

荷電変換リング CHARGE STRIPPER RING

今尾浩士^{#,A)}, 上垣外修一^{A)}, 奥野広樹^{A)}, 福西暢尚^{A)}, 須田健嗣^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 山田一成^{A)}, 矢野安重^{A)}
Hiroshi Imao^{#,A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Kenji Suda^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)},
Kazunari Yamada^{A)}, Yasushige Yano^{A)}
A) RIKEN Nishina Center

Abstract

In the multi-stage acceleration of heavy ions such as the acceleration at the RIKEN RI beam factory (RIBF), the electron stripping process with charge strippers is an inevitable process for the efficient acceleration. The efficiencies, however, for the charge-state conversion of very heavy ions are not so high with common charge strippers in the acceleration up to the energy around hundreds MeV/u. The total efficiency of two charge strippers for ^{238}U acceleration at the RIBF is only 6%. It is an bottleneck for the intensity upgrade. In the present study, we designed high-efficient charge stripper rings which have applicability to the RIBF.

1. はじめに

重イオンの多段階加速において、その加速途中での荷電変換は効率的加速の為に必要不可欠なプロセスである。しかし、ウラン等の特に重いイオンビームを数百 MeV/u まで加速する場合、その電子を全て剥ぎ取る事は通常の方法では出来ない。荷電変換器(ストリッパー)通過後の電荷は物理法則に従った分布を持ち、一つの電荷を選び出した場合、効率的加速と引き換えに強度を大きく損ねる事になる。例えば理研 RI ビームファクトリー(RIBF) [1]におけるウランビームの加速では 2 回の荷電変換を行い、トータル 6%程度の変換効率となっている。大強度ウランビームを生成し、その核分裂片をビームとして、分析・利用する事は核図表の飛躍的拡大と理解に繋がる。しかし、荷電変換効率の低さはウランビーム大強度化の大きなボトルネックとなっている。

米国の次世代重イオン加速器計画 FRIB[2]においては、超伝導線形加速器を用い多数の電荷の重イオンを同時に加速する事で(マルチチャージ加速[2])、荷電変換効率の実質的増強を図っている。しかし、これはアクセプタンスの大きな線形加速器特有の手法であり、サイクロトロン等のリング型の加速器を用いて高エネルギーまで効率的な加速を行う際には応用できない。

ここでは RIBF に代表される多段階リング加速器においても使用可能な荷電変換効率を上げるための手法として、荷電変換リングを提案し、その概要と設計について述べる。

2. RIBF におけるウラン加速

RIBF における ^{238}U ビームの加速スキームを Fig. 1 に示す。28 GHz の超伝導 ECR イオン源[3]から得られる $^{238}\text{U}^{35+}$ を入射加速器システム RILAC2[4]と 4 台のリングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)を用いて 345 MeV/u まで加速している。

荷電変換は 11 MeV/u と 51 MeV/u で 2 回行われている。1 段目は He ガスストリッパー[5,6]を用いて 35 価から 64 価へ、2 段目は回転炭素膜[7]を用いて 64 価から

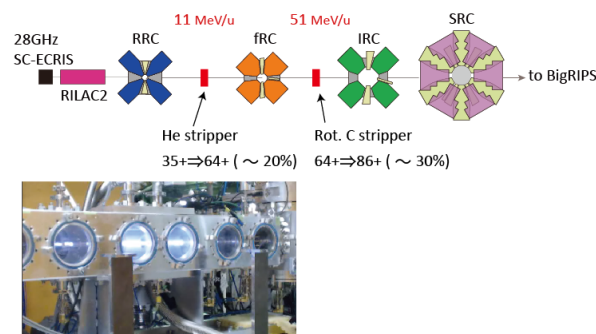


Figure 1: Acceleration scheme of ^{238}U ion beams at the RIBF.

86 価へと荷電変換される。二つのストリッパーはウランの大強度ビームに耐えられる先端ストリッパーであるが、それぞれ 2 割及び、3 割程度の効率であり、トータルでは 6%程度の変換効率となる。

この効率を上げる単純な方法は He ストリッパーをなくして、fRC を増強し、35 価のまま加速する事である。その為には K 値 2200 のサイクロトロンが必要であり、従来型の常伝導リングサイクロトロンで設計する場合、世界最大のサイクロトロンである SRC と同程度の大きさのサイクロトロンが必要となる。大強度化の確実な方法であり、小型化・超伝導化等の可能性を含め、今後最適化を進めていく。

3. 荷電変換リングのコンセプト

さて、ストリッパーを無くすのではなく、ストリッパー自体の効率を上げる方法として、今回提案する荷電変換リングの概念図を Fig. 2 に示す。RIBF 第一ストリッパーを例にとれば、11 MeV/u, 18.25 MHz でやって来る $^{238}\text{U}^{35+}$ ビームを一度 He ストリッパーを通して、偏極磁石によって $^{238}\text{U}^{64+}$ ビームを弁別すれば変換効率は 20%程度となる。一方、荷電変換リングでは、ストリッパー通過後の選択価数以外のビームについて、エネルギーを回復してストリッパーに再突入させる。これを選択価数になるまで繰り返し、選択価数になったもののみを出射できれば変換効率を上げる事が可能である。

[#] imao@riken.jp

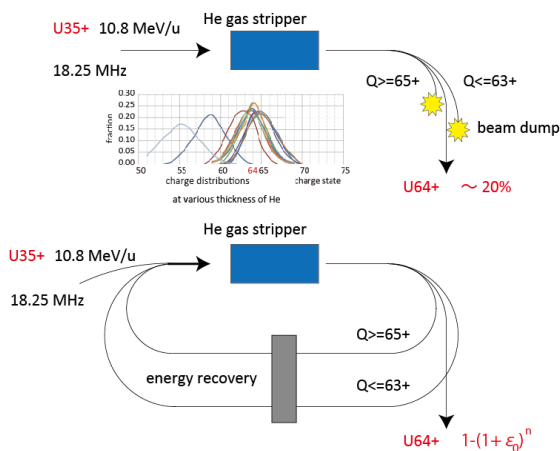


Figure 2: Concept of the charge-stripper ring.

いま、一回当たりの変換効率が $\epsilon_0 = 0.2$ で不変とすれば n 回周回後の変換効率は $\epsilon_n = 1 - (1 - \epsilon_0)^n$ とおけ、理想的には 3 回の周回で現状の 3 倍程度の効率のストリッパーが出来る事が分かる。ただし、後段のサイクロトロンへのマッチングの為、常にバンチ構造を保持する必要がある。

4. 等長荷電変換リング

バンチ構造を保持できるリングとしてまず考えられるのが軌道長が価数に依らない、すなわち $B\rho$ に依らない様な等長荷電変換リングである。モメンタムコンパクションファクター $\alpha=0$ のリングでバンドと逆バンドを用いて実現でき、ハーモニクスを整数にとれば平衡軌道においてバンチ構造は保持される。

例えば Fig. 3 の様な軌道が描け、入射は荷電変換入射、エネルギー回復は分散の大きい領域で電荷依存の回復を行う。取出しはやはり分散の大きい領域でサイクロトロンの EDC と同じ要領で静電セプタムにより蹴り出す事を考える。この等長リングは様々な対称性で描く事が出来、対称性が上がると一般に大きくなるが、複数のストリッパーを何台も置いて複数の入射器からのビームについて荷電変換入射を行えばバンチ構造を保持しつつマージする事も可能となる。

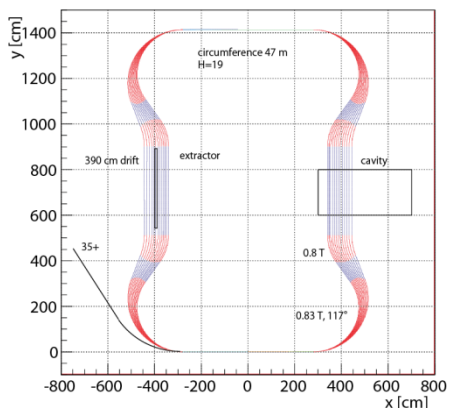


Figure 3: Isometric charge-stripper ring.

さて、等長リングのハーフセルが満たすべき条件は下の 3 つである。

- 偏向角が $B\rho$ に依らず一致すること
- 等長である事
- 垂直ベクトルが一致すること

上記 3 条件から各価数での軌道が描け、自動的に偏向磁石のエッジ角が決まる。ラティスのデザインにおいては、まず対称性を決め、基準 $B\rho$ に対してドリフト長、偏向磁石磁場、偏向角を決めれば、自動的に偏極磁石のエッジ角まで決まり、各 $B\rho$ に対して輸送行列 M が決まる。必要なら四重極磁石を追加し、 M を微調する。回したい全ての価数について計算した M について、安定周回条件 $|\text{Tr}M| < 2$ を満たし、かつ、ストリッパーで周回毎に価数が替わる可能性があるため、それぞれの価数の固有楕円が重なり合うようなラティスが望ましい。

ウランビームの第 1 ストリッパーを等長リングにした場合の軌道の計算例を Fig. 4 に示す。20 m 四方のリングで、磁場は 0.4T、分散領域での軌道のセパレーションは約 15 cm である。

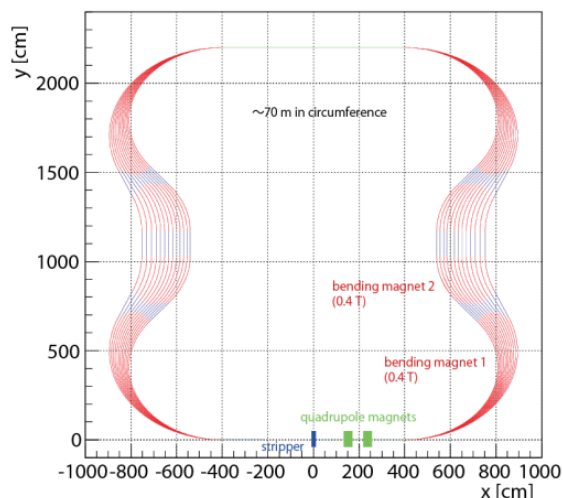


Figure 4: Equilibrium orbit for uranium beams with the charge states from 59+ to 71+.

このラティスにおいて、固有楕円は各価数で Fig. 5 のようになる。ストリッパーでの angular straggling によるエミッタンスグロースの効果を押さえるために楕円は角度方向に長い方が良い。この例では y 方向の楕円の最適化が不十分である。

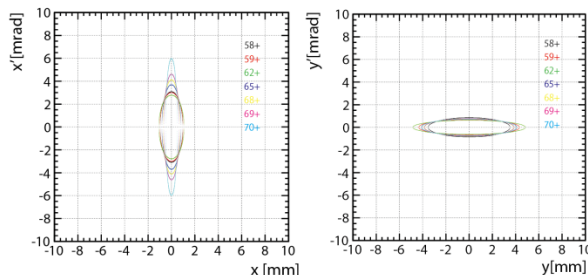


Figure 5: Eigen ellipses.

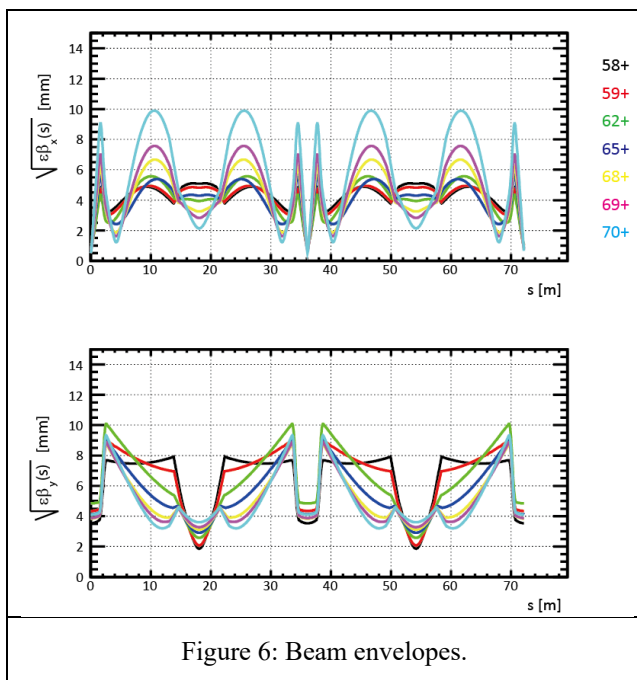


Figure 6: Beam envelopes.

各価数の x 方向、y 方向の 2σ ビームエンベロープは様になる。4 σ エミッタンスは 3π mm-mrad、を仮定し、青色が中心価数 65 価で ± 5 価分を描いている。チューンも価数に依存するが、数周回るだけなのと、また、同じ価数で回り続ける確率は低いので共鳴の問題はあまり深刻でないと予想される。

更に、ここまで求めたラティスと荷電変換のモンテカルロコードを組み合わせて価数が混じりあった時にどうなるかのシミュレーションを行った。

1. 初期エミッタンスを決め、固有楕円の共通部分にマッチした形状の初期楕円を乱数で与える
2. 荷電変換、及びエネルギー損失、angular straggling のモンテカルロ計算を行う
3. エネルギーは Q に依存した関数で回復させる
4. 変換後の価数とエネルギーで輸送行列を求め、輸送する
5. 選択価数になるまで 2-4 のプロセスから繰り返し、欲しい価数になったら取出し位置へ輸送後情報を取得し、1.へ戻る

ストリッパーとしては 0.4 mg/cm^2 の He ガスストリッパーを仮定した。

Figure 7 に荷電発展とエネルギー損失の厚さ依存性を示す。荷電発展は実験値に合うようにノーマライズされたイオン化と電子捕獲の断面積を用いて計算でき[6]、エネルギー損失は Casp コード[8]を元に電子のアンチスクリーニングの効果を入れて計算している。Energy straggling や angular straggling も計算可能で、特にエネルギー拡がりについては電荷の拡がり起因となる荷電変換ストラグリングがドミナントになる[6]。

Figure 8 にビームエンベロープ、ビーム出口での $x-x'$ 及び $y-y'$ 図、エネルギー分布について示す。今回の計算では 65+を約 72%の効率で排出する事が出来ている。リング内で $\square 10 \text{ cm}$ の物理アパーチャを仮定し、そこからはみ出したものが 9%、58-70 価の価数からこぼれ落ちたものが 14%、20 回の周回で価数が変わらなかったもの

が 5%となった。エネルギー拡がりには現在の 2 倍の厚さのストリッパーに相当している。今後更に最適なラティスを検討すると共に、より現実的な計算を進めていく。

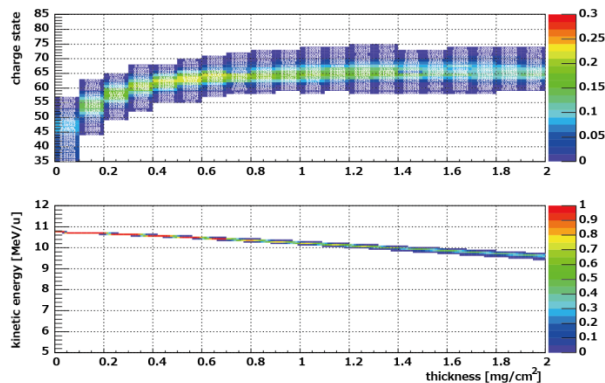


Figure 7: Charge and energy evolution in He gas.

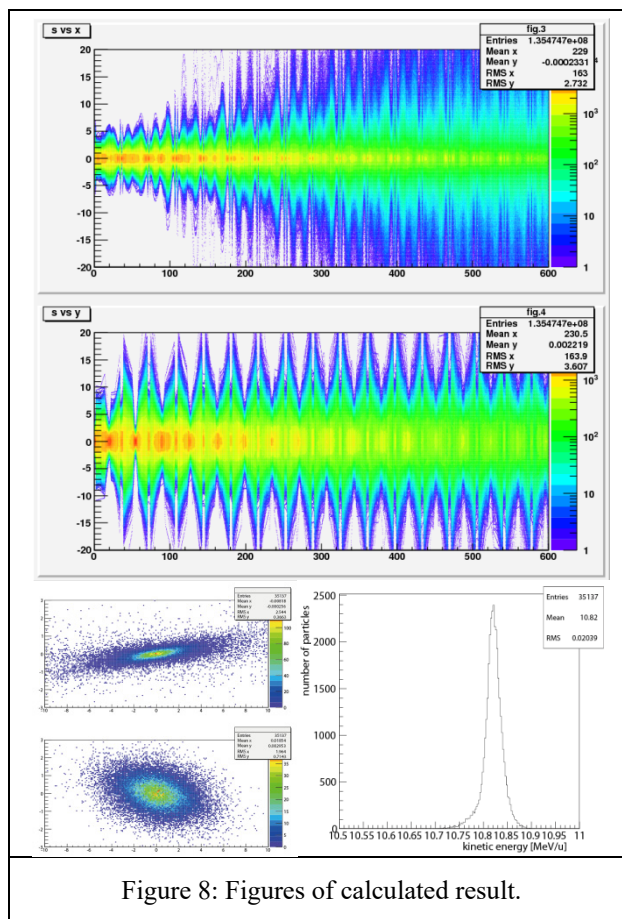


Figure 8: Figures of calculated result.

5. 軌道長差調整リング

もう一つバンチ構造を保つリングとして、価数毎にハーモニクスを変えて価数による軌道差がバンチ間隔に等しくなるような荷電変換リングが考えられる。各価数の軌道のセパレーションが大きくなり、各価数で独立のリングとして扱え、取出しも容易になるという特徴がある。

Figure 9 にウラン第一ストリッパとして今回計算したリングを図示する。62 価から 66 価までの価数を周回する事を想定し、64 価を排出している。価数で独立したマグネチックチャンネルと三連四重極磁石を配置している。

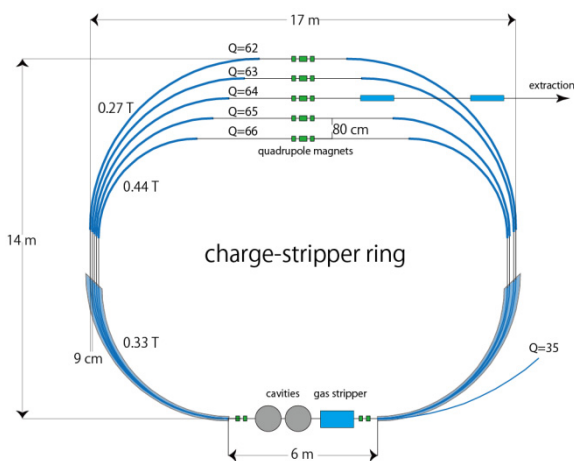


Figure 9: Track-length adjusting charge-stripper ring.

ラティスデザインのポイントは、等長リングと同様に固有楕円のaspect比を大きくし、angular straggling によるエミッタンス増大を防ぐ事、周回中にベータ関数及び分散が大きくなり過ぎない事、ストリッパを含むドリフト部でアクロマト条件を満たすようにする事等がある。また、等長リングと同様、固有楕円が重なり合うようなラティスが望ましいが、独立マグネチックチャンネルののエッジ角、 n 値、三連四重極磁石の磁場、6個を独立パラメータとして、全価数で固有楕円をほぼ一致させる事が出来る点が先に計算を行った等長リングと比べて大きなアドバンテージである。

パラメータ最適化には CERN library の最小化プログラム MINUIT[9]を使用した。6 個のパラメータを振って、固有楕円をほぼ一致させる事が出来ている (Fig. 10)。各価数でビーム包絡線と分散を求めたものが Fig. 11 である。Figure 12 は計算コード TRANSPORT に 65 価、63 価、64 価と変遷するラティスを入力した時のビーム包絡線の計算例である。ビームエミッタンスをアクセプタンス

に一致させると価数変換によるエミッタンスグロースは抑制されることが分かる。こちらら今後更に最適なラティスを検討すると共に、より現実的な計算を進めていく予定である。

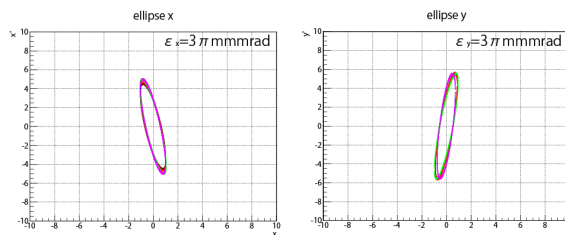


Figure 10: Eigen ellipses.

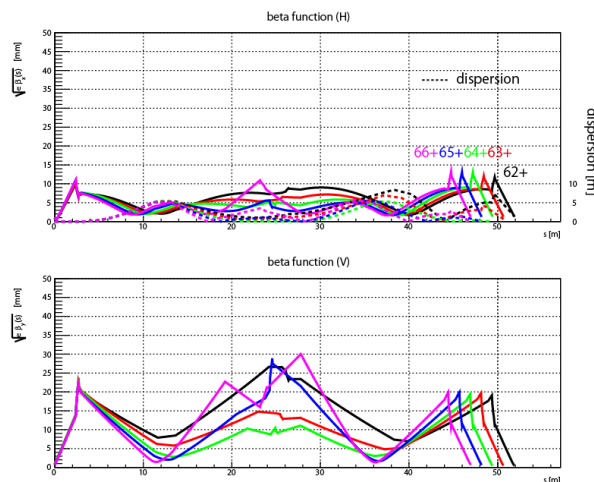


Figure 11: Beam envelopes and dispersion.

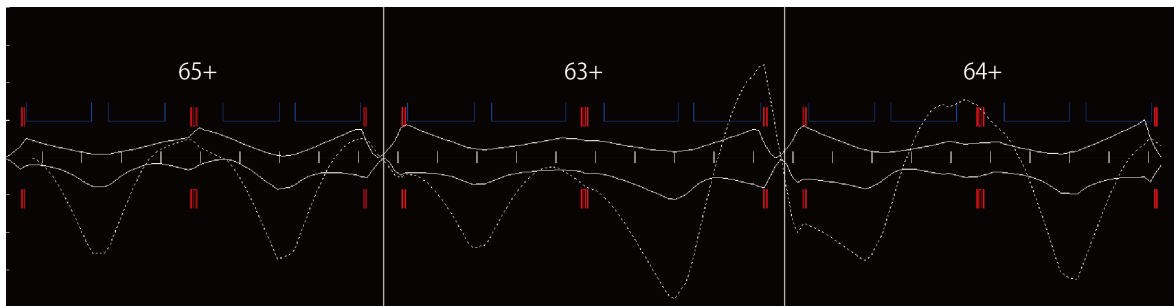


Figure 12: Beam transport calculated with TRANSPORT.

6. まとめと展望

2 種類の荷電変換リングのコンセプトを提案し、基本ラティスデザインの為の計算手法について述べた。今後より現実的な軌道計算、各コンポーネント設計を進めてい

く必要がある。特に小型化と、縦方向のエミッタンスグロース、ロバスト性、RIBF 全体のアクセプタンスとのマッチングが重要検討課題である。応用として、等長リングと

PASJ2016 MOOM02

軌道長調整リングをミックスした様なリングも考えられる。
また、蓄積リングやクーラーリングとしての応用も考えられ、
合わせて検討していく予定である。

参考文献

- [1] Y.Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B261, 1009 (2007).
- [2] FRIB project; <http://www.frib.msu.edu/>
- [3] Y.Higurashi *et al.*, Rev. Sci Instrum. 83, 02A308 (2012).
Y.Higurashi *et al.*, Rev. Sci Instrum. 83, 02A333 (2012).
- [4] K.Yamada *et al.*, Proceedings of IPAC12, TUOBA02 (2012).
- [5] H.Okuno *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 14, 033503 (2011).
- [6] H.Imao *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 15, 123501 (2012).
- [7] H. Hasebe *et al.*, INTDS2016, Cape town (2016).
- [8] P. L. Grande and G. Schiwietz, CASP ver. 1.4; http://www.helmholtz-berlin.de/people/gregor-schiwietz/casp_en.html
- [9] F. James and M. Ross, MINUIT Users Guide, Program Library D506, CERN (1981).