

(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
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]

ホウ素中性子補足療法(BNCT)は、がん細胞を選択的に標的化したホウ素薬剤と中性子との反応を利用した新たな放射線治療の一つである。がんを選択的に照射できる強度変調放射線治療などの高精度放射線治療と比して分子レベルでがん細胞を選択的に照射することができるため、放射線有害事象を軽減でき、患者QOLを向上させる次世代がん治療法として大きな期待が寄せられている。わが国の基礎・臨床研究の進歩により、世界に誇る臨床実績を上げるようになったが、分子レベルでがん細胞を選択的に照射できる特徴を最大限に引き出しているとは言えず、更なる技術革新が望まれている。

特に、中性子フルエンスとその分布測定、及び γ 線の線量分布測定は、BNCTの投与線量の決定や有効性を評価するために不可欠で、実際に治療を行う場合の品質保証にも欠かすことができない。しかし、これらを簡易的に測定する技術は未だ研究途上である。一般的に放射線検出器は中性子線と γ 線の両方に感度を有し、中性子のエネルギーの違いによっても核反応が異なるため、その分離測定は容易ではない。特に分布測定では、放射線検出器の構造や組成が複雑なため放射化や散乱の影響により更に困難を伴う。そのため、構造が単純で組成の均一性も高い受動型の検出器による中性子・ γ 線の弁別測定と分布測定が有力な解決法となるが、現存するイメージングプレートやラジオクロミックフィルムでは、用いる組成が限定され、これまでも実用化に至る有用な提案はなされていない。

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 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ [1]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。 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ 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 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ 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、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ 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。昨年度は、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。

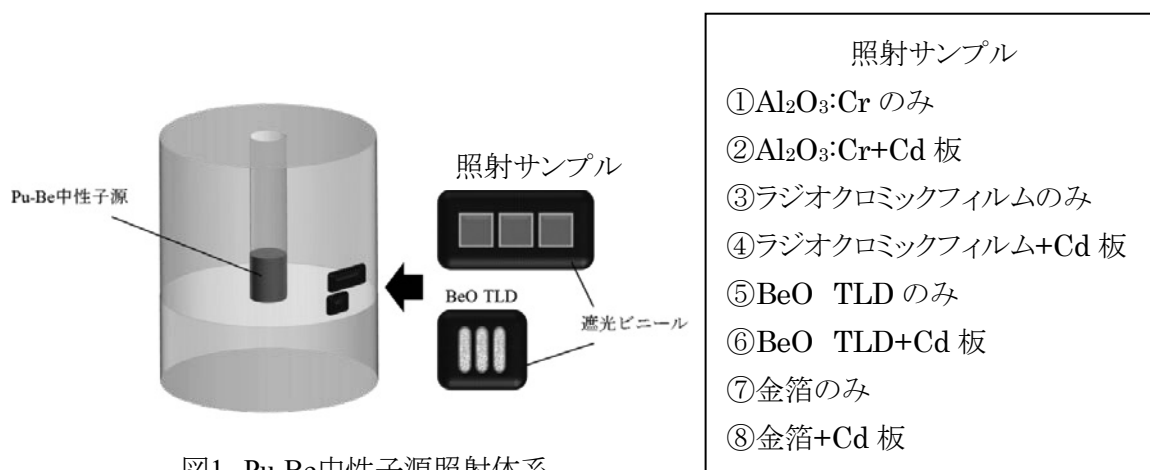
そこで、本申請では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ とCd板状コンバーターを併用して、中性子に対する高感度化を試みたので報告する。

〔使用機器〕

- Pu-Be中性子源及び保管用減速容器
- Al₂O₃: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)
- LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器 (LABR-1.5x1.5、CANBERRA)

〔実験方法〕

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Al₂O₃: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6、24、27時間照射を行った(図1)。その後、各サンプルのTLを測定した。



・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2に示す。測定システムは、45 mm×45 mm角の特注ヒーターとフォトン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°C・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。

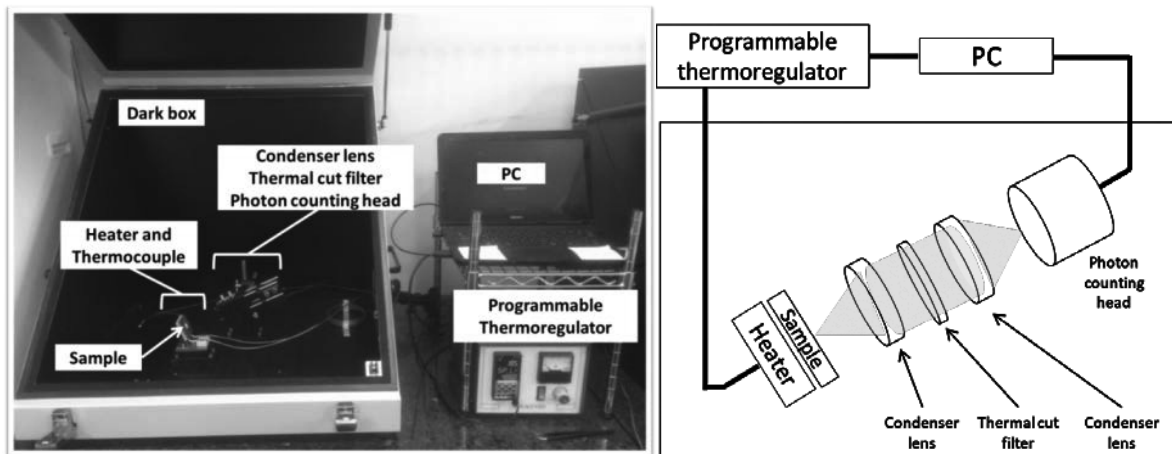


図 2. 精密グロー曲線測定システム

・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。

[実験結果報告]

熱中性子束の測定結果を表1に示す。

表1 金箔の飽和放射能及び熱中性子束

金箔	飽和放射能[1/s]	熱中性子束[1/cm ² /s]
裸	13.9	
カドミウムフィルタ	3.77	
裸-カドミウムフィルタ	10.1	7.40×10^2

また、BeO:Na TLDによる中性子・ γ 線混在場での γ 線量測定結果は、0.5mGy/hであった。

図3にPu-Be中性子源による照射時間とAl₂O₃:Crの熱蛍光強度の関係を示す。いずれの照射時間においてもCdによる増感作用が確認できたが、その割合は5-10%であった。今回使用したPu-Be中性子源による中性子場とBNCTの中性子場では、中性子束も混在する γ 線量もともに大きく異なるため、あらためて検証する必要があるが、Al₂O₃:CrとCd板を用いた熱中性子束測定においては、10²cm⁻²・s⁻¹あたりが検出限界であると思われる。

図4にPu-Be中性子源による照射時間とラジオクロミックフィルム(EBT3)のフィルム濃度の関係を示す。いずれの照射時間においてもCdによる増感作用が確認できなかった。Cdによって中性子から変換された γ 線の多くがラジオクロミックフィルムに吸収されることなく透過したためと考えられる。

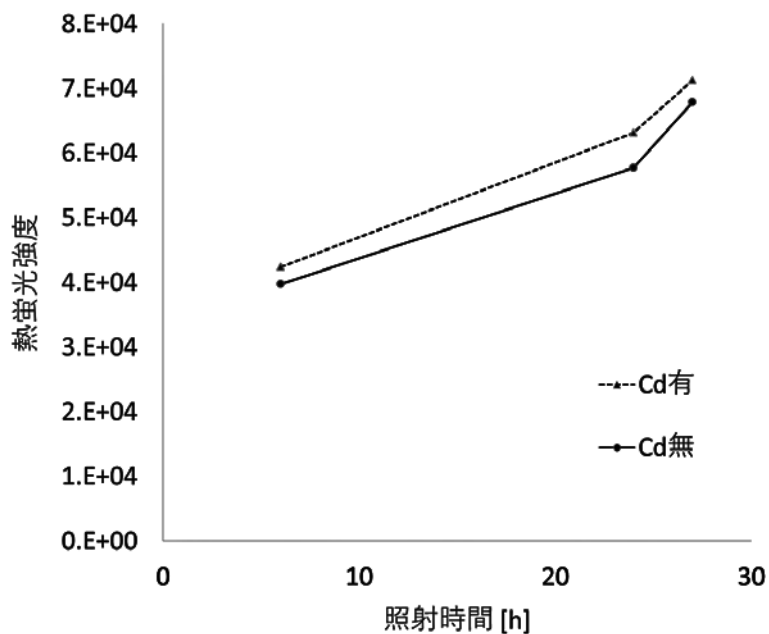


図3. Pu-Be中性子源による照射時間とAl₂O₃:Crの熱蛍光強度

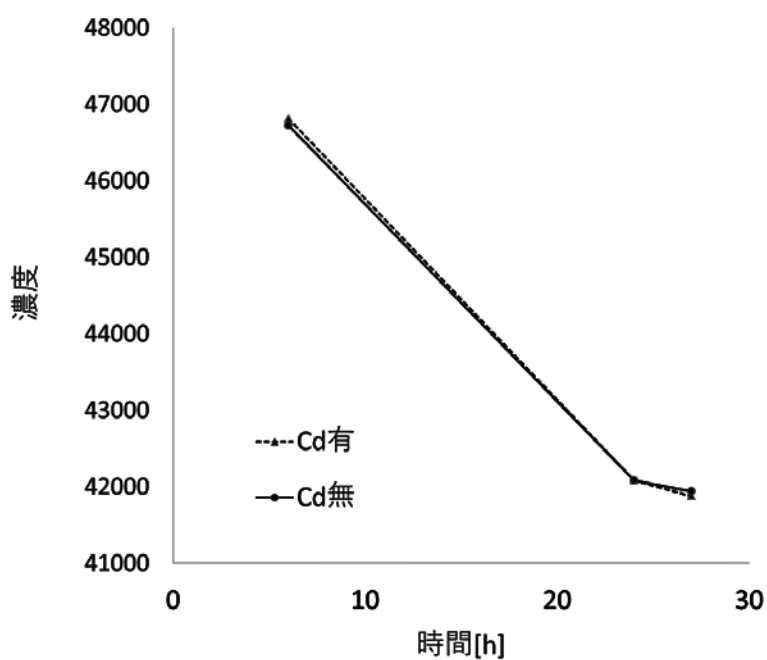


図4. Pu-Be中性子源による照射時間とラジオクロミックフィルム(EBT3)のフィルム濃度

今回行った、Pu-Be中性子源照射によるCd中性子コンバーターを用いたAl₂O₃:Cr CdセラミックTLスラブとラジオクロミックによる中性子測定では、Cdによって変換された中性子由来のγ線やβ線に起因した熱蛍光量と、中性子場に混在していたγ線に起因した熱蛍光量との差が小さく、明らかな優位性は認められなかった。

[参考文献]

[1]K. Shinsho, Y. Kawaji, S. Yanagisawa *et al.*: X-ray imaging using the thermoluminescent properties of commercial Al₂O₃ ceramic plates, Applied Radiation and Isotopes, 111: 117-123, 2016

(業績一覧及び論文要旨 記載例)

なし

(学生等氏名リスト 記載例)

実験・測定補助者

王 良賢	懸川 明貢	川口 綺羅々	工藤 森海
古塩 夏芽	菅原 理	田中 誠也	提箸 瑚乃香

(計 8名)