



Migdal効果観測に向けた 565keV中性子ビーム試験

神戸大学 M1 鈴木 啓司

Migdal効果とは？

Migdal効果

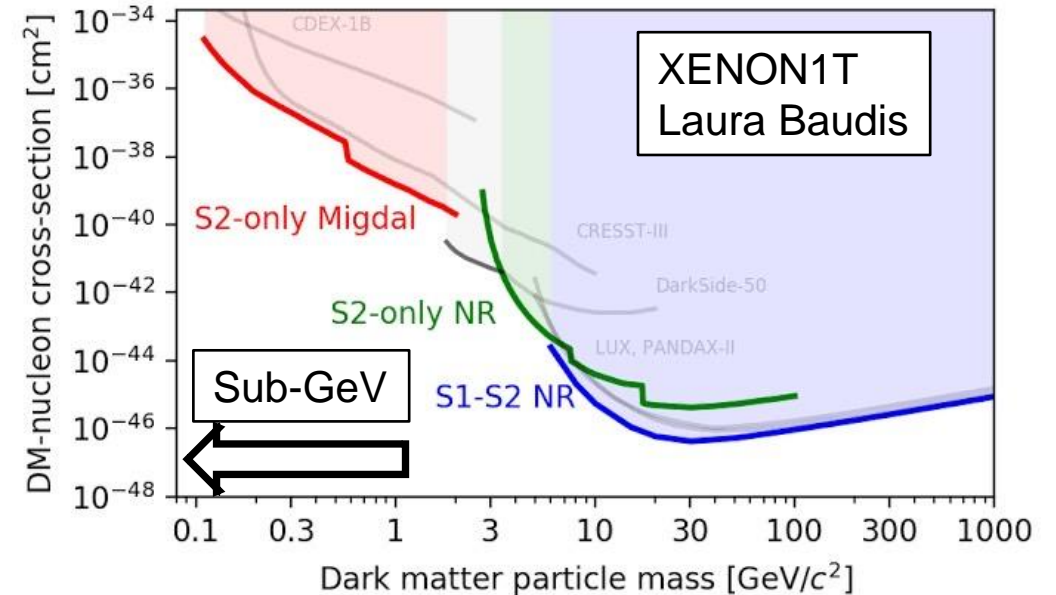
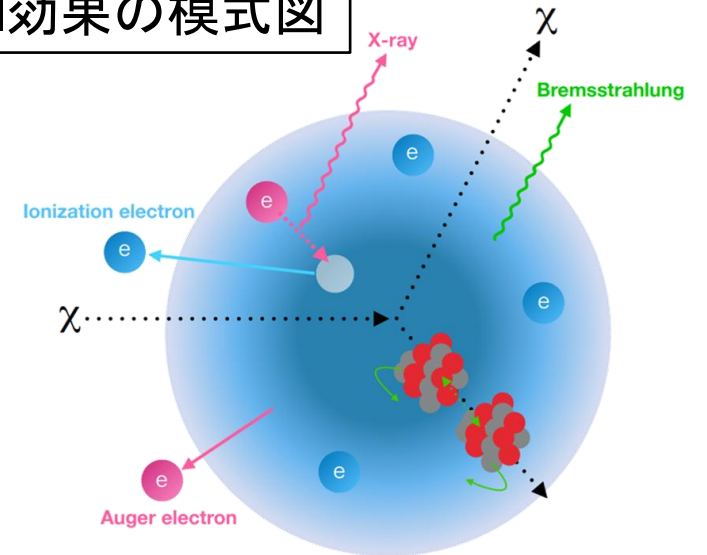
- 原子核反跳(NR)に付随して、追加の電離・励起が生じる
- 実験的な観測事例はない

Migdal効果があれば...

- 軽い暗黒物質に対する感度が向上する
 - 検出が難しいNR事象ではなく Migdal効果による電子を観測する

◎ Migdal効果の観測は重要！

Migdal効果の模式図

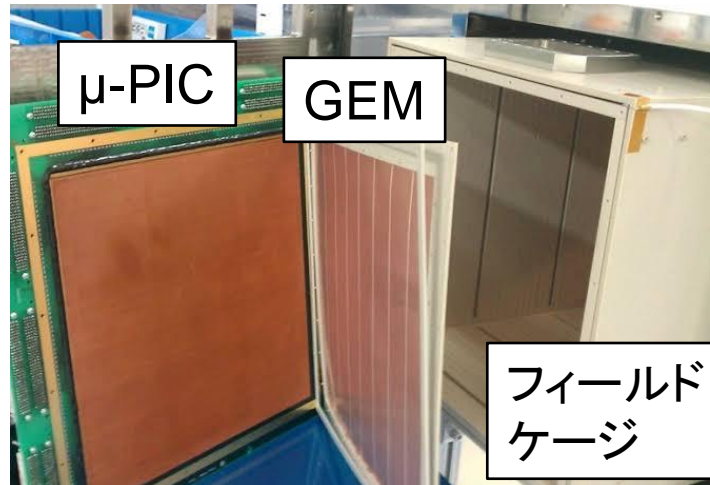
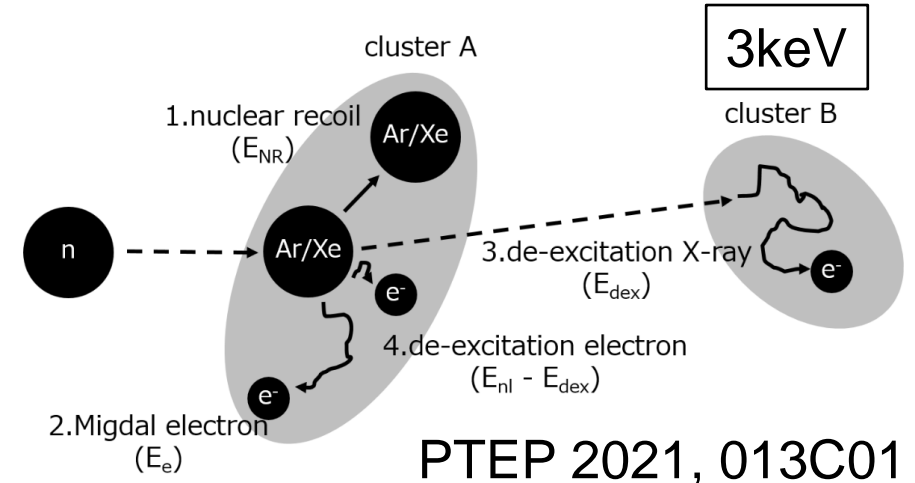


Migdal効果観測に向けて

MIRACLUE実験

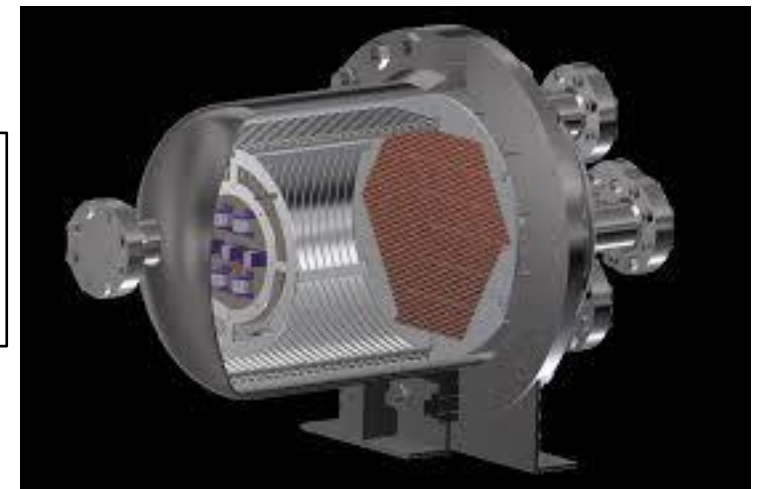
- 東北大と共同でMigdal効果の初観測を目指す
 - 神戸大: ArガスTPC(1atm)
 - 東北大: 高圧XeガスTPC
- K殻電離に伴う**2-cluster事象**を探索
 - 原子核反跳(NR)+Ar(Xe)の特性X線

2-cluster間の距離は
特性X線の吸収長に従う
(Arでは~3cm)



神戸大:
NEWAGE
の技術

東北大:
AXEL
の技術



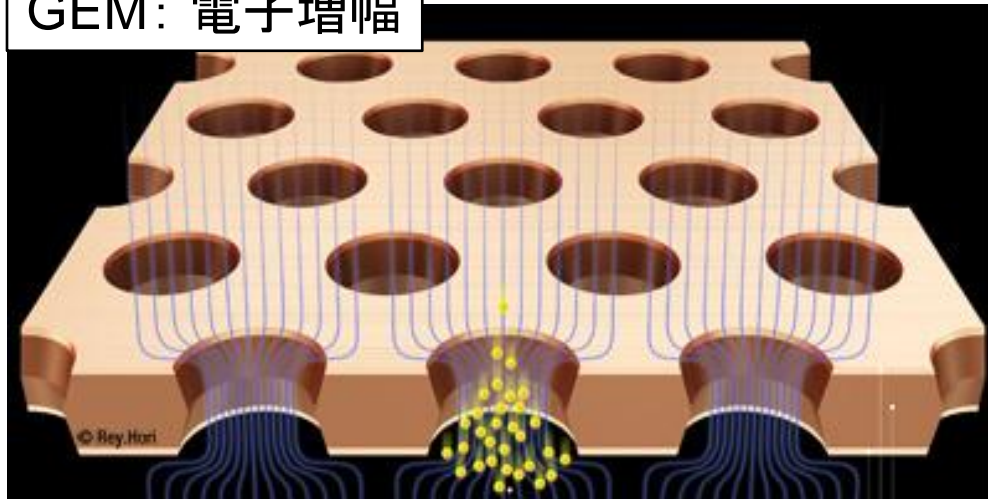
ArガスTPCの検出原理

荷電粒子の検出は次の3ステップ

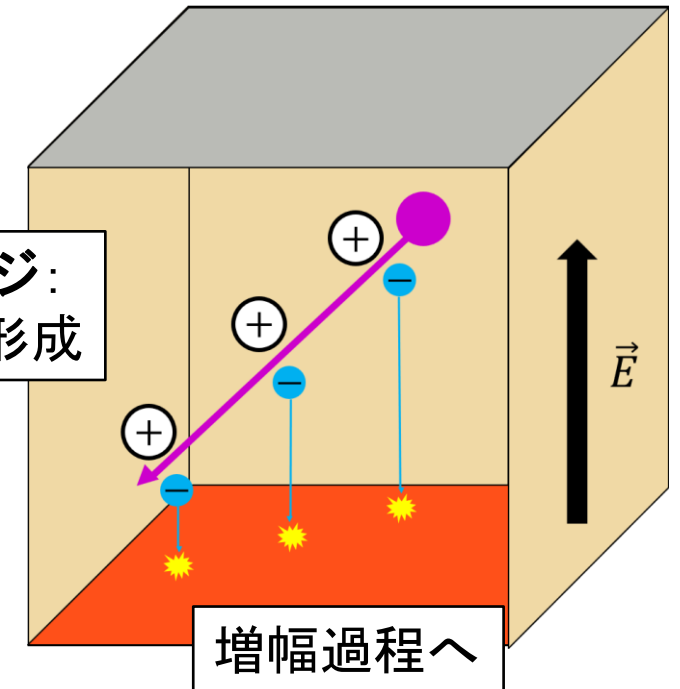
- ① 荷電粒子がArガスを電離
- ② 電場に沿って電子がドリフト
- ③ 強い電場で増幅して検出

- **GEM + μ -PIC**

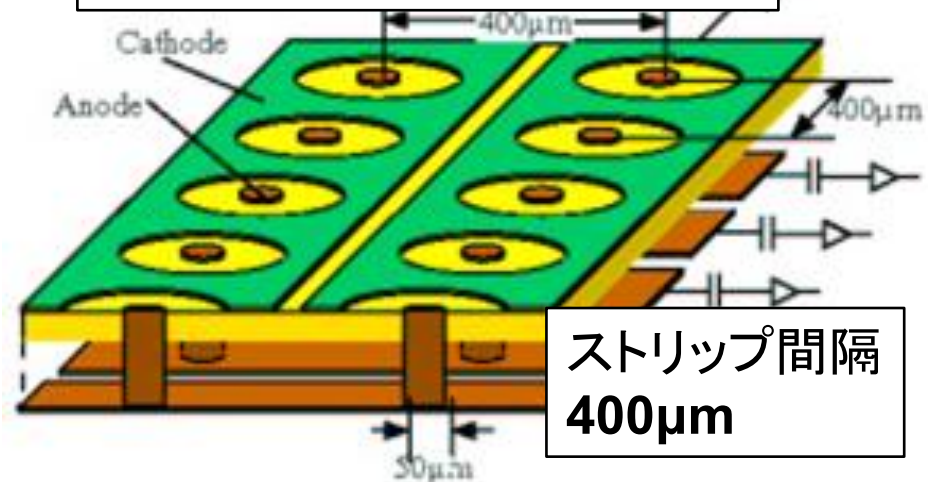
GEM: 電子増幅



フィールドケージ:
ドリフト電場を形成



μ -PIC: 増幅&2次元読み出し

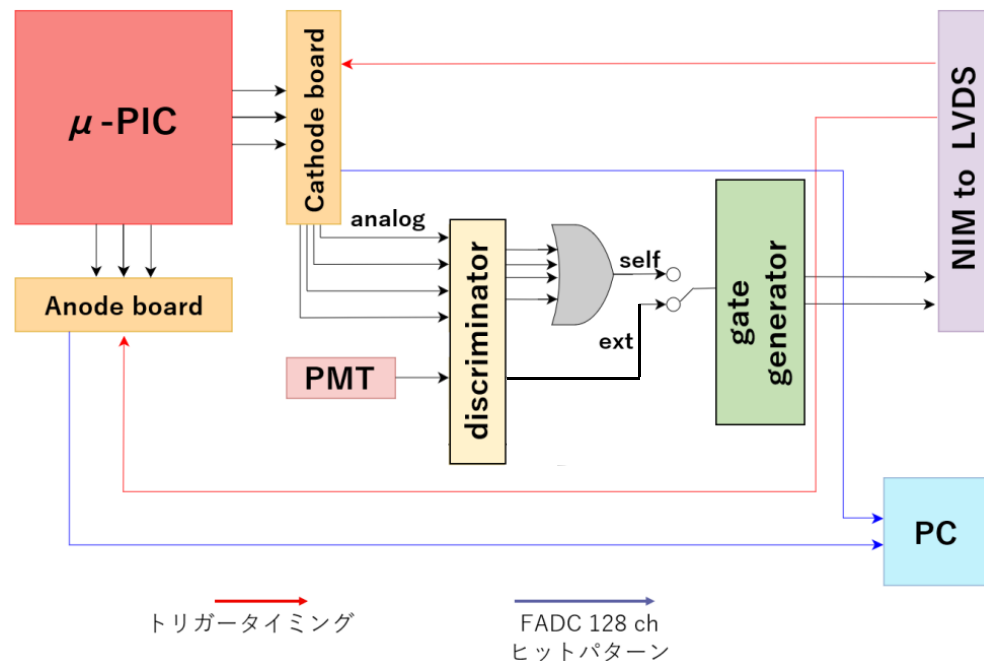


ストリップ間隔
400 μ m

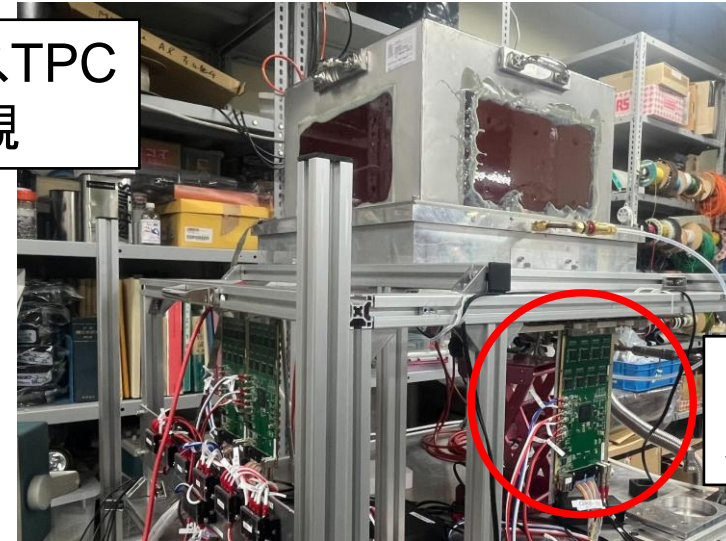
読み出し回路

μ -PICの2次元読み出し

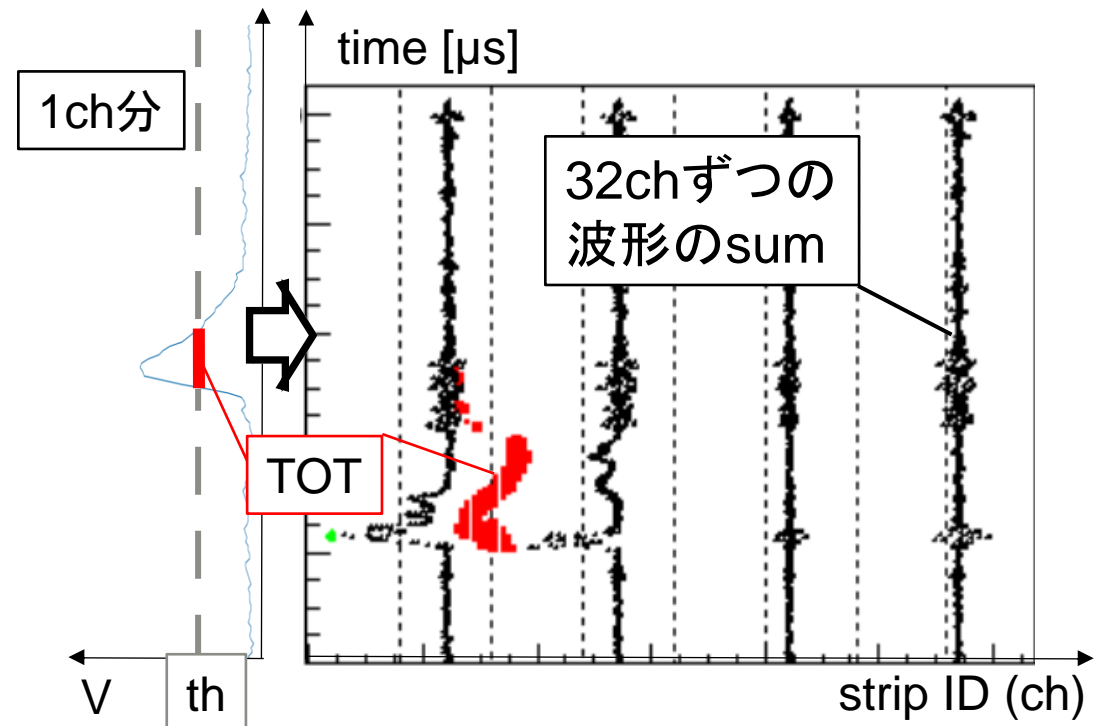
- anode・cathodeともに256strip/10cm
 - 現在は2×128chで使用
- Time over Threshold(**TOT**)を測定



ArガスTPC
の外観



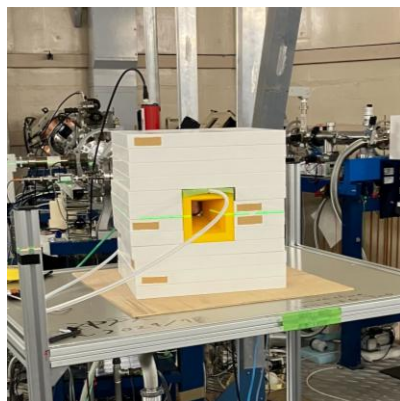
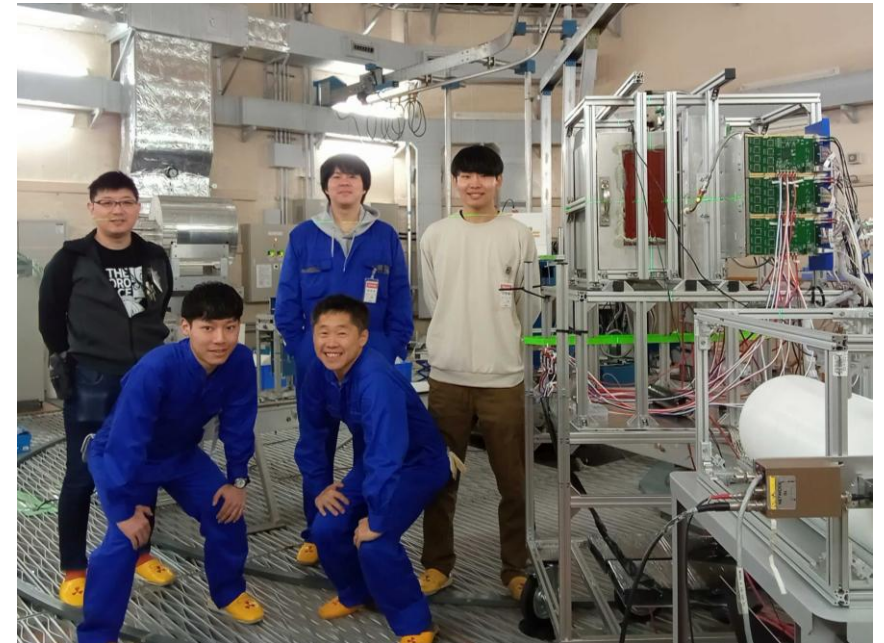
読み出し
ボード



中性子ビーム実験

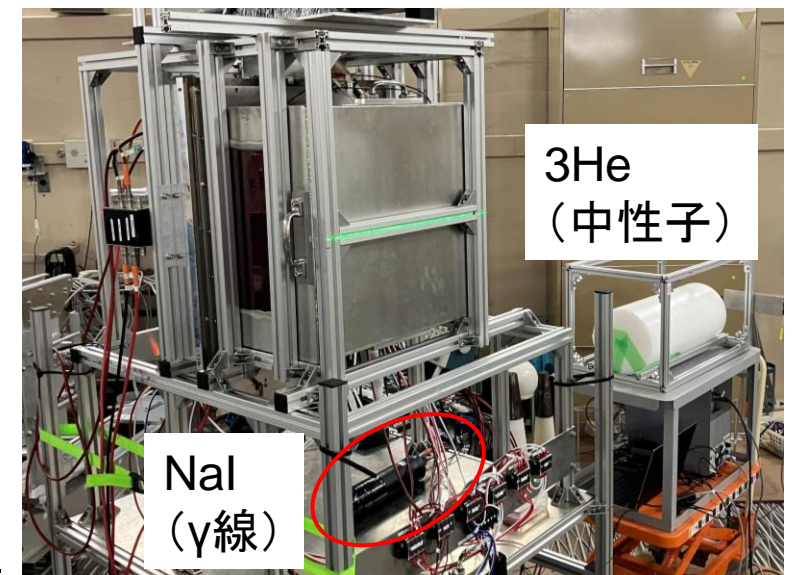
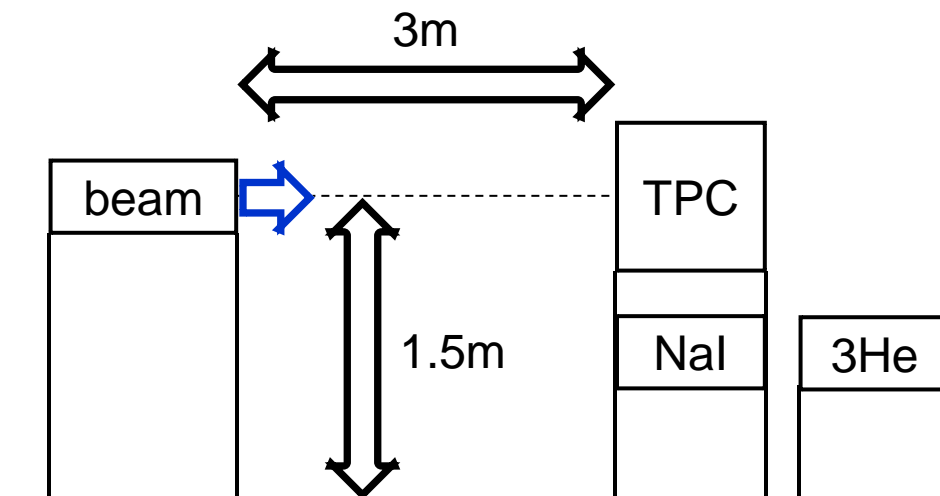
2024年12月 @AIST(産業技術総合研究所)

- ビーム→**565keV**の単色中性子
- 封入ガス→ Ar(0.84atm) + C₂H₆(0.16atm)
- 有感領域→20cm × 30cm × 30cm



コリメーター
を設置

セットアップ図



データ取得の様子

総トリガー数: 3.5×10^6

測定時間(live time): 1.4×10^4 sec

grafanaで監視@制御室

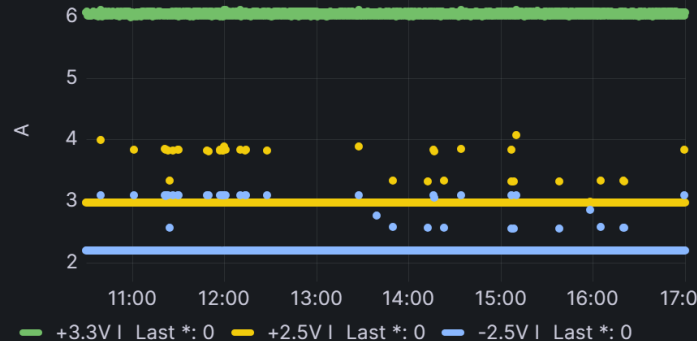
- 3Heのレートとトリガーレートが連動
→DAQは正常
- 読み出しボードやGEM・ μ -PICの電流値はおおむね安定



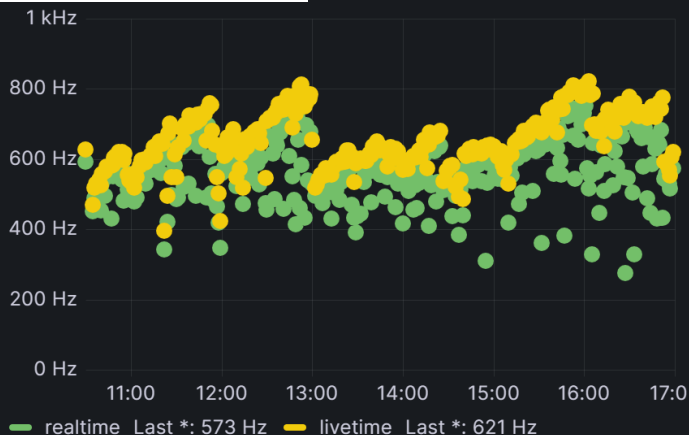
3Heレート(中性子モニター)



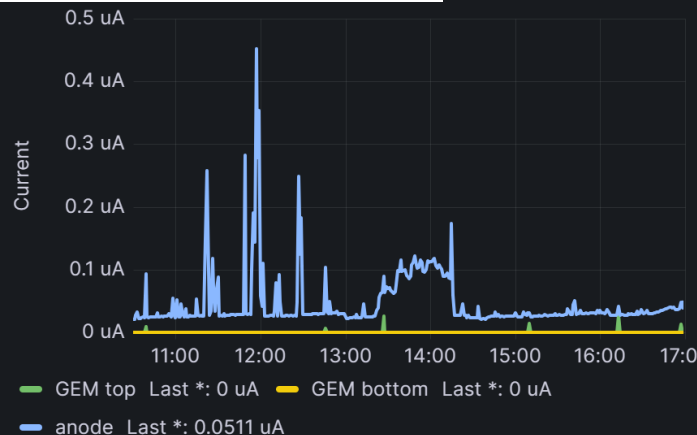
読み出しボード電流値



トリガーレート



GEM・ μ -PIC電流値



イベントレートの見積もり

総トリガー数: 3.5×10^6
live time: 1.4×10^4 sec
(前ページと同じ)

- 中性子ビームのフラックス: $\sim 10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- HとArそれぞれについて予想されるNR事象のレートを算出

Target nuclei	H	Ar
Number of nuclei	7.0×10^{23}	6.1×10^{23}
Cross-section for 565keV neutron	5.75 barn	0.65 barn
Migdal branching		7.2×10^{-5}
Fluorescence yield (K shell)		0.14
Expected event rate	$2.7 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$	$2.7 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$
Expected events	3.8×10^6	3.8×10^5
Expected event rate (Migdal)		34 day⁻¹
Expected events (Migdal)		5.4

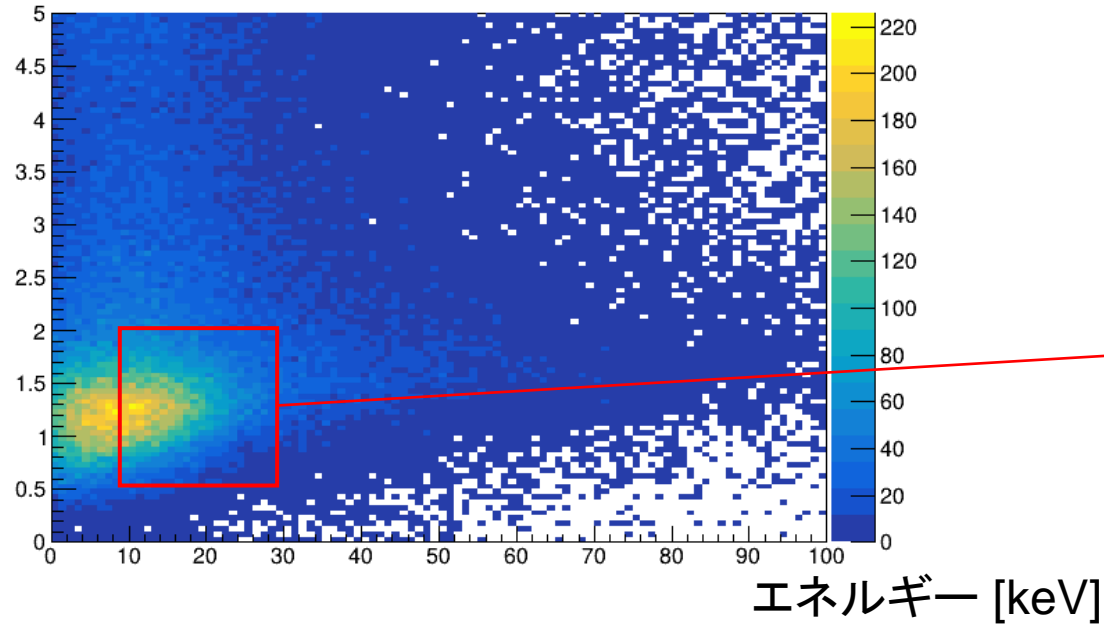
Arについては
Migdalイベント
のレートも計算

背景事象との識別

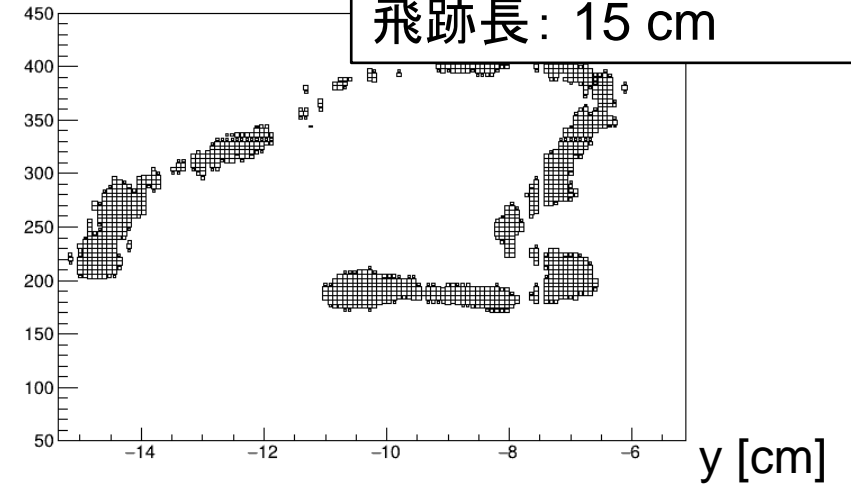
- NRとER(電子反跳)を識別可能
- NRを粒子の種類(H, C, Ar)で識別したい
→Geant4を用いたシミュレーション

※算出方法については
最適化の余地あり

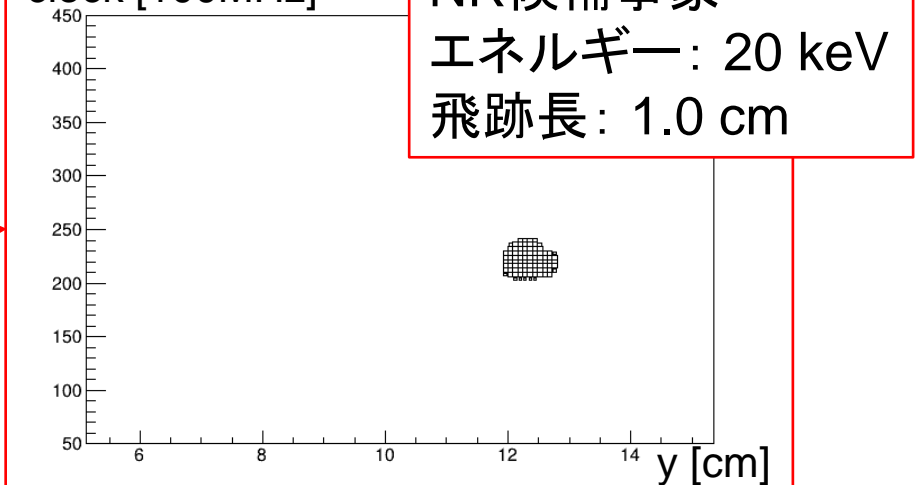
飛跡長 [cm]



clock [100MHz]

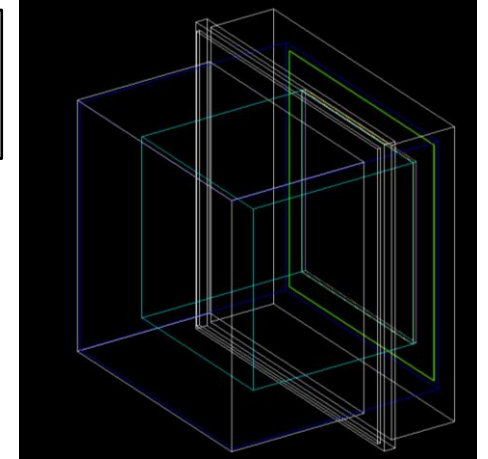


clock [100MHz]

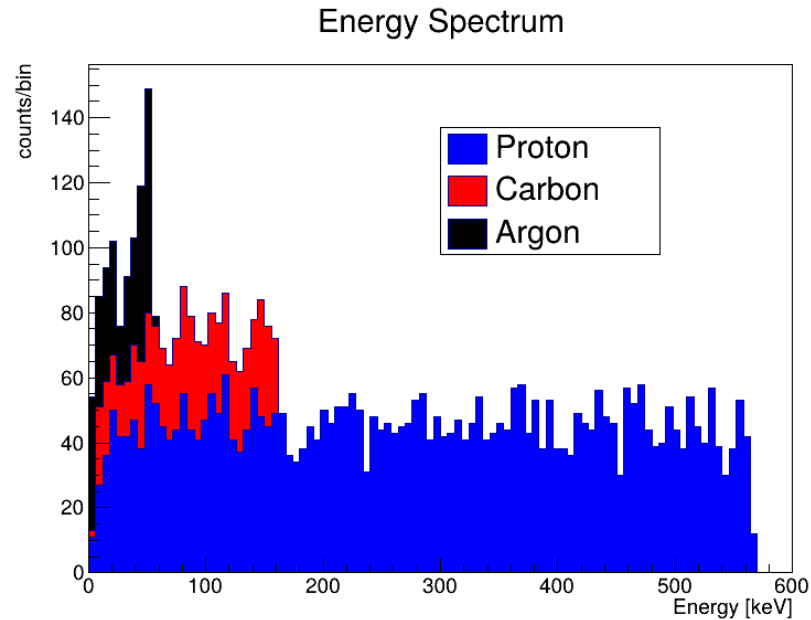


シミュレーション (Geant4)

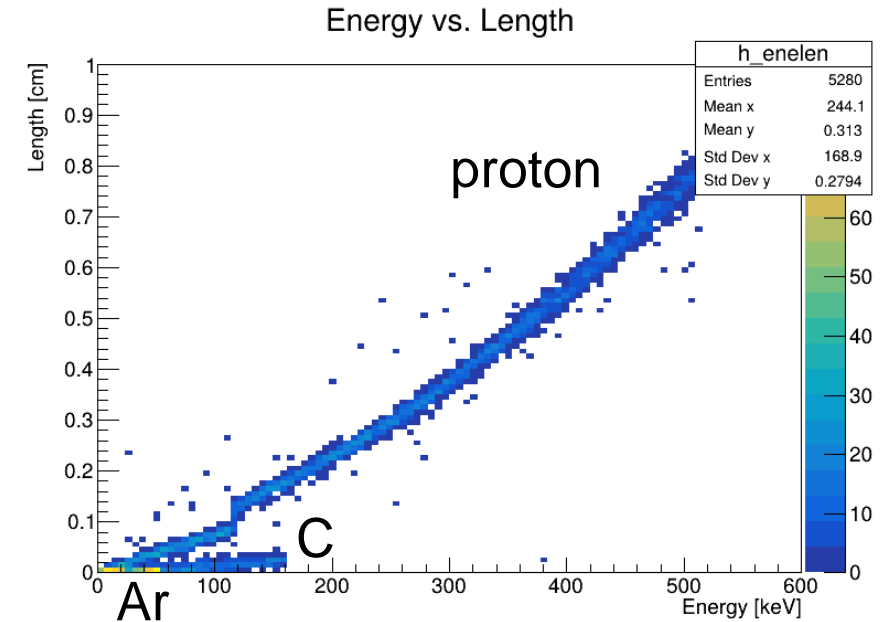
使用した
ジオメトリ



- 検出領域の中心に向けて、565keVの中性子を 10^6 発照射
- NR事象のエネルギーと飛跡長の情報を抽出
 - エネルギー分布から大部分のH(C)を除去可能
 - 50keV以下のNR事象は飛跡情報を用いても粒子識別が難しい



粒子ごとの
エネルギー
スペクトル



まとめと今後の展望

まとめ

- フィールドケージを改良してArガスTPCの動作を確認
- 2024年12月に産総研にて中性子ビーム実験を実施
 - 安定した環境下でデータを取得することができた

今後の展望

- Ar原子核とH原子核の反跳事象を区別する→2-cluster解析へ
- Geant4を用いた背景事象のシミュレーション
- C_2H_6 (16%) のかわりに CF_4 (1%) をクエンチャーとして用いる
 - 背景事象の大幅な削減が期待される

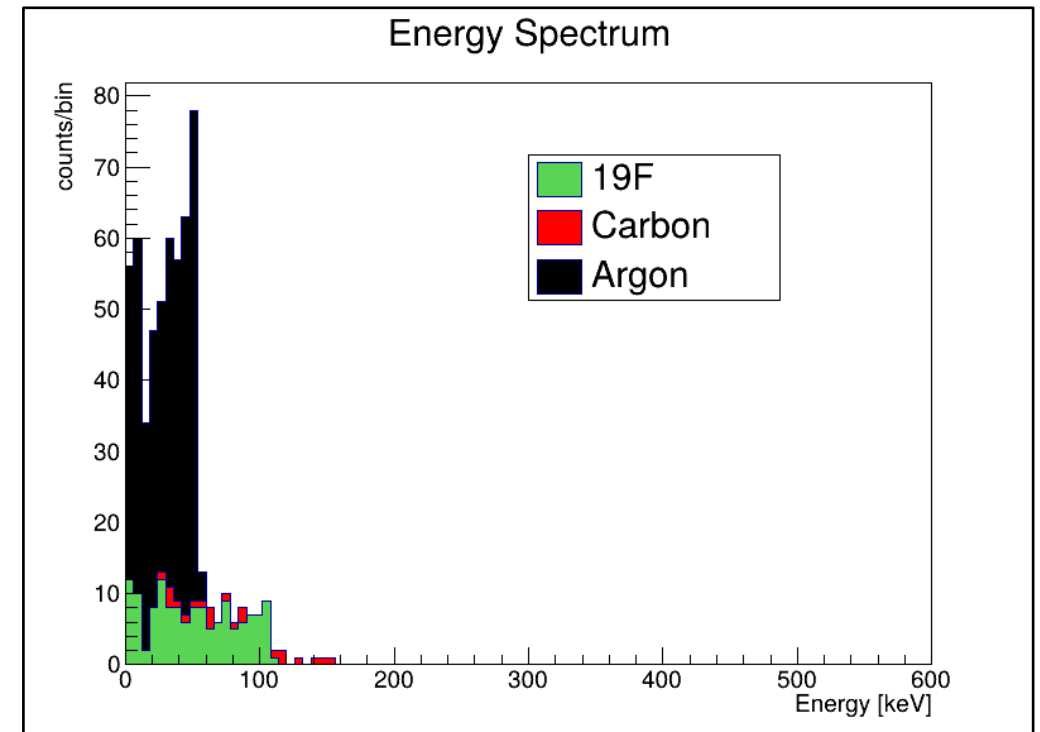
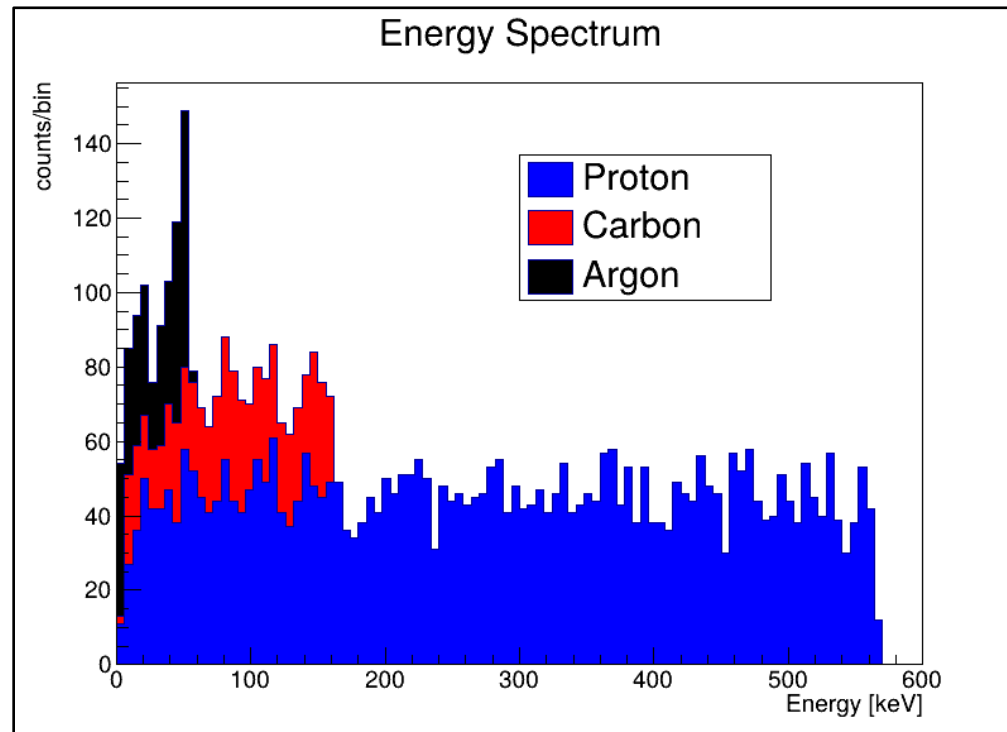


BACK UP

シミュレーション (Geant4)

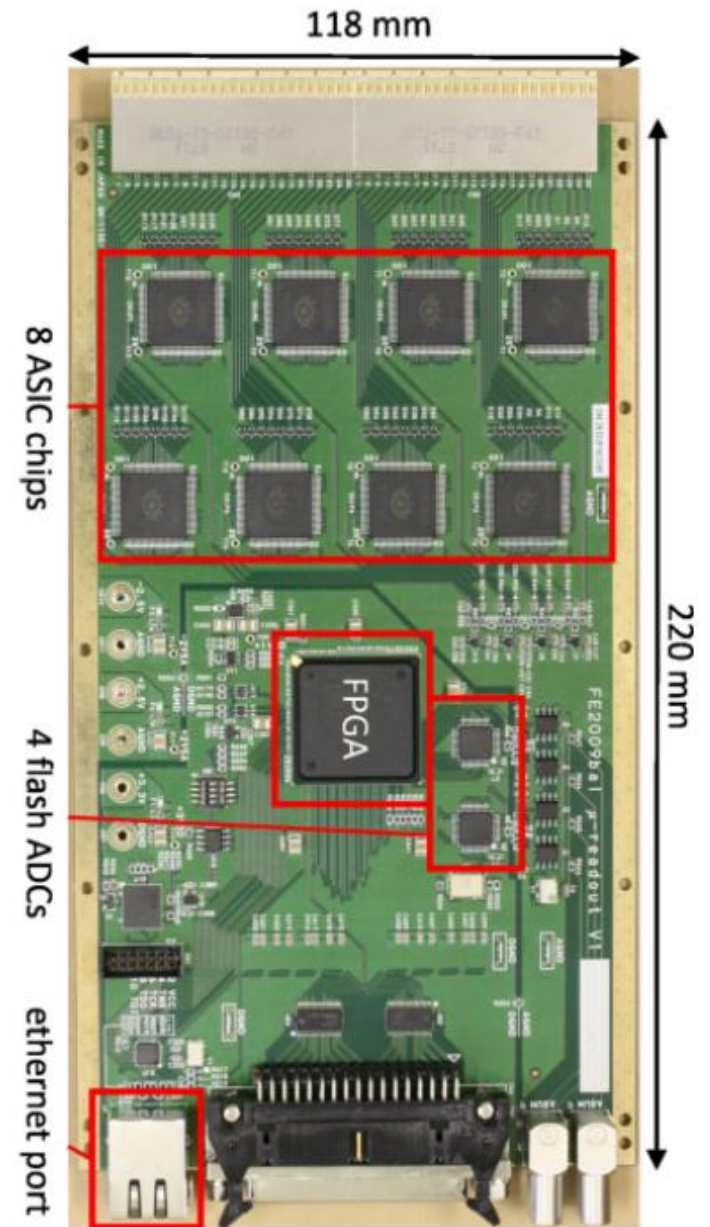
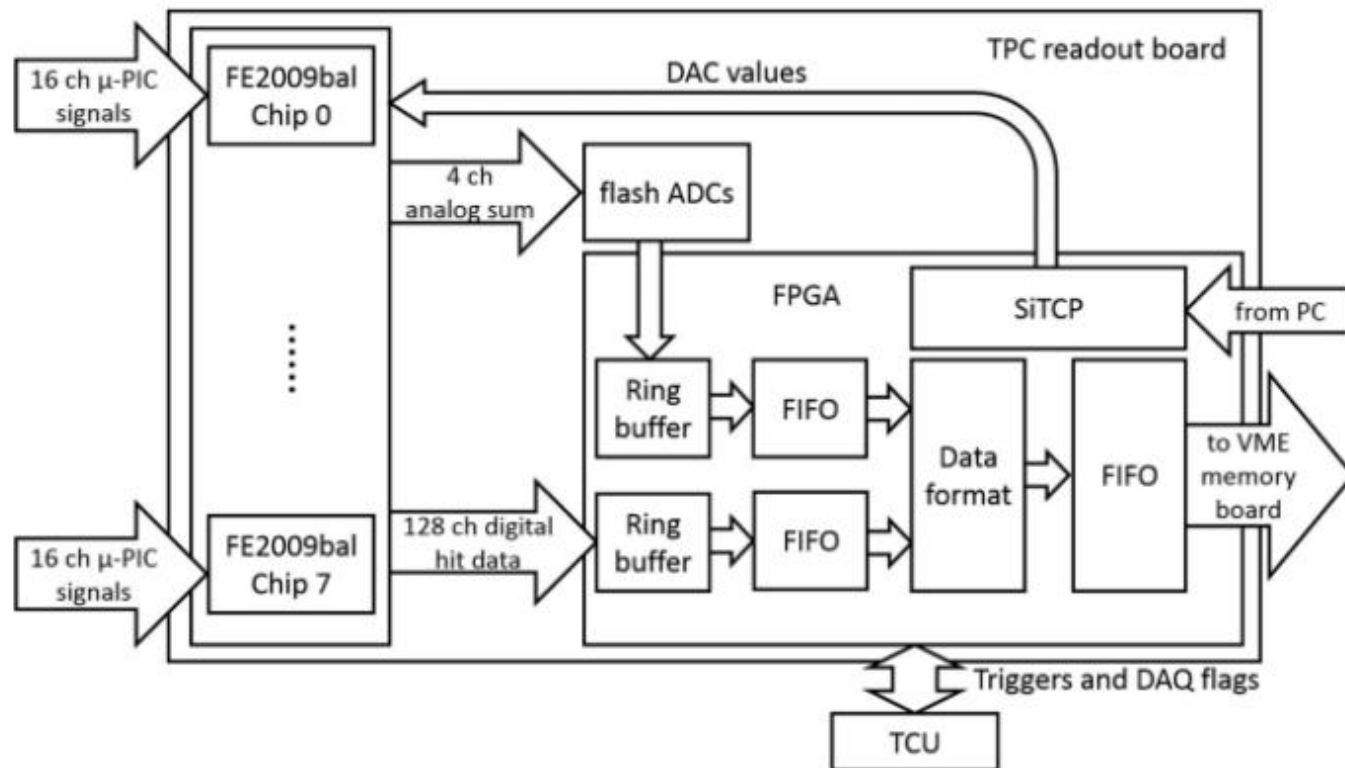
C₂H₆ (16%) のかわりに CF₄ (1%) をクエンチャーとして用いた場合

- クエンチャー由来の背景事象が大幅に削減できる
- Ar原子核反跳のエネルギー領域への染み出しも抑制できている



読み出しボード

岩城ボード



以前のフィールドケージ

高抵抗シートを使用

- 片面にカーボンスパッタ
→ 一様な面抵抗

一様な電場形成が期待されたが...

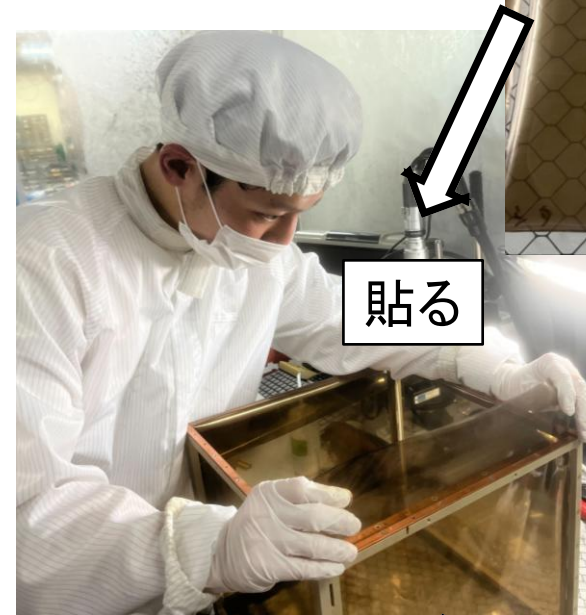
問題点

- 電極まわりの抵抗値が大きい
→ 工夫により解決
 - ドリフト距離の長い事象が見えない
 - 不安定な抵抗値
→ ドリフト電場も不安定に
- ◎ 新タイプのフィールドケージの運用へ

側面のサイズに
合わせてカット



貼る

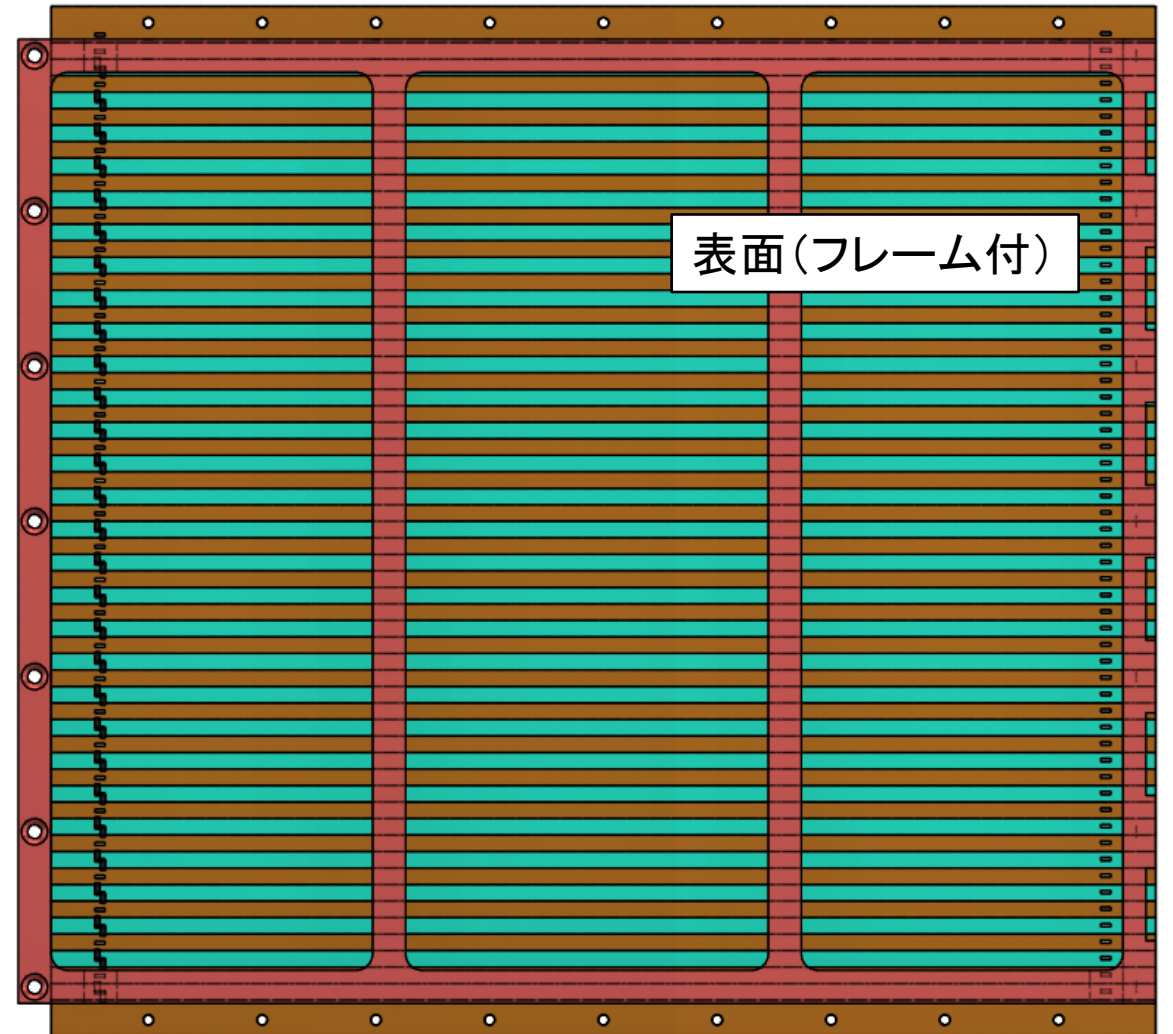
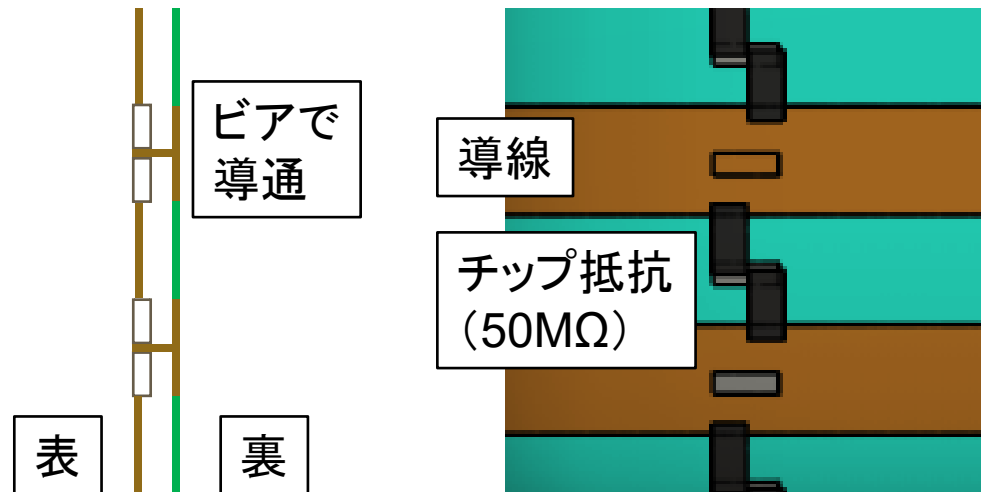


完成図



新フィールドケースジ案 (JPS2024秋)

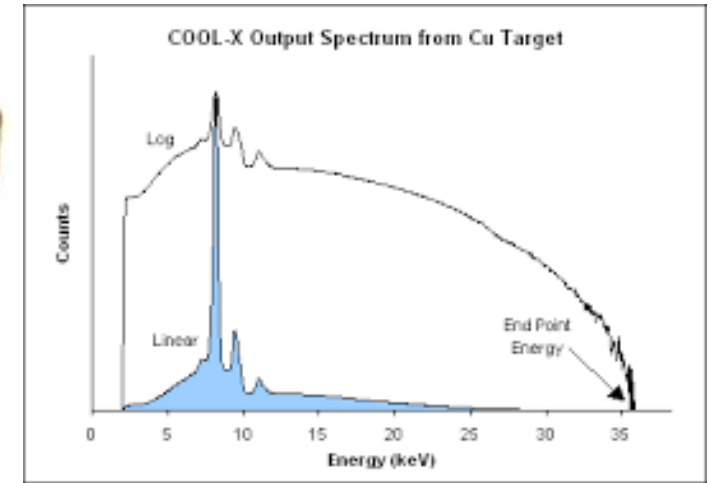
- 導線と絶縁層を5mmごとに交互に配置
- フレキシブル基板 (FPC) を使用
 - 低物質量
- 導線どうしをチップ抵抗でつないで鎖状にする



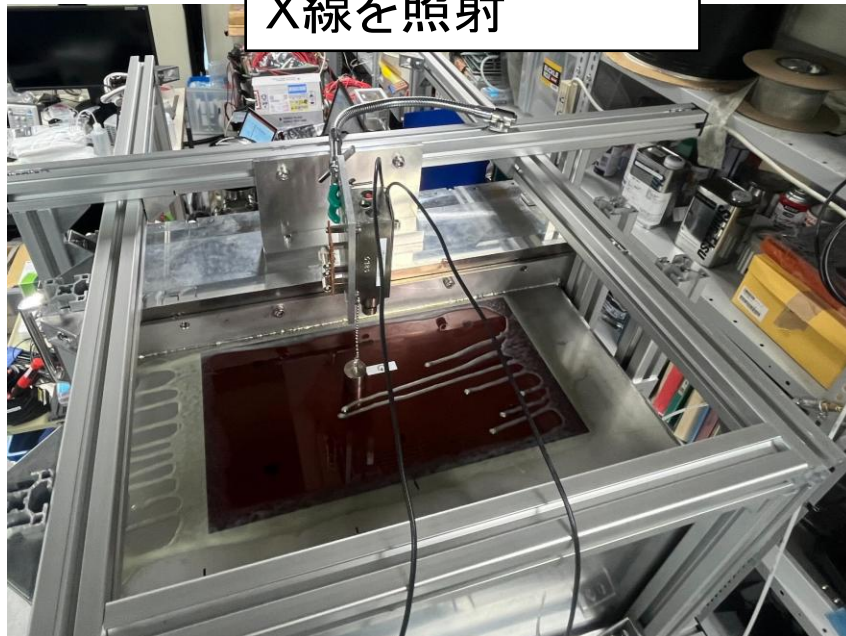
エネルギー較正

Amptekの「[COOL-X](#)」を使用

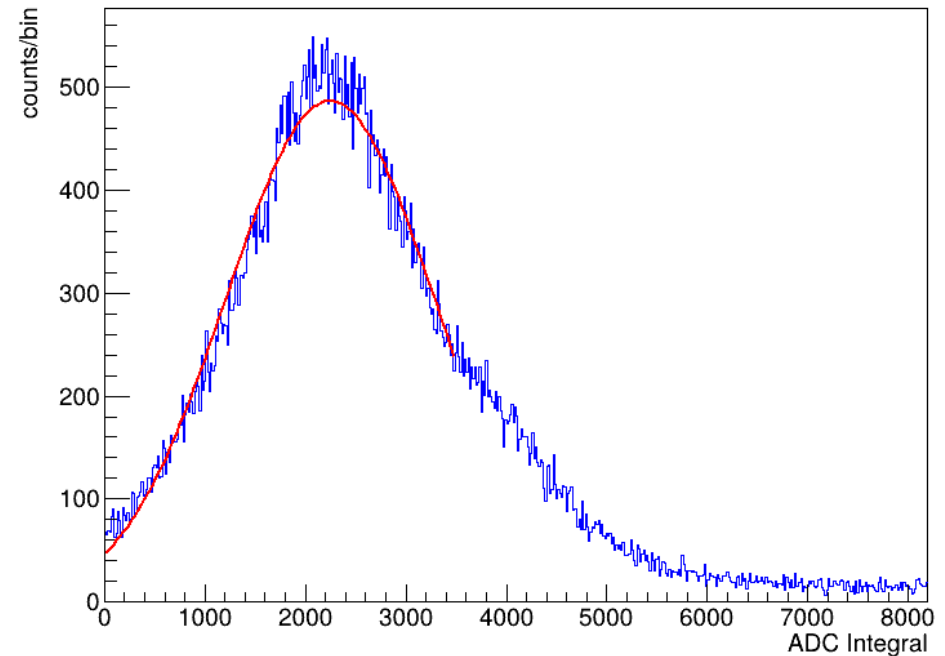
- 8keVのX線でのエネルギー較正が可能であることを確認



ポリイミドの窓から
X線を照射



ADCの積分値のスペクトル



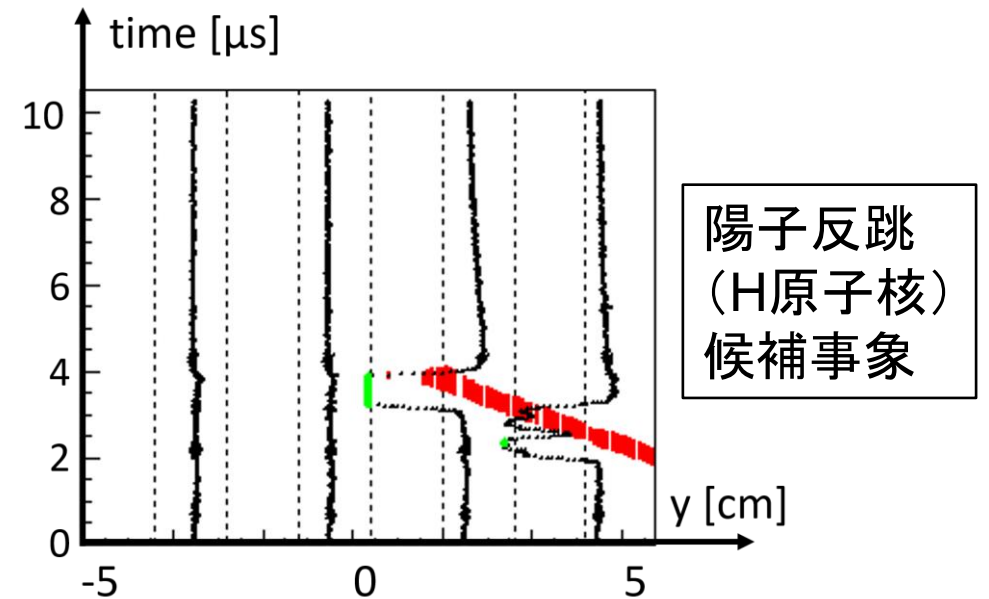
ArガスTPCのこれまで

中性子ビーム実験(2024年1月@AIST)

- ビーム→14.8MeVの中性子
 - 565keVのビームが使用できず
- 封入ガス→Ar(0.84atm) + C₂H₆(0.16atm)
- 有感領域→20cm × 10cm × 30cm
 - 読み出しボードの枚数に依存

ビーム試験時点での問題点

- ドリフト電場の形成不良
 - ドリフト距離の長い事象が見えていない
- ✓ フィールドケージの改良が必要



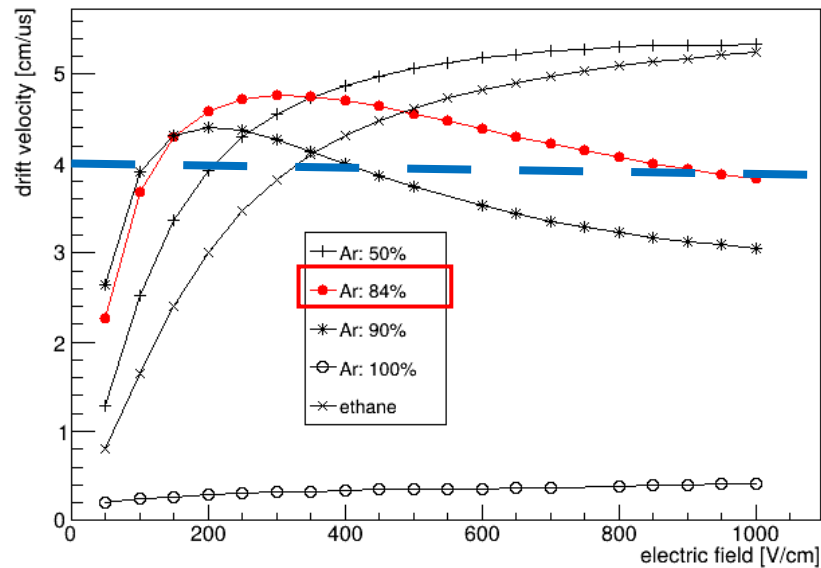
ドリフト電場の要請値

ドリフト速度・拡散の2つの観点からドリフト電場の要請値を決める

■ Magboltzによる電場シミュレーションの結果を使用

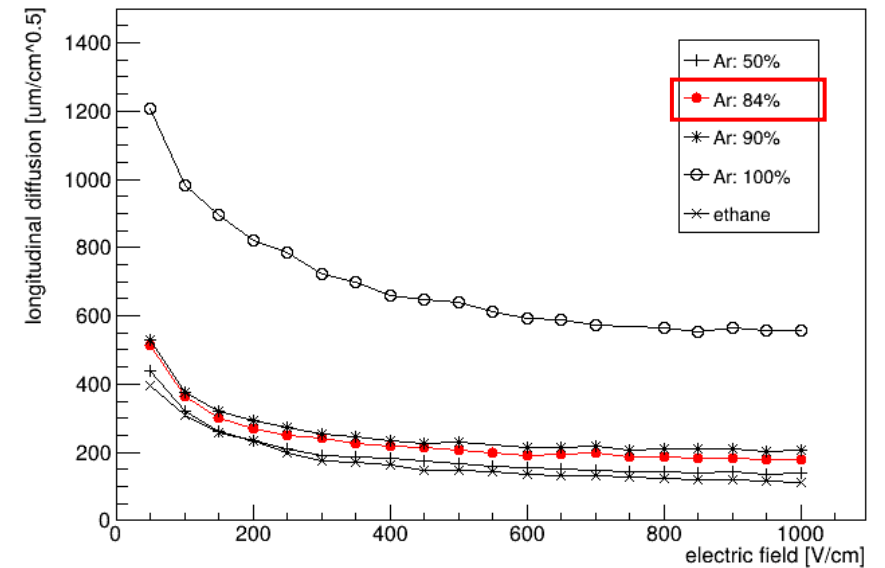
◎ 4cm/μs以上のドリフト速度を要求→ドリフト電場の要請値は150V/cm

ドリフト速度の電場依存性



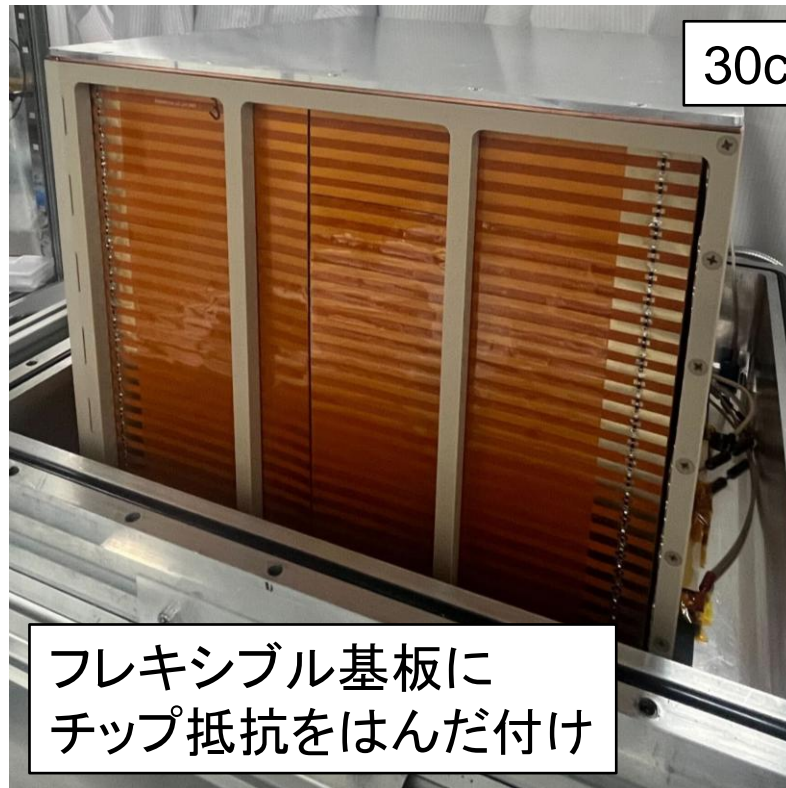
要求値

縦拡散の電場依存性



新フィールドケージ

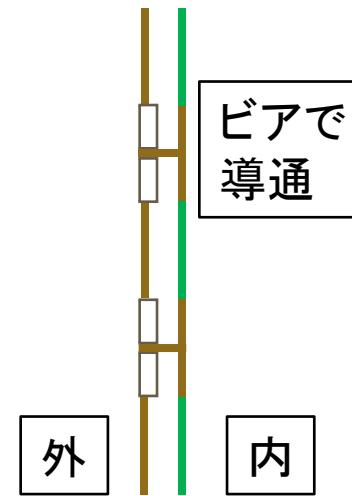
- 放電が起こることなく150V/cmを達成
- 抵抗値の安定性UP



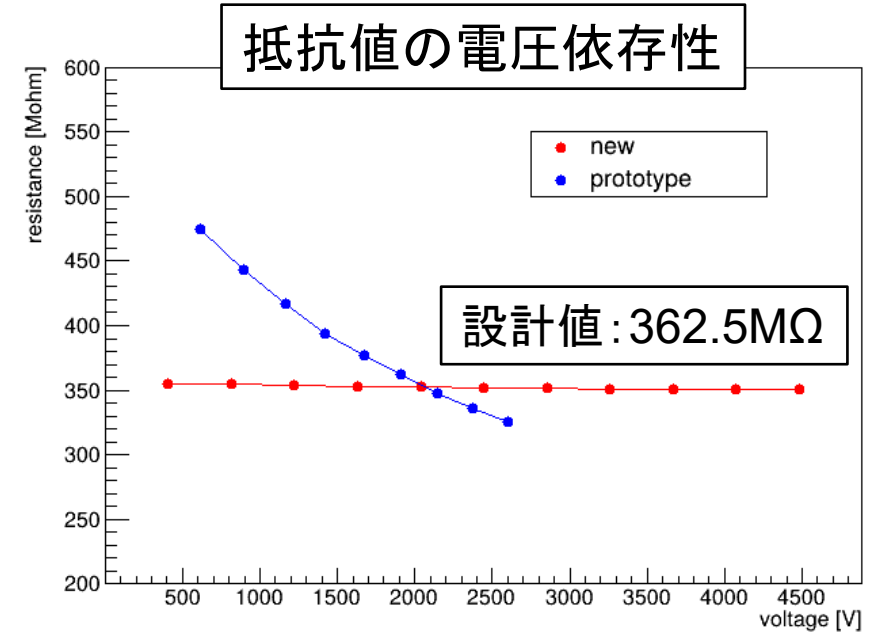
拡大図



横から



電位を段階的に
変化させる
→一様電場の
形成を狙う

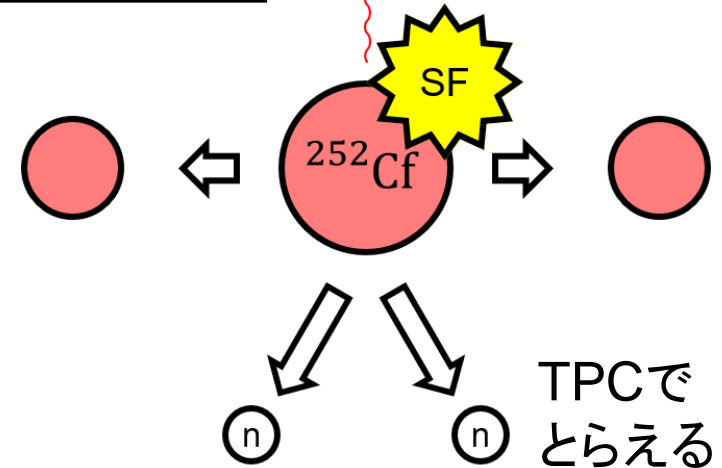


新フィールドケージの性能評価

γ トリガーに使用
(シンチレータ)

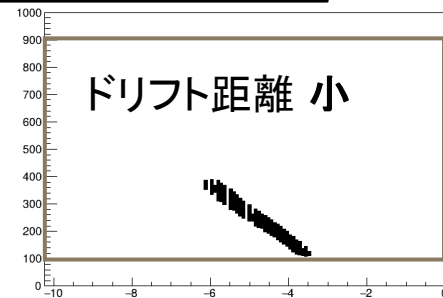
ドリフト速度の測定

- ^{252}Cf の自発核分裂(SF)を利用
 - 複数のガンマ線・中性子を放出
- トリガーとの時間差でZ座標を再構成

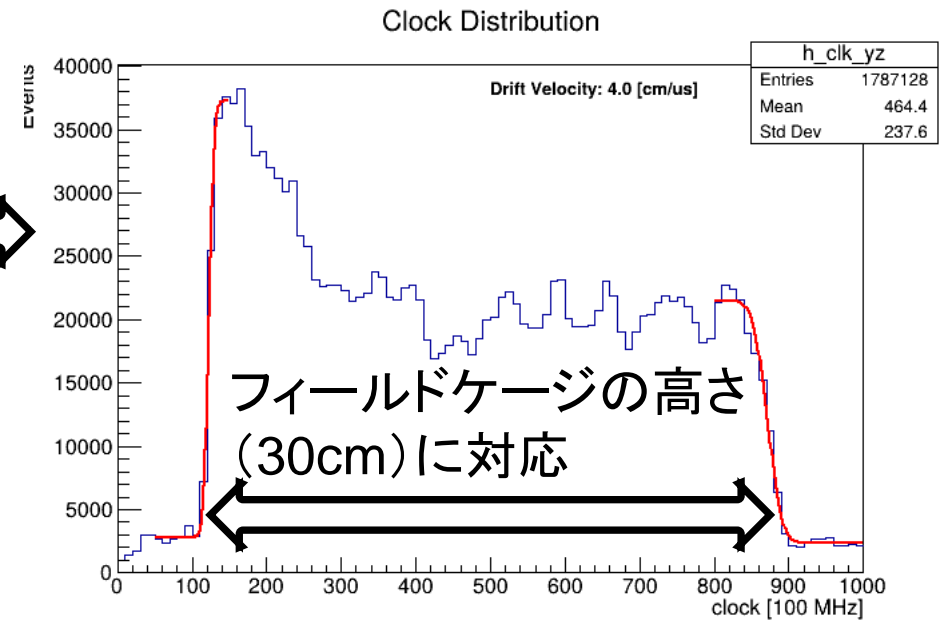
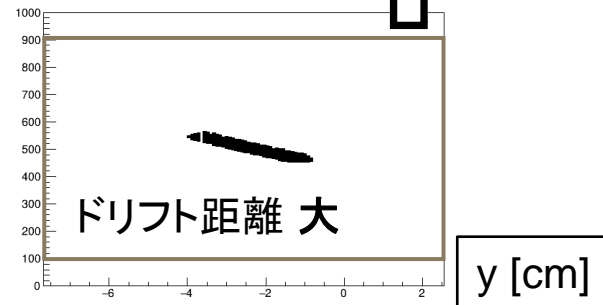


陽子反跳候補の2事象
Z座標の大きいイベント(右)も
検出できている

clock [100MHz]



縦軸に射影して
重ね書き



ビーム実験の準備OK

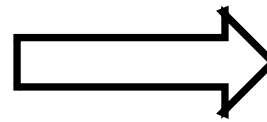
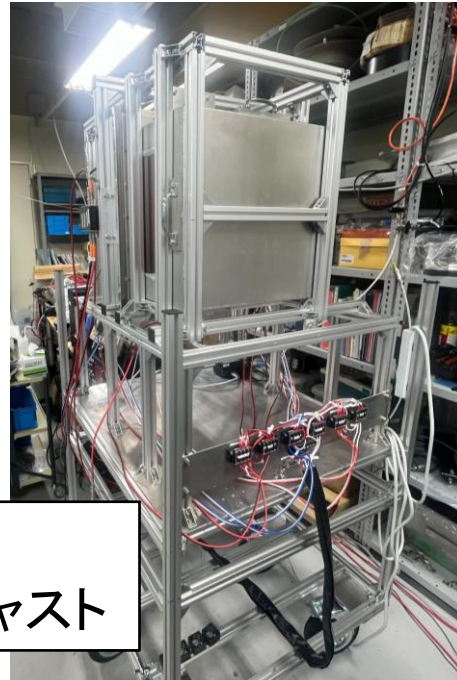
神戸大でのstudyで検出器の応答を理解

- ドリフト速度: $4 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、ガスゲイン: $\sim 10^4$

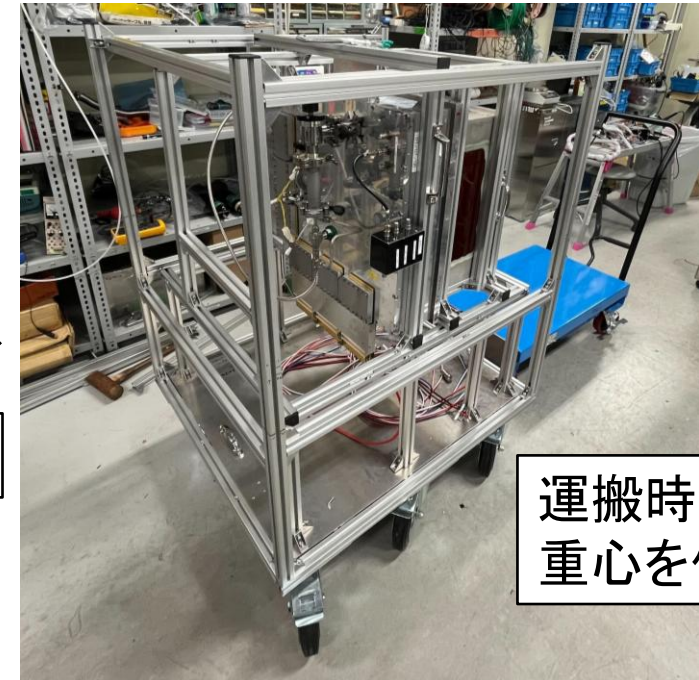
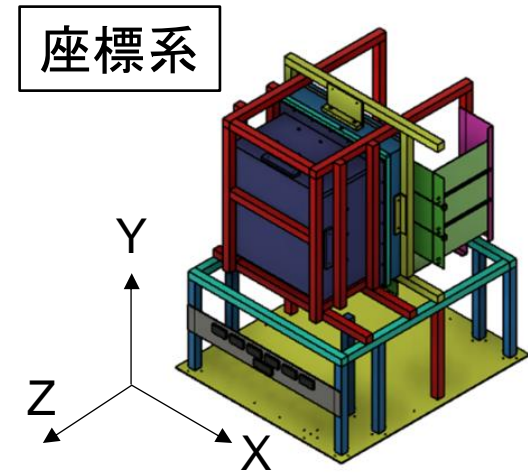
AISTへ運搬して中性子ビーム実験を実施

- GEMの歪み
- 運搬時の振動の観点からTPCを90度回転

ビーム照射時
高さをビーム軸にアジャスト



transform

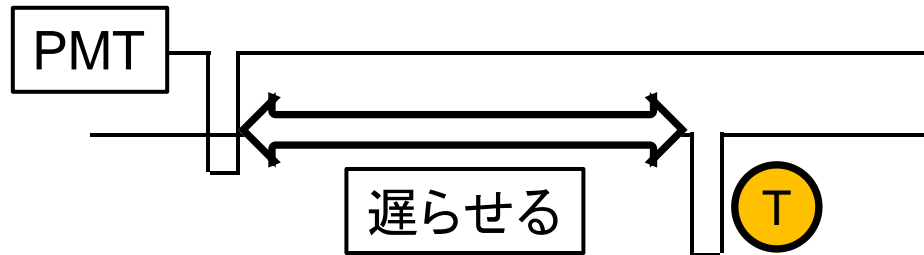
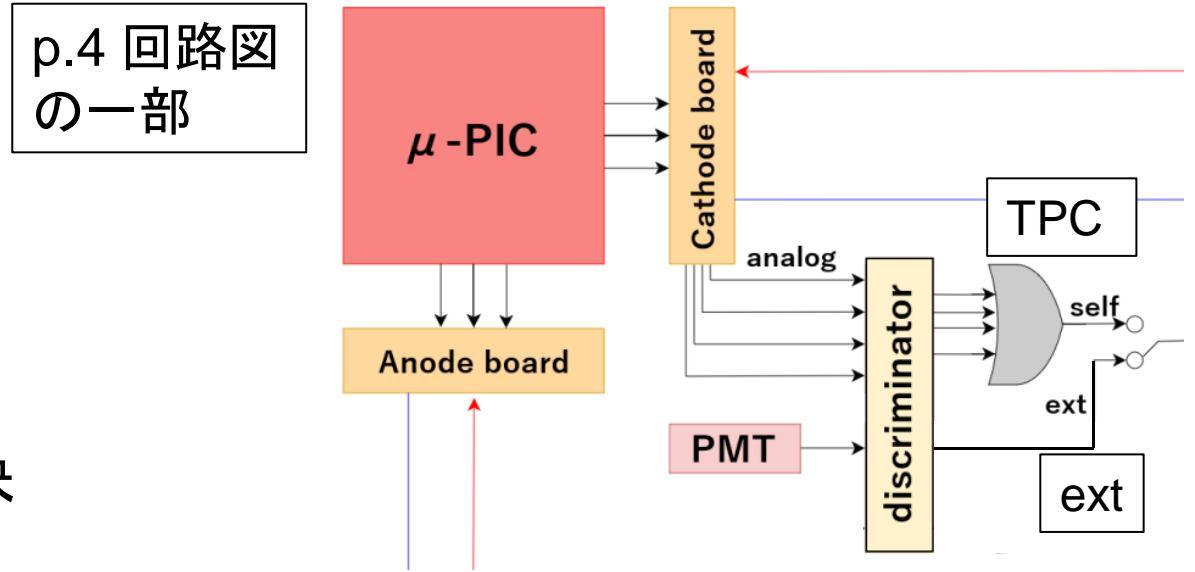


運搬時
重心を低くする

トリガーの改良

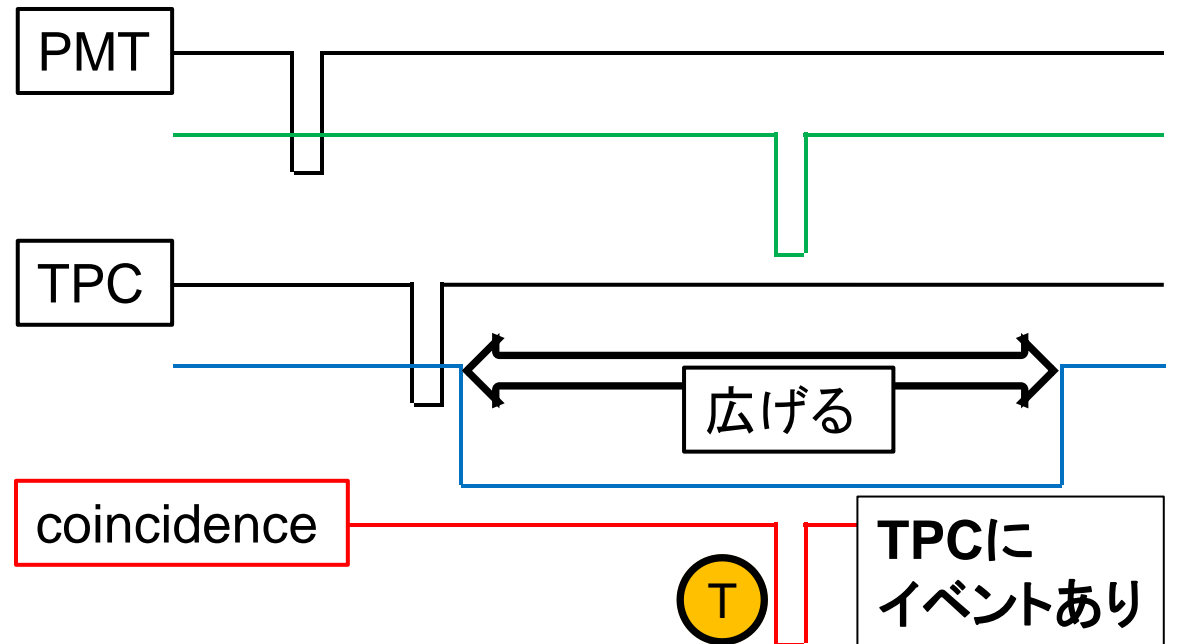
^{252}Cf runにおけるトリガーの問題点

- 高確率でTPCにイベントがない
- ◎ TPCとのコインシデンスをとって解決



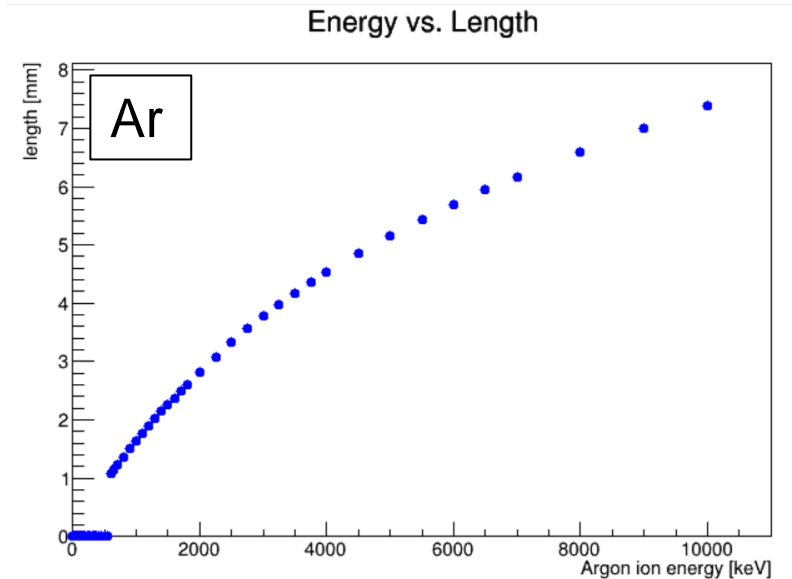
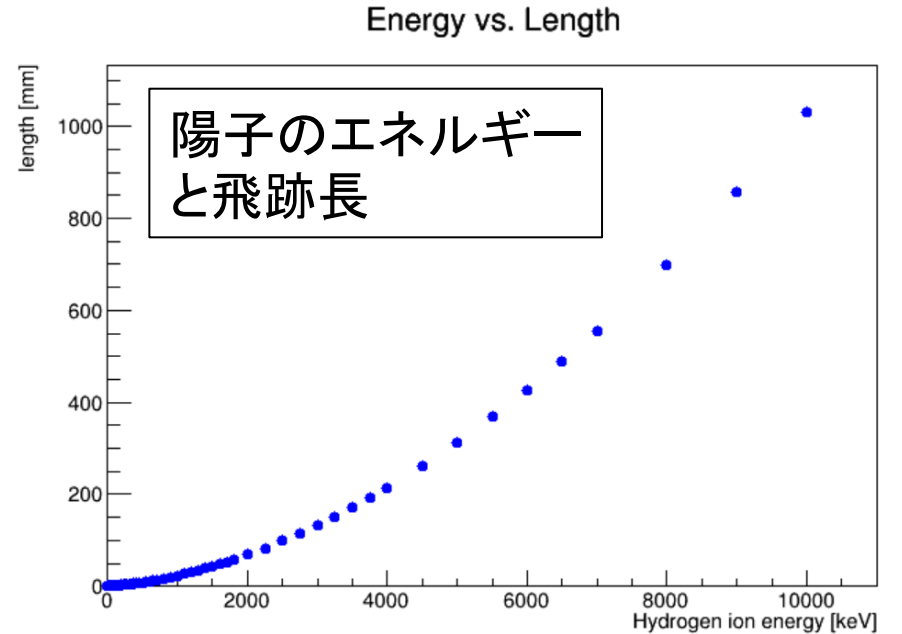
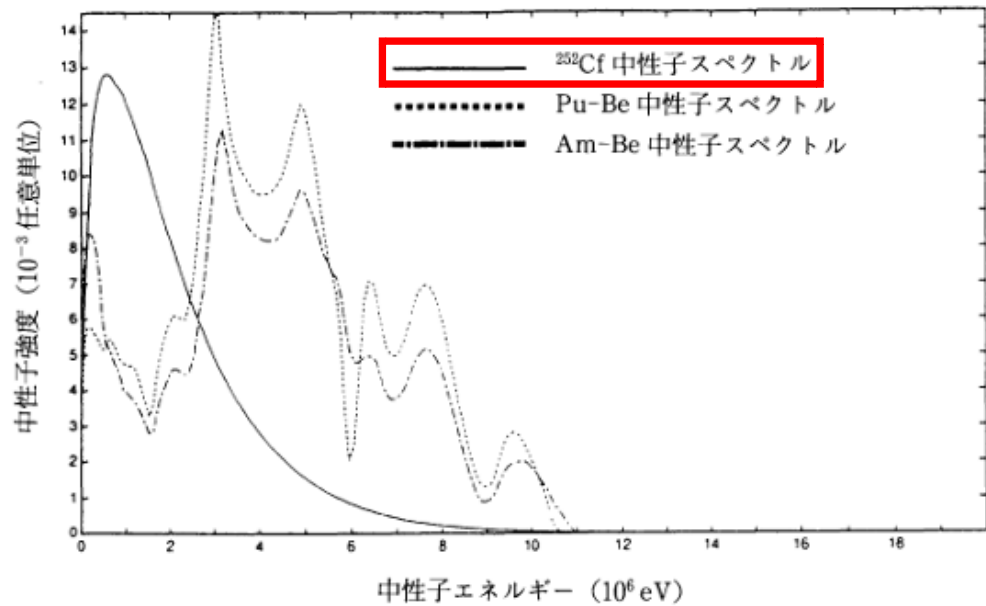
従来のextトリガー

- TPCの信号の有無を問わない
→効率が悪い



252Cf run関連の情報

- 半減期: 2.645年
- α 壊変: 96.9%、自発核分裂(SF): 3.1%
- 1個のSFにより約3.8個の中性子を放出
 - 1MeV付近で極大、平均は2~3MeV



宇宙線ミューオンの飛跡

- 3keVを観測するのに十分なゲインであることを示唆

