

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800139

研究課題名(和文) ガドリニウムの熱中性子捕獲反応でのガンマ線の多重度とエネルギー分布測定

研究課題名(英文) A study of the gamma-ray emission from thermal neutron capture on Gadolinium, for the multiplicity and the energy distribution

研究代表者

矢野 孝臣 (Yano, Takatomi)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70437341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ガドリニウム(Gd)の熱中性子捕獲反応から放出されるガンマ線の総数とそれぞれのエネルギーを実験により精度良く測定することである。また実験データとの比較により、同反応からのガンマ線放出について再現性の良い計算シミュレーションモデルを得ることを目的とする。申請者らはJ-PARC/MLFのANNRI中性子ビームラインを使用することで、天然Gdについて35億事象、濃縮Gd-155,157について計80億事象の大統計高精度のデータを取得した。また、この実験データを良く再現する計算モデルを新たに構築した。この研究結果は、Gdを使用する科学分野、医療分野等への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to measure the energy and multiplicity of the gamma-ray from the thermal neutron capture on Gadolinium nuclei. It is also aimed at obtaining a computer simulation model of the gamma-ray emission from the reaction, by comparing the model and data. In this research, we acquired a high statistics and high energy resolution data at the ANNRI neutron beam in J-PARC/MLF. The number of events was 3 billion for natural Gd and 8 billion for enriched Gd-155 and Gd-157, in total. We also constructed a new computer simulation code for the gamma-ray emission with better reproducibility for the data, comparing to existing simulation codes. The result of our research could be applied for the high-energy neutrino physics, the medical field and the nuclear reactor engineering.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：J-PARC 熱中性子捕獲 ガンマ線 ガドリニウム

### 1. 研究開始当初の背景

ガドリニウム(Gd, Z-64)の安定同位体である  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  は非常に大きな熱中性子捕獲断面積を持ち、また熱中性子捕獲反応によって合計約 8MeV のガンマ線を放出する性質を持つ( $\text{Gd}(n, \gamma)$ 反応)。これら高い熱中性子捕獲断面積と高エネルギーガンマ線の放出という特性により、ガドリニウムは近年のニュートリノ実験の検出器に広く応用されている。ガドリニウムを検出器に用いる目的は反ニュートリノ反応の同定である。反ニュートリノの荷電カレント反応からはニュートリノに対応する荷電レプトンの反粒子と中性子が生成される。荷電粒子のみを用いて(反)ニュートリノの荷電カレント反応を検出することも可能であるが、中性子と荷電粒子を同時に検出することで、反ニュートリノ反応を通常のニュートリノ反応やバックグラウンド事象から分離し、より精度良く検出・測定することが可能になる。しかしながら中性子は、そのままで検出は難しい。Gd を検出器に加えることで、中性子をガンマ線に変換し、容易な検出が可能となる。

研究開始当初においては、Double-Chooz, Daya-Bay, RENO といったガドリニウム添加液体シンチレータを使用した原子炉ニュートリノ振動測定実験が世界各地で行われており、現在もニュートリノ振動角  $\theta_{13}$  の測定が続けられている。世界最大の水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデも、小型試験機 EGADS をもちいて Gd 添加水チェレンコフ検出器への改良に向けた研究開発を進めている状況であった。これらの検出器において、ガドリニウムが熱中性子捕獲反応によって放出するガンマ線は検出効率等に直接影響を与えるため、正確な理解が必須である。しかしながら、各実験グループが独自の  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応のシミュレーションを作成し、用いる状況である。これらの状況を鑑み、独立の実験として精度良く Gd の熱中性子捕獲による放出ガンマ線のエネルギー・多重度(数)を測定することを目的に本研究は開始された。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ガドリニウム(Gd)の熱中性子捕獲反応( $\text{Gd}(n, \gamma)$ )から放出されるガンマ線の総数とそれぞれのエネルギーを実験により精度良く測定することである。また実験データとの比較により、 $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応からのガンマ線放出について再現性の良い計算シミュレーションモデルを得ることを目的とする。計算シミュレーションモデルは当初既存の計算モデルから選定する予定であった。しかしながら比較に用いたモデルはいずれも再現性が不十分であった。よって、実験データを再現する新しい計算モデルの構築を新たな目的として設定した。

Gd は大きな熱中性子捕獲反応断面積と高エネルギーのガンマ線の放出という性質に

より、近年のニュートリノ実験分野に盛んに応用されている他、中性子医療分野でも応用されている元素である。本研究による成果を反映することで、これらの応用分野において検出や治療に関わる計算シミュレーションの精度の向上といった技術の進歩が期待される。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、第一に  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応から生じるガンマ線について高統計、高精度の実験データを新たに取得する。第二に  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応からのガンマ線放出過程、および実験に用いる検出器の精度良い計算シミュレーションモデルを得る。これら実験データの解析と、計算シミュレーションモデルの比較により、 $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応から生じるガンマ線のエネルギー分布と多重度を測定し、知見を得る。

高統計、高精度の実験データの取得の為、申請者らは Gd を標的とした中性子ビーム実験を行った。ビームラインは J-PARC 物質生命科学実験施設(MLF)の世界最高強度の中性子パルスビーム、検出器は同施設の高エネルギー分解能検出器(ANNRI)を用いた。これらの実験装置は平成 24 年度より中性子核反応研究の為に共用装置として公開され稼働していた。申請者らは本申請に先ずる平成 25 年 3 月、および申請後の平成 26 年 12 月にビーム実験をそれぞれ天然 Gd、濃縮  $\text{Gd}(^{157}\text{Gd}, ^{155}\text{Gd})$  を標的として行い、これらのデータを得た。

実験データの理解のため、また  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応からのガンマ線放出過程の理解のためには、それぞれ精度の良い検出器計算シミュレーションとガンマ線放出モデル計算シミュレーションが必要である。申請者らは高エネルギー実験で検出器シミュレーション構築に広く用いられるライブラリ Geant4 をベースに実験に用いた検出器(ANNRI)のシミュレーションを新たに構築した。ガンマ線放出モデル計算シミュレーションとしては Geant4, GLG4Sim, EBITEM(PHITS), CCONE 等を調査比較対象とした。

実験データ、過去の文献との比較により、調査対象とした計算モデルは  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応についてはいずれも再現性が不十分であることが明らかになった。このため申請者らは新たに計算モデルを構築した。この新たなモデルをチューニングし、実データの再現性を高める事で  $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応の理解を推し進め、そのエネルギー分布と多重度について知見を得ることとした。

### 4. 研究成果

我々の研究成果は大別して、 $\text{Gd}(n, \gamma)$  反応の高精度・高統計データの取得、ANNRI 検出器の計算シミュレーションの構築、Gd の熱中性子捕獲ガンマ線の新たな計算シミュレーションの構築に大別される。

### (1)Gd(n, $\gamma$ )高精度・高統計データの取得

我々は平成 26 年の研究として、大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質生命科学実験施設(MLF)において、中性子ビームライン BL04 とゲルマニウムガンマ線検出器アレイ ANNRI を用いたビーム実験を行った。ビーム実験の標的には  $^{157}\text{Gd} \cdot ^{155}\text{Gd}$  を用い、計 80 億事象の実験データを得た。同時に検出器校正用にコバルト、ナトリウム、セシウム、ユーロピウムのガンマ線データ、塩化ナトリウムをターゲットとした中性子ビームデータを取得した。また、これに先んじて平成 25 年 3 月には天然 Gd を用いて同様の実験を行い、35 億事象を取得している。このような高統計・高エネルギー分解能で Gd の熱中性子捕獲ガンマ線を測定したデータは近年全く存在せず、申請の研究のみならず今後の発展的研究にも寄与するものである。

### (2)ANNRI 検出器シミュレーションの開発

我々が実験に用いた ANNRI 検出器は複数のゲルマニウム検出器を組み合わせた検出器であり、その応答の理解には検出器の精度良い計算機シミュレーションが新たに必要とされた。この検出器シミュレーションの開発にあたり、申請者らは素粒子実験に広く用いられるシミュレーションフレームワーク Geant4 を用いた。較正線源データの解析により、我々の開発した検出器シミュレーションはガンマ線のピーク検出効率で評価して  $\pm 15\%$  で ANNRI 検出器を再現していることが確認出来ている。Geant4 は広く公開されたフレームワークであり、誰でも容易に利用することが可能である。我々の検出器シミュレーションも同様に容易に利用することが可能であり、今後の ANNRI を用いた他の実験にも提供してゆくことを予定している。

### (3)Gd(n, $\gamma$ )計算モデルの構築

当初申請者は実験データの比較解析にあたり、既存の Gd(n,  $\gamma$ )計算モデルを使用する予定であった。このため、Geant4、GLG4Sim、国内開発の EBITEM(PHITS)、CCONE 等を比較の対象としたが、いずれも再現性が不十分であることが明らかになった。この為申請者は新たな計算機シミュレーションを構築することとした。新たな Gd(n,  $\gamma$ )計算シミュレーションは過去のガンマ線放出の研究・論文等を参考に基礎的な計算モデルを構築し、さらに我々が新しく得た実験データにあわせチューニングを行うことでより再現性を高めるものである。我々の新しいモデルは現時点で  $\pm 30\%$  で実験データを再現しており、全エネルギー域において既存のモデルより再現性が良い(図 1)。この研究成果については、NNN15 国際会議や VCI2016 国際会議等で発表を行い、現在紀要が査読中である。またこのモデルについては、さらなる精度の向上を行った上で論文としての公表を予定している。

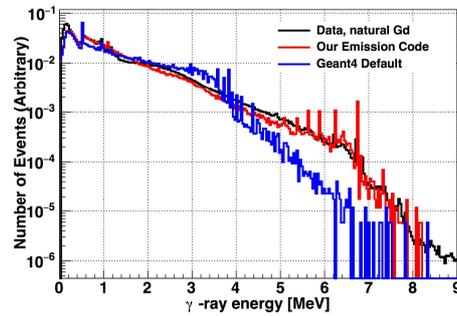


図 1. 本研究の実験データ(黒)、本研究により作成した Gd 熱中性子捕獲ガンマ線モデル(赤)、Geant4 内蔵の Gd 熱中性子捕獲計算モデル(青)の比較。

新しいガンマ線モデルは全域にわたり良い再現性を示している。

## 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)

[雑誌論文](計 3 件)

T. Yano 他、Measurement of Gamma-ray production from thermal neutron capture on Gadolinium for neutrino experiments、Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A、査読有、採録決定

I. Ou, T. Yano 他、Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-ray from the Thermal Neutron Capture Reaction Gd(n,gamma)、JPS Conference Proceedings、査読無、Vol.1、p013053-1-6

DOI 10.7556/JPSCP.1.013053

I. Ou, T. Yano 他、Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-ray from the Thermal Neutron Capture Reaction Gd(n,gamma) using ANNRI、AIP Conference Proceedings、査読無、Vol.1594、p.351

DOI 10.1063/1.4874094

[学会発表](計 16 件)

萩原開人、矢野孝臣 他、ガドリニウムの熱中性子捕獲反応から放出される線データ解析とシミュレーションの比較について、日本物理学会第 51 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北大学(宮

城県仙台市)  
T. Yano 他、Measurement of gamma-ray production from thermal neutron capture on Gadolinium for neutrino experiments、NNN15 国際会議、2016 年 2 月 17 日、Vienna (Austria)  
矢野孝臣 他、Gd 熱中性子捕獲ガンマ線の精密測定と計算モデルの構築、新学術「地下素核研究」第二回超新星ニュートリノ研究会、2016 年 1 月 7 日、富山商工会議所(富山県富山市)  
T. Yano 他、A study of Gamma production from neutron capture on Gadolinium、11<sup>th</sup> Geant4 Space Users Workshop 国際会議、2015 年 8 月 28 日、広島 (広島)  
T. Yano 他、A study of gamma-ray production from thermal neutron capture on Gadolinium、NNN15 国際会議、2015 年 10 月 28 日、Stony Brook (America)  
萩原開人、矢野孝臣 他、濃縮ガドリニウム(A=155,157)の熱中性子捕獲反応から放出される線データ解析、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 26 日、大阪市立大学(大阪府大阪市)  
T. Yano 他、A study of Gamma production from neutron capture on Gadolinium、11<sup>th</sup> Geant4 Space Users Workshop 国際会議、2015 年 8 月 28 日、広島 (広島)  
M. Sakuda、T. Yano 他、Measurement of  $\gamma$ -rays from the thermal neutron capture of natural gadolinium, Gd-155 and Gd-157 Targets、OMEG2015 国際会議、2015 年 6 月 27 日、北京 (中国)  
K. Hagiwara、T. Yano 他、Measurement of neutron capture gamma-rays from the reaction of gadolinium isotopes at the J-PARC/MLF/ANNRI、OMEG2015 国際会議、2015 年 6 月 26 日、北京 (中国)  
K. Hagiwara、T. Yano 他、Gamma production from thermal neutron capture on natural gadolinium, 155Gd and 157Gd、NuInt15 国際会議、2015 年 6 月 11 日、大阪大学 (大阪府吹田市)  
萩原開人、矢野孝臣 他、濃縮ガドリニウム(A=155,157)での熱中性子捕獲反応から放出される線測定実験、「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」第 2 回領域研究会、2015 年 5 月 15 日、神戸大学(兵庫県神戸市)  
作田誠、矢野孝臣 他、ガドリニウム熱中性子反応による線生成、新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会、2015 年 3 月 16 日、東京理科大学(東京都葛飾区)

萩原開人、矢野孝臣 他、濃縮ガドリニウム(A=155,157)での熱中性子捕獲反応から放出される線測定実験、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 22 日、早稲田大学(東京都新宿区)  
作田誠、矢野孝臣 他、ガドリニウム熱中性子反応による線生成、新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会、2015 年 3 月 16 日、東京理科大学(東京都葛飾区)  
山田芳幸・矢野孝臣 他、ガドリニウムの熱中性子捕獲反応から放出される線の測定と計算、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日、佐賀大学(佐賀県佐賀市)  
I.Ou、T. Yano 他、Measurement of the Multiplicity and Energy Spectrum of  $\gamma$ -rays from the Thermal Neutron Capture Reaction Gd(n,  $\gamma$ ), Neutrino 2014 国際会議、2014 年 6 月 02 日、Boston (America)

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 孝臣 (Takatomi Yano)

神戸大学・大学院理学研究科・特命助教

研究者番号： 70437341

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし