

令和元年6月24日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18320

研究課題名（和文）SPIRAL2/NFS施設を利用した中間エネルギー遮蔽ベンチマーク実験

研究課題名（英文）Shielding benchmark experiment in the intermediate energy region using the SPIRAL2/NFS facility

研究代表者

近藤 恵太郎 (Kondo, Keitaro)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉材料研究開発部・主幹研究員（定常）

研究者番号：50513230

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、p/d-Li, Be反応を利用した加速器型中性子源の遮蔽設計の高度化を目指し、フランスGANIL-SPIRAL2の新しい中性子源施設NFS(Neutron for Science)を利用した、20-55 MeV中性子入射による遮蔽実験を実施することである。詳細な解析から、NFSのTOF室において、中性子スペクトロメータと箔放射化法によるスペクトルインデックス測定を併用したベンチマーク実験が可能なることを定量的に明らかにし、実験体系の準備と検出器の整備を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核物理学の観点では、本研究で取り扱う中間エネルギー領域は直接反応と前平衡過程が競合し、多くの多体反応のチャンネルが開くため、理論的に取り扱うにも現象論的に取り扱うにも困難な領域である。従来、このエネルギー領域を利用する中性子源施設はあまりなく、あっても強度がそれほど高くはなかったため、あまり詳細な検討がなされていない。本研究によって将来、同様の中性子源施設を設計する上での遮蔽設計の精度を高めることができ、安全、合理的かつ経済的な設計が可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to improve the shielding design of accelerator-driven neutron source using p/d-Li, Be reactions, and propose a new 20-55 MeV neutron shielding experiment using a new neutron source facility NFS (Neutron for Science, GANIL-SPIRAL2, France). From the detailed analysis, it was quantitatively confirmed that it is possible to perform a benchmark experiment combining the spectrum measurement by the scintillation spectrometer and the foil activation method in the TOF room of NFS, and the preparation of the experimental system and the preparation of the detector were conducted.

研究分野：中性子工学

キーワード：中性子 中間エネルギー 放射線遮蔽

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、線形加速器と低エネルギー核融合反応を用いた強力中性子源が注目され、様々な分野で研究開発が進められている。Li や Be などの軽元素と陽子、重陽子の核融合反応を利用した中性子源は、ビームの加速エネルギーは数 MeV から数十 MeV と比較的低い一方、線形加速器からの大電流ビームを利用し、ビームの加速エネルギーを適切に選択することで、高エネルギーの中性子を高い収量で発生させることができる。現在、以下のような様々な応用が検討されている。

- ・ BNCT (ホウ素中性子捕獲療法) のための放射線治療用中性子源
- ・ テクネチウムなどの医療用アイソトープ製造
- ・ 原子炉の使用済み核燃料の核変換
- ・ 材料試験のための強力中性子源

(2) 中性子源施設を設計する上で、放射線安全上必須の課題は、発生する中性子の遮蔽解析、放射化解析である。本研究代表者はこれまで、高エネルギー中性子と物質の相互作用、核反応に関する実験的な研究とコンピューターシミュレーションに関する研究に従事してきた。これまで、核融合エネルギー研究として、14MeV 中性子源を用いて多数の遮蔽ベンチマーク実験が行われてきた。また、中性子のエネルギーが 100MeV を超えれば、カスケードモデルに基づく計算シミュレーションが成功を収めている。しかし、d-Li 反応のような低エネルギー核融合反応を用いた中性子源からの中性子が持つ、20MeV から 100MeV の間のいわゆる中間エネルギー領域ではこのようなモデルは適用範囲外であり、精度のよい実験データに基づくシミュレーションの精度検証が不可欠である。このエネルギー領域で行われた実験は、これまで、JAEA 高崎研究所の TIARA 施設における 40MeV、65MeV 準単色中性子による鉄、コンクリート、ポリエチレン遮蔽実験しかない。本研究代表者は近年、TIARA 遮蔽実験の再解析を実施し、以下の問題点を明らかにした。

- ・ 鉄、コンクリートのいずれもシミュレーション計算の精度に依然として問題がある。
- ・ 鉄および酸素の 20MeV 以上の断面積の問題が疑われる。

この実験では中性子スペクトルの測定がいわゆるアンフォールディング法を用いて行われており、エネルギー分解能やエネルギースペクトルの細かい構造の測定精度は必ずしも高くない。この遮蔽実験の解析だけでは、どのデータのどの部分に問題があるのかを突き止めるのは難しい。以上のこれまでの研究と現状を踏まえ、20MeV 以上 100MeV までの中性子エネルギー範囲での新たな遮蔽実験の必要性を強く認めるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、現在フランス北部のカーンで建設が進められている GANIL-SPIRAL2 の NFS (Neutron for Science) を利用した、20-55MeV 中性子入射による鉄、およびコンクリートの遮蔽実験を行うことを目的とする。同施設は 20-33MeV の陽子、20-40MeV の重陽子を Li、Be ターゲットに衝突させて中性子を発生させることができる施設で、平成 26 年時点では、平成 27 年夏頃のビーム供用開始を目指して建設の最終段階に入っていた。SPIRAL2 施設を利用することで、従来に比べて 2 桁から 3 桁高い中性子強度を実験に利用でき、従来用いられてきた中性子スペクトロメータに加えて、箔放射化法によるスペクトルインデックス測定が可能となる。両手法を併用することで、スペクトルについてより詳細な議論を行うことが最終目標である。

3. 研究の方法

本研究において利用する、GANIL-SPIRAL2 の NFS(Neutron for Science)施設の平面図を図 1 に示す。この平面図の左上方からビームが入射し、線源室内のターゲットで中性子が発生する。ターゲット周辺はビーム輸送系及びターゲットチェンバーが置かれている。その側方には実験体系を設置するスペースがあり(実験体系位置 1)、高い中性子束が必要な照射はこの位置で行える可能性がある。一方、ビーム下流方向には厚さ 3 m の遮蔽壁があり、コリメーターが埋め込まれている。コリメーター下流は TOF 室となっており、この場所に実験体系を設置して測定を行うことも可能である(実験体系位置 2)。実験体系としては鉄、コンクリートを想定した。実験条件の検討のため、MCNP5 と FENDL-3 を用いたモンテカルロシミュレーションを実施し、予測される中性子束分布と放射化箔を照射した場合の生成放射エネルギーを計算した。解析結果に基づき、実験体系の準備と検出器の準備を行った。

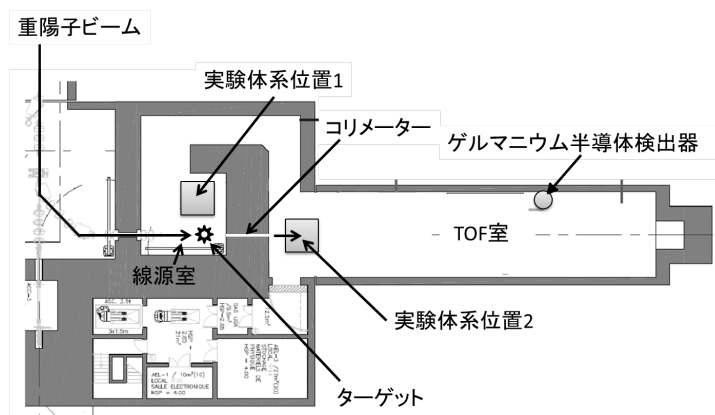


図 1 : NFS 施設の平面図

4. 研究成果

実験体系準備のための解析結果の例として、33 MeV 陽子を薄いリチウムターゲットに照射した場合の結果を以下に示す。この計算では、実験体系位置 2 を想定し、線源から 300 cm の位置に体系を設置した条件を想定した。平均ビーム電流としては上限の 50 μA を仮定した。図 2 に鉄遮蔽体中の中性子束分布の計算結果を示す。これによれば、厚さ 100 cm の遮蔽体であってもおよそ 1 / cm^2/s 以上の中性子束が得られており、有機シンチレーション検出器を用いることで、十分スペクトル測定が可能であることが分かった。図 3 には鉄遮蔽体中で放射化箔を照射した場合の生成放射エネルギー分布を示す。ここでは、数 MeV ~ 50 MeV 程度までのエネルギーの中性子に対して一般的に用いられるドジメトリ反応に対して反応率を計算した。この結果、Au, Nb, Zr, Ni などについては、50 cm 程度の深さまで十分な収量が得られることが分かった。つまり、実験スペースに余裕がある TOF 室においても放射化箔を用いた実験が可能であることを示している。TOF 室に実験体系を設置する場合、既に中性子がコリメートされており、バックグラウンドも低いことから、実験体系を 50 cm 四方程度にまで小型化しても実験精度に影響を与えないことが分かった。これらの結果は、非常に有望なものであり、実験を有効に行える定量的な見通しが得られた。

以上の解析結果を踏まえて、中性子スペクトロメータ(有機シンチレーション検出器)と箔放射化法によるスペクトルインデックス測定の双方に対して実験条件を決定し、実験体系を製作した。また、検出器の調整、放射化箔の選定と調達を実施した。

SPIRAL-2 及び NFS 施設の準備状況については、まず NFS 施設は運転に必要な準備がすべて終了し、既に取り付けられていた薄いリチウムターゲットに加えて、2018 年 4 月に回転ベリリウムターゲットが取り付けられ、大電流運転の準備が整った。線源室のターゲットチェンバーとこれに付随する気送管システムは 2017 年 9 月に設置が完了し、TOF 室も試験に必要な作業は完了した。一方で、SPIRAL-2 は、いくつかの放射線許認可に関連する問題が発生し、施設の運用許可が得られておらず、当初 2019 年頭を目標としていた初実験が延期された。残

念ながら、本研究期間中の実験データの取得には至らなかったが、遮蔽ベンチマーク実験の詳細な実験条件を見出し、SPIRAL-2 および NFS 施設のコミッショニングが完了すれば、速やかに実験に移れる状態まで準備を行うことができた。今後、実験を実施し、得られたデータの解析から、中性子輸送計算の精度を定量的に明らかにし、計算に用いられるデータベースのどの部分に問題があるかを明らかにする計画である。

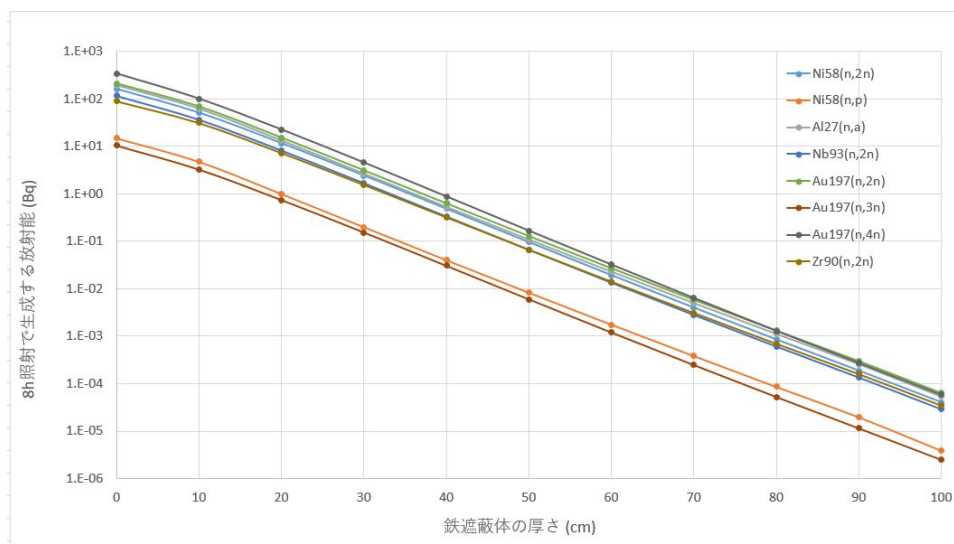


図2 鉄遮蔽体中で生成する放射能の計算結果

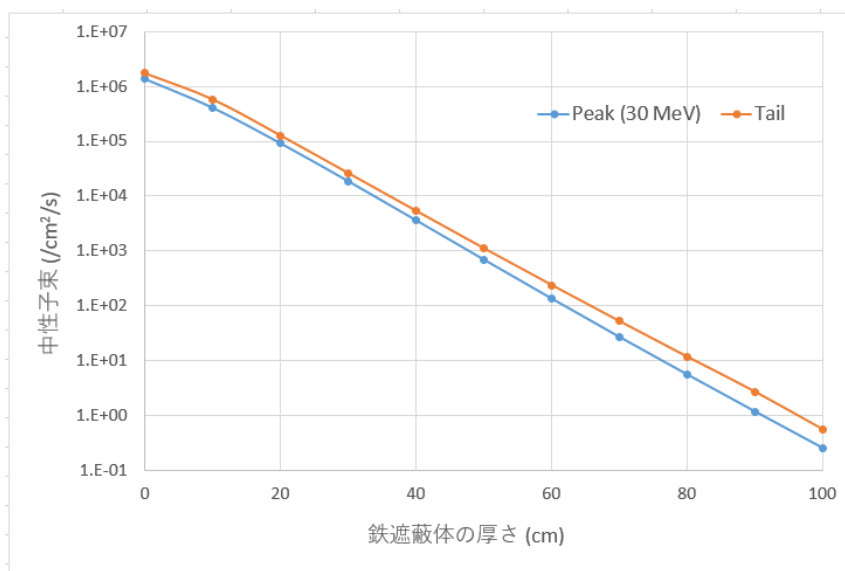


図3 鉄遮蔽体中の中性子束分布の計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

研究代表者氏名：近藤 恵太郎

ローマ字氏名：Keitaro Kondo

所属研究機関名：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

部局名：六ヶ所核融合研究所 核融合炉材料研究開発部

職名：主幹研究員

研究者番号(8桁): 15K18320

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。