

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14311

研究課題名（和文）稀少RIリングにおける質量測定とその高効率化

研究課題名（英文）Developments of high efficient system for mass measurements at Rare-RI Ring

研究代表者

阿部 康志（Abe, Yasushi）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 物理工学部・研究員（任常）

研究者番号：10755531

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は稀少RIリングにおける質量測定実験において、ビームライン上流の検出器から得られる飛行時間及びエネルギー損失の情報を用いることにより、蓄積リングへ入射する原子核の種類を選択することにより、実験の高効率化を図ることである。粒子選択を行うためのシステム開発は順調に進み、1種類の原子核の選択が可能となった。また製作したモジュールを複数台使用することにより、自由度の高い粒子選択が可能となり、このシステムを用いてNi同位体の質量測定を実施することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、稀少RIリング実験における高効率化を図るために、粒子選択システムの開発を行い、Ni同位体の質量測定を実施した。得られたデータは原子核構造の理解に役立つデータとなる。また粒子選択システムについては稀少RIリングの実験のみに限らず、様々な原子核が混じっている不安定核ビーム実験での利用も可能であると考えられ、原子核実験の効率化が期待される。

研究成果の概要（英文）：Purpose of this research is an improvement of efficiency in mass measurement at Rare-RI Ring (R3) by using a particle selection system. This system selects particles to be injected into R3 using the flight time and energy loss information obtained from detectors at beamline.

Development of the particle selection system have been succeeded smoothly and we have been developed some modules. We can select the particles flexibly by using this system. Mass measurement of Ni isotopes at R3 using this system was performed.

研究分野：原子核実験

キーワード：質量測定 蓄積リング 不安定核 粒子選択

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核物理学において、中性子過剰領域においては従来の魔法数(2, 8, 20, 28...)の消失や新たな魔法数(6, 16, 32, 34...など)の出現といった特異な事象が確認されてきている。近年の研究では陽子数及び中性子数がともに魔法数であるような原子核への関心が高く Ni 同位体や Sn 同位体が注目されている。しかしながら、これらの不安定核は安定核の領域から遠く離れたものであり、生成することが難しく(収量が非常に少なく)、また短寿命(数ミリ秒程度)であるために、実験的な研究は困難なものであった。このような原子核に対して質量測定実験を可能とするために、理化学研究所の RI ビームファクトリー(RIBF)において、「稀少 RI リング」と呼ばれる重イオン蓄積リングが開発・建設された。この稀少 RI リングは目的とする不安定核を 1 つずつリング内に蓄積することができ、また収量が少なくとも 1 ミリ秒以内の短時間で質量を高精度で測定することが可能である。図 1 に稀少 RI リングにおける質量測定の概念図を示したが、F3 と呼ばれる焦点面に設置された検出器の信号を用いてリング内のキッカー電磁石を動作させることにより、F3 で検出した原子核のみを入射する仕組み(個別入射法)を採用することで、上記のような測定が可能となっている。

しかしながら、この個別入射法においてキッカー電磁石は 100 Hz 程度の繰り返しが限度であり、F3 で検出された原子核の純度に応じた比率でしか、リングへ入射することができない。そのため、中性子過剰領域の原子核について実験を行うにあたっては、安定核に近い原子核がたくさん生成されてしまい、目的の原子核のデータを収集するのに膨大な時間が必要となってしまう問題があった。

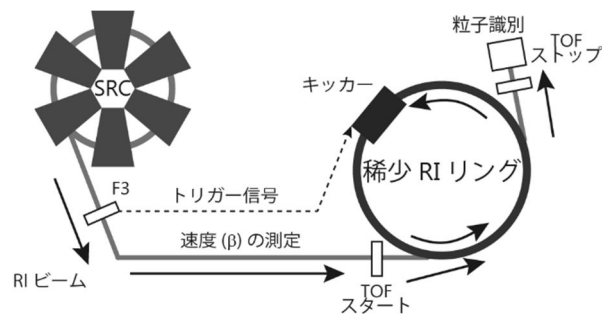


図 1. 稀少 RI リングにおける質量測定の概念図

2. 研究の目的

本研究では、稀少 RI リングにおける個別入射法に対して、飛行時間及びエネルギー損失の情報を用いて、入射する原子核を選択するシステムを導入することにより、中性子過剰領域に存在するような生成量が小さな原子核についても効率的に実験が実施できるようにすることである。さらには関心の高い Ni 同位体について質量測定を行い、魔法数性について質量の観点から明らかにする。

3. 研究の方法

原子核の選択に関しては、不安定核ビーム実験における粒子識別法を参考に仕組み開発を行う。不安定核ビーム実験において、ビームライン上では偏向電磁石等による磁気剛性による分離などを行い、飛行時間やエネルギー損失といった情報から原子核の種類を識別する。飛行時間は質量電荷比、エネルギー損失は陽子数に依存して変化するため、これらの情報を用いて粒子を選択することにした。粒子識別は検出器からのアナログ信号をデジタル化してからデータを取得し、その後ソフトウェア解析により識別するが、本研究の個別入射法に対して適用するにはこのプロセスでは時間がかかりすぎてしまい適用できない。F3 における検出器信号発生からキッカー電磁石のシステムに信号が到達する時間は粒子の到着より短い必要があり、信号伝達時間及びキッカーの励磁速度を考慮すると、個別入射法に対して粒子選択を行うために許される時間は 100 ns 以下に制限されている。そのため、電気回路処理のみで粒子選択を行うこととした。

システム開発は段階的に行い、まずは飛行時間による選択について開発を行う。飛行時間情報は F3 に設置されているプラスチックシンチレータ検出器の信号を用いる。ただし、単体では時間情報とならないため、起点となる信号として加速器に使用されている高周波信号を用いることとした。

エネルギー損失については、F3 では電離箱や半導体検出器などが用いられるが、検出器から得られる信号が遅く、時間の制約から使用することは困難である。プラスチックシンチレータを通常より厚いものを用意することで分解能を向上させ、信号の波高の違いからエネルギー損失の違いが得られるかどうか検証を行い、この信号を用いてエネルギー損失(陽子数)について選択することとした。

4. 研究成果

(1) 飛行時間による粒子の選択

飛行時間による選択が可能であるかどうか実際のビームを用いて検証を行った。検証では市販されている標準的な NIM モジュールを用いて原理実証を行った。具体的には高周波信号と F3 のプラスチックシンチレータの信号との Coincidence(または veto)による回路処理により選択(または除去)を行った。その際、高周波信号のタイミングは短い同軸ケーブル(伝送時間 0.5~10 ns)により調整した。この検証から飛行時間による粒子の選択が可能であることが証明された。

(2) エネルギー損失による粒子の選択

こちらの実証も加速器からのビームを用いて実施した。まずはプラスチックシンチレータの厚みを決定するため、いくつかの厚みに対して照射実験を行い、Ni 領域の実験において波高による分離が可能な厚みを決定した。波高の選択には下限と上限の閾値を調整できるウィンドウタイプのディスクリミネータを用いた。この検証実験から 2 mm 厚のプラスチックシンチレータを用いることで粒子選択が可能であることが明らかとなった。

(3) 専用モジュールの開発

飛行時間及びエネルギー損失によるそれぞれの粒子選択が可能であることが実証できたため、両者を組み合わせて 1 種の原子核の選択が可能となるように開発を行った。実証実験では市販のモジュールを組み合わせていたが、台数が多くなり、各モジュールでの遅延時間が大きくなりすぎることやビームライン脇に設置する必要があり、ビーム利用中に回路調整ができないなどの問題があった。そのため、これらの問題を解決するために専用モジュールの開発を行った。モジュールには Coincidence/Veto 入力及び切り替え機能、波高の下限・上限の閾値調整機能に加えて出力レート調整機能を実装した。出力レートについては 1/n の低減ではなく、一定時間出力を抑制する方式にて実施している。これはキッカー電磁石が受け付けることが可能な 100 Hz を超えないようにするためである。さらにはこれらの各パラメータ調整は Ethernet を通じて調整できるようになっている。これによりビームによる信号を確認しながら最適なパラメータ調整が可能となった。

またこのモジュールを 2 台製作し、それぞれモジュールにより別の原子核を選択した信号を混ぜ合わせることで、任意の原子核を任意の割合で入射することも可能とした。このそれぞれの信号を混ぜ合わせるモジュールについても新規に開発し、最大 4 入力まで対応し、使用する信号は遠隔で選択できるようになっている。そのため、調整段階でいくつかのパターンを用意しておけば、必要に応じて使用するチャンネルを切り替えるだけで核種の切り替えが可能となった。

(4) 質量測定実験の実施

粒子選択システムを用いることが可能となったので、Ni 同位体の質量測定実験を実施した。測定対象は ^{74}Ni 及び ^{75}Ni とした。ビームライン及び蓄積リングは ^{76}Zn に最適化された磁場設定とした。図 2 に ^{74}Ni の測定において使用した粒子選択システムの効果を示した。(a) は粒子選択を行わなかった場合の粒子識別結果である。 ^{77}Ga の収量が一番多い状態である。(b) については、収量の多い ^{77}Ga を除外することで、 ^{76}Zn の純度を向上させ、ビームラインや蓄積リングの調整に使用した。この方法により調整時間の短縮に成功した。さらに(c)は ^{74}Ni の本測定時の粒子選択結果である。これは 2 台のモジュールを組み合わせ、 ^{74}Ni に近い原子核の純度を向上させるとともに、質量の参照となる原子核もある程度入射するといった状況を作り出している。この際、本命の原子核を除去してしまわないようにするため、二つの領域をオーバーラップさせる必要がある。この粒子選択システムにより中性子過剰領域の原子核のイベントデータの収集効率が向上し、 ^{74}Ni 及び ^{75}Ni のデータ取得に成功した。現在は得られたデータから質量の解析を進めている。

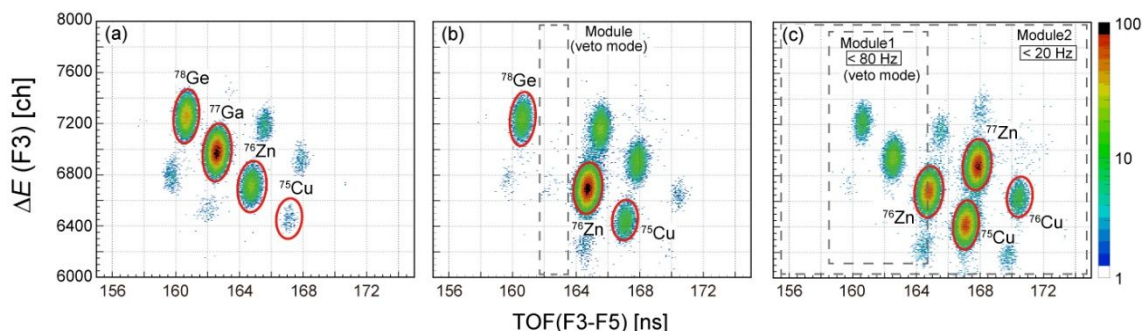


図 2. (a) ビームラインを通過している原子核の粒子識別図。縦軸がエネルギー損失を示し、横軸が飛行時間を示している。(b) 粒子選択システムにより ^{77}Ge を除去した場合の粒子識別図。(c) 二つのモジュールにより点線部分をそれぞれ選択し、記載した出力レートに調整した際の粒子識別図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Abe, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, D. Nagae, F. Suzaki, and for the Rare RI Ring collaboration	4. 巻 52
2. 論文標題 Upgrade of particle selection system for Rare RI Ring experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report 2018	6. 最初と最後の頁 15
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 阿部康志
2. 発表標題 稀少RIリング実験における単一核種選択法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（九州大学伊都キャンパス）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口由高
2. 発表標題 稀少RIリングにおける質量測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（九州大学伊都キャンパス）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 洲崎ふみ
2. 発表標題 単一粒子を用いた稀少RIリングの等時性測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（九州大学伊都キャンパス）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井もも
2. 発表標題 稀少RIリングにおける中性子過剰Ni領域の質量測定
3. 学会等名 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (北海道大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Nagae
2. 発表標題 Demonstration of Mass Measurement Using Rare-RI Ring
3. 学会等名 IX international Symposium on Exotic Nuclei (EXON2018) (Petrozavodsk, Russia) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamaguchi
2. 発表標題 Rare-RI Ring project in RIKEN
3. 学会等名 Symposium on "Precision Physics Experiments with Stored Highly Charged Ions at Low Energies (Lanzhou, China) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasushi Abe
2. 発表標題 Analysis of isochronism in Rare-RI Ring
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 阿部康志
2. 発表標題 理研RIBFにおける稀少RIリングの現状(2)
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019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