

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610047

研究課題名(和文)速中性子精密エネルギー測定のための新型検出器の開発

研究課題名(英文)Development of a new detector for precision measurement of fast neutron

研究代表者

藤井 優 (FUJII, Yu)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30302079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：新型無機シンチレータCLYCについて、速中性子の運動エネルギーを発光量から求めるという、新たな発想がどれだけの可能性を持っているかについての研究を、東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンターの中性子ビームラインを用いて行った。当初の発想は、先行研究によって先に成果が報告され、その報告では、限られた中性子エネルギーの範囲ではあるものの、発光量から速中性子の運動エネルギーを得ることに成功しており、本研究の発想はおよそ正しかったといえる。ただし、検出効率が低いために、応用できる範囲はかなり限られていることもまた明らかとなり、CLYCを用いた速中性子運動エネルギー測定の限界も明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Using a new inorganic scintillator, CLYC, a study of new method to measure kinetic energy of fast neutron using photon-yield, was performed. Prior to publish our study, a new paper based on quite similar idea to measure kinetic energy of fast neutron, had been published. In the paper, the authors succeeded to measure kinetic energy of fast neutrons using photon yield, though maximum energy was limited and detection efficiency was very low. The paper demonstrated that an idea of this study was indeed correct, though range of application of CLYC to measure fast neutron yield was limited.

研究分野：原子核物理学(実験)

キーワード：原子核物理学 速中性子 中性子エネルギー測定 無機シンチレータ 発光量 CLYC

## 1. 研究開始当初の背景

非常に良いエネルギー分解能と、良い中性子-ガンマ線弁別能を持った、CLYC と呼ばれる新型の無機シンチレータが近年開発された。元々の開発目的は、米国の安全保障上、 $\gamma$ 線と熱中性子を弁別でき、また良い分解能で測定できるシンチレータを開発するというにあった。米国では既に安全保障関係の装置にこの新型シンチレータが用いられているようである。本研究の立案を検討している間に、さらにいくつかの原著論文が新たに公開され、さまざまな性質が明らかになってきていた。その論文を検討する中で、高速中性子のエネルギー測定をシンチレータの発光量のみから行えるのではないかと、新たな発想に至り、本研究を着想した。

当初開発された CLYC では、リチウム 6 が熱中性子を捕獲する反応を用いて大きな熱中性子検出効率を得ていたが、速中性子の測定にはバックグラウンドとなるため、本研究においては、リチウム 7 の含有率が非常に大きな、特殊な CLYC を用いることで、高速中性子の測定も可能になるのではないかと、着想を得た。

## 2. 研究の目的

従来、速中性子の運動エネルギーの精密測定には、一般的に飛行時間を精密測定する方法が用いられていた。しかしながら、10 m 以上の長い飛行距離、そしてその距離ゆえに、立体角を大きくするには大きな検出器が必要、など高純度 Ge 検出器を使った  $\gamma$ 線測定などと比較して簡便な方法が存在せず、専用の広く大がかりな実験室、専用のビームライン等目的とする研究に特化した施設が必要で有り、また費用も大幅にかかること、施設に固定の装置となってしまうために、他の場所に持って行くことは事実上不可能という、大きな欠点があった。

そのため、本研究では、シンチレータの発光量のみから速中性子の運動エネルギー (10 MeV 程度まで) を測定するという新たな可能性を探るということを目的とした。本研究の着想が実現すれば、大立体角を持ちつつ高いエネルギー分解能を保った、従来の常識から考えるとたいへん小さな実験装置が実現でき、応用の幅が格段に広がるのが期待できた。特に、高純度 Ge 検出器を用いた  $\gamma$ 線検出器を多数並べたものが、過去 10 年くらいの間に大きな成果を出しているのに匹敵するような、新たな研究の可能性が開けることも期待できた。

## 3. 研究の方法

新型無機シンチレータ CLYC (リチウム 7 濃縮型) を用い、東北大学サイクロトロンラジ

オアイソトープセンター (CYRIC) の中性子ビームライン (32 コース) を用いて、速中性子を測定し、その発光量から中性子の運動エネルギーが測定できるかを見ることによって行った。

CLYC (リチウム 7 濃縮型) については、直径 1 インチ、奥行き 1 インチの円柱形のを、米国 RMD 社から購入した。CLYC は潮解性があるため、アルミ製の容器の中に封入された形であった。この CLYC を、光電子増倍管 H1949 にオプティカルグリス BC-630 を用いて接合し、電荷積分型の ADC を用いて光電子増倍管からの電荷信号を積分し、発光量を求めた。

準単色中性子線としては、リチウム 7 に陽子線を照射して発生する中性子線を用いた。陽子線のエネルギーは、加速器において十分加速実績があり、安定して供給できるという面を重視し、運動エネルギー 30 MeV を選択した。この場合、生成する中性子の運動エネルギーは、約 28 MeV となる。

中性子エネルギーを変化させる方法としては、先述の反応で生成した中性子線を陽子と弾性散乱させ、決まった方向から測定を行うことで、測定する中性子のエネルギーを変化させる方法をとった。荷電粒子が CLYC に入射する事象を落とすために、ビームラインの出射口と CLYC との間には十分大きなプラスチックシンチレータを置き、このシンチレータが光った場合には荷電粒子入射の事象としてデータを取得しないようなデータ収集条件にてデータを収集した。ビームタイムは、24 時間が認められたが、実質ビームが使えた時間は 10 時間ほどであった。

## 4. 研究成果

CYRIC における、最初の実験では、実験室の壁等からくるバックグラウンドが多く、時間スペクトル上どこが正しい中性子線のイベントかを同定することがまず困難であった。

しかしながら、生成した中性子線を直接検出器に入射した場合には、正しい中性子検出のタイミングが、加速器からの加速高周波の信号との差を見る事で可能であったので、まず新型検出器への速中性子の直接入射を行い、発光量分布を見た。その結果、やはり非常にバックグラウンドが多かったものの、準単色中性子のエネルギーに相当するピークが発光量分布にかろうじて統計的に有意な量見えていたことが分かった。しかしながら、中性子エネルギーを変化させたデータをとることができなかったため、観測したピークが、必ずしも準単色中性子線のエネルギーに対応していると断定することはできなかった。

次の実験の計画の中に、同様の発想を研究した原著論文が発表され、本研究自身では明らかには出来なかったが、限られた低いエネルギー範囲内では発光量を用いて中性子の運

動エネルギーの精密測定が可能なこと、ただし検出効率が低く、とくに中性子の運動エネルギーが上がるほど下がることから応用範囲は限られること、などが明らかとなった。

エネルギー範囲が限られる理由としては、発光メカニズムが CLYC 中の塩素 35 原子核と中性子との原子核反応によるものであり、中性子エネルギーが上がると、原子核反応によって生成したアルミ 35 の反跳エネルギーが大きくなり、この反跳エネルギー分が発光量に寄与しなくなることで、また中性子エネルギーが大きくなっていくに従い、アルミ 35 の励起状態や、より複雑な原子核反応も起こり、必ずしも中性子の全エネルギーに対応した発光量が得られなくなっていくためと考えられた。また、中性子エネルギーが上がるにつれて検出効率が落ちていく理由についても、目的とするアルミ 35 の基底状態が生成する反応の他に、さまざまな原子核反応が起こりえるために、中性子の運動エネルギーに比例した発光量が得られなくなるということが、先述の原著論文のシミュレーションにて明らかとされた。また、さまざまな原子核反応が起こることからバックグラウンドも多くなり、中性子の運動エネルギーに対応するピークの幅が大きくなり、検出効率が下がって計数が下がることなど悪条件が重なり、本研究で目的としていた運動エネルギー 10 MeV 以上の速中性子についての測定については、全く不可能であることが明らかとされた。

以上、本研究においては、先行研究によって目的としていた点については明らかとされた。そのため、研究期間を 1 年延長し、発光量の時間分布が、CLYC の温度に依存するか、あるいは温度を下げることで、先述の問題の解決の糸口が発見できないかについての研究を進めることとした。

まず、冷蔵庫を使い、 $-20^{\circ}\text{C}$  付近においての発光量の時間変化が室温に比べてどのように変化するかを調べたが、まず簡易な解析においては、室温においても  $-20^{\circ}\text{C}$  付近においても、発光量の時間変化の特性に変化は見られなかった。より温度を下げるのは、時間がかかるため、次に温度を  $40^{\circ}\text{C}$  程度に保って発光量を見る実験を計画した。

しかしながら、この計画の途中において、先述の原著論文のグループがやはり先行して研究成果を発表し、発光の時間分布はほぼ温度には依存せず、よって温度を下げたとしても、やはり速中性子の運動エネルギーの精密測定は、比較的低いエネルギーにおいては可能であるが、ある程度高いエネルギーになると、分解能も悪化し、また検出効率も極端に落ちるため、実用的な範囲は限られると言ったことが明らかとされた。

本研究では、いずれの計画も先行研究により詳細な原著論文が発表されたために、発光論文等には至らなかったが、結果としては、着想のように、速中性子の運動エネルギーの

精密測定を発光量だけで行うというのは、かなり適していると思われた CLYC (リチウム 7 濃縮) においても困難であることが明らかとなり、改めて速中性子の運動エネルギーの精密測定の困難さが明らかとなる結果が得られた。

## 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 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井優 (FUJII, Yu)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30302079

### (3) 連携研究者

中村哲 (NAKAMURA, Satoshi)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：50280722

### (4) 研究協力者

千賀 信幸 (CHIGA, Nobuyuki)  
東北大学大学院理学研究科・技術職員

内山 大輔 (UCHIYAMA, Daisuke)  
東北大学大学院理学研究科・修士2年