

51 MeV/u重元素イオンビームのための ガスストリッパー

今尾 浩士, 奥野 広樹, 久保木 浩功, 上垣外 修一, 長谷部 裕雄,
福西 暢尚, 加瀬 昌之, 矢野 安重



アウトライン

1. RIBF重元素ビーム加速

- Xe加速と荷電変換における問題

2. ガスストリッパ

- 最適なガス種
- 低原子数ガス

3. 開発と運用

- 差動排気システム
- 空気ストリッパ運用と問題点
- Xe-MTのハイライトデータ

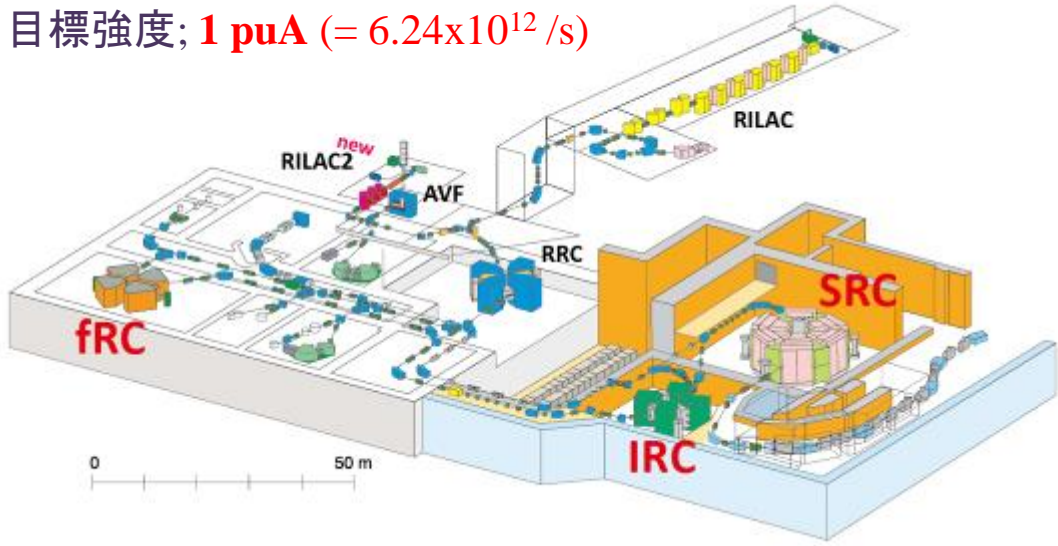
4. まとめと展望

1. 重元素ビーム加速

RIBFにおける重元素ビーム大強度化

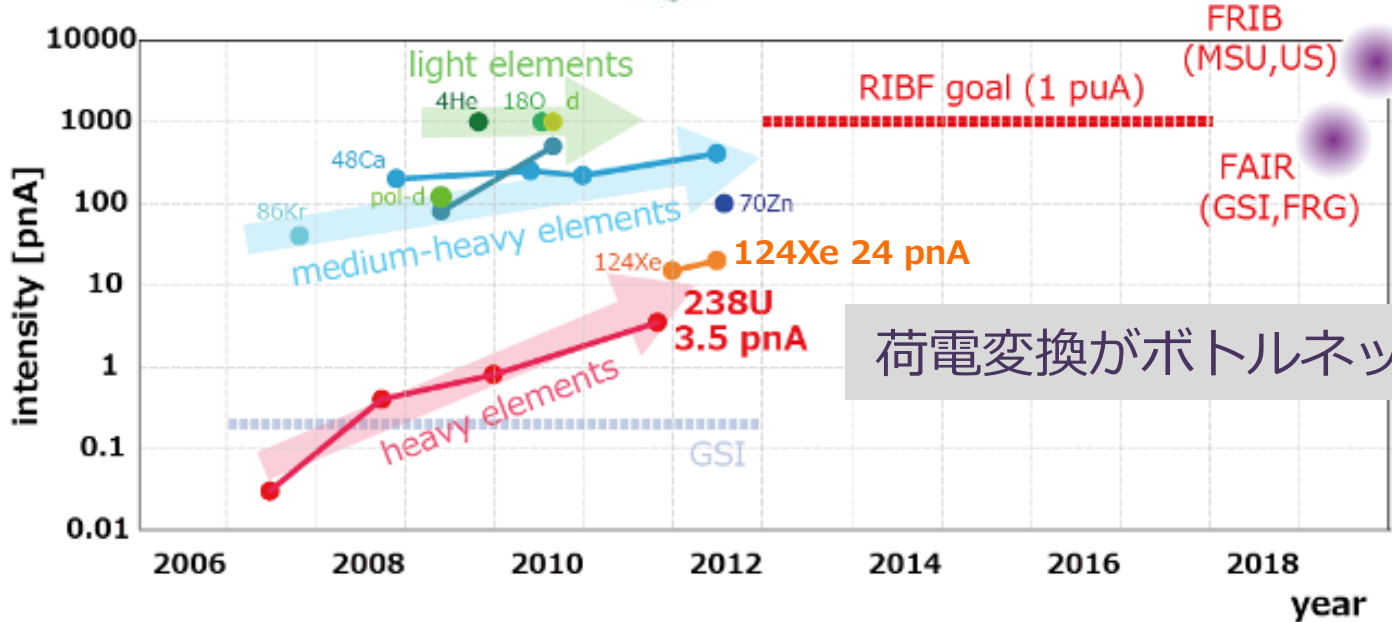
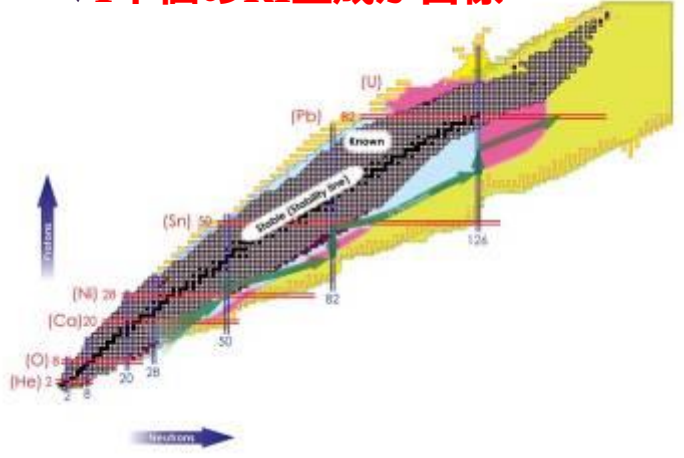
Riken RI Beam Factory (RIBF)

多段サイクロトロンからなる重イオン加速器
 目標強度; **1 puA** ($= 6.24 \times 10^{12} /s$)



^{238}U と ^{124}Xe の大強度化

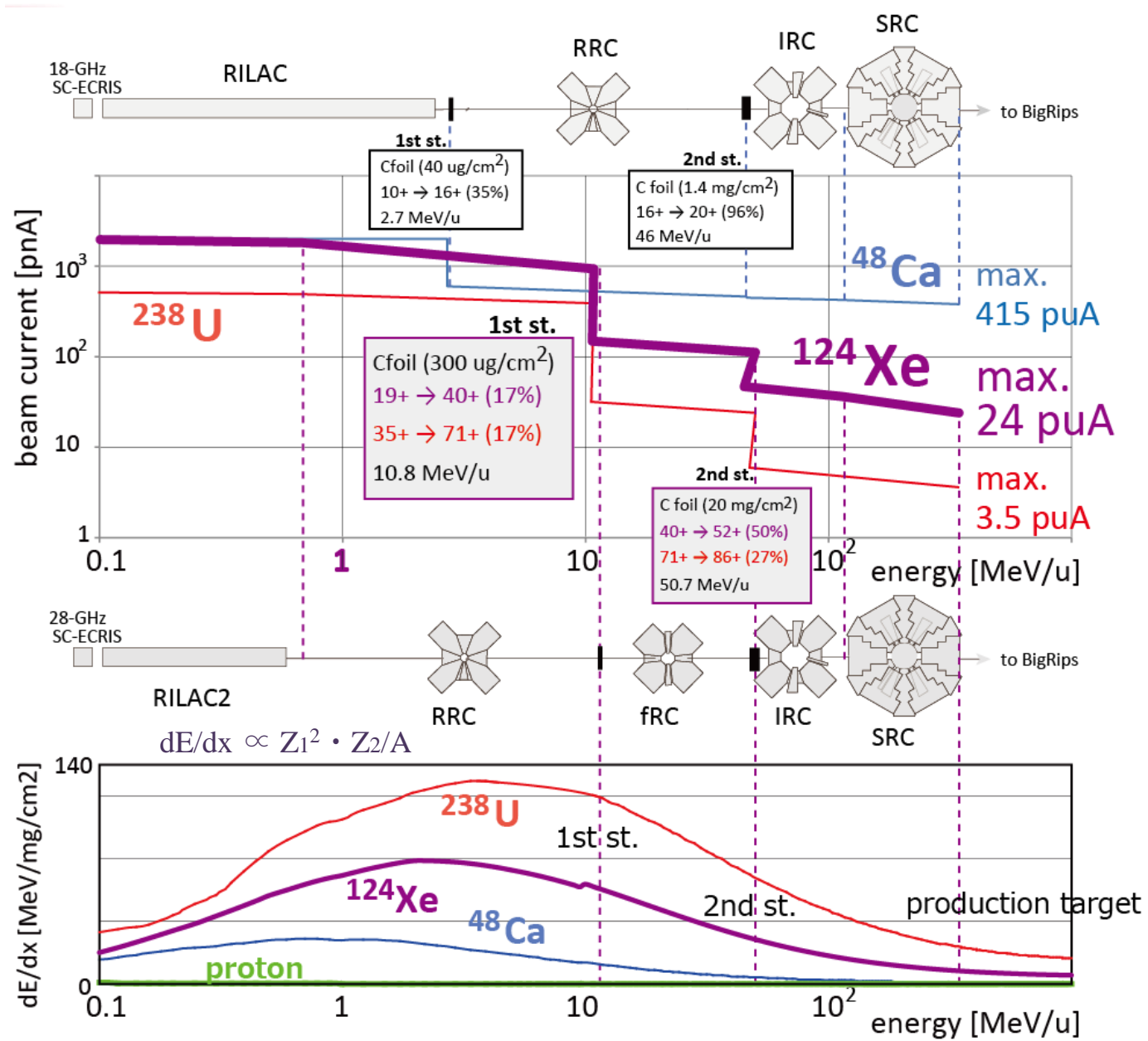
345 MeV/uまで加速
 核図表の拡大に必須
 ⇒**1千個のRI生成が目標**



荷電変換がボトルネック

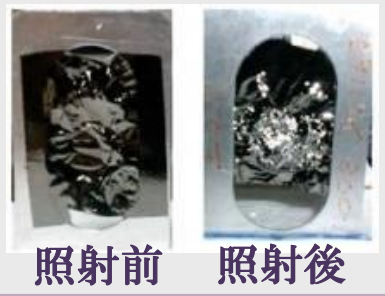
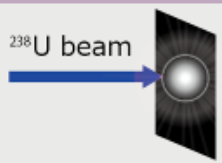
1. 重元素ビーム加速

Xeビームの加速スキーム(2012年)



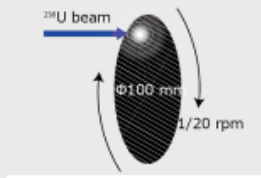
2010年以前

固定膜: $< 0.02 \text{ puA}$



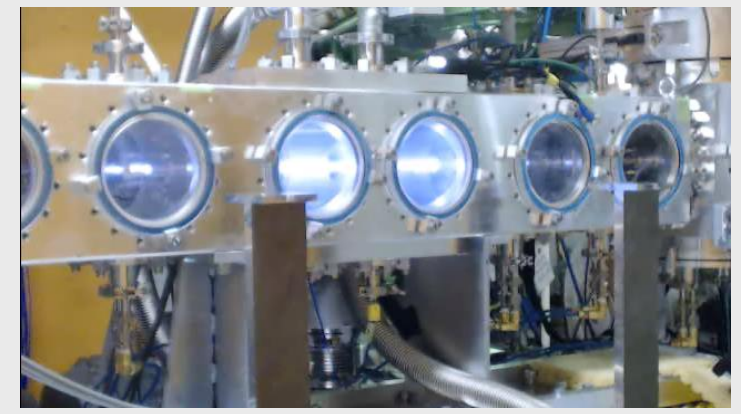
2011年

回転式CNT膜: $< \sim 0.3 \text{ puA}$

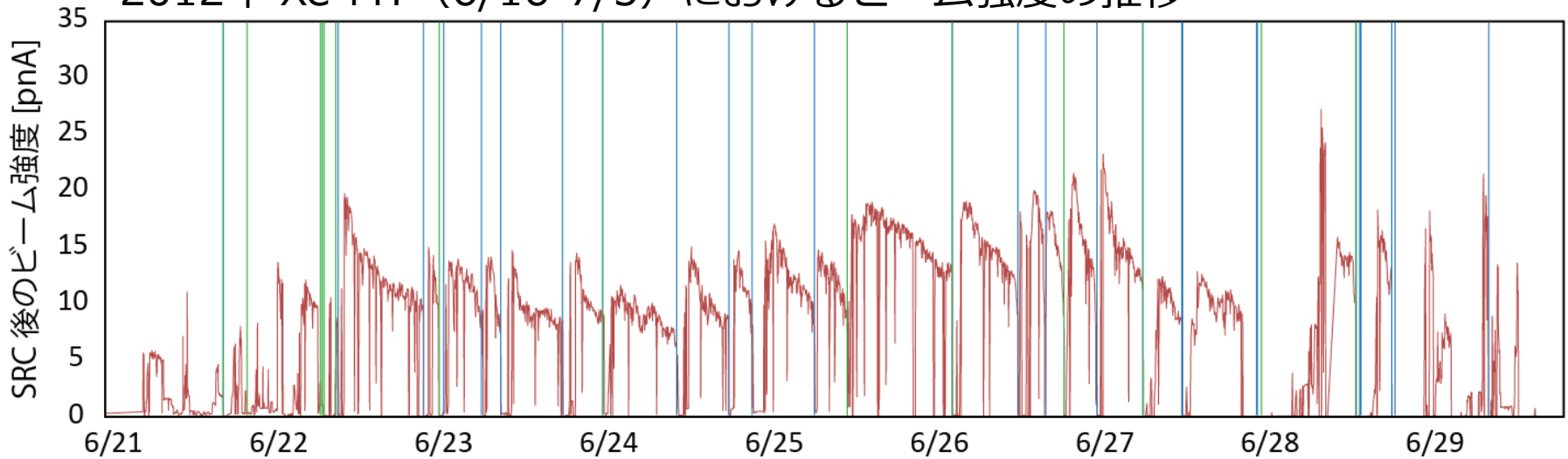


2012年以降

He ガス: $< \infty \text{ puA}$



2012年 Xe-MT (6/16-7/5) におけるビーム強度の推移

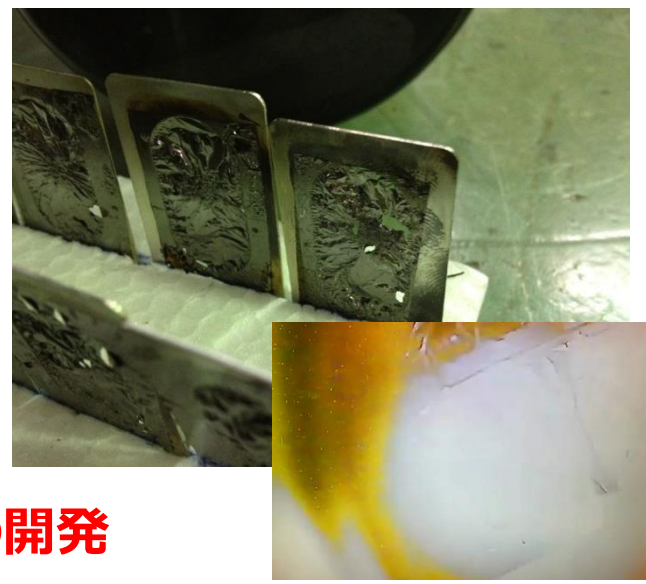


緑線 : 第1炭素膜ストリッパの交換 (MT全期間で約50回)
青線 : 第2炭素膜ストリッパの交換 (MT全期間で約20回)

交換後は焼き出し、再ビーム調整等が必要

ビーム強度は膜の劣化のため減衰

- 第1炭素膜 : 入射強度 $6 \times 10^{12}/s$ で5時間程度
($3 \times 10^{11}/s$ では半日~1日)
- 第2炭素膜 : 入射強度 $6 \times 10^{11}/s$ で12時間程度

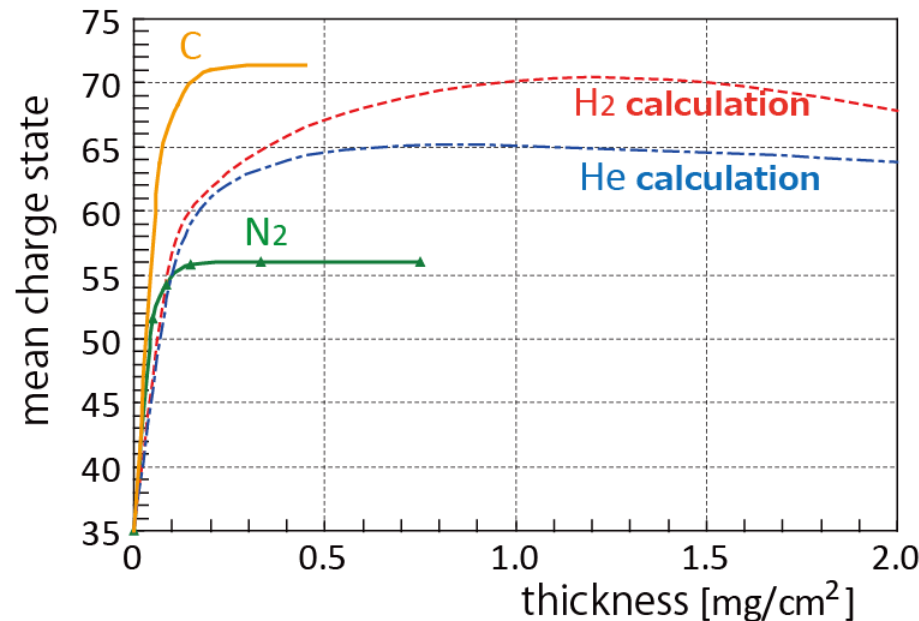


Xeビーム用のガスストリッパの開発

ガスストリッパー

- ☺ **非破壊性**
- ☺ **厚さ均一、厚さ可変**
- ☹ **残留イオン化がなく（密度効果）、平衡電荷が低い**
- ☹ **ガスの窓なし蓄積が必要**

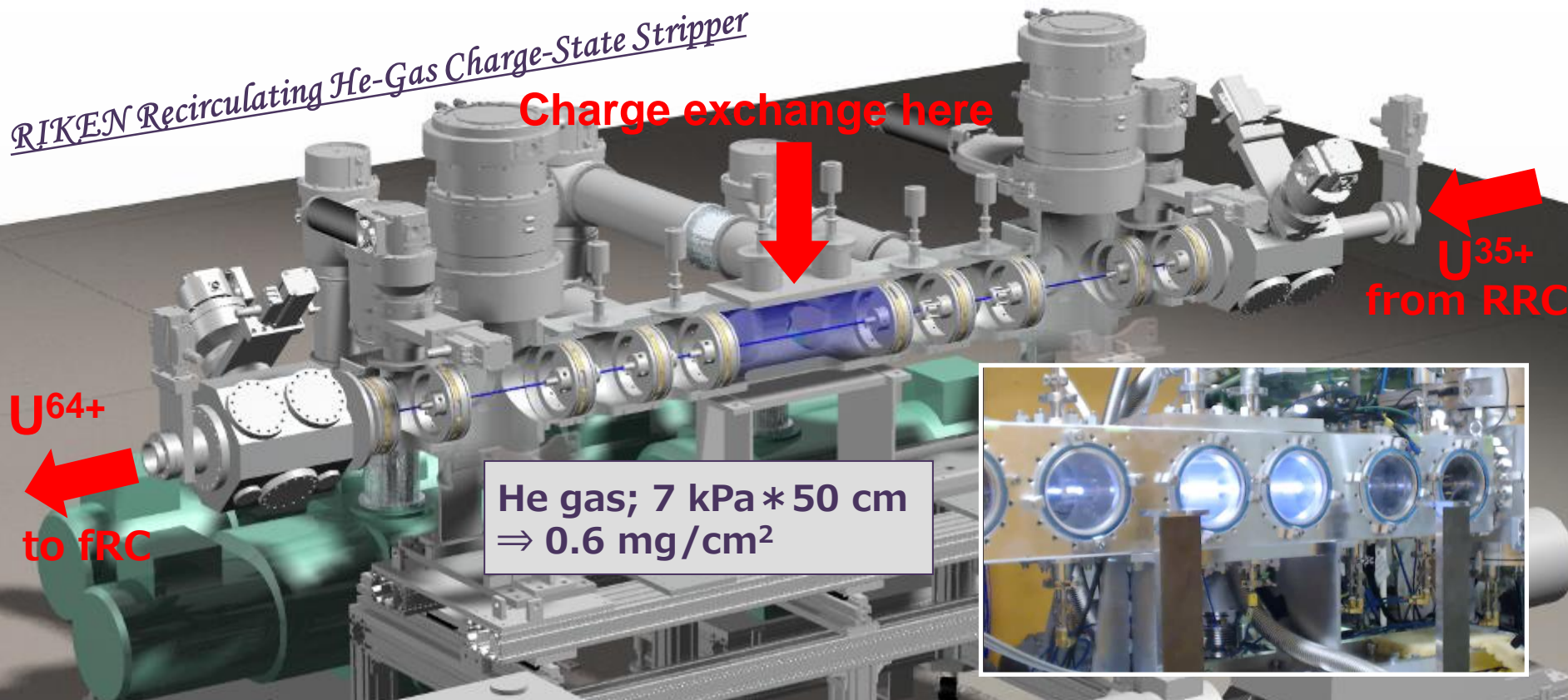
ウラン11 MeV/uでは密度効果可能が明確で、low-Zガスを用いて問題を回避 ⇒ **Heガス循環型ストリッパー**を2012年に開発



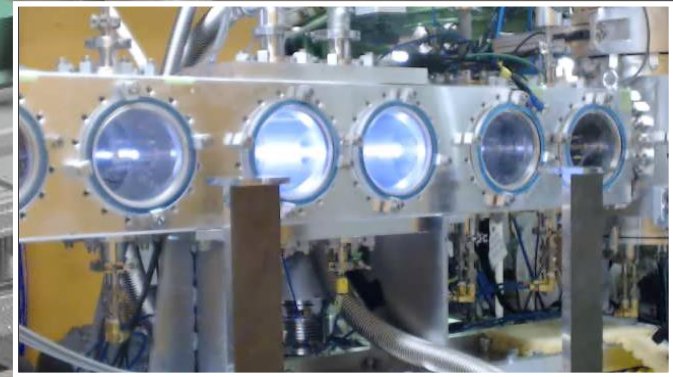
2. ガスストリッパー

ウラン用Heガス荷電変換器

RIKEN Recirculating He-Gas Charge-State Stripper



He gas; 7 kPa * 50 cm
⇒ 0.6 mg/cm²



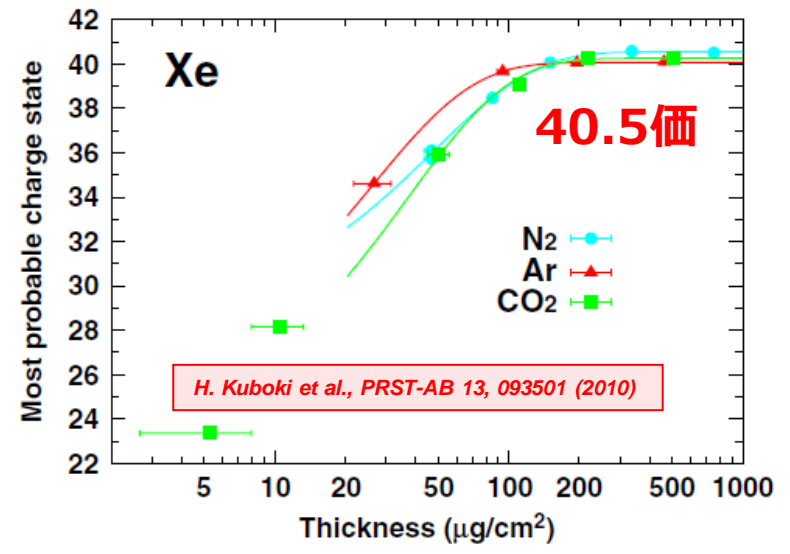
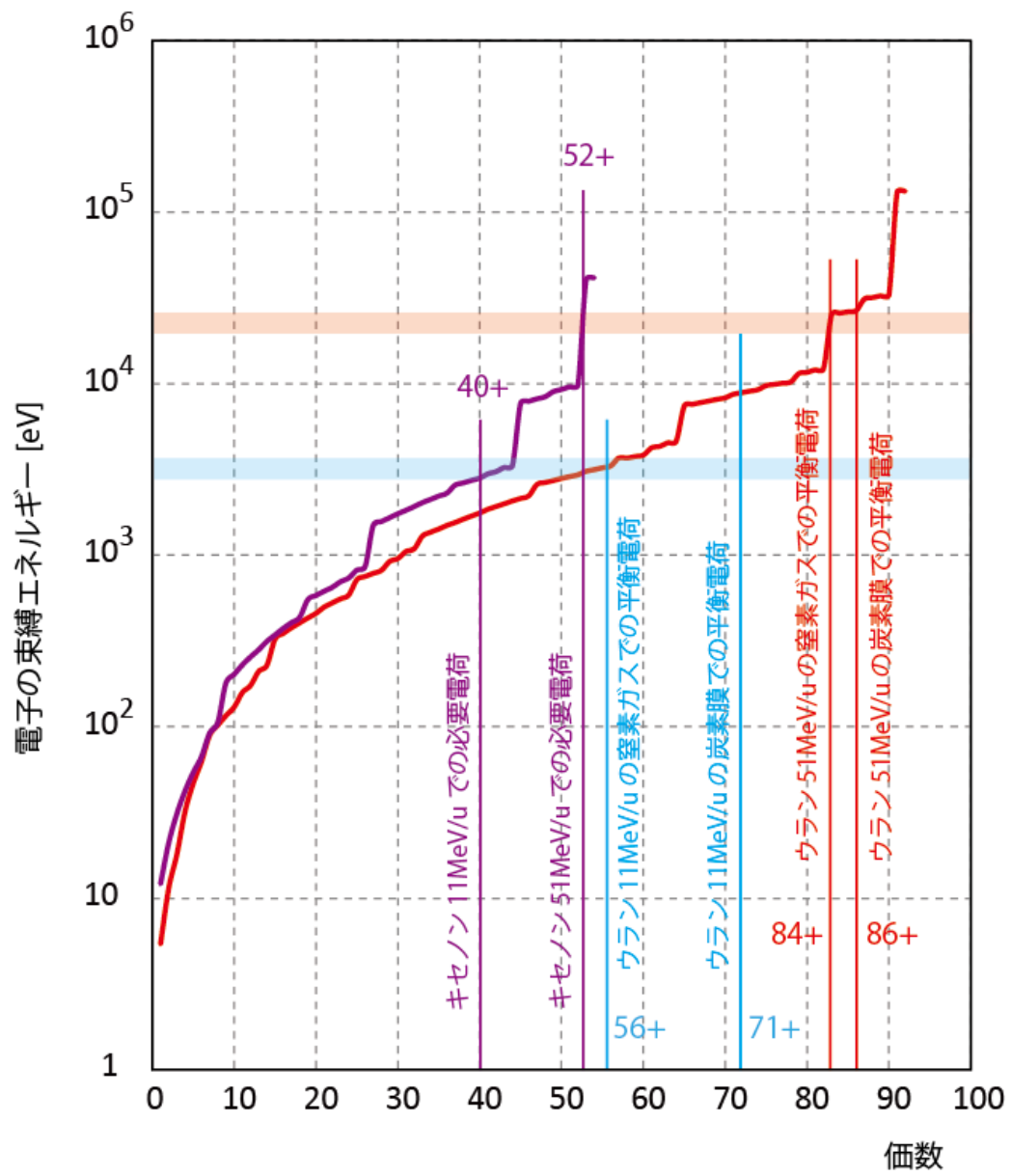
Low-Z ガス

- 蓄積が難しい
- 平衡が遅い⇒厚い標的
- 不純物に弱い

- 5段階差動排気; 22 pumps
- ビームの通り道; >Φ10 mm
- 8桁の圧力差; 7 kPa⇒10⁻⁵ Pa
- Heガス排気量; 300 m³/day (標準状態)

2. ガストリッパー

Xeでの最適ガス種



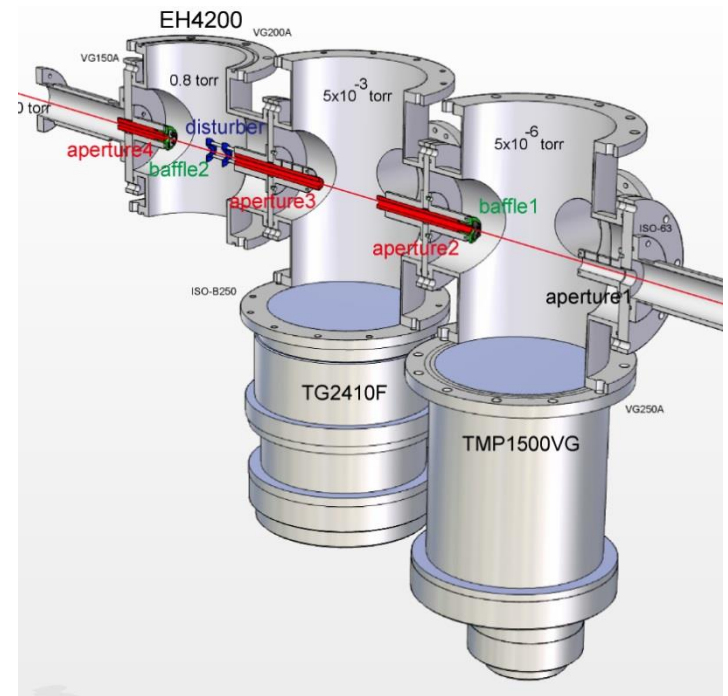
電子の剥ぎ取り易さは電子の束縛エネルギーに比例すると考えられる

11 MeV/u Xeでは窒素ガスが使用可能

51 MeV/uでもテスト

差動排気システム

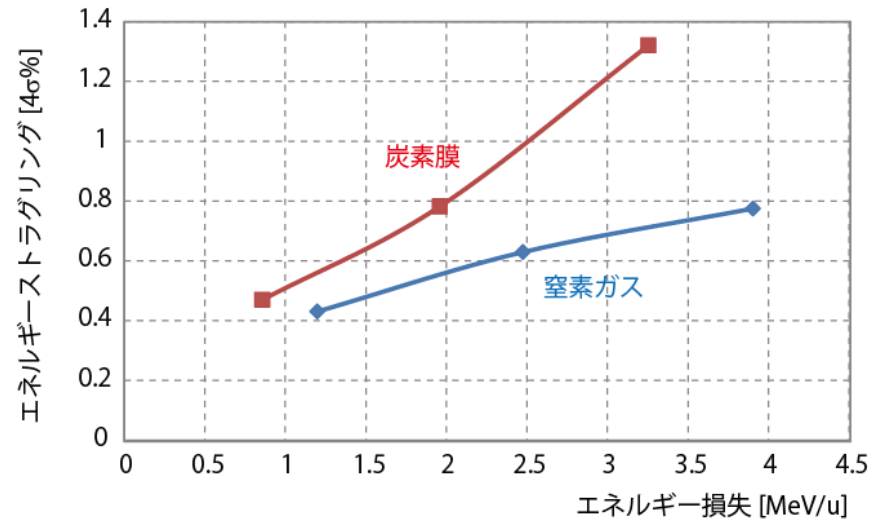
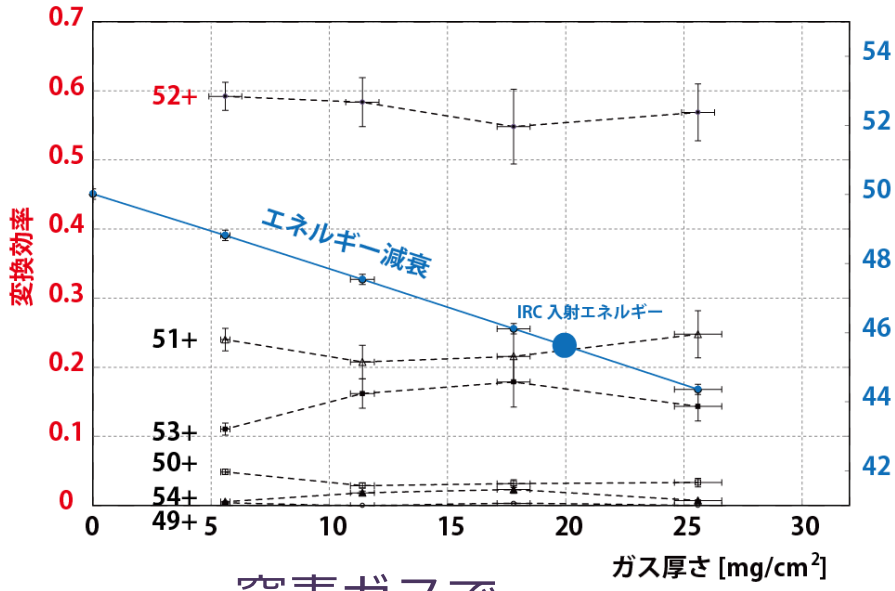
- MBP 4200 m³/h
- チューブオリフィスと標的長
- **ガスフローディスターバー**



50cmの標的に 30 mg/cm² までのN₂ が蓄積された

2. ガスストリッパー

窒素ガスの平衡電荷とエネルギー拡がり



窒素ガスで

- 51 MeV/uでの必要価数52+が問題なくとれる事
- エネルギー拡がりが抑制される事

を実証

エネルギーディグレーダーの役割

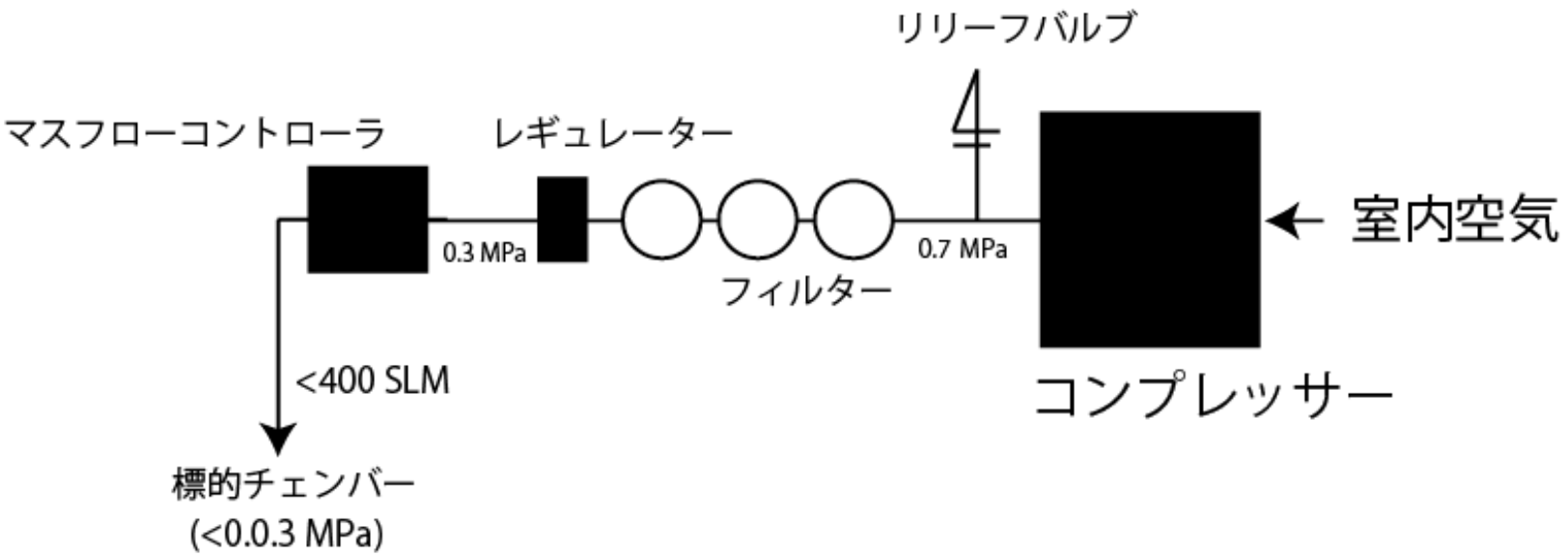
51 MeV/u ⇒ 46 MeV/u (約600 MeVの損失)

厚さ19 mg/cm²

第1ストリッパー⇒既存のHeストリッパーへ窒素

第2ストリッパー⇒新規開発

- プロトタイプよりオリフィス径を拡げる($\phi 6 \Rightarrow \phi 8.5$)
- 19 mg/cm^2 の蓄積 (Heストリッパーの30倍)
- 毎分400リッターまでの供給
(1日にガスボンベ80本分,
CEタンクで供給した場合5日毎の供給が必要)
- 排気性能を保つため、循環は非常に困難

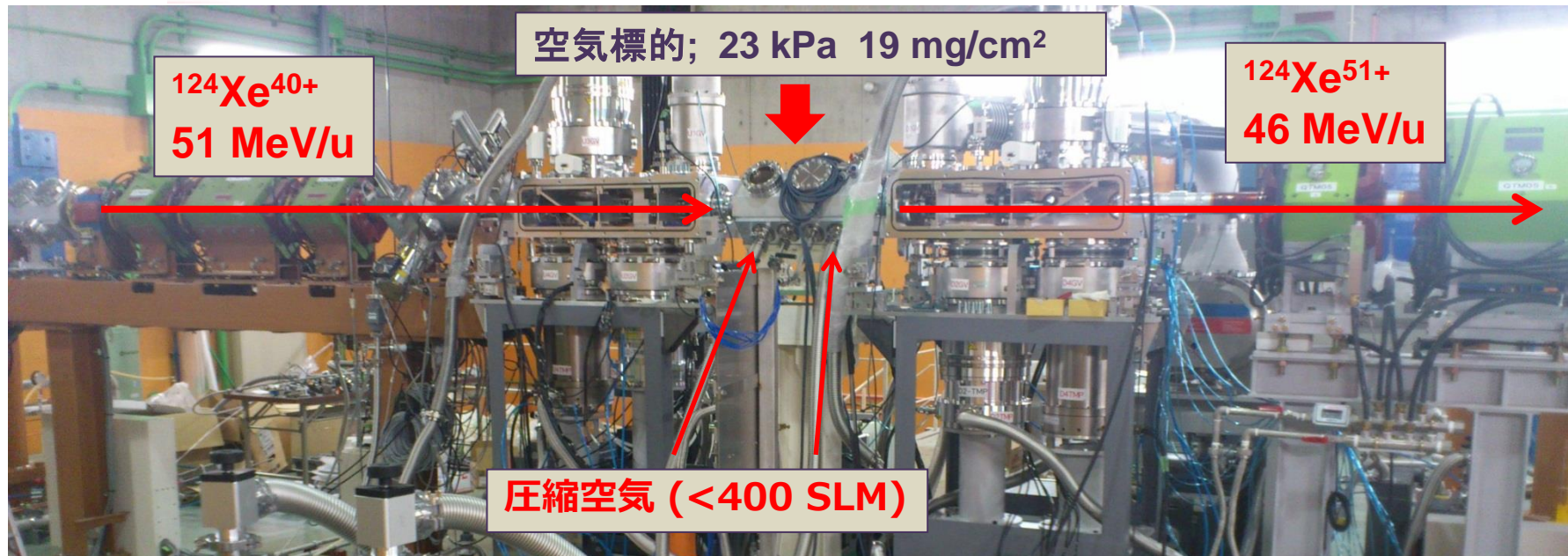


NOxガスの問題

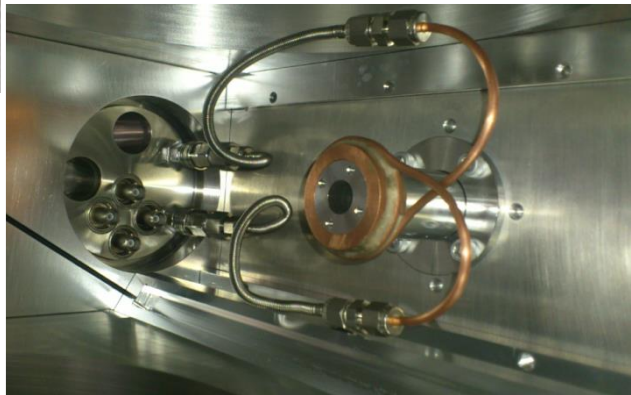
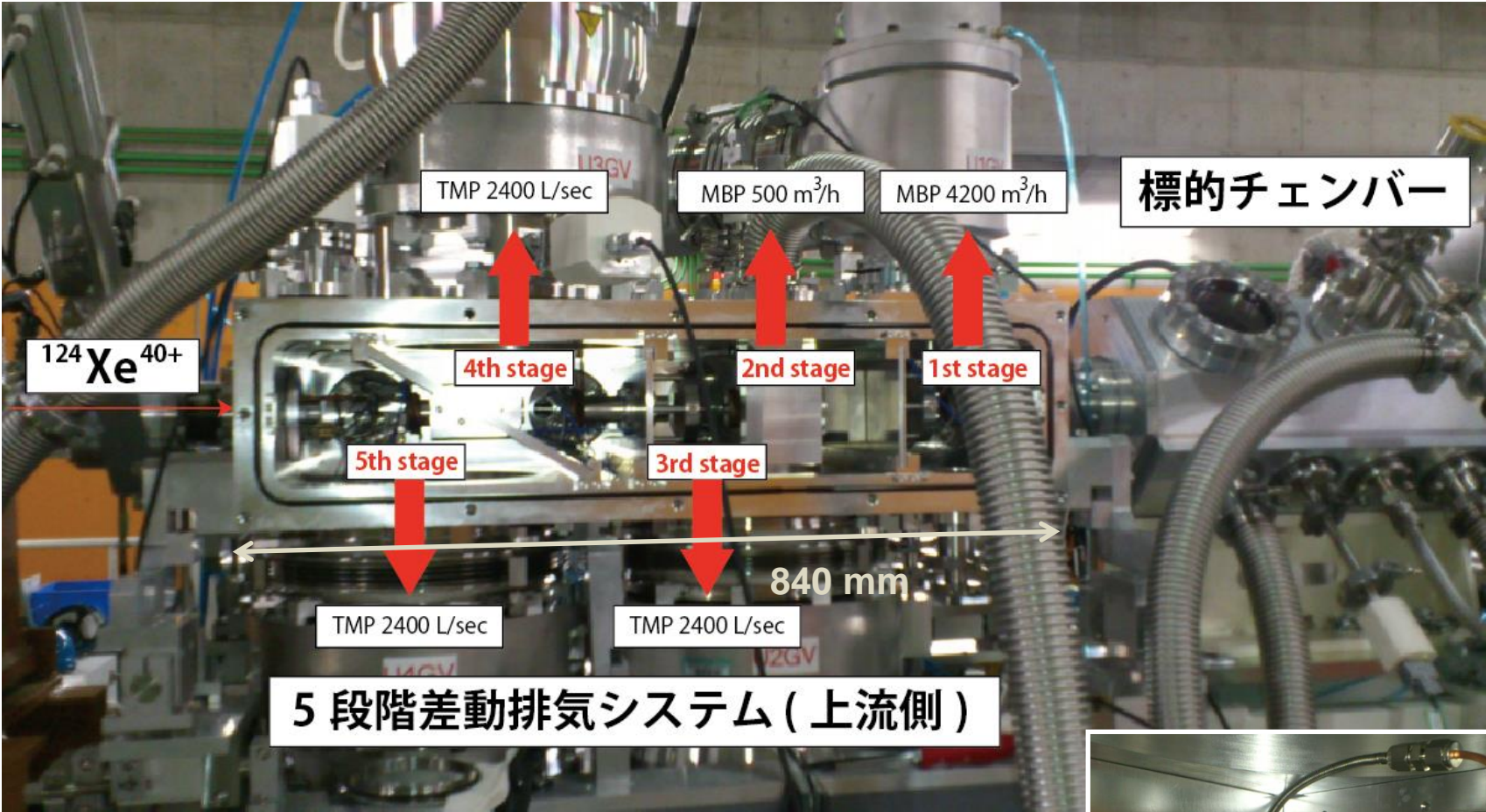
陽子線等で測られた硝酸のG値は 1.5/100 eV程度。
Xeエネルギー損失(500 MeV)から50 cc/日程度の硝酸が生成？

3. 開発と運用

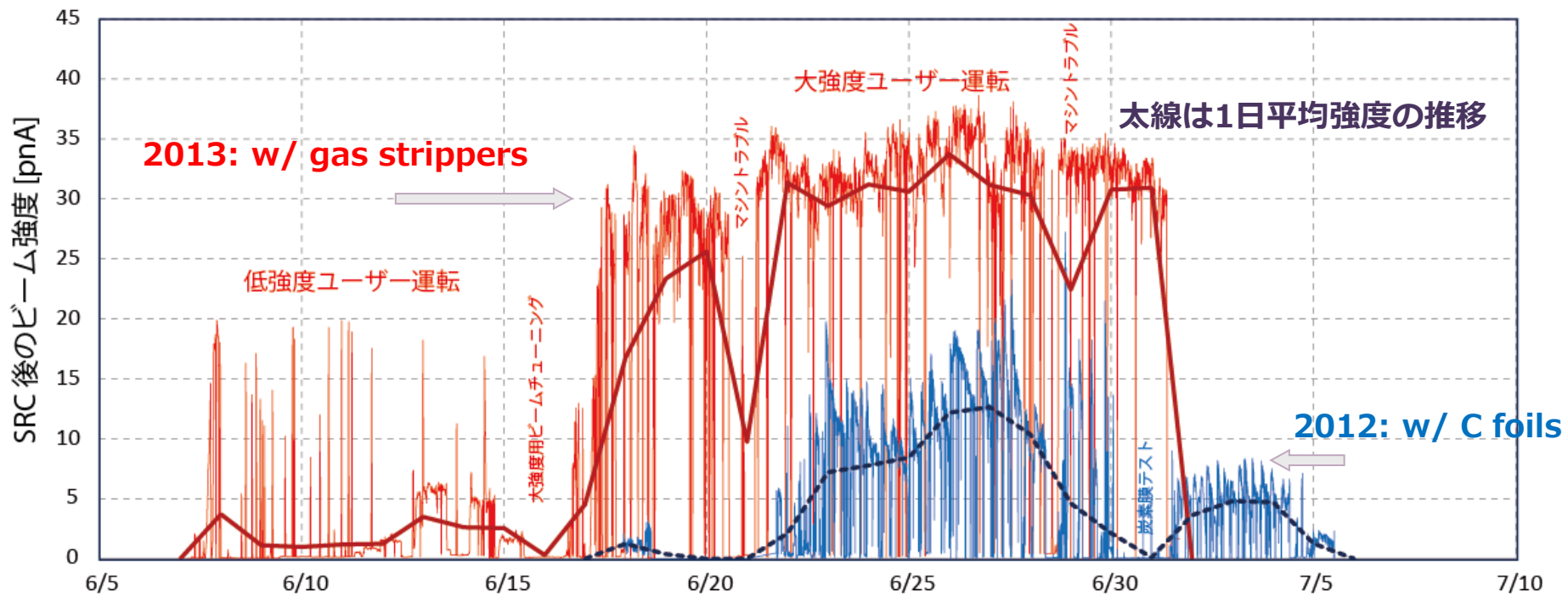
空気ストリッパー



- 5段階差動排気システム; 17 台のポンプ
- ビームオリフィス; >Φ8.5 mm
- 9桁の差動排気; 23 kPa⇒10⁻⁵ Pa
- 空気導入量; <400 SLM



840 mmの領域で5段階の差動排気
隔壁は容易に脱着可能



SRC後のビーム	2011	2012
ピーク強度 [pA]	24	37.5
平均強度 [pA]	6	27

平均強度約4.5倍!! ⇒ガスの安定性と一様性が大きな貢献

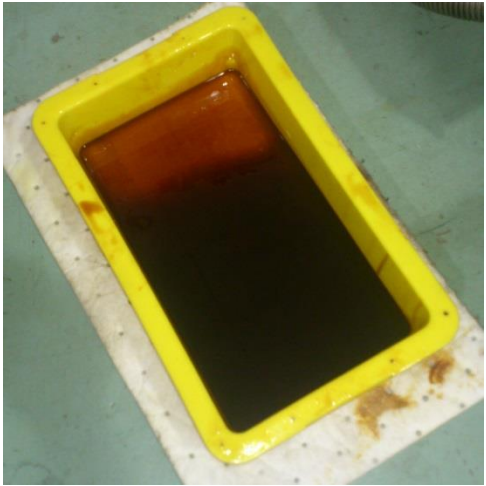
3. 開発と運用

運用での問題点

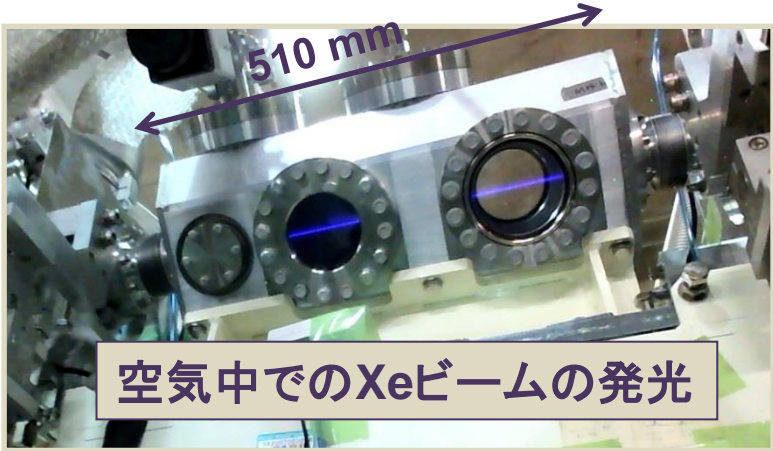


ロータリーオイル油
が1時間程度の運転
で全てオイルミスト
フィルターボックス
へ移ってしまう問題

⇒オイルをリターン
させる構造



ポンプ表面温度 $\sim 90^{\circ}\text{C}$
オイルが劣化していた
⇒冷却水流量を増やす



空気中でのXeビームの発光

懸念された硝酸生成に関し有意な被害なし

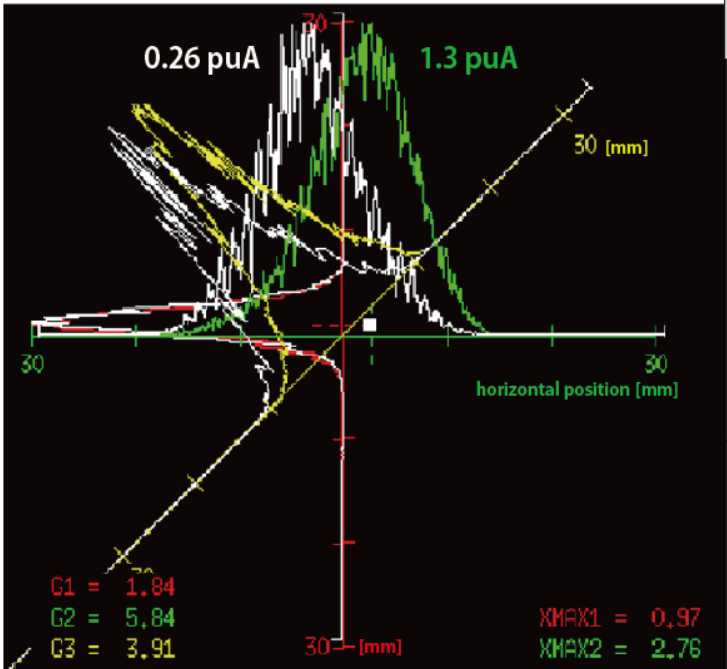
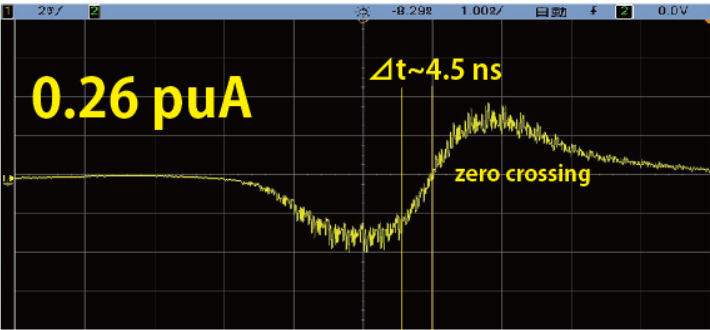
第1窒素ガスストリッパー

$^{124}\text{Xe}^{19+}$ 1.3 puAまでの入射で16Wのパワーロス

窒素ガスの導入流量は2.6 STL/min

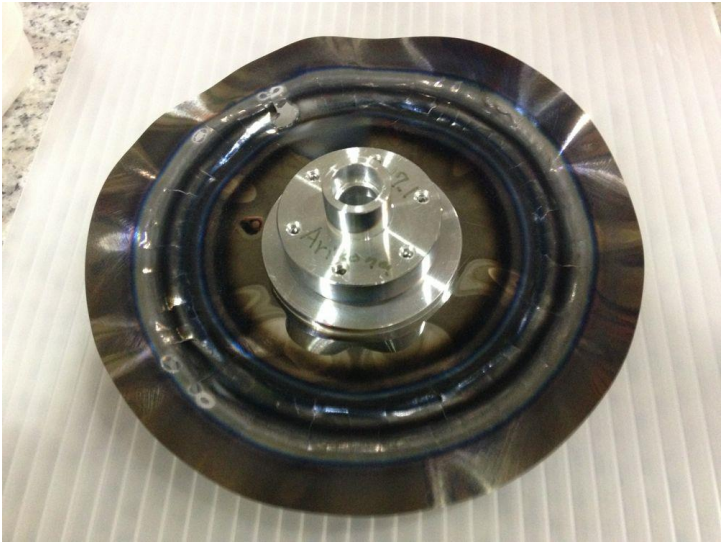
ストリッパー後のエネルギーがビーム強度に比例して高くなる

現状で**25%の密度減少**が起きている

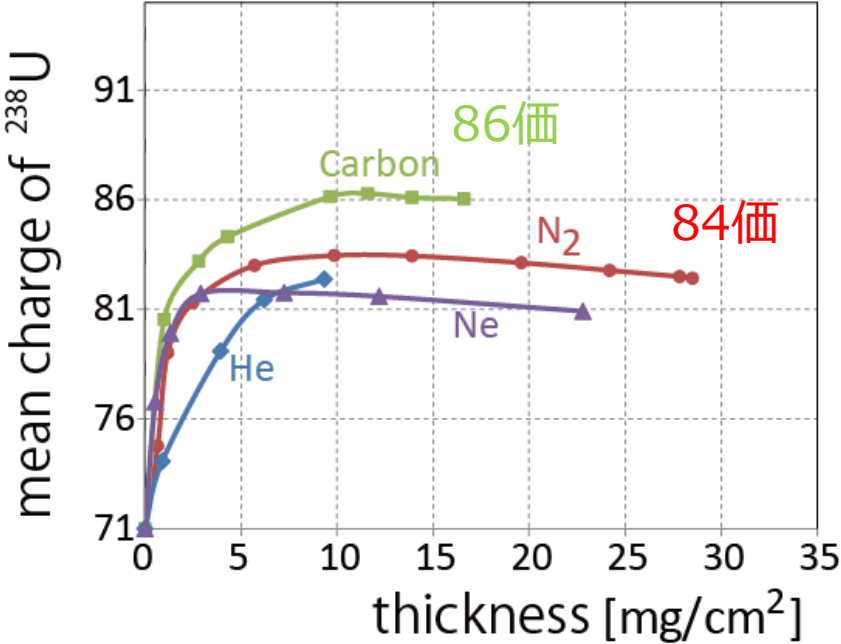


- Xeビーム加速で使用可能な11 MeV/u及び51 MeV/uでのガスストリッパーの開発
- 空気を標的として利用する事で、51 MeV/uという高速領域で使用可能な、厚いガスストリッパーの作成に成功
- 寿命無限大・ダウンタイムフリー・ビーム品質向上
⇒Xeの平均強度が4倍

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



照射後の回転Beストリッパー



ウランの第2ストリッパーが現在の問題

- 回転Beストリッパーの高度化
- ガスストリッパーを用いた加速スキーム
- 液体Li等、他流体