特集　大強度不安定核ビーム

進化する RIBF 加速器システム

理研 RIBF における荷電変換リング構想

今尾 浩士 *

Charge Stripper Ring Plan at RIKEN RIBF

Hiroshi IMAO*

Abstract

Charge stripping process is almost indispensable for efficient accelerations of particularly heavy ions such as uranium in heavy-ion accelerator complex. At the RIKEN RI beam factory (RIBF), the total charge stripping efficiency of two strippers, He gas and rotating graphite sheet disk strippers, used for the uranium acceleration is less than 5% which is a serious bottleneck for further intensity upgrade. We have proposed a novel acceleration scheme with charge stripper rings (CSRs) to increase the charge stripping efficiency as a promising future plan at the RIBF. In this paper, we present some results of calculations on key design issues of the CSR.

1. はじめに

重イオン加速において，加速価数の選択性は特徴的な自由度の一つである．複数の加速器を用いた重イオンの多段階加速において，ストリッパーを用いて荷電変換を行い，価数を上げながら効率的に加速することは必須なプロセスといえる．しかし，ウランのような重いイオンビームを数百 MeV/u 程度まで加速する場合，一般に全ての電子を剥ぎ取ることはできず，ストリッパー通過後の価数は物理法則に従った分布を持つ．ストリッパー通過後に一つの電荷を選択し後段加速器で加速する場合，効率的な加速と引き換えに強度を大幅に低下させることになる．

理研 RI ビームファクトリー[1]（RIBF）においてウラン（^{238}U）ビームの加速は飛行中核分裂による稀少 RI ビームの生成のために特に重要である．2010 年には 0.4 pnA であったウランビーム強度はこの 10 年で飛躍的に向上し，約 100 pnA にまで達している．これは，28-GHz 超伝導イオン源の継続的な性能向上[2–4]，ストリッパーの耐久性と品質の向上[5–10]，大強度ビーム運転技術の洗練化，その他様々な加速器機器の着実な改良[11–14]によるものである．

現在，RIBF のウランビームは他の現行施設に比べて 2 桁以上高い強度を誇る．しかし 2020 年代の間には，FRIB[15]（米国），FAIR[16]（ドイツ），RAON[17]（韓国），HIAF[18]（中国）などの次世代重イオン加速器施設の運転開始が予定されており，大強度ビームを用いた原子核研究は更に次のステージへと進んでいく．RIBF でもウラン強度を飛躍的に増強させるため準備が進んでいる．現在の加速方式において，大強度化を阻む大きな問題の一つは 2 回の荷電変換による約 95% のビーム損失である．本稿ではこの問題を克服すべく検討を進めている荷電変換リング（Charge Stripper Ring: CSR）[19–21]の概要といくつかの設計計算について紹介する．

1.1　RIBF におけるウランの荷電変換

RIBF における ^{238}U ビームの加速スキームを**図1(a)**に示す．28 GHz の超伝導 ECR イオン源で生成された 35 価の ^{238}U は，入射器 RILAC2 と 4 つのリングサイクロトロン（RRC, fRC, IRC, SRC）を用いて 345 MeV/u まで加速される．RRC での加速後，

* 理化学研究所仁科センター　RIKEN Nishina Center

(Hiroshi Imao　E-mail: imao@riken.jp)

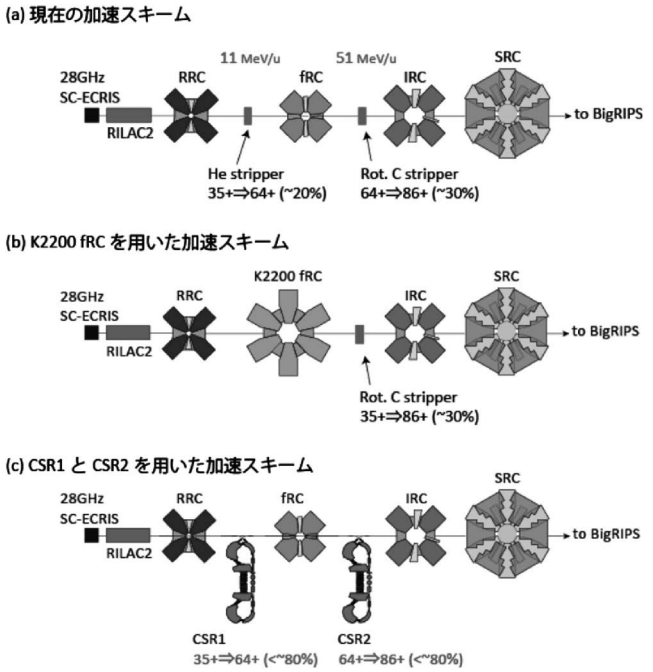

図1　He ストリッパーと炭素ディスクストリッパーを用いた現在の RIBF ウラン加速スキーム(a). 下は K2200 を用いた加速スキーム(b)と CSR を用いた加速スキーム(c).

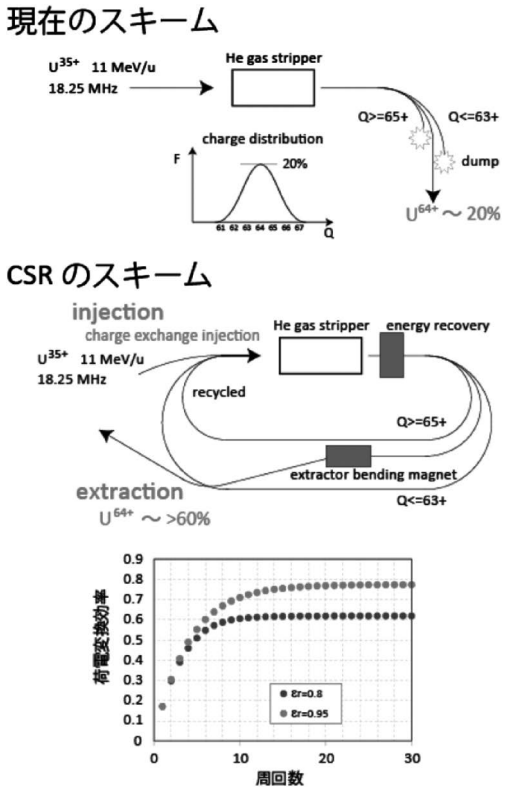

図2　現行第1ストリッパーと CSR 方式の比較. 下は CSR を用いた場合の荷電変換効率の計算.

11 MeV/u における第1ストリッパーとして He ガスストリッパー[9,10]を使用しており，U^{35+}からU^{64+}へと変換する．fRC 加速後の 51 MeV/u における第2ストリッパーは回転グラファイトシートディスクストリッパー[5,6]であり，U^{64+}からU^{86+}へと変換される．これらのストリッパーは，世界最大強度のウランビームに耐え得る先進的ストリッパーといえる．しかし，荷電変換効率はそれぞれ約20% と 25% で，全体の効率は僅か約5% となる．

米国の FRIB 計画では，液体 Li ストリッパーの実効的な電荷変換効率を向上させるため，荷電変換後に超伝導線形加速器で複数の価数のビームを同時に加速（マルチチャージ加速）することが検討されている[22]．しかし，この方法はアクセプタンスの大きい線形加速器特有のものといえ，サイクロトロンのような円形加速器へ直接適用することはできない．

RIBF でトータルの荷電変換効率を高める単純な方法の一つは，fRC を新しく作り直し，U^{35+}ビームを直接加速することで，He ストリッパーをなくすことができる（**図1(b)**）．例えば，新しい常伝導リングサイクロトロン（K＝2200 MeV）を導入することで，ビーム強度を最大5倍にすることができるが，世界最大のリングサイクロトロン SRC と同程度の大きさのサイクロトロンを建設する必要がある．

我々は費用対効果の高い方法として，**図1(c)**に示すように，荷電変換リング（CSR）を用いる方法を提案している．先の K2200 サイクロトロンの場合，鉄の重量は約7000 トン，メインコイルの消費電力は約2.2 MW となる[14]．一方 He ストリッパーの置き換えとして検討している CSR1 ではそれぞれ200 トン，および120 kW 程度に抑えられる試算となる．CSR1 は製造コスト，ランニングコスト，また必要な施設ダウンタイムの点でも優れている．CSR は第2ストリッパー（CSR2）にも適用可能であり，将来計画の有力な候補として，CSR によるウランビーム強度の10 倍増を目指し研究を進めている．

1.2　荷電変換リングのコンセプト

図2 は CSR の概念を説明するための RIBF における例である．現状では RRC で加速されたU^{35+}ビーム（11 MeV/u, 18.25 MHz）は約0.7 mg/cm^2 の厚さの He ストリッパーを通過し，U^{64+}ビームのみ

が偏向電磁石によって選択され，荷電変換効率は約20% となる．一方，CSR を使う場合，選択された U^{64+} 以外のビームについて，ストリッパーで失われたエネルギーを回復して周回し，ストリッパーに再入射する．U^{35+} ビームは，周回周期と同期して荷電変換入射法によって CSR へと連続的に入射される．周回と荷電変換を繰り返し，U^{64+} ビームのみが静磁場デフレクターチャンネルを用いて水平方向へ曲げられ，連続的に取り出される．入射取出しに関して，ターン分離が僅か数センチ程度であるリングサイクロトロンのような困難は少ないと考えられる．

CSR の荷電変換効率は，近似的に $\varepsilon_r\varepsilon_q/(1-\varepsilon_r+\varepsilon_r\varepsilon_q)$ と書くことができる．ここで，ε_r は周回ビームの1ターンあたりの生存確率，ε_q は1周あたりの64＋への変換効率である．**図2** 下に，ε_r を80% および95% とした場合に達成可能な変換効率を周回数の関数としてプロットした．変換効率 ε_q は周回数に依らず18% に固定されている．周回中のビーム損失を十分に低減できれば，現状の3倍にあたる60% 以上の効率を達成できることがわかる．

設計を進めている CSR は周回する全価数のビームに対して同じ軌道長を持つリング（等長リング）で構成され，後段サイクロトロンのアクセプタンスに合わせてビームのバンチ構造を保持する．一般的には，偏向電磁石と反偏向電磁石を併用することで，等長のユニットセルを実現することができ，リングの対称面の数 N は，任意の整数を選べる．

2. CSR1 の設計

2.1 必要要件

Heストリッパーの置き換えとしての CSR（＝CSR1）について考える．後段のリングサイクロトロン（fRC, IRC, SRC）での加速のために，CSR1 では18.25 MHz のバンチ構造を保ち，縦方向のエミッタンスグロースを抑制する必要がある．CSR1 内には縦方向集束のためのリバンチャーが配置される．横方向に関しては，ストリッパー位置で全価数のビームの形状を一致させる，すなわち固有楕円を一致させることで，価数の入れ替わりに起因するエミッタンス増大を抑制する．これは，荷電独立な四重極電磁石のセットを用いて各価数のビームを独立に制御することで実現する．荷電独立な四重極電磁石を配置し，また，U^{64+} の取出しを実現するためには，隣接する価数のビーム間距離を十分に確保した直線部が必要となる．CSR1 ではリングの大きさに対して運動量分散を大きくできる $N=1$ の等長リングを採用している．

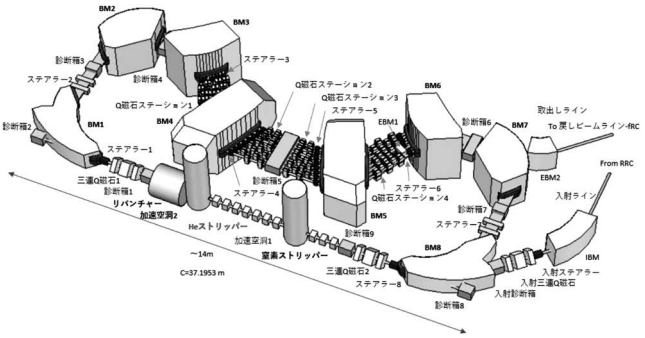

図3 CSR1 俯瞰図.

CSR1 設計における重要な初期目標は，全設計価数のビームに対して横方向固有楕円が一致し安定なビームダイナミクスを与える実現可能で現実的なラティスを見つけることである．そのようなラティスが見つかれば，加速器設計の一般的な手順を用い，より詳細な計算と最適化を行うことができる．

2.2 俯瞰図と設計パラメータ

図3 に設計中の CSR1 の俯瞰図を示す．59＋から66＋までの8価分の周回ウランビームに対して，同じ設計周長37.1953 m（入射ビームバンチ間隔の15倍）を持つコンパクトな等長リングとなっている．CSR1 は，ガスストリッパー（He ストリッパーと N_2 ストリッパー），8台の主偏向電磁石（BM1–8），2台の加速空洞，リバンチャー，4基の荷電独立四重極電磁石ステーション（QS1–4），入射電磁石（IBM と入射四重極トリプレット），取出し偏向電磁石（EBM1 と EBM2），COD 補正用ステアラー，複数の診断用真空箱から構成されている．CSR1 の主要な設計パラメータを**表1** に示す．

2.3 平衡軌道とラティス

図4 は，59＋から66＋までの全周回価数の設計平衡軌道である．軌道の x 方向の幅は13.8 m, y 方向の幅は5.3 m で設置予定位置に収まるように調整されている．また，荷電独立な四重極電磁石を

表1　CSR1 基本パラメータ.

周回エネルギー［MeV/u］	10.8
周回バンチ数	15
周長［m］	37.1953
周回時間［ns］	822
最大周回強度［pμA］	15
入射ビーム	U^{35+}（Bρ＝3.23 Tm）
取出しビーム	U^{64+}（Bρ＝1.76 Tm）
周回価数	59＋–66＋
ストリッパー	He（0.45 mg/cm^2）＋N_2（0.1 mg/cm^2）
エネルギー損失［MeV］	～70
BM1, 8 磁場［T］	1.0
BM2–7 磁場［T］	1.43
加速空洞周波数［MHz］	36.5
リバンチャー周波数［MHz］	109.5
Q 磁石の数	66

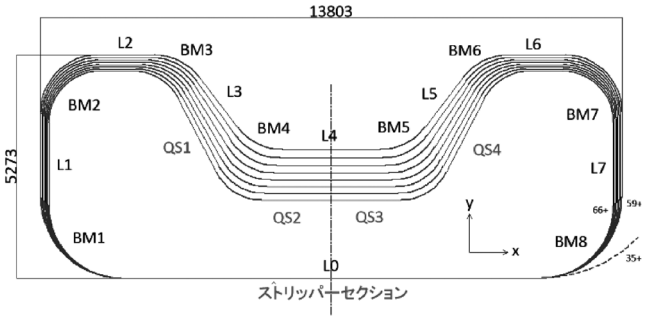

図4　CSR1 平衡軌道.

配置するためのステーション（QS1–4）において 10 cm 以上の隣接軌道間隔を確保している.

CSR1 は，ストリッパーセクションの中心を対称面としたミラー対称型のラティスである．しかもアクロマート系であり，アクロマート条件は最初のハーフセルの輸送行列を M として $M_{26}=0$ で与えられる．これは残りのハーフセルが転置行列 M^t で表せ，1 周の輸送行列 R に対して $R_{16}=2M_{12}M_{26}$ および $R_{26}=2M_{11}M_{26}$ が成り立つためである.

周回軌道が周期安定解を持つとき，固有楕円は対称平面上で直立しており，対称面付近に設置される後述のガスストリッパーの通過に都合が良い.

2.4　荷電独立四重極電磁石の設計

CSR1 では高密度に四重極磁石を配置したステーション（QS1–4）を設けている．全電荷で先述の光学条件を満たせるように，荷電独立な四重極ダブレット（QS1 と QS4 では 66＋のみトリプレット）がそれぞれのラインに配置されている．QS4 の 64＋のラインにはビーム取出し用の偏向電磁石（EBM1）が設置されている．また，COD 補正のための荷電独立ステアラーも QS に配置されている．QS のドリフト長は，CSR1 の大きさで制限されており，隣接する軌道間の距離も非常に狭い（～10 cm）．限られたスペースに配置可能な四重極磁石の設計は重要課題であり，我々はコンパクトな砂時計型四重極電磁石の開発を進めている.

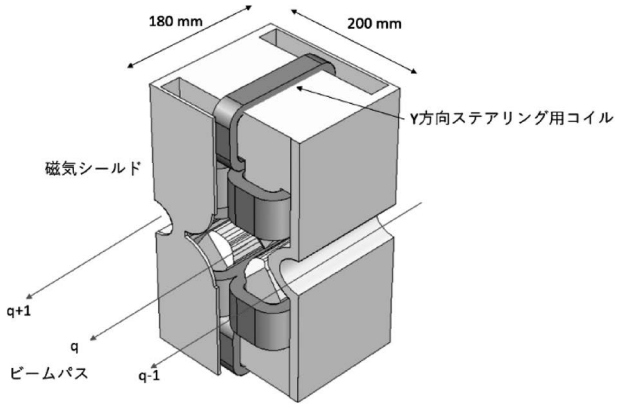

図5　砂時計型四重極電磁石.

図5 に開発中の砂時計型四重極磁石を示す．ポールの先端が折れ曲がっており，コイルはポールのストレートネックに巻かれている．この形状により，サイドヨークの両側にビーム経路を確保しつつ，十分なコイルスペースを確保し，必要な起磁力を発生させることができる．サイドヨークは隣接軌道への漏れ磁場を減らすためにも重要である．構造に関して理化学研究所と日立エンジニアリング株式会社で共同の特許を出願している（出願番号：JP2020-056540）．軌道間隔の小さい QS1 と QS4 では，隣り合う磁石が一つ置きのラインに配置されている．隣接ビームダクトとの干渉を避けるために，**図5** に示すように，サイドヨークにウエストがあり，砂時計型の構造になっている．最大電界勾配は 16 T/m で設計されている．QS2 と QS3 については，軌道分離が比較的大きいために磁石を小型化して隣接配置し，最大磁場勾配を 5 T/m とした.

それぞれの磁石について以下のような最適化を行った.

- 必要な磁場勾配の生成

- 均一性と有効径の最大化
- 水平方向漏れ場の最小化
- 軸方向漏れ磁場の最小化
- Y ステアリング用補正コイルの最適化
- 4 極と 2 極の結合の影響
- 隣接磁石間のクロストークの影響

既に計算を終え，CSR1 で使用可能な四重極電磁石の製作を開始している．

2.5　線形軌道計算

四重極電磁石の設計と配置を決定した後，ストリッパー中心でいくつかのアスペクト比を持った直立固有楕円を仮定し横方向の線形軌道計算を行った．ストリッパーでの角度ストラグリングによるエミッタンス増大を抑えるためには，固有楕円は縦長の方が良い（すなわち，$x'/x, y'/y$ のアスペクト比が大きい楕円）．しかし，縦長過ぎると，ベータトロン振動の振幅が大きくなる傾向があり，また中心付近での空間電荷効果の影響は大きくなり，調整が必要である．計算では，各価数について，$M_{26}=0$ および $r_{12}=r_{34}=0$（r は相関行列）であることと，ストリッパー位置での水平垂直両方向の $\sqrt{\beta}$ と $\sqrt{\alpha}$ が全価数で一致するという条件を満たすようにした．これは 8 個または 9 個の四重極電磁石の調整で実現する．余った自由度で，可能な限り周回中のビームサイズを物理アパーチャに合わせ，全価数で R_{56} が近い値を取るようにし，四重極電磁石の負荷バランスもとる．周回数はせいぜい十周程度であり，ビームの価数は 1 周ごとにシャッフルされるため，共鳴の影響は深刻ではないと考えられる．例えば N 周以内に価数が変化すれば，$1/N$ の共鳴の影響は小さい．

図6 はパラメータを調整して得られた，全価数のビーム包絡線を重ね合わせたもので，水平 x 方向，垂直 y 方向ともに固有楕円のアスペクト比を約 0.75 mrad/cm としている．図は両方向のビームエミッタンスを 6 mm-mrad とし，運動量の広がりは 0.6% として描いた．破線は分散関数を示している．全価数のストリッパー位置における $\sqrt{\beta}$ と $\sqrt{\alpha}$ は x と y の両方向において 1% 以内で一致している．

2.6　ストリッパー

ストリッパーセクションには，ストリッパー，加速空洞，リバンチャーが配置される．CSR1 内のストリッパーは，最大約 38 kW のウランビームに耐え得るストリッパーでなければならない．また，ストリッパーは連続的な荷電変換入射を実現するため 1 回の通過で荷電変換を行うのに十分な厚さであることが望ましい．高密度電子プラズマや電子ビームの使用は，現在の技術では不可能といえる．

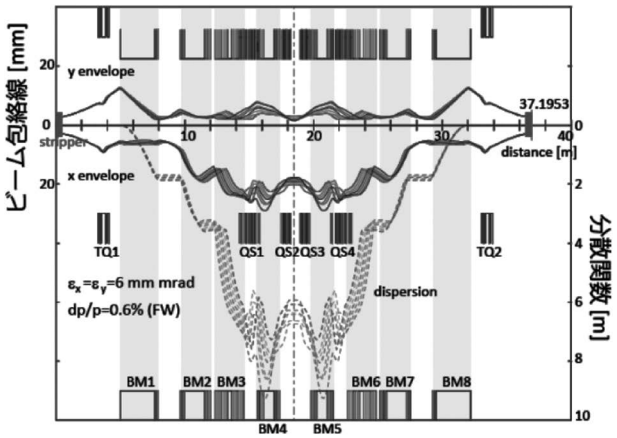

図6　CSR1 における全価数のビーム包絡線と分散関数の重ね書き．

我々はガスストリッパー[7–10]で大きな経験を積んでおり，N_2 ストリッパー（0.1 mg/cm^2）と He ストリッパー（0.45 mg/cm^2）を直列に配置した 2 段階ストリッパーの使用について検討を進めている．ストリッパーの厚さの選択は，エミッタンスグロース，平均周回数，エネルギー回復量などに直結する重要なパラメータである．荷電変換断面積が大きく平衡厚さが薄い N_2 ストリッパー（**図7** 上）で周回ごとに荷電分布をリセットし，続けて He ストリッパーで価数を高めることで，周回による荷電分布のドリフトを抑制することができる．これにより価数が設計範囲（59+–66+）から外れることによる損失が低減される．また，エネルギー回復に起因した，周回によるエネルギードリフトも抑制することができる．**図7** 下段は，N_2 ストリッパーと He ストリッパー通過後の荷電分布の計算結果である．計算では過去の実験の結果[7, 9]に適合するように調整したイオン化断面積と電子捕獲断面積を用いており，ウランの電子アンチスクリーニング効果を考慮してエネルギー損失を求めている．平均価数は，N_2 ストリッパー通過後で約 55+, He ストリッパー後で約 63+ となった．この分布は後述の周回計算で使用した．

N_2 ストリッパーを前段に用いるもう一つの利

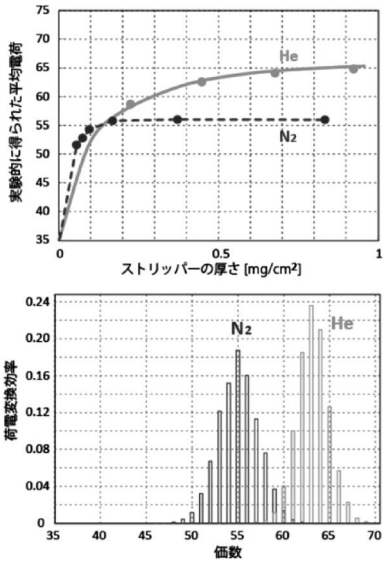

図7　平均電荷の発展(上)とストリッパー通過後の荷電変換分布(下).

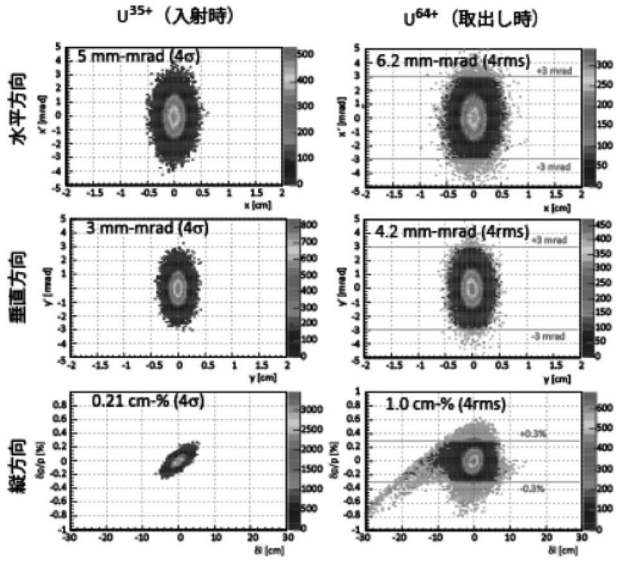

図8　U^{35+}入射時(左)とU^{64+}取出し時(右)の位相プロット.

点は，He ストリッパーの両側に2つの加速空洞を配置することができ，空洞の負荷を分散させ，エネルギー回復によるバラつきを小さくすることができることである．N_2 ストリッパーを使用しない場合，1周目のみエネルギー回復を35+で行うことになってしまう．

2.7　エミッタンスグロース

CSR1 におけるビームのエミッタンスグロースの原因として，以下のようなものが考えられる．

- 電荷変換エネルギーストラグリング
- エネルギー回復の価数依存性
- 加速とリバンチャー電圧の非線形性
- 価数入れ替わりの効果
- 空間電荷効果

線形軌道計算で得られた8つの価数 q に対する6×6の転送行列 $M(q)$ を用いて，エミッタンスグロースについての計算を行った．1周あたりのエネルギーストラグリングは，約0.25%（2σ）とした[9]．また，1周あたりの角度ストラグリングは，ガウス近似を用いて，N_2 ストリッパーでは0.3 mrad(σ)，He ストリッパーでは0.4 mrad(σ)とした[9]．空間電荷効果の影響については，全価数のビームが集まるストリッパーセクションにおいて独立に考え，CST Studio Suite[23] を用いた PIC シミュレーションで評価した．最も関心のある数 pμA 程度の強度においては，空間電荷効果の影響はストリッパーにおける角度ストラグリングに比べて小さいことがわかった．また，ウエスト位置に配置されたガスストリッパー内でのイオン化過程が空間電荷効果を減少させる可能性がある．今回の周回計算では，空間電荷効果の影響は無視した．

縦方向の初期条件として RRC の取出し静電デフレクターチャンネル（EDC）において，位相幅±5°（RRC 周波数18.25 MHz，バンチ長±35 mm），運動量広がり $\delta p/p$ を±0.06% のガウシアンを仮定した．CSR1 の入射における運動量広がりは重要な設計パラメータである．CSR1 では運動量の広がりが約±0.3% を超えると，ビームは物理アパーチャにぶつかる．定性的には，入射時のストリッパーでの運動量の広がりを大きくすると，縦方向のエミッタンスグロースは抑えられるが，ビームが物理アパーチャにぶつかるまでの周回数が少なくなる．入射時の運動量広がりが小さい場合は逆傾向になる．

図8 は CSR1 入射時（ストリッパー中心）の U^{35+} と，取出し時の U^{64+} の位相空間プロットである．計算では約75% の効率で U^{64+} を取出しラインへ送ることができた．この条件での平均周回数は約3周である．ウランは，$|\delta p/p|$ が0.3% を超えるか，角度（$|x'|$ or $|y'|$）が3 mrad を超えると失われると仮定し，損失はそれぞれ13.5% と2% であった．残りの損失（～10%）は，価数が範囲外になることによる．

磁場の不完全性，ミスアライメントの影響を考

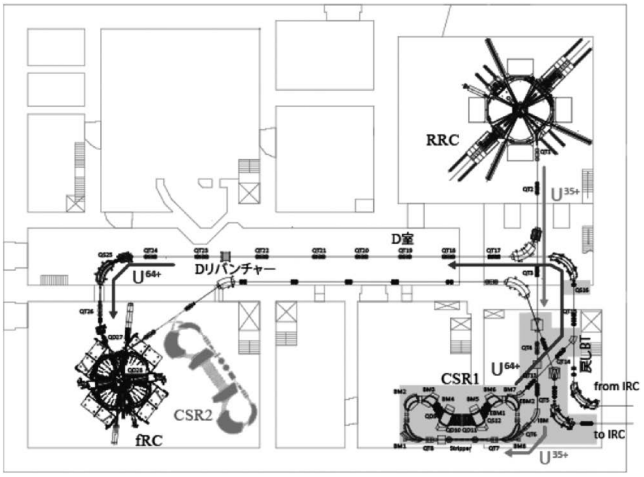

図9　RIBF における CSR1 と CSR2 の配置例.

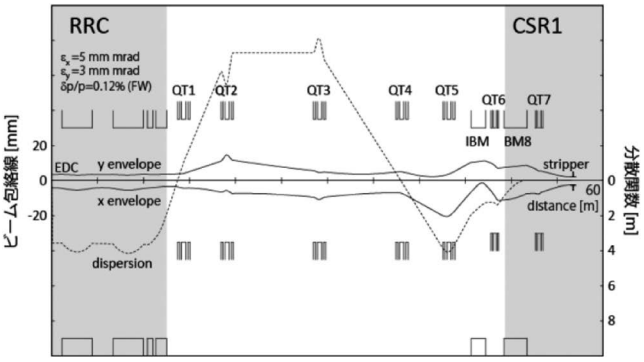

図10　RRC→CSR1 のビーム輸送計算.

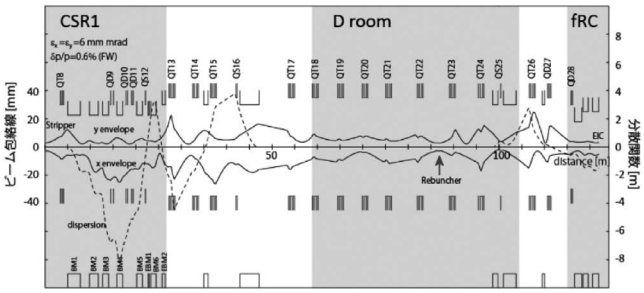

図11　CSR1→fRC-EIC のビーム輸送計算.

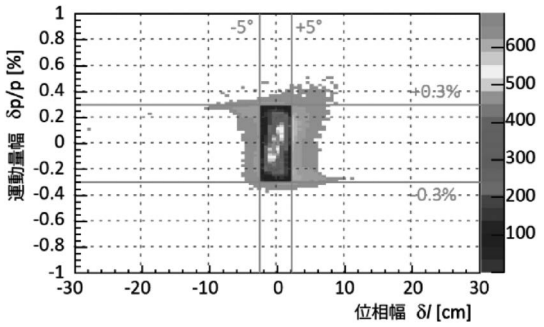

図12　fRC-EIC での縦方向位相プロット.

慮したシミュレーションが必要であり，準備を進めている．これまでに3次元磁場計算により，現実的な磁場分布を持つ等長軌道（±1 mm）が作成できることを確認している．COD 補正は，x 方向に関しては全価数共通のステアラーと荷電独立のステアラー，y 方向に関しては四重極磁石にコンバインドされたステアラーを用いて行う．

2.8　ビーム輸送系

CSR1 の設置位置について今後様々な実際上の検討と調整が必要ではあるが，**図9** および**図10** に現在検討中の CSR1 の配置とビーム輸送系の例を示す．

RRC から CSR1 への U^{35+} ビーム輸送系において横方向マッチングのために5台の四重極トリプレット（QT1–5）を用いる．CSR1 の入射部は，IBM，四重極トリプレット（QT6）と BM8 があり，ビームは無分散で入射される．**図10** に TRANSPORT[24] を用いて計算した RRC-EDC から CSR1 ストリッパー中心までのビーム包絡線と分散関数を示す．横方向について CSR1 の固有楕円と一致させることができている．縦方向については，既存ラインにリバンチャーを追加し CSR1 の設計アクセプタンスに合わせ，設計エネルギーに完全に一致するようにエネルギーを調整する．

CSR1 から取り出された U^{64+} ビームは，既存の IRC からの戻しラインを通って fRC へ送ることを検討している．CSR1 から取り出されたビームは，偏向電磁石で D 室に向かって曲げられ，無分散で輸送される．**図11** は同じく TRANSPORT を用いて計算した CSR1 から fRC の静電インフレクターチャンネル（EIC）までの輸送計算である．

横方向に関して fRC のアクセプタンスに一致させることが可能である．縦方向については，**図8** に示したように，CSR1 でのエミッタンスグロースのため，取出しビームの全てを fRC のアクセプタンスに収めることは難しい．例えば簡単のため fRC の縦方向のアクセプタンスを運動量広がり ±0.3%，位相広がり ±10°（f = 54.75 MHz）以内と仮定し，リバンチャーの集束力を調整しながら計算を行ったところ，約80% の輸送効率となった（**図12**）．この時 CSR1 のトータルの荷電変換効率は約60% となり，従来の3倍のビーム強度となる．今後より詳細な計算と最適化を継続するとと

表2　CSR2 基本パラメータ.

周回エネルギー［MeV/u］	45.8
周回バンチ数	7.5
周長［m］	37.2702
周回時間［ns］	411
最大周回強度［pμA］	10
入射ビーム	U^{64+}（Bρ＝1.76 Tm）
取出しビーム	U^{86+}（Bρ＝2.73 Tm）
周回価数	79＋–88＋
ストリッパー	Rot. Graphite disk（～3 mg/cm^2）
エネルギー損失［MeV］	～400
BM1, 8 磁場［T］	1.60
BM2–7 磁場［T］	1.78
加速空洞周波数［MHz］	73
リバンチャー周波数［MHz］	219
Q 磁石の数	～80

もに，fRC のアクセプタンスを高めるための効果的な改良も検討していく.

3. CSR2 の設計

RIBF の第2ストリッパーの置き換えである CSR2 は，CSR1 と同様の手順で設計することができる．CSR2 の基本的なパラメータを**表2** に示す.

CSR2 の後段のサイクロトロン（IRC と SRC）は 36.5 MHz で動作する．CSR1 との違いの一つは，ビームバンチ間隔距離の（N+1/2）倍の周長で CSR2 を設計することで，ビームの周波数を2倍の f＝36.5 MHz にして周回取出しを行うことができ，空間電荷効果を低減することができることである．また，IRC の入射エネルギーに合わせるため，現在の fRC 出口エネルギー 51 MeV/u を約 46 MeV/u まで下げる必要があり，検討を進めている.

4. 荷電変換ビーム冷却の可能性

CSR の場合，ビーム周回時間はサブμ秒程度であり，従来の重イオンビームの冷却方法（電子冷却，確率冷却，レーザー冷却，イオン化冷却）は適用できない．しかし CSR を用いた場合，短時間でのビーム冷却の可能性があり，その原理について簡単に述べる.

図13 は CSR によるビーム冷却の概念的な例である．まず，ビームの位相空間内の領域を異なる平均電荷でタグ付けすることがスタートとなる．空間的広がりに関してはビームを2つ以上のストリッパー（ハイブリッドストリッパー）にまたがって入射させればよく，場所によって異なる平均電荷となる．十分に異なる平均価数を持った2つのビームは，独立した光学系を介して輸送することができる．チューンを調整し，片方のビームのみが取り出されるように CSR を設計すれば，取り出されたビームのエミッタンスは減少し，ストリッパーによるエミッタンスグロースより効果が大きければ，出射ビームが冷却されたように見える．これが本質的な原理であり，別の自由度のビーム冷却系を設計することもできる.

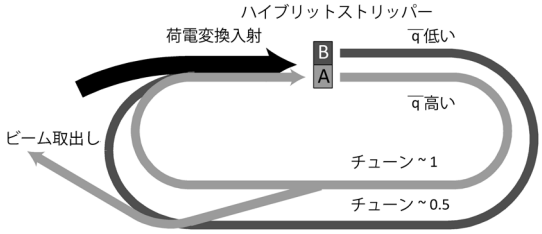

図13　荷電変換ビーム冷却の概念図.

CSR2 でビームサイズを制限するための使用を検討しており，予備的な計算ではビームロスは増えるものの効率的なスリットとして動作することが示されている.

5. ま　と　め

RIBF のような円形加速器を含む多段加速器において適用可能な，ウランの荷電変換効率を向上させるための費用対効果の高い方法として，CSR を用いることを提案している．設計上のいくつかの重要な課題について検討と計算を行った．周回する8つの価数に対して現実的なラティスを導出し，使用可能な四重極電磁石の設計を行った．また，考えられる主要なエミッタンスグロースについての考察を行った．CSR1 の実効荷電変換効率として約60％を見込んでおり，今後さらに詳細な計算と最適化を進めていく.

謝　　辞

本研究は仁科加速器科学研究センター加速器基盤研究部および関連する方々に様々にご協力いただき議論しながら進めているものであり，改めてここで感謝申し上げます．また，CSR の鍵となるアイデアについて継続的に刺激的な議論をさせて

頂いた矢野安重氏，若杉昌徳氏に感謝の意を表します．本研究で使用する磁石の設計について有益な議論をしていただいた日立エンジニアリング社の堀知新氏，阿部充志氏，佐藤友太氏，後藤研吾氏，千葉知雄氏，富樫達識氏，シグマフィ社の杉谷道朗氏，William Beeckman 氏に深く御礼申し上げます．

参 考 文 献

1) Y. Yano: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **261**, 1009 (2007).
2) T. Nakagawa, M. Kidera, Y. Higurashi, J. Ohonishi, A. Goto and Y. Yano: Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A327 (2008).
3) Y. Higurashi, J. Ohnishi, T. Nakagawa, H. Haba, M. Tamura, T. Aihara, M. Fujimaki, M. Komiyama, A. Uchiyama and O. Kamigaito: Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A308 (2012).
4) Y. Higurashi, J. Ohnishi, K. Ozeki, M. Kidera and T. Nakagawa: Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A953 (2014).
5) H. Hasebe, H. Okuno, A. Tatami, M. Tachibana, M. Murakami, H. Kuboki, H. Imao, N. Fukunishi, M. Kase and O. Kamigaito: AIP Conf. Proc. **1962**, 030004 (2018).
6) H. Hasebe et al.: EPJ Web of Conferences **229**, 01004 (2020).
7) H. Kuboki, H. Okuno, S. Yokouchi, H. Hasebe, T. Kishida, N. Fukunishi, O. Kamigaito, A. Goto, M. Kase and Y. Yano: Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams **13**, 093501 (2010).
8) H. Okuno, N. Fukunishi, A. Goto, H. Hasebe, H. Imao, O. Kamigaito, M. Kase, H. Kuboki, Y. Yano, S. Yokouchi and A. Hershcovitch: Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams **14**, 033503 (2011).
9) H. Imao, H. Okuno, H. Kuboki, S. Yokouchi, N. Fukunishi, O. Kamigaito, H. Hasebe, T. Watanabe, Y. Watanabe, M. Kase and Y. Yano: Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams **15**, 123501 (2012).
10) H. Imao et al.: Proceedings of the Twentieth International Conference on Cyclotrons and Their Applications (CYC2013), Vancouver, BC, Canada, September 2013, 265–268.
11) N. Fukunishi et al.: Proceedings of the Twentieth International Conference on Cyclotrons and Their Applications (CYC2013), Vancouver, BC, Canada, September 2013, 1–6.
12) R. Koyama, N. Sakamoto, M. Fujimaki, N. Fukunishi, A. Goto, M. Hemmi, M. Kase, K. Suda, T. Watanabe, K. Yamada and O. Kamigaito: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **729**, 788 (2013).
13) O. Kamigaito et al.: Proceedings of the Twenty-second International Conference on Cyclotrons and Their Applications (CYC2019), Cape Town, South Africa, September 2019, 12–16.
14) H. Okuno, T. Dantsuka, M. Fujimaki, N. Fukunishi, H. Hasebe, Y. Higurashi, E. Ikezawa, N. Ikoma, H. Imao, O. Kamigaito, M. Kidera, M. Komiyama, K. Kumagai, T. Maie, M. Nagase, T. Nagatomo, T. Nakagawa, M. Nakamura, J. Ohnishi, K. Ozeki, N. Sakamoto, K. Suda, U. Uchiyama, S. Watanabe, T. Watanabe, Y. Watanabe, K. Yamada and H. Yamasawa: J. Phys. Conf. Ser. **1401**, 012005 (2020).
15) J. Wei et al.: Proceedings of 2013 North American Particle Accelerator Conference (NA-PAC'13), Pasadena, CA, U.S.A., September 2013, 1453–1457.
16) FAIR Baseline Technical Report. Vol. 2 (2006).
17) D. Jeon: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013), Shanghai, China, May 2013, 3898–3900.
18) J. C. Yang et al.: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013), Shanghai, China, May 2013, WEOBB103.
19) H. Imao et al.: Proceedings of the Twenty-first International Conference on Cyclotrons and their Applications (CYC2016), Zurich, Switzerland, September 2016, 155–159.
20) H. Imao et al.: Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018), Vancouver, BC, Canada, April 2018, 41–46.
21) H. Imao: JINST **15**, P12036 (2020).
22) Q. Zhao: Proceedings of the 54th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity, High Brightness and High Power Hadron Beams (HB2014), East Lansing, MI, U.S.A., November 2014, TUO1LR01.
23) C. S. T. Studio Suite: https://www.cst.com/products/cstmws.
24) L. Brown et al.: "Transport, a Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport System," CERN 73-16 (1973) and CERN 80-04 (1980).