

話 題

理研 RI ビームファクトリー稀少 RI リング – 最近の進展 –

山口 由高^{*1}・若杉 昌徳^{*1}・阿部 康志^{*1}・洲崎 ふみ^{*1}・長江 大輔^{*1}・大甕 舜一郎^{*1,2}
Sarah NAIMI^{*1}・Zhuang GE^{*1,2}・山口 貴之^{*2,3}・小沢 顕^{*4}・上坂 友洋^{*1}

Recent Progress on the Rare-RI Ring at RIKEN RI Beam Factory

Yoshitaka YAMAGUCHI^{*1}, Masanori WAKASUGI^{*1}, Yasushi ABE^{*1}, Fumi SUZAKI^{*1}, Daisuke NAGAE^{*1}
Syun-ichiro OMIKA^{*1,2}, Sarah NAIMI^{*1}, Zhuang GE^{*1,2}, Takayuki YAMAGUCHI^{*2,3}
Akira OZAWA^{*4} and Tomohiro UESAKA^{*1}

Abstract

We recently conducted the performance test for the Rare-RI Ring (R3) using exotic nuclei. A novel injection method, isotope-selectable self-triggered injection, was established. An isochronous condition for the reference nuclide was tuned in an order of ppm. We succeeded in extracting several exotic nuclei from the R3, and are verifying the principle of the mass determination.

1. はじめに

本学会誌 12 巻 3 号では、 α 線源を用いたオフライン試験及びビームコミッショニングを通じて、各機器の仕様・役割などを紹介させていただいた。本装置の基本性能が確認できてからもうすぐ 2 年が経とうとしている。その間に、不安定核を用いた性能試験が無事終了した。現在は、質量導出の原理検証に対する解析を行っており、本装置を用いた最初の質量測定を行う段階に入ろうとしている。

ところで、蓄積リングを用いた不安定核の質量測定にとってパイオニア的存在なのが、ドイツ重イオン科学研究所 (GSI) にある ESR¹⁾ である。ESR は、核破砕片分離装置を介して重イオンシンクロトロンと繋がっており、興味のあるイオンを含んだバンチビームとして入射することができる。不安定核は核反応で生成するので、蓄積リングで質量測定するためには、核反応で発生する速度の広がりを見逃さなければならない。ESR では、

電子冷却を用いてイオンの速度を一定にし、イオンの質量 (m/q) のみに依存する周回周期を非破壊検出器で測定する SMS (Schottky Mass Spectrometry) 法と、等時性場のリング内を周回させることで、 m/q のみに依存する周期をタイミング検出器で測定する IMS (Isochronous Mass Spectrometry) 法の二つの手法が確立された。測定精度の面では SMS 法には劣るが、極短時間で測定することができるのは IMS 法である。IMS 法は、『安定核から遠く離れた稀にしか作り出せない極短寿命不安定核 (稀少 RI) の質量測定』という我々の主目的と合致している。それ故、本装置の根本は、IMS 法を活用して質量測定を行うことに特化した等時性蓄積リングということである。

では、本装置の特色は何か。一つは、興味のある核種を入射する前に確実に識別、そして選択し、event-by-event で測定を完了することである。稀少 RI に狙いを絞った測定を行うために不可欠である。もう一つは、幅広い運動量に対応する等時

*1 理化学研究所仁科加速器研究センター Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN (E-mail: yamaguch@ribf.riken.jp)

*2 埼玉大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

*3 筑波大学数理物質融合科学センター CiRfSE, University of Tsukuba

*4 筑波大学数理物質科学研究科 Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba

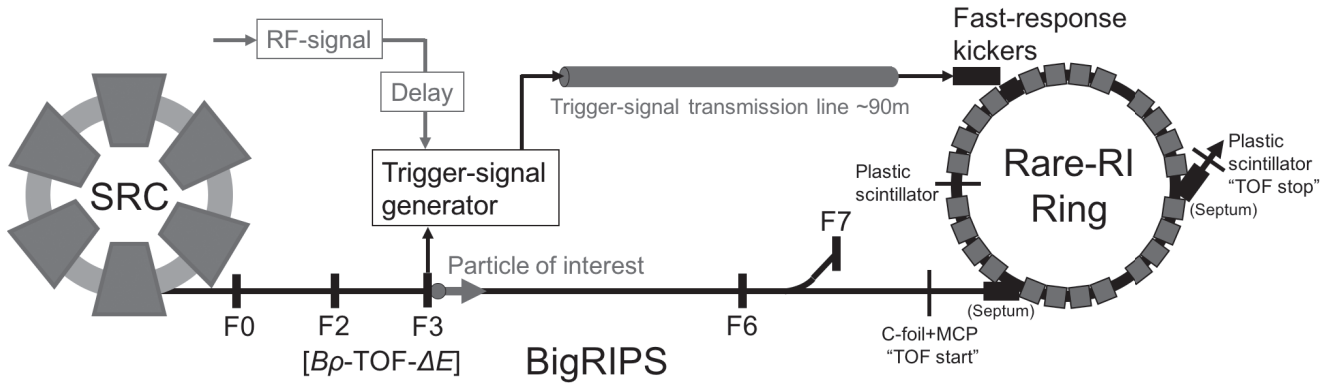


図1 核種選択型自己トリガー入射の概念図.

性場をトリムコイルにより高精度で調整する、サイクロトン型の蓄積リングだということである。ウランの飛行核分裂反応で生成されるような、運動量が広がってしまう中性子過剰な不安定核の測定に優位である。

不安定核を用いた性能試験では、この二つの特色に関する検証を行った上で、数種類の不安定核の入射・取り出しに成功した。本稿では、その結果を中心に本装置の現状を報告する。

2. 核種選択型自己トリガー入射

稀少 RI リング (Rare-RI Ring : R3) は、超伝導 RI ビーム分離装置 BigRIPS²⁾ を介して SRC を中心としたサイクロトン加速器群³⁾ に繋がっている。それらを連携させることで稀少 RI に狙いを絞った event-by-event の測定を可能にする重要な仕掛けが、図1に概念を示す“核種選択型自己トリガー入射”である。これは、メシュコフらが提唱した個別入射⁴⁾ と、BigRIPS が持つ高い粒子識別能力とをうまく組み合わせることで成り立つ斬新な入射手法である。ビームコミッションの際に、すでに1核種 (^{78}Kr) により1イベント毎の個別入射を確立しているが、多数核種の中から興味のある核種を選択して1イベント毎に入射することに成功したので、あらためて紹介する。

まず、どの粒子が何なのか識別しておく必要がある。BigRIPS の F0 には生成標的が設置されており、ウランの飛行核分裂反応や、キセノンやクリプトンなどを利用した入射核破碎反応により、様々な不安定核を二次ビームとして生成できる。

BigRIPS は、それらをきちんと識別してから実験装置側に送り届ける目的のために、2段階構造になっている。前段 (F0 から F2) で選別された粒子を後段 (F3 から F7) で確実に同定する⁵⁾。その情報を元に、F3 までの検出器による飛行時間 (TOF) 情報及びエネルギー損失 (ΔE) 情報を用いて粒子識別を行っている。

次に、入射したい粒子自身でキッカーを励磁するためのトリガー信号を作る必要がある。F3 のタイミング検出器がトリガー信号発生の起点となる。そこに、加速器の RF 信号でゲートを掛けることで、TOF 情報における選択を可能にした。例として、図2に TOF 選択の効果を示す。各イベントは、核子当たりのエネルギーが 345 MeV のウランビームを、厚さ 10 mm のベリリウム標的に照射して生成された二次粒子である。図2(a) は、TOF 選択なしの状態である。そこに、外部遅延の設定を変えながら TOF 選択を行った状態が図2 (b) 及び (c) である。より生成されやすい安定核側の核種をキッカートリガーに参加させないようにして、中性子過剰側の核種のトリガーレートを相対的に上げることができる。この TOF 選択は、キッカーの入射繰返し能力 (現状の上限は 100 Hz) を考えると、稀少 RI の測定にとって不可欠である。

上記のように入射したいイベント毎に作ったトリガー信号を、素早くキッカーに送り届ける必要がある。そこで、銅の中空同軸管を用いて伝送ラインを構築した。全長約 90 m で、1本当たり 2 m のものを繋ぎ合わせて使用しており、伝搬速度は光速の 98.6% である。その後、キッカー電

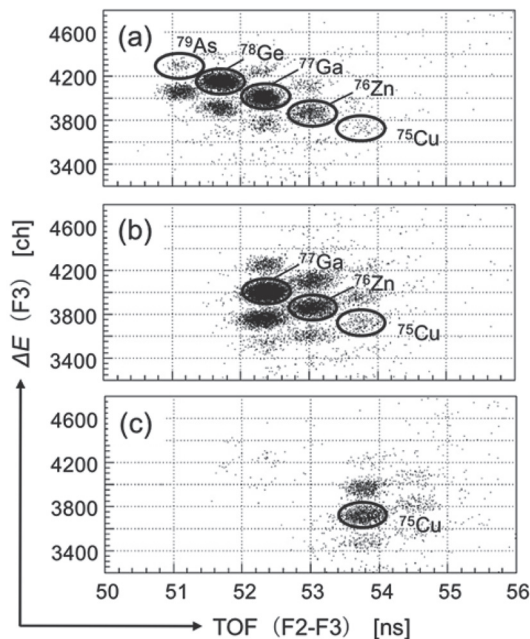


図2 縦軸 ΔE , 横軸 TOF の 2次元プロット. (a) は TOF 選択なし時, (b) 及び (c) は TOF 選択あり時で, TOF 選択の外部遅延設定が異なる 2 パターン.

源に到達したトリガー信号は, サイクロトロンスイッチを動作させるためのグリッドパルサーを立ち上げ, 所定の時間後にキッカー磁石は励磁される. その励磁完了までの時間を, 興味のある粒子の到達時間に合わせれば入射は完了する.

ここで, 実際に行ったタイミング調整について触れておく. F3 でのトリガー信号発生を起点として, グリッドパルサー入力直前までの伝搬時間は最短で 405 ns である. また, グリッドパルサーにトリガー信号が入力された時点から励磁完了までは, 充電電圧が 20 kV 以上でほぼ一定となり, 現状は 545 ns である. つまり, F3 でのトリガー信号発生から励磁完了までの最短時間は 950 ns となる. その一方で, BigRIPS の F3 からキッカーまでの粒子の飛行距離は 161.5 m あり, 例えば, 核子当たりのエネルギーが約 175 MeV の ^{78}Ge がその間を飛行する時間は約 1,000 ns となる. そこで, トリガー信号伝搬を 50 ns 遅延させて両者のタイミングを合わせた. 図3 (a) は, 例として 20 kV 充電時のキッカー磁場分布を示す. 横軸は, F3 でのトリガー信号発生を起点とした伝搬時間としている. 図3 (b) は, キッカー磁石の次の直線部に設置したプラスチックシンチレー

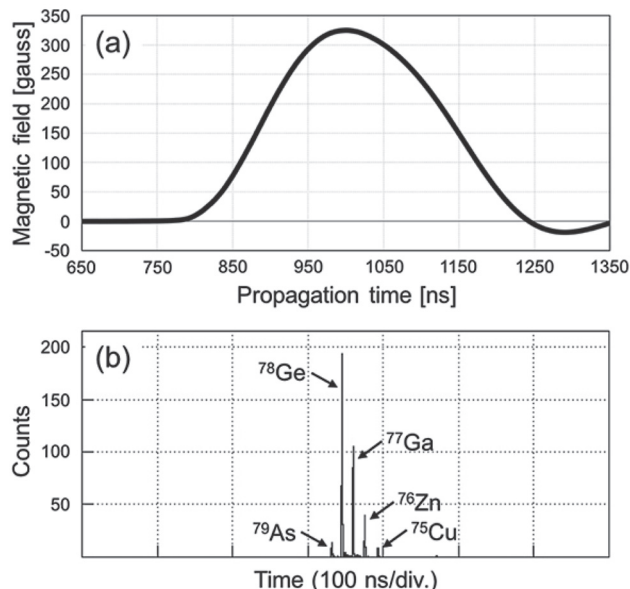


図3 (a)キッカー磁場分布. (b)キッカーに蹴られた後に, 周回軌道上のプラスチックシンチレータでカウントしたイベント.

タでカウントしたイベントを示す. 入射を確認する際には, このプラスチックシンチレータを周回軌道上に設置していたので, これらのイベントは正しく蹴られた粒子を示す. TOF 選択なし, つまり図2 (a) の状態だということと, ビーム輸送ラインや入射軌道の運動量アクセプタンス等を考えると, これらの粒子はほとんどが中性子数 46 のアイソトーンであり, 5本のピークはそれぞれ, 左側(到達時間が早い側)から ^{79}As , ^{78}Ge , ^{77}Ga , ^{76}Zn , そして ^{75}Cu となる. それぞれの核種はエネルギーが違うので, F3 から飛行してくる間に全幅で約 70 ns ほど広がってしまうが, キッカー磁場の有効持続時間が 80 ~ 100 ns 程度あるため同じ設定で入射が可能である.

以上のように, 識別済みの粒子を選択した上で, 1 イベント毎リングに蹴り入れることができることを実証した. このことは, 本装置の一つ目の特色の本質的な部分である.

3. 等時性調整

トリムコイルを用いて等時性を調整する手法は, サイクロトロンからヒントを得ている. R3 は図1の概念図で示すように, 4台の長方形型双極磁石(旧 TARNII⁽⁶⁾)で1セクターを構成する6回対称の蓄積リングである. トリムコイルは,

各セクターの外側2台(計12台)に備え付け、メインコイルが作る平坦な磁場(この章では、メイン磁場と表現する)に対して、リング外側を強く内側を弱くすることで傾斜した磁場(この章では、トリム磁場と表現する)を作り等時性を調整する。このような蓄積リングは他にないため、シミュレーションと実際の結果を照らし合わせながら段階的に検証を進めている。

ビームコミッショニングでは、1次のトリム磁場を変更することで等時性の調整を行った。その際指標としたのは、リング入射前のプラスチックシンチレータと取り出した後のプラスチックシンチレータ間のTOFと、BigRIPSのF6におけるそれぞれの運動量の2次元プロットである。結果はシミュレーション通りで、2次の成分が残るTOF分布となった。また、全体にほぼ一定の幅を持っていた。その幅を狭くしないと等時性の精度は上がらないため、コミッショニング終了後からその原因を探っていた。結果として、磁極面の不均一性などに起因する2次の成分が平坦な磁場に残っていると仮定すると、TOF分布に一定の幅が生じることがわかった。しかしその一方で、その一定の幅は、TOF分布に残る2次の成分を打ち消すようなトリム磁場を作ることによって改善するというシミュレーション結果も得た。

実際に ^{78}Ge を用いてその検証を行い、**図4**に示す結果を得た。この性能試験では、TOFの起

点として炭素薄膜(C-foil)及びマイクロチャンネルプレート(MCP)で構成されるタイミング検出器を用いた。上図は2次のトリム磁場調整前、下図は調整後のTOF分布である。TOF分布に残る2次の成分が打ち消され運動量大きい側の粒子が周回しやすくなっただけでなく、TOF分布全体の幅が改善されていることがわかる。運動量の全幅($\delta p/p \sim 0.6\%$)における等時性の精度は、10 ppmオーダーから大凡5 ppmまで改善した。

ここまでくれば、本装置が設計通りであることに疑う余地はない。今後は、当初より定めていた等時性の目標精度1 ppmに向けた改善を行う。TOF分布のばらつきに影響する可能性がある原因の一つにメイン磁場の変動がある。何故ならば、その変動全幅は5 ppm/dayでありTOF分布の幅とほぼ同じだからである。しかし、今のところTOF分布のばらつきとの強い相関は認められない。もしこのメイン磁場の変動が影響しているのであれば、この変動はメインコイル電源の電流値変動に同調しており、ヨーク温度の変化に合わせてドリフトしている傾向があるので、それら周辺環境を改善する必要があるかもしれない。他に考えられる可能性としては、単に等時性を調整しきれていないだけなのかもしれない。その場合、3次のトリム磁場調整を行えば改善するはずである。様々な可能性に対して検証を続け、この二つ目の特色を最終仕様に持っていきたい。

4. 質量導出の原理検証

最後に、原理検証について簡単に触れておく。サイクロトロンから、質量(m_0/q_0)が良くわかっている1核種に等時性を合わせると、その周回周期(T_0)は m_0/q_0 のみに比例して決めることができる。そして、等時性を合わせた1核種の粒子と測定したい核種の粒子が同じ運動量の場合、リング内の周回軌道は同じはずである。そのことから、両者の周回周期の比は両者の質量の比で表すことができ、次の式(1)より m_0/q_0 を用いて相対的に m_1/q_1 を導出することができる。

$$\frac{m_1}{q_1} = \left(\frac{m_0}{q_0} \right) \frac{T_1 \gamma_0}{T_0 \gamma_1} = \left(\frac{m_0}{q_0} \right) \frac{T_1}{T_0} \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \left(\frac{T_1}{T_0} \beta_1 \right)^2}} \quad (1)$$

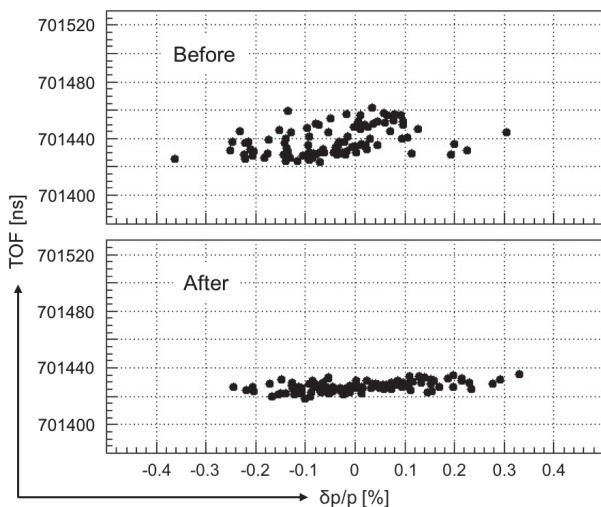


図4 BigRIPS-F6における運動量の関数としてプロットしたTOF分布。上は2次のトリム磁場調整前、下は調整後。

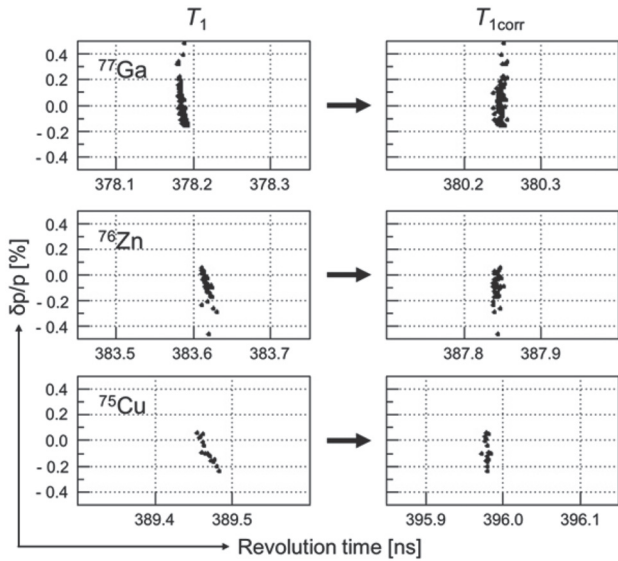


図5 左側は補正前、右側は補正後の周回周期。

T_1 は m_1/q_1 の周回周期， β_1 は m_1/q_1 の速度， $\gamma_{0,1}$ はローレンツ因子である．測定したい核に対しては等時性が保たれていないため，入射前に測定した β_1 で補正する必要がある．図5は，等時性を合わせた ^{78}Ge に対する ^{77}Ga ， ^{76}Zn ， ^{75}Cu の補正前の周回周期 (T_1) と，それぞれの β_1 で補正した後の周回周期 ($T_{1\text{corr}}$) の運動量依存性を示す．運動量依存はなくなるが，幅が広がっている．その原因は， β_1 の測定精度がまだ十分ではないためと考えている．そして，現状の質量測定精度は 10^{-5} オーダーである．目標の 10^{-6} オーダーを達成するための改善策を検討中である．また，これらの核種はすでに質量がよくわかっているので，文献値⁷⁾と比較することで本原理の確からしさを検討している．例えば ^{77}Ga については，文献値との差が大凡 3.5×10^{-6} という許容できる速報値が得られている．いずれにしても，詳細は解析中である．

5. おわりに

2012年に建設が始まって以来，2014年のオフライン試験，2015年のビームコミッションング，そして2016年の不安定核を用いた性能試験と順調に進んでいる．斬新な入射手法を確立し，興味のある核種に狙いを絞った event-by-event の測定が可能となり，また，等時性の精度は徐々に向上し ppm オーダーに到達した．そして，現在進行中の質量導出の原理検証を終えた先には，本装置を用いた最初の質量測定（測定対象はニッケル同位体）が予定されている．性能向上に対する研究開発も継続して進めていき，近い将来には，質量測定だけでなく，二つの特色を最大限に活用したユニークな蓄積リング実験が展開されるはずである．

参考文献

- 1) B. Franzke, “The heavy ion storage and cooler ring project ESR at GSI” Nucl. Instrum. and Methods B24/25 (1987) 18.
- 2) T. Kubo, et al., “BigRIPS separator and ZeroDegree separator at RIKEN RI beam factory” Prog. of Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 03C003.
- 3) H. Okuno, et al., “Progress of RIBF accelerators” Prog. of Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 03C002.
- 4) I. Meshkov, et al., “Individual rare radioactive ion injection, cooling and storage in a ring” Nucl. Instrum. and Methods A523 (2004) 262.
- 5) N. Fukuda, et al., “Identification and separation of radioactive isotope beams by the BigRIPS separator at the RIKEN RI beam factory” Nucl. Instrum. and Methods B317 (2013) 323.
- 6) A. Noda, et al., “Magnet system of heavy ion synchrotron and cooler ring, TARN II” Proc. of the 11th Int. Conf. on Cyclotrons and their applications Tokyo, Japan, 1987.
- 7) M. Wang, et al., “The AME2012 atomic mass evaluation” Chin. Phys. C36 (2012) 1603.