

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：特別推進研究

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06090

研究課題名(和文)革新的質量分光器を用いた重元素の起源の研究

研究課題名(英文) Study of the origin of heavy elements using an innovative mass spectrograph

研究代表者

和田 道治 (Wada, Michiharu)

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：50240560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 432,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重元素の合成過程研究の鍵となる、広範囲の短寿命原子核の質量を網羅的かつ高精度に能率よく測定する仕組みを完成させた。理化学研究所の加速器施設に所在する短寿命核ビーム供給源の内、超重元素領域に有効なGARIS、高融点元素の中性子過剰核に特化したKISS、ウランより軽い広範囲をカバーするBigRIPS-SLOWRIの3箇所に、ガスセル装置とMRTOF質量分光器を整備し、高精度の質量測定を並行して実行できる。既に4百余核種の質量測定に成功しており、数年内に千核種を達成できる予定である。この圧倒的なデータと、関連する核分光研究と合わせて、重元素の起源研究を大いに発展させることが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄より重い元素は通常の恒星内での融合反応では生成できず、爆発的な天体現象が必要な事がわかっている。最近の重力波等の観測に因れば、中性子星合体がその有力候補と考えられている。しかしその爆発的現象の素過程の理解は、普段自然に存在せずその特性が分かっていない短寿命で崩壊する原子核を経るため、確度の不十分な理論計算に依らざるを得ない。実験的に、関与する短寿命原子核の特性、とりわけその質量を網羅的に測定することが、重い元素の起源解明の鍵と考えられている。本研究はそれを大いに発展させる仕組みを作ったことに相当する。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have completed a system to efficiently measure the masses of a wide range of short-lived nuclei comprehensively and precisely. It is a key to the study of the synthesis process of heavy elements. The gas cell system and MRTOF mass spectrometer were installed at three of the short-lived nucleus beam sources located at the RIKEN accelerator facilities: GARIS, which is effective for superheavy elements, KISS, which specializes in neutron-rich nuclei of refractory elements, and BigRIPS-SLOWRI, which covers a wide range of nuclides lighter than uranium, to perform high-precision Mass measurements of all available nuclides at RIKEN RIBF. Over 400 nuclides have already been successfully measured, and we expect to reach 1,000 nuclides within a few years. This overwhelming data, together with related nuclear spectroscopic research, is expected to significantly advance the study of heavy elements' origin.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：元素の起源 質量測定 イオントラップ MRTOF r-過程 短寿命原子核

1. 研究開始当初の背景

原子の質量はその構成要素である陽子・中性子・電子の総和に比べて極僅か軽い。この「質量欠損」は原子の全結合エネルギーに相当し、原子核研究において最も重要な原子の特性である。系統的な質量値の比較は、原子核の崩壊様式、変形、殻効果等の核構造研究に加えて、重元素の起源の解明に繋がる。

白金やウランなどの重元素の起源は爆発的天体現象である r-過程によって生成されたと考えられているが[1]、この過程に関与する原子核は安定線から遠く離れた中性子過剰核であり、質量・半減期等の実験データは極めて乏しく、その拡充が求められている[2]。r-過程の終端でもある超重元素領域では、最近 Nh から Og まで新元素が命名されたが、熱い融合反応による新元素はより確実な原子番号と質量数の同定が求められており、精密質量測定は確実な質量数と原子番号同定法として期待されている。さらに、現在の超重元素の先にあると予測される「安定の島」へ到達する里標を築くものである。

2. 研究の目的

本研究では、新しく開発した高能率・高精度・高確度の質量分光器を、現在世界一多種類の原子核を生成できる施設に複数台展開して、超重元素から中重核に至る広い範囲の多数の原子核の質量を系統的に精密測定して元素の起源の研究を圧倒的に進歩させる計画である。

3. 研究の方法

理化学研究所の加速器施設 RIBF には、超重元素生成に適した GARIS、中性子過剰核生成に特化した KISS、満遍なくウランより軽い広範囲の短寿命核を生成する BigRIPS+SLOWRI という3箇所の短寿命核を提供する施設がある。この施設で得られる様々なエネルギーの短寿命核ビームを、高周波イオンガイドガスセルを用いてイオントラップに捕集し、MRTOF 質量分光器によって質量測定する。

MRTOF 質量分光器(図1)は、トラップから射出したイオンを、1対の静電ミラーからなる飛行管中を数百回往復させた後に引き出して検出し、その総飛行時間から質量を測定する装置であり、数ミリ秒の飛行で質量分解能 200,000~1,000,000 を達成できる。さらに、異なる原子核でも同時に測定できるため、短寿命原子核の網羅的質量測定に最適な装置である。質量測定結果は、半減期、遅発中性子分岐比などのデータと併せて、理論的ネットワーク計算により、重元素の生成過程を再現する

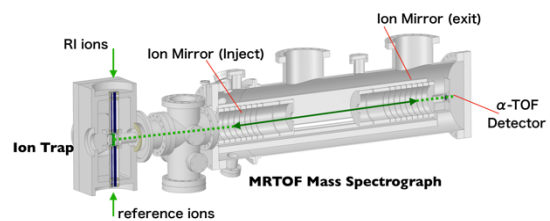


図1 MRTOF 質量分光器の構造

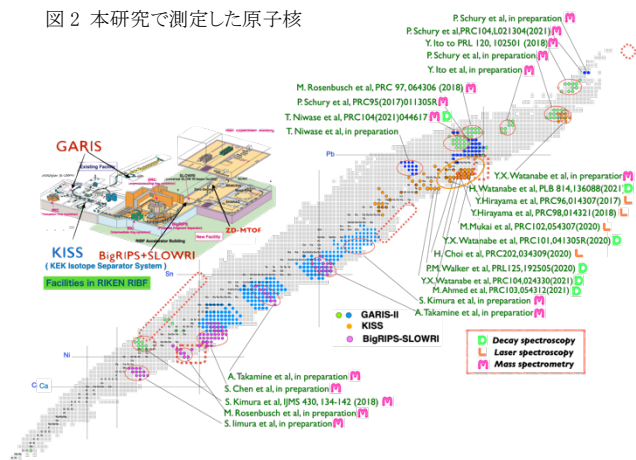
4. 研究成果

(1) 本研究の最も重要な成果は、RIBF の GARIS、KISS、BigRIPS-SLOWRI の3箇所の素性の全く異なる短寿命核ビーム供給装置に、それぞれに適したガスセル装置と MRTOF 質量分光器を整備し、並行して能率よく網羅的質量測定が実行できる装置群を完成させたことである。これを駆使して、数年内に重元素合成の解明に圧倒的なデータを提供できるはずである。これまでに既に 400 核種以上の短寿命原子核の精密測定に成功している。図2に、GARIS、KISS、BigRIPS-SLOWRI の各施設で測定した核種を核図表上に示した。破線で囲んだ領域は実験課題採択委員会で認められた今後の測定対象を示す。

それぞれの測定結果のかなりの部分は解析中であり、詳細の解釈は発表論文に記述する予定である。全体を活かした元素合成のネットワーク計算はさらに測定核種を中性子過剰側へ発展してからの課題である。

① GARISにおける超重元素同位体 $^{257, 258}\text{Db}$ の直接質量測定
 超重元素の質量測定、とりわけ熱い融合反応で生成されるニホニウム同位体の質量測定による

図2 本研究で測定した原子核



採択実験を開始しており、 $^{74,75}\text{Ni}$ の初質量測定に成功している。 ^{78}Ni 近傍、 $N=126$ 領域、 ^{100}Sn 領域、中性子過剰希土類など多くの課題が PAC に採択されており (図 2)、今後ますます重要な測定が実施される予定である。

④ KISS における MRTOF

KISS は KEK が理研 RIBF 内に設置して共同利用研究を運用している短寿命核ビーム装置であり、多核子移行反応を用いて高融点元素の中性子過剰核を精密分光実験に提供する世界で唯一の装置である。位置検出型 β 線ガス検出器 [6]、Ge 検出器アレイを駆使して、難元素同位体の β γ 分光による核構造研究や半減期測定が活発に行われている。さらにアルゴンガスセル内で共鳴イオン化して元素選択をするレーザーの波長スキャンから、荷電半径や核モーメントの測定も行われている。本研究ではこれに MRTOF を組み合わせることによって、格段と研究を広げることができた。例えば、レーザー分光の共鳴検出は従来 β 線の計数で行っていたが、寿命が長い同位体では適用できなかった。MRTOF を導入したことで目的の原子核イオンだけを選択できるため、イオン計数によって共鳴検出できるようになった [7]。また、アイソマー準位の γ 線分光を行う上で、予め MRTOF の質量スペクトルにおいてアイソマーの存在を確認してから測定することができ、確度の高い分光研究が実行できた [8]。KISS+MRTOF のハイライトは、ウランの新同位体 ^{241}U の発見である。多核子移行反応は標的より中性子過剰な原子核を生成するに適している反応であるが、多重度が高く、エネルギーも低い同定が難しい。とりわけ半減期が 45 分と長く予想されている ^{241}U では崩壊による同定も困難である。KISS+MRTOF では、レーザーで元素を正しく同定し、MRTOF で質量を精密測定できるので、崩壊にともなう放射線検出に頼らずに、確実に新同位体の同定ができた。しかも、元素合成過程にもっとも重要な質量の精密測定付きである。近年の多くの新同位体発見はその存在の確認のみであることが多かったが、この新しい同定法は格段と価値の高いものである。今後 KISS+MRTOF の組み合わせをさらに発展させて性能を 1 万倍にし、100 個以上の新同位体の発見に繋がる新施設の礎とすることができた。

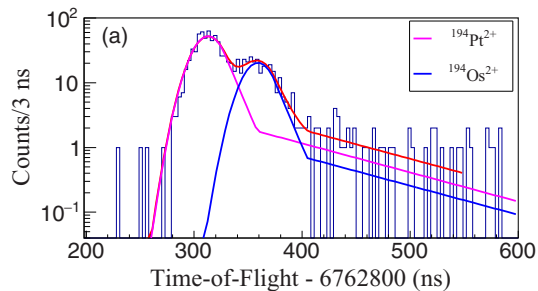


図 6 ToF から Pt のバックグラウンドと Os の共鳴成分を分離

(2) 技術開発

まず BigRIPS, GARIS, KISS の短寿命核ビームエネルギーは、質量数あたり 200 MeV, 5 MeV, 0.2 keV と大きく異なり、それを質量測定するためにイオントラップに捕集する技術開発が必要である。本研究では、いずれの場合でも、異なる大きさ・密度のヘリウムガスを充填したガスセルでイオンを停止させ、高周波カーペットによるイオンガイド法 [9] を用いて高速・高効率でイオントラップに捕集し MRTOF で質量測定することができた。高いエネルギーの入射ビームを受容する BigRIPS のガスセルは、500 mm 長のセルに 200 mbar のヘリウムを充填したセルを用い、2 段式の雨樋型 RF カーペット法を新規に開発して使用した。極低エネルギーの KISS では、新たにガスセル・クラーバンチャー方式を開発して質量測定に成功した。

① GCCB (ガスセルクラーバンチャー)

従来 ISOL ビームと呼ばれる 30 keV/q 程度のビームのイオントラッピングには、静電減速と RFQ トラップによるイオンの捕集が使われてきたが、本研究では、装置を高圧電位に置く必要のない新しい方式を開発した。ビームエネルギーが低く、セルの入射膜を透過することができないため、代わりに 2 mm ϕ のピンホール窓を用い、2 mbar の低密度のヘリウムを充填した高周波カーペットガスセルを用いる方式で、ガスセルクラーバンチャー (GCCB) と命名した。この方式は、本来の意図した機能に加えて、思わぬ副効果があることが判明した。KISS から得られるビームは大抵 1 価の単体原子イオンであるが、GCCB 内で静止する過程で価数が変わり、殆ど 2 価のイオンとして MRTOF で質量測定された。さらに、不純物などの分子イオンは完全に分解されて単体原子イオンとして観測された。このように、GCCB は荷電増倍器 (Charge Breeder) や分子分解器 (Molecular Destroyer) の機能を持つことが示せ、それは質量測定実験のみならず、低エネルギー核物理研究一般に於いても大いに有効な機能である。

② In-MRTOF 偏向器による不純物除去
MRTOF 質量分光器で観測され

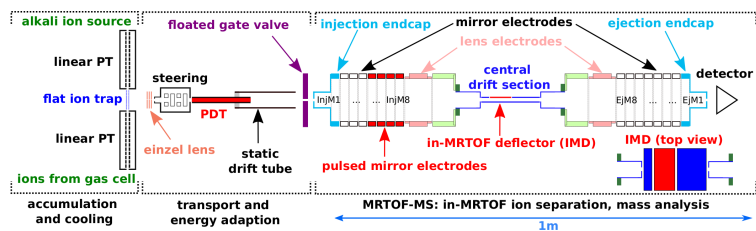


図 7 MRTOF の模式図と In-MRTOF 偏向器 (IMD) の構造

る飛行時間スペクトルには、周回数の異なるイオンが重なるため、未知の不純物が多数あると同定も困難になることがある。とりわけ核分裂片の測定では短寿命原子核だけとでも数百種類のイオンが現れる。また、BigRIPS-SLOWRIのような大型ガスセルにおいて高強度ビームを入射すると、ガスセル内での荷電置換によって多量の不純物分子イオンが生成され、その山に埋もれて目的の短寿命核の測定が不可能になる。それを解決するために、イオントラップに質量弁別性をもたせることと、MRTOF 飛行管中にパルス偏向器を置く In-MRTOF 偏向器 (IMD) を開発した (図 7)。イオンの精密な質量と荷電状態から、周回ごとにどのタイ

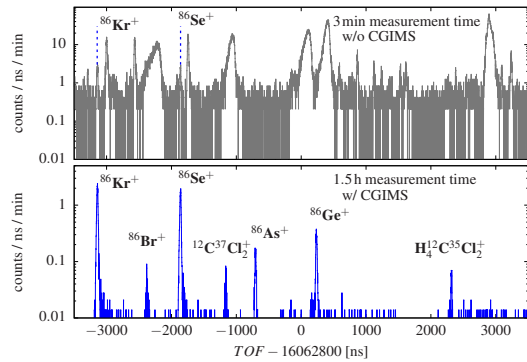


図8 IMD無し(上)とIMD有り(下)のToFスペクトル

ミングで偏向器を通過するか正確に計算できるので、測定したいイオン全てが偏向器の影響を受けずに通過できて、他のイオンは捨てられるようなパルス列を印加することが可能になる。図8は、実際に除去前と除去後の飛行時間スペクトルであり、その効果が明快にわかる。

③ MRTOF 質量分光器の分解能向上

MRTOF 質量分光器の最も大事な性能は、言うまでもなく質量分解能である。これまでMRP=200,000程度で運用してきたが、ミラーに印加する電位の新しい調整法を導入し、500,000は常時得られるようになり、特別に調整すると800,000から1,000,000を達成できるようになった[10]。これは、パルスドリフトチューブ(PDT, 図5)の電位をスキャンすることで模擬的にイオンのエネルギーをスキャンし、飛行時間がエネルギーに依存しない条件(エネルギーアイソクロナス条件)をより容易に設定できるようになった効果である。MRP=1,000,000で100イベント測定すれば、相対統計誤差 10^{-7} で質量を決定できることに相当する。10数ミリ秒の測定でこのような高い質量分解能を持つ装置は、他の測定方法を含めても唯一の高性能であると考えられる。これは、今後の他分野への応用、とりわけ生物・化学分析、環境科学、宇宙探査等への発展が期待される。

④ α -ToF, $\alpha\beta$ -ToF, γ -ToF 検出器

飛行時間信号と崩壊の相関をとった測定は超重元素の測定で示したようにS/N比の向上に絶大な効果があると共に、アイソマー準位の研究などの分光研究にも有効であることを示した[5]。本研究で最初に開発したのは α 崩壊が自発核分裂崩壊に特化した α -ToF検出器であるが、それを発展させて β 崩壊にも対応できる β -ToF検出器と、 $\beta\gamma$ 線分光に特化した γ -ToF検出器も開発した。図9は β -ToF検出器の概念図であり、Si検出器を2段にして β 線を弁別度高く検出することができる。図10は実際に β 崩壊核 ^{81}Ga を測定したもので、イオン飛来時刻と β 線検出時刻の差分から半減期が正確に測定できることが示された。この測定はBigRIPS-SLOWRIでのNi同位体の測定でも威力を発揮した。 γ -ToFはKISSの β 線 γ 線検出器の中心にあるテープ輸送システムのテープの表面にイオンが打ち込まれた信号をToF信号とするもので、 $\beta\gamma$ 分光実験において基底準位とアイソマー準位の標識付を可能にする。

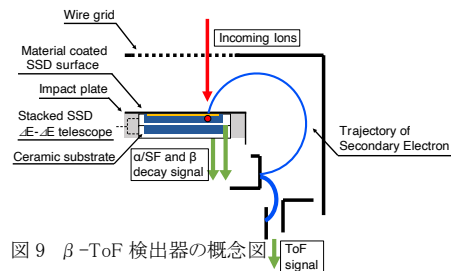


図9 β -ToF検出器の概念図

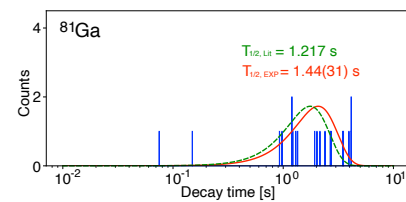


図10 ^{81}Ga と 관련된 β 線の遅延分布

まとめ

重元素の起源の実験的解明はまだその一步を踏み出したに過ぎない。実際にr-過程が起きると予想されている原子核の領域はまだその存在も確認されていない遙か彼方の原子核ばかりである。それらの原子核の特性をより正確に理論予測するためには、できるだけ安定線から離れた原子核の特性、とりわけその質量を実験的に網羅的に測定してデータを蓄積することが王道である。本研究によって、能率よく高精度で網羅的質量測定できる装置群を整備できたことは、重元素の起源の解明に向けて大きな里程碑を築いたといえる。

[1] E. M. Burbidge et al., Rev. Mod. Phys. 29, 547 (1957).
 [2] 和田道治, 「物理科学この1年2022」P109-113.
 [3] T. Niwase, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 953 (2020) 163198.
 [4] P. Schury et al., Phys. Rev. C104 (2021) L021304.
 [5] T. Niwase et al., Phys. Rev. C104 (2021) 044617.

[6] M. Mukai et al., Nucl. Instrum. Meth. A462 (2020) 421.
 [7] H. Choi et al., Phys. Rev. C102 (2020) 034309.
 [8] P. M. Walker et al., Phys. Rev. Lett., 125 (2020) 192505.
 [9] M. Wada et al., Nucl. Instrum. Meth. B204 (2003) 570.
 [10] M. Rosenbusch et al., arXiv:2111.10468 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件/うち国際共著 31件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kimura S., Kaji D., Ito Y., Miyatake H., Morimoto K., Schury P., Wada M.	4. 巻 992
2. 論文標題 Reduction of contaminants originating from primary beam by improving the beam stoppers in GARIS-II	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 164996 ~ 164996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164996	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 Hirayama Y., Schury P., Mukai M., Choi H., Iimura S., Watanabe Y.X., Wada M., Watanabe H., Miyatake H.	4. 巻 997
2. 論文標題 Three-dimensional tracking multi-segmented proportional gas counter for β -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 ~ 165152
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 Tajima M., Takamine A., Wada M., Ueno H.	4. 巻 486
2. 論文標題 Offline ion source for laser spectroscopy of RI at the SLOWRI	5. 発行年 2021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 48 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2020.10.013	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 Watanabe H., Watanabe Y.X., Hirayama Y., Andreyev A.N., Hashimoto T., Kondev F.G., Lane G.J., Litvinov Yu.A., Liu J.J., Miyatake H., Moon J.Y., Morales A.I., Mukai M., Nishimura S., Niwase T., Rosenbusch M., Schury P., Shi Y., Wada M., Walker P.M.	4. 巻 814
2. 論文標題 Beta decay of the axially asymmetric ground state of ^{192}Re	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136088 ~ 136088
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 Hirayama Y., Watanabe Y.X., Mukai M., Ahmed M., Ishiyama H., Jeong S.C., Kakiguchi Y., Kimura S., Moon J.Y., Oyaizu M., Park J.H., Schury P., Wada M., Miyatake H.	4. 巻 1643
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 012138 ~ 012138
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 Walker P.M., Hirayama Y., Lane G.J., Watanabe H., Dracoulis G.D., Ahmed M., Brunet M., Hashimoto T., Ishizawa S., Kondev F.G., Litvinov Yu.A., Miyatake H., Moon J.Y., Mukai M., Niwase T., Park J.H., Podolyk Zs., Rosenbusch M., Schury P., Wada M., Watanabe X.Y., Liang W.Y., Xu F.R.	4. 巻 125
2. 論文標題 Properties of Ta187 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 192505~192505
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 Rosenbusch M., Schury P., Wada M., Imura S., Ito Y., Wolnik H.	4. 巻 456
2. 論文標題 Accurately accounting for effects on times-of-flight caused by finite field-transition times during the ejection of ions from a storage trap: A study for single-reference TOF and MRTOF mass spectrometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 116346 ~ 116346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijms.2020.116346	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 Mukai M., Hirayama Y., Watanabe Y. X., Schiffmann S., Ekman J., Godefroid M., Schury P., Kakiguchi Y., Oyaizu M., Wada M., Jeong S. C., Moon J. Y., Park J. H., Ishiyama H., Kimura S., Ueno H., Ahmed M., Ozawa A., Watanabe H., Kanaya S., Miyatake H.	4. 巻 102
2. 論文標題 In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of Ir196,197,198	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054307~054307
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 Choi H., Hirayama Y., Choi S., Hashimoto T., Jeong S. C., Miyatake H., Moon J. Y., Mukai M., Niwase T., Oyaizu M., Rosenbusch M., Schury P., Taniguchi A., Watanabe Y. X., Wada M.	4. 巻 102
2. 論文標題 In-gas-cell laser ionization spectroscopy of Os194,196 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 034309-034309
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 Chudinov Aleksey Vladimirovich, Rosenbusch Marco, Kozlovskiy Vyacheslav Ivanovich, Raznikov Valeriy Vladislavovich, Schury Peter, Wada Michiharu, Wollnik Hermann	4. 巻 145
2. 論文標題 Model independent peak fitting and uncertainty assignment for high-precision time-of-flight mass spectrometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 3401 ~ 3406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/DOAN00325E	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 Watanabe Y. X., Ahmed M., Hirayama Y., Mukai M., Park J. H., Schury P., Kakiguchi Y., Kimura S., Ozawa A., Oyaizu M., Wada M., Miyatake H.	4. 巻 101
2. 論文標題 Deexcitation γ -ray transitions from the long-lived $I = 13/2^+$ metastable state in Os195	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 041305-041305
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 Niwase T., Wada M., Schury P., Haba H., Ishizawa S., Ito Y., Kaji D., Kimura S., Miyatake H., Morimoto K., Morita K., Rosenbusch M., Wollnik H., Shanley T., Benari Y.	4. 巻 953
2. 論文標題 Development of an “ γ -TOF” detector for correlated measurement of atomic masses and decay properties	5. 発行年 2020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 163198 ~ 163198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163198	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 Hirayama Y., Watanabe Y.X., Mukai M., Schury P., Ahmed M., Ishiyama H., Jeong S.C., Kakiguchi Y., Kimura S., Moon J.Y., Oyaizu M., Park J.H., Wada M., Miyatake H.	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 Rosenbusch M., Wada M., Schury P., Ito Y., Ishiyama H., Ishizawa S., Hirayama Y., Kimura S., Kojima T.M., Miyatake H., Moon J.Y., Niwase T., Sonoda T., Takamine A., Watanabe Y.X., Wollnik H.	4. 巻 463
2. 論文標題 A new multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for the SLOWRI facility	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 184 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.05.058	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 Schury P., Wada M., Wollnik H., Moon J.-Y., Hashimoto T., Rosenbusch M.	4. 巻 91
2. 論文標題 High-stability, high-voltage power supplies for use with multi-reflection time-of-flight mass spectrographs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 014702 ~ 014702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5104292	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 Chudinov Aleksey Vladimirovich, Rosenbusch Marco, Kozlovskiy Vyacheslav Ivanovich, Raznikov Valeriy Vladislavovich, Schury Peter, Wada Michiharu, Wollnik Hermann	4. 巻 145
2. 論文標題 Model independent peak fitting and uncertainty assignment for high-precision time-of-flight mass spectrometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 3401 ~ 3406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0AN00325E	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 Niwase T., Wada M., Schury P., Haba H., Ishizawa S., Ito Y., Kaji D., Kimura S., Miyatake H., Morimoto K., Morita K., Rosenbusch M., Wollnik H., Shanley T., Benari Y.	4. 巻 953
2. 論文標題 Development of an “ -TOF ” detector for correlated measurement of atomic masses and decay properties	5. 発行年 2020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 163198 ~ 163198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163198	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 Tanaka T., Morita K., Morimoto K., Kaji D., Haba H., Boll R.A., Brewer N.T., Van Cleve S., Dean D.J., Ishizawa S., Ito Y., Komori Y., Nishio K., Niwase T., Rasco B.C., Roberto J.B., Rykaczewski K.P., Sakai H., Stracener D.W., Hagino K.	4. 巻 124
2. 論文標題 Study of Quasielastic Barrier Distributions as a Step towards the Synthesis of Superheavy Elements with Hot Fusion Reactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.052502	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 Yokoyama R., Grzywacz R., Rasco B. C., Brewer N., Rykaczewski K. P., Dillmann I., Tain J. L., Nishimura S., Ahn D. S., et al	4. 巻 100
2. 論文標題 Strong one-neutron emission from two-neutron unbound states in decays of the r-process nuclei Ga86,87	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.031302	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 Phong V. H., Lorusso G., Davinson T., Estrade A., Hall O., Liu J., Matsui K., Montes F., Nishimura S., Boso A., et al	4. 巻 100
2. 論文標題 Observation of a μ s isomer in In8549134: Proton-neutron coupling “southeast” of Sn8250132	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.011302	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 Chen Z.Q., Li Z.H., Hua H., Watanabe H., Yuan C.X., Zhang S.Q., Lorusso G., Nishimura S., Baba H., et al	4. 巻 122
2. 論文標題 Proton Shell Evolution below Sn132: First Measurement of Low-Lying β^- -Emitting Isomers in Ag123,125	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.212502	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 Tolosa-Delgado A., Agramunt J., Tain J.L., Algora A., Domingo-Pardo C., Morales A.I., Rubio B., Tarifeo-Saldivia A., Calvio F., Cortes G., Brewer N.T., Rasco B.C., Rykaczewski K.P., Stracener D.W., Allmond J.M., Grzywacz R., Yokoyama R., Singh M., King T., Madurga M., Nishimura S., Phong V.H., et al.	4. 巻 925
2. 論文標題 Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic β^- -delayed neutron emitters	5. 発行年 2019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 133 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.02.004	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 Schury P., Ito Y., Rosenbusch M., Miyatake H., Wada M., Wollnik H.	4. 巻 433
2. 論文標題 Improving wide-band mass measurements in a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph by usage of a concomitant measurement scheme	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 40 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijms.2018.08.007	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 Endo Fumitaka, Koura Hiroyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Analysis of nuclear structure in the nuclear chart and improvement to the gross theory of decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.034303	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 Tolosa-Delgado A., Nishimura S., Phong V.H., Go S., Liu J., Matsui K., Sakurai H., Kiss G.G., Isobe T., Baba H., Kubono S., Fukuda N., Ahn D.S., Shimizu Y., Sumikama T., Suzuki H., Takeda H., Sderstrm P.A., Takechi M., Bruno C.G., Davinson T., et al	4. 巻 925
2. 論文標題 Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic β -delayed neutron emitters	5. 発行年 2019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 133 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.02.004	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 Chen Z.Q., Li Z.H., Hua H., Watanabe H., Yuan C.X., Zhang S.Q., Lorusso G., Nishimura S., et al	4. 巻 122
2. 論文標題 Proton Shell Evolution below Sn132: First Measurement of Low-Lying β^- -Emitting Isomers in Ag123,125	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.212502	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 Phong V. H., Lorusso G., Davinson T., Estrade A., Hall O., Liu J., Matsui K., Montes F., Nishimura S., et al	4. 巻 100
2. 論文標題 Observation of a μ s isomer in In8549134: Proton-neutron coupling “southeast” of Sn8250132	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.011302	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 Ito Y., Schury P., Wada M., Arai F., Haba H., Hirayama Y., Ishizawa S., Kaji D., Kimura S., Koura H., MacCormick M., Miyatake H., Moon J.?Y., Morimoto K., Morita K., Mukai M., Murray I., Niwase T., Okada K., Ozawa A., Rosenbusch M., Takamine A., Tanaka T., Watanabe Y.?X., Wolnik H., Yamaki S.	4. 巻 120
2. 論文標題 First Direct Mass Measurements of Nuclides around Z=100 with a Multireflection Time-of-Flight Mass Spectrograph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 152501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.152501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Schury P., Wada M., Ito Y., Kaji D., Haba H., Hirayama Y., Kimura S., Koura H., MacCormick M., Miyatake H., Moon J.Y., Morimoto K., Morita K., Murray I., Ozawa A., Rosenbusch M., Reponen M., Takamine A., Tanaka T., Watanabe Y.X., Wollnik H.	4. 巻 407
2. 論文標題 Observation of doubly-charged ions of francium isotopes extracted from a gas cell	5. 発行年 2017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 160 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2017.06.014	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 Rosenbusch M., Ito Y., Schury P., Wada M., Kaji D., Morimoto K., Haba H., Kimura S., Koura H., MacCormick M., Miyatake H., Moon J.Y., Morita K., Murray I., Niwase T., Ozawa A., Reponen M., Takamine A., Tanaka T., Wollnik H.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 New mass anchor points for neutron-deficient heavy nuclei from direct mass measurements of radium and actinium isotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kimura S., Ito Y., Kaji D., Schury P., Wada M., Haba H., Hashimoto T., Hirayama Y., MacCormick M., Miyatake H., Moon J.Y., Morimoto K., Mukai M., Murray I., Ozawa A., Rosenbusch M., Schatz H., Takamine A., Tanaka T., Watanabe Y.X., Wollnik H.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Atomic masses of intermediate-mass neutron-deficient nuclei with relative uncertainty down to 35-ppb via multireflection time-of-flight mass spectrograph	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijms.2018.05.001	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25件 (うち招待講演 23件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 M. Wada
2. 発表標題 MRTOF development & Status @ RIBF
3. 学会等名 NUSTAR Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田道治
2. 発表標題 原子質量・なぜ?いかにして測るか?
3. 学会等名 日本物理学会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Haba
2. 発表標題 Present Status and Perspectives of Superheavy Element Chemistry at RIKEN
3. 学会等名 The 10th International Conference on Isotopes, 10ICI(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Wada
2. 発表標題 Towards precise mass measurements of Nh and Mc isotopes
3. 学会等名 4th International Symposium on Superheavy Elements(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Haba
2. 発表標題 Present status and perspectives of superheavy element researches at RIKEN
3. 学会等名 XXXVIth Mazurian Lakes Conference on Physics(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Wada
2 . 発表標題 SHE-Mass II setup for direct mass measurement of hot fusion superheavy nuclides
3 . 学会等名 6 t h International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Miyatake
2 . 発表標題 KISS Project
3 . 学会等名 15th Asia-Pacific Physics Conferece (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Watanabe
2 . 発表標題 Recent experimental results of KEK Isotope Separation System (KISS)
3 . 学会等名 MSI-2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Miyatake
2 . 発表標題 Recent progress of researches with KISS and MRTOF
3 . 学会等名 OMEG 15 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Haba
2. 発表標題 Synthesis and Chemistry of New Elements at RIKEN
3. 学会等名 9th European Chemistry Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Wada
2. 発表標題 Towards comprehensive mass measurements with MRTOF mass spectrographs at RIKEN RIB F
3. 学会等名 2019 The Korean Physical Society Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hirayama
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy of r-process nuclei using KEK Isotope Separator System
3. 学会等名 EMIS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Wada
2. 発表標題 Mass Measurements with MRTOF at RIKEN RIBF
3. 学会等名 NUSTAR Week in Milan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Wada
2. 発表標題 MRTOF Mass Spectrographs at RIKEN RIBF --- toward comprehensive mass measurements of >1000 nuclides including super heavy nuclides ---
3. 学会等名 NN2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wada M
2. 発表標題 Mass measurements of short-lived nuclei with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph - recent results and future plans -
3. 学会等名 The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings(STORI'17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wada M.
2. 発表標題 High Precision Spectroscopy of low-energy short-lived nuclei
3. 学会等名 Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress; TPS33 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wada M.
2. 発表標題 Precision mass measurements of short-lived heavy nuclei, present and future toward comprehensive measurement
3. 学会等名 International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wada M.
2. 発表標題 MRTOF質量分光器を用いた重元素の網羅的高精度質量測定
3. 学会等名 2017年度核データ研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wada M.
2. 発表標題 Toward mass measurement of super-heavy nuclei using MRTOF
3. 学会等名 Workshop for Einsteinium Campaign（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kimura S.,
2. 発表標題 High precision mass measurements of intermediate-mass neutron-deficient nuclei via MRTOF-MS
3. 学会等名 The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings(STORI'17)（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rosenbusch M.
2. 発表標題 Direct mass measurements of neutron-deficient Actinium and Radium isotopes; Probing indirect mass links in the region of heavy nuclei
3. 学会等名 The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings(STORI'17)（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Watanabe Y.
2. 発表標題 Nuclear production by multinucleon transfer reactions with neutron-rich heavy ion beams
3. 学会等名 Workshop for Einsteinium Campaign (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

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

1. 発表者名 Miyatake H.
2. 発表標題 Present status of the KISS pro
3. 学会等名 BUAA Workshop "Impact of Exotic Nuclear Structure on Explosive Nucleosynthesis" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 編：パリティ編集委員会、大槻 義彦	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 204
3. 書名 物理学, この1年 2022	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>KEK和光原子核科学センター https://research.kek.jp/group/wnsc/ 超重元素の初めての精密質量測定に成功 ~ 新元素の新しい原子番号決定法の証明~ https://www.kek.jp/ja/press/202109010000/ 中性子過剰タンタル核異性体で探る原子核形状の多様性原子核構造の研究から重元素合成の起源天体解明に迫る https://www.kek.jp/ja/press/ipns_pr20201111-2/ 2021年3月の活動報告：短寿命核グループ https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/1425/ 2021年12月の活動報告：短寿命核グループ https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/1407/ KEK 和光原子核科学センター http://research.kek.jp/group/wnsc/ KEK 和光原子核科学センター http://research.kek.jp/group/wnsc/</p>
--

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	森本 幸司 (Morimoto Kouji) (00332247)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究分担者	加治 大哉 (Kaji Daiya) (00391912)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・技師 (82401)	
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・その他部局等・シニアフェロー (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
研究分担者	石山 博恒 (Ishiyama Hironobu) (50321534)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究分担者	小浦 寛之 (Koura Hiroyuki) (50391264)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	羽場 宏光 (Haba Hiromitsu) (60360624)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・室長 (82401)	
研究分担者	岸本 忠史 (Kishimoto Tadashi) (90134808)	大阪大学・核物理研究センター・特任教授 (14401)	
研究分担者	西村 俊二 (Nishimura Shunji) (90272137)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・前任研究員 (82401)	

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			
中国	Hong Kong University	IMP Lanzhou	Jinan University	
韓国	Institute of Basic Science			