



方向感度を持つ暗黒物質探索実験のための 低BG検出器性能評価

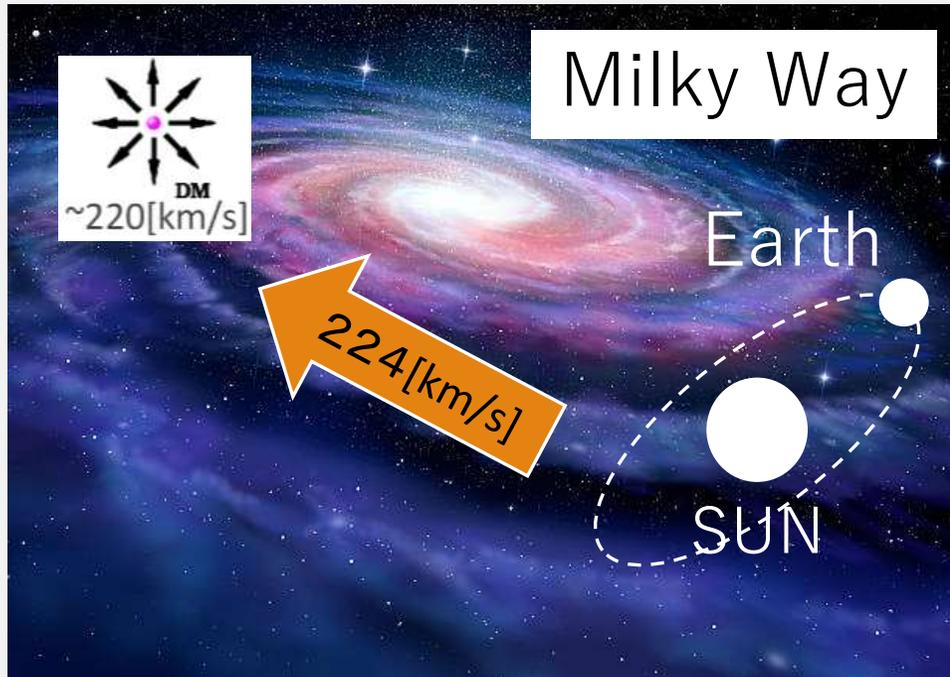
30TH ICEPP SYMPOSIUM

2024/2/20

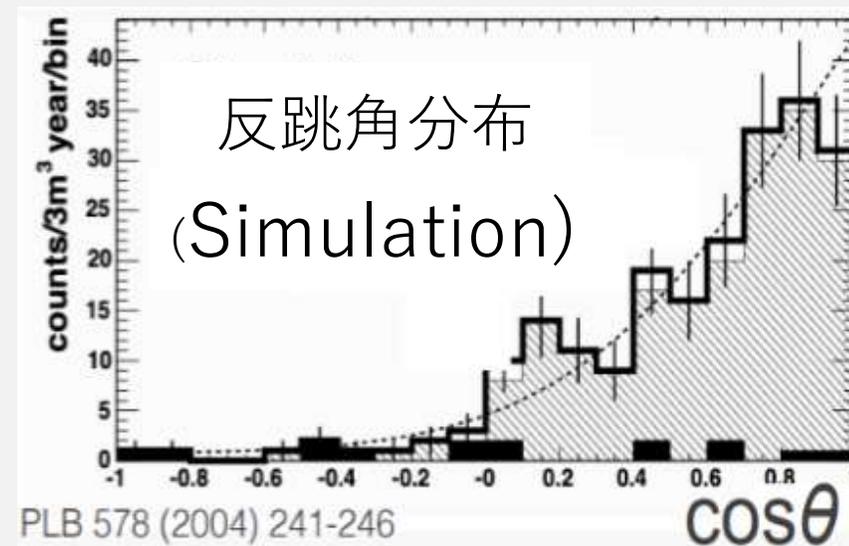
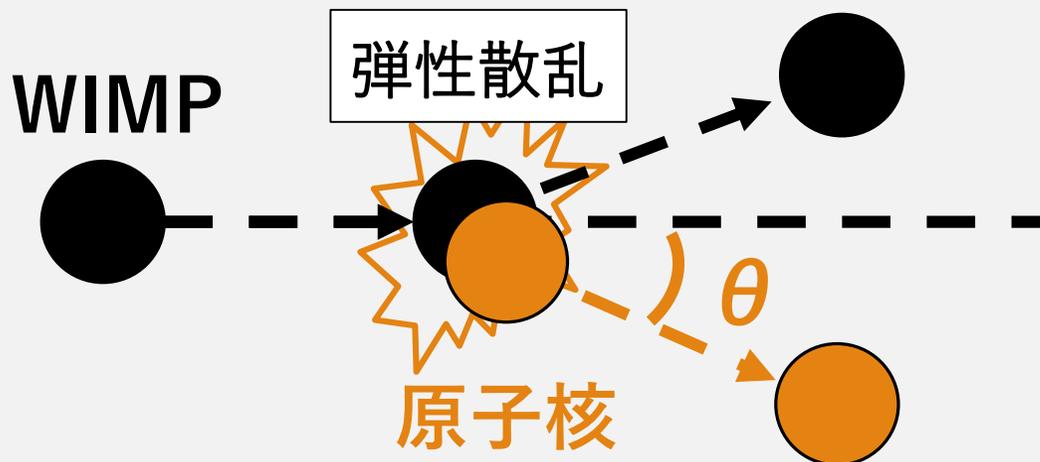
神戸大学 生井凌太

Introduction

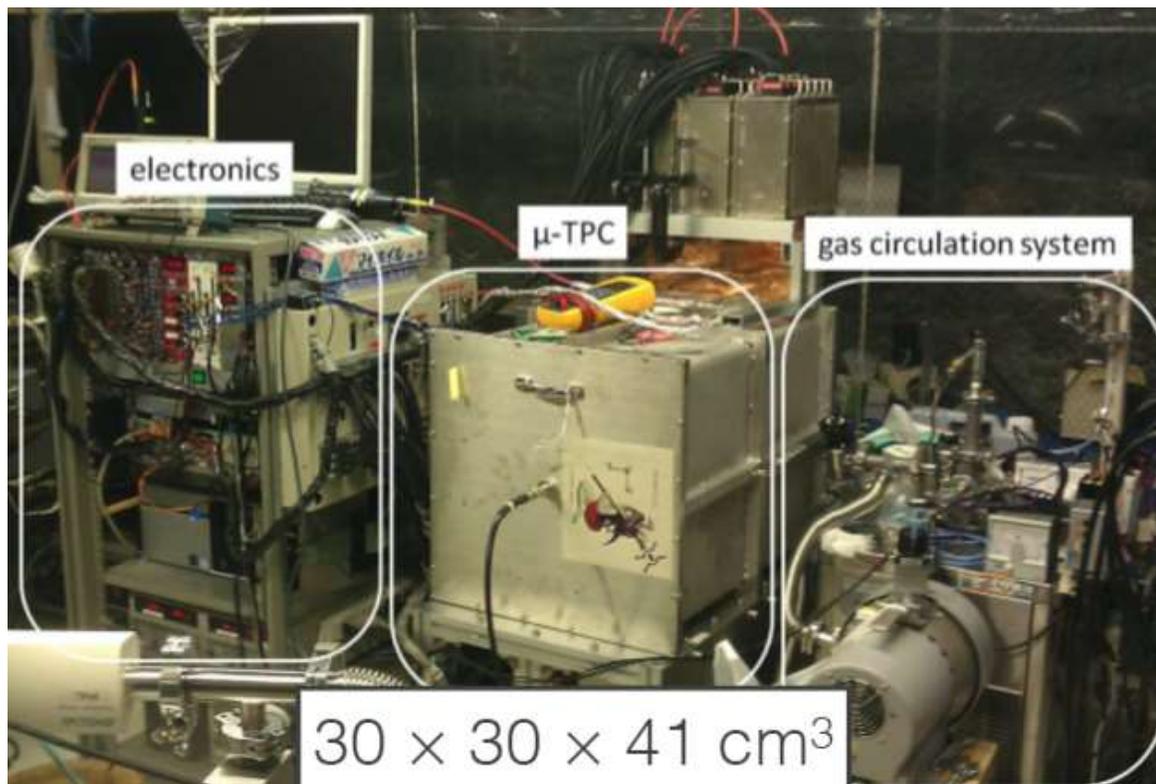
方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索



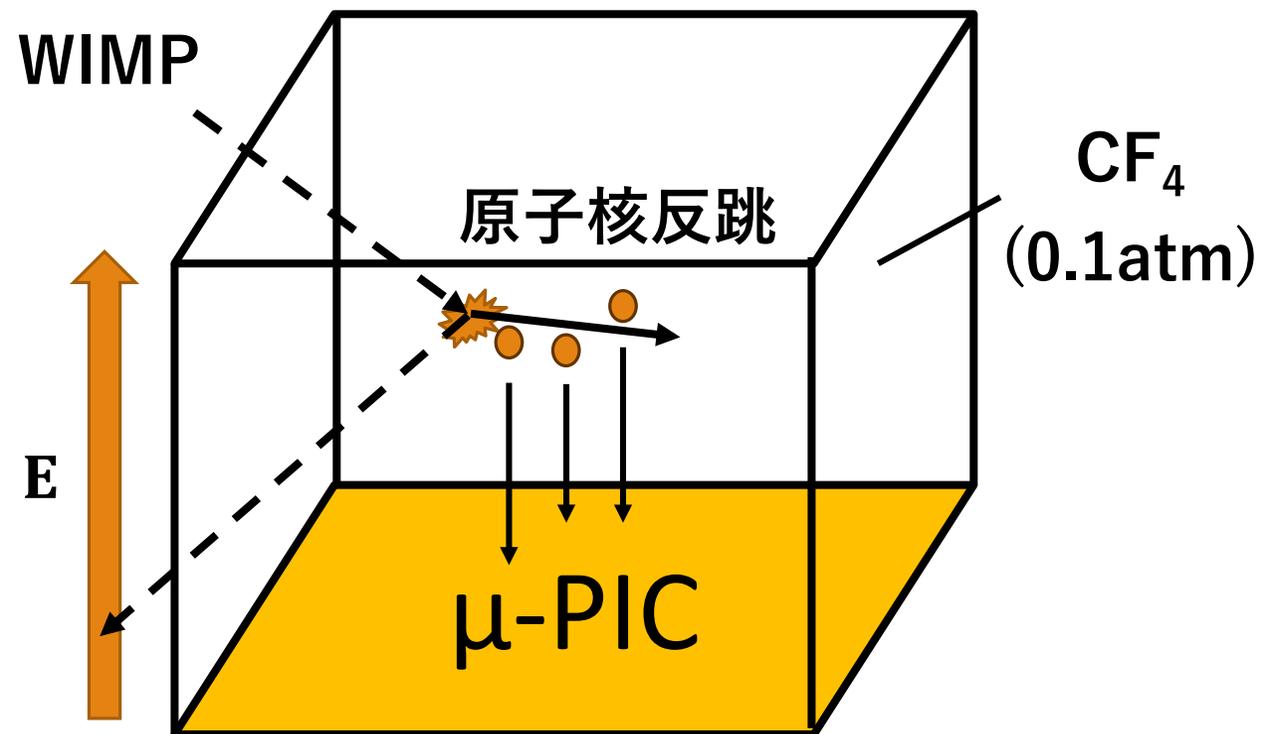
- WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)
: 暗黒物質の候補粒子
- 太陽系の進行方向からのWIMPの到来量が多くなる
→この方向依存性を観測する
- どうやって?
→WIMPと原子核の弾性散乱での反跳角分布を見る



NEWAGE実験

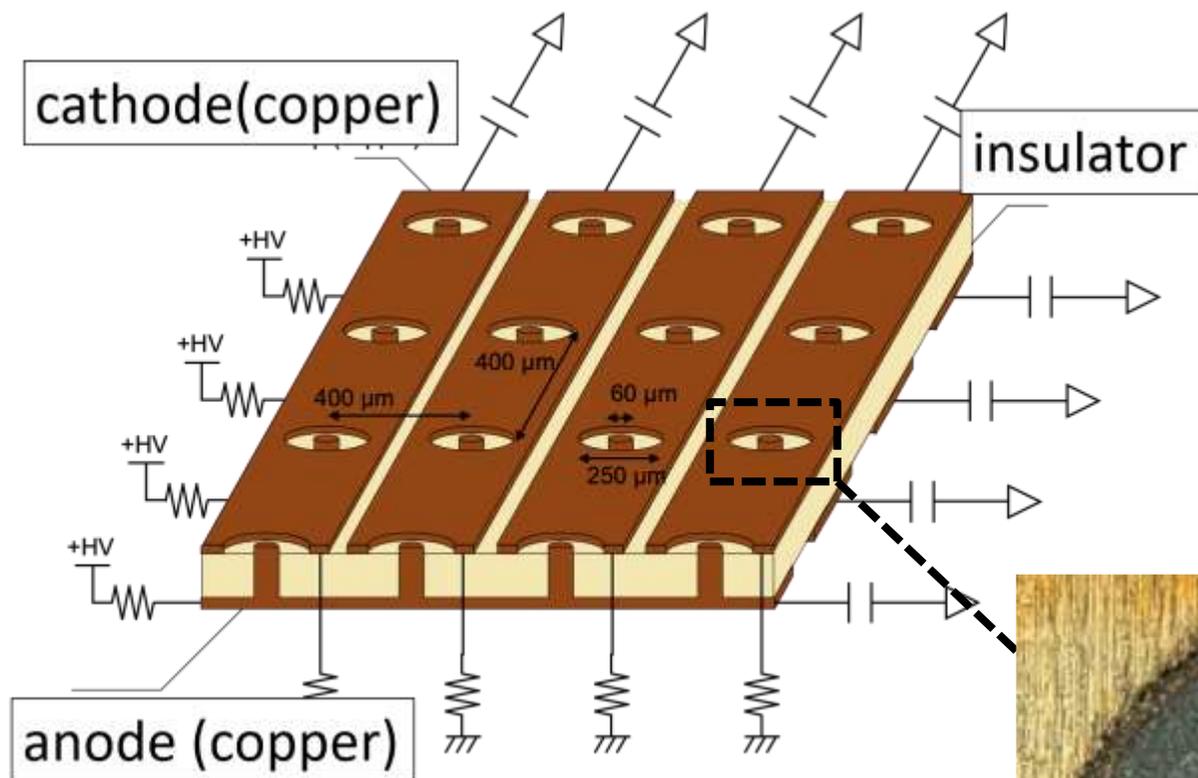


- 場所：神岡鉱山地下
- 検出器：ガスTPC

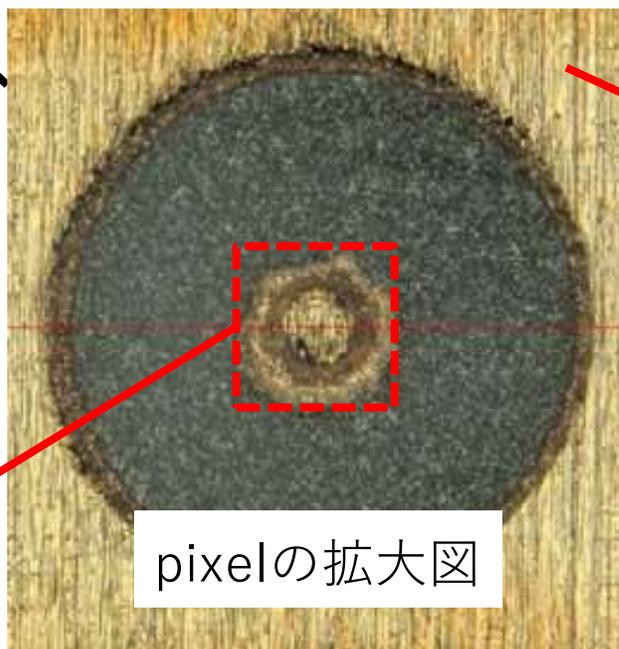


- μ -PIC(Micro Pixel Chamber)：2次元 + 1次元(時間)分解能を持つ検出器
→ 3次元での飛跡が再構成できる

μ -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



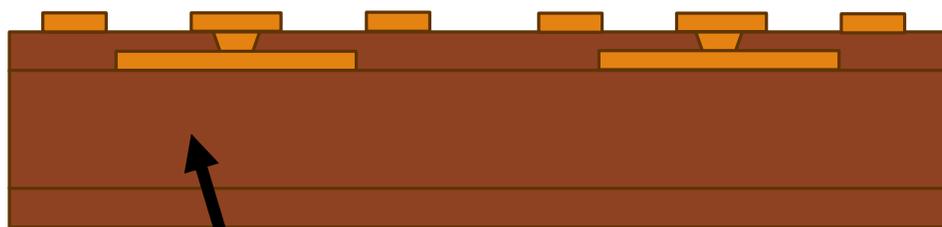
cathode

anode

pixelの拡大図

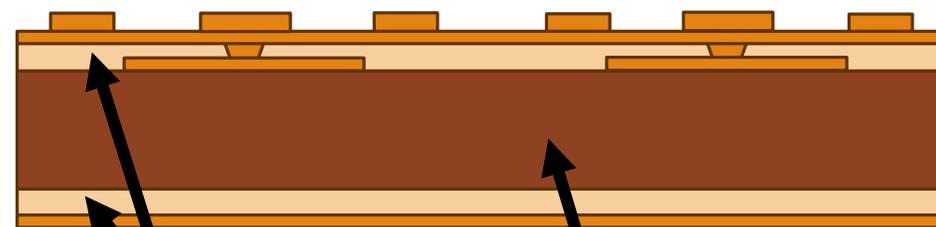
μ -PIC開発の歴史

Original μ -PIC



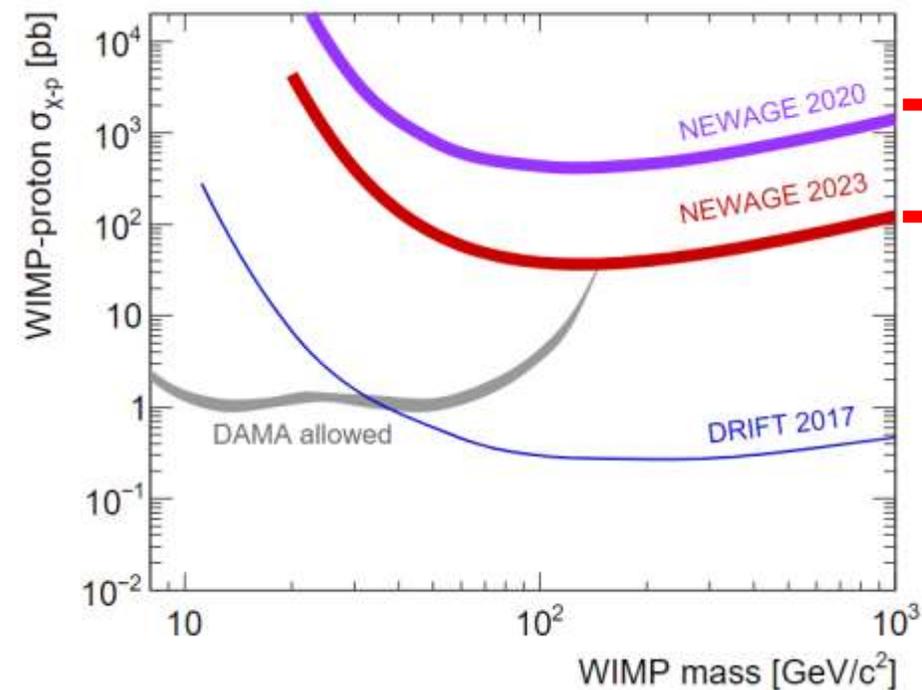
ポリイミド樹脂
(ガラスクロス入り)

Low Alpha μ -PIC (LA μ -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 μ -PIC

PTEP (2020) 113F01

LA μ -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 μ -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！！

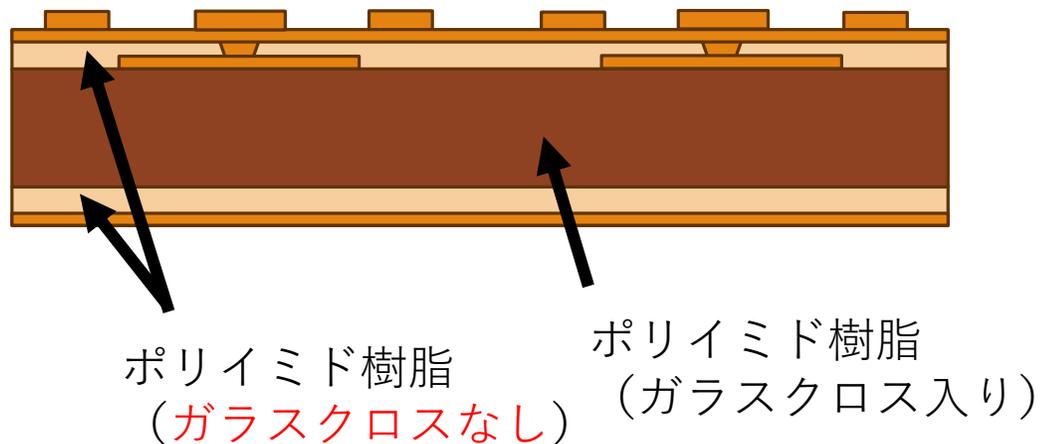
Low Background μ -PIC (LBG μ -PIC)

従来 μ -PICからの変更点

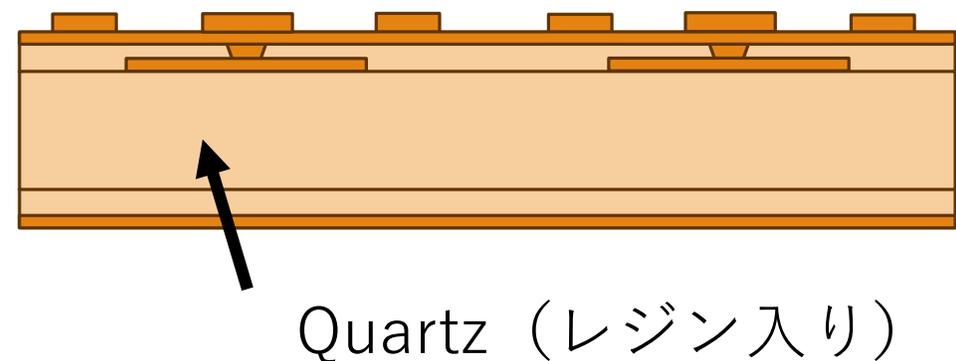
- ・ 使用素材の見直し → より低RIな素材へ
- ・ 構造の見直し → 基板と中継基板の一体化
- ・ 薄型化

コア材	^{238}U upper [ppm]	^{238}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)	$(5.6 \times 1.0) \times 10^{-3}$	$(5.1 \times 1.0) \times 10^{-3}$

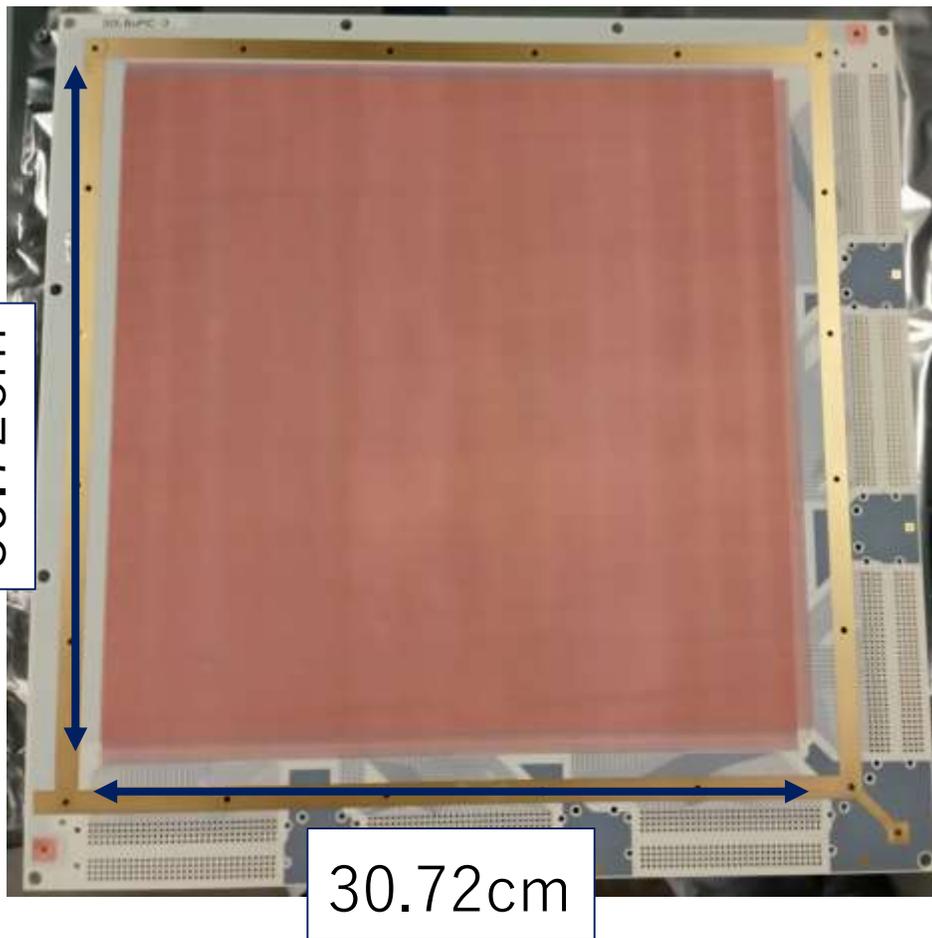
Low Alpha μ -PIC (LA μ -PIC: 2017-)



LBG μ -PIC (2023-)



LBG μ -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

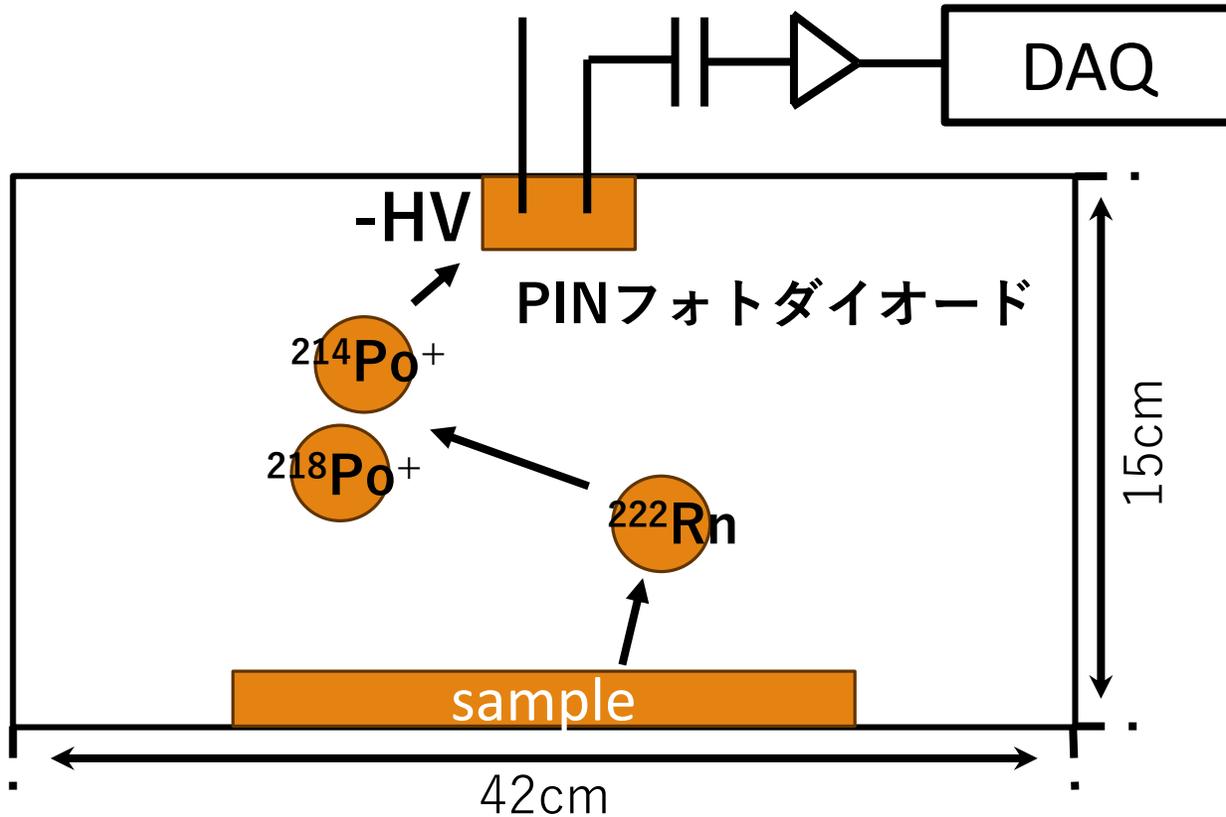
requirements

- 放出 Rn rate : LA μ -PICの1/10以下
- gain : ≥ 1000 in CF₄ (76torr)
- gain uniformity : $< 20\%$ RMS

性能評価

ラドン量測定

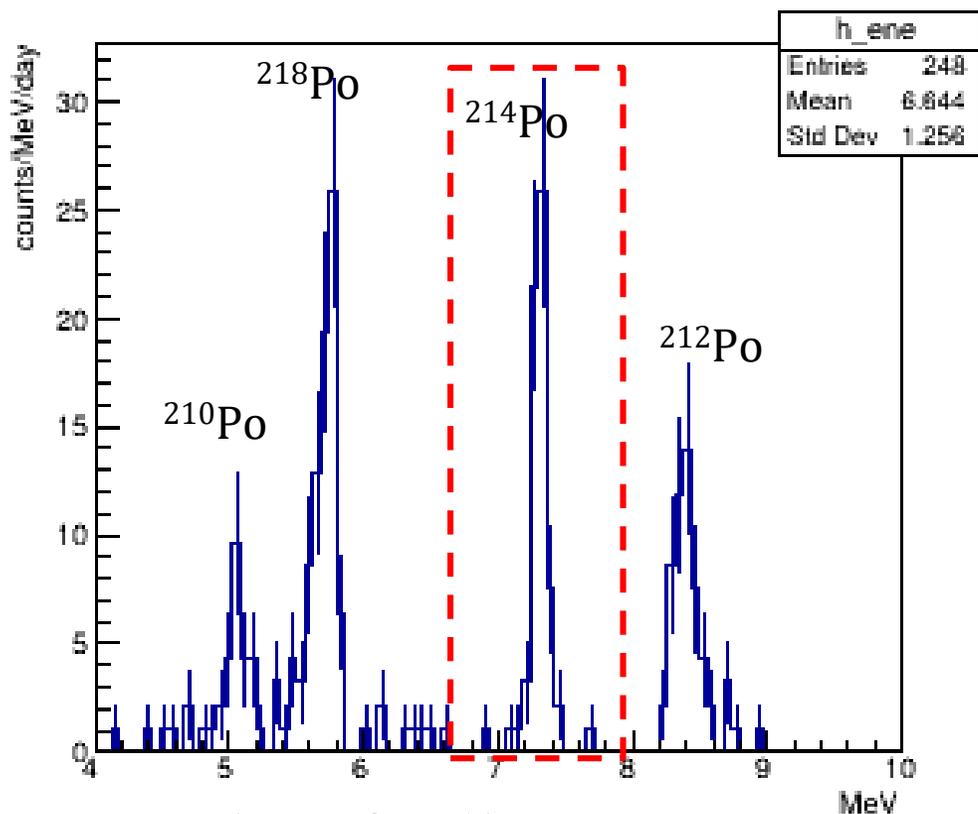
- 静電捕集法で湧き出しラドン娘核の ^{214}Po レートを測定



原理

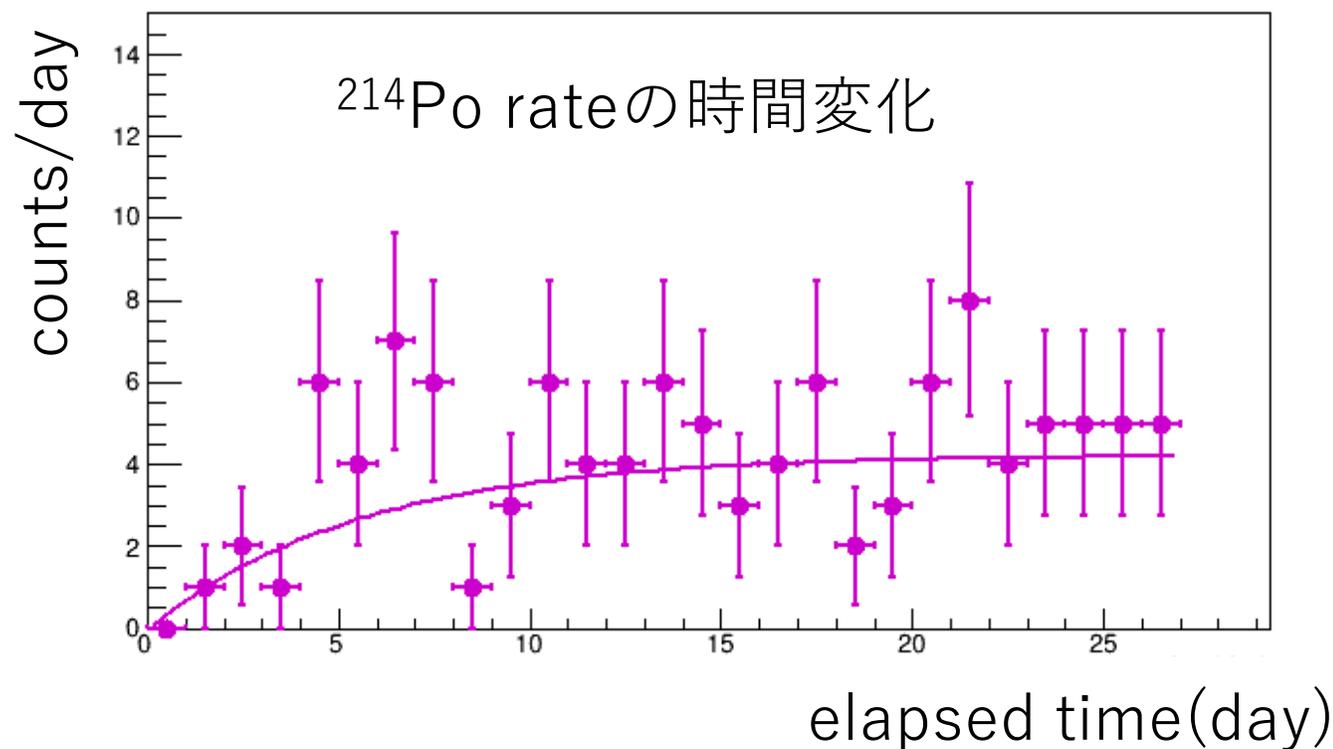
1. サンプルからラドンが湧き出す
2. ラドンが崩壊
3. イオン化しやすいPoイオンがPINフォトダイオードに捕集
4. Poが崩壊し、 α 線が発生
5. waveform digitizerで波形を記録

ラドン量測定



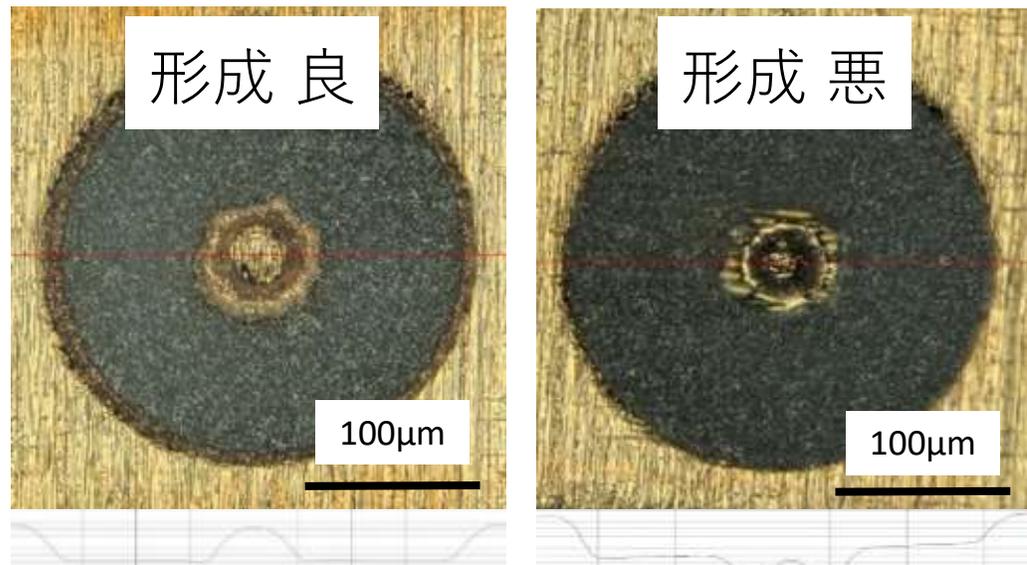
BG差し引き後ラドンレート

Sample	Radon rate [mBq/ μ -PIC]
従来 μ -PIC	2.3 ± 0.5
LBG μ -PIC	< 0.03 (90% C. L)

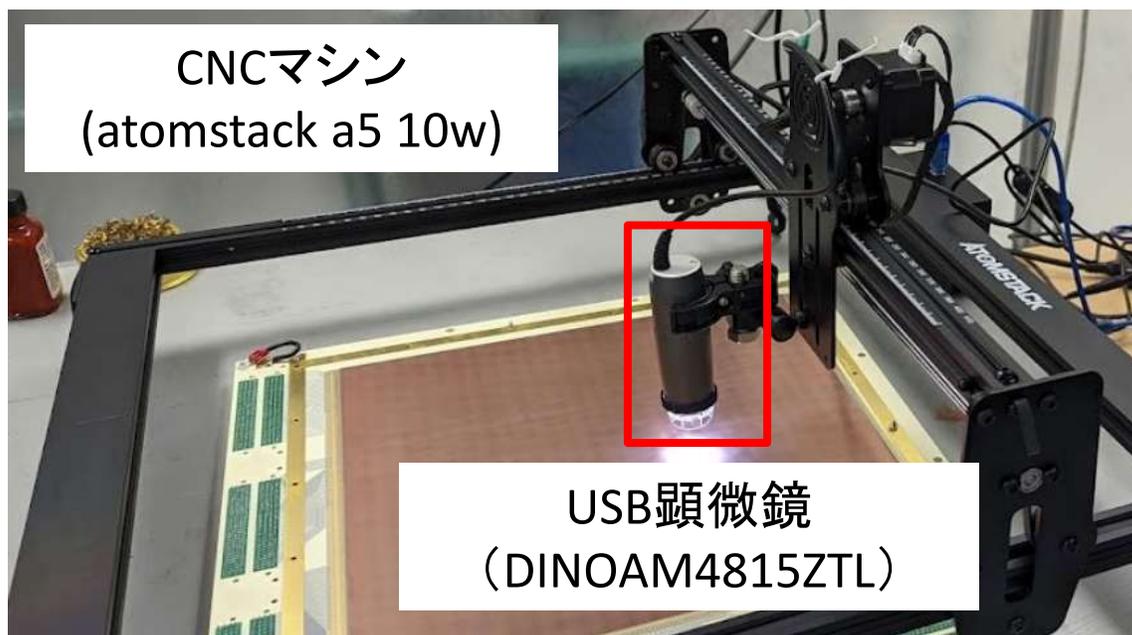


- 従来と比較して1/60のラドン量に減少

pixel形成状態の確認



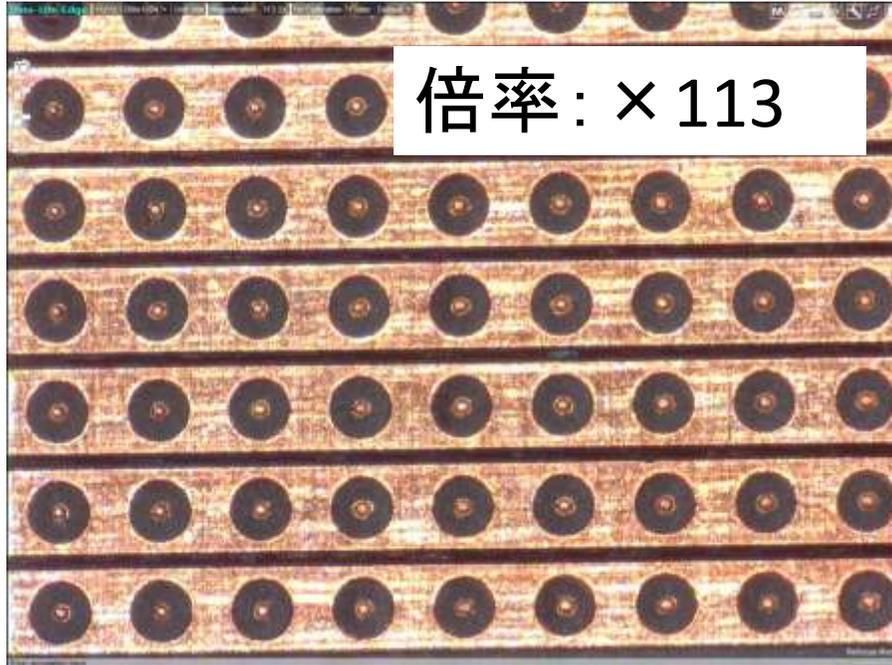
- pixelの形状が変わる→ゲインも変わる
 - カソード半径大
 - アノード陥没 } ゲイン低下
- 形成状態は一様であることが望ましい



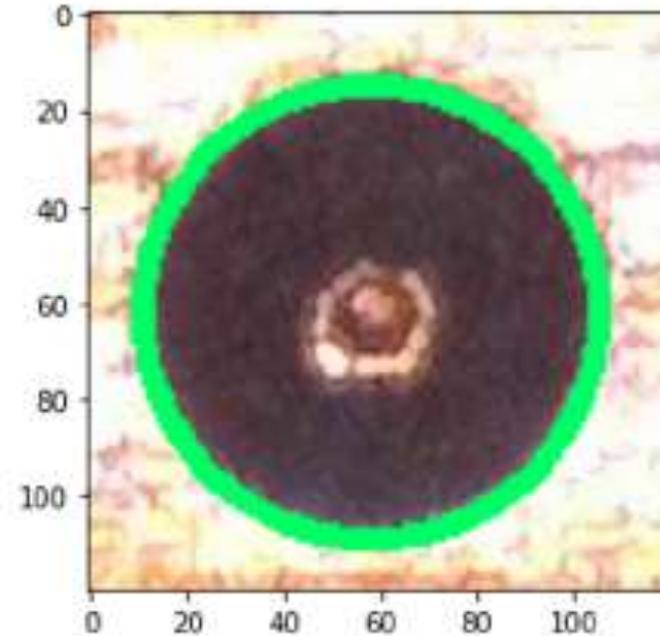
- 神戸大学にある顕微鏡では測定できない
→CNCマシン+USB顕微鏡で自作
- 撮影速度： $\sim 1000\text{cm}^2/\text{day}$
- 撮影枚数： 170×170

pixel形成状態の確認

撮影写真



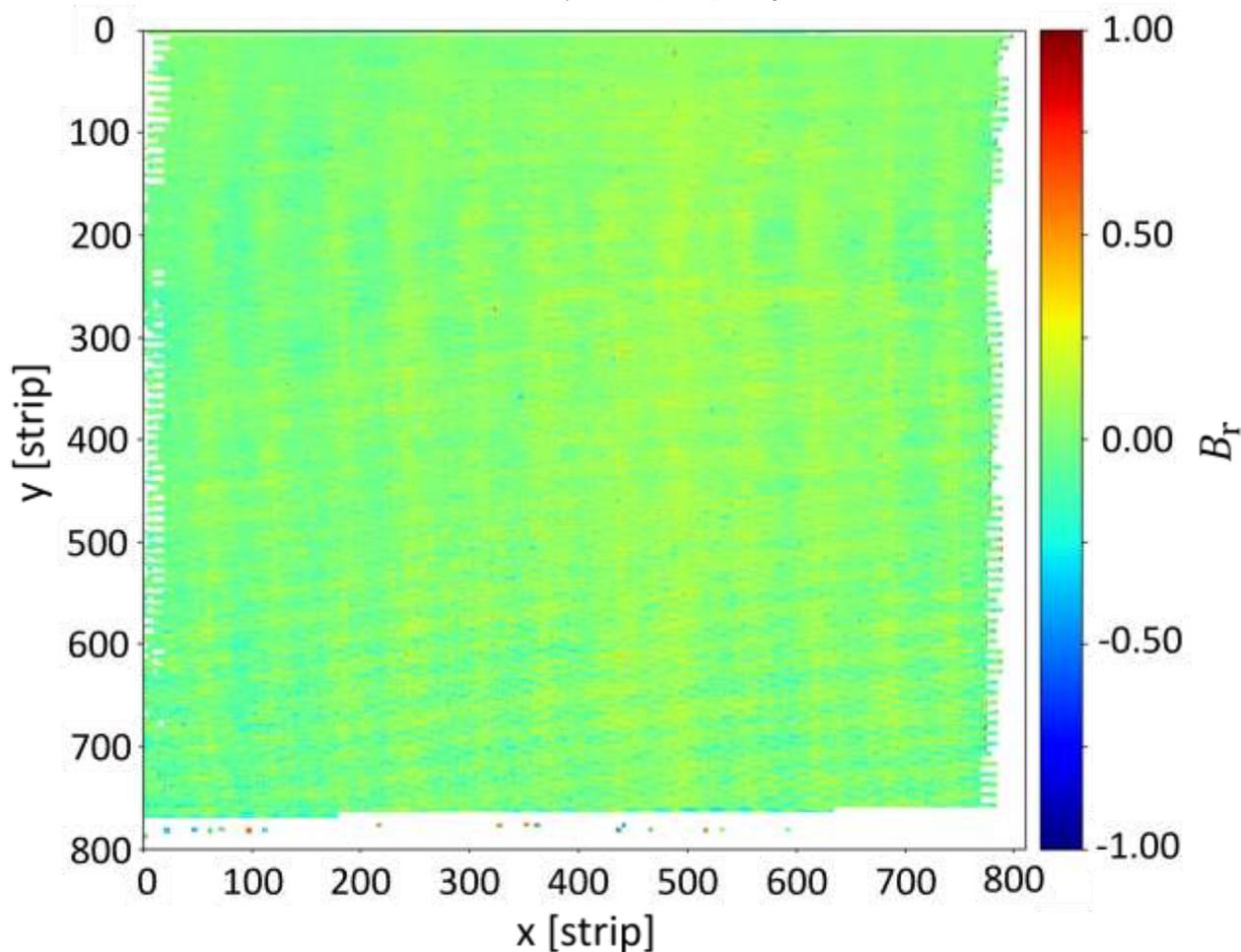
円検出



- 撮影写真をPythonで画像処理 → 円検出
 - cathode半径
 - anodeの明るさ（陥没していると暗く映る）
- を取得

pixel形成状態の確認

Br 二次元分布

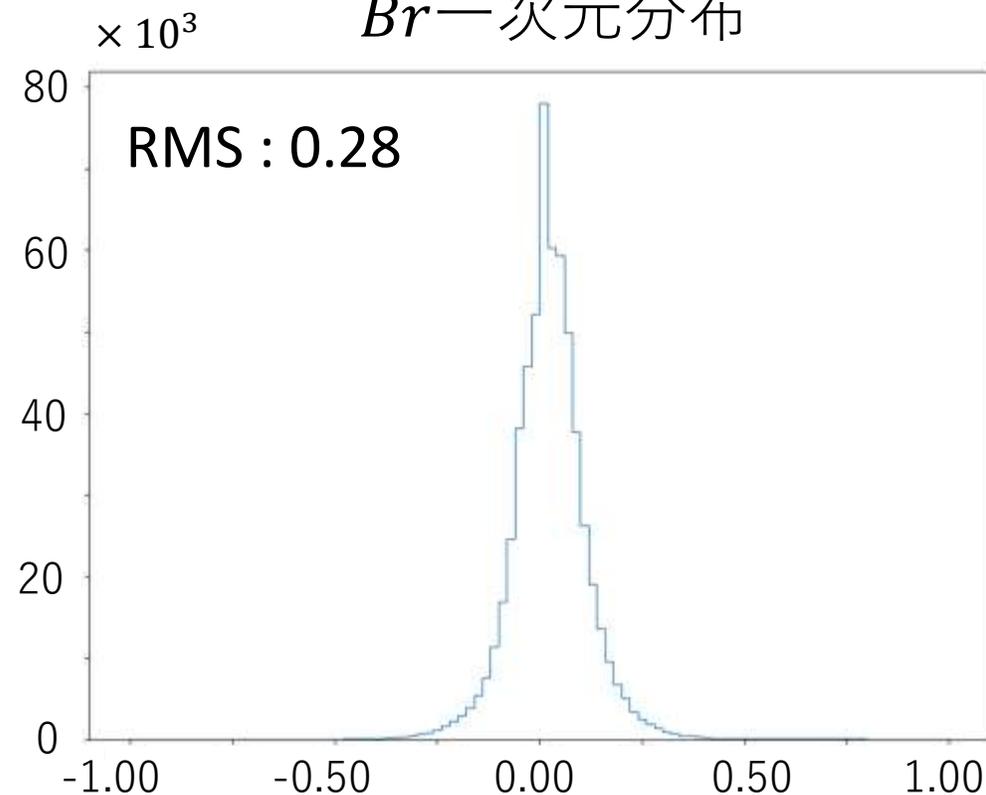


- ・基板の変色などの影響を排除するため

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

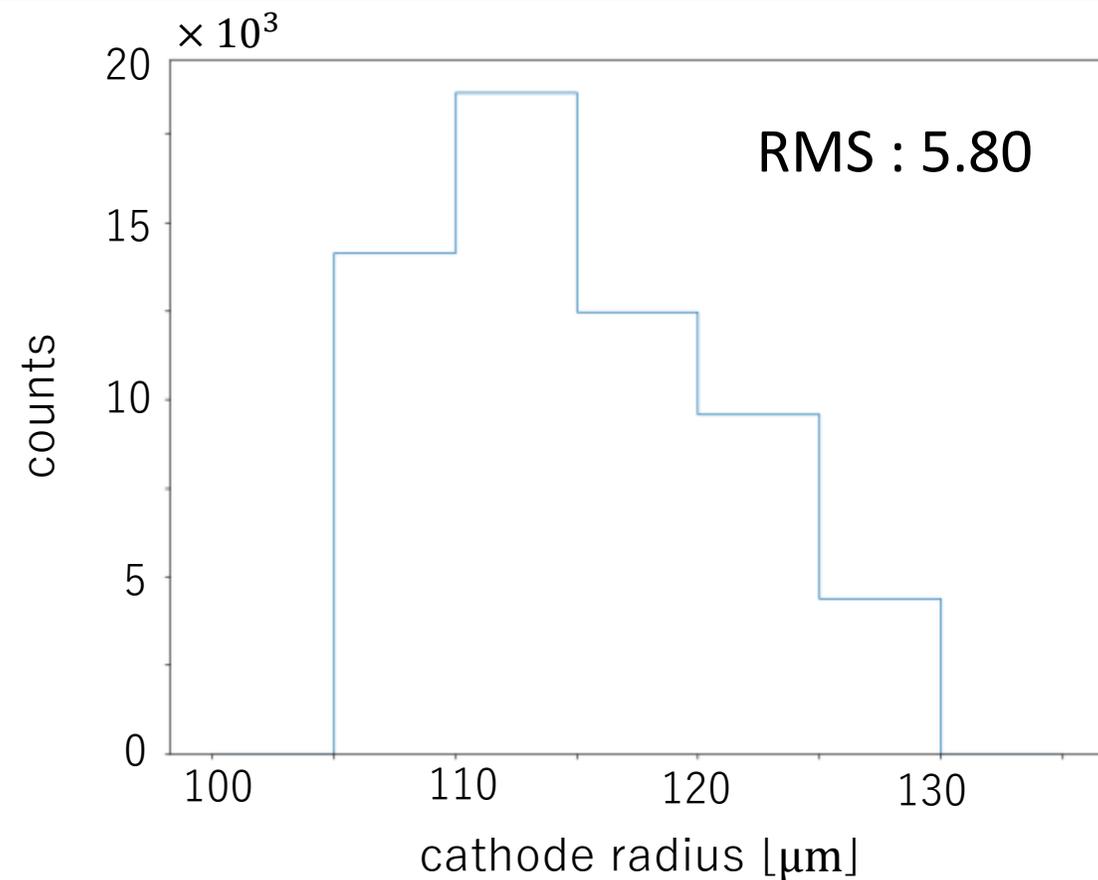
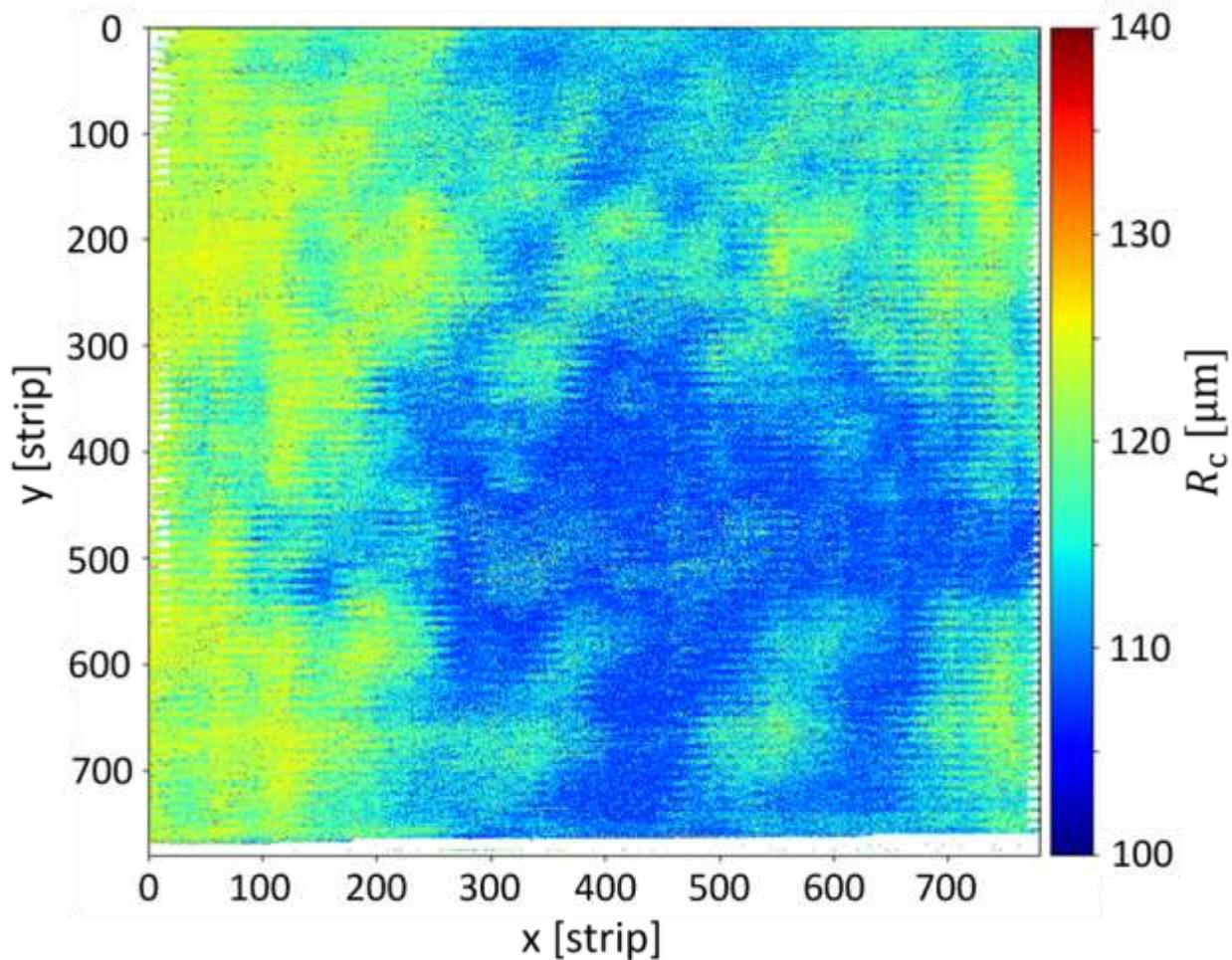
と定義

Br 一次元分布



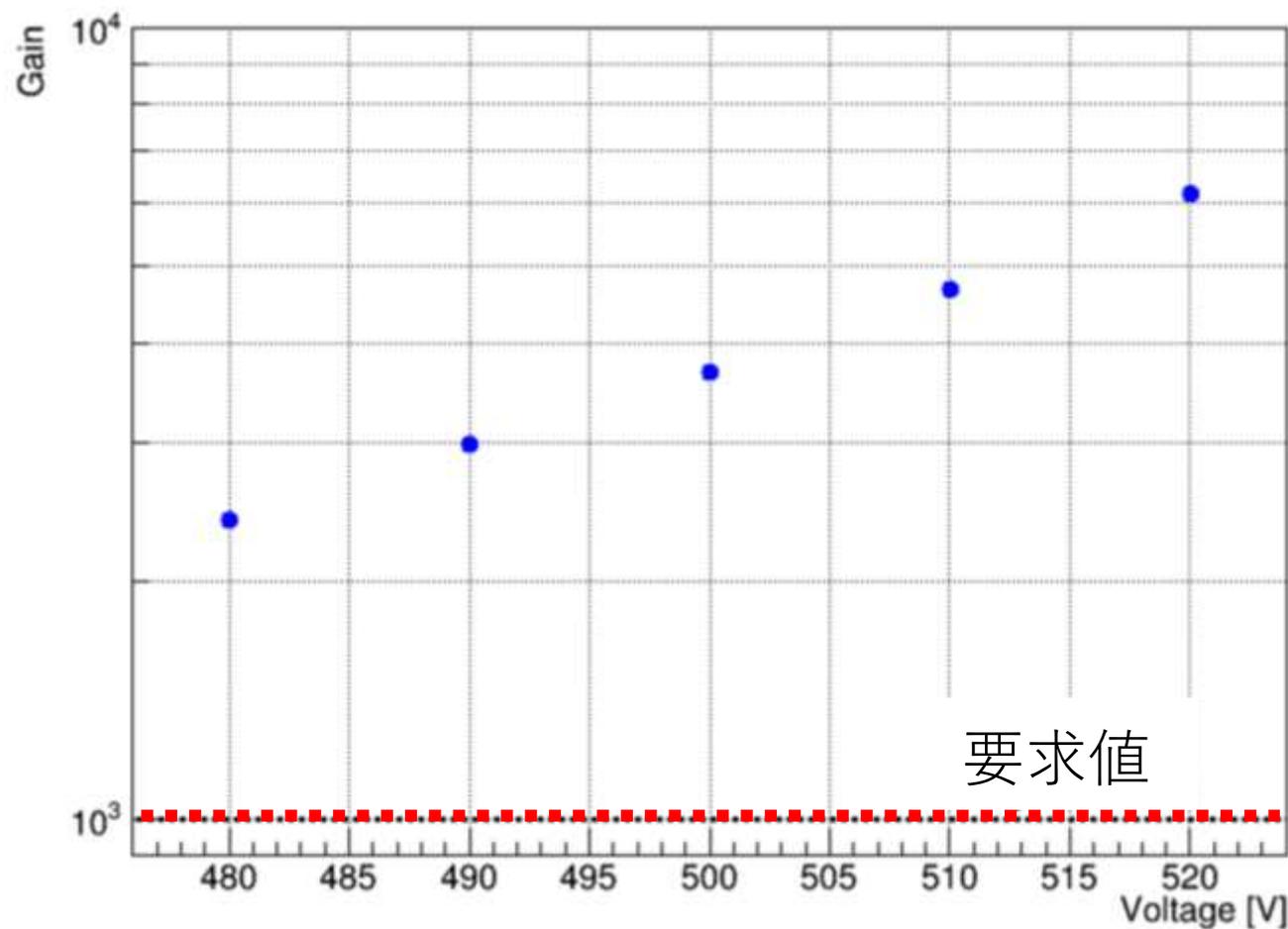
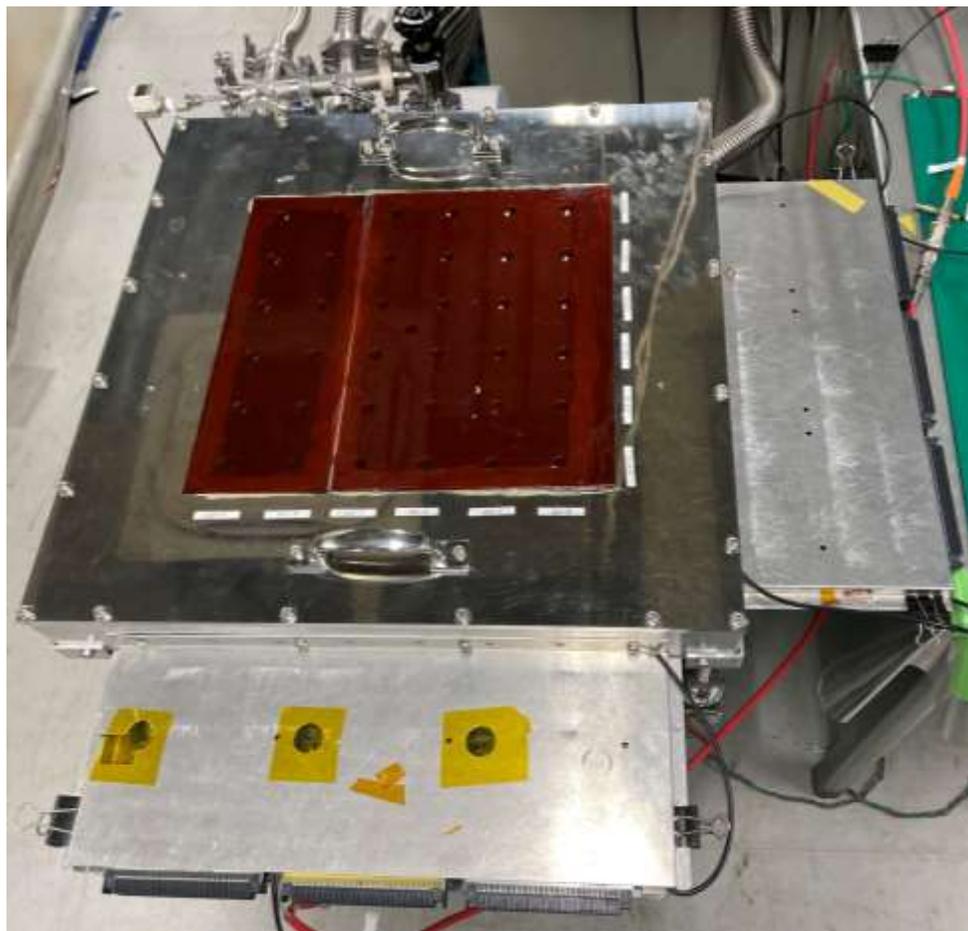
pixel形成状態の確認

cathode半径分布



- 最大約25 μm のばらつきがみられる
ゲインへの影響は？
→ゲイン測定へ

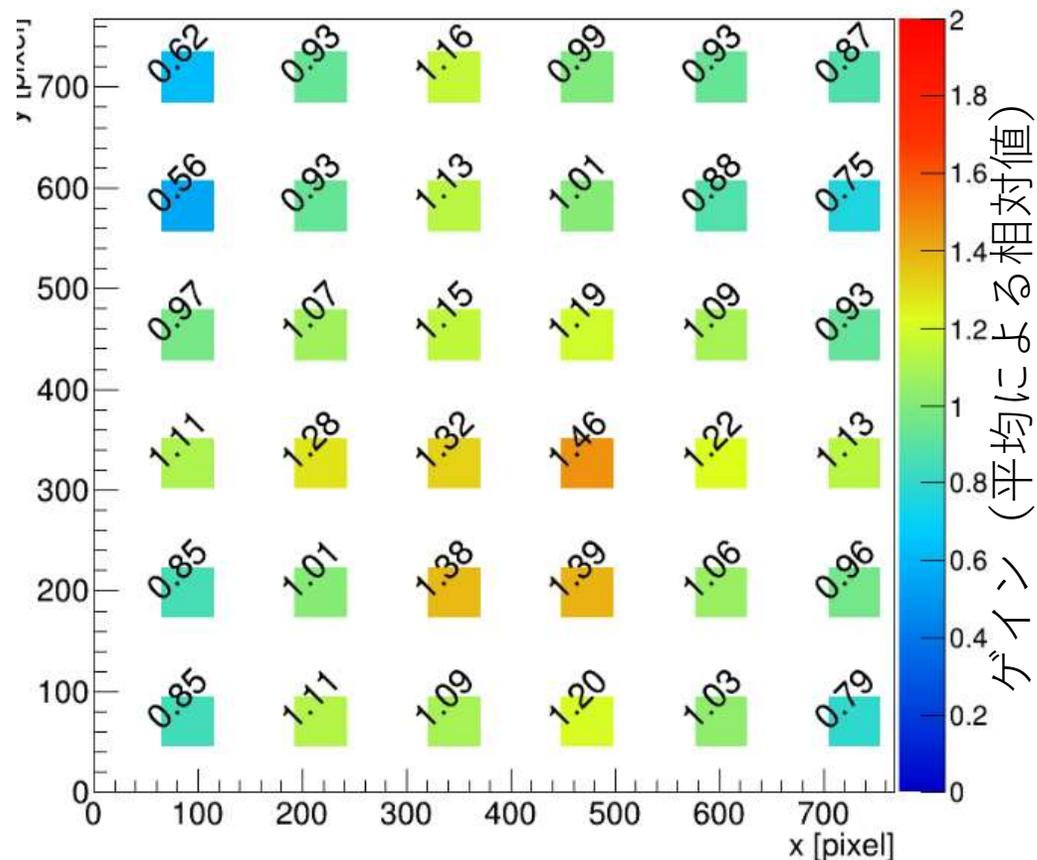
ゲイン測定



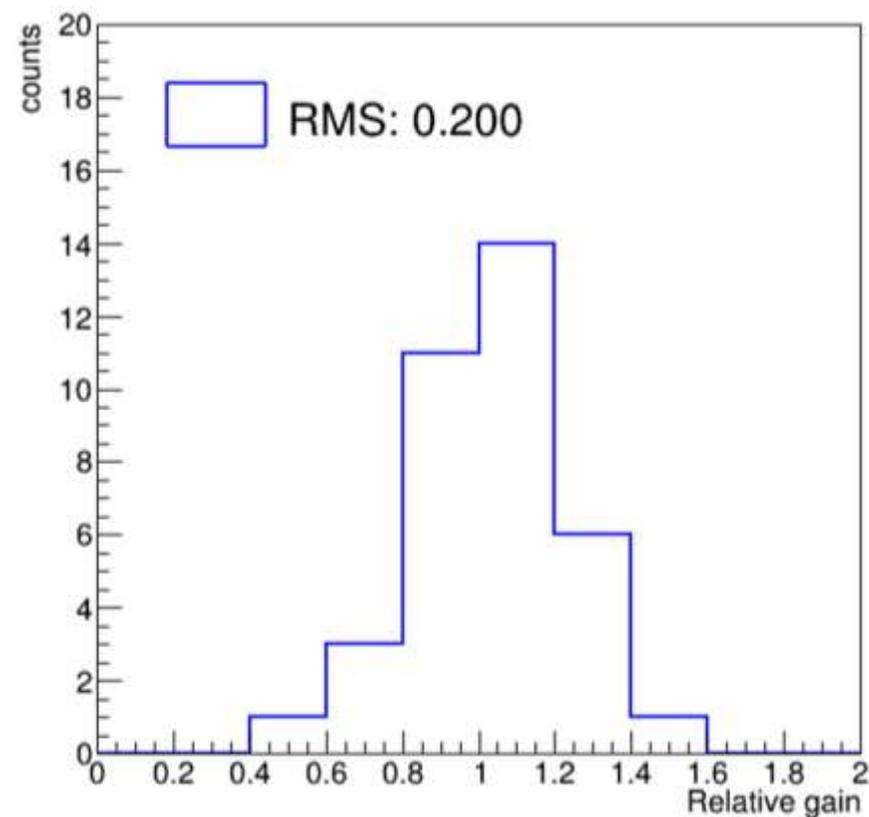
- 等間隔に6×6点箇所でゲイン測定 (⁵⁵Fe)、平均値を計算
- anode-cathode間 < 480V で要求値を超えるゲインを確認

ゲイン一様性測定

ゲイン (二次元分布)



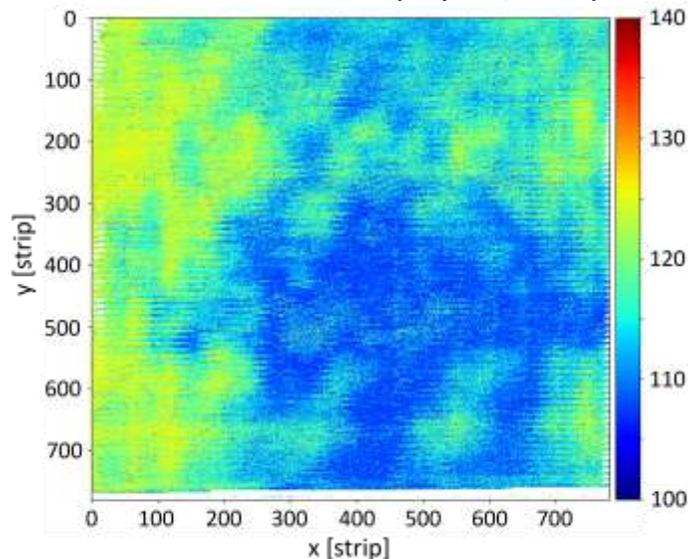
ゲイン (一次元分布)



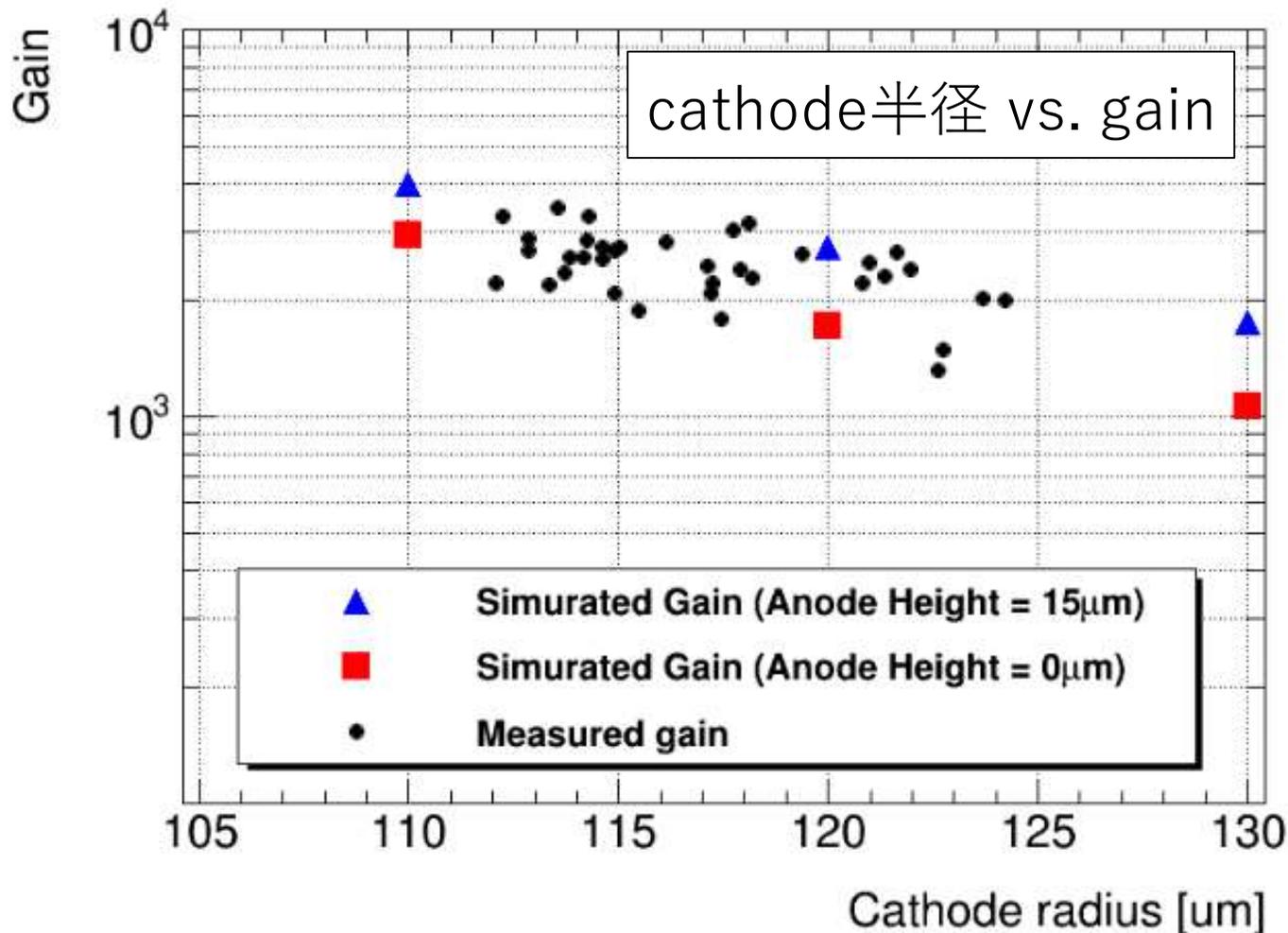
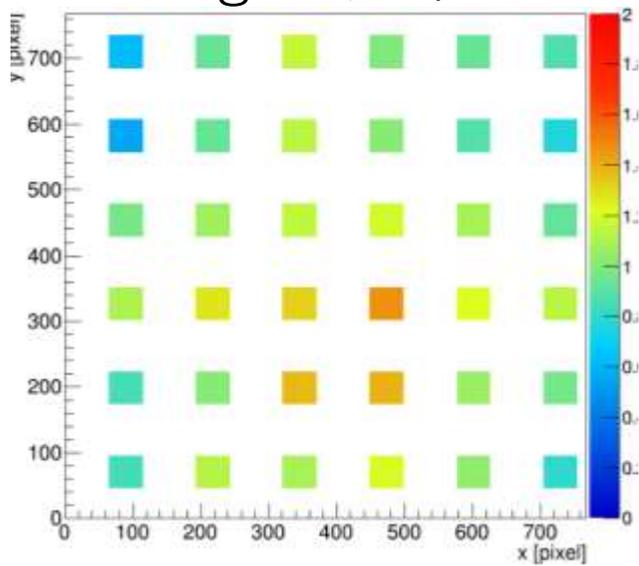
- ゲインを6×6か所で測定→RMS 20%
問題なく使用できる一様性
- cathode半径分布と関係がありそう

ゲインとcathode半径の関係

cathode半径分布



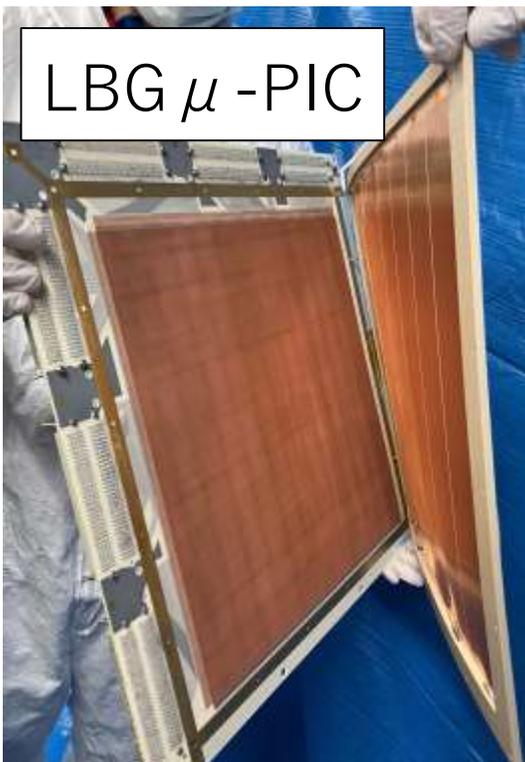
gain分布



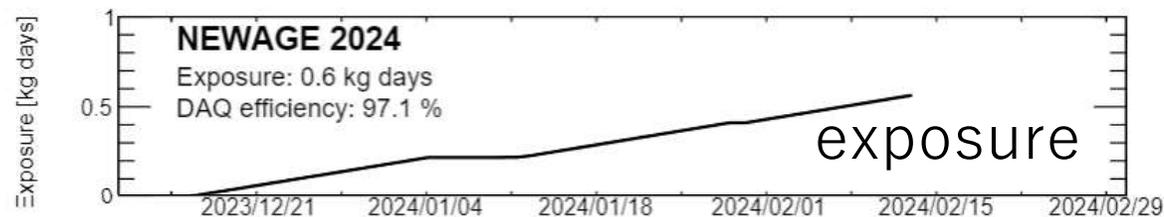
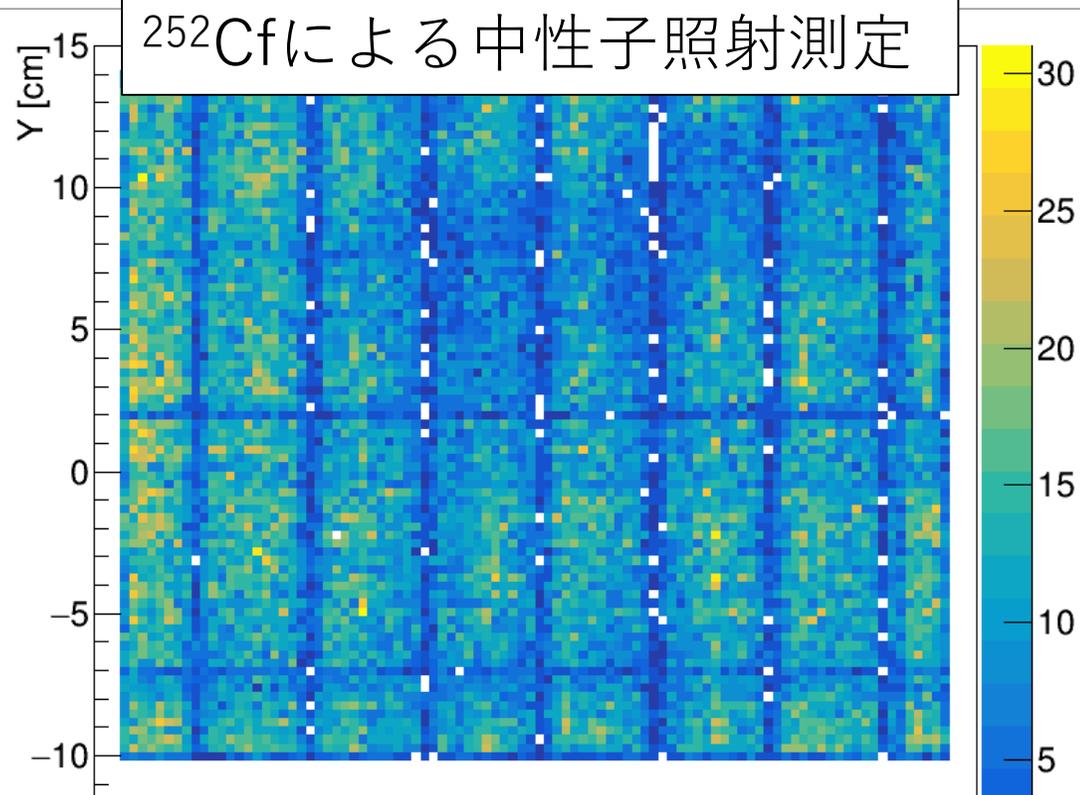
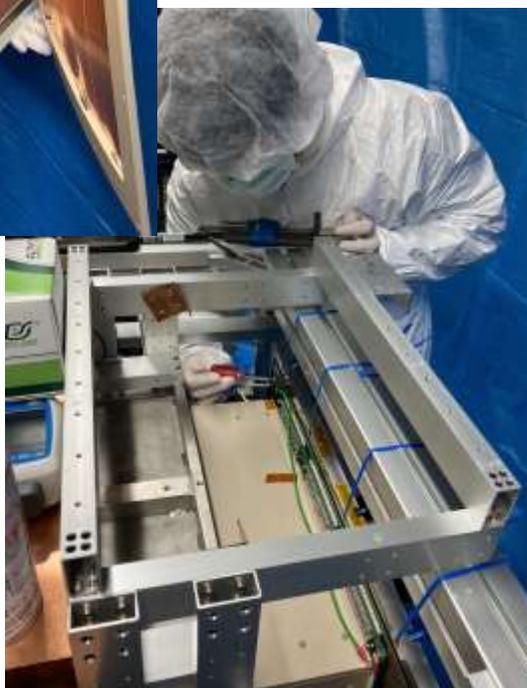
- ゲインとカソード径が直線的に分布
→画像からゲインが推測できる

Prospects

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

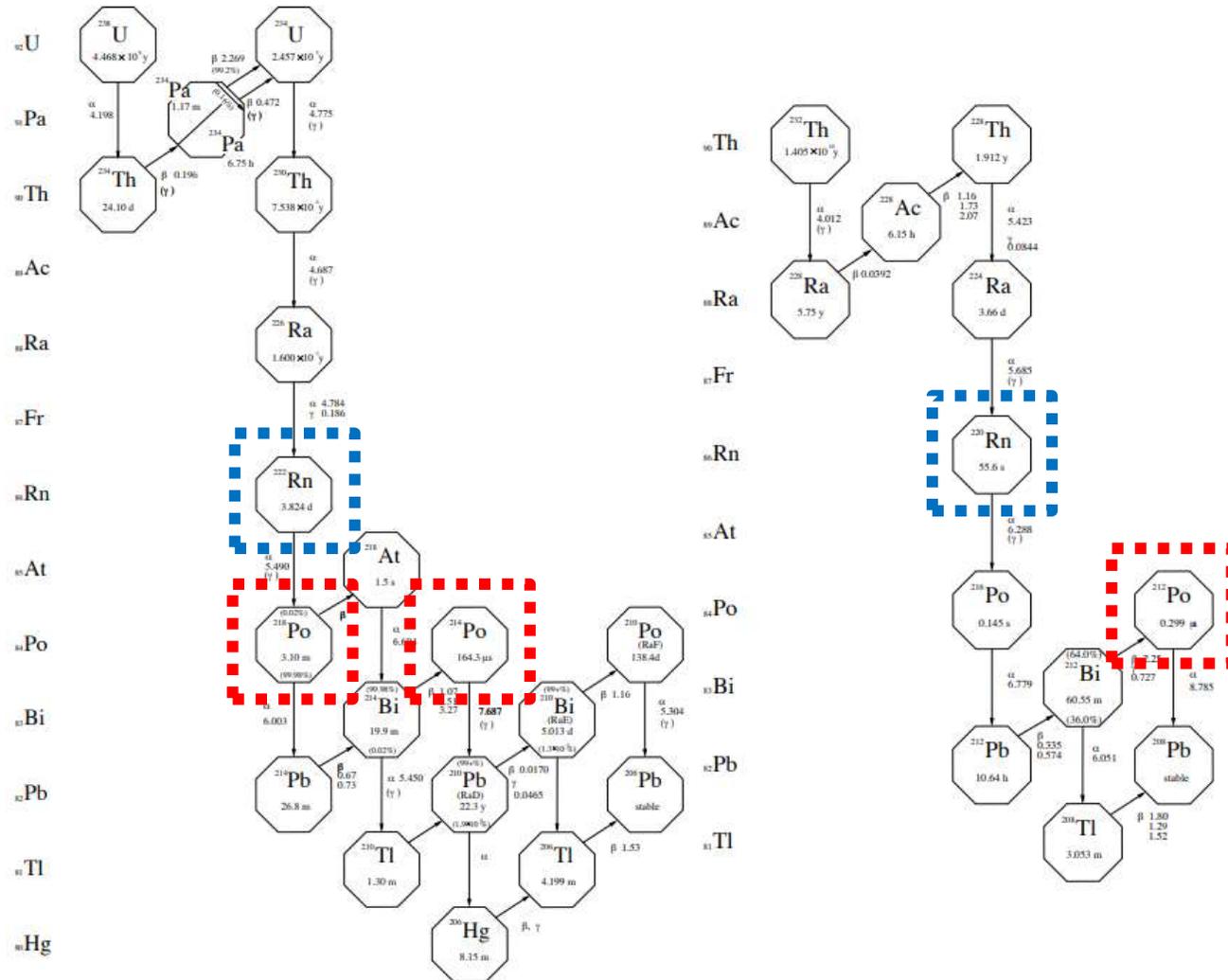
Conclusion

- 放出ラドン量が少ないLBG μ -PICを製作した。
 - 現行のLA μ -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

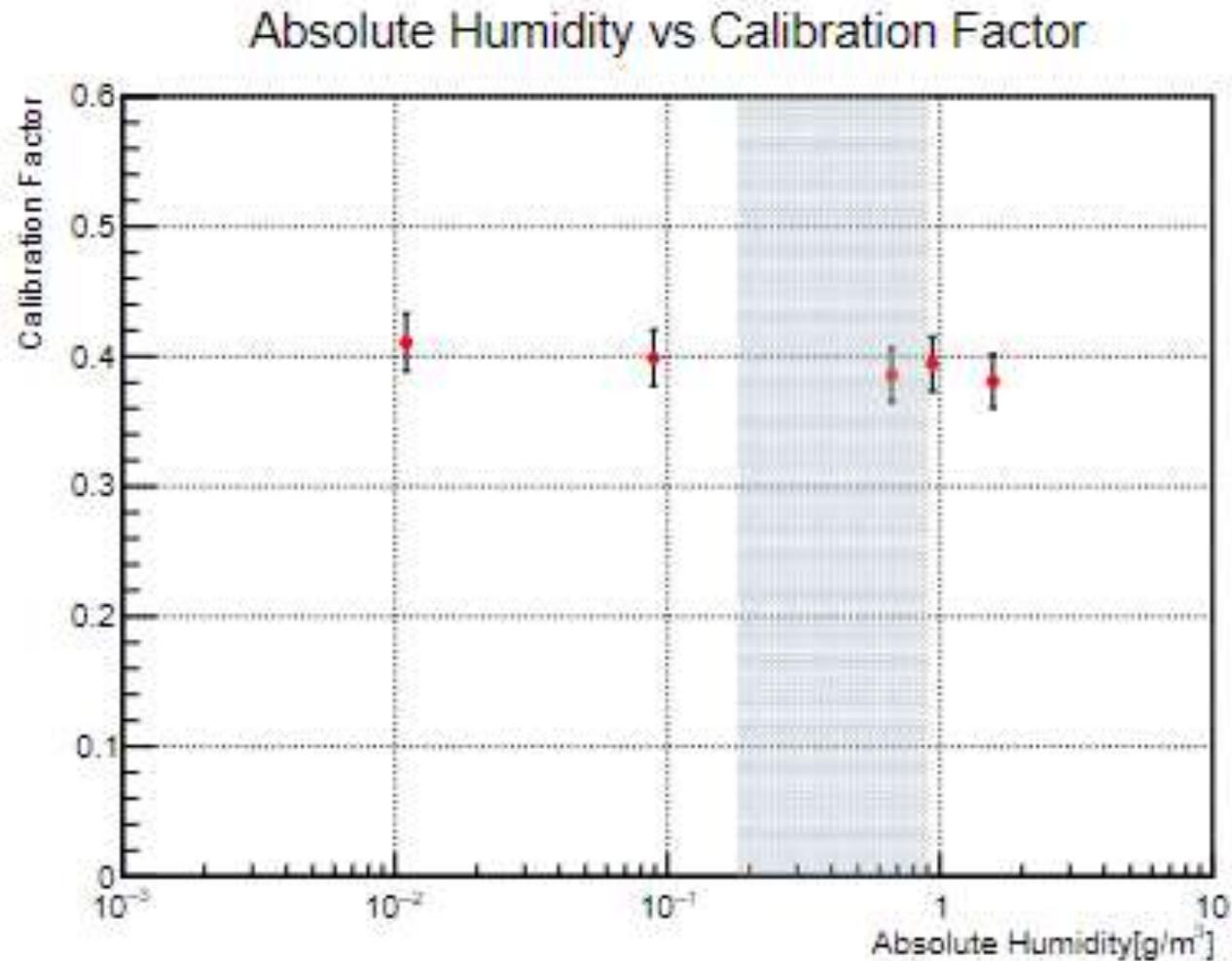
Back up

Radon Decay Chain

9.1 Uranium / Thorium decay chain

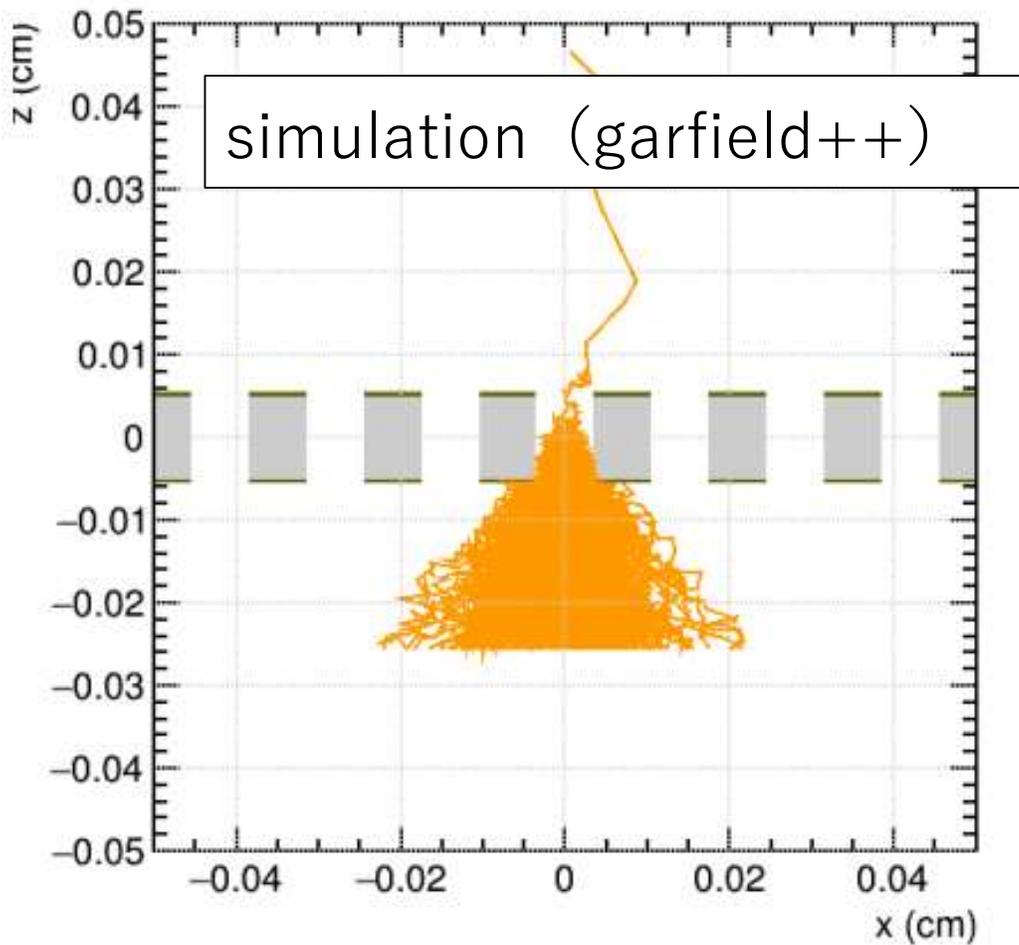
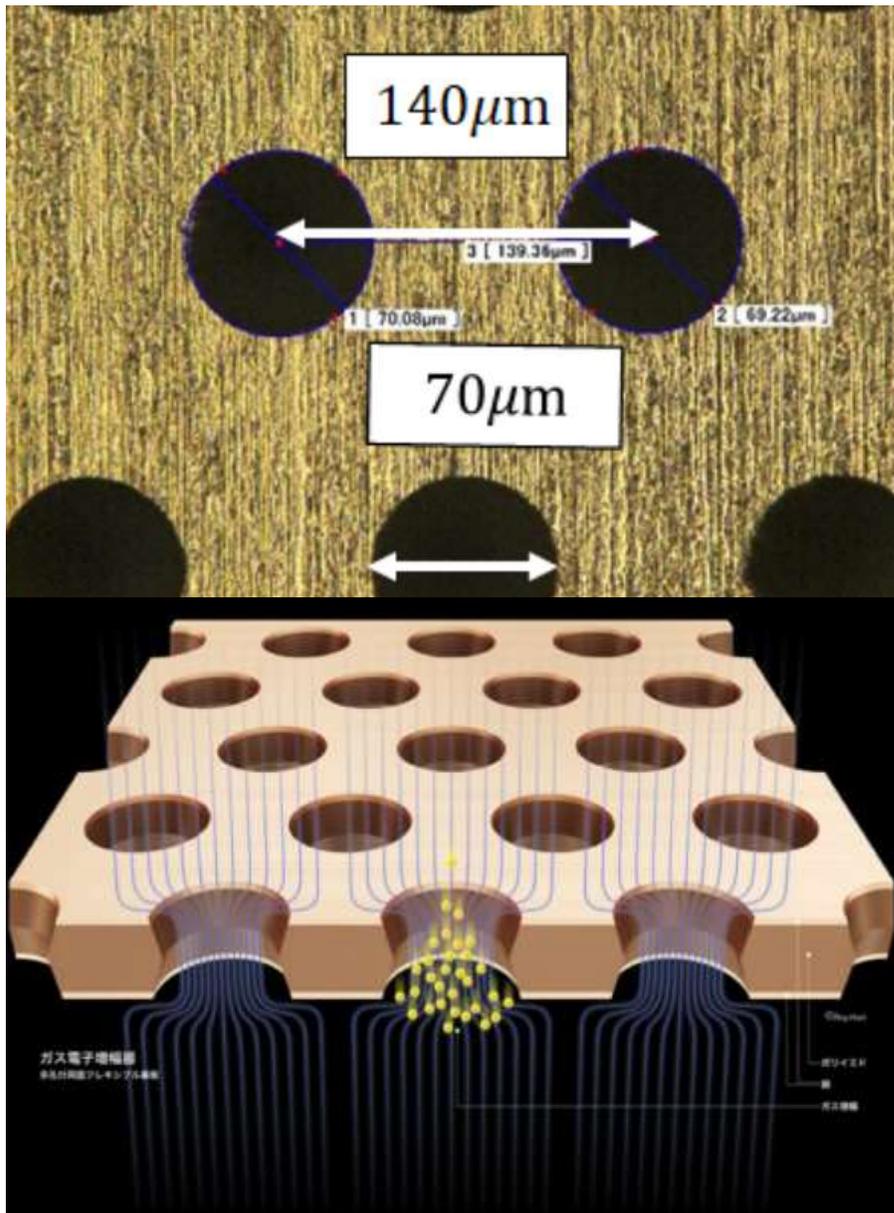


Radon emanation rate



calibration factor $Cf = 0.403 \pm 0.024$ [(count/day)/(mBq/m³)]

GEM



μ -PIC

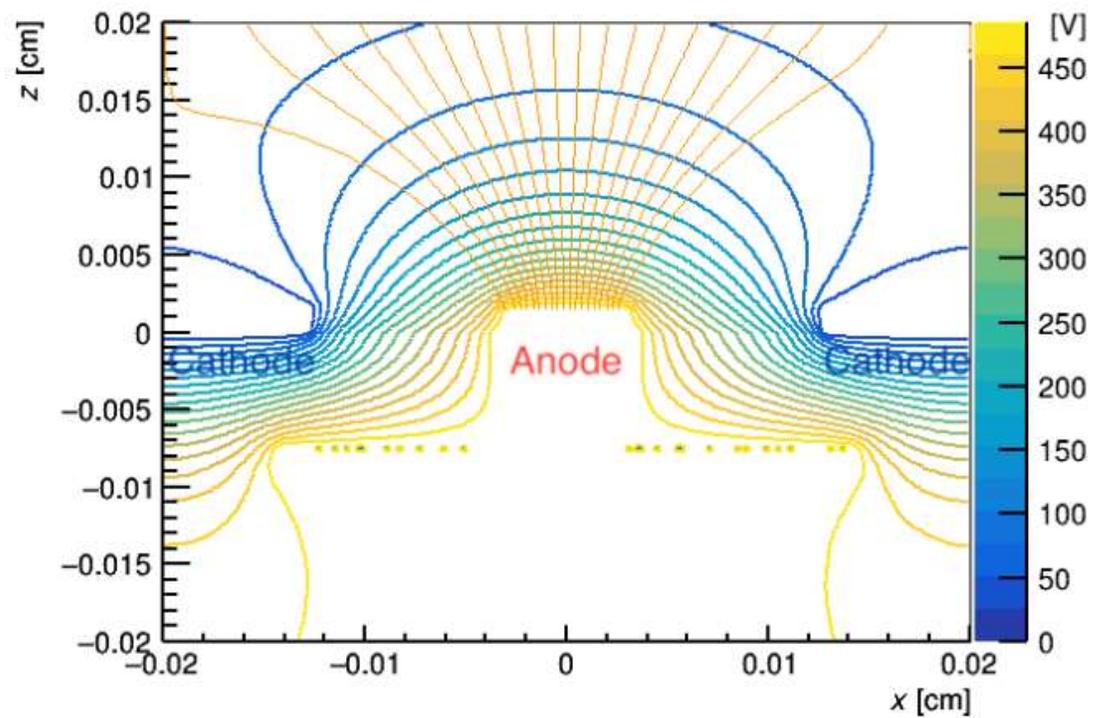


図 4.14 μ -PIC の電気力線 (橙色) と等電位面 (グラデーション)

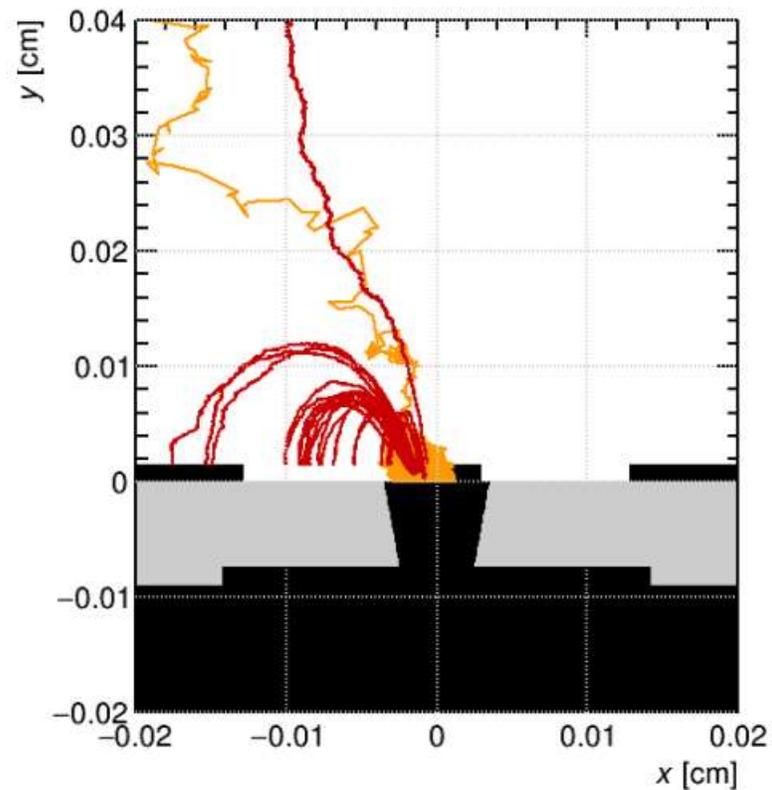


図 4.15 μ -PIC における電子の雪崩増幅の様子. (オレンジ: 電子、赤: Ar^+)

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 μm 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 α 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>