

# He GAS CHARGE STRIPPER FOR HIGH-INTENSITY URANIUM BEAM

Hiroshi Imao<sup>#,A)</sup>, Hiroki Okuno<sup>A)</sup>, Hironori Kuboki<sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>, Hiroo Hasebe<sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>A)</sup>, Takeshi Maie<sup>A)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Yasushige Yano<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

## Abstract

In the present study, a high-beam-transmission charge stripping system employing high-flow circulating He gas (~200 L/min) for  $^{238}\text{U}^{35+}$  beams injected at 10.8 MeV/u has been developed and successfully demonstrated for the first time. He gas is confined in differentially-pumped target room: 10 mm entrance and exit apertures, a target pressure of 7.5 kPa, and a length of 50 cm. Because of the high gas leakage rate via the apertures, high-performance differential pumping and high-flow and clean gas recycling are required at the same time. To realize these, we developed multi-stage mechanical booster pump array having a nominal total pumping speed of  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ . The recycling rate of He gas of approximately 99.5% was achieved. Purification and heat removal of the target are also important subjects to sustain the charge stripping performance. The system performance has been checked irradiating  $^{238}\text{U}^{35+}$  beams with the present maximum beam current up to 13 euA (~1 kW beam power).

## 大強度ウランビームのための He ガス荷電ストリッパー

### 1. はじめに

現在、理研 RIBF では「核図表の飛躍的拡大」を基幹目標の一つとし、ウランビーム大強度化に向けた研究開発に重点的に取り組んでいる。

2011 年度より 28GHz 超伝導 ECR イオン源[1]を含む新入射器 RILAC2[2]が本格稼動し、現在、従来の 100 倍以上の強度を狙い、その多段サイクロトロン加速に伴う諸問題に取り組んでいる。中でも最優先課題の一つが最適な「荷電ストリッパー」の探求開発である。

加速器全体で見れば小さな 1 ピースに過ぎない荷電ストリッパーであるが、現在、重イオン加速器の大強度化、特にウランビーム大強度化における原理的問題はこの荷電ストリッパーに集中しており、その開発が加速ビーム強度を決める鍵となっている。

### 2. ウラン荷電変換における問題点

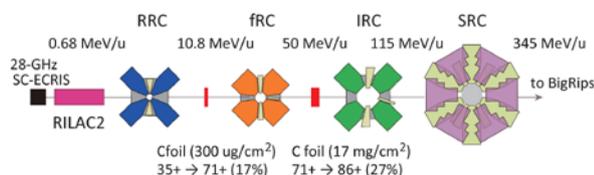


図 1 : RIBF におけるウランの加速スキーム

RIBF における  $^{238}\text{U}$  の加速スキームを図 1 に示す。荷電変換は 2 回行われており、これまで炭素薄膜を荷電ストリッパーとして用いてきた。RILAC2 から生成、加速された  $^{238}\text{U}^{35+}$  ビームを理研リングサイクロトロン(RRC)で 11 MeV/u まで加速後、 $\sim 0.3 \text{ mg}/\text{cm}^2$  の薄膜 (第 1 ストリッパー) を用いて  $^{238}\text{U}^{71+}$  へ変換する。それを周波数固定サイクロトロン(fRC)で更に 50 MeV/u まで加速し、比較的厚

い  $17 \text{ mg}/\text{cm}^2$  の膜で 86+まで荷電変換され、後段の中間段リングサイクロトロン(IRC), 超伝導リングサイクロトロン(SRC)へと入射される。SRC で最終エネルギー345 MeV/u まで加速され、超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRips へと送られる。

ウランのような超重イオンは電子束縛エネルギーが大きいため、一般に電荷質量比  $q/A$  の値を上げるのが困難であり、その価数を上げるためにはウランのエネルギーを十分に上げてから荷電変換する必要がある。そのため、軽いイオンの荷電変換に比べて必然的に膜厚が厚くなり、ビームエネルギー損失は増加し、ビーム品質の劣化を招く。また、ビームによる媒体へのダメージについて、例えば 11 MeV/u における炭素膜への単位長さ辺りのエネルギー損失について考える。 $^{238}\text{U}$  と中程度の重さの  $^{48}\text{Ca}$ 、及び陽子と比較するとそれぞれ単位エネルギー損失は 30 MeV/um、及び 3 MeV/um, 9 keV/um 程度である。現状第 1 ストリッパーにおける 10.8 MeV/u ウランの最大照射強度は  $4 \times 10^2 \text{ pnA}$  であるが、エネルギー損失 (~15W) だけを考えれば  $^{48}\text{Ca}$  で 4 puA, 陽子で 1 mA 以上の大強度ビームを照射する事に相当する。

実際、ウラン照射における第 1 ストリッパーでのダメージは深刻で固定型の炭素膜では 20 pnA までの照射強度においても使用時間は半日程度であり[3]、大強度ビームでの使用は困難である。

その様な中、炭素膜の応用として、CNT ベースの大面积炭素膜を回転膜として使用し、実効的な面積を増やして、ダメージを散逸させるという取り組みが一定の成果を上げてきた[4]。使用可能時間は飛躍的に上がり、2011 年秋の運転では 250 pnA 以上の照射強度においても 3-5 日の使用が可能となった。しかし(1)膜交換時の加速器調整に伴うダウンタイム、(2)膜の経時劣化や部分破損による実効変換効率の低下、(3)膜厚の不均一性起因のエネルギー広が

りによる後段サイクロトン通過効率の減少、等の問題が生じており、こうした問題は今後ビーム強度が上がると共に益々深刻な問題となると考えられる。耐久性や膜厚均一性を劇的に改善するための更なる新機軸が必要とされている。

### 3. Low-Z ガスストリッパー開発

He ガスを用いた荷電変換法はガスの非破壊性と厚さ均一性、low-Z ガスの高い荷電変換能力を併せ持つ次世代ストリッパーの最有力候補である[5]。ヘリウムガスストリッパー実現のための大きな技術的挑戦の一つとして、ヘリウムガスの真空中への窓なし蓄積がある。質量が小さく漏れやすい上に、ヘリウム原子の荷電交換反応の断面積は小さく、平衡電荷を得るための物質量が、例えば 11MeV/u のウランに対して、窒素ガスでの値 (約 0.15 mg/cm<sup>2</sup>) に比べてずっと大きくなり、およそ 1 mg/cm<sup>2</sup> もの標的が必要となる。しかしながら、窒素ガスを蓄積するのに使用された比較的大規模な差動排気系 (標的長さ=14 cm, 4 段式, 初段 MBP 排気量 ~1000 m<sup>3</sup>/h、ビームパス d=φ6mm [7]) で蓄積可能なヘリウムの最大量は 0.0015 mg/cm<sup>2</sup> であった。

我々のグループは、まずポンプの性能と差動排気バランスの最適化を行い、真空排気システムの大規模化(MBP 排気量 ~4200 m<sup>3</sup>/h)を行った。更にビーム光学から標的長さ (~50 cm) とチューブオリフィス形状の最適化を行い、ガスの流れ攪乱板によるコンダクタンスの抑制を行う等のアイデアでヘリウムガス蓄積性能を劇的に改善した。これまでに φ6mm 以上のビームパスを確保し、2 mg/cm<sup>2</sup> までのヘリウムガスを蓄積可能なプロトタイプシステムの開発に成功している[6]。更に、開発されたプロトタイプシステムを用い、11 MeV/u の <sup>238</sup>U<sup>35+</sup>ビームに対し 65 価までのガスとしては非常に高い平衡電荷が得られる事(例えば N<sub>2</sub>では 56 価[7])、ガスの厚さ均一性によって通過ビームのエネルギー広がりが炭素膜の半分程度に抑えられる事[8]を実証した。

これらの結果から RIBF の次期第 1 ストリッパーとして、He ガスストリッパーの採用を決定し、後段 fRC の 64-65+加速への対応[9] (従来 69+までの加速にしか対応していなかった) と He ガスストリッパー実用機の開発に取りかかった。

## 4. He ガス循環式荷電ストリッパー

### 4.1 ガス循環方式

実用機による大強度ビームの荷電変換にはビーム損失を可能な限り避けるため、更なる大口徑のビームパス(>d=φ10 mm)を確保しながら 1 mg/cm<sup>2</sup> もの He ガスを安定蓄積しなければならない。漏れ量は d<sup>4</sup> に比例するため、He ガスの漏れ量は非常に大きく(約 200L/min)、それらをプロトタイプと同様に排気したのでは He ガスの消費量が多すぎて実用に耐えない。その為、プロトタイプで実現した以上の高性能差動排気系に加え、大流量のガス循環系を両立

する事が必要不可欠である。特に循環系において、断面積 ( $\sigma \propto Z^4$ ) の低い He ではその純度も重要なパラメータとなる。また、通過ビームの品質を保つため、厚さ均一性、安定性も当然保たなければならない。

これらを実現させる循環システムとして、我々は複数台のメカニカルブースターポンプ(MBP)からなる多段式 MBP アレイを用いたガス循環システムを開発した。大型の MBP を単体で使用した場合 (公称値 2600 m<sup>3</sup>)、ロータリーポンプでその背圧を排気した場合に比べて MBP の排気能力は当然低くなる。しかし、小型の MBP (公称値 500 m<sup>3</sup>) をロータリーポンプの代りに多段階に直列に繋ぐことで同程度の性能を発揮する事が出来る。実際に性能が上がる事をオフライン試験によって実証し、MBP 配置の最適化がなされ、ヘリウム圧縮による温度上昇も 80°C程度と実用上問題のない事が分かった。基本的には油汚染のない MBP アレイを通過したガスは簡単な熱交換器とフォアライントラップのみを通過して標的へと戻す事が可能である。前例のない方式であるが、油汚染のあるロータリーポンプを用いた循環システムの場合に必要な、大流量ガス純化のための複雑なシステムが省かれ、安定性、信頼性が増すと同時に大幅なコストダウンが可能となる。

### 4.2 実用機のデザイン

実際の He ガス循環式荷電ストリッパーのデザインを図 2 上に示す。ストリッパー領域には全部で 22 台のポンプが接続されており、5 段階の差動排気が行われている (図 2 下)。非常に限られたスペースで多段の差動排気を実現するため、また、ビーム



図 2 : He ガス循環式荷電ストリッパーのデザイン (上) と真空系統図 (下)

パスの同軸性保証のため中心領域の真空チェンバー（メインチェンバー）は長さ 1.5m の一体型アルミチェンバーが使用され、その両端にターボポンプ接続用のサイドチェンバー、更にビームモニターチェンバーが接続される。メインチェンバー及びサイドチェンバー内部には真空隔壁が 0.2 mm の同軸精度で計 10 個設置されている。φ 10 -15 mm のチューブオリフィスがそれぞれの隔壁に設置され、ビームパスを確保しつつ、長さ 2 m 強の領域で標的圧力～10 kPa からビームトランスポート系真空圧力～10<sup>-5</sup> Pa まで約 9 桁のヘリウムガス差動排気を実現出来るようにデザインされている。プロトタイプ製作で成功したガスの流れ攪乱板は計 4 枚設置されている。

ガス循環のための大小計 7 台の MBP からなる MBP アレイの総排気量は公称値で約 1.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h であり、流体計算から得られる循環量は約 200L/min である。ガス循環率はスクロールポンプによる標的からの直接排気量をコントロールする事で制御可能であるが、99%以上にすることも可能である。例えば循環率 99%の場合、残りの 1%はターボ分子ポンプによって排気され、ヘリウム回収系へと送られる。循環率を 100%にせず、標的をある割合でリフレッシュし、アウトガス等による不純物の蓄積とガスの放射化を防ぐ事は非常に重要である。ガス標的の圧力でフィードバックをかけながら、この失われる 1%のガスはガスハンドリングシステムから随時供給され、標的圧力が保たれる。

#### 4.3 インストールとガス蓄積試験

装置は RRC 本体室の A02 サイトに設置された。RIBF で最も使用頻度の高い RRC の直下であるため、ストリッパーの設置、ガス蓄積試験は短期間で集中的に行った。2012 年 1 月に 20 日程度の集中工事で上流ビームラインの組み換え、インフラの整備、ストリッパー設置の全てを完了させ（図 3）、3 月に約 1 週間の期間を設けて、ヘリウムガス循環蓄積試験を行い、蓄積性能に問題のない事を確かめた。



図 3 : RRC 下流の A02 サイトに設置されたガス循環式 He ガス荷電ストリッパー

### 5. ウランビーム照射試験

2012 年 4 月、6 月、7 月に計 3 回それぞれ 3-4 日

のウランビームを用いた He ガス循環式荷電ストリッパーの試験を行った。

試験の目的は(1)荷電分布を測定し、不純物の影響の程度を確認する事、(2)大強度ビームでの荷電変換の実証、(3)改造 fRC による 65+加速試験、(4)長期安定性の確認、等であった。

#### 5.1 荷電分布測定

電子捕獲断面積について、Schlahiter の式[10]によれば Z<sup>4.2</sup> に比例する。そのため、He ストリッパーで得られる価数は Z の大きな分子、ポンプ油、水、空気等混入の可能性がある不純物の影響を大きく受ける。現在の標的圧力 10 kPa 近辺において、in-situ で精度良く不純物濃度を測定する簡単な方法はなく、実際に荷電分布を測定し、加速価数の候補である 64-65+が十分な変換効率で得られる事を確認する必要があった。

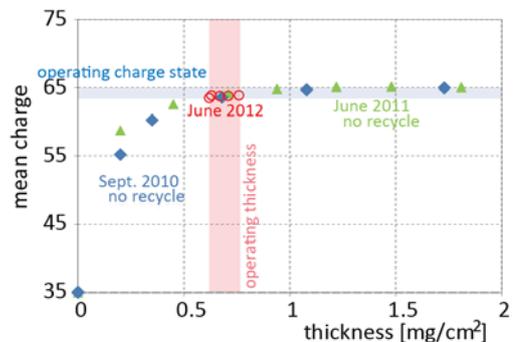


図 4 : 平均電荷のヘリウム標的の厚さ依存性

4 月の試験ではトラブルから実際に価数が下がる様子が観測された。ビーム照射試験開始と同時に熱交換器破損による水漏れが発生し、標的領域に水が 1L 程度混入する事態が発生した。この時観測された平均電荷は 58+と本来の電荷から 7 価程度減少したものであった。その後ガスフラッシングを繰り返す事で不純物除去を行ったが結局 61+までしか回復せず、原因はポンプ内に水が残っていた事等が考えられている。しかし、ガス循環率が 80%程度に落ちる事で本来の平均電荷が得られた。

6 月の試験では熱交換器を改良交換し、更にポンプ油の影響も考慮してガス戻しラインにフォアライントラップを接続し、再度試験を行った。図 4 赤丸が得られたガス循環率約 99.5%における平均電荷で、青と緑でプロットされたガスを排気した場合（ガス循環率 0%）と同等の性能が得られており、不純物の影響が問題ないレベルである事が確認された。

標的の厚さ 0.7 mg/cm<sup>2</sup> 近辺の動作領域で変換効率は 64+は 25%、65+について 18%程度であった。ちなみに 64+で収量が増える定性的な理由として、平衡電荷 65+の隣の価数である事他に、電子シェル効果がある。ウランの電子配置で M シェルと N シェルの境目が丁度 64+と 63+であり、イオン化断面積の差が大きい。更に電子束縛エネルギーはそれぞれ 7.4 keV と 4.6 keV であり、ウラン 11MeV/u の速度は電子 5.8 keV 相当であるので、両価数の間が

速度マッチングの変曲点となる。つまりイオン化断面積の違いは二重の意味で大きく、この事に起因して荷電分布コンプレッション効果が働き、平衡厚以下の薄い標的で過渡的に 64+ の割合が上がっていると考えられる。これは固体の様な多段イオン化のないガス特有の効果と考えられる。ヘリウムガスによる 64+ の変換効率はこれまでの炭素膜の最大変換効率～18% よりも大きく、薄い標的でも効率良く得られるため、加速価数として適している。

## 5.2 大強度ビーム照射試験

エネルギー損失の大きなウランビーム特有の問題として、熱負荷によるガス密度の減少により実効的なガスの厚さが減少する可能性がある。ガス密度減少の程度について、エネルギー損失がどのように熱に変るかに不確かさがあり、実際に測定する必要があった。

試験では現状の最大強度 13 euA までのウランビームを照射し、荷電変換能力や均一性が変らない事の確認を行った。図 5 左に示されているように現在の最大強度においても荷電分布に変化がない事が確認された。また、図 5 右にベンド電磁石で曲げた後のビームプロファイルを重ね合わせて示す。通過後のエネルギーとエネルギー広がりを反映しており、ビーム強度によって有意な変化はなく、性能の劣化は見られないことが分かった。

これまでの試験で、ストリッパーのビーム通過効率は最大 90% が達成されており、最大強度におけるビームオリフィスの温度上昇は冷却なしでも 50°C 程度に抑えられている。また、2011 年秋の運転における最大値～30 pnA を超える、U65+ 36 pnA, U64+ 44 pnA の出口強度が既にデモンストレーションされている。

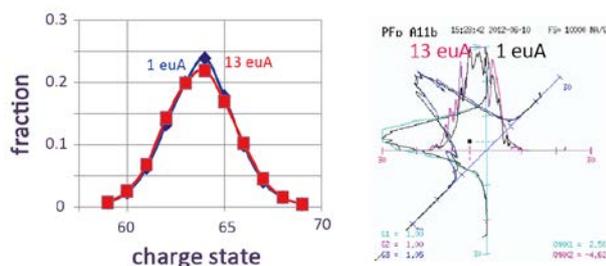


図 5 : ビーム電流 1 euA と 13 euA における荷電分布の比較 (左) とベンド電磁石で曲げた後のビームプロファイルの比較 (右)

## 5.3 改造 fRC による 65+ 加速試験

He ガス循環式荷電ストリッパーの開発と並行して fRC の改造作業が行われてきた[9]。64+ あるいは 65+ の加速をするためには fRC メイン磁場を増強する必要があり、メイン磁場用電磁石電源、および一部トリムコイル電源の増強、入射用電磁石または電源の増強、磁場の増強に伴い飛躍的に増加する電磁石まわりの漏れ磁場による入射ビーム軌道の補正などが行われた。

2012 年 7 月に加速試験が行われ、65+ が問題なく入射、加速される事が確認されている。数時間の調整で 80% 以上の fRC 通過効率が達成されており、サイクロトロン内のターンパターンから間接的、定性的にはあるがヘリウムガスストリッパーからのビームエミッタンスが炭素膜に比べて小さい事が示されている。

## 5.4 長期安定性試験

約 36 時間のシステム安定性試験を行い、長期間に渡りビーム強度変化、位相変化を静電誘導型フェーズプローブ [11] を用いて測定した。標的ガス圧力はゲージの読みで 0.5% 程度の揺らぎに抑えられており、He ガスストリッパー起因と思われる有意な強度、位相の変化はなかった。特に位相揺らぎについては回転炭素膜ストリッパーの 1/10 以下に抑えられており、良好であった。fRC 等の後段加速器の通過効率の向上、通過調整時間の短縮が期待される。また、試験においてシステムの重大な故障などはなく、これまでの所 MBP アレイの使用に問題がない事が示されている。

## 6. まとめと展望

非破壊性と圧さ均一性を大きな特徴とし、大強度ウランビーム加速における原理的問題を解決し得る He ガス循環式荷電ストリッパーの開発を行った。高性能差動排気系と大流量・高純度のガス循環系を両立するため、MBP アレイを用い、約 200L/min ものガスを循環再利用する事でガス消費の問題を解決している。2012 年 1 月より、設置工事、ガス循環蓄積試験を順調に進めて来た。2012 年 4 月より、実際にウランビームの照射試験を行い、不純物の影響がない事、現状の最大強度 13 euA での使用に問題がない事等を確認した。また、変換後のビームの改造 fRC による加速に問題のない事を確認し、強度安定性、位相安定性も良好であった。

今後、インターロックシステム等の整備を行い、今秋に予定されているウランビームの運転で実戦投入し、ウランビーム強度の更なる大強度化に取り組む予定である。

## 参考文献

- [1] Y.Higurashi et al., Rev. Sci Instrum. 83, 02A308 (2012), Y.Higurashi et al., Rev. Sci Instrum. 83, 02A333 (2012).
- [2] K.Yamada et al., Proceedings of IPAC12, TUOBA02 (2012).
- [3] N.Fukunishi et al., Proceedings of PAC09, MO3GRI01 (2009).
- [4] H.Hasebe et al., in this proceedings.
- [5] H.Okuno et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 033503 (2011).
- [6] H. Imao, et al., Proceedings of IPAC11, TUPS088 (2011).
- [7] H.Kuboki et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 093501 (2010).
- [8] K.Kumagai and N.Fukunishi, in this proceedings.
- [9] H. Imao, et al., to be submitted.
- [10] A.S.Schlachter et al., Phys. Rev. 27, 3372 (1983).
- [11] R.Koyama et al., Proceedings of PASJ5-LAM33, WP007, (2008).