

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05384

研究課題名（和文）GAGGシンチレータによる核分裂即発中性子測定システムの開発

研究課題名（英文）Development of fission neutron measurement system using GAGG scintillator

研究代表者

執行 信寛（Shigyo, Nobuhiro）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：40304836

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：核分裂に伴い放出される中性子のエネルギースペクトルを測定するために、GAGGシンチレータの中性子測定への適用について調査し、GAGGシンチレータと飛行時間法を組み合わせることによりこれまで困難であった1 MeV以下の低エネルギー中性子のエネルギースペクトルの測定への応用を試みた。シミュレーションによりGAGGシンチレータの中性子に対する応答を調査して、熱中性子に対する応答を測定し検出効率を導出した。またGAGGシンチレータを飛行時間と組み合わせることで100 keV程度の中性子を測定できる可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GAGGシンチレータを使用することで、従来利用されている有機液体シンチレータによる測定では困難であった1 MeV以下の中性子エネルギースペクトルの測定に道を拓いた。GAGGシンチレータと飛行時間法を組み合わせる手法を核分裂中性子エネルギースペクトルの低エネルギー領域の測定に応用することにより高精度のエネルギースペクトルデータを得ることができ、将来の革新炉や長寿命放射性廃棄物の核変換の実現に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：For measurement of energy spectrum of neutrons emitted by fission, the application of GAGG scintillators to neutron measurements was studied, and attempted to apply the combination of GAGG scintillators and the time-of-flight method to the measurement of the energy spectrum of low-energy neutrons below 1 MeV, which has been difficult to measure so far. The GAGG scintillator and the time-of-flight method were combined to measure the energy spectrum of low energy neutrons below 1 MeV. The response of the GAGG scintillator to neutrons was investigated by simulation, and the response to thermal neutrons was measured to derive the detection efficiency. We also found the possibility to measure neutrons of about 100 keV by combining the GAGG scintillator with time-of-flight.

研究分野：原子核工学

キーワード：中性子 GAGGシンチレータ 飛行時間法 核分裂

1. 研究開始当初の背景

(1) 革新炉の核設計や長寿命放射性廃棄物の核変換などの実現には、核分裂断面積に加えて核分裂反応に伴って放出される中性子のエネルギースペクトルなどのデータや高度な理解が必要である。中性子入射核分裂反応に伴う中性子のエネルギースペクトルでは数 10 MeV 程度までの入射中性子のデータが必要とされている。

(2) 中性子のエネルギースペクトル測定には液体有機シンチレータと飛行時間法を組み合わせ測定されてきたが、1 MeV 以下の中性子に対して測定が困難になるため、近年低エネルギー中性子検出器として $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce^{3+}$ (GAGG) シンチレータが候補の一つとなっている。このシンチレータには中性子捕獲断面積が大きな ^{155}Gd 、 ^{157}Gd が含まれているため、中性子捕獲後のこれらの原子核から放出される約 80 keV から約 300 keV までの即発ガンマ線を測定することで、低エネルギー中性子の測定ができると考えられている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、元々ガンマ線測定用に利用されてきた GAGG シンチレータの中性子測定への適用について調査すること、GAGG シンチレータ内での中性子捕獲反応に伴う即発ガンマ線測定と飛行時間法を組み合わせることによりこれまで困難であった核分裂に伴い放出される中性子の中で 1 MeV 以下の低エネルギー中性子のエネルギースペクトルの測定への応用を試みることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) はじめに ^{252}Cf 中性子源からの中性子エネルギースペクトルの測定に適した GAGG シンチレータの大きさを中性子のシンチレータとの反応率やシンチレータへのエネルギー付与の観点から放射線挙動解析コード PHITS によるシミュレーションで検討した。

(2) 次に熱中性子に対する GAGG シンチレータの応答を調査するために、 ^{252}Cf からの中性子をポリエチレンブロックで減速させた中性子を使用して発光量スペクトルなどの応答特性を調査した。

(3) さらに幅広いエネルギー範囲の中性子エネルギースペクトル測定の可能性を ^{252}Cf からの減速させない中性子と飛行時間法を用いて調査した。

4. 研究成果

(1) 研究方法(1)のために、PHITS で中性子輸送に核データライブラリ JENDL-4.0、電子・光子輸送に EGS5 モデルを適用して、 ^{252}Cf 中性子源からの中性子を減速させて使用することを想定して、1 meV から 10 MeV までの中性子が GAGG シンチレータに入射し中性子捕獲反応後の励起状態の ^{156}Gd や ^{157}Gd から放出される即発ガンマ線やその他の過程でシンチレータに付与されるエネルギーや反応率のシミュレーションを複数の大きさのシンチレータに対して行った。

(2) 図 1 に GAGG シンチレータの厚さを 0.1 mm から 10 cm まで変化させた時の中性子検出効率の中性子エネルギー依存性を示す。これらの結果から 0.1 eV 程度までは 0.1 mm のような薄いシンチレータでも十分に中性子を測定できるが、1 MeV 程度では検出効率が大きく低下することがわかった。これは低エネルギー領域では中性子捕獲断面積が大きいために薄いシンチレータでも中性子による反応が起こりやすいのに対し、抗エネルギー領域では中性子捕獲断面積が小さくなり非弾性散乱断面積が大きくなるが断面積全体としては小さいためである。本研究では ^{252}Cf 中性子源からの中性子エネルギースペクトルの測定に適している GAGG シンチレータの大きさを 2 cm × 2 cm × 1 cm とした。

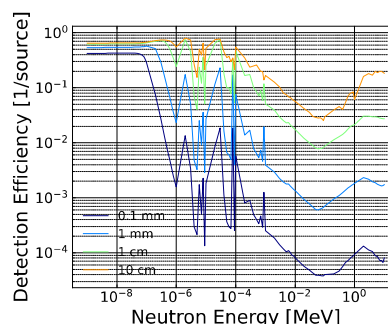


図 1 GAGG シンチレータの厚さを変化させた時の中性子の検出効率の中性子エネルギー依存性

(3) 次に研究方法(2)のために、 ^{252}Cf からの中性子をポリエチレンブロックで減速することにより、熱中性子成分を増加させた。ポリエチレンブロックの厚さは PHITS によるシミュレーションにより熱中性子成分が多くなるが GAGG シンチレータに入射する中性子が少なくならないよう

に 10 cm のものを使用した。 ^{252}Cf からは核分裂の際や核分裂片からガンマ線が放出されバックグラウンドの要因となるため、5 cm の鉛ブロックを追加した。熱中性子の有無による GAGG シンチレータの応答特性を比較するために、厚さ 0.7 mm の Cd 板で熱中性子をほぼ全量吸収させた場合の測定も行った。

(4) GAGG シンチレータからの発光は光電子増倍管で電子パルス信号に変換し、波形デジタイザで事象ごとに信号波形を保存した。その後波形処理でバックグラウンド等を取り除いた。

(5) 図 2 に発光量スペクトルの例を示す。発光量が 30000 程度のピークが ^{156}Gd からの即発ガンマ線である。この図から Cd 板を挿入していない青線の熱中性子が存在する場合と赤線の Cd 板を挿入することで熱中性子シンチレータに到達しないようにした場合で明確にスペクトルに差があることが確認できた。この結果、GAGG シンチレータは熱中性子の測定に有用であることがわかった。また発光量スペクトルと線源強度、熱中性子束等を考慮することで、2 cm x 2 cm x 1 cm の GAGG シンチレータの熱中性子に対する検出効率が 23% ということがわかった。

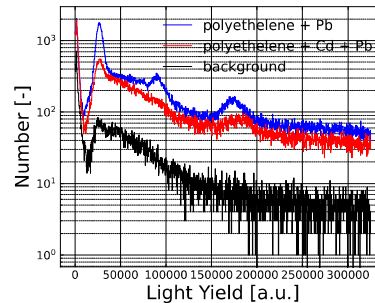


図 2 GAGG シンチレータの発光量スペクトルの例

(6) 次に研究方法(3)のために、 ^{252}Cf からの中性子を減速させない場合の中性子エネルギースペクトルを GAGG シンチレータと飛行時間法を組み合わせ測定することを試みた。GAGG シンチレータ内の中性子捕獲後の ^{156}Gd や ^{157}Gd から放出される即発ガンマ線を識別することで中性子事象を選別し、中性子のエネルギー自体は飛行時間法により導出することとした。図 3 にシミュレーションによる中性子飛行時間と GAGG シンチレータに付与されるエネルギーの関係を示す。この図から 80 keV から 300 keV の強度の高い領域が ^{156}Gd や ^{157}Gd から放出される即発ガンマ線的事象に相当する。

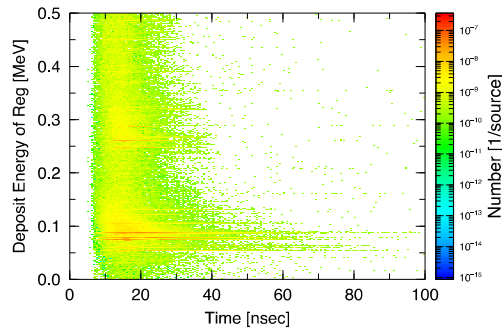


図 3 シミュレーションによる中性子の飛行時間と GAGG シンチレータに付与されるエネルギーの関係

(7) 中性子源近傍に EJ-276 プラスチックシンチレータを設置し中性子が線源から放出される時刻として使用し、GAGG シンチレータで発生する信号の時刻との差から中性子エネルギースペクトルを導出した。両シンチレータの信号を波形デジタイザに入力して時間差と発光量を測定した。中性子の飛行距離は 30 cm とした。比較のために GAGG シンチレータの代わりに直径 5.04 cm、長さ 5.04 cm の円柱状有機液体シンチレータ EJ-301 による測定も行った。この結果、EJ-301 シンチレータは有感領域が大きいため測定効率が GAGG シンチレータよりも高かった。また中性子 EJ-301 シンチレータでは測定できた中性子エネルギーの下限が 500 keV 程度であったが、GAGG シンチレータでは約 100 keV であることがわかった。これは有機液体シンチレータでは低エネルギー中性子に対してはガンマ線事象との弁別が困難になるのに対して、GAGG シンチレータでは 80 keV から 300 keV までのガンマ線事象を選択するためである。

(8) 以上のことから、GAGG シンチレータはこれまで有機液体シンチレータによる測定が困難である 1 MeV 以下の中性子のエネルギースペクトル測定に応用できると考えられる。GAGG シンチレータは 1 MeV 以上の高エネルギー中性子に対しては検出効率が低くなるため、核分裂に伴う中性子のエネルギースペクトル測定には GAGG シンチレータのみならず有機液体シンチレータと組み合わせ使用することが望ましいことがわかった。また、本研究では中性子が放出される時刻を測定するためにプラスチックシンチレータを使用した。核分裂電離箱を使用することで中性子エネルギースペクトルと核分裂断面積を同時に測定できると考えられる。

<引用文献>

T. Sato, et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 2018, 684-690.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 R. Sakai, N. Shigyo
2. 発表標題 Study of GAGG scintillator as a neutron detector
3. 学会等名 2022 Symposium on Nuclear Data
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------