアノーマリーの 6%を説明できることなどを報告した。スペインの Tain 氏 (バレンシア大学素粒子物理研究所) は GSI-FRS、JYFL-IGISOL に設置した BELEN-30, 48 等の測定器による結果や BRIKEN の現状報告を行った。JYFL では Rocinante という  $\text{BaF}_2$  のアレイからなる低エネルギー中性子に感度のある検出器による、中性子放出閾値近傍の  $\gamma/n$  競合の結果を、共鳴幅の揺らぎを考慮したモンテカルロ計算と比較して、揺らぎの有りと無しとで結果が非常に異なる可能性を指摘した。Algora 氏 (バレンシア大学素粒子物理研究所) は遅発中性子によって中性子過剰核の中性子しきい値の情報を引き出すことや、先行核の変形度とベータ崩壊の強度関数の相関について紹介した。またカナダの Garrett 氏 (ゲルフ大学) とイギリスの Lorusso 氏 (国立物理学研究所) はそれぞれ、カナダと理研で最近測定された遅発中性子データや半減期について報告を行った。

2 日目は、英国の Lorusso 氏 (国立物理研究所) による報告が行われた。彼の所属する研究所はサレイ大学との協力関係にある標準局である。やはり理研に EURICA という測定器を持ち込んで  $^{136,137}\text{Sn}$  の測定を行った他、Te, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sb の遅発中性子放出の測定を行っている。BRIKEN では WASABi (Wide-range Active Strip Stopper for beta and ions) という測定器により多数の核種の測定を行っている旨の報告がされた。次にカナダの Singh 氏 (マクマスター大学) から、原子番号 2 から 28 までの遅発中性子の評価済みデータについて報告があった。原子番号 28 以降は次の会合までの期間に継続して行われるようである。インドの Banerjee 氏 (可変エネルギーサイクロトロンセンター) は遅発中性子の測定および遅発中性子スペクトルの評価について報告した。カナダの Dillmann 氏 (TRI University Meson Facility) は天体物理学における遅発中性子の役割について報告し、Ciccione 氏 (マクマスター大学) は遅発中性子データベースのウェブ上の可視化システムについて紹介した。ロシアの Piksaikin 氏 (物理エネルギー工学研究所) は世界各国の核データを用いて総遅発中性子量を計算し、既存の実験データと比較してその再現性について報告した。スペインの Cano-Ott 氏 (CIEMAT) はヨーロッパで計画されている次世代原子炉のプロジェクトについて紹介をした。イギリスの Mills 氏 (国立核物理研究所) は世界各国の核データを様々な組み合わせで行ったベータ遅発中性子数の計算結果を報告し、フランスの Fallot 氏 (ナント大学スパテック研究所) は原子炉ニュートリノとベータ

タ遅発中性子の関係について報告し、アメリカの Sonzogni 氏（ブルックヘブン国立研究所）はベータ遅発中性子の共分散についての発表を行った。

3、4 日目は、前回の CRP 会合から現在までの研究進捗のまとめと、次回の CRP 会合までに進めておくべき各参加者の研究課題の設定が行われた。湊は、微視的理論モデルと統計理論を用いたこれまでの遅発中性子分岐比データを IAEA へ送ることと、核分裂生成物よりもさらに中性子ドリップラインにまで範囲を広げた原子核の遅発中性子分岐比の計算を分担することとなった。また、感度計算の結果を出席者間で共有し、原子炉や応用分野で重要なベータ遅発中性子先行核リストを共同で作成することになった。会議の最終日 5 日目は、これまでの議論の議事録の確認と修正を行った。

#### 4. おわりに

本会合では、カナダとイギリスから学生が参加していた。おそらく滞在費等は IAEA から出ていないものと思われるが、国際機関での活動に学生を連れてくるのは、未来の研究者（そうでなくても国際的に活躍できる人材）育成に大切かもしれないと感じた。

この分野の理論研究では、ロスアラモス研究所の Moller 氏が主に発展させてきた FRDM モデルとそれに基づいた発展型モデルが原子核の質量や半減期、遅発中性子分岐比を統一的に求めており、世界中の研究者に広く使用されている。しかし最近では、RHB モデルによって求められた質量が実用可能な精度にまで高まり、本会議ではさらに Marketin 氏により RHB モデルを基にした QRPA の遅発中性子計算結果が紹介され、本 CRP で作成される遅発中性子データベースにその数値データが掲載されようとしている。「基礎研究がいつの間にか身近なものに当たり前に利用されていく」といったことはこんな風に進展していくのかな、と感じさせられた。我々も基礎研究の一部を行う研究者の一人として、いつしか皆さんが当たり前に使う基礎研究成果を提供できるよう、今の研究を発展させていきたい。

さて、以下は余談である。前回の CRP の報告ではウィーンの街並みを写真に収めることがほとんどなく、核データニュースに彩りを加えることができなかった。今回は、いっぱい写真を撮ろうと準備したのだが、残念ながら唯一自由な時間が作れる金曜の午後は天気が悪く、読者の皆さんの気分をほぐすことができるような写真を撮ることができなかった。下の写真はカーレンベルグ（Kahlenberg）の丘から見たウィーン市街地である。ヌスドルフ（Nußdorf）という駅からブドウ畑を超え、隣の州にちょっと足を踏み入れ、そしてドナウ川沿いに戻ってきた。帰り道は息子へのおみやげを探しながら帰ったが、良いものは見つからなかった。千葉さんからおすすめいただいたかぼちゃとトリュフのオイルはとてもおいしく、食卓には欠かしたくないものになった。次回の会合が最後なので、買い溜めるかもしれない。

