



AXEL実験

**0 $\nu$   $\beta$   $\beta$ 崩壊探索のための  
高圧キセノンガスTPC大型試作機の開発**

---

京都大学 中村 和広  
他AXEL Collaboration

2021年3月24日 (水)  
第7回極低放射能技術研究会@オンライン

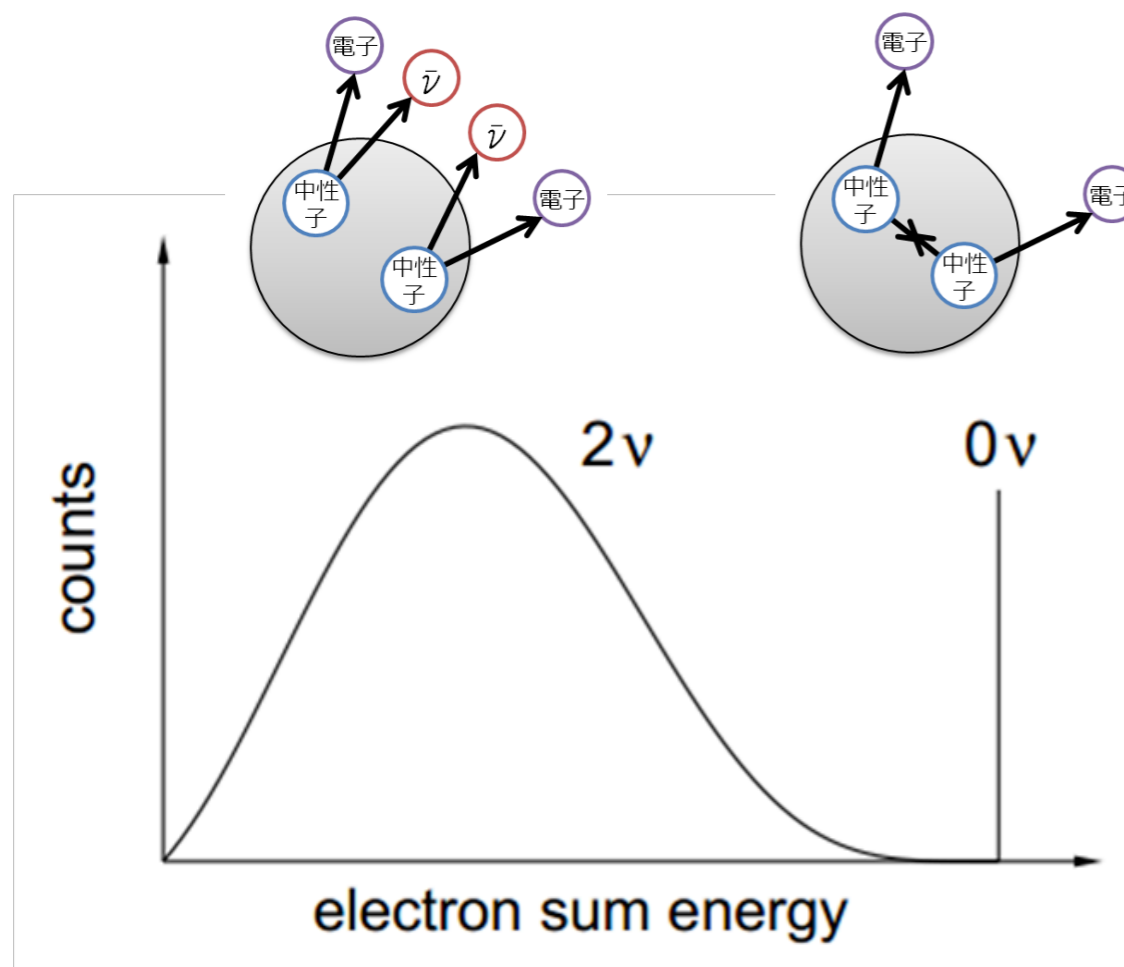
# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ )

## ● ニュートリノはマヨラナ粒子か？

- ニュートリノが異常に軽い理由 ( $m_\nu/m_e < 10^{-7}$ )
- 物質優勢宇宙の謎

## ● $0\nu\beta\beta$ の特徴

- 非常にまれな現象  $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1.07 \times 10^{26}$  year (90% C.L.)
- 電子の運動エネルギーの和がQ値に一致



- ✓ Q値に一致する特徴的なピークの発見を目指す
- ✓ 探索には、大質量&&低背景事象の実現が不可欠

# AXEL実験

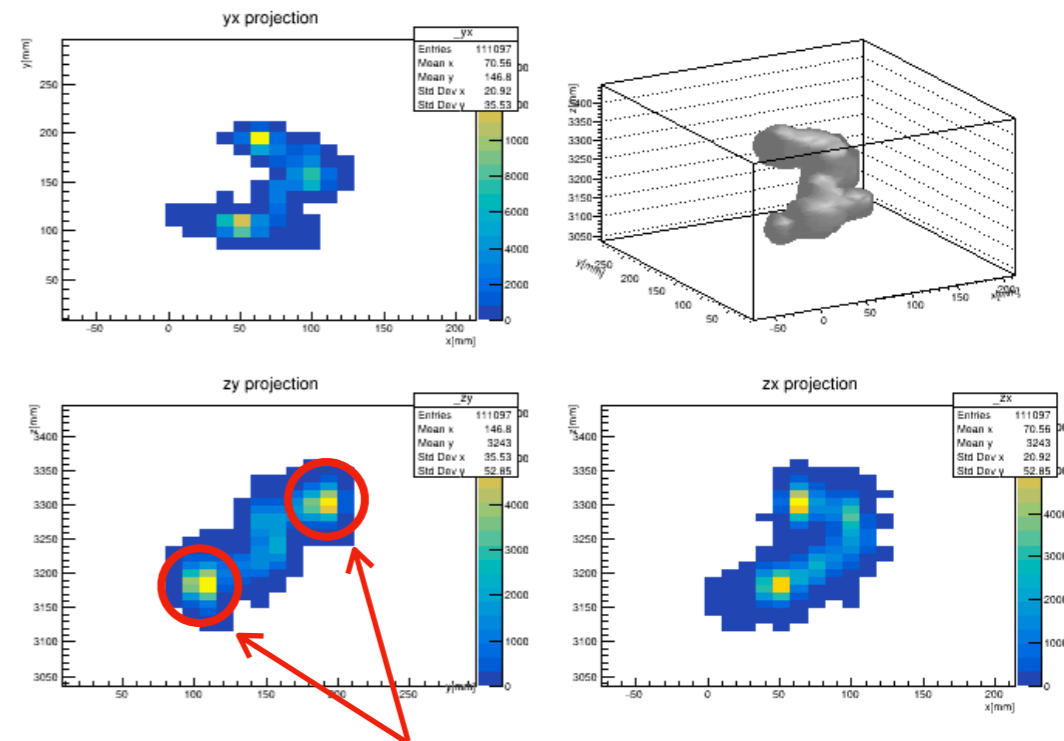
● 高圧キセノンガスTPC

● 特徴

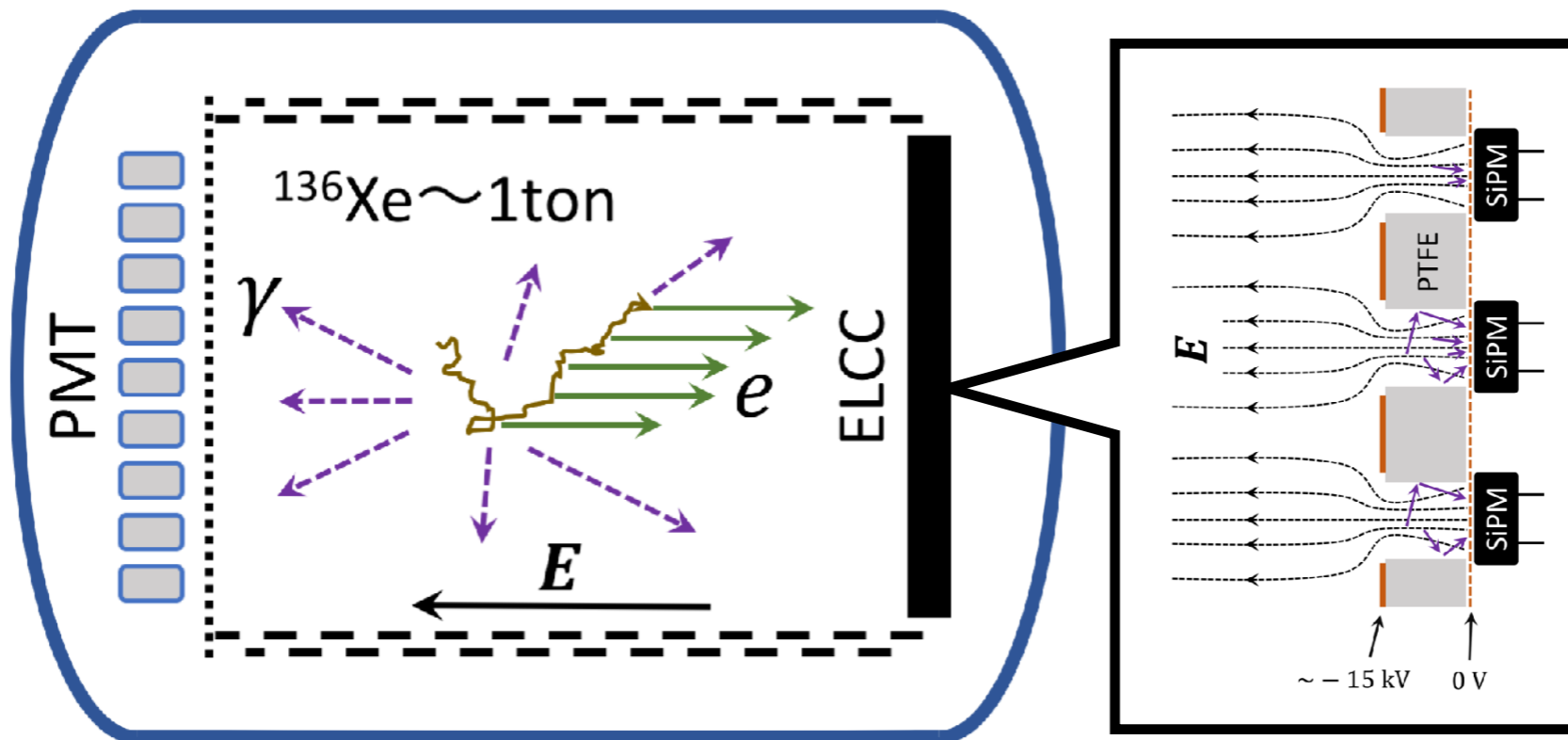
- 高圧キセノンガス → 安価に大型化が可能
- 高エネルギー分解能 → 背景事象の除去に有効
- 飛跡再構成

✓ Xe1トン &&  $\Delta E=0.5\%$  (FWHM)@Q値を目指している

シミュレーションで得られた $0\nu\beta\beta$ の飛跡



$0\nu\beta\beta$ の飛跡には2個のblobがある(終端が2個あるため)



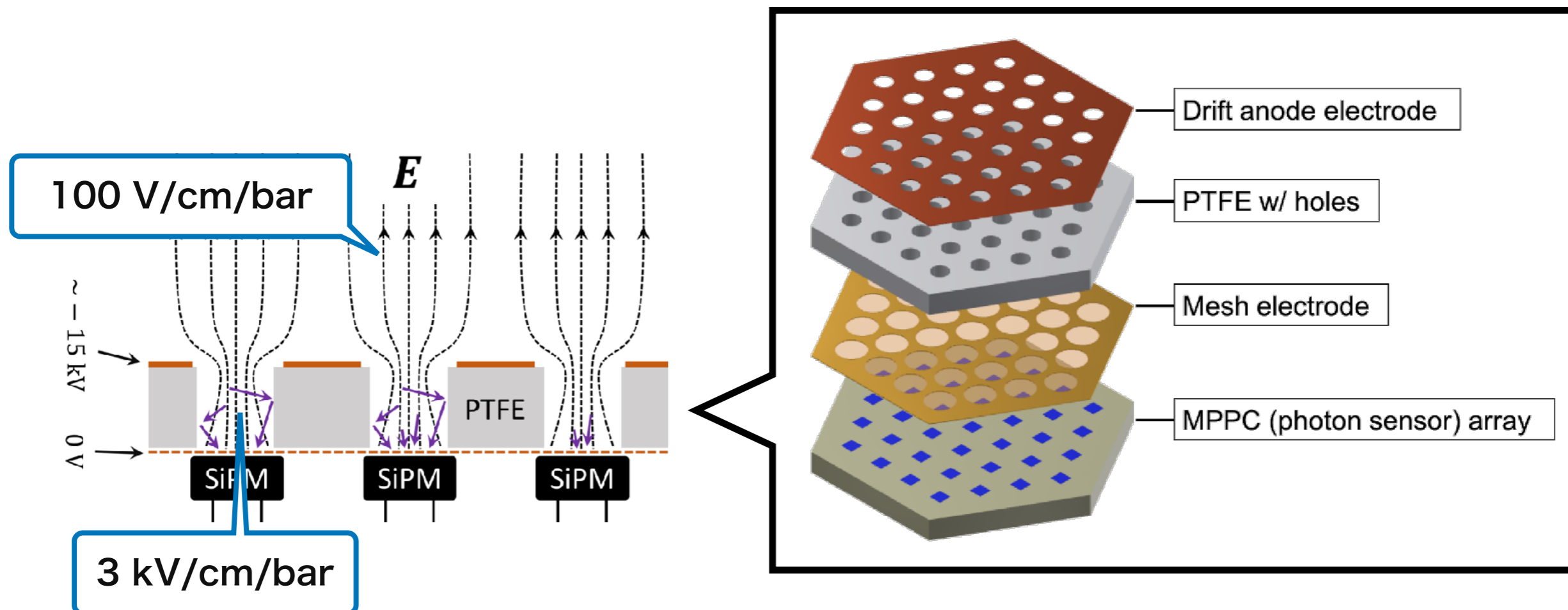
# ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell)

## ● EL過程を応用

- なたれ増幅をともなわない比例蛍光過程
- 分解能を保ったまま電離電子を光子に変換・増幅が可能

## ● モジュール構造

- 大型化が容易
- 堅牢な構造のため、位置依存性が生じにくい



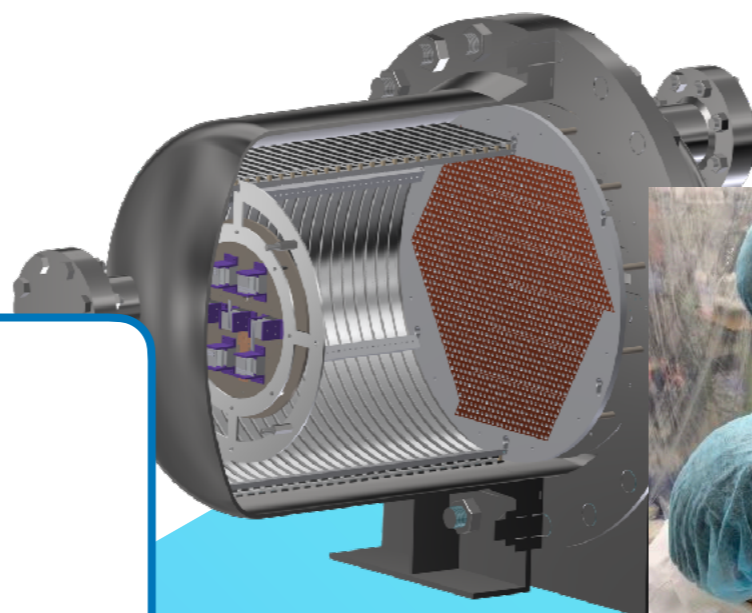


# AXELロードマップ

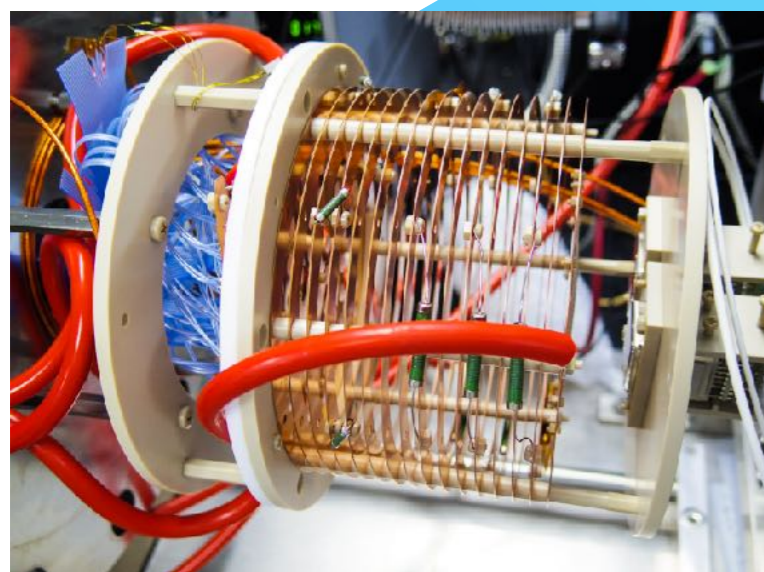
202X -  
1トン検出器

2024 -  
1000L(40 kg)検出器

10L試作機  
2014 - 2018  
(~0.005 kg@8bar)  
実験コンセプトの原理実証



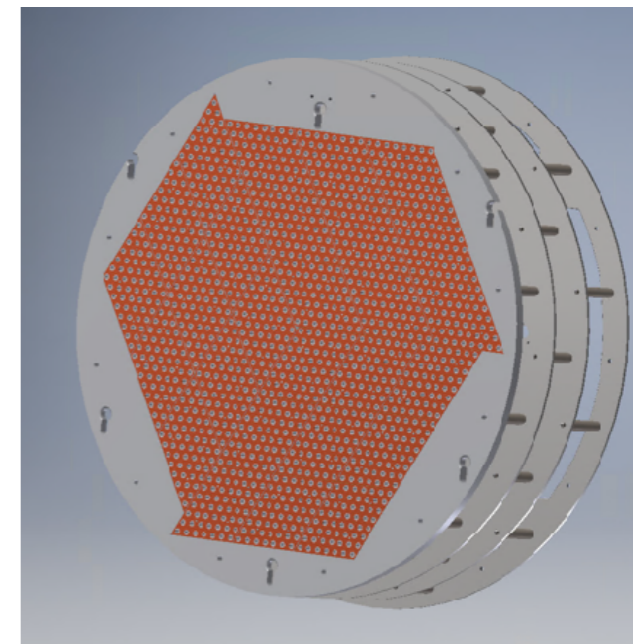
180L試作機  
2018 -  
(4.5 kg@8bar)  
Q値(2.5 MeV)付近での性能評価  
大型化の技術確立



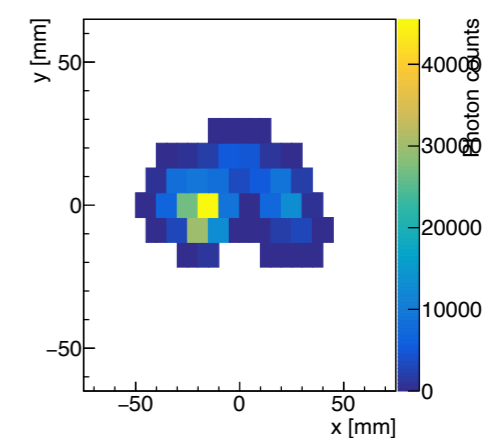
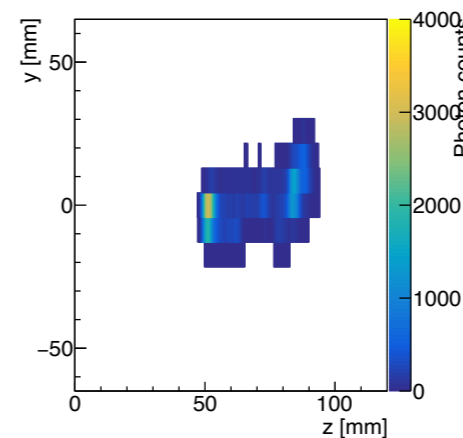
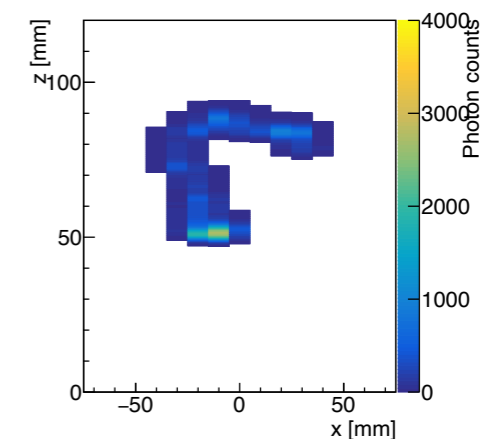
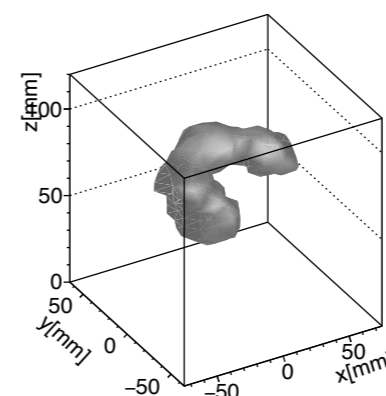
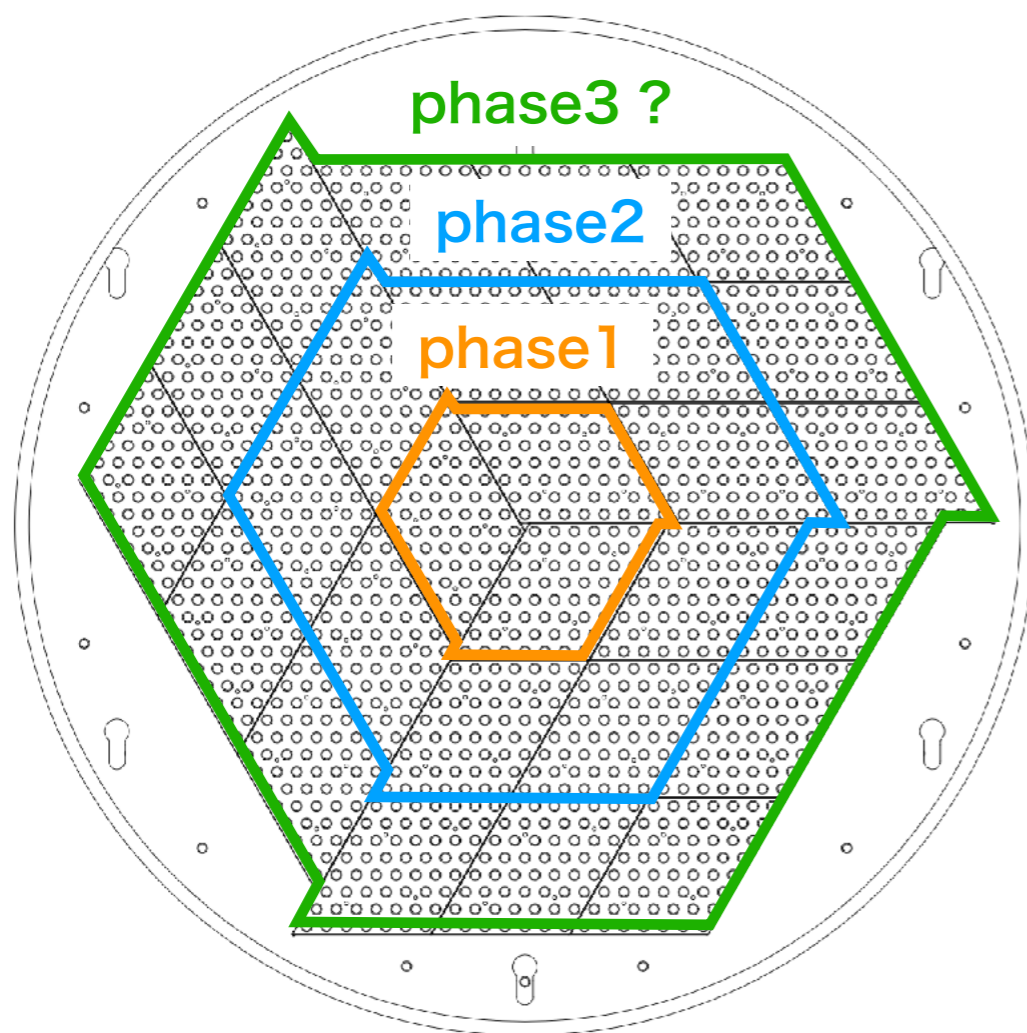
# 180L試作機

## ● 段階的に大型化

- phase1: 3ユニット (168 ch)
- phase2: 12ユニット (672 ch) ↘ 現在アップデート中
- phase3: 27ユニット? (1503 ch ??)

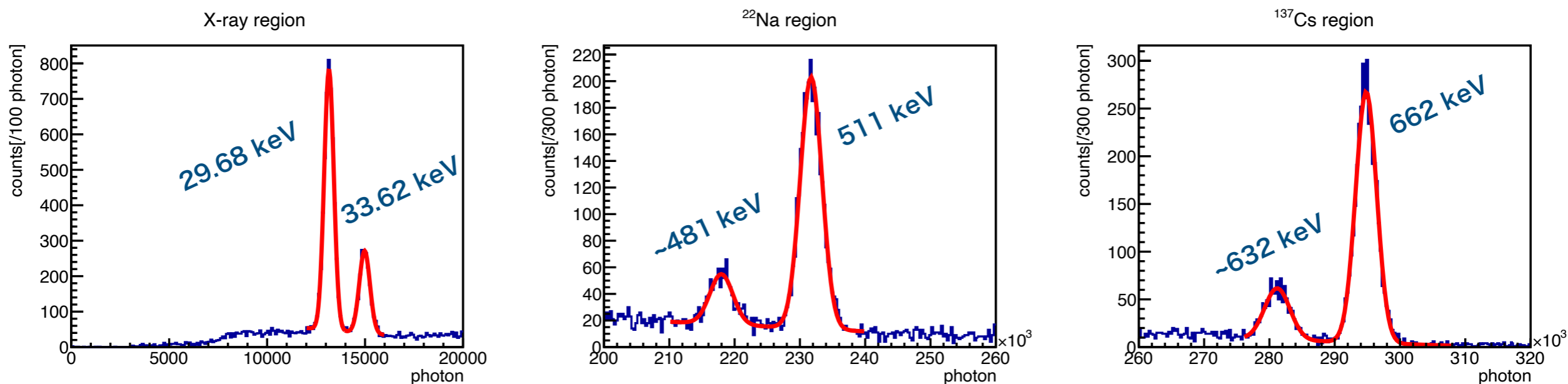


phase1で得られた $\gamma$ 線(662keV,  $^{137}\text{Cs}$ )の飛跡



# phase 1 で得られた結果

- $^{22}\text{Na}$ と $^{137}\text{Cs}$ のガンマ線による性能評価(5.0 bar, 最大662 keV)
  - 特性X線とガンマ線のピークをガウシアン+1次関数でフィット



	$\Delta E/E$ (FWHM)	@Q値( $\sqrt{E}$ で外挿)
$K_{\alpha}$ : 29.68 keV	$4.38 \pm 0.07\%$	0.48%
$K_{\beta}$ : 33.62 keV	$4.24 \pm 0.16\%$	0.50%
$^{22}\text{Na}$ : 511 keV	$1.68 \pm 0.04\%$	0.77%
$^{137}\text{Cs}$ : 662 keV	$1.28 \pm 0.02\%$	0.67%

$\beta^+$ の対消滅時の重心系運動量により、 $^{22}\text{Na}$ のガンマ線は単色ではないことが判明

- ✓ キセノンを使った実験の中では世界最高レベルのエネルギー分解能
- ✓ 目標の0.5%まであと少し



# phase2への課題

## ● ELCCでの放電

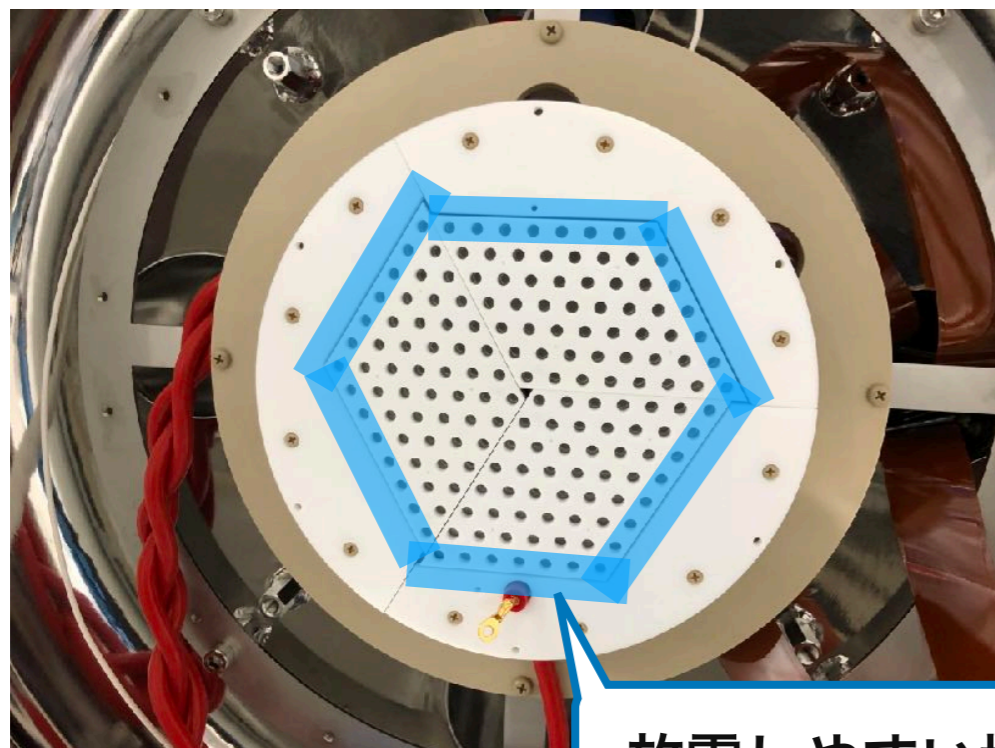
- 数時間に1回程度インターロックが作動してHVが落ちる
- ガス圧を5.5 barにあげるとモジュール境界で放電が多発

(ELCCへの印加電圧 $\propto$ 3 kV/cm/bar)

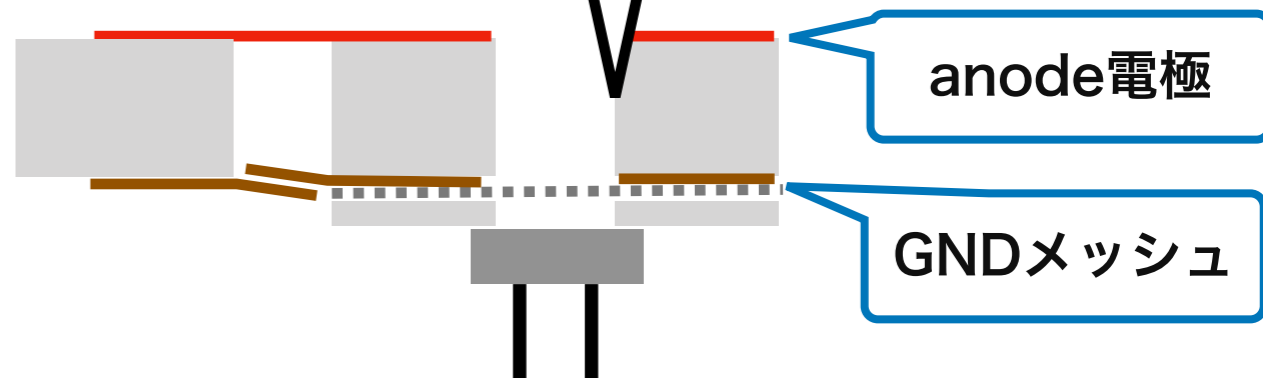
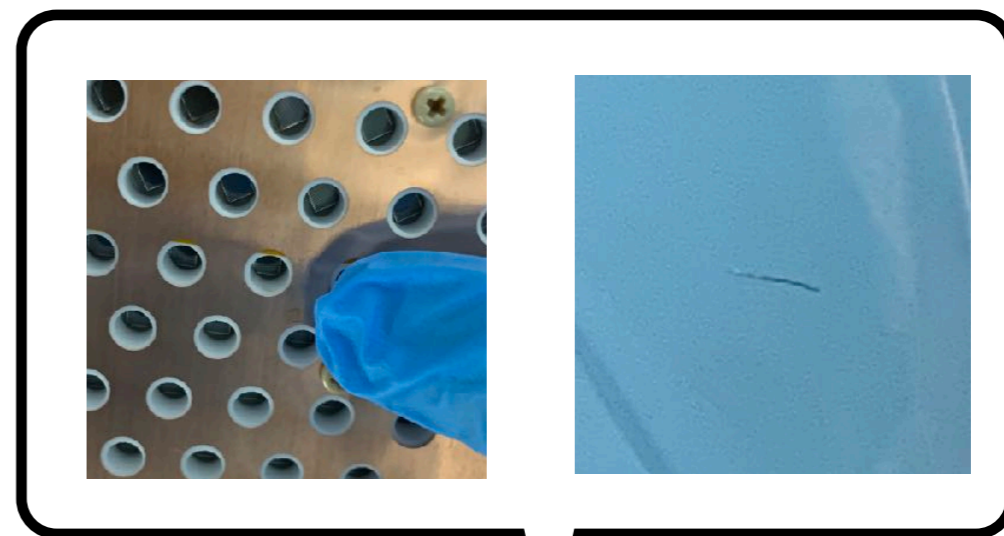
目標圧力：8 bar

✓ モジュール境界での放電対策

✓ 放電を誘発するGNDメッシュから生じる切れ端をいかに減らすかが重要



放電しやすい場所

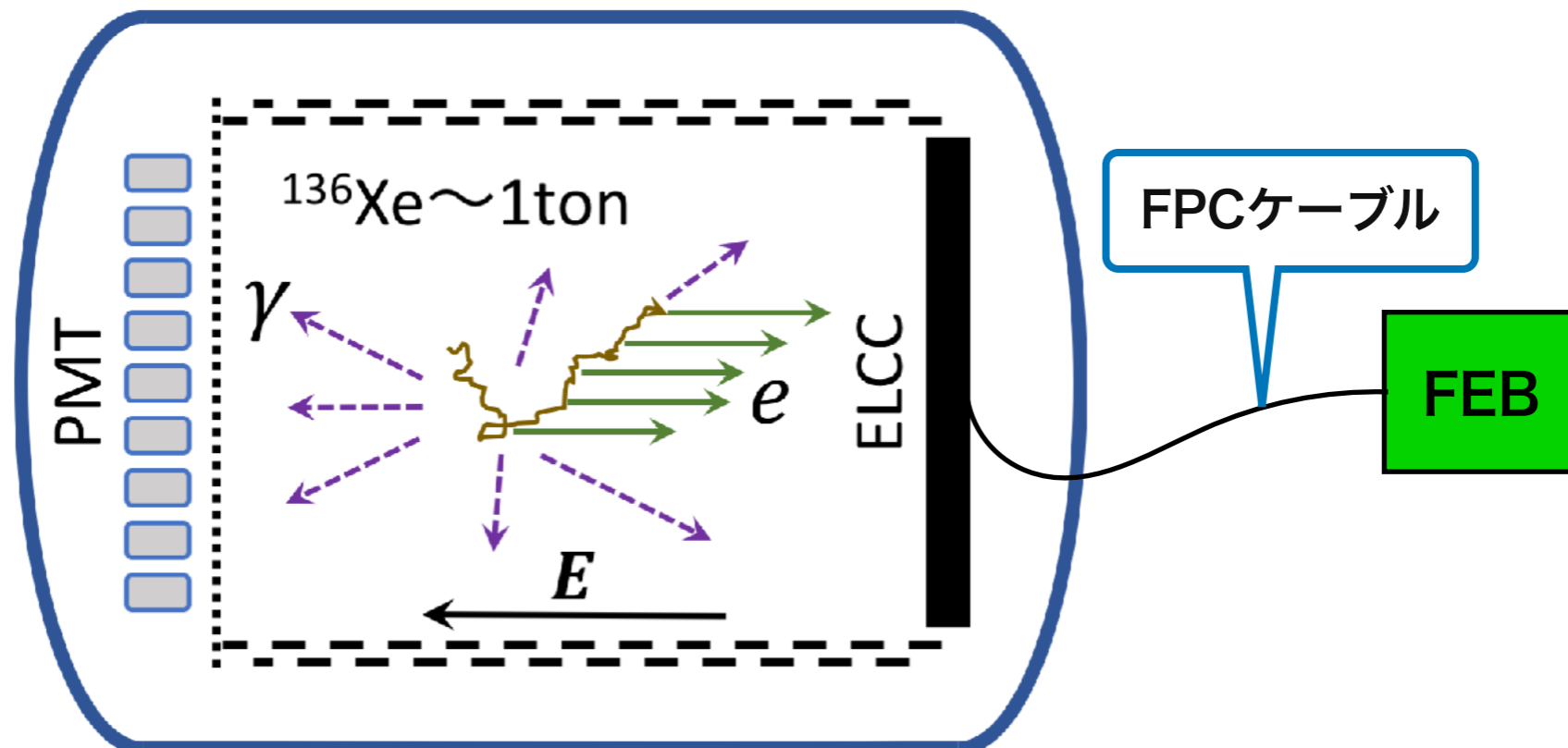


anode電極

GNDメッシュ

# phase2への課題

- フィールドケージでの放電
  - 1日に数回インターロックが作動してHVが落ちる
- deadチャンネル対策
  - ELCCをインストールすると、数チャンネル程度deadになっていることが多い
  - FPCケーブルの断線、MPPCの故障、コネクタの寿命など原因が多岐にわたるため、原因特定に非常に時間がかかる（3ユニット・168chでもELCCの組み立てから測定がredyになるまで数週間を要することも）



# モジュール間での放電対策

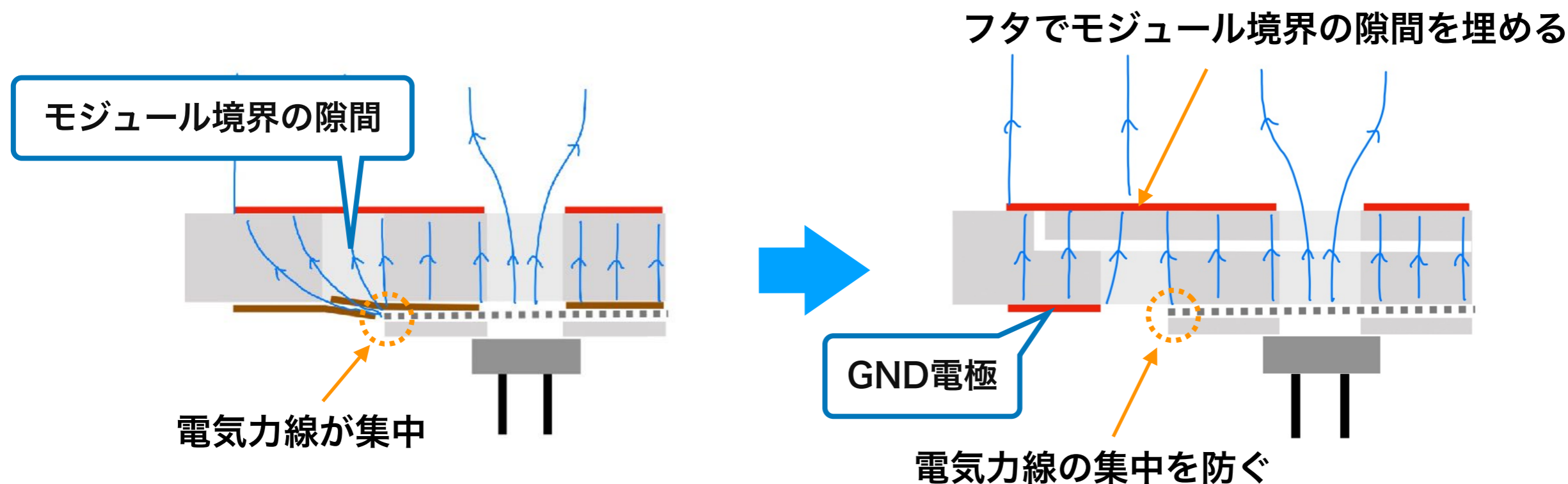
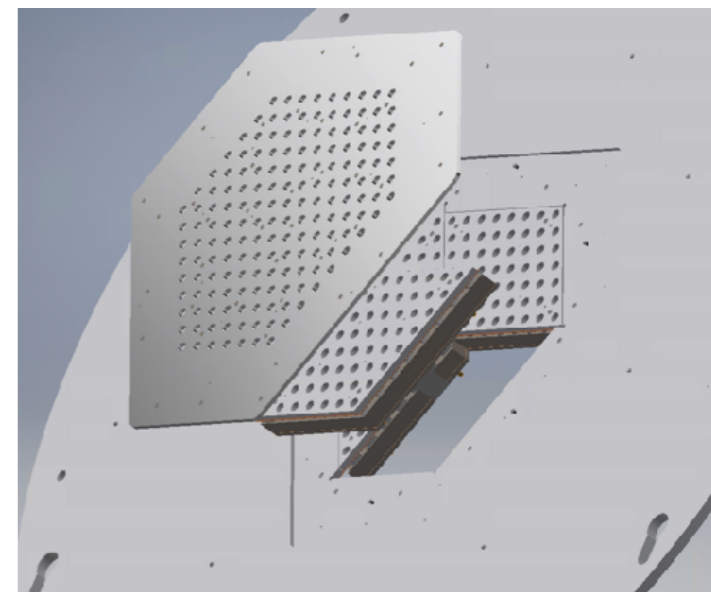
## ● ELCCの構造を工夫

- 外周部の裏側にGND電極を配置して電気力線の集中を防ぐ
- モジュールの境界にフタをする

## ● 放電対策の効果

- 5.0 barまでは安定して電圧がかけられるようになった
- フタ構造ELCCでもエネルギー分解能が問題ないことを確認

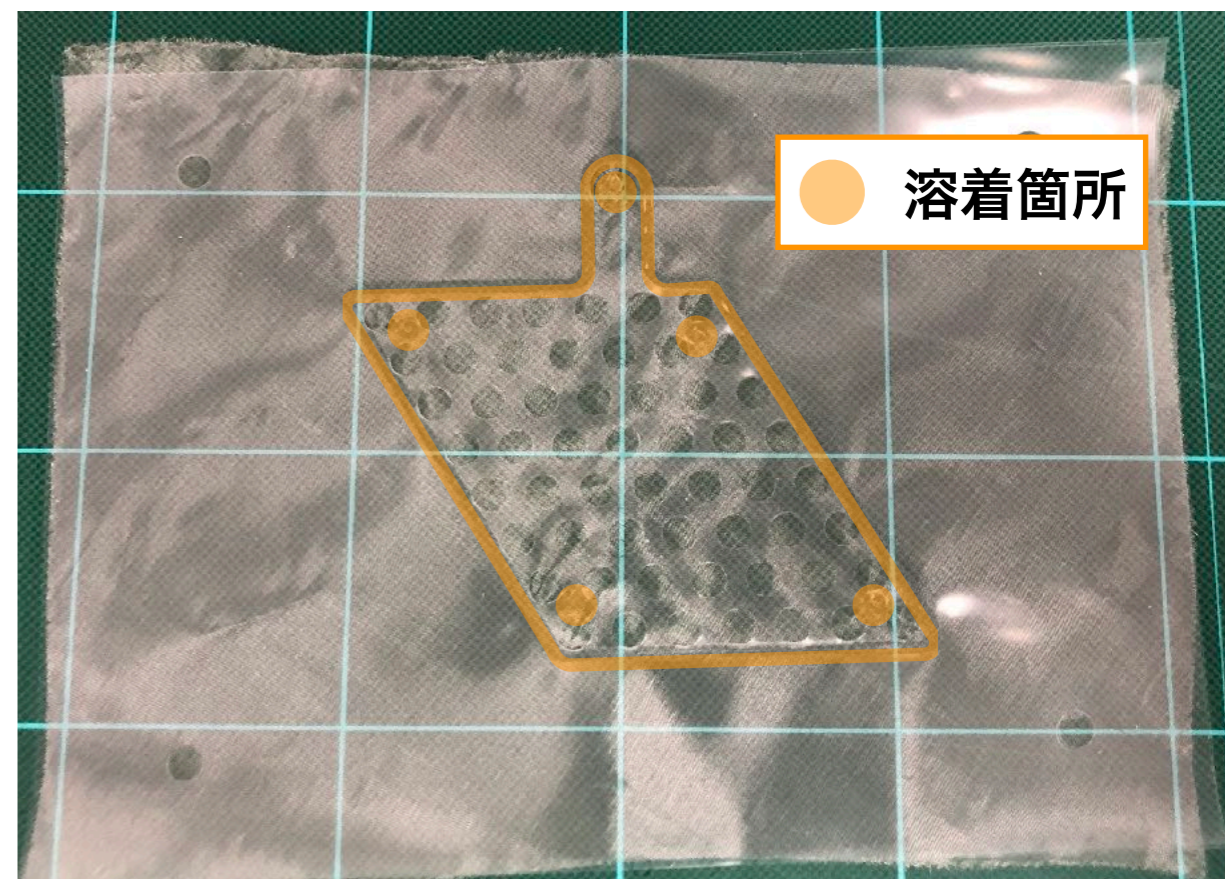
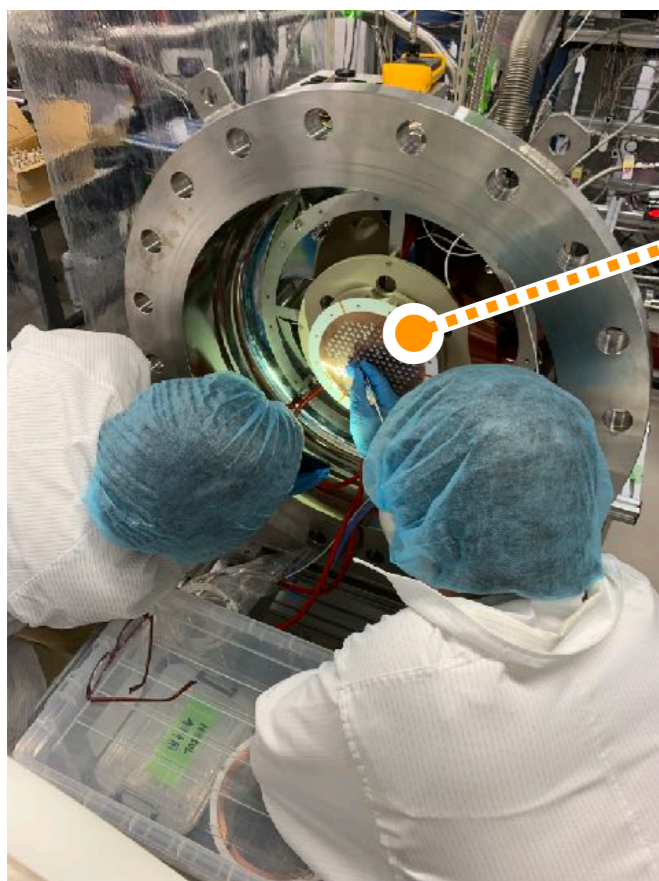
✓ 今後細かい設計の修正を行い、8 barで性能試験を行う予定





# メッシュのほつれ対策

- メッシュを樹脂フィルムでラミネートできないか
  - フッ素樹脂溶着の技術をもつ(株)陽和に相談
  - PFAフィルムで挟んで溶着したメッシュを作成し、ELCCに組み込み
- ✓ ELCCに付着するホコリの量が減少
- ✓ 溶着メッシュを用いたELCCでもエネルギー分解能が問題ないことを確認

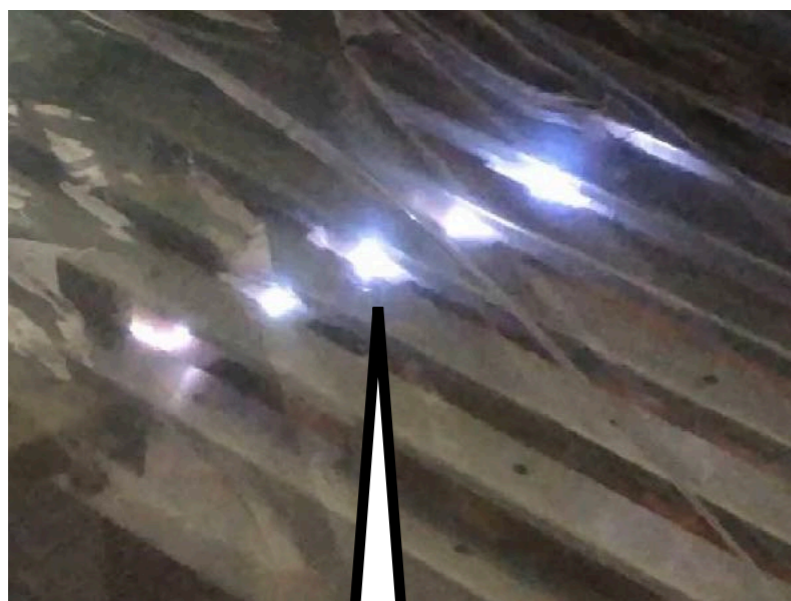
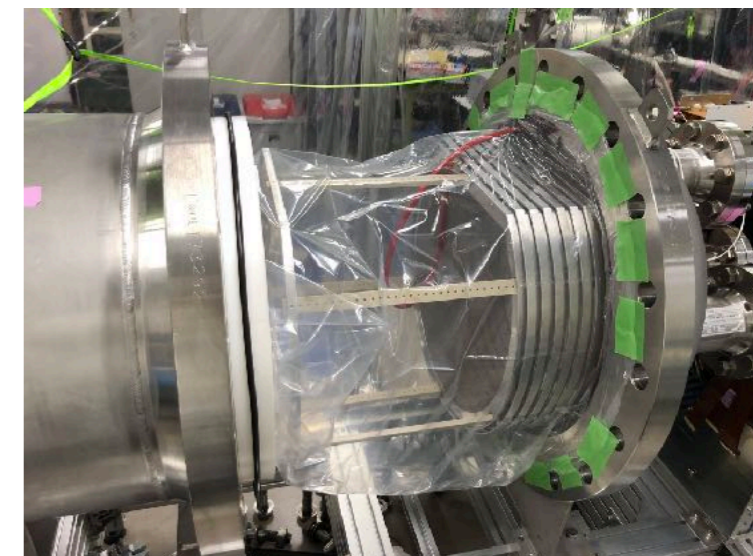




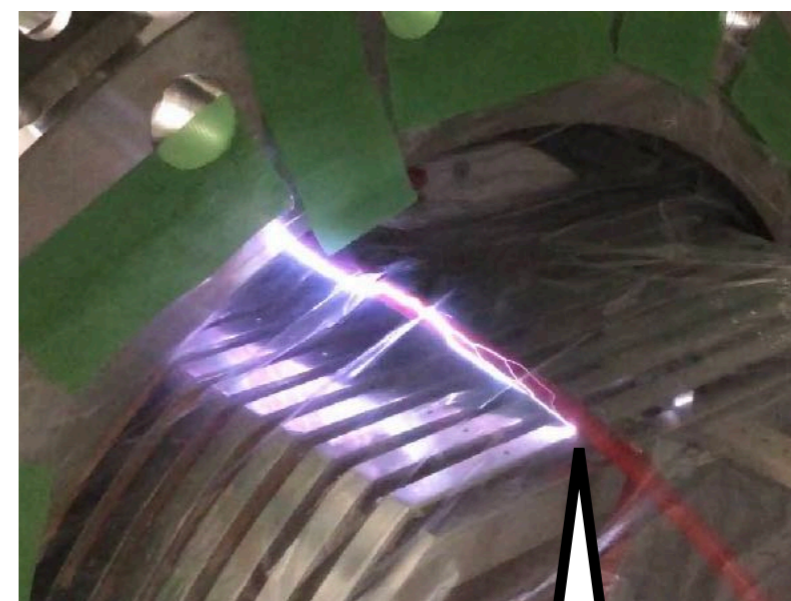
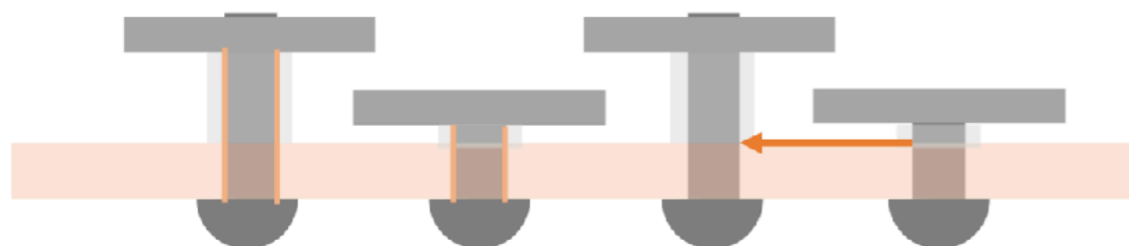
# フィールドケージでの放電対策

## ● 放電箇所の特定

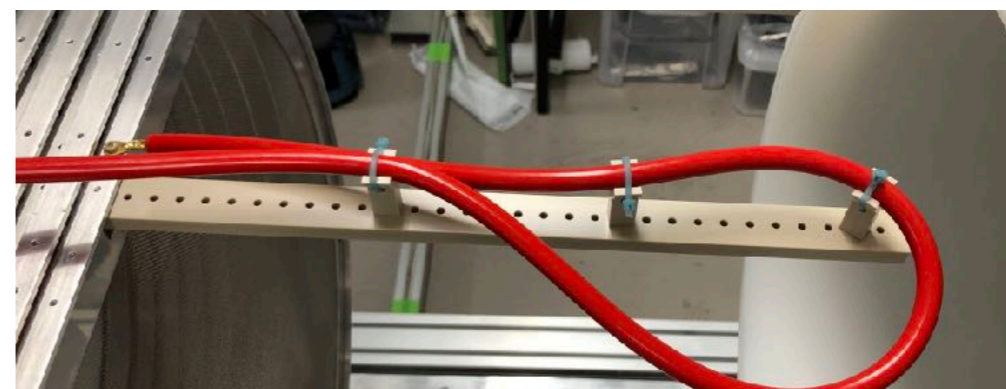
- 大気中での放電試験では放電しなかったため、放電箇所が特定できていなかった
- 空気よりも放電しやすいArガスをフローさせて放電試験



電極に電位を与えるためのSUSネジを伝って放電  
→ネジの周りにカプトンテープを巻いて対処



ケーブルが電極に触れた場所をきっかけとした放電  
→ケーブルが電極に触れないようにジグを作成





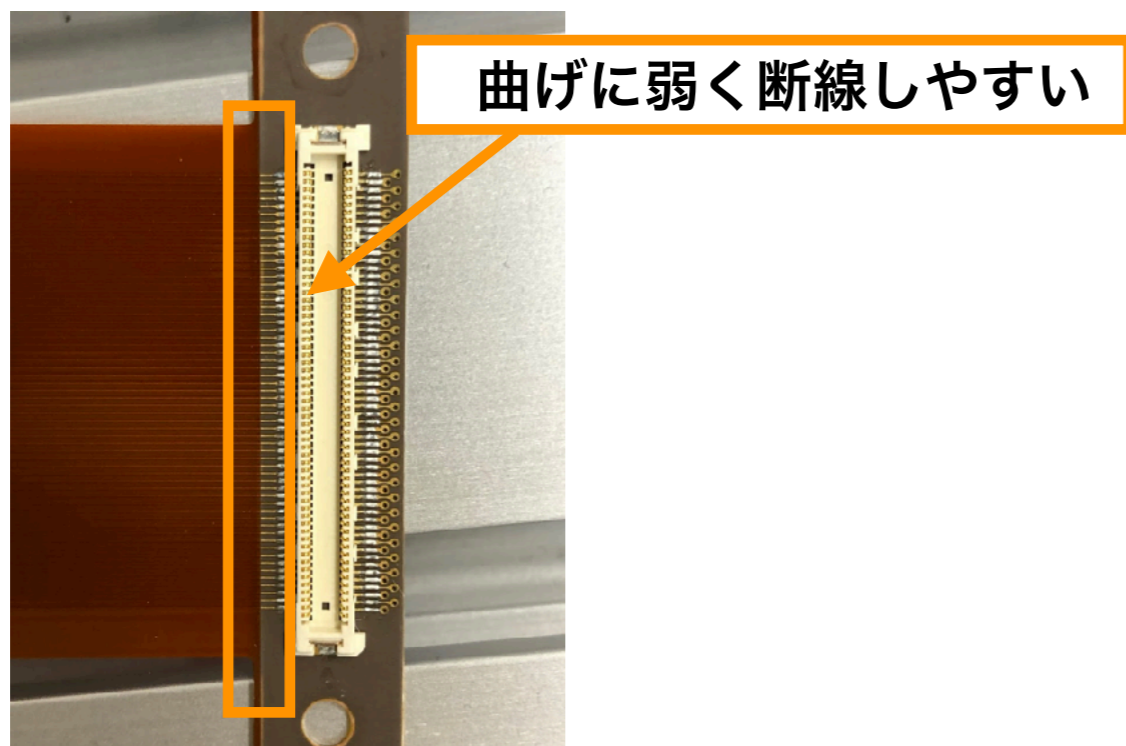
# deadチャンネル対策

## ● FPCケーブルの断線

- コネクタがついた補強板とFPCケーブルの接続部が曲げに弱いのが原因
- 接続部を折れにくい設計に変更

## ● ELCC測定システムを開発

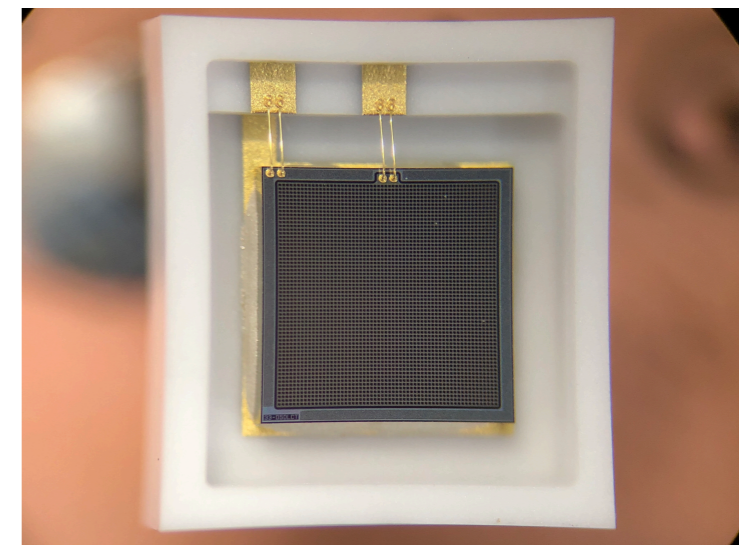
- ELCCをチェンバーにインストールする前にこのシステムでMPPCのダークを確認
- チャンネルがdeadになっている原因の切り分けを効率的に行えるようになった



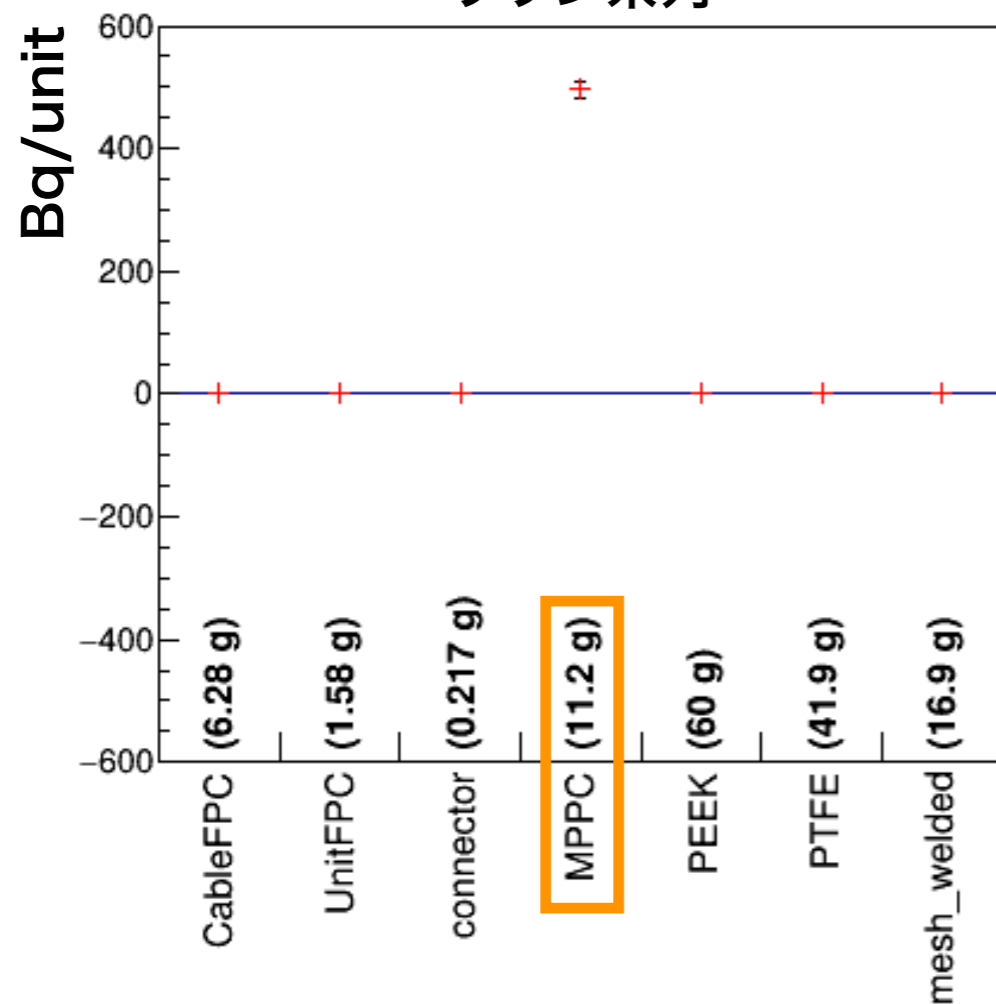
# 低放射能化

## ● 検出器の部材の放射能を調査中

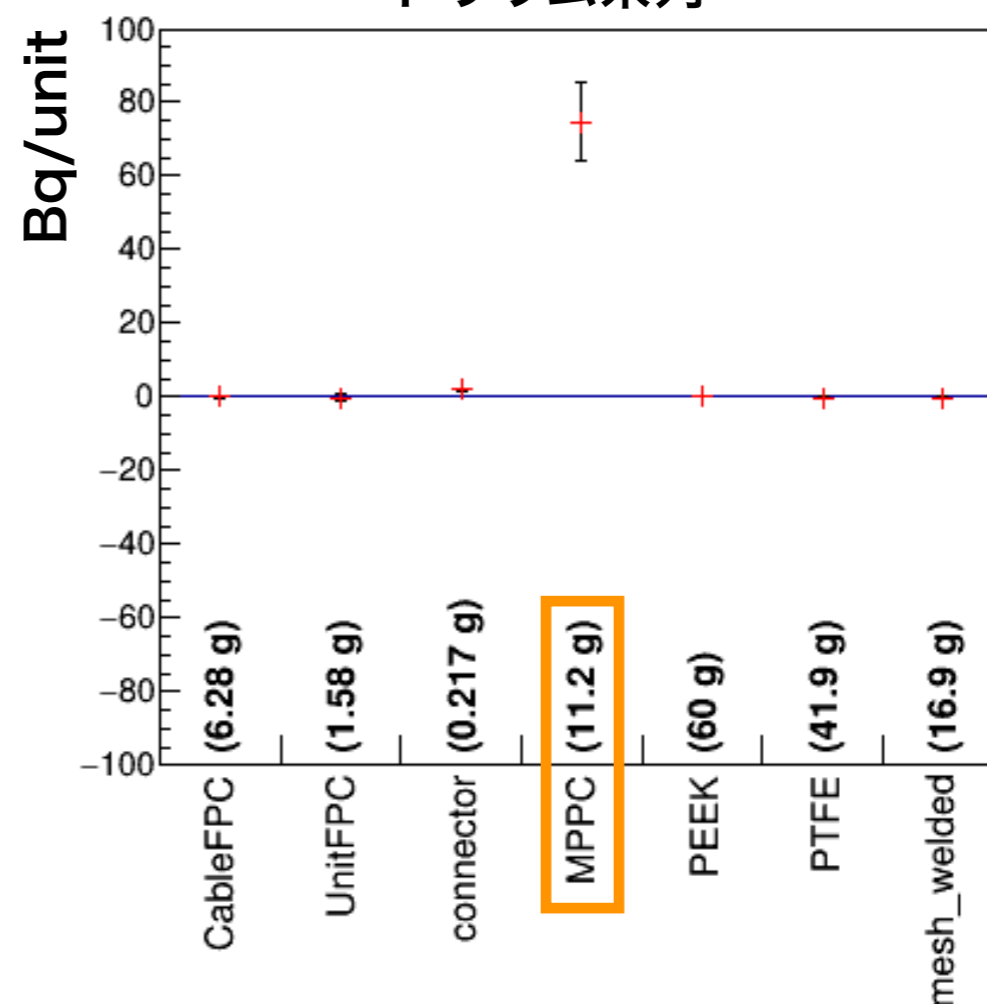
- MPPCのセラミックパッケージが汚いことが判明
- PEEKパッケージのMPPC開発に着手
- 今年中に試作機の完成を目指す



### ウラン系列



### トリウム系列



# まとめ

## ● AXEL実験

- 高圧XeガスTPCを用いたニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験
- 大型化の技術を確認するために180L試作機を開発中
- 3ユニット(168 ch)から12ユニット(672 ch)へのアップデートを進めている

## ● 180L試作機の開発状況

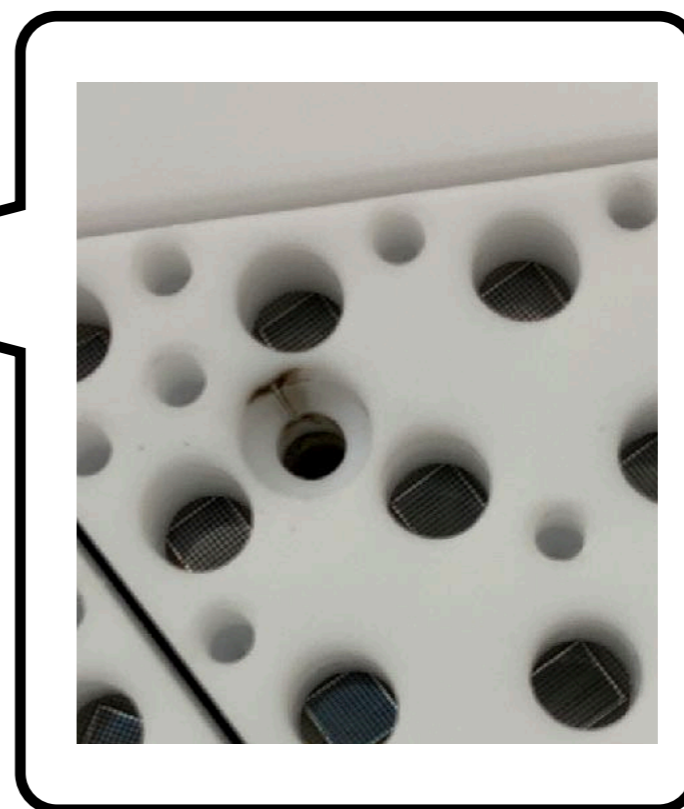
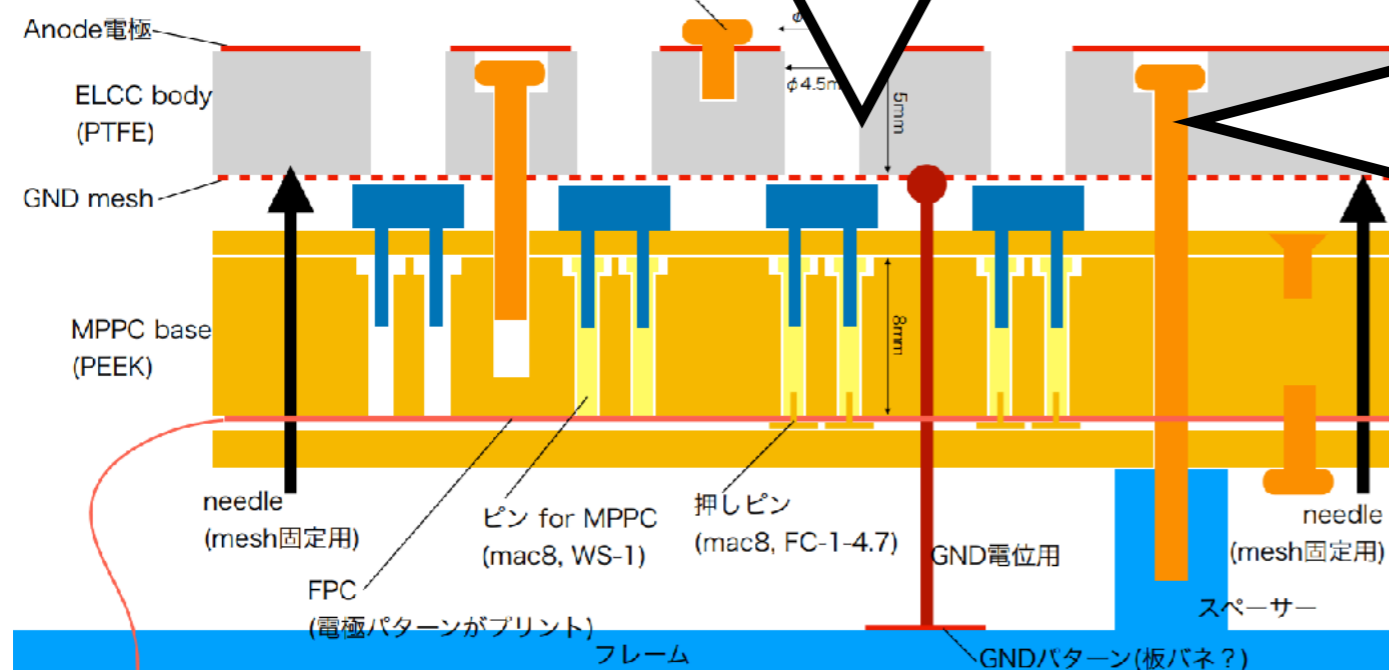
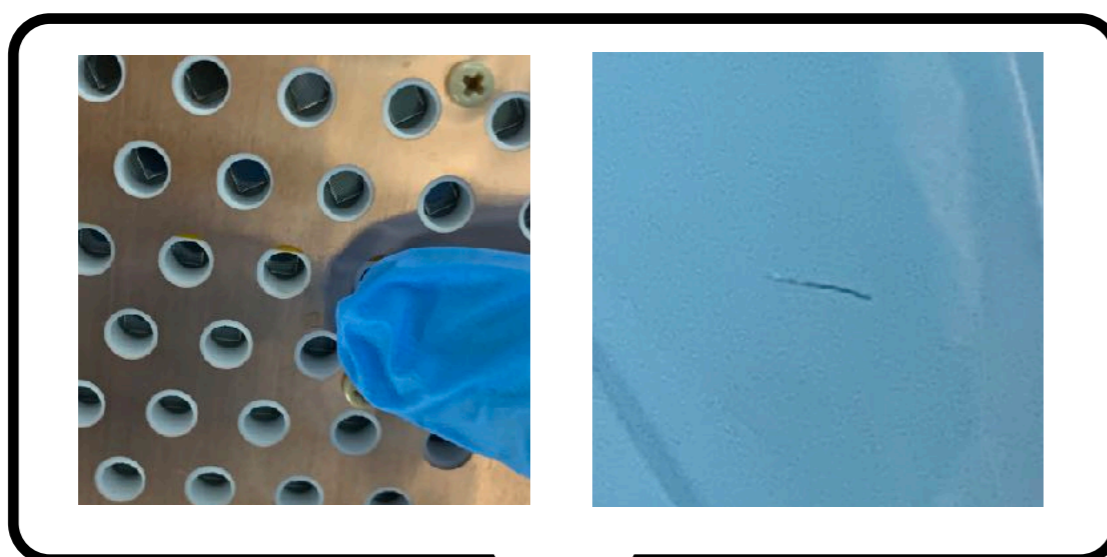
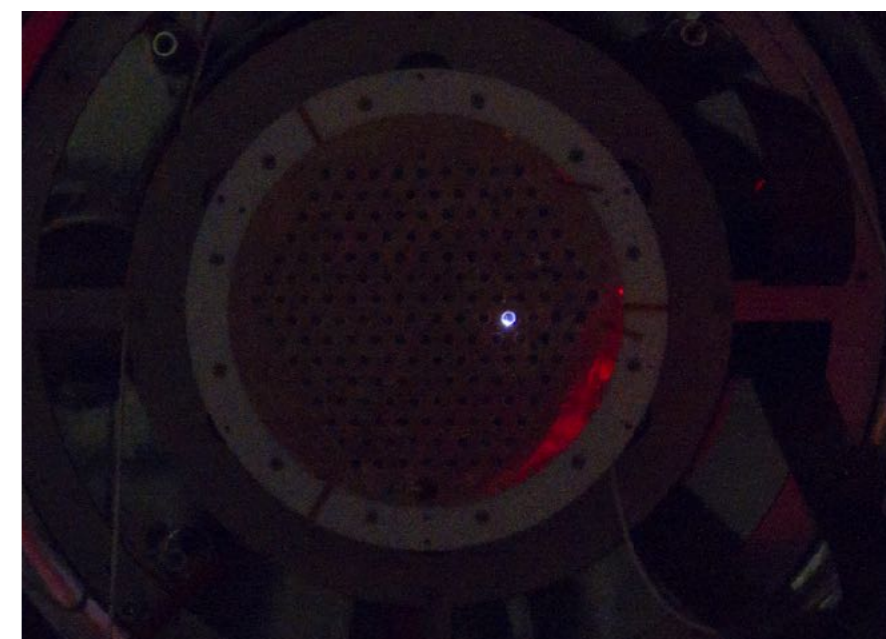
- 放電対策
  - ELCCやフィールドケージなどあらゆる場所で放電が発生
  - 放電しやすい箇所をひとつずつ潰しており、12ユニット化に向けたデザインがほぼ固まった
- 12ユニット化
  - 来年度初頭より12ユニットの製作を開始予定
- 低放射能化
  - MPPCのセラミックパッケージが汚いことが判明
  - PEEKパッケージのMPPC開発に着手

 **Back Up**



# phase 1 初期に得られた設計への教訓

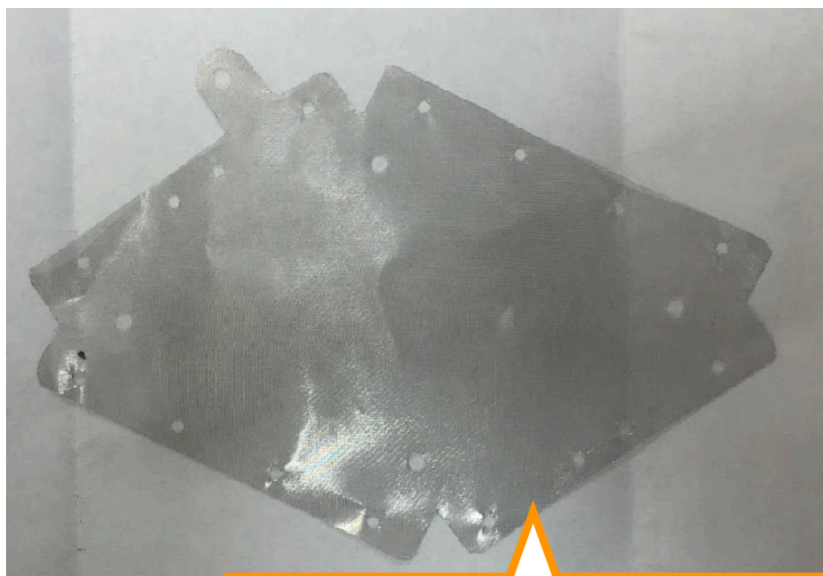
- メッシュの切れ端による放電や貫通穴を伝った放電が問題になった
  - いかにメッシュの切れ端を減らすか？
  - 貫通穴のない設計



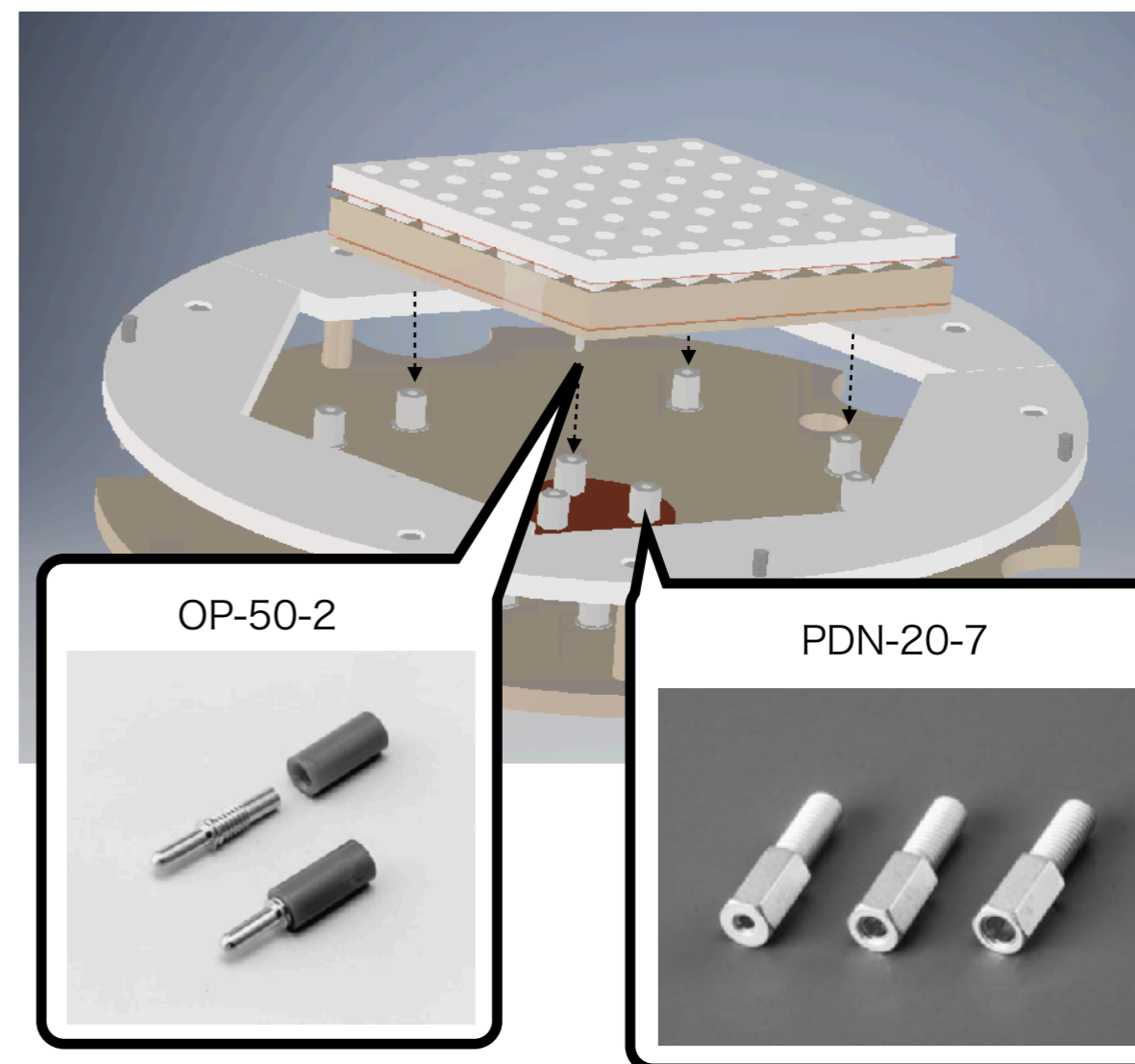
# 教訓を基にしたELCCの新設計

- メッシュのほつれ対策
  - メッシュの生産・加工を行う(株)くればあに相談
  - 焼結メッシュを用い、カット方法を工夫することでほつれが改善
- コネクタを用いた接続によって、貫通穴を作らない&&フレームへの固定時の作業性改善

焼結メッシュ



ゆがみにくいというメリットも

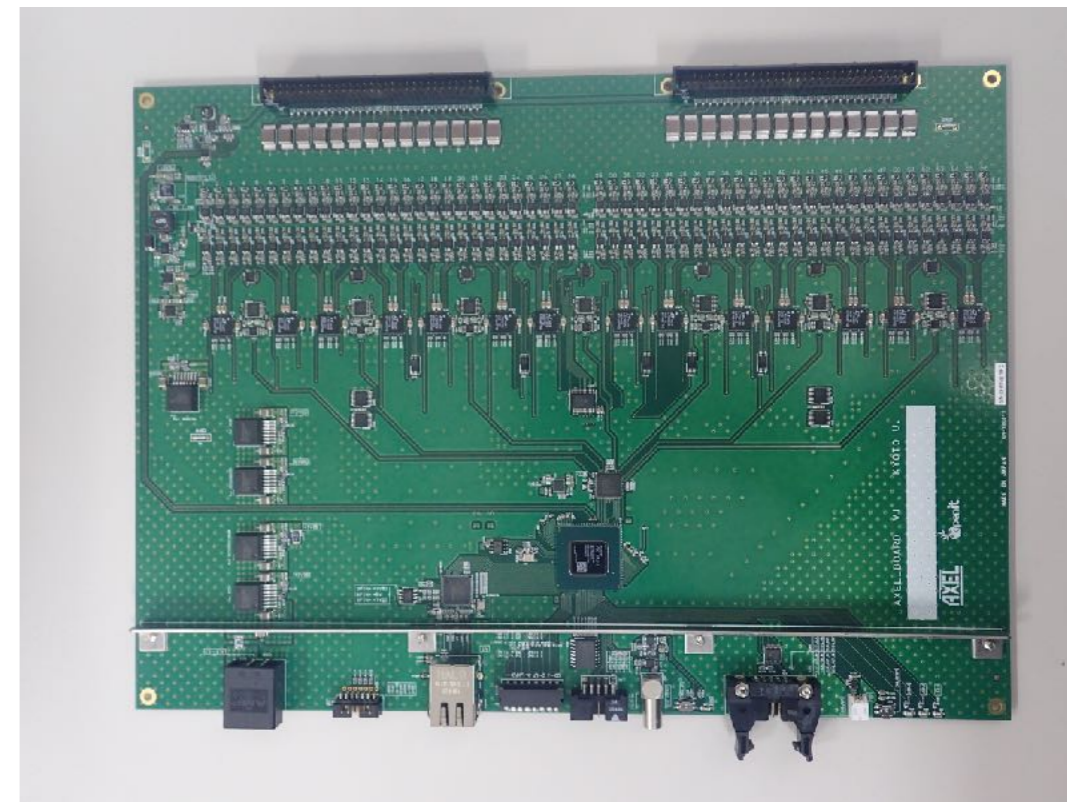




# phase 1 で直面した課題

- DAQが安定して動かない
  - フロントエンドボードには、我々が開発した AXELBOARDを利用
  - データ取得のために、ボードの再起動を数回～数十回繰り返すことになる(ことがある)
  - データ取得中に突然データがとれなくなる(ことがある)
- ELCCでの放電
  - 数時間に1回程度インターロックが作動
  - ガス圧を5.5 barにあげると放電が多発 (ELCCへの印加電圧 $\propto$ 3kV/cm/bar)

目標圧力：8 bar



## AXELBOARD

- MPPCへの電源供給
- 個々のMPPCの電源電圧の微調整
- dead-time freeのデータ取得 (5MSPS)
- ダークカレントの監視 (40MSPS)

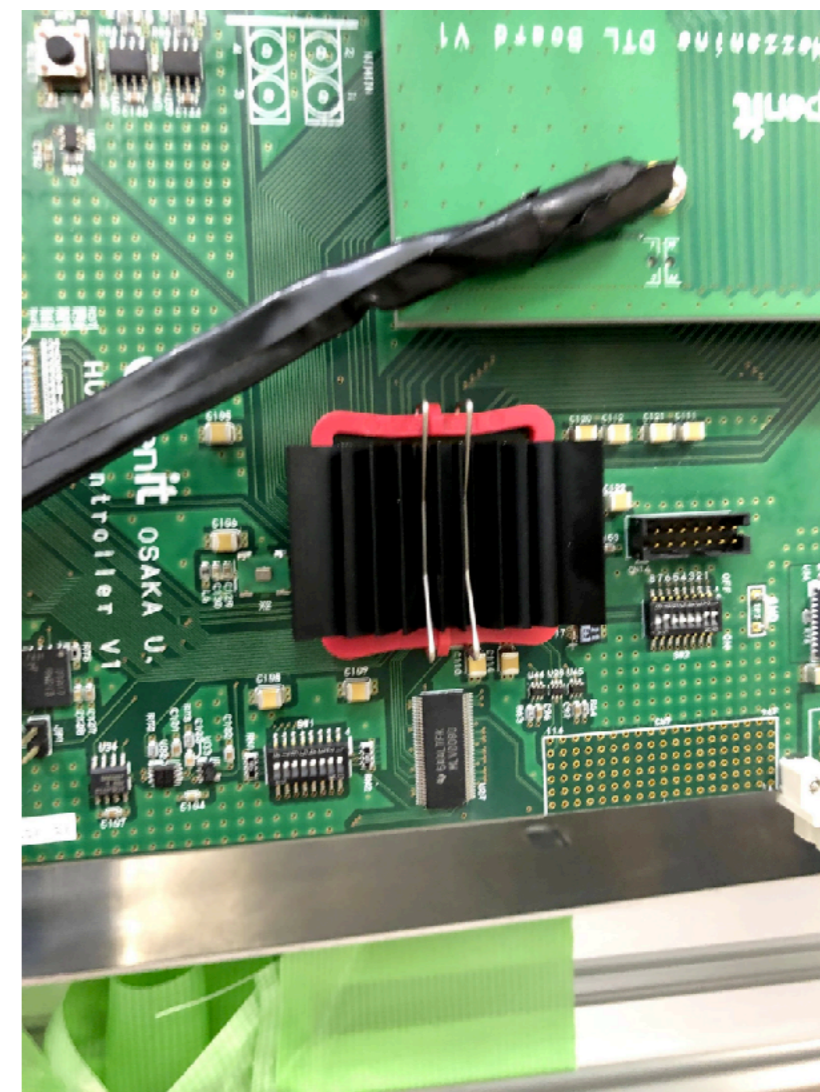
- ✓ DAQトラブルの原因を特定&&対処 → ファームウェアのバグが原因と判明
- ✓ ELCCでの放電の原因箇所を特定&対処



# DAQトラブル対策

## ● 熱対策

- クリーンルーム内の温度が4月の時点で30°C近くまで上昇していた
- 熱源（真空ポンプ、循環ポンプ、ゲッター）をカーテンで分離
- エアコンの冷気をHEPAフィルタに直接取り込む
- FPGAにヒートシンクを取り付ける





# DAQトラブル対策

## ● 熱対策の効果

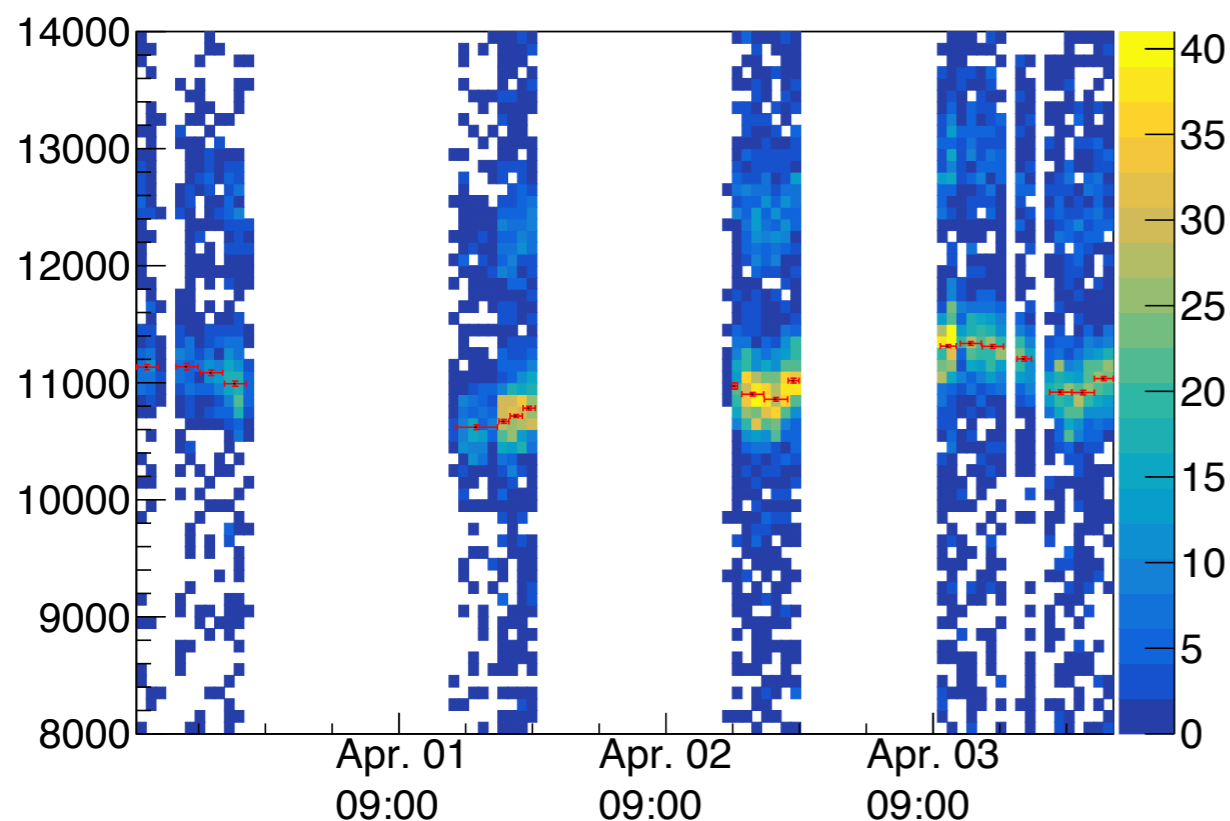
- クリーンルーム内の温度：28°C→23.5°C
- 1日の温度変化も小さくなった (2°C→0.5°C)

✓ DAQの不調は改善せず

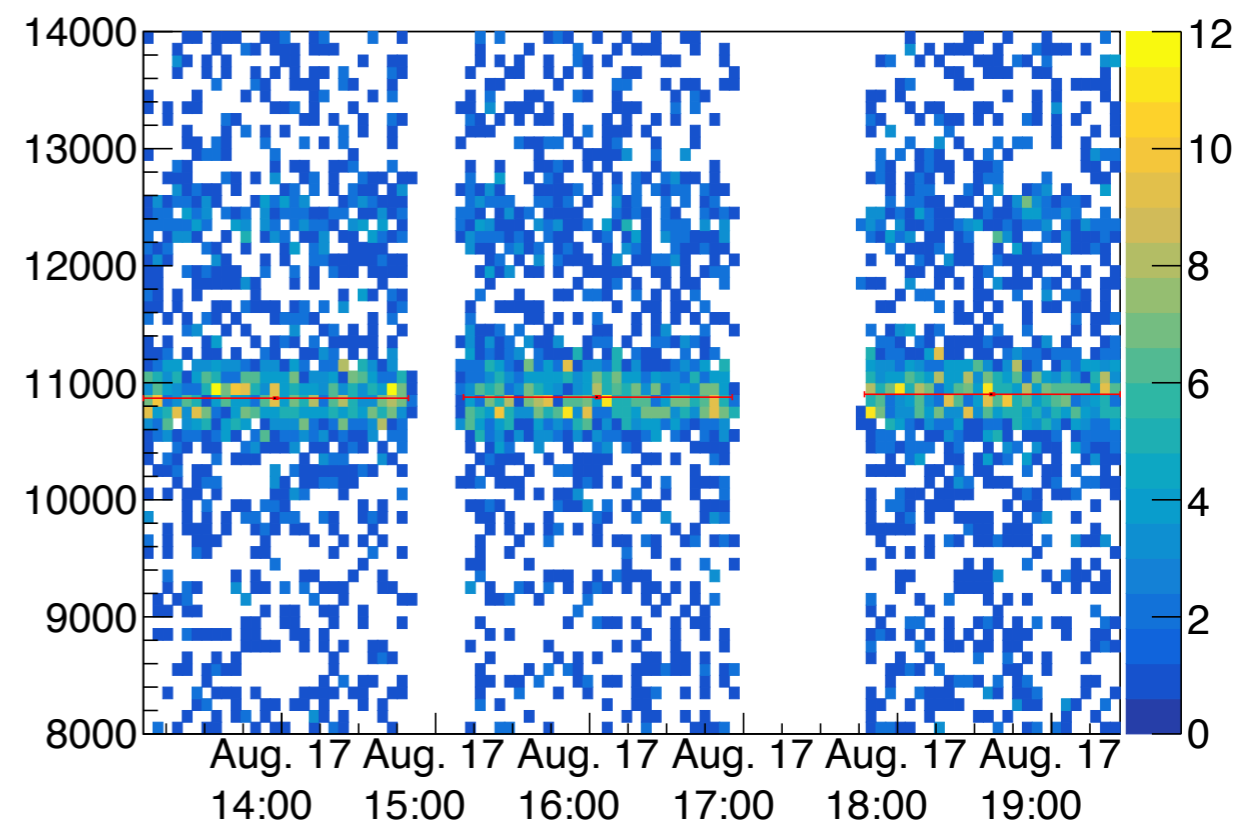
✓ 温度変化が小さくなったことで光量の時間揺らぎが減少 → エネルギー分解能が向上

## 光量の時間変化

熱対策前

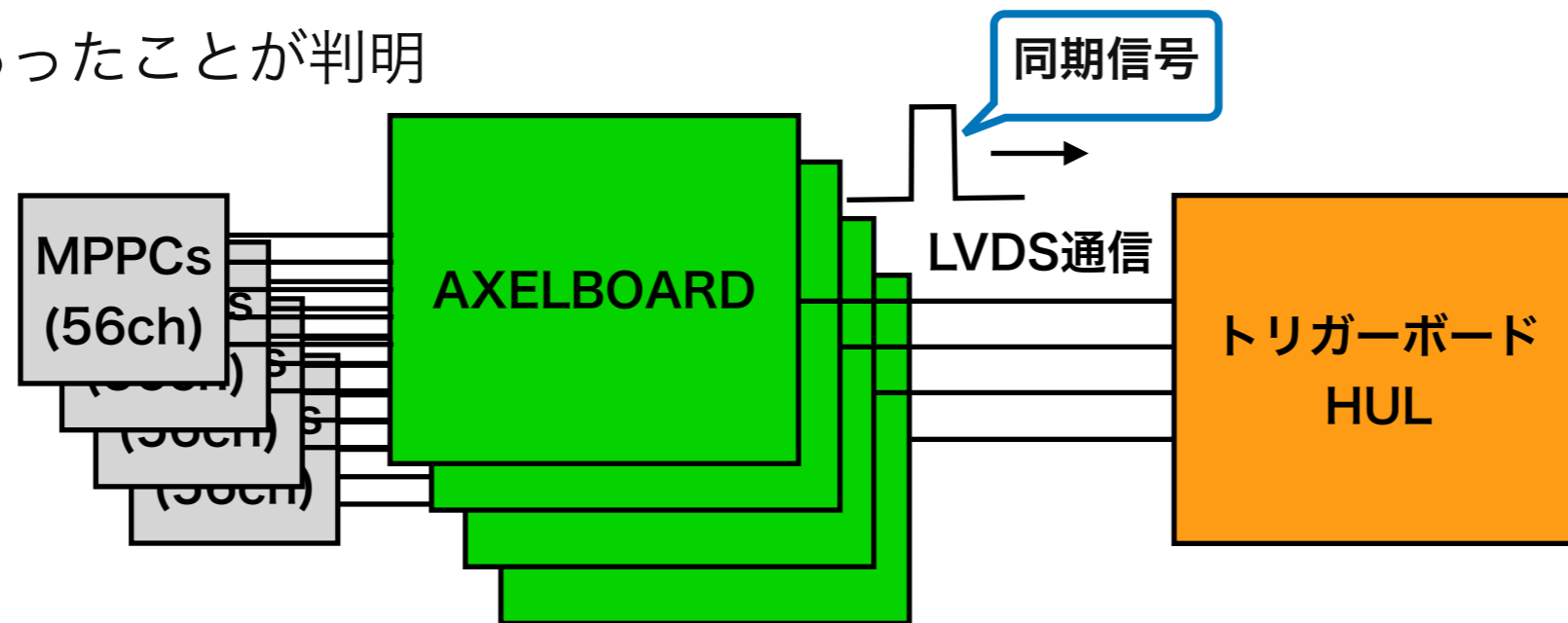


熱対策後



# DAQトラブル対策

- ファームウェアのバグが原因と判明
  - AXELBOARDはトリガーボードに対して600 ns(160 MHz, 96 clock)ごとに同期信号を送っている
  - 各ボードから送られる同期信号は356.25 ns(57 clock)以内で同期していないとトリガーが発行されない仕様にもかかわらず、同期させる機能が未実装だった (AXELBOARDはPCからUDP通信でリセットさせていたため、各ボードはバラバラのタイミングで同期信号を送っていた)
  - これまでDAQが動いていたときは、再起動を繰り返す中でたまたま全ボードが同期したタイミングであったことが判明



- ✓ ファームウェアを修正し、トリガーボードからLVDS通信によってAXELBOARDを同時に初期化することで同期するようにした
- ✓ 再起動を数十回繰り返さないとDAQが動かない問題を解決

# ELCCでの放電対策

## ● 放電箇所の特定

- これまでは放電痕の位置から想像するしかなかった
- 放電痕が残らないような放電はわからない

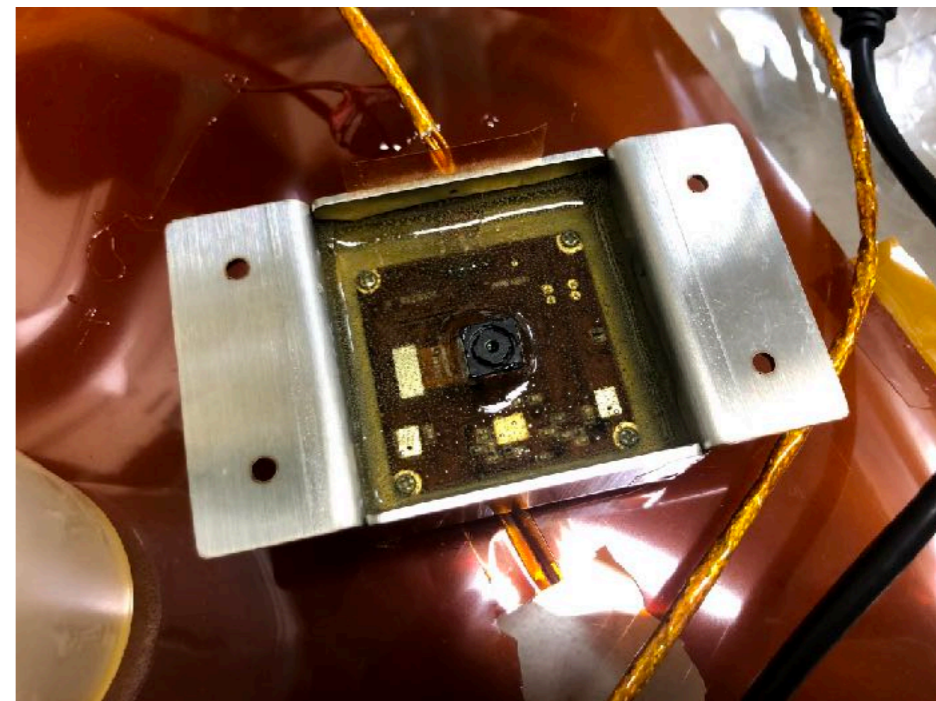


- ✓ チェンバー内にUSBカメラをインストールして放電の様子を記録
- ✓ 放電位置の特定につなげる



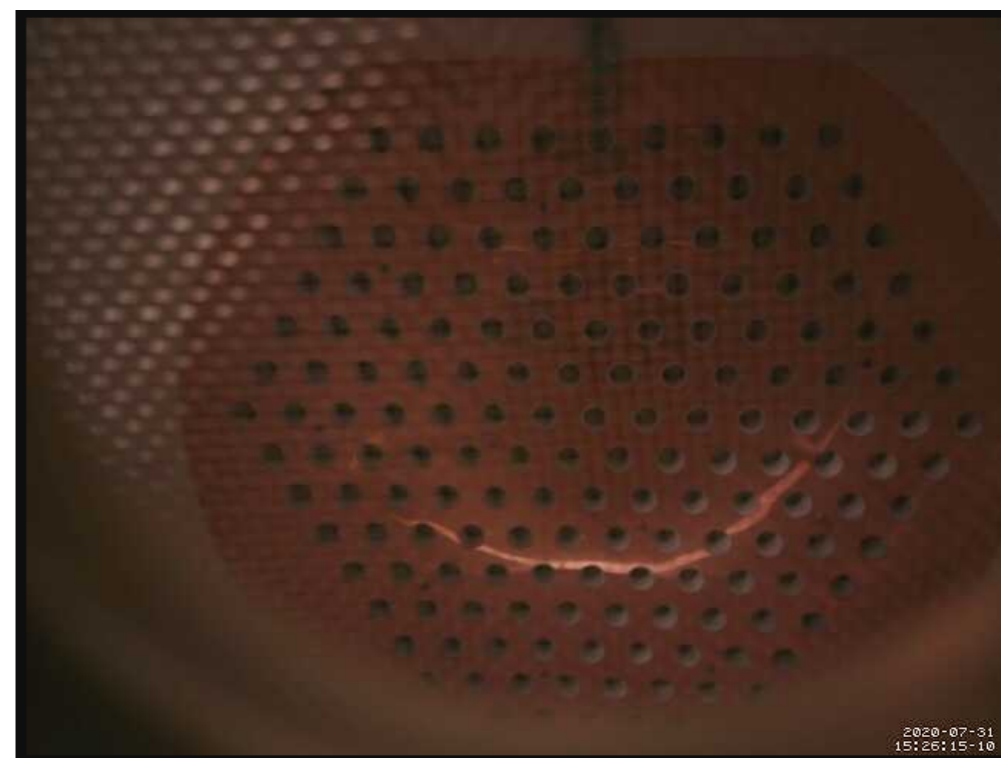
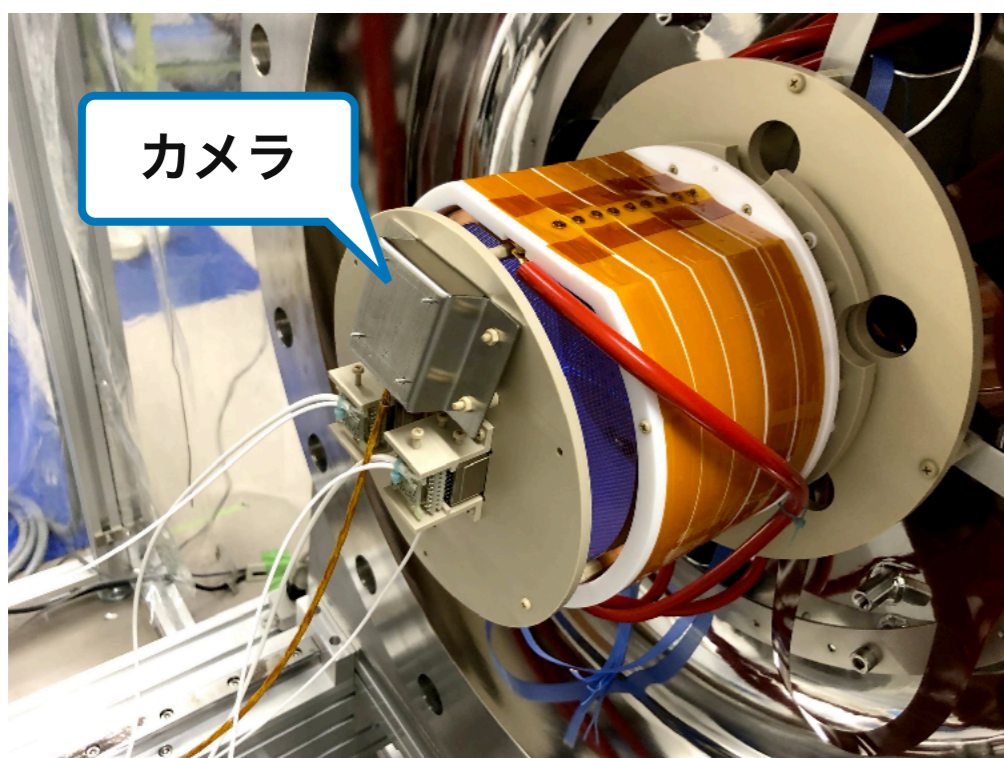
# カメラのインストール

- カメラからのアウトガス対策
  - 真空用USBケーブルに交換
  - 真空用エポキシでカメラをポッティング+真空脱泡



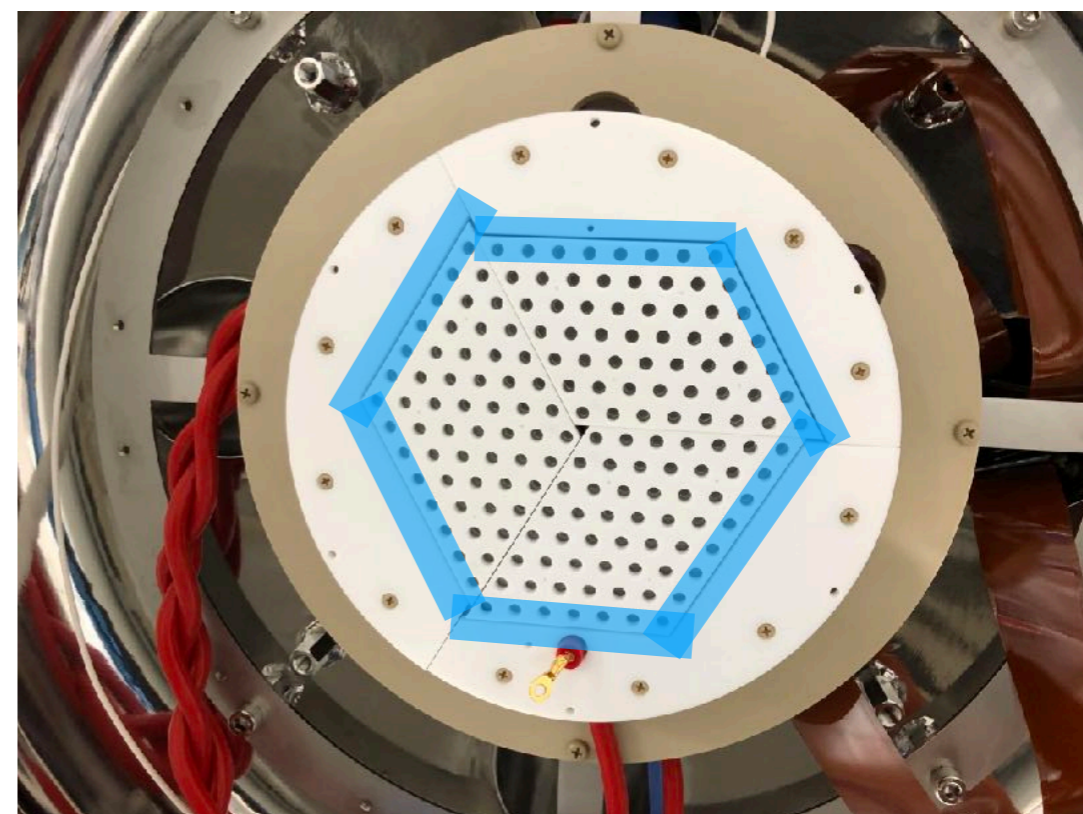
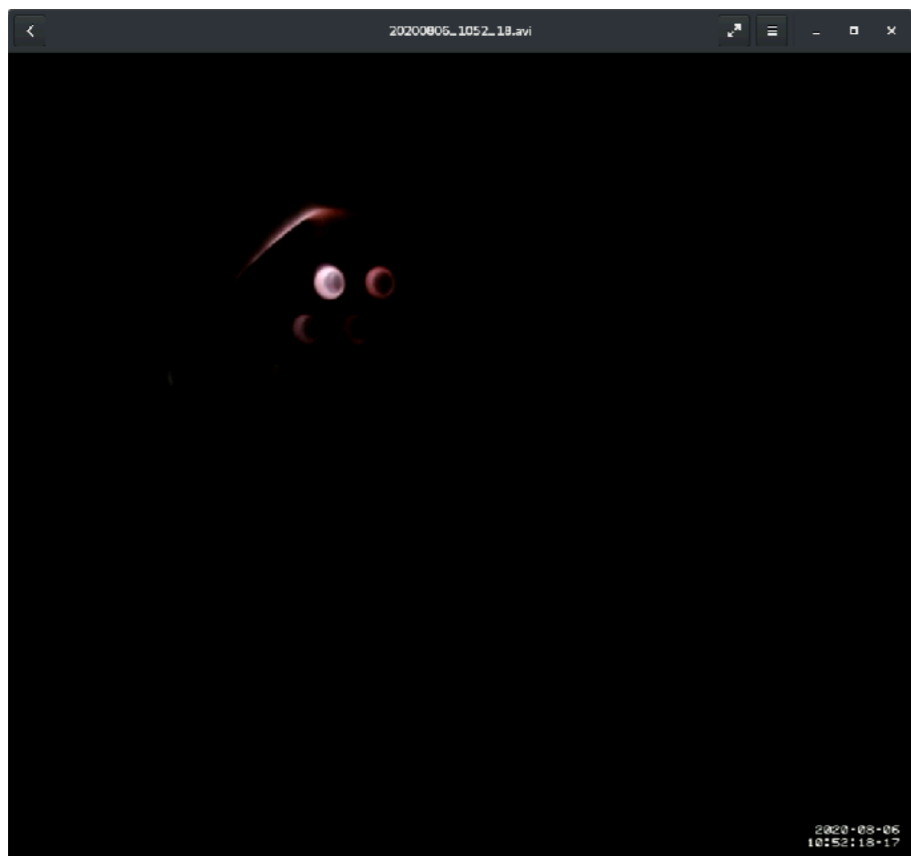
✓ アウトガス・リークレート： $1.96 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  → Swagelok系と同程度

- ELCCが見えるようにカメラをインストール



# 放電箇所の特定

- 動体検知アプリ motion で動体検知



ポリイミドシート  
(t125um)

anode電極

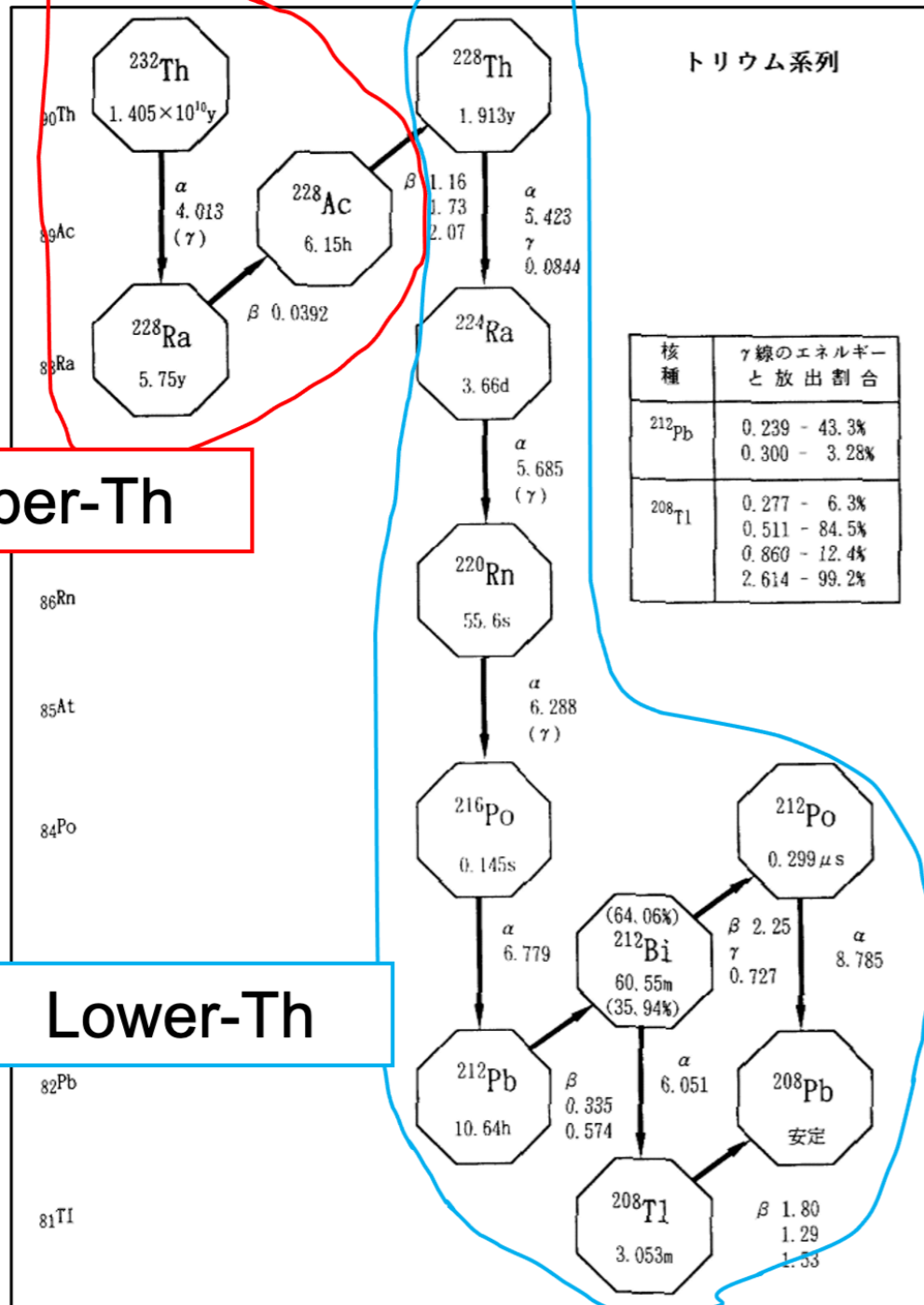
GNDメッシュ

電場が集中

- ✓ 外周部で放電が起こりやすい
- ✓ 外周部の裏側にGNDがなかったのが原因
- ✓ データ取得中のDAQトラブルも放電が原因だったことが判明

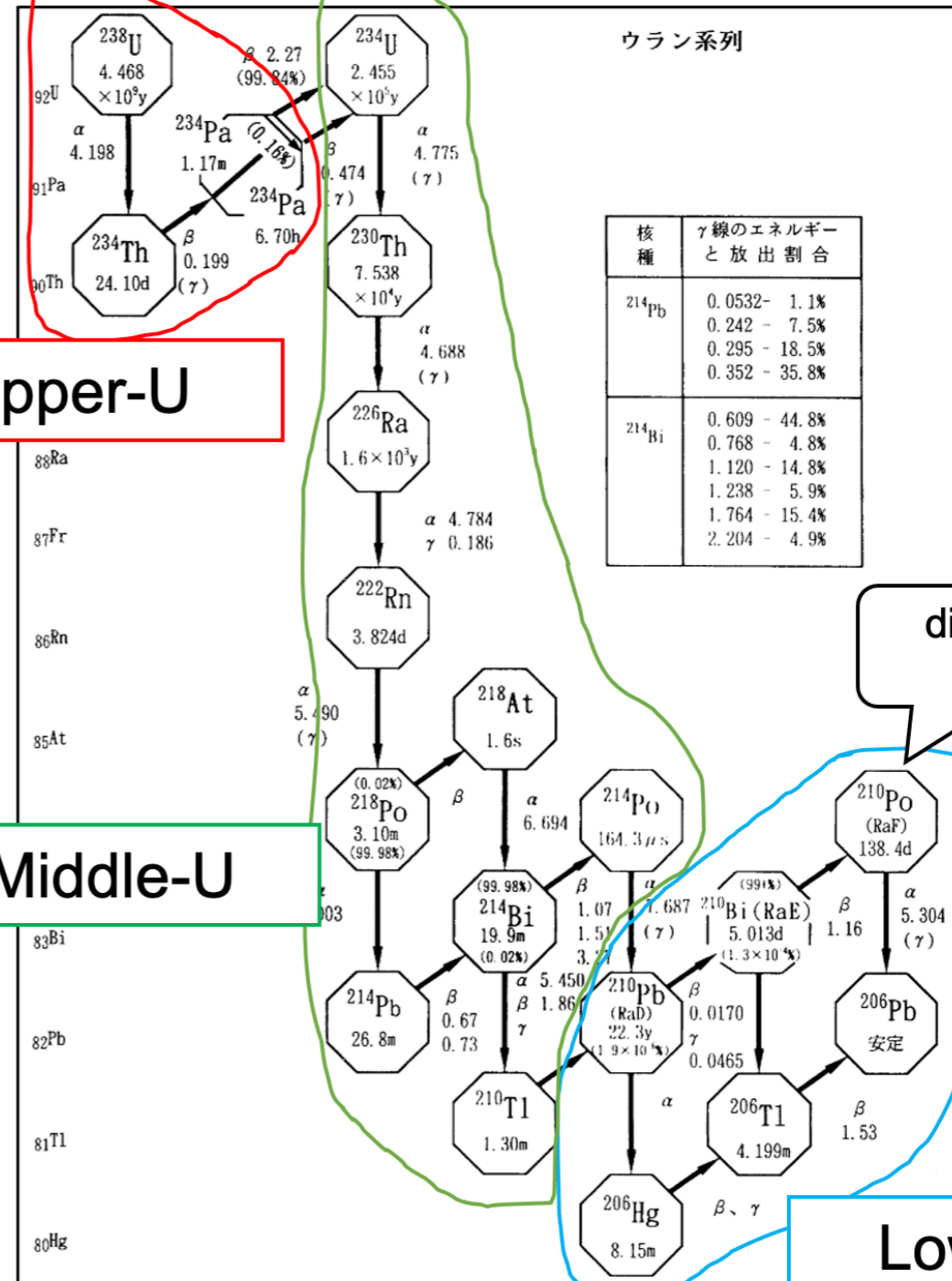


# 崩壊系列



Upper-Th

Lower-Th



Upper-U

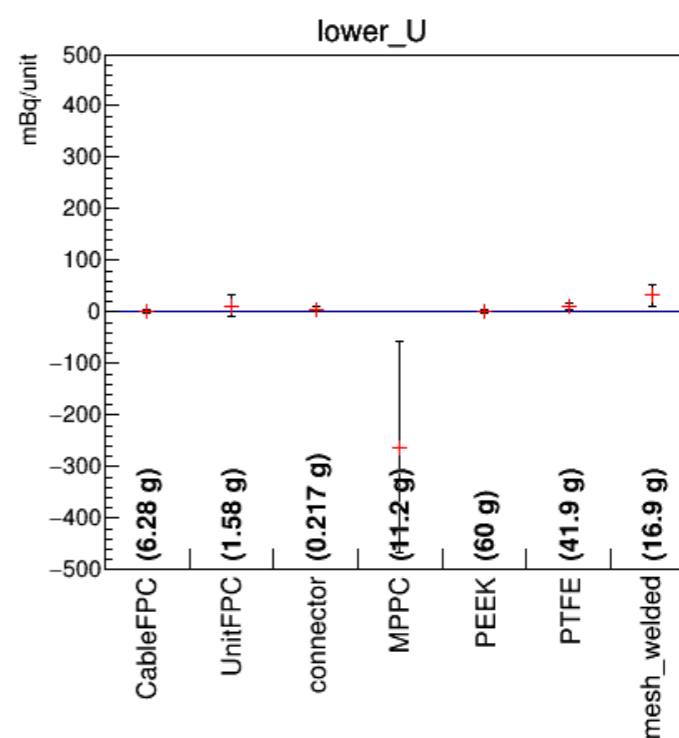
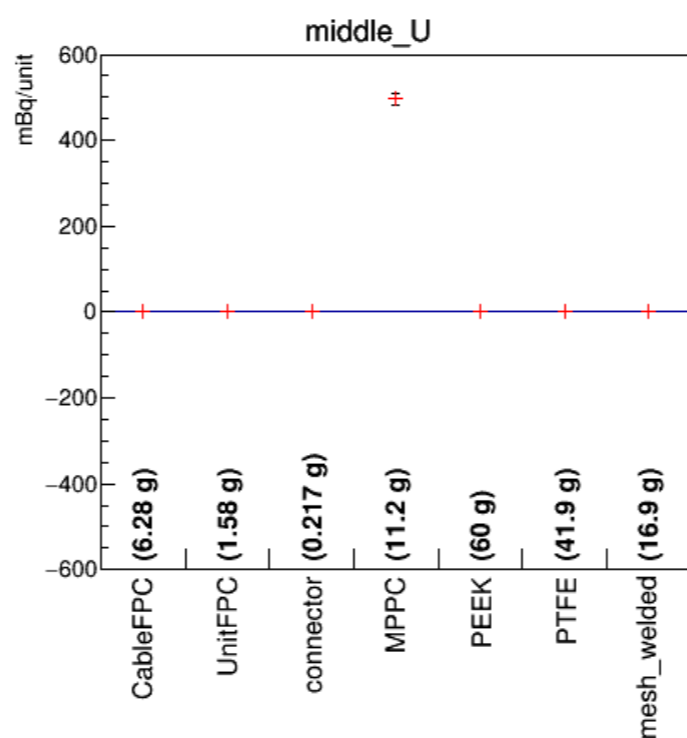
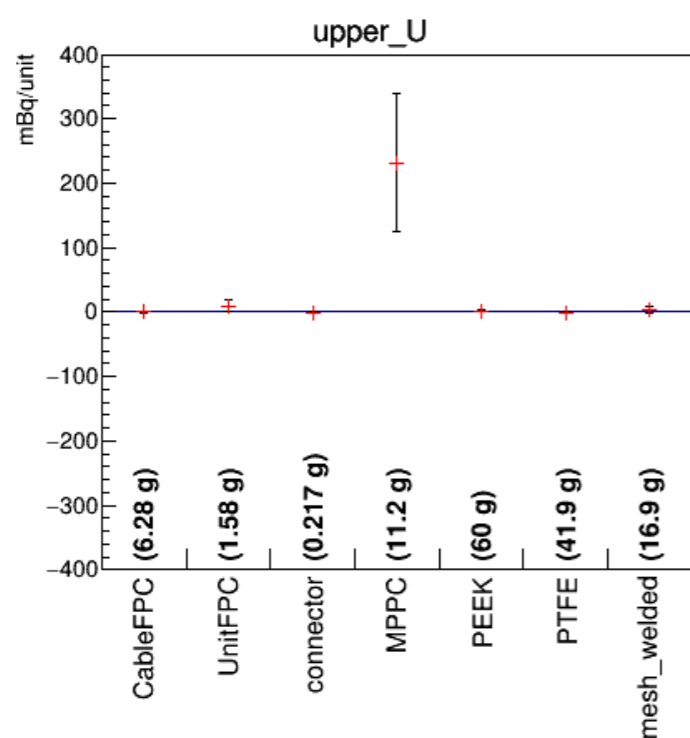
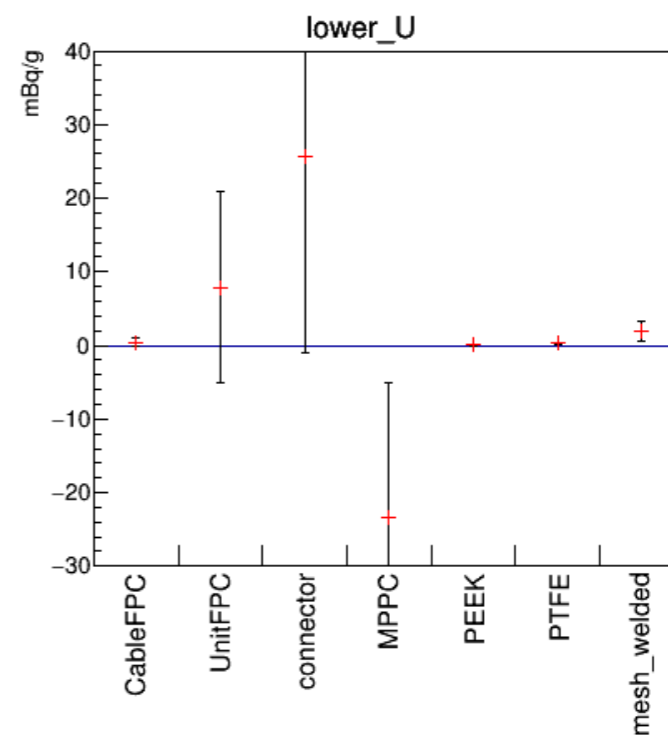
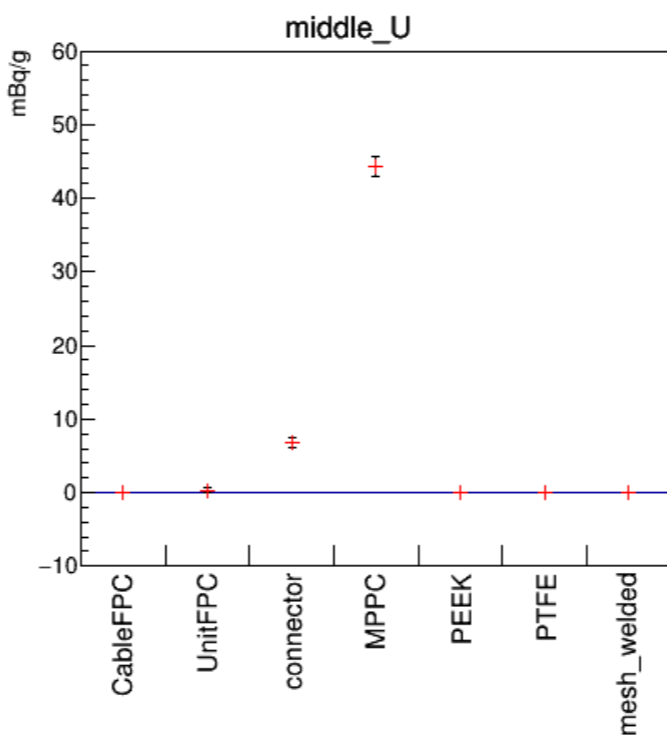
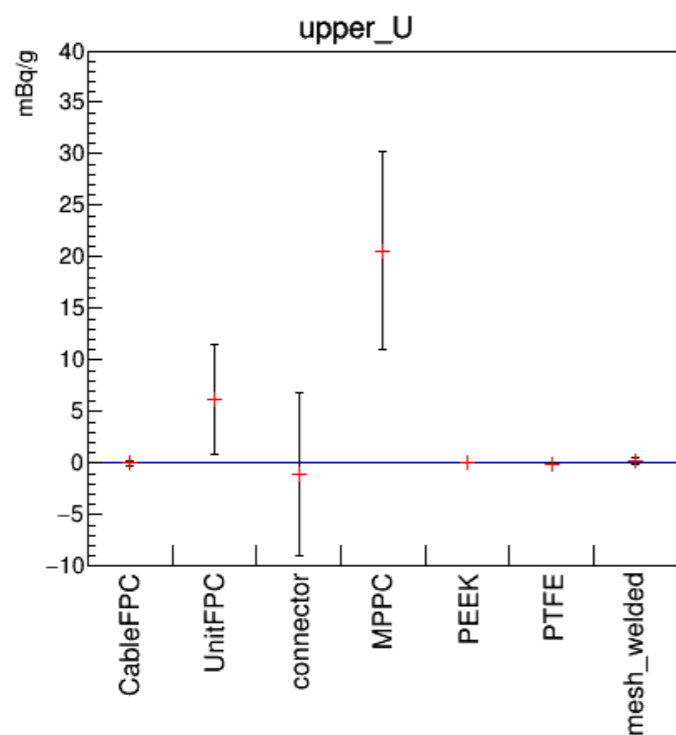
Middle-U

difficult for HPGc

Lower-U

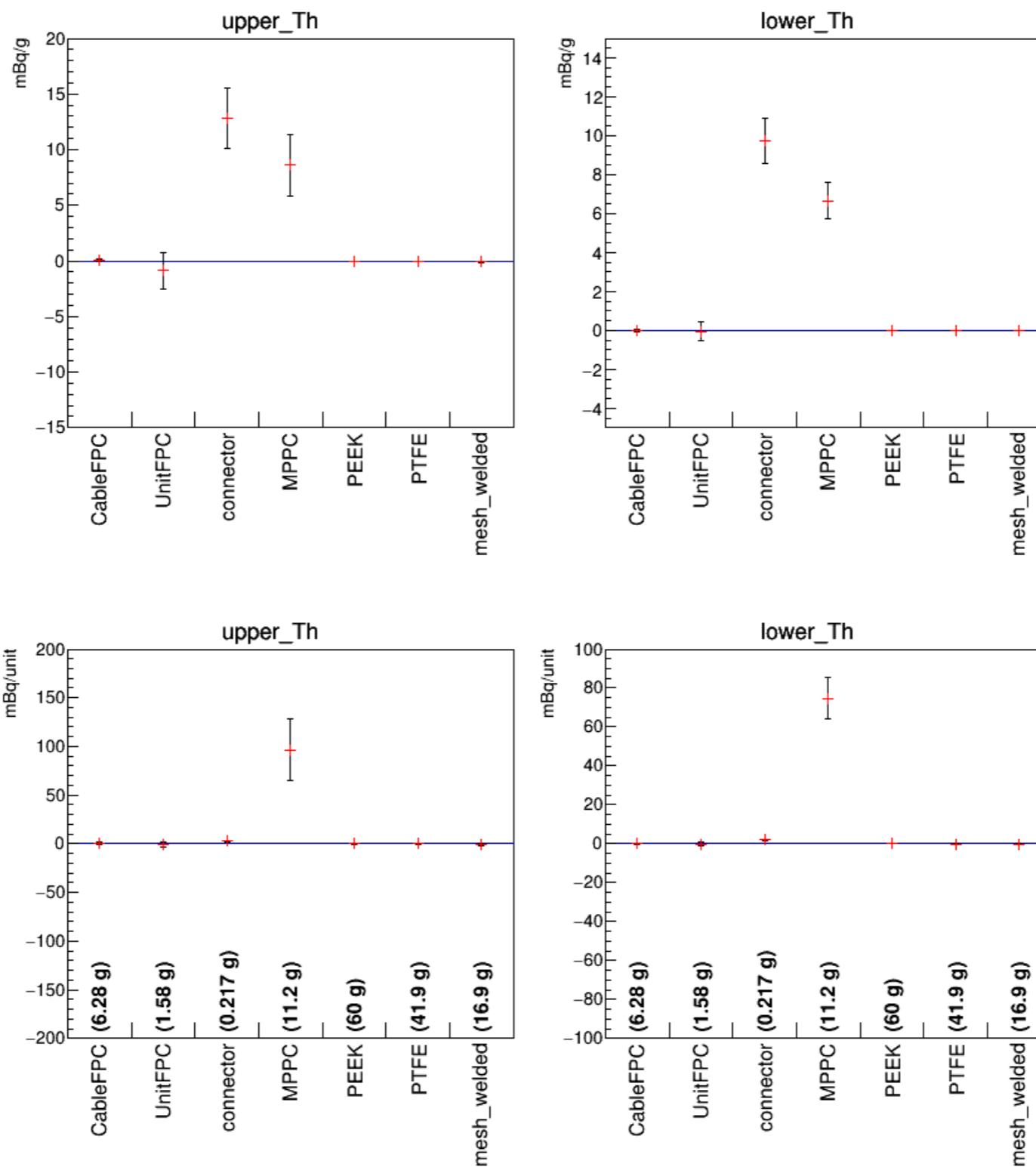
# 各コンポーネントの放射能

## ● ウラン系列



# 各コンポーネントの放射能

## ● トリウム系列





# 各コンポーネントの放射能

●  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$

