



# 方向感度をもつ暗黒物質探索に向けた 大型ガスTPCの性能評価

---

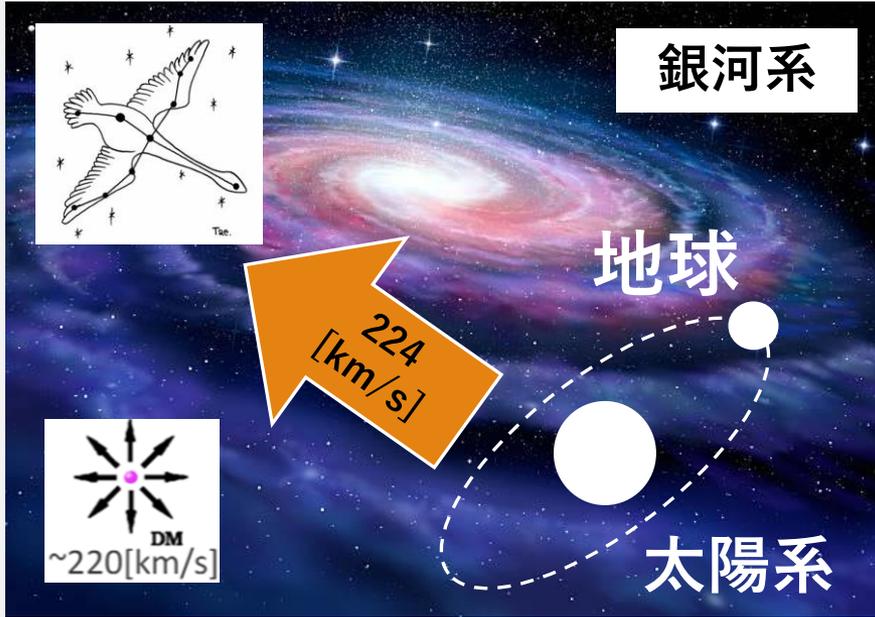
MPGD & ACTIVE媒質TPC2025研究会

神戸大学 生井 凌太

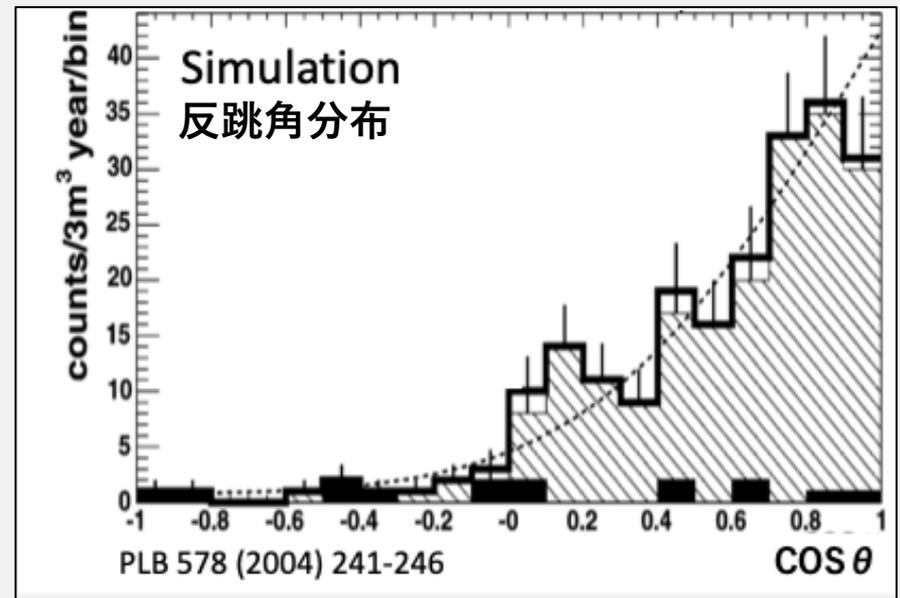
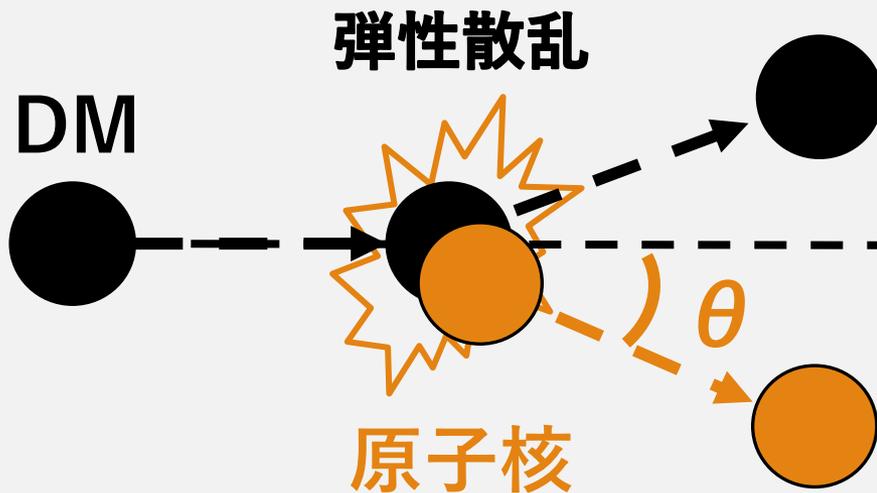
2025/12/20

岩手大学 銀河ホール

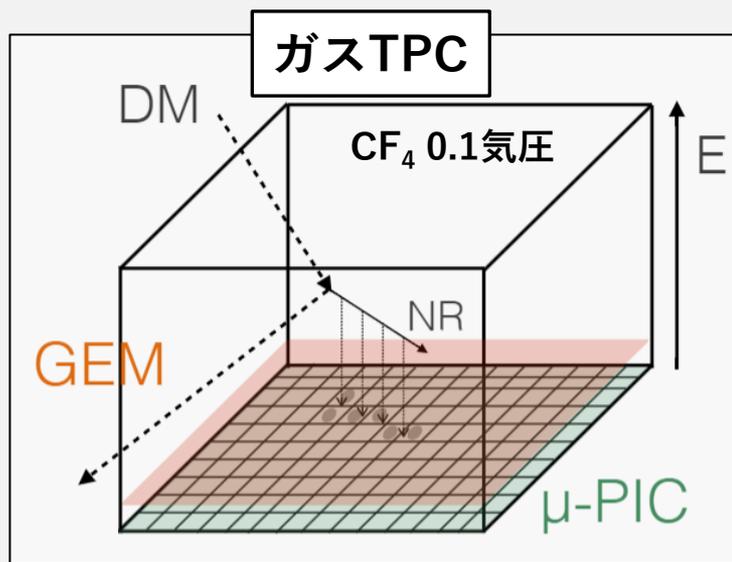
# 方向感度をもつ暗黒物質探索



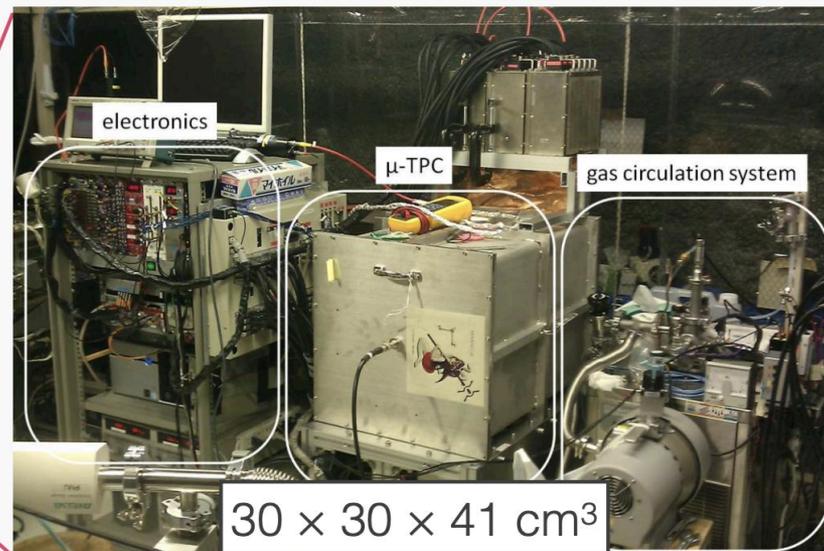
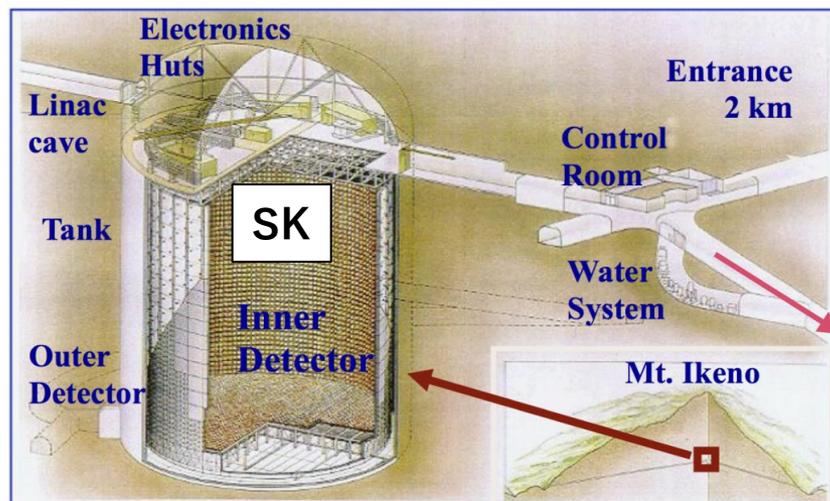
- 不明な質量の存在の観測事実  
→ 世界中での暗黒物質 (DM) 探索
- 方向に感度を持つ探索  
→ DMの到来方向依存性を利用
- どうやって?  
→ DM -原子核弾性散乱の反跳角分布を利用 (直接探索)



# NEWAGE実験



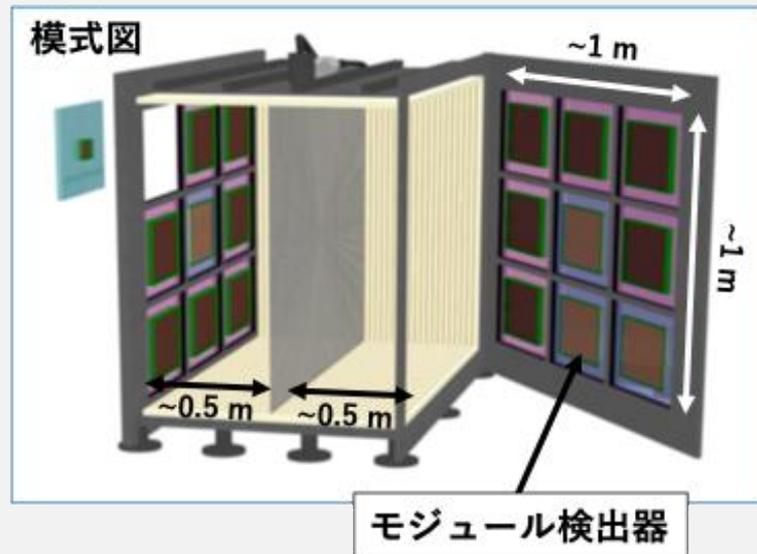
- ガスTPC (Time Projection Chamber)
  - $\text{CF}_4$  0.1気圧
  - GEMによる前置増幅
  - $\mu$ -PIC (Micro Pixel Chamber)による三次元読み出し
- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
  - 電極付近に高電場を形成、電子を雪崩増幅



# チェンバーの大型化

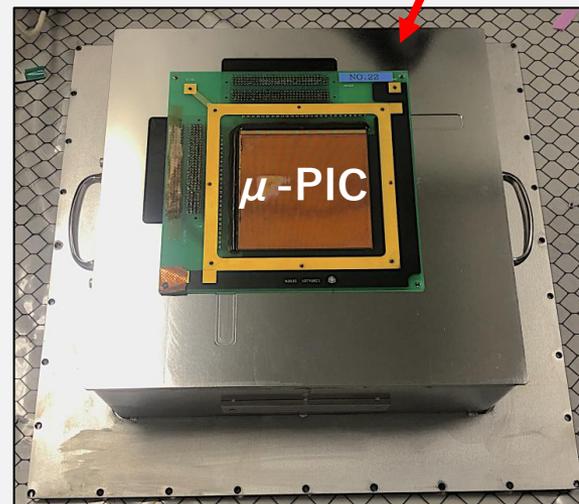
- 更なる高感度での探索に向け、チェンバーの大型化を計画

現行チェンバー@神岡

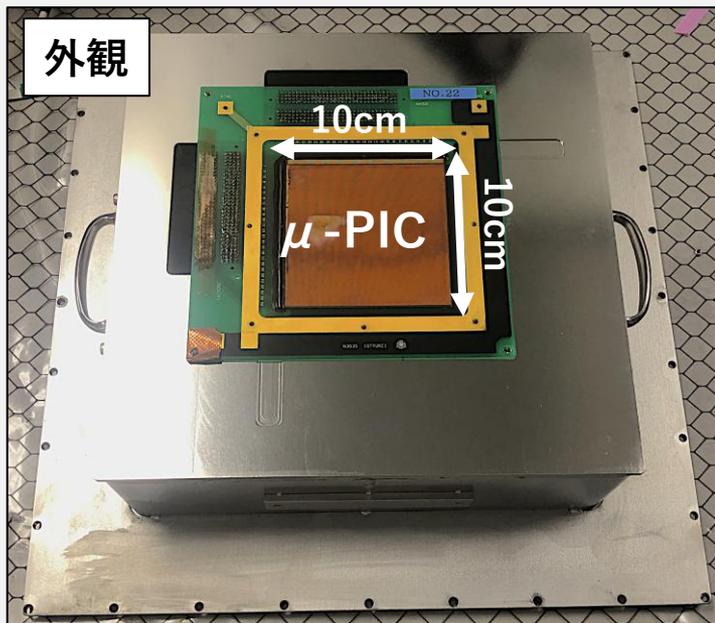


CYGNUS/NEWAGE-KM-1.0 (C/N-1.0)

- 容積: ~1 m<sup>3</sup>
  - NEWAGEの約30倍
- モジュール型の検出器を最大18台搭載
  - 現行NEWAGEと同様に方向感度をもつモジュールを製作



# Module-1

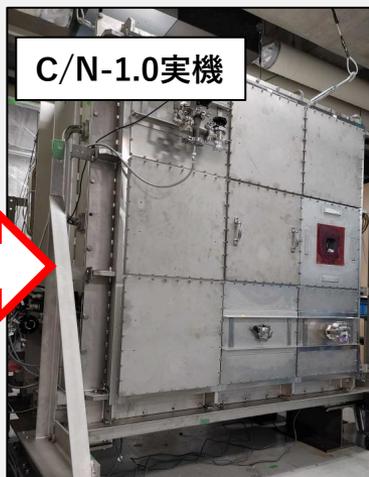


- 特徴

- 検出面積:  $10 \times 10 \text{ cm}^2$
- $\mu$ -PICによる三次元飛跡再構成  
→ 現行NEWAGEを模した構造

- 現行NEWAGEと異なる電場構造

- GND面の場所
  - C/N-1.0の内部電場を乱さないため  
→ 形成電場に影響がないことを確認済  
(JPS2024春 20aV1-3)



## 動作試験

- テストチェンバーを用いた性能評価を実施

方向感度を持つ = 飛跡の角度を再構成可能

$29.2^{+1.8}_{-0.6} \text{ }^\circ$  (stat.)の角度分解能を確認

→ C/N-1.0へのModule-1導入へ

# データ取得

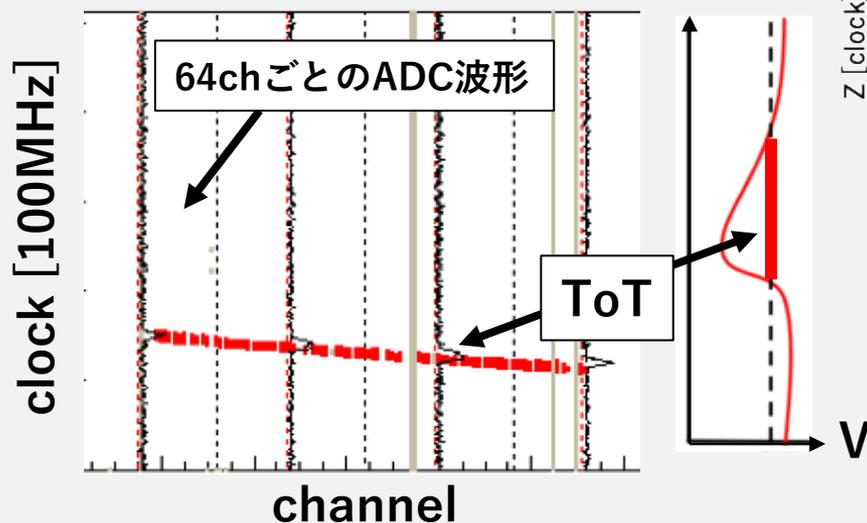
## 信号読み出し回路の外観



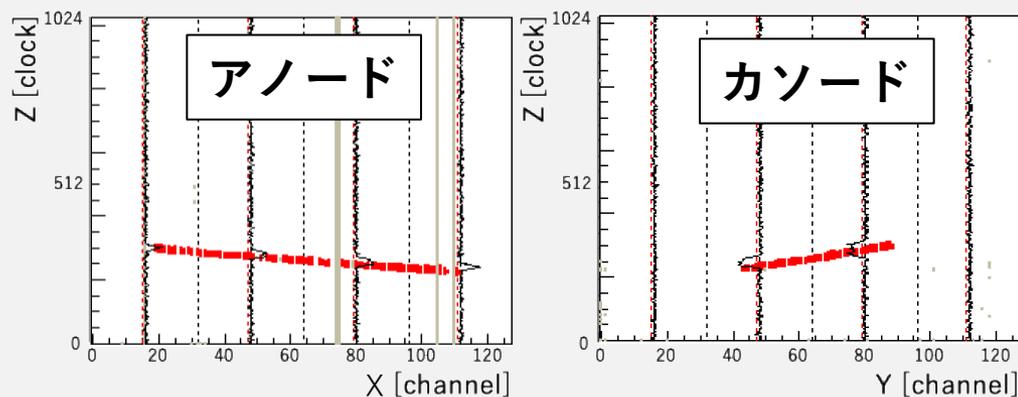
読み出しボード  
SMILE実験@京大

- アノード、カソード各128チャンネル
- 読み出される信号は2種類
  - 32チャンネルごとに合計したADC波形  
→ トリガー発行、エネルギー算出に使用
  - 各チャンネルのTime over Threshold (ToT)  
→ 飛跡長、反跳角度算出に使用

## 読み出しボードで取得される情報



## 再構成された飛跡の例



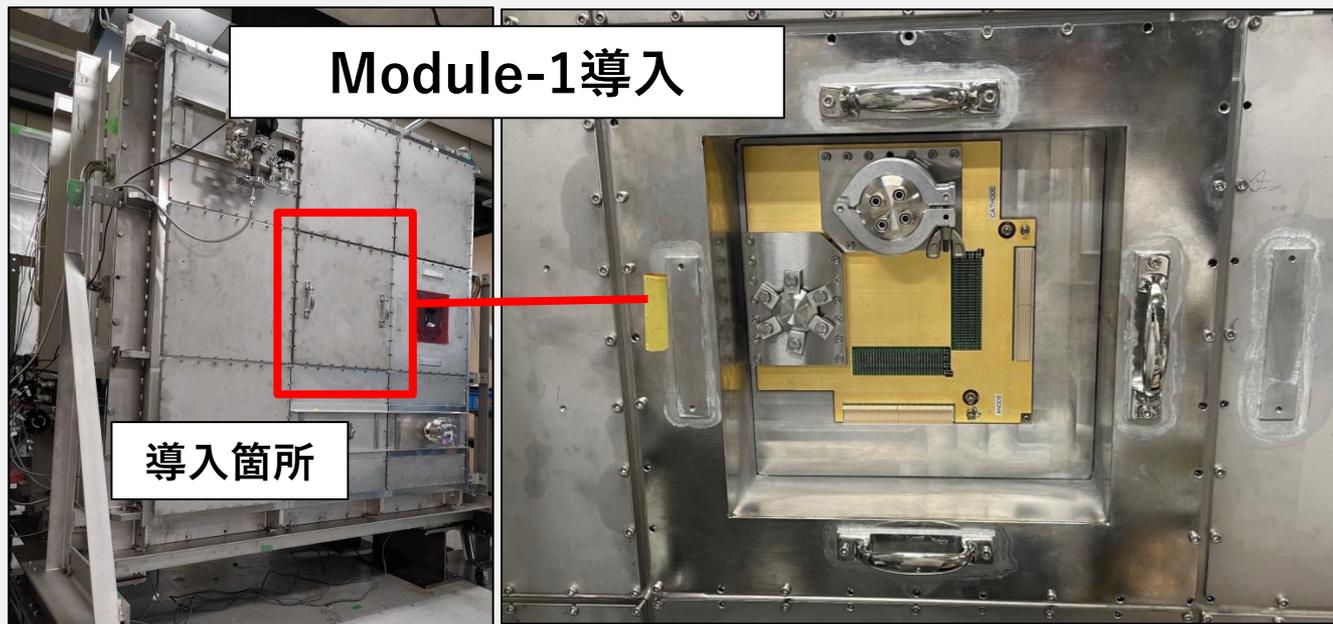
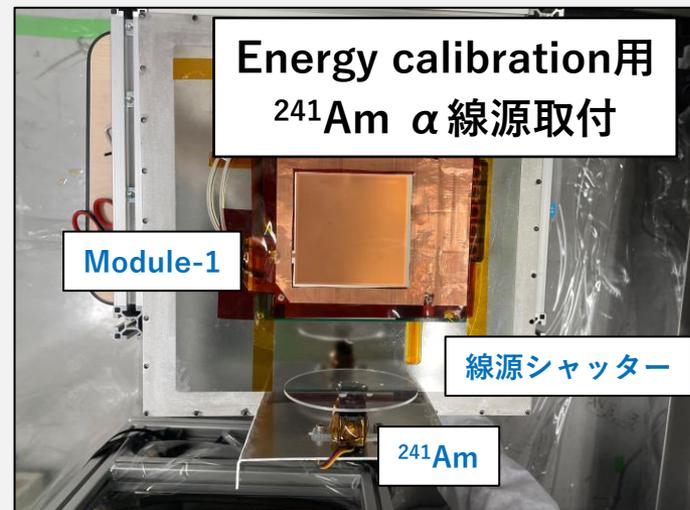
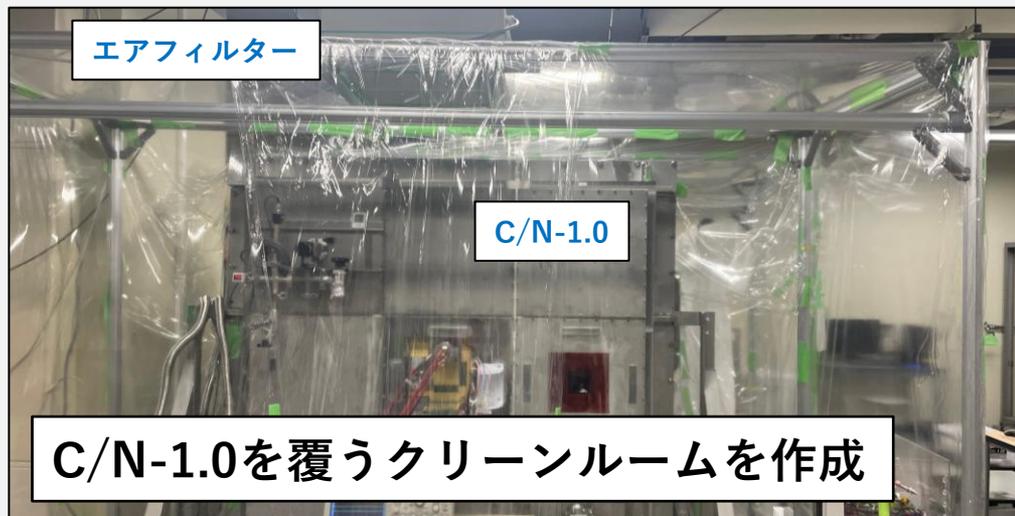
エネルギー : 340.0 keV  
飛跡長 : Length: 9.1 cm

**C/N-1.0**

---

# C/N-1.0への導入

➤ 動作試験の完了したModule-1をC/N-1.0へ導入



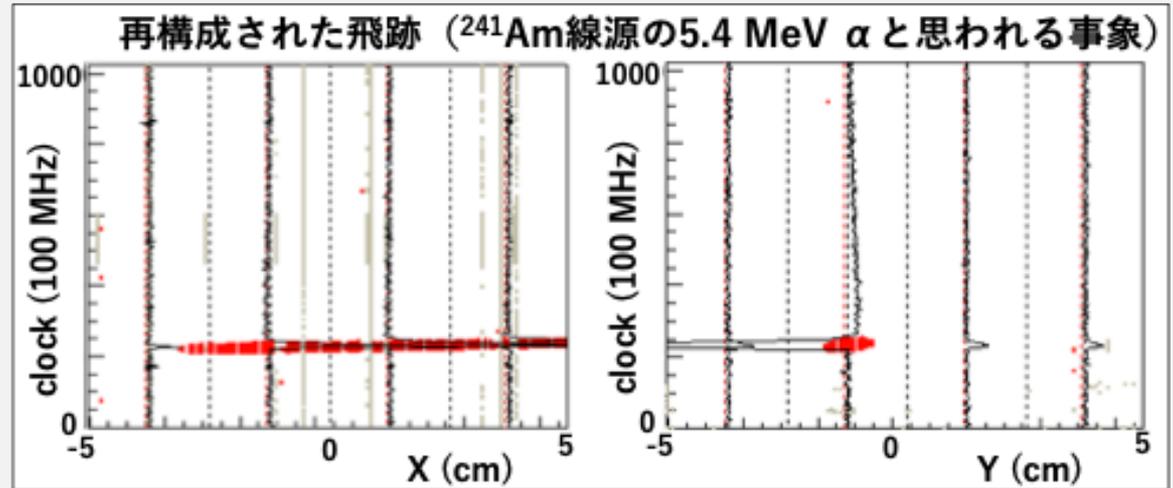
C/N-1.0への導入が  
完了



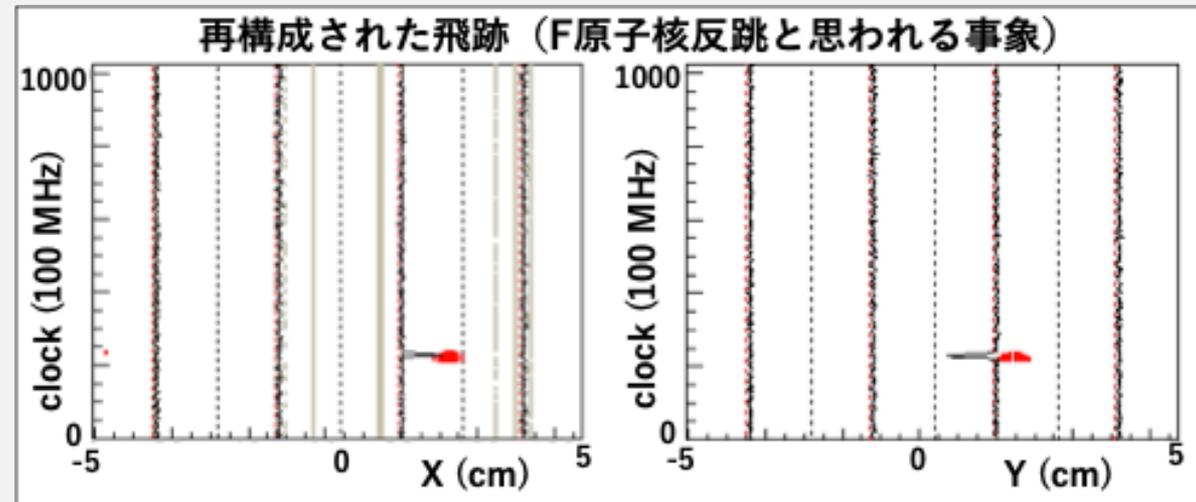
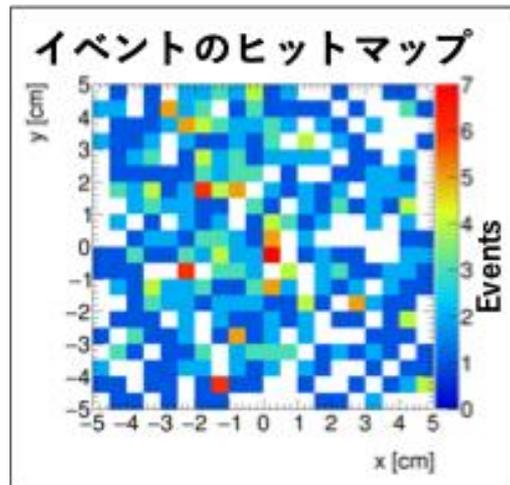
C/N-1.0による  
飛跡の取得試験へ

# C/N-1.0による飛跡取得試験

## ➤ $^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 線源

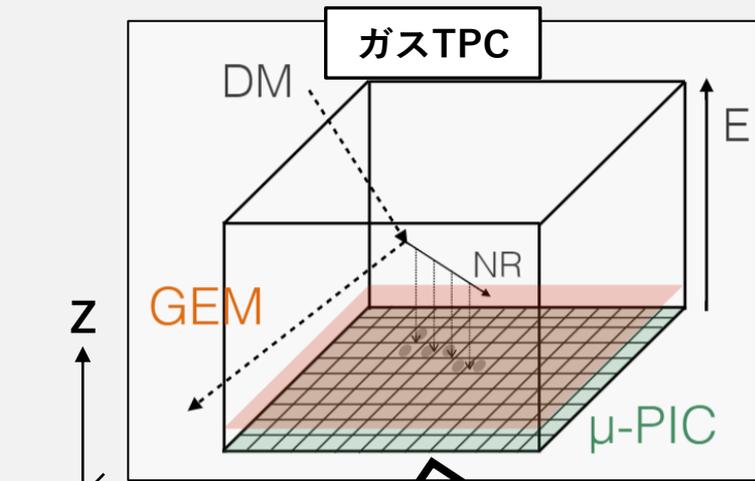


## ➤ $^{252}\text{Cf}$ 中性子線源 照射

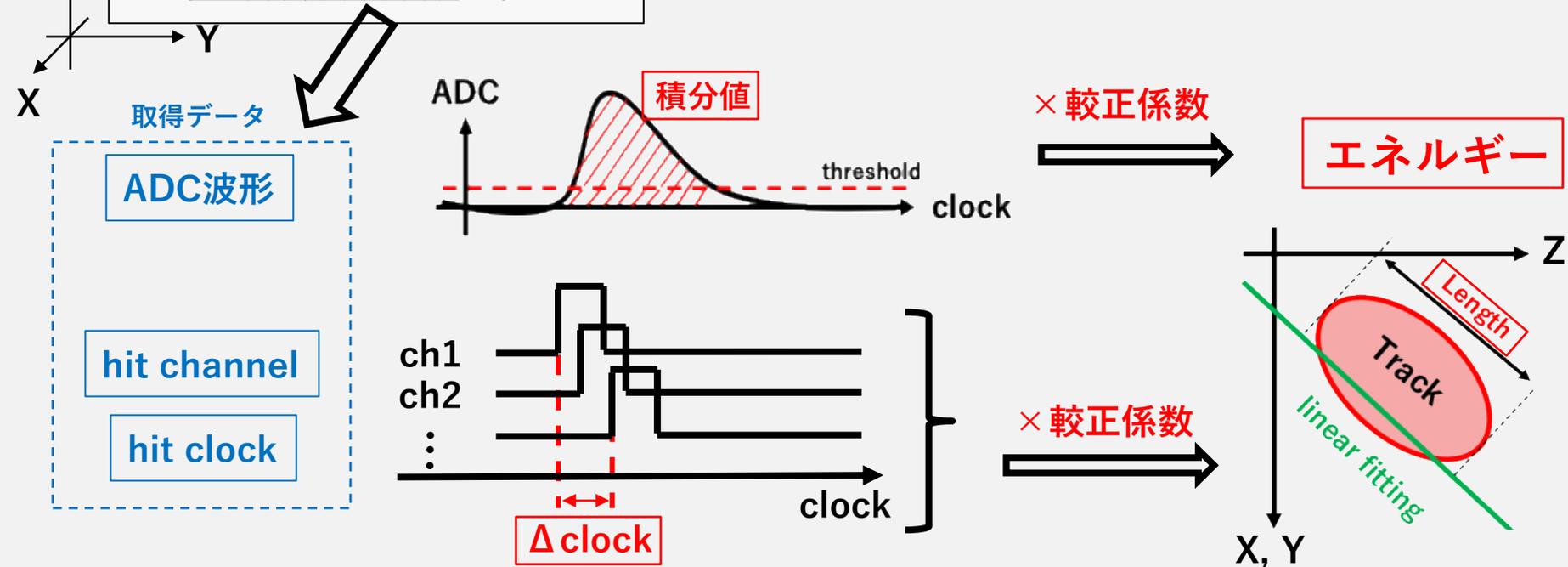


→ NEWAGEモジュールで初となるC/N-1.0での飛跡再構成に成功

# 飛跡情報の再構成



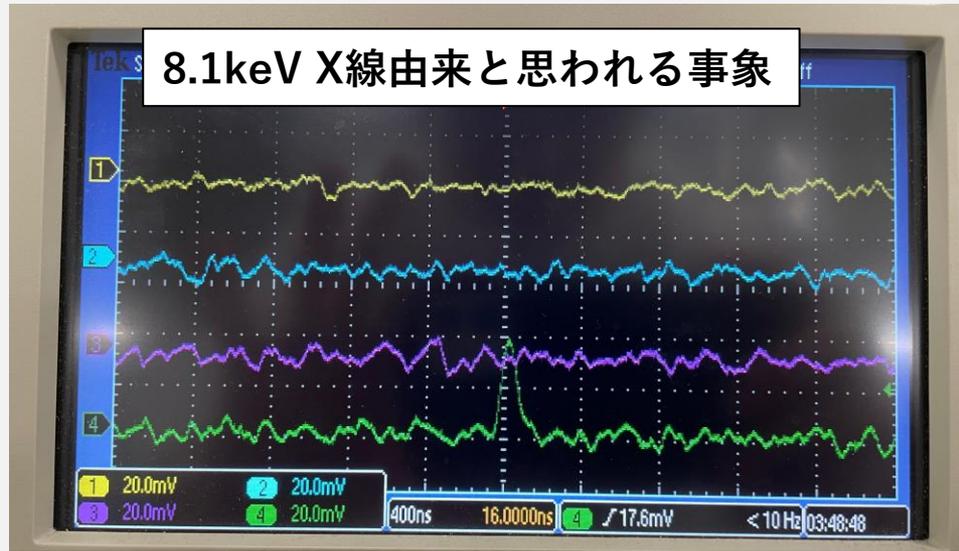
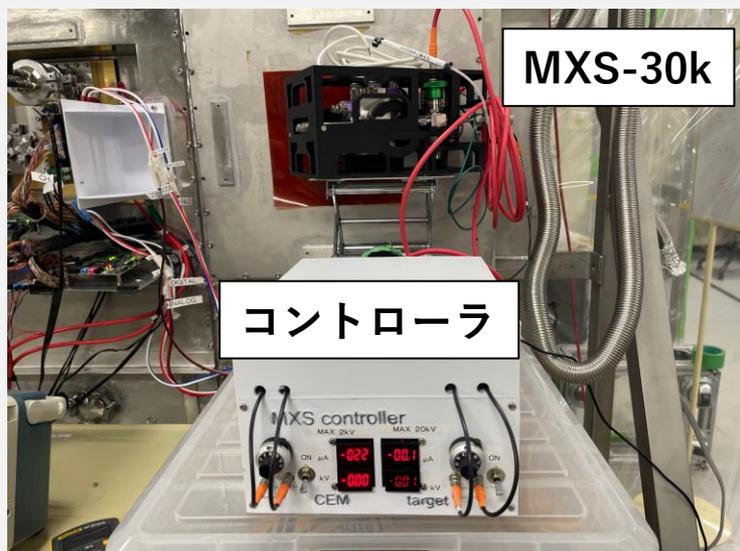
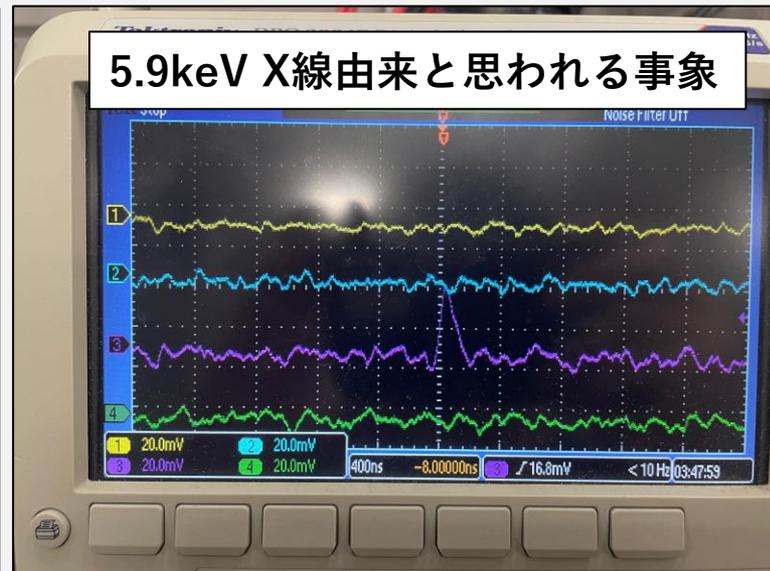
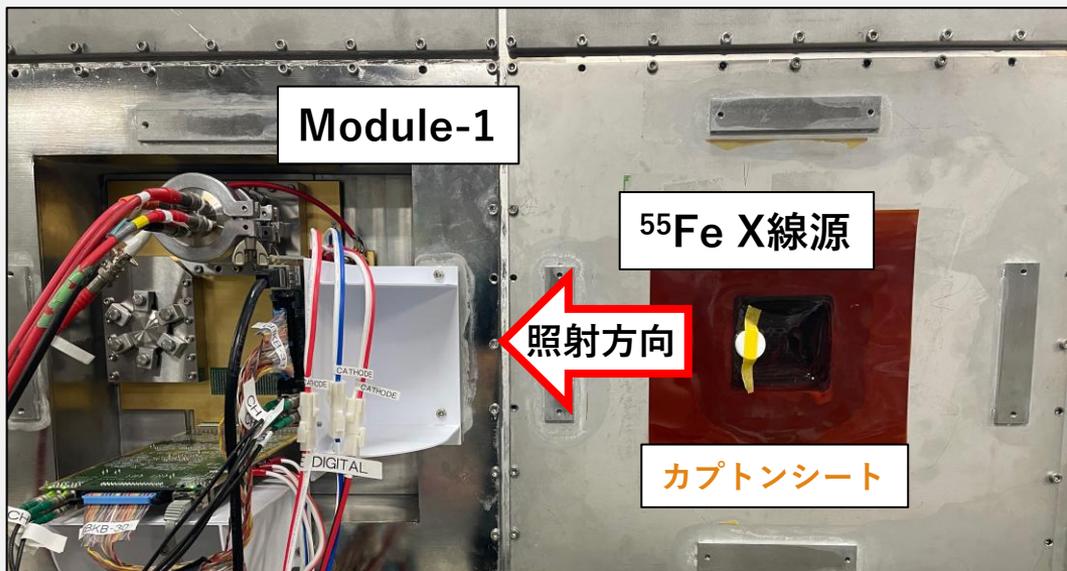
- $^{19}\text{F}$ 反跳事象を選別するため、飛跡パラメータを抽出
- 飛跡パラメータを再構成するためには校正係数が必要



➤ エネルギー・長さの再構成に向けた校正係数測定の実施へ

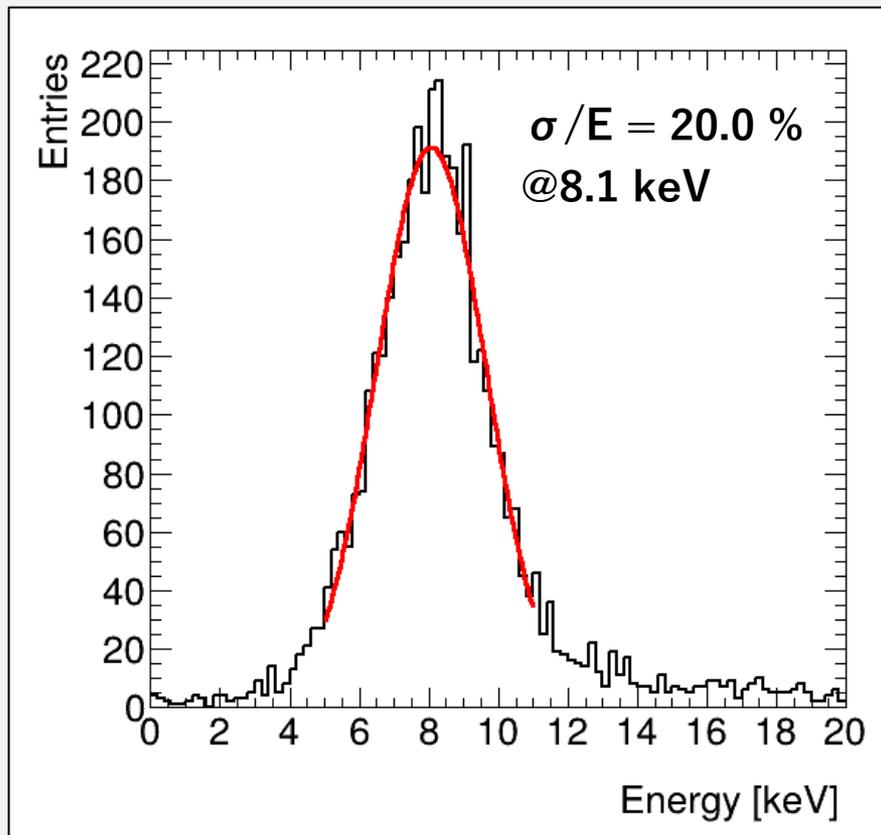
# エネルギー較正

- $\text{CF}_4$  ガス 0.1 torr
- $^{55}\text{Fe}$ 線源 5.9 keV, MXS-30k (身内トーク) 8.1 keV X線の2種類を使用

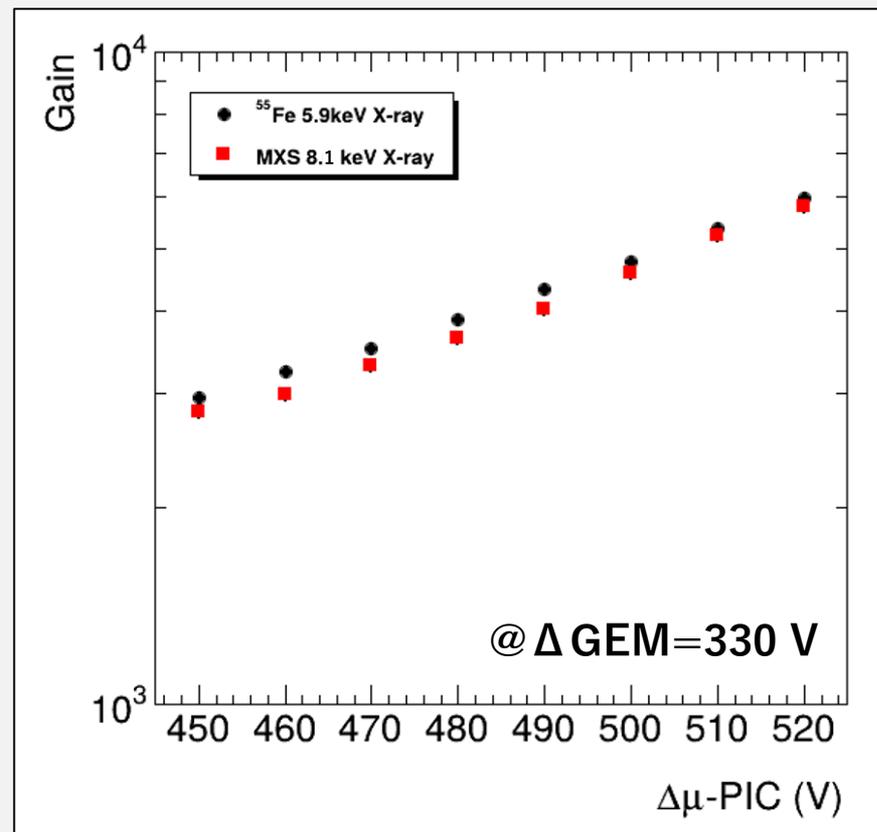


# エネルギー較正

## 8.1 keV X線照射時のスペクトル



## $\mu$ -PICに印加する電位差とゲインの関係性



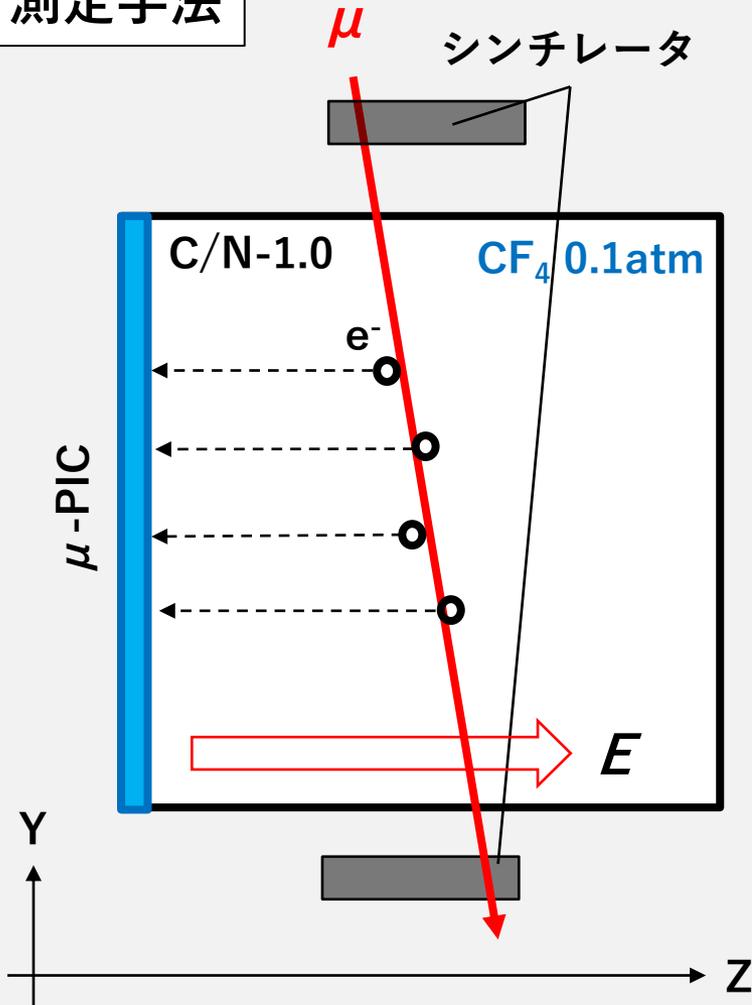
- 単色スペクトルの再構成を確認
- referenceの $^{55}\text{Fe}$  5.9keV X線とも数%での誤差範囲で一致を確認

→ エネルギーの再構成手法を確立

# ドリフト速度較正

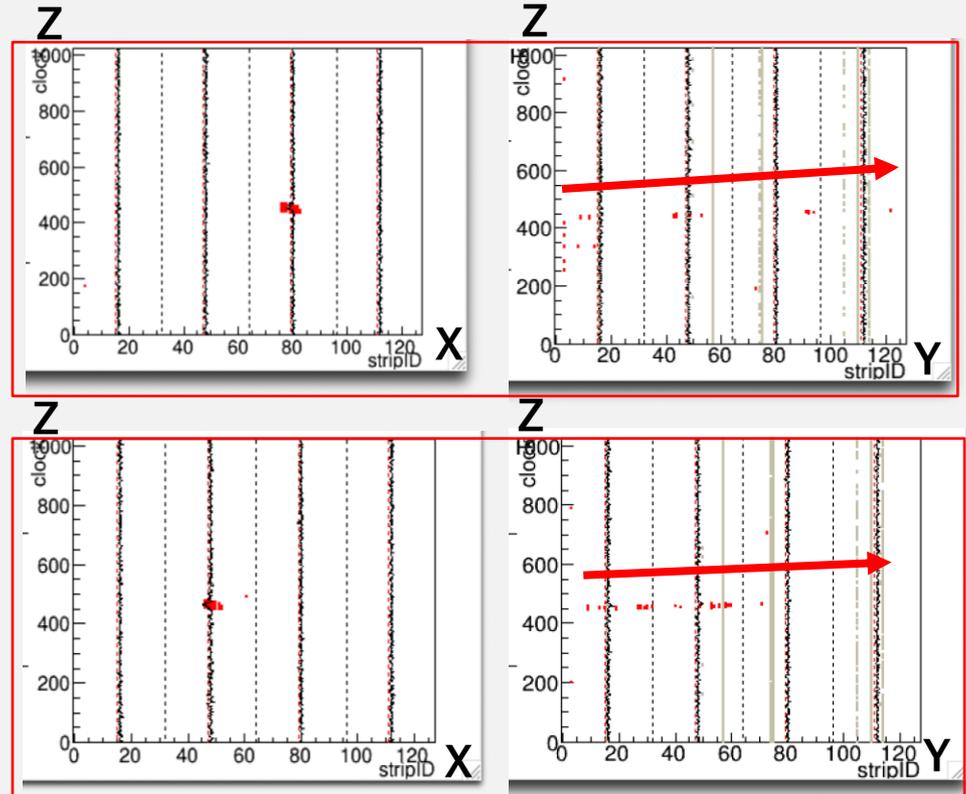
- 宇宙線 $\mu$ を使用した手法によってドリフト速度を確認

## 測定手法



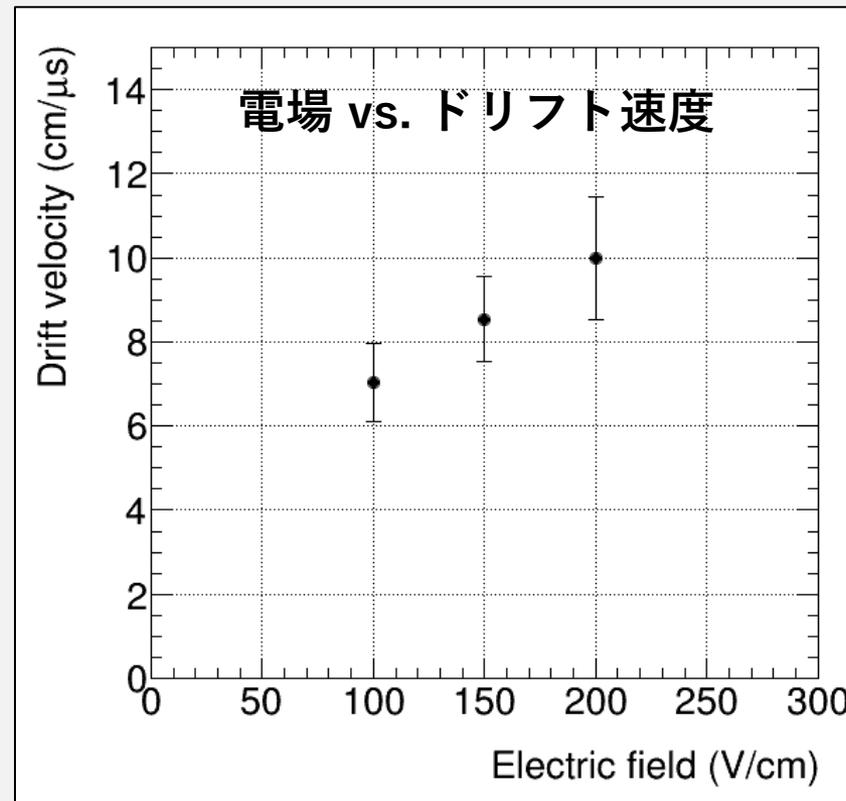
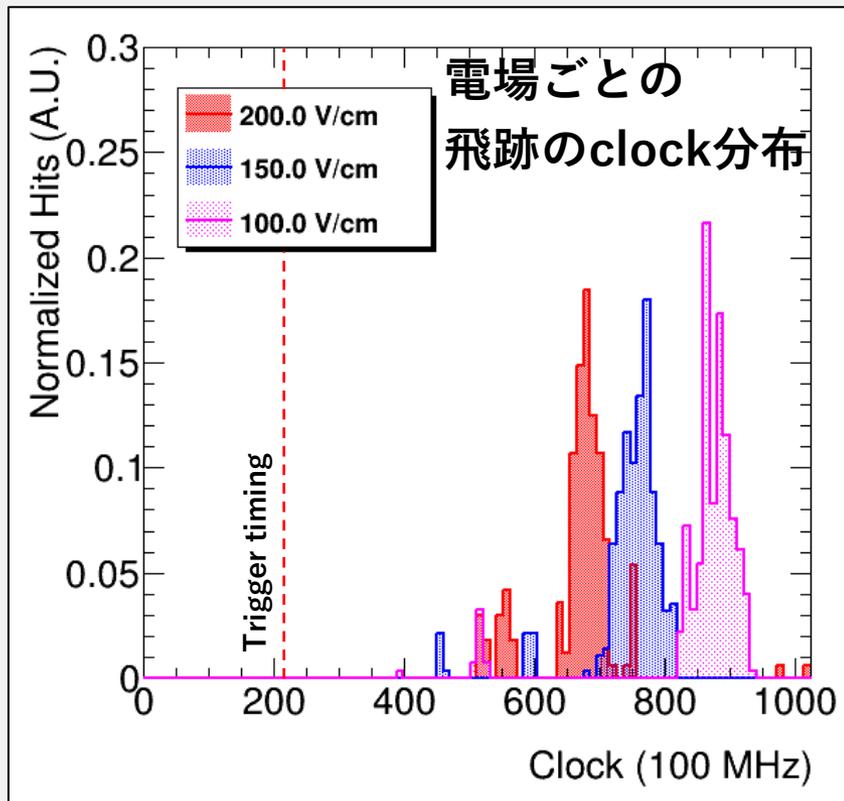
- 検出を挟んでシンチレータを配置
- 同時計測時にでトリガを発行

## 取得された飛跡の例



# ドリフト速度較正

- 異なる電場強度でドリフト速度測定を実施



- ドリフト速度の測定が可能であることを確認

エネルギーと合わせて。。

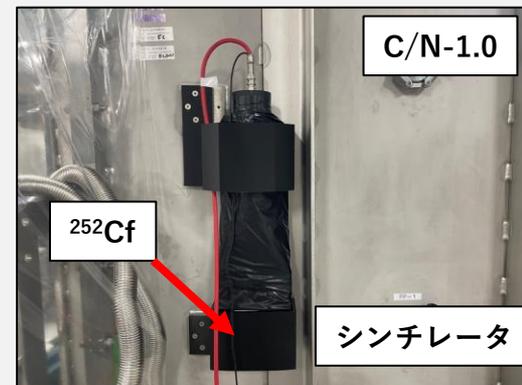
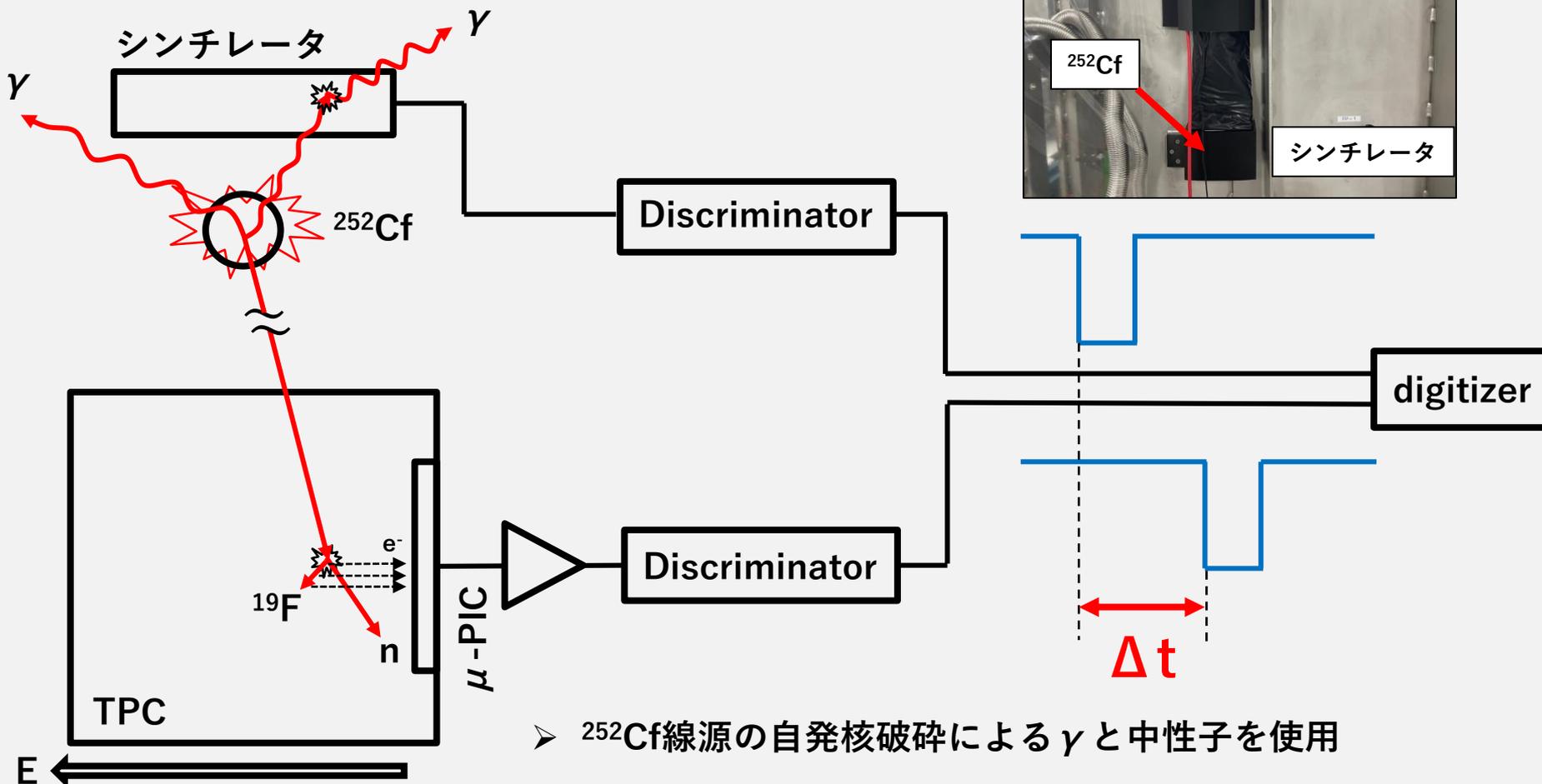


C/N-1.0で飛跡の再構成が可能であることを確認

# ドリフト速度較正

- 地下ではミュオンを用いた手法が使用できない。  
→ 別手法を確立する必要がある。

## 測定手法

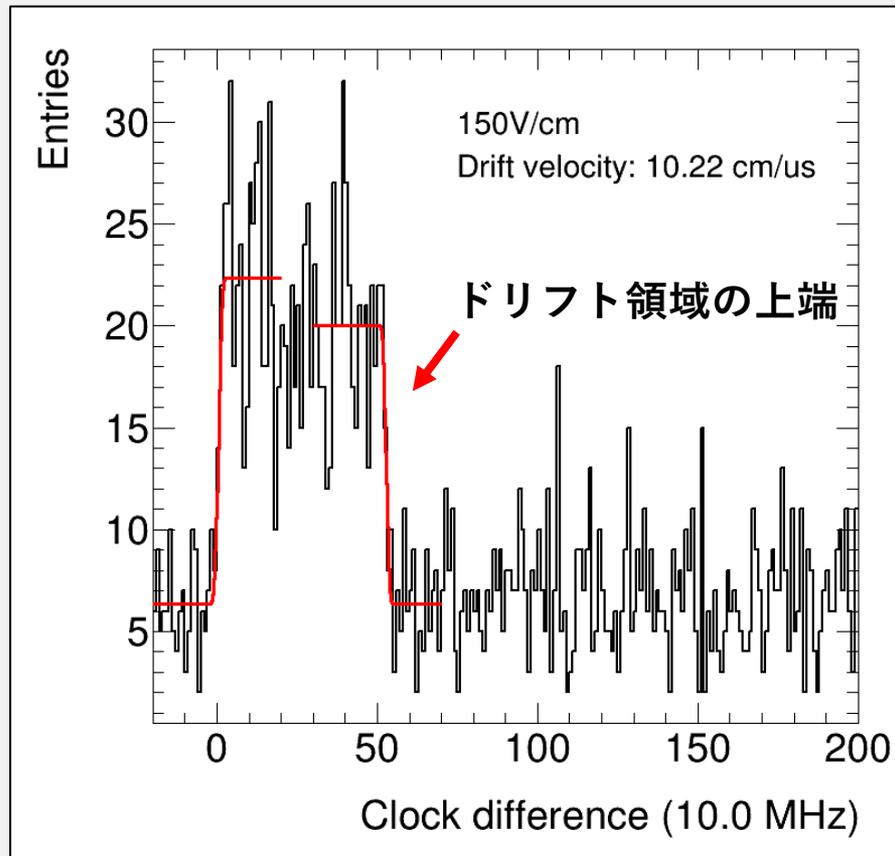


- $^{252}\text{Cf}$ 線源の自発核破砕による $\gamma$ と中性子を使用
- シンチレータとTPCで同時計測、信号の時間差を計算

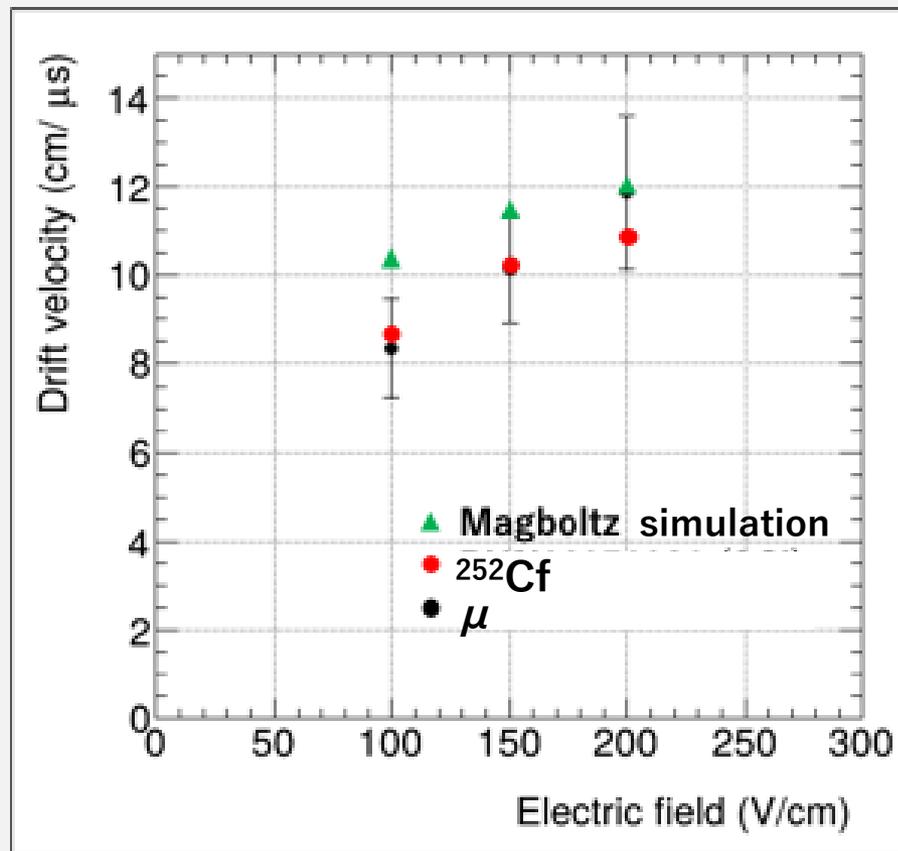
# ドリフト速度較正

- CF4 ガス 0.1 torr
- 100, 150, 200 V/cmの3通りで検証

シンチレータ-TPCの信号時間差分布



ドリフト速度の電場強度依存性

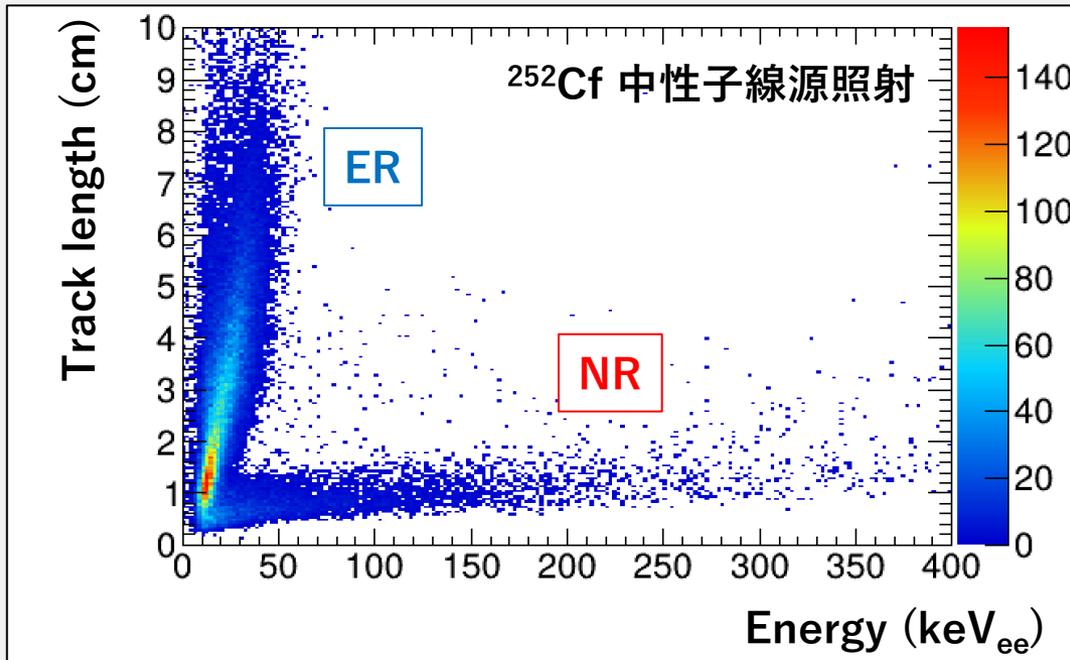


- μを用いた手法と誤差の範囲内で一致
- **ドリフト速度の較正方法を確立**

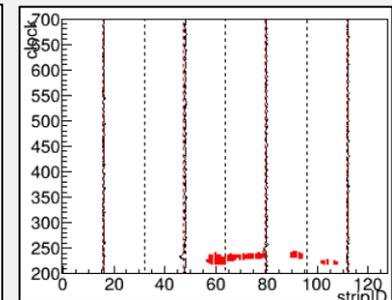
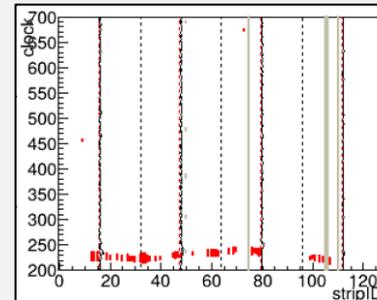
# 飛跡情報の再構成

- 得られた較正係数を用いて飛跡情報を再構成する。

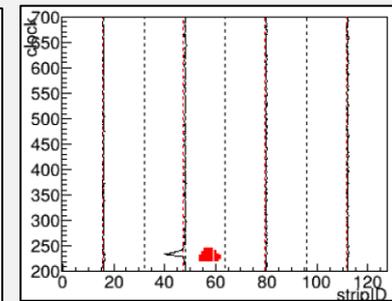
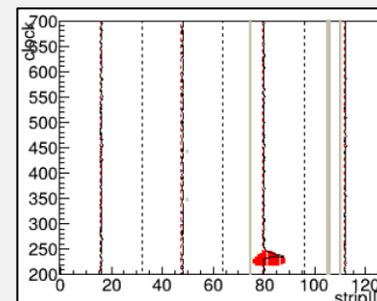
再構成されたエネルギー-長さ分布



ER



NR



- 電子反跳 (ER) と原子核反跳 (NR) の分離を確認  
→ カットパラメータの決定が可能

## 今後の解析

- カットによりNRを選別 → 検出効率、角度分解能の確認
- バックグラウンドの推定

地上でのDM探索へ

# C/N-1.0 ロードマップ

2025



## ➤ C/N-1.0での性能評価

- 検出効率の評価
- 角度分解能の評価

} 検出感度の推定

## ➤ 地上での暗黒物質探索試験

2026

神岡坑内への搬入 (2025年度)

@神戸

## ➤ Module-1地下測定 (commissioning)

@神岡

2027

## C/N-1.0による暗黒物質探索へ

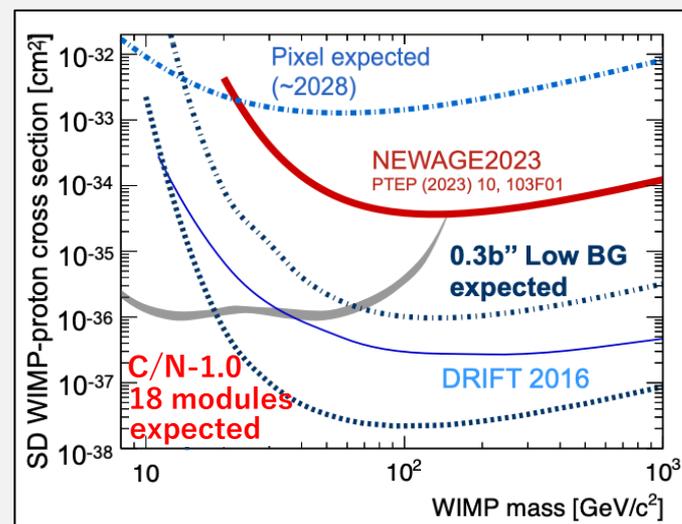
- $\mu$ -PICを  $\square$  10 cm  $\rightarrow$   $\square$  30 cmに upgrade

- モジュールの増設

$\rightarrow$  18台体制での運用を目指す

2030

**DAMA/LIBRA領域のさらなる探索**



# まとめ



- NEWAGE: 方向に感度をもつ暗黒物質直接探索実験
- 感度向上に向けた大型検出器「C/N-1.0」の開発が進行中
  - 検出器を「モジュール」化
- 「Module-1」モジュールをC/N-1.0へ導入
  - 信号取得に成功
  - エネルギー、飛跡の長さの較正係数の測定が完了
- C/N-1.0によるDM探索に向けて
  - 地上DM探索試験に向けコミッショニング中
    - 検出器性能（検出効率、角度分解能）の評価
    - 背景事象の評価
- 今年度中の神岡坑内搬送を目標

バックアップ

---

# 事象選別



## ➤ F原子核反跳事象を選別

- 飛跡の情報から飛跡長、エネルギー情報を再構成
- $^{252}\text{Cf}$ 線源による中性子照射

## 選別条件

### ① 有効体積カット

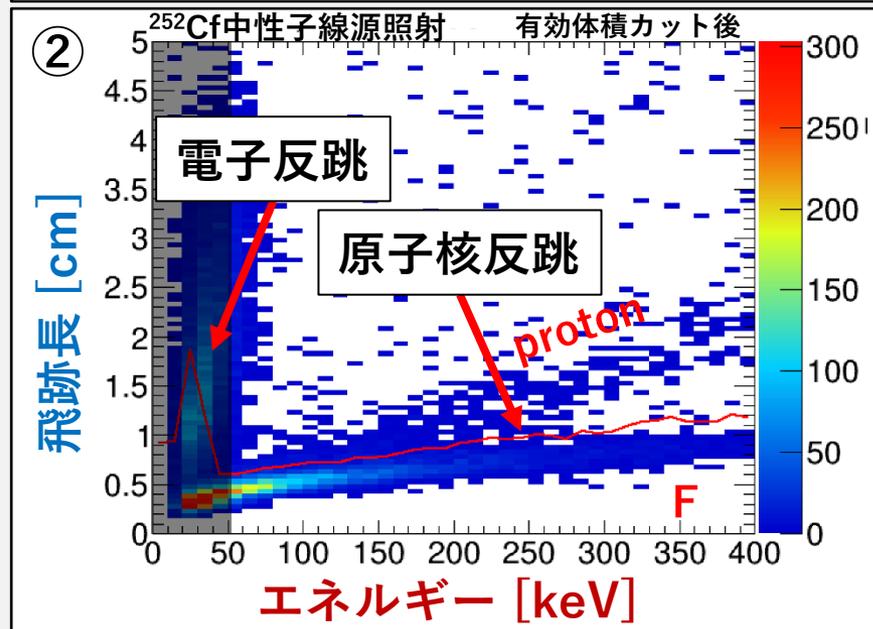
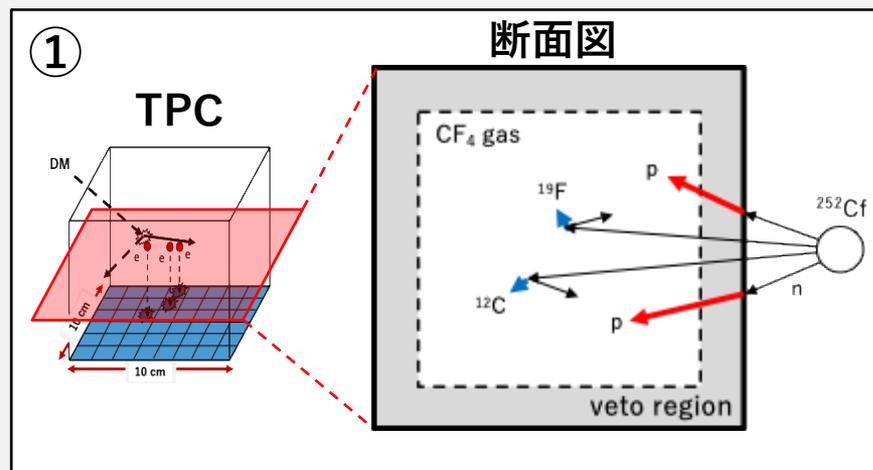
- 検出面積の端1cmでの事象をカット  
→ 検出領域外からのproton等を除去

### ② エネルギー-飛跡長カット

- 原子核反跳に対してカットラインを決定  
→ F反跳事象を選別

- 本解析ではprotonとの分離が良い  
> 200 keVを使用

飛跡の角度分解能評価へ

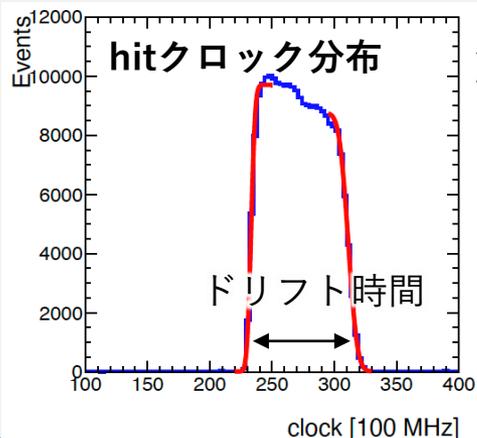


# 事象選別



## ドリフト速度（飛跡長）較正

Hit信号分布から電子のドリフト速度を評価

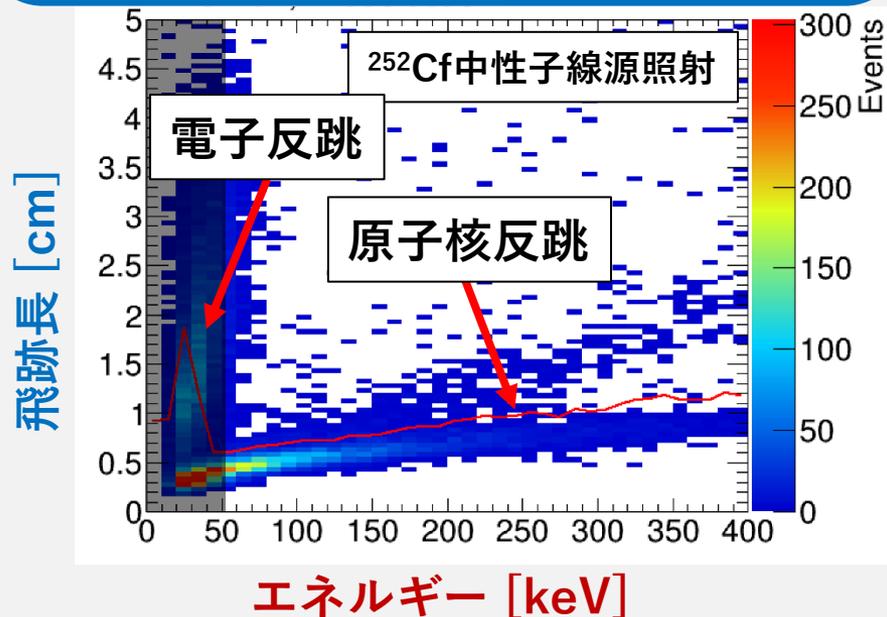
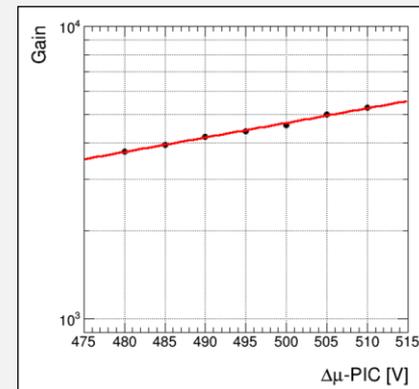
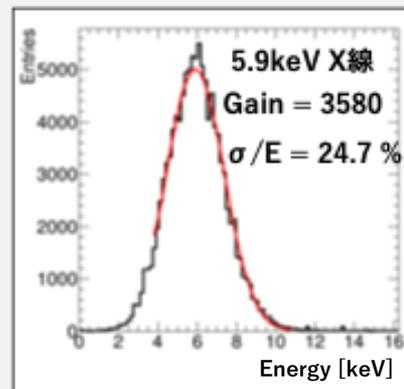


- シンチレータによる外部トリガ
  - 宇宙線  $\mu$  を使用
- 5.1 cm/ $\mu$ s

## エネルギー較正

$\mu$ -PICの印加電圧とガス利得の関係を評価

➤ 55Fe 5.9keV X線

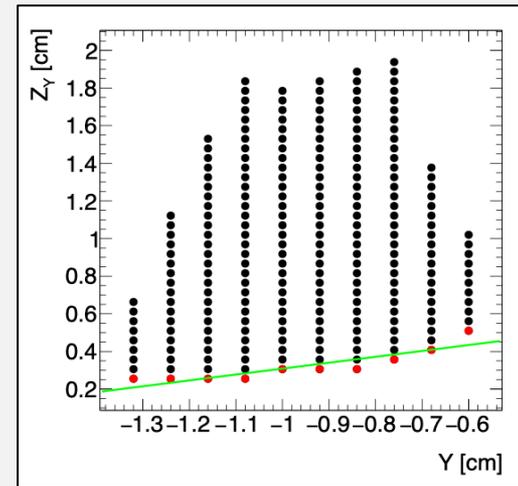
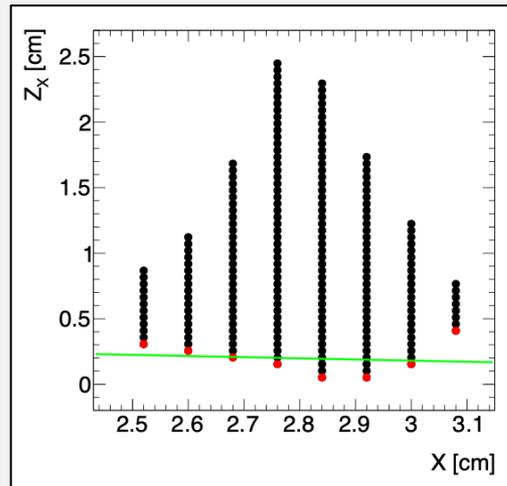
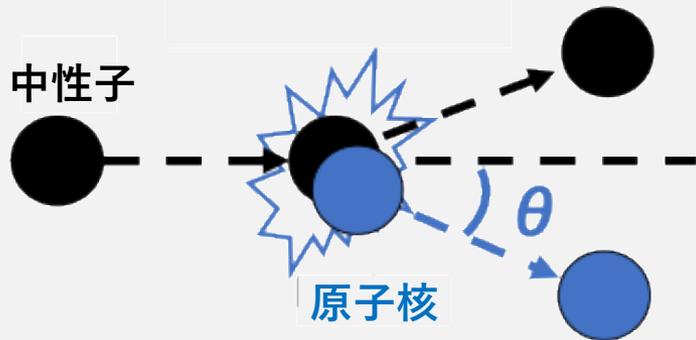


- 有効体積カット
  - 検出面積の端1cmでの事象をカット
    - 検出領域外からのproton等を除去
- エネルギー-飛跡長カット
  - $^{252}\text{Cf}$ 線源による中性子照射
  - 原子核反跳に対してカットラインを決定
    - F反跳事象を選別

# 角度分解能評価



➤  $^{252}\text{Cf}$ 線源の中性子を使用



➤ 中性子による反跳原子核の反跳角を計算

- 飛跡に対して線形fitting
- MCでの反跳角度分布と比較

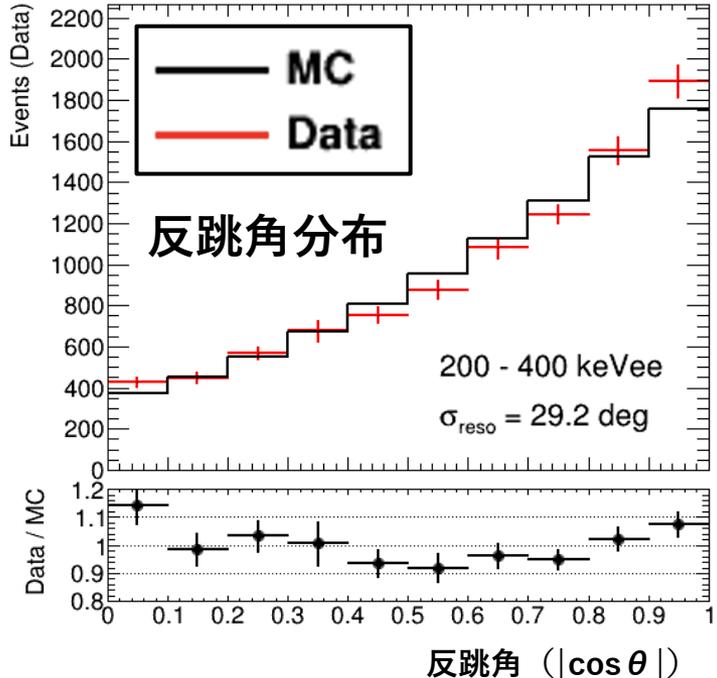


$$\sigma_{\text{reso}} = 29.2^{+1.8}_{-0.6} \text{ } ^\circ \text{ (stat.)}$$

(200 keV < E < 400 keV)

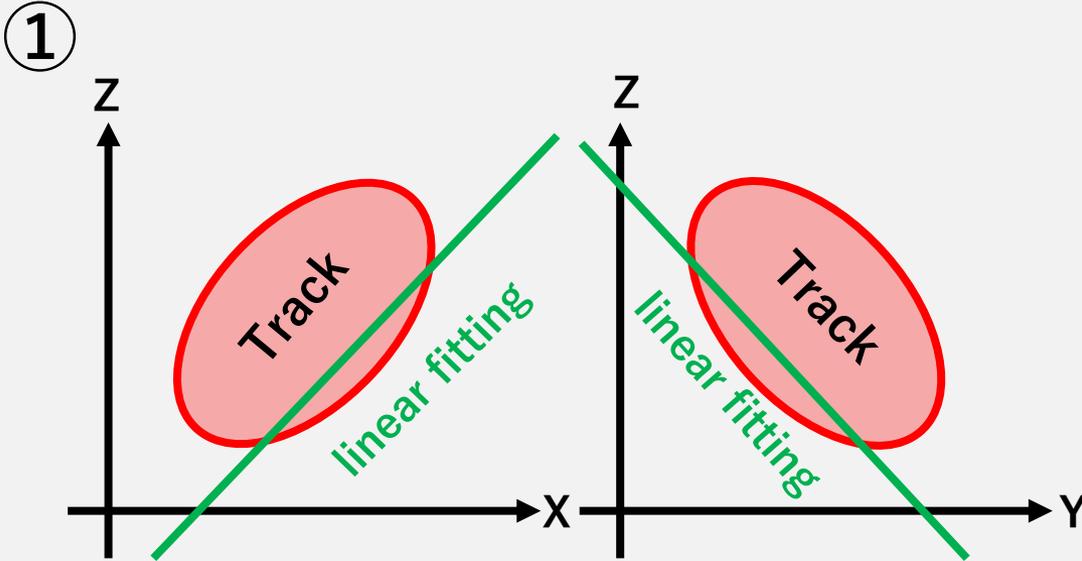
NEWAGE:  $\sigma_{\text{reso}} = 41.1^{+1.6}_{-1.6} \text{ } ^\circ \text{ (stat.)}$

➤ drift距離の違いによる電子拡散による改善と思われる。

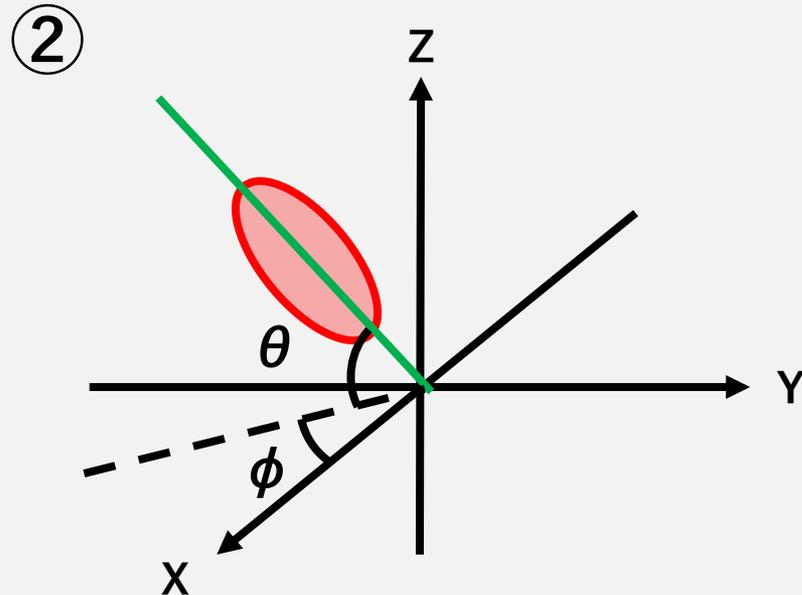


飛跡の角度情報を再構成できることを確認

# 角度計算方法



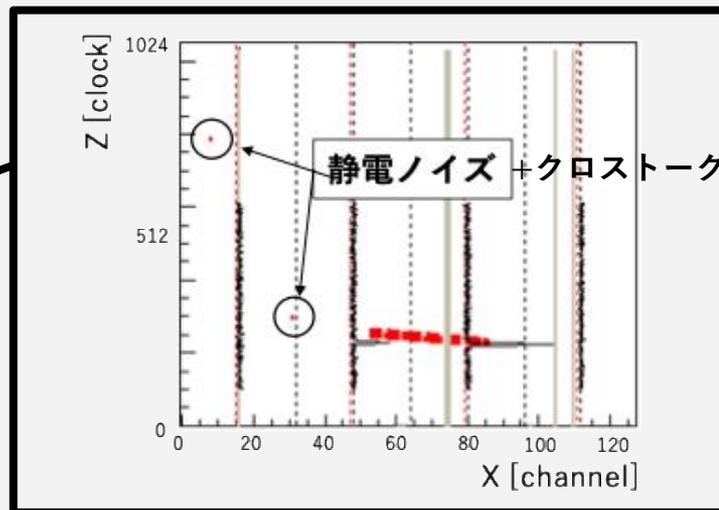
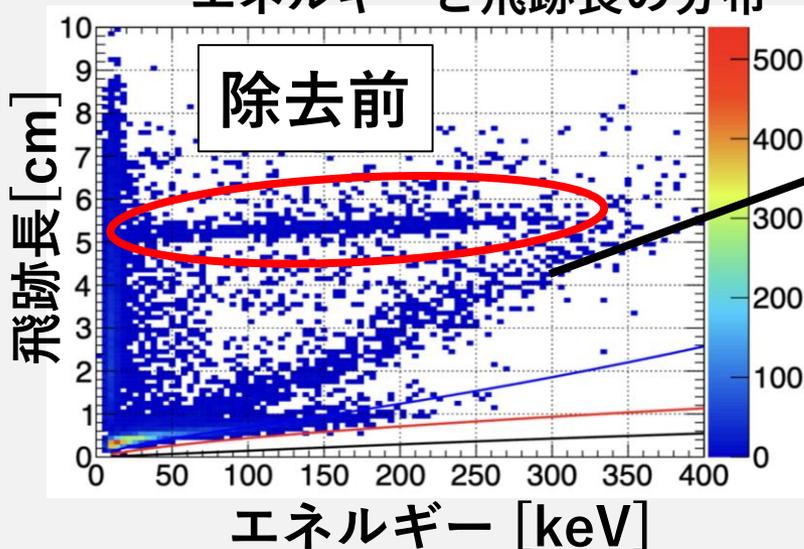
- F原子核反跳を事象選別
- X-Z、Y-ZのToTを線形fitting



- X-Z、Y-Zの傾きから球面座標系における仰角、方位角を計算
- X-Z、Y-Zの傾きから球面座標系における仰角 $\theta$ 、方位角 $\phi$ を計算
- 線源照射方向に対する反跳方向 $\gamma$ を計算

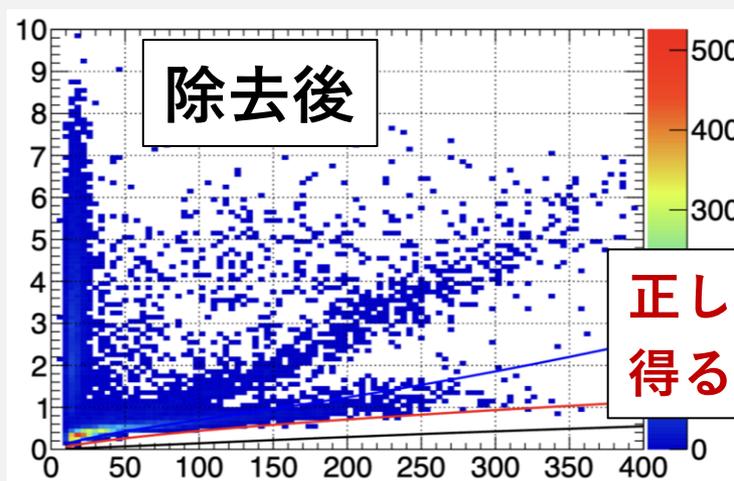
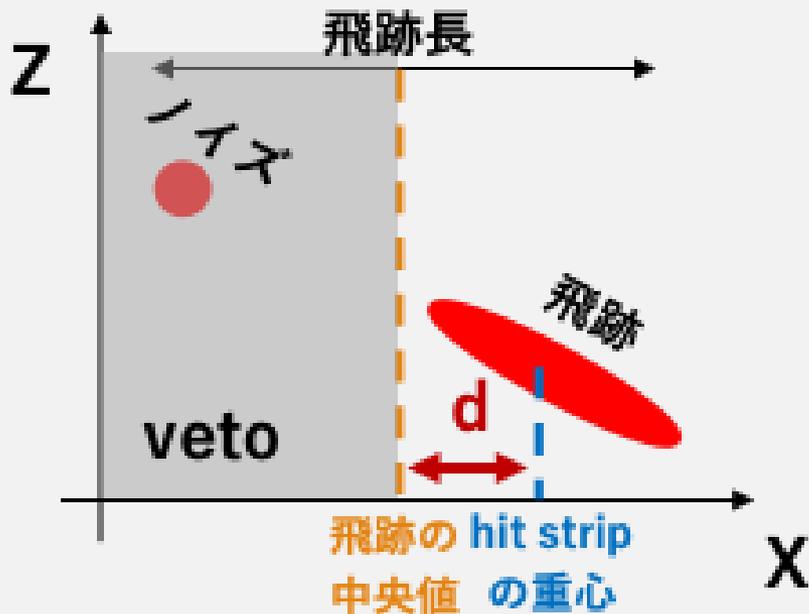
# ノイズ、クロストークの除去

エネルギーと飛跡長の分布



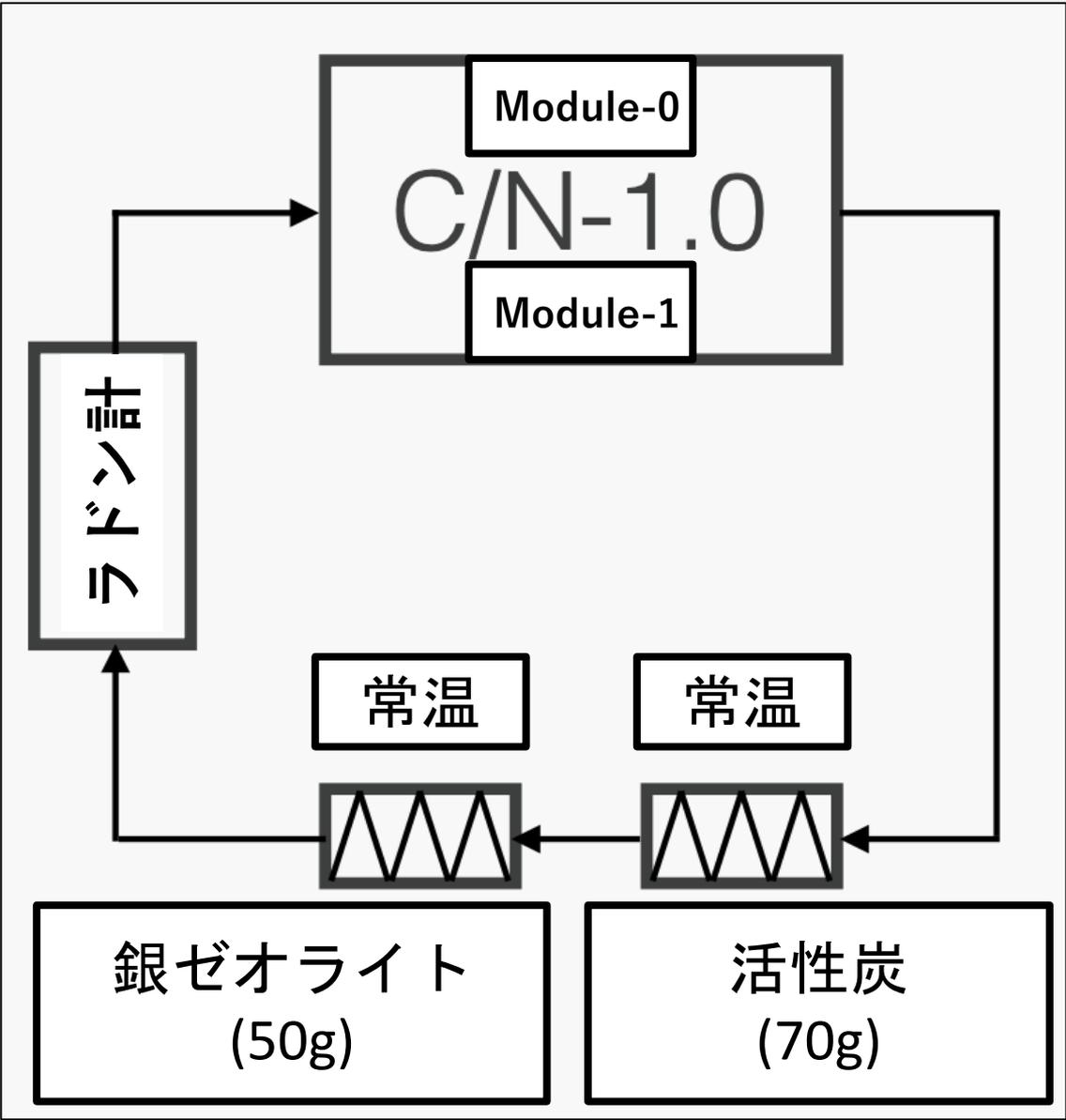
ノイズにより誤った飛跡長が計算されてしまう

d (飛跡の中心と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



正しい飛跡長を  
得ることに成功

# C/N-1.0 循環系



# Module-0

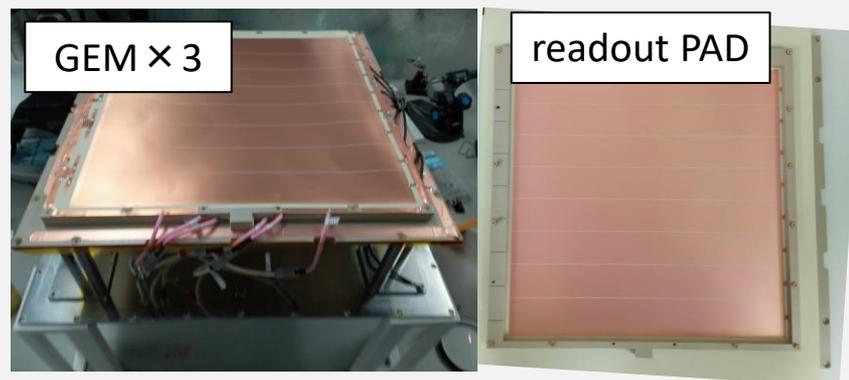


## 用途

- BG確認等のためのモジュール。
- 方向感度を持たない。

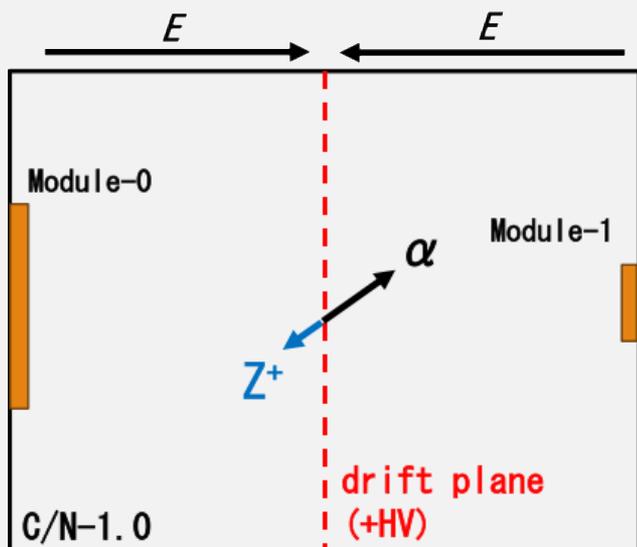
## 検出器

- 増幅: GEM3枚(液晶ポリマー)  $31 \times 31\text{cm}^2$
- readout PAD:  $31 \times 31\text{cm}^2$  8ch読み出し



## ラドン由来 $\alpha$ 線の除去

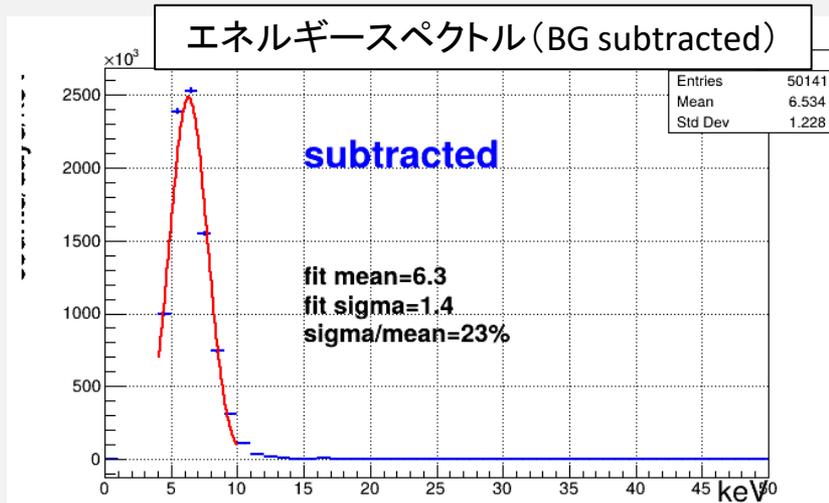
### GEM拡大図



- ドリフト面からのラドン娘核崩壊による表面  $\alpha$  線
- 崩壊したラドン娘核が運動量保存で recoil  
→ 時刻の同期により選択的に  $\alpha$  線事象を除去

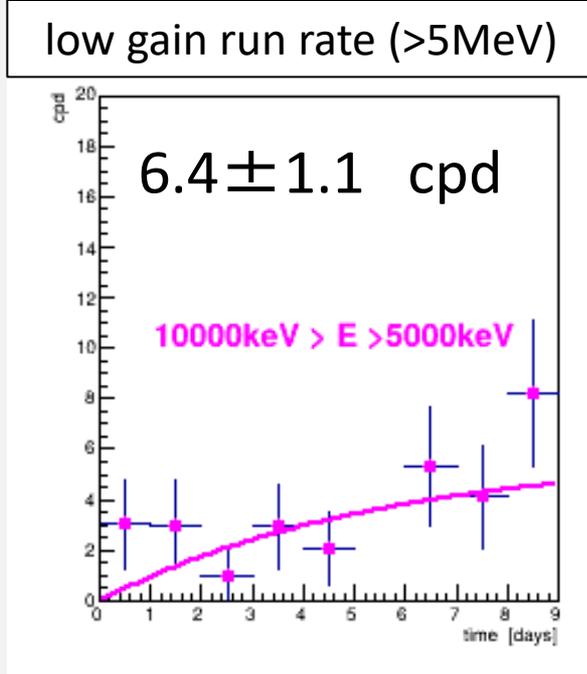
現在モジュール間イベント同期システムを開発中

# Module-0 事象取得 w/ テストチェンバー



## X線試験 5.9keV X-ray ( $^{55}\text{Fe}$ )

- 全面照射 (9か所scanしてsum)
  - ガスゲイン  $\sim 2000$
  - $\sigma/E=23\%$  (ゲイン補正後)
- high gainでのenergy calibrationが可能であることを確認

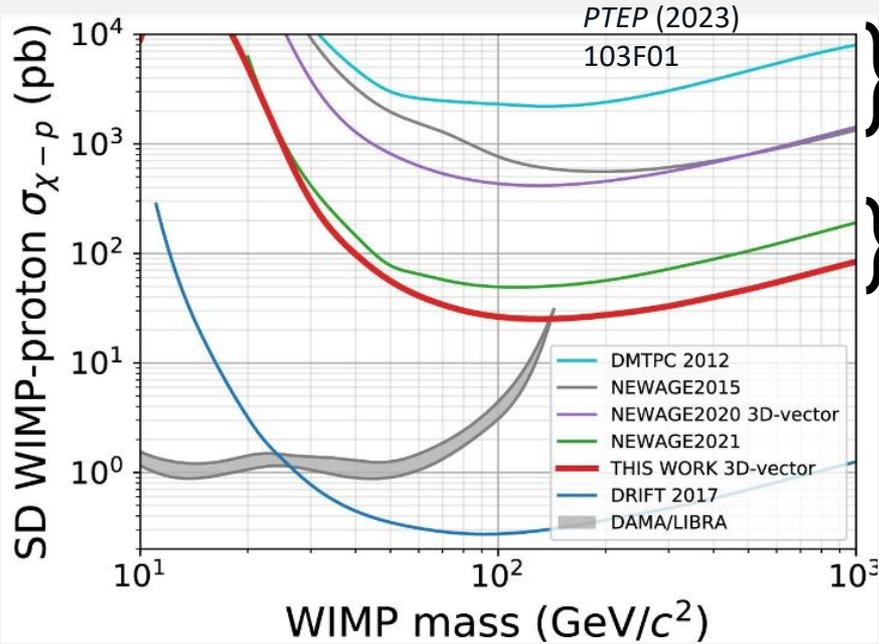


## BG (低ゲインrun)

- high gain ( $\sim 2000$ )で1weekの安定動作
  - low gain ( $\sim 100$ )で高エネルギー事象取得
- low gainでの $\sim 6\text{MeV}$ のU、Th系列の娘核由来の $\alpha$ の測定が可能であることを確認

→C/N-1.0に導入がreadyに

# $\mu$ -PIC開発の歴史と低バックグラウンド化の経緯



$\mu$ -PIC  
NEWAGE2015 & 2020



Low  $\alpha$ (LA) $\mu$ -PIC  
NEWAGE2020 & 2023

低バックグラウンド化による感度の向上を行ってきた。

➤ Low  $\alpha$  (LA)  $\mu$ -PIC: 検出器表面からの  $\alpha$  を抑制  
→ 検出感度向上 (PTEP (2023) 103F01)

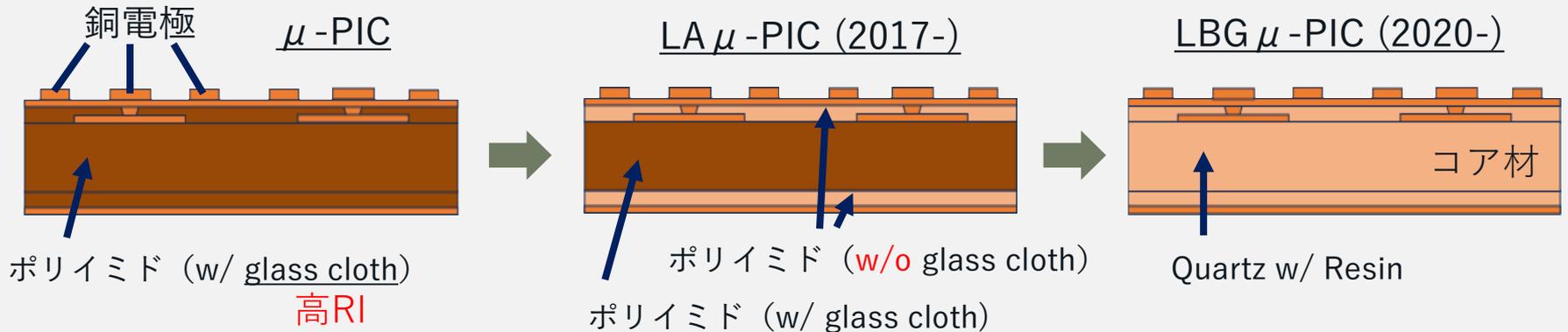
➤ 一方でラドンBGが顕在化

→ コア材をより低RIなものにした Low BG (LBG)  $\mu$ -PIC を製作

➤ ラドンレート要求値: LA  $\mu$ -PIC の  $< 1/10$

研究目的: LBG  $\mu$ -PIC の性能評価

## $\mu$ -PICの改良



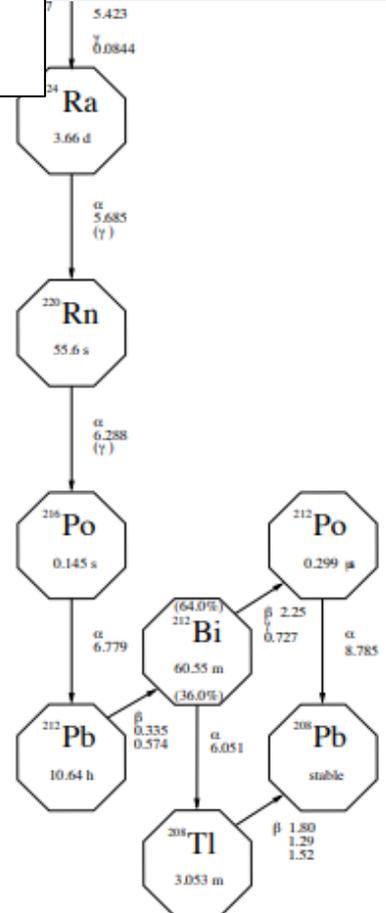
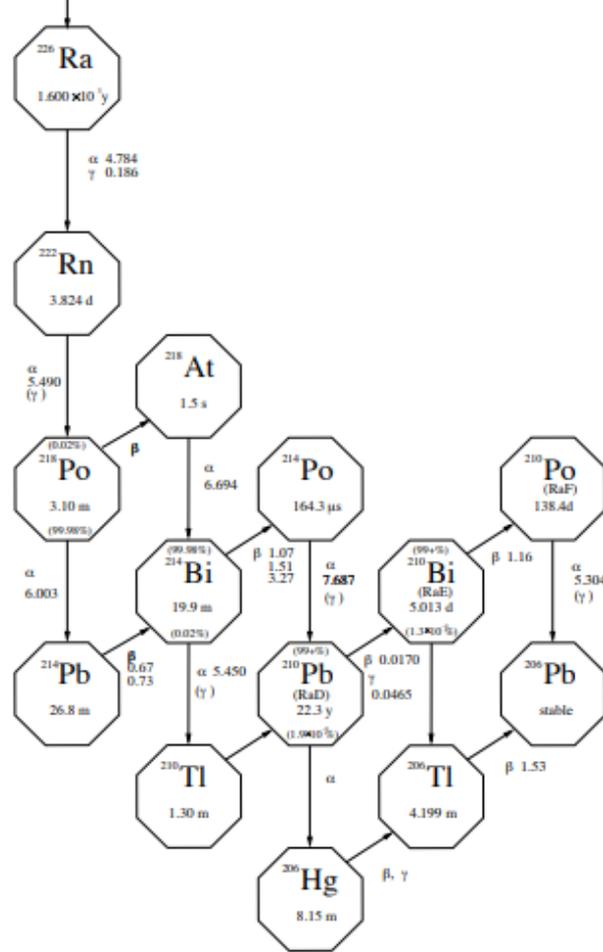
# Radon Decay Chain

$^{238}\text{U}$  chain (下流)

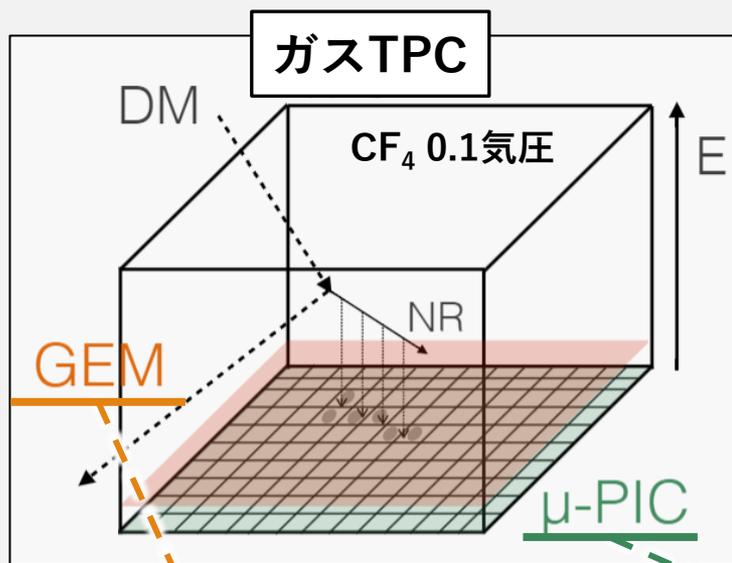
$^{232}\text{Th}$  chain (下流)

$^{88}\text{Ra}$   
 $^{87}\text{Fr}$   
 $^{86}\text{Rn}$   
 $^{85}\text{At}$   
 $^{84}\text{Po}$   
 $^{83}\text{Bi}$   
 $^{82}\text{Pb}$   
 $^{81}\text{Tl}$   
 $^{80}\text{Hg}$

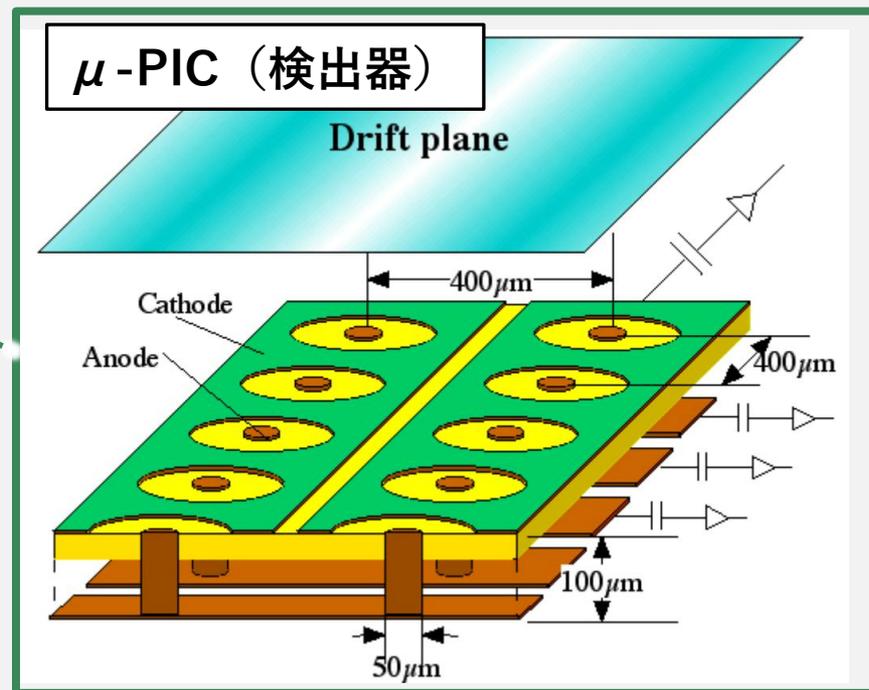
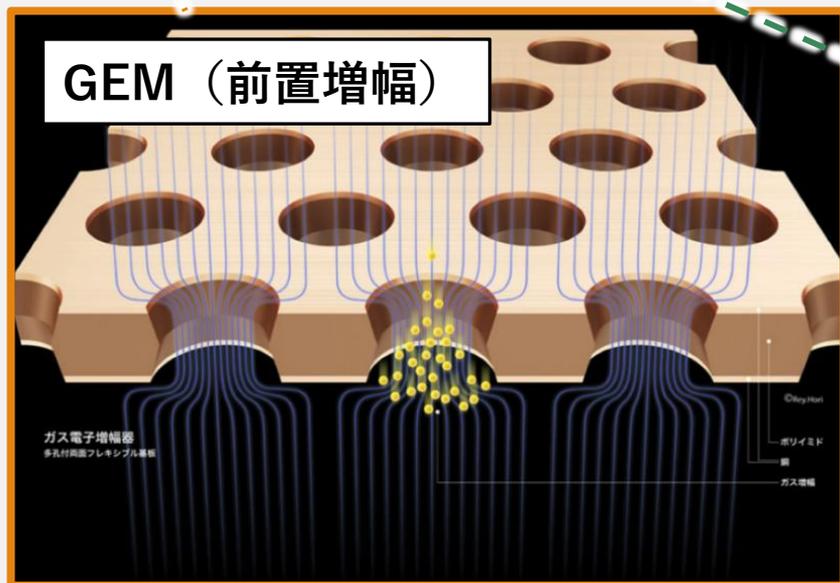
$^{88}\text{Ra}$   
 $^{87}\text{Fr}$   
 $^{86}\text{Rn}$   
 $^{85}\text{At}$   
 $^{84}\text{Po}$   
 $^{83}\text{Bi}$   
 $^{82}\text{Pb}$   
 $^{81}\text{Tl}$



# NEWAGE実験

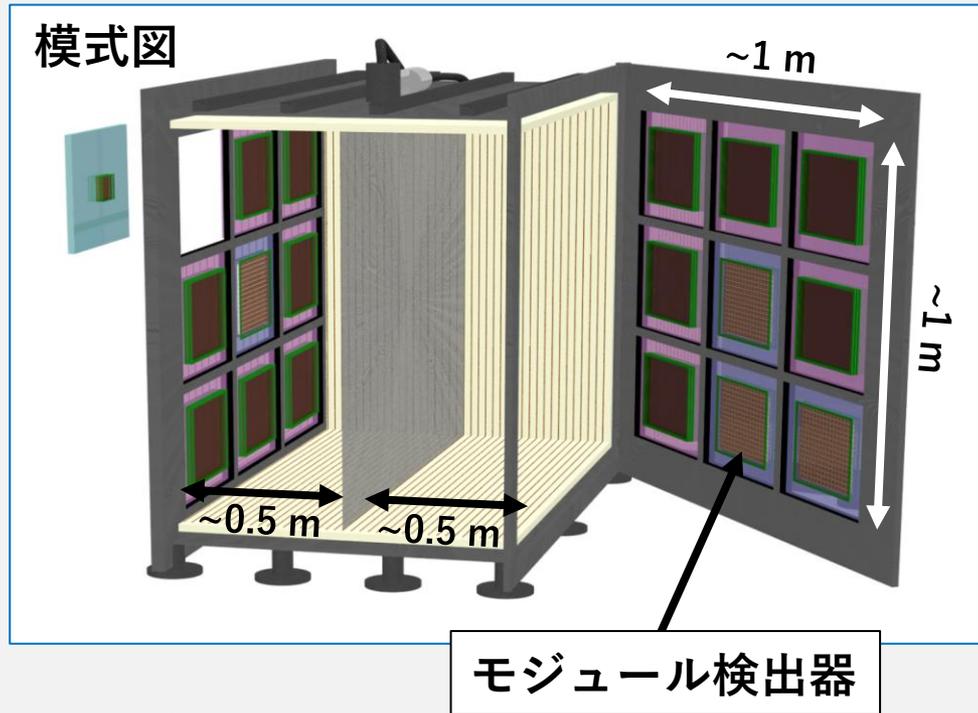


- ガスTPC (Time Projection Chamber)
- CF<sub>4</sub> 0.1気圧
- GEMによる前置増幅
- μ-PIC(Micro Pixel Chamber)による三次元読み出し



- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
- 電極付近に高電場を形成、電子を雪崩増幅

# C/N-1.0



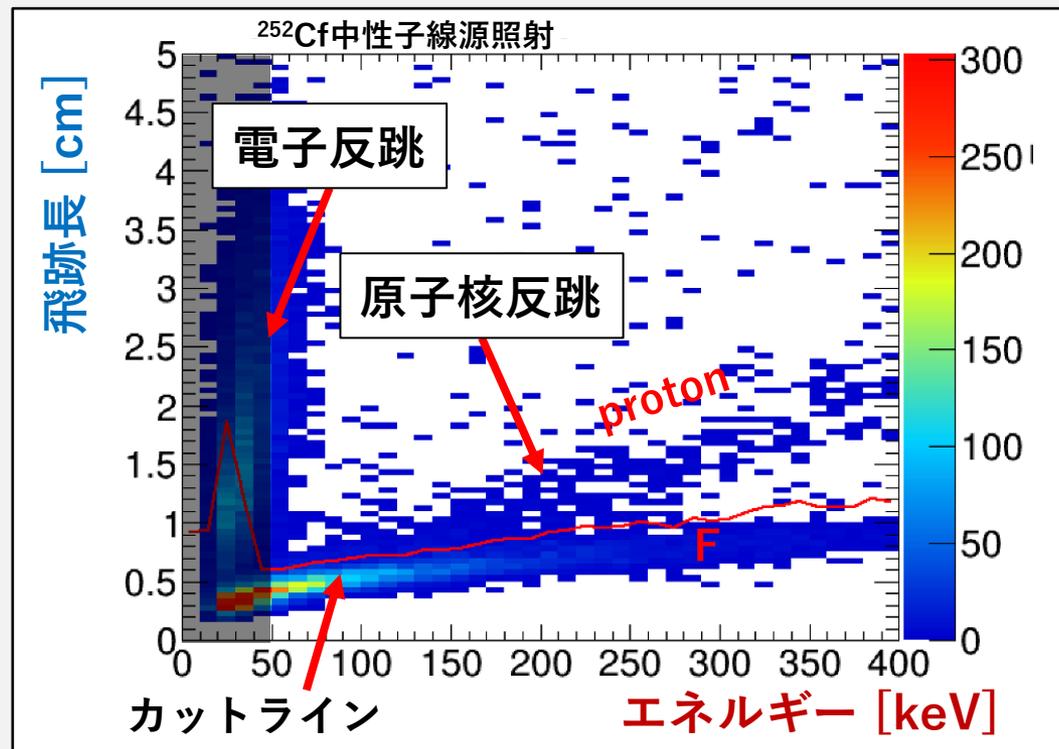
- 容積: ~1 m<sup>3</sup>
  - NEWAGEの約30倍
- モジュール型の検出器を最大18台搭載
  - 2台のモジュール検出器を開発中
    - Module-0
    - Module-1 ← 本講演

# 飛跡情報の再構成

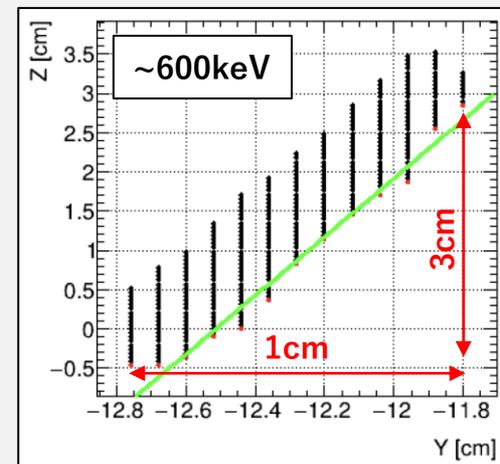
- $^{19}\text{F}$ 反跳事象を選別するため、飛跡の情報を再構成する必要がある。
  - これから行う統計処理に対する説明

## テストチェンバーでの例

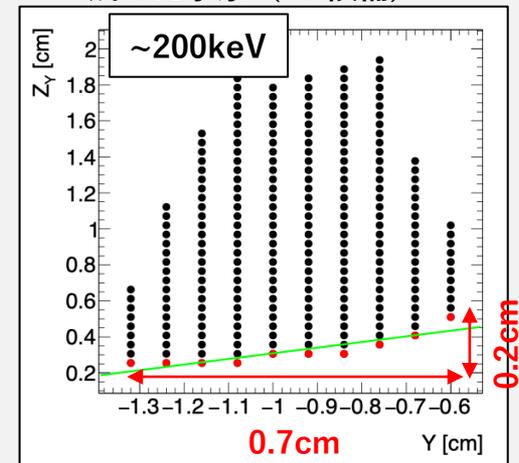
### エネルギー-飛跡長分布



### カットされた事象



### 残った事象 ( $^{19}\text{F}$ 候補)



- エネルギー・長さの再構成に向けた校正係数測定の実施へ