

D01 地下環境中性子測定

南野彰宏（横国大）

第10回極低放射能技術研究会@富山大

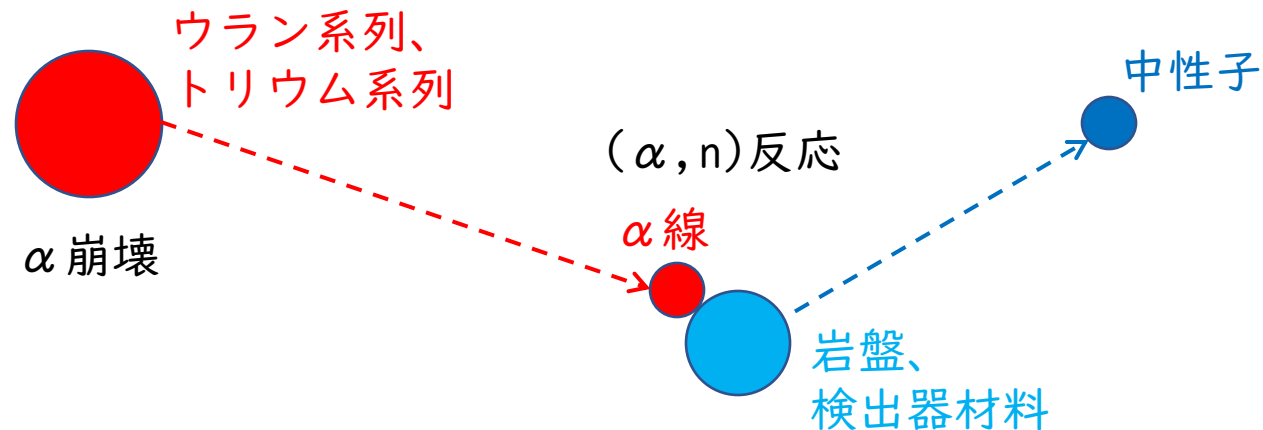
2025年3月8日

目次

- 地下実験室における環境中性子
- ^3He 比例計数管による長期測定データにおける2つの問題
- まとめと今後の予定

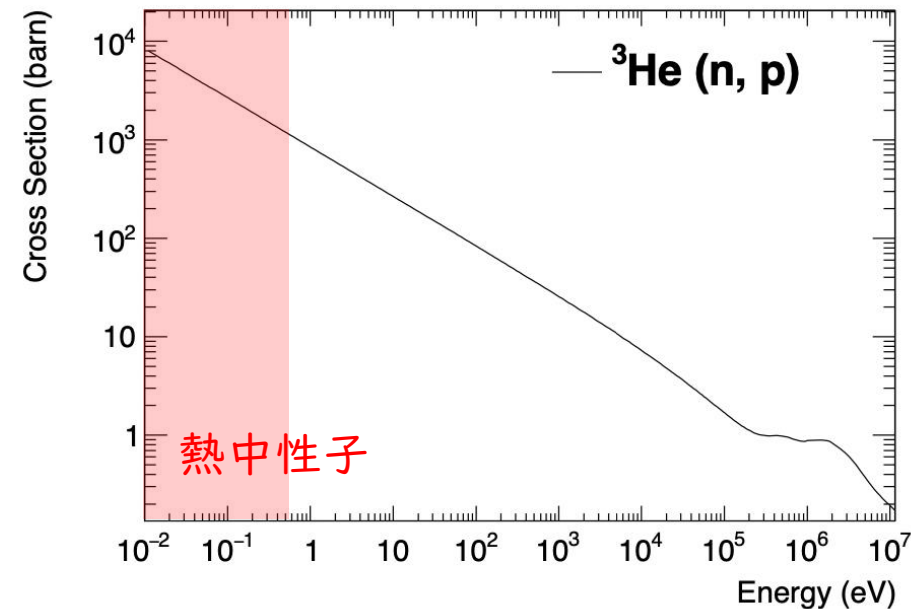
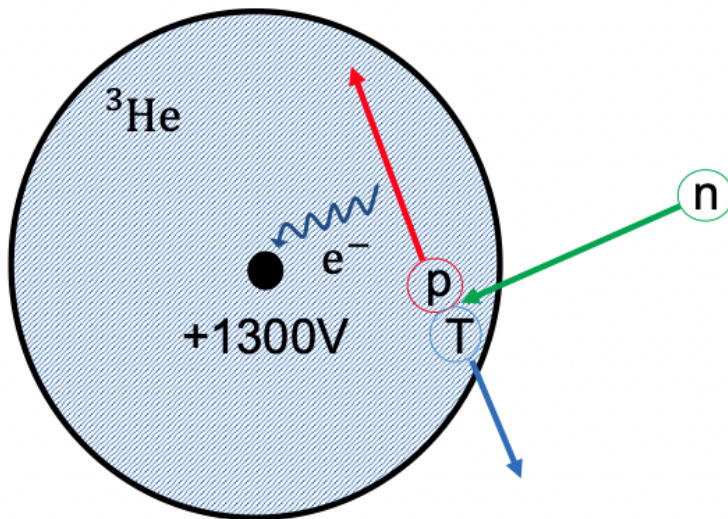
地下実験室における環境中性子

- 地下宇宙素粒子実験のバックグラウンド源
 - 標的物質との弾性散乱→宇宙暗黒物質直接探索
 - 標的物質との非弾性散乱→ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索
- 地下実験室での主な環境中性子発生源
 - 岩盤や検出器材料とそれに含まれるウラン系列、トリウム系列の崩壊で発生する α 線との (α, n) 反応。



^3He 比例計数管

- $^3\text{He} + n \rightarrow p + T + 0.765 \text{ MeV}$
- 熱中性子に高い感度
- 高速中性子は減速材（ポリエチレンなど）で減速後に測定。



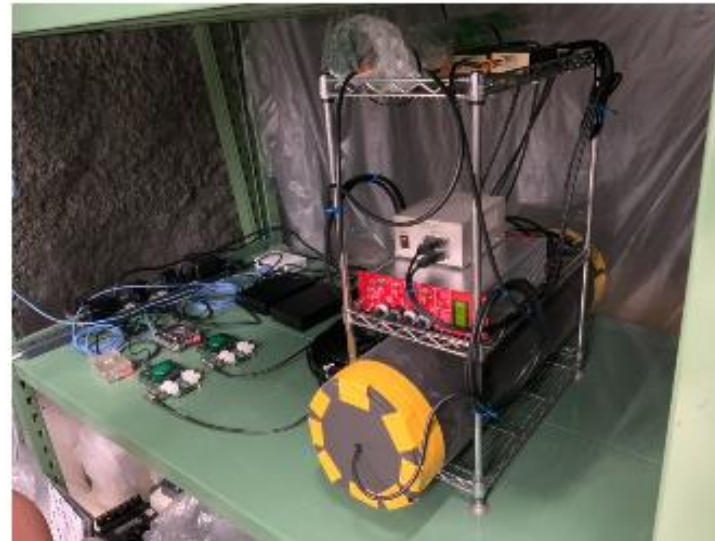
^3He 比例係数管による地下環境中性子測定

2021年7月～2023年4月



2023年4月～

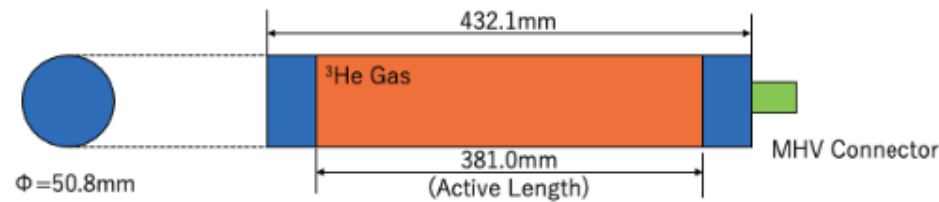
比例計数管



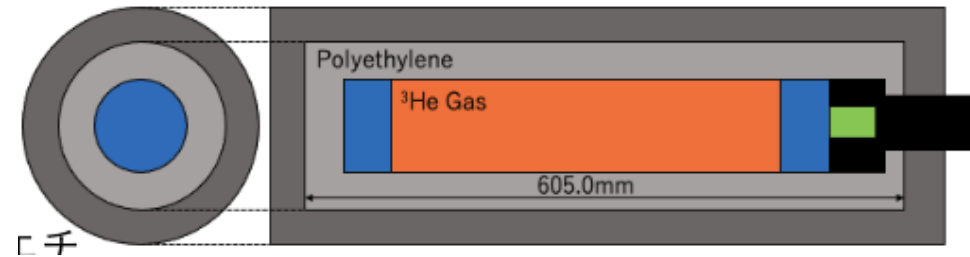
^3He 比例係数管による地下環境中性子測定

- 神岡地下実験室Lab-B、2021年7月～2023年4月、2023年4月～2024年8月

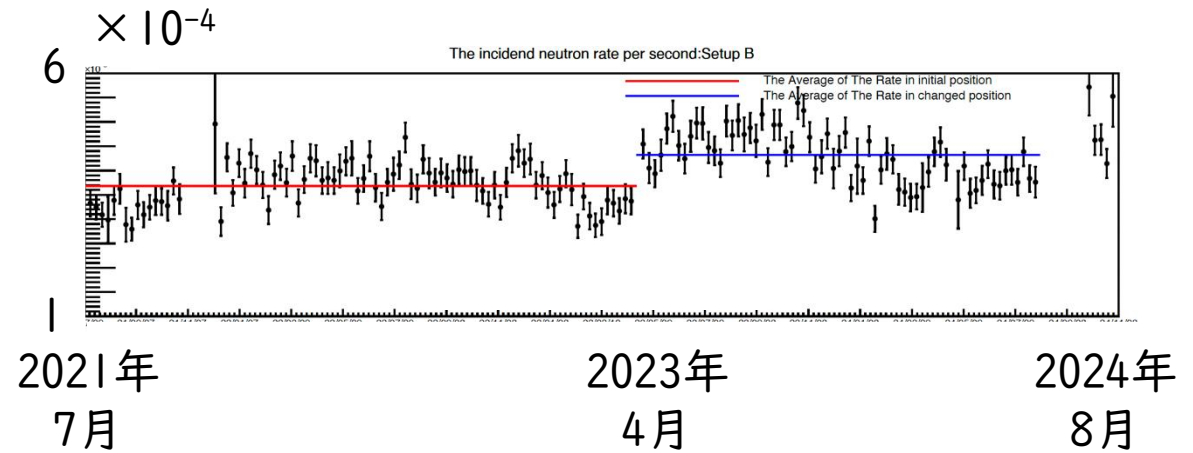
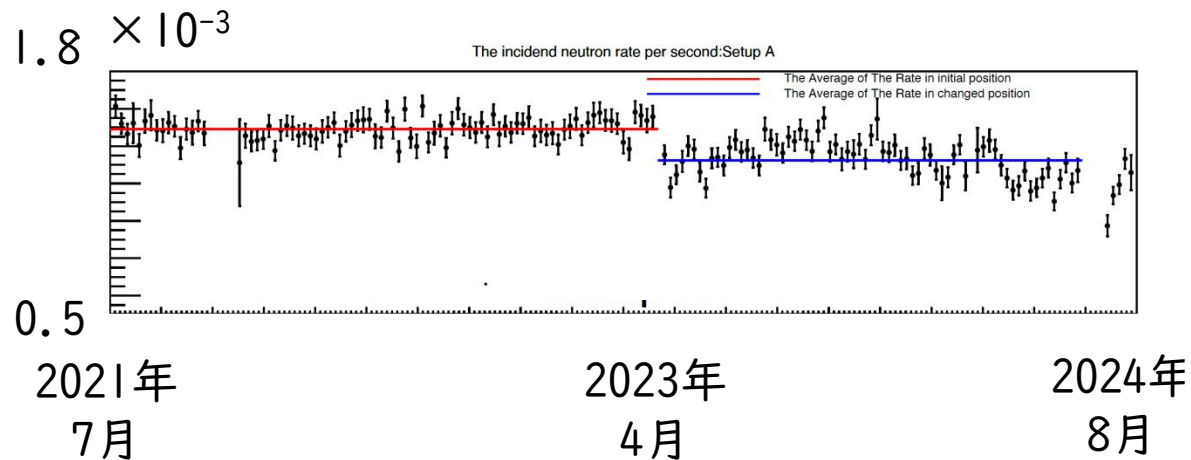
Setup A: 熱中性子



B: 高速中性子



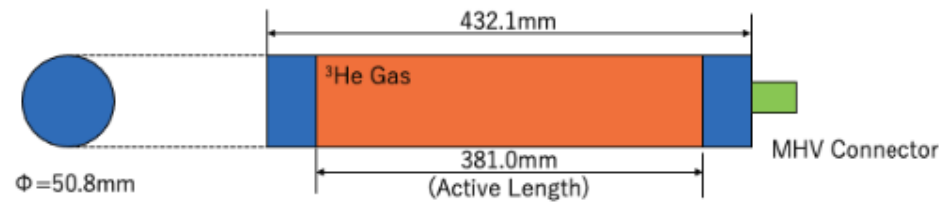
events/秒



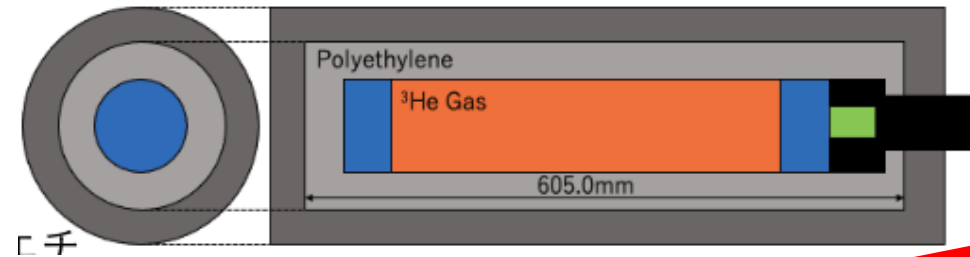
^3He 比例係数管による地下環境中性子測定

- 神岡地下実験室Lab-B、2021年7月～2023年4月、2023年4月～2024年8月

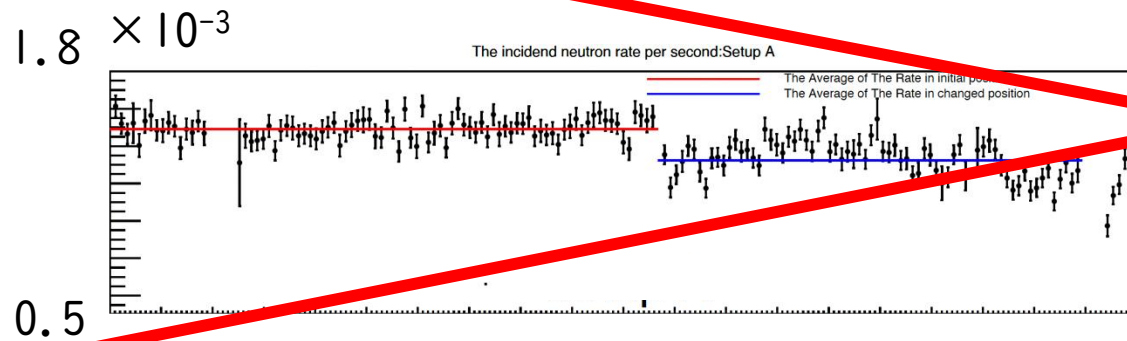
Setup A: 熱中性子



B: 高速中性子



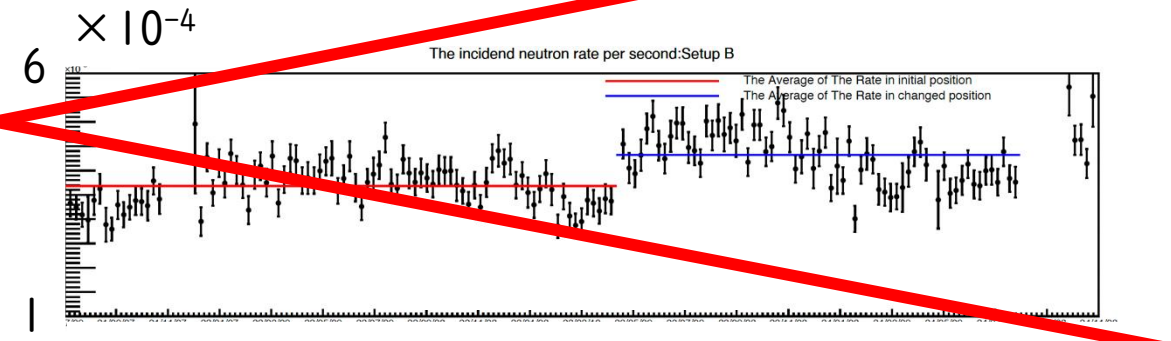
events/秒



2021年
7月

2023年
4月

2024年
8月



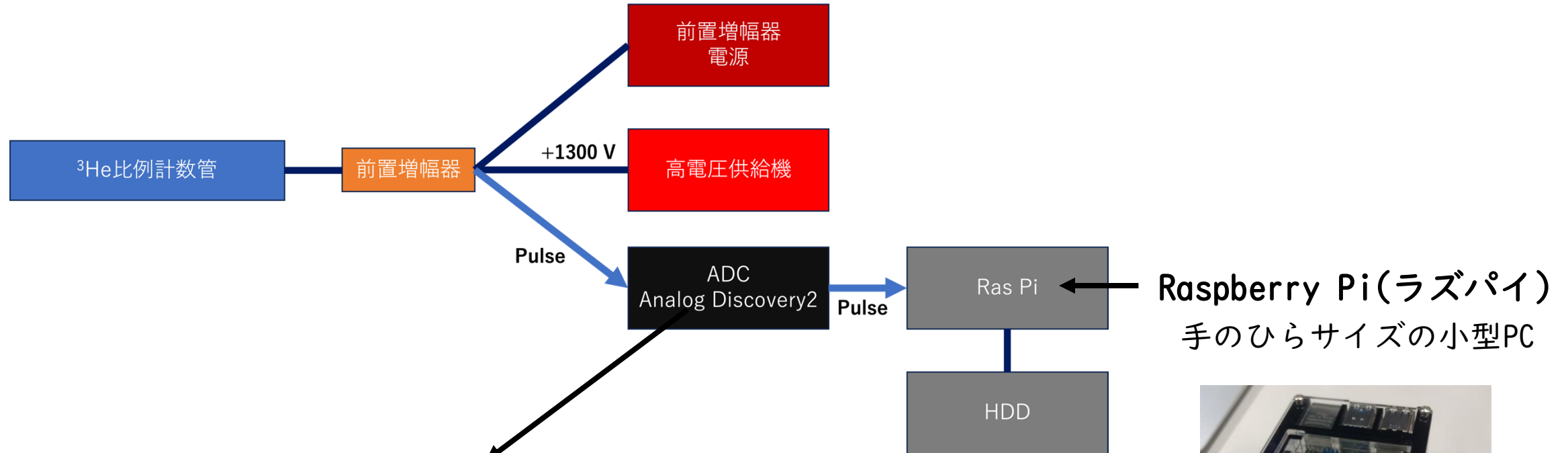
2021年
7月

2023年
4月

2024年
8月

後述する理由のために観測データが信頼できないと結論した。

問題①: ^3He 比例計数管のデータ収集系



Analog Discovery 2(AD2)

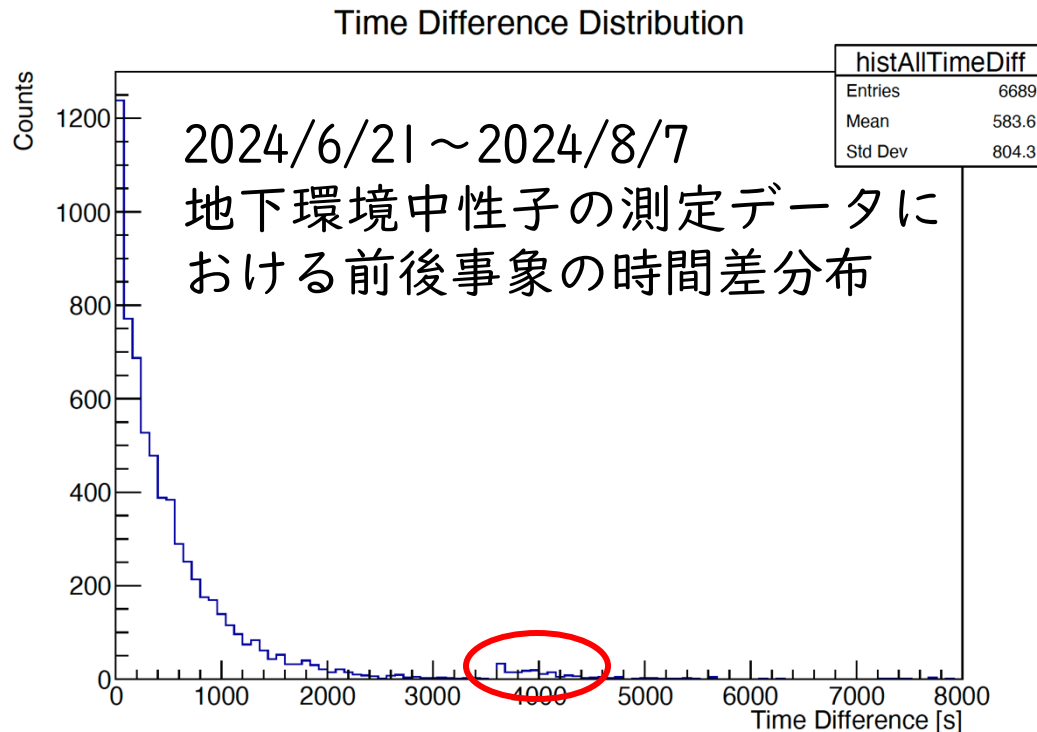
USBオシロスコープ及び
多機能計測器 (Digilent社)

→ ^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



問題①: ^3He 比例計数管のデータ収集系

- 環境中性子測定時の前後事象の時間差分布に外れ値を確認
 - 3600秒から4400秒に信号が観測される割合
 - 指数関数に従う場合: 0.2%
 - 測定データ: 2.2%
- 他の期間および校正データ (^{252}Cf) でも同様の問題を確認



テストパルスを用いた試験でも問題（測定できない時間が発生）を再現

観測データは信頼できないと結論

問題①: ^3He 比例計数管のデータ収集系

- 問題への対策I

- 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、問題は再現しなくなった。

- 長期試験開始後は半年ごとに新しいSDカードに交換

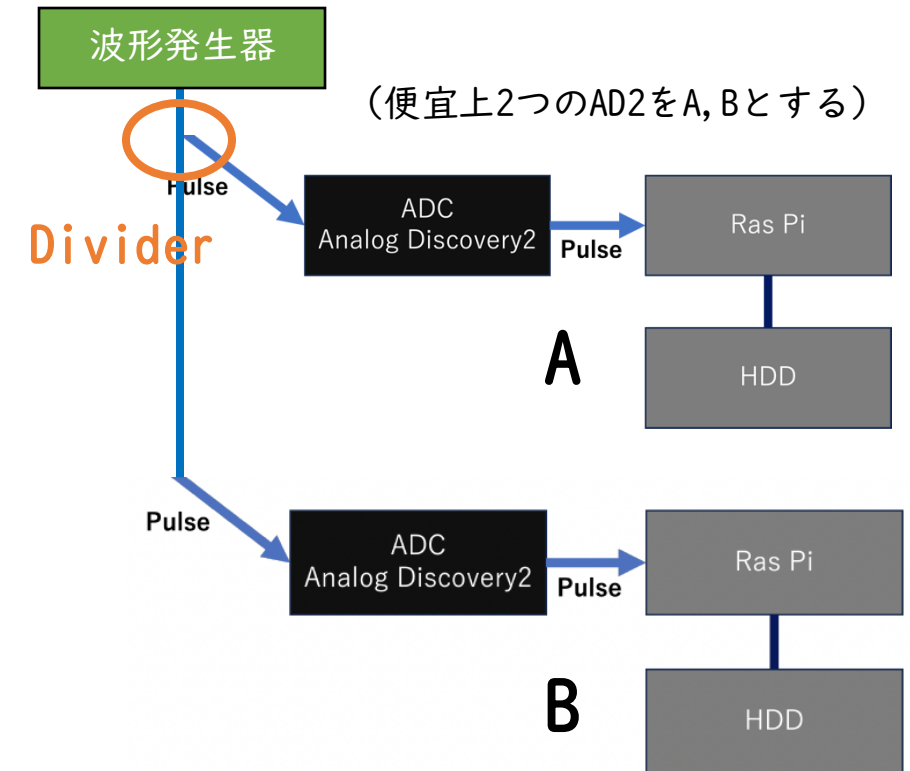
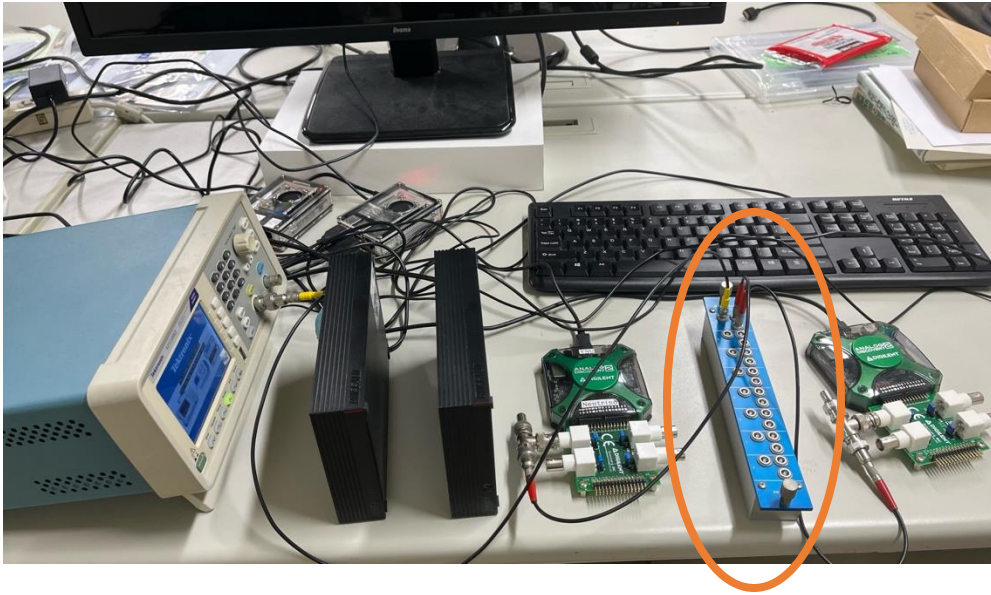


SanDisk High Endurance
microSD™ Card - 32GB



問題①: ^3He 比例計数管のデータ収集系

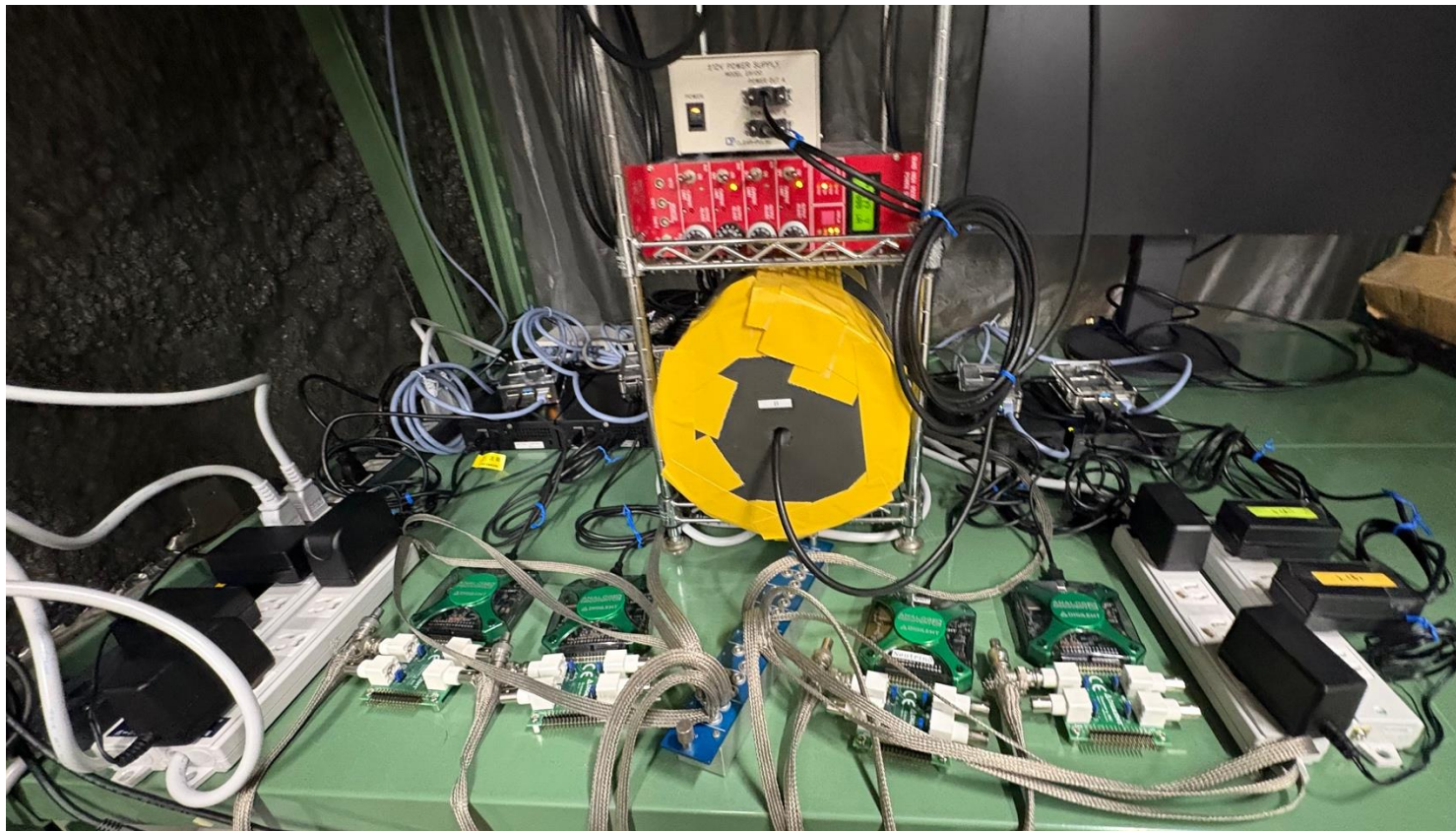
- 問題への対策2
 - データ収集系の多重化
 - 1台の ^3He 比例計数管を2つのデータ収集系で測定し、ORを取る。



問題①: ^3He 比例計数管のデータ収集系

- 問題への対策3（これから。東野さんからのアドバイス）
 - Analog discovery2に専用の電源を用意する
 - 現在はラズパイからUSB給電
 - データ収集プログラムの改良
 - 周期的にAnalog discovery2との通信状況を確認し、通信が途切れたらランを切り替える。

新しいデータ収集系

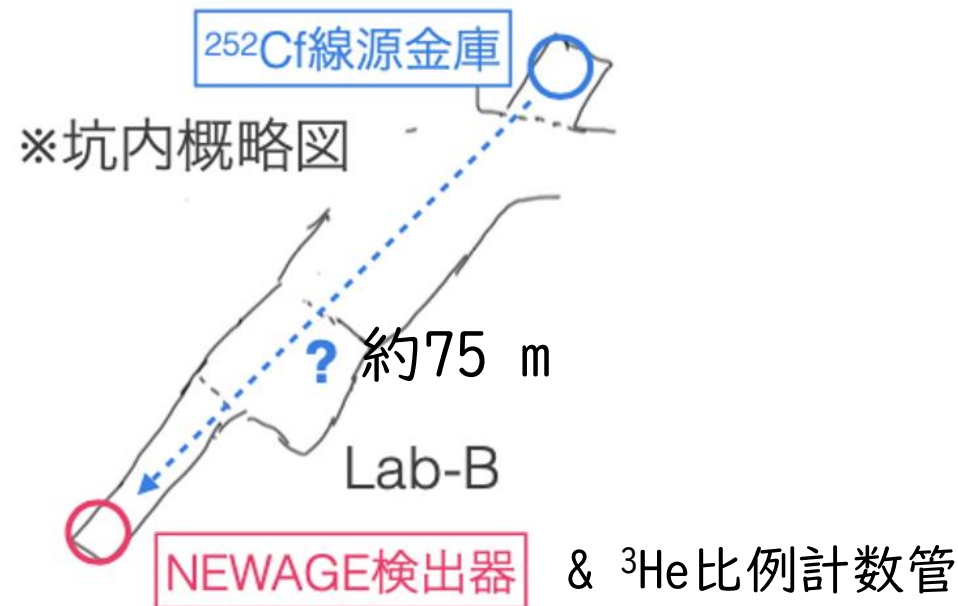


2025年2月24日に測定を再開。

← グランドも強化した。

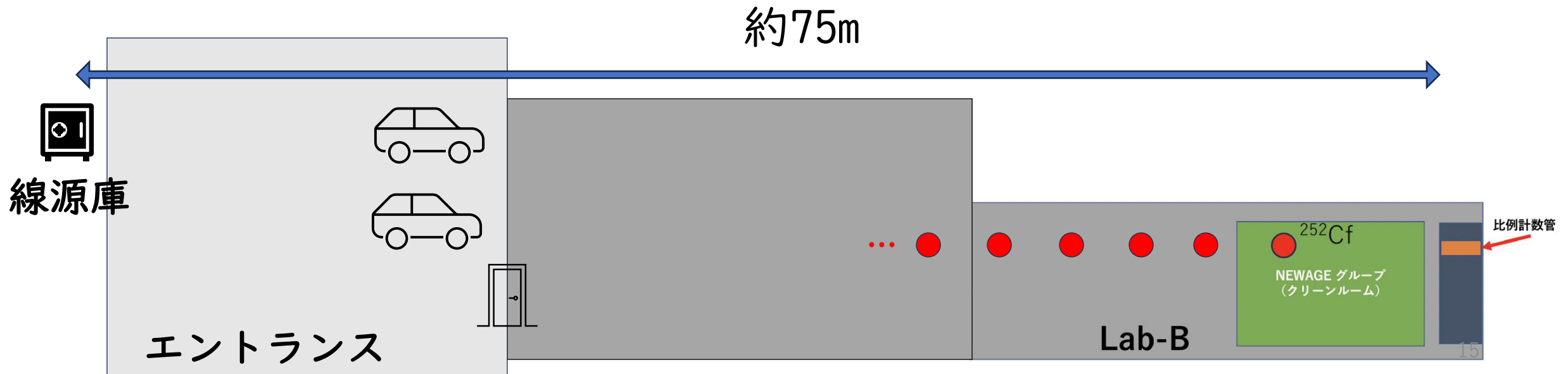
問題②:地下金庫内の ^{252}Cf 中性子線源の影響

- 同じ地下実験室Lab-Bで測定中のNEWAGE実験(B03)から地下金庫内の ^{252}Cf 中性子線源の影響の可能性について報告を受けた。
- 地下金庫内に ^{252}Cf が「あり」と「なし」の状態観測を数ヶ月行い、影響を定量的に見積もる。



^{252}Cf 中性子線源のレート距離依存性

- ^{252}Cf 中性子線源の距離を変えながら測定
- 3mごとに距離を遠ざけていき、3mから30mまで実施
- $\frac{b}{(x-a)^2}$ の形でfitし、BGレートに相当する距離を求めた



^{252}Cf 中性子線源のレート距離依存性(熱中性子)

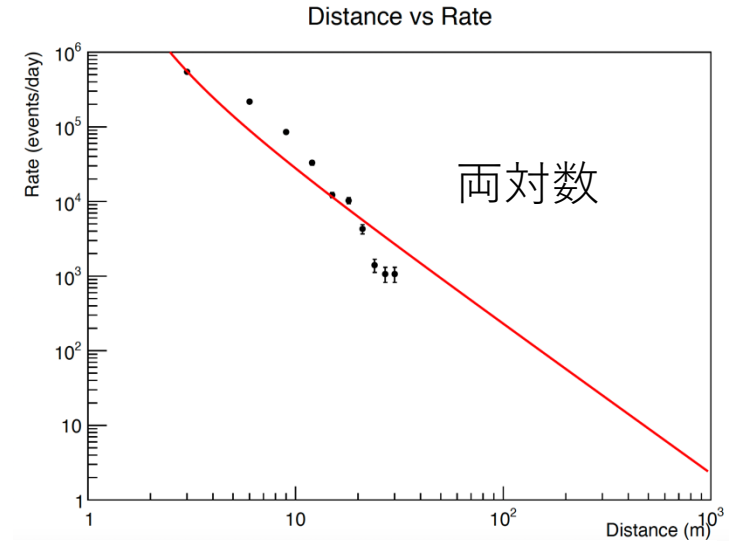
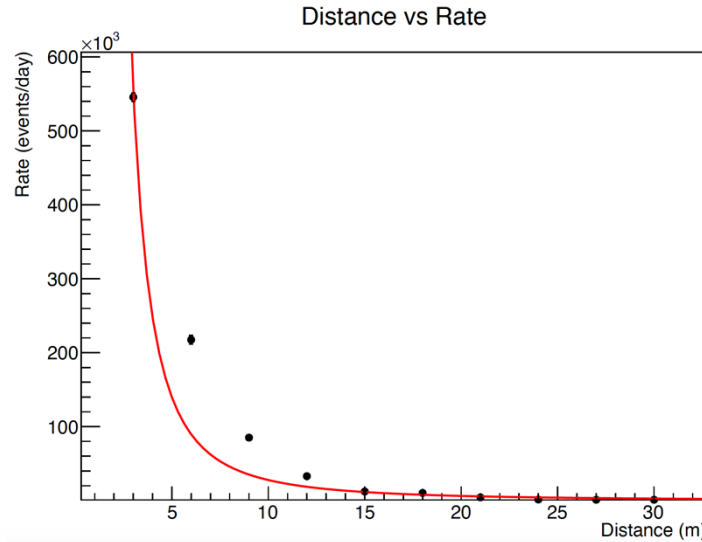
T1

Distance: 3 counts: 8757 Rate: 545648 Error: 5830.89
 Distance: 6 counts: 1293 Rate: 217530 Error: 6049.51
 Distance: 9 counts: 506 Rate: 85127.7 Error: 3784.39
 Distance: 12 counts: 196 Rate: 32974.4 Error: 2355.31
 Distance: 15 counts: 145 Rate: 12197.2 Error: 1012.92
 Distance: 18 counts: 122 Rate: 10262.4 Error: 929.117
 Distance: 21 counts: 51 Rate: 4290.03 Error: 600.725
 Distance: 24 counts: 25 Rate: 1401.97 Error: 280.394
 Distance: 27 counts: 19 Rate: 1065.5 Error: 244.442
 Distance: 30 counts: 19 Rate: 1065.5 Error: 244.442

Minimizer is Minuit2 / Migrad

Chi2	=	907.34
NDf	=	8
Edm	=	2.08068e-07
NCalls	=	72
p0	=	2.25841e+06 +/- 72922.8
p1	=	0.981259 +/- 0.0343515

Rate 112.32 events/day corresponds to distance: 142.78 meters
 distance 75m corresponds to rate: 412.21 events/day



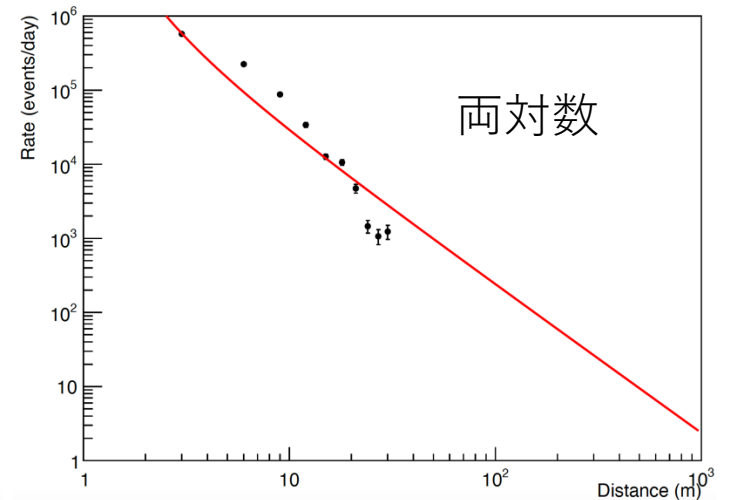
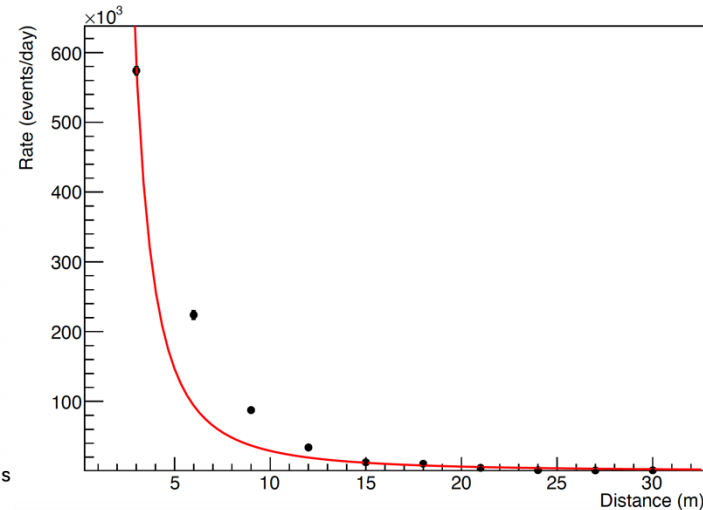
T2

Distance: 3 counts: 9214 Rate: 574443 Error: 5984.43
 Distance: 6 counts: 1331 Rate: 224048 Error: 6141.17
 Distance: 9 counts: 520 Rate: 87531.7 Error: 3838.52
 Distance: 12 counts: 202 Rate: 34002.7 Error: 2392.42
 Distance: 15 counts: 151 Rate: 12708.9 Error: 1034.24
 Distance: 18 counts: 126 Rate: 10604.8 Error: 944.751
 Distance: 21 counts: 56 Rate: 4713.25 Error: 629.834
 Distance: 24 counts: 26 Rate: 1458.86 Error: 286.106
 Distance: 27 counts: 19 Rate: 1066.09 Error: 244.578
 Distance: 30 counts: 22 Rate: 1234.42 Error: 263.18

Minimizer is Minuit2 / Migrad

Chi2	=	916.758
NDf	=	8
Edm	=	2.85014e-08
NCalls	=	73
p0	=	2.36352e+06 +/- 74651.2
p1	=	0.986946 +/- 0.0335061

Rate 112.32 events/day corresponds to distance: 146.048 meters
 distance 75m corresponds to rate: 431.462 events/day

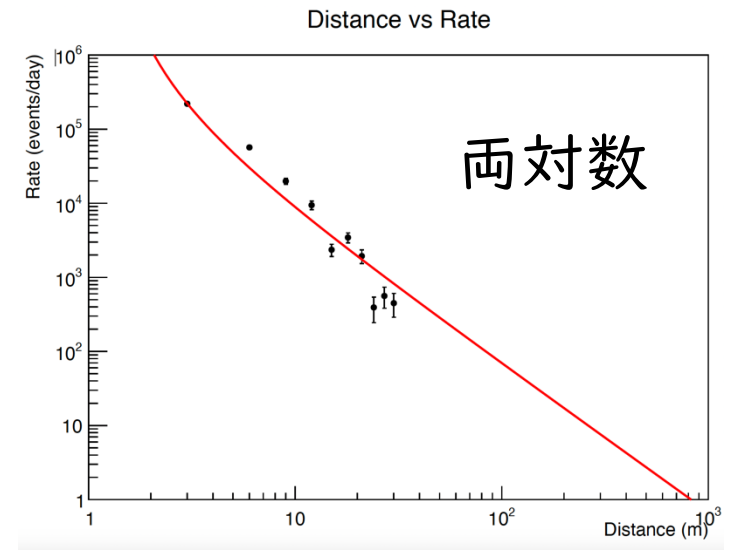
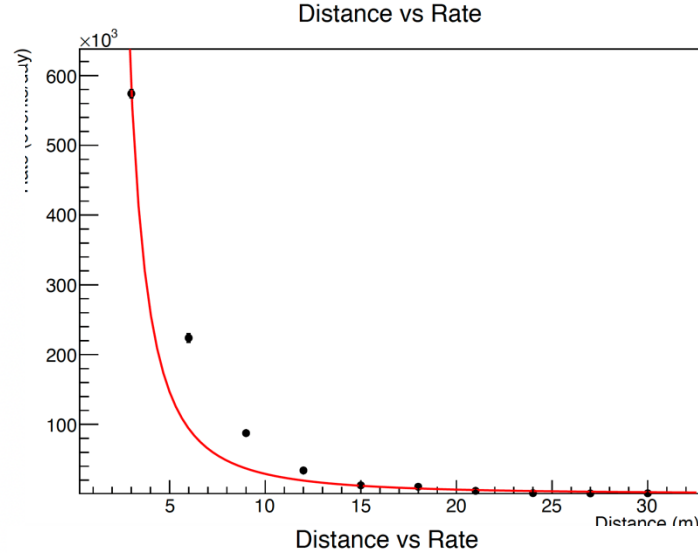


$\frac{b}{(x-a)^2}$ の形に乗らない $\rightarrow \chi^2/\text{NDf}$ の値 ~ 100

^{252}Cf 中性子線源のレート距離依存性(高速中性子)

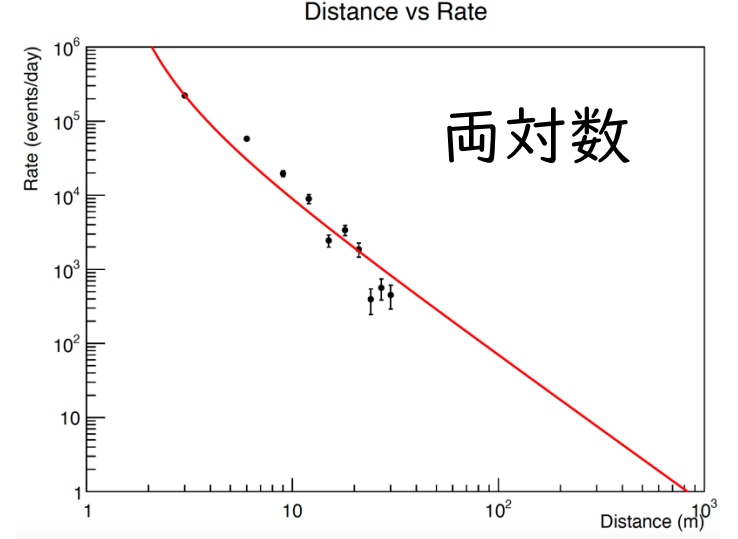
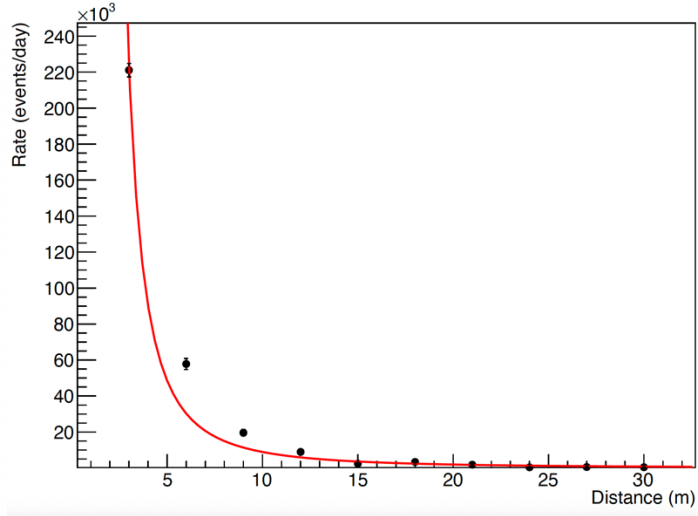
F1

```
Distance: 3 counts: 3531 Rate: 221061 Error: 3720.18
Distance: 6 counts: 337 Rate: 56965.1 Error: 3103.09
Distance: 9 counts: 118 Rate: 19946.2 Error: 1836.2
Distance: 12 counts: 56 Rate: 9466.01 Error: 1264.95
Distance: 15 counts: 28 Rate: 2366.5 Error: 447.227
Distance: 18 counts: 41 Rate: 3465.23 Error: 541.179
Distance: 21 counts: 23 Rate: 1943.91 Error: 405.334
Distance: 24 counts: 7 Rate: 394.417 Error: 149.076
Distance: 27 counts: 10 Rate: 563.453 Error: 178.179
Distance: 30 counts: 8 Rate: 450.762 Error: 159.369
*****
Minimizer is Minuit2 / Migrad
Chi2      = 166.535
Ndf       = 8
Edm       = 4.85323e-07
NCalls    = 76
p0        = 683002 +/- 39154.7
p1        = 1.25006 +/- 0.0525261
Rate 34.56 events/day corresponds to distance: 141.83 meters
distance 75m corresponds to rate: 125.574 events/day
```



F2

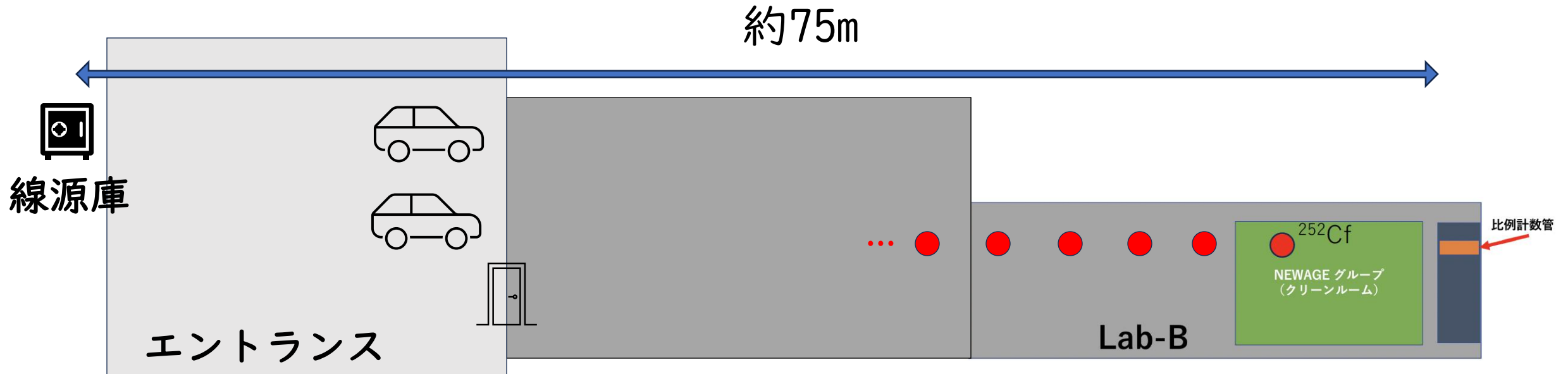
```
Distance: 3 counts: 3530 Rate: 221078 Error: 3720.98
Distance: 6 counts: 342 Rate: 57830.9 Error: 3127.14
Distance: 9 counts: 116 Rate: 19615.2 Error: 1821.22
Distance: 12 counts: 53 Rate: 8962.1 Error: 1231.04
Distance: 15 counts: 29 Rate: 2451.9 Error: 455.306
Distance: 18 counts: 40 Rate: 3381.93 Error: 534.73
Distance: 21 counts: 22 Rate: 1860.06 Error: 396.566
Distance: 24 counts: 7 Rate: 394.558 Error: 149.129
Distance: 27 counts: 10 Rate: 563.654 Error: 178.243
Distance: 30 counts: 8 Rate: 450.924 Error: 159.426
*****
Minimizer is Minuit2 / Migrad
Chi2      = 165.162
Ndf       = 8
Edm       = 5.10359e-09
NCalls    = 80
p0        = 683389 +/- 39147.9
p1        = 1.2497 +/- 0.0524959
Rate 34.56 events/day corresponds to distance: 141.87 meters
distance 75m corresponds to rate: 125.644 events/day
```



$\frac{b}{(x-a)^2}$ の形に乗らない $\rightarrow \chi^2/\text{Ndf}$ の値 ~ 20

^{252}Cf 中性子線源のレート距離依存性

- 今後、75m先の金庫からの影響の見積もりを行う。

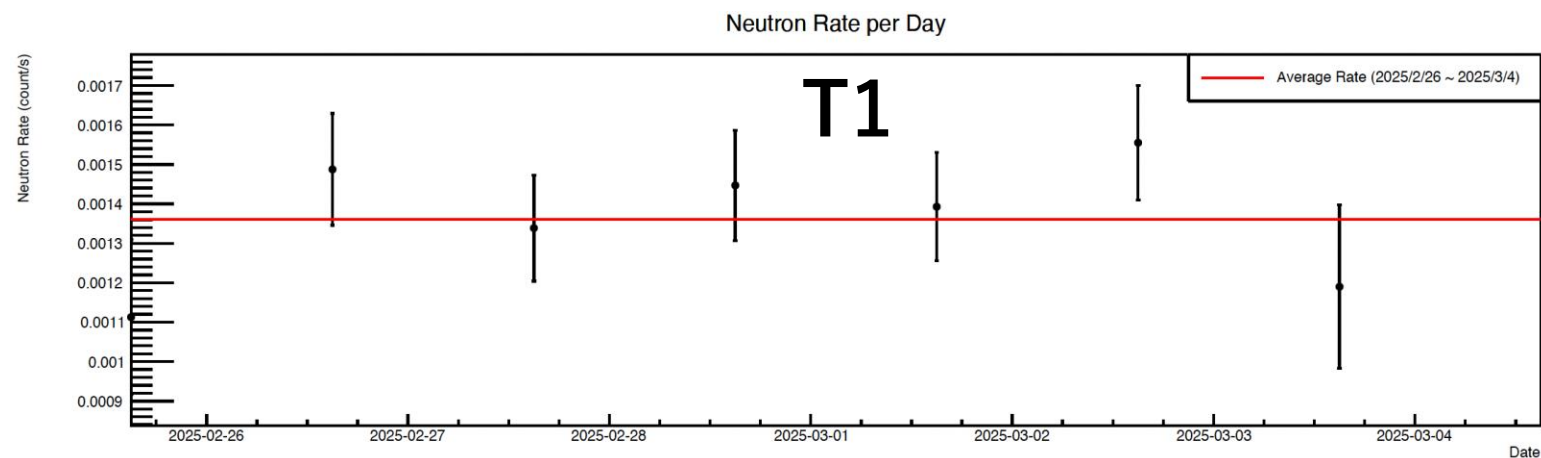


地下環境中性子測定を再開

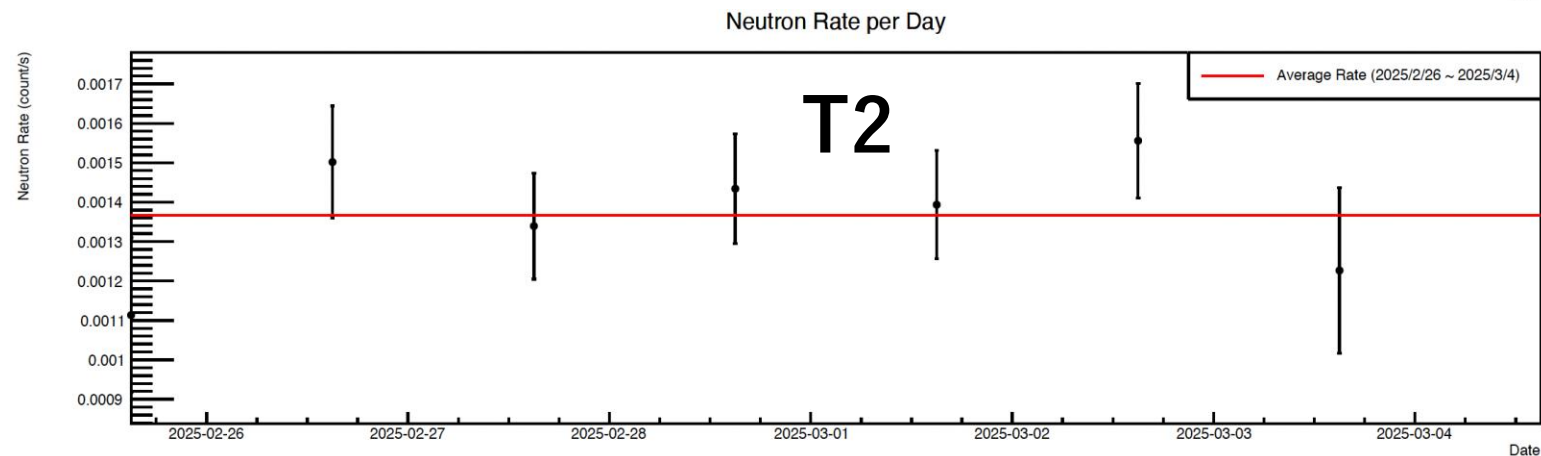
- 線源が金庫にある状態で開始（2025年2月25日から2025年4月上旬）
- 速報（preliminary）
 - 2025/2/26~3/4の1週間分のデータ
 - 電気信号の時間差分布からデータ収集系のフリーズがないか確認

以後の結果は
preliminary

2025/2/26~3/4の結果 (Setup A: 熱中性子)



#	Date	Count	Livetime(sec)	Rate(count/sec)	Error
2025/2/26	32	33600	0.00111268	0.000196695	
2025/2/27	110	86400	0.00148743	0.000141821	
2025/2/28	99	86400	0.00133869	0.000134543	
2025/3/1	107	86400	0.00144687	0.000139874	
2025/3/2	103	86400	0.00139278	0.000137234	
2025/3/3	115	86400	0.00155504	0.000145008	
2025/3/4	33	32401	0.00118991	0.000207137	
Overall Average Rate:			0.00136048		

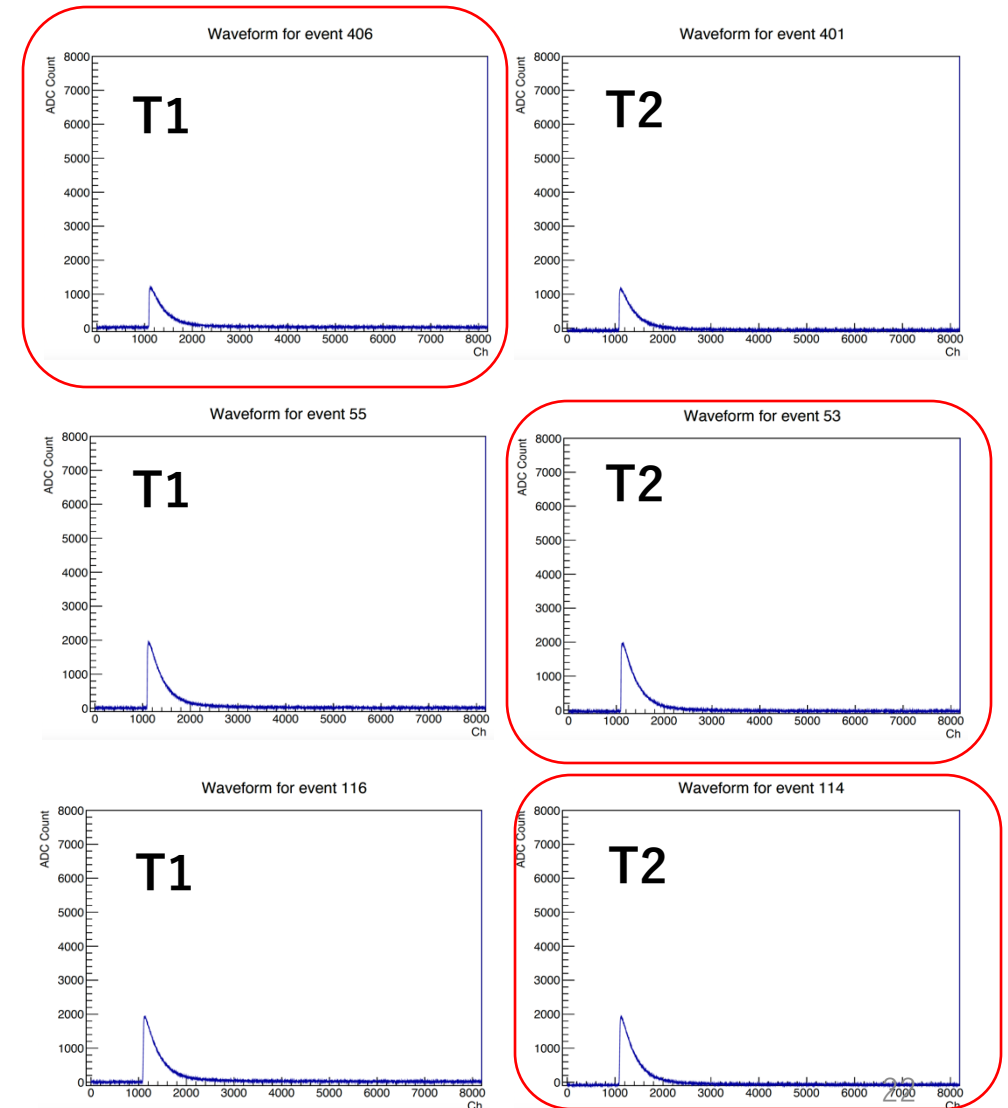


#	Date	Count	Livetime(sec)	Rate(count/sec)	Error
2025/2/26	32	33600	0.0011133	0.000196805	
2025/2/27	111	86400	0.00150179	0.000142543	
2025/2/28	99	86400	0.00133943	0.000134618	
2025/3/1	106	86400	0.00143414	0.000139296	
2025/3/2	103	86400	0.00139355	0.000137311	
2025/3/3	115	86400	0.00155591	0.000145089	
2025/3/4	34	32401	0.00122665	0.000210368	
Overall Average Rate:			0.0013664		

2025/2/26~3/4の結果 (Setup A: 熱中性子)

片方だけ中性子事象があった時間が3つあったが、もう一方のその時間のデータを確認するとききれいな波形が確認された。

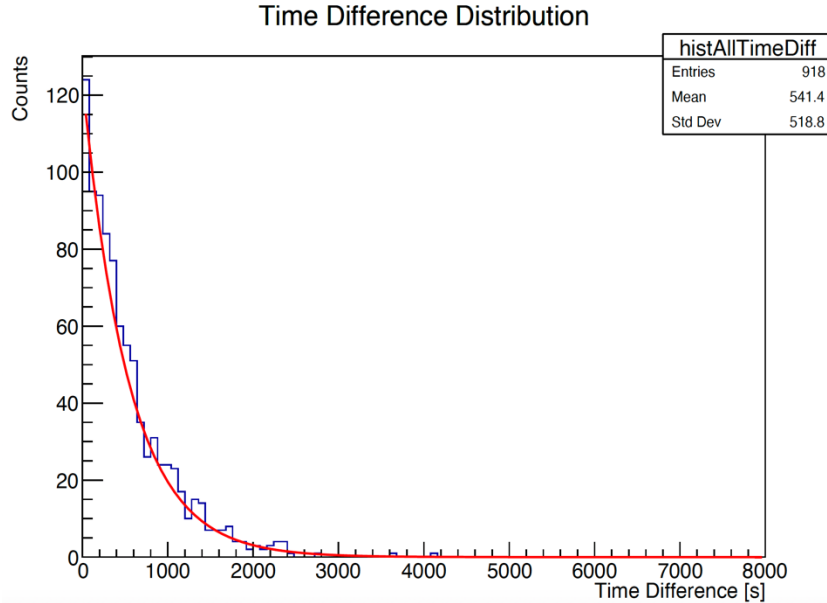
→ 解析プログラムにも問題がある。



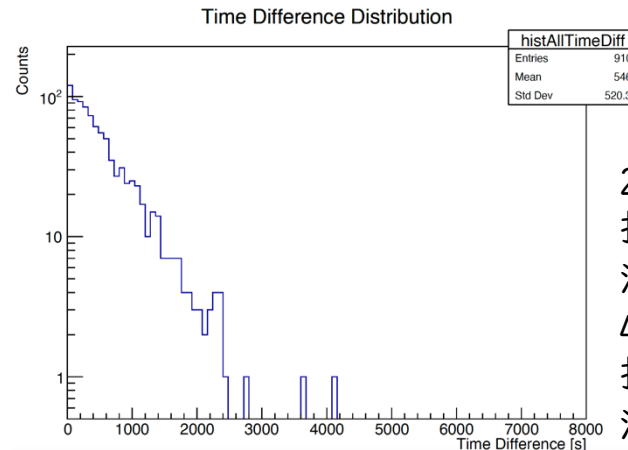
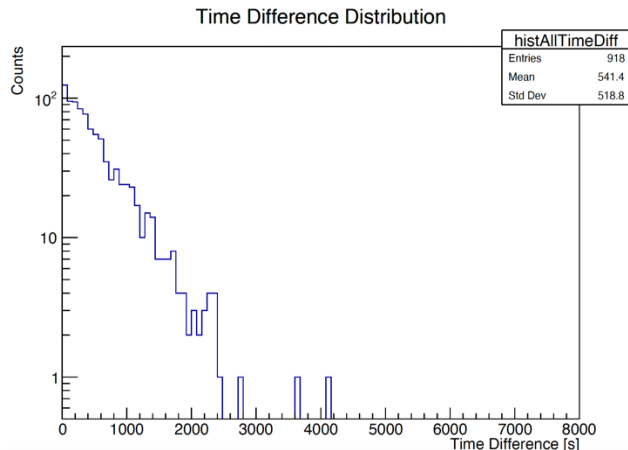
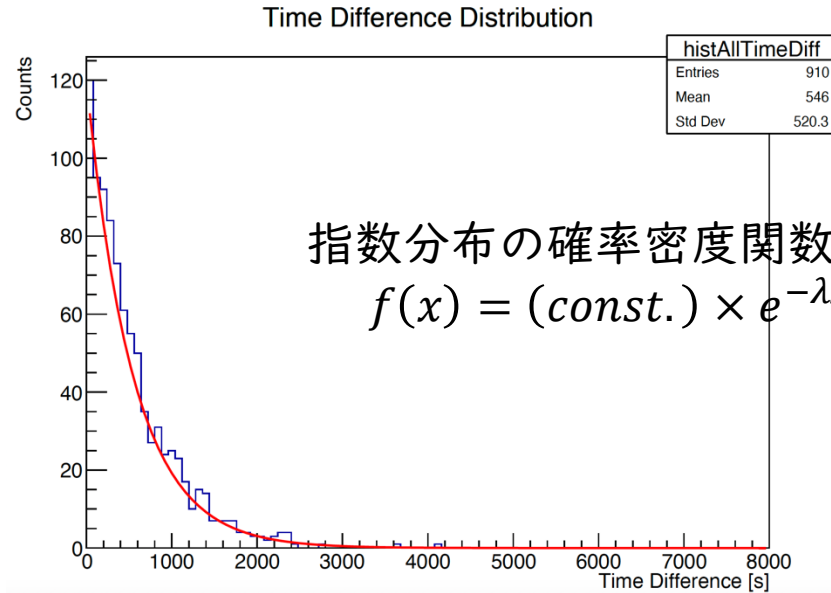
2025/2/26~3/4の結果 (Setup A: 熱中性子)

時間差分布

①



②



1200秒から1400秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 3.37%

測定データ: **3.52%**

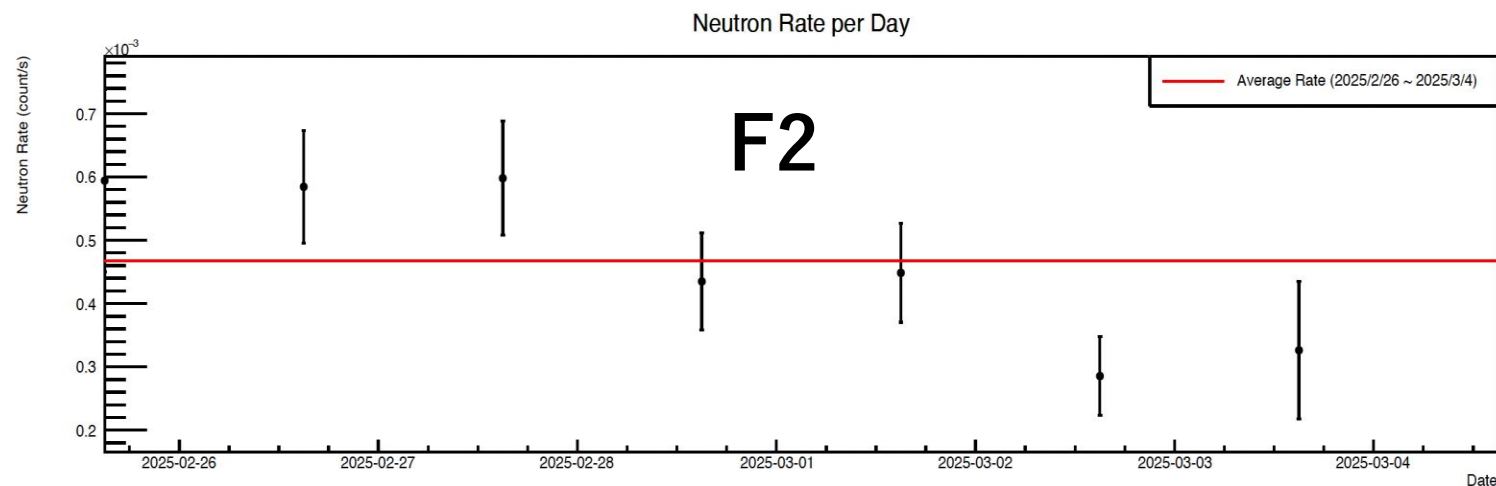
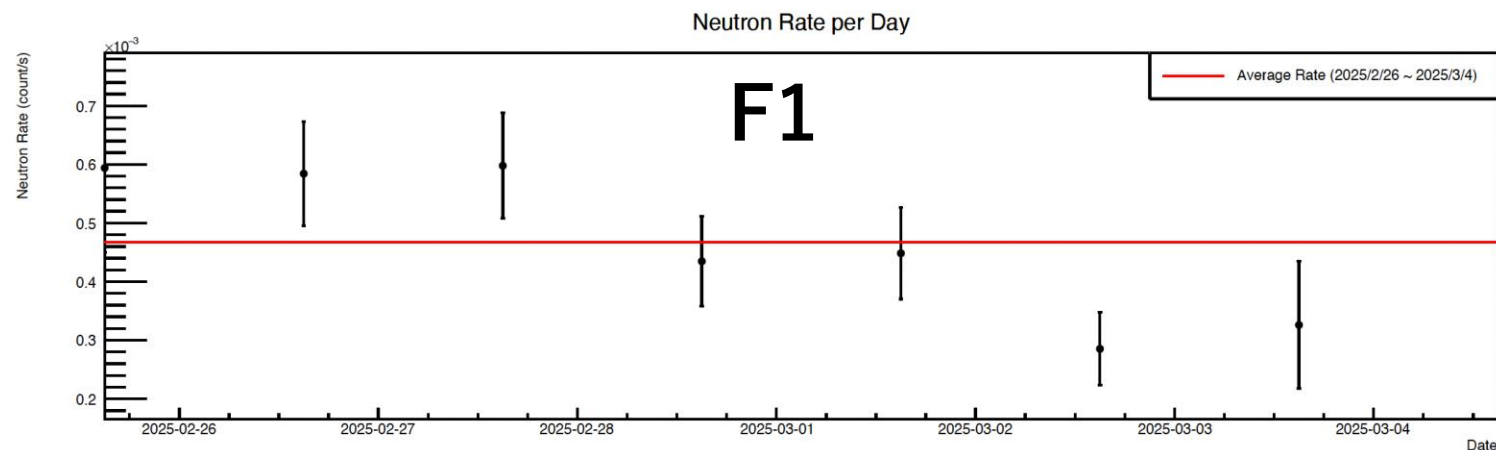
2400秒から2600秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 0.37%

測定データ: **0.1%**

4100秒から4200秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 0.009%

測定データ: **0.1%**

2025/2/26~3/4の結果 (Setup B: 高速中性子)

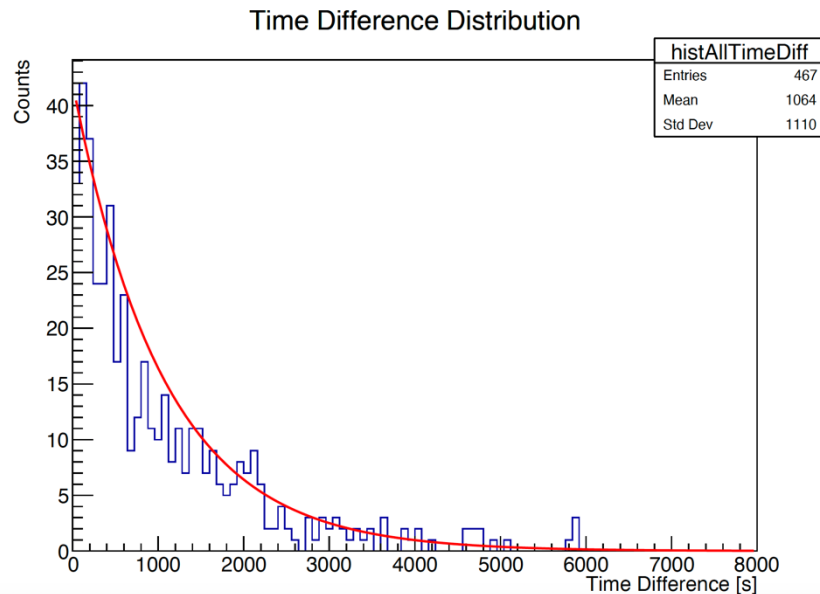


- Setup Bは

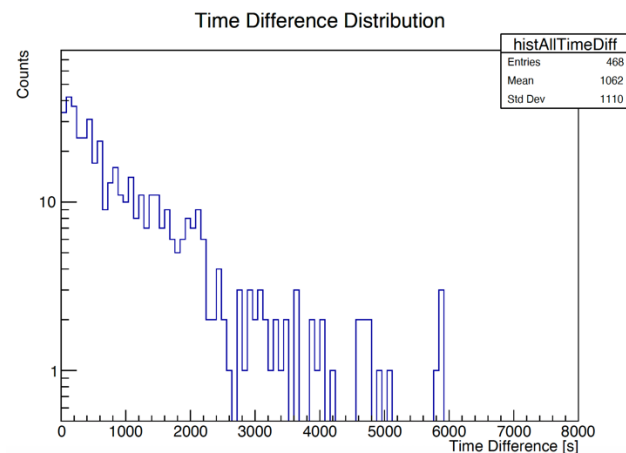
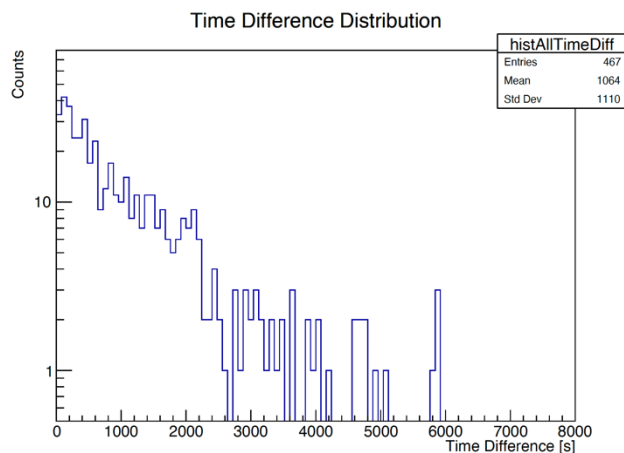
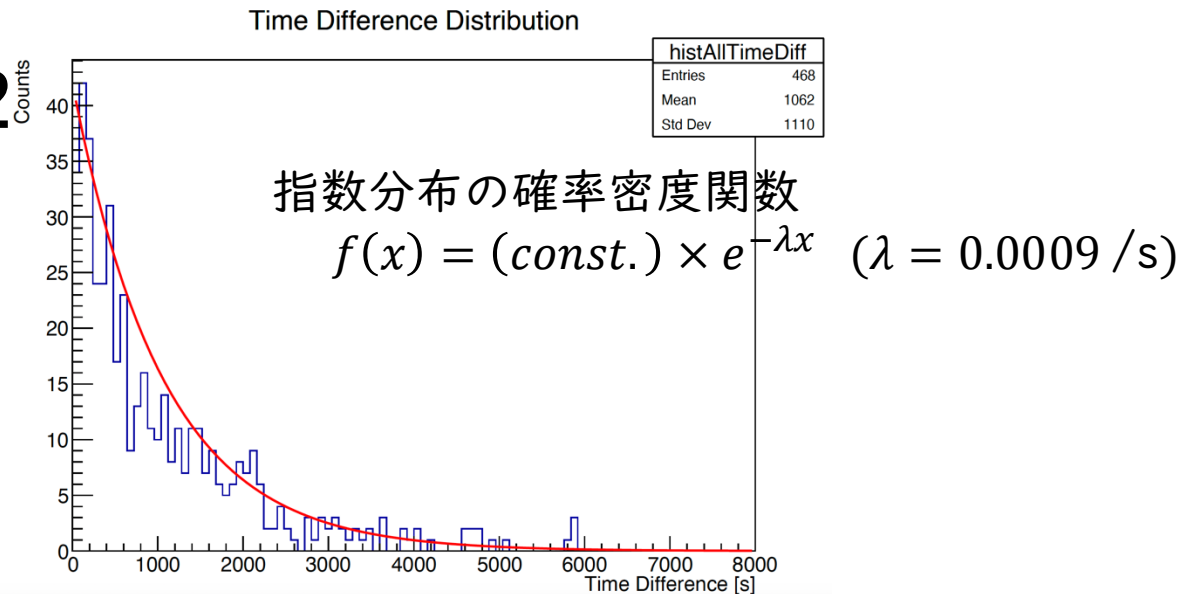
2025/2/26~3/4の結果 (Setup B: 高速中性子)

時間差分布

F1



F2



600秒から800秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 9.74%

測定データ: **7.26%**

2000秒から2200秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 2.62%

測定データ: **4.05%**

5800秒から6000秒に信号が観測される割合
 指数分布に従う場合: 0.074%

測定データ: **0.85%**

まとめと今後の予定

- 神岡地下環境中性子測定
 - ^3He 比例計数管を用いて2021年7月から2024年8月まで測定を行ったがデータ収集系の問題が発覚し、観測データは信頼できないと結論した。
 - ^3He 比例計数管：対策後のデータ収集系で2025年2月末に測定を再開。
- 今後の予定
 - ^3He 比例計数管：地下金庫内の ^{252}Cf 中性子線源の影響を定量的に見積もった後、地下環境中性子の長期測定を開始する。
 - 見上さん（東北大）の ^3He 比例計数管測定と協力する。まずはLab-Bで同時測定を行う予定。
 - 液体シンチレーター中性子検出器： α 線バックグラウンド低減に向けた研究を再開する。

バックアップ

地下実験室の環境中性子測定

- 中性子測定コンソーシアム
 - 2015年に若手を中心に立ち上げ。
 - 複数の実験グループで協力
- 本研究では2種類の検出器を開発



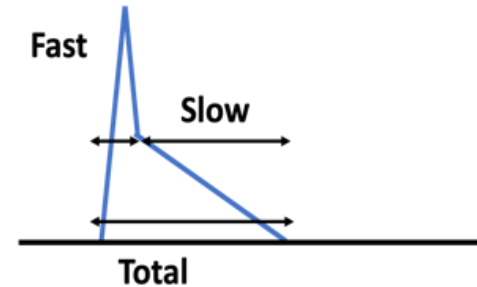
検出器	標的原子核	測定に使う反応	感度領域
^3He 比例計数管	^3He	(n, p)反応	熱中性子
有機液体シンチレーター	H (主に)	弾性散乱	高速中性子

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

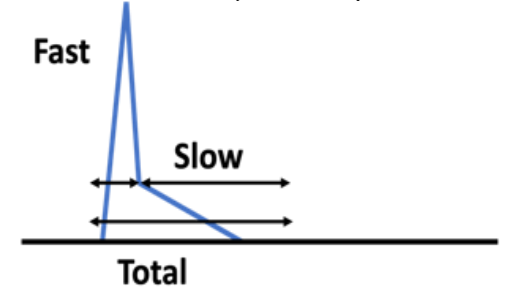
液体シンチレータ*検出器

- 中性子に反跳された陽子を検出。
- 波形弁別により γ 線、電子は除去できるが α 線は難しい。

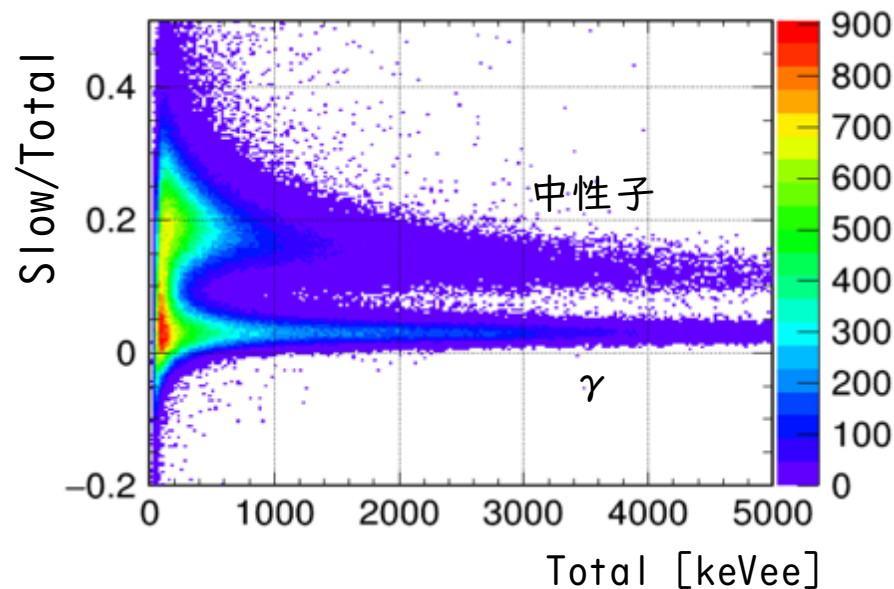
原子核事象(α 線や中性子)



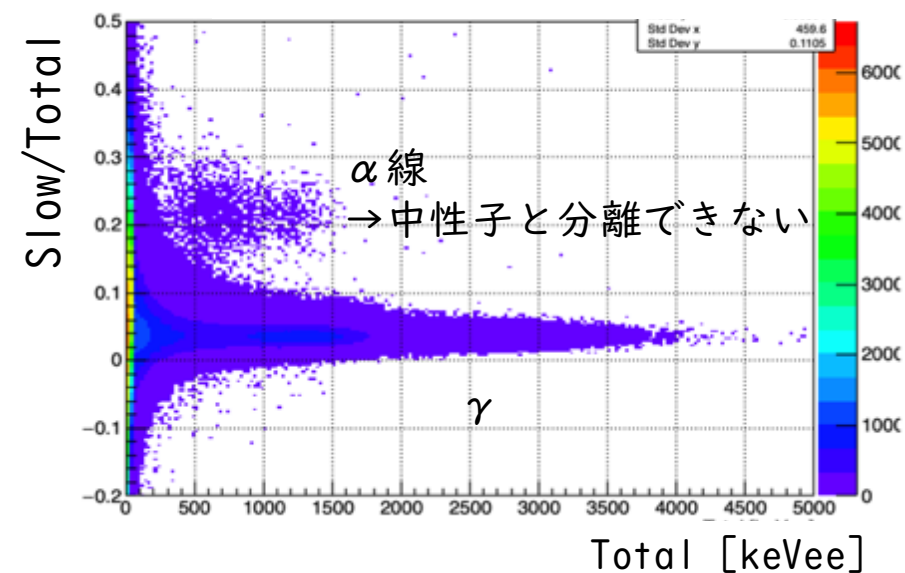
電子事象(γ 線や β 線)



^{252}Cf 中性子線源Run

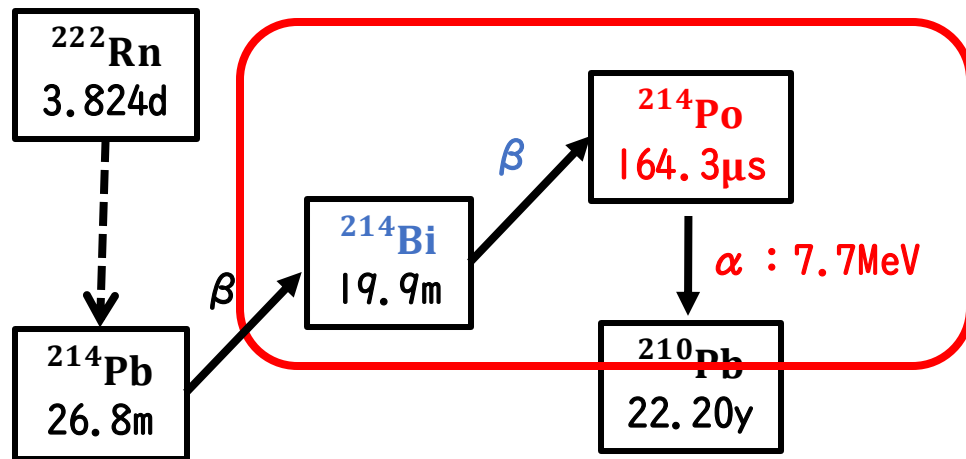


バックグラウンドRun



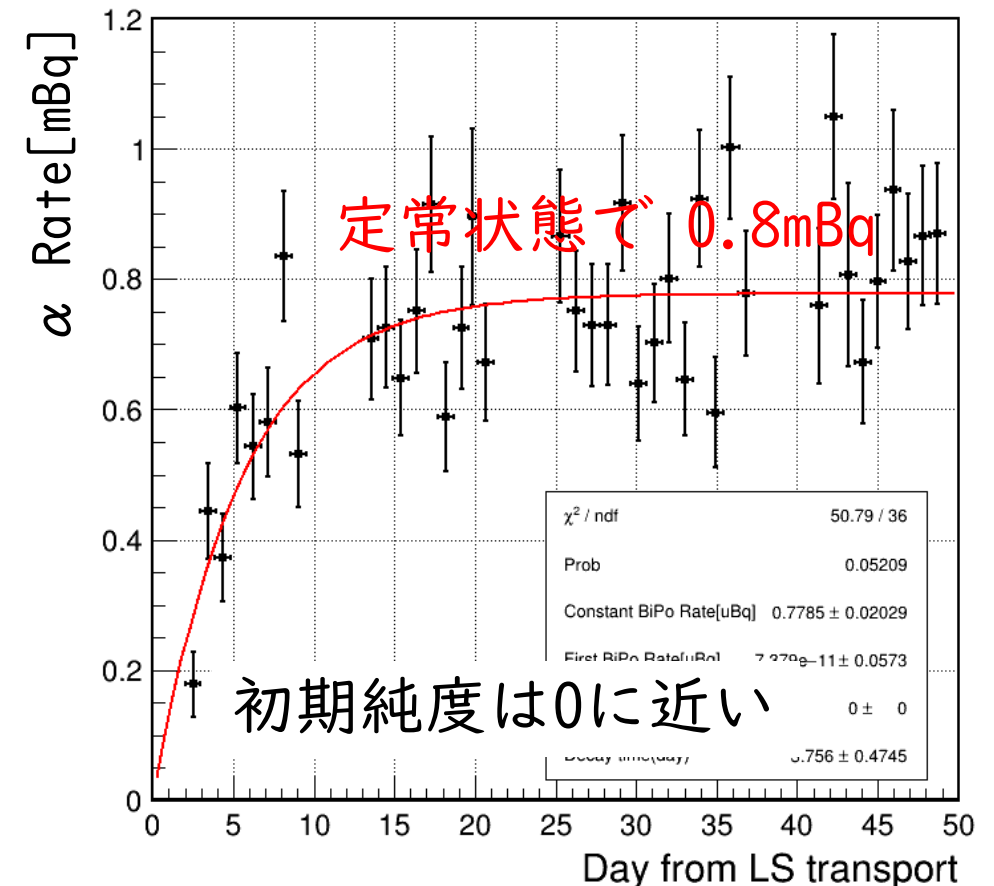
液体シンチレータ検出器の現状

- α 線バックグラウンドを ^{214}Bi - ^{214}Po の遅延同時計測で評価



^{214}Po の半減期が短いため Δt で強力に事象選択可

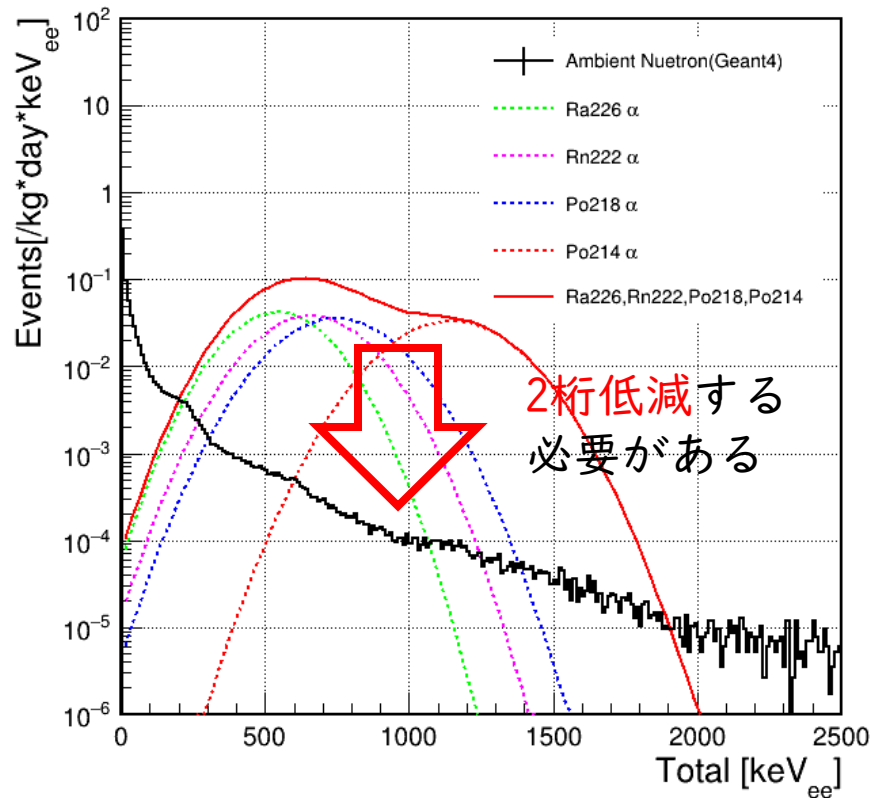
Bi-Po α 線レートの時間変動



液体シンチレータ検出器の展望

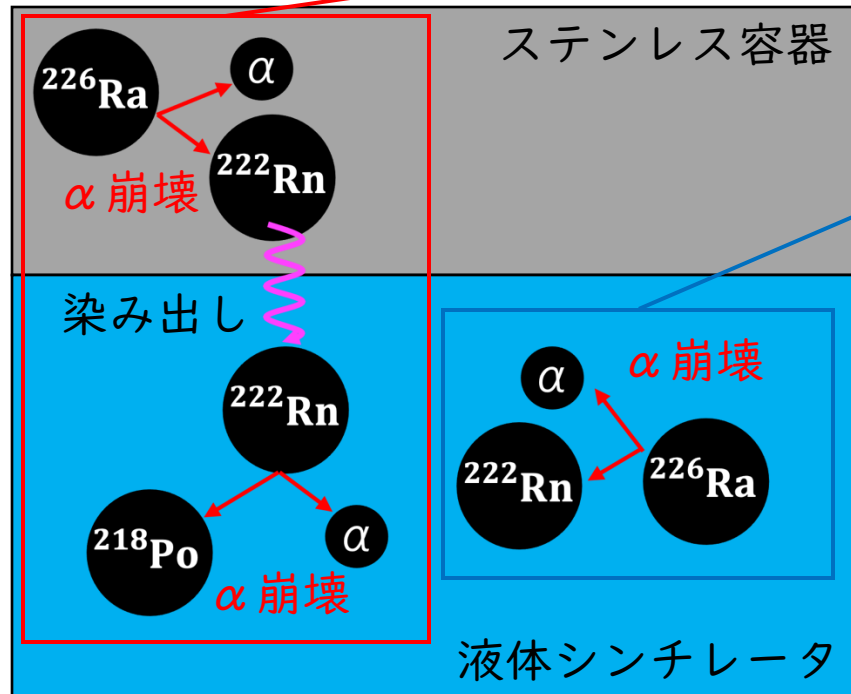


期待される環境中性子スペクトラムと
 α 線バックグラウンド(0.8mBq)の比較



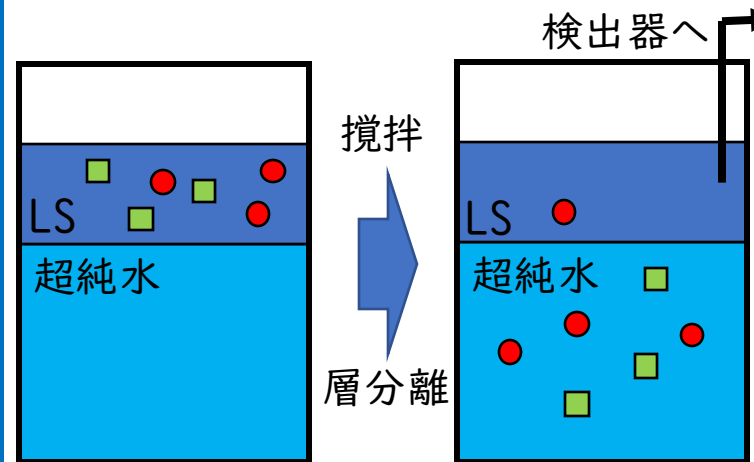
- α 線バックグラウンドを **1桁** 低減する @ 早稲田大
 - 液体シンチレータの純化
 - 窒素バブリングによる ^{222}Rn の低減
 - ステンレス容器の表面処理
- 解析で **更に 1桁** 低減
 - γ 線のパイルアップによる偽事象
 - 遅い遅延同時計測: ^{222}Rn - ^{218}Po の **α** と **α** (^{218}Po の半減期 3.1分)

液体シンチレータ検出器の低バックグラウンド化



- ステンレス容器からの ^{222}Rn の染み出し
- 電解複合研磨（ラドン検出器の技術*）

- 液体シンチレーター中の放射性核子
- 超純水による液液抽出



早稲田大の純化システム

