

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 6×10^{12} 個/s、第二ストリッパーでは約 6×10^{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るべく、最適なガスストリッパーの開発を行った。

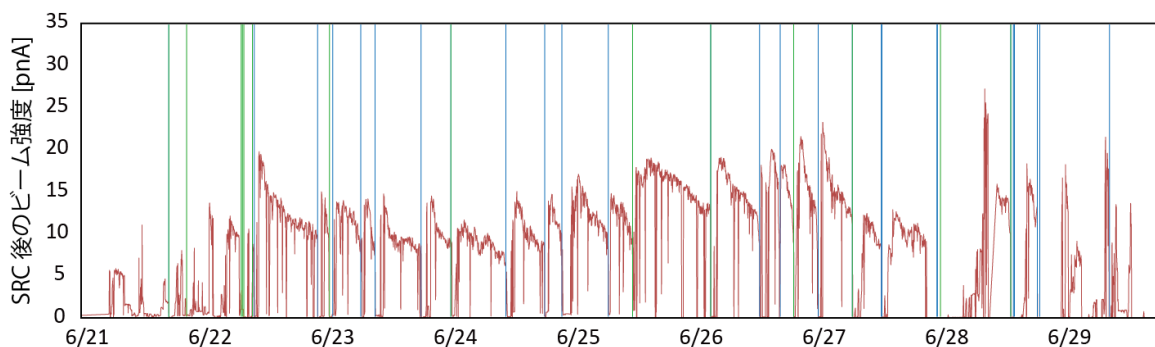


図2：2012年のXeユーザー運転時におけるビーム強度の変遷の傾向。緑線は第一ストリッパーの交換、青線は第二ストリッパーの交換のタイミングを示している。交換作業とビーム調整後、強度がピークとなり、膜の劣化と共に再び強度が下がっていく様子が分かる。

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}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、

