

小型散乱型RI密度計の開発と 月面への適用検証

○谷口龍¹，池永太一¹，小林泰三²

1，ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社

2，立命館大学

小型散乱型RI密度計の開発

月面基地建设 ⇒ 地盤性状の把握が必須

かさ密度：土の変形・強度特性に影響

RI(Radio Isotope)による密度測定は

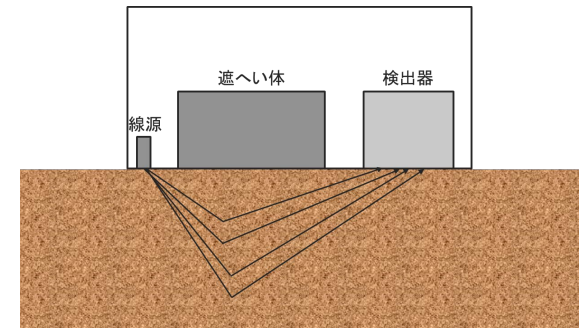
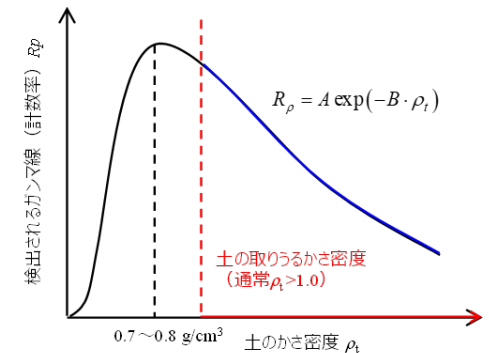
既に地上で実用化され土木現場で利用

月面ローバのロボットアームに取付けを想定

最小クラスの散乱型RI密度計を開発

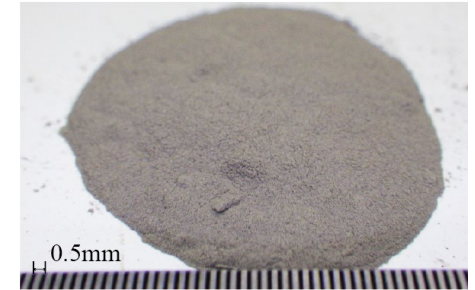
(130mm×100mm×100mm, 1.65kg)

- ・ タングステンを遮へい体として採用
- ・ 線源は ^{133}Ba (1MBq) : 法令規制値以下



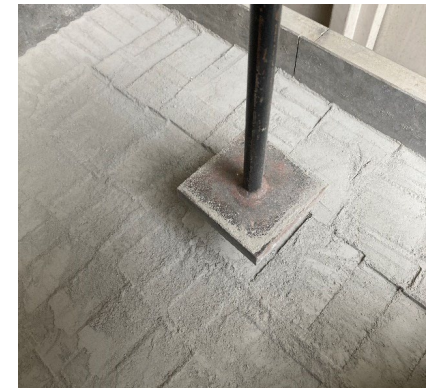
小型散乱型RI密度計の室内実証試験

小型散乱型RI密度計の月面での利用を見据え
フェロニッケルスラグ微粉末(FNS)を用いた
室内試験を実施



FNSを乾燥炉で絶乾後、ふるい分けしモールド内に撒き出し

- ①静かに撒き出し表面を軽く整形($\rho_t=1.137\text{g/cm}^3$)
- ②小型ランマで緩く締固め($\rho_t=1.201\text{g/cm}^3$)
- ③小型ランマでさらに締固め($\rho_t=1.291\text{g/cm}^3$)



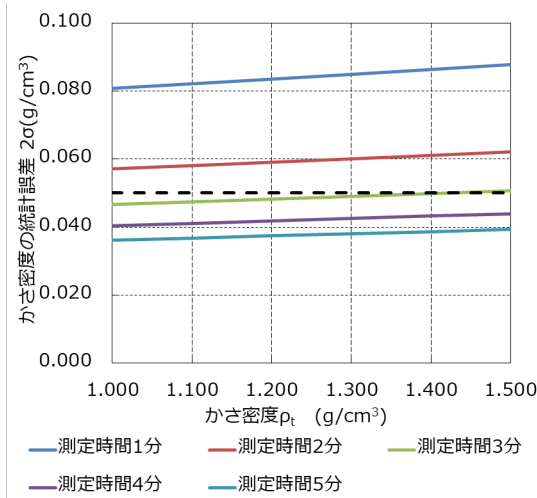
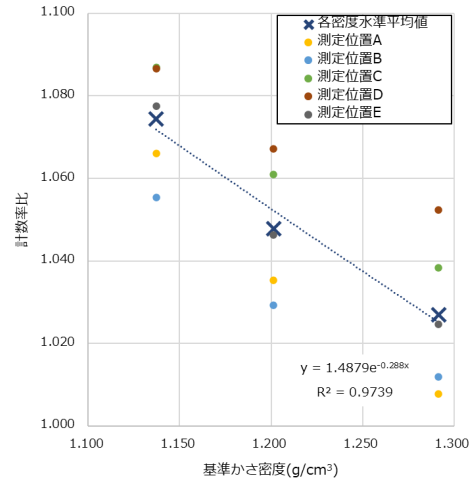
モールド内5か所で小型散乱型RI密度計で測定

小型散乱型RI密度計の室内実証試験

FNS測定時の校正式を得た
 測定位置によるばらつきあり
 ⇒モールド内の密度の偏り
 ⇒自重による沈み込み

統計誤差について机上検討

1.500g/cm³のかさ密度で
 測定時間4分以上ならば
 統計誤差0.050g/cm³以内



小型散乱型RI密度計の取付け実証

小型散乱型RI密度計を月面ローバに搭載
ロボットアームとアクチュエータに取付け
小型散乱型RI密度計を不陸影響軽減のため
地表面に押しつけ測定

- ・ロボットアームのトルク不足
- ・アクチュエータへの取付機構
両者の改良が必要⇒来年度以降改良

通信に関しては問題がないことを確認



フィールドでの透過型RIとの比較

FNSとまさ土についてフィールド実験で透過型RIの結果と比較

FNS

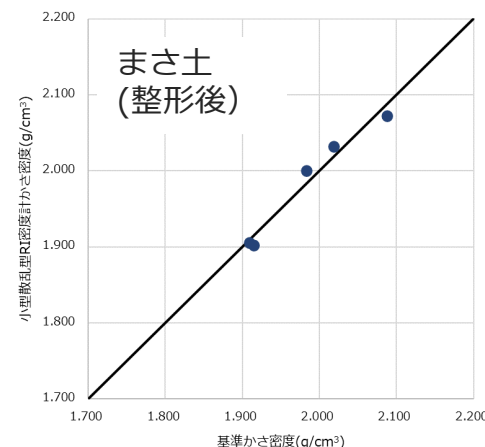
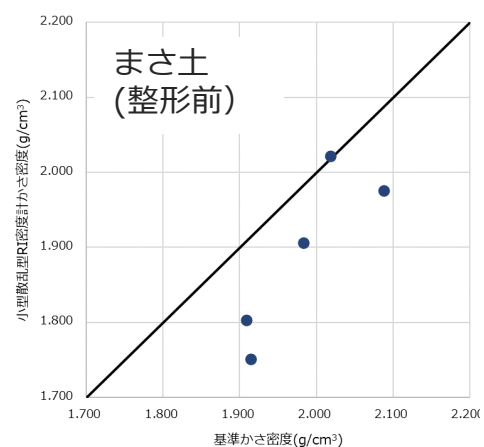
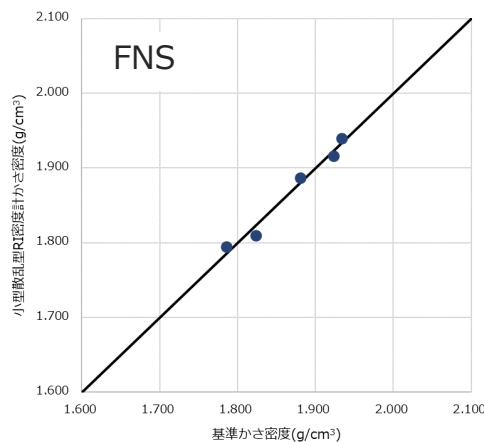
測定精度としては妥当な精度

まさ土

整形前はかさ密度を過小評価

整形後はかさ密度を正しく評価

⇒掘削バケットで不陸影響軽減



まとめと今後の展開

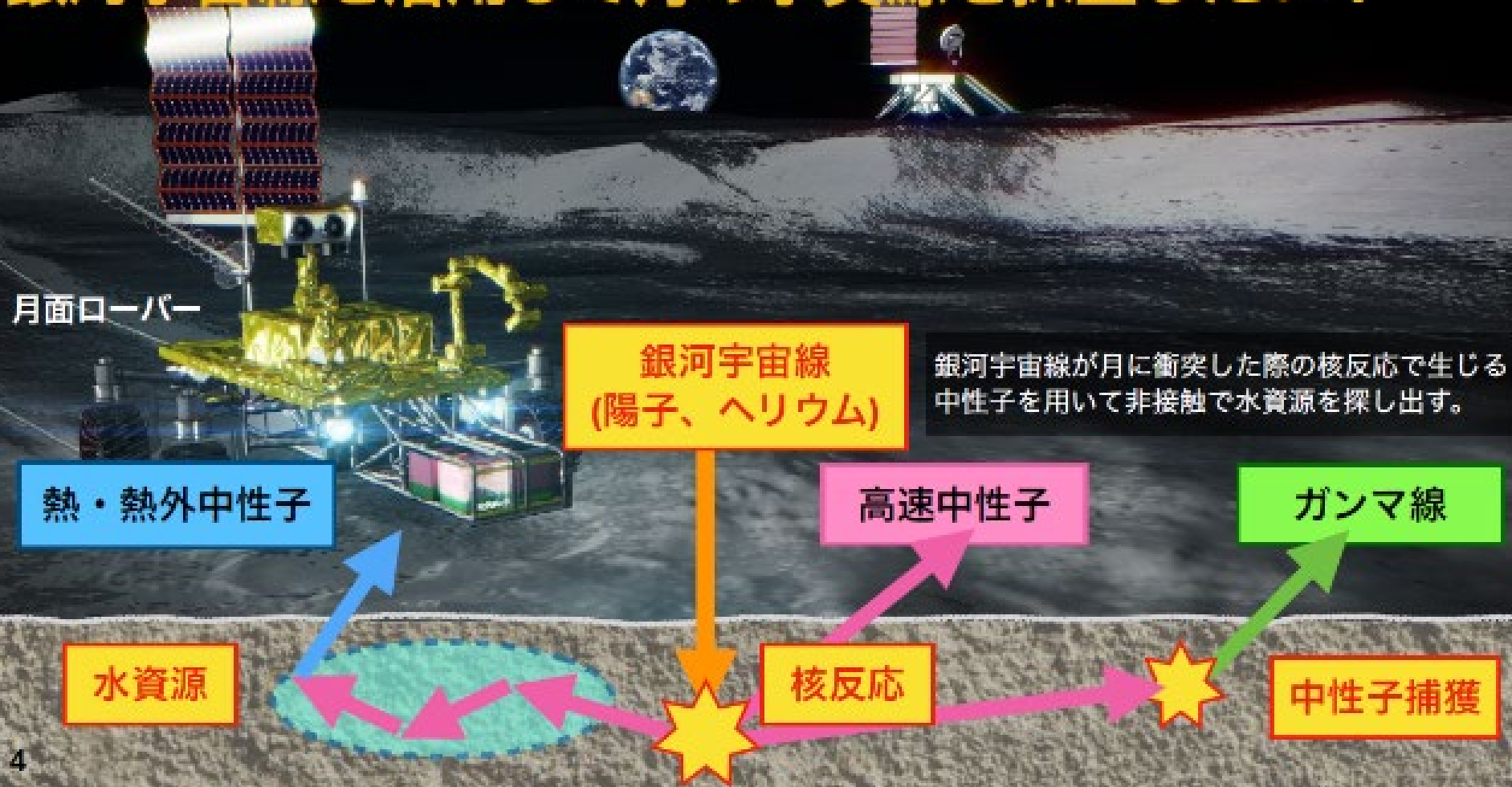
- ・ 月面ローバへの搭載を想定した最小サイズの密度計を開発
⇒宇宙仕様への改良、耐環境試験
- ・ 室内試験でFNSを測定し校正式を取得
⇒より精度の良い校正方法の確立
- ・ ロボットアームとアクチュエータに取付け課題抽出
⇒取付機構の改良
- ・ フィールドで透過型RIと比較
⇒データの蓄積とより月面に近い環境での実証
⇒BGの推定方法の確立

宇宙使用も視野に入れた土木建築での活用を目指す次世代型の中性子水モニタの開発

○池永太一¹, 榎戸輝揚^{2,3}, 辻直希², 加藤陽³, 谷口絢太郎³, 晴山慎⁴,
大竹淑恵³, 岩本ちひろ³, 高梨宇宙³, 若林泰生³, 小林泰三⁵, 長岡央⁵,
中野雄貴¹, 塚本雄士¹, 草野広樹⁶, 玉川徹³, 星野健⁷, 上野宗孝⁷
1ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社, 2京都大学, 3理化学研究所, 4聖マリアンナ医科大学,
5立命館大学, 6量子科学技術研究開発機構, 7宇宙航空研究開発機構



銀河宇宙線を活用して月の水資源を探查したい！



4

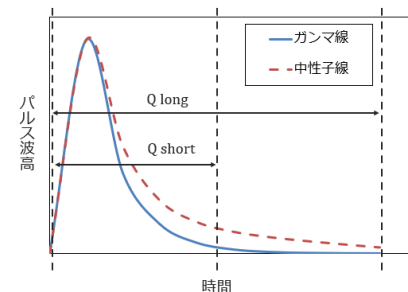
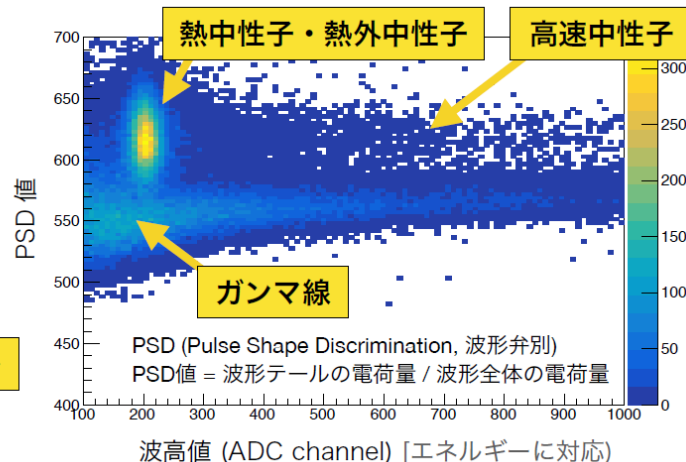
中性子による水探查は、月・惑星や地球上において非接触による探查法の一つとして広く用いられている。大気が薄い月では銀河宇宙線が常に降り注ぎ、月面表層の地盤との核反応で高速中性子が発生する。発生した高速中性子が水(水素)で散乱されると、徐々にエネルギーを失い、熱・熱外中性子として月面表層から漏れ出してくる。



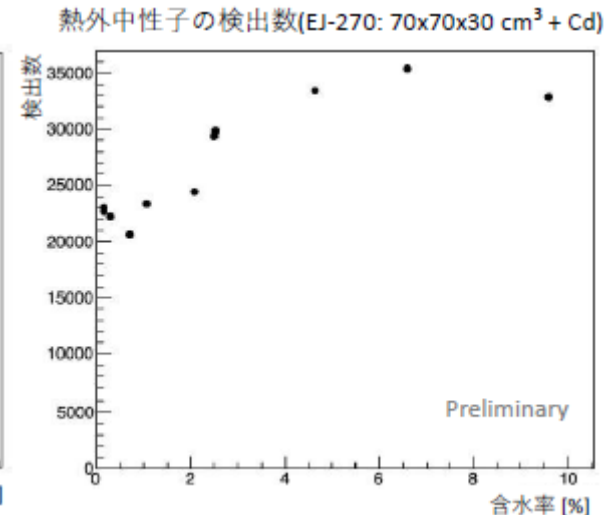
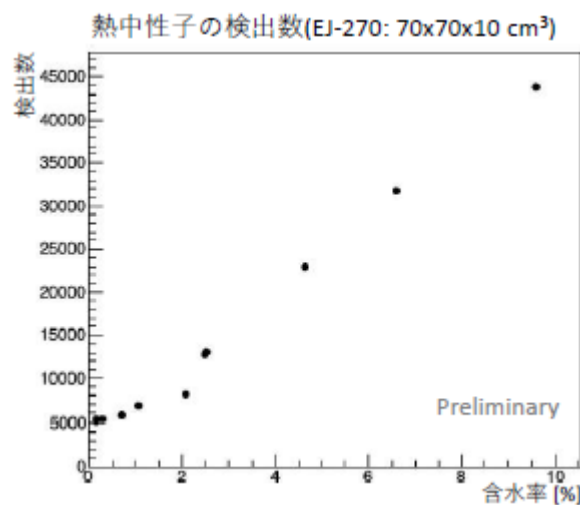
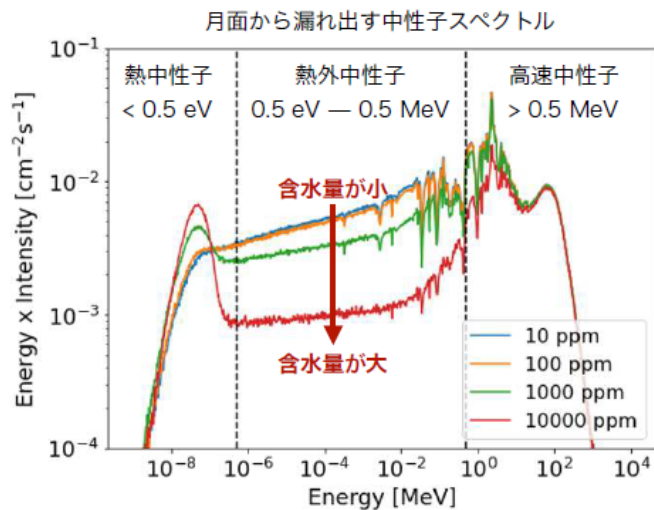
MoMoTarO



中性子線源とセンサー間の距離 16 cm



熱・熱外中性子とバックグラウンドとなる高速中性子やガンマ線を識別できる新しい非接触型の放射線モニタMoMoTarO (Moon Moisture Targeting Observatory)を開発した。将来の月面ローバーでの活用を視野に入れ、超小型衛星で標準となる1Uサイズ (10cm × 10cm × 10cm) に収まるようにサイズを設計した。中性子検出にはLi-6を添付したプラスチックシンチレータ (EJ-270) を用いておりSiPM (Silicon Photomultipliers) 光検出器と組み合わせて検出信号を出力する。この装置は、既存のHe-3比例計数管と比べて、振動に強く、低電圧、省電力に加えて、熱・熱外・高速中性子、ガンマ線のパルスを波形とエネルギーで高弁別できる能力を備えており、高感度な測定を実施できる。



(1) 数%以下の含水率の月シミュラントを土槽に詰める



(2) 中性子線源とMoMoTarO検出器を設置



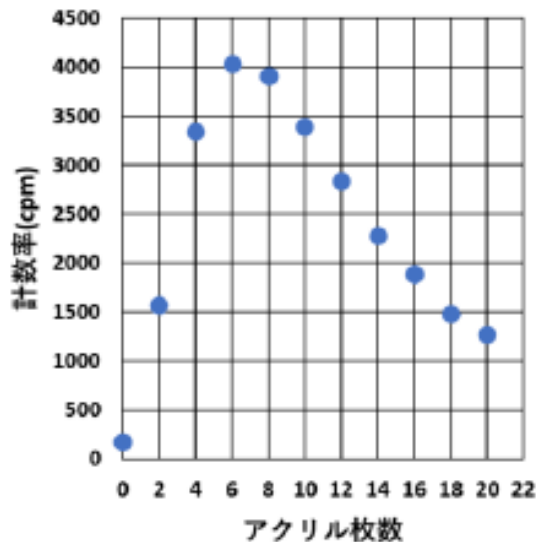
(3) 土槽からの中性子を測定

極低含水率(月面での含水率は1.0%以下が有力)の月シミュラントに対して, 中性子の計数率を測定した. 広範囲の含水率で熱中性子, 熱外中性子カウント数の変化を確認. Geant4シミュレーションと傾向は一致.

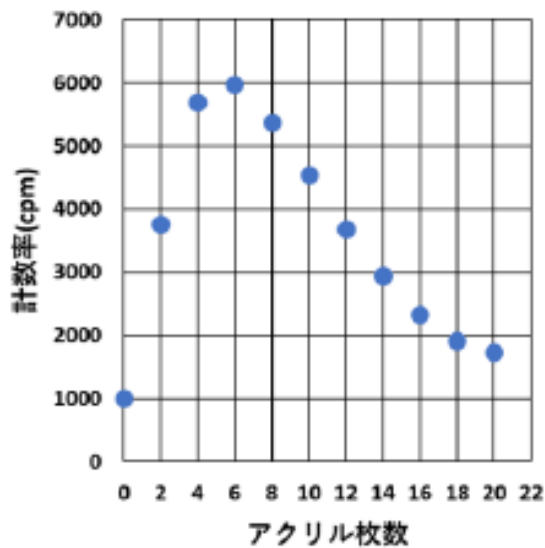
引き続き実験, 検討を継続中.

辻直希 他「月での水資源探査、中性子寿命測定に挑むMoMoTarO計画」超小型衛星利用シンポジウム2024

熱中性子の応答は既存検出管とほぼ一致

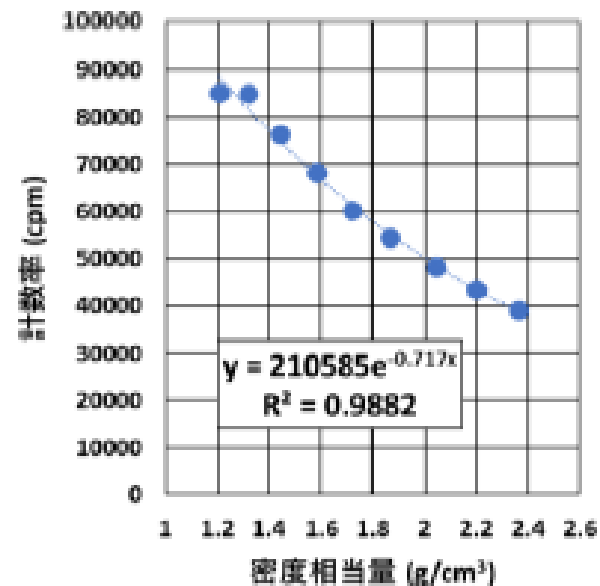


(1) He-3 比例計数管



(2) EJ-270

ガンマ線の応答も確認

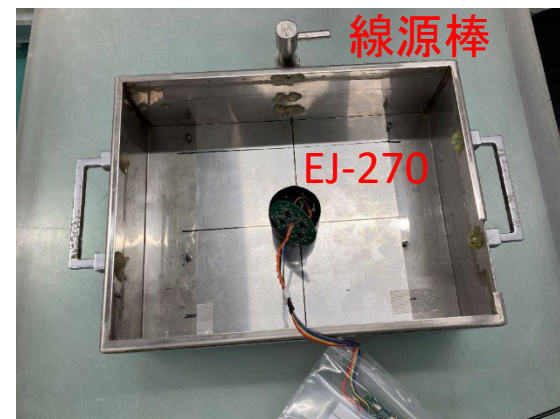


ガラス板20cmの上にt1cmのアクリル板を重ねた試験体を用いて、EJ-270シンチレータの応答実験を実施。熱中性子の応答は既存の検出管とほぼ一致することを確認。既存RI計器（透過型RI）に搭載した実験では、ガンマ線に対して高い密度に対する相関があることも確認できた。

⇒既存のRI計器に搭載できる可能性が高い。

現在は、散乱型RIを用いて、引き続き実験、検討を継続中。

塚本雄士 他「RI計器搭載に向けたEJ-270シンチレータの応答評価」R5年土木学会全国大会



ガラス板の上にアクリル板を積み重ねた試験体

まとめと今後の展開

- ・ JAXAイノベーションハブのプロジェクトチームで新しい中性子検出器 (MoMoTarO) を開発. 月面の水探査技術としての検討を行っている.
- ・ 地上応用として, 既存のRI計器 (透過型RI) に適用可能性検討. EJ-270中性子シンチレータを筐体に内蔵させ, 中性子に対する水分応答, ガンマ線に対する密度応答を確認.
- ・ 現在, 散乱型RIで同様の応答実験を実施中. 2024年の土木学会全国大会で発表の予定. 散乱型RI水分計の精度向上, 含水比適用範囲の拡大を目指している.
- ・ 今後, ロバーへ搭載し移動計測の実験, 様々な土質材料での応答を確認する予定.