

## (9)BNCT 大強度中性子ビーム計測用リアルタイム中性子モニターの特性評価

防衛大学校 応用物理学科	高田 真志、八木茄津未
広島大学大学院先進理工系科学研究科	遠藤 暁
京都大学 複合原子力科学研究所	田中 浩基
産業技術総合研究所 計量標準総合センター	松本 哲郎、増田 明彦
近畿大学 原子炉研究所	堀口 哲男

### 1. はじめに

悪性腫瘍の治療方法である放射線治療は患部を温存し生活の質を維持できるメリットがある。この治療方法にはエックス線やガンマ線を用いた外部照射治療、陽子線の粒子線治療があり、これらに加え新たな治療法として熱中性子を用いたホウ素中性子捕捉療法(BNCT)がある。この BNCT は、がん細胞に集積されやすいホウ素製剤をあらかじめ注射で投与し、その後 中性子を照射しホウ素薬剤中のホウ素-10 に中性子を取り込ませる。この中性子を捕獲したホウ素原子核は核反応( $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ )を起こし、細胞 1 個分しか飛ぶことができない強力な細胞殺傷能力を有するヘリウムとリチウムの原子核を生成する。この原子核はがん細胞のみを破壊する。この特徴を活かし、BNCT は脳腫瘍、再発頭頸部がん、悪性黒色腫などの治療に適用されている。

この BNCT を実現するために必要不可欠な大強度中性子ビームは、従来の研究用原子炉から粒子線加速器を用いた中性子源へと移行している。これにより病院設置型かつ安全性が高い BNCT 装置を実現運用できる。加速器中性子源は加速ビーム電流の増減と中性子生成ターゲット物質の損耗により変動する可能性があるため、中性子発生量を常時監視したい。しかし、現在この中性子強度の変動は金箔による中性子放射化法(受動型測定法)を用いて計測評価されているため、リアルタイムに中性子強度の変動をモニターできていない。中性子発生ターゲット故障を早期に発見検出できず、また中性子の過少/過大照射につながる恐れもある。これらの観点から患者に照射される中性子強度をリアルタイムに計測できる手法が必要とされている。しかしこの大強度中性子照射ビームの計測は非常に困難である。BNCT 中性子ビームには、強力な中性子ビームに付随し大強度なガンマ線も混在しているため、これらの中性子和ガンマ線をリアルタイムに識別し計測しなければならない。この中性子計測を実現するために、対電離箱検出器(組織透過物質壁と炭素壁で構成された2種類の計数管)、核分裂計数管、小型シンチレーション検出器(リチウムガラスや LiCaF シンチレーター)などが利用・開発されてきている。

この現状を踏まえ、我々のグループは BNCT 大強度中性子ビームを直接リアルタイムに計測できる中性子モニターを開発し、ビームモニターとしての実用化することを目指している。これまで京都大学複合科学研究所の研究用原子炉を利用した BNCT 場、国立がん研究センターの粒子線加速器を利用した BNCT 場で実験を行ってきた。本研究課題では、実際の BNCT 治療場での試験と実用化に向けたリアルタイム中性子モニターの特性評価を行う。特に、中性子センサーの熱中性子フラックスに対する検出効率と中性子コンバーター(LiF)蒸着量との相関関係、BNCT 中性子ビームに混在する熱外中性子や速中性子ビーム強度の計測手法の開発を行う。本研究で得られた成果を元に中性子モニターを最適化し、BNCT 中性子ビームモニターを実用化する。

## 2. 方法

図1に BNCT 用リアルタイム中性子ビームモニターの概略図を示す。ビームモニターは、厚み  $40\ \mu\text{m}$  の薄型シリコンセンサーと極薄のフッ化リチウム(LiF)をテフロン板に蒸着した中性子センサーから構成されている。外部から+8V の逆バイアスを印加しシリコンセンサーを動作させている。この薄型シリコンセンサー(pin 型ダイオード)は、BNCT 中性子ビームに混在する数  $100\ \text{mGy/h}$  の線量率を有するガンマ線を計測でき、さらに強い数  $\text{Gy/h}$  までガンマ線も検出できる能力がある[1]。本センサーの中性子検出方法は、中性子コンバーターに含有されているリチウムと中性子が核反応( ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ ,  $Q=4.78\ \text{MeV}$ )し、放出された三重陽子(トリトン  $E_t=2.73\ \text{MeV}$ )とアルファ線( $E_\alpha=2.05\ \text{MeV}$ )を pin ダイオードで検出するものである。厚み  $1\ \mu\text{m}$  以下の天然 LiF( ${}^6\text{Li}$  含有率 7.6%)をテフロンに蒸着することで、熱中性子フラックス  $1\times 10^9\ (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$  以上を計測可能にしている[2,3]。本中性子センサーを炉心中心部に挿入し、中性子センサーからの出力信号を炉心上部(炉心外)まで伝送し、プリアンプ(Canberra 2004)で波形整形した後、数  $\text{kcps}$  以上の高計数率にも対応できる高速波高分析装置(AmpTek PX5)でデータ取得した。原子炉出力  $1\text{W}$  で定常運転している炉心中心部(照射位置)の熱中性子フラックスとカドミ比を金放射化法を用いて計測評価した結果、熱中性子と熱外中性子フラックスがそれぞれ  $1.4\times 10^7\ (\text{n}\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1})$  と  $2.9\times 10^5\ (\text{n}\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1})$  であり、金放射化のカドミ比は 4.0 であった。ガンマ線量率は  $300\sim 400\ \text{mGy/h}$  である。これらの強度は BNCT 用リアルタイム中性子センサーの特性評価には好ましい。

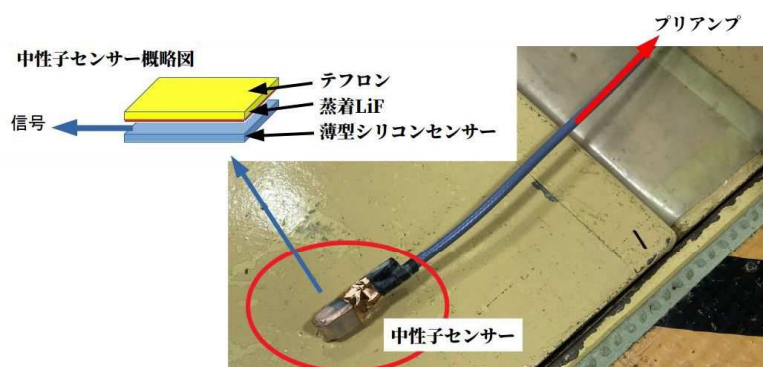


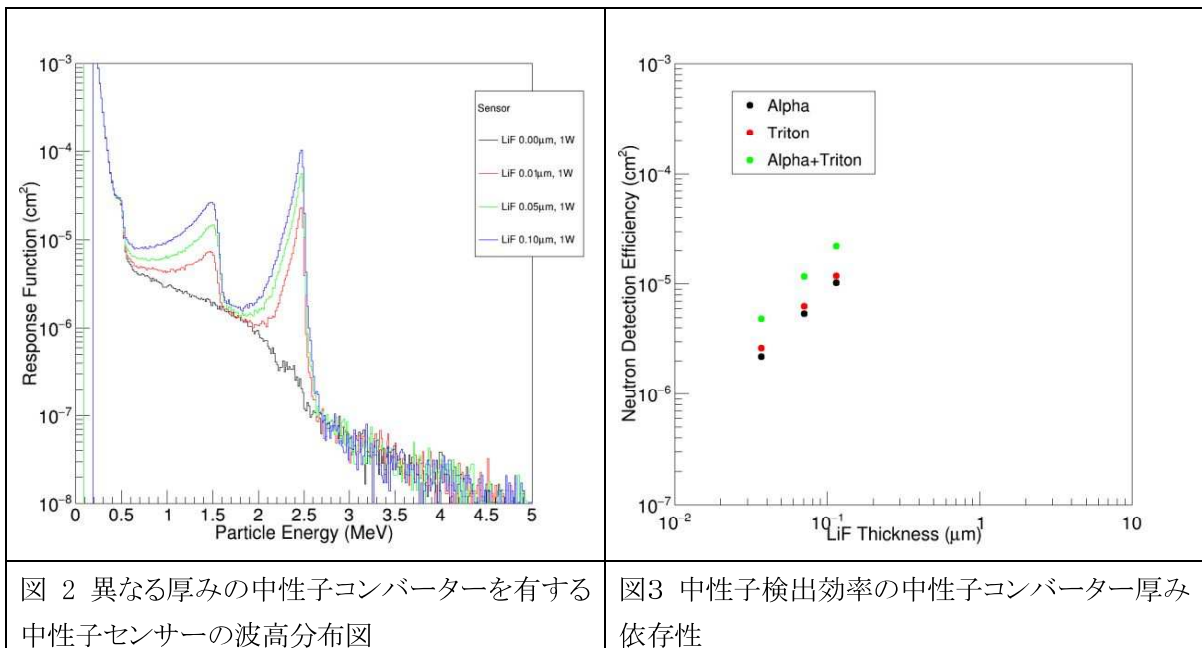
図 1 中性子センサーの写真と概略図

本中性子センサーはガンマ線感度を低くしたまま、中性子コンバーター(LiF)の厚みを変えることで中性子検出効率を変化できる特徴がある。天然フッ化リチウム蒸着厚みを  $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$  で変化させた。昨年度まで厚み  $0.1\ \mu\text{m}$  以上を有する天然フッ化リチウムの中性子コンバーターに対する検出効率を評価できた。今年度、より大強度の中性子ビームを計測するために厚み  $0.1\ \mu\text{m}$  以下の中性子コンバーターを作成し、検出効率を実測した。中性子コンバーターの厚みが薄いため、シリコンセンサー母体と中性子との直接的な反応により生成された2次粒子事象も無視できなくなる。実験時、同一のシリコンセンサーを用い、中性子コンバーターのみを付け替えて中性子応答特性を取得した。後日、防衛大学校にてアルファ線源で計測したアルファ線エネルギーピークチャンネルとそのエネルギー値を用いて、実験で得られた波高分布図のチャンネル番号を粒子エネルギーに変換した。不純物ホウ素による事象を評価するためにフッ化リチウムを蒸着していない中性子コンバーターも用いた。この中性子コンバーターが無い計測結果を各フッ化リチウム厚みの計測結果から差し引いて正味の検出効率を導出し

た。熱外中性子の寄与を計測するために、カドミウム板でセンサー部を遮へいた計測も実施した。この熱中性子に対する熱外中性子の計数率の比率も加味して、熱中性子に対する検出効率を導出した。

### 3. 結果と考察

蒸着フッ化リチウムの厚みを変えて計測した応答関数を図 2 に示す。波高分布図の横軸は MCA の波高値(チャンネル数)をアルファ線エネルギー校正の結果を用いて粒子エネルギーに変換したもの、縦軸は計数率を中性子フラックスで除した検出効率である。波高分布中の 2.5MeV 付近に確認できるピークは  ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$  反応により生成された3重陽子を検出した成分、1.5MeV の幅広いピーク成分は同中性子核反応により生成されたアルファ線を検出した成分である。中性子コンバーターが薄いため、3重陽子とアルファ線のエネルギー損失を下げられ明瞭な両粒子のピークを確認できる。また、0.5MeV 付近に明瞭なエッジを確認できる。このエッジは中性子コンバーターとシリコンセンサーの間に存在する空気中窒素が中性子を捕獲して放出された陽子(0.58MeV)を検出した事象である。このエッジよりも低い波高領域は炉心内に混在するガンマ線や中性子がセンサー構成物質と反応し発生した電子を検出した成分である。フッ化リチウムを蒸着していない中性子コンバーターを利用した応答関数には、シリコンセンサーに付与された不純物ホウ素と熱中性子とが核反応  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  して放出されたアルファ線とリチウム原子核を検出した事象を確認でき、2.3MeV 付近の成分は  ${}^7\text{Li}$  原子核が直接、基底状態へ移行した原子核反応によるものである。粒子エネルギー2.7MeV 以上の成分は、4種類の応答関数で全て変化がない。これらの事象は  $\text{Si}(n,x)$ 反応により発生した陽子やアルファ線の2次粒子と考えられる。これまでこの高エネルギー領域の事象はガンマ線や中性子検出によるパイルアップ事象と考えられていた。この事象が  $\text{Si}(n,p)$ や $(n,\alpha)$ 反応により生成された2次荷電粒子による事象とすれば、速中性子によって起こりうるこれらの原子核反応により発生した2次粒子を検出することで、BNCT 中性子場に混在する速中性子成分を検出できる可能性がある。この可能性について、今後 モンテカルロシミュレーションなどで検証していく。



検出効率の中性子フラックスに対する直線性を確認するために、原子炉出力を4段階に変化させて

応答関数を計測した。その結果、この中性子フラックス領域では、本中性子センサーの計数率は、中性子フラックスに対して良い相関を示すことが分かった。計測された3重陽子とアルファ線成分を比較すると、厚みに依存して波高が下がっていくのが分かる。以前よりも蒸着精度が向上したためより薄い中性子コンバーターも作成できるようになったためである。より薄い中性子コンバーターも用意してあったが、今回実験時間の都合で実施できなかった。より薄い中性子コンバーターの検出効率の測定実験は来年度に持ち越しである。

次に、このトリトンとアルファ線の両ピークを積分した中性子検出効率を、中性子コンバーターの厚みとの相関で図3にプロットした。このように中性子検出効率は、中性子コンバーターの厚みと良い直線相関を示しており、生成トリトンの飛程が中性子コンバーターの厚みよりも十分に長いコンバーター中のトリトン自己吸収は無視できることが分かる。現在、この実測した中性子検出効率の妥当性をモンテカルロ法シミュレーションで検証中である。

テフロン板に蒸着する天然フッ化リチウムの厚みを制御することで任意の中性子検出効率を有する中性子センサーを作製することができる。これは、本研究の中性子センサーがガンマ線感度を非常に低くしたまま中性子検出感度を変化できるという特徴も有すると言える。中性子発生に用いる照射荷電粒子の種類やエネルギー、中性子発生ターゲットが BNCT 施設毎に異なるため、中性子フラックスも変化し BNCT 施設毎に中性子感度が異なる中性子測定器を用意する必要が生じる。事前に評価された中性子照射場の中性子フラックスから必要な中性子検出効率を見積もり、図 3 に示した中性子検出効率の直線相関を利用することで最適なフッ化リチウムの蒸着厚みを有する中性子センサーを作製できる。その結果、様々な BNCT 施設が必要としている中性子感度を有するリアルタイム中性子測定器を提供できるようになる。

#### 4. 結論

今回、前年度よりもより薄い中性子コンバーターを用いて原子炉内の中性子を計測でき、中性子検出効率を計測評価することができた。熱中性子と中性子コンバーター中のリチウム6との中性子捕獲原子核反応により生成されたトリトンとアルファ線の両粒子線を検出することができた。トリトンの計数率と金放射化法で計測した熱中性子フラックスにより熱中性子に対するリアルタイム中性子センサーの検出効率を評価することができ、両者は良い直線相関を示すことが分かった。この直線相関を利用することにより、様々な BNCT 施設の中性子フラックスに対応したリアルタイム中性子センサーを提供できるようになる。現在、得られた実験結果の妥当性をモンテカルロシミュレーションなどを用いて検証中である。

#### 参考文献

- [1] M. Takada, et al., “SIMULATION OF RESPONSE FUNCTIONS OF FAST NEUTRON SENSORS AND DEVELOPMENT OF THIN NEUTRON SILICON SENSOR”, Radiat. Prot. Dosim. (2014).
- [2] M. Takada, et al., “Characterization of a real-time neutron detector for boron neutron capture therapy using a thin silicon diode”, Radiat. Meas. 137, 106381 (2020).
- [3] M. Takada, et al., “Development of a Real-Time Neutron Beam Detector for Boron Neutron Capture Therapy Using a Thin Silicon Sensor”, Appl. Radiat. Isot. 176, 109856 (2021).

#### 業績一覧

なし

実験・測定補助者

なし

(計 0 名)