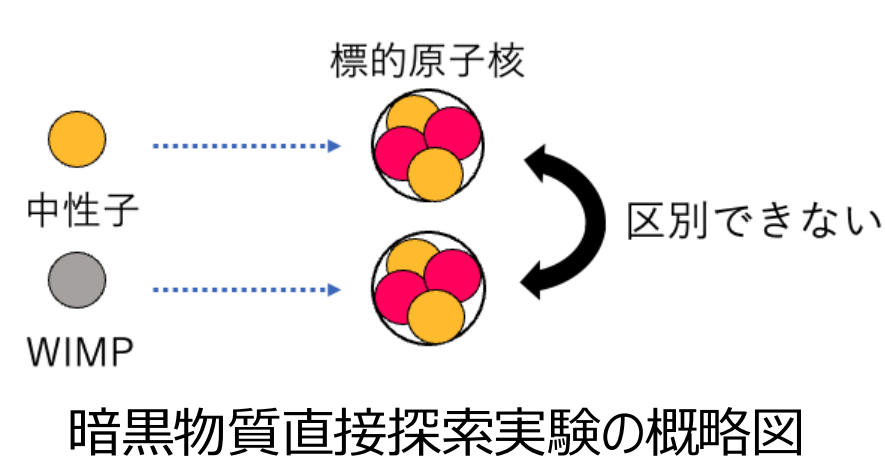


1. 環境中性子

a. 地下宇宙素粒子実験の背景事象(バックグラウンド)

- ・暗黒物質直接探索実験
中性子がWIMPと**同様**に原子核反跳事象を起こす
- ・ $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験
中性子捕獲などで探索エネルギー**付近**の γ 線が放出される

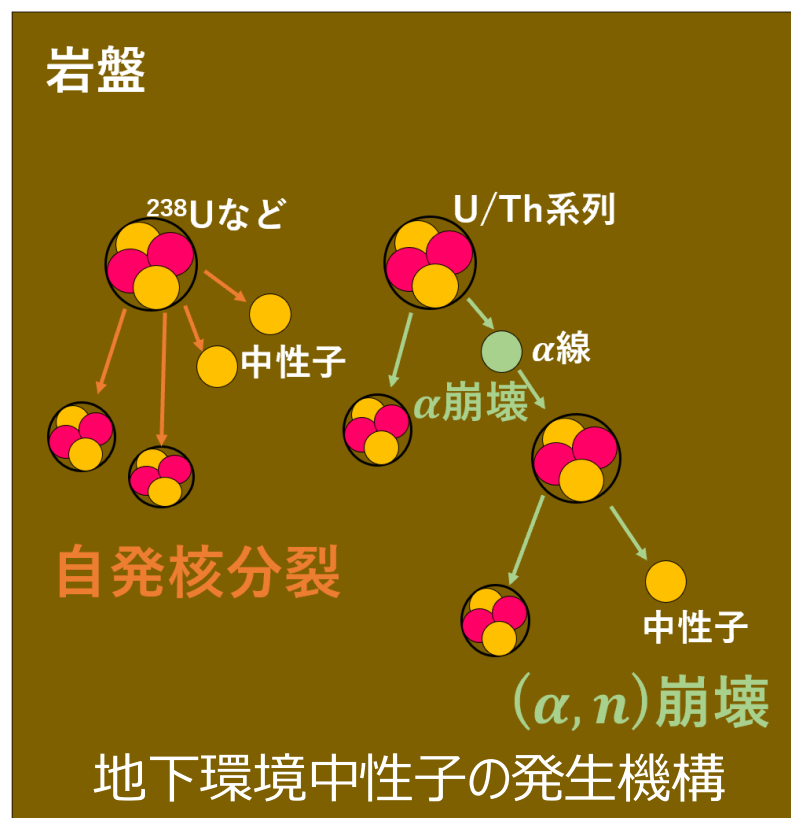


暗黒物質直接探索実験の概略図

地下実験室における環境中性子フラックスやエネルギースペクトルを正確に測定し、バックグラウンドを定量

b. 環境中性子の発生源

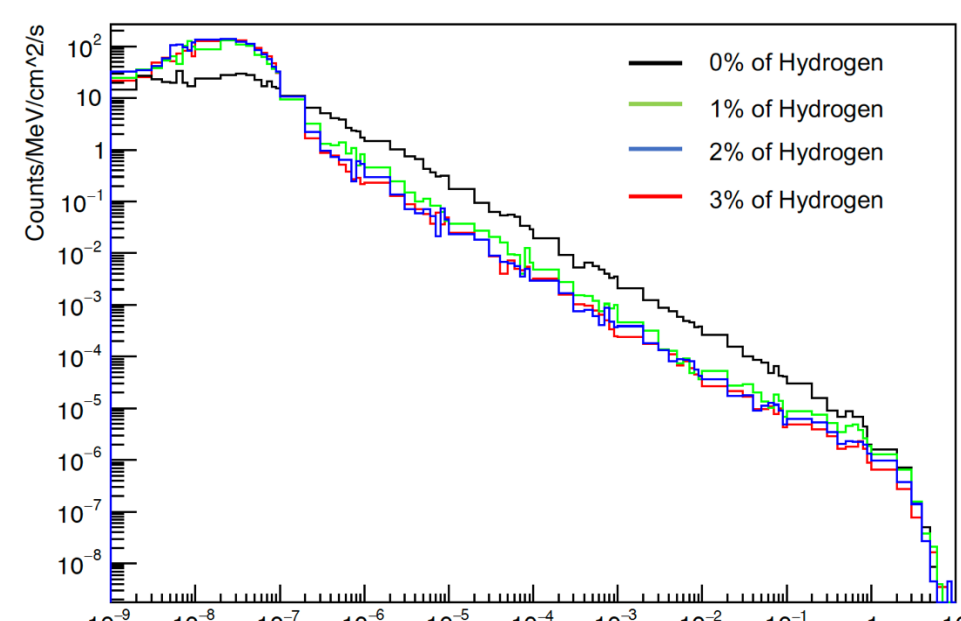
- 宇宙線由来 二次宇宙線のミュオンによる原子核破碎、etc.
→ 地下で低減
- 岩盤由来 放射性核種(主にU/Th系列)の自発核分裂
 α 崩壊で生じた α 線が起す(α, n)崩壊



c. これまでの環境中性子測定

^3He 比例計数管とシミュレーションを用いた間接的な地下環境中性子スペクトルの測定

岩盤の化学組成と水素含有量(重量比で岩盤の0,1,2,3%)を仮定、球形の実験室を再現し、Geant4やNeuCBOTを用いて環境中性子スペクトルを求めた (横浜国立大学 佐々木遼太氏 2021年修士論文)



- ・岩盤中の水素含有量が増加すると低エネルギー側のスペクトル形が変化した。
- ・岩盤に含まれる**水素**が、岩盤内で生成された中性子が実験室に輸送される際の熱化(低エネルギー化)に関係することを示唆している。

地下実験室の中性子フラックスは岩盤内の水分量によって変化する

実際は降水量の変化や春の雪解けにより、神岡地下実験室周囲の岩盤の水素含有量は変化すると予測される

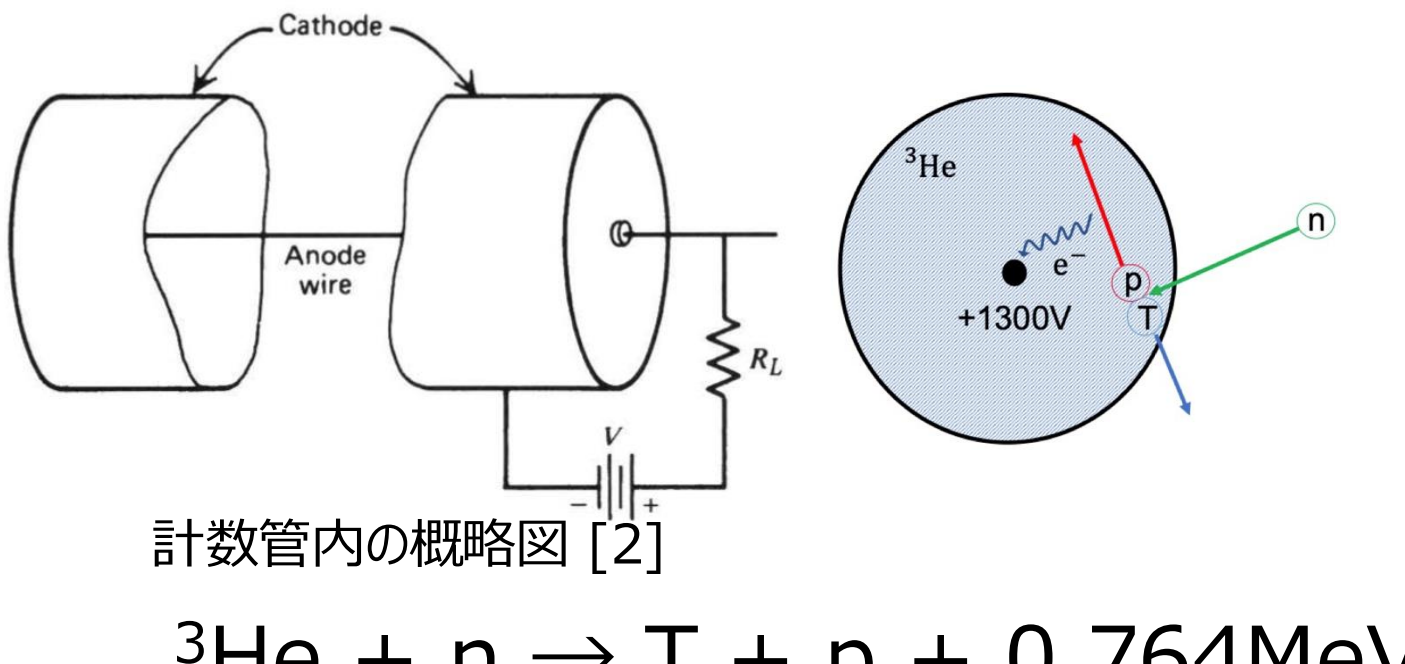
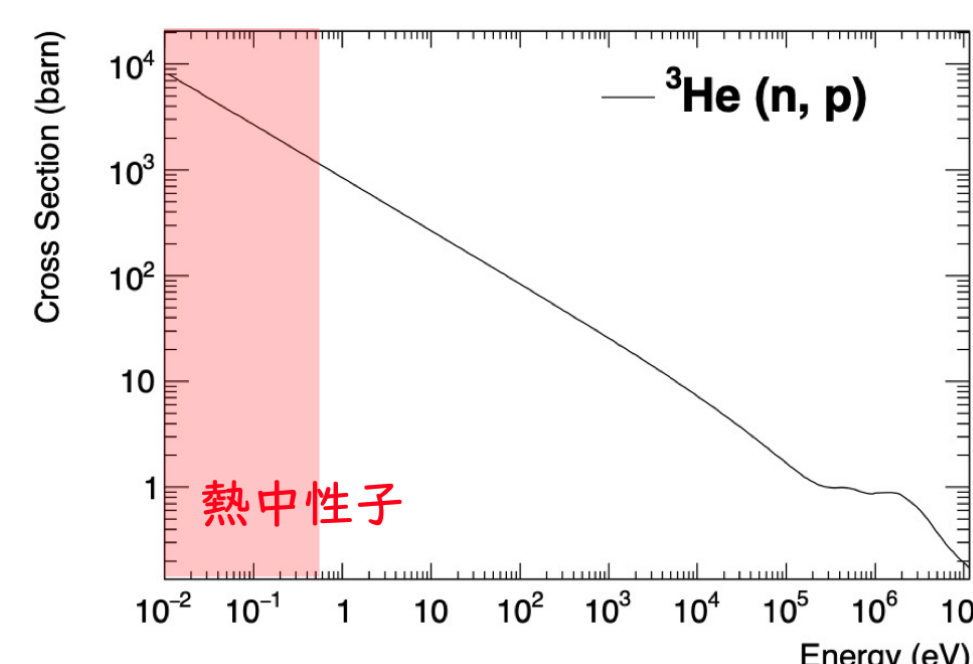
環境中性子の長期測定により
神岡地下実験室の岩盤内の水分量変化との相関を調査

2. 神岡地下実験室Lab-Bでの ^3He 比例計数管による測定

a. ^3He 比例計数管

熱中性子: 運動エネルギーが0.5eV以下
高速中性子: 運動エネルギーが1MeV以上

ガス検出器の一種で熱中性子に高い感度を持つ

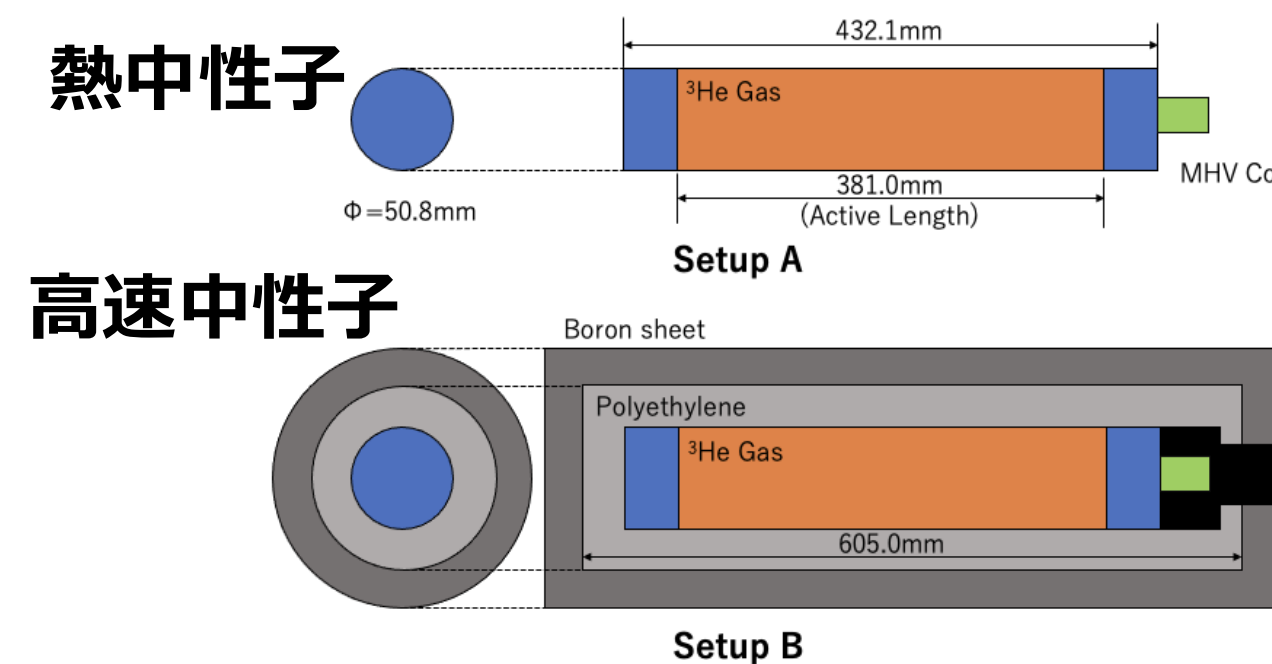


$^3\text{He} + n \rightarrow \text{T} + \text{p} + 0.764\text{MeV}$

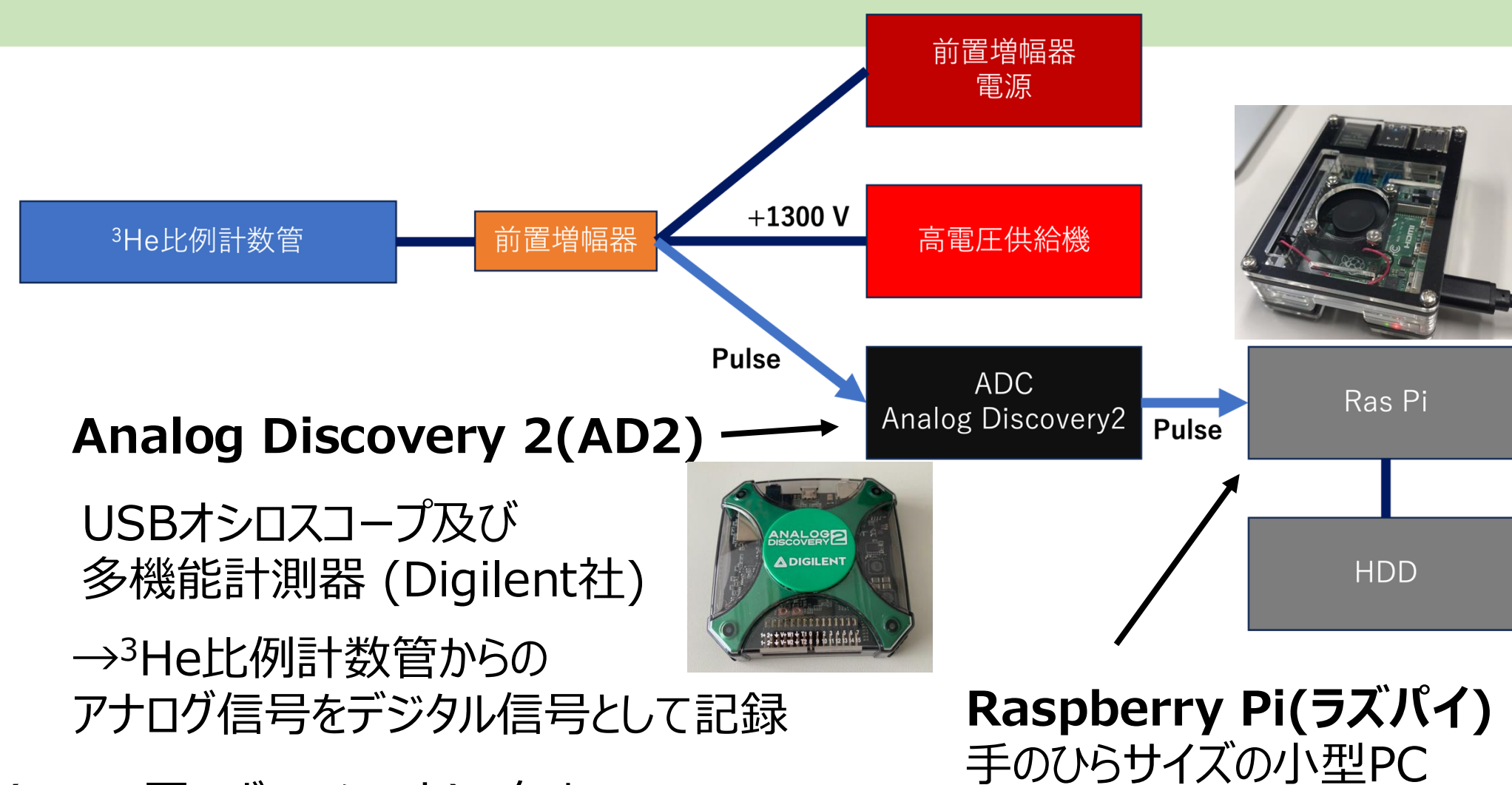
中性子エネルギーに対する ^3He ガスの反応断面積 [2]

b. 測定セットアップとデータ収集系

・SetupAとSetupB 2つのセットアップを構築



中性子減速材(6.5 cm厚のポリエチレン)と熱中性子吸収剤(5mm厚のボロンシート)で包む



Analog Discovery 2(AD2)

USBオシロスコープ及び多機能計測器 (Digilent社)

→ ^3He 比例計数管からのアナログ信号をデジタル信号として記録

Raspberry Pi(ラズパイ)
手のひらサイズの小型PC

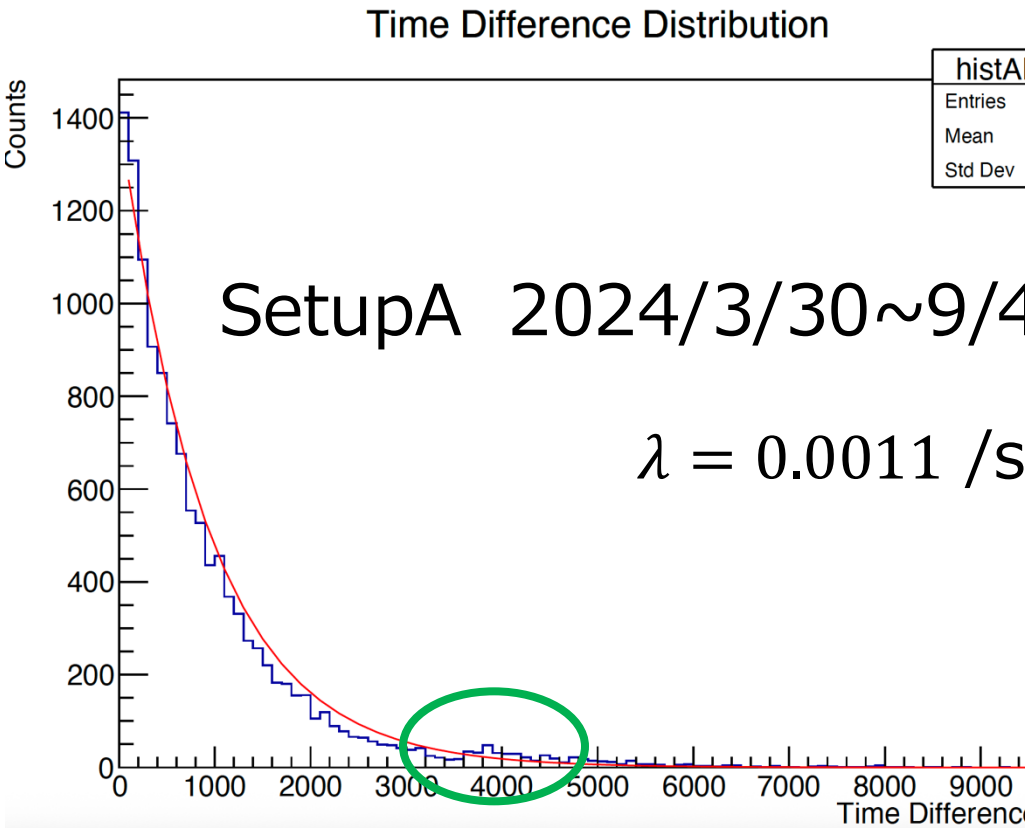
3. DAQの改善・安定化への取り組み

2021年7月から2024年8月まで長期測定を行っていたが、測定データが信頼できないと結論

- ・ ^{252}Cf 中性子線源を使ったcalibration時に1時間を超えるデータ欠損が複数回あった
- ・ラズパイのsshリモート接続が応答しない期間が続いた

現地へ行き、ラズパイが熱を持つ + SDカードの破損を確認

加えて、環境中性子測定時の前後事象の時間差分布を調査



→ 信号の時間差分布は**指数分布**に従うとして外れ値の確率を求めた
(ランダムなイベントの発生間隔を表す分布 累積分布関数: $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$)

$P(3600 < x < 4000) = F(4000) - F(3600) = 0.7\%$
よって3600s~4000sの間に観測されるはずの信号数は87個
99%信頼区間で62~111個

一方実際には145個もの信号が見られた $\frac{145}{12451} = 1.2\%$

★横国でのテストパルスを用いた試験でも同様の問題を再現

DAQのフリーズがあったと断定

問題への対策

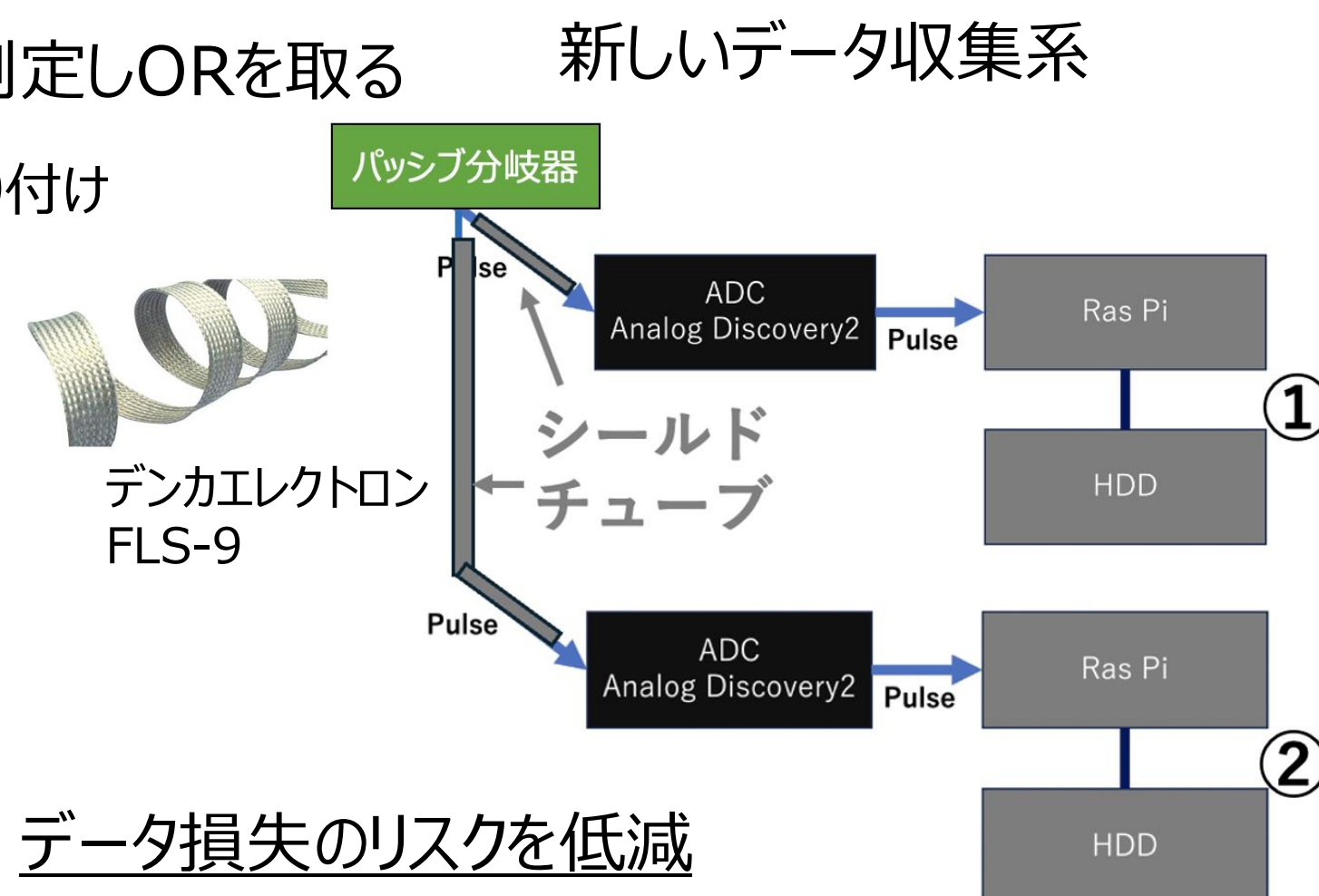
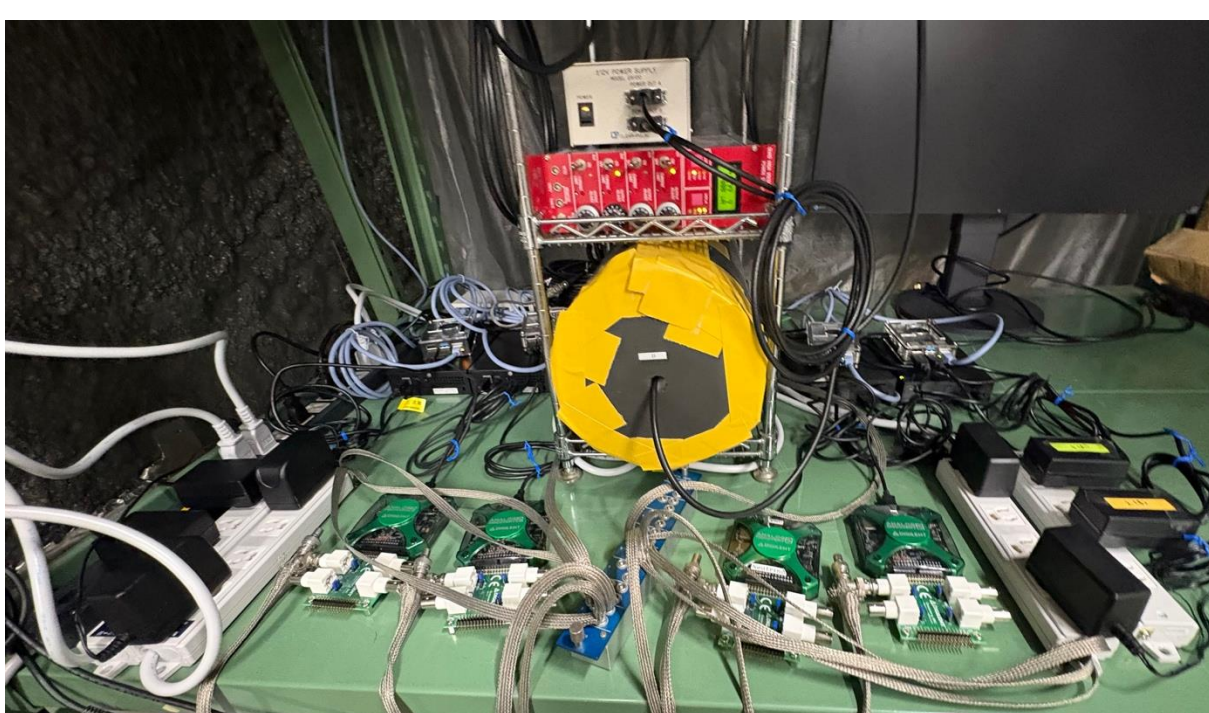
- ①ラズパイの安定性向上
 - ・高耐久なSDカードに変更
 - ・冷却ファンを追加
 - ・高出力のACアダプターに変更

テストパルスを用いた数週間の試験で問題は再現されず
長期測定再開後は半年ごとに新しいSDカードに交換

②データ収集系の多重化

1台の ^3He 比例計数管を2つのデータ収集系で測定しORを取る

電気信号が通るLEMOケーブルにシールドチューブを取り付け
→ グランドも強化しノイズを防ぐ

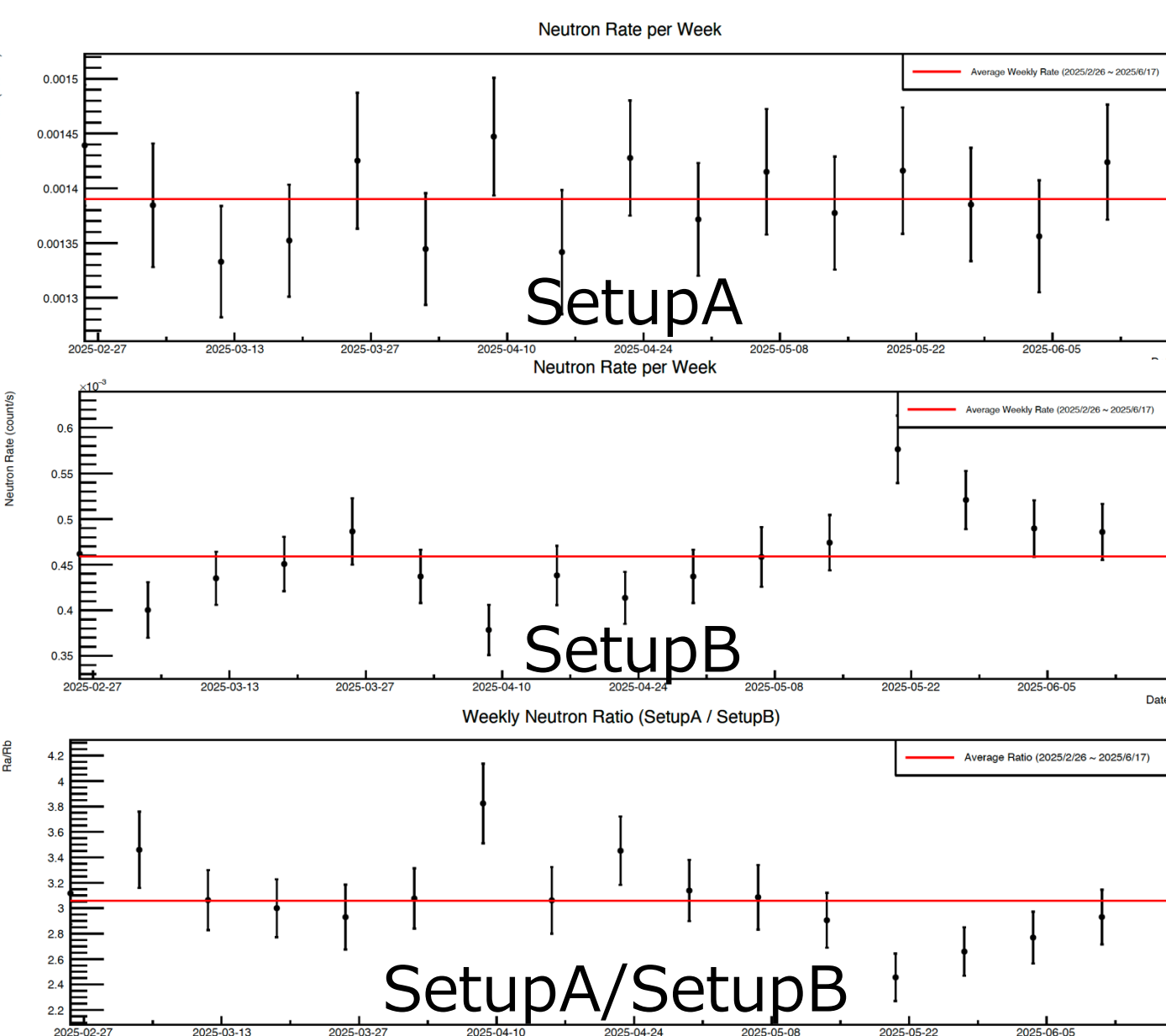


データ損失のリスクを低減

2025年2月26日より長期測定を再開

4. 115日分の環境中性子測定結果及び環境要因との相関 (2025/2/26~2025/6/20)

a. 週毎の中性子レート推移



- ・多重化したDAQで日毎の中性子カウント数まで一致することを確認
- ・ R_A は週が変わると大きく変動するのに対し、 R_B は滑らかに変動

b. 誤差を考慮した相関係数の評価と必要測定期間の見積もり

以下のモンテカルロシミュレーションで誤差付き相関係数を求めた

- 1.各日(週)の中性子レートを正規分布でランダムにサンプリング
- 2.相関係数を10000個計算
- 3.分布を集計して平均&標準偏差を算出し、68%信頼区間で評価

有意性検出に必要なデータ数の見積もり

上記で推定された相関係数の範囲内を0.01刻みで走査
各相関係数 ρ に対してサンプル数 N を変えながら以下を行う

I. 相関係数 ρ に基づく N 個の人工データ (x, y) を生成

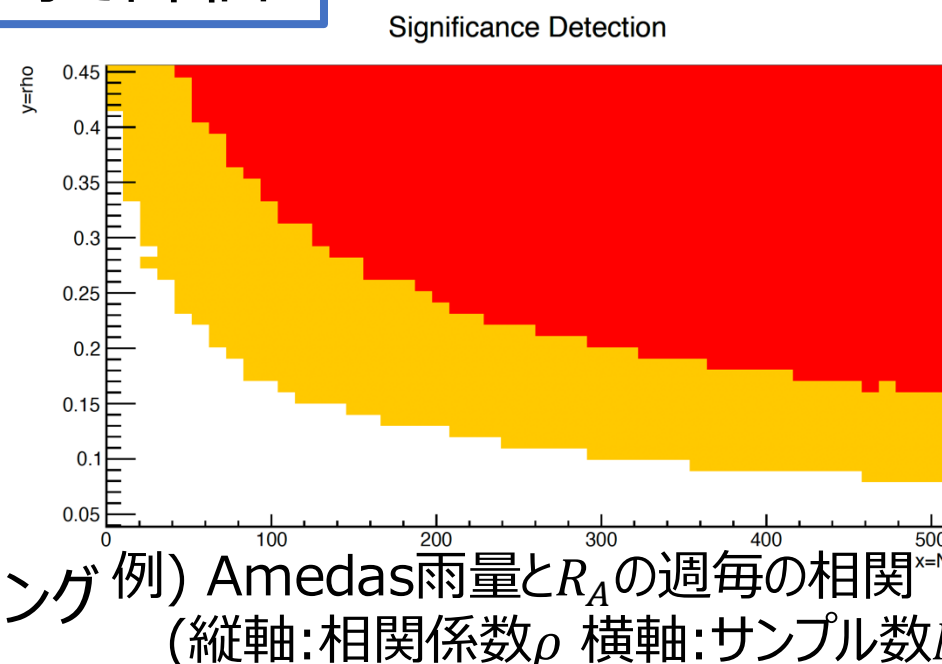
$x = \mu_x + u\sigma_x$ $y = \mu_y + (u\rho + v\sqrt{1-\rho^2})\sigma_y$ u, v は標準正規乱数

II. 中性子レートは実際の相対誤差から誤差付き乱数として再サンプリング

III. 以下の2つの条件で有意な相関が検出できたと判断

- ① 相関の68%CIが0を跨がない
- ② 68%CIの半幅<相関係数の半値

ρ	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
N	330 未達	150 未達	90 320	60 200	40 130	30 100	30 80	20 60



2025/6/20現在
 $N_{\text{日}} = 115$ $N_{\text{週}} = 16$

湿度 vs R_B

湿度 vs R_A/R_B

c. 環境パラメータとの相関結果

- ①**雨量**: 岩盤の含水量が増加し中性子の熱化が起こると仮定
→ R_A R_A/R_B で正、 R_B で負の相関と予想
(神岡町の気象庁アメダス、KAGRAの雨量計 by 鷲見さん)
- ②**湿度**: 空気中の水分が熱化を誘起させていると仮定
→ R_A R_A/R_B で正、 R_B で負の相関と予想
(坑内のRn Monitoring System by Raspberry Pi)

相関係数	AMeDAS	KAGRA雨量	湿度
R_A	0.247 ± 0.20	0.386 ± 0.31	0.075 ± 0.21
R_B	0.133 ± 0.14	-0.34 ± 0.27	0.481 ± 0.12
R_A/R_B	-0.024 ± 0.15	0.465 ± 0.26	-0.400 ± 0.14

(KAGRA雨量計は積雪に弱く冬シーズンを除いているため、AMeDASと相関が大きく異なる。このように時期によって相関は大きく異なる。)

- ・ほとんどのデータで誤差が大きく、相関についてまだ議論できない
- ・湿度と R_B 、 R_A/R_B の相関については予想とは逆の有意な相関が見られた
- ・岩盤へ雨水が染み込むタイムラグを考慮し週をずらした相関も調査中

5. まとめと展望

- ・ ^3He 比例計数管を用いて神岡地下実験室Lab-Bにおける環境中性子を長期測定している
- ・データ収集系を安定化させ、2025年2月末より長期測定を再開
- ・今後は環境要因及び金庫内の ^{252}Cf 中性子線源が中性子レートに与える影響を見積もる

6. 参考文献

- [1] 佐々木遼太. 地下実験施設における環境中性子測定. 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系理工学専攻物理学教育分野 修士論文
- [2] Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., 2010. 162p.