

ハイパーカミオカンデに向けた銀ゼオライトを用いたラドン除去装置の開発と自動化



地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化
The History of the Universe and the Evolution of Matter

極稀現象で探る宇宙物質の起源と進化
Origin and Evolution of Cosmic Matter Probed by Extremely Rare Events



Supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 19H05807, 24H02243, and 24K21549.

神戸大学大学院 粒子物理学研究室 M1 番原大登
担当教員 竹内康雄

スーパーカミオカンデ(SK),ハイパーカミオカンデ(HK)

SK: 世界最大の地下に設置された水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置
→ニュートリノ振動の発見(2015年ノーベル物理学賞)

HK: 2028年観測開始予定 総体積はSKの約5倍
→新たな発見の期待



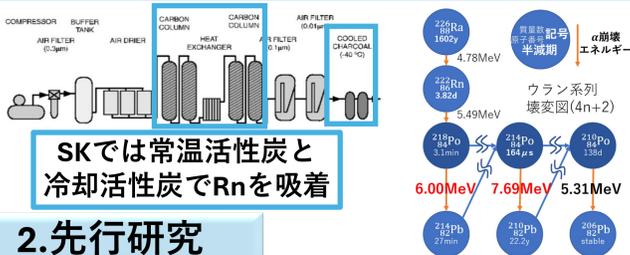
SK内部[1]



HK[2]

1. 研究概要

地下実験の空気層にはラドン-222(^{222}Rn)が存在
 > 水中に溶け出しバックグラウンド(BG)となる
 > 空気中のRnを吸着剤で吸着し、Rn除去空気を通してRn除去
 > HKでは $50\text{Bq/m}^3 \rightarrow 1\text{mBq/m}^3$ 以下のRn除去空気の供給が必要
 つまり、 ^{222}Rn 濃度を1/50000にする必要あり
 HKに向けてRn除去システムの増強が望まれる
 しかし、既存のシステム(SK: 流量 300L/min で 8m^3 の活性炭を用いたRn除去システム[3])をHK用に作ると巨大すぎる&ハイコスト



SKでは常温活性炭と冷却活性炭でRnを吸着



左図のように、 ^{222}Rn は α 崩壊し、その子孫核種が β 崩壊する。これが太陽ニュートリノ観測でBGとなる[4]。

2. 先行研究

銀ゼオライトが空気中で高いRn吸着があると報告[5]
 Rn吸着の指標としてRn吸着係数(K)を使う
 (粒状活性炭 $K=4.96 [\text{m}^3/\text{kg}]$ 冷却活性炭 $K=379 [\text{m}^3/\text{kg}]$)

$$K = \frac{F \times RT}{m} [\text{m}^3/\text{kg}]$$

F: 空気流量
 RT: 保持時間
 m: 質量



試料	RT[day]	K [m ³ /kg]
3Ag-FER (-70°C)	2.65 ± 0.02	573 ± 4
3Ag-FER (-90°C)	11.97 ± 0.06	2563 ± 14
8Ag-FER-B (-90°C)	30.12 ± 0.37	6506 ± 81
8Ag-FER-D (-90°C)	21.38 ± 0.16	4618 ± 35

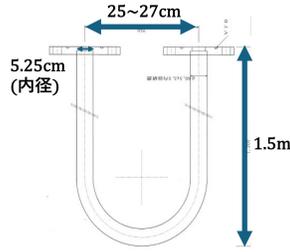
銀ゼオライトは活性炭より大きなRn吸着がある▶特に8Ag-FER-B

目的 HKに向け、銀ゼオライト(8Ag-FER-B)を使ったよりコンパクトで精度の高いRn除去システムを構築する!

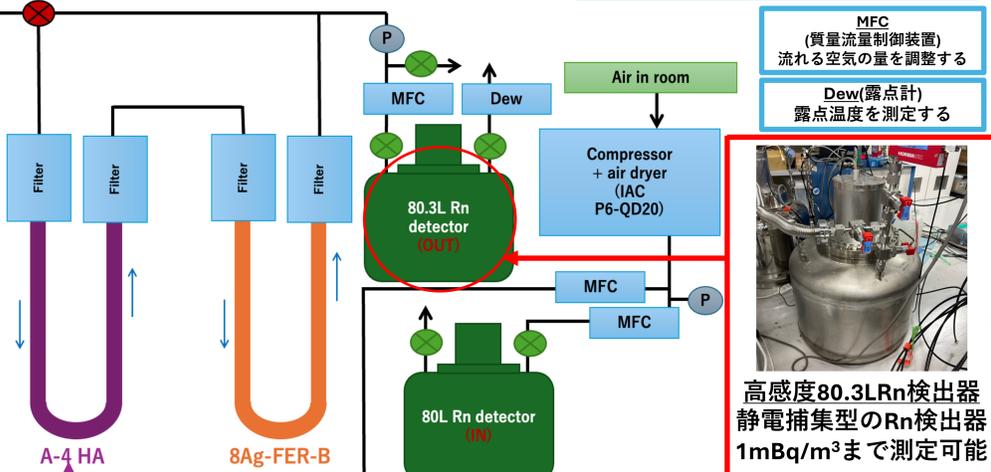
3. 試験方法

本番を想定し大型カラムにA-4 HA(3756g),8Ag-FER-B(4000g)を充填
 ←[本来、ここに300L/minの空気を流す]。実験室の空気を取り込み流量(今回は300L/min出せないため15L/min)を調整する。そしてカラムの前方と後方でRnの計測(^{214}Po のカウント数の比較)を行う[Rn除去試験]。

大型カラムの写真と大きさ



最終的に実績のあるSKのRn除去装置の処理能力を3倍に増強する計画(本番)
 流量: 300L/min
 銀ゼオライト: 4000g
 > この条件で ^{222}Rn 濃度が1/50000となる計算
 本実験はその予備試験

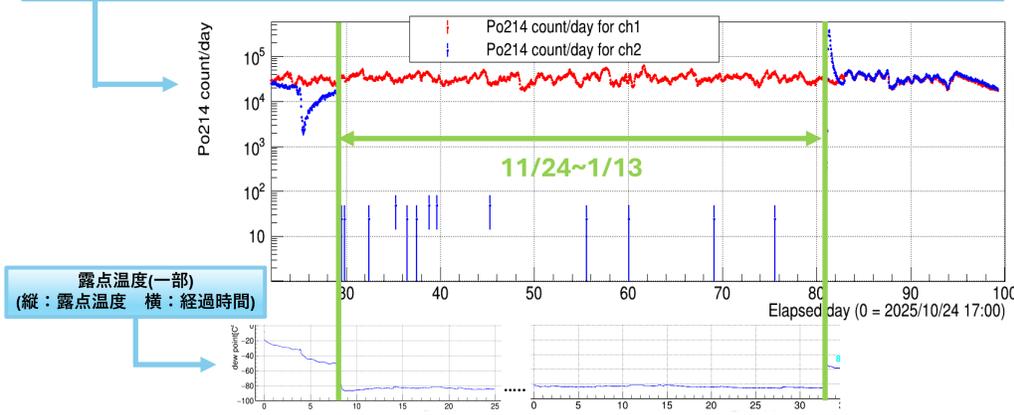


除湿用ゼオライト A-4 HA 高い除湿効果があることが報告されている。



4. 試験結果

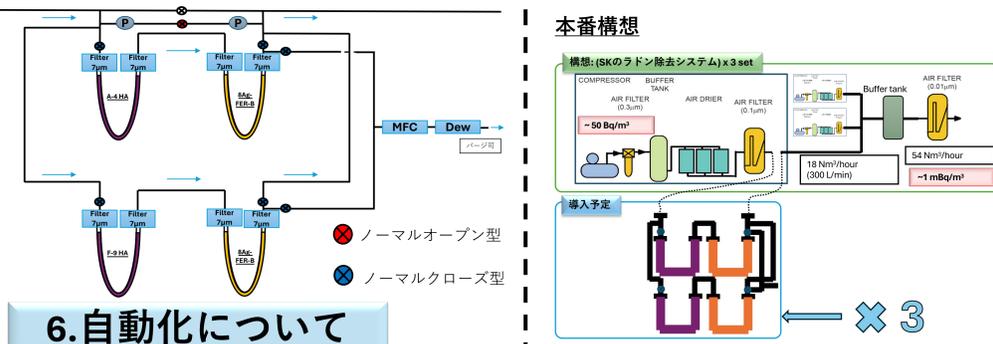
Rn除去試験の結果 (縦: Poのカウント数 横: 経過時間)
 赤: カラム前方(銀ゼオライト通っていない) 青: カラム後方(銀ゼオライト通っている)



銀ゼオライトを通過していない空気は ^{222}Rn の子孫核種 ^{214}Po のカウント数が30000~40000cpdある一方で、銀ゼオライトを通過させた空気は $0.32 \pm 0.08\text{cpd}$ となった。これはRn検出器のBG(G1純空気を充填させ測定) $3.58 \pm 0.29\text{cpd}$ より少ない値であった。この状態が50日間続いた時点(2026/1/13)で測定を中断してベーキングを行った。ベーキング直後に吸着されていたラドンの放出が確認でき、期待通り銀ゼオライトでラドンを保持し続けていたことが確認できた。この $0.32 \pm 0.08\text{cpd}$ という値は、校正計数 $2.0 (\text{cpd})/(\text{mBq/m}^3)$ [6]を使うと $0.16 \pm 0.04 \text{mBq/m}^3$ に相当し $< 1\text{mBq/m}^3$ を達成している。その他、本試験において露点温度は -85°C 程度で安定していた。

5. まとめ、展望

- 銀ゼオライト(8Ag-FER-B)を4000g使用することで、流量 15L/min の条件下で、50日の間 ^{222}Rn の子孫核種である ^{214}Po のカウント数をRn検出器のBG以下で維持でき、そして $0.16 \pm 0.04 \text{mBq/m}^3$ を達成できた。
- 本システムを本番へ向けて下図のように改変する。
- 改変後、本システムを神岡(SK)へ持っていき、空気中に ^{214}Po が50000cpd以上ある条件下で300L/minの空気を流しRn除去試験を行う。



6. 自動化について

キーエンス社のシーケンサーKV-X500、その他付属ユニット(温度調節ユニット、アナログ信号入力ユニット等)を使い本システムの自動化を図っている。



シーケンサーを大型カラムを設置するアルミフレームにはめる。自動化のための電磁弁、空圧バルブ、SSR(ソリッドステートリレー)等を接続。ラダープログラムを書きシーケンサーへ転送することで自動制御が可能。

参考文献

[1]スーパーカミオカンデ 公式ホームページ <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
 [2]ハイパーカミオカンデ 公式ホームページ <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>
 [3]NIMA 501 (2003) 418-462
 [4]日本アイソトープ協会.アイトープ手帳.11版.丸善出版.2017.196(p-11)ウラン系列)
 [5] T Sone, Y Takeuchi, M Matsuura, Y Nakano, H Ogawa, H Sekiya, T Wakihara, S Hirano, A Taniguchi. Study of Radon Removal Performance of Silver-Ion Exchanged Zeolite from Air for Underground Experiments. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2025, Issue 1, January 2025, 013H01.
 [6] K. Okamoto, Y. Nakano, G. Pronost, H. Sekiya, Y. Takeuchi, and M. Nakahata. Improvement of radon detector performance by using a large-sized PIN-photodiode. <https://arxiv.org/pdf/2112.06614>