



# 暗黒物質探索実験に用いる 陰イオンガスTPCの不純物組成および 読み出しノイズ評価

神戸大学 M1 遠山和佳子

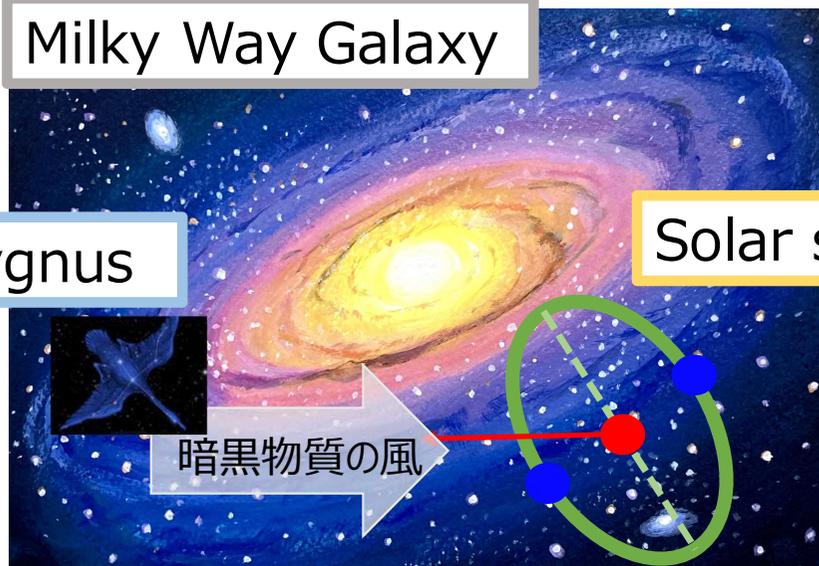
2026/3/5

# 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

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

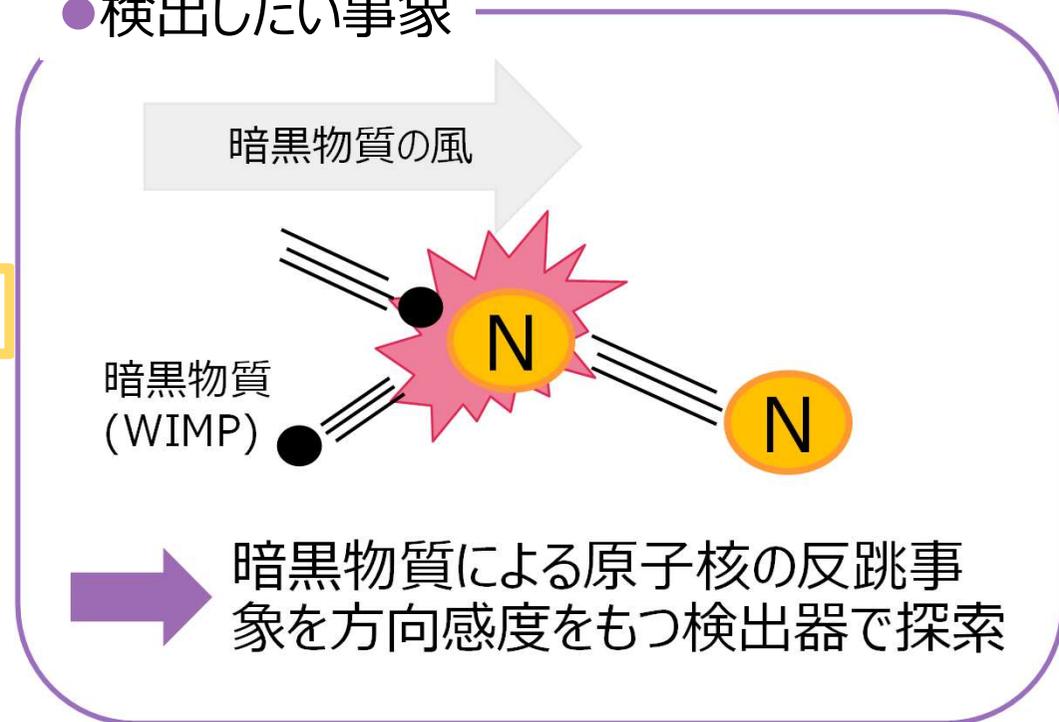
- 暗黒物質をWIMPと仮定して探索

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

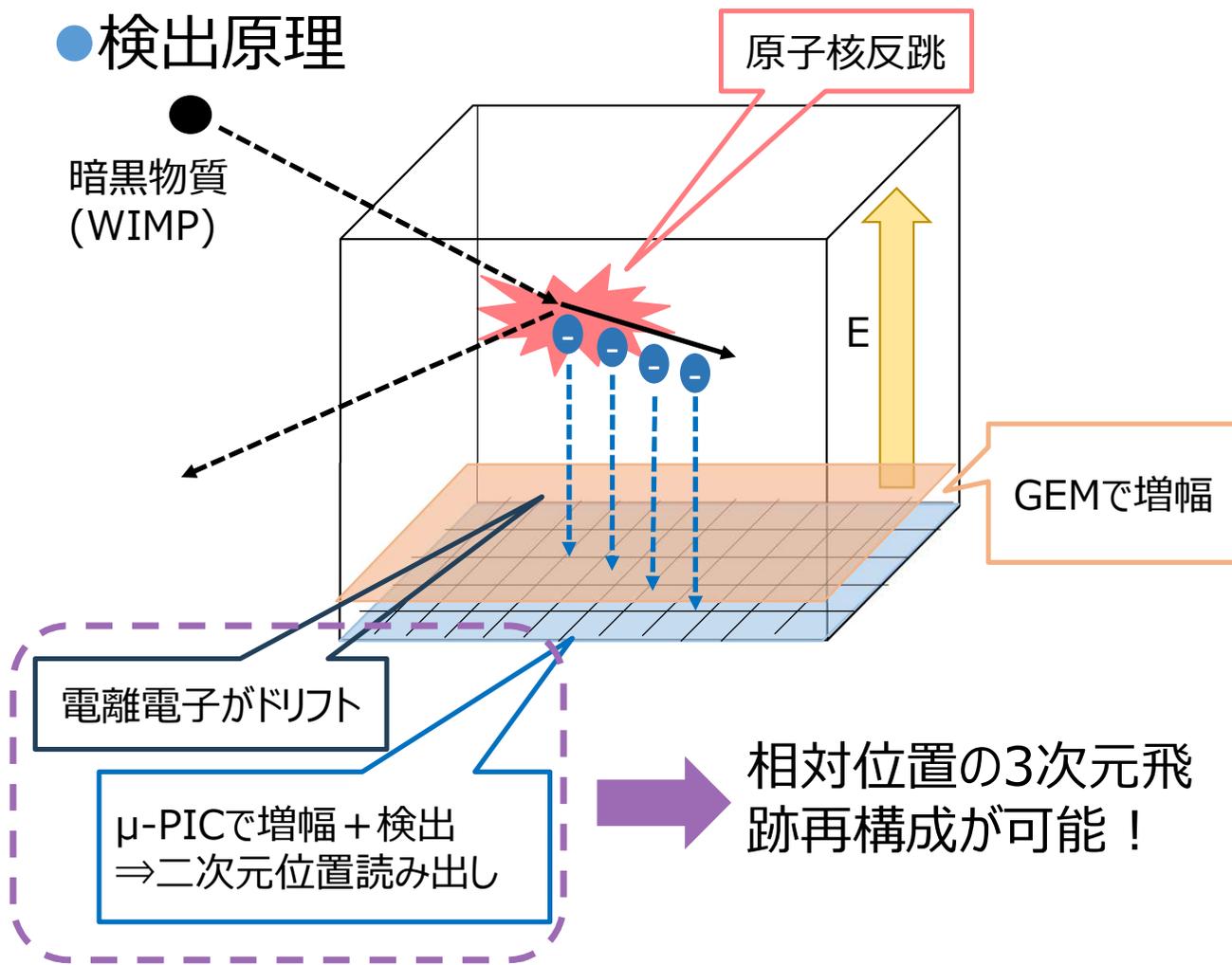


はくちょう座の方向から暗黒物質がやってくるように見える。反跳核分布が指向性をもつため暗黒物質の強い証拠となる。

# ガスTPCによる検出原理

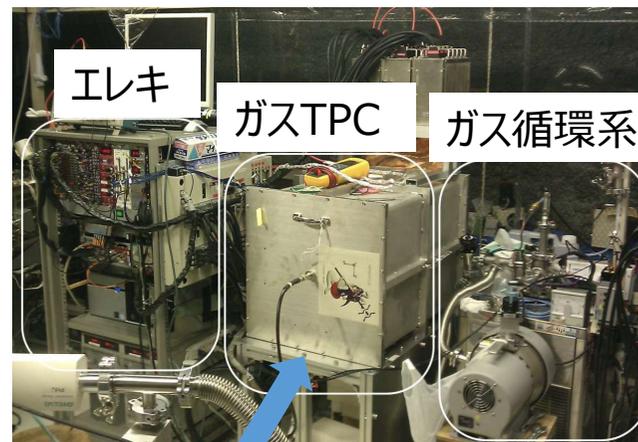


## ● 検出原理



## ● NEWAGE実験

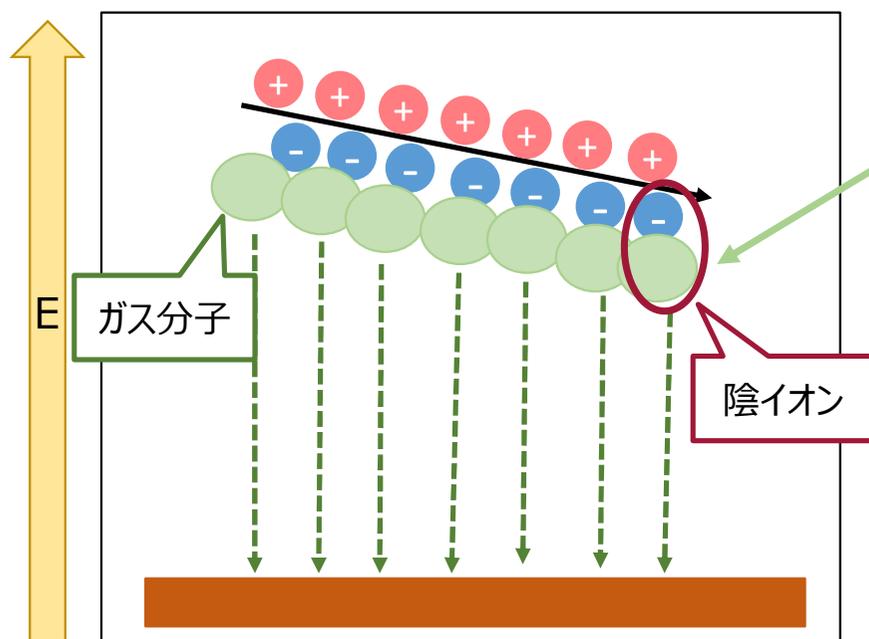
神岡鉱山地下実験室(LabB)に  
ガス検出器保有



使用しているガスは $CF_4$   
将来的には…陰イオンガスである  
 **$SF_6$** 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

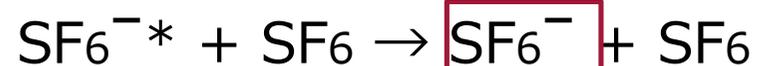
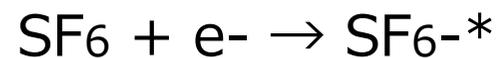


➤ ゆっくりドリフト、低拡散

⇒ 正確な飛跡再構成へ

陰イオンガスの中でも注目しているガスは..

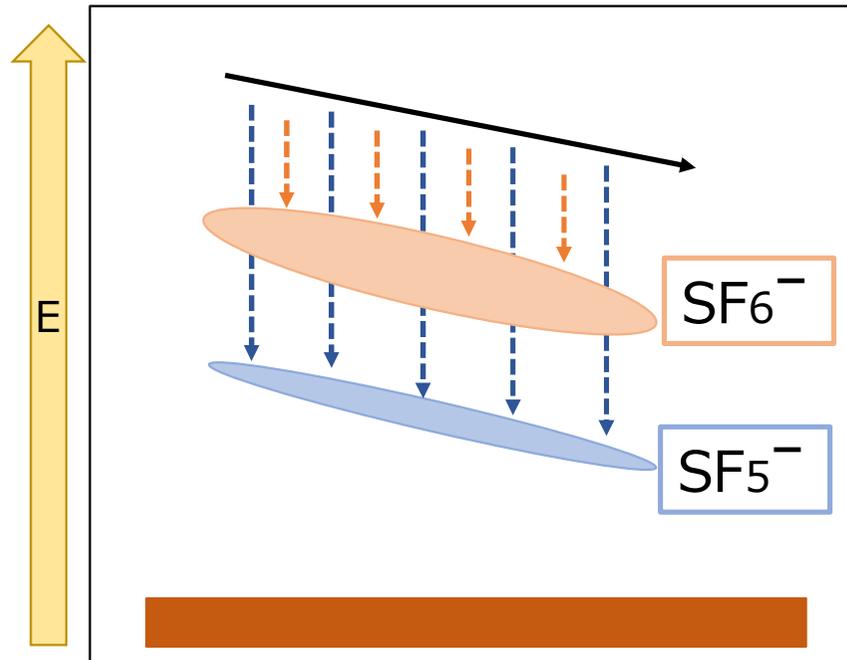
➤ **SF<sub>6</sub>**



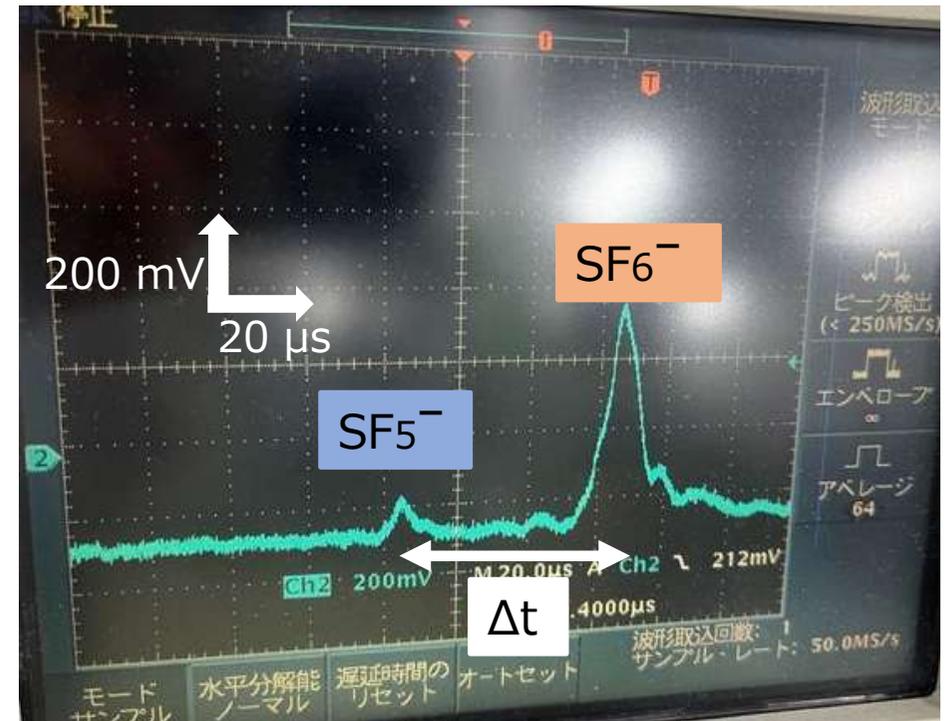
**SF<sub>6</sub><sup>-</sup>** と **SF<sub>5</sub><sup>-</sup>**  
2つの陰イオンが生成

# SF<sub>6</sub>ガスについて

SF<sub>6</sub><sup>-</sup>とSF<sub>5</sub><sup>-</sup>の二つの陰イオンが生成されるため…



きれいに取得できた信号



➡ SF<sub>6</sub><sup>-</sup>とSF<sub>5</sub><sup>-</sup>の到達時間差から絶対位置の飛跡再構成が可能  
⇒BG削減に貢献

# SF6ガスを用いた暗黒物質探索における課題

SF5-による信号はSF6-に比べてとても小さい…

- 1 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



**TPC内のガスの不純物組成評価を行う**

- 2 2つの信号のデータ取得の際、ダイナミックレンジを変える必要がある  
⇒読み出し基板にHG & LGのアンプを搭載することで解決

SF5-による信号を観測するためにはノイズを低くする必要がある



**ノイズ低減を目指し、読み出し基板を改良**

本研究で基板評価を実施!

# 陰イオンガスTPC開発に向けて

陰イオンガスTPC開発に向けて

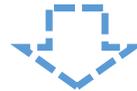


本講演のテーマ

陰イオンガスTPCの不純物組成評価

陰イオンガスTPCに用いる読み出し  
基板のノイズ評価

最終的には…

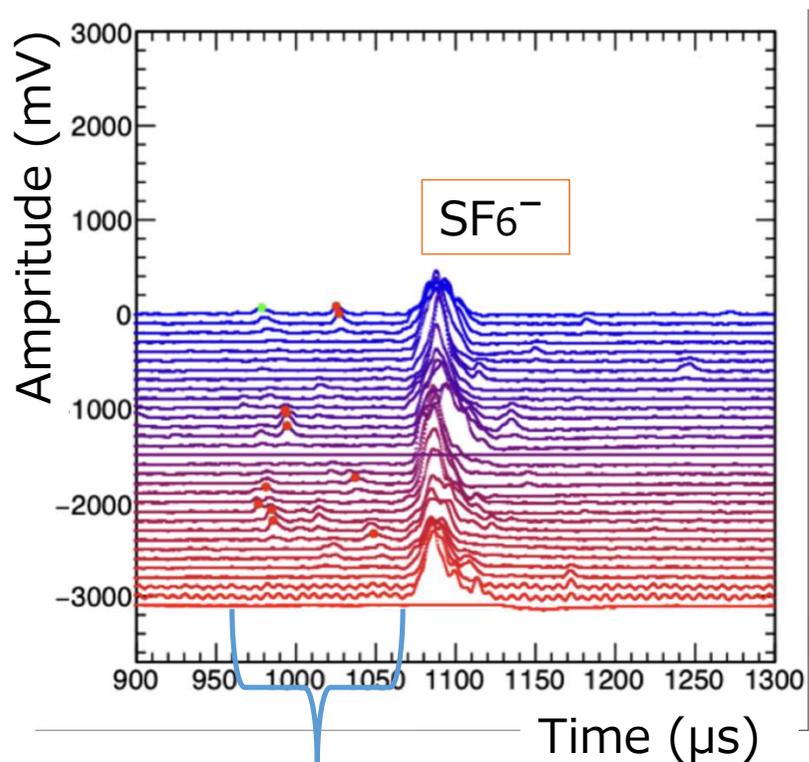


陰イオンガスTPCを用いた暗黒物質探索へ!!

# 陰イオンガスTPCの不純物組成評価

# SF<sub>6</sub>ガス中の不純物として考えられるもの

SF<sub>6</sub>ガス中でのα線の信号波形



SF<sub>5</sub><sup>-</sup>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 SF<sub>6</sub> 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



SF<sub>5</sub><sup>-</sup>特定が難しくなる！

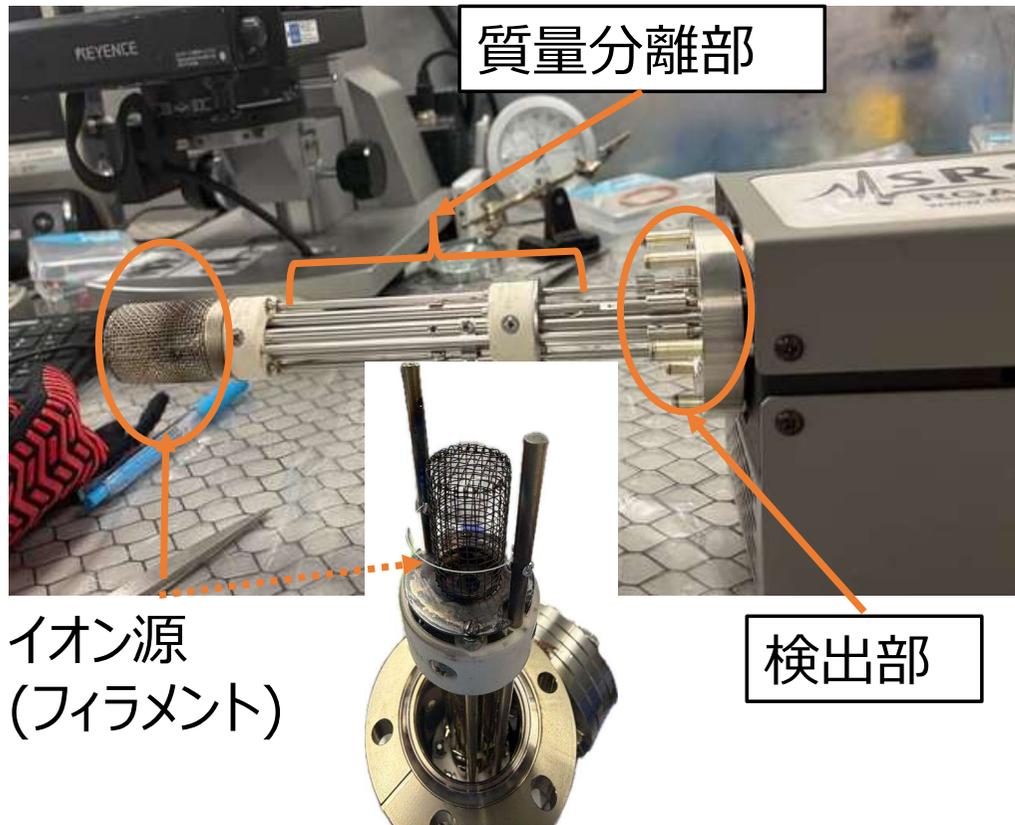
# RGA –残留ガス分析装置–

- 真空システム内の残留ガス組成を評価する



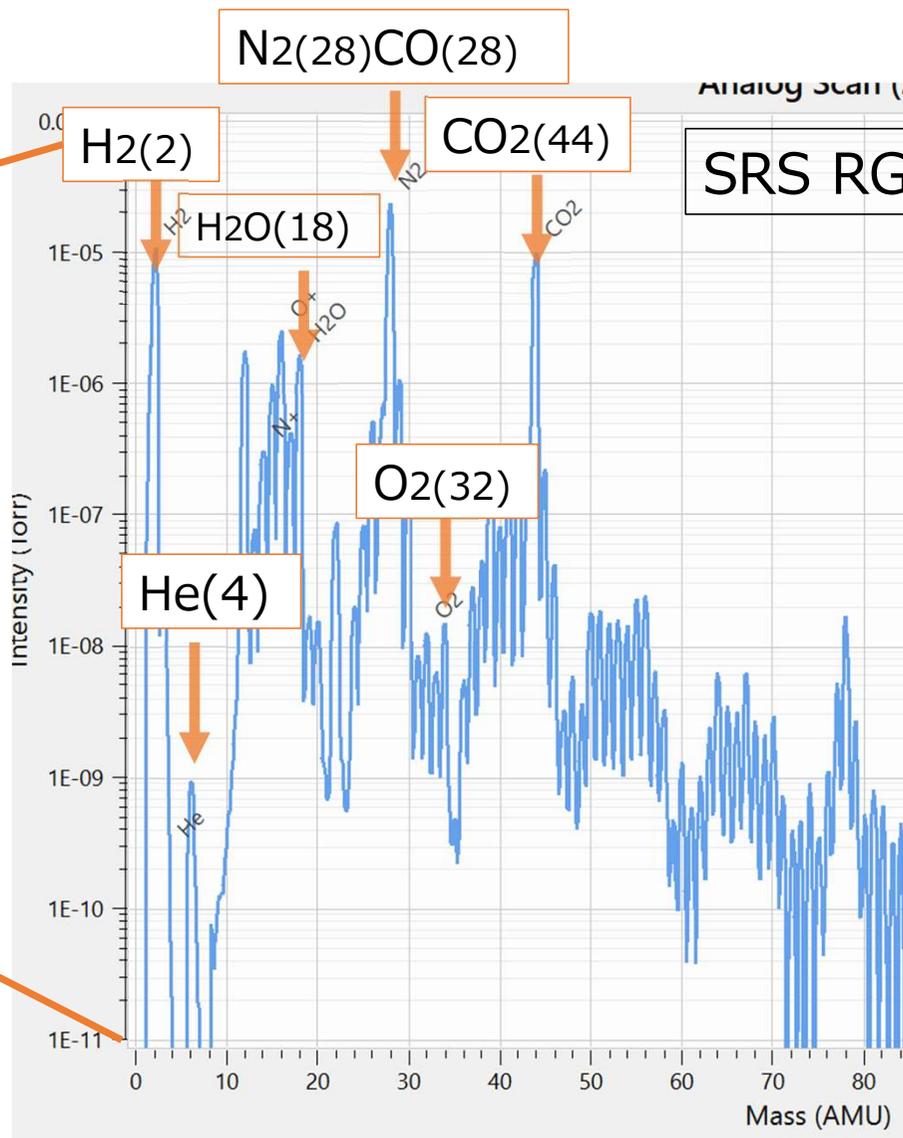
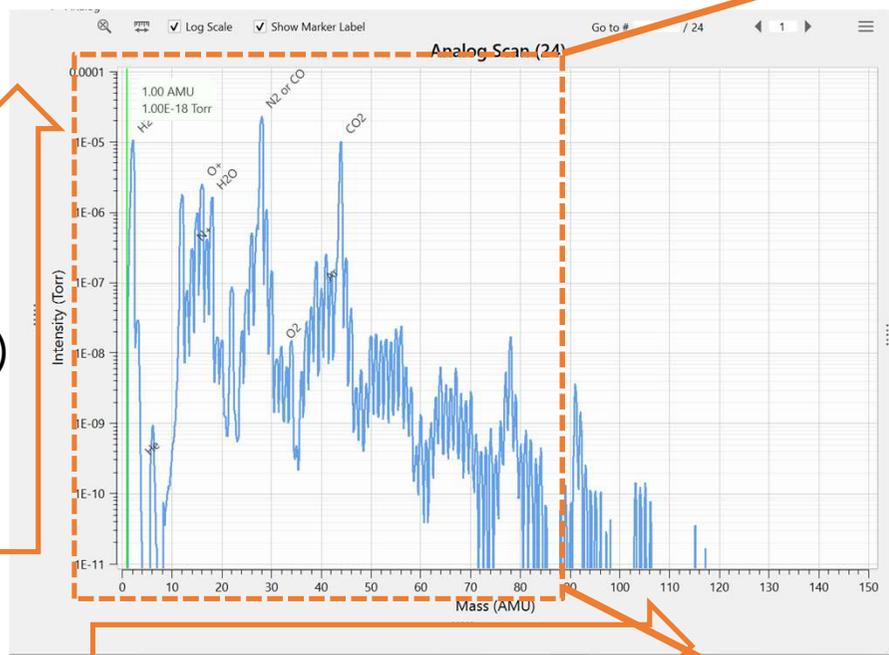
## ➤ 原理

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



# RGAでとれるデータ

## 真空中のデータ



分圧  
(Torr)

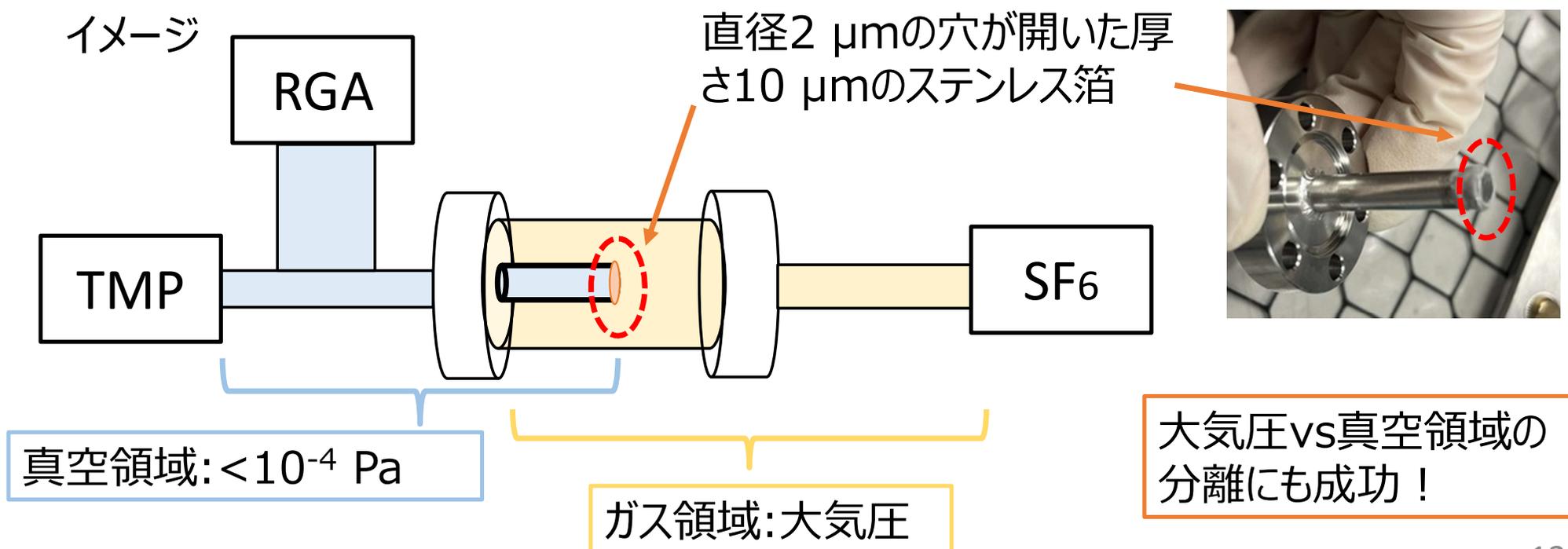
分子量(AMU)

真空中(BG)のデータを把握しつつSF6ガスを見定める！

# 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  $\mu\text{m}$ 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！



# 測定条件

## ●ガス検出器中の不純物組成調査

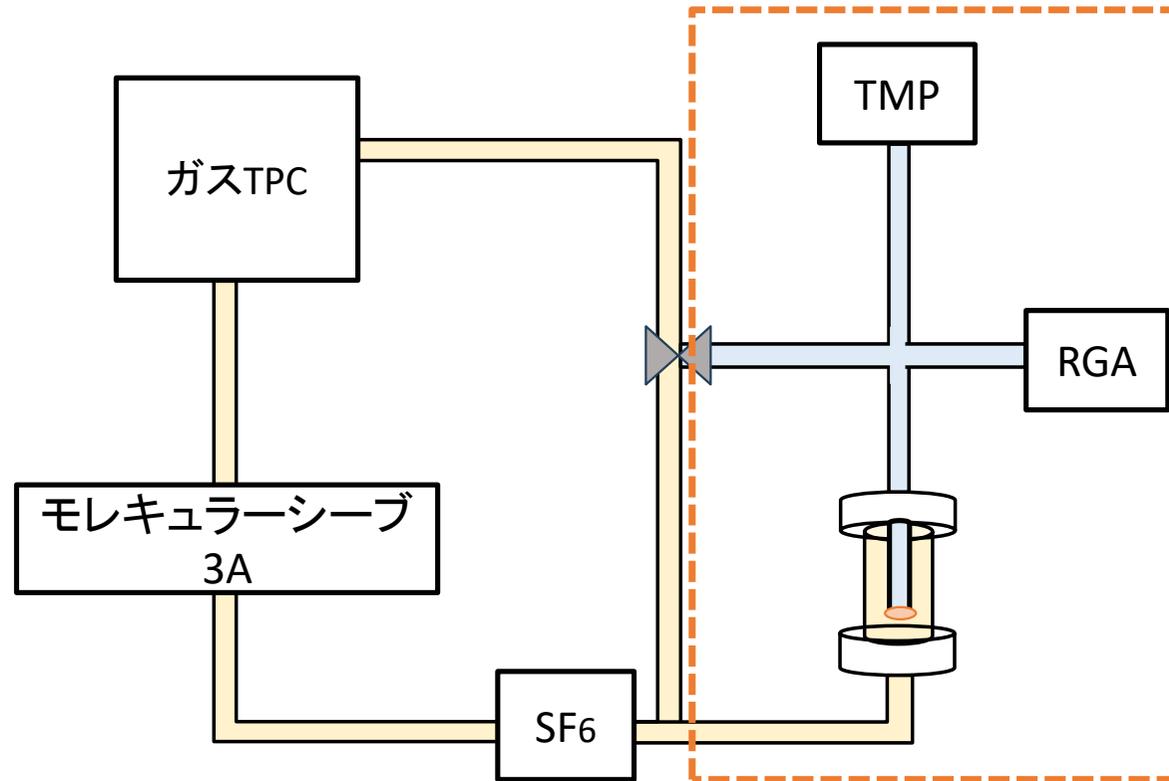
### ➤セットアップ



水を除去するMS3Aはすでに導入済み



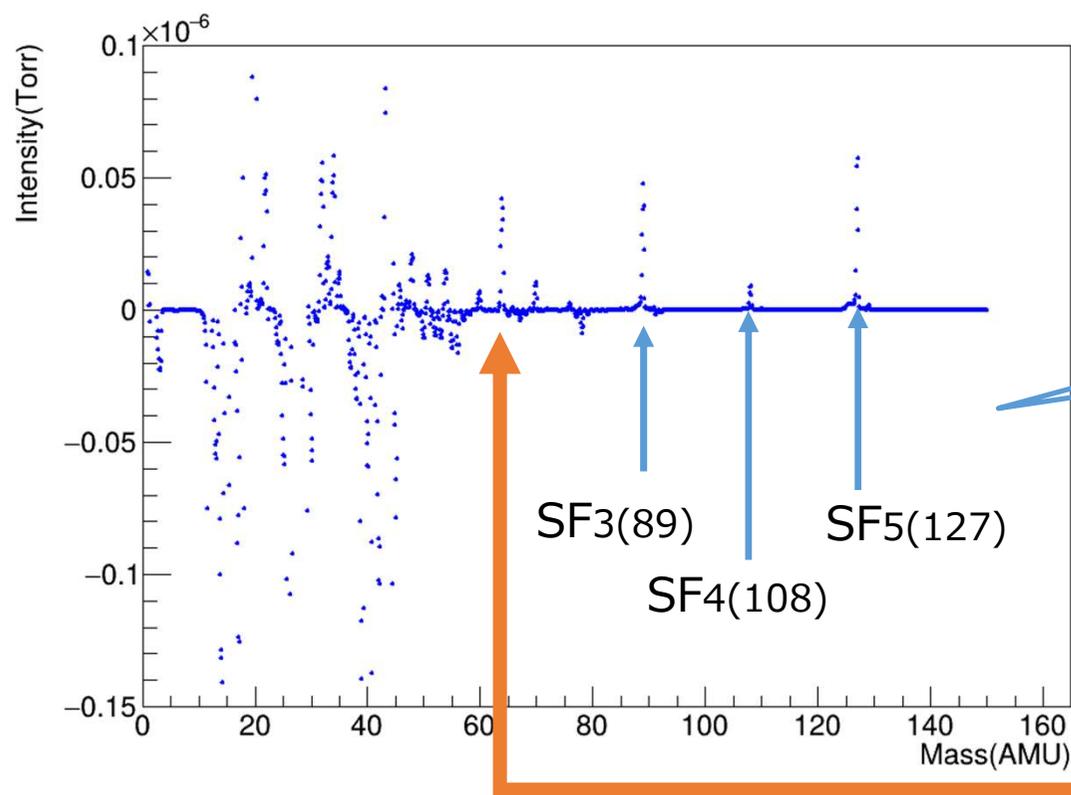
TPC & 循環系込み



長時間の測定によりチェンバー内の不純物調査を実施。

# 測定結果

- TPC & 循環込みのSF6の長期測定(約22 h)で時間が経つと明瞭にたつピークを確認
- SF6ガスの測定結果 - BGの測定結果



SF6ガス由来の信号をはっきりと確認!

分子量64  $\rightarrow$  エタノール(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)!?

- 今後、低分子量側のBG削減やエタノールのマイナリティピークへの影響の調査・対策へ!

## まとめ -陰イオンガスTPCの不純物組成評価-

- 陰イオンガスTPCを用いた暗黒物質探索実験のためのSF<sub>6</sub>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SF<sub>6</sub>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

# 陰イオンガスTPCに用いる 読み出しボードのノイズ評価

# SF6ガスを用いた暗黒物質探索における課題

SF5-による信号はSF6-に比べてとても小さい…

- 1 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



**TPC内のガスの不純物組成評価を行う**

- 2 ~~2つの信号のデータ取得の際、ダイナミックレンジを変える必要がある  
⇒読み出し基板にHG & LGのアンプを搭載することで解決~~

SF5-による信号を観測するためにはノイズを低くする必要がある



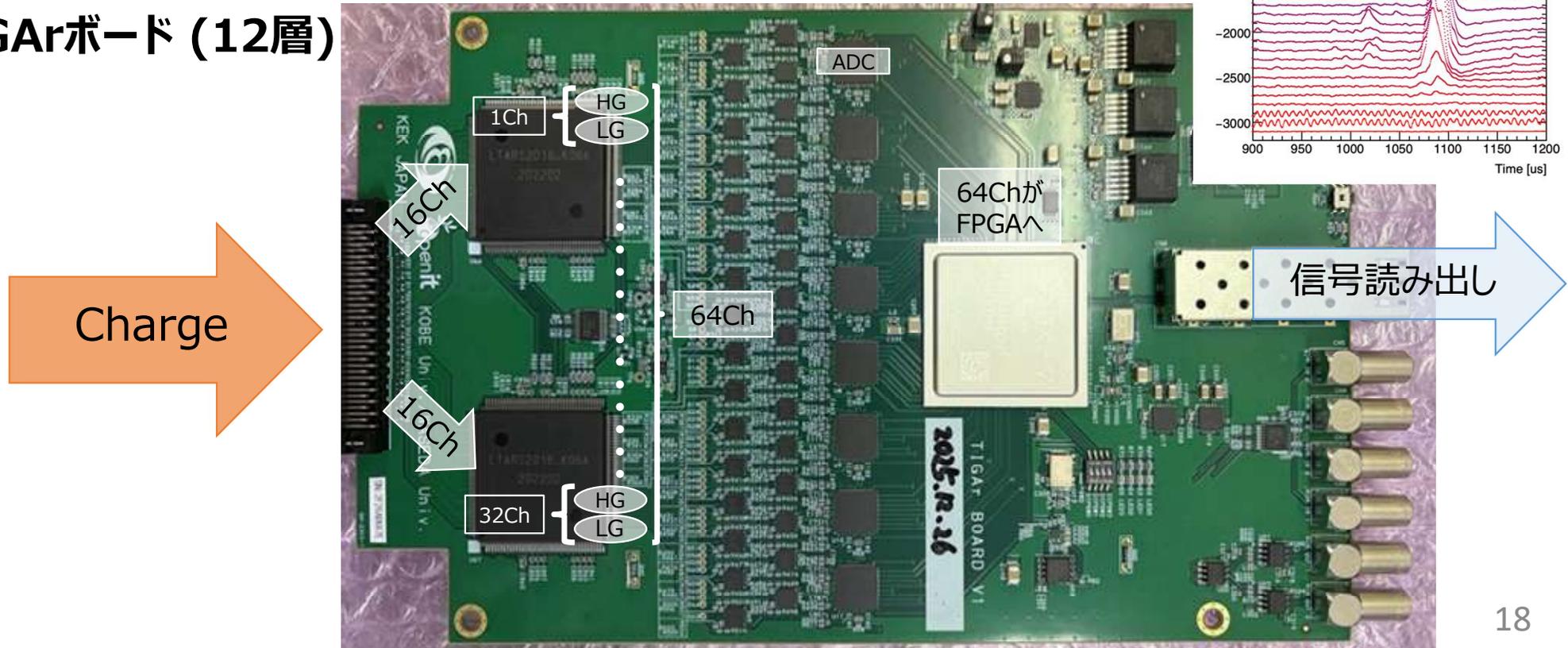
**ノイズ低減を目指し、読み出し基板を改良**

本研究で基板評価を実施!

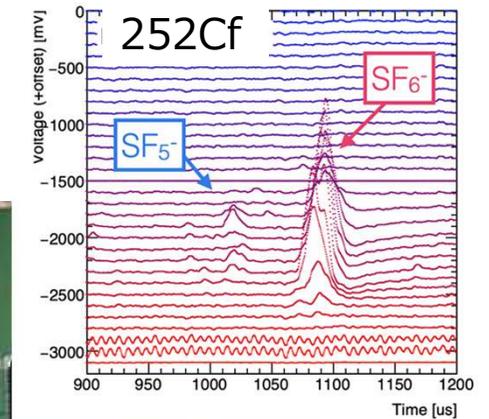
# TIGArボード

- 早稲田大が中心となって開発
- SF6を用いた探索を想定して改良されたアンプLTARS2018を搭載
  - マイノリティチャージ用 ⇒ High Gain
  - メインチャージ用 ⇒ Low Gain

## TIGArボード (12層)



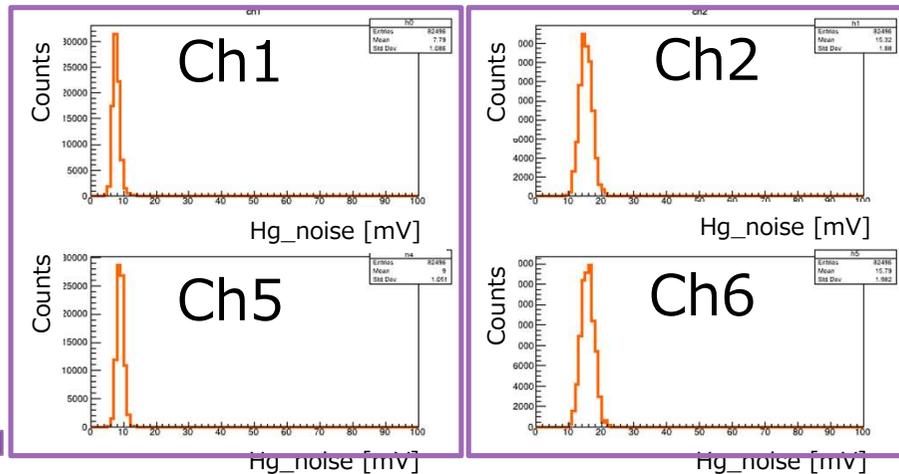
## ● 取得できる信号例



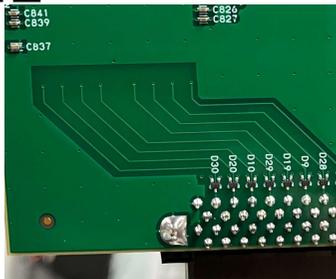
# TIGArボード 課題と原因

- 今までのTIGArボードの問題点

➡ 隣り合うCh毎にノイズの大きさが異なる



裏L12

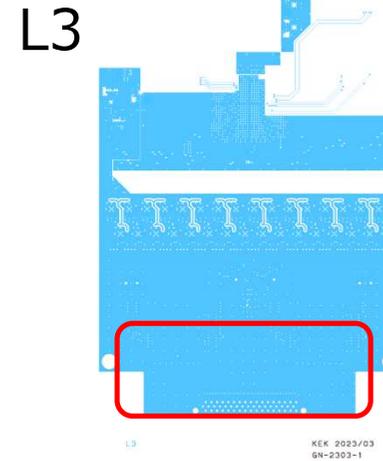


表L1



- 原因

➤ L3の電源層のメタルを抜いていないことで電源ノイズの影響を受けている



- 配線表 ⇒ L1
- 配線裏 ⇒ L12

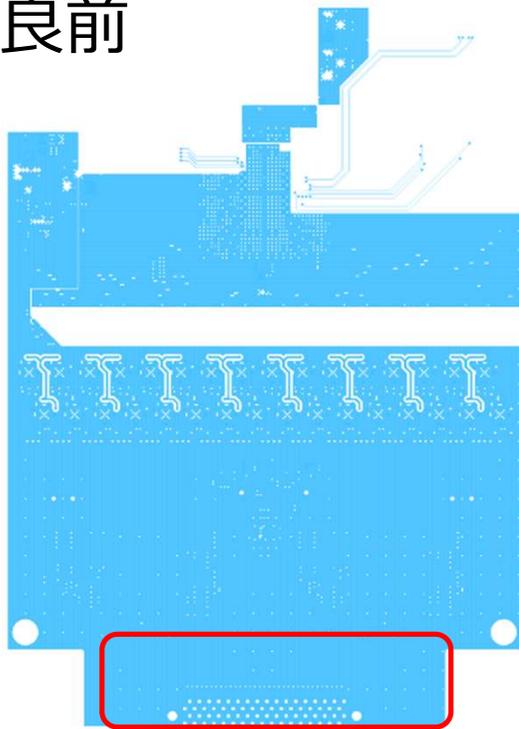
➡ L3との距離によってノイズの大きさに違いが生じる



# TIGArボード 改良

改良として…

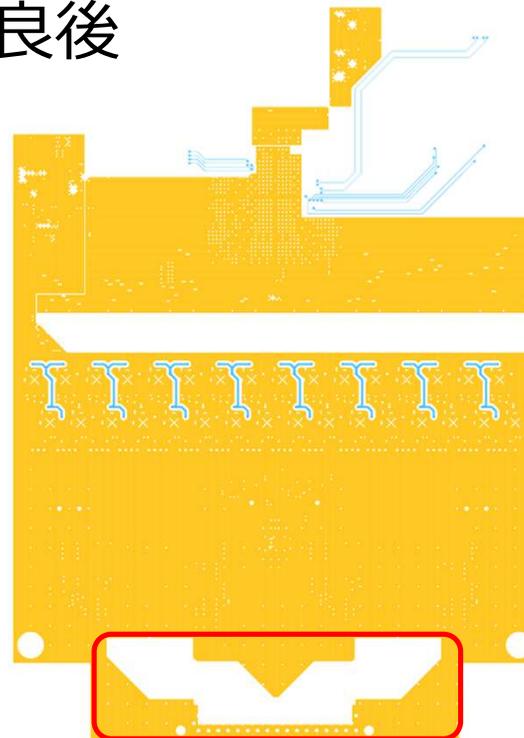
改良前



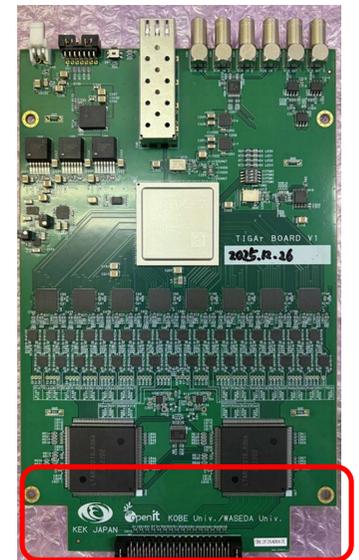
L3

KEK 2023/03  
GN-2303-1

改良後

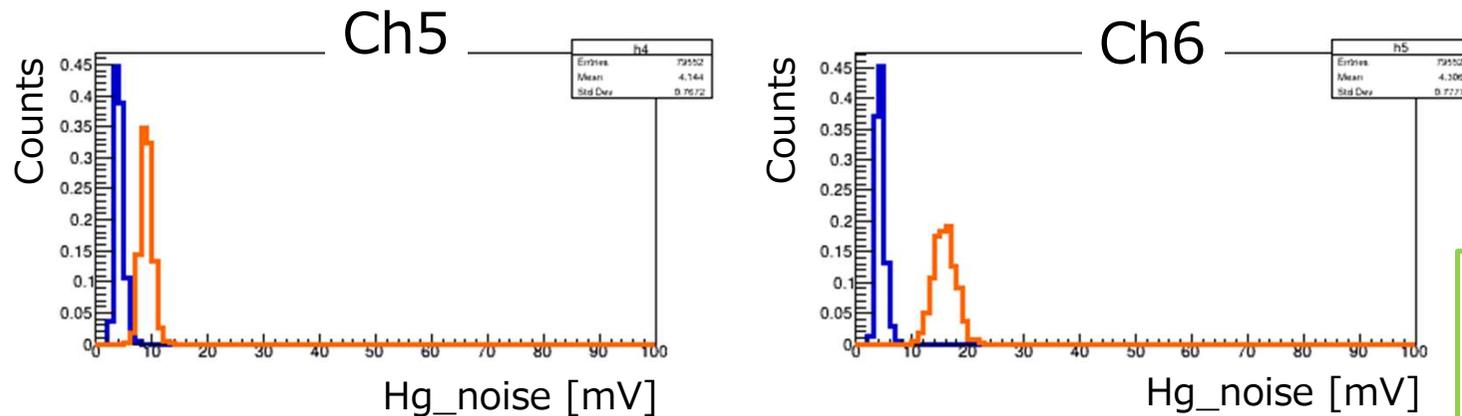


配線部分のメタル層を切り取る



# TIGArボード 改良前後のノイズ

## ● TIGArボード改良前後 結果



### ● 改良前

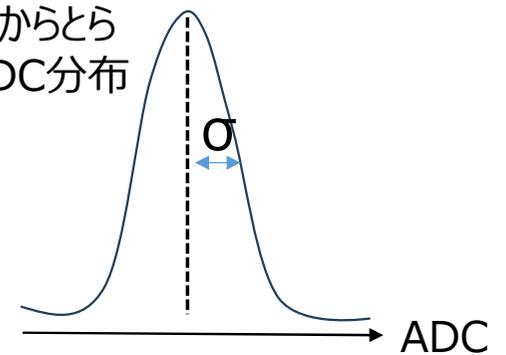
- 偶数Chと奇数Chとでノイズの大きさに違いが見られる

### ● 改良後

- 隣のCh同士での差がなくなった
- 全体的にノイズが小さくなった  
⇒ L3の電源層は裏配線にも影響を及ぼしていたことが分かる

➤ 測定で得られたスペクトルの $\sigma$ を横軸としている

1波形からとられたADC分布



# TIGArボード ノイズ評価方法

- Detector capacitance (= 検出器の容量) に相当を入れてノイズ評価を行う

神戸大学 中村拓馬さんの修論より



測定により求める値

- $Q = CV$ よりDetector capacitanceの増加に伴いノイズも増える

(equivalent noise charge:ENC)  
ノイズの大きさを電子数に換算する

$$ENC = \frac{\sigma_V [V]}{Gain \left[ \frac{V}{C} \right]} \times \frac{1}{e [C]}$$

HG : 10 mV/fC  
LG : 0.5 mV/fC

この上限値よりも大きい  
信号が必要となる

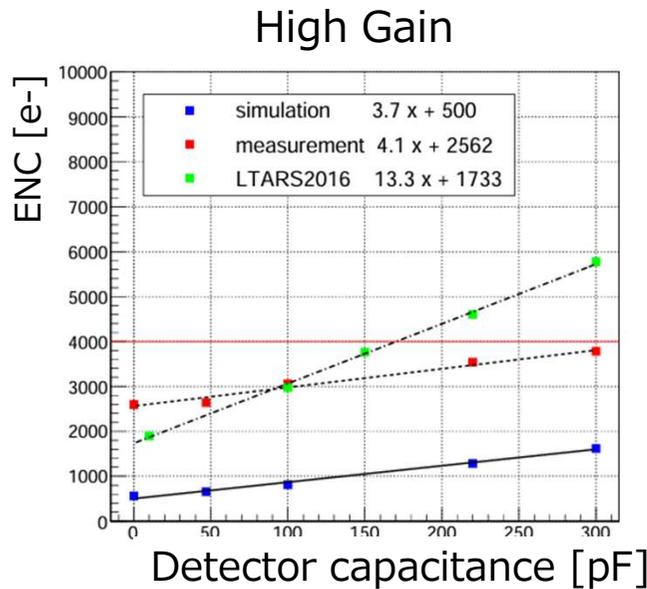


図 6.24 HG/slow の ENC の検出器容量依存。横軸が検出器容量、縦軸が ENC。

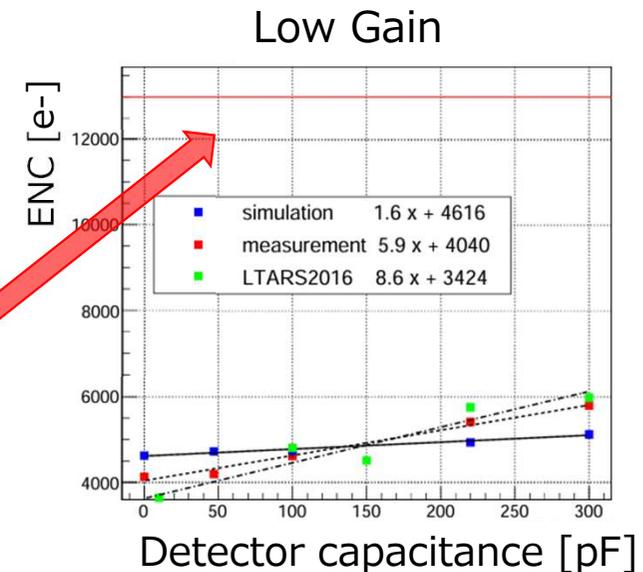
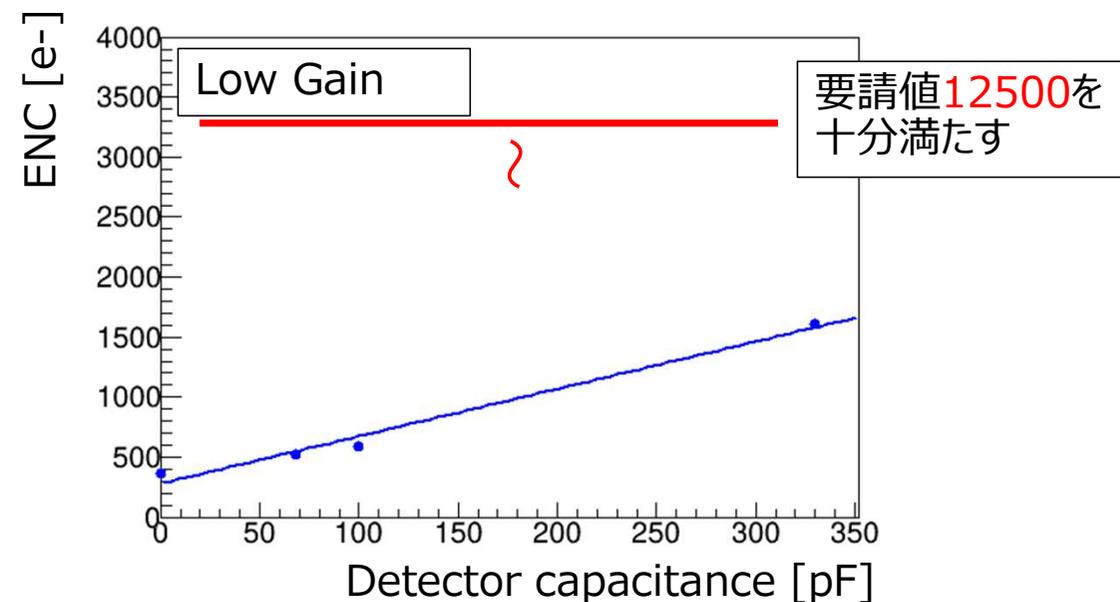
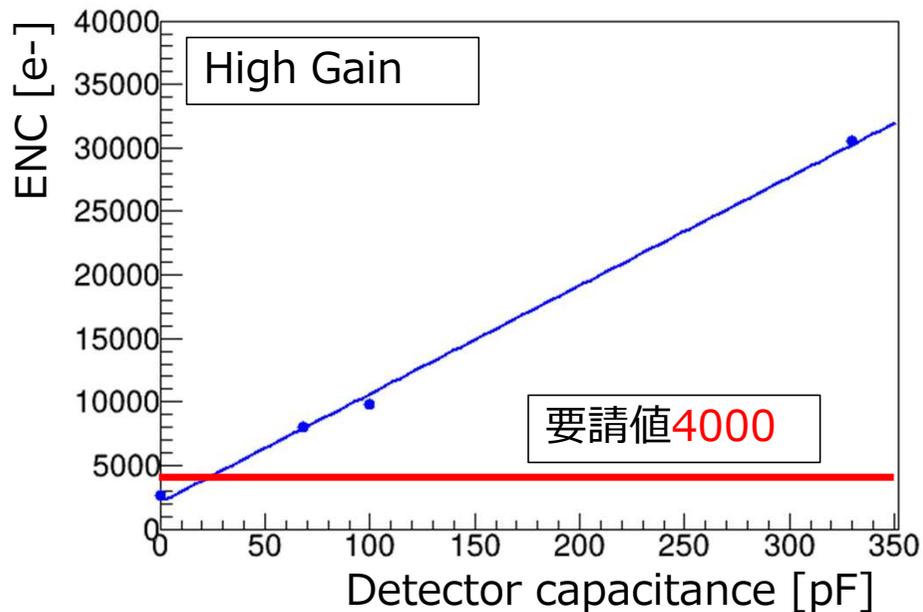


図 6.25 LG/slow の ENC の検出器容量依存。横軸が検出器容量、縦軸が ENC。

# TIGArボード ノイズ評価 結果

## ●HGとLGのある1ChのENC-Detector Capacitance プロット

- 要請値(赤線)はNEWAGEのNI $\mu$ TPCで使用を想定している30 cm<sup>2</sup>×30 cm<sup>2</sup>の $\mu$ -PICに対応した300 pFとしている



- LGでは要請値を満たしたが、HGでは満たさないという結果になった

- 高いゲインで検出器を運用する、遮蔽することなどでノイズをさらに落とす工夫が必要

## まとめ -読み出しボードノイズ評価-

- 将来的に暗黒物質探索実験に使用予定の読み出し基板(TIGArボード)を製造  
⇒ 問題があったため、改良も実施
- 改良後のTIGArボードの性能評価を実施して改良前後での変化があるかを確認
- 改良後のTIGArボードでノイズ評価を実施



陰イオンガスTPCを用いた暗黒物質探索へ!!

Back up

# RGA 検出原理

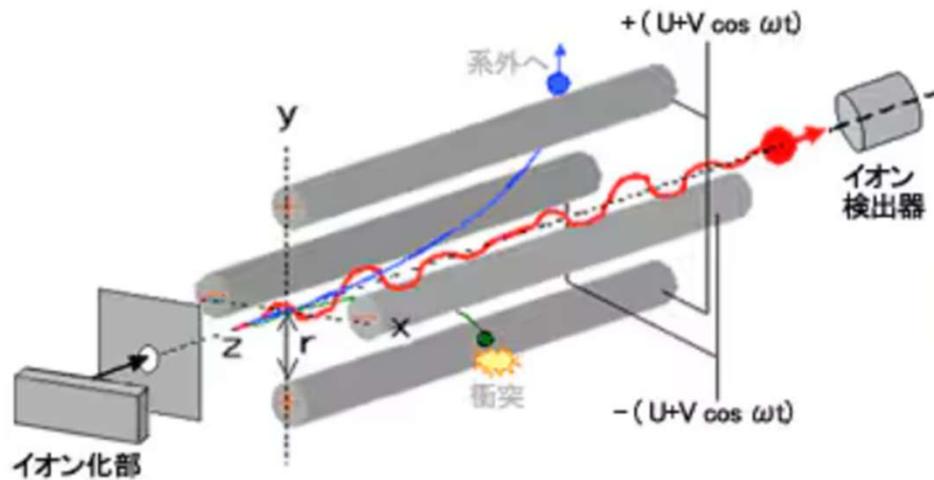


図1.四重極型MSの模式図

直流電圧：U  
高周波交流電圧：Vcosωt  
(ω：高周波振動数)

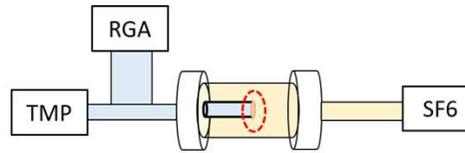
イオン化部で生成したイオンは数十ボルトの比較的弱い電圧でZ軸方向に加速され、細孔を通り四重極の領域に進入します。四重極には、互いに対向する電極に同じ極性の電圧が、また隣接する電極に正負逆の電圧がかけられています。それぞれの電極に直流電圧Uと高周波交流電圧V cos ωt (ω：高周波の振動数 t：時間) とを重ね合わせてかけると、四重極の中には高速で位相の変化する電場が生じます。

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。

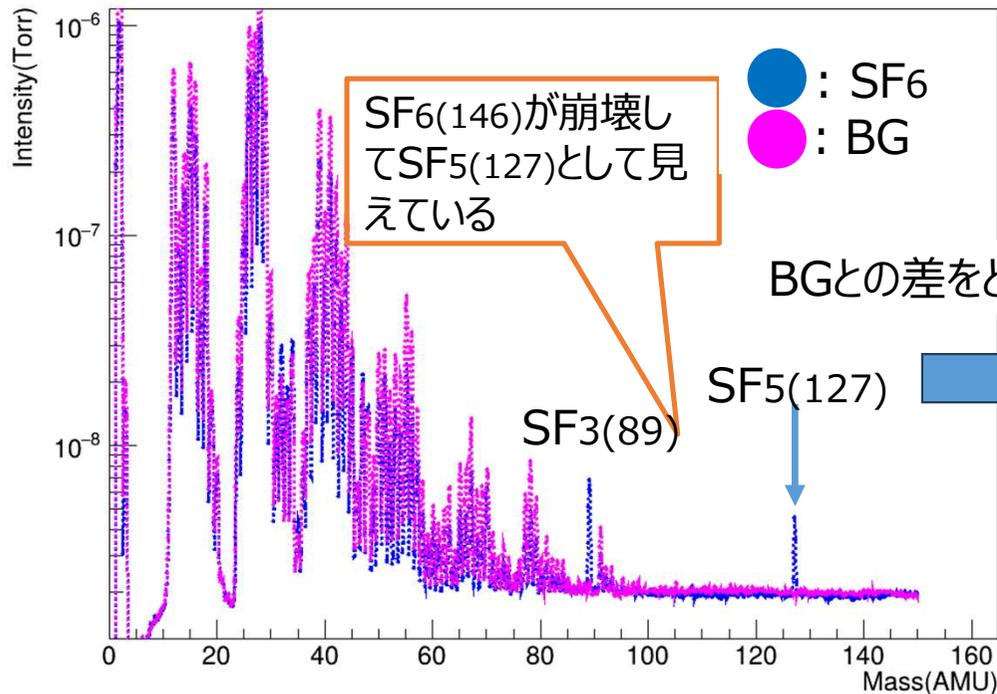
ある特定範囲の質量電荷比(m/z)のイオンは"安定な振動"状態になり、四重極を通り抜けて検出器に到達

[四重極型, イオントラップ型, 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](#)

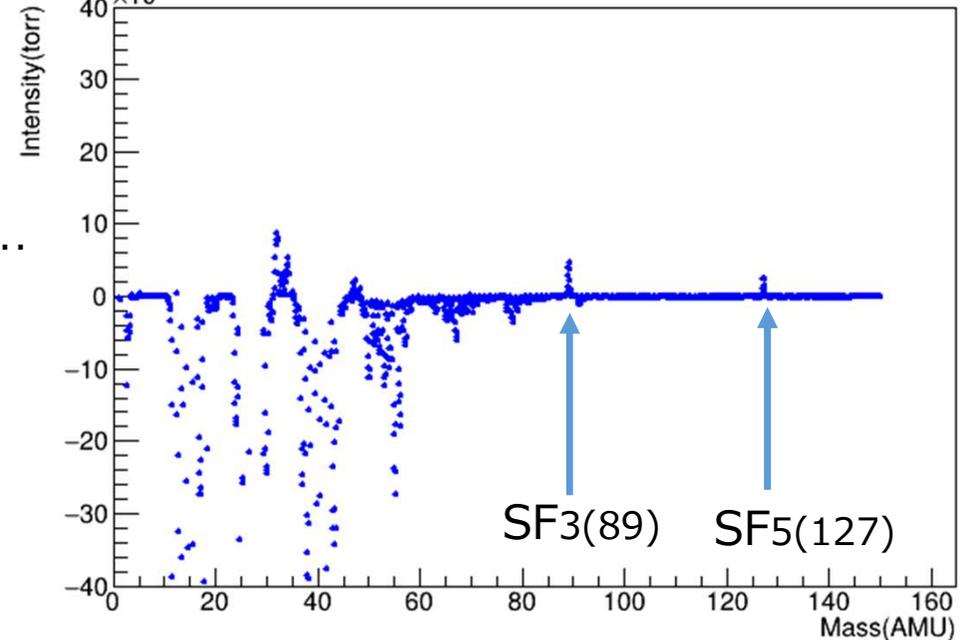
# 測定結果(配管のみ)



## ● 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!

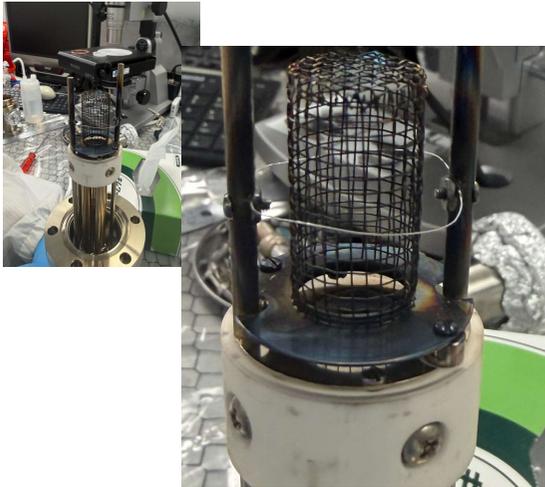
# BG削減

BG削減は必須…

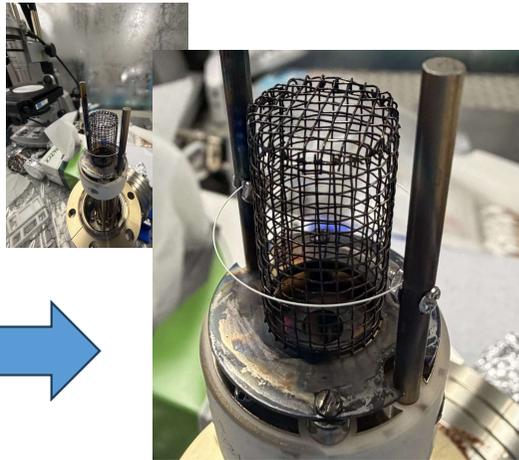
ということですのですぐにできるBG削減方法としてベーキングやRGA内の清掃を実施

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

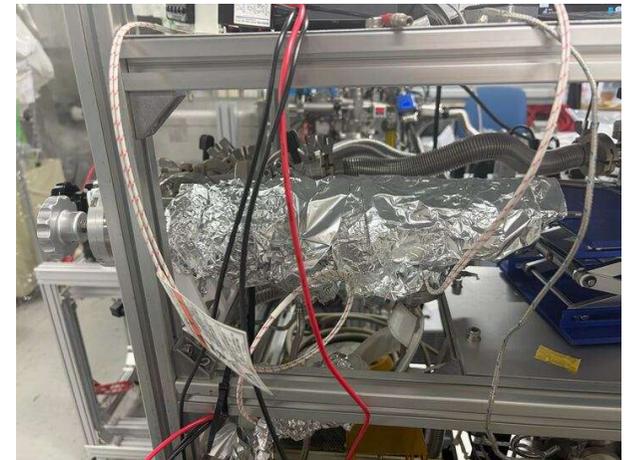
before



after



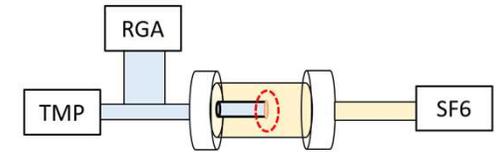
ベーキングしている様子



240°Cで2晩ほど実施  
(前回は215°C)

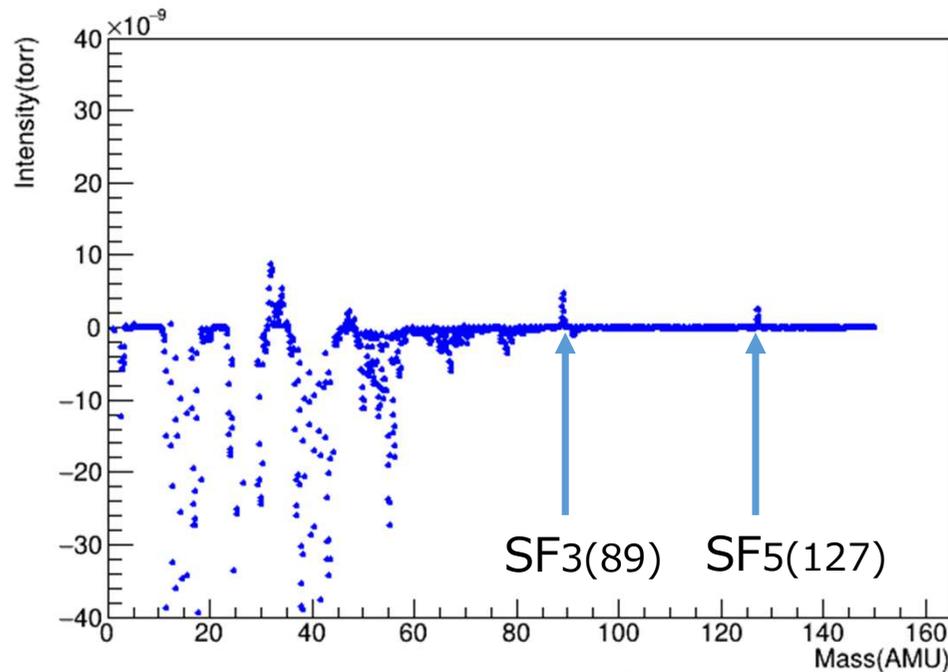
これらの取り組みに効果があったのかを前後で比較！

# BG削減前後での比較(配管のみ)

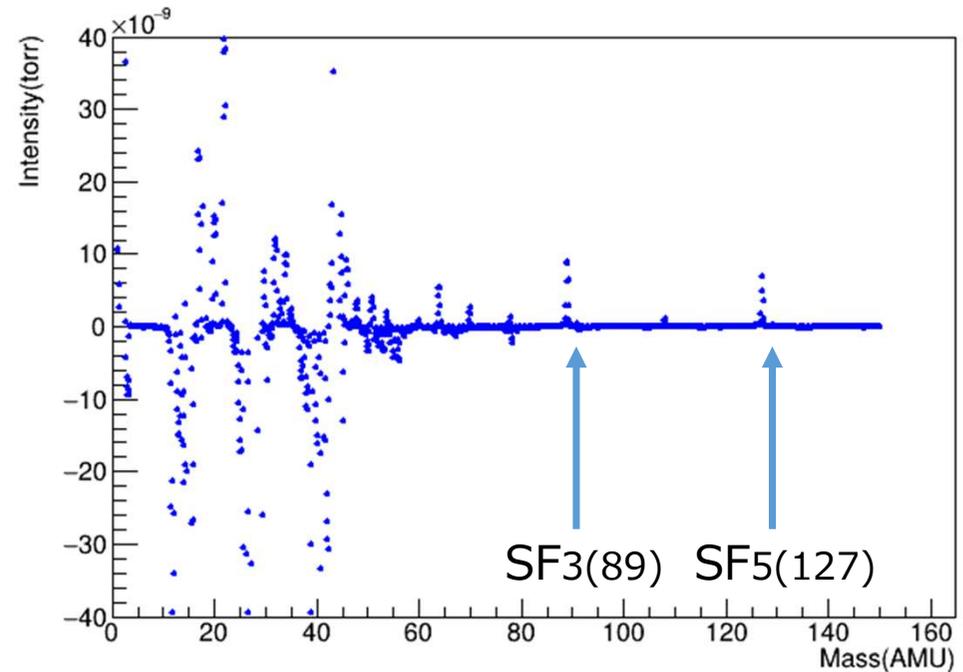


- BG削減前後でのSF<sub>6</sub>とBGスペクトルの差をとり、比較してみた

BG削減前



BG削減後



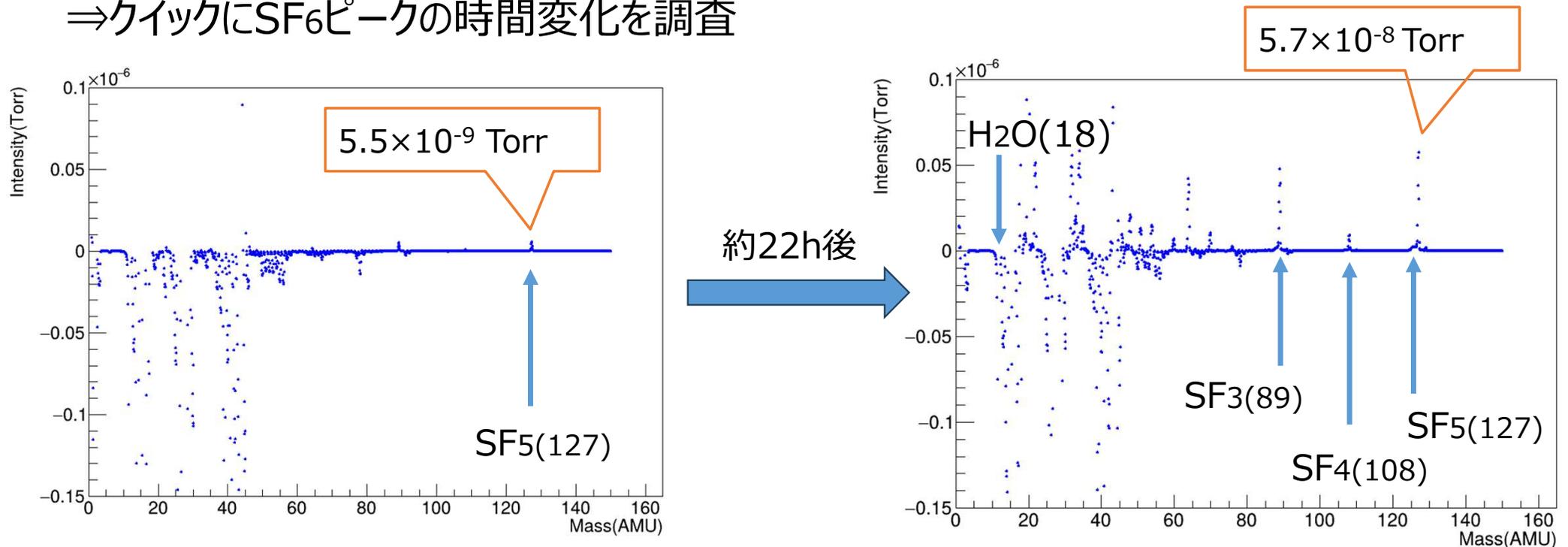
- わずかにSF<sub>3</sub>(89), SF<sub>5</sub>(127)のピークが大きくなっている
- 低分子量側についてはさらなるBG削減が必要



この結果を踏まえてTPCにつないで変化があるかを調査

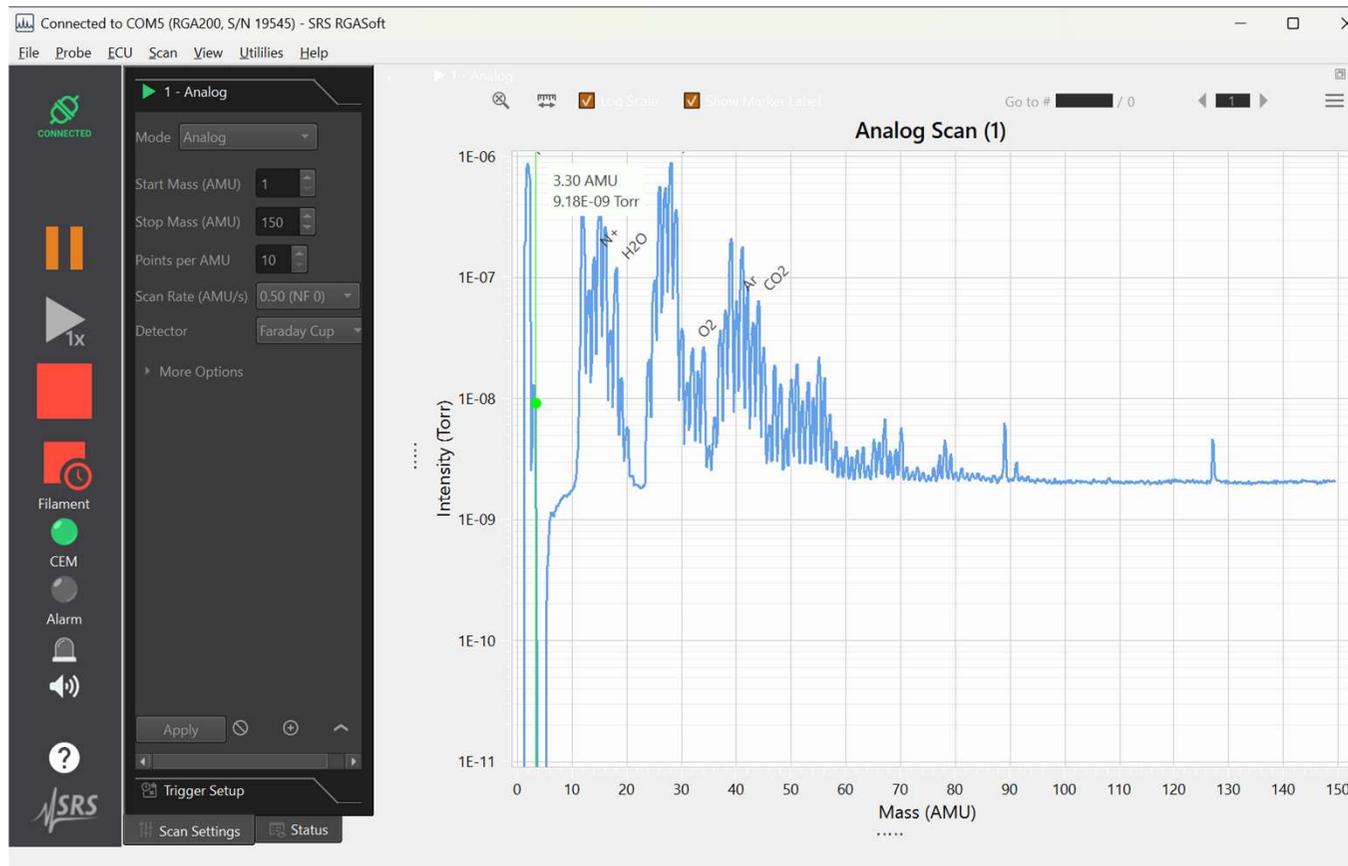
# SF<sub>6</sub>ピークの時間変化(TPC込み)

- 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SF<sub>6</sub>ピークの時間変化を調査



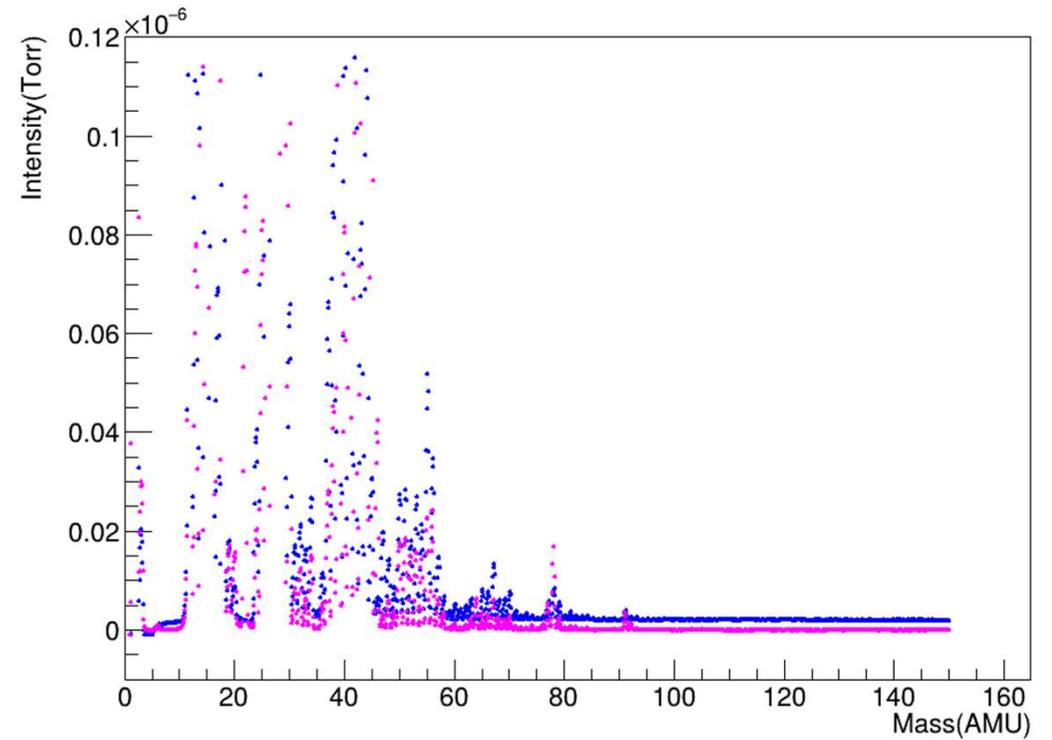
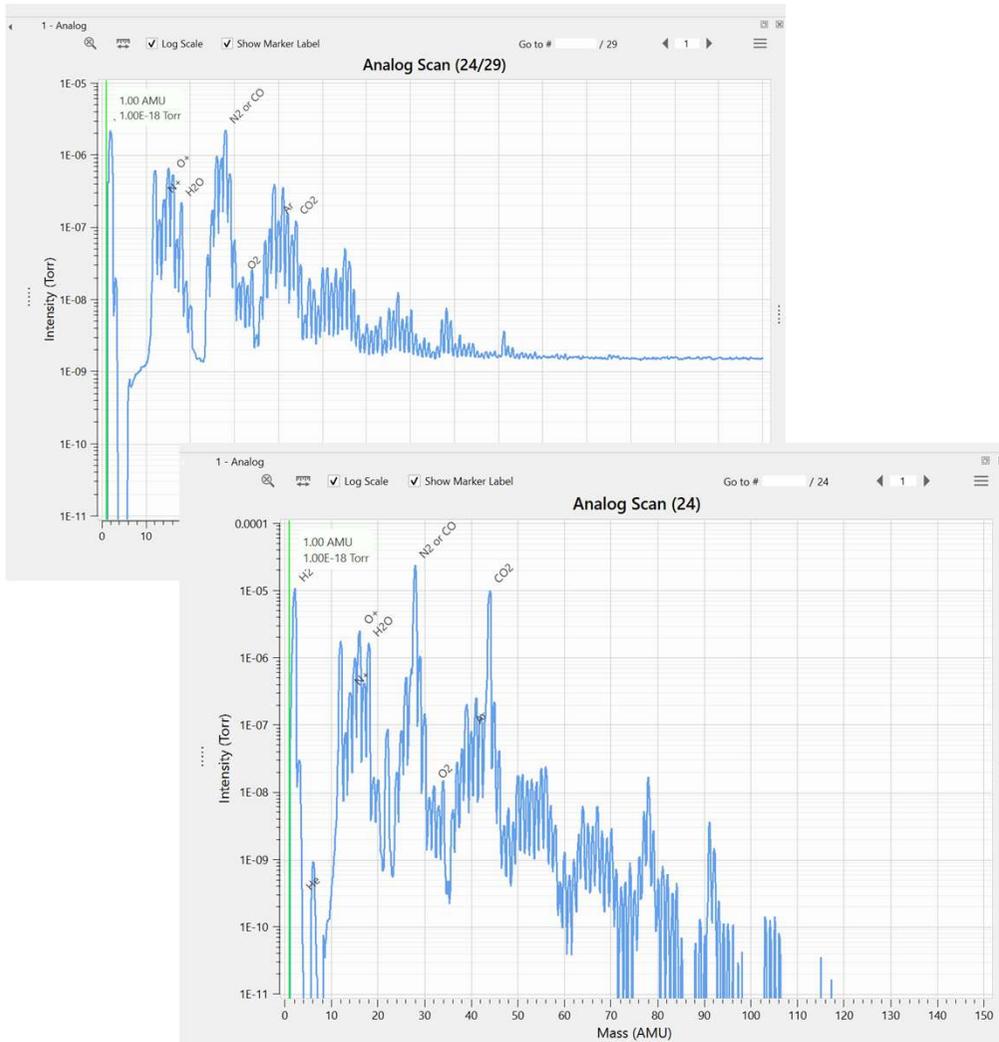
- SF<sub>5</sub>に注目すると分圧に一桁以上の差があることを確認
- 時間が経つとSF<sub>6</sub>ガス由来のSF<sub>5</sub>に加えてSF<sub>4</sub>, SF<sub>3</sub>の信号も明瞭になった
- 除去しているはずの水が存在することや、低分子量側の削減については今後の課題

# BG削減前のRGA生データ



変な平地が見える

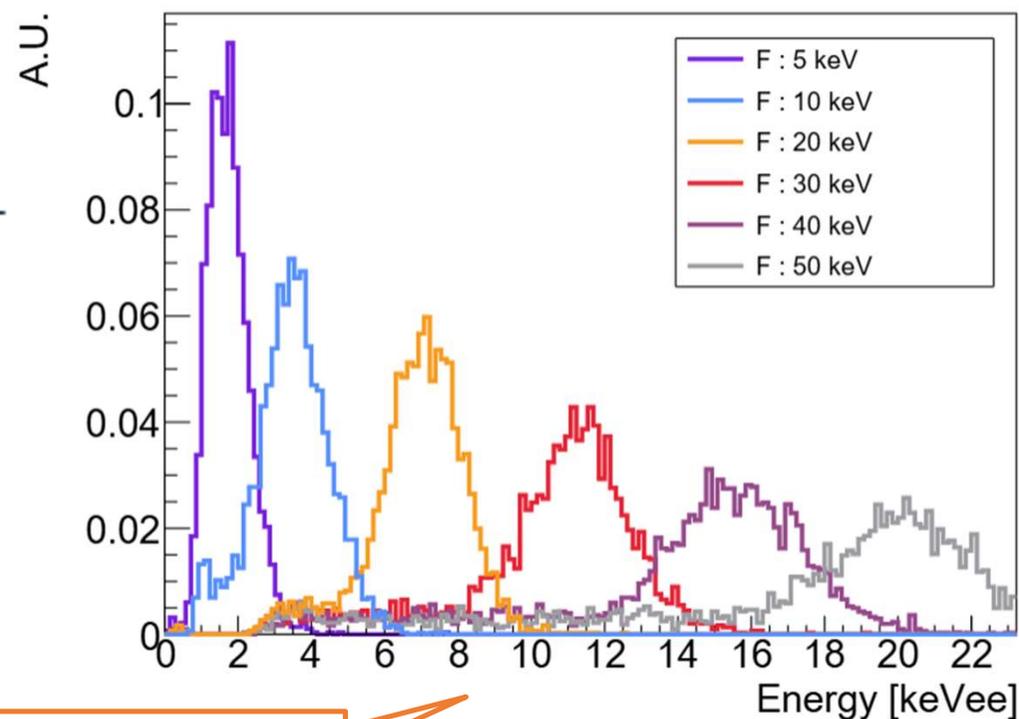
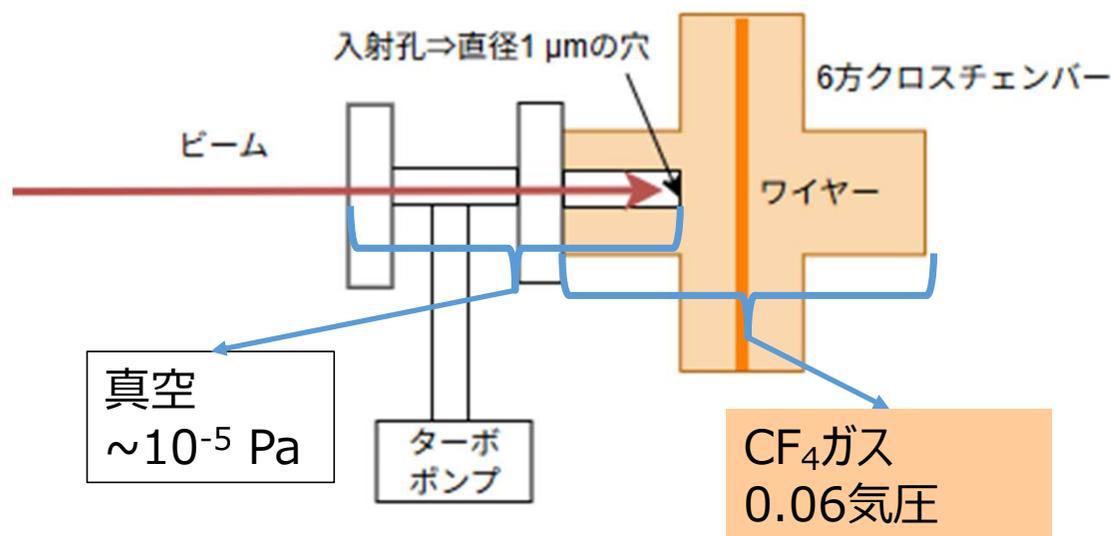
# BG削減後の測定結果 —BG比較—



## c.f. 小さな穴を用いた他の実験

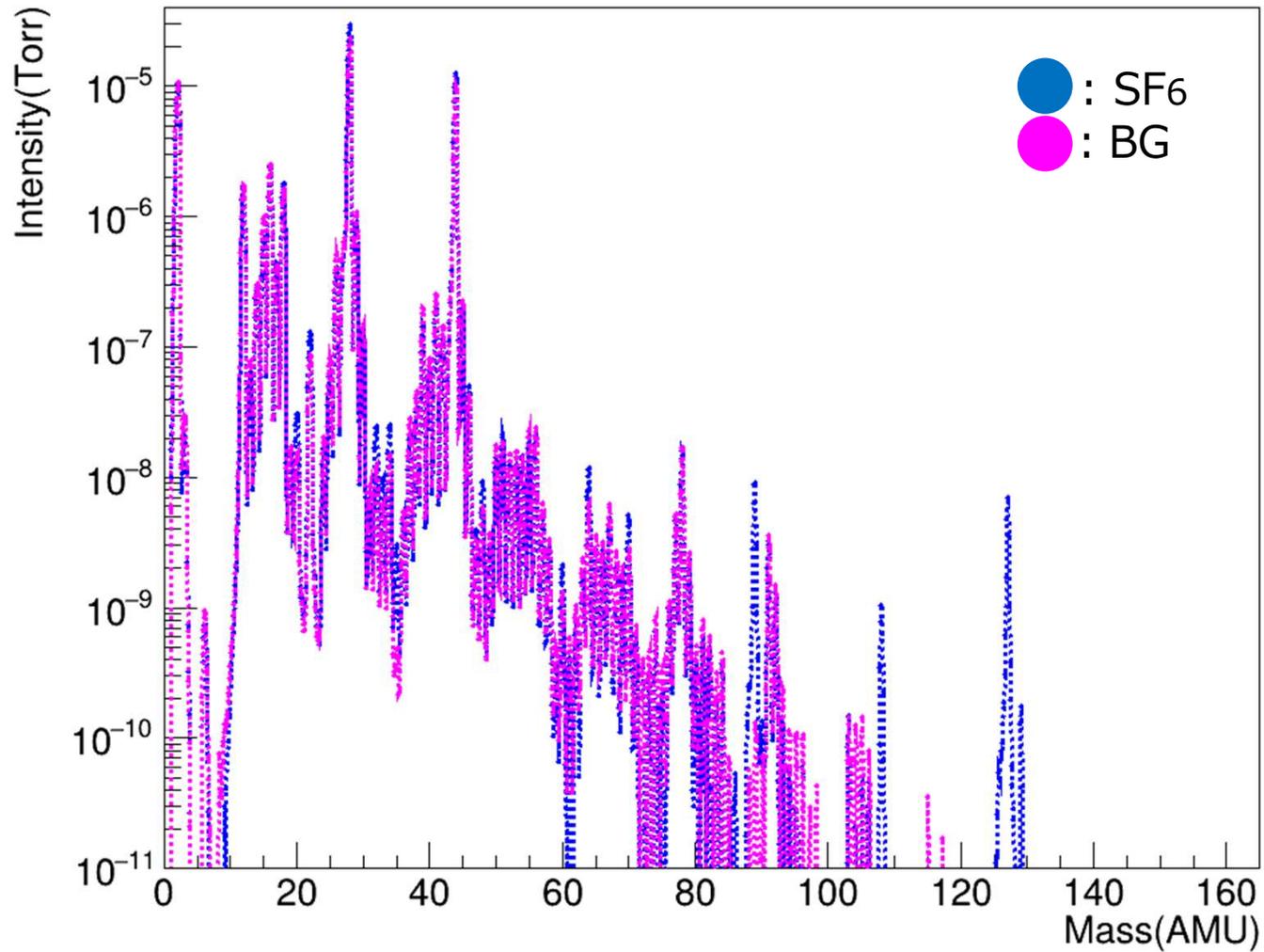
- 1  $\mu\text{m}$ の穴を用いて低速イオンビームをワイヤーチャンバーに入射させることに成功
- FイオンのIonization yield測定 @神奈川大

### ➤ 1 $\mu\text{m}$ の穴を用いたイオンビーム注入機構

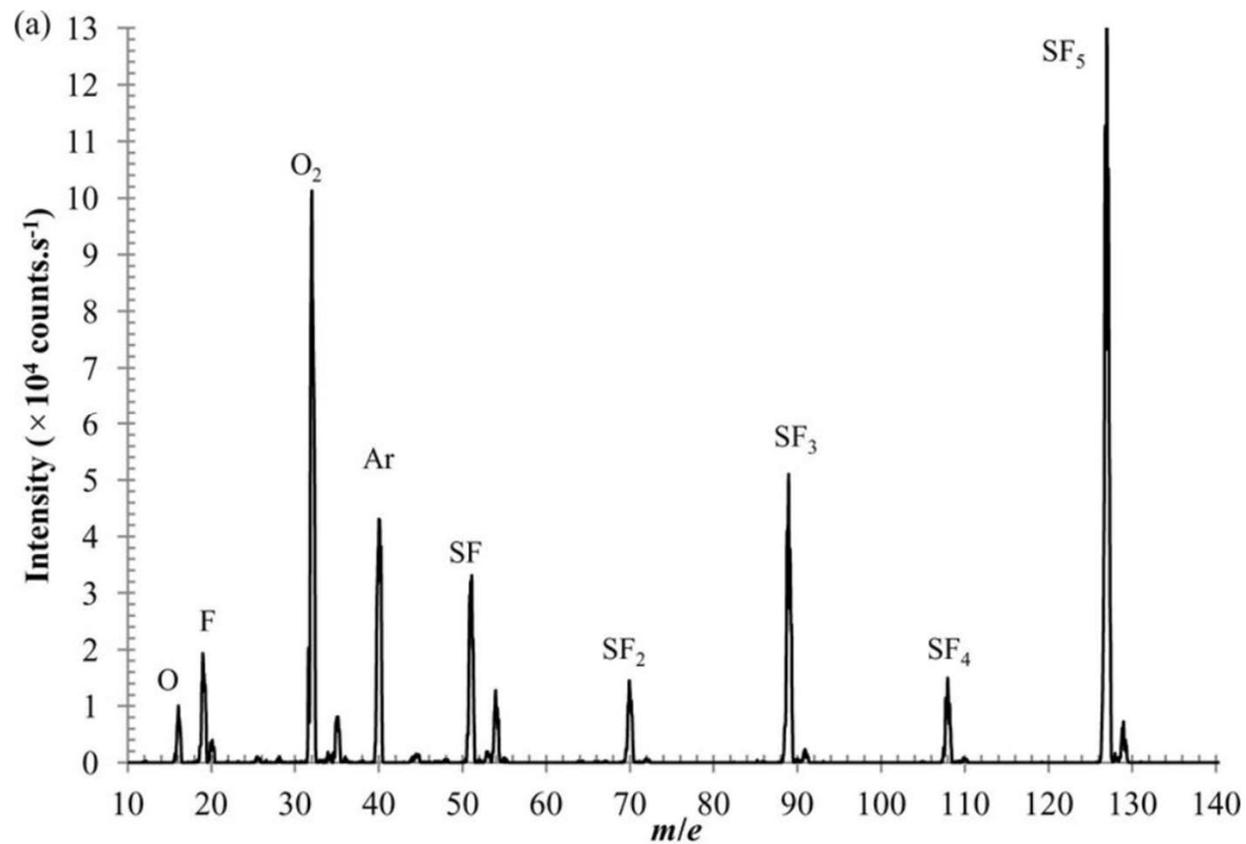


エネルギーに応じた信号を確認

# BG削減後のSF<sub>6</sub>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

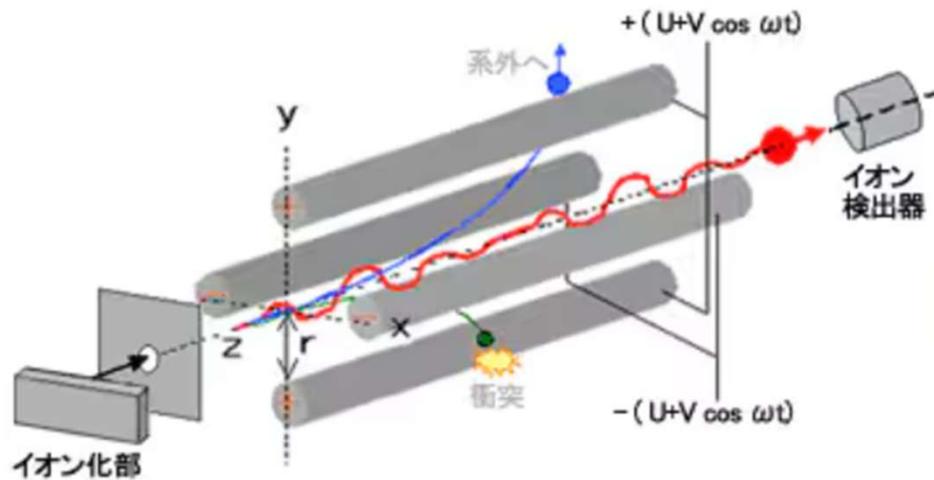


図1.四重極型MSの模式図

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

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

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  $\omega t$  ( $\omega$ ：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。

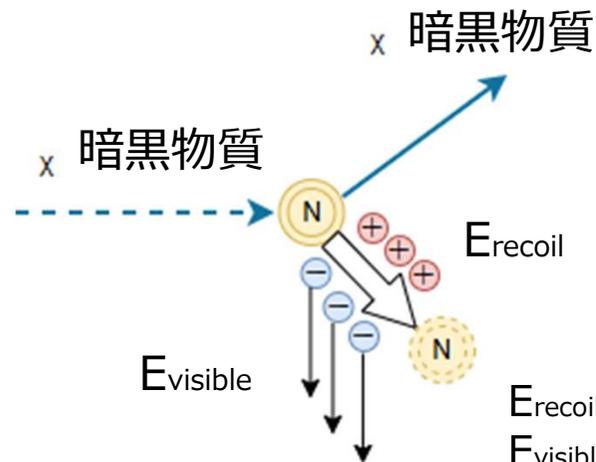
この電場により通過するイオンはX、Yの軸方向に振動します。このとき特定の条件 (U, V,  $\omega$ ) が与えられると、**ある特定範囲の質量電荷比(m/z)のイオンは"安定な振動"状態になり、四重極を通り抜けて検出器に到達できます。**その他のm/zを持つイオンは不安定な振動を行い、電極に衝突したり、系外にとびだし検出されません。

[四重極型, イオントラップ型, 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

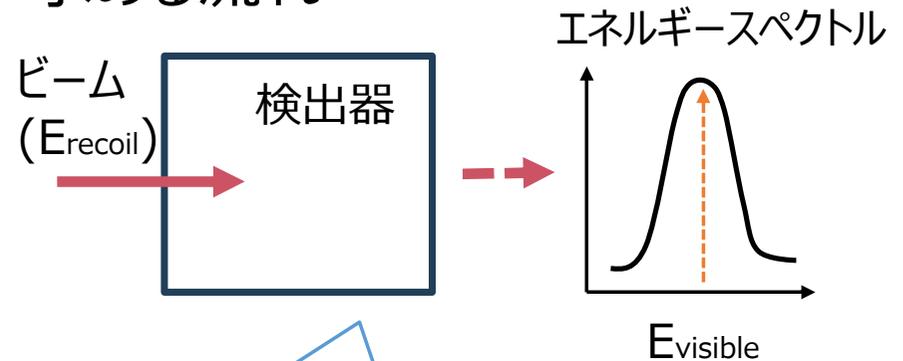
## ●暗黒物質直接探索

- ▶反跳原子核が電離によって失うエネルギーを観測



$E_{recoil}$  : 原子核反跳エネルギー  
 $E_{visible}$  :  $E_{recoil}$ のうち電離によって失われたエネルギー  
 $Y$  : Ionization Yield

## ●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！

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

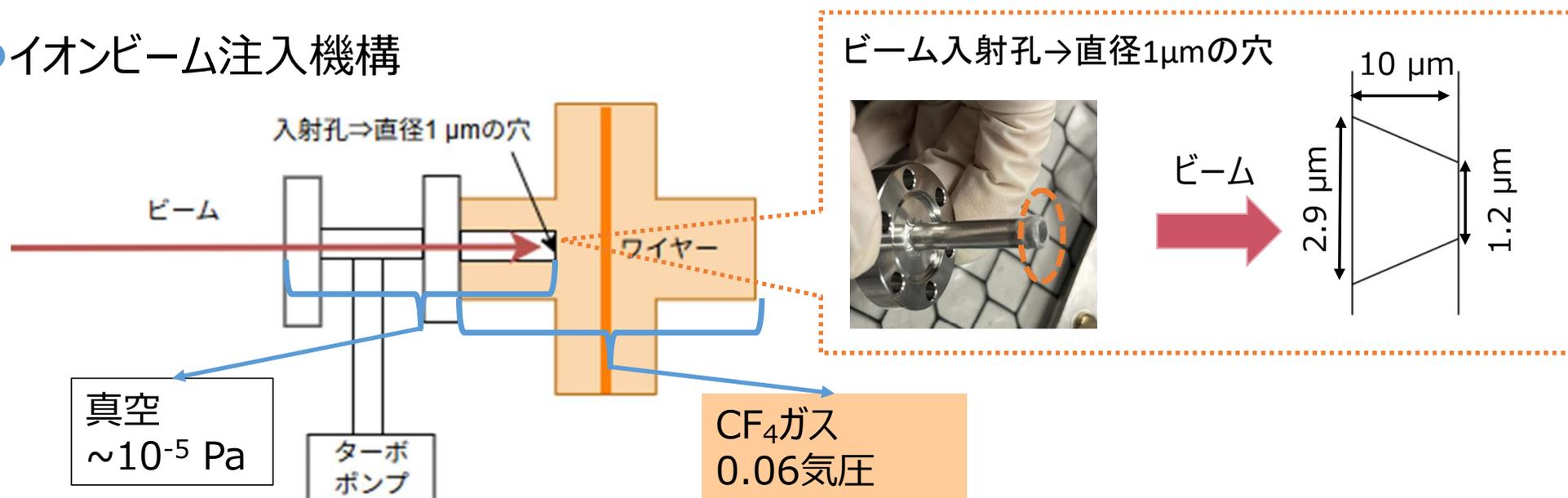
# ビーム入射孔

## ●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 $\mu\text{m}$ の穴を通した真空とガス領域の破れがないことを確認

マイノリティチャージとメインチャージという大きさが 30 倍程度異なる信号を 1 つの同じ増幅率で読み出すことは現実的でないため、マイノリティチャージ用には High Gain(以下 HG と表記)、メインチャージ用には Low Gain(以下 LG と表記) の回路をそれぞれ用意することを想定して要請値はまとめられた。雑音等価電圧 (equivalent noise charge:ENC) に関しては最小入力電荷を対雑音信号比 (Signal to noise ratio:S/N) $S/N = 10$  で読み出すことを要請している。時定数 (本論文では信号の立ち上がりからピークまでの時間を「時定数」と表記する。) の要請値は電荷収集効率の時定数依存性を測定することにより決定された。LArTPC2016\_K01 の開発は LArTPC との共同開発ということもあるため、時定数に関しては LArTPC からの要請である  $1\sim 4\mu\text{s}$  と NI $\mu$ TPC からの要請である  $4\sim 7\mu\text{s}$  を選択できるようになっている。以下本論文では時定数  $1\sim 4\mu\text{s}$  を「fast」、 $4\sim 7\mu\text{s}$  を「slow」と表現する。

### 6.1.1 LTARS2018\_K06A

表 6.1 に LTARS2018\_K06A 製作に対する要請値を示す。ここで検出器容量としては NEWAGE の  $\text{NI}\mu\text{TPC}$  で使用を想定している  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  の  $\mu\text{-PIC}$  に対応した  $300 \text{ pF}$  という値とした。要請値は LTARS2016\_K01 のものを基にして策定し、ENC については見直しを行った。ENC (Equivalent Noise Charge) とは等価雑音電荷のことであり、ノイズの大きさを示す指標となる。LTARS2016\_K01 では対雑音信号比 (signal to noise ratio: S/N) を 10 で最小信号を読むという想定で開発がなされていた。ここで、雑音は電圧分布の標準偏差として定義する。これは必要以上に安全を見た数字であると考えた。本研究ではノイズを電圧分布の標準偏差として測定を行うため、S/N が 5 であったとしても  $10 \text{ MHz}$  でサンプリングを行うと仮定すると、1 ストリップあたりに最小信号程度のノイズが  $10 \text{ Hz}$  で乗るだけである。実際の測定では飛跡を読み出すため、近接した複数のストリップからの同時計測を行うため、この程度のノイズでは測定に影響が出ないと考えて ENC の要請値 (許容値) を LTARS2016\_K01 の時の倍に設定した。表中には時定数という項目があるが、本論文では時定数とは信号の立ち上がりからピークまでの時間を言う。この時定数の項目に 2 種類の値を入れているが、これは LTARS2018\_K06A が液体アルゴン検出器開発グループと  $\text{NI}\mu\text{TPC}$  のそれぞれの要請に応じて時定数の切り替えを可能とするということを示している。本論文では  $4 \sim 7 \mu\text{s}$  を fast と呼ぶこととし、主に、 $\text{NI}\mu\text{TPC}$  からの要請である slow で動作させた時の性能につ

表 6.1 LTARS2018\_K06A の要請値一覧

	High Gain (マイノリティチャージ)	Low Gain (メインチャージ)
最小信号	3 fC	100 fC
ENC	<4000(0.6 fC)	< $1.3 \times 10^5$ (20fC)
ダイナミックレンジ	-80 fC、80 fC	-1600 fC、1600 fC
ゲイン	10 mV/fC	0.5 mV/fC
時定数	4~7 $\mu\text{s}$ / 1~4 $\mu\text{s}$	4~7 $\mu\text{s}$ / 1~4 $\mu\text{s}$

# SF<sub>6</sub>を使うことでRn起源のBG減へ！！

- 現在NEWAGEを悩ませているBG源 ⇒ “Rn”
- Rnは6 MeVのα線を放出して崩壊  
⇒ ターゲットとしているエネルギー領域は keV オーダーなので分離できない？



- 実際は検出器の上部や下部の壁付近で崩壊して、壁で止まり、エネルギーを低く落としてしまう事象がある



- 絶対位置の飛跡再構成が可能になるとそれらの事象をカットできる！  
(今だと相対位置しか分からないのでできない)

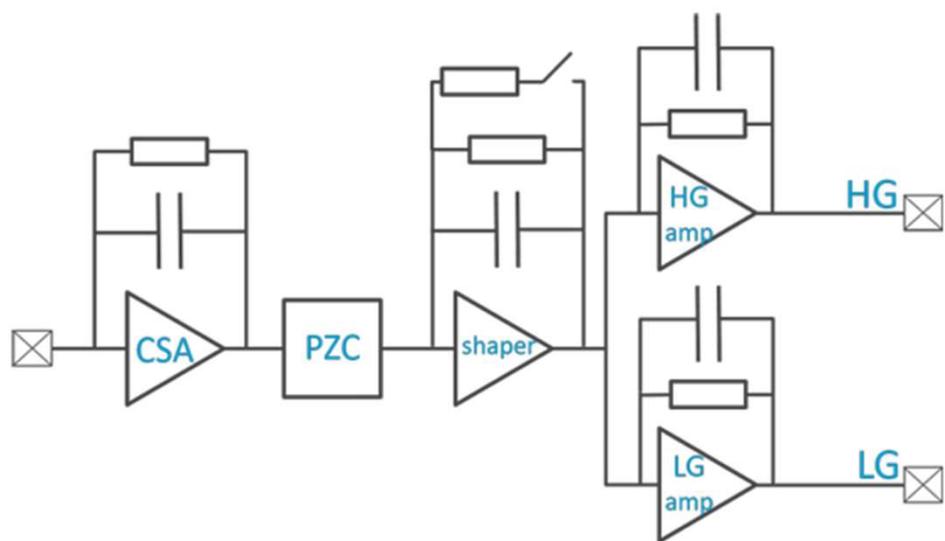


図 5.1 MT 回路のブロック図 [34]

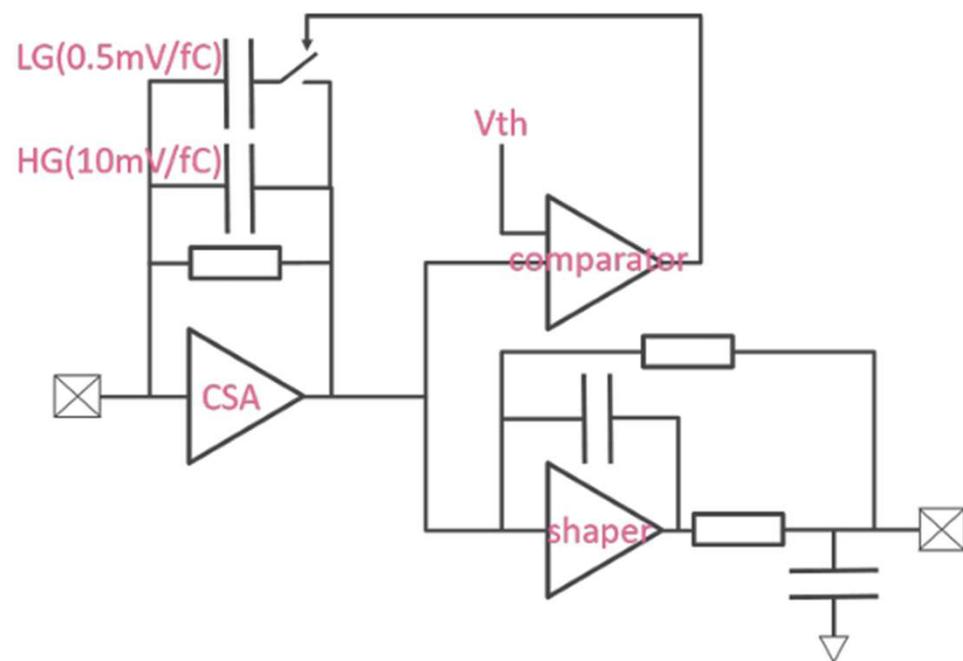


図 5.2 TK 回路のブロック図 [34]

## 7.2 NEWAGE2018 RO

LTARS2018\_K06A に対して性能評価を行い、ダイナミックレンジは LG においてわずかに達成することができなかったものの、問題とされていたノイズに関しては要請値を達成することが確認できた。この結果より LTARS2018\_K06A は実際の測定でも使用することが可能であると判断し、NI $\mu$ TPC で用いるための測定用のアナログボード “NEWAGE 2018 RO” を製作した。製作した基板を図 7.2 に示す。

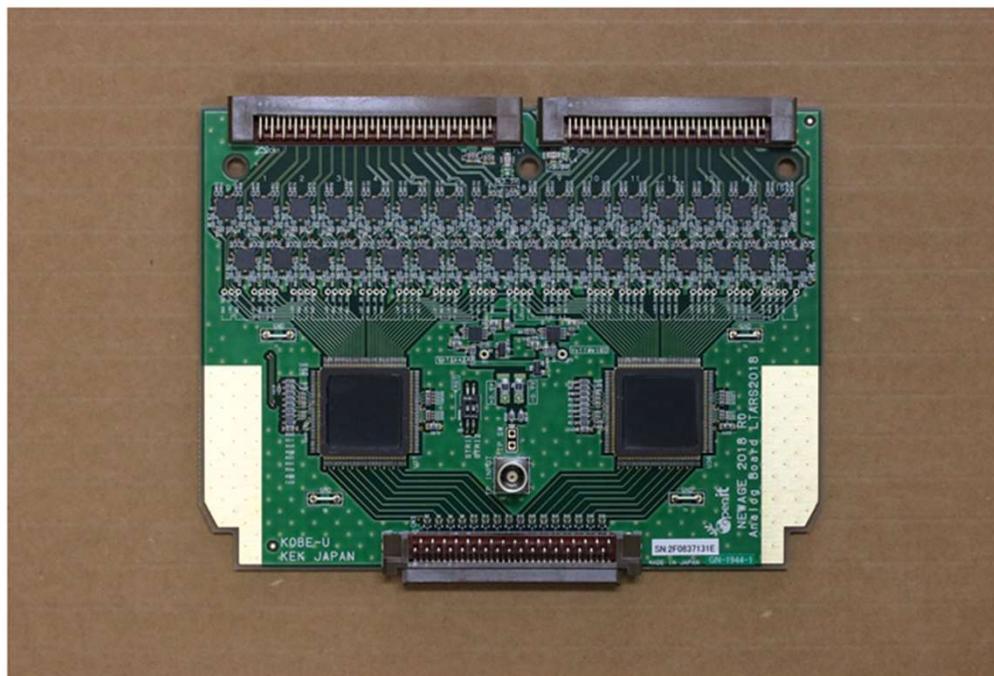


図 7.2 NEWAGE 2018 RO 基板

