

第2回理研における遅発中性子放出測定ワークショップ “BRIKEN: Beta delayed neutron emission measurement at RIKEN”

日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
小浦 寛之
koura.hiroyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

2013年7月30～31日に理研（和光市）のRIFB棟においてワークショップ「BRIKEN: Beta delayed neutron emission measurement at RIKEN」が開催された。BRIKENとは理研における遅発中性子放出の測定に関する国際共同プロジェクトの名称で、理研でRIBF（RIビームファクトリー）の超伝導RIビーム生成分離装置BigRIPSの下流に遅発中性子測定装置を設置して、RIBFが生成する不安定核の遅発中性子を測定するというプロジェクトである。今回の会合はその実務的な内容を議論するワークショップであり、2012年12月にスペインのバレンシアで第1回が開催されている。

現在BigRIPS下流には大球形ゲルマニウム半導体検出器が設置されている。これはRIBFと欧州ガンマ線検出委員会との核分光研究プロジェクト「EURICA（ユーリカ）」によって導入されたものである。このプロジェクトは2012年3月～2013年6月の期間で行われ、核分光に関するさまざまな実験が集中的に実施されてきたが、このほどプロジェクト期間が終了した。BRIKENはEURICAに続く国際共同プロジェクトとなることをめざして立ち上げられたものであり、ワークショップを開いてその意義および期待される成果を議論した。

2. 遅発中性子放出測定の意義

遅発中性子は原子炉において臨界を制御するのにきわめて重要な役割を果たしている。その遅発中性子はウランなどが核分裂した際の核分裂片から放出されるが、その個々の核種から放出される β 崩壊遅発中性子割合 P_n を累積核分裂収率 Y_c に掛けて、それを全ての核分裂核種に対して足し合わせたものが平均遅発中性子割合 $\bar{\nu}_d$ となる。これが遅発中性子における総和計算の考え方である。その意味で各核種の P_n を精度よく測定すること

は遅発中性子の振る舞いを理解するのに ($^{235}\text{U}+n_{th}$ など軽水炉関連に対しても、また高燃焼度原子炉において寄与が大きくなるマイナーアクチノイドに対しても) 重要といえる。一方、天体核物理の観点では r 過程元素合成における遅発中性子放出の影響が議論される。r 過程は超新星爆発など極めて中性子高密度の環境下で起こる中性子捕獲過程であるが、その中性子捕獲過程と競合する β 崩壊および r 過程が終了した後の β 崩壊の際に遅発中性子を放出し、最終的な同位体生成比に影響を与える可能性が指摘されている¹。また、その割合自体は原子核の核構造の詳細から影響を受けていると考えられる。つまり遅発中性子は原子力、天体核、原子核構造に共通したテーマとなり得る。BRIKEN はこのような背景を動機付けとして意図されている。

遅発中性子割合が測定された核種は筆者の認識ではこれまで 160 核種以上あり (上限、加減を与えるのみなど実験対象となった核種としては 200 核種以上)、2 個放出する P_{2n} もかなり測られているようである (後述)。BRIKEN プロジェクトの目的は中性子のスペクトルは考慮せず、その代わりに P_n のみならず、 P_{2n} 、 P_{3n} といった多中性子放出割合を多く測定したいというところのようで、後述するようにセットアップは多中性子放出を測定することを意図したデザインとなっている。以下研究会の内容を時系列で追って列記しつつ、所々筆者のコメントを交えて紹介する。

3. 研究会の内容 1 : EURICA および BRIKEN の主旨

議論に先立って西村氏 (理研) が EURICA プロジェクトのサマリーを行った。EURICA では 2 年の期間に ^{238}U ビーム照射に対して 9 課題、 ^{124}Xe ビーム照射に対して 2 課題、その他 3 課題の実験が行われたこと、現在 U ビームで 10pnA を順次増強し、5 年後には 100pnA を超える強度を目指すとのことであった。



写真 1 : Domingo-Pardo 氏

続けて BRIKEN プロジェクトのとりまとめ役である

Domingo-Pardo 氏 (IFIC (CSIC, University of Valencia)) がプロジェクトの概要を説明した。BRIKEN は天体核物理研究、核構造研究、原子炉技術の 3 つに対する必要性から企画されたということを強調しており、そのために中性子過剰核の遅発中性子放出割合 P_n の測

¹ 筆者の印象で言えばおそらく r 過程生成比のうち偶奇による増減を埋め合せて、なます効果がある程度で、生成比の全体の振る舞いを変えるほどの効果はあまり期待できないようにも思う。

定が重要である。そこで理研の BigRIPS で生成される大強度の中性子過剰不安定核を利用して、それらの P_n を測定するというものである。その測定手法としてはポリエチレンで満たされた装置の中心に目的の核種を誘導し、その周りを取り囲むように ^3He が通る多数のチューブを配置し、その核種から放出される中性子と ^3He との反応 ($^3\text{He}+n\rightarrow^3\text{H}+^1\text{H}+765\text{ keV}$) を利用して中性子数を測定し、それから中性子放出率 P_n 、 P_{2n} 、 P_{3n} …を得ようという原理である。昨年 の第 1 回会合では一案として 48 本のチューブで取り囲み、0.5 MeV の中性子で 48% の効率となるというシミュレーションの結果を紹介していた。

4. 研究会の内容 2 : 他の研究機関の状況

続いて F. Montes 氏 (NSCL ミシガン州立大) は NSCL における中性子測定装置 NERO (Neutron Emission Ratio Observer) を紹介し P_n 測定の実績を説明した。NERO はポリエチレンモデレータ内に計 16 本の ^3He チューブおよび 44 本の BF_3 チューブを配置し、その中心に目的の核種が配置するように取り囲んだ設計で (図 1)、前述の ^3He の反応に加えて $^{10}\text{B}+n\rightarrow^7\text{Li}+^4\text{He}+2310\text{ keV}$ および $^7\text{Li}^*\rightarrow^7\text{Li}+480\text{ keV}$ の反応・崩壊を利用して測定するものである。これまで 38 核種の P_n を測定した実績があるとのことである。

続いて K. Rykaczewski 氏 (ORNL) による Digital beta-delayed neutron detector である $^3\text{He}n$ の紹介があった。ORNL のタンデム加速器 HRIBF では ^{238}U の陽子誘起核分裂により多量の中性子過剰核を生成することが可能であり (例えば ^{86}Ga の場合、 $15\mu\text{A}$ の陽子で 1 時間当り千個生成。彼らが比較した理研 RIBF の 2010 年時の実績では 0.2pnA の ^{238}U で 1 時間当り十個生成²⁾、中性子過剰核の研究に関して多くの成果を残してきた。残念ながら HRIBF は現在シャットダウンの状態である。関係者は今後の研究活動場所を模索しているところであり、日本に対しても理研 (実験 PAC 申し込

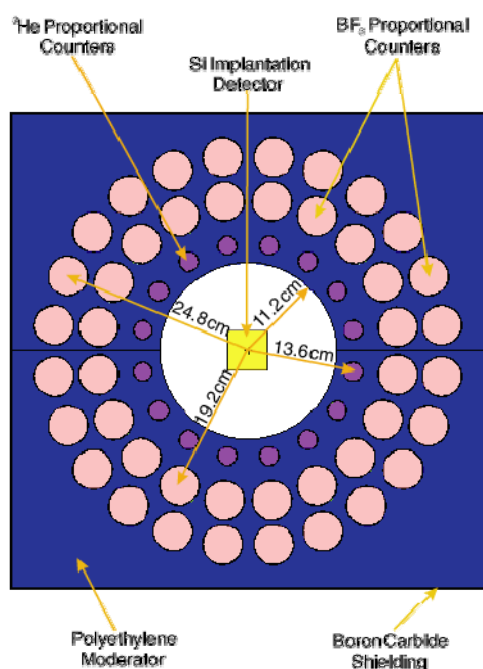


図 1 : NERO の模式図。目的の核種 (中心) を取り囲むようにチューブが配置され、 ^3He が通される。

http://www.nscl.msu.edu/files/nero_390.gif より。

² RIBF もアップグレードされているので現在は単純な比較はできない。

みなど。今回の **BRIKEN** プロジェクトも含む) や原子力機構 (先端基礎研究センターの黎明研究採択など) などと共同研究を提案している。Rykaczewski 氏は HRIBF での 2012 年までの成果を報告した。 ^3He は高密度ポリエチレンの円筒中に 72 本の ^3He を通すチューブからなる構成で、NERO より倍以上の効率があるとのことである。また、中性子と同時にガンマ線も同時に測る目的で LeRIBSS (Low-energy Radioactive Ion Beam Spectroscopy Station) と組み合わせたハイブリッド検出器も紹介していた。同時計測は多様な物理情報を引き出せる利点が多いが、この場合、 ^3He を通すチューブを 42 本と落とし、効率は中性子検出として 20~30% と少し落ちるようである。研究成果としては、 ^{86}Ga (執筆時点で $A=86$ 同重体の中で最中性子過剰の既知核種) の β 崩壊からの P_{1n} および P_{2n} を紹介し、それぞれ 60%、20% の測定結果を得て論文投稿中とのことである。なお、Rykaczewski 氏は IAEA が 2013~2017 年の期間で企画している遅発中性子に関するプロジェクトにも言及しており、現在の遅発中性子測定研究を取り巻く環境において、その重要性を強調していた。

続いて R. Caballero-Folch 氏 (DFEN-UPC) が BELEN (Beta dELayEd Neutron detector) の紹介をした。BELEN も ^3He 型検出器で、2009 年にフィンランドのユバスキラの IGISOL で 20 本の ^3He チューブのデザインで始め (^{85}Ge 、 $^{85,86}\text{As}$ 、 ^{91}Br の P_n を測定)、2011 年にドイツ GSI の FRS で 30 本と増やし (^{209}Hg 、 $^{211,212,213}\text{Tl}$ を測定、現在解析中)、遅発中性子測定に実績を上げている。2013 年の現在は 48 本に拡張しているとのことである。

5. 研究会の内容 3 : **BRIKEN** における最適なジオメトリは？

日本からは松井氏 (東大) が、RIBF に **BRIKEN** を設置することを想定して、BigRIPS の下流の ZeroDegree Spectrometer のある F11 ホールでの中性子のバックグラウンド測定をした報告があった。EURICA 実験中に測定したもので、結論としては中性子のバックグラウンドが極めて低く、RIBF での中性子実験は十分可能であるとのことであった。

G. Cortes-Rossel 氏 (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona) は様々な条件を想定し (チューブの半径、個数、 ^3He の圧力、中性子エネルギーが 1、3、5 MeV それぞれに対して、 $1n$ 、 $2n$ の場合の効率)、それらに対するシミュレーションを行った結果を発表した。この詳細のシミュレーションは、翌日の **BRIKEN** のデザイン選定の議論の際に大いに参考となっていた。

以上 1 日目の様子である。

6. 研究会の内容 4 : プロポーザル

研究会 2 日目は **BRIKEN** でどの領域の核種を、どのような動機付けで測定したいのかというプロポーザルを各提案者が紹介した。

西村氏 (理研) は質量数 $A=110\sim 125$ 付近の中性子過剰核の測定 (半減期が主でそれに

付随して P_n も、という形で) を提案した。この領域は r 過程の第 2 ピーク手前に位置しており、特に $A=110$ 領域では r 過程計算の理論モデルによっては著しく生成量が少なくなってしまうことが指摘されている。その原因がこの領域における原子核の形状が強く変化するからなのではないかと、核構造の観点からも興味をもたれている領域である。西村氏はこれを実験的に確認したいと主張していた。

F. Monte 氏は $A=130$ 付近の P_n 測定を提案した。彼の主張によるとこの付近の P_n が大きいと r 過程のフリーズアウトが速く起こり、 P_n が小さいとフリーズアウトが遅く起こるので、測定をすることで理論モデルの選別ができるのではないかと主張であった。

Domingo-Pardo 氏は r 過程の希土類のピークに着目し、 r 過程の後半部分の反応における P_n の値が希土類のピークに影響を与えるので重要であるという主張であり、そこにアクセス可能なのは現在では RIBF のみである。彼は RIBF+BELEN をイメージした形での BRIKEN 装置を提案した。

M. Marta 氏 (Helmholtz) は r 過程の影響の興味をむしろ多中性子放出にもっており、BRIKEN のデザイン選定において多中性子放出の効率が低くならないように注意を促していた。なお、彼のまとめによると P_n は ${}^8\text{He}$ - ${}^{150}\text{La}$ 間で 227 核種、 P_{2n} は 27 核種、 P_{3n} は 6 核種 (${}^{11}\text{Li}$ - ${}^{31}\text{Na}$) がこれまでに測定されたとのことである。

Rykaczewski 氏は HRIBF が主に P_n の研究にとどまっていたので、BRIKEN では P_n のみならず P_{2n} への大きな拡張を期待していた。また、ガンマ線同時測定の重要性も強調し、BRIKEN に対しても ORNL と同様のハイブリッド検出器の作成を進めていた。彼は ${}^{78}\text{Ni}$ (P_n)、 ${}^{81}\text{Cu}$ (P_{1n} 、 P_{2n} 、 γ)、 ${}^{82}\text{Zn}$ (P_{1n})、 ${}^{134}\text{In}$ (P_n のこれまでの報告値が有意に異なっているのでテストとして)、 ${}^{135}\text{In}$ ($P_{1,2,3n}$) ${}^{136}\text{In}$ ($P_{1,2,3,4n}$) といったように具体的な核種での測定を提案した。

R. Grzywacz 氏 (University of Tennessee/ORNL。今回不参加で Rykaczewski 氏が代理) は核構造を具体的にみることのできる量として P_n をとらえ、 ${}^{54}\text{K}$ ($P_{2,3n}$ 測定。N=32 閉殻の研究として)、 ${}^{74,75,76}\text{Co}$ (P_{12n} 測定。N=50 近傍の B(GT)の系統的検証として)、 ${}^{78}\text{Ni}$ (P_{1n} 測定。殻模型の検証として)、といった核種での測定の提案をした。

7. 飛び入り

2 日目の午後に急遽筆者が話すこととなった。筆者はもともと参加のみで話を聞くだけで発表は想定していなかったのだが、初日の開始前に世話人の G. Lorusso 氏 (理研) に挨拶した際に自分が遅発中性子放出の研究プロジェクトで理論の立場で仕事をしていると話したら、可能であればぜひ発表して欲しいということであった。そういう訳でトピック提供という立場で、現在東工大-原子力機構で進行中の JST 事業「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 (平成 24 年 11 月~27 年度末)」の概要と、筆者が担当している「 β 崩壊に伴う遅発中性子放出および崩壊熱の理

論的研究」の紹介を行った。本事業はマイナーアクチノイド (MA) 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目的としたもので、MA の核分裂集率を実験及び理論的に得、それをもとに MA の遅発中性子放出率および崩壊熱を導出しようと言うものである。筆者は崩壊熱及び遅発中性子放出の理論計算を担当しており、後者で言えば遅発中性子放出割合 $\bar{\nu}_d$ を各核種の P_n および核分裂収率の総和計算から算出し、軽水炉に主要に関わる $^{235}\text{U}+n_{th}$ などの $\bar{\nu}_d$ の精度良い再現および MA の $\bar{\nu}_d$ の予測を図るというものである。質疑応答では P_n に対する β 崩壊強度関数の高励起部分の重要性 (Algora 氏) や Los Alamos グループとの計算手法の違い (Rykaczewski 氏) などに関する質問を受けた。

8. 研究会の内容 5 : 高励起部分の強度関数への興味

Valencia グループは TAGS (全吸収ガンマ線分光) でパンデモニウム問題の解決の道を作ったことで遅発中性子や崩壊熱に関心がある者にはなじみが深い³。IFIC-CSIC Valencia からは A. Algora 氏と B. Rubio 氏が発表を行った。BRIKEN への提案というよりは彼らの研究の紹介といった立場であった。

Algora 氏は TAGS、 4π 中性子モニターおよび n-ToF を組み合わせることにより、パンデモニウム問題を回避しつつ P_n および中性子エネルギーを同時に測定しようという TAS (Total Absorption Spectrometer) のアイデアを紹介した。また、トピックとして B(GT)測定と原子核の形状との関連を紹介した。Gamow-Teller 強度 B(GT)値を娘核の基底状態から順に積み上げた和が、原子核の形状が球形、プロレイト、オブレイトの場合で顕著に異なる傾向を示すという指摘があり (実験では ^{76}Sr 、 ^{74}Kr で既実施とのこと) 彼らはこれまで TAGS 実験で対象とした核種 Zr、Mo の中性子過剰同位体 ($A=100\sim 110$ 近辺) を用い、高励起状態のより詳細な情報を得たいとこのことのようにであった。

B. Rubio 氏は彼女らがこれまで開発を進めてきた TAS のデザインを紹介した。また、B (GT) のトピックとして ^{132}Sn 近辺の β 崩壊からの B(GT)値の和則問題 (実験値の B(GT)値の和が理論が要請する和則に比べて著しく小さい) を紹介した。彼女らは β 崩壊 Q 値が大きい核種の崩壊に興味を持っており、 β 崩壊強度関数の完全な図を記述したいというのが目標であるとまとめていた。

9. 研究会の内容 6 : 原子核質量値の重要性

A. Estrad 氏 (エジンバラ大) は、海外からインターネットビデオ発表を行い、原子核質量値の重要性を主張した。(BRIKEN だけではなく Nuclear Masses を加えた MBRIKEN だと (半分 joke で) 主張していた)。r 過程生成の理論計算は用いる理論質量値に大いに

³ 例えば吉田正氏による「原子炉崩壊熱におけるパンデモニウム問題の発見からその解決まで」核データニュース No.99(2011)p.1 参照。

依存し、実際中性子過剰核での質量理論値は質量計算模型間で大きく偏差することがわかっている。質量の理論計算をしている筆者としてもこの指摘は重要と認識しており（理論反応・崩壊計算において入力値として質量値（の差）が常に必要で、質量未測定核種では理論予測値を用いる）、ある物理量を測定する際にどの量が支配的であるかは常に意識しておく必要があると思う。質量測定に関しては理研側でも多重反射型飛行時間測定式質量測定器（multi-reflection time-of-flight mass spectrometer, MRTOF）作成や蓄積リング建設など準備を進めており BRIKEN のみに特化させるというものではないが、理研における質量測定として期待しているところである。

10. 研究会の内容 7：原子力と中性子放出

今回の研究会の最後に D. Cano Ott 氏（CIEMAT, Nuclear Innovation -Nuclear Fission Division, DOE, Spain）による、インターネット発表があった。彼は原子炉における遅発中性子の制御上の重要性を（あまりなじみがない）原子核物理関係者に解説をし、そのデータベースとしての P_n の重要性を紹介した。また、現在の核データライブラリにおける核分裂関連データの説明を行った。

計算値も含めてデータベース化されている β 崩壊遅発中性子割合が載せてある核種は彼のまとめによると以下の通りである。

JEFF3.1.1: P_n : 241 核種、 P_{2n} : 18 核種、 P_{3n} : 4 核種 (^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B , ^{31}Na)

ENDF/B-VII.1: P_n : 390 核種、 P_{2n} : 111 核種、 P_{3n} : 14 核種

なお、こういった P_n を含むデータベースは（Rykaczewski 氏も触れていたように）IAEA でもデータライブラリを再検討するプログラムを今年から数年の期間で進めることになるという情報を紹介していた。

核データサイドにおける課題の例として、比較的良好とされているとされる $^{235}\text{U}+n_{th}$ でもたとえば瞬時照射 1 秒後まででは総和計算での中性子放出率は 2 割以上 Keeping の積分データより過大評価な食い違いを生じているなど、半減期の短い核種の中性子放出割合（及び核分裂集率）に大きな不定性があるという事例を紹介した。今後のデータの改良が必要で、より高精度のデータが目標というのが核データサイドからのコメントということであった。

11. 研究会の内容 7：目標

会の最後に Domingo-Pardo 氏を取りまとめとなり、今回紹介された情報、提案を整理し、今後の方針について話し合った。具体的なジオメトリ及びその効率、またデータ収集系の構築、検出器のコスト（輸送した場合または日本で作成する場合）などが議論された。今後のスケジュールとして 10 月の下旬までにプロジェクトのドキュメント作成を

行い、12月に開催予定の理研の原子核実験のプログラム委員会に **BRIKEN** 全体としてのプロポーザルを提出することが確認された。

12. まとめ

以上駆け足で **BRIKEN** 研究会の紹介をした。個人的には原子核データとしての遅発中性子の現状をまとめて知る機会を得て大変参考になった。遅発中性子研究は理研や **IAEA** のプロジェクトなどと併せて今後数年間で世界中でかなり活発になるのではないかという印象を受けたことを報告しつつ、この稿の終わりとしたい。



集合写真（理研 RIBF 棟前にて。2013年7月31日）