話　題

理研 RI ビームファクトリー稀少 RI リングの建設

山口　由高*1・若杉　昌徳*1・阿部　康志*1・洲嵜　ふみ*1,2・長江　大輔*1・大甕　舜一朗*2
三浦　宙*2・Sarah NAIMI*1・Zhuang GE*1,2・山口　貴之*2・小沢　顕*3・上坂　友洋*1
大西　純一*1・菊池　崇志*4・込山　美咲*1・熊谷　桂子*1・徳地　明*5・藤縄　雅*1
眞家　武士*1・山澤　秀行*1・柳澤　善行*1・渡邉　環*1・渡邉　裕*1・矢野　安重*1

Construction of the Rare-RI Ring at RIKEN RI Beam Factory

Yoshitaka YAMAGUCHI*1, Masanori WAKASUGI*1, Yasushi ABE*1, Fumi SUZAKI*1,2, Daisuke NAGAE*1
Syun-ichiro OMIKA*2, Hiroshi MIURA*2, Sarah NAIMI*1, Zhuang GE*1,2, Takayuki YAMAGUCHI*2
Akira OZAWA*3, Tomohiro UESAKA*1, Jun-ichi OHNISHI*1, Takashi KIKUCHI*4, Misaki KOMIYAMA*1
Keiko KUMAGAI*1, Akira TOKUCHI*5, Tadashi FUJINAWA*1, Takeshi MAIE*1, Hideyuki YAMASAWA*1
Yoshiyuki YANAGISAWA*1, Tamaki WATANABE*1, Yutaka WATANABE*1 and Yasushige YANO*1

Abstract

We are constructing an isochronous storage ring named “Rare-RI Ring （R3）” at RIKEN RI Beam Factory. R3 is the most favorable equipment for measuring the mass of rare-RIs in a precision of the order of ppm by using the relative TOF measurement method. Recently, we carried out a commissioning run using ^{78}Kr beam and the basic performances of R3 were verified. In this article, we describe the history of the past, the results of the commissioning run, and future prospects.

1. はじめに

稀少 RI リングは, 理研仁科加速器研究センター RI ビームファクトリーの基幹実験装置の一つであり，サイクロトロン原理に基づく等時性磁場を活用して質量を精度良く（目標は ppm オーダー）測定することを主目的としたユニークな蓄積リングである．測定したい粒子に狙いを定めてリングに蹴り入れる個別入射方式[1,2]を世界で初めて導入することで，RI ビームファクトリーをもってしても稀にしか生成されない放射性同位元素（以下，稀少 RI とする.）を効率良く 1 粒子毎リングに入射する．それに加えて測定時間を 1 ms 以内とすることで，安定核より遠く離れた極短寿命な領域，例えば，鉄より重い金やウランに至るまでの重い元素の約半分が合成されたという仮説「r 過程」領域まで研究対象を広げることができる特色を持つ．つまり，稀少 RI リングを用いて r 過程領域の質量を系統的且つ精度良く測定することで，重元素合成過程の謎を解き明かす糸口となる実験的データが得られると期待されている．

稀少 RI リングが，RI ビームファクトリーの基幹実験装置として提案されてから既に十年以上経過している．その間，必要な性能・特色を保持しつつ如何にしてコストを削減し現実的な装置にするかということを念頭に検討を進めてきた．そして，凡そ目処がついた 2012 年初頭に予算を獲得し，建設を開始することとなった．使用する電磁石の大半を再利用することで約 1 年で装置全体の概形を完成させ，次の 1 年で真空や制御系な

*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 筑波大学数理物質科学研究科　Institute of Physics, University of Tsukuba
*4 長岡技術科学大学原子力システム安全工学専攻
Department of Nuclear System Safety Engineering, Nagaoka University of Technology
*5 株式会社パルスパワー技術研究所　Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

どの整備を行い，各機器の健全性を確認した．2014 年には，α 線源を用いた各機器のオフライン性能試験を行い，基本動作に問題がないことを確認した．そして，2015 年 6 月には ^{78}Kr を用いたビームコミッショニングを初めて実施した．ビームコミッショニングでは，1 粒子毎の個別入射を確立し，約 700 μs 周回させた後に素早く取出すことに成功した．また，本装置で行なう質量測定手法に欠かせない飛行時間（TOF）も測定した．その際に得られた TOF スペクトルの幅は，取出された粒子に対する等時性度に起因する．等時性度は質量測定精度に直接影響を及ぼす．今回は，等時性磁場を調整するために設けたトリムコイルの効果を TOF スペクトルを使って確認した．最後に取出しを行なわない蓄積モードにおいて，共鳴空洞型ショットキーピックアップの性能試験を行なった．^{78}Kr が 1 粒子のみでも，感度を高めたこの非破壊型ビームモニタを用いれば，周波数情報を獲得することができることを確認した．

このように装置として大きな第一歩を踏み出した今，これまでの経緯を踏まえつつ本装置の全容についてご報告させていただきたい．

2. 装置に求める性能と建設に至るまで

本装置を用いて稀少 RI の質量を精度良く測定するための概念設計を**図 1** に示す．超伝導リングサイクロトロン SRC 及び RI ビーム生成分離装置 BigRIPS[3] をもってしてもポツポツとしか生成されない稀少 RI を効率良くリングに入射するためには，先にも述べた個別入射が必要不可欠である．具体的には，BigRIPS の F3 焦点面でリング用キッカー電磁石を励磁するためのトリガ信号を，リングに入射したい粒子自身で発生させる．そしてそのトリガ信号をリングのキッカーシステムに素早く伝達し尚かつキッカーシステムを素早く応答させる．粒子が入射ラインを通りキッカー電磁石に到達する前にキッカー電磁石を励磁できれば，この入射方式は実現する．入射ラインを十分長く設けリング本体を BigRIPS の F3 焦点面の近傍に設置できれば，特に難しいことではない．しかし実際には，建屋の制限でリング本体の設置場所はユニークに決まっていたため，個別入射を成立させつつ各装置のレイアウトを決めることに多くの時間を費やしてきた経緯がある．

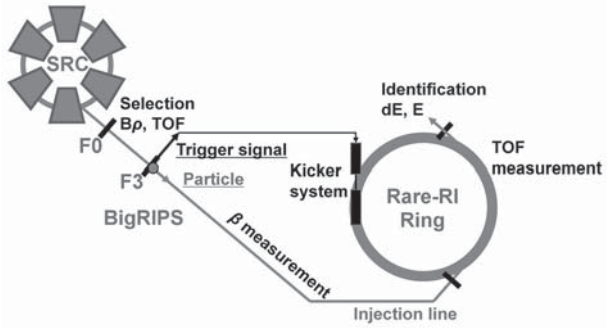

図 1　質量測定のための概念図．

2.1 質量測定の原理

リングに入射された粒子の質量は，測定対象となる粒子（m_1/q）とその粒子のリファレンスとなる粒子（m_0/q）を同じ条件の下で周回させ取出して，それぞれの TOF を測定することで相対的に導出する[4]．2 つの粒子が同じ磁気剛性の時，等時性中での飛行軌道は同じなので，

$$\frac{m_0}{q}\gamma_0\beta_0 = \frac{m_1}{q}\gamma_1\beta_1 \tag{1}$$

$$T_0\beta_0 = T_1\beta_1 \tag{2}$$

という関係が成り立ち，測定対象となる粒子の質量は，

$$\frac{m_1}{q} = (\frac{m_0}{q})\frac{T_1}{T_0}\sqrt{\frac{1-\beta_1^2}{1-(\frac{T_1}{T_0})^2\beta_1^2}} \tag{3}$$

によって求めることができる．すなわち周回時間 $T_{0,1}$ の測定と，それとは独立に速度 β_1 も測定すればよい．また，m_1/q を ppm オーダーで決定するには，

$$\frac{\delta(\frac{m_1}{q})}{\frac{m_1}{q}} = \frac{\delta(\frac{m_0}{q})}{\frac{m_0}{q}} + \gamma_0^2\frac{\delta(\frac{T_1}{T_0})}{\frac{T_1}{T_0}} + k\frac{\delta\beta_1}{\beta_1} \tag{4}$$

$$k = -\frac{\beta_1^2}{1-\beta_1^2} + (\frac{T_1}{T_0})^2\frac{\beta_1^2}{1-(\frac{T_1}{T_0})^2\beta_1^2} \tag{5}$$

の関係より，リファレンスとなる粒子の m_0/q 値が ppm オーダーでわかっていることはもちろん，

等時性がppmオーダーで保証され，m_1/qがm_0/qと比較して1%以内の違いである限り，周回時間$T_{0,1}$の測定精度がppmオーダーであれば，$k \sim 10^{-2}$なので，速度β_1を10^{-4}の精度で測定すればよい．周回時間$T_{0,1}$は，リングを数百μsだけ飛行させ，数十psの分解能で測定を行なうことで精度を出すことが可能であり，β_1は上流の入射ラインで測定することによって精度を出すことは可能である．そして取出した後に粒子識別を行なう，これが質量測定を行なう際に本装置に求める性能である．

2.2 建設

2009年当時の設計では，長い入射ラインとして，2005年に譲り受けた旧東京大学原子核研究所の重イオンクーラーシンクロトロン[5]（以下，TARN IIとする．）の偏向電磁石及び四極電磁石，それに2009年初頭にその一部を譲り受けた高エネルギー加速器研究機構の12 GeVプロトンシンクロトロン[6]（以下，KEK-PSとする．）の四極電磁石の再利用を予定していた．そして，リング本体のセクター電磁石は新規製作することになっていた．ppmオーダーの等時性形成は，ビームエネルギーを核子当たり200 MeVで固定することを前提として1次の補正を面角で2次以上の高次補正をトリムコイルで行なうことで，住友重機械工業（株）や（株）日立製作所と具体的な設計を進めていた．この当時の計画については，東広島で開催された第5回日本加速器学会年会などにおいて発表した経緯がある[7,8]．

設計仕様が固まりつつある一方で，コスト増で計画自体が頓挫する恐れが常にあったため，規模を縮小する検討を2009年以降も引き続き行なっていた．そして，多くの検討を重ね2010年夏頃にたどり着いた方針は，2009年にビームコミッショニングを終えていたSHARAQスペクトロメータ[9]を通過させ，その後段に再利用品のKEK-PS四極電磁石と偏向電磁石を用いたリング用入射ラインを設け，リング本体にも偏向電磁石を再利用することであった[10]．個別入射の成立を考慮した上で入射ラインの短縮に着手できた背景には，長岡技術科学大学及び（株）パルスパワー技術研究所と共同で成し得たキッカーシステム応答時間の高速化[11,12]があったことを付記しておく．**図2**に決定した稀少RIリングの配置図を示す．

図2 稀少RIリングの配置図．SHARAQスペクトロメータを介してBigRIPSと接続．

また，リング本体に偏向電磁石を再利用すると決めたことで，最適ではない面角に対しどのように等時性の1次補正を行なうべきか決める必要があった．まだこの段階ではエネルギー固定としていたこともあり，少し強引ではあったが，リング外側にいくに従ってギャップが狭くなるよう磁極面に階段状の薄い積層シム板を接着する方法[12,13]や上下ヨークを縦方向に回転してやはりリング外側にいくに従ってギャップを狭くし磁場を強くする方法などが提案された．しかし，それらを検証したところ，どちらも技術的に容易ではないことが判明したため，トリムコイルのみで行なう方針に絞った．その場合，1本当たりに対する負担が大きくなる分，設置に必要なスペースも広くなり貴重な縦方向のアパーチャが犠牲になってしまうが，エネルギー可変となることもあり，これが最善策だと結論づけた[14]．この決定は，その後の性能試験がエネルギー固定だった場合に比べ数段楽になったことは言うまでもない．

最終設計仕様の決定に前後して本装置の建設が認められた．まずはリング用ステージ，天井クレーン，電力系及び冷却系などの付帯設備工事から着手した[15]．この付帯設備工事については，名古屋で開催された第10回日本加速器学会年会において発表した経緯がある[16]．続いてステージ上に精密測量した基準点を設け，電磁石の粗据付けを行い電力ケーブル及び冷却水配管などを敷設した．その後直ちに，再利用する電磁石のフラッシングを実施，各種インターロックを整備し，各DC電源による実負荷試験を行い電磁石の健全性を確認した．続いて電磁石の精密アライメントを行なった後に，真空機器接続，ベーキング用機器及びEPICSを用いた制御系の整備などを着実に

進め[17, 18]，建設決定より約２年でα線源を用いたオフライン性能試験ができる状態に仕上げた．

3. 稀少 RI リングを構成する機器

図３は，SHARAQ スペクトロメータ直後に設置する位置検出器用 ILC1 チェンバより後段にある稀少 RI リングを構成する各機器のレイアウトを示す．

3.1 入射ラインとリング本体

入射ラインは，10 台の KEK-PS 四極電磁石及び１台の TARN II 偏向電磁石で構成されている．四極電磁石のボア半径は 50 mm，磁極長は 600 mm，最大磁場勾配は 18 T/m である．偏向電磁石の偏向角は本来 15 度であるが，入射ラインとして使用しているこの１台だけは 15.7 度偏向する必要があるため，補助コイルを設けている．また，この入射ライン用の偏向電磁石の主コイルもリング本体の偏向電磁石の主コイルと直列に接続されているため，入射軌道調整のためだけに変更するわけにはいかないが，補助コイルがあるおかげで ILC2 チェンバに設置する位置検出器を用いて水平方向の位置微調整が可能となる．ギャップは 80 mm である．

リング本体は６セクター対称構造であり，４台の偏向電磁石で１セクターを構成，計 24 台となる．直線部は約 4.02 m であり，中心軌道の周長は約 60.35 m となる．また，各セクター４台の偏向電磁石のうち外側２台に，**図４**に示すようなトリムコイルを上下ヨークに 10 本ずつ設けることで，いかなるエネルギーに対しても周回軌道中心より±50 mm（運動量幅にすると凡そ±0.5%）の範囲内において，ppm オーダーで等時性を調整できるよう改良した．

3.2 入射及び取出しスキーム

入射ラインを通過した粒子は，ILC2 チェンバに設置する TOF スタート検出器[19]を通過し，２台の入射セプタム電磁石によりリング内の入射軌道へ導かれる．セプタム電磁石の偏向角及び曲率半径はそれぞれ 12.7 度と 5.3 度，5.05 m と 13.0 m である．２台目のセプタム電磁石出口における入射軌道中心は，リング周回軌道中心から外側に 90 mm となる．外側へ入射された粒子は，水平方向のベータトロンチューン ν_x に従い大きく蛇行しながら進む．**図３**上方に示した取出しセプタム電磁石を設けた直線部を通過する際の入射軌道は，周回軌道中心より内側に膨らむためそこでビームダクト等と干渉することは無い．さらに蛇行しながら進み，位相進度が $3\pi/2$ の位置にあるキッカー電磁石により典型的には約 11 mrad 蹴られる．ディスパージョンマッチングをとることで，様々な運動量を持つ粒子は，それぞれの平衡軌道へ蹴り入れられ周回を始める．ある決められた時間だけ周回した粒子は，同じキッカー電磁石により同じ量だけ磁場を感じ蹴られて取出し軌道に入る．キッカー電磁石を軸にして入射軌道を折り返したような軌道をとりながら，再びリング内を大きく蛇行し取出しセプタム電磁石に到達し外に出される．外に出された粒子は，ELC チェンバ内に設置する TOF ストップ検出器により TOF 測定は完了する．さらに粒子識別用検出器（$E-\Delta E$）により取出された粒子は識別される．尚，取出しセプタム電磁石は入射セプタム電磁石

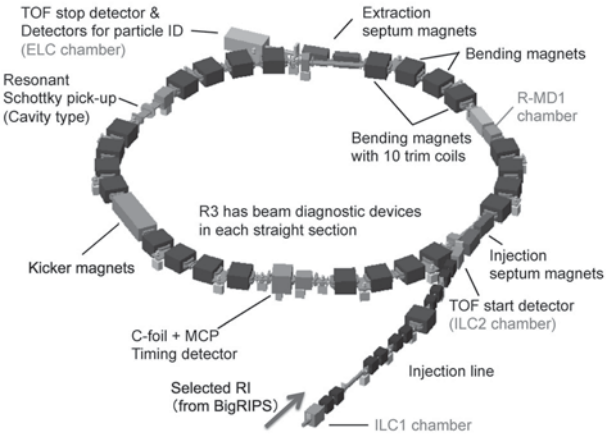

図３　稀少 RI リングを構成する機器．

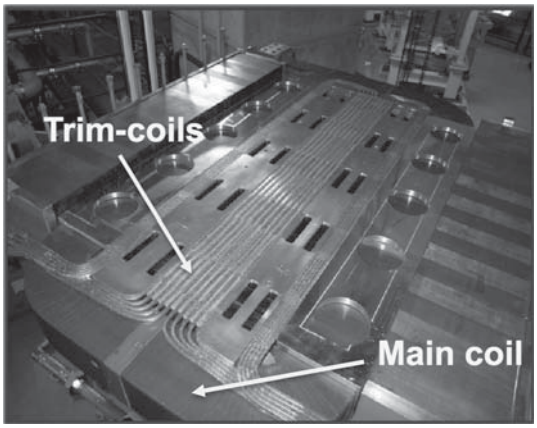

図４　トリムコイルを実装した際の様子，１ターン 6 mm 角のホロコン 10 本を磁極面に固定．

と同じ仕様であり新規製作品となる．

3.3 高速キッカーシステム

図 5 にキッカーシステムのブロック図を示す．先に述べた応答時間の高速化を実現したのは，サイラトロンスイッチのためのグリッドパルサーの改良にあった[11, 12]．また，入射時のみならず取出し時にも同じキッカーシステムを活用するわけだが，入射から取出すまで 1 ms 以内という短時間に，入射用と取出し用のキッカー磁場を発生させる必要がある．そこで我々は，高速繰返し充電システム「ハイブリッド充電システム」を開発した[20, 21]．この充電システムは，主充電系と補充電系で構成される．主充電は，全体の 90%充電を約 100 μs で達成し，残りの 10%分を補充電が約 100 μs かけて徐々に行なう．100%充電に要する時間は約 200 μs である．それに加えて，サイラトロンの約 500 μs という回復時間を考慮すると，再充電完了までの時間は 700 μs を実現できる．さらに，入射のタイミングは粒子自身が決めるため，100%充電状態を保つ必要がある．その役割を担うのは補充電であり，充電状態を監視し 100%を維持するよう常に働きかける．その精度は 1%以内を達成している．**図 6** は，実機仕様キッカーシステムの試験時に得られた信号で，入射のための放電の約 700 μs 後に取出しのための放電が可能であることがわかる．最大 75 kV 充電に対して，この 2 連続充放電 1 セットを最大 100 Hz で運転可能なシステムを完成させた[22]．

3.4 ビーム診断系

リング内の入射軌道を調整する時に用いるビームモニタは，現段階では一般的なプラスチックシンチレータをキッカー電磁石がある直線部以外の 5 箇所にそれぞれ設置している．将来的にはベーキングに耐えうるスクリーンモニタを導入する予定である．一方，周回している 1 粒子に対するビームモニタとしては，炭素薄膜（100 mm × 50 mm，厚さ 60 μg/cm^2）とマイクロチャンネルプレート（MCP）を用いたタイミング検出器[19]及び非破壊型ビームモニタである共鳴空洞型ショットキーピックアップ[23]を用意した．前者は最初の数十周の粒子の周回周波数情報などの確認のため，後者は等時性を調整する際に用いるビームモニタである．

3.5 真空，電源及び制御系

リング内を 10^{-8} Pa の超高真空で維持するために，真空ダクトをベーキングする準備が整っている．また，イオンポンプ 26 台と NEG ポンプ 26 台を用いた密閉型の排気システムとし，入射部及び取出し部には高速緊急遮断バルブを設け周囲のチェンバ内のトラブルからリング内の真空を守れるよう設計した．現状はベーキングをまだ行なっていないこともあり，リング内の真空度は 10^{-5} Pa 前半から 10^{-6} Pa に留まっている．

各直流電源はリングステージの下に設置した．入射ラインの四極電磁石 10 台についてはそれぞれ空冷の直流電源を使用している．定格消費電力は 1 台当たり 10 kW 程度である．セプタム電磁石は入射及び取出し用に計 4 台あるが，それぞれのリングに近い側のセプタム電磁石 2 台を直列に接続，リングから離れている側のセプタム電磁石 2 台を直列に接続することで直流電源は計 2 台で運用している．それぞれの定格消費電力は 85 kW 程度と 110 kW 程度となる．トリムコイル用直流電源は 12 系統が 1 つの筐体に収まって

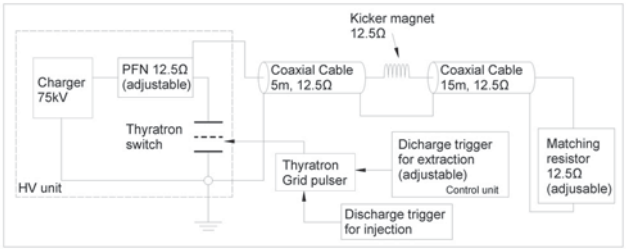

図 5 キッカーシステムのブロック図．主にコントロールユニット，高圧ユニット，電磁石及びマッチングロードから構成され，特性インピーダンスは 12.5 Ω とした．

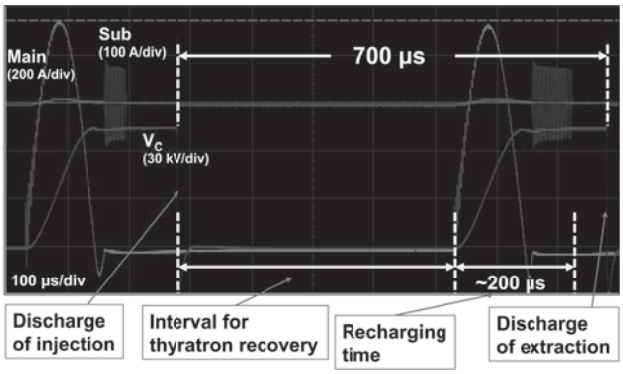

図 6 入射用と取出し用それぞれの充放電パターンを示す．図中の Main 波形，Sub 波形及び Vc 波形はそれぞれ主充電電流値，補充電電流値及び充電電圧値．

いる再利用品を活用しており，定格消費電力は 1 台当たり 5 kW 程度である．入射ラインの補助コイル用直流電源はトリムコイル用直流電源の余りの系統を拝借して運用している．最も大容量なのがリング主コイル用直流電源で，入射ラインの偏向電磁石も含め 25 台を直列接続し励磁するため 1.3 MW 級となる．一方で，電流リップル及び長期ドリフトを ppm オーダーで収めるように制御する必要がある．また，リングを構成する 24 台の偏向電磁石は，過去の磁場測定データを参考に各セクター毎の BL 積値が平均化するように配置している．ただ，将来的に補正が必要な場合に備え，各偏向電磁石に付随する補正コイルを活用できるよう準備した．補正コイルは各セクター毎，つまり偏向電磁石 4 台分を直列に接続し励磁できる体制をとっている．

上記の直流電源系及びリングの運転に必要な駆動系の制御には EPICS を用いている．但し，真空制御系は独立に制御することとし，制御室では監視のみできる状態となっている．この章の終わりに，リングの俯瞰写真を**図 7** に示す．

4. α 線源を用いたオフライン性能試験

ビームコミッショニングに向けた高速キッカーシステム及びビーム診断系の整備を進める一方で，本装置の基本性能を確かめるため α 線源（^{241}Am）を用いたオフライン試験を実施した．

4.1 トリムコイルの役割

まず，α 線源をリング直線部の周回軌道中心に設置し（**図 3** の R-MD1 チェンバ内），線源を挿むように TOF スタート検出器と TOF ストップ検出器を設置，主コイル及びトリムコイルを適切に励磁すれば α 粒子がリング内を 1 周回ることを確認した[24]．この時 10 本のトリムコイルには，1 次のトリム磁場の最適解を反映した電流値を与えている．次に，トリムコイルが等時性調整の役割を果たしているかどうかを確認するため，主コイル電流値を固定し，トリムコイル電流値（1 次のトリム磁場（dB/dr）$/B_0$［1/m］）を変更しながら α 粒子 1 周の TOF 測定を行った．この時，途中にコリメータを設置し角度を ±20 mrad 程度に絞っている．また，線源出口の薄膜でのストラグリングによるエネルギーの広がりにも制限をかけており，ディスパーシブエリア（水平方向のベータトロンチューンがほぼ 1 なので線源の対角側）にスリットを設け，運動量幅にして 1%以内に絞っている．1 次のトリム磁場を変数として 1 周後の時間幅をプロットした結果を**図 8** に示す．データを 2 次の関数でフィッティングした結果，1 次のトリム磁場が（dB/dr）$/B_0=0.205$ の時に時間幅は最小値となり計算での推定値と一致し，トリムコイルが設計通りだということが確認された．一方，α 粒子が 1 周する時間（約 4.5 μs）に対し，（dB/dr）$/B_0=0.205$ の時でも時間幅は RMS で約 1.7 μs であり，等時性度としては 4×10^{-4} 程度と言える．これは，1 次のトリム磁場による TOF のばらつきを数値解析した結果よりも凡そ 1 桁悪い．理由としては，測定系のジッターの影

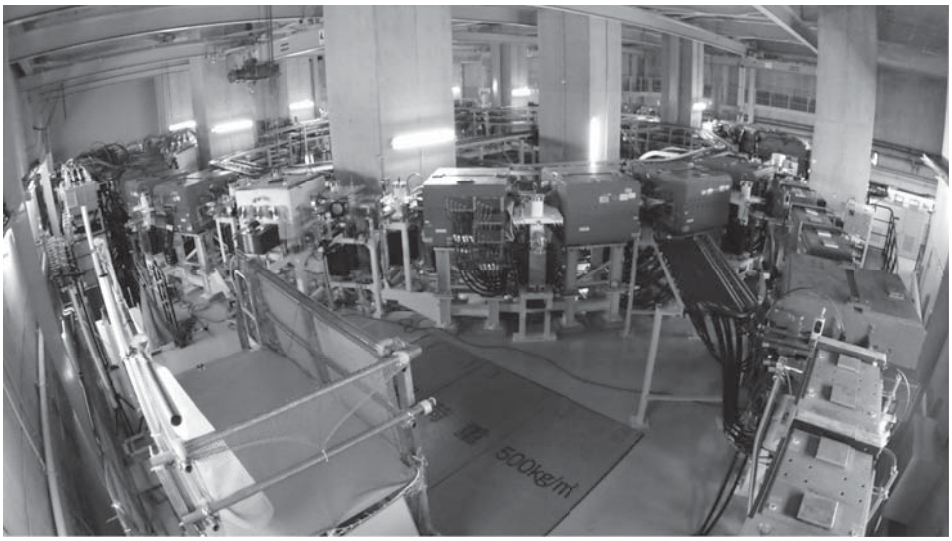

図 7　入射ライン側から撮影した稀少 RI リングの俯瞰写真．

響や主コイル電源の電流安定度の影響（電流値が定格より小さいため）などが考えられる．トリムコイルによる等時性調整の検証については，ビームコミッショニングに譲ることとした．

4.2 個別入射・取出しの実現

続いて，入射ラインの健全性，入射軌道の調整手法の確立及びキッカーによる入射・周回・取出しを確認するために，α線源を入射ラインスタート地点（**図3**のILC1チェンバ付近）に設置した．リング入射直前（**図3**のILC2チェンバ内）には炭素薄膜＋MCPを設置し，TOFスタート信号を得るだけでなく，キッカーシステムへのトリガ信号を発生させた．α粒子の場合は飛行速度が遅いため，発生させたトリガ信号を一般的な同軸ケーブルを用いてキッカーシステムへ伝達させても，α粒子がキッカー電磁石へたどり着くよりも十分速くキッカー電磁石の励磁が可能なため，個別入射の仕組みが成り立つ．

入射ラインの健全性を確認した後，リング内の各直線部に設置した水平方向に駆動可能なプラスチックシンチレータを用いて入射軌道の調整を行なった．次に，キッカー電磁石を励磁し，そのタイミング及び強度を調整することでα粒子をリングの周回軌道にのせた．このオフライン試験では，キッカー電磁石を入射用と取出し用の2系統用いることで，α粒子を1周回すだけで取出し可能な仕組みとした．入射した後，再びキッカーエリアを通過するタイミングに合わせて取出し用キッカー電磁石を励磁し（強度は入射時と同じ値で固定），リング取出し後（**図3**のELCチェンバ付近）に設置したプラスチックシンチレータにてα粒子の計測に成功した．収量は非常に少なかったが，取出し用キッカー電磁石の励磁タイミングを整数倍ずつ遅延させることで最大10周回した後に取出すことにも成功した．

このオフライン性能試験を通じて我々が得た本装置運転に対する知識は，ビームコミッショニングを遂行するための十分な訓練となった．

5. ビームコミッショニング

2015年6月，^{78}Krを用いたビームコミッショニングを実施した．目的は，ビーム輸送系の確立，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である．

5.1 個別入射・周回・取出し

ビーム輸送は，各焦点面に設置した位置検出器（PPAC）を用いてBigRIPS上流から慎重に行なった．**図9**は，SHARAQスペクトロメータ直前の焦点面（S0焦点面）からキッカー電磁石までの水平方向のビーム光学軌道計算結果を示す．S0ではアクロマティックフォーカス，ILC1及びILC2ではディスパーシブフォーカスを，キッカー電磁石中心ではリングのディスパージョンとのマッチングをとるような軌道とした．リング入射時のエネルギーは核子当たり168 MeVであり，その時のリングの設計値は次の通りである．運動量中心（$\delta p=0$）に対する遷移ガンマは$\gamma_{tr}=1.18$，ベータトロンチューンはそれぞれ$\nu_x=1.18$，$\nu_y=0.93$である．また，β関数はそれぞれ$\beta_x=8.4$ m，$\beta_y=11.9$ m，キッカー電磁石中心に

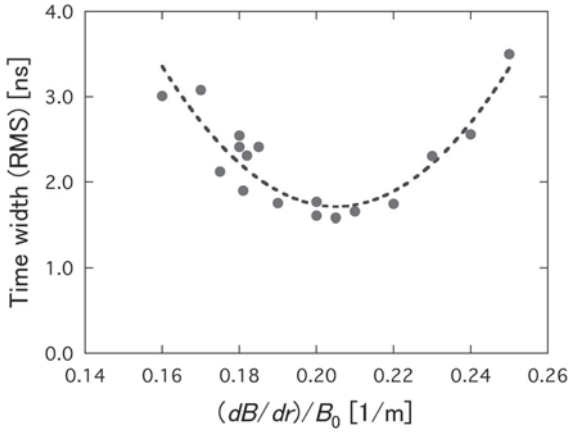

図8 丸点は1次のトリム磁場（dB/dr）/B_0［1/m］を変数としたα粒子1周後の時間幅のプロット．点線はデータを2次の関数でフィッティングした結果を示す．

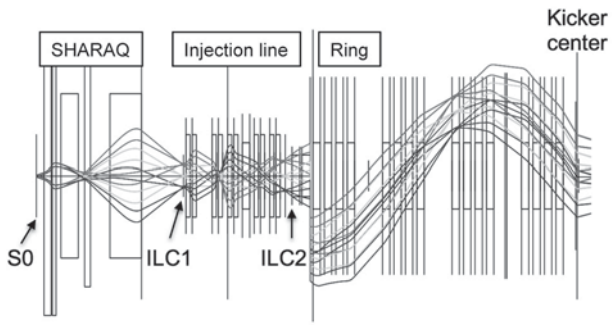

図9 水平方向のビーム光学軌道計算結果．想定している運動量幅は$\delta p/p_0=\pm0.3\%$．リングへの入射点はリング周回軌道中心から外側へ90 mm．

おけるディスパージョンは $D_x = 7.0$ m となる．

光学計算に基づき入射軌道を調整した後キッカー電磁石を励磁し，そのタイミング及び強度を調整することで ^{78}Kr を 1 粒子毎に周回軌道にのせ，個別入射に成功した．**図 10** は，リング周回軌道上に設置したビームモニタである炭素薄膜＋MCP によって得られたスペクトルである．それは周期的な信号であり，粒子がリングに入射され周回を始めたことが確認された記念すべき瞬間であった．

周回している ^{78}Kr をリングから取出すには，高速取出しのために開発した「ハイブリッド充電システム」を備えた入射時と同じ充放電系を使用する．取出す側のタイミングは，クロックジェネレータを用いて入射動作開始時より最短 700 μs から最長 9.5 ms までの間を 10 ns ステップで調整可能である．まずは最短 700 μs 付近で取出しのタイミングを調整し，取出し後に設置したプラスチックシンチレータにて信号を確認した．その後取出す時間を徐々に遅延させていき，最長 9.5 ms 付近での取出しに成功しこのシステムの健全性を証明した．

5.2 等時性調整

等時性度の確認には**図 11** に示すような，縦軸を TOF，横軸を運動量とした 2 次元プロットを活用した．**図 11** 上側は，1 次のトリム磁場が $(dB/dr)/B_0 = 0.277$ における結果，下側は $(dB/dr)/B_0 = 0.279$ における結果をそれぞれ示す．これらの結果よりまずわかることは，リングから取出すことのできる範囲は，運動量幅にすると ±0.2% 程度に留まっているということである．この値は，リング内で等時性を ppm オーダーで調整できる範囲の半分以下となる．これは，セプタム電磁石付近のビームダクト口径の狭さと入射取出し軌道の大きな蛇行に起因するためと思われ劇的に改善するのは難しい．しかし，入射軌道を再検討することで改善する余地が若干あると考えている．次にわかることは，約 700 μs の TOF に対して取出し可能な運動量範囲内での時間差は全幅でも数十 ns 程度ということである．これは等時性度が取出し可能な運動量範囲内で 10-ppm オーダーで成り立っていることを意味する．また，今回のコミッショニングにおいては時間の都合上，1 次のトリム磁場 $(dB/dr)/B_0$ を規則的に変更した系統的なデータを得ることができなかったが，$(dB/dr)/B_0$ 値 2 点の違いによる運動量を関数とした TOF 分布の変化を比較することができた．2015 年 9 月現在，詳細な解析を行なっている最中だが，その傾向は事前に実施したシミュレーション結果と一致しており，システム全体が想定通り動作していることを証明できた．

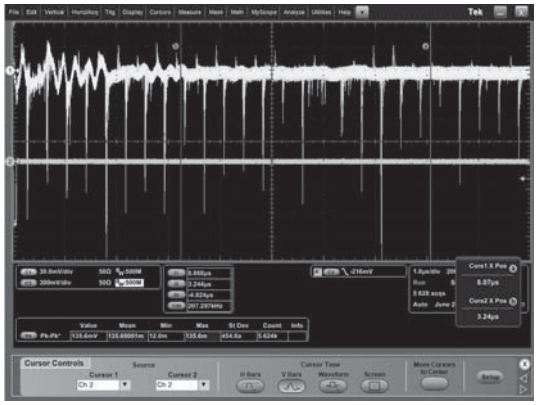

図 10 リング周回軌道上に設置したビームモニタ（炭素薄膜＋MCP）を粒子が通過する度に得たスペクトル．

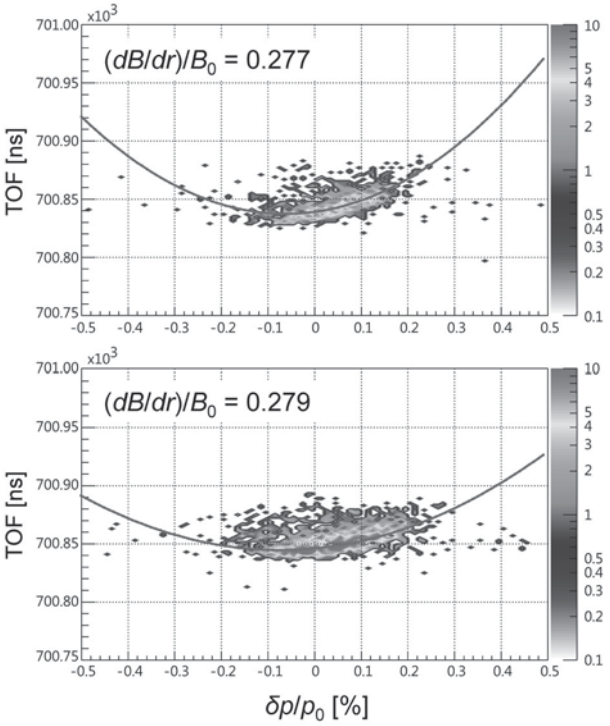

図 11 縦軸を TOF，横軸を運動量とした 2 次元プロット．上図は 1 次のトリム磁場が $(dB/dr)/B_0$=0.277 における結果，下図は $(dB/dr)/B_0$=0.279 における結果をそれぞれ示す．曲線は横軸の運動量 0.01%毎に TOF の平均値を導出しその値を 2 次の関数でフィッティングした結果を示し等時性傾向の目安とした．

高精度の質量測定実験を行なう場合には，等時性を高精度で調整する技術が必要なため，次回以降のビームタイムのできるだけ早い段階で系統的な測定を行なう予定である．その時には，1次のみならず2次のトリム磁場の調整についても考慮し（ppm オーダーでの等時性調整が可能というシミュレーション結果を得ているため），**図 11** の2次元プロットを指標とするだけでなく，非常に精度良く周波数情報を得ることができる共鳴空洞型ショットキーピックアップを活用する．

5.3 共鳴空洞型ショットキーピックアップ

共鳴空洞型ショットキーピックアップとは，共鳴空洞をピックアッププローブとする非破壊型のビームモニタである．ビームが通過した際に空洞内に誘起されるわずかな電磁場を捕らえ，ローノイズアンプで増幅した後に，リアルタイムスペクトラムアナライザーを用いて高速フーリエ変換しショットキースペクトルを得るシステムを構築した[23]．今回のコミッショニングでは，^{78}Kr が1粒子でもリング内を周回していれば，その周波数情報を得ることができることを実証することが目的であった．空洞の共鳴周波数は，**図 10** より得た周回周波数をハーモニクス（h = 66）倍した値の 174.217 MHz とし，取出しを行なわない蓄積モードでイベントの発生を待った．^{78}Kr が1粒子のみでも，それに起因する信号がアベレージング後の熱ノイズに勝った時に，周波数情報として得ることができる．**図 12** は1粒子の ^{78}Kr がリング内を周波数を変えながら4 s 程度周回していたことを示す1例である．周波数が変わってしまう理由は，リング内の真空度が 10^{-5} Pa 前半とあまり良くなく（ベーキングなし），周回を重ねるうちにエネルギーを失い運動量が変わっていったためである．また，**図 12** が示すこの曲線はそれぞれの運動量での等時性度に起因しており，この例では運動量が中心より少しプラス側の粒子が入射され周回を始めたが，徐々にエネルギーを失い運動量を小さくしながら一旦は周回時間が速くなるがその後徐々に遅くなる，というように理解すると，**図 11** の曲線と同じ傾向であることがわかる．**図 12** に示した例以外にも数 s の間リング内に留まったイベントを 11 個観測しており，**図 11** の2次元プロットと照らし合わせ，得られた結果を理解するための詳細な解析を行なっている最中である．

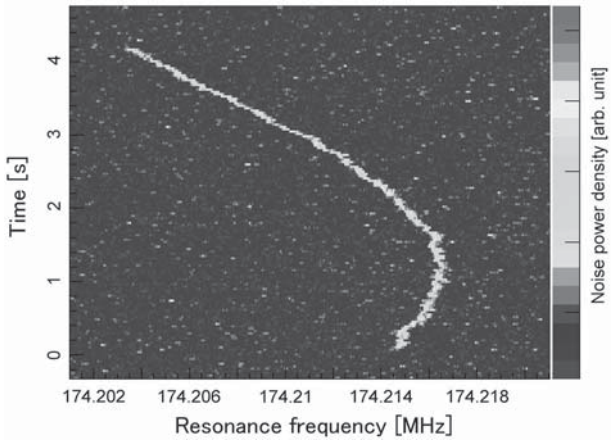

図 12 縦軸は信号検出後からの時間経過，横軸は共鳴周波数を示す．

今回のコミッショニングにおいて，1粒子でも数十 ms 周回を続ければその周波数情報を得ることが可能であり，このシステムが高感度であることを初めて示すことができた．また，^{78}Kr に起因して得られた信号の幅は，共鳴周波数に対して FWHM で 1.3×10^{-6} 程度と非常に狭く高分解能であることも確認できた．高感度且つ高分解能なこの共鳴空洞型ショットキーピックアップは，必要な運動量範囲内の等時性を ppm オーダーで調整する際の指標として十分に活用できるはずである．

6. 今後の展望

今後まず行なわなければならないのは，本装置を用いた質量測定の原理検証である．そのために，複数核種（二次ビーム）を用いたビームコミッショニングを今年 12 月に実施する予定である．そして，質量測定の原理検証を無事終えた後，来年には質量測定実験を開始したいと考えている．また，ppm オーダーマシンの構築に向けまずは2次のトリム磁場を取り入れ等時性の調整を行なう必要がある．ppm オーダーとなると，電源の電流，室温，冷却水温度及びヨーク温度などのそれぞれの安定度や，各セクター毎の磁場のばらつき，ディスパージョンマッチングの達成具合等様々な要因が影響を及ぼすと考えられる．今後数年かけて，本装置を総合的に理解し改良・検討を重ね，たとえ1日1粒子だけでもリングから取出せさえすれば，ppm オーダーで質量を決定出来る装置に

仕上げたい．一方では，共鳴空洞型ショットキーピックアップを活用した稀少 RI の寿命測定も計画されており，現在はまだ乏しいリング内の真空度を，ベーキングを行なうなどして超高真空にする必要がある．また将来的には，薄い内部標的とエネルギー回復用 RF 加速空洞を利用した稀少 RI の核反応実験等も予定されており，RI ビームファクトリーの重イオン蓄積リングとしての特徴を活かした実験の場として発展していくはずである．

7. おわりに

長い間稀少 RI リングの開発に従事してきた一人として，^{78}Kr を用いたビームコミッショニングを通じて，本装置が想定どおりに動作することが確認できたことは感慨深い．また，共著者として名前を掲載させて頂いた方々だけでなく，これまで本装置に関わっていただいた業者・大学・研究所の方々に，この場をお借りして心より感謝致します．

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) I. Meshkov, et al., “Possibilities for experiments with rare radioactive ions in a storage ring using individual injection” Proc. of European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, July 5-9, 2004.
3) T. Kubo, “In-flight RI beam separator BigRIPS at RIKEN and elsewhere in Japan” Nucl. Instrum. and Methods B204 (2003) 97.
4) A. Ozawa, et al., “The rare-RI ring” Prog. Theor. Exp. Phys 2012, 03C009.
5) 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.
6) https://www.kek.jp/ja/Facility/IPNS/PS/
7) Y. Yamaguchi, et al., “理研 RIBF における稀少 RI リング計画の現状” Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashi-Hiroshima, Aug. 6-8, 2008.
8) Y. Yamaguchi, et al., “Rare-RI ring project at RIKEN RI beam factory” Nucl. Instrum. and Methods B266 (2008) 4575.
9) T. Uesaka, et al., “The SHARAQ spectrometer” Prog. Theor. Exp. Phys 2012, 03C007.
10) Y. Yamaguchi, et al., “Status of Rare-RI Ring” RIKEN Accel. Prog. Rep. 44 (2011) 159.
11) Y. Yamaguchi, et al., “Development of ultrafast-response kicker system for Rare-RI Ring” RIKEN Accel. Prog. Rep. 44 (2011) 157.
12) Y. Yamaguchi, et al., “Present status of Rare-RI Ring project in RIKEN RI Beam Factory” Proc. of the 8th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Frascati, Italy, Oct. 9-14, 2011.
13) Y. Yamaguchi, et al., “Remodeling of TARN II dipole magnet for the Rare-RI ring” RIKEN Accel. Prog. Rep. 45 (2012) 146.
14) J. Ohnishi, et al., “Design of the Trim Coils Generating the Isochronous Magnetic Field for the rare-RI Ring” RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 170.
15) Y. Yamaguchi, et al., “Present status of the rare-RI ring construction” RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) xiv.
16) T. Fujinawa, et al., “理研 RIBF 稀少 RI リングの付帯設備” Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
17) Y. Yamaguchi, et al., “Construction status of the Rare-RI Ring (R3)” RIKEN Accel. Prog. Rep. 47 (2014) 199.
18) M. Komiyama, et al., “Present status of the rare-RI ring construction” RIKEN Accel. Prog. Rep. 47 (2014) 202.
19) Y. Abe, et al., “Developments of time-of-flight detectors for Rare-RI Ring” JPS Conf. Proc. 1, 013059 (2014).
20) Y. Yamaguchi, et al., “Development of the fast charging kicker system for Rare-RI Ring” RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 166.
21) S. Sato, et al., “入出射キッカー用高速 - 高精度 - 高電圧充電器の開発” Proc. of the Annual Meeting of Plasma and Pulse Power, Tokyo, Japan, Dec. 12-14, 2012.
22) Y. Yamaguchi, et al., “Fast-kicker system for rare-RI ring” Proc. of the 9th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Sankt Goar, Germany, Sep. 29 - Oct. 3, 2014.
23) F. Suzaki, et al., “Performance of a resonant Schottky pick-up for Rare-RI Ring project” JPS Conf. Proc. 6, 030119 (2015).
24) Y. Abe, et al., “Isochronous field study of the Rare-RI Ring” Proc. of the 9th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Sankt Goar, Germany, Sep. 29 - Oct. 3, 2014.