

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02096

研究課題名(和文)r-過程解明に向けたブランクスポット領域核の質量測定開拓

研究課題名(英文)Pioneering mass measurement research of r-process nuclei in the blank spot region

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：質量数が195となる金・白金などの元素は、天体における速い中性子捕獲過程(r-過程)で生成された、極めて中性子が過剰な不安定核の崩壊によって作られたと考えられる。起源となった中性子過剰不安定核の質量・寿命からは、逆にr-過程の天体環境を探ることが出来る。

本研究では、これら中性子過剰不安定核を原子核反応で人工的に合成し、質量を測定を行うための開拓的研究を進めてきた。これまでに、中性子過剰不安定核の生成・分離を高効率で行える元素選択型質量分離器(KISS)に、原子核の質量を精度よく測定するための反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF)を結合し、質量測定を本格的に行える環境を整えた。

研究成果の概要(英文)：Heavy elements like gold and platinum are generated in universe through successive decays of neutron-rich nuclei, which are synthesized in the rapid neutron-capture process (r-process). We can investigate an astrophysical condition of the r-process based on the masses and lifetimes of these neutron-rich nuclei.

In this pioneering research, we have been preparing mass measurements of neutron-rich heavy nuclei, which were produced artificially by the nuclear reactions and separated from many radioactive nuclei simultaneously produced. We have succeeded to construct a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph (MRTOF-MS), which has been connected to the KEK isotope separation system (KISS). This experimental setup will make it possible to perform precise mass measurement of neutron-rich radioactive nuclei, being produced and separated using KISS.

研究分野：原子核物理

キーワード：多重反射型飛行時間測定式質量分光器 レーザー共鳴イオン化 速い中性子捕獲過程 ブランクスポット

1. 研究開始当初の背景

金・白金などの重元素は、速い中性子捕獲( $r$ -過程)により生成されたと考えられているが、未だその起源天体は特定されていない。起源天体の環境を明らかにする上で、特に生成・測定が困難なブランクスポットと呼ばれる原子核領域に位置する中性子数 126, 127、原子番号 74-78 の中性子過剰未知重原子核の半減期・質量測定あるいは周辺核研究による高精度予測の確立が焦眉の研究課題となっていた。

2. 研究の目的

上記ブランクスポット周辺の未知原子核の質量測定から、金・白金・アクチノイド等の重元素を生成した速い中性子捕獲過程( $r$ -過程)の環境温度と中性子数密度の条件、中性子光分解反応率などの高精度推定を行い、起源天体解明の研究に資することを目的とした開拓的研究を開始する。

3. 研究の方法

ブランクスポット周辺の未知原子核生成・分離に有効な、KEK の元素選択型質量分離器 (KISS) 下流に多重反射型飛行時間測定式質量分光器 (MRTOF-MS) を開発・設置し、開拓研究を進める。円筒電場によるビーム偏向装置を製作し、既存の寿命・崩壊分光装置と並行して稼働させることで、効率よく寿命と質量の同時測定を実現させる。

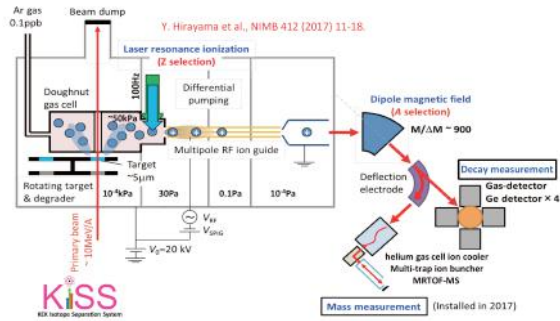


図1 KISS 測定装置配置



図2 mini-MRTOF-MS

MRTOF-MS では、30 keV 程度の低速 KISS ビームを一端ヘリウムガスセル中に入射し、下流のイオンガイド、平板トラップな化を実現し、MRTOF による測定を行う。そのため、効率良いヘリウムガスセル入射系、引出し効率の高いヘリウムガスセル開発をおこなう (図1)。並行して、既存 MRTOF-MS の性能を確認の上、よりコンパクトな mini-MRTOF を製作 (図2)。

全系の性能試験を行ったのちに、 $^{198}\text{Pt}$  周辺の原子核質量測定に臨む。

4. 研究成果

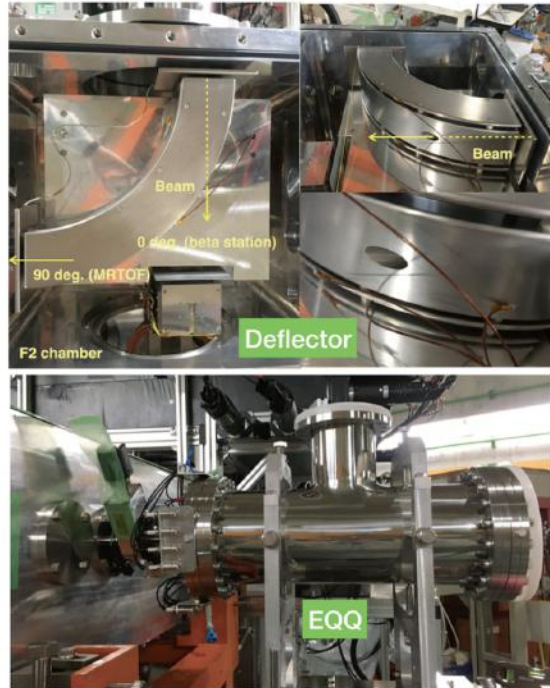


図3 新設した MRTOF 入射用静電ビームデフレクタと4連四重極電場。

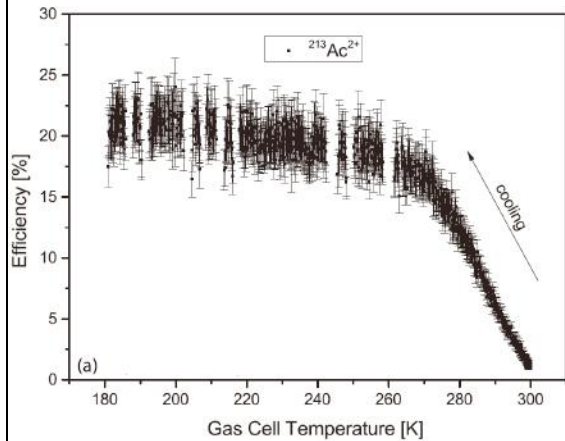


図4  $^{213}\text{Ac}^{2+}$  イオンの引出し効率におけるガスセル温度依存性。

ヘリウムガスセル上流のビーム輸送系は、円筒電場によるビームデフレクター、ステアラー、4連四重極電場を設置し、口径 2mm の入射系を実現した (図3)。

効率よいヘリウムガスセルの開発では、先行して MRTOF を設置した理研ガス充填型反跳イオン分離器 (GARIS) 焦点面での開発研究において、低温ガスセルを用いることで 20% 以上のイオン引出しが可能であることを実証できた (図4)。

この先行研究では、長時間の MRTOF 装置の安定性、その高精度質量測定能力を実証することに成功した。一連の照射実験において 80 以上にのぼる安定・不安定同位体に対する原子核質量の測定を行うことが出来た (図5)。特に超ウラン元素に対する質量測定は

世界的にもユニークな結果であり、2017年3月に KEK-RIKEN-九大の共同研究チームによるニュースリリースを行った (<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/03/29/1000/>)。

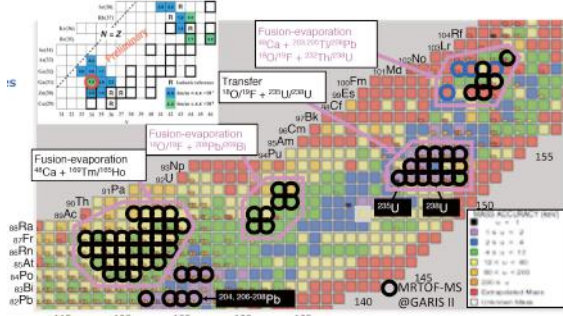


図5 GARIS-MRTOFによる実証実験の結果。黒枠が本研究により測定された同位体を示している。

他方、質量測定に向けた KISS 装置の改良においては、これまで KISS のアルゴンガスセルからのイオン引出し効率を阻害していた重イオンビーム由来のガス中プラズマを軽減する処置として、ドーナツ型ガスセルの製作、新たな真空隔壁の設置によるアルゴ

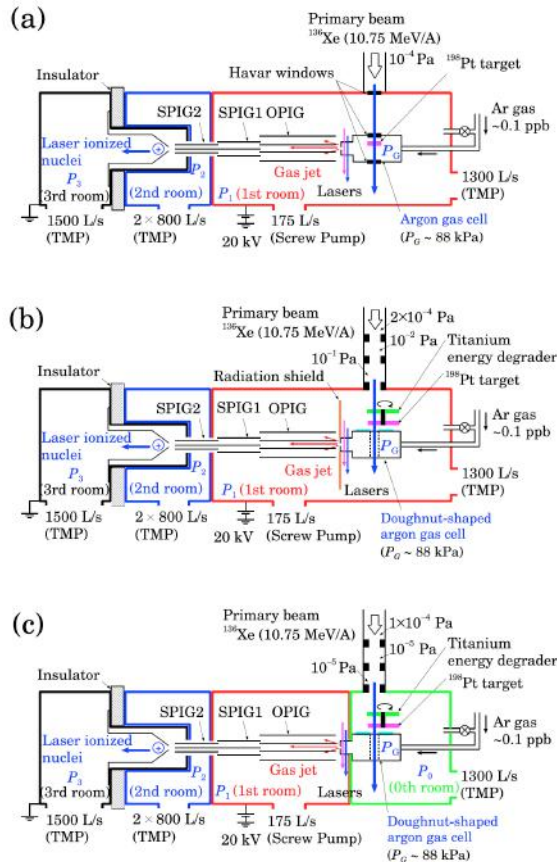


図6 KISS ガスセル改良。(a)改良前、(b)ドーナツ型ガスセル投入(5 倍の効率向上)、(c)真空隔壁設置(強度 3 倍の入射ビーム受け入れ実現)。

ンガス領域の限定化が図られ、従来よりも約一桁高いイオン引出しを実現することが出来た (図6)。

効率向上に伴い、副産物としてレーザー共鳴イオン化法による超微細構造測定の可能性を示すことが出来た (図7)。これにより、中性子過剰な不揮発性元素に対する荷電半径や磁気モーメント決定などを元にした変形核に関する研究の道が切り拓かれた。今後 r-過程起源天体を特定する上でも、重要な物理成果である。

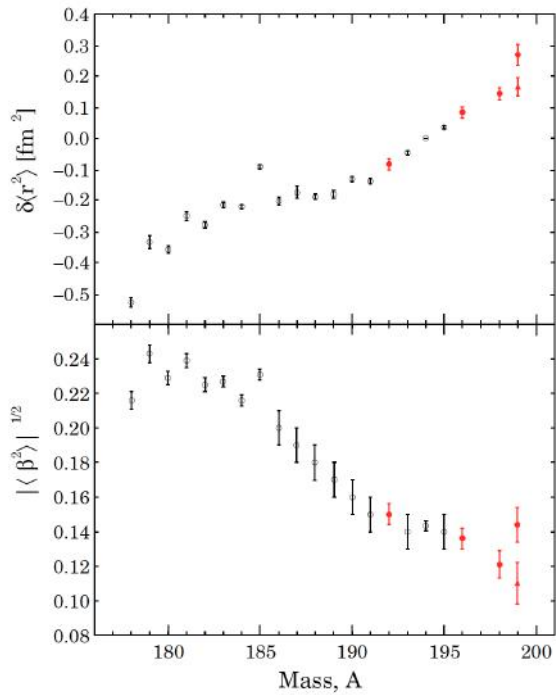


図7  $^{199}\text{Pt}$  のレーザー分光研究から得られた荷電半径 (上図) および変形パラメーター (下図) の系統的变化。

以上、これまでの開発・整備状況を述べてきた。質量測定実験の開始準備が整ったことから、2017年末に開催された理研仁科センターの RIBF 実験課題審査会に NP1712RRC59 (Direct mass measurement of neutron-rich isotopes of Ir and Os: first step toward  $N=126$  and r-process pathway) を申請し、Grade A で採択・実験遂行の了解を得た。マシнтаイムの混み具合によるが、2018年度秋以降の実験を予定している。

### 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12件)

(1) Ito, Y., Schury, P., Wada, M., Hirayama, Y. (6/26 番目), Miyatake, H. (12/26 番目), Watanabe, Y.X. (24/26 番目), et al., First Direct Mass Measurements of Nuclides

around  $Z=100$  with a Multireflection Time-of-Flight Mass Spectrograph, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 152501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.152501

(2) Mukai, M., Hirayama, Y., Watanabe, Y. X., Schury, P., Wada, M. (17/18 番目), Miyatake, H. (18/18 番目), High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for  $\beta$ -decay spectroscopy, Nucl. Instrum. Meth. A884 (2018) 1-10., DOI:10.1016/j.nima.2017.12.013

(3) Hirayama, Y., Watanabe, Y. X. Schury, P. (10/12 番目), Wada, M. (11/12 番目), Miyatake, H. (12/12 番目), Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System, Nucl. Instrum. Meth. B412 (2017) 11-18., DOI: 10.1016/j.nimb.2017.08.037

(4) Hirayama, Y., Watanabe, X. Y. (3/11 番目), Miyatake, H. (8/11 番目), Schury, P. (9/11 番目), Wada, M. (10/11 番目), Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium, J. Phys. B50 (2017) 215203, DOI: 10.1088/1361-6455/aa8b50

(5) Schury, P., Wada, M., Ito, Y., Hirayama, Y. (6/21 番目), Miyatake, H. (10/21 番目), Watanabe, Y. X. (20/21 番目), Observation of doubly-charged ions of francium isotopes extracted from a gas cell, Nucl. Instrum. Meth. B407 (2017) 160-165., DOI: 10.1016/j.nimb.2017.06.014

(6) Hirayama, Y., Watanabe, Y. X., Schury, P. (14/19 番目), Wada, M. (16/19 番目), Miyatake, H. (19/19 番目), In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the  $N \approx 126$  isotope Pt 199, Phys. Rev. C96 (2017) 014307., DOI: 10.1103/PhysRevC.96.014307

(7) Schury, P., Wada, M., Ito, Y., Miyatake, H. (12/21 番目), First online multireflection time-of-flight mass measurements of isobar chains produced by fusion-evaporation reactions: Toward identification of superheavy elements via mass spectroscopy, Phys. Rev. C95 (2017) 011305., DOI: 10.1103/PhysRevC.95.011305

(8) Hirayama, Y., Watanabe, Y. X., Miyatake, H., Schury, P., Wada, M., et al., Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around  $N = 126$  using KISS, Nuov. Cim. C39 (2016) 359., DOI: 10.1393/ncc/i2016-16359-9

(9) Kimura, S., Miyatake, H. (3/10 番目), Hirayama, Y. (4/10 番目), Watanabe, Y. X. (5/10 番目), et al., Development of the detector system for  $\beta$ -decay spectroscopy at the KEK Isotope Separation System, Nucl. Instrum. Meth. B376 (2016) 338-340., DOI: 10.1016/j.nimb.2016.01.041

(10) Hirayama, Y., Watanabe, Y. X.,

Miyatake, H. (7/16 番目), Wada, M. (13/16 番目), et al., On-line experimental results of an argon gas cell-based laser ion source (KEK Isotope Separation System), Nucl. Instrum. Meth B376 (2016) 52-56., DOI: 10.1016/j.nimb.2016.03.031

(11) Mukai, M., Hirayama, Y., Miyatake, H. (5/11 番目), Watanabe, Y. X. (7/11 番目), et al., Search for efficient laser resonance ionization schemes of tantalum using a newly developed time-of-flight mass-spectrometer in KISS, Nucl. Instrum. Meth B376 (2016) 73-76., DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.017

(12) Schury, P., Wada, M., Ito, Y., Miyatake, H. (11/17 番目), et al., Status of the low-energy super-heavy element facility at RIKEN, Nucl. Instrum. Meth. B376 (2016) 425-428., DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.061

[学会発表] (計 13 件)

(1) 宮武、「KISS, 超微細構造測定と質量測定 の現状」、平成 29 年度 KUR 専門研究会、熊取、12/20-21, 2017

(2) Miyatake, H., Present status of the KISS project, BUAA WS, Beijing, 11/23-24, 2017

(3) 和田、「MRTOF 質量分光器を用いた重元素の網羅的高精度質量測定」、2017 年度核データ研究会、東海、11/16-17, 2017

(4) 平山、「KISS I: 199Pt のレーザー共鳴イオン化核分光」、日本物理学会、宇都宮、9/12-15, 2017

(5) Miyatake, H., Present status of the KISS project, OMEG2017, Daejeon, 6/27-30, 2017

(6) Schury, P., Direct mass measurements of neutron-deficient isotopes of Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, and Ac at RIKEN/SHE-Mass, ARIS2017, Keystone, 5/28-6/2, 2017

(7) Watanabe, Y. X., Production of  $N = 126$  Nuclei and Beyond Using Multinucleon Transfer Reactions for KISS Project, ARIS2017, Keystone, 5/28-6/2, 2017

(8) 平山、「r 過程の第三ピーク滞留核の核分光 (KISS 計画)」、宇宙核物理連絡協議会研究会、国立天文台、2/22-24, 2016

(9) 宮武、「KISS, SLOWRI 施設での低エネルギー核分光研究」、平成 28 年度 KUR 専門研究会、熊取、12/20-21, 2016

(10) Miyatake, H., Recent progress of the KISS project at KEK-WNSC, 40th ASRC Int. WS, “Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei”, 12/12-13, JAEA-Tokai, 2016

(11) Hirayama, Y., On-line experimental results of argon gas cell based laser ion source (KEK Isotope Separation System), EMIS2015, Grand Rapids, MI, 5/11-15, 2015

(12) Schury, P., Status of the Low-Energy Super Heavy Element Facility at RIKEN, EMIS2015, Grand Rapids, MI, 5/11-15, 2015  
(13) Watanabe, X.Y., Measurements of multinucleon transfer reactions of  $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$  for production of exotic nuclei, EMIS2015, Grand Rapids, MI, 5/11-15, 2015

〔図書〕(計 2件)

(1) 宮武、「III-13, 反跳核分離装置」、放射化学の事典、日本放射化学会編集、朝倉書房、2015

(2) 和田、「III-18, イオントラップ」、放射化学の事典、日本放射化学会編集、朝倉書房、2015

〔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：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮武 宇也 (Miyatake, Hiroari)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター・教授  
研究者番号：50190799

### (2) 研究分担者

渡邊 裕 (Watanabe, Yutaka)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター・研究機関講師  
研究者番号：50353363

平山 賀一 (Hirayama, Yoshikazu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター・研究

機関講師

研究者番号：30391733

### (3) 連携研究者

和田 道治 (Wada, Michiharu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター・教授  
研究者番号：50240560

Schury, Peter

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センター・助教  
研究者番号：30462724

伊藤 由太 (Ito, Yuta)

理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員  
研究者番号：30711501

### (4) 研究協力者

向井 もも (Mukai, Momo)

筑波大学、大学院生

木村 創大 (Kimura, Sota)

筑波大学、大学院生

Moon, Jun-young

韓国 IBS, researcher

Park, Jinhyung

韓国 IBS, researcher