

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247045

研究課題名(和文) 爆発的重元素合成の第1,2ピークに関わる中性子過剰核の研究

研究課題名(英文) Study of neutron-rich nuclei relevant to 1st and 2nd peak of r-process nucleosynthesis

研究代表者

西村 俊二 (Nishimura, Shunji)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・前任研究員

研究者番号：90272137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：爆発的重元素合成(r過程)において重要な役割を果たす原子核の崩壊を調べるために、欧州の大型線検出器と高検出効率線測定装置を導入した。研究期間中に234種もの半減期測定に成功した。122種の新半減期データを超新星爆発におけるr過程計算に導入した結果、r過程の第1から第2ピークの分布を決定する上で非常に重要な役割を果たすことを明らかにした。さらに希土類元素領域における元素組成比の不確定性を大幅に減らすことに成功した。78Niの半減期、128Pdの励起レベルの系統的な研究を行い、中性子魔法数N=50、82がまだ健在であることを示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：High efficiency γ -ray detectors (Cluster Germanium detector) and β -ray detectors were introduced to investigate the role of the neutron-rich nuclei in the rapid-neutron capture process (r process) nucleosynthesis. In total, 234 β -decay half-lives were measured successfully during this research program. We found that newly measured 122 β -decay half-lives play an important role in the determination of the shape of 1st and 2nd peaks of r-process elements. In addition, our results reduce the uncertainty of synthesis in the formation of heavier rare-earth elements. The neutron magic number $N = 50$ and 82 were investigated by studying the systematics of β -decay half-lives and excited states of ^{78}Ni and ^{128}Pd , respectively. The results suggest that neutron shell closure at $N = 50$ and 82 are still robust for such very neutron-rich nuclei.

研究分野：原子核(実験)

キーワード：崩壊 r過程 中性子過剰核 超新星爆発 中性子星合体 半減期

1. 研究開始当初の背景

自然界において鉄より重い重元素の約半分は、重い星がその一生を終えるときに起こす超新星爆発において合成されたと考えられている。大量の中性子が存在する爆発的環境においては、星の中にある原子核が中性子を次々と吸収する中性子捕獲反応が一挙に進み、生成された中性子過剰な原子核のβ崩壊の競合により金やウランなどが作られる。この一連の重元素合成は数秒程度と速いスピード (rapid) で進むことから「r過程」と呼ばれている。最近では、これら重元素は超新星爆発でなく中性子星合体で生成されたという議論もなされており、未だ多くの謎に包まれている。

2009年、理研のRIBF施設を利用した最初の崩壊測定実験を実施した。質量数 $A=110$ 近傍の中性子過剰核 36種の寿命測定に成功し、r過程が速く進むことを示す結果を得た。この成果は、質量数 $A=110-125$ 領域の太陽系でのr過程成分の不足問題を少しだけ解消する効果があることが分かった。質量数 $A=110-125$ 領域の元素不足問題を解消する1つのシナリオとして、 $N=82$ 領域でのシェル・クエンチング効果が提唱されており、第1ピーク (質量数 $A=80$)、第2ピーク領域 (質量数 $A=130$) では、魔法数の消失の可能性が議論されていた。そこで、r過程に直接影響を与える中性子過剰核の魔法数、寿命に関する大規模な実験的検証を行う必要がある。

2. 研究の目的

r過程の元素組成比は、r過程において生成された数千種もの中性子過剰な原子核 (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) に大きく依存する。特に、重元素生成において原子番号の増加スピードを決定するβ崩壊の速度が、重元素生成の鍵をにぎる。

ここでは、世界最高性能のRI生成能力をもつ理研のRIBF加速器とBigRIPS輸送ビームラインを利用し、中性子過剰核の崩壊に着目した崩壊測定実験を行う。さらに、r過程のピーク構造に直接影響を与える中性子数 $N=50, 82$ の領域の中性子過剰核の核構造に着目した研究を推進する。得られた原子核の崩壊データを超新星爆発におけるr過程・重元素合成計算に取り込み、r過程におけるインパクトについて検証を行う。

3. 研究の方法

ウランビームをベリリウム標的と衝突させ、核分裂反応によりRIを生成する。生成したRIは、BigRIPS輸送ビームラインにより分離・粒子識別を行い、崩壊測定用の位置検出型シリコン半導体検出器に打ち込む。打ち込んだRIの停止位置から放出されるβ線のエネルギーと時間を測定し、RIの半減期を決定する。さらに、励起したRIから放出さ

れるγ線を測定し、RIのエネルギー準位を調べる。ここでは、シリコン半導体検出器の周囲にゲルマニウム半導体検出器を配置し、γ線を測定する。さらに、γ線の崩壊時間を調べるために高速γ線検出器 (LaBr3(Ce)) を追加する。

β崩壊に伴い放出される中性子の放出確率を調べるために、娘核、孫核からのγ線を測定する。また、 ^3He 検出器と中性子減速材 (ポリエチレン) を組合せた検出器の開発をおこなう。さらに、遅発中性子のエネルギーを測定するために、γ線と中性子の波形弁別を可能とする飛行時間検出器の開発を行う。



図1: RIBFにおける崩壊測定実験の全体像

4. 研究成果

高検出効率のβ線検出器を開発し、世界最高性能のγ線検出器 (クラスター型ゲルマニウム検出器) と組合せた最高水準の崩壊測定実験を実施した。研究期間中に440種のRI崩壊データの収集に成功した。研究期間中に以下の研究成果を得ることに成功した。

$N=50$ 領域: 2重魔法数を持つ ^{78}Ni とその近傍の ^{77}Co , $^{79,80}\text{Ni}$ を含む20種のRIの半減期測定に成功した。その結果、 ^{78}Ni の半減期 (122 ms) と比較し、 ^{79}Ni が3倍、 ^{80}Ni が6倍、 ^{77}Co が10倍速く崩壊することが分かり、 ^{78}Ni において2重魔法数が実現していることを示す最初の実験結果を得た。

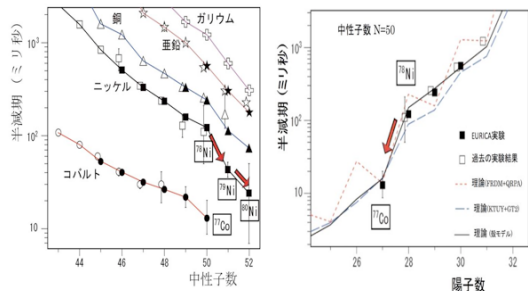


図2: 2重魔法核 ^{78}Ni 近傍の半減期の中性子数と陽子数依存性。理論計算との比較 (右)。

$N=82$ 領域: r過程の第2ピーク成分を決定する領域となる。この領域において110種

の半減期測定に成功した。この内 40 種の原子核の半減期は世界で初めて測定したものとなる。特に r 過程において重要となる $N=82$ の ^{127}Rh , ^{128}Pd , ^{130}Cd , ^{131}In の半減期を高い精度で決定し、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。得られた半減期データを超新星爆発における r 過程の理論計算に取り込み、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と矛盾しない結果を得た。

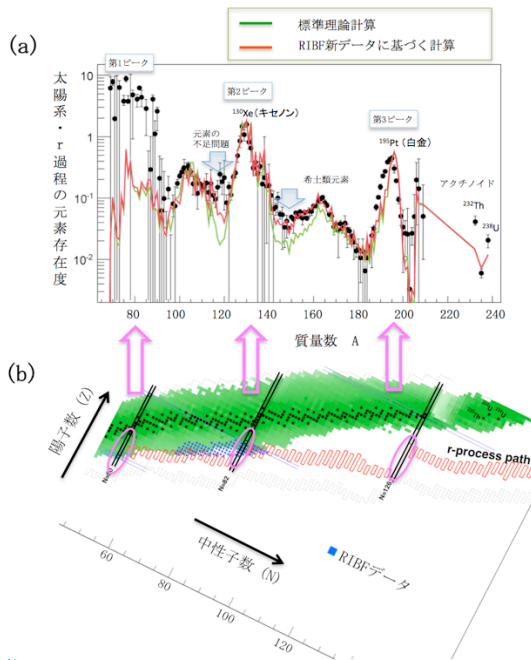


図3 : (a) r 過程に起因する太陽系の重元素存在度。第 1,2,3 ピークと希土類元素のピーク構造を持つことが分かる。緑線は従来の原子核理論を、赤線は本研究で得た新データを取り込んだ元素存在度

さらに第 2 ピーク上のテルルを含む「重元素存在比の普遍性」を検証するために、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、テルル、キセノン、バリウム元素は安定して生成されるが、

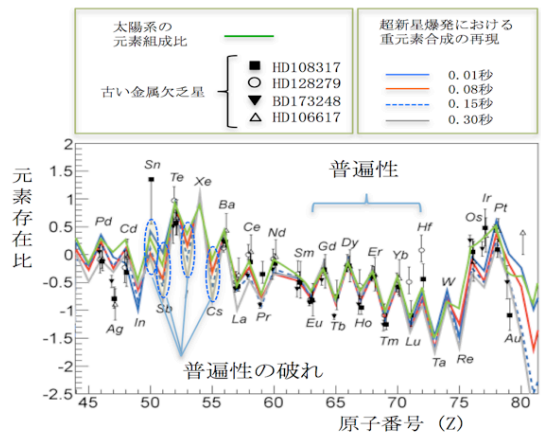


図4 : 太陽系、金属欠乏星、および半減期データを取り込んだ元素存在比スペクトル

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ことを明らかにした。これは「重元素存在比の普遍性」の破れがあることを示す最初の結果となり、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可能性をひらいた。

r 過程の第 2 ピークを形成する要因として中性子魔法数 $N = 82$ の検証が必要とされている。生成した RI の核異性体探索を行った結果、 $N = 82$ 上にある最も中性子過剰な ^{128}Pd に特別な核異性体があることを発見した。これは、陽子もしくは中性子数が魔法数の原子核に出現する特徴的な状態を示しており、中性子の数 82 が魔法数であることを示す。

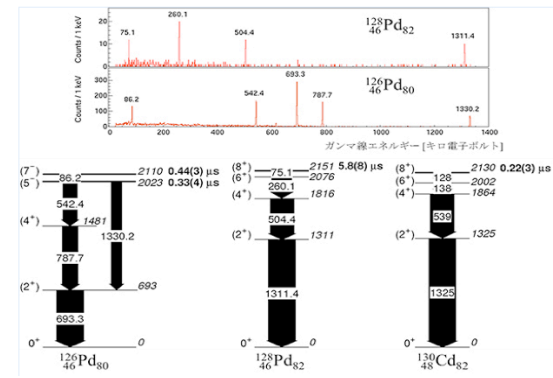


図5 : γ 線スペクトル (上) と ^{126}Pd , ^{128}Pd , ^{130}Cd の準位図 (下)

$N = 100$ 領域 : 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。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。

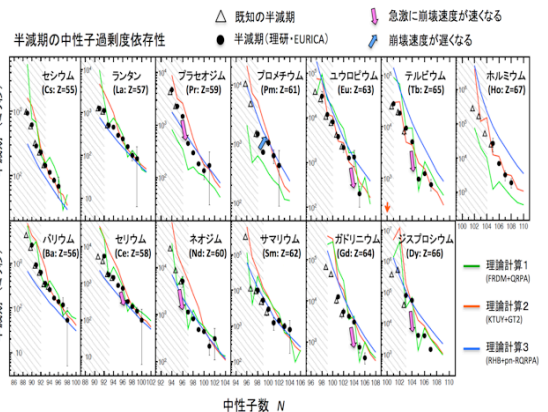


図6 : セシウムからホロミウムまで 13 元素の半減期の中性子過剰度依存性

得られたデータを r 過程の理論計算に取り込み、太陽系の重元素合成の検証を行った結果、希土類元素の組成を決定する上で新たな 57 種のデータが非常に重要な役割を果たすこ

とを明らかにした。

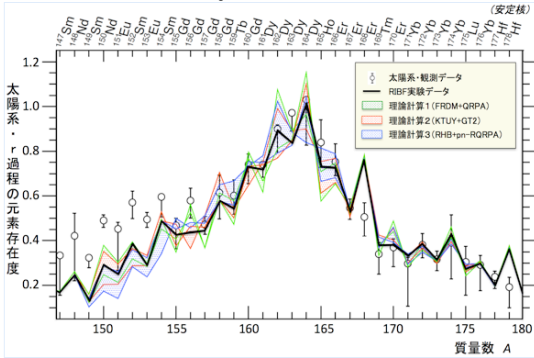


図7：観測による太陽系の元素存在度と超新星爆発を起因とした場合の予想元素存在度

研究期間中に 234 個の半減期の測定に加え、36 個の新同位体元素 (^{77}Co , ^{80}Ni , ^{118}Mo , ^{121}Tc , ^{127}Rh , ^{129}Pd , ^{132}Ag , ^{134}Cd , ^{136}In , ^{137}In , ^{139}Sn , ^{141}Sb , ^{144}Te , ^{96}In , ^{94}Cd , ^{92}Ag , ^{90}Pd , ^{63}Se , ^{67}Kr , ^{68}Kr , ^{154}Ba , ^{156}La , ^{158}Ce , ^{168}Eu , ^{160}Pr , ^{166}Sm , ^{162}Nd , ^{170}Gd , ^{172}Dy , ...) を発見した。

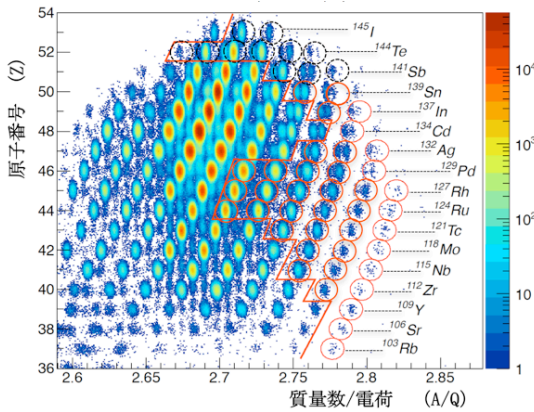


図8：中性子数 $N=82$ 領域で生成した RI の識別結果。色は粒子の生成量を示す。

さらに、14 種の核異性体の発見、37 種の遅発 γ 線測定、5 個の遅発中性子放出確率粒子、3 個の陽子放出の発見を報告した。

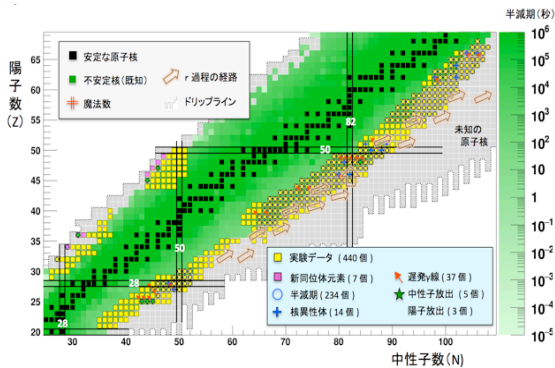


図9：本研究においてデータ収集した RI (黄色の□) と半減期測定した RI (青い○)。発見した核異性体 (青い十字)、中性子または陽子放出する RI (緑の星)。

また、遅発中性子放出確率を測定するために ^3He 検出器とシリコン半導体検出器を組合せ

た実験装置を完成させた。

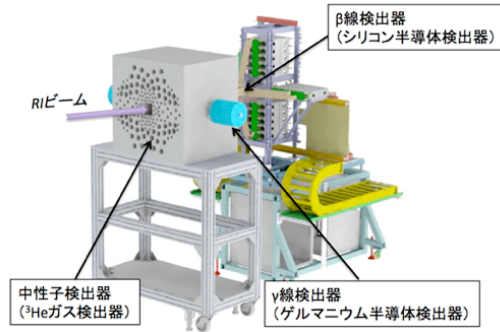


図10：遅発中性子放出測定実験

さらに、波形解析により n/γ 分離を可能とする新たなプラスチックシンチレータ (EJ-299) を導入した飛行時間検出型中性子検出器の開発に成功した。

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 34 件)

- ① B. Moon, ..., S. Nishimura et al., “Nuclear structure and β -decay schemes for Te nuclides beyond $N=82$ ”, Phys. Rev. C **95**, 044322 (2017) 1-6. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044322
- ② P. Davies, ..., S. Nishimura et al., “The role of core excitations in the structure and decay of the 16^+ spin-gap isomer in ^{96}Cd ”, Phys. Lett. B **767** (2017) 474-479, DOI:10.1016/j.physletb.2017.02.013
- ③ J. Wu, S. S. Nishimura et al., “ ^{94}B -Decay half-Lives of Neutron-Rich ^{55}Cs to ^{67}Ho : Experimental Feedback and Evaluation of the r-Process Rare-Earth Peak”, Phys. Rev. Lett. **118**, 0672701 (2017) 1-6, DOI:10.1103/PhysRevLett.118.072701
- ④ A. I. Morales, ..., S. Nishimura et al., “Type II shell evolution in $A=70$ isobars from the $N \geq 40$ island of inversion”, Phys. Lett. B **765** (2017) 328-333, DOI:10.1016/j.physletb.2016.12.025
- ⑤ E. Ideguchi, ..., S. Nishimura et al., “ μs isomers of $^{158,160}\text{Nd}$ ”, Phys. Rev. C **94**, 064901 (2016) 1-5, DOI: 10.1103/PhysRevC.94.064901
- ⑥ J. Taprogge, ..., S. Nishimura et al., “Proton-hole and core excited states in the semi-magic nucleus $^{131}\text{In}_{82}$ ”, Eur. Phys. J. A **52**, 347 (2016) 1-10, DOI: 10.1140/epja/i2016-16347-y
- ⑦ P.-A. Söderström, ..., S. Nishimura et al., “K-mixing in the doubly

- mid-shell nuclide ^{170}Dy and the role of vibrational degeneracy”, *Phys. Lett. B* **762** (2016) 404-408,
DOI: 10.1016/j.physletb.2016.09.058
- ⑧ T. Goigoux, ..., S. Nishimura et al., “Two-proton Radioactivity of ^{68}Kr ”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 162501 (2016) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.162501
- ⑨ A. Jungclaus, ..., S. Nishimura et al., “ β -decay of semi-magic ^{130}Cd : Revision and extension of the level scheme of ^{130}In ”, *Phys. Rev. C* **94**, 024303 (2016) 1-8,
DOI: 10.1103/PhysRevC.94.024303
- ⑩ H. Watanabe, ..., S. Nishimura et al., “Long-lived K isomer and enhanced γ vibration in the neutron-rich nucleus ^{172}Dy : Collectivity beyond double midshell”, *Phys. Lett. B* **641** (2016) 641-646,
DOI: 10.1016/j.physletb.2016.07.057
- ⑪ B. Blank, ..., S. Nishimura et al., “New neutron-deficient isotopes from ^{78}Kr fragmentation”, *Phys. Rev. C* **93**, 061301 (2016) 1-5,
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.061301
- ⑫ I. Čeliković, ..., S. Nishimura et al., “New Isotopes and Proton Emitters - Crossing the Drip-Line in the Vicinity of ^{100}Sn ”, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 162501 (2016) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.162501
- ⑬ A. Jungclaus, ..., S. Nishimura et al., “First observation of γ rays emitted from excited states south-east of ^{132}Sn : The $\pi_{g_{9/2}^{-1}} \otimes \nu f_{7/2}$ multiplet of $^{132}\text{In}_{83}$ ”, *Phys. Rev. C* **93**, 041301 (2016) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.041301
- ⑭ A. I. Morales, ..., S. Nishimura et al., “Low-lying excitations in ^{72}Ni ”, *Phys. Rev. C* **93**, 034328 (2016) 1-14,
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.034328
- ⑮ S. Shibagaki, ..., S. Nishimura et al., “RELATIVE CONTRIBUTIONS OF THE WEAK, MAIN, AND FISSION-RECYCLING r-PROCESS”, *Astrophys. Jour.* **816**, 79 (2016) 1-9,
DOI: 10.3847/0004-637X/816/2/79
- ⑯ R. Lozeva, ..., S. Nishimura et al., “New isomer found in $^{140}_{52}\text{Sb}_{89}$: Sphericity and shell evolution between $N=82$ and $N=90$ ”, *Phys. Rev. C* **93**, 014316 (2016) 1-8,
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.014316
- ⑰ Z. Patel, ..., S. Nishimura et al., “Decay spectroscopy of ^{160}Sm : The lightest four-quasiparticle K isomer”, *Phys. Lett. B* **753** (2016) 182-186,
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.12.026
- ⑱ P.-A. Söderström, S. Nishimura et al., “Two-hole structure outside ^{78}Ni : Existence of a μs isomer of ^{76}Co and β decay into ^{76}Ni ”, *Phys. Rev. C* **92**, 051305 (2015) 1-5,
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.051305
- ⑲ R. Lozeva, ..., S. Nishimura et al., “New decay scheme of the $^{136}_{51}\text{Sb}_{85} 6^{-}$ isomer”, *Phys. Rev. C* **92**, 024304 (2015) 1-4,
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.024304
- ⑳ G. Benzoni, ..., S. Nishimura et al., “Decay properties of $^{68,69,70}\text{Mn}$: Probing collectivity up to $N=44$ in Fe isotopic chain”, *Phys. Lett. B* **751** (2015) 107-112,
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.10.025
- ㉑ P. Lee, ..., S. Nishimura et al., “ β -delayed γ -ray spectroscopy of non-yrast state in ^{138}Te near the neutron drip line”, *Phys. Rev. C* **92**, 044320 (2015) 1-7,
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.044320
- ㉒ F. Browne, ..., S. Nishimura et al., “Lifetime measurement of the first 2^{+} states in $^{104,106}\text{Zr}$: Evolution of ground-state deformations”, *Phys. Lett. B* **750** (2015) 448-452,
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.09.043
- ㉓ J. Taprogge, ..., S. Nishimura et al., “ β -decay of ^{129}Cd and excited states in ^{129}In ”, *Phys. Rev. C* **91**, 054324 (2015) 1-11,
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.054324
- ㉔ G. Lorusso, S. Nishimura et al., “ β -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 (2015) 1-7,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.192591
- ㉕ Z. Patel, ..., S. Nishimura et al., “Isomer Decay Spectroscopy of ^{164}Sm and ^{166}Gd : Midshell Collectivity Around $N=100$ ”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 262502 (2014) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.262502
- ㉖ J. Taprogge, ..., S. Nishimura et al., “Identification of a millisecond isomeric state in $^{129}\text{Cd}_{81}$ via the detection of internal conversion and Compton electrons”, *Phys. Lett. B* **738** (2014) 223-227,
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.047
- ㉗ G. Simpson, ..., S. Nishimura et al., “Yrast 6^{+} Seniority Isomers of $^{136,138}\text{Sn}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 132502 (2014) 1-6,

- DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.132502
- ⑳ H. Watanabe, G. Lorusso, S. Nishimura et al., “Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus ^{132}Sn Explored with the Long-Lived Isomer in ^{126}Pd ”, Phys. Rev. Lett. **113**, 042502 (2014) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.042502
- ㉑ Z.Y. Xu, S. Nishimura et al., “ β -Decay Half-Lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$, and ^{81}Cu : Experimental Indication of a Doubly Magic ^{78}Ni ”, Phys. Rev. Lett. **113**, 032505 (2014) 1-5,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.032505
- ㉒ J. Taprogge, ..., S. Nishimura et al., “ $1p_{3/2}$ Proton-Hole State in ^{132}Sn and the Shell Structure Along $N=82$ ”, Phys. Rev. Lett. **112**, 132501 (2014) 1-6,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.132501
- ㉓ H. Watanabe, G. Lorusso, S. Nishimura et al., “Isomer in ^{126}Pd and ^{128}Pd : Evidence for a Robust Shell Closure at the Neutron Magic Number 82 in Exotic Palladium Isotopes”, Phys. Rev. Lett. **111**, 152501 (2013) 1-5,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.152501
- ㉔ P.-A. Söderström, ..., S. Nishimura et al., “Shape evolution in $^{116,118}\text{Ru}$: Triaxiality and transition between the $O(6)$ and $U(5)$ dynamical symmetries”, Phys. Rev. C **88**, 024301 (2013) 1-10,
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024301
- ㉕ 西村俊二、「重元素合成の鍵を握る中性子過剰核の研究：r過程研究の幕開け」、パリティー 2016年1月号 (2016)
- ㉖ 西村俊二、「RIBFにおける不安定核の崩壊測定と重元素合成」、原子核研究 2015年3月号、Vol. 59, No. 2 (2015)

[学会発表] (計 9 件)

- ① S. Nishimura (Invited), “Experimental beta-decay rates of r-process nuclei”, Neutron star mergers: From gravitational waves to nucleosynthesis, Hirschegg, Austria (2017).
- ② S. Nishimura (Invited), “ β -decay properties of neutron-rich nuclei: impact on r-process abundance”, The 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Niigata, Japan (2016).
- ③ S. Nishimura (Invited), “Experimental Challenges: Study of r-Process Nucleosynthesis at RIBF”, The 9th Japan-China Nuclear Physics Symposium, Osaka, Japan (2015).
- ④ S. Nishimura (Invited), “Survey of Decay Properties for Exotic Nuclei at RIBF”, International Symposium on the Frontier of g-ray Spectroscopy, Osaka, Japan (2015).
- ⑤ S. Nishimura (Invited), “Properties of

exotic Nuclei Identified at RIBF”, XXXIV Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland (2015).

- ⑥ S. Nishimura (Invited), “Decay Spectroscopy and Future perspectives at RIBF”, ARIEL Science Workshop, Vancouver, Canada (2015).
- ⑦ S. Nishimura (Invited), “Decay Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei Relevant to Astrophysical r-Process”, The 5th Symposium: Neutrinos and Dark Matter in Nuclei Physics, Jyväskylä, Finland (2015).
- ⑧ S. Nishimura (Invited), “Decay properties of exotic nuclei relevant to r-process nucleosynthesis”, APS-JPS Meeting, Hawaii USA (2014).
- ⑨ S. Nishimura (Invited), “Study of r-Process Nucleosynthesis via Decay Spectroscopy at RIBF”, International Conference on Nuclear Physics and Astrophysics, Antalya, Turkey (2014).
- ⑩ S. Nishimura (Invited), “Decay spectroscopy of very neutron-rich nuclei at RIBF”, 25th International Nuclear Physics Conference, Firenze, Italy (2013).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://ribf.riken.jp/~nishimu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 俊二 (NISHIMURA Shunji)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・前任研究員
研究者番号：90272137

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()