

### (3) 熱蛍光体を利用した中性子線・ $\gamma$ 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、山本祥太郎、 佐々木大地、角田瑞季、相澤若奈、張 維珊
九州大学大学院 医学研究院	納富昭弘、栗原凌佑、徳永征瑛、柿野 諒
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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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・ $\gamma$ 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。

我々は、これまでに中性子線・ $\gamma$ 線の混在場において中性子と $\gamma$ 線に感度を有する  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  [1]と $\gamma$ 線にのみ感度を有する  $\text{BeO}$  の熱蛍光特性を用いた中性子・ $\gamma$ 線弁別測定を行ってきた。 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  は、X 線や $\gamma$ 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、 $^{27}\text{Al}$  の(n,  $\gamma$ )で生成された  $^{28}\text{Al}$  が $\beta^-$ 壊変を伴うため、その $\beta^-$ 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、 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線を弁別する際には、中性子に対する感度が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。

そこで、本申請では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  を母材料とした熱蛍光体に B を添加して、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]

- ・熱蛍光素子:  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミック (千葉セラ)

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0.05wt%)

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0.05wt%)

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0.05wt%)

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0.05wt%)

- ・石英ガラス管封入  $\text{BeO}:\text{Na}$  TLD (UD-170LS、松下電器)
- ・グロー曲線測定装置
- ・金箔及びカドミウムフィルタ
- ・U8 容器
- ・端窓型 GM 計数管 (NDE11001、富士電機)
- ・ $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 (LABR-1.5x1.5、CANBERRA)

[方法]

1. 照射体系

UTR-KINKI の炉心中央部に、 $10 \times 10 \times 0.7 \text{mm}^3$  の各種  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  セラミックを貼り付けた U8 容器を炉心中央部に挿入した。(図1.)

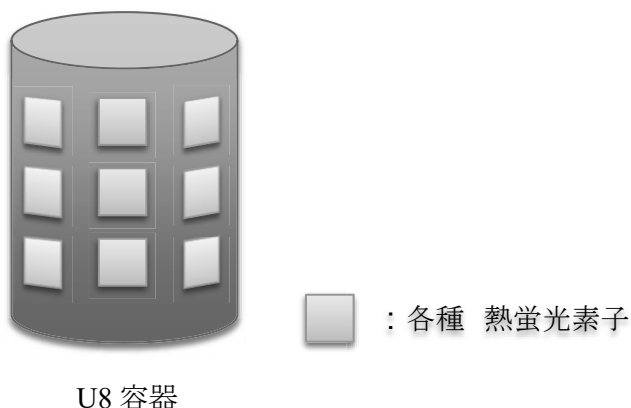


図 1. 照射体系

2. 熱蛍光測定システム

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、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。TL 波長の測定では、図1のフotonカウンティングユニット部を Hamamatsu PMA-11 multichannel CCD detector に組み替えた。

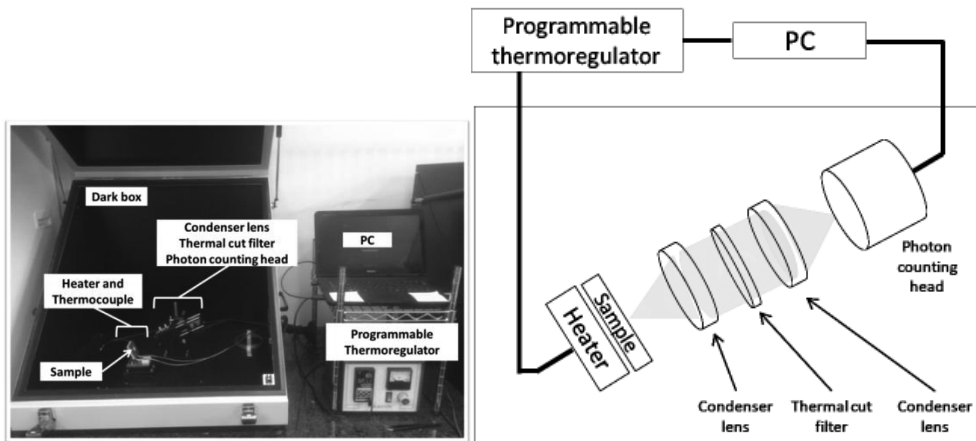


図 2. 精密グロー曲線測定システム

[実験結果報告]

・グロー曲線

図 2. に  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0,05wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0,05wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0,05wt%),  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%),  $^9\text{B}$ (0,05wt%) に UTR-KINKI で 3 時間照射した時(中性子・ $\gamma$  線混在場)のグロー曲線を示す。

いずれの熱蛍光素子もグローピーク温度は、約 300°C であり違いは見られなかった。

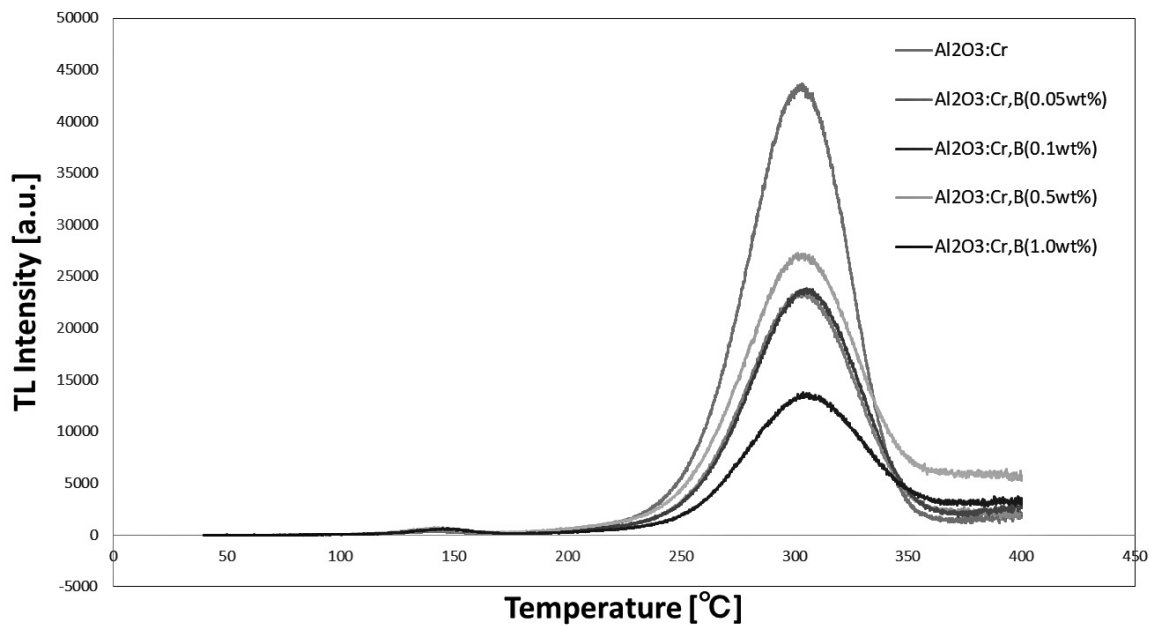


図 3. UTR-KINKI で 3 時間照射した時の  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ,  $^9\text{B}$  のグロー曲線

・熱蛍光波長

図 4. に  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ,  $^9\text{B}$  の熱蛍光波長と温度の関係を示す。熱蛍光の波長は、いずれの温度に

においても  $\text{Cr}^{3+}$  の  ${}^2\text{E} - {}^4\text{A}_2$  遷移に基づく 693 nm の発光が支配的であり、B の添加は熱蛍光波長に影響を与えないことが明らかになった。

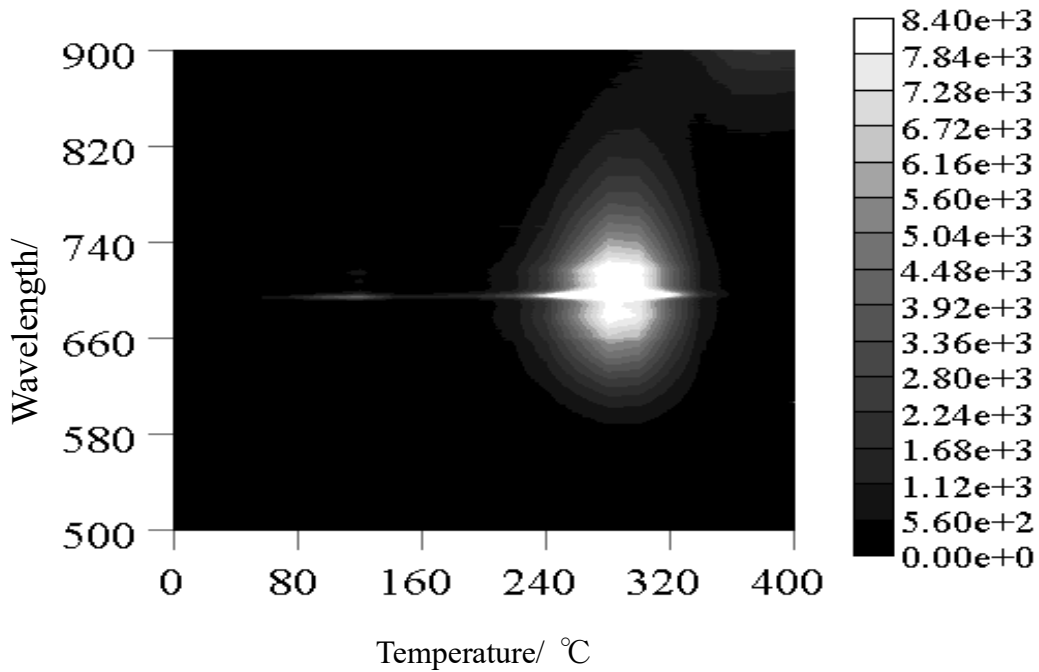


図 4.  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ,  ${}^9\text{B}$  の熱蛍光波長(照射:UTR-KINKI)

・ 照射時間と熱蛍光量

図 5. に UTR-KINKI で  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)、 ${}^9\text{B}$ (0,05wt%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)、 ${}^9\text{B}$ (0,05wt%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)、 ${}^9\text{B}$ (0,05wt%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$  (0.05wt%)、 ${}^9\text{B}$ (0,05wt%) に照射した時の照射時間と熱蛍光量の関係を示す。

いずれの熱蛍光素子も 90 分から 720 分に渡って、熱蛍光量は照射時間に対して高い直線性を示した。また、B の添加量が増えるに伴い熱蛍光の感度が低下したことから、中性子線と  $\gamma$  線のどちらから一方、または、双方に対する熱蛍光特性を低下させることが明らかになった。今後は、中性子線と  $\gamma$  線それぞれに対する B 添加の感度への影響を調べる。

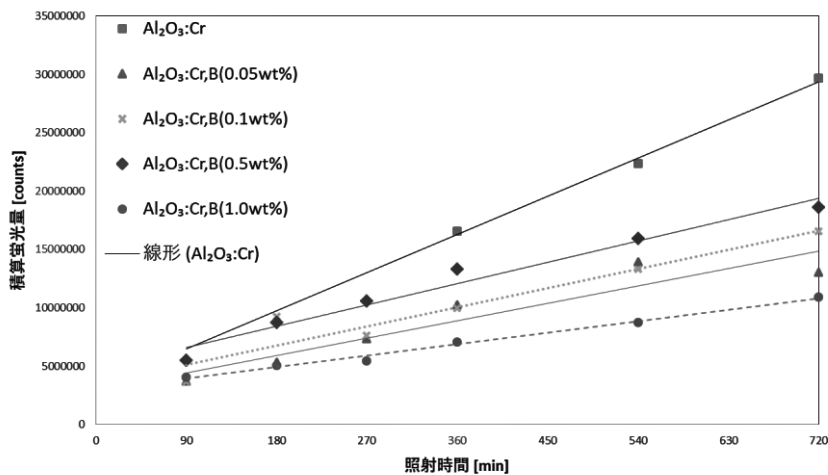


図 5.  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ,  ${}^9\text{B}$  の照射時間に対する熱蛍光量の応答性(照射:UTR-KINKI)

[参考文献]

[1]K. Shinsho, Y. Kawaji, S. Yanagisawa *et al.*: X-ray imaging using the thermoluminescent properties of commercial Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic plates, *Applied Radiation and Isotopes*, 111:117-123, 2016

[業績一覧]

- ・真正浄光, 古場裕介“熱蛍光線量計の諸特性と応用研究の紹介”, *放射線化学* (103) 13-19  
2017年5月
- ・相澤若奈, “Tm 添加 CaSO<sub>4</sub> 熱蛍光素子を用いた中性子線・γ線混在場での弁別測定法の検討”,  
首都大学東京大学院人間健康科学研究科放射線科学域, 2018年1月30日

[学生等氏名リスト]

実験・測定補助者

王 良賢

懸川明貢

川口綺羅々

工藤森海

(計 4名)