



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

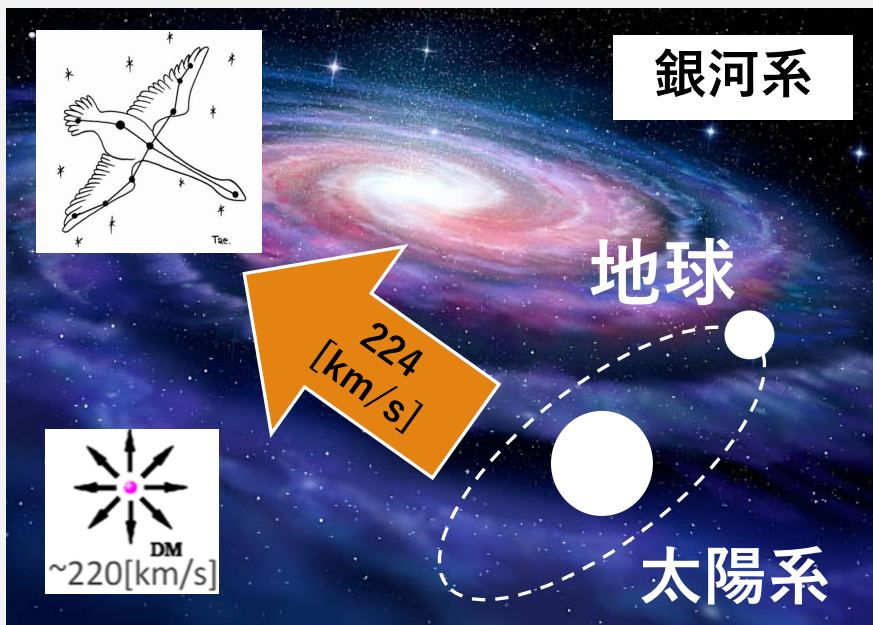
MPGD & ACTIVE媒質TPC2025研究会

神戸大学 生井 凌太

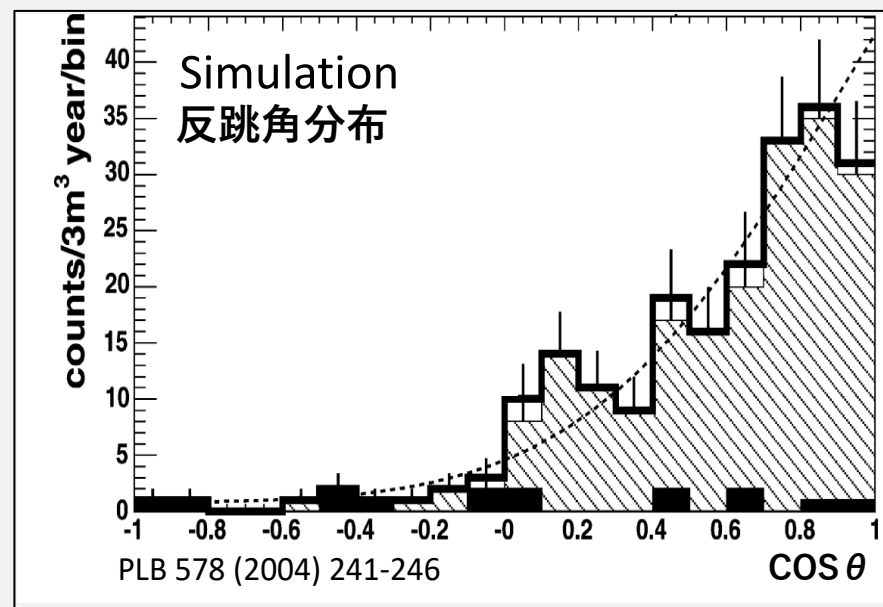
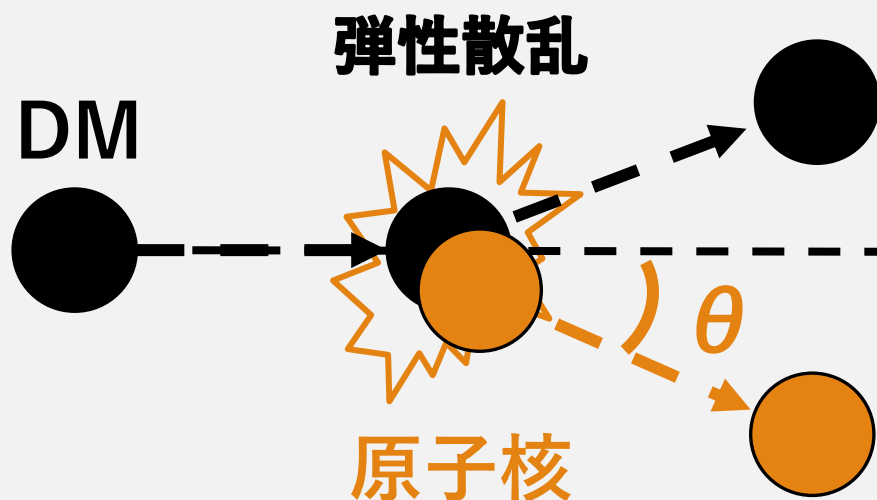
2025/12/20

岩手大学 銀河ホール

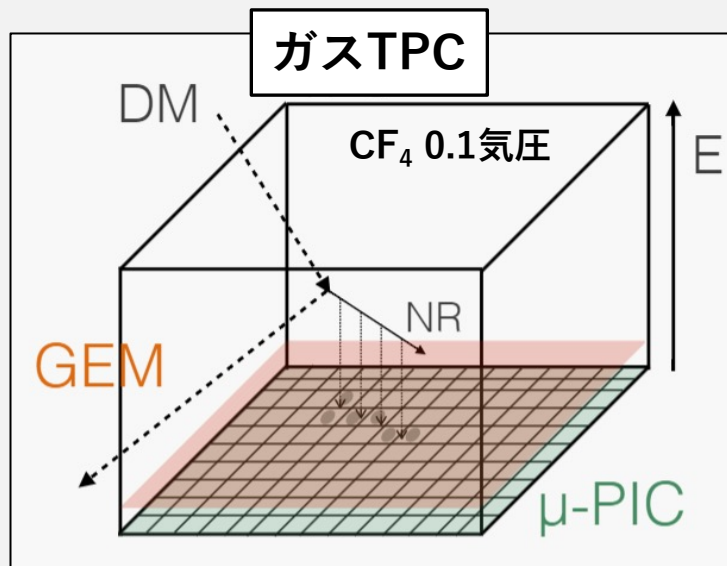
方向感度をもつ暗黒物質探索



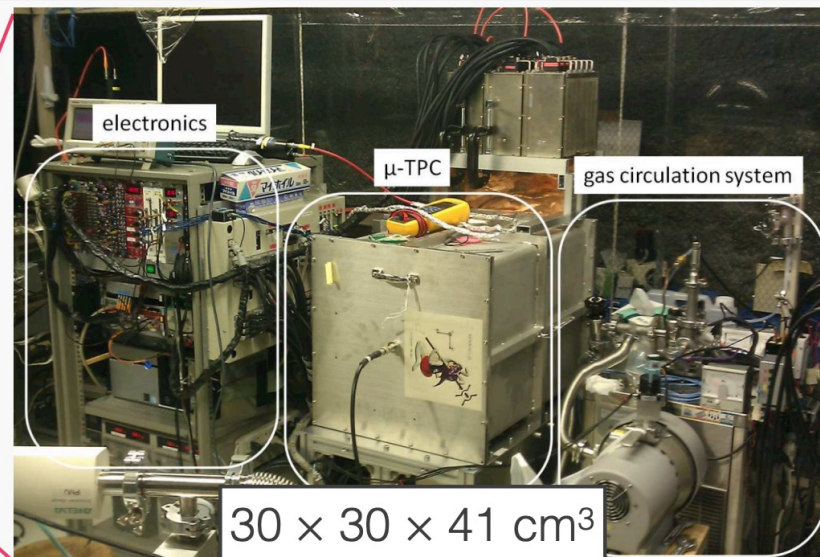
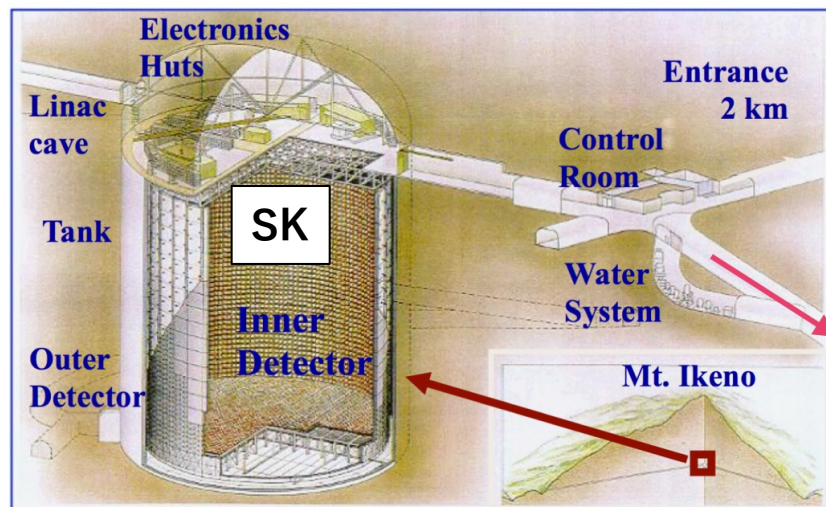
- 不明な質量の存在の観測事実
→ 世界中での暗黒物質 (DM) 探索
- 方向に感度を持つ探索
→ DMの到来方向依存性を利用
- どうやって?
→ DM -原子核弾性散乱の反跳角分布
を利用 (直接探索)



NEWAGE実験



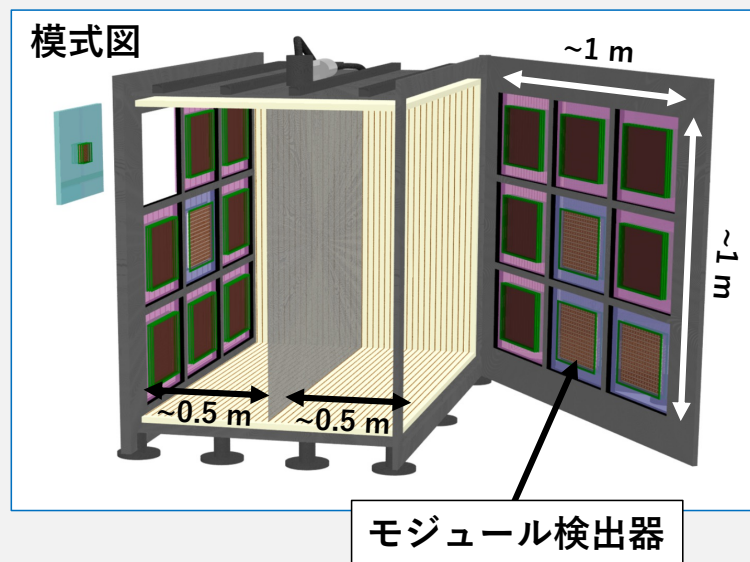
- ガスTPC (Time Projection Chamber)
 - CF_4 0.1気圧
 - GEMによる前置増幅
 - μ -PIC (Micro Pixel Chamber)による三次元読み出し
- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
 - 電極付近に高電場を形成、電子を雪崩増幅



チェンバーの大型化

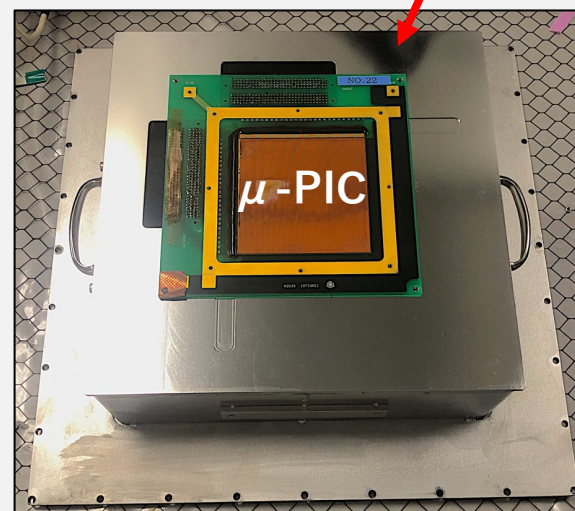
- 更なる高感度での探索に向け、チェンバーの大型化を計画

現行チェンバー@神岡

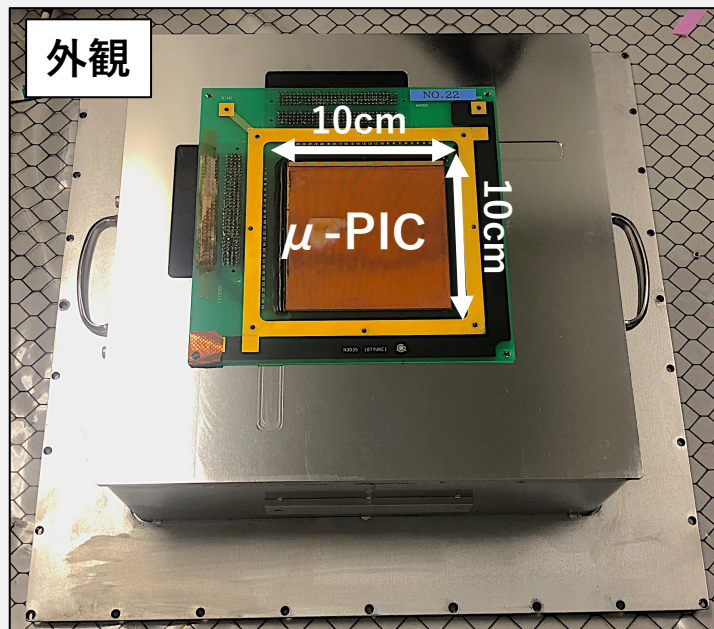


CYGNUS/NEWAGE-KM-1.0 (C/N-1.0)

- 容積: $\sim 1 \text{ m}^3$
 - 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

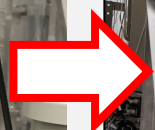
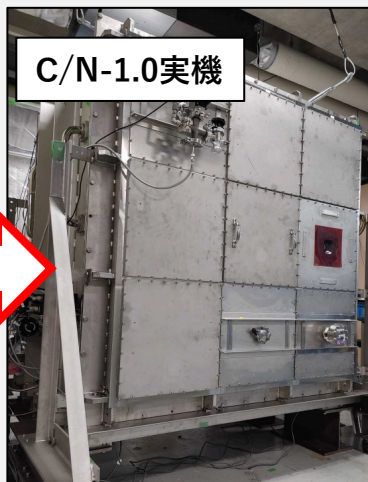
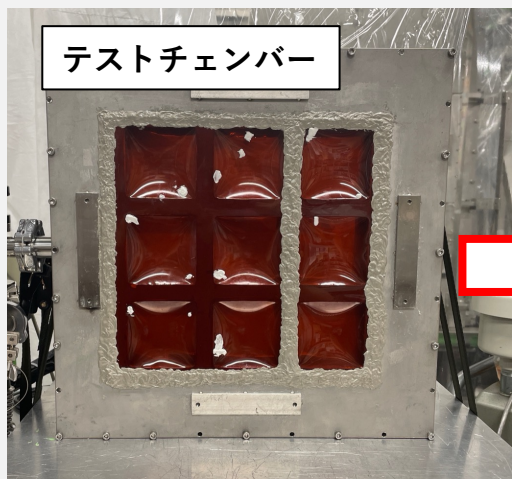


- 特徴

- 検出面積: $10 \times 10 \text{ cm}^2$
- μ -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

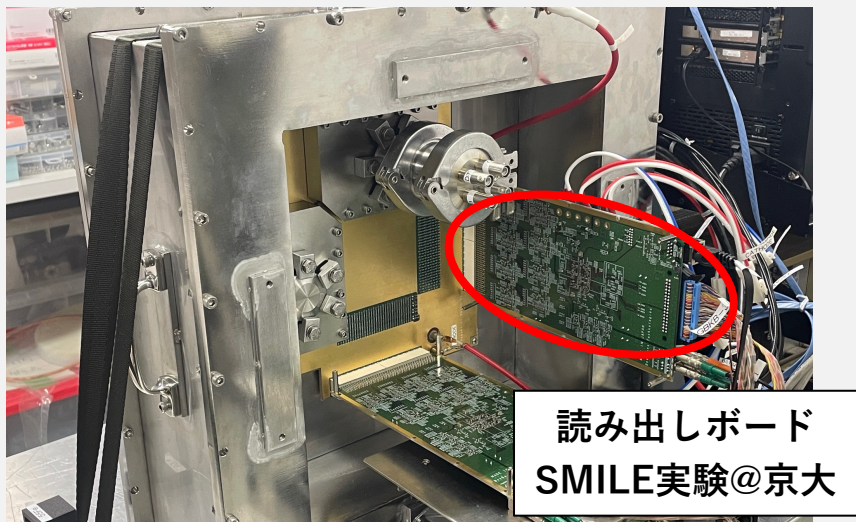
方向感度を持つ = 飛跡の角度を再構成可能

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

→ C/N-1.0へのModule-1導入へ

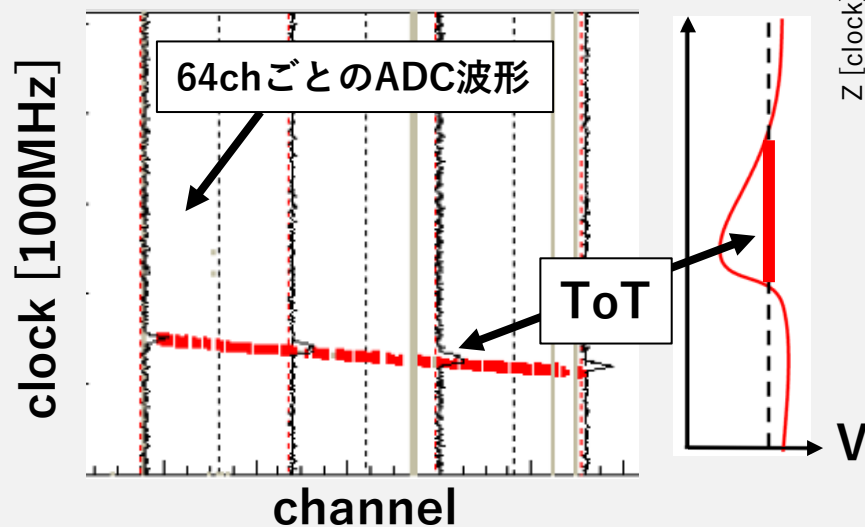
データ取得

信号読み出し回路の外観

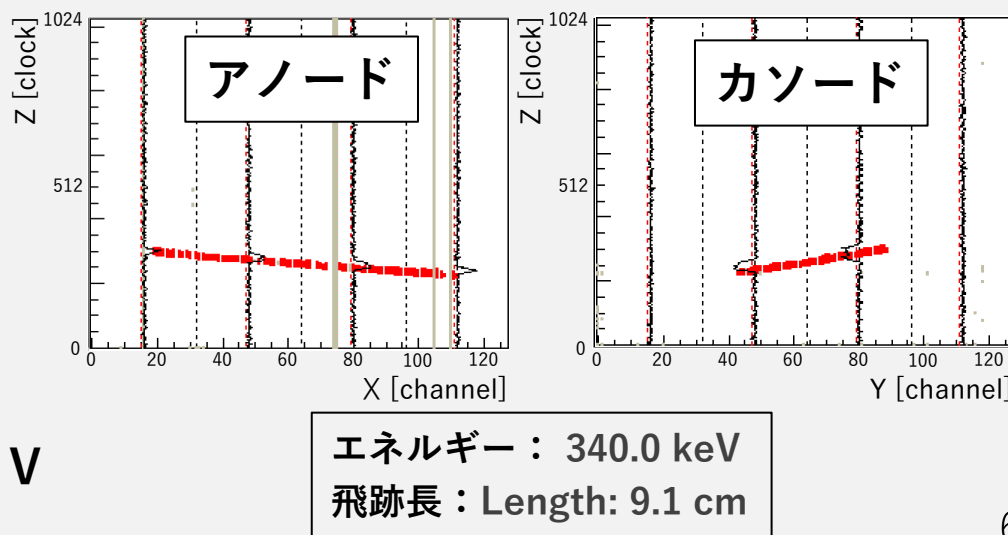


- アノード、カソード各128チャンネル
- 読み出される信号は2種類
 - 32チャンネルごとに合計したADC波形
→ トリガー発行、エネルギー算出に使用
 - 各チャンネルのTime over Threshold (ToT)
→ 飛跡長、反跳角度算出に使用

読み出しボードで取得される情報



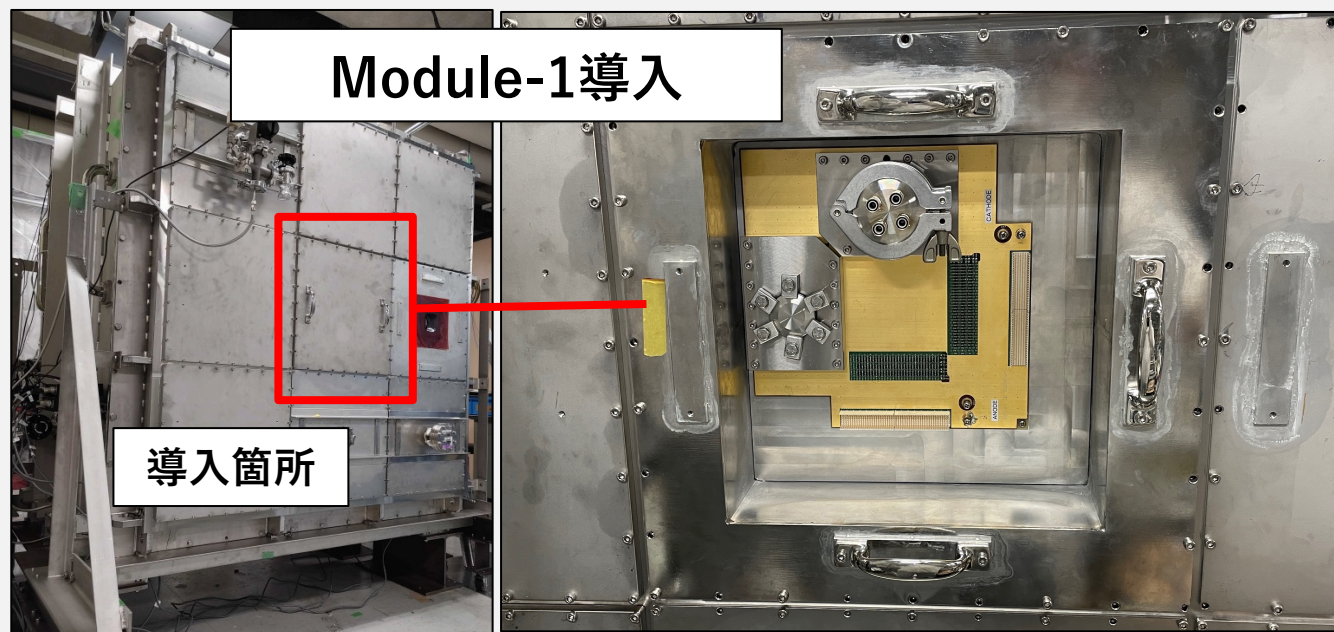
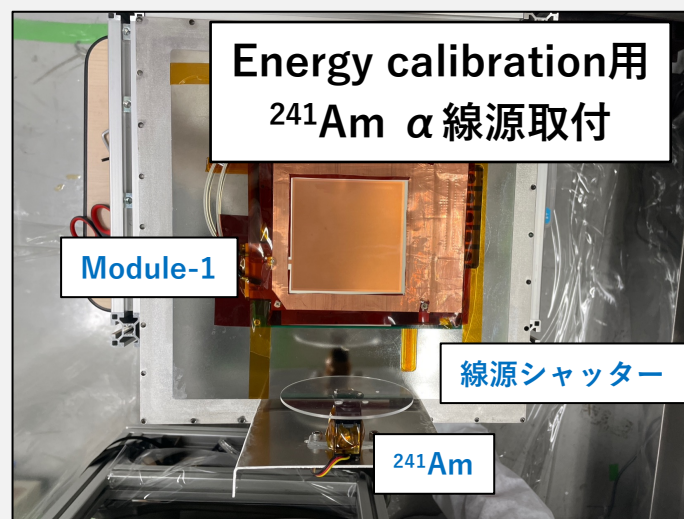
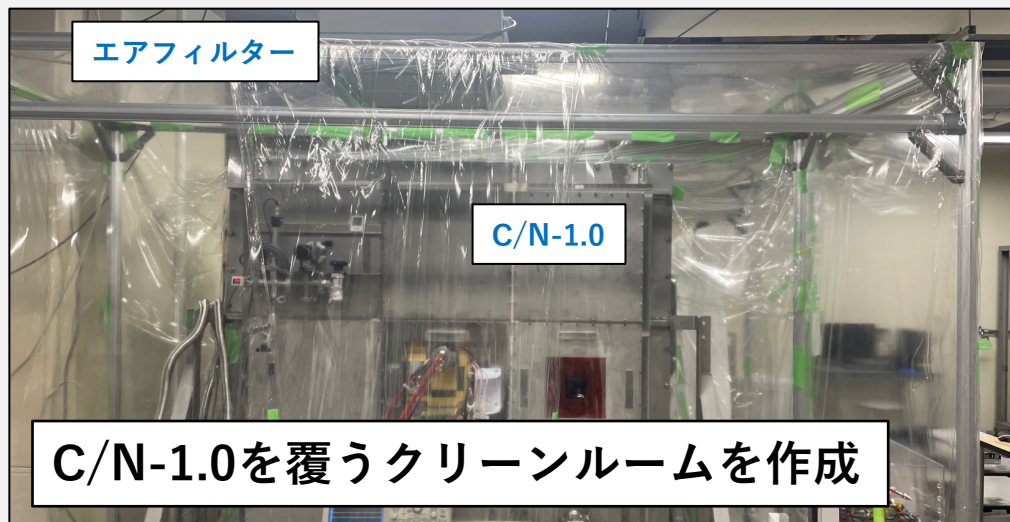
再構成された飛跡の例



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



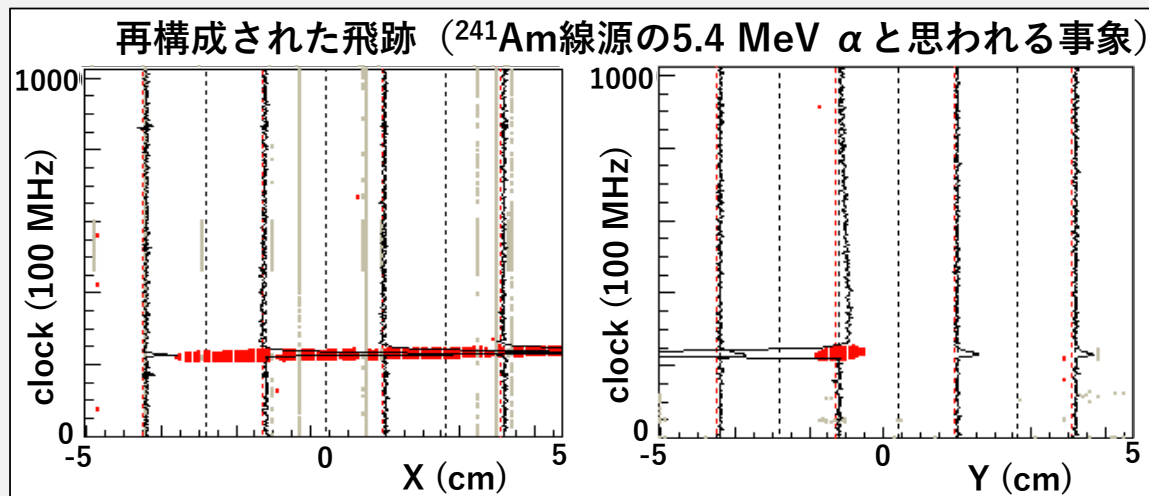
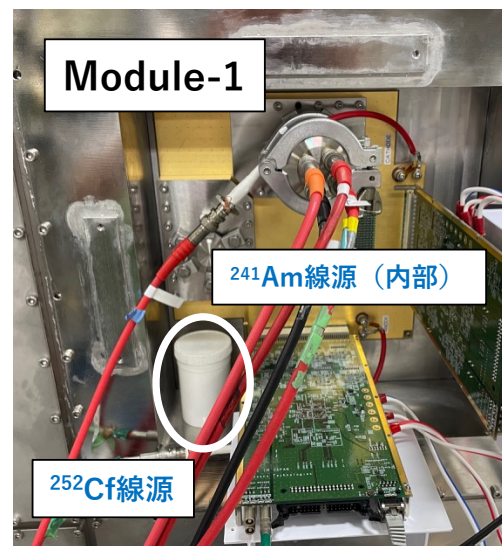
C/N-1.0への導入が
完了



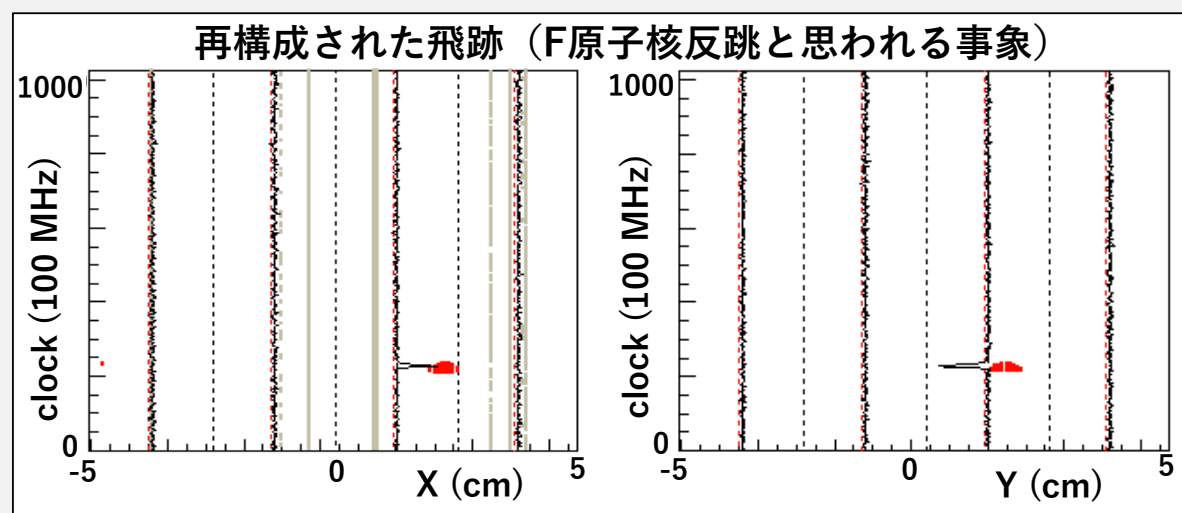
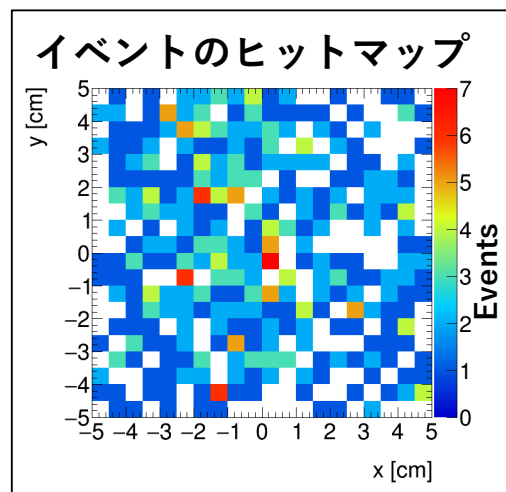
C/N-1.0による
飛跡の取得試験へ

C/N-1.0による飛跡取得試験

➤ ^{241}Am α 線源

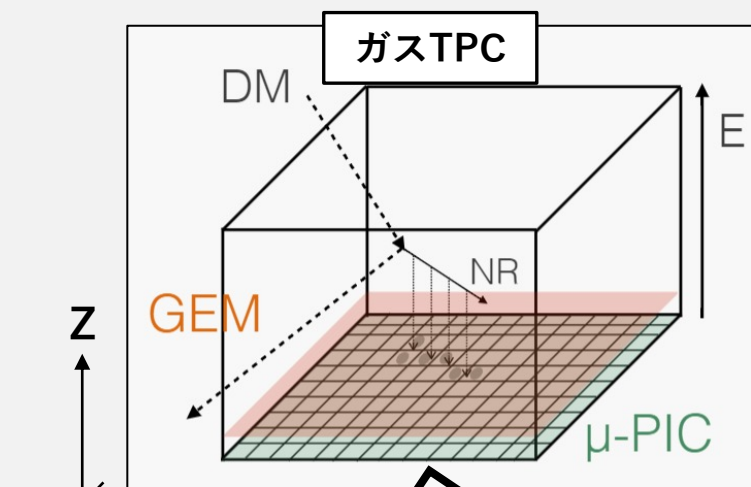


➤ ^{252}Cf 中性子線源 照射

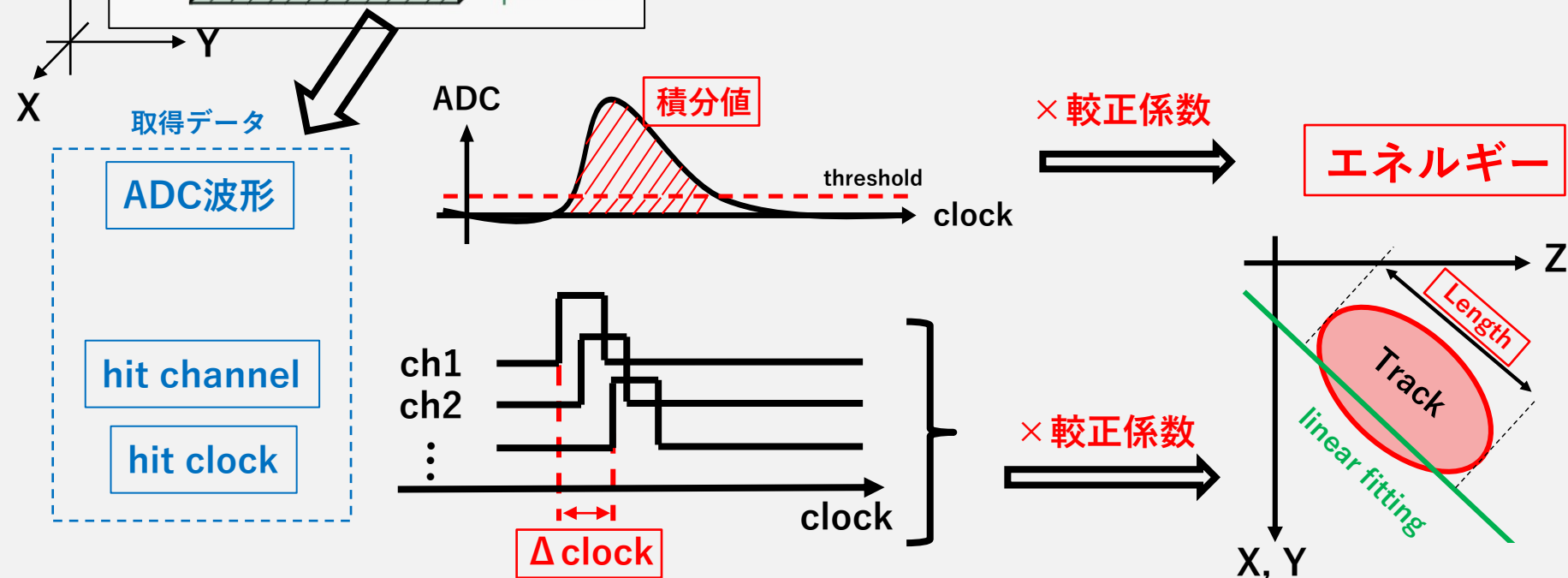


→ **NEWAGEモジュールで初となるC/N-1.0での飛跡再構成に成功**

飛跡情報の再構成



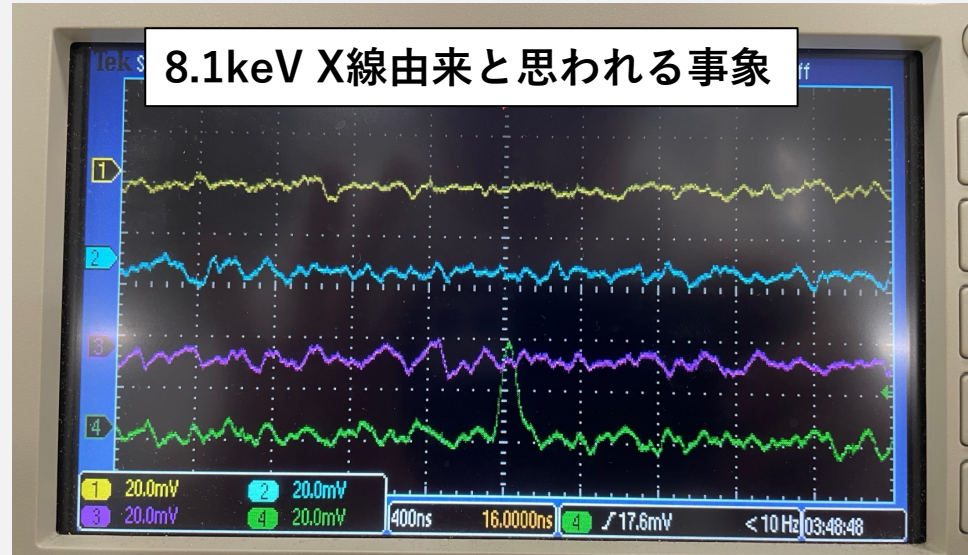
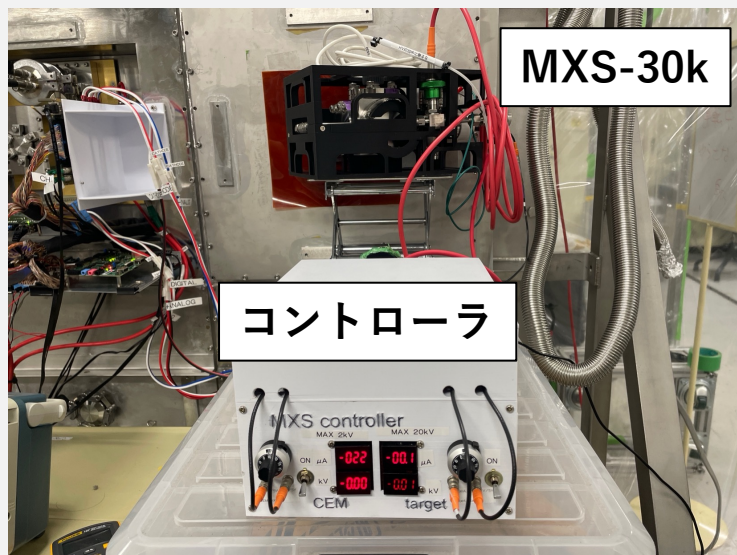
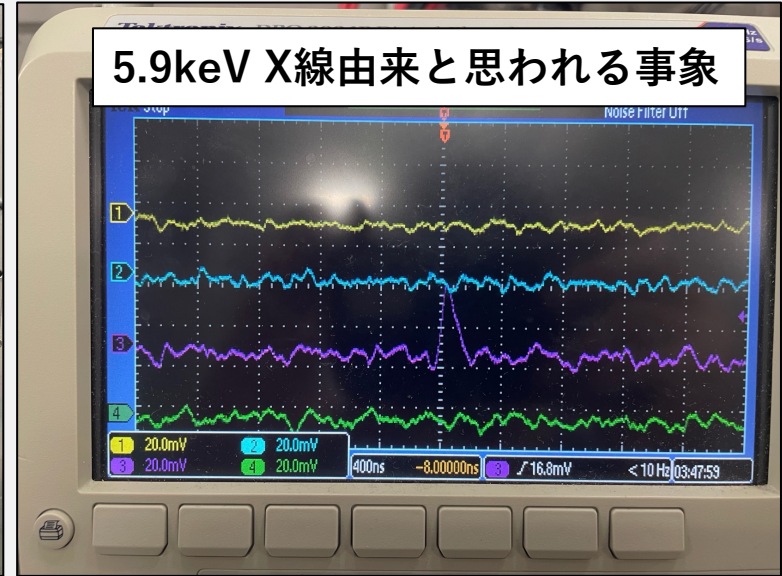
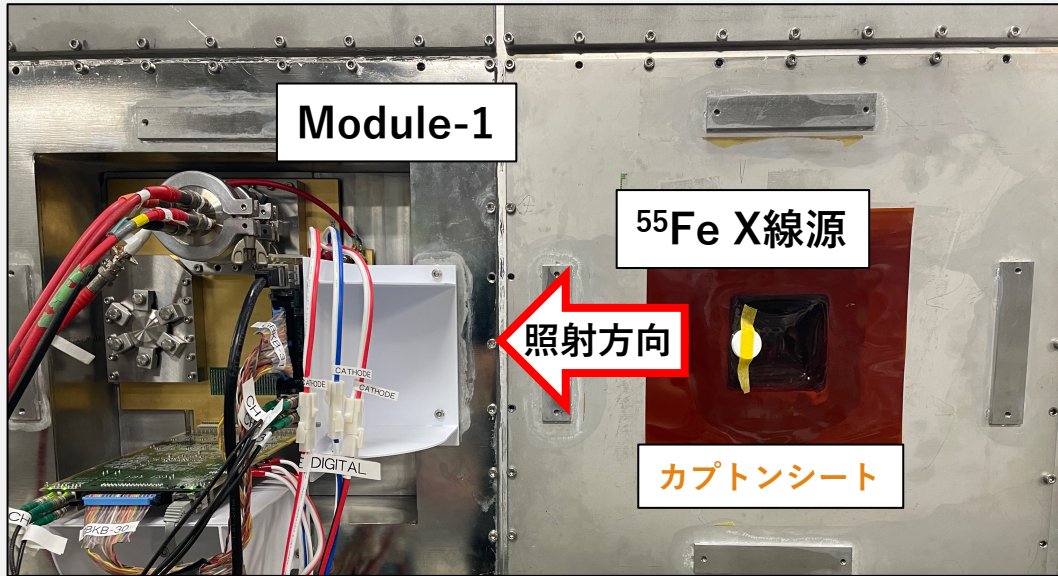
- ^{19}F 反跳事象を選別するため、飛跡パラメータを抽出
- 飛跡パラメータを再構成するためには校正係数が必要



➤ 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

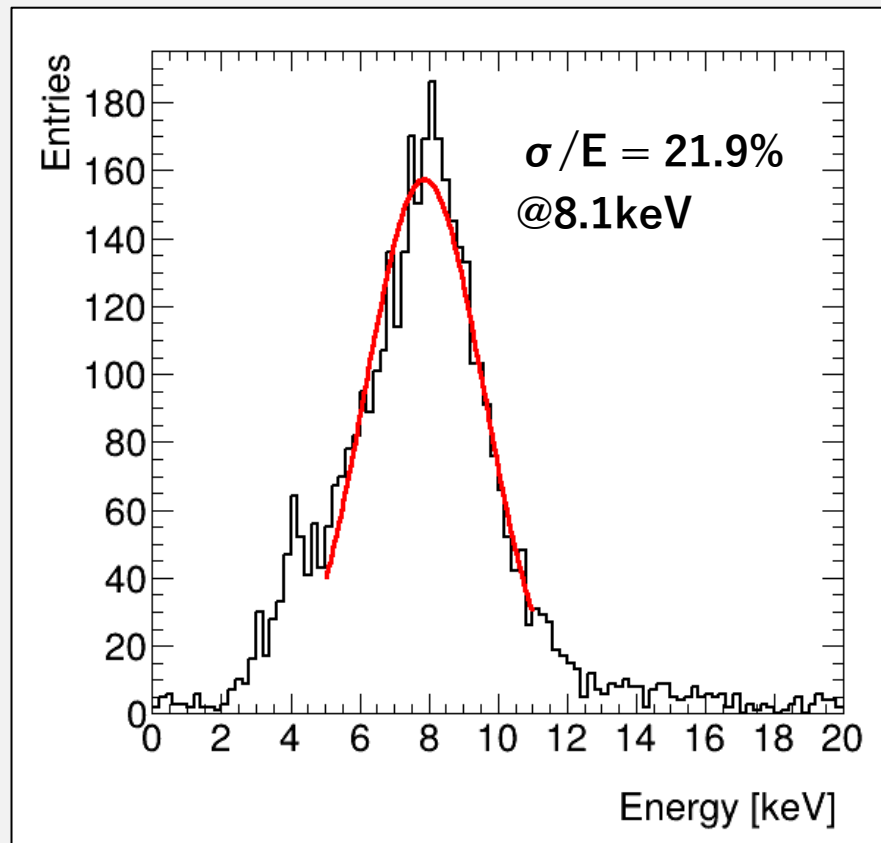
エネルギー較正

- CF_4 ガス 0.1 torr
- ^{55}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

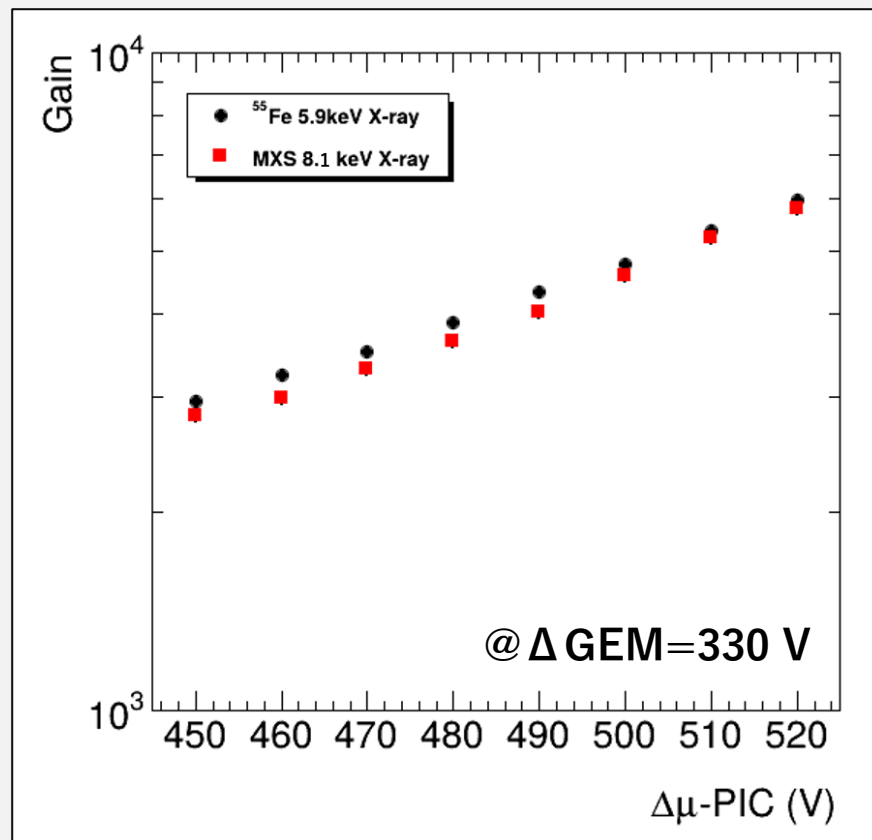


エネルギー較正

8.1 keV X線照射時のスペクトル



μ -PICに印加する電位差とゲインの関係性



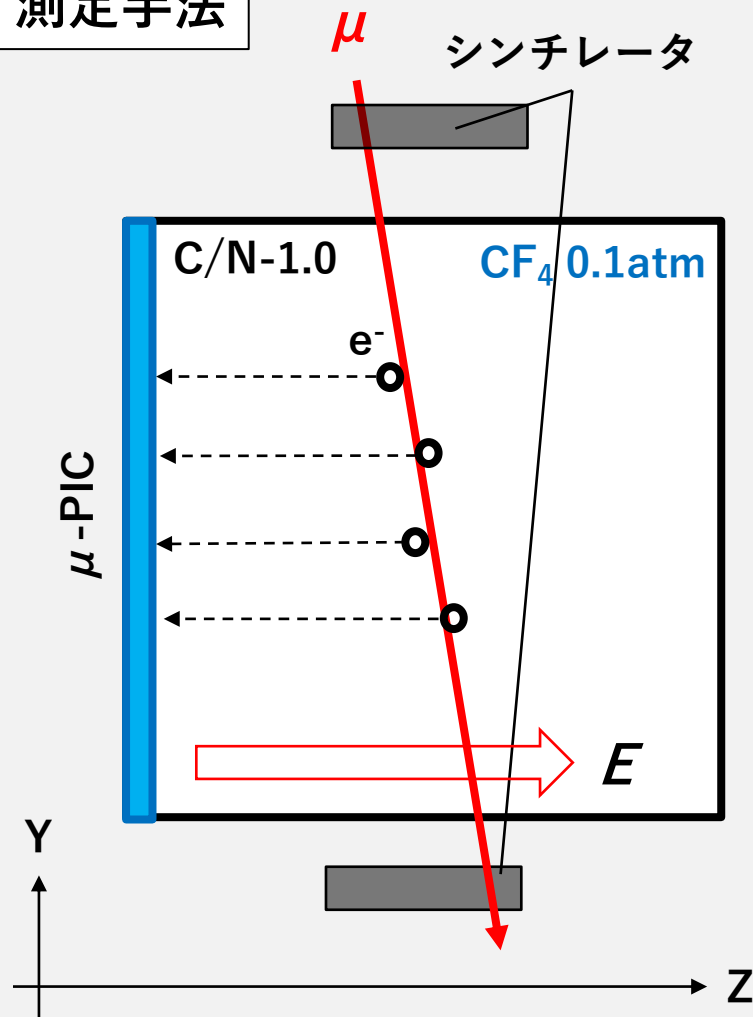
- 単色スペクトルの再構成を確認
- referenceの ^{55}Fe 5.9keV X線とも数%での誤差範囲で一致を確認

→ エネルギーの再構成手法を確立

ドリフト速度較正

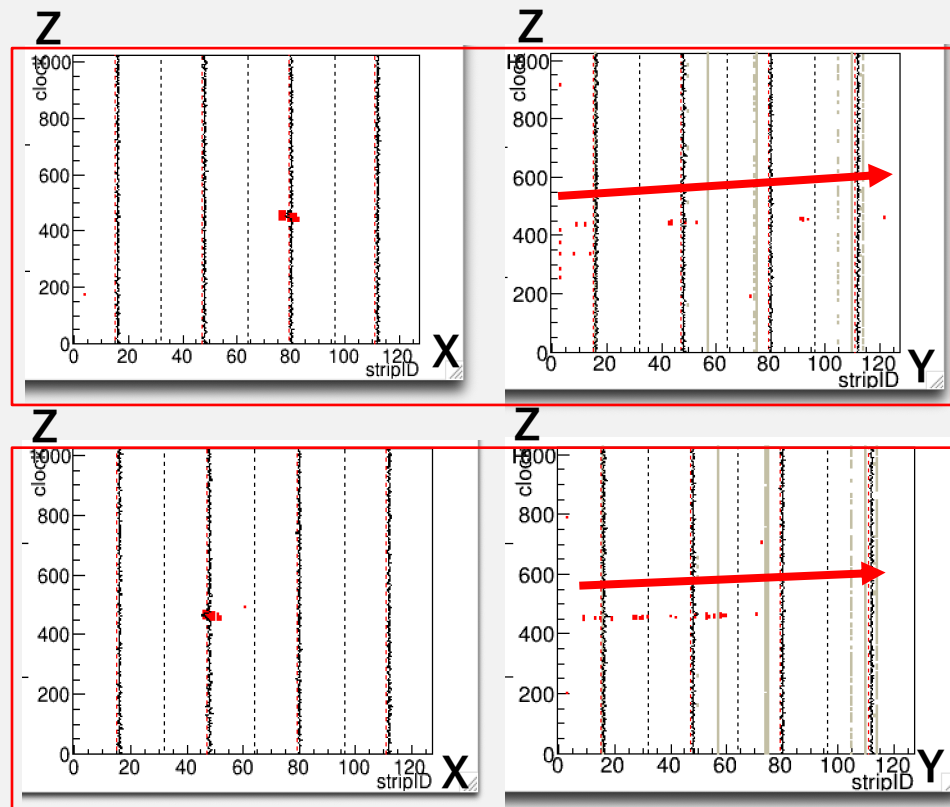
- 宇宙線 μ を使用した手法によってドリフト速度を確認

測定手法



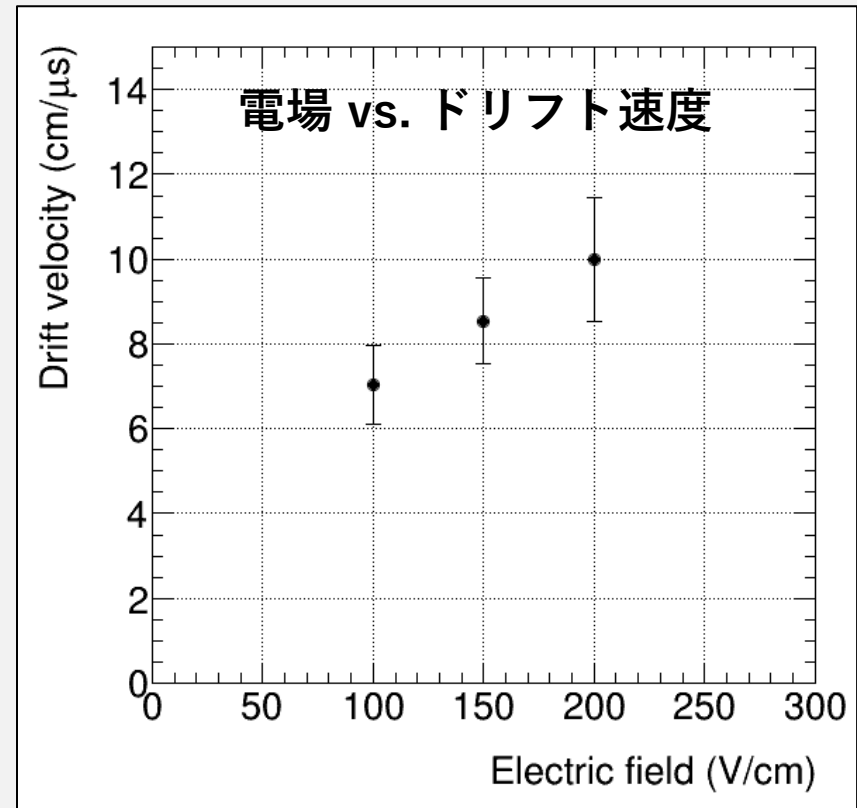
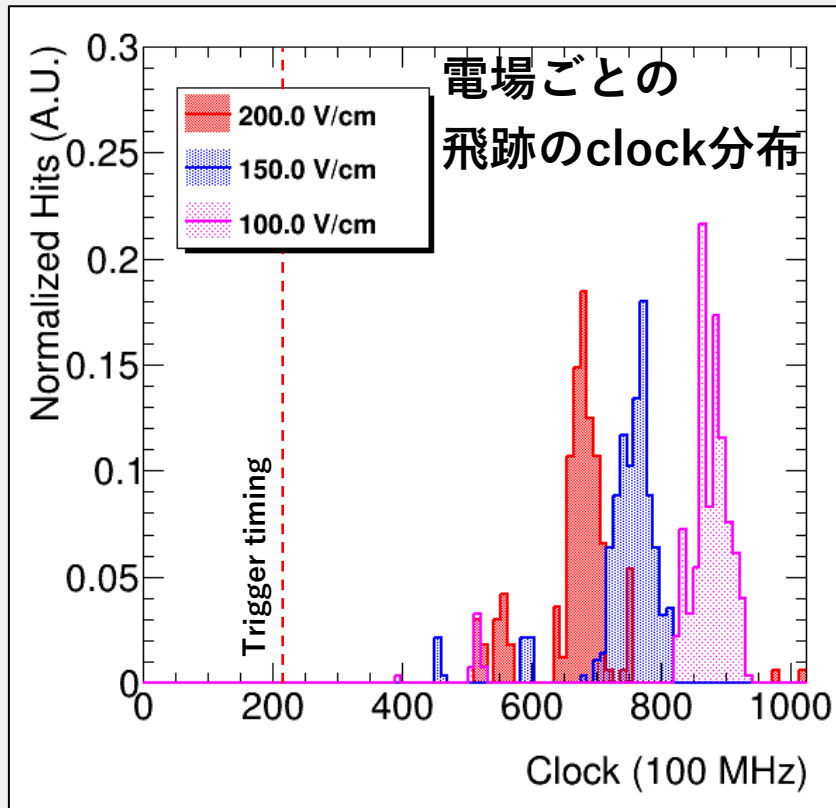
- 検出を挟んでシンチレータを配置
- 同時計測時にでトリガを発行

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。。

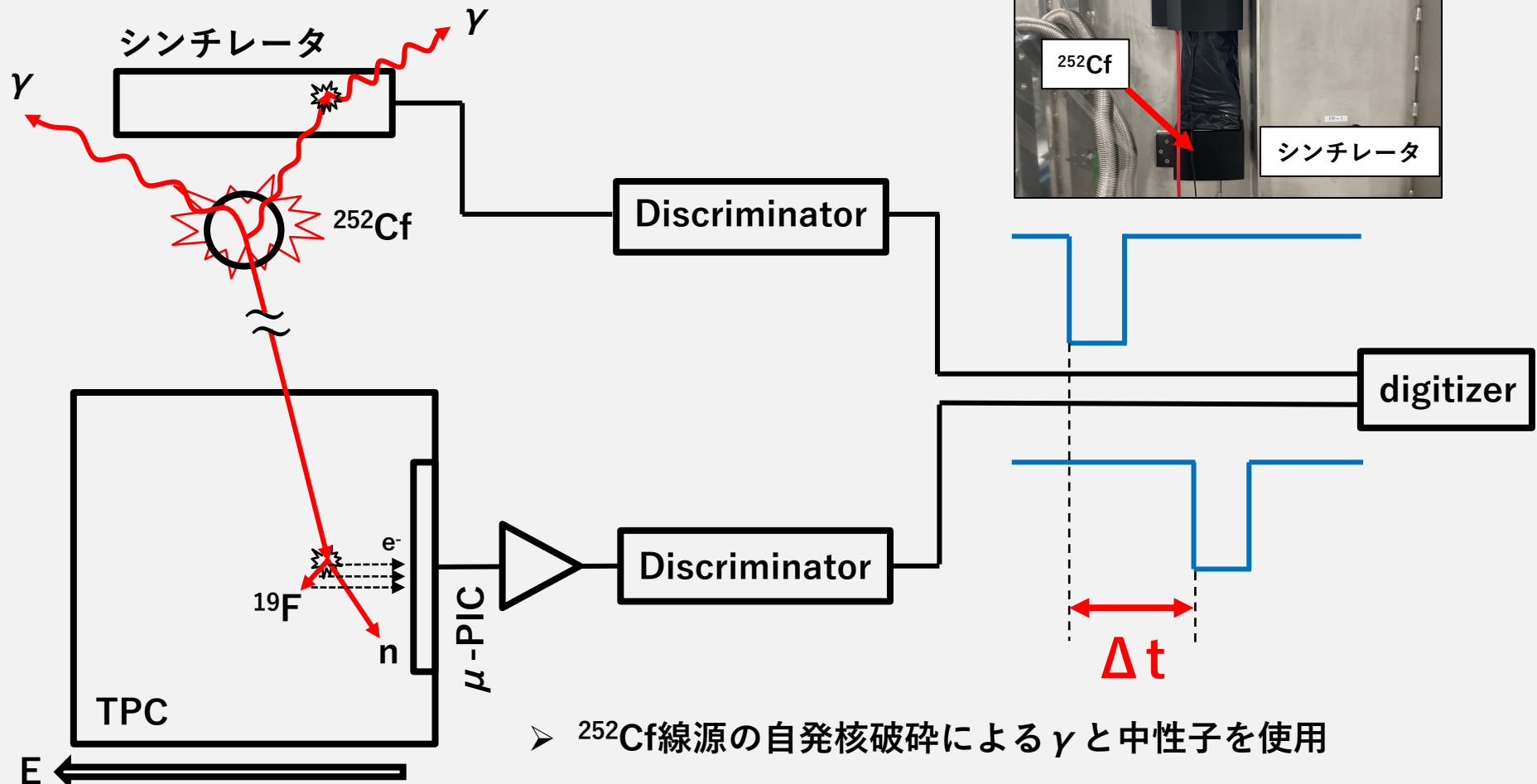


C/N-1.0で飛跡の再構成が可能であることを確認

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

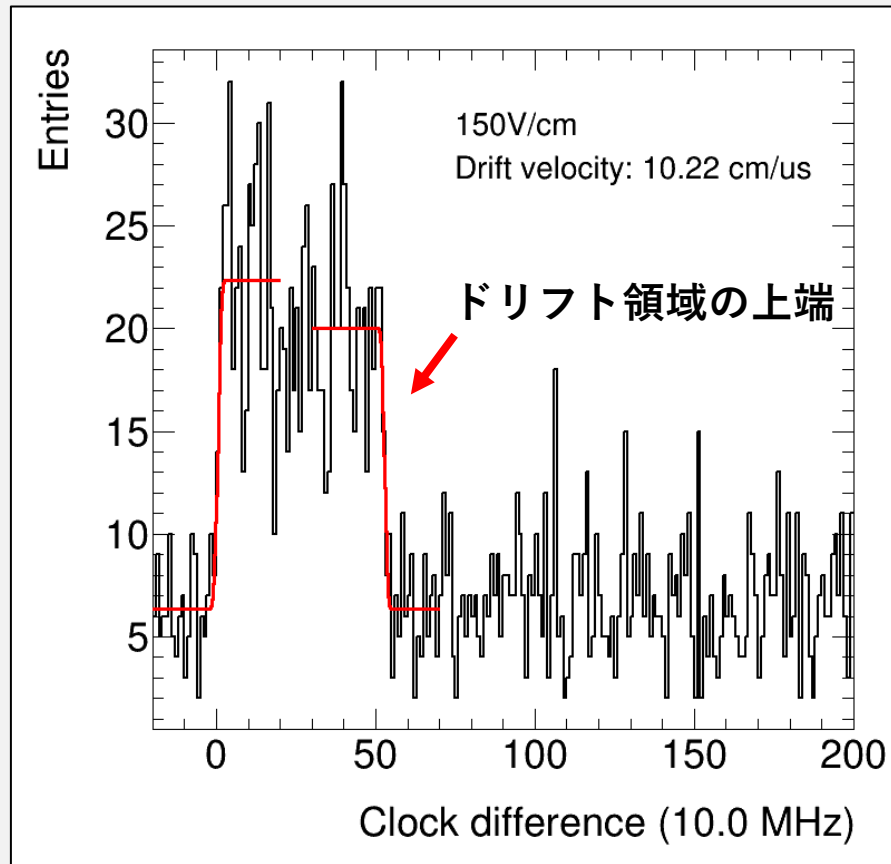


- ^{252}Cf 線源の自発核破砕による γ と中性子を使用
- シンチレータとTPCで同時計測、信号の時間差を計算

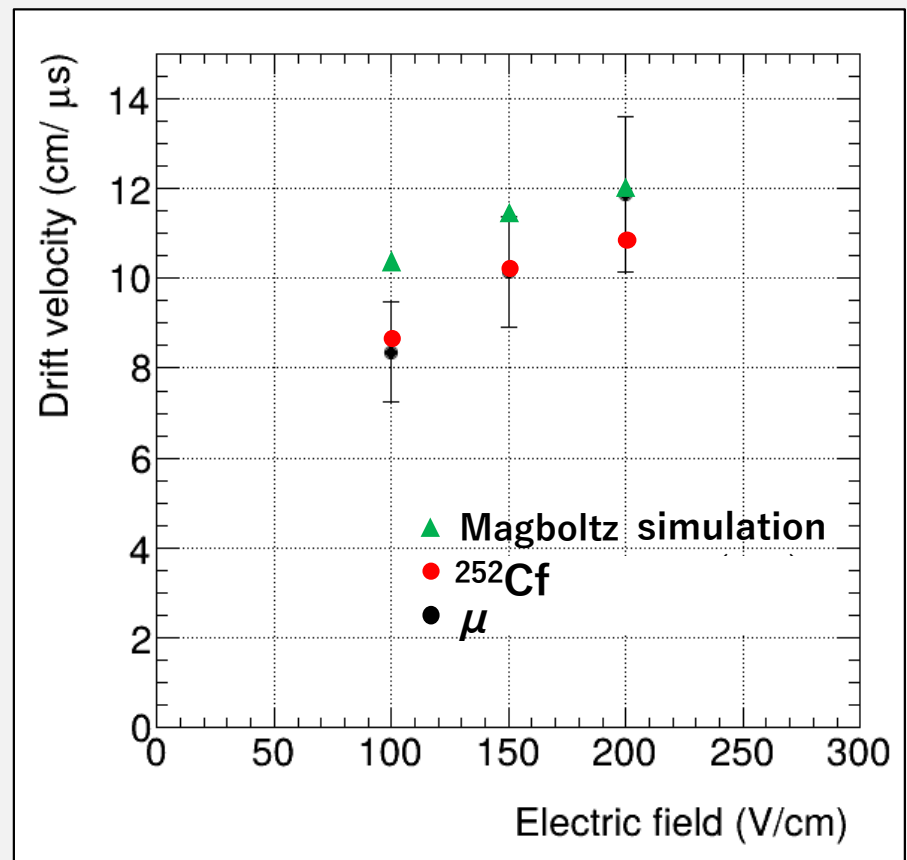
ドリフト速度較正

- 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

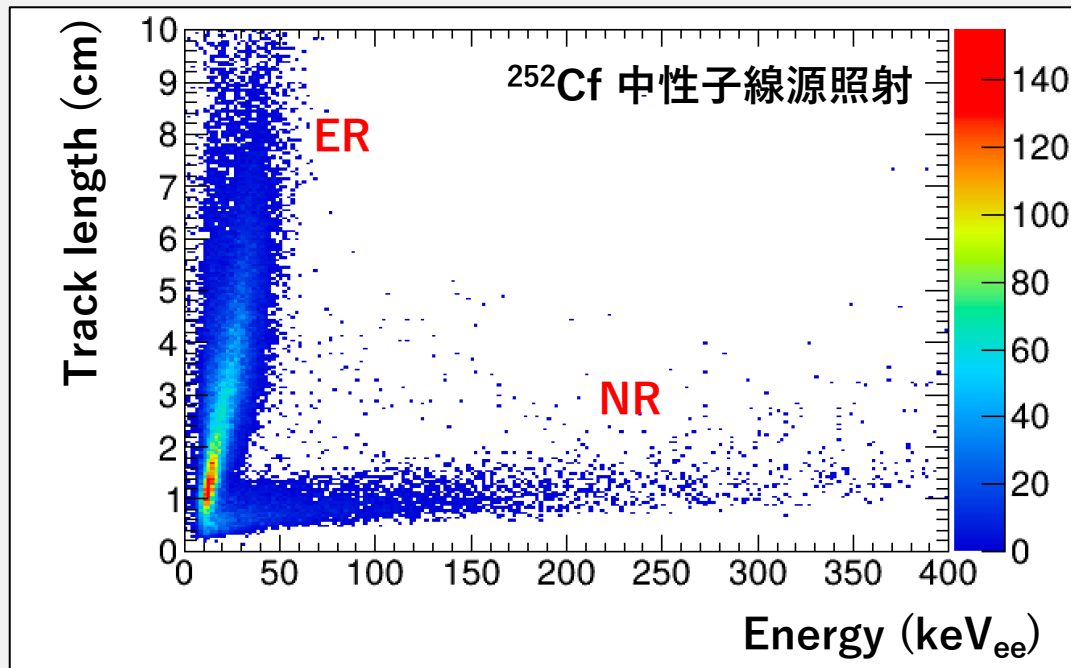


- μ を用いた手法と誤差の範囲内で一致
- **ドリフト速度の較正方法を確立**

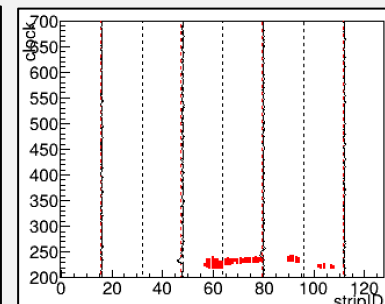
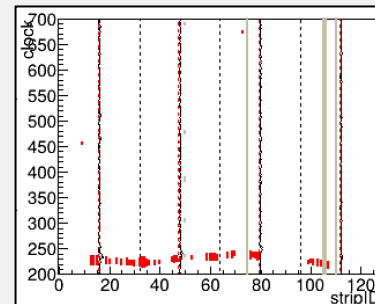
飛跡情報の再構成

- 得られた較正係数を用いて飛跡情報を再構成する。

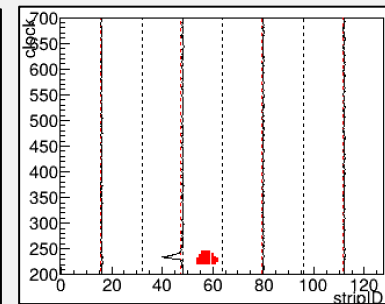
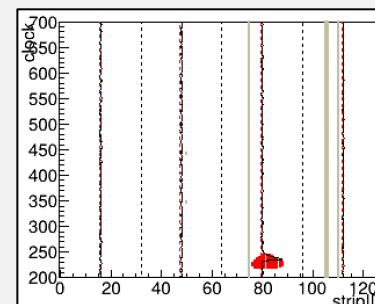
再構成されたエネルギー-長さ分布



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

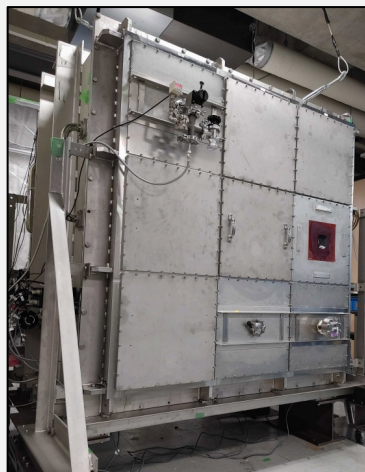
今後の解析

- 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

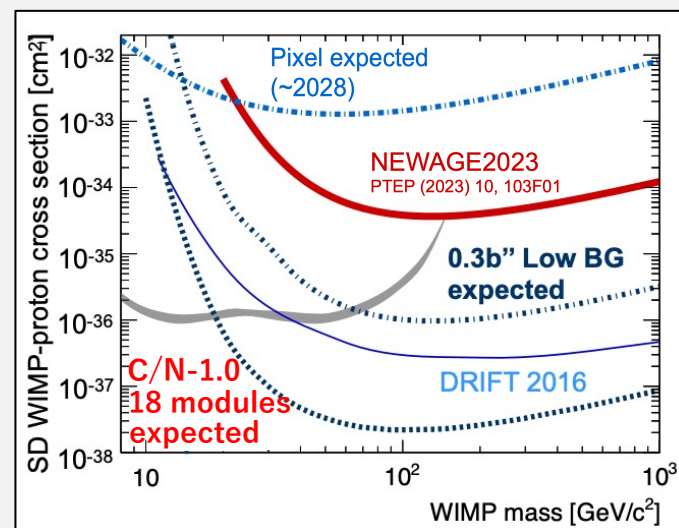
C/N-1.0による暗黒物質探索へ

- μ -PICを□ 10 cm → □ 30 cmに upgrade
- モジュールの増設

→ 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

Back up

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}Cf 線源による中性子照射

選別条件

① 有効体積カット

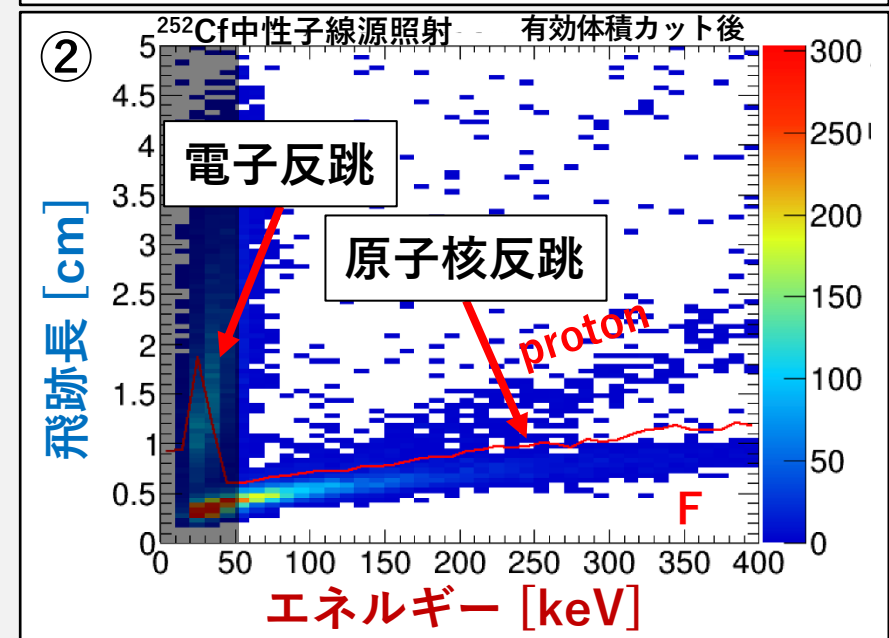
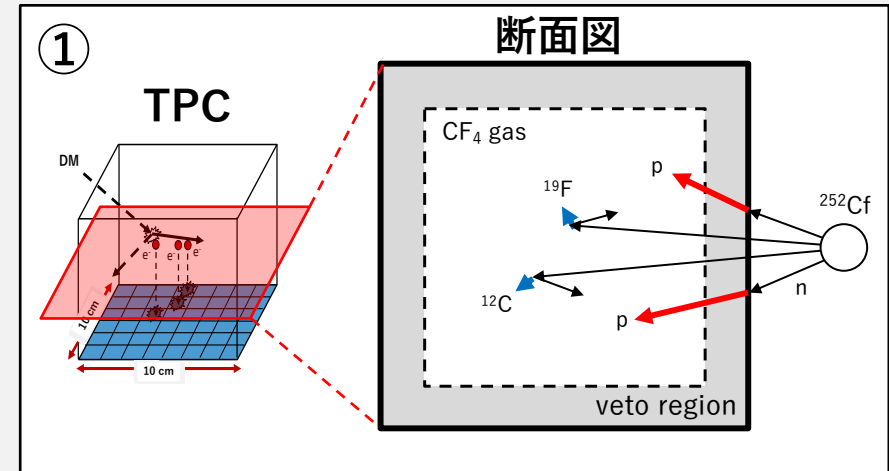
- 検出面積の端1cmでの事象をカット
→ 検出領域外からのproton等を除去

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

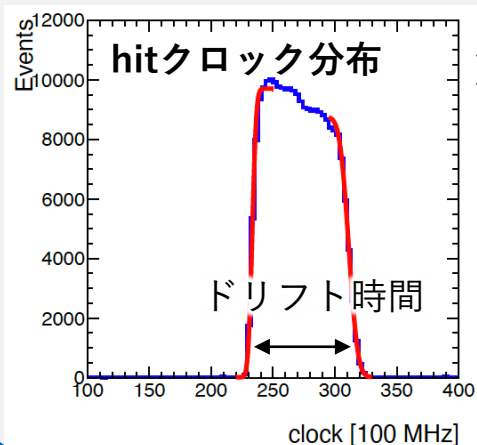


事象選別

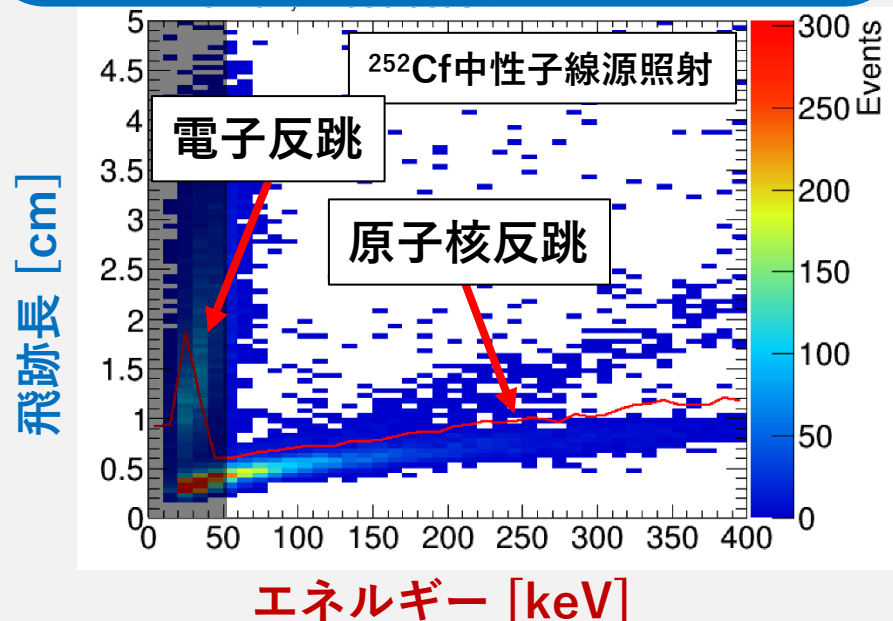


ドリフト速度（飛跡長）較正

Hit信号分布から電子のドリフト速度を評価



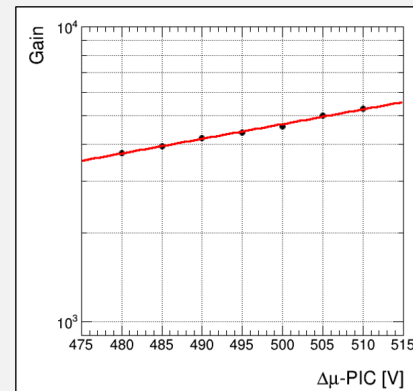
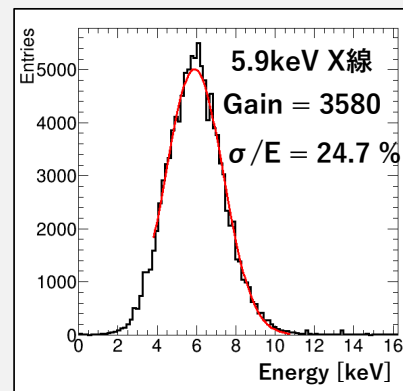
- シンチレータによる外部トリガ
 - 宇宙線 μ を使用
- $5.1 \text{ cm}/\mu\text{s}$



エネルギー較正

μ -PICの印加電圧とガス利得の関係を評価

➤ ^{55}Fe 5.9keV X線

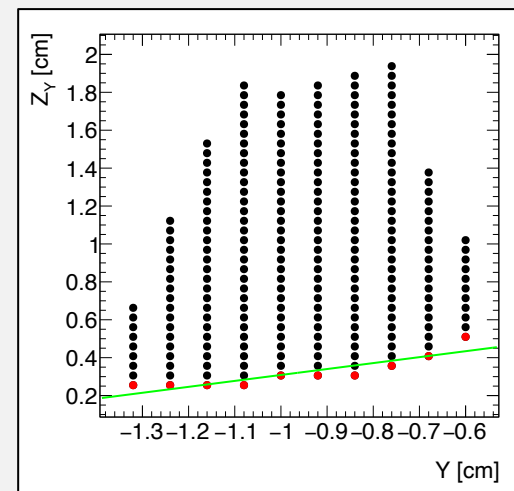
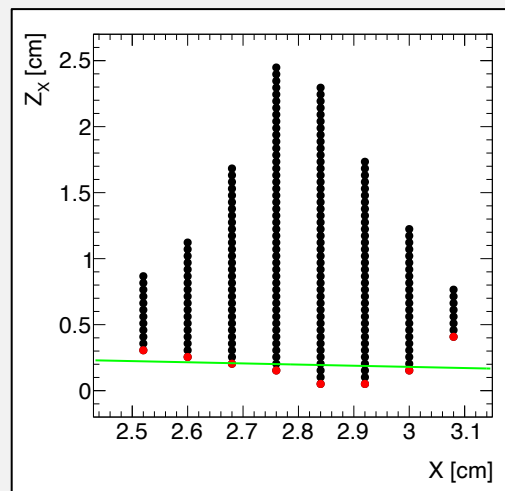
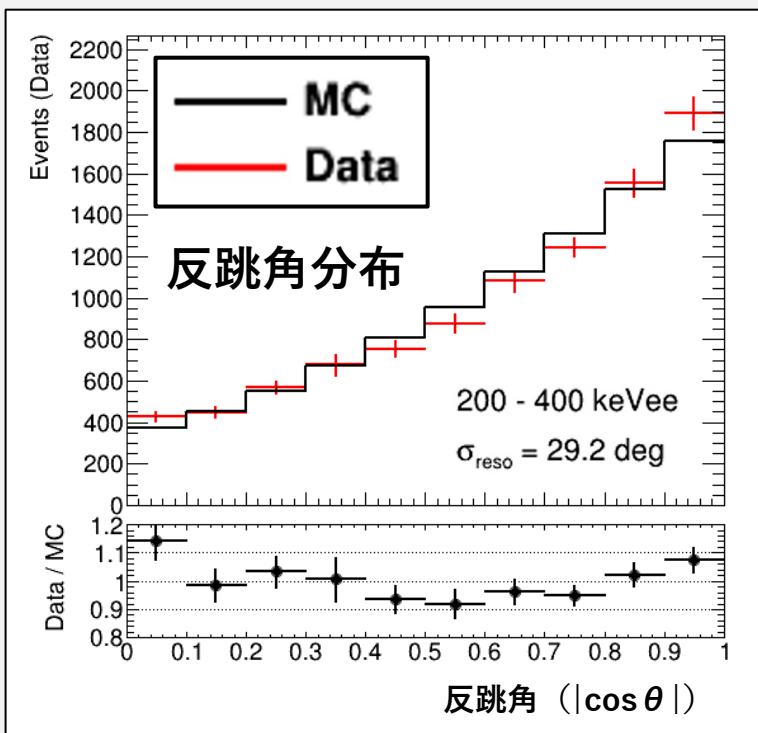
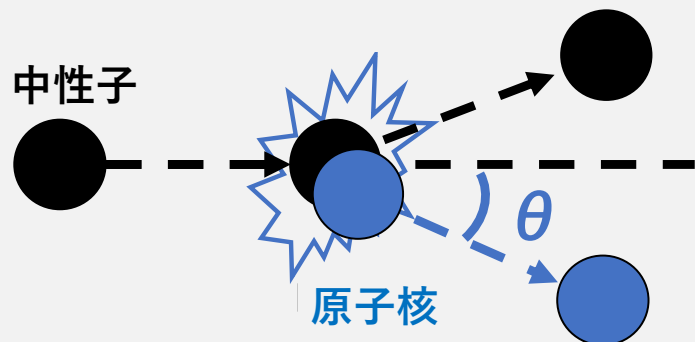


- 有効体積カット
 - 検出面積の端1cmでの事象をカット
 - 検出領域外からのproton等を除去
- エネルギー-飛跡長カット
 - ^{252}Cf 線源による中性子照射
 - 原子核反跳に対してカットラインを決定
 - F反跳事象を選別

角度分解能評価



➤ ^{252}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



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

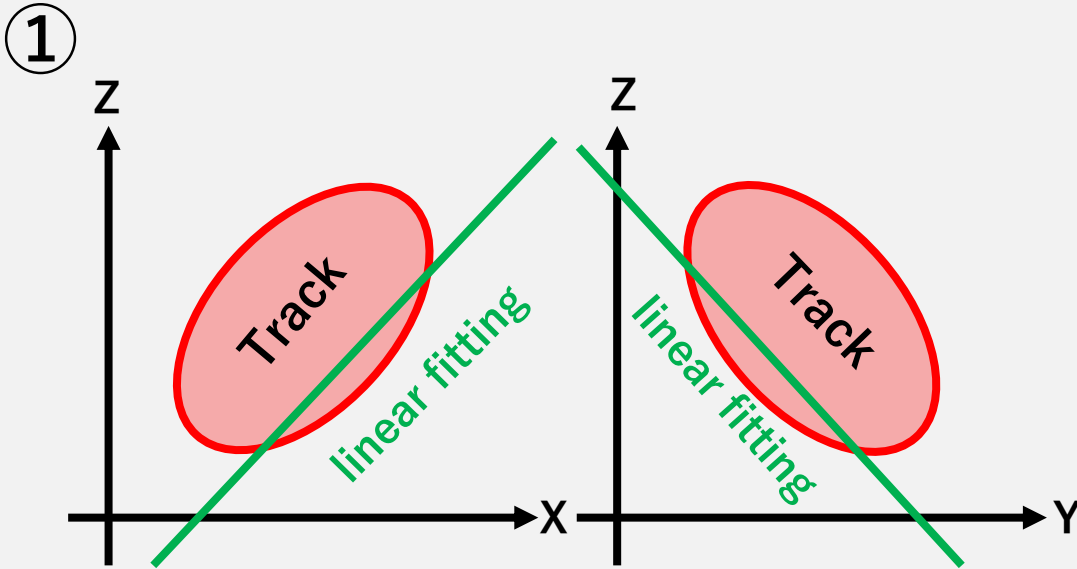
(200 keV < E < 400 keV)

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

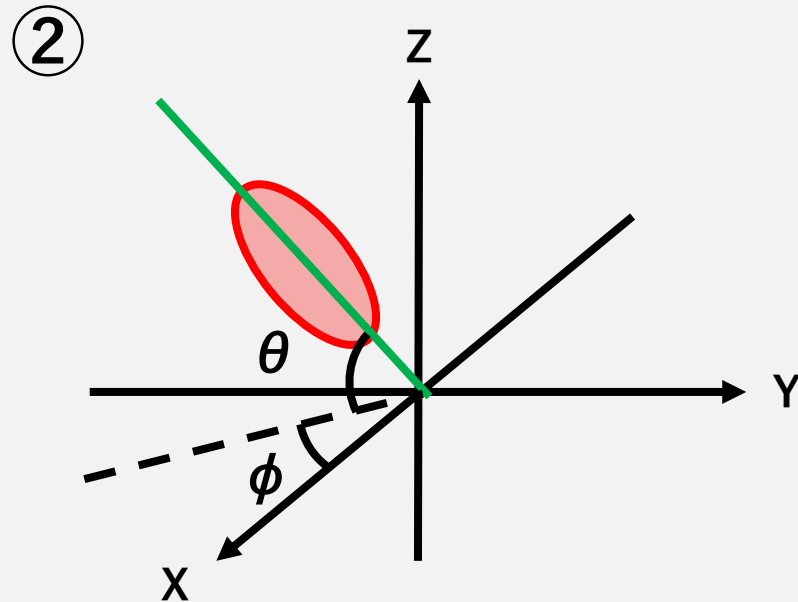
➤ drift距離の違いによる電子拡散による改善と思われる。

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

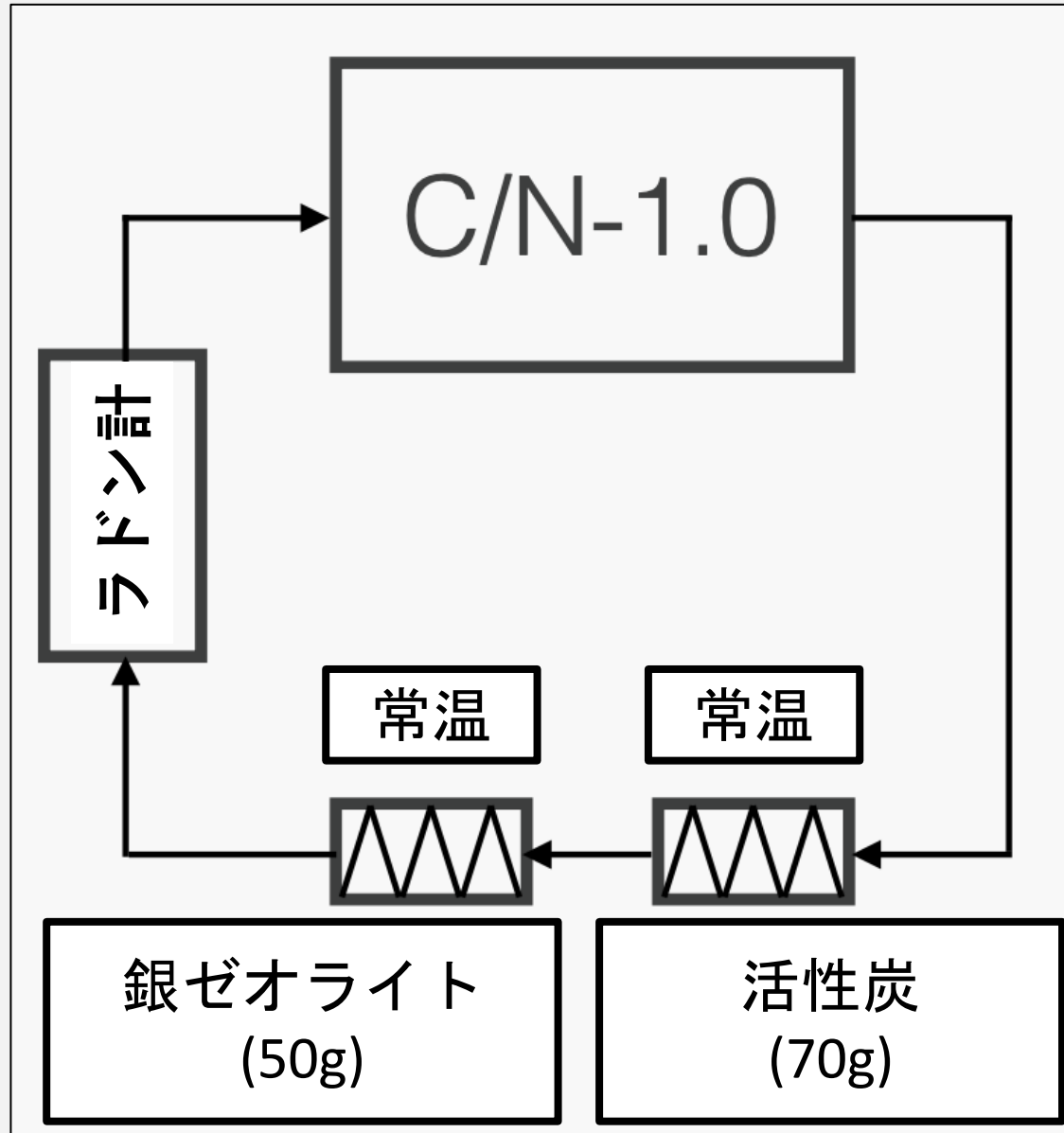


- F原子核反跳を事象選別
- X-Z、Y-ZのToTを線形fitting

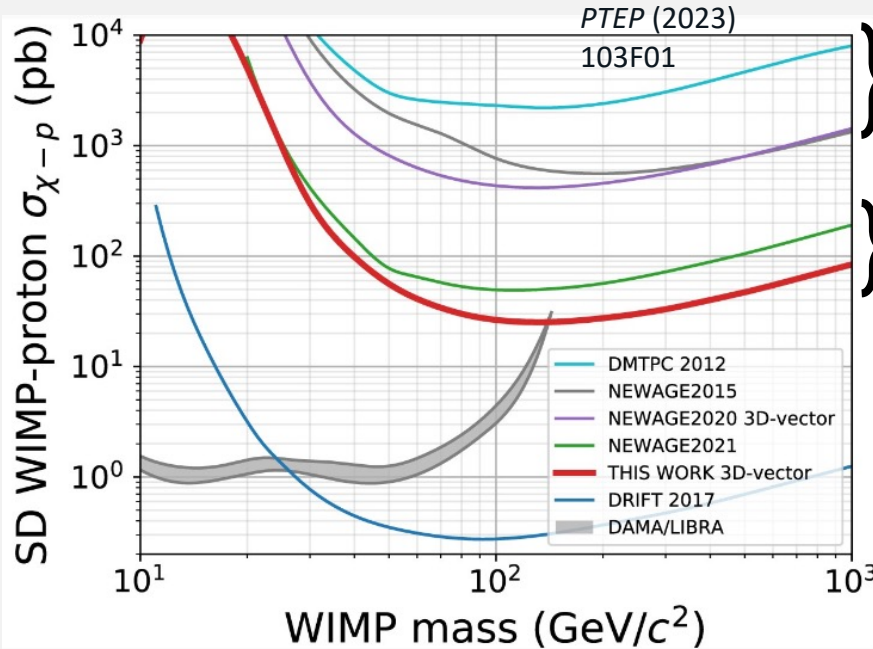


- X-Z、Y-Zの傾きから球面座標系における仰角、方位角を計算
- X-Z、Y-Zの傾きから球面座標系における仰角 θ 、方位角 ϕ を計算
- 線源照射方向に対する反跳方向 γ を計算

C/N-1.0 循環系



μ -PIC開発の歴史と低バックグラウンド化の経緯



μ -PIC
NEWAGE2015 & 2020



Low α (LA) μ -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 α (LA) μ -PIC: 検出器表面からの α を抑制

→ 検出感度向上 (PTEP (2023) 103F01)

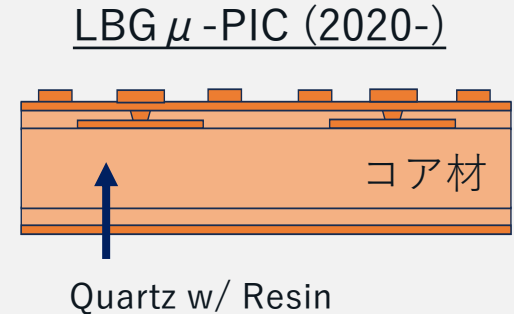
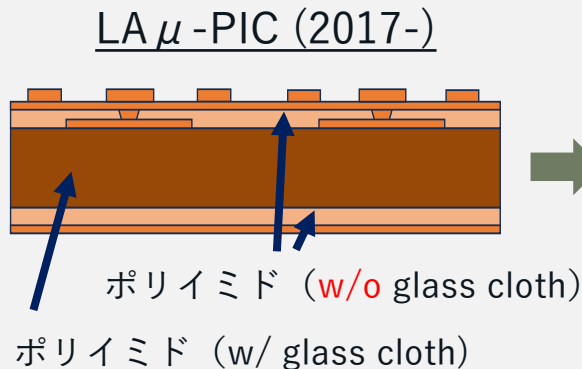
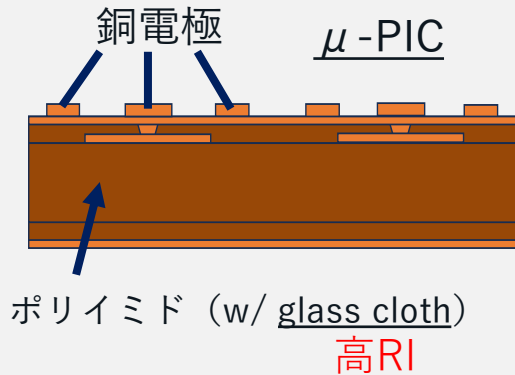
➤ 一方でラドンBGが顕在化

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

➤ ラドンレート要求値: LA μ -PIC の $< 1/10$

研究目的: LBG μ -PIC の性能評価

μ -PICの改良



Radon Decay Chain

^{238}U chain (下流)

^{232}Th chain (下流)

^{88}Ra

^{87}Fr

^{86}Rn

^{85}At

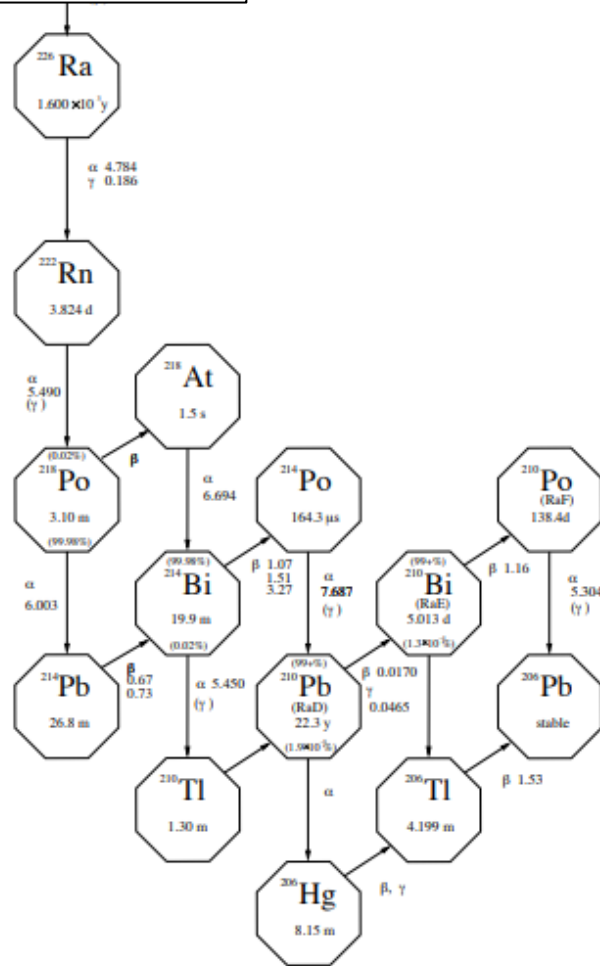
^{84}Po

^{83}Bi

^{82}Pb

^{81}Tl

^{80}Hg



^{88}Ra

^{87}Fr

^{86}Rn

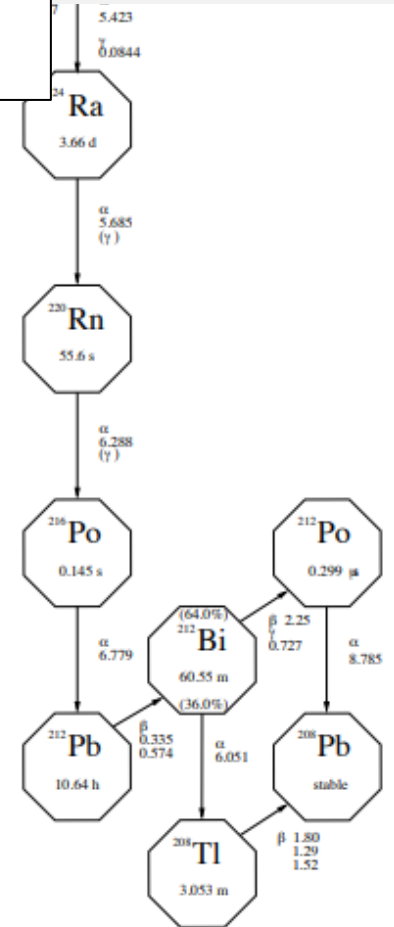
^{85}At

^{84}Po

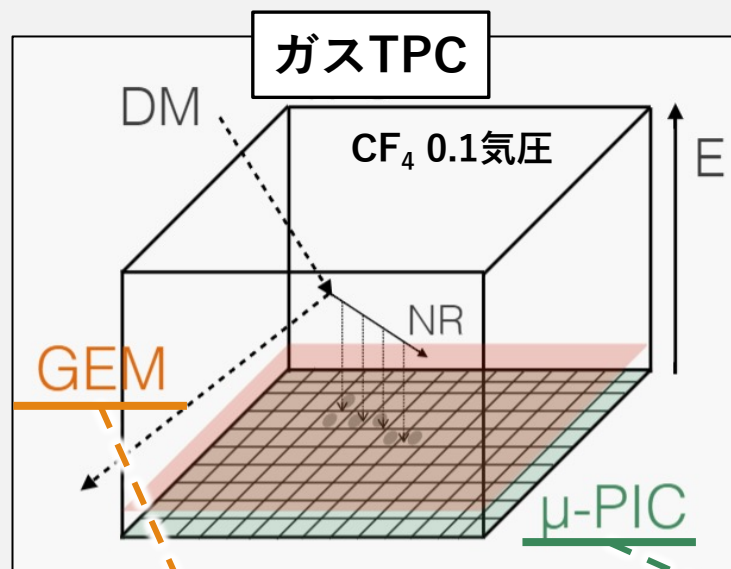
^{83}Bi

^{82}Pb

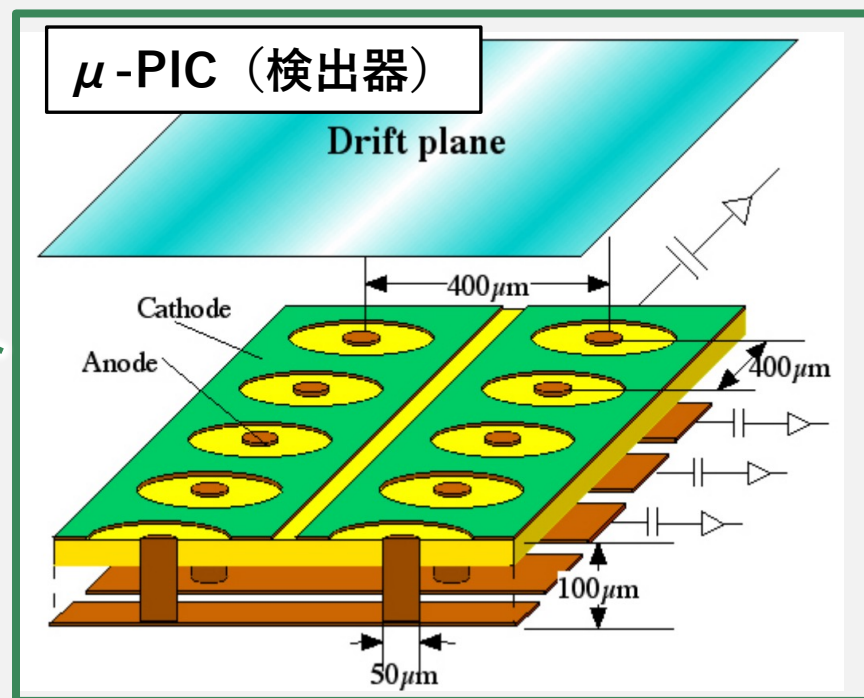
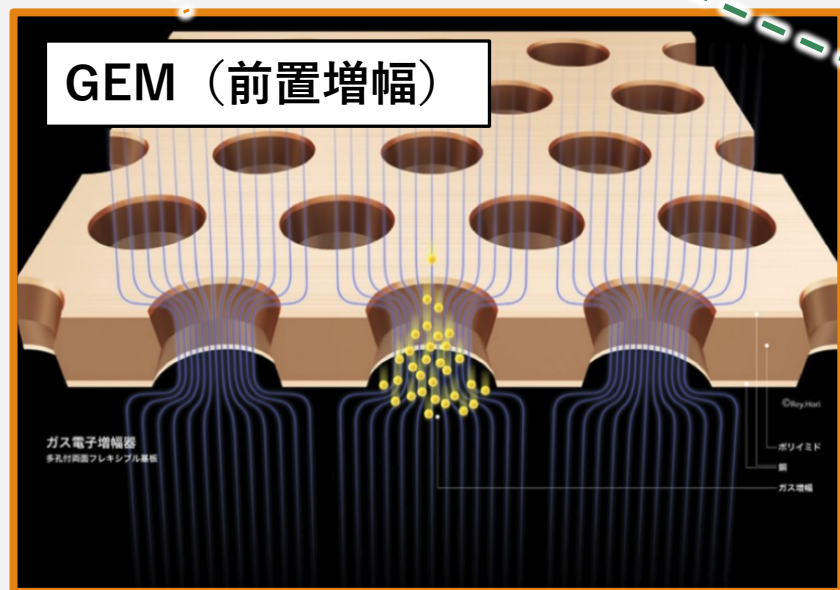
^{81}Tl



NEWAGE実験



- ガスTPC (Time Projection Chamber)
- CF_4 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

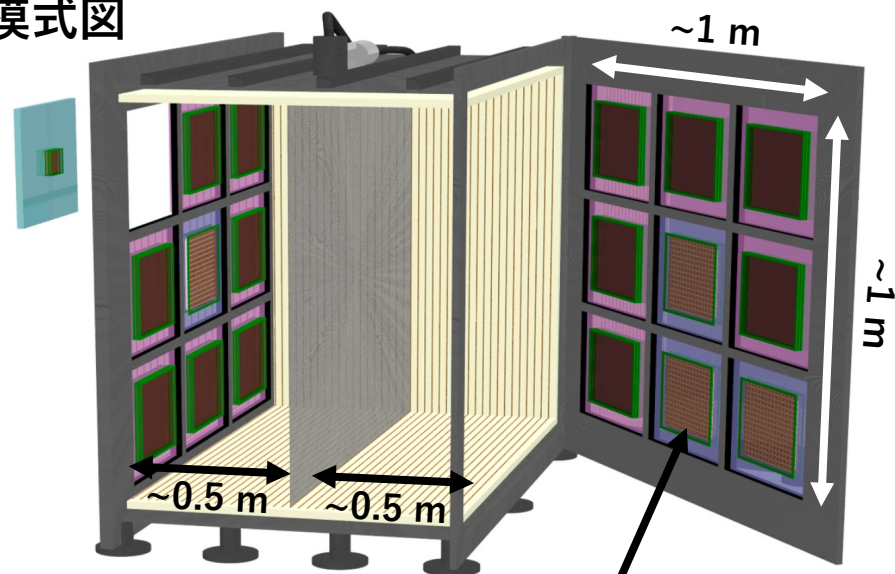


- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
- 電極付近に高電場を形成、電子を雪崩増幅

C/N-1.0



模式図



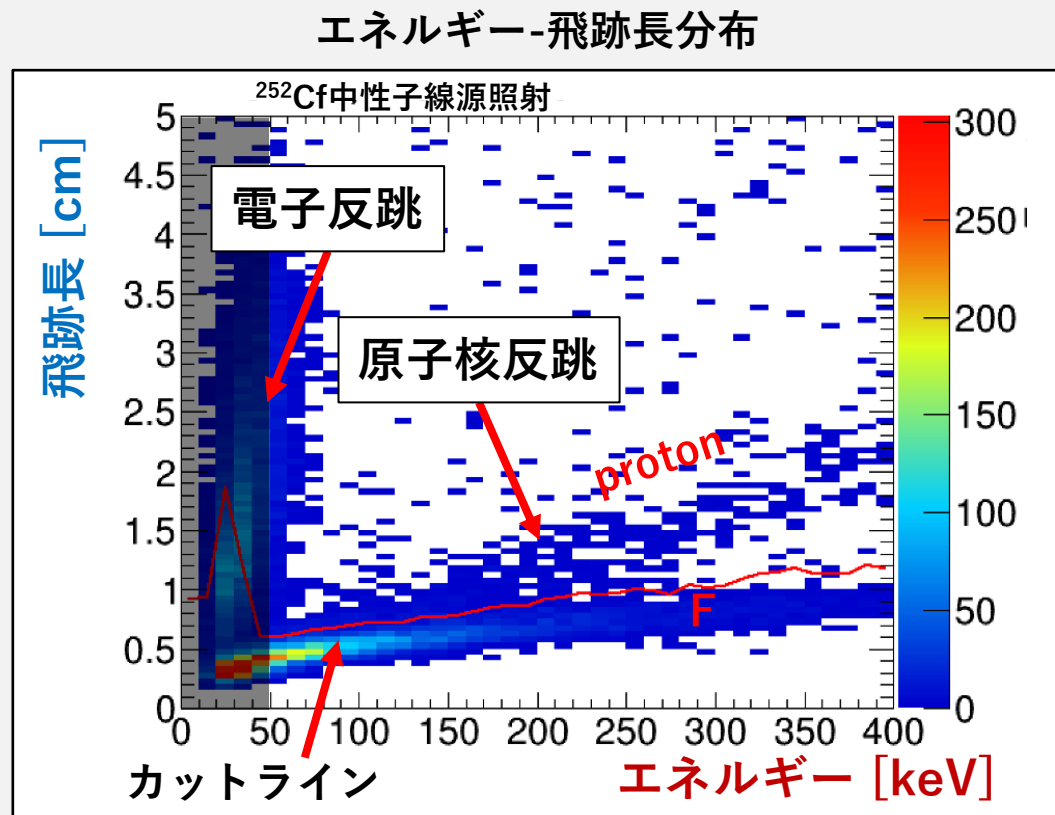
モジュール検出器

- 容積: $\sim 1 \text{ m}^3$
 - 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

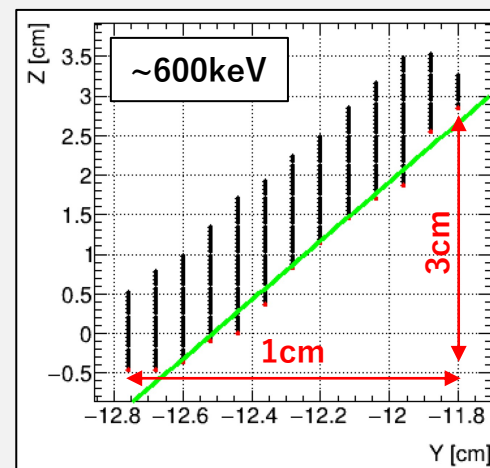
- ^{19}F 反跳事象を選別するため、飛跡の情報を再構成する必要がある。
 - これから行う統計処理に対する説明

テストチェンバーでの例



- エネルギー・長さの再構成に向けた校正係数測定の実施へ

カットされた事象



残った事象 (^{19}F 候補)

