



NEWAGE実験91：

暗黒物質探索実験に向けた 大型ガスTPCの運用状況

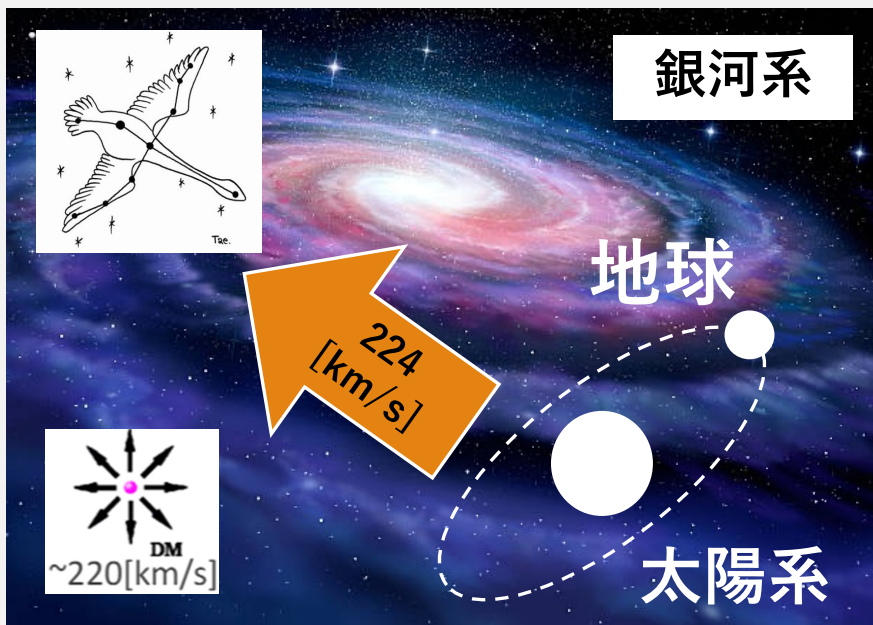
神戸大理 生井 凌太

身内賢太郎，東野聡，遠山和佳子，西田汐里，佐村航星，白水渉太，高井優花

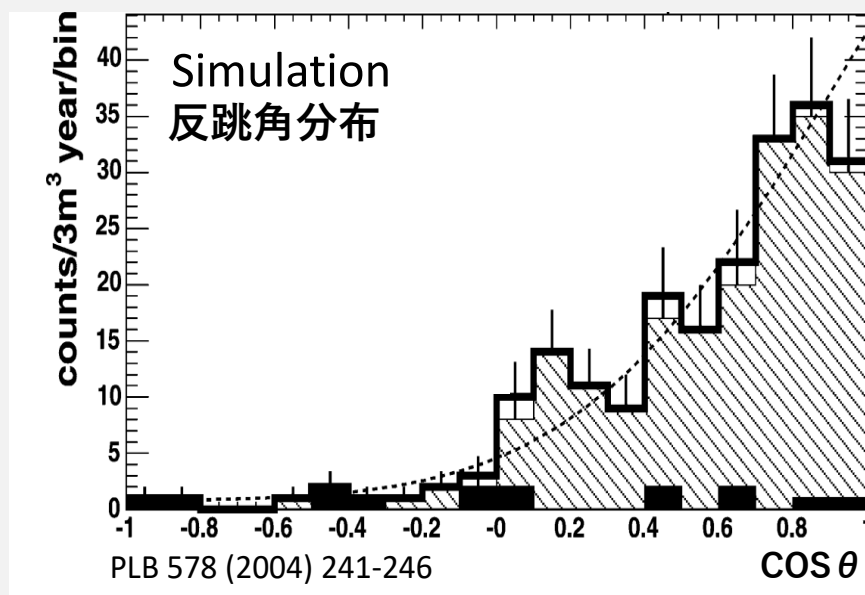
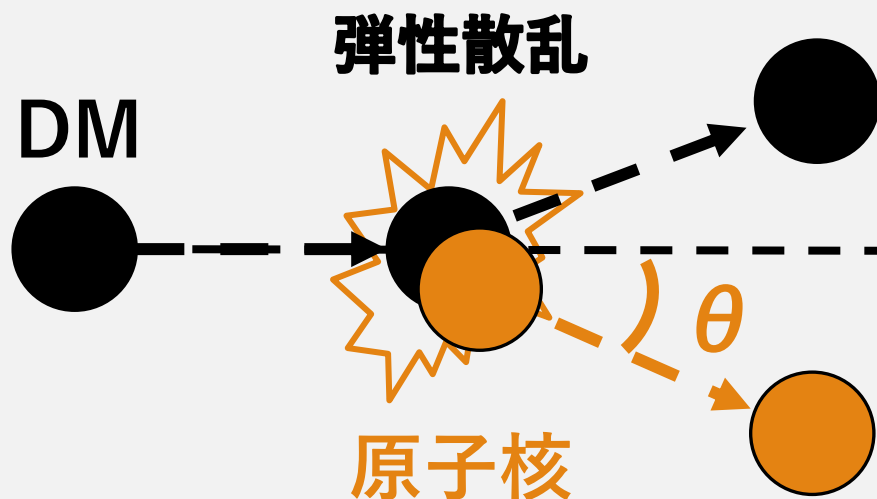
2026/9/16

Introduction

方向感度をもつ暗黒物質探索

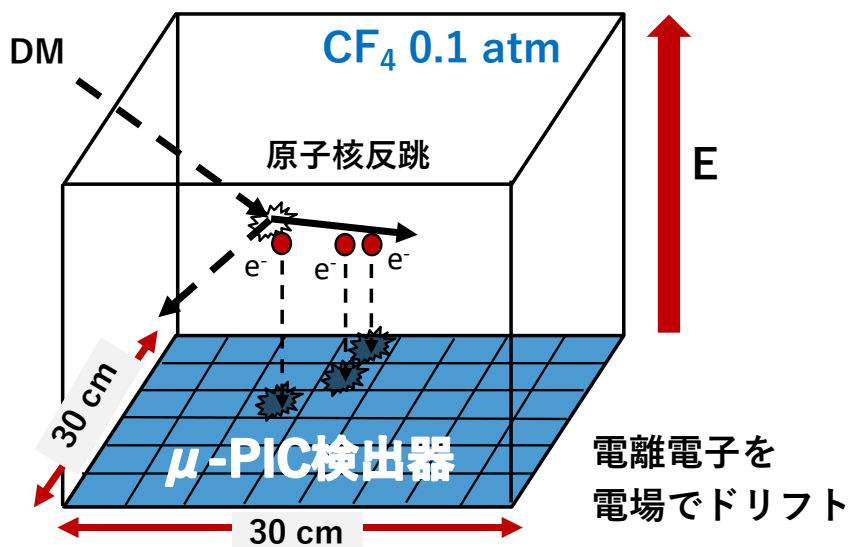


- 不明な質量の存在の観測事実
 - 世界中での暗黒物質 (DM) 探索
- 方向に感度を持つ探索
 - DMの到来方向依存性を利用
→ DMの運動学的な情報まで得られる
- どうやって?
 - DM - 原子核弾性散乱の反跳角分布を利用 (直接探索)

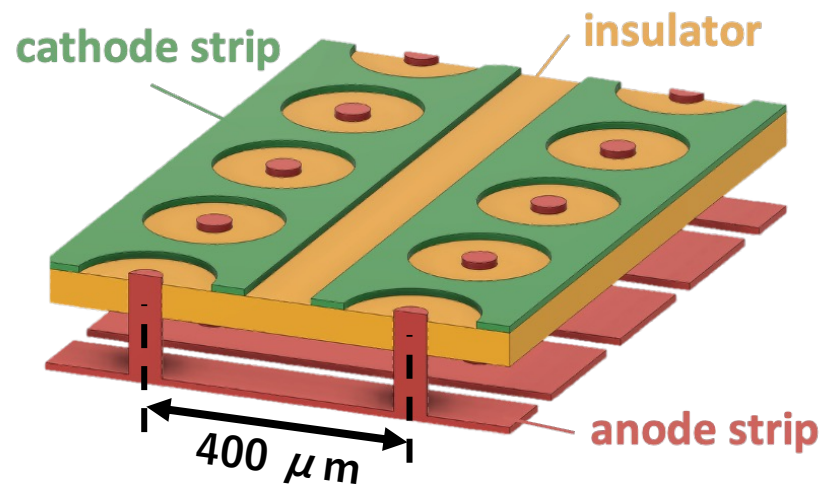


- ガスTPCで飛跡を三次元再構成することで反跳方向の情報を得る。

ガスTPC (Time Projection Chamber)



μ -PIC検出器



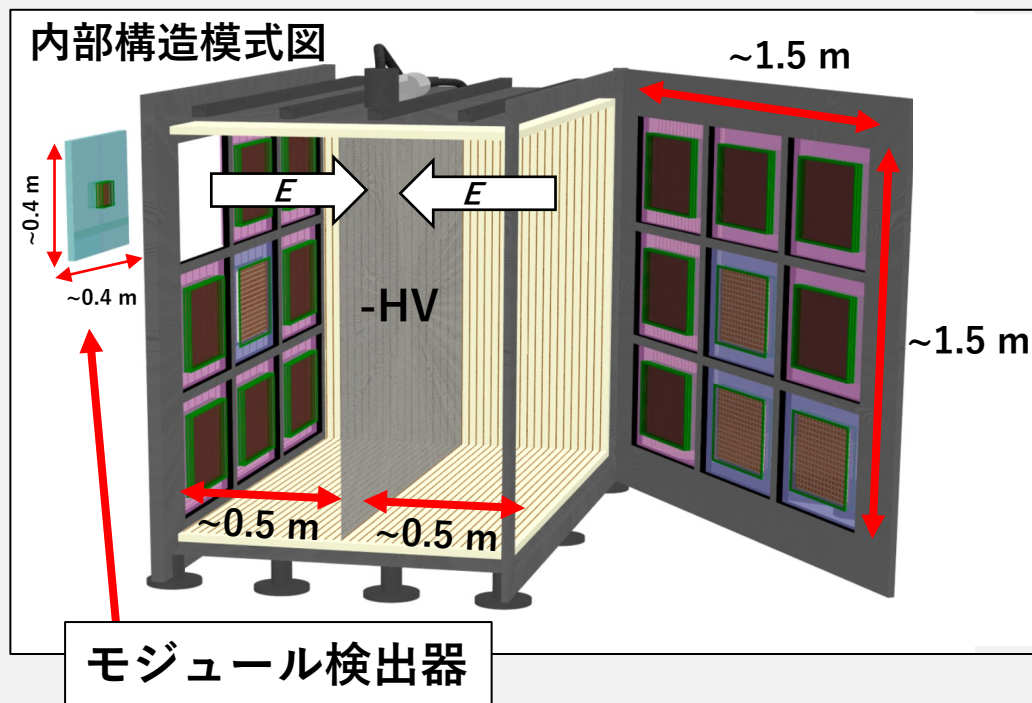
- 二次元座標 + 時間による飛跡の3次元再構成
- 電極付近の高電場による電子のガス増幅

- DM検出感度向上のための取り組み

- 低背景事象化 ← 東野トーク (16aE524-1)
- 検出器の大型化: 大型検出器C/N-1.0の開発が進行中

C/N-1.0

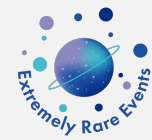
➤ C/N-1.0: 大容積ガスチェンバー



- 有効体積: 最大 $\sim 1 \text{ m}^3$
 - NEWAGEの約30倍
- モジュール検出器を最大18台搭載可能
 - モジュールごとに異なる役割を割り振れる
 - 段階的な大型化

➤ C/N-1.0とモジュール検出器の開発が神戸大学で同時進行中

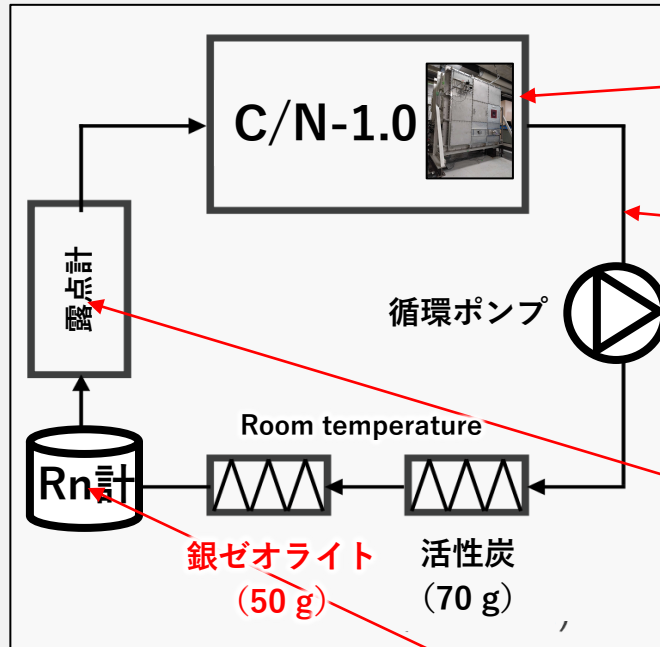
C/N-1.0 ガス循環系



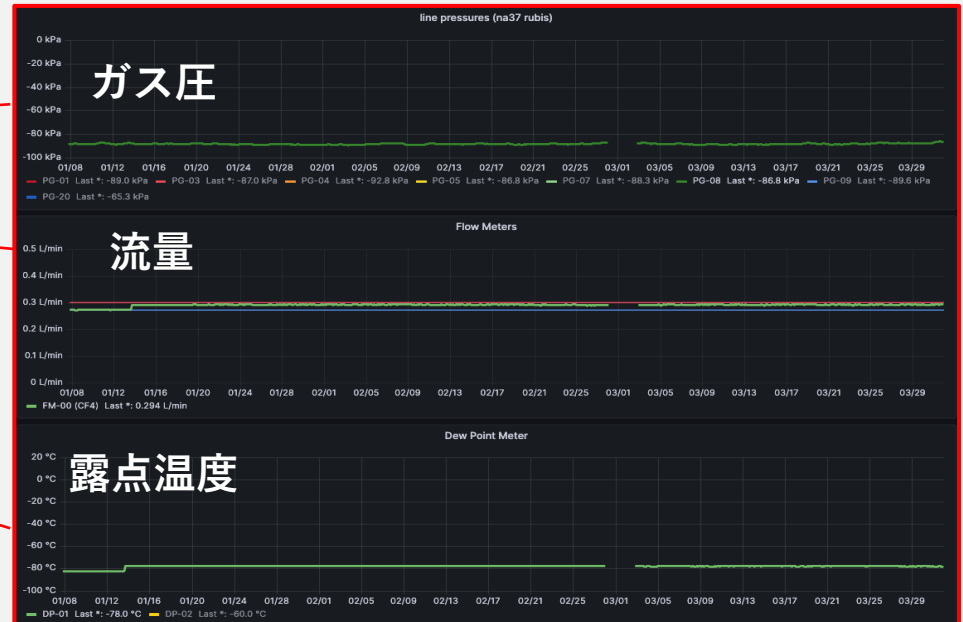
➤ 放射性同位体ラドンの崩壊に伴う放射線が大きな背景事象要因

- ・ 銀ゼオライトを用いたガス循環系を構築

ガス循環系



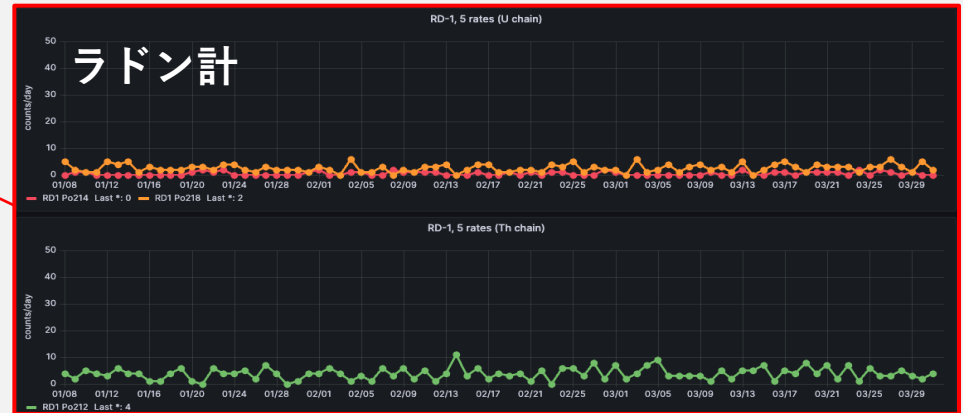
ステータスマニタ (Grafana)



➤ Grafanaで系を監視

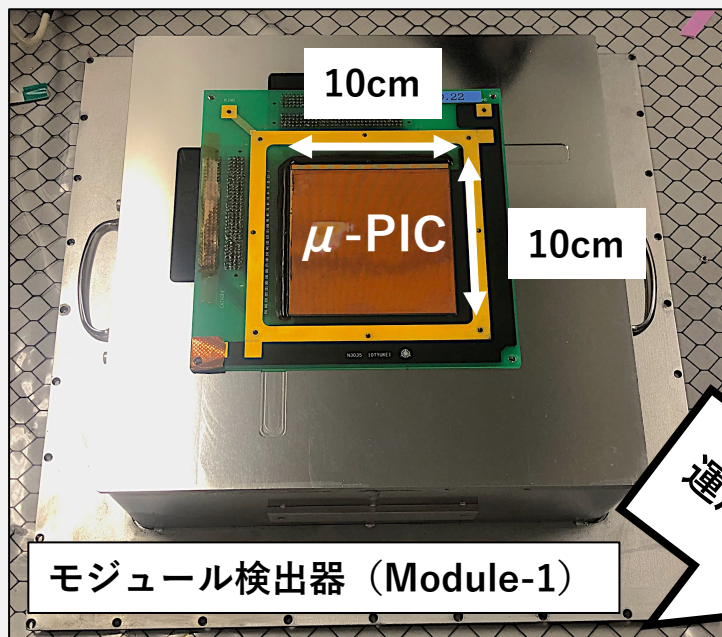
➤ ラドン計によるラドン量を測定

- ・ 静電捕集型の検出器
- ・ ラドン娘核崩壊時の α を測定



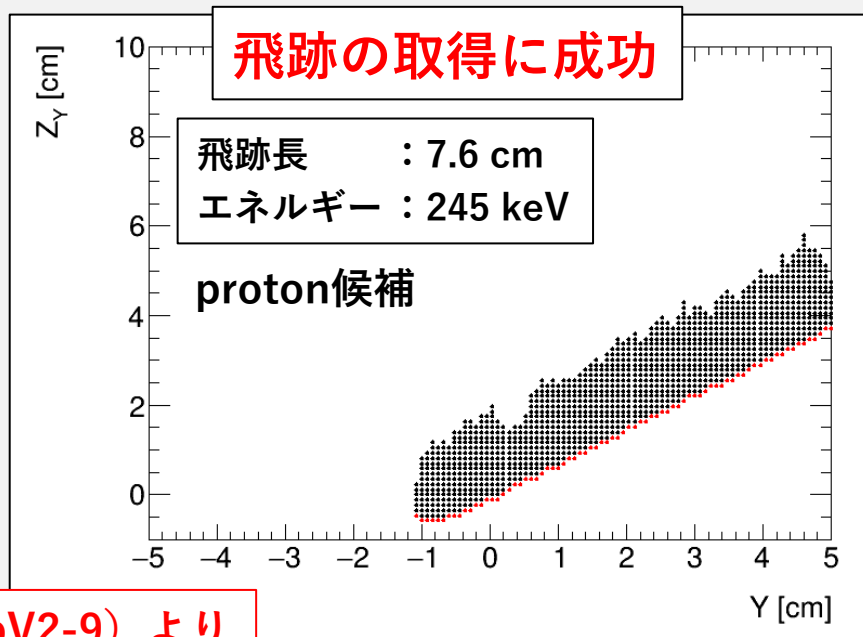
C/N-1.0運用試験

C/N-1.0運用試験

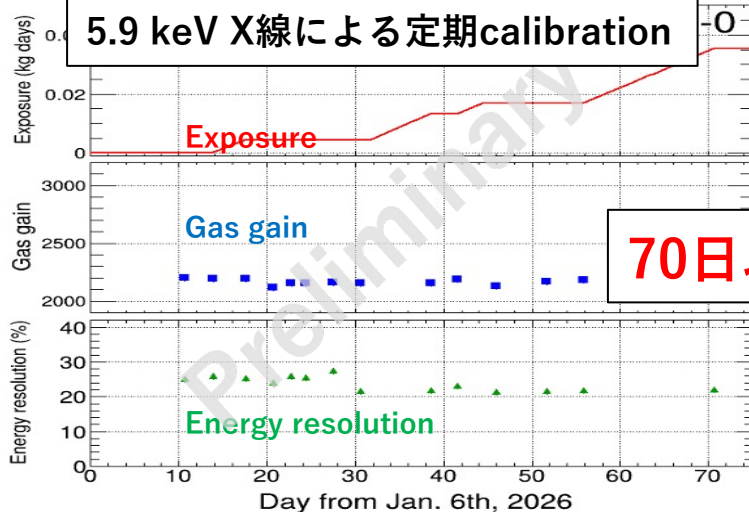


運用試験

モジュール検出器 (Module-1)

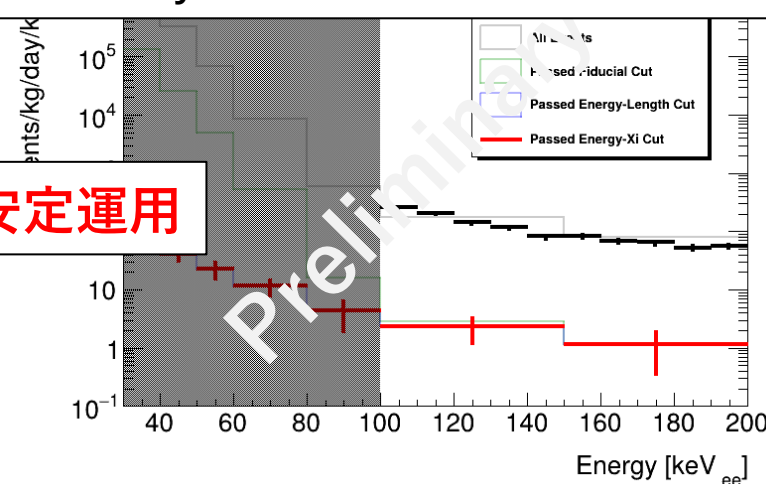


JPS2026春 (25pV2-9) より

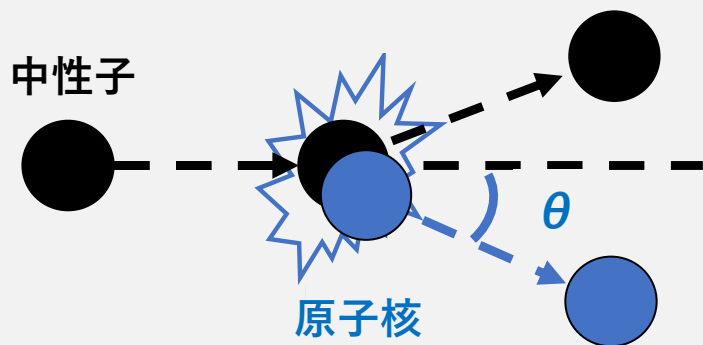


70日以上安定運用

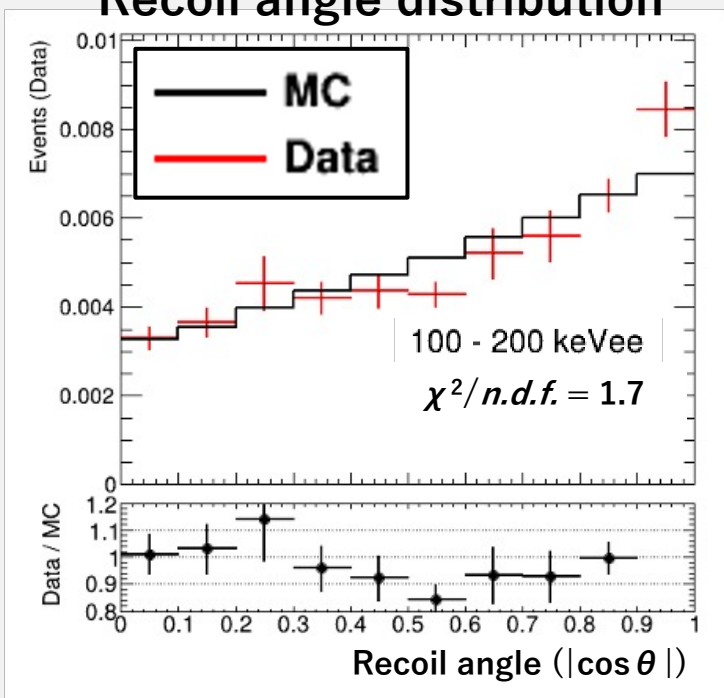
efficiencyを考慮したeffectiveなスペクトル



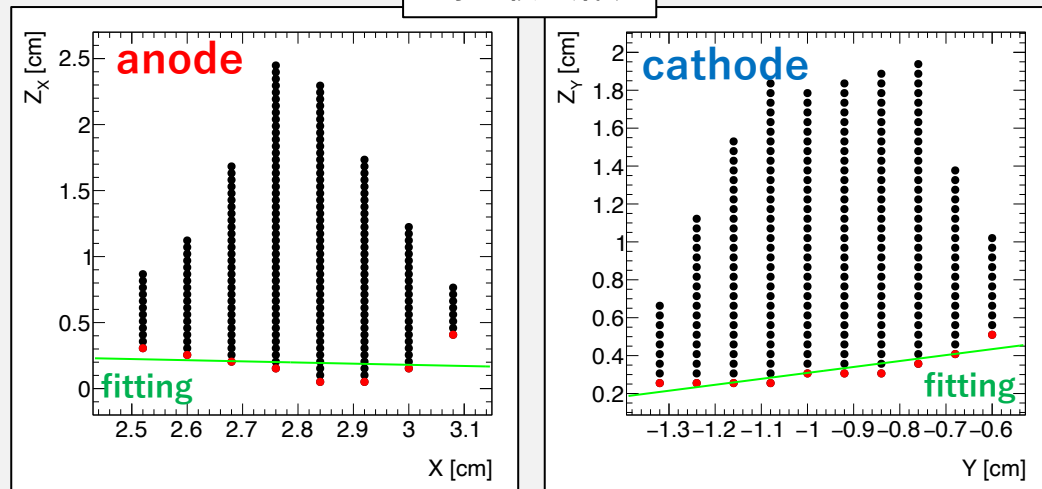
角度分解能測定



Recoil angle distribution



F原子核の飛跡



➤ ^{252}Cf 中性子線源を用いてF反跳事象を取得

➤ 解析

- 飛跡に対して線形フィッティング、角度分布を作成
- MC expected分布に対して分解能をかけて



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

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

> 100 keV_{ee}での角度再構成に成功

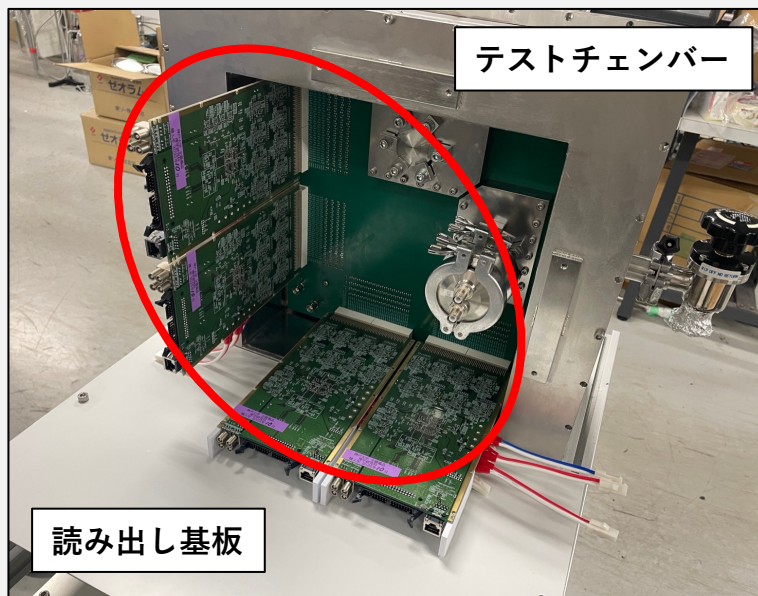
現況

- **完了: C/N-1.0の運用試験**
 - ✓ 飛跡の再構成
 - ✓ 長期での連続運転
 - ✓ $> 100 \text{ keV}_{ee}$ での角度分解能を確認

現況

- **完了: C/N-1.0の運用試験**
 - ✓ 飛跡の再構成
 - ✓ 長期での連続運転
 - ✓ $> 100 \text{ keV}_{\text{ee}}$ での角度分解能を確認
- **NEXT: C/N-1.0のシステム改良**
 - ✓ 角度分解能のエネルギー閾値改善
 - ✓ 循環系の改良

モジュール 改良



特徴

	Module-1	Module-2
検出面積	$10 \times 10 \text{ cm}^2$	$10 \times 10 \text{ cm}^2$
チャンネルピッチ	$800 \mu\text{m}$	$400 \mu\text{m}$
チャンネル数	$128 \times 2 \text{ ch}$	$256 \times 2 \text{ ch}$
エネルギー閾値 (角度分解能あり)	$100 \text{ keV}_{\text{ee}}$	$50 \text{ keV}_{\text{ee}}$

➤ Module-1の半分のチャンネルピッチ（NEWAGEと同等）

- より短飛跡の事象再構成に期待

➤ detector の構成はModule-1 (μ -PIC + GEM)と同様

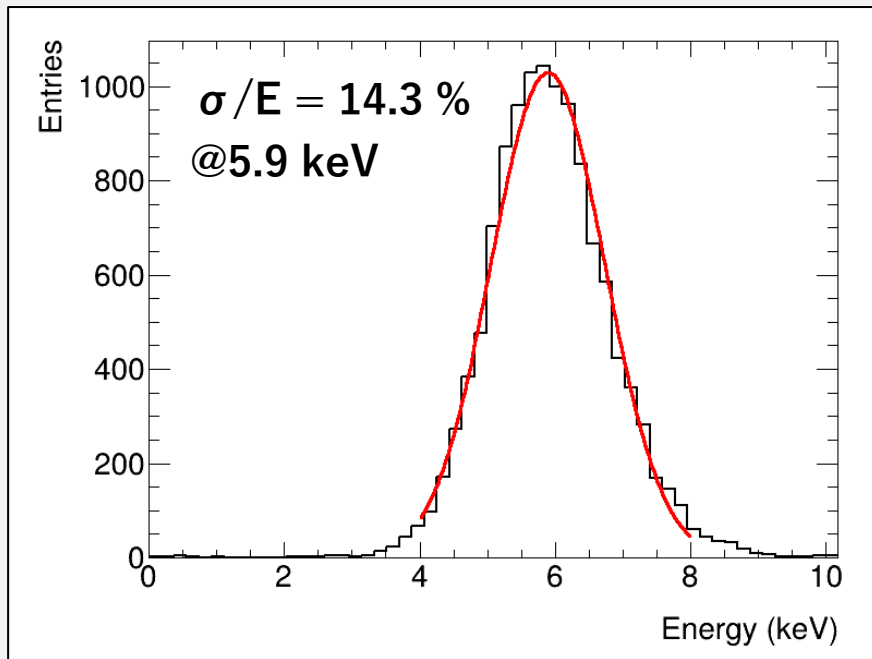
➤ テストチェンバーを用いて動作試験と性能評価を実施

- エネルギー較正: Module-1と同等を要求
- 飛跡の再構成: 複数読み出し基板にまたがる事象、短飛跡の事象

エネルギー較正

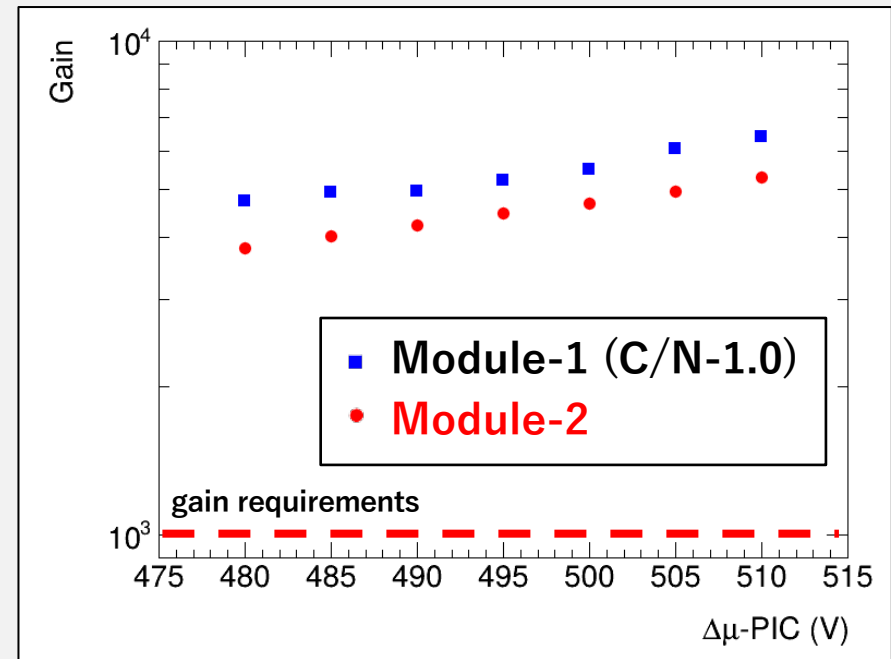
- ^{55}Fe の5.9 keV X線
- CF_4 ガス、0.1 atm（現行NEWAGEと同様）

エネルギースペクトル



分解能評価（要請値： $\sigma = 12.4\%$ @50 keV）

ゲインカーブ



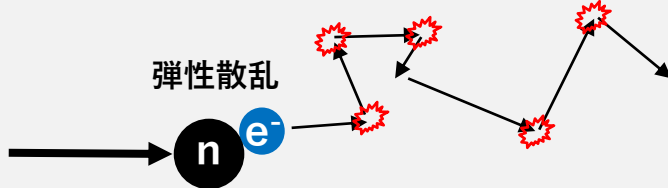
ゲイン評価（要請値： >1000 ）

- 要請値を満たすことを確認

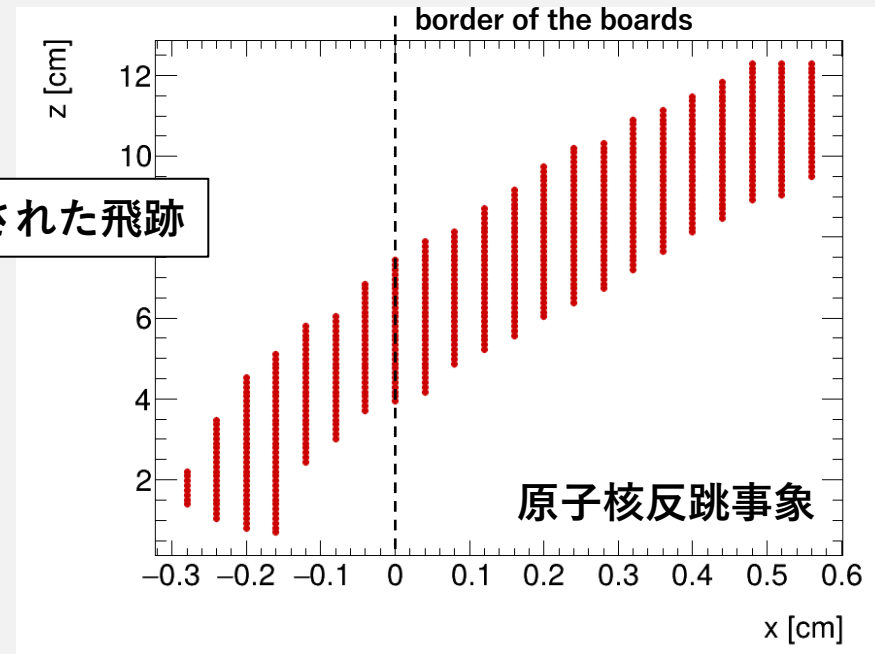
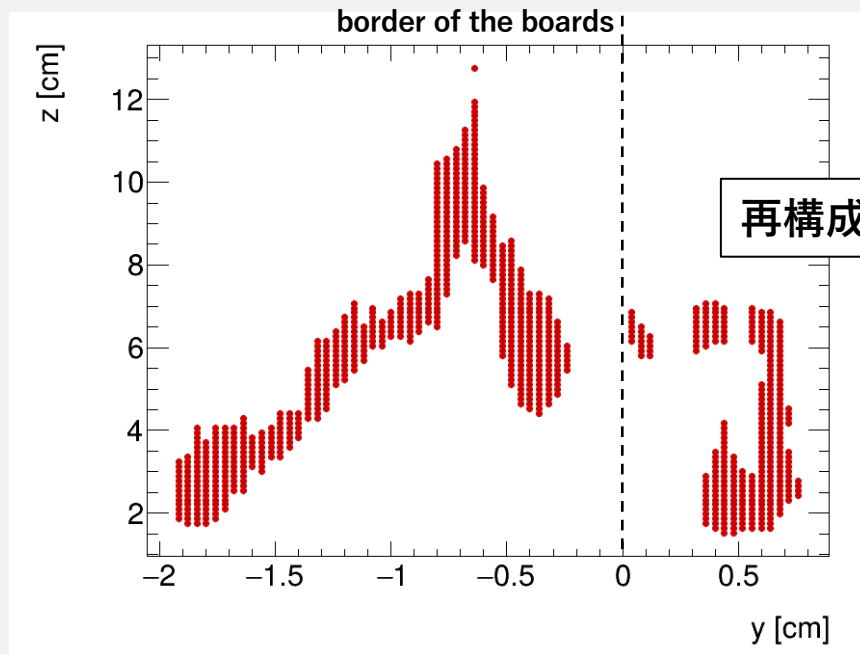
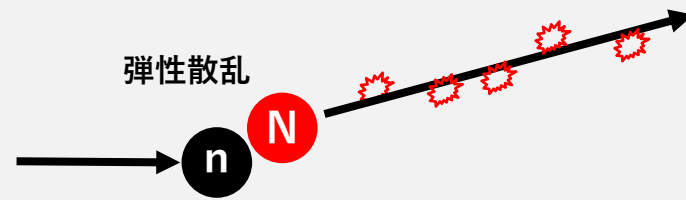
飛跡の再構成

- ^{252}Cf 中性子線源のfissionによるガンマ線+中性子
- CF_4 ガス、0.1 atm

電子反跳事象: 多重散乱



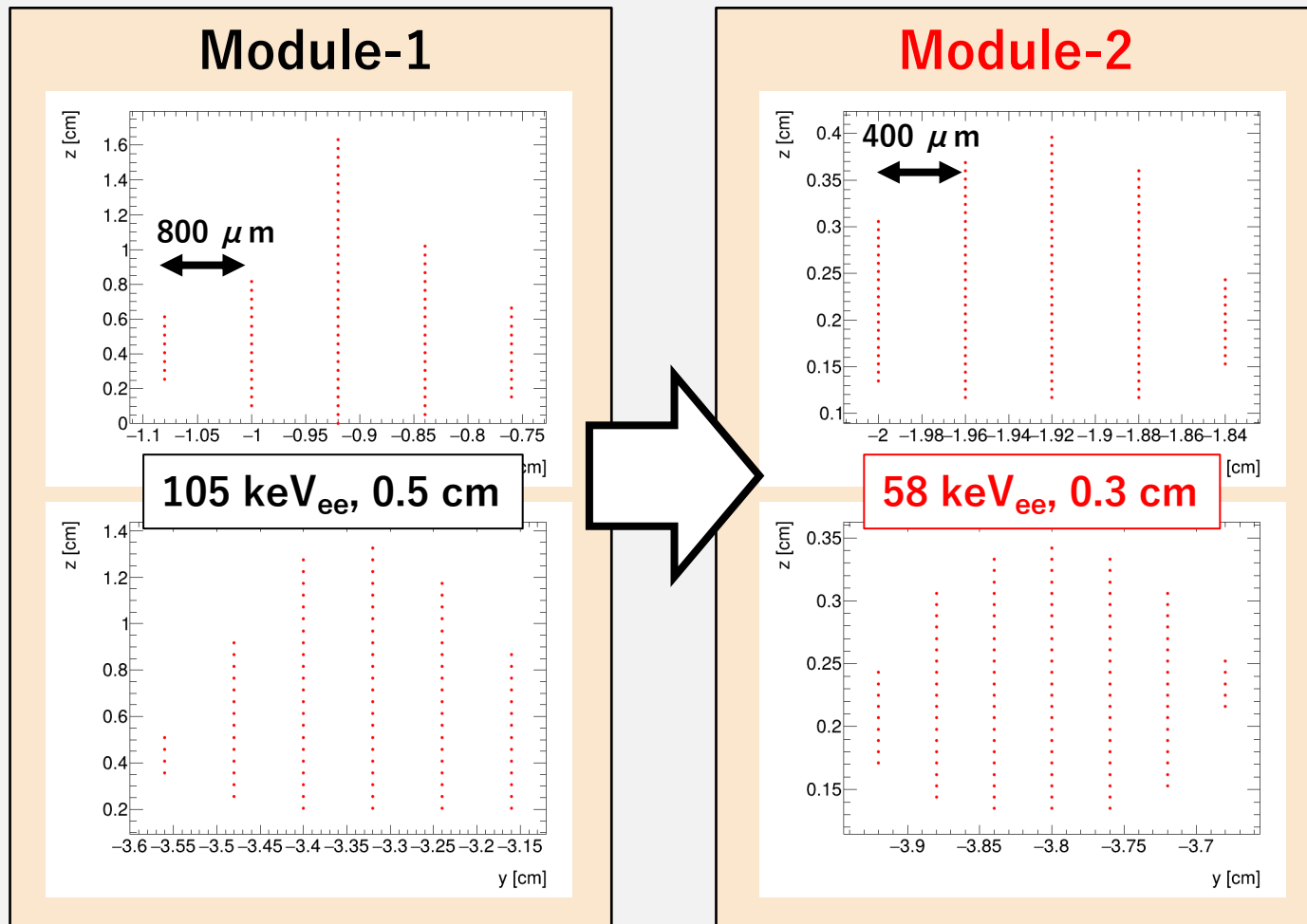
原子核反跳事象



- アノード/カソードそれぞれ複数の読み出し基板を使用
 - 読み出し基板間でのコインシデンスが取れていることを確認

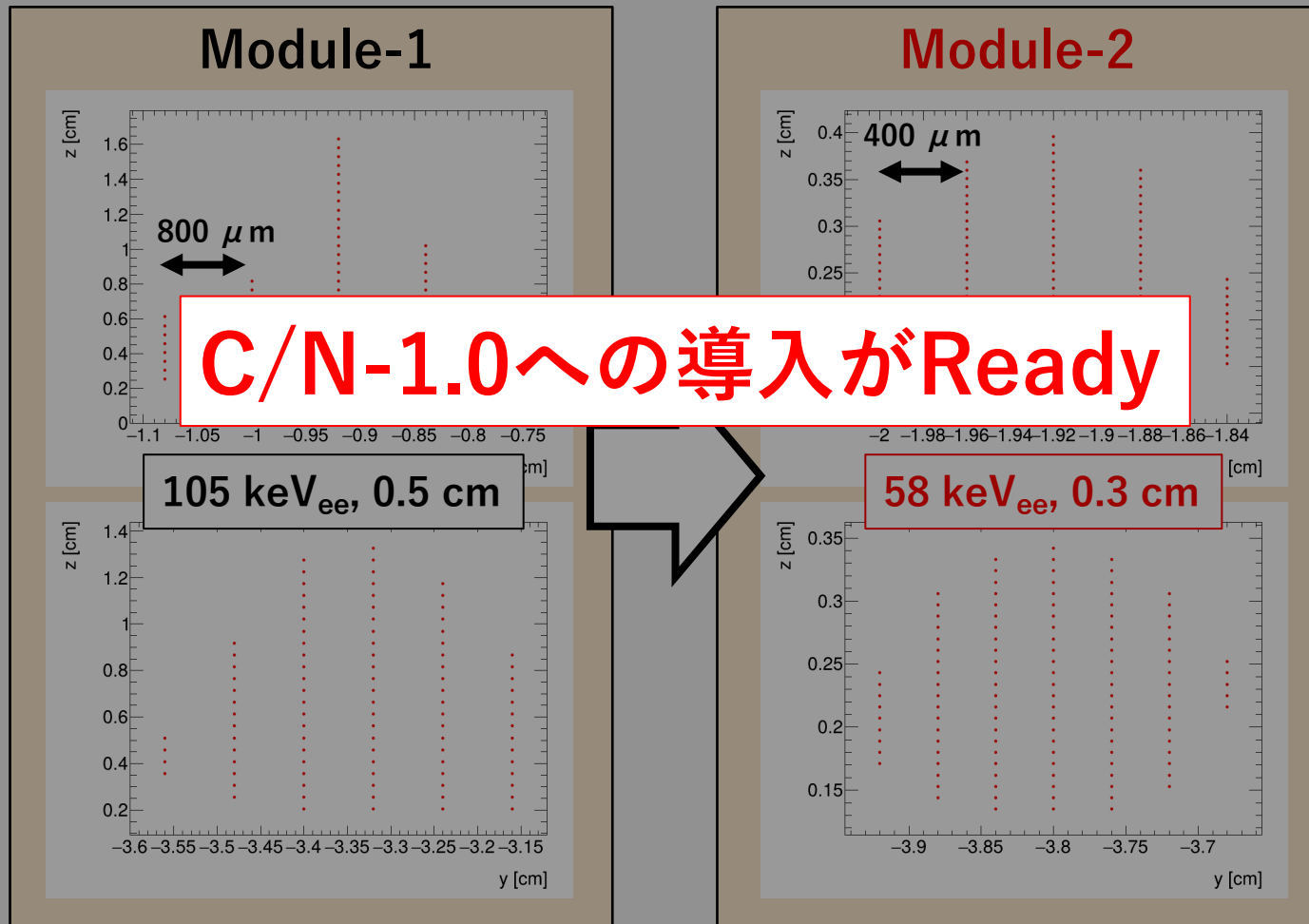
飛跡の再構成

- CF_4 ガス、0.1 atm、 ^{252}Cf 中性子線源
- Module-1の $\sim 100 \text{ keV}_{\text{ee}}$ ^{19}F track $\doteq$ Module-2の $\sim 50 \text{ keV}_{\text{ee}}$ ^{19}F track
 - ・ エネルギーの低閾値化に期待

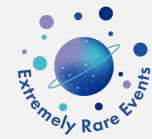


飛跡の再構成

- CF_4 ガス、0.1 atm、 ^{252}Cf 中性子線源
- Module-1の $\sim 100 \text{ keV}_{\text{ee}}$ ^{19}F track $\doteq$ Module-2の $\sim 50 \text{ keV}_{\text{ee}}$ ^{19}F track
 - ・ エネルギーの低閾値化に期待

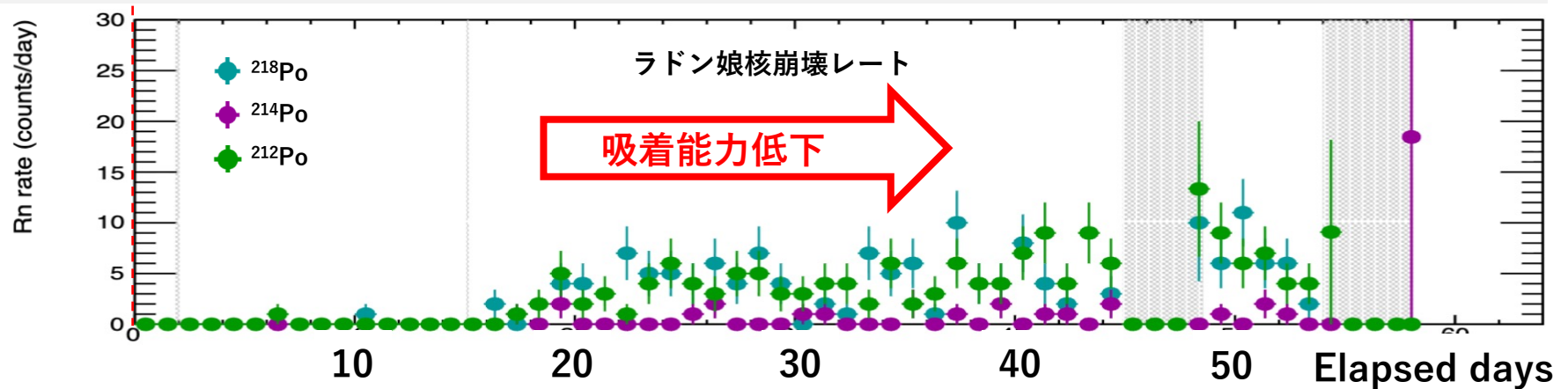


循環系 改良



問題点

- 循環系内の水分により銀ゼオライトのラドン吸着能力が低下
 - ・ C/N-1.0チェンバー内部のアクリルが多量の水を保持



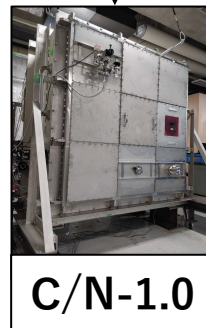
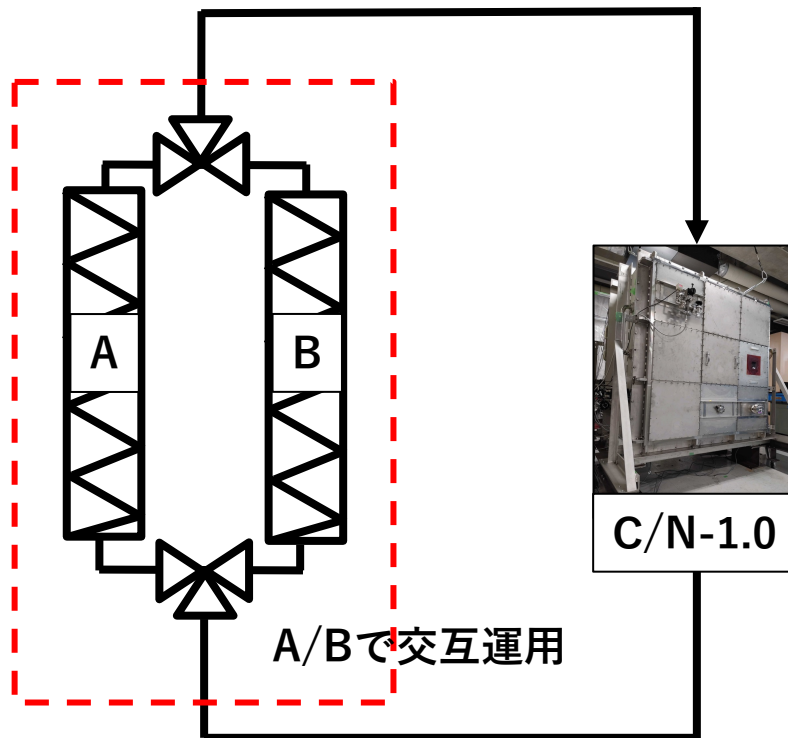
- 吸着能力を回復させるにはベーキングが必要: 循環を止める必要あり

継続的に使用できるラドンフィルターが必要

循環系 改良

問題点

➤ 循環系



➤ 吸着

並列フィルターを製作中

ロードマップ



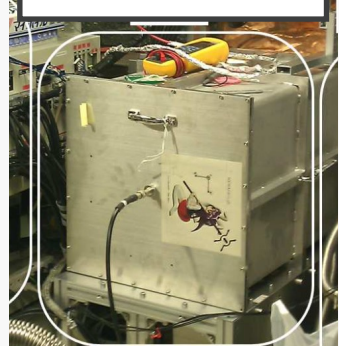
2025

2026

2027

... 2030

NEWAGE 0.3b''



30 × 30 × 41 cm³

地下測定

CF₄、SF₆ガスでの基礎研究

2023年12月
低BG μ -PIC実装

ピクセル検出器試験
(小型検出器)

低BG μ -PIC
C/N-1.0に実装

C/N-1.0



1 m³

2025年12月
Module-1実装
地上測定開始

Module-0, 1, 2 地下測定
(commissioning)

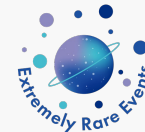
18モジュール運転
1 m³ チェンバーで
地下測定

2026年夏
Module-2実装

2026年
神岡坑内へ搬送

低BG μ -PIC
C/N-1.0に実装

ロードマップ



2025

2026

2027

... 2030

NEWAGE 0.3b''

地下測定

CF₄、SF₆ガスでの基礎研究

NEWAGEでのLow BGに関する知見をC/N-1.0で利用

低BG μ -PIC

C/N-1.0地上運転開始、
地下搬入に向け準備中

DAMA/LIBRA領域到達
C/N-1.0, "大質量測定"

Module-0, 1, 2 地下測定
(commissioning)

18モジュール運転
1 m³ チェンバーで
地下測定

C/N-1.0

2025年12月
Module-1実装
地上測定開始

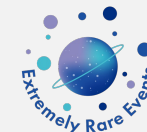
2026年夏
Module-2実装

2026年
神岡坑内へ搬送

低BG μ -PIC
C/N-1.0に実装

1 m³

まとめ

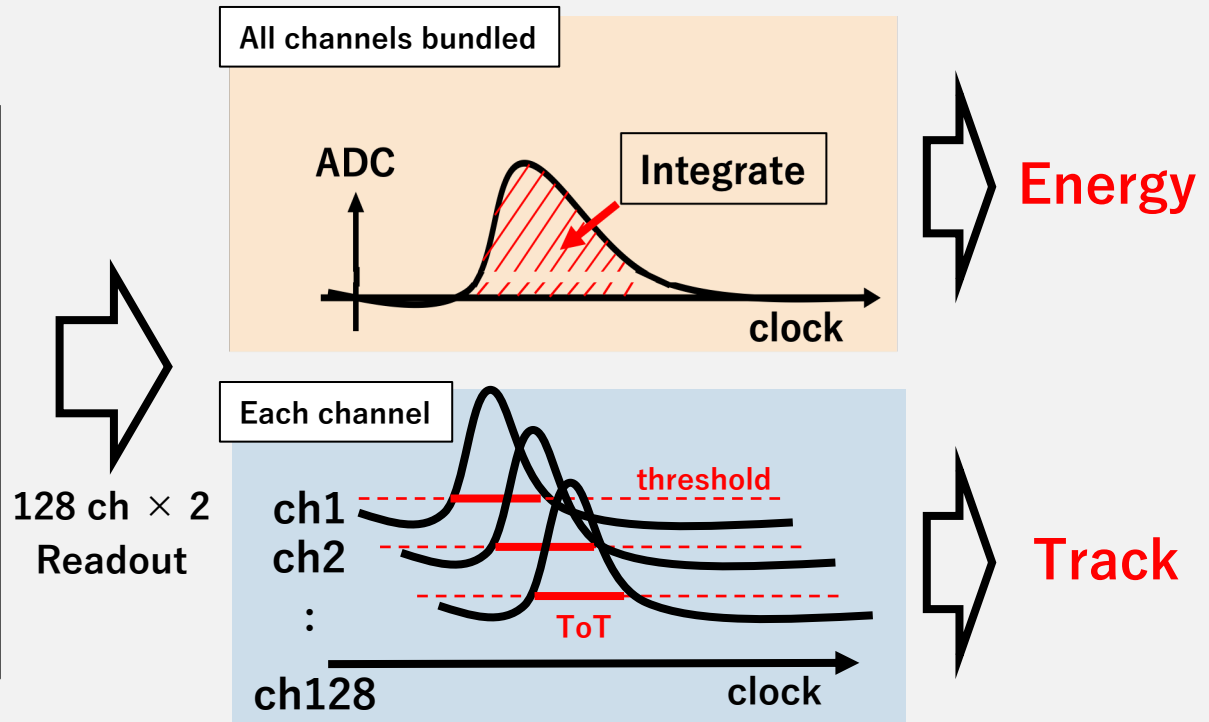
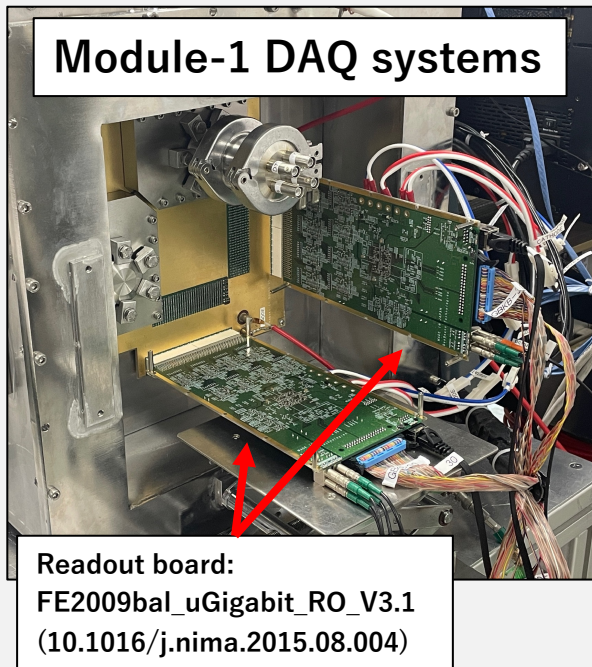


- **NEWAGE：方向に感度をもつ暗黒物質直接探索**
- **C/N-1.0の運用試験**
 - ✓ 長期運用試験を完了
 - ✓ $> 100 \text{ keV}_{ee}$ での角度再構成可能であることを確認
- **検出器の改良**
 - エネルギー閾値低減に向けた検出器の改良が進行中
 - ✓ 試験容器での性能評価が完了、C/N-1.0導入へ
 - 背景事象削減に向け、循環系を改良中

Back up

Data acquisition

Data acquisition flow

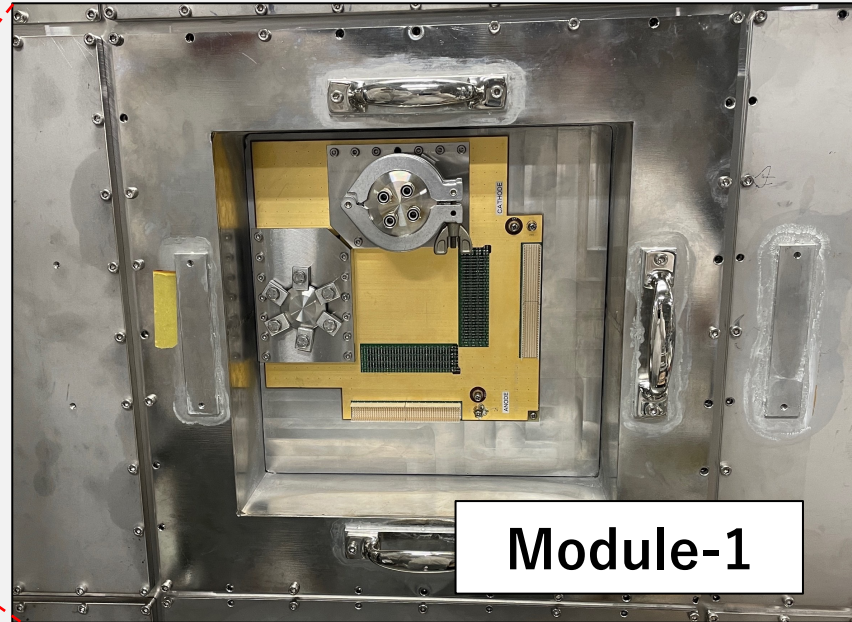
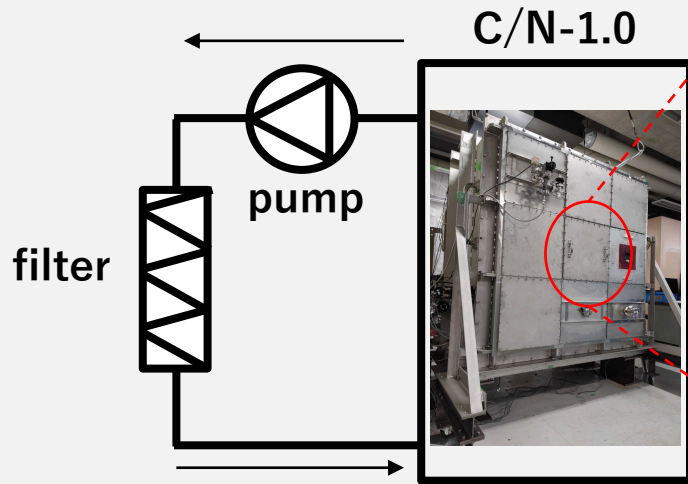


- Signals are read out from 128 channels in each readout board.
- An energy is calculated by integrating ADC waveforms over all channels.
- A track is reconstructed with the time-over-threshold (ToT) information for each channel.
- All electronics are arranged so as not to interfere with the neighboring module slot.

Measurement setup

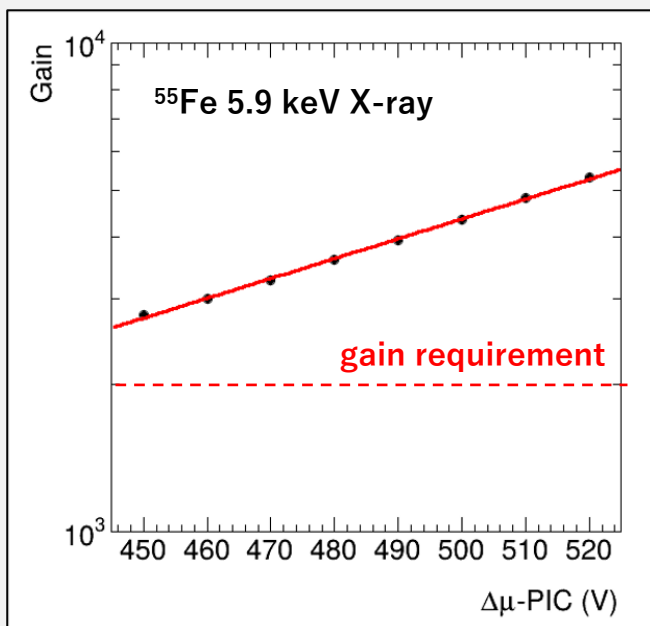
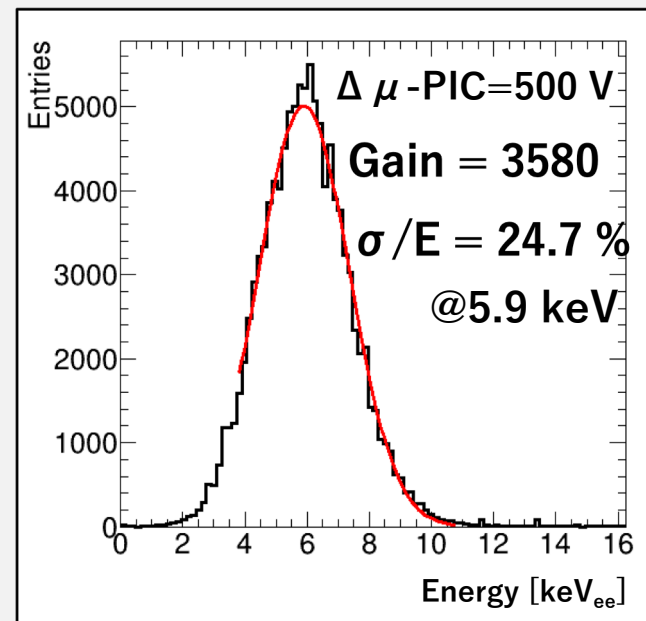
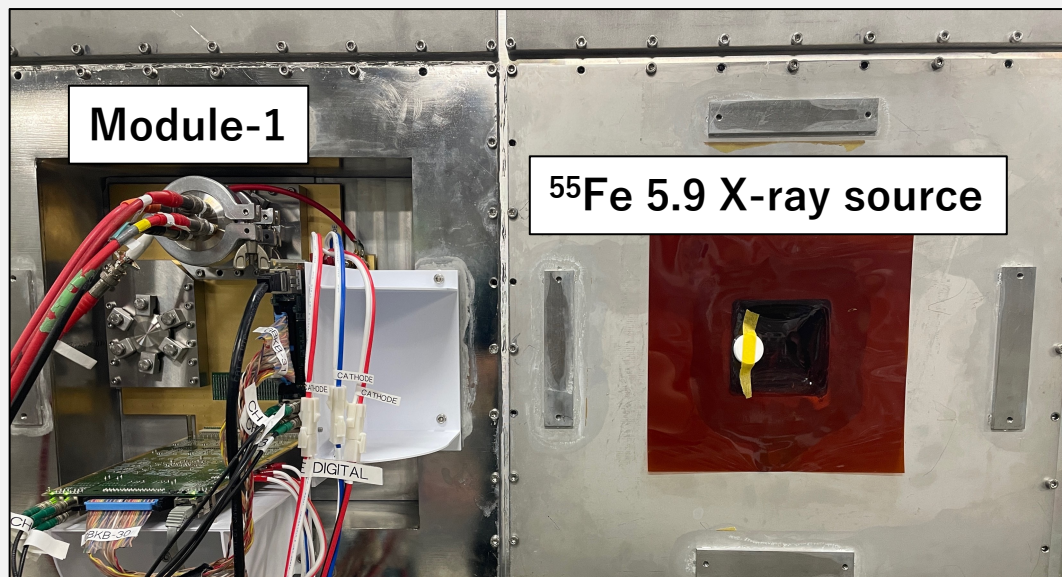
- Gas: CF_4 gas (0.1 atm)
- A circulation system with a filter for adsorbing impurities (a radioactive isotope and water) has already been built.

Schematic of circulation system



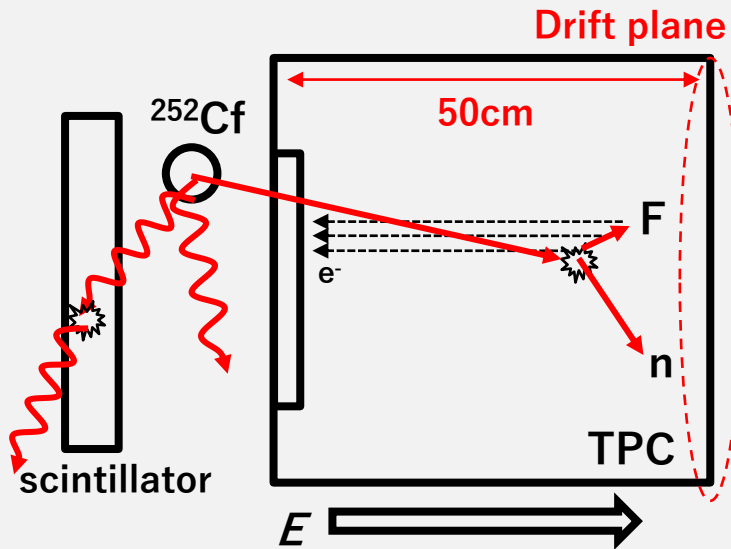
- Module-1 was installed in the center slot.
- Three operation tests were conducted.
 - ✓ Gas gain and energy resolution measurement (energy calibration)
 - ✓ Electron drift velocity measurement
 - ✓ Angular resolution measurement

Energy calibration



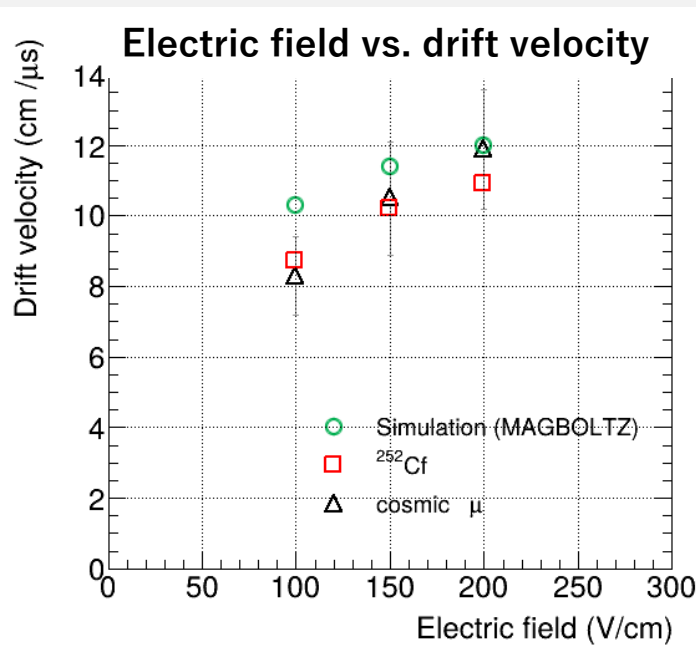
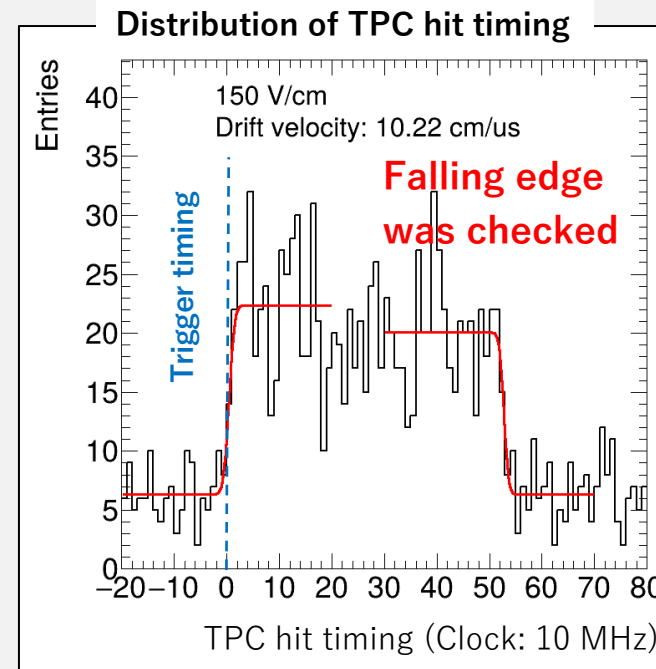
- An ^{55}Fe 5.9 keV X-ray source was used for energy calibration.
- An energy resolution comparable to or better than that of NEWAGE was measured.
- We confirmed that the required gas gain was achieved at an applied voltage with no discharge.

Drift velocity measurement



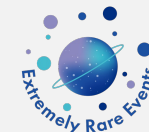
Measurement method

- Gamma rays and neutrons from a ^{252}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.

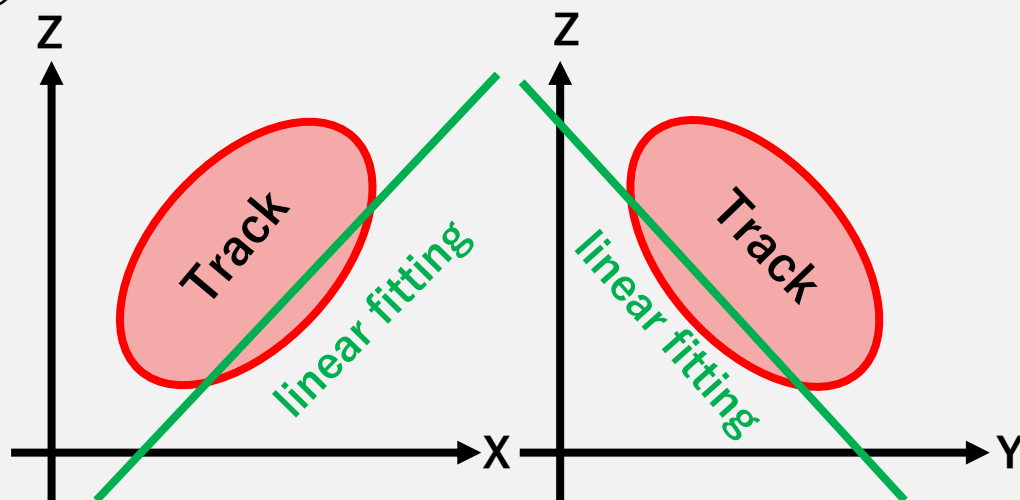


- Since a falling edge was observed, we confirmed that nuclear recoils nearby the drift plane are successfully detected.
 - The measured drift velocity as a function of the electric field strength is consistent with the simulation.
- **The electric field is properly formed.**

角度計算方法

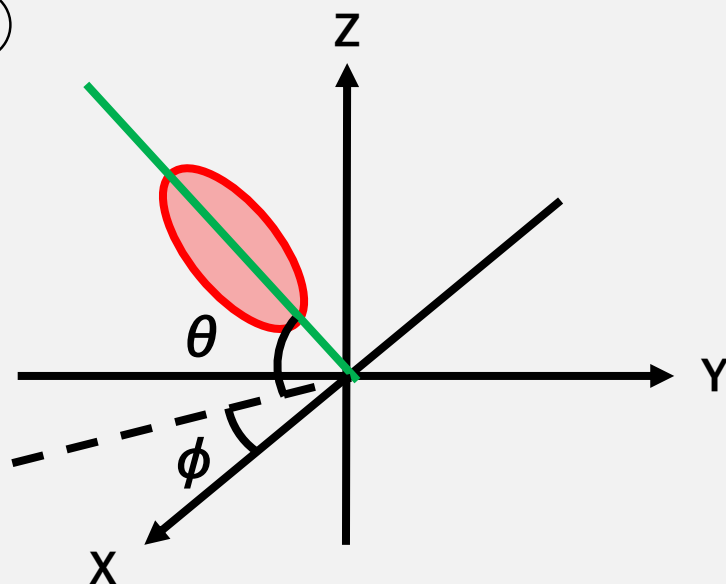


①



- F原子核反跳を事象選別
- X-Z、Y-ZのToTを線形fitting

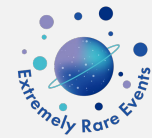
②



- 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

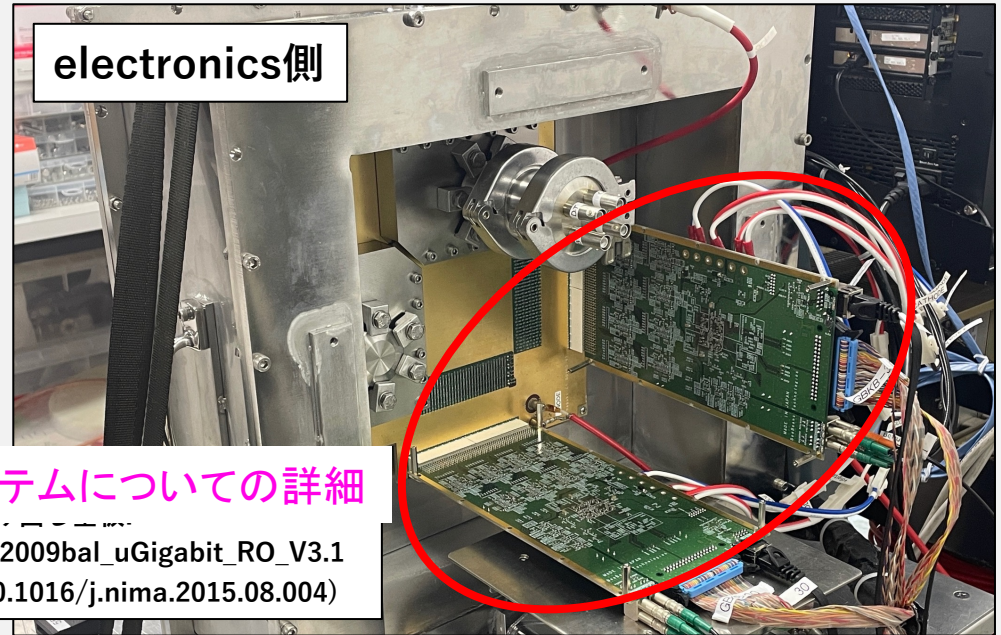
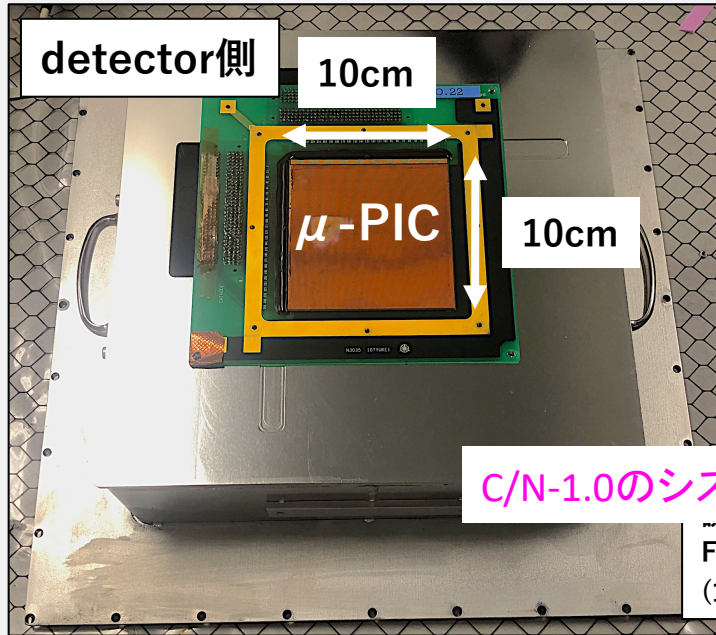
Temporary

モジュール検出器



➤ 方向感度をもつモジュール検出器 (Module-1) を開発

Module-1



C/N-1.0のシステムについての詳細

FE2009bal_uGigabit_RO_V3.1
(10.1016/j.nima.2015.08.004)

	NEWAGE	Module-1
検出面積	$30 \times 30 \text{ cm}^2$	$10 \times 10 \text{ cm}^2$
チャンネル数	$768 \times 2 \text{ ch}$	$128 \times 2 \text{ ch}$
チャンネルピッチ	$400 \mu\text{m}$	$800 \mu\text{m}$

➤ electronicsが隣のモジュールと干渉してはいけない

- 信号の読み出しピッチをNEWAGEの倍にしてチャンネル数を削減

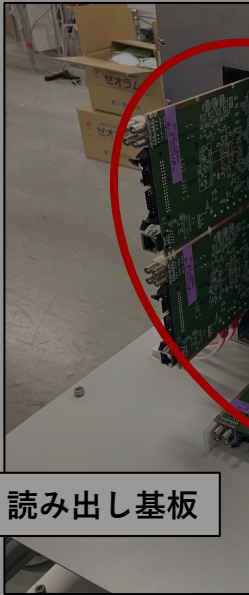
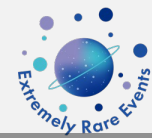
Outline

- イントロ
 - ・ 方向感度をもつ暗黒物質探索
 - ・ NEWAGE実験
 - ・ C/N-1.0
- C/N-1.0運用試験
 - ・ 方向感度をもつモジュール
 - ・ モジュールのアップグレード
- Prospects
- ロードマップ
- まとめ



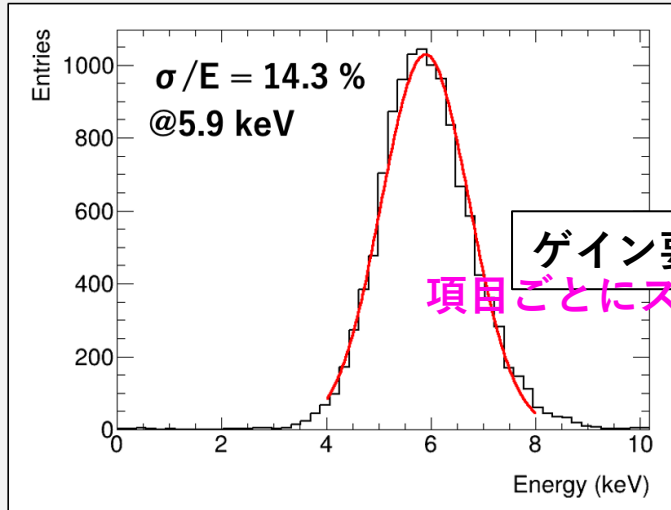
higgstan.com

モジュール 改良

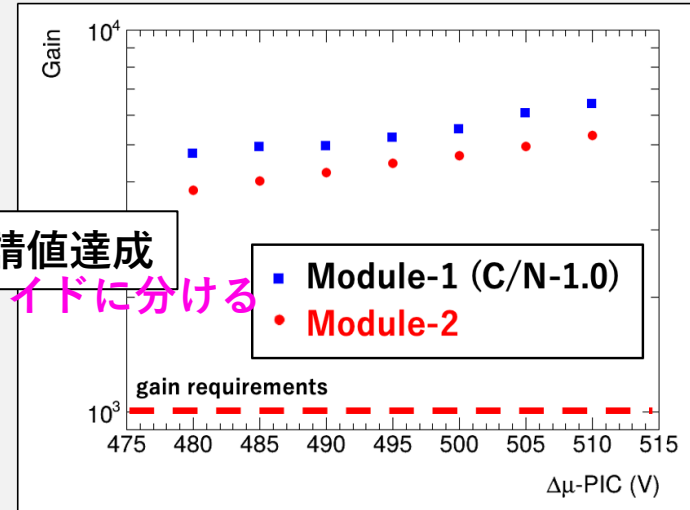


読み出し基板

エネルギースペクトル



ゲインカーブ



分解能評価 (要請値: $\sigma=12.4\%$ @50 keV)

ゲイン評価 (要請値: >1000)

➤ Module 1の半分のチャンネルピッチ (NEWAGEと同等)

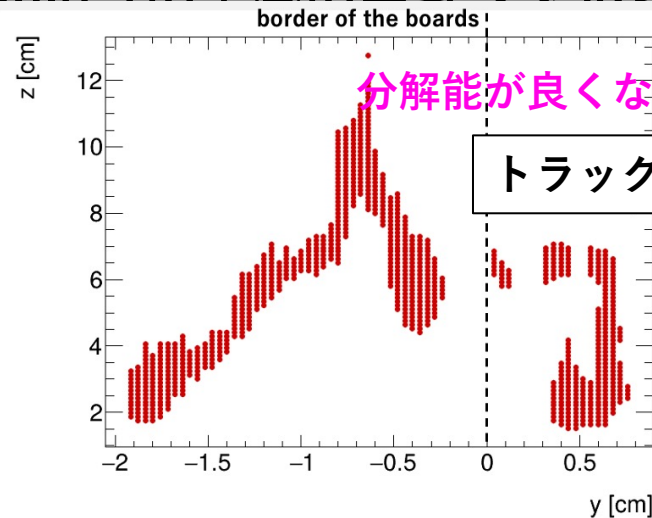
•

➤ det

➤ テス

•

•



トラックの取得に成功

