

J-PARC・MLF 水銀標的からの熱中性子領域における 180 度方向 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^{#, A)}, 明午伸一郎^{B)}, 岩元大樹^{B)}
Shoichi Inoue^{#, A)}, Shinichiro Meigo^{B)}, Hiroki Iwamoto^{B)}
^{A)} Nagaoka University of Technology
^{B)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In Nuclear Transmission Division, J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), it has plan to conduct an experiment such as soft error test using spallation neutrons at an angle of 180° from the J-PARC・MLF mercury target. In light of this, measurement and evaluation of Thick Target Neutron Yield (TTNY) at an angle of 180° for the J-PARC・MLF mercury target induced by 3 GeV protons is essential. In this study, we measured Thick Target Neutron Yield (TTNY) at an angle of 180° in thermal neutron region and evaluated this by radioactivation methods using ¹⁹⁷Au foil. At the results, Thick Target Neutron Yield (TTNY) at an angle of 180° obtained by measurement show the evaporation spectrum with a peak at 1 MeV and thermal neutrons which may be caused by thermalization of scattering in shielding zone near the mercury target. In addition, measurement data was evaluated by radioactivation methods quantitatively. We are firmly convinced that this data must make a major contribution to an experiment using spallation neutrons at an angle of 180° in J-PARC・MLF.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター核変換ディビジョンでは、大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC)において、Fig. 1 に示すように RCS(Rapid Cycling Synchrotron)からの 3 GeV 陽子ビームを物質・生命科学実験施設(Material and Life Science Experimental Facility, MLF) の中性子生成用水銀標的へ照射した際に核破砕反応によって発生する180°方向中性子を使用した、半導体ソフトウェア試験や材料照射試験、遮蔽設計のための核データ測定、

医療用 RI 製造に代表される様々な中性子利用実験の実施を計画している。これに向けて、MLF 水銀標的からの180°方向中性子収量(Thick Target Neutron Yield, TTNY)に関する精密な測定および評価が非常に重要となる。

本研究では、J-PARC・MLF 水銀標的への 3 GeV 陽子ビーム照射による、1 MeV 以下の特に熱中性子領域における180°方向中性子収量(TTNY)の測定を飛行時間分析(Time of Flight, TOF)法によって実施し、さらに測定結果のうち熱中性子(25 meV)に注目して¹⁹⁸Au 箔を用いた放射化法による測定結果の定量的評価を実施した。

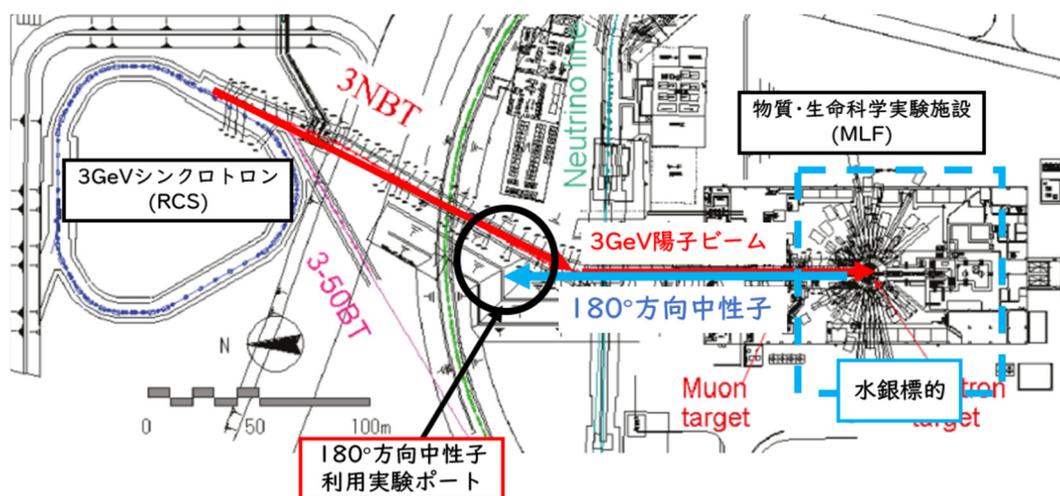


Figure 1: Overall layout.

[#] s221010@stn.nagaokaut.ac.jp

0.8 MeV 以上の高エネルギー領域における180°方向中性子収量(TTNY)については、先行研究においてNE213シンチレーション検出器を用いたTOF法によって既に測定し、In箔やNb箔を用いた放射化法による測定結果の定量的評価を実施済みである[1]。

2. 実験方法

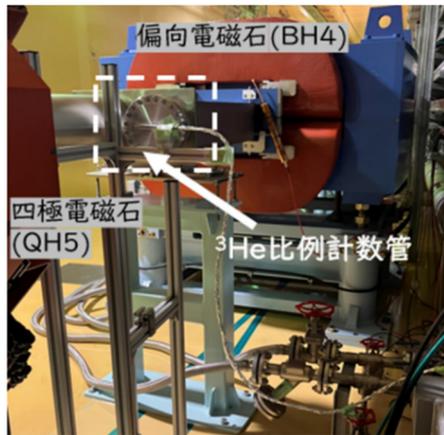
2.1 180°方向中性子収量(TTNY)の測定結果

2.1.1 測定の概要

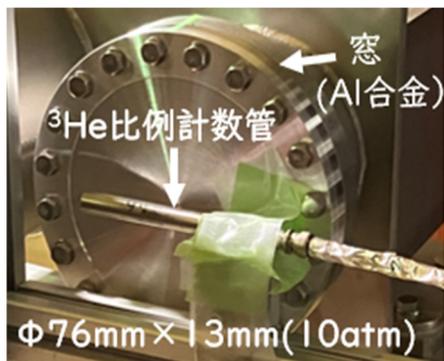
180°方向中性子収量(TTNY)の測定は、水銀標的より126m上流に設置した中性子利用実験ポートにて実施した。測定対象の中性子エネルギー領域が1 MeV以下の特に熱中性子領域であるため、核反応断面積が $1/v$ 則に従う ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応による ${}^3\text{He}$ 比例計数管を検出器として使用した。水銀標的からみた検出器の立体角 $\Delta\Omega[\text{sr}]$ は、

$$\Delta\Omega = \frac{0.076 \times 0.013}{(126.4)^2} \approx 6.18 \times 10^{-8} \quad (1)$$

であった。中性子利用実験ポートにおいて構築した180°方向中性子収量(TTNY)測定における測定系の全体像および検出器の配置について Fig. 2 に、測定回路を Fig. 3 にそれぞれ示す。



(a) 180° neutrons experiment port



(b) ${}^3\text{He}$ proportional counter

Figure 2: The whole measuring system of TTNY.

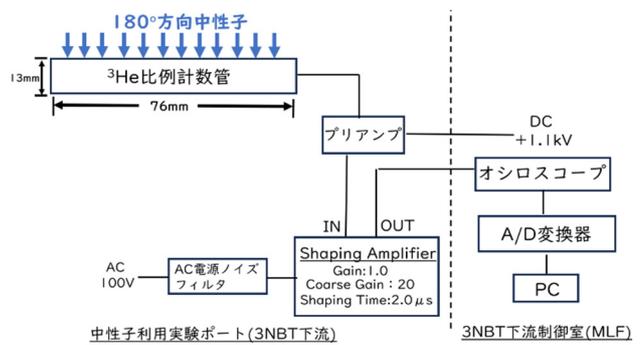


Figure 3: Measurement circuit with ${}^3\text{He}$ proportional counter.

中性子の飛行時間 $\Delta t[\text{ns}]$ からエネルギー $E_n[\text{MeV}]$ への変換については、古典力学に基づき以下の数式(2)を使用した。

$$E_n = \left(\frac{72.4 \times 126.4}{\Delta t} \right)^2 \quad (2)$$

2.1.2 MLF 水銀標的への入射陽子ビームに関する条件

MLF 水銀標的へ照射する 3 GeV 陽子ビームの条件を以下の Table 1 に示す。測定中においては、水銀標的から約 30 m 上流においてカスケード状に配置されているミュオン生成用黒鉛回転標的、および 3 GeV 陽子ビーム輸送施設(3NBT)ビームラインの各所においてビームプロファイル測定のため配置されている MWPM (Multi-wire profile monitor)については、陽子ビームダクトから待避させた。

Table 1: Terms of Proton Beam from RCS

Proton beam energy	3 GeV
Proton beam repetition frequency	1.7 Hz
Irradiation time to mercury target (Measurement time)	1hour 46minutes 32seconds
Number of protons per 1 shot	1.48×10^{10}
Chopping width of intermediate pulse	80 ns

本測定では、熱中性子の飛行時間を考慮するため、RCS からの 3 GeV 陽子ビームにおける繰り返し周波数について、MLF 利用運転時の 25 Hz よりも小さい 1.7 Hz とした。Figure 4 に、横軸を中性子の飛行時間 $\Delta t[\text{ns}]$ とし、縦軸を中性子の運動エネルギー $E_n[\text{MeV}]$ として、中性子の飛行時間と運動エネルギーの関係について古典力学(数式(2))および相対論力学の双方において計算した際の結果を示す。Figure 4 の結果より、陽子ビームの繰り返し周波数 1.7 Hz (周期:0.58 s) の条件において、測定対象である熱中性子から 1 MeV 付近にいたるまで問題なく測定できることが分かる。

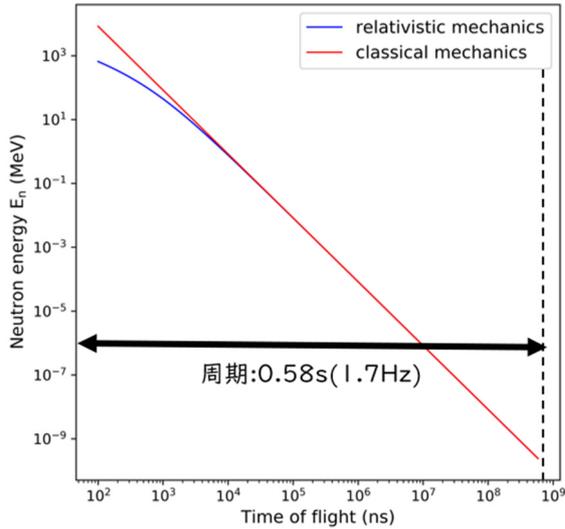


Figure 4: Relationship between Time of flight and neutron energy.

2.1.3 180°方向中性子収量(TTNY)の導出

^3He 比例計数管によって得られた180°方向中性子におけるカウント数のエネルギースペクトルをもとに、以下の数式(3)を用いて180°方向中性子収量(TTNY)を導出した。ここで、 ^3He 比例計数管の全吸収ピーク(765 keV)におけるカウント数を N 、水銀ターゲットに入射した陽子の総数を n_p (=1 ショットあたりの陽子数×繰り返し周波数×測定時間)、エネルギービンのレサジー幅を Δu (=0.5)、水銀標的からみた ^3He 比例計数管の立体角 $\Delta\Omega$ (= 6.18×10^{-8} sr)、 ^3He 比例計数管の全吸収ピーク(765 keV)における検出効率を ε 、および 180°方向中性子収量を $TTNY$ [1/sr/lethargy/proton]とした。

$$TTNY = \frac{N}{\Delta\Omega\Delta u} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{n_p} \quad (3)$$

2.2 放射化法による180°方向熱中性子反応率の測定

測定した180°方向中性子収量(TTNY)の妥当性評価のため、熱中性子(25meV)に注目して ^{197}Au 箔を用いた放射化法による測定結果の定量的評価を実施した。

^{197}Au は熱中性子捕獲断面積が 2.5×10^4 bと非常に大きく、 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ 反応によって生成される ^{198}Au が99.8%の確率で β^- 崩壊することによって生成する ^{198}Hg から放出される即発 γ 線(411 keV)の強度を測定することによって、中性子反応率を調べることができる。さらに、同一の照射条件かつ測定条件において、 ^{197}Au 箔単体(裸の状態)における中性子反応率の結果から、 ^{197}Au 箔を熱中性子吸収効率の良い遮蔽体である炭化ホウ素(B_4C)ブロックによって覆った試料における中性子反応率の結果を差し引くことで、熱中性子反応率を調べることができる。

中性子利用実験ポートでの放射化法を用いた180°方向熱中性子反応率測定について、測定試料(^{197}Au 箔)の配置を Fig. 5 に、使用した ^{197}Au 箔のサイズおよび質量を Table 2 にそれぞれ示す。Figure 5 について、写真

左が B_4C ブロックによって覆われた遮蔽体ありの測定試料(^{197}Au 箔)であり、写真右が遮蔽体のない裸状態の測定試料(^{197}Au 箔)である。

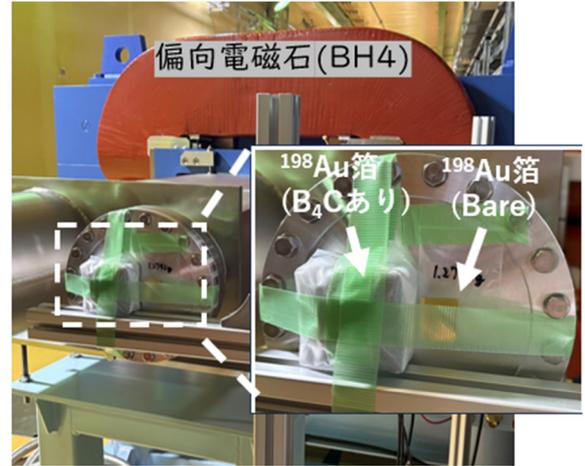


Figure 5: The whole measuring system of radioactivation method.

Table 2: Size and Mass of ^{197}Au Foil

	Measurement sample (^{197}Au foil)	
	Bare	With B_4C
Mass[g]	1.2742	1.2321
L × W × D[mm]	25 × 25 × 0.1	

本測定において、MLF水銀標的に入射する3 GeV陽子ビームの平均出力は 105 kW であり、繰り返し周波数は MLF 利用運転時と同じ 25 Hz とした。また、測定時間は約 6.6 日であった。

測定試料(^{197}Au 箔)から放出される即発 γ 線(411 keV)のピーク強度(カウント数)をゲルマニウム半導体検出器によって測定し、以下の数式(4)を用いて180°方向熱中性子反応率を導出した[2]。ここで、 γ 線のピーク強度(カウント数)を C 、 ^{198}Au の崩壊定数を λ [1/s]、測定試料(^{197}Au)の原子番号を N_{tar} 、ゲルマニウム半導体検出器での計測時間 t_m [s]、照射終了後からの冷却時間を t_c [s]、照射係数を F_{irr} 、 γ 線の分岐比を I 、およびゲルマニウム半導体検出器における γ 線の全吸収ピークにおける検出効率を ε とした。

$$RR = \frac{C\lambda}{N_{\text{tar}}F_{\text{irr}}e^{-\lambda t_c}(1 - e^{-\lambda t_m})I\varepsilon} \quad (4)$$

照射係数 F_{irr} については、サンプリング時間 Δt [s]、 $n\Delta t$ から $(n+1)\Delta t$ 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を $I_p(n\Delta t)$ 、照射開始時間[s]を t_s 、および照射終了時間 t_f [s]として、以下の数式(5)および(6)を用いて導出した[2]。

$$F_{\text{irr}} = \sum_{n=0}^{N-1} I_p(n\Delta t)(1 - e^{-\lambda\Delta t})e^{-\lambda\{t_f - (n+1)\Delta t\}} \quad (5)$$

$$N = \frac{t_f - t_s}{\Delta t} \quad (6)$$

3. 測定結果

3.1 180°方向中性子収量(TTNY)の測定結果

3.1.1 波高分布および180°方向中性子カウント数

³He 比例計数管による測定において得られた波高分布を Fig. 6 に、および ³He 比例計数管によって得られた 180°方向中性子カウント数のエネルギースペクトルを Fig. 7 にそれぞれ示す。

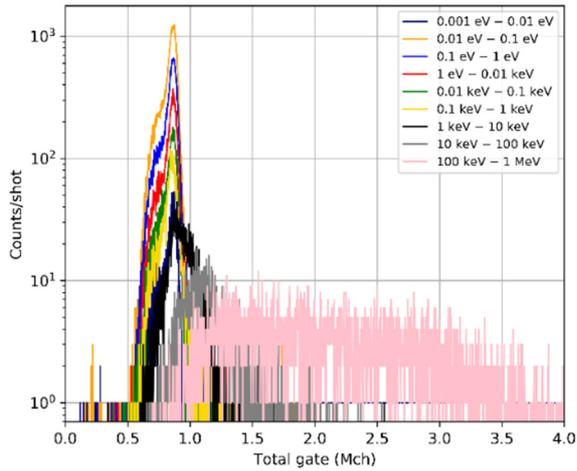


Figure 6: Wave height distribution.

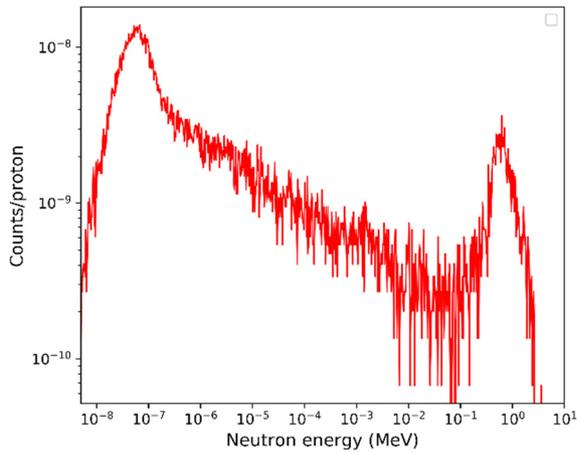


Figure 7: The number of 180° neutrons from ³He counter.

3.1.2 全吸収ピークにおける180°方向中性子カウント数

³He 比例計数管によって得られた180°方向中性子カウント数のエネルギースペクトル (Fig. 7) より、データ解析ソフト ROOT を使用してレサジー幅 0.5 のエネルギービン毎ごとにガウスフィッティングを行い、フィッティングした領域を積分することで、³He 比例計数管の全吸収ピーク (765 keV) におけるカウント数 N のエネルギースペクトルを導出した。この結果を Fig. 8 に示す。

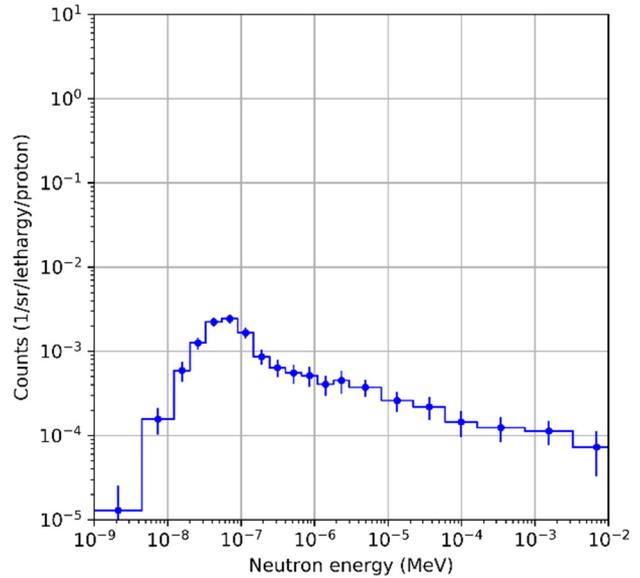


Figure 8: The number of 180° neutrons full absorption peak.

3.1.3 全吸収ピーク(765 keV)における検出効率εの導出

本測定で使用した ³He 比例計数管の全吸収ピーク (765 keV) における検出効率εについて、放射線挙動解析コード PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)[3]を使用して各中性子エネルギーについて単色中性子源を仮定し、入射中性子数と全吸収ピークにおけるイベント数との比を計算することによって導出した。

全吸収ピーク(765 keV)における検出効率εの結果について Fig. 9 にそれぞれ示す。

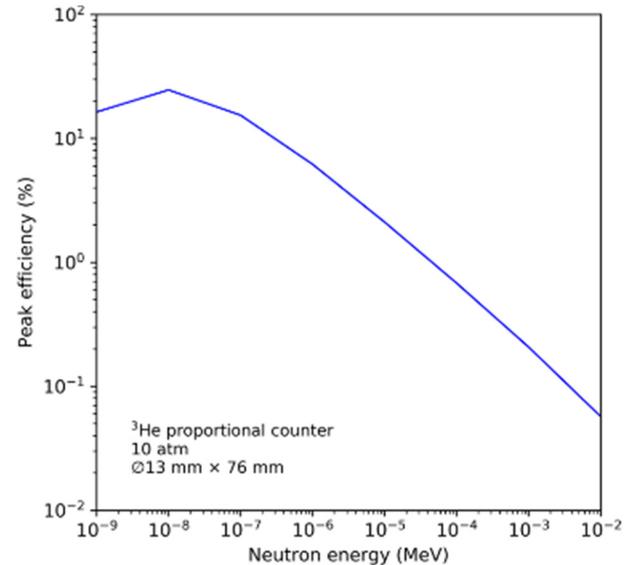


Figure 9: Detection efficiency in the ³He counter sensitive region.

Figure 9 の結果より、横軸である中性子エネルギーに対して縦軸である吸収ピーク(765 keV)における検出効率εについて、熱中性子領域(10⁻⁸ MeV)において極大

値をとっており、熱中性子を境に右側は $1/v$ 則に従っていることが確認できる。

3.1.4 180°方向中性子収量(TTNY)の導出

得られた ^3He 比例計数管の全吸収ピーク(765 keV)におけるカウント数 N のエネルギースペクトルについて、検出効率 ϵ によって補正することによって180°方向中性子収量(TTNY)の導出を行った。この結果を Fig. 10 に示す。ここで、Fig. 10 には本研究において測定したデータと併せて、先行研究での 0.8 MeV 以上の領域におけるデータについても掲載している[1]。

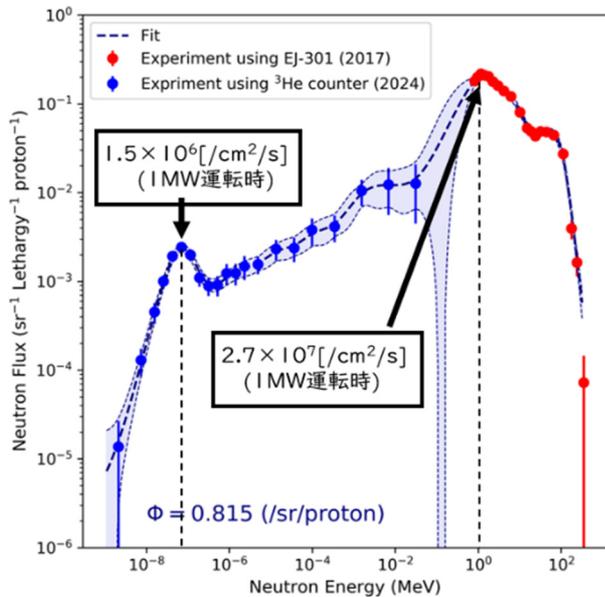


Figure 10: Thick Target Neutron Yield (TTNY) at an angle of 180° [1].

Figure 10の結果より、180°方向中性子収量(TTNY)の測定結果は高エネルギー陽子入射核破砕反応によって放出される中性子のスペクトルとして広く知られている、1 MeV 付近にピークを有する蒸発スペクトルと良く一致していた。一方で、3 GeV 陽子ビームの入射方向に対して180°方向中性子は後方散乱となるため、中性子エネルギーは最大でも 500 MeV であった。

また、熱中性子において明確なピークが確認できた。これについて、核破砕反応によって発生した水銀標的付近での遮蔽体等による散乱によって熱化した可能性が高いと考えている。

3.2 放射化法による180°方向熱中性子反応率の結果

測定した180°方向中性子収量(TTNY)の妥当性評価のため、熱中性子(25 meV)に注目して ^{197}Au 箔を用いた放射化法による測定結果の定量的評価を実施した結果について Table 3 に示す。ここで、180°方向中性子収量(TTNY)の測定値については PHITS を使用して180°方向熱中性子反応率に換算した。

Table 3 より、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と放射化法(^{197}Au 箔)による結果は良く一致していた。

Table 3: The Results of Radioactivation Experiment

	Reaction Rate [1/atom/proton]
^{197}Au foil	7.53×10^{-33}
180°TTNY	6.69×10^{-33}

4. まとめと今後の展望

本研究において、J-PARC・MLF 水銀標的に 3 GeV 陽子ビームを照射した際の熱中性子領域から 10^{-2} MeV までの180°方向中性子収量(TTNY)の測定を行い、測定結果のうち熱中性子(25 meV)に注目して ^{198}Au 箔を用いた放射化法による測定結果の定量的評価を実施した。

得られた180°方向中性子収量(TTNY)については、1 MeV 付近にピークを有する蒸発スペクトルであり、熱中性子において明確なピークが確認された。これについて、核破砕反応によって発生した水銀標的付近での遮蔽体等による散乱によって熱化した可能性が高いと考えており、PHITS 等の放射線挙動解析コードを用いた数値計算によって上記に関する考察を今後実施する予定である。

また、180°方向熱中性子反応率について、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と放射化法(^{197}Au 箔)による結果は良く一致しており、本研究において測定した180°方向中性子収量(TTNY)について妥当性を示すことができた。

以上の結果より、180°方向中性子利用実験ポートについて 1 MeV 準単色中性子源(陽子ビーム平均出力 1 MW において 2.7×10^7 [1/cm²])としての利用が可能であり、材料照射試験や半導体ソフテラー試験等の中性子利用実験への応用が期待される。また、ハドロン実験 (COMET 等)で用いる検出器のソフテラー試験を行う計画も存在する。

謝辞

本研究を実施するにあたって、学生実習生として受け入れていただき、終始ご指導およびご鞭撻を賜った日本原子力研究開発機構 J-PARC センター核変換ディビジョンの明午 伸一郎氏、岩元 大樹氏および前川 藤夫氏に深く御礼申し上げます。また、実験においてご協力いただいた株式会社日本アクシスの平野 幸則氏および株式会社 NAT の堤 和昌氏に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [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. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.09.012>
- [2] Y. Kasugai *et al.*, “Measurement of High-energy Neutron Fluxes and Spectra around the J-PARC Mercury Spallation Neutron Target using Multi-foil Activation Method”, AEA-Data/Code 2015-033.
- [3] T. Sato *et al.*, “Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33”, Journal of Nuclear Science and Technology Volume 61, 2024. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>