

令和元年6月13日現在

機関番号：82502

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07377

研究課題名（和文）シンチレータと光ファイバを用いた熱・速中性子、ガンマ線リアルタイム検出器の開発

研究課題名（英文）Development of scintillator with optical fiber detector with pulse shape discrimination

研究代表者

小川原 亮 (Ogawara, Ryo)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 加速器工学部・博士研究員（任常）

研究者番号：00807729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,170,000円

研究成果の概要（和文）：Geant4を用いた光学シミュレーションを用いて、光ファイバの長さに依存するパルス波形弁別精度の低下とその原因を調べた。その結果、シンチレーション光が光ファイバを通過する際の光路長のばらつきが精度低下の大きな要因となっていることを示した。したがって、ファイバ検出器にパルス波形弁別を実装する場合、光路長のばらつきが小さいグレーデッドインデックス型の光ファイバが適切であることを示唆した。

放射線医学総合研究所の中性子照射施設において、検出器開発に適した中性子場照射場を作成し、またリファレンスデータとして熱中性子束、速中性子線量、ガンマ線線量を独立に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバとシンチレータを用いた検出器における光学輸送過程をモンテカルロ法によって解析することで、高精度パルス波形弁別を実装するために必要な情報を示した。また、本研究では熱中性子束、速中性子線量、ガンマ線線量の混在比を変化させた中性子場を作成し、それぞれ独立に評価した。NASBEE施設の様な供用施設において、このような研究開発用の中性子場は、本研究だけでなく様々な研究開発に有用である。

研究成果の概要（英文）：Accuracies of a pulse shape discrimination using scintillator with optical fiber (SOF) detector were evaluated by Geant4 Monte Carlo code. The results shown that a deviation of optical path length in an optical fiber reduces the accuracy. Therefore, this suggests that the graded-index optical fibers, which has the low deviation, are suitable for the pulse shape discrimination using SOF detector.

An accelerator-based neutron fields are generally consisted thermal, fast neutrons and gamma rays. The neutron fields characteristics were evaluated for detector developments in the accelerator-based neutron source in QST/NIRS, names NASBEE facility. These reference data in the NASBEE neutron fields are useful for many researches.

研究分野：放射線計測

キーワード：シンチレータ 光ファイバ パルス波形弁別 中性子場特性評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年開発されている治療用中性子線源の多くは加速器を使用し速中性子を発生させている。この加速器中性子源による熱中性子場では、発生させた速中性子を減速材(モデレータ)によって熱中性子に変換し照射に利用しているが、標的の劣化や加速器パラメータに依存して照射量は変化する。また、被照射物に依っても中性子場の特性は変化してしまう。したがって、照射装置の最適化や運用において、リアルタイムで熱中性子束、速中性子吸収線量、ガンマ線吸収線量を測定する検出器が要求されている。また、治療用の加速器中性子源は大強度の放射線を出力するため、その様な放射線場においても機能する検出器の開発が必要である。

2. 研究の目的

先行研究では、光ファイバの先端にシンチレータを接続した scintillator with optical fiber (SOF)検出器によって、リアルタイム熱中性子束モニタの開発が行われている。SOF 検出器は非常に小さなシンチレータを使用するため、大強度の放射線場においても窒息することなく測定が可能である。一方、有機シンチレータを用いたパルス波形弁別によって、速中性子とガンマ線の弁別の成功が報告されている。本研究では、SOF 検出器の解析にパルス波形弁別を導入し、照射野内の熱中性子束、速中性子吸収線量、ガンマ線吸収線量を一つの検出器でリアルタイムに測定可能な装置を開発することが目的である(図1)。

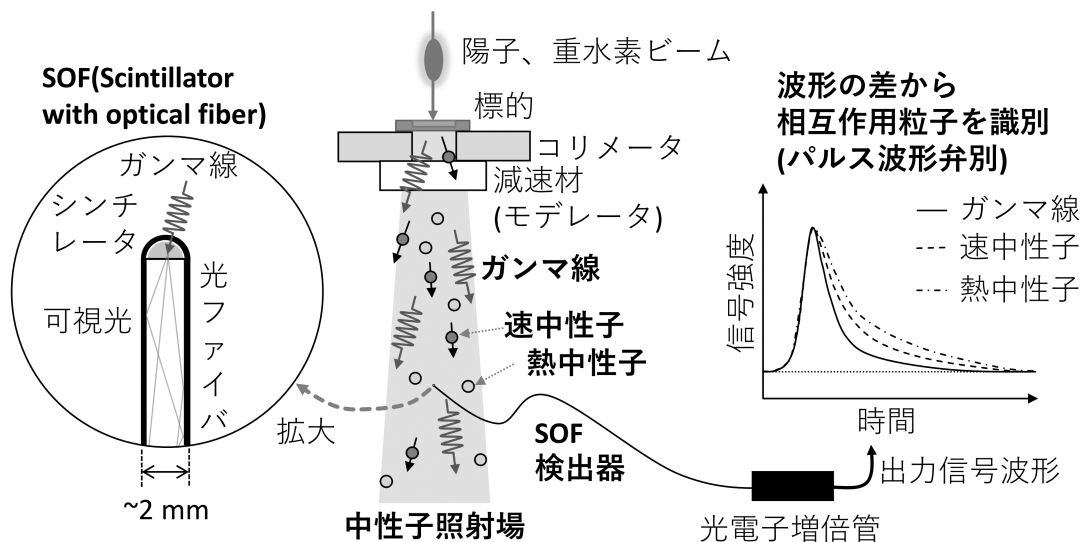


図1. 本研究で開発する放射線検出器を用いた測定の概要図

3. 研究の方法

(1) シミュレーションによる検討

開発する SOF 検出器では、熱中性子、速中性子、ガンマ線を検出する必要がある。本研究では、先行研究に依ってそれらの測定が可能で ${}^6\text{Li}$ 添加 EJ-270 を採用した。一方、SOF 検出器では、使用する光ファイバによって性能が変化する。したがって、まずはパルス波形弁別を実装した SOF 検出器に必要な光ファイバの性能をシミュレーションによって評価する。この検討では、シンチレータから発生したシンチレーション光が、光ファイバによってどのように輸送されるかを計算する必要があるため、光学輸送シミュレーションが必要である。本研究では、Geant4 Monte Carlo コード を用いて、光ファイバ中におけるシンチレーション光の輸送シミュレーションを行い、必要な光ファイバの性能を見積もる。

パルス波形弁別の方法は、先行研究にて開発した Peak-to-charge discrimination (PQD) 法を採用した。PQD 法は信号波形のピーク電圧と積分電荷の比を用いてパルス波形弁別を行う方法であり、簡便かつ高い精度でシンチレータにおける信号弁別が可能である。また、研究代表者は先行研究において、シンチレータの光学特性を用いて高い精度で信号波形を再現する方法を開発しており、本研究ではそのシミュレーション方法を応用してシンチレータの信号波形を再現した。このシミュレーションで得られた知見を元に検出器デザインを決定し、SOF 検出器を作成する。

(2) オンライン SOF 検出器の作成

(1) によるシミュレーションによる検出器デザインの検討後は、中性子場を用いた照射実験を行う。本研究における中性子照射実験では、量子科学技術研究開発機構 (QST) 放射線医学総合研究所 (NIRS) における中性子照射施設 (Neutron exposure Accelerator System for Biological Effect Experiments : NASBEE) を利用した。NASBEE 施設は速中性子の生物影響を評価するために建設された加速器中性子源であり、水素や重水素ビームを Be 標的に照射することで中性子を発生させている。

照射実験ではまず、高サンプリングレートのデジタルオシロスコープを用いて信号波形を高

精度に取得し、事後解析によってパルス波形弁別の精度を検証する。また、この検討時に光ファイバの屈曲や長さによって信号波形情報がどの程度欠損するかを実測で調べ、開発する検出器の測定限界を精査する。また、オンラインで波形弁別解析を行うには、Flash ADC を用いた高速デジタルパルスサンプリングが必要である。したがって、オシロスコープを用いた測定結果から、Flash ADC に要求される性能を見積もり、オンライン測定が可能なデータ収集系を開発する。

<引用文献>

- M. Ishikawa et. al., Radiat. Oncol.11:105 (2016).
- M. J. I. Balmer et al., Nucl. Instrum. And Meth. A 788, 146-153 (2015).
- J. Allison et al., Nucl. Instrum. And Meth. A 835, 186-225 (2016).
- R. Ogawara and M. Ishikawa, Rev. Sci. Instrum. 86,085108 (2015).
- R. Ogawara and M. Ishikawa, Rev. Sci. Instrum. 87,075114 (2016).
- M. Suda, et al., Radiat. Phys. And Chei. 78,1216-1219 (2009).

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる検討

現在開発されているSOF検出器では、ステップドインデックス型の光ファイバが主流である。したがって、まずは既存のSOF検出器で使用されている光ファイバについてシミュレーションで検討を行った。

Geant4を用いた光学シミュレーションを用いて、光ファイバ(MH4001, 0-1m, Mitsubishi Rayon)の長さを変化させ、ファイバ出口の信号波形を計算した。その結果、光ファイバの長さに依存して信号波形が広がること became 明らかになった(図2 a)。これは、シンチレーション光が光ファイバを通過する時、それぞれの光が様々な光路長で伝搬することに起因している。光ファイバが短い場合、それらの光路長のばらつきは目立たないが、光ファイバが長くなるにつれ、そのばらつきは顕著になっていくことが明らかになった。

パルス波形弁別の精度はしばしば性能指数と呼ばれるパラメータで評価され、性能指数が大きいほど精度が高い。本研究では、既存のパルス波形弁別法である“部分積分電荷比較法”とPQD法のどちらが高い性能指数を得られるか評価した。その結果、今回の条件ではPQD法の方が約1.7倍高い性能指数が得られた。

図2 bに、光ファイバ長に依存するPQD法における性能指数を計算した結果を示す。図2 bに示す通り、光ファイバ長に依存して性能指数が低下している。また、線形関数による近似から、約2.4mの光ファイバ長で性能指数が1以下になると見積もることができた。SOF検出器として使用するためには、少なくとも10m以上の光ファイバが必要となるため、今回検討したステップドインデックス型の光ファイバでは高精度なパルス波形弁別は困難であることが示された。また、信号波形のサンプリングレートを低下させ、性能指数を評価した結果、 ${}^6\text{Li}$ 添加 EJ-270 のシンチレータを用いた場合、1 GHz以上のサンプリングレートのFlash ADCが必要ということが明らかになった。

これらの計算結果から、光路長のばらつきに起因して、パルス波形弁別の性能指数が低下するということが明らかになった。したがって、まだSOF検出器への応用はされていないが、光路長のばらつきを減らす効果のあるグレーデッドインデックス型の光ファイバが、本研究の目的に沿った光ファイバである可能性が示唆された。

(2) 実験用中性子場の形成と特性評価

本研究では熱中性子、速中性子、ガンマ線のそれぞれの挙動を独立で追跡可能な検出器を開発しているため、照射実験ではそれらの存在比を変化させた照射実験が必要である。したがって、本研究では中性子発生源であるBe標的と、検出器の間に設置するモデレータの厚さを変化させることによって、熱中性子、速中性子、ガンマ線の混合比を変化させた中性子場を作成した。モデレータの材質は速中性子の減速効率の高いポリエチレンを採用した。

開発した検出器の性能を評価するため、まずは作成した中性子場における熱中性子、速中性

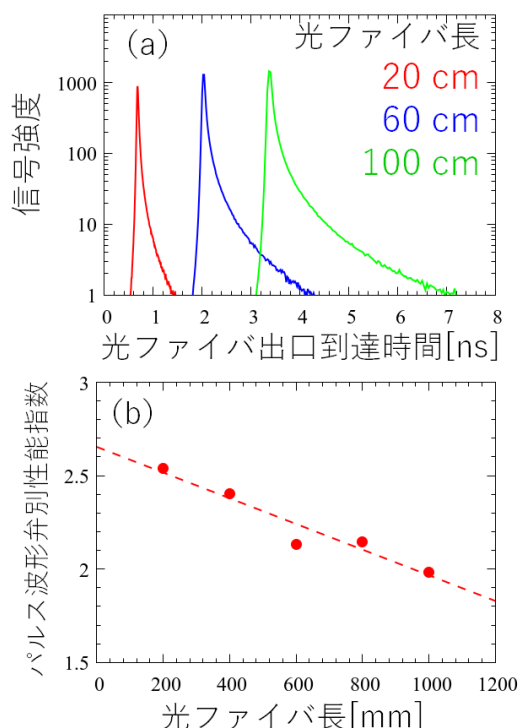


図2 .(a) 信号波形と(b) パルス波形弁別の光ファイバ長依存性

子、ガンマ線の混合比（中性子場特性）を評価する必要がある。したがって、これらの放射線を独立に評価する必要がある。熱中性子束は金箔とカドミウム片を用いた金の放射化法を用いて評価し、ガンマ線線量の評価には速中性子感度の小さい optically stimulated luminescence (OSL) 線量計を用いた。速中性子線量の測定には電離箱を用いたが、電離箱はガンマ線にも感度を持つため、電離箱と OSL 線量計で得られた結果の差分から速中性子線量を評価した。また、開発した検出器を NASBEE 中性子場で照射した場合のシミュレーションを行うため、NASBEE 照射室のジオメトリを再現したシミュレーションコードの作成を行った(図3 a)。シミュレーションコードの妥当性を評価するため、実測した熱中性子束との比較を行った(図3 b)。その結果、シミュレーションは実験値を高い精度で再現し、NASBEE 施設における中性子照射のシミュレーションが可能となった。

これらの検出器開発用の中性子場形成とその評価は当初予期していなかった。しかし、開発した検出器の性能評価を行う場合、それぞれの放射線の混在比のリファレンスデータが必要不可欠であるため、中性子場の形成とその評価を行った。また、NASBEE の様な一般に公開された共用施設において、評価済みの実験用中性子場が確立されたことや、シミュレーションコードが確立されたことは今後様々な研究開発に有用であると考えられる。

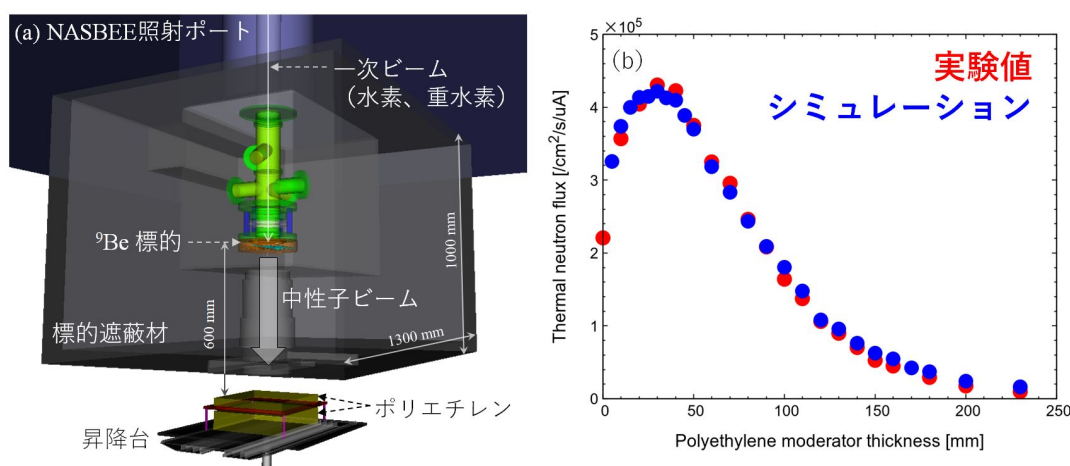


図3 . (a)NASBEE 施設の中性子照射ポート。 (b)熱中性子束の実験値とシミュレーション比較。

(3) オンライン SOF 検出器の作成

(1)の結果から、本研究ではグレーデッドインデックスの光ファイバが適切である可能性が示された。したがって、実験的にステップインデックス型とグレーデッドインデックス型 (GIF625-100, THORABS) でどの程度差が生じるか評価するため、それぞれの光ファイバを購入した。また、当初予期していたよりも Flash ADC に高いサンプリングレートが必要となり、Flash ADC の購入は价格的に困難となってしまった。したがって、今後はオシロスコープを用いたオフライン解析による実験を行い、そのデータを元に研究費を申請しデータ収集系の完成を目指す。

(2)で行った中性子場の評価から、NASBEE 中性子場では照射中僅かに一次ビーム電流がふらつくため、オンラインのモニタ検出器を開発する場合、補正のため一次ビームの電流値の取得が必要であることが明らかになった。したがって、異なるデバイスから得られたデータを包括的に処理するシステムが必要となるため、データ収集系には LabVIEW システム開発ソフトウェア (National Instruments) を採用した。今後はこれらの装置を組み合わせ、実機を開発しパルス波形弁別機能を実装した SOF 検出器システムの開発を行う。

<引用文献>

- R. A. Winyard et. al., Nucl. Instrum. And Meth. 95, 141-153 (1971).
- P. Blanc et al., Nucl. Instrum. And Meth. A 750, 1-11 (2014).

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計7件)

- 小川原 亮、加速器中性子場での CR-39 における速中性子イベントと $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応線の弁別、第33回固体飛跡検出器研究会、2019年3月23, 24日、「名古屋大学 東山キャンパス ES 館 034 講義室、愛知県、名古屋市」。
- 小川原 亮、加速器中性子場における速中性子起源の OH ラジカル生成量の評価、第33回固体飛跡検出器研究会、2019年3月23, 24日、「名古屋大学 東山キャンパス ES 館 034 講義室、愛知県、名古屋市」。
- 小川原 亮、平成30年度 理研シンポジウム、RIKEN Symposium 2018、放医研中性子

発生用加速器システムの現状、2019年2月20日、「理化学研究所、埼玉県、和光市」。
小川原 亮、第15回日本中性子補足療法学会 学術大会、RIKEN Symposium 2018、放医
研中性子、2018年9月1, 2日、「北海道大学学术交流会館、北海道、札幌市」。
小川原 亮、NASBEE 中性子場における CR-39 固体飛跡検出器を用いた速中性子線量計の研
究開発、第31回固体飛跡検出器研究会、2018年3月29、30日、「関西光科学研究所・多目
的ホール、京都府、木津川市」。
小川原 亮、OSL 線量計を用いた NASBEE 中性子場における 線線量の評価、ESR 応
用計測・ルミネッセンス年代測定・FT 研究会、2018年2月10 - 12日、「国立極地研究所、
東京都、立川市」。
小川原 亮、NASBEE 装置を利用した研究開発とその現状、第67回放射線計測研究会、
2018年1月20日、「量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所、千葉県、千葉市」。

6 . 研究組織

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。