

令和元年6月10日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13799

研究課題名（和文）新元素の発見に向けたイオン蓄積リング法の基礎開発

研究課題名（英文）Feasibility study on storage-ring spectrometry of superheavy elements

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、次世代の新元素の識別方法として、蓄積リングに新元素を蓄積し、ショットキーピックアップ法によって新元素を1個から確実に識別する方法を提案する。蓄積リングに新元素を周回させられれば、たとえ短寿命のうちにアルファ崩壊しても親核を一義的に同定することができる。本研究は、この方法を実現に近づけるために、ショットキーピックアップの基礎研究を行うことを目的とした。本研究では、共鳴空洞の高感度化、小型化を目指し、3次元電磁場シミュレーションを行い、プロトタイプを設計製作およびオフライン試験を行った。その結果、陽子1個を1.5秒で識別することができる性能を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理研加速器の大強度ビームと気体充填型反跳分離装置GARISを用いた10年以上にもおよぶ長期実験において、原子番号113番元素が合成され、ニホニウムと命名されるに至った。この実験ではニホニウムから崩壊連鎖して放出される粒子の相関を用いて、合成が証明された。しかし、今後の新元素探索に於いて合成確率が下がること、また、崩壊中に核分裂する確率があることから、新しい識別方法が望まれている。本研究では蓄積リング中に周回させた新元素を1粒子から同定するショットキーピックアップ法の開発を行った。開発したショットキーでは約1.5秒で陽子1個を識別できるため、新しい新元素合成実験に向けて応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The present study aims at developing a new particle identification technique for superheavy elements. When they are stored in a storage ring, they can be unambiguously identified using the Schottky-pickup technique, even for a single ion. This could be a new direction for a series of new elements synthesis experiments. To realize such experiments, feasibility studies were conducted; we performed realistic three-dimensional electromagnetic field simulations to design a high-sensitive and compact Schottky cavity, and fabricated a prototype. As the results of offline tests, we obtained the sensitivity that a proton could be detected within 1.5 sec, that is good enough for the present purpose.

研究分野：原子核物理学

キーワード：実験核物理 ショットキーピックアップ イオン蓄積リング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

理化学研究所線形加速器の大強度ビームと気体充填型反跳分離装置 GARIS を用いた 10 年以上にもおよぶ長期実験において、原子番号 113 番元素が合成され、ニホニウムと命名されたのは記憶に新しい。この実験では  $^{70}\text{Zn}$  ビームを  $^{209}\text{Bi}$  標的に照射する冷たい核融合反応  $^{70}\text{Zn}(^{209}\text{Bi}, n)^{278}\text{Nh}$  を用いた。そして、合成された蒸発残留核が連続して  $\alpha$  崩壊する時放出される  $\alpha$  粒子のエネルギーと時刻を測定して新元素の合成を証拠付けた ( $\alpha$  粒子相関法)。しかしながら、今後、原子番号 119 番以降の新元素を合成するにあたっていくつかの技術的な問題がある。

新元素の合成確率が極めて小さいため、 $\alpha$  粒子相関法に於ける統計的な不確実性がつきまとうこと。また独立な実験で追試することが非常に困難ということ。そこで現在、合成確率のより大きな熱い核融合反応を採用することが一般的になりつつある。この熱い核融合反応で合成された蒸発残留核は、 $\alpha$  崩壊連鎖の途中で自発核分裂する確率が高い。核分裂すると、 $\alpha$  粒子相関法による新元素合成の証拠固めが揺らぎ不確実性が伴ってくる。そこで従来採用されてきた  $\alpha$  粒子相関法に代わる新しい実験技術が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究は新元素の同定に於ける問題を解決するための新しい方法を提案する。すなわち、核融合反応によって合成される新元素をイオン蓄積リングに入射、蓄積、周回させる。そして、周回イオンを非破壊的に検出できる共鳴ショットキーピックアップを用いて、周回している新元素の質量電荷比を得る。この方法であれば、粒子固有の情報である質量が得られるため、イオン 1 個から確実に粒子識別することができる。

新元素が長寿命で十分長い時間蓄積できれば、その質量電荷比を直接測定できる。たとえ新元素が短寿命ですぐに  $\alpha$  崩壊しても、娘核と  $\alpha$  粒子を同時に測定できれば、親核を一義的に決定することができる。あるいは  $\alpha$  粒子を検出しなくとも、親核、娘核、孫核と崩壊連鎖の核種の質量を測定していけば、どのような反応と崩壊が起こったか同定することができる。共鳴ショットキーピックアップはイオン 1 個に感度を持ち、周回イオンの質量電荷比に比例する周回周波数を与える。したがって、バックグラウンドを気にすることなく、たった 1 粒子で確実な識別が行える。

本研究はこの新しい方法を実現に近づけるために、共鳴ショットキーピックアップのフィージビリティスタディを行うことを目的としている。共鳴ショットキーピックアップには、電荷状態の低い重イオンと  $\alpha$  粒子を検出できるほどの高い感度が要求される。

### 3. 研究の方法

高感度な共鳴ショットキーピックアップを開発するために、我々の共同研究グループ(理研、筑波大、埼玉大)が建設した、理化学研究所仁科加速器研究センターの蓄積リング(稀少 RI リング(引用文献①))を利用する(重イオンを蓄積できる蓄積リングは日本では他にない)。稀少 RI リングは高エネルギー RI ビームを蓄積する装置で、すでに共鳴ショットキーピックアップを備えており、原子番号 36 のクリプトンイオンの 1 粒子検出に成功している。そこで、ビームエネルギーの違いはあるが、稀少 RI リングで原子番号 1 すなわち陽子 1 粒子の検出を目指す。

稀少 RI リングを改造しなくてもいいように、稀少 RI リングの真空チェンバーに設置できる小型空洞を設計した。CST 社の 3 次元電磁場シミュレーションソフトウェア Micro Wave Studio を用いて、空洞内に誘起される電磁場をシミュレートした。設計では信号強度を決めるシャントインピーダンスを最適化した。次の左図は空洞内に誘起される磁場分布を示す。右の写真は製作したプロトタイプ(260×520×200 mm<sup>3</sup>)である。空洞の材質は無酸素銅とした。

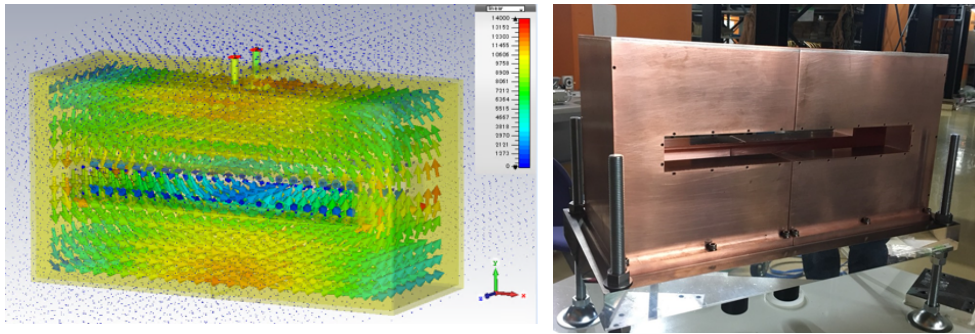


図:(左)電磁場シミュレーションによる磁場分布。(右)製作したプロトタイプ共鳴空洞

#### 4. 研究成果

製作したプロトタイプをオフラインにて試験した結果、以下の値を得た(値の範囲は共鳴周波数を調整するチューナーの状態によって変化する範囲を示す)。

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
|                          | 空洞性能      |
| 共鳴周波数(MHz)               | 503~508   |
| シャントインピーダンス(k $\Omega$ ) | 700~1000  |
| 共鳴 Q <sub>0</sub> 値      | 5000~7000 |

現在稀少 RI リングに設置されている共鳴ショットキーピックアップの性能と比較すると、これらの値は、共鳴周波数と共鳴 Q<sub>0</sub> 値で約 3 倍、シャントインピーダンスで 6 倍改善することができた。これらの数字を使って得られる信号強度を計算すると、約 10 倍の感度向上が期待できる。これを陽子1個に適用すると、約 1.5 秒で検出することができることになる。

ニホニウムはミリ秒で崩壊してしまうが、平均の電荷状態が高ければ、測定時間は電荷の二乗に反比例するため、ミリ秒レベルの測定も可能になる。また、 $\alpha$  崩壊連鎖の先では数秒の寿命の核種も多い。本研究で開発した共鳴ショットキーピックアップの性能は当初の目標を満たしていると言える。今後は稀少 RI リングでのビーム試験を待つばかりである。

#### < 引用文献 >

- ① A. Ozawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 03C009 (2012).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計15件)

- ① T. Tanaka, Y. Narikiyo, K. Morita, K. Fujita, D. Kaji, K. Morimoto, S. Yamaki, Y. Wakabayashi, K. Tanaka, M. Takeyama, A. Yoneda, H. Haba, Y. Komori, S. Yanou, B. J.-P. Gall, Z. Asfari, H. Faure, H. Hasebe, M. Huang, J. Kanaya, M. Murakami, A. Yoshida, T. Yamaguchi, F. Tokanai, T. Yoshida, S. Yamamoto, Y. Yamano, K. Watanabe, S. Ishizawa, M. Asai, R. Aono, S. Goto, K. Katori, and K. Hagino, Determination of fusion barrier distributions from quasielastic scattering cross sections towards superheavy nuclei synthesis, J. Phys. Soc. Jpn. 87 (2018) 014201/1-9(査読あり)  
doi:10.7566/JPSJ.87.014201
- ② D. Atanasov, K. Blaum, F. Bosch, C. Brandau, P. Buehler, R. B. Cakirli, X.C. Chen, I. Dillmann, T. Faestermann, B.S. Gao, H. Geissel, R. Gernhaeuser, J. Glorius, R. Grisenti, S. Hagmann, P.-M. Hillenbrand, C. Kozhuharov, G. Lane, C. Langer, C. Lederer-Woods, M. Lestinsky, S. A. Litvinov,

Yu. A. Litvinov, X.W. Ma, M. A. Najafi, F. Nolden, T. Ohtsubo, A. Ozawa, F. C. Ozturk, Z. Patyk, M. K. Pavicevic, N. Petridis, R. Reifarth, R. Sanchez, M. S. Sanjari, D. Schneider, V. Shevelko, U. Spillmann, M. Steck, T. Stoehlker, B.H. Sun, F. Suzaki, T. Suzuki, C. Trageser, S. Yu. Torilov, X.L. Tu, T. Uesaka, P. M. Walker, M. Wang, H. Weick, N. Winckler, P. J. Woods, H.S. Xu, T. Yamaguchi, X.L. Yan, Y.H. Zhang, X.H. Zhou for the ILIMA, SPARC, TWBD, and NucAR Collaborations, Studies at the border between nuclear and atomic physics: Weak decays of highly charged ions, J. Phys. Conf. Ser. 875 (2017) 012008/1-7 (査読あり)

doi:10.1088/1742-6596/875/2/012008

- ③ D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, M. Asai, K. Fujita, Z. Gan, H. Geissel, H. Hasebe, S. Hofmann, M. Huang, Y. Komori, L. Ma, J. Maurer, M. Murakami, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Tanaka, Y. Wakabayashi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, and A. Yoshida, Study of the Reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{296}\text{Lv}^*$  at RIKEN-GARIS, J. Phys. Soc. Jpn 86 (2017) 034201/1-7 (査読あり)
- doi:10.7566/JPSJ.86.034201
- ④ S. Yamaki, K. Morimoto, D. Kaji, Y. Wakabayashi, M. Takeyama, K. Tanaka, T. Tanaka, H. Baba, T. Yamaguchi, T. Suzuki, K. Morita, R&D status of pulse shape analysis for short-lived decay of superheavy elements in GARIS-II, Physical Sciences and Technology 3 (2016) 12-16 (査読あり)
- <https://phst.kaznu.kz/index.php/journal>

[学会発表] (計10件)

- ① T. Yamaguchi, Status of RIKEN Ring, NucAR collaboration meeting 2019.3.7-8, Heidelberg, Germany
- ② T. Yamaguchi, Rare-RI Ring project in RIKEN and a proposal at CSRe, Symposium on Precision Physics Experiments with Stored Highly Charged Ions at Low Energies, 2018.8.13-16, Lanzhou, China
- ③ T. Yamaguchi, Storage-ring mass spectrometry of exotic nuclei, International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, 2017.12.4-5, Wako, Japan
- ④ T. Yamaguchi, RI beam experiments with storage rings -present and future-, International Symposium on Interplay between Hadronic, Nuclear and Atomic Physics, 2016.7.6-8, Shimoda, Japan
- ⑤ S. Yamaki, R&D status on pulse shape analysis for short-lived decay of superheavy elements in GARIS-II, III International workshop “Nuclear physics and astrophysics”, 2016.4.14-16, Almaty, Kazakhstan

## 6. 研究組織

### (1)研究協力者

研究協力者氏名: 森本 幸司

ローマ字氏名: MORIMOTO, Koji

所属研究機関名: 理化学研究所・仁科加速器科学研究センター

職名: チームリーダー

研究者番号(8桁): 00332247

研究協力者氏名: 西室 国光

ローマ字氏名 : NISHIMURO, Kunimitsu

所属研究機関名 : 埼玉大学・理工学研究科

職名 : 大学院生

※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、研究者個人に帰属されます。