

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05005

研究課題名(和文) 加速器BNCTのための符号化イメージング法を用いた中性子線量評価法の開発

研究課題名(英文) Development of neutron dosimetry using coded imaging for accelerator BNCT

研究代表者

宮丸 広幸 (Hiroyuki, Miyamaru)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80243187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：新しいがん治療法であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)において利用が進んでいる加速器による中性子にはエネルギーが高く人体に有害な成分が含まれている。このため治療用の中性子束をそのエネルギー成分ごとに計測、評価する必要がある。本研究では中性子束を熱、熱外、高速成分と分離しながらリアルタイムで測定する新しい中性子線量測定法を提案し、その基礎的な測定原理と有効性を確認した。中性子のエネルギー成分を分離するため窒化ホウ素材をフィルターとして用いた。フィルター厚みの関数である中性子計数値のデータを基に成分の分離を解析的に行い、勾配降下法やベイズ推定法が共に有効であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、先進がん治療であるホウ素中性子捕捉療法に使われる中性子だが、中性子は電荷を持たないため、そのエネルギーを直接測定することは通常は困難である。本研究では中性子吸収材の厚みを変化させながら測定したデータに対して、勾配降下法やベイズ推定法を用いて解析することでエネルギー成分の弁別を可能にした。また、治療用の中性子束が極めて大線量なため、光ファイバーによる伝送、ガンマ線に感度が小さい薄板状シンチレーターの開発など、困難な大線量場の計測を可能にする工夫が多く含まれており中性子計測技術の発展に貢献した。

研究成果の概要(英文)：Boron neutron capture therapy (BNCT) using accelerators is now widely spread as a new cancer treatment. But the neutrons produced by the accelerators have high energetic part and it is harmful components. Therefore, it is necessary to measure and evaluate the therapeutic neutron flux for each energy component. In the present study, we have developed a new type of neutron spectrometer to measure the neutron flux in real time by separating the thermal, epi-thermal and fast components. A new dosimetry method was proposed and its basic principle and effectiveness were confirmed. Boron nitride was used as a filter to separate the energy components of neutrons. Based on the neutron detection yield which is a function of the filter thickness, the component separation was performed analytically, and it was found that both methods of gradient decent and the Bayesian estimation were effective.

研究分野：放射線計測 放射線物理

キーワード：BNCT 中性子 窒化ホウ素

1. 研究開始当初の背景

新しいがん治療法の一つとして中性子とホウ素薬剤を用いるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) が日本において注目されている。これは主にホウ素薬剤の進化によって、その臨床治療効果の著しい向上によるものだが、これにより本治療法の適用拡大が期待されてきた。しかしながら大線量の熱外中性子が必要なため、研究用原子炉からの中性子しか利用できないという困難があった。そこで近年、加速器を用いて大線量の中性子を発生させるいわゆる“加速器中性子源”の開発が着目されるようになり、その実現に向けて京都大学原子炉実験所、筑波大学、大阪大学、名古屋大学等が中心となり様々な開発プロジェクトが進んでいる。これらの中性子を発生させるための手法としては、p-Li 反応、p-Be 反応、スポレーション反応、等様々なアプローチが考えられ、各グループが個別にその実現に取り組んでいるが、核反応率がどれも小さいために一般に中性子発生量が不足している。BNCT で治療に用いられる中性子は 0.5eV ~ 10keV の熱外領域と呼ばれるエネルギー帯が有効であり、この帯域の線量を最大化する必要がある。原子炉では豊富な中性子量のため問題がないが、加速器による中性子の発生では核反応断面積の制限から中性子量を稼ぐために初期のイオンビームエネルギーを高くする必要があり、かつ大電流のビームが必要である。このようにして生成された中性子束は最大十数 MeV にも及ぶ非常に高いエネルギー成分を含むものとなっている。これらは中性子減速材を用いて低減されるものの、一部は残され、中性子エネルギーのスペクトル形状はこれまで BNCT で長きにわたり研究されてきた原子炉でのそれと大きく異なっている。このように加速器からの中性子束に含まれる高速成分、熱領域の中性子は余分な線量増加や皮膚線量の増加につながり、治療時における患者の不要な被ばくの低減に悪影響を与える懸念がある。加えて、様々なプロジェクトで加速器中性子源が開発されている現状から、それぞれの中性子源でもその生成手法の違いから中性子スペクトル形状は互いに異なる可能性が高い。このような状況から様々な発生様式を持つ加速器中性子源からの中性子について、熱外中性子に加え、高速成分、熱成分についてリアルタイムで精度よい線量評価を行うことが求められている。BNCT での中性子の測定はボナーカウンター、放射化法等の手法があるが、詳細なリアルタイム線量測定は一般的に困難である。このような熱外中性子の測定の手法として近年、名古屋大学のグループでは比例計数管に各種の中性子吸収材を巻いた形でのスペクトル測定が試みられている。またファイバーを用いた研究もあるもののエネルギー分布を区別できる明確な検出手法が求められている。

2. 研究の目的

BNCT で今後用いられる様々なタイプの加速器中性子源から放出される中性子束について、主に 1MeV 以下の中性子エネルギー領域においてリアルタイムで大線量に対応した中性子計測が行え、なおかつ熱、熱外、高速の 3 成分の線量の分離評価が可能となる検出器とその手法の開発を行い、その基本的な性能を評価する。

3. 研究の方法

3.1 中性子エネルギー群の弁別手法について

本研究にて新たに考案した中性子のエネルギー成分の分離法について説明する。図 1 は中性子吸収材であるホウ素 10 を含む窒化ホウ素材に様々なエネルギーを持つ中性子を入射させた際の中性子の吸収の様子である。ホウ素 10 と中性子によりアルファ線が発生する核反応断面積は熱中性子領域において極めて大きく、その後は中性子の速度の逆数に従って減少する。つまり、一定厚みのホウ素吸収材に対して高いエネルギーの中性子は透過しやすく、熱中性子はほぼ吸収される。その間のエネルギー領域、つまり熱外中性子は吸収材厚みに敏感にその吸収量を変える。この傾向を利用して対象となる中性子束を様々な厚みを持つ吸収材を透過させ透過後の中性子束を測定し、吸収材厚みと中性子収量との相関データを得る。このような入射中性子エネルギーに依存した中性子収量変化はあらかじめモンテカルロシミュレーション計算にて導出することができる。様々な吸収材厚みと中性子エネルギーの条件を幅広く選択し厚さごとの反応率データを応答関数としてあらかじめ得る事ができる。実測デー

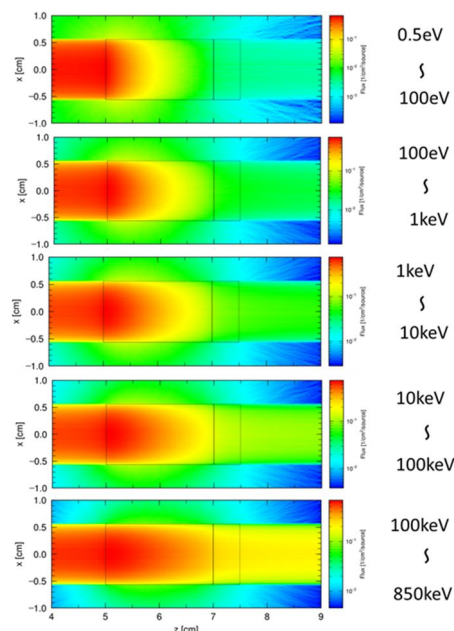


図1 中性子エネルギー差による吸収材透過率

夕をこの応答関数をもちいて逆問題を解くことでエネルギー群ごとの中性子束を最終的に推定する。

3.2 大線量中性子環境での計測について

BNCT の治療に用いられる主に熱外中性子束は 1×10^9 /cm/sec にもなる。またガンマ線の混在も問題となる。このような大線量の環境では比例計数管ではその応答が飽和する可能性が高く、またノイズの問題から光電子増倍管などは直接用いることはできない。そこで本研究では大線量の影響を避けるため長尺の光ファイバーを用いている。また中性子を検出するセンサー部においても様々な工夫を行い、中性子とガンマ線の弁別、大線量中性子による飽和防止対策などを施している。詳細は以下の研究成果にて説明する。

4 . 研究成果

4.1 検出部の製作と特性試験

図 2 に製作した中性子検出部の概略を図 3 に試作したものの写真を示す。中性子吸収材は天然の窒化ホウ素の粉末をアクリル容器に充填し、厚みの調整ができるよう複数個用意した。吸収材を通過した中性子束はリチウム 6 含有の銀活性硫化亜鉛シンチレーターの薄板にて核反応によりアルファ線に変換される。アルファ線はシンチレーター内部でエネルギーを失い可視光領域のシンチレーション光が生成される。この光を集光レンズにて収集し、アクリル製光ファイバーへ導入する。この光ファイバーによって放射線の影響が少ない遠方に配置された光電子増倍管 (PMT) までシンチレーション光は誘導され PMT にてフォトンカウンティングされる。用いた光ファイバーは 10 m 程にも達し、ガンマ線を用いたシンチレーション光の伝送特性については実験的にその有効性を確認した。この検出部において適切に中性子を検出するための試験を行った。はじめにガンマ線と中性子との弁別については、本学の大線量ガンマ線照射施設を用い、検出部をガンマ線照射しその応答を調べた。ガンマ線に関しては感度を持つシンチレーターの厚みを薄くすることで 2 次電子による発光の影響を極力小さくすることができた。これによりガンマ線由来の信号も観測されるが、その波高は小さく、中性子由来のアルファ線による発光とは明確に分離できることを実験的に確認した。またアルファ線標準線源を用いた実験により、本研究で用いたシンチレーターが十分な感度でアルファ線を測定できることも確認した。

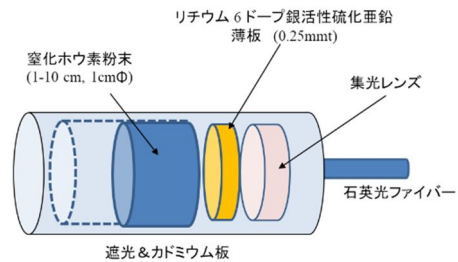


図2 中性子検出部 概略図

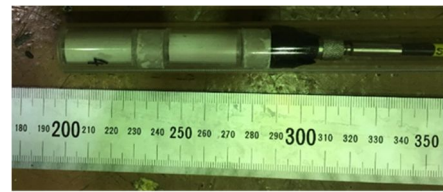


図3 検出部 写真

4.2 エネルギー群推定法の開発と検証

本研究にて開発した中性子検出器では実験データとシミュレーション計算より得られた検出器応答関数との逆問題を解くことでエネルギー群の分離と強度推定が可能となる。このため、逆問題を最適に解くために勾配降下法ならびにベイズ推定法を用いることを検討し、その有効性を検証した。エネルギー群ごとの中性子束強度 と応答関数行列 R 、吸収材厚みの違いによって得られるアルファ線検出量 H_i との関係は N をノイズ成分として以下の式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_k \\ \vdots \\ H_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \vdots \\ R_{ij} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_k \\ \vdots \\ \Phi_n \end{pmatrix} + N$$

応答関数行列 R は既知であるが逆行列を求めるのは困難なため、勾配降下法では中性子束強度

を求める際に初期値を定め、上式にて H を算出し、実験データとの差分を計算し、その差分量が小さくなるよう入力値を変更する。実際には以下の誤差関数を用いて、実測値からの開きを小さく収束させる。

$$S = \frac{1}{2} (R\Phi - H)^2$$

次にベイズ推定法でも同様に初期値を定め、代入計算し測定値に相応する出力を得る。ベイズ推

定法では誤差関数を用いず、入力値の更新は以下の式に従う。

$$\Phi_i^{(n+1)} = \sum_{j=1}^m H_j \frac{R_{i,j} \Phi_i^{(n)}}{\sum_i R_{i,j} \Phi_i^{(n)}}$$

核データファイル JENDL4.2 の中性子核反応断面積データとモンテカルロ輸送計算コード PHITS による窒化ホウ素内部の輸送計算を行い中性子エネルギー群の推定のために応答関数行列を作成した。また、推定法の検証にはエネルギー群を 0.5eV~800keV を 5 群に分割し、この 5 群について中性子模擬分布をランダムに 10000 パターン発生させ、そのパターンの推定割合を調べた。図 4 に勾配降下法を用いて推定を行ったエネルギー群ごとの結果を示す。赤色は推定値と真値が相対誤差 30% 未満で一致したパターン割合を示し、青色は 30% 以上 60% 未満を示す。この結果は低エネルギー群と高エネルギー群での推定が良好であることを示している。本研究で問題となる熱外中性の弁別値となる 10keV 周辺については 80% 程が弁別可能という結果が得られた。本実験では 5 群のエネルギー強度を乱数を振って決定しており、パターンの中には途中のエネルギー群だけ極端に発生量が少ないという、現実の中性子スペクトルではあり得ないものも含まれており、この良好な推定結果は本研究で用いた推定法の有効性を示している。

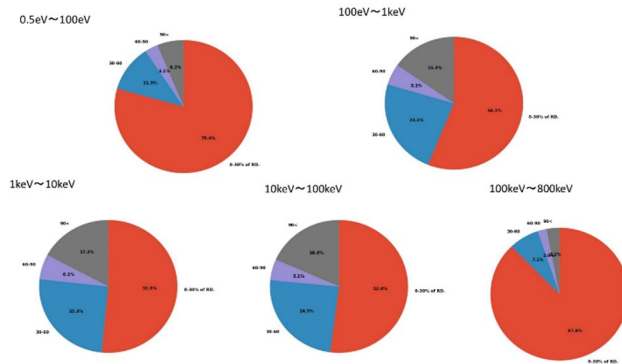


図 4 勾配降下法での推定結果

この結果は低エネルギー群と高エネルギー群での推定が良好であることを示している。本研究で問題となる熱外中性の弁別値となる 10keV 周辺については 80% 程が弁別可能という結果が得られた。本実験では 5 群のエネルギー強度を乱数を振って決定しており、パターンの中には途中のエネルギー群だけ極端に発生量が少ないという、現実の中性子スペクトルではあり得ないものも含まれており、この良好な推定結果は本研究で用いた推定法の有効性を示している。

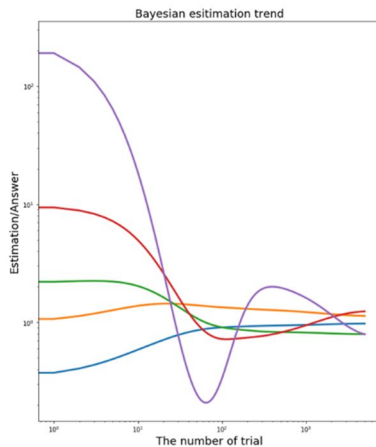


図5 ベイズ推定におけるデータ更新の様子

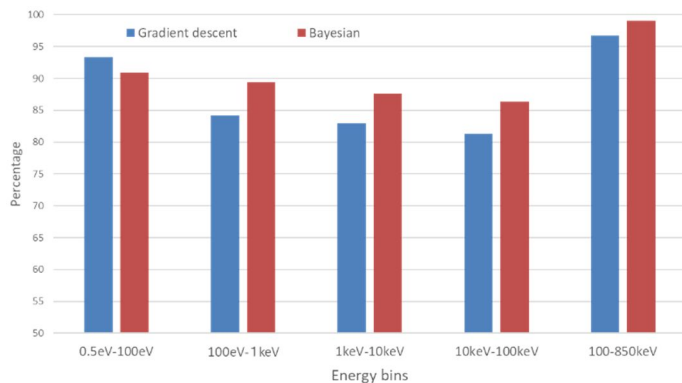


図 6 各エネルギー群の推定値における両推定法の精度比較

次にベイズ推定法を用いて同様のパターンの推定を行った。図 5 はあるパターンにおけるベイズ推定の収束の様子を示す。図の横軸は更新回数、縦軸は評価値と真値との比を表しており、更新が進むにつれて収束する様子が分かる。図 6 に両推定法の推定精度の比較をエネルギー群ごとに行った結果を示す。概ねベイズ推定法が優れているが、その差は 5% 程度と小さいことが分かった。これらの研究成果については日本原子力学会秋の大会、日本ホウ素中性子捕捉療法学会等で報告を行った。

4.3 中性子源を用いたエネルギー群推定法の検証

本手法は原理的にホウ素と中性子の核反応のエネルギー特性を利用した弁別であるため、1MeV

を越えるエネルギーを持つ中性子では反応断面積が小さく、エネルギー特性が無くなるため適用できない。従って本計測法は p - Li 核反応による中性子源のように初期エネルギーが 1 MeV 以下の中性子束が測定対象となる。本研究では DD 核融合反応により 2.2MeV の中性子が発生できる大阪大学工学部の強力 14MeV 中性子発生装置 OKTAVIAN を用いて検証実験を当初から行う予定であった。しかしながら 2018 年 6 月の大阪北部地震の影響により、当該加速器が修理のため当面使用不可となった。このため中性子計測については本学に有するラジウム - ベリリウム線源 (Ra-Be 線源) を用いて実験を行った。Ra-Be 線源は主に数 MeV の高エネルギー中性子の放出が主であるが、ポリエチレンブロックにて熱化することで少量の低エネルギー中性子束が含まれている。図 7 に中性子吸収材厚みを 0 から 6 cm まで 0.3 cm ごとに変化させた際の中性子計数率の変化を示す。0.9 cm を越えた領域ではほとんど中性子計数率に変化がなく一定である。これは入射中性子束の大部分を占める高速中性子成分の寄与によるものである。また、0.9 cm までの計数率の減少は急激である。この領域は熱、熱外成分の中性子が影響している。この実験結果から熱、熱外、高速中性子成分の分離は十分可能であることが実証された。

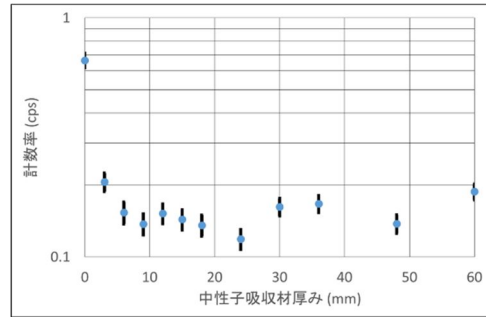


図7 Ra-Be中性子源からの中性子束計数率変化

4.4 マルチアノード光電子増倍管を用いた検出器の高度化

上に述べたように本研究で開発したエネルギー群別計測法は中性子吸収材の厚みを段階的に変化させて複数のデータを集める必要があり、実験条件の再現性や利便性に課題があった。そこで本手法の利点を生かしつつより高度化するため、新たにマルチアノード型光電子増倍管 (MAPMT) を検出部に用いた改良を行った。MAPMT は一つの光電面に対して格子状の複数のアノードで構成されており、複数の光電子増倍管を数 cm 角のコンパクトに集合させたものとなっている。このそれぞれのアノードの前面に厚みの異なる吸収材を配置できることから一回の計測で複数条件のデータ取得が可能になった。ガンマ線源を用いた試験ではガンマ線によるシンチレーション光の発光強度は極めて小さく、中性子と分離できることが実験的に明らかになった。また、ラジウム-ベリリウム中性子線源を用いた中性子の計測では MAPMT において 2 つの領域に分割され、中性子吸収材厚みの異なる 2 領域における中性子検出量の差から、線源の主成分が高速中性子であることを示す結果が得られた。これらの研究成果については 2020 年 2 月の非破壊検査シンポジウム等で報告を行った。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 磯部祐太 中西健太 宮丸広幸 小嶋崇夫 谷口良一	4. 巻
2. 論文標題 加速器BNCTにおける中性子エネルギー群別計測法の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第12回放射線による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 55 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 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮丸 広幸、山本 雄大、玉置 真悟、佐藤 文信、村田 勲
2. 発表標題 p-Li加速器中性子源に対するホウ素吸収材とシンチレーターを用いたエネルギー群別中性子束計測
3. 学会等名 第15回 日本中性子捕捉療法学会 学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本雄大、宮丸 広幸、小嶋崇夫、谷口良一
2. 発表標題 ホウ素吸収材と光ファイバーを用いた熱・熱外中性子束の計測
3. 学会等名 第55回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮丸 広幸、山本雄大、村田 勲、小嶋崇夫、谷口良一
2. 発表標題 BNCT 加速器中性子源に対するホウ素吸収体を用いたエネルギー群別中性子束計測法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会秋の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Miyamaru, Takao Kojima, Kiwamu Omura, and Ryoichi Taniguchi
2. 発表標題 Development of intense gamma-ray source monitoring system in water for radiation safety
3. 学会等名 the Ninth International Symposium On Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 磯部祐太, 宮丸広幸, 中西健太, 小嶋崇夫, 谷口良一
2. 発表標題 ホウ素吸収材を用いたエネルギー群別中性子計測法の開発 1
3. 学会等名 第57回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西健太, 宮丸広幸, 磯部祐太, 小嶋崇夫, 谷口良一
2. 発表標題 ホウ素吸収材を用いたエネルギー群別中性子計測法の開発 2
3. 学会等名 第57回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮丸広幸, 中西健太, 磯部祐太, 小嶋崇夫, 谷口良一
2. 発表標題 マルチアノードPMTを用いた中性子エネルギー群別検出器の開発
3. 学会等名 第16回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 磯部祐太, 宮丸広幸, 中西健太, 小嶋崇夫, 谷口良一
2. 発表標題 加速器 BNCT における中性子エネルギー群別計測法の開発
3. 学会等名 第12回放射線による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----