

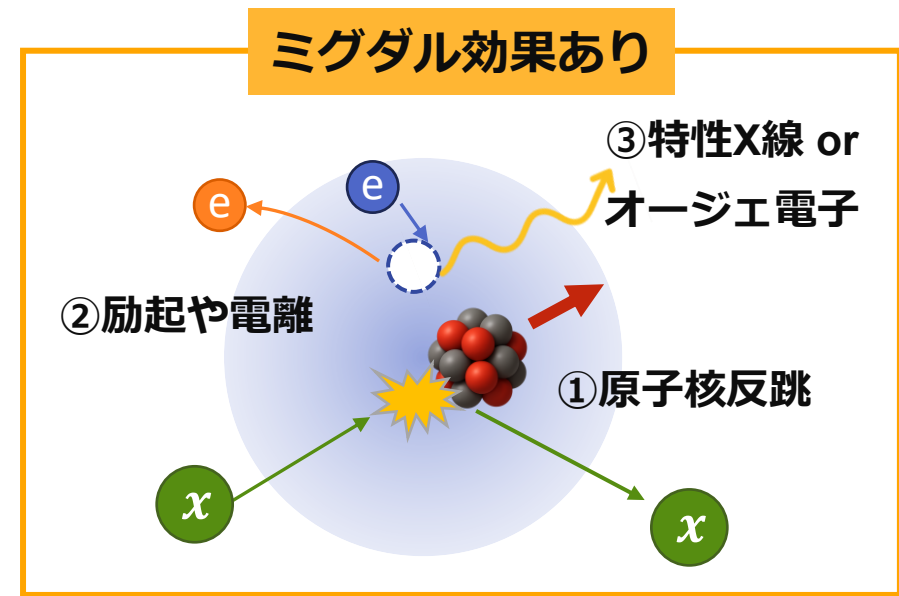
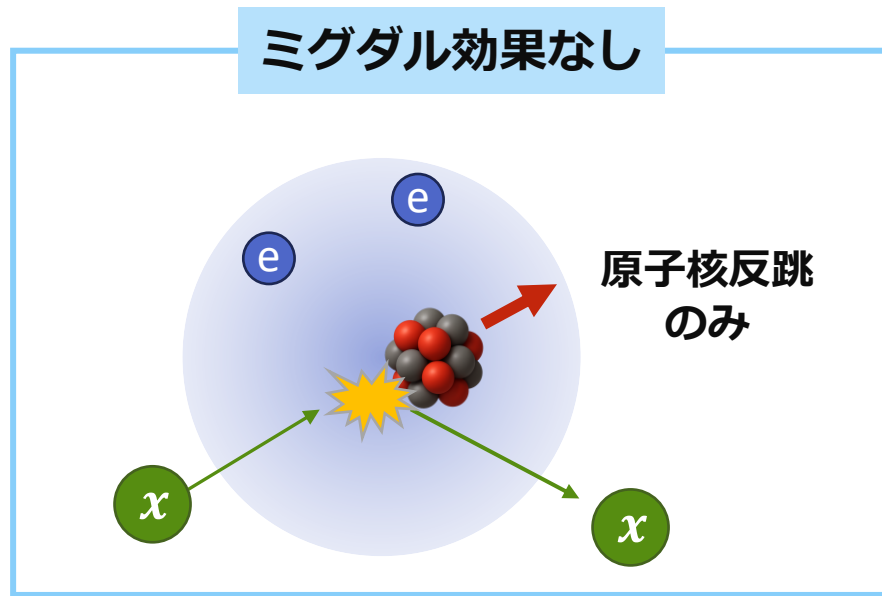


# 高圧XeガスTPCを用いた ミグダル効果探索の初期解析結果

東北大理，神戸大理<sup>A</sup>，東北大RCNS<sup>B</sup>

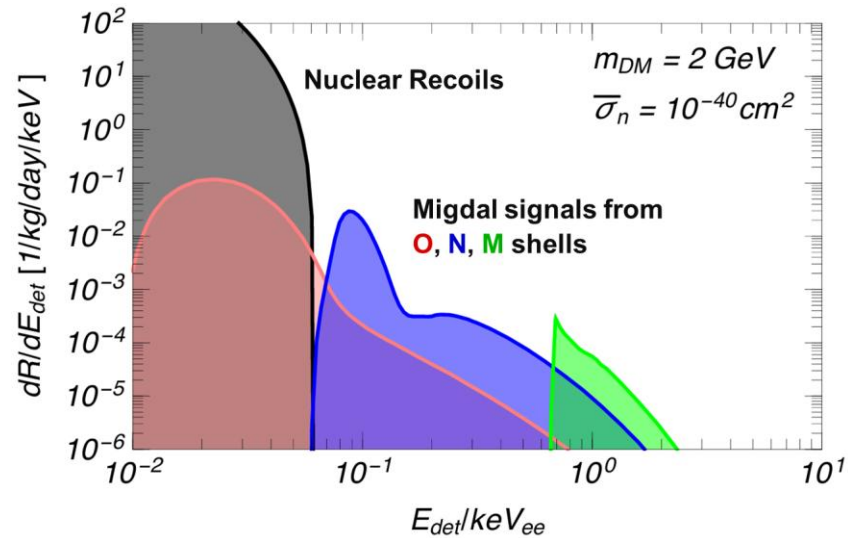
中野愛弓，中村輝石，身内賢太郎<sup>A</sup>，東野聡<sup>A</sup>

鈴木啓司<sup>A</sup>，西田汐里<sup>A</sup>，細川佳志<sup>B</sup>



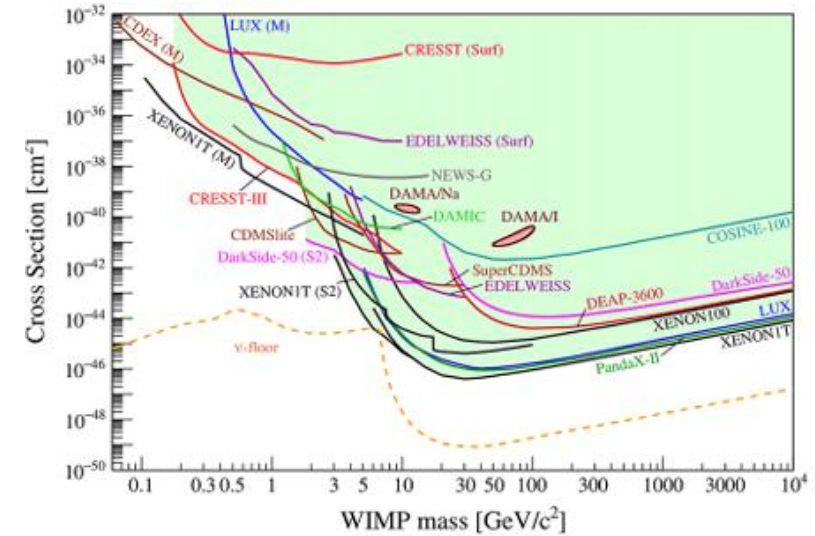
- ✓ 原子核の運動に伴い、極稀に電子の電離や励起が起こる  
→ Xe原子核の場合、原子核反跳 $\sim 10^5$ に対して1回
- ✓ 1939年に A.B.Migdalにより提唱
- ✓  $\alpha$ 崩壊や $\beta$ 崩壊に伴うもので観測済み
- ✓ 暗黒物質の直接探索において実効的な感度を増加させるとして期待

## ミグダル効果を仮定した反跳エネルギー



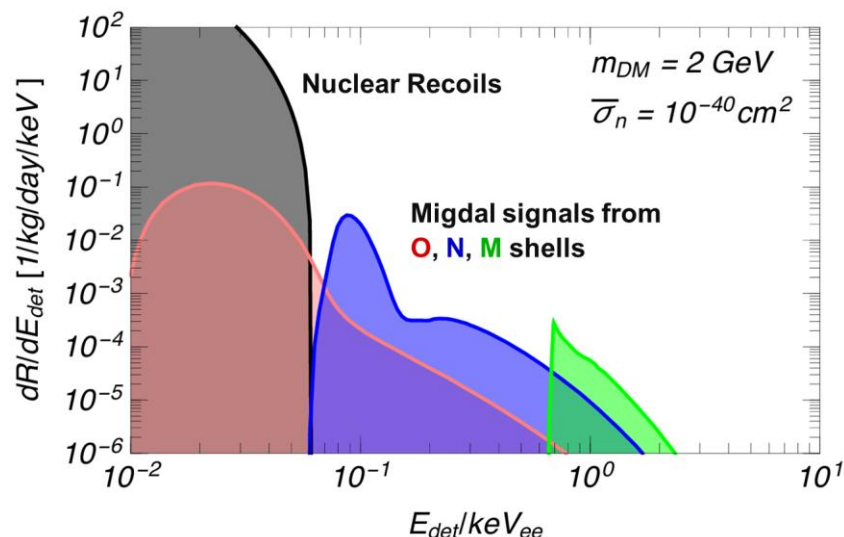
JHEP 03 (2018) 194.

## 直接探索による暗黒物質の制限



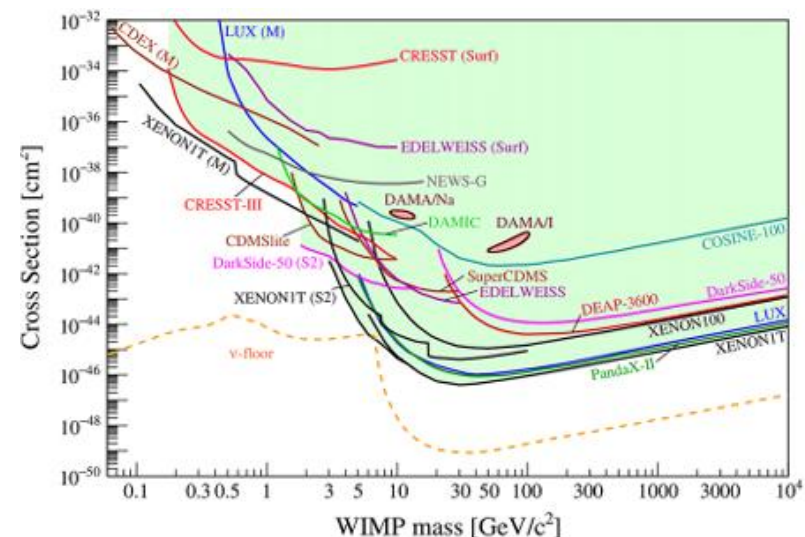
Rep. Prog. Phys. **85** (2022).

## ミグダル効果を仮定した反跳エネルギー



JHEP 03 (2018) 194.

## 直接探索による暗黒物質の制限



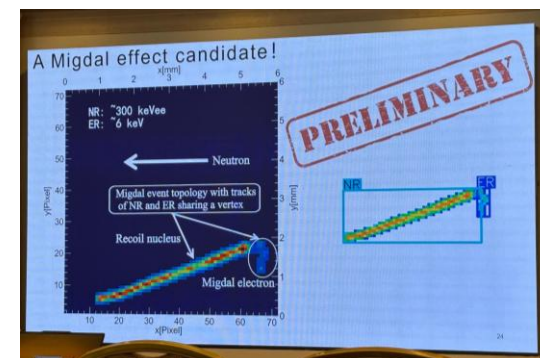
Rep. Prog. Phys. **85** (2022).

## 現行のミグダル効果探索

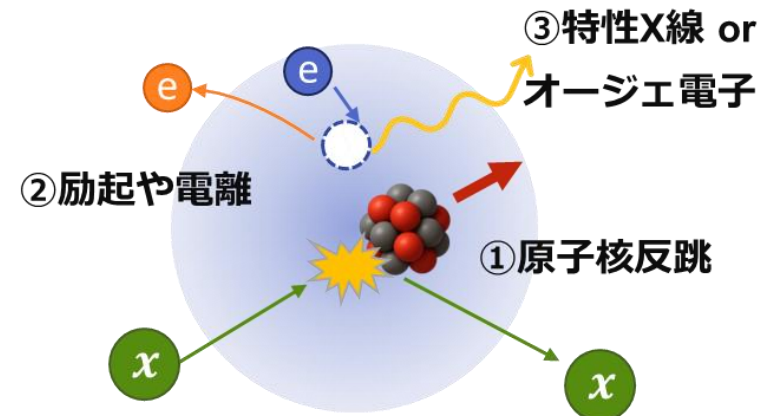
低圧CF<sub>4</sub>ガスを用いた探索：Astroparticle Physics 151, 102853 (2023).

液体Xeを用いた探索：PHYSICAL REVIEW D 109, L051101 (2024).

Heガスを用いた探索：TAUP2025でミグダルイベント候補を観測したと報告



神戸大：Arガス（1気圧），入射中性子 565 keV  
東北大：Xeガス（8気圧），入射中性子 10 MeV



a few meters

Pressure vessel

$^{136}\text{Xe} \sim 1 \text{ ton}$

PMTs

ELCC

Ionized electrons

Scintillation

$E$

Cathode electrode:  $\sim -200 \text{ kV}$

Field shaper

Anode electrode:  $\sim -15 \text{ kV}$

GND mesh:  $0 \text{ V}$

SPM

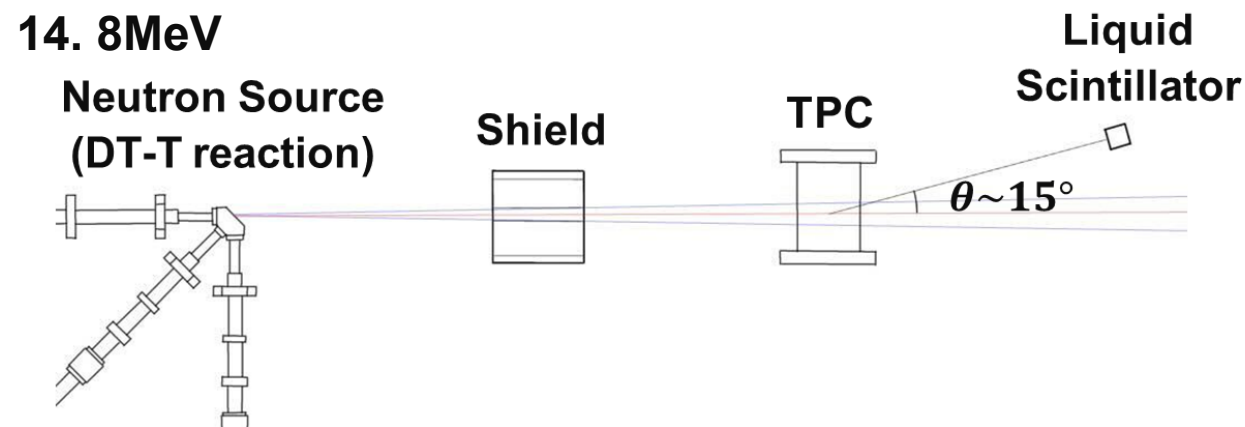
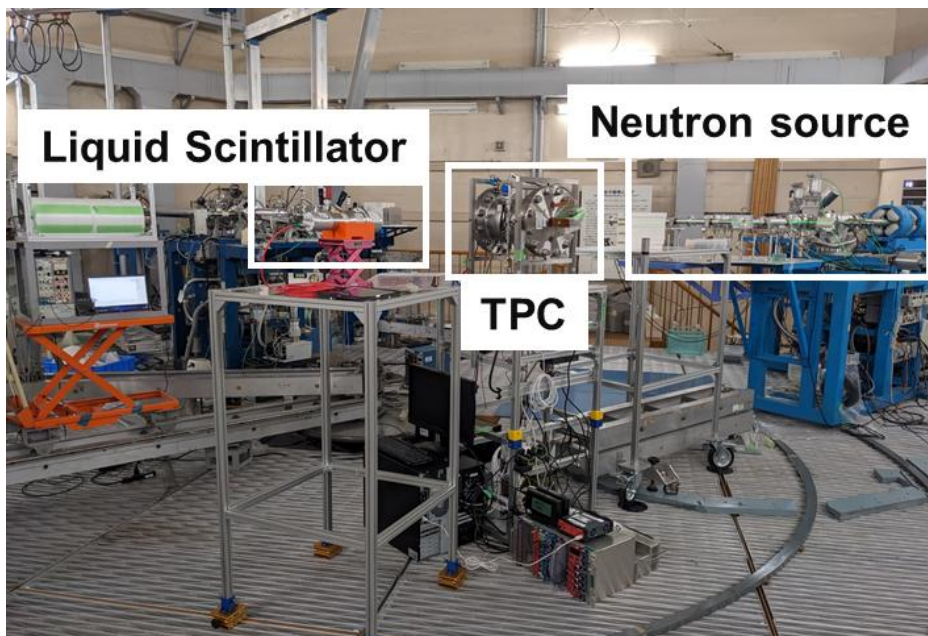
PTFE

$E$

- ✓ AXEL実験 ( $0\nu\beta\beta$ 探索) のプロトタイプ検出器
- ✓ ドリフト電子をEL増幅して検出
- ✓ 高いエネルギー分解能
- ✓ イベントトポロジーを取得可能



## 前回ビーム試験でのセットアップ (2024年, AIST)



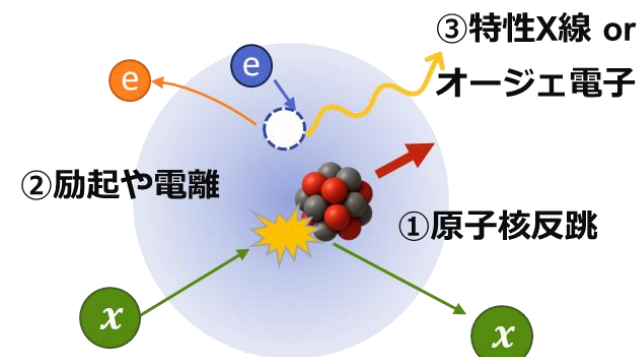
- ✓ TPCで散乱した中性子を，液体シンチレータで検出するDAQシステムが動作することを確認できた。
- ✓ ミグダル効果の理論分岐比に対して $10^5$ の背景事象が存在し，事象の有無は明らかにできなかった。

**イベント数の少なさ，背景事象の多さが問題**

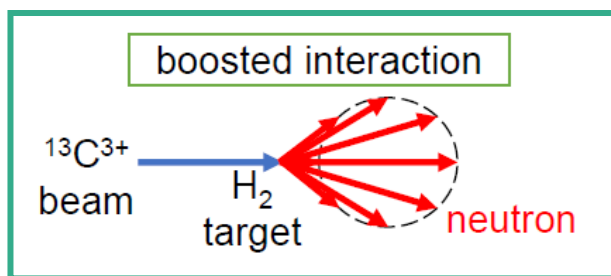
## 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果の実験的観測に向けて

1. バックグラウンド
2. クエンチング値
3. 原子核反跳エネルギー

の測定を目指す

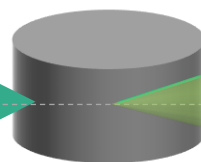


### ①中性子



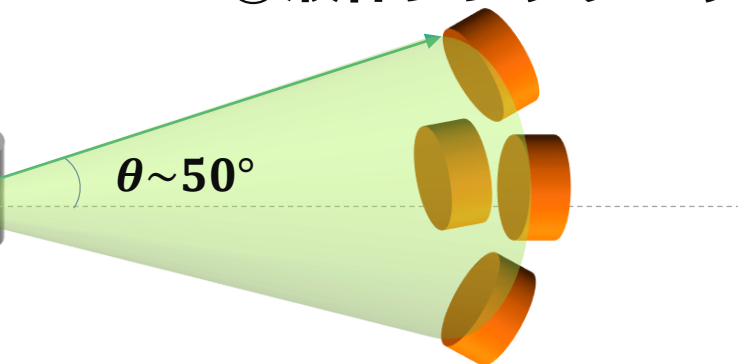
- ・エネルギー幅が狭い
- ・ビームの広がりがない

### ②TPC



- ・分解能が良い
- ・標的が多い（高気圧）

### ③液体シンチレータ（LS）

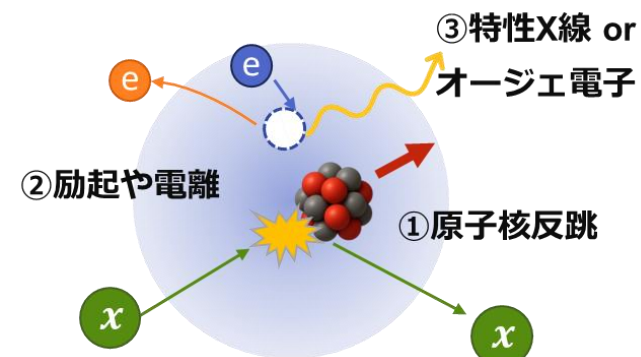


- ・n / γ 分別 → B.G除去

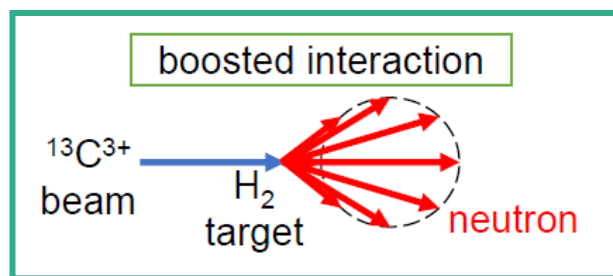
## 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果の実験的観測に向けて

1. バックグラウンド
2. クエンチング値
3. 原子核反跳エネルギー

の測定を目指す



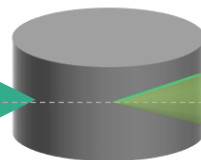
### ①中性子



- ・エネルギー幅が狭い
- ・ビームの広がりがない

中性子シールドの検討

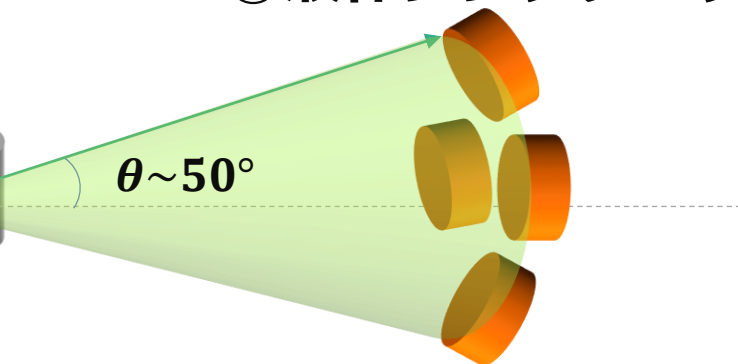
### ②TPC



- ・分解能が良い
- ・標的が多い（高気圧）

フィールドケージの改良

### ③液体シンチレータ (LS)



- ・n / γ 分別 → B.G除去



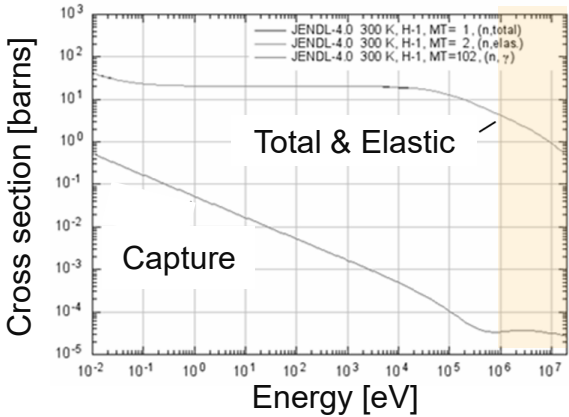
各素材の中性子遮蔽力を，Geant4シミュレーションを用いて評価

✓ 高エネルギー中性子減速体

	密度 [g / cm <sup>3</sup> ]
Fe	7.874
Pb	11.35

核破碎を用いる

<sup>1</sup>Hと中性子の反応断面積 [1]



✓ 低エネルギー中性子吸収体

	密度 [g / cm <sup>3</sup> ]	混合割合
Polyethylene (PE)	0.94	-
LiF-Polyethylene (LiFPE)	1.39	LiF 50 wt%
B-Polyethylene (BPE)	1.06	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20 wt%
Borated Water (BWATER)	1.05	B(OH) <sub>3</sub> 0.05 g/cm <sup>3</sup>
Boron-loaded rubber (BLR)	1.4	Silicone rubber with 50 wt% B <sub>4</sub> C

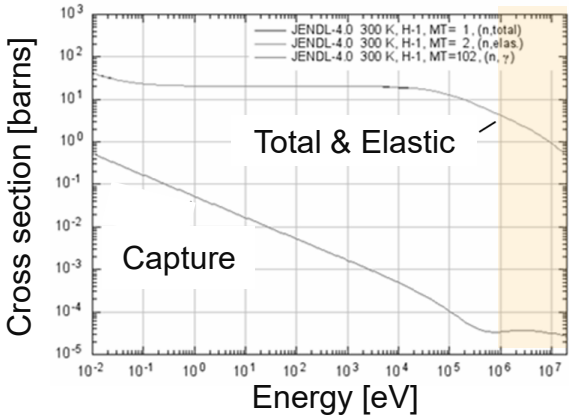
各素材の中性子遮蔽力を，Geant4シミュレーションを用いて評価

✓ 高エネルギー中性子減速体

	密度 [g / cm <sup>3</sup> ]
Fe	7.874
Pb	11.35

核破碎を用いる

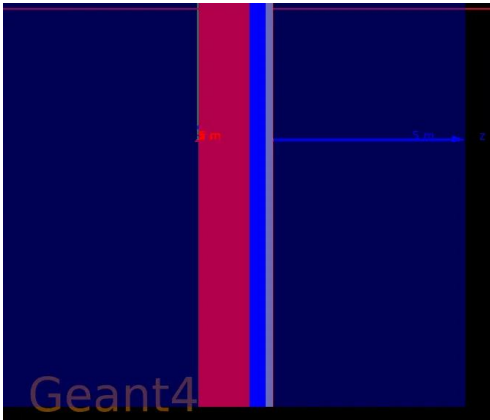
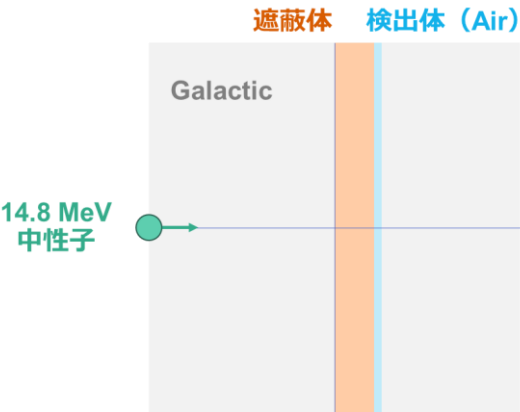
<sup>1</sup>Hと中性子の反応断面積 [1]



✓ 低エネルギー中性子吸収体

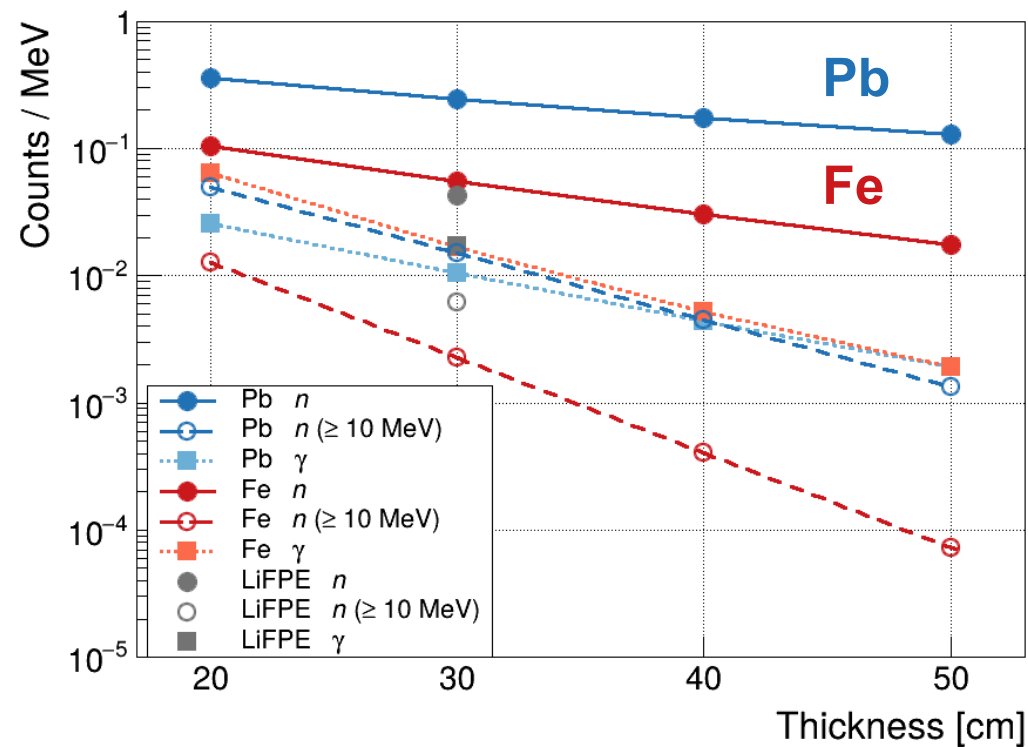
	密度 [g / cm <sup>3</sup> ]	混合割合
Polyethylene (PE)	0.94	-
LiF-Polyethylene (LiFPE)	1.39	LiF 50 wt%
B-Polyethylene (BPE)	1.06	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20 wt%
Borated Water (BWATER)	1.05	B(OH) <sub>3</sub> 0.05 g/cm <sup>3</sup>
Boron-loaded rubber (BLR)	1.4	Silicone rubber with 50 wt% B <sub>4</sub> C

シミュレーションの様子

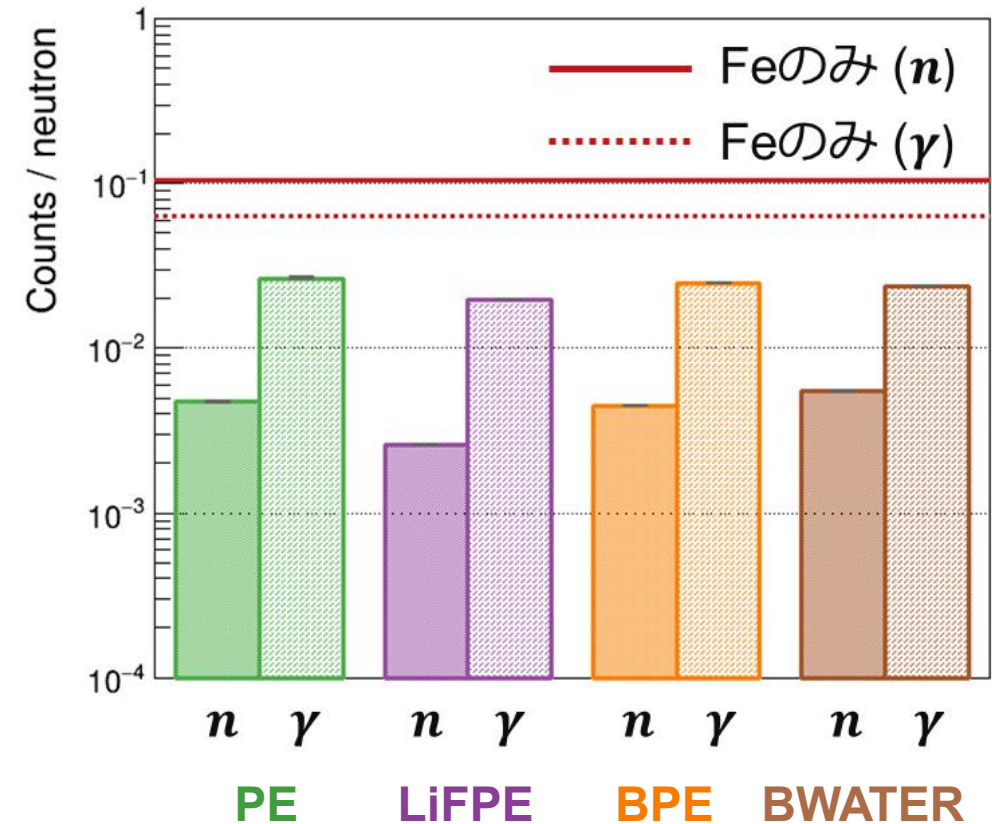


## 中性子遮蔽に用いる素材の選択

## 高エネルギー中性子減速体

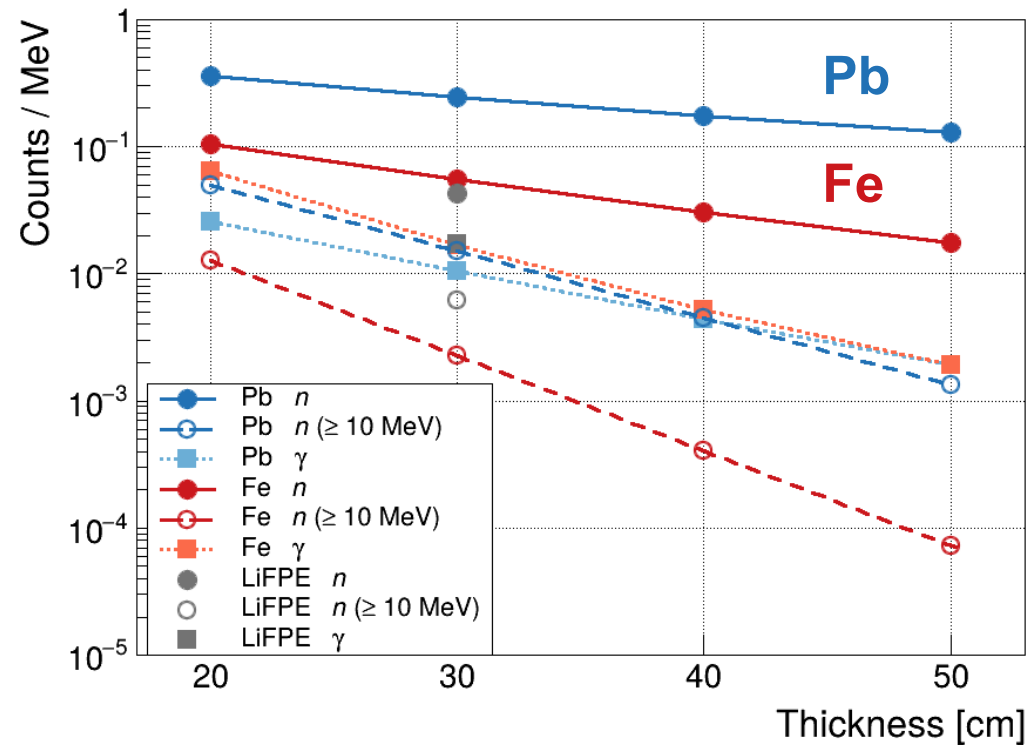


## 低エネルギー中性子吸収体



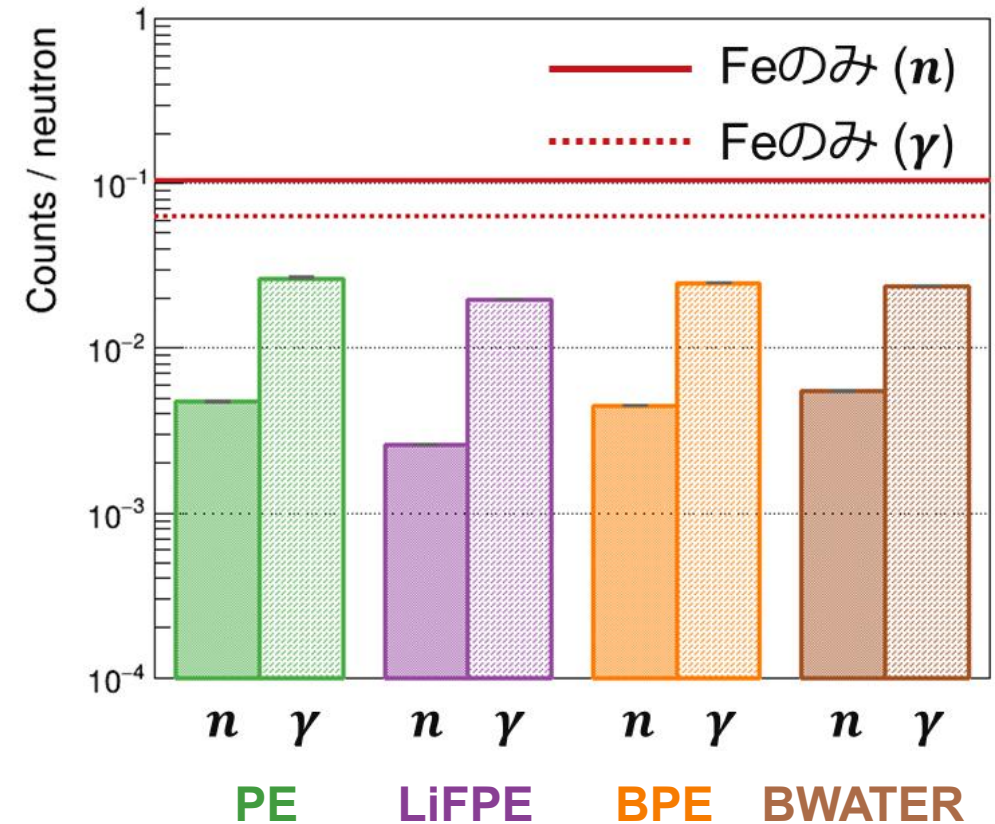
## 中性子遮蔽に用いる素材の選択

## 高エネルギー中性子減速体



Feを選択

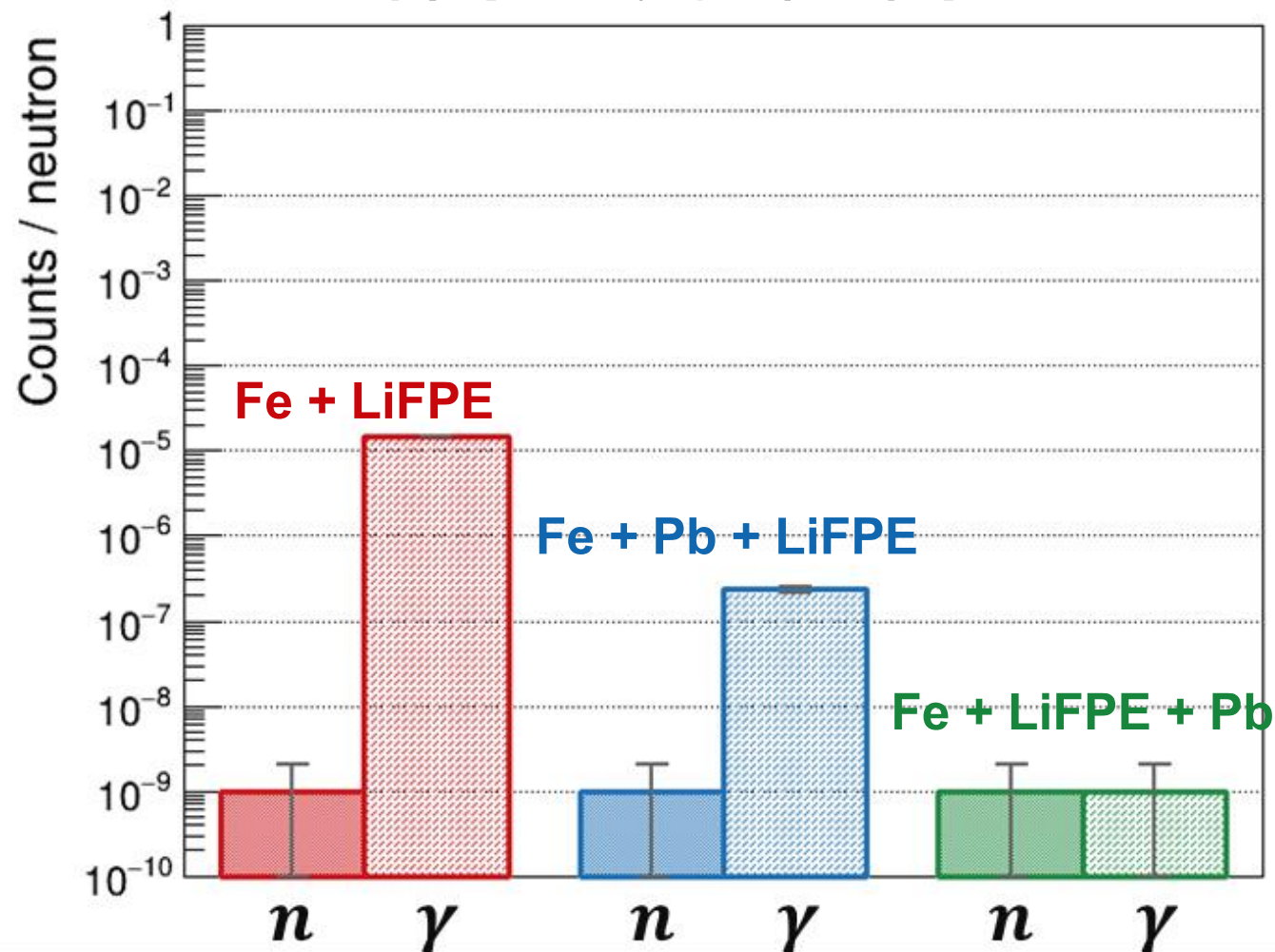
## 低エネルギー中性子吸収体



LiFPEを選択

前回試験からの要求値 $4e-7$ を満たす材料として, Fe 100 cm, LiFPE 30 cm, Pb 20 cmを用いる

入射中性子に対する各検出粒子の割合



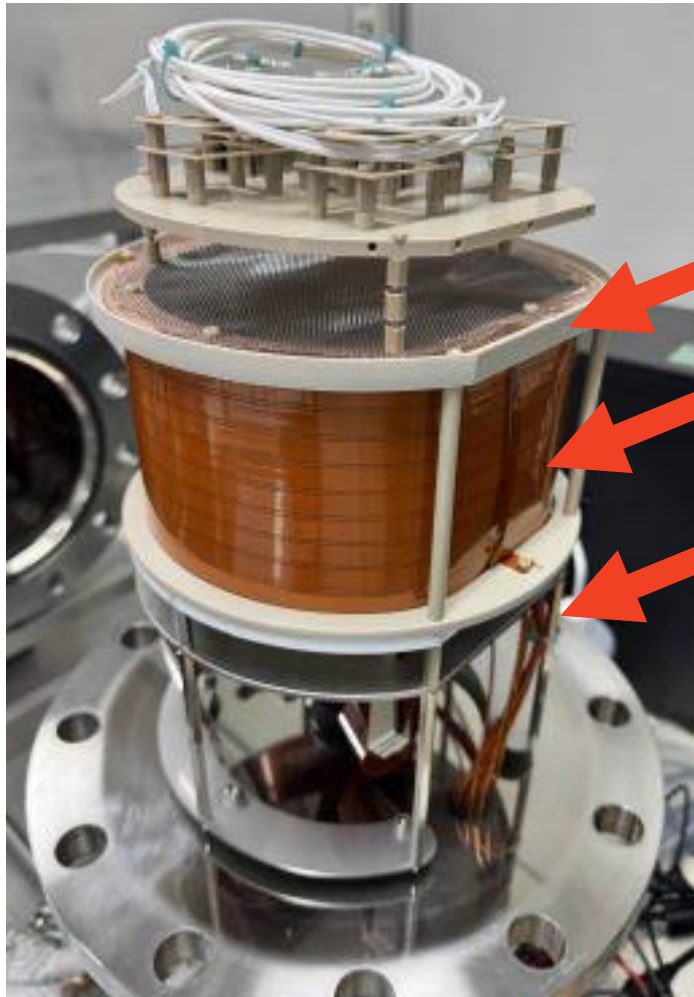
✓ Fe + LiFPEの後ろにPbを置くことで $\gamma$ 線除去

✓ LiFPE → Pbの順で置く方が, $\gamma$ を除去できる

✓ 要求値 $4e-7$ に対して,  $1e-9$ の十分な遮蔽力



2024年度ビーム試験 → 目標電圧12.5 kVに対して, 8 kVで放電 (Xe 5気圧)



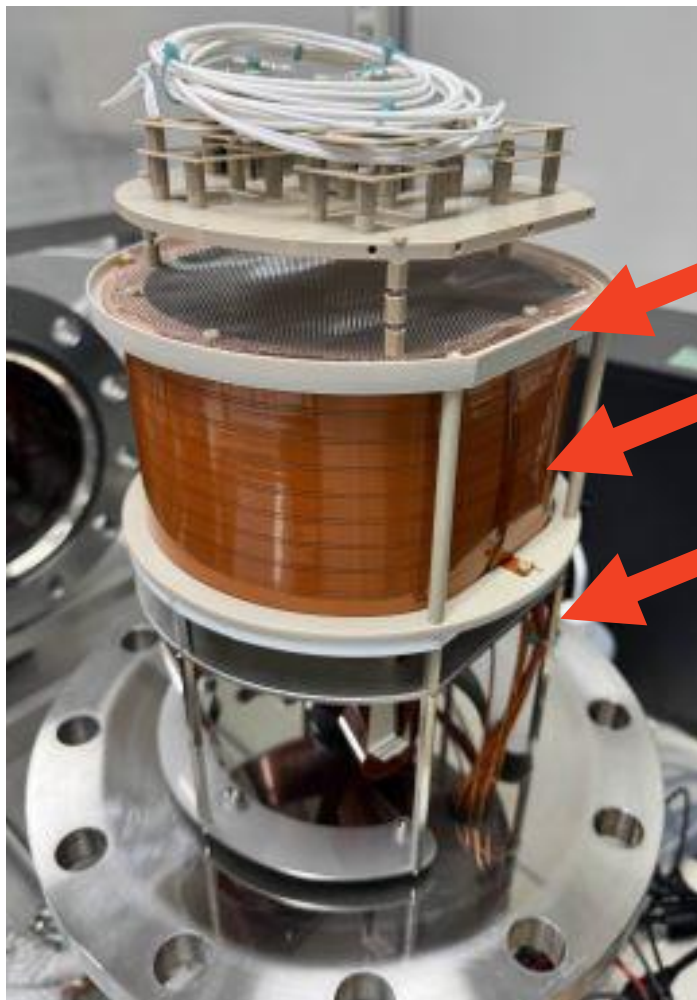
① Catode cage

② FPC

③ 支柱



2024年度ビーム試験 → 目標電圧12.5 kVに対して, 8 kVで放電 (Xe 5気圧)



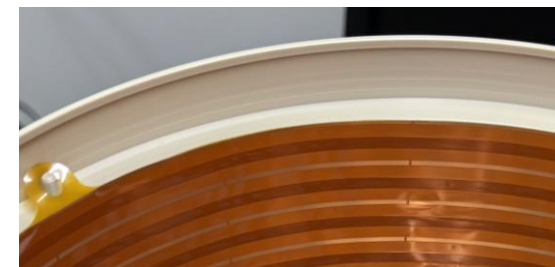
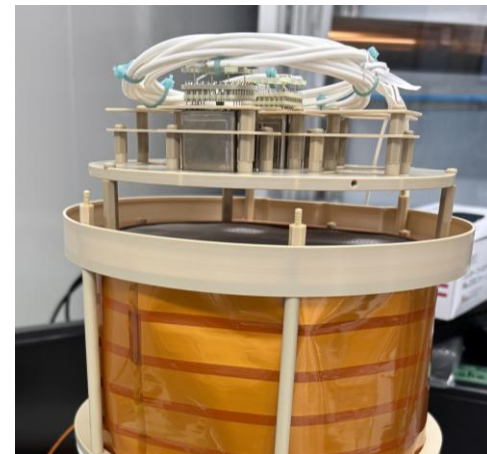
① Catode cage

② FPC

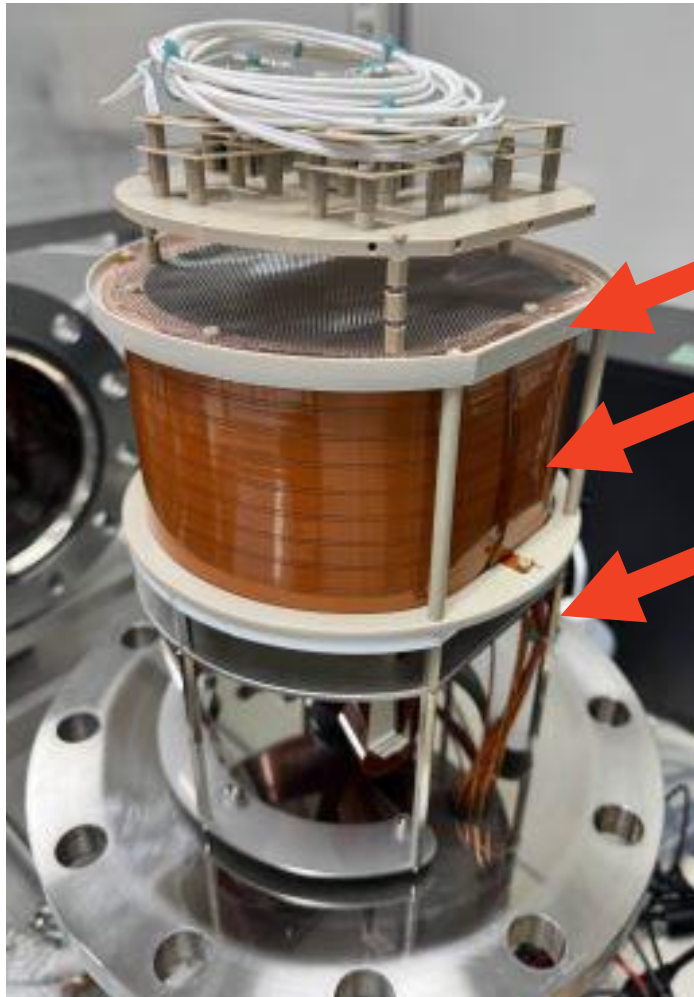
③ 支柱

① Catode cage

- ・ 高さ方向の長さを10 → 19 mmに伸ばす
- ・ 厚さ1 mm, 長さ2 mmの返しを付ける



2024年度ビーム試験 → 目標電圧12.5 kVに対して, 8 kVで放電 (Xe 5気圧)



① Cathode cage

② FPC

③ 支柱

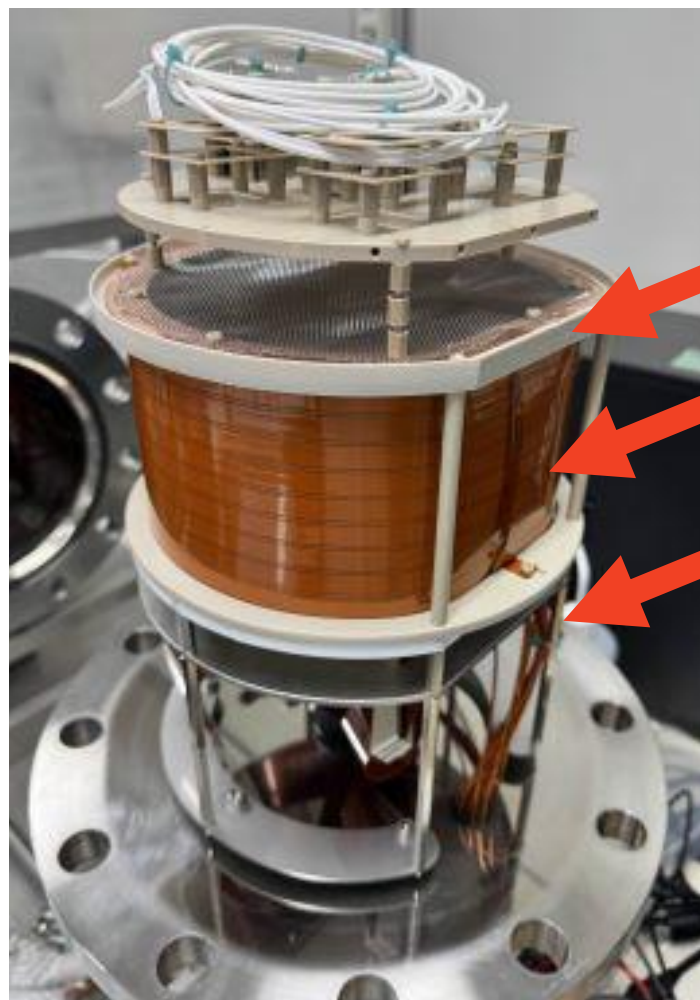
## ② FPC

- ・ 抵抗を  $100\text{ M}\Omega \times 20\text{段}$  →  $200\text{ M}\Omega \times 10\text{段}$  に変更
- ・ FPCの端を絶縁体で覆う





2024年度ビーム試験 → 目標電圧12.5 kVに対して, 8 kVで放電 (Xe 5気圧)



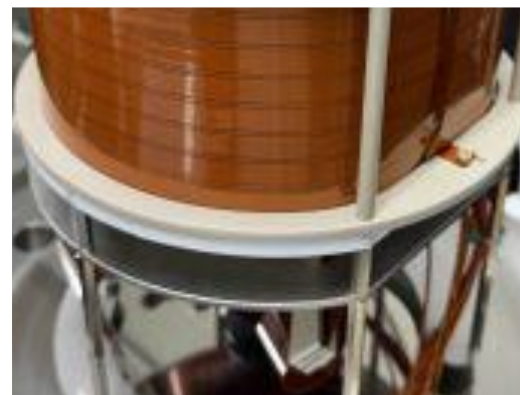
① Cathode cage

② FPC

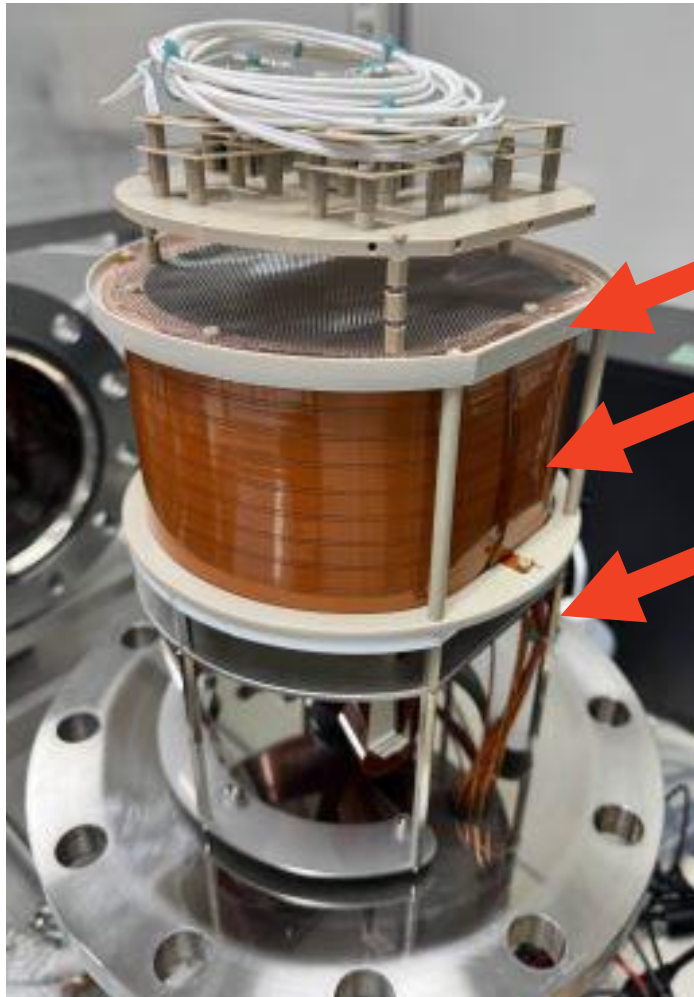
③ 支柱

③ 支柱

・ 金属 → PEEK材に変更



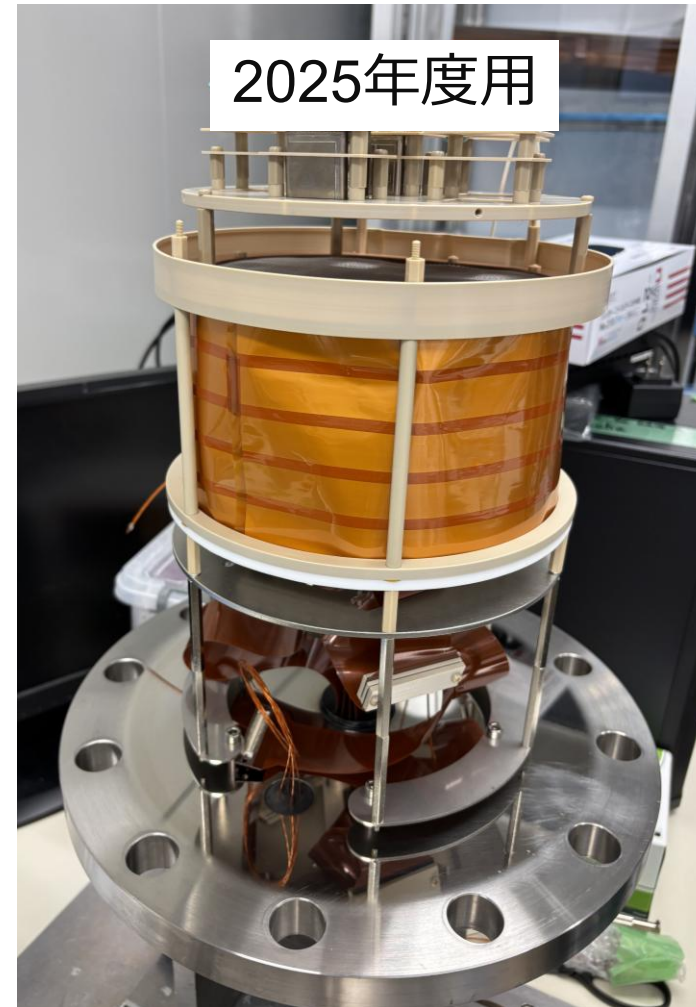
2024年度ビーム試験 → 目標電圧12.5 kVに対して, 8 kVで放電 (Xe 5気圧)



① Catode cage

② FPC

③ 支柱



大気中 → 20 kV, Xe7.5気圧中 → 12 kVが印加できた！



# 2025年ビーム試験

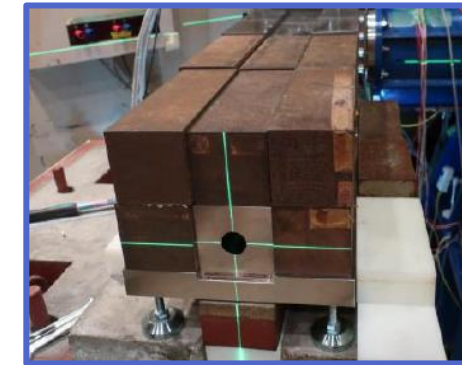
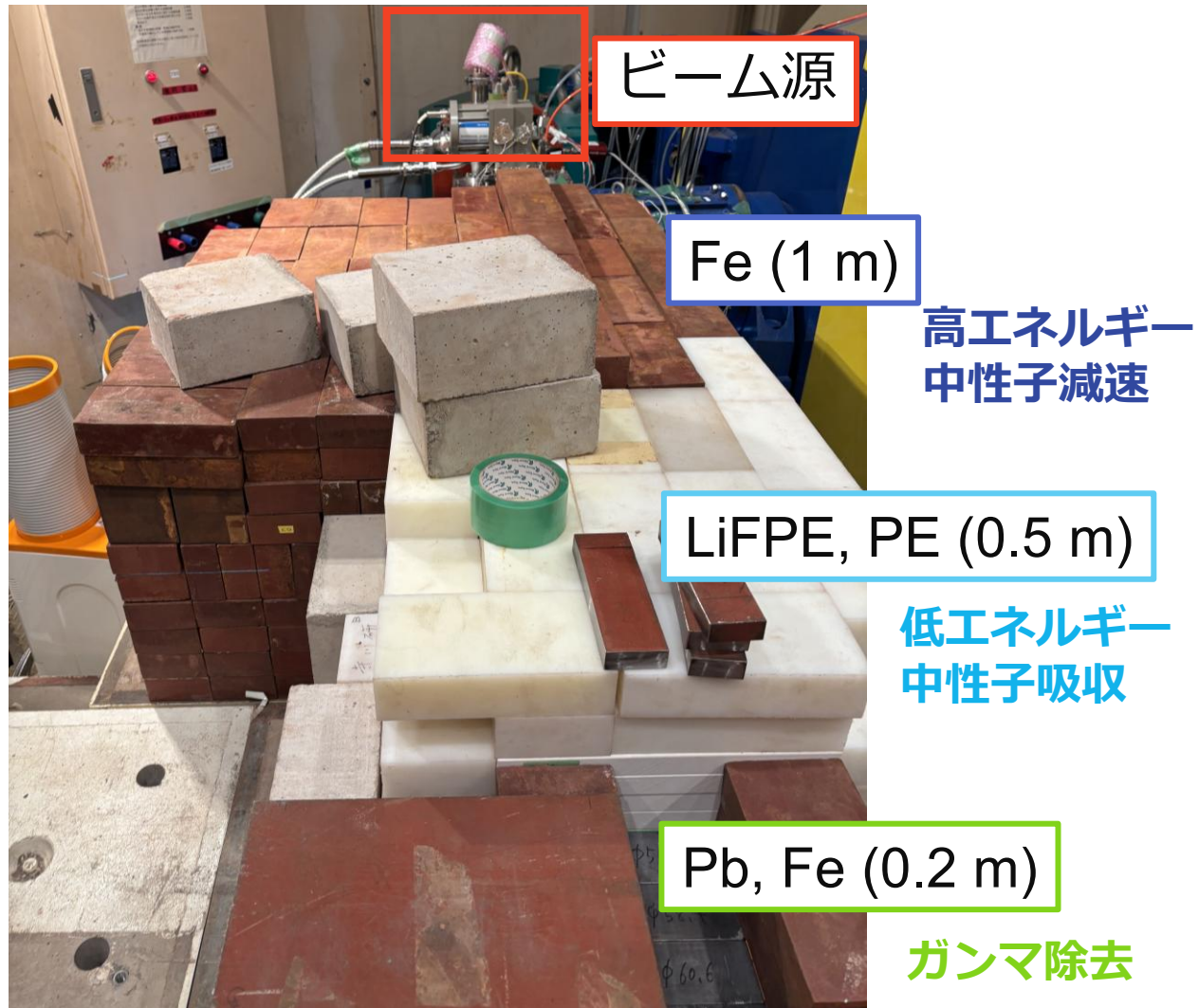
日時: 12/3 8:00 ~ 12/5 8:00

場所: 東北大RARiS



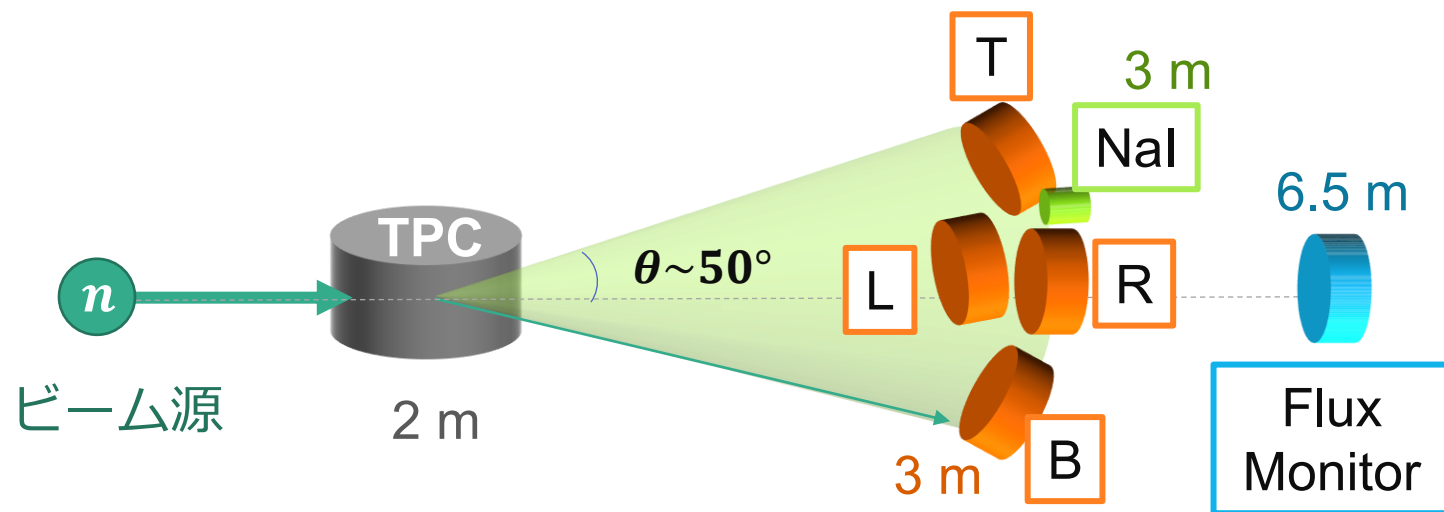
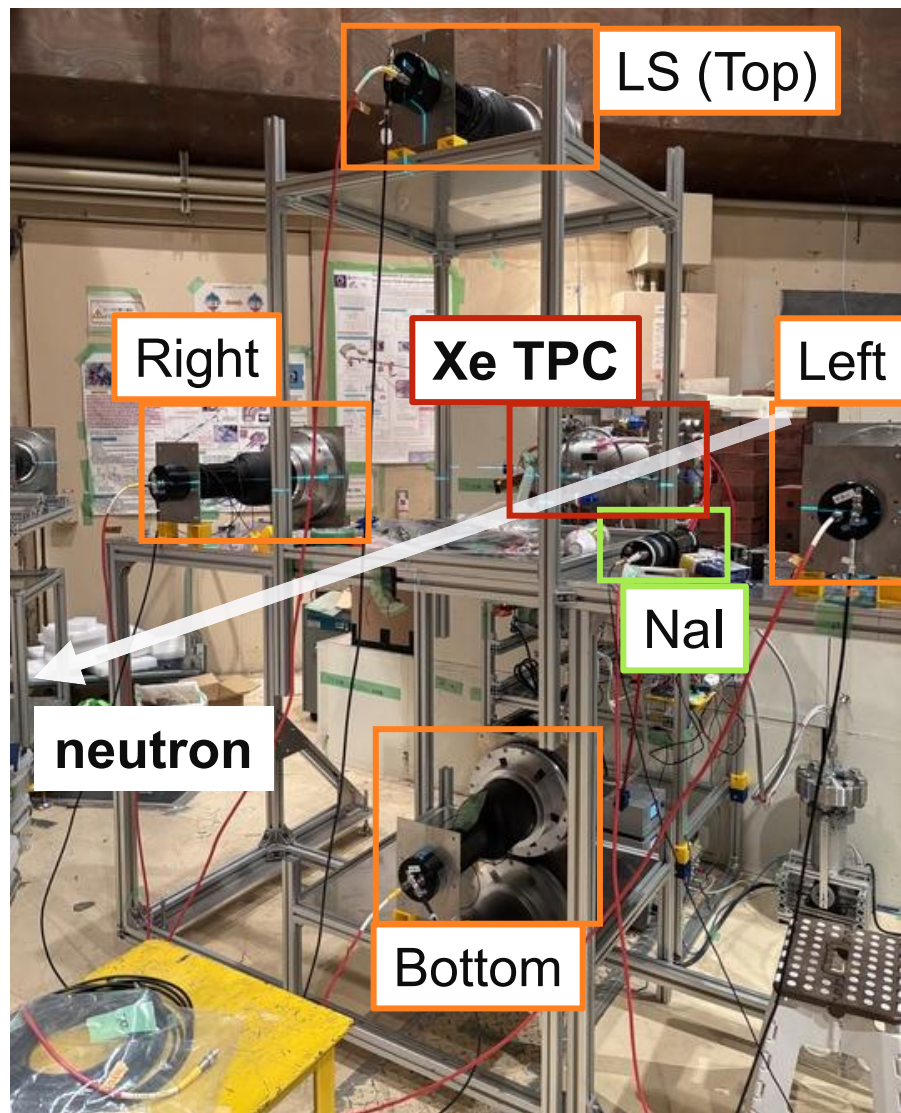


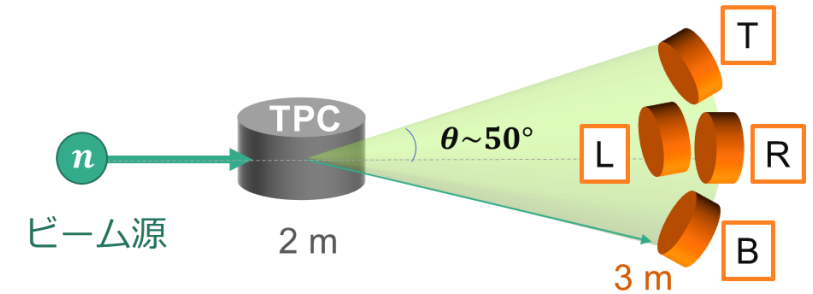
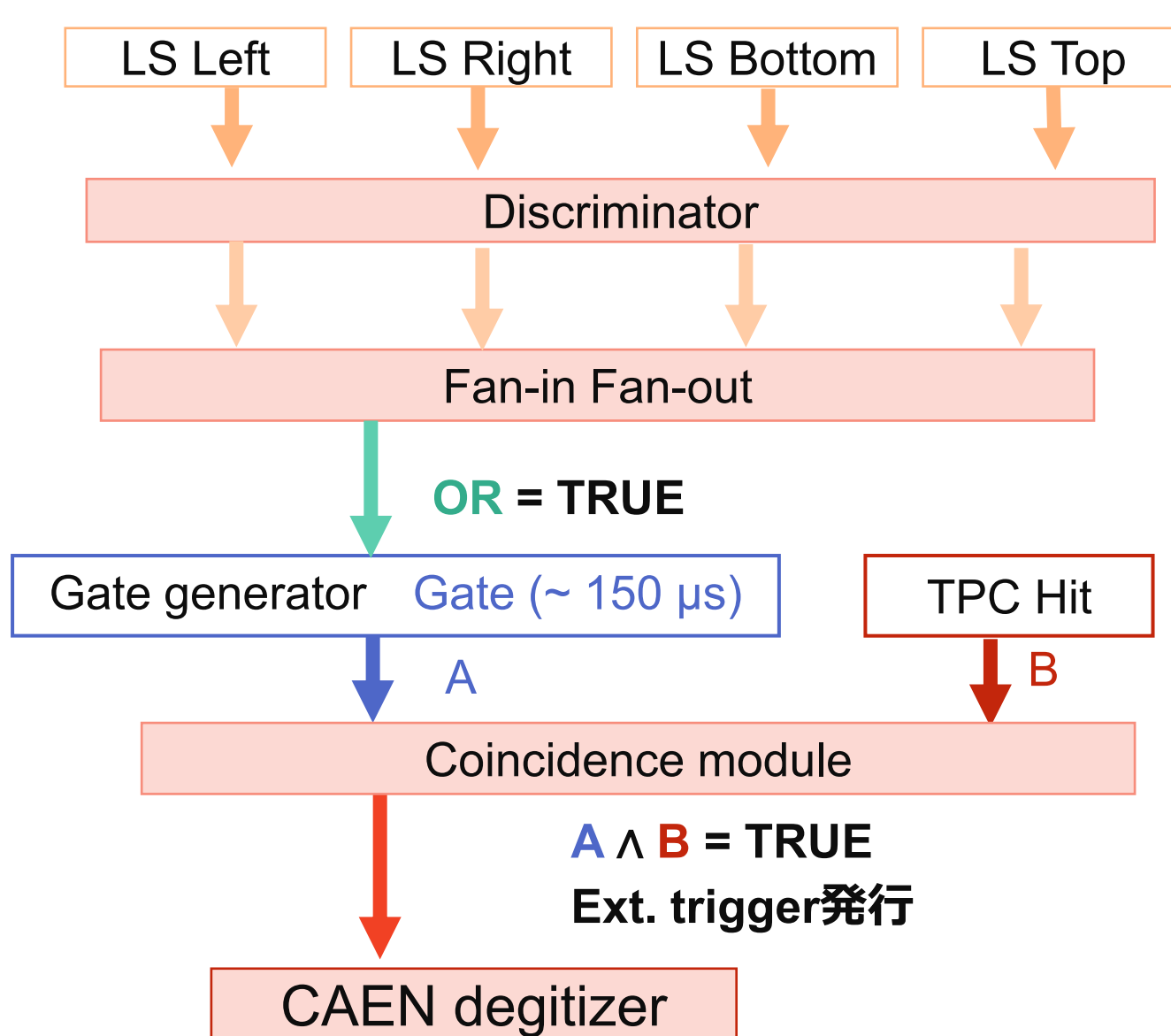
ビーム源から前方に広がる中性子を，コリメータとシールドで絞る





TPCで散乱した中性子を，液体シンチレータ（LS）で検出

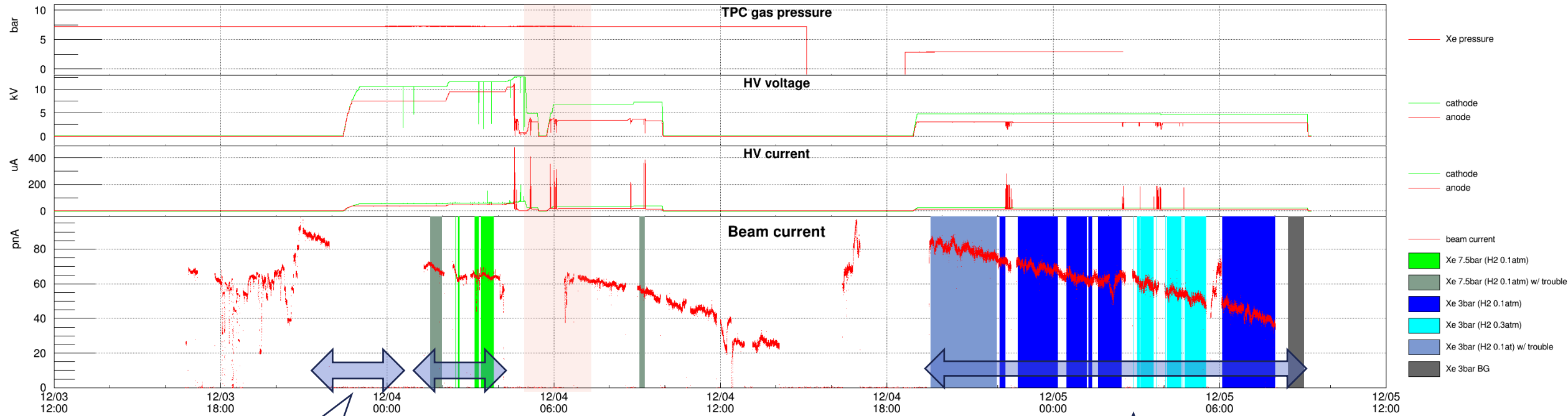




## ビーム試験の様子



Xe循環用ポンプを開発中  
(東北大 中村輝石)



LS, NaI calibration  
(AmBe, 60Co, 137Cs)

Beam data  
@7.5 bar

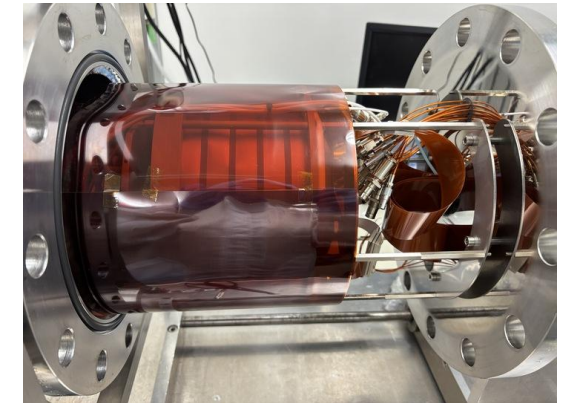
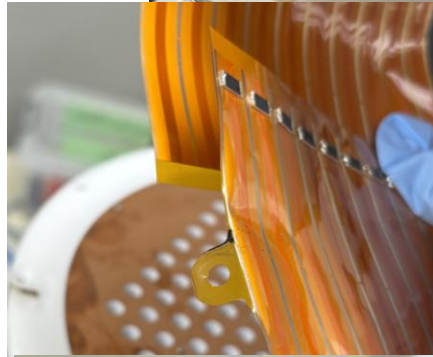
TPCガス減圧  
7.5→3 bar

Beam data  
@3 bar

Anodeで放電

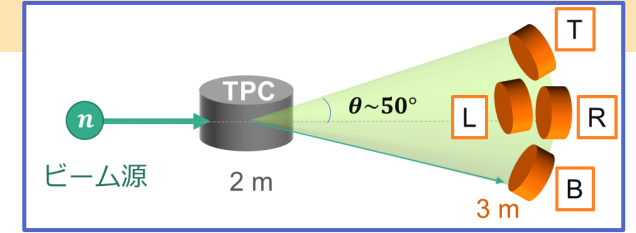


# TPC (Anode) での放電痕

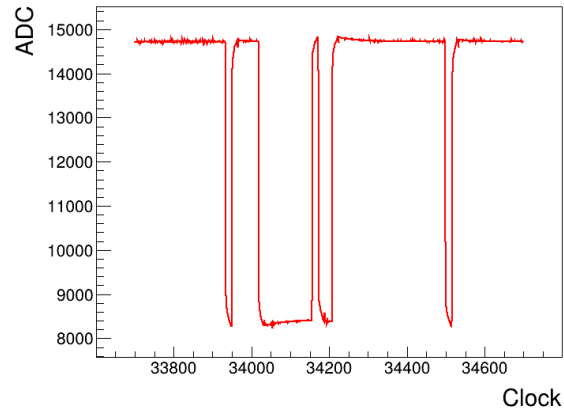


カプトンシートを長くしてみる

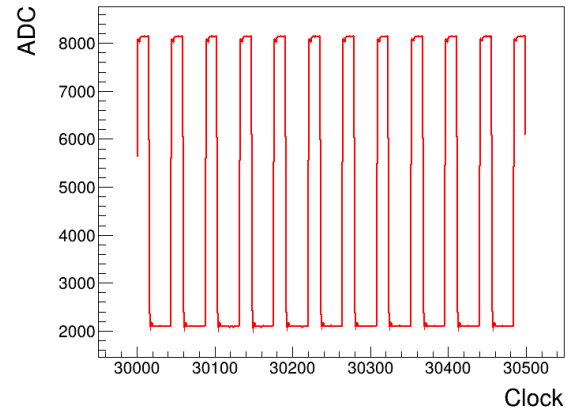
EventID, Beam pluse, PMT, LSの信号をCAEN degitizerで取得



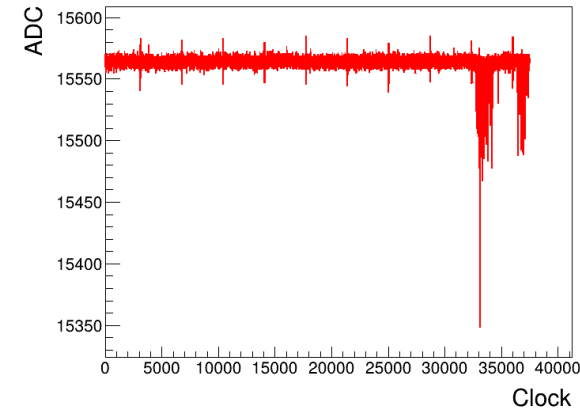
EventID



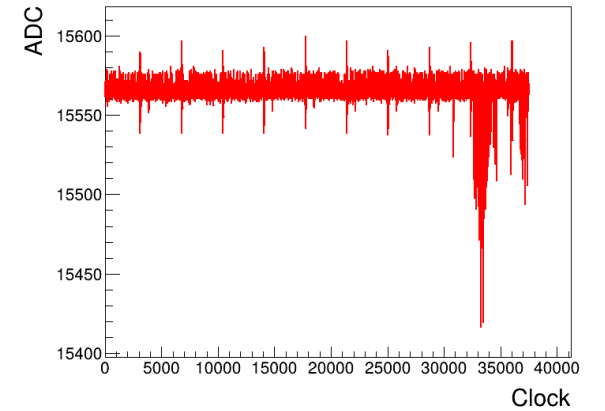
Beam pluse



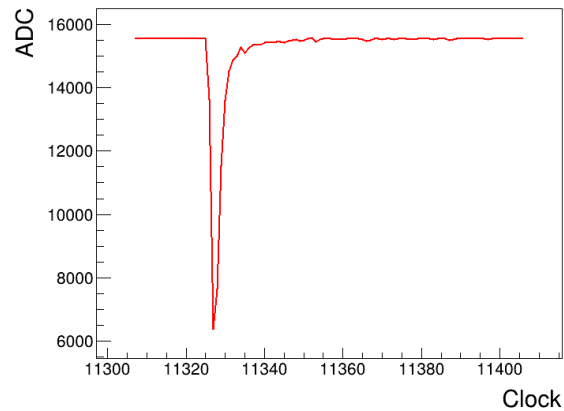
PMT 1



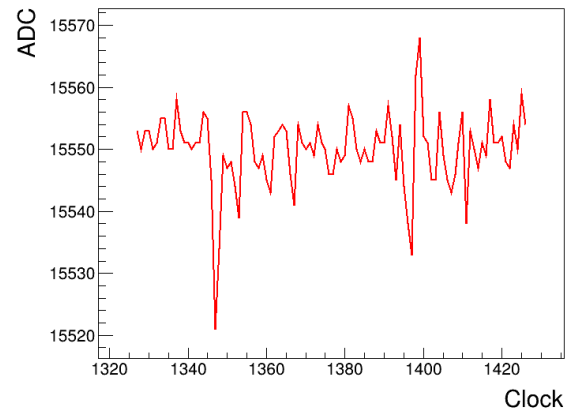
PMT 2



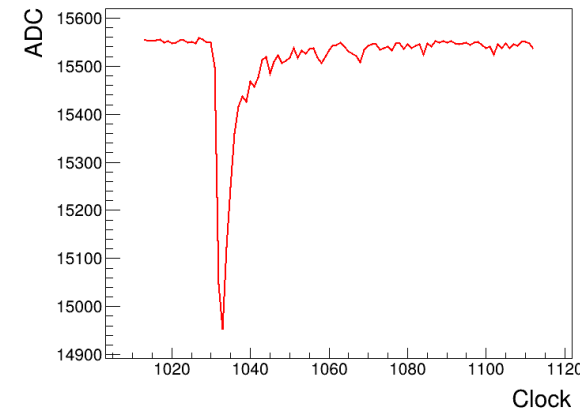
LS Left



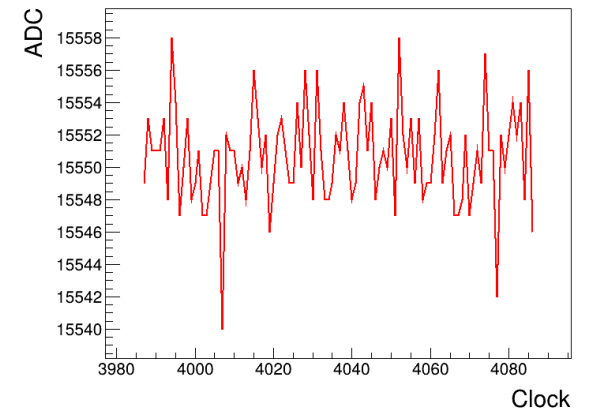
LS Right



LS Bottom

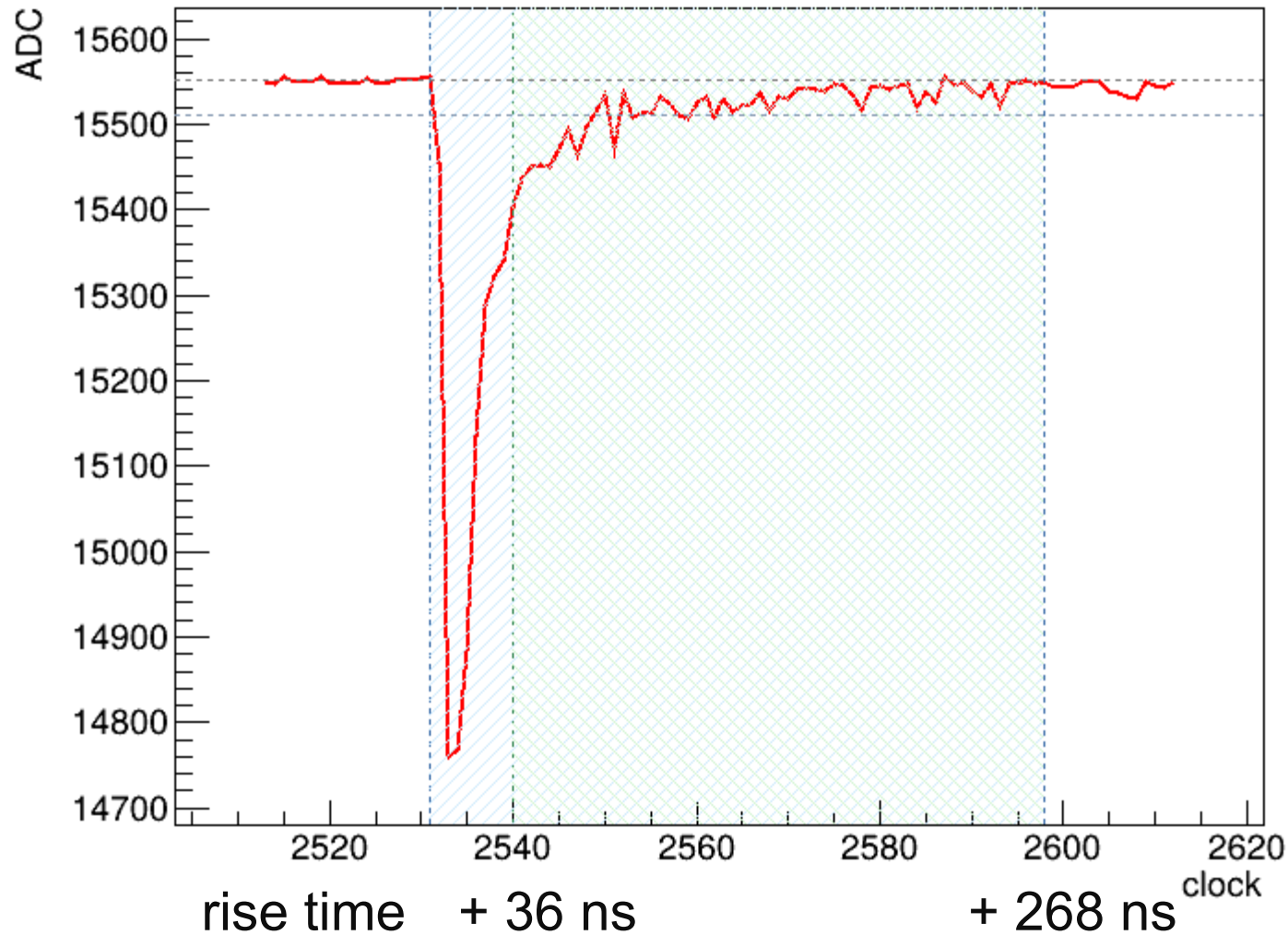


LS Top





## 各波形のSlow成分の割合を求める



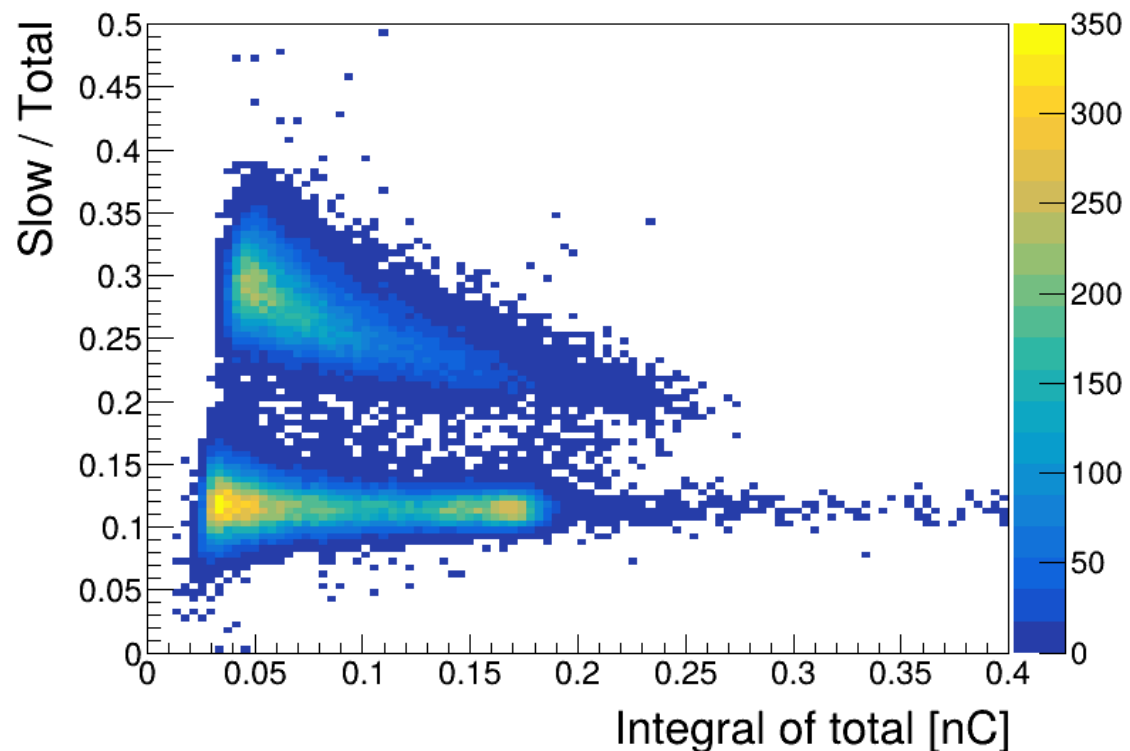
baseline  
threshold

Integral of total  
rise time  
~ rise time + 268 ns

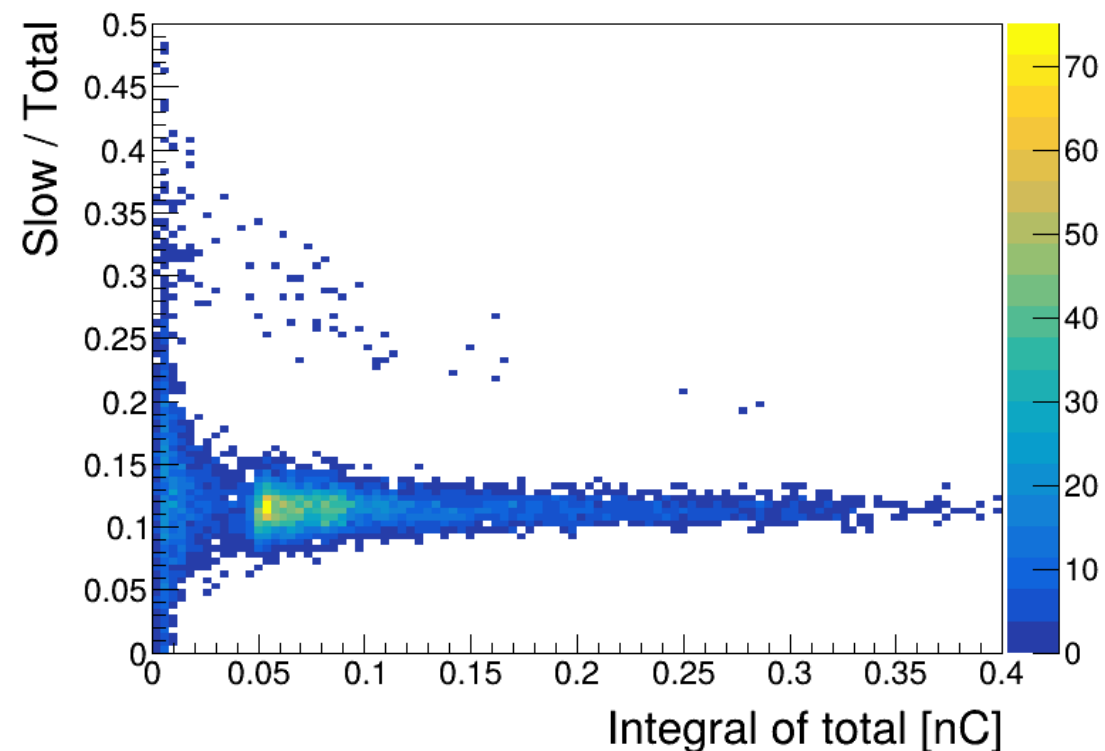
Integral of slow  
rise time + 36 ns  
~ rise time + 268 ns

Totalの積分値に対する, Slowの積分値の割合をプロット

Calibration data (AmBe)

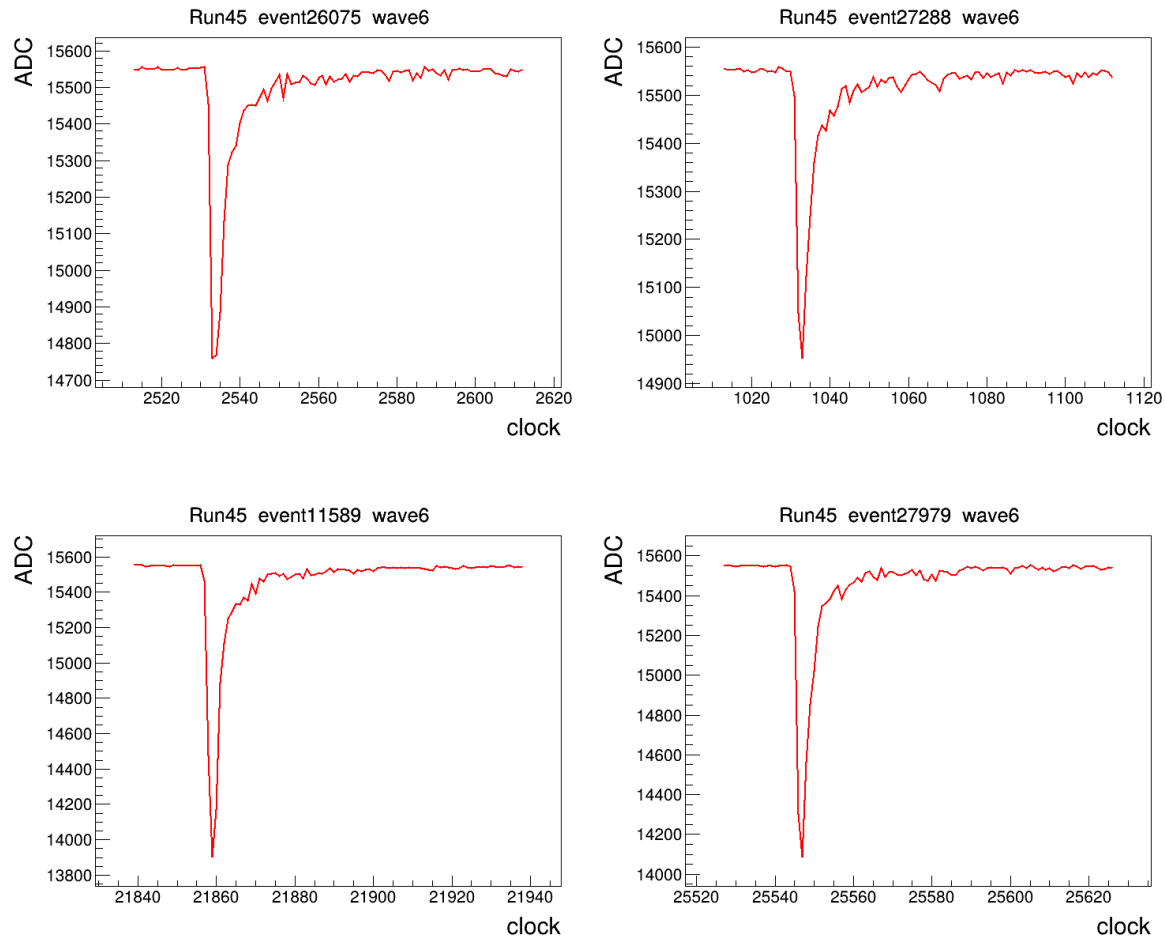


Beam data (Xe 3 bar)

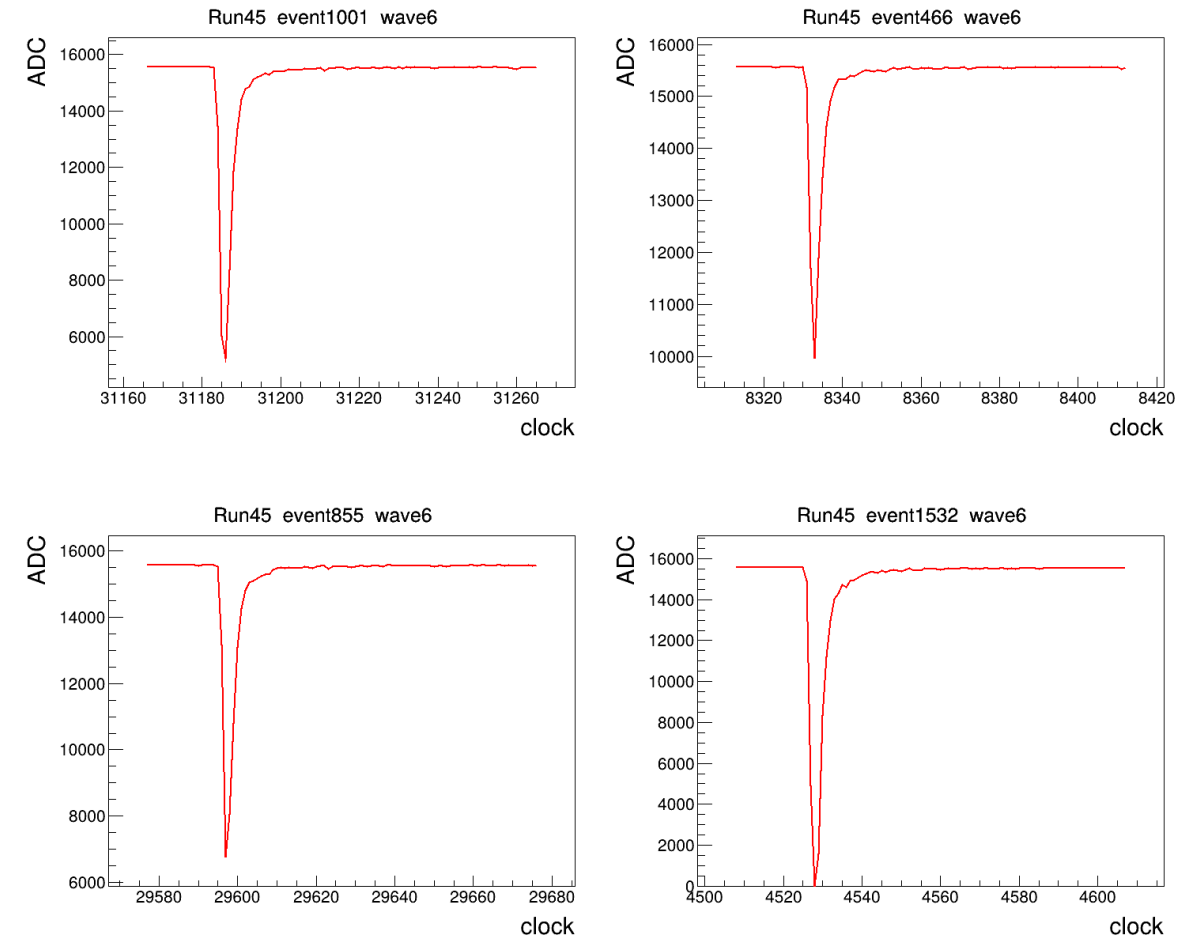


Slow / Total  $\sim 0.2$ くらいで中性子, ガンマを分別できそう

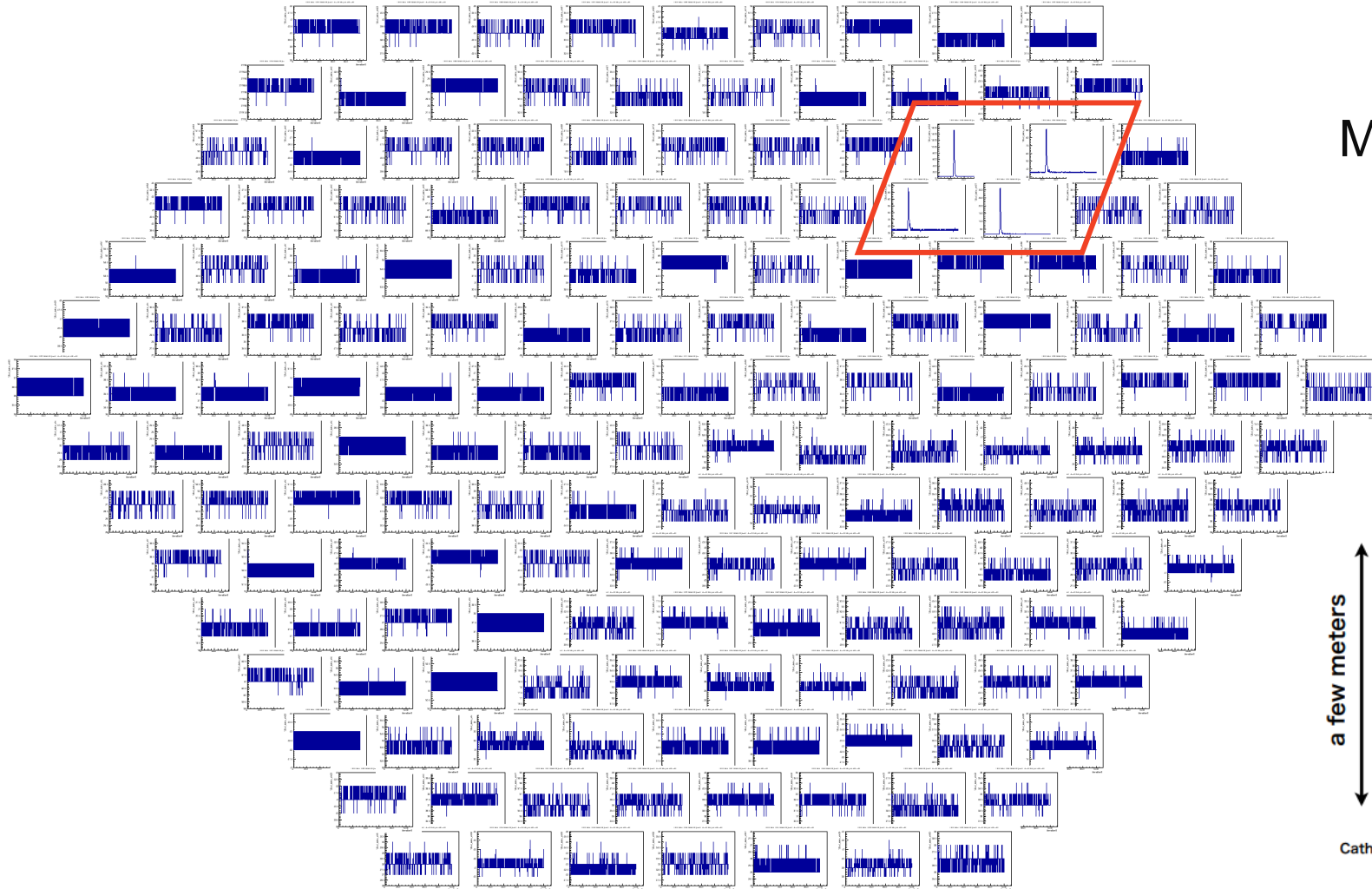
## 中性子と思われるイベント



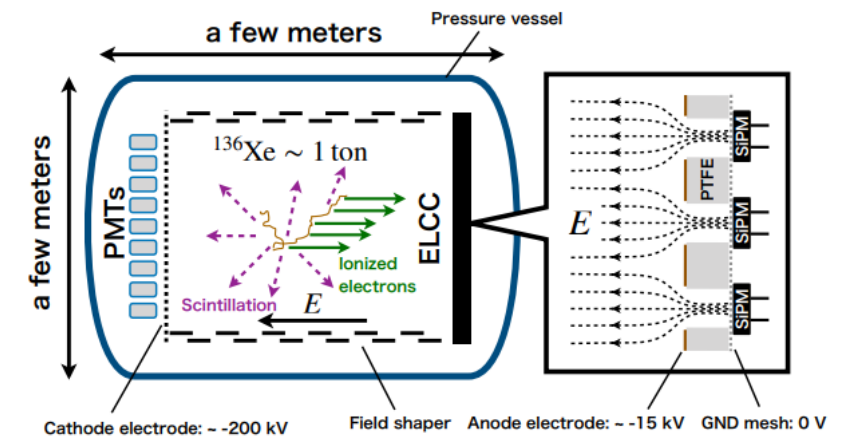
## 光子と思われるイベント



## TPCで取得したEL光のデータ

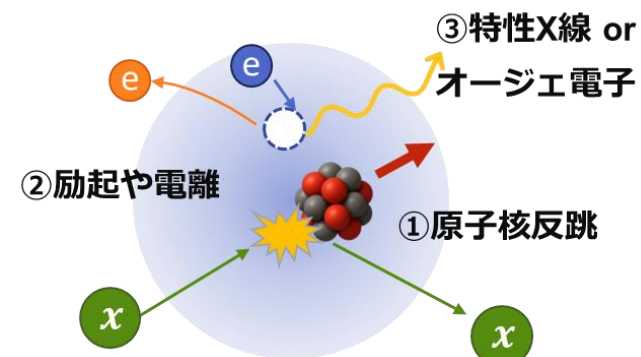


MPPC4chでEL光のHit



## 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果の実験的観測に向けて

1. バックグラウンド
2. クエンチング値                      の測定を目指す
3. 原子核反跳エネルギー



- ・ 12/3~12/4, RARiSでビーム試験を行った。
- ・ 液体シンチレータを4台に増やし, DAQ取得が行えた。
- ・ TPCのAnodeで放電が起き, ガス圧を3気圧に減圧した。
- ・ 液体シンチレータで中性子とガンマの波形を分別中。

**液シンとTPCでの取得データを統合し, 原子核反跳によるエネルギーを測定する**