

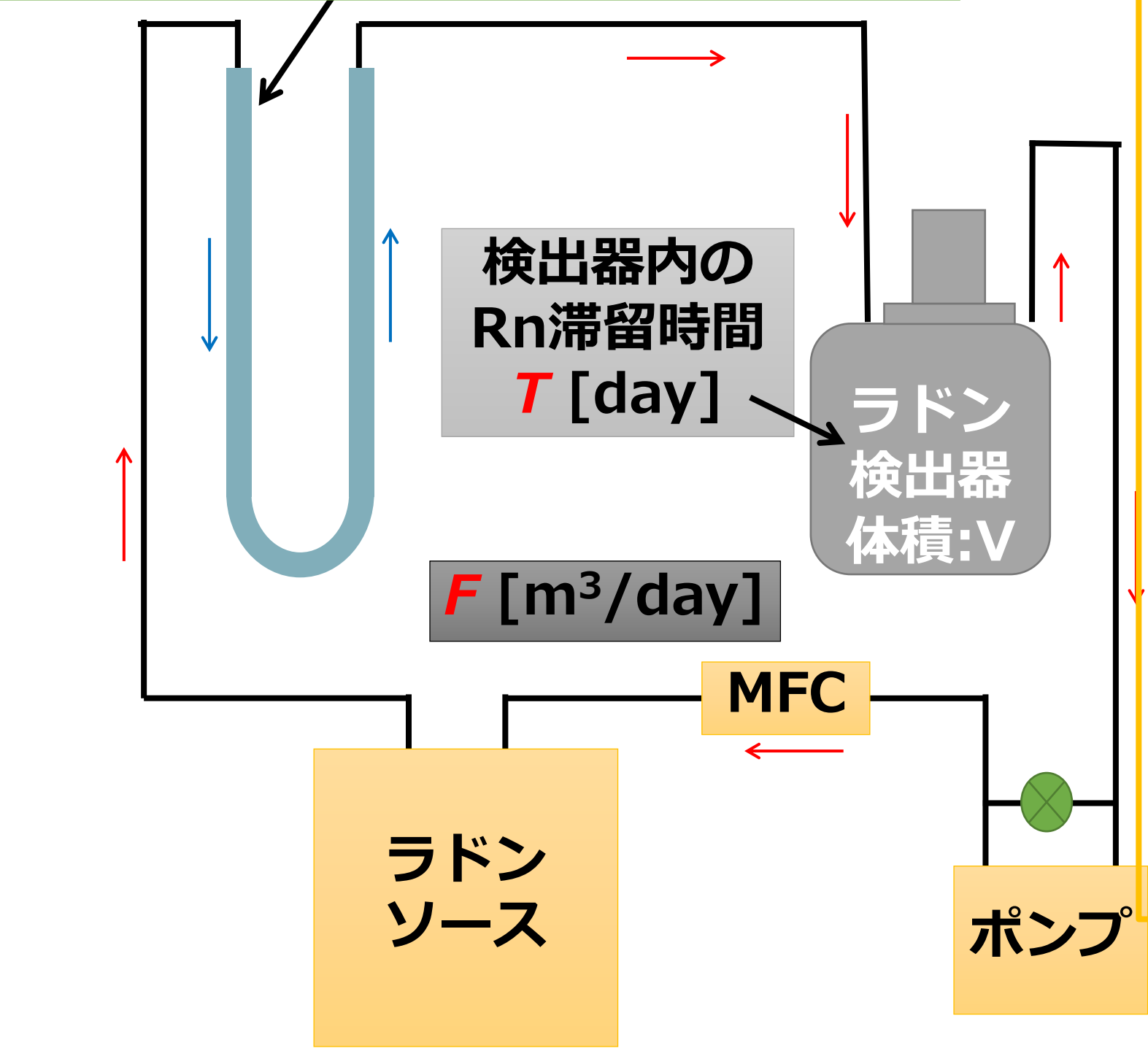
1. 背景・目的

- 放射性貴ガスのラドン(Rn-222)は、地下実験(SK,XENON等)を行う上で重大なBG(バックグラウンド)源になる
- 天体ニュートリノ観測を行うスーパーカミオカンデ(SK)では以下の性能の空気中ラドン除去装置を使っている。
 - ラドン濃度: $< 1 \text{ mBq/m}^3$, 流量: $\sim 18 \text{ Nm}^3/\text{hour}$
 - (参照) NIMA 501 (2003) 418-462
- ダークマターの直接探索などで用いられる貴ガス(Ar,Xe)においてもラドンによるBGを減らしていきたい。
 - XENON実験では、液体キセノンのラドン濃度: $< 4 \text{ } \mu\text{Bq/kg}$
 - (参照) E. Aprile et al., Eur. Phys. J. C

3.ラドン吸着係数(K)の定義と評価

$$\text{Rn吸着係数: } K = \frac{RT \times F}{m}$$

カラムのラドン保持時間: RT [day]
ラドン吸着材の質量: m [kg]



・カラム内のRn量とRn検出器内のRn量の比はRnの滞留時間の比と等しいと仮定

・Rn検出器内のRnの割合 = Rn濃度比 (Rn_{ratio})

$$Rn_{ratio} = \frac{T}{RT+T} = \frac{V}{F \cdot RT + V} = \frac{V}{m \cdot K + V}$$

・一方で Rn_{ratio} は以下のように表せる。

$$Rn_{ratio} = \frac{\text{カラムを通したRn濃度}}{\text{カラムを通していないRn濃度}}$$

・測定された Rn_{ratio} から K を求める。

2.本研究の概要

- これまで、SKでのラドン除去では、**活性炭**が使われてきた
- 先行研究より、**銀ゼオライト8Ag-FER-B**が特に高いラドン吸着性能を有することが分かった
 - イオン交換によって銀イオンが導入されたゼオライト
 - 常温で**活性炭**の約1000倍
 - (参照) T. Sone et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2025(1), 013H01.
- ただし貴ガス中でのラドン吸着性能は未測定
- 本研究の動機:**8Ag-FER-B**による貴ガス(Ar,Xe)内のラドン除去性能の評価を初めて行う

4.活性炭と銀ゼオライト

・活性炭: **ファンデルワールス力**と**原子の分極性**によって**不純物を吸着**(物理吸着)。分子サイズが似ている場合は、**同時に吸着される傾向**がある。[1]

- XeとRnの分子サイズは似ているため、同時に吸着される

・銀ゼオライト: 金属銀もしくは銀イオンによる**化学吸着**が指摘されている。[7]

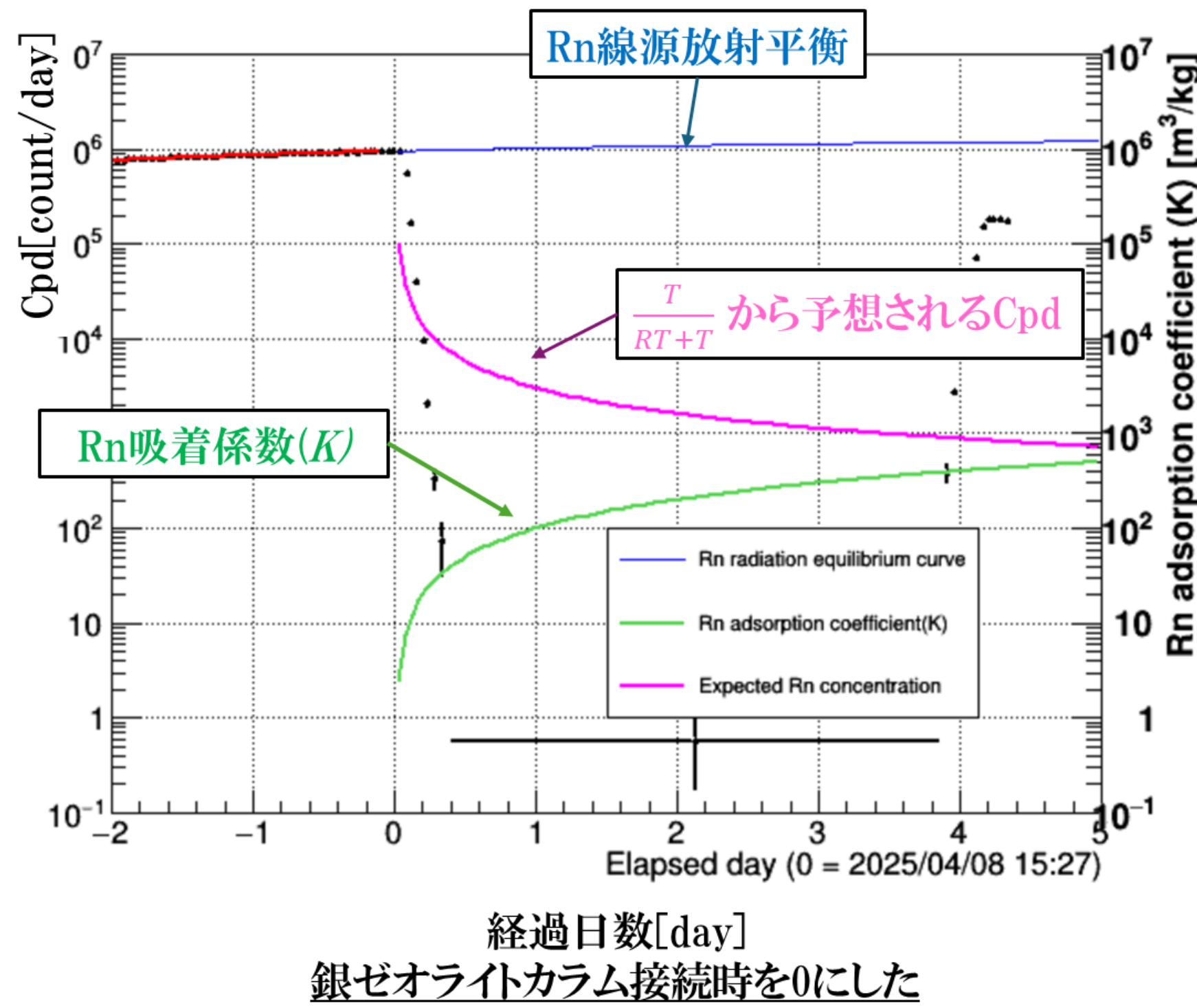
吸着材	気体	温度[°C]	m [kg]	RT [day]	K [m³/kg]
Ag-ZSM-5 [3]	Air	室温	8.85×10^{-3}	10.69	3500
Ag-ETS-10 [3]	Air	室温	16.3×10^{-3}	19.16	3400
活性炭繊維[4]	Air	室温	4.65	1.9	6.47
粒状活性炭 [4]	Air	室温	26.9	10.16	4.96
冷却活性炭(SK)[5,6]	Air	-60	18.8	16.5	379 (*)
8Ag-FER-B [7]	Air	室温	20×10^{-3}	30.12	6506
冷却活性炭繊維A-15[1]	Air	-105	4.75×10^{-3}	-	64 (*)
冷却活性炭繊維A-15[1]	Ar	-105	4.75×10^{-3}	-	82 (*)
冷却活性炭繊維A-25[1]	Xe	-95	10.5×10^{-3}	-	3 (*)

(*)は論文から見積もった

- [1] Y. Nakano et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2020(11), 113H01.
[2] J. Phys. Chem. C 2014, 118, 24811-25290.
[3] Sci Rep 13, 6811 (2023).
[4] Kobe-u, Takagi Mthesis (2024).
[5] Y.Takeuchi et al./ Physics Letter B 452 (1999) 418-424
[6] Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 867 (2017) 108-114
[7] T. Sone et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2025(1), 013H01.

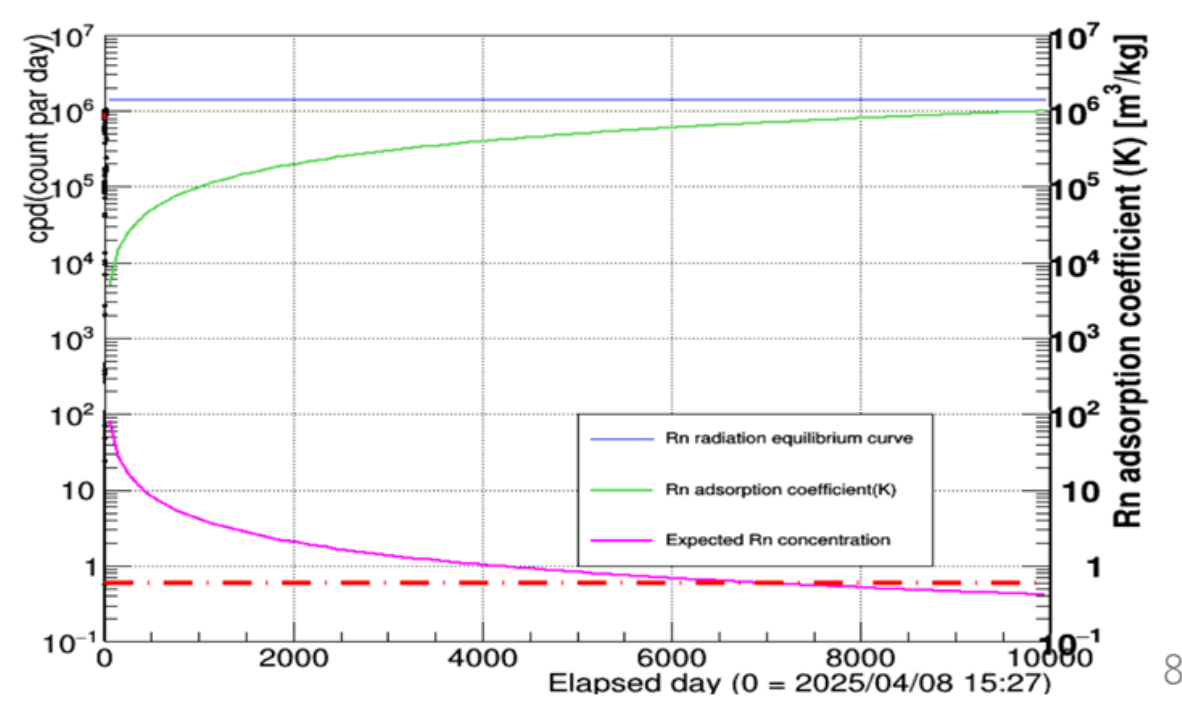
5. Rn吸着試験

Arガス内のRn吸着試験

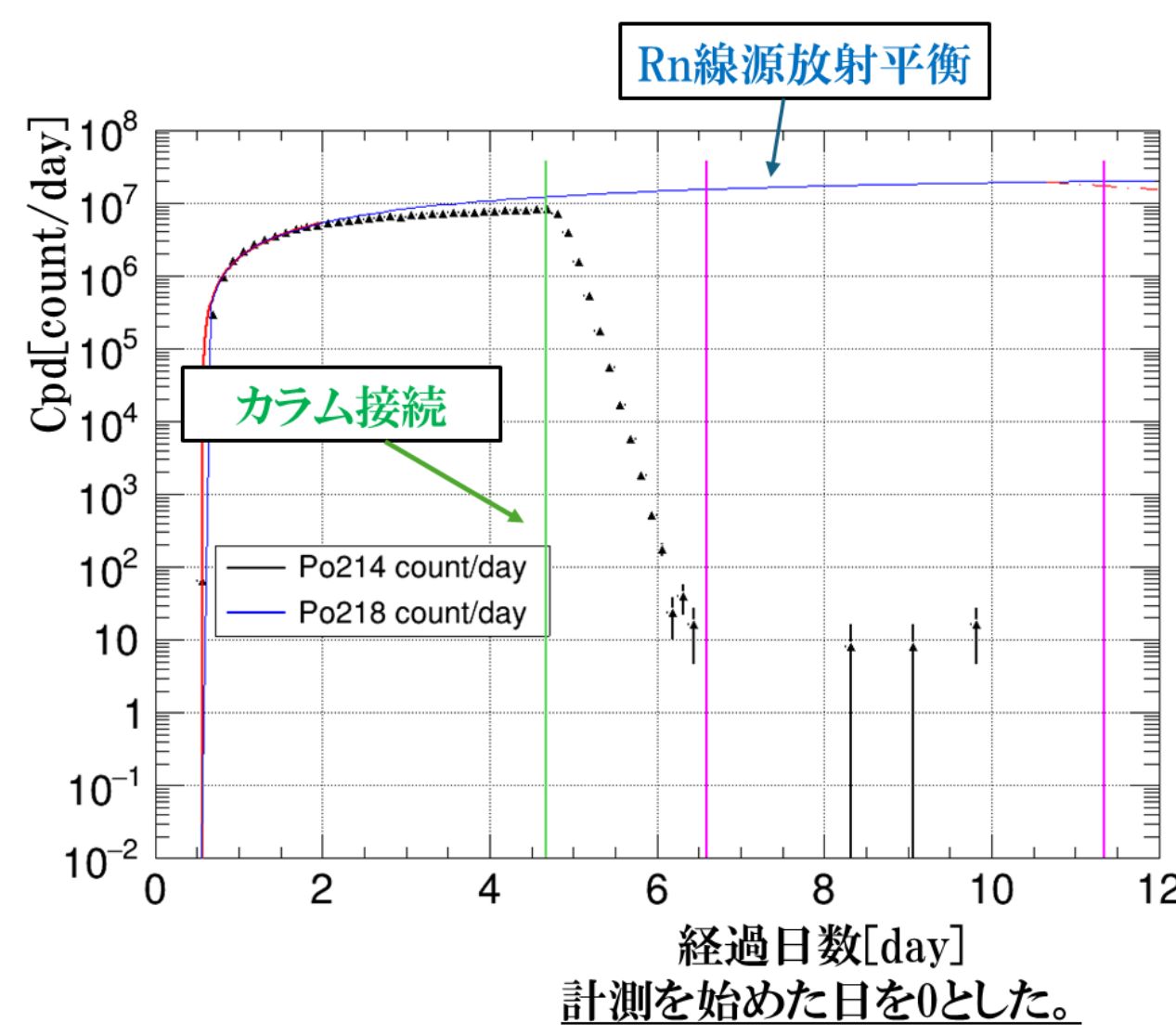


8AgFERB, 20g, 1.4SLM, -90°C, -300V

➢Rn吸着能力が高すぎてRTの測定(Rn濃度の測定値と予想されるRn濃度が一致するまでに5000日以上がかかりそう
→中断
➢BGかもしれないがカラム経由ラドン濃度が0.6と仮定して $K=(5 \pm 4) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{kg}$ という結果が得られた。
➢ Rn_{ratio} をより小さな値まで正確に計算できるように線源をピッチブレンドに変更
➢ラドン検出器の保持時間Tを増やすために6LRn検出器を80LRn検出器に変更



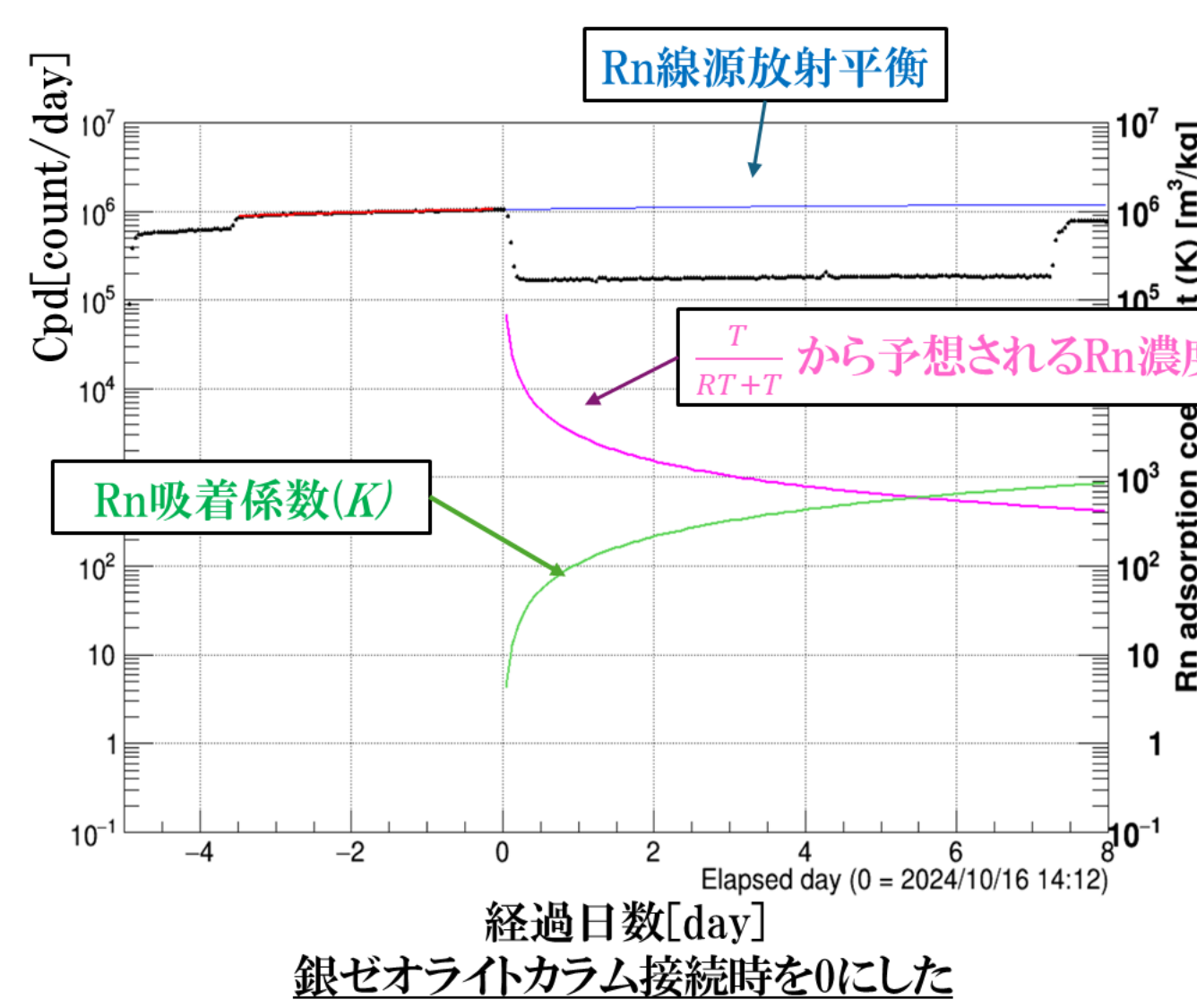
Arガス内のRn吸着試験(変更後)



8AgFERB, 10g, 1.0SLM, -90°C, -2000V

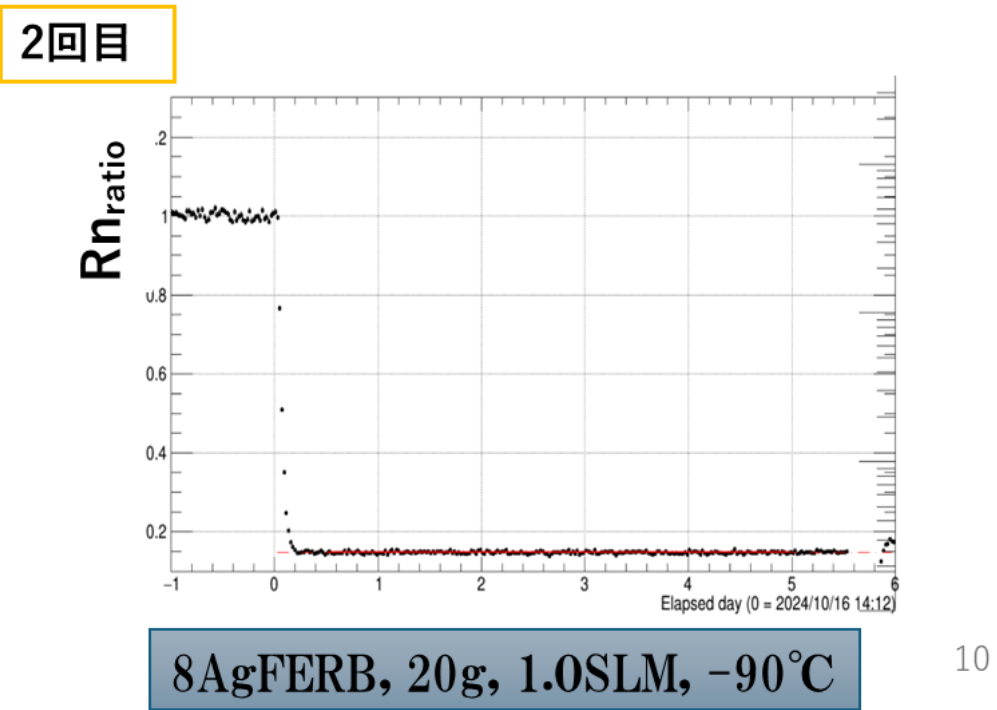
➢変更前の条件を信頼すると、80LRn検出器と線源を変更することで、カラム経由ラドンのcpdは1000を超える予想
➢結果は、1.0count/day以下だった
➢測定期間4.7日、4count
➢この4countはBGの可能性もある
➢今回はすべてのデータが信号だと仮定し、上限値を見積もることにした。
➢Cpd < 1.0count/dayとして、 Rn_{ratio} を求め、Kの値を見積もると、 $K > 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{kg}$

Xeガス内のRn吸着試験



8AgFERB, 20g, 1.5SLM, -90°C, -500V

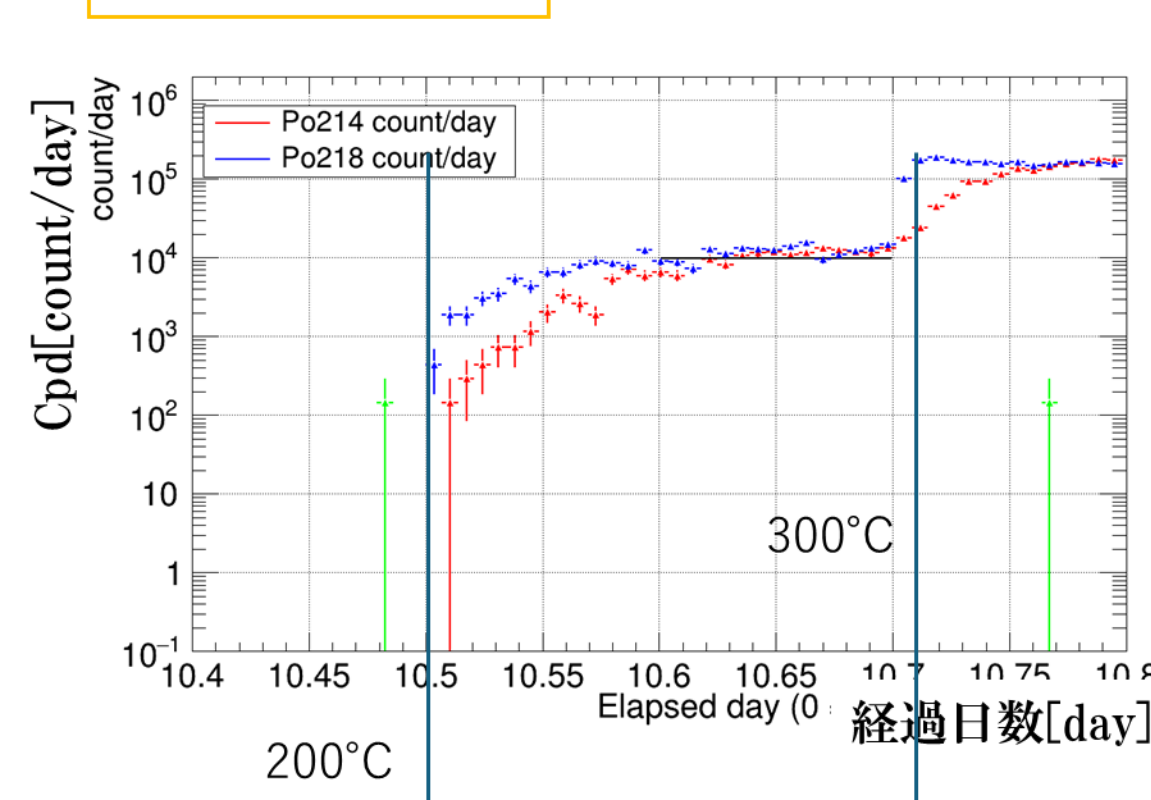
➢Rn吸着能力があまりに弱くRT=0.014dayという結果が得られた。
➢この結果から、 $K=1.6 \text{ m}^3/\text{kg}$ という結果が得られた。
➢再現性を確かめるために、2度目の測定を行うも、 $K=1.7 \text{ m}^3/\text{kg}$



BakingによるRn吸着力の測定

- Rn吸着測定後にカラムを200°C,300°Cで温める(Baking)。
 - 活性炭の場合は吸着されたラドンがほぼ100%脱離する
 - 銀ゼオライトでは100%脱離しなかった

Bakingの例



結果

	Air	Ar	Xe
200°C	10%	0.9%	51%
300°C	-	14%	66%

Airの値は神戸大学での先行研究[7]の値を参照した。

[7] T. Sone et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2025(1), 013H01.

6.まとめと展望

吸着材	気体	温度[°C]	m [kg]	RT [day]	K [m³/kg]
8Ag-FER-B [7]	Air	室温	20×10^{-3}	30.12	6506
冷却活性炭繊維A-15[1]	Air	-105	4.75×10^{-3}	-	64 (*)
冷却活性炭繊維A-15[1]	Ar	-105	4.75×10^{-3}	-	82 (*)
冷却活性炭繊維A-25[1]	Xe	-95	10.5×10^{-3}	-	3 (*)
8Ag-FER-B	Ar	室温	10×10^{-3}	$> 1.3 \times 10^6$	$> 1.8 \times 10^8$
8Ag-FER-B	Xe	室温	20×10^{-3}	2.4×10^{-2}	1.7

結論

- Ar:Airよりも $> 2.7 \times 10^4$ 倍以上の高いRn吸着係数(K)を持つ。
- Xe:Rn吸着係数(K)は小さいが常温でも冷却活性炭と同等の性能を持つ。
- 冷却活性炭ではAr=Air>>Xeだったが、銀ゼオライトにおいてはAr>>Air>>Xeとなることが分かった。
- BakingでもAr>>Air>>Xeとなることが分かった。

展望

- Ar中ラドンの吸着性能の詳細試験
- 別の種類の銀ゼオライトや、冷却銀ゼオライトでの吸着試験