

## 重イオン蓄積リング個別入射方式の開発

### DEVELOPMENT OF THE INDIVIDUAL INJECTION METHOD FOR HEAVY ION STORAGE RING

山口由高\*

Yoshitaka Yamaguchi\*

RIKEN Nishina Center

#### Abstract

Individual injection technique as a method to inject a particle, which was randomly produced via fragmentation reaction using a continuous beam from cyclotrons, into a heavy-ion storage ring has demonstrated for the first time at RIKEN RI Beam Factory. This technique gives us a new perspective for measuring the physics quantities such as mass and life-time of short-lived rare isotopes.

#### 1. はじめに

理研 RI ビームファクトリー (RIBF) に重イオン蓄積リング (Rare-RI Ring) を建設する際に解決すべき技術的課題の 1 つに、サイクロトロン群からの連続的な 1 次ビームと生成標的による破砕反応で生成される 2 次粒子の入射手法の確立があった。それは、2 次粒子の中でも、ごく稀にしか生成されない粒子の質量や寿命といった物理量を測定するという Rare-RI Ring の目的にも起因する。つまり、どのタイミングで生成されるかわからない粒子でも効率良く Rare-RI Ring へ入射する手法が必須だった。そこで、入射したい粒子に狙いを定め、それが生成される度に Rare-RI Ring 側で受け入れる態勢を整える入射方式を開発した。本報告では、まずその仕組みと関連装置の開発について述べ、ビームを用いた実証試験についてまとめる。

#### 2. 個別入射の仕組み

Rare-RI Ring は、RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) を介して超伝導リングサイクロトロン (SRC) と繋がっている。図 1 に開発した入射方式の概念設計を示す。セプトムとキッカー電磁石を用いたシングルターン入射を行う過程で本方式を特徴付けているのが、キッカーを励磁するためのトリガー信号を、入射する粒子自身で

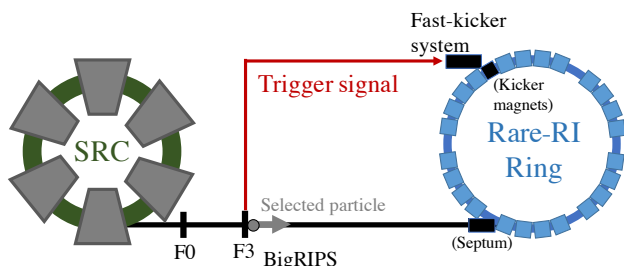


Figure 1: Conceptual design of individual injection method at RIBF.

\*yamaguch@ribf.riken.jp

発生させる点である。入射する粒子は、BigRIPS の F3 焦点面に至るまでの情報 ( $B\rho$ -TOF- $\Delta E$ ) を用いて選択する。発生させたトリガー信号を高速キッカーシステムへ伝達し、その後直ちにキッカーを励磁する。一方で入射粒子自身はビーム輸送ラインを飛行しキッカー電磁石へ到達する。到達したタイミングに合わせてキッカーの励磁を完了させれば、粒子はキッカー磁場を感じ周回軌道へと個別に入射される仕組みである。

#### 3. 装置開発

個別入射を成立させるためのキーポイントは、キッカーを励磁するまでの時間の短縮である。その要素は 3 つあり、①トリガー信号形成時間の短縮、②トリガー信号伝達時間の短縮、そして③キッカーシステムの高速度化である。これらを検討する前提として、入射粒子のエネルギーは核子当たり 200 MeV を目標としていた。言い換えると、約 950 ns で BigRIPS-F3 とキッカー電磁石間 (161.5 m) を飛行することに相当する。

トリガー信号形成には、最低限必要な NIM 回路を組合せて使用しており、BigRIPS-F3 エリアにて 63 ns (タイミング検出器からの電気信号が NIM 回路に至る時間も含む)、キッカーシステムエリアでも 63 ns の合わせて 126 ns の時間を必要としている。また、トリガー信号を BigRIPS-F3 エリアからキッカーシステムエリアに伝達するために、我々は銅 (C1020) の同軸管を製作した。銅管の厚みは 1 mm で、外管外径を 25 mm、内管外径を 10 mm とすることでインピーダンスを 50  $\Omega$  にしている。1 本当たり 2 m のものを繋ぎ合わせ全長約 90 m で最短距離を結んだ。その伝達速度は  $\beta = v/c \sim 0.986$  であり、全長を 299 ns で伝達する。2 つの要素 (①、②) を合わせ最短 425 ns で、BigRIPS-F3 で発生させたトリガー信号をキッカーシステムに入力できる仕掛けを構築した。

一方、キッカーシステムの高速度化については、別のプロジェクト用に開発が行われていたモデルキッカー [1] のパルス電源を用いて長岡技術科学大学と共同で実施してきた。Rare-RI Ring の要求仕様である 75kV、3kA の大電力を制御するためにサイクロトロンを使用を前提

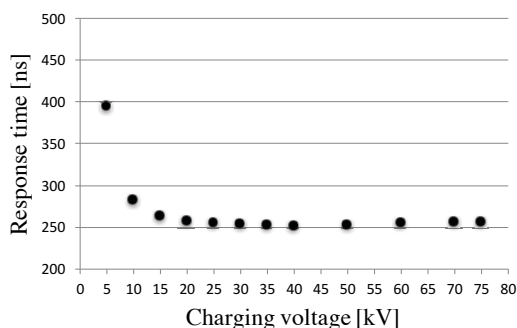


Figure 2: Charging voltage dependence of response time.

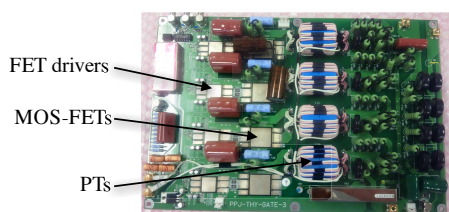


Figure 3: Photograph of new substrate for forming thyratron gate pulse.

とし、トリガー信号入力からサイラトロン出力までの応答時間の短縮に開発の重点を置いた。図2は実機仕様の応答時間を測定した結果を示している。測定はサイラトロンの自爆がないようにリザーバ電圧を調整したうえで行った。充電電圧 20 kV 以上では応答時間がほぼ一定となり約 250 ns を達成している。これはサイラトロン用のゲートパルス形成基板 (図3) を新調したことが決め手となっている。主に FET ドライバー、MOS-FET 及びパルストランスを 1 セットとして構成し、計 4 セットを 1 次側は並列に 2 次側は直列に接続している。入力されたトリガー信号 (5 V-TTL) を、2 kV、1  $\mu$ s 幅のロジック信号として約 80 ns で出力する。サイラトロンには e2v 社製の CX1171 を用いており、その動作時間は図2に示す測定結果を考慮すると約 170 ns と推定できる。図4に実機仕様キッカーシステム 1 系統分のブロック図を示す。サイラトロン及び充電系は高圧ユニット内に絶縁油で浸している。キッカー電磁石は広い開口幅に対応するために分布定数型二つを向かい合わせたツインタイプを採用しており、5 m の同軸ケーブルで充電系と接続している。現在は、同仕様のキッカー電磁石を 3 台 (計 6 系統) 使用している。サー

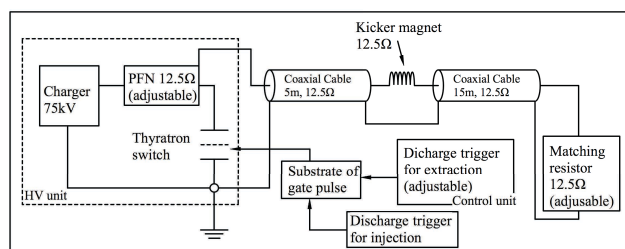


Figure 4: Block diagram of fast-kicker system.

チコイルを用いた充電電圧 20 kV 時のキッカー磁場分布の測定結果より、トリガー信号入力からキッカー磁場中心までの時間は現状約 525 ns である。したがって、3つの要素 (①、②、③) を合わせて、BigRIPS-F3 でトリガー信号が発生してから最短で約 950 ns 後に粒子を入射することができる態勢が整った。

#### 4. 実証試験

ビームを用いた実証試験は、これまでに 2 回行う機会を得ることができた。1 回目は Rare-RI Ring のコミッショニング時で、SRC で核子当たり 345 MeV まで加速された  $^{78}\text{Kr}$  ビームを、核子当たり 168 MeV まで減衰させて入射を試みた。2 回目は、48Ca の 1 次ビームを Be 生成標的に照射し破碎反応で得られた 2 次粒子の入射を試みた。得られた 2 次粒子は核種によってエネルギーが違ってくるが、主に入射したい粒子のエネルギーが核子当たり 170 MeV 前後に収まるようエネルギーを減衰させた。

ここでまず、入射エネルギーが核子当たり 170 MeV 時の Rare-RI Ring の仕様を表 1 に示す。図 5 には各機器の配置を示す。入射用セプタム直後における入射軌

Table 1: Specifications of Rare-RI Ring

Transition $\gamma_{tr}$	1.18
Betatron tune	$\nu_x = 1.18, \nu_y = 0.92$
Beta function	$\beta_x = 8.4 \text{ m}, \beta_y = 11.9 \text{ m}$
Dispersion	7.0 m
Circumference	60.35 m
Length of straight section	4.0225 m

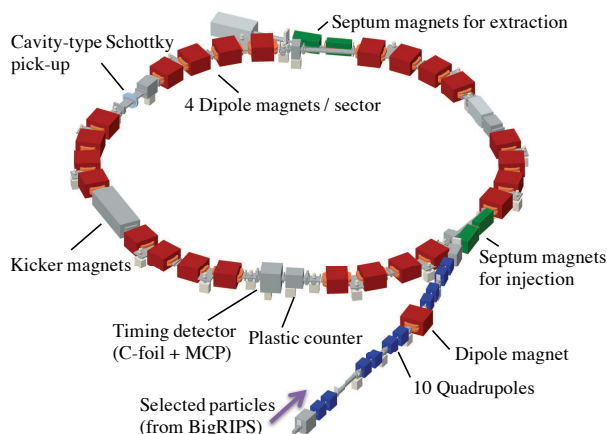


Figure 5: Configuration of Rare-RI Ring.

道中心は、周回軌道中心から 90 mm 外側である。入射用セプタムを通過した粒子は、ベータトロンチューンに従い蛇行しながらキッカー電磁石へ到達する。ビーム光学的には、キッカー電磁石中心でゼロクロスしディスページョンマッチングを取る。入射用セプタムからキッカー電磁石までの位相進度は  $3\pi/2$ 、蹴り角は約 11.4 mrad (設計値) である。入射の繰返しは最大 100 Hz である。ちなみに、取り出しにも同じキッカー電磁石を使用して

おり、キッカー電磁石から取り出し用セプトまでの位相進度は入射側と同じ  $3\pi/2$  である。そのため、同じ方向に同じ強さで蹴れば入射軌道を折り返したような軌道を描いて取り出し用セプトに到達する。

次に、実証試験の結果についてまとめる。個別入射により粒子が蹴られたかどうかを判断するため、キッカー電磁石の次の直線部に設置したプラスチックカウンターを周回軌道中心に配置（横方向駆動）し入射粒子を計測した。図6は、キッカーを励磁するためのトリガー信号入力時間を少しずつ遅延させながら計測した結果であり、この分布は現状のキッカー磁場分布を反映している。横軸の0 nsは、BigRIPS-F3でトリガー信

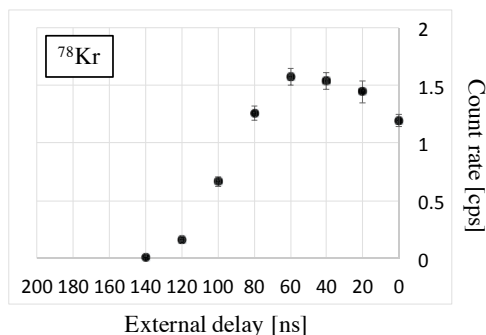


Figure 6: Count rates of injected particles as a function of external delay for kicker excitation timing.

号が発生してからキッカーを励磁するまでの最短時間と考えている 950 ns に相当する。一方で  $^{78}\text{Kr}$  のエネルギーは核子当たり 168 MeV だったので、BigRIPS-F3 とキッカー電磁石間の飛行時間は約 990 ns と計算できる。図6から、トリガー信号入力を 40~50 ns 遅らせた時にキッカー磁場分布のピークで  $^{78}\text{Kr}$  が蹴られたと理解することができ、個別入射が的確に動作していることを初めて実証した。また、現状の磁場分布は明らかなフラットトップを有するわけではないが、分布のピークから見て計数が 10% 落ちる付近までをキッカー持続時間とすると、それは約 80 ns となる。これに加えて、キッカーの磁場強度を最適化するために充電電圧依存性も確認した。結果は、ほぼ設計値通りの蹴り角 11.2 mrad に相当する 26.6 kV でピークとなる分布を得た。

2 回目の 2 次粒子を入射する際は、トリガー信号入力に対する遅延時間を 40 ns に固定して個別入射を試みた。それは、入射エネルギーが核子当たり 169 MeV の  $^{36}\text{Ar}$  を主核種（リファレンス）として入射するよう狙いを定めたためである。また、ビーム輸送ラインの  $B\rho$  設定も  $^{36}\text{Ar}$ （中性子数 18 の同中性子体）が通るように合わせていた。図7(a)は、図6と同様にプラスチックカウンターで計測した結果を示し、横軸は任意の時間である。図7(b)は、BigRIPS-F3に至るまでの情報（縦軸  $\Delta E$ 、横軸 TOF）で粒子識別した際の 2 次元プロットを示す。図7(a)で示すプラスチックカウンターで計測されたイベントにゲートをかけて粒子識別図を見ると、赤く示す通り  $^{36}\text{Ar}$  と  $^{35}\text{C}$  の島にプロットされ、2本のピークがそれぞれ  $^{36}\text{Ar}$  と  $^{35}\text{C}$  だと理解できる。この結果から、狙った 2 次粒子は的確に入射できること、さらにその測定時の運動量スリット幅、キッカー電磁

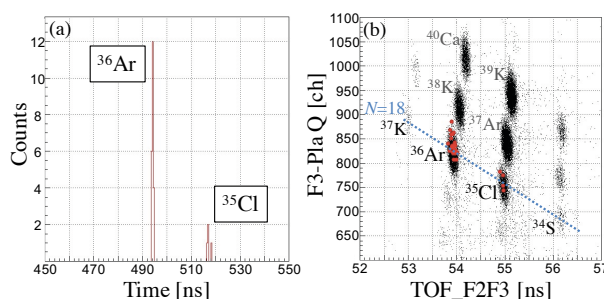


Figure 7: (a) Timing signal of injected particles. (b) Two dimensional plot for particle identification before BigRIPS-F3. Red circle indicates the injected particles.

石励磁タイミング及びビーム輸送ラインの  $B\rho$  設定などの条件が合致すれば、周辺の核種も選択的に入射できることを実証した。

以上のように個別入射を確認した後は、2 回の実証実験とともに、炭素薄膜 (60ug/cm<sup>2</sup>) と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て入射粒子が確実に周回したことも確認した。そして、同じキッカー電磁石を使用した取り出しにも成功している。一方で、取り出さずに蓄積する運転モードにおいて、非破壊ビームモニターの空洞型ショットキーピックアップの性能試験も行い、周回を続ける 1 イベントの  $^{78}\text{Kr}$  からその周期情報を高分解能で獲得することに成功したことも付記しておく。

## 5. まとめと今後

我々は理研 RIBF に於いて、Rare-RI Ring に入射したい粒子に狙いを定め、その粒子自身で入射用キッカーを励磁するトリガー信号を発生させ素早く伝達し、Rare-RI Ring 側で受け入れる態勢を事前に整える、個別入射方式を開発した。1 回目の実証試験にて、キッカー磁場の励磁タイミングや強度依存を確認しながら  $^{78}\text{Kr}$  を個別に入射することに初めて成功した。2 回目の実証試験では、破碎反応により生成された 2 次粒子のうち、狙った粒子を的確に入射できることを実証した。次回は、運動量スリット幅の変更、キッカー磁場の励磁タイミングの変更により、狙う領域を容易に変更できるか検証する。それらの条件に加え、トリガーに参加する粒子に対して BigRIPS-F3 に至るまでの情報 ( $\Delta E$  や TOF) を用いて制限を設け、相対的に収量の少ない領域の入射も試みる予定である。

## 6. 謝辞

キッカーシステムの高速化を進める上で大変お世話になりました (株) パルスパワー技術研究所の徳地明氏にこの場をお借りして深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Ohkawa et al., "Development of the kicker magnet for muses", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A547 (2005) 287-293.