

# 3 ヘリウム比例計数管を用いた神岡地下実験施設の 環境中性子の長期測定

日本物理学会2022年秋季大会 2022/9/7

横国大理工,国立天文台<sup>A</sup>

天内昭吾,南野彰宏,鷺見貴生<sup>A</sup>,中性子測定コンソーシアム

# 研究目的(中性子測定)

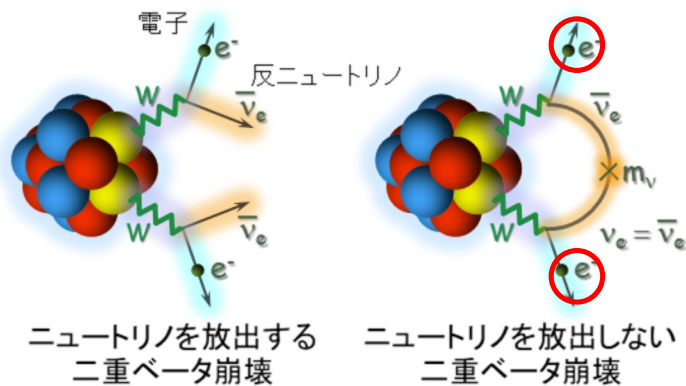
中性子は地下環境で行われている暗黒物質探索やニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊)の信号事象の背景事象(バックグラウンド)となる



バックグラウンドを取り除くため地下環境における中性子の理解を深めることが必要

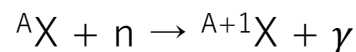
## バックグラウンド例

CANDLES実験( $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索)



中性子捕獲

(原子核に中性子が入射して $\gamma$ 線が崩壊する現象)



$0\nu\beta\beta$ 崩壊で放出される電子のQ値と地下環境における中性子捕獲により放出される $\gamma$ 線のエネルギーが近いため、重要なバックグラウンドとなる。

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/candles/index.html?Lang=JP&InputContents=Study>

# 研究目的(長期測定)

- 中性子は質量の近い水素原子との弾性散乱でエネルギーを落としやすい



- 地下実験室の環境中性子の主な発生源は岩盤中の放射性同位体である。
- そのため、地下実験室の岩盤中の水分量によって環境中性子のエネルギースペクトラムが変化する。
  - 特に神岡は豪雪地帯で雪解けなどにより岩盤内の水分量の季節変動が大きい

**高速中性子と熱中性子の長期測定によりエネルギー分布の時間変化を確認する**

# 中性子の種類

中性子はその運動エネルギーで以下の2つに分けることができる。

## 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

# 中性子検出器

- ・ 中性子は電荷を持たないため、測定には標的原子核との相互作用を利用

種類	標的原子核	反応	感度領域
有機液体シンチレータ	H(主に)	弾性散乱	高速中性子
$^3\text{He}$ 比例計数管	$^3\text{He}$	(n,p)反応	熱中性子

本研究では  $^3\text{He}$ 比例計数管を用いて熱中性子、 $^3\text{He}$ 比例計数管 + 中性子減速材（ポリエチレン）で高速中性子を測定する

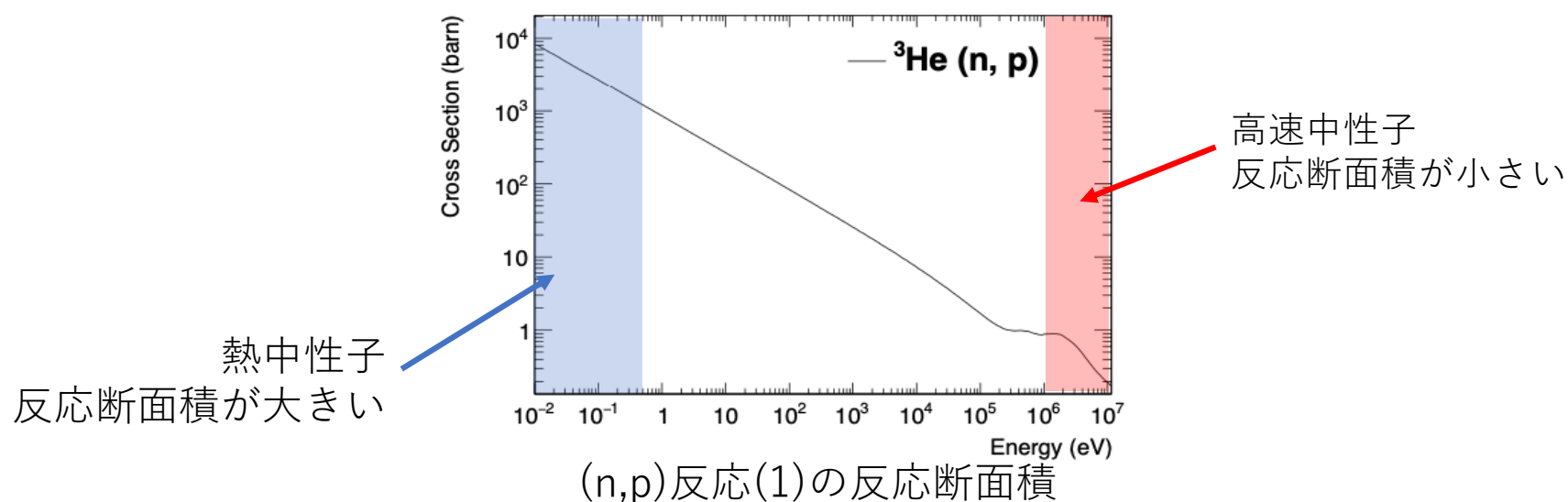
# 中性子検出器： $^3\text{He}$ 比例計数管の測定原理

① 入射中性子と $^3\text{He}$ ガスが以下の反応をする



② Q値のエネルギーが陽子とトリチウムの運動エネルギーとなり、それらが $^3\text{He}$ ガスを電離する

③ 電離により生成された電子がアノードワイヤー中心の強電場により加速され、さらに $^3\text{He}$ ガスを電離する。この結果として、増幅した信号を読み出すことができる。



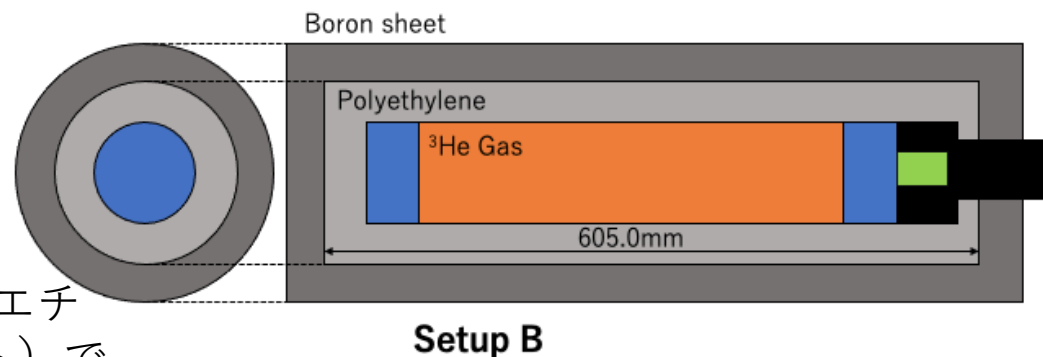
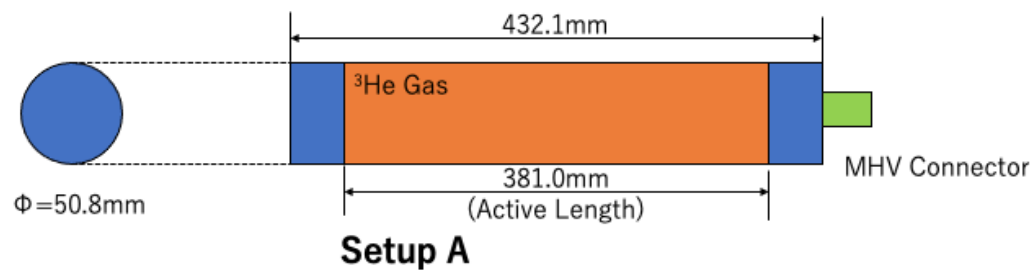
# 検出器のセットアップ

## • Setup A

熱中性子測定用  
そのまま測定

## • Setup B

高速中性子測定用  
 $^3\text{He}$ 比例計数管を中性子減速材(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。

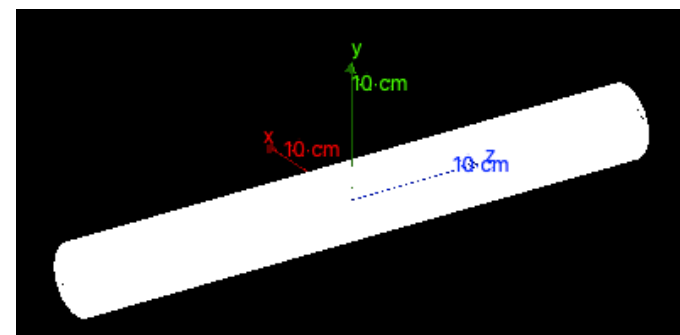
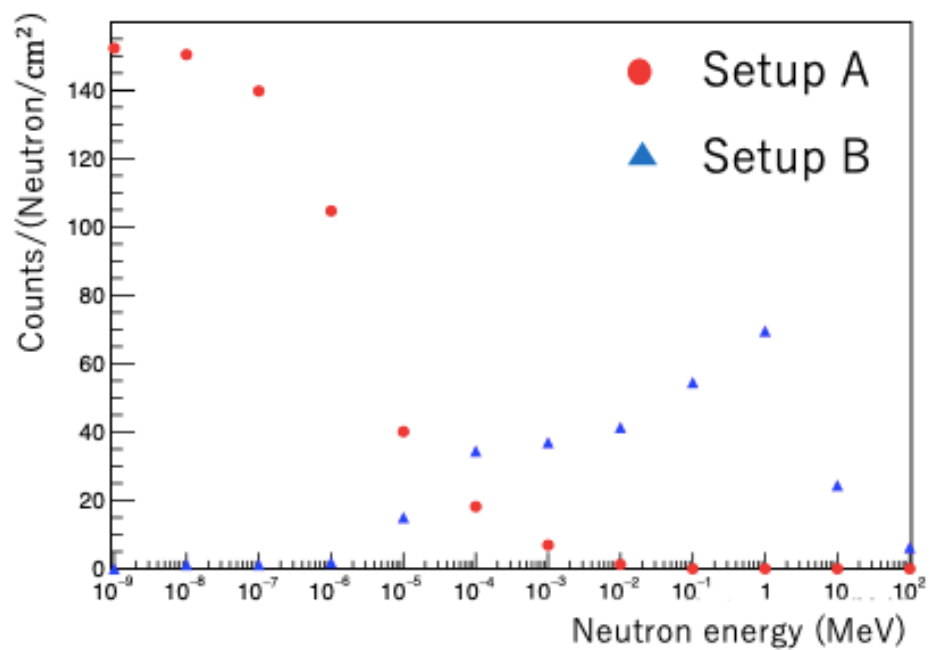


使用した $^3\text{He}$ 比例計数管  
(RS-P4-0810-220)

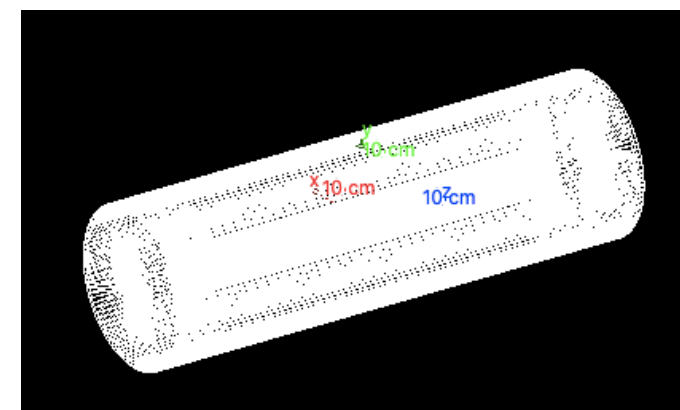
Setup A  
Setup B



# 各セットアップの感度



Setup A



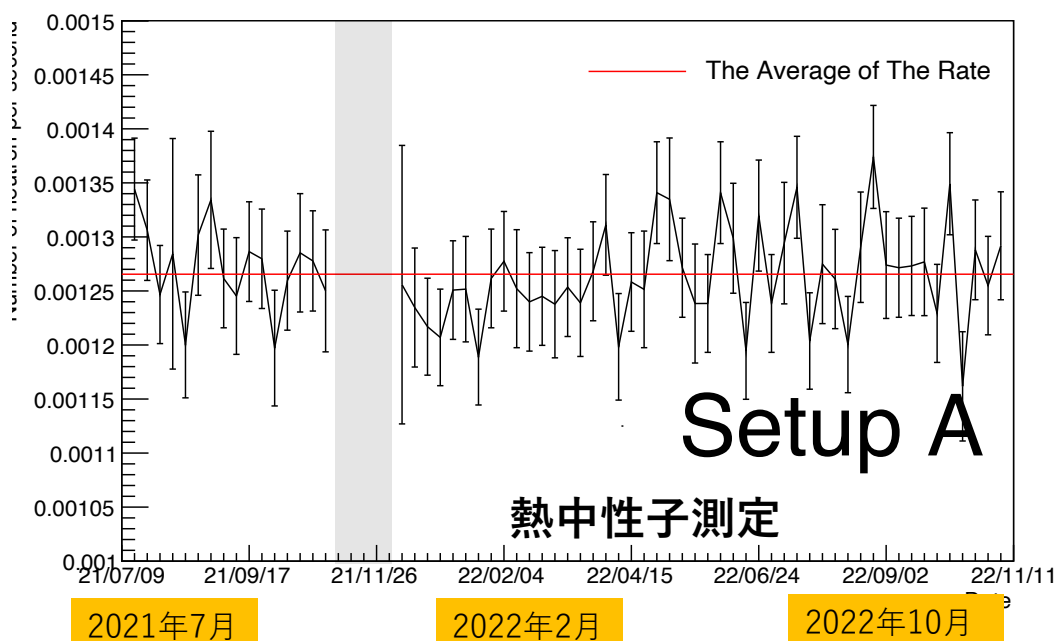
Setup B



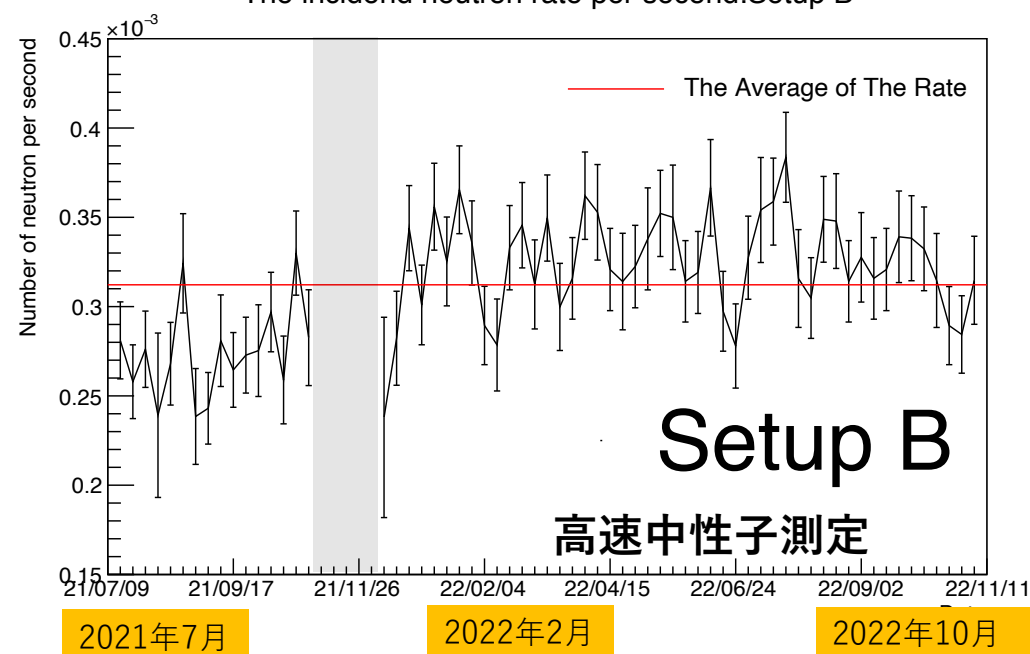
# 測定結果

測定場所：神岡地下実験室Lab-B  
 測定期間：2021/7/16～2022/11/10  
 1週間毎の中性子イベント頻度の平均(event/秒)  
 中性子源が使用されていない時間は解析に用いていない(下図灰色部)

The incident neutron rate per second: Setup A



The incident neutron rate per second: Setup B



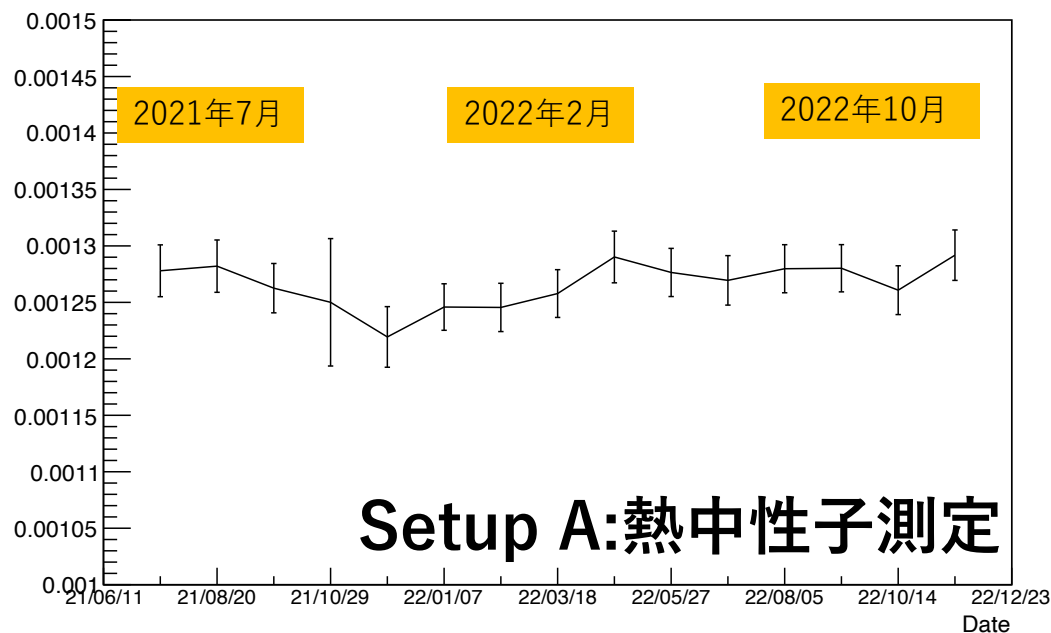
# 測定結果

測定場所：神岡地下実験室Lab-B

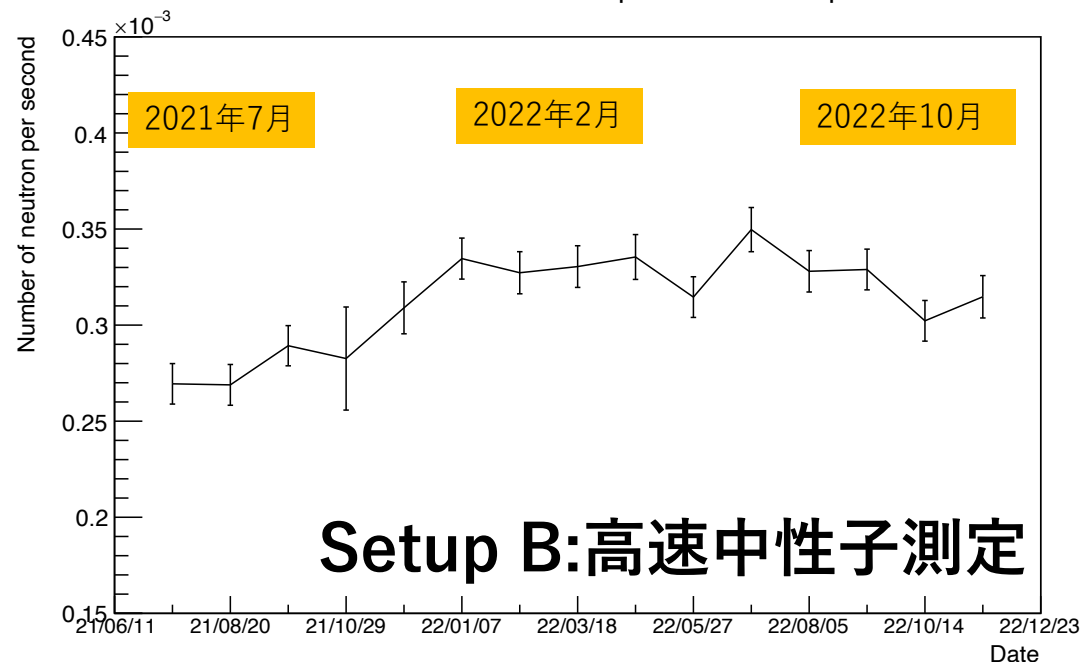
測定日時：2021/7/16～2022/11/10

5週間毎の中性子イベント頻度の平均(event/秒)

The incidend neutron rate per second:Setup A



The incidend neutron rate per second:Setup B



以後、Setup Aの平均観測レートを $R_A$ (event/s)、Setup Bの観測レートを $R_B$ (event/s)とする

カウントレートに変動があった

# 地下実験室の環境中性子シミュレーション

## 1. 地下実験室の環境中性子の発生源

- U,Th系列の地下実験施設の岩盤中の放射線不純物の( $\alpha, n$ )反応
  - ( $\alpha, n$ )反応シミュレーター-NeuCBOTで計算
- $^{238}\text{U}$ の自発核分裂
  - Watt Spectrumを用いる

## 2. 岩盤から実験室までの中性子の輸送

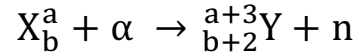
- 検出器シミュレーター-Geant4で計算

## 3. 各環境中性子スペクトルに対する $^3\text{He}$ 比例計数管の応答

- 検出器シミュレーター-Geant4で計算

# ( $\alpha, n$ )反応シミュレーター (NeuCBOT)

- TALYSの計算結果をデータベースを元とした( $\alpha, n$ )反応 (下式) のシミュレーター



- TALYSのデータベースが2020年にアップデート

NeuCBOT-v1.0 → NeuCBOT-v2.0													
Relative change from v1→v2: <10% 10-20% 20-30% 30-40% ~ 60-70% 70-80% >80%													
Neutron yield [n/a] for $E_\alpha = 4 \text{ MeV}$													
	natBe	natB	natC	natN	natO	natF	natAl	natSi	natAr	natTi	natFe	natCu	natXe
v1	5.09 $\times 10^{-5}$	1.28 $\times 10^{-5}$	8.38 $\times 10^{-8}$	0	1.28 $\times 10^{-8}$	2.03 $\times 10^{-6}$	6.91 $\times 10^{-8}$	4.04 $\times 10^{-9}$	3.13 $\times 10^{-9}$	5.86 $\times 10^{-11}$	3.70 $\times 10^{-14}$	0	0
v2	4.85 $\times 10^{-5}$	1.04 $\times 10^{-5}$	7.98 $\times 10^{-8}$	0	1.24 $\times 10^{-8}$	1.17 $\times 10^{-6}$	2.04 $\times 10^{-8}$	3.88 $\times 10^{-9}$	2.68 $\times 10^{-9}$	2.55 $\times 10^{-11}$	1.16 $\times 10^{-14}$	0	0
Neutron yield [n/a] for $E_\alpha = 9 \text{ MeV}$													
	natBe	natB	natC	natN	natO	natF	natAl	natSi	natAr	natTi	natFe	natCu	natXe
v1	2.75 $\times 10^{-4}$	1.20 $\times 10^{-4}$	1.19 $\times 10^{-6}$	3.28 $\times 10^{-5}$	3.38 $\times 10^{-7}$	1.05 $\times 10^{-4}$	4.03 $\times 10^{-5}$	3.20 $\times 10^{-6}$	3.47 $\times 10^{-5}$	1.26 $\times 10^{-5}$	3.27 $\times 10^{-6}$	9.43 $\times 10^{-7}$	1.87 $\times 10^{-11}$
v2	2.72 $\times 10^{-4}$	1.04 $\times 10^{-4}$	1.19 $\times 10^{-6}$	2.05 $\times 10^{-5}$	3.42 $\times 10^{-7}$	8.05 $\times 10^{-5}$	2.14 $\times 10^{-5}$	2.48 $\times 10^{-6}$	3.37 $\times 10^{-5}$	1.06 $\times 10^{-5}$	3.32 $\times 10^{-6}$	6.74 $\times 10^{-7}$	2.40 $\times 10^{-12}$

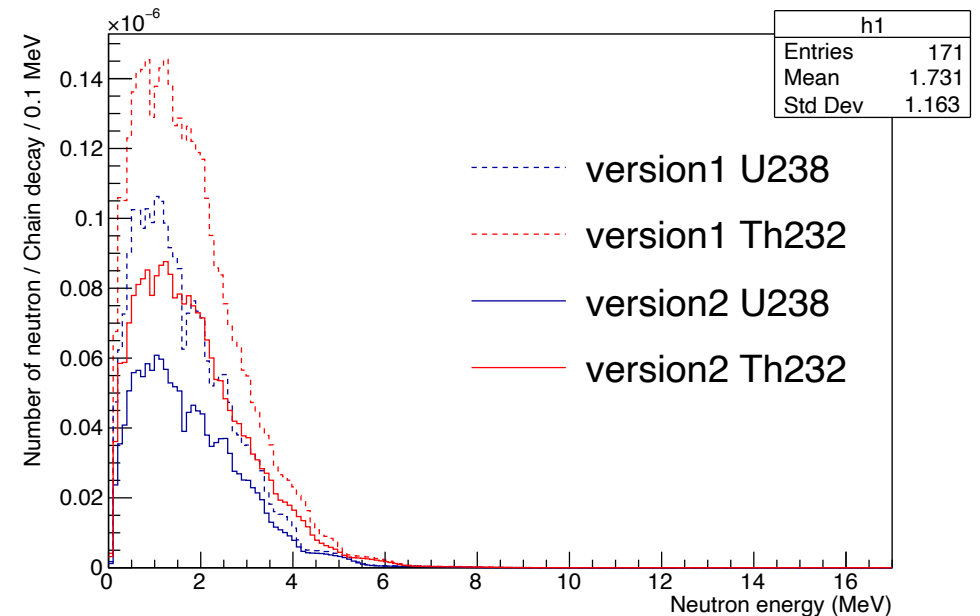
S. Westerdale (Princeton U.) IAEA Technical Meeting on ( $\alpha, n$ ) 12

NeuCBOTの開発者Shawn Westerdale氏より、  
( $\alpha, n$ )反応断面積の変化

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ZnO
Sample 1	35.75	11.35	10.95	1.09	0.99	39.37	0.02	0.35	0.10	0.03

シミュレーションで用いた岩盤中の組成

TALYS : [https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2019/talys.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2019/talys.html)

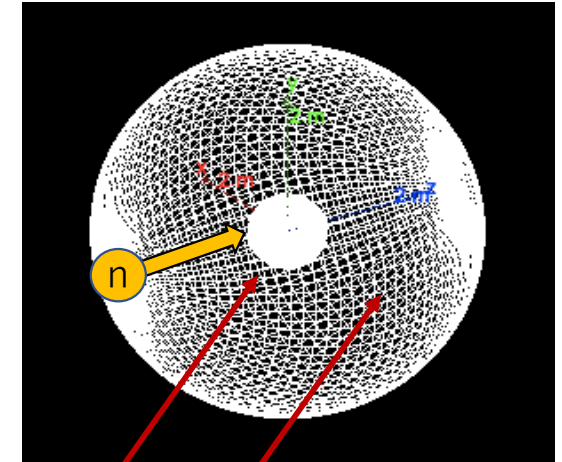


岩盤中のU系列、Th系列の崩壊に伴い生成される  
中性子のスペクトル

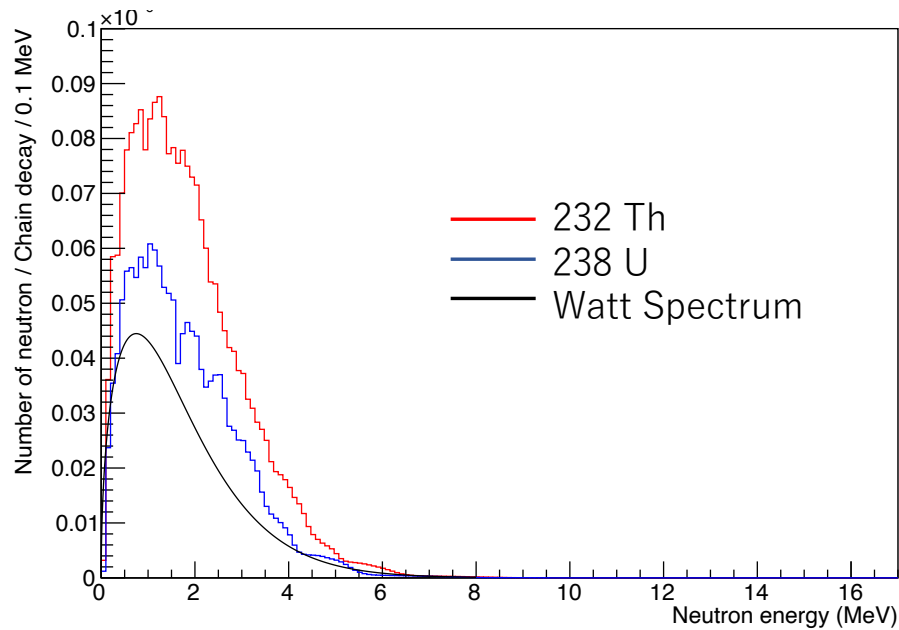
U系列、Th系列ともに、1 Chain decayあたりの中性子生成量がVersion 1からおよそ40%程度に減少し、高エネルギー帯(U系列では5MeV、Th系列では4MeV)では変化が10%未満と小さかった

# 岩盤から実験室までの中性子の輸送

厚さ2mの球形の岩盤の中心に直径1mの球形の実験室を配置したジオメトリーで計算。  
 岩盤から等方的に左図のスペクトルに従う中性子を発生させた。  
 岩盤中の水素の割合を変えながら、岩盤から実験室まで中性子を輸送し、右図を得た。

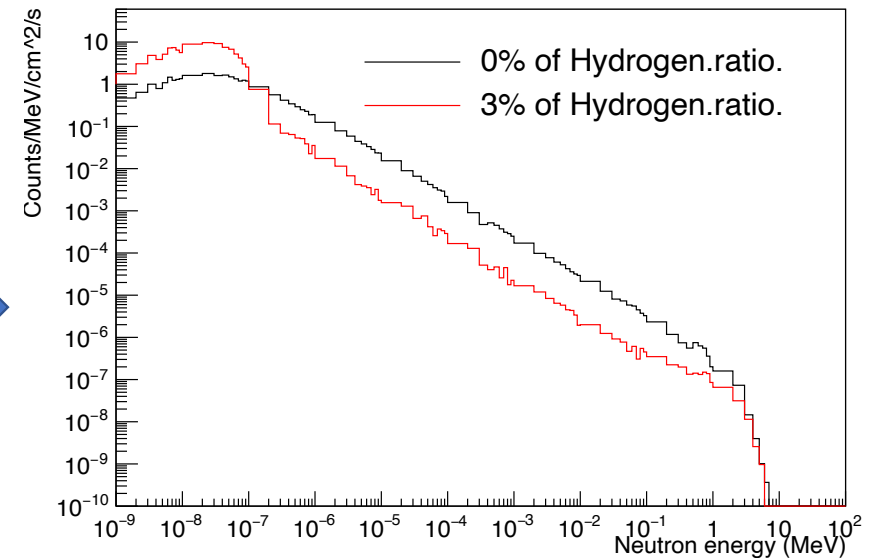


実験室 岩盤



輸送前の中性子のエネルギースペクトル

輸送後

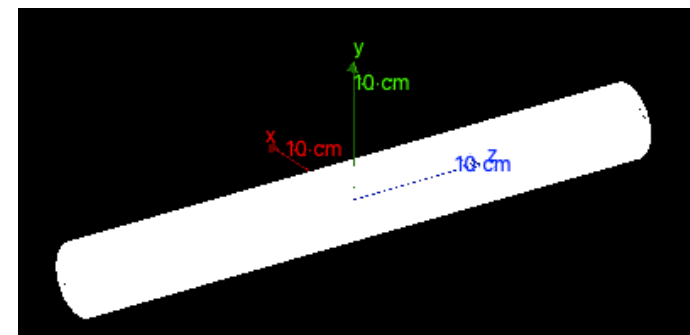


岩盤から実験室に輸送した後の中性子のエネルギースペクトル  
 (0~3.5%の範囲でHの比率を変更して計算した)

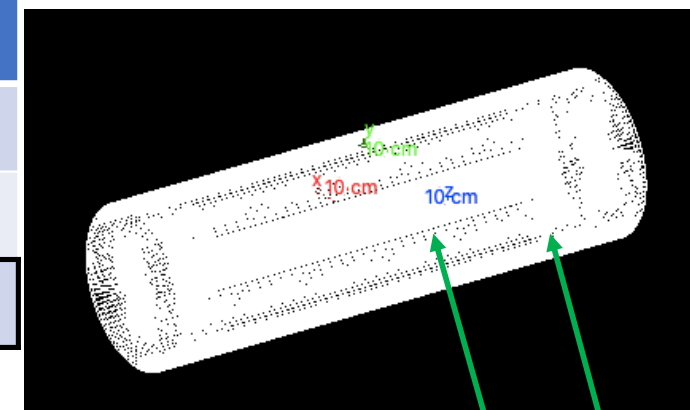
# 各環境中性子スペクトラムに対する<sup>3</sup>He比例係数管の応答

実験室に輸送された中性子を<sup>3</sup>He比例検出器に入射する。

Setup AとBの<sup>3</sup>He比例計数管で反応数 $R_{A,G}$ ,  $R_{B,G}$ をそれぞれ確認する。



Setup A



Setup B

<sup>3</sup>He比例計数管

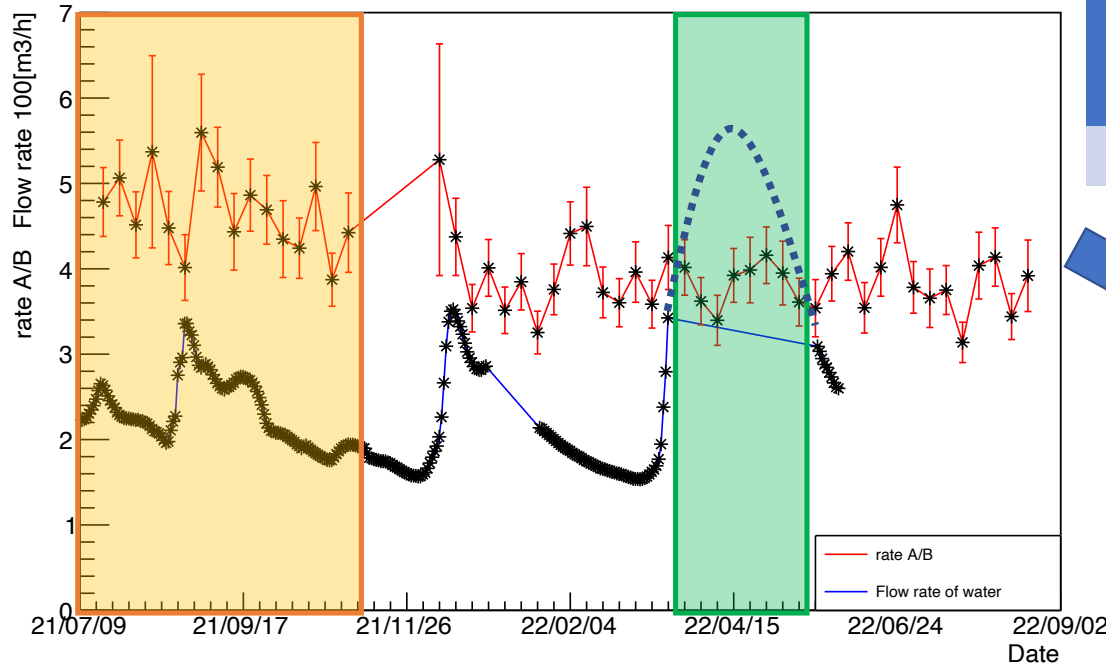
ポリエチレン容器 (減速材)

水素の岩盤内での質量比	0%	1%	2%	2.5%	3%	3.5%
$R_{A,G}$	3567	8003	9828	10555	10792	11076
$R_{B,G}$	3980	3440	2851	2517	2484	2369
$R_{A,G}/R_{B,G}$	0.896	2.326	3.447	4.193	4.347	4.675

1,000,000個の中性子を発生させた場合の反応数

岩盤内の水分量により $R_{A,G}/R_{B,G}$ が変化することが確認された

# 中性子イベント頻度とKAGRAトンネル排水路流量との比較



岩盤中の水素含有量	0%	1%	2%	2.5%	3%	3.5%
$R_A/R_B$	0.896	2.326	3.447	4.193	4.347	4.675

中性子シミュレーションによる見積もり

オレンジ(夏季: 2021年7月から10月)の $R_A/R_B$ の平均値 **4.678**  
 -> シミュレーションとの比較から水素含有量 3.5%程度だと予想される

緑(雪解け期: 2022年3月から5月)の $R_A/R_B$ の平均値 **3.833**  
 -> シミュレーションとの比較から水素含有量 2.5%程度だと予想される

赤は $^3\text{He}$ 比例計数管の測定による5週間ごとの $R_A/R_B$

青は国立天文台、鷲見氏の測定によるKAGRAトンネル排水路での流量調査の結果

緑の部分は雪解けにより流量が多すぎたため、流量を測定できなかった期間

シミュレーション: 水分量増える ->  $R_A/R_B$ が大きくなった

測定結果: 水分量増える ->  $R_A/R_B$ が小さくなった。

# 中性子イベント頻度とKAGRAトンネル排水路流量との比較

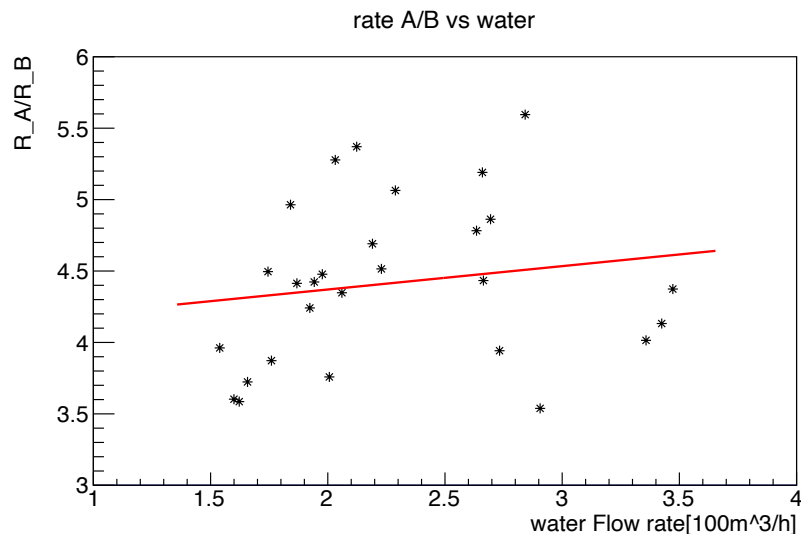
## 結論

### 考察①

： KAGRAトンネル排水量と $R_A/R_B$ にはシミュレーションで予想された相関は見られない  
 環境中性子を測定したLab-BとKAGRAトンネルは同じ山の真ん中とフチと大きく離れているため、Lab-Bの岩盤中の水分量とKAGRAトンネルの流量には違いがあってもおかしくない。

### 考察②

：  $R_A/R_B$ は2021年11月以降、それ以前に比べて安定しているようにも見える。これに関しては、2021年11月前後で測定環境になにか違いがないかを確認するで予定ある。

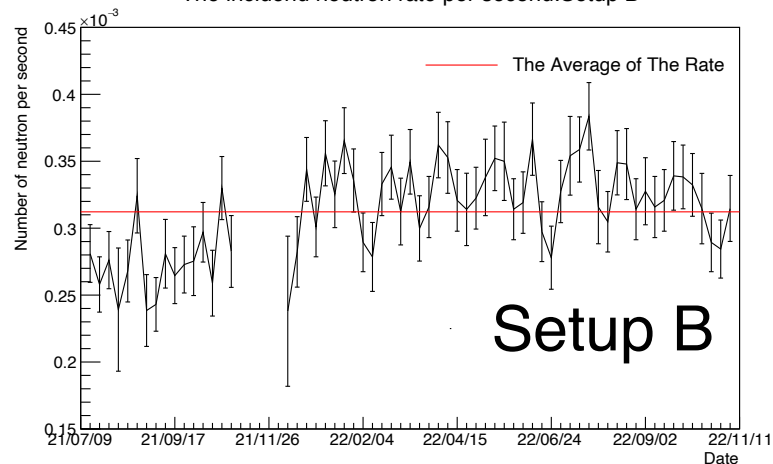


中性子イベント頻度とKAGRAトンネル排水路流量の散布図（相関係数：0.162）

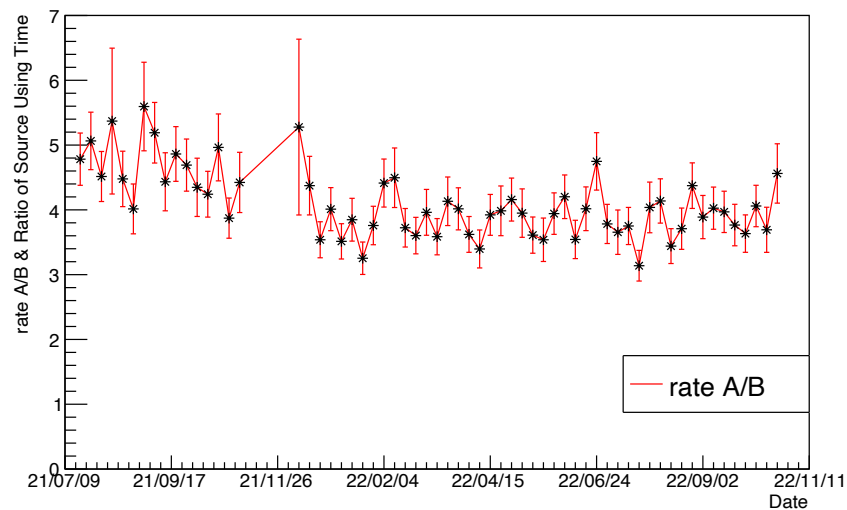


# 考察

The incident neutron rate per second: Setup B



rate A/B



2021年11月以降の高速中性子のレートは高め(約1.2倍)

2021年11月に環境の違いがあった...?

LabBでは検出器の校正などで中性子源がよく使われており、中性子源の使用により実験室中の物質で放射化がおき高エネルギーの中性子が増えた可能性

# 結論

- 神岡地下実験室Lab-Bにおいて、環境中性子測定を約1年間行った結果、カウントレートの変動があった。
- 地下実験室の岩盤中水分量が環境中性子に与える影響をシミュレーションで見積った。
- Lab-Bでの環境中性子の測定結果とKAGRAトンネル排水量の間には相関がなかった。

# 今後の予定

- 長期観測を継続し、複数年に渡る環境中性子カウントレートの変化を調べる。
- Lab-B付近のトンネル排水量や神岡の雨量との比較
- 中性子のエネルギースペクトルを直接観測できる液体シンチレーター検出器との同時観測を行う。
- 神岡地下実験室の地下坑道や実験を行ったLab-Bのラドン濃度の時間変化と中性子イベント頻度の相関を調べてみる。
- 放射化の評価

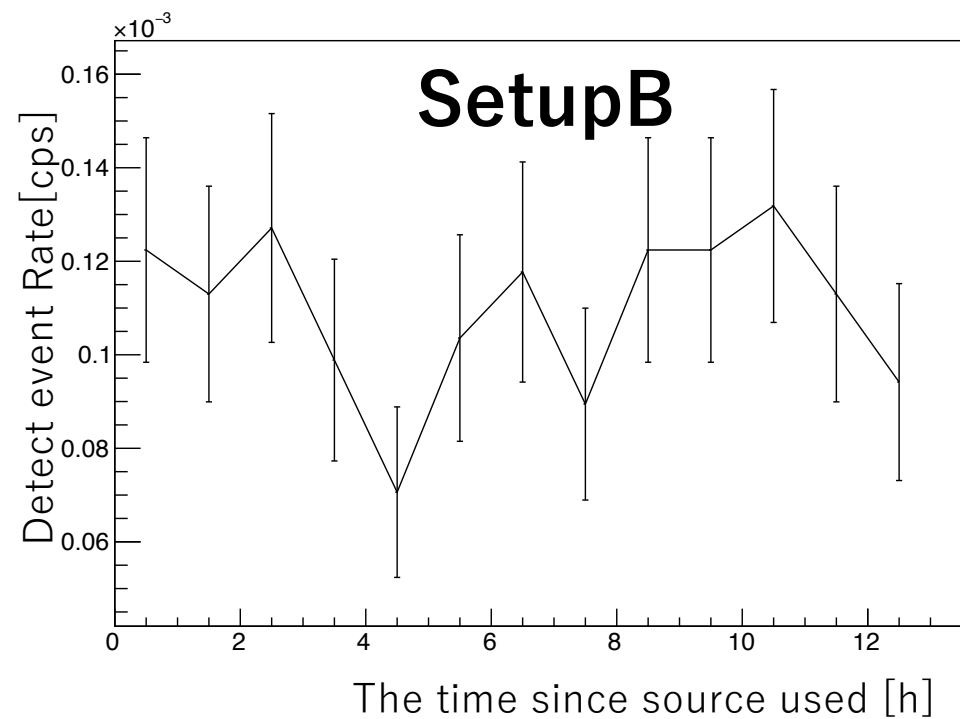
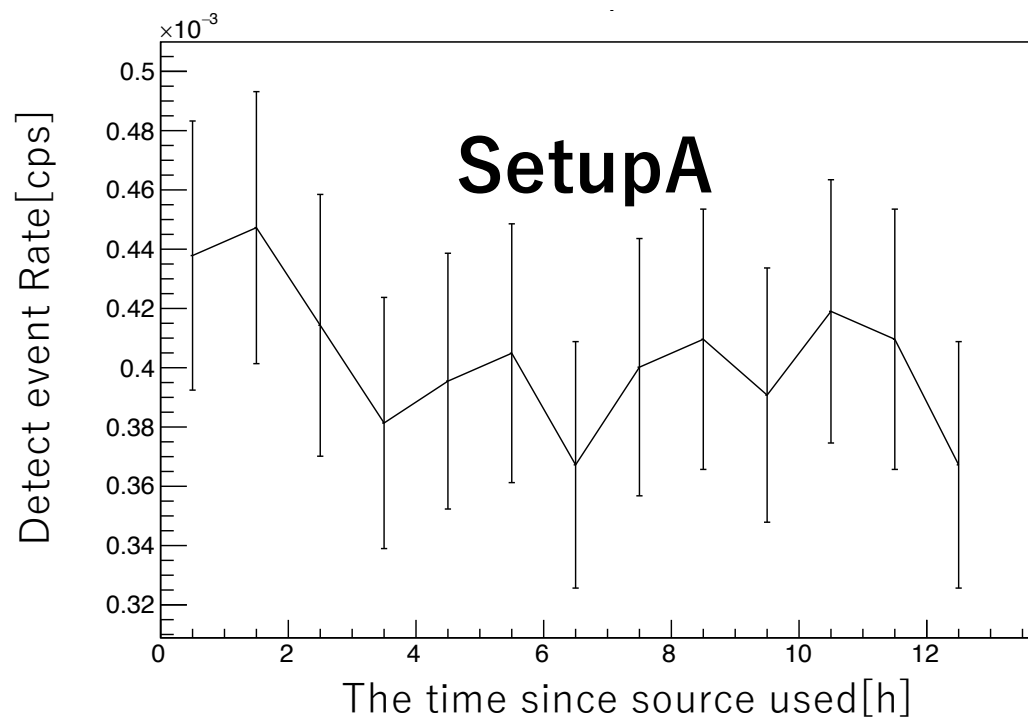
# 参考文献

- [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 理工学府 数物・電子情報系理工学 専攻 物理工学教育分野修士論文(未公刊)
- [2] Keiichi SHIBATA et al. Jendl-4.0: A new library for nuclear science and engineering. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48, No. 1, pp.1-30, 2011.
- [3] K. Mizukoshi et al. Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at the Kamioka Observatory. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol 2018, Issue 12.

BACK UP

# 放射化の評価

the rate after the source using the period each an hour



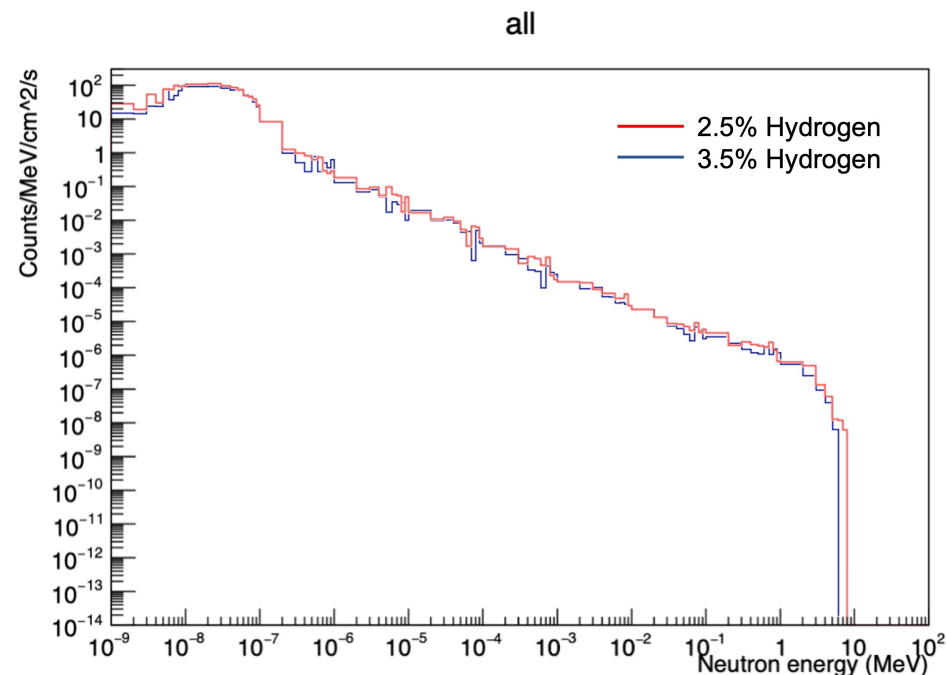
# フラックスの導出

$^3\text{He}$ 比例係数管が収まる半径 $r$  cmの球を通過した中性子数を $N_{G4,gen}$ として、中性子のフルエンスは球の大円の断面積で割り、

$$\phi_{G4} = \frac{N_{G4,gen}}{\pi r^2}$$

$^3\text{He}$ 比例係数管の実測のカウントレート $R$ を用いて、フラックスは

$$\Phi = \frac{\phi_{G4}}{N_{G4,det}} R$$



**H:2.5%**

エネルギー	~0.5eV	0.5eV~1keV	1keV~1MeV	1MeV~
比率 (%)	57.45	10.96	22.82	8.77
フラックス( $\times 10^{-6}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	8.738	1.667	3.471	1.334

**H:3.5%**

エネルギー	~0.5eV	0.5eV~1keV	1keV~1MeV	1MeV~
比率 (%)	60.15	10.00	22.69	7.14
フラックス( $\times 10^{-6}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	8.793	1.462	3.317	1.044

# シュミレーション結果

H:2.5%

エネルギー	~0.5eV	0.5eV~1keV	1keV~1MeV	1MeV~
比率 (%)	57.45	10.96	22.82	8.77
フラックス( $\times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	8.738	1.667	3.471	1.334

H:3.5%

エネルギー	~0.5eV	0.5eV~1keV	1keV~1MeV	1MeV~
比率 (%)	60.15	10.00	22.69	7.14
フラックス( $\times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	8.793	1.462	3.317	1.044

- 冒頭の測定結果からもわかるように低いエネルギー帯のフラックスの変化は小さい
- 一方、高速中性子は水素の比率が3.5%の場合と比べると1.28倍と変化が大きい

# 中性子生成シミュレーション(NeuCBOT)

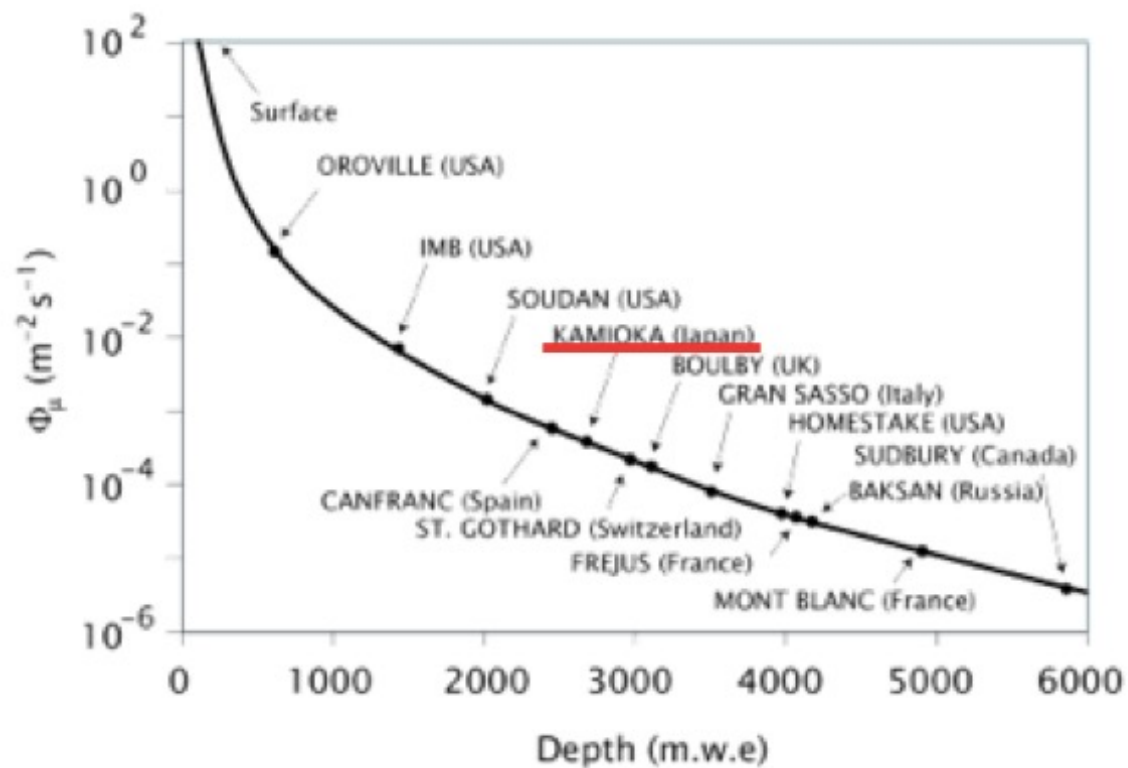
神岡実験室Lab-Bの壁面における岩盤成分(下表,先行研究[3]による調査)の岩盤構成から生成されるウラン・トリウム崩壊系列の $\alpha$ 崩壊由来の中性子量を求めた

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ZnO
Sample 1	35.75	11.35	10.95	1.09	0.99	39.37	0.02	0.35	0.10	0.03

神岡地下実験室における岩盤成分



# 宇宙線ミューオンの環境中性子

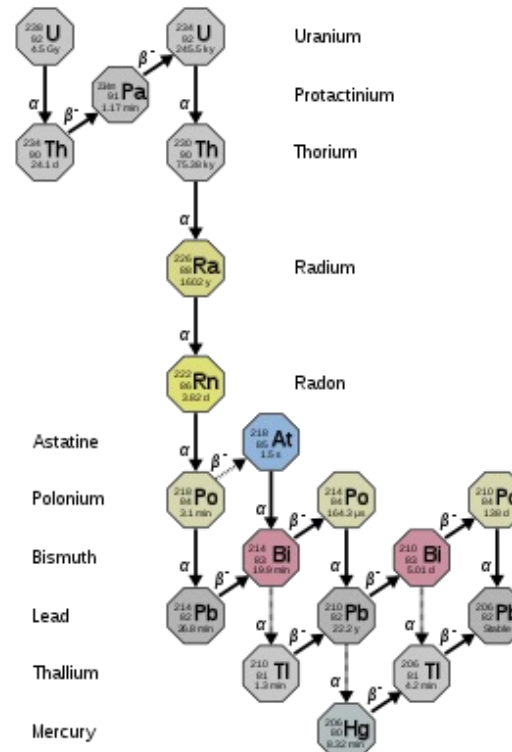


地上よりも1/100以下であり、地下環境における環境中性子はウラントリウム系列由来の中性子が支配的であることが確認されている[2]

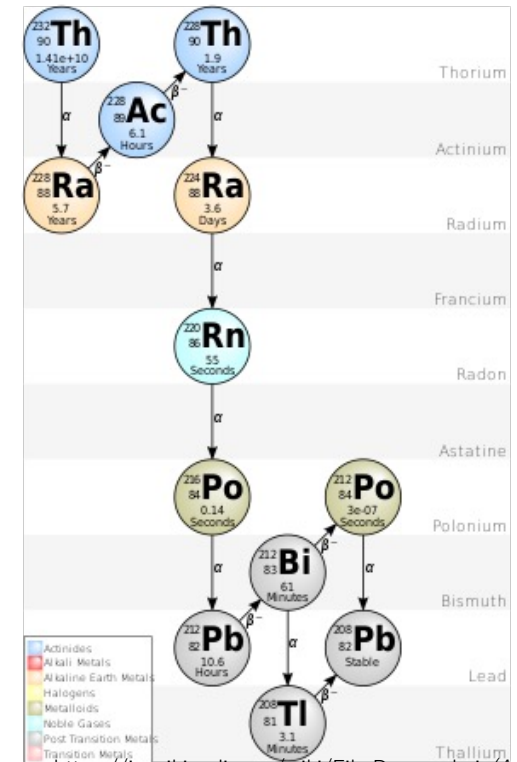
# 崩壊系列

ウラン崩壊系列 (左)  
トリウム崩壊系列 (右)

$\alpha$ 崩壊で生成される $\alpha$ 粒子が $(\alpha, n)$ 反応を起こす

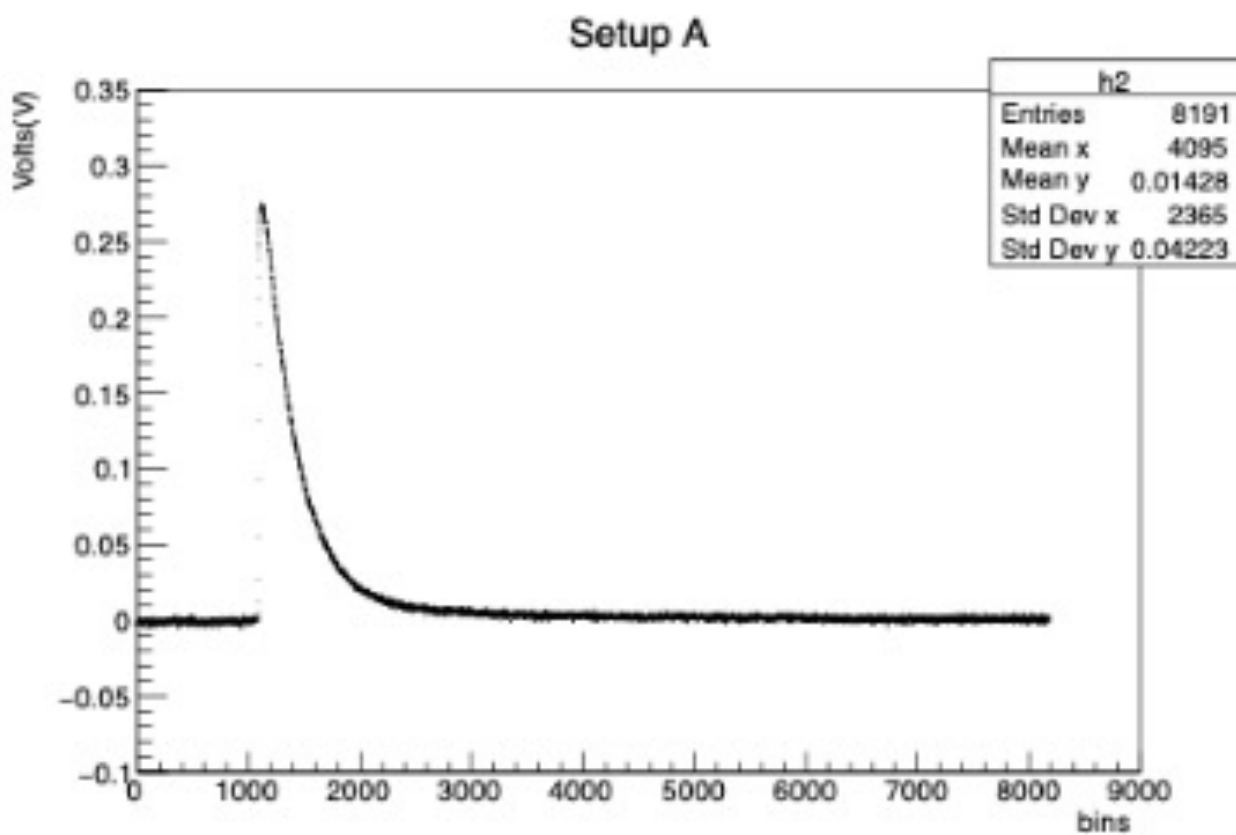


[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay\\_Chain\\_of\\_Thorium.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_of_Thorium.svg)

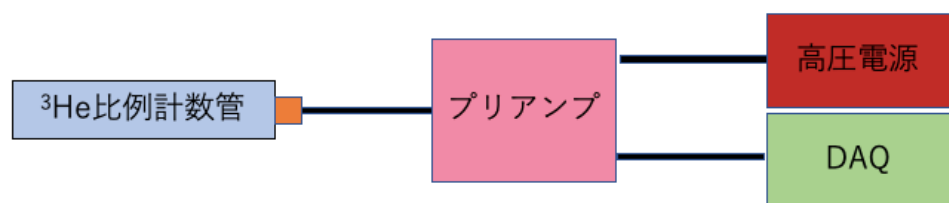


[https://ja.wikipedia.org/wiki/File:Decay\\_chain\(4n%2B2, Uranium\\_series\).svg](https://ja.wikipedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2, Uranium_series).svg)

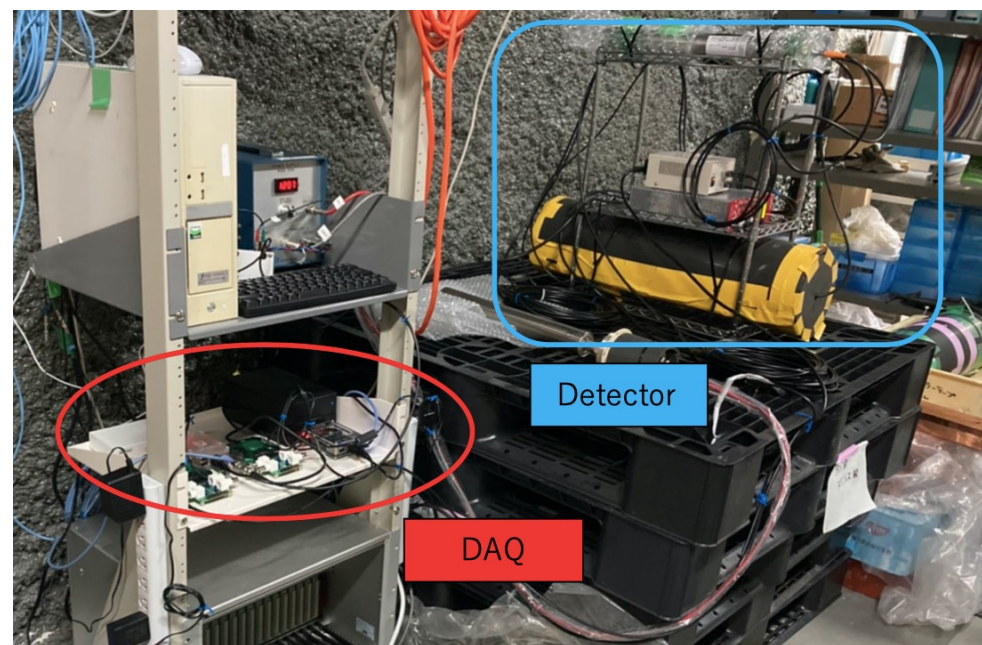
### $^3\text{He}$ 比例計数管のアンプを通じたあとの信号



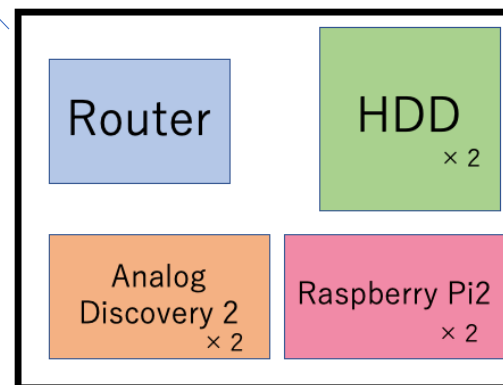
# 検出器のセットアップ



接続の略図



得られたデータはHDDにマウント  
VPN接続を用いて自分のコンピュータにデータを転送した

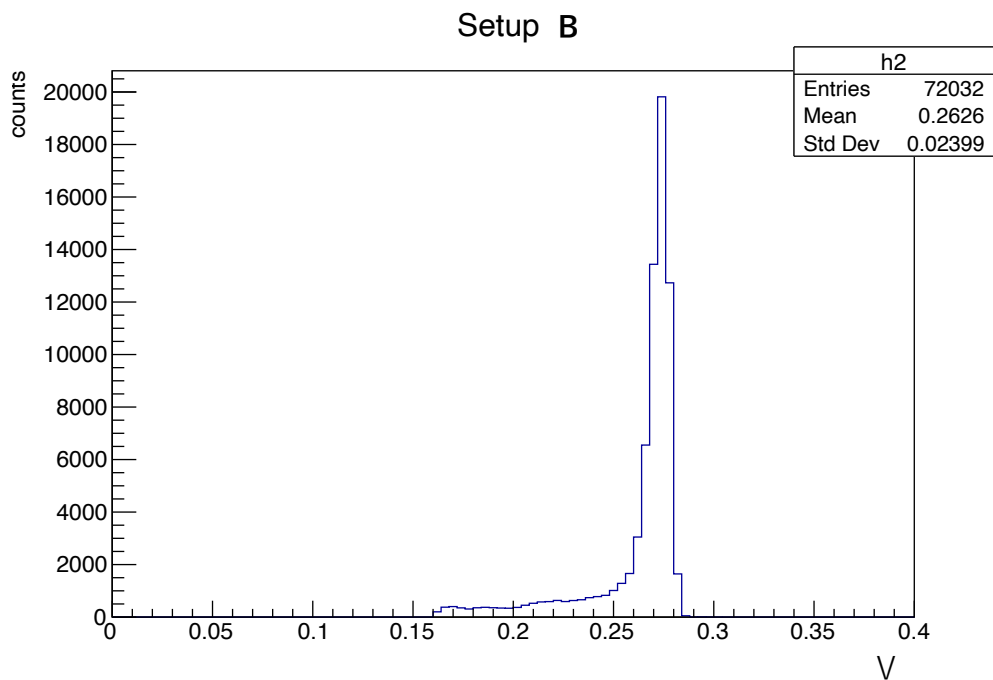


DAQ周り

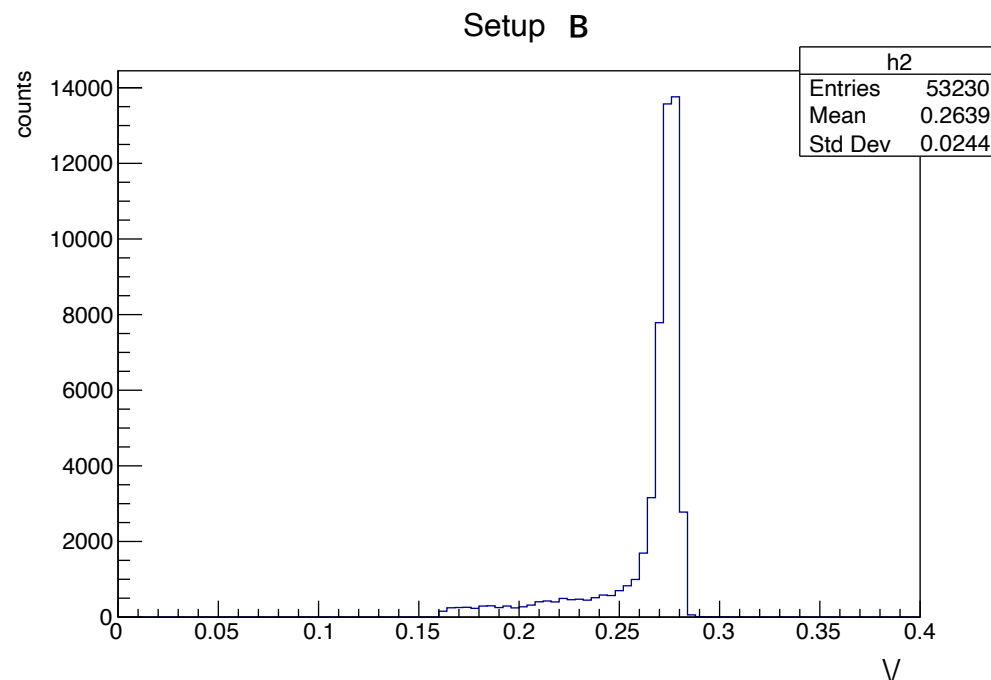
実際のセットアップ

# 検出器の較正

- 中性子線源が使われている時間のデータで $^3\text{He}$ 比例計数管の較正を行う
  - (n,p)反応のQ値が0.765MeVであり、下の出力のヒストグラムのピークにあたる



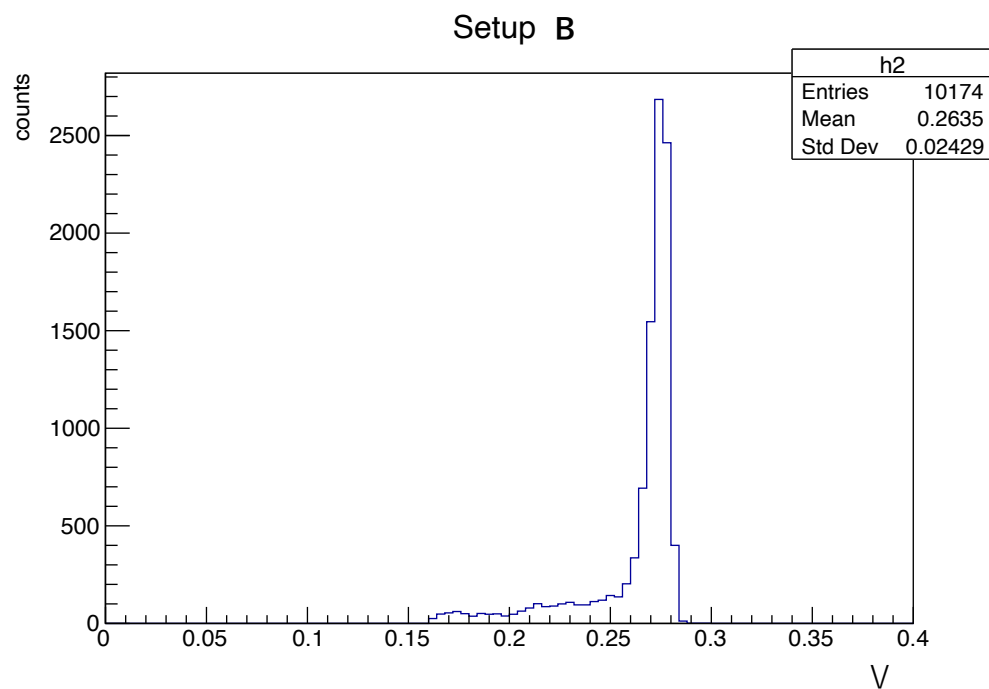
2022年7月上旬時点の較正



2021年8月下旬時点の較正

# 検出器の較正

- 中性子線源が使われている時間のデータで $^3\text{He}$ 比例計数管の較正を行う
  - (n,p)反応のQ値が0.765MeVであり、下の出力のヒストグラムのピークにあたる



2022年1月中旬時点の較正

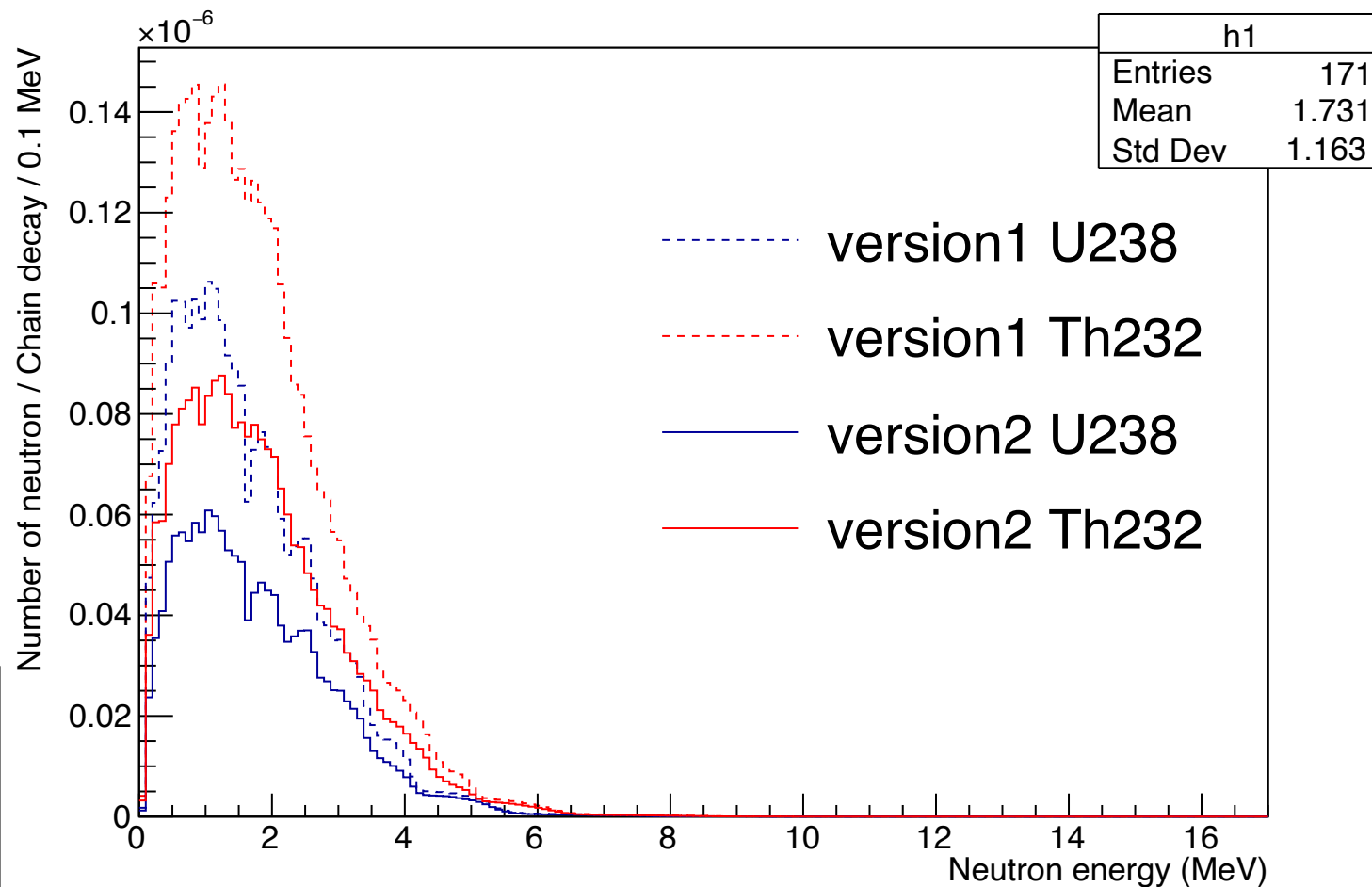
# 中性子生成シミュレーション

それぞれの崩壊系列が一回起こった  
ときの中性子生成量を計算

右図から、それぞれのエネルギーで  
中性子生成量が小さくなり、スペク  
トル形が変化したことがわかった

赤線：トリウム崩壊系列  
青線：ウラン崩壊系列

点線：TALYS. Version 1  
実線：TALYS. Version 2



# Watt spectrum

- $^{238}\text{U}$  は自発核分裂を起こしうる
- 中性子スペクトルは以下の方程式で計算できる

$$W(a, b, E') = Ce^{-aE'} \sinh(\sqrt{bE'}) \quad (2)$$

where  $C = \sqrt{\pi \frac{b}{4a} \frac{e^{\frac{4a}{b}}}{a}}$ , and  $E'$  is the secondary neutron energy. The coefficients  $a$  and  $b$  vary weakly from one isotope to another.

- 定数は以下の通りである
- $\bar{\nu}$  : 自発核分裂による平均的な中性子の発生数

Reference J.M.Verbeke,C.Hagmann,andD.Wright.Simulation of neutron and gamma ray emission from fission and photofission. UCRL-AR-228518, 2014.

Isotope	$\bar{\nu}$	$a[\text{MeV}^{-1}]$	$b[\text{MeV}^{-1}]$
$^{238}\text{U}$	2.01	1.54245	6.81057