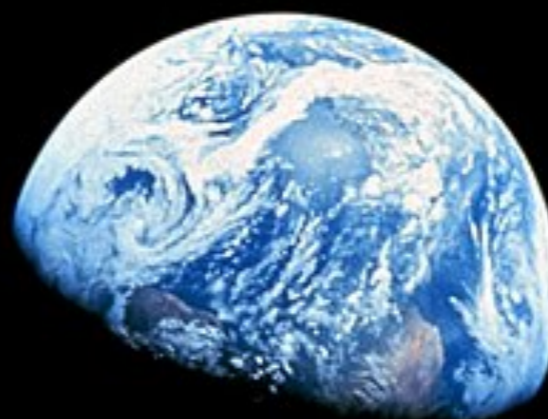


# 銀河宇宙線を用いた月面の水資源探査 を行う1Uサイズ放射線モニタの開発



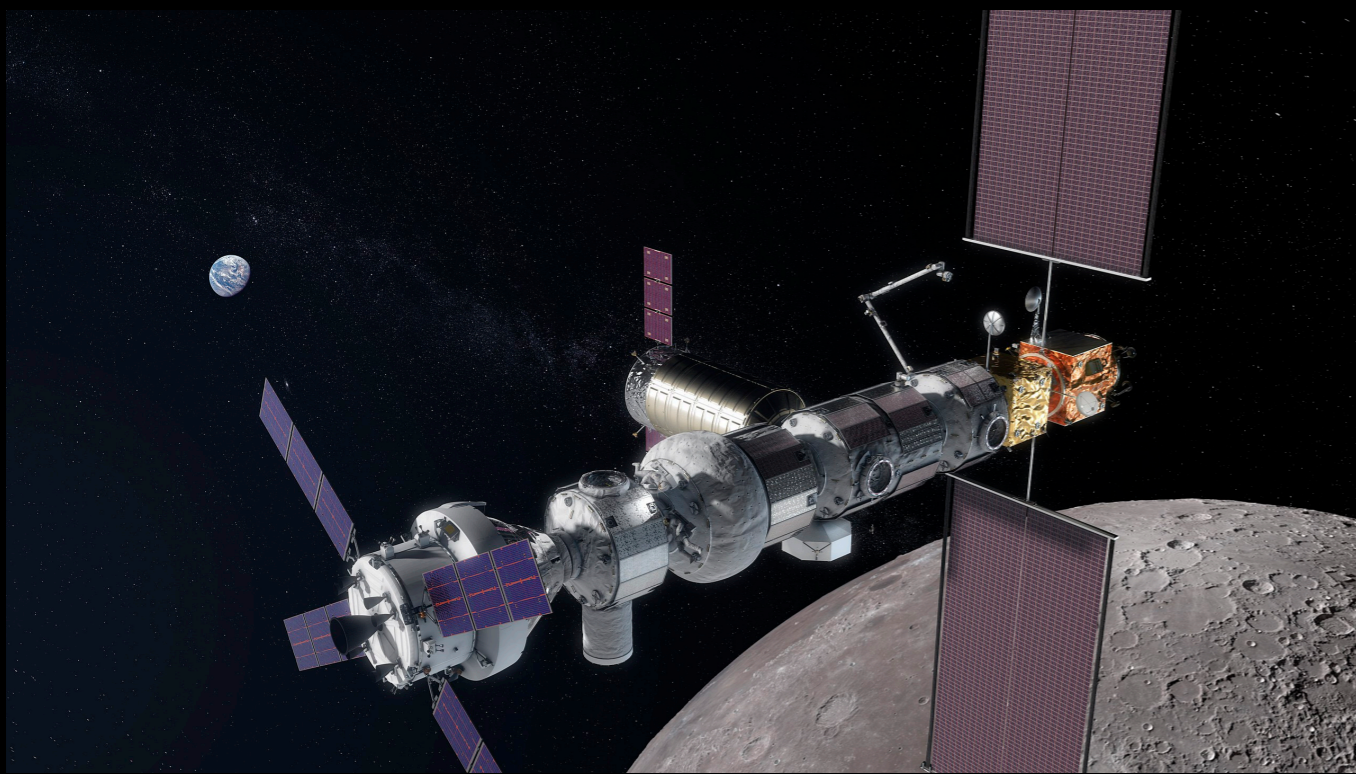
## 榎戸輝揚

理化学研究所 開拓研究本部

榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

加藤陽, 長岡央, 谷口絢太郎, 大竹淑恵, 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 若林泰生, 玉川徹 (理化学研究所), 晴山慎 (聖マリアンナ医科大), 小林泰三 (立命館大), 池永太一, 中野雄貴, 塚本雄士 (ソイルアンドロック エンジニアリング社), 草野広樹 (量研), 星野健, 唐牛譲, 上野宗孝 (JAXA), 沼澤正樹 (都立大)

# 人類の宇宙進出と月の水資源探査



月周回ゲートウェイ・ステーション構想 (C) NASA



ファルコン9ロケットの着陸 (C) SpaceX

- 宇宙フロンティアは未来社会に活力を与え人類を多惑星種族代に
- 月の水資源は宇宙船や基地の燃料となり宇宙進出のイノベーション
- アルテミス計画に代表される各国の月進出に加え、民間企業も参入
- 銀河宇宙線を用いて非接触で水探査を実施し、月面天文学に展開。

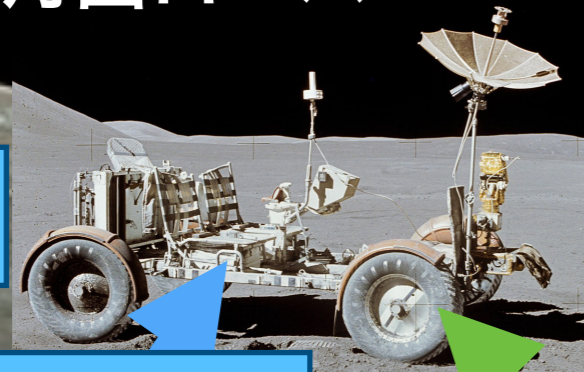
# 宇宙線の月面中性子による水探査

基本原理



銀河宇宙線  
(陽子、ヘリウム)

月面ローバー



熱中性子

高速→熱外→熱

高速中性子

ガンマ線

水資源

核反応

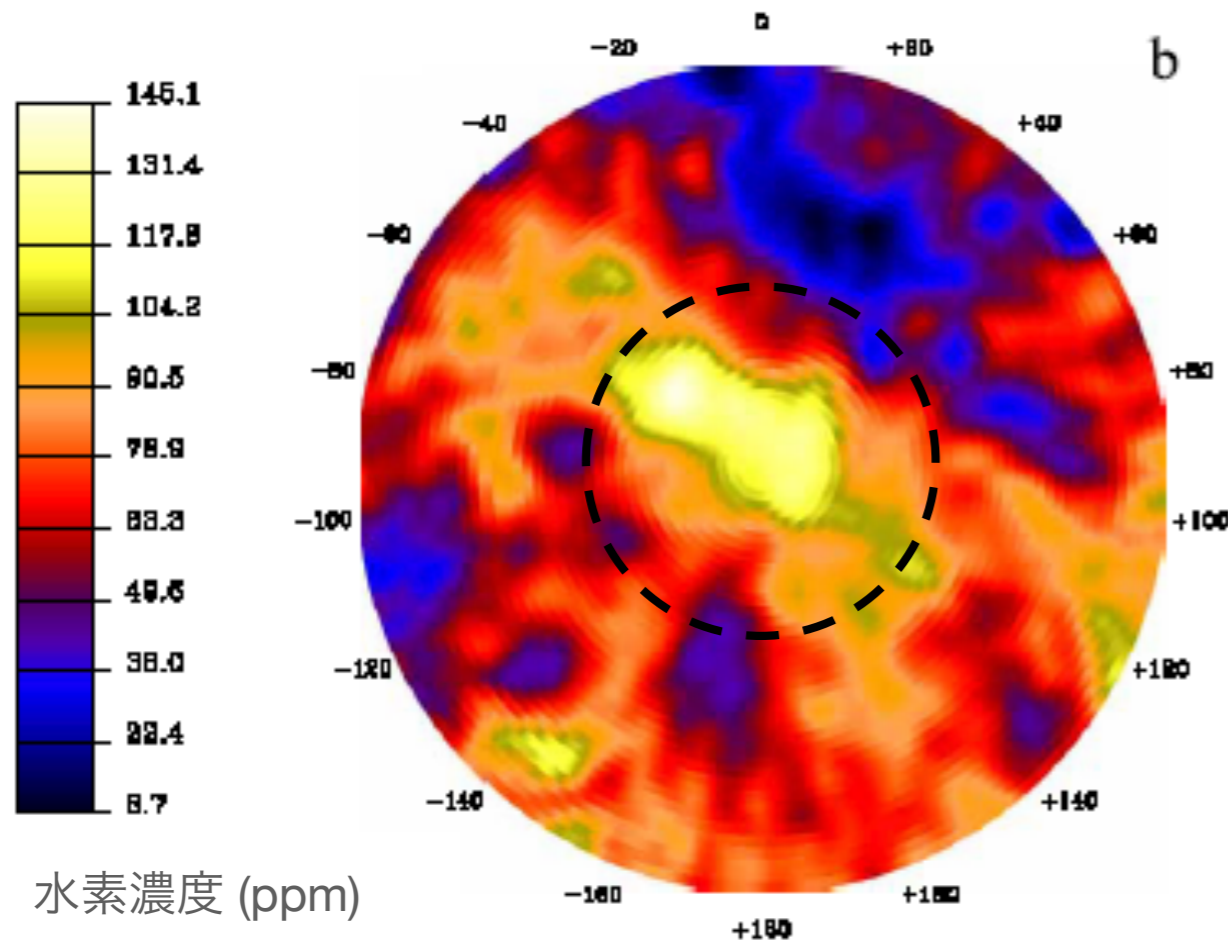
中性子捕獲

月面

3m  
↑  
↓

# 月極域に水素濃集 (水の痕跡) ?

月の南極 (緯度 70° 以下) の水素分布



Lawrence et al. 2006

Lunar Prospector Neutron Spectrometer

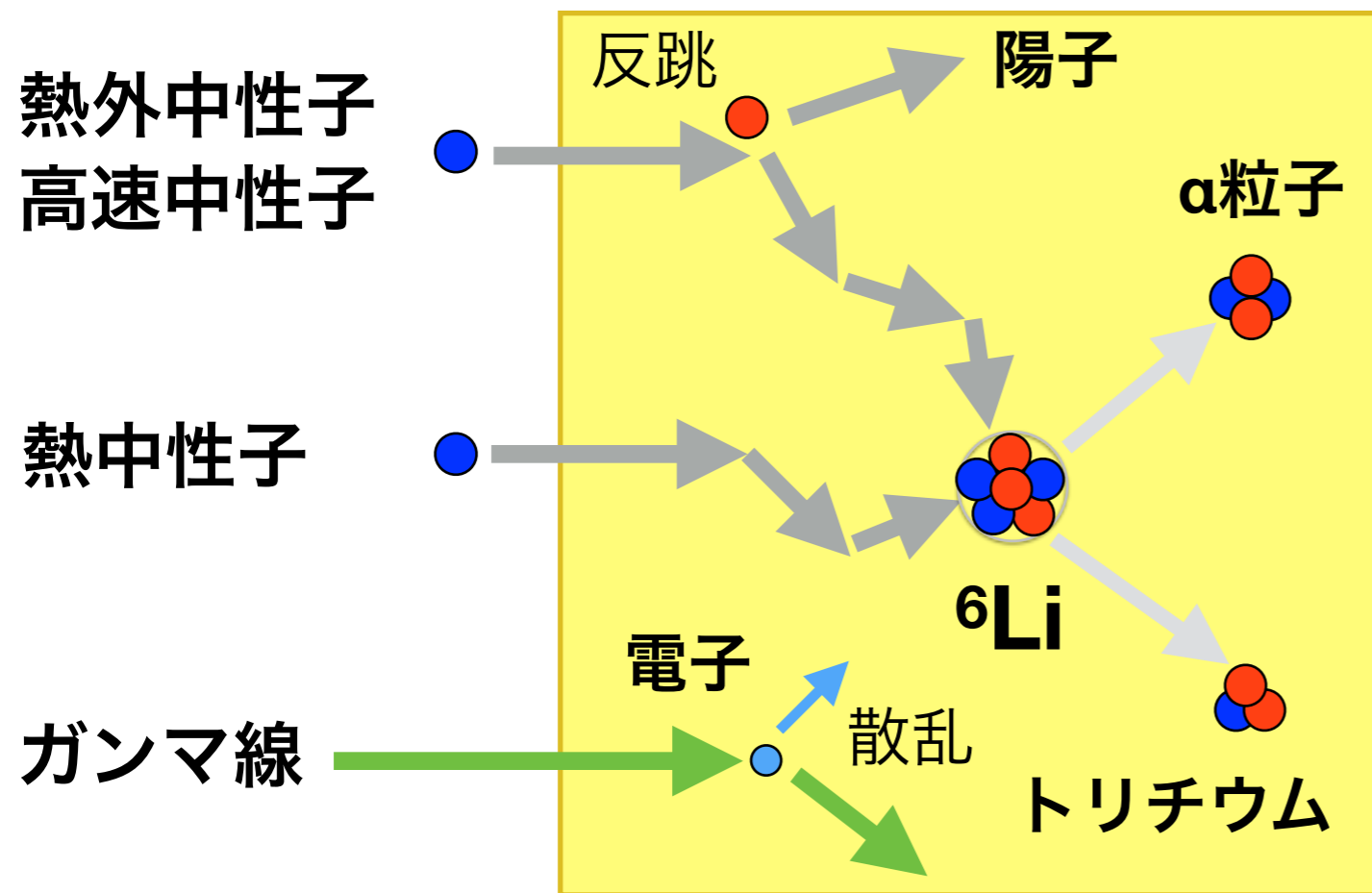
- 太陽風や隕石、彗星が月に水を供給。
- 月極域の太陽が当たらない永久影には水が濃集していると期待されている。
- 月周回機の中性子分光計は極域に濃集した水等価水素量 (WEH) を観測した。
- WEH でサブ wt% の水が期待される、月表面から数十 cm 以内の深さに存在？
- 軌道上での測定は数十 km 四方の平均的な水濃度。ローカルに水が濃集の可能性
- **月面ローバーに搭載した中性子モニタで水資源の詳細マッピングを実施したい**

水等価水素量 (Water Equivalent Hydrogen; WEH) は、中性子で計測された水素量が全て水として存在すると仮定して推定した場合の量 [H]。この 9 倍が含水量に対応 (i.e.,  $[H_2O] = [H] \times 18/2$ )。図は  $WEH = \text{enhancement} = ([H] - [H]_0) \times 9$  で、 $[H]_0$  は average non-polar level = 0.045% WEH

# JAXA探査ハブとの共同研究

- 第6回 研究提案募集<A.課題解決型> **小型・可搬型の地下水分センサ / 地産地消型探査技術「月面探査と土木建築でのデュアルユースを視野に入れた次世代型の中性子水モニタの開発」** (2021-2023年度) 採択
  - ローバー搭載で 400x200x200 mm, 5 kg の小型軽量で可搬な検出器を目標として、0.5% 未満の質量含水率の測定を狙う。
- 新たに、背景の異なる4分野+JAXAの連携し、ノウハウの融合を測る
  - X線天文学での宇宙での高感度な放射線測定 (理化学研究所)
  - 惑星核分光での月面の観測ノウハウ (かぐや衛星メンバー)
  - 土木建築分野でのRI計器の活用 (立命館大学、および SRE社)
  - 中性子のビーム技術 (理化学研究所 RANS チーム)
  - JAXA宇宙探査イノベーションハブ

# 新たな中性子とガンマ線の測定技術



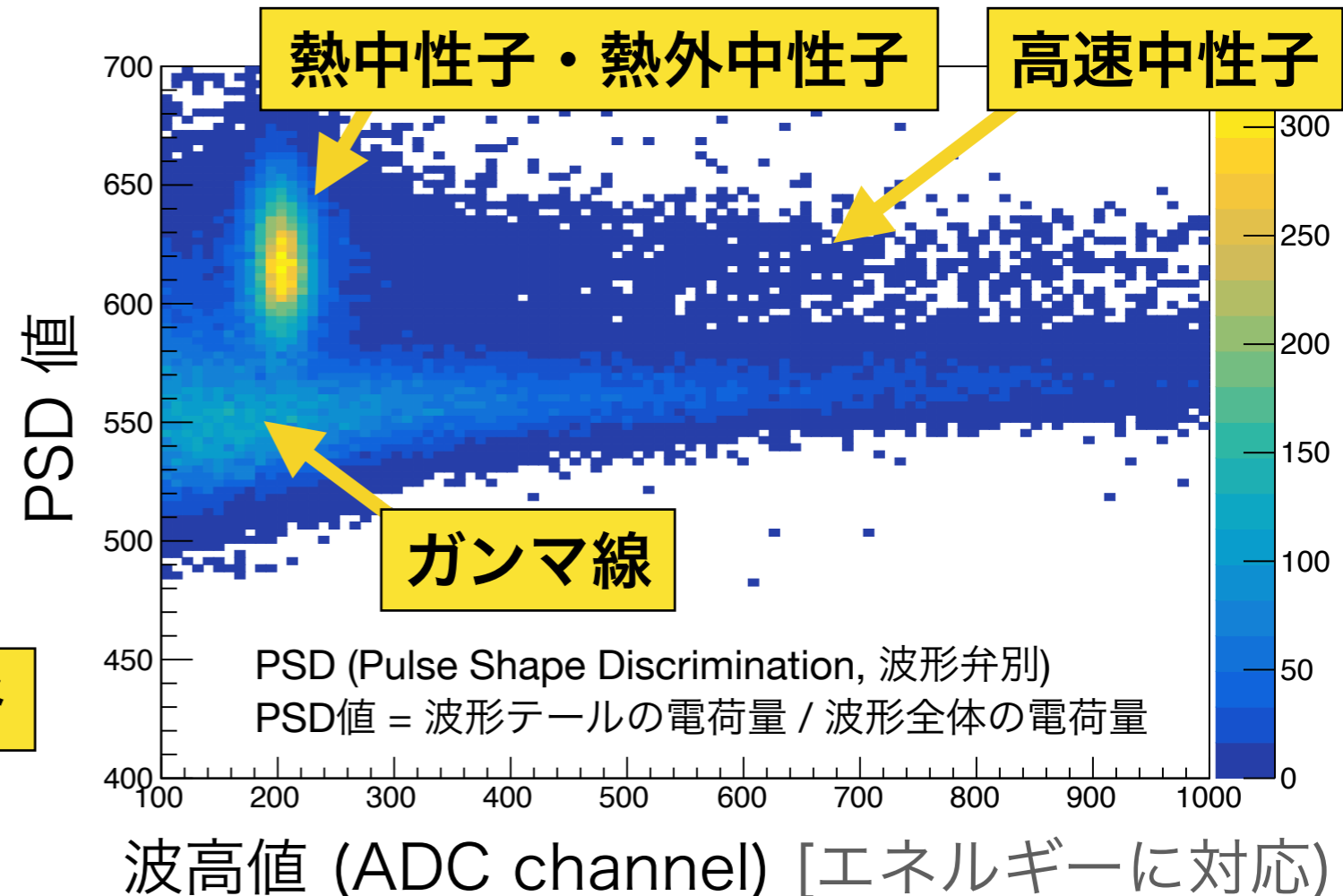
- 高速中性子：主に陽子(水素原子核)との弾性散乱でエネルギーを落とす。十分エネルギーを失って熱化され、 ${}^6\text{Li}$ に捕獲される。
- 熱中性子： ${}^6\text{Li}$ に捕獲されると、 $(n, \alpha)$ 反応 (Q値:  $\sim 4.8$  MeV) で  $\alpha$ 粒子と ${}^3\text{H}$ を放出する。
- $\gamma$ 線：主にコンプトン散乱を起こす。

- これまでの中性子の検出では、ヘリウムのガス検出器が多用
  - 価格の高騰、振動に弱い
- リチウムを含むプラスチックシンチレータとマルチピクセル型光検出器(SiPM)を使う新技術の活用
  - ヘリウムに比べ安価
  - 振動に強く、小型・省電力
- 中性子とガンマ線を同時測定し弁別が可能 → 高感度化、地中の元素組成を測定できる

# 中性子とガンマ線を弁別するシンチレータ

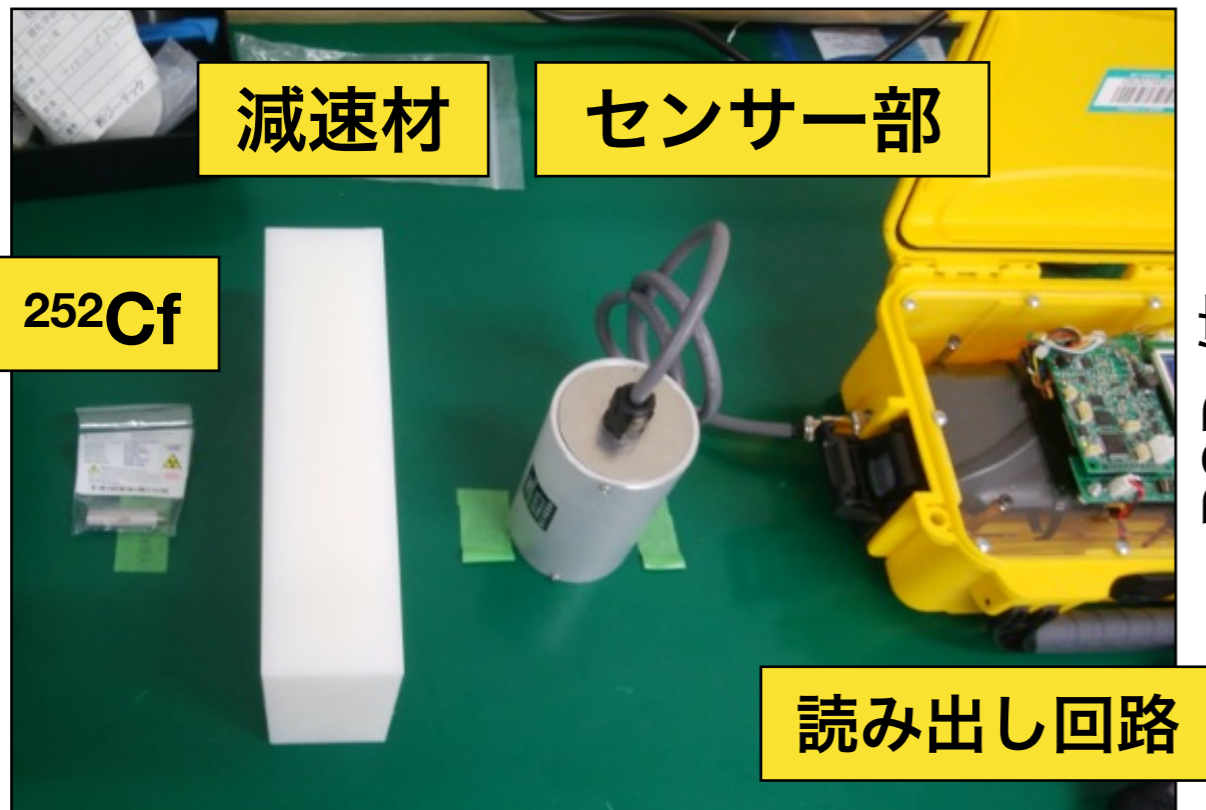


中性子線源とセンサー間の距離 16 cm

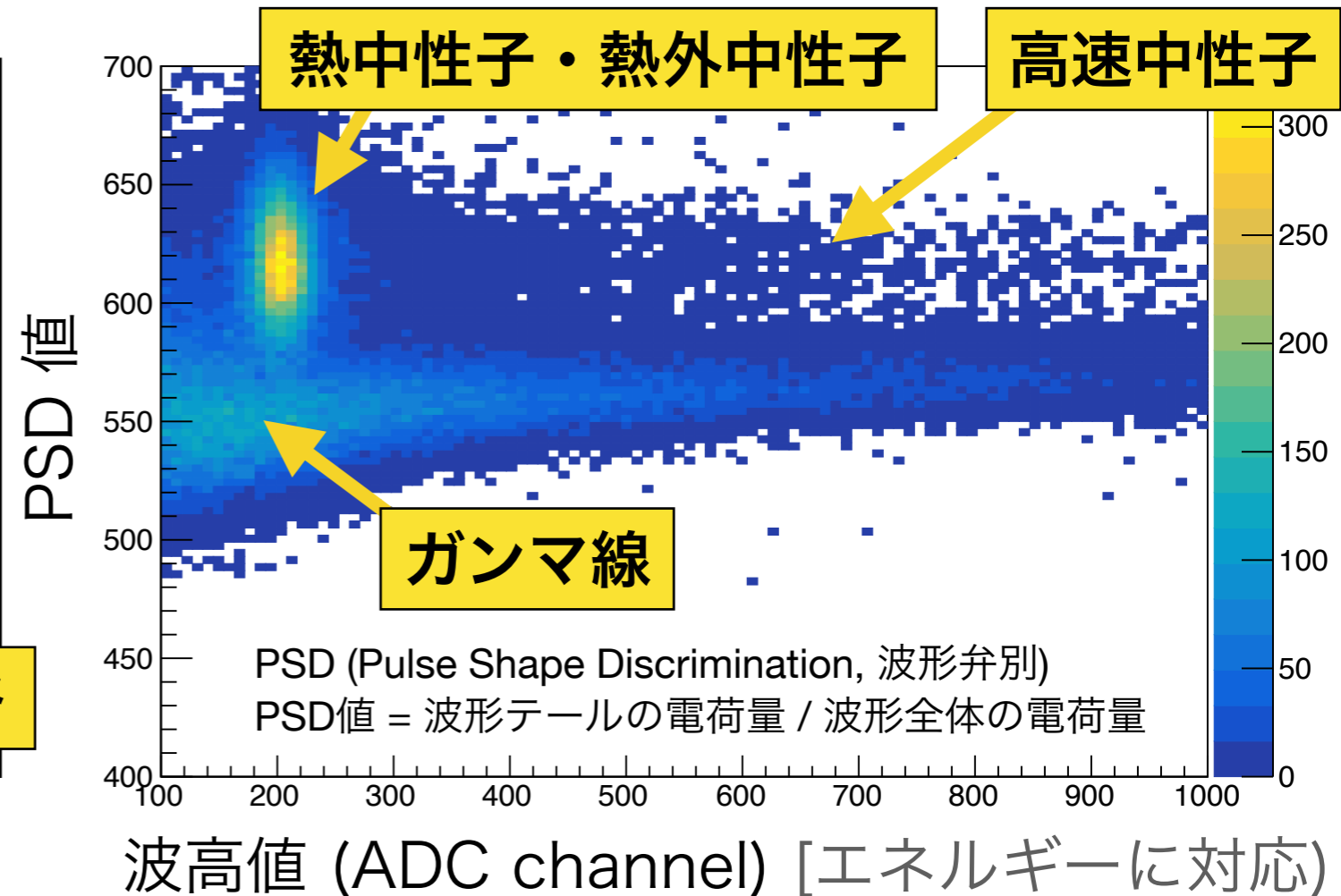


- 実験室モデルで中性子、高速中性子とガンマ線の弁別を確認
- 宇宙環境モデル（過酷な熱環境、放射線の影響、打ち上げの振動）への設計へ

# 中性子とガンマ線を弁別するシンチレータ



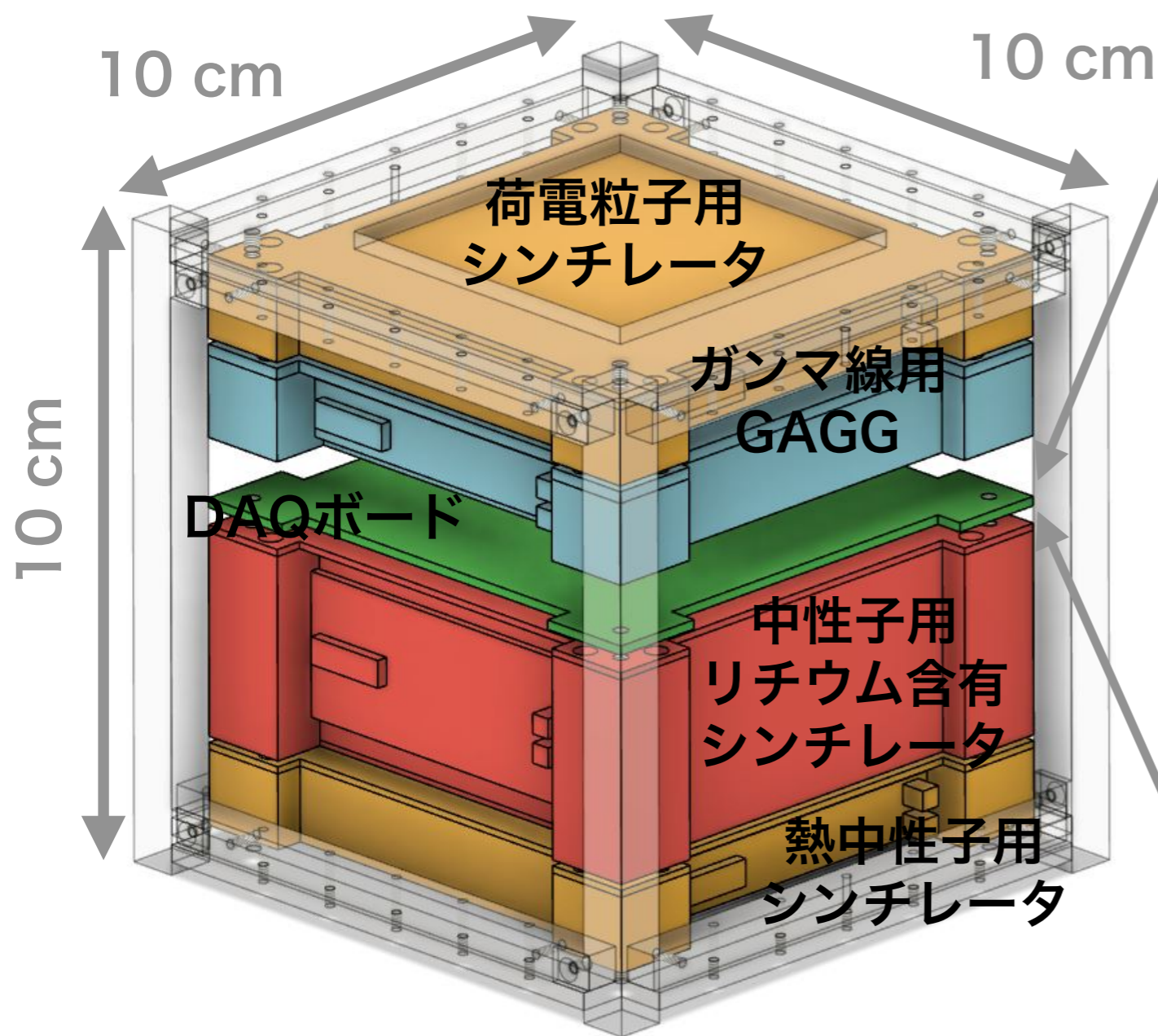
中性子線源とセンサー間の距離 16 cm



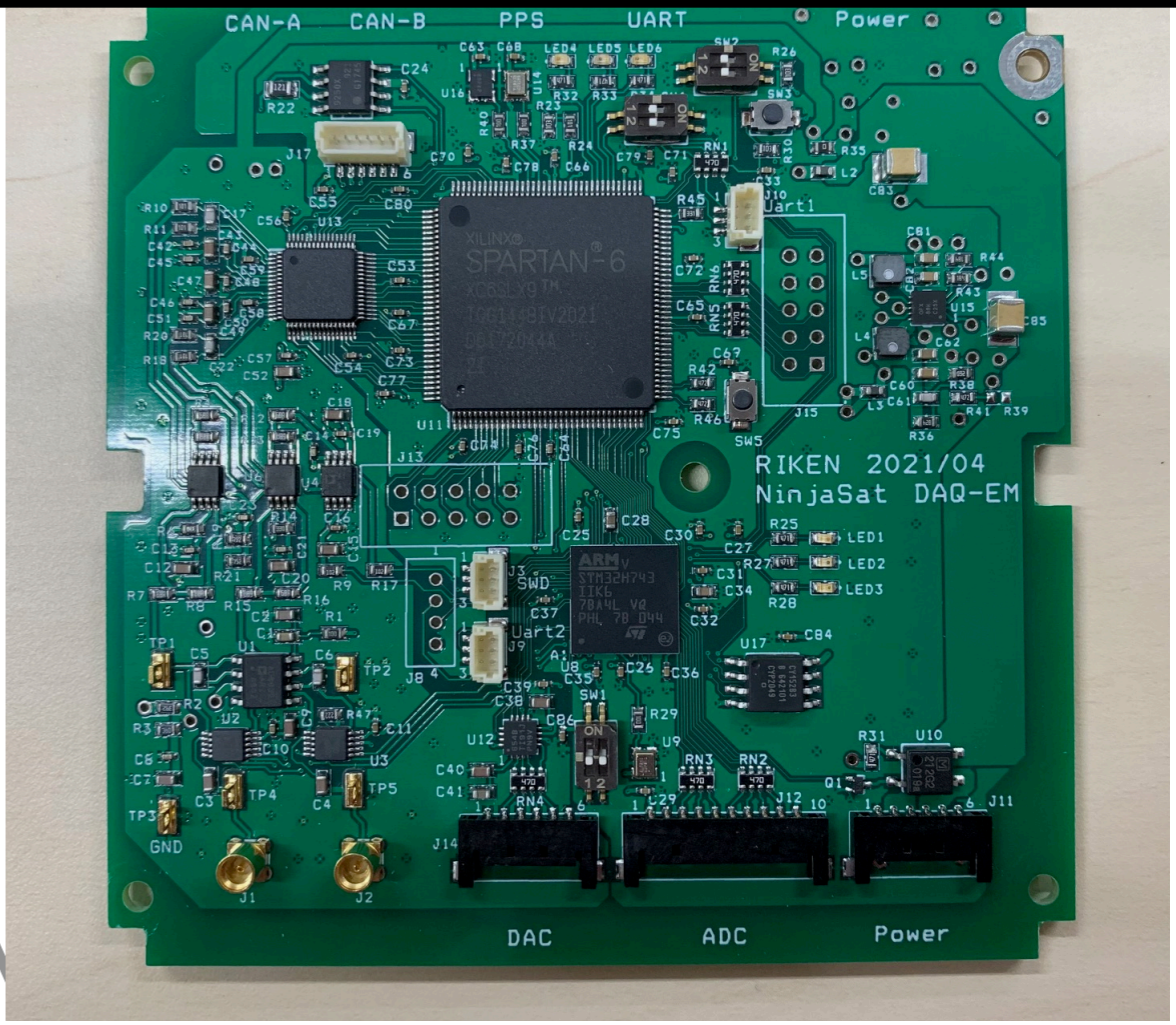
- 実験室モデルで中性子、高速中性子とガンマ線の弁別を確認
- 宇宙環境モデル（過酷な熱環境、放射線の影響、打ち上げの振動）への設計へ



# 中性子とガンマ線を弁別するシンチレータ



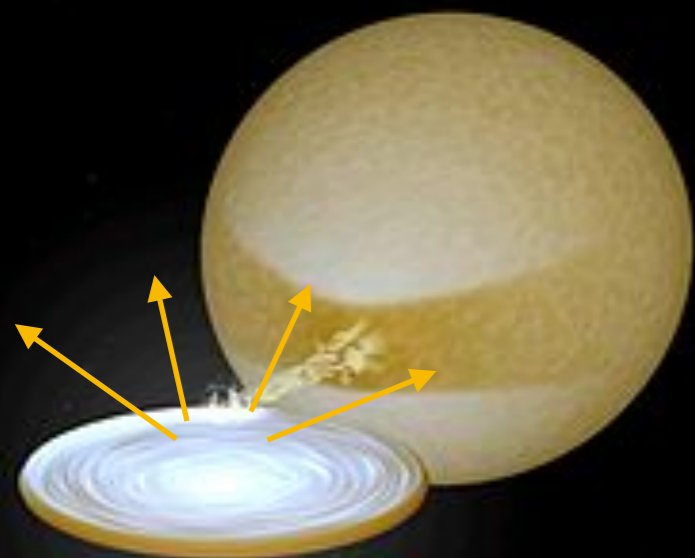
キューブサット用データ読み出し基板



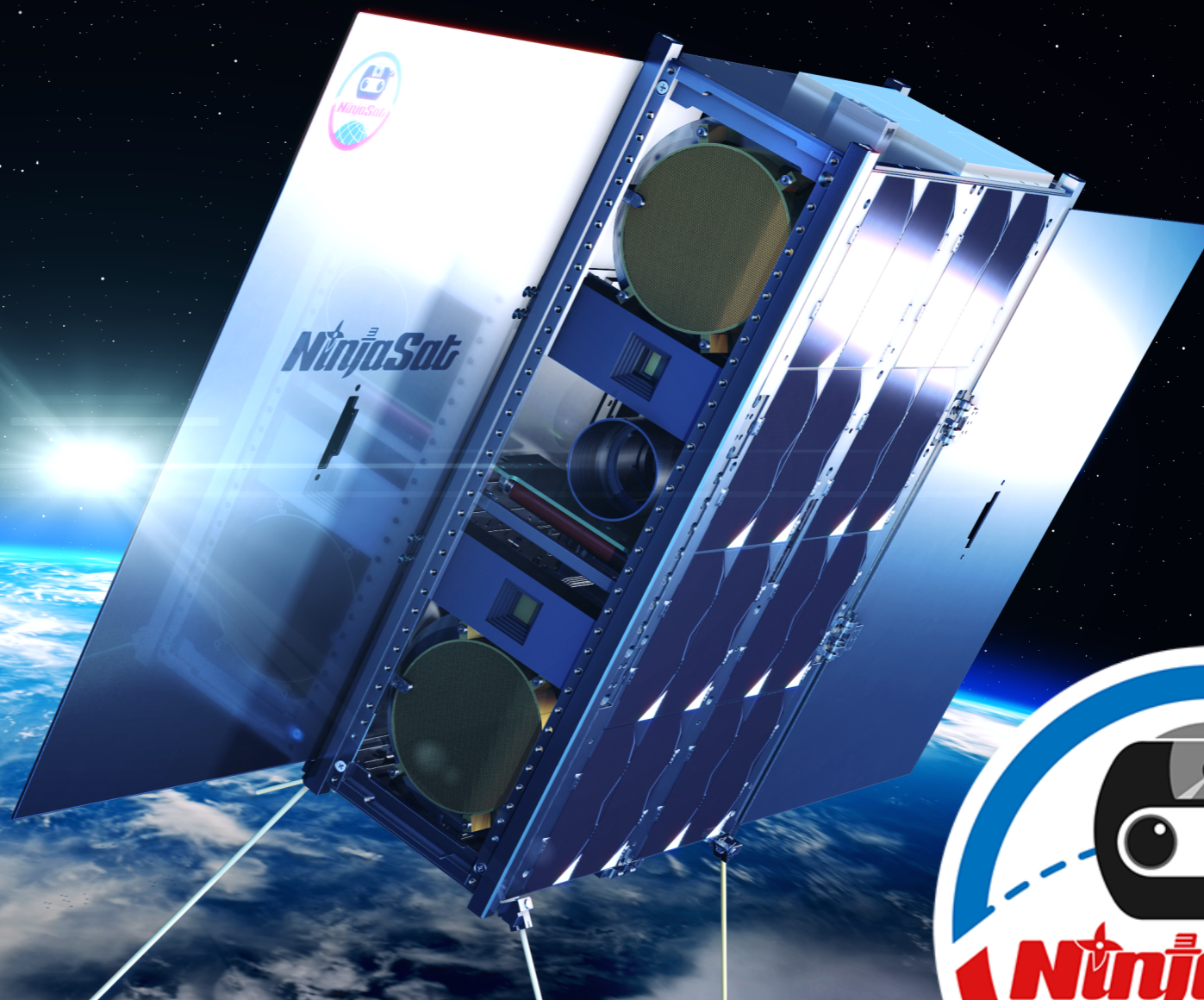
- 水探査用の中性子センサーと、土壌組成や月面での宇宙観測用のガンマ線センサーを搭載。民間の搭載機会も視野に 1U に収まる設計。
- 読み出し電子回路はキューブサット衛星 NinjaSat のノウハウ活用

# 6U キューブサット X線衛星 NinjaSat

理研で開発中の超小型衛星 NinjaSat  
2023年に打ち上げ・観測開始

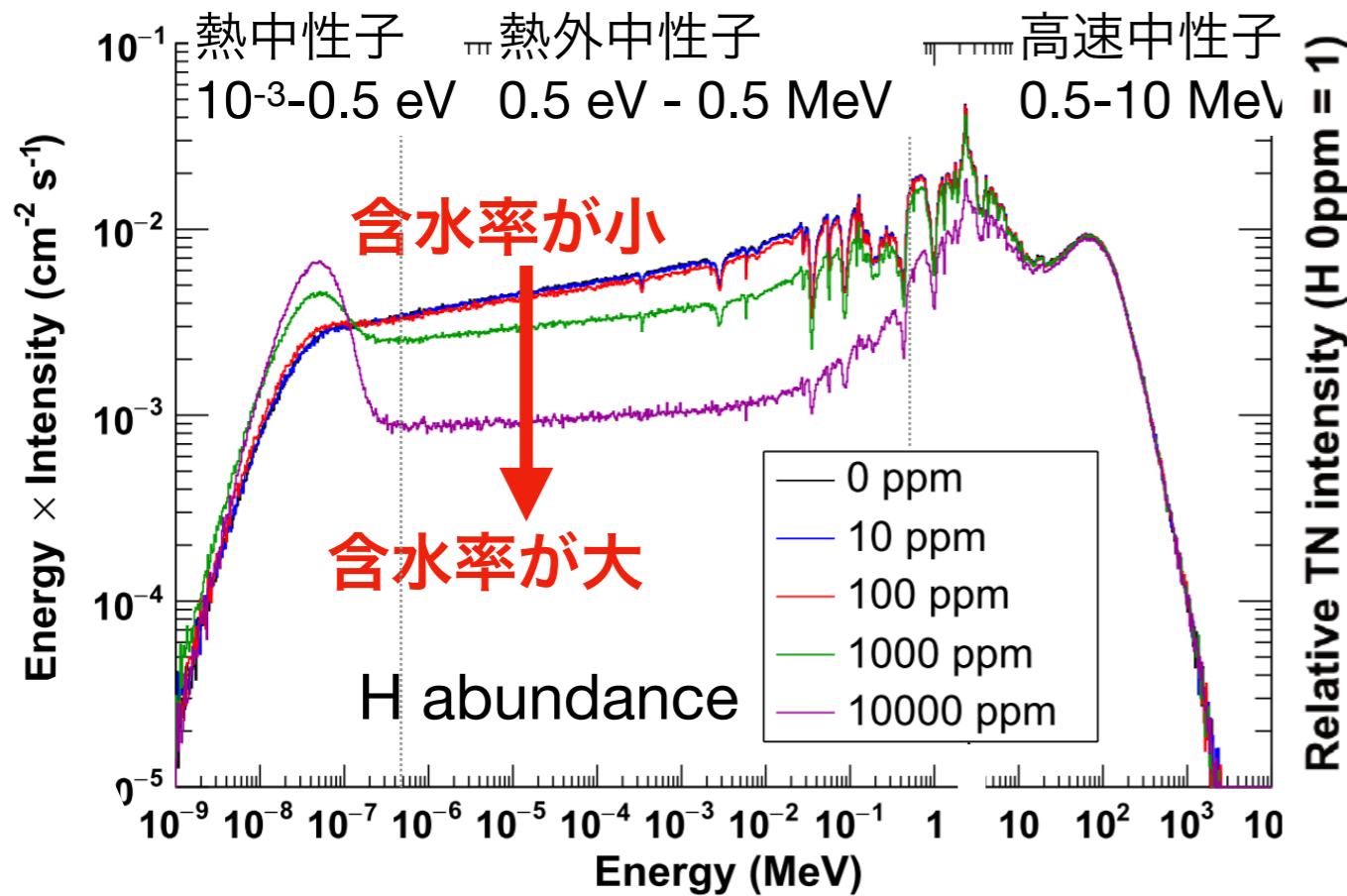


高速自転する中性子星からの重力波？  
自転周期をX線で調べる



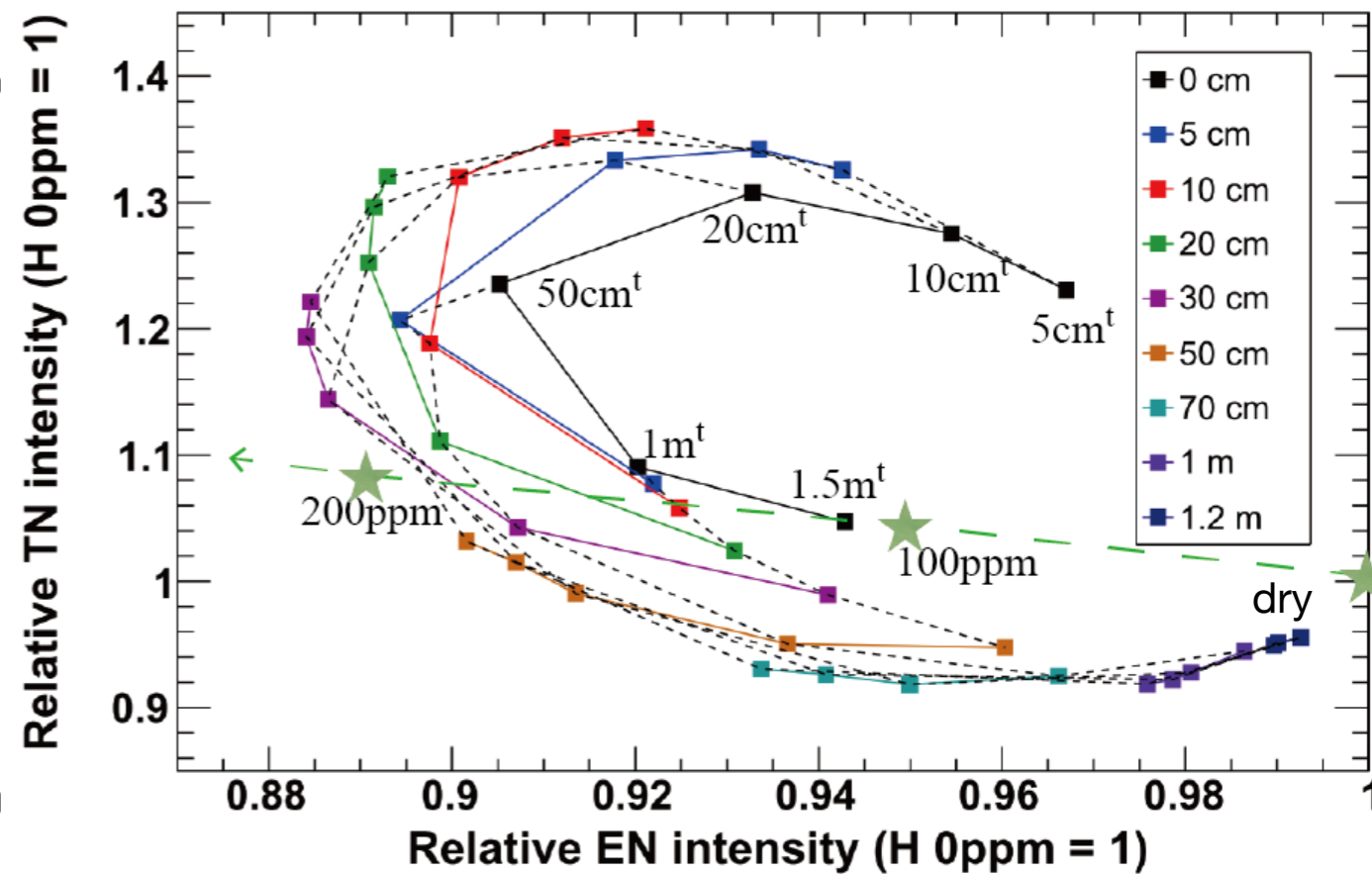
# 月面の中性子伝搬シミュレーション

## 月面から漏れ出す 中性子スペクトル (出力)



## 漏れ出す中性子強度の関係

深さ1.5mまでの平均H量は固定し、H層の深さと厚さ(層内のH濃度)を変化させた場合(一様分布からのずれ)



- 水素含有量は熱外中性子に、組成の違いは熱・高速中性子に主に影響する。
- 含水率の違い、含水層の位置、元素組成 (Fe, Ti, Gd, Sm 等)、空隙率や温度影響評価。

本プロジェクト (草野、長岡、晴山ほか)の計算結果,  
ref: Lawrence et al., 2013, Kusano et al. in preparation

# 土木建築や橋梁検査など地上インフラへ応用



## RI計器による建築現場（締固め）の検査

(提供: ソイルアンドロックエンジニアリング社)

- 中性子水モニタの応用範囲は広い
- 放射線源を使った水測定の実用例
  - 土木工事（地盤調査、締固め）
  - コンクリート構造物の非破壊検査（橋梁、ダムなどの構造物、コンビナートなど）
- 将来の日本のインフラ維持への貢献
  - 例えば、国内の橋梁は73万橋。橋梁点検は、5年に1回。塩分検査は10年に1回。
- 月探査用に開発した装置や技術ノウハウは、地上でのインフラ検査などにも活用を進める。

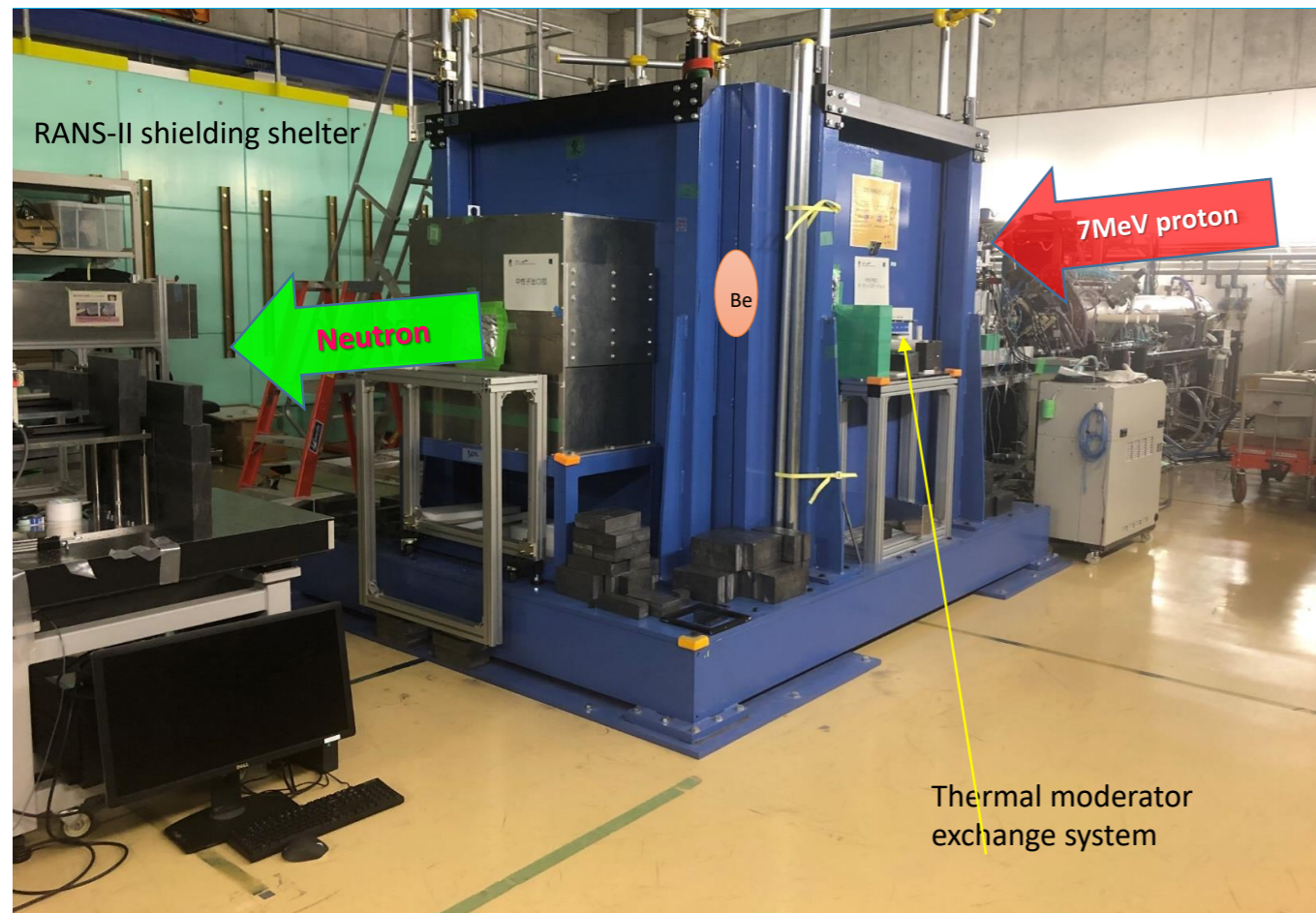
# 中性子水モニタの利用環境での違い

	地上	大気科学・天文学	月・小惑星	火星
中性子源	$^{252}\text{Cf}$ 線源が必要	雷での核反応 太陽中性子	銀河宇宙線の 核反応	銀河宇宙線 (小型中性子源)
検出器の構成	本計画で開発する同一の中性子水分計（ただし、高速中性子・熱外中性子・熱中性子・ガンマ線ごとに要求される感度で検出器構成を調整しうる）			
搭載可能性	車載 ドローン	地上の多地点観測 超小型衛星	月面ローバー 月周回衛星 小惑星探査機	火星探査ローバー
期待される成果	橋梁の劣化調査 建築現場の調査 ドローン配管調査	雷や太陽からの中 性子の科学観測	月・火星・小惑星の 水資源探査・元素組成調査	

(補足) 火星の大気圧は地球の0.8%程度（大気厚では約 $8\text{g}/\text{cm}^2$ ）で、地球での高度30~40 kmに相当し希薄のため、銀河宇宙線の陽子が表面に到達する。これで発生する中性子による検出は可能で、火星周回機(Mars Odyssey) に搭載のガンマ線・中性子計で水を含む土壌組成分析が行われた。しかし、質量数の大きな銀河宇宙線の重粒子衝突で発生する大気中性子などが背景バックグラウンドになるため、火星ローバー(Curiosity) では中性子線源(14 MeVパルス中性子)を搭載して水素・水氷探査を行った。月や火星でも、中性子源を搭載した方がより検出確度は向上する。

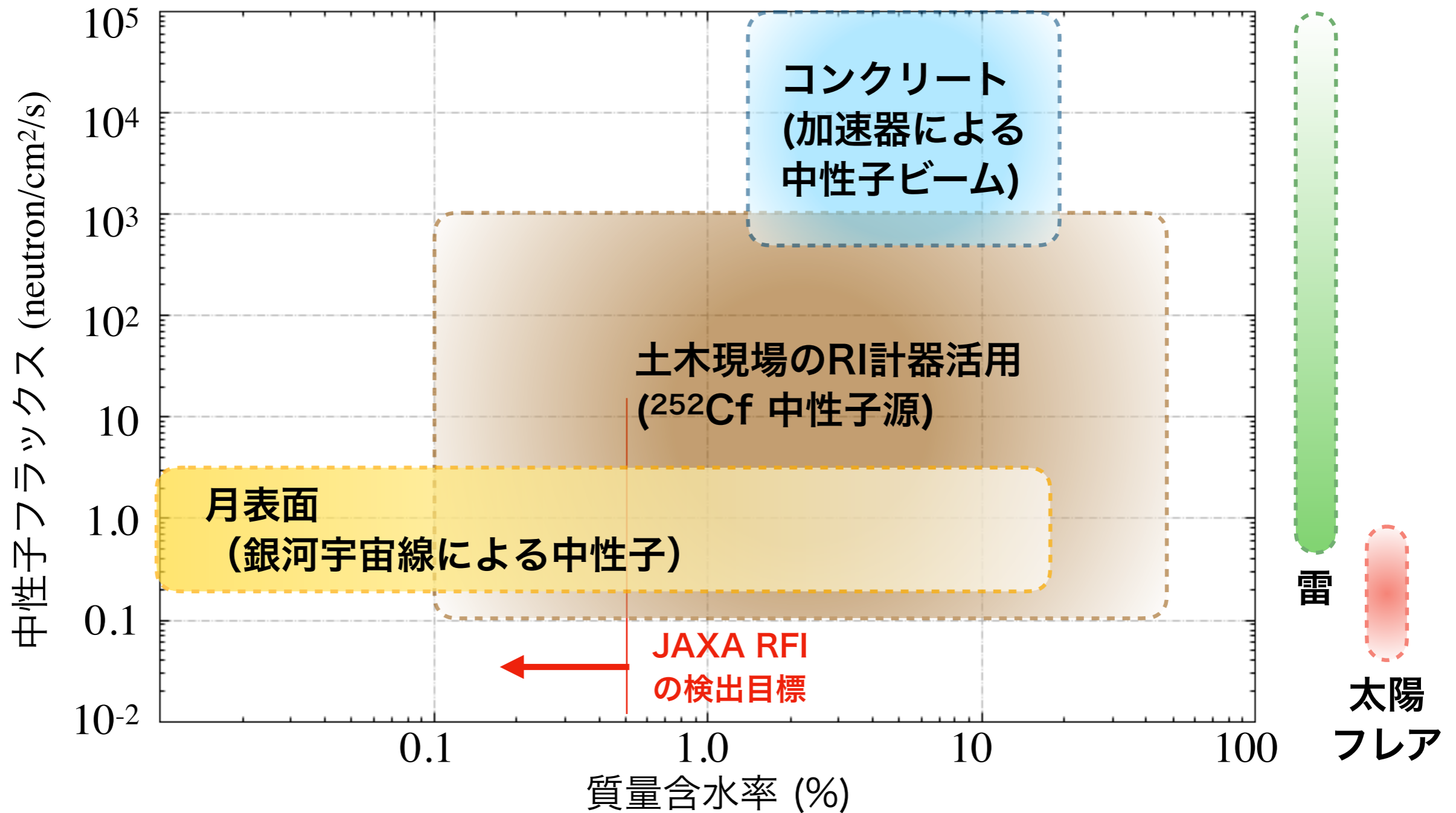
# 理研 RANS と小型中性子源の開発検討

RANS = RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source



- 理化学研究所の陽子線形加速器と  $\text{Be}(p,n)\text{B}$  反応による小型中性子源。本計画でも活用を検討。
- 車載レベルまでの小型軽量化を開発中。橋梁の非破壊検査などに活用できる。
- 本計画では、宇宙機搭載レベルの小型化を目指し、 $^{252}\text{Cf}$  中性子源にシャッター機能を付けるなどの検討を行う。大気のある火星や、月面の洞窟等で活用。

# 中性子を用いた含水率測定 of 計測対象

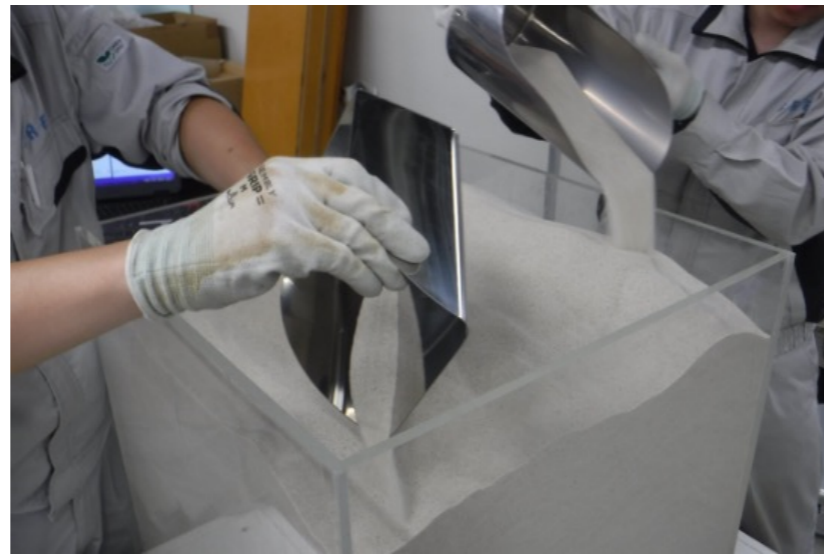


- 地上の測定対象に対し、月面では極低含水率を測定する必要がある。

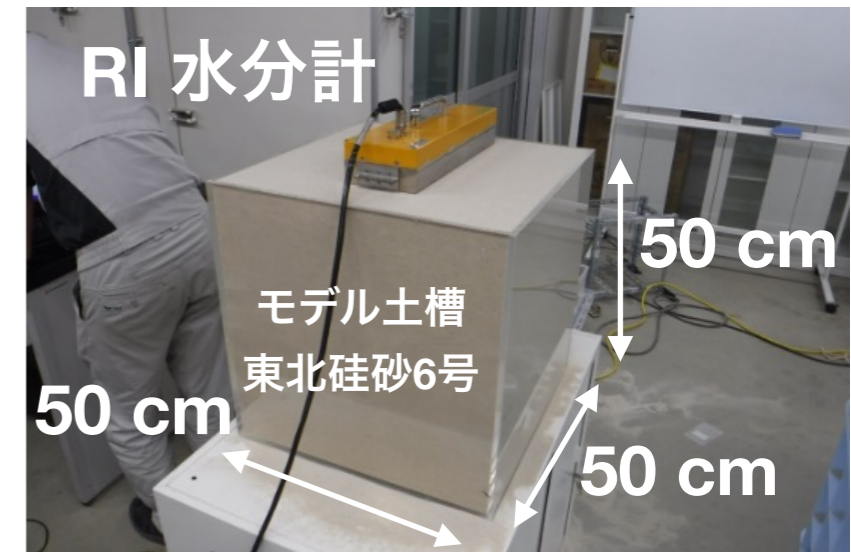
# 月面のモデル土槽を用いた模擬実験



霧吹きによる含水・攪拌



モデル地盤作成



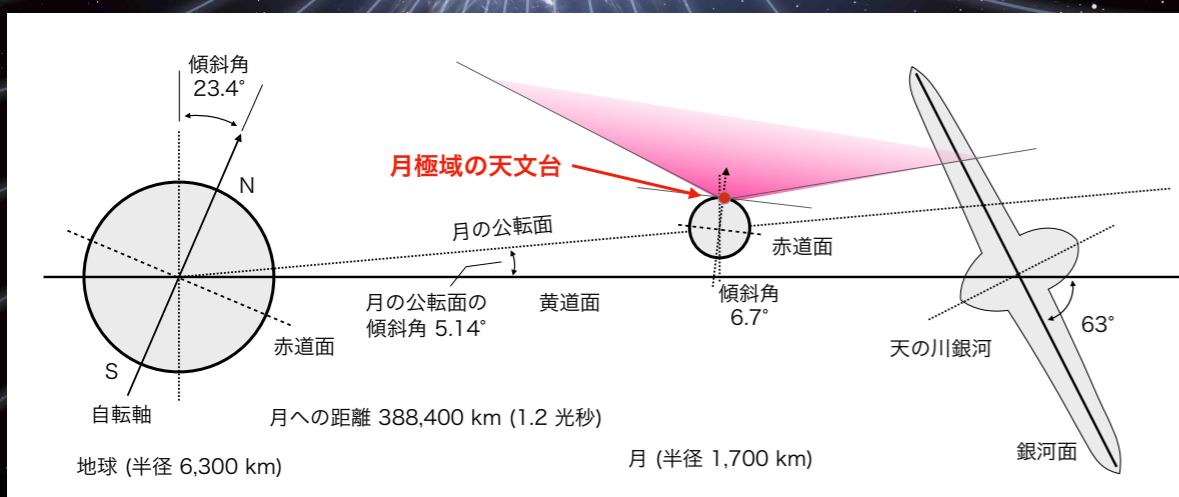
1回10分計測

- 土木分野では、放射線源を用いた地盤含水率の測定が広く行われる。
- しかし、月面のような超低含水率の測定実績はない。
- そこで、実験室内に含水率を制御した月面の地盤モデルを製作する。
- 月面の超低含水率の模擬環境の製作ノウハウの構築と、それを活用した装置性能評価や校正作業を行う。



# 月面天文台としても活用も検討

- 月面ローバーに搭載した中性子水モニタは、ガンマ線バーストや太陽中性子などを検出する月面天文台となる。
- (例) ガンマ線バーストを複数の箇所  
で検出すると、その時間差から発生  
方向を測定できる。地球と月の距離  
を利用すると、方向の決定精度を1桁  
ほど向上できる(degree → sub-  
degree)。これは、中性子星連星合体  
や、宇宙の再電離研究に貢献  
低周波電波天文学との連携が有効の  
ため、X線・ガンマ線・電波天文学者  
のチームを形成中。



# まとめ

- 月というフロンティア開拓では、水の効率的な探査が重要である。月面に降り注ぐ銀河宇宙線は表面下の核反応で中性子を生成し、水で散乱されて漏れ出す熱中性子が、水の存在を示す有効な信号となる。
- 宇宙放射線の高感度観測で培ったノウハウを活かし、月面ローバーに搭載可能な非接触の中性子水モニタを開発する。熱中性子と背景事象であるガンマ線、高速中性子を弁別する技術を磨き上げる。
- 開発した中性子水モニタは、月への展開のみならず、地上の土木建築現場での活用や、雷で発生する中性子の測定、さらに月面での天文台としての活用などの異分野も引き込んだプロジェクトに育てたい。