

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560871

研究課題名（和文）

エネルギーサム $\gamma$ 線分光法による原子核の高エネルギー励起準位の解明

研究課題名（英文）

Beta-decay study on high energy excited levels in nuclei far off stability line with energy-sum gamma-ray spectroscopy.

研究代表者

柴田 理尋 (SHIBATA MICHIIRO)

名古屋大学・アイソトープ総合センター・教授

研究者番号：30262885

研究成果の概要（和文）：

$\beta$ 壊変する安定線から離れた原子核の崩壊核データ測定について、特殊な貫通型Ge検出器およびクローバー検出器を用いて、カスケード関係にある $\gamma$ 線をエネルギー和の $\gamma$ 線ピークとして検出して高エネルギーの励起準位を明らかにするエネルギーサム $\gamma$ 線分光法と、特にクローバー検出器に対して $\gamma$ 線強度を精度良く決定するためのコインシデンスサム補正法を開発した。その結果、相対強度0.1%の $\gamma$ 線まで考慮すれば、100keVから3MeVの範囲に渡って5%程度で $\gamma$ 線強度を決定できることがわかった。一方、京都大学原子炉に附置したオンライン同位体分離装置に検出器を設置し、 $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物 $^{147}\text{La}$ の崩壊 $\gamma$ 線を測定した。両検出器によるエネルギーサム $\gamma$ 線分光の解析から、娘核 $^{147}\text{Ce}$ について1MeVまでしか報告がなかった崩壊図式に対し3.5MeVまで新たに160本の $\gamma$ 線を同定するとともに、新たな56個の $\beta$ 遷移する高エネルギー準位の存在を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

With a through-hole type HPGe detector and a clover Ge detector, decay schemes including high energy excited states of nuclei far off the  $\beta$  stability line were studied. These detectors have high solid angle and high detection efficiency, then, de-excite  $\gamma$ -rays with cascade relation can be detected as a coincidence summing peak. It means the observed sum peaks correspond to energy of the excited states. Those are useful tools for identify high energy levels. In addition, a correction method for coincidence summing in the clover detector were also developed, the  $\gamma$ -ray intensities could be determined with the accuracy of 5%, approximately, from 100 keV to 3 MeV.

On the other hand,  $\gamma$ -rays in the decay of neutron-rich nucleus  $^{147}\text{La}$ , which were separated by the on-line mass separator KUR-ISOL from fission products of  $^{235}\text{U}$  with thermal neutron, were measured with the detector. The 56 excited levels and 160  $\gamma$ -rays in the daughter nucleus  $^{147}\text{Ce}$  were newly identified up to 3.5 MeV.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：原子力学  
科研費の分科・細目：総合工学  
キーワード：炉物理・核データ

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は不安定核の崩壊エネルギー( $Q_\beta$ )測定のために、HPGe 検出器を用いた 2 種類の全吸収型検出器を作成してきた。これらの検出器は、中心部に貫通孔をもつ同軸型 HPGe 検出器と、その周りを取り囲む同時計数用の円環状 BGO シンチレーション検出器から成り、HPGe 検出器のシングルスペクトルと BGO との同時計数スペクトルの差を取ることで、HPGe 検出器内で全エネルギー吸収した現象のみのスペクトルを得るものである。

そのスペクトルでは全吸収された $\gamma$ 線のスペクトルおよびカスケード関係によってサムピークとしてクロスオーバー $\gamma$ 線を強調して見ることができる。例として  $^{147}\text{La}$  の崩壊エネルギーを測定した全吸収スペクトルを図 1 に示す。 $^{147}\text{La}$  の  $Q_\beta$  は 5MeV 程度であるが、娘核  $^{147}\text{Ce}$  の励起準位は 1MeV 程度までしか確認されていない。このスペクトルから明らかに 2MeV 以上にまで励起準位が存在し、そこに比較的大きな $\beta$ 遷移があることがわかる。すなわち、本検出器を用いれば通常の検出器では効率が低く測定できない高エネルギー準位から脱励起する $\gamma$ 線を測定でき、高エネルギーの励起構造と $\beta$ 遷移強度を決定できると考えられる。

世界の核分光研究の現状は、多数の検出器を線源を取り囲むように配置して幾何学的効率を上げるといった複合検出器を用いるのが一般的である。複合型の場合には検出器間に隙間が生じることから、幾何学的効率に限界がある。本研究で用いる 2 台の検出器は 1 台でほぼ 100% の立体角を覆うことができる上、結晶の体積も比較的大きいので検出効率も高い。以上の特性を活かし、高エネルギーまで励起構造の解明に向けて本研究を開始した。

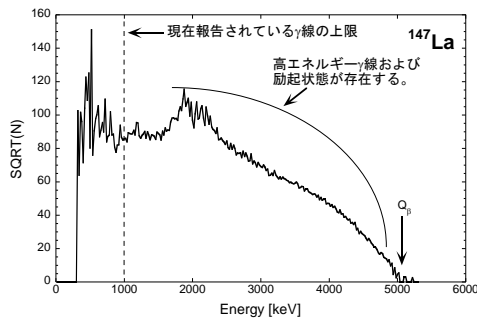


図 1  $^{147}\text{La}$  の崩壊に伴う全吸収のスペクトル

### 2. 研究の目的

高検出効率である全立体角型 HPGe 検出器を用いて核分裂で生成する質量数 150 程度の中性子過剰核の核構造の解明に向けて、高エネルギー準位を含む崩壊核データを測定する。特に、半減期が分以下の短寿命核種の高エネルギー励起準位は、検出器の検出効率と対象核種の収率のいずれもが小さいために崩壊核データが不十分なものが多い上、複数回の実験を行う必要があるデータがある。また図 2 に示すようにデータがあっても、低エネルギー領域に限られている場合が多く、崩壊エネルギーや高エネルギー励起準位は報告されていない。

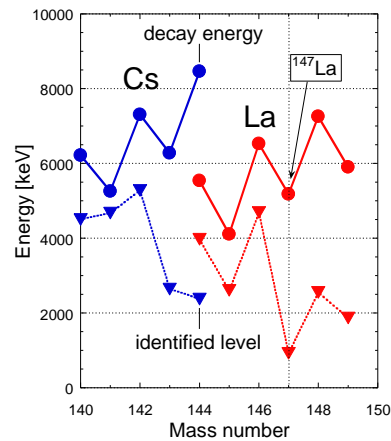


図 2 質量数 150 近傍の Cs, La の崩壊エネルギーと同定されている励起準位の最高エネルギー

励起準位同定のために、高立体角である特徴を活かしてコインシデンスサムピークを強く検出し、通常の測定法との違いから励起準位を同定するエネルギーサム $\gamma$ 線核分光法を開発する。一方、この検出器を用いて $\gamma$ 線強度を精度良く決定するためのコインシデンスサム補正法を開発することによって収率の小さい核種の励起構造を 1 回の実験で決定できる可能性がある。

核分裂生成物の崩壊核データは、崩壊熱の評価にも重要であり、特に、 $\gamma$ 線による寄与は、今までの高エネルギー $\gamma$ 線の測定データが不十分であったために小さく見積もられていることがわかっている。本手法を用いて、それらの問題点も解明できる可能性がある。

### 3. 研究の方法

貫通型 HPGe 検出器とクローバー検出器の 2 台の全立体角型 HPGe 検出器を京大原子炉のオンライン同位体分離装置に設置し、テー

プ式不安定核捕集装置に質量分離した不安定核ビームを捕集し、測定した(図 3)。対象とした核種は、 $^{147,148}\text{La}$ 、 $^{145}\text{Ba}$  で、半減期と  $Q_{\beta}$  は、それぞれ 4.0 秒、1.3 秒、4.3 秒、5.4MeV、7.7MeV、5.6MeV である。炉室内のバックグラウンドを下げるために、検出器は鉛ブロックとボロン入りポリエチレンで遮蔽した。2 半減期ずつビーム捕集-測定を繰り返し、統計精度を向上させた。

2 台の検出器でそれぞれ同様の測定を行い、高エネルギー励起準位を同定した。クローバー検出器は 4 台の独立した HPGe 検出器を四つ葉のクローバー上に組み合わせたものであり、中心部分には貫通孔が開いている(図 4)。時間情報を含むリストモード測定を行い、測定終了後に同時に計数されたエネルギー情報を足し合わせてエネルギーサムスペクトルを作成した。エネルギーサムスペクトルでは励起準位に相当する  $\gamma$  線が強く確認されており、また、エネルギーサムピークを個々の検出器に入射した  $\gamma$  線に分解することもできる。このようにして励起状態を同定した。

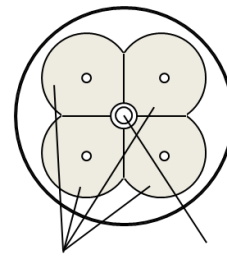


図 3 KUR-ISOL における測定。

一方、個々の検出器についての立体角は約 25% であり、モンテカルロシミュレーションを併用すれば検出効率を決定できる。検出効率が決まれば、対象核種の  $\gamma$  線強度も決定することができる。そこで、まず単色  $\gamma$  線源  $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{56}\text{Mn}$  とモンテカルロシミュレーション GEANT4 を併用してピーク検出効率を作成した。一方、対象核種は複数の準位から多数の  $\gamma$  線を放出し複雑なコインシデンスサムを起こす。標準線源  $^{56}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{152}\text{Eu}$  を測定し、それらの崩壊図式の情報を用いてサム効果を補正した結果が、単色  $\gamma$  線源で作成した検出効率と一致すれば正しく補正できたことになるとして、100keV から 3MeV までの相対検出効率を決定した。この方法を用いれば、 $^{147}\text{La}$  に関しても、崩壊図式を詳しく作成し、それに基づいて適切に補正することができる。

#### 4. 研究成果

はじめに、得られたクローバー検出器の検



Ge Crystals Through hole  
(80 mm $\phi$  × 90 mm $\phi$ ) 15 mm $\phi$

図 4 クローバー検出器の概略図

出効率を図 5 に示す。単色  $\gamma$  線源と GEANT4 を用いて決めた検出効率(実線)に対し、複雑な崩壊図式を持つ標準線源の  $\gamma$  線強度はコインシデンスサム効果のため検出効率と一致していない(白抜き丸)。それらの核種の崩壊図式はわかっているため、その崩壊核データに従って崩壊し、実線で表す検出効率を持つ検出器で測定するというシミュレーション計算を行った。そのとき、サム補正に重要となる全吸収効率も同様に実測値と GEANT4 によるシミュレーションで決定したものを用いた。コインシデンスサムの有無の計算結果の比から補正係数を決定し、その補正係数を測定データ(白抜き丸)に掛けたものが補正後の効率(実丸)である。

これを見ると、補正された結果は単色  $\gamma$  線を得られた検出効率に 5% 程度の精度で一致している。すなわち、複雑な崩壊図式で複雑なコインシデンスサムがある場合でも、崩壊図式がわかれば 5% の精度で  $\gamma$  線強度を決定できることを示している。さらに、 $^{152}\text{Eu}$  を用いて、崩壊図式中で相対強度 1% までの  $\gamma$  線を用いれば補正の影響はほとんどないことも確認し

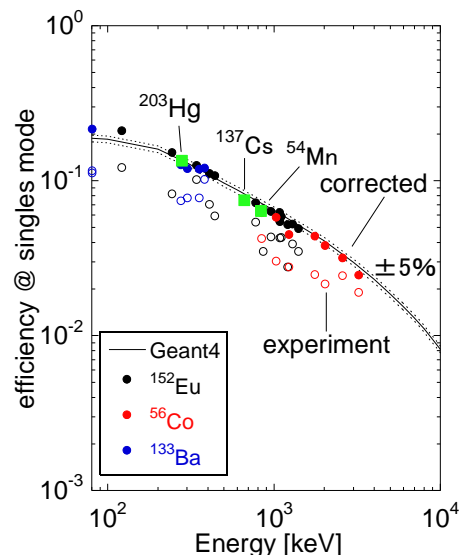


図 5 標準線源で決めた検出効率。 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{56}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$  の測定値にコインシデンスサムの補正を施すことによって、単色  $\gamma$  線源で決めた検出効率に一致している。

た。

次いで、オンライン同位体分離装置を用いて得られた  $^{147}\text{La}$  の  $\gamma$  線スペクトルを図 6 に示す。エネルギーサムスペクトル(図中では add-back と記した)では、2MeV 以上に通常のシングルス測定よりもカウントが多くなっている。これは、励起準位からカスケード状に放出される場合に、カスケード  $\gamma$  線が足し合わさって、あるいは、コンプトン散乱として足し合わさって高いエネルギーの  $\gamma$  線と見なされことを意味する。よって、シングルススペクトルよりもカウント数が多いピークはそのエネルギーに対応する励起準位であると見なすことができる。それらのピークを解析

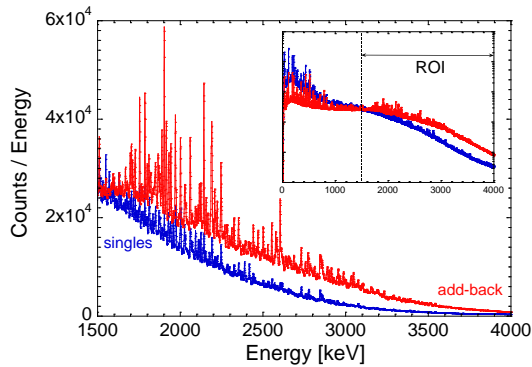


図 6  $^{147}\text{La}$  の崩壊に伴う  $\gamma$  線スペクトル。add-back は 4 つの Ge の同時事象のエネルギーを足し合わせたもの。Singles は 4 つのスペクトルを足し合わせたもの。

した結果、今まで 924.3keV までしか報告されていなかった励起準位に対し、3509keV まで新たに 56 個の準位があることを確認した(図 7)。また、新たに見つけた準位に組み込まれる  $\gamma$  線は 160 本であった。

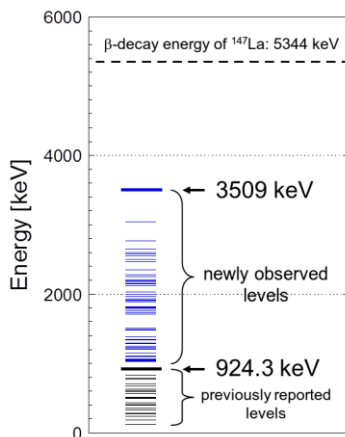


図 7 新たに確認した  $^{147}\text{La}$  の娘核  $^{147}\text{Ce}$  の励起準位。

全立体角型 HPGe 検出器を用いたエネルギーサム  $\gamma$  線分光法を開発し、それを用いて核分裂生成物  $^{147}\text{La}$  の娘核  $^{147}\text{Ce}$  の高エネルギー励起準位を同定した。また、崩壊図式を利用して、コインシデンスサムを補正して精度良く  $\gamma$  線強度を決定することを可能とした。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

嶋洋佑、小島康明、柴田理尋、林弘晃、谷口秋、Identification of High-Energy Levels in  $^{147}\text{Ce}$  with a Total Absorption Clover Detector. 2011.11.16-17、原子力研究開発機構(東海村)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 理尋 (SHIBATA MICHIIHIRO)

研究者番号 : 30262885

