

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247044

研究課題名(和文) r - 過程元素組成比における第3ピーク滞留核近傍核のベータ崩壊様式研究

研究課題名(英文) Beta-decay spectroscopy of waiting-point nuclei in the third peak of element abundance pattern produced by r-process

研究代表者

鄭 淳謙 (Jeong, SunChan)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・客員教授

研究者番号：00262105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円

研究成果の概要(和文)：重元素を合成する速い中性子捕獲過程の起源天体の環境解明を目指し、中性子数 $N=126$ 近傍核のベータ崩壊核分光実験を行った。そのために三つの開発を行った。(1)ドーナツ型ガスセルを開発し、反応生成物の収量を10倍増やすことに成功。(2)新たに色素レーザーを導入し、重元素のレーザー共鳴イオン化様式探索に成功。(3)希少短寿命核の寿命測定のため、高効率・低バックグラウンドガス検出器を開発。その結果、短寿命核 $199, 201\text{Pt}$ 、 $196, 197, 198, 201\text{Ir}$ 、 196Os の寿命測定に成功した。更にレーザー共鳴イオン化核分光法で、核磁気モーメントと荷電半径の変化量の導出に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the astrophysical environment for the formation of the 3rd peak in the solar r-abundance pattern produced by the r-process, we performed precise beta-decay spectroscopy of the nuclei around neutron magic number $N=126$. We developed the following three items to proceed with our research. (1) We developed a doughnut-shaped gas-cell and could increase the production yield by a factor of ten. (2) We installed a new dye laser and established laser resonance ionization schemes of the heavy elements with atomic number $Z=73-78$. (3) We developed highly efficient and low-background gas-counter for the lifetime measurement by detecting the beta-rays. As the result, we can successfully measure the lifetimes of $199, 201\text{Pt}$, $196, 197, 198, 201\text{Ir}$ and 196Os . Moreover, we can evaluate the magnetic dipole moments and the change of the charge radii by using the in-gas-cell laser ionization spectroscopy technique successfully.

研究分野：実験核物理

キーワード：国際情報交換 ベルギー 元素合成 アルゴンガスセル レーザー共鳴イオン化

1. 研究開始当初の背景

天体核物理学分野において主な課題のひとつは重元素がどう合成されたのかであろう。1957年に既に Burbidge らによって提唱されて以来、鉄より重い元素の半分は速い中性子捕獲元素合成 (r 過程) によって合成されたと考えられている。r 過程は核図表上質量数 80、130、195 近傍の中性子魔法数を持つ超中性子過剰な原子核 (夫々、 $N=50$ 、 82 、 126 滞留核) を通る。そのため、高温、高密度の中性子を持つ天体環境が必要となり、大質量星が進化の末、終焉を迎えるときの超新星爆発で発生する衝撃波に伴う過程がその天体起源であると考えられているものの、今後の理論・観測双方において更なる進展が待たれている。r 過程経路上並びにその近傍の超中性子過剰核の実験的研究は、星の元素組成の天体観測と星の進化理論間の接点となる元素合成ネットワーク計算に使える直接的なデータを提供し、重元素起源天体解明の掛け橋となる。4000にも上る核種が関わるその計算において、特に、滞留核の崩壊寿命は、r 過程の進行と全体の時間規模、その結果元素組成パターンを理解する上で不可欠である。

滞留核の中でも最も重い $N=126$ 滞留核は、r 過程元素合成の最後のボトルネックとして、星の年代推定に重要な超重元素の組成 (ウラン、トリウム等) にも関わる。 $N=50$ 、 82 の滞留核近傍は、最近実験室での合成が可能となり、得られた実験データを元にファクター2以内でベータ崩壊寿命予測ができるようになった。しかし、本研究で注目している $N=126$ 滞留核近傍は未だに有力な生成手法がなく、核図表の未到達域 (ブランクスポット) になっており、ベータ崩壊寿命は理論計算の予測に頼るしかない。それに、この領域では、 $N=50$ 、 82 滞留核近傍とは異なり、通常であれば凡そ 100 倍も違う崩壊様式が競合することが考えられ、 $N=126$ 滞留核近傍核のベータ崩壊寿命予測値は模型によって一桁以上のバラツキがある。ベータ崩壊様式の競争を精度よく記述するには、 $N=126$ 近傍核の詳細な核分光的な知見が不可欠であるが、それに先駆けて崩壊様式の競争に対する実験的な裏付けとして理論計算の標準となる崩壊寿命の実験値が切望されている。

2. 研究の目的

r 過程経路における最後のボトルネックである第3ピーク滞留核付近のベータ崩壊核分光を行い、今まで最も不正確であったその滞留核に対する原子核理論の予見能力を著しく改善させ、重元素の起源天体を論ずるに当たって、原子核物理学から生じる不確定性の完全解消への突破口を開くことを目指している。そのため、本研究では、核子当たり 10MeV 程度の ^{136}Xe ビームと ^{198}Pt 標的を用いた多核子移行反応で、効率良くブランクスポット領域の短寿命核を生成し、当研究

グループが開発した生成核の元素選択型質量分離器・実験装置の性能向上させるための開発を行い、核図表において今まで到達困難とされた第3ピーク滞留核 (質量数 ~ 195 近傍、中性子数=126) 近傍核のベータ崩壊寿命を測定する。

3. 研究の方法

金、ウラン等の重元素を合成する速い中性子捕獲過程の起源となる天体環境の解明を目指し、 ^{136}Xe ビームと ^{198}Pt 標的を用いた多核子移行反応で生成した中性子数 $N=126$ の安定閉殻近傍核の精密ベータ崩壊核分光実験を行った。

加速器を用いたオンライン実験で効率良く測定を行うために、次の3項目の開発を実施した。

(1) 多核子移行反応で生成される希少原子核を高速かつ高効率で分離、収集可能な単一原子核ビーム生成用ガスセルの開発。

(2) 高効率かつ安定したレーザー装置の開発および重元素のレーザー共鳴イオン化様式の確立。

(3) 寿命測定用の高効率・低バックグラウンドなベータ崩壊測定用検出器およびベータ遅発ガンマ線測定用のゲルマニウム検出器の開発。

4. 研究成果

(1) レーザー共鳴イオン化したイオンは、アルゴンガス中の不純物と分子イオンを形成し、単体イオンとして存在する確率が低下していることが判明した。 ^{198}Pt 標的を使用した加速器実験では、 $^{198}\text{Pt}^+ : ^{198}\text{PtH}_2^+ : ^{198}\text{PtH}_2\text{O}^+ : ^{198}\text{PtAr}_2^+ = 1:1:1:6$ の比率で分子イオンを形成しており、 $^{198}\text{Pt}^+$ は 1/9 しか存在しない。

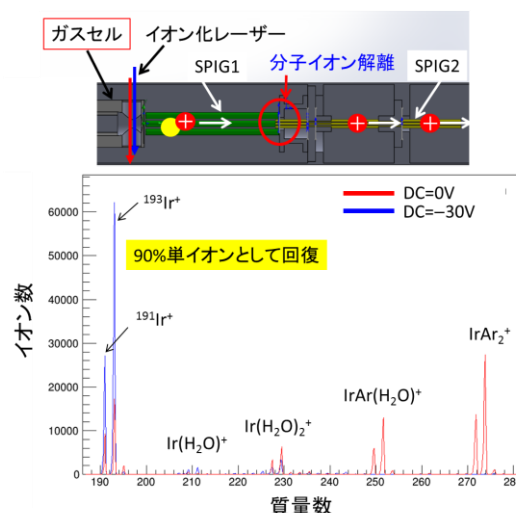


図1：安定核 $^{191}, ^{193}\text{Ir}$ の分子イオンの質量分布。SPIG1-SPIG2間に-30Vの加速電圧を印可することで分子イオンの解離に成功。

効率を向上させるためにイオンを高周波でトラップして輸送する六極高周波イオン

ガイド(SPIG)をこれまでの1組から2~3組に増やし、各SPIG間に印可した電場でイオンを加速し雰囲気中(20Pa)のアルゴンガスとの衝突により、分子イオンを解離させて単体イオンとしての存在比の改善を図った。図1は加速器を用いないオフライン試験で、イリジウム原子をレーザーイオン化して測定したイオンの質量分布である。SPIG1-SPIG2間に-30Vの電場を印可(青線の質量分布)することによって、分子イオンを解離し、単体のイリジウムイオンの引き出し量増加に成功したことを示している。その後、オンライン試験を行い、ほぼ $^{198}\text{Pt}^+$ のみを引き出すことに成功した。

(2) これまで運用中のガスセルは一次ビーム入射用にハーバー薄膜窓(アルゴンガス1気圧を封じるため)を有しており、その窓を通してガスセル内部に設置した白金標的にビームを照射し、未知核を生成していた。そのため、ハーバー薄膜窓および白金標的が一次ビームの熱損傷で破損しない10pnA程度のビーム強度しか利用できない。未知核の生成量を飛躍的に増大するためには、大強度一次ビームを利用できる新ガスセルシステムが必要である。また一次ビームの作るアルゴンプラズマがガスセルからの引出し効率低下の原因であり、できるだけ一次ビームがガスセル内に入らない工夫が必要である。

この相反する要求、ガスセル内のプラズマ効果を低減させつつ、一次ビーム増大による多核子移行反応生成物の収量増加を実現させるために、一次ビームが直接ガスセル内に入射しないドーナツ型ガスセルと回転標的を開発した(図2参照)。その結果、引き出し効率が5倍に増え、一次ビーム強度を増大でき、反応生成物の収量を10倍に増やすことに成功した(図3参照)。

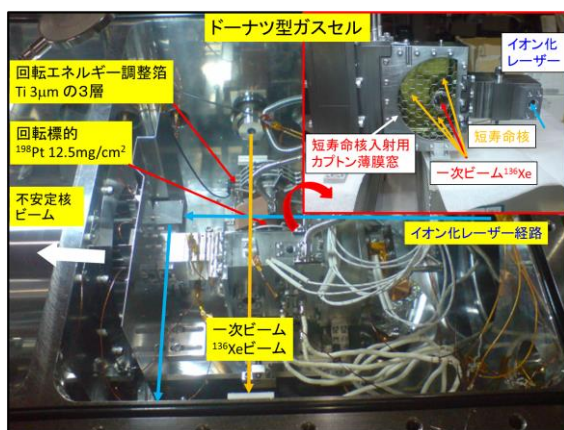


図2：開発したドーナツ型ガスセル写真(右上)と、回転標的を含めた実験装置の写真(全体)。一次ビームはガスセルに入ることなく、ドーナツの穴部分を通り抜ける。一方、生成された短寿命核は放出角度が大きいので、カプトン薄膜窓を通してガスセル内に打ち込まれる。

短寿命核 ^{199}Pt (半減期:30.8分)

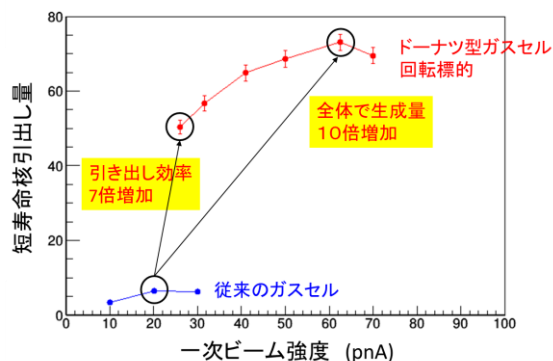


図3：短寿命核 ^{199}Pt イオン引き出し量の一次ビーム強度依存性。

(3) 生成量の少ない短寿命核の核分光を行うためには、高効率かつ長時間安定のレーザー装置を構築する必要がある。これまで使用してきた色素レーザーは25年前のものでありメーカーによる保守もなく、安定性に欠けていた。その点において新規導入した色素レーザーは、各段に性能が上がっている。波長及び強度を常にモニターすることで、長時間の安定性を容易に保てる。そのおかげで、ガスセル内に設置したフィラメントから蒸発した中性原子のタンタル($Z=73$)、レニウム($Z=75$)、オスミウム($Z=76$)、イリジウム($Z=77$)、白金($Z=78$)を用いたオフライン試験で、効率の良いレーザー共鳴イオン化様式の探索に成功した(表1)。 λ_1 と λ_2 (308nm固定)の2色のレーザーを同時に照射してイオン化している。波長 λ_1 は各元素に固有であるため、元素選択性がある。波長 λ_1 を250nm近傍に選ぶことで実験中に引き出す元素を容易に変更できる。短寿命核をイオン化する際に不可欠な情報である同位体シフト量、アルゴンガス中での波長の圧力シフト量を定量的に調べることができた。これらは、元素中で最高融点を有するタングステン($Z=74$)については今後調べる予定である。

元素	イオン化エネルギー (eV)	λ_1 (nm)	イオン化様式の確立	同位体シフト (pm/1a.u.)	圧カシフト (pm/100kPa)
Pt ($Z=78$)	8.96	248.7920	○	-0.13	0.35
Ir ($Z=77$)	8.97	247.5871	○	0.24	0.26
Os ($Z=76$)	8.44	247.7583	○	-0.17	1.0
Re ($Z=75$)	7.83	252.0763	○	0.28	0.30
W ($Z=74$)	7.86	255.2115	予定	-	-
Ta ($Z=73$)	7.55	248.5706	○	-	1.3

表1：重元素のイオン化レーザー波長 λ_1 と測定した同位体シフト量、圧カシフト量。

(4) 生成量が少ない短寿命核のベータ崩壊寿命測定のため、高効率かつ低バックグラウンドガス検出器を開発した(図4参照)。このガス検出器は16組32チャンネルに分割されており、検出パターンでバックグラウンドを除去できる。用いたガスはアルゴン+メタン(10%)の混合ガスで、比例係数管として使用

する。各組の固有検出効率は 95%以上、有感立体角は 80%ある。一般的に、低エネルギーベータ線になるとエネルギー損失のため検出効率が低下する。しかしながら、ガス検出器にすることによって、1MeV 程度のベータ線検出効率をこれまでの絶対検出効率 10% (プラスチックシンチレータ) から 30%に上げることに成功した。バックグラウンド計数率も 0.08cps まで低減させることに成功した。

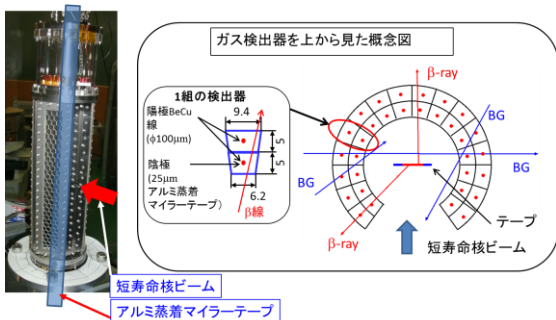


図 4 : 左はガス検出器の写真。中心部分にアルミ蒸着マイラーテープがあり、短寿命核ビームはそこに打ち込まれ、放出されるβ線をガス検出器で検出する。右図はガス検出器を上から見た概念図である。16組 32チャンネルの検出器の信号の組み合わせから、正しいβ線の信号を判断し、バックグラウンド(BG)を除去できる仕組みになっている。

上記のベータ線検出器の後ろにガンマ線検出器として、4 台のスーパークローバーGe検出器(SCGe, 16ch)を配置した(図5参照)。検出効率は、これまで使用していた同軸型Ge検出器の 10 倍に増大できた。ガス検出器と SCGe 用に新たなデータ取得システムを構築し、2kHz のイベント数に対して 98%以上の高効率でデータ取得できる。



図 5 : 開発したベータ遅発ガンマ線核分光用の検出器の写真。上記のガス検出器の周りにガンマ線測定用のスーパークローバーGe検出器を 4 台配置している。

(5) 上記 (1)-(4) の開発により、短寿命核 ^{199}Pt 、 ^{196}Ir 、 ^{197}Ir 、 ^{198}Ir 、 ^{201}Ir 、 ^{196}Os を引出し、ベータ崩壊の寿命を測定することに成功した。図 6 に典型例として ^{197}Ir 、 ^{198}Ir の測定結果を示す。

測定時間 30 分から 2 時間程度で十分な精度を達成できている。このことから、今後、より中性子過剰核の寿命測定を実施できることが判明した。

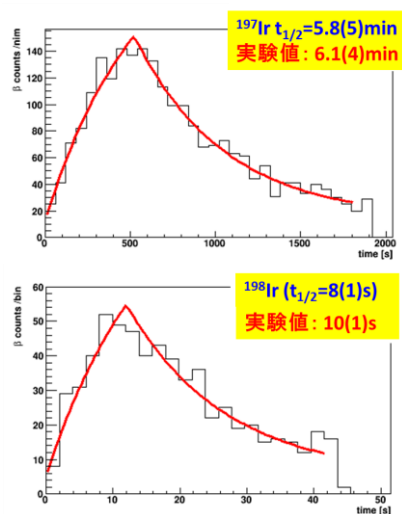


図 6 : ^{197}Ir 、 ^{198}Ir のベータ崩壊寿命測定結果。

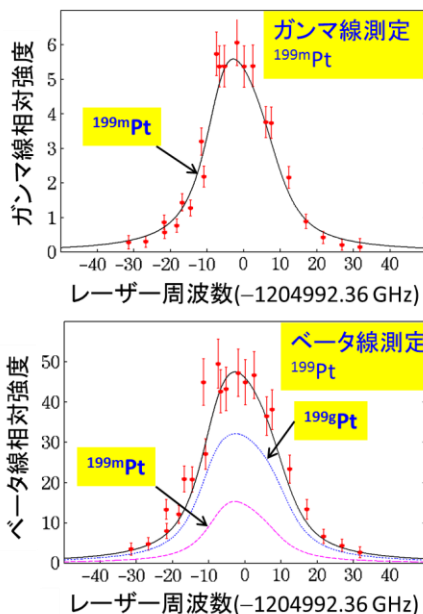


図 7 : 短寿命核 ^{199}Pt のレーザー核分光結果。上図はアイソマー状態からの崩壊ガンマ線検出により測定した超微細相互作用構造(HFS)。下図はベータ線検出により測定した HFS であり、アイソマー状態と基底状態からのベータ崩壊が混入しているため、2 成分で解析している。

(6) レーザー共鳴イオン化法でのイオン効率を最適化するためには、短寿命核原子の超微細相互作用による原子のエネルギー分布を知る必要がある。この測定によって、最適化を図ると同時に、より詳細に核構造を議論できる磁気モーメントと荷電半径の変化量を導出することができる。これらの物

理量から波動関数を導出でき、理論予測の精度向上に大きく貢献できる。この領域は、高融点元素が多いため、安定核に1.2個中性子が付いた短寿命核ですら、測定結果がない。

本研究では、寿命測定に加えて、 $^{199,199m}\text{Pt}$, $^{196,197,198}\text{Ir}$ のレーザー核分光を行った。スーパークローバーGe 検出器のおかげでアイソマー $^{199m}\text{Pt}(t_{1/2}=13.6\text{s})$ からの崩壊ガンマ線を効率良く測定できたので、アイソマー状態と基底状態の磁気モーメントと荷電半径の変化率を導出できた。現在、 $^{196,197,198}\text{Ir}$ についても同様に解析中である(図7参照)。

本研究により、 β 崩壊の寿命測定、HFS 測定を展開できる環境が整い、いくつかの測定に成功している。

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 8 件)

① Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, H. Miyatake, P. Schury, M. Wada, M. Oyaizu, Y. Kakiguchi, M. Mukai, S. Kimura, M. Ahmed, S. C. Jeong, J. Y. Moon, J. H. Park, Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around $N=126$ using KISS, IL NUOVO CIMENTO 39 C 査読有、2016, 359-1, 359-5, DOI: 10.1393/ncc/i2016-16359-9

② Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, H. S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, S. Kimura, M. Mukai, Y. H. Kim, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen, On-line experimental results of an argon gas cell-based laser ion source (KEK Isotope Separation System), Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、2016, 376, p52-56 doi:10.1016/j.nimb.2016.03.031

③ M. Mukai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H. S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y. X. Watanabe, S. Kimura, A. Ozawa, S. C. Jeong, T. Sonoda, Search for efficient laser resonance ionization schemes of tantalum using a newly developed time-of-flight mass-spectrometer in KISS, Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、2016, 376, p73-76, doi:10.1016/j.nimb.2016.02.017

④ S. Kimura, H. Ishiyama, H. Miyatake, Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, H. S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S. C. Jeong, A. Ozawa, Development of the detector system for image-decay spectroscopy at the KEK Isotope Separation System, Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、2016, 376, p338-340

doi:10.1016/j.nimb.2016.01.041

⑤ Y. Hirayama, H. Miyatake, Y. X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, H. S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S. Kimura, T. Sonoda, M. Wada, Y. H. Kim, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen, Beta-decay spectroscopy of r-process nuclei around $N = 126$, EPJ Web Conf. 査読有、109, 2016, 08001, p1-6 DOI: 10.1051/epjconf/201610908001

⑥ Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, H. Miyatake, M. Oyaizu, S. Kimura, M. Mukai, Y. H. Kim, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen, Laser ion source for multi-nucleon transfer reaction products, Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、2015, 353, p4-15 doi:10.1016/j.nimb.2015.04.001

⑦ Y. X. Watanabe, Y. H. Kim, S. C. Jeong, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, H. S. Jung, H. Miyatake, S. Choi, J. S. Song, E. Clement, G. de France, A. Navin, M. Rejmund, C. Schmitt, G. Pollarolo, L. Corradi, E. Fioretto, D. Montanari, M. Niikura, D. Suzuki, H. Nishibata, and J. Takatsu, Pathway for the Production of Neutron-Rich Isotopes around the $N=126$ Shell Closure, Phys. Rev. Lett. 115, 172503, 2015, p1-5, 査読有、 DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.172503

⑧ Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y. Matsuo, T. Sonoda and M. Wada, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47, 2014, 075201, 査読有、 doi:10.1088/0953-4075/47/7/075201

[学会発表] (計 19 件)

① 宮武 宇也、KISS, SLOWRI 施設での低エネルギー核分光研究、短寿命 RI を用いた核分光と核物性研究 III、2016年12月20-21日、京大原子炉(大阪府、熊取町)

② Y. X. Watanabe, Production of $N = 126$ nuclei and beyond using multinucleon transfer reactions(招待講演), Sixth International conference on Fission and Properties of Neutron-rich Nuclei, 2016年11月6-12日, **Sanibel, Florida (USA)**

③ Y. Hirayama, Recent spectroscopic activities using multi-nucleon transfer reaction products at KISS(招待講演), the La3net laser ion source and RESIST 2016 Workshop, 2016年10月24-26日、

Paris (France)

④ Y. X. Watanabe, Production of radioactive nuclei relevant to r-process by multinucleon transfer reaction for KISS, 14th International symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, 2016年6月19-24日, 朱鷺メッセ(新潟県、新潟市)

⑤ Y. Hirayama, Spectroscopy of multi nucleon transfer reaction products using KISS(招待講演), The 12th International Conference on Stopping and Manipulation of Ions and related topics (SMI-2016), 2016年6月8-10日, Lanzhou(China)

⑥ Y. X. Watanabe, Experimental study of multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for KISS project(招待講演), Korean Physical Society 2016 Spring Meeting, 2016年4月20-22日, Daejeon(Korea)

⑦ 平山 賀一, KISSを用いた核分光実験、短寿命RIを用いた核分光と核物性研究II, 2015年11月4-5日、京大原子炉(大阪府、熊取町)

⑧ H. Miyatake, Beta-decay spectroscopy of r-process nuclei around $N = 126$, The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies(OMEG2015), 2015年6月24-27日、Beijing(China)

⑨ Y. X. Watanabe, Measurements of multi-nucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for production of exotic nuclei, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), 2015年5月11-15日、Michigan(USA)

⑩ Y. Hirayama, On-line experimental results of an argon gas cell-based laser ion source (KEK Isotope Separation System), International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), 2015年5月11-15日、Michigan(USA)

[その他]

ホームページ等

<http://research.kek.jp/group/wnsc/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鄭 淳讚 (JEONG, SunChan)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・客員教授

研究者番号：00262105

(2) 研究分担者

平山 賀一 (HIRAYAMA, Yoshikazu)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：30391733

宮武 宇也 (MIYATAKE, Hiroari)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：50190799

石山 博恒 (ISHIYAMA, Hironobu)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・客員准教授

研究者番号：50321534

渡辺 裕 (WATANABE, Yutaka)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：50353363

(4) 研究協力者

和田 道治 (WADA, Michiharu)

園田 哲 (SONODA, Tetsu)

木村 創大 (KIMURA, Souta)

向井 もも (MUKAI, Momo)

Y. H. Kim

M. Huyse

Yu. Kudryavtsev

P. Van Duppen