



# 地下実験のための低BG検出器性能評価

---

若手研究会

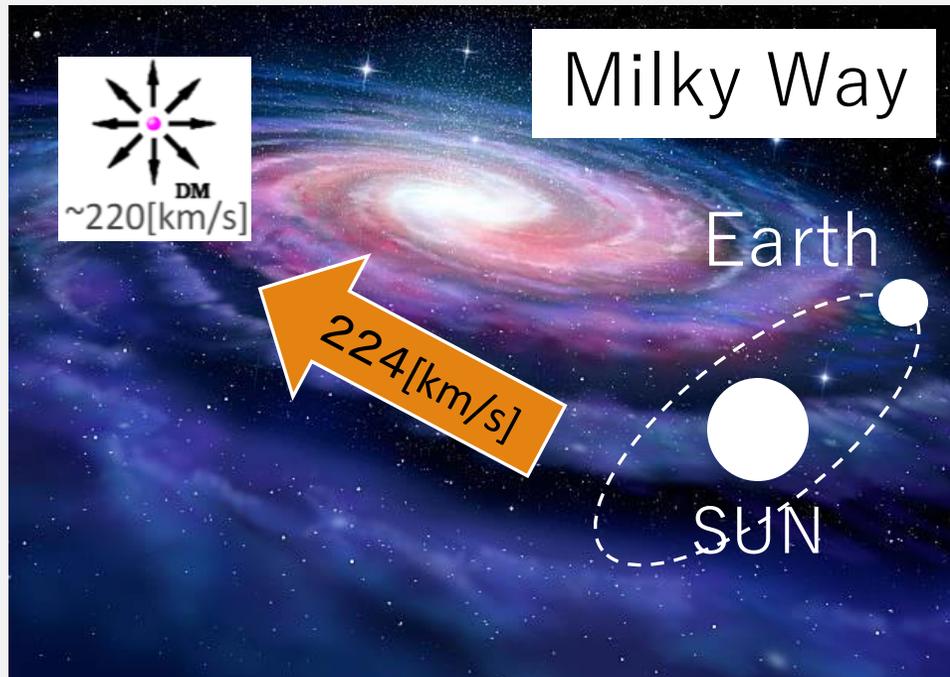
2024/3/7

神戸大学 生井凌太、身内賢太郎、東野聡

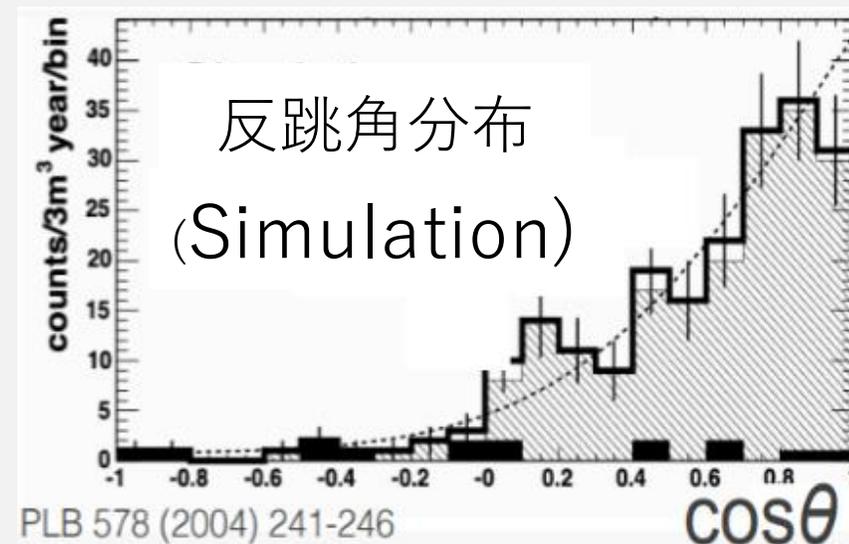
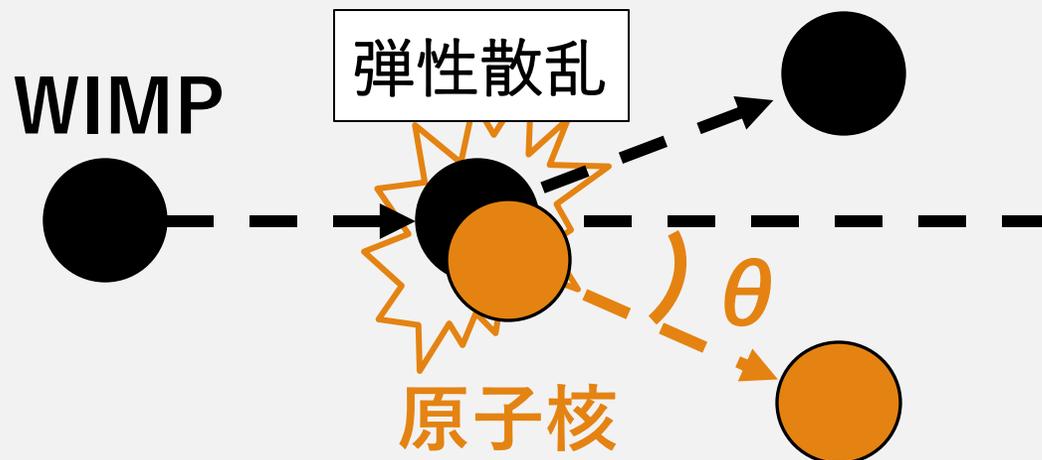
# Introduction

---

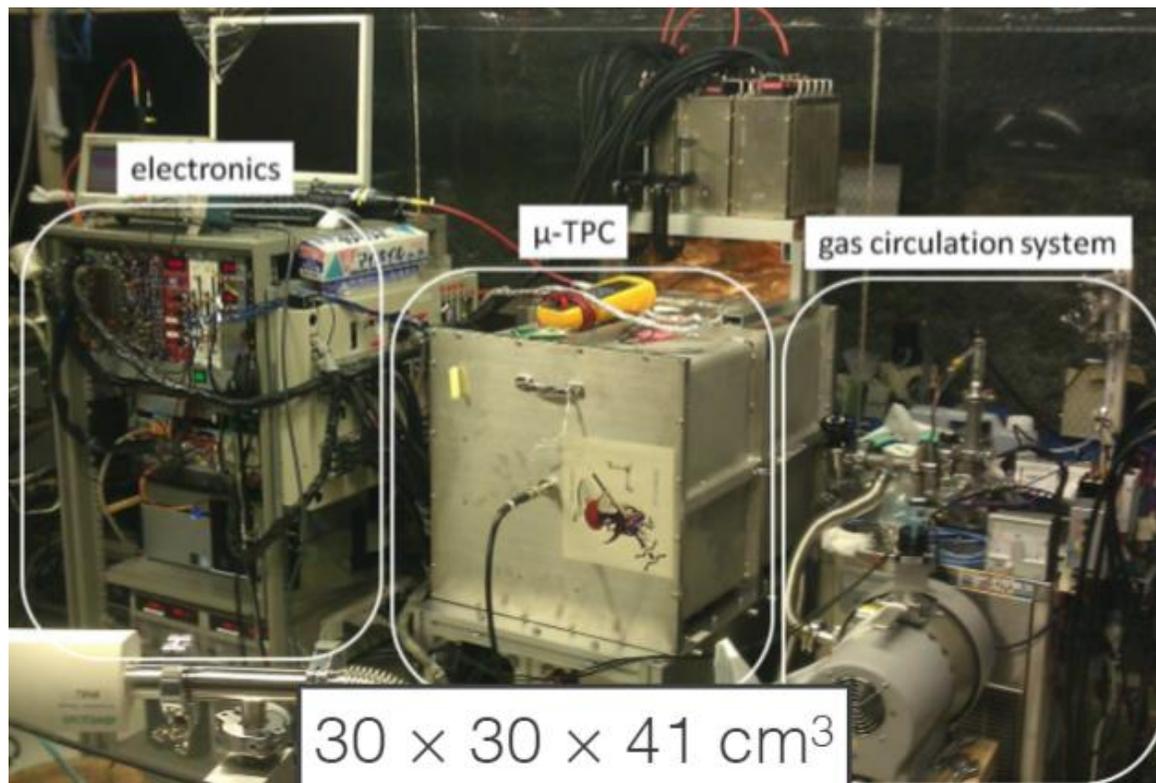
# 方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索



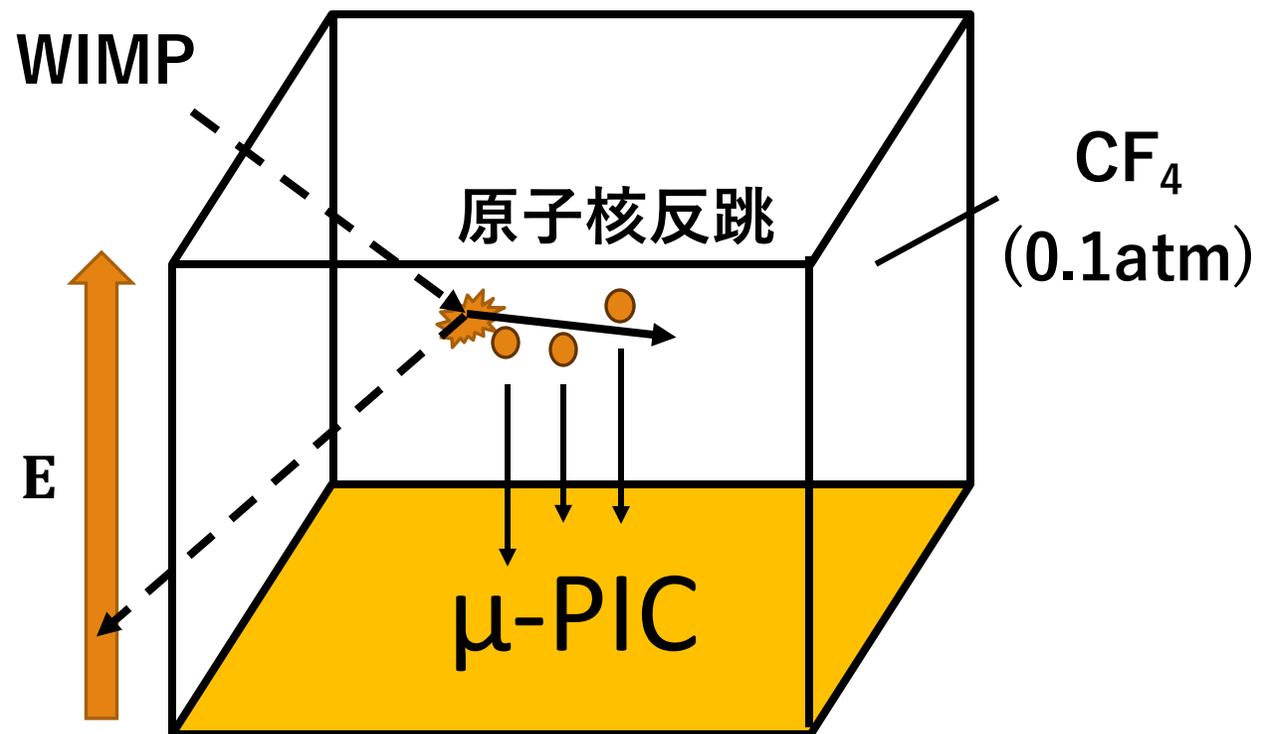
- WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)  
: 暗黒物質の候補粒子
- 太陽系の進行方向からのWIMPの到来量が多くなる  
→この方向依存性を観測する
- どうやって?  
→WIMPと原子核の弾性散乱での反跳角分布を見る



# NEWAGE実験

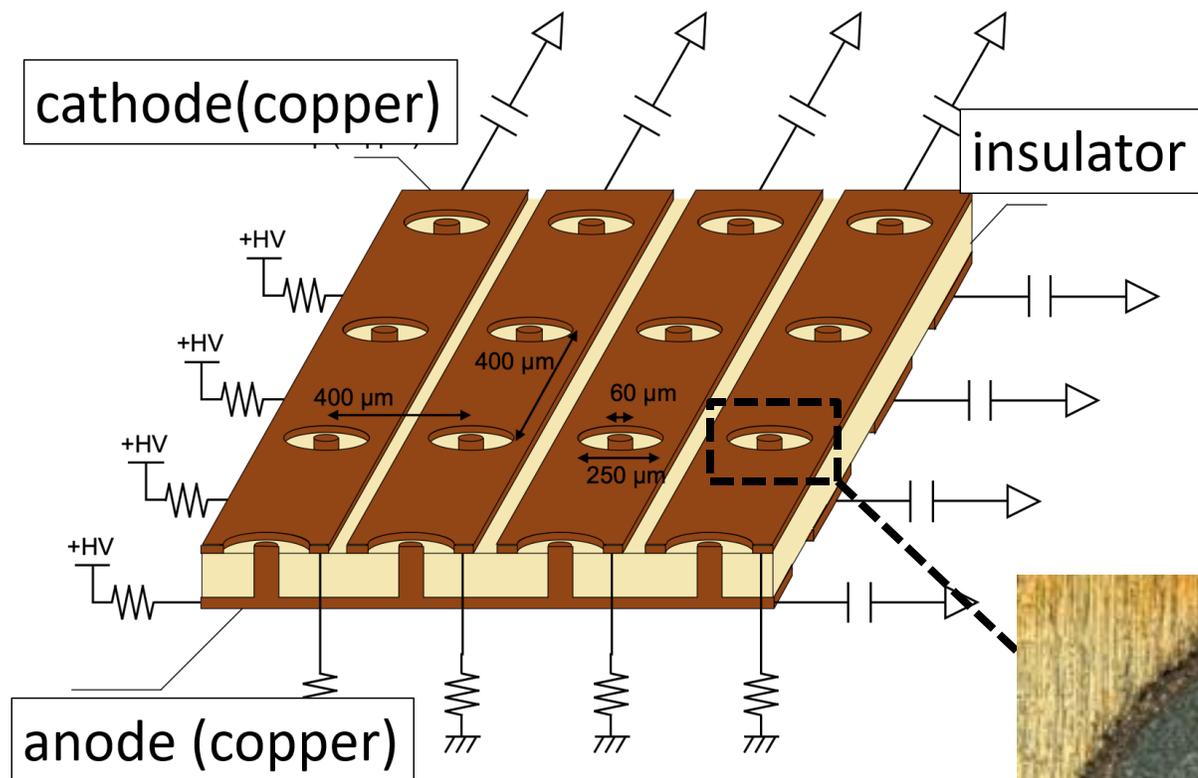


- 場所：神岡鉱山地下
- 検出器：ガスTPC

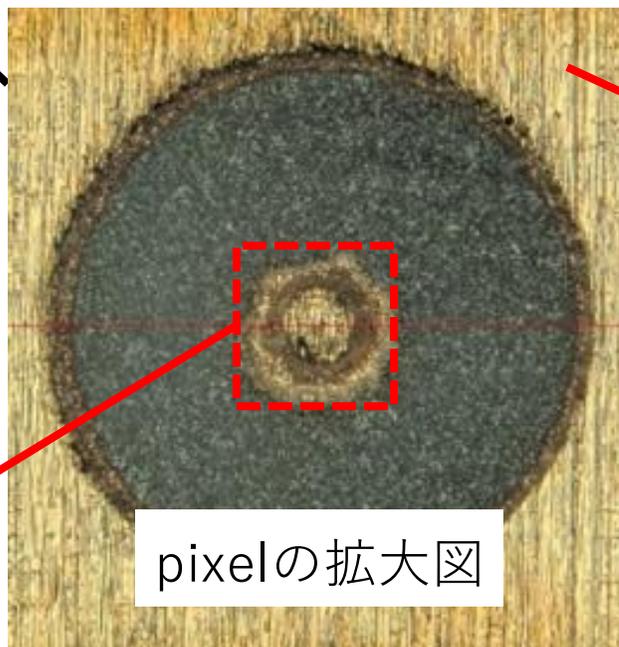


- $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)：2次元 + 1次元(時間)分解能を持つ検出器  
→ 3次元での飛跡が再構成できる

# $\mu$ -PIC

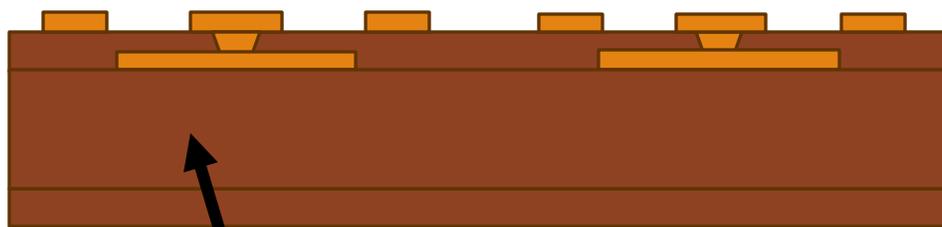


- anode-cathodeが直角に配列
- anode-cathode間に高電圧を印加  
→ 電子を増幅
- 各stripごとに読み出し



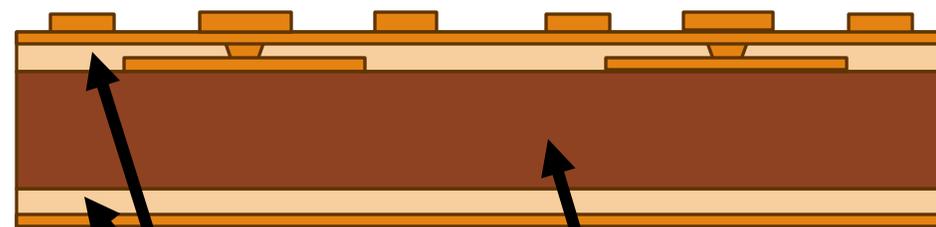
# $\mu$ -PIC開発の歴史

Original  $\mu$ -PIC



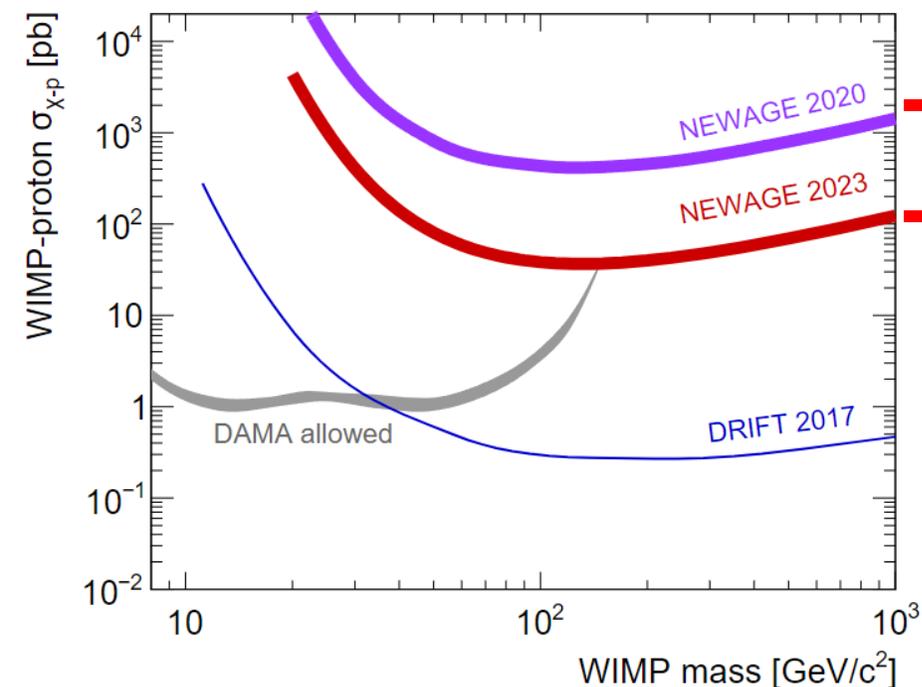
ポリイミド樹脂  
(ガラスクロス入り)

Low Alpha  $\mu$ -PIC (LA  $\mu$ -PIC: 2017-)



ポリイミド樹脂  
(ガラスクロスなし)

ポリイミド樹脂  
(ガラスクロス入り)



Original  $\mu$ -PIC

PTEP (2020) 113F01

LA  $\mu$ -PIC

PTEP (2023) 103F01

- 検出器から湧き出すラドンがバックグラウンド源に
- Rnを多く含むガラスクロスを減らした**LA  $\mu$ -PIC**を製作  
→ 感度が向上した

更なる低バックグラウンド化を！！

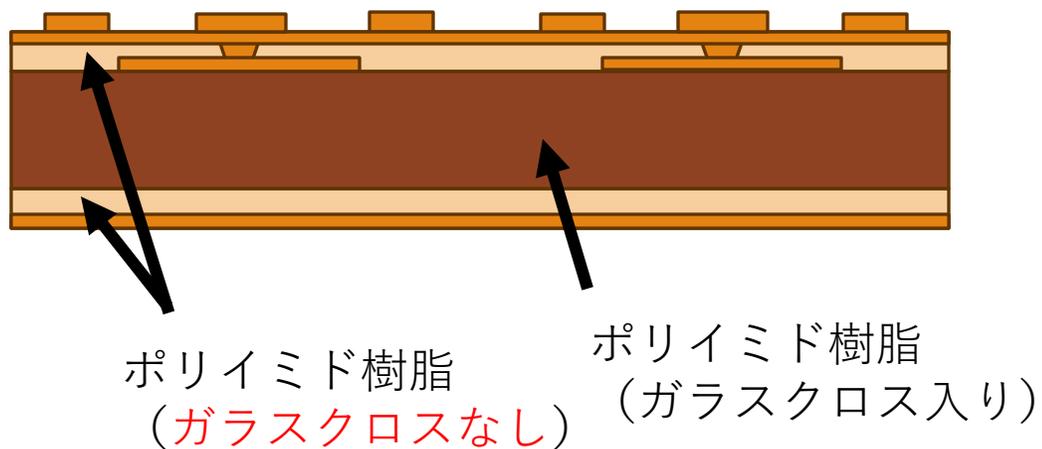
# Low Background $\mu$ -PIC (LBG $\mu$ -PIC)

従来  $\mu$ -PICからの変更点

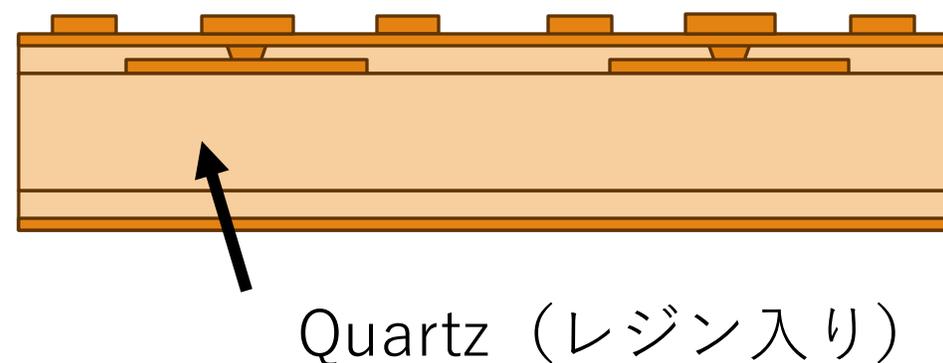
- ・ 使用素材の見直し → より低RIな素材へ
- ・ 構造の見直し → 基板と中継基板の一体化
- ・ 薄型化

コア材	$^{238}\text{U}$ upper [ppm]	$^{238}\text{U}$ middle [ppm]
ポリイミド樹脂 (ガラスクロス入り)	$(7.8 \times 0.1) \times 10^{-1}$	$(7.6 \times 0.1) \times 10^{-1}$
Quartz (レジジン入り)	$(5.6 \times 1.0) \times 10^{-3}$	$(5.1 \times 1.0) \times 10^{-3}$

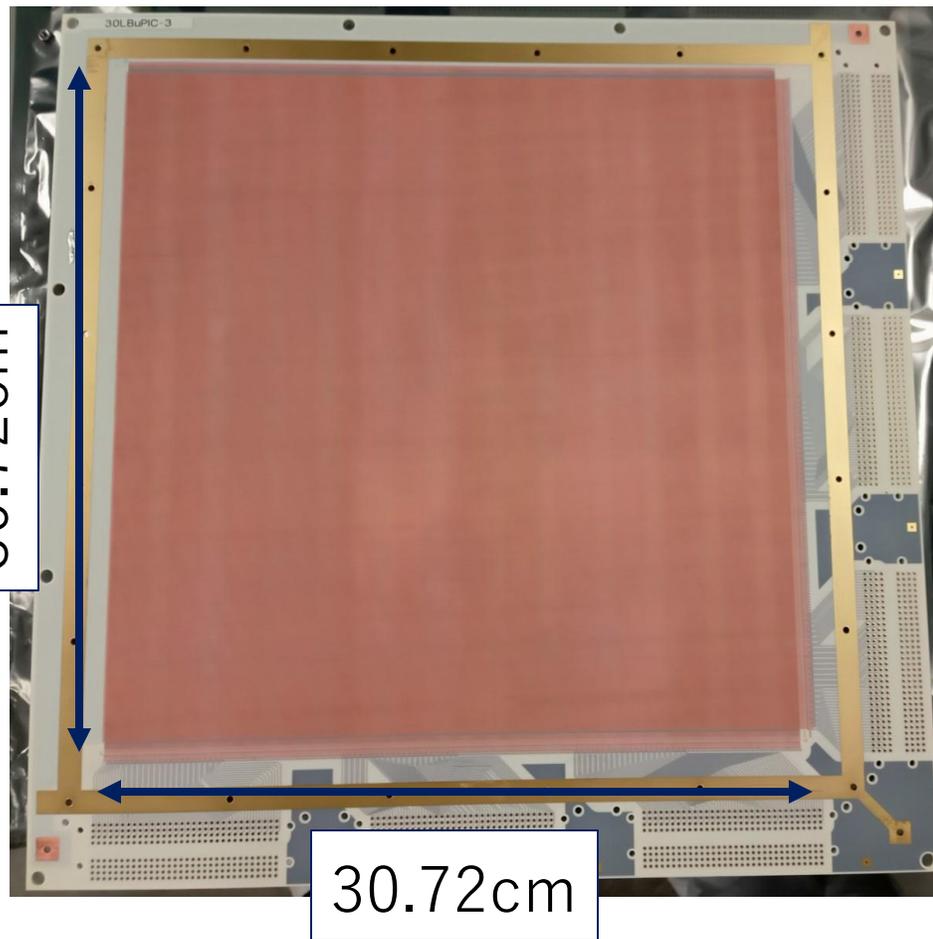
Low Alpha  $\mu$ -PIC (LA  $\mu$ -PIC: 2017-)



**LBG  $\mu$ -PIC (2023-)**



# LBG $\mu$ -PICの製作



2023年完成

製作：大日本印刷

低バックグラウンド素材：信越化学

→ 暗黒物質探索実験に使えるか 性能評価

本研究の目的

requirements

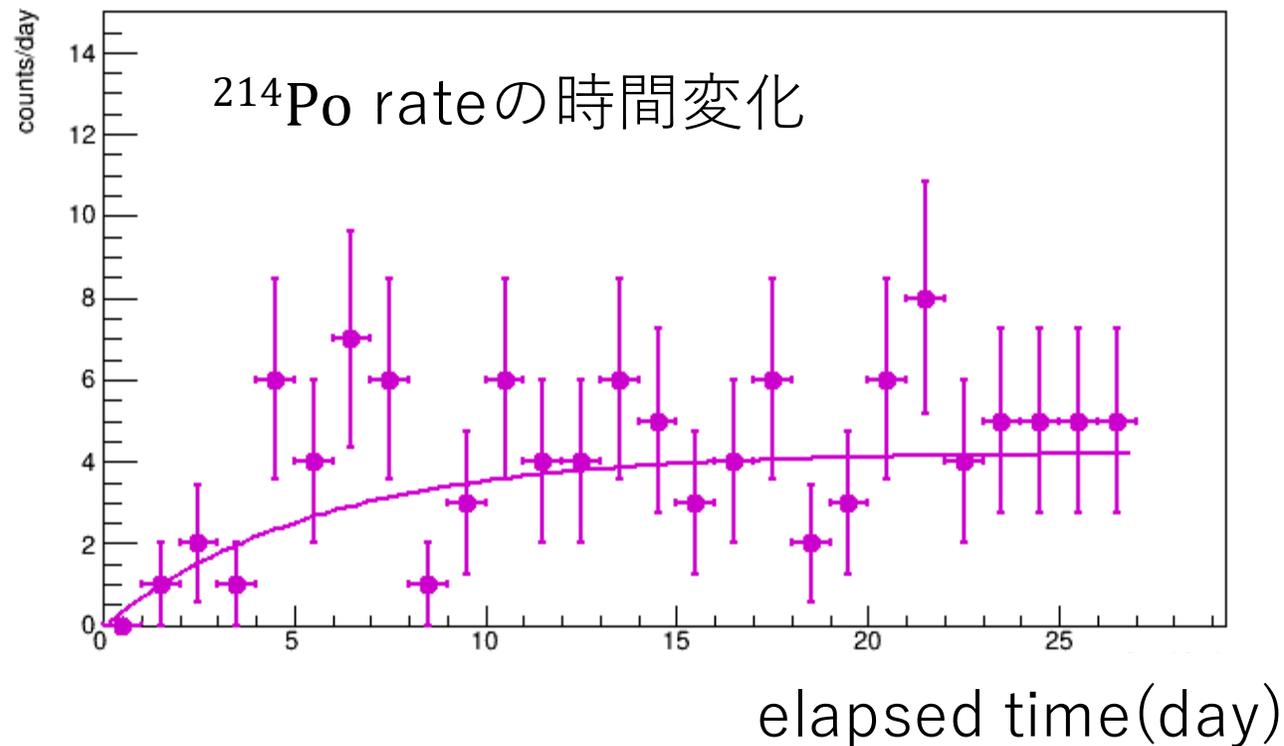
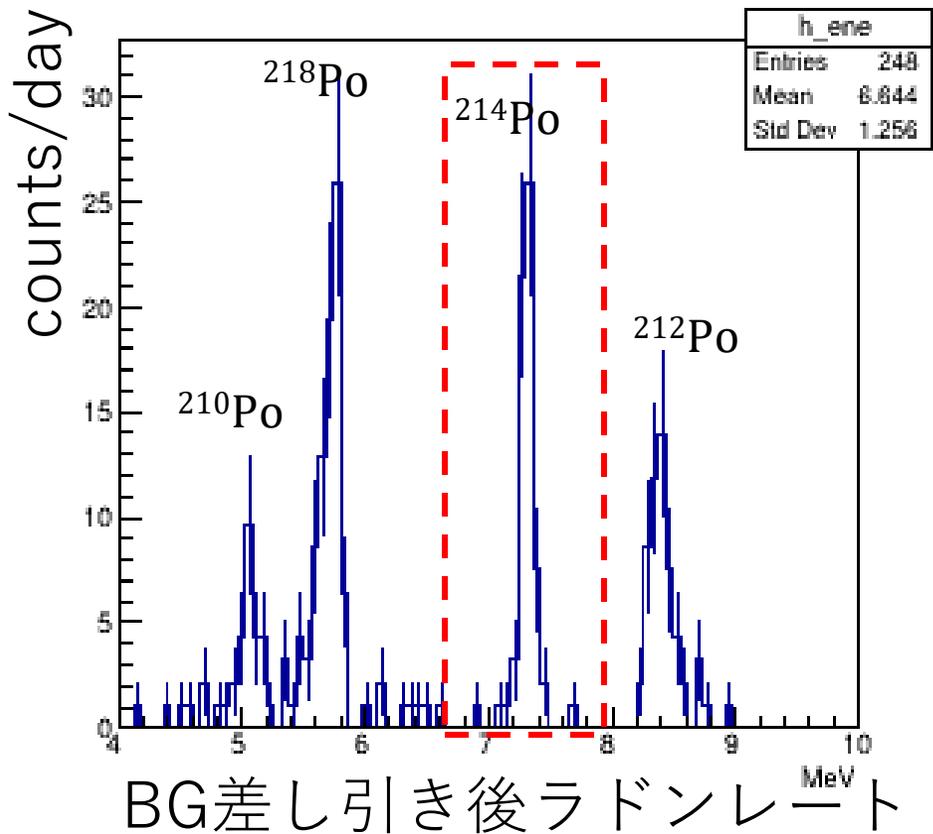
- 放出 Rn rate : LA $\mu$ -PICの1/10以下
- gain :  $\geq 1000$  in CF<sub>4</sub> (76torr)
- gain uniformity :  $< 20\%$  RMS

# 性能評価

---

# ラドン量測定

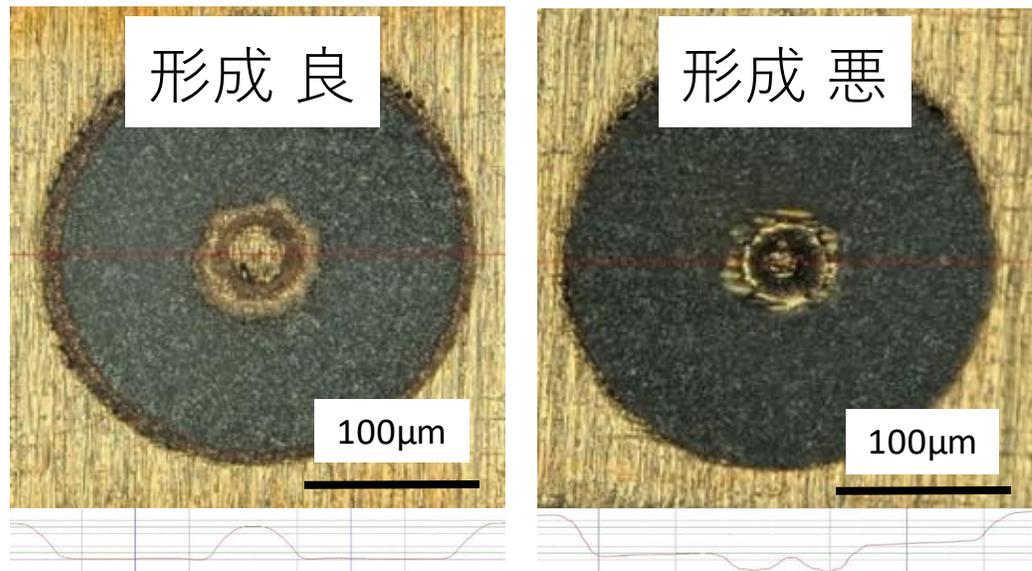
- 静電捕集法で $^{222}\text{Rn}$ 娘核の $^{214}\text{Po}$ レートを測定



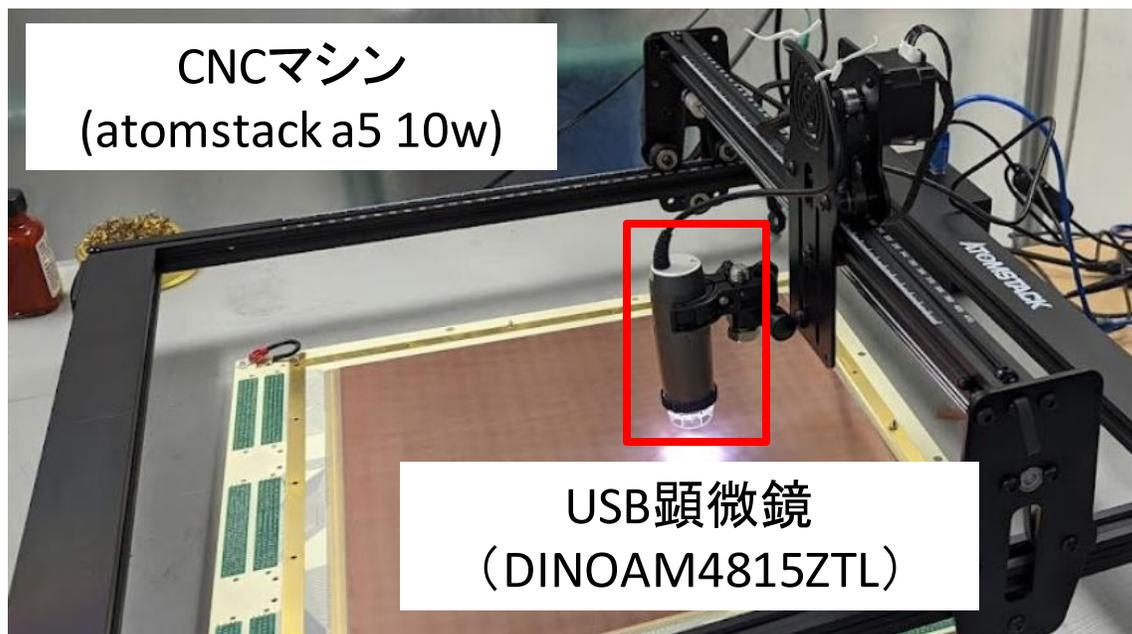
- 従来と比較して $< 1/60$ のラドン量に減少

Sample	Radon rate [mBq/chamber]
従来 $\mu$ -PIC	$2.3 \pm 0.5$
LBG $\mu$ -PIC	$< 0.03$ (90% C.L)

# pixel形成状態の確認



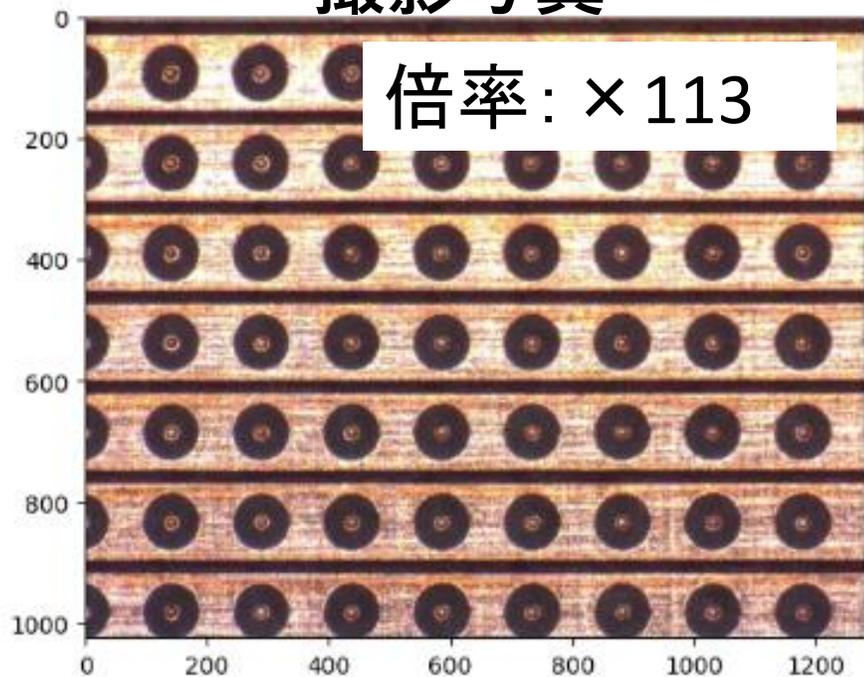
- pixelの形状が変わる→ゲインも変わる
  - カソード半径大
  - アノード陥没 } ゲイン低下
- 形成状態は一様であることが望ましい



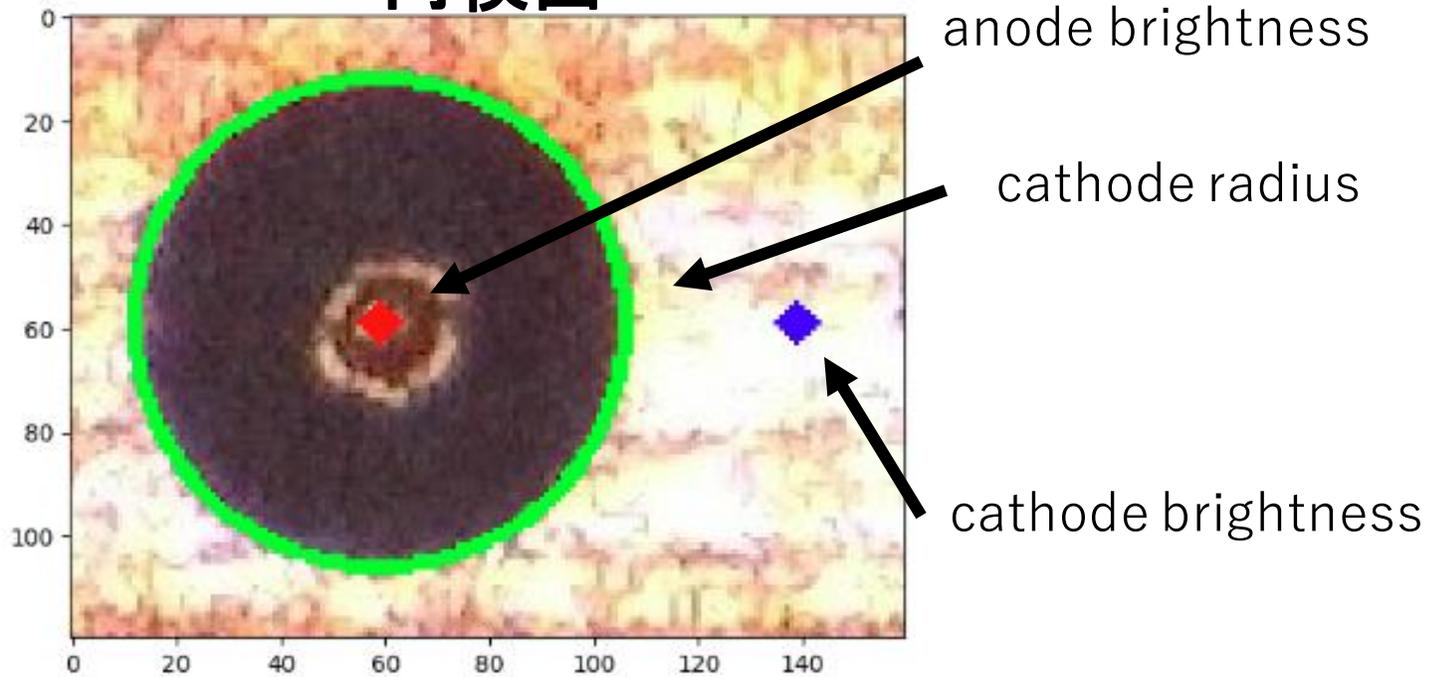
- 神戸大学にある顕微鏡では測定できない  
→ CNCマシン + USB顕微鏡で自作
- 測定用マクロを作成
  - CNCマシン：シリアル通信
  - USB顕微鏡：専用softwareを制御
- 撮影速度： $\sim 1000\text{cm}^2/\text{day}$
- 撮影枚数： $170 \times 170$

# pixel形成状態の確認

撮影写真



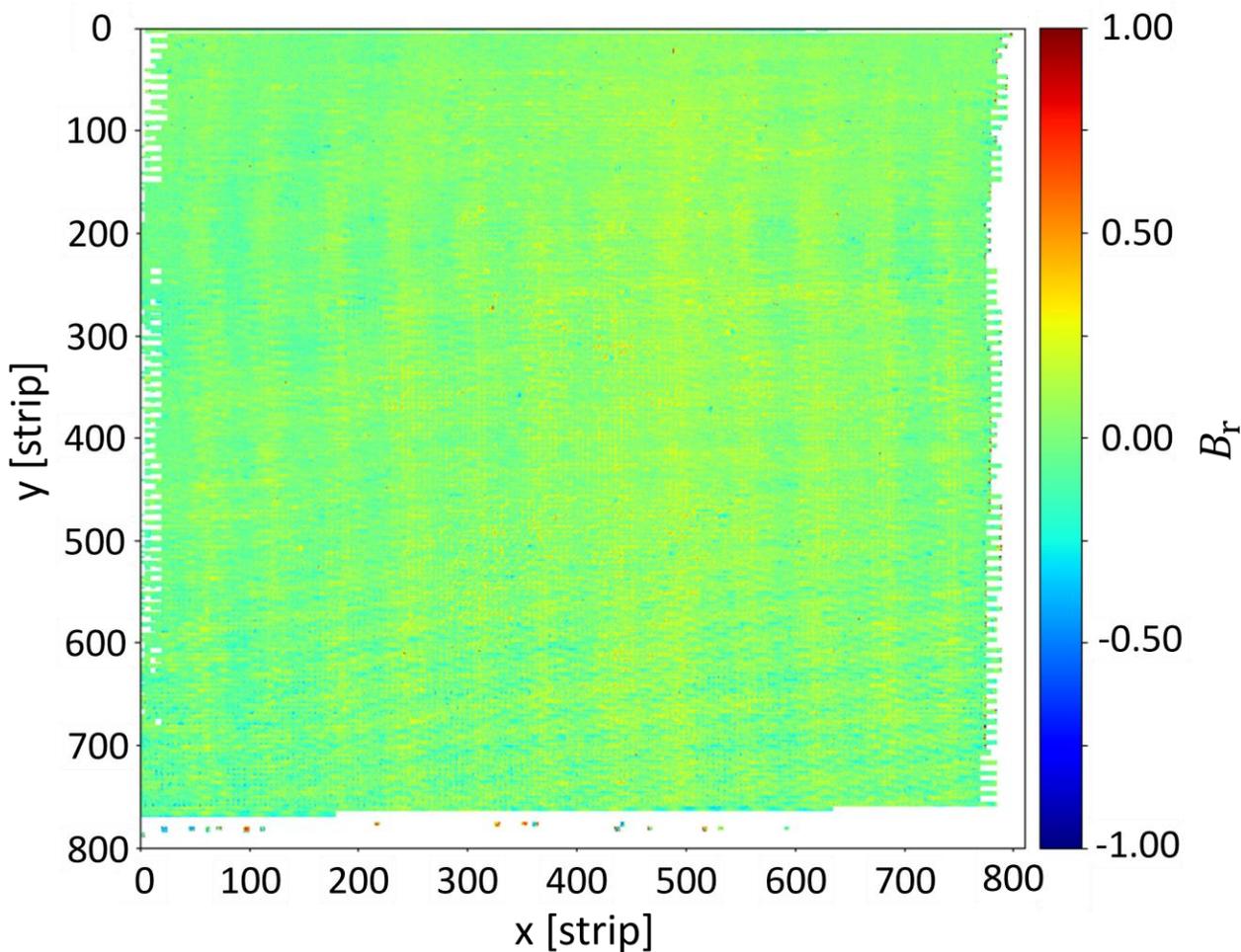
円検出



- 撮影写真の解析
- 各写真をPythonで画像処理 → 円検出
  - cathode半径
  - anode、cathodeの明るさを取得

# pixel形成状態の確認

$Br$ 二次元分布

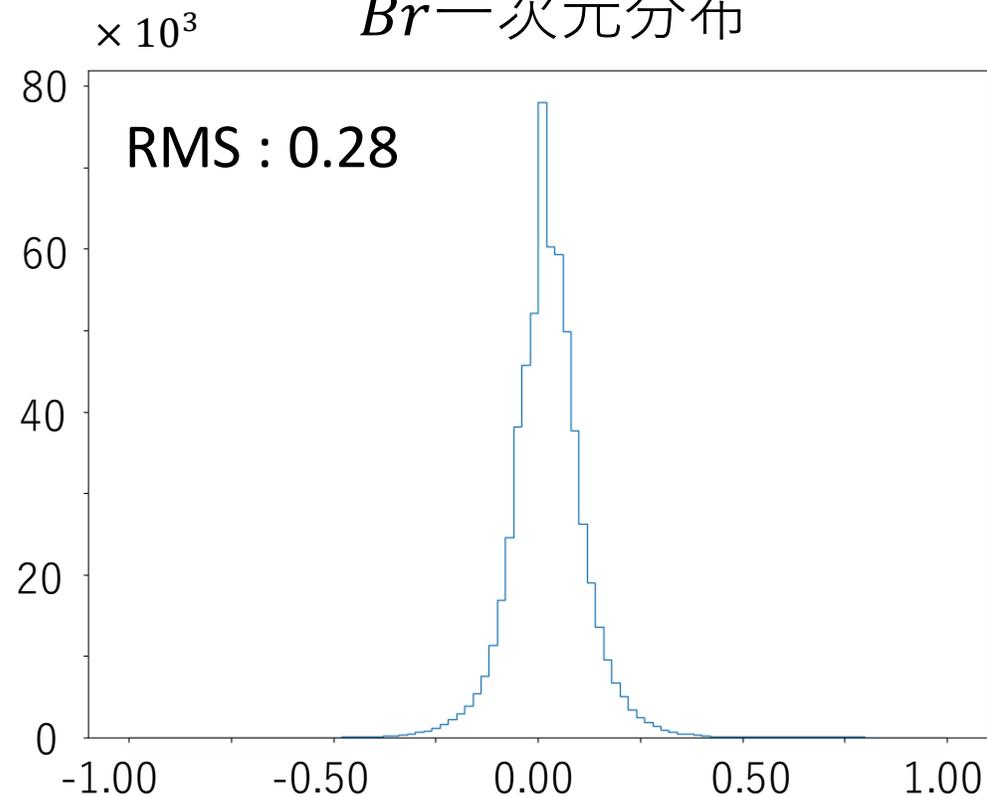


- ・基板の変色などの影響を排除するため

$$Br = \frac{\text{anodeの明るさ} - \text{cathodeの明るさ}}{\text{cathodeの明るさ}}$$

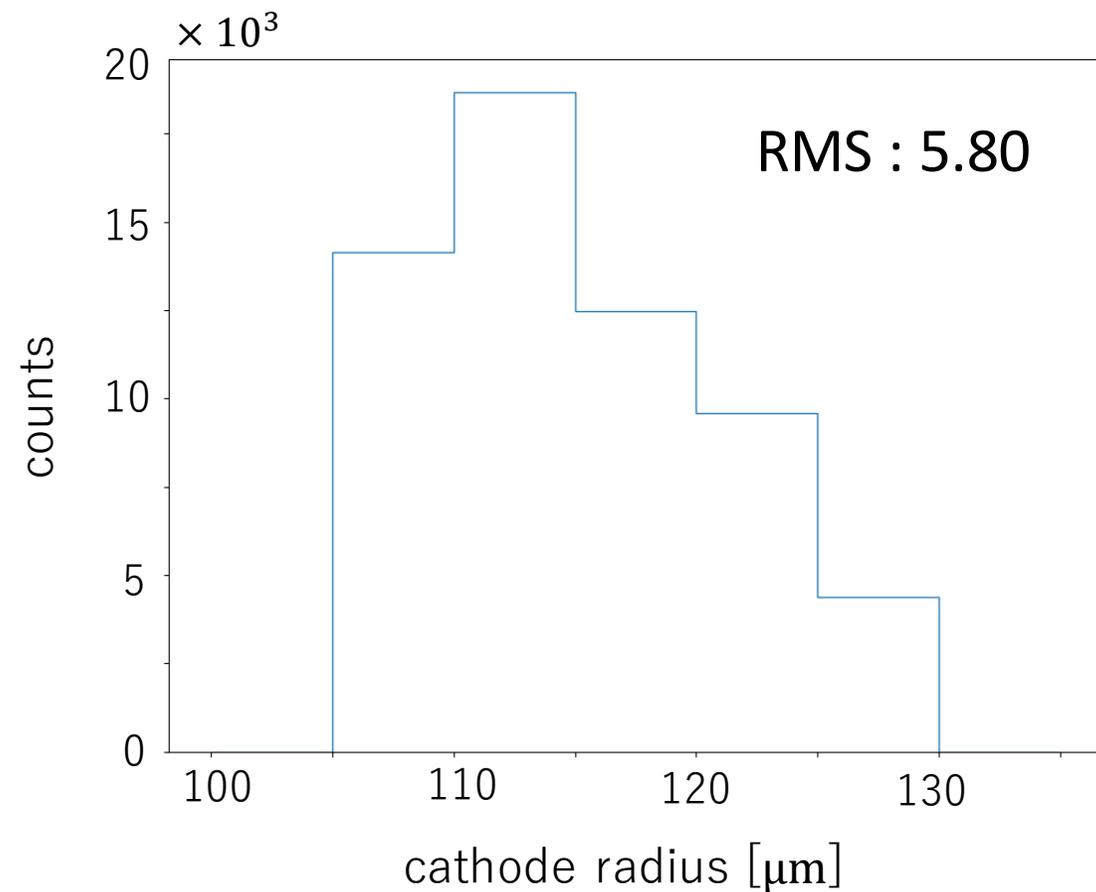
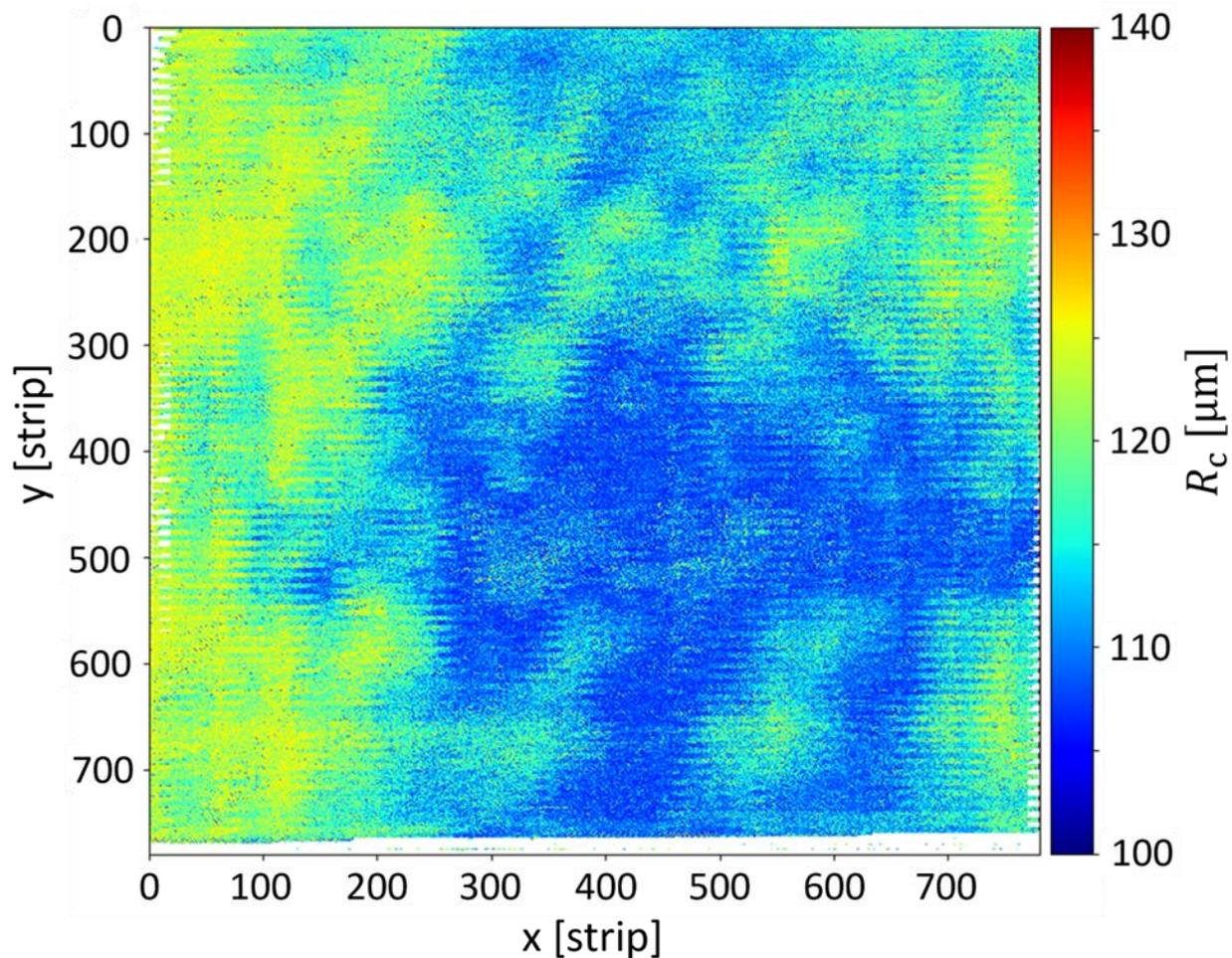
と定義

$Br$ 一次元分布



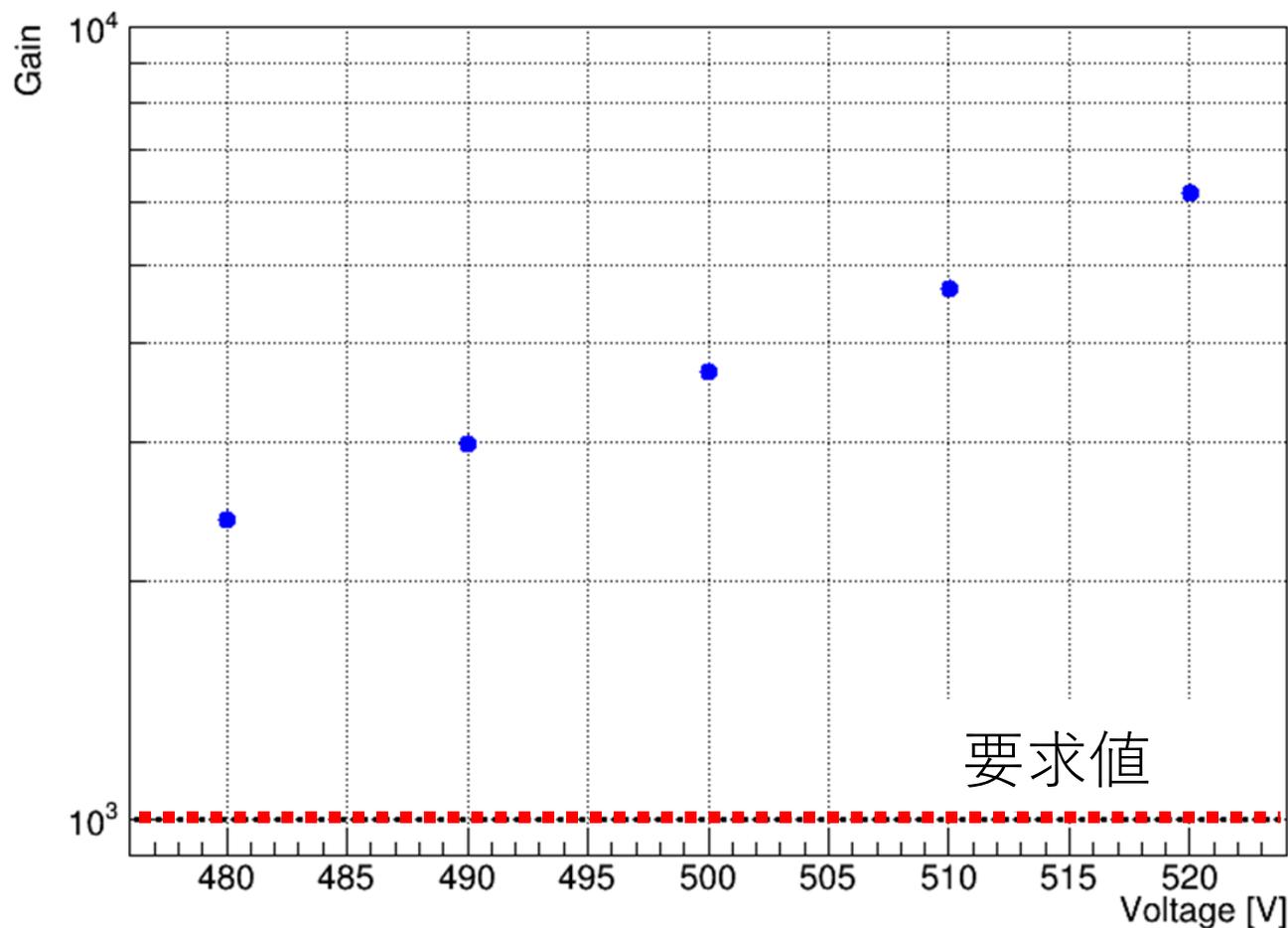
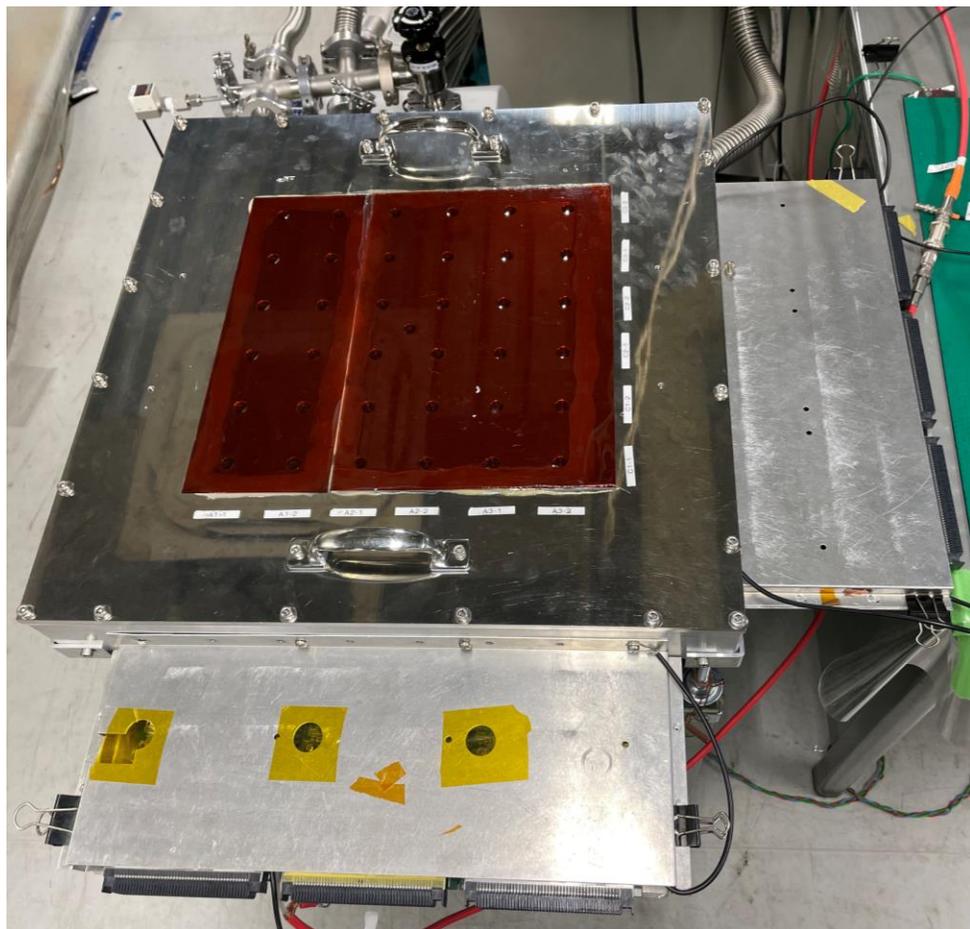
# pixel形成状態の確認

cathode半径分布



- 最大約25 $\mu\text{m}$ のばらつきがみられる  
ゲインへの影響は？  
→ゲイン測定へ

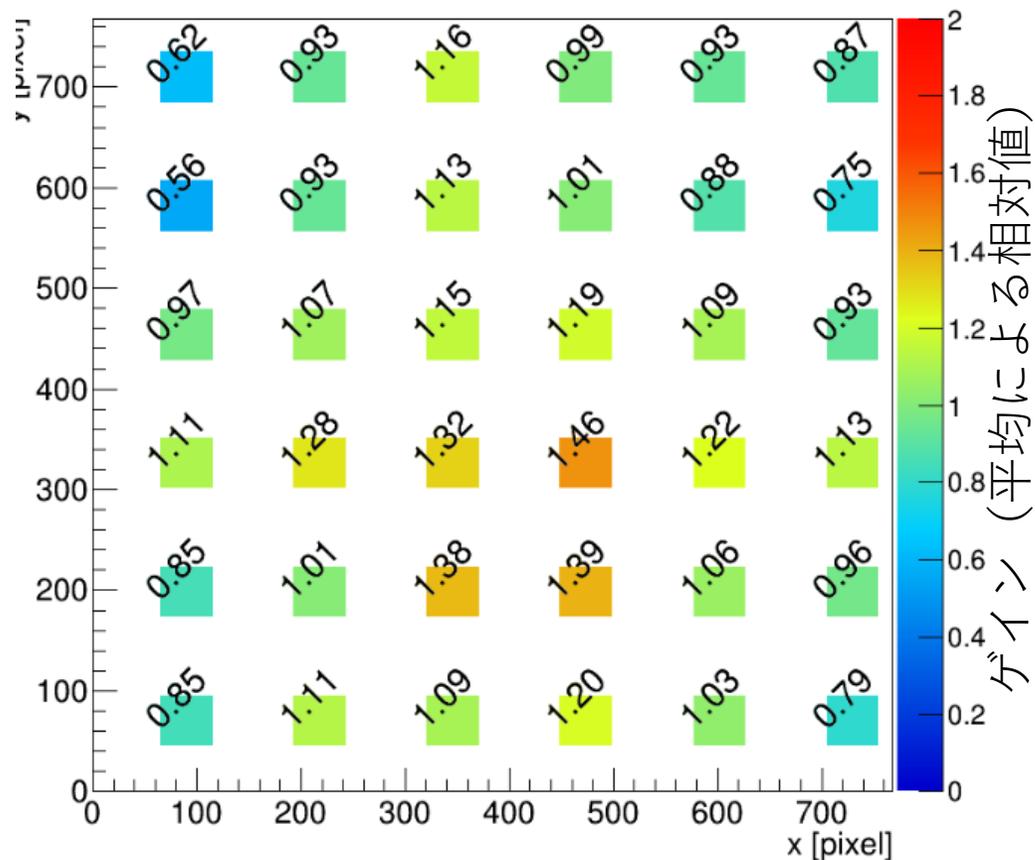
# ゲイン測定



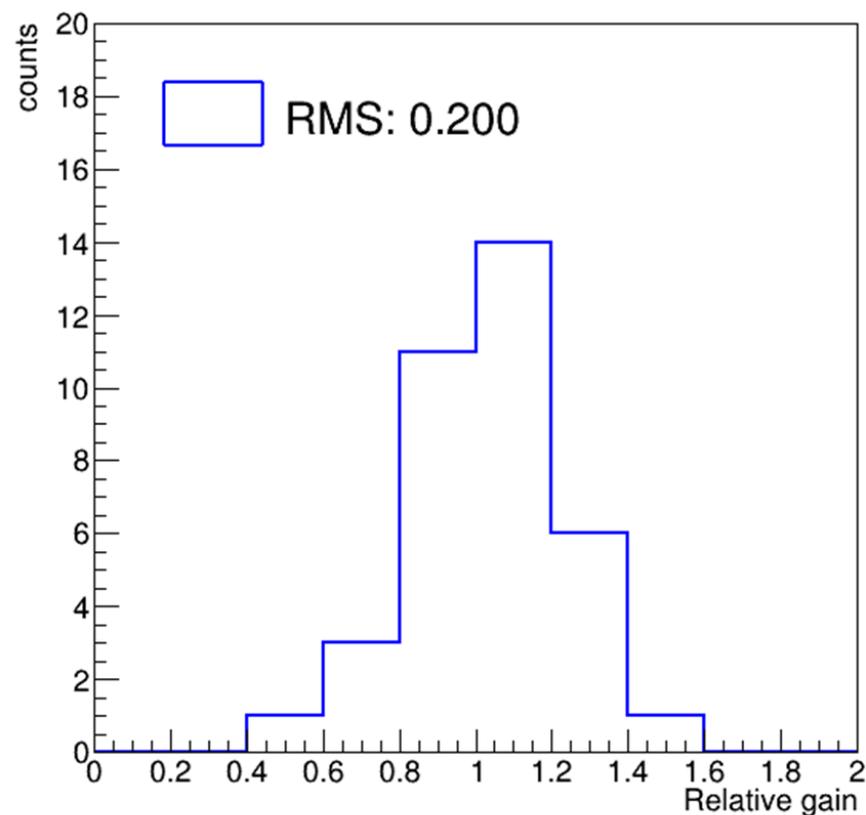
- 等間隔に $6 \times 6$ 点箇所ゲイン測定 ( $^{55}\text{Fe}$ )、平均値を計算
- anode-cathode間 < 480V で要求値を超えるゲインを確認

# ゲイン一様性測定

ゲイン (二次元分布)



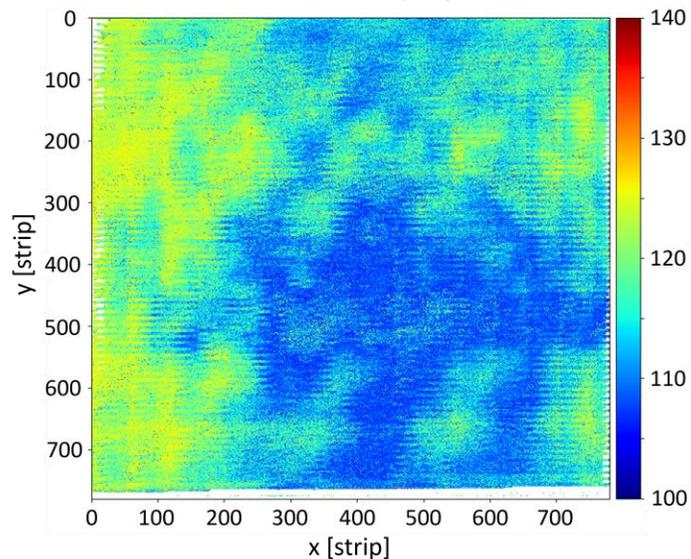
ゲイン (一次元分布)



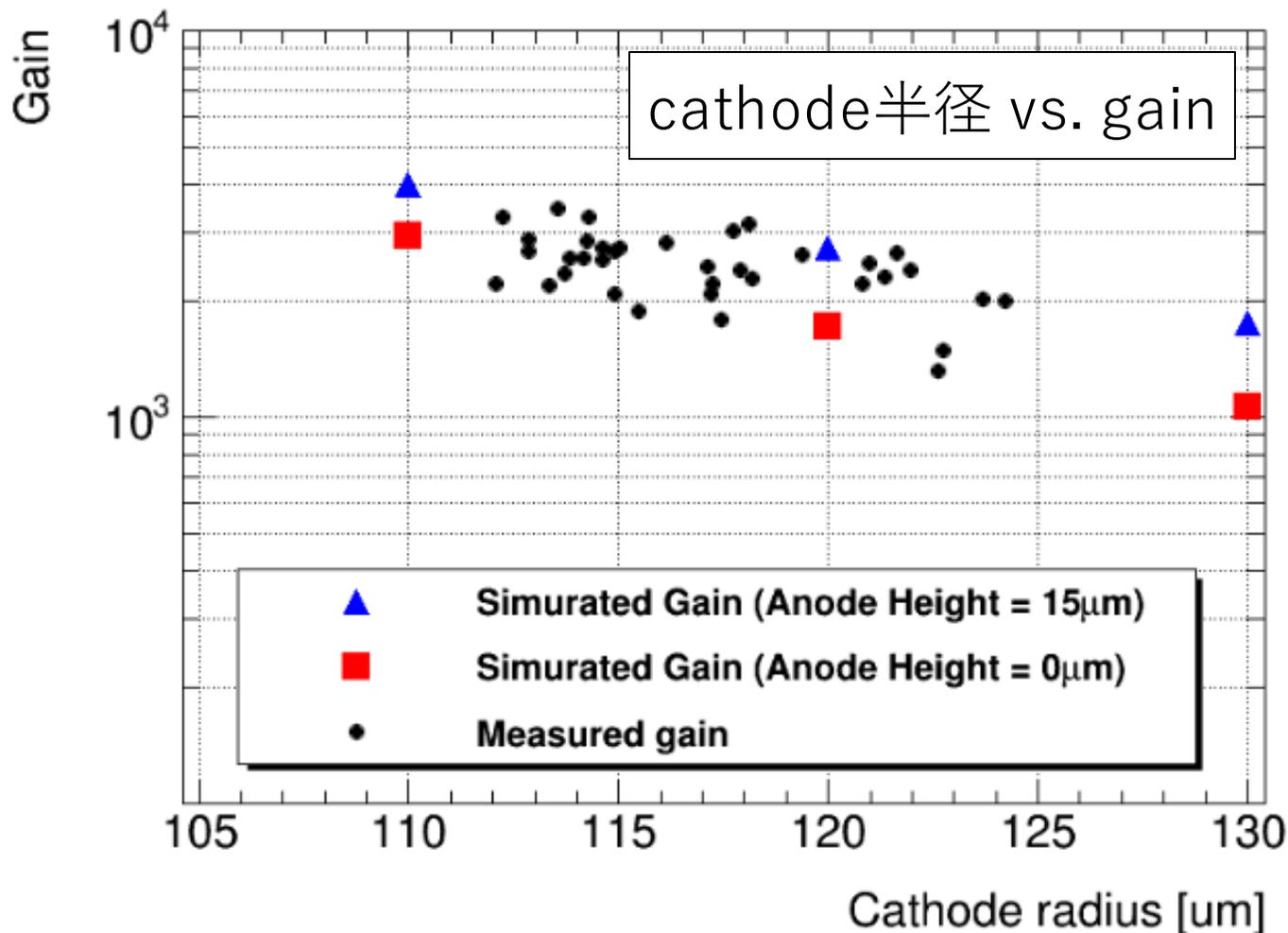
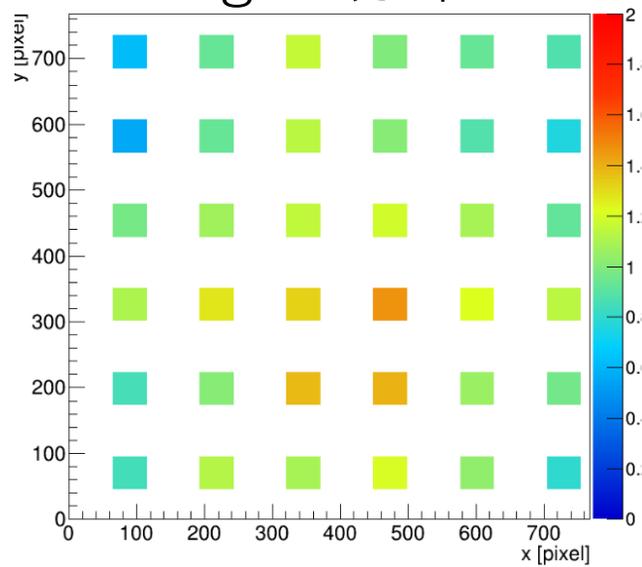
- ゲインを6×6か所で測定→RMS 20%  
問題なく使用できる一様性
- cathode半径分布と関係がありそう

# ゲインとcathode半径の関係

cathode半径分布



gain分布



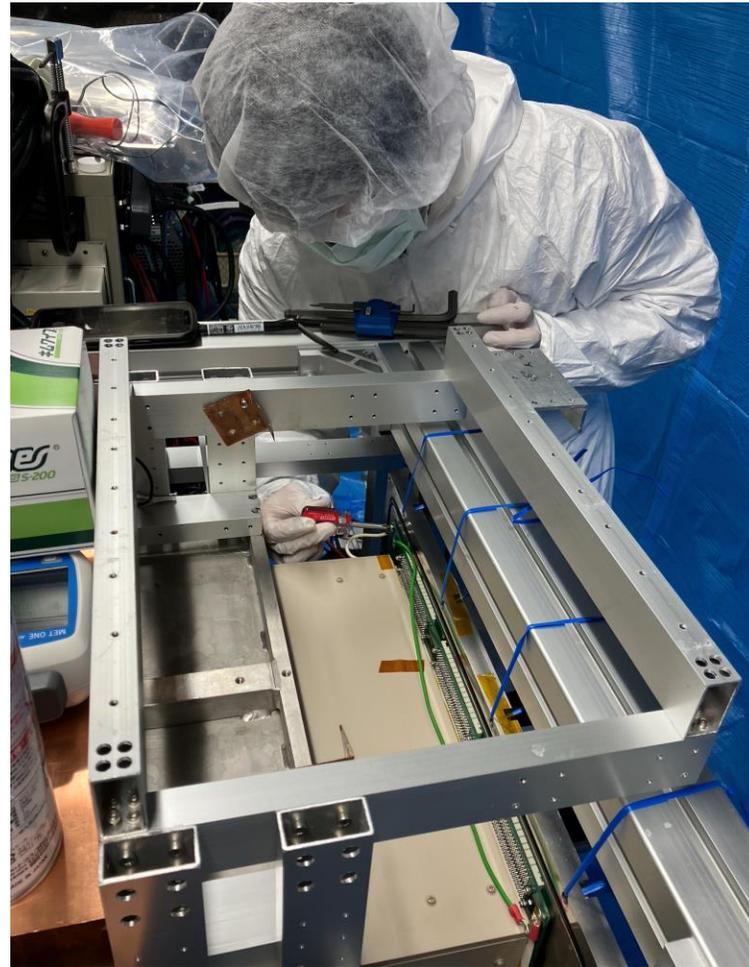
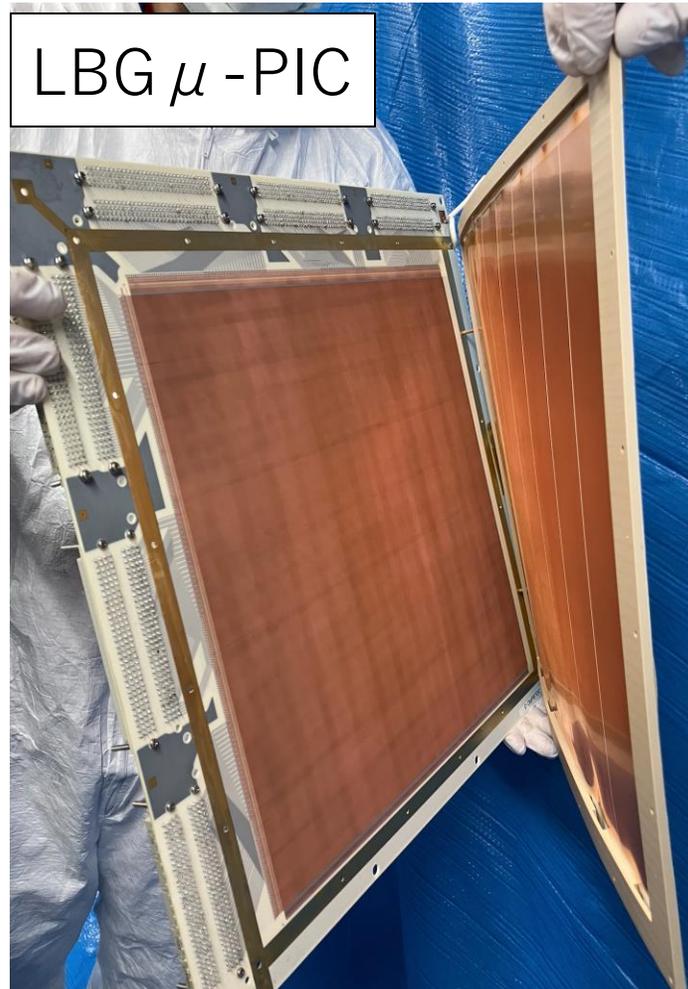
- ゲインとカソード径が直線的に分布  
→画像からゲインが推測できる

# Installation

---

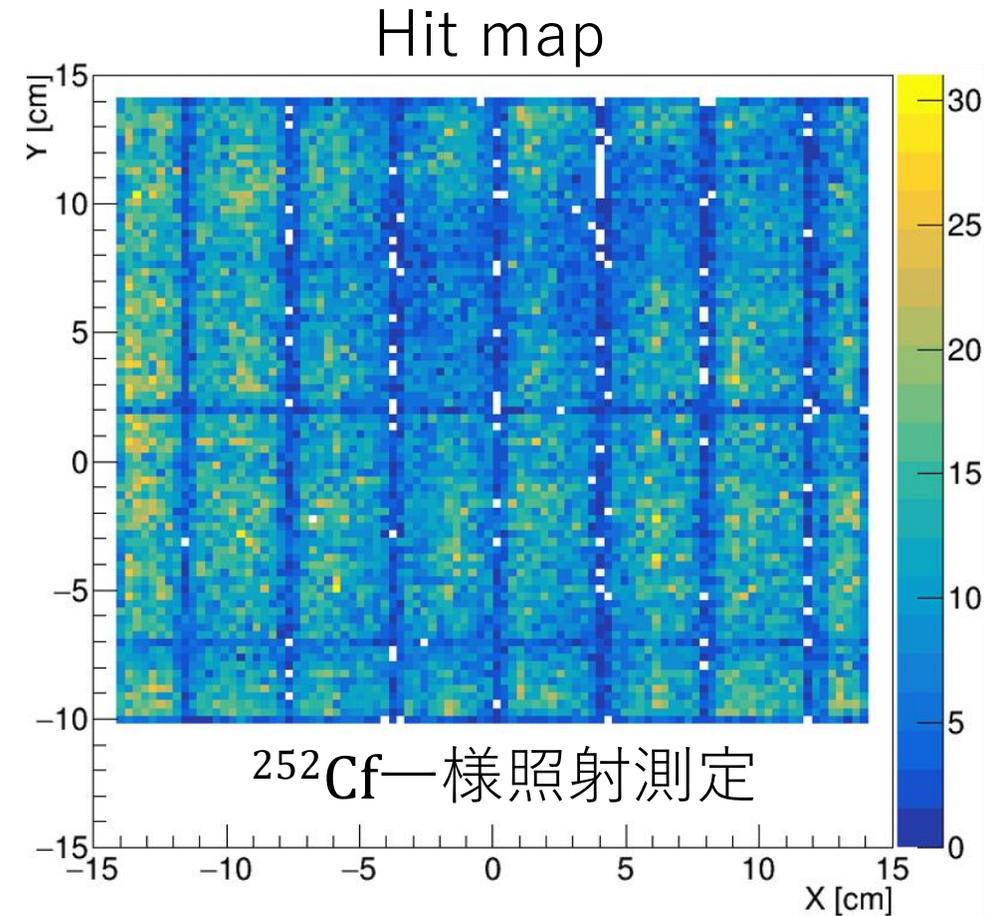
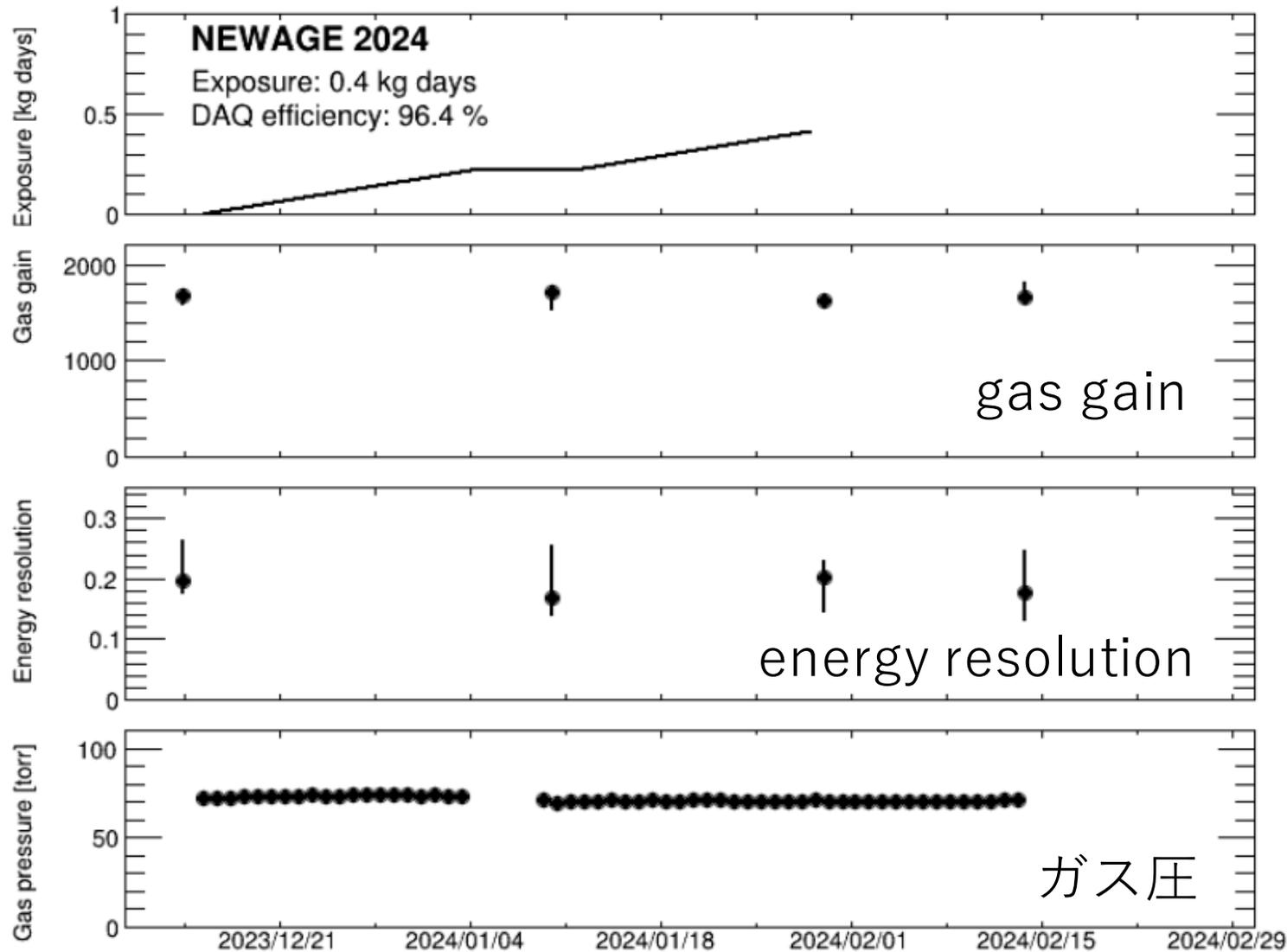
# 暗黒物質探索実験への実装

実装時の様子



- 神岡地下での測定に実装
- 2023/12/15よりデータ取得開始

# 暗黒物質探索実験への実装



安定してデータ収集できている。

# Conclusion

---

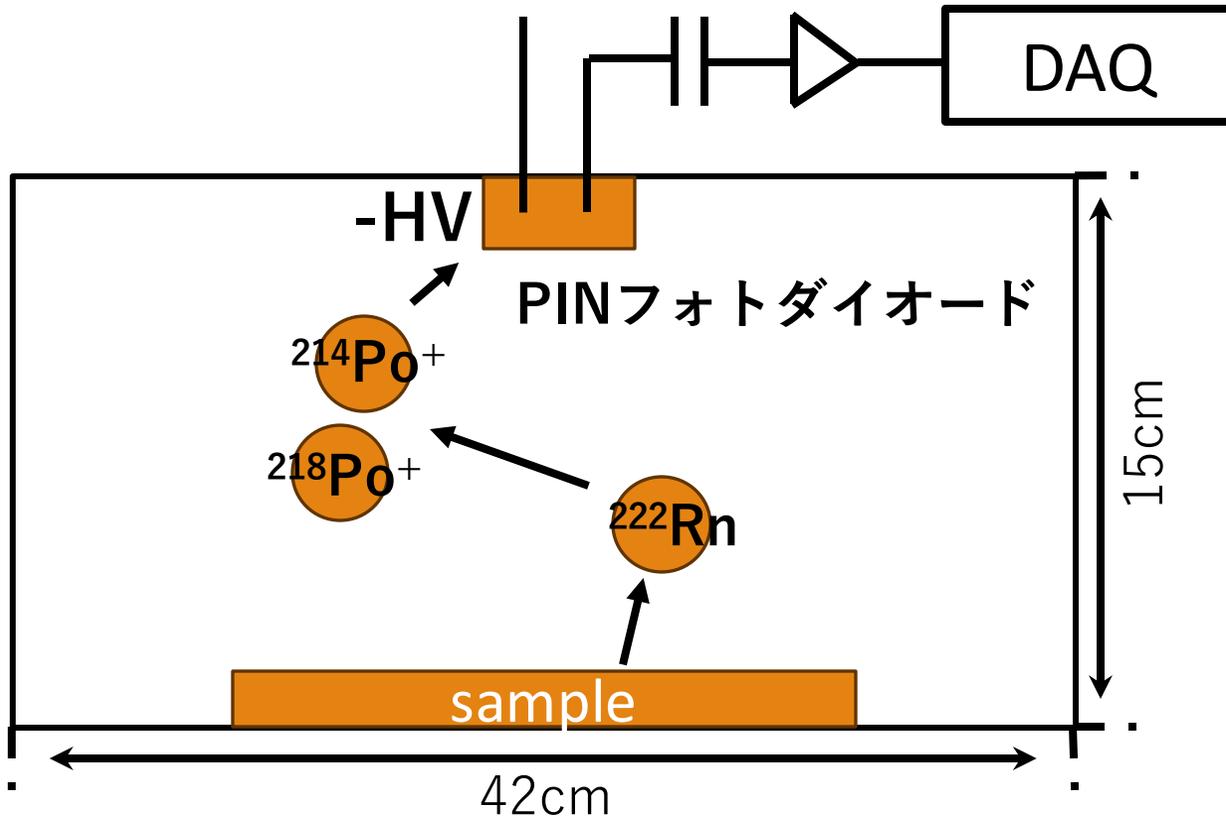
- 放出ラドン量が少ないLBG  $\mu$ -PICを製作した。
  - 現行のLA  $\mu$ -PICと比較して、ラドン量が $<1/60$ となった。
  - ゲインの要請値を十分満たしている。
  - 地下実験へ実装、DM探索実験を開始した。
- 現在論文執筆中

Back up

---

# ラドン量測定

- 静電捕集法で湧き出しラドン娘核の $^{214}\text{Po}$ レートを測定

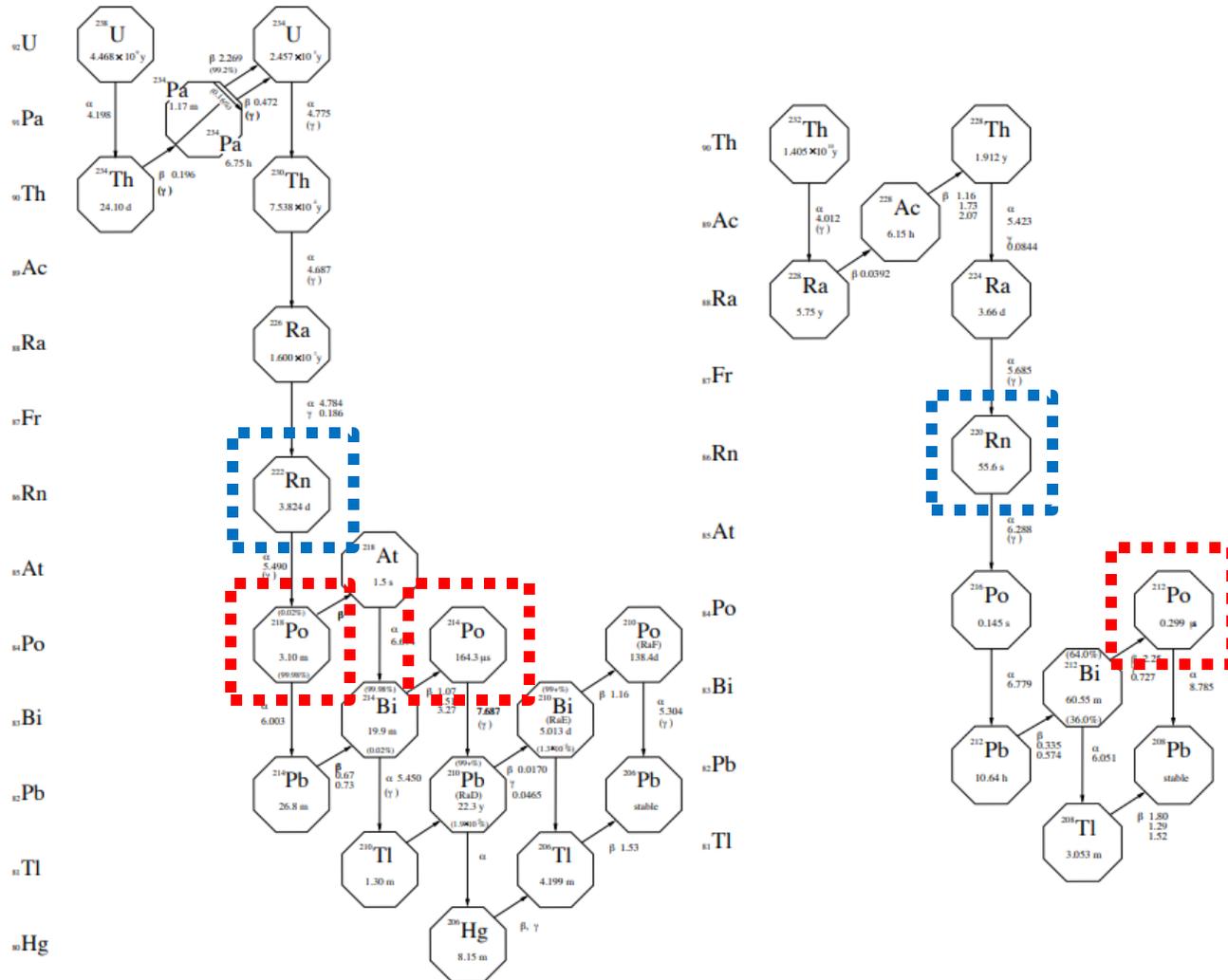


## 原理

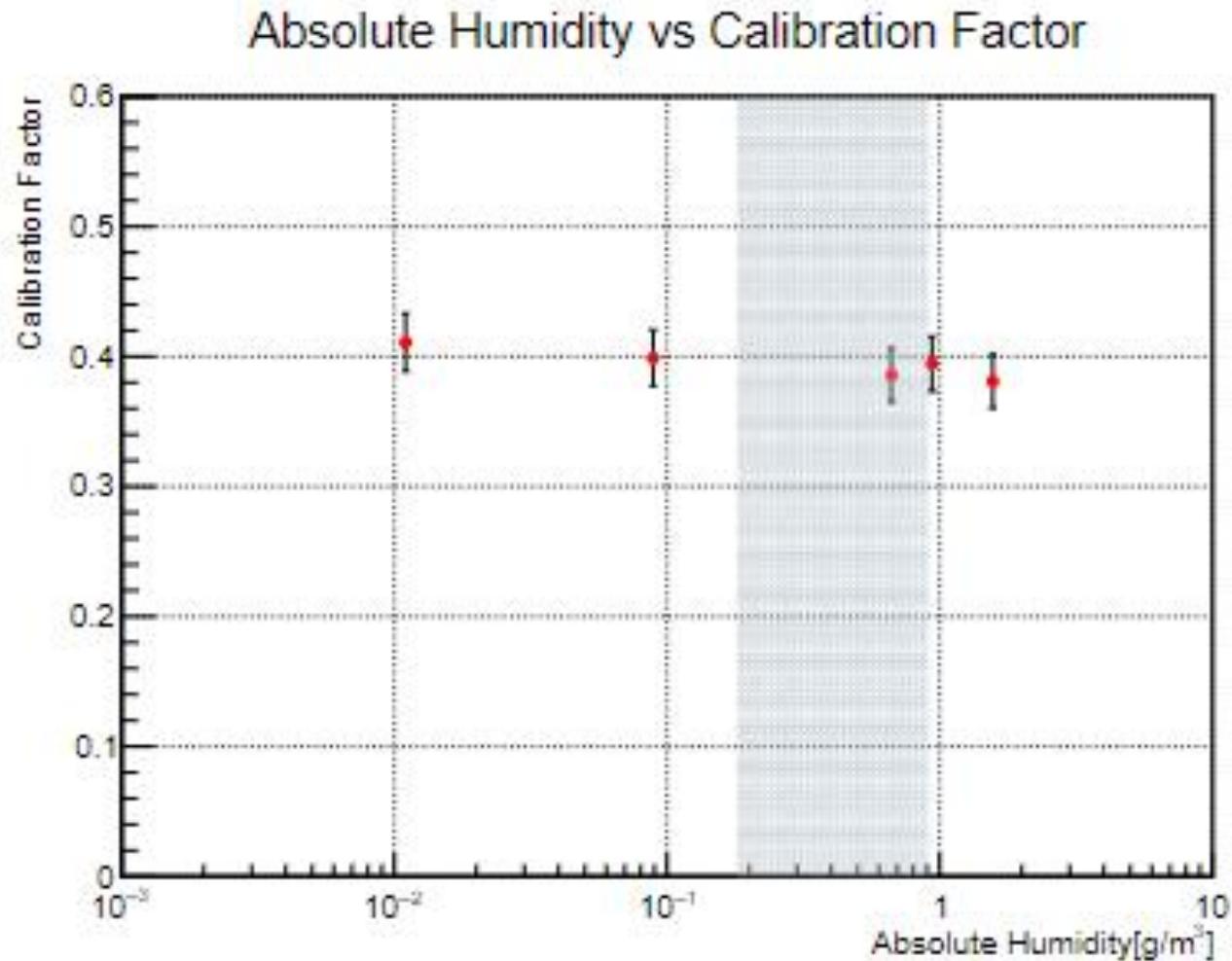
1. サンプルからラドンが湧き出す
2. ラドンが崩壊
3. イオン化しやすいPoイオンがPINフォトダイオードに捕集
4. Poが崩壊し、 $\alpha$ 線が発生
5. waveform digitizerで波形を記録

# Radon Decay Chain

## 9.1 Uranium / Thorium decay chain

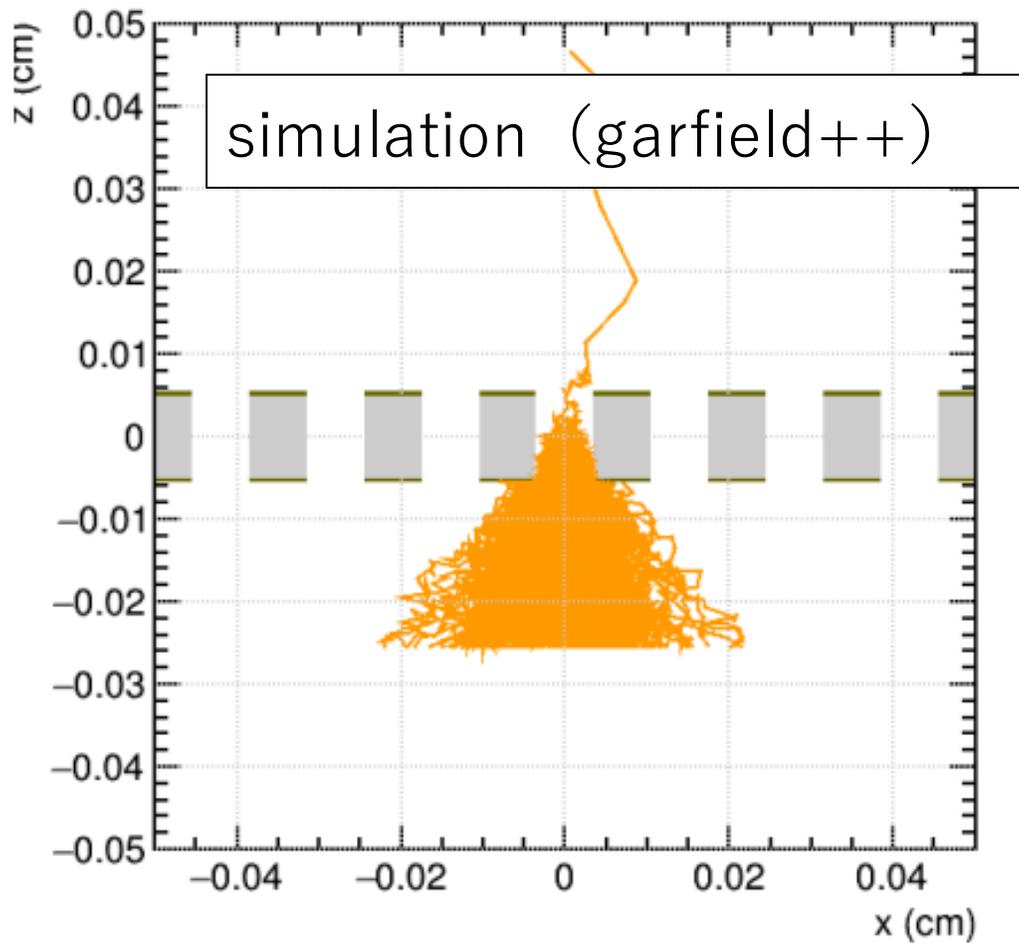
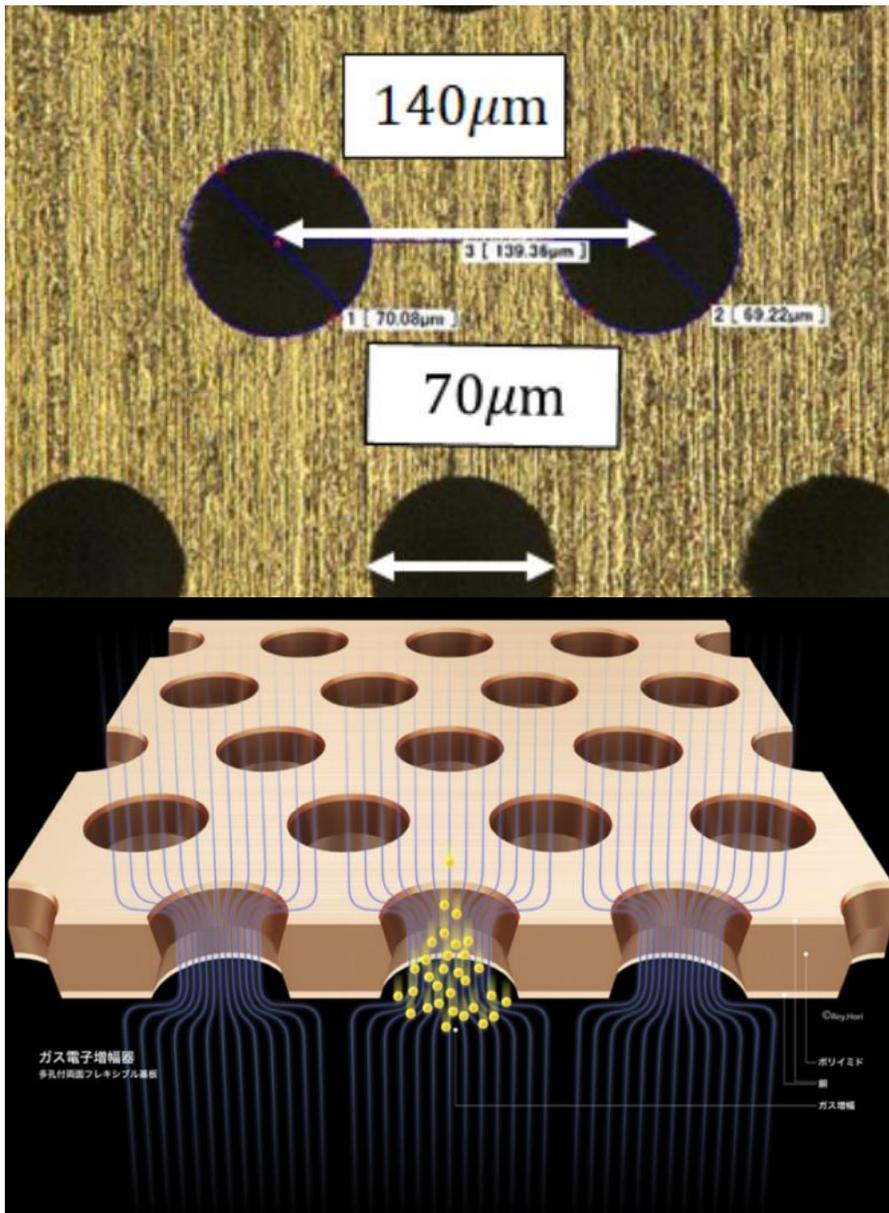


# Radon emanation rate



calibration factor  $Cf = 0.403 \pm 0.024$  [(count/day)/(mBq/m<sup>3</sup>)]

# GEM



# $\mu$ -PIC

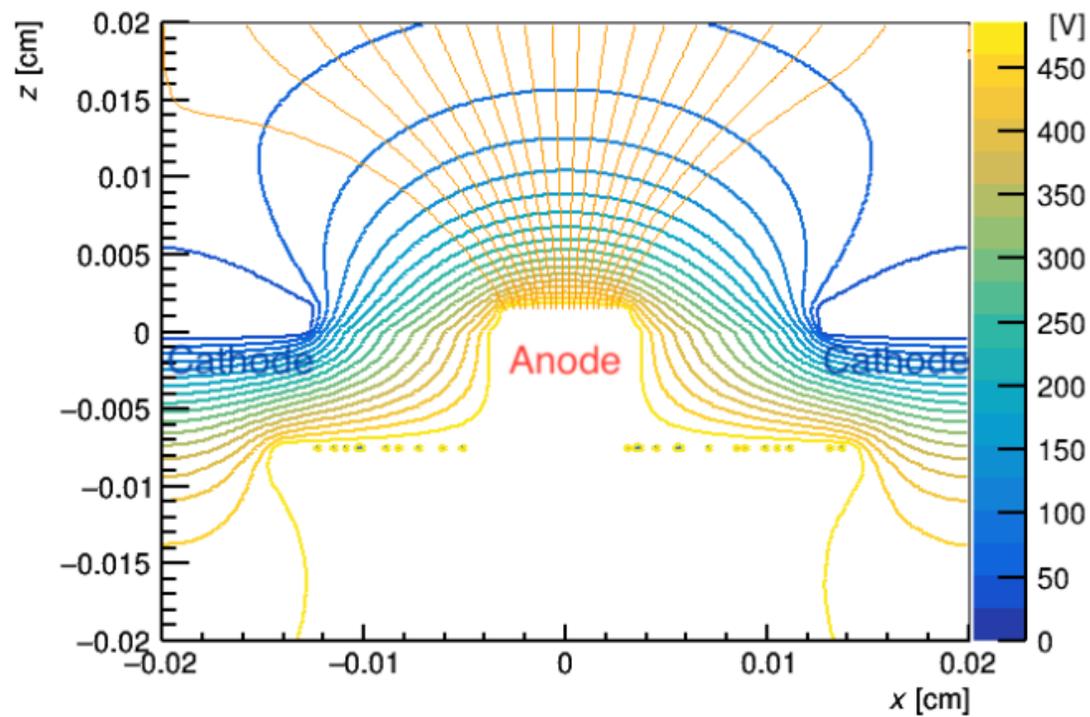


図 4.14  $\mu$ -PIC の電気力線 (橙色) と等電位面 (グラデーション)

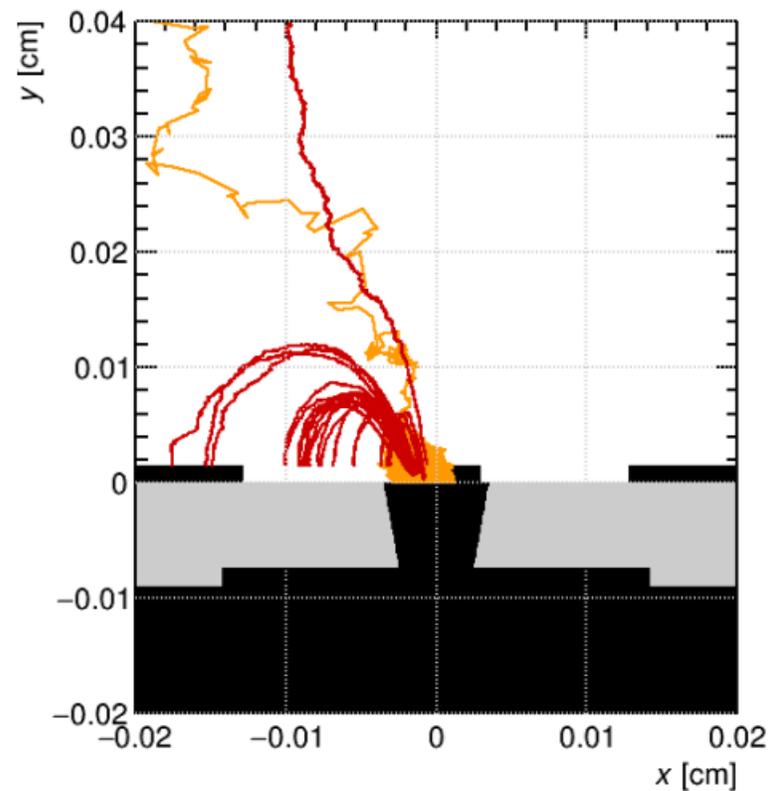


図 4.15  $\mu$ -PIC における電子の雪崩増幅の様子. (オレンジ: 電子、赤:  $\text{Ar}^+$ )

# Quartz cloth

---

## 1) 石英クロス(商品名 : SQXシリーズ)

誘電率 3.7 以下、誘電正接 0.001 以下、線膨張係数 1ppm/°C 以下など、伝送損失(電気信号の劣化の度合い)に関わる特性が極めて優れている。5Gのキーワードである超高速通信を支える配線基板のコア材として最適であり、アンテナやレーダードームの繊維強化プラスチック部材としてもその特性を発揮する。

石英クロスは、非常に細い石英の糸を素材とし、厚さを 20  $\mu\text{m}$  以下とすることも可能で、積層基板の薄膜化に対応可能である。また、石英は $\alpha$ 線の発生が極めて少ない特長を有し、放射線によるデバイスの誤動作を防止できる。需要に応じ逐次生産能力を上げていく計画である。

<https://www.shinetsu.co.jp/jp/news>