

氏 名 田 中 俊 一

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 53 年 12 月 6 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 42 年 3 月

東北大学工学部原子核工学科卒業

学 位 論 文 題 目 熱蛍光線量計による放射線測定に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 梶山 一典 東北大学教授 長尾 重夫

東北大学教授 瀬戸 邦夫 東北大学助教授 武部 雅汎

論 文 内 容 要 旨

原子炉物理や遮蔽の研究では、ガンマ線や中性子の測定が極めて重要である。しかし、原子力の分野で対象とする放射線計測の内容は多岐にわたっており、現状の測定器では十分対処できないことが多い。とりわけ原子炉のようにガンマ線と中性子が混在している場合の放射線計測は難しく、有効な測定器も測定方法も少なく、その適用条件も限られている。

熱蛍光線量計 (TLD) は放射線に対し、高い感度を有し、測定可能な線量の範囲の広い小型の放射線検出器として、また多くの絶縁性結晶が放射線照射によって熱蛍光現象を示すことから新しい特性を有する TLD の開発の可能性が大きい点など、放射線検出器として極めて興味深い特性を有している。したがって、TLD を利用したガンマ線や中性子の新たな測定法の開発は原子炉物理、放射線遮蔽、被曝管理といった原子力の広い分野の研究開発に大きく寄与することが期待できる。

本研究は従来十分になされていなかった TLD の中性子に対する応答特性等を実験的および理論的に研究し、これらの成果を土台に TLD を利用したガンマ線や中性子の新たな測定法を開発することを目的としている。

第 1 章 序 論¹⁾

本章は TLD に関する従来の研究、本研究の目的と背景、および本研究の概要からなる。

第2章 TLDの中性子に対するレスポンス²⁻⁶⁾

本章は中性子に対するエネルギーレスポンス、発光効率、およびグロー曲線等のTLDの基本特性に関する研究である。

単色エネルギーの中性子を用いて測定した⁶LiF TLDエネルギーレスポンスと中性子照射によって⁶LiF TLDに付与されるエネルギー(Kerma)とを中性子エネルギーの関数として表わすとFig.1が得られた。他の6種類のTLDについて同様の測定とKermaとの比較を行った結果、中性子照射によってTLDに付与されるエネルギーとその時生じるTLDの熱蛍光量は近似的に比例関係にあることが明らかとなり、この比例定数(全発光効率)が求められた。

次に荷電粒子に対するTLDの微分発光効率 η' と平均発光効率 $\bar{\eta}$ を以下の式で定義した。

$$\eta' = dG/dE \quad (1)$$

$$\bar{\eta} = G_0/E_0 \quad (2)$$

ここで、 dG は荷電粒子がTLD内で dE のエネルギーを損失した際に生じる熱蛍光量を意味し、 G_0 は荷電粒子の初期エネルギー E_0 がTLD内ですべて吸収された時に生じる熱蛍光量を意味する。

これら2種類の発光効率を荷電粒子の質量阻止能の関数で表わすことによってFig.2とFig.3のような結果を得た。これらの図に見られるようにTLDの発光効率がTLDの種類や入射荷電粒子の種類によらないほぼ1本の滑らかな曲線として表わされ、この結果から「TLDに熱蛍光を生じさせる荷電粒子のエネルギー損失過程はTLDの中の電子の電離作用によるものであり、

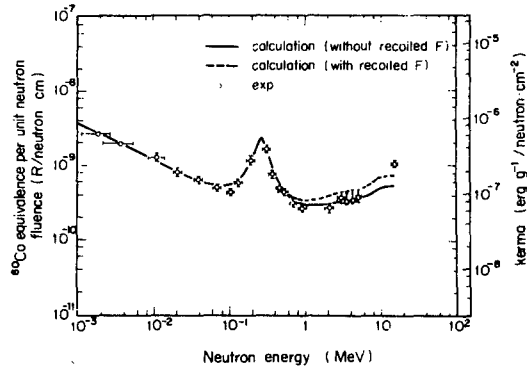


Fig. 1 Energy response of integral thermoluminescence of ⁶LiF TLD to neutrons

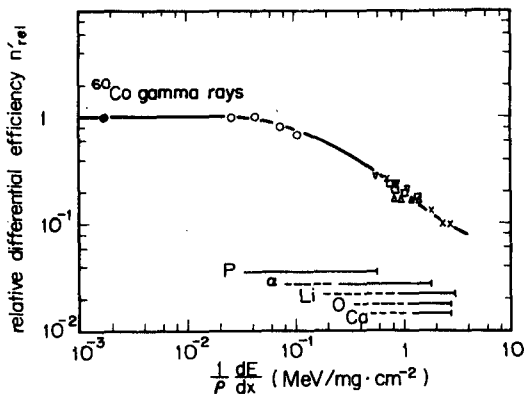


Fig. 2 Relative differential efficiency of TLDs

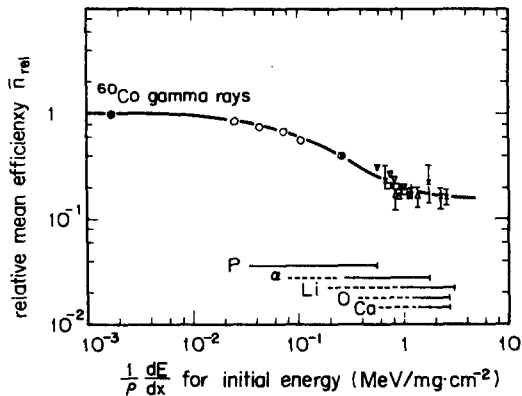


Fig. 3 Relative mean efficiency of TLDs

TLDの発光効率 η は荷電粒子のエネルギー損失過程で生まれた2次電子の密度に依存する物理量であることが結論づけられた。さらにTLDの平均発光効率 $\bar{\eta}$ がFig. 3のように一般的な形で求められたので、これを用いることによりTLDの中性子に対するレスポンスが理論的に得られるようになった。Fig. 4はCaSO₄(Tm) TLDの中性子に対するエネルギーレスポンスの理論値(実線)と実測値の比較の一例で、両者は極めてよい一致を示した。

次にTLDを⁶⁰Coガンマ線、単色エネルギーの高速中性子、原子炉放射線、アルファ粒子等で照射した時のグロー曲線を測定してTLDの熱蛍光量の測定条件を確立した。

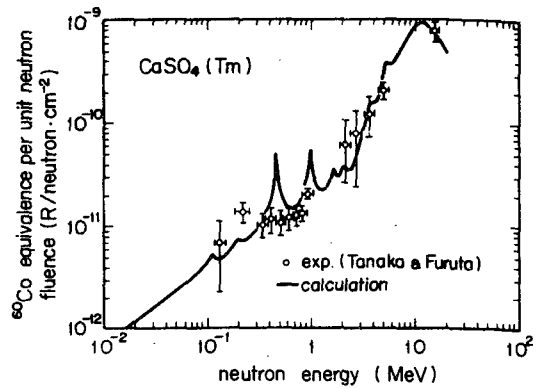


Fig. 4 Comparison of the calculated energy response of CaSO₄(Tm) TLD with the experimental one

第3章 ガンマ線と中中性子の混在場におけるガンマ線の照射量の測定法⁷⁾

前章の研究で⁶LiFと⁷LiF TLDは中中性子に対するエネルギーレスポンスに著しい差異があることが明らかになったが、一方、ガンマ線に対してはいずれも空気と同じ応答特性を示すことが知られている。

従って、本章ではこれらの特性にもとづいて⁶LiFと⁷LiF TLDを対として用いることによりガンマ線と中中性子が混在する放射線場におけるガンマ線の照射量を推定する方法を確立した。

第4章 熱蛍光線量計による高感度熱中中性子束測定法⁸⁾

本章では⁶LiFと⁷LiF TLD、またはUD-136 NとUD-137 N TLDを対として用いることによって、ガンマ線と中中性子の混在している場における熱中中性子束を高感度で測定する方法を確立した。

Cd被覆の⁶LiFと⁷LiF TLDの対と、Cd被覆なしの対とを同時に照射することによって、Cdカットオフエネルギー($E_{cd} = 0.5$ eV)以下の中中性子による⁶LiF TLDの熱蛍光量 $\Delta G_{6LiF(n)}$ が得られるが、これは第2章で得た全発光効率 $\eta_{6LiF(n)}$ とkerma $K(E_n)$ を用いて

$$\Delta G_{6LiF(n)} = \int_0^{E_{cd}} \eta_{6LiF(n)} K(E_n) \epsilon_{6LiF(n)} \phi(E_n) dE_n \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで、 $\phi(E_n)$ はエネルギー E_n の中中性子束である。Cdカットオフエネルギー以下の⁶LiF TLDのkermaは⁶Li(n, α)³t反応によって支配されるので、この反応断面積 $\sigma_{6LiF(n)}$ を用いると、(3)式は次のように書き直すことができる。

$$\Delta G_{6LiF(n)} = C_0 \int_0^{E_{cd}} \sigma_{6Li(n, \alpha)}(E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (4)$$

Cdカットオフエネルギー以下の⁶Li(n, α)³t反応の断面積は1/v型であり、(4)式は従来から熱中

中性子束の測定に利用されている Au 箔と全く同様にして ${}^6\text{LiF}$ TLD の熱蛍光量から熱中性子束が得られることを意味している。

UD-136 N と UD-137 N TLD の組合せについても全く同じ取扱いが適用できる。

Au 箔法を用いて実験で求めた ${}^6\text{LiF}$ および UD-136 N TLD の熱蛍光量 AG から熱中性子束を求めるための変換係数はそれぞれ次の通りである。

$$\chi_{{}^6\text{LiF}} = 1.12 \pm (0.06) \times 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{R } {}^{60}\text{Co equivalence}$$

$$\chi_{\text{UD-136N}} = 3.45 \pm (0.07) \times 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{R } {}^{60}\text{Co equivalence}$$

これらの TLD の測定限界は数 $\text{mR } {}^{60}\text{Co equivalence}$ であり、これは約 10^4 n/cm^2 の熱中性子の照射量に相当する。

本方法は BF_3 検出器や Au 箔法と比べると、

- a 熱中性子束の検出感度は Au 箔法より数桁大きく BF_3 検出器に近い。
- b 形状が小さいので、位置の分解能が Au 箔と同様極めて優れている。
- c 取扱いが容易で、測定精度も他の検出器とはほぼ同じである。

といった特長がある。

第 5 章 TLD による放射線加熱の測定⁹⁾

本章では実効原子番号の異なる複数個の TLD を用いて任意の物質中のガンマ線の吸収線量を推定する方法を確立した。

一様な物質 M の中で、 $D_M(E_\gamma)$ の吸収線量を与えるガンマ線の場合で TLD を照射した時、物質 M の吸収線量 $D_M(E_\gamma)$ と TLD の熱蛍光量 $G_{\text{TLD}}(E_\gamma)_M$ の関係は次式で表わされる。

$$D_M(E_\gamma) = f_\gamma(E_\gamma)_{\text{TLD-M}} G_{\text{TLD}}(E_\gamma)_M \quad (5)$$

$f_\gamma(E_\gamma)_{\text{TLD-M}}$ は物質、TLD の種類と形状、ガンマ線エネルギー等によって決められる係数であるが、この係数の最も重要な因子は物質と TLD の質量エネルギー吸収係数の比である。例えば、Fig. 5 は鉄と実効原子番号の異なる種々の TLD の質量エネルギー吸収係数の比を ${}^{60}\text{Co}$ ガンマ線のエネルギーで規格化したもので、この図から明らかなようにエネルギーの低い領域では質量エネルギー吸収係数の比は 1 からのずれが大きく、そのずれは TLD の実効原子番号が鉄の原子番号に近づくにつれて減少し、それより大きい場合は小さくなり、逆の場合は大きくなる。一方、数 MeV 以上ではこうした規則性はわずかに崩れるが、この領域での 1 からのずれは小さい。

したがって、 $f_\gamma(E_\gamma)_{\text{TLD-M}}$ として ${}^{60}\text{Co}$ ガンマ線エネルギーでの値を代表値として用いた場合、実効原子番号の異なる TLD から (5) 式によって推定した物質の吸収線量は、TLD の実効番号が物質のそれより小さければ過小評価、逆の場合は過大評価となり、その推定値は TLD の実効原子番号と共に一様な変化を示すことになる。すなわち、物質の吸収線量は物質の原子番号に対応する内挿値として求められるのである。

半径 25 cm の球形状の鉄の中心に点等方状の ${}^{60}\text{Co}$ ガンマ線線源を配置した体系で、中心から 10 cm、15 cm の位置で 5 種類の TLD で測定した鉄の吸収線量を原子番号の関数として表わしたのが Fig. 6 である。TLD の測定値を内挿して求めた鉄の吸収線量は計算値 (○印) と非常によい一致を示してい

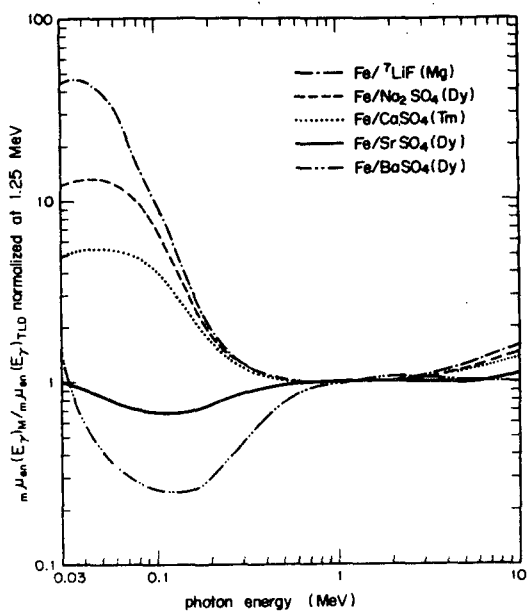


Fig. 5 The ratio of the mass energy absorption coefficient of iron to that of TLDs normalized at ^{60}Co gamma-ray energy

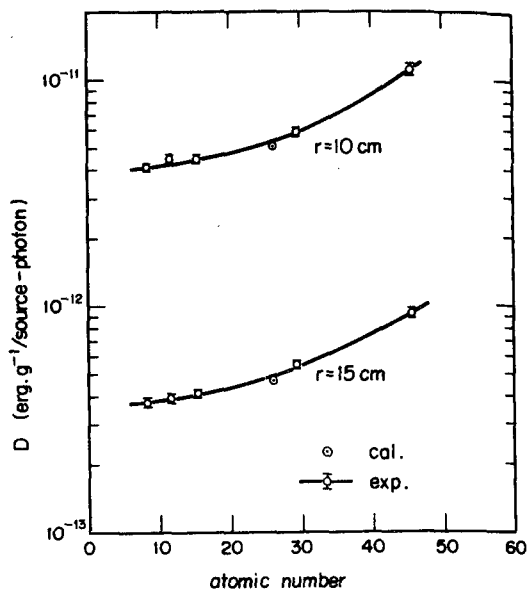


Fig. 6 Measured and calculated absorbed dose of gamma rays in an iron sphere

る。以上の結果から、本章で提案した内挿法は十分な精度を有し、その有効性が実証された。さらに、この他にいくつかの物質中の中性子の吸収線量を TLD で推定する方法も示した。

第 6 章 結 論

本研究で得られた成果、および TLD の研究や原子炉物理、放射線遮蔽、被曝管理の分野における本研究の有効性をまとめ結論とした。

なお、本研究の成果は下記の方法で公表した。

- 1) Y. Furuta and S. Tanaka : "Neutron Dosimetry by Thermoluminescence Dosimeter", Proc. of Intern. Symp. on Radiation Physics, NBS 461, Calcutta, 209 (1974)
- 2) Y. Furuta and S. Tanaka : "Response of ^6LiF and ^7LiF Thermoluminescence Dosimeters to Fast Neutrons", Nucl. Instr. Meth., 104, No.2, 365 (1972)
- 3) S. Tanaka and Y. Furuta : "Revised Energy Response of ^6LiF and ^7LiF Thermoluminescence Dosimeters to Neutrons", Nucl. Instr. Meth., 140, 395 (1977)
- 4) S. Tanaka and Y. Furuta : "Neutron Responses of Thermoluminescence Dosimeters, $\text{BeO}(\text{Na})$, $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$, and Its Mixture with ^6LiF or ^7LiF ", Proc. 4th Intern. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, 1213 (1974)
- 5) S. Tanaka and K. Takeuchi : "Neutron Energy-dependent Kerma Factors for Nuclides", JAERI-M 6348 (1975) (in Japanese)
- 6) Y. Furuta and S. Tanaka : "The Relation between Light Conversion Efficiency and Stopping Power of Charged Particles in Thermoluminescence Dosimeter", Proc. 4th Intern. Conf. on Luminescence Dosimetry, Kraków, 97 (1974)
- 7) S. Tanaka and Y. Furuta : "Estimation of Gamma-Ray Exposure in Mixed Gamma-Neutron Fields by ^6LiF and ^7LiF Thermoluminescence Dosimeters in Pair Use", Nucl. Instr. Meth., 117, 93 (1974)
- 8) S. Tanaka and Y. Furuta : "Usage of a Thermoluminescence Dosimeter as a Thermal Neutron Detector with High Sensitivity", Nucl. Instr. Meth., 133, 495 (1976) (translated to Атомная техника за рубежом, 7, 42 (1977))
- 9) S. Tanaka, K. Takeuchi, and Y. Furuta : "Application of Thermoluminescence Dosimeters for Nuclear Heating Measurements of Gamma Rays and Neutrons", Proc. of First ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry, Petten, 599 (1975)

審査結果の要旨

熱蛍光線量計は、従来、個人被曝線量計測器として用いられてきたが、中性子に対する特性が十分に知られておらずその適用範囲は限られていた。これは中性子が熱蛍光物質にエネルギーを付与する際に複雑な過程を経てなされるためである。著者はこの点に着目し、中性子およびガンマ線と熱蛍光物質との相互作用を理論的に研究しエネルギー吸収過程を定量的に明確にする努力を行って、熱蛍光線量計が個人被曝管理のみならず原子炉工学や放射線遮蔽など原子力の広い分野にわたって適用しうることを明らかにした。本論文はこれらの成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は序論であり、従来の研究を概括して本研究の目的を明らかにしている。

第2章では、7種類の熱蛍光物質の中性子に対する応答特性と発光効率およびグロー曲線など基本的性質の研究を理論的および実験的に行った経過とその結果が述べられている。すなわち、種々の単色エネルギーの中性子による熱蛍光量と中性子エネルギー付与量（KERMA）の測定から求めた発光効率を中性子核反応において放出された荷電粒子の質量阻止能で表す解析法を導入することによって、熱蛍光線量計の中性子に対する応答特性を定量的に求めている。また、グロー曲線の研究では各種放射線量に対する熱蛍光量をうる場合の必要な測定条件を確立している。

第3章では、前章においてえられた ${}^6\text{LiF}$ と ${}^7\text{LiF}$ の特性の差異からこれらの熱蛍光体を組み合わせることによってガンマ線と中性子とが混在する放射線のみによる照射線量を知る方法を述べている。

第4章では、二種類の対となる熱蛍光体にカドミウム被覆を行うことによって熱中性子束を高い感度で測定しうることを説明し、この方法が BF_3 計数管法や金箔放射化法と比べて同等以上の良い結果を与えることを示している。これは第3章に述べられた方法と組み合わせることによってガンマ線と中性子との混在場においてそれぞれの放射線を分離して測定しうる途を開いたものとして注目される。

第5章では、本研究の応用例として原子炉において重要な放射線発熱の定量的な評価法をとりあげ、著者の提案する内挿法を導入することによって熱蛍光線量計が有用な手段となることを実証している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は熱蛍光線量計の中性子に対する応答特性を明らかにして個人被曝線量計としてのみならず原子力の広い分野にわたっての実用化に指針を与えるもので原子核工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。