

理研 RIBF における稀少 RI リングの現状 (2) PRESENT STATUS OF RARE-RI RING AT RIKEN RIBF (2)

阿部康志^{*A, B)}、山口由高^{B)}、上坂友洋^{B)}、Naimi Sarah^{B)} 洲崎ふみ^{B, C)}、長江大輔^{B, D)}、
Li Hongfu^{B, E)}、大甕舜一朗^{F)}、山口貴之^{F)}、荒川裕樹^{F)}、猪俣玖美^{F)}、小林孝彰^{F)}、西室国光^{F)}、稲田康人^{F)}、
坂上護^{F)}、細井駿^{F)}、横田健次郎^{F)}、梶木大輔^{F)}、濱川大貴^{F)}、竇文博^{F)}、小沢顕^{G)}、森口哲朗^{G)}、
向井もも^{G)}、上岡大起^{G)}、景澤怜央^{G)}、道正新一郎^{H)}、大田晋輔^{H)}、北村徳隆^{H)}、増岡翔一朗^{H)}、鈴木伸司^{E)}、
Ge Zhuang^{E)}、Wang Qian^{E)}、Wang Kailong^{D)}、Litvinov A Yury^{J)}、若杉昌徳^{B, K)}
Yasushi Abe^{*A, B)}、Yoshitaka Yamaguchi^{B)}、Tomohiro Uesaka^{B)}、Sarah Naimi^{B)}、Fumi Suzaki^{B, C)}、
Daisuke Nagae^{B, D)}、Hongfu Li^{B, E)}、Syunichiro Omika^{F)}、Takayuki Yamaguchi^{F)}、Hiroki Arakawa^{F)}、
Kumi Inomata^{F)}、Takaaki Kobayashi^{F)}、Kunimitsu Nishimuro^{F)}、Yasuto Inada^{F)}、Mamoru Sakaue^{F)}、
Shun Hosoi^{F)}、Kenjiro Yokota^{F)}、Daisuke Kajiki^{F)}、Daiki Hamakawa^{F)}、Wenbo Dou^{F)}、Akira Ozawa^{G)}、
Tetsuaki Moriguchi^{G)}、Momo Mukai^{G)}、Daiki Kamioka^{G)}、Reo Kagesawa^{G)}、Shin'ichiro Michimasa^{H)}、Shinsuke Ota^{H)}、
Noritaka Kitamura^{H)}、Shoichiro Masuoka^{H)}、Shinji Suzuki^{E)}、Zhuang Ge^{E)}、Qian Wang^{E)}、Kailong Wang^{D)}、
Yury A Litvinov^{J)}、Masanori Wakasugi^{B, K)}

^{A)}Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences (NIRS),

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{B)}RIKEN Nishina Center, ^{C)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{D)}Kyushu University

^{E)}IMP, ^{F)}Saitama University, ^{G)}Univ. of Tsukuba, ^{H)}CNS, Univ. of Tokyo, ^{I)}CMU, ^{J)}GSI, ^{K)}ICR, Kyoto University

Abstract

We constructed the isochronous storage ring named "Rare-RI Ring (R3)" at RIKEN RI Beam Factory. Recently, we demonstrated a high-precision mass-measurement capability for the extremely short-lived and rarely-produced exotic nuclei by means of the time-of-flight based mass-spectrometry using R3. We measured one-by-one the revolution times for accepted nuclei including not only the mass-reference nucleus but also the unknown-mass nuclei. One of the mass-reference nuclei circulates under the isochronous condition. The momentum dependence of the revolution times of stored nuclei was corrected by using their velocities measured in the beam transport line before the injection. Consequently, the mass-to-charge ratios are proportional to the corrected revolution time, and the mass precision is ensured by the precision of the isochronism. We have introduced an event-by-event technique for the first time in the storage ring experiment to make precision mass measurement for extremely rarely produced nuclei possible. That was established with a newly developed self-triggered injection technique and an in-flight particle identification technique. Here, we report on the present status of R3.

1. はじめに

原子核物理学において、金やウランなど鉄より重い元素がいかにして作られたか(重元素合成過程)は未だに解明されておらず、解き明かすべき重要課題の一つである。重元素合成過程の有力候補である「r過程」では安定核より遠く離れた中性子過剰な領域に位置する不安定核を経由する。r過程領域の不安定核は世界最高強度を誇るRIBFの加速器をもってしても1日数個以下と稀にしか生成することができず、また生成したとしても極短寿命であることがほとんどであるため、その原子核の物理的な研究は従来の手法で遂行することは困難であった。最も基本的な物理量である質量に着目し、このような不安定核の質量を測定することを主目的とした装置の設計・開発を行い、理化学研究所、仁科加速器科学研究センター(RNC)のRIビームファクトリー(RIBF)に「稀少RIリング」を建設した。

稀少RIリングはサイクロトロンが設計のベースと

なっており、運動量及びエミッタンスが広がってしまうRIビームを受け入れられるようなアクセプタンスを有しており、さらに統計に頼らず質量精度(ppmオーダー)を保証するために高精度の等時性磁場を形成することが可能となっている。さらに稀少RIリングでは測定したい粒子に狙いを定めてリングへ入射する個別入射方式[1]を世界で初めて導入しており、データは1粒子毎に取得することが可能となっている。そのため、蓄積リングは原則パルス運転であるためにサイクロトロン施設との組み合わせは効率の面から不利であると考えられてきたが、このシステムにより蓄積リングの運転周期より低いレートでしか生成されない粒子に対しては最も効率的な測定が可能となっている。

稀少RIリングは非常に長い期間にわたり検討を重ね、2012年から建設が始まり、リング用のステージ、天井クレーン、電力系及び冷却系などの付帯設備を整えた[2]。さらに電磁石の据え付けなども行き、2013年には再利用である電磁石及び電源の健全性確認や真空機器の整備や制御系の整備を進めた[3]。2014年にはスタンドアロンで動作及び性能を確認するために²⁴¹Am線源からのα線を用いた試験を実施した[4]。その後2015年からビー

* abe.yasushi@qst.go.jp

ムコミッションングを開始し、2018年までに4度にわたりビームを用いたマシンスタディを重ねた。そしてついに2019年には本稼働となり、質量が未だ測定されていなかった不安定核についての物理実験を開始し、現在に至っている。

2. 質量測定原理

稀少 RI リングでの質量測定は測定対象となる粒子 (質量 m_1 , 荷数 q_1) とその粒子のリファレンスとなる粒子 (m_0, q_0) を同じ条件の下でそれぞれの飛行時間を測定することで相対的に導出する [5]。この二つの粒子が同じ磁気剛性であれば、同じ磁場構造を飛行する限りその軌道長は同じになるので、

$$\frac{m_0}{q_0} \gamma_0 \beta_0 = \frac{m_1}{q_1} \gamma_1 \beta_1, T_0 \beta_0 = T_1 \beta_1 \quad (1)$$

の関係が成り立つ。ここで、 $\gamma_{0,1}$ はローレンツ因子であり、 $\beta_{0,1}$ は粒子の速度、 $T_{0,1}$ は粒子の飛行時間 (周回時間) を表す。この関係から測定対象である粒子の質量は

$$\frac{m_1}{q_1} = \frac{m_0}{q_0} \frac{T_1}{T_0} \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - (T_1/T_0)^2 \beta_1^2}} \quad (2)$$

により求めることができる。すなわち、実際の測定において各粒子の飛行時間 ($T_{0,1}$) と測定対象粒子の速度 (β_1) の三つを測定するだけでよい。また測定した質量の相対精度は

$$\frac{\delta(m_1/q_1)}{m_1/q_1} = \frac{\delta(m_0/q_0)}{m_0/q_0} + k_1 \frac{\delta(T_1/T_0)}{T_1/T_0} + k_2 \frac{\delta\beta_1}{\beta_1}, \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{1}{1 - (T_1/T_0)^2 \beta_1^2},$$

$$k_2 = -\frac{\beta_1^2}{1 - \beta_1^2} + \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2 \frac{\beta_1^2}{1 - (T_1/T_0)^2 \beta_1^2}.$$

のように表され、質量を ppm オーダーでの測定するためには、各項の寄与を ppm オーダー以下に抑えなければならない。この関係からはリファレンスとなる粒子には他の手法により高精度で質量が測定されている粒子を用いることに加えて、等時性を ppm オーダーで保証しなければならない。さらに、質量電荷比 (m/q) の違いが 1% 以下である場合には、速度 β_1 を 10^{-4} の精度で測定し、また飛行時間についても ppm のオーダーで測定しなければならない。稀少 RI リングとリングに至るまでの RIBF のビームラインをうまく活用することにより、これらの条件を満たす測定が可能となっている。

3. 稀少 RI リング

稀少 RI リングにおける質量測定 の概念図を Fig. 1 に示す。稀少 RI リングは超伝導リングサイクロトロン (SRC) 及び超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) の後段に位置している。BigRIPS の F0 に不安定核を生成するための標的が設置されおり、その後の各焦点面には計測に必要な検出器がそれぞれ設置されている。不安定核が生成された後、磁気剛性などの物理量に従って RI を

分離し、F2 や F3 といった焦点面に設置された検出器を用いて、粒子識別 (PI) を行うとともに個別入射を行うために必要なキッカー電磁石を励磁するためのトリガー信号を生成する。この際、後述する粒子選択システムにより、BigRIPS で分離された粒子の中から必要な種類の原子核のみを選択するまたは排除するといったことも可能である。稀少 RI リングに到達するまでのビームラインにおいては、時間分解能が良く、エネルギー損失の小さな検出器により速度 β の測定を行う。粒子がキッカー電磁石のエリアに到達した際には、先ほどのトリガー信号と同期してキッカー電磁石が励磁され、入射される (個別入射)。その後、等時性が高精度で保証されたリング内を 2000 周ほど周回し、同一のキッカー電磁石を励磁させることにより取り出される。リングの入口と出口に設置された飛行時間検出器により各粒子の飛行時間の測定が行われる。さらに、出口部分には粒子識別を再確認するための検出器群が設置されている。

4. ビームコミッションング

2015 年 6 月には ^{78}Kr を用いたビームコミッションング初めて実施した。主な目的は、1 粒子毎の個別入射・周回・取出しの確認、トリムコイルによる等時性調整の検証及び共鳴空洞型ショットキーピックアップの性能試験などである。その後 2015 年 12 月には ^{48}Ca ビームから生成した二次ビームを用いたコミッションング、2016 年 11 月には ^{238}U ビームから生成した ^{78}Ge 近傍の RI ビームを用いたコミッションングを実施した。これらのコミッションングでは複数種の原子核における個別入射・周回・取出しの確認や質量測定原理の実証を行った。そして、2017 年 11 月には 3 度目のコミッションングと同じビームを用いて、リングの性能向上に向けたマシンスタディを行った。

4.1 等時性

稀少 RI リングは 4 台の偏向電磁石で 1 セクターが構成されており、全 6 セクターとそれぞれが直線部で繋がることによりリングが形成されている。この 1 セクターの両端に位置する 12 台の偏向電磁石には 10 本のトリムコイルが装着されており、10 台の電源によって磁場形状を制御している。このトリムコイルの調整はビームを用いた測定を繰り返しながら行う。粒子の収量が十分な場合においては、リング部分での飛行時間 (または周回時間) と粒子の運動量の相関を示す 2 次元プロットを活用している。Figure 2 は 2017 年 11 月の実験にて得られた ^{78}Ge についての結果を示している。横軸が粒子の運動量を表し、縦軸が粒子の周回時間を表している。相関がわずかに残っているが、周回時間について射影しガウシアンフィッティングを行った結果が Fig. 2 (b) であり、このスペクトルの幅から等時性の精度を評価すると、3.7 ppm 程度と推定することができる。これよりさらに高精度の等時性に調整するためにトリムコイルの調整を何度か試しているが、現状では最適解が見つかっていない。その要因としては、環境温度の変化や電源性能による磁場変動なども影響するためにトリムコイルの調整だけでは到達できない領域に近づいているためと考えられており、今後改善すべき要素については調査を進めている。

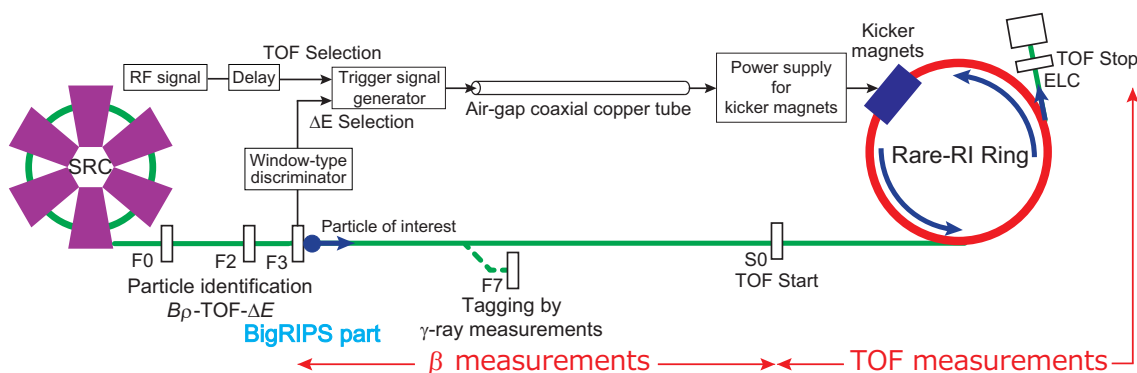


Figure 1: Schematic diagram of the mass measurement scheme at Rare-RI Ring (R3). Particle identification is performed from F0 to F3 in combination with tagging by γ -ray measurements in F7. The broken line beamline is used only during the particle identifications. The trigger-signal generator processes the F3 plastic scintillation detector signal together with a gate signal for isotope selection. A RF driving cyclotrons gives the timing gate for TOF selection. Analog signal of the plastic scintillation detector gives the ΔE selection gate by using window-type discriminator circuit. Time-of-flight (TOF) measurements at the R3 under a precise isochronous condition is essential to relatively determine the masses of interested particles. The flight distance is around 120 km after 2000 turns. Velocity (β) required for correction can be measured independently of the TOF measurement before injection.

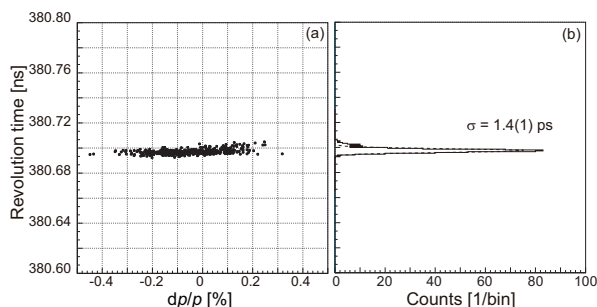


Figure 2: (a) Correlations between revolution time and the momentum difference relative to that defined by the beam transport line for ^{78}Ge . (b) Distribution of revolution time of ^{78}Ge with Gaussian fitting (broken line).

4.2 粒子選択システム

稀少 RI リングの特徴の一つである個別入射方式であるが、この方式に対してビームラインにおける粒子識別の機能を組み合わせることで、任意の粒子を選んで入射することを可能にした。粒子識別は粒子の様々な物理量の測定により行われるが、このシステムでは飛行時間が質量電荷比 (m/q) に依存しており、エネルギー損失 (ΔE) が陽子数 (Z) に依存していることを利用している。

Figure 3(a) は ^{78}Ge 原子核近傍の粒子について飛行時間及びエネルギー損失による粒子識別のプロットである。この図における 1 つの島が 1 つの種類の原子核に対応している。この中から任意の粒子を選択するために、我々は飛行時間情報とエネルギー損失情報に対して制限を加えることにした。まず時間情報であるが、粒子の到達は加速器の高周波とも同期することとなるため、加速器の高周波信号と粒子が BigRIPS の F3 にて生成する時間信号の間で論理処理を行うことで横軸の選択を行う。エ

ネルギー損失については、プラスチックシンチレータの信号波形に対して、ディスクリミネータの閾値を低い側と高い側の 2 種類を設定することで、縦軸の選択を行う。この二つの機能を組み合わせることで、1 種の原子核を選ぶことが原理的に可能となる。ただ、このような機能を標準の NIM モジュール等で行った場合、信号処理に時間を要してしまい、キッカー電磁石の励磁が粒子到達に間に合わなくなってしまう。そこで、上記の機能を有し、高速な信号処理を行うモジュールの開発を行った。このモジュールにはイーサネットを通じた遠隔操作機能も搭載している。これは信号ケーブルにより遅延などを防ぐため、モジュールはビームライン脇に設置する必要があるためである。

このモジュールを用いて粒子選択機能を確認した後、さらに物理実験に対応するために粒子の取量分布を調整するための機能についても開発した。これは上記のモジュールを複数台用意してそれぞれのモジュールにて粒子を選択した後、各モジュールの出力レートを調整して足し合わせた処理を行うことで実現している。この機能を用いた測定の一例が Fig. 3 の (b) 及び (c) である。この実験では ^{76}Zn に対して稀少 RI リングの等時性などの調整を行い、さらに中性子過剰な原子核の質量測定を目的としていたため、機器の調整時には Fig. 3 (b) のような設定により ^{76}Zn の純度を向上させることにより、効率的に時間を使用することができた。質量測定を行う際には対象粒子の純度を高くし、参照となる他の粒子の純度を下げ、より効率的にデータを収集できるように設定した。

この粒子選択システムについてはさらにモジュールの台数を増やすことで、より自由度の高い選択が可能となるとともに、稀少 RI リングの実験だけでなく生成されることが稀な原子核を対象とした他の物理実験にも利用が可能となるため、今後も開発を継続する予定である。

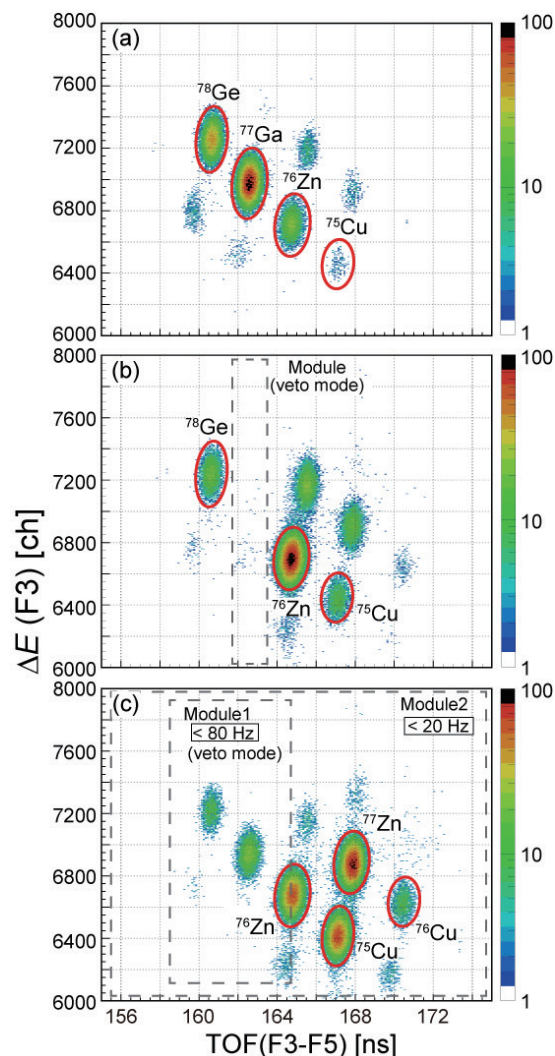


Figure 3: (a) Typical PID plot of the secondary particles with TOF and ΔE . (b) Ga isotope was ridded by the selection system. (c) Typical example of abundance control. Broken-lines show the time window and frequency of the output rate set by each module.

4.3 質量測定と決定精度

稀少 RI リングでは 3 回目のビームコミッショニングにおいて、いくつかの不安定核を用いて質量測定原理の実証と装置性能の評価を行った。等時性の調整には ^{78}Ge を選択し、同中性子数の原子核 (^{79}As , ^{77}Ga , ^{76}Zn , ^{75}Cu) をリングへ入射し、質量の導出を試みた。これらの原子核はすでに質量がよくわかっているため、文献値 (AME2016 [6]) と比較を行うことで、本原理の確からしさを検証することができる。現状における文献値とのずれは ^{79}As の場合では 3×10^{-6} であり、許容できる値となっている。 m/q が参照の原子核から大きく異なる場合には、このずれが増加する傾向にあり、精度についても悪くなる傾向が見られている。これらの原因については各粒子の β_1 の測定精度なども考えられるが詳細については現在も解析中である。

5. まとめ

2012 年に建設が始まり、2014 年のオフライン試験にはオフライン試験を終えた。その後 2015 年から順次ビームコミッショニングを実施し、粒子選択機能を持った個別入射という世界初の技術を用いた入射手法を確立し、サイクロロン施設における重イオンの効率的な蓄積に成功した。さらに、1 粒子ずつ測定を行うことにより、粒子識別を事前に行った上で質量を決定することが可能となっている。また、等時性についても精度を徐々に向上させており、現在は ppm オーダーに到達している。さらなる精度向上にむけて、環境温度や電源性能などの調査を進めている。2018 年には本装置を用いた物理実験が 2 件実施され、数種類の原子核については新規データとなる見込みであり、鋭意解析中である。2019 年現在、物理実験課題は上記のものを含め 3 件が認められており、これから大いに活用されることと思われる。さらには質量測定だけでなく、本装置の特色を活用した蓄積リング実験についても検討が進められており、さらに広い分野での展開が期待されている。

謝辞

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP25105506, JP26287036, JP16K13799, JP15H00830, JP17H01123, JP17K14311, JP18H03695. YAL acknowledges the support by the European Research Council (ERC) under the EU Horizon 2020 research and innovation program (ERCCG 682841 “ASTRUM”)

参考文献

- [1] I. Meshkov *et al.*, “Individual rare radioactive ion injection, cooling and storage in a ring”, Nucl. Instrum. and Methods A523 (2004) 262.
- [2] T. Fujinawa *et al.*, “UTILITIES FOR THE RARE-RI RING OF THE RIKEN RI-BEAM FACTORY (RIBF)” Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [3] Y. Yamaguchi *et al.*, “PRESENT STATUS OF RARE-RI RING AT RIKEN RIBF”, Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [4] Y. Abe *et al.*, “Isochronous field study of the Rare-RI Ring”, Phys. Scr. T166 (2015) 014047.
- [5] A. Ozawa *et al.*, “The rare-RI ring” Prog. Theor. Exp. Phys (2012), 03C009.
- [6] M. Wang *et al.*, “The AME2016 atomic mass evaluation”, Chin. Phys. C 41 (2016) 030003.