

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17672

研究課題名(和文) 短寿命核の精密分光実験に向けた窓なしガスセル型ビームクーラー・バンチャーの開発

研究課題名(英文) Development of a windowless gas-cell ion beam cooler-buncher for precision experiments for short-lived nuclei

研究代表者

伊藤 由太 (Ito, Yuta)

国立研究開発法人理化学研究所・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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：低エネルギー不安定核精密分光実験の基幹装置である窓なしガスセル型ビームクーラー・バンチャー(GCCB)及び付随するイオントラップの開発を目的とした。ガスセル引出し用RFカーペットの最適化及びバンチ化イオントラップの開発を行った。RFカーペットは直径200mmの大口径にして13MHzの高周波数を得られるよう回路を最適化し、高捕集能力の見込みが立った。またプリント基板を用いたバンチ化トラップを開発し、広質量範囲のイオンに対して90%以上の効率を得ることができた。GCCBは汎用性、扱いの簡便さ、高効率を持ち合わせるため、他の施設への採用も予定されている。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a window-less gas-cell cooler-buncher and an ion trap for precision experiments for low-energy unstable nuclei.

We optimized an RF carpet dedicated to the gas cell filled with 2 mbar helium gas and developed a PCB-based ion trap for ion bunching. For the RF carpet, we tuned RF resonance circuit to obtain a frequency of 13 MHz even for the large diameter of 200 mm which fully covers the cross section of the gas cell. For the ion trap, we developed thick PCB electrodes which has a printed pattern of segmented electrodes. We tested the transport and the bunching efficiency with wide mass-ranged ions (40~250) and could obtain the efficiency of more than 90%. The GCCB has universality, simple structure, and high efficiency, therefore it is planned to install for other low-energy nuclear physics facilities.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：クーラーバンチャー ガスセル イオンガイド RFカーペット イオントラップ

### 1. 研究開始当初の背景

質量測定やレーザー核分光に代表される短寿命な放射性同位体(RI)の精密分光実験において、対象 RI イオンを静止もしくはエネルギーのよく揃った状態に制御することは実験の成否に直結し、測定の質を高める上で必須である。そのため、実験装置前段において連続ビームを冷却・パルス化するためのクーラー・バンチャーが必ず要求される。

この目的のために、30 keV 程度のイオンビームを静電減速したのち希薄な He ガスで満たした線形高周波四重極(RFQ)型ビームクーラー・バンチャー(RFQCB)で冷却・バンチ化を行う手法が一般的に用いられてきた。この手法は広く使用されているにもかかわらず、大きな革新のないまま全効率は 20%程度に留まっている。要因は静電減速の際のエミッタンスの悪化、RF による横方向の閉じ込めポテンシャルの制限が挙げられ、また静電減速のために装置全体に高電圧を印可する必要性から十分な絶縁を必要とし、必然的に装置は大型 (>1 m)かつ取扱いも煩雑となる。

現在理化学研究所で始動しつつある次世代の停止・低速 RI ビーム施設 SLOWRI では、入射核破砕片分離装置 BigRIPS で物理的プロセスのみによって生成された様々な核種の高エネルギー RI ビームを、ガスセルによって汎元素的かつ速やかに低エネルギー RI ビームへと変換する。これにより、従来の低エネルギー RI ビーム生成法では難しかった元素及び半減期 100 ms 以下の短寿命 RI の研究が初めて可能となる。SLOWRI でも他の施設と同様様々な測定を行うために、クーラー・バンチャーは必須の基幹装置である。

### 2. 研究の目的

このような要請の元、より高効率かつ簡便な取扱いを実現するために、静電減速に代わってガス衝突のみによるビーム減速と高周波イオンガイド法による高速・高効率輸送に着目し、全効率の向上が見込める新たな手法として窓なしガスセル型ビームクーラー・バンチャー(GCCB)を考案した(図 1)。

GCCB では、低ガス圧(<2 mbar@77 K)の He ガスで満たされたガスセルとイオントラップの組合せにより SLOWRI からの連続ビーム(<30 keV)の冷却・バンチ化を行う。静電減速を行わないため装置はすべて接地電

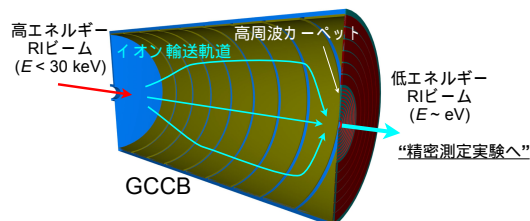


図 2: GCCB の概念図。ビームは 2 mm 程度の入射穴よりガスセルに導入され、静電及び高周波イオンガイドによって高真空領域へと輸送される。

位で使用する事ができ簡易かつ従来の RFQCB と比べ約半分のサイズ(□0.5 m)とコンパクトでもある。

本研究では GCCB の性能評価とイオントラップの高効率化を目的とした。特に大アクセプタンスかつ高効率でビームを捕集するための RF カーペット( 200 mm)の開発と 100%近い効率を持つ RFQ イオンガイドの開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、

1. 低ガス圧下での RF カーペットの最適な構成を SIMION によるイオン軌道シミュレーションによって見出す。

2. 1 を参考に大面積 RF カーペットを製作し、輸送に最適な高周波条件と 100%近い輸送効率が得られることをイオン電流によって確認する。

3. 抵抗分割型の RFQ イオントラップを開発し、RI を用いて輸送・トラップ効率の評価を行う。

という手順で行った。3 のイオントラップの開発では、SLOWRI からの RI ビームを用いるのではなく、核融合反応で生成した Fr イオンを高圧(100 mbar)のガスセルで減速し、引き出した連続ビームを用いて評価を行った。

### 4. 研究成果

高ガス圧下(約 100 mbar)からのイオン引き出し手法として開発されてきた RF カーペットを低ガス圧下(約 2 mbar)で用いることは今回が初めての試みである。従来 RF カーペットの電極間隔を小さくすることでより大きな実効反発力を得ることができるとされてきた。しかしながら、本研究での詳細なシミュレーションと実験によって、低ガス圧下では He ガスとの衝突頻度が下がるため、電極間隔が小さいとイオンの運動が不安定となり効率良く輸送されないことがわかった。低ガス圧下では逆に電極間隔を大きくし、イオンの運動の安定条件を満たすことがより重要であることを見出した。シミュレーションを基に、電極ピッチ 0.32 mm・引出し穴径 0.62 mm・外径 80 mm の RF カーペットを試作した(図 2)。

RF カーペットでのイオンの輸送方式として、進行波型を採用した。これはイオンに実

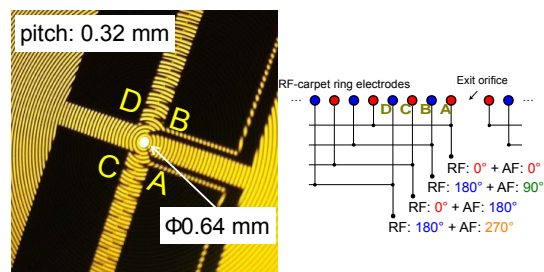


図 1: 製作した RF カーペットと RF・AF 電圧回路の模式図

効反発力を与える RF(隣接電極間で 180 度の位相差)に、イオンの輸送を行う AF(隣接電極間で 90 度の位相差)を進行波として重畳させることで、まるで波乗りのようにイオンを輸送する方式である(図 2)。これにより、従来の抵抗分割型と同様かそれ以上の高速輸送を放電に制限されず行える利点がある。

この RF カーペットを用いて、K イオンのイオン電流によって輸送効率を測定した。5~2 mbar までではほぼ 100%の輸送効率を得られ、さらに低い 1 mbar においても 60~100%と十分高い輸送効率を得られた。これはシミュレーション結果ともよく一致しており、低ガス圧下での RF カーペットの適用条件を初めて明らかにすることができた。

この結果を基に大面積 RF カーペット(外径 200 mm)をピッチ 0.64 mm にて製作した。現在までに 13 MHz・200 Vpp の RF 条件が得られており、イオン輸送には十分と考えられる。これを基に、イオン電流による性能評価の準備を現在進めている。

一方で、抵抗分割型イオントラップの開発については、2 つのタイプの開発、性能評価を行った。1 つは電極自体を Si の抵抗体で構成したもの、もう 1 つは抵抗分割パターンの厚いプリント基板で構成したものである。

前者では電極全体が抵抗体であることにより、なめらかで連続的な電位勾配が構成できることから理想的である。Fr イオンを用いて試作したイオントラップの効率測定を行なったところ、90%近い効率を得られた。ところが長時間の使用を行なったところ、次第に挙動が不安定となり、最終的には破損に至った。原因は Si 電極とフィードスルー間の接着が RF の熱で劣化し破損に至ったと推測された。この手法は理想的ではあるが未だ構造上難点があることがわかった。

後者ではプリント基盤の特徴を生かし、分割パターンを細かく取ることでできるだけなめらかな電位勾配を実現できるよう工夫した。同様の Fr イオンによる効率測定では 95%以上の効率を得られた。また長期間の使用にも耐え、現状最適手法であると言える。また 100 pA 以上の大量のイオンに対しても輸送・バンチ化効率が変わらないことを確認し、大量の不純物イオンが混在するような条件下においても性能が保証されることを実証した。

以上により、GCCB で捕集されたイオンは 90%以上の効率で輸送・バンチ化されることが保証された。現在イオンビームの入射・捕集を評価するための準備を進めており、近いうちに全効率の評価を通して RFQCB に対する GCCB の優位性を実証したい。

##### 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 3 件)

“First Online Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Measurements of Isobar Chains Produced by Fusion-Evaporation Reactions: Toward Identification of Super-Heavy Elements via Mass Spectroscopy”, P. Schury, M. Wada, Y. Ito (他 18 名), Phys. Rev. C 95, 011305 (2017) (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevC.95.011305

“Ion Preparation Systems for Low-Energy Experiments at SLOWRI”, Y. Ito (他 6 名), JPS Conf. Proc., 6, 030112, (2015) (査読有)

DOI: 10.7566/JPSCP.6.030112

“多重反射型飛行時間測定式質量分析器 MRTOF による短寿命核精密原子質量測定”, 伊藤由太, 原子核研究 59-2, 25 (2015) (査読無)

[学会発表](計 5 件)

“MRTOF 質量分析器による八重極変形核  $^{223,224}\text{Th}$  の精密原子質量測定”, 伊藤由太, 日本物理学会 27pSH-5, 大阪府・豊中市, 2017 年 3 月 17-20 日

“First Online Mass Measurements of Isobar Chains Via MRTOF-MS: Toward Direct Identification of SHE”, Y. Ito, The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016), Adelaide, Australia (11-16 Sep. 2016)

“多重反射型飛行時間式質量分析器 MRTOF による短寿命核精密原子質量測定”, 伊藤由太, 日本物理学会 26aSB-3 (招待講演), 大阪府・大阪市, 2015 年 9 月 25-28 日

“SHE-Mass プロジェクトのための低速 SHE ビーム生成装置の開発”, 伊藤由太, 日本物理学会 27pSH-5, 大阪府・大阪市, 2015 年 9 月 25-28 日

“Development of a Gas Cell System for SHE-Mass Project at RIKEN”, Y. Ito, The fifth international conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN15), Fukushima, Japan (25-29 May 2015)

[図書](計 0 件)

[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

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

伊藤 由太 (Yuta Ito)  
国立研究開発法人理化学研究所・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

##### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4)研究協力者

( )