

# 世界最高水準の核分光研究プロジェクト「EURICA」 —440種の希少原子核崩壊データ収集完了—

西村 俊二  
Nishimura Shunji

## 1. はじめに

私たちの周りには、金や鉄など自然に存在する安定な原子核（約 270 種類）がある。理論的には約 7,000～10,000 個の放射線同位元素（RI）が存在すると考えられており、崩壊した後にいずれは安定な原子核となる。これら RI の性質は、陽子と中性子の個数で決まり、陽子数や中性子数が魔法数（2, 8, 20, 28, 50, 82, 126）となる場合には、比較的安定となる。最近の研究ではドリップライン近傍の軽い中性子過剰な RI において、魔法数（8, 20, 28）の消滅、新たな魔法数（16, 32, 34）の出現が発見され話題となっている。更に重く安定核から離れた原子核においても、新たな魔法数の描像についての実験的検証が注目されている。また、これら RI の性質は、爆発的重元素合成（r 過程）の解明において重要な鍵となる。

2012 年、理化学研究所（理研）・仁科加速器研究センターの重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー（RIBF）」において欧州の  $\gamma$  線測定用大型ゲルマニウム半導体検出器と  $\beta$  崩壊測定用シリコン半導体検出器を組み合わせた世界最高水準の国際共同核分光研究プロジェクト「EURICA（ユーリカ）」<sup>1)</sup> がスタートした。EURICA は、20 か国から 230 名以上の研究者（日本人 40 名）が参加する大規模な国際共同核分光研究プロジェクトである。RI の励起や崩壊を調べる核分光法に着目し、魔法数の消失・出現、原子核の変形の実験的検証を行うために、計 440 種もの希少 RI の崩壊データ収集に成功した。ここでは、理研 RIBF で実施した EURICA 実験の活動について紹介する。

## 2. 重イオン加速器施設 RIBF と核分光プロジェクト EURICA

最近、理研の加速器を利用した研究成果が話題となっている。例えば、重イオン線形加速器 RILAC を用いた超重元素 113 番元素ニホニウム ( $^{113}\text{Nh}$ ) の発見<sup>2)</sup>、世界最高性能の RI 生成能力を持つ理研・大強度重イオン加速器施設（RIBF：RI Beam Factory）と東大 CNS の SHARQA スペクトロメータを利用した 4 個の中性子の束縛状態（テトラ中性子）を示唆する研究成果<sup>3)</sup>などが挙げられる。

### 2.1 EURICA 実験の背景

大強度重イオンを特長とする RIBF 加速器施設は、2007 年から本格的な稼働が始まった。この RIBF の目玉は、ウランビームを利用した重い RI の生成能力にある。筆者の研究グループは、2009 年に 4 台のクローバー型ゲルマニウム半導体検出器と両面ストリップ型シリコン半導体検出器を利用した最初の  $\beta\gamma$  崩壊測定実験を実施した。当初のウランビームは最終目標の 1/3,000 程度（約 0.3 pA）の強度であったが、既に他実験施設を圧倒する数百倍もの効率で崩壊測定を実現した。2010 年末、GSI 研究所の大型ゲルマニウム半導体検出器（旧：RISING 装置）を理研の RIBF に移設する案が W. Henning 氏（GSI 研究所の旧所長）により提案され、日本と欧州の核物理研究者を集めた具体的な検討が始まった。2011 年 3 月に東日本大震災があり、原子炉から放出された放射性同位元素による汚染、電力不足による加速器の運転時間の短縮などの問題があった。同年 7 月に欧州の  $\gamma$  線検出器委員会（Euroball Owners Committee）の承認を得ることができ、この国際的な核分光プロジェクトを EURICA（Euroball RIKEN Cluster Array）と名付けた。

## 2.2 EURICA 装置

EURICA の主要検出器は、クラスター型ゲルマニウム半導体検出器 12 台を球状に配置した  $\gamma$  線測定装置である。この高性能  $\gamma$  線検出器の導入により、従来の約 10 倍もの  $\gamma$  線検出効率（662 keV の  $\gamma$  線検出効率は約 15%）を実現した。また、効率的な  $\beta$  崩壊測定を実現するために、高性能寿命測定装置「WAS3ABi（ワサビ）」（最大 12,000 px, ピクセルサイズ: 1 mm<sup>2</sup>）の開発・導入に成功した。並行して、加速器グループの努力により、RI 生成の要となる RIBF 加速器のビーム強度は、20~100 倍にも増強された。2012 年春から、万全の体制で世界最高水準の  $\beta$   $\gamma$  核分光測定プロジェクト EURICA がスタートした<sup>4)</sup>。

## 2.3 測定手法

EURICA 実験では、RIBF の超伝導リングサイクロトロン「SRC」で光速の 70% まで加速したウラン (<sup>238</sup>U) ビームを標的であるベリリウム (<sup>9</sup>Be) に照射し、その核分裂反応により中性子過剰核（質量数  $A = 56 \sim 175$ ）を生成した。図 1 は、RIBF 加速器

施設と EURICA 実験の概略図を示す。一方、陽子過剰核の生成にはキセノン (<sup>124</sup>Xe), クリプトン (<sup>78</sup>Kr) ビームの核破砕反応を利用した。生成された RI は、下流の超伝導 RI ビーム生成分離装置「BigRIPS」により分離後に粒子識別を行い、カクテル RI ビーム（20~100 種程度の RI が混在したビーム）を  $\beta$  崩壊測定装置 WAS3ABi に打ち込む。WAS3ABi に埋め込まれた RI の位置から放出される  $\beta$  線のエネルギーと時間を測定することにより、同時に多種類の RI の半減期を測定する。また、励起した RI から放出される  $\gamma$  線は、WAS3ABi を取り囲む  $\gamma$  線測定用のゲルマニウム半導体検出器と高速シンチレーション検出 (LaBr3(Ce)) 器により効率的に検出し、各種 RI のエネルギー準位、崩壊時間を調べる。

## 3. 収集したデータと研究成果

EURICA 実験では、原子核の核構造（魔法数、原子核の変形）の検証、様々な崩壊モード（核異性体、内部転換電子、中性子・陽子放出）の探索、新同位

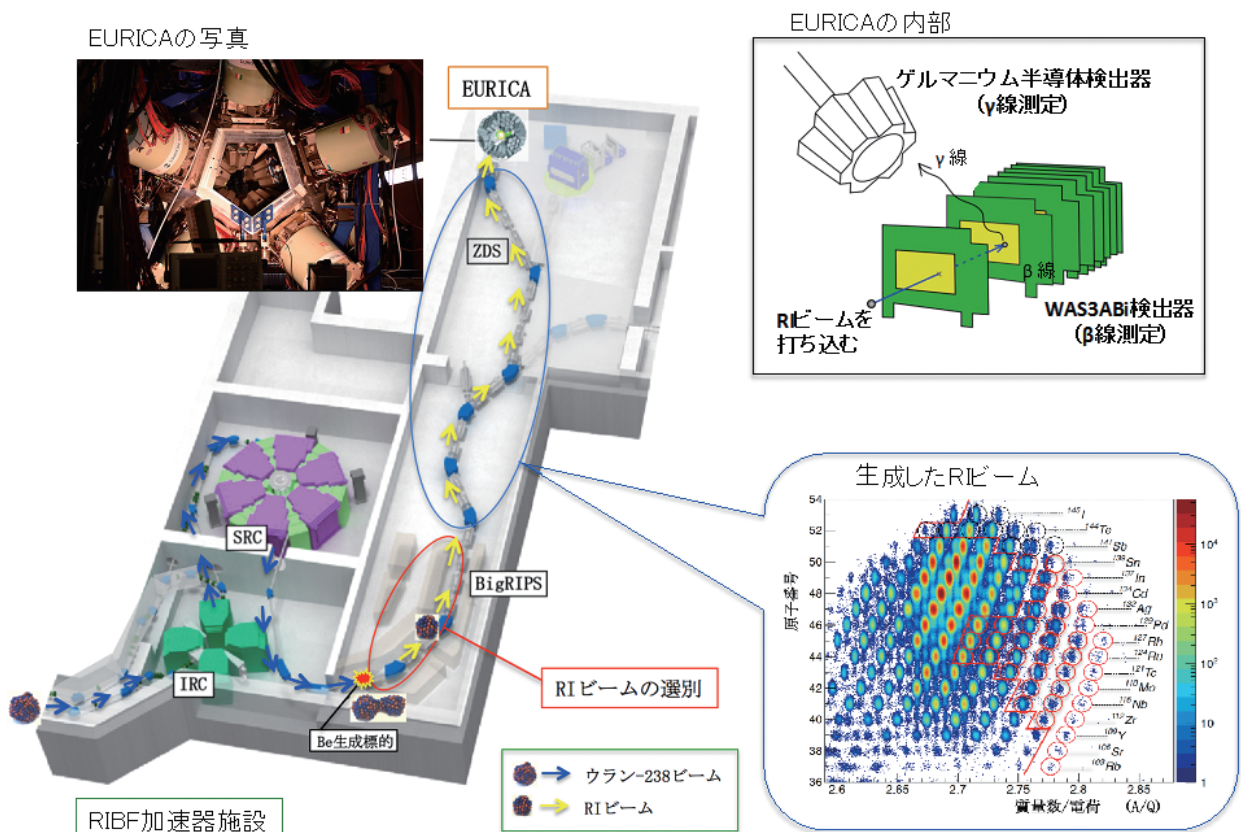


図 1 RIBF における崩壊測定実験の全体像

体元素の探索、陽子ドリップラインの決定、重元素合成 (r 過程, rp 過程) の研究を目的としている。2016 年夏までに約 100 日間の実験を行い、18 件の実験プロポーザルを終了した。EURICA で収集した希少 RI の崩壊データは、最終的に 440 種にのぼる。これまでに、新同位体元素 ( $^{96}\text{In}$ ,  $^{94}\text{Cd}$ ,  $^{92}\text{Ag}$ ,  $^{90}\text{Pd}$ ,  $^{63}\text{Se}$ ,  $^{67}\text{Kr}$ ,  $^{68}\text{Kr}$ , ...) の発見、半減期 (234 種)<sup>4,5,6)</sup> の測定、核異性体 (14 種)<sup>7)</sup> の発見、遅発  $\gamma$  線 (37 種) の測定、遅発中性子放出確率 (5 種) の決定、陽子放出 (3 種) の発見など、論文 31 報<sup>8)</sup> を報告した (図 2)。その内、理研グループが中心となり報告した研究成果について以下に紹介する。

### 3.1 魔法数

2 重魔法数を持つ  $^{78}\text{Ni}$  (陽子数  $Z=28$ , 中性子数  $N=50$ ) とその近傍の  $^{77}\text{Co}$ ,  $^{79,80}\text{Ni}$  を含む 20 種の RI の半減期測定に成功した<sup>4)</sup>。 $^{78}\text{Ni}$  の半減期 (122 ms) と比較し、 $^{79}\text{Ni}$  が 3 倍、 $^{80}\text{Ni}$  が 6 倍、 $^{77}\text{Co}$  が 10 倍速く崩壊することが分かり、 $^{78}\text{Ni}$  において 2 重魔法数が実現していることを示す結果を得た。また、中性子魔法数  $N=82$  上にある最も中性子過剰な  $^{128}\text{Pd}$  ( $Z=46$ ,  $N=82$ ) に特別な核異性体が存在することを発見し、その励起エネルギーから魔法数が健在であることを示唆する結果を得た<sup>7)</sup>。この成果は、r 過程の第 2 ピーク (質量数  $A=130$ ) を形成する要因となる中性子魔法数  $N=82$  の検証に重要な条件を

与えることとなった。

### 3.2 重元素合成過程 (r 過程)

鉄より重い原子核は、超新星爆発において原子核が高速 (rapid) に連続して中性子を捕獲しながら  $\beta$  崩壊する重元素合成過程 (r 過程) により大量に生成されたと考えられている。最近の研究では r 過程の有力なサイトとして中性子星合体説が有力視され始めている。r 過程で生成される元素組成の成分を理解する上で、数千種もの RI の性質 (質量, 半減期, 核構造, 変形, 遅発中性子放出確率, 中性子捕獲反応率) を把握する必要がある。現状では、r 過程で生成される重要な RI は安定核から非常に離れているため実験データが殆どなく、理論計算に大きく依存している。

重元素生成において RI の半減期は、重い元素を生成するスピードを決定するため非常に重要な情報となるが、理論計算の不確実性が問題となっている。r 過程元素組成比の定量的な議論を行うために、r 過程で重要な役割を果たす中性子過剰核の半減期を測定し、r 過程に関する最初の実験的検証を行った<sup>5)</sup>。まず、r 過程において重要となる中性子魔法数  $N=82$  の  $^{127}\text{Rh}$ ,  $^{128}\text{Pd}$ ,  $^{130}\text{Cd}$ ,  $^{131}\text{In}$  の半減期を高い精度で決定することに成功した。その結果、従来の理論計算よりも 30~35% 程度速く崩壊することを明らかにした。得られた 110 種の半減期データ (質量数  $A=102\sim139$ )

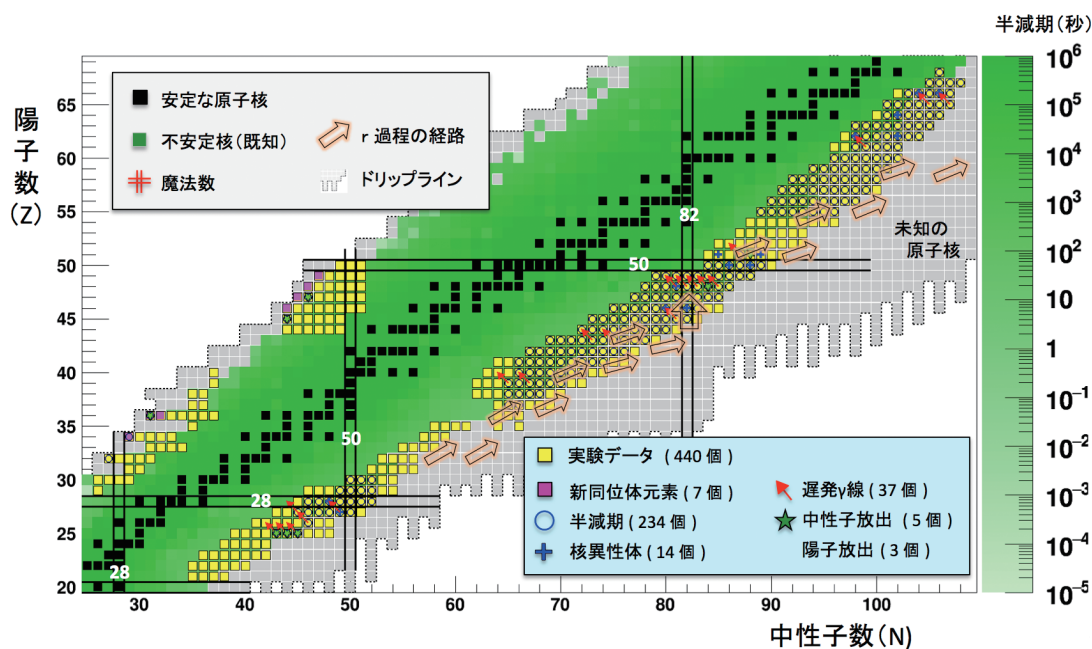


図 2 EURICA 実験

データ収集した RI (黄色の□) と半減期測定した RI (青い○)。発見した核異性体 (青い十字), 中性子又は陽子放出する RI (緑の星)



を超新星爆発における r 過程計算に取り込み、太陽系の組成比と比較した。その結果、超新星爆発環境下における元素合成シナリオを支持する結果を得た。更に超新星爆発における膨張速度条件 (r 過程の時間スケール) 依存性を調べた結果、r 過程第 2 ピーク成分のテルル、キセノン、バリウム元素は安定して生成されるが、スズ、アンチモン、ヨウ素、セシウムの生成量が大きく依存する「重元素存在比の普遍性」の破れを示唆する結果を得た。これらの結果は、今後の金属欠乏星での成分分析と r 過程の爆発条件の関連性を結びつける最初の試みとなる。また、重いランタノイドを含む希土類元素 (レアアース) の生成を検証するためにセシウムからホロミウムまでの 13 元素の中性子過剰核 (94 種) の半減期測定に成功した<sup>6)</sup>。このうち 57 種は初めての報告となる。得られた半減期の系統性を調べたところ、中性子数  $N=97$  と  $N=105$  において崩壊スピードが急激に速くなる現象を見出した。

#### 4. まとめと将来の展望

RIBF の性能は、現在も向上しており、ウランビームの強度は EURICA 実験開始時と比べ更に約 6 倍に強化されている。EURICA で使用したゲルマニウム半導体検出器は、2016 年 9 月に解体し、欧州に返還した。2016 年 11 月からは、世界最高水準の中性子測定装置を導入した国際共同研究プロジェクト「BRIKEN (ビーリケン)」(図 3) をスタートした。BRIKEN は  $\gamma$  線測定に加え 65% の非常に高い中性子検出感度を特長としており、数百種もの中性子過剰な RI の遅発中性子放出確率の測定を目的としている。また RIBF では、質量リング、MR-TOF を利用した質量測定、スペクトロメータ (SAMURAI, SHARAQ, ZDS) を利用した原子核反応実験など、多くの研究プロジェクトが始まっている。今後、希少 RI の核構造や重元素合成の解明に向け、RIBF から多くの研究成果と新しい発見が出てくることが期待される。

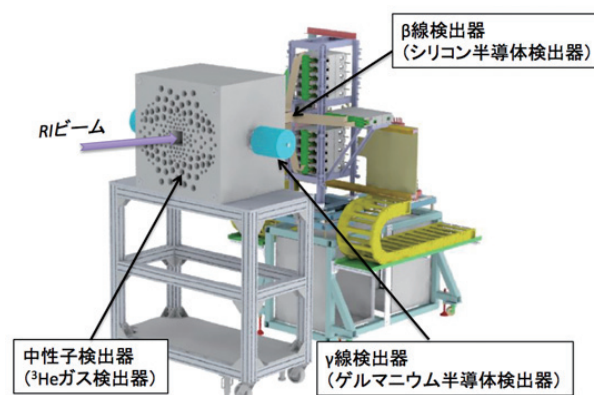


図 3 遅発中性子放出測定実験 BRIKEN (ビーリケン)

#### 参考文献

- 1) S. Nishimura, "The EUROBALL RIKEN Cluster Array Project (EURICA)", *Nucl. Phys. News*, Vol. 22, No. 3, 38-39 (2012)
- 2) 矢野安重 "ニホニウム誕生物語", *Energy Review* 27, 第 4 号, 38-42 (2017)
- 3) 下浦享, "テトラ中性子の探査", *Isotope News* No 749, 7-9 (2017)
- 4) Z.Y. Xu, S. Nishimura, *et al.*, " $\beta$ -Decay Half-Lives of  $^{76,77}\text{Co}$ ,  $^{79,80}\text{Ni}$ , and  $^{81}\text{Cu}$ : Experimental Indication of a Doubly Magic  $^{78}\text{Ni}$ ", *Phys. Rev. Lett.* **113**, 032505, 1-5 (2014)
- 5) G. Lorusso, S. Nishimura, *et al.*, " $\beta$ -Decay Half-Lives of 110 Neutron-Rich Nuclei across the  $N=82$  Shell Gap: Implications for the Mechanism and Universality of the Astrophysical r Process", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 192591, 1-7 (2015)
- 6) J. Wu, S. Nishimura, *et al.*, "94  $\beta$ -Decay half-Lives of Neutron-Rich  $_{55}\text{Cs}$  to  $_{67}\text{Ho}$ : Experimental Feedback and Evaluation of the r-Process Rare-Earth Peak", *Phys. Rev. Lett.* **118**, 0672701, 1-6 (2017)
- 7) H. Watanabe, G. Lorusso, *et al.*, "Isomer in  $^{126}\text{Pd}$  and  $^{128}\text{Pd}$ : Evidence for a Robust Shell Closure at the Neutron Magic Number 82 in Exotic Palladium Isotopes", *Phys. Rev. Lett.* **111**, 152501, 1-5 (2013)

‡ EURICA ホームページ: <http://ribf.riken.jp/EURICA/>

((国研)理化学研究所 仁科加速器研究センター)