

2025年度卒業研究発表

LHC-ALICE実験FoCal検出器の被ばく 量試験に向けた中性子線量評価

奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室

高畦凜 安場心花

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 解析方法
4. 解析結果
5. まとめ

研究背景

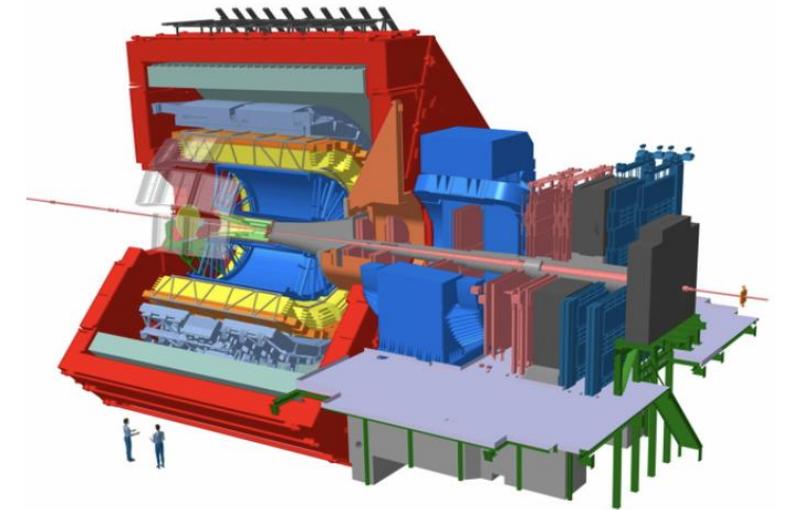
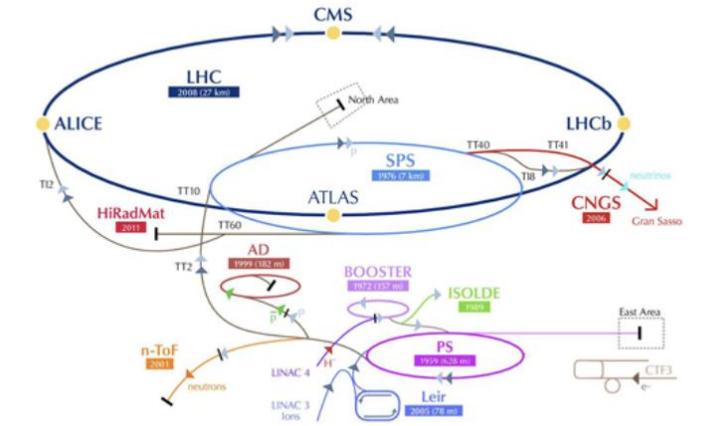
LHC-ALICE実験

- **Large Hadron Collider(LHC)**

CERN（ヨーロッパ共同原子核研究機構）にある世界最大のハドロン衝突型加速器

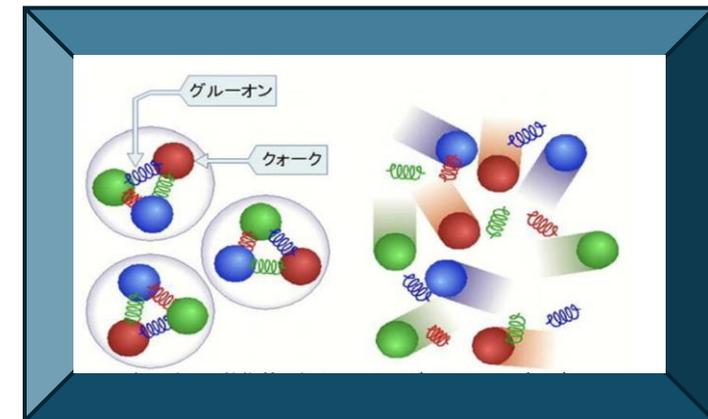
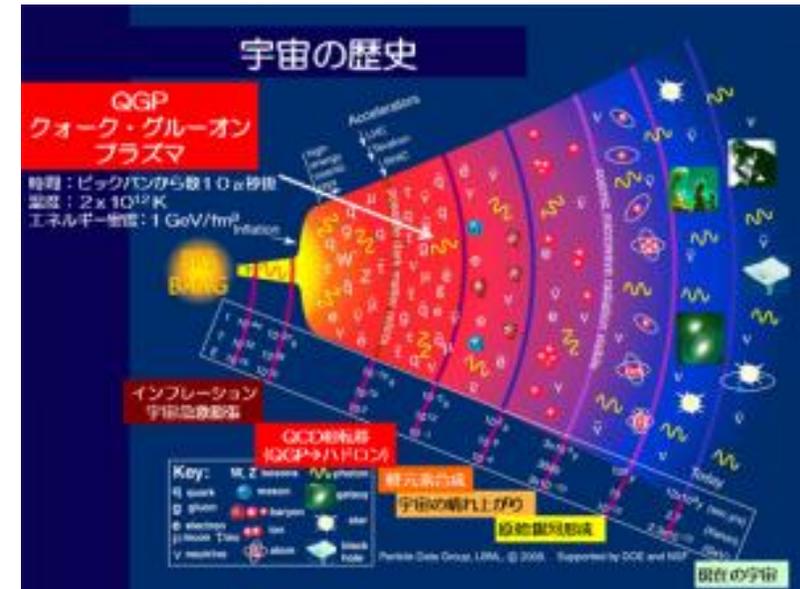
- **ALICE実験**

重イオンを加速衝突させQGPを生成し、その性質を解明することを目指した実験



Quark-Gluon Plasma(QGP)

- ビッグバンから数 μ ~数 10μ 秒の間に存在していたとされる
- 通常、強い相互作用により陽子・中性子の中に閉じ込められているクォークとグルーオンが、高温・高密度下で解放されている状態

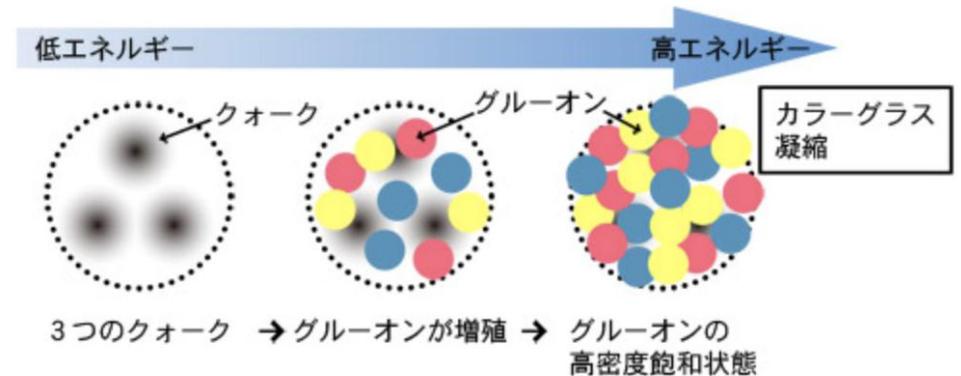


カラーガラス凝縮(CGC)

原子核同士が衝突してからQGPができるまでの時間が予想より短い

→ 衝突直前の原子核がCGC状態にあるため

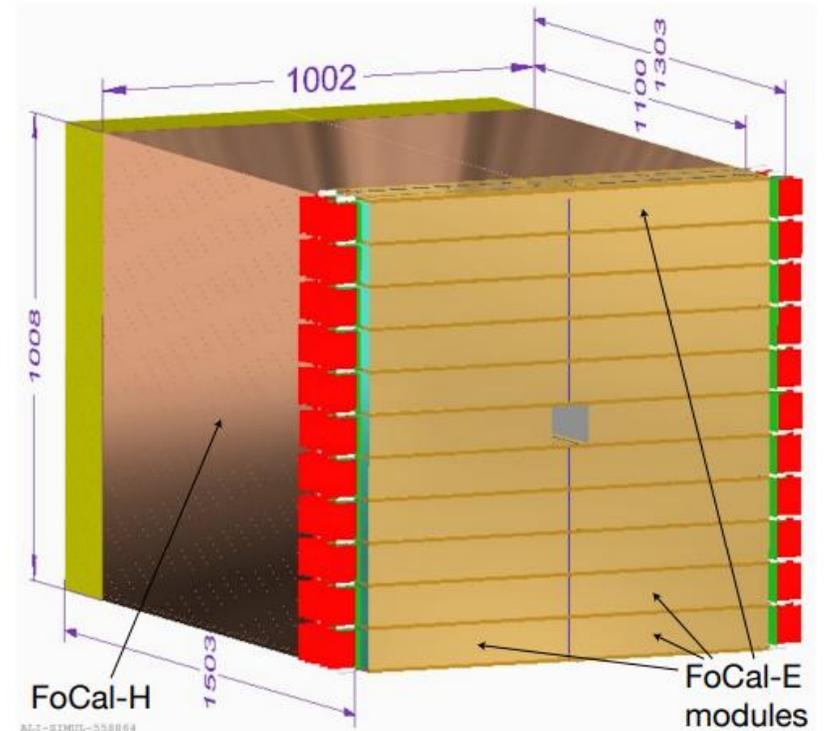
- CGCとは高エネルギー領域において、グルーオンの放出が活発になり、グルーオンの飽和状態になる現象
 - 前方領域で支配的となる
- QGPの性質解明のため観測を目指す



引用 : <https://www2.kek.jp/ja/news/highlights/2010/CGC.html>

Forward Calorimeter(FoCal)

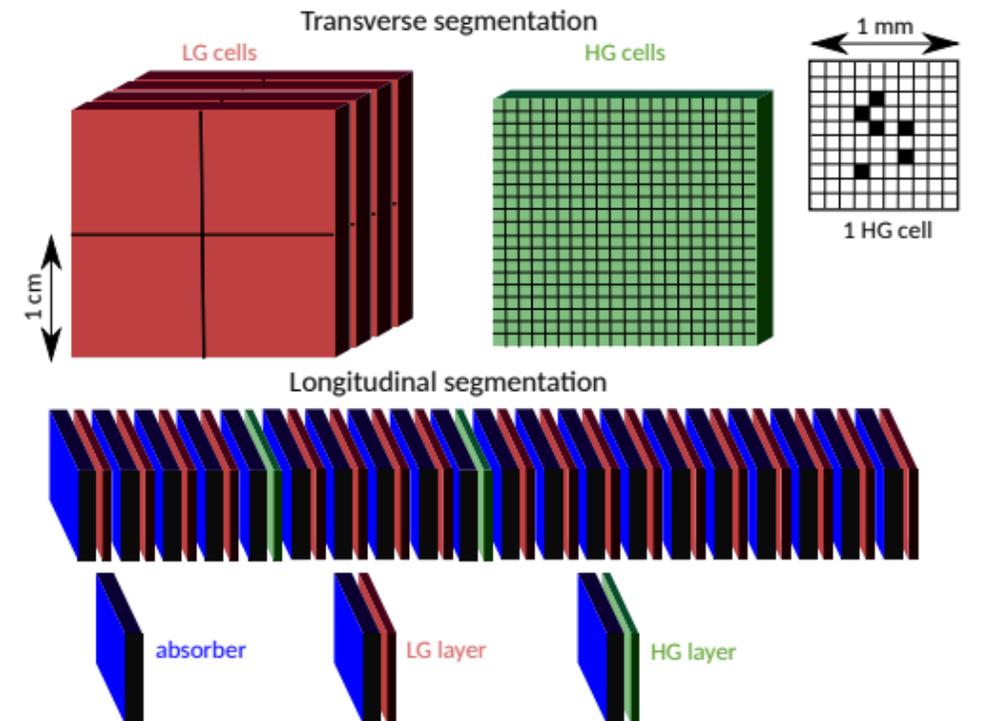
- CGCの観測を目的として、前方方向の直接光子を測定するための検出器
- LHC-ALICE実験に導入する計画が立てられている
- 光子を測定する電磁カロリメータのFoCal-Eとハドロンを測定するためのFoCal-Hで構成されている



引用：ALICE Collaboration
Technical Design Report of the ALICE Forward Calorimeter(FoCal)

FoCal-E

- Siセンサーの検出層とタングステン(W)の吸収層に分かれ、20層ずつ並んでいる
- 検出層は、高い位置分解能を持つHGL(high Granularity Layer)とエネルギー測定を行うLGL(Low Granularity Layer)の2種類が使用される
- LGLには 1cm^2 のp型Siセンサーが用いられる



引用：ALICE Collaboration
Technical Design Report of the ALICE Forward Calorimeter(FoCal)

研究目的

目的

FoCal-Eに用いられるp型Siセンサーは中性子に曝されすぎると特性が変化する



理研RANSを用いて中性子照射実験を行い、その後、性能評価を行う

**過去2回(2023年・2024年)の実験データの解析を行い、
分かったことをもとに2026年度中性子照射実験の計画を立てる**

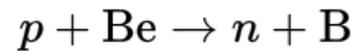
実験方法・解析手法

中性子照射実験

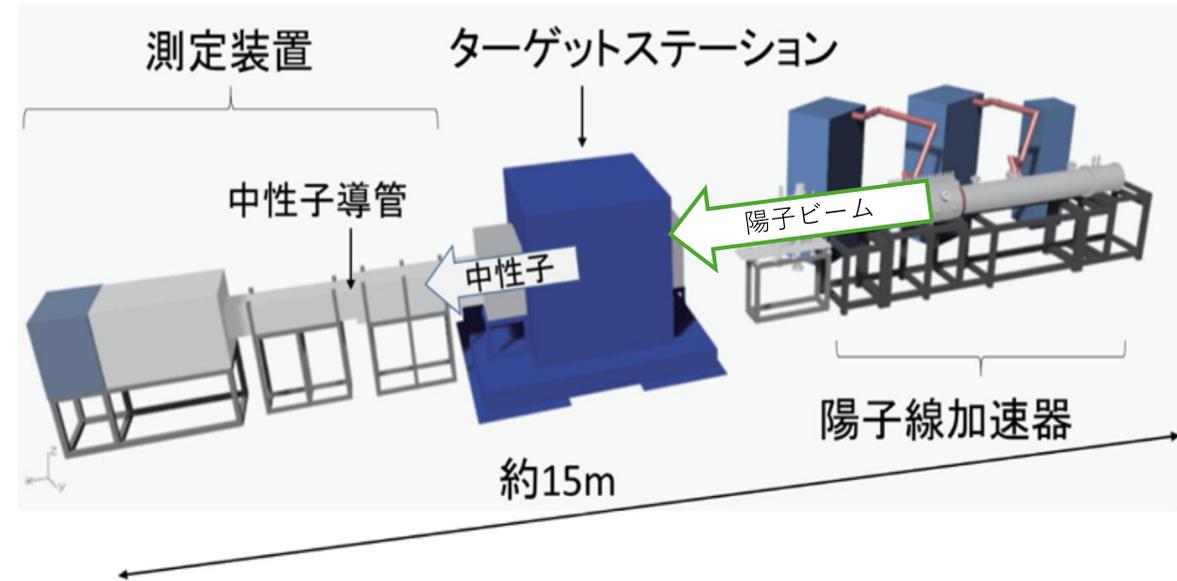
・ RANS（理化学研究所 小型中性子源）について

中性子発生仕組み

加速させた陽子をBeに衝突させ、



の反応により中性子を発生させ照射する



引用：
<https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p18020501/>

中性子照射実験

• 中性子照射実験(RANS実験)について

p型Siセンサーが浴びた中性子量はセンサーから直接測定することはできない(センサーに測定機能が付いていない)



基盤上のセンサーの位置に対応して置かれたインジウム箔が浴びた中性子量を測定することで、センサーが浴びた中性子量を見積もる

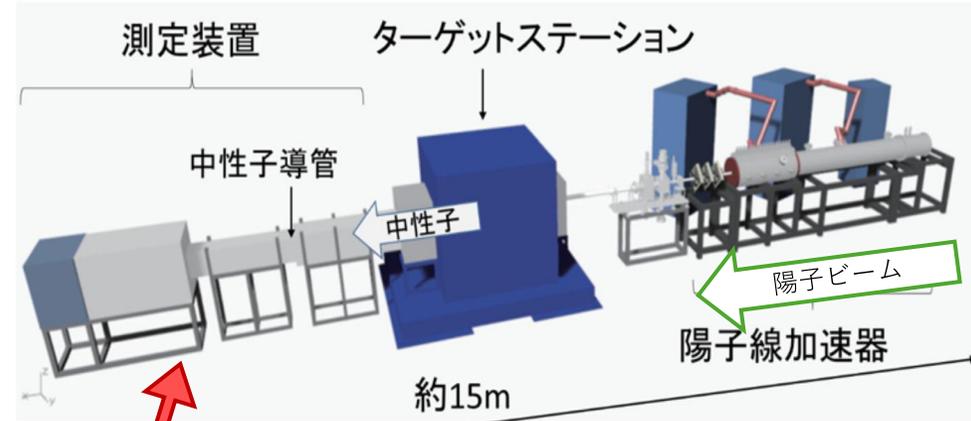
• 実験の流れ

センサーとインジウム箔を取り付けた基板のはいった暗箱をトンネル内に入れて中性子を照射する



インジウム箔を取り出してGe検出器に入れγ線量を測定

RANS模式図



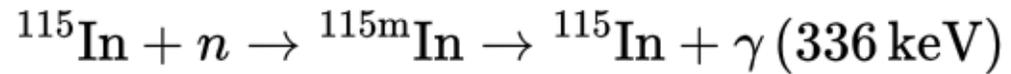
引用：
<https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p18020501/>

トンネル

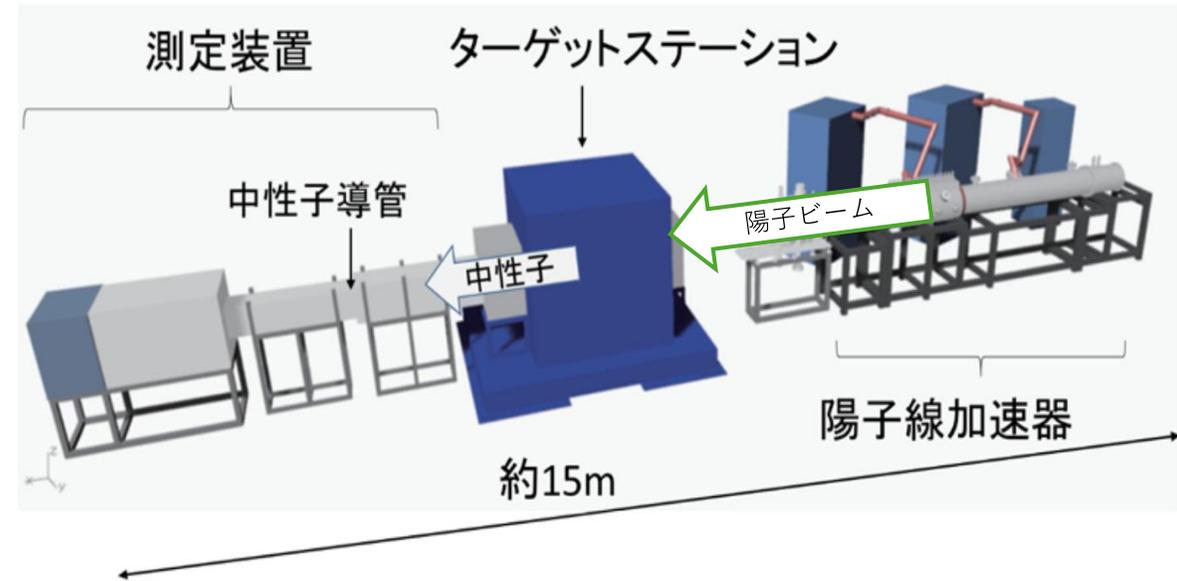


中性子照射実験

・インジウム箔の反応について



上記の反応のように、中性子を捕獲して核異性状態になったインジウムが、基底状態に戻る際に γ 線を放出する



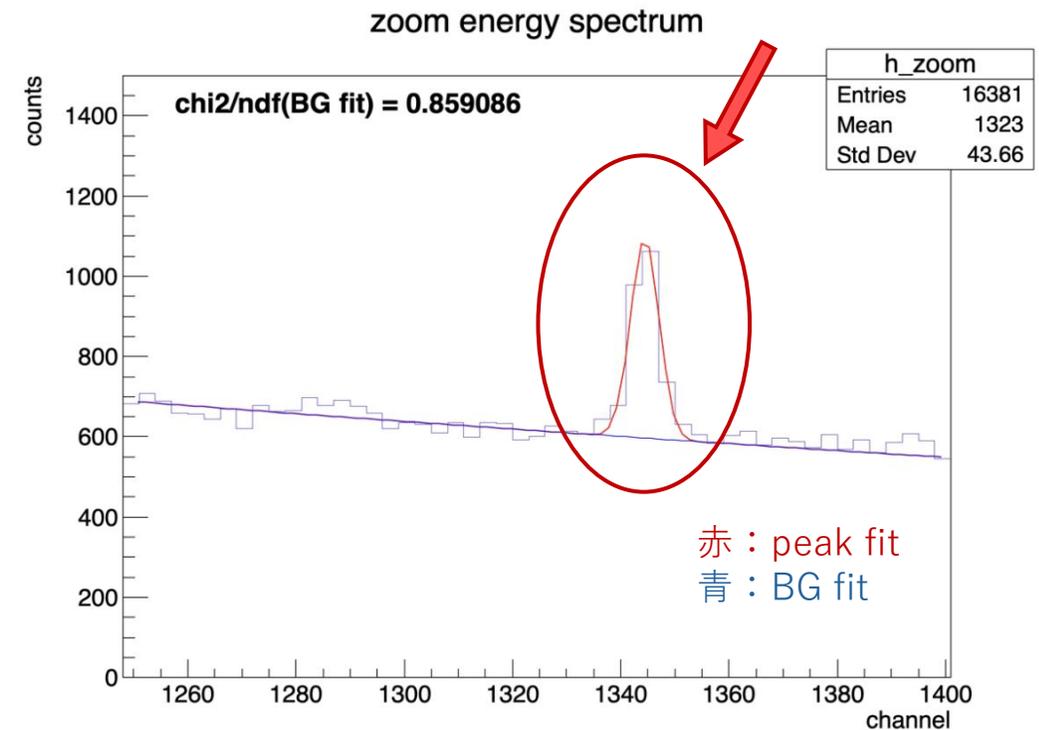
引用：
<https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p18020501/>

中性子照射量見積方法

γ 線量の測定方法

- Ge検出器で、インジウム箔が放出する γ 線量を測定する
- 測定結果として得られるエネルギースペクトルの1360ch付近の拡大図に対し
 - BG→指数関数 fit
 - peak→ガウス関数+指数関数 fitを行う
- Mean $\pm 3\sigma$ の範囲のヒストグラムの積分値から、BGの積分値を引くことでピーク部分の面積を算出。
 - ※ピーク部分の面積 = γ 線量

ピーク部分の面積
= γ 線量



図：エネルギースペクトルと γ 線fitの例
(1360ch付近の拡大図)

中性子照射量見積方法

中性子照射量見積もり 比例式

A : ピーク部分の積分値 (γ 線量)

N : 中性子照射量

$$N = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\lambda M t_i}{m R N_A B_\gamma \varepsilon_{\text{cap}} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m})} A$$

積分値を比例式の
右辺に代入すること
で中性子被曝量
を得る。

パラメーター

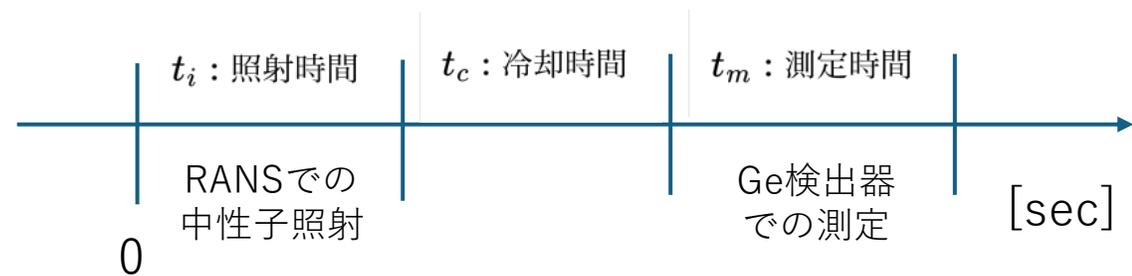
$$\sigma = 0.2 \text{ barn} \quad (\text{barn} = 10^{24} \text{ cm}^2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (t_{1/2} = 4.486 \text{ h})$$

B_γ : γ 線分岐比 ε_{cap} : 検出効率

N_A : アボガドロ定数 M : ^{115}In 原子量

R : 同位体存在比 m : 箔重量



図：実験の流れ

セットアップ

RANSビーム情報

- 各RANS実験において中性子をそれぞれ

2023年：9回

2024年：10回

照射した。

※本研究では、1回目の中性子照射における中性子被曝量を解析した。

1回目の照射についての中性子量の結果 + 右図のビーム情報を用いれば、2-9回目の照射での中性子照射量を見積もることができるが、本研究では用いない。

※ビーム強度

Beam

$$\text{Amount[C]} = \text{Current}[\mu\text{A}] \times \text{Time[s]}$$

表：2023年度ビーム情報

Run No.	1	2~9
time[sec]	3634	25676
current[μA]	5.132	32.883
amount[C]	0.0186	0.8437

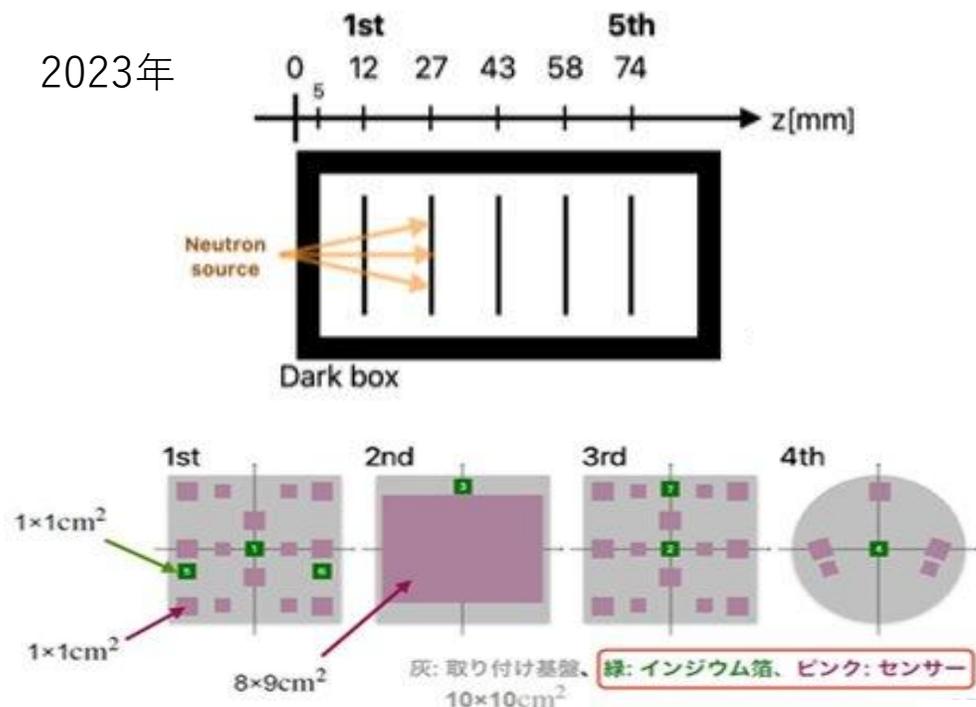
表：2024年度ビーム情報

Run No.	1	2~10
time[sec]	3600	25676
current[μA]	4.001	32.883
amount[C]	0.0144	0.8437

セットアップ

引用：2025/02/17 修士論文審査会 佐々木優花

2023年

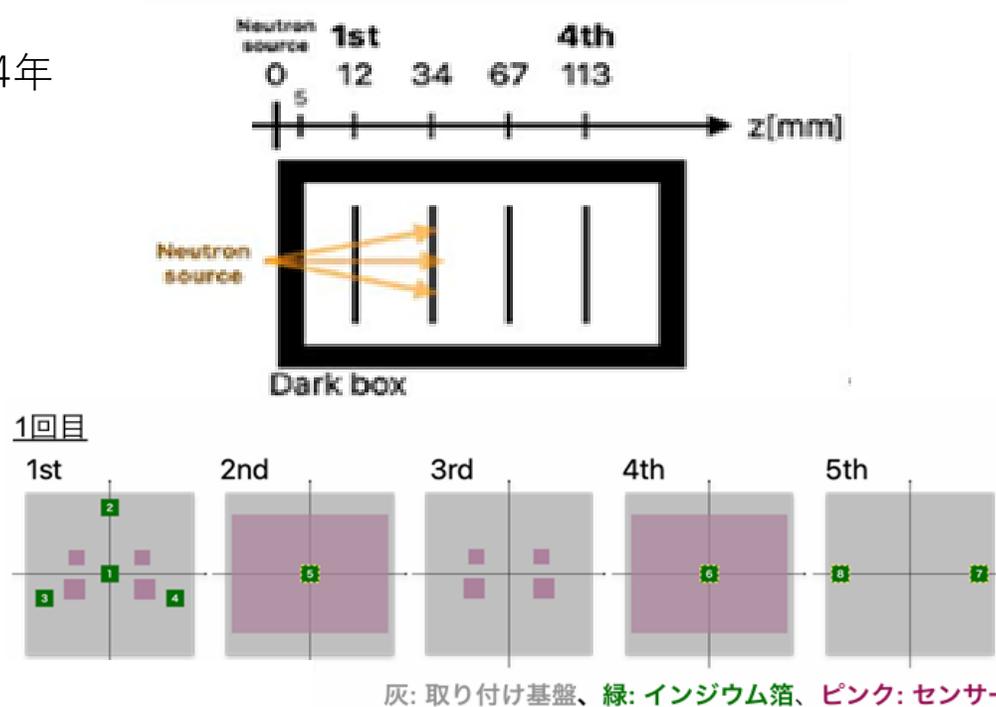


図：2023年基板の中性子照射口からの位置とインジウム箔の基板上的配置

- 暗箱内に4枚の基板
- 基板にセンサー、インジウム箔を右図のように設置し、照射
- 測定に用いたインジウム箔：7枚

2026/3/2

2024年



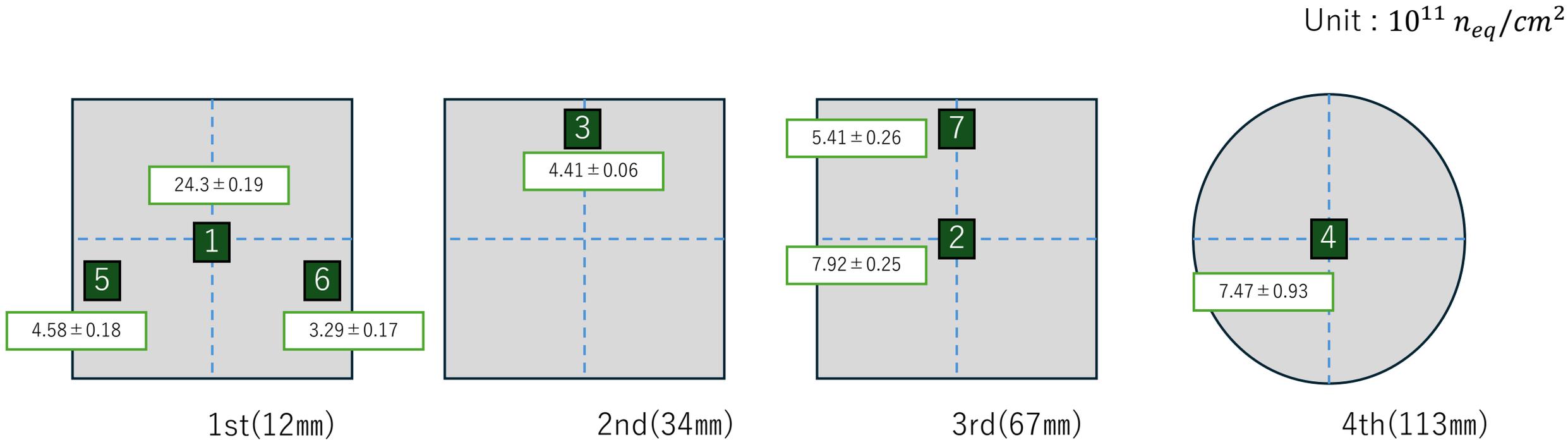
図：2024年基板の中性子照射口からの位置とインジウム箔の基板上的配置

- 暗箱内に5枚の基板
- 内4枚の基板にセンサー、インジウム箔を右図のように設置し、照射
- 測定に用いたインジウム箔：8枚

卒業論文発表

18

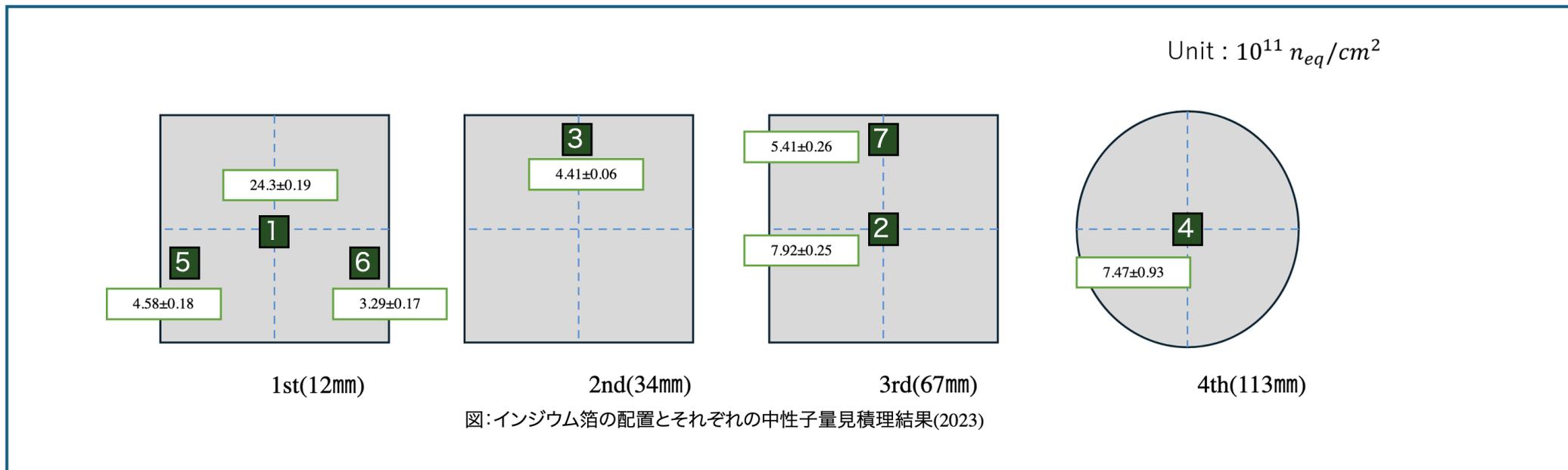
中性子量見積もり結果 (2023)



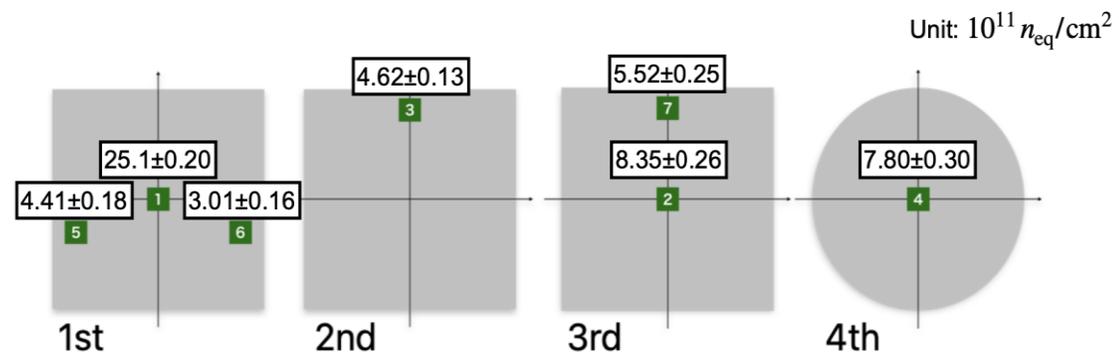
図：インジウム箔の配置とそれぞれの中性子量見積り結果(2023)

- 2023年のRANS実験の結果を、比例式を用いて計算

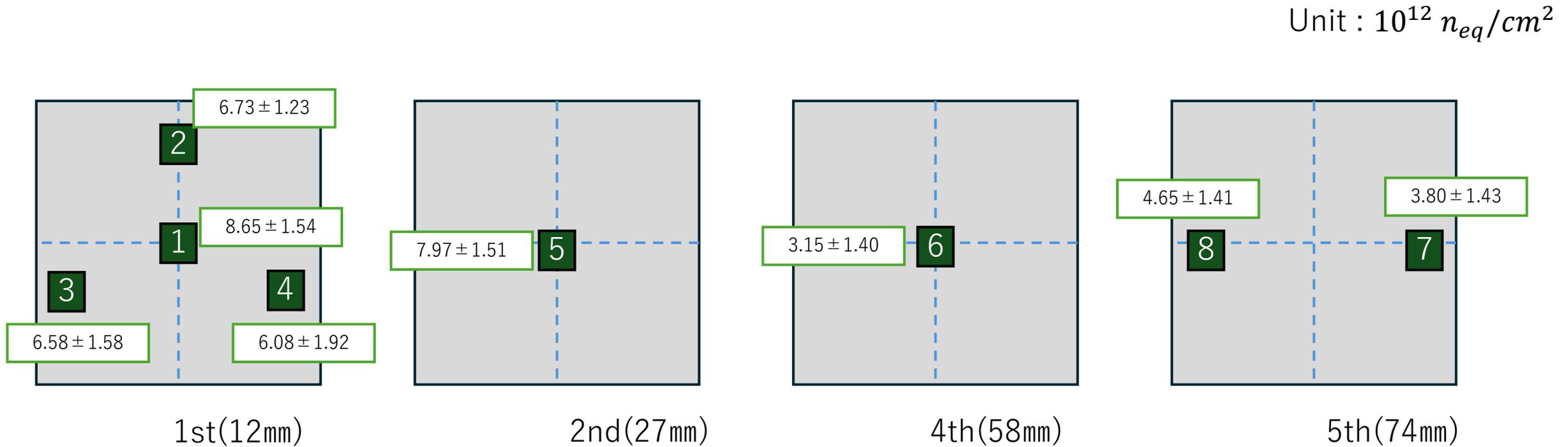
中性子量見積もり結果 (2023)



先行研究(右図 佐々木優花 2025) の結果と比べて
誤差の範囲内で整合的



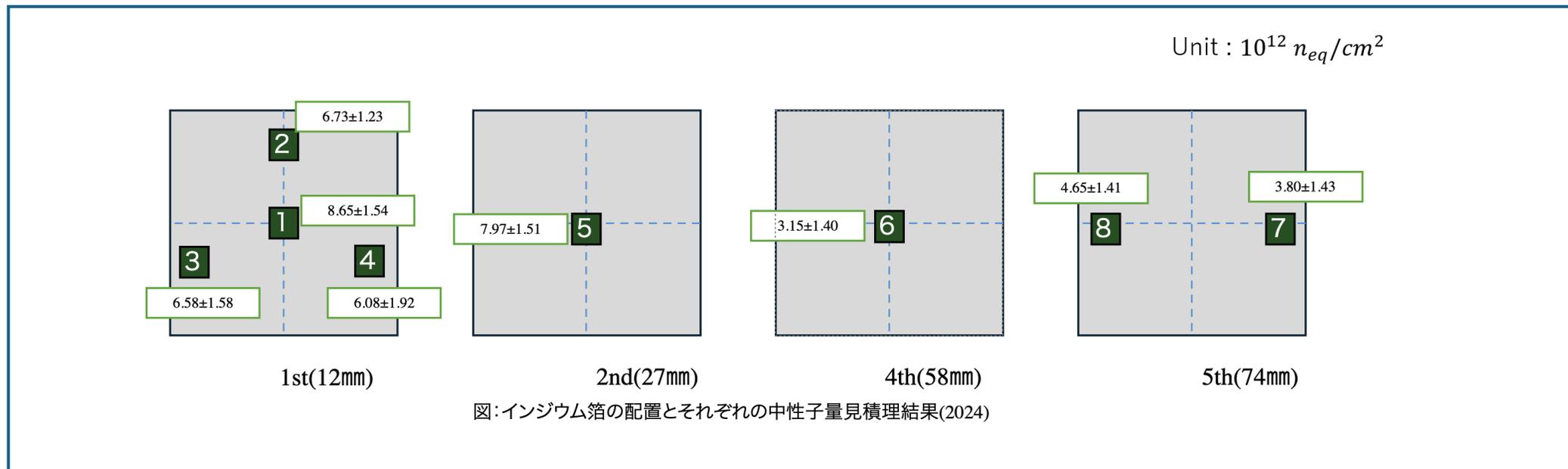
中性子量見積もり結果 (2024)



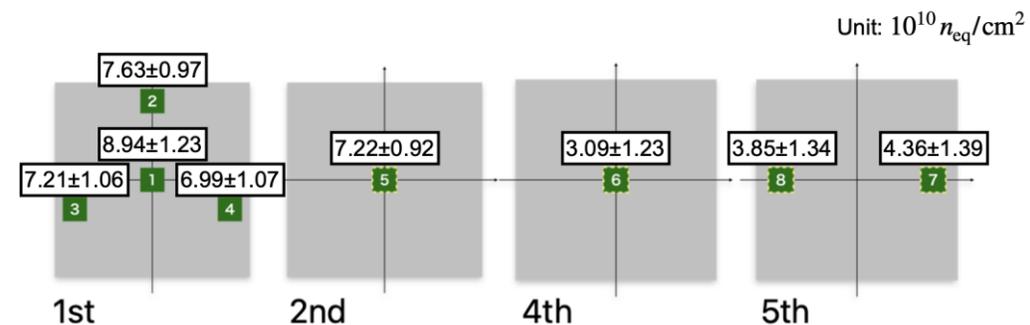
図：インジウム箔の配置とそれぞれの中性子量見積り結果(2024)

- 2024年のRANS実験の結果を、比例式を用いて計算

中性子量見積もり結果 (2024)



先行研究 (右図 佐々木優花 2025) の結果と比べて
誤差の範囲内で整合的

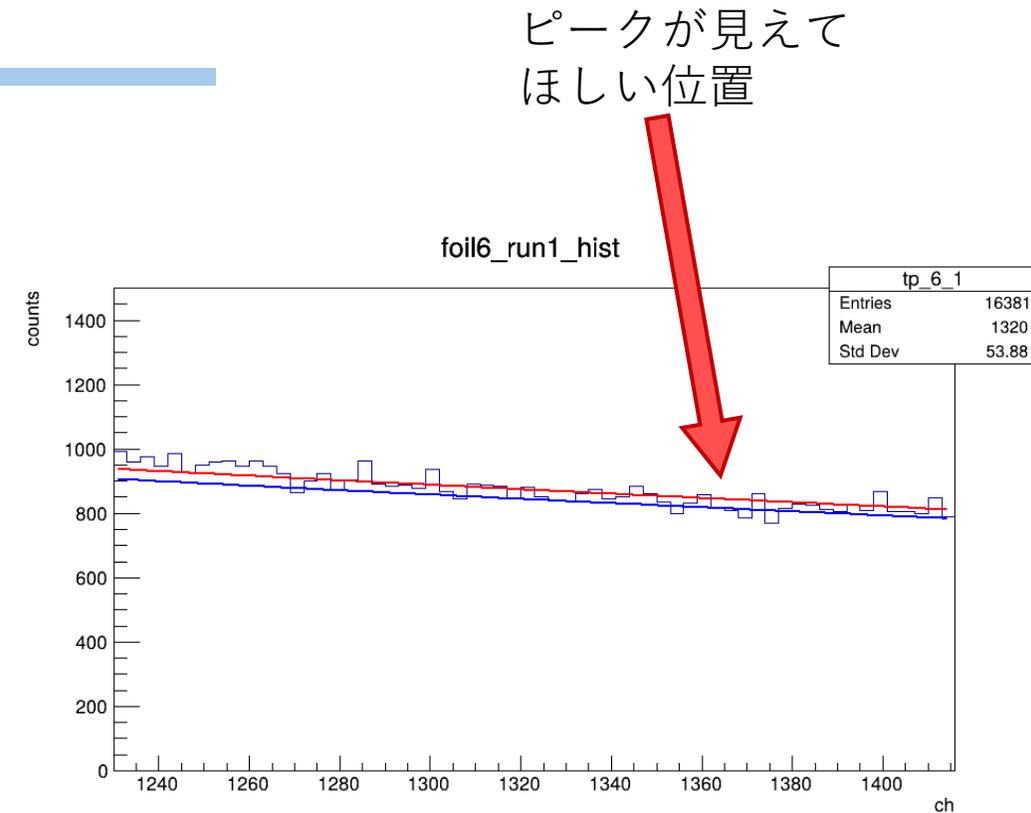


見積結果からの考察

- ・ 2024年の中性子照射量は2023年に比べて約1/20倍であり、インジウム箔によっては γ 線ピークが小さくフィットがかけられないものがあった

例：右図、 γ 線ピークが見られず、fitが予想通り行われていないとき

- ・ 実験の手順によっては精度が悪くなる懸念がある



図：2024年次 インジウム箔No.6 Ge検出器run 1 の γ 線fit

➡ 2026年の実験の計画を練る必要がある

見積結果からの考察

また、見積結果から以下のことがわかっている

- 1) 中性子源からの**基板距離**によって中性子照射量が変化する
- 2) 中性子照射終了からGe検出器での測定開始までの時間(**冷却時間** t_c)で γ 線量が減少する

これらを踏まえ、計画を立てるために冷却時間と γ 線ピークの検出精度の関係について調べた。

精度の計算方法

- 検出結果を測定時間と基板距離で規格化を行う

$$A_0 = A \cdot \left(\frac{t_{m0}}{t_m}\right) \cdot 2^{\frac{d}{r_0}}$$

r_0 : 50[mm]

t_m0 : 300[s]

t_m : Geでの測定時間(300sに統一)

d : 基板距離

$$\left(\frac{t_{m0}}{t_m}\right)$$

:Ge検出器でインジウム箔を測定する時間を300秒に規格化

$$2^{\frac{d}{r_0}}$$

: 中性子源から各インジウム箔までの距離を 0 mmとして規格化

年度	foil no	run no	基板距離 d	t_m	
2024	1	1	12	1.2	917
	1	2	12	1.2	914
	2	1	12	4.657252	910
	2	2	12	4.657252	908
	3	1	12	4.294182	604
	3	2	12	4.294182	603
	4	1	12	4.294182	301
	4	2	12	4.294182	301
	4	3	12	4.294182	301
	5	1	27	2.7	300
	5	2	27	2.7	300
	5	3	27	2.7	300
	6	1	58	5.8	924
	6	2	58	5.8	920
	6	3	58	5.8	300
	6	4	58	5.8	300
	7	1	74	8.411896	913
	7	2	74	8.411896	910
	8	1	74	8.411896	938
	8	2	74	8.411896	931
	8	3	74	8.411896	300
	8	4	74	8.411896	300

年度	foil no	run no	基板距離 d	t_m	
2023	1	1	12	1.2	308
	1	2	12	1.2	308
	1	3	12	1.2	307
	1	4	12	1.2	307
	1	5	12	1.2	306
	2	1	67	6.7	343
	2	2	67	6.7	340
	2	3	67	6.7	337
	3	1	34	5.640035	334
	3	2	34	5.640035	332
	3	3	34	5.640035	329
	3	4	34	5.640035	327
	3	5	34	5.640035	325
	4	1	113	11.3	390
	4	2	113	11.3	382
	4	3	113	11.3	375
	5	1	12	4.294182	318
	5	2	12	4.294182	317
	5	3	12	4.294182	316
	5	4	12	4.294182	315
	5	5	12	4.294182	314
	6	1	12	4.294182	311
	6	2	12	4.294182	311
	6	3	12	4.294182	310
	6	4	12	4.294182	309
	6	5	12	4.294182	309
	7	1	67	8.070936	369
	7	2	67	8.070936	363
	7	3	67	8.070936	358

距離の補正について

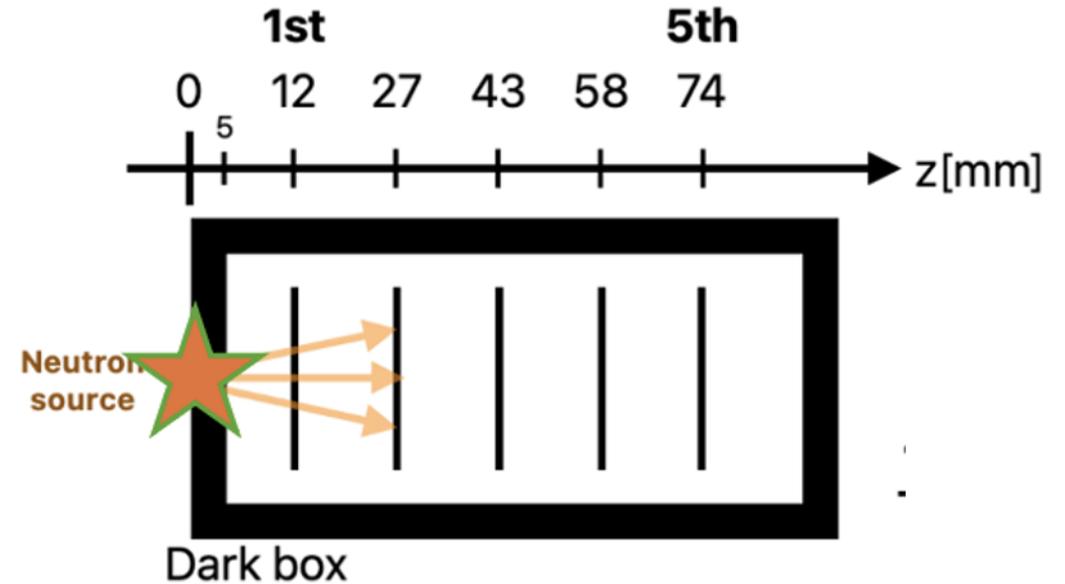
- 距離が50mm離れるごとにcountが1/2



$$2^{\frac{d}{r_0}} \quad r_0 : 50[\text{mm}]$$

をかけることで規格化

- d : 右図の星の位置(中性子照射位置)と
各インジウム箔が貼られている位置との距離



精度の計算方法

- 検出結果を測定時間と基板距離で規格化を行う

$$A_0 = A \cdot \left(\frac{t_{m0}}{t_m}\right) \cdot 2^{\frac{d}{r_0}}$$

r_0 : 50[mm]

t_m0 : 300[s]

t_m : Geでの測定時間(300sに統一)

d : 基板距離

- 導入予定の基板位置について精度を確認するため、以下の式を用いて予想値を導く

$$A_{r_e} = A_0 * \frac{1}{2^{\frac{r_e}{r_0}}}$$

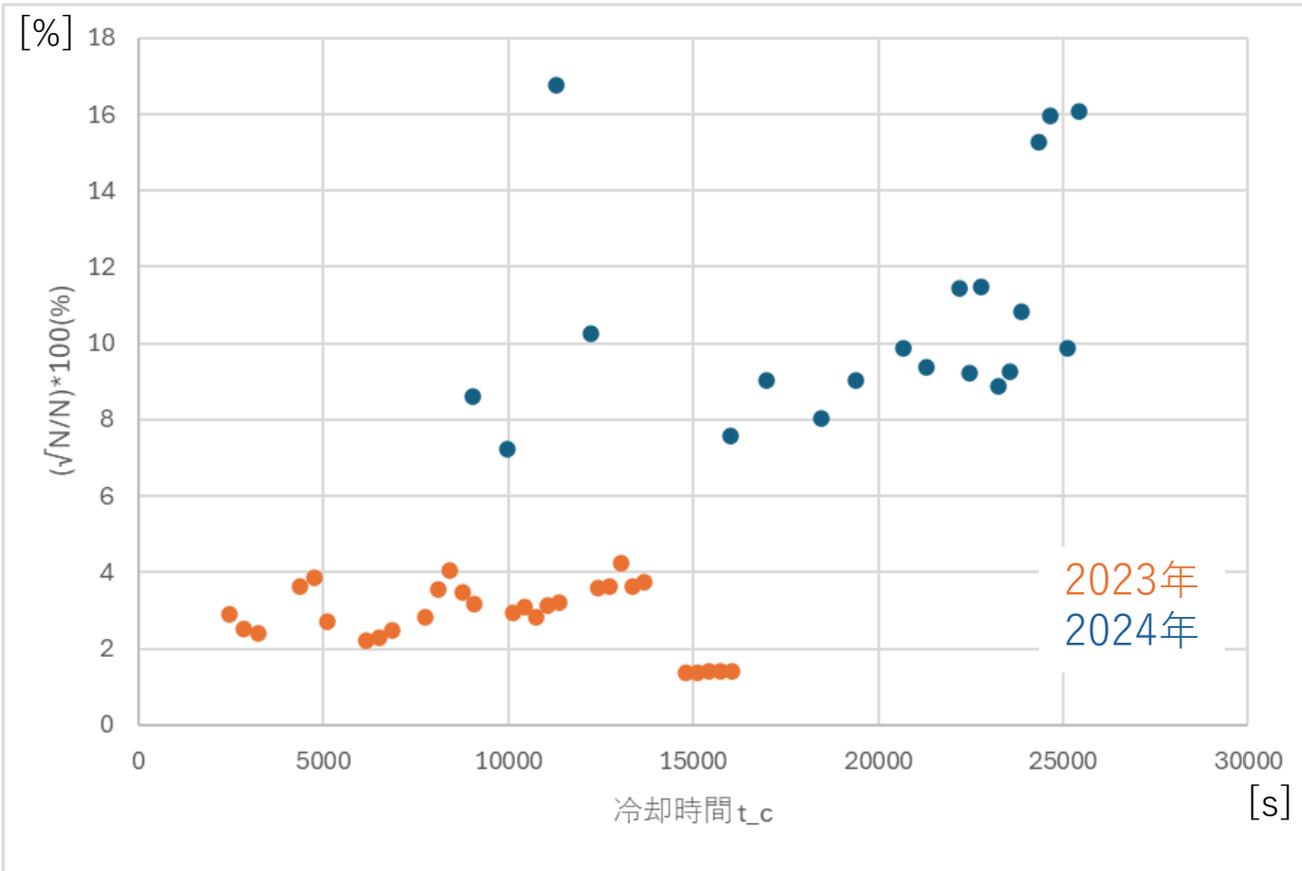
r_e : 基板導入予定位置

- 検出精度は下記の式で導く

$$s = \frac{\sqrt{A_{r_e}}}{A_{r_e}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

解析結果

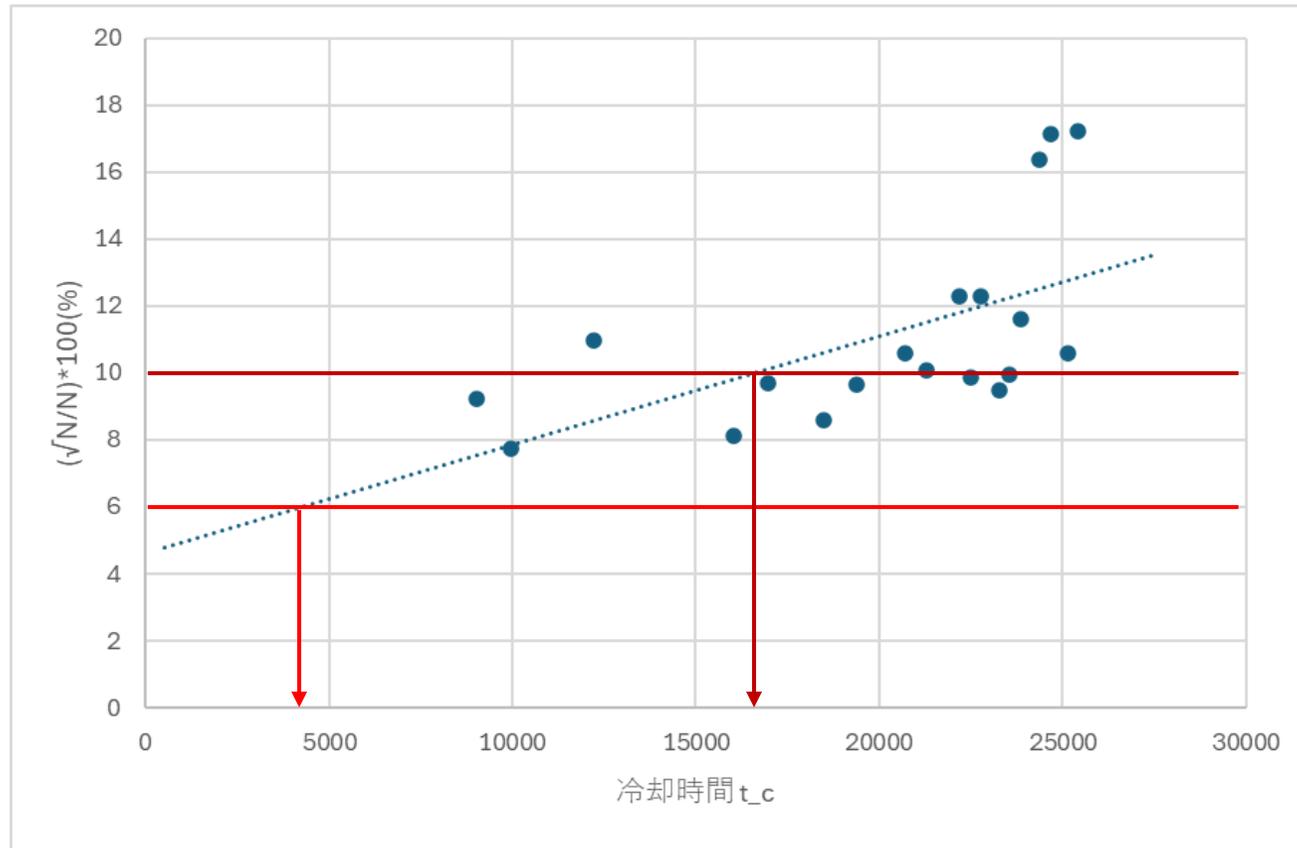
冷却時間と検出精度の関係



- 左図：各インジウム箔のGe検出器での各ランについて、「冷却時間」と「基板距離と測定時間の規格化を行った後の精度」との関係
- 2023年の実験での精度の最大値：
4.02%
- 2024年の実験は全体として精度が悪くなっている

図：基板距離と測定時間について規格化したときの冷却時間と検出精度の関係

冷却時間と検出精度の関係



図：基板距離10mmについて規格化したときの冷却時間と検出精度の関係

- 左図：前ページの2024年(青色)のデータを用いて、10mmの位置での冷却時間と検出精度

$$A_{r_e} = A_0 * \frac{1}{2^{\frac{r_e}{r_0}}} \text{ に、 } r_e=10 \text{ を代入}$$

- これらの値を直線でfitし、精度が10%、6%に収まる時間を確認した



導入予定のすべての距離について同様の作業を行い、時間制限を確認した

時間制限について

右表：2023年、2024年のデータを用いて10%、6%の検出精度基準で各基板距離についての冷却時間(t_c)の時間制限を表している

- 基板距離が遠いほど早く測定を行う必要がある
- 赤色の部分は冷却時間 $t_c=0$ でも希望の精度に満たない部分

→精度の悪い2024年の結果に注目して、ビームが弱い場合の時間制限を求める

表：各基板距離に対する、10%,6%の時間制限

基板距離(mm)	2023 10%(s)	2023 6%(s)	2024 10%(s)	2024 6%(s)
10	41918.48	22979.61	14432.80	963.70
20	38747.78	21077.19	12177.83	-389.28
30	35789.42	19302.17	10073.88	-1651.65
40	33029.16	17646.02	8110.82	-2829.49
50	30453.76	16100.78	6279.22	-3928.45
60	28050.82	14659.01	4570.28	-4953.81
90	21765.12	10887.59	99.96	-7636.00
120	16659.54	7824.25	-3531.06	-9814.61
180	9144.11	3314.99	-8875.95	-13021.55
360	-1243.76	-2917.73	-16263.67	-17454.18

時間制限について

- 2024年次の実験について、ビーム強度を増やした場合を考える

※ビーム強度Amount[C]=Current[μ A]×Time[s]
において、中性子照射時間を2倍にした

- ビーム強度をあげれば10%,6%に到達することができる
- ただし、すでに十分に精度がある場合、無駄に被曝することは好ましくない

表：ビーム時間を増やした時の10%,6%の時間制限

基板距離(mm)	2024 10%(s)	2024 6%(s)
10	28380.50	9332.32
20	25191.50	7418.92
30	22216.06	5633.66
40	19439.88	3967.95
50	16849.60	2413.78
60	14432.80	963.70
90	8110.82	-2829.49
120	2975.78	-5910.51
180	-4583.03	-10445.80
360	-15030.85	-16714.49

→検出精度を考慮して実験を行うための段取りを考えた

2026年度 RANS実験に向けて

実験の概要

基板の配置

- ・ 中性子照射の分布を知るために100倍の中性子量の差を作りたい
- ・ 中性子源から、 10mm,20mm,30mm,40mm,50mm,
60mm,90mm,120mm,180mm,360mm
の位置に基板を置いて測定する
- ・ 各基板の中央にインジウム箔を張る

→350mmの差を作ることで $2^{\frac{350}{50}}$ 倍を作ることができる

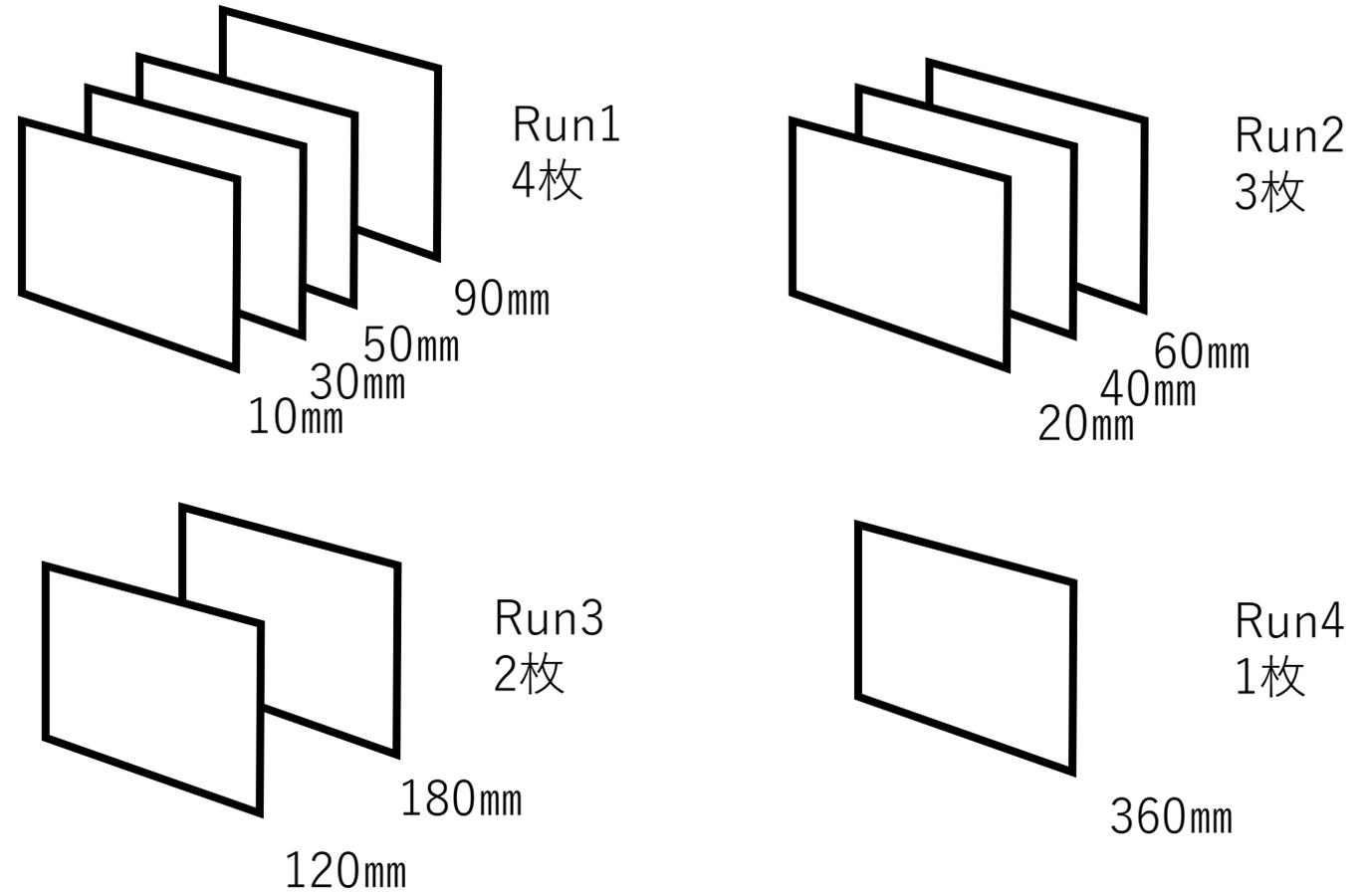
2026年度 RANS実験に向けて

実験の概要

基板の配置

・冷却時間の時間制限を考慮して、基板距離によって中性子照射のrunを分ける

・右図のように配置することにより、希望の精度を満たしつつ実験を行うことができる考えた



図：各runの基板配置

2026年度 RANS実験に向けて

- 6%、10%の精度基準に達する各runの希望ビーム強度
- 2024年度の精度が悪かった時と比較し、時間制限が再現可能な範囲になる条件を確認した

表：run1の精度10.6%での時間制限(時間)

Run1
4枚
ビーム強度
2024年の2倍

基板距離(mm)	2024 10%(h)	2024 6%(h)
10	7.88	2.59
30	6.17	1.56
50	4.68	0.67
60	4.01	0.27
90	2.25	-0.79

表：run2の精度10.6%での時間制限(時間)

Run2
3枚
ビーム強度
2024年の2倍

基板距離(mm)	2024 10%(h)	2024 6%(h)
20	7.00	2.06
40	5.40	1.10
60	4.01	0.27

表：run3の精度10.6%での時間制限(時間)

Run3
2枚
ビーム強度
2024年の2倍

基板距離(mm)	2024 10%(h)	2024 6%(h)
120	0.83	-1.64
180	-1.27	-2.90

表：run4の精度10.6%での時間制限(時間)

Run4
1枚
ビーム強度
2024年の2倍

基板距離(mm)	2024 10%(s)	2024 6%(s)
360	-4.18	-4.64

2026年度 RANS実験に向けて

暗箱の作成

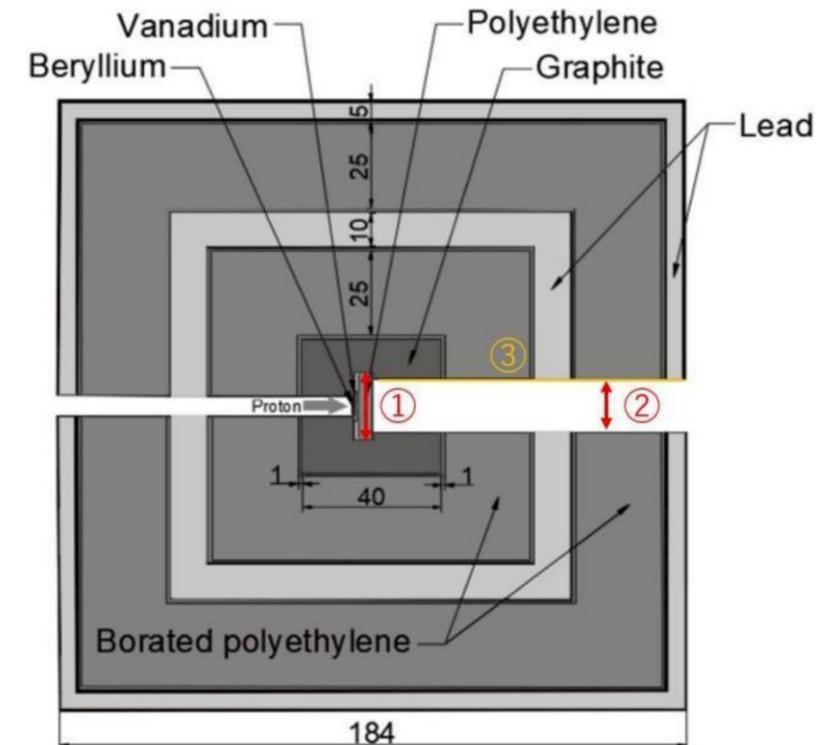
2024年次に使用した既存の暗箱はトンネル内部と比べて小さすぎるために、出し入れによる左右位置の固定が難しい

→以下の条件を基に左右固定の機構を提案

満たしたい条件

- トンネルの入り口 (16 cm × 16 cm) に対し、横方向を1mmの精度で入れる
- 中で基板を固定
- 基板の入れ替えをスムーズに行える機構が必要

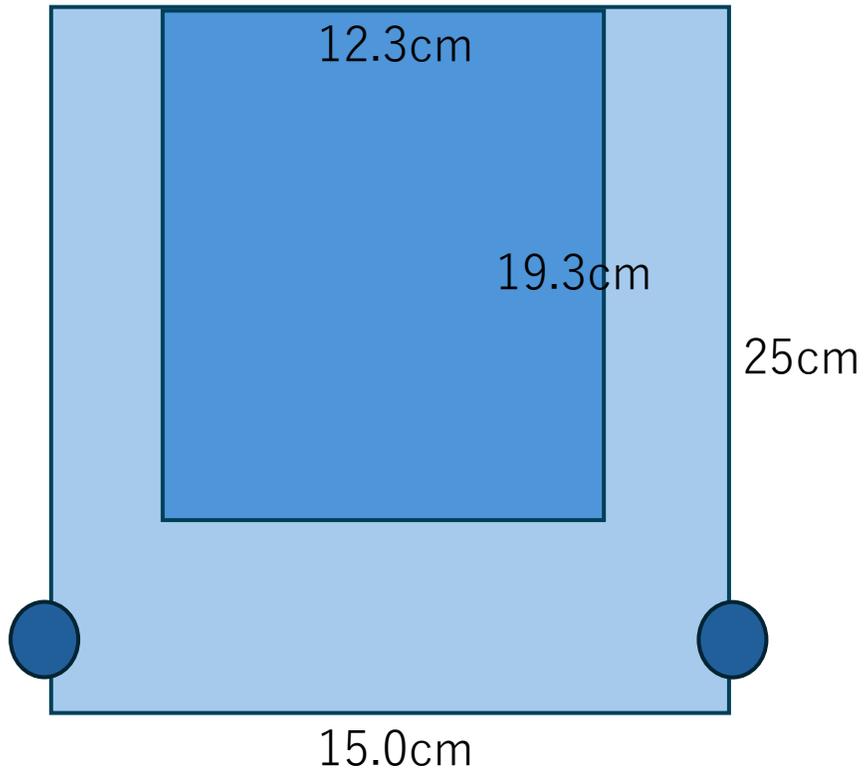
RANSトンネル内部の構造



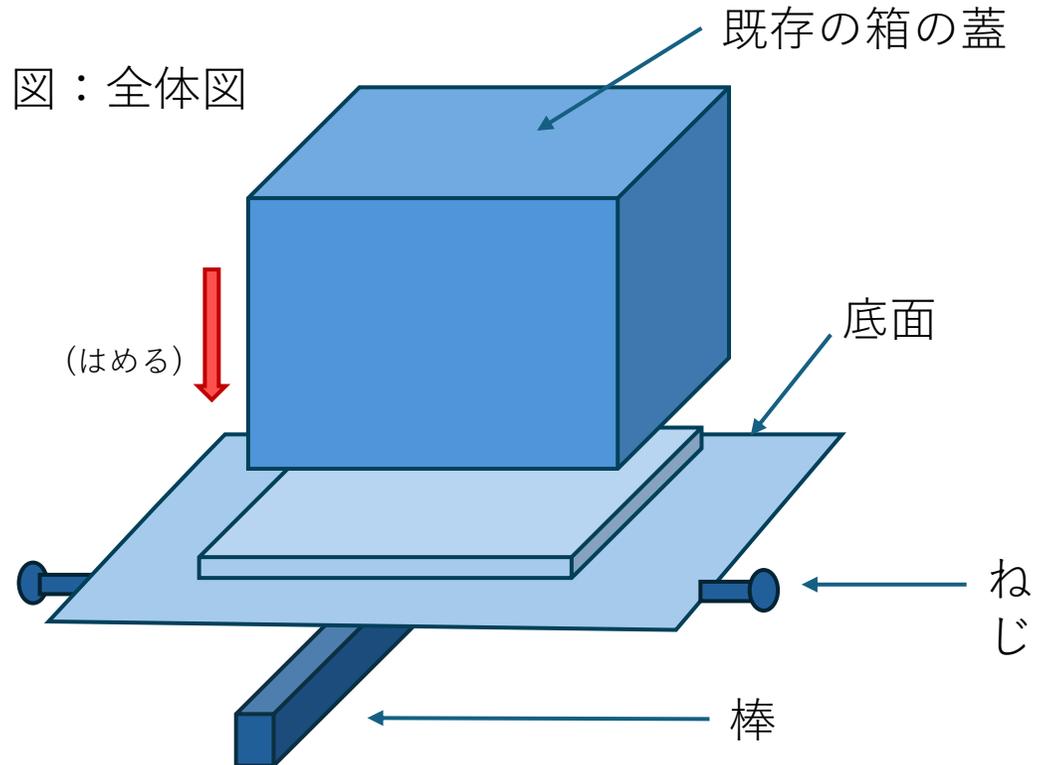
2026年度 RANS実験に向けて

暗箱の設計（外部）

図：真上から見た図



図：全体図



- ・ 蓋は既存のものを用い、トンネルの大きさに合うような底面を作成
- ・ さらに底面に、蓋をはめ込めるような段差を作成
- ・ ねじにより横方向の幅を固定

2026年度 RANS実験に向けて

暗箱の設計（内部）

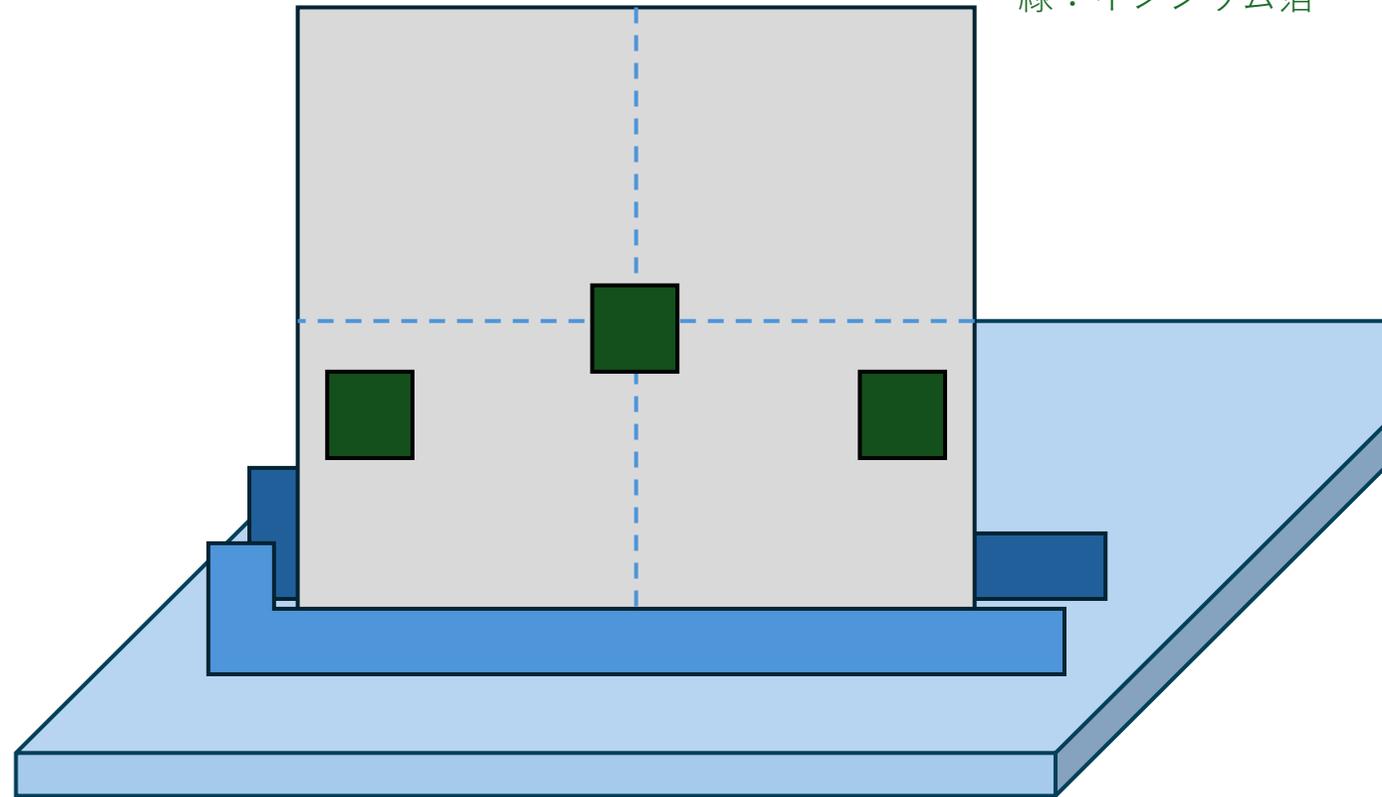
- ・底面に基板の厚みに合わせたL字スリットを作成し、基板を固定する

→基板の入れ替え時に同じ位置に導入できる

- ・基板の導入個数分作成

図：正面から見た図

灰色：基板
緑：インジウム箔



まとめ

まとめ

- P型Siセンサーの性能評価のため、2023年、2024年に行われた中性子照射実験のデータの解析を行った。
- 2024年のデータは2023年のデータよりも検出精度が悪かった。
また、インジウム箔の冷却時間が長くなるほど検出精度が悪くなることが確認された。
- 2024年、2023年のデータを用い、2026年の中性子照射実験で基板を置く予定の位置において、検出精度が6%または10%以内になる冷却時間を見積もった。この結果をもとに、2026年中性子照射実験の計画を立てた。

今後の課題

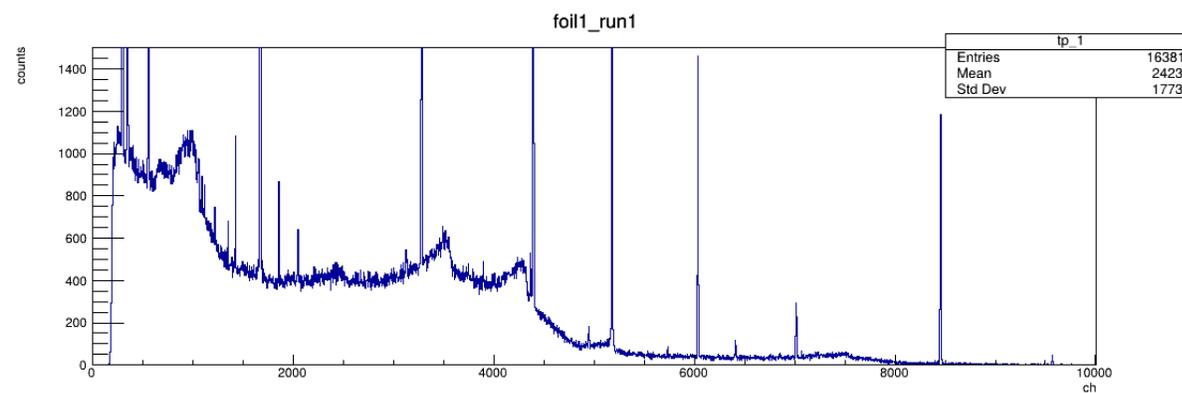
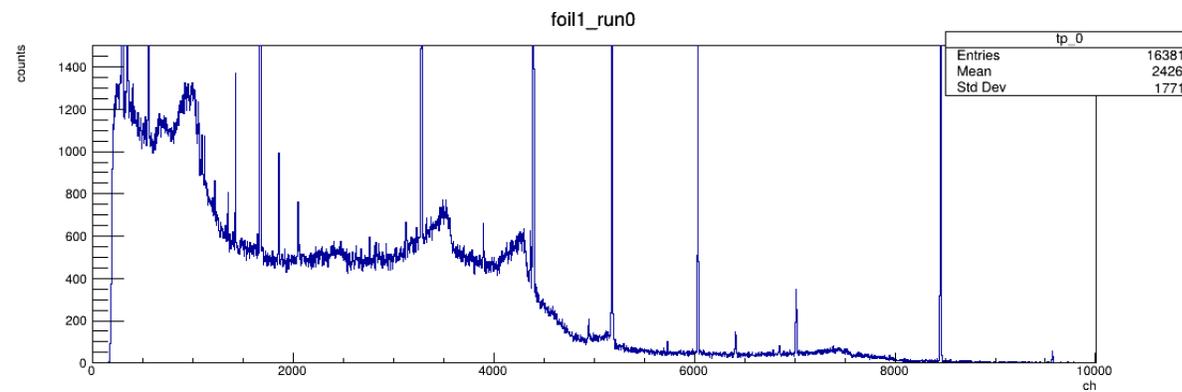
- 以上の結果から、RANSの中性子分布を得るための予備実験を実施
- 実験のための暗箱の作成
- 予備実験にて得た分布を基にp型Siセンサーの中性子照射による性能評価のための本実験を行う

ご清聴ありがとうございました

Back up

ピークフィットについて

- 2024年のインジウム箔1の2回のランについて、エネルギースペクトル全体のピークフィット



測定における回数や時間

表：各インジウム箔の測定回数と測定時間、時刻（2023）

In No.	測定回数	合計測定時間(s)	測定開始時刻(h:m:s)
1	5	1,536	17:08:47
2	3	1,020	14:45:03
3	5	1647	15:11:23
4	3	1147	13:43:02
5	5	1580	15:50:49
6	5	1550	16:29:06
7	3	1090	14:15:08

表：各インジウム箔の測定回数と測定時間、時刻（2024）

In No.	測定回数	合計測定時間(s)	測定開始時刻(h:m:s)
1	2	1,831	17:47:51
2	2	1,818	18:27:51
3	2	1207	19:04:49
4	3	903	19:29:44
5	3	900	19:47:39
6	2	1844	16:28:12
7	2	1823	19:47:39
8	2	1869	15:50:28

測定における距離や測定時間

表：各インジウム箔の基板距離と測定時間（2023）

年度	foil no	run no	基板距離	d	t_m
2023	1	1	12	1.2	308
	1	2	12	1.2	308
	1	3	12	1.2	307
	1	4	12	1.2	307
	1	5	12	1.2	306
	2	1	67	6.7	343
	2	2	67	6.7	340
	2	3	67	6.7	337
	3	1	34	5.640035	334
	3	2	34	5.640035	332
	3	3	34	5.640035	329
	3	4	34	5.640035	327
	3	5	34	5.640035	325
	4	1	113	11.3	390
	4	2	113	11.3	382
	4	3	113	11.3	375
	5	1	12	4.294182	318
	5	2	12	4.294182	317
	5	3	12	4.294182	316
	5	4	12	4.294182	315
	5	5	12	4.294182	314
	6	1	12	4.294182	311
	6	2	12	4.294182	311
	6	3	12	4.294182	310
	6	4	12	4.294182	309
	6	5	12	4.294182	309
	7	1	67	8.070936	369
	7	2	67	8.070936	363
	7	3	67	8.070936	358

表：各インジウム箔の基板距離と測定時間（2024）

年度	foil no	run no	基板距離	d	t_m
2024	1	1	12	1.2	917
	1	2	12	1.2	914
	2	1	12	4.657252	910
	2	2	12	4.657252	908
	3	1	12	4.294182	604
	3	2	12	4.294182	603
	4	1	12	4.294182	301
	4	2	12	4.294182	301
	4	3	12	4.294182	301
	5	1	27	2.7	300
	5	2	27	2.7	300
	5	3	27	2.7	300
	6	1	58	5.8	924
	6	2	58	5.8	920
	6	3	58	5.8	300
	6	4	58	5.8	300
	7	1	74	8.411896	913
	7	2	74	8.411896	910
	8	1	74	8.411896	938
	8	2	74	8.411896	931
	8	3	74	8.411896	300
	8	4	74	8.411896	300

実験における諸時間(2023)

- 中性子を測定し終わってからインジウム泊を測定するまでの時間
：41分
- Ge検出器での測定時間
：300秒で統一
- インジウム箔の入れ替え時間(測定から次の測定までの時間)
：10－20分
- 8枚すべてのインジウム箔の測定時間：約4時間

(参考)

中性子照射の終了時刻：13時04分

一番最初のインジウム箔を入れた時刻：15時50分

一番最後のインジウム箔を入れた時刻：17時29分

実験における諸時間(2024)

- 中性子を測定し終わってからインジウム泊を測定するまでの時間
：2時間半（※しばらく鉛の塀の中に入れて放置する時間があった）
- Ge検出器での測定時間
：300秒、600秒、900秒（ピークが小さかった分の調整が入っている）
- インジウム箔の入れ替え時間(測定から次の測定までの時間)
：20分以上かかっている時が多い？（まれに短い時間）
- 8枚すべてのインジウム箔の測定時間：約4時間

(参考)

中性子照射の終了時刻：13時20分

一番最初のインジウム箔を入れた時刻：15時50分

一番最後のインジウム箔を入れた時刻：19時52分

使用したデータ (2023)

2023	1	1	14793	5292.59	308	12	5155.12013	6088.159	78.02666	1.281613299
	1	2	15103	5216.71	308	12	5081.211039	6000.873	77.4653	1.290900545
	1	3	15413	5155.14	307	12	5037.596091	5949.364	77.13212	1.296476738
	1	4	15722	4947.52	307	12	4834.710098	5709.757	75.56293	1.323400156
	1	5	16030	5005.11	306	12	4906.970588	5795.096	76.12553	1.313619761
	2	1	6169	2092.26	343	67	1829.965015	4632.581	68.06306	1.469225676
	2	2	6514	1940.58	340	67	1712.276471	4334.65	65.83806	1.518878234
	2	3	6855	1661.62	337	67	1479.186944	3744.581	61.19298	1.634174278
	3	1	7749	1272.93	334	34	1143.350299	1831.807	42.79961	2.336469664
	3	2	8085	806.152	332	34	728.4506024	1167.08	34.16255	2.92718215
	3	3	8418	614.49	329	34	560.325228	897.7193	29.96196	3.337564852
	3	4	8750	829.355	327	34	760.8761468	1219.03	34.91461	2.864130597
	3	5	9078	992.498	325	34	916.152	1467.804	38.31192	2.610153416
	4	1	2448	1314.73	390	113	1011.330769	4844.188	69.6002	1.436777422
	4	2	2840	1694.12	382	113	1330.460733	6372.794	79.82978	1.252665378
	4	3	3223	1842.67	375	113	1474.136	7060.986	84.02967	1.190055809
	5	1	10115	1158.43	318	12	1092.858491	1290.658	35.92573	2.783520571
	5	2	10435	1028.06	317	12	972.9274448	1149.02	33.8972	2.950096167
	5	3	10753	1242.64	316	12	1179.721519	1393.242	37.32616	2.679085969
	5	4	11071	996.262	315	12	948.8209524	1120.551	33.47463	2.98733734
	5	5	11387	953.199	314	12	910.6996815	1075.53	32.79527	3.049220341
	6	1	12412	757.151	311	12	730.3707395	862.5625	29.36941	3.404902792
	6	2	12726	732.45	311	12	706.5434084	834.4226	28.88637	3.461839875
	6	3	13037	542.621	310	12	525.1170968	620.1594	24.903	4.015580359
	6	4	13349	737.451	309	12	715.9718447	845.5575	29.07847	3.438970326
	6	5	13660	690.519	309	12	670.4067961	791.7455	28.13797	3.553916309
	7	1	4374	834.307	369	67	678.298374	1717.121	41.43816	2.413234442
	7	2	4744	728.524	363	67	602.0859504	1524.189	39.04086	2.561419175
	7	3	5109	1466.38	358	67	1228.810056	3110.749	55.77409	1.7929473

シグナル積分値Nを距離、測定時間で規格化している。

t_c : 冷却時間
(中性子照射終了からGe検出器に入れるまでの時間)

t_m : Ge検出器での測定時間

距離について、50mmで照射量が1/2になることを用いている

使用したデータ (2024)

年度	foil no	run no	t_c	N	t_m	基板距離	N 時間補正	距離補正	\sqrt{N}	$\sqrt{N/N*(100)}$
2024	1	1	16020	523.969	917	12	171.4184297	202.4439	14.22828	7.028257171
	1	2	16989	367.45	914	12	120.607221	142.4362	11.93467	8.378952823
	2	1	18471	440.633	910	12	145.2636264	171.5553	13.09791	7.634805183
	2	2	19382	349.324	908	12	115.4154185	136.3048	11.67496	8.565337599
	3	1	20689	194.416	604	12	96.56423841	114.0417	10.67903	9.364147388
	3	2	21295	214.9	603	12	106.9154229	126.2663	11.23683	8.899307667
	4	1	22184	72.0225	301	12	71.78322259	84.77546	9.207359	10.86087774
	4	2	22487	111.219	301	12	110.8495017	130.9124	11.4417	8.73996167
	4	3	22789	71.6443	301	12	71.40627907	84.33029	9.183153	10.88950652
	5	1	23259	122.503	300	27	122.503	178.116	13.34601	7.492875888
	5	2	23561	112.024	300	27	112.024	162.8798	12.76244	7.835493655
	5	3	23863	82.3097	300	27	82.3097	119.676	10.93965	9.141056468
	6	1	11292	101.2	924	58	32.85714286	73.42173	8.568648	11.67045275
	6	2	12218	269.44	920	58	87.86086957	196.3316	14.01184	7.136821816
	6	3	25129	94.4181	300	58	94.4181	210.9843	14.5253	6.884540738
	6	4	25431	35.7628	300	58	35.7628	79.91463	8.939498	11.18630987
	7	1		112.53	913	74	36.97590361	103.1438	10.15597	9.846421099
	7	2		186.591	910	74	61.51351648	171.5912	13.09928	7.634006509
	8	1	9028	373.824	938	74	119.5599147	333.5109	18.26228	5.475767565
	8	2	9968	529.17	931	74	170.5166488	475.654	21.80949	4.58515909
	8	3	24359	38.17	300	74	38.17	106.4747	10.31866	9.69118141
	8	4	24661	34.8654	300	74	34.8654	97.25659	9.861876	10.14005889

シグナル積分値Nを距離、測定時間で規格化している。

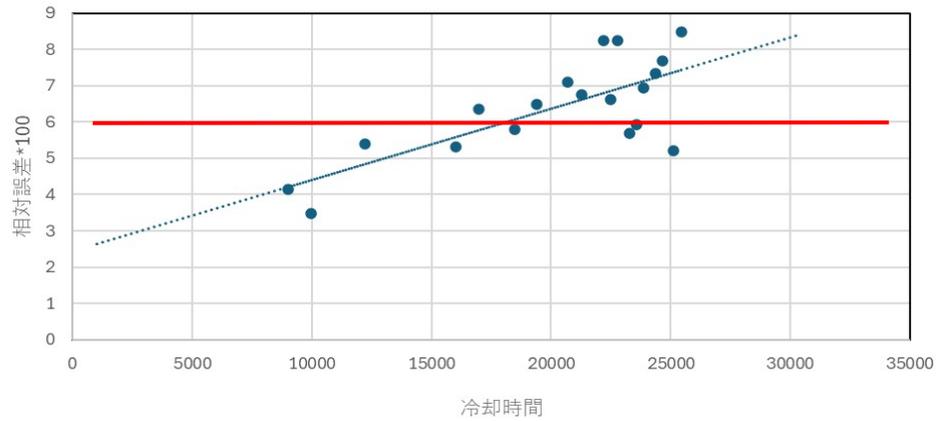
t_c : 冷却時間
(中性子照射終了からGe検出器に入れるまでの時間)

t_m : Ge検出器での測定時間

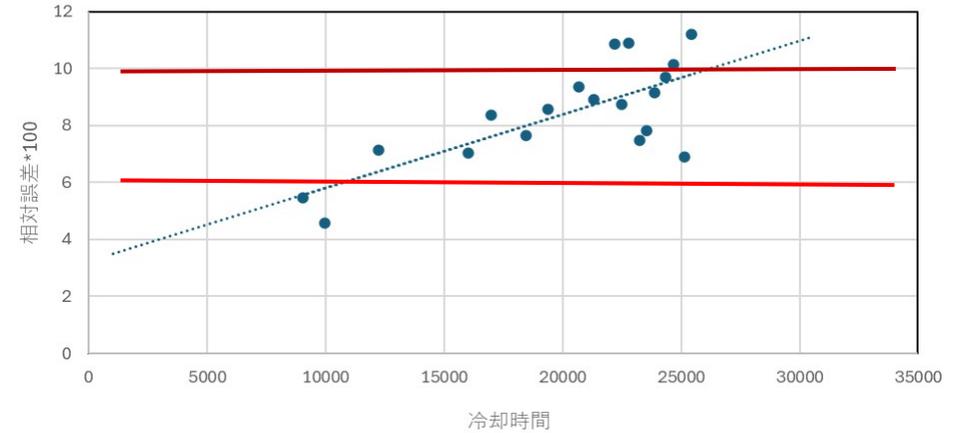
距離について、50mmで照射量が1/2になることを用いている

距離ごとの関係 (2024年データより)

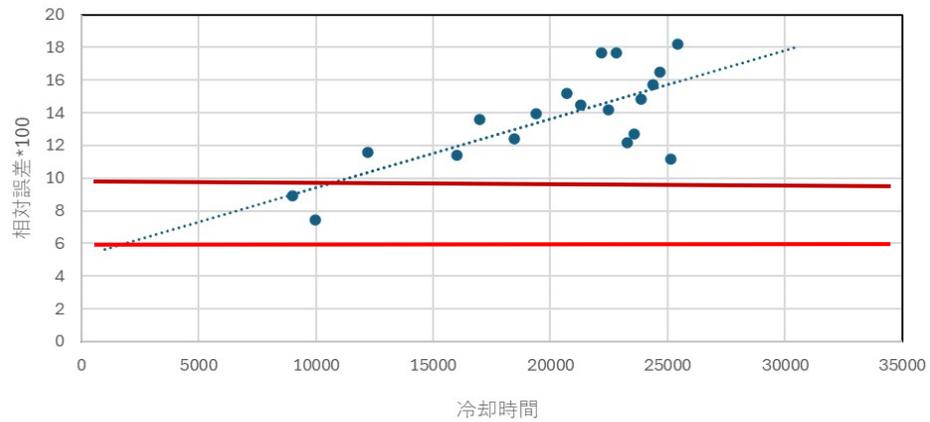
10mm



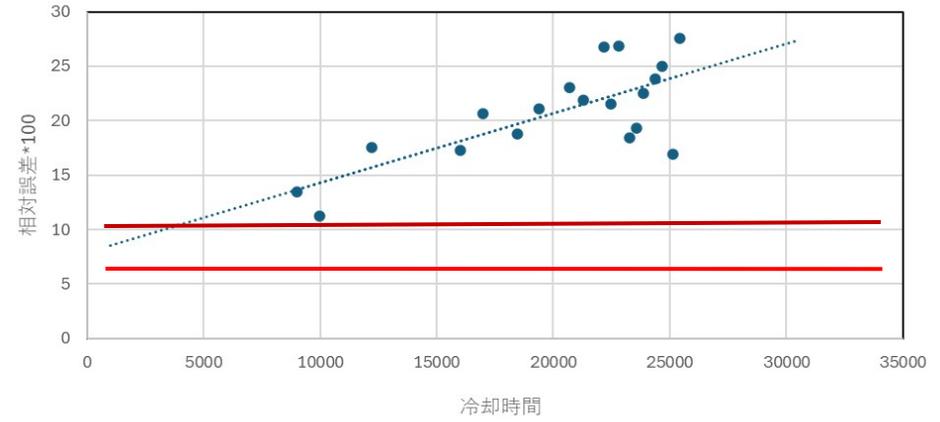
50mm



120mm

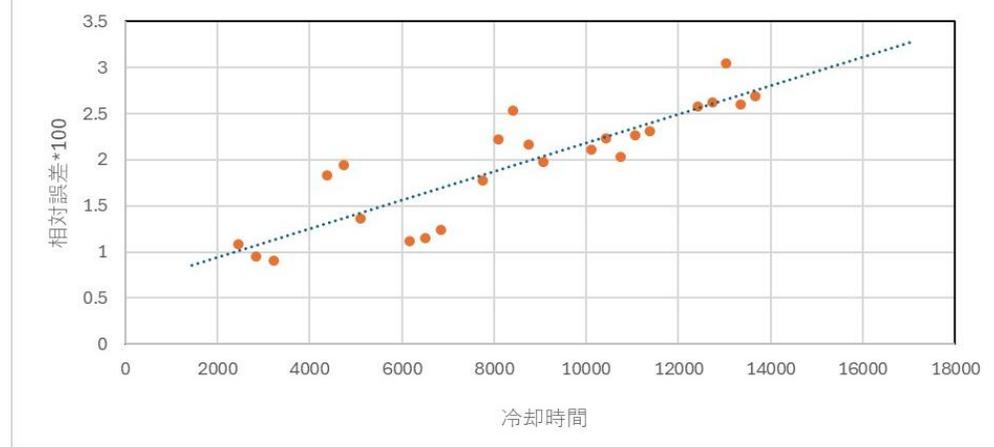


180mm

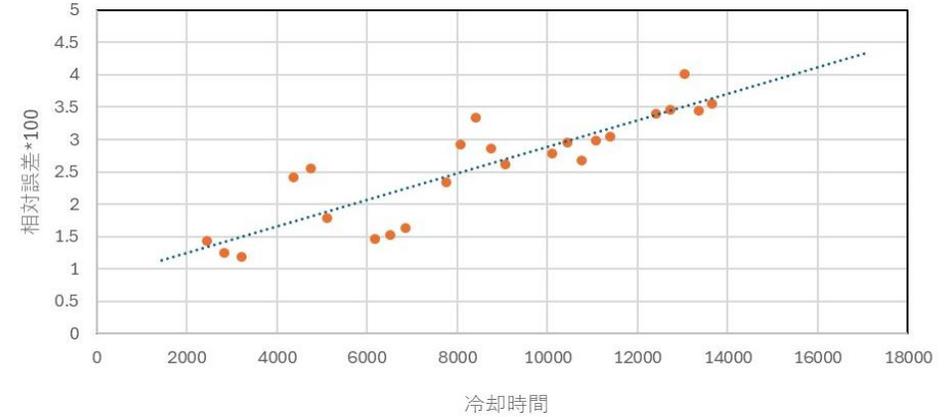


距離ごとの関係 (2023年データより)

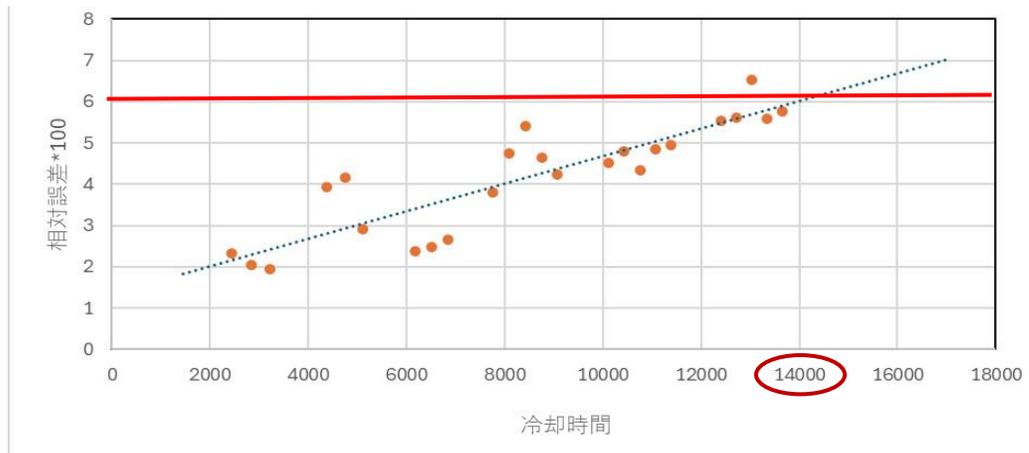
10mm



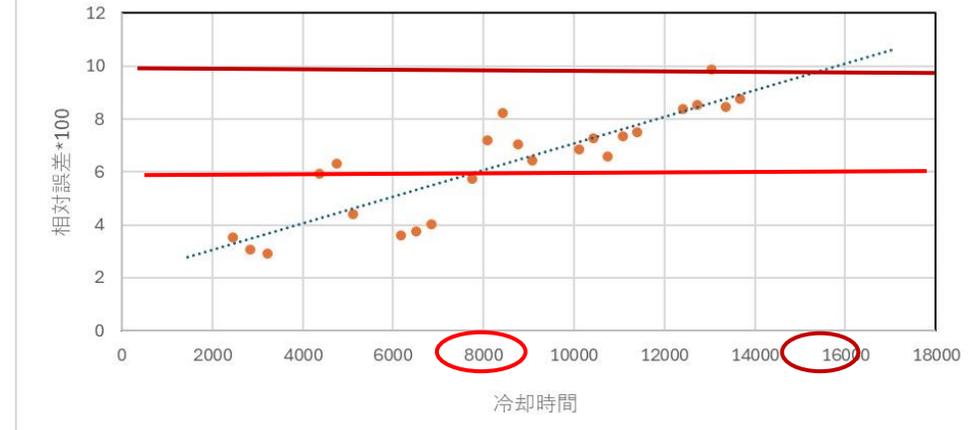
50mm



120mm

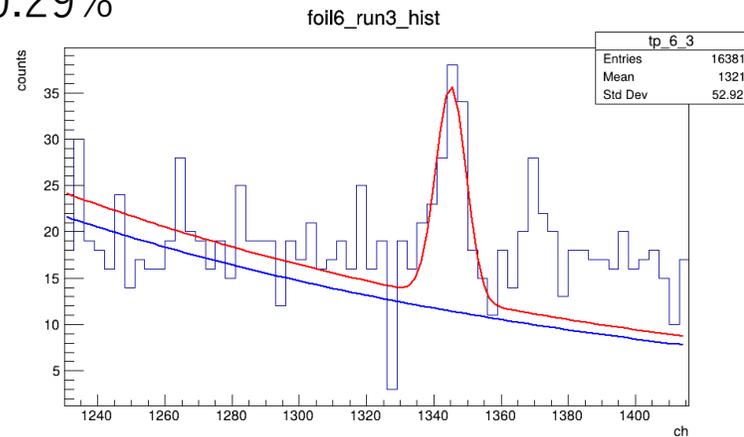


180mm

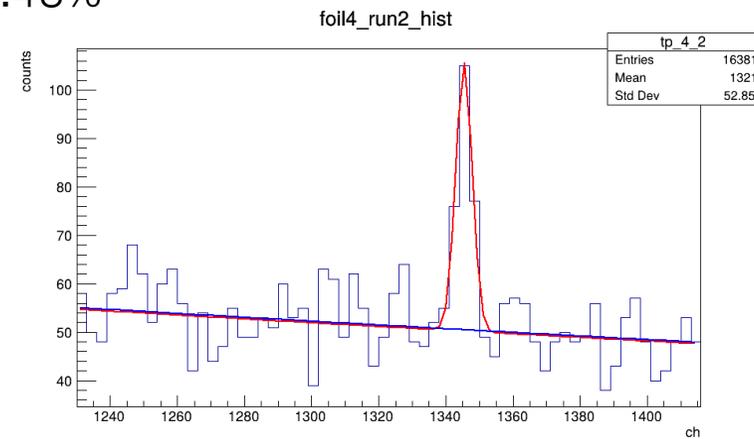


10%の基準について

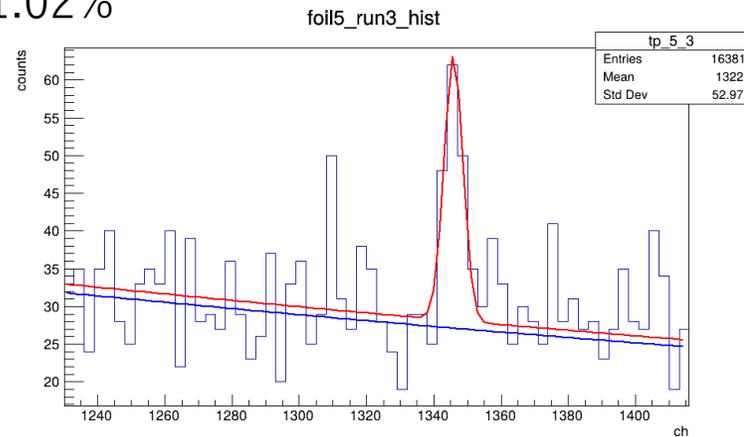
s=10.29%



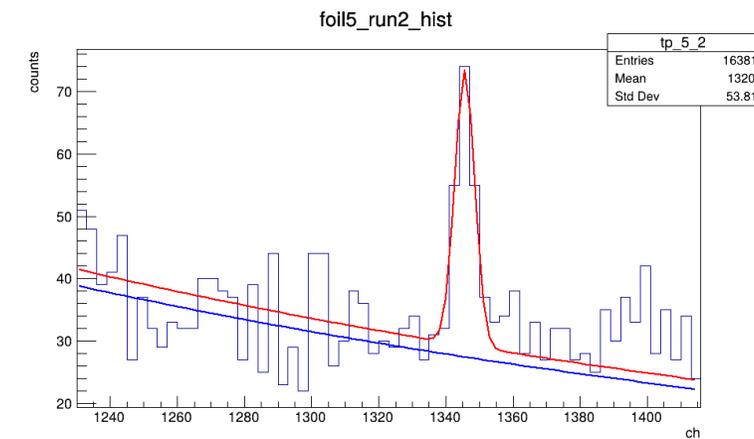
s=9.48%



s=11.02%

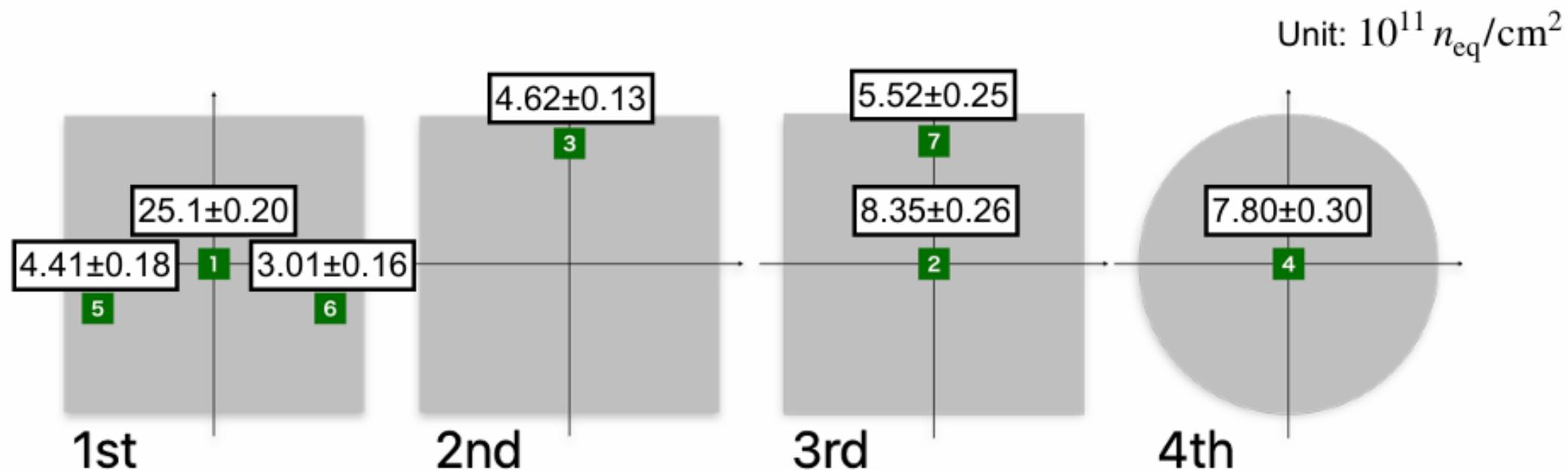


s=9.45%



先行研究

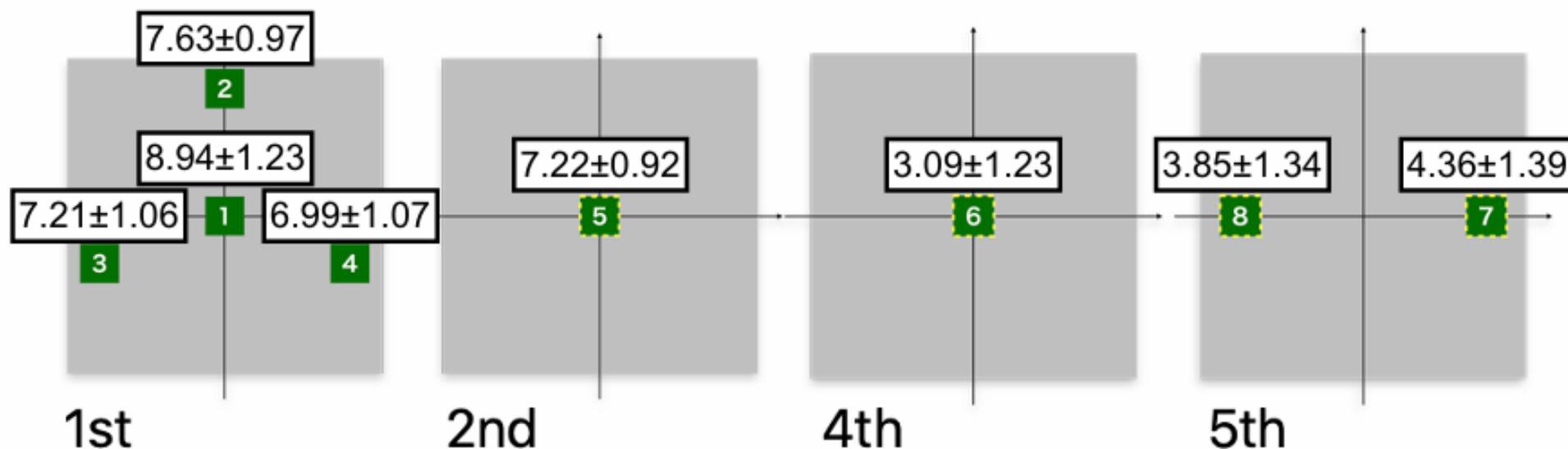
結果：2023年度 1回目の中性子照射量



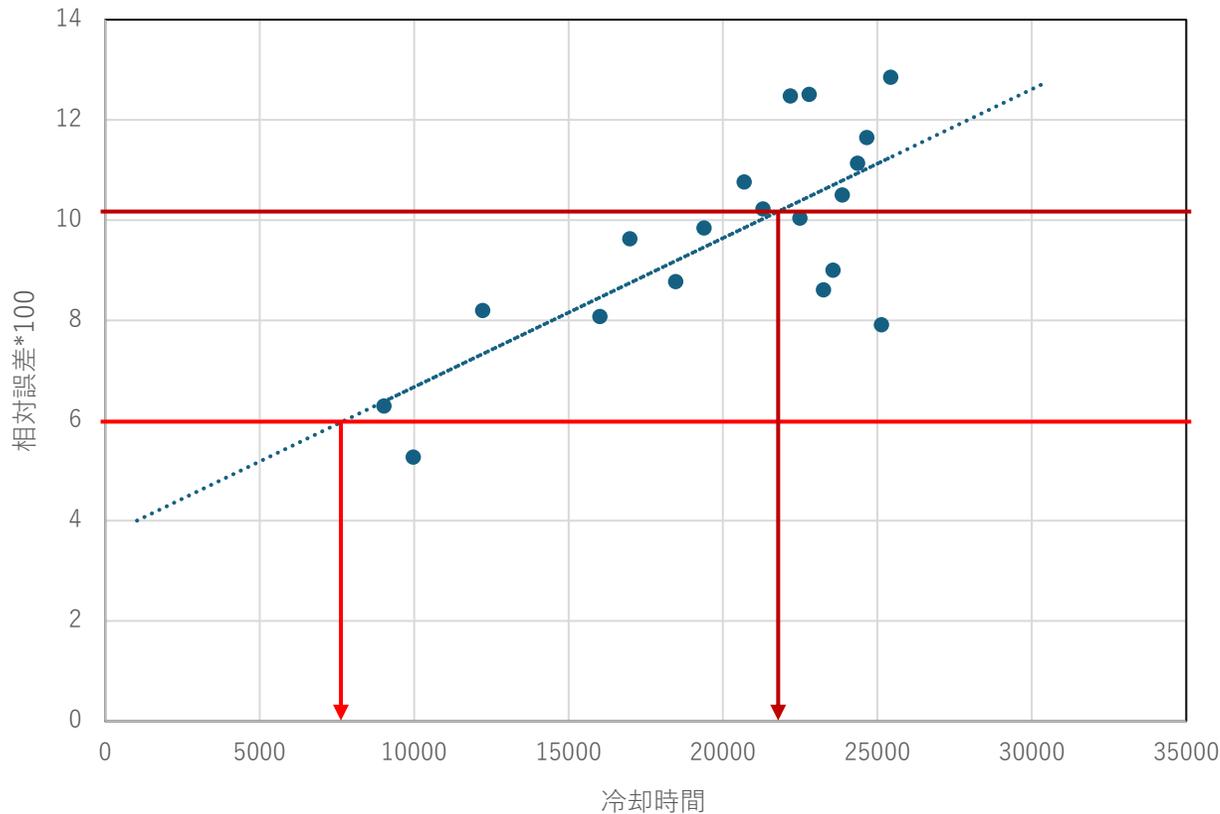
先行研究

結果：2024年度 1回目の中性子照射量

Unit: $10^{10} n_{eq}/cm^2$



冷却時間と精度の関係 (基板距離ver)



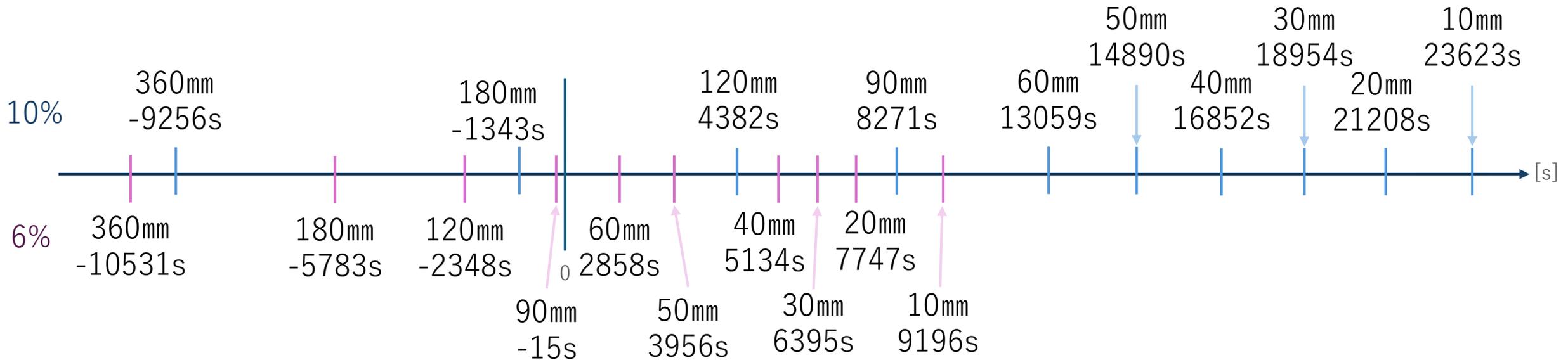
左図は基板距離のみで規格化した値を用いて10mmの場合をプロットしたものの。

基板上のインジウム箔の設置位置の正確な値がわからなかったため、中性子源からの正確な距離が計算できているか怪しい。

図：基板距離10mmについて規格化したときの冷却時間と検出精度の関係

時間制限について (基板距離ver)

- 2024年のデータを用いて10%、6%の精度基準で各基板距離についての時間制限を図示した



2026年度 RANS実験に向けて (基板距離ver)

- 6%、10%の精度基準での各距離についての時間制限(h)

※2024/2023、 ◎：4時間以上許容、 △：冷却時間にかかわらず見えない可能性がある

Run 1		90mm	50mm	30mm	10mm
	6%	△/3.2h	1.1h/◎	1.7h/◎	2.5h/◎
ビーム時間 1時間	10%	2.3h/◎	◎	◎	◎

Run 2		60mm	40mm	20mm
	6%	0.7h/◎	1.4h/◎	2.15h/◎
ビーム時間 1時間	10%	3.6h/◎	◎	◎

Run 3		180mm	120mm
	6%	0.8h/2.1h	0.5h/3.8h
ビーム時間 2時間	10%	0.9h/◎	3.1h/◎

Run 4		360mm
	6%	×
ビーム時間 2時間	10%	△/0.4h

時間制限について

- 右表：2023年のデータを用いて10%、6%の精度基準で各基板距離についての時間制限を表している

表：各基板距離に対する、10%,6%の時間制限

基板距離(mm)	10% [s]	6% [s]
10	41918.48	22979.61
20	38747.78	21077.19
30	35789.42	19302.17
40	33029.16	17646.02
50	30453.76	16100.78
60	28050.82	14659.01
90	21765.12	10887.59
120	16659.54	7824.25
180	9144.11	3314.99
360	-1243.76	-2917.73

時間制限について

- 360mmにおける時間制限について
ビーム強度を増やした場合を考えて
表にした

ビーム強度 $\text{Amount}[\text{C}] = \text{Current}[\mu\text{A}] \times \text{Time}[\text{s}]$ に
おいて、時間を2倍、3倍にした

- ビーム強度をあげれば10%に到達
することができる

表：距離360mmにおける、ビーム時間を
増やした時の10%,6%の時間制限

ビーム時間	10% [s]	6% [s]
×1	-1243.76	-2917.73
×2	489.70	-1877.66
×3	1819.83	-1079.58