

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01132

研究課題名(和文) 未踏中性子魔法数126領域における多角的精密核分光によるr過程天体環境の解明

研究課題名(英文) Understanding of the r-process environment through the precise nuclear spectroscopic works of the unknown nuclei in the vicinity of neutron magic number N=126

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の性質を従来の方法よりも精密に調べるために、(1)指向性の良いガスジェット内で運動している中性短寿命核の精密レーザー分光用装置開発、(2)短寿命核がベータ崩壊する際に放出する電子線を、高い検出効率および低いノイズ環境で測定できる3次元位置測定型検出器開発、(3)原子核の質量を百万分の1の精度で測定可能な精密質量測定器の導入に成功した。これらの装置を高エネルギー加速器研究機構が開発した元素選択型質量分離器(KISS)にインストールして、KISS施設で生成した希少短寿命核の崩壊寿命や質量を精密に測定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精密な短寿命核の性質(崩壊寿命や質量)を測定可能な実験装置を開発し、これらを駆使して $^{187}\text{Ta}$ 、 $^{198}\text{Ir}$ など約20種類程の希少短寿命核の性質を研究した。これらの希少短寿命核は非常に高温(10億度)で高い中性子密度の星の中で生成されたと考えられている。その性質を研究することは、金や白金といった身の回りに存在する重い安定な元素が誕生した天体環境の謎を解き明かす上で不可欠であり、学術的意義は非常に高い。

研究成果の概要(英文)：In order to study the properties of heavy short-lived nuclei more precisely, we have successfully developed the following three items; (1) laser system and related equipment for the precise laser resonance ionization spectroscopy of the short-lived nuclei which are in the gas-jet with good directivity, (2) 3 dimensional-tracking-type multi-segmented proportional gas counter with high detection efficiency and low background rate to detect the electrons emitted from rare short-lived nuclei for the precise nuclear decay spectroscopy, (3) install and operation of multi-reflection time of flight mass-spectrograph in order to measure the nuclear mass with one millionth precision. By using the equipment, we could successfully measure the nuclear half-lives and masses of rare heavy nuclei produced at the KISS (KEK isotope separation system) facility.

研究分野：実験核物理

キーワード：元素合成 レーザー共鳴イオン化 質量測定 国際情報交換 ベルギー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

重い元素の半分は、超新星爆発、中性子星衝突といった爆発的天体環境下で早い中性子捕獲過程(r過程)により合成されたと考えられているが、未だ解明されていない。これを解明するには、r過程時に生成される中性子過剰な重い不安定核、特に滞留核と呼ばれている中性子数  $N=126$  の不安定核のベータ崩壊様式、寿命、質量等の核データをベータ崩壊核分光で詳細に調べる必要がある。これらの核データは、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不可欠である。しかし、中性子数  $N=126$  の滞留核を生成する原子核反応率は非常に小さく、ほとんどの核種が生成されておらず、ブランクスポットとなっているため核データが欠乏しており、核構造に関する知見は非常に乏しい。

この状況を打破するために、我々は、安定核  $^{136}\text{Xe}$  ビームと標的  $^{198}\text{Pt}$  ( $Z=78$ ,  $N=120$ ) の低エネルギー ( $\sim 10$  MeV/核子) 多核子移行反応で  $N=126$  近傍核を、高エネルギー核破砕反応より 1-2 桁高い収量で生成し、それらの質量数と原子番号の選別で特定の核種のみを高効率・高純度で引出せる元素選択型質量分離器 (KEK Isotope Separation System : KISS 装置) を建設した。KISS 装置を活用して、寿命、質量等の核データに加えて、レーザー核分光 (電磁気モーメント、荷電半径) や崩壊核分光 (基底および励起状態に関する核データ) による  $N=126$  近傍核の系統的かつ多角的な核分光測定で核データを世界に先駆けて取得する。これにより重元素合成解明に向けての貢献が期待できる。

### 2. 研究の目的

生成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魔法数  $N=126$  近傍、原子番号  $Z=74-78$  領域の中性子過剰未知原子核 (滞留核) の核構造を系統的かつ包括的に実験で調べる。これによりベータ崩壊時に許容遷移と第一禁止遷移が複雑に絡み合う、この領域の特異な核構造解明に資する先駆的な研究を行い、滞留核に対する原子核理論の予測能力を著しく向上させることで、早い中性子捕獲過程による重元素合成に関与する原子核物理学の不確定さを解消する決定打となる研究を展開する。特色は原子核質量数 ( $A$ ) と原子番号 ( $Z$ ) を分離・収集可能な KISS 装置と多核子移行原子核反応を組合せることで飛躍的に未知原子核の生成量を増大させ、ベータ崩壊核分光、レーザー核分光および質量測定による多角的な核分光を行う点である。これらの核分光実験に必要な装置開発を行い、重元素合成の天体環境解明に向けて核構造を詳細に調べることが目的である。

### 3. 研究の方法

図1は元素選択型質量分離器 KISS 装置の概略図および本研究で開発した核分光装置を示している。図下方から  $^{136}\text{Xe}/^{238}\text{U}$  ビーム (10.75 MeV/核子) を輸送し、回転  $^{198}\text{Pt}$  標的に照射し、多核子移行反応で中性子過剰未知核を生成する。一次ビームは、ドーナツ型ガスセルの穴を通過してビームダンプで停止する。未知核はカプトン薄膜窓を通過してアルゴンガス 1 気圧で満たされたドーナツ型ガスセル (図1挿入写真参照) に打ち込まれる。未知核はガスセル中で中性化されて、ガスの流れでレーザー共鳴イオン化領域まで輸送されて、元素選択的にイオン化された後、S型

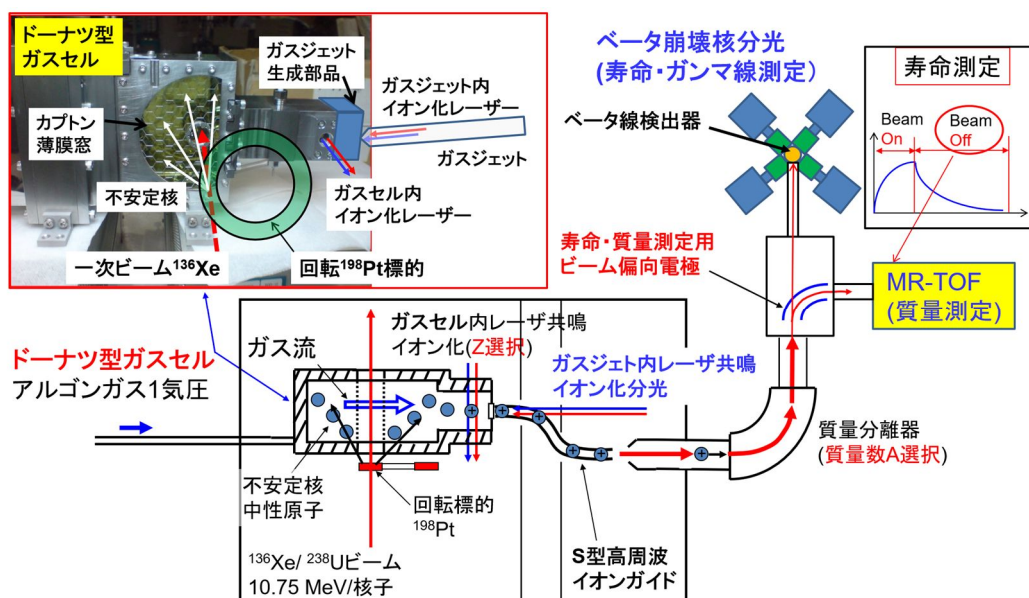


図1 : KISS 装置および核分光装置の概略図

高周波イオンガイドで加速電極まで輸送され、20 keV に加速される。その後、双極電磁石から

成る質量分離器で質量選択した後、ベータ崩壊核分光用検出器または多重反射型飛行時間質量測定器(MRTOF-MS)に輸送されて、それぞれ寿命測定・ガンマ線核分光・レーザー核分光または質量測定を行う。崩壊寿命測定(Beam Off)時に、開発するビーム偏向電極でMRTOF-MS ビーム輸送することで、一回の実験で同時に寿命と質量を測定できる。

高効率・低バックグラウンド3次元位置感応型ベータ線検出器、寿命・質量測定用ビーム偏向装置、レーザー核分光用装置(S型高周波イオンガイドおよびレーザーシステム)を開発し、多角的な核分光実験により、中性子魔法数  $N=126$  近傍核の核構造研究を推進する。

#### 4. 研究成果

本研究期間内で行った下記の6項目の開発及び核分光実験について報告する。

##### (1) 高効率・低バックグラウンド3次元位置感応型ベータ線検出器の開発

生成量の少ない中性子過剰核のベータ崩壊核分光測定を推進するために、高効率・低バックグラウンド率の2次元位置感応型比例係数管(Multi-Segmented Proportional Gas Counter :MSGPC)を開発した[引用文献1]。これにより従来のプラスチックシンチレータを用いた検出器よりもベータ線エネルギー $Q_{\beta} = 1\text{MeV}$ での検出効率を3倍に向上させ、バックグラウンド率を0.1 cpsに抑えることができた。更に生成量が1/10の不安定核のベータ崩壊核構造研究を進めるために、3次元の位置感応型検出器(3DT-MSPGC)を新たに開発した。アノードワイヤーを高抵抗カーボン製にすることで縦方向の位置検出を可能にした。図2はガス検出器の縦方向(検出可能領域200mm)の(a)測定した位置校正直線、(b)校正直線との残差、(c)位置分解能を表している。図2(b)より1mm程度の良い直線性を実現した。図2(c)より半値幅で位置分解能3.5mm程度を達成できたことにより、バックグラウンド率を0.02(3) cpsまで抑えることに成功した。これにより研究対象の不安定核の数を20種類程度増大できた[引用文献2]。

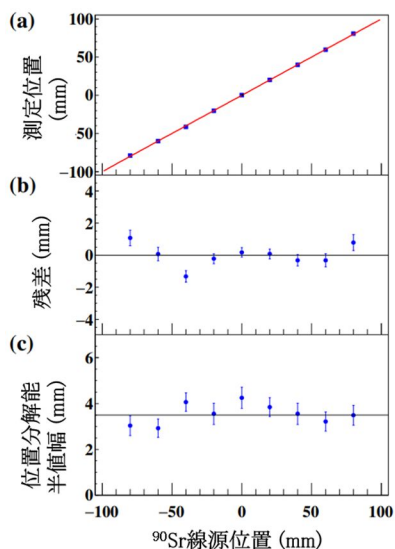


図2 : 高抵抗カーボン製アノードワイヤーの位置分解能の測定結果。

##### (2) 寿命・質量測定用ビーム偏向装置の開発

KISS装置にてベータ崩壊寿命測定に加えて、MRTOF-MSによる精密質量測定を実現するために、ビームラインを改良してビーム偏向電極を導入することでMRTOF-MSへのビーム輸送を可能にした(図3参照)。これにより、ベータ崩壊寿命測定時に捨てていた不安定核ビームをMRTOF-MSに輸送することで寿命測定と同時に質量測定が可能となり、効率よく研究を進められる環境を整えた[引用文献3]。

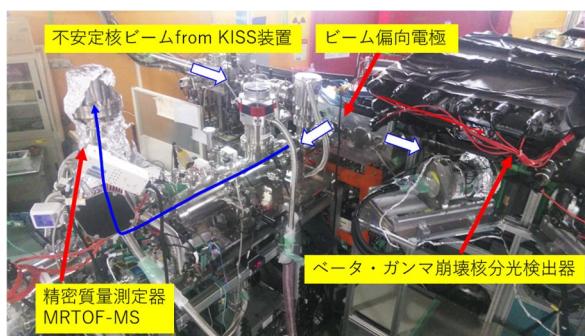


図3 : KISS 装置ビームライン。

##### (3) 精密レーザー核分光装置の開発

KISS装置ではガスセル内で元素選択的にイオンを生成するためにレーザー共鳴イオン化法を行っている。このイオン化過程で励起レーザー波長を走査することで原子の超微細構造測定から原子核の電磁気モーメントと荷電半径および核変形度を調べることができる。ただし、一気圧のアルゴンガス中で分光するため、原子衝突により共鳴幅が13 GHz程度と広くなり[図4の赤線で示した安定核 $^{198}\text{Pt}$ の共鳴ピーク参照]、10%の精度でしか物理量を決めることができない。より精密な核構造研究のために1%の精度で物理量を決定可能なガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光装置を開発した。指向性の良いガスジェットを生成するためにラバールノズルを設計・製作した。これによりドップラー効果およびガス衝突に起因する共鳴線幅を0.5GHzに抑えることができた。更に狭線幅半導体レーザー誘起のパルス色素レーザー開発によりレーザー幅を0.1GHz

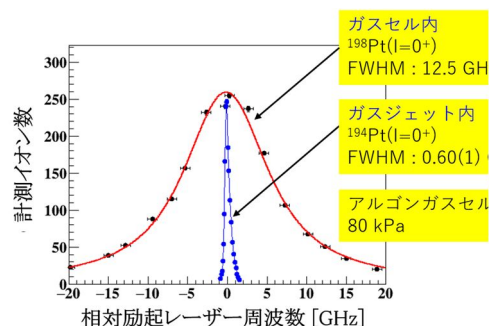


図4 : ガスジェット内およびガスセル内レーザー核分光測定結果

できた。更に狭線幅半導体レーザー誘起のパルス色素レーザー開発によりレーザー幅を0.1GHz

程度に抑えることができ、併せて0.6GHzの共鳴線幅[図4の青線で示した安定核 $^{194}\text{Pt}$ の共鳴ピーク参照]を達成でき、分解能を20倍以上改善できた[引用文献3]。不安定核に応用するためには、イオン化効率の向上が不可欠であり、ガスジェット内原子とレーザー光のオーバーラップが良くなるように光学系と高周波イオンガイドの改良を進めている。

#### (4) ベータ・ガンマ崩壊核分光

生成量の少ない中性子過剰核のベータ崩壊核分光測定を推進するために開発した3DT-MSPGC[引用文献1, 2]とこれまで報告されていたイオン化様式より100倍程度高効率なオスミウムの新イオン化様式[引用文献4]により、不安定核 $^{198}\text{Os}$ の崩壊寿命の初測定に成功した[引用文献5]。更に、 $^{195}\text{Os}$ の崩壊様式の決定[引用文献6]、核異性体を発見した[引用文献7]。中性子過剰Os同位体の核構造研究を進めることができた。また $^{192}\text{Os}$ 同位体の親核である $^{192}\text{Re}$ のベータ崩壊様式を決定したことにより詳細な核構造議論が行えた[引用文献8]。

生成標的にタングステンを用いることで、 $^{187}\text{Ta}$ の高Kアイソマーが1.778 MeVの励起状態に存在することを発見し、崩壊寿命を7.3(9)秒と精度良く測定できた[図5参照]。更に、そのガンマ崩壊様式を決定することで、 $^{187}\text{Ta}$ がプロレート変形しており、2つ中性子が増えた $^{189}\text{Ta}$ ではオブレート変形に原子核形状が変化していることを示唆できた[引用文献9]。本結果は、KEKのWebページを通してプレスリリースされ、科学新聞にも掲載された。

このように、この領域で系統的なベータ崩壊核分光を着実に進めている。

#### (5) 精密質量測定

ビーム偏向装置の導入によりKISS装置においてMRTOF-MSによる不安定核の高精度( $10^{-6}$ )質量測定が可能となった。質量分解能200,000を達成したことにより、わずか100個のイオン計測数で天体環境解明に必要な100 keVの精度で質量を決定できる。前述のTa, Os, Re同位体のベータ・ガンマ崩壊核分光実験中に同時に質量測定も行っており、現在、データ解析中である。

図6にレーザーイオン化された不安定核 $^{194}\text{Os}^{2+}$ (半減期6年)の飛行時間分布と生成標的から放出され混入した安定核 $^{194}\text{Pt}^{2+}$ の飛行時間分布を示す。MRTOF-MSではイオン計測するため、半減期に関係なく飛行時間測定から質量を精密に決定することで粒子識別を行える。そのため精密質量測定の他にレーザー核分光にも応用できる(後述)。

#### (6) レーザー核分光

N=126近傍核は高融点元素のため、安定核よりも重い同位体ではレーザー核分光測定が不可能であった。しかしKISS装置ではレーザー共鳴イオン化法を用いることで、他施設では不可能な高融点元素の中性子過剰核のレーザー核分光を行える。これまでベータ・ガンマ崩壊核分光装置による崩壊放射線測定とガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光法を組み合わせ、不安定核 $^{199}\text{g}, ^{199}\text{m}\text{Pt}$ [引用文献10]および $^{196}\text{g}, ^{197}\text{g}, ^{198}\text{g}\text{Ir}$ [引用文献11]の超微細相互作用分布の測定に成功した。導出した磁気モーメント、荷電半径、変形度から原子核の波動関数や構造を議論でき、この重い領域での核構造研究が進展した。

更にこれまで長寿命なため有限の加速器実験中に崩壊放射線測定が困難であった $^{194}\text{Os}$ (半減期6年)や $^{196}\text{Os}$ (半減期35分)に関しても、MRTOF-MSによる精密質量測定から $^{194}, ^{196}\text{Os}$ を同定し、MRTOF-MSで計測したイオン数(図6参照)のレーザー波長依存性測定(レーザー核分光)を効率良く行った[図7参照。引用文献12]。測定した荷電半径の変位や核変形度から、 $^{194}\text{Os}$ はオブレート変形しているが $^{196}\text{Os}$ では非軸対称変形していることを示唆できた。

このようにレーザー核分光による詳細な核構造研究を展開し始めた。本科研費で精密核分光

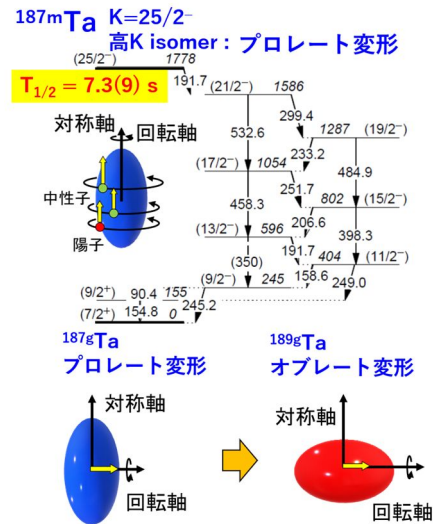


図5: 高Kアイソマー $^{187}\text{mTa}$ の崩壊様式と中性子過剰Ta同位体の形状変化。

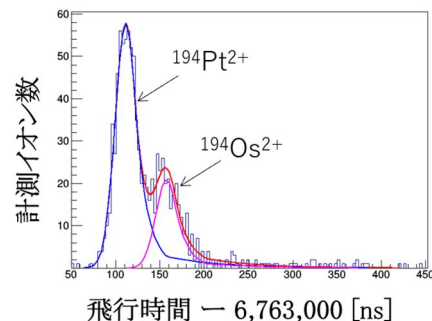


図6: MRTOF-MSで測定した質量荷電比A/q=97の飛行時間分布。

用を高繰り返し色素レーザーシステムを導入したことにより、高分解能ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光法が可能となり、分解能を20倍以上改善できた。これにより測定精度を一桁以上向上できるため、更に詳細な核構造研究を推進できるようになった[引用文献 3]。

まとめ：本科研費研究にて、高効率・低バックグラウンド3次元位置感応型ベータ線検出器、寿命・質量測定用ビーム偏向装置、レーザー核分光用装置を開発し、多角的な核分光実験をKISS装置にて展開することができた。KISS装置で利用できる不安定核の収量を増大させることで、重元素を合成する天体環境の解明に向けて、更なる中性子魔法数  $N=126$  近傍での核構造研究が期待できる。

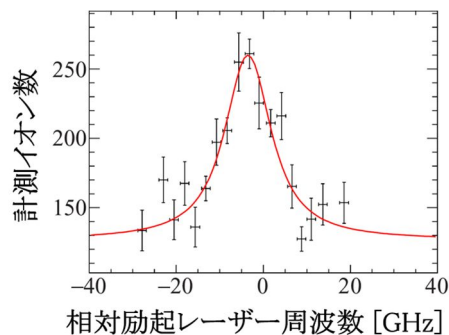


図7：MRTOF-MSを活用して測定した<sup>194</sup>Osのレーザー共鳴イオン化スペクトル。

#### <引用文献>

- M. Mukai et al., N Nuclear Instrument and Method A884 (2018) 1.
- Y. Hirayama et al., Nuclear Instrument and Method A997 (2021) 165152.
- Y. Hirayama et al., Nuclear Instrument and Method B463 (2020) 425.
- Y. Hirayama et al., Journal of Physics B 50 (2017) 215203.
- Y. Hirayama et al., Physical Review C 98 (2018) 014321.
- M. Ahmed et al., Physical Review C 103 (2021) 054312.
- Y.X. Watanabe et al., Physical Review C 101(2020)041305(R).
- H. Watanabe et al., Physics Letter B 814 (2021) 136088.
- P. Walker et al., Physical Review Letters 125 (2020) 192505.
- Y. Hirayama et al., Physical Review C 96 (2017) 014307.
- M. Mukai et al., Physical Review C 102 (2020) 054307.
- H. Choi et al., Physical Review C 102 (2020) 034309.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Ahmed, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, M. Mukai, J.H. Park, P. Schury, Y. Kakiguchi, A. Ozawa, M. Oyaizu, M. Wada, and H. Miyatake	4. 巻 103
2. 論文標題 - spectroscopy of the 1950s nucleus	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 054312-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.054312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, P. Schury, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, J.H. Park, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 997
2. 論文標題 Three-dimensional tracking multi-segmented proportional gas counter for b-decay spectroscopy of unstable nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165152-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Watanabe, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, A.N. Andreyev, T. Hashimoto, F.G. Kondev, G.J. Lane, Yu.A. Litvinov, J.J. Liu, H. Miyatake, J.Y. Moon, A.I. Morales, M. Mukai, S. Nishimura, T. Niwase, M. Rosenbusch, P. Schury, Y. Shi, M. Wada, P.M. Walker	4. 巻 814
2. 論文標題 Beta decay of the axially asymmetric ground state of <sup>192</sup> Re	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136088-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 12138
2. 論文標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei using KEK Isotope Separation System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1643-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 P.M. Walker, Y. Hirayama, G.J. Lane, H. Watanabe, G.D. Dracoulis, M. Ahmed, M. Brunet, T. Hashimoto, S. Ishizawa, F.G. Kondev, Yu.A. Litvinov, H. Miyatake, J.Y. Moon, M. Mukai, T. Niwase, J.H. Park, Zs. Podolyk, M. Rosenbusch, P. Schury, M. Wada, X.Y. Watanabe, W.Y. Liang, and F.R. Xu	4. 巻 125
2. 論文標題 Properties of 187Ta Revealed through Isomeric Decay	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW LETTERS	6. 最初と最後の頁 192505-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.192505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Mukai, Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, S. Schiffmann, J. Ekman, M. Godefroid, P. Schury, Y. Kakiguchi, M. Oyaizu, M. Wada, S. C. Jeong, J. Y. Moon, J. H. Park, H. Ishiyama, S. Kimura, H. Ueno, M. Ahmed, A. Ozawa, H. Watanabe, S. Kanaya, H. Miyatake	4. 巻 102
2. 論文標題 In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of 196,197,198Ir	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 054307-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.054307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Choi, Y. Hirayama, S. Choi, T. Hashimoto, S. C. Jeong, H. Miyatake, J. Y. Moon, M. Mukai, T. Niwase, M. Oyaizu, M. Rosenbusch, P. Schury, A. Taniguchi, Y. X. Watanabe, M. Wada	4. 巻 102
2. 論文標題 In-gas-cell laser ionization spectroscopy of 194,196Os isotopes by using a multireflection time-of-flight mass spectrograph	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 034309-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.034309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. X. Watanabe, M. Ahmed, Y. Hirayama, M. Mukai, J. H. Park, P. Schury, Y. Kakiguchi, S. Kimura, A. Ozawa, M. Oyaizu, M. Wada, and H. Miyatake	4. 巻 101
2. 論文標題 Deexcitation $\gamma$ -ray transitions from the long-lived $I^{-13/2+}$ metastable state in 195Os	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 041305(R)-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.041305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, P. Schury, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, J.H. Park, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 463
2. 論文標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei using KEK Isotope Separation System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 425-430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.04.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Mukai, Y. Hirayama, P. Schury, Y.X. Watanabe, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 463
2. 論文標題 Development of a multi-segmented proportional gas counter for $\beta$ -decay spectroscopy at KISS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 421-424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.04.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, M. Oyaizu, S. C. Jeong, Y. Kakiguchi, P. Schury, M. Wada, and H. Miyatake	4. 巻 90
2. 論文標題 Efficient two-color two-step laser ionization schemes of $\lambda_1 \sim 250$ nm and $\lambda_2 = 307.9$ nm for heavy refractory elements-Measurements of ionization cross-sections and hyperfine spectra of tantalum and tungsten	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 115104-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5124444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Watanabe, Y. Hirayama, H. Miyatake	4. 巻 28
2. 論文標題 KEK Isotope Separation System (KISS)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Physics News	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10619127.2018.1529984	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, M. Mukai, M. Ahmed, S. C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Watanabe, and H. Miyatake	4. 巻 98
2. 論文標題 - and -decay spectroscopy of 197,1980s	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 014321-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Miyatake, M. Wada, X. Y. Watanabe, Y. Hirayama, P. Schury, M. Ahmed3, H. Ishiyama, S. C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J. Y. Moon, M. Mukai, M. Oyaizu, and J. H. Park	4. 巻 1947
2. 論文標題 Present status of the KISS project	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 020018-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5030822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Mukai, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, P. Schury, H.S. Jung, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 884
2. 論文標題 High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for -decay spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods A	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.12.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Oyaizu, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake	4. 巻 412
2. 論文標題 Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods B	6. 最初と最後の頁 11-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2017.08.037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, M. Oyaizu, M. Ahmed, Y. Kakiguchi, S. Kimura, H. Miyatake, P. Schury, M. Wada, S.-C. Jeong	4. 巻 50
2. 論文標題 Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. of Phys. B	6. 最初と最後の頁 215203-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aa8b50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Hirayama, M. Mukai, Y.X. Watanabe, M. Ahmed, S.C. Jeong, H.S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J.Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J.H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, H. Miyatake	4. 巻 96
2. 論文標題 In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the N-126 isotope 199Pt	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 014307-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.014307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 平山 賀一
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy at KISS
3. 学会等名 Symposium on Nuclear Data 2020 (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺 裕
2. 発表標題 KISS、MRTOFを用いた核分光実験の現状
3. 学会等名 令和2年度専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Study of nuclear structure in the vicinity of N=126 at KISS
3. 学会等名 Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, Bormio, Italy, Feb. 4-9, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroari Miyatake
2. 発表標題 KISSでの核分光研究
3. 学会等名 令和元年度KUR専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」兼「第11回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会」、京大複合原子力科学研、1/ 16-17, 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroari Miyatake
2. 発表標題 KISS Project
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference, Borneo, Nov. 17-22, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山 賀一
2. 発表標題 KISSでのガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会、山形大学、9/17-20, 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroari Miyatake
2. 発表標題 第7周期元素科学：超重元素の物理と化学
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会、山形大学、9/17, 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Peter Schury
2. 発表標題 Nuclear physics by multi-reflection time-of-flight mass spectrograph at WNSC
3. 学会等名 INPC 2019 Glasgow, Jul. 29-Aug. 2, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei in the vicinity of N=126 by using KISS
3. 学会等名 INPC 2019 Glasgow, Jul. 29-Aug. 2, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Peter Schury
2. 発表標題 Present status and future plans for slow and stopped beams in RIKEN
3. 学会等名 SMI-2019 Montreal, Jul. 16-19, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Watanabe
2. 発表標題 Recent experimental results of KEK Isotope Separation System (KISS)
3. 学会等名 SMI-2019 Montreal, Jul. 16-19, 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei in the vicinity of N=126 at KISS
3. 学会等名 Physics between lead and uranium: in preparation of new experimental campaigns at ISOLDE, Leuven, Apr. 16-18, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Watanabe
2. 発表標題 Production of N=126 nuclei and beyond using multinucleon transfer reactions
3. 学会等名 Physics between lead and uranium: in preparation of new experimental campaigns at ISOLDE, Leuven, Apr. 16-18, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei in the vicinity of N = 126 at KISS
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroari Miyatake
2. 発表標題 KISS/MRTOFの現状
3. 学会等名 平成30年度KUR専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 MD. Murad Ahmed
2. 発表標題 - spectroscopy of neutron-rich nucleus 1950s
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Peter Schury
2. 発表標題 KISS and MRTOF Projects of KEK
3. 学会等名 The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroari Miyatake
2. 発表標題 RNB project on the astrophysical element synthesis
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week 2018 (TGSW2018)@Tsukuba International Congress Center (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Watanabe
2. 発表標題 Nuclear production by multinucleon transfer reactions
3. 学会等名 10th Northeastern Asian Symposium on “Nuclear Physics in the 21st Century” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei using KEK Isotope Separation System
3. 学会等名 The XVIII International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Momo Mukai
2. 発表標題 Development of a multi-segmented proportional gas counter for b-decay spectroscopy at KISS
3. 学会等名 The XVIII International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Watanabe
2. 発表標題 Production of neutron-rich nuclei by multinucleon transfer reactions at KISS project
3. 学会等名 IX International Symposium on Exotic Nuclei (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Hirayama
2. 発表標題 Present status of KISS
3. 学会等名 RIBF Users Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平山 賀一
2. 発表標題 KISS I : 199Ptのレーザー共鳴イオン化核分光
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会、宇都宮大学、2017年9月12-15日
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around N=126 by using KISS
3. 学会等名 International symposium of RI beam physics in the 21th century: 10th anniversary of RIBF, RIKEN, 4-5th December, 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around N=126 by using KISS
3. 学会等名 KEK-TRIUMF Scientific Symposium, TRIUMF, 14-15th December, 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 宮武 宇也
2. 発表標題 Present status of the KISS project
3. 学会等名 nt. WS on "Impact of Exotic Nuclear Structure on Explosive Nucleosynthesis", Beijing Univ., Beijin China, 23-24, Nov., 2017 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮武宇也
2. 発表標題 KISS、超微細構造測定と質量測定の現状
3. 学会等名 平成29年度KUR専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」、京大原子炉実験所、12/20 - 21
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Miyatake
2. 発表標題 Present status of the KISS project
3. 学会等名 International Workshop on "Physics Opportunities using CAGRA and RCNP tracking Ge detector" (CAGRA17), 10-12, Oct., Toyonaka Osaka-U. (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Miyatake
2. 発表標題 Present status of the KISS project
3. 学会等名 OMEG 2017, International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, 27-30th, June, Daejeon Korea (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Miyatake
2. 発表標題 Recent progress of the KISS project at KEK-WNSC
3. 学会等名 China-Japan collaboration workshop on “Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process”, 26-28th, June, Univ. Tsukuba (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Miyatake
2. 発表標題 Recent KISS activities and future's plan
3. 学会等名 Workshop for Einsteinium Campaign, 7-8th, Nov., 2017, Tokai, JAEA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 向井 もも
2. 発表標題 KISS II : 196-198Irのレーザー共鳴イオン化核分光
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会、宇都宮大学、2017年9月12-15日
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y.X. Watanabe
2. 発表標題 Production of neutron-rich nuclei by multinucleon transfer reactions at KISS Project
3. 学会等名 3rd International Symposium on Super-Heavy Elements (SHE 2017), Kazimierz Dolny, Sep. 10-14, 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y.X. Watanabe
2. 発表標題 Production of N = 126 Nuclei and Beyond Using Multinucleon Transfer Reactions for KISS Project
3. 学会等名 ARIS2017, Keystone, May 28 - June 2, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Momo Mukai
2. 発表標題 Laser resonance ionization spectroscopy of 196-198Ir
3. 学会等名 KEK Student Day 2017, High Energy Accelerator Research Organization, Oct. 24, 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Momo Mukai
2. 発表標題 Beta-ray detector in KISS
3. 学会等名 The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, University of Tsukuba, Mar. 26-27, 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

KEK 和光原子核科学センターのホームページ  
<http://research.kek.jp/group/wncs/>

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮武 宇也  (Miyatake Hiroari)  (50190799)	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    (82118)	
研究分担者	渡邊 裕  (Watanabe Yutaka)  (50353363)	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・准教授    (82118)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小柳津 充広  (Oyaizu Michihiro)		
研究協力者	向井 もも  (Mukai Momo)		
研究協力者	ムラッド アーメド  (Murad Ahmed)		
研究協力者	チェ ヒュンスク  (Choi Hyunsuk)		
連携研究者	シュリー ピーター  (Schury Peter)  (30462724)	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・助教    (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	和田 道治  (Wada Michiharu)  (50240560)	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    (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ベルギー	KU Leuven			
英国	Surrey University			
韓国	IBS RISP			
中国	北京航空航天大学			
イギリス	University of Surrey	Univ. Brighton		
アメリカ	Argonne Nat. Lab.			
オーストラリア	Australian Nat. Univ.			
ドイツ	GSI			