

話題・解説 (I)

2022 年度核データ部会賞

奨励賞

–345 MeV/u ^{238}U と Cu との反応で発生する中性子収量測定–

高エネルギー加速器研究機構

共通基盤研究施設放射線科学センター

杉原 健太

kenta.sugihara@kek.jp

1. 緒言

近年、大強度加速器の応用が、医療分野 [1]・核変換 [2]・新しい原子核の生成 [3] などに広がっている。日本で有名な加速器施設の一つに、理化学研究所が挙げられる。理化学研究所 Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) [4] では、超伝導リングサイクロトロン [5] を通して、 ^{48}Ca 、 ^{86}Kr 、 ^{136}Xe 及び ^{238}U などの重イオンビームを核子あたり 345 MeV (以下、MeV/u) のエネルギーで供給する [6]。これら大強度重イオンビームにより、様々な RI ビームを生成し、原子核物理学の実験を行なっている [7, 8, 9]。以下、 ^{238}U ビームに焦点を当てる。RIBF のビームラインを図 1 に示す。RIBF では、図 1 内の “Target” と記された箇所の F0 チェンバー内に設置したベリリウム標的に ^{238}U ビームを照射し、RI ビームを生成している。 ^{238}U ビームは標的を通り抜けた後に銅 (Cu) ビームダンプ内で止まる。これらの核反応により、ベリリウム標的と Cu ビームダンプ周囲は高線量率領域となっている。

RIBF を含む大強度加速器施設において、作業従事者や近隣住民への法令限度を超える被ばくを防ぐために放射線遮蔽設計が重要になる。荷電粒子に対しては、遮蔽材との間で生じる電磁相互作用により比較的容易に遮蔽可能である。そのため、非荷電粒子、特に透過能が最も高い高エネルギー中性子の遮蔽が重要である。大強度加速器施設では遮蔽の評価精度が低い場合、巨大遮蔽の高コスト化や運営上の様々な困難を引き起こす。そのため、使用反応により発生する中性子のエネルギー・角度分布 (線源項) の実測データが必要である。RIBF 設計時において、高線量率領域の遮蔽設計は Moyer モデル [10] により実装された。Moyer モデルにおいて、345 MeV/u ^{238}U ビーム入射による中性子の線源項が必要であったが、345 MeV/u ^{238}U ビーム入射の過去の報告例はなく、Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) における 1 GeV/u ^{238}U ビームと鉄の反応で発生する 0° から 15° までの中性子線源項 [11] のみが報告されていた。GSI での測定結果は前方方向のみであり、地下施設である RIBF にお

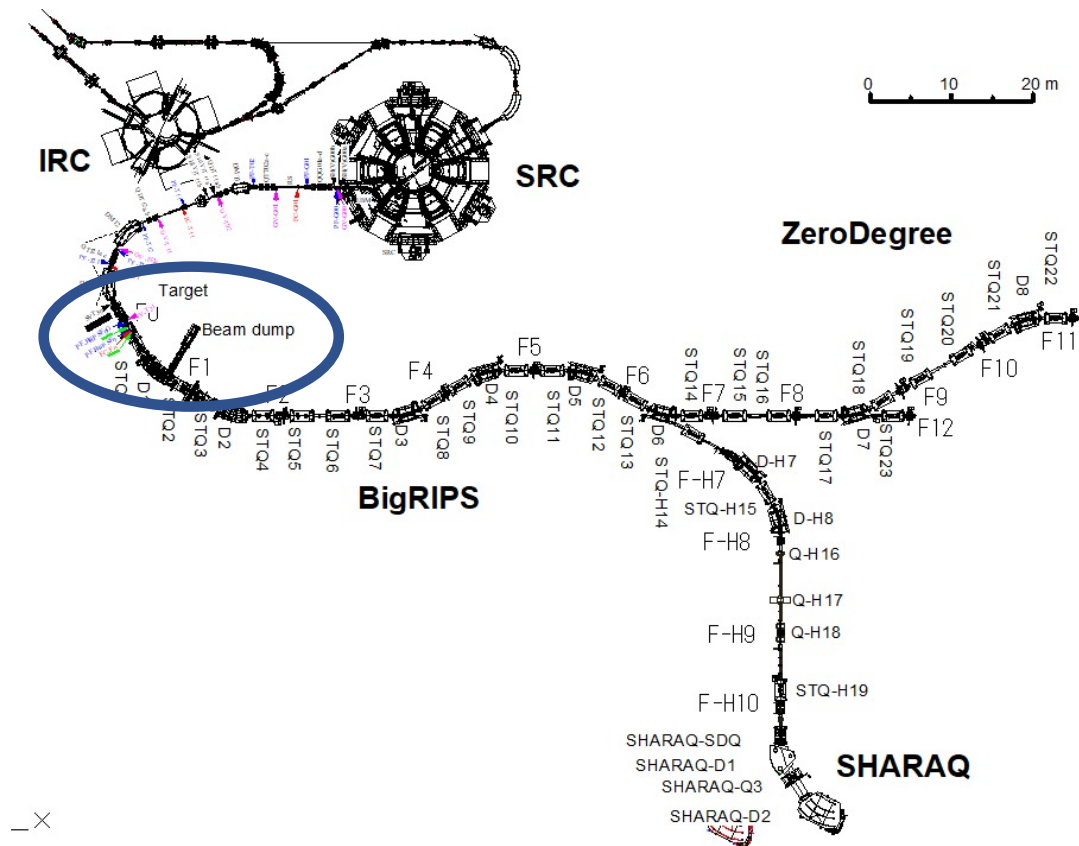


図 1 RIBF のビームライン

いては地上方向 (90°) のデータが必要なため、GSI の測定データではなく、他のデータ [12] の外挿で線源項を評価した。そのため、線源項に不確かさが残存している。

現在、 ^{238}U ビームの運転電流は 70 p nA で、許可値は 300 p nA である。RIBF ではこの許可値を $1\ \mu\text{A}$ まで大強度化する将来計画がある。この際に遮蔽の最適化が必要となるが、上述したように線源項に不確かさがあり、実測値が望まれている。

近年計算機の性能向上に伴って、理論に基づいた核反応モデルにより線源項予測が可能になっている。 ^{238}U ビーム入射においては、PHITS[13] と Geant4[14, 15, 16] に組み込まれている JQMD[17] と G4QMD[18] が利用可能である。しかしながら、核反応モデル計算がどの程度現実を反映しているのかについては実測値がなければ検証不可能である。

そこで本研究の目的は、 $345\ \text{MeV/u}$ ^{238}U ビームと Cu との反応で生成する中性子二重微分収量 (Thick Target Yield: TTY) を 0° 、 45° 及び 90° 方向で測定すること、JQMD と G4QMD 結果と実測値を比較することによりベンチマーク検証すること、これら 2 点とした。

2. 実験

実験は RIBF の ZeroDegree Spectrometer[19] で行った。実験体系を図 2 に示す。

^{238}U ビームの入射エネルギーは $345\ \text{MeV/u}$ と設定した。強度は $10^6\ \text{pps}$ とした。 $345\ \text{MeV/u}$

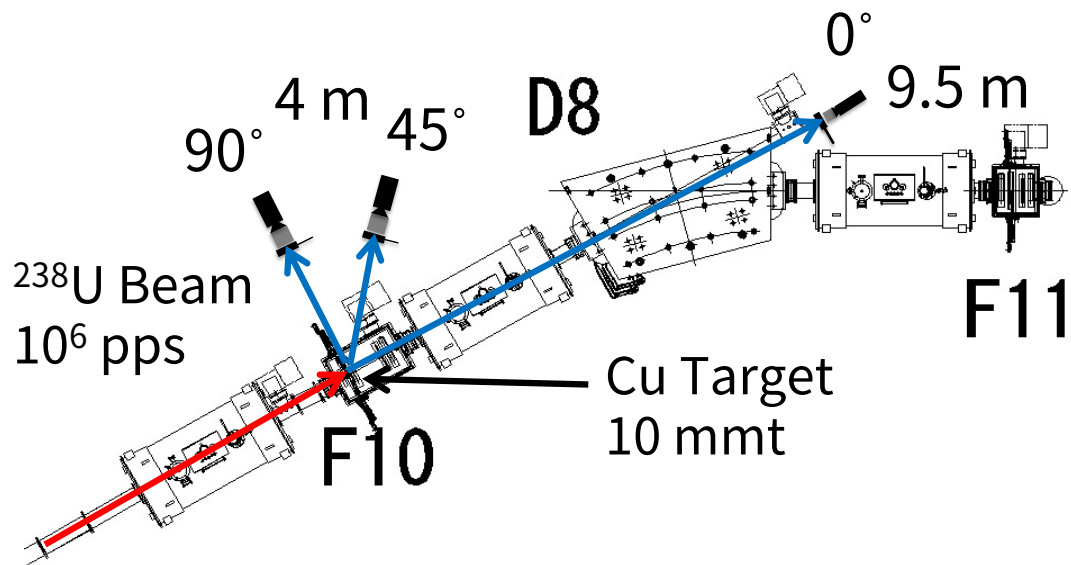


図 2 実験体系 [20]

^{238}U ビームの Cu 中での飛程は、Bethe-Bloch の式から 3.3 mm と求まる。そのため ^{238}U ビームを確実に止めるために、Cu 標的の厚さを 10 mm と設定した。

核反応で発生した中性子は 0° 、 45° 及び 90° に設置した有機液体シンチレータで測定した。飛行距離は 0° 方向で 9.5 mm、 45° 及び 90° 方向で 4 m であった。中性子の運動エネルギーは飛行時間法で決定した。加速器の RF 信号が 18.5 MHz と大きいので、入射ビームは 54 nsec 周期で入射した。そのため、本測定における測定可能最低エネルギーは表 1 の通りであった。また、荷電粒子イベントを除去するために、各シンチレータの前面にプラスチックシンチレータを設置した。

表 1 各角度における本測定での測定可能最低エネルギー (E_{min})

	E_{min} [MeV]
0°	130
45°	40
90°	40

加えてバックグラウンドイベント除去のために、1 m 厚さの鉄を各検出器の前面に設置した測定も行った。

3. 結果

解析については参考文献 [21] に記してある通りである。本測定により得られた中性子生成 TTY、JQMD 結果及び G4QMD 結果の比較を図 3 に示す。

図 3 において、黒三角が実験結果、赤線が JQMD 結果、青線が G4QMD 結果を示している。 0° において、準弾性散乱ピークが 300 MeV 付近に現れていることがわかる。また、この

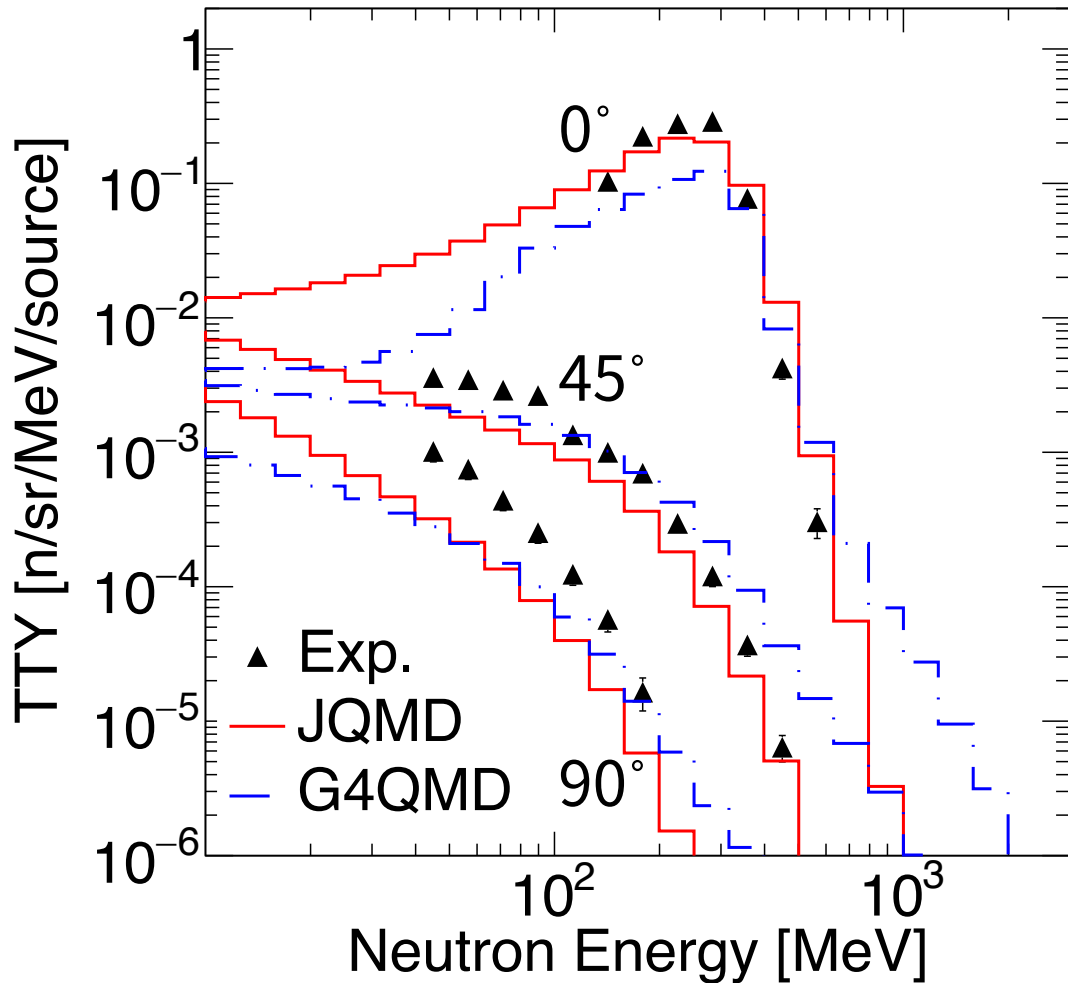


図3 345 MeV/u ^{238}U と Cu との反応による中性子生成 TTY の実測値、JQMD 及び G4QMD 結果の比較 [22]

ピーク領域に対して、JQMD の方が G4QMD よりも実験結果を再現していることがわかる。また、45° 方向に対して、JQMD は実験データを測定できたエネルギー範囲において、実験データを過小評価していることがわかった。対して、G4QMD では 100 MeV 以上の実験データを過大評価する傾向にあることがわかった。また、90° 方向では、どちらの QMD 計算も実験データを過小評価する傾向にあることがわかった。上述したように、RIBF は地下施設なので、地上方向である 90° 方向の過小評価傾向が示されたことは非常に重要な結果である。

図 3 を実験データが測定できた範囲内で積分した結果を図 4 に示す。0° 方向の値が大きく、前方性が強いことがわかる。各角度における C/E を表 2 に示す。0° 方向では、JQMD で 15% 程度の過小評価、G4QMD で 50% 程度の過小評価となった。45° 方向では、逆の結果が得られた。また、90° 方向では大差なし、という結果が得られた。全中性子生成量に対して、0° 方向の寄与が一番大きいので JQMD の方が G4QMD よりも実験データ再現性が良いという結論が得られた。

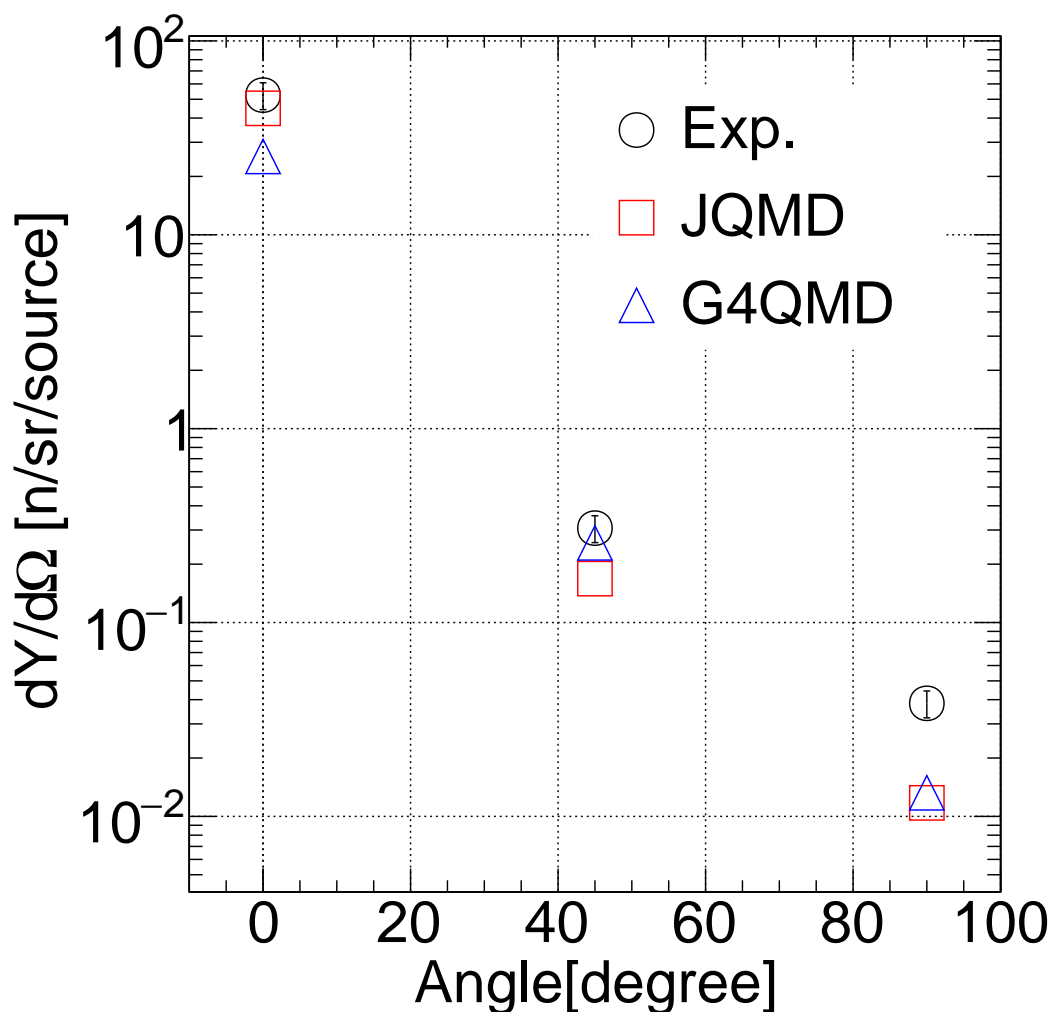


図 4 345 MeV/u ^{238}U と Cu との反応による中性子生成 TTY 角度分布の実測値、JQMD 及び G4QMD 結果, の比較 [23]

	0°	45°	90°
JQMD	85%	55%	30%
G4QMD	50%	82%	30%

4. 結言

本研究において、345 MeV/u ^{238}U ビームと Cu との反応による中性子生成 TTY を 0°、45° 及び 90° 方向で測定した。また、JQMD と G4QMD の計算結果と実測値を比較することによりベンチマーク検証を行った。0° 方向の比較において、JQMD と G4QMD はそれぞれ実験データを 15%、50% 程度過小評価することがわかった。また 90° 方向の比較において、両計算結果は実験データを 70% 過小評価することがわかった。これらのデータは、RIBF の将来的な大強度化に対して非常に有益なデータとなる。

5. 謝辞

研究を遂行するにあたり、共同研究者である九州大学執行信寛博士、理化学研究所仁科加速器科学研究センター安全業務室田中鐘信博士、赤塩敦子氏には並々ならぬご尽力を賜りました。この場を借りて心より感謝申し上げます。本実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センターと東京大学原子核研究センターで共同運営される RIBF で行いました。ビームを供給頂いた加速器基盤研究部を始めとする、ご協力頂いた皆様に深く御礼申し上げます。本研究の計算結果は、理化学研究所が有するスーパーコンピュータを使わせていただきました。この場を借りて改めて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Feng, *et al.*: Nucl. Med. Biol., 100 (2021).
- [2] K. Tsujimoto, *et al.*: J. Nucl. Sci. Technol., 41:1, 21-36.
- [3] K. Morita, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn., 81 (2012), 103201.
- [4] Y. Yano: Nucl. Instr. Meth., B261 (2007), 1009-1013.
- [5] <https://www.nishina.riken.jp/facility/SRC.html>
- [6] <https://www.nishina.riken.jp/ribf/accelerator/tecinfo.html>
- [7] M. Tanaka, *et al.*: Phys. Rev. Lett., 124 (2020), 102501.
- [8] R. Taniuch, *et al.*: Nature, 569 (2019), 53-63.
- [9] S. Bagchi, *et al.*: Phys. Rev. Lett., 124 (2020), 222504.
- [10] B. J. Moyer, in Proc. 1st Int. Conf. Shielding around High Energy Accelerators, Presses Universitaires de France, Paris 65 (1962).
- [11] O. Yordanov, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B240 (2005), 863-870.
- [12] T. Kurosawa, *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 37(sup1) (2000), 135-141.
- [13] T. Sato, *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 55 (2018), 684-690.
- [14] S. Agostinelli, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A506 (2003), 250-303.
- [15] J. Allison, *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci. 53 (2006), 270-278.
- [16] J. Allison, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A835 (2016), 186-225.
- [17] K. Niita, *et al.*, Phys. Rev. C. 52, 2620 (1995), 2620-2635.
- [18] K. Tatsumi, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010).

- [19] T. Kubo, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 2012, 03C003.
- [20] Reprinted from Nucl. Instr. Meth., B/512, K. Sugihara, *et al.*, "Measurement of neutron energy spectra of 345 MeV/u ^{238}U incidence on a copper target"/"Experiment", Page 103, Copyright (2022), with permission from Elsevier.
- [21] K. Sugihara, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B512 (2022), 102-107.
- [22] Reprinted from Nucl. Instr. Meth., B/512, K. Sugihara, *et al.*, "Measurement of neutron energy spectra of 345 MeV/u ^{238}U incidence on a copper target"/"Results and discussion", Page 106, Copyright (2022), with permission from Elsevier.
- [23] Reprinted from Nucl. Instr. Meth., B/512, K. Sugihara, *et al.*, "Measurement of neutron energy spectra of 345 MeV/u ^{238}U incidence on a copper target"/"Results and discussion", Page 106, Copyright (2022), with permission from Elsevier.