

# STUDY OF GAS CHARGE STRIPPER FOR ACCELERATION OF HIGH-INTENSITY HEAVY ION BEAM

Hiroshi Imao <sup>#,A)</sup>, Hiroki Okuno <sup>A)</sup>, Hironori Kuboki <sup>A)</sup>, Shigeru Yokouchi <sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi <sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito <sup>A)</sup>, Hiroo Hasebe <sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe <sup>A)</sup>, Masayuki Kase <sup>A)</sup>, Akira Goto <sup>B)</sup>, Yasushige Yano <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

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

## Abstract

The charge state evolution of uranium-238 ion beams injected at 10.8 MeV/u has been measured using H<sub>2</sub> gas in the thickness range 0.11-1.05~mg/cm<sup>2</sup> and He gas in the thickness range 0.20-1.73 mg/cm<sup>2</sup>. The obtained maximum mean charge states both for H<sub>2</sub> and He were approximately 65+, which is significantly higher than that for medium-Z gases like N<sub>2</sub> and Ar. The observed charge state evolution has been compared with theory.

## 大強度ウランビーム加速に向けたガス荷電ストリッパの研究

### 1. ウラン大強度化計画とその問題点

現在、理研 RI ビームファクトリー(RIBF)[1]では「核図表の飛躍的拡大」を基幹目標の一つとして、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。

これまで RIBF におけるウランビームの強度は目標値 1 puA に対して 0.1%以下の 0.8 pnA に留まっていた。一方で、大強度ウランビームの開発は世界的競争の中にあり、2017 年にはドイツの FAIR, 2020 年には米国の FRIB といった競合加速器の稼動が予定されている。この様な状況の中、我々の施設ではウランビーム大強度化に向けた改良の第一弾として、新入射器の開発を行ってきた。2010 年末には無事、28GHz 超伝導 ECR イオン源を含む新入射器 RILAC2[2]の建設を終えた。今後従来の 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、空間電荷、熱負荷、放射線ダメージに関わる様々な問題を解決しなければならない。特に大強度ウランビームに最適な荷電ストリッパの探求は加速ビームの品質を決め、ひいては加速器全体の性能を決める鍵といえる。

荷電ストリッパは RIBF のような重イオンの多段加速システムにおいて一般的に使用され、前段加速器で加速後、重イオンを多価化し、後段加速器の負荷を減らすために使用される。RIBF では現在、薄膜炭素膜を荷電ストリッパとして用いている。RIBF における <sup>238</sup>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、ウランについては <sup>238</sup>U<sup>35+</sup> のビームを理研リングサイクロトロン(RRC)で 11 MeV/u まで加速後に ~0.3 mg/cm<sup>2</sup> の薄膜 (第 1 ストリッパ) を用いて <sup>238</sup>U<sup>71+</sup> へ変換される。それを周波数固定サイクロトロン(fRC)で 50 MeV/u まで加速し、比較的厚い 17 mg/cm<sup>2</sup> の膜で 86+まで荷電

変換され、更に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。最終エネルギーは 345 MeV/u となっている。

ウランのような超重イオンは一般に電荷質量比 q/A の値を上げるのが困難であり、電子束縛エネルギーが大きいため、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、ビーム品質の劣化を招く。また、ビームによる媒体へのダメージの問題も深刻で、例えば 11 MeV/u の場合の炭素膜へのエネルギー損失を <sup>238</sup>U と中程度の重さの <sup>48</sup>Ca で比較するとそれぞれ 30 keV/mm、及び 3 keV/mm 程度であり、単位長さ当りの損失は実に 10 倍程度の違いがある。

こうしたウランビームによる炭素膜へのダメージの問題は既に第 1 ストリッパで顕在化している。RIBF で荷電変換に用いている炭素膜は理研で開発が進められているオリジナル膜[3]とアリゾナ膜[4]と呼ばれる商用品を併用して用いている。いずれも炭素膜としては最高性能のものであるが、目標照射強度 15 puA より桁違いに少ない現状の 0.1 puA 程度のビーム強度であっても最大使用可能時間は 10 時間程度であり、ウランビーム特有の問題となっている。また固体薄膜特有の問題として 10%程度の膜厚の非均一性があり、エネルギー損失の大きなウランビームにおいては無視できないエネルギー拡がりとなり、ビーム品質の劣化を招く。これらの問題が後段サイクロトロンにおける通過調整を難しくしており、通過効率の低下を招き、特に今後予想される大強度ビームの加速においては致命的な問題になると考えられる。

この様に従来型炭素薄膜は耐久性や膜厚均一性に問題があり、今後のウランビーム大強度化に伴いこれらの問題を大幅に改善できる新機軸が必要である。

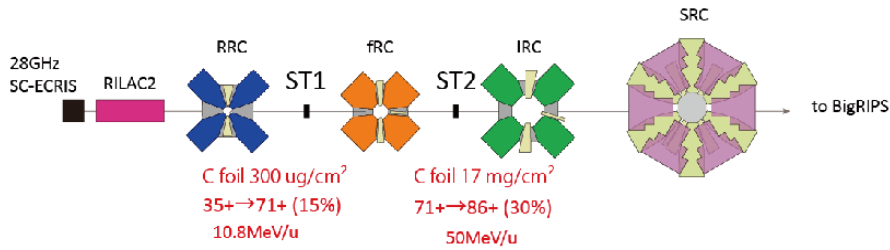


図 1 : RIBF における  $^{238}\text{U}$  の加速スキーム

## 2. Low-Z ガスストリッパー

新機軸荷電ストリッパーへの要求をまとめると以下ようになる。(1) 高電荷が得られる (69+が現在の fRC における最低加速可能電荷)、(2) 媒体安定性、耐久性 (ダメージを散逸できる)、(3) ビーム品質 (必要物質量、厚さの一様性)、(4) 取扱い簡便性 (高価でない、危険でない等)、(5) 必要開発期間に目処がつけられる。新機軸の荷電ストリッパーとして、特に流体を用いる事でダメージを散逸させるといった思想のストリッパーがいくつか提案されており、液体 Li 膜ストリッパー([5])、高密度プラズマストリッパー([6])等がある。RIBF では特にガスストリッパーの開発が進められて来た。またカーボンナノチューブ等の材料を駆使して炭素膜を高度化 (回転式炭素膜等) するという取り組みも平行して行われている。

ガスストリッパーは耐久性、安定性、厚さ均一性、簡便性といった先に挙げた性質を兼ね備え理想的なストリッパーであるが、得られる平衡電荷が小さいという問題があった。例えば窒素、アルゴンで測定された 11 MeV/u の  $^{238}\text{U}$  に対する平衡電荷は 56+[7]と炭素膜の~72+に比べて格段に低いものであった。これは励起イオン化やオーグジュイオン化といった固体の高密度に起因する過程の不在によるものと考えられる。RIBF の加速器群は炭素膜の荷電変換性能に合わせて設計されているため、このような低電荷のウランを加速するためには大規模な加速器の改造が必要となり、実際上は使用できない。この欠点を補うために提案されたのが low-Z ガスストリッパーである[8]。

Low-Z ガスストリッパーとは原子番号の小さいガス (水素・ヘリウム) を用いたストリッパーで、Z の小さな原子では電子の束縛エネルギーが小さく、軌道電子の速度が入射ウランの速度に比べて小さいため、速度マッチングが悪く、電子捕獲過程が抑制される。このため平衡電荷が上がり、簡単な計算によるとヘリウム・水素について 65+以上の平衡電荷が得られる見込みとなる。実際ヘリウ

ムの平衡電荷について 66+でイオン化断面積と電子捕獲断面積が交差する事が実験的に確かめられた[8]。

## 3. Low-Z ガスストリッパー開発実験

Low-Z ガスストリッパーは全ての要求を満たす理想的ストリッパーと思われるが、更に研究を進めるためには大きな問題があった。ガスの拡散性が大きく、真空中への「窓無し」蓄積が非常に困難であるという事である。更に low-Z 原子の荷電交換反応の断面積は小さく、平衡電荷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 0.15 mg/cm<sup>2</sup> に比べてずっと大きくなり、1 mg/cm<sup>2</sup> 程度の標的が必要となる。実際過去に窒素ガスを蓄積するのに使用された差動排気系 (標的長=14 cm, 4 段式, 初段 MBP 排気量 ~1000 m<sup>3</sup>/h [7]) で蓄積可能なヘリウムの最大量は 0.0015 mg/cm<sup>2</sup> 水素は 0.0003 mg/cm<sup>2</sup> と桁違いに少なく、low-Z ガスの蓄積の困難さを物語っている。水素について言えばこの旧システムで蓄積される量の実に 300 倍以上のガス蓄積が必要となる。

そこで、我々は(1)差動排気系を最適化・増強し、(2)標的の長さを長くする事で 1 mg/cm<sup>2</sup> の low-Z ガス蓄積を試みた。作成した荷電変換システムは図 2 のようなものである。標的の下流側の差動排気系は従来のを改良し、片側の排気専用とし、上流側の差動排気系は新規に作成した。標的部分の長さは約 8 m であり、当然ビームの通過が問題となるが、ガス途中に三連四重極磁石を配置し、荷電変換を行いながら欲しい電荷のビームを収束させるという事を行った。この荷電変換システムをビームライン中に配置し、RRC からの 11 MeV/u の  $^{238}\text{U}^{35+}$  ビームを打ち込み、荷電変換させて、その荷電分布の情報について分析用ダイポール磁石を用いて取得した(図 3)。平衡電荷、電荷がどの様に発展していくか、ビーム品質がどう変わるかを調べ、low-Z ガスストリッパーの実現可能性を判断する事ができる。

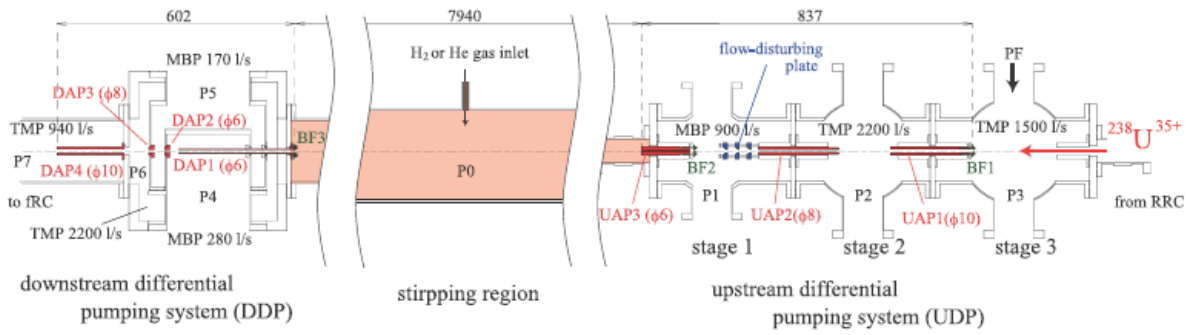


図 2 : 8m 長尺荷電変換システムの断面図

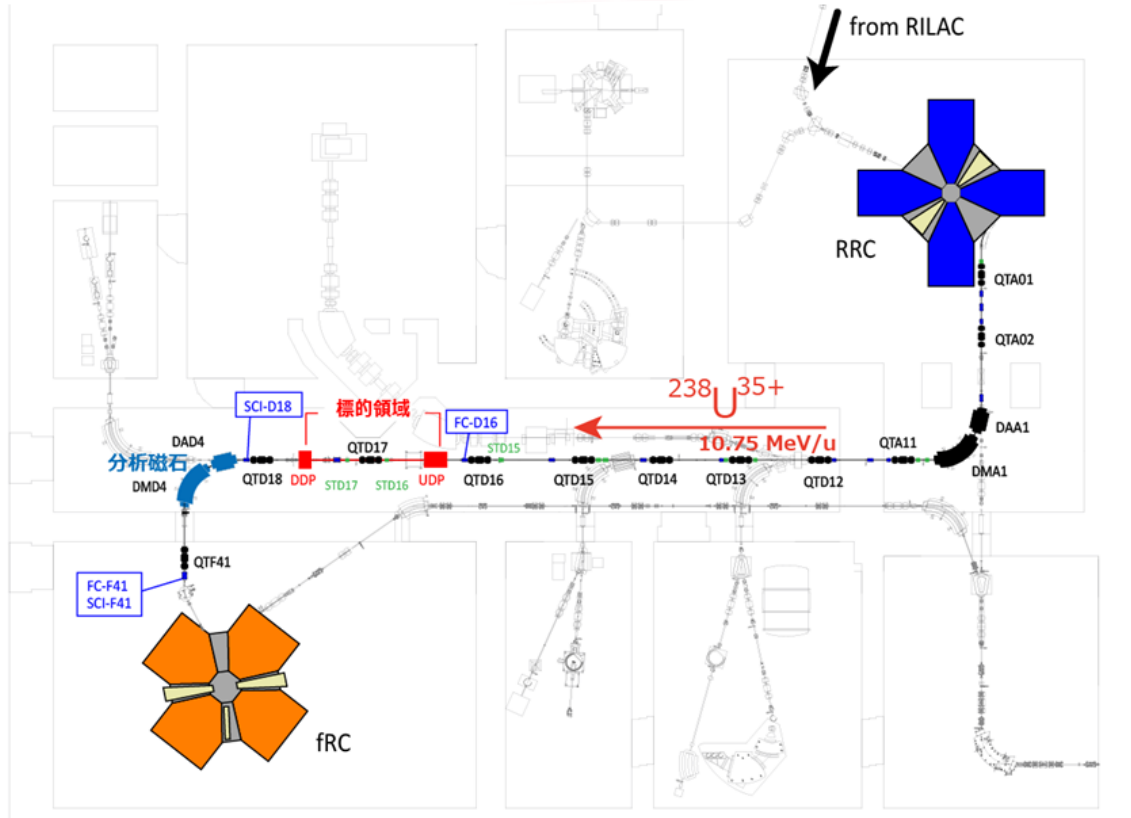


図 3 : 開発実験におけるセットアップ

#### 4. 結果

得られた平均電荷のガス厚依存性は図 3 のようになった。計算値はイオン化断面積について binary encounter model [9], 電子捕獲断面積については Schlachter の semi-empirical な式 [10] を用いて導出している。ヘリウムについては計算値とほぼ同じ 65+ 程度の平均電荷が得られているが、電荷の発展が理論より遅い。水素については最高平均電荷が計算値より低く 65+ 止まりであった。電荷分布の発展は図 4 のようになった。電荷分布をフィットする事で理論的な断面積との違いを評価することができる。水素については、

$$\sigma_{ion} = 0.62(1)\sigma_{ion}^{theory}, \quad \sigma_{cap} = 2.55(2)\sigma_{cap}^{theory} \text{ となった。}$$

また、ヘリウムについては、

$\sigma_{ion} = 0.48(1)\sigma_{ion}^{theory}, \quad \sigma_{cap} = 0.41(2)\sigma_{cap}^{theory}$  という結果になった。水素についてはイオン化断面積が小さく、また特に電子捕獲断面積が理論より大きいため平衡電荷が下がっている事が分かる。一方ヘリウムの場合はイオン化断面積と電子捕獲断面積が同程度理論より小さいため、平衡電荷自体は理論とあまり変わらないが、平衡に必要な物質質量が増加している。現在 fRC で加速できる最低の価数は 69+ であるが、その収量はヘリウム、水素いずれについても 3% 程度であり、例えば現状の加速スキームで用いている炭素 71+ への変換効率の 1/5 程度に留まっている。

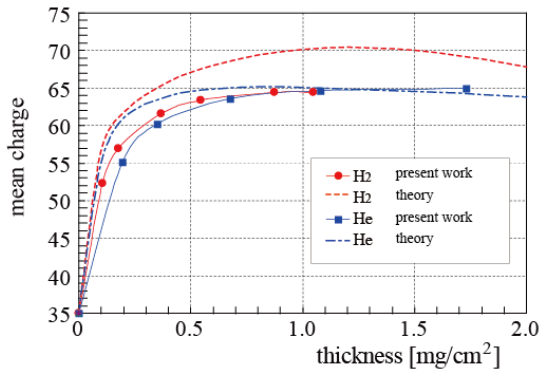


図 4 : 平均電荷のガス厚依存性

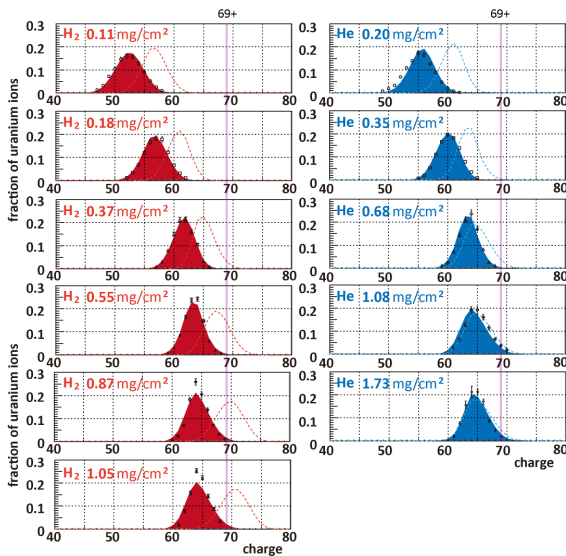


図 5 : 電荷分布のガス厚依存性

## 5. 考察

ヘリウムと水素の平衡電荷が同程度であったため、ビーム品質（エネルギー損失）、ガスの取扱いと蓄積の容易さから、ヘリウムがより優れたストリッパーである事が分かる。ヘリウムガスの蓄積に特化させるのであれば本研究で開発された新しい差動排気系を用いて 50cm へ短尺化が可能であり、ビームの通過がより容易になる。また収量の少ない 69+ではなく、65+を選択し fRC のビーム入射系・磁石電源系を改造するという方針で開発を進めている。50cm へ短尺化したヘリウムガスストリッパーを実際に製作し、2011 年 6 月にはウランビームを用いた照射試験が行われ、更なる研究が進められている。

## 6. まとめ

強力な差動排気系を有する長尺ガス荷電変換システムを作成し、高真空中に 1 mg/cm<sup>2</sup> 以上の low-Z ガスの蓄積を実現した。実際に 11 MeV/u の 238U ビームを通過させ、65 価までの最高平均電荷を観測し、実用への基礎データを得た。このデータを元に現在実用化に向けた研究開発を進めている。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B261**, 1009 (2007).
- [2] O. Kamigaito et al., HIAT09, MO11T (2009).
- [3] H. Hasebe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A613**, 453 (2010).
- [4] ACF-Metal Co. Ltd.
- [5] Y. Momozaki et al., JINST **4**, P04005 (2009).
- [6] A. Golubev et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A464** 247 (2001).
- [7] H. Kuboki et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 093501 (2010).
- [8] H. Okuno et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 033503 (2011).
- [9] M. Cryzinski et al., Phys. Rev. **A138**, 305, 322, 336 (1965).
- [10] A. S. Schlachter et al., Phys. Rev. **A27**, 3372 (1983).