

RI ビームファクトリーのビーム強度増強

BEAM-INTENSITY UPGRADE OF RIKEN RI BEAM FACTORY

福西暢尚[#]

Nobuhisa Fukunishi[#]

Accelerator Group, Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

Abstract

RIKEN RI Beam Factory, commissioned in 2006, is the world's most intense heavy-ion beam facility aiming at exploring vast unknown research fields of unstable nuclei. Within various heavy-ion beams accelerated by RIBF, the uranium-ion beam is most important for its research impact and also most difficult to obtain high-intensity beams. The history of uranium beam acceleration at RIBF started with a very low beam intensity of 0.05 pnA in 2007 and recorded 94 pnA in 2019 thanks to various technical developments. In this report, these key developments will be briefly outlined and a future plan of RIBF will be introduced.

1. はじめに

2006年に初ビーム取り出しに成功した理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)[1,2]は、多様な中高エネルギー重イオンビームを用い、入射核破碎反応や飛行核分裂法により自然界に安定に存在しない短寿命核ビームを生成・分離し、これら不安定核の質量、寿命、崩壊様式などを実験的に調べ、宇宙における元素合成の謎を解明する事を目的とする。不安定核の生成断面積は安定核から離れるに従い急激に低下するため、例えば r 過程核の探査には極めて大強度の重イオンビームが必要である。更に、生成された不安定核は大きなエネルギー、角度拡がりを持つため、これをビームとして効率良く利用するには数百 AMeV(A は質量数、以後核子当たりのエネルギーをこの様に記載する)のエネルギーが必要となる。

RIBF のレイアウトを Fig. 1 に示す。RIBF は 2 つの線形加速器(RILAC[3], RILAC2[4])と K 値 70 MeV の AVF サイクロトロン[5]のいずれかを入射器とし、後段加速器として 4 台のリングサイクロトロンを用いて水素からウランに至る全元素を 345 AMeV 以上に加速する。ビーム強度の最終目標は 1 μ A である。使用する加速器の組み合わせ(加速モード)は主として 3 種あるが、うち"固定エネルギーモード"で加速されるウランビームは飛行核分裂法により稀な不安定中重核が得られるため実用的に重要であるとともに加速器技術的にも最も難しい。RIBF でウランビームを加速する場合、いずれかの線形加速器を入射器とし、4 台のリングサイクロトロン(RRC[6], fRC[7], IRC[8], SRC[9])で次々加速する事で 345 AMeV を実現している。尚、RIBF 加速器のうち RILAC, AVF, RRC は RARF と呼ばれた旧施設から継続して使用される加速器で、fRC, IRC, SRC, RILAC2 は RIBF プロジェクトで新たに建設された。RILAC2 を除く新加速器は 2006 年に完成したが、RILAC2 の運用開始は 2011 年であり、それまで固定エネルギーモードの入射器は RILAC であった。本報告では主として RIBF におけるウランビーム強度増強の過程を振り返り、

RIBF の今後を展望する。個々の技術開発の詳細は発表済みの個別の報告に譲り、以下ではウランビーム大強度化の全体的な流れを纏める。

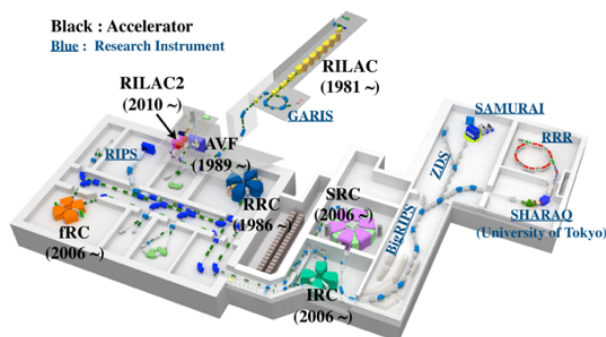


Figure 1: Layout of RI Beam Factory.

2. RIBF 立ち上げ当初の状況

プロジェクト当初予定通り 2006 年に SRC からの初ビーム取り出しに成功した RIBF であるが、2007 年実施のウランビーム実験で得られたビーム強度は 0.05 pnA、最終目標の 1/10000 以下と惨憺たる有様であった。この実験では荷電変換効率を除いた加速器系の総加速効率は僅か 2% に止まり、これは、(1)二次電子や漏洩電場対策が不十分で機能しない各種ビーム診断機器、(2)SRC 共振器におけるマルチパルタ放電、(3)加速器システム全体としての不安定性、に起因する。要するに加速器を十分に調整出来なかったのである。詳細は措くが、(1)に対してはファラデーカップ二次電子サプレッサの強化、サイクロトロン微分プローブの改造など[10]、(2)に対しても真空排気系の強化、共振器内面のクリーニング法、コンディショニング法の見直し[11]などでほぼ問題は解決した。

最大 4 台のリングサイクロトロンを直列に繋いで加速する RIBF では各加速器におけるビーム入射タイミングを厳密に管理することが決定的に重要である。例えば、fRC - IRC 間にはリバンチャ無しの 140

m ビーム輸送系があり、飛行時間は約 1500 ns である。fRC 取り出しビームの速度が 0.01 %変わると IRC に到達するビーム位相は 0.15 ns 変化し、これは IRC 加速高周波の位相に換算して 2 度に相当し、十分に調整された状態でも数%のビーム損失を生じる。ビーム位相を変動させる要因は多様であるが、RIBF の旧施設加速器では冷却水や室温の制御が不十分で、磁極温度変化による磁場変動を 1 ppm 精度で制御する事は出来ず、また荷電変換に用いた炭素薄膜の膜厚がビーム照射に伴い変化するのを抑制する事も不可能であるので、ビーム位相を精密に測定して手動でフィードバックする事とした。

そこで開発されたのが、市販ロックインアンプ SR844 を用いたビーム・RF 位相モニタリングシステム[12]である。本システムでは、全高周波系の位相と電圧、およびビームライン上もしくはサイクロトロン内に設置された位相ピックアッププローブで測定されるビーム位相を常時モニターする。各種時系列データの相関から不安定性の要因を割り出し RIBF 加速器系の安定度改善に貢献するとともに、RIBF の安定運用に必要な不可欠な基盤を提供している。

これら一連の改造、高度化により 2008 年 12 月実施の 345-AMeV ^{48}Ca ビーム実験では 175 pA のビームをユーザーに供給し、2009 年 10 月には He ビームで、2010 年 6 月には ^{18}O ビームでそれぞれ 1 pA を達成した[10]。 ^{48}Ca ビーム強度は当時のイオン源の性能により制限されていたが、その後イオン源からの供給が増えるに従い順調に増加し、2016 年には 740 pA に達する。一方、2008 年 11 月時点のウランビーム強度は 0.4 pA に止まり、相も変わらず最終目標の 1/1000 以下であった。

3. 新入射器の建設

RIBF が目標とするウランビーム強度 1 pA は、イオン源から U^{35+} を 15 pA (= 525 eA) で供給し、fRC 前後で 2 度行われる荷電変換の総効率を 1/15、5 台の加速器の加速効率を 100 %として得られる値である。2008 年時点のビーム強度が目標の 1/1000 以下に止まった本質的な理由は、当時使用していた 18-GHz ECR イオン源が U^{35+} という多価イオンの生成に適さず、イオン源から 2 ~ 4 eA のビームしか得られなかった点にある[13]。また、入射器 RILAC はウランを加速するには真空度が悪く、残留ガスによる荷電変換反応で加速中にビームが失われるという問題があり、更に理研では RIBF 新加速器を用いる不安定核物理研究と RILAC 単独で行う超重元素探索実験の両者を推進する必要があり、後者の実験が長期間 RILAC を占有することから、新たな入射器がどうしても必要であった。これら諸問題を解決するために、28-GHz ECR イオン源と 5 MV 線形加速器からなる新入射器 RILAC2 を建設した。

3.1 28-GHz 超伝導 ECR イオン源の開発

RIBF の設計段階では、先進的な LBNL の VENUS イオン源[14]と同等以上の性能を持つイオン源の使用を想定していた。新イオン源設計に当たっては、

磁場分布、マイクロ波のパワー密度、プラズマから流出する電子をプラズマに戻すバイアスディスクなど、多価イオンのビーム強度に影響を与える種々の要因に対する依存性を調べ[15]、それらを広い範囲で調整可能な設計とした。全て超伝導のソレノイドコイル 6 本と 6 極コイルで強い閉じ込め磁場を形成し、更にソレノイドコイル 6 本の自由度を活かして電子サイクロトロン共鳴領域の大きさ及び共鳴点での磁場勾配を自在に制御してビーム強度を極大化する事が出来る。また、多価イオン生成に必要なイオン閉じ込め時間を確保しつつ大強度ビームを生成する為に大容量プラズマチェンバー(11 L)が用意された。

28 GHz 超伝導 ECR イオン源の建設は 2007 年度に始まり、イオン源本体は 2009 年 春に完成した。まず既存 18-GHz マイクロ波源を用いて磁場分布の最適化等を行った[16]。2011 年春に 28-GHz マイクロ波源ジャイロトロンの運用を開始し、従来比 10 倍の 30 eA の U^{35+} ビームを得た[17]。当初 1 W であった 4 K 冷凍能力は 2012 年までに GM-JT 冷凍機 2 台を追加して 8 W に向し、マイクロ波パワーの増加が可能となった。プラズマチェンバーにも熱伝導性に優れた二次電子放出能が高いアルミニウムを採用し、2013 年にピーク強度 180 eA を達成した[18]。実際のユーザー実験では RIBF の効率的運用のため 1 ヶ月以上の連続運転が求められるので試料消費を抑えた運転を行う。2013 年の実験ではスパッタリング法でウランを供給し平均 90 eA のビームを供給した[19]。その後スパッタリング法にて平均 100 eA 程度のビーム供給を続けてきたが、より大強度のビーム生成に適した高温オープンを導入する[20]などしてビーム強度を増やし、現在は 1 ヶ月連続運転で平均 140 eA のビームを安定供給するに至っている。

3.2 線形加速器 RILAC2

RILAC2 は Kr より重いイオンを 345 AMeV に加速する際の入射器としての使用に限定されるため、36.5 MHz の固定周波数システムとして開発された。4 ロッド型 RFQ と 3 台の QWR-DTL および 3 台のバンチャを中心に構成され、総加速電圧 5 MV、 $m/q = 7$ のイオンを 0.67 AMeV に加速する[4]。建設コスト削減のため、2 台の DTL と 2 台のリバンチャを除き他は既存品から改造した。3 台の DTL では、設置スペースが限られ、また建設コスト削減の観点から、終段アンプ出力回路と同軸管を省き、真空管と共振器が容量性カップラで結合される直接結合方式を採用した。チューナーの調整代が大きいため、真空管の最適出力インピーダンスにカップラ、共振器を整合させた条件で真空管 - カプラ - 共振器系の共振周波数を 36.5 MHz に合わせるべく精密に設計された[21]。

RILAC2 の建設は 2008 年度末に始まり、3 台の DTL は 2010 年 1 月に完成、各種試験の後 2010 年 3 月に全 DTL で規定電圧を達成した。RFQ も 2010 年 8 月にハイパワー試験を行い規定電圧 42 kV を達成した。その後プリバンチャと 1 台のリバンチャの搬

入、据付を行い、2010年12月に ^{124}Xe ビームを用いてコミッショニングを行なった。ビーム強度は少ないながらも加速試験初日にほぼ設計通りの加速効率75%を実現した。その後2011年2月に残る1台のリバンチャを導入してRILAC2で加速したビームを後段fRCとfRCで加速する試験を行なった[22]。東北震災後の2011年10月以降はRILACに代わりウランなど重いイオン用の入射器として用いられている。完成当初より電圧安定度 $\pm 0.03\%$ 、位相安定度 ± 0.1 度を実現し、加速効率75%程度でビームの安定供給を続けている[23]。

4. 第一ストリッパーの長寿命化

ウランビームを加速する際、RIBFでは第3段加速器fRCの前後で2回荷電変換を行う。2008年当時は第1ストリッパーにACF-Metals社製炭素薄膜(0.3 mg/cm^2)を用い、 10.8 AMeV の $^{238}\text{U}^{35+}$ ビームを71価に変換していた。当時は炭素薄膜に照射されるウランビーム強度は $0.5\sim 1\text{ e}\mu\text{A}$ に限定されていたが、ストリッパーの寿命は12時間以下で、2桁のビーム強度増強を目指す新入射器稼働後は市販炭素薄膜の使用は早晚限界を迎えると予想された。そこで2008年より第1ストリッパー長寿命化を目指した技術開発が2つの方向で進められた。一方は炭素薄膜を大型化して回転させ、ビームが照射される面積を増して長寿命化を図るものであり、他方は本質的に寿命に制限のないガスストリッパーを用いるものである。

4.1 回転炭素薄膜ストリッパーの開発

回転炭素薄膜で二桁近い長寿命を得るには直径100mm程度の大面積薄膜が必要となるが、RIBFで用いる 0.3 mg/cm^2 の厚みで十分な強度を持つ炭素薄膜は存在しなかった。そこで2005年以来開発を続けて来たPCC foilの使用を検討した。PCC foilはコーティング剤として用いられるパリレンと蒸着炭素を積層させたものである。開発当初はパリレン5層より成る構成であったが、後にパリレン1層のsingle-layer PCC foilの開発に成功し、これを回転させることで $1.7\text{ e}\mu\text{A}$ ウランビームに対して38時間連続使用でほぼ性能劣化無しという結果を得た[24]。更に、カーボンナノチューブ(CNT)薄膜両面に炭素を蒸着したCNT-SDC膜も開発した。この膜はsingle-layer PCC foilよりも更に長寿命で、2011年のウランビーム実験では $10\text{ e}\mu\text{A}$ という従来比10倍のビーム強度に対して連続40時間の使用が可能となった。これは市販炭素薄膜の100倍の寿命に相当する[25]。しかしながら、これら炭素薄膜は回転に同期してビーム量、エネルギーが変動するなど厚み均一度の不足が明らかで、大強度ビーム用ストリッパーとして継続して使用するのには困難と判断された。

4.2 Low-Z ガスストリッパーの開発

寿命に制限のないガスストリッパーであるが、 10.8 AMeV のウランビームに対して N_2 ガスを用いて得られる平衡電荷は56+であり[26]、後段fRCで加速

可能な69+に遠く及ばないという問題があった。平衡電荷はイオンの電子損失反応と電子捕獲反応のバランスで決まるが、原子中の電子速度がウランイオンの速度より大幅に遅い水素、ヘリウムなどのlow-Z(Zは原子番号)ガスでは、速度の整合が取れず電子捕獲断面積が減少し、平衡電荷が増えると予想された。このアイデアに基づきRIBFで様々なエネルギー、荷電状態のウランに対し電子損失、電子捕獲断面積を測定し、これを基に物質中での荷電状態発展の方程式を解いて平衡電荷を推定した。結果、ウラン11 AMeV入射に対しHe標的厚 1 mg/cm^2 で65~66+イオンが得られると結論された[27]。65+はfRCで加速可能な69+に少し及ばないが、この差はfRCの改造で埋められると判断された。そこで、 1 mg/cm^2 のHeガスを蓄積出来るコンパクトなガスストリッパーの開発が行われた[28]。最終的な実機[29]は、中央ガスセルに7 kPaのヘリウムを溜め込み、上流下流各5段の差動排気を26台のポンプを用いて行うもので、Heガスセル側2段の排気に計7台、排気能力 $11900\text{ m}^3/\text{h}$ のメカニカルブースターポンプ(MBP)を、残り3段にTMPを用いる。強力な排気装置に加え超音速ヘリウムジェットの流れを阻害する“流れ攪乱板”を導入するという流体力学的工夫も凝らし、ガスセル内10 kPaに対してビーム開口 $\phi 10\text{ mm}$ を確保した状態で、ビームライン接続部の真空度 10^{-5} Pa を実現した。このシステムは $280\text{ m}^3/\text{day}$ のHeを要するが、MBP排気口からHeガスを回収して効率99.6%で再利用する循環型システムである。

4.3 fRC の改造

Heガスストリッパー[28]による実験で、電子の殻効果により64+イオンの収量が増進する事が示された。fRCに対する詳細な磁場解析の結果、主コイル、入射用偏向電磁石、入射用磁気チャネル2、取り出し用偏向電磁石、そして等時性磁場形成用トリムコイル2本の磁場の増強によって64+イオンの加速が可能になると結論された。主コイルとトリムコイル磁場に対しては電源を増強し、残る磁石、チャネル類は新規製作する事とした。更に、主コイル磁場の増加($1.7\text{ T} \rightarrow 1.9\text{ T}$)に伴い入射ビーム軌道上の漏れ磁場が増大し、入射イオンが大きな偏向を受けるので、これを補正する1組の小型偏向電磁石を入射ビームライン上に増設した。2010年度後半から設計を開始し、約1年間で改造を完了させ、2012年7月実施の改造後初の加速試験で設計性能が得られている事を確認した。これにより第1ストリッパーの寿命問題は根本的な解決をみた[30]。

5. 第2ストリッパー

fRC下流で用いる第2ストリッパーの寿命もRIBFの潜在的課題であった。ウランビームのエネルギーは50 AMeV、後段加速に必要な86価イオンは市販(ACF-Metals社)の多結晶グラファイト(厚み 17 mg/cm^2)で得られるが、2011年時点でこの炭素薄板の寿命は約9時間であり、使用の限界に近づいていた。RIBF建設当初の想定に従い、2007年に炭素薄

板を回転させる事で長寿命ストリッパーとする可能性を検討したが、厚み均一度が悪く実用にならなかった。

5.2 回転 Be ストリッパー

2011年に低密度カーボン、0.04 mm 厚 Ti 板、0.1 mm 厚 Be 板を用いた試験が行なわれた。低密度カーボンは板厚が不均一で使い物にならず、Ti は荷電分布のピークが 82+ と不十分である一方、Be は 86+ ピークで厚み均一度も炭素に比べ格段に良いことから 2012 年秋の実験に回転 Be 薄板ストリッパーを用いた。結果、4 ~ 5 μA (熱負荷 90 W) のウランビームに対して 35 日間無交換で使用された。交換不要の回転 Be ストリッパーの導入でビーム可用度は大幅に向上した。一方、実験中にビームの時間構造を下流の位相ピックアッププローブで測定すると、回転に同期してビーム量が落ち込む時間帯が存在し、厚み均一度に改善の余地があると認められた。そこで、厚み 0.15 mm の Be 板からダイヤモンド研磨で 0.085 mm の厚みに削り出すという方法で均一度を向上させた[31]。回転 Be ストリッパーは 2012 - 2014 年の間ユーザー実験に使用され、最終的には 12 μA (熱負荷 230 W に相当) のウランビームまで使用された。固定炭素板との比較で 140 倍以上のウラン照射量に耐えたが、使用時の Be 板の温度推定値は 1100 K と Be 融点 1560 K に近づき熱による大きな変形と照射ダメージから使用限界に近づいていた[31]。

5.2 グラファイトシートストリッパーの開発

Be に代わる回転ストリッパー候補として、2014 年に多層グラフェン(KANEKA 社製グラファイトシート)を対象にビーム試験を行った。このグラファイトシートは 2 g/cm³ と十分な密度があり、平均価数は 86.4、また厚み均一度はダイヤモンド研磨した Be 板と同等以上であった。熱伝導率は 1500 Wm⁻¹K⁻¹ (面内)、熱拡散率もアルミニウムや銅を凌ぎ、ウランビーム照射による温度上昇が低く抑えられる事から画期的なストリッパーとなると期待された。2015 年から第 2 ストリッパーとしての使用を始め、最大ビーム強度 17.5 μA のウランビームに対して 40 日間連続使用で殆どダメージなしという結果が得られた。ビーム照射時の温度は ANSYS シミュレーションで約 600 K と推定された[32]。その後このストリッパーは現在に至るまで継続して使用され[33]、2019 年秋には 30 μA のビームに対して無交換で約 1 ヶ月の実験を乗り切った。しかし長期実験終盤にはストリッパーの劣化による加速効率の低下が認められた事から、今後は計画的な交換が必要となるであろう。

6. 更なる高度化

RIBF のウランビーム強度は 2015 年に 49 pnA に到達したがその後の伸びは緩慢で、2017 年に漸く 70 pnA に到達した。ビーム強度を制限したのは RRC のビーム取り出しにおけるビーム損失の増大と RRC 下流 He ガスストリッパーオリフィスにおけるビーム

損失の増大である。上流から供給されるビーム強度が増えるに従い、RRC における空間電荷効果によりビームの質が劣化したことが原因である。

サイクロトロンにおける空間電荷効果は PSI の経験や様々なシミュレーションによりその機構や限界については良く知られており、RRC における加速電圧の不足が根本的原因である。サイクロトロンでは、空間電荷効果に抗してビームを収束させる磁場は等時性条件より固定されるため、バンチにおける許容イオン密度も決まる。よって、ビーム強度を増やすにはバンチサイズを大きくする必要がある。この大きなバンチをロス無く取り出すには、大きな加速電圧で十分広いターン間隔を確保するのが正攻法である。RRC は周波数 18.25 MHz でウランを加速するが、RRC 加速共振器は周波数範囲 20 - 45 MHz で設計されたもので、設計より低い 18.25 MHz では粗チューナーとして働くムーバブルボックスのショート板とディー電極の間隔が 22.5 mm しかなく、85 kV 程度の電圧しか印加できなかった。そこで、共振器ステムの切り欠きで誘導リアクタンス成分を増やし、共振周波数を低周波数側にシフトさせる改造を検討した。数値解析の結果、この改造でショート板とディー電極の間隔も 43 mm に拡がりシャントインピーダンスも改善し、加速電圧を 150 kV まで増やせると判断された[34]。2017 年に改造に着手し、2018 年春に改造部品の設置を完了させた。2018 年秋のウランビーム実験では 120 kV 加速を実現し、取り出し時のビーム損失を 1/3 に低減させた。更にコンディショニングを進めて臨んだ 2019 年の運転では、150 kV の加速電圧で安定に動作した。

ヘリウムガスストリッパーにおけるビーム損失の問題は、ストリッパー両端にビームと垂直方向に流れる N₂ ガスのジェットを導入し、これをヘリウムの流れを遮るカーテンとして働かせてヘリウム封止能を向上させる、というアイデアで解決された。N₂ ガスジェットは流量 4 l/min 以上で従来比 10 倍の封止能が得られ、これを利用してオリフィス径を 10 mm から 12 mm に増やした結果 4 次元(水平×垂直)アクセプタンスは 1.5 倍に増加した[35]。これらの改造、開発により、2019 年秋の運転では 94 pnA のビームが得られた。この数字は 2008 年 11 月比 240 倍に相当する。イオン源のビーム強度増(70 倍)、前述の 64+イオン加速に伴う収量増(1.3 倍)に加え、加速効率もこの間 2.5 倍の改善を成し遂げてこの性能を実現した。一連のビーム強度増強の過程を Fig. 2 に纏

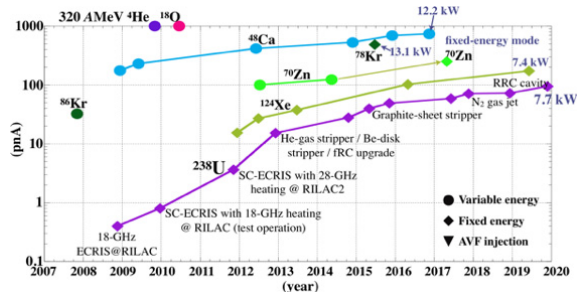


Figure 2: Beam-intensity upgrade of RIBF.

める。

7. RIBF の今後

この 10 年間、RIBF は他施設との比較で 1~2 桁多い 2 次ビームの供給を続けてきたが、諸外国で新施設の建設が相次ぎ、2020 年代前半には国際競争上の優位は消失する。シンクロトロンを用いて 2 次ビームの生成・分離に有利な高エネルギー重イオンビームの供給を目指す独国 FAIR 計画、中国 HIAF 計画も強力なライバルであるが、ビームエネルギーや志向する科学の広がりの違いからこれらとは直接的な競合関係には無い。一方、超伝導線形加速器で 200 AMeV まで加速する米国 FRIB 計画及び韓国 RAON 計画は RIBF の直接的ライバルで、特に FRIB は 400 kW の重イオンビームの供給を予定しており、RIBF の現状では全く太刀打ち出来ない。FRIB の計画ビーム強度は現 RIBF の 80 倍で、主たる差は荷電変換効率の違いである。FRIB は荷電変換を 1 回しか必要とせず、更にリニアックの広いアクセプタンスを活かして荷電変換で発生する複数荷電状態のイオンを同時に加速する予定である。結果、荷電変換効率 85 % を想定している。RIBF は 2 回の荷電変換の総効率が 5 % なので、その差は 17 倍である。サイクロトロンでは原理的に複数荷電状態を同時に加速出来ないため、後段加速器で加速出来ない価数のイオンを再利用する荷電変換リング(CSR)を考案し、この差を埋めようとする構想を進めている[35]。

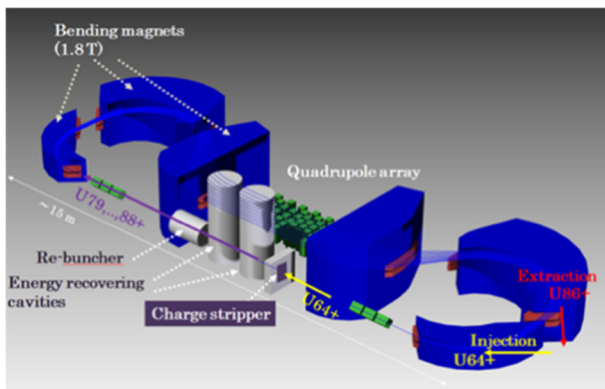


Figure 3: Design of charge stripper ring.

CSR の概要を Fig. 3 に示す。ビーム入射においては、charge stripping injection 法で次々と連続にビームが入射される。ストリッパー通過後のイオンは価数に応じて異なる軌道に分離させ、必要価数のイオンのみ CSR から取り出され、他は周回して再度ストリッパーに入射される。そして必要価数となって CSR から取り出されるか、CSR のアクセプタンスから外れて失われるかするまで周回を続ける。価数毎に異なる軌道に対し、周長を厳密に一致させる事で縦方向のビーム拡がりを回避し、独立に調整可能な Q 電磁石群を用いてストリッパーにおける位相空間固有楕円の形状を同一にする事で横方向エミッタンスの増大も回避する。連続ビーム入射のため、CSR の周長はビームのバンチ間隔の整数倍に合わせ、荷

電変換に伴うエネルギー損失は高周波加速で補償する。イオン光学設計の結果、縦方向、横方向のエミッタンス増大を小さく抑える解が得られており[35]、現在は不整磁場の効果や空間電荷効果など、RIBF 加速器系の構成要素として機能させるに必要な仕様の詳細を検討中である。RIBF で 100 kW のウランビームを安定に供給するには現在 98 % 程度の SRC 取り出し効率を 99.8 % 以上に向上させる必要があり、サイクロトロンにおけるビーム損失をこの精度で制御する機構を CSR に、もしくは別途盛り込む事が重要な技術的挑戦となるであろう。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Meth. **B 261**, p. 1009 (2007).
- [2] H. Okuno, N. Fukunishi, O. Kamigaito, Prog. Theo. Exp. Phys. 2012, 03C002 (2012).
- [3] M. Odera *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A 227**, p. 187 (1984).
- [4] K. Yamada *et al.*, Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, MOPD046, p. 789.
- [5] A. Goto *et al.*, Proc. of 12th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 51 and p. 439 (1989).
- [6] Y. Yano, Proc. of 13th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 102 (1992).
- [7] T. Mitsumoto *et al.*, Proc. of 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 384 (2004).
- [8] J. Ohnishi *et al.*, Proc. of 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, p. 197 (2004).
- [9] H. Okuno *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **18**, p. 226 (2008).
- [10] O. Kamigaito *et al.*, Proc. of 19th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Lanzhou, China, Sept. 6-10, 2010, TUM2CIO01, p. 286.
- [11] N. Sakamoto *et al.*, Proc. of 19th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Lanzhou, China, Sept. 6-10, 2010, WEM2CC002, p. 338.
- [12] R. Koyama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A 729**, p. 788 (2013).
- [13] Y. Higurashi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02C714 (2008).
- [14] C. Lynes *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, p. 1389 (2004).
- [15] T. Nakagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A327 (2008).
- [16] T. Nakagawa *et al.*, Proc. of ECRIS2010, Grenoble, France, Aug. 23-26, 2010, MPCPAK03, p. 8.
- [17] Y. Higurashi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A333 (2012).
- [18] Y. Higurashi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A953 (2014).
- [19] O. Kamigaito *et al.*, Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, June 15-20, 2014, MOPRI082, p. 800.
- [20] J. Ohnishi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A941 (2014).
- [21] K. Suda *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A 722**, p. 55 (2013).
- [22] K. Yamada *et al.*, Proc. of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, MOPS021, p. 301.
- [23] N. Sakamoto *et al.*, Proc. of LINAC12, Tel Aviv, Israel, Sept. 9-14, 2012, MO3A02, p. 125.
- [24] H. Hasebe *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A 655**, p. 57 (2011).
- [25] H. Hasebe *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem. **299**, p. 1013 (2014).
- [26] H. Kuboki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 053502 (2011).
- [27] H. Okuno *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 033503 (2011).
- [28] H. Imao *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 123501 (2012).
- [29] H. Imao *et al.*, Proc. of 20th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Vancouver, Canada, Sept. 16-20, 2013, TU3PB03, p. 265.
- [30] N. Fukunishi *et al.*, Proc. of 20th Int. Conf. on Cyclotrons

PASJ2020 WEOOP02

and Their Applications, Vancouver, Canada, Sept. 16-20,
2013, MO1PB01, p. 1.

- [31] H. Hasebe *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem. **305**, p. 825 (2014).
- [32] H. Hasebe *et al.*, AIP Conf. Proc. **1962**, 030004 (2018).
- [33] H. Hasebe *et al.*, EPJ Web of Conferences **229**, 01004 (2020).
- [34] K. Yamada *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **52**, p. 13 (2019).
- [35] H. Imao *et al.*, Proc. of IPAC'18, Vancouver, Canada, Apr. 29 – May 4, 2018, MOZGBE1, p. 41.