

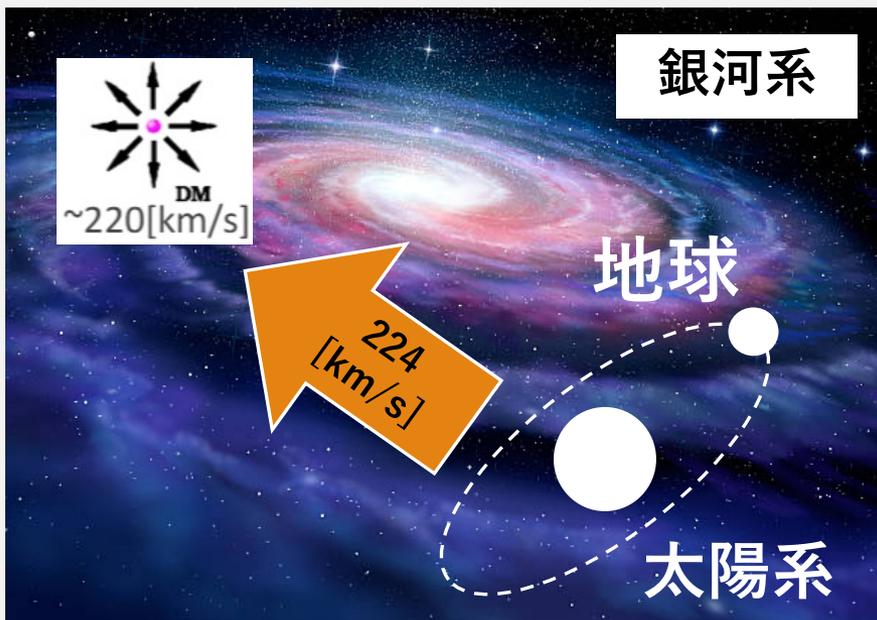
# 方向感度を持つ暗黒物質直接探索に向けた 大型ガス検出器開発

神戸大学 生井 凌太

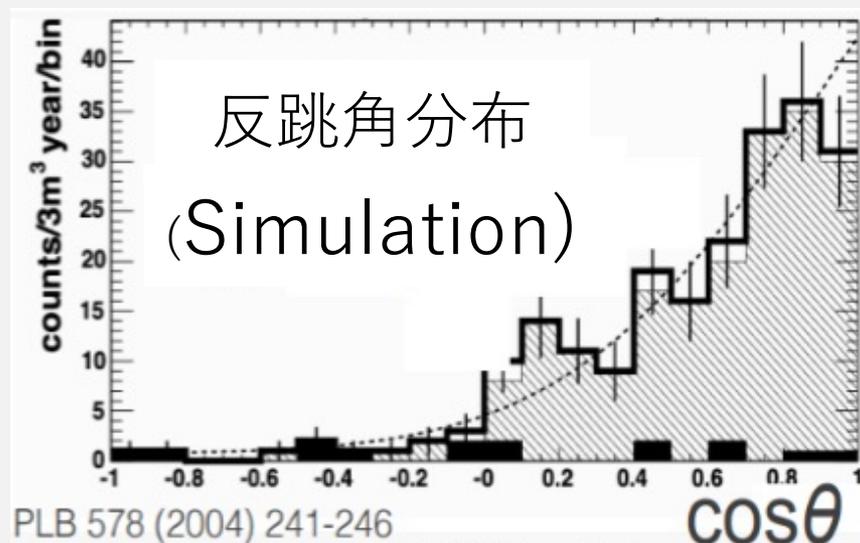
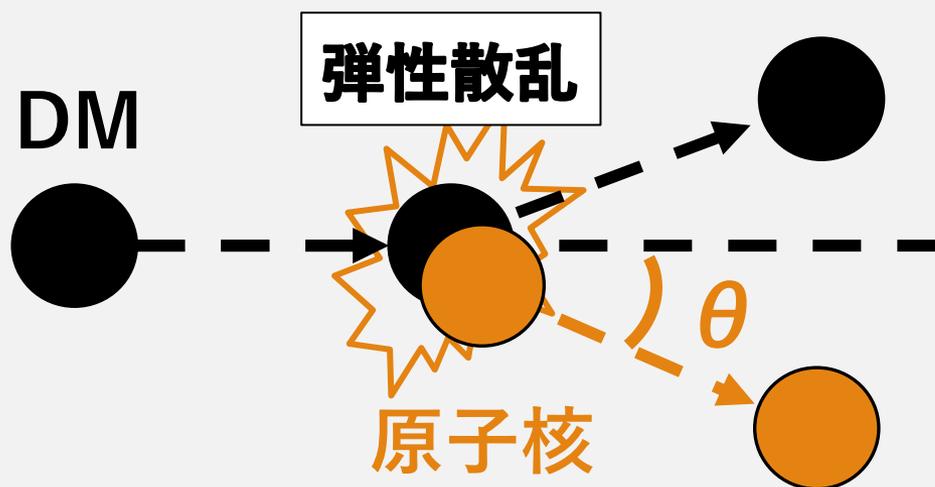
第2回 学術変革「地下稀事象」若手研究会

2026/3/4 神戸大学

# 方向に感度を持つ暗黒物質探索

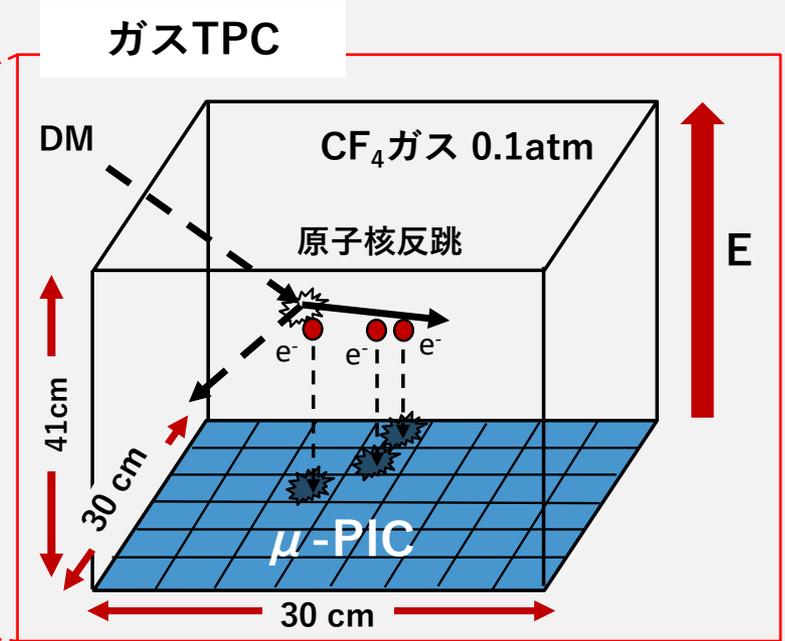
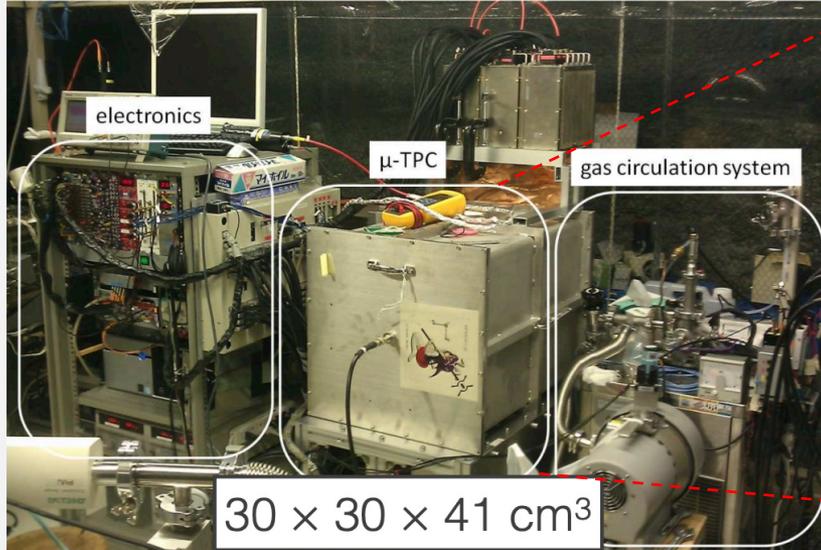


- 宇宙観測による不明な質量の存在  
→ 世界中での暗黒物質 (DM) 探索
- 方向に感度を持つ探索  
→ DMの運動学的な情報まで得られる
- どうやって?  
→ DM-原子核弾性散乱の反跳角分布を利用 (直接探索)



# NEWAGE実験

- 場所：神岡鉱山地下実験室
- 検出器：ガスTPC



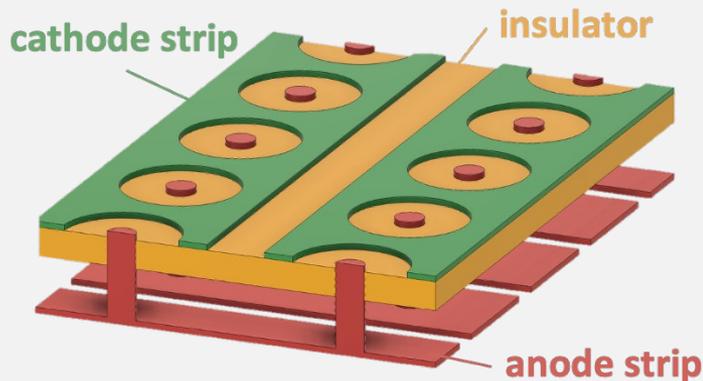
## 検出原理

1. 原子核がDMにより反跳
2. 電離電子が電場でドリフト
3.  $\mu$ -PIC検出器で読み出し

## $\mu$ -PICの特徴

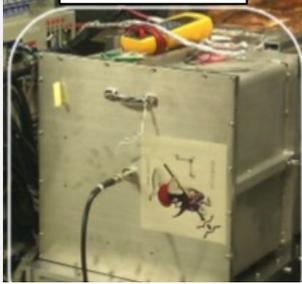
- 二次元位置情報 + 時間情報  
→ 反跳された原子核の飛跡を三次元読み出し
- 電極付近の高電場で電離電子を増幅

## $\mu$ -PIC



# 将来計画

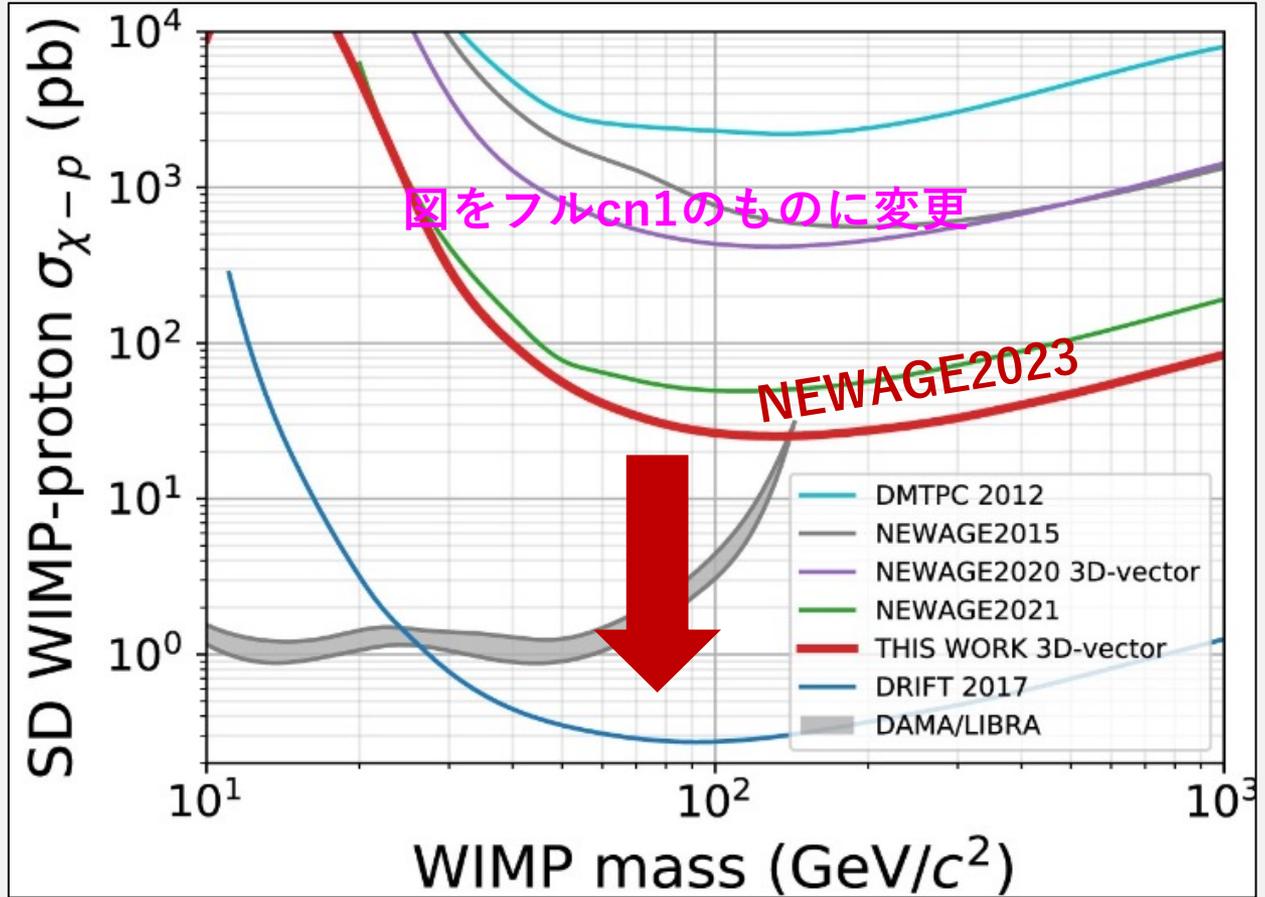
NEWAGE検出器（現在）



$0.3 \times 0.3 \times 0.4 \text{ m}^3$



$\sim 1 \text{ m}^3$

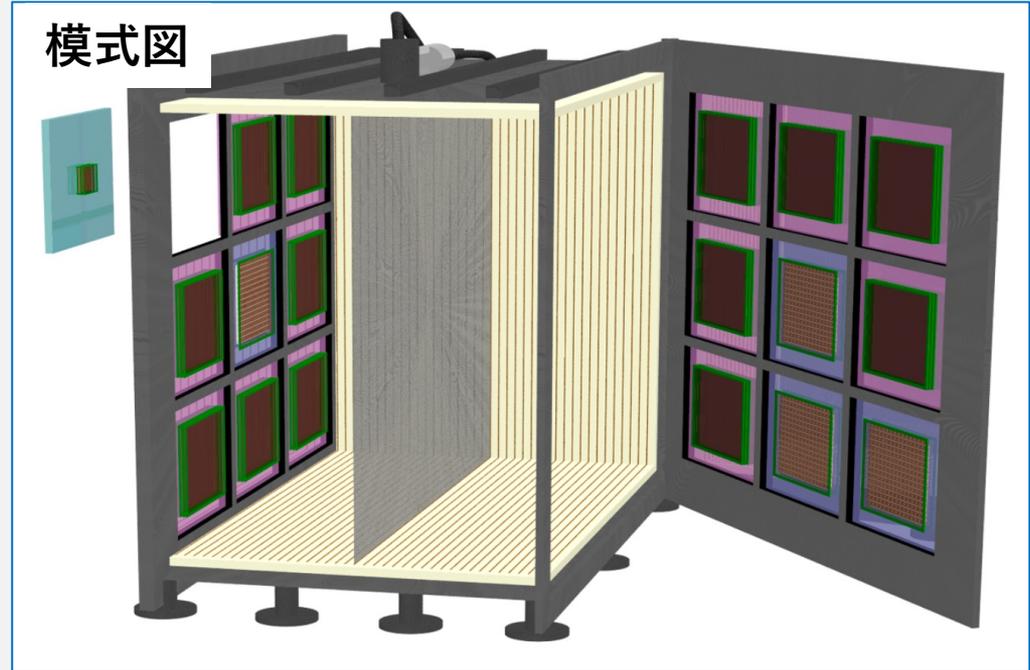
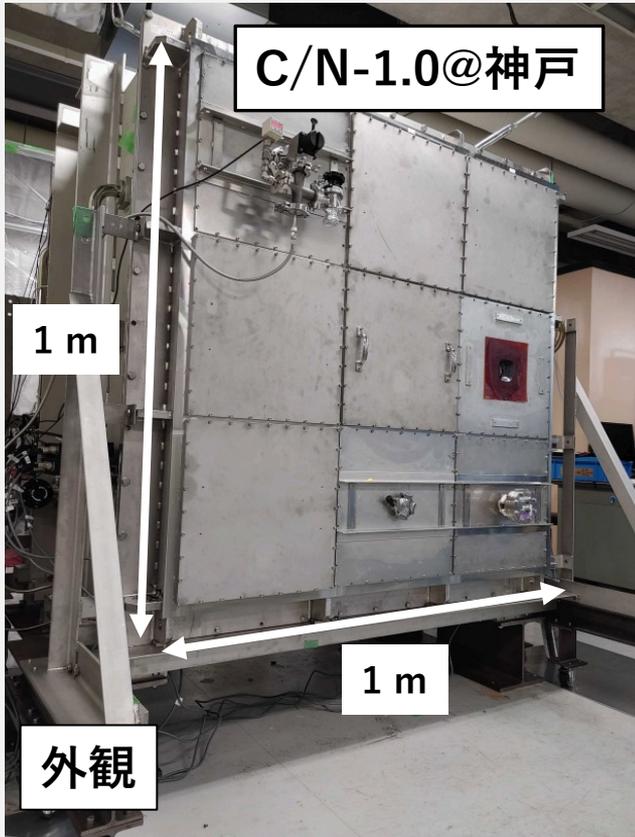


➤ 感度向上に向けた低背景事象化と大型化の取り組み

本日はこちらについて

感度向上に向けて、大型検出器の開発が進行中

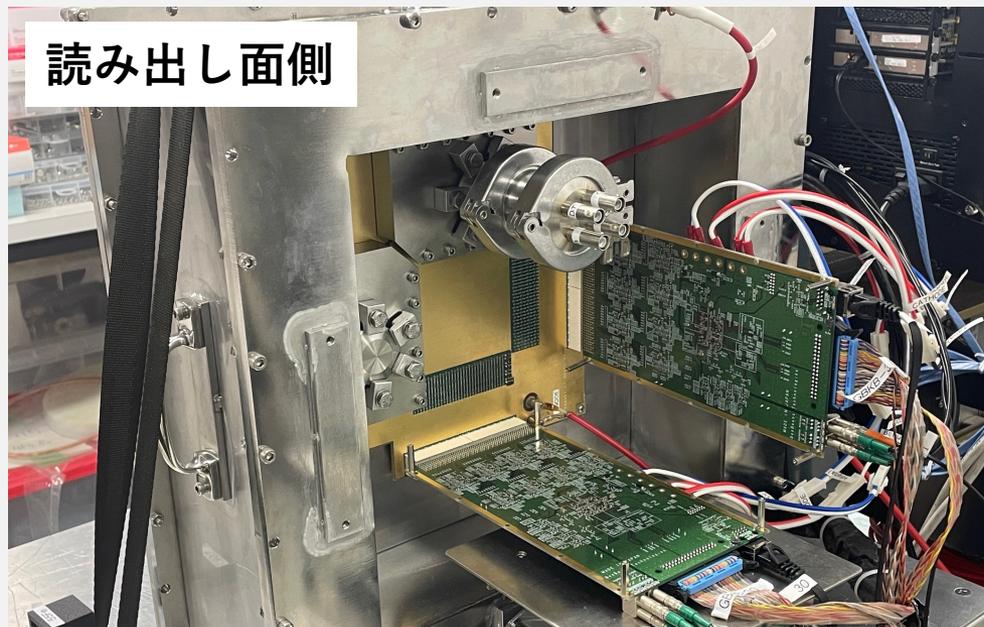
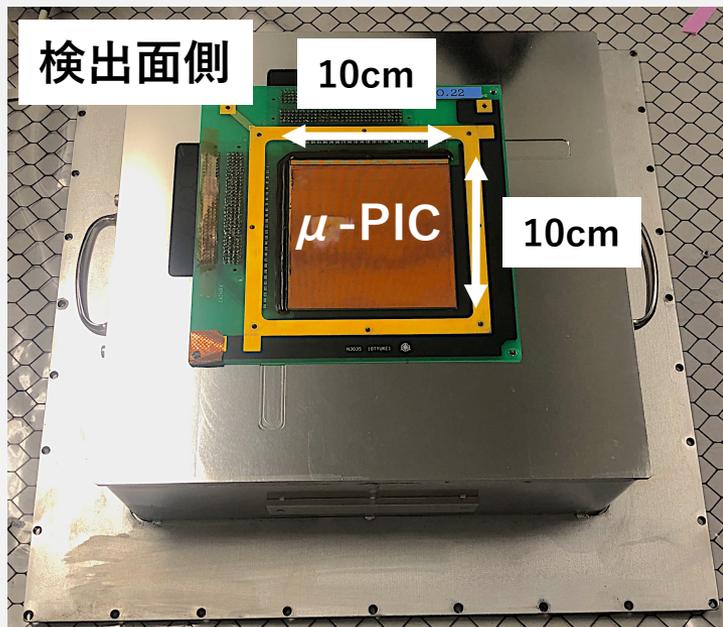
# C/N-1.0



- 現在2台の検出器を開発中
  - Module-0: 検出面積大、方向感度なし
  - Module-1: 検出面積小、方向感度あり

本発表はModule-1について

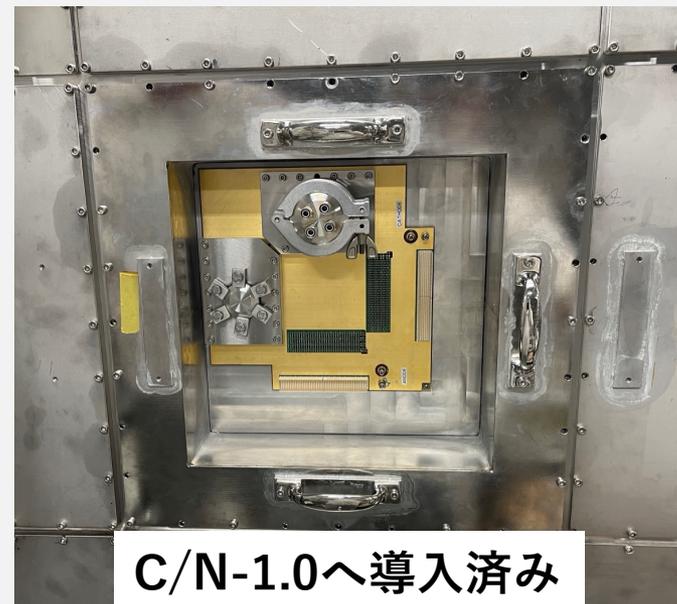
# Module-1



	Module-1	NEWAGE
detection area	10×10 cm <sup>2</sup>	30×30 cm <sup>2</sup>
strip pitch	800 μm	400 μm
energy threshold w/ directionality	100 keVee	50 keVee

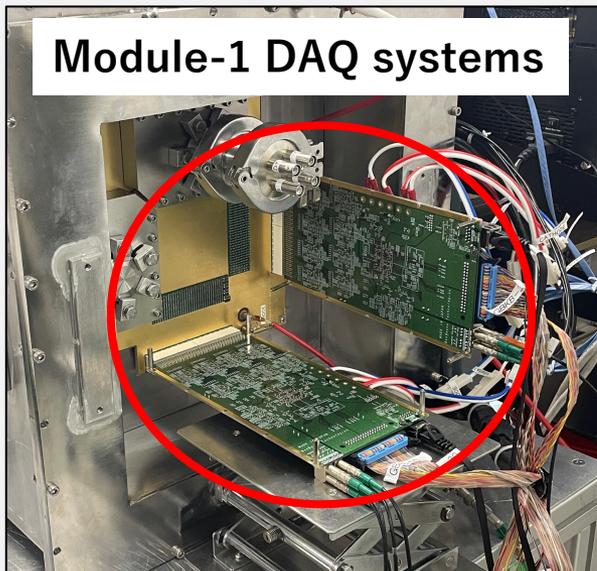
- 読み出しチャンネル数の制約から  
ストリップ間隔がNEWAGEの倍

→ C/N-1.0検出器のデモンストレーションが目的



# DAQシステム

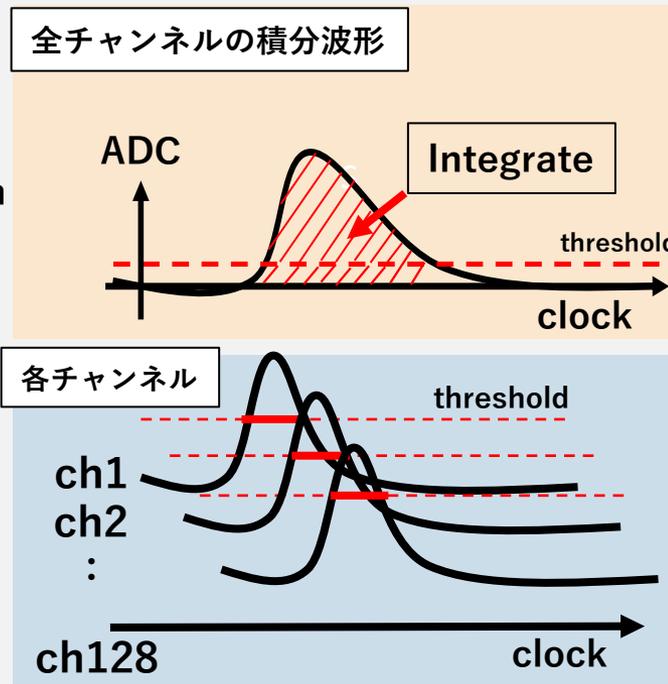
## Data Acquisition Flow



128 ch  
800  $\mu\text{m}$  pitch



Readout



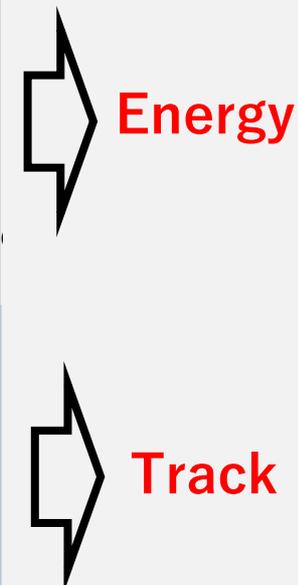
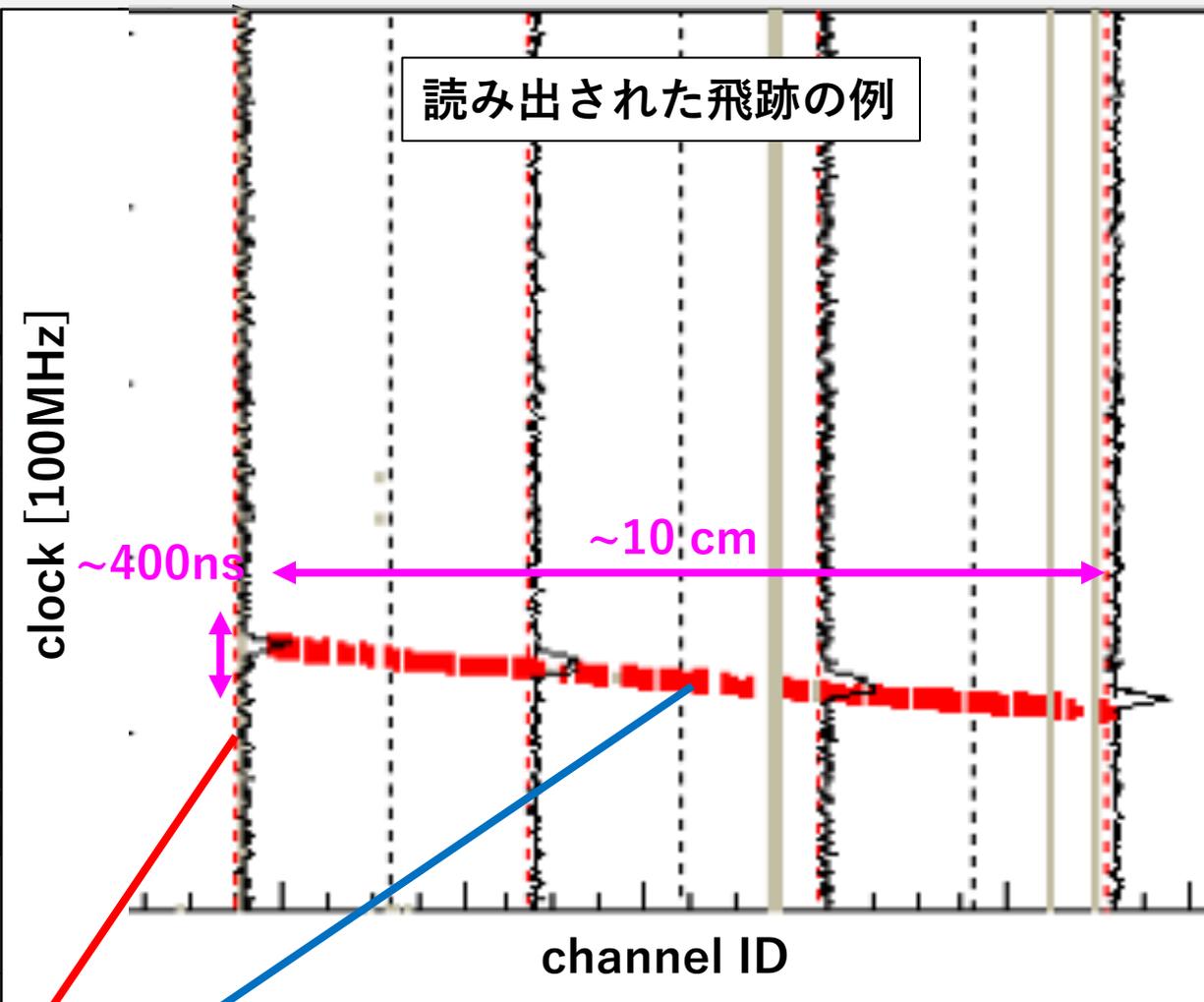
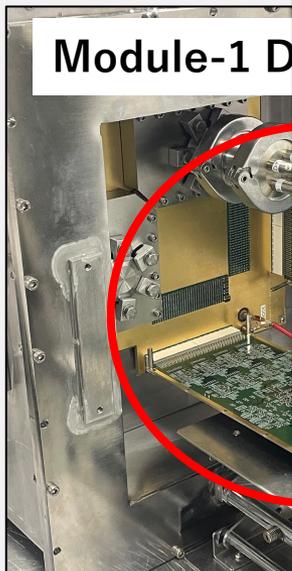
Energy

Track

- アノード、カソード各800  $\mu\text{m}$ 間隔で128 chの信号読み出し
  - エネルギー : 全チャンネルの波形の積分値
  - 飛跡 : 各チャンネルの閾値を超えた時間 (Time-over-threshold)

# DAQシ

Data Acqu



• アノード

- エネルギー : 全チャンネルの波形の積分値
- 飛跡 : 各チャンネルの閾値を超えた時間 (Time-over-threshold)

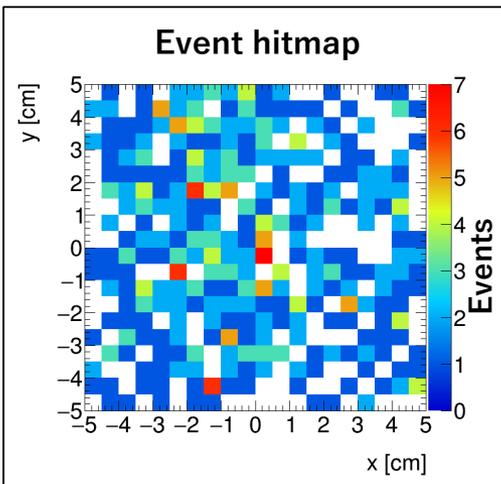
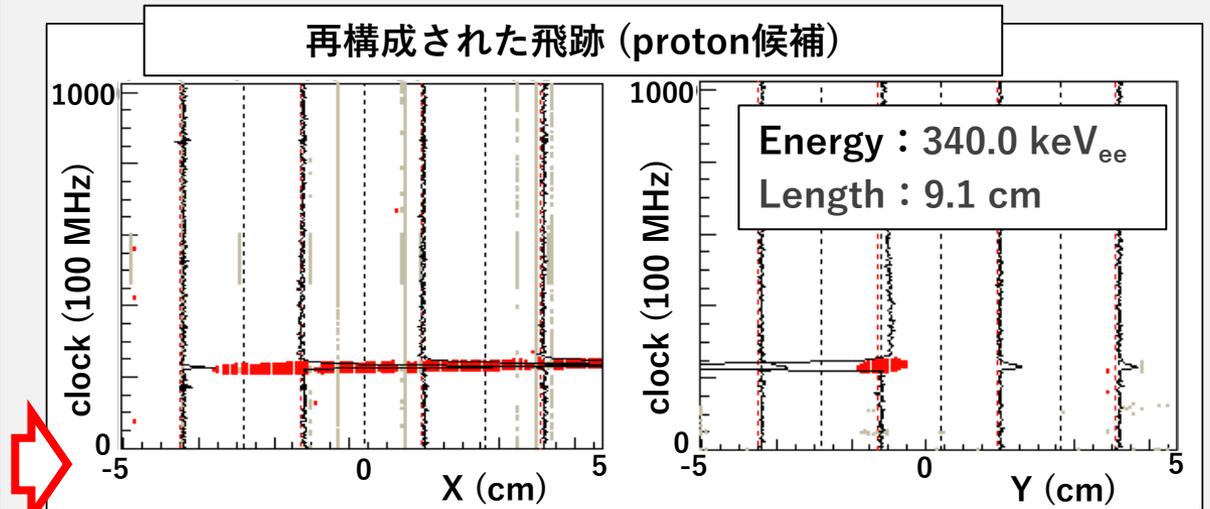
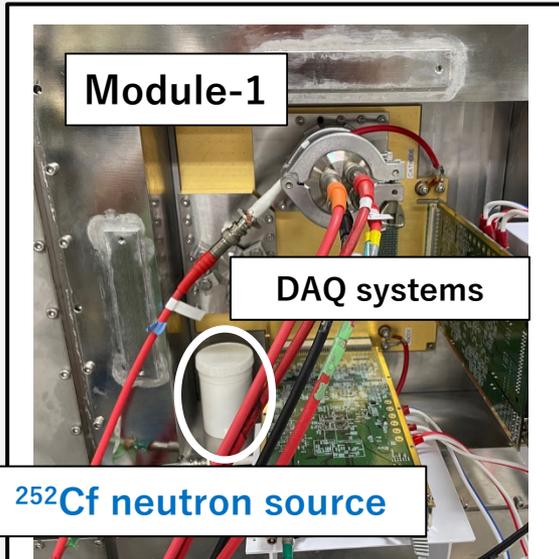
**C/N-1.0**

---

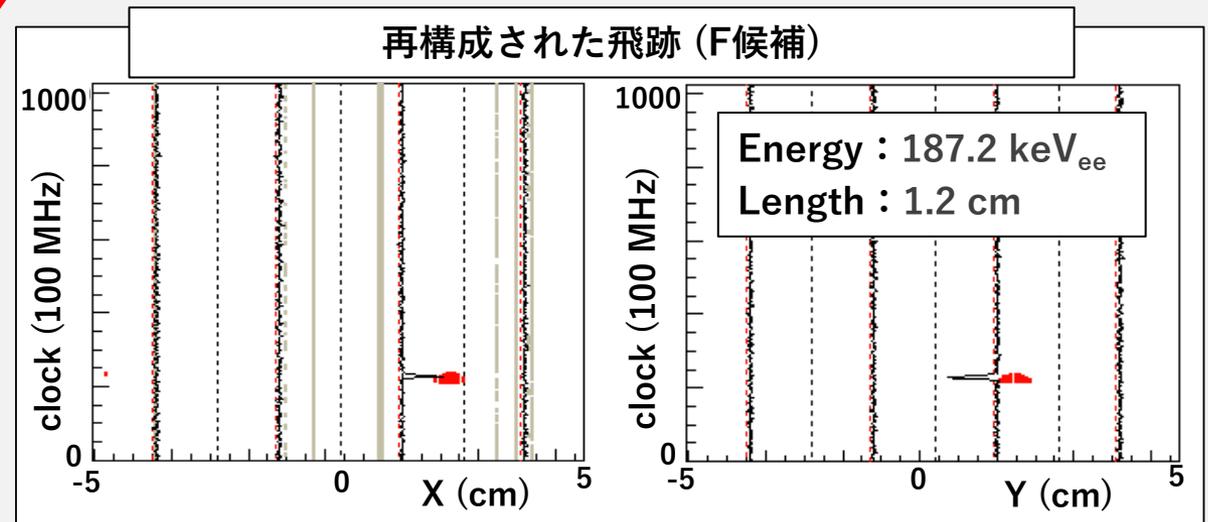
# 飛跡の再構成

## NEWAGEモジュールで初となるC/N-1.0での飛跡再構成

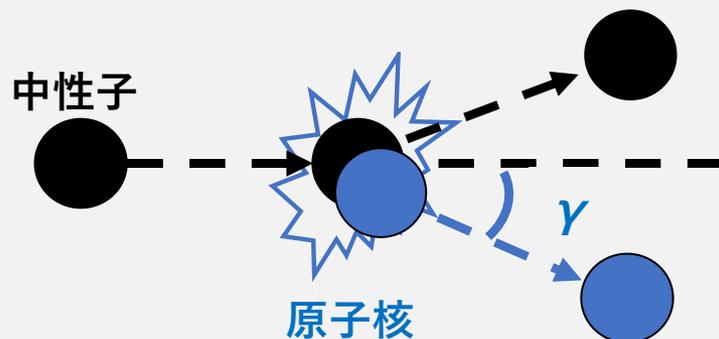
- ガス:  $\text{CF}_4$  (0.1 atm)
- $^{252}\text{Cf}$ 線源による中性子照射



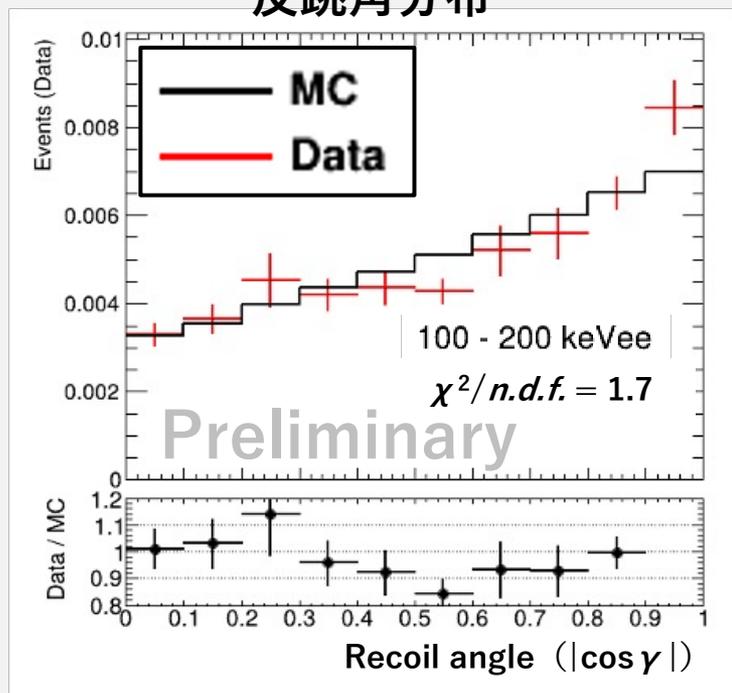
Obtaioned uniform hitmap



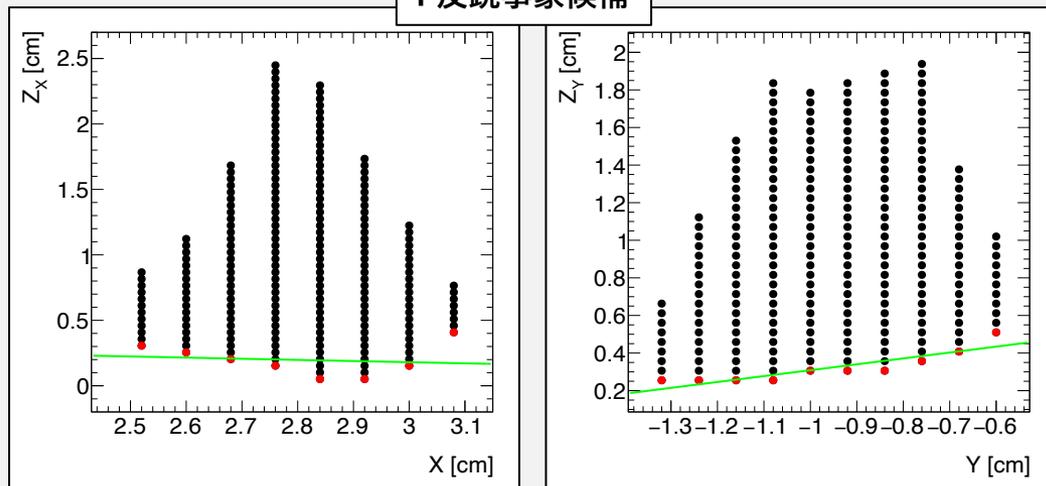
# 角度分解能



反跳角分布



F反跳事象候補



- $^{252}\text{Cf}$ 中性子線源によるF反跳事象を使用
- 飛跡を線形フィット、3次元空間内での反跳方向を計算
- 測定データをMCでフィッティング角度分解能を計算



$$\sigma_{\text{reso}} = 48.5_{-5.6}^{+2.8} \text{ }^\circ \text{ (stat.)} \quad (100 \text{ keV}_{\text{ee}} < E < 200 \text{ keV}_{\text{ee}})$$

$$\text{(NEWAGE: } \sigma_{\text{reso}} = 44.5_{-3.1}^{+2.5} \text{ }^\circ \text{ (stat.))}$$

- **角度情報の再構成に成功**  
( $> 100 \text{ keV}$ )

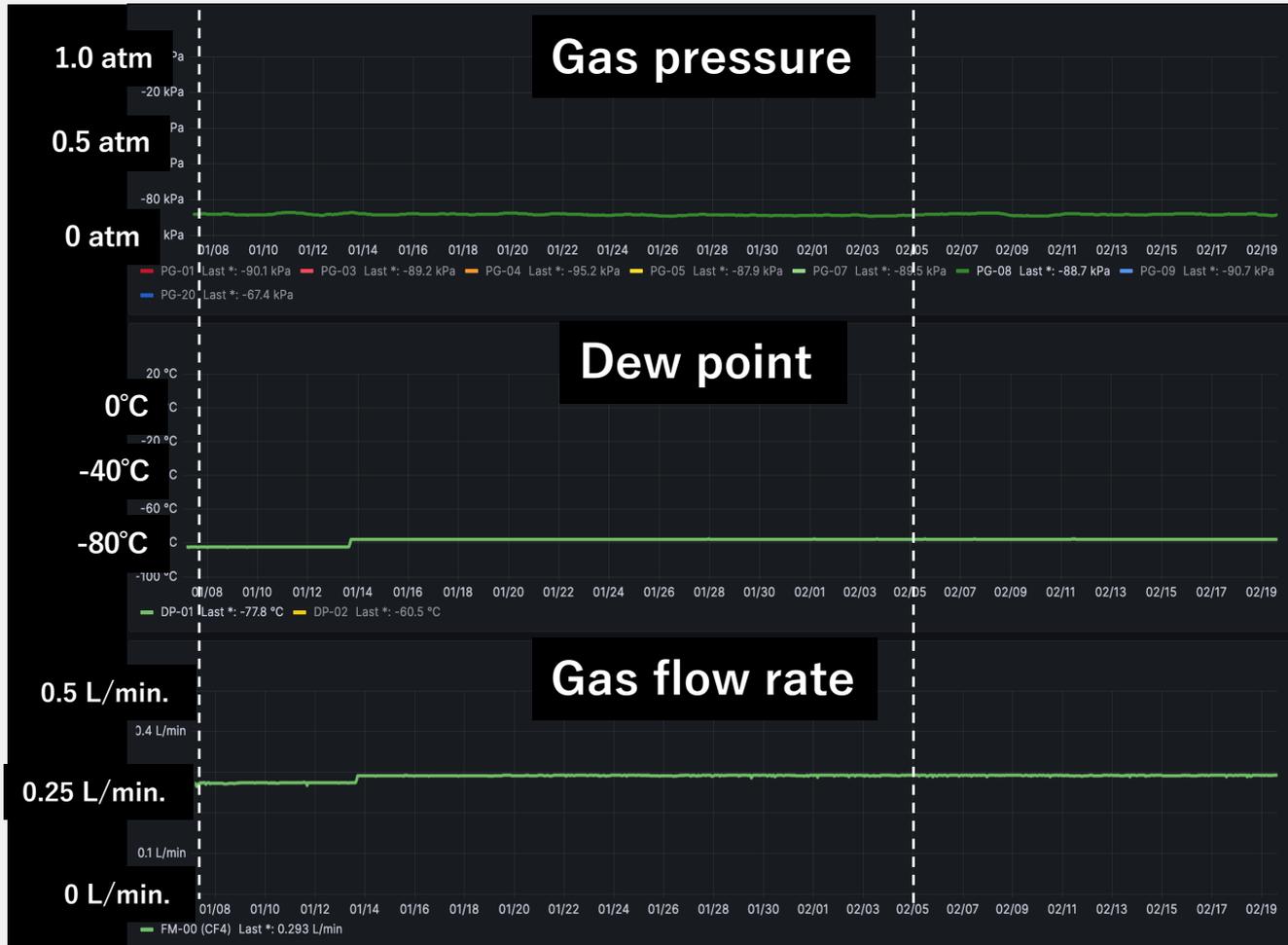
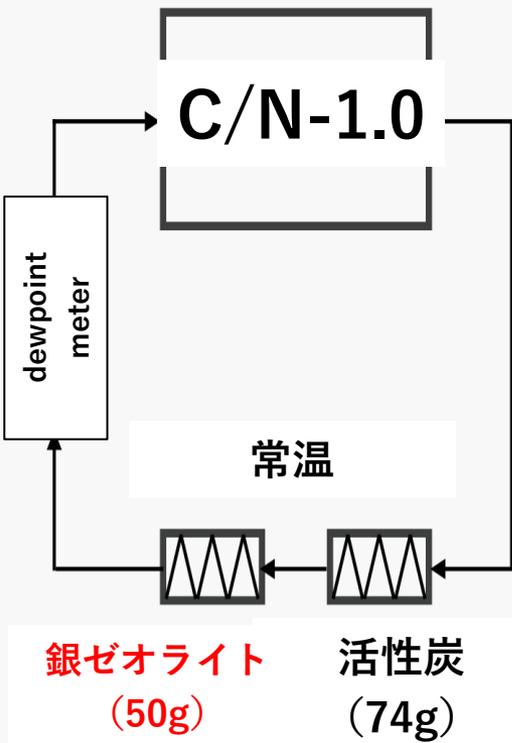
# C/N-1.0地上試験: background run

---

Module-1によるC/N-1.0の運用デモンストレーション

# 循環系ステータス

循環系の簡略化した概念図

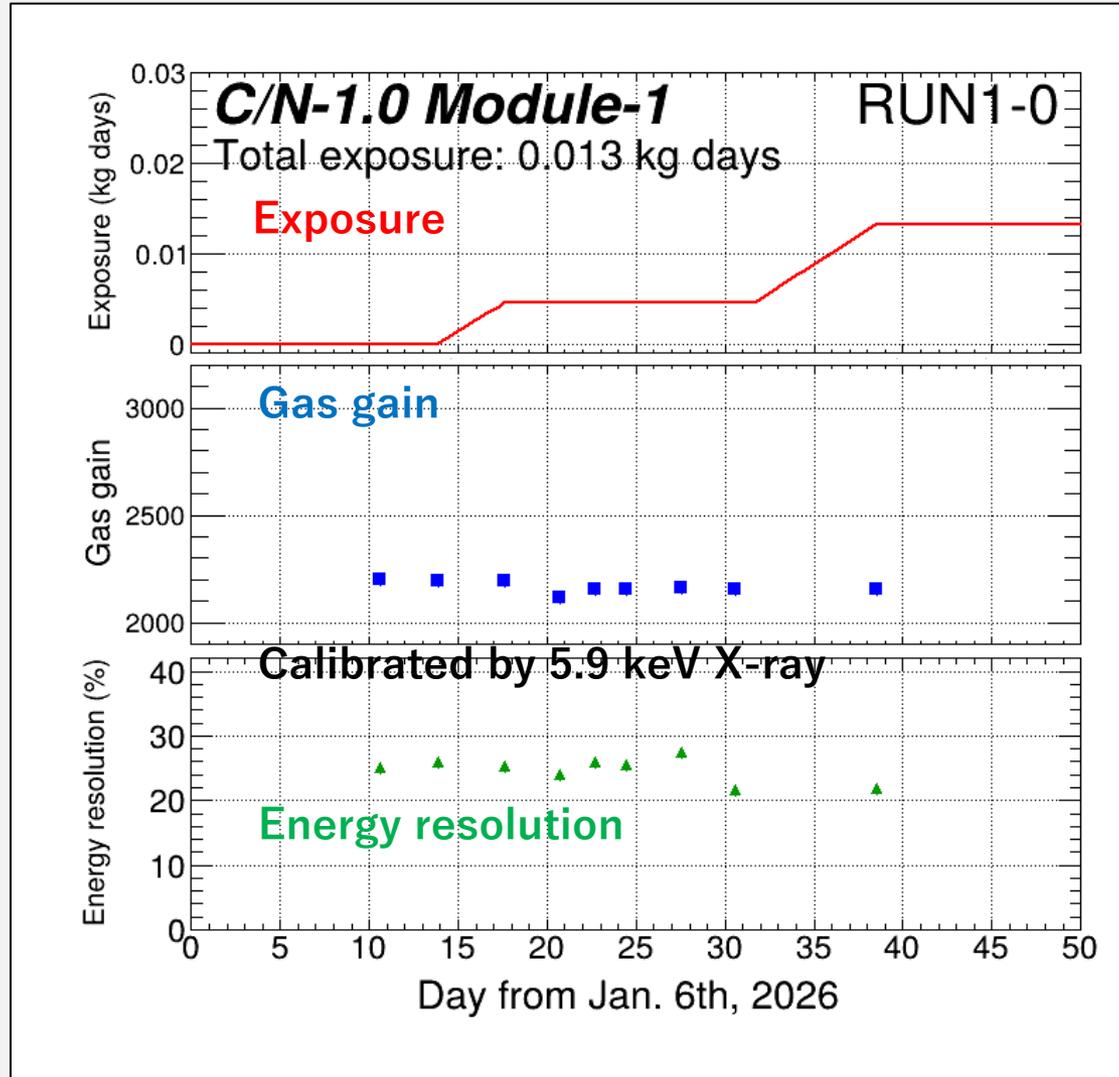
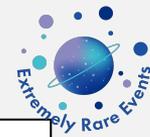


Jan. 6th, 2026  
(gas was installed)

Feb. 6th, 2026

- 50日以上安定して循環

# 検出器ステータス

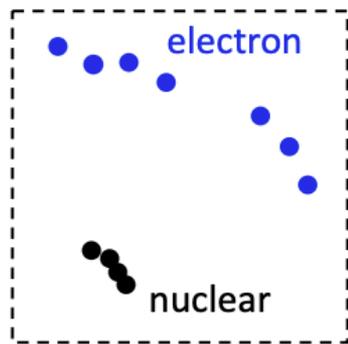


- ガス :  $\text{CF}_4$  0.1気圧
- Exposure: 0.013 kg days
- $^{55}\text{Fe}$  5.9 keV X線源を使用した定期キャリブレーションを実施。ゲインの不定性は約 $\pm 2\%$  14

# 事象選別: カットラインの決定

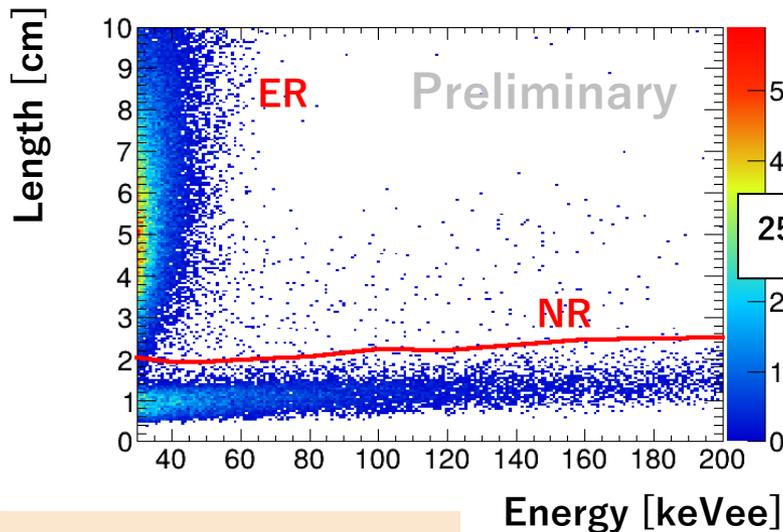
- 環境ガンマ線除去のため、有効体積カット + 2種類のカットを使用。
- $^{252}\text{Cf}$ 線源の中性子によるF反跳事象を使用してカットラインを決定。

## 1. Energy-Length cut



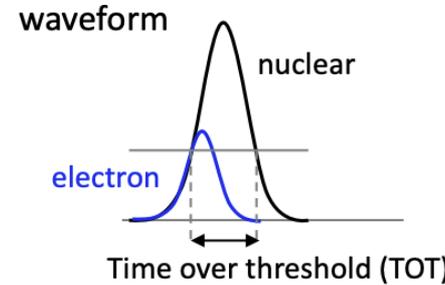
Track length of **electron** is long

Track length of **nuclear** is short



- Red line:  $+3\sigma$  from NR median

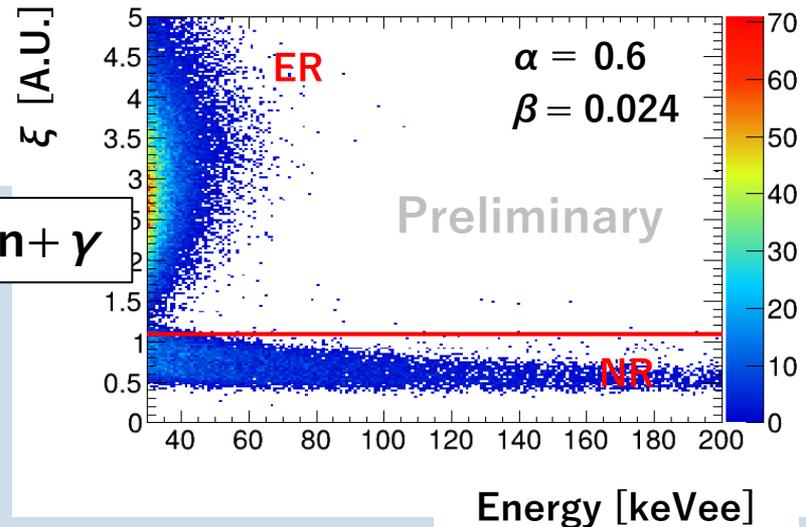
## 2. Energy-ToT cut



Electron has small  $dE/dx$

Nuclear has large  $dE/dx$

Define:  $\xi \equiv \sum \text{ToT} * \beta / \text{Energy}^\alpha$  (empirical)

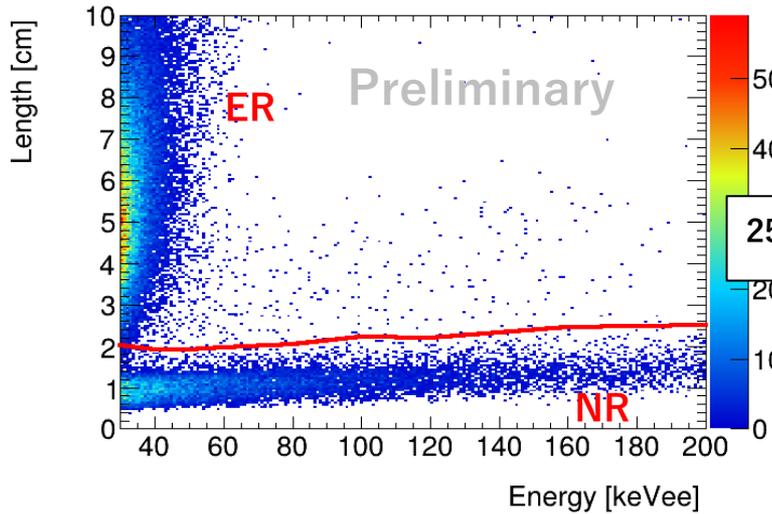


- Red line: constant parameter

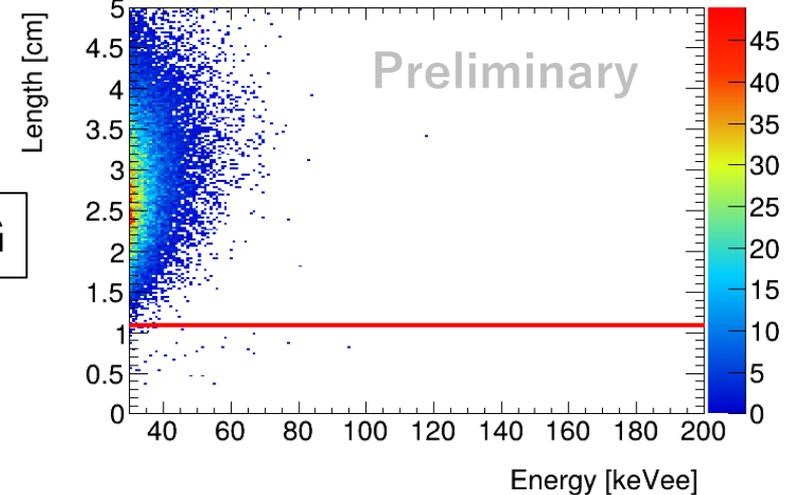
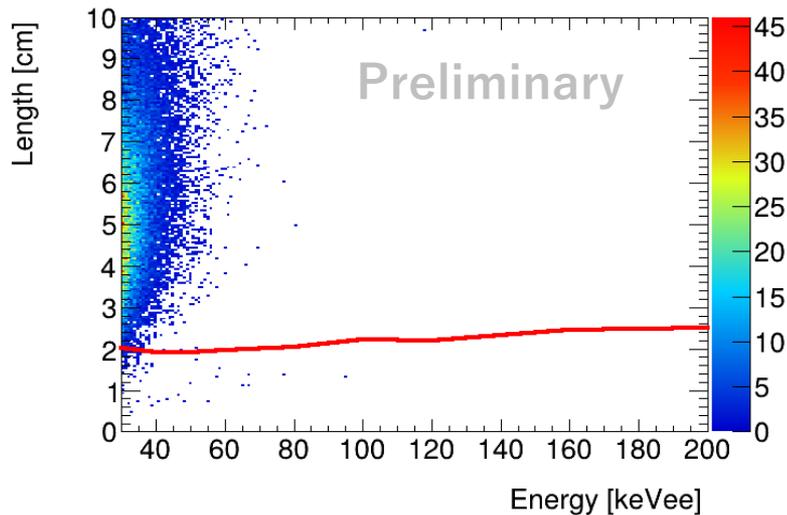
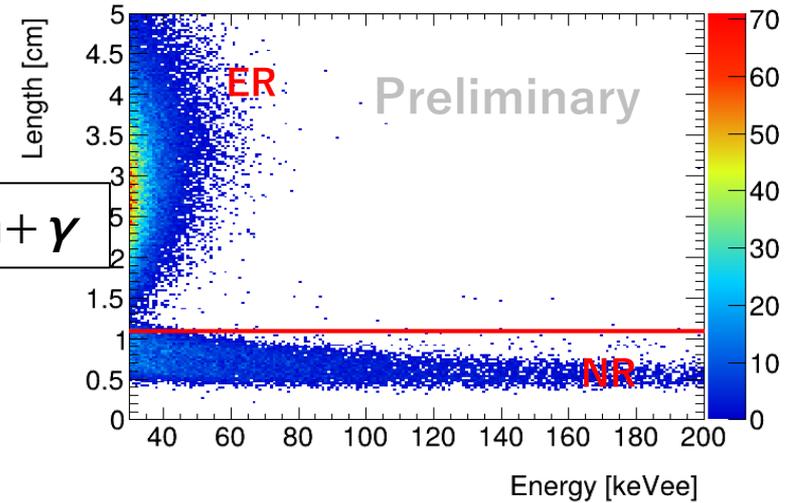
# 事象選別: BG runへの適用

- 背景事象へカットラインを適用

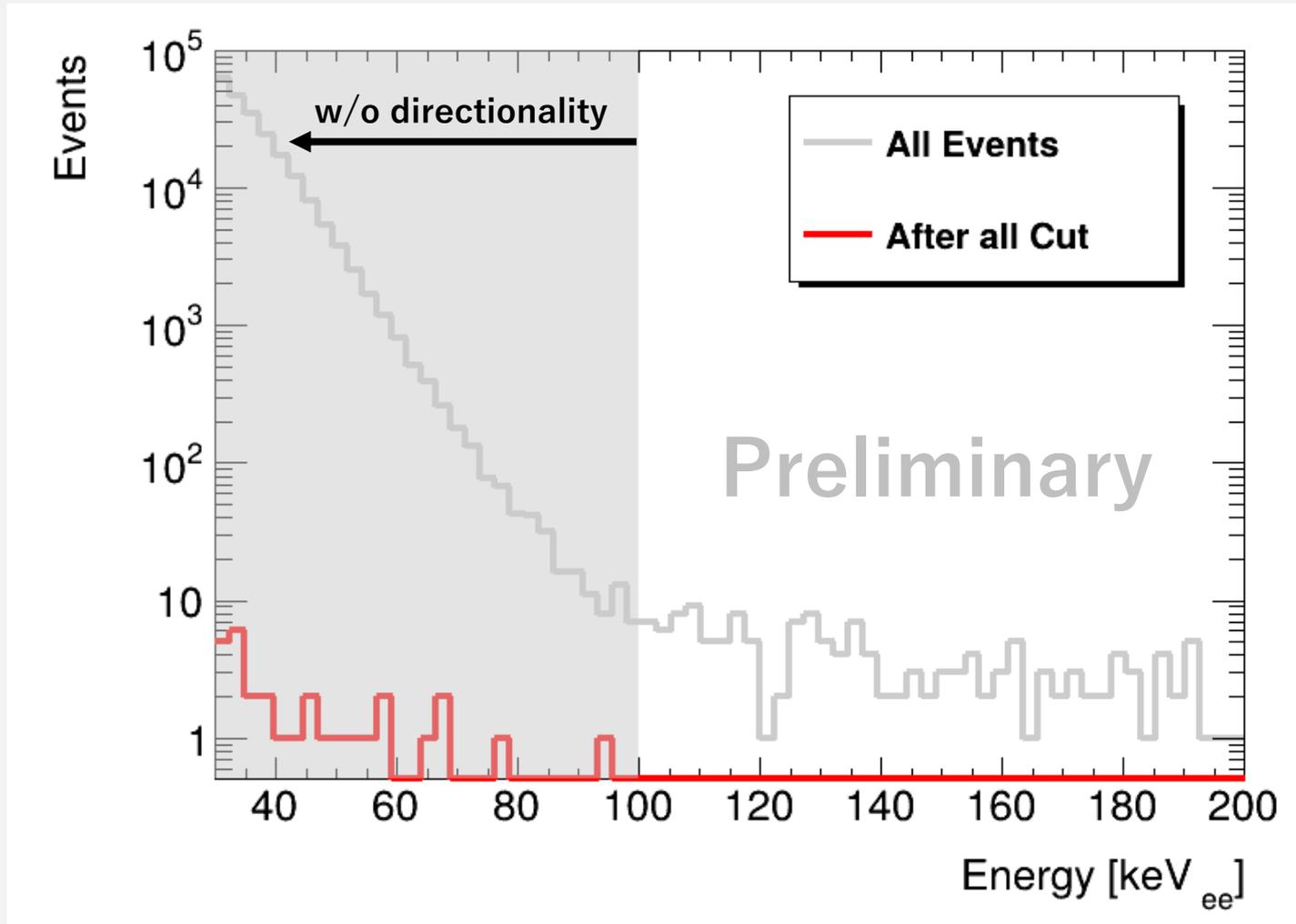
1. Energy-Length cut



2. Energy-ToT cut



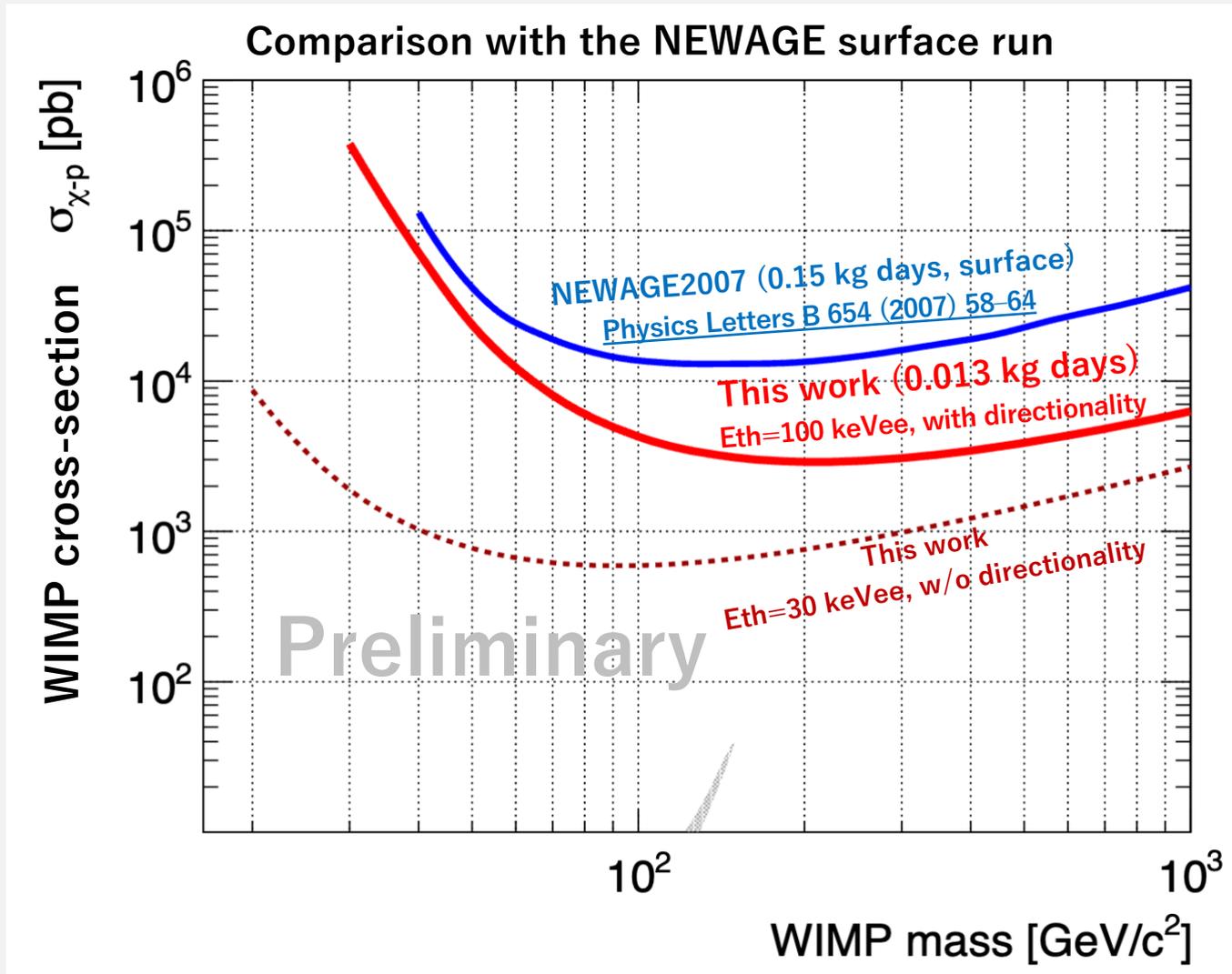
# エネルギーースペクトル



- 100–200 keV<sub>ee</sub>において、事象選別後にイベントは残らなかった。

# Results for BG run

- C/N-1.0での背景事象測定により得られた感度曲線 (100 keVee energy threshold)



- NEWAGEの地上測定と同等の感度を確認。
- Module-1を用いた測定により、C/N-1.0がWIMP探索に使用可能な検出器であることを確認。

# C/N-1.0 ロードマップ

2025



## ➤ C/N-1.0の動作試験

- 地上での暗黒物質探索試験
- 背景事象評価

## ➤ 地下導入後のC/N-1.0性能見積もり

@神戸

2026

神岡坑内への搬入 (2026年)

## ➤ Module-1地下測定 (commissioning)

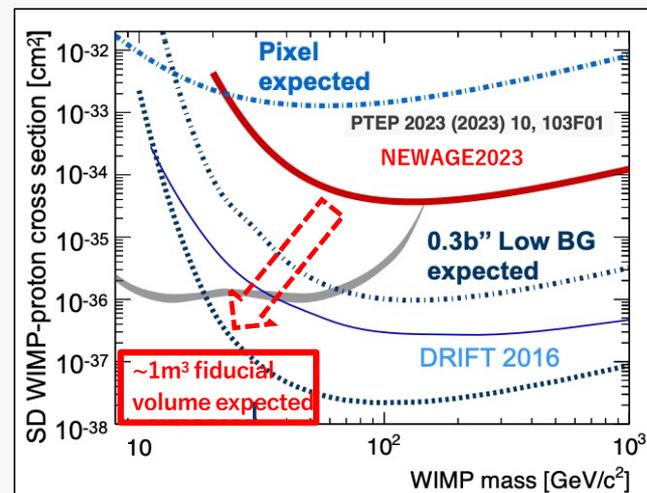
@神岡

## C/N-1.0による暗黒物質探索へ

- $\mu$ -PICを□ 10 cm → □ 30 cmに
- モジュールの増設

2027

NEWAGEを超える感度での  
方向感度WIMP探索へ



# まとめ

NEWAGE：方向に感度をもつ暗黒物質直接探索

高感度化に向けて大型検出器を開発中

- モジュール検出器：Module-1をinstall
- 100 keVee以上で方向感度を伴うDM探索が可能であることを実証

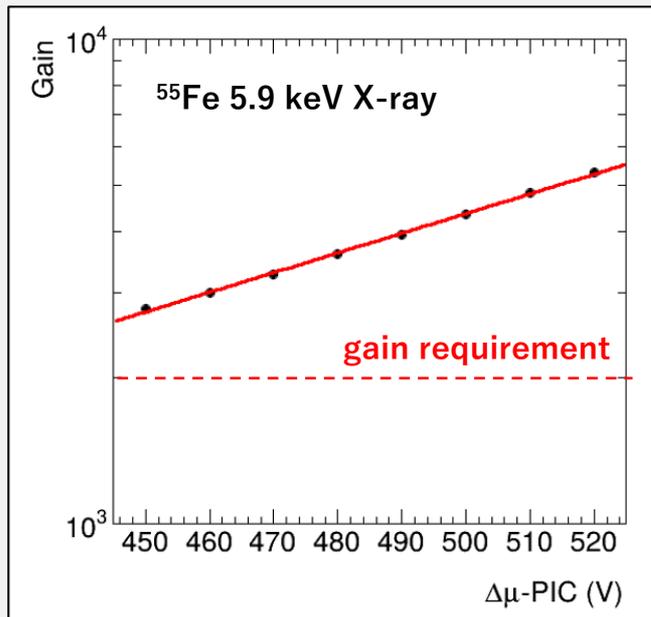
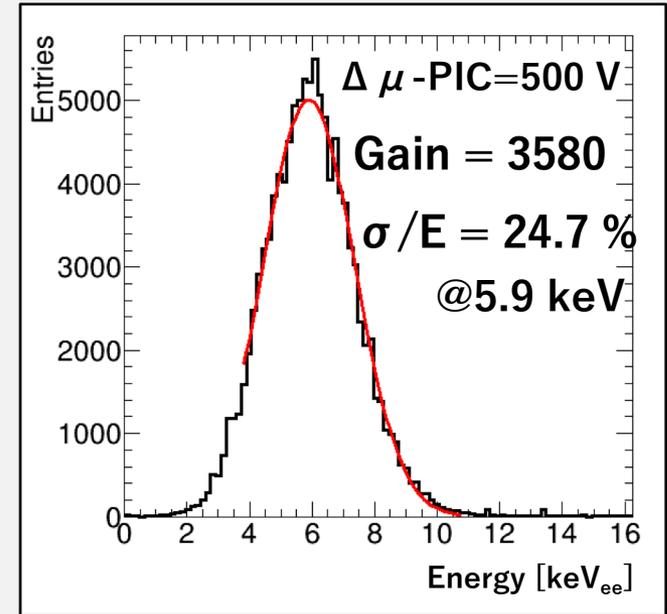
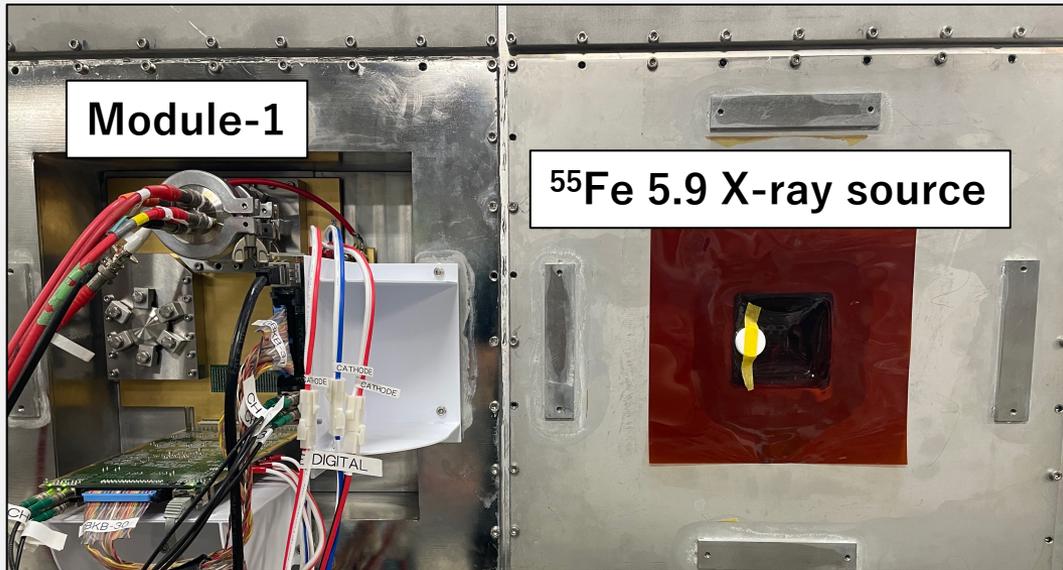
今後の課題

- 背景事象の評価
- 検出面積のアップグレード
  - 検出面積大型化
  - チャンネル間隔の高精細化

# Back up

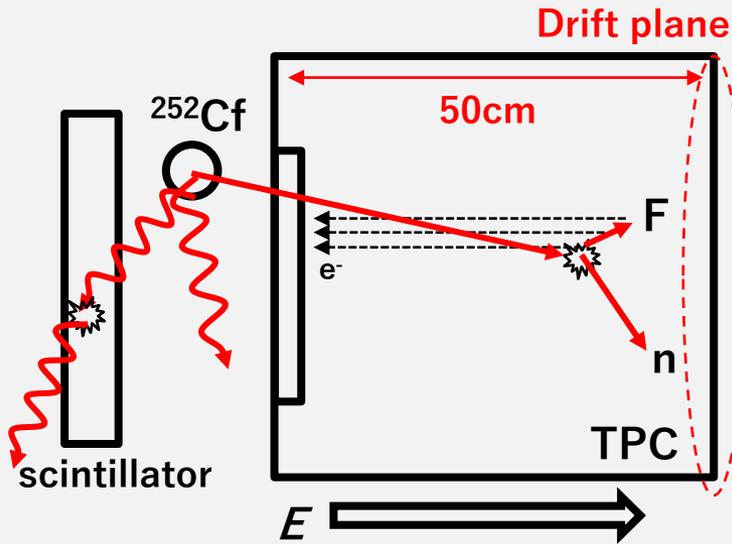
---

# Energy calibration



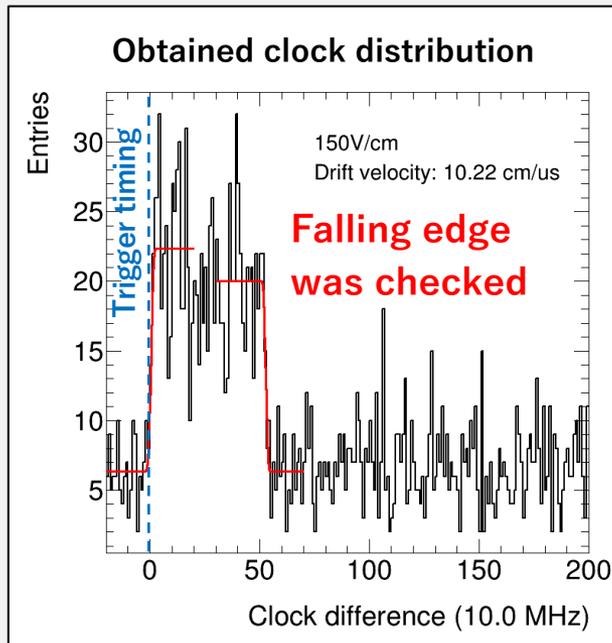
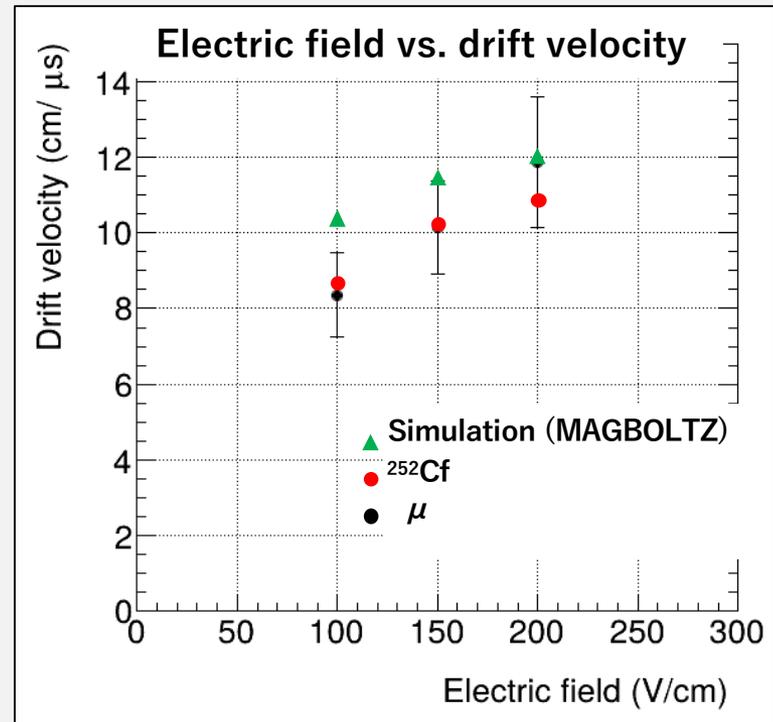
- An  $^{55}\text{Fe}$  5.9 keV X-ray source was used for energy calibration.
- We confirmed that the required gas gain was achieved at an applied voltage with no discharge.
- It is expected that an energy resolution comparable to or better than that of NEWAGE

# Drift velocity measurement



## Measurement method

- Gamma rays and neutrons from a  $^{252}\text{Cf}$  source were used.
- Events were triggered by a scintillator.
- The drift velocity was calculated from the time difference between the scintillator signal and the TPC signal.



The drift velocity as a function of the electric field strength shows a trend consistent with the simulation.  
→ the electric field is properly formed.

# 検出器のパラメータ校正

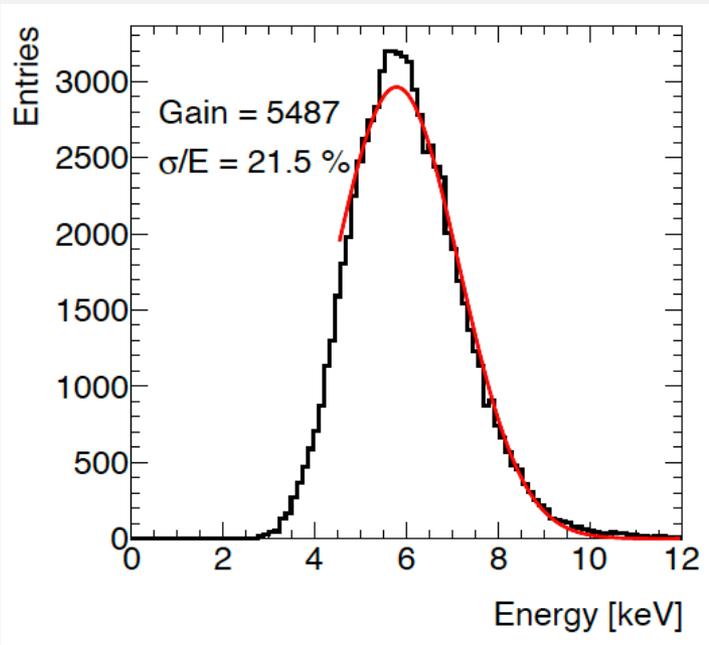


エネルギー、飛跡長を再構成するためには較正值を求める必要がある

- エネルギー

- $^{55}\text{Fe}$ の5.9 keV X線
- $\text{CF}_4$ ガス、0.1 atm (現行NEWAGEと同様)

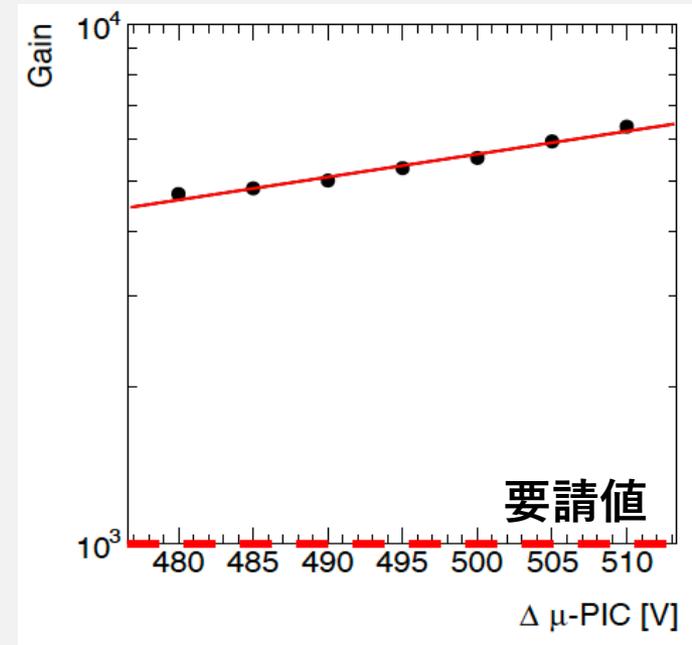
分解能評価 (要請値:  $\sigma = 12.4\% @ 50\text{ keV}$ )



- 分解能:  $\sigma = 21.5\% @ 5.9\text{ keV}$

- 外挿により要請値達成可能の見積もり

ゲイン評価 (要請値:  $> 1000$ )

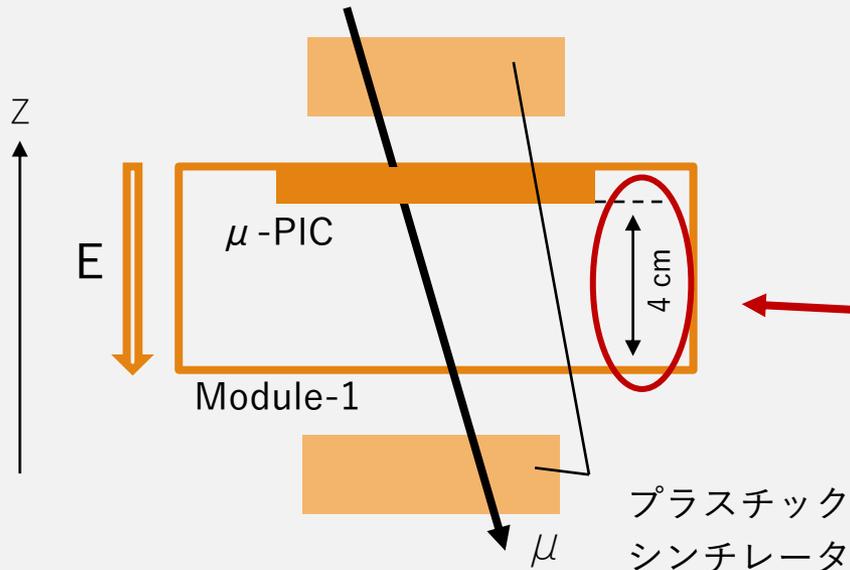


- 放電のない電圧値で達成可能

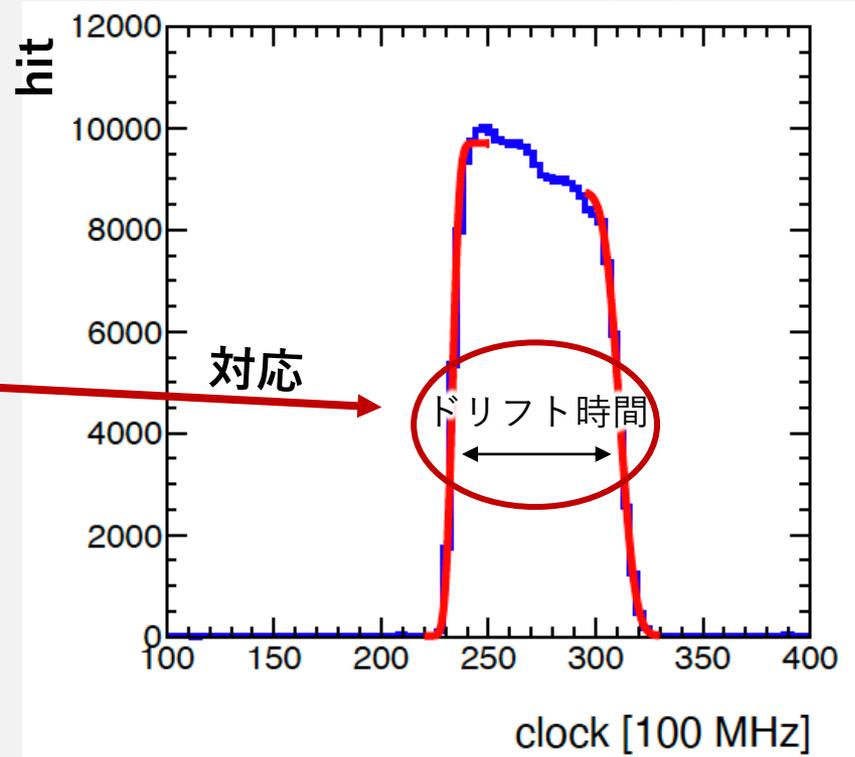
# 検出器のパラメータ較正

- 電場に並行な方向の距離を知るためには電離電子のドリフト速度が必要

## セットアップ概略図



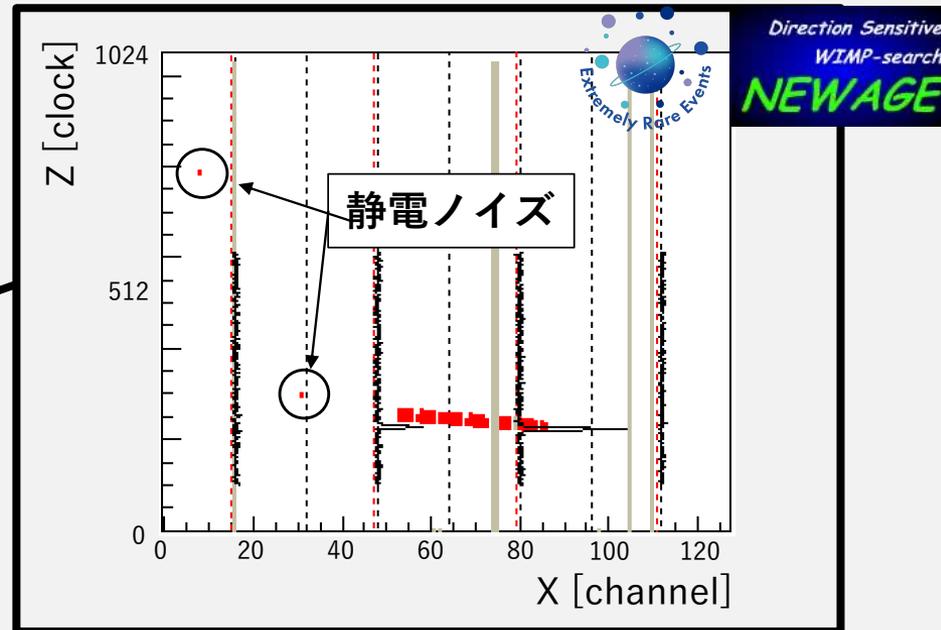
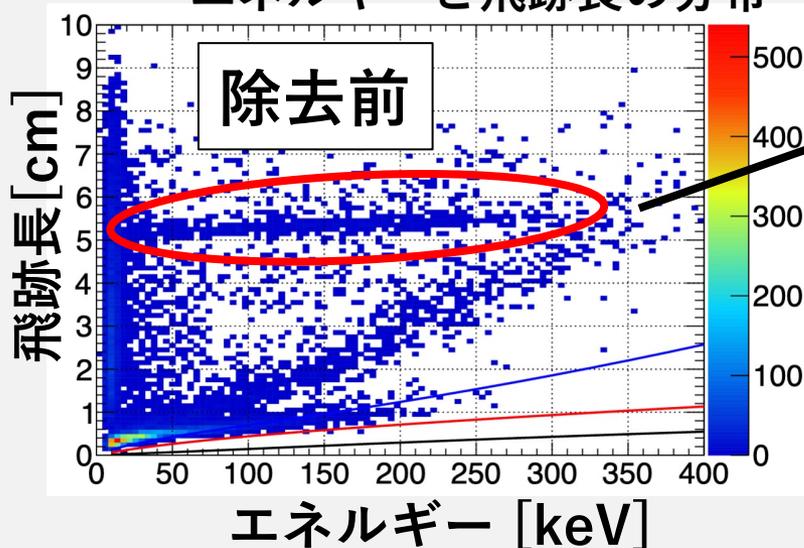
## hitのあったクロック分布



- hitのあったのクロック分布の幅からhitのあった時間分布を取得。
- ドリフト領域の高さ4 cm
- 求められたドリフト速度は5.1 cm/ $\mu$ s

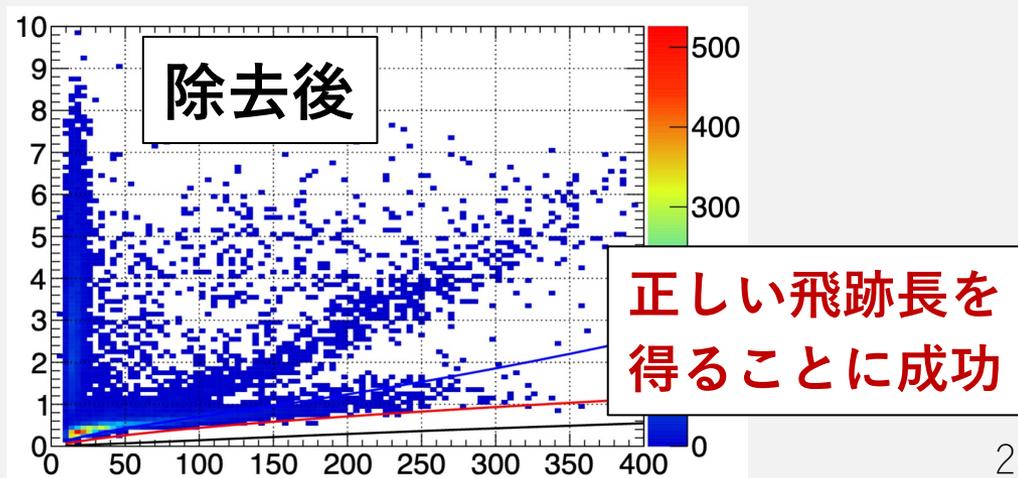
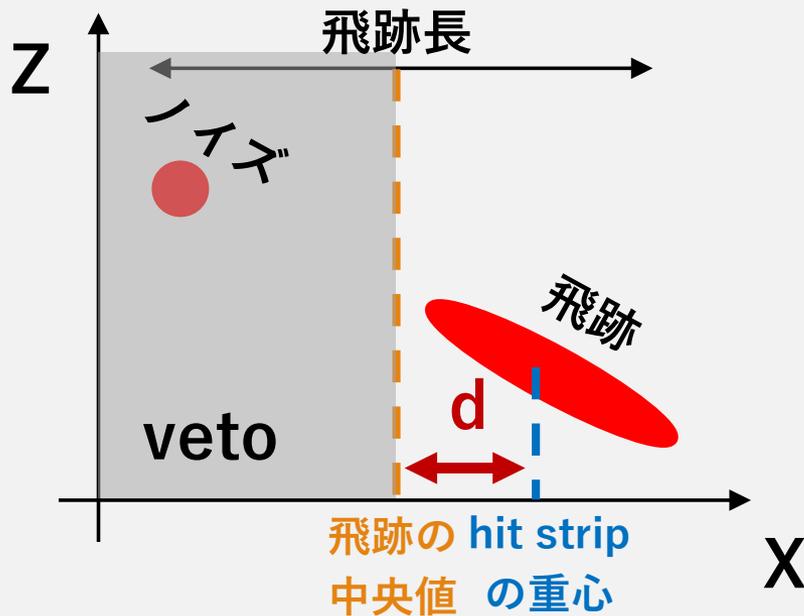
# ノイズの除去

エネルギーと飛跡長の分布

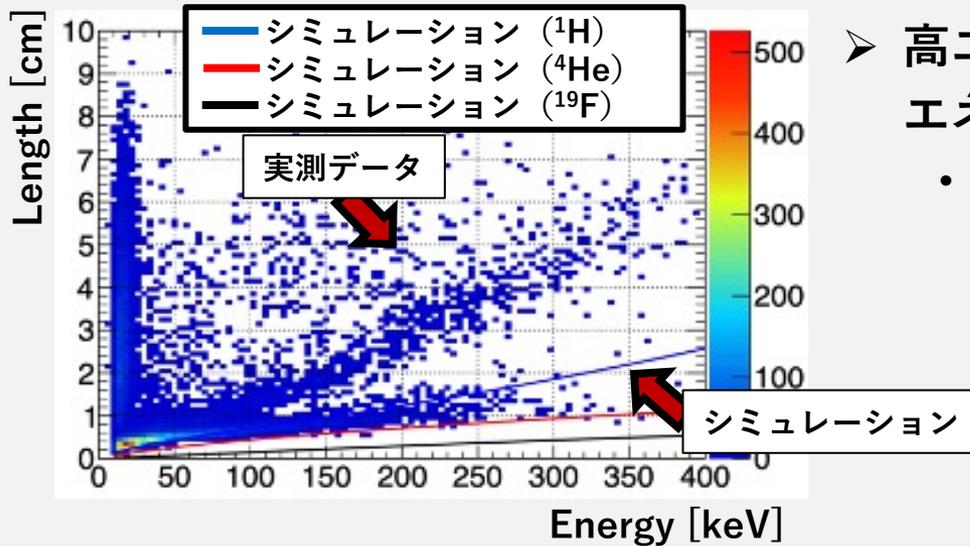


ノイズにより誤った飛跡長が計算されてしまう

d (飛跡の midpoint と hit strip の重心の差) に閾値を設定  
→ 飛跡の中央で分割して、hit の少ない方に veto



## エネルギー vs 飛跡長

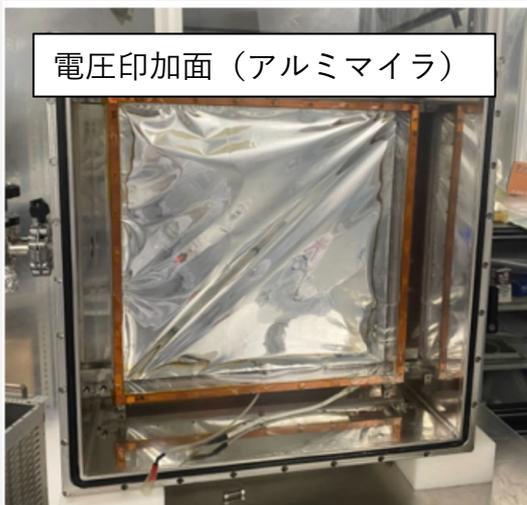


### ➤ 高エネルギーでのシミュレーションと実測値 エネルギーの不一致

- 青線：SRIMシミュレーションによる $^1\text{H}$ のエネルギー損失曲線

→ 他エネルギーによるエネルギー較正  
241Am, 5.4 MeV  $\alpha$ 線  
cool-X 8 keV X線  
etc ..

### ➤ H原子核反跳事象の除去



### ➤ Hを含む部材を除去

- アルミマイラテープ  
→ 金属メッシュ
- ポリイミドシート  
→ 露出面積低減

# Conclusion



- 検出器大型化に向けたモジュール検出器の性能評価を行った
    - 検出器のゲイン：放電のない電圧で達成可能
    - 宇宙線 $\mu$ を用いたドリフト速度評価：評価完了
  
  - 再構成した飛跡のパラメータにシミュレーションとの不一致
    - 複数のエネルギーでのエネルギー較正
    - 検出領域に $^1\text{H}$ が飛ばないように検出器の見直し
- 正確な飛跡パラメータの取得、原子核反跳事象の選別へ