

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561014

研究課題名(和文) 軽核に対する中高エネルギー原子核反応断面積評価

研究課題名(英文) Evaluation of Intermediate Energy Nuclear Reaction for Light nuclei

研究代表者

執行 信寛 (Shigyo, Nobuhiro)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40304836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：核融合装置や核破砕ターゲットで利用されるリチウムやベリリウムのような軽い原子核に対する核データ評価に必要な光学ポテンシャルを入射エネルギーが1 MeVから200 MeVの範囲で求め、原子核反応計算コードの改良を行ない、原子核反応断面積を評価できるようにした。また反応断面積の計算値の妥当性検証のために、生成中性子のエネルギースペクトルを測定する方法を改良した。本研究で得られた成果は軽い原子核以外にも適用できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To evaluate nuclear reaction cross sections for light nuclei such as lithium and beryllium which are used in nuclear fusion reactions and spallation neutron sources, optical model potential parameters from 1 to 200 MeV were obtained. Nuclear reaction calculation codes were modified to perform reaction cross sections for light nuclei. Measurement technique of neutron energy spectrum was refined to validate calculated nuclear reaction cross sections. The results of calculation and experimental methods will be applied for nuclear data evaluation of heavier nuclei.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子核反応 断面積 リチウム ベリリウム 中性子

### 1. 研究開始当初の背景

放射線発生施設における中性子発生量や材料損傷を評価するために、評価済核データが用されている。既存の汎用評価済核データライブラリ (日本の JENDL-4、米国の ENDF/B-VII、欧州の JEFF-3.1.1) や核融合に特化したライブラリの FENDL-2.1 では、リチウム、ベリリウムのような軽い原子核に対して入射エネルギーが 20 MeV までの範囲で収納されているだけである。

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) では、40 MeV の重陽子をリチウムターゲットに入射させることで得られる大強度中性子の利用が計画されているが、施設設計のために 150 MeV までの中性子、陽子、重陽子入射の核データが必要とされることから、FENDL-2.1 を 150 MeV まで拡張する FENDL-3 の作成が始まっている。また、日本の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設では 3 GeV の陽子が水銀ターゲットに入射した際に生成される中性子の反射体としてベリリウムが使用されており、その寿命などの評価のために 20 MeV 以上の高エネルギー領域の核データが求められている。

20 MeV 以上の評価済核データライブラリについて、日本では 3 GeV までを適用範囲とした JENDL-HE、米国では 150 MeV までの ENDF/B-VII が存在するが、リチウムやベリリウムのような軽い原子核に対する核データは収納されていない。これは、これらの原子核の質量数が 6 から 9 と小さいが、ヘリウムよりは多くの核子で構成されているため、厳密な解析的な解を得ることが非常に困難なためである。

核データの評価では、始めに光学模型を使用し、全断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積を求めるが、この中では光学ポテンシャルのパラメータが重要な役割を果たす。例えば、コバルトやカルシウムのような原子核に対しては、光学模型による計算は中性子の入射エネルギーが 90 MeV 程度まで実験値を再現しているが、リチウムやベリリウムのような軽い原子核に対しては 10 MeV から 70 MeV までのエネルギー領域でのみ実験値を再現している。これは前述のリチウムとベリリウムの核子数の少なさに起因している。また、20 MeV 以下でも FENDL-2.1 に格納されているベリリウムの中性子入射弾性散乱断面積に問題があることわかっている。これまでに、軽核に対する光学ポテンシャルパラメータセットが幾つか提案されているが、5 MeV から 100 MeV 程度が適用範囲である。

### 2. 研究の目的

核融合装置や核破砕ターゲットで利用されるリチウムやベリリウムのような軽い原子

核に対する核データ評価は入射エネルギー 150 MeV までに対して要求されているが、現状は 20 MeV までの領域で整備されているに過ぎない。本研究では、軽核に対して 200 MeV までの入射エネルギーに対して光学ポテンシャルを求め、計算コードの改良を行ない、核反応断面積を評価できるようにすることを目的とする。また実験データが存在しない中性子入射中性子放出断面積については、実際に測定を行ない評価の妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

核データ評価のうち、全断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積を光学模型で計算するためには光学ポテンシャルが不可欠であり、この記述するためには 20 以上の多数の調整可能パラメータが必要である。本研究では、入射エネルギーが 1 MeV から 200 MeV の領域で、光学ポテンシャルの多数のパラメータを同時に変化させて光学模型計算を行い、逐一実験値と比較する手法を採用し最適な光学ポテンシャルを探索することとした。

対象とする入射エネルギーの下限値が 1 MeV としたのは、20 MeV までの領域で FENDL-2.1 の問題点を解決するためである。上限値を 200 MeV としたのは、これ以上のエネルギーでは相対性理論の効果が顕著に現れ、数 MeV のエネルギー領域と同一の枠組みで表記することが困難であるためである。

光学模型計算には、ECIS と OPTMAN コードを使用した。計算値の検証に必要な実験データは主に EXFOR データベースから抽出した。光学模型計算との比較には、ROOT フレームワークを使用し、比較のためのプログラムを作成した。

これらを用いてリチウムやベリリウムに対する中性子の光学ポテンシャルを入射エネルギーが 1 MeV から 200 MeV までの領域で求め、全断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積を評価した。得られたポテンシャルは GNASH や CCONE という原子核反応計算コードの粒子放出過程で陽子や中性子の粒子放出や放出粒子のエネルギースペクトル計算に利用できるようにした。

得られた光学ポテンシャルを用いた原子核反応計算で求められる粒子の生成量やエネルギースペクトルの妥当性を確認するための予備実験を放射線医学総合研究所において行った。

### 4. 研究成果

核融合炉における中性子増倍材やホウ素中性子捕捉療法用の中性子源、核破砕中性子源の窓材として使用される軽核のひとつで

あるが、反応断面積の実験データが少ないベリリウム9の中性子入射断面積に関する計算を中性子の入射エネルギーが1 MeV から200 MeV の範囲で実施した。計算には、まず光学模型、Haser - Feshbach 統計模型、励起子模型を用いて断面積を計算する GNASH コードを使用した。しかし、このコードはそのままではベリリウムのような軽い原子核の反応断面積の計算ができないため、以下の改良を行った。

全ての反応断面積の基となる全断面積は多く測定されているため、この全断面積の実験データを再現するように光学模型計算コード ECIS と OPTMAN により光学ポテンシャルのパラメータを決定した。決定を容易にするために ROOT フレームワークと C++ 言語をベースにしたマクロ言語を利用した。

ベリリウムは一般的に 原子核が変形していると考えられるが本研究では球形と仮定した。数 MeV 以下の低いエネルギー領域では共鳴反応などが起こるため、入射エネルギーが 6 MeV までは既存のパラメータセットを用い、6 MeV 以上をの新規パラメータセットで記述することで 1 MeV から 200 MeV までの入射エネルギー範囲で全断面積を再現できるようになった。

また、入射エネルギーが 6 MeV でパラメータセットを分けることなく、1 種類のパラメータセットで幅広い入射エネルギー領域で実験データの再現性が比較的良好なセットがあることがわかった。

次に、得られた光学ポテンシャルパラメータを使用し粒子放出の計算の改良を行った。励起子模型では反応の遷移行列要素の絶対値二乗平均値で使用されるパラメータと実効ポテンシャルの深さを実験値データを再現できるように決定した。Hauser - Feshbach 統計模型で必要な複合核とその近傍の残留核の核子の準位密度パラメータを粒子生成断面積の実験データを再現するように決定した。以上のことから、入射エネルギーが 1 MeV から 200 MeV の範囲でベリリウム9の中性子入射断面積を一部の反応断面積を除き高い精度で計算できるようになり、20 MeV 以下のエネルギー領域では評価済み核データライブラリよりも精度が高いことが分かった。

GNASH コードは開発されてから数十年以上経っており実績はあるものの最新の核反応模型の知見が取り入れられていない。そこで、日本において新たに開発された CCONE コードで粒子生成断面積やエネルギースペクトルを計算することとし、前述の光学ポテンシャルのパラメータセットを使用し、CCONE コードの内部で指定する原子核の準

位密度パラメータ、励起子模型での最大粒子放出数などを最適化することで粒子生成断面積などで実験データをより再現することができるようになった。

本研究で取られた手法は、リチウムやベリリウムなどの軽い原子核だけではなく、その他の原子核の断面積評価にも利用できるため、断面積計算と実験データとの比較が行えるようになった。

核反応計算で得られるさまざまな反応断面積の内、中性子生成断面積とそのエネルギースペクトルの測定手法を検討するために、放射線医学総合研究所サイクロトロン加速器施設において、予備実験を実施した。このときは 70 MeV 陽子ビームがターゲットに入射した際の中性子二重微分断面積測定を想定した。

中性子検出器には直径と長さが 5.08 cm の円筒形の NE213 液体有機シンチレータを使用し、中性子の運動エネルギーはターゲットのすぐ上流に設置した厚さ 0.5 mm のプラスチックシンチレータを用いたビーム検出器と中性子検出器間の飛行時間法により導出することとした。このサイクロトロンから射出されるビームは時間幅が非常に広いため、そのままでは飛行時間法によって中性子の運動エネルギーを測定できない。そのため、サイクロンの運転パラメータを調節し、ビーム強度は低くなるが 2 ns 以下の短パルス幅として取り出すこととした。しかし、このサイクロンの繰り返し周波数が 19 MHz であるため、飛行時間が 50 ns を超えるような低エネルギー中性子の測定は不可能であった。

中性子検出器は中性子以外のガンマ線や荷電粒子にも有感であるため、中性子検出器の前面に設置した厚さ 2 mm のプラスチックシンチレータによるベト検出器により、荷電粒子と非荷電粒子(中性子とガンマ線)を識別して、中性子検出器の発光パルスの減衰成分でガンマ線と中性子を識別した。

中性子測定で非常に重要であるバックグラウンド中性子事象を差し引くために、長さ 110 cm の鉄のシャドーバーの設置を考慮した。しかし、これはビーム出器と中性子検出器の距離が約 2 m 以上離れている場合にのみ設置可能であることがわかったため、ターゲットを外した測定を行うことで、バックグラウンド事象の測定とした。

この結果、数 10 MeV 以上の中性子を測定する場合は、ビーム検出器と中性子検出器の距離を 2 m 以上確保して測定できることがわかったが、10 MeV 以下の中性子を測定する場合には、ビーム検出器と中性子検出器の

距離を約1 mまで近づけて測定する必要があることがわかった。

一方、入射粒子は当初予定していた陽子、中性といった核子とは異なるものの重イオンビームを入射粒子として中性子エネルギースペクトルのテスト測定を放射線医学総合研究所 HIMAC 施設で行った。

この施設では入射ビーム強度を1秒辺り $10^5$ 個程度と非常に小さくすることができるため、前述のサイクロトロン施設と異なり、飛行時間法で測定できる時間幅として最大数100 ns 取ることができた。このため、ターゲットと中性子検出器の飛行距離を2 m以上取ることができるため、長さ110 cmの鉄シャドーバーを設置したバックグラウンド測定が可能となることがわかった。

また、低エネルギーの中性子を測定には110 cm よりも短い鉄シャドーバーを採用しても実験データの解析段階で十分バックグラウンド事象を除去できることがわかった。

この測定手法は軽い原子核だけではなく他の原子核による反応から生成される中性子の生成量やエネルギースペクトルを測定する際に利用できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 5 件)

執行信寛、魚住裕介、今林洋一、板敷祐太郎、佐藤大樹、梶本剛、佐波俊哉、古場裕介、高田真志、松藤成弘、Tae-Yung Song、Cheol Woo Lee、Jong Woon Kim、Sung-Chul Yang、炭素に対する290MeV/u Ar 入射中性子生成二重微分断面積の測定、日本原子力学会2013年秋の大会、2013年9月3日、青森県八戸市

執行信寛、魚住裕介、今林洋一、板敷祐太郎、佐藤大樹、梶本剛、佐波俊哉、古場裕介、高田真志、松藤成弘、Tae-Yung Song、Cheol Woo Lee、Jong Woon Kim、Sung-Chul Yang、Measurement of neutron production cross sections from heavy ion induced reaction、2013 Symposium on Nuclear Data、2013年11月15日、福井県敦賀市

執行信寛、魚住裕介、上原春彦、西澤知也、水野貴文、高宮大義、橋口太郎、佐藤大樹、佐波俊哉、古場裕介、高田真志、松藤成弘、Measurement of 100- and 290-MeV/u

Carbon Incident Neutron Production Cross Sections for Carbon, Nitrogen and Oxygen、International Conference on Nuclear Data for Science and Technology、2013年3月7日、アメリカ合衆国ニューヨーク市

執行信寛、魚住裕介、上原春彦、西澤知也、水野貴文、高宮大義、橋口太郎、佐藤大樹、佐波俊哉、古場裕介、高田真志、松藤成弘、

Measurement of 100 MeV/u carbon incident neutron production cross sections on a carbon target、2012 Symposium on Nuclear Data、2012年11月15日、大阪府泉南郡熊取町

執行信寛、魚住裕介、上原春彦、西澤知也、平林慶一、佐藤大樹、佐波俊哉、古場裕介、高田真志、松藤成弘、

Measurement of neutron yields from a water phantom bombarded by 290 MeV/u carbon ions、The 12<sup>th</sup> International Conference on Radiation Shielding、2012年9月3日、奈良県奈良市

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

執行 信寛 (SHIGYO, Nobuhiro)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40304836