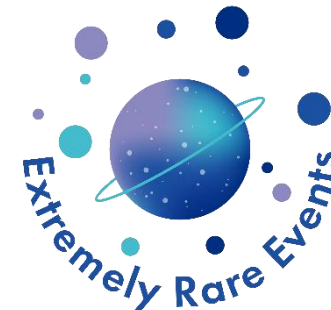




講演番号: 16pE524-7

ArガスTPCを用いたミグダル効果探索実験

日本物理学会 第81回年次大会
2026/09/16

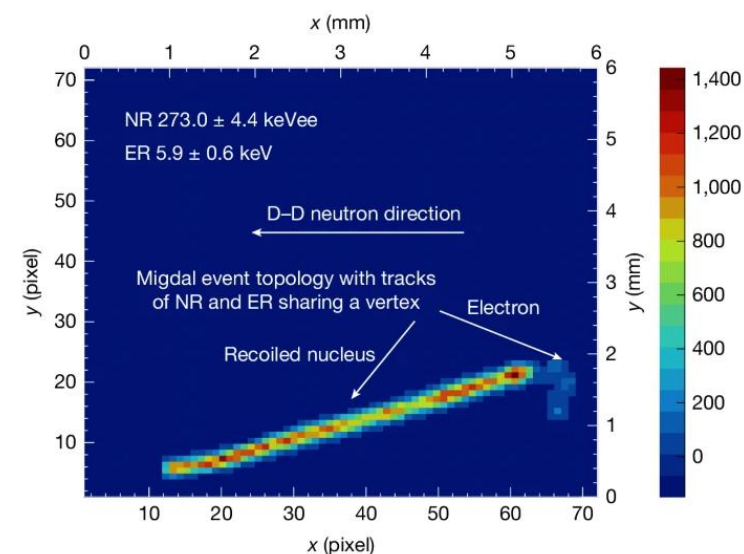
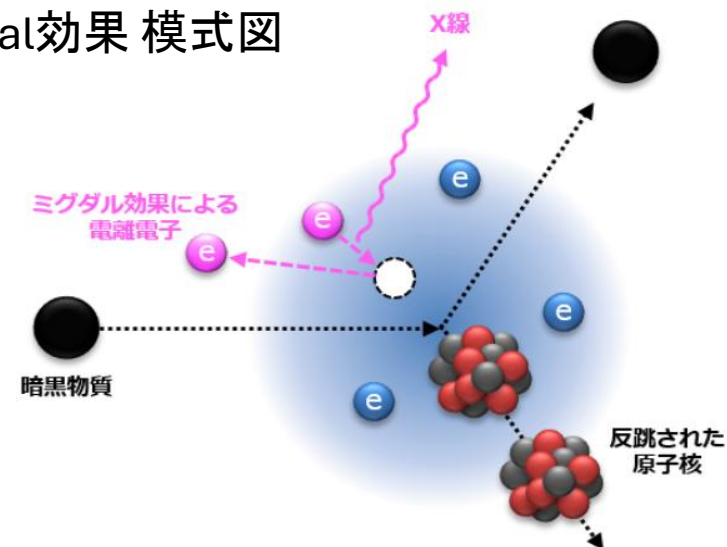
神戸大理 西田汐里

身内賢太郎, 東野聡, 生井凌太, 遠山和佳子,
佐村航星, 白水渉太, 高井優花, 中村輝石^A, 中野愛弓^A, 細川佳志^B
東北大理^A, 東北大RCNS^B

Migdal効果

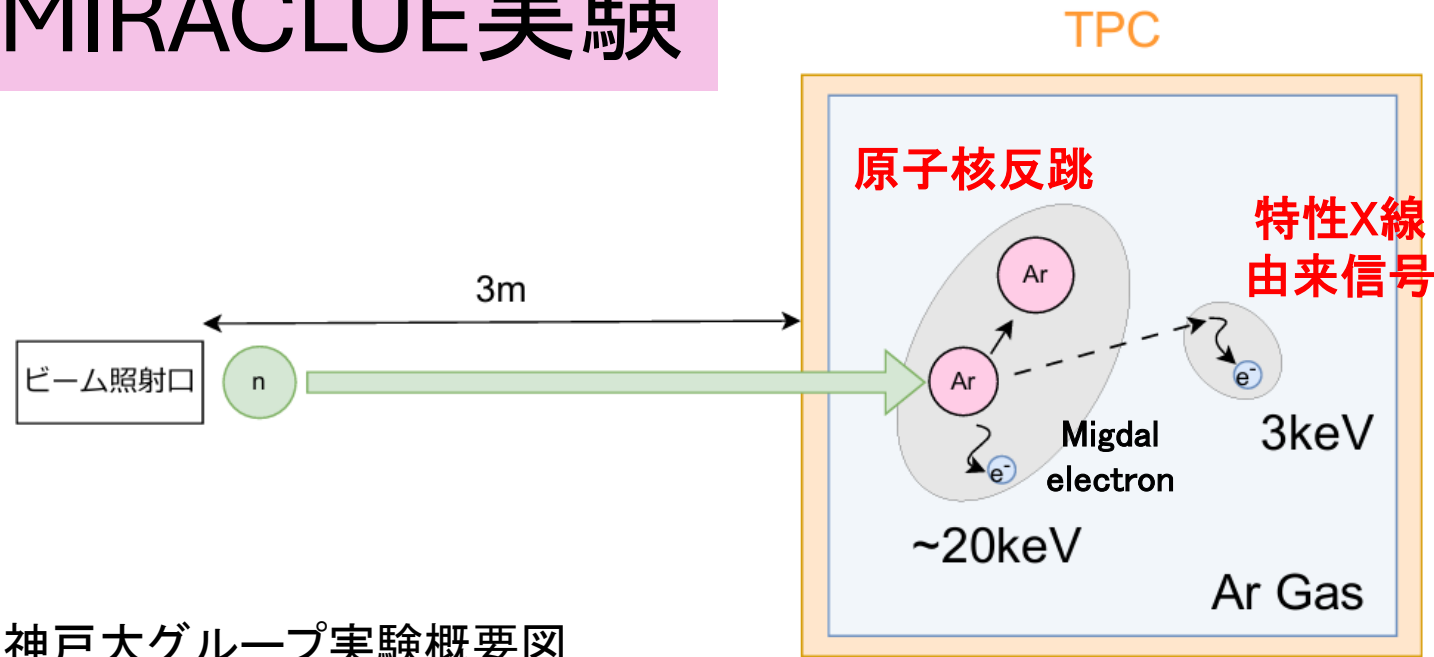
- 原子核が急激に動く際、
低確率で束縛電子が電離・励起する現象
- 原子核反跳に伴うMigdal効果
 - 低質量DM(WIMP)に対する感度向上
 - ✓ 原子核反跳＋Migdal効果に起因する電子反跳
 - 2026年1月に中国グループが初観測を報告
(Nature 649, 580-583)
 - ✓ ヘリウム40%、ジメチルエーテル60%の混合ガス
- WIMP直接探索への応用に向けて
Arガスでの観測を目指す
 - **MIRACLUE実験**

Migdal効果 模式図



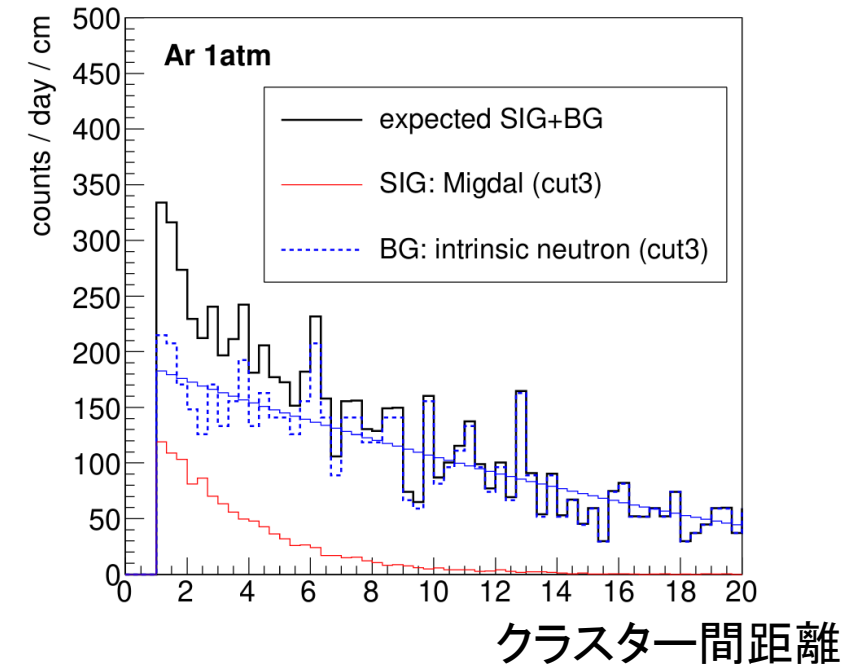
中国グループが報告したMigdal Event

MIRACLUE実験



神戸大グループ実験概要図

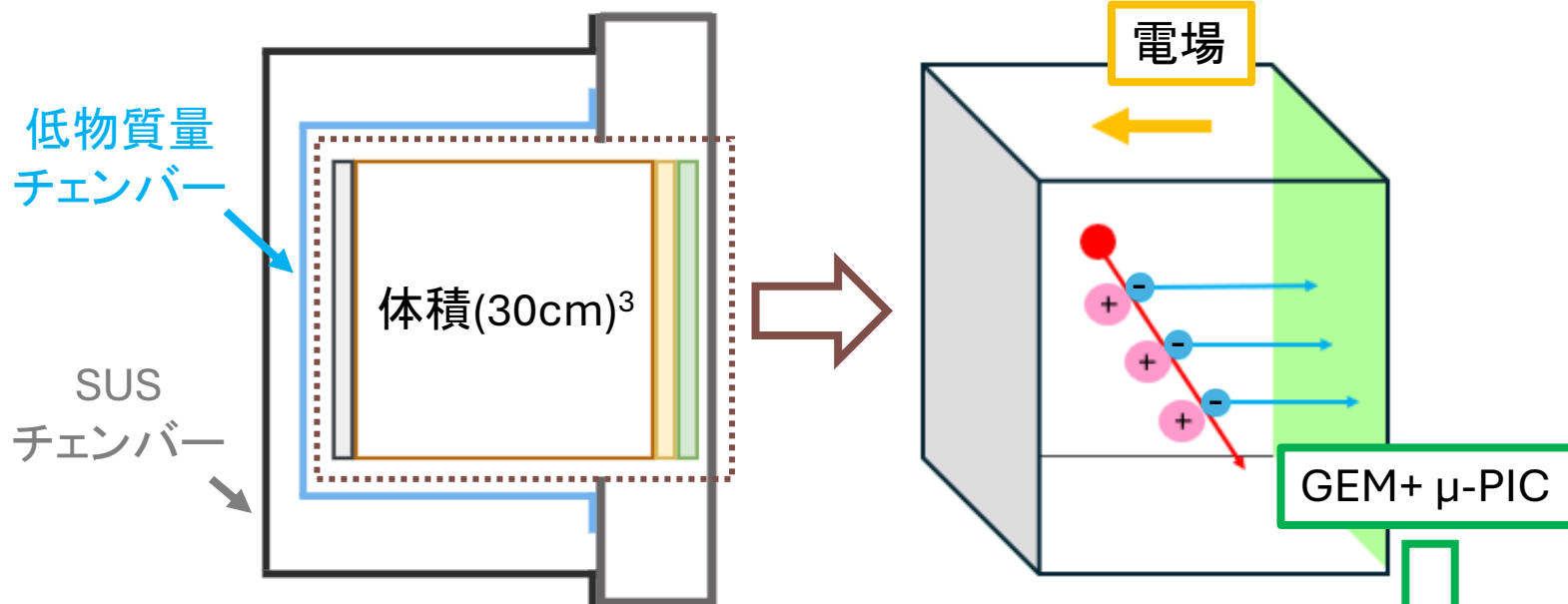
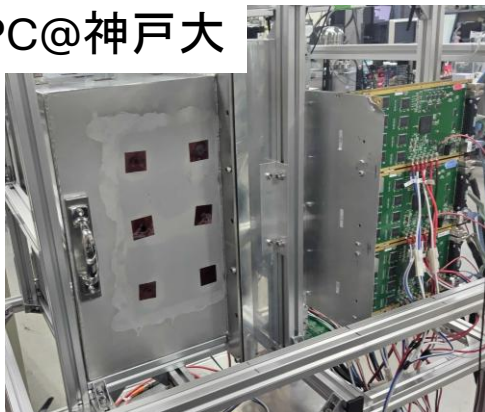
クラスター間距離分布



- **中性子ビーム**を照射して原子核反跳に伴うMigdal効果を観測する
 - 標的物質: WIMP探索での使用実績がある**Ar**(神戸大)・**Xe**(東北大)
- ガスTPCを用いた**2クラスター探索**
 - 原子核反跳と**Ar**(**Xe**)の特性X線による信号を検出
 - **エネルギー**と**座標**の取得ができる検出器が必要

ArガスTPC

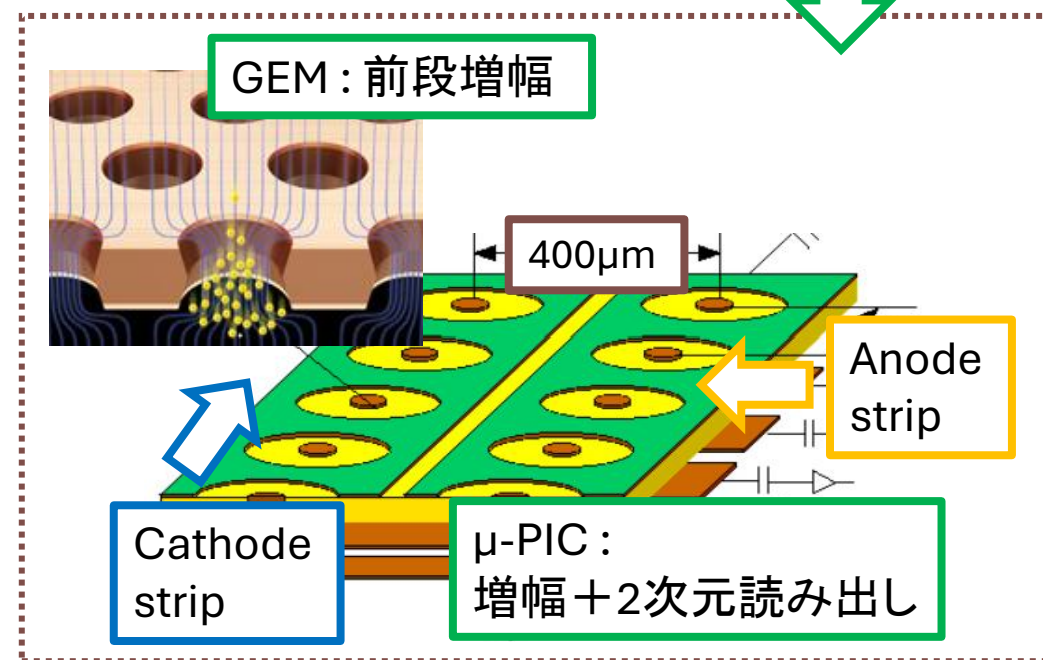
ArガスTPC@神戸大



- NEWAGEの技術を応用したガスTPC

- 体積: $(30\text{cm})^3$
- Ar+クエンチャーの混合ガス1気圧を封入
 - ✓ Ar: C₂H: CF₄ = 91:8:1
- 2重構造チェンバー
 - ✓ 低物質量の素材で背景事象削減

- エネルギー・3次元飛跡を取得可能



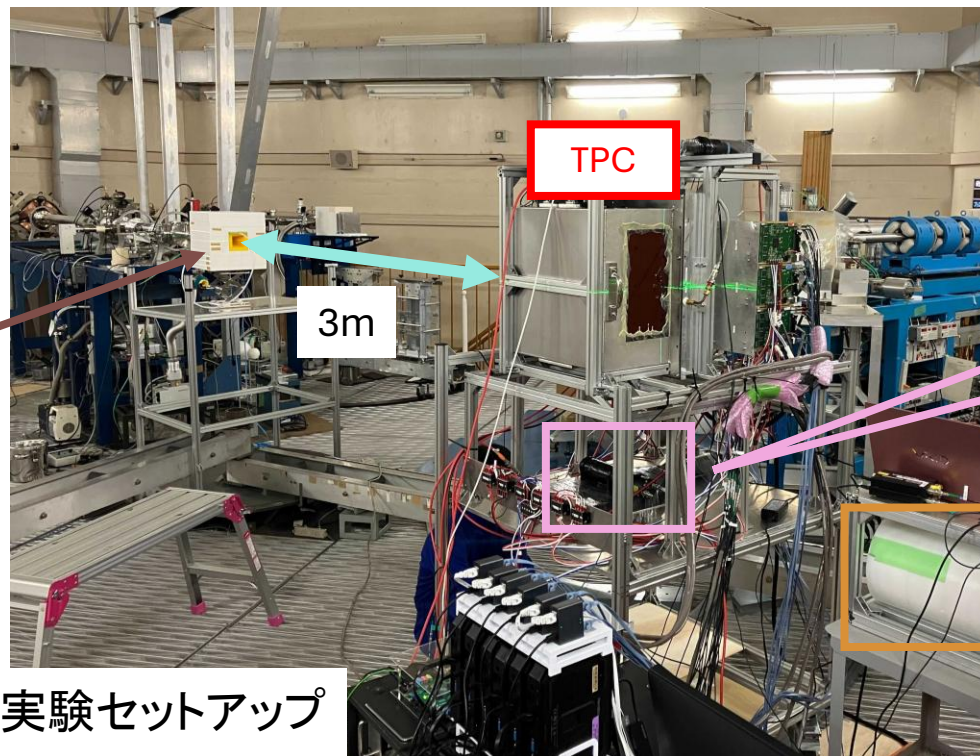
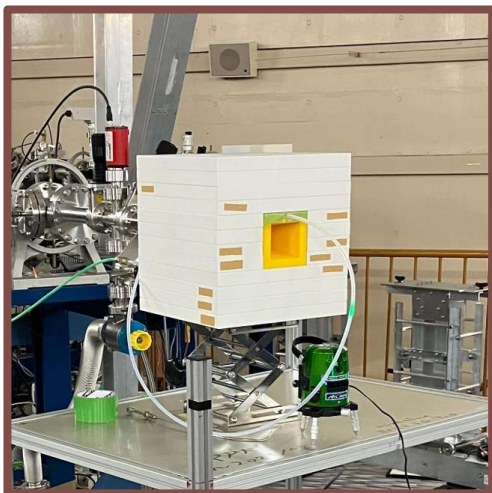
前回の中性子ビーム実験

- 2025年11月 産業技術総合研究所にて実施
 - 565keV単色中性子ビーム
 - コリメータとしてLiF50%添加ポリエチレン(LiF-PE)を使用

測定諸元

- 入射中性子数: 1.0×10^9
- 総トリガー数: 1.2×10^6
- 測定時間(live time): 1105sec

LiF-PE製コリメータ
(30cm角)



実験セットアップ

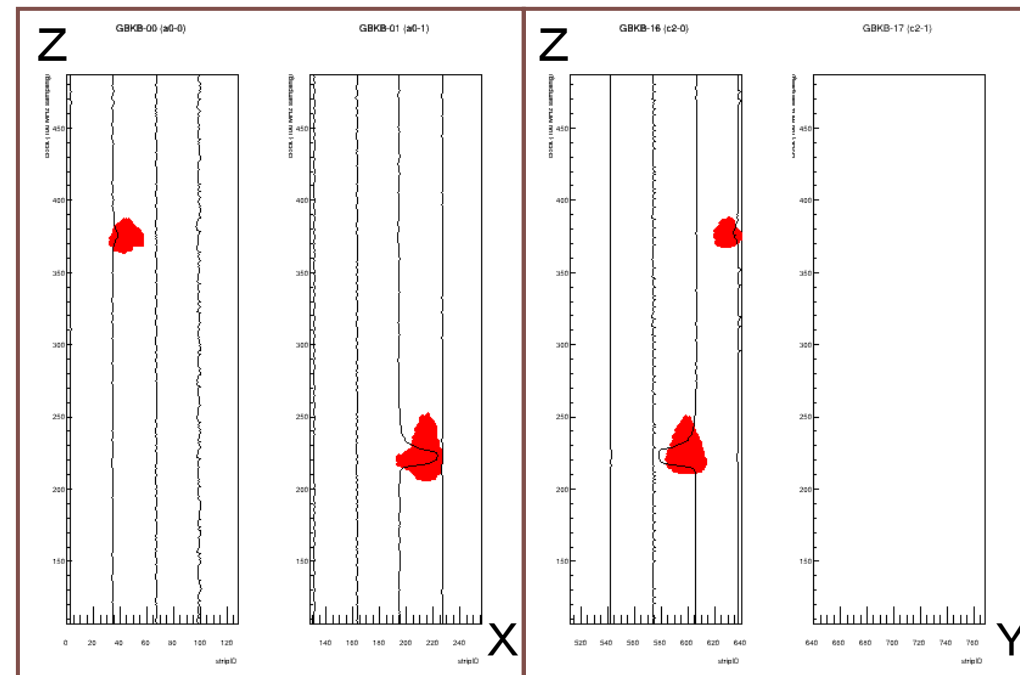
NaIシンチレータ
• γ 線の測定

^3He 比例計数管
• 中性子量のモニター

前回の実験結果

- 2クラスター手法で解析
 - 2段階のカット条件
 - ✓ 2つのクラスターが存在する
 - ✓ 一方のクラスターのエネルギーが $3.0 \pm 1.5\text{keV}$
 - 背景事象を3桁削減
- 分岐比
 - 上限値(信頼度95%) $BR < 1.4 \times 10^{-2}$
- Arを用いたMigdal効果探索では世界初の制限
 - 理論値 7.2×10^{-5} (Journal of High Energy Physics 2018, 194)
よりも3桁大きい値を得た
→ Migdal事象の 10^3 倍の背景事象が存在する

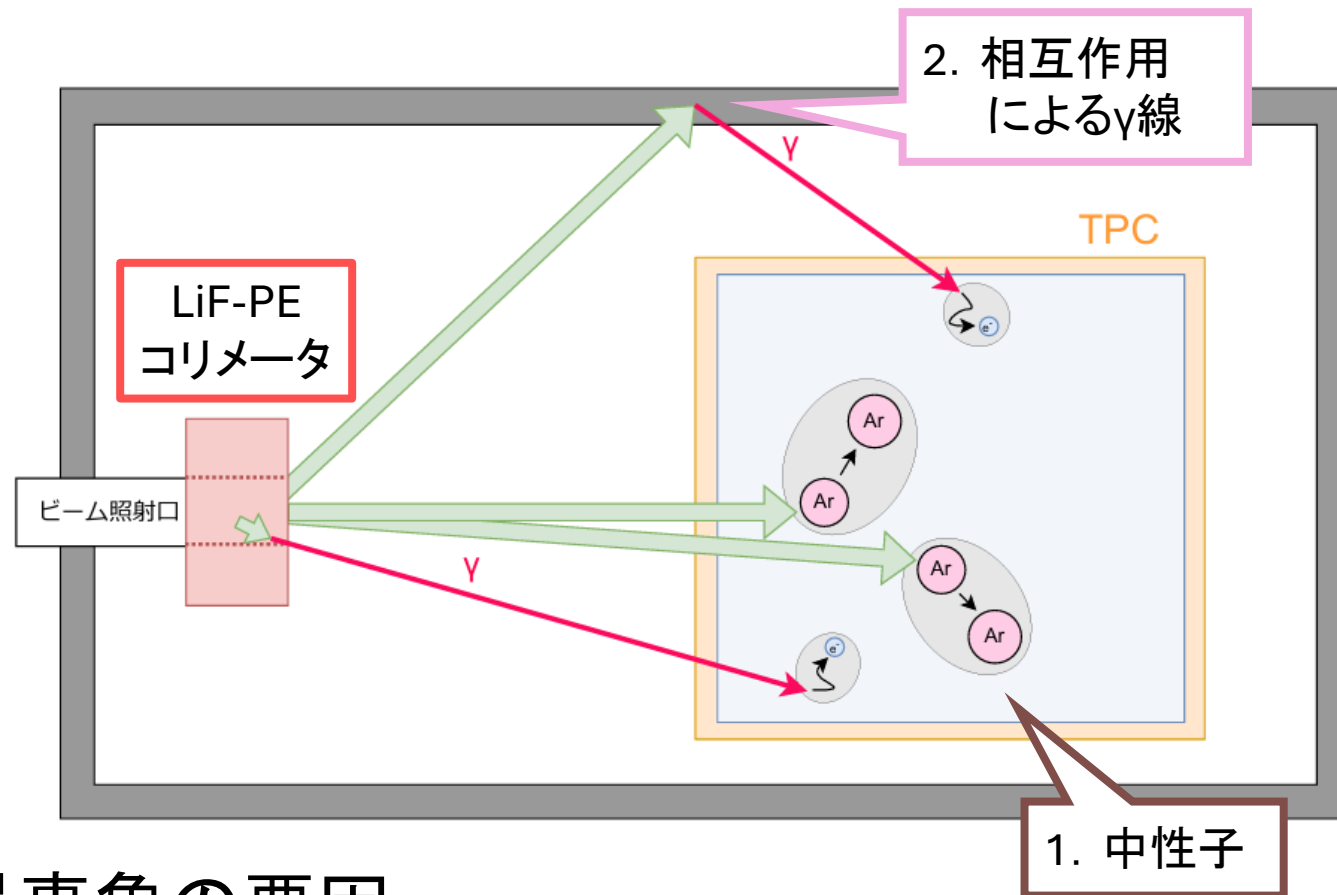
2つのカットを通過した事象の例



適用したカット	通過した事象数
なし	1.2×10^6
2-cluster	3499
3keV cut	1058

背景事象

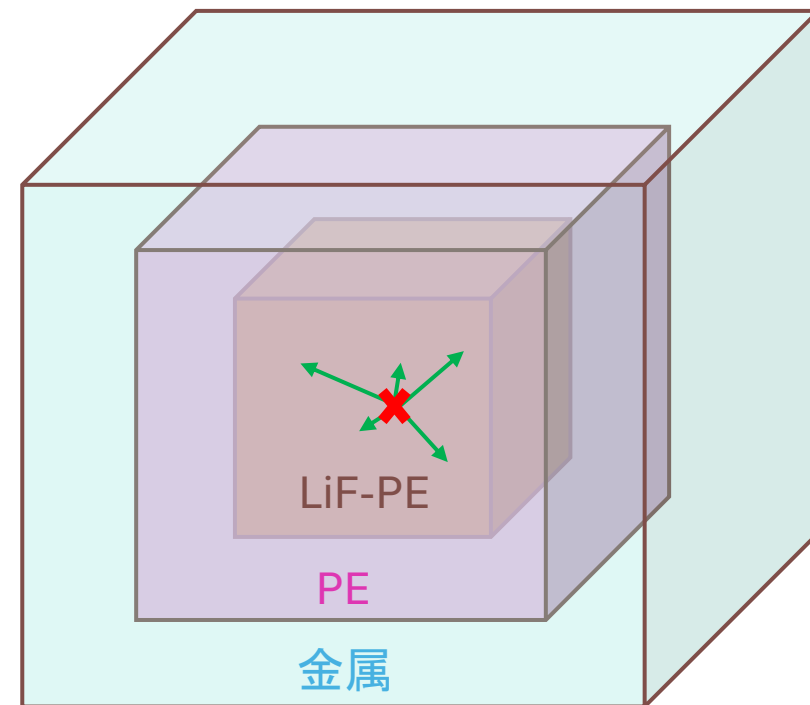
背景事象
模式図



- Accidental Coincidenceが背景事象の要因
 - 1. 中性子
 - 2. 壁、床を含む周辺物質との相互作用(中性子捕獲など)による γ 線
- 10月に予定している次回ビーム実験に向けて、
背景事象を削減し、S/N比を向上させる

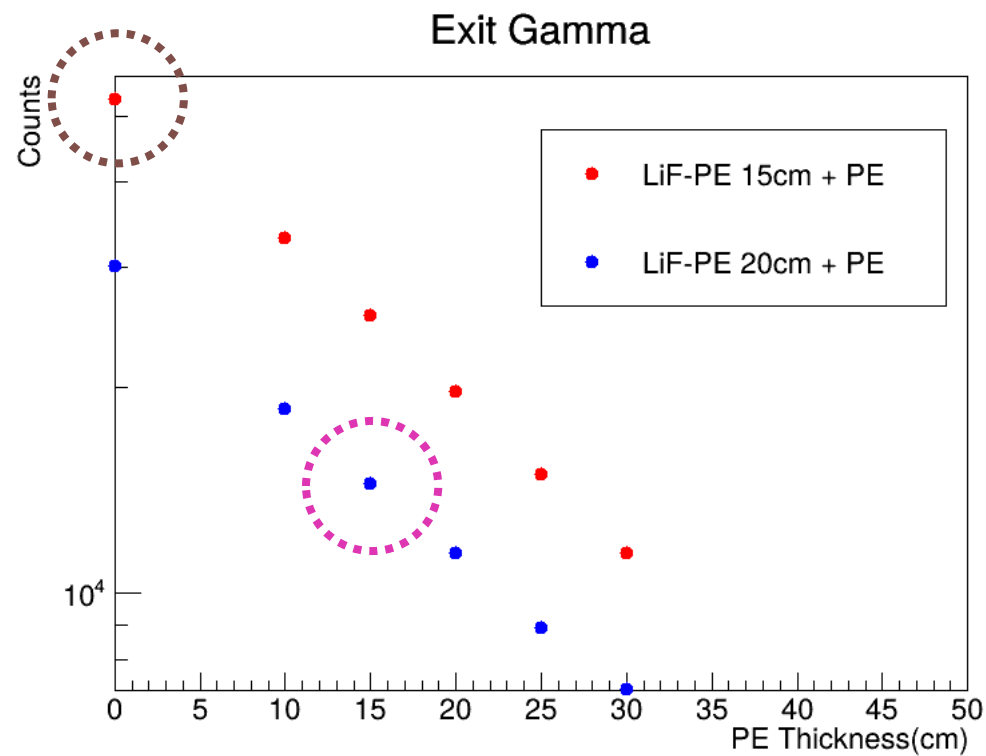
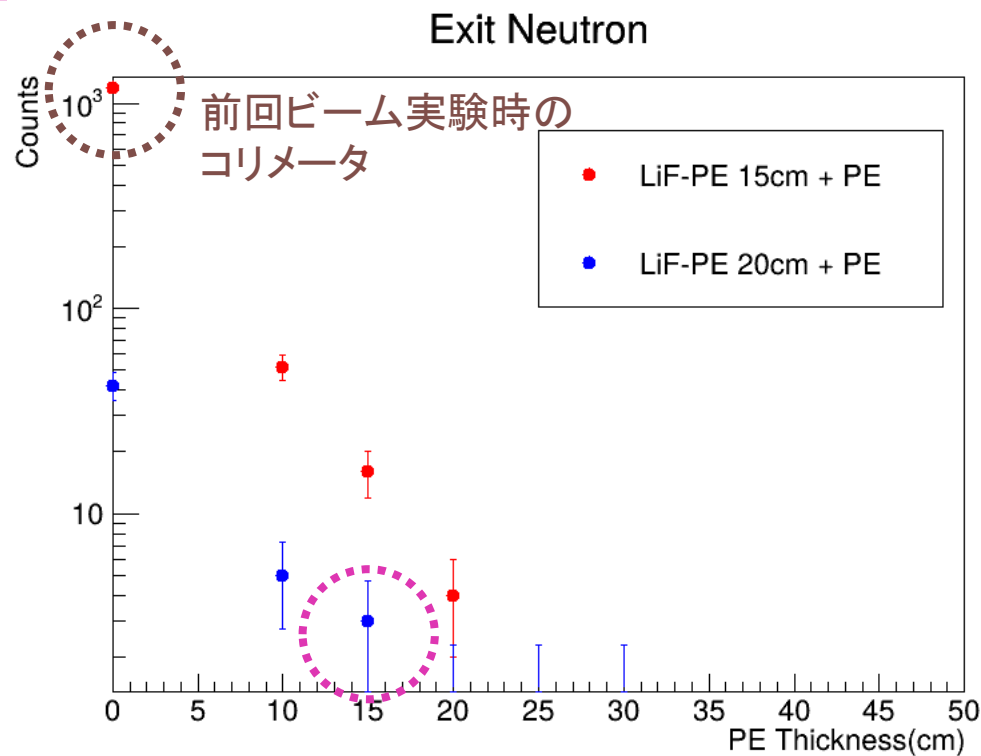
背景事象の削減

- 相互作用による γ 線の削減
→ コリメータの改良で実現
- シミュレーションによる最適化
 - 材質・サイズの異なるコリメータ(立方体)を作成
 - ✓ LiF-PE、PEで中性子遮蔽
 - ✓ 金属で γ 線遮蔽
 - ✓ 中心から見た厚みを変えて、適切な条件を見つける
 - 中心から全方位に中性子を照射
 - コリメータから出射した中性子・ γ 線数をカウント
- 出射粒子数を比較し、背景事象の低減効果を評価
 - 中性子・ γ 線ともに3桁程度の低減を目指す



ジオメトリイメージ図
立方体の入子構造
中心(×印)から中性子を照射

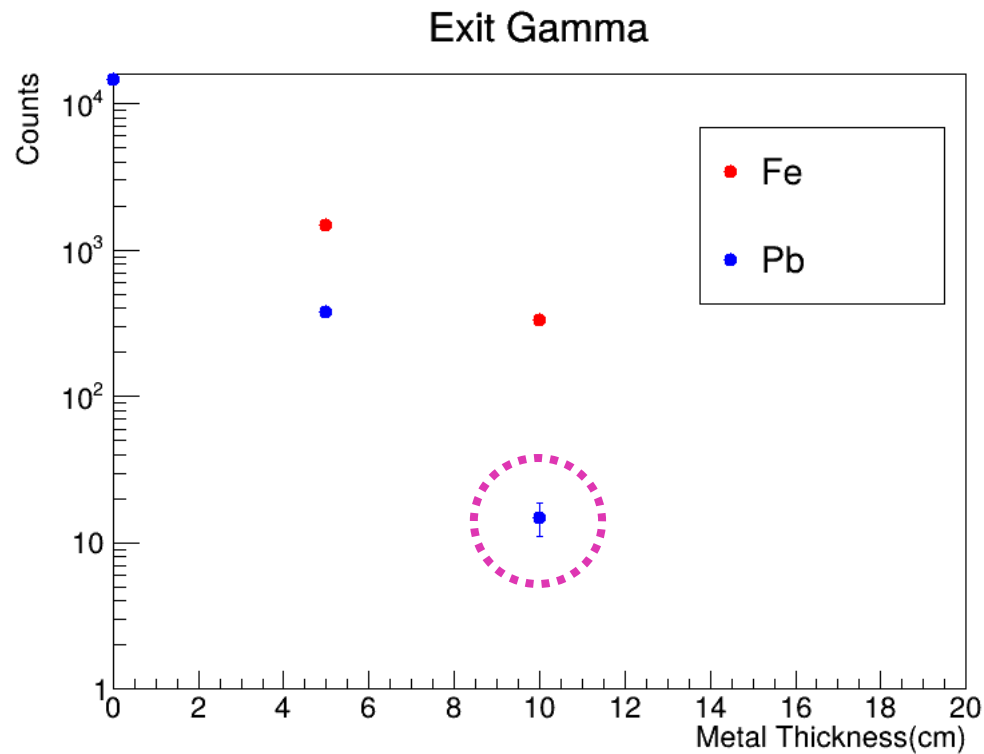
背景事象の削減



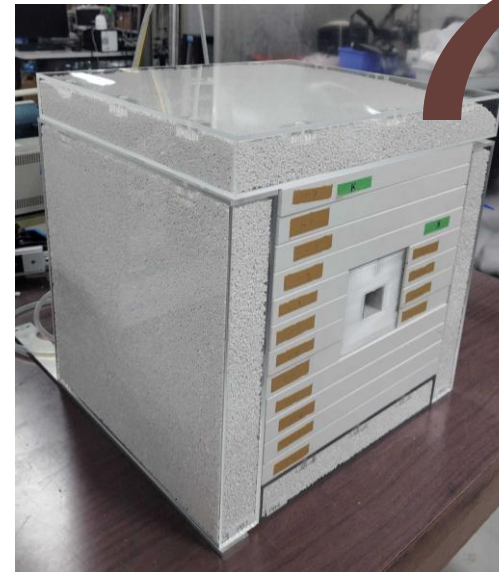
- 中性子の削減

- 中性子: 20cm厚LiF-PE+15cm厚PEで3桁程度削減
- γ線: 3桁削減には至らない
- 表面に金属を追加してγ線をより遮蔽

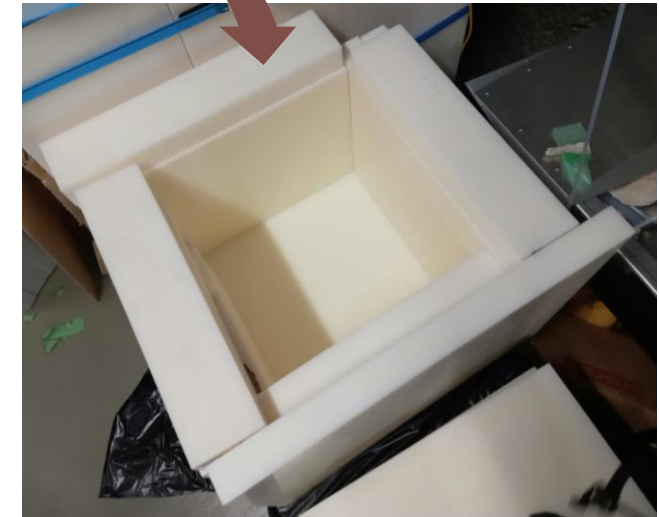
背景事象の削減



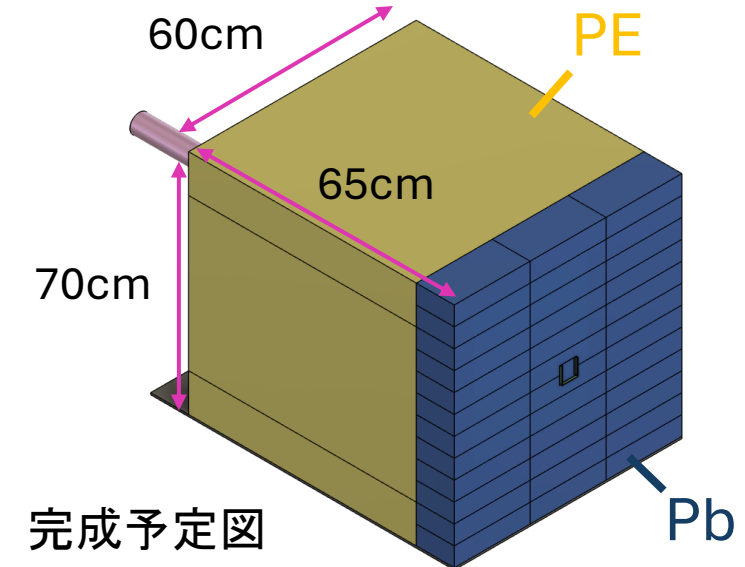
- γ 線の削減
 - Feでは3桁削減に至らない → **Pb**を採用
- 20cm厚LiF-PE+15cm厚PE+10cm厚Pbに決定
 - 準備を進めている



LiF-PE

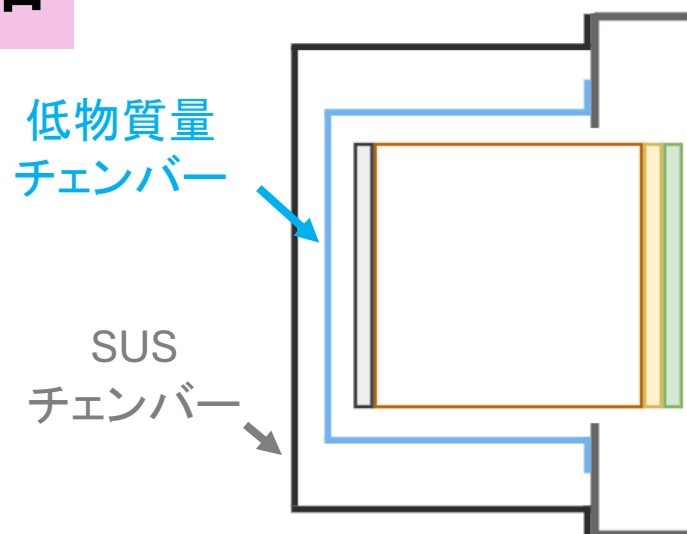


PE

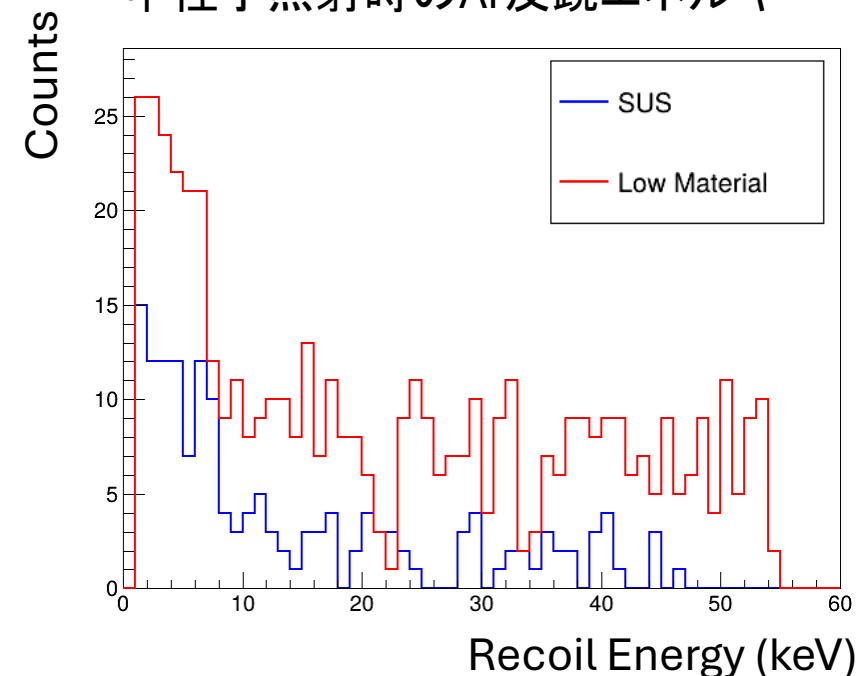


観測事象数の増加

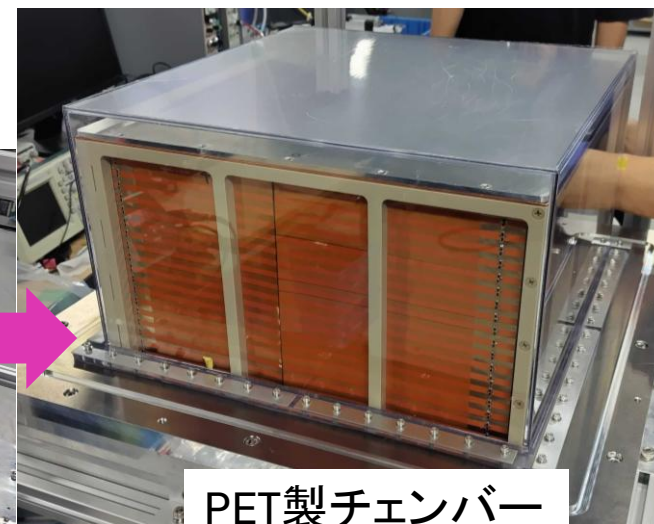
チェンバー模式図



中性子照射時のAr反跳エネルギー



- SUSで中性子が散乱してしまう
 - Arの反跳数が少ない
- 低物質質量チェンバーのみで測定したい
 - 従来のもの(EVOHシート)は破れやすい
- 新たにPETで製作
 - 低物質質量 & 破れにくい



Sensitivityの見積もり

- 前回ビーム実験で得たデータをもとに計算
 - コリメータ改良によるBG3桁削減
 - チェンバー改良による観測事象数の増加(1.37倍)
- Live timeの増加により、**3 σ** での検出を期待
 - Dead timeの削減、観測時間の増加

	前回ビーム実験	次回ビーム実験(expected)
Real time(sec)	9747	54000
Live time(sec)	1105	30240
観測されるAr反跳数	7.9×10^4	3.0×10^6
予測されるMigdalイベント数 (BR: 1.0×10^{-5})	0.79	30
全てのカットを通過したBG事象数	1058	< 29

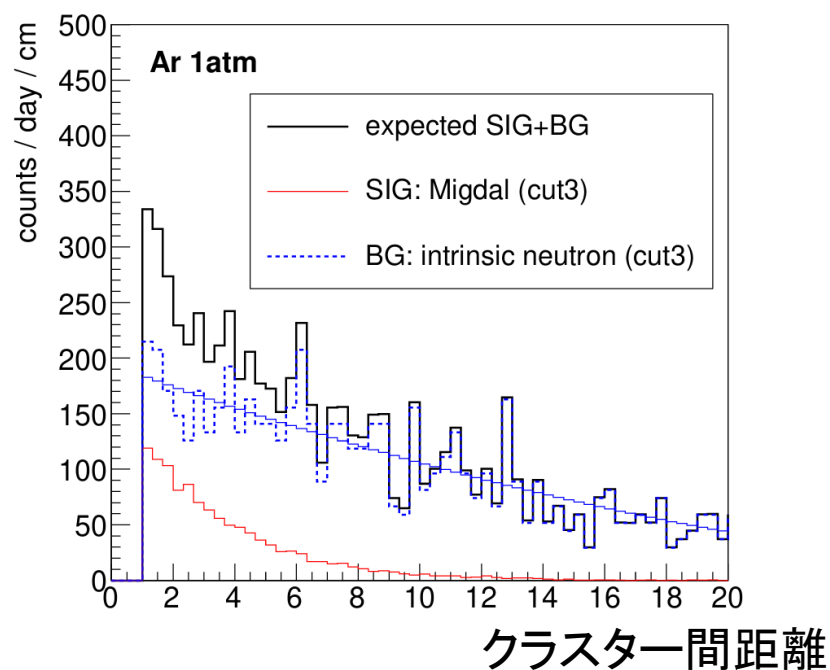
まとめ

- ArガスでのMigdal効果探索実験:MIRACLUE
- 昨年11月の中性子ビーム実験で分岐比の上限値を設定
 - 上限値(信頼度95%) $BR < 1.4 \times 10^{-2}$
 - 背景事象削減が課題
- 実験環境の改良
 - コリメータ改良による背景事象削減
 - チェンバー改良による観測事象数増加
- 10月の次回中性子ビーム実験でMigdal効果の観測を目指す

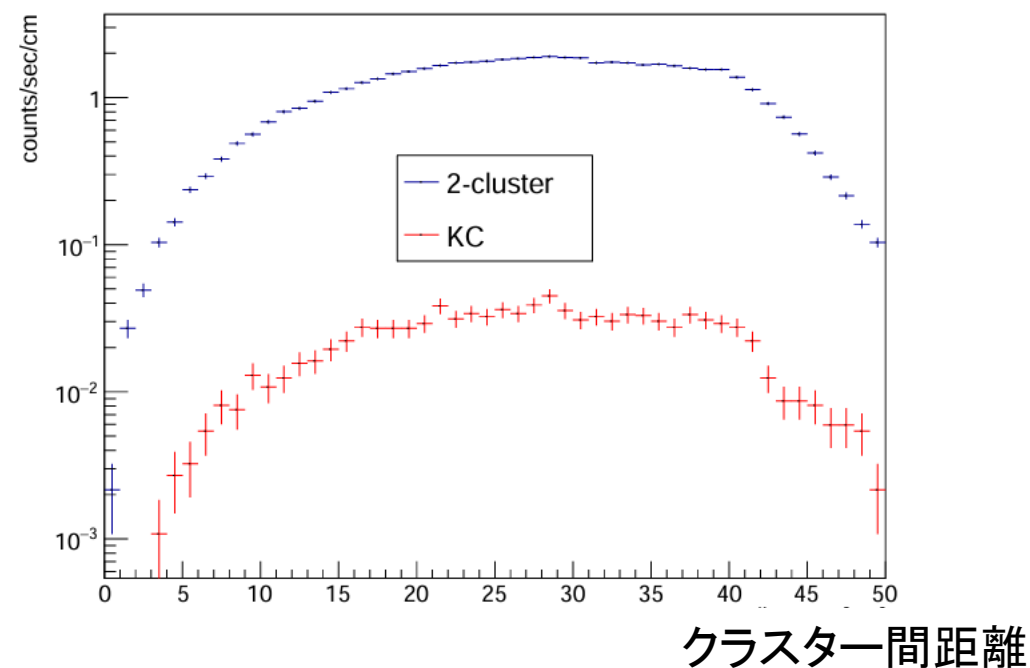
Backup

距離分布

Migdal事象の
2クラスター間距離分布

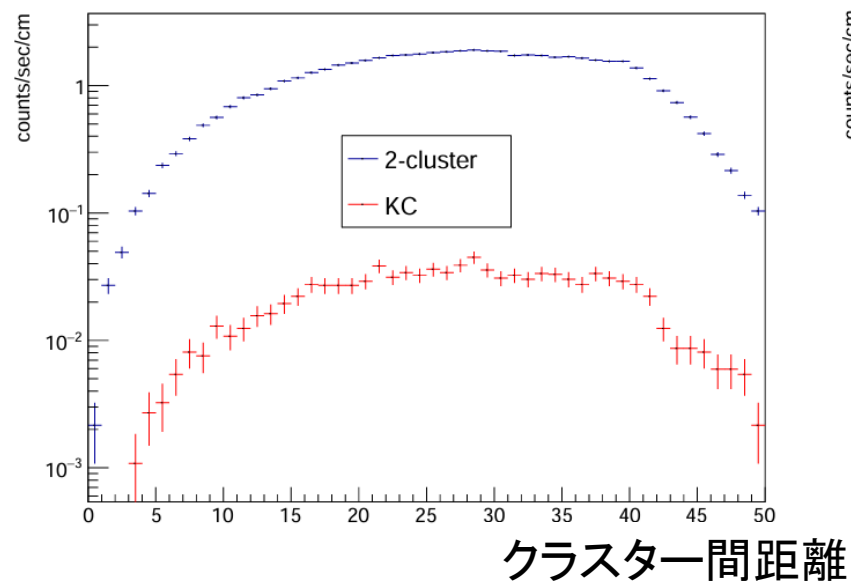


シミュレーションで得た
2クラスター間距離分布

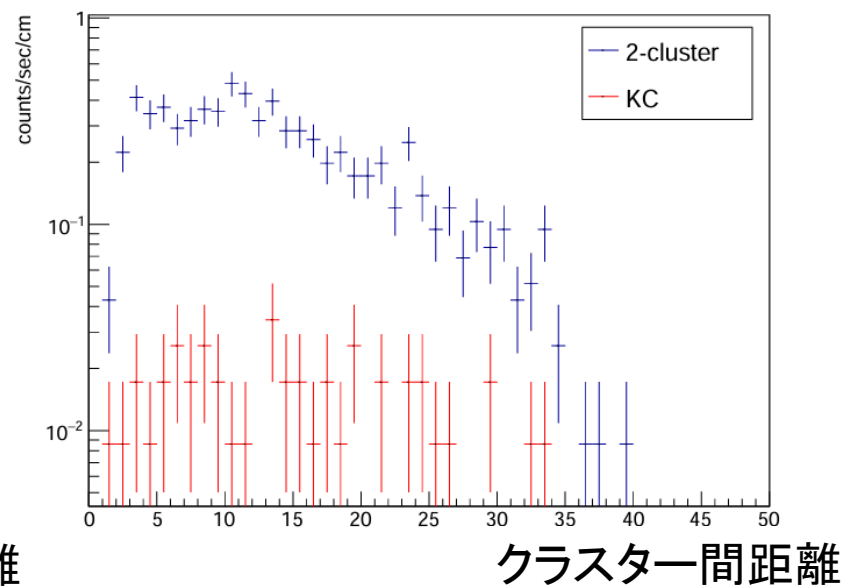


距離分布

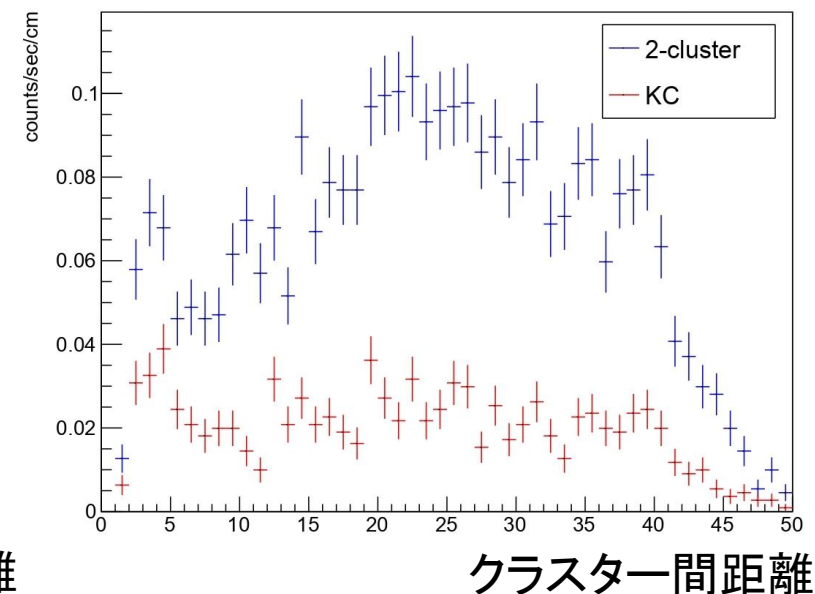
シミュレーションで得た
Accidental Coincidenceの距離分布



シミュレーションで得た
Multiple Scatteringの距離分布

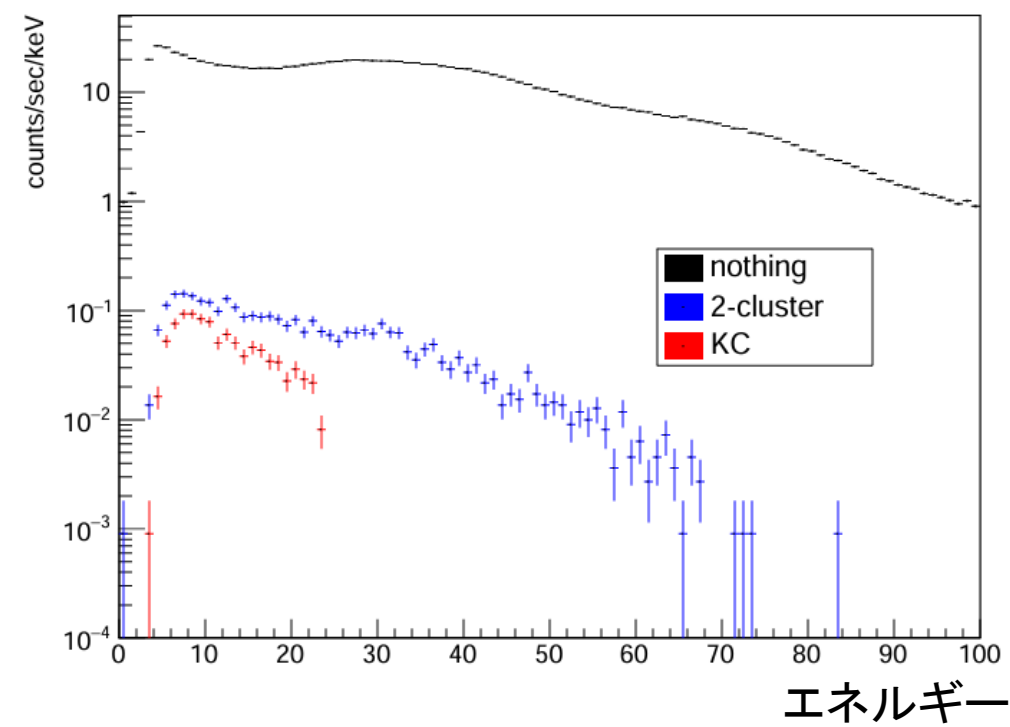


前回ビーム実験で得た
2クラスター間距離分布



エネルギー分布

エネルギー分布
(前回ビーム実験)



解析の方針

- 分岐比計算

- $\frac{\text{観測されたMigdal事象候補数}(N_{\text{sig}})}{\text{観測されたAr原子核反跳事象数}(N_{\text{Ar}})}$
- $\text{BR} < \frac{N_{\text{sig}} + 1.96\sqrt{N_{\text{sig}}}}{N_{\text{Ar}}} = \frac{1058 + 1.96 \times \sqrt{1058}}{7.93 \times 10^4} = 1.4 \times 10^{-2}$

- Migdal事象候補数の見積もり

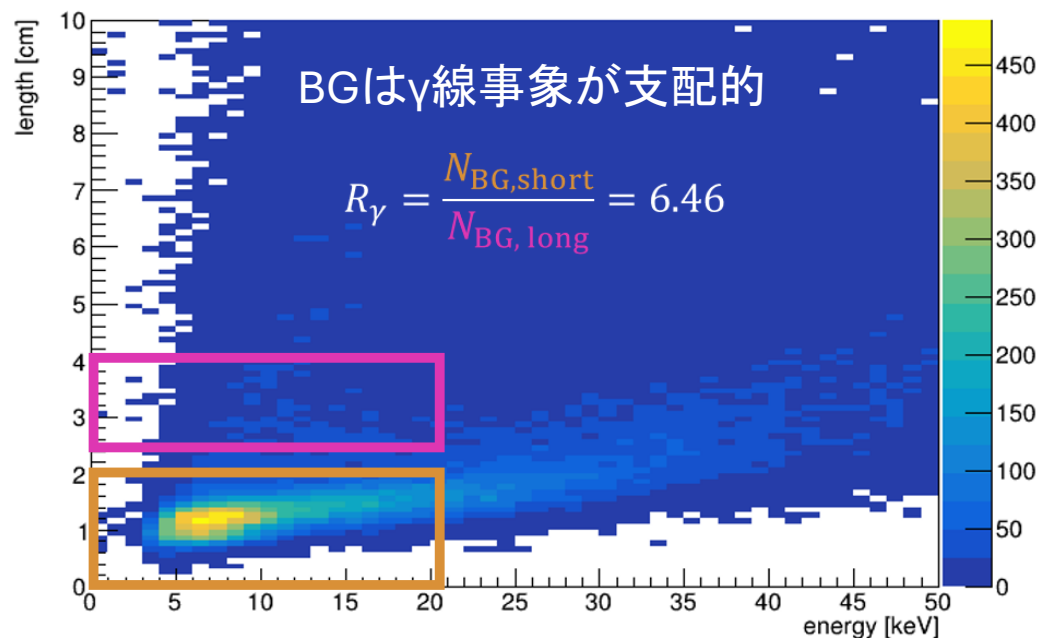
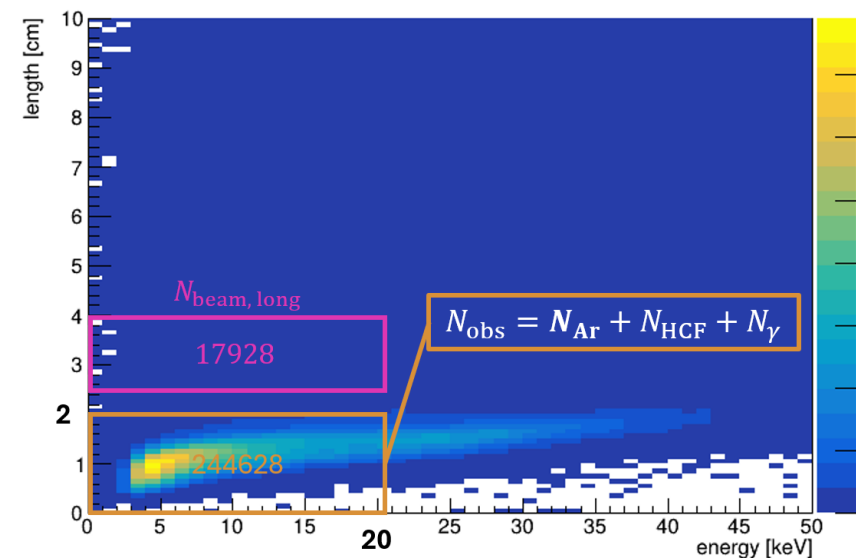
- 特性X線のエネルギーを持つ2クラスター事象数

- Ar原子核反跳事象数

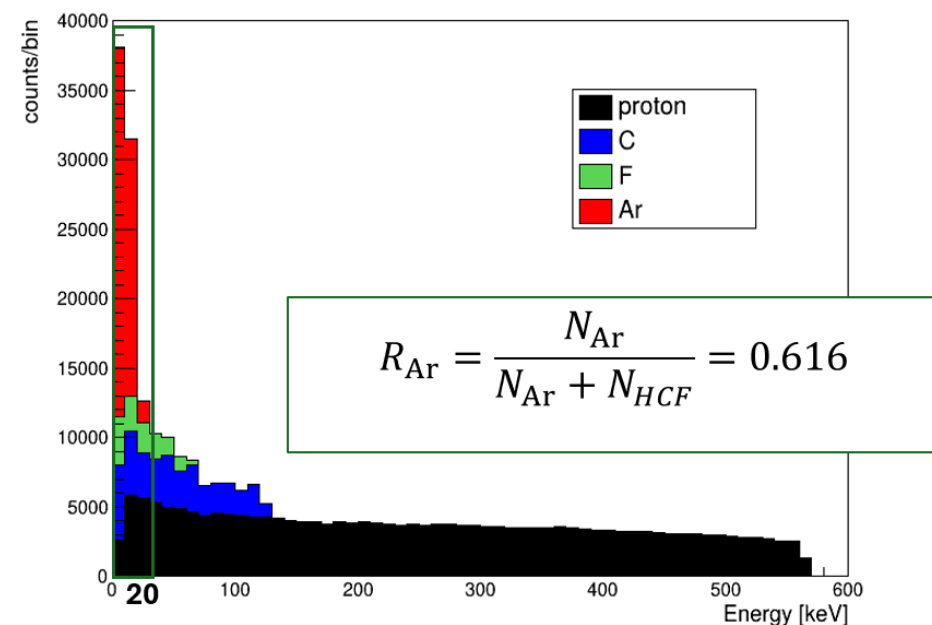
- Ar以外の原子核(H, C, F)が反跳された事象数
- γ 線由来の事象数
を差し引く

Ar反跳事象数の見積もり

- ROI : Energy < 20.5keV、Length < 2cm
- ガンマ線事象 : $N_{\text{beam, long}} \times R_{\gamma} = 115770$
- Ar反跳事象 : $(N_{\text{obs}} - N_{\gamma}) \times R_{\text{Ar}} = 7.93 \times 10^4$



BG測定におけるエネルギーと飛跡長の関係



クエンチングファクタを考慮したエネルギースペクトル

2クラスター解析(手法)

ヒットに一定距離以上の「とび」が1回だけあるものを探す

- ヒット情報を用いてクラスター間の距離を計算

$$d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + \{(\Delta z_x + \Delta z_y)/2\}^2}$$

- クラスターごとに波形を積分してエネルギーを算出

とびの閾値

縦方向:1クロック

X/Y方向:1.28 cm

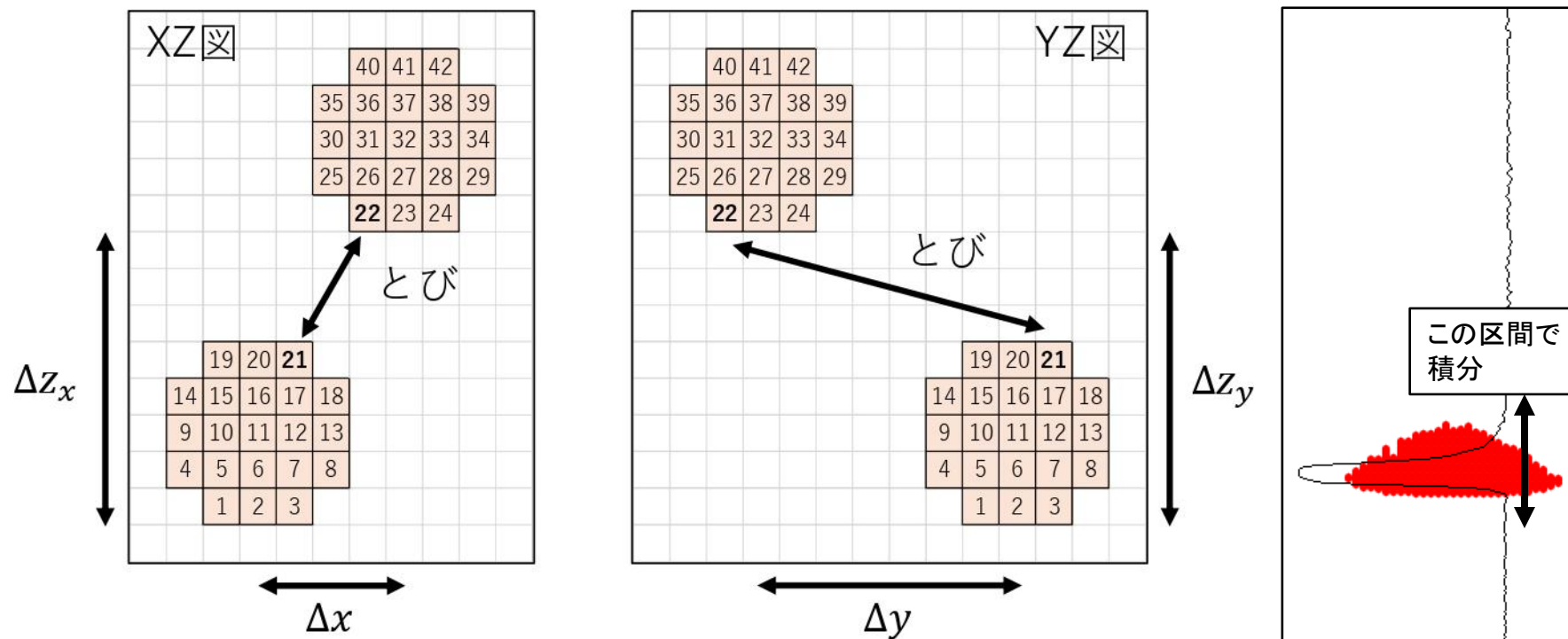
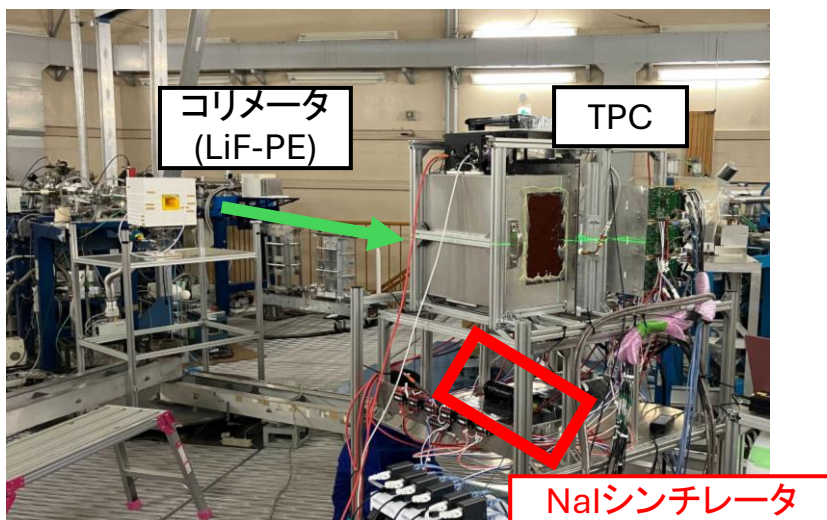


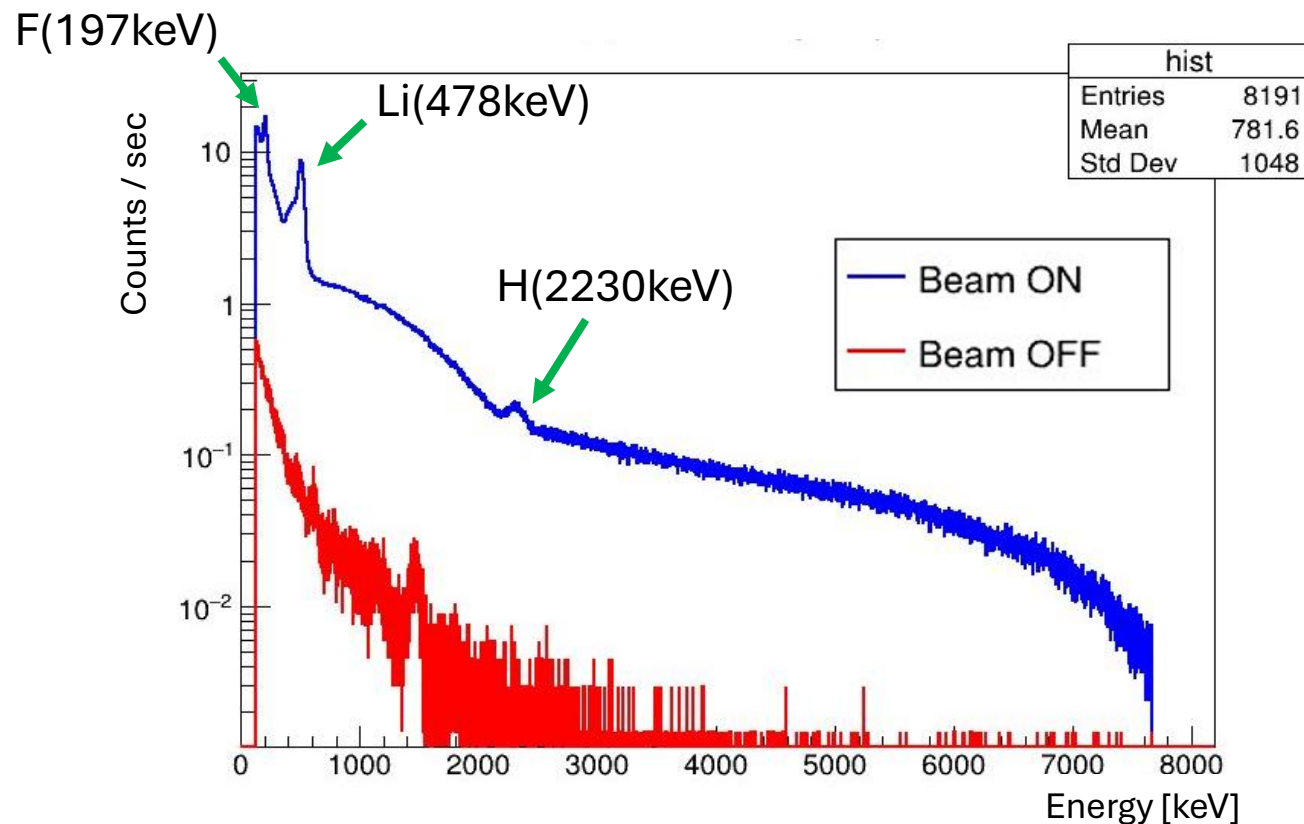
図4.14:2クラスター事象の選別方法

γ 線背景事象

- ビーム照射時に計数が増加
- ビーム照射時特有のピーク
 - LiF-PEコリメータ、Liターゲット由来
 - Fと中性子の非弾性散乱(197keV)
 - Liの中性子捕獲(478keV)
 - Hの中性子捕獲(2230keV)



前回ビーム実験で取得した γ 線エネルギースペクトル

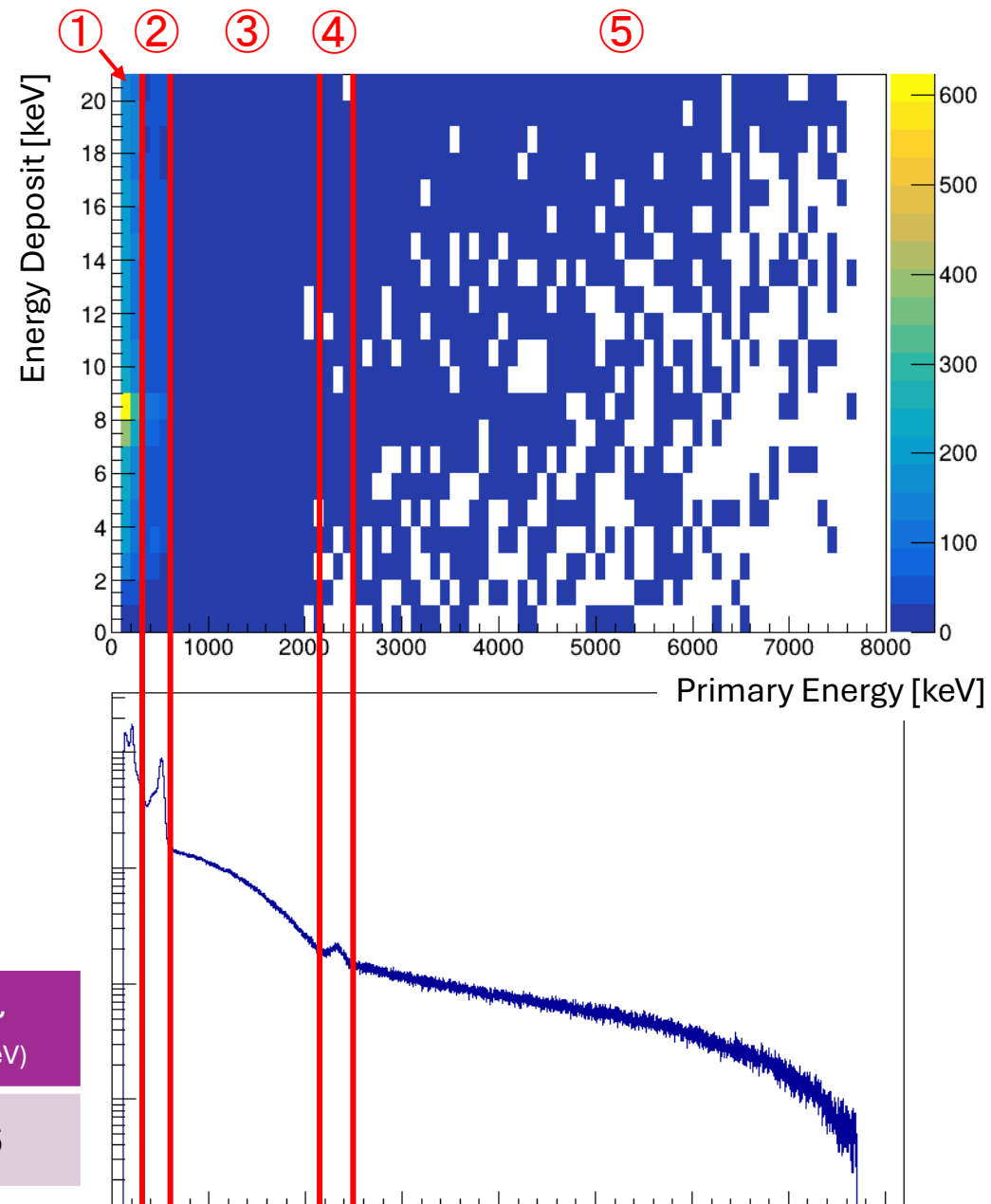


成分	F(197keV)	Li(478keV)	H(2230keV)
γ 線flux [$/cm^2/s$]	12.7 ± 0.1	44.6 ± 0.6	3.69 ± 0.13

γ線背景事象

- 実測スペクトルを確率分布として
Geant4でTPCへγ線を照射
 - TPCへの影響を調査
- ROI内事象数を比較

領域	①F (~300keV)	②Li (300~600keV)	③Li~H (600~2150keV)	④H (2150~2500keV)	⑤H~ (2500~keV)
割合 [%]	51.6	20.2	16.4	1.2	10.6



背景事象の削減

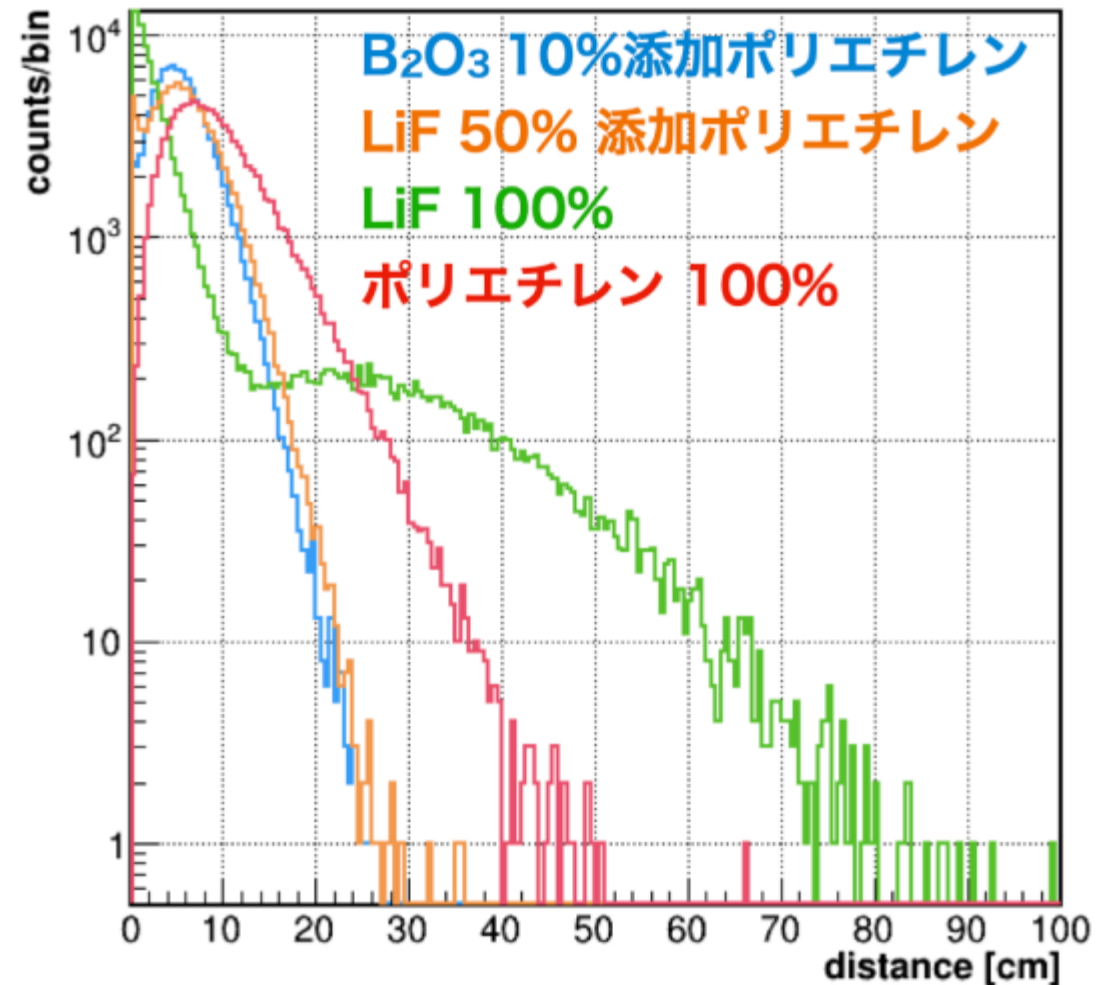
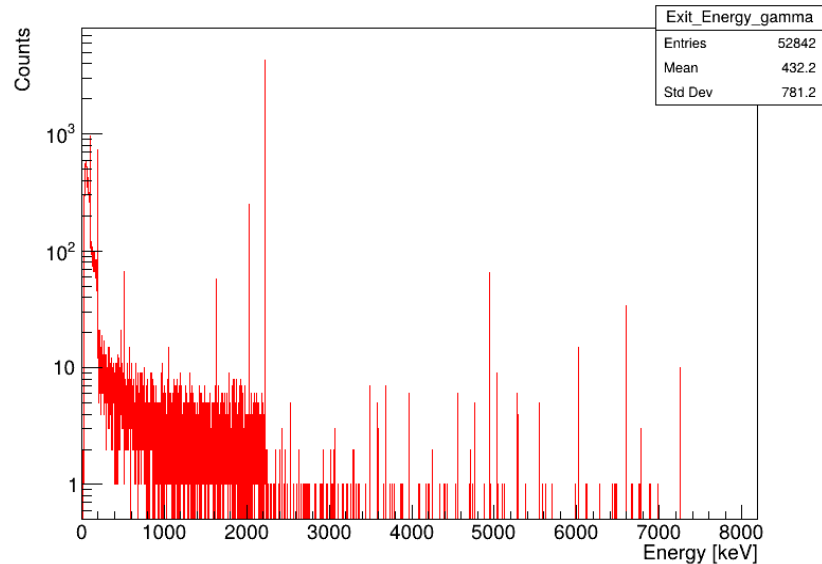


図 4.6: 500 keV の中性子が物質中で停止するまでの距離分布。

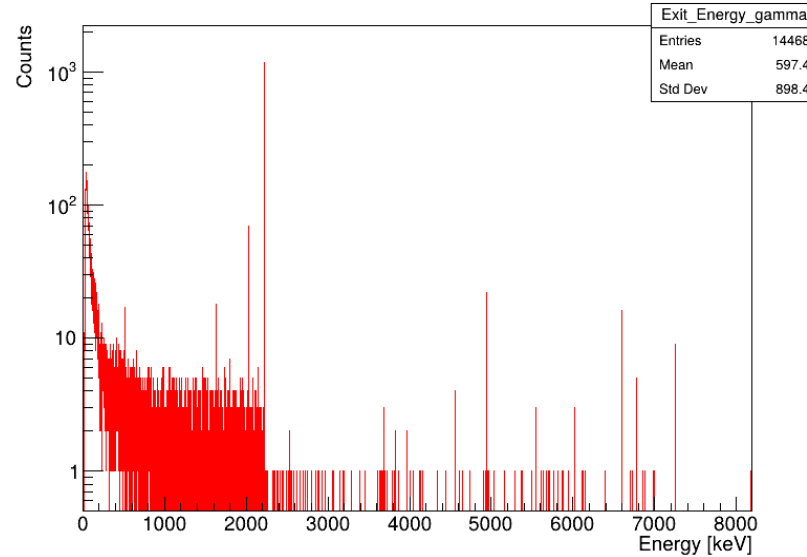
背景事象の削減

- コリメータから出射した γ 線のエネルギー分布

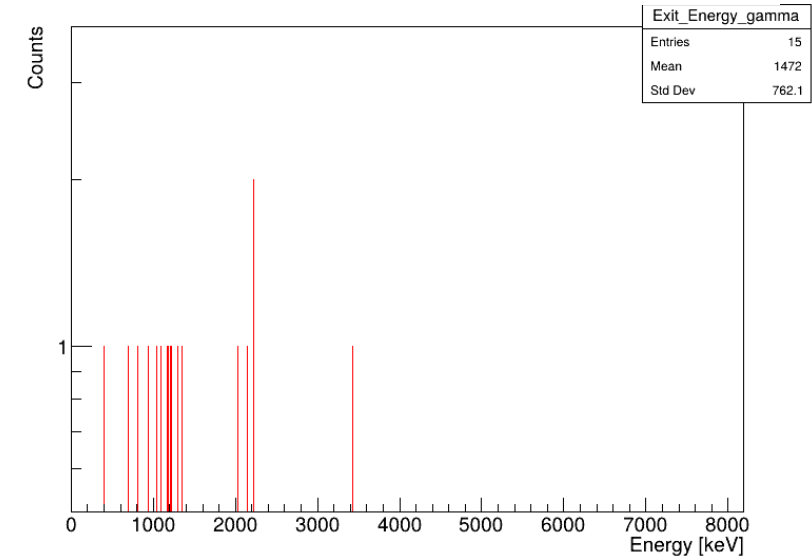
LiF-PE15cm(前回コリメータ)



LiF-PE20cm+PE15cm



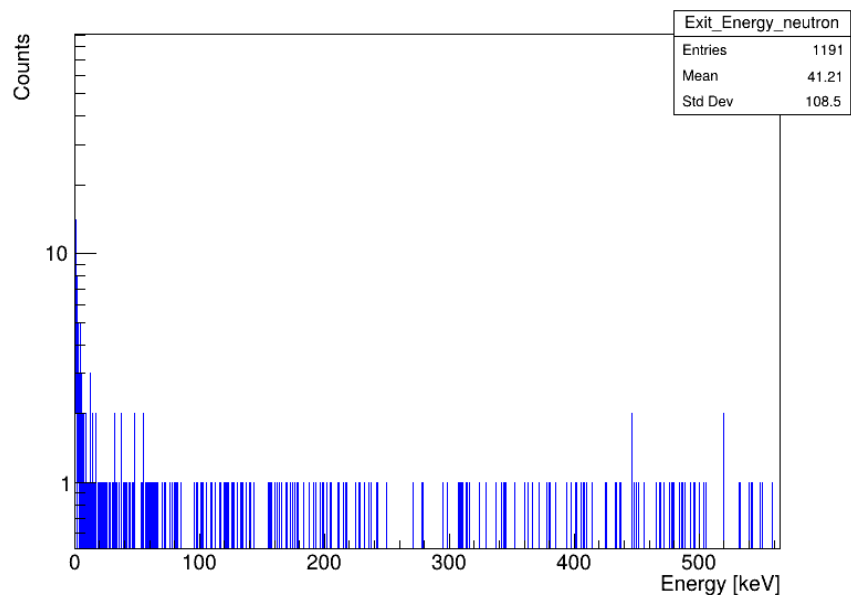
LiF-PE20cm+PE15cm+Pb10cm



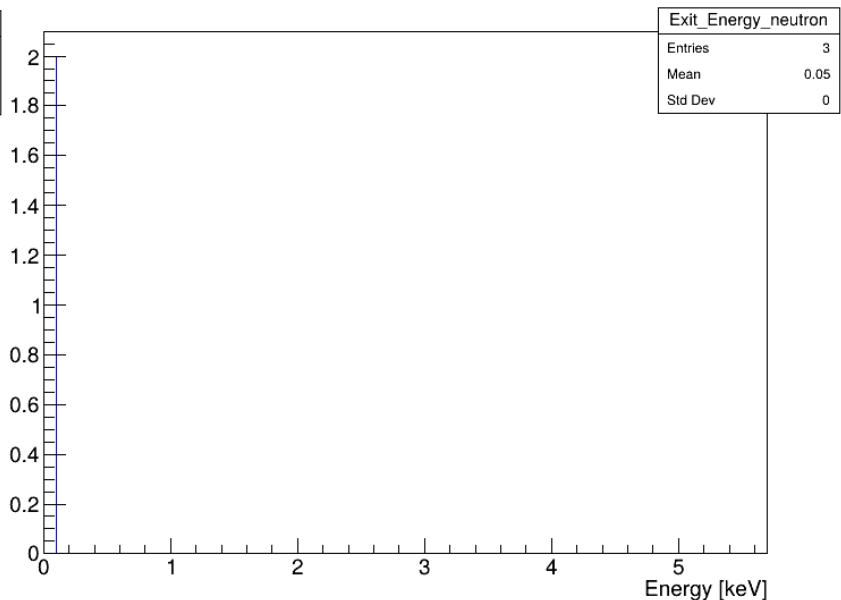
背景事象の削減

- ・ コリメータから出射した中性子のエネルギー分布

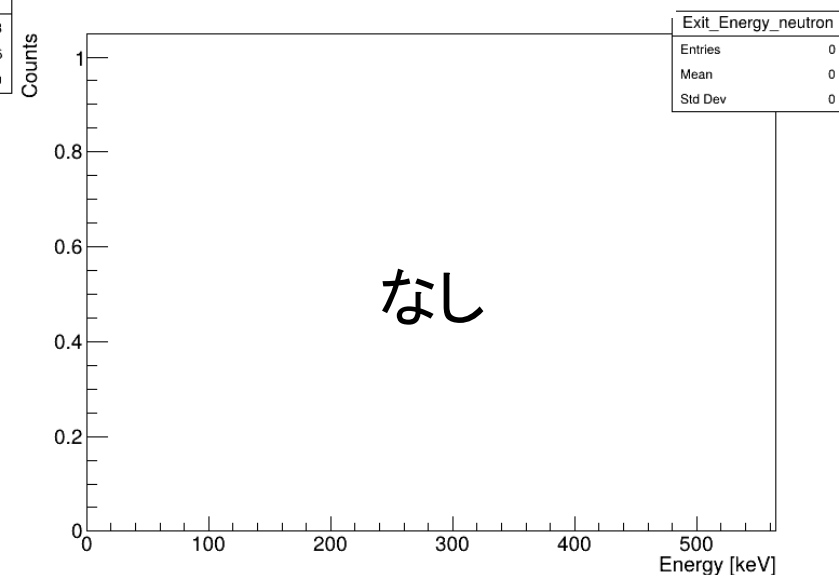
LiF-PE15cm(前回コリメータ)



LiF-PE20cm+PE15cm



LiF-PE20cm+PE15cm+Pb10cm



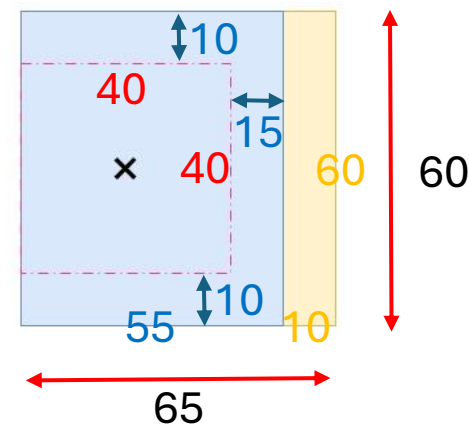
背景事象の削減

最終的に決定したコリメータの設計

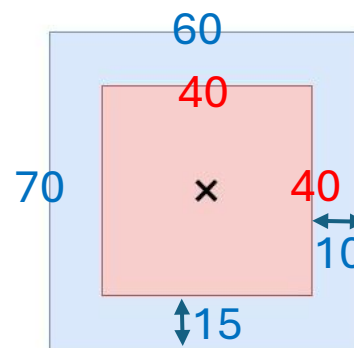
赤：LiF
青：PE
黄：鉛

材質	LiF	PE	Pb	計
重さ [kg]	83.2	158.65	474.6	716.45

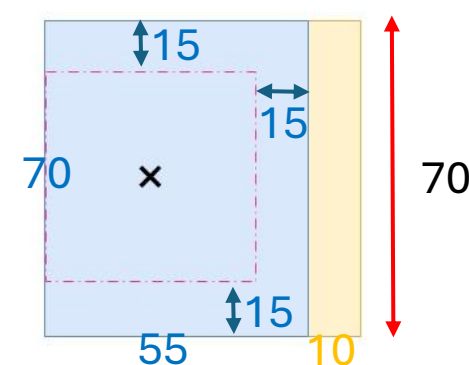
上



後ろ

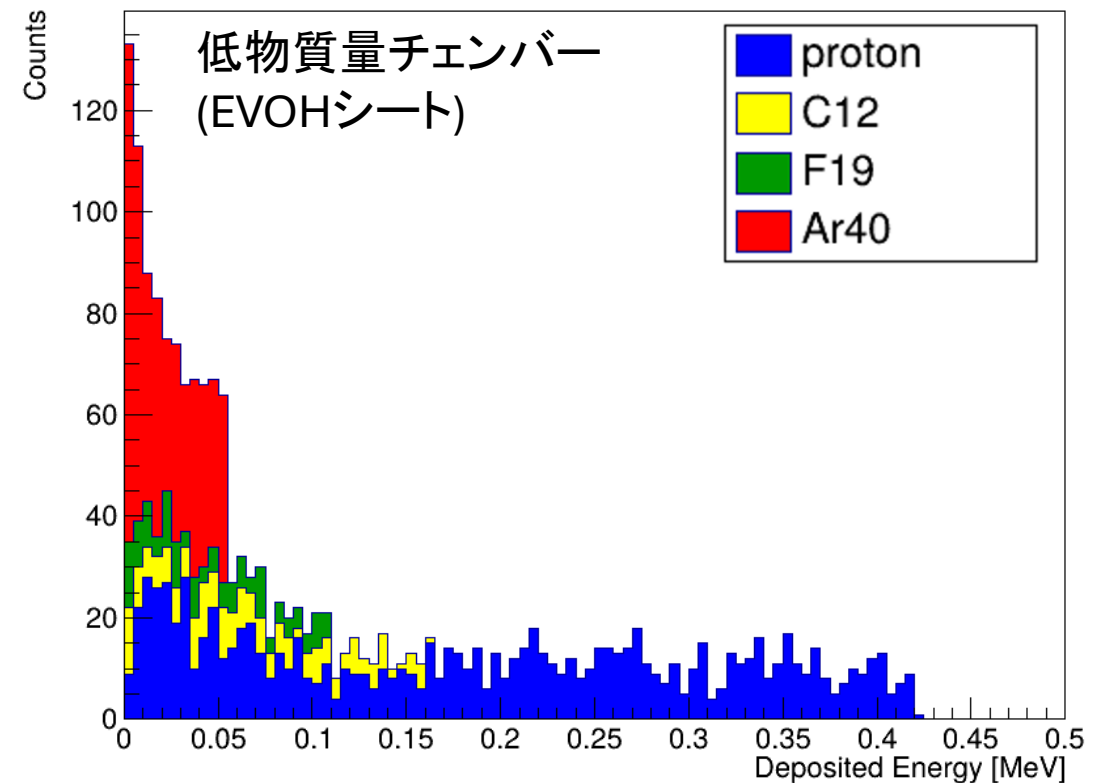
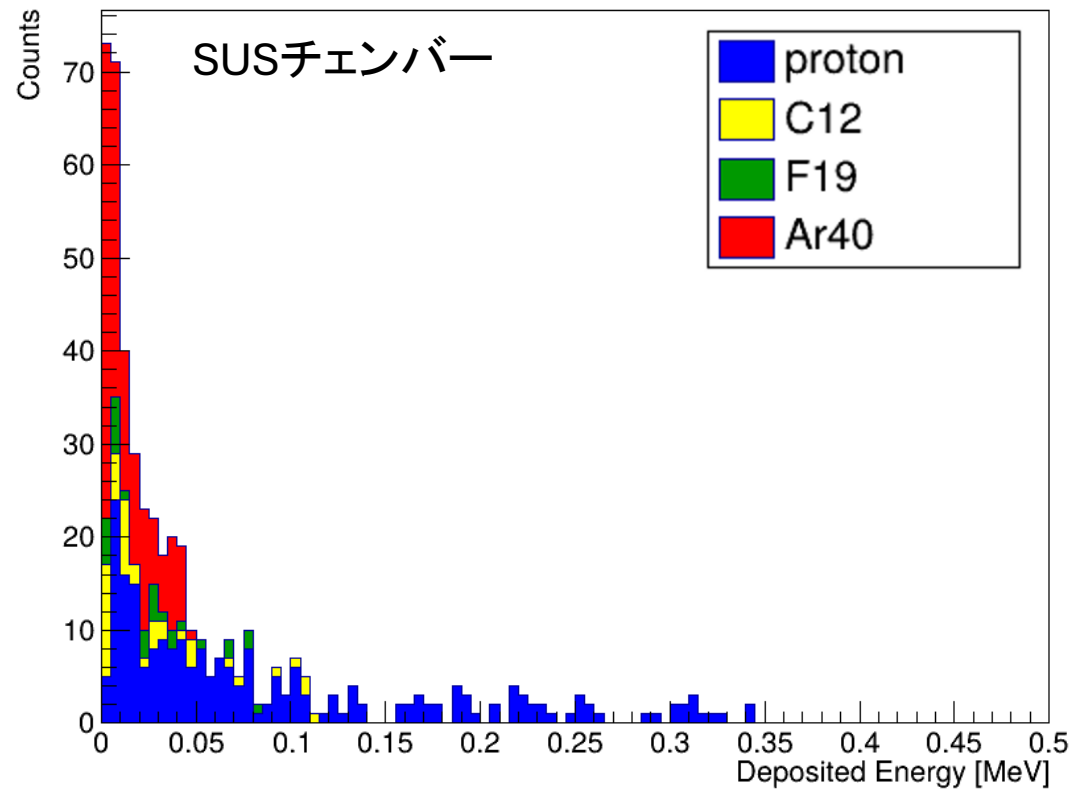


横



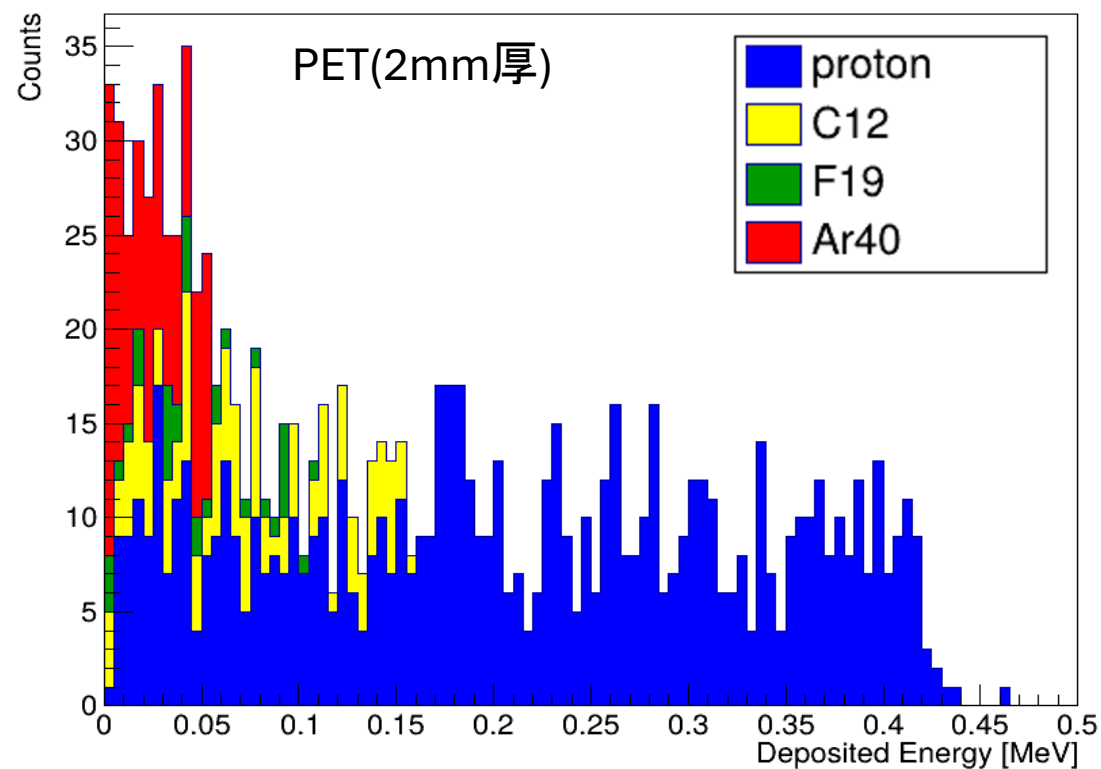
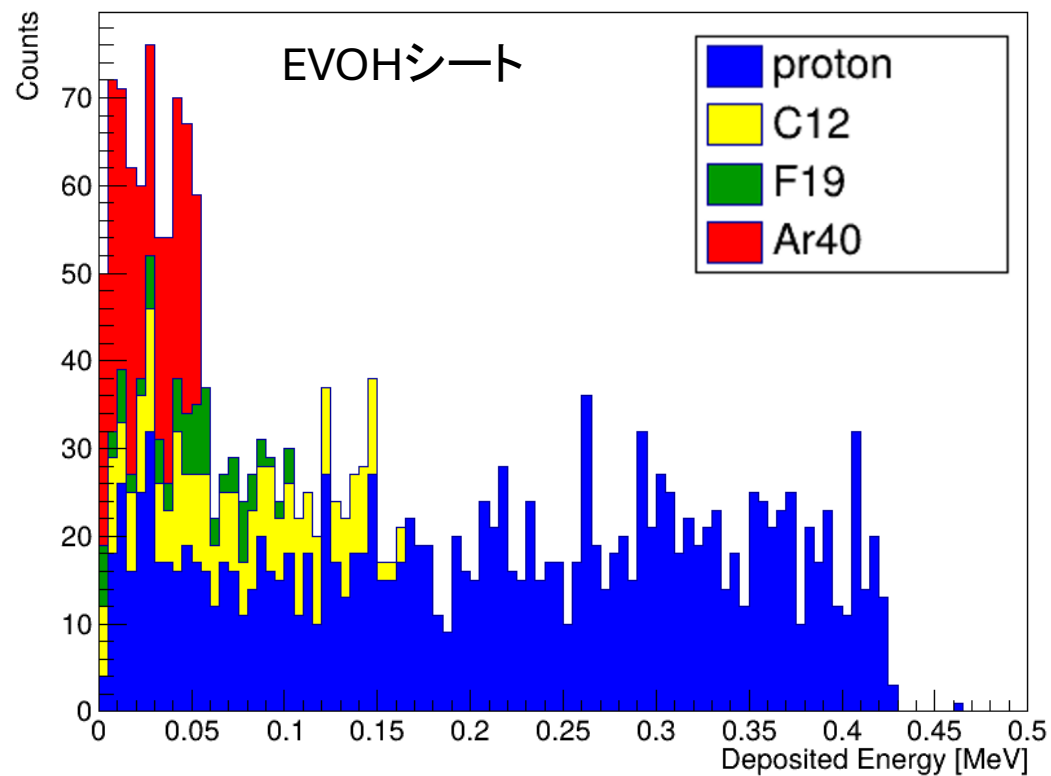
観測事象数の増加

中性子照射時の粒子種別反跳エネルギー



観測事象数の増加

中性子照射時の粒子種別反跳エネルギー



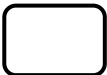
Sensitivityの見積もり

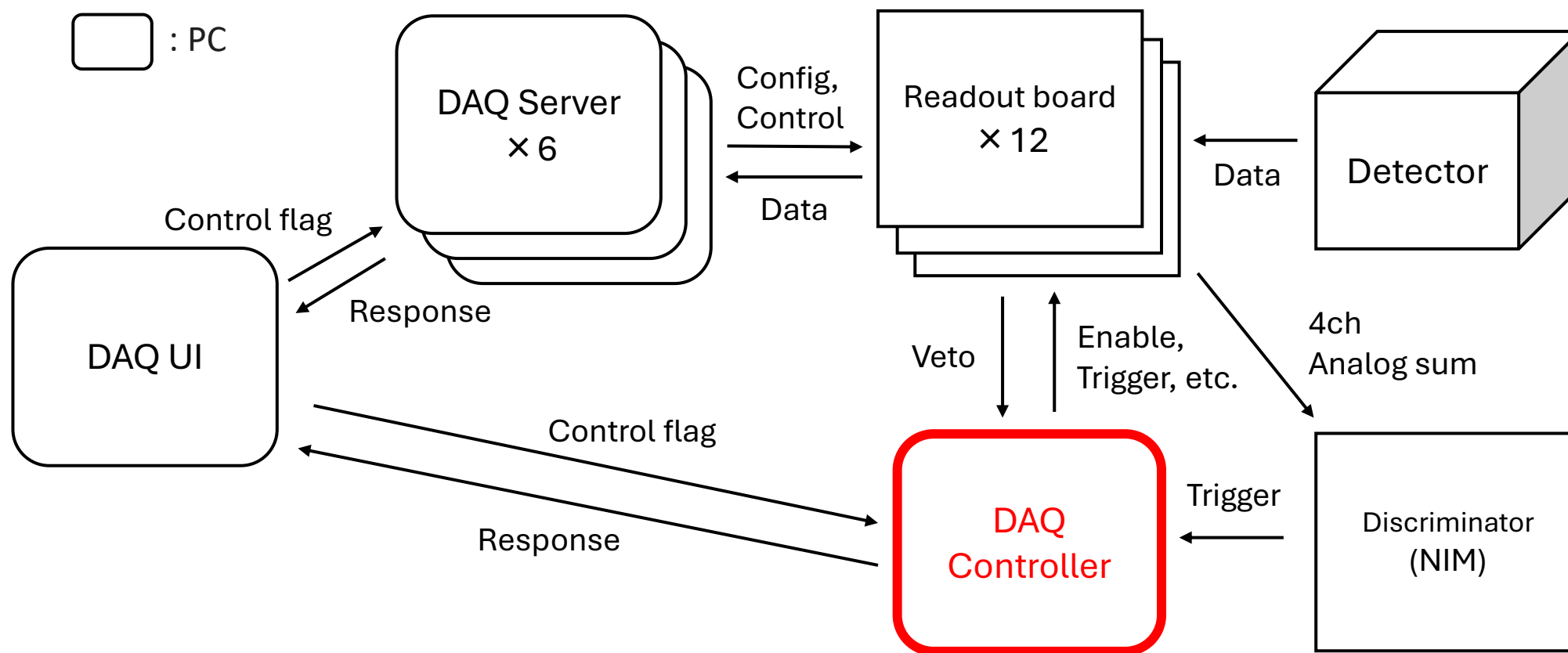
- 前回ビーム実験で得たAr反跳数を1.37倍
 - チェンバー改良
- 分岐比をかけてMigdalイベント数を算出
 - Migdal効果の分岐比 7.2×10^{-5}
 - Migdal効果のうち特性X線を出す確率0.14
- カットを通過するBG事象数を 10^{-3} 倍
 - コリメータ改良
- Sensitivityを $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ で計算
 - Live timeと各事象数は比例すると仮定
 - 3σ :9時間、 5σ :25時間のReal timeが必要

	前回ビーム実験
Real time(sec)	9747
Live time(sec)	1105
観測されるAr反跳数	7.9×10^4
予測されるMigdalイベント数 (BR: 1.0×10^{-5})	0.79
全てのカットを通過した BG事象数	1058

DAQシステム

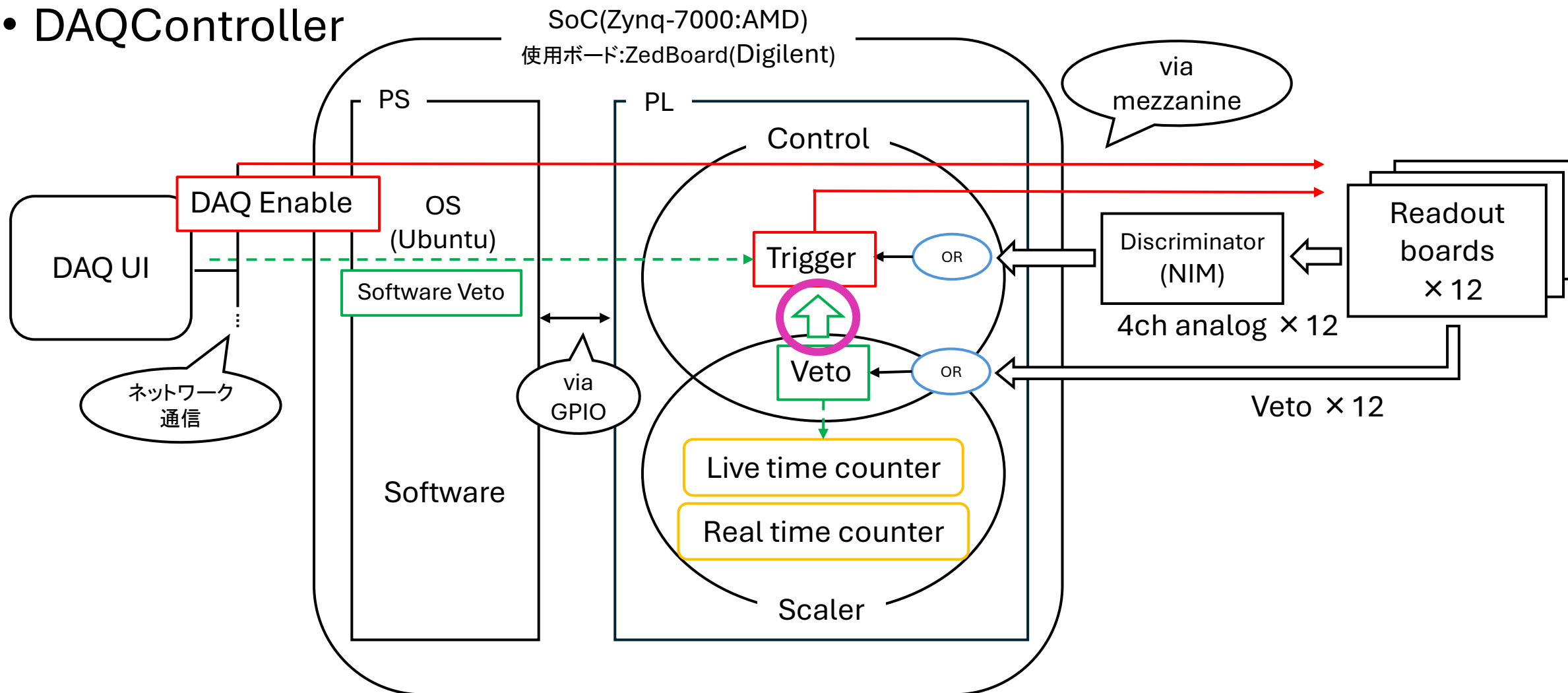
• DAQシステム概念図

Legend  : readout electronics
 : PC



DAQシステム

- DAQController



DAQシステム

- Dead time

