

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

山口由高 ^{*,A)}, 矢野朝陽 ^{A,B)}, 大西哲哉 ^{A)}, 阿部康志 ^{A)}, 小沢顕 ^{B)},
滝浦一樹 ^{C)}, 長江大輔 ^{D)}, 森口哲朗 ^{B)}, 山口貴之 ^{C)}, 若杉昌徳 ^{E)}

Yoshitaka Yamaguchi ^{*,A)}, Asahi Yano ^{A,B)}, Tetsuya Onishi ^{A)}, Yasushi Abe ^{A)}, Akira Ozawa ^{B)},
Kazuki Takiura ^{C)}, Daisuke Nagae ^{D)}, Tetsuaki Moriguchi ^{B)}, Takayuki Yamaguchi ^{C)}, Masanori Wakasugi ^{E)}

^{A)} RIKEN Nishina Center ^{B)} University of Tsukuba ^{C)} Saitama University

^{D)} Tokyo Institute of Technology ^{E)} ICR, Kyoto University

Abstract

Rare-RI Ring (R3) at RIKEN RIBF aims to precisely measure the masses of rare radio-isotopes. A unique feature is that pre-identified particles can be injected and measured one by one. The measurement time is less than 1 millisecond. Since the successful beam commissioning in 2015, the performance of related equipments has been confirmed through machine studies using unstable nucleus beams, and the first mass measurement was conducted in 2018. After that, the following two improvements were mainly implemented to increase measurement efficiency: one is the extension of the kicker effective magnetic fields for extraction, and the other is the adjustment of the injection beam with vertical steering magnets. In addition to the results of these improvements, a newly developed high-sensitive Schottky pick-up is also reported.

1. はじめに

稀少 RI リング (R3) は、理研 RI ビームファクトリー (RIBF) の放射性同位元素 (RI) 生成能力を持ってしても 1 日数個など稀にしか生成されない稀少 RI の質量を、精度良く測定することを主目的として開発された重イオン蓄積リングである [1]。R3 では、等時性磁場下で飛行時間を測定することで質量を導出する。飛行時間は、R3 へ入射する前にスタート検出器を、出射後にストップ検出器をそれぞれ設置して測定する。時間分解能 100 ps 程度の汎用検出器でも 1 ms も周回させれば十分な精度 (ppm 以下) で測定可能となる。また、R3 は四極電磁石を持たず偏向電磁石のみで構成され、トリムコイルによるサイクロトロ的な磁場構造を形成することで、RI ビームが持つ広い運動量分布に対し等時性を ppm オーダーの高精度で調整できる。いつ生成されるかわからない稀少 RI を見逃すことなく入射することができる仕組みとして、事前に粒子識別された RI 自身が入射キッカーをトリガーする個別入射スキームもユニークな特徴である。

2012 年に建設を開始し 2015 年にはビームコミッショニングに成功した。その後の RI ビームによる性能試験を通じて、関連機器が期待通りに機能していることを確認 [2]、同時に質量導出手法を確立した [3]。質量測定実験は 2018 年に本格的に始動し成果を上げつつあるが [4]、今後、取量が少ない稀少 RI の質量測定を目指すためには、測定効率の向上及び測定精度の向上が必須となる。本研究では、質量測定効率向上を念頭に実施した、出射する際に使用するキッカー磁場の有効持続時間延長、垂直方向ステアリング電磁石を用いた入射ビーム調整、これら 2 つの概要とビームによる検証結果について報告する。また、蓄積リングでしか実現できない稀少 RI の寿命測定や崩壊事象の検出に着目して開発を進めている、高感度ショットキーピクアップ

プのビームによる検証結果についても簡単に報告する。

2. キッカー磁場の改良

R3 のキッカー電磁石は、入射セプタム電磁石に対して水平方向の位相空間進度 $3/2 \pi$ の位置に設置され、入射だけでなく出射にも使用している。核子あたり 150~180 MeV のエネルギーを持つ数核種の入射時の時間的広がり、そして周回時間 370~400 ns を考慮すると、入射時は、約 100 ns の有効磁場持続時間と、その後 300 ns 以内にはほぼ 0 Tesla となる磁場波形が必要である。その磁場波形は実現し [5]、入射された粒子が再びキッカー電磁石を通過する際に周回できなくなるほどの磁場を感じることはない。一方、出射時に対して約 100 ns では短すぎる。これは、異なる速度を持つ数核種が 100 km 以上の長距離を周回すれば、周回数も出射タイミングも異なるためである。これまで、出射タイミングを 100 ns 刻みにずらした測定を数回行うことで、数核種全てを出射してきたが、出射タイミングをずらさずに全てを出射できればその分測定効率は向上する。また、稀少 RI の飛行時間測定に対しても必須と考える。

そこで、これまで 3 台で運用してきたキッカー電磁石を 1 台追加して計 4 台とした。まず入射時には、磁場波形の異なる 2 台のキッカー電磁石を利用した。本キッカー電磁石はツインタイプであり相互インダクタンスの影響が大きく、Fig. 1 (a) の細かい実線で示す磁場分布となる。そこに、向かい合う電極間を 2600pF のセラミックコンデンサで接続すると Fig. 1 (a) の点線で示す磁場分布となる。入射される粒子がそれぞれの磁場波形を持つキッカー電磁石を通過するタイミングを考慮すると、その粒子が感じる磁場は実質的には Fig. 1 (a) の太い実線に示すフラットトップを持った波形と考えることができる。一方、出射時には、まず入射時に使用した 2 台を再励磁する (Fig. 1 (b) の細かい実線左側)。次に、入射用と同じ考えで調整した他の 2 台を数百 ns 遅延させて励磁する (Fig. 1 (b) の細かい実線右

* yamaguch@ribf.riken.jp

側)。すると長いフラットトップを獲得でき、出射される粒子が感じる磁場は実質的には Fig. 1 (b) の太い実線に示す波形となる。この長いフラットトップは約 400ns であり 1 周分をカバーする。実際にこの磁場分布を使用して実験を行った際の飛行時間の測定結果を Fig. 2 に示す。縦軸は、約 0.755 ms 飛行した後の 5 核種の飛行時間の違い、横軸は運動量である。タイミングを変更することなく 5 核種を出射できるため、100 ns 刻みにタイミングをずらして測定していたこれまでと比較し、測定時間は半分以下で済む。

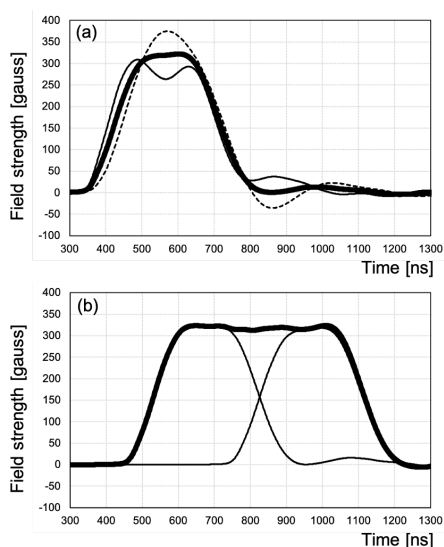


Figure 1: (a) Thin-solid and dotted lines show measured magnetic fields, whereas thick-solid line shows a field experienced by injection particles. (b) Thin-solid line is the same as thick-solid line in (a), and thick-solid line, which has long flat-top, shows a field experienced by extraction particles.

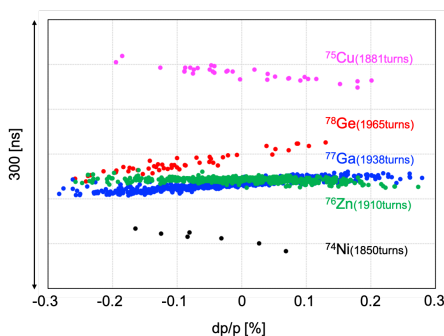


Figure 2: Extracted nuclei after approximately 0.755 ms storage using long effective duration of kicker magnetic field.

ここで、この改良後に発生したキッカー電源の不具合について簡単にふれておく。3 台で運用していた当初は、BL 積で考えた際、磁極長 (L) が長く充電電圧は典型的には 30 kV 前後で十分だったが、2 台で入射・出射となると L が短くなる分を磁場強度 (B) で補う必要があった。充電電圧にすると 55 kV 前後であり製品仕様の範囲内ではあったが、実験中に充電系のセラミック

コンデンサの絶縁破壊が頻発する事象が発生した。この不具合を解消すべく最終的にはセラミックコンデンサを一新した経緯がある [6]。

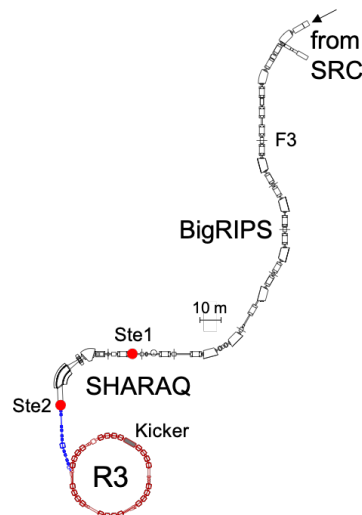


Figure 3: Layout of R3 connected to BigRIPS via SHARAQ spectrometer. Red points indicate the locations of the steering magnets.

3. 垂直方向ステアリング電磁石の導入

Figure 3 に示すように、R3 は SHARAQ スペクトロメーター [7] を介してフラグメントセパレーター Bi-gRIPS [8] と繋がっている。垂直方向アパーチャが広い SHARAQ スペクトロメーターまでで完結する実験では、BigRIPS 上流におけるビームのわずかなシフトは問題にならない。しかし、R3 の垂直方向アパーチャは BigRIPS と比較して 1/3 以下と非常に狭く、わずかなシフト量でも通過効率を悪くする要因となる。そこで、垂直方向アパーチャが狭くなる前に R3 専用のステアリング電磁石を導入し、入射ビーム軌道を補正することで通過効率の改善を図った。

既存の電磁石及びチェンバに干渉せず設置できる箇所に限定し光学計算を繰り返し行った。その結果として、Fig. 3 の赤丸で示す部分に 1 台ずつ設置することで、数 mrad の偏向でこれまで経験した上流での如何なるシフト量でも対応できる、つまりシフトがない状態とほぼ同じ通過効率に回復できる解を見つけた。その後、磁場解析ソフト (OPERA-3D) により可能な限りコンパクトな全体設計及び最適なポール形状を検討し製作 [9]、設計通りの磁場が得られていることを確認した。磁気剛性率 6.4 Tm のビームを 2 mrad 偏向する際の仕様を Table 1 にまとめた。また、間接水冷タイプを採用し、コイル全体の平均温度上昇を 20 °C 以内に抑えるために必要な流量は 2 l/min である。

2024 年 6 月、¹²⁴Xe ビームを用いたステアリング電磁石の性能試験を実施した。ビームが持つ磁気剛性率は約 4.3 Tm だった。また、上流でのシフト量を BigRIPS の F3 と呼ばれる焦点面で確認したところ、垂直方向の位置 (y) が約 2 mm、角度 (y') が約 4 mrad であった。

ステアリング電磁石の調整手順は、まず 1 台目の

Table 1: Specifications of Steering Magnets

	Ste1	Ste2
Pole length [m]	0.3	0.25
Pole gap [m]	0.17	0.125
Flux density [T]	0.043	0.051
Turn number [T/P]	204	204
Current [A]	15.0	13.1
Weight [kg]	180	110

Ste 1 を Ste 2 で $y = 0$ mm になるように調整する。次にその状態での Ste 2 における垂直方向の角度 (y') を調べ、その逆符号分 ($-y'$) だけ偏向するよう Ste 2 を調整する。その際、Fig. 3 の青色で示した入射ラインの最初と最後の 2 箇所での焦点面で、ビーム像を確認できる。最終的には、R3 の入射点であるキッカー電磁石部でのビーム像を確認し各ステアリング電磁石の電流値を決定した。位置及び角度の確認には各焦点面に設置した位置検出器 PPAC [10] を用いている。

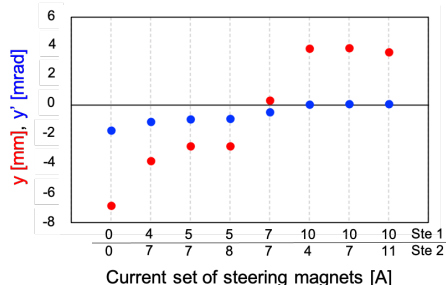


Figure 4: Red and blue circles show the center of distribution for position and angle at injection point, respectively. Horizontal axis indicates the combination of the current values of two steering magnets.

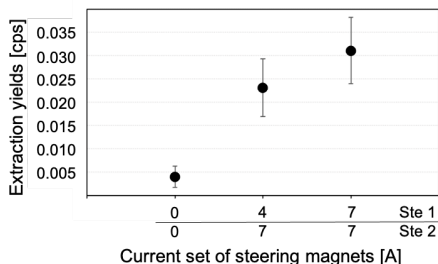


Figure 5: Black dots show the extraction yields at the different three combination of the current values of two steering magnets.

Figure 4 は、入射点における垂直方向の位置・角度 (ともに分布中心値) が、ステアリング電磁石の電流設定の違いによりどのように変化するか示した結果である。位置・角度ともに Ste 1 の電流値依存性が強いように見えるが、これは計算結果と矛盾しない。また、Ste 1・Ste 2 ともに 7 A の時、位置・角度ともに適切に補正さ

れていることがわかる。この結果より、入射以降の R3 の調整時には 2 台とも 7 A で使用した。

Figure 5 は、ステアリング電磁石の 3 つの電流設定における出射収量の違いを示した結果である。今回の性能試験では、ステアリング電磁石がない場合と適切な場合で出射収量が約 6 倍増えるという結果を得ることができた。但し、今回は、途中の四極電磁石の設定ミスによりこれまでの出射収量の 1/100 以下という状態だったことを付記しておく。

4. 高感度ショットキーピックアップの開発

周回している荷電粒子の周期を非破壊で測定し、等時性磁場を精度良く調整する際の指標にするべく、R3 には共鳴空洞型ショットキーピックアップが装備済みである [11]。最近、その経験をもとに稀少 RI の寿命測定や崩壊事象の検出に向けた、より高感度なショットキーピックアップを開発した。それは、既存のものと比較して、1/10 の時間で信号を検出することを目標に設計された。そして 2024 年 6 月、 $^{124}\text{Xe}^{54+}$ 粒子に起因する信号を ms オーダーで検出できることを実証した。

Figure 6 は、その時に得られた Waterflow diagram の 1 例を示す。横軸は周波数情報であり、縦軸は、ある一定のフレーム長のスペクトラムを積み重ねた時間情報である。色の濃さの違いは信号強度の違いを示し、濃い方が信号強度が強い。この例では、周波数中心は 503.587 MHz、全幅は 500 kHz、1 フレーム長は 4.48 ms に設定した。また、入射繰り返しの設定が 100 Hz だったことより、Fig. 6 が示す結果は、先に入射され周回していた粒子 (図中左側) が 10 ms 後の次の入射時のキッカー磁場によって完全に消え、それと同時に別の粒子が入射され周回を始めた、と解釈できる。また、2 つの粒子の周波数の違いは運動量の違いであり、その差は等時性度に依存する。いずれにしても、他にも測定条件の異なる複数のデータを取得できており、現在は詳細な解析を進めている段階である。

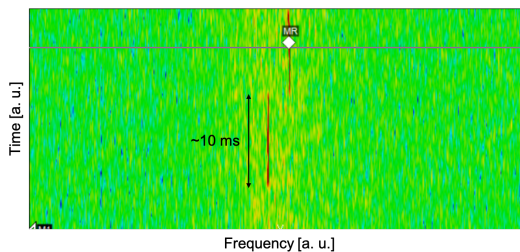


Figure 6: Schottky waterflow diagram of single particle detection for $^{124}\text{Xe}^{54+}$. See text for details.

5. 今後の展望

今後の R3 実験においては、出射用キッカー磁場の改良と垂直方向ステアリング電磁石の導入により、実験開始当初と比較しトータルで 10 倍以上の測定効率の向上が見込まれる。また、キッカー電源の不具合も解消されたので、R3 でしか成し得ない半減期が 10 ms 程度の稀少 RI も視野に入れ、質量測定実験を進めていく予定である。一方、高感度ショットキーピックアップの

開発の成功は、稀少 RI の寿命測定や崩壊事象の検出の実現のみならず、稀少 RI の質量測定精度の向上への貢献、さらにはアイソマー状態にある粒子をタグ付けする役割など、今後の R3 の戦略に不可欠な検出器と期待される。

謝辞

本研究は、理研仁科センターと東大 CNS で共同運用している RI ビームファクトリーで実施されました。装置開発の一部には、日本学術振興会科学研究費の助成を受けています（助成番号 18H03695、21H04461）。

参考文献

- [1] A. Ozawa *et al.*, “The rare-RI ring”, *Proc. Theor. Exp. Phys.*, (2012) 03C009. doi:10.1093/ptep/pts060
- [2] Y. Abe *et al.*, “Performance of a precise isochronous magnetic field over a wide momentum range in the Rare-RI Ring”, *Nucl. Instrum. Method Phys. Res., Sect., A* (2024) in press.
- [3] D. Nagae *et al.*, “Isochronous mass spectrometry at the RIKEN Rare-RI Ring facility”, *Phys. Rev., C* 110, (2024) 014310. doi:10.1103/PhysRevC.110.014310
- [4] H. F. Li *et al.*, “First Application of Mass Measurements with the Rare-RI Ring Reveals the Solar *r*-Process Abundance Trend at $A=122$ and $A=123$ ”, *Phys. Rev. Lett.*, 128, (2022) 152701. doi:10.1103/PhysRevLett.128.152701
- [5] H. Miura *et al.*, “Performance of a fast kicker magnet for Rare-RI Ring”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, 49, (2016) 154.
- [6] Y. Yamaguchi *et al.*, “Operation test of kicker system with new PFN capacitors”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, 56, (2023) S26. / “Performance test of kicker system for Rare-RI Ring”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, 57, (2024) in press.
- [7] T. Uesaka *et al.*, “The SHARAQ spectrometer”, *Proc. Theor. Exp. Phys.*, (2012) 03C007. doi:10.1093/ptep/pts042
- [8] T. Kubo *et al.*, “BigRIPS separator and ZeroDegree spectrometer at RIKEN RI Beam Factory”, *Proc. Theor. Exp. Phys.*, (2012) 03C003. doi:10.1093/ptep/pts064
- [9] A. Yano *et al.*, “Design of the vertical steering magnets for Rare-RI Ring”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.*, 57, (2024) in press.
- [10] H. Kumagai *et al.*, “Development of Parallel Plate Avalanche Counter (PPAC) for BigRIPS fragment separator”, *Nucl. Instrum. Method Phys. Res., Sect., B* 317, (2013) 717.
- [11] F. Suzuki *et al.*, “The SHARAQ spectrometer”, *Proc. of HIAT2015*, (2015) MOPA24.