

D01:極低放射能技術の展開

神戸大学 理学研究科 竹内康雄



D01の現在のメンバー

- (代表) 竹内康雄(神戸大)
- (分担者) 坂口綾(筑波大)、中野佑樹(富山大)、伊藤博士(東京理科大)
- (協力者・研究員) 南野彰宏(横国大)、高久雄一(筑波大)、小川洋(日本大)、脇原徹(東京大学)、伊與木健太(東京大学)、松倉実(東京大学)、谷口明男(シナネンゼオミック)、平野茂(東ソー)

研究の目的

- 地下実験グループで蓄積した極低放射能技術のノウハウを継承し、**他分野研究者の知識、産業界の技術**を結集し、共通性の高い極低放射能技術開発に取り組む
 - **高感度スクリーニング装置**の運用・改善・展開を行う
 - 次世代の極稀事象観測実験に向けて、**実験環境の改善・環境把握**に取り組む
 - 他分野技術を取り込み、**研究対象を広げる**
 - 銀ゼオライトによるラドン除去
 - 新たな化学分離法を用いた極微量放射能の定量分析
- これらを**領域内外の実験グループに提供**し、極稀事象観測研究を加速する

D01での研究トピック概要

新学術「地下素核」・
「地下宇宙」の成果

高感度ラドン分析装置
質量分析器

高感度中性子測定装置
表面α線イメージ分析装置

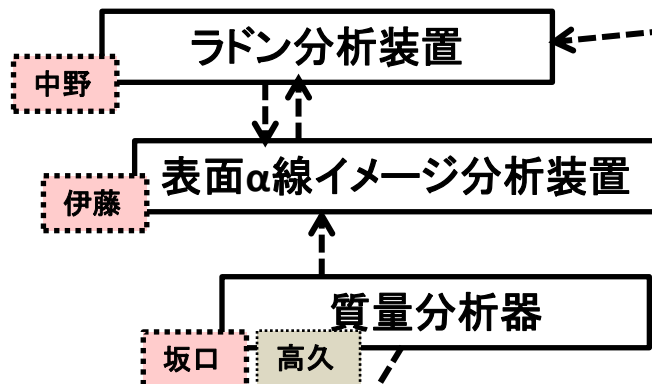
全体の総括：
竹内(代表者)

主担当の分担者

研究員・協力者

蓄積した要素技術・ノウハウを継承・応用・展開する

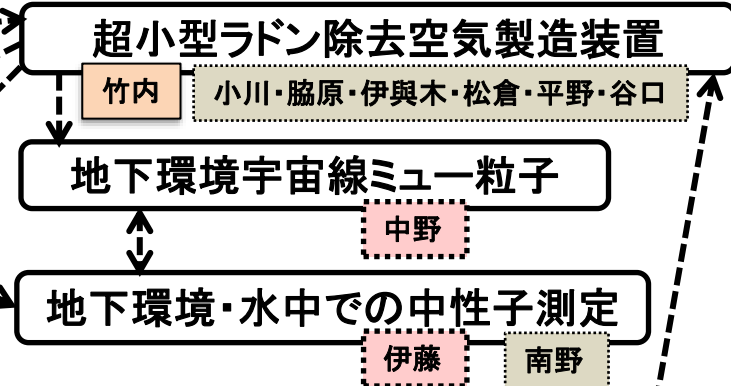
(1)高感度スクリーニング装置の展開



地球科学研究
への応用

坂口

(2)次世代の極稀事象観測環境の開発



医療分野との共同
研究・応用

領域内外の実験グループで活用
し、極稀事象観測を加速する

■ 領域内(外)の技術連携の維持・発展：「極低放射能技術」研究会を開催する

研究連携のイメージ

計画研究B

暗黒物質の直接探索

B01 アクシオン探索

B02 XENONnT

B03 飛跡検出器

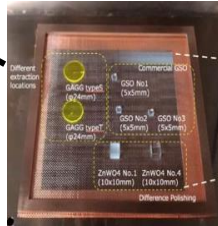
クリーン環境

ラドン分析装置
@神岡
@神戸大
@富山大(新設)



Gd水で
 $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$

表面 α 線イメージ分析装置
@神岡
@理科大(新設)



$10^{-5} \alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$

計画研究A

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象の探索

A01 KamLAND-Zen

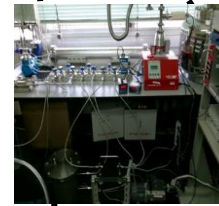
A02 次世代 ^{48}Ca 検出器

質量分析器
@筑波大



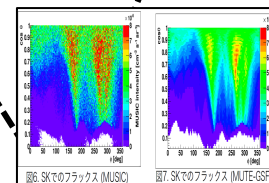
U, Th :
 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ g/g}$

超小型ラドン除去空気製造装置



1/500 に小型化

地下環境
宇宙線
ミュ粒子



シミュレーションの改善

地下環境・水中での中性子測定



基本特性の確認

計画研究C

超新星ニュートリノ観測

C01 SK-Gd

計画研究D

地球科学研究

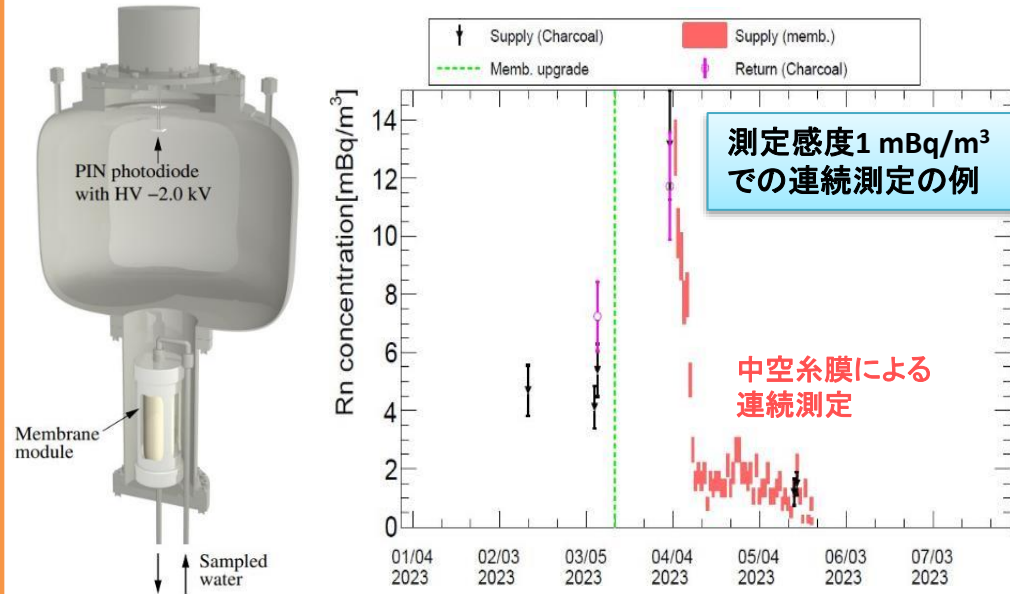
ハイパーカミオカンデ

医療分野との連携

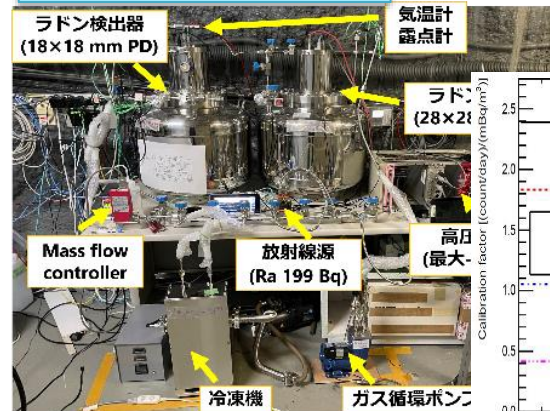
ラドン(Rn)分析装置

- ラドン(Rn-222)は多くの地下実験共通のバックグラウンド(BG)源でその分析は必須。
- Gd水中で $10 \sim 100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ の測定感度を達成する
 - 検出器由来のBGを低減可能か評価する(試験片でテスト)
 - C01のSK-Gd検出器内のGd水溶液中Rn濃度をモニターする。
 - B02のXENONnT実験のGd水を用いた中性子検出器中のRn濃度分析及びハイパーカミオカンデ(HK)への応用も検討する。
- 地下実験で利用されているガスを用いて、Rn検出器の系統的な特性評価を実施
- 富山大学で新たな分析サイトを立ち上げる

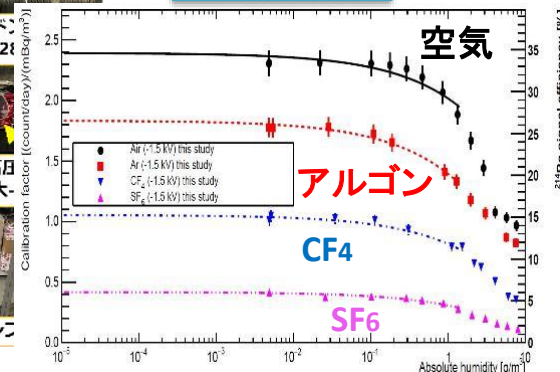
ガドリニウム(Gd)溶液中ラドン濃度測定器



Rn検出器校正装置



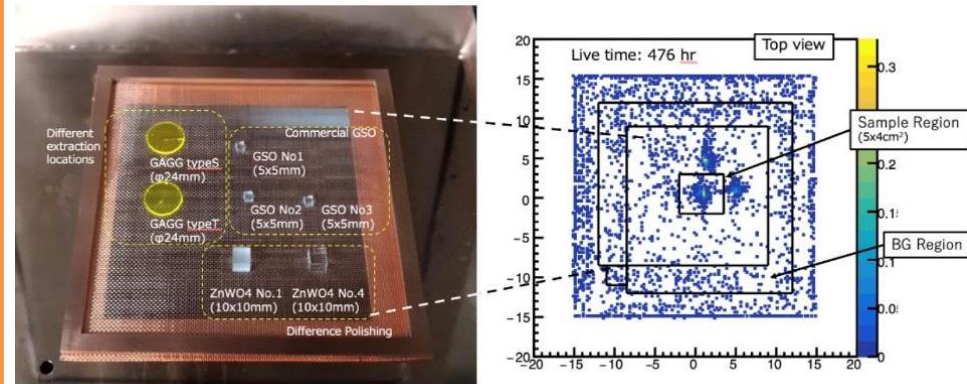
予備試験例



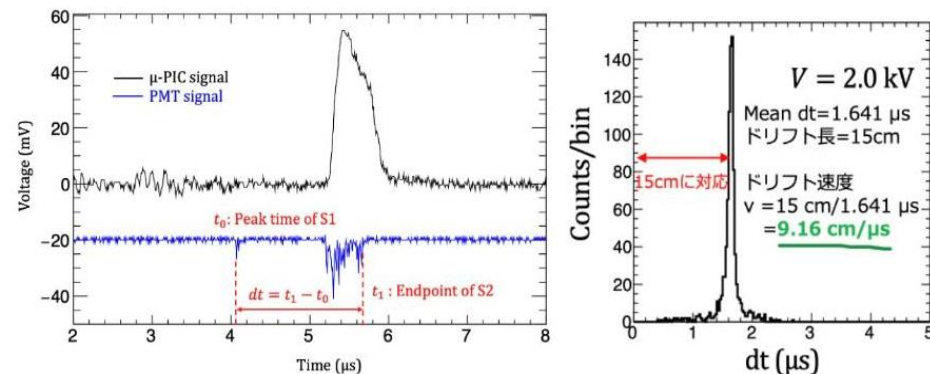
表面 α 線イメージ分析装置

- 神岡地下実験室A(LAB-A)に設置されている装置(AICHAM)の感度向上
 - 本研究前: $10^{-3} \alpha / \text{cm}^2 / \text{hr}$ 台
 - $<10^{-3} \alpha / \text{cm}^2 / \text{hr}$ (PMT追加)
 - $<10^{-4} \alpha / \text{cm}^2 / \text{hr}$ (LOWBG μ -PIC)
- 大型化の際に高感度になる要素技術を小型の装置を用いて東京理科大学で開発。理科大で分析サイトを立ち上げる。
 - 大型時の目標: $<10^{-5} \alpha / \text{cm}^2 / \text{hr}$
 - 銀ゼオライトでラドン除去、Rn放出少ない金属プレートを使う(D01内で協力)
- 熱中性子測定に本装置を応用する可能性を検討
 - 内部にホウ素板を置く等
- 半導体業界にも応用が可能
 - 特許出願等、進行中

AICHAMによる表面アルファ線イメージ分析例



2段階ガス発光の時間差を用いた分析感度向上のための検証試験結果。



質量分析器

- 放射化学分野の専門家が参加
- 放射化学分野の技術を地下実験に本格的に適用する
 - 新しい化学分離法の確立等
- サブppt(10^{-12}) ~ ppq(10^{-15})レベルでの極微量U, Thの定量を行う
 - 典型的手法ではppt程度
- 加速器質量分析器(AMS)による極微量の ^{210}Pb 測定法の提案(<1 mBq)
 - 地下実験では、長年の問題核種
 - 環境動態研究ツールとして環境試料に適用した際の、地球科学分野の研究も提案
- 新たな微量分析技術は材料物質評価にとっての重要な技術革新となる

管理区域に設置された
ICP-QQQ-MS



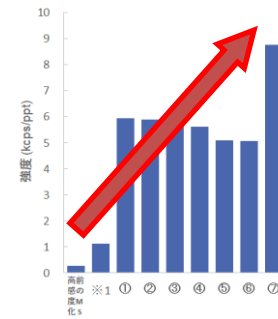
ラジウム(^{226}Ra)の定量下限値:
 $3.5 \times 10^{-16} \text{ g/g}$ ($1.3 \times 10^{-5} \text{ Bq/g}$)
Sakakieda et al. (PTEP, 2023)

世界初のサブmBqオーダー
 ^{210}Pb 迅速分析への挑戦

極微量核種のための
化学分離法
確立



通常の質量分析計の
32倍の感度達成



	径 (mm)	流量 ($\mu\text{L}/\text{min}$)	IF 部の 真空度 (Pa)	IF 部 拡長距離 (mm)
①	2.5	200	264	0.0
②	2.0	200	264	0.0
③	2.5	100	264	0.0
④	2.5	100	142	0.0
⑤	2.5	100	142	0.2
⑥	2.5	100	142	0.4
⑦	2.5	100	238	0.0

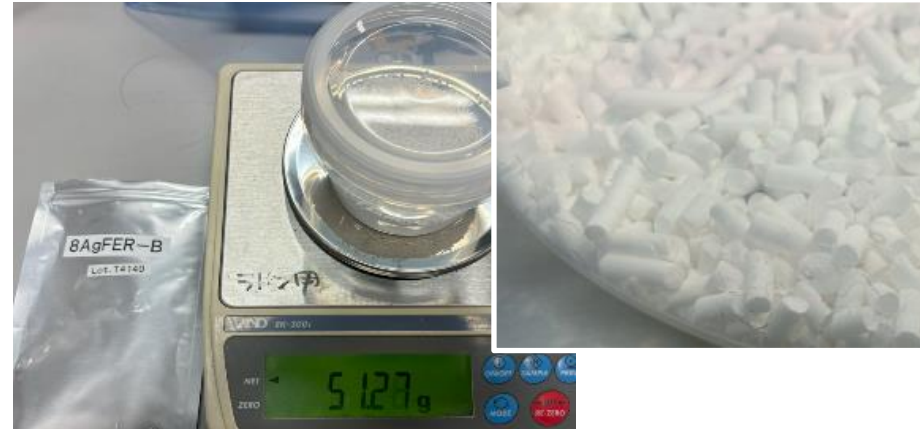


筑波大学 6MVタンデム加速器

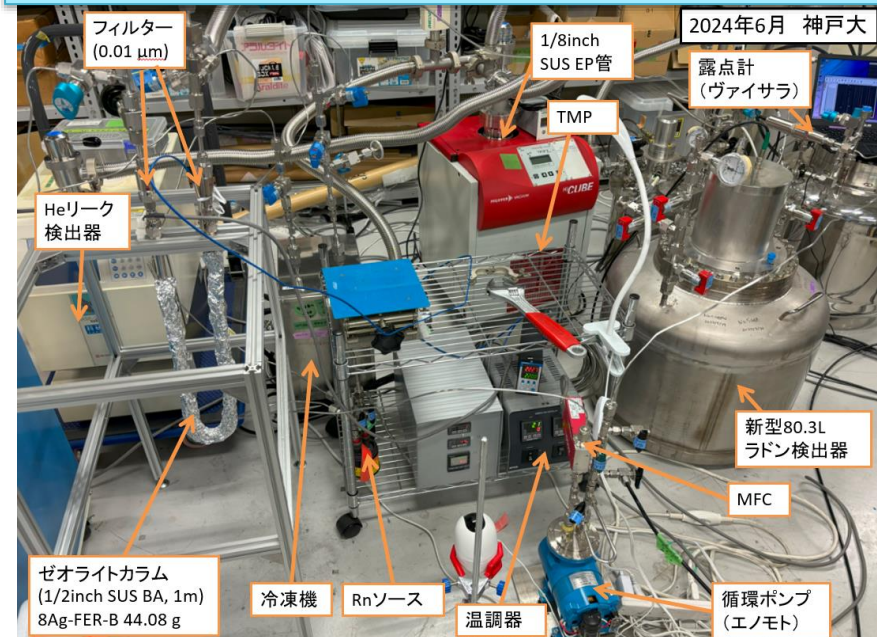
超小型ラドン除去空気製造装置

- Rnは多くの地下実験共通のBG源でその削減は必須。
- 「銀ゼオライト」が非常に高い貴ガス(Xe, Rn)の吸着特性を持つことが近年判明
 - 日大での予備試験で性能確認
- 「銀ゼオライト」を地下実験での空气中的Rn除去に初めて応用する。
 - 1/500程度の大きさの空気純化装置を実現する
 - HKでのRn除去装置を目標にする
 - 神戸大での試験経過→ポスターで報告(P20)
- 国内トップクラスの専門家・製造業者の協力を得る。
 - 東大脇原研、東大伊與木研、東ソー社、シナネンゼオミック社
 - 2024年5月から、量子科学技術研究開発機構(量研/QST)の研究者と共同で研究を進めることになった。

銀ゼオライトサンプル(2024年5月)



神戸大でのRn吸着性能試験装置(2024年6月)



地下環境宇宙線ミュー粒子

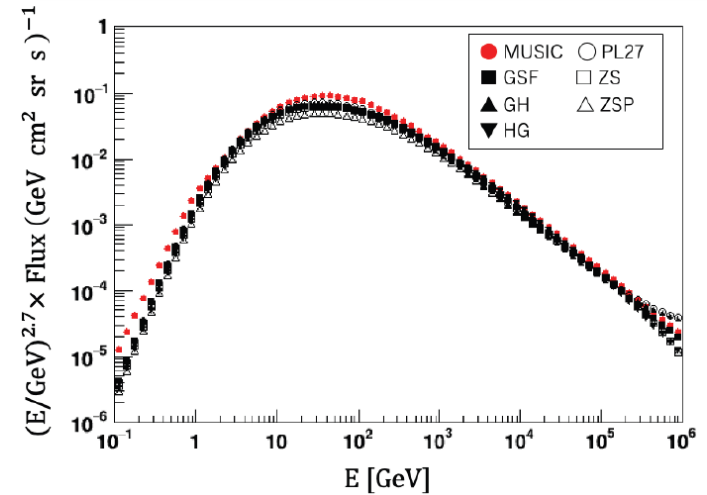
■地下まで浸透する高いエネルギーの宇宙線 μ 粒子が核破砕をし、生成された放射性物質が極稀事象観測のBG事象になる

■シミュレーションの高精度化

■ハイパーカミオカンデ実験エリアでの核破砕BG事象の影響を評価、等

■SK-Gd (C01)やKamLAND-Zen(A01)で、核破砕が主なBG事象となっている稀事象観測の精度の向上を目指す

地表のミューオンスペクトル(天頂角 = 0°)



地下実験室のフラックスの比較

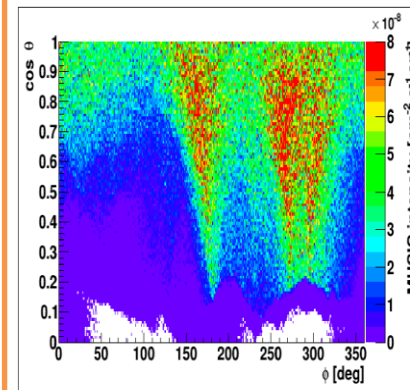


図6. SKでのフラックス (MUSIC)

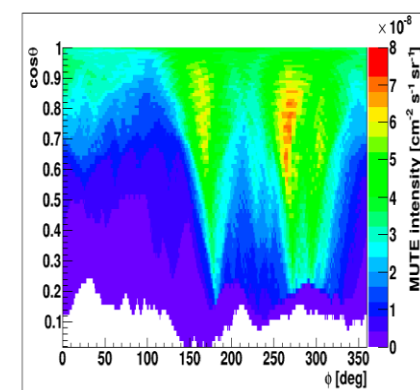


図7. SKでのフラックス (MUTE-GSF)

地下環境・水中での中性子測定

■地下での中性子は極稀事象
観測のBGになり得る

■He3中性子検出器を用いて、
地下環境での中性子強度の
継続的なモニターを行う

■AmBe中性子源とBGOシンチ
レータを組み合わせた線源
(AmBe+BGO線源)は、水中で
の中性子のふるまいを較正
する代表的な装置

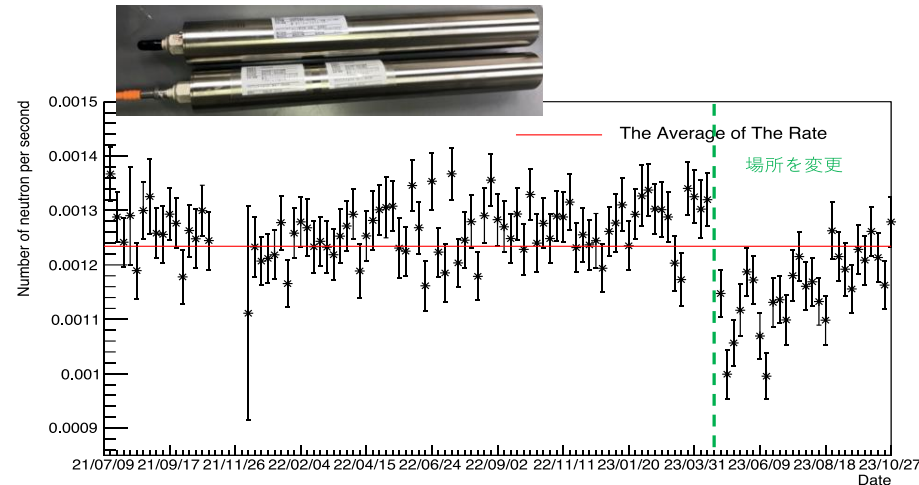
■AmBe+BGOの理解に取り組
む

■C01のSK実験、B02の
XENONnT実験でも必要とされ
る基本特性

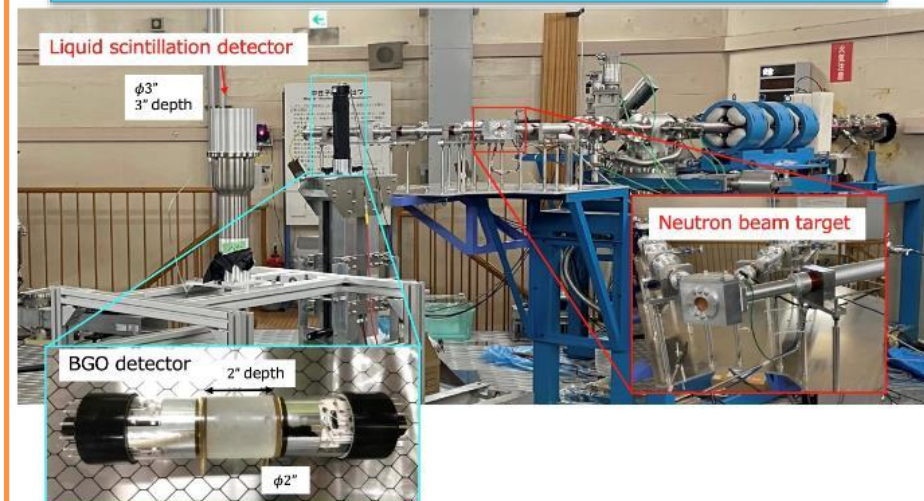
■これまでに産総研で実施した
ビーム試験で取得したデータ
の詳細解析をする

■将来の水チェレンコフ実験で
の活用も可能

He3中性子検出器の写真(上)と神岡地下実験室に
おける環境中性子観測頻度の推移(約2年間)(下)



2022年度に行った産総研でのビーム試験の様子



まとめ

- 極低放射能技術は、極稀事象観測実験で必須の基盤技術
- D01では、共通性の高い極低放射能技術の研究開発に取り組む
 - スクリーニング装置の運用・改善・展開
 - 実験環境の改善・把握
 - 研究対象を拡張
- 領域内外の技術的連携を維持・発展させるため、「極低放射能技術」研究会を主宰していく
- 得られた知見を領域内外に提供し、極稀事象観測研究(＋他分野の研究)を加速する

Thorium series, Uranium series

- **Underground environment (in soil): $1 \sim 10$ ppm(10^{-6})**
→ **Experimental device : ppb(10^{-9}), ppt(10^{-12}), ppq(10^{-15}),,,**

