

J-PARC・MLF水銀標的からの熱中性子領域に おける180°方向中性子収量(TTNY)の測定および評価

Measurement and evaluation of Thick Target Neutron Yield(TTNY)
at an angle of 180° for mercury target(J-PARC・MLF) in thermal
neutron region

井上 翔一^{○1}、明午 伸一郎²、岩元 大樹²

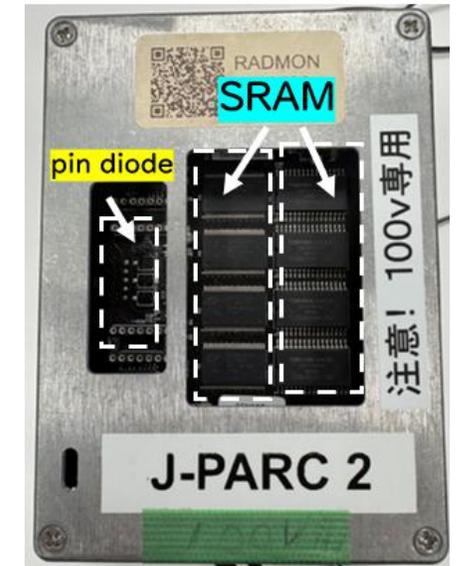
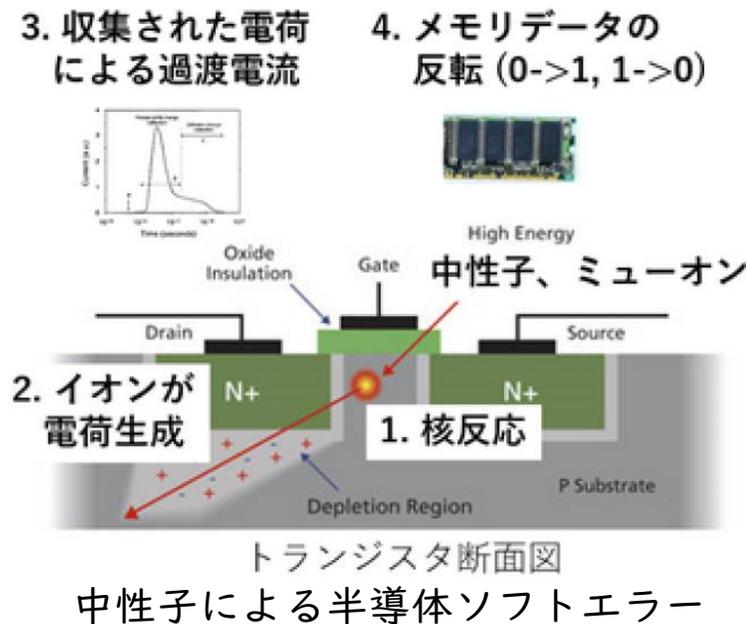
1. 長岡技術科学大学、 2. 原子力機構 J-PARCセンター

1. 背景 & 目的

- J-PARCセンター核変換ディビジョンでは、物質・生命科学実験施設(MLF)において核破碎中性子源(水銀標的)から発生する180°方向中性子を用いた、様々な中性子利用実験を計画している。
- これに向けて、MLF水銀標的からの**180°方向中性子収量(TTNY)に関する精密な測定**が必要不可欠である。

主な中性子利用実験

- 半導体ソフトウェア研究
- 遮蔽設計のための核データの取得
- 材料照射試験
- 検出器の試験(素粒子実験 etc..)
- 医療用RI製造(核医学研究)



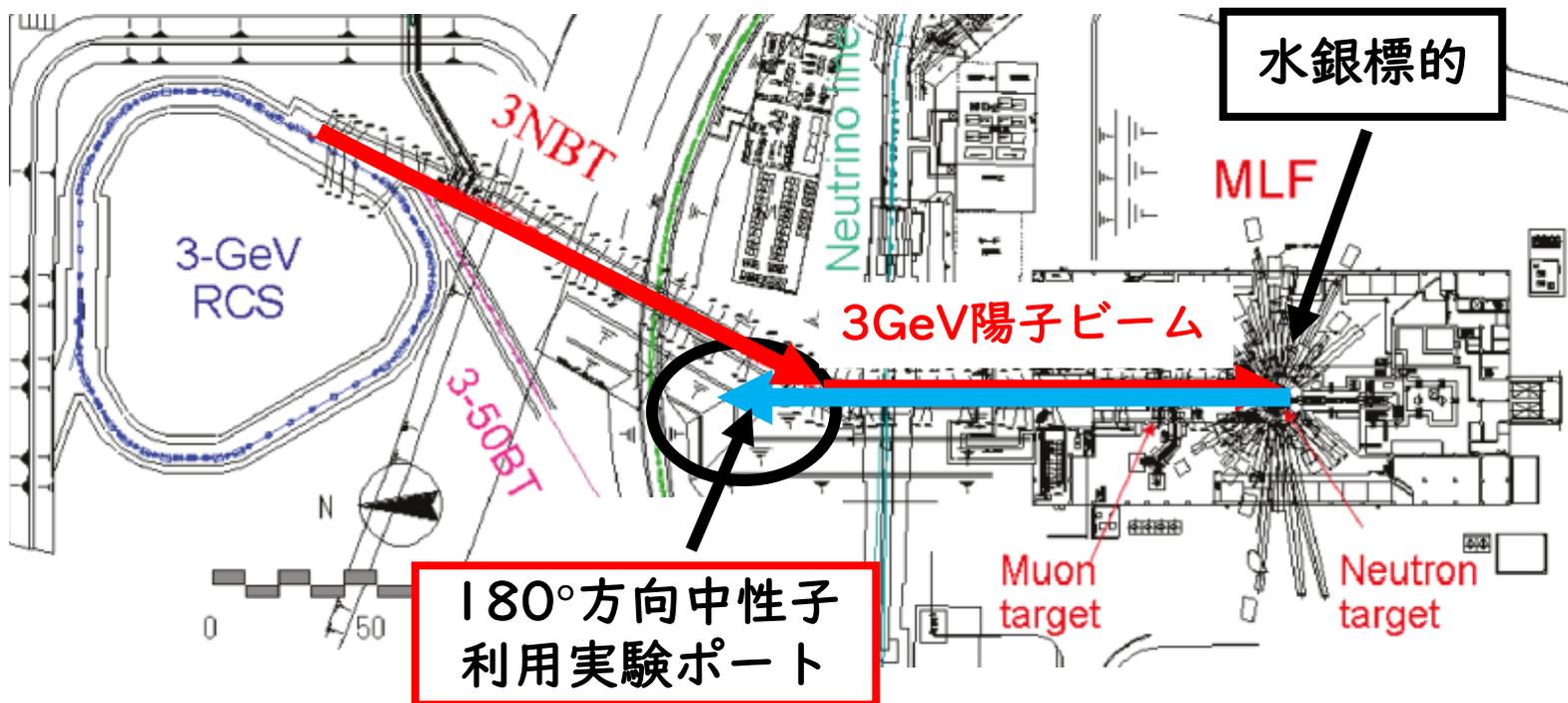
放射線検出器RADMON

特に**熱中性子領域**($10^{-9} \sim 1 \text{ MeV}$)における180°方向中性子収量の取得が必要
(0.8MeV以上は先行研究^[1]にて既に取得 & 評価済み)

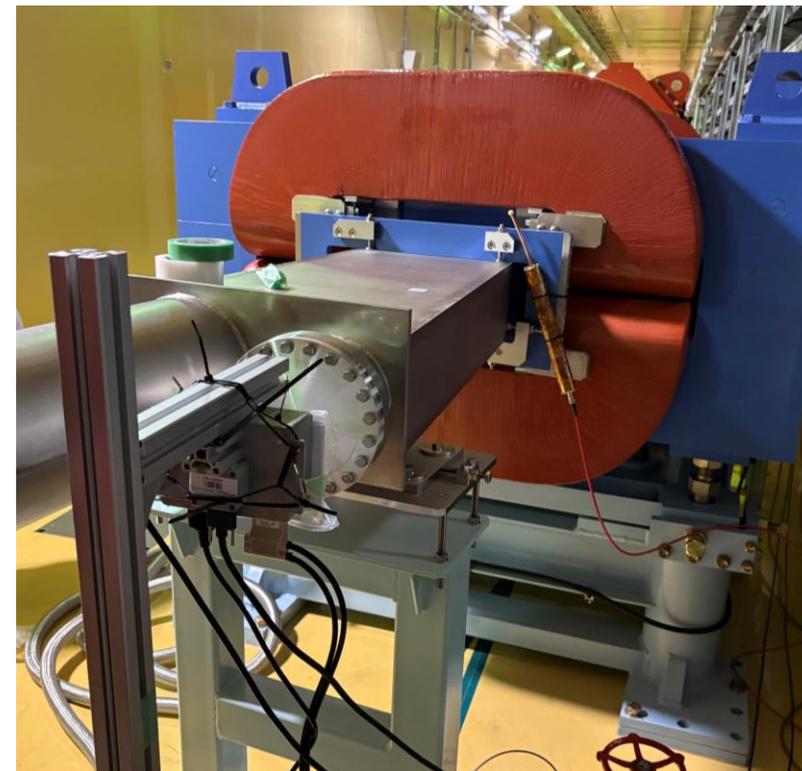
[1] H. Matsuda et.al, "Measurement of thick target neutron yield at 180° for a mercury target induced by 3-GeV protons", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B, 2020

J-PARC・MLFにおける180°方向中性子利用実験の概要 3/14

- 水銀標的にRCSからの3GeV陽子ビームを照射することで、核破砕反応によって発生した180°方向中性子は、3 GeV陽子ビームの輸送ライン(ビームダクト)の中を逆走するように移動する。
- 水銀標的から約126m上流に、図に示すように**専用の実験ポート**を配置した。



MLF水銀標的から実験ポートまでの大まかな配置

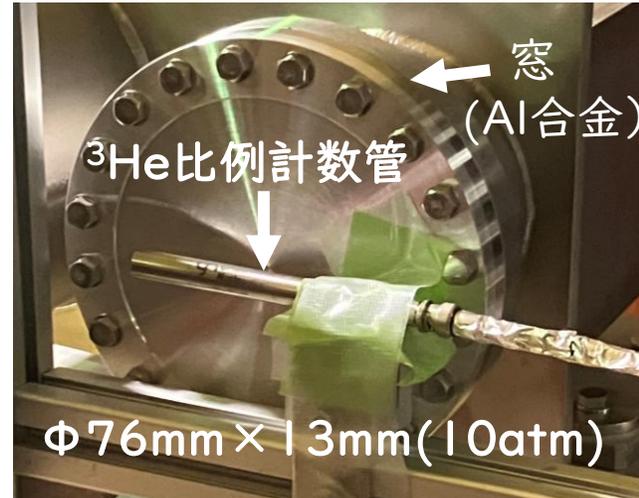


180°方向中性子利用実験ポート

2. 実験方法

飛行時間分析(TOF)法を用いて、MLF水銀標的に3GeV陽子ビームを入射した際の、熱中性子領域(~1MeV)における180°方向中性子収量(TTNY)を測定した。

- 使用した検出器： ^3He 比例計数管
(熱中性子に感度が高い)
- 検出器の立体角： 6.18×10^{-8} sr
- 中性子の飛行距離：**126.4m**
- 測定時間：1時間46分32秒

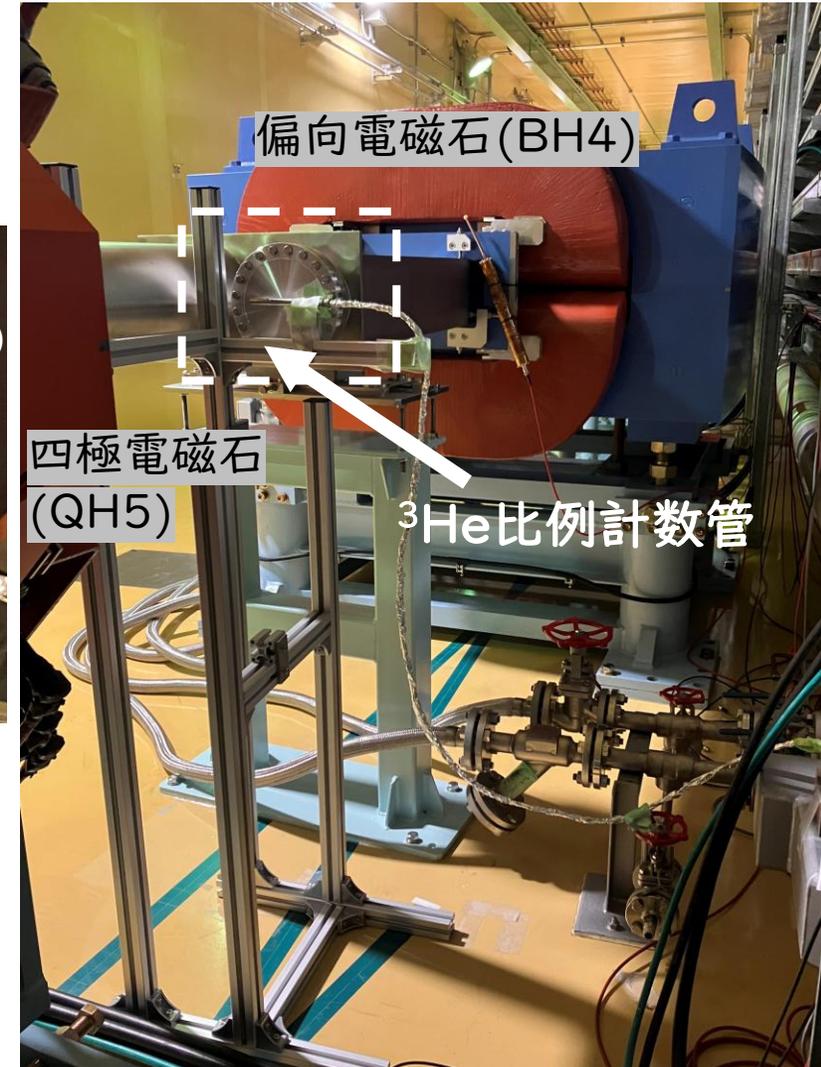


使用した ^3He 比例計数管の概要

$$E_n[\text{MeV}] = \left(\frac{72.3L}{\text{TOF}[\text{ns}]} \right)^2$$

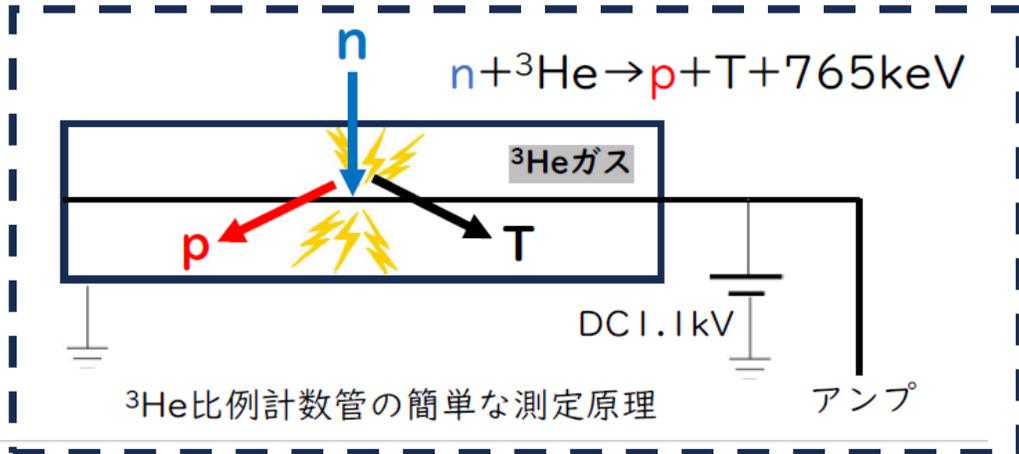
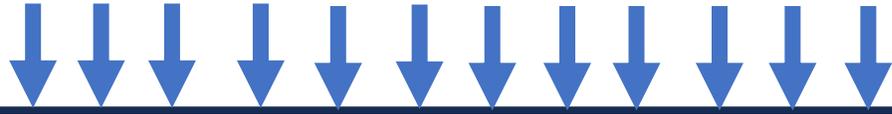
L[m]：中性子の飛行距離
TOF[ns]：中性子の飛行時間
 E_n [MeV]：中性子のエネルギー

※測定時間中はミュオンターゲット(黒鉛回転標的)および実験区画にあるMWPM(プロファイルモニター)等は取り外してある。



実験における測定系の全体像

180°方向中性子



AC 100V

AC電源ノイズ
フィルタ

Shaping Amplifier
Gain: 1.0
Coarse Gain : 20
Shaping Time: 2.0 μ s

プリアンプ

DC +1.1kV

オシロスコープ

A/D変換器

PC

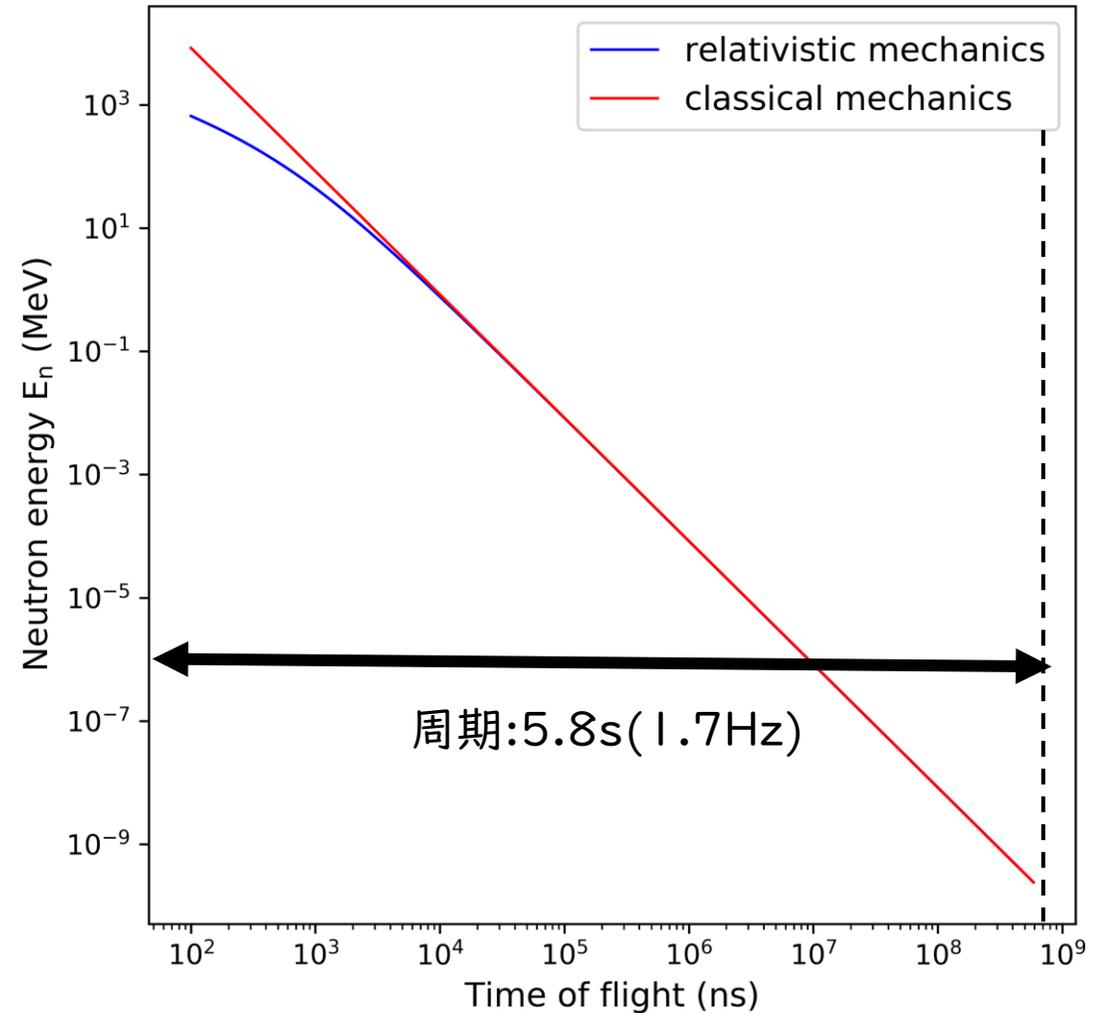
中性子利用実験ポート(3NBT下流)

3NBT下流制御室(MLF)

RCS(Rapid Cycling Synchrotron)で発生させた以下に示す条件の陽子ビームを、MLF水銀標的に入射して180°方向中性子収量(TTNY)の測定を行った。

- ビームのエネルギー : 3GeV
- ビームの繰り返し周波数 : 1.7Hz
(MLF利用運転では25Hz)
- 1ショットあたりの陽子数 : 1.48×10^{10} 個
- 1中間パルスのチョップ幅 : 80ns

⇒ 熱中性子の飛行時間を考慮するため、ビームの繰り返し周波数を通常(MLF利用運転時)より小さくした。



中性子のエネルギーE_nと飛行時間の関係

180°方向中性子収量(TTNY)の導出

7/14

測定より得られた波高分布およびエネルギースペクトルから、以下の数式よりMLF水銀標的に3GeV陽子ビームを入射した際の180°方向中性子収量(TTNY)を求めた。

$$TTNY = \frac{N}{\Delta\Omega\Delta u} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{n_p}$$

TTNY: 180°方向中性子収量[1/sr/lethargy/proton]

N: 全吸収ピークの中性子カウント数

n_p : 水銀ターゲットに入射した陽子の総数
(1ショットあたりの陽子数×繰り返し周波数×測定時間)

ε : 全吸収ピークの検出効率

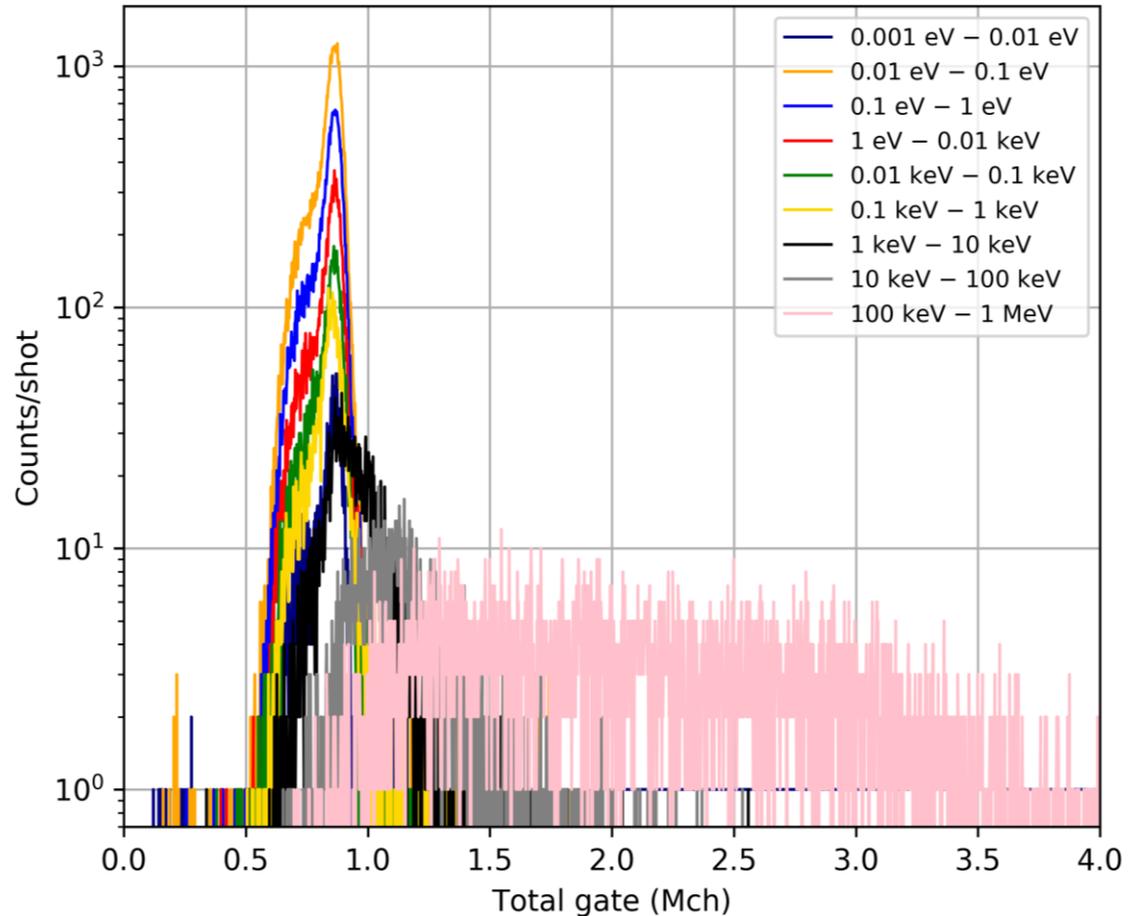
Δu : エネルギービンのレサジー幅(=0.5)

$\Delta\Omega$: ^3He 比例計数管の立体角(= 6.18×10^{-8} sr)

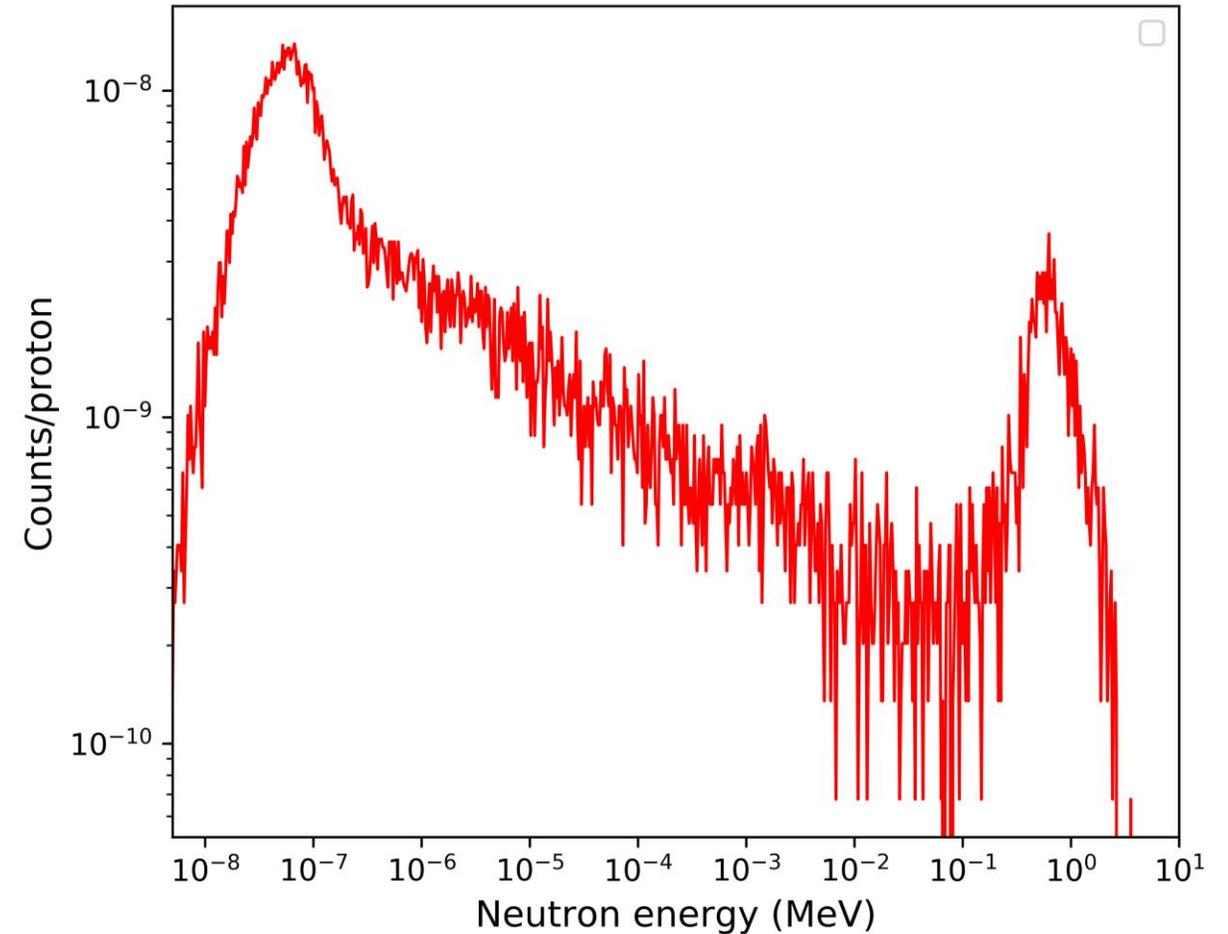
- 全吸収ピーク(765keV)の中性子カウント数Nは、得られたエネルギースペクトルについて全吸収ピークをガウス分布関数を用いてフィッティングすることで導出。
- 全吸収ピーク(765keV)の検出効率 ε については、放射線拳動解析コード(PHITS)による数値計算によって導出。

3. 実験結果

^3He 比例計数管から得られた波高分布および飛行時間分析(TOF)法により計算したエネルギースペクトルの結果について示す。



実験によって得られた波高分布(応答関数)

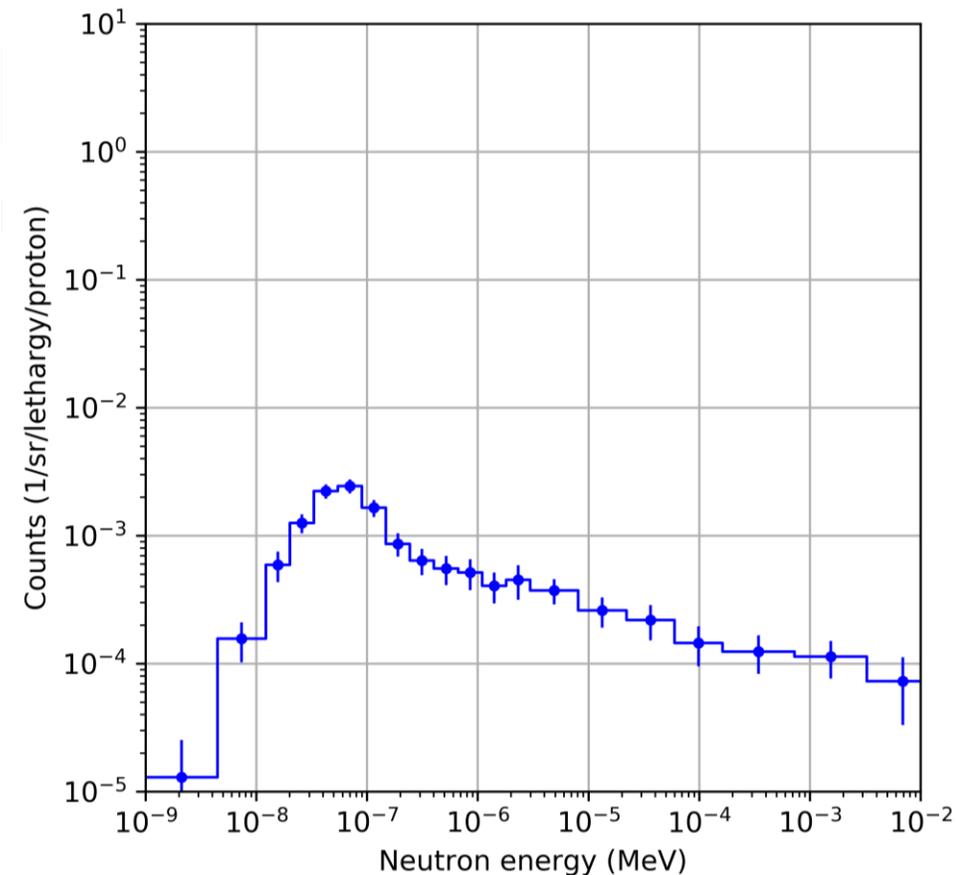
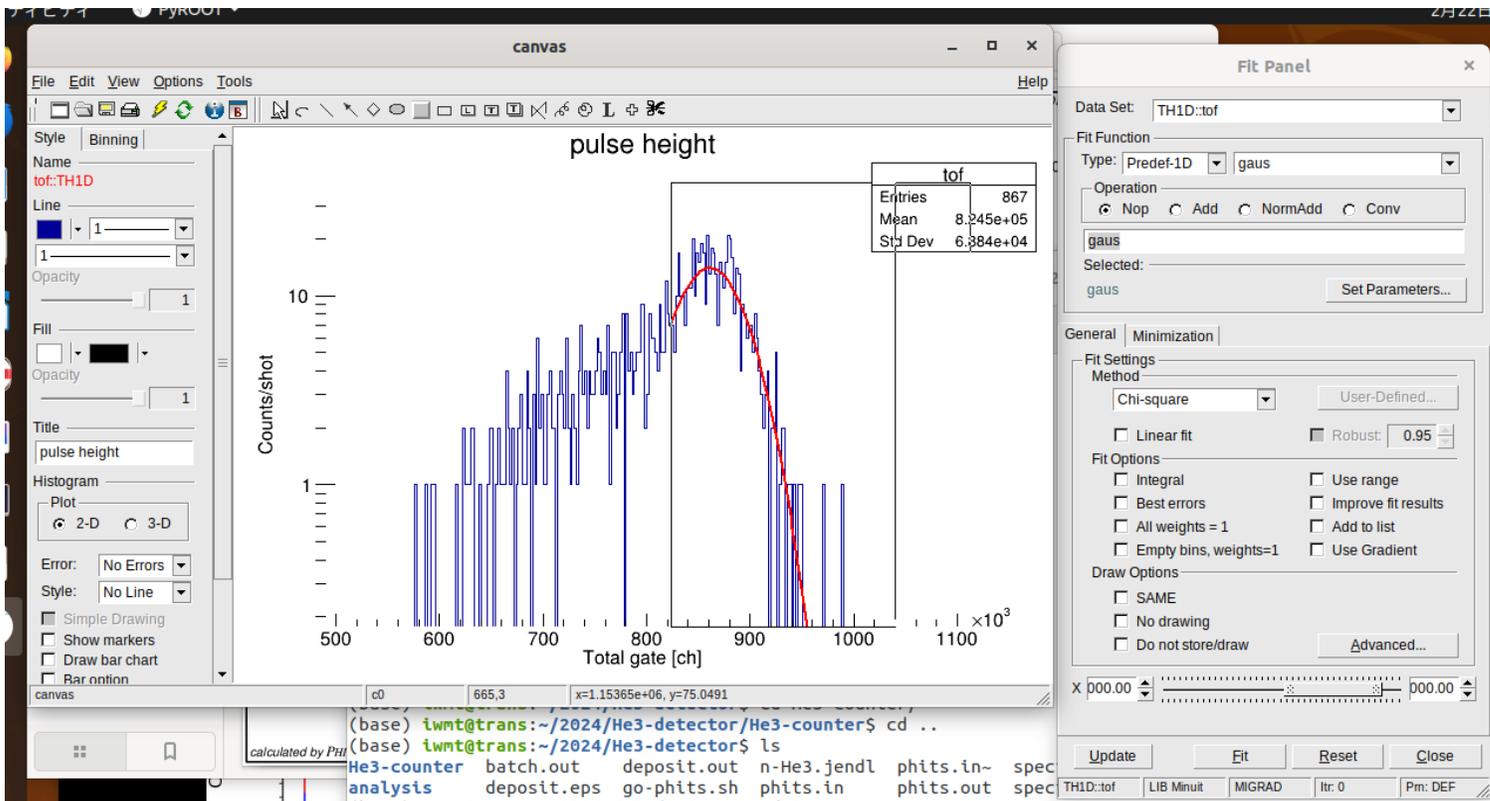


180°方向中性子のエネルギースペクトル(陽子1個あたり)

全吸収ピークにおける中性子カウント数Nの導出

9/14

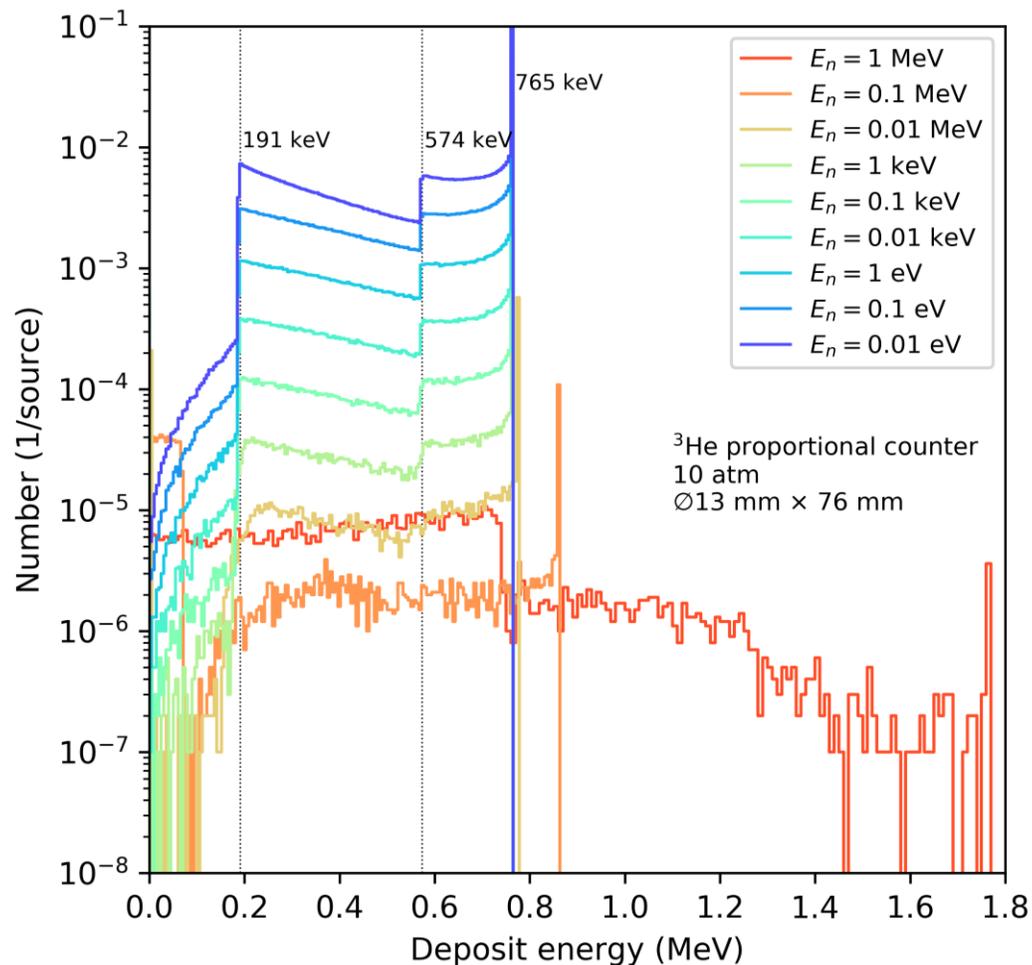
データ解析ソフトROOTを用いて、前頁のエネルギースペクトルについてエネルギービン毎に全吸収ピーク(765keV)をガウスフィッティングして積分を行うことで、³He比例計数管の全吸収ピーク(765keV)における中性子カウント数Nを導出した。



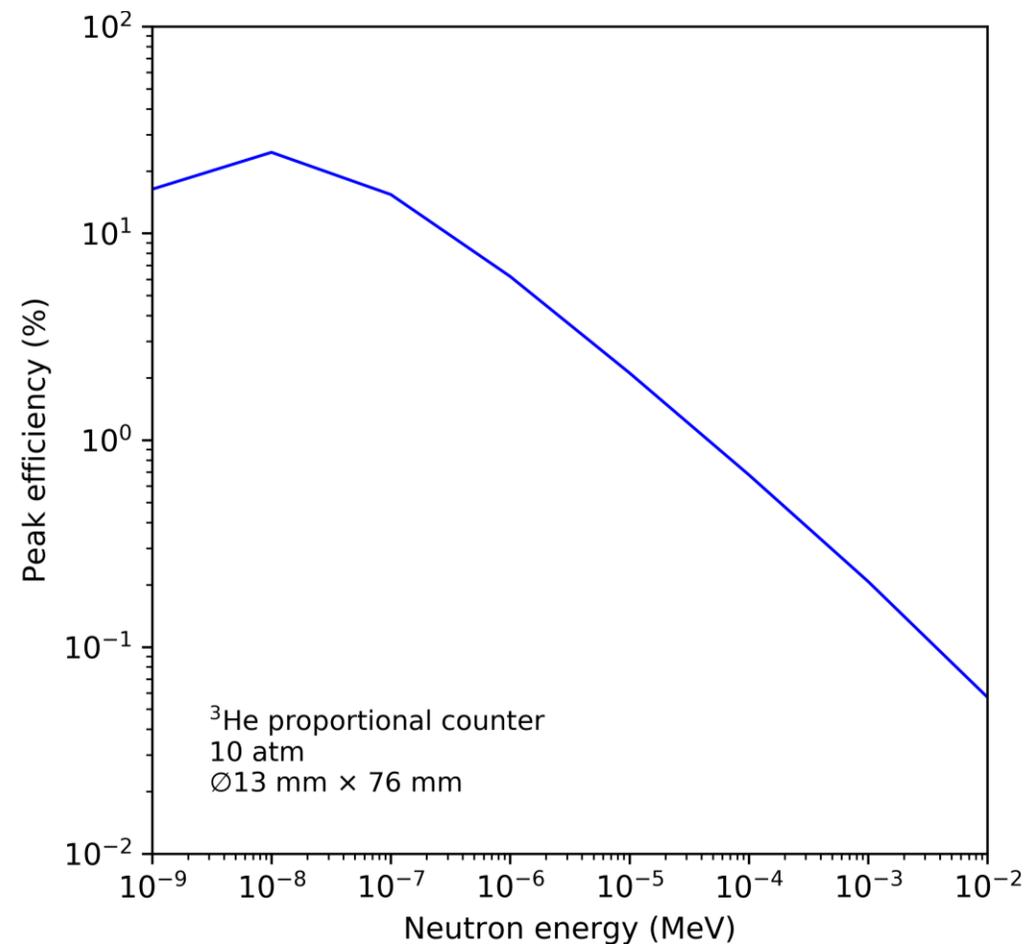
10^{-7.914} – 10^{-7.697} MeVのエネルギービン (レサジー幅 0.5) における波高分布

全吸収ピークにおける中性子カウント数N

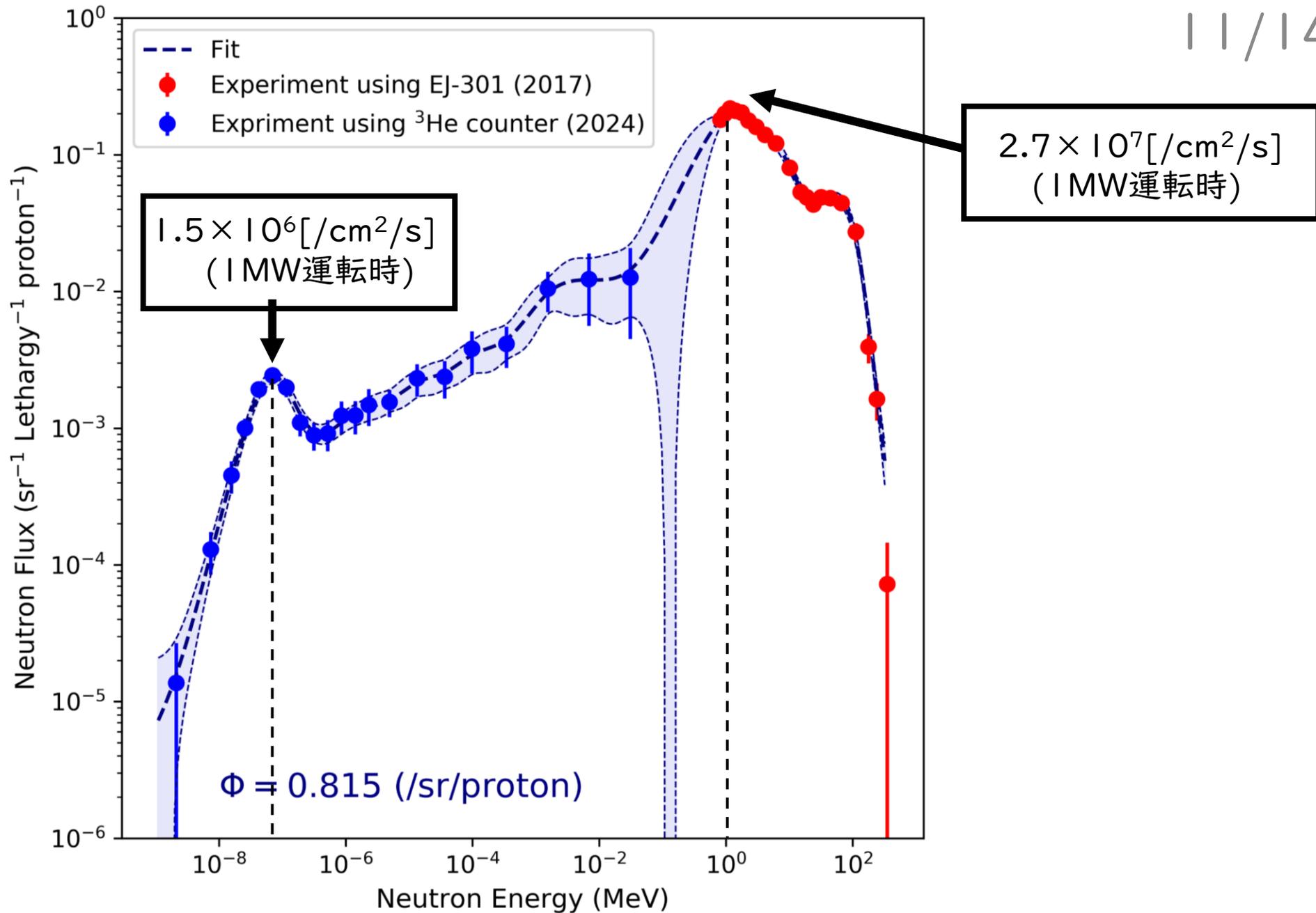
放射線挙動解析コード(PHITS)を用いて、 ^3He 比例計数管の全吸収ピーク (765keV) における検出効率 ε を導出した。



^3He 比例計数管の有感領域におけるエネルギー付与分布



^3He 比例計数管の全吸収ピーク(765keV)検出効率



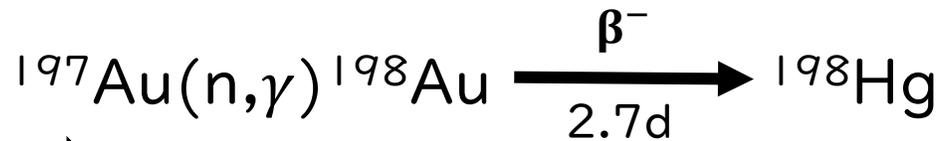
測定した180°方向中性子収量(TTNY)のエネルギースペクトル(先行研究の結果を含む)

測定した180°方向中性子収量(TTNY)について、放射化法(^{197}Au 箔)によって定量的に評価した。

⇒ 測定結果のうち、**熱中性子(0.025eV)**に注目

- 入射陽子ビーム: 105kW(3GeV,25Hz)
- 測定時間: 6.6日

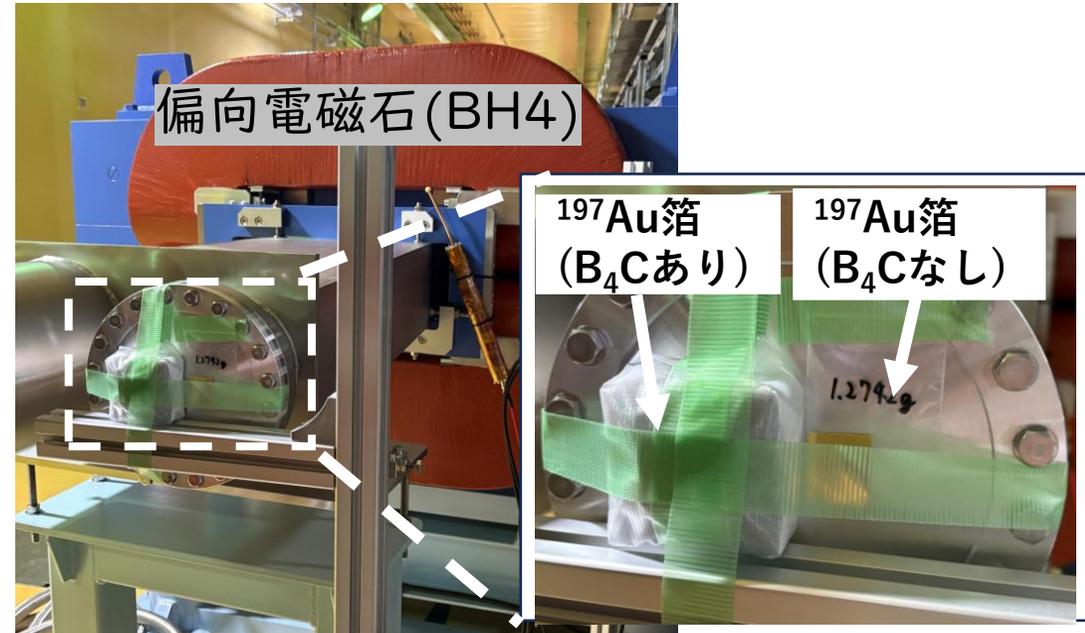
使用した核反応



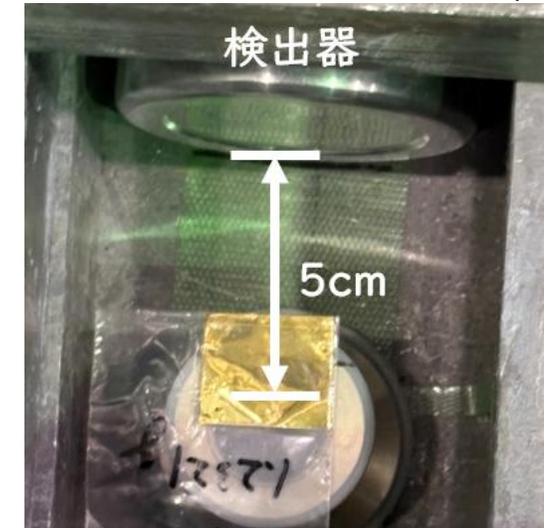
⇒ ^{198}Hg からの**即発γ線(411keV)**を観測
(411keVのγ線は99.98%の確率で放出)

使用した放射化検出器(^{197}Au 箔)の概要

	測定試料(^{197}Au 箔)	
	Bare	B_4C (厚さ:12.9mm)遮蔽体あり
質量[g]	1.2742	1.2321
縦×横×厚さ[mm]	25×25×0.1	



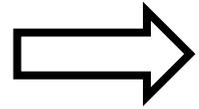
放射化法(^{197}Au 箔)による180°方向中性子収量(TTNY)の評価



Ge半導体検出器から試料までの配置

放射化法(金箔)による熱中性子反応率の導出

γ 線(411keV)の測定結果(ピーク強度)より、180°方向熱中性子における反応率RRを以下の数式より導出した。



測定結果(ピーク強度) = 遮蔽体(B₄C)なしでの結果 - 遮蔽体(B₄C)ありでの結果

$$RR = \frac{C\lambda}{N_{\text{tar}} F_{\text{irr}} e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m}) I \varepsilon}$$

$$F_{\text{irr}} = \sum_{n=0}^{N-1} I_p (n\Delta t) (1 - e^{-\lambda \Delta t}) e^{-\lambda \{t_f - (n+1)\Delta t\}}$$

C: γ 線のピーク強度(カウント数)

λ : ¹⁹⁸Auの崩壊定数[1/s]

N_{tar}: ¹⁹⁷Auの原子番号

I: γ 線の分岐比

ε : Ge半導体検出器での γ 線の全吸収ピークにおける検出効率

I_p: n Δt から (n+1) Δt の間において単位時間当たりに入射した陽子の平均個数

t_c: 冷却時間[s]

t_m: 検出器での計測時間 [s]

Δt : サンプリング時間[s]

t_i: 照射開始時間[s]

t_f: 照射終了時間[s]

$$N = (t_f - t_i) / \Delta t$$

反応率に関して180° TTNYをもとにPHITSで評価した結果と放射化法(金箔)による結果の比較

	Reaction Rate[1/atom/proton]		
	Bare(B ₄ Cなし)	B ₄ C遮蔽体あり	測定結果
放射化法(¹⁹⁷ Au箔)による結果	9.20 × 10 ⁻³³	1.67 × 10 ⁻³³	7.53 × 10 ⁻³³
³ He検出器での結果(PHITSを使用)	8.33 × 10 ⁻³³	1.64 × 10 ⁻³³	6.69 × 10 ⁻³³

4.まとめ

14/14

□ J-PARC・MLF水銀標的に3GeV陽子ビームを入射した際の、**熱中性子領域** ($10^{-9} \sim 10^{-2} \text{MeV}$)における180°方向中性子収量(TTNY)の測定を実施した。

- ⇒
- 先行研究と併せて、熱領域以上のすべてのエネルギー領域におけるデータを得られた。
 - 測定した中性子収量(TTNY)において、明確な熱中性子のピークを観察した。
 - ⇒
 - ・核破碎反応によって発生した中性子が、水銀標的付近での遮蔽体等による散乱により、熱化した可能性が高い。
 - ・今後、PHITS等を用いた数値計算によって、上記に関して考察を行う予定。

□ 放射化法(^{197}Au 箔)を用いて、測定した**熱中性子領域**における180°方向中性子収量(TTNY)に関して定量的な評価を実施した。

⇒ 測定した180°方向中性子収量 (TTNY)をもとにPHITSによって評価した結果、および放射化法(金箔)による結果は**良く一致を示した**。

○ 1MeVの準単色中性子源($2.7 \times 10^7 [\text{/cm}^2] @ 1 \text{MW}$ 運転)として利用可能。

○ 今後、材料照射試験や半導体ソフトエラー試験への利用が期待される。

⇒ 本結果を用いて、ハドロン実験(COMET等)に用いる検出器のソフトエラー試験を行う計画も存在する。