

修士学位論文

Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD を
併用した熱蛍光の中性子線・ γ 線弁別解析

(西暦) 2017 年 1 月 6 日 提出

首都大学東京大学院

人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻

放射線科学域

学修番号 : 15897611

氏 名 : 齋藤 雄介

(指導教員名 : 眞正 浄光)

(西暦) 2016 年度 博士前期課程学位論文要旨

学位論文題名

Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD を
併用した熱蛍光の中性子線・γ 線弁別解析

学位の種類： 修士（放射線学）

首都大学東京大学院

人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻 放射線科学域

学修番号 15897611

氏名： 齋藤 雄介

(指導教員名： 眞正 浄光)

ホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy : BNCT）は、ホウ素同位体 ¹⁰B を集積させた腫瘍細胞に中性子線を照射し、核反応により発生する α 粒子と ⁷Li 粒子を利用する、腫瘍への高い線量集中性と強力な殺細胞効果の特徴とした次世代型の放射線治療法である。高度化の進む昨今の放射線治療の中でも、BNCT は細胞単位の革新的な放射線治療法として多大な期待が寄せられている。しかし、安定した中性子源の開発や、より高い腫瘍集積性を有するホウ素薬剤の開発、適応症例の拡大など、医療としての BNCT の普及に向けて残された課題は多い。放射線計測の分野においても、中性子線と γ 線を簡便且つ高精度に弁別可能な、低コストの放射線測定デバイスの開発が求められている。熱蛍光線量計（Thermoluminescent Dosimeter : TLD）を用いた中性子線・γ 線弁別測定法には、中性子吸収断面積の差が大きい二種類の TLD の TL 量差を利用する手法がある。しかし、BNCT の線量域に対応した TLD は市販されておらず、実際の BNCT においてこの手法は行われていない。

そのような背景の中で、本研究では優れた TL 特性と幅広い利用可能性を有する Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブに着目し、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD を併用した TL の中性子線・γ 線弁別解析法について検討を行った。中性子感度が非常に小さく BNCT において積算 γ 線線量計として用いられている BeO TLD を併用することにより、BNCT における中性子束及び γ 線量測定を同時に行うことが期待できる。

本論文では、この中性子線・γ 線弁別解析の手法を報告するとともに、密封中性子源及び加速器中性子源を用いた実測結果について記した。その結果、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブが中性子に感度を有することを明らかにした。また、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの TL 量から熱中性子束の試算を行い、金の放射化法より求めた値の 3.3 倍という結果を得た。この差の原因として、数 keV ないしは数 MeV 領域の中性子の TL への寄与が考えられた。しかし、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの示した中性子感度の要因を解明することで、TL 量から中性子束を算出することのできる可能性が示された。

今後、中性子線・γ 線の弁別照射やモンテカルロ計算の結果との比較を行い、本解析法の有用性を明らかにする必要がある。また、前述したように Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの中性子感度の要因を解明することも大きな課題であるといえる。本研究が今後の BNCT の発展と普及の一助となることを期し、更なる検討を進めていきたい。

目次

要旨

第1章 序論.....	1
1.1 我が国の死因別にみた死亡率の年次推移.....	1
1.2 ホウ素中性子捕捉療法.....	2
1.3 放射化を利用した中性子束測定法.....	3
1.4 TLD を用いた中性子線・ γ 線弁別測定法.....	4
1.5 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブ.....	5
1.6 本研究の目的.....	6
1.7 本研究の概要.....	7
第2章 TLの原理及び測定システム.....	8
2.1 TLの原理.....	8
2.2 グロー曲線.....	9
2.3 TL素子.....	10
2.4 グロー曲線測定システム.....	11
2.5 アニーリング処理.....	13
第3章 TLの中性子線・ γ 線弁別解析法.....	14
3.1 解析法の概要.....	14
3.2 解析法の原理.....	15
3.3 質量エネルギー吸収係数.....	16
第4章 密封中性子源に対するTLの中性子線・ γ 線弁別解析.....	21
4.1 緒言.....	21
4.2 方法.....	21
4.3 結果.....	27
4.4 考察.....	35
第5章 加速器中性子源に対するTLの中性子線・ γ 線弁別解析.....	37
5.1 緒言.....	37
5.2 方法.....	37
5.3 結果.....	41
5.4 考察.....	46
第6章 結語.....	50
参考文献.....	51

謝辞

第1章 序論

1.1 我が国の死因別にみた死亡率の年次推移

厚生労働省が発表した2015年の人口動態統計¹⁾によると、2015年の全死亡者に占める悪性新生物による死亡者の割合は28.7%であり、全死亡者の3.5人に1人が悪性新生物で死亡している。この割合は年々増加傾向にあり、1981年以降死因第一位となっている(図1.1)。今後も患者数が増えることが予想される悪性新生物に対して、その治療法の更なる発展が望まれている。

がんの三大療法として手術療法、化学療法、放射線療法がある。中でも放射線療法は臓器の形態・機能の温存が可能であり、治療後のQOL(生活の質)の高いがん治療法として期待されている。

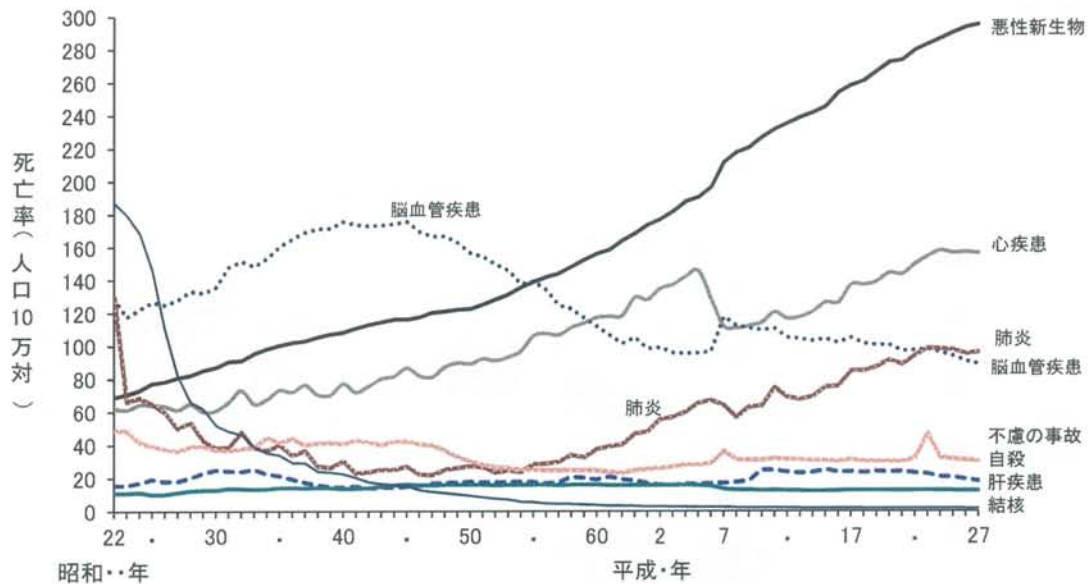


図1.1 主な死因別にみた死亡率の年次推移¹⁾

1.2 ホウ素中性子捕捉療法

高度化の進む昨今の放射線治療には、小照射野を用いて多方向からの照射を行う定位放射線治療（Stereotactic Radiotherapy：SRT）や、標的病巣に合わせて強度を調節した照射を行う強度変調放射線治療（Intensity Modulated Radiation Therapy：IMRT）等がある。これらはいずれも正常組織へのダメージを最小限に抑えながら、標的病巣へ集中的に線量を投与することを目的としている。

近年、腫瘍への高い線量集中性と強力な殺細胞効果の特徴とする次世代型の放射線治療法として、ホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy：BNCT）が注目されている。BNCTでは、ホウ素同位体 ^{10}B を集積させた腫瘍細胞に中性子線を照射し、核反応により発生する α 粒子と ^7Li 粒子を利用する。これらの荷電粒子は腫瘍細胞内で多量のエネルギーを失い、その飛程は腫瘍細胞ほぼ一個分に相当するため、がんを細胞単位で選択的に、効率良く破壊することが可能である（図 1.2）。従来の BNCT は中性子源として原子炉を必要としたが、医療としての確立、普及の難しさから、現在では加速器を中性子源とした BNCT システムについて研究が進められている。

中性子源として原子炉、加速器のいずれにおいても、中性子線の発生と同時に γ 線が発生する。腫瘍及び正常組織の吸収線量評価に際して、この中性子線と γ 線は生物学的効果比が異なるため両者の弁別測定が不可欠である。現在、中性子束の測定は金の放射化法によって行われており、 γ 線の積算線量測定は中性子感度が非常に小さい BeO を成分とする熱蛍光線量計（Thermoluminescent Dosimeter：TLD）を用いて行われている。

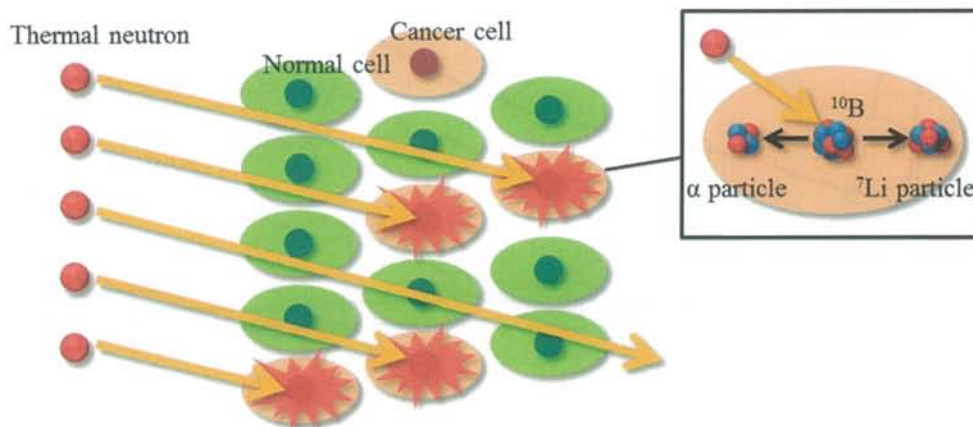


図 1.2 BNCT の照射イメージ図

1.3 放射化を利用した中性子束測定法

BNCTにおいて、細胞に与えられる線量は照射される中性子束の大きさに依存する。ここでは、この中性子束の測定法について述べる。

光子や中性子は直接電離作用を持たないが、光子が主に軌道電子と相互作用を起こすのに対して、中性子は原子核とのみ相互作用を起こす。そして、原子核との相互作用によって発生した二次粒子が電離作用を起こす。このような特性から、中性子線の測定には大きく分けて二種類の方法がとられている。一つはコンバータやラジエータを用いて中性子線を α 線や陽子線に変換する方法である。もう一つは、中性子捕獲反応で生成する放射性核種からの γ 線や β 線を測定する方法であり、放射化法と呼ばれる。

原子核が中性子捕獲反応を起こすと、質量数の1つ大きな励起状態の原子核が生成する。この生成核種は不安定なため、 γ 線や β 線を放出して崩壊し基底状態へ移行する。このときの飽和放射能の値が中性子束に比例することを利用したものが放射化法である。放射化法では、他の中性子検出器に比較し検出器の質量や寸法を小さくすることが可能であるため、測定する中性子場を乱すことが少ない。また、 γ 線の影響を受けないことも大きな利点であり、非常に精度の高い中性子束測定法として知られている。今日では、熱中性子に対して高い放射化断面積(98.5 barn)を有し、生成核種が適度な半減期(2.7日)を持つことから、主な放射化検出器として ^{197}Au が金箔や金線の形で使用されている(図1.3)。

放射化法による熱中性子束の測定において、カドミウム差引法と呼ばれる手法が用いられる。カドミウムは低エネルギー中性子に対して大きな吸収断面積を有するため、1mm程度の厚さのカドミウムフィルタ(図1.4)で放射化検出器を被覆することで、熱中性子による放射化を防ぐことができる。裸の放射化検出器とカドミウムフィルタで被覆した放射化検出器の飽和放射能の差分から、熱中性子束が求められる。

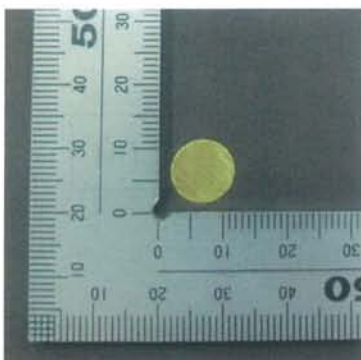


図 1.3 金箔

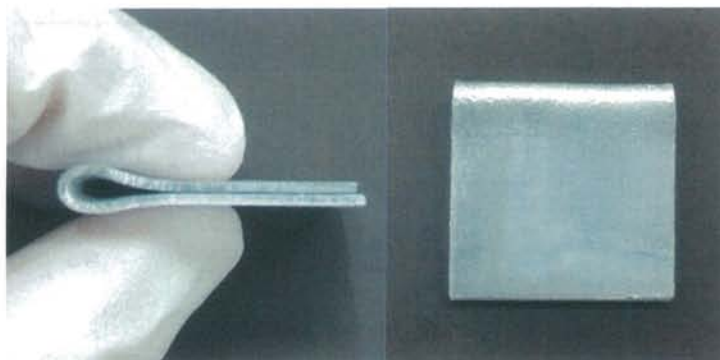


図 1.4 カドミウムフィルタ

1.4 TLD を用いた中性子線・ γ 線弁別測定法

中性子線・ γ 線混在場における両者の弁別測定法として、TLD を用いた手法がある。一般的に TLD の示す熱蛍光 (Thermoluminescence : TL) 量には加算性があることが知られている。中性子線及び γ 線を照射した TLD の全 TL 量は、各線質に対する TL 量の和に一致する。

$$\text{TL}(n, \gamma) = \text{TL}(n) + \text{TL}(\gamma) \quad (1.1)$$

TLD を用いた中性子線・ γ 線弁別測定ではこの特性を利用して、二種類の TLD の TL 量の差分を取る手法が用いられている。

例として、リチウムの同位体 ${}^6\text{Li}$ は熱中性子に高い吸収断面積 (940.4 barn) を有し、 (n, α) 反応により α 粒子と ${}^3\text{H}$ 粒子を生成する。しかし、 ${}^7\text{Li}$ においてこのような反応はみられない。 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ をそれぞれ含有し、それ以外の組成が等しい二種類の TLD を併せて用いると、熱中性子に対して大きな感度差をつくることができる。更に、二つの同位体の γ 線に対する反応特性は等しいため、二つの TLD 読取値の単純な差引により中性子線・ γ 線弁別測定が可能である (図 1.5)。現在、 ${}^6\text{LiF:Mg, Ti}$ と ${}^7\text{LiF:Mg, Ti}$ から成る TLD (TLD-600, TLD-700, Harshaw) をはじめとした幾つかの中性子測定用 TLD が製品化されている。しかし、いずれも BNCT のような数十 Gy の線量域には対応していない。

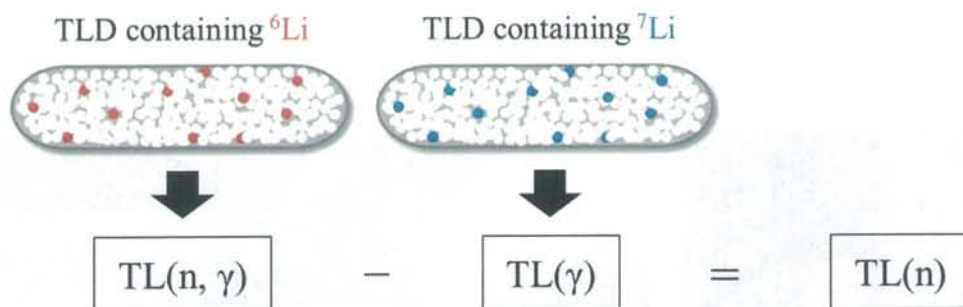


図 1.5 TLD を用いた中性子線・ γ 線弁別測定法

1.5 Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブ

我々は、Al₂O₃を主成分とする市販のセラミック板が光子線や重粒子線に高い TL 感度を有することを発見し、他にも広範なダイナミックレンジや、高空間分解能の二次元イメージング特性を有することを明らかにした²⁾。図 1.6 は、Al₂O₃セラミック板による USB メモリと一円玉硬貨の X 線像である。分解能 50 μm 程度の細密な二次元画像が得られている。

また、我々は Al₂O₃セラミック板の TL 波長が Cr の発光準位に基づく 693 nm であることを明らかにし、Al₂O₃セラミック板に微量の Cr₂O₃を添加した Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブを開発した。これにより、更なる高感度化と TL の熱安定性向上に成功した。上述した特長に加えて、安価且つ繰り返しの使用が可能で経済性が高く、加工が容易であることなどから、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブは幅広い利用可能性を有する TL 素子として期待されている。



図 1.6 Al₂O₃セラミック板による USB メモリと一円玉硬貨の X 線像²⁾

1.6 本研究の目的

BNCTにおいて、腫瘍及び正常組織の吸収線量評価のために中性子線と γ 線の弁別測定が不可欠である。TLDを用いた中性子線・ γ 線弁別測定法には、中性子吸収断面積の差が大きい二種類のTLDのTL量差を利用する手法がある。しかし、BNCTの線量域に対応したTLDは市販されておらず、実際のBNCTにおいてこの手法は行われていない。

我々は、 Al_2O_3 を主成分とするセラミック板の優れたTL特性を発見し、更にTL感度を向上させた $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブを開発した。BNCTにおける簡便な中性子線・ γ 線弁別測定デバイスとして、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブの利用を検討している。

そこで、我々は中性子吸収断面積が非常に小さく、BNCTにおいて γ 線線量計として用いられているBeO TLDに注目し、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブとBeO TLDのTL量差を利用した中性子線・ γ 線弁別測定法を考案した。この手法により、BNCTにおける中性子束及び γ 線量測定を同時且つ簡便に行うことが期待できる。本研究では、この $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブとBeO TLDを併用したTLの中性子線・ γ 線弁別解析法について、その手法と実測結果を報告する。

1.7 本研究の概要

本論文は以下に示す 6 章にて構成される。

第 1 章では、序論として本研究の背景と目的について記した。

第 2 章では、TL の原理と、TL 素子及び測定システムについて記した。

第 3 章では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD を併用した TL の中性子線・ γ 線
弁別解析法の概要及び原理について記した。

第 4 章では、密封中性子源に対する TL の中性子線・ γ 線弁別解析結果について記した。

第 5 章では、加速器中性子源に対する TL の中性子線・ γ 線弁別解析結果について記した。

第 6 章では、結語として本研究の総括と今後の展望について記した。

第2章 TLの原理及び測定システム

2.1 TLの原理

ある種の物質に放射線を照射した後に加熱すると、蛍光を発することがある。これを熱蛍光 (TL) という。この TL 量はある線量範囲で物質の得た吸収線量に比例し、それを利用した線量計が TLD である。

TL 素子に放射線が照射されると、電離作用により価電子帯の電子が励起エネルギーを受けて伝導帯へ移動し、自由電子となる。電子が抜け出した後には正孔が生じる。この自由電子と正孔は物質中の不純物や結晶の格子欠陥による捕獲中心に捕獲され、準安定状態となる。この準安定状態の TL 素子を加熱すると、捕獲されていた電子と正孔が再結合し、その準位差のエネルギーが蛍光として放出される (図 2.1)。

TL 素子が放射線のエネルギーを受けて TL を生じるとき、そのエネルギー変換効率は TL 素子の組成によって異なり、物質固有である。但し実際の TL 測定においては、それ以外にも厚さや密度等、TL 素子の構造によって得られる TL 強度は異なる。本論文では、この TL 素子の構造を考慮したエネルギー変換効率を、発光効率と呼称する。また、物質が得る吸収線量は放射線の線質やエネルギーによって変化するため、TL には線質依存性やエネルギー依存性がみられる。

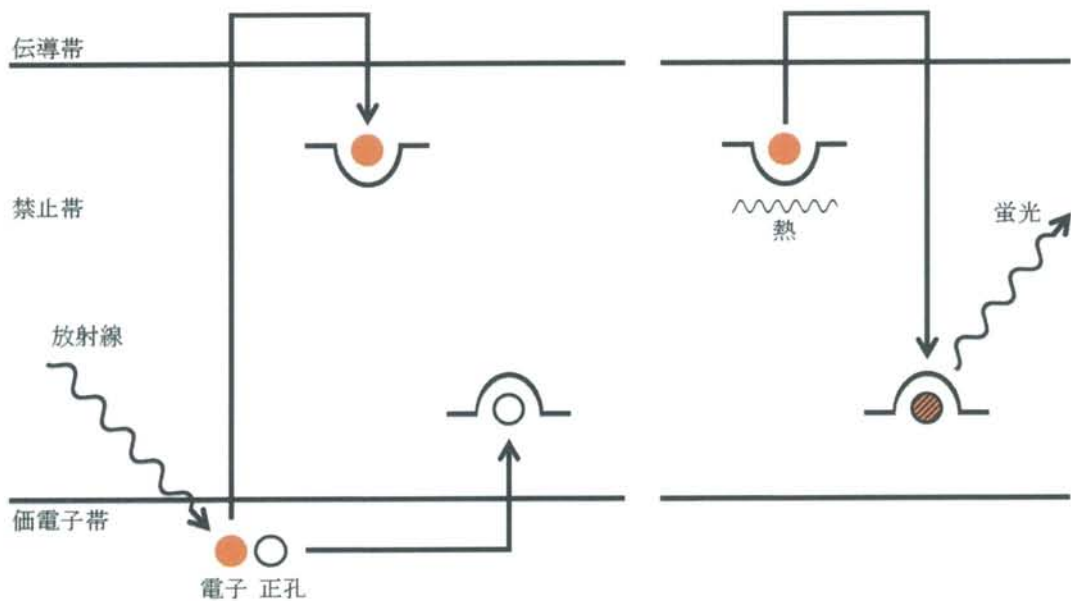


図 2.1 TL の原理

2.2 グロー曲線

TL 素子を一定の昇温速度で加熱して TL を測定したとき、その加熱温度と TL 量の関係を示したグラフをグロー曲線と呼ぶ。グロー曲線の形状や面積、半値幅、グローピーク温度等はその TL 素子の TL 特性が表れる。例として、図 2.2 に昇温速度約 0.13°C/s で加熱した Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブのグロー曲線を示す。

励起された電子が全て発光すると仮定したとき、グロー曲線は以下のモデルによって説明される³⁾。

$$I(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right] \quad (2.1)$$

- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| $I(T)$: 温度 T [K] における TL 強度 | s : 頻度因子 [1/s] |
| n_0 : 捕獲電子数 | k : ボルツマン定数 [eV/K] |
| E : 捕獲エネルギー準位 [eV] | β : 昇温速度 [K/s] |

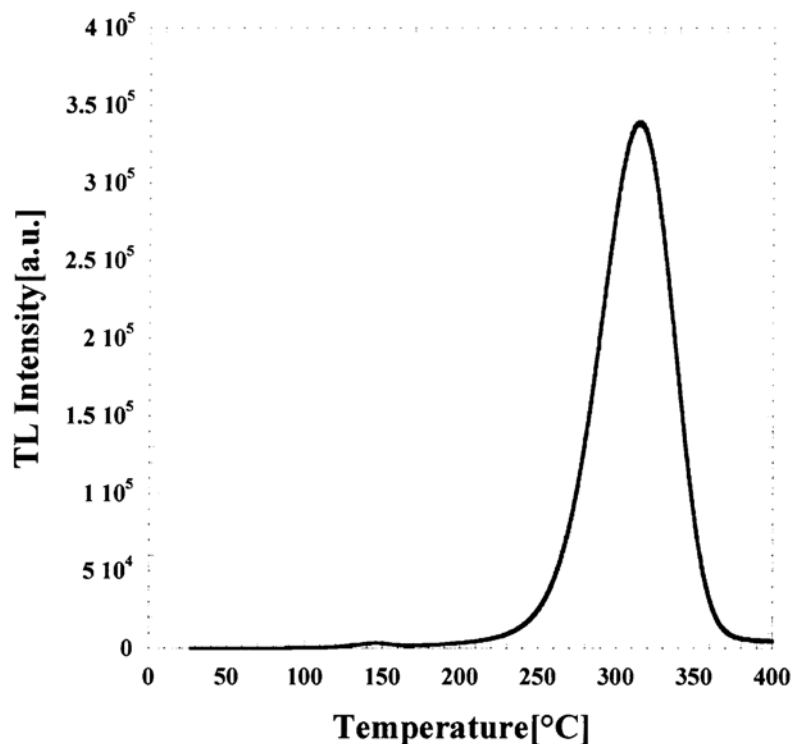


図 2.2 グロー曲線

2.3 TL 素子

一般的に、TLD は小型で安価な受動型積算線量計として、主に個人被ばく線量計や環境モニタリングに用いられている。TL 物質の種類が多いことも特徴のひとつであり、特に生体組織等価の TLD は人体の吸収線量評価に適している。

本研究で使用する $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ (千葉セラ) は、 Al_2O_3 セラミック板に微量の Cr_2O_3 を添加した TL 素子であり、その組成は Al_2O_3 : >99.5wt%、 Cr_2O_3 : 0.05wt% である。また、実効原子番号は 11.1、密度は 3.7 g/cm^3 である。1.5 項でも述べたように、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは以下の特性を有する。

- 光子線や重粒子線に高い TL 感度を有し、TL の熱安定性が高い
- 広範なダイナミックレンジを有する
- 高空間分解能の二次元イメージング特性を有する
- 加工が容易で、ポイント測定から大面積の二次元イメージングまで用途が幅広い

本研究では $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 厚のチップ型素子を使用した (図 2.3)。

BeO TLD (UD-170LS、松下電器) は $\text{BeO}:\text{Na}$ セラミック粒を $2 \text{ mm} \phi \times 12 \text{ mm}$ の石英ガラス管に封入した TL 素子である (図 2.4)。BeO TLD は実効原子番号が 7.6 と生体組織に近く、エネルギー依存性が小さいため、生体組織の吸収線量測定に用いられてきた。また、BeO は中性子に超低感度のため、中性子線・ γ 線混在場における γ 線測定に適した TL 物質である。しかし、従来のホウケイ酸ガラス管封入 BeO TLD (UD-170L、松下電器) はガラス中の元素が原因で、熱中性子に対して $3.2 \times 10^{-12} \text{ Gy}/(1/\text{cm}^2)$ の感度を示すことが報告されている⁴⁾。本 TLD は石英ガラス管を用いることで、その熱中性子感度を $8 \times 10^{-14} \text{ Gy}/(1/\text{cm}^2)$ に低減した TLD である⁵⁾。本研究で利用したこの石英ガラス管封入 BeO TLD は、実際の BNCT において積算 γ 線線量計として使用されている。

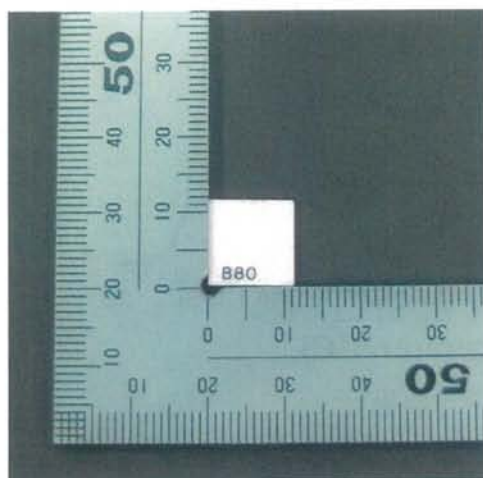


図 2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ

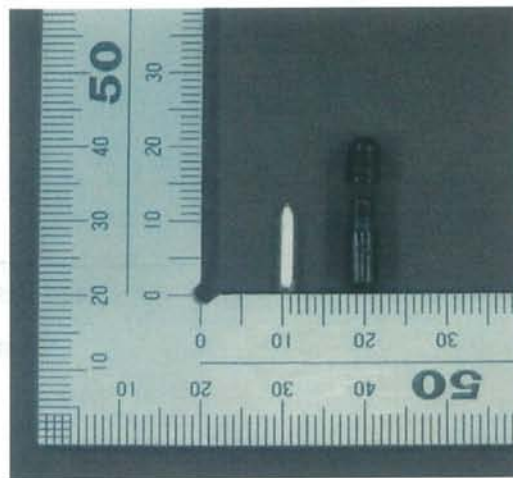


図 2.4 BeO TLD

2.4 グロー曲線測定システム

一般的な TLD 読取装置の昇温速度は 10~40°C/s であるが、速い昇温速度はヒータ温度と TL 素子の温度に差異を生じやすく、詳細な TL 特性の調査に適していない。我々は、約 0.13°C/s (400°C/50 min) の非常に遅い昇温を可能とする独自のグロー曲線測定システムを用いることにより、TL 測定精度の向上に成功した⁶⁾。

このグロー曲線測定システムは真鍮製ヒータ及び光子カウンティングヘッドを内蔵した暗箱、プログラム温度調節器、PC から構成される。構成機器の詳細を表 2.1 に示す。また、図 2.5、図 2.6 にグロー曲線測定システムの全体図及び暗箱内部の拡大図を示す。

表 2.1 測定システム構成機器

機器	製造	型番
暗箱	サイエンテックス	BOX-U2
温度調節器	坂口電熱	SCR-SHQ-A
ヒータ	坂口電熱	特注品
光子カウンティングヘッド	浜松ホトニクス	H11890-210

測定の際は、暗室下にてヒータ上に TL 素子を設置し、暗箱を閉じた後、ヒータ温度を昇温速度 0.13°C/s で室温から 400°C まで上昇させた。ヒータ温度は熱電対でモニタし、プログラム温度調節器で出力を調節した。素子からの TL はレンズで集光して光子カウンティングヘッドで検出し、PC に記録した。測定後、素子を室温から 400°C まで再加熱し、得られたカウントをバックグラウンド値とした。



図 2.5 グロー曲線測定システム（全体図）



図 2.6 グロー曲線測定システム（暗箱内部）

2.5 アニーリング処理

TL 素子の繰り返し使用の際には、読み出されなかった蛍光中心を高温の加熱処理によって初期化する必要がある。これをアニーリング処理という。

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブのアニーリング処理は図 2.7 に示す電気炉及び制御盤 (SAH0869、坂口電熱) を使用し、 1000°C の加熱処理を 1 時間行った。



図 2.7 アニーリング処理装置 ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ)

BeO TLD のアニーリング処理は図 2.8 に示す電気炉 (VTDW-2R、いすゞ製作所) を使用し、 450°C の加熱処理を 1 時間行った。



図 2.8 アニーリング処理装置 (BeO TLD)

第3章 TL の中性子線・ γ 線弁別解析法

3.1 解析法の概要

一般的に TLD を用いた中性子線・ γ 線弁別測定では、中性子吸収断面積の差が大きく、 γ 線に対する TL 特性が等しい二種類の TLD を併用する。一方の中性子吸収断面積がもう一方に対して非常に小さいとき、両者の TL 量差は中性子線に対する TL とみなせるため、中性子線と γ 線とが弁別できる。

本研究は BNCT における中性子線・ γ 線弁別測定デバイスの開発を目的としており、中性子吸収断面積が非常に小さく、実際の BNCT において使用される BeO TLD を $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと併用することを考えた。しかし、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の γ 線に対する TL 特性は異なるため、単純な TL 量の差引で中性子線と γ 線を弁別することはできない。そこで、本研究では BeO TLD の TL 量に γ 線エネルギー依存性及び発光効率の補正を行い、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL 量に変換する手法を検討した。その後、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの全 TL 量との差引により中性子線と γ 線の弁別を図った (図 3.1)。

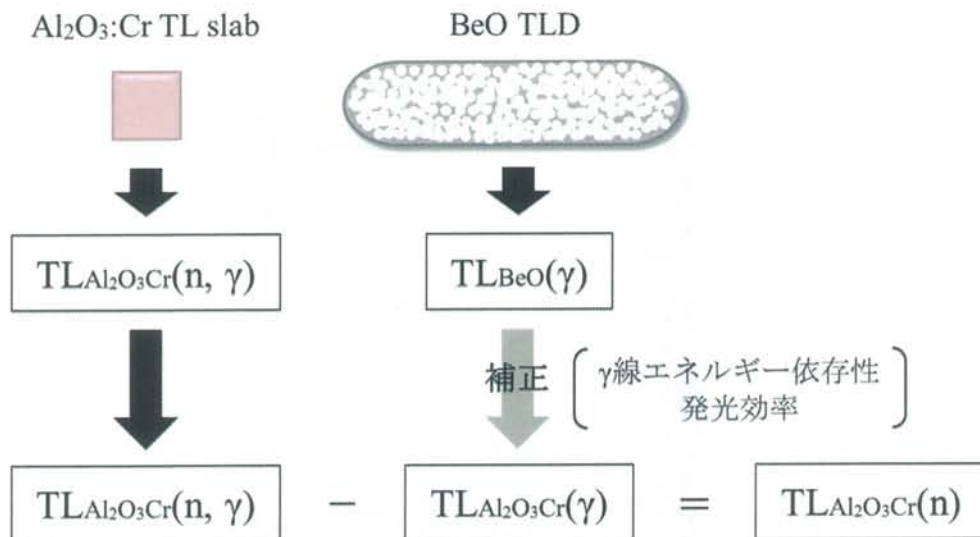


図 3.1 中性子線・ γ 線弁別解析法

3.2 解析法の原理

TL 素子が吸収線量 D で熱蛍光 TL を生じたとき、その発光効率 η は

$$\eta = \text{TL} / D \quad (3.1)$$

式(3.1)より、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の発光効率比 $\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}}$ は

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}} = \frac{\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}} / D_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}}{\text{TL}_{\text{BeO}} / D_{\text{BeO}}} \quad (3.2)$$

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の γ 線吸収線量は γ 線のエネルギーに依存する。このときの γ 線吸収線量比はそれぞれの質量エネルギー吸収係数 μ_{en} / ρ の比で表される。

$$\frac{D_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma)}{D_{\text{BeO}}(\gamma)} = \frac{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}}{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{BeO}}} \quad (3.3)$$

式(3.2)(3.3)より、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の γ 線に対する発光効率比は

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}}(\gamma) = \frac{\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma) / (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}}{\text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) / (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{BeO}}} \quad (3.4)$$

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD に中性子線及び γ 線を照射したとき、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの全 TL は、各線質に対する TL の和に一致すると仮定できる。

$$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\mathbf{n}, \gamma) = \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\mathbf{n}) + \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma) \quad (3.5)$$

また、BeO TLD は中性子に超低感度のため

$$\text{TL}_{\text{BeO}}(\mathbf{n}, \gamma) = \text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) \quad (3.6)$$

とみなせる。式(3.4)の関係より、この BeO TLD の TL に $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の質量エネルギー吸収係数比 $(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}}$ 及び、 γ 線に対する発光効率比 $\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}}(\gamma)$ を乗じることで、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL が求められる。

$$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma) = \text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}} \times \eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr, BeO}}(\gamma) \quad (3.7)$$

式(3.7)の結果を用いて、式(3.5)の関係より $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの中性子線に対する TL が得られる。

$$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\mathbf{n}) = \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\mathbf{n}, \gamma) - \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma) \quad (3.8)$$

3.3 質量エネルギー吸収係数

TL 素子の γ 線エネルギー依存性は、その構成元素の質量エネルギー吸収係数に依存する。質量エネルギー吸収係数は物質の光子エネルギーの吸収の大きさを表す指標であり、元素の種類と光子エネルギーによって異なる。図 3.2 及び表 3.1 に、アルミニウム、酸素、クロム、ベリリウム⁷⁾の質量エネルギー吸収係数を示す。

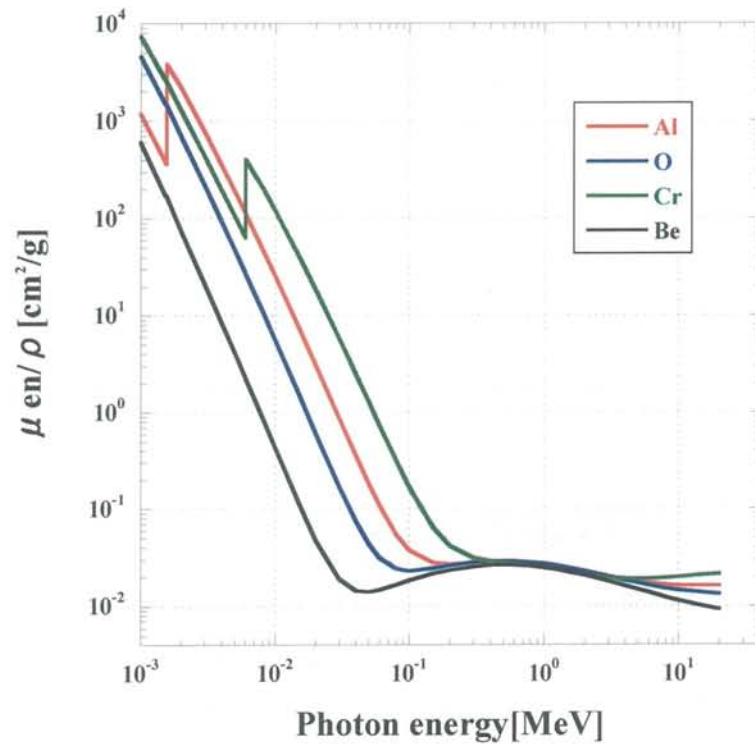


図 3.2 各元素の質量エネルギー吸収係数⁷⁾

表 3.1 各元素の質量エネルギー吸収係数⁷⁾

Photon Energy [MeV]	μ_{en} / ρ [cm ² /g]			
	Al	O	Cr	Be
1.00E-03	1.18E+03	4.58E+03	7.39E+03	6.04E+02
1.50E-03	4.00E+02	1.55E+03	2.69E+03	1.79E+02
1.56E-03	3.60E+02	1.44E+03	2.52E+03	1.67E+02
1.56E-03	3.83E+03	1.44E+03	2.52E+03	1.67E+02
2.00E-03	2.20E+03	6.93E+02	1.27E+03	7.42E+01
3.00E-03	7.73E+02	2.16E+02	4.31E+02	2.09E+01
4.00E-03	3.55E+02	9.22E+01	1.96E+02	8.37E+00
5.00E-03	1.90E+02	4.72E+01	1.06E+02	4.08E+00
5.99E-03	1.14E+02	2.73E+01	6.38E+01	2.28E+00
5.99E-03	1.14E+02	2.73E+01	4.03E+02	2.28E+00
6.00E-03	1.13E+02	2.71E+01	4.03E+02	2.26E+00
8.00E-03	4.92E+01	1.12E+01	2.09E+02	8.84E-01
1.00E-02	2.54E+01	5.57E+00	1.19E+02	4.26E-01
1.50E-02	7.49E+00	1.55E+00	4.09E+01	1.14E-01
2.00E-02	3.09E+00	6.18E-01	1.85E+01	4.78E-02
3.00E-02	8.78E-01	1.73E-01	5.78E+00	1.90E-02
4.00E-02	3.60E-01	7.53E-02	2.48E+00	1.44E-02
5.00E-02	1.84E-01	4.41E-02	1.28E+00	1.40E-02
6.00E-02	1.10E-01	3.21E-02	7.42E-01	1.47E-02
8.00E-02	5.51E-02	2.47E-02	3.18E-01	1.66E-02
1.00E-01	3.79E-02	2.36E-02	1.70E-01	1.84E-02
1.50E-01	2.83E-02	2.51E-02	6.54E-02	2.16E-02
2.00E-01	2.75E-02	2.68E-02	4.21E-02	2.35E-02
3.00E-01	2.82E-02	2.88E-02	3.16E-02	2.55E-02
4.00E-01	2.86E-02	2.95E-02	2.94E-02	2.62E-02
5.00E-01	2.87E-02	2.97E-02	2.85E-02	2.64E-02
6.00E-01	2.85E-02	2.96E-02	2.79E-02	2.63E-02
8.00E-01	2.78E-02	2.89E-02	2.68E-02	2.57E-02
1.00E+00	2.69E-02	2.79E-02	2.58E-02	2.48E-02
1.25E+00	2.57E-02	2.67E-02	2.45E-02	2.37E-02
1.50E+00	2.45E-02	2.55E-02	2.34E-02	2.27E-02
2.00E+00	2.27E-02	2.35E-02	2.18E-02	2.08E-02
3.00E+00	2.02E-02	2.07E-02	2.01E-02	1.81E-02
4.00E+00	1.88E-02	1.88E-02	1.95E-02	1.62E-02
5.00E+00	1.80E-02	1.76E-02	1.93E-02	1.48E-02
6.00E+00	1.74E-02	1.67E-02	1.93E-02	1.38E-02
8.00E+00	1.68E-02	1.55E-02	1.97E-02	1.23E-02
1.00E+01	1.65E-02	1.48E-02	2.02E-02	1.14E-02
1.50E+01	1.63E-02	1.40E-02	2.11E-02	1.00E-02
2.00E+01	1.63E-02	1.36E-02	2.17E-02	9.29E-03

Al₂O₃:Cr 及び BeO の質量エネルギー吸収係数を算出するため、式(3.9)よりそれぞれの構成元素の質量比を求めた。Al₂O₃:Cr 中の元素の質量比は、Al₂O₃ 及び Cr₂O₃ 中の元素の質量比を基に求めた。組成比は Al₂O₃ : 99.95wt%、Cr₂O₃ : 0.05wt%とした。結果を表 3.2 に示す。

$$\omega_i = \frac{N_i \times A_i}{M} \times 100 \quad (3.9)$$

ω_i : 元素 i の質量比[%] N_i : 1 分子中の元素 i の原子数

M : 分子量 A_i : 元素 i の原子量

表 3.2 Al₂O₃:Cr 及び BeO の構成元素の質量比

構成元素	Al ₂ O ₃ :Cr			BeO	
	Al	O	Cr	Be	O
質量比[%]	52.90	47.07	0.03	36.03	63.97

表 3.2 の結果を用いて、式(3.10)より $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ 及び BeO の質量エネルギー吸収係数を算出した。結果を図 3.3 及び表 3.3 に示す。本解析法では、この結果と照射した γ 線のエネルギースペクトルから平均質量エネルギー吸収係数を導出し、 γ 線エネルギー依存性の補正に用いる。

$$\mu_{\text{en}} / \rho(E) = \sum_i \left\{ (\mu_{\text{en}} / \rho)_i(E) \times \frac{\omega_i}{100} \right\} \quad (3.10)$$

$(\mu_{\text{en}} / \rho)_i(E)$: 光子エネルギー E における元素 i の質量エネルギー吸収係数[cm^2/g]

ω_i : 元素 i の質量比[%]

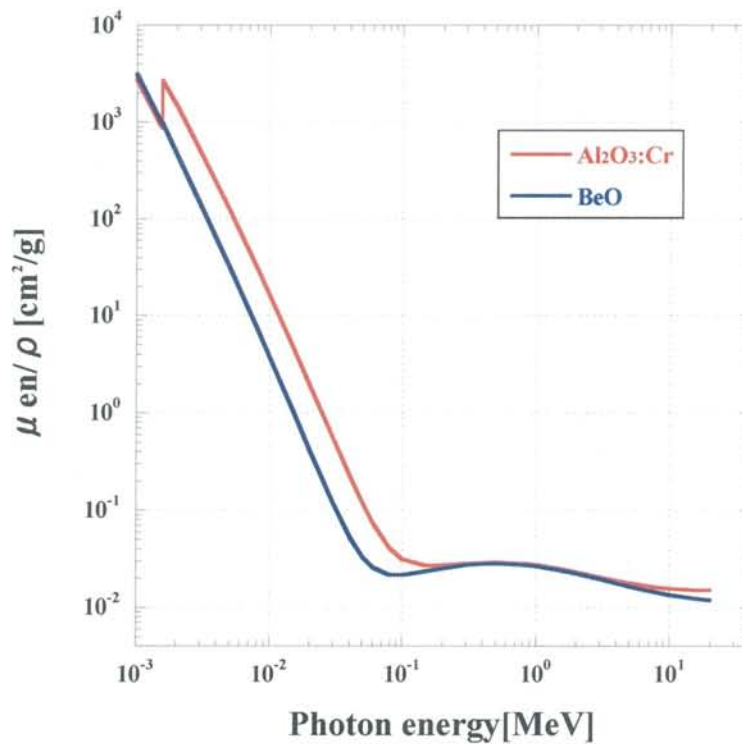


図 3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ 及び BeO の質量エネルギー吸収係数

表 3.3 Al₂O₃:Cr 及び BeO の質量エネルギー吸収係数

Photon Energy [MeV]	μ_{en} / ρ [cm ² /g]	
	Al ₂ O ₃ :Cr	BeO
1.00E-03	2.78E+03	3.14E+03
1.50E-03	9.40E+02	1.05E+03
1.56E-03	8.71E+02	9.83E+02
1.56E-03	2.71E+03	9.83E+02
2.00E-03	1.49E+03	4.70E+02
3.00E-03	5.11E+02	1.46E+02
4.00E-03	2.31E+02	6.20E+01
5.00E-03	1.23E+02	3.16E+01
5.99E-03	7.32E+01	1.83E+01
5.99E-03	7.34E+01	1.83E+01
6.00E-03	7.28E+01	1.81E+01
8.00E-03	3.13E+01	7.46E+00
1.00E-02	1.61E+01	3.71E+00
1.50E-02	4.70E+00	1.03E+00
2.00E-02	1.93E+00	4.13E-01
3.00E-02	5.48E-01	1.17E-01
4.00E-02	2.27E-01	5.34E-02
5.00E-02	1.19E-01	3.33E-02
6.00E-02	7.35E-02	2.58E-02
8.00E-02	4.09E-02	2.18E-02
1.00E-01	3.12E-02	2.17E-02
1.50E-01	2.68E-02	2.38E-02
2.00E-01	2.71E-02	2.56E-02
3.00E-01	2.84E-02	2.76E-02
4.00E-01	2.90E-02	2.83E-02
5.00E-01	2.92E-02	2.85E-02
6.00E-01	2.90E-02	2.84E-02
8.00E-01	2.83E-02	2.77E-02
1.00E+00	2.74E-02	2.68E-02
1.25E+00	2.61E-02	2.56E-02
1.50E+00	2.50E-02	2.45E-02
2.00E+00	2.31E-02	2.25E-02
3.00E+00	2.04E-02	1.97E-02
4.00E+00	1.88E-02	1.79E-02
5.00E+00	1.78E-02	1.66E-02
6.00E+00	1.71E-02	1.56E-02
8.00E+00	1.62E-02	1.44E-02
1.00E+01	1.57E-02	1.36E-02
1.50E+01	1.52E-02	1.25E-02
2.00E+01	1.50E-02	1.20E-02

第4章 密封中性子源に対する TL の中性子線・ γ 線弁別解析

4.1 緒言

我々は、BNCT における簡便な中性子線・ γ 線弁別測定デバイスの開発を目的として、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD を併用した TL の中性子線・ γ 線弁別解析法を考案した。本章では、本解析法を用いた実測結果について報告する。まず、我々は簡易な中性子場として、近畿大学原子炉に備える原子炉起動用 Pu-Be 密封中性子源を用いて照射及び解析を行った。

4.2 方法

4.2.1 素子間個体差調査

TL 感度の素子間個体差を補正するため、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD 全素子にリニアック (Clinac-21EX, Varian) にて 6 MV X 線を 5 Gy 照射した。SCD は 100 cm とし、素子の上下に 10 cm 厚のタフウォーターファントムを設置して照射を行った。照射体系を図 4.1 に示す。照射後、各 TL 素子のグロー曲線を測定した。昇温速度 $0.13^\circ\text{C}/\text{s}$ で室温から 400°C まで加熱し、1 秒間隔で積算 TL 量を収集した。



図 4.1 リニアック照射体系

4.2.2 発光効率比導出

Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD の発光効率比を求めるため、量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所に備えるコバルト照射装置 (図 4.2) にて、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブ及び BeO TLD に ⁶⁰Co-γ 線を空気カーマ 0.5 Gy 照射した。照射後、各 TL 素子のグロー曲線を測定した。昇温速度 0.13°C/s で室温から 400°C まで加熱し、1 秒間隔で積算 TL 量を収集した。

この TL 量を用いて、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの発光効率は次式で定義される。

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}} = \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}} / D_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}} \quad (4.1)$$

ここで、 $\frac{D_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma)}{D_{\text{Air}}(\gamma)} = \frac{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}}{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Air}}}$ の関係より

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}} = \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma) / [D_{\text{Air}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}, \text{Air}}] \quad (4.2)$$

となり、式(4.2)から Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの発光効率が求められる。同様にして BeO TLD の発光効率を求め、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD の発光効率比を導出した。



図 4.2 コバルト照射装置

4.2.3 密封中性子源照射及び TL 測定

アニーリング処理を行った $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD を 3 個ずつ遮光ビニールで被覆し、照射サンプルとした。Pu-Be 密封中性子源 (1 Ci) を封入した線源保管用中性子減速材の外壁にサンプルを設置し、7, 17, 24, 30 時間照射を行った。照射体系を図 4.3 に示す。照射後、各 TL 素子のグロー曲線を測定した。昇温速度 $0.13^\circ\text{C}/\text{s}$ で室温から 400°C まで加熱し、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは 1 秒間隔、 BeO TLD は 10 秒間隔で積算 TL 量を収集した。

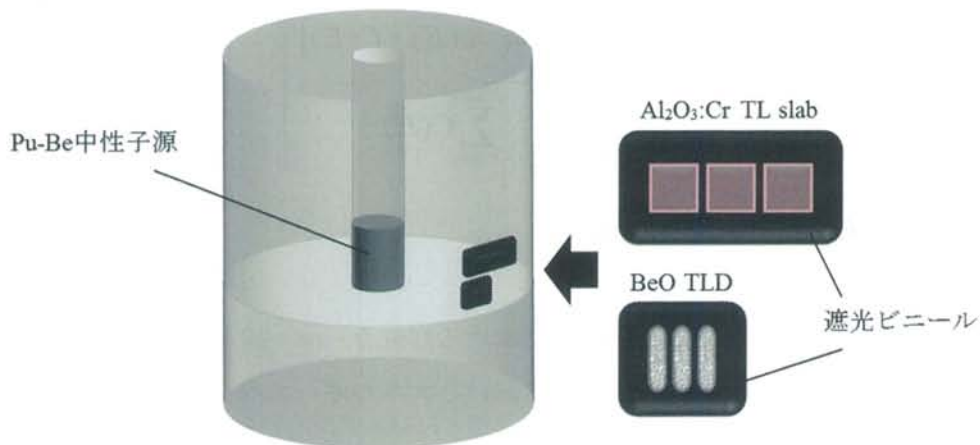


図 4.3 密封中性子源照射体系

4.2.4 γ 線エネルギースペクトル測定

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD の平均質量エネルギー吸収係数を決定するため、サンプル位置における γ 線エネルギースペクトルを測定した。測定には図 4.4 に示す $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 (LABR-1.5x1.5、CANBERRA) を使用した。検出器のエネルギー較正は ^{60}Co 及び ^{137}Cs 線源を用いて行った。



図 4.4 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器

4.2.5 γ 線量及び熱中性子束測定

サンプル位置における γ 線量はBeO TLDを用いて測定した。TL測定と同様の体系で、BeO TLDに密封中性子源を7, 17, 24, 30時間照射した。照射後、図4.5に示すTLD読取装置(UD-512、Panasonic)にて線量当量を測定し、式(4.3)より空気カーマに換算した。空気カーマ線量当量換算係数は、4.2.4項にて測定した γ 線エネルギー範囲における係数を表4.1⁸⁾から内挿して求め、スペクトルの計数値で加重平均した。

$$K_{\text{air}} = \frac{X}{\frac{\sum_{E \text{ min}}^{E \text{ max}} \{k_{\text{sv, Gy}}(E) \times C(E)\}}{\sum_{E \text{ min}}^{E \text{ max}} C(E)}} \quad (4.3)$$

K_{air} : 空気カーマ[mGy]

X : 線量当量[mSv]

$k_{\text{sv, Gy}}(E)$: γ 線エネルギー E における空気カーマ線量当量換算係数

$C(E)$: γ 線エネルギー E におけるエネルギースペクトルの計数値



図 4.5 TLD 読取装置

表 4.1 空気カーマ-1 cm 線量当量換算係数⁸⁾

Photon Energy [MeV]	換算係数 $k_{sv, Gy}$
0.010	0.008
0.015	0.26
0.020	0.61
0.030	1.10
0.040	1.47
0.050	1.67
0.060	1.74
0.080	1.72
0.10	1.65
0.15	1.49
0.20	1.40
0.30	1.31
0.40	1.26
0.50	1.23
0.60	1.21
0.66	1.20
0.80	1.19
1.00	1.17
1.25	1.16
1.5	1.15
2.0	1.14
3.0	1.13
4.0	1.12
5.0	1.11
6.0	1.11
8.0	1.11
10	1.10

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。TL 測定と同様の体系で、裸及びカドミウムフィルタで被覆した金箔に密封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 線を図 4.6 に示す端窓型 GM 計数管 (NDE11001、富士電機) により測定し、式(4.4)から金箔の飽和放射能を算出した。GM 計数管の検出効率 ϵ は U_3O_8 標準線源を用いて求めた。更に、式(4.5)より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、熱中性子束を算出した。

$$A_{\infty} = \frac{\lambda_{\text{Ib}} T_c C_{\text{av}} (1 + \alpha)}{\epsilon (1 - e^{-\lambda_{\text{Ib}} T_i}) e^{-\lambda_{\text{Ib}} T_w} (1 - e^{-\lambda_{\text{Ib}} T_c})} \quad (4.4)$$

$$\phi_{\text{th}} = \frac{A_{\infty, \text{bare}} - A_{\infty, \text{Cd}}}{N_{\text{Ia}} \sigma_{\text{Ia}}} \quad (4.5)$$

- | | |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| A_{∞} : 飽和放射能[1/s] | λ_{Ib} : 生成元素 Ib の崩壊定数[1/s] |
| T_i : 照射時間[s] | C_{av} : 平均計数率[1/s] |
| T_c : 測定時間[s] | ϵ : 検出効率 |
| T_w : 照射終了から測定開始までの待ち時間[s] | α : 内部転換係数 (=0.041) |
| ϕ_{th} : 熱中性子束[1/cm ² /s] | N_{Ia} : 放射化元素 Ia の原子数 |
| σ_{Ia} : 放射化元素 Ia の熱中性子放射化断面積[cm ²] | |



図 4.6 GM 計数管

4.3 結果

4.3.1 素子間個体差調査

測定した TL 量の内、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは 200-400°C、BeO TLD は 100-200°C を積算範囲として積算 TL 量を算出した。これを全体の平均値で除し規格化した。結果を図 4.7 及び図 4.8 に示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは最大 20%、BeO TLD は最大 37% の個体差がみられた。この結果を用いて TL 感度の素子間個体差を補正した。

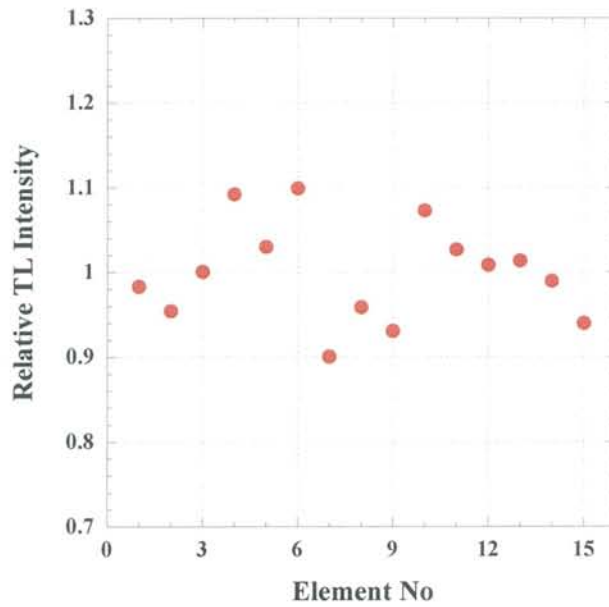


図 4.7 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの素子間個体差

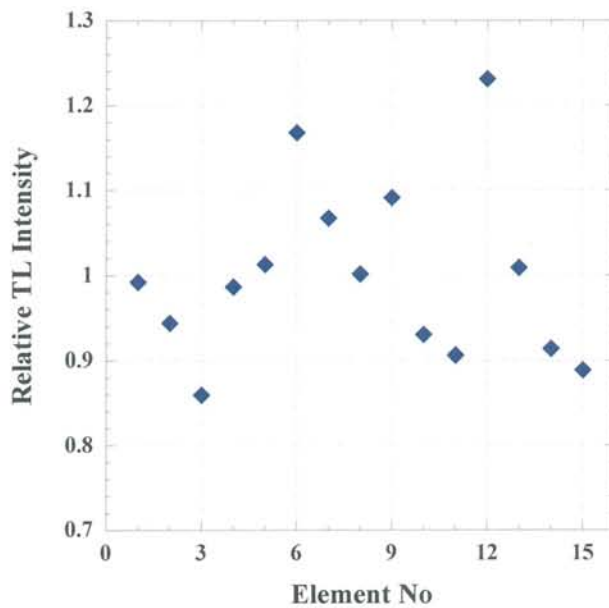


図 4.8 BeO TLD の素子間個体差

4.3.2 発光効率比導出

測定した TL 量の内、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは 200-400°C、 BeO TLD は 100-200°C を積算範囲として積算 TL 量を算出した。まず、式(4.2)より $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの発光効率を求めた。

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}} &= \text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}(\gamma) / \left[D_{\text{Air}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{Air}} \right] \\ &= (1.71 \times 10^7) / \left[0.5 \times \frac{2.62 \times 10^{-2}}{2.67 \times 10^{-2}} \right] = 3.48 \times 10^7\end{aligned}\tag{4.6}$$

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと空気の質量エネルギー吸収係数は、それぞれの 1.17 MeV 及び 1.33 MeV の γ 線エネルギーに対応した質量エネルギー吸収係数の平均値とした。

同様にして、 BeO TLD の発光効率は

$$\begin{aligned}\eta_{\text{BeO}} &= \text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) / \left[D_{\text{Air}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{BeO}, \text{Air}} \right] \\ &= (1.01 \times 10^7) / \left[0.5 \times \frac{2.56 \times 10^{-2}}{2.67 \times 10^{-2}} \right] = 2.11 \times 10^7\end{aligned}\tag{4.7}$$

以上より、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の発光効率比は

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}} = \frac{\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}}{\eta_{\text{BeO}}} = \frac{3.48 \times 10^7}{2.11 \times 10^7} = 1.65\tag{4.8}$$

4.3.3 密封中性子源照射及び TL 測定

図 4.9 に、密封中性子源を 7, 17, 24, 30 時間照射した $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブのグロー曲線を示す。310°C にグローピークが観測された。同様に、図 4.10 に BeO TLD のグロー曲線を示す。160°C 及び 290°C 付近にグローピークが観測された。

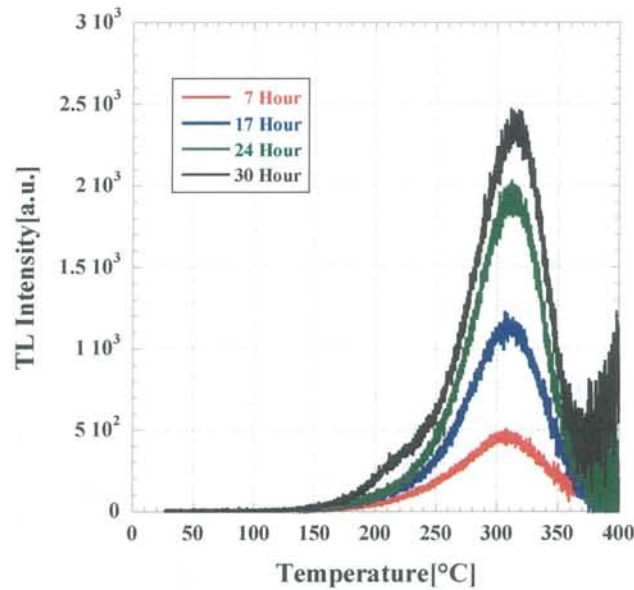


図 4.9 密封中性子源照射に対する $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブのグロー曲線

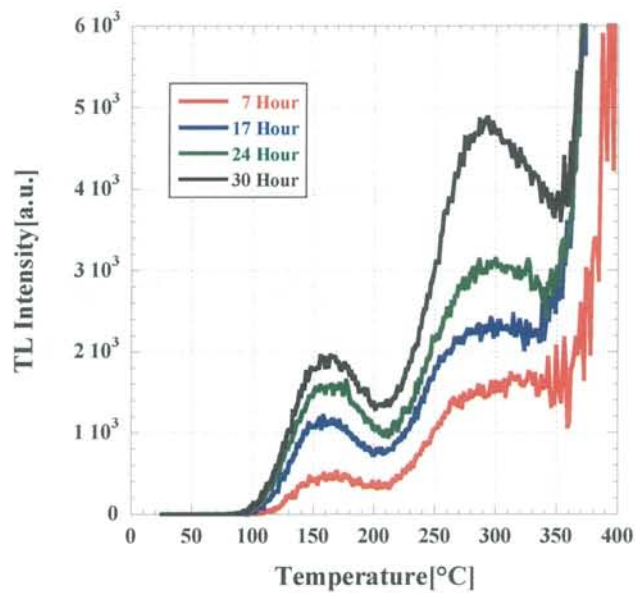


図 4.10 密封中性子源照射に対する BeO TLD のグロー曲線

更に、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブは 200-400°C、BeO TLD は 100-200°C を積算範囲として積算 TL 量を算出した。照射時間に対する $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の積算 TL 量を図 4.11 に示す。3 個の素子の積算 TL 量の平均値でプロットした。また、その標準偏差をエラーバーとして示した。 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD ともに、照射時間に対する TL に高い直線性がみられた。

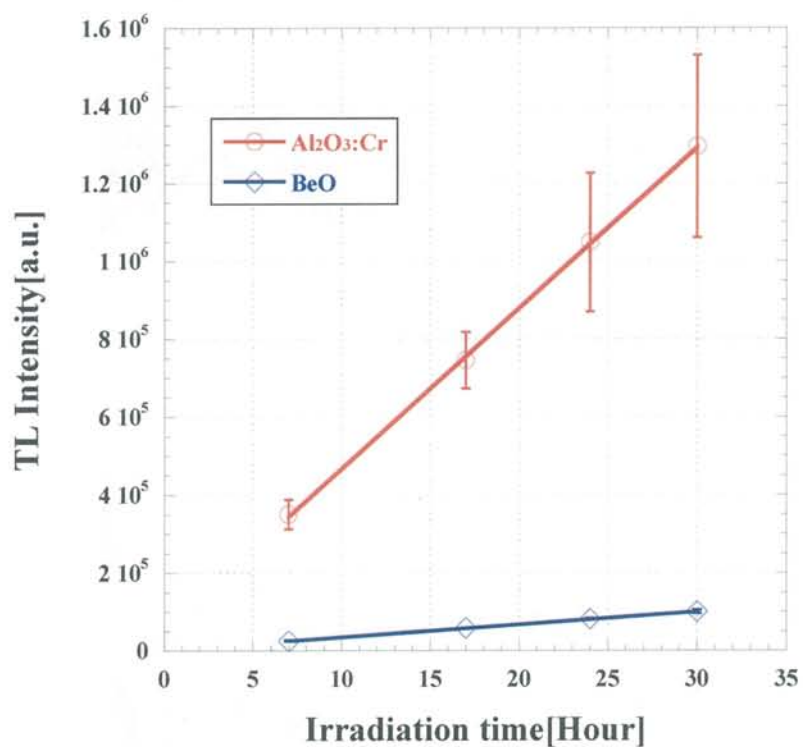


図 4.11 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD の照射時間に対する積算 TL 量

4.3.4 γ 線エネルギースペクトル測定

図 4.12 に、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器により測定したエネルギースペクトルを示す。但し、これは LaBr₃(Ce)結晶内で生成した二次電子のスペクトルであるため、入射 γ 線スペクトルを得るためにはスペクトルの復元処理 (アンフォールディング) が必要となる。本実験では、簡便のためこの測定結果をサンプル位置における入射 γ 線のエネルギースペクトルとした。

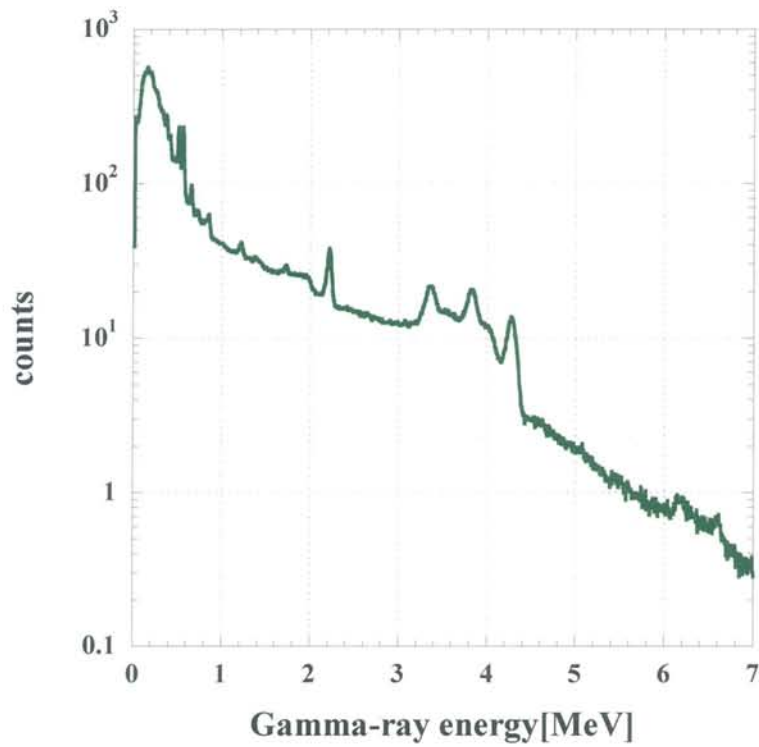


図 4.12 エネルギースペクトル測定結果

4.3.5 γ 線量及び熱中性子束測定

表 4.2 に、サンプル位置における線量当量及び式(4.3)から求めた空気カーマを示す。また、表 4.3 に式(4.4)、式(4.5)から求めた金箔の飽和放射能及びサンプル位置における熱中性子束を示す。尚、金箔の測定に用いた GM 計数管の検出効率は、標準線源の測定結果より 15.2% とした。

表 4.2 γ 線量

照射時間[Hour]	線量当量 X [mSv]	空気カーマ K_{air} [mGy]
7	1.72	1.31
17	3.95	3.02
24	5.35	4.09
30	7.14	5.46

表 4.3 熱中性子束

金箔	飽和放射能 A_{∞} [1/s]	熱中性子束 ϕ_{th} [$1/\text{cm}^2/\text{s}$]
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

4.3.6 中性子線・γ線弁別解析

3.2項より、次式から $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL 量を導出した。

$$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}(\gamma) = \text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}} \times \eta_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}}(\gamma)$$

まず、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の質量エネルギー吸収係数比を求めた。図 4.13 に照射場の γ 線エネルギースペクトルと、そのエネルギー範囲における $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD の質量エネルギー吸収係数を示す。

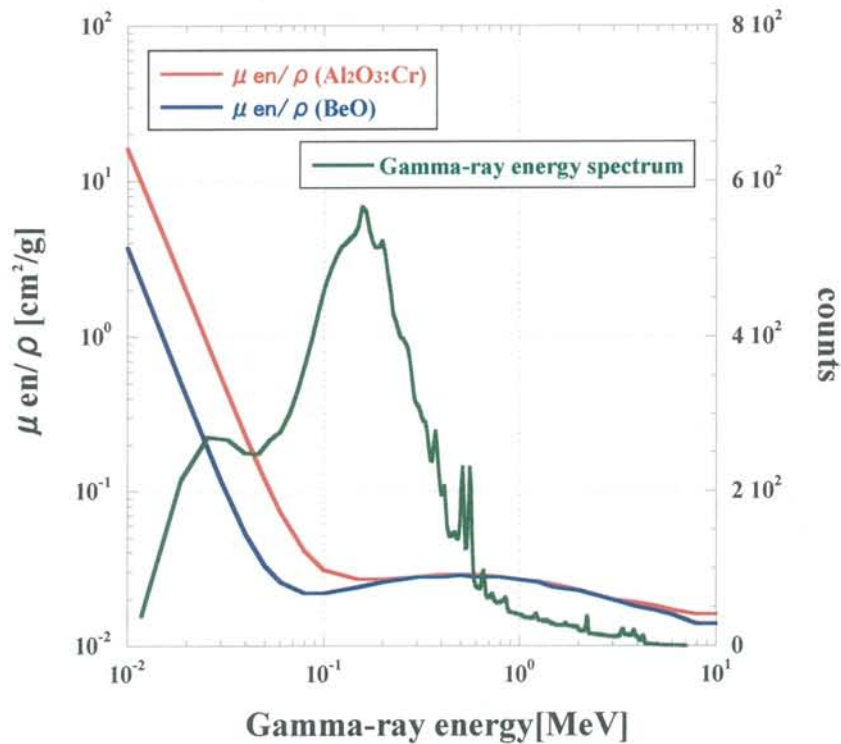


図 4.13 γ 線エネルギースペクトルと質量エネルギー吸収係数

次式より、それぞれの質量エネルギー吸収係数を γ 線エネルギースペクトルで加重平均して平均質量エネルギー吸収係数を算出し、その比を求めた。

$$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}} = \frac{\left[\frac{\sum_{E_{\min}}^{E_{\max}} \{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}(E) \times C(E)\}}{\sum_{E_{\min}}^{E_{\max}} C(E)} \right]}{\left[\frac{\sum_{E_{\min}}^{E_{\max}} \{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{BeO}}(E) \times C(E)\}}{\sum_{E_{\min}}^{E_{\max}} C(E)} \right]} = \frac{6.78 \times 10^{-2}}{3.31 \times 10^{-2}} = 2.05 \quad (4.9)$$

また、式(4.8)より $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の γ 線に対する発光効率比は以下の値とした。

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr,BeO}}(\gamma) = 1.65 \quad (4.10)$$

以上の結果を用いて、BeO TLD の TL 量に $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の質量エネルギー吸収係数比及び γ 線に対する発光効率比を乗じ、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL 量を導出した。図 4.14 に、密封中性子源照射に対する $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの積算 TL 量及び、導出した γ 線に対する積算 TL 量を示す。また、表 4.4 に $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの各線質に対する積算 TL 量を示す。

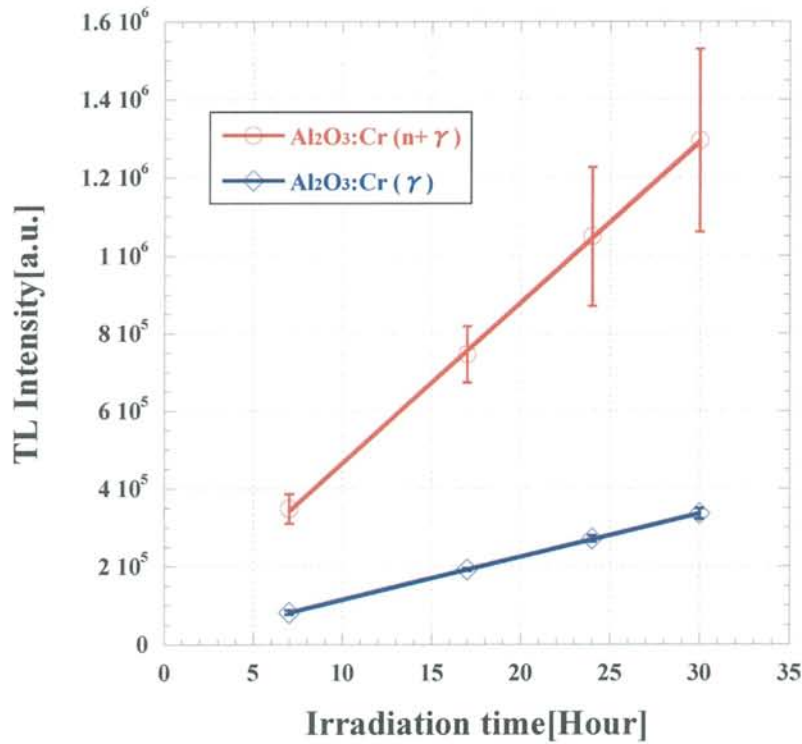


図 4.14 中性子線・ γ 線弁別解析結果

表 4.4 中性子線・ γ 線弁別解析結果

照射時間[Hour]	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(n, \gamma)$	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma)$	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(n)$
7	3.49×10^5	8.36×10^4	2.65×10^5
17	7.45×10^5	1.94×10^5	5.52×10^5
24	1.05×10^6	2.74×10^5	7.75×10^5
30	1.30×10^6	3.37×10^5	9.58×10^5

4.4 考察

図 4.9 及び図 4.10 において、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD とともにグローピーク以降で再びカウントが増加しているが、これはヒータの熱輻射の光を原因とするバックグラウンド値を十分に減算できていないためである。SN 比が小さく、その影響が顕著にみられたものと考えられる。

図 4.14 及び表 4.4 より、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の TL 量差を利用した TL の中性子線・ γ 線弁別解析の結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブが中性子に感度を有することが明らかになった。本実験において、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの中性子線に対する TL は全体の 74%、 γ 線に対する TL は 26% の割合であった。

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの示した中性子感度の要因を検討するため、表 4.5 にスラブ構成元素の熱中性子捕獲断面積を示す⁹⁾。 Cr の捕獲断面積は、同位体 ^{50}Cr 、 ^{52}Cr 、 ^{53}Cr 、 ^{54}Cr の各熱中性子捕獲断面積を、その天然存在比で加重平均して算出した。表 4.5 より、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの中性子感度の要因として、アルミニウムの熱中性子捕獲反応が考えられる。図 4.15 に、アルミニウムの中性子捕獲反応及びそれに関わって発生する放射線について示す。まず、 ^{27}Al の中性子捕獲の過程で 7.72 MeV の即発 γ 線が放出される。更に、生成した ^{28}Al は半減期 2.24 分で β^- 崩壊し、安定な ^{28}Si となる。その際に平均エネルギー 1.25 MeV の β 線及び 1.78 MeV の γ 線が放出される。今回使用した $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの厚さとこれらの放射線のエネルギーを考慮すると、中性子感度の要因には ^{28}Al からの β 線の寄与が大きかったことが推測される。

表 4.5 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ構成元素の熱中性子捕獲断面積⁹⁾

構成元素	質量比[%]	熱中性子捕獲断面積
Al	52.90	230.3 mb
O	47.07	189.9 μb
Cr	0.03	3.144 b

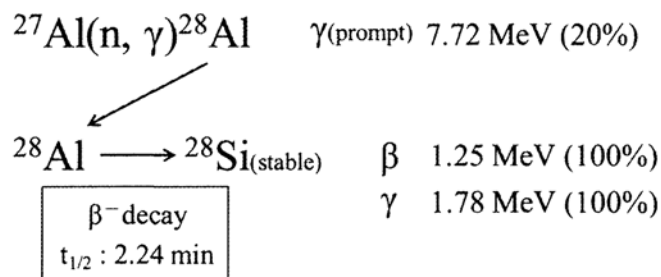


図 4.15 アルミニウムの中性子捕獲反応

ここまで、簡易な中性子場として Pu-Be 密封中性子源を用いた実測を行い、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブが中性子に感度を有することを明らかにした。しかし、本実験では照射場の γ 線量や熱中性子束が小さく、十分な精度で解析が行えていない。そのため、より高線量の照射場における本弁別解析法の検討が求められる。また、本解析法は $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD の平均質量エネルギー吸収係数を決定するため、照射場の γ 線エネルギースペクトルを得る必要がある。本実験では、測定したエネルギースペクトルにアンフォールディングを行っていないため、その影響についても今後の検討が求められる。

第5章 加速器中性子源に対する TL の中性子線・ γ 線弁別解析

5.1 緒言

我々は、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD を併用した TL の中性子線・ γ 線弁別解析法を考案し、Pu-Be 密封中性子源を用いた実測を行った。しかし、照射場の γ 線量や熱中性子束が小さく、結果に十分な精度が得られなかった。我々はより高線量の照射場における本解析法の検討を行うため、量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所に備える中性子発生用加速器システム NASBEE (Neutron exposure Accelerator System for Biological Effect Experiments) を用いて照射及び解析を行った。本章ではその結果を報告する。

5.2 方法

5.2.1 加速器中性子源照射及び TL 測定

アニーリング処理を行った $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD を 3 個ずつ遮光ビニールで被覆し、照射サンプルとした。加速器中性子源 (NASBEE) からの中性子線を減速し熱中性子束を増大させるため、直径 25.4 cm のポリエチレン製ボナーボール中心部にサンプルを設置して照射を行った。照射ローサンプル距離は 20 cm とした。サンプル位置において電離箱で測定した空気吸収線量が 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 Gy となる時間を求め、照射時間は 7.5, 11.25, 15, 22.5, 30 分とした。その他の照射条件を以下に示す。

- 加速ビーム核種： ^1H
- ビームエネルギー：4 MeV
- 中性子発生ターゲット：Be

照射体系を図 5.1 及び図 5.2 に示す。照射後、各 TL 素子のグロー曲線を測定した。昇温速度 $0.13^\circ\text{C}/\text{s}$ で室温から 400°C まで加熱し、1 秒間隔で積算 TL 量を収集した。TL 感度の素子間個体差は、4.3.1 項にて示した結果から補正を行った。

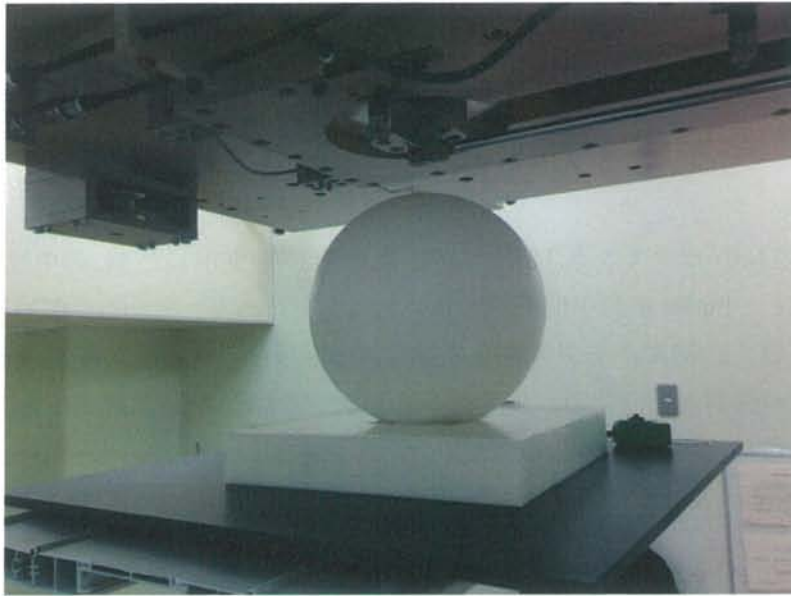


图 5.1 加速器中性子源照射体系 (1)

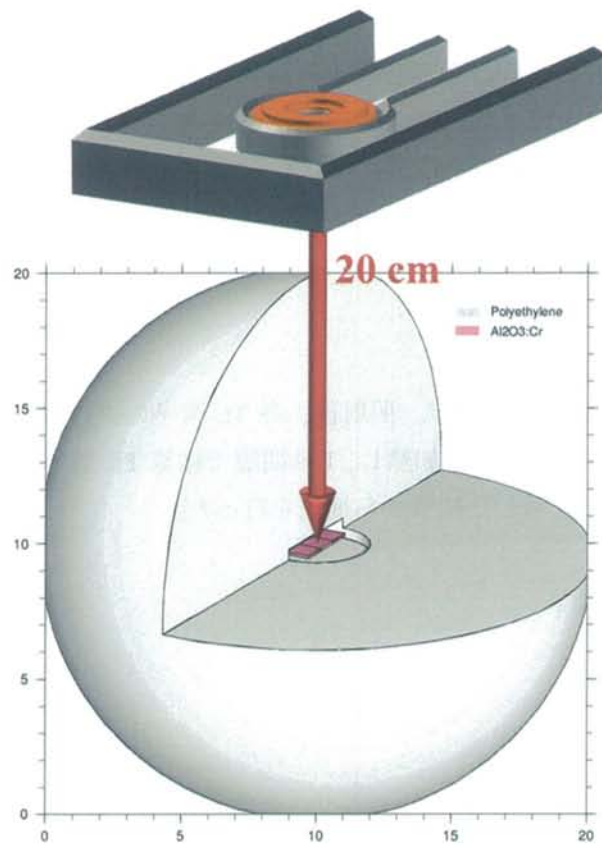


图 5.2 加速器中性子源照射体系 (2)

5.2.2 γ 線エネルギースペクトル計算

サンプル位置における γ 線エネルギースペクトルは、モンテカルロ計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) ver. 2.82 を用いて計算した。Ge(Li)半導体検出器で測定した空気中の γ 線エネルギースペクトル (図 5.3) を線源として、ボナーボール中心部における γ 線エネルギースペクトルを計算した。計算ヒストリー数は 1.0×10^8 とした。

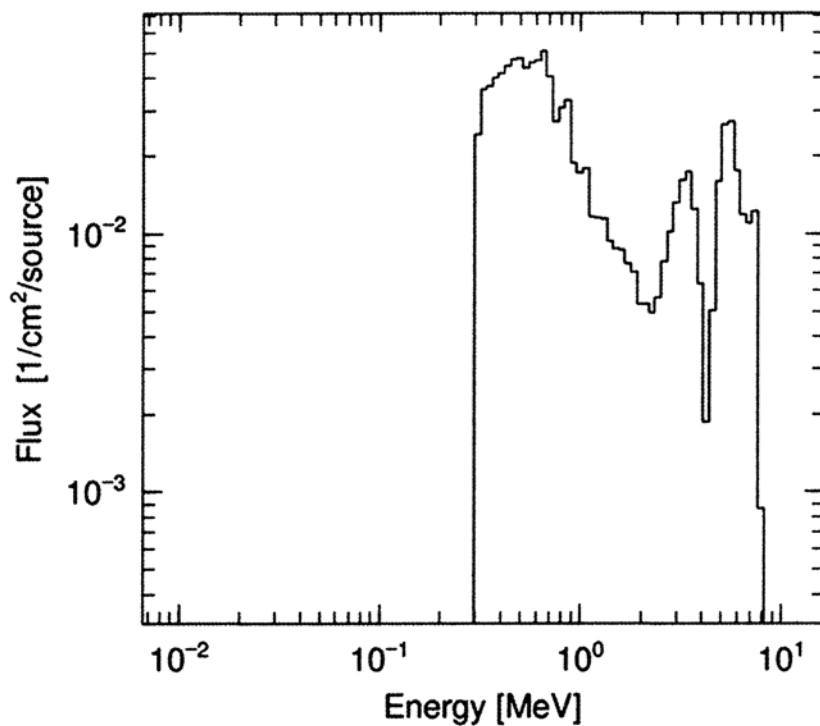


図 5.3 空気中の実測 γ 線エネルギースペクトル

5.2.3 熱中性子束測定

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。TL 測定と同様の体系で、裸及びカドミウムフィルタで被覆した金箔に加速器中性子源を用いて照射を行った。十分に放射化させた後、放出された γ 線を図 5.4 に示すウェル型 NaI(Tl)測定装置 (Model 7J7、CANBERRA) により測定し、式(4.4)から金箔の飽和放射能を算出した。測定装置の検出効率は ^{22}Na 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am の較正用 γ 線源を用いて求めた。更に、式(4.5)より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、熱中性子束を算出した。



図 5.4 ウェル型 NaI(Tl)測定装置

5.3 結果

5.3.1 加速器中性子源照射及び TL 測定

図 5.5 に、加速器中性子源にて空気吸収線量 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 Gy 照射した $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブのグロー曲線を示す。310°C にグローピークが観測された。同様に、図 5.6 に BeO TLD のグロー曲線を示す。図 4.10 に示した密封中性子源照射に対するグロー曲線と形状が異なり、160°C のグローピークが顕著にみられた。

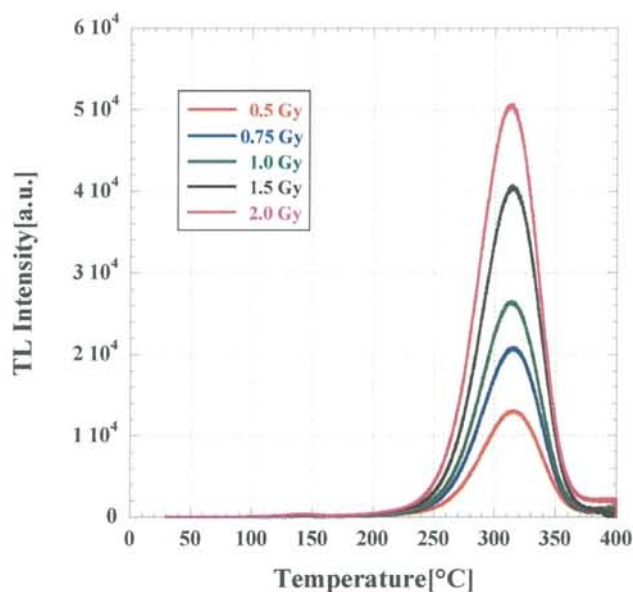


図 5.5 加速器中性子源照射に対する $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブのグロー曲線

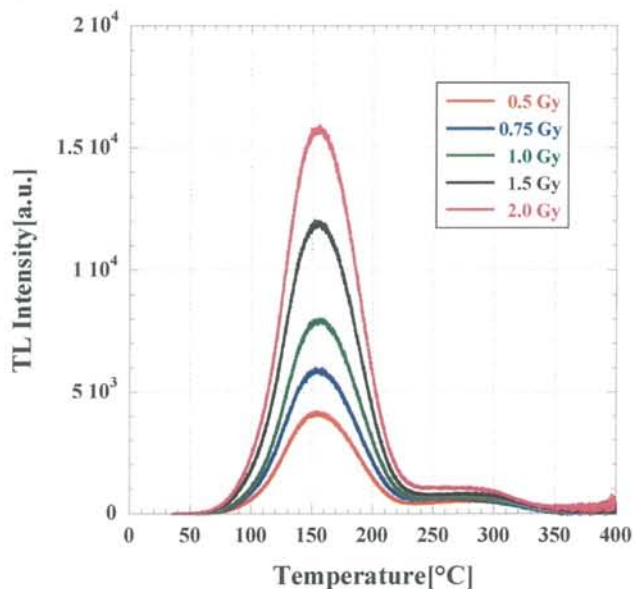


図 5.6 加速器中性子源照射に対する BeO TLD のグロー曲線

Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブは 200-400°C、BeO TLD は 100-200°C を積算範囲として積算 TL 量を算出した。照射時間に対する Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD の積算 TL 量を図 5.7 に示す。3 個の素子の積算 TL 量の平均値でプロットし、その標準偏差をエラーバーとして示した。Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブと BeO TLD とともに、照射時間に対する TL に高い直線性がみられた。

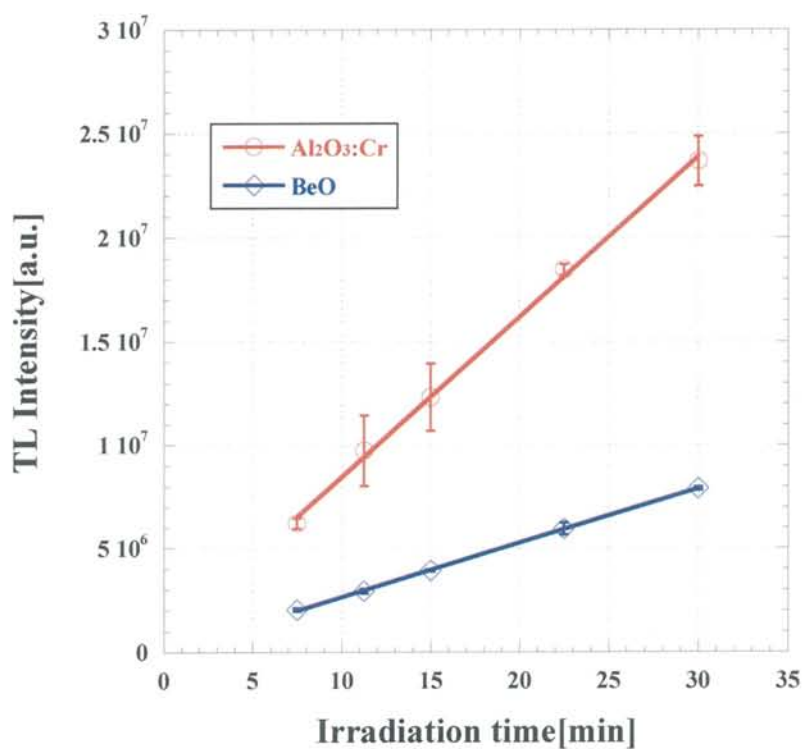


図 5.7 Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブ及び BeO TLD の照射時間に対する積算 TL 量

5.3.2 γ 線エネルギースペクトル計算

図 5.8 に、PHITS により計算したサンプル位置における γ 線のエネルギースペクトルを示す。

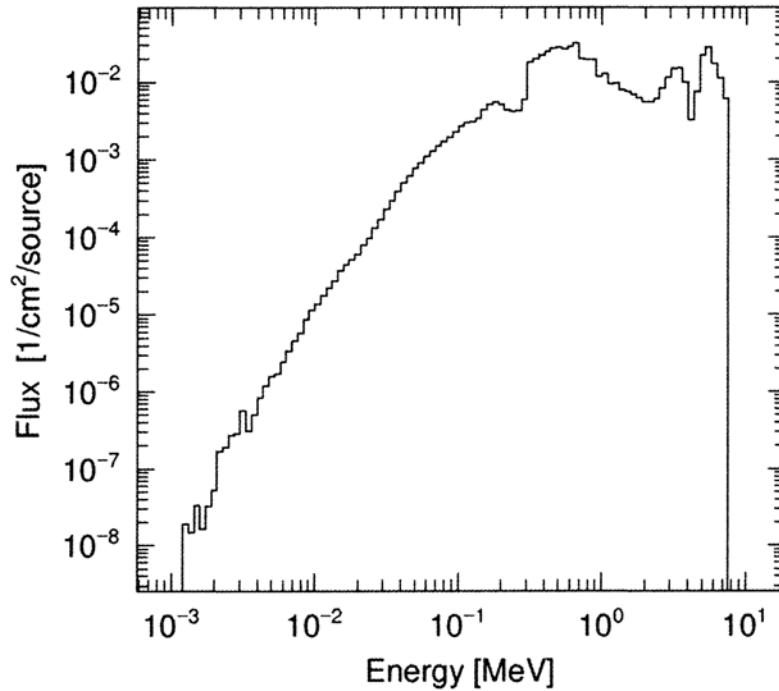


図 5.8 γ 線エネルギースペクトル計算結果

5.3.3 熱中性子束測定

表 5.1 に、式(4.4)、式(4.5)から求めた金箔の飽和放射能及びサンプル位置における熱中性子束を示す。尚、金箔の測定に用いたウェル型 NaI 測定装置の検出効率は、各較正用 γ 線源の測定結果より ^{198}Au - γ 線のエネルギー411.8 keV に相当する検出効率を内挿して求め、30.8%とした。

表 5.1 熱中性子束

金箔	飽和放射能 A_{∞} [1/s]	熱中性子束 ϕ_{th} [1/cm ² /s]
裸	7.71×10^5	
カドミウムフィルタ	6.10×10^4	
裸-カドミウムフィルタ	7.10×10^5	5.50×10^7

5.3.4 中性子線・γ線弁別解析

4.3.6 項と同様に、次式から $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL 量を導出した。

$$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}(\gamma) = \text{TL}_{\text{BeO}}(\gamma) \times (\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}} \times \eta_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}}(\gamma)$$

図 5.9 にサンプル位置における γ 線エネルギースペクトルと、そのエネルギー範囲における $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブ及び BeO TLD の質量エネルギー吸収係数を示す。

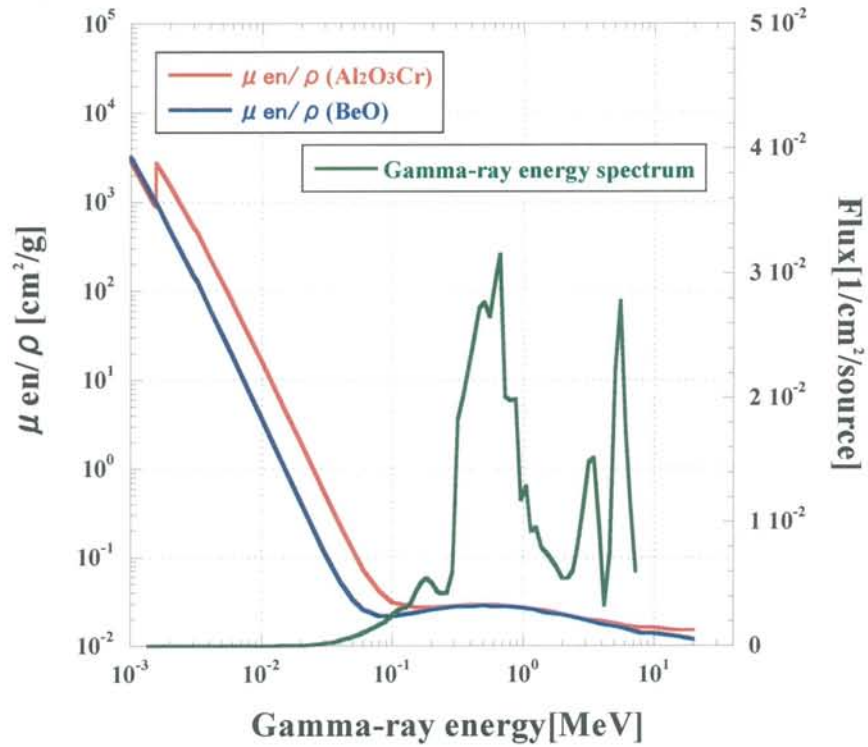


図 5.9 γ 線エネルギースペクトルと質量エネルギー吸収係数

次式より、それぞれの質量エネルギー吸収係数を γ 線エネルギースペクトルで加重平均して平均質量エネルギー吸収係数を算出し、その比を求めた。

$$(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}, \text{BeO}} = \frac{\left[\frac{\sum_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}}(E) \times \text{Flux}(E)\}}{\sum_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \text{Flux}(E)} \right]}{\left[\frac{\sum_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \{(\mu_{\text{en}} / \rho)_{\text{BeO}}(E) \times \text{Flux}(E)\}}{\sum_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \text{Flux}(E)} \right]} = \frac{3.59 \times 10^{-2}}{2.70 \times 10^{-2}} = 1.33 \quad (5.1)$$

また、式(4.8)より $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の γ 線に対する発光効率比は以下の値とした。

$$\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr,BeO}}(\gamma) = 1.65$$

以上の結果を用いて、 BeO TLD の TL 量に $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブと BeO TLD の質量エネルギー吸収係数比及び γ 線に対する発光効率比を乗じ、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの γ 線に対する TL 量を導出した。図 5.10 に、加速器中性子源照射に対する $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの積算 TL 量及び、導出した γ 線に対する積算 TL 量を示す。また、表 5.2 に $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ セラミック TL スラブの各線質に対する積算 TL 量を示す。

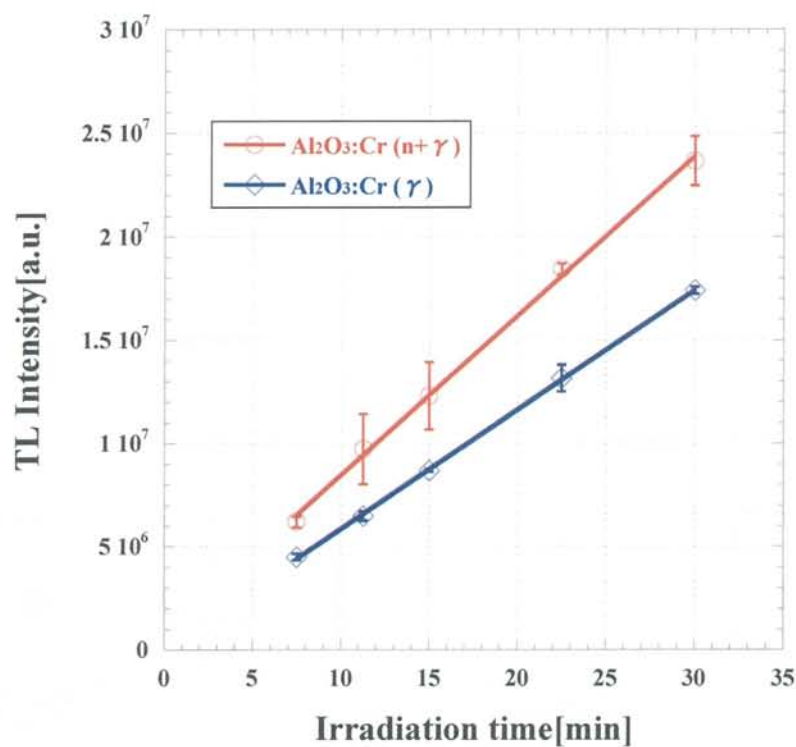


図 5.10 中性子線・ γ 線弁別解析結果

表 5.2 中性子線・ γ 線弁別解析結果

照射時間[min]	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(n, \gamma)$	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(\gamma)$	$\text{TL}_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}}(n)$
7.5	6.21×10^6	4.53×10^6	1.67×10^6
11.25	9.72×10^6	6.52×10^6	3.20×10^6
15	1.23×10^7	8.72×10^6	3.58×10^6
22.5	1.84×10^7	1.32×10^7	5.28×10^6
30	2.36×10^7	1.74×10^7	6.22×10^6

5.4 考察

図 5.6 の加速器中性子源照射に対する BeO TLD のグロー曲線について、図 4.10 で示した密封中性子源照射に対する同素子のグロー曲線と異なる形状がみられた。160°C のグローピークが顕著にみられ線量直線性を示したのに対して、290°C 付近のグローピークは小さく、線量依存性もみられなかった。これは、BeO 中の 290°C のグローピークを成すエネルギー準位の捕獲中心が、飽和状態に近づいたためと考えられる。捕獲電子数の増加に伴って 290°C のグローピークを形成する捕獲中心の電子捕獲効率が低下し、その後は 160°C のグローピークを形成する捕獲中心による電子捕獲が支配的になることが示唆された (図 5.11)。

表 5.1 より、本実験のサンプル位置における熱中性子束は 5.5×10^7 l/cm²/s であった。これは実際の BNCT 照射場における中性子束の大きさに近く、本研究の利用目的として十分な条件下で実験が行えたといえる。図 5.10 及び表 5.2 より、加速器中性子源に対する TL の中性子線・ γ 線弁別解析の結果、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの中性子線に対する TL は全体の 29%、 γ 線に対する TL は 71% の割合であった。

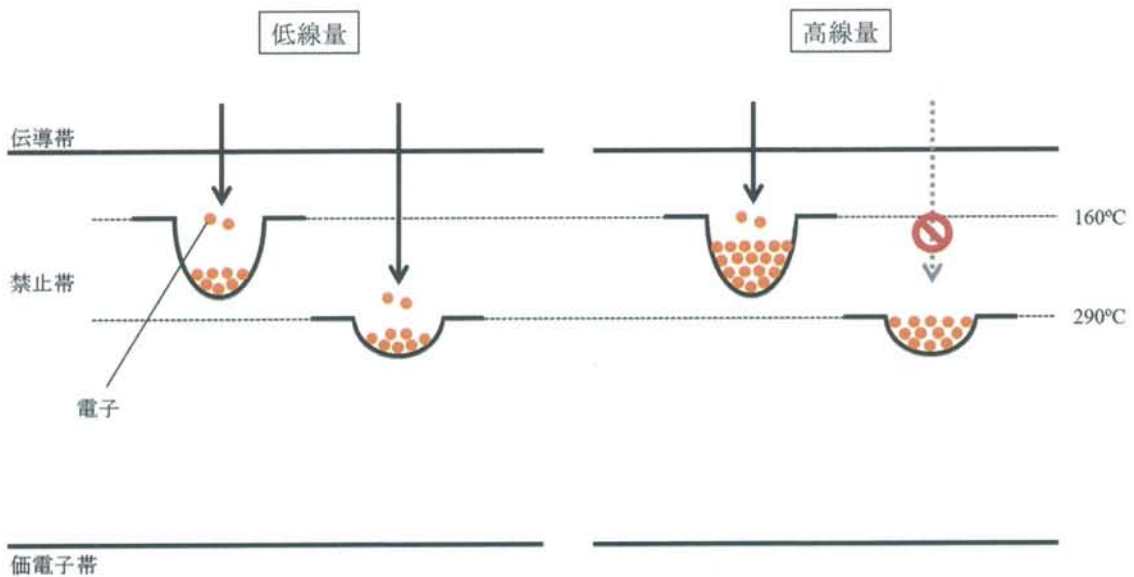


図 5.11 BeO TLD の電子捕獲の変化

ここで、Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの中性子線に対する TL を全て ²⁸Al からの β 線に起因するものと仮定し、照射場の熱中性子束の試算を行う。

質量 M [kg]、体積 V [cm³] の Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブに熱中性子束 ϕ_{th} [1/cm²/s] を T [s] 時間照射したとき、熱中性子捕獲反応を起こす中性子数 N は

$$N = \Sigma \phi_{th} TV \quad (5.2)$$

Σ [1/cm] は Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの巨視的熱中性子捕獲断面積で、微視的熱中性子捕獲断面積 σ [cm²] にスラブ中の ²⁷Al (質量比 ω [%]、原子量 A) の原子数密度を乗じた値である。

$$\Sigma = \sigma \times \frac{1000 M \times \frac{\omega}{100} \times (6.02 \times 10^{23})}{A V} \quad (5.3)$$

Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブの熱中性子捕獲反応により β 線が放出されたとき、その数は反応を起こした中性子数 N に等しい。エネルギー E [J] の β 線が全て Al₂O₃:Cr セラミック TL スラブに吸収されたと仮定すると、スラブの吸収線量 $D(n)$ [Gy] は

$$D(n) = \frac{E \times N}{M} \quad (5.4)$$

TL(n) = $\eta D(n)$ の関係より
$$TL(n) = \eta \frac{E \times N}{M} \quad (5.5)$$

式(5.2)より
$$TL(n) = \eta \frac{E \times \Sigma \phi_{th} TV}{M} \quad (5.6)$$

変形して
$$\phi_{th} = \frac{TL(n) M}{\eta E \Sigma TV} \quad (5.7)$$

となり、式(5.7)から熱中性子束が求められる。各値を代入すると

$$\begin{aligned} \phi_{th} &= \frac{(6.22 \times 10^6) \times (5.37 \times 10^{-4})}{(3.48 \times 10^7) \times (2.00 \times 10^{-13}) \times (1.01 \times 10^{-2}) \times (1.80 \times 10^3) \times (1.45 \times 10^{-1})} \\ &= 1.83 \times 10^8 \text{ [1/cm}^2\text{/s]} \end{aligned} \quad (5.8)$$

以上より照射場の熱中性子束の試算を行ったが、結果は金の放射化法により求めた値の 3.3 倍となった。この差の原因を検討するため、図 5.12 に ^{27}Al の中性子エネルギーに対する反応断面積を示す⁹⁾。中性子捕獲反応は中性子エネルギーが小さいほど起こり易くなるが、 ^{27}Al は約 6 keV の中性子エネルギーに顕著な中性子捕獲断面積の共鳴ピークがあり、このエネルギーの中性子に対しても捕獲反応を起こし易い。更に、数十～数百 keV の領域にも複数の共鳴ピークがみられる。金の放射化法によって求めた熱中性子束はカドミウム差引法により共鳴ピークの影響が除かれているため、その違いが過大評価の原因となったと考えられる。また、図 5.13 に速中性子領域における ^{27}Al の反応断面積を示す⁹⁾。照射した中性子線に数 MeV の速中性子が含まれていた場合、 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ や $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応により各種粒子線が発生するため、それらの TL への寄与も原因として考えられる。

本研究では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの中性子線及び γ 線に対する TL の弁別解析法を示した。更に、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの中性子線に対する TL 量から中性子束を算出することのできる可能性を示した。今後、この算出精度の向上に向けて $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミック TL スラブの示した中性子感度の要因の解明を進める。

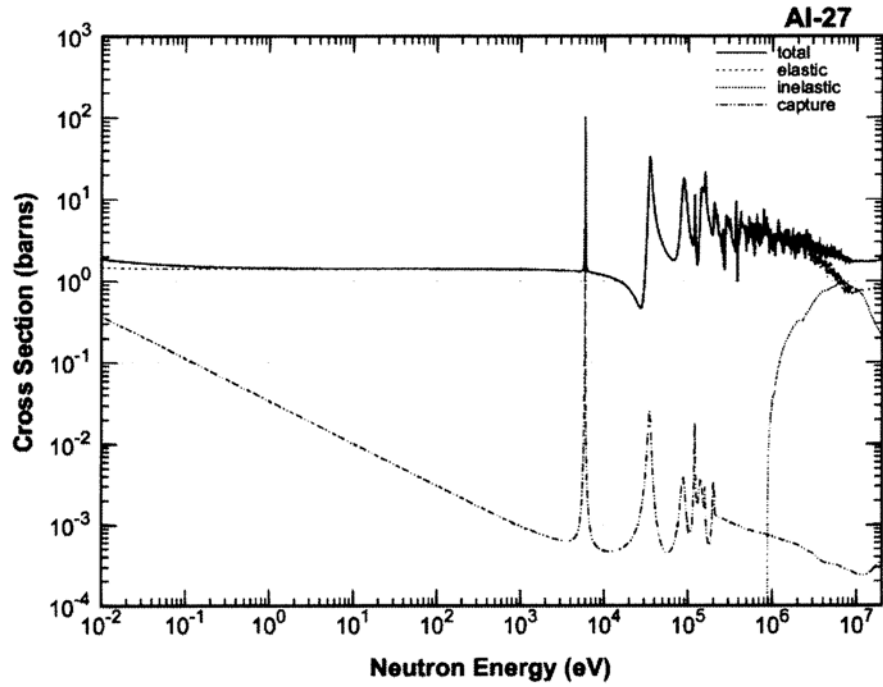


図 5.12 ^{27}Al の中性子エネルギーに対する反応断面積 (1) ⁹⁾

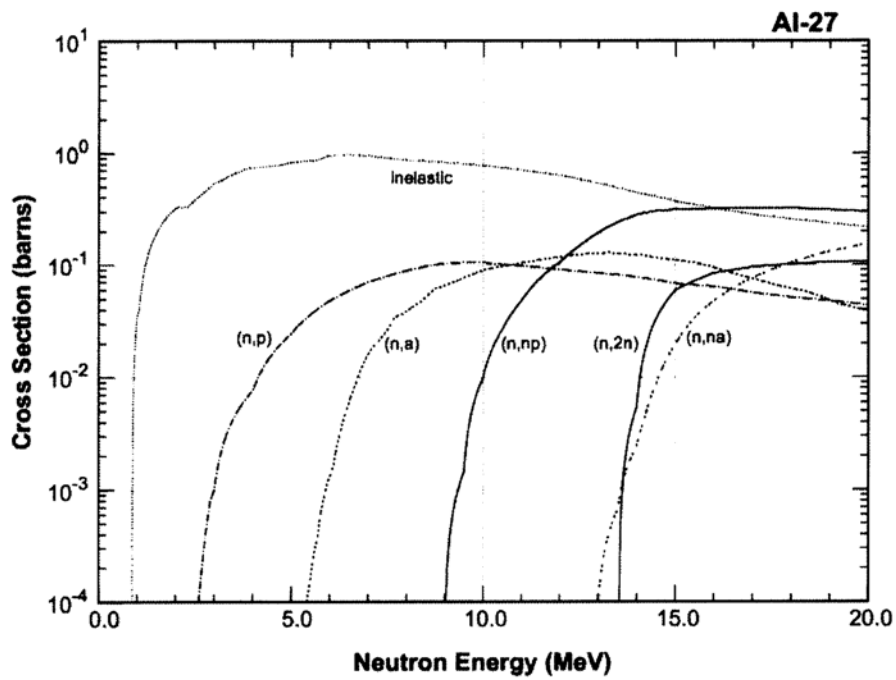


図 5.13 ^{27}Al の中性子エネルギーに対する反応断面積 (2) ⁹⁾

第6章 結語

高度化の進む昨今の放射線治療の中でも、BNCTは細胞単位の革新的な放射線治療法として多大な期待が寄せられている。しかし、安定した中性子源の開発や、より高い腫瘍集積性を有するホウ素薬剤の開発、適応症例の拡大など、医療としてのBNCTの普及に向けて残された課題は多い。放射線計測の分野においても、中性子線と γ 線を簡便且つ高精度に弁別可能な、低コストの放射線測定デバイスの開発が求められている。

そのような背景の中で、本研究では優れたTL特性と幅広い利用可能性を有する $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブに着目し、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブとBeO TLDを併用したTLの中性子線・ γ 線弁別解析法について検討を行った。中性子感度が非常に小さくBNCTにおいて積算 γ 線線量計として用いられているBeO TLDを併用することにより、BNCTにおける中性子束及び γ 線量測定を同時に行うことが期待できる。

本論文では、この中性子線・ γ 線弁別解析の手法を報告するとともに、密封中性子源及び加速器中性子源を用いた実測結果について記した。その結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブが中性子に感度を有することを明らかにした。また、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブの示した中性子感度の要因を解明することで、TL量から中性子束を算出することのできる可能性についても示した。

しかしながら、本論文ではこの $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブとBeO TLDを併用したTLの中性子線・ γ 線弁別解析法の確かさについて、十分な検討を行えていない。今後、中性子線・ γ 線の弁別照射やモンテカルロ計算の結果との比較から、本解析法の有用性を明らかにする必要がある。また、前述したように $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ セラミックTLスラブの中性子感度の要因を解明することも大きな課題であるといえる。本研究が今後のBNCTの発展と普及の一助となることを期し、更なる検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 27 年人口動態統計月報年計の概況
- 2) 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
- 3) J. T. Randall, M. H. F. Wilkins : Phosphorescence and Electron Traps. I. The Study of Trap Distributions, Proceedings of the Royal Society A, 184 : 365-389, 1945
- 4) S. Hisanaga, T. Yamashita, I. Kitamura *et al.* : Investigation on thermal-neutron sensitivity of commercial BeO(Na) thermoluminescence dosimeter and development of thermal-neutron insensitive BeO(Na) phosphors encapsulated in quartz-capillary, RADIOISOTOPES, 39 : 381-385, 1990
- 5) Y. Sakurai, T. Kobayashi : Characteristics of the KUR Heavy Water Neutron Irradiation Facility as a neutron irradiation field with variable energy spectra, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 453 : 569-596, 2000
- 6) K. Shinsho, Y. Suzuki, Y. Yamamoto *et al.* : The thermoluminescence activation energy and frequency factor of the main glow of CaSO₄:Tm phosphor determined by heating rate method including very slow rates of heating, Journal of Applied Physics, 97 : 123523, 2005
- 7) J. H. Hubbell, S. M. Seltzer : Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, National Institute of Standards and Technology Interagency Report, 5632, 1995
- 8) 日本工業標準調査会：JIS Z 4511 付表 1 1 cm 線量当量換算係数, 2005
- 9) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa *et al.* : JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, Journal of Nuclear Science and Technology, 48 : 1-30, 2011

謝辞

本稿を終えるにあたり、長い間数々の御指導、ご鞭撻を賜りました首都大学東京大学院人間健康科学研究科 放射線科学域 眞正浄光准教授に深く感謝致します。共同研究においては、量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 古場裕介先生ならびに福田茂一先生、近畿大学原子力研究所 若林源一郎准教授、九州大学 医学研究院 保健学部門 納富昭弘准教授に多大なお力添えを賜り、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。京都大学原子炉実験所 田中浩基先生には BeO TLD をお貸し頂き、また研究について貴重な助言を頂きましたことに厚く御礼申し上げます。最後に、本研究を行うにあたって、セラミック板を提供して頂きました株式会社千代田テクノルならびに千葉セラミック工業株式会社に感謝申し上げます。