

方向に感度を持つ
暗黒物質探索実験NEWAGE
のための
低バックグラウンド μ -PIC開発

神戸大理

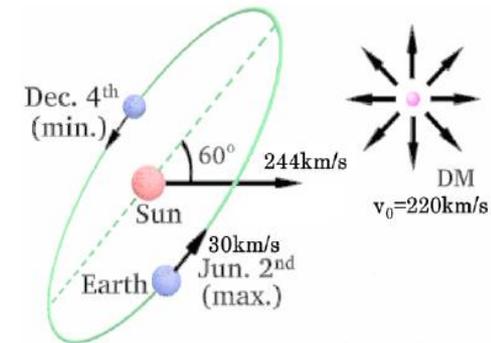
石浦宏尚

➤ 暗黒物質

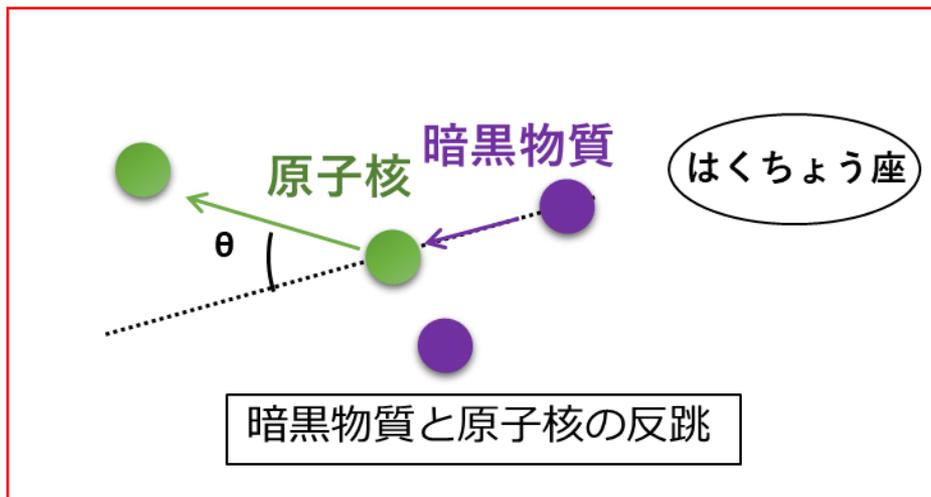
- 観測的証拠 → 存在すると考えられているが未発見
- 直接・間接・加速器による探索が行われている

➤ 方向感度を用いた暗黒物質探索手法

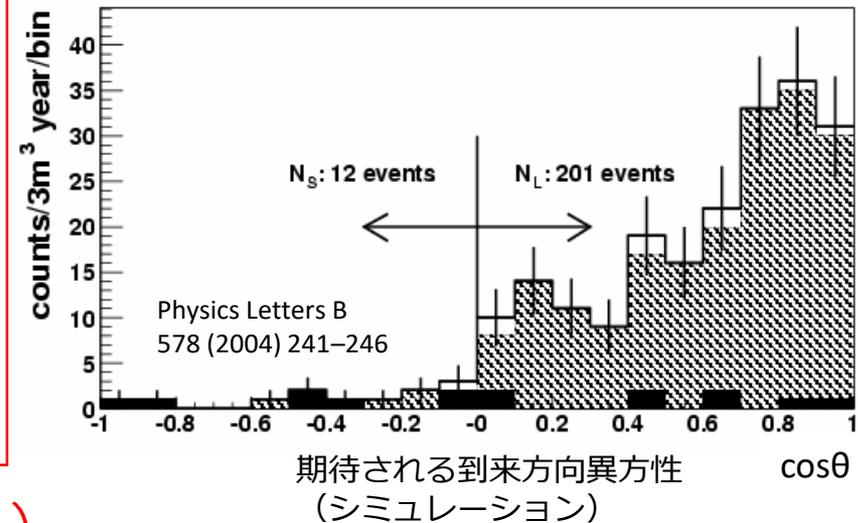
- 太陽系の運動による暗黒物質の「風」をとらえる
- 暗黒物質到来方向異方性が確実な証拠として期待



銀河中を運動する太陽系のモデル



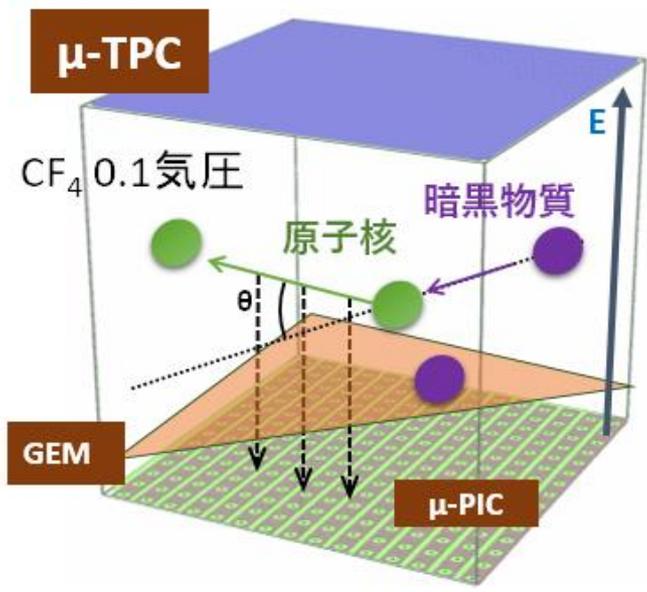
これを捉えて、到来方向を見たい



➤ **NEWAGE** (NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

- **方向に感度を持つ**暗黒物質直接探索実験
- 暗黒物質により原子核反跳されたフッ素原子核の飛跡をガスTPCでとらえる

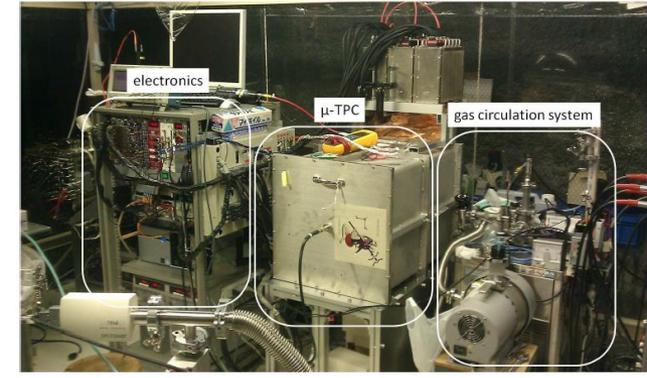
3次元ガス飛跡検出器μ-TPC



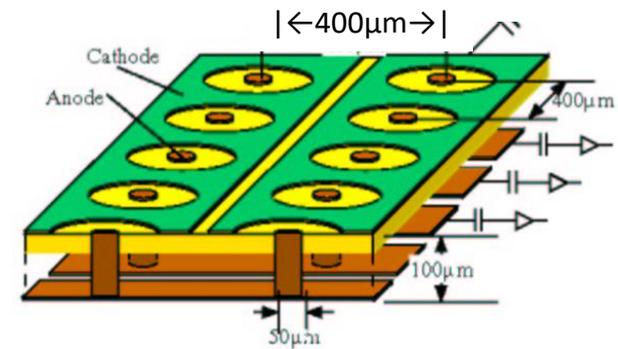
低圧ガス
→ 飛跡長

GEM：前段増幅器

μ-PIC：400μmピッチ 2次元イメージ ガス検出器
→ 今回はこのμ-PICの低BG化の話



0.3b''検出器
神岡地下施設Lab-Bで測定中



μ-PIC模式図

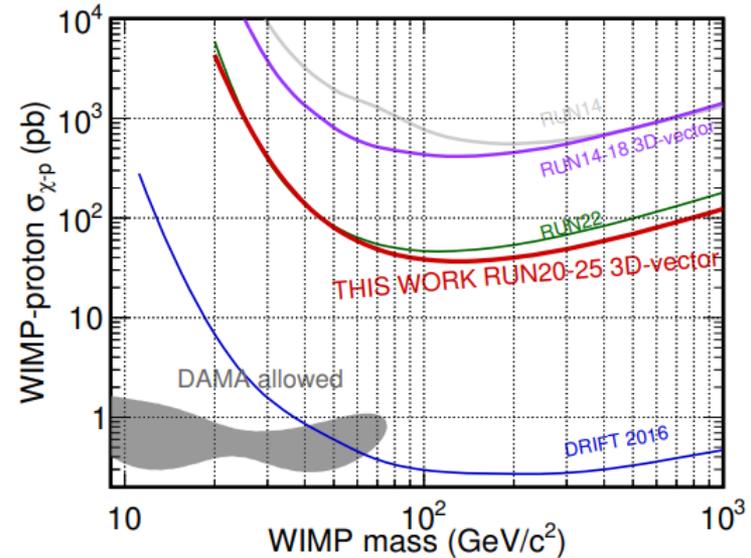
これまで

- 飛跡前後判定解析(RUN14-18) PTEP 2020 113F01
- 検出器の低アルファ線化(RUN22) PTEP 2021 063F01
- 解析改善・高統計(RUN20-25)
 - 2017年12月 - 2020年3月 318日分データ

→ 方向に感度を持つ実験として世界最高感度

NEWAGE現在の感度

島田拓弥 修士論文 神戸大学 2021年2月



残存バックグラウンドとして

- 外部由来
 - 環境 γ 線
 - 環境中性子
- 内部由来
 - ^{222}Rn , ^{220}Rn
 - μ -PIC表面 BG



外部:

- シールドによる低減 (中山 講演)

内部

- 低BG検出器開発(本講演)

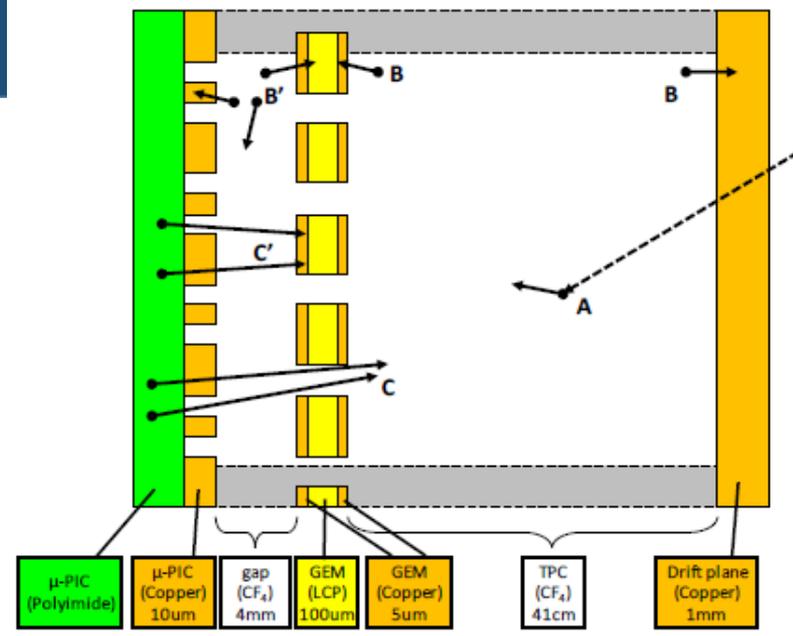
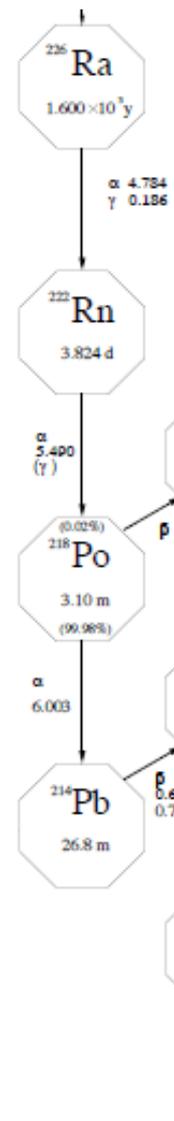
NEWAGE BG

外部由来

- A: 環境ガンマ線
中性子など

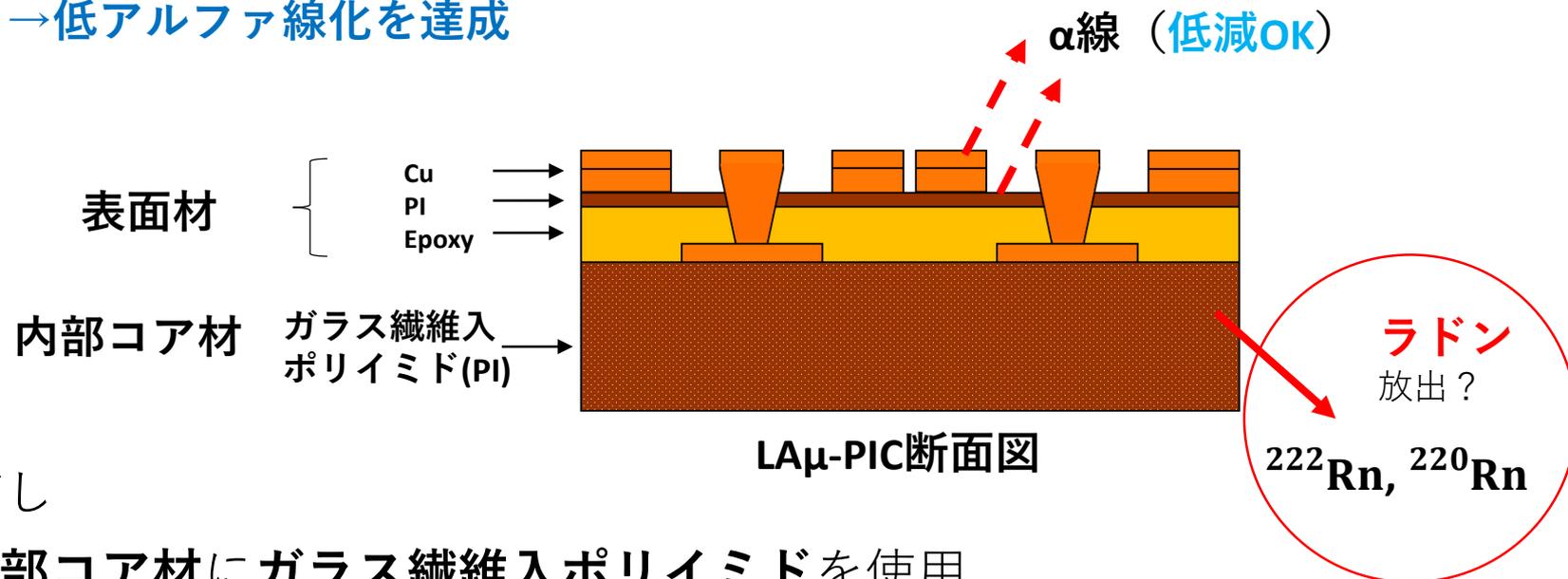
内部由来

- B: ガス中ラドン由来BG
- C: 検出器表面 α BG



現行検出器: **Low- α μ -PIC(LA μ -PIC)** 検出器: NIM A 977 (2020) 164285, 物理:PTEP 2021 063F01

- 従来 表面材に使われていたガラス繊維を含む材料を含まないものにした検出器
→低アルファ線化を達成



ただし

- 内部コア材にガラス繊維入ポリイミドを使用
 - U/Th 系列 $^{222}\text{Rn}, ^{220}\text{Rn}$ 放出→恒常的なガス中BGになりえる
 - ^{222}Rn 子孫核種 ^{218}Po 以降が検出器表面埋め込み→検出器表面から出る α 線に

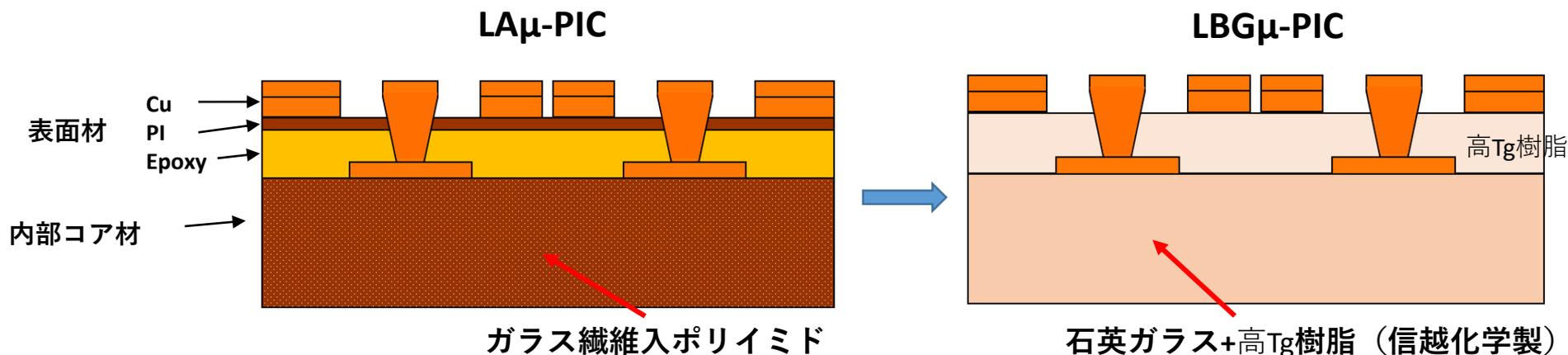
→Next : 内部コア材低BG化へ
表面 α 線だけでなくラドン放出量も減らす

Low Background μ -PIC (LBG μ -PIC)開発

新規にLBG μ -PIC を開発、製作(DNP製)

内部コア材も放射性不純物の少ないものに

- ガラス繊維入ポリイミド→石英ガラス+樹脂(信越化学製)へ
- ラドンBGを低減、保管時の ^{218}Po 以降埋め込み由来表面 α も低減



HPGe 測定結果	^{238}U middle(ppm)	^{232}Th (ppm)
LA μ -PIC 内部コア材(従来) ガラス繊維入ポリイミド	$(7.8 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	3.42 ± 0.03
LBG μ -PIC 内部コア材(今回) 石英ガラス+高Tg樹脂	$(5.1 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
LAμPIC/LBGμPIC 削減比 (今回) / (従来)	1/150	1/300

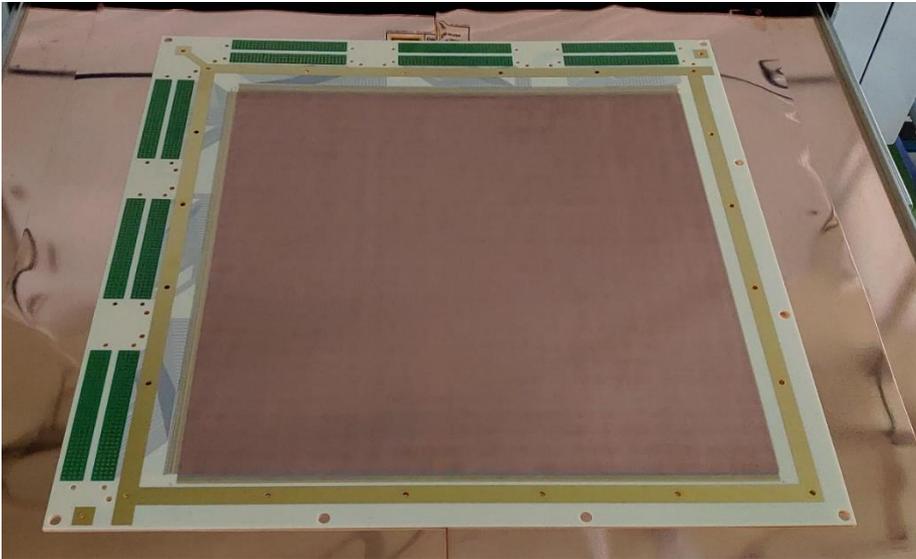
→材料ベースで**1/100**以下を達成 **BG低減が期待**

- 検出器と読み出し部を一体化して製作
 - ワイヤーボンディング、接着等不要に
- ソルダレジスト(SR)→コネクタ周りのみに使用 使用量 1/15に
 - ^{222}Rn , ^{220}Rn 放出源に→将来的には不使用を視野に

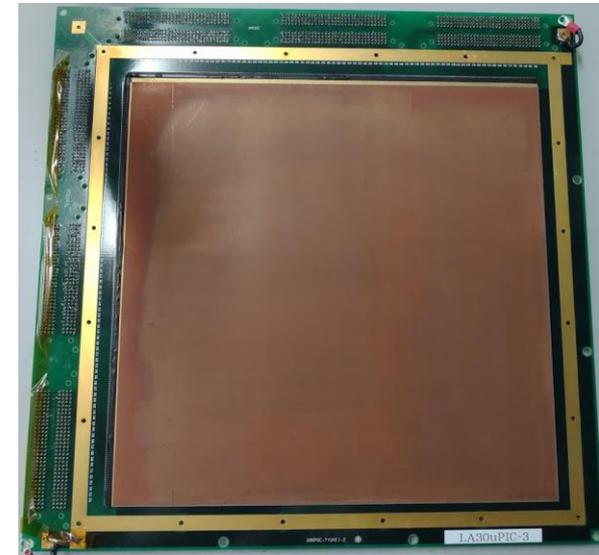
(参考)

HPGe 測定結果	238U middle (ppm)	238U upper(ppm)	232Th(ppm)
ソルダレジスト(SR)	$(3.9 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	$< 2.3 \times 10^{-3}$	$(4.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$

- 30cm角 LBG μ -PIC 製作(開発期間:2018~2020年) (DNP製)

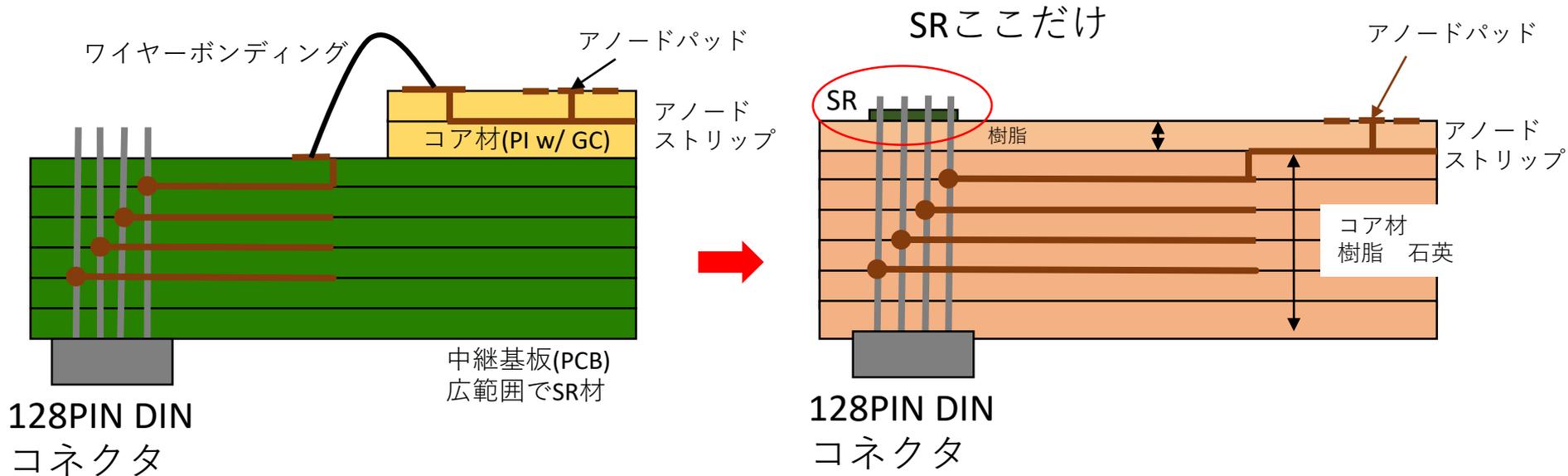


今回製作したLBG μ -PIC



(参考) LA μ -PIC

▶ 断面図



LAμ-PIC 基板断面図 (従来)

LBGμ-PIC 基板断面図 (今回製作)

- 一体化することでワイヤーボンディングなどを不必要に
- SR材 (ソルダーレジスト) についても使用量減
 - 将来的に不使用を検討

➤ アルファ線カウンターUltraLoを用いた表面 α 測定

- 素材と製作品で同程度→製造時混入なし

JPS2021 年次大会などで報告

➤ 検出器としての動作確認

- ガス検出器としての動作OK

今回話す

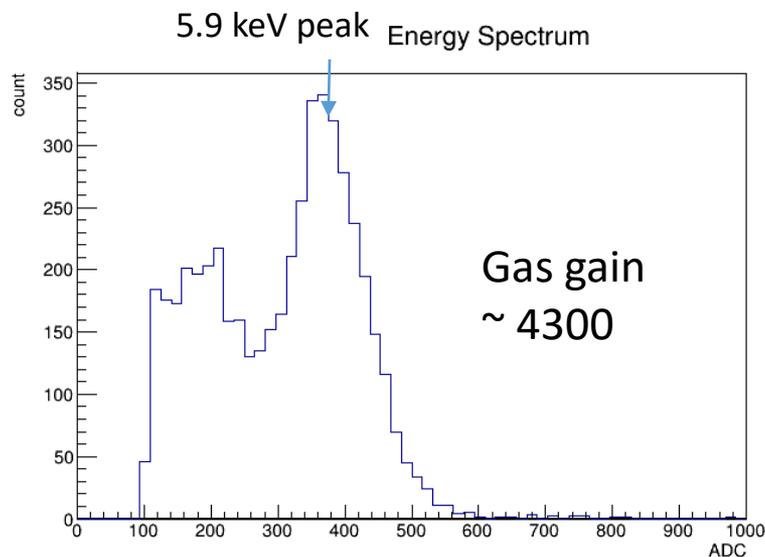
➤ 検出器からのラドン放出量測定

今回話す

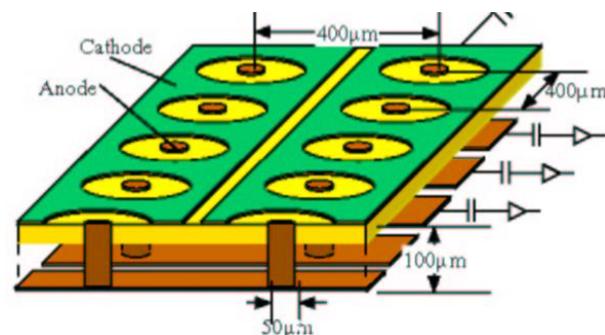
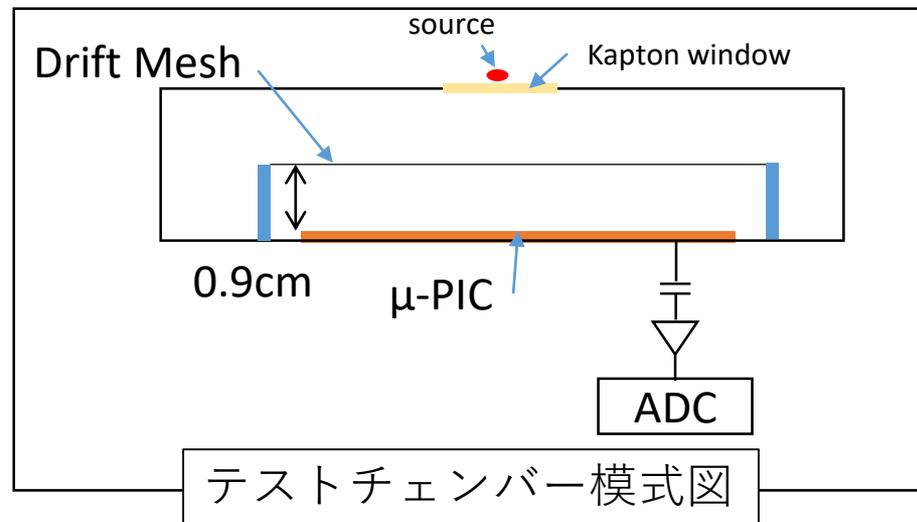
新規製作したLBG μ -PICの動作試験 & 性能評価を行った

➤ テストチェンバーセットアップ

- Ar+C₂H₆ (9:1) 1atm
- ドリフト電場 0.5 kV/cm
- 線源 ⁵⁵Fe 5.9 keV X線
- アノード 520V 印加



**5.9 keV X線由来の信号確認
& エネルギースペクトル取得OK**

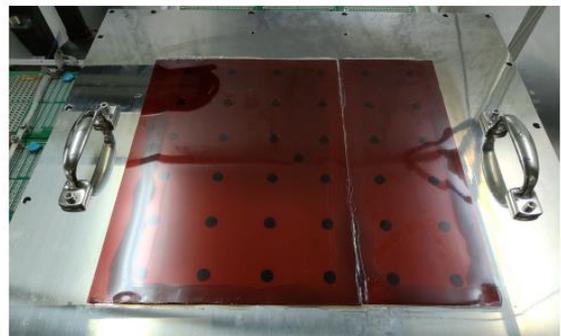
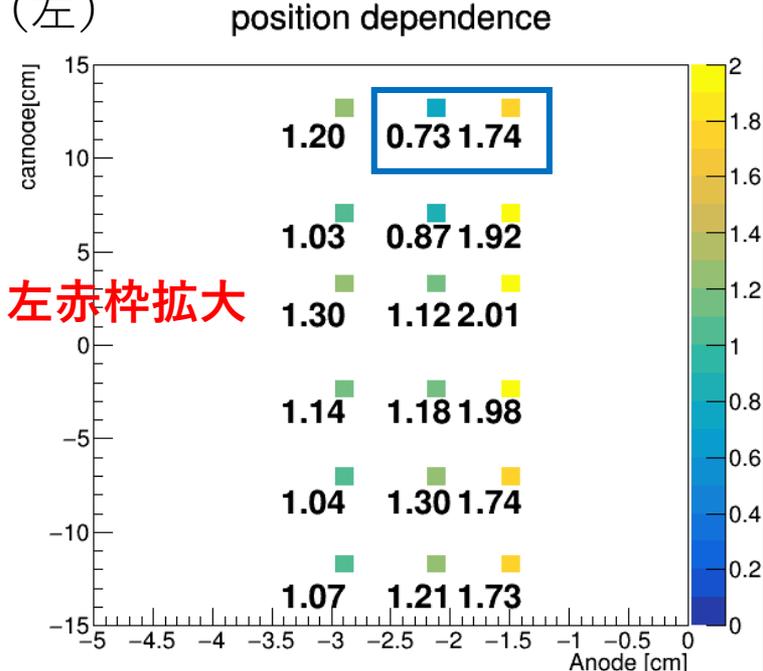
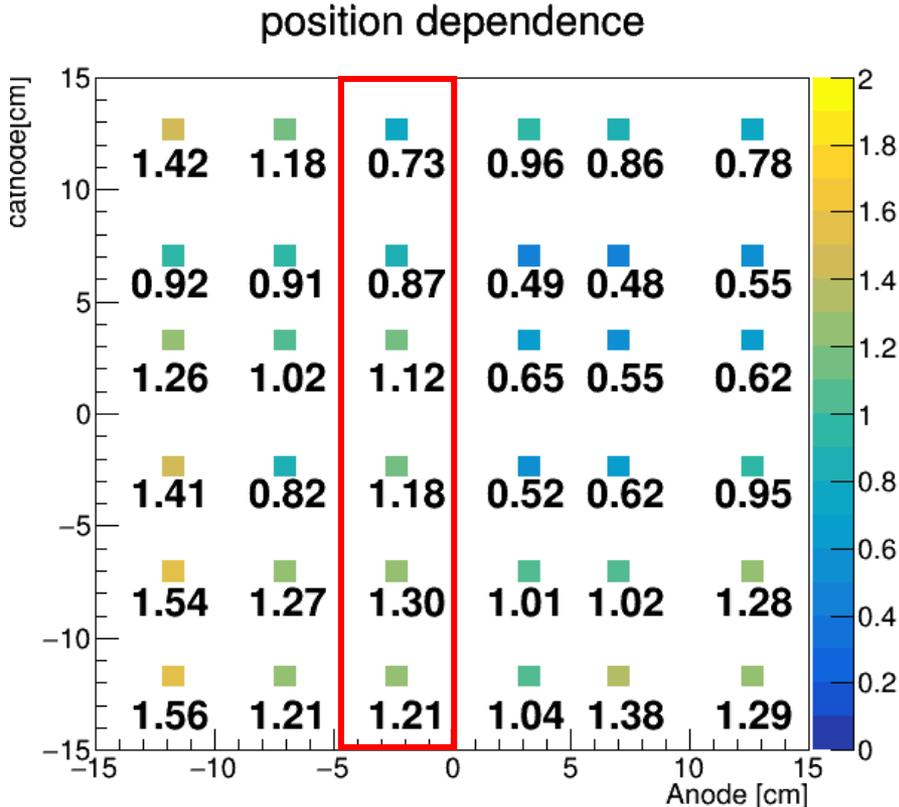


6strip を SUMして測定
カソードをトリガにして
アノードでガスゲイン測定

ガスゲイン位置依存性測定

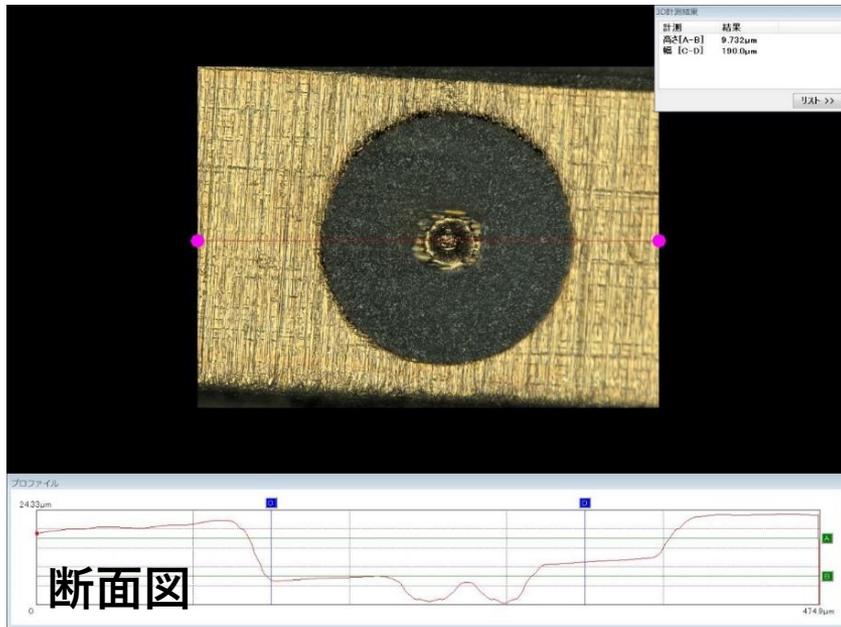
- 位置依存を測定 (1-➔平均)
 - 全体的なサンプリング➔位置依存が見られた (左)
 - ところが狭い範囲でも位置依存性 (右上)

➔顕微鏡観察による調査へ (右上、青枠)

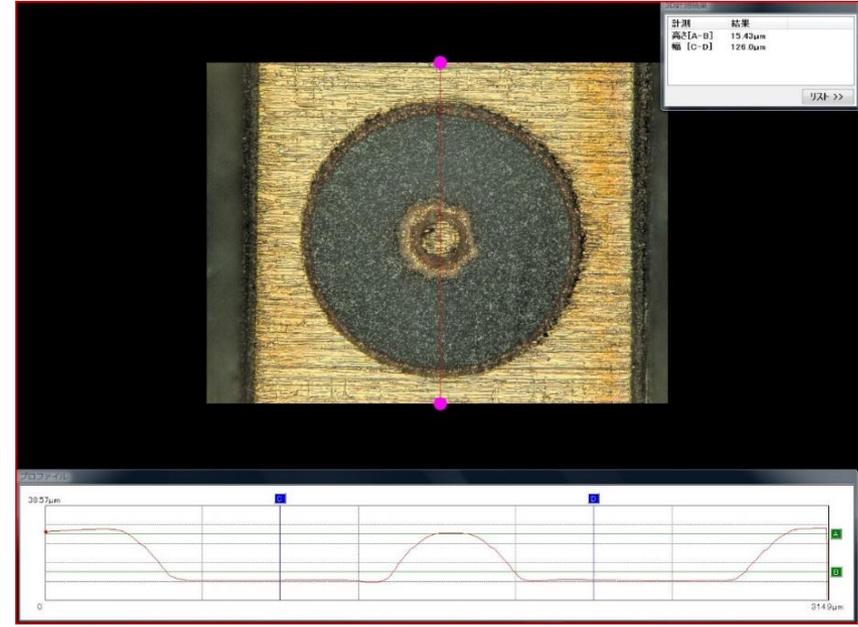


36+1箇所の穴
位置依存測定用セットアップ

▶ ゲインの低い/高い箇所を顕微鏡で観察→アノード形状の違いが見られた



前ページ右上図
0.73に対応する箇所



前ページ右上図
1.74に対応する箇所

- ▶ これによりガスゲインが小さい&局所的なばらつきが生じたと考えられる
 - ▶ DNPとやりとり中。アノードのエッチング時の不良? →現在調査中
- ▶ ゲインが高い所=LAuPICと同程度 と

ラドン放出量測定

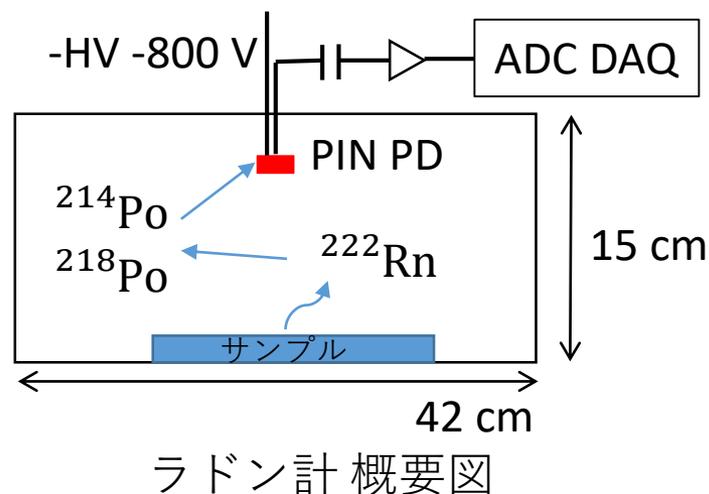
神戸大で新たにラドン計を立ち上げ、 μ -PICのラドン放出量測定を行った New

➤ ラドン計

- ステンレス容器（内部電解研磨済、元々TPCとして使用）
- Po^+ イオンをPIN Photo Diode (浜松ホトニクス S3590-09)へ静電捕集
→ 出てきた α 線(^{214}Po 7.687 MeV)を計数、サンプルからの ^{222}Rn 放出量へ換算
- 既存のラドン計やサンプル容器では30 cm角 μ -PICが入らない……→新たに構築



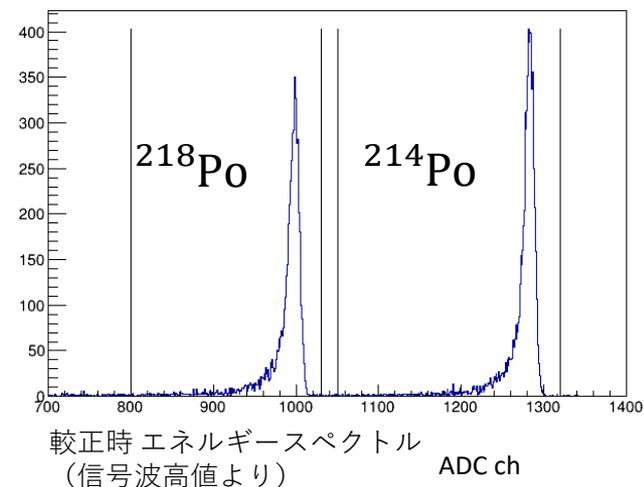
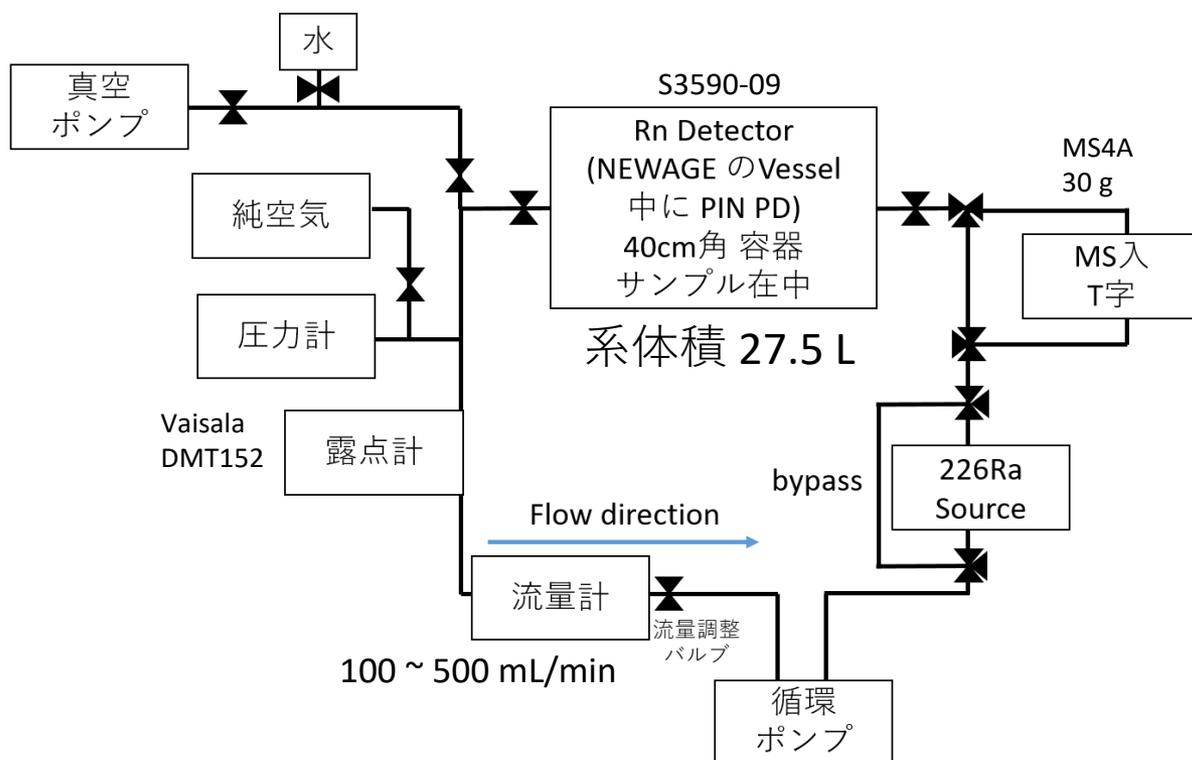
ラドン計
(検出器テスト用チェンバーを転用)



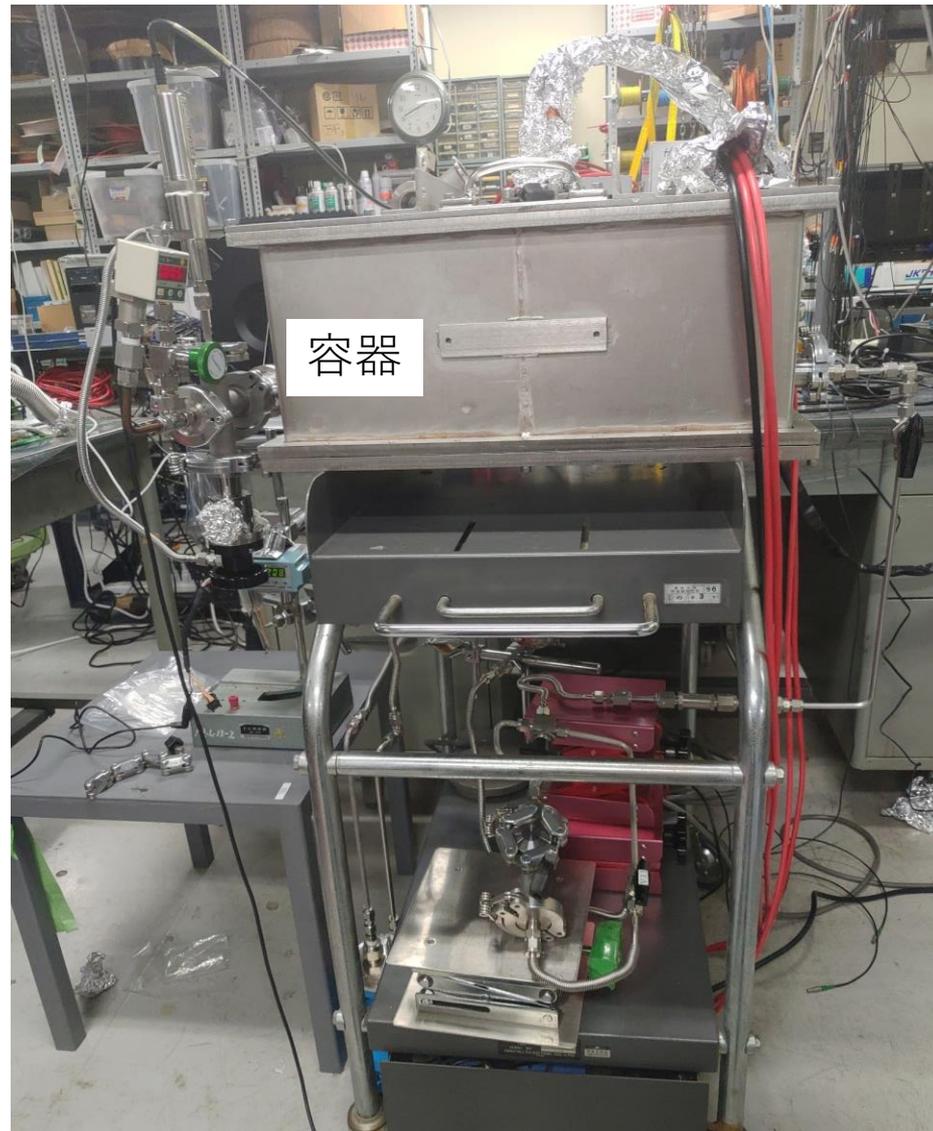
^{214}Po 計数率 [count/day] からラドン濃度 [mBq/m^3] に換算する較正計数を求めた

➤ 較正手順

- 既知線源強度のラドン源 (PYLON RNC ^{226}Ra , 78.3 Bq) を接続、測定系 (左下図) を放射平衡にし、 ^{214}Po 計数率 [count/day] を測定
- Calibration Factor (CF) [(count/day)/(mBq/m^3)] 算出



▶ 神戸大実験室で行った



➤ 校正係数 Calibration Factor (CF)

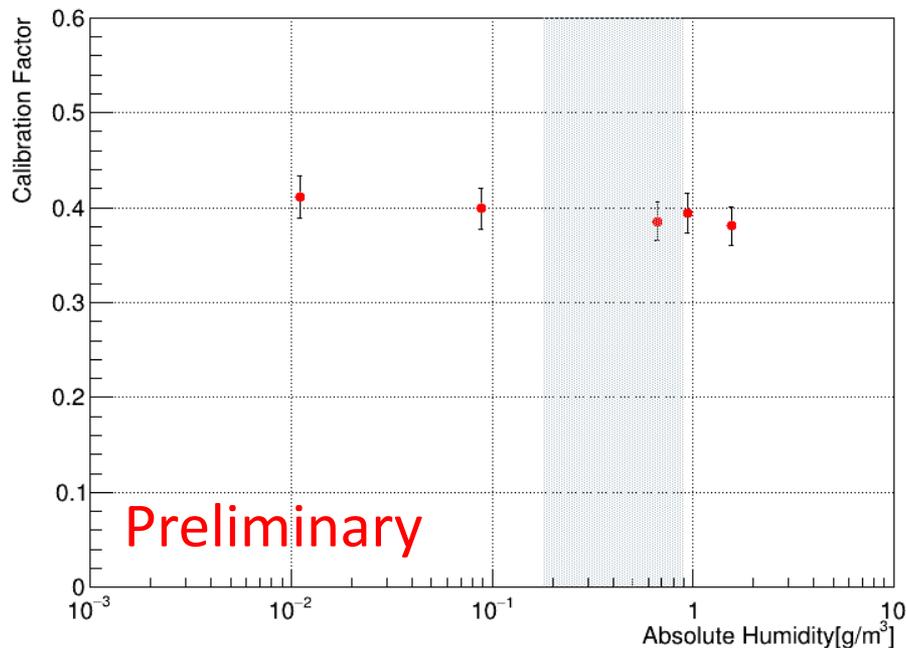
➤ 系内の絶対湿度を変えて校正を行い、CFと絶対湿度の相関を調べた。

➤ CF :

➤ 0.39 ± 0.02 [(count/day)/ (mBq/m³)] at 0.67 [g/m³]

➤ 0.41 ± 0.02 [(count/day)/ (mBq/m³)] at 0.01 [g/m³]

Absolute Humidity vs Calibration Factor

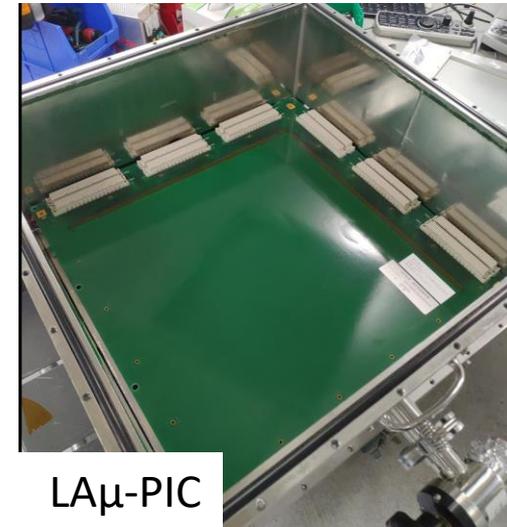
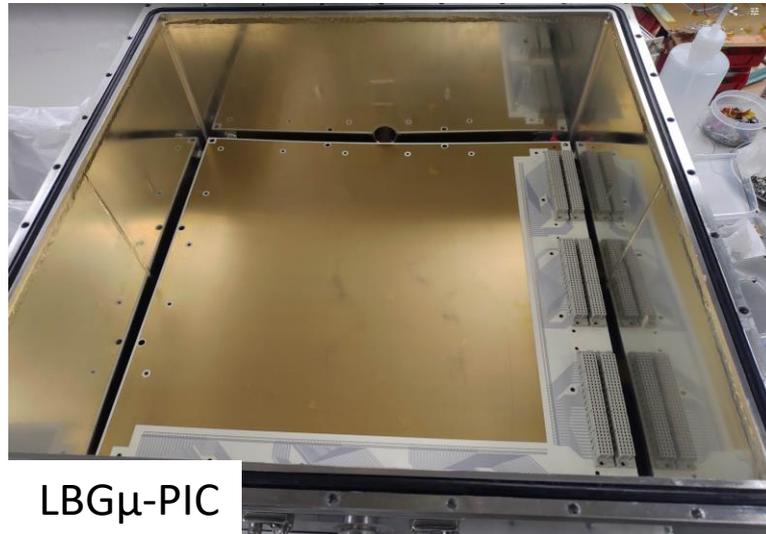


系統誤差項目	誤差
ラドンソース強度	±5%
露点温度精度	±2%
系体積	±2%
合計	±6%

- 今回校正した範囲では校正計数の顕著な低下は見られず
- 網掛け範囲の水分量で測定を行い、ラドン放出量を求めた

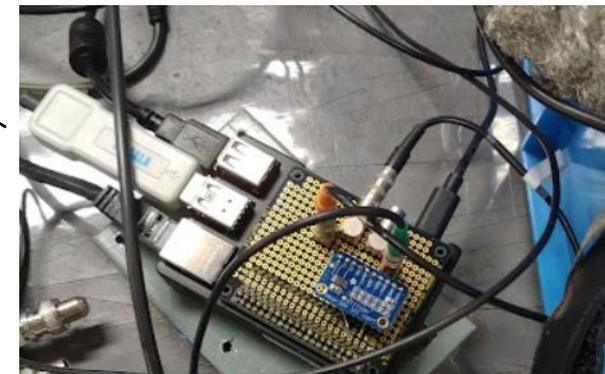
2. ラドン放出量測定

- ラドン計へサンプルを入れ、 ^{214}Po 計数率[count/day]を測定
- ^{214}Po 計数率[count/day]と校正係数 CF →ラドン放出量 [mBq/m^3]へ



- 測定中、各種センサー（圧力計、露点計など）の値
→Raspberry PI で読み込み (ADC, Serial)→DB(InfluxDB)へ
→ブラウザ(Grafana)でモニタ システム構築

→いい感じにまとめた発展形 => **rubis** (水越 Talk)



4ch 16bit ADCを載っている

2. ラドン放出量測定 - 測定結果(preliminary)

▶ サンプルの測定結果からBGを差し引きラドン放出量を求めた

Preliminary

測定サンプル	測定期間	214Po count rate [count/day] (stat.)
LA μ -PIC	5 days	40.8 \pm 4.9
LBG μ -PIC	17 days	7.62 \pm 0.94
BG測定(サンプル無し)	26 days	6.74 \pm 0.56

Preliminary

BG差し引き後	214Po count rate [count/day]
LA μ -PIC	34.6 \pm 4.9
LBG μ -PIC	0.88 \pm 1.1 < 3.3 (90% C.L. 上限値)

=>LA μ -PIC の10分の1以下へ

LA μ -PIC→LBG μ -PICでラドン放出量の低減を確認！
外部BG低減と合わせて感度向上へ

➤ 今後

- 感度向上への寄与評価中
- ガスゲインの非一様性についての調査
- 次世代新 μ -PIC の開発へのフィードバック

➤ まとめ

- 暗黒物質直接探索実験 NEWAGE → 検出器の低BG化を推進
- 従来検出器より材料の放射性不純物 1/100 以下の "LBG μ -PIC" を開発製作
- 材料や構造を大きく変更したがガス検出器として動作確認
- 電極形成不良によるものと思われるゲイン位置依存性あり
 - 不良箇所以外はガスゲインが出ていると考えられる
- 30 cm 角 μ PIC ラドン放出量を測定できるラドン計を神戸大で構築、目論見通りラドン放出量の低減を確認