

PRESENT STATUS OF RARE-RI RING PROJECT AT RIKEN RIBF

Yoshitaka Yamaguchi^{1,A)}, Tadashi Fujinawa^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Akira Goto^{A)}, Tetsuya Ohnishi^{A)}, Hiroyoshi Sakurai^{A)}, Masanori Wakasugi^{A)}, Yasushige Yano^{A)}, Akira Ozawa^{B)}, Ichiro Arai^{B)}, Yusuke Yasuda^{B)}, Takashi Kikuchi^{C)}, Takashi Ohtsubo^{D)}, Takeshi Suzuki^{E)}, Takayuki Yamaguchi^{E)}

^{A)}RIKEN, Nishina Center (2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198)

^{B)}Institute of Physics, University of Tsukuba (1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577)

^{C)}Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology (1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188)

^{D)}Department of Physics, Niigata University (2-8050 Ikarashi, Niigata, Niigata, 950-2181)

^{E)}Department of Physics, Saitama University (255 Shimo-Ookubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570)

Abstract

We propose an apparatus for precisely measuring the masses of short-lived rare nuclei including the r-process region (i.e. neutron-rich unstable nuclei that locate far from the β -stability). Such short-lived rare nuclei will be generated with a production rate of about one particle per day by uranium in-flight fission with an intensity of 1 μ A at the RIKEN RIBF accelerator complex with the BigRIPS in near future. Our apparatus will be located at the downstream of the BigRIPS as one of the major experimental installations. It consists of three main parts: a long injection beam line, a fast kicker system and a cyclotron-like isochronous storage ring. The combination of a long injection beam line and a fast kicker system enables us to inject short-lived rare nuclei into the ring one by one. The ring, which consists of six sector magnets and straight sections, allows us to determine the mass with an order of 10^{-6} precision even for only one particle by measuring the revolution time of the particle in precisely tuned isochronous optics. Here, we report on the present status of this project.

理研RIBFにおける稀少RIリング計画の現状

1. はじめに

来るべきRIBF加速器系におけるビーム大強度化を見据えて、今後いくつかの基幹実験設備の建設が予定されており、その内の一つに「稀少RIリング」^[1]がある。この基幹実験設備は、安定線から遠く離れた、非常に生成量が少なく短寿命なRIの精密質量測定に特化した装置となる。1つ粒子を入射できれば測定可能であり、その測定時間は1ms以下で良い。尚かつ、質量を相対誤差 10^{-6} のオーダーで決定出来る。例えば、未知の中性子過剰な短寿命RI (RIBF加速器系がフル稼働すればBigRIPSを用いて生成が可能)を経由するr-過程、そのr-過程領域の質量を100keVのオーダーで系統的に測定することが可能となる。その結果として、r-過程の道筋の検証に対し、実験的に精度良く得られた質量値を用いる事で決定的な知見を与え、他の物理量や天文学などと合わせてr-過程を統合的に理解できると期待される。

このように非常に稀 (1p/day) で短寿命 (>1ms) なRIの質量を精度良く ($\delta m/m \sim 10^{-6}$) 測定する本実験設備は大きく分けて3つの系から成る。(1)RIビームの速度測定と到達時間遅延のための長尺の入射ビームライン、(2)キッカーとセプタムからなる入射スキーム、(3)6個の偏向電磁石と直線部から成るリングサイクロトロン型等時性蓄積リングである。まず

本実験設備の概念と原理を簡単に述べ、次に各設備に対する基本仕様及び進捗状況を報告する。

2. 概念と原理

図1に本実験システムの概念図を示す。概念は前回の発表^[2]から変更無いが簡単に記述する。BigRIPS前段において選別された粒子 (核子当り200MeV) は、自らがBigRIPSのF3焦点面で発生させたトリガ信号により励磁されたキッカー電磁石によって、等時性リングの平衡軌道に入射される。粒子ごと上記のような手法により入射を行う個別入射手法^[3]を採用する。入射後、約3000周 (~1ms) リングの平衡軌道上を周回した粒子は、入射時と同じキッカー電磁石により出射される。出射された粒子は粒子識別される ($B\rho$ -TOF- ΔE -E)。

粒子の質量 (質量電荷比: m/q) は、等時性磁場 ($B=B_0 \gamma$) が形成されているリングの周回時間 (T) を測定することにより導出する ($T=2\pi(m/q)(1/B_0)$)。質量の相対誤差は 10^{-6} のオーダーを目標としているため、等時性磁場調整及びリング周回時間測定はそれぞれ 10^{-6} 以下の精度で行う必要がある。

等時性磁場の調整には安定核を用いる。質量未知の目的粒子と同等の m/q 値及びエネルギーを持った質量既知の安定核を生成し、リングに入射した上でRFにより加減速する。RFで加減速することで異な

¹ E-mail: yamaguch@ribf.riken.jp

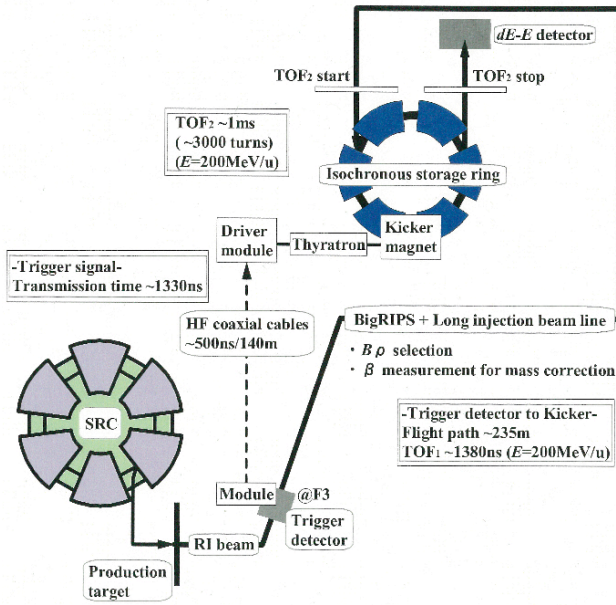


図1：実験システムの概念図

る平衡軌道上（運動量幅： $\delta P/P \sim \pm 1\%$ ）で粒子を保持させつつ周回させ、各周回周波数をリング内に設置する検出器で測定する。各周回周波数の差が 10^{-6} 以下になるように偏向電磁石の磁場を調整し等時性を形成する。その後、調整した等時性磁場内に質量未知の目的粒子を入射、周回時間を測定し質量を決定する。しかしながら、目的粒子は磁場調整時に使用した安定核と m/q 値が完全に一致しているとは限らない ($m_1/q = m_0/q + \Delta(m_0/q)$)。その場合、目的粒子にとってリング内は等時性であるとはいえ、次の式に示すような関係から、速度 β による補正が必要となる。

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

また、 m_1/q の相対誤差は次のように表される。

$$\frac{\delta(m_1/q)}{m_1/q} = \frac{\delta(m_0/q)}{m_0/q} + \frac{\delta(T_1/T_0)}{T_1/T_0} + k \frac{\delta\beta_1}{\beta_1},$$

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

係数 k は $\Delta(m_0/q) \sim 1\%$ の時、 10^2 のオーダーとなる。従って、同じ磁場設定のまま、 m/q 値が1%違う粒子に至るまで、質量を相対誤差 10^{-6} のオーダーで導出しようとするとはリング周回時間測定とは独立に粒子の速度 β を 10^{-4} 以下の精度で測定する必要がある。その測定はBigRIPS後段と入射ビームラインで行う。

3. 各設備の基本仕様と進捗状況

3.1 長尺の入射ビームライン

図2に現段階におけるフロアアレンジ案を示す。入射ビームラインは、BigRIPSから東大CNSのSHARAQスペクトロメータ^[4]へと続く分散整合ビームライン^[5]の途中から分岐する。入射ビームラインにはTARNII^[6]の偏向電磁石（TN-D、図2赤色）、四極電磁石（TN-Q、図2黄色）及KEK-PSの四極電磁石（PS-Q、図2青色）をそれぞれ再利用する（但し、PS-Qは23台すべてを再利用できない可能性がある）。各電磁石の基本仕様を表1にまとめる。TN-Dの偏向角は15度/台、曲率半径は4.045mである。

表1：再利用する電磁石の基本仕様

MODEL	TN-D	TN-Q	PS-Q
Number of magnets	24	20	(23)
Gap, Bore Diameter (mm)	80	130	100
Length (m)	1.06	0.20	0.60
B(T), B ² max(T/m)	1.6	7	18

図2中の配置は、COSY INFINITY^[7]を用いた1次の光学計算結果を反映している。計算はBigRIPSのF3焦点面を起点として行い、初期条件： $\delta x = \pm 1\text{mm}$, $\delta y = \pm 1\text{mm}$, $\delta\theta = \pm 8\text{mrad}$, $\delta\phi = \pm 8\text{mrad}$, $\delta p/p = \pm 1\%$ で、リングにディスパーシブ入射可能という結果を得た。

今後、より高次の項を考慮し、速度 β を 10^{-4} 以下の精度で測定できるのか、マッチングがとれ効率良く入射できるかなど、収差などを踏まえて検討する。入射ビームラインは平成22年度中の完成を目指す。

3.2 入出射スキーム

リングへの入出射は、キッカーとセプタムを利用してシングルターンで行う（入射周期は1Hz）。セプタムにおける偏向角は約30度であり、キッカーにおける蹴り角は約30mradとなる。キッカーとセプタム間の位相進度は、リングのTUNEにもよるが約280度である。

キッカーシステムの応答時間短縮は、トリガ信号伝達時間短縮に繋がる。既存のモデルキッカー（フェライトと極板容量による分布定数型）を用いたR&Dの結果、応答時間を約550nsにすることが可能であることがわかった。加えて、電源内部回路の最適化を行えば、さらに100ns程度短縮できる見込みである。また、キッカー電磁石は周回軌道に設置するため、入出射時以外に粒子が磁場を感じると平衡軌道から逸脱してしまう。特に入射時点（最大磁場発生時点）から330ns後（リング一周後）には磁場を完全に0Tにする必要がある、それを満たす磁場波形の構築が不可欠となる。現状ではフラットトップを持った磁場波形を考えているが、フラットトップを十分長くとれない分、リングによる影響を完全に除去しきれない可能性が高く、sin半波などを発生させる方法も含めて、今後詳細に検討し最

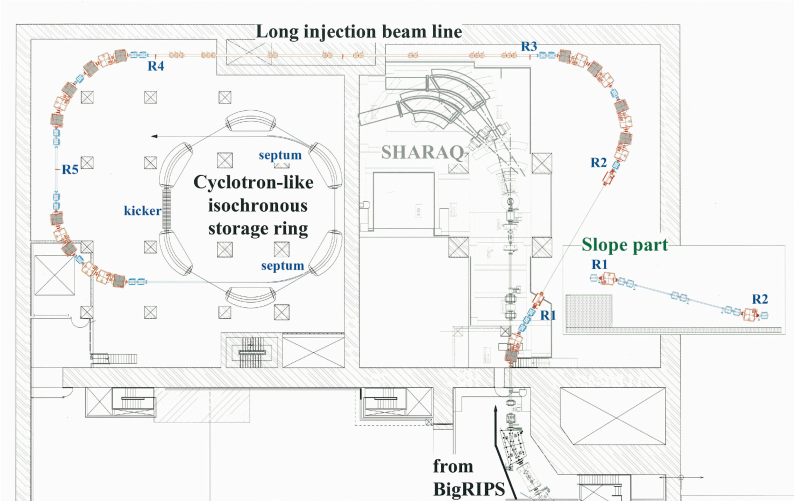


図2：フロアアレンジ案

適なキッカーシステムの構築を目指す。

3.3 リングサイクロトン型等時性蓄積リング

等時性リングは6個の偏向電磁石に加え、直線部には入射デバイスとRFキャビティ及び軌道補正用ステアラーなどを備える予定である。手始めに、MADプログラムを用いた行列計算よりTUNEやTWISSパラメータなどを算出し、リングの基本仕様(表2)を考察した。TUNEは $\nu_x=1.26$ 、 $\nu_y=0.78$ である。

表2：リングの基本仕様

Ring	Sector number	6
	Circumference	56.13 m
	Momentum acceptance	$\pm 1\%$
Sector magnet	Bending angle	1.047 rad
	Edge angle	0.155 rad
	Radius of curvature	4.3 m
	Magnetic strength	~ 1.5 T

さらなる詳細な検討のために、4次のルンゲクッタ法を用いたシミュレーションコードを開発中である。等時性磁場に関しては、リングの偏向電磁石の面角による1次の補正、高次の補正をトリムコイルで行うことにより、その出来具合を 10^{-6} 以下の精度まで調整する方針である。図3に設置誤差、磁場誤

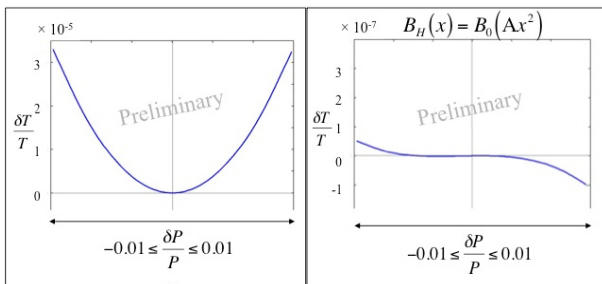


図3：等時性磁場の出来具合

差、設計誤差などが無い理想条件下における等時性磁場の出来具合に対する予備的な計算結果を示す。運動量幅： $\delta P/P \sim \pm 1\%$ において、偏向電磁石の面角による1次の補正を考慮すると 3.5×10^{-5} に達し、さらにトリムコイルによる2次の補正まで考慮すると 10^{-7} の精度を得る。

現段階ではRFキャビティとステアラーの設置場所は未定である。今後、粒子のリング内での振る舞いなど、さらに詳細な検討を進める。

また、基本的に等時性磁場の調整は2章で述べたように安定核を入射しRFを用いて行う予定だが、等時性磁場確認(調整)作業に対し、クラスターイオン源を活用することができないかR&Dを開始した。クラスターイオン源を用いる事が可能となれば、オフライン

でいつでも等時性磁場形成具合を確認できるので非常に都合が良い。

3.4 検出器

粒子の周回時間測定用及び速度 β 測定用検出器としては、プラスチックシンチレータの使用を考えている。しかし、エネルギーストラグリングや電子を有する安定核が通過する際の荷電変換を考慮し、なるべく薄くする必要がある。尚かつ時間分解能は100ps以下に保つ必要もある。MCPの使用なども視野に入れ、TOFカウンタのR&Dは進行中である^[8]。

また、等時性磁場確認(周回周波数測定)用検出器として、高感度ショットキーモニタの開発を予定している。

4. まとめ

本実験設備の概念と原理を基に、各設備の基本仕様を検討した。入射ビームラインの光学計算も本格的に開始され、その配置もほぼ確定した。今後行うべき事は多々あるが、詳細検討を着実にを行い、完成を目指す。

参考文献

- [1] Y. Yamaguchi, et al., "Rare-RI ring project at RIKEN RI beam factory" Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008), in press
- [2] H. Ohta, et al., 第2回日本加速器学会年会報告集 (2005) 171.
- [3] I. Meshkov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A523 (2004) 262.
- [4] T. Uesaka, et al., "The high resolution SHARAQ spectrometer" Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008), in press
- [5] T. Kawabata, et al., "High resolution beam line for the SHARAQ spectrometer" Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008), in press.
- [6] T. Katayama, et al., Part. Accel. 32 (1990) 105.
- [7] M. Benz, Nucl. Instr. and Meth. A298 (1990) 473.
- [8] S. Nakajima, et al., "Development of a time-of-flight detector for the Rare-RI Ring project at RIKEN" Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008), in press.