

(3) 熱蛍光体を利用した中性子線・ γ 線弁別測定法に関する研究

首都大学東京大学院 人間健康科学研究科	眞正 浄光、柳澤 伸、丸山 大樹、下村 理紗、高木 瞳、 王 良賢
九州大学大学院 医学研究院	納富 昭弘
量研機構放医研 放射線防護情報統合センター	古場 裕介
近畿大学 原子力研究所	若林 源一郎

[はじめに]

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT:boron neutron capture therapy)は、腫瘍内部に取り込まれたホウ素と中性子線の(n, α)反応を利用した放射線治療法である。中性子線と γ 線では生物学的効果比が異なるため、中性子線と γ 線が混在するBNCTでは、これらを分離して測定することが必要である。現在、BNCTの γ 線量の測定には、熱中性子に感度をほとんど持たない熱蛍光線量計BeOが使用されているが、毒性が高く使用できなくなったため、熱中性子のみを高効率で測定する技術や γ 線のみを測定できる技術の開発が望まれている。

われわれは、これまでに中性子線・ γ 線の混在場において中性子と γ 線に感度を有する $Al_2O_3:Cr$ と γ 線にのみ感度を有するBeOの熱蛍光特性を用いた中性子・ γ 線弁別測定を行ってきた。 $Al_2O_3:Cr$ は、X線や γ 線などの光子に対して熱蛍光を示すことは報告されていたが、中性子の測定には用いられていなかった。しかし、 ^{27}Al の(n, γ)で生成された ^{28}Al が β^- 壊変を伴うため、その β^- 線のエネルギーのほぼ全てを $Al_2O_3:Cr$ が吸収していることが示唆された。そのため、 γ 線だけでなく中性子線にも感度を有することが明らかになった。しかし、中性子線と γ 線を弁別する際には、中性子に対する感度がより高いことが望ましく、 $Al_2O_3:Cr$ を母材料とした熱蛍光体の中性子感度を向上させる課題が残された。これまでに、添加剤としてBを添加して中性子に対する熱蛍光の高感度化を試みたが、期待した効果は得られなかった。

今年度は、 $Al_2O_3:Cr$ をはじめとする熱蛍光体の中性子検出効率の向上および、その中性子線- γ 線弁別測定法に関する研究と、熱中性子と γ 線に起因する熱蛍光を分離できる新たな熱蛍光材料の開発と測定手法に関して研究を行った。

[使用機器]

- ・Pu-Be中性子源及び保管用減速容器
- ・ $Al_2O_3:Cr$ セラミックTLスラブ(千葉セラ)
- ・石英ガラス管封入BeO:Na TLD(UD-170LS、松下電器)
- ・ラジオクロミックフィルム(ガフクロミックフィルムEBT3)
- ・グロー曲線測定装置
- ・金箔及びカドミウム板
- ・端窓型GM計数管(NDE11001、富士電機)
- ・ $LaBr_3(Ce)$ シンチレーション検出器(LABR-1.5x1.5、CANBERRA)

〔実験方法〕

今回は、主に $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ とCdコンバータの併用による熱中性子測定について検討を行った。原理の模式図を図1に示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ は γ 線に感度を有するため、Cdコンバータを設置しない場合の $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ には中性子線と元々の混在場に含まれる γ 線が吸収される。一方で、Cdコンバータを設置した場合にはCdによって熱中性子を γ 線や β 線に変換するため、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ には中性子線由来の γ 線や β 線と元々の混在場に含まれる γ 線が吸収される。また、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ は、中性子線に対する捕獲断面積は小さいため、中性子線由来の γ 線や β 線に対して $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ に吸収された中性子線が無視できる程度に小さいと仮定すると、中性子線由来の γ 線や β 線がCdコンバータ設置時の熱蛍光量の増加分と評価することが出来る。

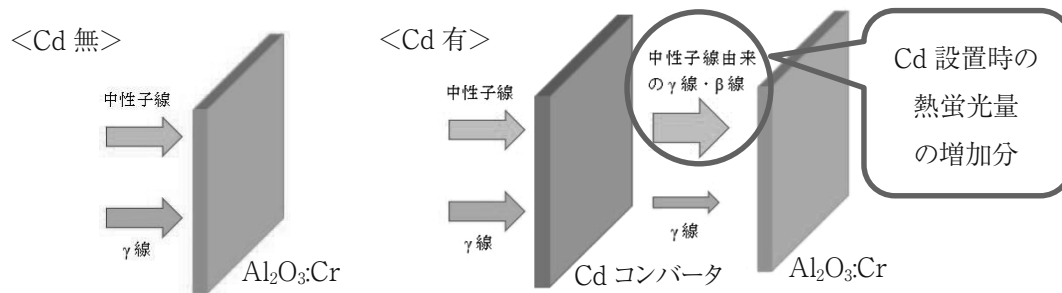


図1. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ とCdコンバータの併用による熱中性子測定の原理

・照射体系

Pu-Be中性子源(1 Ci)を封入した線源保管用中性子減速容器の外壁に $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブとラジオクロミックフィルム、BeO TLDを設置し2時間照射を行った(図2)。その後、各サンプルのTLを測定した。Cdコンバータ設置時の $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ は、図3のようにした。

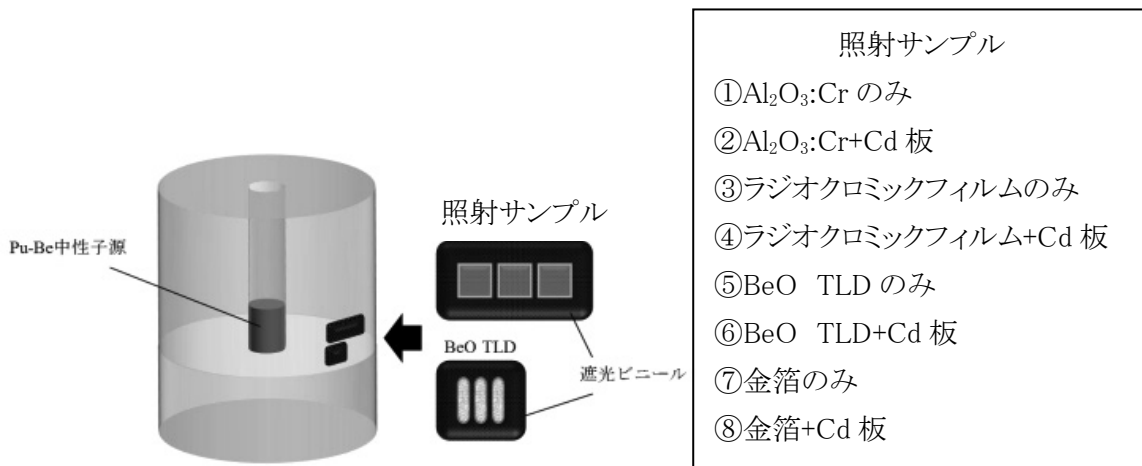


図2 Pu-Be中性子源照射体系

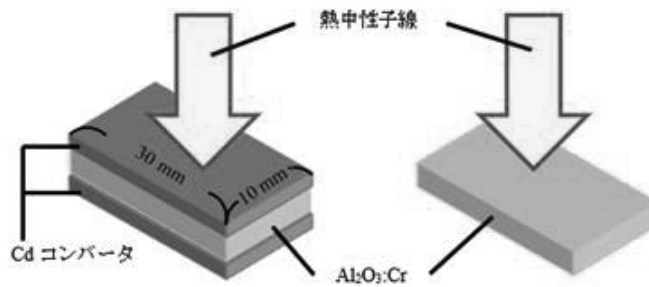


図3. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ へのCdコンバータの設置

・熱中性子束の測定

サンプル位置における熱中性子束は金の放射化法にて求めた。TLD照射と同様の体系で、裸及びカドミウムフィルタで被覆した金箔にPu-Be中性子源を照射して放射化させた。十分に放射化させた後、放出された β 線をGM計数管により測定し金箔の飽和放射能を算出した。裸の金箔とカドミウムフィルタで被覆した金箔の飽和放射能の差から、熱中性子束を求めた。

・グロー曲線の測定

構築した精密グロー曲線の測定システムを図4に示す。測定システムは、45 mm×45 mm 角の特注ヒーターとフotonカウンティングユニット(Hamamatsu Photonics Photosensor module H10722-110)、集光レンズ、赤外線カットフィルター、温度コントローラー(SHIMADEN FP21 programmer)、暗箱、ノートPCから構成される。昇温速度は、市販されているTLリーダーよりも3桁ほど遅くすることが可能であり、精密なTLグロー曲線解析が可能である。今回は、中性子線に対する熱蛍光特性を比較するため、昇温速度を $0.1^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ と精密なグロー曲線の測定を行った。測定波長は、300 nm から700 nmとした。

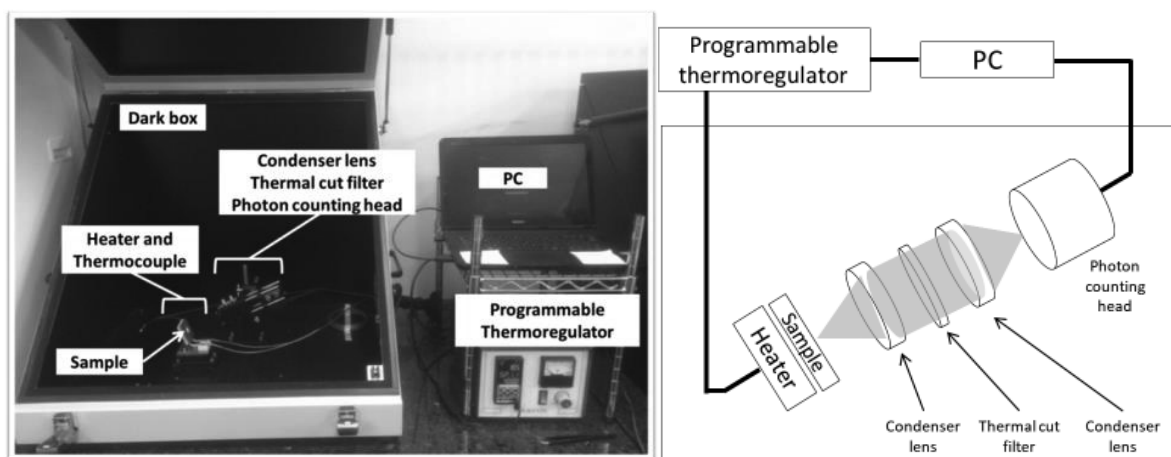


図4. 精密グロー曲線測定システム

・ラジオクロミックフィルムの測定

市販のスキャナーを用いて、フィルム濃度を測定した。

・中性子・ γ 線混在場での γ 線量測定
BeO:Na(UD-170LS、Panasonic)を用いた。

[実験結果]

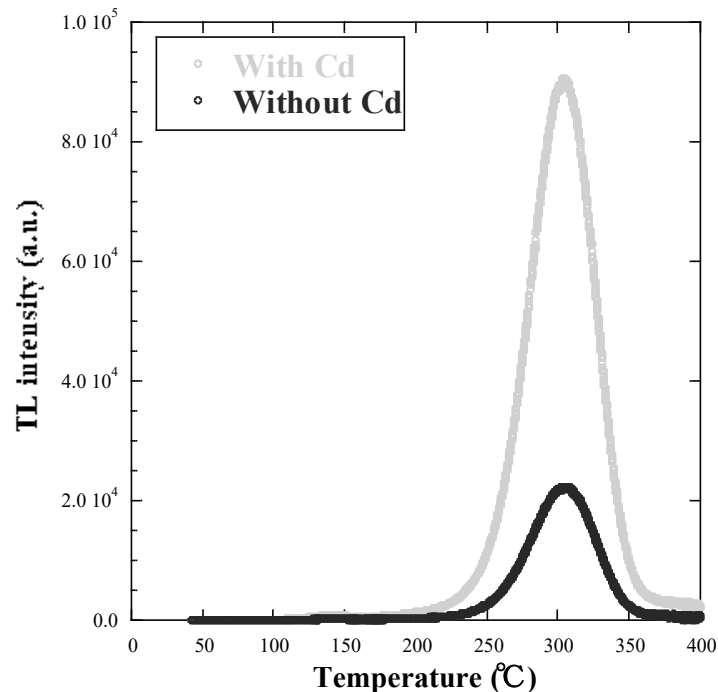


図5. Cdコンバータを使用した時の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ のグロー曲線

図5にCdコンバータを使用した時の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ のグロー曲線を示す。Cdコンバータの使用した時のグロー曲線は、 310°C にグローピークを有し、ピーク強度が大きく増加した。グロー曲線の面積から導出した熱蛍光量は、約3.97倍であった。Cdコンバータの影響は、感度のみであった。

金箔とBeO:Naによる熱中性子束と混在場での γ 線量の測定結果は、それぞれ $9.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と0.23 Gyであった。

[まとめ]

本研究では、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ にCdコンバータを設置することで熱中性子を測定することを目的とし、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ とCdコンバータの併用による有用性を検討した。その結果、Cdコンバータを設置したことで熱蛍光量が増加し、高効率で熱中性子を検出できることが明らかとなった。今後は大面積の $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ とCdコンバータを使用した熱中性子の二次元分布測定を試みる。

[参考文献]

[1]K. Shinsho, Y. Kawaji, S. Yanagisawa *et al.*: X-ray imaging using the thermoluminescent properties of commercial Al_2O_3 ceramic plates, *Applied Radiation and Isotopes*, 111:117-123, 2016

(業績一覧及び論文要旨)

業績一覧(発表のみ)

- 田中誠也, 王良健, 柳澤伸, 若林源一郎, 島津美宙, 田中浩基, 安藤隆之, 眞正浄光, “Cr 添加 Al_2O_3 熱蛍光線量計を用いた熱中性子測定に対する Cd 中性子コンバータの有用性”, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 2019 年 9 月, 札幌
- 田中誠也, 王良健, 柳澤伸, 若林源一郎, 島津美宙, 田中浩基, 安藤隆之, 眞正浄光, “Cd 中性子コンバータを用いた熱中性子測定に対する熱蛍光量とラジオクロミックフィルム濃度の比較”, 次世代放射線シンポジウム 2019, 2019 年 8 月, 東京

(学生等氏名リスト)

実験・測定補助者

古塩 夏芽	菅原 理	田中 誠也	提箸 瑚乃香
中村 柚月	杉岡 奈津美	吉田 実加	

(計 7 名)