



値を上げるのが困難であり、価数を上げるためには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。軽いイオンの荷電変換に比べて荷電変換効率は下がり、また必然的に膜厚が厚くなる。ビームのエネルギー損失は増加し、エミッタングロースを招く。また、最も深刻な問題はビームによるダメージであり、炭素膜の劣化、破損は実効的な変換効率、照射時間やビーム品質減少の原因となる。図1下段に示すように U, Xe といった重元素ビームの単位長エネルギー損失  $dE/dx$  は陽子等の軽いビームに比べて桁外れに大きなものとなる。更に局所的なエネルギー損失によるサーマルスパイクと付随するイオンハンマリング等の非線形なダメージも報告されており[8]、状況はより深刻である。

図2は、2012年のXeユーザー運転時のある代表期間におけるビーム強度の変遷の傾向を示したものである。縦軸のSRC後の強度は常時モニターされていたIRC後のビーム強度と間欠的に記録したSRC通過効率の線形補完を用いて求めている。縦にひか

れた緑線は第一ストリッパーの交換、青線は第二ストリッパーの交換に取り掛かったタイミングを示している。交換時に、新しい膜に直ちに大強度ビームを当てると破損の可能性が高く、段階的に強度を上げて慣らしながら照射する手法がとられた（この作業は予め行っておくことが可能である）。その後、迅速にビーム調整が行われ、出射強度は最大となるが、膜の劣化と共に再び強度が下がっていく様子が分かる。2012年の20日程度の運転期間の間に、第一ストリッパーは約50回、第二ストリッパーは約20回の膜交換が行われた。第一ストリッパーの最大照射強度は約  $6 \times 10^{12}$  個/s、第二ストリッパーでは約  $6 \times 10^{11}$  個/sであった（図1）。膜の個性も大きい、この辺りの強度がXeビームにおける固定型炭素膜の使用限界と言える。

我々はXeビームの更なる大強度化を目指して、荷電ストリッパーにおける耐久性や厚さ均一性を劇的に改善すべく、最適なガスストリッパーの開発を行った。

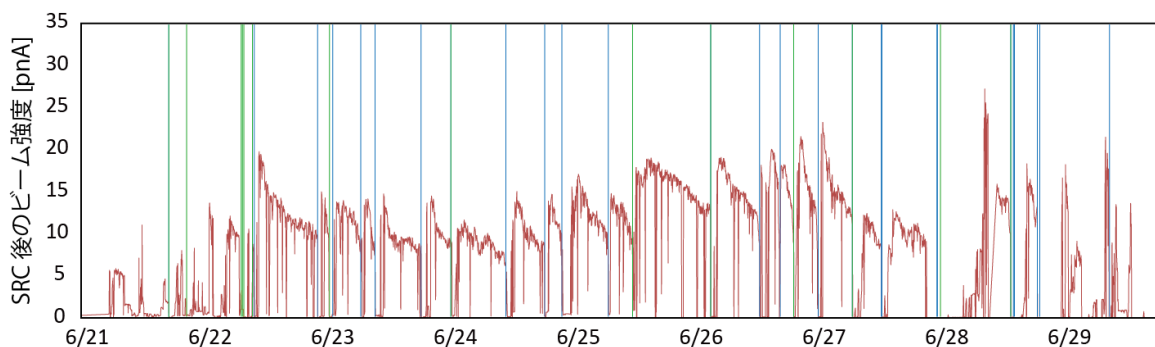


図2：2012年のXeユーザー運転時におけるビーム強度の変遷の傾向。緑線は第一ストリッパーの交換、青線は第二ストリッパーの交換のタイミングを示している。交換作業とビーム調整後、強度がピークとなり、膜の劣化と共に再び強度が下がっていく様子が分かる。

### 3. ガスストリッパー

ガスは流体であり、ビーム標的として耐久性、安定性等に優れているが、固体に比べて密度が低く、残留イオン化等のプロセスが抑制されるため、一般に平衡電荷が低くなるという弱点もある。またその加速器ビームの標的としての利用のためには、真空中への窓なし蓄積が必要で、特に我々が使用する高速イオンに対しては大掛かりな蓄積システムが必要となる。

例えば、ウランについては上記の密度効果が顕著であり、11 MeV/uの入射エネルギーでは窒素ガスの平衡価数は56価、炭素薄膜の平衡価数は71価となり、原子番号があまり変わらないにも関わらず大きな開きがある[9]。2012年に開発されたウラン用ガスストリッパーでは原子番号の小さいヘリウム(He)ガスを用いる事で65価までの平衡価数が得ら

れた[10,11]。しかし、原子番号の小さいガスでは、ガスの蓄積が困難な上、断面積が小さく、平衡状態を得るための厚さも大きくなる。そのため、エネルギー損失が大きくなり、エミッタングロースを招く(Heストリッパーではシェル効果を用いて効果を低減している)。また、電子捕獲断面積がおおよそ原子番号Zの4.2乗に比例するため、不純物による価数低下等の影響にも気を配る必要がある。

図3はXeとUについて価数毎のイオン化エネルギーをプロットしたものである。RIBFにおける $^{124}\text{Xe}$ ビーム加速での変換後の必要価数は第一ストリッパーについて40価、第二ストリッパーについて52価である。ここで、縦軸はイオン化の容易さの指標と言える。第一ストリッパーの入射エネルギー11 MeV/uで窒素ガスを用いた場合、Uでは56価が得られるが、図3の青横線よりこれはXeで40価を得られる可能性が高い事を示している。また、

51 MeV/u の U では平衡電荷として 84 価が得られることが分かっているが、図 3 の赤横線よりこれも Xe で 52 価を得るのに十分な能力がある事を示している。U では価数不足で使用できなかった窒素ガスは質量の軽い Xe ビームの荷電変換において有力な候補と言える。

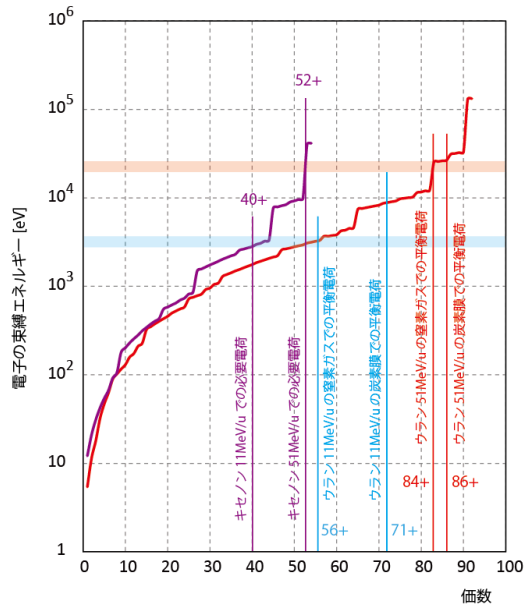


図 3 : Xe と U の各価数でのイオン化エネルギー。

実際 11 MeV/u の Xe ビームについてそれぞれ荷電分布、平衡電荷のデータが得られ[9]、Xe ビームの場合は 40.5 価の平衡価数が得られ、後段加速器で加速可能である事が分かった。

一方、51 MeV/u の Xe ビームで平衡電荷を測るためには厚いガスが必要となる。我々はφ6mm 以上のビームパスを確保し、30 mg/cm<sup>2</sup> までの窒素ガスを蓄積可能なプロトタイプシステム[11]を開発し、それをを用いて、実際に荷電分布、エネルギー拡がり等の測定を行った (図 4)。炭素膜と変わらず、約 60%の効率で 52 価が得られることが示された。また、ガスの均一性のため、エネルギー拡がりが図 4 下段の様に大きく改善される事が分かった。前述のように RIBF の第二ストリッパーはエネルギーディグレーダーの役割を兼ねており 51 MeV/u の入射ビームを 19 mg/cm<sup>2</sup> のガスに通す事で、46 MeV/u までエネルギーを下げて後段の IRC 入射軌道とマッチングを取っている。大きなエネルギー損失が避けられない中、通過ビームのエネルギー拡がりを抑えられる事はガストリッパーの大きな利点であり、後段サイクロトロン通過にとって非常に重要であると考えられる。

以上の研究から、第一、第二ストリッパー共に窒素ガスが使用可能である事が分かった。特に厚い第二ストリッパーにおけるガス蓄積は low-Z ガスを用

いた場合、既存のガス蓄積技術では不可能であり、窒素ガスが使えて初めて可能となる。

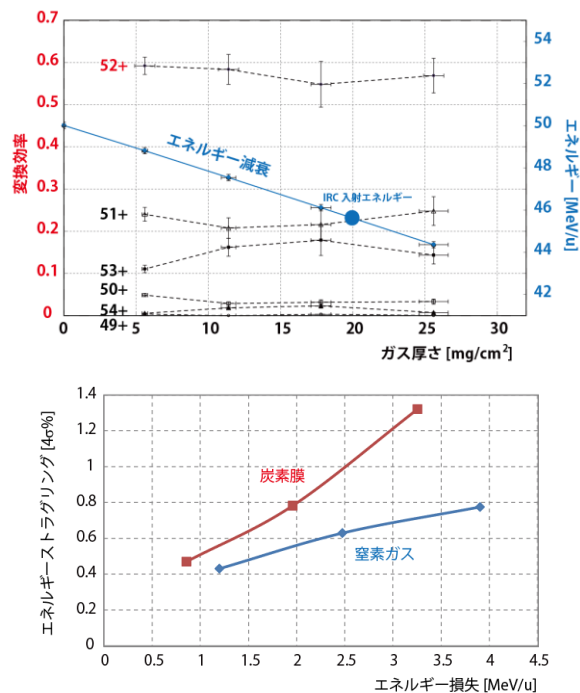


図 4 : Xe ビームの荷電変換効率とエネルギーの窒素ガス厚さ依存性 (上) と炭素膜と窒素ガスにおけるビーム通過後のエネルギーストラグリング。

#### 4. 開発と運用

Xe ビーム用の第一ストリッパーについては既存の He ガストリッパーを流用し、He ガスを窒素ガスに置き換える事で容易に達成できた。しかし、第二ストリッパーについては、新規開発の必要があった。必要な標的厚さは He ガストリッパーの約 30 倍であるが、プロトタイプシステム開発の経験から窒素ガスであれば既存技術の応用で蓄積可能である。実用機作成における一つの問題は毎分 400 リッターまでのガスの供給 (日にガスボンベ 80 本分) をどのように行うかであった。差動排気能力を十分に確保するためには、He ガストリッパーで用いた様なガス循環は非常に困難である。我々は実用機開発において、窒素ガスと空気のストリッパーとしての特質がほとんど変わらない事に着目して、室内空気を利用したストリッパーの開発を行った。

図 5 に空気供給ラインの概略図を示す。室内の空気がドライヤー一体型のオイルフリーコンプレッサー (ES4AD, コベルコ) で常時圧縮される。吐出空気量は 410 L/min である。下流の圧力はリリーフバルブで 0.7 MPa に保たれ、更にパーティクル除去フィルターとレギュレータを介し、マスフローコントローラ (FCST1500F, フジキン) の上流側が 0.3 MPa に保たれる。これにより、大気圧変動などの

影響を受けずに一定量の空気導入が可能となる。また、使用量に制限がなく、当然無料である。

空気使用において予想される一つの問題点はビームの電離作用による NOx ガス生成と HNO<sub>3</sub> の生成である。空気中での Xe のエネルギー損失は約 500 MeV であり、単純に陽子ビームで測定された G 値の文献値 1.5[12]を当てはめると一日に 50 cc 程度の HNO<sub>3</sub> が生成される事になる。排気された窒素ガスは全て不織布フィルターを介してガス排気ラインへと送られる。

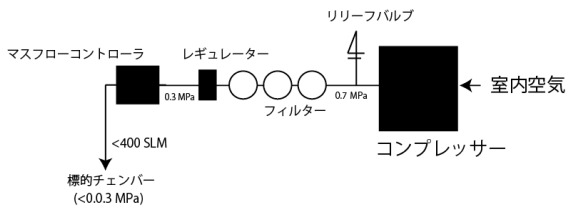


図 5：空気供給ラインの概略図。

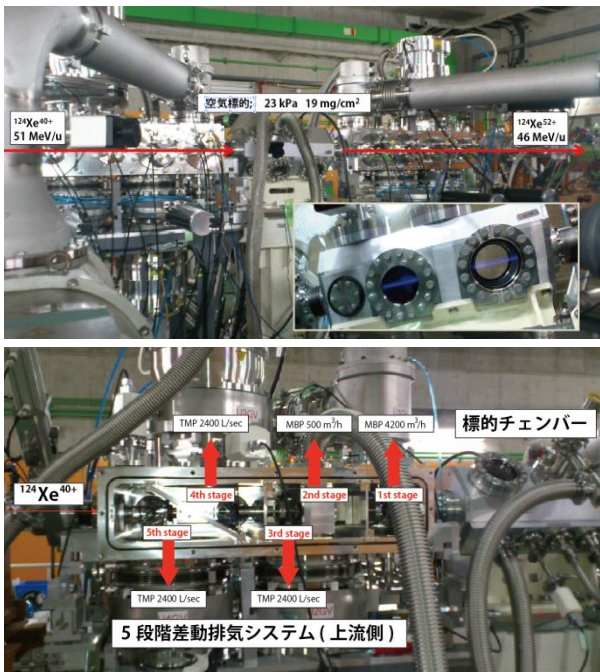


図 6：空気荷電ストリッパーのセットアップ図（上）と 5 段階差動排気システム（下）。上段右下はビーム通過時の空気ストリッパー中での発光の様子。

図 6 に開発された空気ストリッパーの写真を示す。ストリッパー領域には全部で 17 台のポンプが接続されており、上下流それぞれ 5 段階の差動排気が行われている（図 6 下）。中心領域の真空チェンバーは空気供給ラインに繋がっており、23 kPa の圧力に保たれている。両側の差動排気用チェンバーはそれぞれ全長 880 mm であり、非常に限られたスペースで 5 段階の差動排気を可能としており、標的圧力～

23 kPa から BT 系真空圧力 $\sim 10^{-5}$  Pa まで約 9 桁の空気の差動排気を実現出来るようにデザインされている。φ8.5 -15 mm の水冷チューブオリフィスを含む隔壁はスライド式で容易に脱着できるようになっており、Xe 加速以外の時は取り外される。プロトタイプ開発で成功したガスの流れ攪乱板は計 6 枚設置されている。

開発された空気荷電ストリッパーは、2013 年 6 月に約 25 日間のユーザー運転において実戦投入された。図 7 は 2013 年（窒素ガスストリッパー+空気ストリッパー）、及び 2012 年（炭素膜）の SRC 通過後のビーム強度を時系列でプロットしたものである（図 2 と同様の方法で作成）。太線は 1 日毎の平均強度を示している。

運転開始後は低強度で実験可能なユーザー運転を行い、6/15 から約 2 日の本格的な大強度ビーム調整を行った。その後のビーム強度は 2012 年のユーザー運転に比べて大幅に増強されている事が分かる。

ピーク強度は 2012 年の 24 pnA に比べて 37.5 pnA まで増強された。2013 年の大強度運転時(6/17-7/1)のトラブルを含む平均強度が 2012 年のピーク強度を上回る 27 pnA 程度となっており、これは 2012 年の定常運転時(6/21-7/5)の平均強度約 6 pnA の 4 倍以上の値となっている。平均強度の大きな増強は、ガスストリッパーにダウンタイムが少ない事、劣化がなく後段サイクロトロン通過効率が良い事が大きな寄与をしている。

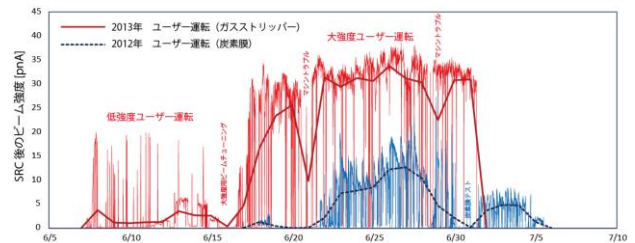


図 7：SRC 後の Xe ビーム強度の 2012 年（青）と 2013 年（赤）の比較。

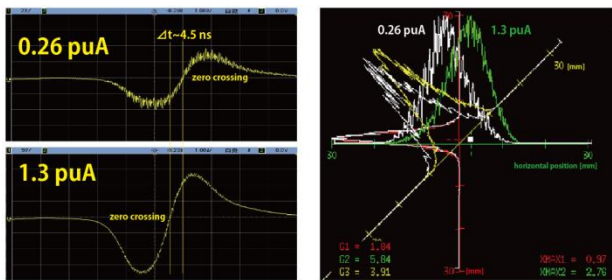
運転時に発生した問題としてロータリーポンプのオイル消費の問題があった。初段のロータリーポンプで排気される空気の流量が非常に大きいため、ロータリーポンプの油が数時間でオイルミストフィルターに移り、排気出来なくなる問題が発生した。そこで、オイルミストフィルターを持ち上げてオイルミストフィルターに溜まったオイルをポンプのオイル室へリターンするラインを作成し、循環する事で問題を解決した。

一方、懸念された空気中での HNO<sub>3</sub> の生成については今回のユーザー運転ではその生成の明確な兆候は見られず、機器への被害は認められなかった。

第一窒素ガスストリッパーにおいては、ビームの照射によってガスの温度が上がり、密度が減少するという現象が観測された。窒素ガス中には <sup>124</sup>Xe<sup>19+</sup> が 1.3 puA までの強度で入射され、16W のパワーロ



スが生じる。図 8(左)はストリッパーの下流約 33 m の位置にある静電誘導型の位相プローブで測定したデータであり、ゼロクロス点がビーム通過タイミングを示している。図の様にビームの強度が上がるとより早いタイミングでビームが通過して、密度の減少に伴うエネルギー損失の減少を示している。最大強度における時間差から計算される密度減少量は約 25%であった。図 8(右)はストリッパー後方のベンディング磁石通過後の水平方向の位置を表したもので、ビーム強度に応じて変化している。実際の加速器運転ではガスの導入量をビーム強度に応じて増減する事で密度減少を補償した。第一ストリッパーの窒素ガスの導入流量は 2.6 L/min と比較的小さいため (He ストリッパー運転時は約 200 L/min) 効果が大きくなったと考えられる。今後更に入射強度が上がり問題となった場合には、オリフィス径を増やしガス導入量を上げ、更に標的内のガスについて熱交換器を介して閉サイクルで循環する、等の対策が考えられる。



## 5. まとめ

Xe ビーム加速で使用可能な 11 MeV/u 及び 51 MeV/u でのガスストリッパーの開発を行った。特に空気を標的として利用する事で、51 MeV/u というかつてない高速領域で使用可能な、非常に厚いガスストリッパーの作成に成功した。これにより、ガスストリッパーのみを使用した Xe の新しい加速スキームが実現され、実際に 2013 年のユーザー運転に使用する事で、安定的な荷電変換が行われた。耐久性の制限もなく、変換効率、ビーム品質が向上し、実効的な平均ビーム出射強度の 4 倍増に大きな貢献をした。

今後の応用課題としてウランの 51 MeV/u で使用可能なガスストリッパーの開発が考えられる。現状の加速スキームでは空気ストリッパーを用いた場合、平衡電荷が 2 価足りず、加速スキーム全体を含めた検討も進んでいる。

## 6. 謝辞

住重加速器サービスの RIBF 加速器オペレータの方々に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

[1] Y.Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B261, 1009 (2007)

- [2] FRIB project, <http://www.frib.msu.edu/>  
 [3] H.Imao et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. DOI 10.1007/s10967-013-2649-x, (2013).  
 [4] Y.Higurashi et al., Rev. Sci Instrum. 83, 02A308 (2012).  
 Y.Higurashi et al., Rev. Sci Instrum. 83, 02A333 (2012).  
 [5] K.Yamada et al., Proceedings of IPAC12, TUOBA02 (2012).  
 [6] H.Hasebe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 613, 453 (2010).  
 [7] H.Hasebe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 655, 57 (2011).  
 [8] A. Benyagoub and S. Klaumunzer, Radiation Effects and Defects in Solids, 126, 105 (1993).  
 [9] H.Kuboki et al., Phys. Rev. ST-AB 13, 093501 (2010).  
 [10] H.Okuno et al., Phys. Rev. ST-AB 14, 033503 (2011).  
 [11] H.Imao et al., Phys. Rev. ST-AB 15, 123501 (2012).  
 [12] Y. Kanda et al., Rad. Phys. Chem. 74(5), 338(2005).