

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32610  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2017～2020  
課題番号：17K10491  
研究課題名（和文）ホウ素中性子捕捉療法に用いるリアルタイムパルス中性子ビームモニタシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a Real-time Pulsed Neutron Beam Monitoring System for Boron Neutron Capture Therapy

研究代表者  
小池 貴久（KOIKE, Takahisa）  
杏林大学・保健学部・准教授

研究者番号：40326955  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）用のパルス中性子ビームの品質保証（エネルギー分布、2次元強度分布の評価）を目的として、ガス電子増幅器（GEM）を検出器主要技術に利用した、リアルタイムパルス中性子ビームモニタシステムの開発を行った。コンピュータシミュレーションにより検出器応答の最適化を行い、中性子照射試験では、実用的なビームモニタとして必要とされる長期動作安定性・耐久性を確保しつつ、飛行時間法（TOF法）による中性子波長分布（エネルギー分布）と、GEMの高位置分解能を利用した2次元強度分布画像をリアルタイムに取得することができた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

がんの放射線治療法の一つであるホウ素中性子捕捉療法（BNCT）では、治療効果を左右する中性子照射野の形状、治療線量に影響を与える中性子ビーム中のエネルギー分布および強度分布の評価が重要である。開発したビームモニタシステムによって、飛行時間法（TOF法）で取得した中性子波長分布から得られる中性子エネルギー分布と2次元強度分布画像をリアルタイムに取得することが可能となり、BNCTに有用なパルス中性子ビームの品質が保証され、治療精度の向上に寄与するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a real-time pulsed neutron beam monitoring system using a gas electron multiplier (GEM) as the main detector technology to evaluate the energy and two-dimensional intensity distributions of pulsed neutron beams for boron neutron capture therapy (BNCT). The detector response was optimized by computer simulation. In addition, in the neutron irradiation experiments, we were able to acquire the neutron wavelength distribution using the time-of-flight (TOF) method and two-dimensional intensity distribution images in real time.

研究分野：放射線計測学、放射線検出器

キーワード：リアルタイムパルス中性子ビームモニタ ホウ素中性子捕捉療法（BNCT） ガス電子増幅器（GEM） 飛行時間法（TOF法） 中性子波長分布 中性子強度2次元分布

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

ホウ素中性子捕捉療法 (**BNCT**) は物質の核分裂現象を利用した、がんの放射線治療の一つである。近年の加速器中性子源技術の進展により、医療施設に設置可能な小型加速器ベースの中性子発生装置を利用した **BNCT** 用放射線治療装置の開発が進められている。**BNCT** では、中性子照射範囲の寸法形状の制御、中性子ビーム中の各種放射線成分およびエネルギー分布の評価が重要であり、放射線治療の品質保証・品質管理として、治療効果に影響を与える、ビーム中の熱・熱外中性子のエネルギー分布、およびその二次元分布と強度の評価、速中性子線や線の混在状況の評価が必要である。これらのビーム成分がどのように存在しているのかを確認・評価することは、**BNCT** に用いるパルス中性子ビームの品質保証を行う上で重要な意義を持つ。

### 2. 研究の目的

**BNCT** 用のパルス中性子ビームの品質保証を目的として、ガス電子増幅器 (**GEM**) を検出器主要技術に利用した、リアルタイムパルス中性子ビームモニタシステムの開発を行う。これまでに検討を行ってきた **GEM** を用いた検出器開発技術を応用してシステムを構成し、熱・熱外中性子のエネルギー分布の評価には、飛行時間法 (**TOF** 法) を用いることによって波長 (エネルギー) 別の分布状態を高時間分解能で測定し、2次元強度分布は、**GEM** が2次元平面内に様に高位置分解能を得られることを利用した。本研究では、これら2つの情報をリアルタイムに収集することができる、パルス中性子ビームモニタシステムの研究・開発を進め、放射線治療の品質、精度の向上を目指すことを目的とした。また、治療中の中性子場に擾乱を与えることなく中性子ビームを評価できる検出器システムが必要であり、この点についても研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) パルス中性子ビームモニタシステムの構成

開発した中性子ビームモニタシステムは、中性子検出部として、**GEM** を用いたガス検出器 (図1) と信号読み出し用エレクトロニクスにより構成される。有効検出面積は **100mm × 100mm** で、中性子変換層にはコンピュータシミュレーションにより最適厚 (ビームモニタとして使うために検出効率を抑える: 中性子場に擾乱を与えない) を算出し、カソードプレートに **2 μm** 厚のホウ素 (**<sup>10</sup>B**) をコーティングし、**<sup>10</sup>B (n, <sup>7</sup>Li)** 反応により放出された荷電粒子を検出することで中性子を検出するようにした。**GEM** には、これまでの研究からテフロン製の **GEM** と、近年開発された低温焼成セラミックスを用いた **GEM (LTCC - GEM)** を用いることとした。また、信号増幅用の **ASIC** とオンラインデータ処理用の **FPGA** により、ネットワークを介して **PC** に直接データを転送できるよう構成し、データ処理を **PC** 上で行えるようにした。

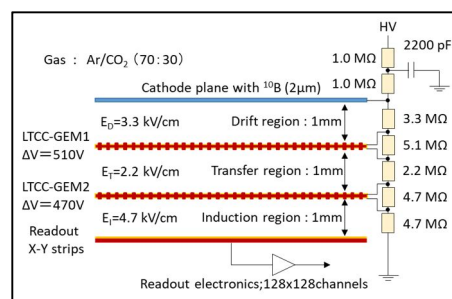


図1 GEM 検出器の構成

#### (2) パルス中性子源での実証実験及び性能評価

理化学研究所の小型中性子源システム (**RANS**) を使用した熱・冷中性子照射試験を実施し、**TOF** 法を用いたデータ解析プログラムにより、中性子エネルギー分布と2次元画像がリアルタイムに取得可能か評価した。また、神戸大学のタンデム静電加速器システムを使用した速中性子照射試験により、高線量場でのアーク放電対策に対する検討を行った。さらに、京都大学複合原子力科学研究所の **BNCT** 照射場 (**KUR** 重水照射システム) で中性子照射試験を実施し、広範囲の中性子エネルギーが混在する原子炉生成中性子においても、2次元画像をリアルタイムで収集可能か、ビーム形状を適切に評価可能か検証した。

#### 4. 研究成果

##### (1) RANS を使用した熱・冷中性子照射試験

RANS の中性子源システムの改良により照射エネルギー領域(発生中性子のエネルギー範囲)が変更されたことを、データ収集システムに組み込んだ TOF 法を用いたデータ解析プログラムにより、照射中の中性子エネルギーの全領域をリアルタイムに取得・評価することができた(図 2、3)。一方、放電耐性に優れた特性から導入した LTCC-GEM であるが、BNCT で用いられるエネルギー領域の中性子を吸収してしまい、必要とされる中性子場を擾乱する可能性が示唆された。RANS の中性子ビームラインに対して、LTCC の中性子断面積が大きいことが関係しているとも考えられ、実際の BNCT 用パルス中性子ビームライン(RANS より高い中性子エネルギー領域)での検討が必要であり、加えて、評価したいエネルギー領域の中性子に対して極めて低感度の素材を利用した GEM の開発が今後の課題である。

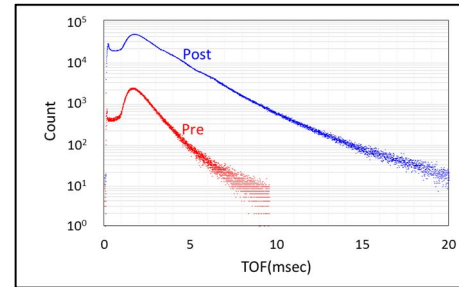


図 2 TOF 分布

##### (2) 神戸大学のタンデム静電加速器システムを使用した速中性子照射試験

高線量場でのアーク放電を頻発させる原因を特定することができ、加えて検出器内部構成の最適化を行った結果、GEM の 1 枚当たりの増幅率を抑え GEM を多段化することで、検出器全体の印加電圧の上昇を抑え、高線量場で安定動作させるための検出器構成を確立する見通しがついた。

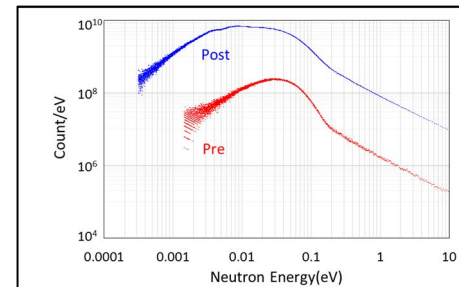


図 3 TOF 分布より算出した中性子エネルギー分布

##### (3) KUR 重水照射システムを使用した中性子照射試験

研究・開発を進めたビームモニタシステムは、中性子の発生時間を元に、データ収集システムに組み込んだ TOF 法を用いたデータ解析プログラムにより中性子波長(エネルギー)分布をリアルタイムに取得・評価するシステムであるため、パルス状に中性子を取り出すことのできない原子炉で生成される中性子のエネルギーを弁別して測定することはできない。しかしながら、広範囲の中性子エネルギーが混在し、線も混在する原子炉生成中性子場においても、2 次元画像として、ビームコリメータの形状に依存した照射状況をリアルタイムに観測できることが実証された(図 4)。開発した検出器システムは線には極めて低感度であるので、ビームの強度プロファイルについても、線の影響を受けることなく(分布のテールはコリメータからの中性子漏れによるものと推定)、リアルタイムに取得することが可能であった。

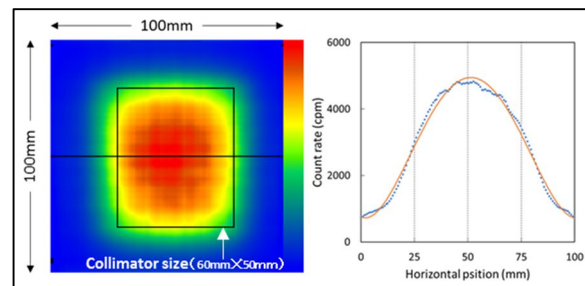


図 4 ビーム中心における中性子空間分布と強度プロファイル

開発した検出器システムは線には極めて低感度であるので、ビームの強度プロファイルについても、線の影響を受けることなく(分布のテールはコリメータからの中性子漏れによるものと推定)、リアルタイムに取得することが可能であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S.Uno, T.Koike, K.Miyamoto, K.Nobori, H.Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of neutron distributions in the BNCT irradiation field using a GEM detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 KURNS Progress Report	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Komiya, Y. Takeuchi, S. Uno, T. Koike
2. 発表標題 Two-dimensional imaging technique based on LTCC-GEM with cold and thermal neutron beam.
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小宮一毅、竹内陽子、宇野彰二、小池貴久
2. 発表標題 LTCC-GEMの中性子検出器への応用
3. 学会等名 MPGD研究会
4. 発表年 2018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
研究分担者	宇野 彰二 (UNO Shoji) (70183019)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  (82118)	

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