



暗黒物質探索実験に用いる 陰イオンガスTPCにおける不純物組成評価

神戸大学 遠山和佳子

2025年 12月20日

方向感度をもつ暗黒物質直接探索実験



- 方向感度を持ったWIMP直接探索

Milky Way Galaxy



Cygnus

Solar system

暗黒物質の風

$V=230 \text{ km/s}$

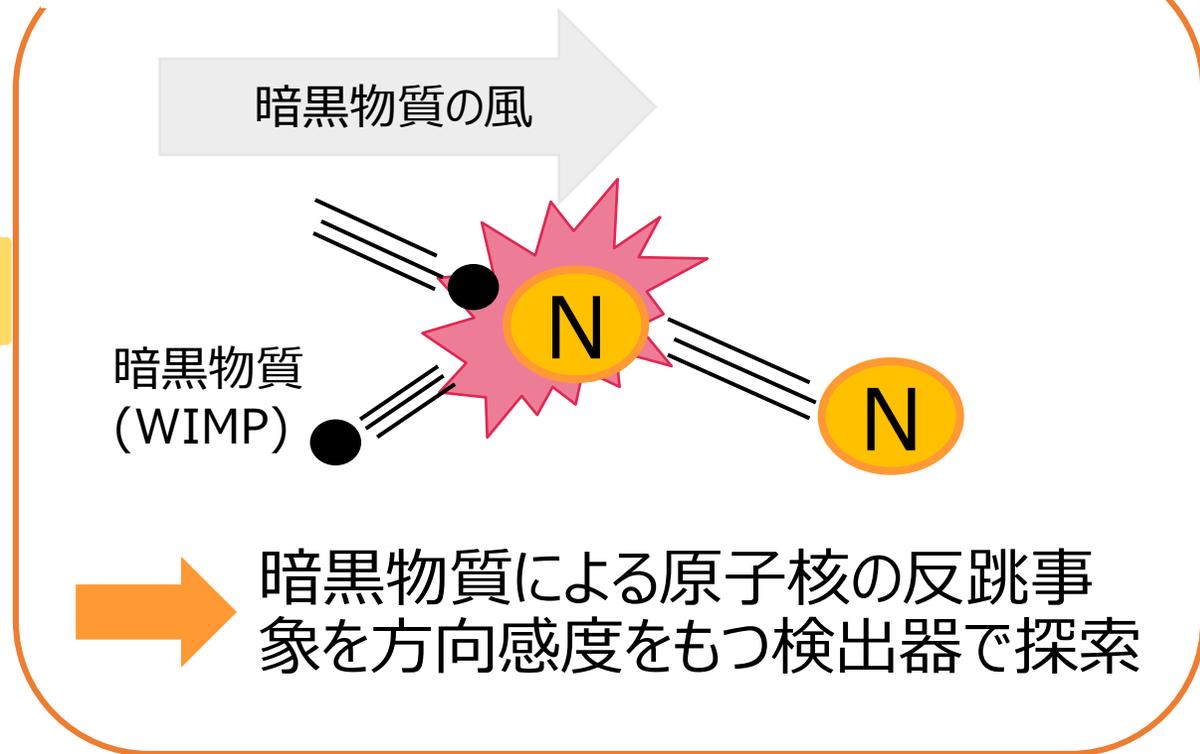
- 暗黒物質をWIMPと仮定して探索

暗黒物質が天の川銀河全体を覆っている



太陽系が230 km/sの速さで銀河を周回

- 検出したい事象

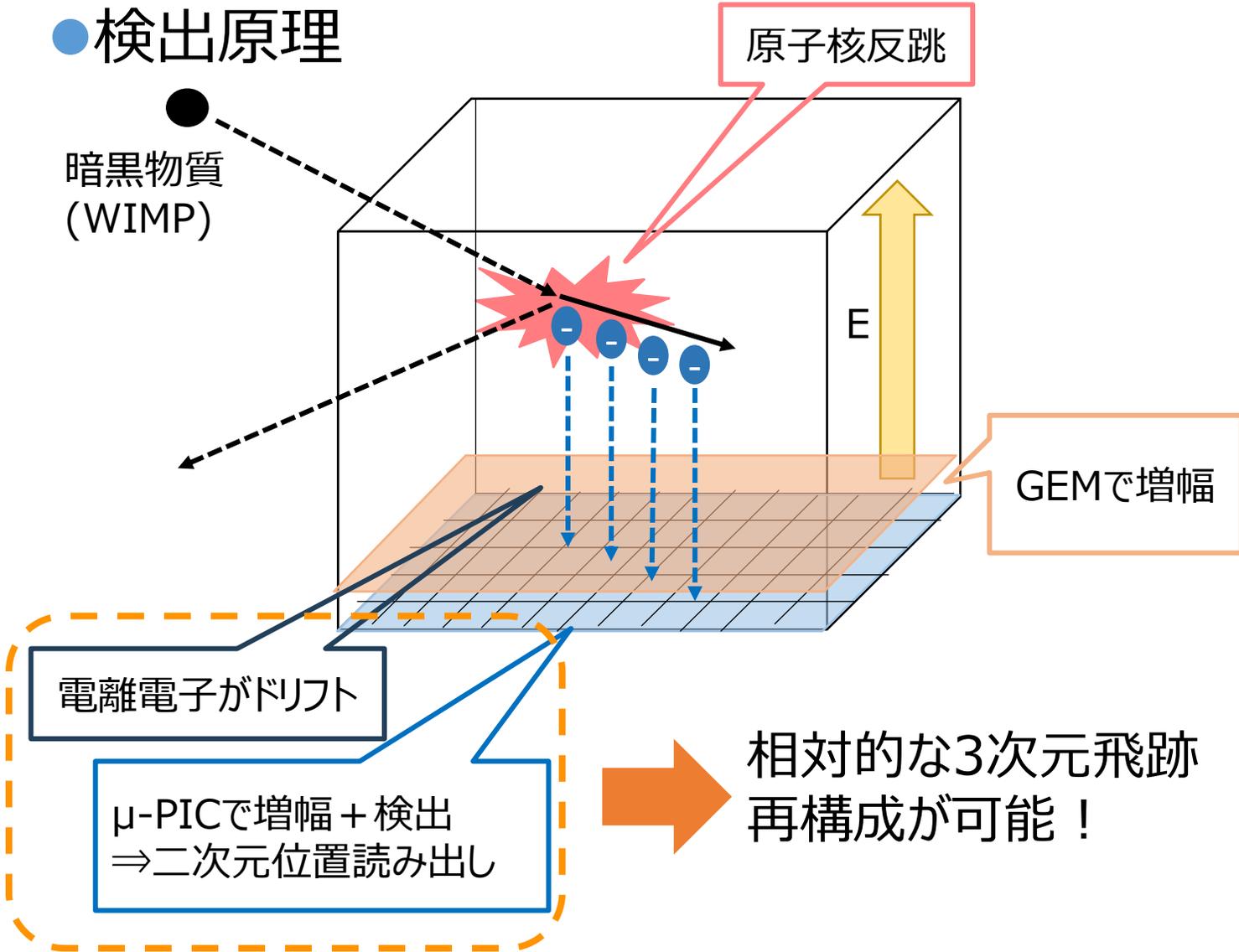


はくちょう座の方向から暗黒物質がやってくるように見える。反跳核分布が指向性をもつため暗黒物質の強い証拠となる

ガスTPCによる検出原理

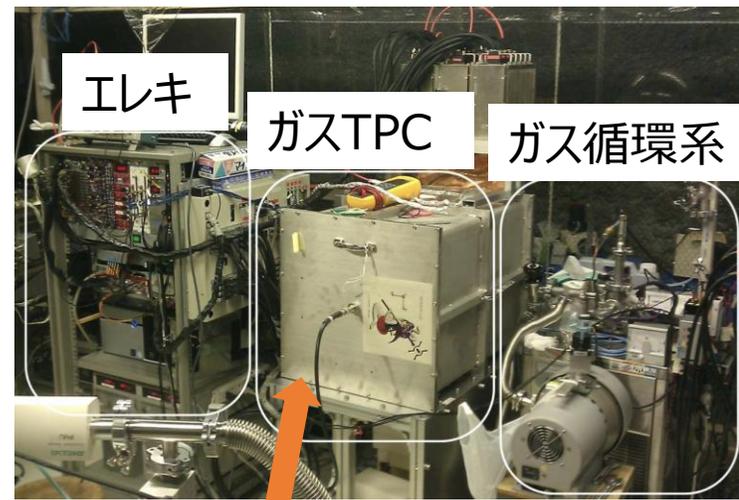


●検出原理



●NEWAGE実験

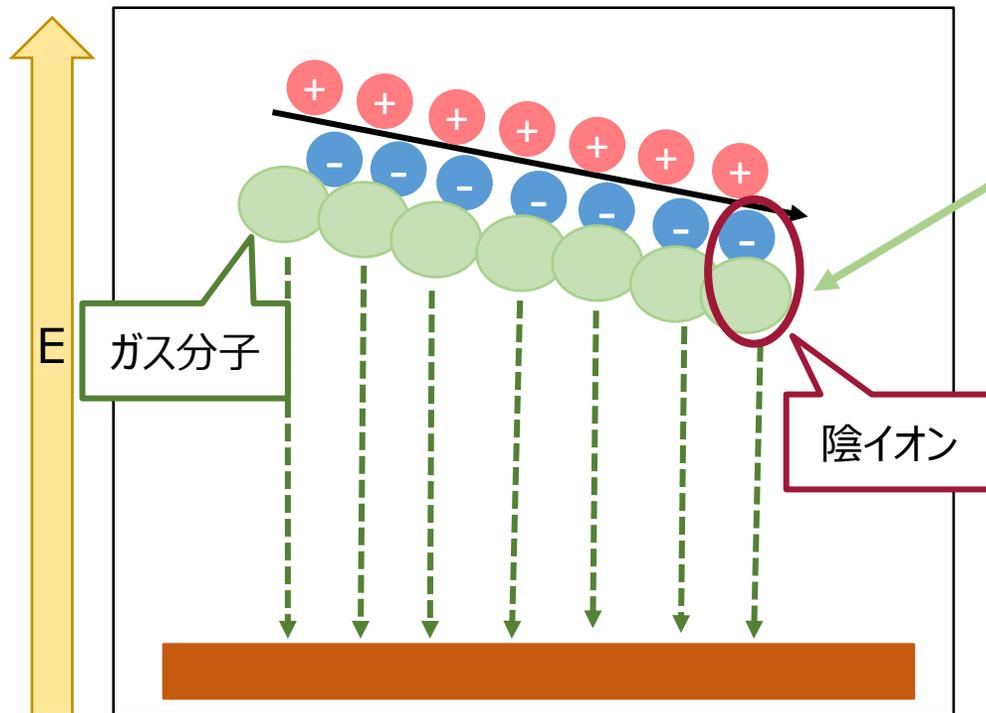
神岡鉱山地下実験室(LabB)に
ガス検出器保有



使用しているガスはCF₄
将来的には…陰イオンガスである
SF₆を使う！

陰イオンガスTPC

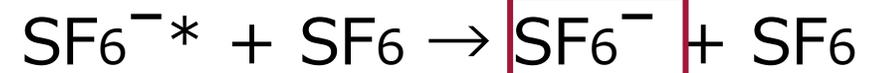
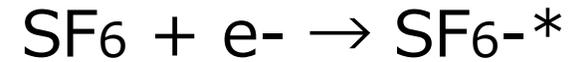
- ▶ 電離電子をアタッチして生成された陰イオンがドリフト



➡ ゆっくりドリフト、低拡散

陰イオンガスの中でも注目しているガスは..

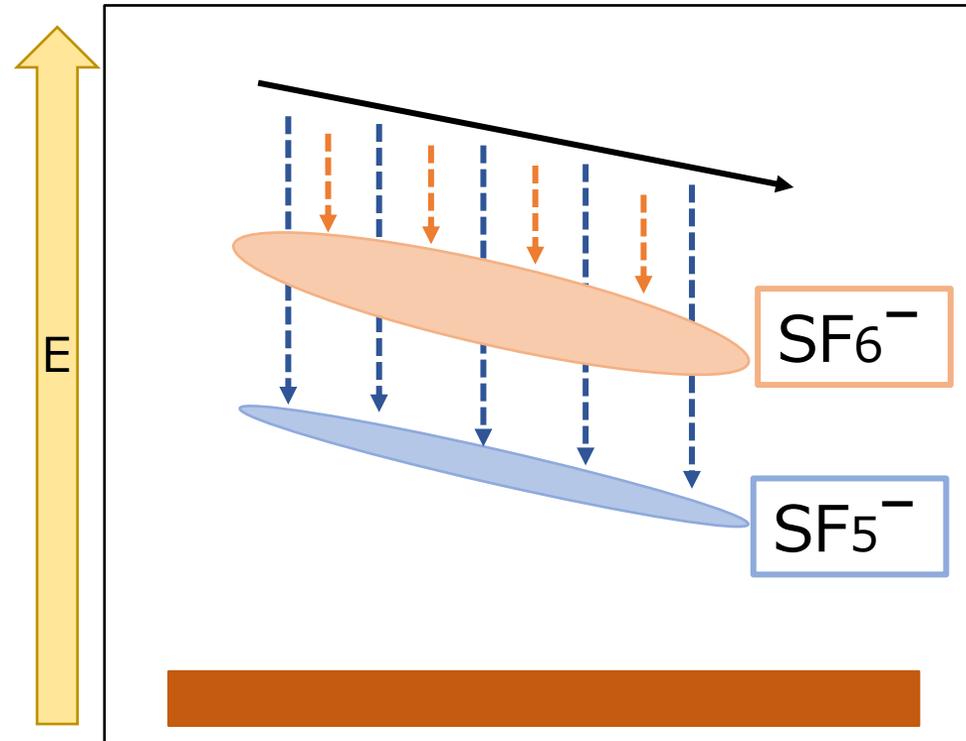
➡ **SF₆**



SF₆⁻ と **SF₅⁻**
2つの陰イオンが生成

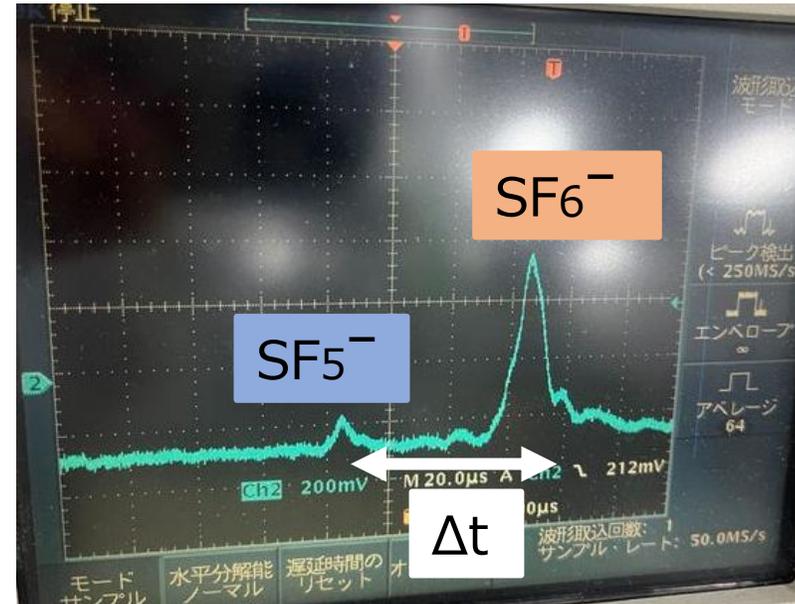
SF₆ガスについて

SF₆⁻とSF₅⁻の二つの陰イオンが生成されるため…



➡ SF₆⁻とSF₅⁻の到達時間差から絶対的な飛跡再構成が可能

きれいに取得できた信号

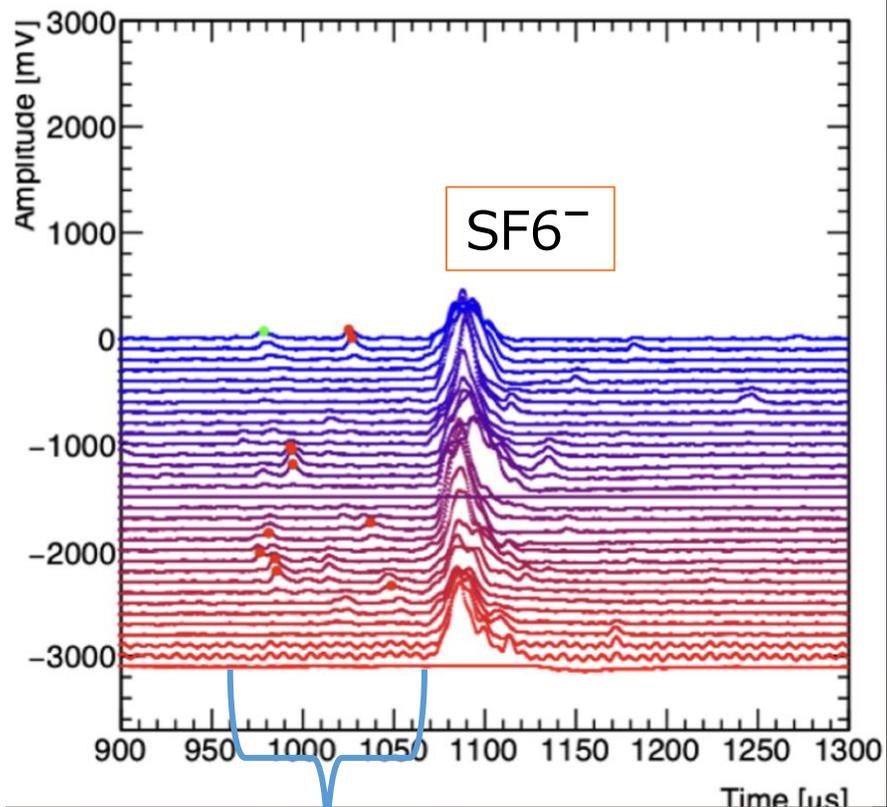


➡ 実際はガス中の不純物の影響でキャリアが複数できてしまい位置再構成が困難

SF₆ガス中の不純物組成評価を行う必要がある！

SF₆ガス中の不純物として考えられるもの

SF₆ガス中でのα線の信号波形



SF₅⁻候補が複数存在
⇒実際何が不純物なのかは分からない

先行研究

The novel properties of SF₆ for directional dark matter experiments

2017 JINST 12 P02012

によると…水が不純物の一つとして有力な候補
水の混入でクラスター形成

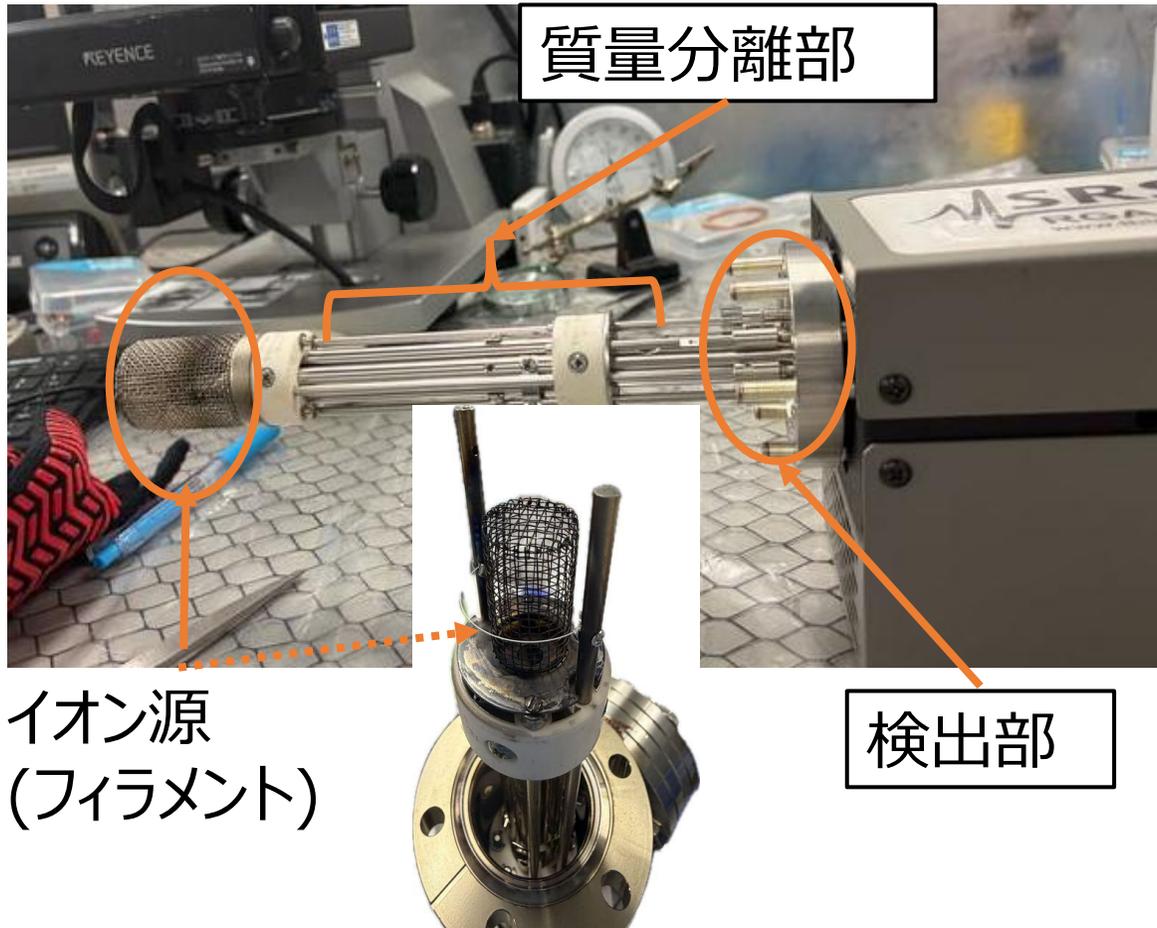
その後



SF₅⁻特定が難しくなる！

RGA -残留ガス分析装置-

- 真空システム内の残留ガス組成を評価する



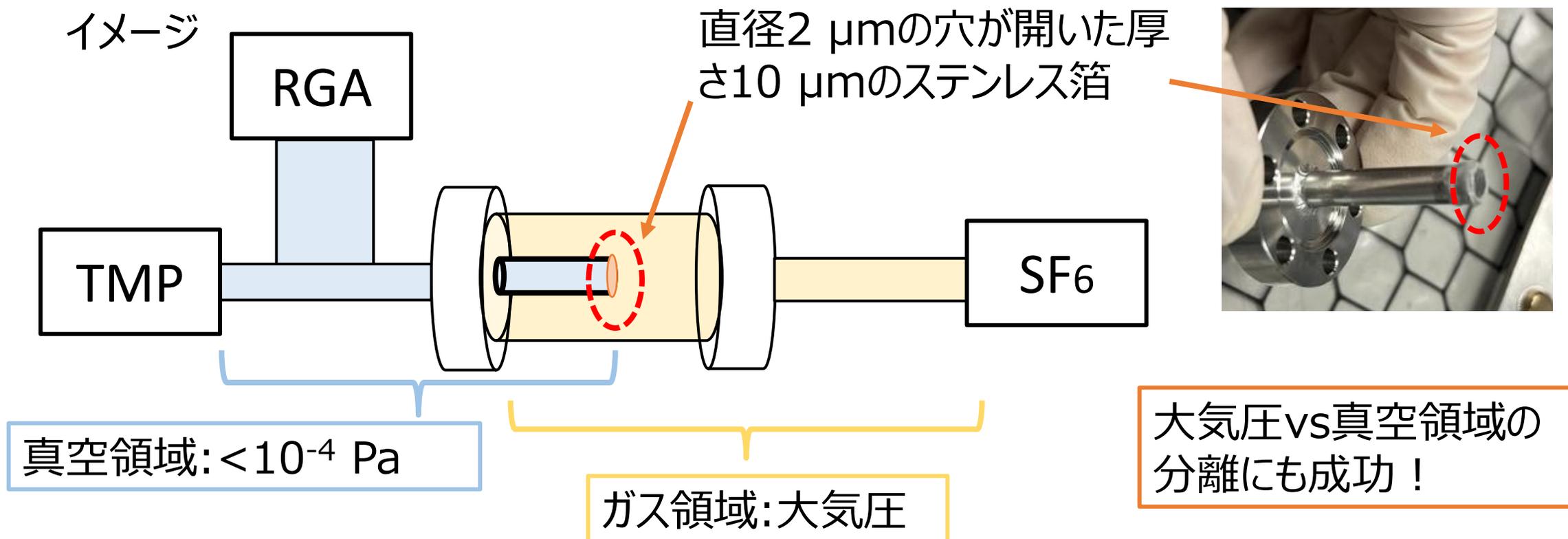
➤ 原理

1. フィラメントから熱電子 e^- を放出
⇒熱電子は電極の周囲に分布
2. 熱電子と衝突した気体分子がイオン化
3. 質量分離部に入ったイオンは質量ごとに分離され、検出部へ送られる
4. 検出部で信号を生成

分析手法

- RGAの作動真空度は $< 10^{-4}$ Pa
 - ・ 流量が増えるとフィラメントが切れる恐れがある

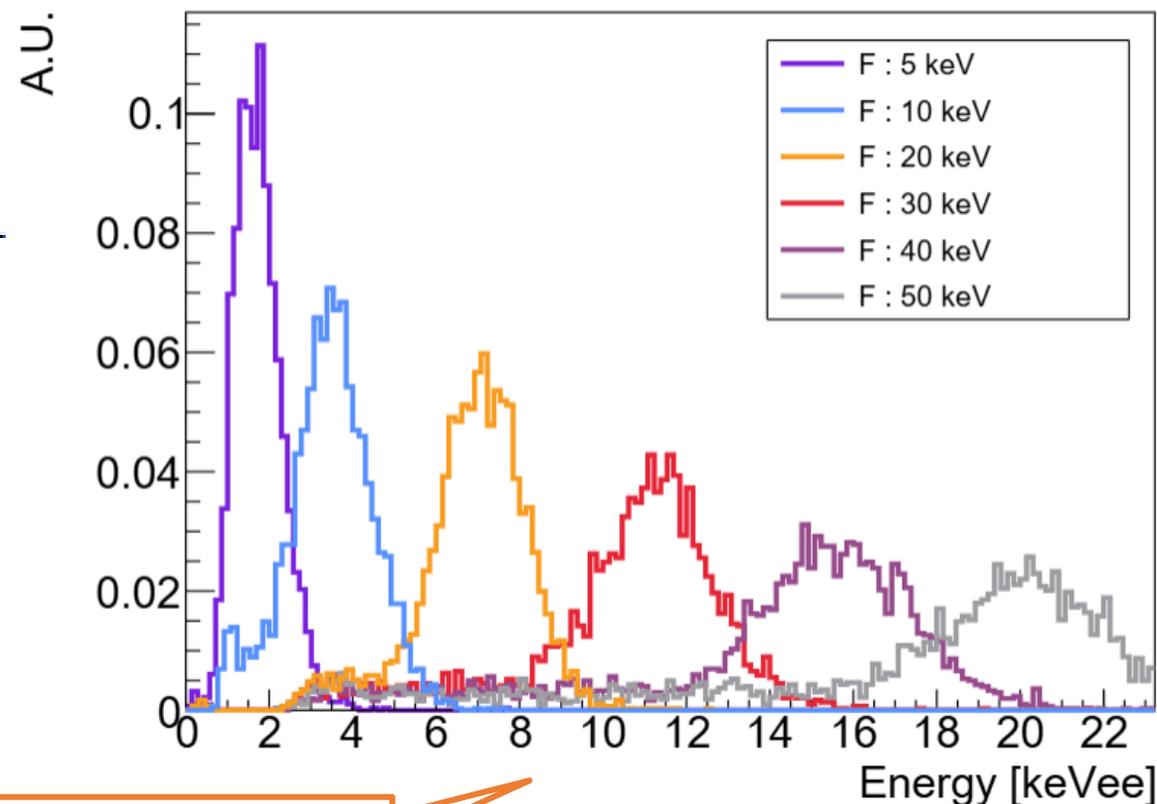
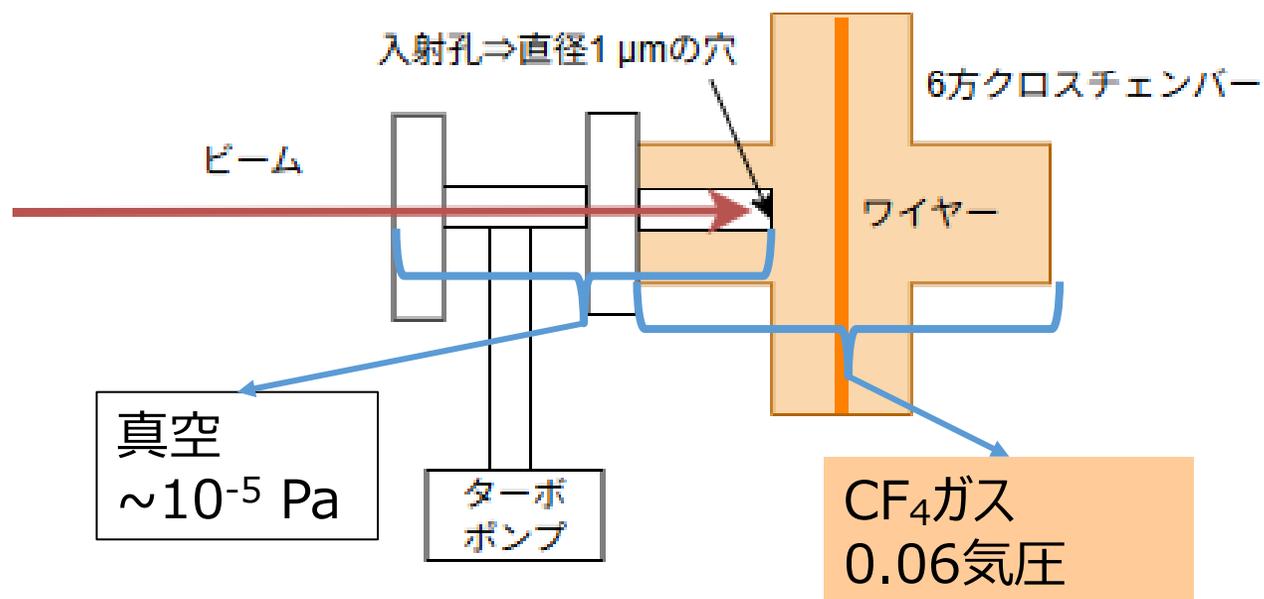
➡ **2 μm の穴**を用いて微量なガスをRGAに送り込み検出する機構を製作！



c.f. 小さな穴を用いた他の実験

- 1 μm の穴を用いて低速イオンビームをワイヤーチェンバーに入射させることに成功
- FイオンのIonization yield測定 @神奈川大

➤ 1 μm の穴を用いたイオンビーム注入機構

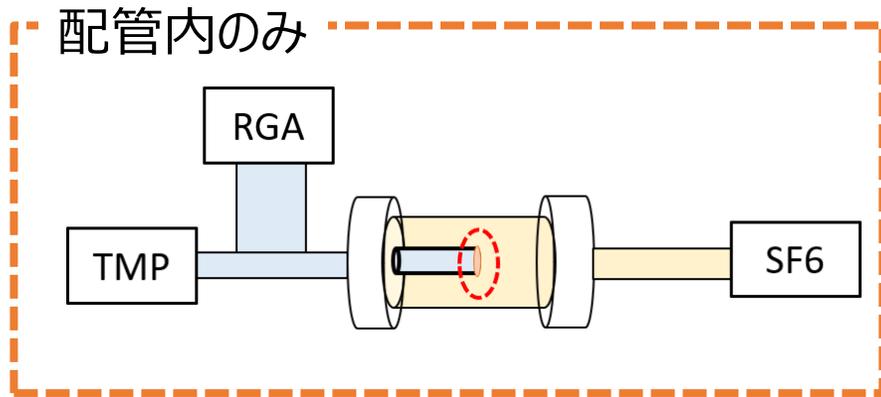


エネルギーに応じた信号を確認

測定条件

- ガス検出器中の不純物組成調査

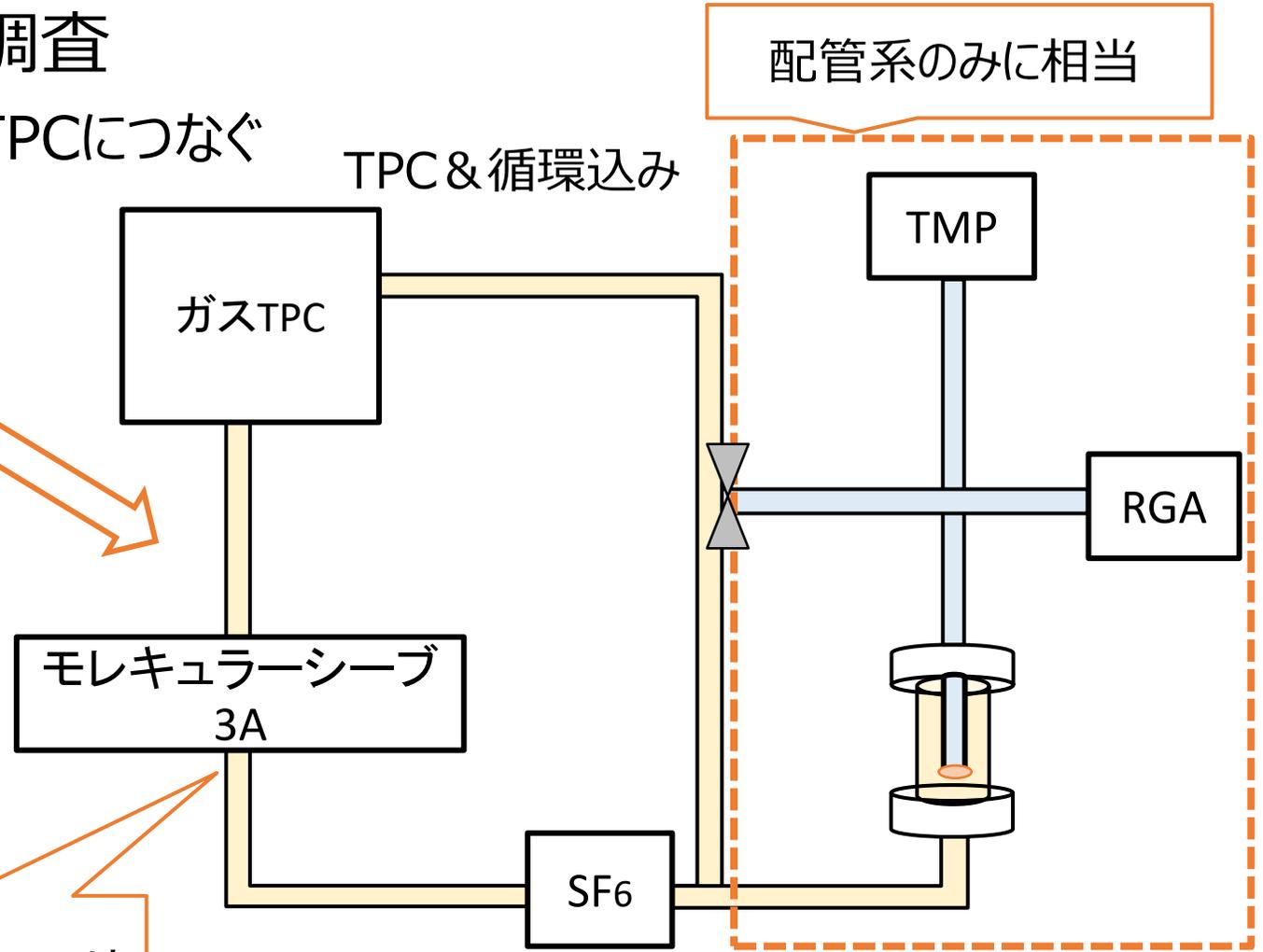
- 配管内のみで組成調査を実施後TPCにつなぐ



長期間の測定によりチェンバー内のアウトガス不純物調査を実施。絶賛測定中！

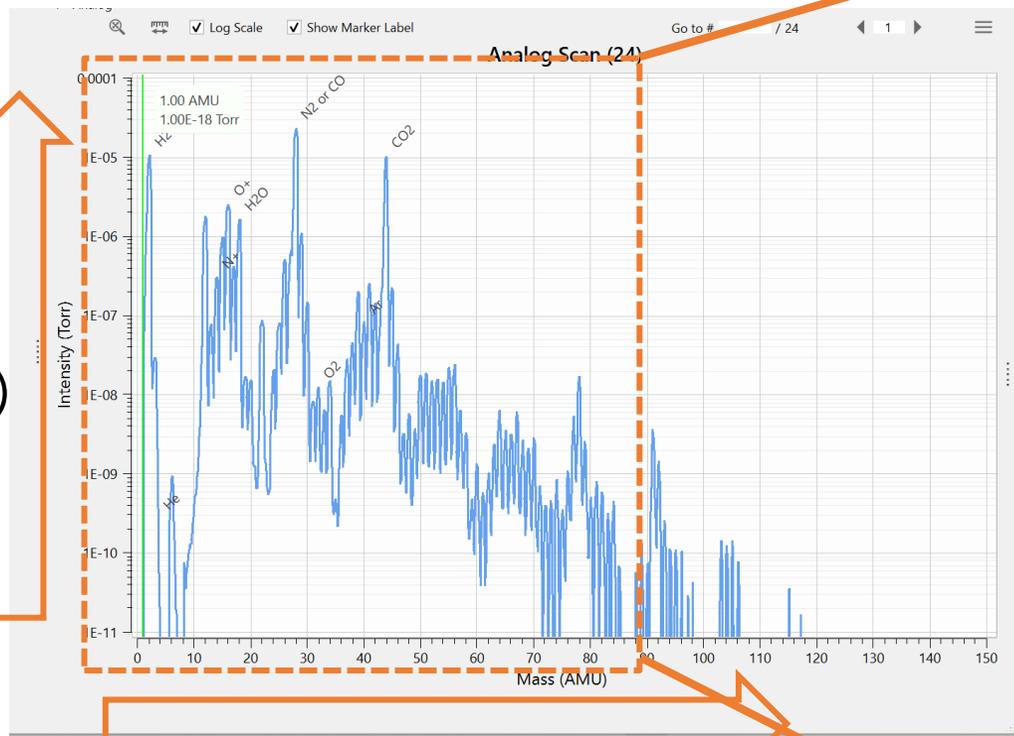


水を除去するMS3Aはすでに導入済み



RGAでとれるデータ

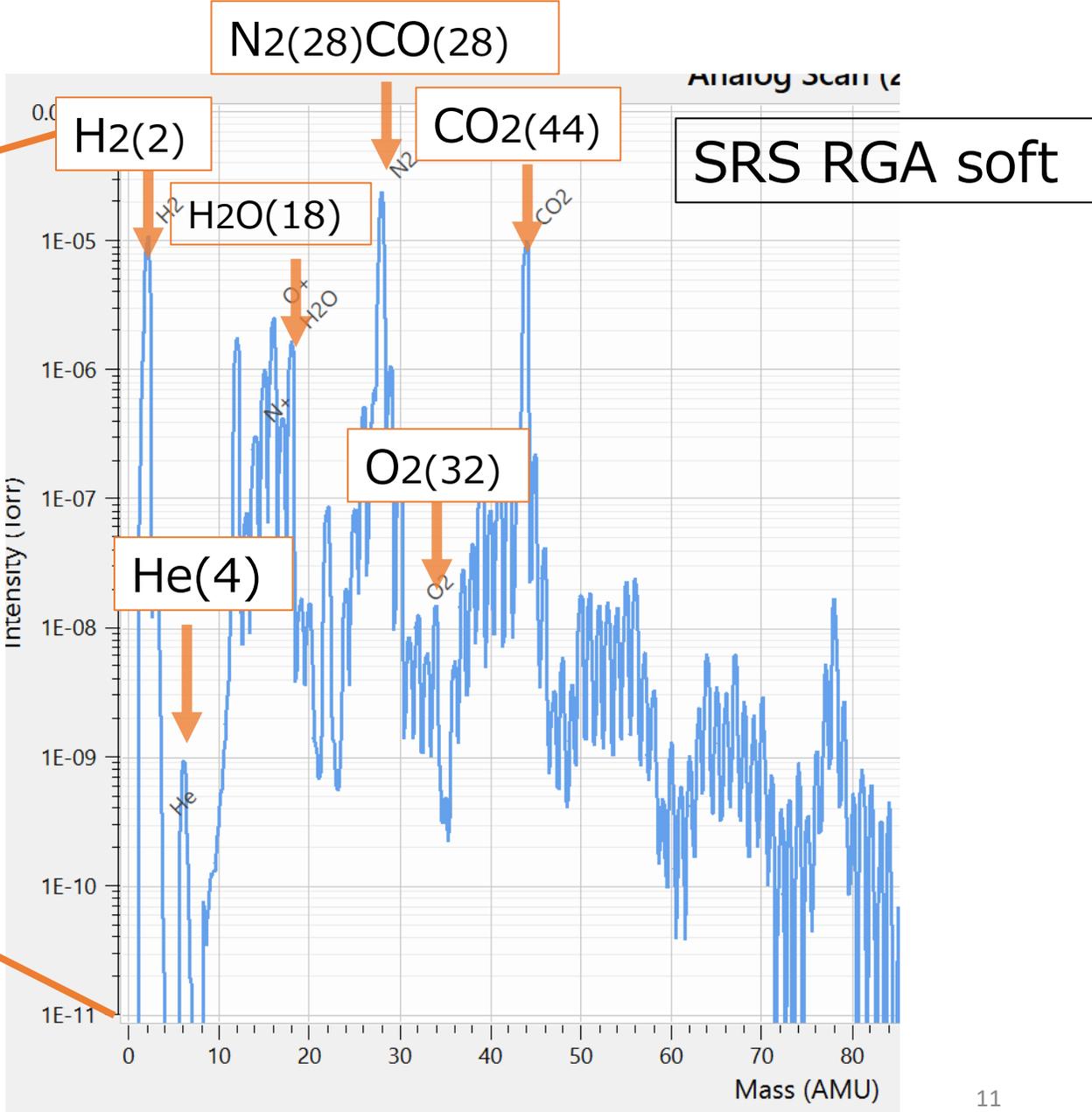
真空中のデータ



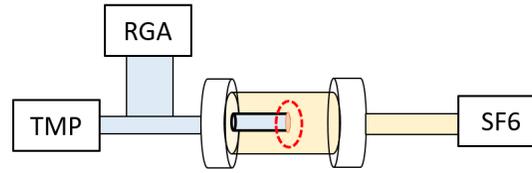
分圧
(Torr)

分子量(AMU)

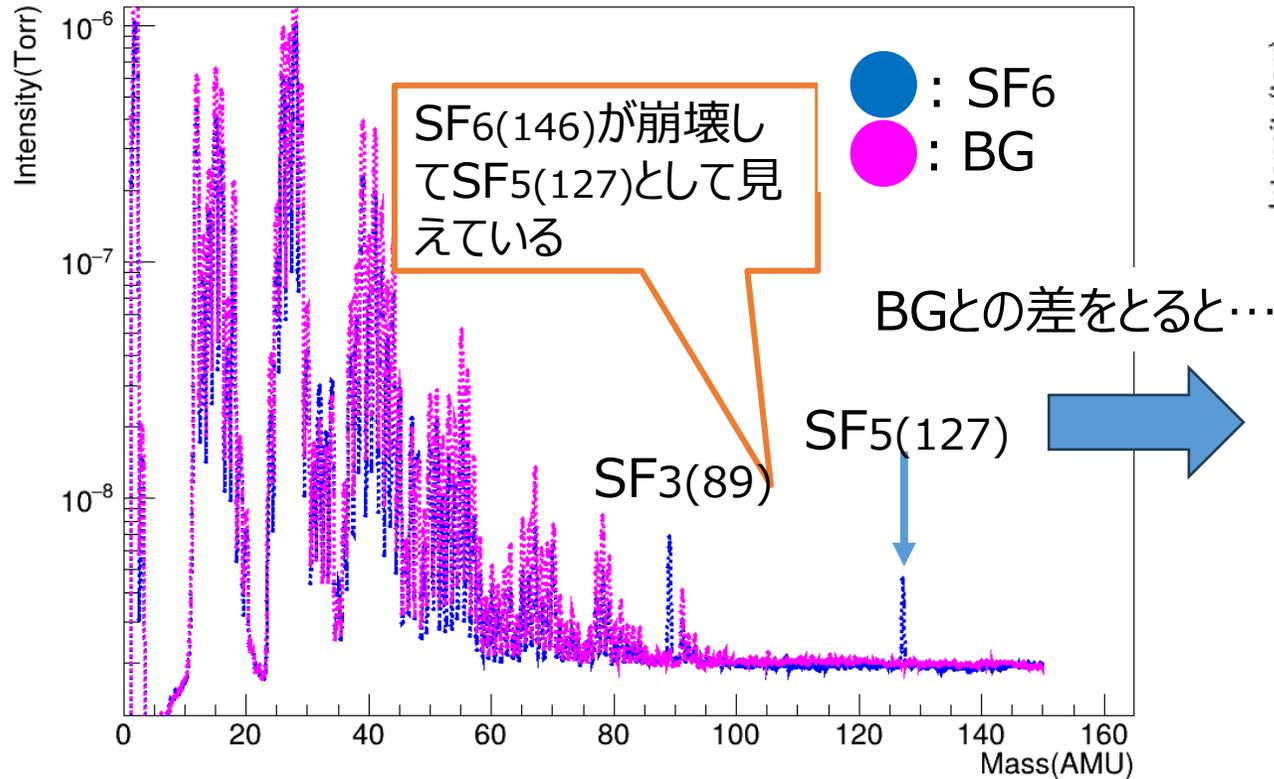
真空中(BG)のデータを把握しつつSF6ガスを見てみる！



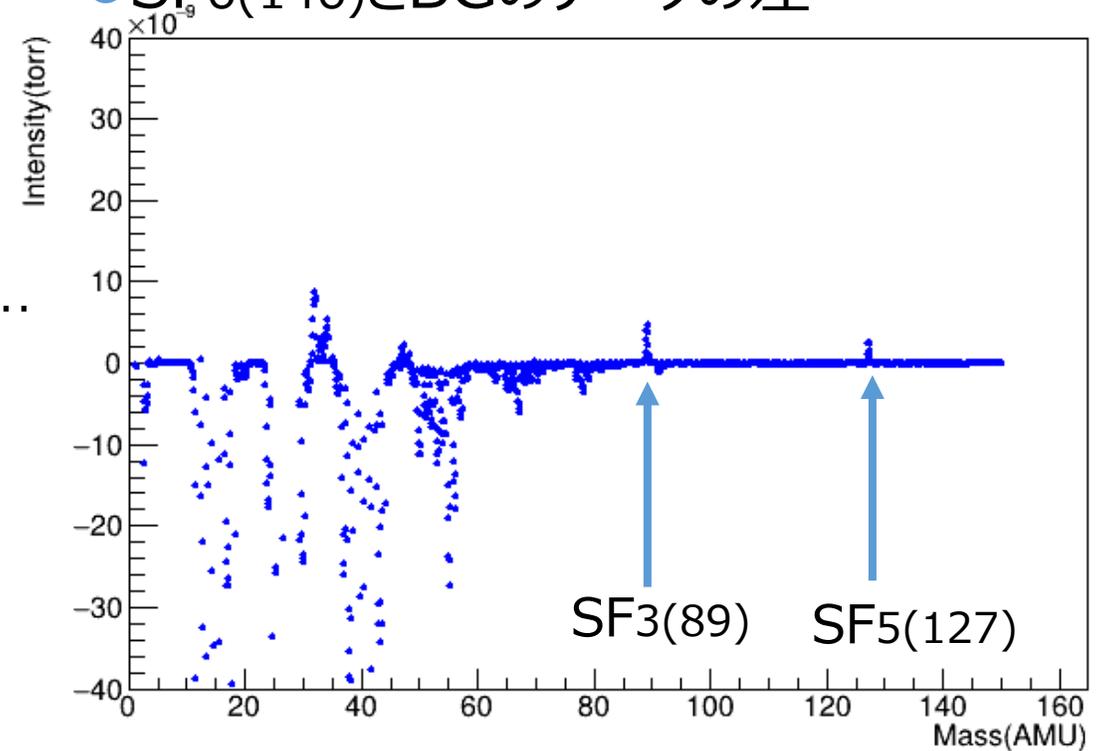
測定結果(配管のみ)



● SF6(146)とBGの重ね書き



● SF6(146)とBGのデータの差



➤ SF3(89), SF5(127)のところに信号を確認

➤ 低質量側のBGが多い
⇒ 増減の判断が難しい

➤ SF3(89)とSF5(127)のところにピークを確認

➔ 2 μmの穴を用いたRGA動作に成功!

BG削減

BG削減は必須…

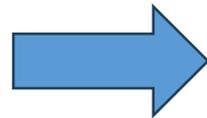
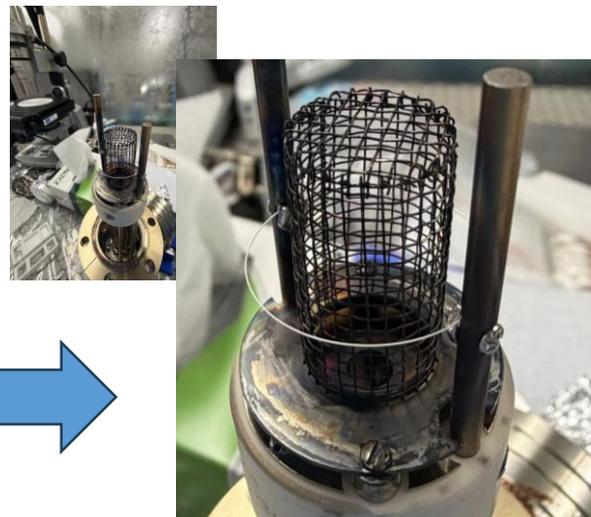
ということですのですぐにできるBG削減方法としてベーキングやRGA内の清掃を実施

ベーキング：機器を高温で温め分子運動を活性化させ内部に付着している不純物をはぎ取りやすくする

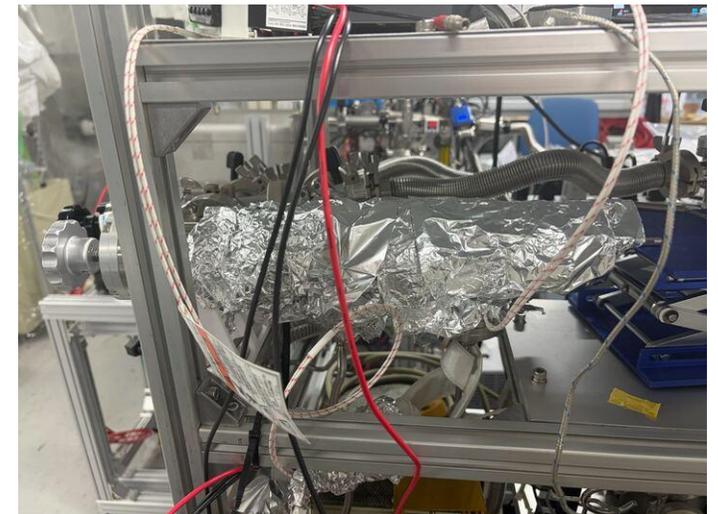
before



after



ベーキングしている様子

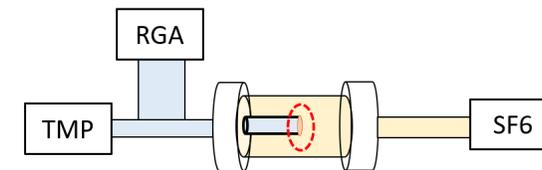


240℃で2晩ほど実施
(前回は215℃)



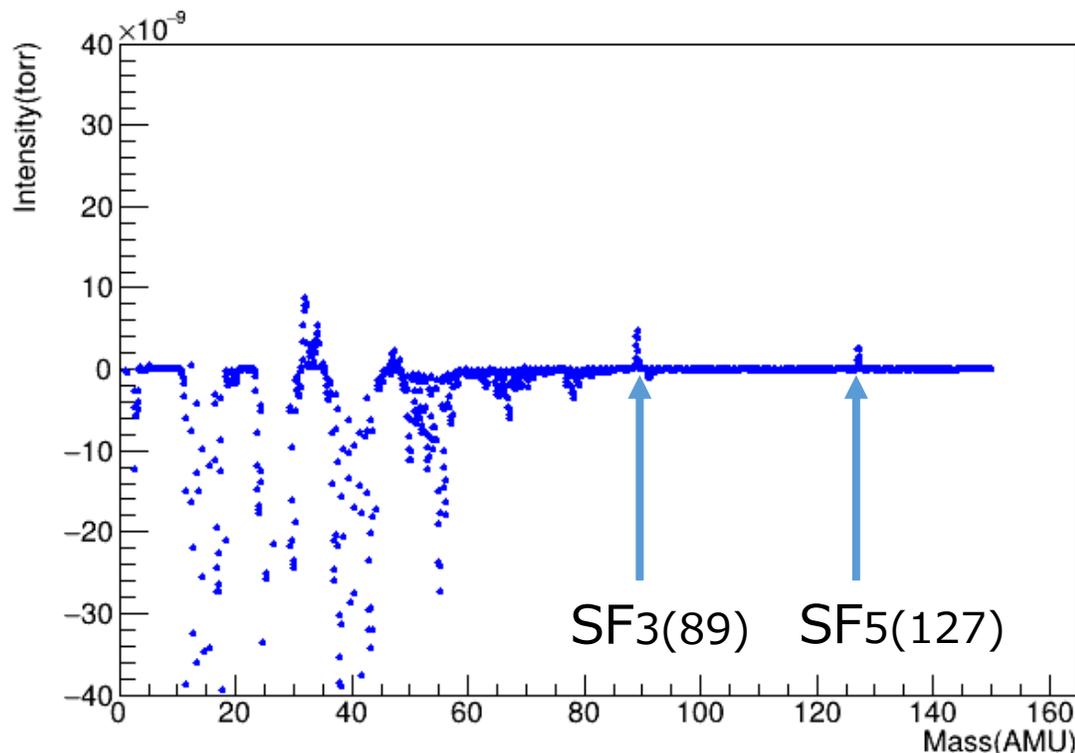
これらの取り組みに効果があったのかを前後で比較！

BG削減前後での比較(配管のみ)

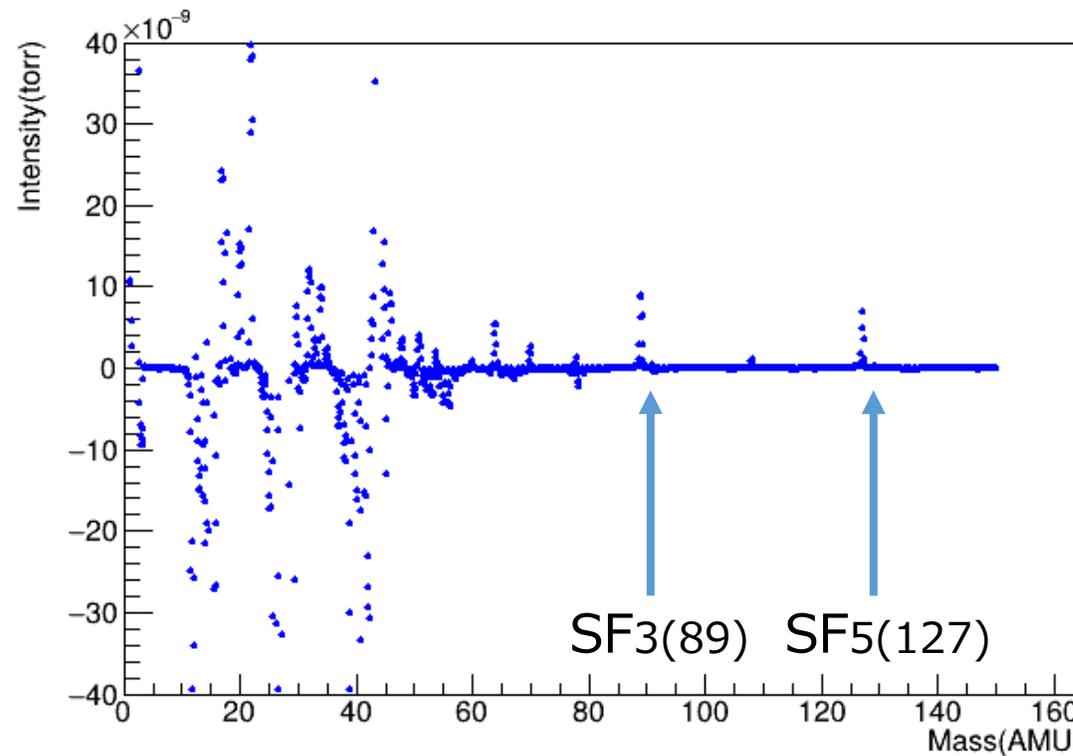


- BG削減前後でのSF₆とBGスペクトルの差をとり、比較してみた

BG削減前



BG削減後



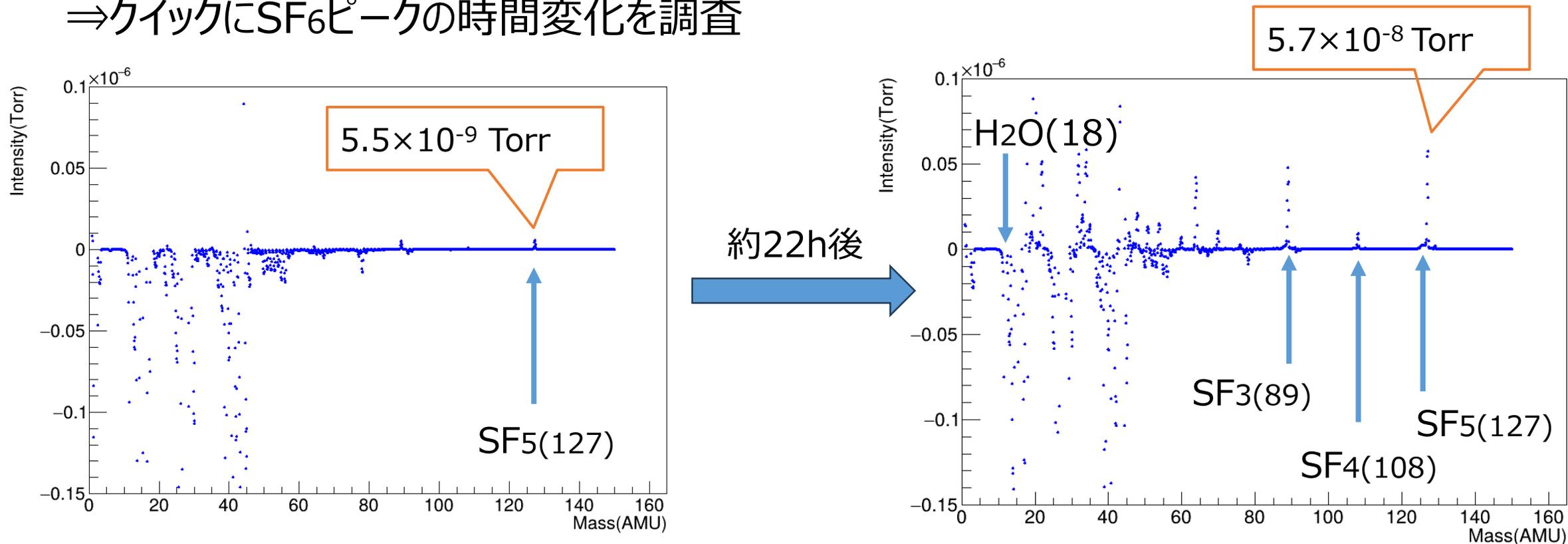
- わずかにSF₃(89), SF₅(127)のピークが大きくなっている
- 低分子量側についてはさらなるBG削減が必要



この結果を踏まえてTPCにつないで変化があるかを調査

SF₆ピークの時間変化(TPC込み)

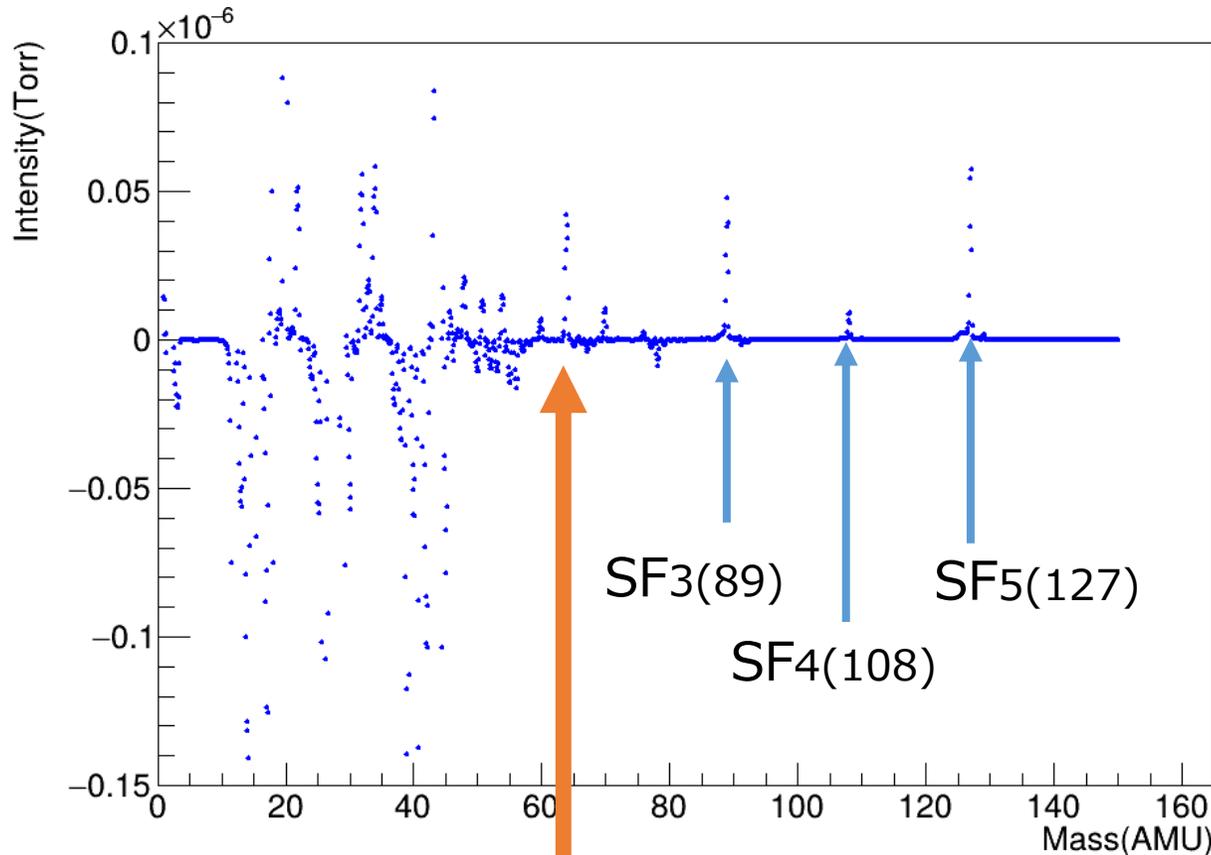
- ガスTPCに接続し循環を回した状態で長期測定を実施
⇒ クイックにSF₆ピークの時間変化を調査



- SF₅に注目すると分圧に一桁以上の差があることを確認
- 時間が経つとSF₆ガス由来のSF₅に加えてSF₄, SF₃の信号も明瞭になった
- 除去しているはずの水が存在することや、低分子量側の削減については今後の課題

新たなピーク(TPC込み)

- TPC & 循環込みのSF₆の長期測定で時間が経つと明瞭にたつピークを確認



分子量64  エタノール(C₂H₅OH)!?

- 分子量64⇒調べたらエタノール
- 配管部をアルコールで拭いたときに混入したかも
⇒まだわかっていない

吸着剤の種類			
タイプ	吸着される分子	吸着されない分子	代表的な用途
3A	H ₂ O, NH ₃ , He (有効孔径<0.3 nmの分子)	CH ₄ , CO ₂ , C ₂ H ₂ , O ₂ , C ₂ H ₅ OH, H ₂ S, C ₂ H ₄	クラッドガス、アクリレン、ブタジエン、エタノール等の脱着
4A	H ₂ S, CO ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₅ OH, C ₂ H ₆ (有効孔径<0.4 nmの分子)	エタン、コンプレッサー油、 置換炭化水素	天然ガス、溶剤、浸漬飽和炭化水素の乾燥 天然ガスからCO ₂ の除去
5A	n-パラフィン、オレフィン、 n-C ₄ H ₉ OH (有効孔径<0.5 nmの分子)	iso-化合物、四員環化合物	ナフサ、ケロシンから n-パラフィンの回収
13X	iso-パラフィン、iso-オレフィン、 ジネブチルアミン芳香族 (有効孔径<1.0 nmの分子)	(C ₂ F ₆) _n	脱酸、乾燥、水分とCO ₂ の同時除去 炭化水素の吸着

MS4Aで吸着可能

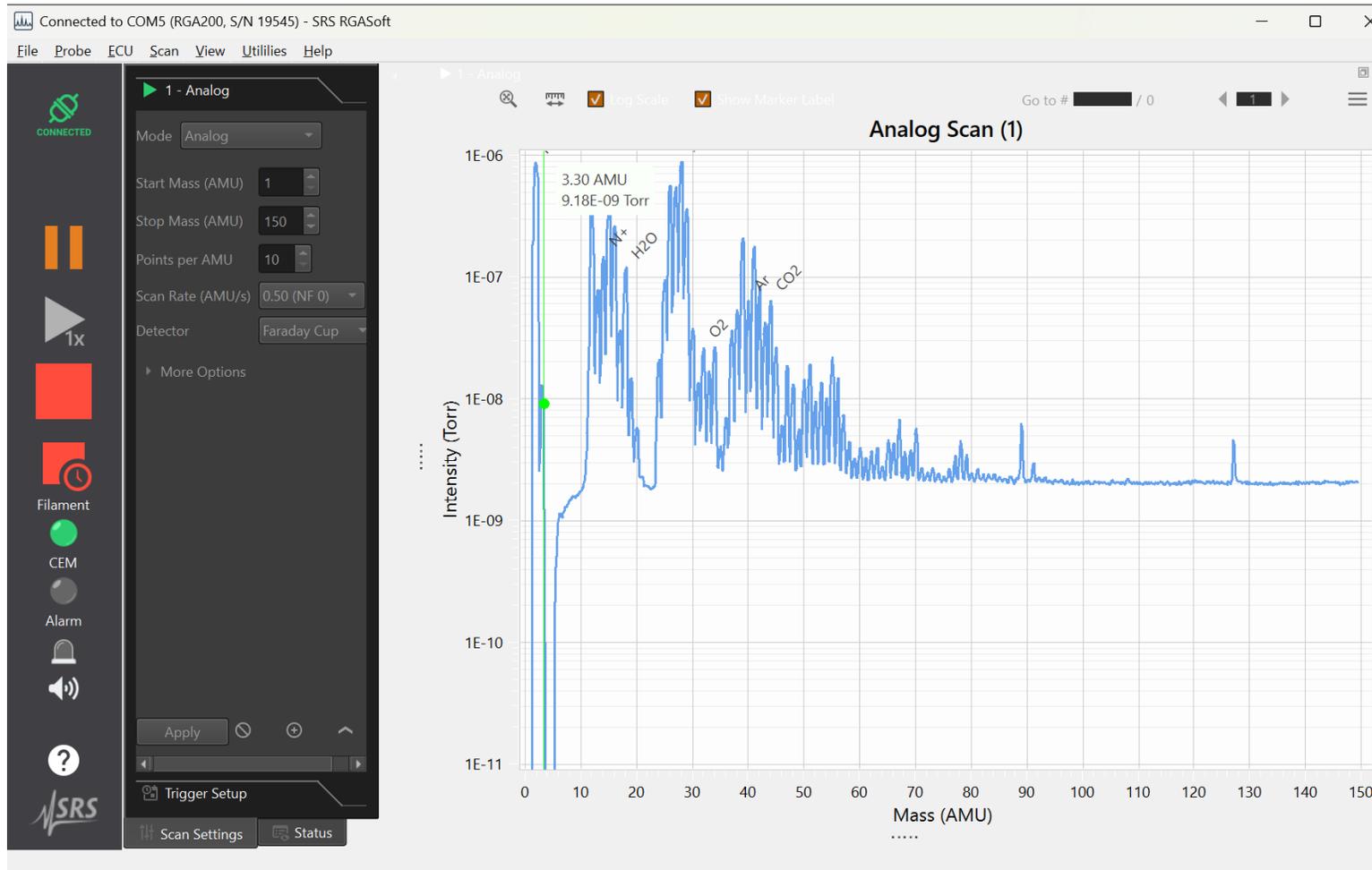
3A, 4A, 5A, 13Xは吸着孔径を表しており、それぞれ3A, 4A, 5A, 10Aです。
吸着孔径は3A<4A<5A<13Xの順ですので、例えば3Aに吸着される分子は、4A, 5A, 13Xの全てに吸着されます。
また、1/16はペレットの直径を表しており、約1.6 mmとなっています。

結論

- ▶ 陰イオンガスTPCを用いた暗黒物質探索実験のためのSF₆ガスの組成評価を実施
- ▶ 直径2 μmの穴を用いて残留ガス分析装置(RGA)を動かした
 - ▶ 動作条件である $<10^{-4}$ Pa以下を達成
- ▶ 試料であるSF₆ガス由来の信号を確認
- ▶ チェンバー内のアウトガス調査を実施
 - ▶ 現在も測定中
- ▶ 長期測定の結果を見つつ、低質量側のBG削減に関する方針を決める

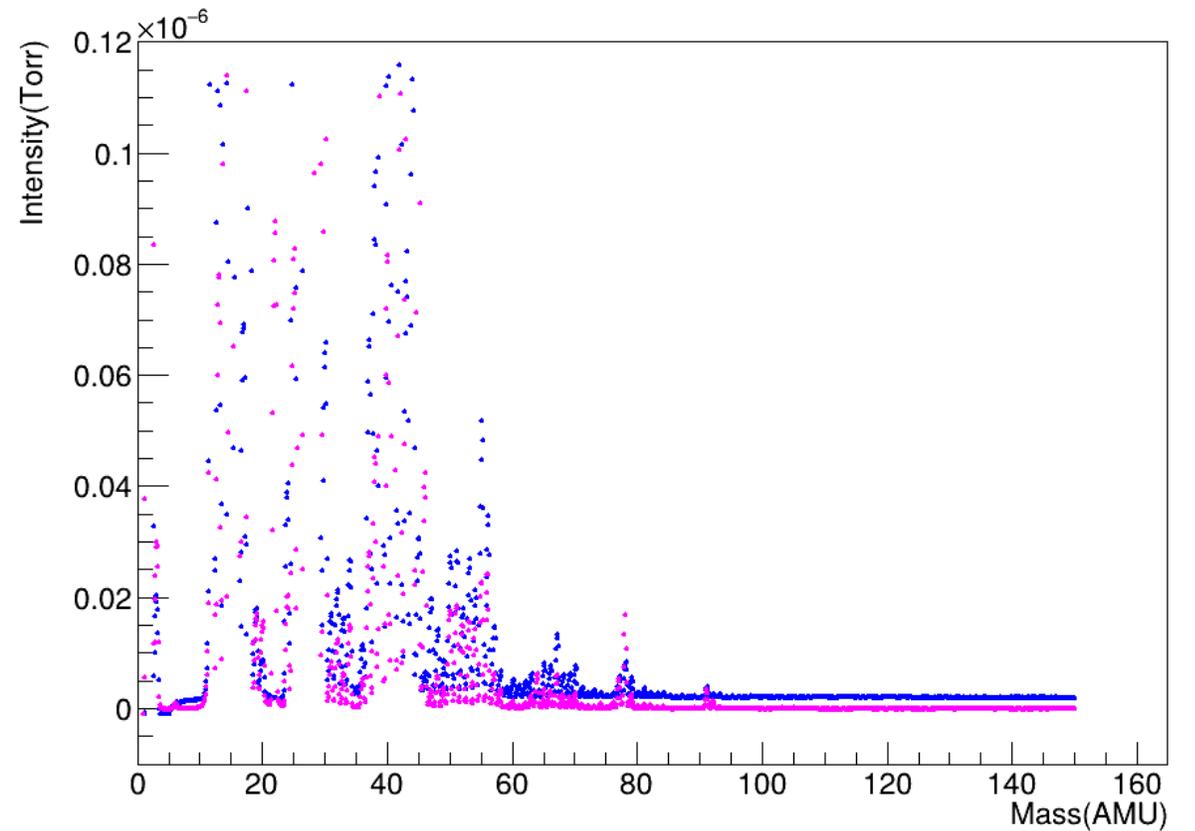
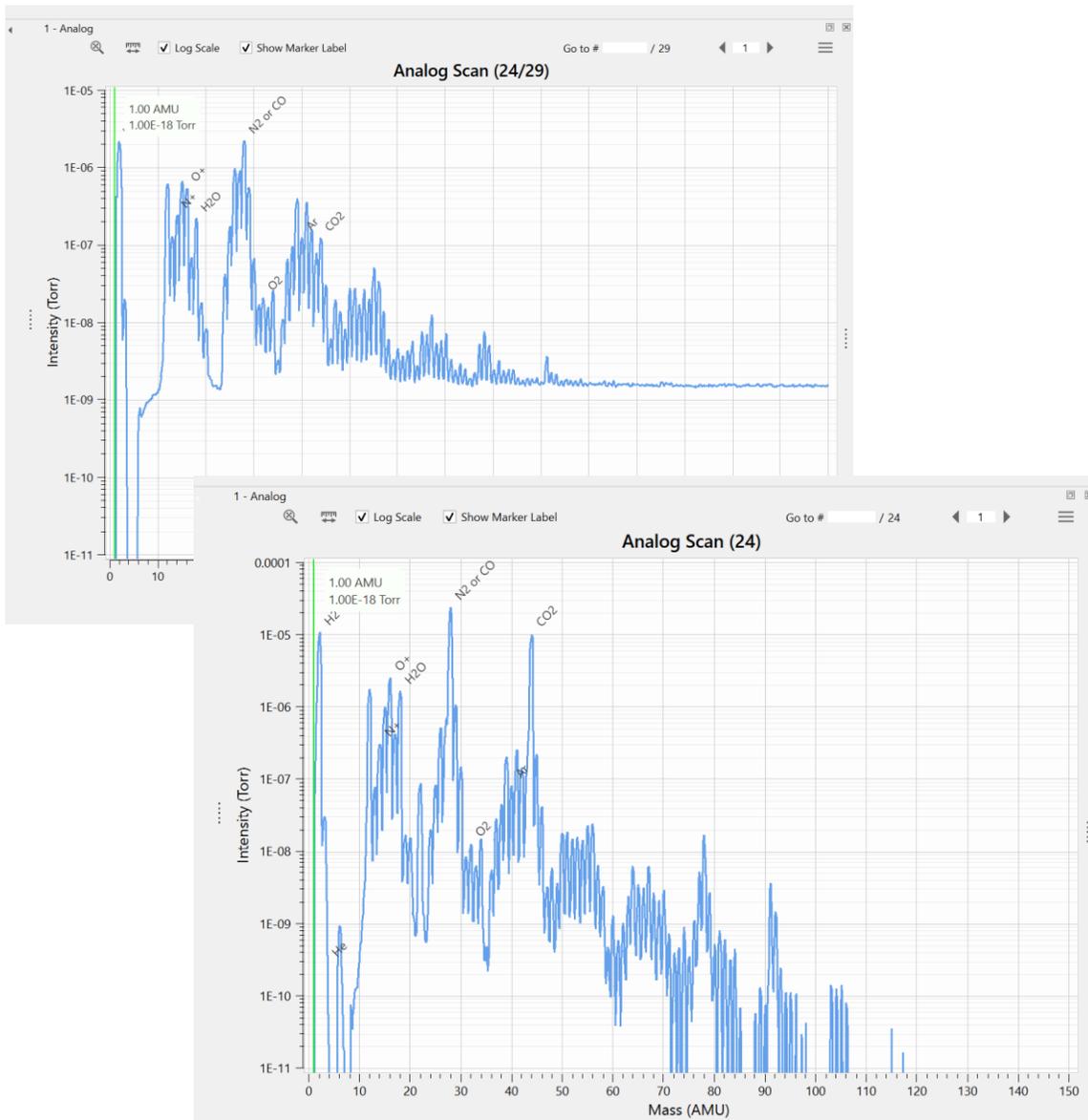
Back up

BG削減前のRGA生データ

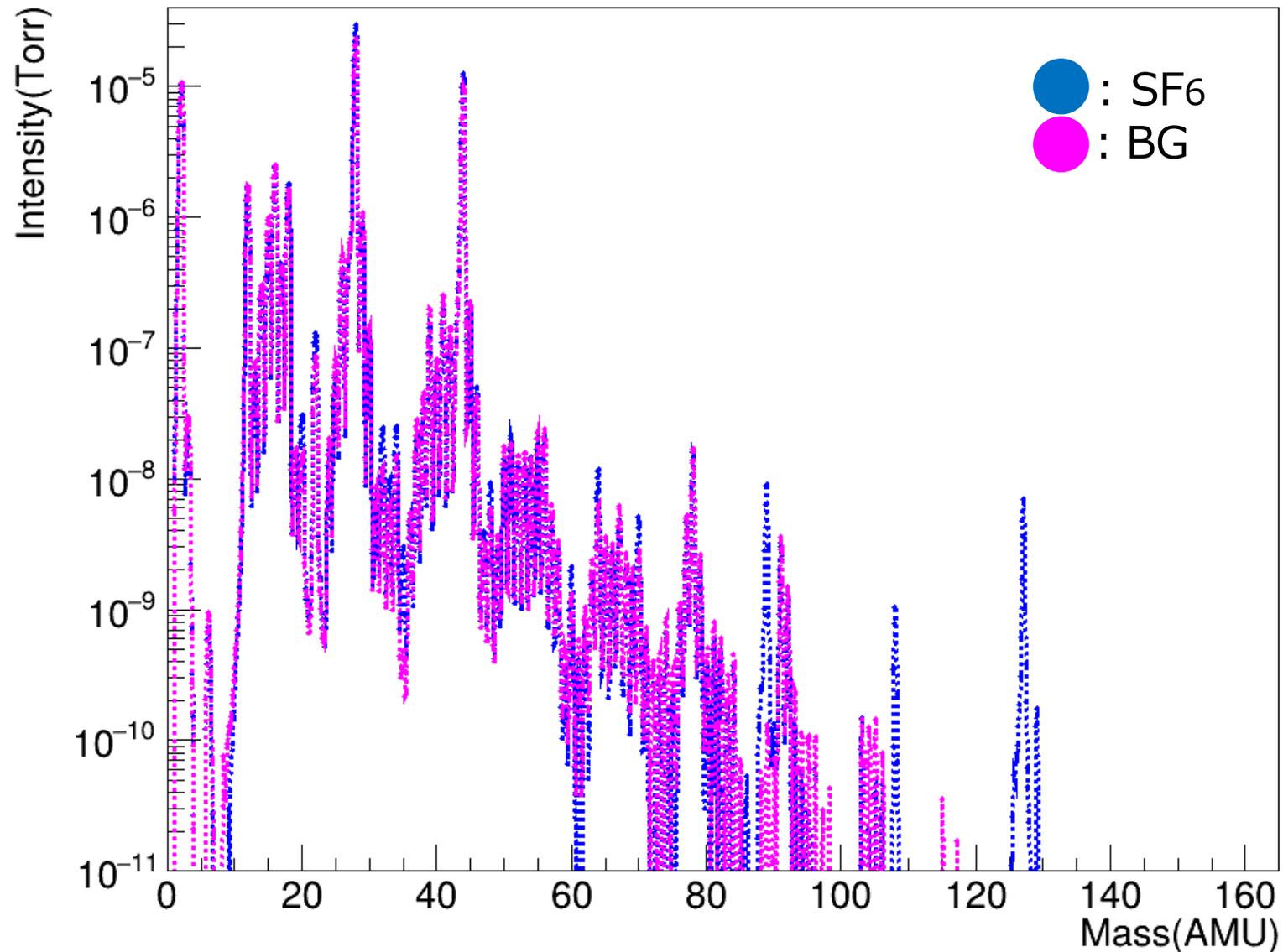


変な平地が見える

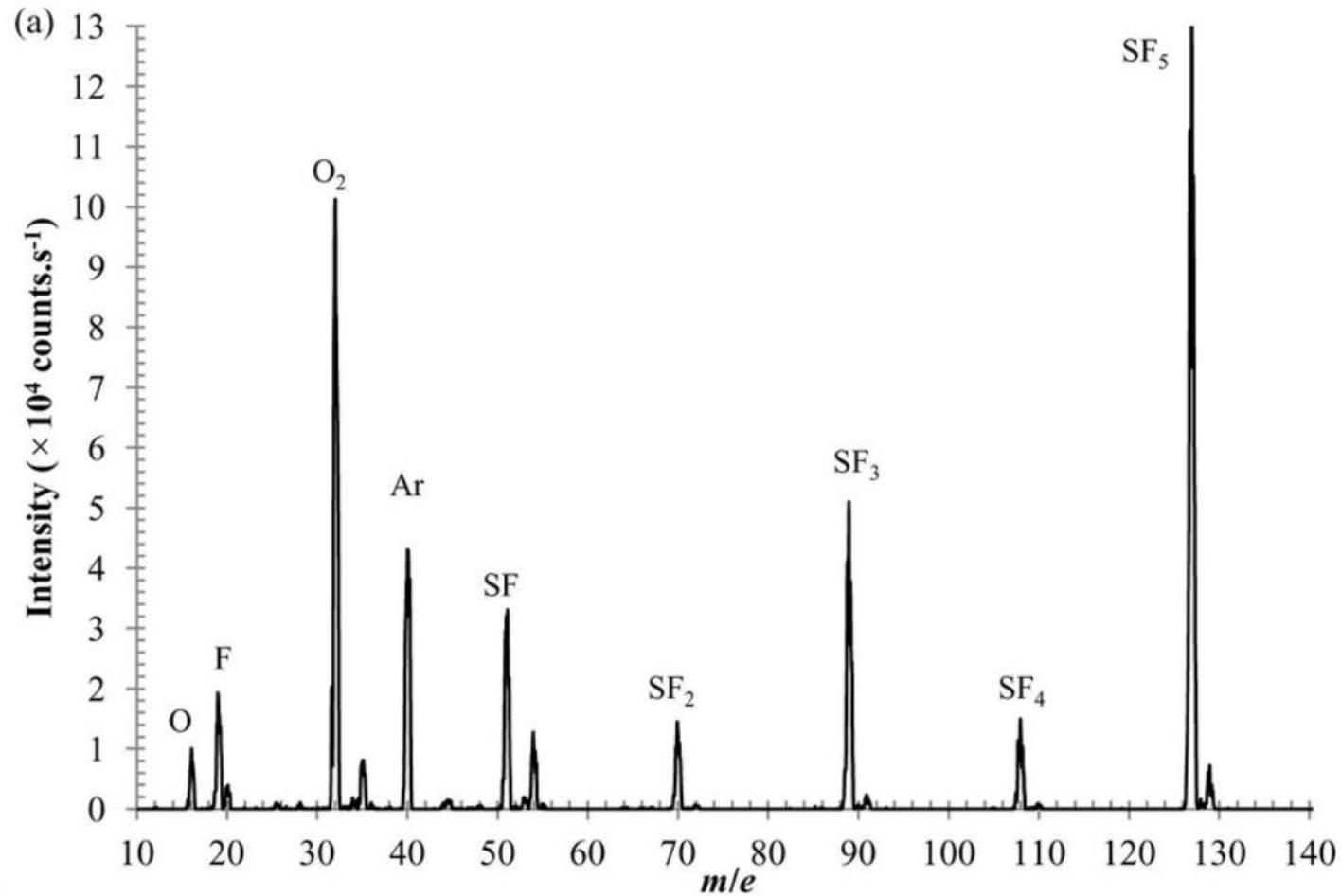
BG削減後の測定結果 -BG比較-



BG削減後のSF₆とBGの重ね書き



SF6の見え方



SF6としては見えず、
分子量127 SF5が一番支配的

RGA 検出原理

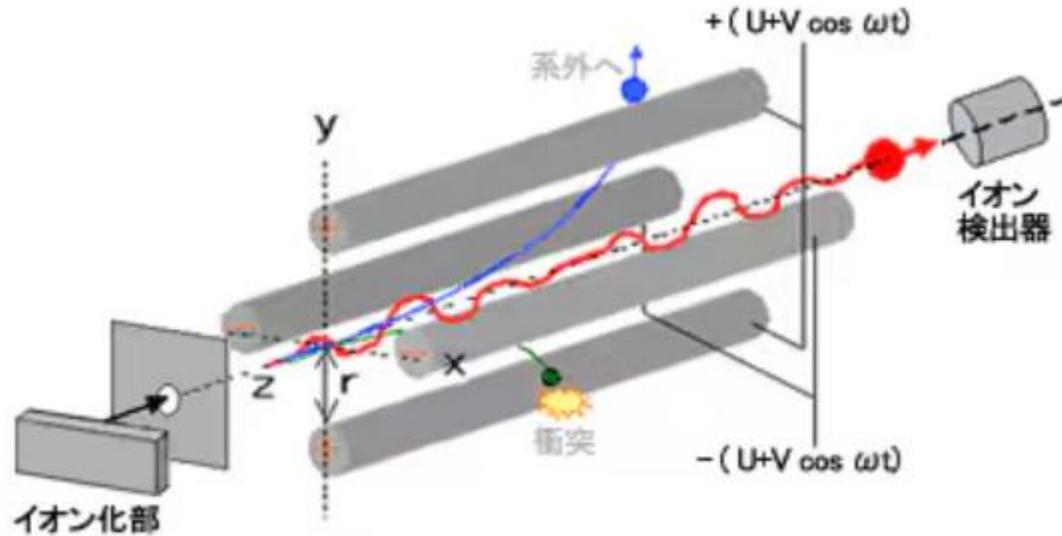


図1.四重極型MSの模式図

直流電圧：U
高周波交流電圧： $V \cos \omega t$
(ω ：高周波振動数)

イオン化部で生成したイオンは数十ボルトの比較的弱い電圧でZ軸方向に加速され、細孔を通り四重極の領域に進入します。四重極には、互いに対向する電極に同じ極性の電圧が、また隣接する電極に正負逆の電圧がかけられています。それぞれの電極に直流電圧Uと高周波交流電圧 $V \cos \omega t$ (ω ：高周波の振動数t：時間)とを重ね合わせてかけると、四重極の中には高速で位相の変化する電場が生じます。

この電場により通過するイオンはX、Yの軸方向に振動します。このとき特定の条件 (U, V, ω) が与えられると、**ある特定範囲の質量電荷比(m/z)のイオンは"安定な振動"状態になり、四重極を通り抜けて検出器に到達できます。**その他の m/z を持つイオンは不安定な振動を行い、電極に衝突したり、系外にとびだし検出されません。

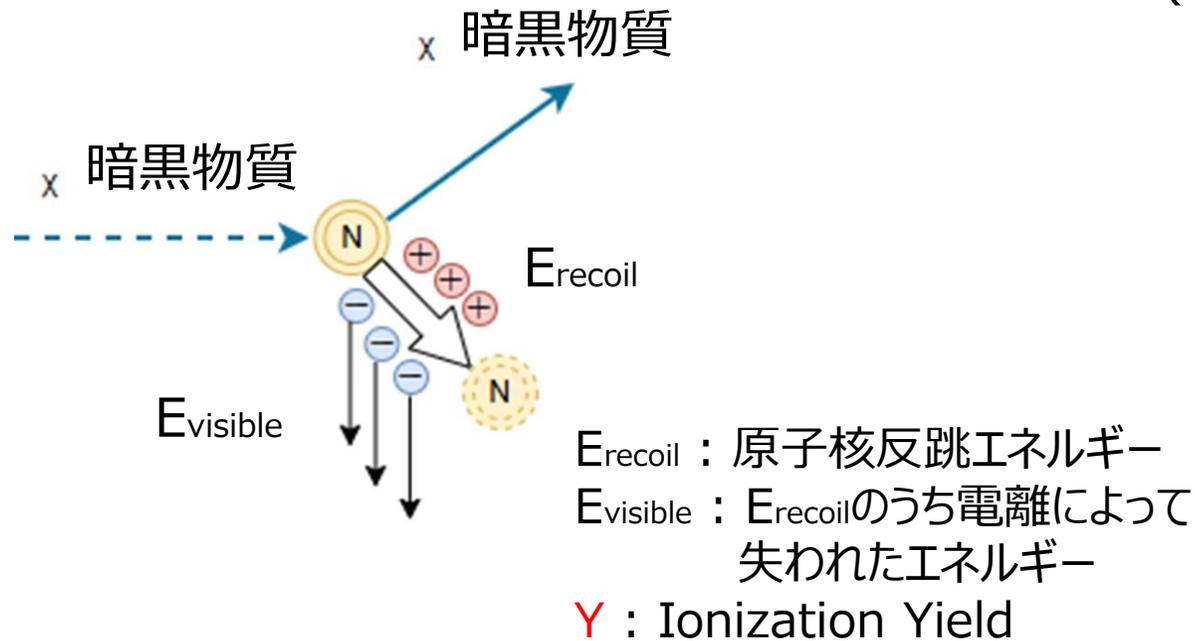
ある特定範囲の質量電荷比(m/z)のイオンは"安定な振動"状態になり、四重極を通り抜けて検出器に到達

[四重極型, イオンラップ型, 飛行時間型 各質量分析計の分離機構と特徴: 分析計測機器\(分析装置\) 島津製作所](#)

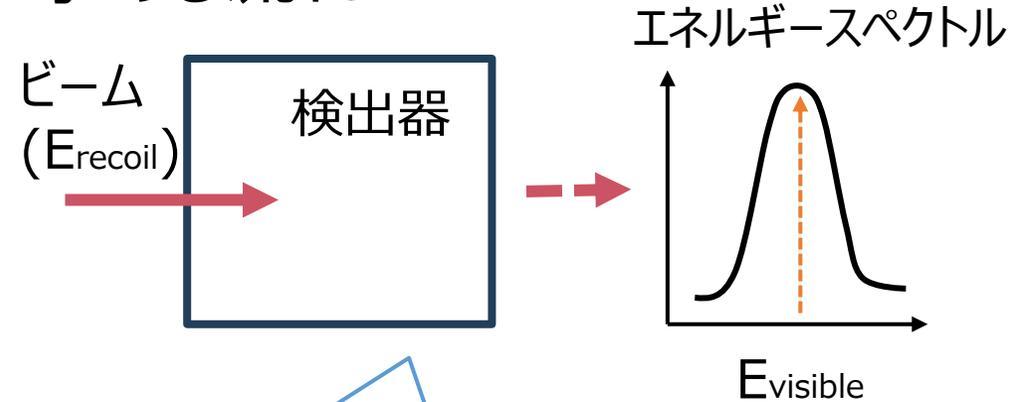
Ionization Yield測定

● 暗黒物質直接探索

- ▶ 反跳原子核が電離によって失うエネルギーを観測



● 求める流れ



Ionization Yieldを実験的に求めることが必要

イオンビームをガスチェンバーに入射させてエネルギーを測定する機構が必要！

$$E_{\text{visible}} = Y \times E_{\text{recoil}}$$

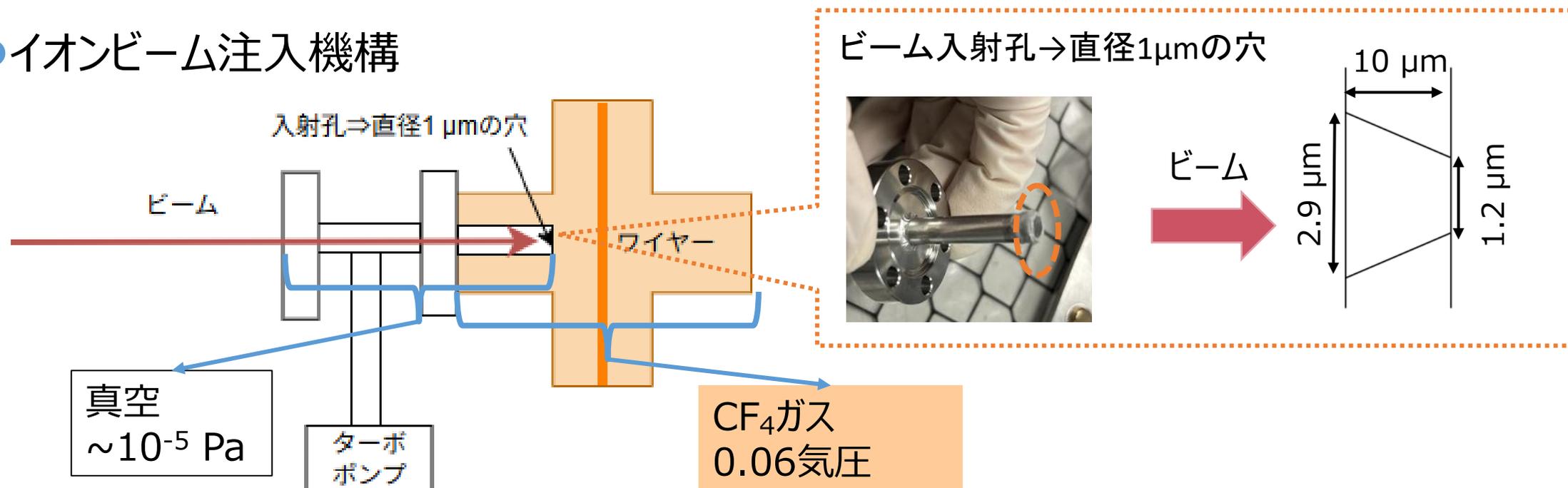
ビーム入射孔

● 先行研究

グルノーブルのLPSCはCOMIMAC加速器、ビームの入射孔として $1\mu\text{m}$ の穴を用いて実験

➡ Ionization Yieldを測定し、**ガス検出器への低エネルギーイオンビーム注入機構の確立を目指す!**

● イオンビーム注入機構



➡ 1 μm の穴を通した真空とガス領域の破れがないことを確認