

ヘリウム3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と
中性子輸送シミュレーションの精度の理解に向けた研究

**第9回極低放射能技術会
(2024/2/7)**

横浜国立大学 南野研究室

天内昭吾

研究目的(中性子測定)

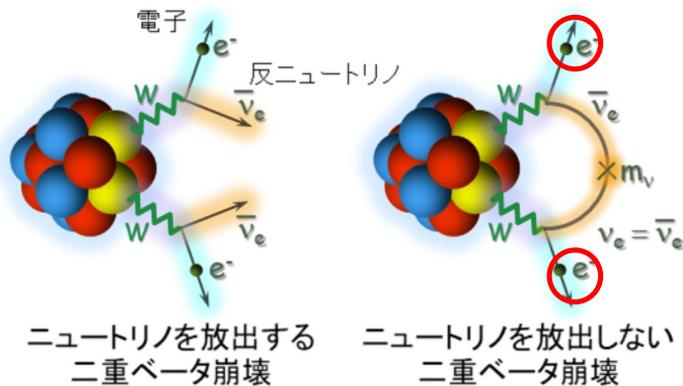
中性子は地下環境で行われている暗黒物質探索やニュートリノを伴わない二重 β 崩壊($0\nu\beta\beta$ 崩壊)の信号事象の背景事象(バックグラウンド)となる



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

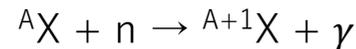
バックグラウンド例

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 γ 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 γ 線のエネルギーが近いこと、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と予想される

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

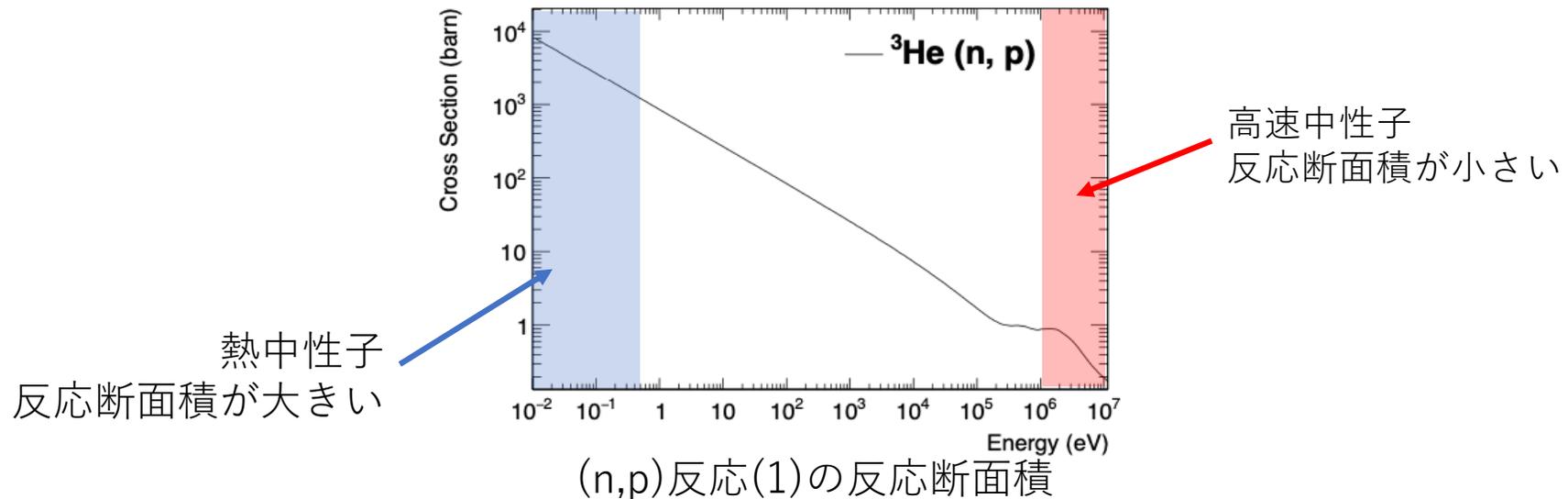
中性子検出器： ^3He 比例計数管の測定原理

① 入射中性子と ^3He ガスが以下の反応をする

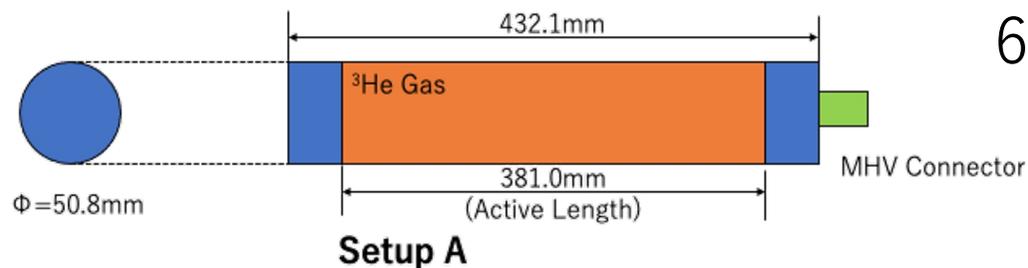


② Q値のエネルギーが陽子とトリチウムの運動エネルギーとなり、それらが ^3He ガスを電離する

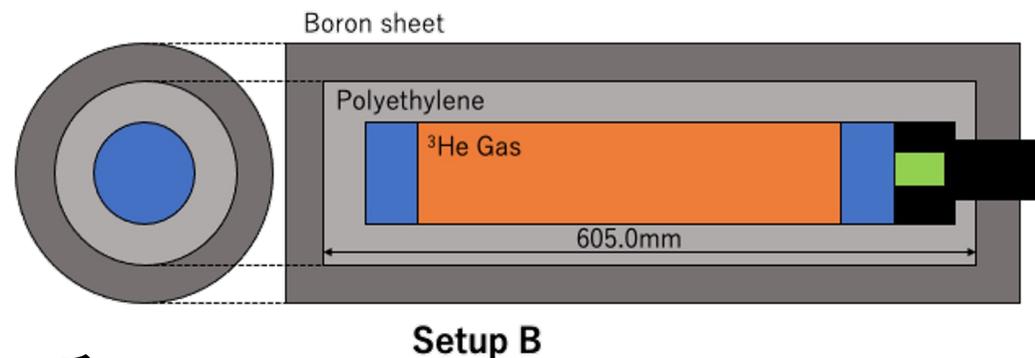
③ 電離により生成された電子がアノードワイヤー中心の強電場により加速され、さらに ^3He ガスを電離する。この結果として、増幅した信号を読み出すことができる。



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
³He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。

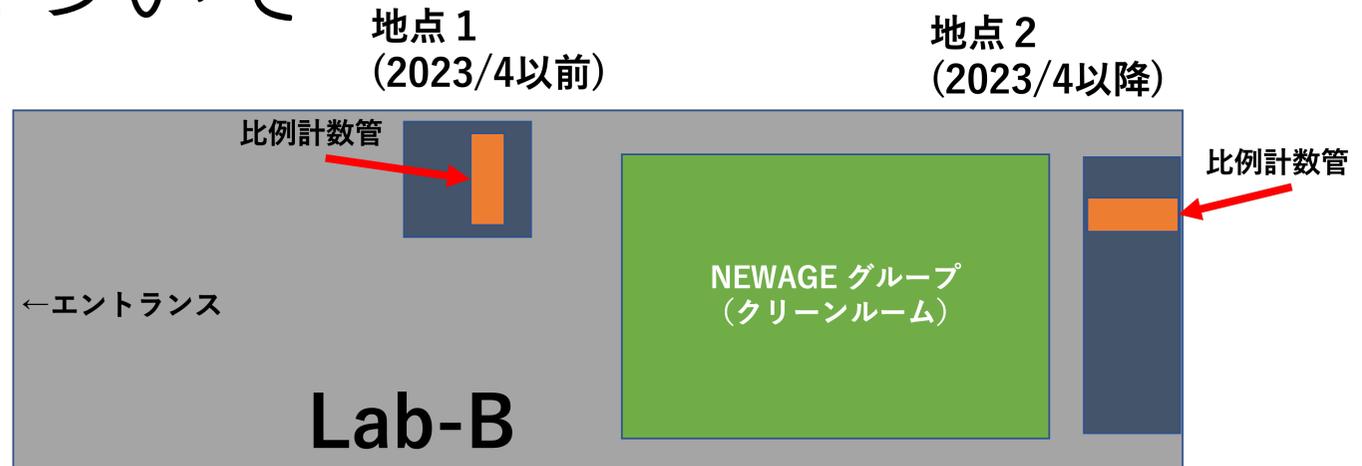
使用した³He比例計数管
(RS-P4-0810-220)

Setup A
Setup B

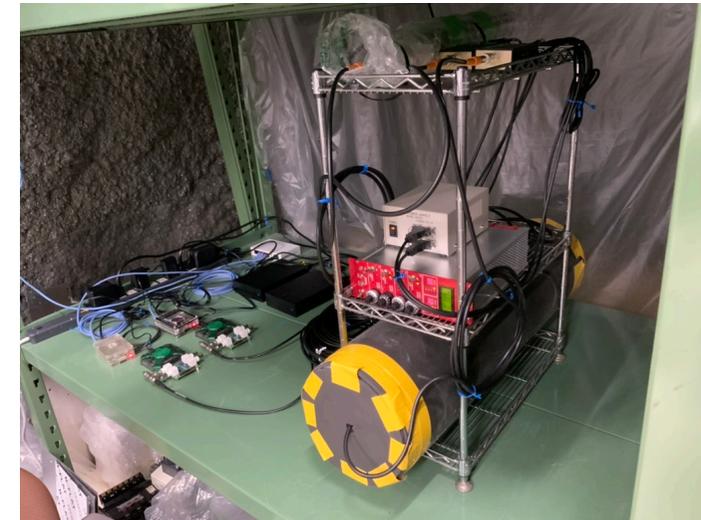


環境中性子測定について

測定は2021/7から行っている
2023/4から測定位置を変更して測定



地点1の配置



地点2の配置

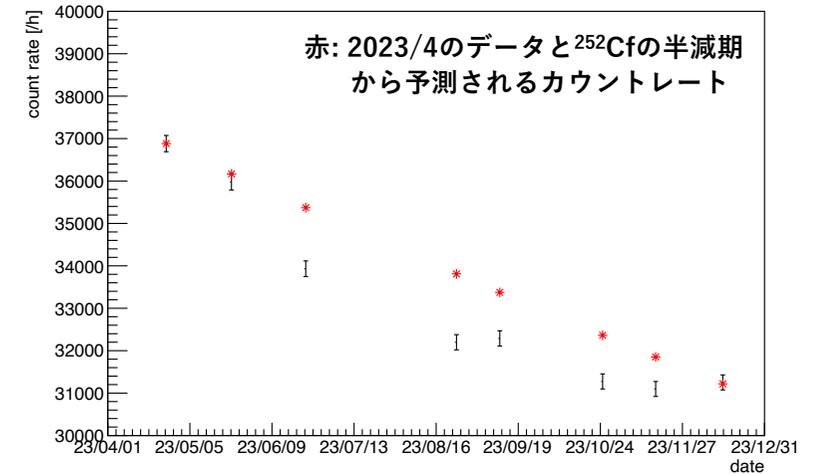
^3He 比例計数管のキャリブレーション

^3He 比例計数管のキャリブレーション

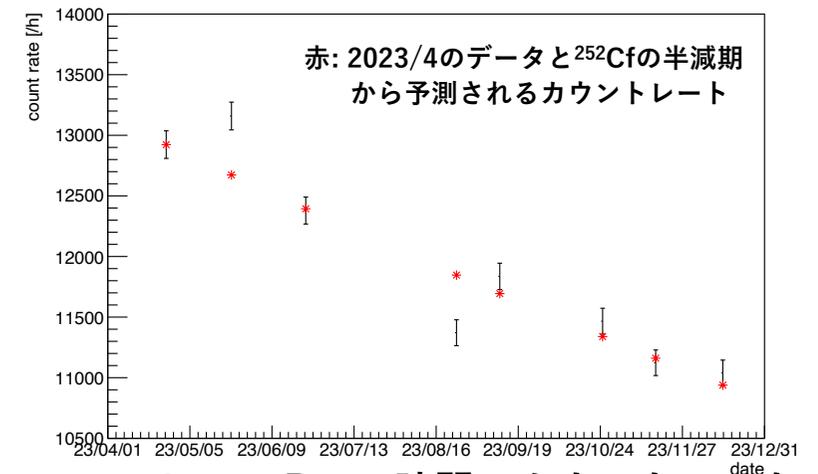
^3He 比例計数管の感度が変化していないか確認
2023年4月から開始した

- 決まった同じ場所で1時間 ^{252}Cf 線源を置いてカウントレートを計測
- 月に一回行う

NEWAGEグループの方に線源を指定の場所に置いてもらっている



Setup Aの1時間のカウントレート



Setup Bの1時間のカウントレート

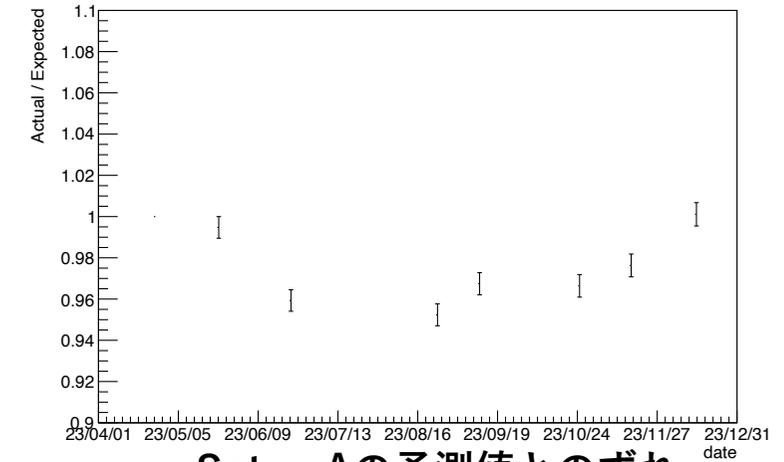
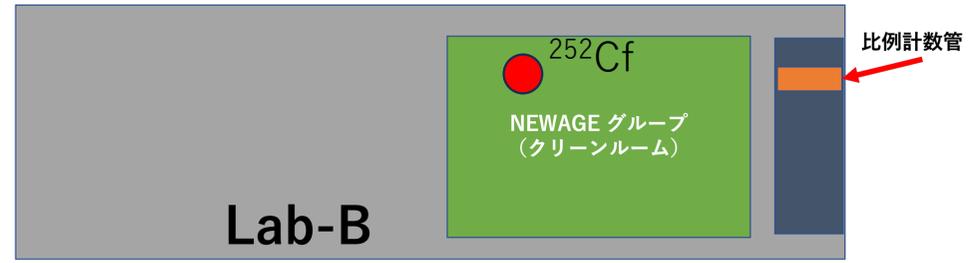
^3He 比例計数管のキャリブレーション

予測値とのずれ (右図)

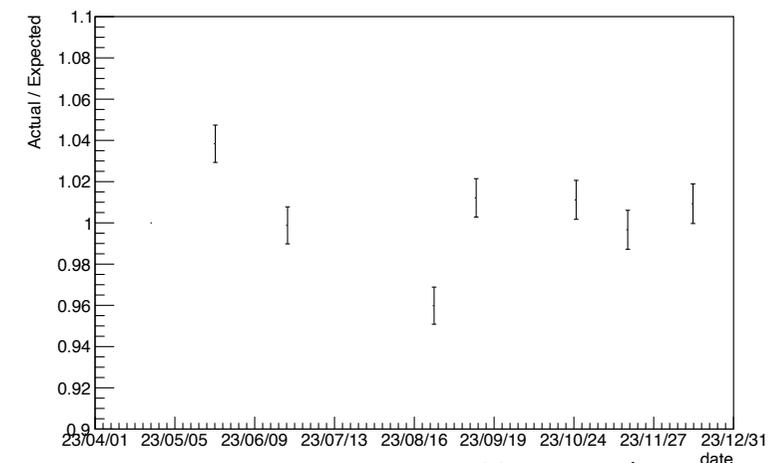
実際のカウントレートの変動は
 Setup A: 10 %
 Setup B: 4 %

カウントレートが予測と合わない時期もあり
 →原因を探る
 Setup Bのデータの統計量を増やすべき
 →キャリブレーションの時間を増やす

NEWAGEグループの方に一回線源を指定の場所に置いてもらっている



Setup Aの予測値とのずれ



Setup Bの予測値とのずれ

環境中性子測定結果

R_A : Setup Aのカウンtrate

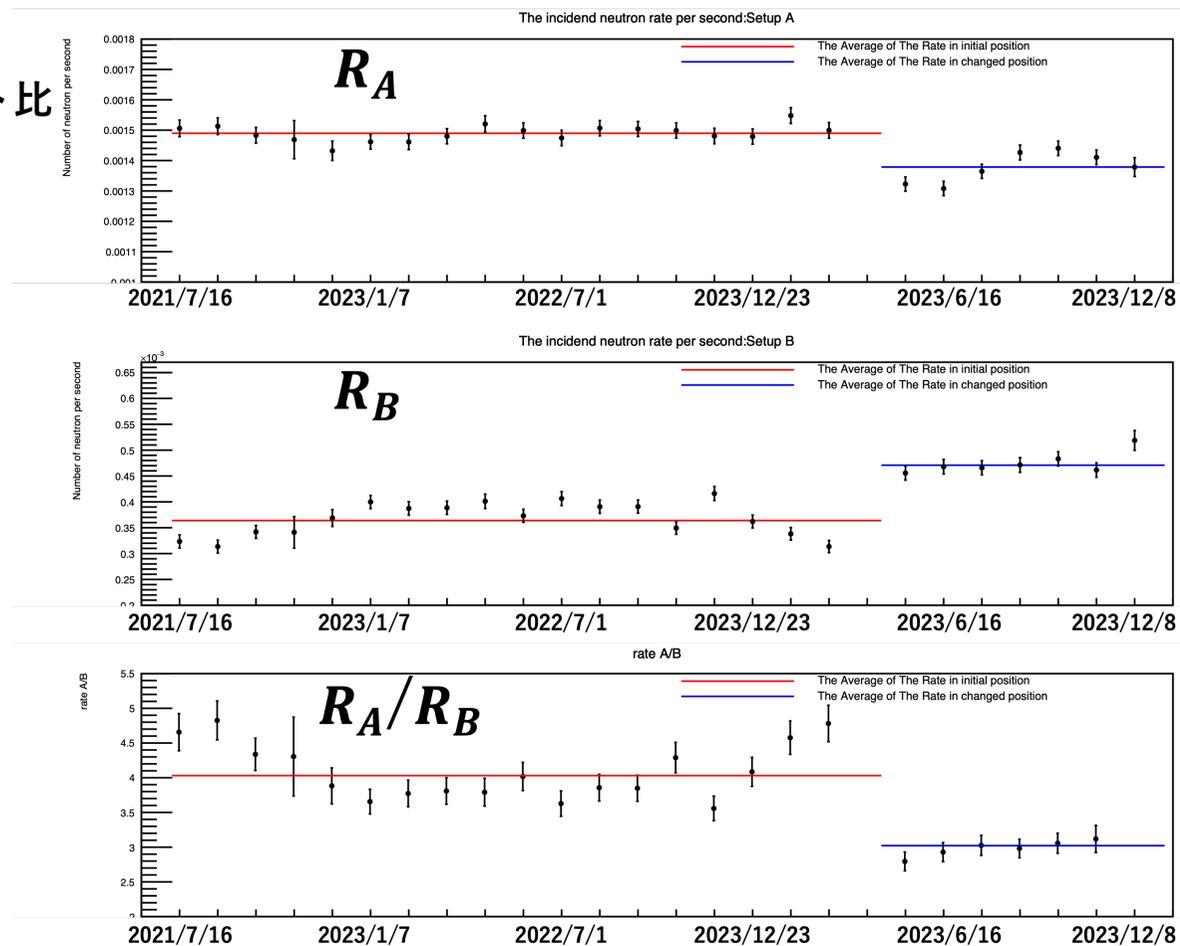
R_B : Setup Bのカウンtrate

R_A/R_B : (熱中性子) / (高速中性子)のカウンtrate比
以上を5週間ごとにまとめたもの

赤 : 地点1の期間

青 : 地点2の期間

地点1のデータの解析を今回はお話する



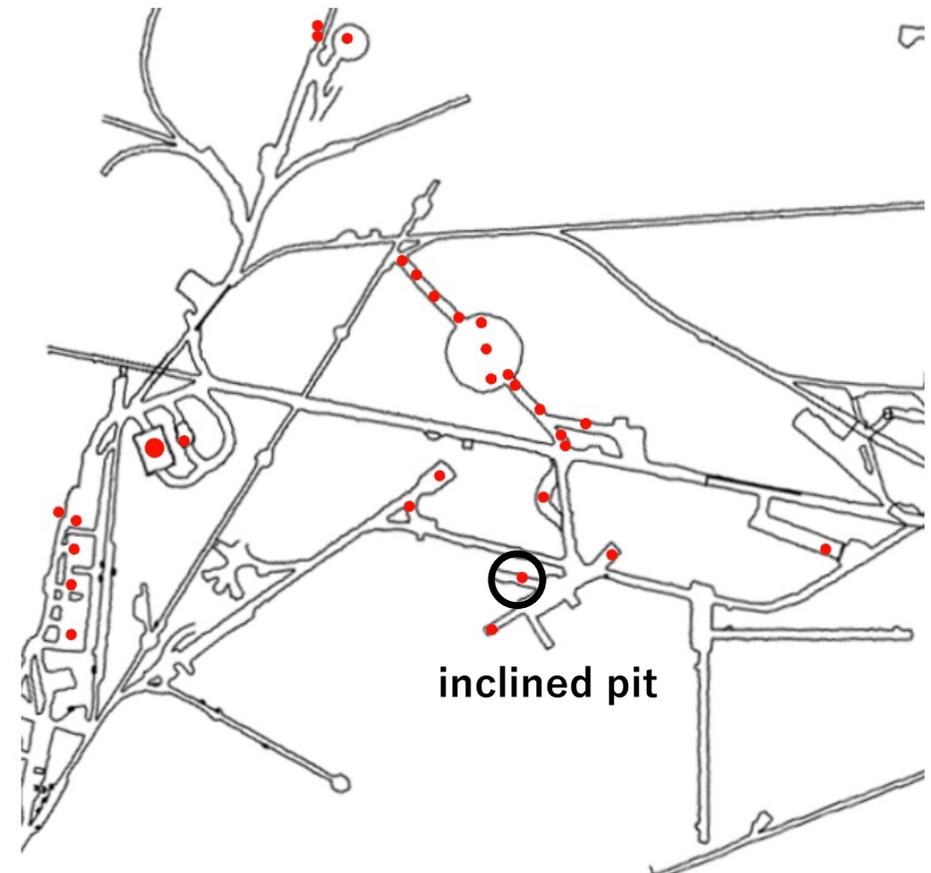
環境中性子と他環境要因との相関

中性子カウントレートと環境要因に相関があるか確認する

- 雨量 (神岡町 by AMeDAS)
- Rn濃度 (inclined pit)
- 湿度 (inclined pit)

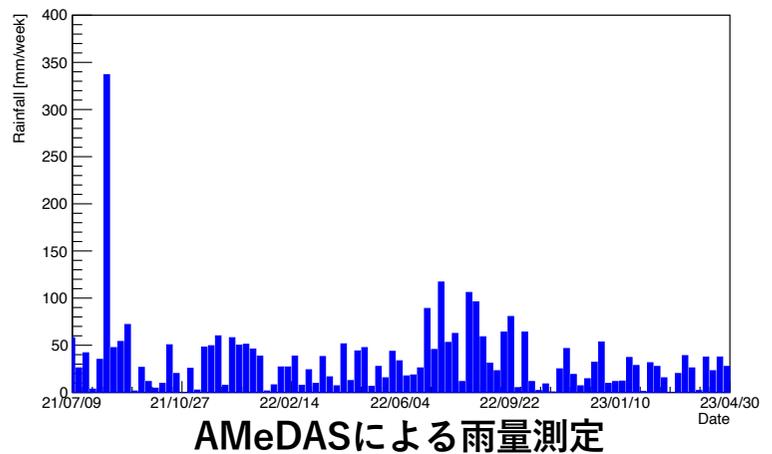


AMeDASの設置位置と地下実験施設の位置



Lab-B内のRnモニターが一時止まっていたためinclined pitに設置されているRnモニターのデータを用いた

環境中性子カウントレートと雨量



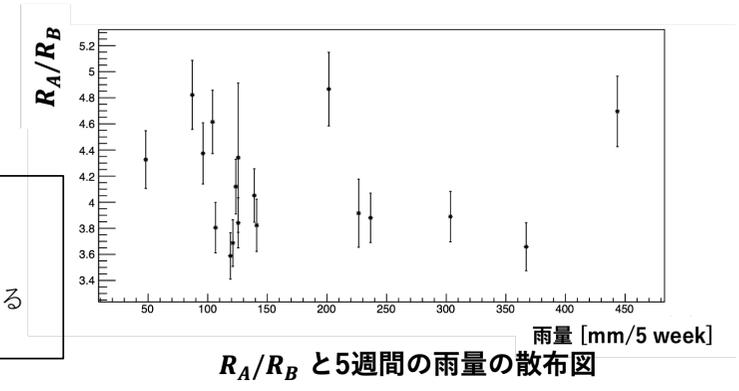
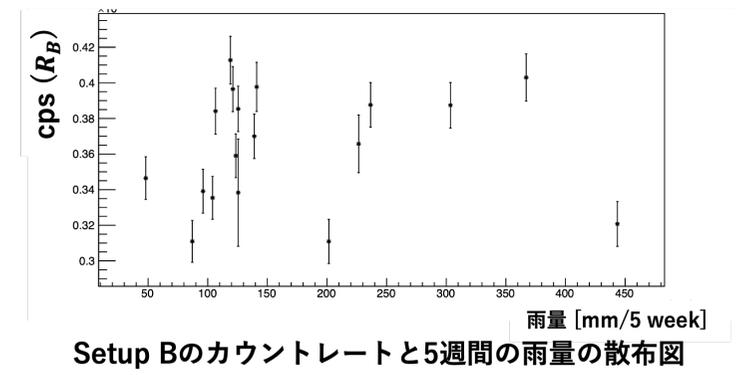
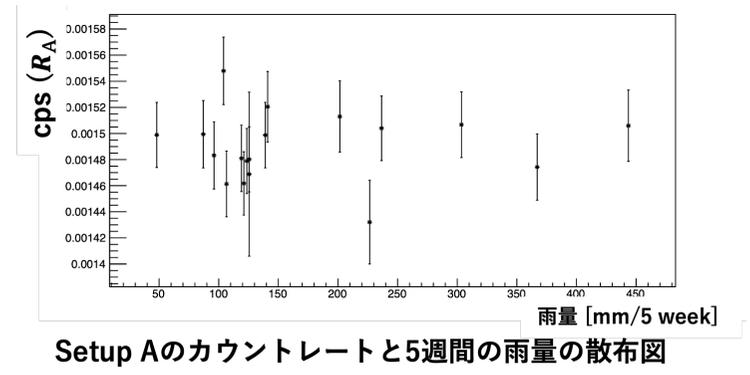
5週間ごとの雨量とカウントレートの散布図（右図）
 熱化が起きている場合は以下のようになることが予想される

- R_A と R_A/R_B で正の相関
- R_B で負の相関

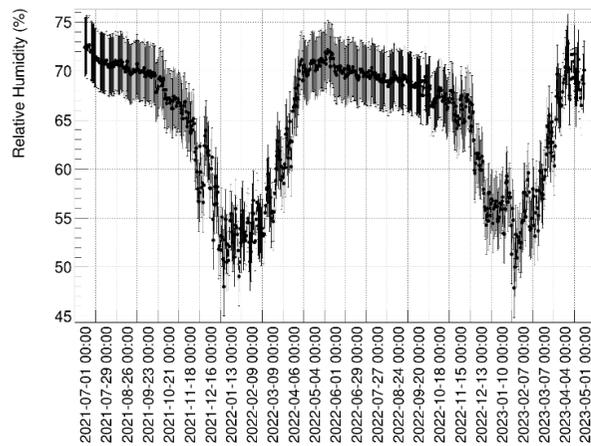
→予想された相関は見られなかった

| | R_A | R_B | R_A/R_B |
|------|-------|-------|-----------|
| 相関係数 | 0.17 | 0.12 | -0.08 |

相関係数
 0.0~0.2: ほぼ相関関係がない
 0.2~0.4: やや相関関係がある
 0.4~0.7: かなり相関関係がある
 0.7~1.0: 強い相関関係がある



環境中性子カウントレートと湿度



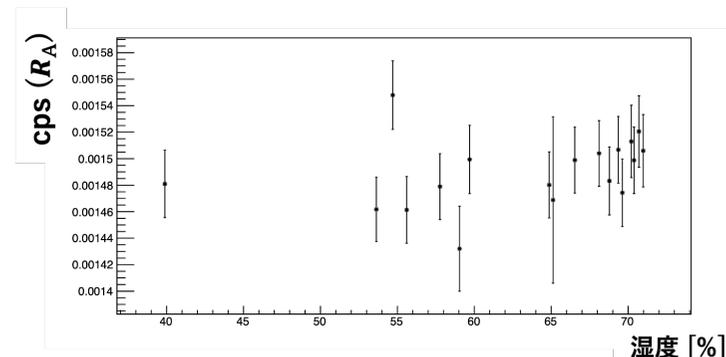
inclined pitで観測されている湿度

空気中の水分が熱化を誘起させている可能性あり
 →湿度が上がることによるカウントレートへの影響
 (次ページで検証)

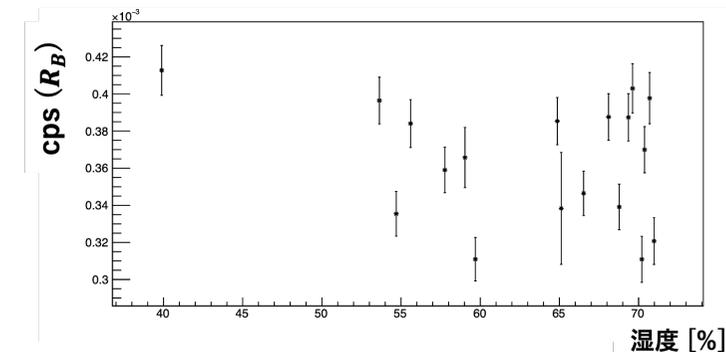
| | R_A | R_B | R_A/R_B |
|------|-------|-------|-----------|
| 相関係数 | 0.28 | -0.27 | 0.28 |

相関係数

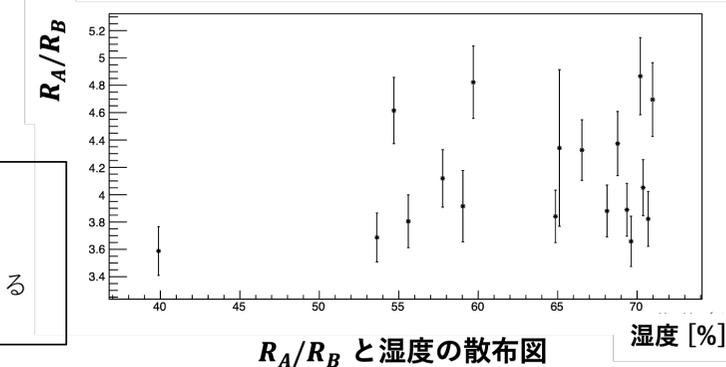
0.0~0.2: ほぼ相関関係がない
 0.2~0.4: やや相関関係がある
 0.4~0.7: かなり相関関係がある
 0.7~1.0: 強い相関関係がある



Setup Aのカウントレートと湿度の散布図



Setup Bのカウントレートと湿度の散布図



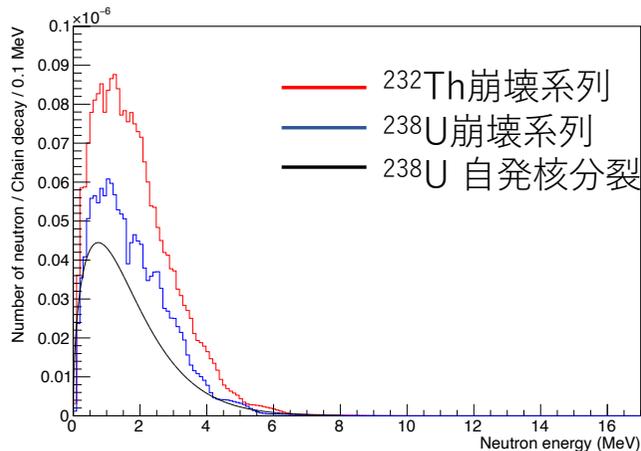
R_A/R_B と湿度の散布図

空気中の水分によるカウントレートの変動①

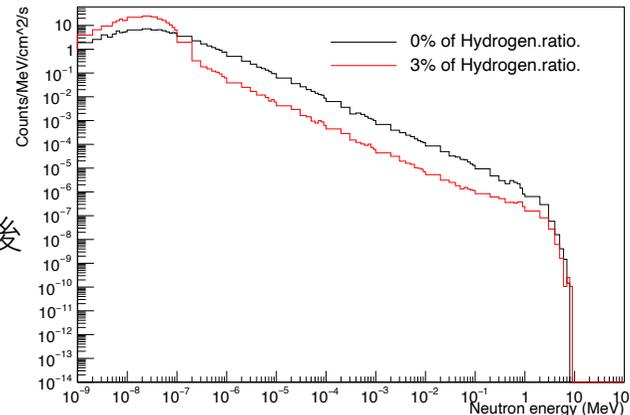
まず、実験室に届く中性子のエネルギースペクトルをまず求める

手順

1. 岩盤中でU,Th崩壊系列由来の α 線により生成された中性子エネルギースペクトル(NeuCBOT)
2. ^{238}U の自発的核分裂により生成される中性子エネルギースペクトル(Watt Spectrum)
3. 岩盤を通り抜け実験室に入ってくる中性子エネルギースペクトル(Geant4)

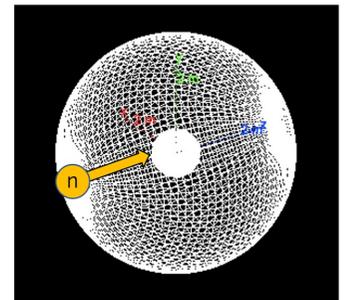


岩盤内で生成される中性子のエネルギースペクトル



岩盤内で生成され実験室に入ってくる中性子のエネルギースペクトル

直径1mの球を実験室、厚さ2mの岩盤を見立てた
岩盤から等方的に中性子を発生させる

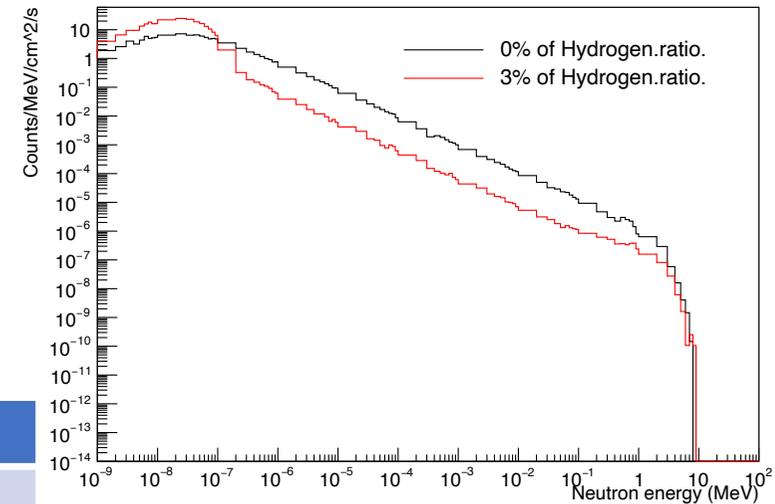


空気中の水分によるカウントレートの変動②

岩盤を通り抜け実験室に入ってくる中性子エネルギースペクトル（岩盤中のHの割合が0%のものを使った）



右図のエネルギースペクトルに従う中性子を入射してそれぞれの反応数を確認する



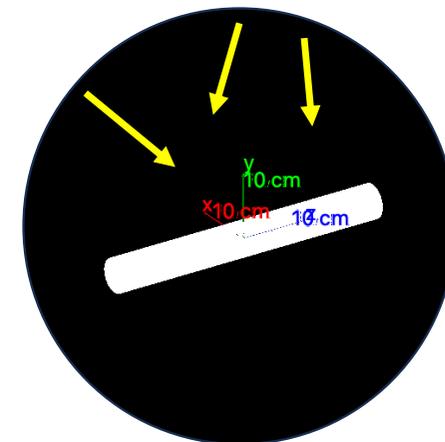
| setup | 反応数 | setup | 反応数 |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| R_A | 1051 ± 32 | R_A | 985 ± 31 |
| R_B | 1093 ± 33 | R_B | 1215 ± 35 |
| R_A/R_B | 0.962 ± 0.042 | R_A/R_B | 0.814 ± 0.035 |

湿度 0 %

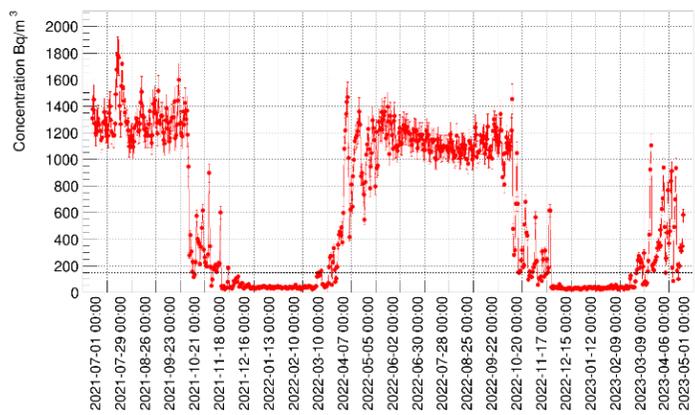
湿度 100 %

10,000,000発中性子を打った場合

R_A/R_B が上がるという予想は外れた
なぜ R_B が増加したのかなど原因を追求していく

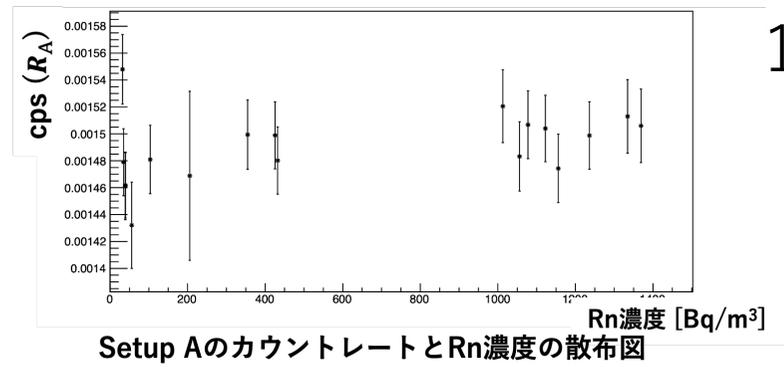


環境中性子カウントレートとRn濃度

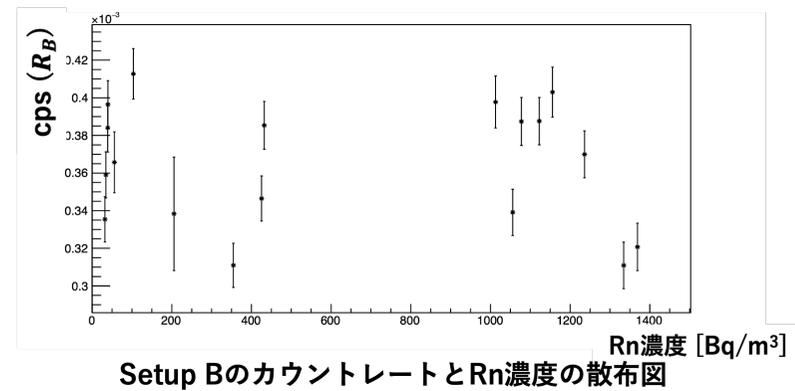


inclined pitで観測されているRn濃度

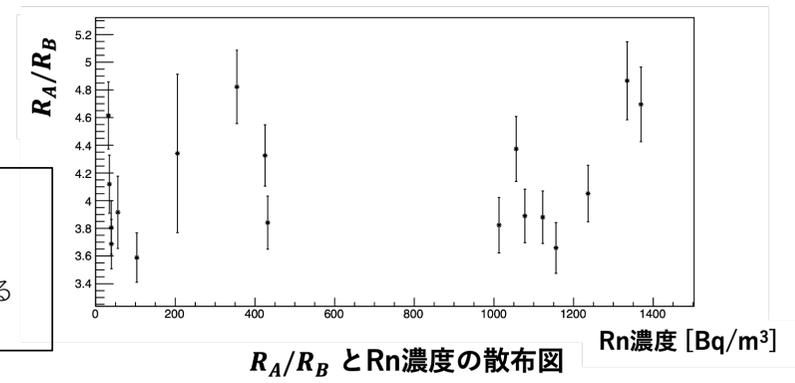
Rn濃度の増加に伴い R_A が増加する可能性
→次のページで検証



Setup AのカウントレートとRn濃度の散布図



Setup BのカウントレートとRn濃度の散布図



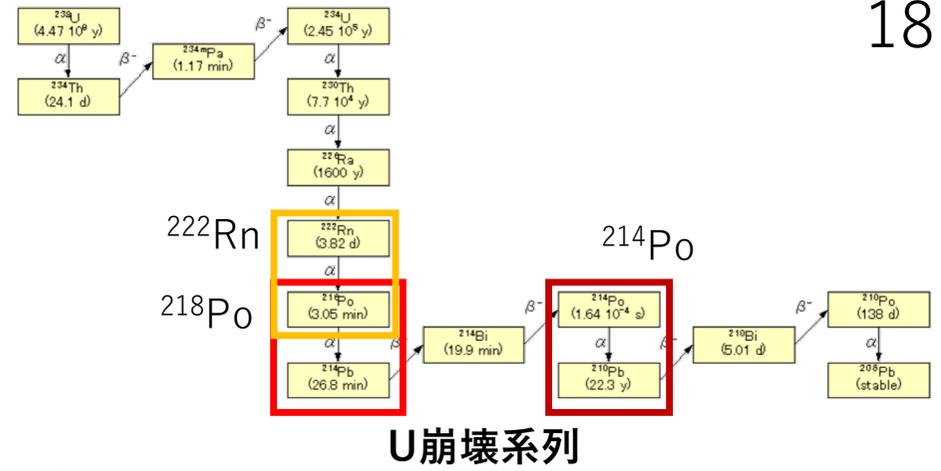
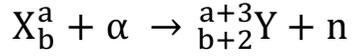
R_A/R_B とRn濃度の散布図

| | R_A | R_B | R_A/R_B |
|------|-------|-------|-----------|
| 相関係数 | 0.41 | -0.11 | 0.19 |

相関係数
 0.0~0.2: ほぼ相関関係がない
 0.2~0.4: やや相関関係がある
 0.4~0.7: かなり相関関係がある
 0.7~1.0: 強い相関関係がある

空気中のRnによる中性子生成量

NeuCBOTを用いて α 線により生成される中性子量を計算
 (α, n)反応シミュレーションツール



空気とRn由来の α 線によって生成される中性子量

Rn濃度 100 Bq/m³

空気中でRn由来の右図の α 崩壊が一回ずつ崩壊した場合生成される中性子量 5.965×10^{-6} [n/decay]

単位体積あたりの中性子生成量 5.965×10^{-4} [n/s · m³]

(出典：国連科学委員会報告書「放射線とその人間への影響」)

岩盤とU系列由来の α 線によって生成される中性子量

岩盤中の ${}^{238}\text{U}$ 含有量 0.6×10^{-6} U/g

→ 22399 Bq/m³

岩盤中でU系列の α 崩壊がすべて一回起きたときに生成される中性子量 2.312×10^{-6} [n/decay]

単位体積あたりの中性子生成量 5.178×10^{-2} [n/s · m³]

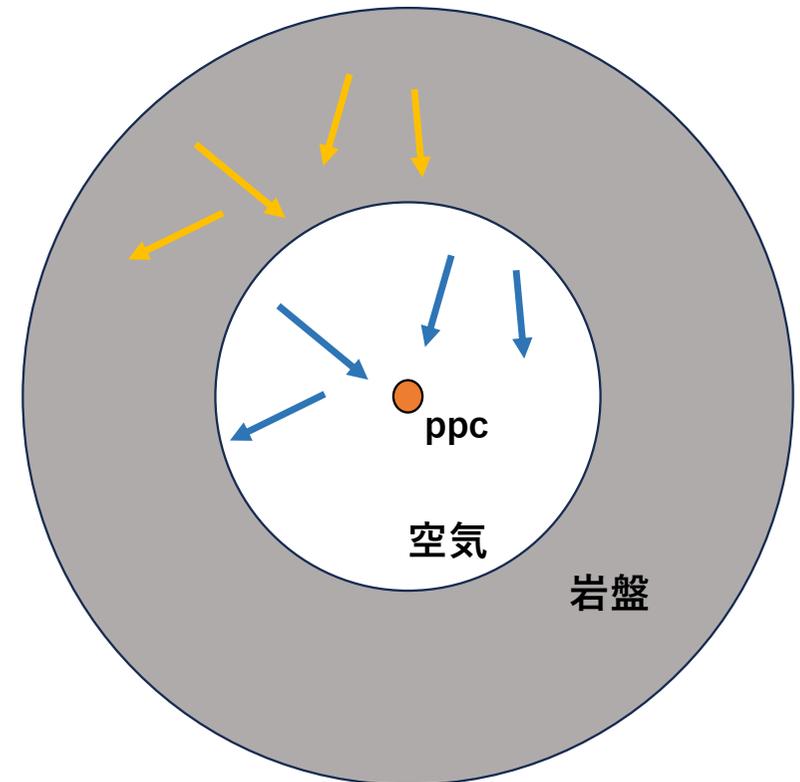
空気中のRnによる中性子生成量

空気とRn由来の α 線によって生成される中性子

岩盤とU系列由来の α 線によって生成される中性子

それぞれで生成される中性子の
カウントレートへの影響を見積もる必要がある

↓
今後行う



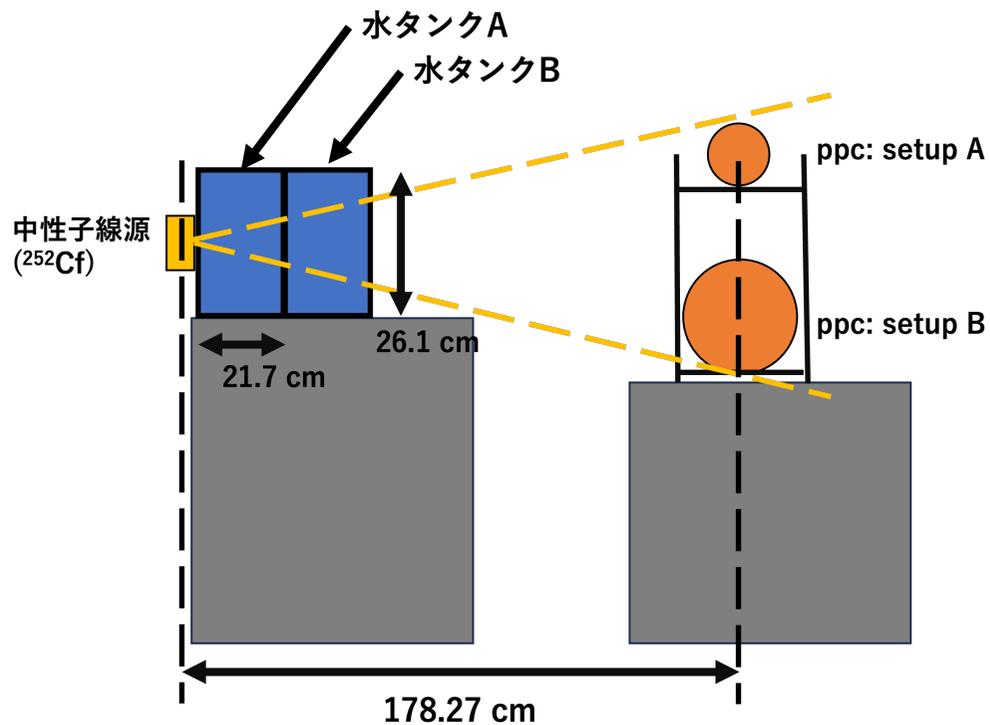
まとめ

- 環境中性子測定
 - 2021年7月から約2年6ヶ月測定を行った
 - 2023年4月からキャリブレーションを開始した
 - Rn濃度、湿度と環境中性子カウントレートに相関が見られた
 - 湿度による熱化はシミュレーションでは確認されなかった
 - Rnによる中性子カウントレートへの影響の検証を行う

シミュレーション 精度の確認

水タンク実験

モンテカルロ・シミュレーションでは中性子熱化再現が難しいことが知られている
 実験とシミュレーションの差異を知るために、水タンク(12L)を用いて熱化を誘起した

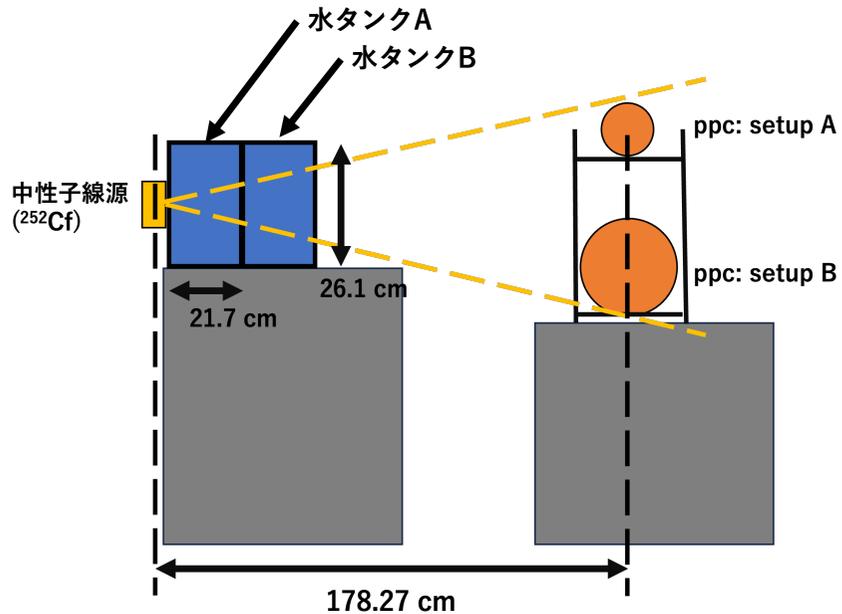


実験手順

- I. 水タンクA,Bどちらも置く
- II. 水タンクAのみ置く
- III. 水タンクを置かない



水タンク実験結果



Setup Bでは、水タンクを置くとカウントレートが下がっている
→熱化が起きていることを確認できた

Setup A (熱中性子)

| タンク | Count rate[/s] |
|---------|----------------|
| 水タンクA,B | 16.47 |
| 水タンクAのみ | 17.30 |
| 水タンクなし | 17.47 |

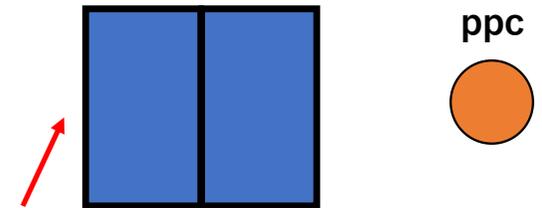
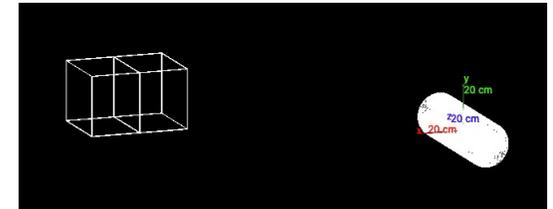
Setup B (高速中性子)

| タンク | Count rate[/s] |
|---------|----------------|
| 水タンクA,B | 5.21 |
| 水タンクAのみ | 5.71 |
| 水タンクなし | 22.37 |

水タンク実験の再現

① 周りに岩盤なし

- ^{252}Cf から生成される中性子のエネルギースペクトルはWatt spectrumで再現
- 6,000,000発の中性子を生成
 - ^{252}Cf 線源は一秒間で89886個の中性子を生成
 - 6,000,000発の中性子を生成することは**66.75秒**観測することと同じ



中性子をここで生成させる

実測値よりシミュレーションのカウントレートが低い
→ 周りに岩盤を置くことで反跳させる (次ページ)

Setup A

| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 1.33 ± 0.14 | 16.47 |
| 水タンクAのみ | 1.41 ± 0.15 | 17.30 |
| 水タンクなし | 0.03 ± 0.02 | 17.47 |

Setup B

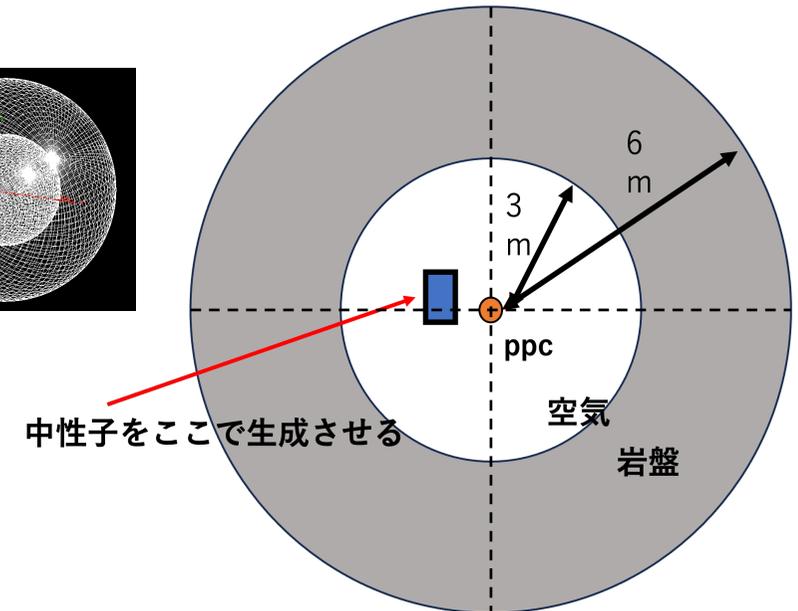
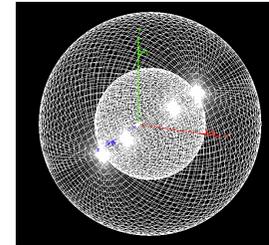
| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 1.14 ± 0.13 | 5.21 |
| 水タンクAのみ | 1.17 ± 0.13 | 5.71 |
| 水タンクなし | 17.86 ± 0.52 | 22.37 |

水タンク実験の再現

②球殻の岩盤を追加

- 100,000発の中性子を生成
 - ^{252}Cf 線源は一秒間で89886個の中性子を生成
 - 100,000発の中性子を生成することは**1.113秒**観測することと同じ

実測よりカウントレートが高くなり、中性子が反跳していることが確認された



Setup A

| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 27 ± 5.0 | 16.47 |
| 水タンクAのみ | 27 ± 5.0 | 17.30 |
| 水タンクなし | 25 ± 4.5 | 17.47 |

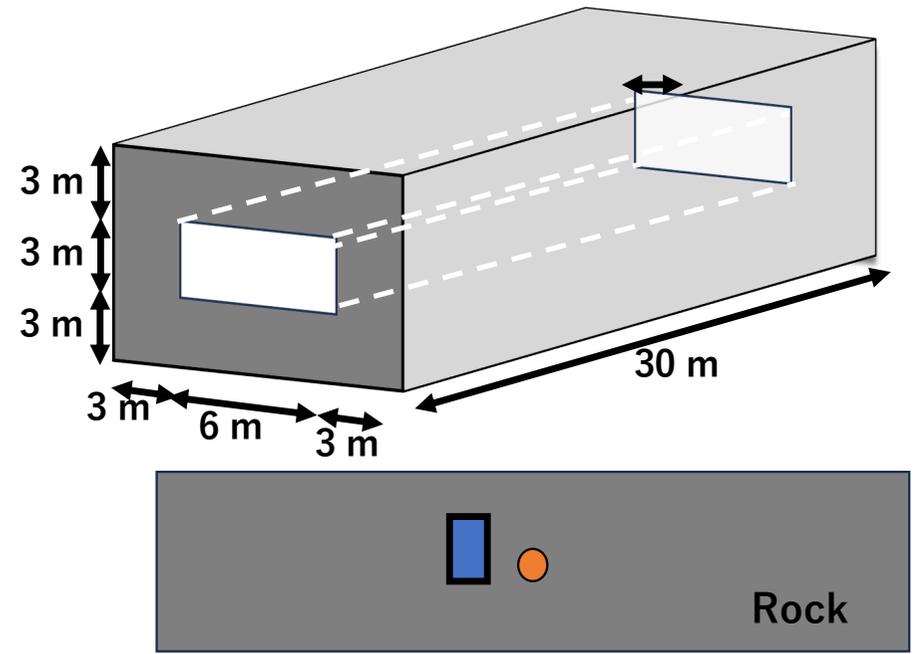
Setup B

| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 31 ± 5.2 | 5.21 |
| 水タンクAのみ | 44 ± 5.9 | 5.71 |
| 水タンクなし | 60 ± 6.9 | 22.37 |

水タンク実験の再現

③ 直方体をくり抜いた岩盤を追加

- 500,000発の中性子を生成
 - ²⁵²Cf線源は一秒間で89886個の中性子を生成
 - 500,000発の中性子を生成することは**5.565秒**観測することと同じ



Setup A

| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 10.1 ± 1.3 | 16.47 |
| 水タンクAのみ | 11.9 ± 1.5 | 17.30 |
| 水タンクなし | 10.3 ± 1.3 | 17.47 |

Setup B

| タンク | Count rate[/s] シミュレーション | Count rate[/s] 実測 |
|---------|----------------------------|----------------------|
| 水タンクA,B | 11.9 ± 1.5 | 5.21 |
| 水タンクAのみ | 15.3 ± 1.7 | 5.71 |
| 水タンクなし | 42.3 ± 2.8 | 22.37 |

水タンク実験のまとめ

| 水タンクA,B | 実験値 | 岩盤なし | 岩盤 (球殻) | 岩盤 (直方体) |
|---------|-------|------------------|--------------|--------------|
| Setup A | 17.47 | 0.03 ± 0.02 | 25 ± 4.5 | 10 ± 1.3 |
| Setup B | 22.37 | 17.86 ± 0.52 | 60 ± 6.9 | 31 ± 5.2 |

| 水タンクAのみ | 実験値 | 岩盤なし | 岩盤 (球殻) | 岩盤 (直方体) |
|---------|-------|-----------------|--------------|--------------|
| Setup A | 17.30 | 1.41 ± 0.15 | 27 ± 5.0 | 12 ± 1.5 |
| Setup B | 5.71 | 1.17 ± 0.13 | 44 ± 5.9 | 44 ± 1.7 |

| 水タンクなし | 実験値 | 岩盤なし | 岩盤 (球殻) | 岩盤 (直方体) |
|---------|-------|-----------------|--------------|--------------|
| Setup A | 16.47 | 1.33 ± 0.14 | 27 ± 5.0 | 10 ± 1.3 |
| Setup B | 5.21 | 1.14 ± 0.13 | 31 ± 5.2 | 60 ± 2.8 |

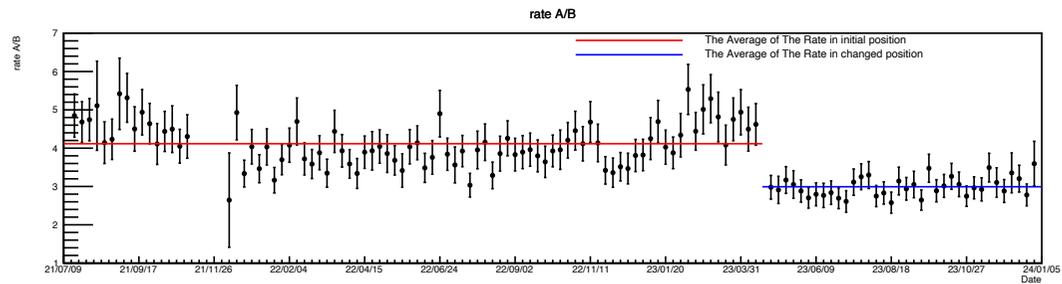
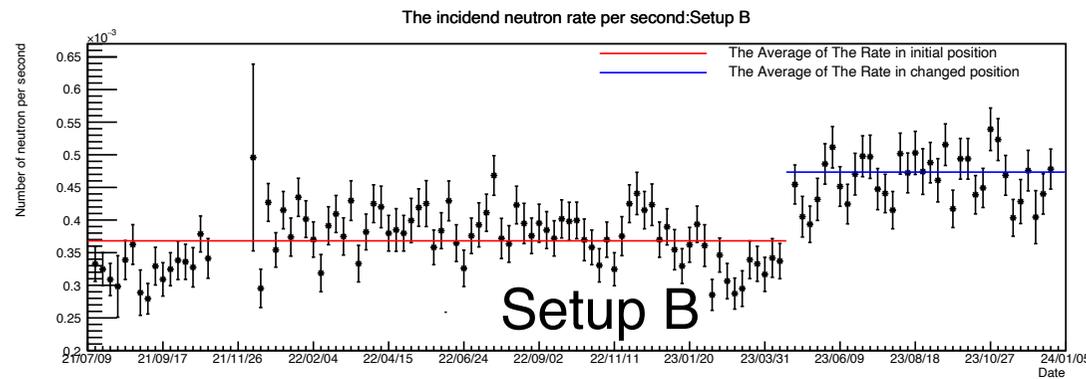
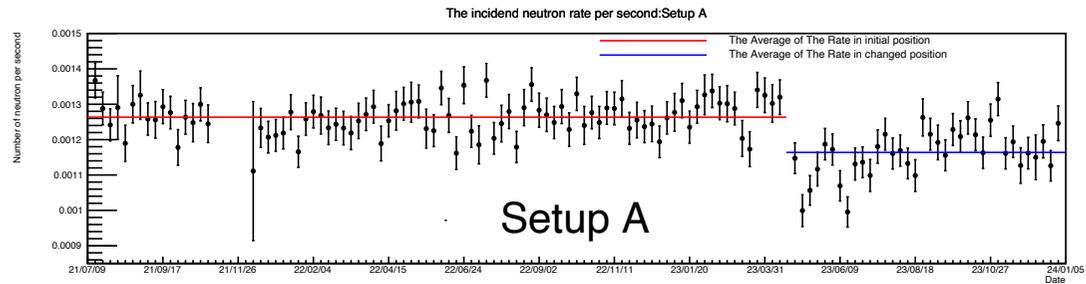
Count rate [/s]

岩盤の再現方法でカウントレートは大きく異なる
→より再現度を上げるには試行錯誤が必要

まとめ

- 熱化シミュレーション
 - 岩盤の再現方法に大きくカウントレートが依存することがわかった
 - 熱化の再現を評価するまでには至っていない

Backup up



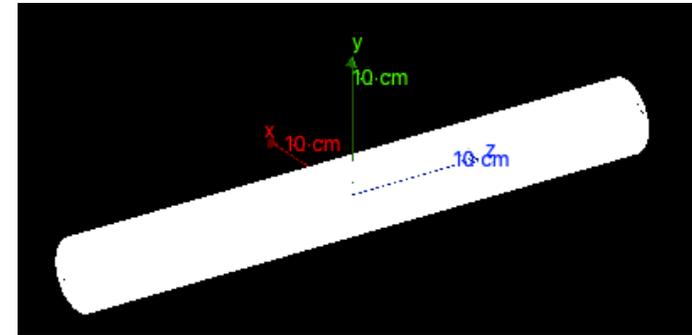
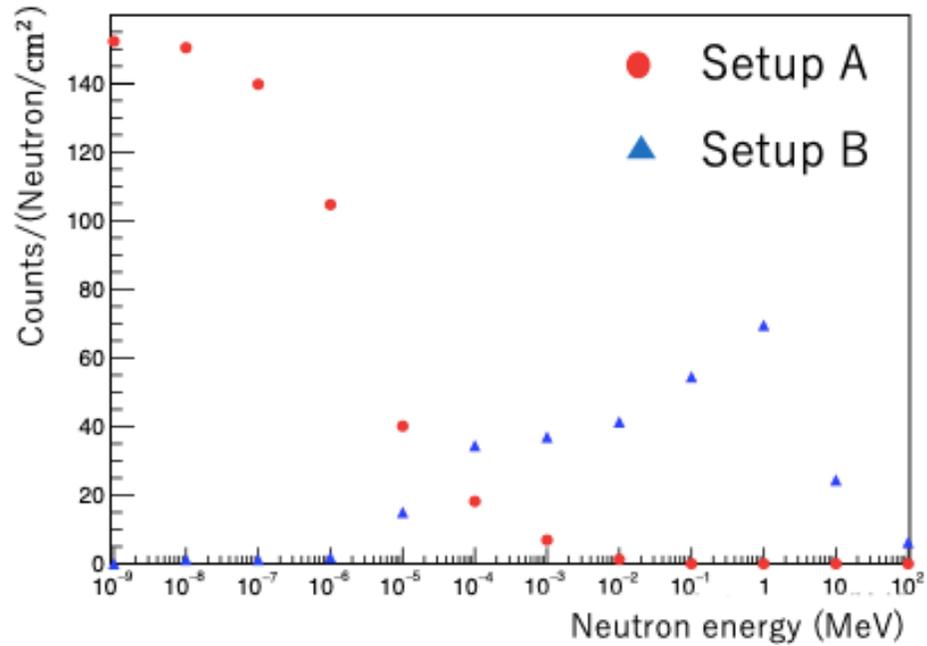
^{252}Cf

- 放射能

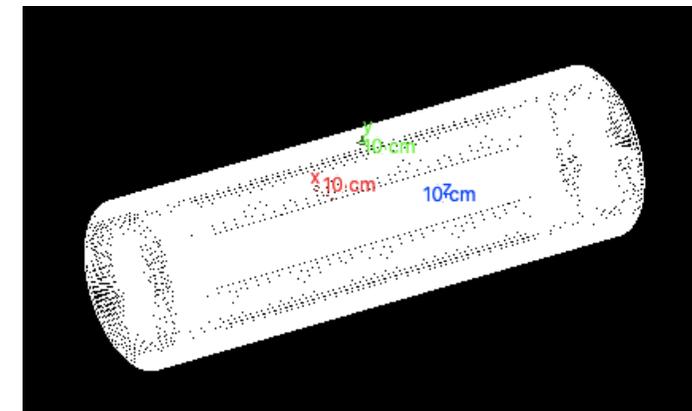
- 3.7 MBq (M decay/sec) @ 2017/3/14
- 2017/3/14 → 2023/2/9
- 2158 day = 5.912328767 year
- 半減期は2.62年
- 核分裂の分岐比 = 0.0309 (fission/decay)
- 一度の核分裂で生成される平均の中性子量 = 3.757 (neutron/fission)
- 89886 neutron/sec
- ex in simulation
- 100,000 (neutron)/ 89886(neutron/sec) = 1.112518173 sec

$$3.7 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{2} \frac{5.912328767}{2.62} \cdot 0.0309 \cdot 3.757 = 89886.1721$$

各セットアップの感度



Setup A



Setup B

成分

- 岩盤成分

| Sample | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | SO ₃ | ZnO | Others |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------|-------------------------------|-----------------|------|--------|
| Sample 1 | 35.60 | 11.30 | 10.90 | 1.08 | 0.99 | 39.20 | 0.02 | 0.35 | 0.10 | 0.03 | 0.43 |