

論	文
---	---

低線量率, 低線量域の中性子及びガンマ線

混在場での線量測定評価法 (I)

—TLD によるガンマ線量測定評価法について—

小川喜弘*, 木村雄一郎*, 本田嘉秀*

**Dose Measurement and Evaluation Method in Low Dose Rate
and Low Dose Neutron and Gamma-ray Mixed Fields (I)**

—Gamma-ray Dose Measurement and Evaluation Method with TLD—

Yoshihiro OGAWA*, Yuichiro KIMURA* and Yoshihide HONDA*

(Received September 23, 1983)

Gamma-ray dose measurement and evaluation method in low dose rate and low dose neutron and gamma-ray mixed fields were studied with thermoluminescence dosimeters. A principle of this method is based on a difference in the energy dependence of TL phosphors which have different effective atomic numbers. A ratio of TL values measured by two different kinds of TL phosphors is given by a ratio of their mass energy absorption coefficients. This ratio is not dependent on gamma-ray dose but only on gamma-ray energy. Using this ratio we can estimate effective gamma-ray energy in unknown mixed fields and also obtain absorbed doses of irradiated materials.

Gamma-ray dose measurement and evaluation using two different kinds of TL phosphors such as CaSO_4 and BeO were carried out in graphite reflector at central stringer of UTR-KINKI. The results obtained agreed fairly well with the gamma-ray energy spectrum by $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillation spectrometer and absorbed dose by tissue equivalent paired ionization chamber.

KEYWORD

neutron and gamma-ray mixed field, low dose rate, low dose, thermoluminescence dosimeter, mass energy absorption coefficient, effective atomic number, effective gamma-ray energy, absorbed dose, UTR-KINKI

1. 緒 言

原子炉は, 加速器や R.I. 線源と比較すると, 定常的な出力を 保ち得る 強力な 中性子源であるため, 近

年, 生物照射ならびに医療照射などの利用が増大してきた。我国においても, 京都大学原子炉や武蔵工業大学原子炉などが, ヒトを含む生物を照射できる原子炉に改造され, 生物, 医療照射を行なっている^{1), 2)}。しかし, これらの原子炉は, いずれも出力が 100kW 以

* Department of Nuclear Reactor Engineering,
Faculty of Science and Technology.

* 理工学部原子炉工学科

上と高いため，今日問題となっている低線量率，低線量域での放射線の生物学的影響の研究には，より線量率の低い照射場が必要である。そこで，近畿大学原子炉は，最大出力が，1W で残留ガンマ線も低く，さらに，任意の低出力での調整が容易な原子炉であるため，低線量率，低線量域の原子炉放射線の生物学的影響を研究する上では好都合である。

低線量率，低線量域での原子炉放射線の線量測定評価法の基本的な考え方は，中，高出力の原子炉の場合と同じく，

- (1) 生物の放射線による影響は，線量だけでなく，線質にも依存するため，その線量測定評価は，各成分別に行なう。
- (2) 生物の放射線による影響を評価するため，その線量測定評価は，吸収線量で行なう。

であるが，その線量測定評価においては，従来の方法を，必ずしも100%適応できない。したがって，低線量率，低線量域の中性子及びガンマ線混在場での線量測定のためには，検出器は，高感度であることが必要であり，より精度の高い線量評価のためには，多数の線質線量情報が必要である。

その点で，熱蛍光線量計（Thermoluminescence Dosimeter, TLD と略す）によるガンマ線量測定法は，高感度であり，その感度のエネルギー依存性は，TLD 素子の種類によって異なることがあるため，この違いが，ガンマ線の線質情報を提供するのに適している。さらに，TLD により測定される量は，そのTLD 素子が吸収したエネルギーに比例した量であるため，吸収線量を評価する上では，好都合な測定器である。

そこで，本論文では，低線量率，低線量域の中性子及びガンマ線混在場での TLD によるガンマ線量測定評価法について述べ，その線量測定評価法の妥当性について検証した。

2. 原 理

ある種の物質は，放射線の照射を受けると電子と正孔が励起され格子欠陥に捕えられる。次にこの物質を加熱すると，電子と正孔が再結合し，このとき，発光する（Thermoluminescence, TL と略す）。この TL 量は，その物質が吸収したエネルギーに比例した量であり，500R 程度の照射線量まで直線関係にある。この性質が，線量計として利用され，現在，種々な TLD ならびに TL 読み取り装置が市販されている。

2.1 TL 読み取り装置の吸収線量校正

TLD の TL 量を，TL 読み取り装置で測定し，吸収線量を得るためには，読み取り値の規格化，すなわち，TL 読み取り装置の吸収線量校正をする必要がある。一般に，ある TLD 素子の吸収線量は，

$$D_{TLD} = D_{air} \times \frac{(m\mu_{en})_{TLD}}{(m\mu_{en})_{air}} \quad (1)$$

$$= f \times R \times \frac{(m\mu_{en})_{TLD}}{(m\mu_{en})_{air}} \quad (2)$$

で与えられる。ここで，

- D_{TLD}, D_{air} : TLD と空気のおおのの吸収線量
- $(m\mu_{en})_{TLD}, (m\mu_{en})_{air}$: TLD と空気のおおのの質量エネルギー吸収係数であり，ガンマ線のエネルギーに依存する値
- R : 照射線量
- f : 空気に対する 1R の吸収線量

すなわち， ^{60}Co 標準線源による TLD の標準照射を行ない，その照射線量より TLD 素子の吸収線量を算出し，TL 読み取り装置の読み取り値の吸収線量校正を行なう。以後実際の線量測定に際しては，この読み取り値校正曲線を用い，内挿法により，読み取り値から TLD 素子の吸収線量を算出する。

2.2 ガンマ線実効エネルギーの推定

実効原子番号の異なる 2 種類の TLD 素子の吸収線量は，それぞれ，

$$D_{TLD_1} = D_{air} \times \frac{(m\mu_{en})_{TLD_1}}{(m\mu_{en})_{air}} \quad (3)$$

$$D_{TLD_2} = D_{air} \times \frac{(m\mu_{en})_{TLD_2}}{(m\mu_{en})_{air}} \quad (4)$$

で与えられる。そこで，2 種類の TLD 素子の吸収線量比は，

$$\frac{D_{TLD_1}}{D_{TLD_2}} = \frac{(m\mu_{en})_{TLD_1}}{(m\mu_{en})_{TLD_2}} \quad (5)$$

で与えられ，これは，質量エネルギー吸収係数の比，すなわち，ガンマ線のエネルギーにのみ依存し，線量に無関係な定数である。

一般に，市販の TL 読み取り装置は，使用する TLD に対して，同一照射線量の ^{60}Co のガンマ線の

照射に関して、同じ読み取り値を示すように較正されているため、 $(m\mu en)_{TLD1}/(m\mu en)_{TLD2}$ 値を ^{60}Co のガンマ線エネルギーで規格化、TL 読み取り装置の読み取り値の比より、ガンマ線エネルギー指標を

$$G.E. = \frac{TL(1)}{TL(2)} \quad (6)$$

と定義する。

したがって、ガンマ線エネルギーと TLD の読み取り値の比、すなわち、G.E. との関係を事前に求めておくなら、未知なエネルギーのガンマ線場で、2種類の実効原子番号の異なる TLD 素子を照射することにより、 ^{60}Co のガンマ線で較正された TL 読み取り装置での読み取り値の比より、ガンマ線実効エネルギーを内挿法により推定することができる。

2.3 照射線量及び被照射物質の吸収線量評価

TL 量より、その TLD 素子の吸収線量が測定されると、その場の照射線量及び被照射物質の吸収線量換算が必要となる。照射線量は、(1)より

$$R = D_{TLD} \times \frac{(m\mu en)_{air}}{(m\mu en)_{TLD}} \times \frac{1}{f} \quad (7)$$

で与えられ、また、被照射物質の吸収線量は、

$$D_{medium} = f \times R \times \frac{(m\mu en)_{medium}}{(m\mu en)_{air}} \quad (8)$$

$$= f \times R \times \frac{(m\mu en)_{TLD}}{(m\mu en)_{air}} \times \frac{(m\mu en)_{medium}}{(m\mu en)_{TLD}} \quad (9)$$

$$= \frac{(m\mu en)_{medium}}{(m\mu en)_{TLD}} \times D_{TLD} \quad (10)$$

となる。したがって、ガンマ線エネルギー指標より推定されたガンマ線実効エネルギーを用い、 $(m\mu en)_{air}/(m\mu en)_{TLD}$ や、 $(m\mu en)_{medium}/(m\mu en)_{TLD}$ を算出し、TLD 素子の吸収線量より、照射線量及び被照射物質の吸収線量へと換算できる。

以上の方法より、実効原子番号の異なる2種類の TLD 素子を同時に使用することにより、未知なガンマ線場の実効エネルギーを推定することができ、また照射線量や被照射物質の吸収線量評価が可能である。

3. 実 験

3.1 ガンマ線量測定用 TLD

TLD によるガンマ線の実効エネルギーの推定なら

Table 1 TL phosphors and effective atomic number

TL phosphors	BeO	LiF	CaSO ₄ :Tm	CaF:Mn	Mg ₂ SO ₄ :Tb
Effective atomic number	7.6	8.1	15	16	11

(Effective atomic number of tissue: 7.4)

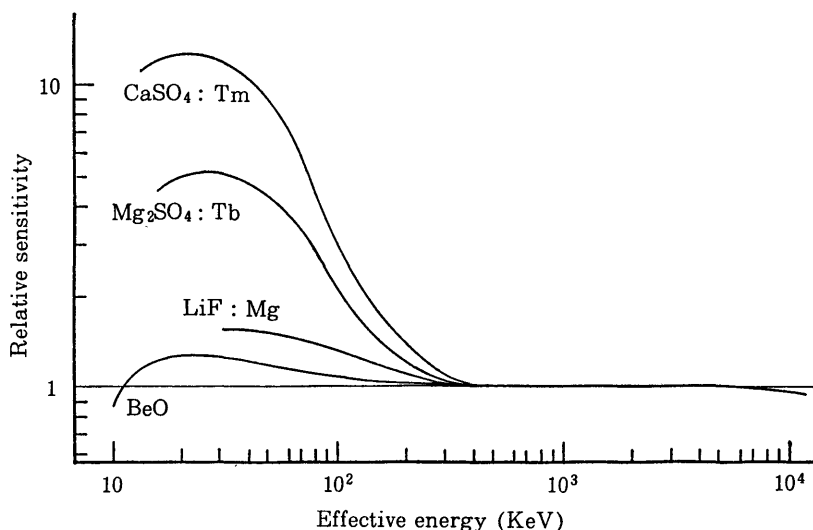


Fig. 1 Energy characteristics of various kinds of TL phosphors^{3),4)}

びに線量を評価するには、実効原子番号の異なった TLD 素子が必要である。Table 1 は、市販されている TLD 素子とその実効原子番号であり、Fig. 1 は、それらのエネルギー応答特性を示す。現在市販されている TLD 素子の実効原子番号は、7.6から16程度である。エネルギー応答の違い、すなわち、質量エネルギー吸収係数の違いにより、ガンマ線実効エネルギーの推定ならびに線量を評価するため、なるべく実効原子番号の異なった TLD 素子が必要である。

そこで、本研究では、松下電器製の CaSO₄ 系 TLD の UD-110S と BeO 系 TLD の UD-170A を使用した^{3),4)}。

3.2 TLD によるガンマ線量測定評価法の妥当性の検証

近畿大学原子炉共同利用研究として、昭和55年度に、東京大学工学部原子力工学研究施設の吉井等が、近畿大学原子炉黒鉛反射体内の種々な位置での線量測定を、組織等価対電離箱により実施した⁹⁾。それらのうち、中央ストリンガー位置でのガンマ線量測定評価を、TLD により同時に行ない、組織等価対電離箱による測定評価値との相互比較により、TLD による線量測定評価法の妥当性を検証した。

中央ストリンガー部の垂直方向のガンマ線量分布の測定は、9.5×9.5×121.0cmの黒鉛ストリンガーを引き抜き、臨界調整のため、9.5×9.5×33.0cmの黒鉛プラグを挿入した状態で実施した。測定位置は、中央ストリンガー底部より、15cm 毎の6個所で、各位置に、CaSO₄ 系及び BeO 系 TLD 4本ずつを配置し、1W 運転下で、1時間照射した。

4. 実験結果及び考察

4.1 ガンマ線実効エネルギーの推定

ガンマ線実効エネルギーの推定ならびにガンマ線量評価に使用する種々な物質の質量エネルギー吸収係数⁶⁾ を Table 2 および 3 に示す。なお、ここで、CaSO₄ 系と BeO 系 TLD の質量エネルギー吸収係数は、実効原子番号より算出した。 $(\mu_{en})_{BeO}/(\mu_{en})_{CaSO_4}$ の値を ⁶⁰Co のガンマ線エネルギー（平均1.25MeV）で規格化し、TL 読み取り装置の読み取り値の比で定義したガンマ線エネルギー指標を Fig. 2 に示した。これより、ガンマ線実効エネルギーを推定した。

なお、放射線医学総合研究所の中島が、TLD による環境中での人工放射線と自然放射線の弁別評価法と

Table 2 Gamma-ray mass energy absorption coefficients of some elements and materials⁶⁾

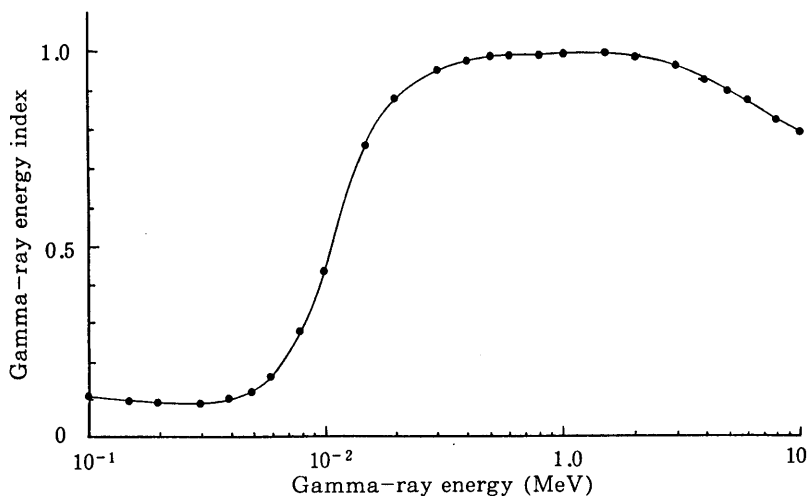
Energy	N	O	P	Air	Water
0.010	3.42	5.50	40.1	4.66	4.89
0.015	0.916	1.49	11.9	1.29	1.32
0.020	0.360	0.587	5.00	0.516	0.523
0.030	0.102	0.163	1.45	0.147	0.147
0.040	0.0465	0.700	0.570	0.0640	0.0647
0.050	0.0299	0.0410	0.282	0.0384	0.0394
0.060	0.0244	0.0304	0.166	0.0292	0.0304
0.080	0.0218	0.0239	0.0780	0.0236	0.0253
0.10	0.0222	0.0232	0.0500	0.0231	0.0252
0.15	0.0249	0.0252	0.0315	0.0251	0.0278
0.20	0.0267	0.0271	0.0292	0.0268	0.0300
0.30	0.0289	0.0289	0.0290	0.0288	0.0320
0.40	0.0296	0.0296	0.0290	0.0296	0.0329
0.50	0.0297	0.0297	0.0288	0.0297	0.0330
0.60	0.0296	0.0296	0.0287	0.0296	0.0329
0.80	0.0289	0.0289	0.0280	0.0289	0.0321
1.0	0.0280	0.0280	0.0270	0.0280	0.0314
1.25	0.0268	0.0268	0.0258	0.0268	0.0299
1.5	0.0255	0.0255	0.0245	0.0255	0.0283
2.0	0.0234	0.0234	0.0228	0.0234	0.0260

Table 3 Gamma-ray mass energy absorption coefficients of TL phosphors and gamma-ray energy index

Energy	BeO (7.6)*	CaSO ₄ (15)*	BeO/CaSO ₄	G. E.**
0.010	4.67	40.1	0.117	0.113
0.015	1.26	11.9	0.106	0.102
0.020	0.496	5.00	0.0992	0.0954
0.030	0.139	1.45	0.0959	0.0922
0.040	0.0606	0.570	0.106	0.102
0.050	0.0366	0.282	0.130	0.125
0.060	0.0280	0.166	0.169	0.163
0.080	0.0231	0.0780	0.296	0.285
0.10	0.0228	0.0500	0.456	0.438
0.15	0.0251	0.0315	0.797	0.766
0.20	0.0269	0.0292	0.921	0.886
0.30	0.0289	0.0290	0.997	0.959
0.40	0.0296	0.0290	1.02	0.981
0.50	0.0297	0.0288	1.03	0.990
0.60	0.0296	0.0287	1.03	0.990
0.80	0.0289	0.0280	1.03	0.990
1.0	0.0280	0.0270	1.04	1.00
1.25	0.0268	0.0258	1.04	1.00
1.5	0.0255	0.0245	1.04	1.00
2.0	0.0234	0.0228	1.03	0.990

*Numbers in parentheses represent effective atomic number of material.

**Gamma-ray energy index, see text.

**Fig. 2** Relation between gamma-ray energy and gamma-ray energy index

してエネルギー応答の異なる TLD 発光体の発光応答比から、実効エネルギー推定の有効性を確かめている⁷⁾。

4.2 TLD によるガンマ線量測定評価法の妥当性

4.2.1. ガンマ線量測定用 TLD の熱中性子感度の補正

市販の TLD は、TLD 粉末の封入ガラスに、ほう

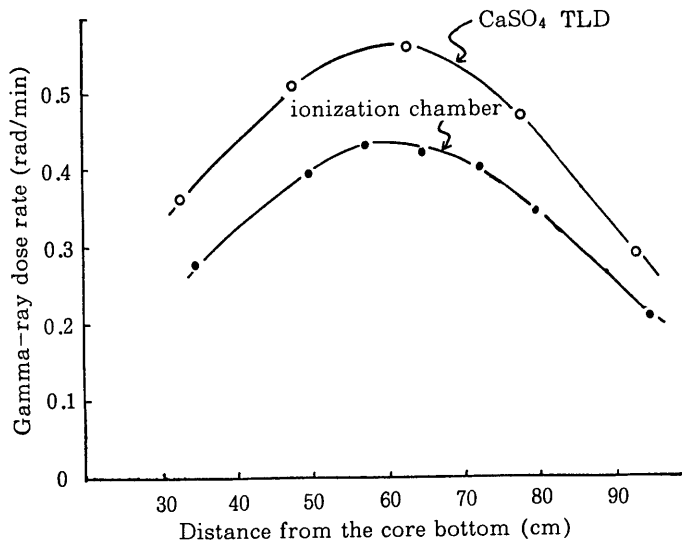


Fig. 3 Gamma-ray dose rate distribution in central stringer measured by CaSO₄ TLD and tissue equivalent paired ionization chamber

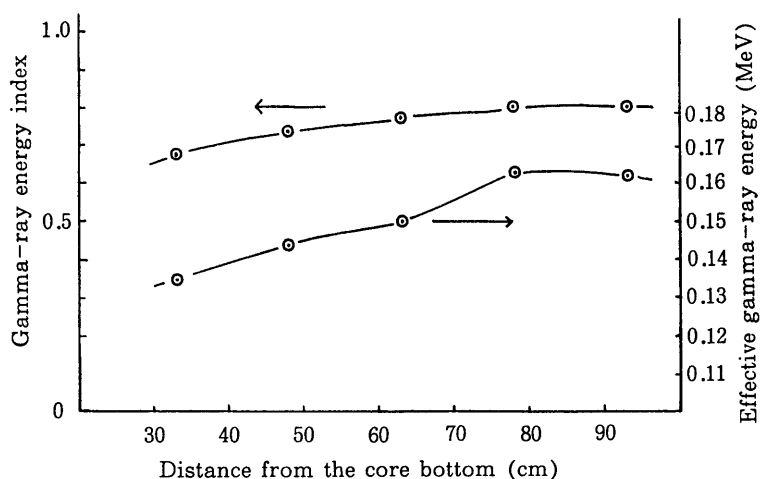


Fig. 4 Distribution of gamma-ray energy and gamma-ray energy index in central stringer measured by TLDs

珪酸ガラスが使われており，ほう素の熱中性子吸収断面積は，3,838バーンと大きく，同時にガンマ線も放出される。そのため，ガンマ線量測定用 TLD が熱中性子にも感度を示し，ガンマ線量は，実際よりも過大評価される。その補正法として，京都大学原子炉実験所の古林等が，入射中性子を2次ガンマ線を放出することなく吸収，遮蔽し，かつ，ガンマ線場を大きく乱さない ⁶LiF TLD セルを開発した⁸⁾。

中央ストリンガー部でのガンマ線量測定において，

⁶LiF TLD セルを用い，使用 TLD の熱中性子感度を調べた結果，実験条件（熱中性子フルエンス $\approx 10^{10}$ n/cm²）では，TLD の熱中性子感度は無視できる程小さかった。

4.2.2. 中央ストリンガー部でのガンマ線実効エネルギー及びガンマ線量

組織等価対電離箱及び CaSO₄ 系 TLD により測定された中央ストリンガー部垂直方向でのガンマ線吸収線量率分布を Fig. 3 に示す。これより明らかなように，CaSO₄ 系 TLD により測定された吸収線量率は，組織等価対電離箱のそれより約 25% 過大評価している。その原因として，近畿大学原子炉反射体は，黒鉛で構成されているため，燃料からの核分裂ガンマ線が散乱され，その

結果，ガンマ線スペクトルが低エネルギー側に移り，CaSO₄ 系 TLD が過大応答しているためと定性的に考えられる。しかし，実際，原子炉運転中での中央ストリンガー部でのガンマ線スペクトルを測定することが困難であるため，2種類の TLD によるガンマ線実効エネルギーの推定を行なった。

CaSO₄ 系と BeO 系 TLD により測定された中央ストリンガー部でのガンマ線エネルギー指標ならびにガンマ線実効エネルギー推定曲線により推定されたガンマ線実効エネ

ルギーを Fig. 4 に示す。Fig. 4 に見られるように，中央ストリンガー部でのガンマ線実効エネルギーは，130~160KeV である。この結果は，京都大学原子炉実験所の神田等が，炉心より引き出されてくるガンマ線スペクトルを，上ぶた実験孔で，NaI(Tl) シンチレーション検出器により測定した結果⁹⁾ とよく一致する。

これらのガンマ線実効エネルギーを用いてガンマ線エネルギー依存の質量エネルギー吸収係数を推定し，

それらにもとづいて算出した中央ストリンガー部垂直方向の水の吸収線量率分布ならびに組織等価対電離箱により測定された結果を Fig. 5 に示す。その結果、中央ストリンガー部での吸収線量率は、 $0.2 \sim 0.4 \text{ rad/min}$ であり、2種類の TLD を用いたガンマ線量測定評価法による水の吸収線量率と組織等価対電離箱による測定結果とは、よく一致し、本線量測定評価法の妥当性が検証された。

5. 結 論

実効原子番号の異なる2種類の TLD 素子の TL 量の比は、ガンマ線量に依存せず、おのこの TLD 素子の質量エネルギー吸収係数の比に、すなわち、ガンマ線エネルギーにのみ依存する。このことを利用して、未知なガンマ線場での実効エネルギーの推定ならびに線量評価法について検討した。さらに、本線量測定評価法の妥当性の検証を近畿大学原子炉黒鉛反射体内の中央ストリンガー部垂直方向での組織等価対電離箱の測定結果との相互比較により実施した。

これらのことから、次の結論を得た。

- (1) 市販の実効原子番号の異なる2種類の TLD 素子、 CaSO_4 系と BeO 系 TLD の組み合わせにより、ガンマ線実効エネルギーの推定が可能である。
- (2) 本線量測定評価法により得られた近畿大学原子炉中央ストリンガー部でのガンマ線実効エネルギーは、 $130 \sim 160 \text{ KeV}$ であり、 NaI(Tl) シンチレーション検出器による測定結果とよく一致した。
- (3) 本線量測定評価法により得られた近畿大学原子炉中央ストリンガー部でのガンマ線吸収線量率は、 $0.2 \sim 0.4 \text{ rad/min}$ であり、組織等価対電離箱による測定結果とよく一致した。
- (4) 今後、本線量測定評価法を拡張することより、すなわち、使用する TLD 素子を2種類以上とすることより、より多くのガンマ線質情報が得られる可能性がある。

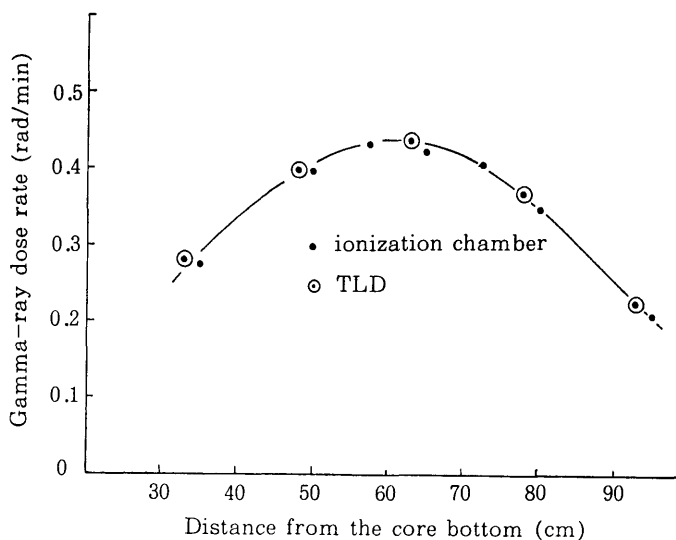


Fig. 5 Gamma-ray dose rate distribution in central stringer measured by TLD and tissue equivalent paired ionization chamber

参考文献

- 1) 神田啓治：医療用中性子場の開発，日本原子力学会誌，**17**，582 (1975)。
- 2) O. Aizawa et al.: Remodeling and dosimetry on the neutron irradiation facility of the Musashi Institute of Technology Reactor for boron neutron capture therapy, Nucl. Technol., **48**, 150 (1980)。
- 3) 松下電器産業㈱ TLD 技術資料
- 4) 松下電器産業㈱ TLD 取り扱い説明書
- 5) 吉井康司等：近畿大学原子炉共同利用経過報告書（昭和55年度），15 (1981)。
- 6) ICRU, Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements, 10 (1956)。
- 7) 中島敏行：TLD による環境中の人工・自然放射線の弁別評価法，日本原子力学会誌，**23**，58 (1981)。
- 8) 古林徹等：LiF タイル中性子遮蔽材の開発とそのトリチウム保持特性，KURRI-TR-198 (1980)。
- 9) 神田啓治等：近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和56年度），1 (1982)。