

加速器 BNCT 中性子源のための耐放射線性を有する

石英ファイバー線量計の開発

京都大学原子炉実験所
放射線生命医科学研究本部
医学物理学分野

田中 浩基

1. 研究目的

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy:BNCT) は腫瘍細胞に取り込まれた ^{10}B と熱中性子との核反応で放出される高 LET 荷電粒子によって腫瘍細胞を破壊する療法である。荷電粒子の飛程が細胞サイズと同等であるため、腫瘍細胞に限定して線量を与えることが可能である。京都大学原子炉実験所では研究用原子炉[1]を用いて現在までに 300 例を越える臨床試験を実施してきた。一方、サイクロトロン加速器を用いた BNCT 用熱外中性子源の開発を行ってきた。サイクロトロン加速器を用いた熱外中性子場は研究用原子炉の熱外中性子源よりも高速中性子成分の混入が多く、皮膚線量の増加の原因となることから皮膚表面での線量評価が非常に重要である。

本研究の目的は皮膚線量の正確な評価を行うための加速器中性子源用の線量計を開発することである。これまで原子炉中性子場で使用されてきた熱中性子用のプラスチックファイバーとシンチレータの組み合わせでは、高速中性子と水素の反応によりファイバーが損傷、劣化してしまう。本研究では加速器中性子源での使用に耐えられる手法として石英ファイバーと液体有機シンチレータを用いた方法を提案している。石英ファイバーには水素を含まないため中性子場での耐放射線性に優れている。また液体有機シンチレータも耐放射線性が強く、高速中性子に感度を有するため高速中性子を精度良く測定できると考えている。本研究では、石英ファイバーと液体有機シンチレータを組み合わせた線量計を構築し加速器中性子源において特性試験を実施し臨床試験への実用化を目指すことを目的としている。本報告書ではファイバー検出器の概要を示すとともに、水ファントム照射実験を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 サイクロトロンベース加速器中性子源

京都大学原子炉実験所で開発してきた、サイクロトロン加速器を用いた熱外中性子源のことを Cyclotron-Based Epi-thermal Neutron Source ; C-BENS と略する[2][3]。C-BENS は BNCT に特化して開発された熱外中性子源であり、サイクロトロン加速器、ビーム輸送系、中性子発生ターゲット、減速体系から構成される。図 1 に C-BENS の概略図を示す。

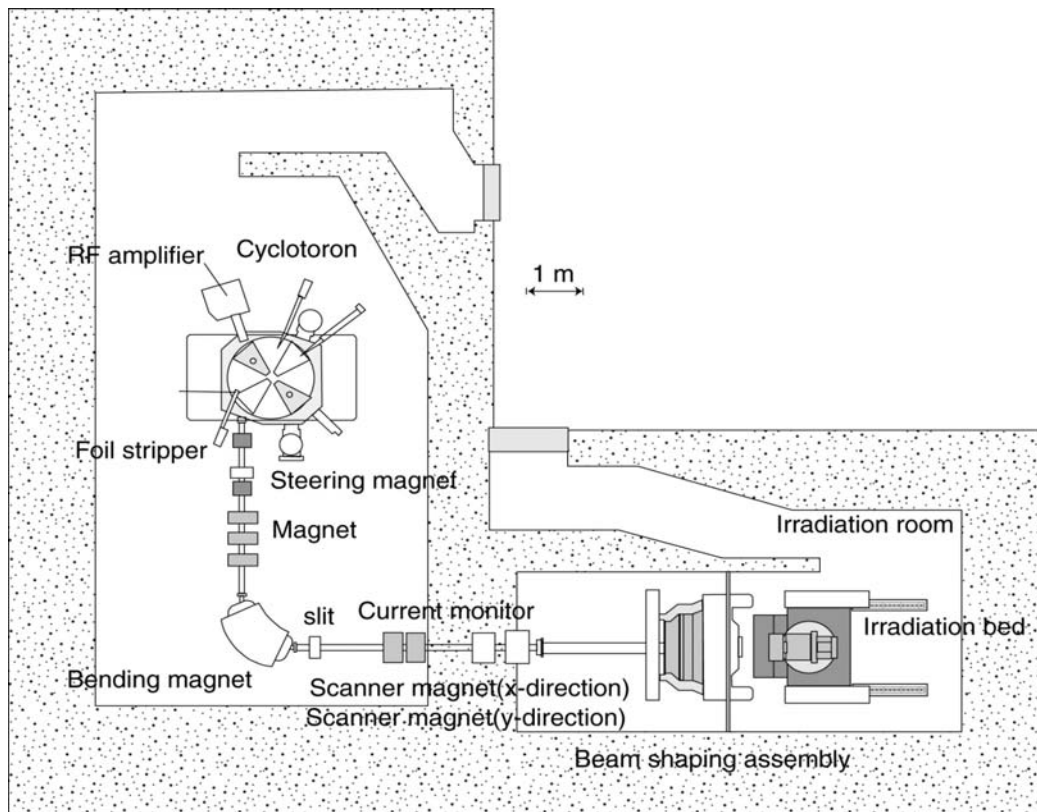


図1 C-BENSの概略図

サイクロトロン加速器では水素負イオンを 30MeV まで加速させ、カーボンストリッパーを用いて荷電変換を行い、ビーム輸送系へ陽子ビームを入射する。最大電流値 1mA の陽子ビームはベンディングマグネットによって 90 度曲げられ、スキャニングマグネットによって陽子ビームは広げられる。ベリリウムターゲットでの熱出力は最大で 28kW と非常に大きいため、スキャニングマグネットにより拡大することにより熱負荷を低減し、ターゲットの健全性を保つ構造となっている。

ベリリウムと 30MeV 陽子との反応で発生する高エネルギー中性子は図 2 に示すような減速体系において、最適な熱外中性子エネルギーへ整形される。減速体系は Pb、Fe、Al、CaF₂、ポリエチレン、LiF 含有ポリエチレンから構成される。Pb、Fe は高エネルギー中性子に対して非弾性散乱断面積を有しており、かつ(n,2n)、(n,3n)反応断面積をもつため、中性子を増倍させながらエネルギーを減速させることができる。Pb、Fe で 1MeV 近傍までエネルギーを減速させ、Al、CaF₂ に入射させることにより、さらにエネルギーを減速させる。また、Al には 27keV 近傍に断面積の谷が存在するため、そのエネルギー領域の中性子は吸収されずに透過する。BNCT において、より深部の腫瘍に対してより多くの線量を付与するためには 4keV-40keV のエネルギー領域の中性子が理想的であるとされている。

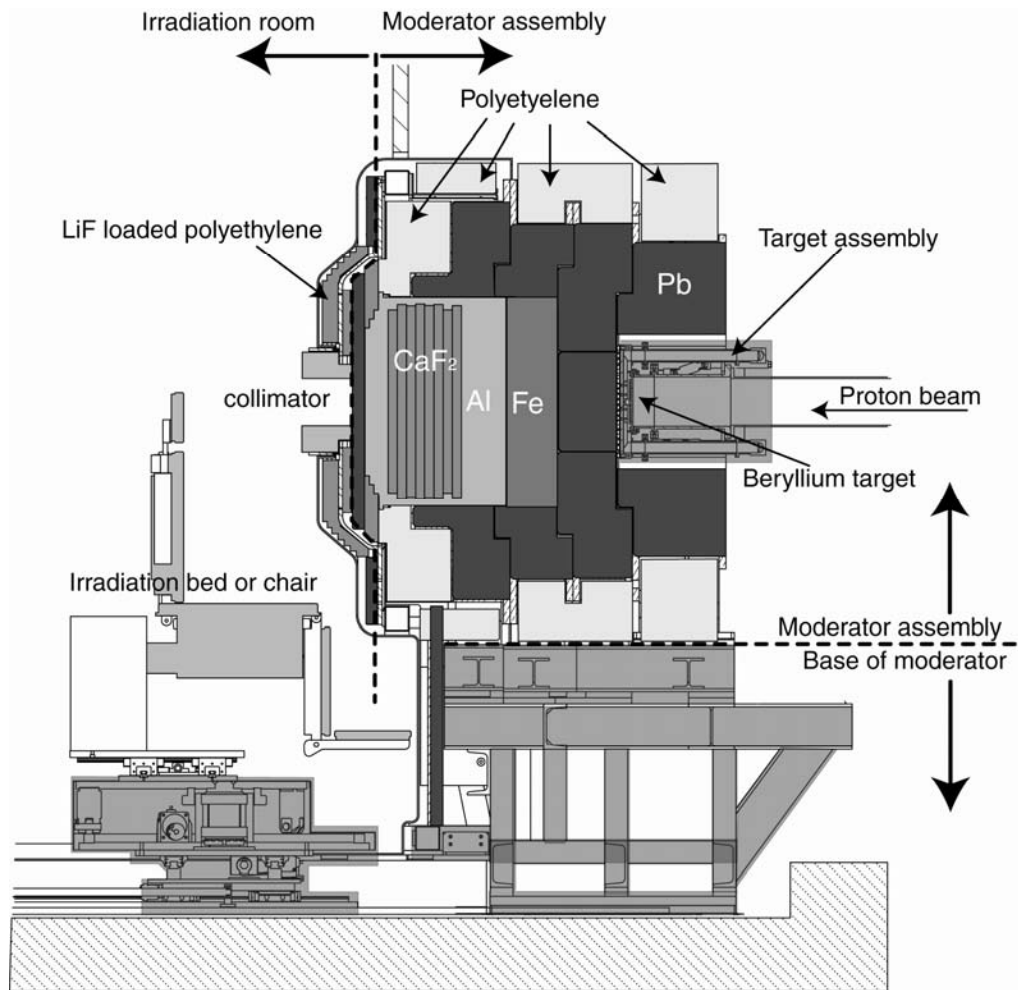


図 2

C-BENS の減速体系断面図

患者への高速中性子による全身被ばくを防ぐためにポリエチレンで減速体系の周り及び前方方向を遮蔽している。ポリエチレンによって減速された熱中性子が治療ビームに混入するが、鉛製のガンマ遮蔽の上流にカドミニウムフィルターを挿入することにより熱中性子を除去している。図 3 にガンマ遮蔽後の中性子スペクトルを示す。KUR 重水設備における臨床試験で最も良く使われている熱外中性子モードのスペクトルも図 3 に示す。C-BENS からの中性子エネルギーは KUR 重水設備よりもエネルギーが高いことが分かる。また、高速中性子のエネルギーが高いことが分かる。

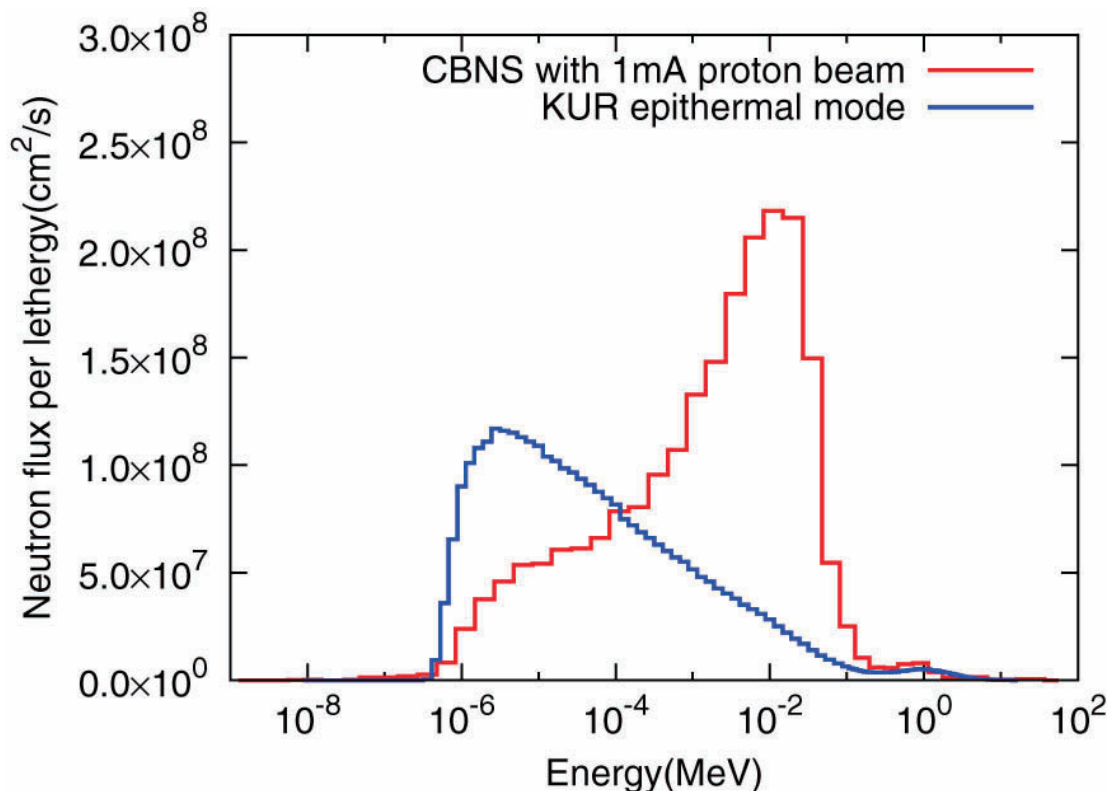


図3 ガンマ線遮蔽表面における C-BENS 及び KUR の中性子スペクトル

2.2 石英ファイバーと有機シンチレータとの組み合わせによる中性子束モニタ

本研究で開発した中性子束モニタはシンチレータ、石英光ファイバー、光電子増倍管、データ処理回路から構成される。光ファイバーの特性を表1に示す。プラスチックは石英に比べて透過率及び耐放射線が悪いが、自由に曲げることができ、また安価であることから一般の放射線計測の分野で良く用いられている。しかしながら、本研究での放射線場は中性子およびガンマ線強度が強いことから耐放射線に優れた材質が必要である。

通常の石英ファイバーは曲げ半径が小さいため、取り扱いが困難であり、曲げによる破壊が生じてしまう。一方、ポリイミドで被覆された石英ファイバーは通常の石英ファイバーよりも曲げ半径が小さく、取り扱いに優れている。また、コア半径を大きくできることから、シンチレーション光の取り込み効率を向上することができる。

また、プラスチックファイバーと比べて石英ファイバーの透過率は非常に良いことから、有機シンチレータからの 450nm の光をファイバー中でほとんど減衰することなく光電子増倍管まで導くことができる。透過率は 0.3dB/10m に対し減衰率はおよそ 0.95 である。

石英光ファイバーの先端には、一辺が直径 2mm、長さ 2mm の領域を有した石英セル内に液体有機シンチレータを封入したものを光学セメントによって接着した。図4に有機シンチレータ-石英ファイバーシステムの外観写真を示す。石英ファイバー周りには光が入ってくるのを防ぐために遮光チューブによって覆われている。

表1 ファイバーの特性比較

	透過率	耐放射線	コア半径	曲げ半径	価格
プラスチック	△	△	◎	◎	◎
石英	◎	◎	△	△	○
石英@本研究	◎	◎	○	○	○



図4 石英ファイバーと有機シンチレータを組み合わせた高速中性子束モニタ

3. 結果

3.1 水ファントム表面における高速中性子の導出

ファイバー検出器の照射試験に先立って、水ファントム表面における高速中性子束の導出を行った。ファイバー検出器では 1MeV 以上の高速中性子を測定できることと、ガンマ線との弁別が可能となるように、ディスクリレベルを調整している。よって 1MeV にしきいエネルギーを有するインジウム箔を用いることで高速中性子束の測定を可能としている。使用したインジウム箔は直径 20mm、厚み 0.5mm とした。照射後に $\text{In}(n, n')$ 反応で生成される $^{115\text{m}}\text{In}$ からのガンマ線を高純度ゲルマニウム検出器によってカウントし、反応率導出には以下の式を用いて補正を行った。

$$R = \frac{\lambda C}{\epsilon \gamma e^{-\lambda T_c} (1 - e^{-\lambda T_m}) \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\Delta t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) e^{-\lambda(n-i)\Delta t} \right)}$$

ここで、それぞれの係数を以下に示す。 ϵ : 検出効率、 γ : ガンマ線放出率、 λ : 減衰定数、 C : カウント数、 T_c : 例伽軸時間、 T_m : 測定時間、 Δt : 照射の間における減衰の補正（ここでは 1 秒とした）、 Q : Δt 間のベリリウムターゲットに入射する陽子の電荷量。

一方、モンテカルロシミュレーションコード MCNPX を用いて、水ファントム実験を模擬し、水ファントム表面における中性子スペクトルを導出した。 $\text{In}(n, n')$ 反応断面積と計算で得られた中性子スペクトルを乗じて反応率を導出した。実験で得られたインジウムの反応率で規格化したところ、1MeV 以上の高速中性子束は陽子電流 1mA あたり 9.3×10^5 (n/cm²/s) であった。

3.2 ファイバー検出器の水ファントム照射実験

照射体系の概略図及び写真を図 5、6 に示す。C-BENS のコリメータ出口に 20cm 角の水ファントムを設置し、照射野の中心にファイバー検出器の有機シンチレータ部分を設置した。有機シンチレータからのシンチレーション光は 10m の石英ファイバーを通して光電子増倍管へと入射される。光電子増倍管で電気信号に変換され、ディスクリミネータによって、電子ノイズ及び、ガンマ線のイベントを除去する。ディスクリミネータでデジタル信号に変換され、300MHz のスケーラによって高速中性子束はカウントされる。

図 7 にベリリウムターゲットに入射する陽子電流の時間経過を示す。照射開始の電流値は 0.8mA で照射開始から 5 分たってから 0.9mA まで上昇させた。その後照射終了までに電流値を増加させ、照射終了直前には 1mA まで到達させた。この照射条件でファイバー検出器を動作させてカウント値を取得した結果を図 8 に示す。照射中 3 回ビームが落ちて、すぐに復旧したが、その応答もファイバー検出器で測定することができた。また、緩やかな電流の上昇に合わせて高速中性子束も上昇していることを確認することができた。ベリリウムターゲットに入射する電流値の時間変化と同様の結果が得られたことから、高速中性子束を正確にモニタできることを確認することに成功した。また、今回 30 分照射を実施したが、信号の劣化は見られなかった。

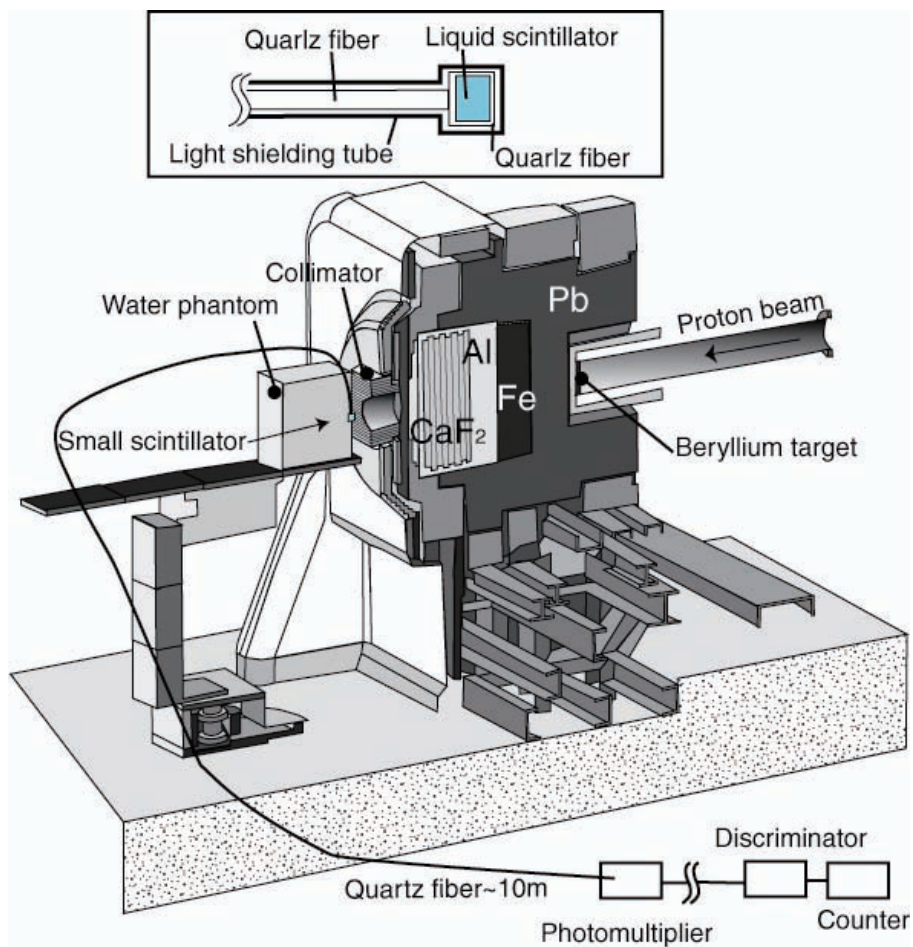


図5 水ファントム照射実験概略図



図6 水ファントム照射実験写真

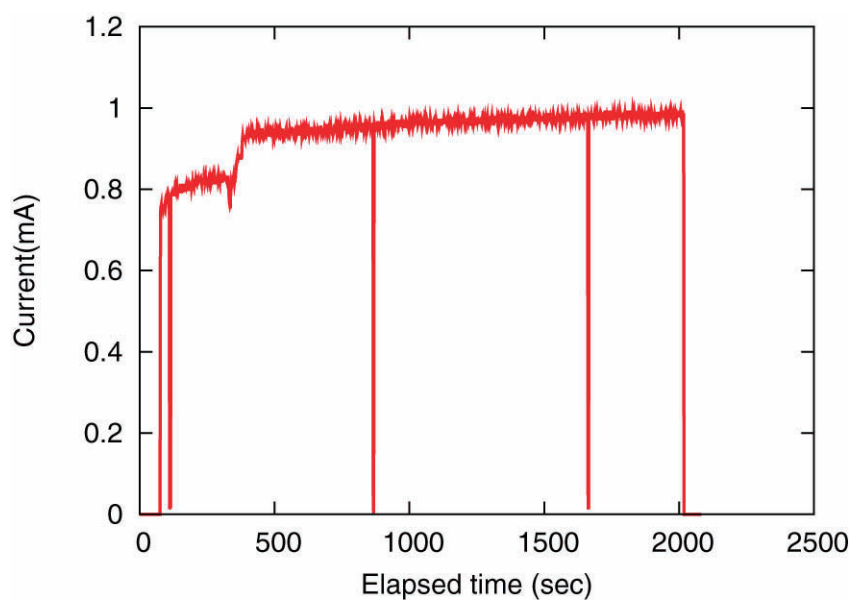


図7 ベリリウムターゲットに入射する陽子電流の時間経過

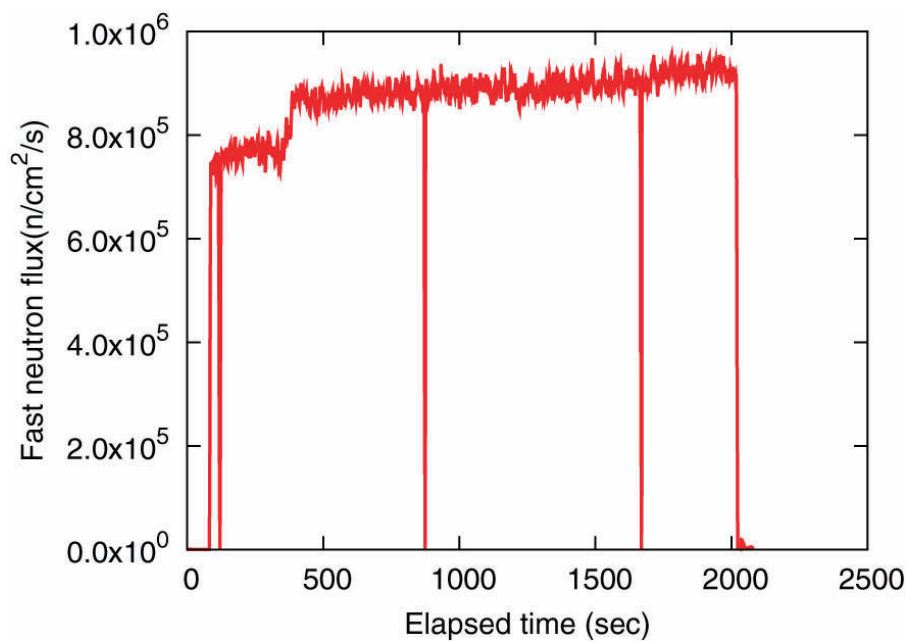


図8 石英ファイバーと有機シンチレータの組み合わせによって測定された高速中性子束の照射中のモニタ値

4. まとめ

京都大学原子炉実験所に設置されたサイクロトロン加速器中性子源の治療ビームには、これまで臨床試験を実施してきた研究用原子炉の中性子源よりも高速中性子の混入が多いことから、高速中性子を正確にモニタする必要がある。そこで、本研究では耐放射線性を有する石英ファイバーと液体有機シンチレータを組み合わせた高速中性子モニタを開発した。本システムをサイクロトロン加速器中性子源の水ファントム実験に適応し、高速中性子束を正確にモニタすることに成功した。このシステムは検出器のヘッドを熱中性子用、熱外中性子用に変更できることから、広いエネルギー領域で中性子束をモニタすることが可能であり、今後 BNCT の線量評価の精度向上に役立つと考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、助成いただきました財団法人医用原子力技術研究振興財団に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1]Sakurai Y. and Kobayashi T., “The medical-irradiation characteristics for neutron capture therapy at the Heavy Water Neutron Irradiation Facility of Kyoto University Research Reactor”, Med. Phys. 29(10), 2328-2337(2002)
- [2]H. Tanaka, et. al., “Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy”, Nucl. Instrum. Methods. B 267, 1970-1977(2009)
- [3]H. Tanaka, et. al., “Experimental Verification of Beam Characteristics for Cyclotron-based Epithermal Neutron Source (C-BENS)”, Applied Radiation and Isotopes, in press