

(14) 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

広島大学 工学研究科

遠藤 暁

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

放射線がん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。この非侵襲的な放射線治療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などがあり、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、通称 BNCT がある。この治療法は脳腫瘍、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。このがん治療法は、あらかじめ注射によりホウ素製剤 BPA をがん細胞に集積させ、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核反応($^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$)を起こさせる。このホウ素-10 は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に分裂し、これらの原子核は細胞 1 個分しか飛ばないため、がん細胞のみを破壊できる。

この BNCT を実現するために大強度な中性子ビームが必要である。従来の原子炉を用いた強力な中性子源が粒子線加速器による中性子源へと移行することで、病院併設型の BNCT 治療施設が運用している。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。この中性子強度の変動を金箔などによる中性子放射化法を用いて計測評価している。この計測手法は受動型であり中性子強度の変動をリアルタイムに知ることができないため、中性子の過少/過大照射につながる恐れがある。この中性子強度をリアルタイムに計測できる手法が必要である。BNCT 中性子ビームは強力な中性子ビームに付随し大強度なガンマ線も発生しており、リアルタイムな中性子ビーム計測は非常に困難である。これまで、対電離箱検出器、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)などが開発されてきた。

我々のグループは、この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を目指している。これまで京都大学複合科学研究所の原子炉 BNCT 場、国立がん研究センターの加速器 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備え、リアルタイム中性子モニターの特性評価を行う。特に、中性子センサーの検出効率の熱中性子フラックスや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ビーム強度と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の実用化に近づける。

2. 方法

BNCT 中性子ビームモニターとして開発した厚み $40\ \mu\text{m}$ の薄型シリコンセンサーに極薄のフッ化リチウム(LiF)を蒸着したリアルタイム中性子センサーを実験に用いた。BNCT 中性子ビームに混在するガンマ線は数 $100\ \text{mGy/h}$ であるため、このガンマ線に対する感度を大幅に低減する必要がある。これ

を実現するために、本研究では厚さを $40\text{ }\mu\text{m}$ まで薄くした pn 型ダイオードを用いた[1]。本シリコンセンサーは数 Gy/h までガンマ線を計測可能である。シリコンセンサーに外部から数 V の逆バイアスを印加し動作させている。BNCT 中性子の検出方法は、中性子コンバーターである LiF と中性子が核反応 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ し、生成された3重陽子を pn ダイオードで検出するものである。BNCT 中性子場の熱中性子フラックスは $1\times 10^9\text{ (n/cm}^2\text{/s)}$ に及ぶため、中性子感度を大幅に下げる必要がある。本研究では、天然の LiF (${}^6\text{Li}$ 含有率 7.6%) を厚み $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下に極薄にテフロンやガラスに蒸着して BNCT 用中性子コンバーターを作製した。この中性子ラジエーターを利用することで、BNCT 中性子ビームを計測可能になった[2,3]。図1に本中性子センサーの写真と概略図を示す。センサー部のみ炉心上部から炉心中心部に挿入できるように小型化してある。中性子センサーからの検出信号を炉心上部(炉心外)まで伝送し、プリアンプ(Canberra 2004)で波形整形し、その後 高速波高分析装置(AmpTek PX5)でデータ取得した。数 kcps 以上の高計数率にも対応できる測定系である。原子炉は 1W で定常運転した。炉心中心部の熱中性子フラックスが $1.2\times 10^7\text{ (n cm}^{-2}\text{ s}^{-1})$ 、ガンマ線量率が 300~400 mGy/h であり、中性子センサーの特性評価には好ましい強度である。

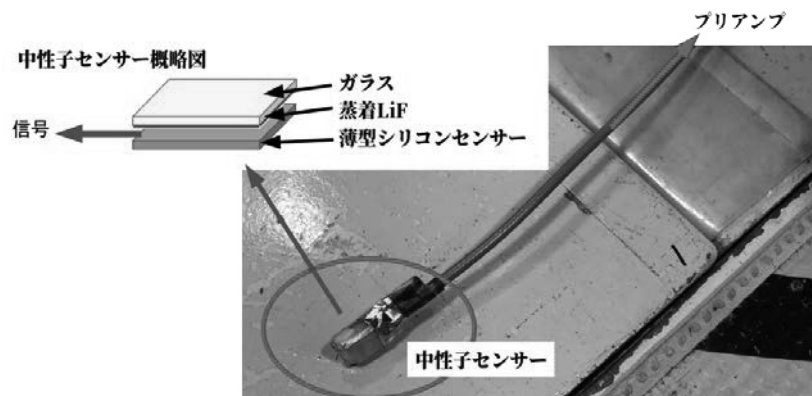


図 1 中性子センサーの写真と概略図

本中性子センサーが様々な BNCT 中性子源の強度に対応できるように、中性子コンバーター(LiF)の厚みを変えて中性子検出効率を変化させることを提案している。蒸着 LiF の厚みと中性子検出効率の相関関係を得ることで LiF 厚みから中性子感度が分かり、中性子強度をリアルタイムに知ることができる。今年度は、蒸着する LiF の厚みを $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 、濃縮リチウムを $0.05\text{ }\mu\text{m}$ に変化させた中性子ラジエーターを準備した。これを原子炉心内の同じ位置に挿入して、中性子感度の違いを調べた。

BNCT 中性子源は、体内の悪性腫瘍の位置で熱中性子フラックスを最大にするために、熱外中性子が多くを占めるエネルギースペクトルを有する。この熱外中性子のみを直接 検出することで中性子ターゲットから発生した熱外中性子の変動をリアルタイムに計測できる。熱中性子検出は照射物によりフラックスが変動する可能性がある。本研究では熱中性子に対する感度を下げたセンサーの開発も行っている。熱中性子を遮へいするために、中性子センサーの周囲をカドミウム板、ボロンゴムでカバーした。また熱外中性子に核反応断面積の共鳴ピークを有するインジウム、銀を中性子コンバーターとして利用することも試みている。

BNCT 中性子ビームには数 MeV の速中性子も混在する施設がある。この速中性子の測定可能性を調べるために、核分裂により発生した中性子に混在する数 100keV 以上の中性子検出を試みた。この数 100keV 以上の速中性子を計測するために上記の LiF の代わりに高密度ポリエチレンに変更した。

その他の測定手法は同じである。本センサーにはダイオードの n 層を作成するために微量に不純物ボロンをドーピングしてある。このボロン中のボロン 10 と熱中性子による核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ を利用することでも中性子を検出できる。この事象は速中性子検出の妨害になる可能性がある。速中性子検出事象を明確にするため、ボロン遮へい体で検出部を遮へいすることで妨害事象を低減した。

3. 結果と考察

a) 中性子コンバーターの厚み依存性

3種類の厚みを有する中性子コンバーターで計測した波高分布図を図 2-(a)に示す。波高分布図の横軸は MCA の波高値(チャンネル数)、縦軸は計数率である。中性子センサーは炉心内のほぼ中心位置に挿入した。波高分布中の 3500ch と 3800ch 付近に確認できるピークは、 $^6\text{Li}(n, t)$ 反応により生成された3重陽子を検出した成分であり、炉心内の熱中性子を確実に検出できていることが分かる。中性子コンバーターが薄いとき、2本のピークを確認できる。これらは生成された3重陽子がシリコンダイオード中の空乏層領域に粒子のエネルギーを一部付与し透過した事象と全エネルギーを付与し空乏層内で停止した事象と考えられる。厚い中性子コンバーターで計測した波高分布には1本のピークのみ確認できる。これは中性子コンバーター中での3重陽子の自己吸収により空乏層内で停止する事象が増加したためと考えられる。波高分布中の 1000ch～2500ch の領域は、散乱した3重陽子を検出した事象と、ダイオード中の不純物ボロンと熱中性子との核反応により生成されたアルファ線を検出した事象である。1000ch 以下は炉心内のガンマ線を検出した事象である。検出部をかなり薄くしたことでガンマ線検出事象を低く抑えられていることが分かる。今後、これらの事象の妥当性を調べるために、モンテカルロシミュレーションを用いて検証していく。

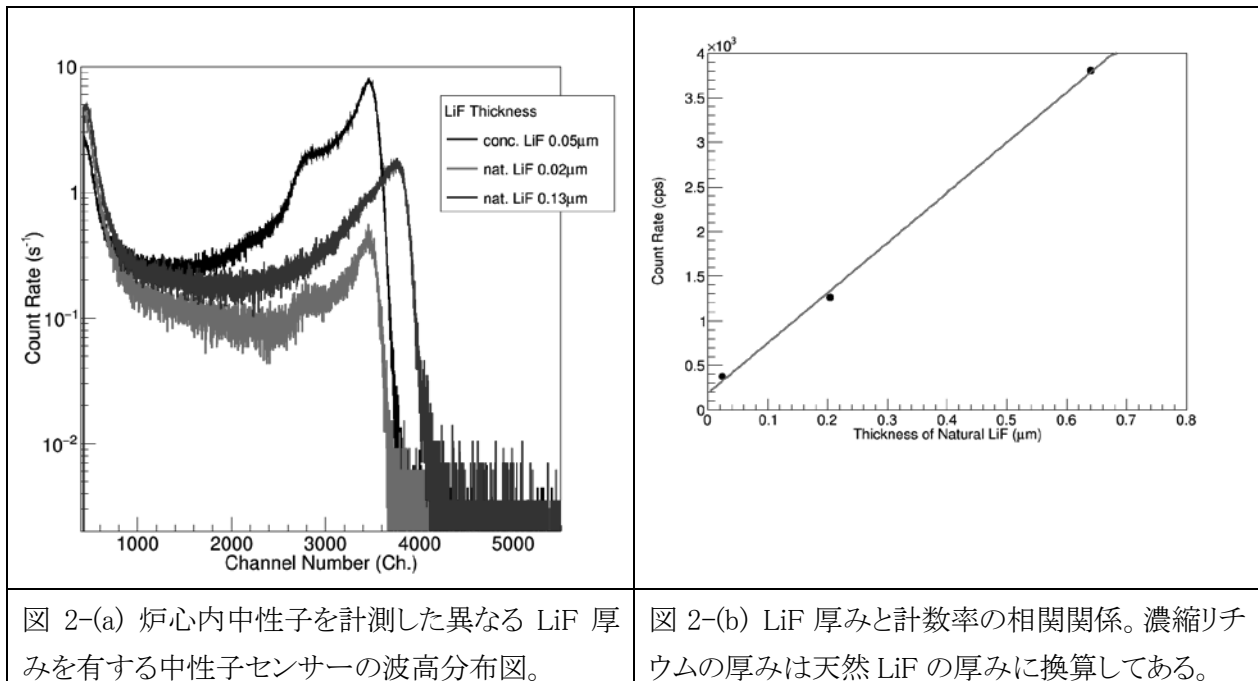


図 2-(a) 炉心内中性子を計測した異なる LiF 厚みを有する中性子センサーの波高分布図。

図 2-(b) LiF 厚みと計数率の相関関係。濃縮リチウムの厚みは天然 LiF の厚みに換算してある。

中性子コンバーターの厚みに対する中性子事象の計数率の相関を図 2-(b)にプロットした。濃縮 LiF の場合、 ^6Li の存在比と天然リチウム中の ^6Li の存在比の比率から、天然リチウムの場合の厚みに換算してプロットしてある。波高分布図の中性子ピーク事象から中性子計数率を導出した。計数率はリチウム厚みと直線相関があることが分かる。今回の実験から、中性子コンバーターの厚みを変えることで中性子センサーの検出感度を制御できる可能性を見出させた。厚いリチウムするとき、生成された3重陽子

の自己吸収により計数率が多少低くなっていると考えられる。

今後、測定点を増やし、直線性の妥当性を調べていく必要がある。

b) 熱外中性子センサー

今回の実験では、インジウムを熱外中性子に対する中性子コンバーターとして利用した。中性子照射により放射化したインジウムから放出されるベータ線を検出することで熱外中性子検出を試みた。測定結果は、中性子放射化によるガンマ線(2次電子)を検出した事象の増加を確認できた。実用化するために、炉心内ガンマ線検出事象との識別が課題である。

c) 速中性子計測

中性子コンバーターとして高密度ポリエチレンを装着して炉心内で計測した波高分布図を図3に示す。波高値が 600ch 以下がガンマ線を検出した事象であることから、600ch 以上に速中性子を検出した事象と考えられる。

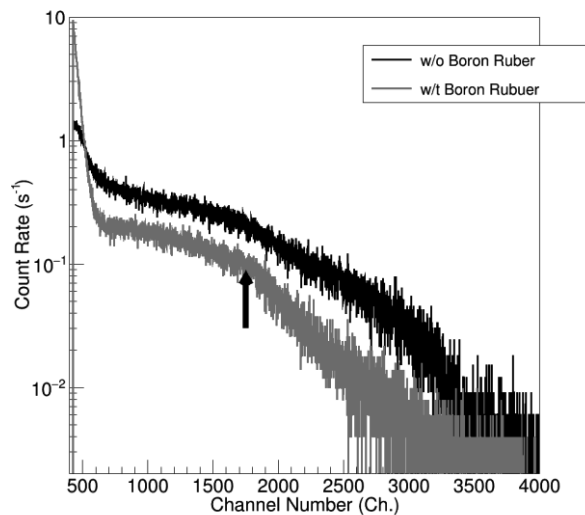


図 3 速中性子を計測した波高分布図。黒とグレイ実線はボロン遮へい体が無い場合と有る場合である。

波高値が 600～1800ch 付近はポリエチレンで反跳された陽子を検出した成分であり、それ以上の波高値の検出事象は不純物ボロンによるアルファ線を検出した成分と考えられる。この熱中性子検出事象を減らすために、ボロンゴムで遮へいした計測も実施した。この遮へいにより 1800ch 以上の事象が減少したことで、矢印で示した 1800ch 付近にエッジを確認できた。今回、初めて速中性子検出実験を実施し、その事象を確認できた。今後、この反跳陽子検出事象をモンテカルロシミュレーションで検証したり、追加実験を行うことで速中性子検出の妥当性を調べていく。最終的に、BNCT 中性子ビームに混在する速中性子フラックス計測と、速中性子のエネルギースペクトル導出に利用していく。

4. 結論

今回、リアルタイム BNCT 中性子センサーを利用した3種類の実験を実施した。炉心内部の中性子ビームをガンマ線事象から識別して計測できることが分かった。中性子コンバーターの厚みを変えることで中性子センサーの検出感度を制御できる可能性を見出せた。熱外中性子検出手法としてインジウムを用いた。実用化には、ガンマ線との識別が今後の課題である。最後に BNCT 中性子ビームに混在する速中性子ビーム計測法を実施した。速中性子と推測される事象を取得できた。今後、計測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していく必要がある。追加実験も行い、計

測結果の妥当性を調べていく。

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., “Development of a Real-Time Neutron Beam Detector for Boron Neutron Capture Therapy Using a Thin Silicon Sensor”, Appl. Radiat. Isot. Submitted (2020).
- [3] M. Takada, et al., “Characterization of a real-time neutron detector for boron neutron capture therapy using a thin silicon diode”, Radiat. Meas. 137, (2020).

業績一覧

なし

実験・測定補助者

なし

(計 0名)