

KERNELでの空気純化システムの性能評価



第2回 学術変革「地下稀事象」若手研究会 2026/3/5
東北大学 ニュートリノ科学研究センター
見上 万葉



KERNELエリア

- 神岡極稀現象研究拠点 (Kamioka Extremely Rare phenomena and NEutrino research Laboratory) の略称
- ラドンを除去するための空気純化システムで作成された空気が供給



実験室の利用予定

- HPGe検出器
- 暗黒物質検出器

スーパークリーンルームの利用予定

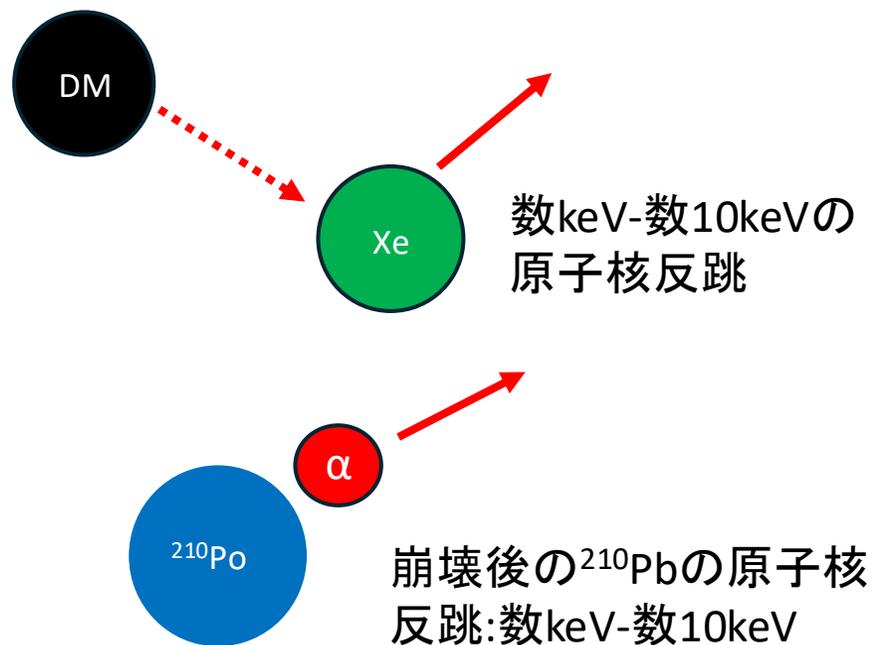
- 検出器の組み立て
- 結晶作成

研究背景:ラドン由来のバックグラウンド

暗黒物質直接探索実験

- WIMP(質量:数GeV-数10GeV)の探索の際に ^{210}Bi の β 崩壊や ^{210}Po の α 崩壊がバックグラウンド

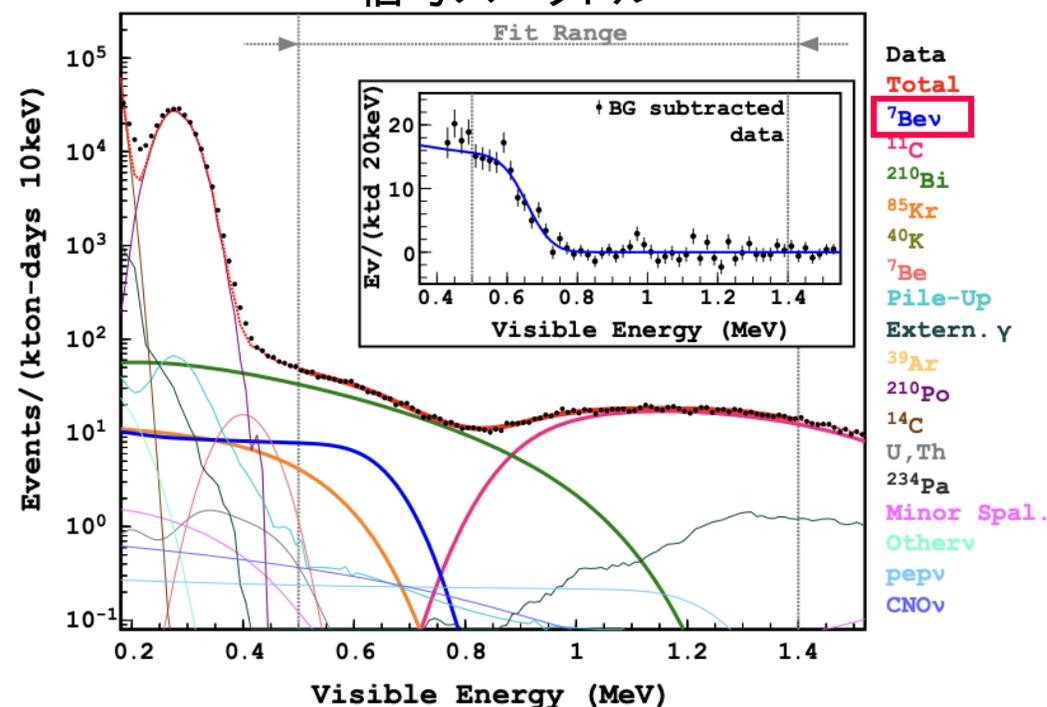
例: Xe核の原子核反跳



太陽ニュートリノ測定実験

- ^7Be ニュートリノ測定において、 ^{210}Bi の β 崩壊が主要なバックグラウンド

KamLAND実験での ^{210}Bi の最も少ない領域での信号スペクトル



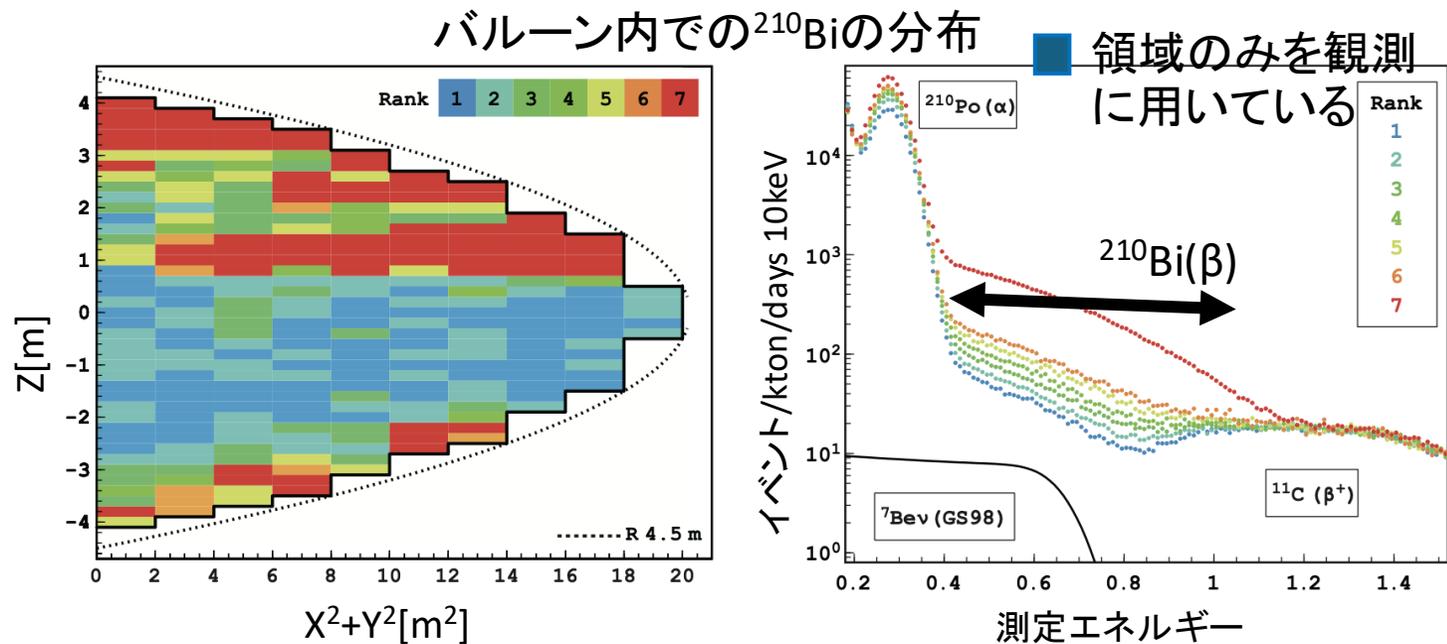
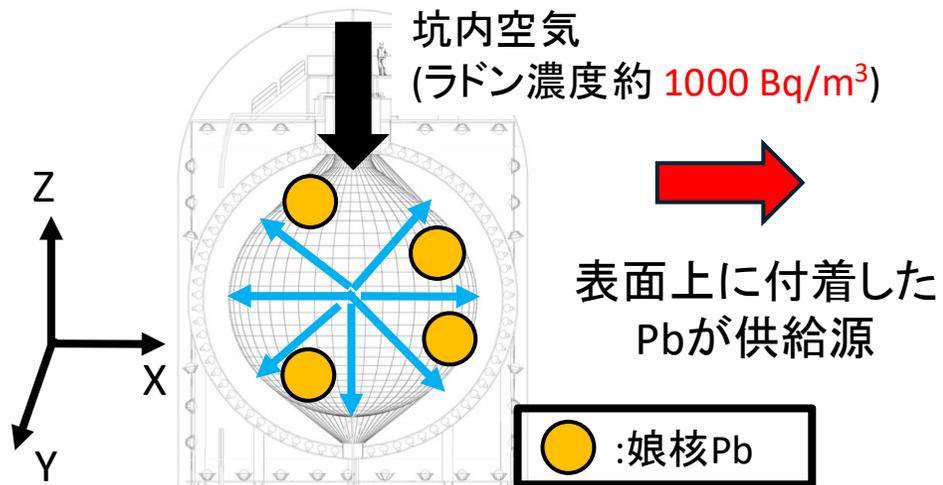
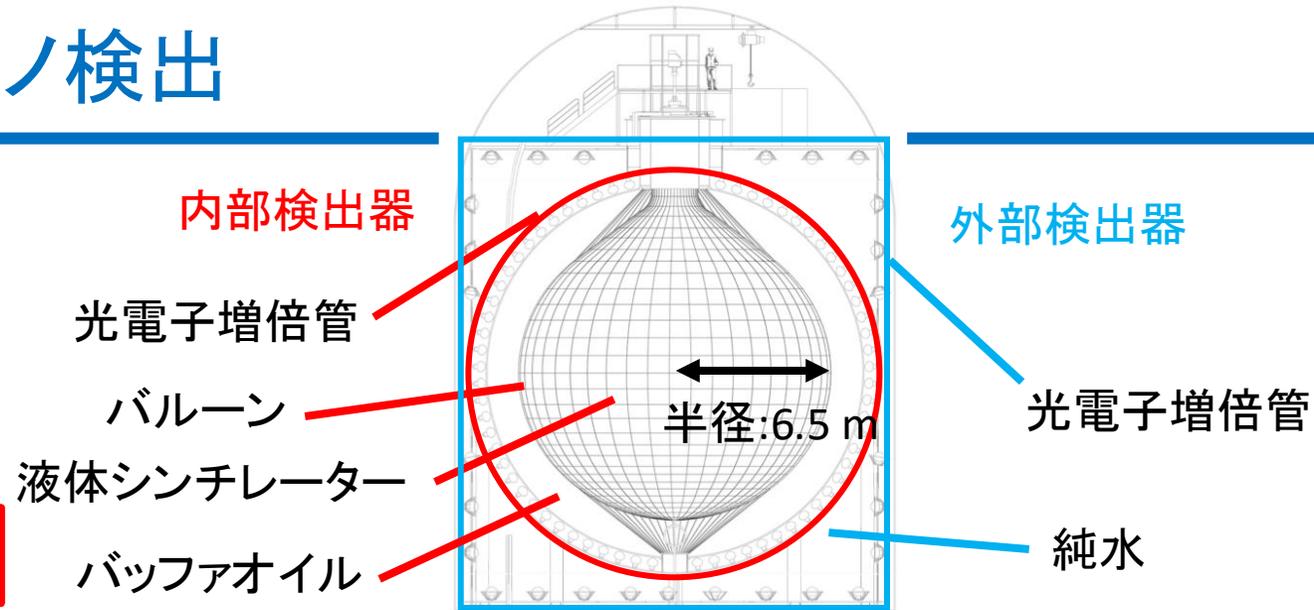
KamLAND実験での太陽ニュートリノ検出

➤ KamLAND検出器

- 岐阜県神岡鉱山地下約1000 mにある大型液体シンチレータ検出器
- 太陽ニュートリノは電子散乱で測定

$$\nu_i + e \rightarrow \nu_i + e$$

課題 : ^{210}Bi の β 崩壊が主要なバックグラウンド



将来計画:KamLAND2実験での太陽ニュートリノ検出

➤ KamLAND2実験

■ エネルギー分解能の向上

- 高量子効率PMT
- 集光ミラーの取り付け

➡ 集光率↑

■ KamLAND2バルーンの導入

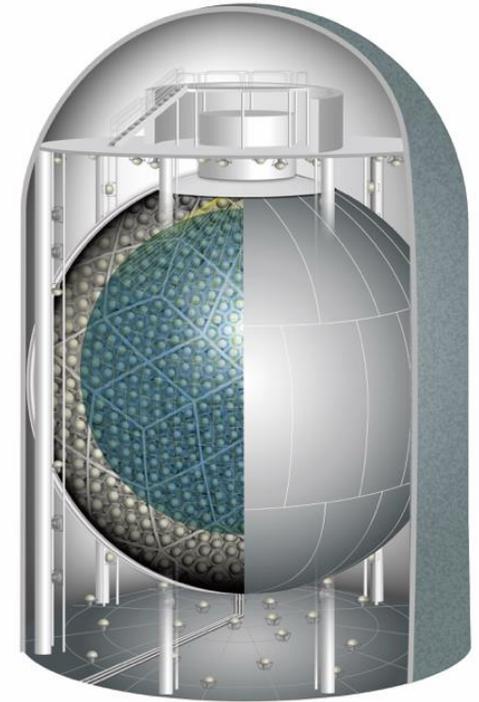
- 素材の低放射能化
- 膨らませる際にラドンフリー空気を利用

➡ ポスター P5:小幡

➡ バックグラウンド↓

↓ 本発表

◆ ラドンフリー空気の作成を行う空気純化システム



^7Be ニュートリノの高精度観測へ

研究目的

KamLAND2バルーンを膨らませるための条件

- ✓ KamLAND2バルーン約1500 m³を約1日で膨らませるための流量
- ✓ バルーン表面のラドン由来の娘核の汚染をできる限り除去



目標

- 以下のような条件での空気純化システムの運用方法を確立する
 1. 空気の流量: 50 m³/h以上
 2. 空気中に含まれるラドン濃度: 10 mBq/m³以下

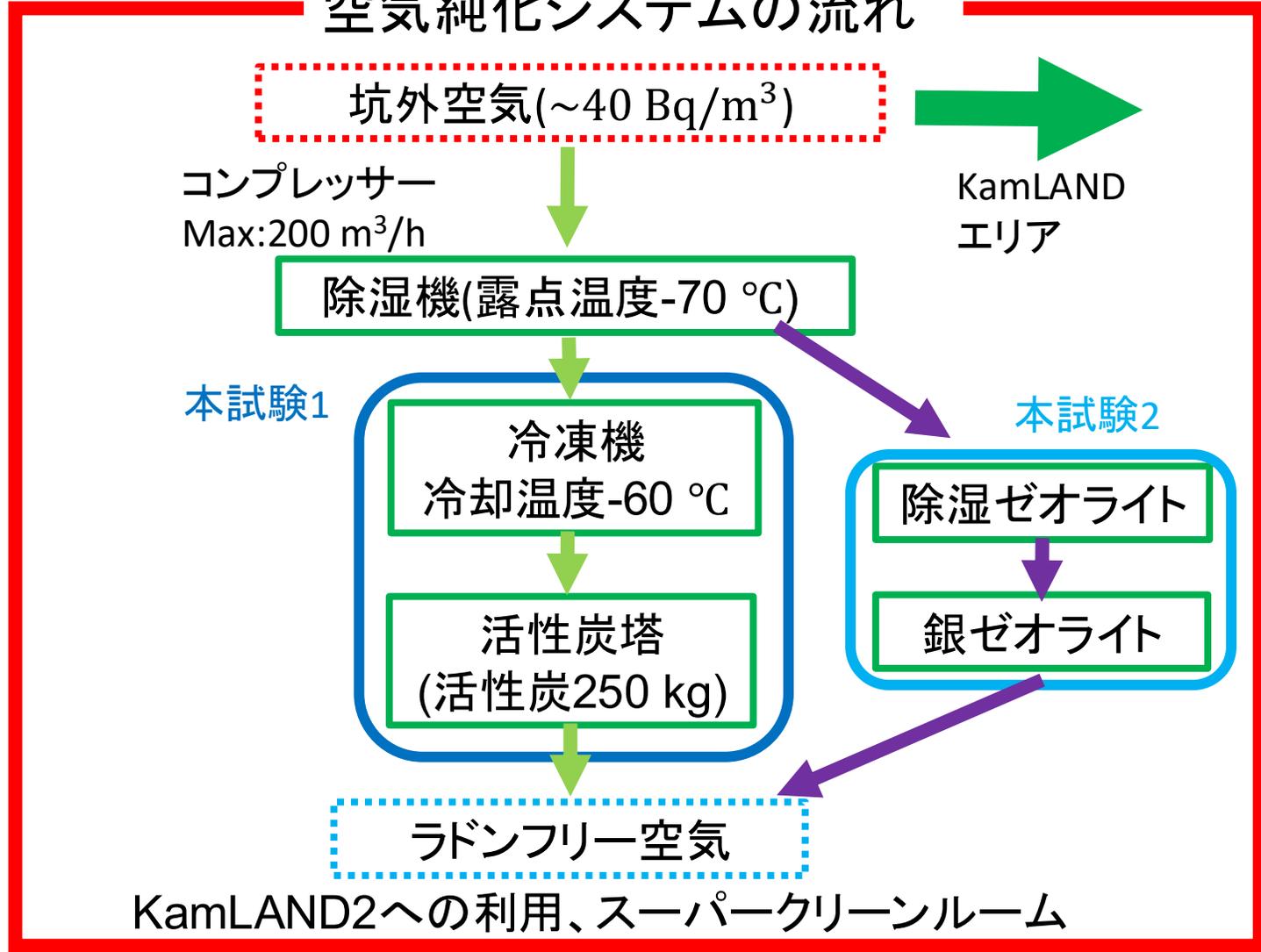
本実験

- 空気純化システムの性能を評価するための高感度ラドン計のセットアップ
- システムに用いる2つのラドン吸着剤の除去能力評価
現行のシステム: 冷却活性炭 将来計画: 銀ゼオライト

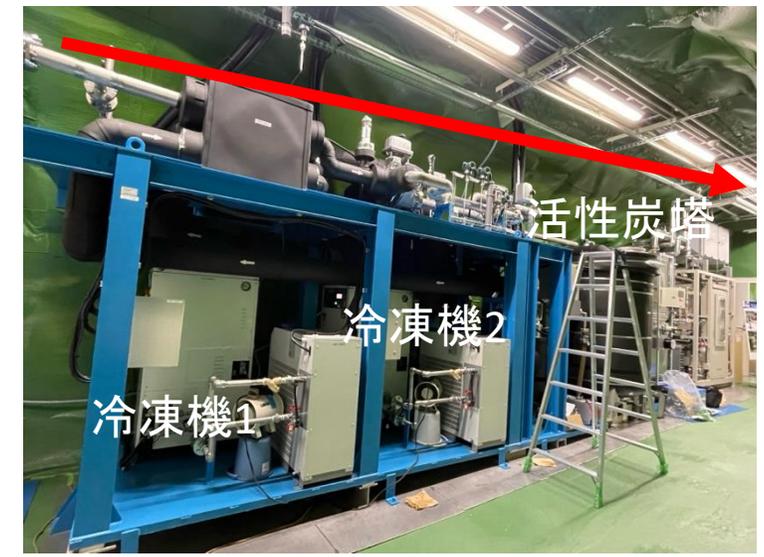
明日の
ポスターで
発表(P11)

空気純化システム

空気純化システムの流れ



本試験1(現行システム: 冷却活性炭)



本試験2 (銀ゼオライト)



ラドン吸着剤の特徴

活性炭[太閤TC2B1](現行システム)

- 内部の細孔にラドンが物理吸着

< 粒状・粉末活性炭 >



メリット

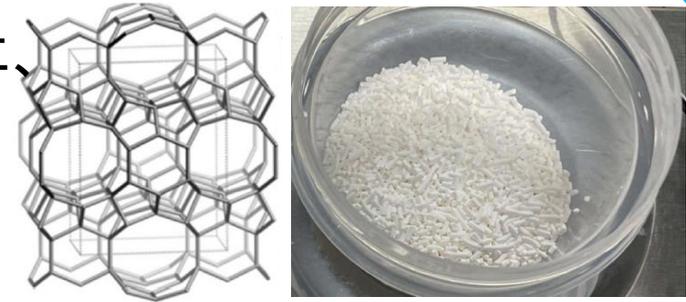
- 既然大流量での**利用実績がある**
e.g. SK(18 m³/h:1mBq/m³),
LSC(220 m³/h:1mBq/m³)

デメリット

- **冷却する必要**がある
- 除湿が必要(<露点温度 -60 度)

銀ゼオライト[8Ag-FER-B](将来計画)

- ゼオライトと呼ばれる細孔結晶に、銀を添加。
- 細孔内の銀がラドンを物理吸着
(2023年に新たに発見)



メリット

- **常温**でもラドン除去能力が非常に高い
[1](>>冷却活性炭)

デメリット

- **除湿**が必要(<露点温度 -90 度)
- ベーキングの際には、350度かつ長時間(2時間以上)必要
- 大流量での**利用実績がない**
- 価格が高い

[1] T. Sone(2024), DOI: 10.1093/ptep/ptae181.

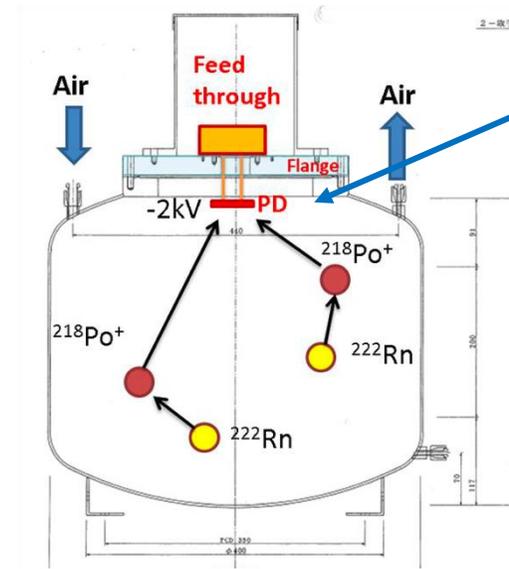
80Lラドン計[2]

静電捕集法

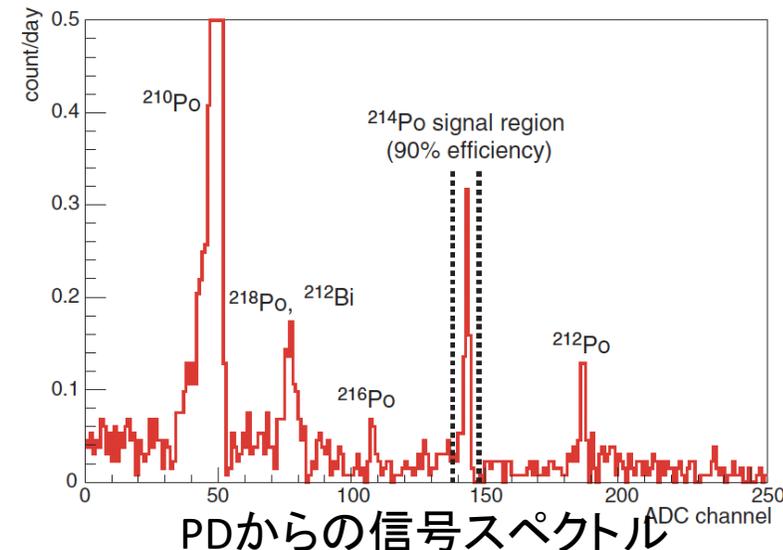
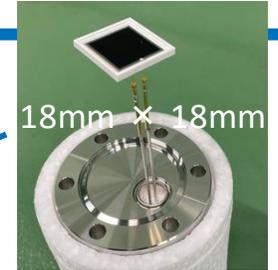
- ラドンの娘各種が**正に帯電している**という性質を利用
 $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po}^+ \rightarrow ^{214}\text{Pb}^+ \rightarrow ^{214}\text{Bi}^+ \rightarrow ^{214}\text{Po}^+$
- この帯電した粒子を逆バイアスの高電圧を印加したPD(PINフォトダイオード)に捕集
- 捕集時に崩壊した時に放出する α 粒子をPDで検出

特徴

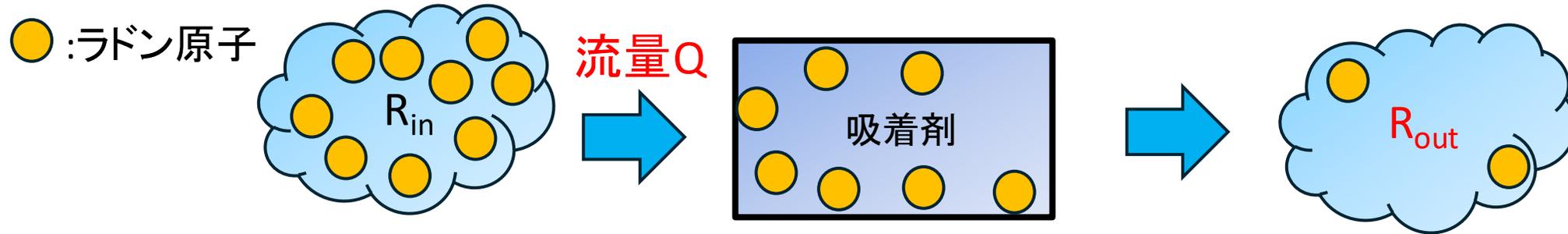
- 高感度で測定可能
- バックグラウンドが小さい
($0.41 \pm 0.15 \text{ mBq/m}^3$)



PD



吸着係数 K [m^3/kg]



- 入り口ラドン濃度を R_{in} 、出口ラドン濃度を R_{out} と定義
- ラドン濃度比を R として、以下のように実効保持時間 τ [day] を定義

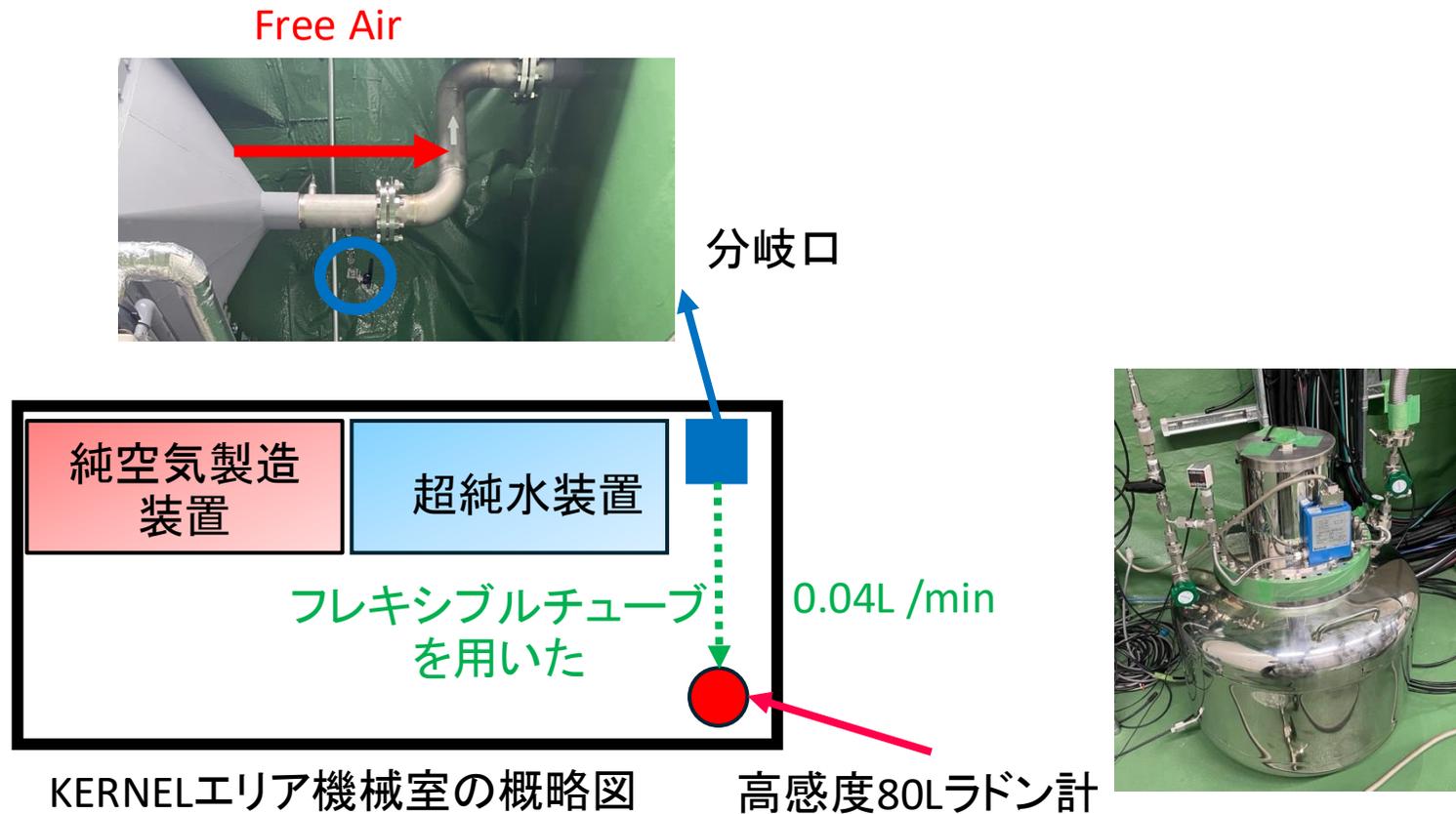
$$R = \frac{R_{out}}{R_{in}} = e^{-\lambda\tau} \quad (\lambda = \log 2 / T_{1/2}, T_{1/2} \text{ は } ^{222}\text{Rn} \text{ の半減期: } 3.82 \text{ day})$$

- 保持時間と吸着剤の質量 m [kg]、流量 Q [m^3/hour] を用いて、**吸着係数 K** は表せる

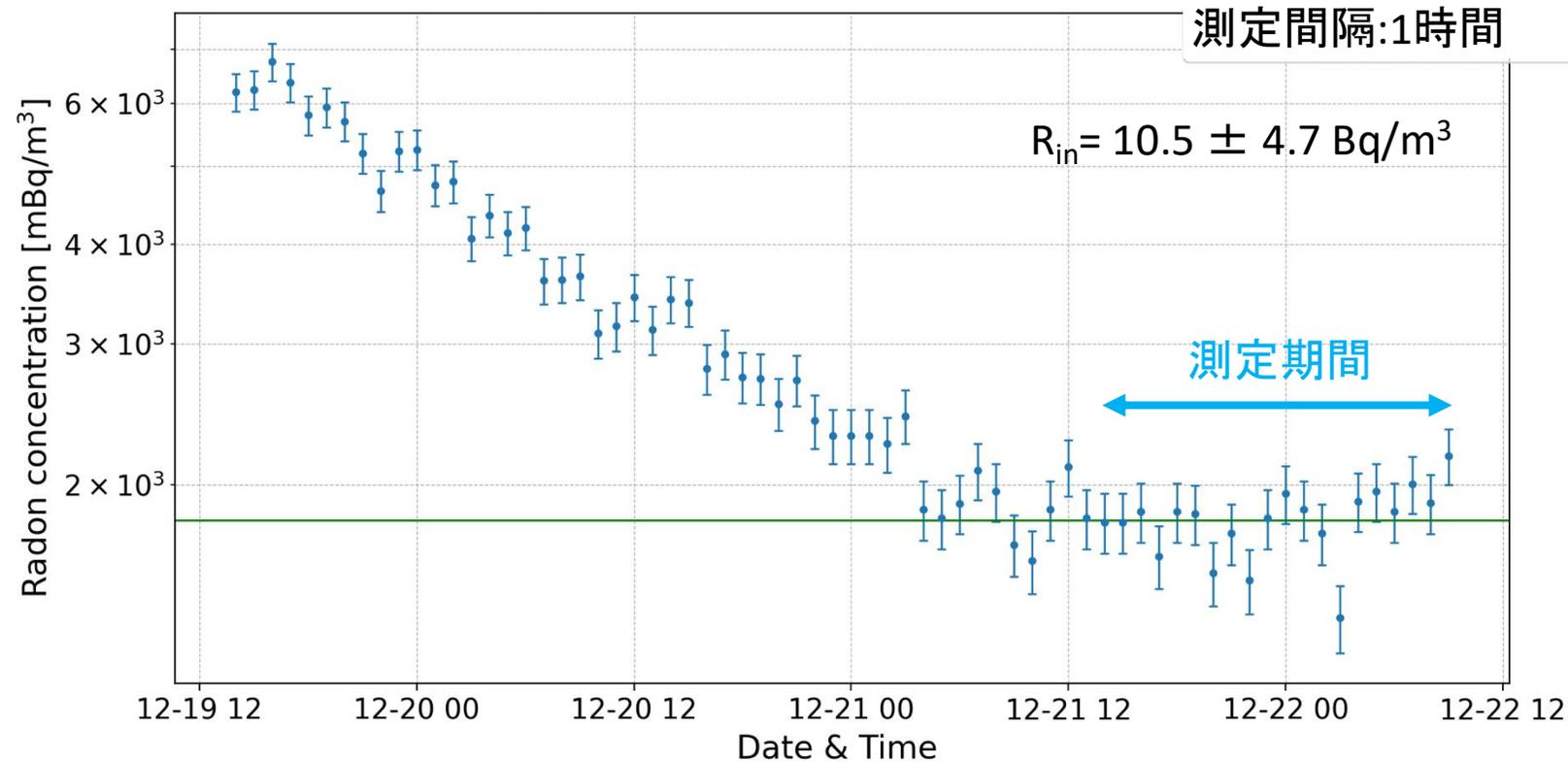
$$K[\text{m}^3/\text{kg}] = \frac{\tau \times Q \times 24}{m} \text{ 吸着剤の吸着能力を示す指標}$$

冷却活性炭試験のセットアップ

- 活性炭塔を80度で2時間ベーキング
- 準備段階での運用のため、冷却温度は-30 度で活性炭を冷却しつつ、坑外空気を $Q = 160 \text{ m}^3/\text{h}$ 、露点温度 -62 度で流す
- この空気をフレキシブルチューブを通して、80Lラドン計へ $0.04 \text{ L}/\text{min}$ で流す



出口ラドン濃度 R_{out} の測定結果



- 入りラドン濃度 R_{in} として、測定開始前の6日間のデータの平均をとる
- 出口ラドン濃度 R_{out} は、この測定期間内での安定した期間をとる

| 冷却温度(°C) | 流量 (m³/h) | R_{out} (mBq/m³) | R (ラドン濃度比) | τ (day) | K (m³/kg) |
|------------|---------------|---|-------------|--------------|-----------|
| -30(目標-60) | 160 > 50 (目標) | $(1.80 \pm 0.18) \times 10^4 > 10$ (目標) | 0.17 ± 0.08 | 9.79 ± 2.55 | 149 ± 41 |



結果の考察

課題点: ラドン除去能力が不十分

原因

1. 冷却温度の不足 (-30 度 > 目標: -60 度)
2. 流速が速い (160 m³/h)

運用条件の考察

- Kの温度依存性を用いて、予定の冷却温度 **-60 度** でのKを計算
$$K = 369 \pm 105 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$
- 目標ラドン濃度に達成するための「流速」 vs 「質量」を計算
- 現在の活性炭の質量だと、流速が **約84 m³/h**で可能

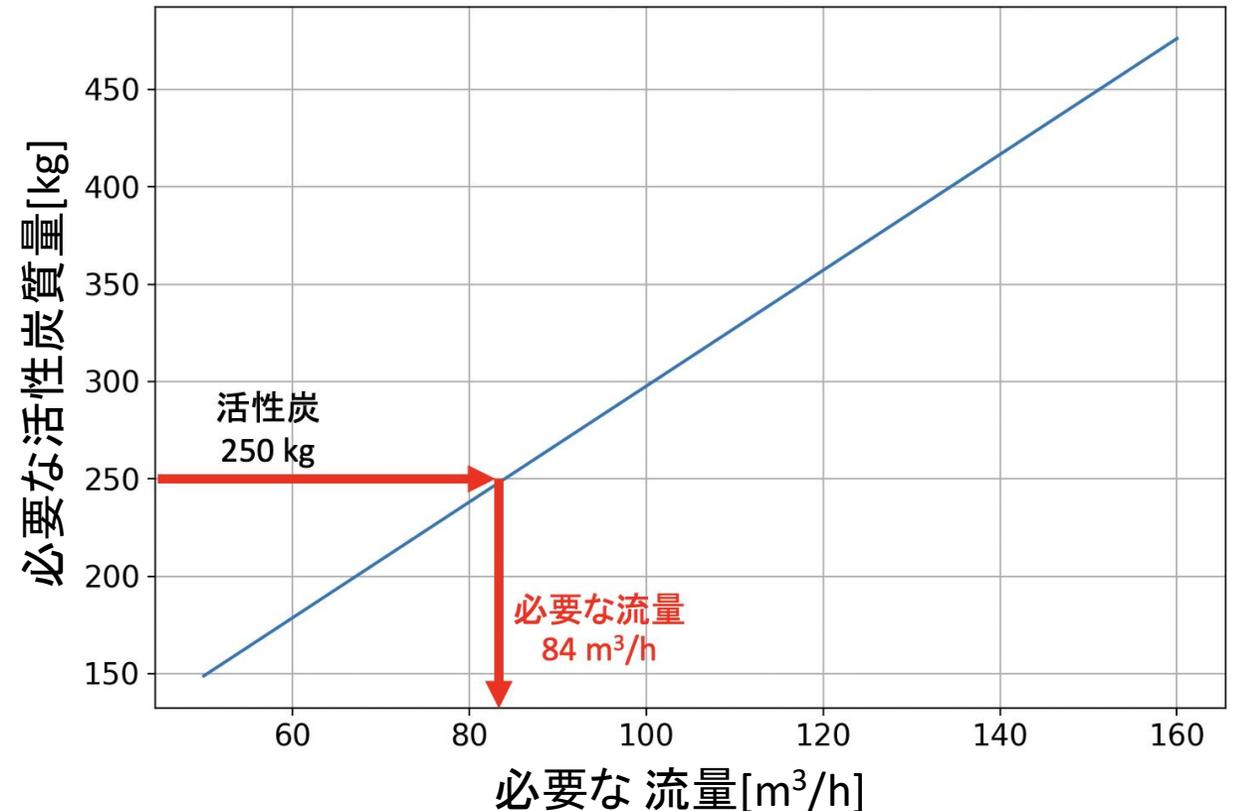
➡ 大流量で目標濃度に達成可能

吸着係数Kの温度依存性

$$K = K_0 \times \exp\left(-\frac{Q}{R \times T}\right)$$

K₀, Q, Rは定数、Tは温度[K]

Charcoal mass needed for 40.0 Bq/m³ → 10 mBq/m³
(K = 369 m³/kg)



銀ゼオライト試験(8Ag-FER-B)のセットアップ

性能試験の準備

1. 除湿ゼオライトカラムに2.6kg、銀ゼオライトカラムに2.7kgを詰める
2. 除湿ゼオライトを真空引き、350度で2時間ベーキング
3. 銀ゼオライトを真空引き、350度で6時間ベーキング

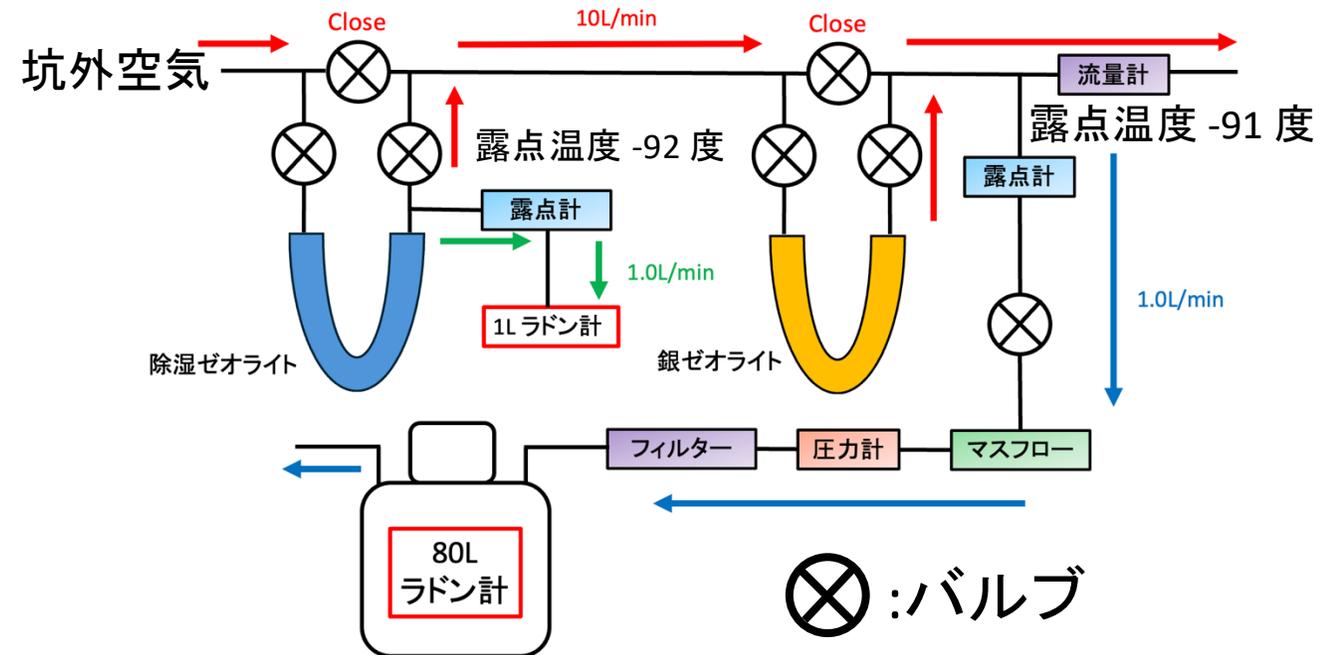


性能試験

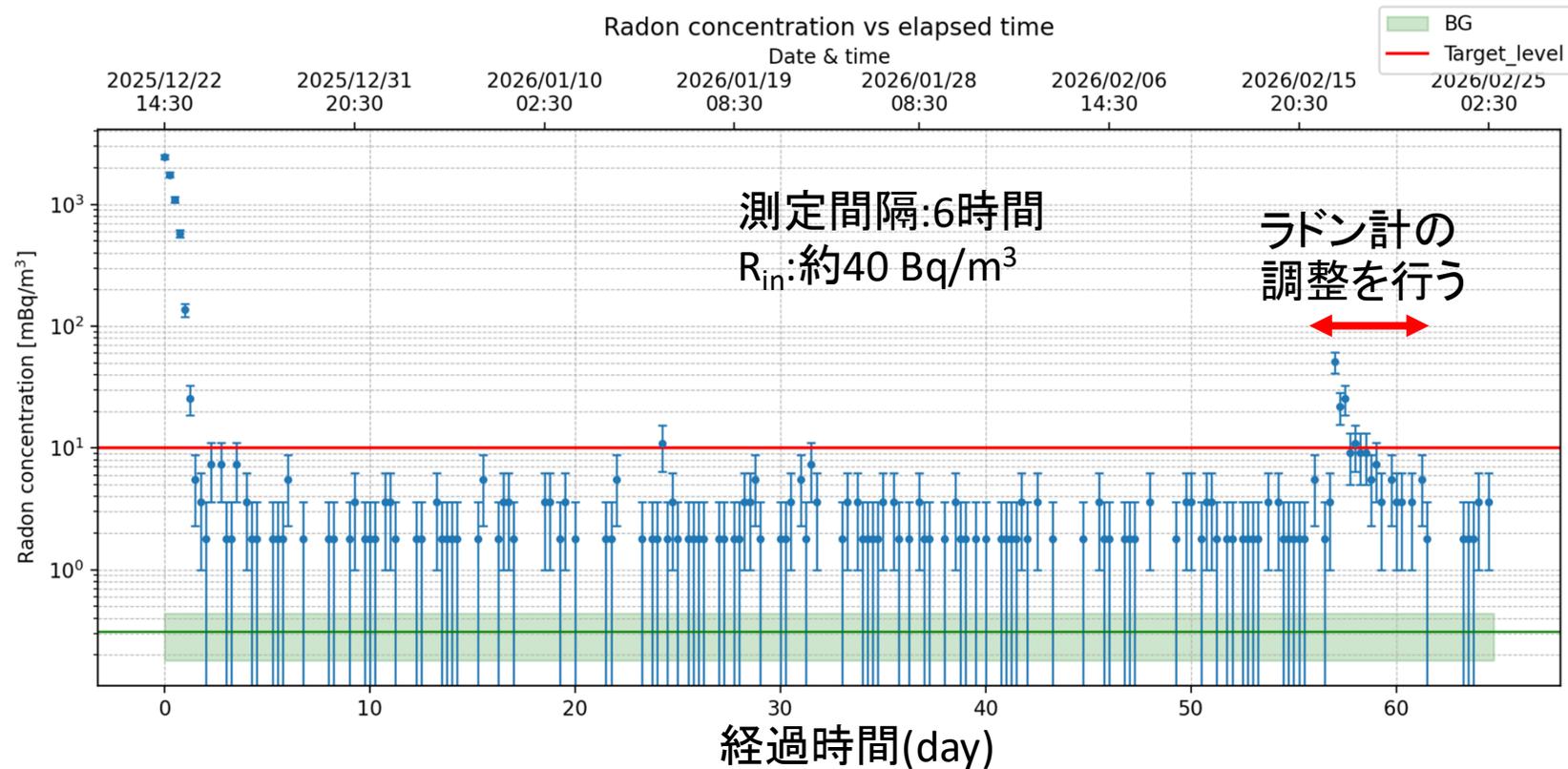
- 各カラムに流量 $Q = 10 \text{ L/min} (=0.6 \text{ m}^3/\text{h})$ で流し込む
- 入り口ラドン濃度 R_{in} は別のラドン計で測定
- 80Lラドン計へ 1.0 L/min で流し込み、 R_{out} を測定

課題点

配管の分岐や大きさの関係で目標の $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ではできなかった。



銀ゼオライト(8Ag-FER-B)試験結果



- 目標の10 mBq/m³以下は到達されている
- 約2ヶ月経過したが、まだブレイクは見られていない

| 流量 (m ³ /h) | R_{out} (mBq/m ³) | R (ラドン濃度比) | τ (day) | K (m ³ /kg) |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------|
| 0.6 << 50(目標) | 0.88 ± 0.31 < 10(目標) | (1.92 ± 0.67) × 10 ⁻⁵ | 59.9 ± 1.9 | 319 ± 12 |

まとめ

- 冷却活性炭、および銀ゼオライトの吸着性能試験を行った
- 銀ゼオライトについて、目標に到達しなかったものの十分なラドン吸着能力を有していることがわかった

今後の展望

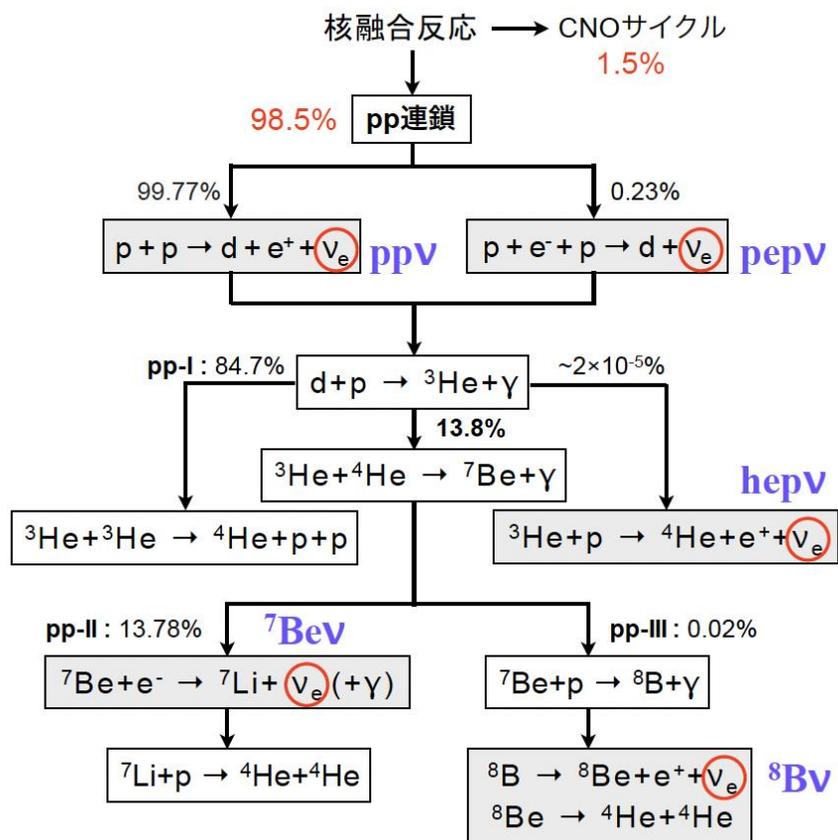
- 冷却のコストなどを考慮すると、銀ゼオライトの方が適当
- 銀ゼオライト用の配管を新たに建設し、目標の50 m³/h以上の流量でのラドン除去を目指す

Back Up

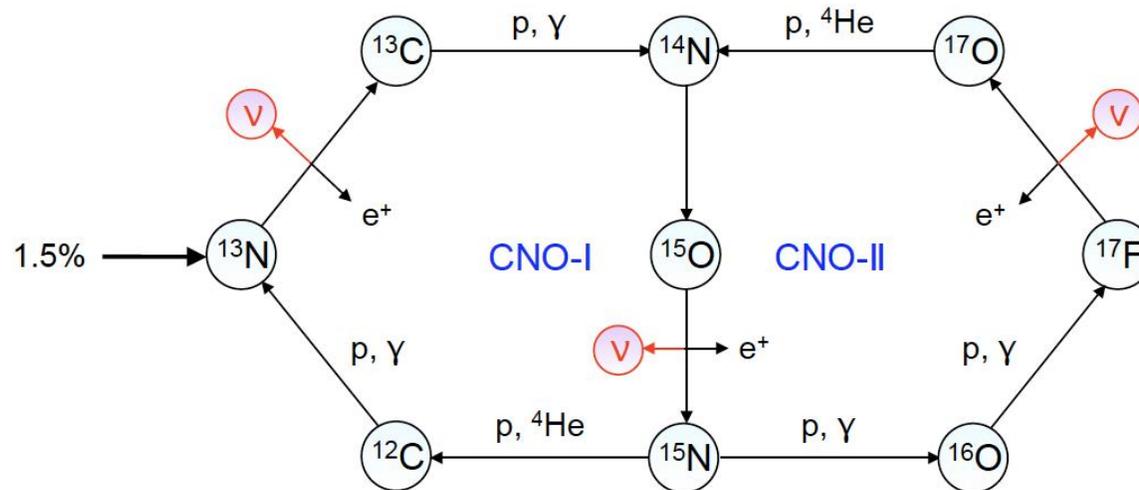
太陽ニュートリノの生成過程

- 太陽ニュートリノの生成過程は主に二つに分類される
- 主要な反応は、pp連鎖によるもの

1. pp連鎖

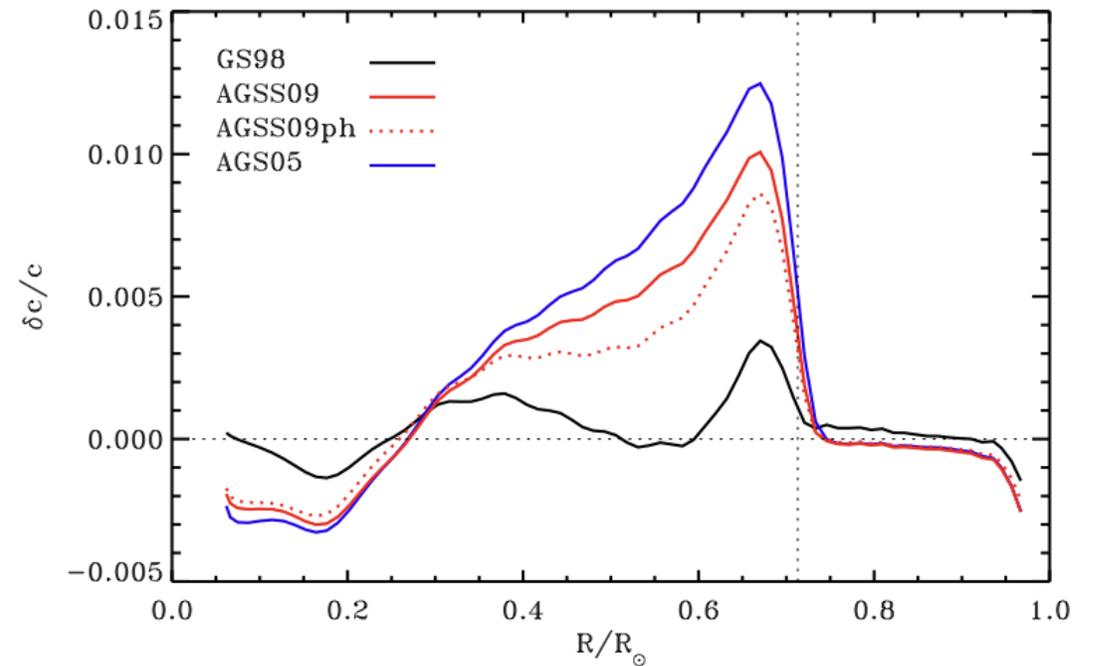
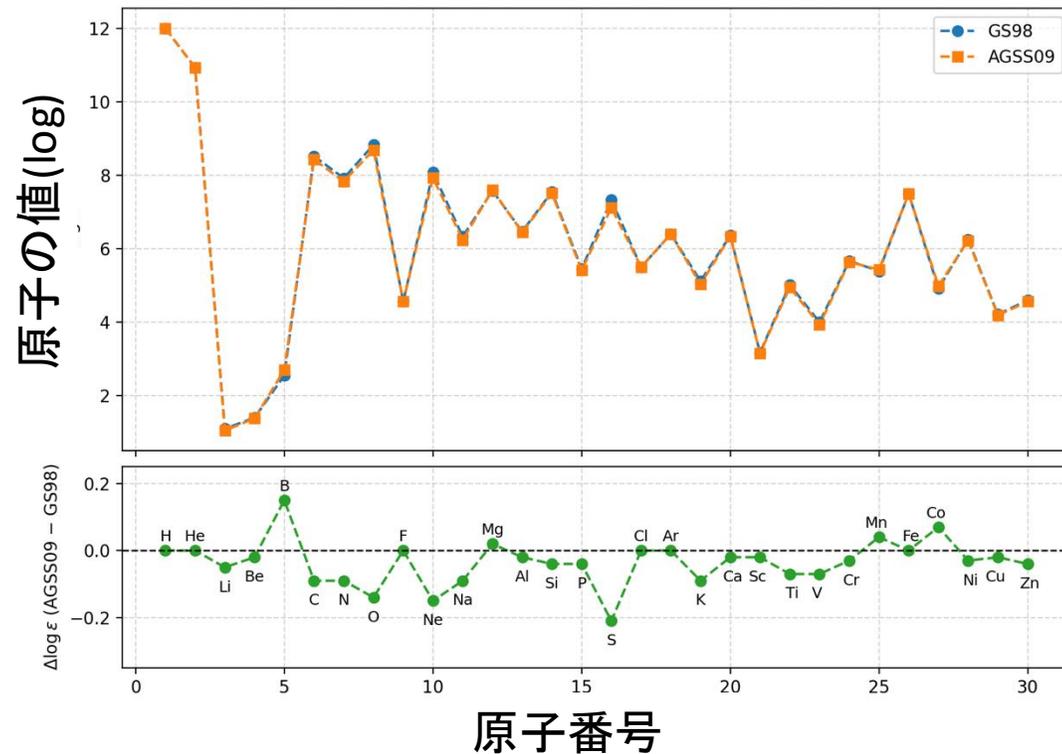


2. CNOサイクル



太陽標準模型(SSM)の課題

- GS98と呼ばれる太陽モデルを高精度分光観測などにより、改良したAGSS98と呼ばれるモデルが存在
- GS98と最新のAGSS09ではさまざまな面で違いがある
 - 太陽内部の金属量(←太陽科学組成問題)
 - 太陽内部の音速の違い

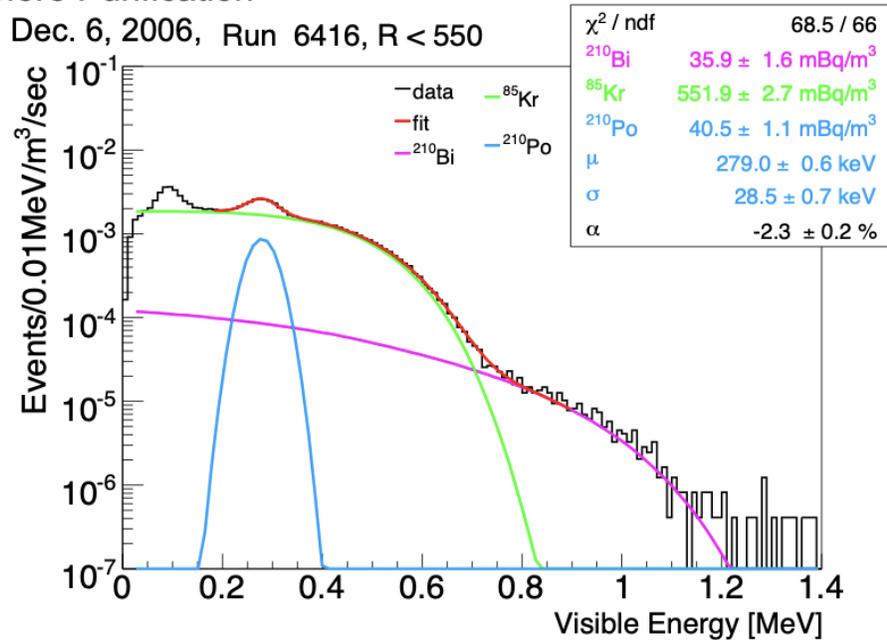


KamLAND検出器の純化

- 液液法と蒸留法による純化が行われる
- ほとんどの検出器由来のバックグラウンドは、純化により ${}^7\text{Be}$ ν と同等のレートまで低減したが、ラドン由来の ${}^{210}\text{Bi}$ は残存した

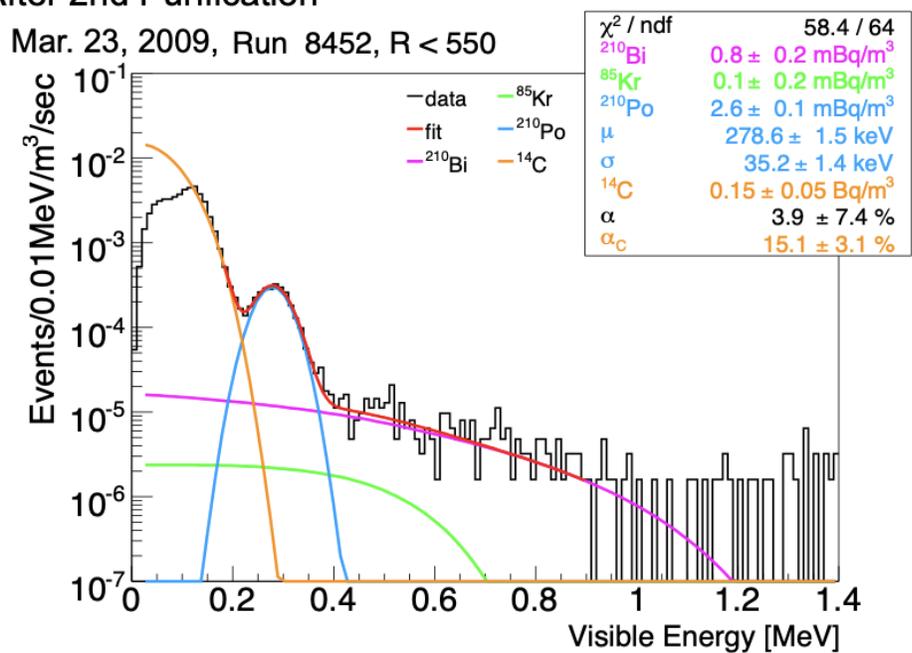
Before Purification

Dec. 6, 2006, Run 6416, R < 550



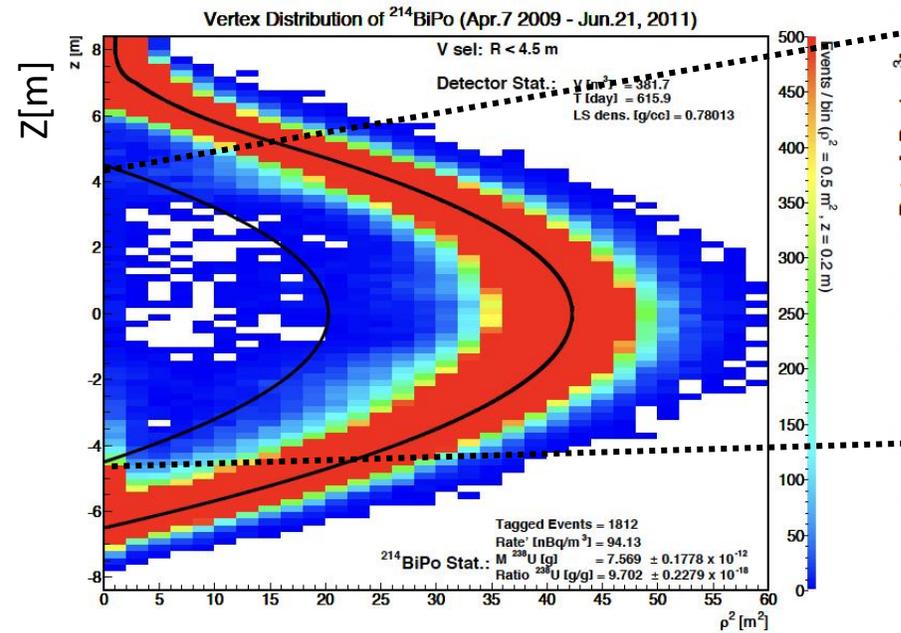
After 2nd Purification

Mar. 23, 2009, Run 8452, R < 550

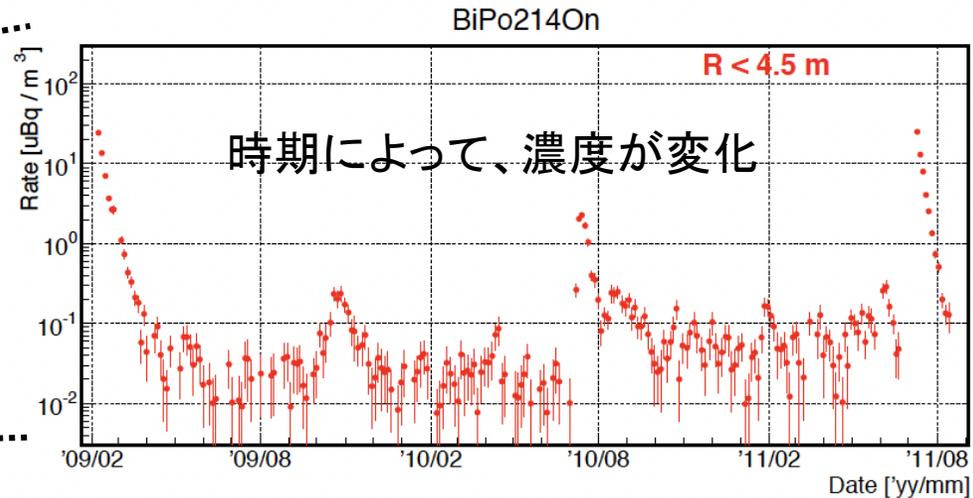


太陽ニュートリノ測定でのバックグラウンド分布

- バルーン表面上(6.5m)に ^{222}Rn 由来のバックグラウンドが多く存在



バルーン内の ^{214}Bi の分布 $X^2+Y^2[\text{m}^2]$



バルーン半径4.5m内の ^{214}Bi のレート

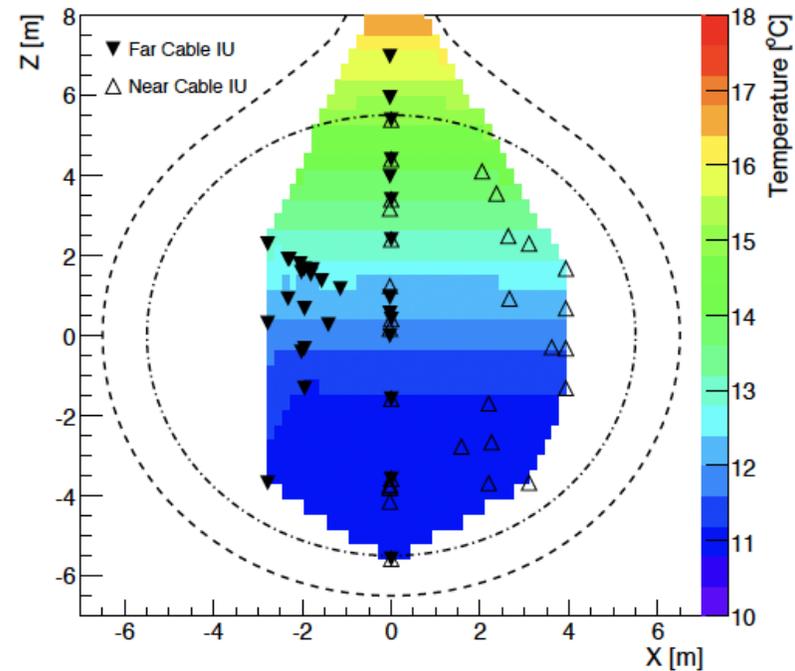
液体シンチレータの対流により、内部への染み込みを示唆

| 放射性核種 | 起源 | 崩壊率 [Hz] |
|-----------------------------|----------|----------|
| ^{14}C (pileup のみ) | 液体シンチレータ | 3582 |
| ^{210}Po | 液体シンチレータ | 1.9 |
| ^{210}Bi | 液体シンチレータ | 0.10 |
| ^{85}Kr | 液体シンチレータ | 0.010 |
| ^{11}C | 液体シンチレータ | 0.01156 |
| ^{210}Po | ナイロンバルーン | 80 |
| ^{210}Bi | ナイロンバルーン | 200 |
| ^{238}U | ナイロンバルーン | 0.26 |
| ^{232}Th | ナイロンバルーン | 0.054 |
| ^{40}K | ナイロンバルーン | 14 |
| ^{238}U | ケプラー紐 | 1.3 |
| ^{232}Th | ケプラー紐 | 2.97 |
| ^{40}K | ケプラー紐 | 34 |
| ^{238}U | PMT ガラス | 7.78 |
| ^{232}Th | PMT ガラス | 6.48 |
| ^{40}K | PMT ガラス | 2.76 |
| ^{238}U | ステンレス鋼 | 20.7 |
| ^{232}Th | ステンレス鋼 | 8.14 |
| ^{40}K | ステンレス鋼 | 2.48 |
| ^{208}Tl | 周囲岩盤 | 34 |

対流の原因

対流の原因だと考えられていること

- KamLAND検出器内のLSは温度分布
- LSの密度分布が高さによって異なる
- 外水槽(10~24°C)との温度差

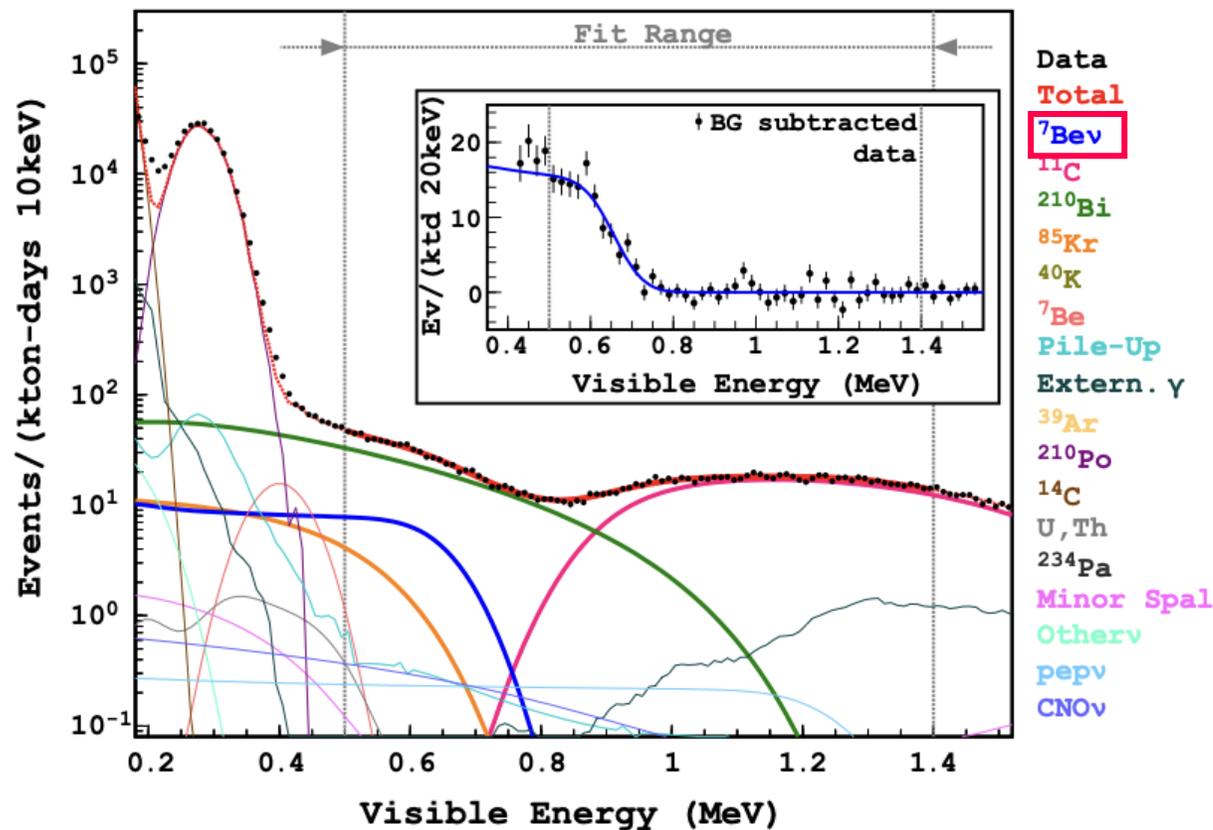


KamLAND実験での太陽ニュートリノ測定結果

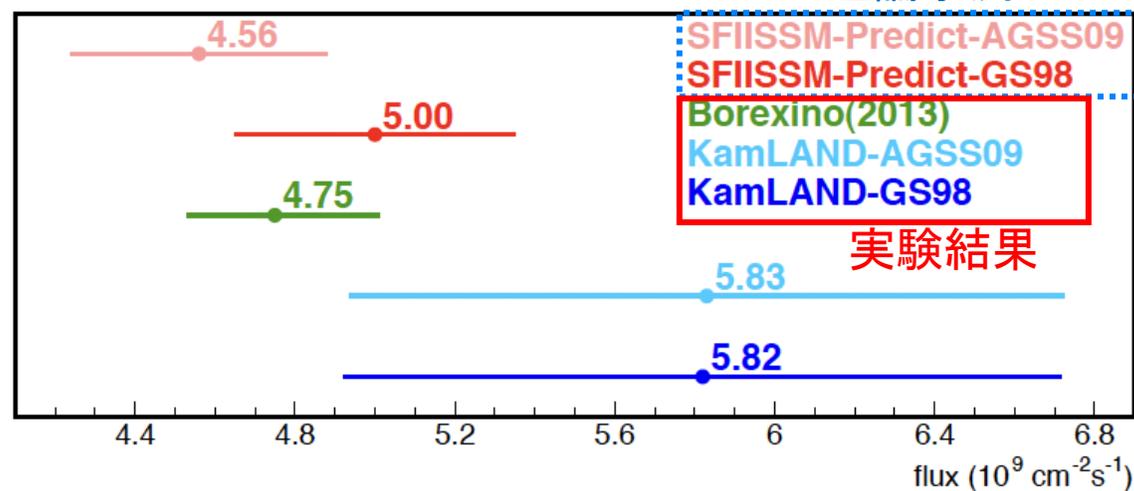
- KamLANDの実験結果は、 ^{210}Bi の影響により大きく制限

| Source | Uncertainty (%) |
|---|-----------------|
| Cross section | 1.0 |
| Number of target | 0.10 |
| Fiducial volume | 3.4 |
| Vertex misreconstruction | 0.5 |
| Energy scale | 7.9 |
| Rank-dependent energy scale | 2.9 |
| Energy resolution | 3.4 |
| BG from ^{238}U -series (^{222}Rn - ^{210}Pb) | 1.7 |
| BG from ^{232}Th -series (^{228}Th - ^{208}Pb) | 1.8 |
| BG from other solar neutrinos | 1.9 |
| Systematic total | 10.2 |
| Statistics | 12.4 |
| Total | 16.1 |

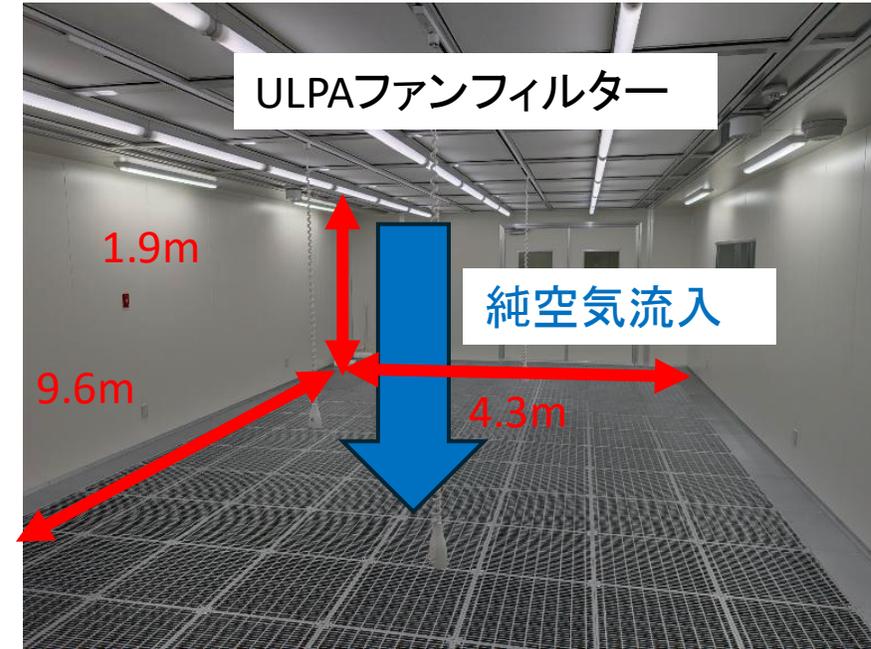
^{210}Bi の最も少ない領域での信号スペクトル



^7Be Solar Neutrino Flux 理論予測



スーパークリーンルーム(SCR)



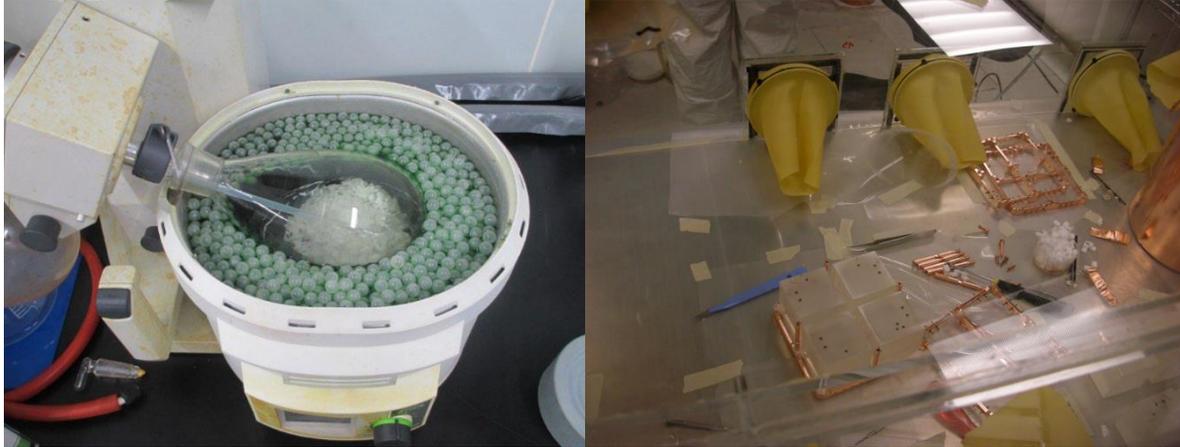
- ULPAファンフィルター群で目標の **ISO 14644-1 class1** クリーン度をすでに達成
- 空気純化システムにより極低ラドン濃度の純空気を流入



SCRの利用案

予定案1

NaI結晶作成、検出器のアセンブリ



予定案2

KamLAND2-Zen用のミニバルーン作成



- このクリーンな環境と極低ラドン下で、NaI結晶の作成や KamLAND2-Zen用のミニバルーン作成などを予定

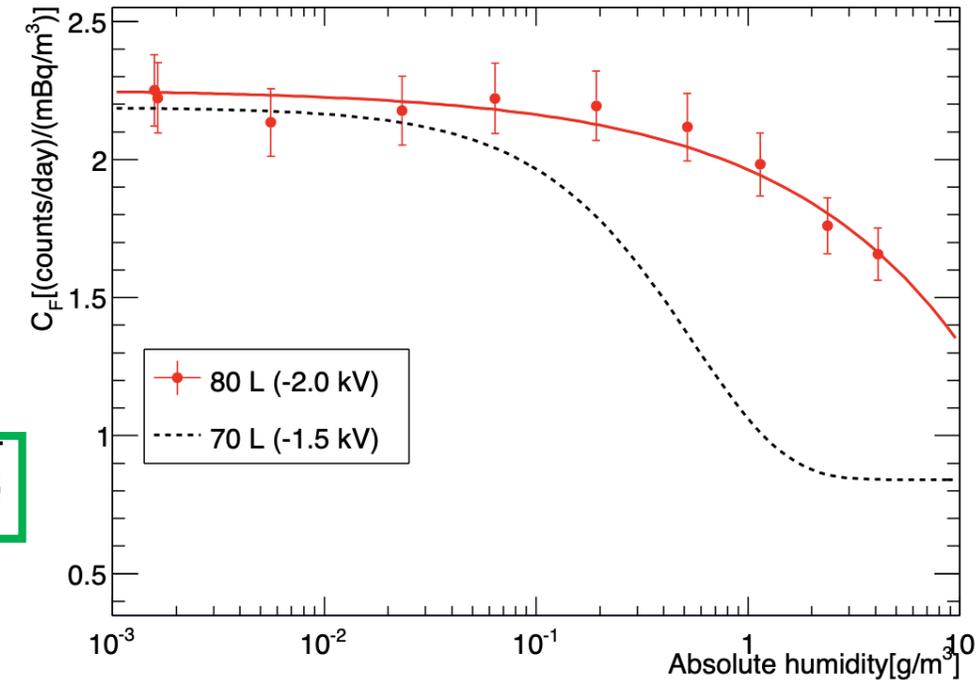
ラドン計の較正係数CFの求め方

- ラドン濃度は、較正係数CFと ^{214}Po のカウント数から算出

$$\text{Rn濃度 (Bq/m}^3\text{)} = \frac{\text{}^{214}\text{Poカウント(/day)}}{\text{CF}}$$

$$\text{CF}(\text{count/day})/(\text{Bq/m}^3) = p_0 - p_1 * \sqrt{\text{絶対湿度(g/m}^3\text{)}}$$

先行研究で求められている



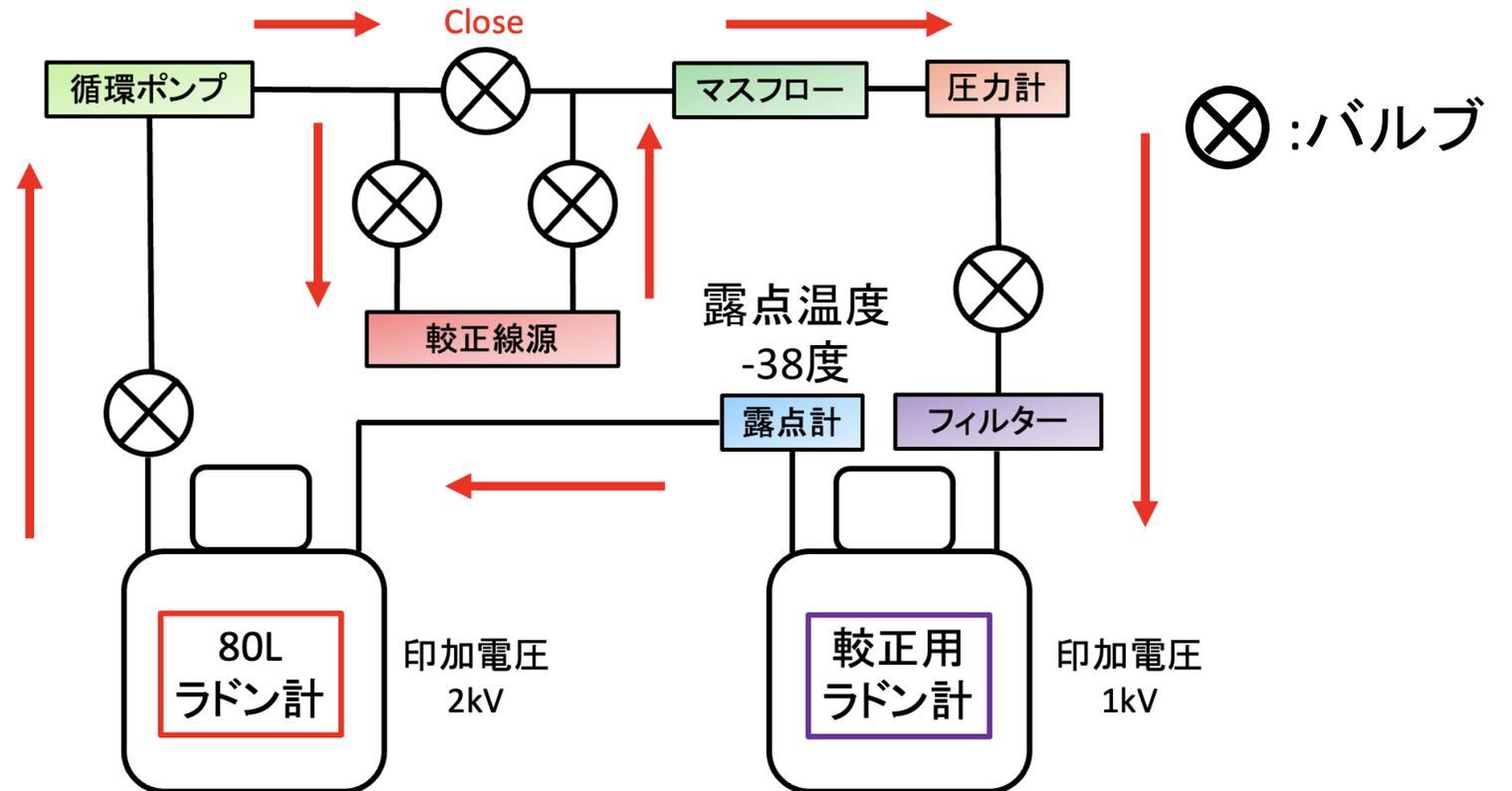
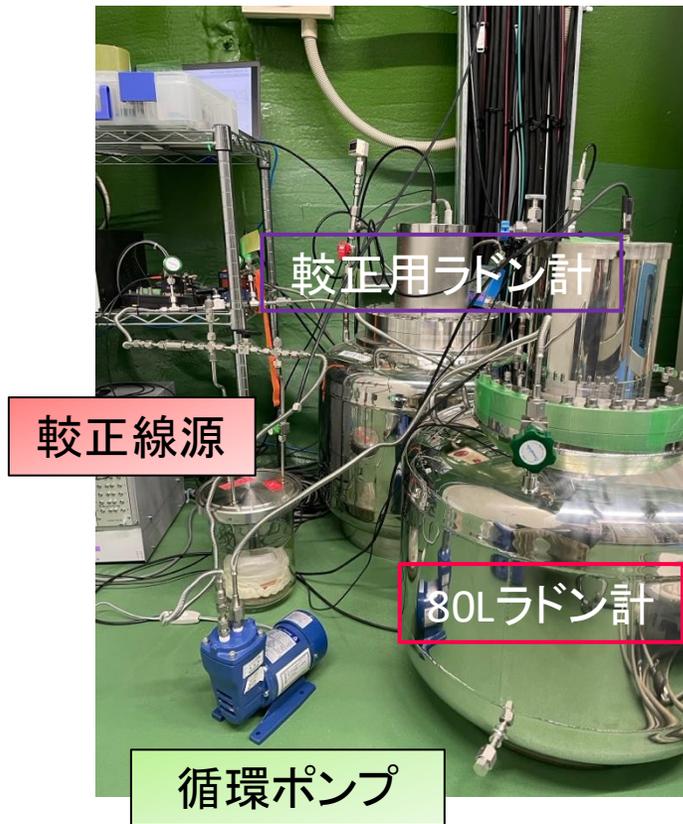
先行研究でのCFの絶対湿度依存性

この既に求めている係数の間に以下の補正係数Dをつけ
較正実験で算出

$$\begin{aligned} & \text{本実験の較正係数(CF}_1\text{)} \\ & = D \times \text{較正用ラドン計の較正係数(CF}_0\text{)} \end{aligned}$$

ラドン計の較正

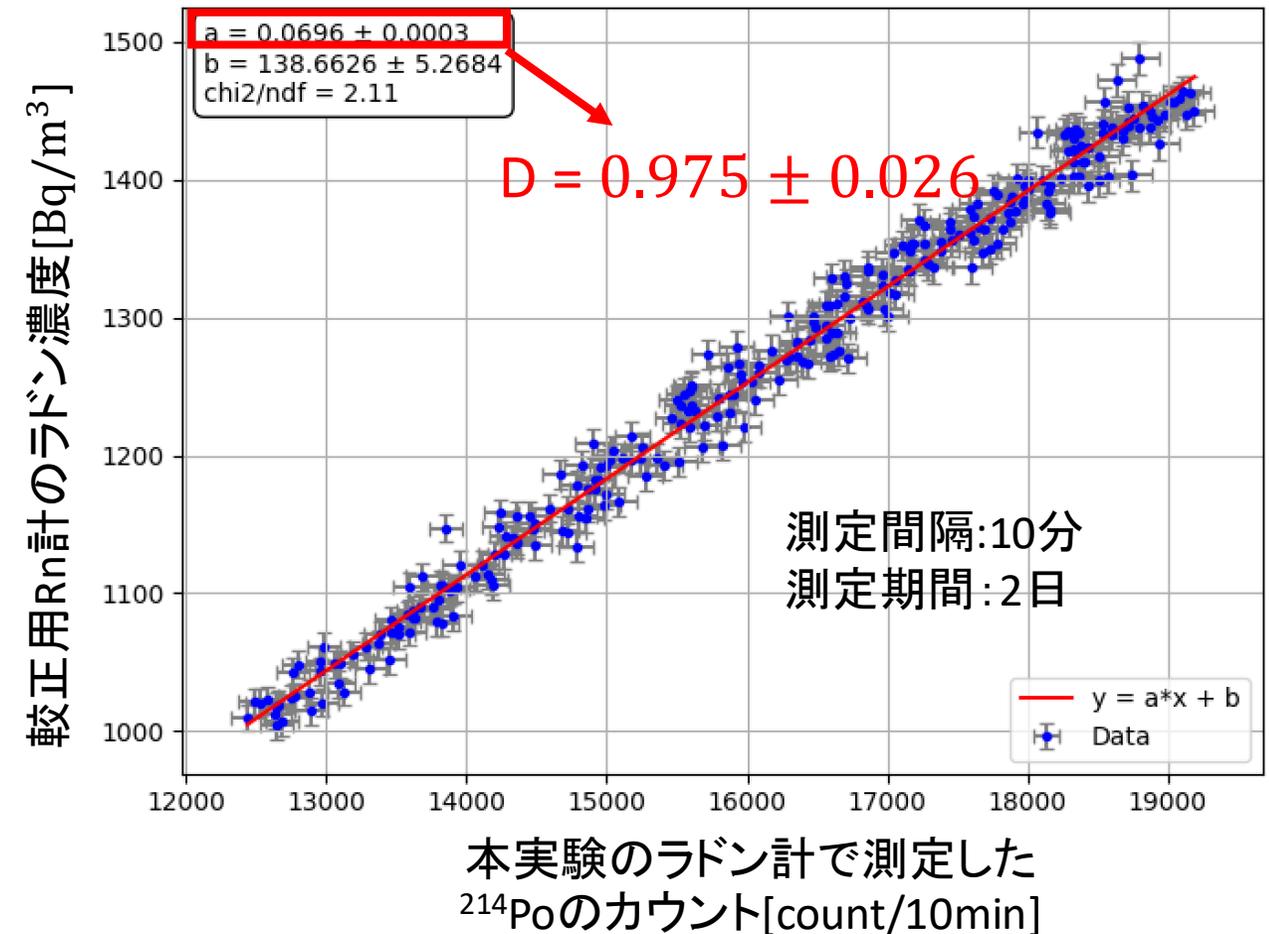
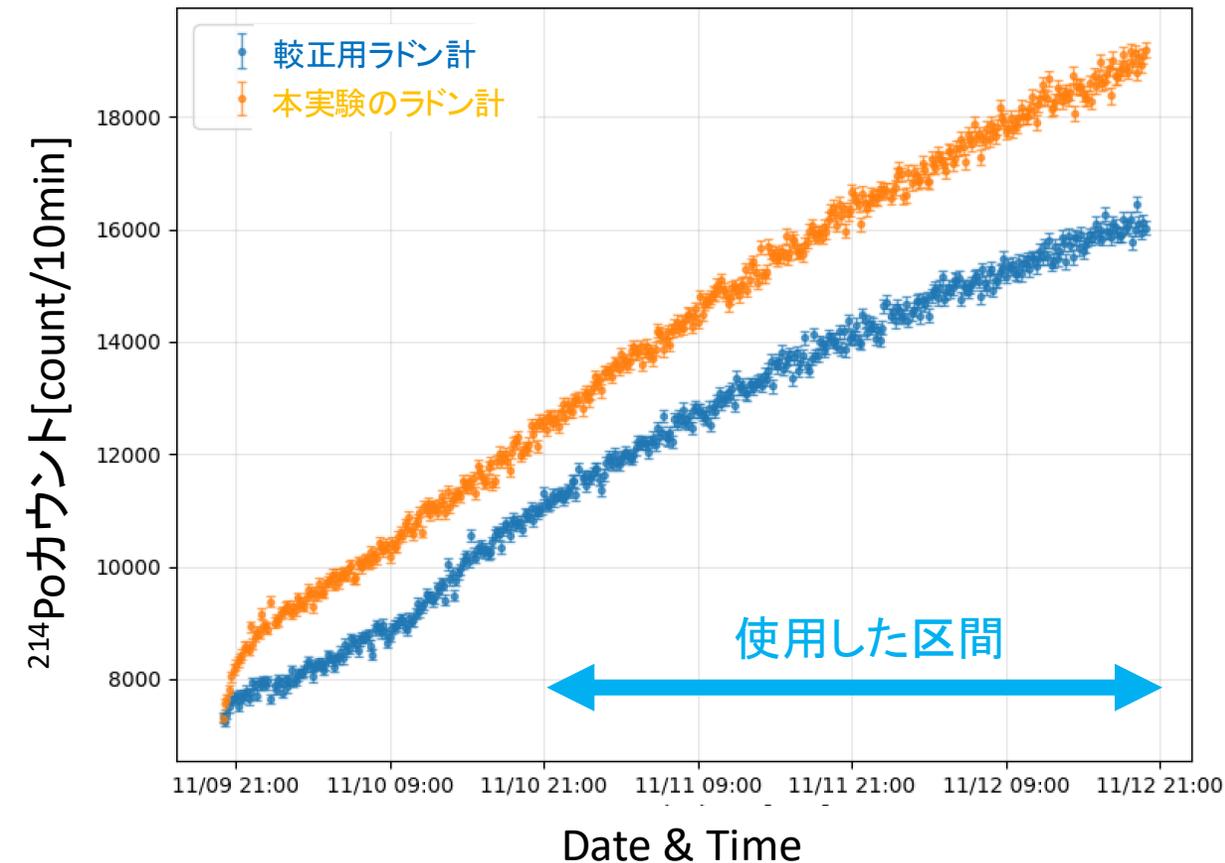
- 較正済みの神戸大からお借りした高感度80Lラドン計を用いて**二次較正**
- 線源は、人形峠で採取された 12.5 gの鉱石
- 測定系を閉じて、ポンプで空気を 1.2 L/minで循環



較正実験の結果

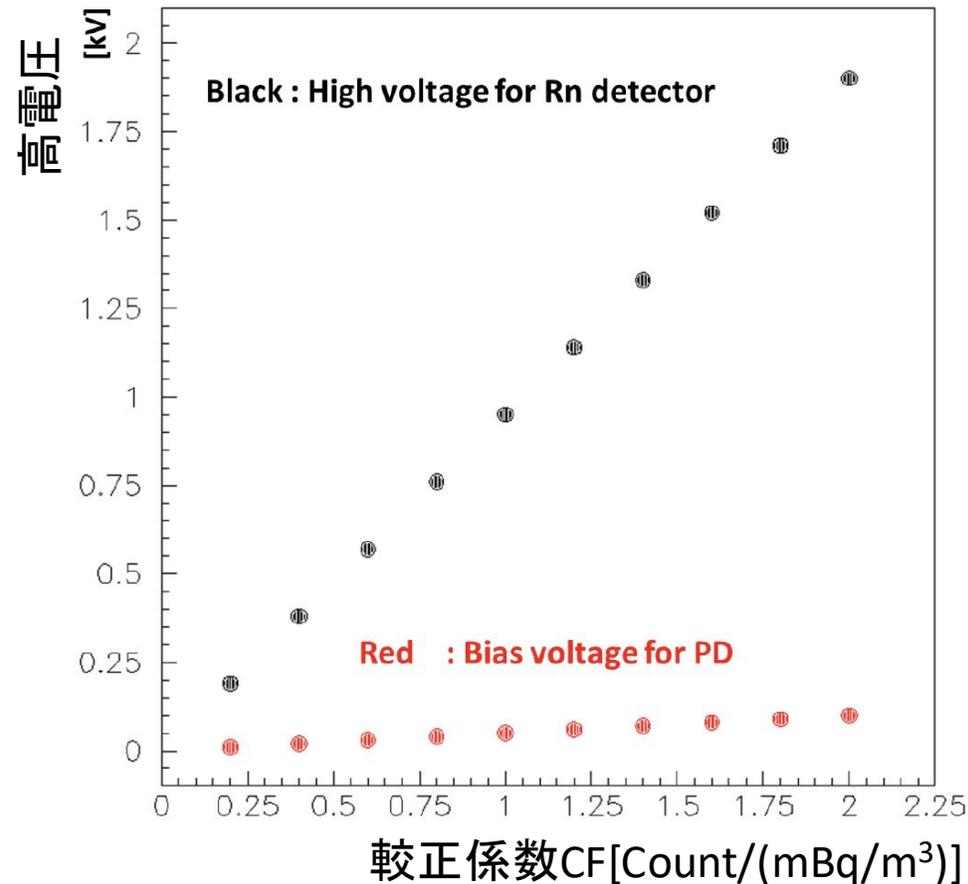
- 較正用ラドン計のRn濃度 VS 本実験のラドン計の ^{214}Po カウントで線形フィッティング
- 傾きaから本実験のラドン計の係数(CF_1)を算出し、補正係数Dを計算

Rn濃度 VS ^{214}Po カウント



較正係数の高電圧依存性

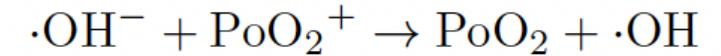
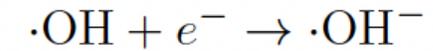
- PDにかける高電圧の値によっても捕集効率が異なる
- 高電圧をかけるほど、電場が強まり捕集効率が高まる→較正係数大



較正係数の絶対湿度依存性

- 水分、水素基、水酸基の濃度を $[H_2O]$, $[H]$, $[OH]$ とする。
- 水分子の分解定数を Q ,水素基と水酸基の結合定数を k とすると、水酸基の時間変化は

$$\frac{d}{dt} [OH] = Q [H_2O] - k [H] \times [OH]$$



- 平衡状態になり、 $[OH]$ の時間変化がなくなると、 $[H] \approx [OH]$ となるので

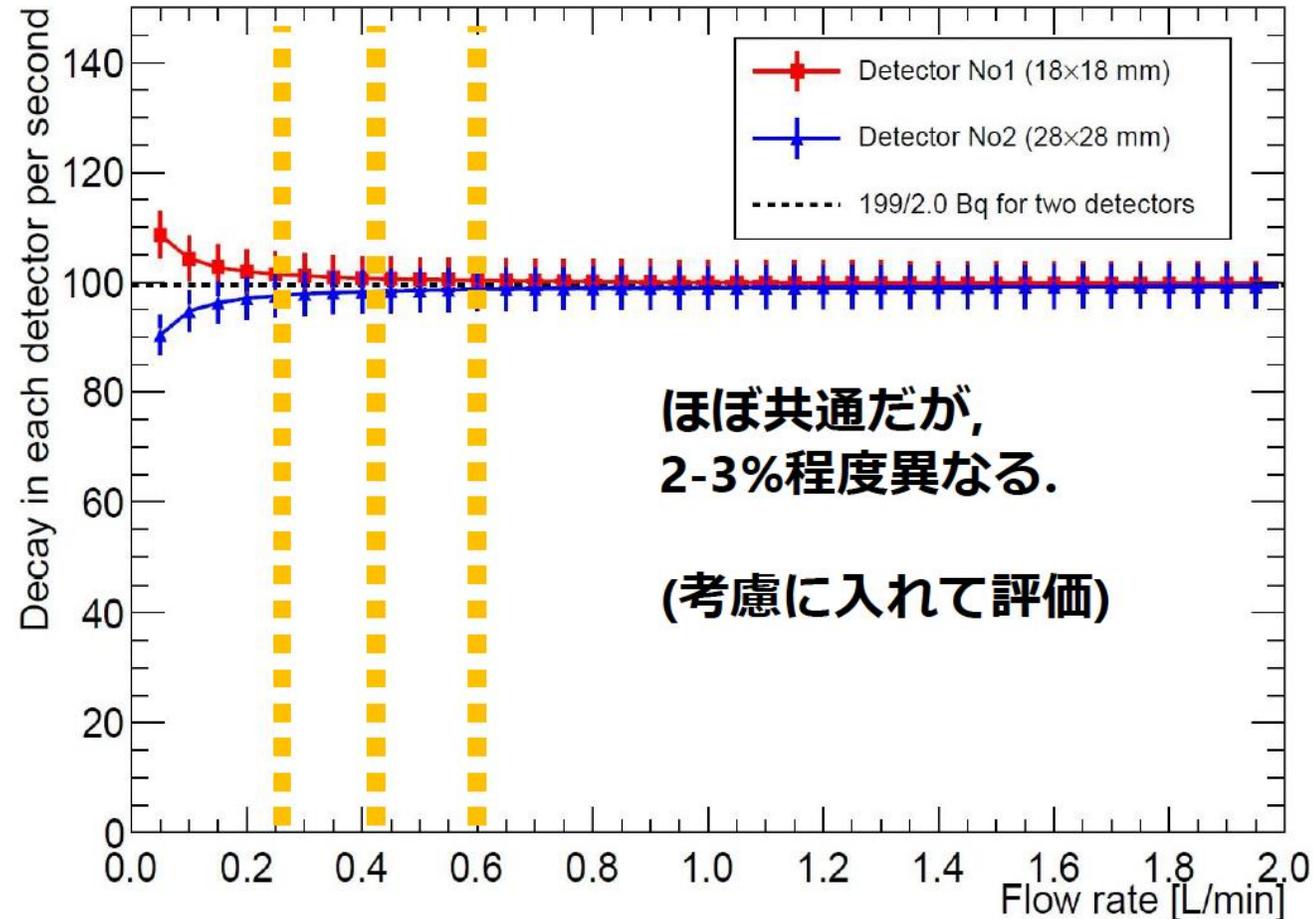
$$0 = Q [H_2O] - k [H] \times [OH]$$

$$[OH] = \sqrt{\frac{Q}{k}} \times [H_2O]$$

- 中和頻度は $[OH]$ に比例し、この頻度は捕集効率に依存するので、 $CF \propto \sqrt{[H_2O]}$

二次較正実験における流速と崩壊数の関係

- 流速が遅いと、各検出器の崩壊数の数が変化する
- 流速が0.8L/min以上だと、崩壊数が一致する



バックグラウンド測定

1. リークテストのため、真空引きを行う(目安となる 1.0×10^{-4} Paを下回る 1.9×10^{-5} Paを達成)
2. G1グレードの純空気を容器に導入
3. 測定系を閉じて、バックグラウンド測定



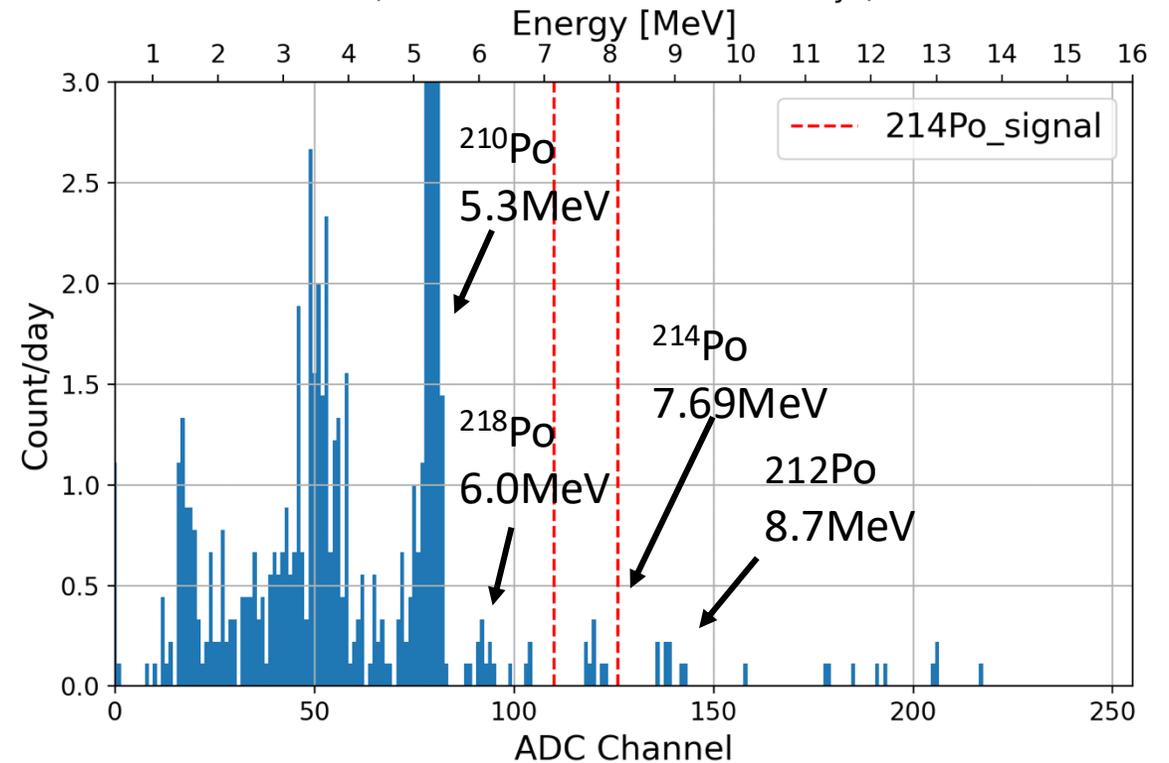
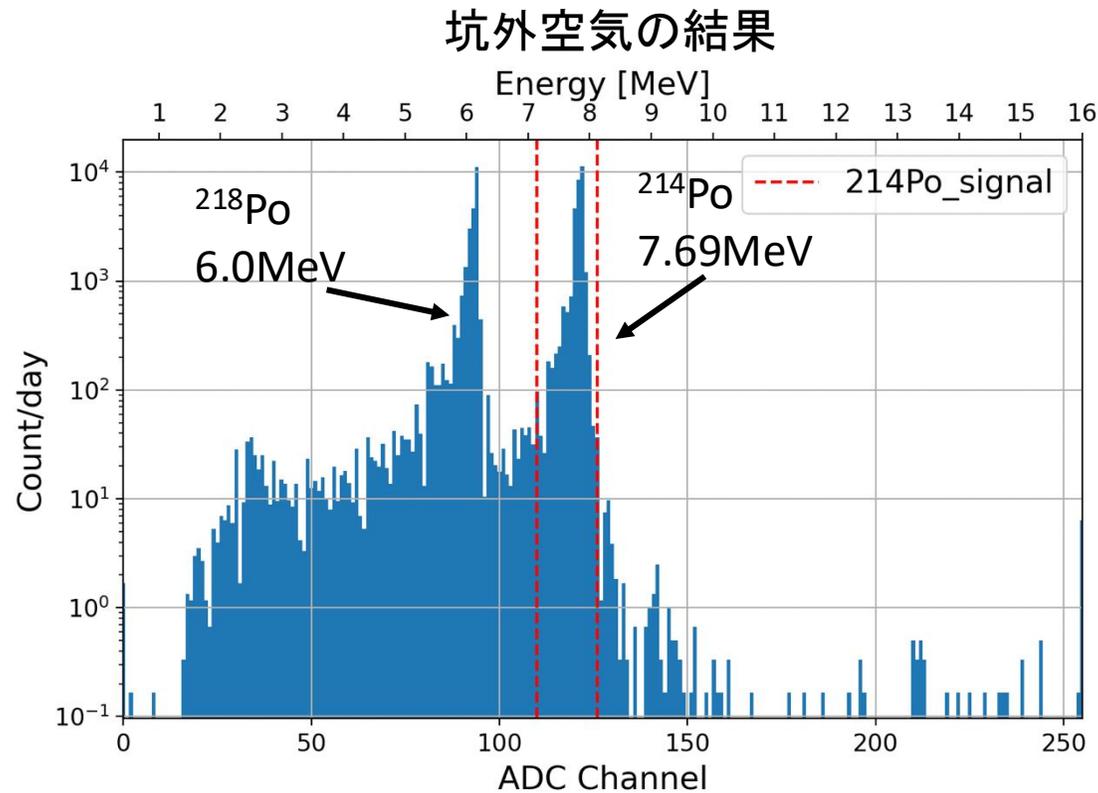
真空引きポンプ

バックグラウンド測定の結果

- 9日間(2025/11/16 – 2025/11/25)バックグラウンド測定
- ^{214}Po のレートは $0.89 \pm 0.31(\text{stat})$ count/day、ラドン濃度は $0.41 \pm 0.15 (\text{stat} + \text{syst}) \text{ mBq/m}^3$

➡ 性能評価(< 10 mBq/m³)に十分!

バックグラウンド測定の結果



1Lラドン計

測定方法: 静電捕集法(高電圧:-120V)

感度: 6 cpm/(kBq/m³)

検出限界(1day): 0.4 Bq/m³

arXiv:1807.11142v3 [physics.ins-det] 3Jun 2019

底がメッシュ
となっている



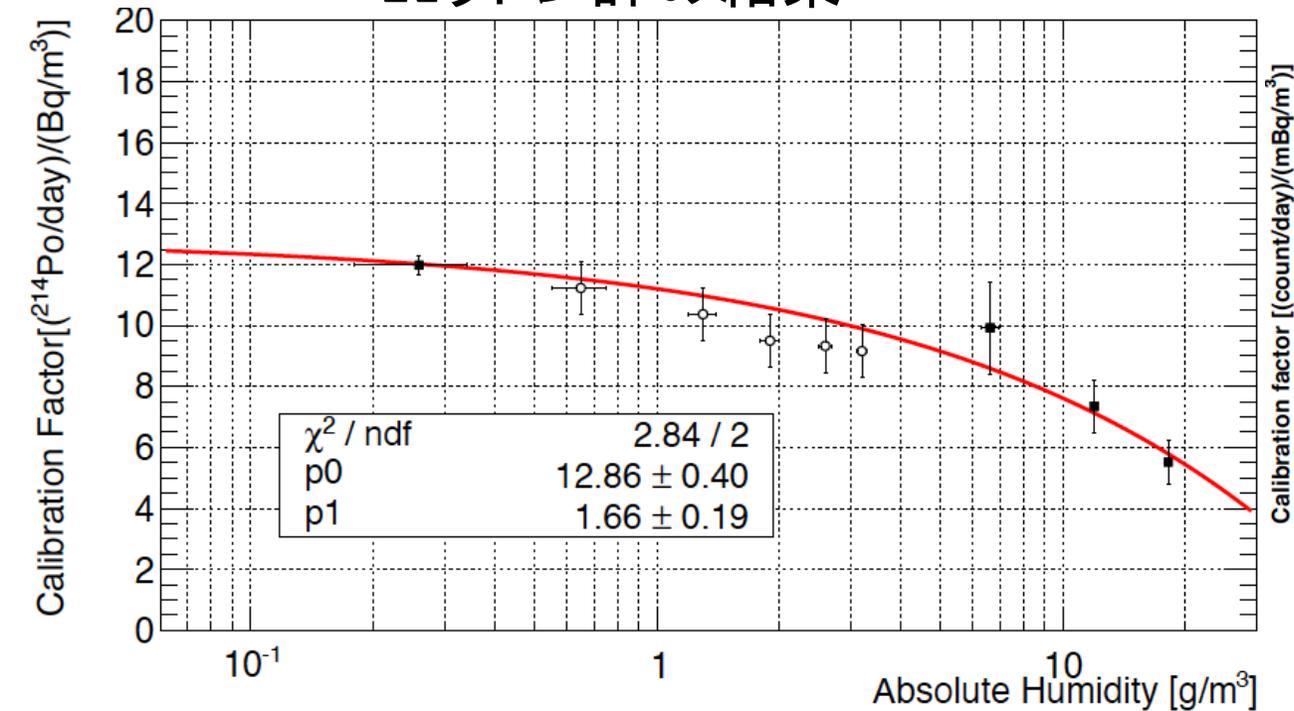
ラドン計の較正係数

較正係数CFは絶対湿度の平方根に比例:

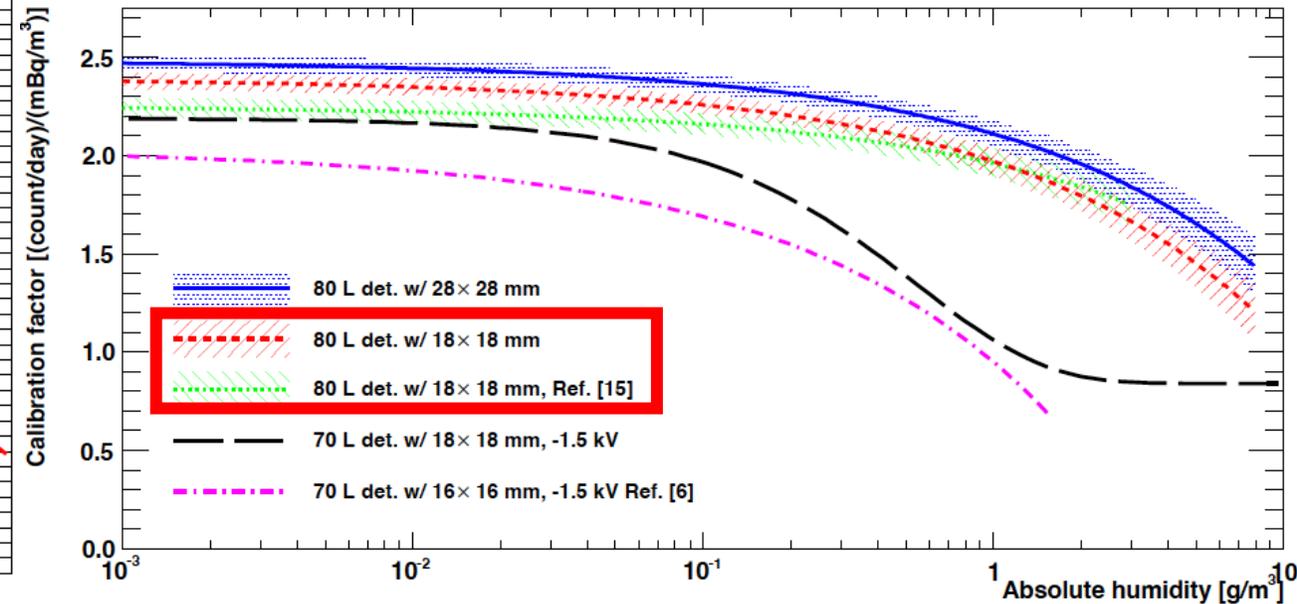
$$\text{Rn Concentration (Bq/m}^3\text{/day)} = \frac{214\text{Po count(/day)}}{\text{CF}}$$

$$\text{CF (Count/day/Bq/m}^3\text{)} = p_0 - p_1 * \sqrt{\text{Absolute Humidity}}$$

1Lラドン計の結果

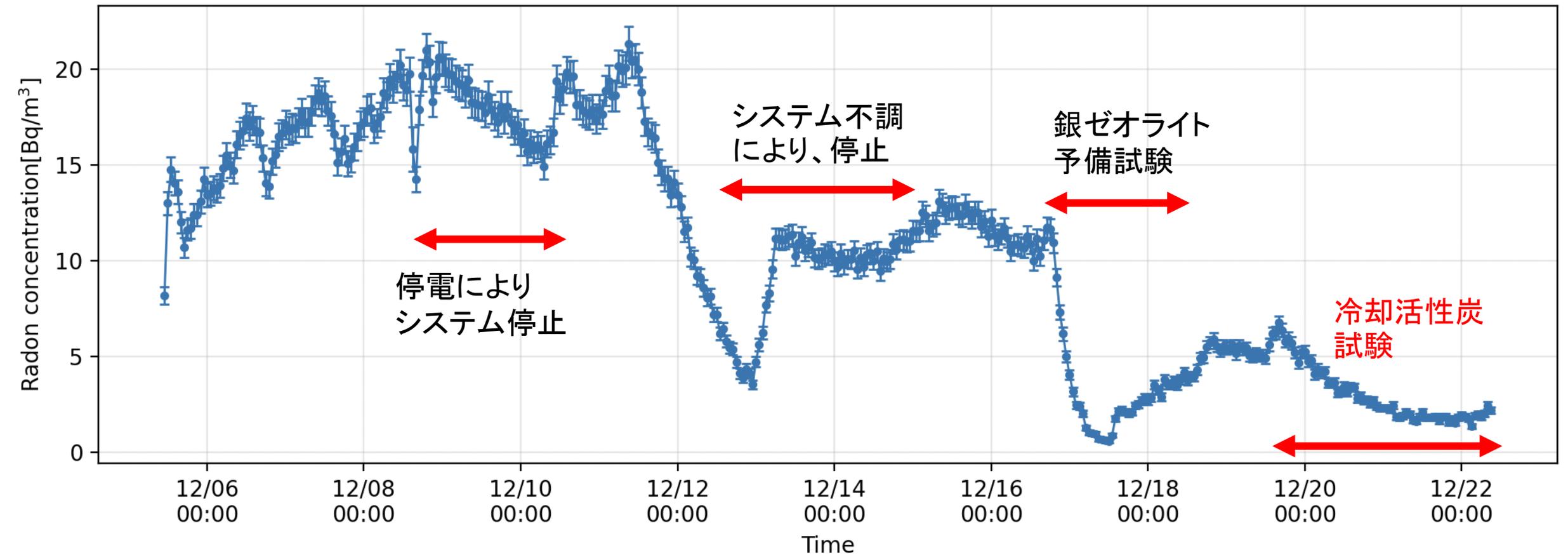


80Lラドン計の結果



活性炭試験での C_{in} の結果

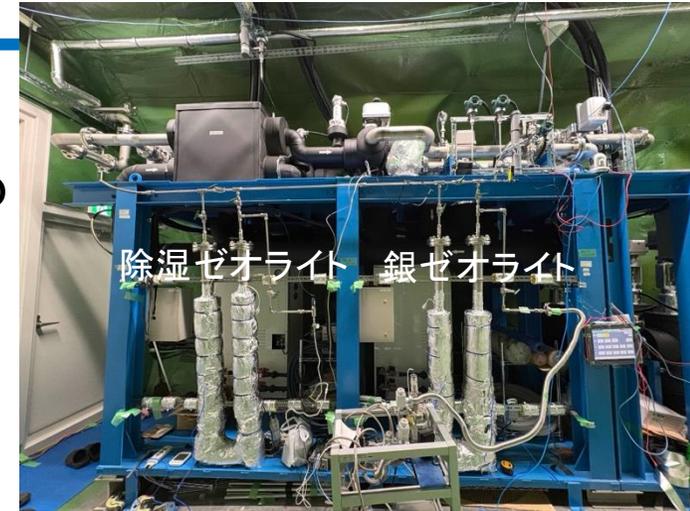
- 坑外空気が流れていた6日間の測定結果は $C_{in} = 10.5 \pm 4.7 \text{ Bq/m}^3$



銀ゼオライト試験のセットアップ

性能試験の準備

1. 除湿ゼオライトカラムに2.6kg、銀ゼオライトカラムに2.7kgを詰める
2. 除湿ゼオライトを真空引き、350度で2時間ベーキング
3. 銀ゼオライトを真空引き、350度で6時間ベーキング

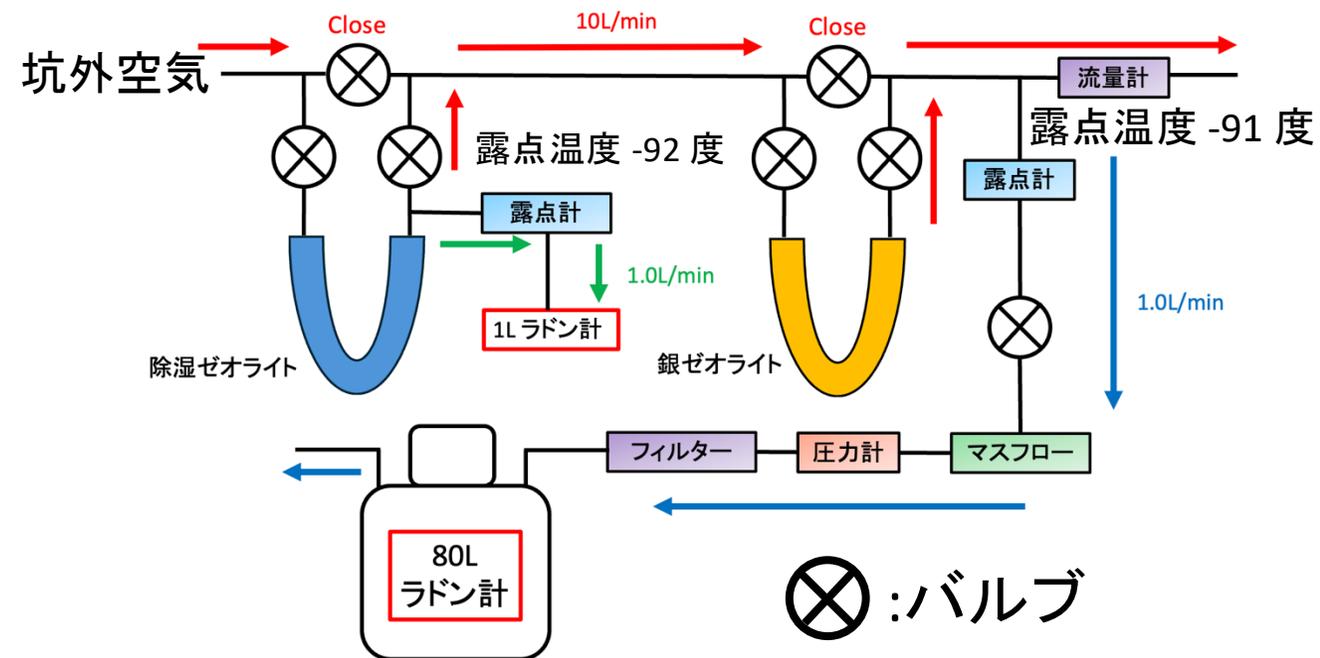


性能試験

- 各カラムに流量 $Q = 10 \text{ L/min} (=0.6 \text{ m}^3/\text{h})$ で流し込む
- 入り口ラドン濃度 R_{in} は別のラドン計で測定
- 80Lラドン計へ 1.0 L/min で流し込み、 R_{out} を測定

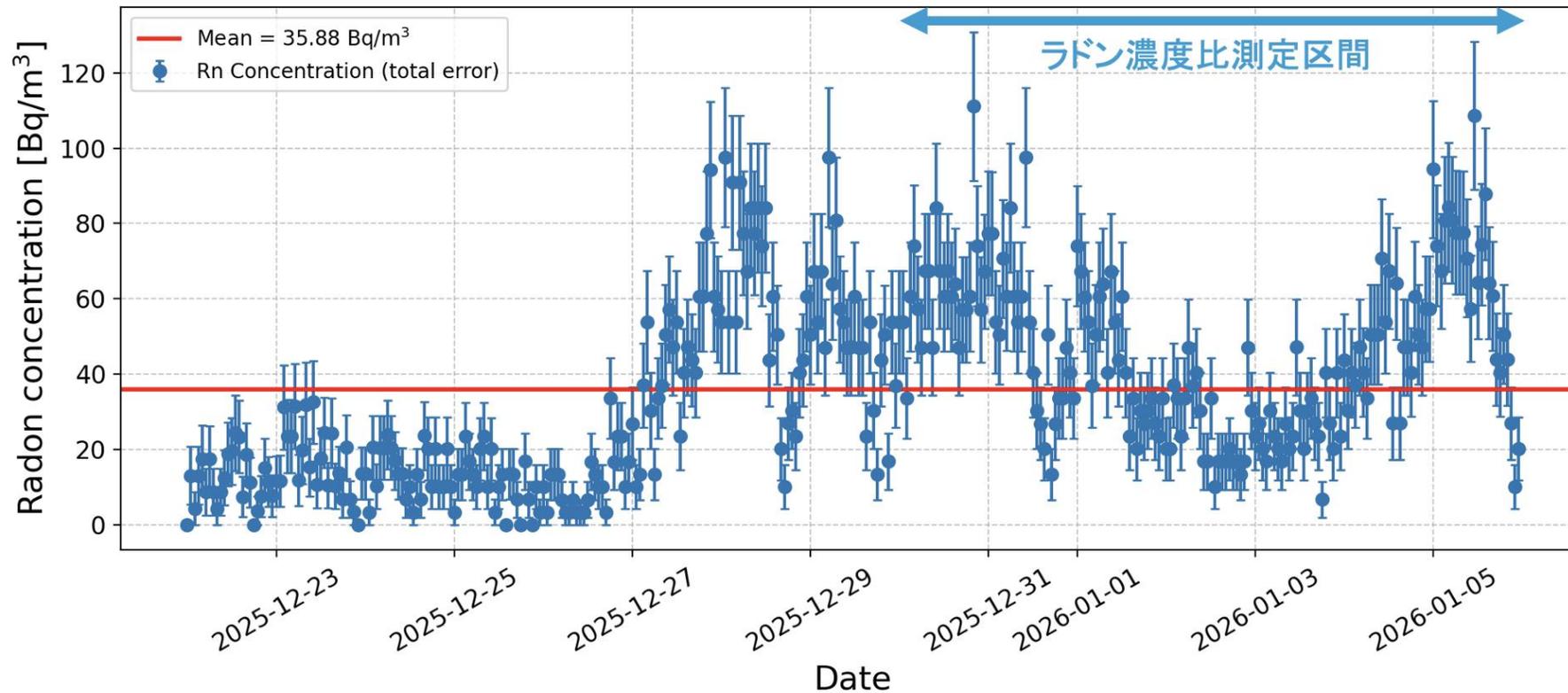
課題点

配管の分岐や大きさの関係で目標の $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ではできなかった。



銀ゼオライト試験での C_{in} の結果

- ラドン濃度比測定区間では $C_{in} = 45.65 \pm 1.84 \text{ Bq/m}^3$ であった



銀ゼオライトの性能

- ラドン除去能力をラドン吸着係数Kで評価
- 冷却活性炭と比べて、銀ゼオライトは高いラドン除去能力を持つ

| 試料 | M[kg] | 保持時間[day] | 吸着係数 [m ³ /kg] |
|-----------|-------|--------------|------------------------------|
| 8Ag-FER-B | 0.02 | 30.12 ± 0.48 | 6506 ± 81 |
| 活性炭繊維 | 4.65 | 1.9 | 6.47 |
| 粒状活性炭 | 26.9 | 10.16 | 4.96 |
| 冷却活性炭 | 18.8 | 16.5 | 379 |

← 今回使用

<https://academic.oup.com/ptep/article/2025/1/013H01/7911846>