

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740188

研究課題名(和文) 爆発的元素合成過程における質量数160近傍の希土類元素ピーク形成の解明

研究課題名(英文) Elucidation of the rare-earth element peak around  $A = 160$  in the r-process nucleosynthesis

研究代表者

渡邊 寛 (Watanabe, Hiroshi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員

研究者番号：60333316

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：自然界に存在する安定同位体のうち、鉄より重い元素の約半分は、r過程と呼ばれる速い中性子捕獲による爆発的元素合成により生成されたと考えられている。本研究では、質量数80、130付近の主要ピークに加え、質量数160近傍に現れる希土類元素ピークの形成メカニズムを解明すべく、広範囲に亘る中性子過剰核の崩壊経路や半減期を調べた。得られた実験結果は、r過程シミュレーションの精度向上に寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：Nearly half of elements heavier than iron in the universe are considered to be synthesized via a rapid-neutron capture (r) process, which takes place in explosive astrophysical sites like supernovae and/or neutron-star mergers. In the present work, we have measured beta-decay half-lives, decay schemes, and isomeric states in a wide range of neutron-rich isotopes relevant to the r-process nucleosynthesis, particularly focusing on deformed nuclei around mass 160 which should affect the formation of the so-called rare-earth element peak. Those spectroscopic information, in combination with the new data obtained as well for neutron-rich isotopes in the vicinity of the doubly-magic nuclei  $^{78}\text{Ni}$  and  $^{132}\text{Sn}$ , are expected to serve for improvement of the astrophysical simulations of r-process.

研究分野：原子核物理学

キーワード：国際共同研究 元素合成 中性子過剰核 ベータ崩壊 半減期 核異性体 RIビームファクトリー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) r 過程元素合成の研究では、特に質量数 140 以上の重元素領域において、標準的な原子核理論を取り入れた天体シミュレーションが、観測によって得られた元素存在量を過小評価するという問題があった。そのため、r 過程が起こるとされる天体現象の特定にも至っていない。

(2) これまでの r 過程の実験的研究では、質量数 80、130 付近の主要ピーク形成に寄与する中性子数魔法数 50 および 82 に沿った原子核領域が主な対象であった。一方、元素存在量の理論予測値と観測値の不一致が特に著しい質量数 160 近傍の希土類元素領域では、実験データが不足していた。

## 2. 研究の目的

(1) r 過程により合成される元素分布において、特に存在量が多い質量数 80、130、195 近傍の 3 本のピークは、中性子数 50、82、126 の魔法数を持つ中性子過剰核に由来する。一方、本研究で着目する質量数 160 近傍の希土類元素ピークに属する原子核は、魔法数から遠く離れており、その合成には核変形が重要な役割を果たすと考えられている。

(2) 本課題では、質量数 160~170 の中性子過剰な希土類原子核の形状変化を系統的に研究し、核変形の進化と希土類元素ピーク形成の関連を解明する。具体的には、励起準位のエネルギーと寿命測定から変形の大きさを導出するとともに、基底状態の半減期とベータ崩壊強度の測定から許容/禁止遷移分布を導出し、崩壊経路を特定する。

(3) 上記(2)で得られる核崩壊および核構造に関する情報は、r 過程による元素合成を解明する上で重要な基礎となるものであり、r 過程シミュレーションの精度向上に貢献する。

## 3. 研究の方法

(1) 理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) 施設において、核子あたり 345 メガ電子ボルトに加速されたウラン 238 をベリリウム標的に照射する。生成された大量の核分裂・破砕片から、目的の放射性同位元素 (RI) のみを同位体分離装置 BigRIPS を用いて分離・輸送した後、最終焦点位置の両面分割型シリコン半導体検出器上に停止させる。

(2) シリコン検出器に埋め込まれた RI と、その崩壊に伴い放出されるベータ線の位置および時間の相関を取り、ベータ崩壊の半減期

を導出する。ベータ崩壊後に放出されるガンマ線をシリコン検出器の周囲に配置した大球形ゲルマニウム半導体検出器装置 (EURICA) で測定し、娘核のエネルギー準位および崩壊経路を決定する。また、速い時間応答を備えた臭化ランタン検出器によりガンマ線を検出し、1 ナノ秒程度の励起準位の寿命を測定する。一方、マイクロ秒程度の寿命を持つ励起状態 (核異性体) を、ビームとの遅延同時計測により観測する。

## 4. 研究成果

(1) 中性子数 82 を持つパラジウム 128 に、半減期 5.8 マイクロ秒の核異性体 (励起エネルギー 2151 キロ電子ボルト、スピン 8+) を新たに発見した。この核異性体は、魔法数を持つ原子核に特徴的に現れる状態であり、この中性子過剰領域において中性子数 82 が魔法数として健在であることを示す有力な実験的証拠である。また、これまで長らく議論されてきた、魔法数 82 の消滅を仮定した元素合成モデルの破綻を示唆するとともに、重い中性子過剰核における魔法数の成因を探る大きな手掛かりを与える。

(2) パラジウム 126 (中性子数 80) に、半減期 23 ミリ秒の非常に長寿命な核異性体 (励起エネルギー 2406 キロ電子ボルト、スピン 10+) を発見した。類似する核異性体は、中性子数 80 の同調体に系統的に確認されているが、いずれも半減期がマイクロ秒程度であり、パラジウム 126 の場合のようなミリ秒台の寿命を持つものは非常に稀である。このような長寿命核異性体が出現する背景には、この中性子過剰領域に特有の殻構造の進化が密接に関係しており、更に中性子率が増した場合に魔法数 82 がどのように変遷するかを推測する有力な知見を与える。

(3) ニッケル 78 (陽子数 28、中性子数 50) 周辺の中性子過剰核のベータ崩壊半減期を高精度で測定した。これらの核種は、r 過程元素存在量における主要第一ピークの形成に大きく寄与すると考えられており、元素合成の解明において重要な基礎となるものである。系統的な研究の結果、より中性子過剰なニッケル 79、80、コバルト 77 では、ニッケル 78 と比べて半減期が一桁程度も短く、ニッケル 78 が二重魔法数核の性質を維持していることを明らかにした。

(4) ルビジウム (陽子数 37) からスズ (陽子数 50) に亘る質量数 100~140 の中性子過剰核 110 個の半減期測定に成功した。そのうち 40 核種については、初めて測定されたものである。本測定で得られた半減期のデータを r 過程元素合成の理論シミュレーションに取り込んだところ、観測で得られた太陽系の元

素組成比を非常に良く再現した。この結果は、原子核の中性子捕獲と光分解反応の平衡状態が成り立つ高温・高中性子密度の環境下で、r 過程元素合成が進行したことを示唆しており、今後の重元素合成の謎の解明において重要な手がかりを与えると期待される。

(5) 中性子過剰な希土類原子核、サマリウム 164 とガドリニウム 166 に新たな核異性体を発見し、励起状態の観測に初めて成功した。核異性体のエネルギー、寿命、遷移確率、および第一 2+状態の系統性を調べた結果、中性子数 102 で局所的に変形が安定することを明らかにした。この原子核の変形に関する新たな知見は、r 過程元素合成における希土類元素ピーク形成の謎の解明において、重要な役割を果たすと期待される。

(7) 英国サリー大学グループとの共同研究により、高速時間応答を備えたガンマ線検出装置 - 臭化ランタン (LaBr3) 検出器 - を新たに導入した。また、ベータ線を良い時間分解能で測定するためのプラスチックシンチレーション検出器の開発も行った。これらの研究開発により、1 ナノ秒程度の励起状態の寿命測定を可能にした。ジルコニウム 104,106 の第一 2+状態の寿命を世界で初めて測定し、変形の大きさを決定した。

## 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 12 件)

G. Lorusso, S. Nishimura, Z.Y. Xu, H. Watanabe, 他 51 名(掲載順位 8 番目)  
-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, *Physical Review Letters* 114, 192501 (2015) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.192501

Z. Patel, P.-A. Soderstrom, Zs. Podolyak, P.H. Regan, P.M. Walker, H. Watanabe, 他 51 名(掲載順位 6 番目)  
Isomer Decay Spectroscopy of  $^{164}\text{Sm}$  and  $^{166}\text{Gd}$ : Midshell Collectivity Around N = 100, *Physical Review Letters* 113, 262502 (2014) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.262502

G.S. Simpson, G. Gey, A. Jungclaus, J. Taprogge, S. Nishimura, H. Watanabe, 他 45 名(掲載順位 32 番目) Yrast  $6^+$  Seniority Isomers of  $^{136, 138}\text{Sn}$ , *Physical*

*Review Letters* 113, 132502 (2014) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.132502

J. Taprogge, A. Jungclaus, H. Grawe, S. Nishimura, H. Watanabe, 他 55 名(掲載順位 33 番目)  $1p_{3/2}$  Proton-Hole State in  $^{132}\text{Sn}$  and the Shell Structure Along N = 82, *Physical Review Letters* 112, 132501 (2014) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.132501

J. Taprogge, A. Jungclaus, H. Grawe, S. Nishimura, H. Watanabe, 他 55 名(掲載順位 33 番目), Identification of a millisecond isomeric state in  $^{129}\text{Cd}_{81}$  via the detection of internal conversion and Compton electrons, *Physics Letters B* 738, 223 (2014) 査読有  
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.047

H. Watanabe, 他 53 名(掲載順位 1 番目), Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus  $^{132}\text{Sn}$  Explored with the Long-Lived Isomer in  $^{126}\text{Pd}$ , *Physical Review Letters* 113, 042502 (2014) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.042502

Z.Y. Xu, S. Nishimura, G. Lorusso, H. Watanabe, 他 35 名(掲載順位 14 番目), -Decay Half-Lives of  $^{76, 77}\text{Co}$ ,  $^{79, 80}\text{Ni}$  and  $^{81}\text{Cu}$  Experimental Indication of a Doubly Magic  $^{78}\text{Ni}$ , *Physical Review Letters* 113, 032505 (2014) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.032505

G.D. Dracoulis, G.J. Lane, H. Watanabe, 他 13 名(掲載順位 3 番目), Three-quasiparticle isomers and possible deformation in the transitional nuclide,  $^{195}\text{Au}$ , *Physical Review C* 87, 014326 (2013) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.014326

G.D. Dracoulis, G.J. Lane, A.P. Byrne, H. Watanabe, 他 11 名(掲載順位 4 番目), Isomers and excitation modes in the gamma-soft nucleus  $^{192}\text{Os}$ , *Physics Letters B* 720, 330 (2013) 査読有  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.02.026

R.O. Hughes, G.J. Lane, G.D. Dracoulis, A.P. Byrne, P. Nieminen, H. Watanabe, 他 7 名(掲載順位 6 番目), Multiquasiparticle states in the neutron-rich nucleus  $^{174}\text{Tm}$ , *Physical Review C* 88, 014311 (2013) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.014311

P.-A. Soderstrom, G. Lorusso, H. Watanabe, 他 48 名(掲載順位 3 番目), Shape evolution in  $^{116,118}\text{Ru}$ : Triaxiality and transition between the O(6) and U(5) dynamical symmetries, Physical Review C 88, 024301 (2013) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024301

H. Watanabe, 他 51 名(掲載順位 1 番目), Isomers in  $^{128}\text{Pd}$  and  $^{126}\text{Pd}$ : Evidence for a Robust Shell Closure at the Neutron Magic Number 82 in Exotic Palladium Isotopes, Physical Review Letters 111, 152501 (2013) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.152501

〔学会発表〕(計 8 件)

渡邊寛, Decay spectroscopy at RIBF (招待講演), 日本物理学会第 70 回年次大会, 平成 27 年 3 月 23 日, 早稲田大学(東京都)

渡邊寛, Highlights of EURICA decay spectroscopy (招待講演), 第 4 回日米合同物理学会, 平成 26 年 10 月 10 日, ハワイ(アメリカ)

Hiroshi Watanabe, Gamma-ray spectroscopy of exotic nuclei with EURICA (招待講演), International Symposium on EXotic Nuclei (EXON-2014), 平成 26 年 9 月 9 日, カリーニングラード(ロシア)

Hiroshi Watanabe, The nature of a shell closure at  $N = 82$  explored with seniority and spin-gap isomers in neutron-rich Pd and Ag isotopes (口頭発表), Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 平成 26 年 6 月 2 日, 東京大学(東京都)

Hiroshi Watanabe, Decay spectroscopy with EURICA at RIBF: Exploring new aspects far from stability (招待講演), 2nd Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure Advances in Nuclear Structure at Extreme Conditions, 平成 26 年 2 月 22 日, ボロミオ(イタリア)

Hiroshi Watanabe, Shape-phase transitions in very neutron-rich nuclei from  $^{40}\text{Zr}$  to  $^{46}\text{Pd}$  (口頭発表), The 7th International Symposium on Chiral

Symmetry in Hadrons and Nuclei, 平成 25 年 10 月 27 日, 北京(中国)

Hiroshi Watanabe, Recent results of decay spectroscopy at RIBF (口頭発表), Heavy Ion Accelerator Symposium on Fundamental and Applied Science (HIAS2013), 平成 25 年 4 月 8 日, キャンベラ(オーストラリア)

Hiroshi Watanabe, Recent results of decay spectroscopy at RIBF and future perspectives with EURICA (招待講演), 8th Tours Symposium On Nuclear Physics and Astrophysics (TOURS2012), 平成 24 年 9 月 6 日, ブラックフォレスト(ドイツ)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

The magical stability of nuclei  
RIKEN RESEARCH  
<http://www.riken.jp/en/research/rikenresearch/highlights/7551/>

「魔法数」を持つ原子核に現れる「特別な核異性体」を発見 - 中性子を非常に多く含むパラジウム同位体で魔法数 82 の存在を実証 -  
理化学研究所プレスリリース  
[http://www.riken.jp/pr/press/2013/20131009\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2013/20131009_1/)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

渡邊 寛 (WATANABE, Hiroshi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員

研究者番号：6 0 3 3 3 3 1 6

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：