



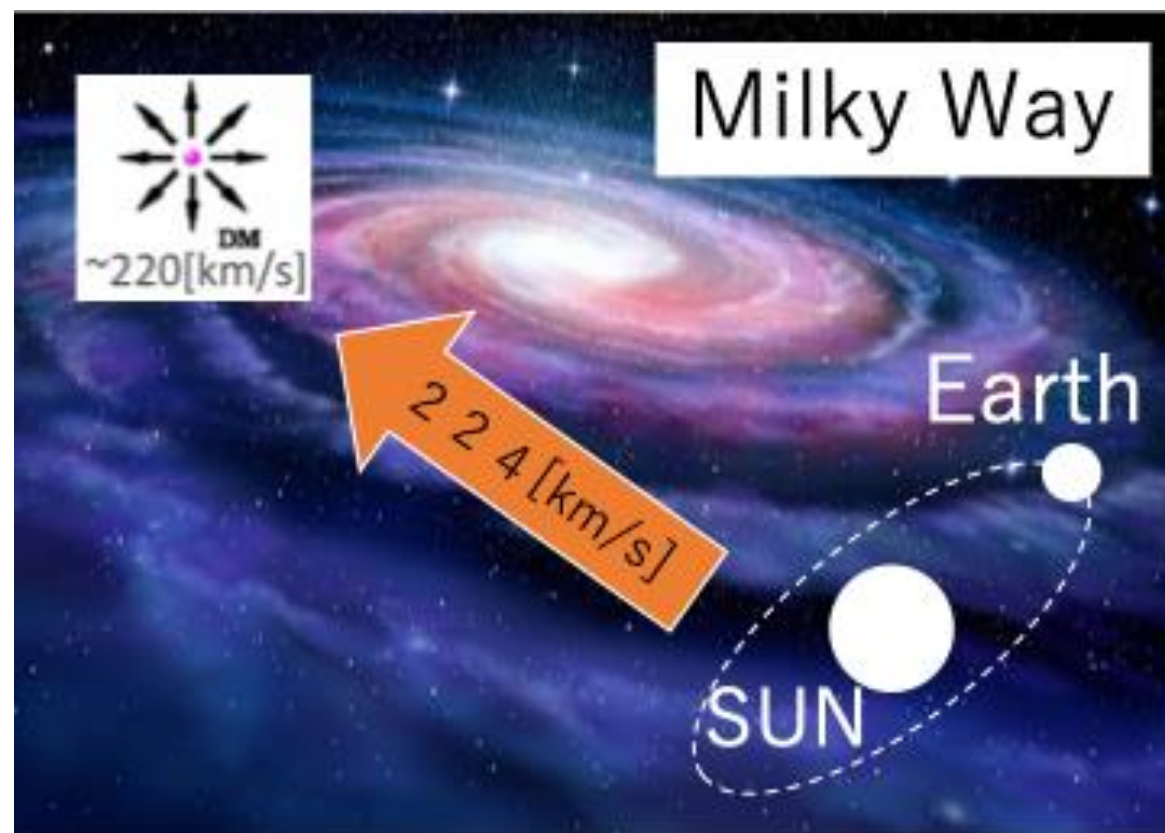
方向に感度を持った暗黒物質直接探索に向けた 低バックグラウンド検出器の性能評価

第9回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

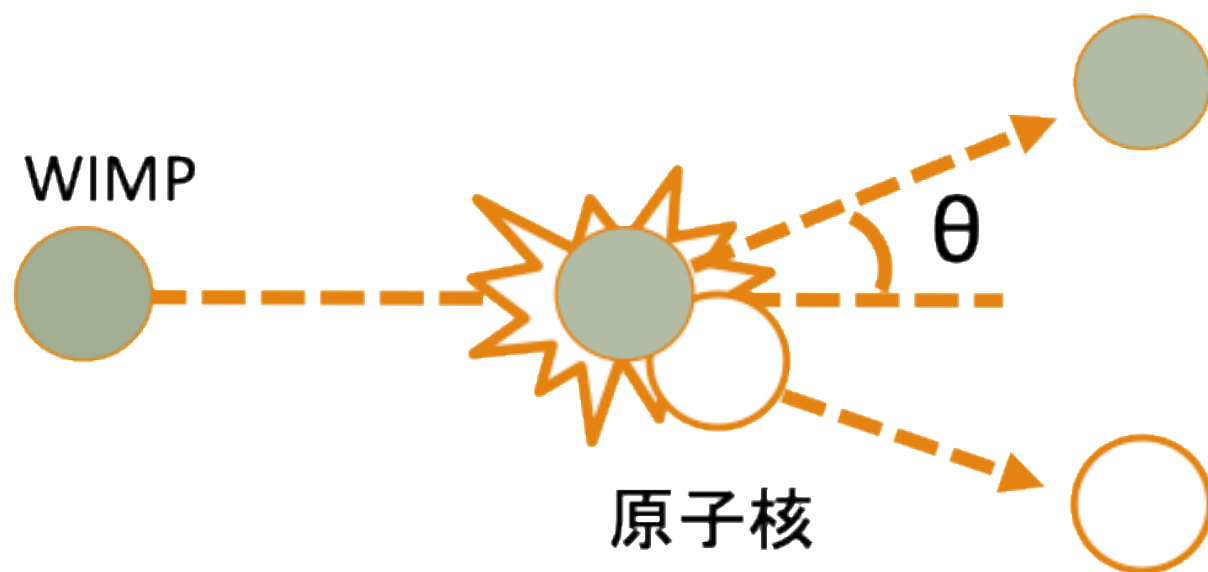
2024/11/7-9 東大宇宙線研 神岡宇宙素粒子研究施設

神戸大学 生井 凌太

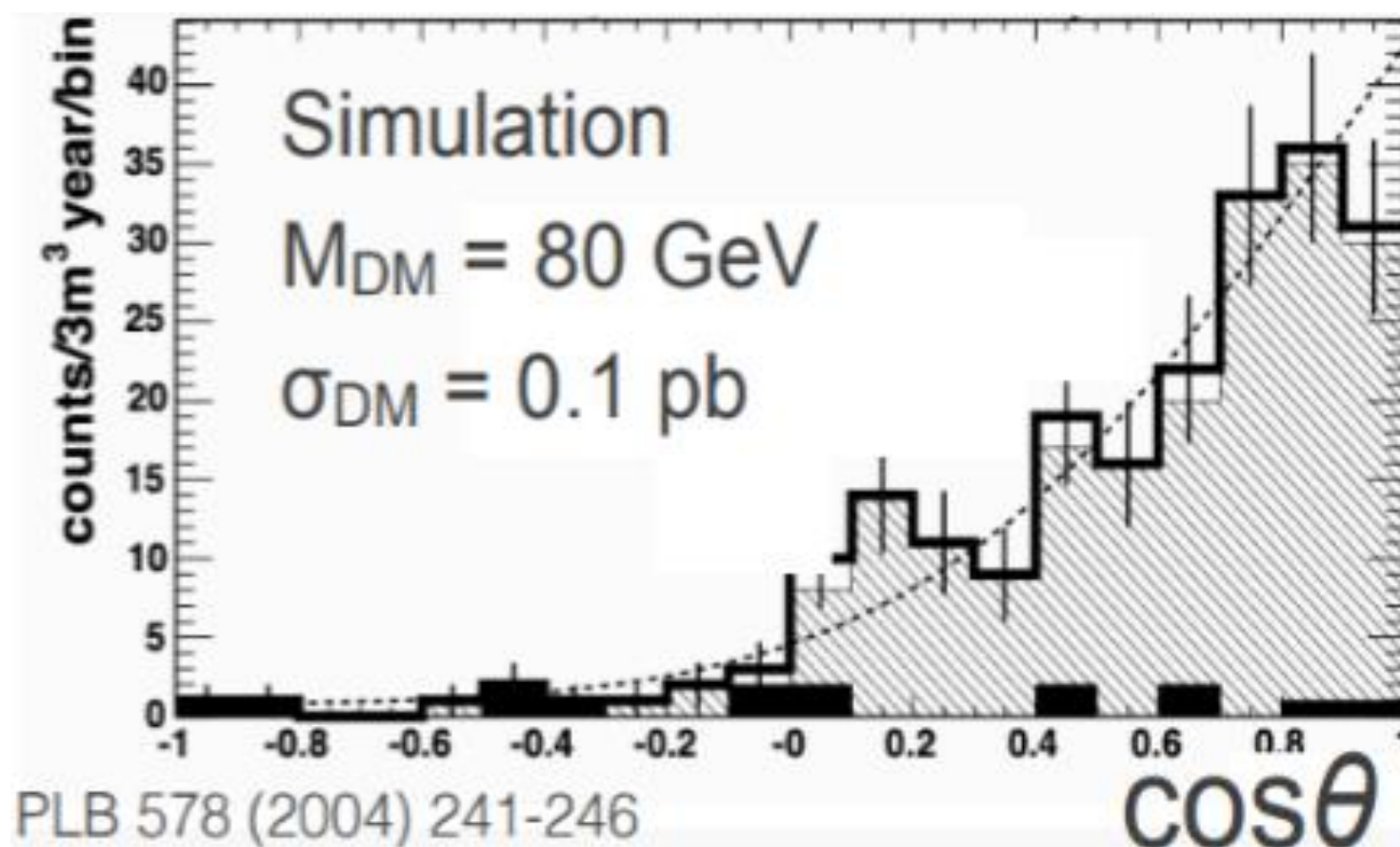
方向に感度をもつ暗黒物質直接探索



- 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WIMPと原子核の**弾性散乱**での**反跳角分布**をから観測する

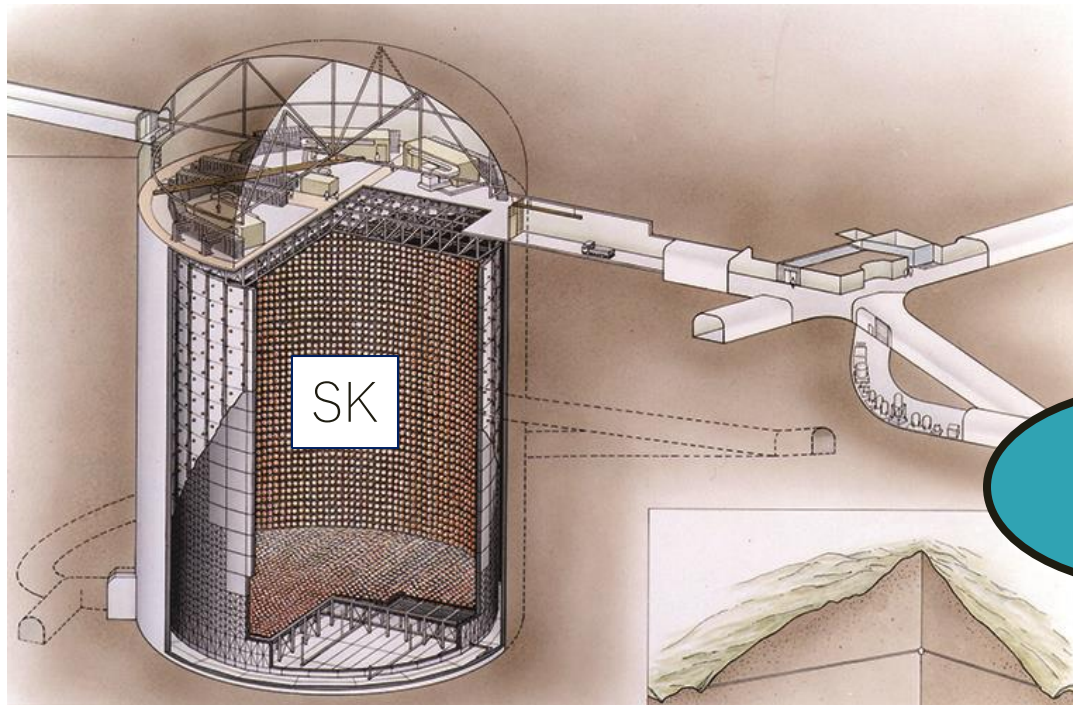


WIMPによる原子核反跳事象

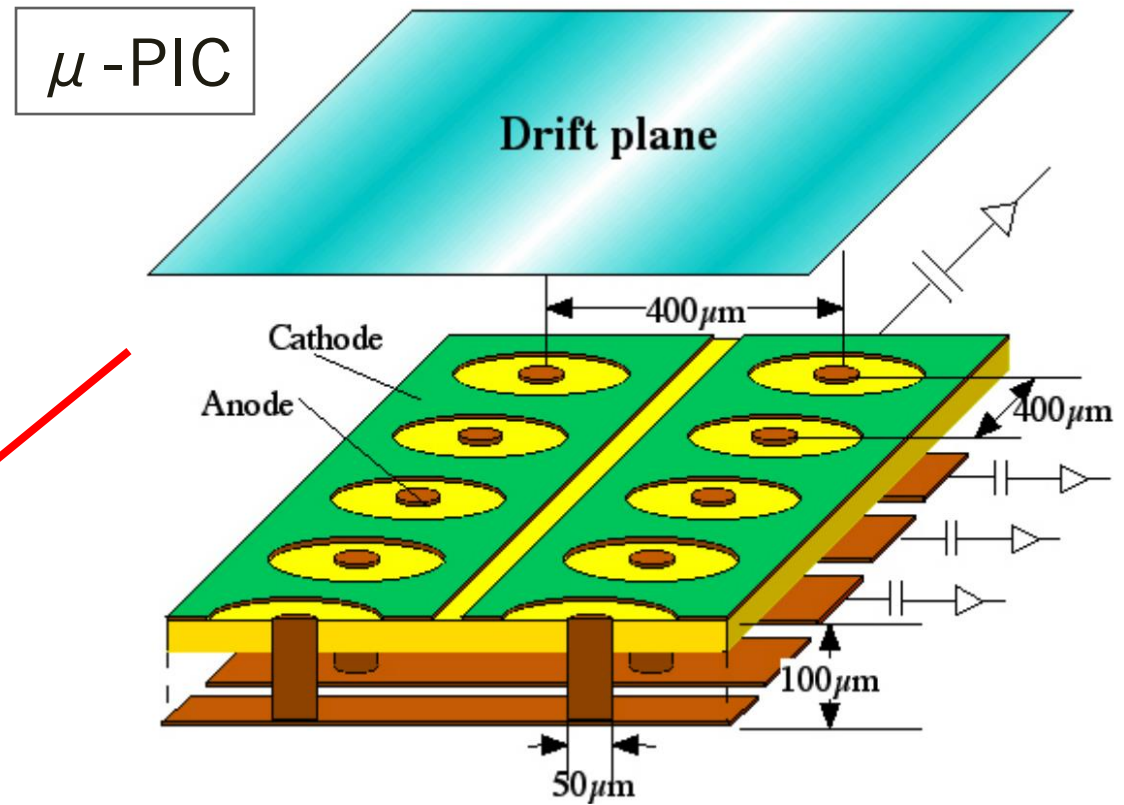
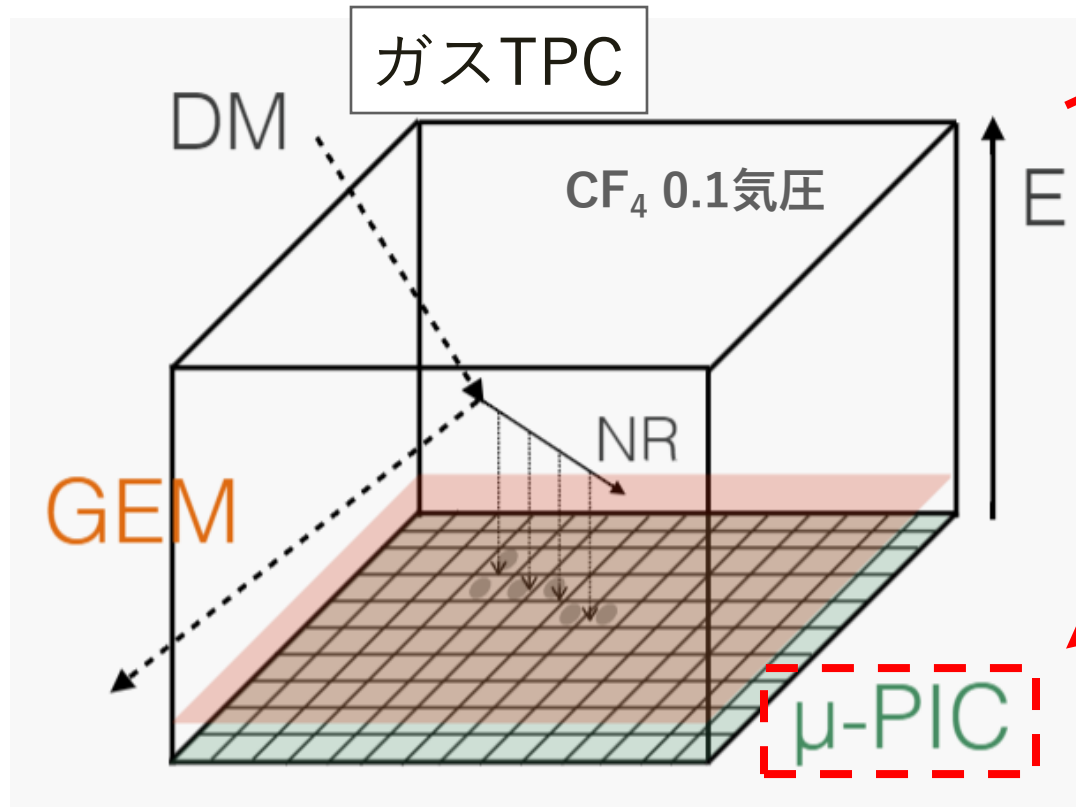
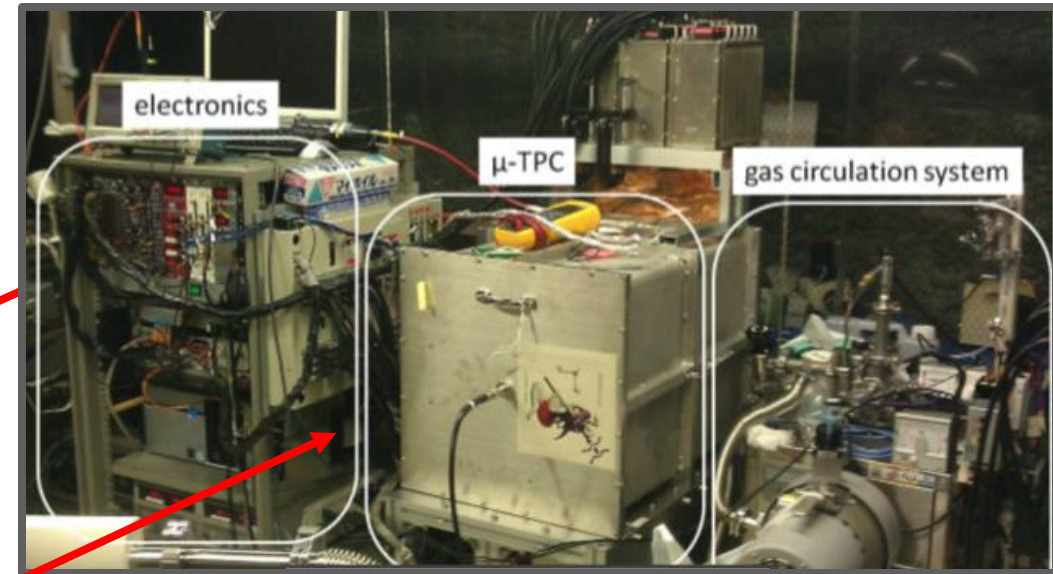


原子核反跳の角度分布 (シミュレーション)

NEWAGE実験



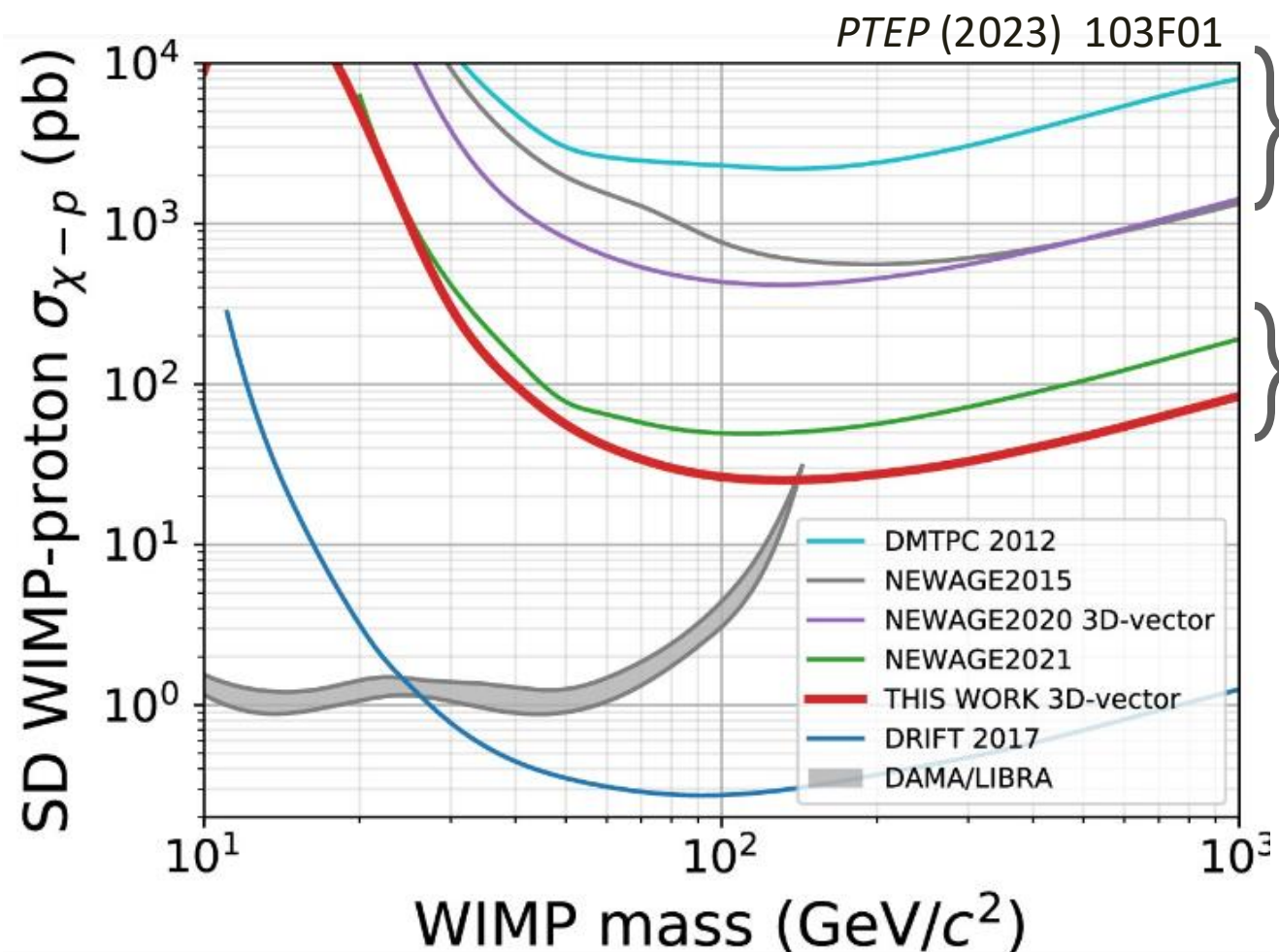
@神岡坑内 (Lab-B)



- ガスTPC (Time Projection Chamber)
 - CF_4 0.1気圧
 - $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}^3$ detection volume
- μ-PIC(Micro Pixel Chamber)による三次元読み出し

- $768 \times 768 \text{ ch}$ ($30 \times 30 \text{ cm}^2$)
- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
- 電極付近に高電場を形成し、電子の増幅を行う

μ-PIC開発の歴史と低バックグラウンド化の経緯



μ-PIC
NEWAGE2015 & 2020



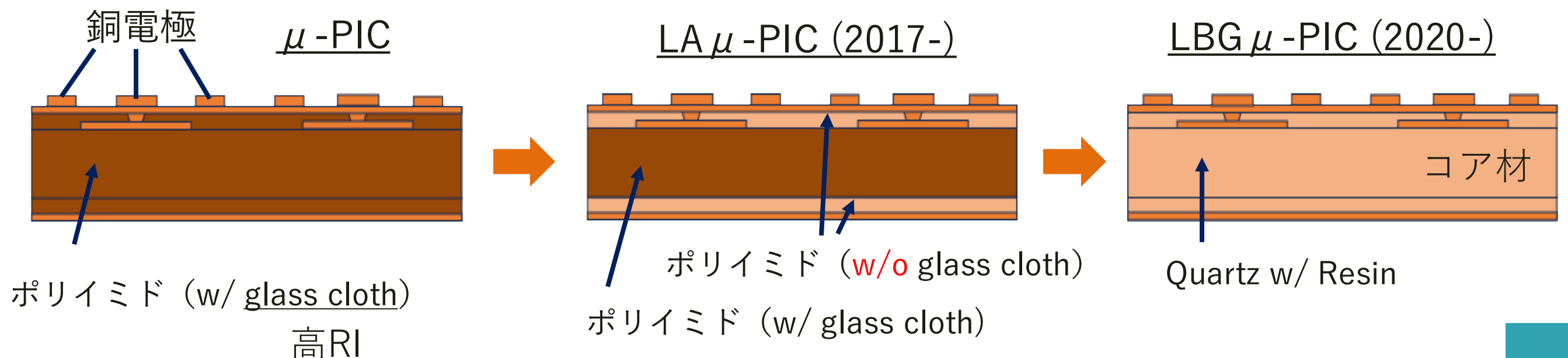
Low α(LA)μ-PIC
NEWAGE2020 & 2023

低バックグラウンド化による感度の向上を行ってきた。

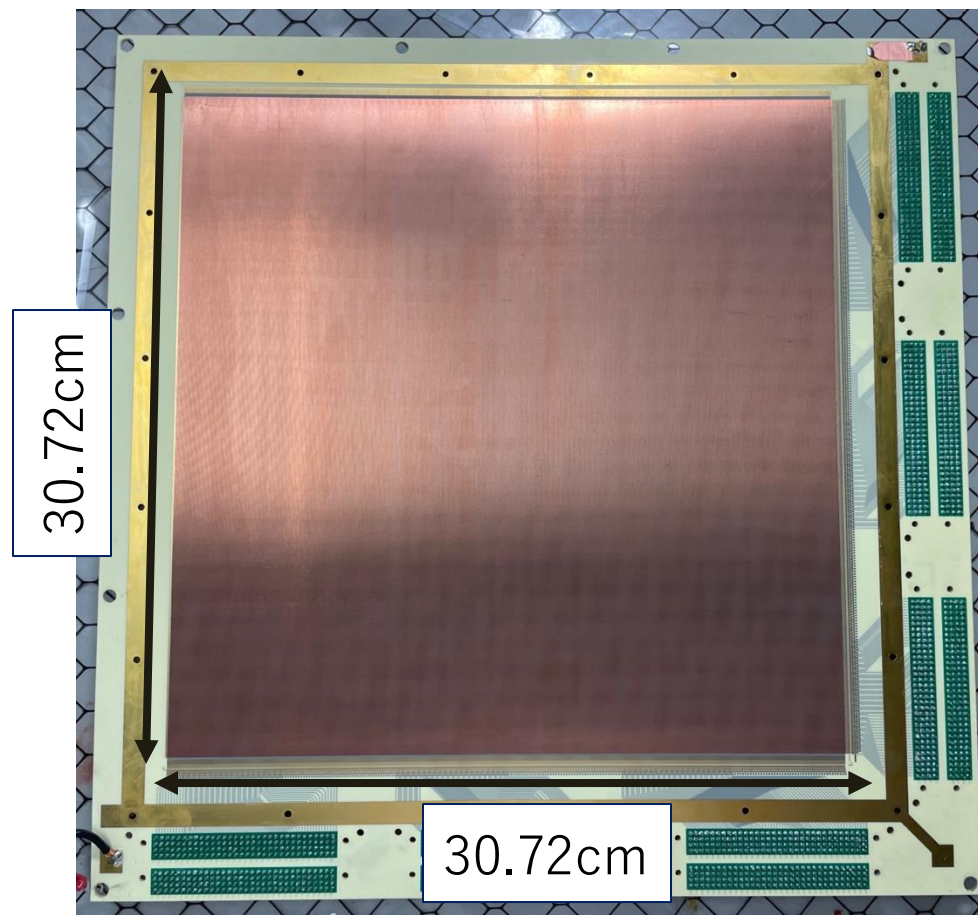
- Low α (LA) μ-PIC: 検出器表面からの α を抑制
→ 検出感度向上 (PTEP (2023) 103F01)
- 一方でラドンBGが顕在化
→ コア材をより低RIなものにした Low BG (LBG) μ-PIC を製作
- ラドンレート要求値: LA μ-PICの <math>< 1/10</math>

研究目的: LBG μ-PICの性能評価

μ-PICの改良



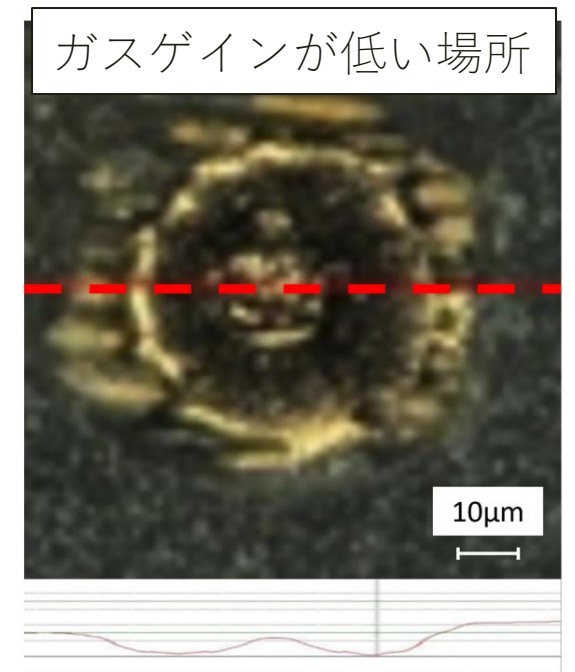
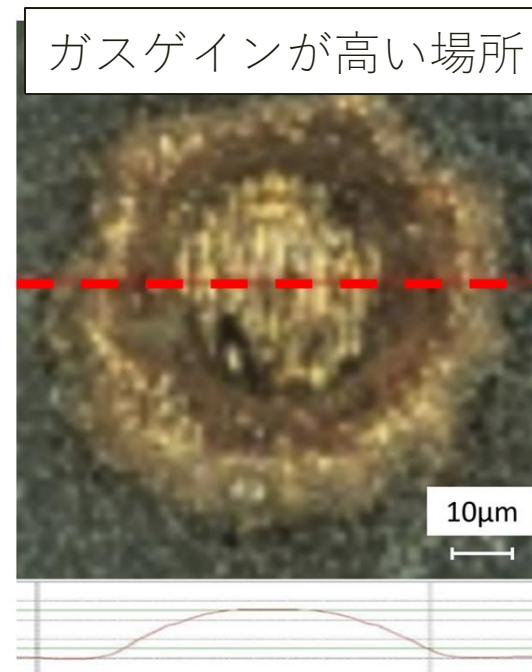
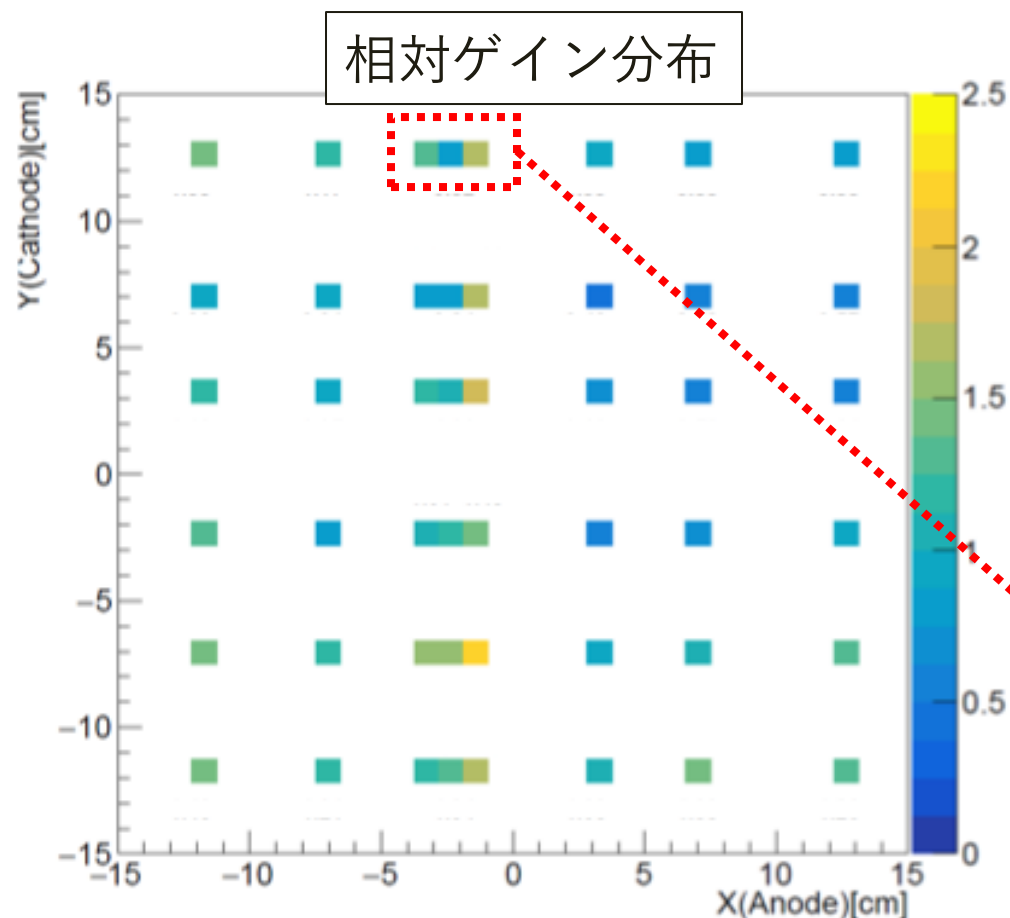
LBG μ -PICの製作 (2020)



- LA μ -PICの1/14以下のRnレートを達成

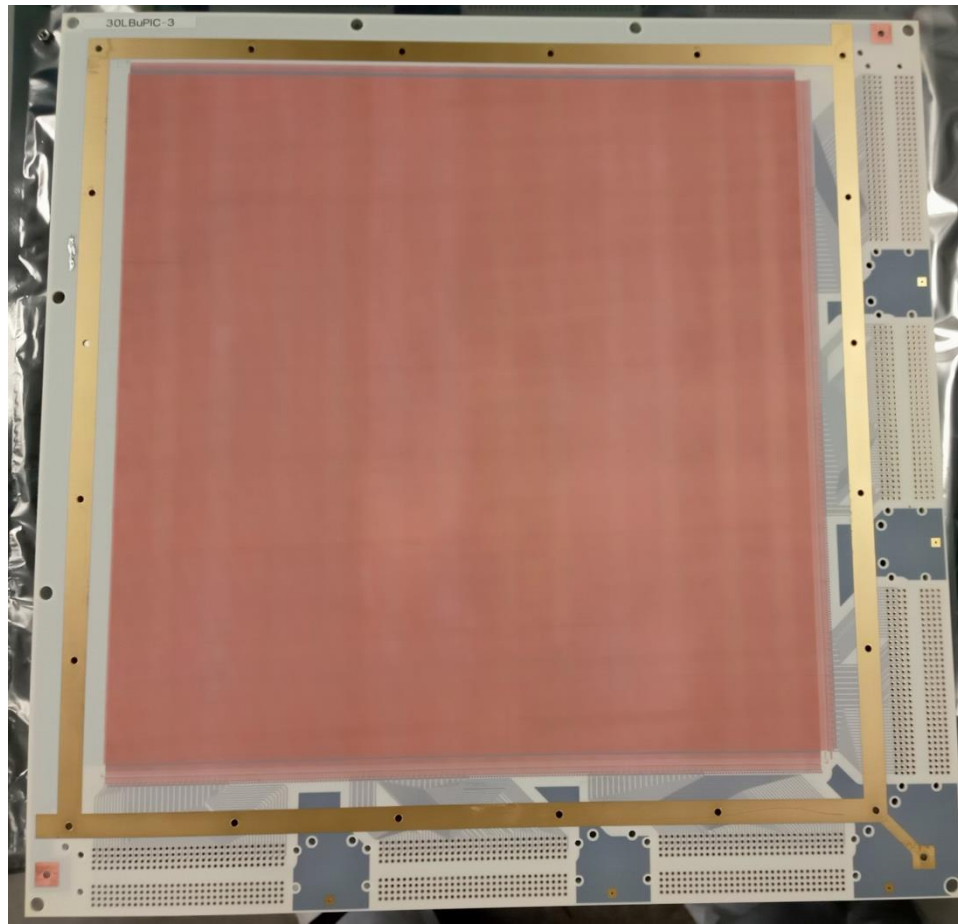
Sample	Radon rate [mBq/chamber]
LA μ -PIC	2.3 ± 0.5
LBGμ-PIC2020	< 0.14 (90% C.L)

- 問題点：ローカルなゲインの一様性が低い
 - 位置分解能の低下
 - 角度分解能の低下
- 原因：電極の形成不全



→ 電極の形成状態を改善したモデルを新規に製作 (2023)

LBG μ -PICの製作 (2023)

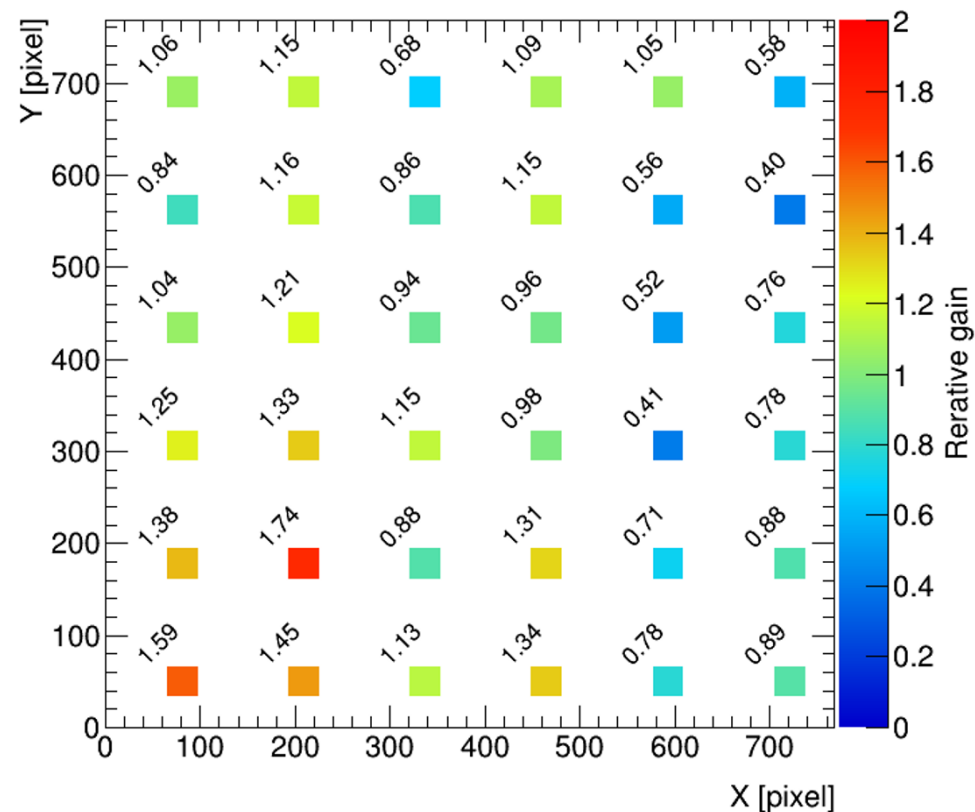


- 製造方法の見直し
 - ・ 電極デザインの見直し
 - ・ 製造工程の見直し (by DNP)
- ラドンレートは2020年モデル未満

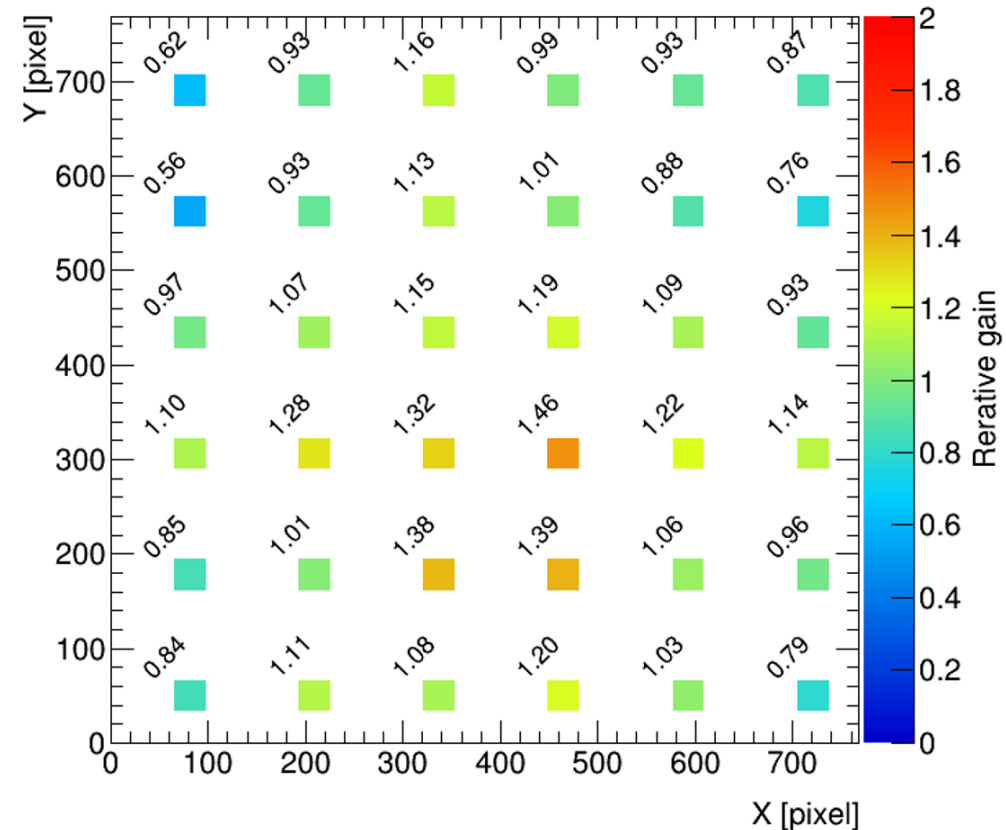
Sample	Radon rate [mBq/chamber]
LBG μ -PIC2020	< 0.14 (90% C. L)
LBGμ-PIC2023	< 0.04 (90% C. L)

相対ゲイン分布

2020モデル

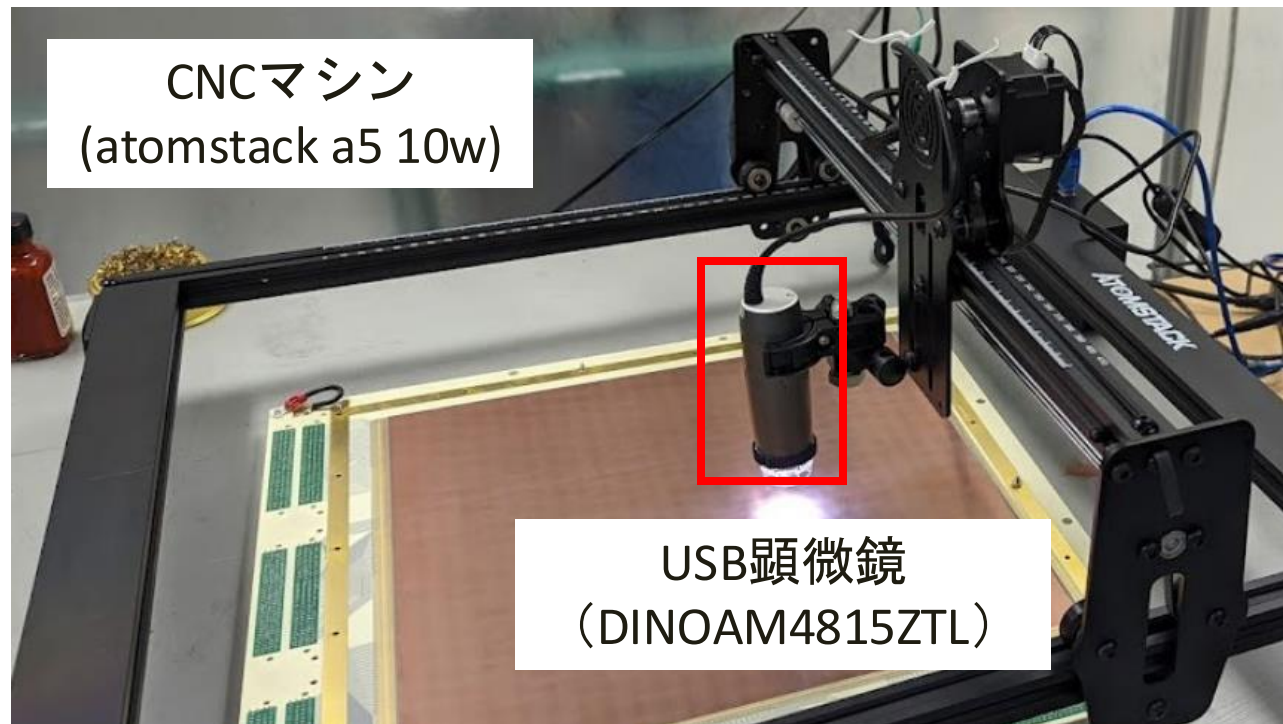


2023モデル



- ローカルなゲインの一様性が改善

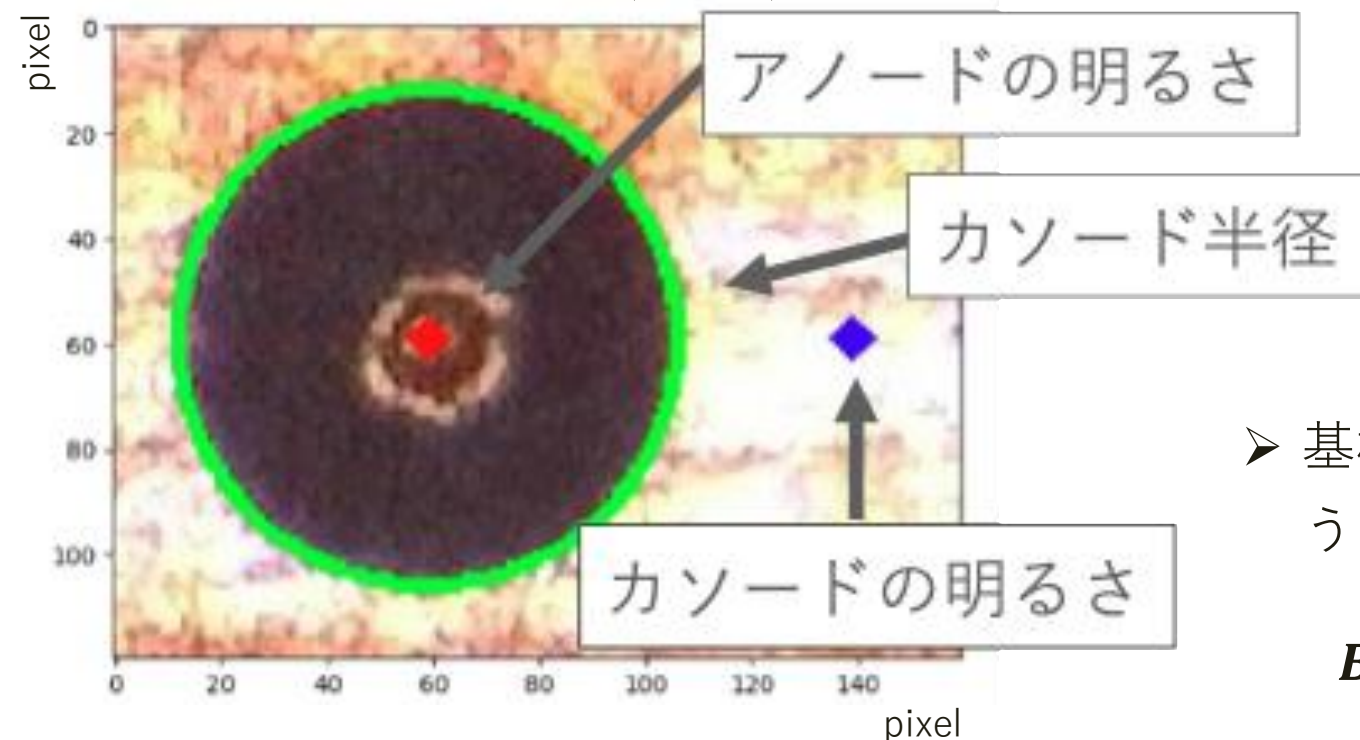
電極の外観検査



測定の動機

- 各電極の形成状態の確認
 - 768x768 chのゲイン測定は現実的ではない
 - ゲインは電極の形状に依存する
- ゲインの一様性の推定
- 神戸大学にある3D実体顕微鏡では大きすぎて測定不可
- CNCマシン+USB顕微鏡で測定器を自作
 - 撮影速度：~1000 cm²/day
 - 撮影枚数：170 × 170

撮影された写真（拡大）



➤ 写真から以下の情報を取得

- カソードの半径(R_C)
 - アノードの明るさ
 - カソードの明るさ
- 形成不良時暗く映る
→光度を利用

- 基板の変色などの影響を排除するため、明るさ(Br)を以下のように定義

$$Br = \frac{\text{アノードの明るさ} - \text{カソードの明るさ}}{\text{カソードの明るさ}}$$

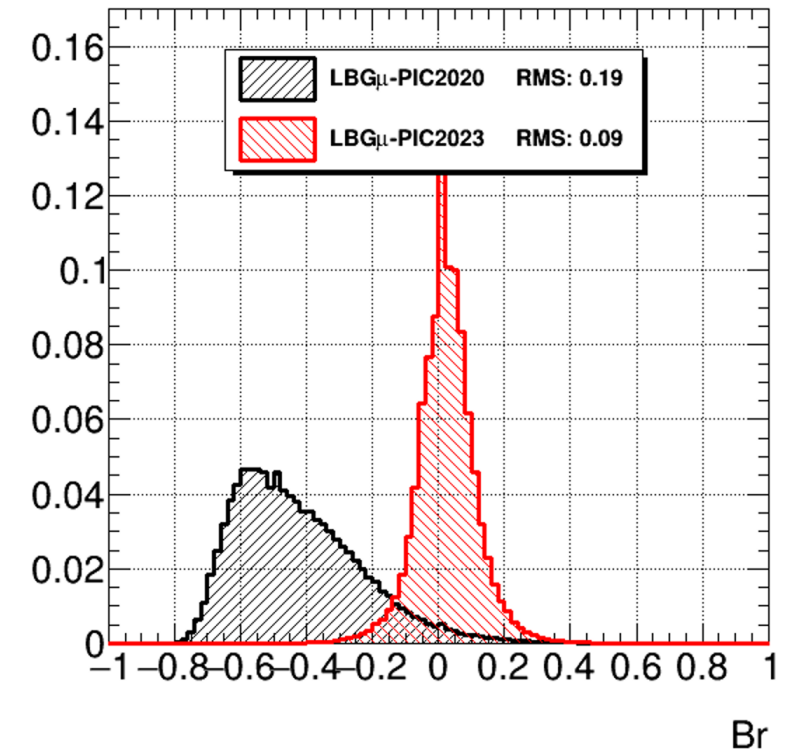
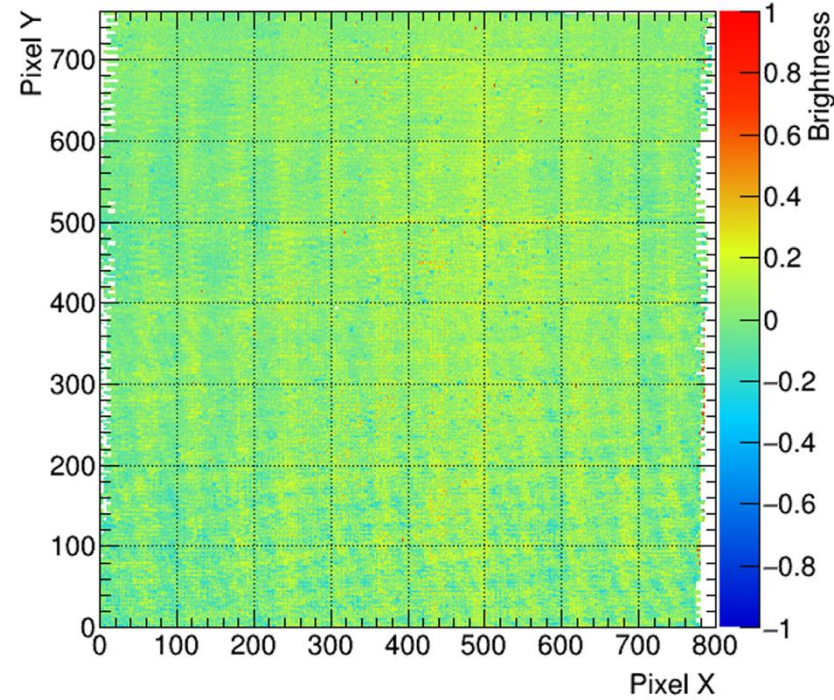
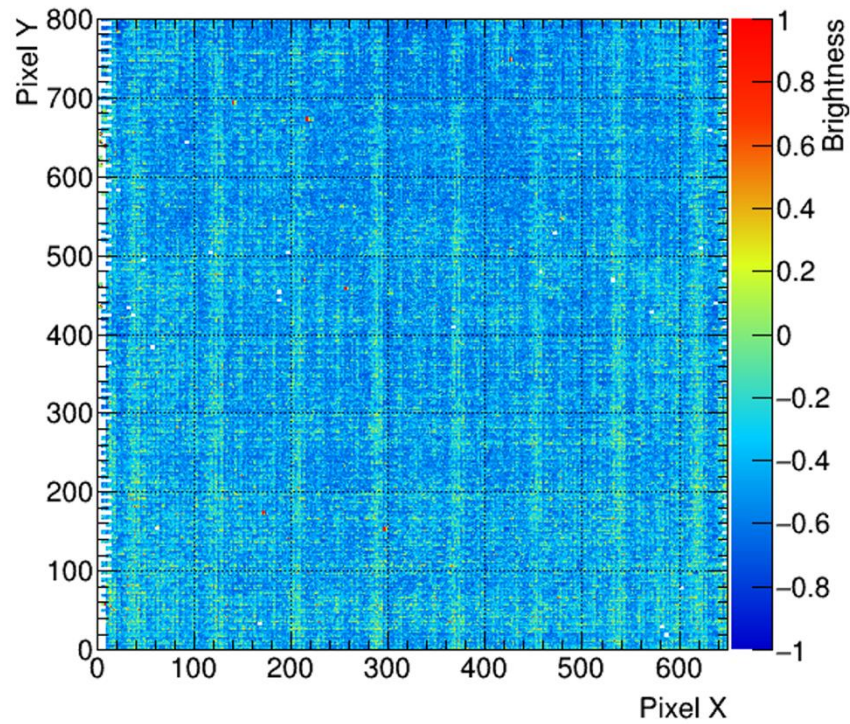
電極の外観検査

2020年

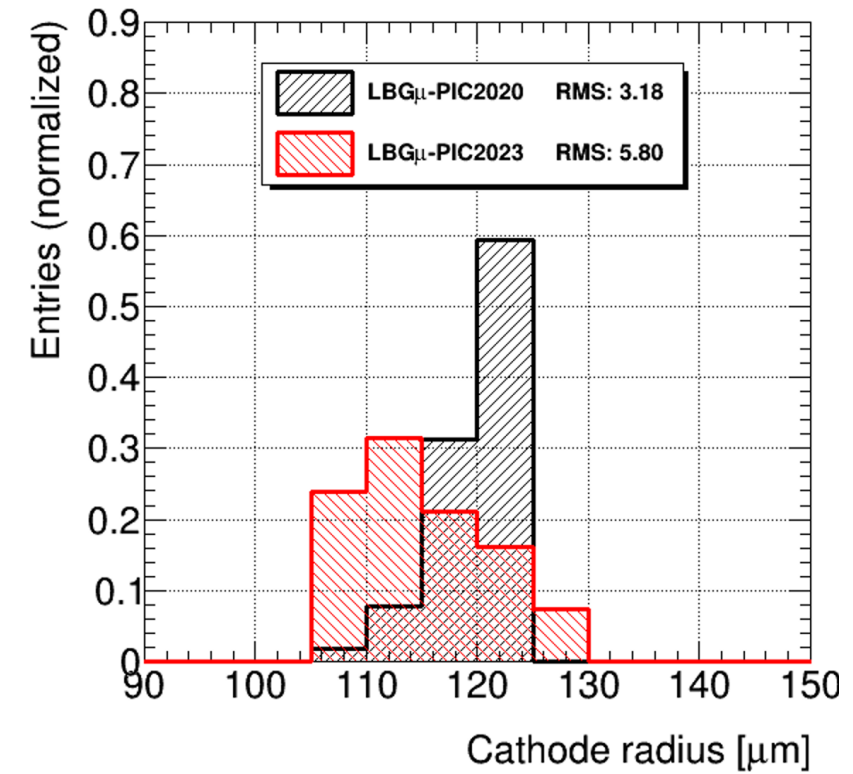
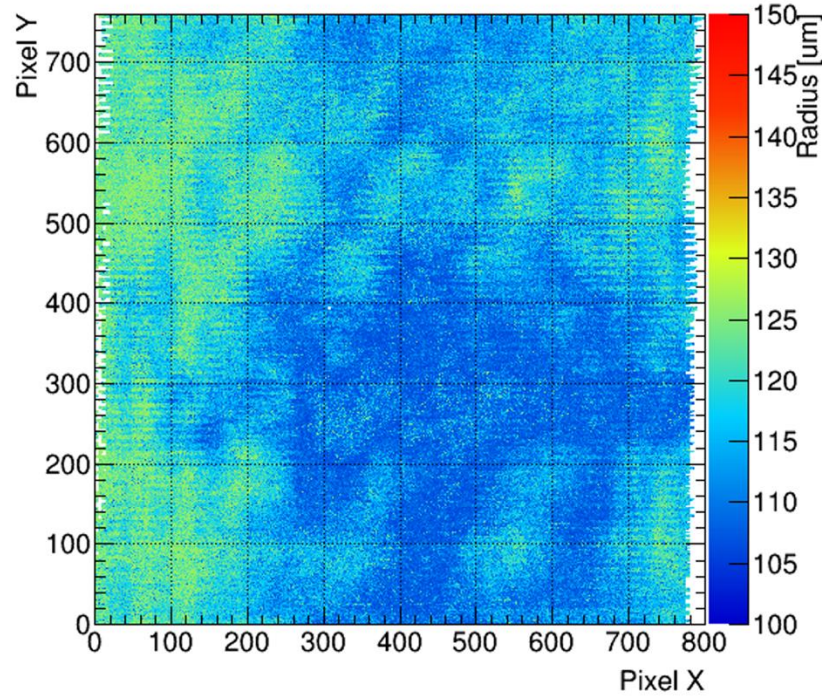
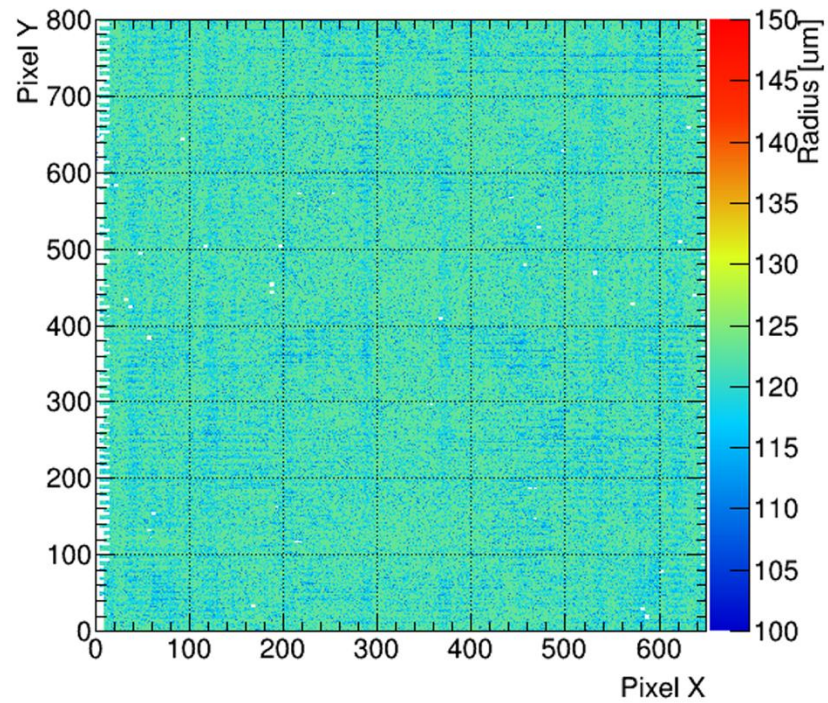
2023年

比較

Br 分布



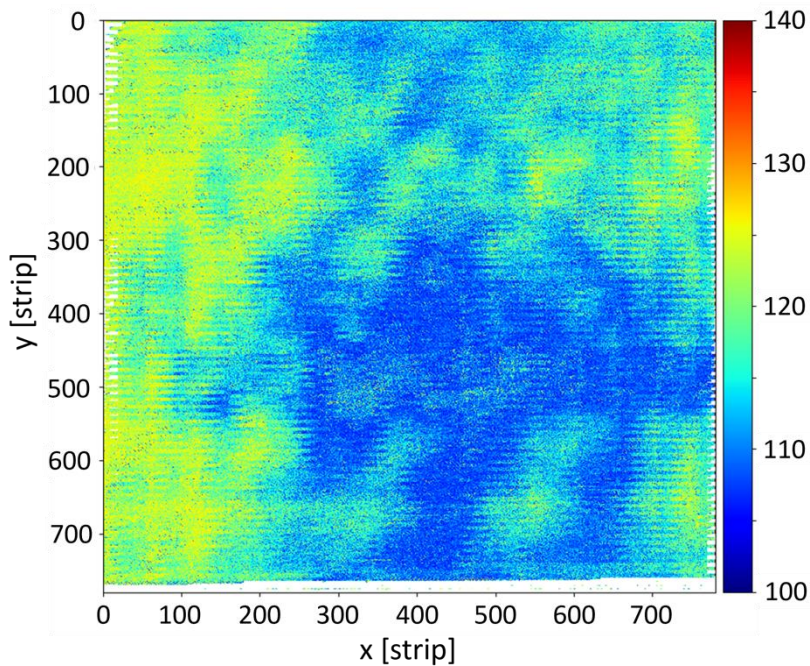
R_c 分布



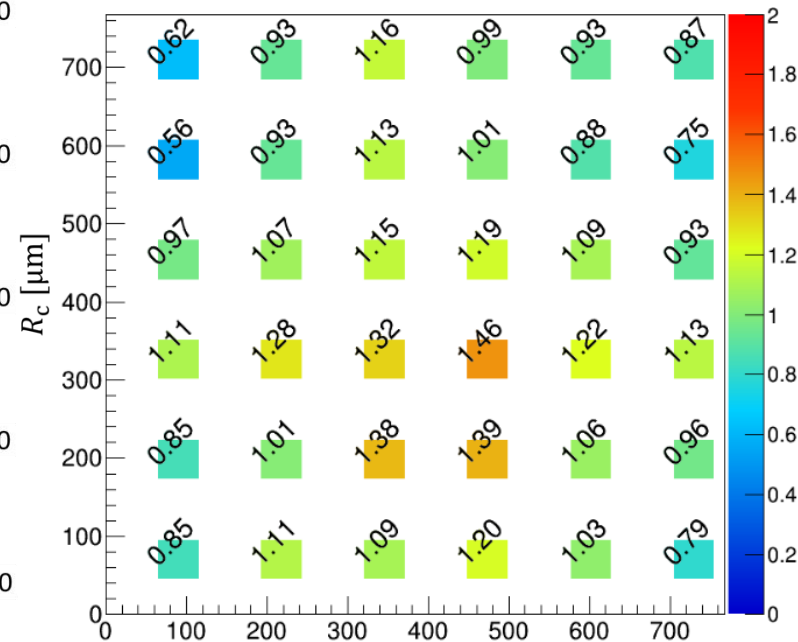
- Br の一様性が改善
- R_c のローカルなゲインの一様性が改善
- R_c のグローバルなゲインの一様性については解析で補正 (後述)

ゲインの補正

カソード半径(R_C)分布



ゲイン分布



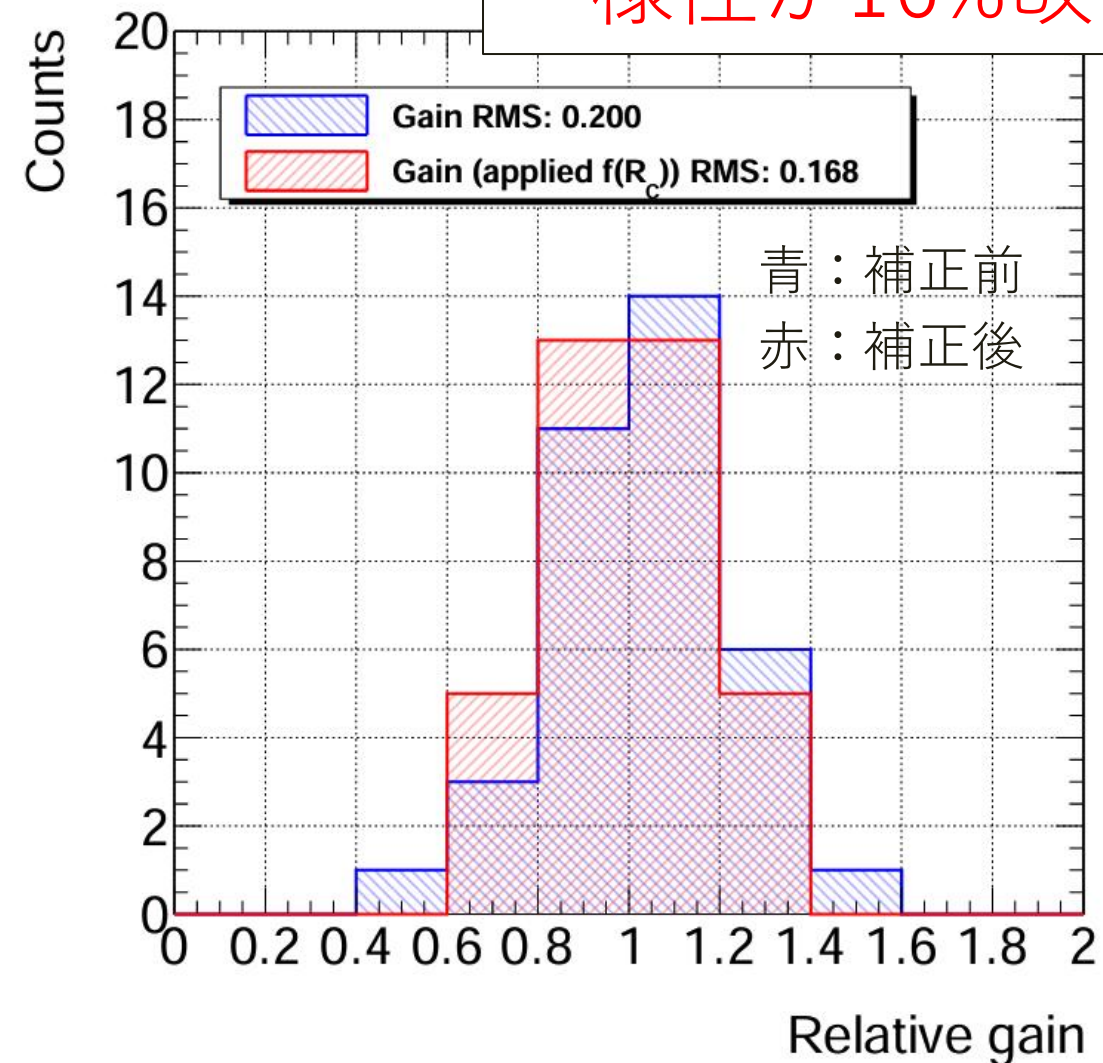
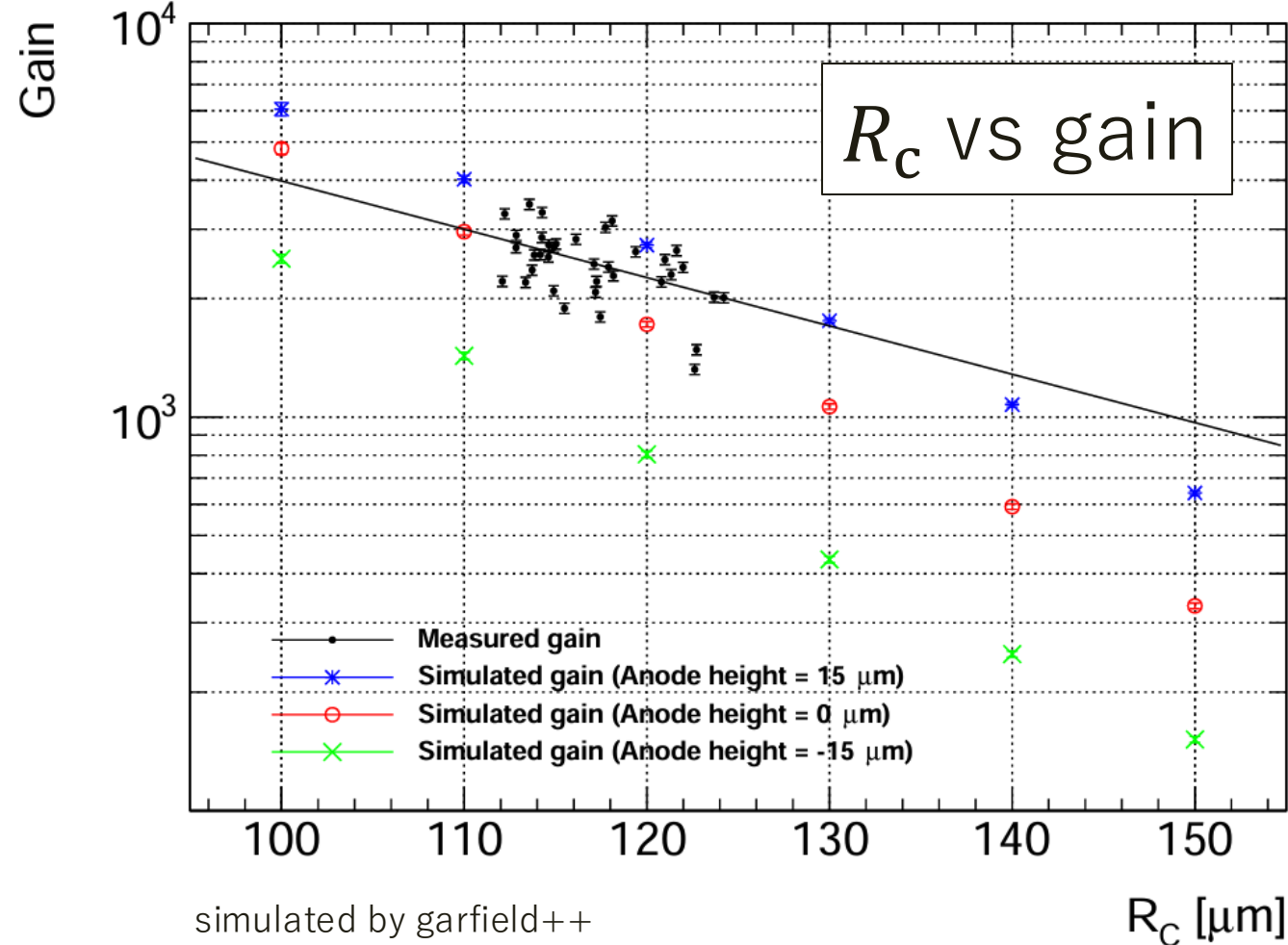
- R_C が小さいほどゲインが高い傾向
- 以下の式で R_C vs gain を fitting

$$G_{fit}(R_C) = a_0 \exp(a_1 R_C),$$

- $R_C = 120 \mu\text{m}$ のゲインに補正

$$f(R_C) = G_{fit}(120) / G_{fit}(R_C),$$

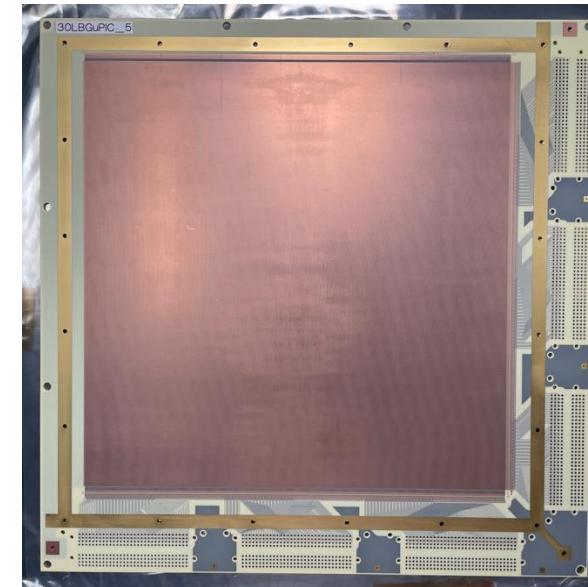
一様性が16%改善



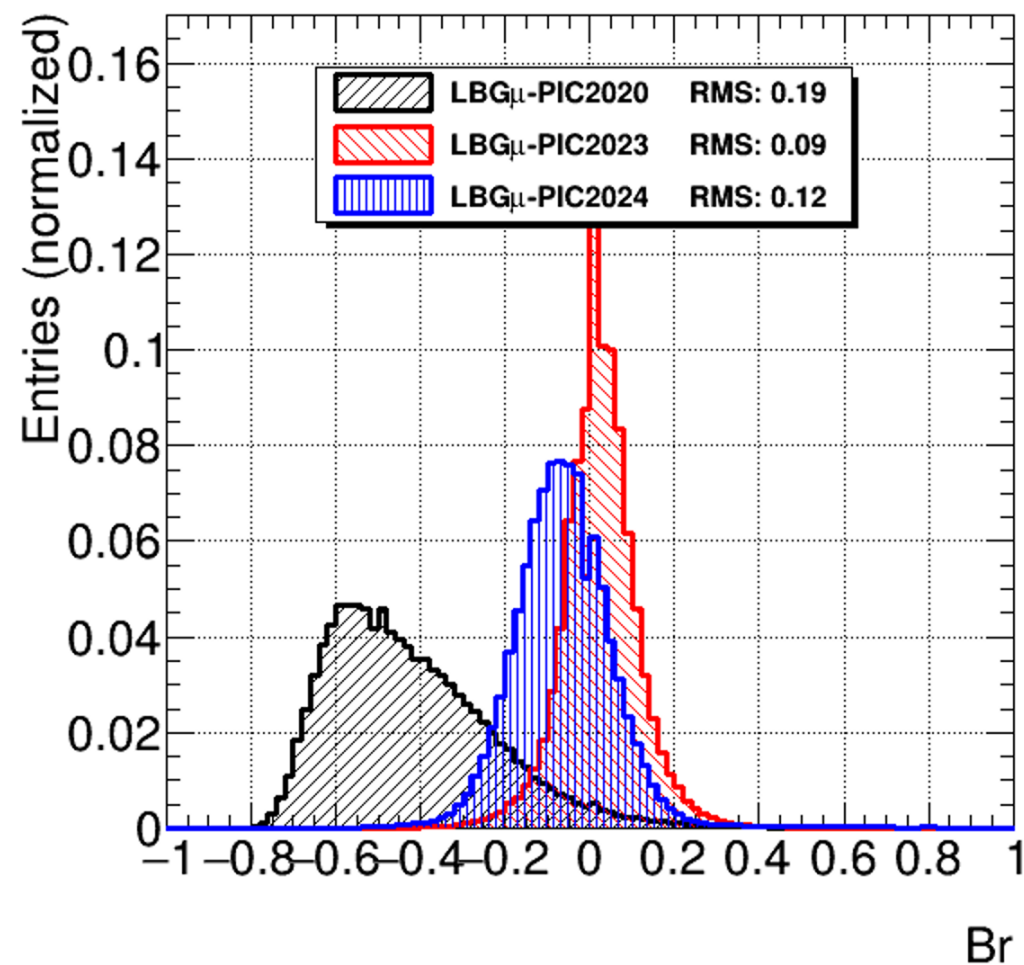
LBG μ -PICの製作 (2024)

- 電極の形成状態をさらに改善したLBG μ -PICを作成。
 - 電極が変形しにくい製造方法
- ラドンレートは要求値をクリア。

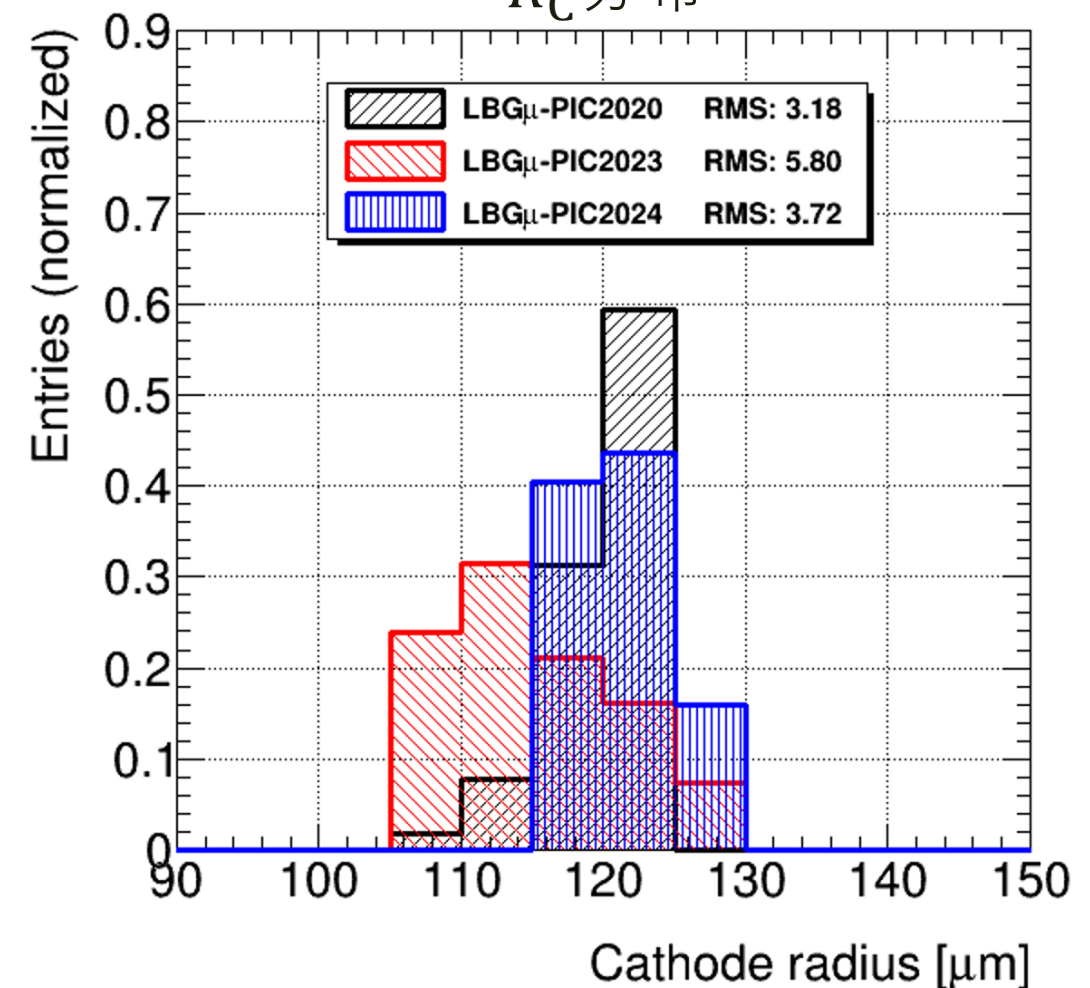
Sample	Radon rate [mBq/chamber]
LBG μ -PIC2023	< 0.04 (90% C. L)
LBGμ-PIC2024	< 0.05 (90% C. L)



Br分布



R_C 分布



- 更なる一様性の改善が期待される。
- 今後ゲイン測定を実施。

まとめ

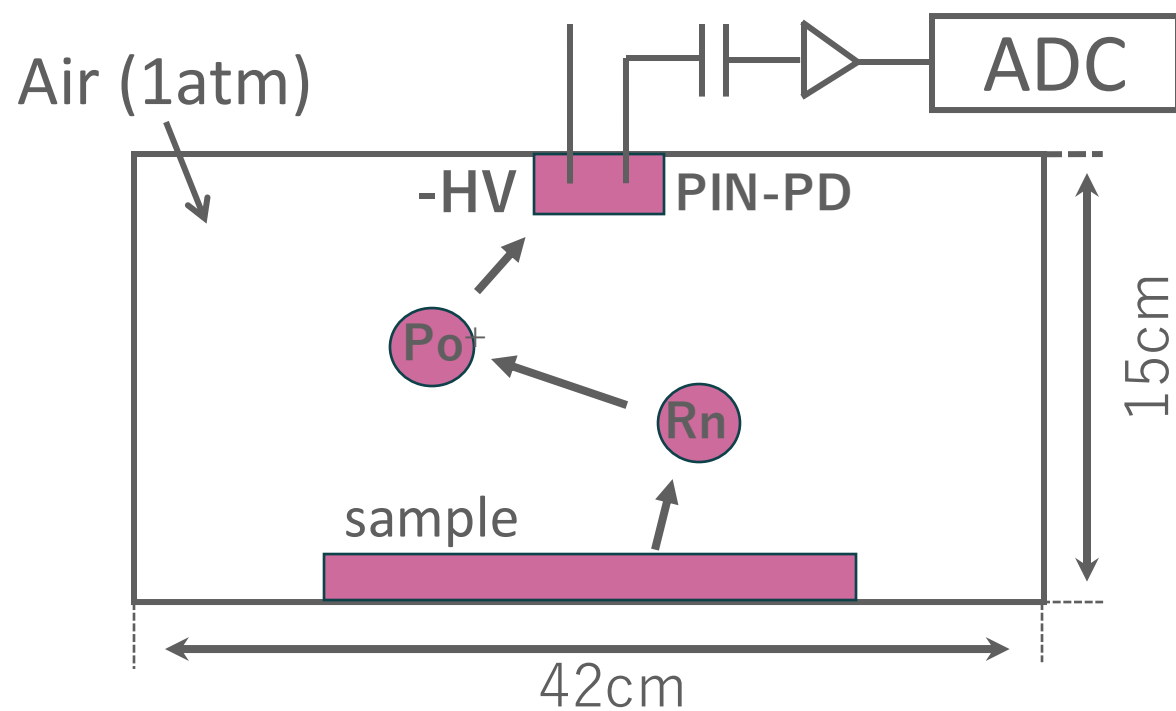
- 暗黒物質直接探索実験の感度向上を目的とした、低バックグラウンド化した μ -PIC検出器（LBG μ -PIC）を製作し、性能評価を行なった
- 2020年に製作したモデルではローカルなゲインの一様性が低く、実用には至らなかったが、2023年モデルでは改善に成功した
- カソード半径からゲインを補正することで、一様性が16%改善した
- 製造工程を見直したLBG μ -PIC検出器を製作した（2024）
 - 電極の形成状態における一様性に改善がみられた
 - ゲインの測定は今後行う



Back up

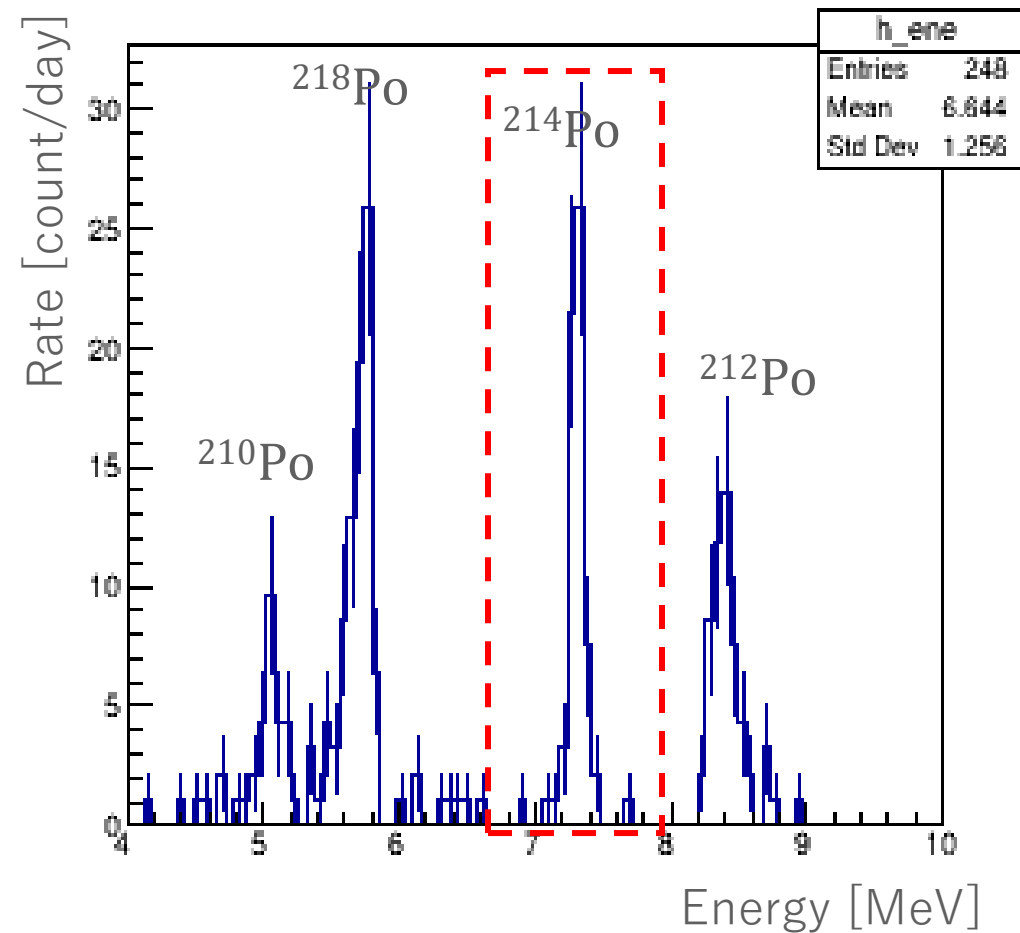
ラドン量測定

- 静電捕集法で湧き出しラドン娘核の ^{214}Po レートを測定、ラドンレートに変換



ラドンレート

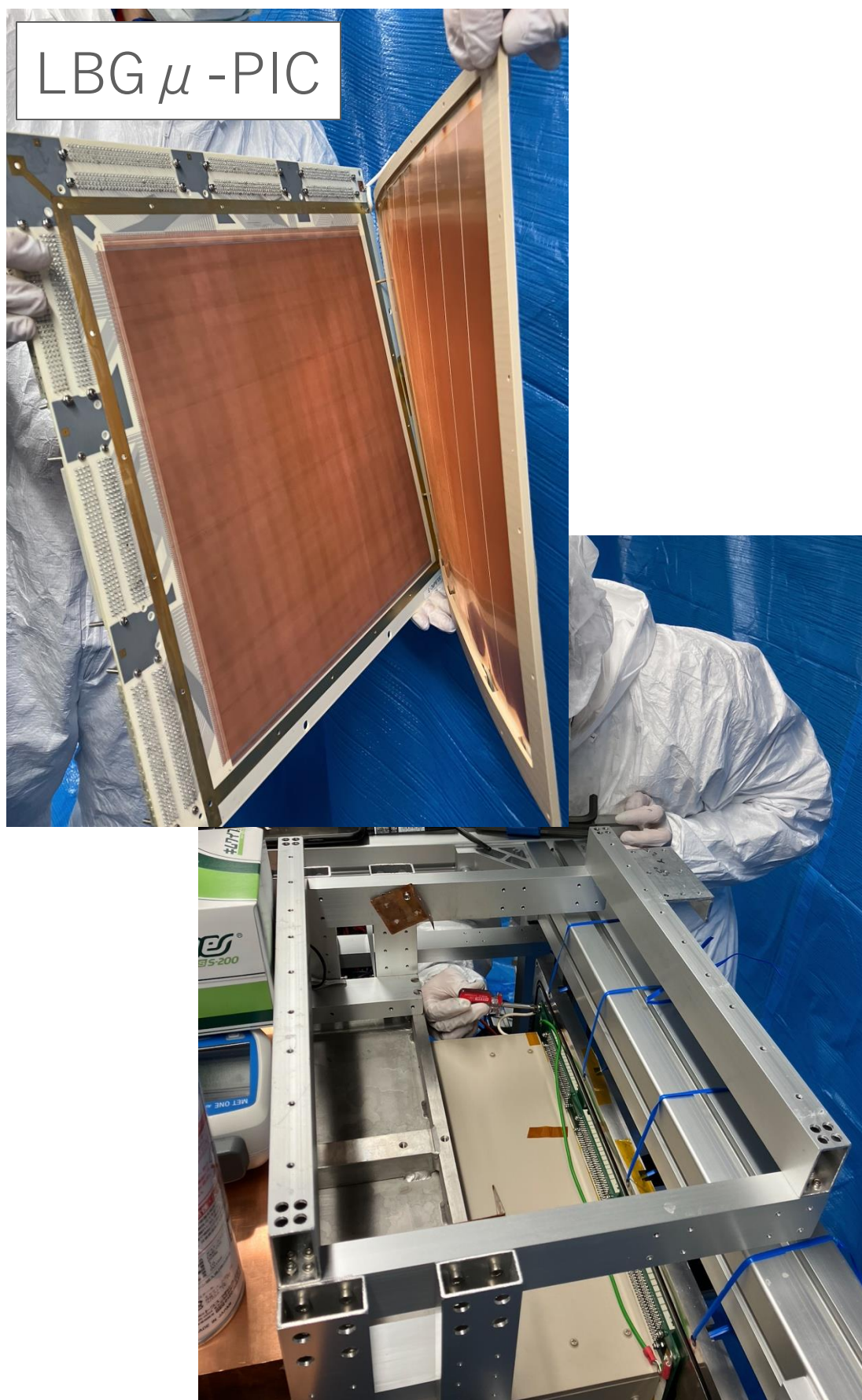
Sample	Radon rate [mBq/chamber]
LA μ -PIC	2.3 ± 0.5
LBG μ -PIC	< 0.03 (90% C.L)



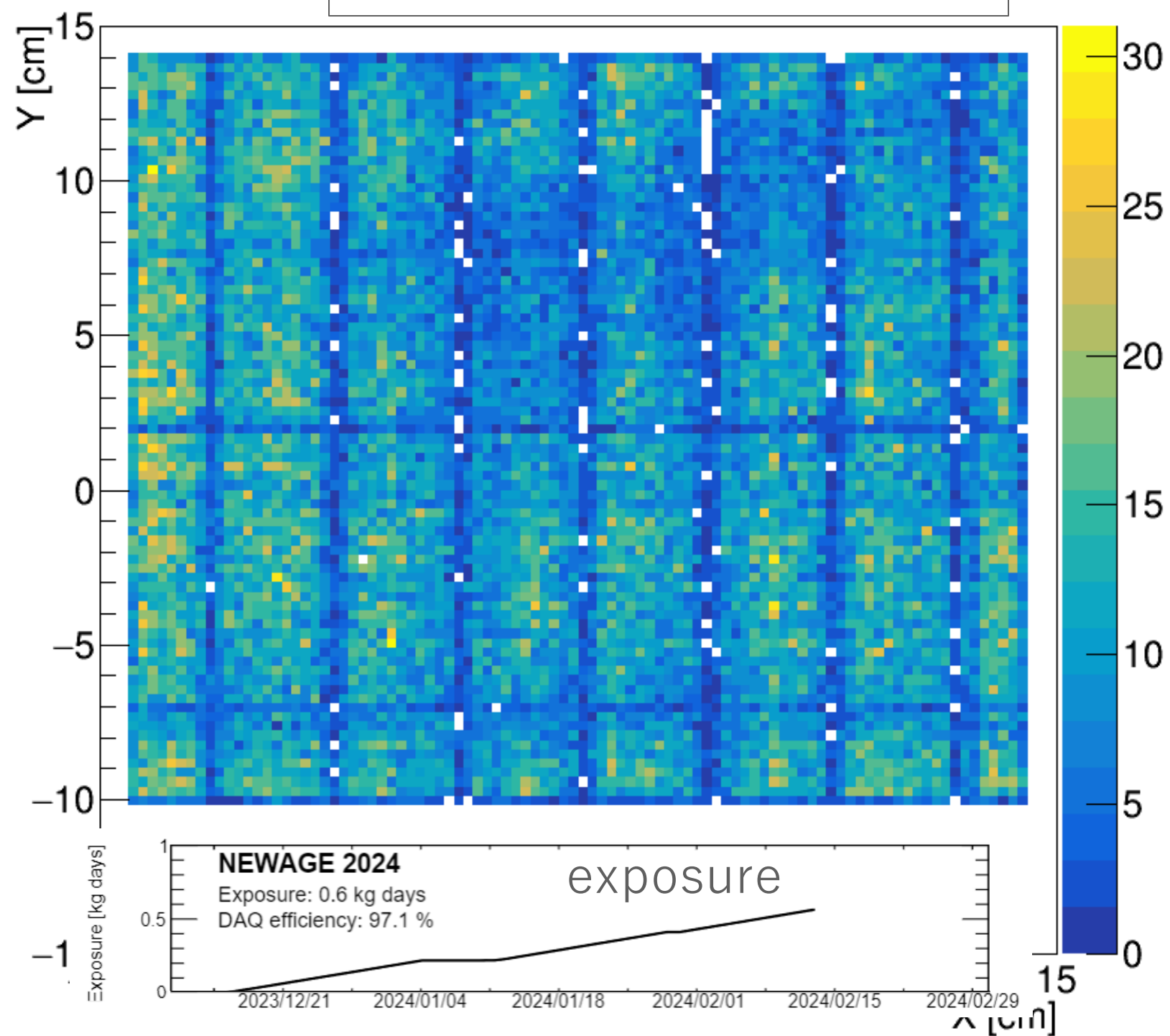
- 従来と比較して $< 1/60$ のラドン量に減少
→要請値をクリア

暗黒物質探索実験への実装

実装時の様子

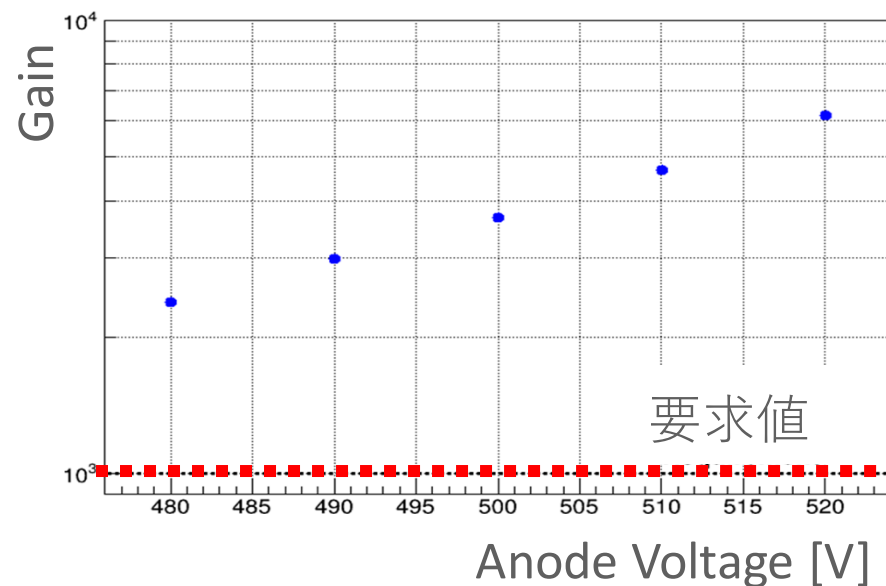
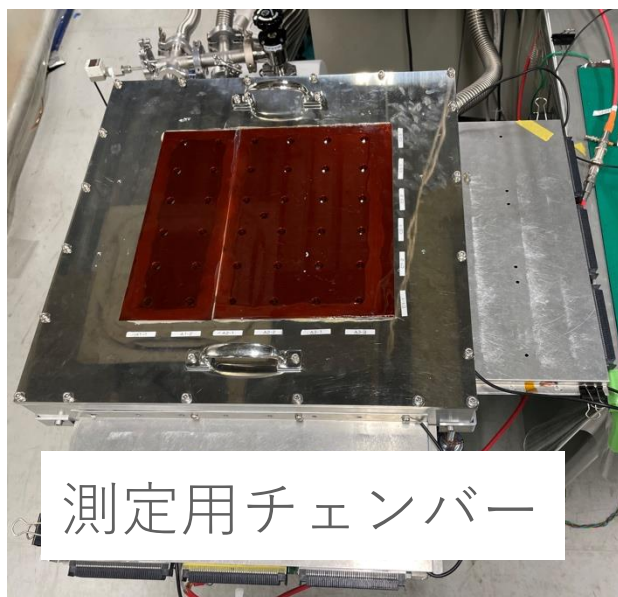


^{252}Cf による中性子照射測定



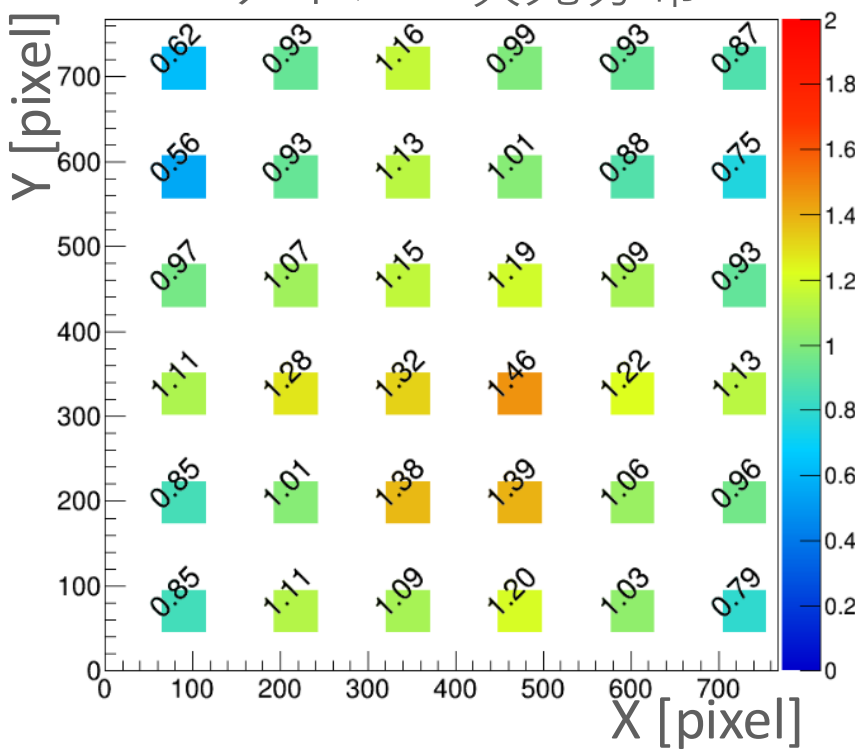
- 神岡地下での測定に実装
- 2023/12/15よりデータ取得開始

ゲイン測定

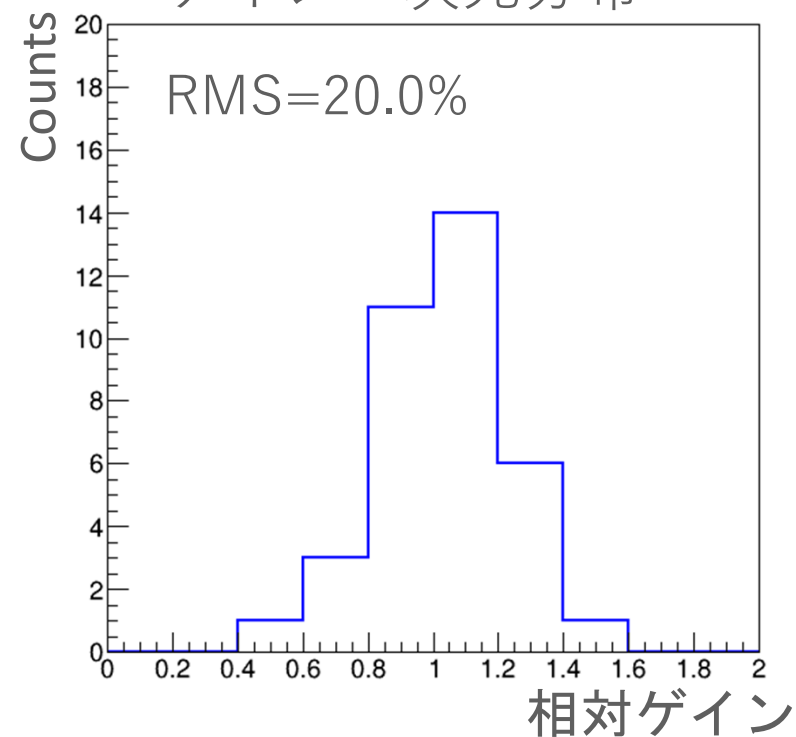


- 6 × 6箇所ゲインを測定
- 平均化したgain vs voltageを確認
- ≥ 480 Vで要求値を満たすことを確認。

ゲイン二次元分布



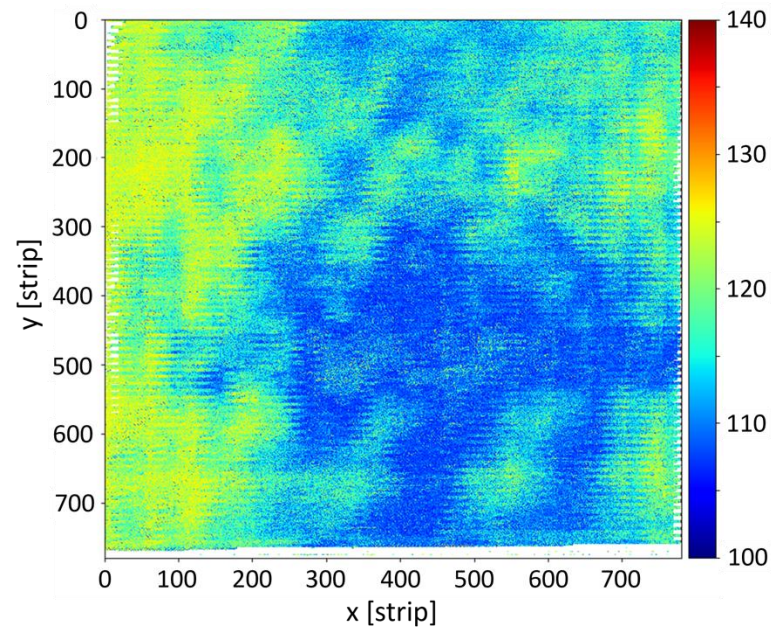
ゲイン一次元分布



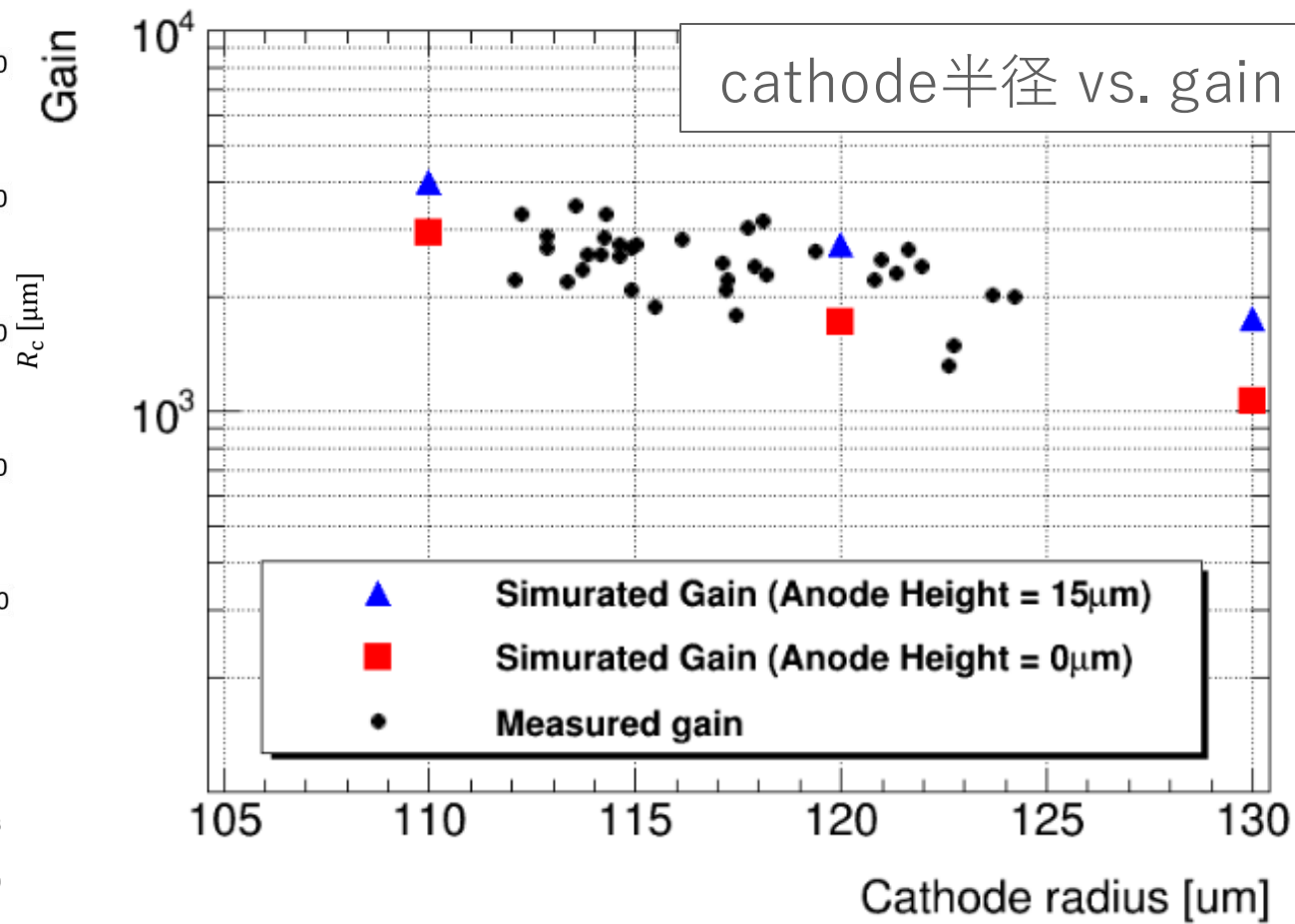
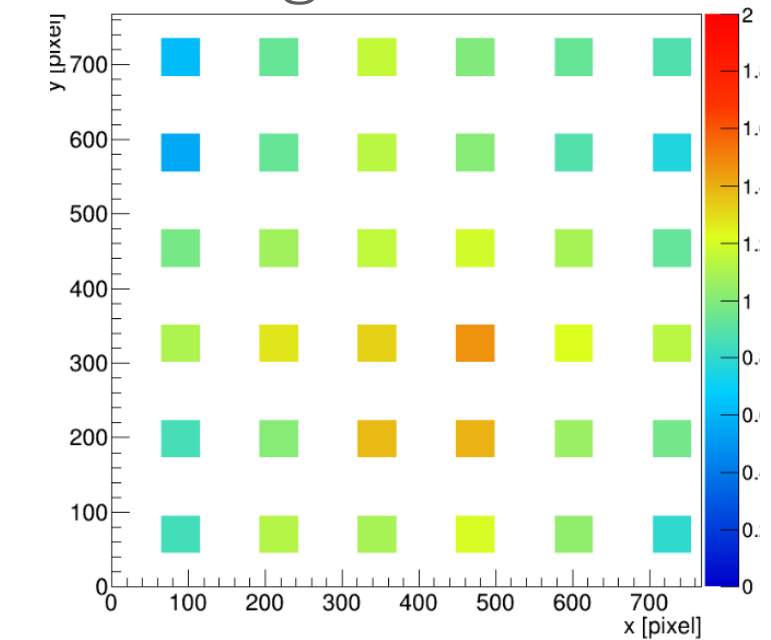
- 各測定位置でのゲインを確認
- 一様性がRMS 20%であることを確認

ゲインとcathode半径の関係

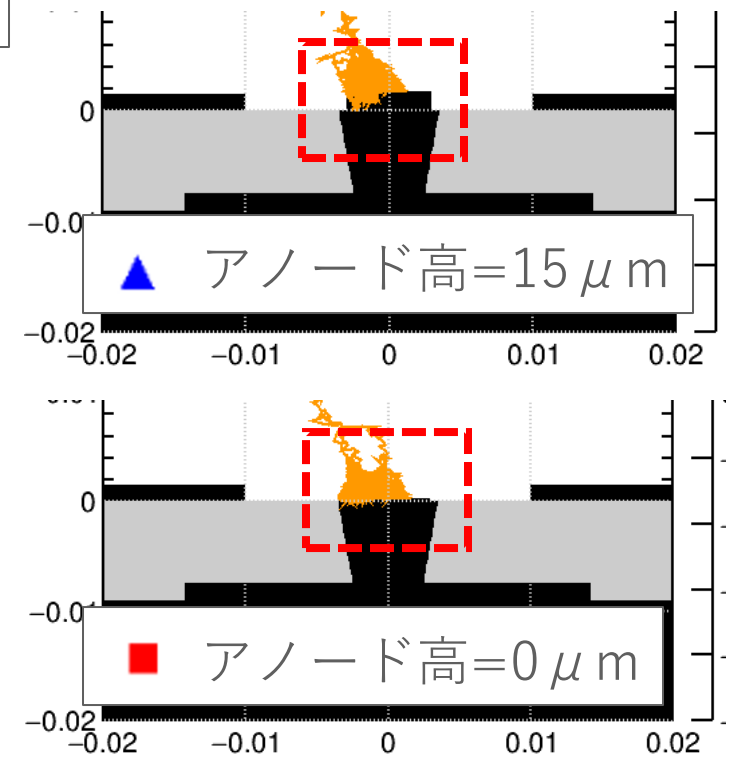
cathode半径分布



gain分布



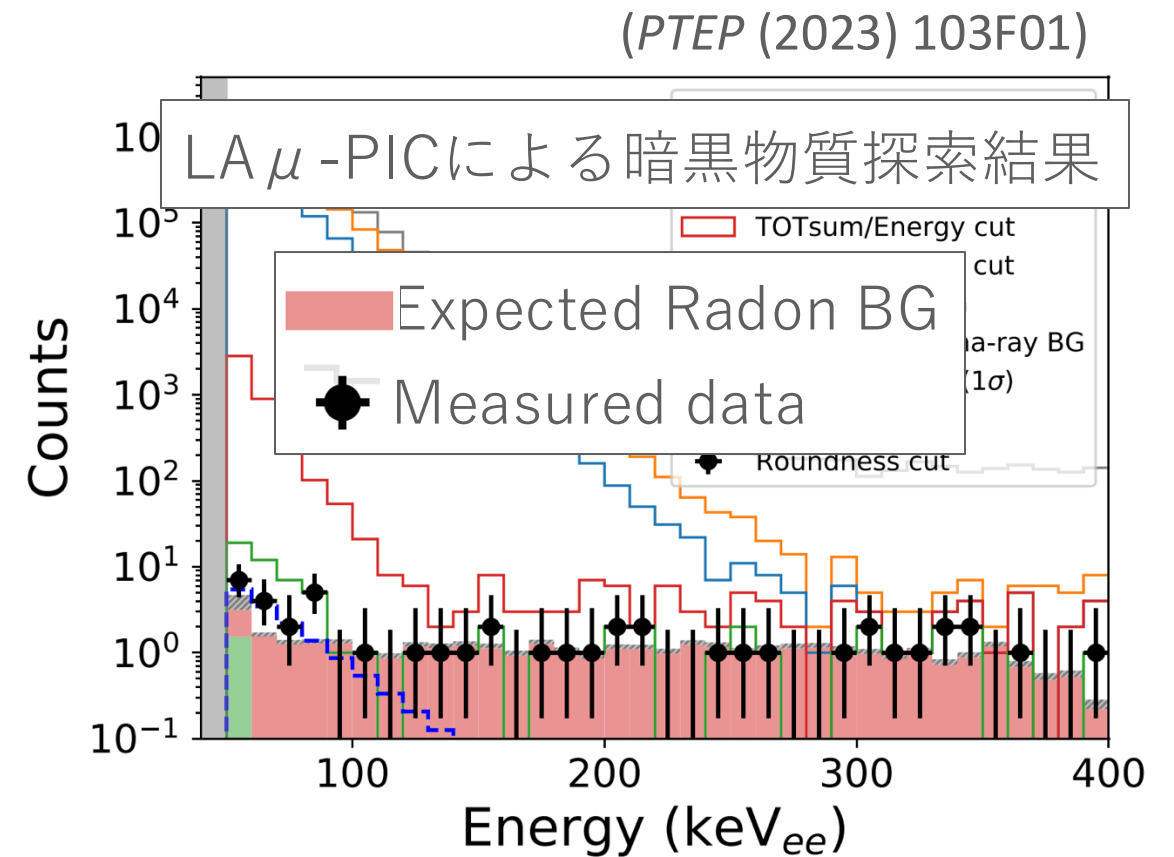
Garfield++によるsimulation



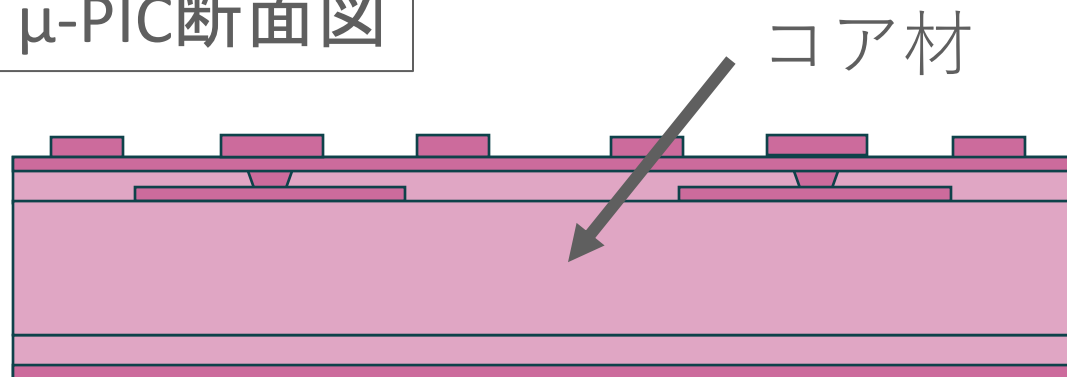
- ゲインとカソード径の関係がsimulationを再現
- カソード径からゲインを見積もれる
 - 全てのpixelでのゲイン推測が可能になる
 - チャンネルごとのゲイン補正ができる

μ-PICの低放射能化

- μ-PIC低RI化の歴史
 - 検出器表面からのα線を減らした**LA μ-PIC**を製作
→検出感度の向上 (PTEP (2023) 103F01)
 - 一方で**ラドンBGが顕在化**
- **Low Background μ-PIC(LBGμ-PIC)の製作**
 - ✓ コア材を低RIなものに変更



μ-PIC断面図

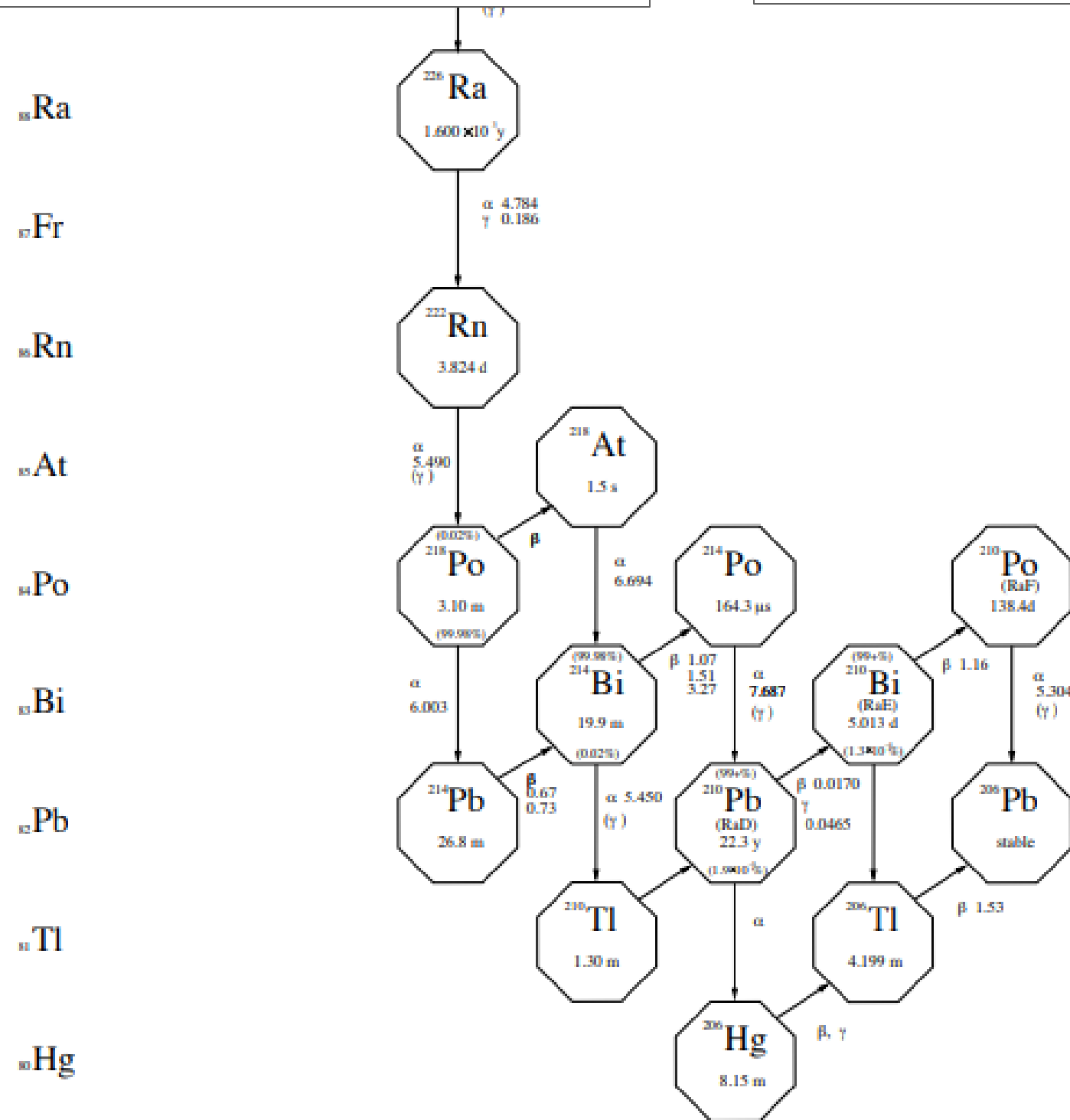


	コア材	^{238}U upper [ppm]	^{238}U middle [ppm]
旧	ポリイミド樹脂 (ガラスクロス入り)	$(7.8 \times 0.1) \times 10^{-1}$	$(7.6 \times 0.1) \times 10^{-1}$
新	Quartz (レジン入り)	$(5.6 \times 1.0) \times 10^{-3}$	$(5.1 \times 1.0) \times 10^{-3}$

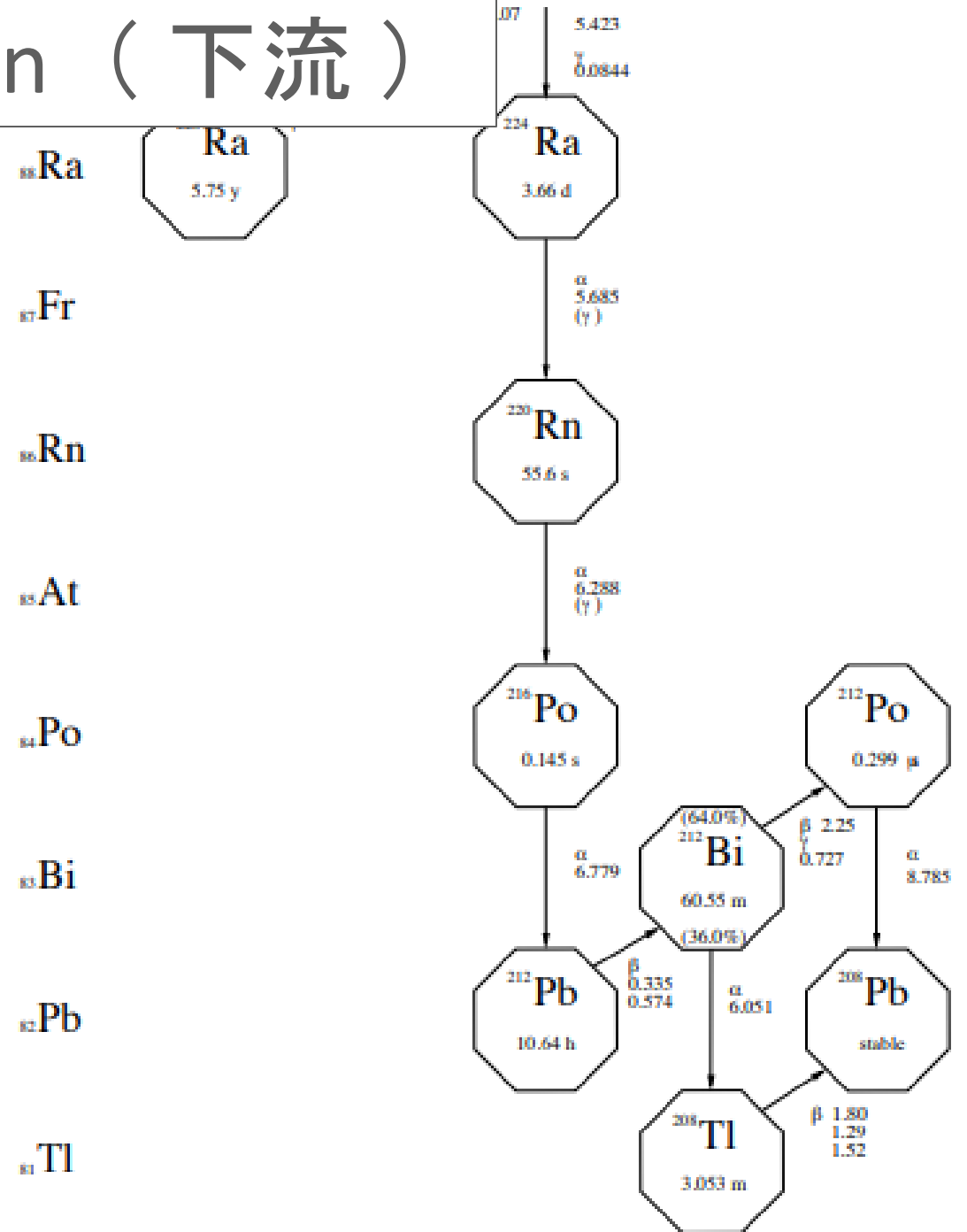
↓ $\sim 10^{-2}$

Radon Decay Chain

^{238}U chain (下流)



^{232}Th chain (下流)



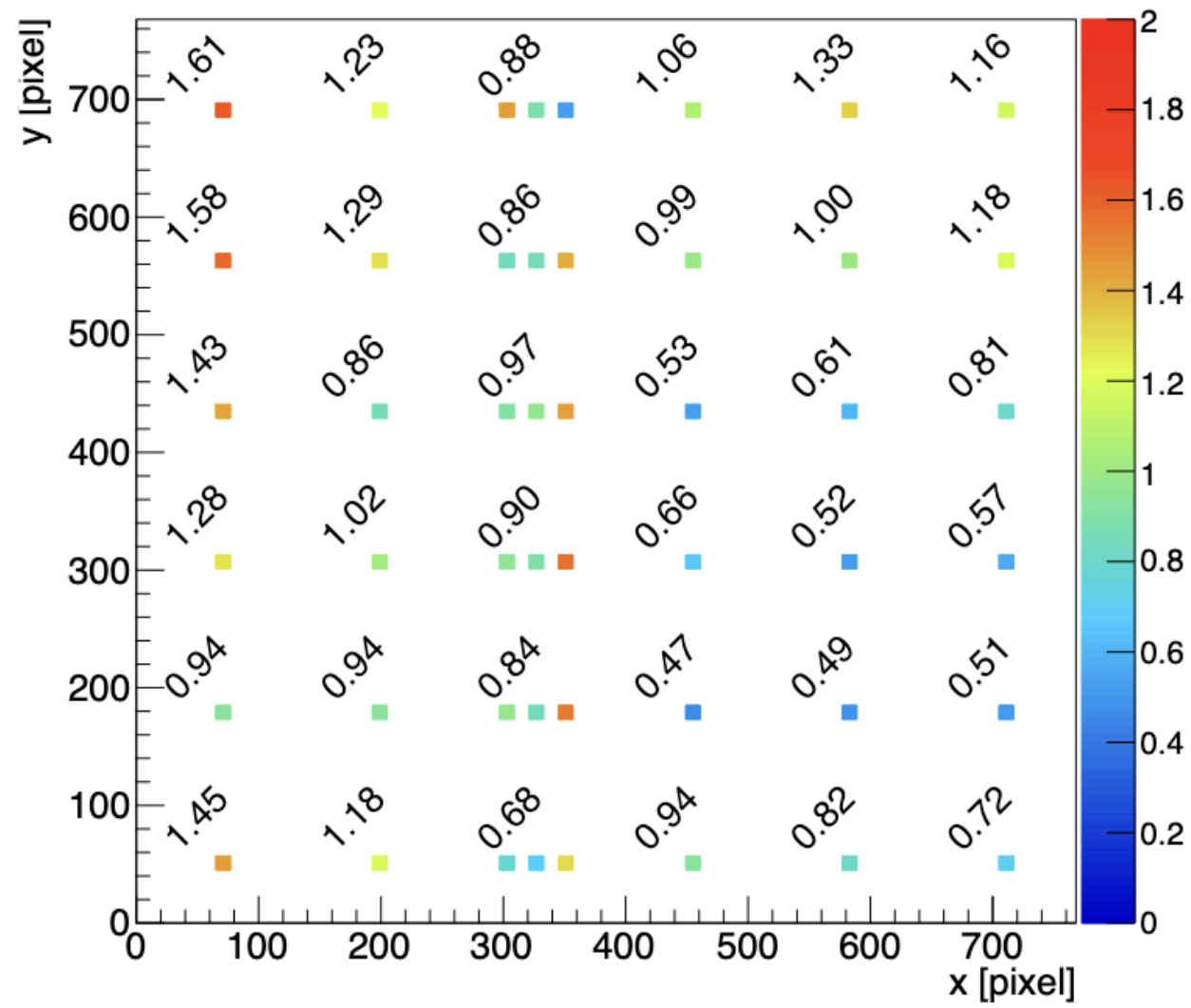
Quartz cloth

1) 石英クロス(商品名：SQXシリーズ)

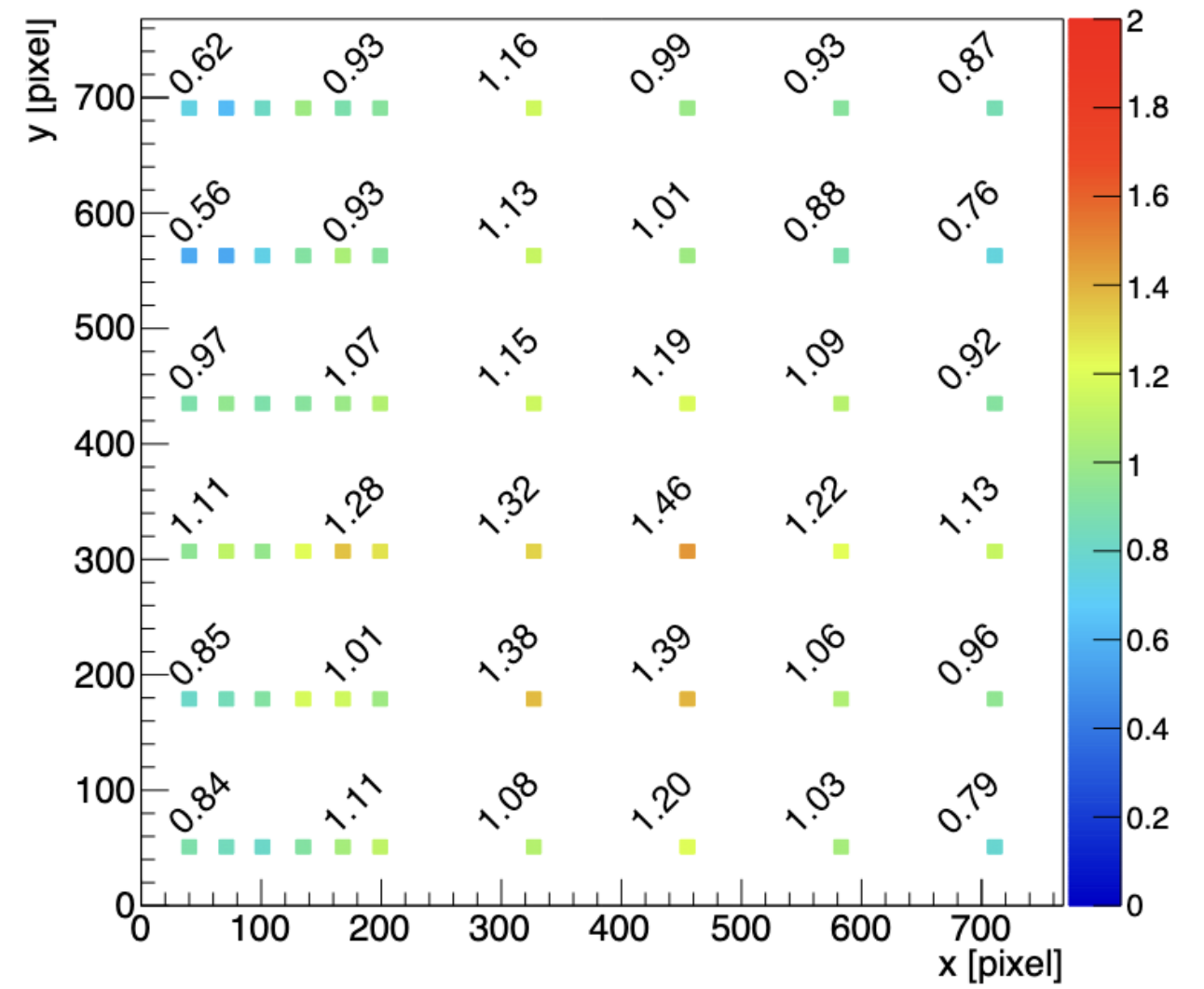
誘電率 3.7 以下、誘電正接 0.001 以下、線膨張係数 1ppm/°C 以下など、伝送損失(電気信号の劣化の度合い)に関わる特性が極めて優れている。5Gのキーワードである超高速通信を支える配線基板のコア材として最適であり、アンテナやレーダードームの繊維強化プラスチック部材としてもその特性を発揮する。

石英クロスは、非常に細い石英の糸を素材とし、厚さを 20 μ 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 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>



2020年モデル



2023年モデル