

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540344

研究課題名(和文) スピンおよび核行列の同時決定に基づく中性子過剰希土類核の核構造の実験的解明

研究課題名(英文) Studies of nuclear structure of neutron-rich rare-earth nuclei via determination of spin and nuclear matrix elements

研究代表者

小島 康明 (KOJIMA, YASUAKI)

名古屋大学・アイソトープ総合センター・講師

研究者番号：80314730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：質量数150近傍の中性子過剰希土類核の構造を明らかにするために、 $\beta$ -核分光の手法を用いた実験を、京都大学原子炉付置のオンライン同位体分離装置を利用して行った。150Ceに対しては18本の励起準位を含む詳細な崩壊図式を作成した。149-150Prおよび149Ndに対しては、核行列に直接関係する励起準位の寿命を遅延同時計数法を使って決定した。このうち、149Prの87および126keV準位の半減期は初めて得られた実験値である。また、現在データ解析中ではあるが、150Prの110keV準位が10ns以上の長い半減期を持つことが確実である。周辺核には見られない特異的な現象であり、興味深い結果である。

研究成果の概要(英文)：We have studied neutron-rich rare-earth nuclei around a mass number of 150 by means of beta-gamma decay spectroscopy methods. For 150Ce, a detailed decay scheme was constructed on the basis of gamma-gamma coincidence relations. It includes 18 excited levels and 54 gamma-rays, and gives more information on the level structure than that in the published data. For 149-150Pr and 149Nd, half-lives of excited levels were determined using the delayed coincidence technique. Among them, half-lives of 87- and 126-keV levels in 149Pr were first found to be 4.2(5) and 1.0(2)ns, respectively; The 110-keV level in 150Pr shows a half-life longer than 10ns, while detailed data analysis is now in progress. This level depopulates via E1 gamma-ray emission, which usually shows short half-lives; Long half-life values are not observed in the neighboring nuclei, so that the results are attractive from a view point of nuclear structure.

研究分野：応用原子核物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理，原子核(実験)

キーワード：中性子過剰核 核構造 励起準位寿命 崩壊図式

### 1. 研究開始当初の背景

ウラン 235 の核分裂で生成される質量数 150 近傍の中性子過剰核は、球形核から 4 重極変形への遷移領域に位置するため、原子核物理上、興味深い研究対象である。このため、理論・実験の両面から多くの研究がなされているが、未だ、十分に解明されたとは言えない。実際、例えば、申請者の所属するグループによる  $\beta$  崩壊エネルギーの測定から得られた 2 中性子分離エネルギーの値は、系統性から予想されている滑らかな傾向と比べ、局所的なずれを示している。2 中性子分離エネルギーは、核子結合の大局的な様相を反映していると考えられるため、その局所的な変動は、周辺に原子核構造の変化が起きている可能性を強く示唆している。この核構造変化の内容を具体的に見いだすことは、遷移領域の原子核物理に新たな展開を生み出す可能性を秘めている。

### 2. 研究の目的

前節で述べた目標を達成するには、 $\beta$  線測定は不向きであり、詳細な  $\gamma$  線計測が必要である。本研究では、質量数 150 近傍希土類核 (La, Ce, Pr) の  $\gamma$  線放出率、励起準位の寿命、スピン・パリティを決定するために、 $\beta$ - $\gamma$  崩壊核分光の手法を用いた実験を行う。さらにそれらのデータに基づいて、原子核行列と結びつけることのできる換算転移確率を決定し、原子核構造を明らかにすることを目指した。

具体的には、(1) “準位構造” (本報告書では、各励起準位からの  $\gamma$  線放出のパターンや各  $\gamma$  線の放出率のことをまとめて、準位構造と呼ぶことにする) を決めるための  $\gamma$ - $\gamma$  同時計数測定、(2) 各励起準位の寿命または半減期を決めるための  $\beta$ - $\gamma$ - $\gamma$  遅延同時計数測定を中心とした実験を行い、核構造の議論に使うことのできる詳細かつ信頼性の高い核データを得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究は、データ収集系の整備と、核分裂生成物に対するオンライン実験の 2 段階に分けて行った。以下に、各実験の詳細を順に述べる。

#### (1) データ収集系の整備

本実験では、限られたマシンタイムを有効に利用するために、多数の放射線計測器を用いる。それらの計測器からの信号を高速に取り込んで保存するために VME ベースの多次元データ収集系 A3100 (仁木工芸) を新規購入した。現有の密封校正用線源、および液体標準試料を使って自作した線源を用いて、長時間測定での安定性の確認等を含めた予備実験を行った。

さらに、得られたリスト形式データから同時計数事象のみを取り出して、解析するためのソフトウェアを開発した。

#### (2) 準位構造を決定するための $\gamma$ - $\gamma$ 同時計数測定実験

本実験ならびに次項 (3) の実験は、京都大学原子炉実験所の研究用 5MW 原子炉に付置されたオンライン同位体分離装置 (KUR-ISOL, Kyoto University Reactor, Isotope Separator On-Line) を用いて行った。すなわち、原子炉からの中性子でウラン 235 を照射して生成した核分裂生成物を表面電離型イオン源でイオン化した。イオン化された生成物をイオン源から引き出した後、30kV の電圧で加速し、磁場内に導き、質量分離した。質量分離された原子核ビームは、テープ式線源移送装置に打ち込み、測定対象核種の半減期に応じた間隔で、測定器前まで周期的に移送した。本節 (2) (3) の各実験では、各核種に対して、50 時間程度の連続測定を行った。

$^{150}\text{Ce}$  の崩壊に伴う  $^{150}\text{Pr}$  の励起準位の構造を決める実験では、低エネルギー用の Ge 測定器および n 型 Ge 測定器の 2 台を用いて  $\gamma$ - $\gamma$  同時計数実験を行った。実験時の様子を図 1 に示す。

$^{150}\text{Ce}$  は核分裂収率が小さい上に、半減期が 4.0 秒と短いため測定が難しく、崩壊図式はこれまでにほとんど報告されていない (なお、半減期は文献では 4.0 秒と報告されていたが、本研究から正しくは 6.1 秒であることが分かった)。公刊された崩壊図式としては、5 本の励起準位と 7 本の  $\gamma$  線を含む報告があるだけである。



図 1 KUR-ISOL での  $\gamma$ - $\gamma$  同時計数実験の様子。右奥に見える電磁石で測定対象核を質量分離し、その核から放出される  $\gamma$  線を 2 台の Ge 検出器で測定した。

#### (3) 励起準位の半減期を決定するための $\beta$ - $\gamma$ - $\gamma$ 遅延同時計数測定

$\beta$ - $\gamma$ - $\gamma$  遅延同時計数法を用いて、 $^{149}\text{Pr}$ 、 $^{149}\text{Nd}$ 、および  $^{150}\text{Pr}$  の励起準位の半減期を決めるための実験を KUR-ISOL で行った。測定には、 $\gamma$  線測定用に 1mm 厚のプラスチックシンチレータ、 $\gamma$  線測定用に  $\text{LaBr}_3$  シンチレータを用いた。さらに、 $\text{LaBr}_3$  測定器のエネルギー分解能を補い、測定対象の励起準位を曖昧さなく特定するために、低エネルギー用の Ge 測定器を補助的に用いた。測定器配置の写真を図 2

に示す。

各測定器からの信号処理には通常のNIMモジュールを用いた。すなわち、シンチレーション測定器のアノード信号をコンスタントフラクションディスクリミネータに入力し、タイミング信号を取り出し、それを時間波高変換器に入れることで、 $\beta$ 線および $\gamma$ 線の検出時間差を高分解能で得た。測定系全体の時間校正は市販の時間校正器で行うとともに、半減期が既知の励起準位の測定を行い、本測定系が系統的誤差無しで動作していることを確認した。1核種の測定時間内の時間校正の精度(安定性)は、20ps程度であり、測定対象の半減期の値(100psあるいはそれ以上)に比べて十分に小さい。



図2 KUR-ISOLでの $\beta$ - $\gamma$ - $\gamma$ 同時計数測定の様子。手前がプラスチックシンチレータ。右奥が $\text{LaBr}_3$ シンチレータ。

#### 4. 研究成果

前節で述べた研究の方法に対する結果ならびに考察を以下に述べる。

##### (1) データ収集系の整備

オフラインで実験を行った結果、本データ収集系は長時間安定的に動作することを確認した。また、得られたリスト形式データを処理し、 $\gamma$ 線同時計数情報や時間差情報を取り出すための汎用性の高いソフトウェアをVisual C++を使って開発し、以降の実験で利用した。

##### (2) $^{150}\text{Pr}$ の励起準位構造の決定

質量数150の $\gamma$ 線スペクトルを測定した結果、多数の未報告の $\gamma$ 線を観測した。そのほとんどは $^{150}\text{Ce}$ または $^{150}\text{Pr}$ の崩壊に伴うものである。各 $\gamma$ 線の崩壊曲線の傾き、および特性X線との同時計数関係から、過去に報告されていたものを含めて計58本の $\gamma$ 線を $^{150}\text{Ce}$ の崩壊に伴うものと同定した。

次に、それらの $\gamma$ 線の間同時計数関係を調べた。得られた関係に基づき、 $^{150}\text{Pr}$ の励起準位を決定し、さらに $\gamma$ 線を組み込んだ。本研究で作成した崩壊図式には18本の励起準位と54本の $\gamma$ 線が含まれ、従来の結果と比べ、大幅に詳細化することができた。過去に報告さ

れていた717keVの準位および149keVと210keVの $\gamma$ 線は、本研究では観測されなかった。過去の研究では、不純物による $\gamma$ 線を $^{150}\text{Ce}$ からの $\gamma$ 線と誤認した可能性がある。また、180keVおよび230keVの $\gamma$ 線の配置に誤りがあることも明らかにした。

次に、各 $\gamma$ 線の相対強度を決定した。この際、上で述べた準位構造に基づき、カスケードサム効果の補正を行った。さらに、この $\gamma$ 線強度の収支関係から、各励起準位への $\beta$ 線遷移強度を推定した。

最後に、 $\gamma$ 線の遷移の型を、同時計数データに現れている $\gamma$ 線強度と特性X線強度の比から推定した。その結果、110keVの $\gamma$ 線はE1遷移であることが分かり、基底状態のスピン・パリティが(1-)であるという過去の結果と組み合わせると、110keV準位が(1+)であると推定できた。この結果は $^{150}\text{Ce}$ の基底状態(スピン・パリティは0+)から110keV準位に極めて強い $\beta$ 遷移があるという実験事実と矛盾しない。また、103keVおよび154keVの $\gamma$ 線はM1またはE2遷移であることが分かった。

これらの結果は、現在、論文にまとめているところである。

##### (3) 励起準位の半減期の決定

###### ① $^{149}\text{Nd}$ の励起準位

$\beta$ - $\gamma$ 遅延同時計数で得られた崩壊曲線の傾きから、221、258および271keV準位の半減期を決定した。崩壊曲線の例を図3に示すとともに、結果を表1にまとめた。221keVの結果は文献値と誤差の範囲内で一致している。258keV準位については、これまでは上限値のみしか報告されていなかったが、本研究で初めて明確な値を決めることができた。271keV準位の半減期は文献値と大きく異なる。過去の実験では、測定対象核が質量分離されていないため、不純物によって誤った結果が報告された可能性が高いと考えている。また、過去の研究では時間分解能が悪い測定器を使用しているため、0.42nsという短い半減期が観測されなかった点も合理的に説明できる。

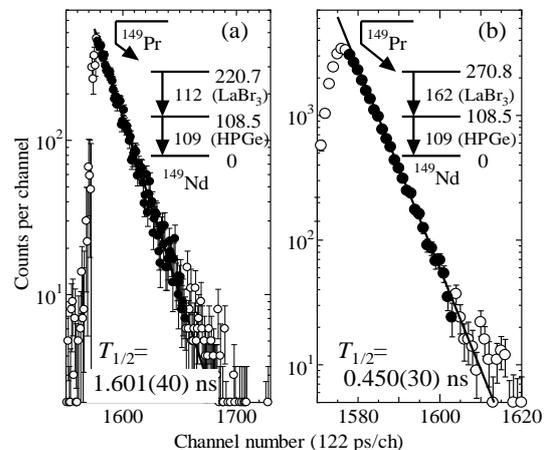


図3  $^{149}\text{Nd}$ の励起準位の崩壊曲線の例

表 1  $^{149}\text{Nd}$  の励起準位の半減期

準位 (keV)	半減期 (ns)	
	本研究	文献値
108.5	0.11(3)	< 0.7
138.5	0.14(3)	< 0.6
220.7	1.60(4)	2.1(5)
258.4	0.22(3)	< 0.7
270.8	0.42(3)	5.1(3)

さらに、221keV 以外の準位については崩壊曲線の重心位置からも半減期を決定した。表 1 に結果を示すが (258 および 271keV 準位については、傾きから求めた値との平均値を示した)、この解析法により、0.1ns 程度の半減期まで決定できることを明らかにした。

②  $^{149}\text{Pr}$  の励起準位

図 4 および表 2 に示すように、58, 87 および 126keV の 3 つの励起準位について半減期を決定した。このうち、87 および 126keV 準位の半減期は、初めての実験値である。

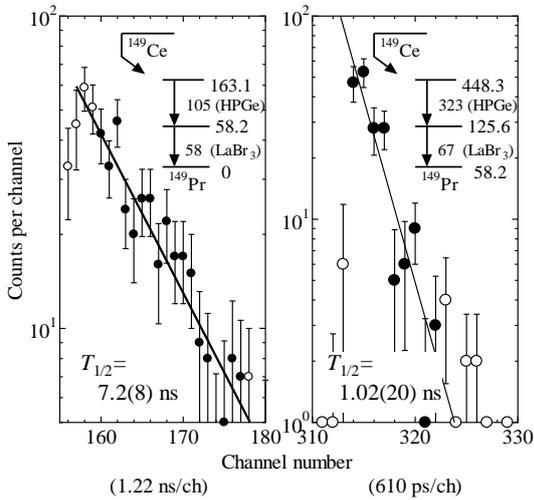


図 4  $^{149}\text{Pr}$  の励起準位の崩壊曲線の例

表 2  $^{149}\text{Pr}$  の励起準位の半減期

準位 (keV)	半減期 (ns)	
	本研究	文献値
58.2	7.2(6)	10(2)
86.5	4.2(5)	—
125.6	1.0(2)	—

③  $^{150}\text{Pr}$  の励起準位

$^{150}\text{Pr}$  の励起準位の半減期は、現在データ解析中である。図 5 に示す予備的に得られた崩壊曲線から分かる通り、110keV 準位に極めて長い半減期があることが確実である。4(2)節で述べたように、110keV の  $\gamma$  遷移は E1 遷移である。多くの E1 遷移は非常に短い半減期を示すが、 $^{150}\text{Pr}$  では長くなるという点は特徴的な実験事実であり、興味深い現象である。この準位以外に、131keV や 160keV 準位のものと思われる崩壊曲線にも傾きが見えており、半減期を決定できる見込みである。

今後は、半減期の値を確定させた上で、換算遷移確率 (核行列) を決定する。準位構造

に関するデータと合わせて、核物理の観点での考察を行い、 $^{150}\text{Pr}$  の原子核構造を明らかにする。

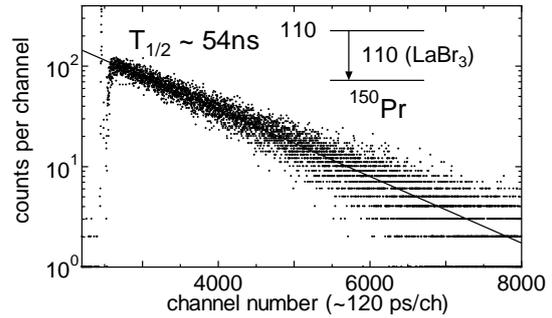


図 5  $^{150}\text{Pr}$  110keV 準位の崩壊曲線 (予備的な結果)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Y. Kojima, H. Hayashi, M. Shibata, S. Endo, K. Shizuma, A. Taniguchi, Nuclear Instruments and Methods A 659 (2011) 193-197. "A spectrometer for lifetime determination by  $\beta$ - $\gamma$ - $\gamma$  delayed coincidence technique at KUR-ISOL" 査読有り.
- (2) Y. Kojima, Y. Shima, H. Hayashi, A. Taniguchi, M. Shibata, KURRI Prog. Rept. 2012, p.110, "Half-life measurements of excited levels in  $^{149}\text{Pr}$ ". 査読無し.
- (3) Y. Kojima, Y. Shima, H. Hayashi, A. Taniguchi, M. Shibata, KURRI Prog. Rept. 2011, p.174, "Half-life measurements of excited levels in  $^{149}\text{Nd}$ ". 査読無し.

[学会発表] (計 3 件)

- (1) Y. Kojima, Y. Shima, H. Hayashi, A. Taniguchi, M. Shibata, Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. 2013 (2013/3/4 ~ 8, New York, USA), "Half-life measurements of excited levels in fission products around mass number 150".
- (2) Y. Shima, Y. Kojima, H. Hayashi, A. Taniguchi, M. Shibata, Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. 2013 (2013/3/4 ~ 8, New York, USA), "Measurements of high energy excited states and  $\gamma$ -rays of fission products with 4 $\pi$  clover detector".
- (3) 小島康明, 嶋洋佑, 林裕晃, 谷口秋洋, 柴田理尋. 「不安定原子核の理工学と物性応用研究 II」専門研究会 (2012/12/18~19, 京大原子炉実験所), "質量数 150 近傍中性子

過剰希土類核の励起準位の寿命測定” .

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

<http://anp.nucl.nagoya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 康明 (KOJIMA YASUAKI)

名古屋大学・アイソトープ総合センター・  
講師

研究者番号：80314730

(2) 研究分担者

なし ( )

(3) 連携研究者

なし ( )