

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01123

研究課題名(和文) 多価イオン状態の不安定核のための新しい寿命測定法の確立と宇宙元素合成過程への応用

研究課題名(英文) Lifetime measurements of highly charged radioactive ions in storage rings

研究代表者

山口 貴之 (Yamaguchi, Takayuki)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10375595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、理化学研究所RIビームファクトリーに新設された、エキゾチック核の質量測定専用の蓄積リング(名称：稀少RIリング)に改良を加え、多価イオン状態の不安定核の寿命測定を可能にするための開発を行った。主な成果として、単一イオンを非破壊的に検出する小型高感度ショットキー検出器、薄膜表面から放出される高エネルギー二次電子を利用した新しいビーム周回モニター、ならびに崩壊娘核を検出するため蓄積リング周長に沿って配置するシンチレーションファイバー位置検出器を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した検出器群によって、多価イオン状態で崩壊するエキゾチック原子核の寿命を飛行中に測定することができ、原子核の寿命は軌道電子の有無によって劇的に変化することがある(例えば、崩壊と内部転換電子崩壊が競合する場合)。このような条件は星の中にあると考えられるため鉄からウランまでの重元素合成過程の理解に鍵となる情報となる。開発したショットキー検出器で短時間に単一粒子(親核)を非破壊的に測定し、蓄積リング周長に配置したファイバー検出器によって娘核を測定する。本研究のバックグラウンドがない効率的な測定は他の装置では不可能である。

研究成果の概要(英文)：This program aims at a new development which enables in-flight decay measurements of highly charged exotic ions, by exploiting recently built heavy-ion storage ring, Rare-RI Ring, at the RI Beam Factory in RIKEN. Major developments achieved so far are following: a compact high-sensitive Schottky detector which non-destructively detects single ions stored in the storage ring, a new beam circulation monitor which measures high-energy secondary electrons emitted from a thin foil, and a long scintillating fiber detector installed along the ring circumference for decaying daughter detection.

研究分野：原子核物理学(実験)

キーワード：実験核物理 蓄積リング 多価イオン RIビーム

1. 研究開始当初の背景

鉄からウランまでの重元素はいかにして合成されたか。これは原子核物理と宇宙物理共通の重要課題となっている。これら重元素の約半分は、宇宙のどこか中性子密度が極端に高い環境において、原子核が連鎖的な中性子捕獲とベータ崩壊を繰り返す r プロセス (rapid neutron capture process) によって生成されたと考えられている。最近、中性子星の連星合体によって発生した重力波の観測に伴って、元素合成発生時に予想されていたキロノバの放射が検出され、r プロセスの証拠として注目を浴びている。原子核分野から r プロセスの解明に貢献するには、反応のダイナミクスを支配する質量や元素存在比に影響を与える寿命の情報が不可欠である。しかし r プロセス核は極めて中性子過剰であるため、これまで実験室で研究することが難しかった。

理化学研究所 RI ビームファクトリーは、大強度ウランビームの飛行中核分裂を利用して多くの中性子過剰核を生成できるため、この分野で世界をリードしている。r プロセス解明のために寿命測定が進んでいる。寿命測定は通常、生成した中性子過剰核を停止させ、放出されるベータ線、ガンマ線、中性子を測定するため、中性原子状態のデータとなる。しかし高温高压の星の環境では、中性子過剰核はイオン化している可能性が高く、その寿命は中性状態から変化している可能性がある。電子を剥ぎ取った状態の寿命測定はこれまでの実験では不可能であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多価イオン状態の中性子過剰核の寿命測定を可能にすることである。多価イオン状態で寿命が変化する一例として、励起した原子核のガンマ崩壊を考える。通常、励起した原子核はガンマ線放出と競合する内部転換電子放出によって脱励起するが、多価イオン (フルストリップ) 状態では軌道電子が存在しないため、内部転換は起こりえない。よって寿命が変化する。このような現象が r プロセスの経路で起こると元素存在比に影響を及ぼすと考えられる。

我々は最近、理化学研究所 RI ビームファクトリーに不安定核ビームを貯蔵できる新しい蓄積リング、稀少 RI リングを建設した。その目的は短寿命中性子過剰核の質量を精密に測定することである。等時性に調整された蓄積リングを飛行する核の周回周期から質量を決定することができる。そこで蓄積された多価イオン状態の不安定核の崩壊を飛行中に観測できれば、寿命の変化を検出することができるだろう。本研究では稀少 RI リングを改良して、飛行中に中性子過剰核の寿命を測定できるよう装置開発を行った。

3. 研究の方法

稀少 RI リングで寿命測定を行うための手順は次のようになる。加速器からのウランビームを生成標的に照射して、目的の r プロセス核を生成する。破砕片分離装置 BigRIPS にて、エネルギー損失と飛行時間の測定によって粒子を識別する。多くのウラン核分裂片から目的の核が生成された時のみ蓄積リングの入射キッカー電磁石を励磁する (個別入射方式)。蓄積された核は等時性に調整されたリングを周回する。この時、周回周期は蓄積された核の質量電荷比に比例するため、精密に調整された等時性場の下、高精度な粒子識別が可能となる。周回周期の測定には共鳴型ショットキー検出器を用いる。ショットキー検出器によって周回周期の時間変化を測定する。もし周回中に崩壊が起こり、娘核が蓄積リングのアクセプタンスに残る場合、ショットキー検出器で観測される親核の周期が突然シフトし、娘核の質量電荷比に相当する周期に移動する。また、もし崩壊によって生成された娘核が蓄積リングのアクセプタンスから外れる場合、娘核は真空パイプ内壁に衝突して周回軌道から失われる。ショットキー検出器では信号が失われたように見えるため、蓄積リング周長に長いシンチレーションファイバー検出器を配置し、娘核を検出する。このようにして多価イオン状態の飛行中崩壊現象を観測する。

本研究では以上の測定を可能にするため、ショットキー検出器とシンチレーションファイバー検出器の開発が重要になる。また、これらに関する検出器としてデルタ線検出器の開発とビーム調整時に不可欠な位置検出器などの開発を行った。検出器の性能評価は放射線医学総合研究所の重イオンビームを用いた。

4. 研究成果

(1) 小型共鳴型ショットキー検出器の開発と予備実験

共鳴型ショットキー検出器は蓄積リングの直線部に設置された共鳴空洞からなる。周期的にイオンビームが空洞を通過するとビームの周回周期に共鳴して電磁場が蓄えられる。その信号を磁気カップラーで取り出し、高速フーリエ変換すれば、周回周期すなわち質量電荷比に比例する周波数にピークを作る。稀少 RI リングの共鳴型ショットキーピックアップは GSI 研究所の蓄積リング ESR を手本に開発された。図 1 (左) は寿命測定の予備実験にもなるデータで H29 年度のコミッションングで取得した。約 170MeV/u の ^{78}Ge を 6 秒以上蓄積することに成功した。残留ガスとの衝突によって刻々とエネルギーを失うところ、等時性が 5.4×10^{-6} と非常に良いため、エネルギーを失っても周回周波数が変化していない。6 秒以降は稀少 RI リングのアクセプタン

スから外れるため周波数がずれていくと考えられる。もし飛行中に崩壊が起こると、このショットキー信号の周波数がシフトするはずである。このようにコミッショニング実験で寿命測定が可能であることを示すことができた。

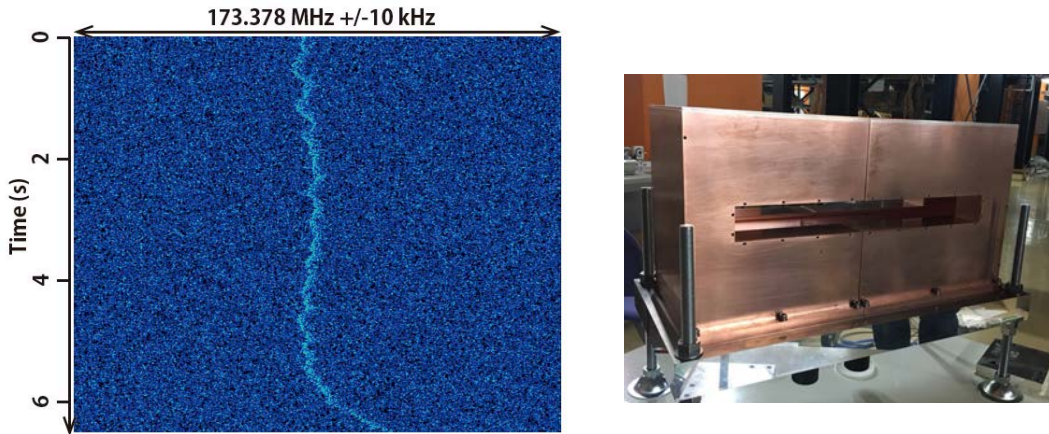


図 1 : (左) 稀少 RI リングの共鳴型ショットキー検出器 (初号機) による ^{78}Ge の Waterflow ダイアグラム (右) 開発した小型共鳴型ショットキー検出器の外観

しかしながら、稀少 RI リングの共鳴型ショットキー検出器には空洞と真空パイプを遮断するためにセラミックギャップが使用されており、誘電損失が無視できない。図 1 (左) の信号ノイズ比も悪い。そこで、新しい共鳴型ショットキー検出器を開発した。無酸素銅で製作した空洞をそのまま真空チェンバーに入れる形を採用した。CST 社の Micro Wave Studio を用いて 3 次元電磁場シミュレーションし、感度を最適化した。形状は $260 \times 520 \times 200 \text{ mm}^3$ の直方体とした(図 1 右)。ビード法によるオフライン試験を行った結果、共鳴周波数 $f = 503 \sim 508 \text{ MHz}$ 、シャントインピーダンス $R = 700 \sim 1000 \text{ k}\Omega$ 、共鳴 Q 値 $Q_0 = 5000 \sim 7000$ を得た (数字の範囲はチューナーによる調整範囲を示す)。この結果は初号機の値と比較して Q 値で 3 倍、シャントインピーダンスで 6 倍の改善に相当する。信号強度は 10 倍の向上が期待できる。さらに 2 台のショットキー検出器を使うことにより測定周波数範囲を広げることができると、また 2 台のショットキー信号の相関を取ることができることなどの利点がある。

ショットキー検出器を使った寿命測定のビームタイムは本研究の期間中に理研ではアサインされなかった。そこで、代表者がスポークスパーソン (ILIMA 国際共同研究) を務める GSI 研究所の蓄積リング ESR にてショットキー検出器の実験を並行して進めている。図 2 は ESR の共鳴型ショットキー検出器による $^{142}\text{Pm}^{60+}$ の電子捕獲崩壊を観測した図である。横軸は周回周波数 (ハーモニクス 125)、縦軸は蓄積時間 (入射後約 55 秒以降) を示す。入射から約 58 秒後に 1 つ目の崩壊、約 62 秒後に 2 つ目の崩壊が起こったことが鮮明に観測されている。娘核の ^{142}Nd のラインに伸びているテールは反跳による娘核の速度変化を示す。この実験は国際共同研究であったが、図 2 のような事象約 9000 個の全データは埼玉大にて詳細に解析が行われたことを付記しておきたい。崩壊定数を $0.0141(7) \text{ s}^{-1}$ と決定し、Phys. Lett. B に出版した。

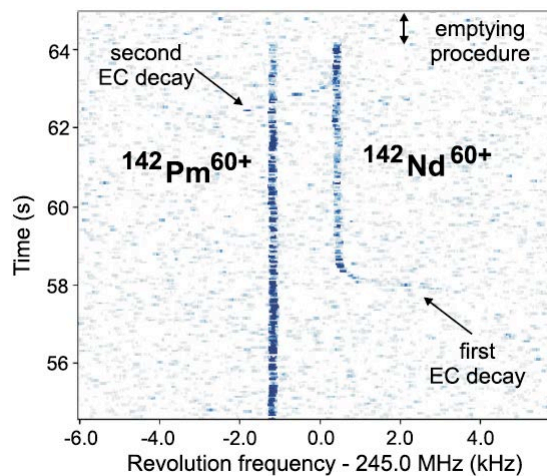


図 2 : $^{142}\text{Pm}^{60+}$ の電子捕獲崩壊のショットキースペクトラム

本研究ではもともと寿命変化を示す例として ^{80}Ge の測定を想定していた。 ^{80}Ge の第 1 励起状態は 0^+ で

ガンマ崩壊できないため、内部転換電子放出が起こる。フランスの ALTO 研究所で測定された結果は Phys. Rev. Lett. に出版され、低励起状態の 0^+ は中性子過剰核の変形共存の証拠として注目を浴びた。しかし、最近 TRIUMF で追試実験が行われ、その結果が Phys. Rev. Lett. に発表されたが ALTO の結果を否定するものであった。これは低エネルギーの内部転換電子測定が実験的に難しいことを示している。そこで急遽方針を転換し、 ^{72}Ge の第1励起状態 0^+ に着目した。691 keV に半減期 444ns の状態がある。基底状態も 0^+ であるため、フルストリップ状態では内部転換が起こらず、寿命が延びると予想される。幸いなことに GSI 研究所にてビームタイムがアサインされ、ごく最近実験を行うことができた。結果は解析中であるが、寿命は~100 ms 程度まで延びることが分かった。解析が完了次第、いち早く誌上発表する予定である。

(2) 蓄積リングのファイバーシンチレーション検出器開発

本研究の開発のもう一つの柱は、飛行中崩壊によって蓄積リングのアクセプタンスから外れる娘核を真空パイプ中で直接検出するためのファイバーシンチレーション検出器の開発である。図3(左)に示すように周回粒子がベータ崩壊すると、娘核の磁気剛性率は小さくなるため、蓄積リングのダイポール磁石で運動量分析され、真空パイプの内壁に衝突して失われる。したがって蓄積リングの周長 (~60 m) に沿って検出器を配置すれば原理的には効率 100% でバックグラウンドなしの測定が可能となる。四重極磁石のような収束要素がなくダイポール磁石のみで構成されている稀少 RI リングならではの測定である。このアイディアは蓄積リングの国際会議 STORI17 にて発表した。

開発ではいくつかの試作機 (~2 m 長) を製作して性能評価を行った。はじめにクラレのファイバーシンチレータ SCSF-78J (2 mm 角 2 m 長) を束ねて、両端から Multi Pixel Photon Counter MPPC (S13360-6075CS) でシンチレーション光を読み出した。両端の時間差から位置を検出する方式で、3 cm の位置分解能と 76 ps の時間分解能を得た。性能としては十分であったが、ファイバーシンチレータ 1 本ずつの個性があったため実機には採用しなかった。いくつかの試作を経て最終的にプラスチックシンチレータを分割して並べたものに波長変換ファイバー (クラレ Y11) を接続する方式を採用した。プラスチックシンチレータは蓄積リングのダイポール磁石の曲率に合うよう分割し、波長変換ファイバーが収まるよう溝が彫ってある (図3右の写真はパーツの一つを示す)。この方式でタイミングとパルスハイト同時に測定することができる。位置分解能は 4 mm、時間分解能は 76 ps という非常に良い結果を得た。この成果は物理学会にて発表した。

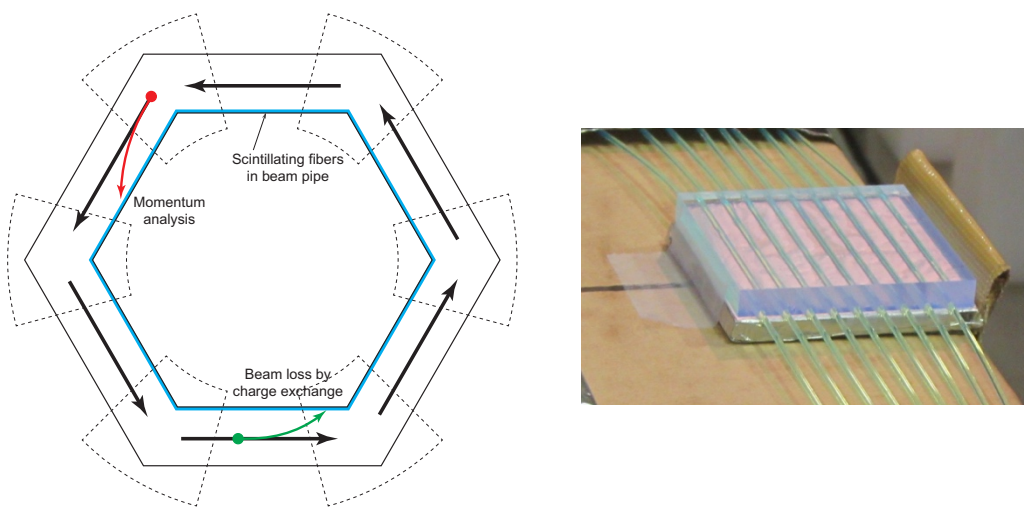


図 3 : (左) 蓄積リングファイバー検出器の概念図。周回中の粒子が飛行中に崩壊するとダイポール磁石で運動量分析され真空パイプ内壁に衝突する (右) プラスチックシンチレータと波長変換ファイバーの組み合わせによる試作機の一部

(3) デルタ線検出器の開発

高エネルギー重イオンビームが薄膜を貫通するとき、表面から 2 次電子が放出されることが知られている。そのうち低エネルギーの電子は電磁場によって制御しやすいため多くの検出器に応用されている。本研究では高エネルギー成分すなわち通称デルタ線に着目した。デルタ線を電磁場の制御なしに直接シンチレータに打ち込み、シンチレーション光を光センサで読み出す。この方式はデルタ線の発生が多い、高エネルギー重イオンビームに限られるが、電磁場の複雑な制御が不要なためノイズに強く、操作も簡便で信頼性が高い。

いくつかの試作機による試験を経て実機の開発に成功し、稀少 RI リングに設置済みである。アルミニウム薄膜 (厚さ 3 μm) から放出される 2 次電子をプラスチックシンチレータに効率よく打ち込むために、薄膜はビームラインに対して 45° 傾けた。シンチレータ板 (100×100 mm²)

の側面にはMPPC (S12572-100CP) を左右5個ずつ取り付け付けた。図4は稀少 RI リングで周回する 175 MeV/u の ^{78}Ge を検出したものである。図4の上(黄)と中(マゼンダ)の信号はそれぞれ検出器からの左右の読み出しで(ディスクリミネータ出力)、蓄積リングを周回する ^{78}Ge が周期的に検出器の薄膜を通過したことを示す。下(青)は入射タイミングを示す。この測定から ^{78}Ge の周期を 373.5(3) ns と決定することに成功した。目標の 10^{-4} の決定精度を達成した。

稀少 RI リングは原理上1粒子しか蓄積することができない。したがって通常蓄積リングに装備されているビームモニターは適用できない。本検出器は入射粒子の蓄積をいち早く確認するための新しいモニターとして重要な役目を果たしている。この結果は Nucl. Instrum. Methods B に発表した。

本検出器は様々な応用が考えられる。まず第1にショットキー検出器のトリガー検出器として使えることである。稀少 RI リングの入射軌道に設置し、入射を確認したと同時にショットキー検出器をスタートさせる。これによりショットキー検出器のスペクトラムアナライザーの大量データを効率よく取得できる。第2に高レートのビームライン実験に使用できる。ビームは薄膜しか通過しないため、検出器の放射線損傷が発生しない。かつ薄膜であるため物質通過によるビームのエミッタンスに与える影響がきわめて少ない。本検出器の進化形として開発した光電子増倍管 (R7600U) で読み出したものでは、検出効率 99%、時間分解能 250 ps であった。

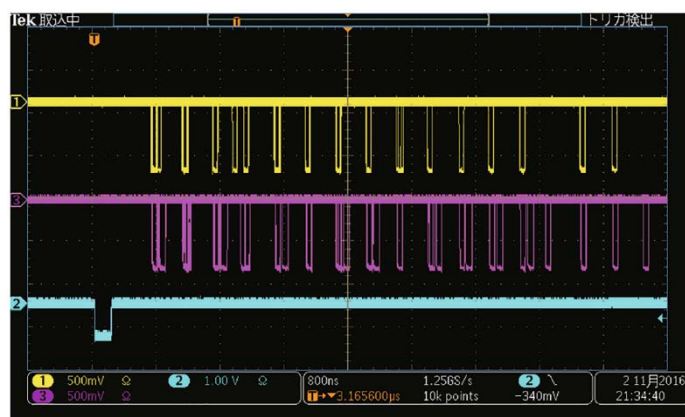


図4：開発したデルタ線検出器による ^{78}Ge イオンビームの周回の様子

(4) その他の開発と今後

本研究で行ったその他の開発についてまとめる。

稀少 RI リングは RI ビームファクトリで長い入射ラインの最下流に位置しているため、ビームライン軌道を確認するための位置検出器が不可欠である。この目的のためにプラスチックシンチレータの読み出しを工夫した位置検出器を開発した。1 mm 幅のプラスチックシンチレータを短冊状に並べ、両端にそれぞれライトガイドを直交するよう接続する。ライトガイドの両端からシンチレーション光をまとめ読みする。発光の伝播経路を制限することによって位置の感度を向上させることに成功した。1 mm 以下の分解能を得た。また、断面が楔型のプラスチックシンチレータのパルスハイトから位置を読み出す小型検出器を開発した。稀少 RI リング内部で使用する。1 mm 以下の分解能を得た。

無機シンチレータに対する重イオンビームの応答試験も系統的に行った。現在 RI ビームファクトリーでエネルギー損失検出器として標準的に使用されているイオンチェンバーは遅い検出器である。高レート実験に対応するため高速応答する無機シンチレータを系統的に試験した。CsI(pure), BaF₂, YAP(Ce), TiO₂, GAGG など 0.5~2 mm 厚の板状である。左右に光電子増倍管を接続し発光を読み出した。Kr ビーム 200~400 MeV/u に対して、これらの検出器の時間分解能は多くのもので 20 ps 台の良い結果が得られたが、エネルギー損失分解能は 1~3%とシリコン検出器並みであった。GAGG に関しては NaI(Tl)に代わる真空対応の全エネルギー検出器としての性能も検証した。NaI(Tl)同様 1%程度のエネルギー分解能が得られた。

以上のように装置開発は予定通り終了し、学会発表もしくは誌上発表済みあるいは予定である。検出器開発では当初の予想以上の優れた性能が得られたものもあり、今後蓄積リング実験以外にも応用が期待できる。RI ビームファクトリーでの蓄積リング実験について準備は整っておりビームタイムを待つばかりである。一方並行して進めている GSI 研究所の蓄積リング実験は期間中に行うことができ物理成果が得られた。主な発表論文等には上記の他、開発経費は使っていないが物理考察で関連し本研究を推進する上で補助となった IMP 研究所の蓄積リングを使った研究成果を加えた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件/うち国際共著 21件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S. Naimi, H.F. Li, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzaki, M. Wakasugi, H. Arakawa, W. Dou, D. Hamakawa, et al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Experimental Challenges of the First Mass Measurement Campaign at the Rare-RI Ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 012058/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012058	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 C. Y. Fu, Y. H. Zhang M. Wang, X. H. Zhou, Yu. A. Litvinov, K. Blaum, H. S. Xu, X. Xu, P. Shuai, Y. H. Lam, et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 Mass measurements for the $T_z = -2$ fp-shell nuclei ^{40}Ti , ^{44}Cr , ^{46}Mn , ^{48}Fe , ^{50}Co , and ^{52}Ni	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 054311/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.054311	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 R. Igosawa, A. Hirota, N. Kimura, S. Kuma, K. C. Chartkunchand, P. M. Mishra, M. Lindley, T. Yamaguchi, Y. Nakano, T. Azuma	4. 巻 153
2. 論文標題 Photodissociation spectroscopy of N_2^+ in the ion storage ring RICE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 184305/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0027805	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 D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, S. Omika, K. Wakayama, S. Hosoi, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, et al.	4. 巻 986
2. 論文標題 Development and operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A	6. 最初と最後の頁 164713/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164713	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 A. Hirota, R. Igosawa, N. Kimura, S. Kuma, K. C. Chartkunchand, P. M. Mishra, M. Lindley, T. Yamaguchi, Y. Nakano, T. Azuma	4. 巻 102
2. 論文標題 Radiative cooling dynamics of isolated N20+ ions in a cryogenic electrostatic ion storage ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 023119/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.023119	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 Yu.A. Litvinov, Th. Stoehlker, X.W. Ma, Y.H. Zhang, T. Yamaguchi	4. 巻 1401
2. 論文標題 Nuclear physics research at heavy ion accelerators: Precision studies with stored and cooled exotic nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 012001/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1401/1/012001	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 S. Suzuki, A. Ozawa, D. Kamioka, Y. Abe, M. Amano, H. Arakawa, Z. Ge, K. Hiraishi, Y. Ichikawa, K. Inomata, et al.	4. 巻 965
2. 論文標題 Efficiency and timing performance of time-of-flight detector utilizing thin foils and crossed static electric and magnetic fields for mass measurements with Rare-RI Ring facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A	6. 最初と最後の頁 163807/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.163807	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 S. Omika, T. Yamaguchi, N. Tadano, Y. Abe, M. Amano, Z. Ge, D. Kamioka, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, A. Ozawa, F. Suzaki, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Wakayama, Y. Yamaguchi	4. 巻 463
2. 論文標題 Development of a new in-ring beam monitor in the Rare-RI Ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B	6. 最初と最後の頁 241-243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.05.029	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 J.H. Liu, X. Xu, P. Zhang, P. Shuai, X.L. Yan, Y.H. Zhang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, H.S. Xu, K. Blaum, et al.	4. 巻 463
2. 論文標題 Improving the resolving power of Isochronous Mass Spectrometry by employing an in-ring mechanical slit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B	6. 最初と最後の頁 138-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.06.007	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 Z. Ge, T. Uesaka, S. Naimi, D. Nagae, Y. Abe, S. Omika, F. Suzaki, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, M. Wakusugi, H. Li, K. Wakayama, H. Arakawa, K. Inomata, K. Nishimuro, T. Kobayashi, A. Ozawa, S. Hosoi, Y. Inada, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Mukai, M. Amano, D. Kamioka, Y. Yano,	4. 巻 240
2. 論文標題 Scheme of high-resolution identification and selection of secondary ions for mass measurements with the Rare-RI Ring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hyp. Int.	6. 最初と最後の頁 92/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-019-1599-2	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 X. Xu, J. H. Liu, C. X. Yuan, Y. M. Xing, M. Wang, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, Yu. A. Litvinov, K. Blaum, R. J. Chen, et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Masses of ground and isomeric states of 101In and configuration-dependent shell evolution in odd-A indium isotopes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 051303(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.100.051303	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 J.T. Zhang, K. Yue, H.X. Li, X.L. Tu, C.J. Shao, P. Ma, B. Mei, X.C. Chen, Y.Y. Yang, X.Q. Liu, Y.M. Xing, K.H. Fang, Z.Y. Sun, M. Wang, Yu. A. Litvinov, T. Yamaguchi, P. Egelhof, Y.H. Zhang, X.H. Zhou,	4. 巻 948
2. 論文標題 The development of in-ring reaction measurements at the HIRFL-CSR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A	6. 最初と最後の頁 162848/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162848	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 F.C. Ozturk, B. Akkus, D. Atanasov, H. Beyer, F. Bosch, D. Boutin, C. Brandau, P. Buehler, R.B. Cakirli, R.J. Chen, et al.	4. 巻 797
2. 論文標題 New test of modulated electron capture decay of hydrogen-like 142Pm ions: Precision measurement of purely exponential decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 134800/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.134800	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 X. Xu, M. Wang, K. Blaum, J. D. Holt, Yu. A. Litvinov, A. Schwenk, J. Simonis, S. R. Stroberg, Y. H. Zhang, H. S. Xu, et al.	4. 巻 99
2. 論文標題 Masses of neutron-rich 52-54Sc and 54,56Ti nuclides: The N = 32 subshell closure in scandium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 064303/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.064303	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.M. Xing, K.A. Li, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, M. Wang, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, S. Wanajo, S. Kubono, G. Martinez-Pinedo, et al.	4. 巻 781
2. 論文標題 Mass measurements of neutron-deficient Y, Zr, and Nb isotopes and their impact on rp and p nucleosynthesis processes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 358-363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.04.009	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 C. Y. Fu, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, M. Wang, Yu. A. Litvinov, K. Blaum, H. S. Xu, X. Xu, P. Shuai, Y. H. Lam, et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Masses of the Tz = -3/2 nuclei 27P and 29S	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 014315/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014315	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. H. Zhang, P. Zhang, X. H. Zhou, M. Wang, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, X. Xu, P. Shuai, Y. H. Lam, R. J. Chen, et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Isochronous mass measurements of $T_z = -1$ fp-shell nuclei from projectile fragmentation of ^{58}Ni	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 014319/1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.014319	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 X. L. Tu, A. Kelic-Heil, Yu. A. Litvinov, Zs. Podolyak, Y. H. Zhang, W. J. Huang, H. S. Xu, K. Blaum, F. Bosch, R. J. Chen, et al.	4. 巻 95
2. 論文標題 Application of isochronous mass spectrometry for the study of angular momentum population in projectile fragmentation reactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 014610/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.95.014610	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. Zhang, X. Xu, P. Shuai, R.J. Chen, X.L. Yan, Y.H. Zhang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, H.S. Xu, et al.	4. 巻 767
2. 論文標題 High-precision QEC values of super allowed $0^+ \rightarrow 0^+$ b-emitters ^{46}Cr , ^{50}Fe , and ^{54}Ni	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 20-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2017.01.039	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 J. C. Zamora, T. Aumann, S. Bagchi, S. Boenig, M. Csatos, I. Dillmann, C. Dimopoulou, P. Egelhof, V. Eremin, T. Furuno, et al.	4. 巻 96
2. 論文標題 Nuclear-matter radius studies from ^{58}Ni (,) experiments at the GSI Experimental Storage Ring with the EXL facility	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 034617/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.034617	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 Q. Zeng, M. Wang, X. H. Zhou, Y. H. Zhang, X. L. Tu, X. C. Chen, X. Xu, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, K. Blaum,	4. 巻 96
2. 論文標題 Half-life measurement of short-lived $^{94}\text{mRu}44+$ using isochronous mass spectrometry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 031303/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.031303	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17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 梶木大輔
2. 発表標題 稀少RIリングにおける周回周期の測定のためのデルタ線検出器の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱川大貴
2. 発表標題 稀少RIリングのためのプラスチックシンチレータを用いた位置検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 New experimental plan and detector R&D at the Rare-RI Ring facility
3. 学会等名 China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 ILIMA status report and phase-0 program
3. 学会等名 Nuster Week 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣田彩音
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEを用いたN20+の輻射振動冷却II
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲田康人
2. 発表標題 稀少RIリングのためのファイバースynchレシオン検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細井駿
2. 発表標題 稀少RIリングのための薄膜を利用した位置検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣田彩音
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEによるN20+の振動冷却測定
3. 学会等名 2019年原子衝突学会44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 Status of RIKEN Ring
3. 学会等名 NucAR collaboration meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 Rare-RI Ring project in RIKEN and a proposal at CSRe
3. 学会等名 Symposium on Precision Physics Experiments with Stored Highly Charged Ions at Low Energies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 Precision mass spectrometry of stored exotic nuclei
3. 学会等名 重力波マルチメッセンジャー研究会「重力波観測時代のrプロセスと不安定核」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 Storage-ring mass spectrometry of exotic nuclei
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 T. Yamaguchi
2. 発表標題 ILIMA project: isomeric beams, lifetimes and masses at the FAIR storage rings
3. 学会等名 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 ILIMA status report
3. 学会等名 NUSTAR week 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大藪舜一朗
2. 発表標題 稀少RIリングを用いたウラン核分裂片の質量測定実験のデータ解析
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大薮舜一朗
2. 発表標題 稀少RIリングの質量測定の現状
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会（宇都宮大学峰キャンパス）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山口貴之
2. 発表標題 Storage-ring mass spectrometry at GSI/FAIR
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会（宇都宮大学峰キャンパス）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	山口 由高 (Yamaguchi Yoshitaka) (40415328)	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	洲崎 ふみ (Suzaki Fumi) (70779727)	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・研究職 (82110)	
研究分担者	長江 大輔 (Nagae Daisuke) (60455285)	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・協力研究員 (82401)	

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	若杉 昌徳 (Wakasugi Masanori) (70250107)	京都大学・化学研究所・教授 (14301)	

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			
ドイツ	GSI	Max-Planck Institute	Giessen Univ	他4機関
中国	IMP	Beihang Univ		