

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14916

研究課題名（和文）180度方向中性子エネルギースペクトルの測定と核破砕反応モデルの改良

研究課題名（英文）Measurement of neutron energy spectrum at 180 degrees and improvement of spallation model

研究代表者

岩元 大樹 (Iwamoto, Hiroki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：50589744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：大強度陽子加速器施設J-PARCにおいて、3 GeVに加速された陽子ビームを水銀標的に照射し、ビーム進行方向から180度方向に放出される中性子のエネルギースペクトルを測定した。実験で得られたエネルギースペクトルの測定値は、放射線挙動解析コードPHITSに組み込まれている最新の核反応モデルによる解析値とよく一致することを明らかにした。さらに、高エネルギー核分裂に関する核反応モデルを新たに提案し、これをPHITSに組み込んだ。実験値との比較の結果、提案したモデルは実験値を従来モデルよりも精度良く再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、高エネルギー陽子ビームを核破砕標的に入射させたときに発生する中性子の情報を定量的に測定でき、核反応モデルによる解析結果の妥当性を示すことができた。この成果は、高エネルギー加速器を用いた核破砕中性子源の遮蔽設計の高度化及び加速器駆動核変換システムの研究開発に貢献するものである。さらに、新たに提案した核反応モデルは、高エネルギー核分裂反応で発生する放射性核種の収量予測の精度向上に貢献する。

研究成果の概要（英文）：At the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), we measured the energy spectrum of neutrons emitted from a mercury target irradiated by a proton beam accelerated to 3 GeV in the direction 180 degrees from the beam direction. The measured energy spectrum was found to be in good agreement with that obtained by the latest nuclear reaction model incorporated in the particle transport code PHITS. In addition, a new nuclear reaction model for high-energy fission was proposed and incorporated into PHITS. As a result of comparison with the experimental data, it is shown that the proposed model can reproduce the experimental data more accurately than the conventional model.

研究分野：原子力

キーワード：核破砕反応 核破砕中性子 核反応モデル 高エネルギー核分裂

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器施設や核破砕中性子源施設の遮蔽設計及び加速器駆動核変換システムの研究開発では、高エネルギーの陽子ビームと標的原子核との核反応(核破砕反応)を記述する核反応モデルが重要な役割を演じる。核破砕反応によってビーム進行方向から 180 度方向に放出される中性子(180 度中性子)は、施設の遮蔽設計に大きなインパクトを与えるが、数 GeV の高エネルギー陽子入射による 180 度中性子に関する実験データは当時存在していなかった。そのため、180 度中性子に対する核反応モデルの予測精度に関する実験的な検証が強く望まれていた。一方、施設の遮蔽解析に広く用いられる当時最新の核反応モデルは、核破砕反応による核種の生成量を精度よく予測できないことが、過去に実施されたベンチマークテスト¹⁾により指摘されていた。そのため、上記の実験データの取得とともに核反応モデルの高度化も望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、大強度陽子加速器施設 J-PARC の 3 GeV 陽子ビームを用いて、物質生命科学実験施設 MLF²⁾ に設置された水銀標的から核破砕反応によって放出される 180 度中性子のエネルギースペクトルを測定するとともに、測定結果を用いて加速器施設の遮蔽解析に用いられる放射線挙動解析コード PHITS³⁾ に組み込まれた最新の核反応モデルの予測精度の検証を行うことを目的とした。さらに、核種生成量の予測精度向上のための核反応モデルの改良も本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 180 度中性子エネルギースペクトルの測定

図 1 に、本測定の実験体系を示す。測定は J-PARC において、3 GeV に加速された陽子ビームを MLF の水銀標的に照射し、核破砕反応によって 180 度方向に放出される中性子を飛行時間(TOF)法によって測定した。中性子検出器には直径 0.8 cm 長さ 2 cm の小型の液体有機シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた液体有機シンチレーションカウンタを用い、水銀標的の先端部から 126.4 m 離れた位置に中性子検出器を設置して測定した。測定データの収集及び解析には、それぞれ FPGA 内蔵のデータ収集システム及びデータ解析ソフト ROOT⁴⁾を用いた。偏向電磁石の磁場漏れが測定に影響することが懸念されたため、中性子検出器を磁気シールドで覆った。

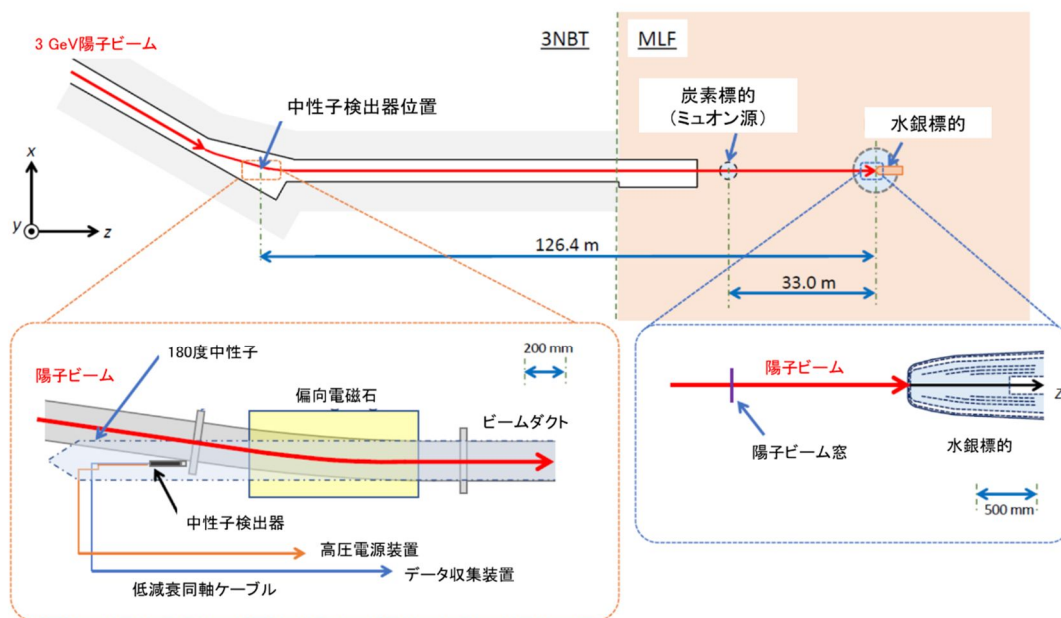


図 1 180 度中性子測定体系図(平面図)

測定では、標的から放出される中性子とともにガンマ線も検出されるが、中性子とガンマ線の発光応答の特性を利用してガンマ線の検出事象を取り除いた。中性子検出器の検出効率は、過去に行われた中性子エネルギースペクトル測定実験で使用実績のある検出器効率計算コード SCINFUL-R^{5,6)}を用いて評価した。TOF 法による測定では、キッカー電磁石の 25 Hz のタイミング信号をスタート信号として、水銀標的から放出される中性子が中性子検出器に到達するまでの飛行時間スペクトルすなわち TOF スペクトルを測定し、これを相対論的運動学により中性子の運動エネルギーに換算して中性子エネルギースペクトルを得た。

測定で得られたエネルギースペクトルを、放射線挙動解析コード PHITS に組み込まれている

現標準仕様の最新の核反応モデル INCL4.6/GEM^{7,8)}と旧標準仕様の核反応モデル Bertini/GEM^{9,8)}による解析結果と比較した。PHITS による解析では、図2に示すように、MLFの水銀標的を詳細に体系化したモデル¹⁰⁾を用いて、実験を可能な限り忠実に再現するように粒子輸送シミュレーションを行い、中性子検出器位置における中性子のエネルギースペクトルを求めた。

さらに、TOF法により求めた中性子エネルギースペクトルの妥当性検証のために、インジウム箔及びニオブウム箔を中性子検出器付近に設置して、それぞれの箔に対する中性子入射反応率を放射化法により求め、PHITSによる解析結果との比較を行った。

(2) 核反応モデルの改良

過去に実施されたベンチマーク¹⁾では、INCL4.6/GEMは、高エネルギー核分裂で生成される核種(核分裂片)の生成を大幅に過小評価することが指摘された。高エネルギー核分裂は、核破砕反応のプロセスの一つであり、脱励起プロセス計算コードGEMにより記述される。核分裂片生成量の過小評価は、脱励起プロセス計算における核分裂確率の記述に問題があると考え、核分裂確率の記述の改良を試みた。

核分裂確率の記述の改良では、核破砕反応のプロセスの一つである核内カスケードプロセスで生じた高励起原子核の情報を核内カスケードプロセス計算コードINCL4.6によって求め、これとProkofievが提案した核分裂断面積系統式¹¹⁾を組み合わせることで、核分裂確率を入射粒子及び標的核に対して統一的に記述できることを提案し、このモデルをGEMに組み込んだ。

4. 研究成果

(1) 180度方向中性子エネルギースペクトルの測定

図3に、測定及び解析により得られたエネルギースペクトルの比較の結果を示す。この結果から、INCL4.6/GEMによる解析値は、実験値とよく一致することがわかった。一方で、Bertini/GEMはエネルギースペクトルを過大に評価することがわかった。これらの結果は、放射化法によって得られた $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ 、 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 、 $^{93}\text{Nb}(n, 4n)^{90\text{m}+9}\text{Nb}$ 反応率の測定値と計算値との比較結果とも、測定及び核データの不確かさの範囲内で整合することが明らかとなった。これらの結果より、GeV領域における180度中性子のエネルギースペクトルに関する信頼性の高いデータを取得でき、PHITSに組み込まれている核反応モデルによる予測結果の妥当性を示すことができた¹²⁾。

(2) 核破砕反応モデルの改良

図4に、本研究で提案した手法と従来手法による高エネルギー核分裂断面積の解析値の比較を実験値とともに示す。従来手法では核分裂断面積を大幅に過小評価していたが、提案手法は、広範囲の入射エネルギー及び標的核にわたって、核分裂断面積の実験値を再現でき、核分裂片収量予測の過小評価も大幅に改善できることを示した。さらに解析により、予測精度のさらなる向上には、核内カスケードプロセスにおける高励起核種の記述の改良が重要であることを示した¹³⁾。

参考文献

- 1) Iwamoto, Y., et al., J. Nucl. Sci. Technol., **54** (2017) 617-635.
- 2) Takada, H., et al., Quant. Beam Sci. **1**(2) (2017) 8-1-8-26.
- 3) Sato, T., et al., J. Nucl. Sci. Technol. **55** (2018) 529-533.

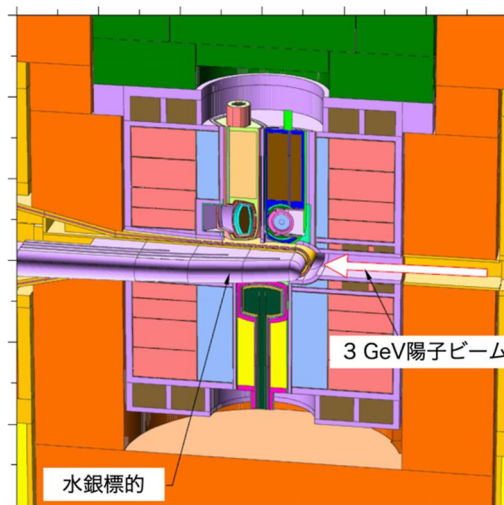


図2 PHITSの解析に使用したMLF水銀標的の幾何形状モデル

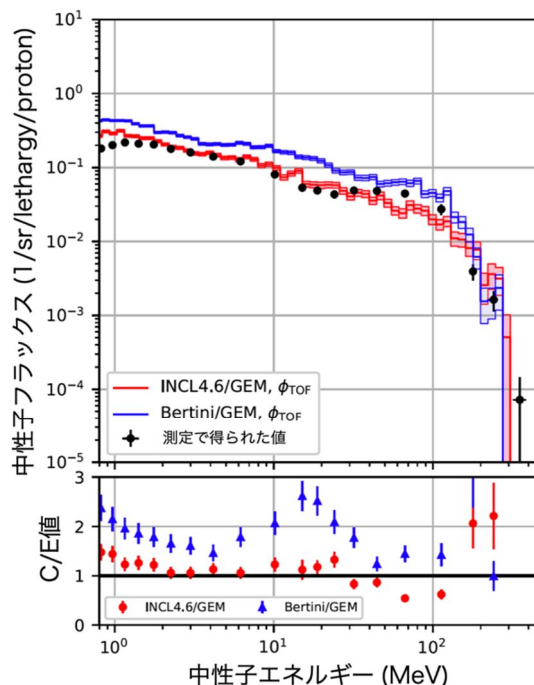


図3 測定及び解析により得られた中性子エネルギースペクトルの比較

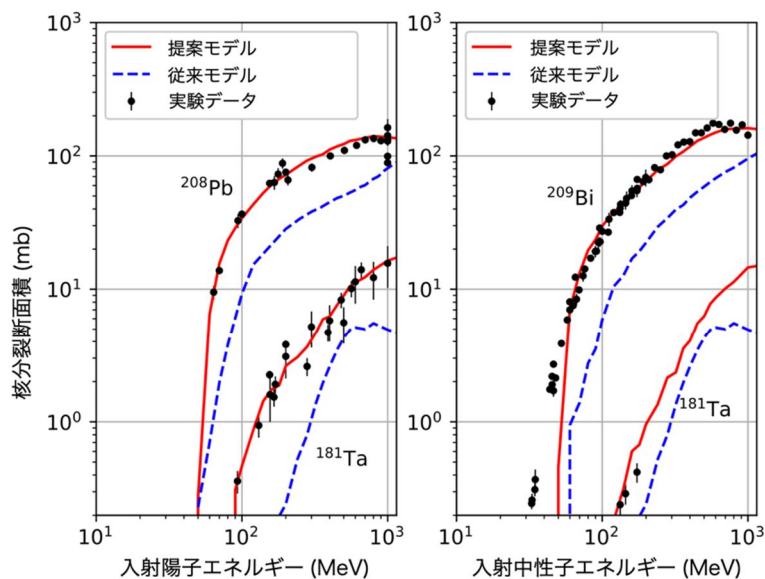


図4 陽子入射及び中性子入射核分裂断面積の比較

- 4) ROOT: Analyzing Petabytes of Data, Scientifically., <https://root.cern> (参照 2021 年 5 月).
- 5) Dickens, J.K., ORNL-6462, 1988, Oak Ridge National Laboratory (USA).
- 6) Meigo, S., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, **401** (1997) 365-378.
- 7) Boudard, A, et al., Phys. Rev. C, **87** (2013) 0146066.
- 8) Furihata, S., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, **171** (2000) 251-258.
- 9) Bertini, H., Phys. Rev. **188** (1969) 1711-1730.
- 10) Harada, M., et al., Nucl. Prog. Nucl. Sci. Technol., **2** (2011) 872-878.
- 11) Prokofiev A.V., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, **463** (2001), 557-575.
- 12) Matsuda, H., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, **483** (2020) 33-40.
- 13) Iwamoto, H., J. Nucl. Sci. Technol., **56** (2019) 160-171.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Iwamoto Hiroki、Meigo Shin-ichiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Unified description of the fission probability for highly excited nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 160 ~ 171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2018.1539351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwamoto Hiroki、Meigo Shin-ichiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Estimation of uncertainty in lead spallation particle multiplicity and its propagation to a neutron energy spectrum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 276 ~ 290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2019.1671912	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsuda Hiroki、Iwamoto Hiroki、Meigo Shin-ichiro、Takeshita Hayato、Maekawa Fujio	4. 巻 483
2. 論文標題 Measurement of thick target neutron yield at 180° for a mercury target induced by 3-GeV protons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 33 ~ 40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2020.09.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwamoto Hiroki、Meigo Shin-ichiro	4. 巻 33
2. 論文標題 Estimation of Uncertainty in Proton-induced Spallation Neutron Multiplicity for Pb, W, Fe, and C Targets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11046
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 松田 洋樹、明午 伸一郎、岩元 大樹
2. 発表標題 J-PARC MLF水銀標的からの後方角核破砕中性子のスペクトル測定
3. 学会等名 日本原子力学会2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩元 大樹、明午 伸一郎
2. 発表標題 高エネルギー粒子輸送計算における核分裂確率の統一的記述
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Iwamoto, S-I. Meigo
2. 発表標題 Improvement of a high-energy fission model for spallation reactions
3. 学会等名 14th Specialists' workshop on Shielding aspects of Accelerators, Targets, and Irradiation Facilities (SATIF-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Matsuda ¹ , S-I Meigo, H. Iwamoto, H. Takeshita
2. 発表標題 Measurement of the energy spectrum of spallation neutron emitted to the most backward angle of 180° produced from thick mercury target irradiated with 3 GeV protons
3. 学会等名 14th Specialists' workshop on Shielding aspects of Accelerators, Targets, and Irradiation Facilities (SATIF-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田 洋樹、明午 伸一郎、岩元 大樹
2. 発表標題 J-PARC MLF水銀標的から放出される180度方向核破砕中性子エネルギースペクトルの測定
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Iwamoto, S-I. Meigo
2. 発表標題 Estimation of Uncertainty in Proton-induced Spallation Neutron Multiplicity for Pb, W, Fe, and C Targets
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松田 洋樹 (Matsuda Hiroki)		
研究協力者	明午 伸一郎 (Meigo Shinichiro)		
研究協力者	竹下 隼人 (Takeshita Hayato)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	前川 藤夫 (Maekawa Fujio)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関