



Title	熱ルミネッセンス線量計による密封小線源近傍の線量分布測定法の開発とその応用
Author(s)	入船, 寅二
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1981, 41(7), p. 619-632
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15255
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

熱ルミネッセンス線量計による密封小線源近傍の 線量分布測定法の開発とその応用

癌研究会癌研究所物理部

入 船 寅 二

(昭和56年2月19日受付)

(昭和56年3月23日最終原稿受付特別掲載)

Development of method for measuring dose distributions close to sealed
small sources using a thin disk-type TLD and its application

Toraji Irisune

Department of Physics, Cancer Institute, Tokyo

Research Code No.: 203

Key Words: Thermoluminescent dosimeter, Dosimetry, Sealed small
source, Brachytherapy

The method for measuring the doses at points close to a sealed small source using $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ foil (UD 100M8) in a phantom has been developed. Since the doses around a sealed small source change rapidly with distance from the source, a detector of very small thickness and cross sectional dimension is required. UD 100M8 has the shape of disks, 8 mm in diameter and 0.06 mm thick in which $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ powder is incorporated in poly-imid resin. The thickness may be small enough, but the diameter of disk is too large for the measurement at points close to a source. To obtain the small cross sectional dimension, the thin metal diaphragm having the aperture of 0.7 to 3 mm in diameter was attached between TL dosimeter and light guide during TL reading. The doses at source-detector distance from 0.1 to 1 cm in direction perpendicular to long axis of a line source were measured using UD 100M8 with the diaphragm of several dimensions for the radium (^{226}Ra) needle and tube, gold (^{198}Au) grain, radon (^{222}Rn) seed and ^{125}I seed. The TL dosimeters were calibrated individually with ^{60}Co gamma rays from a therapy head. Geometrical efficiency for a thin disk-type detector was calculated as a function of the diameter of a detector, the length of line source and source-detector distance, and were compared with the experimental values. The results obtained are as follows:

- 1) The linear relationships between the dose and relative TL response of UD 100M8 attached the diaphragm of aperture larger than 1 mm in diameter were observed from 3.3 to 156 R within the coefficient of variation of 8% for 10 dosimeters for ^{60}Co gamma rays.
- 2) The geometrical efficiencies calculated from theoretical equation agreed with the measured values within the experimental errors.
- 3) The doses at points greater than 0.25 cm from a source for any length could be measured

within the error of 2% without correction for the geometrical efficiency when TL of UD 100M8 is measured using the diaphragm having the aperture of 1 mm in diameter.

4) Although the leakage of beta-ray dose from a gold grain has been reported, it was not observed at the source-detector distances greater than 0.1 cm in present measurement.

5) The leakage of beta rays from a radon seed was observed at the source-detector distances up to 1 cm. From the measured values and calculated gamma-ray dose from theoretical equation, the empirical formula for the dose calculation of beta rays from the radon seed has been derived.

6) Because of the energy dependency of UD 100M8, the measured values at points greater than 1 cm from a source were higher than the calculated values. TLD BeO:Li (UD 170L, glass encapsulate ceramic powder, 1.2 mm in diameter × 8 mm) is useful for the measurements at points greater than 1 cm from a source.

目 次

1. 緒論
2. 実験装置および方法
 2. 1 材料
 2. 1. 1 TLD 素子
 2. 1. 2 TL 計測装置
 2. 1. 3 ファントム
 2. 2 線源
 2. 3 線量評価の方法
 2. 4 γ 線線量分布の計算
3. 基礎的実験
4. 検出器の実効断面積の大きさの線量分布測定値への影響
5. 応用
 5. 1 ラジウム管
 5. 2 ゴールドグレイン
 5. 3 ^{125}I シード
 5. 4 ラドンシード
6. 考察
7. 結論

1. 緒 論

密封小線源を用いた腔内または組織内放射線治療において、線源近傍の吸収線量を知ることは臨床上重要なことである。また、ラドンシードやゴールドグレインなどの線源容器の壁の薄い線源では、一次 β 線の漏洩が報告されている^{1)~3)}。ファントム内で密封小線源の近傍を測定する場合、最も問題となるのは検出器の形状と大きさである。線源近傍では、線源からの距離による線量率の変

動が激しいので、検出器の実効厚さが小さいこと、また、線源の形状は主に放射能長が0.2cmから5cmの線状線源であるので、検出器の断面積が充分に小さいことが測定に用いる検出器の主な条件である。従来、指頭形や円板形の電離箱^{4)~16)}、フィルム^{17)~19)}、蛍光ガラス線量計^{20)~25)}、シンチレーション クリスタル^{26)~30)}、また、最近では熱ルミネッセンス線量計(TLD)^{31)~39)}が用いられている。電離箱は最も多く使用されているが、比例計数管領域で使用¹⁵⁾する場合を除くと、一般に用いられている電離箱領域では、測定に必要な電離電流を得るために、最低3.6mm 直径 × 1mm の電離箱が要求される⁴⁾。勿論、電離箱について検出部の大きさを補正するための方法⁵⁾⁶⁾⁸⁾も発表されている。しかし、線源の極近傍の測定について論じたものは殆どない。TLDは電離箱に比べて一般に小さく、小線源近傍の測定に用いられているが、これらも直徑あるいは長さが8mm程度あるので、このままでは線源から数mm以内の極近傍の測定には問題がある³⁹⁾。

本論文は、フォイル型 TLD を用いた線源の極近傍の線量の測定方法を開発したので報告する。また、円板状検出器の大きさと、線状線源の長さおよび線源からの距離との関係について理論的に計算した幾何学的効率とを比較検討した結果と、実際に治療に用いられている小線源についての測定結果について併せて報告する。

2. 実験装置および方法

2.1. 材料

2.1.1. TLD 素子

線源の極近傍の測定は、直径 8mm のフォイル型 TLD UD 100M8 (ナショナル製, アルミニウム箔に $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Tm}$ 粉末を耐熱性樹脂ポリイミドアミドで薄く成形したもの, 発光層の厚さ 60 μm , アルミニウム箔 30 μm)⁴⁰⁾ を用い, 曝射後, 熱発光量 (TL) を測定する際, 厚さ 0.25mm の特殊金属に円形の穴をあけた絞りにより測光面積を小さくして, 検出器の実効断面積の縮小化を行った。方法の詳細は後で述べる。また, 線源から 1cm 以上の距離の線量測定には UD 170L (ナショナル製, $\text{BeO} \cdot \text{Li}$ 焼結粉末を 1.2mm 直径 × 8mm のガラスカプセルに封入) を用いた。

アニールは UD 100M8 は 380°C, 5 分, UD 170L は 470°C, 1 時間である。

2.1.2. TL 計測装置

TL の測定にはナショナル製 UD 505A 型の TL 計測装置を用いた。これは 380°C の熱風を TLD 素子に 10 秒間吹きつけ, 加熱する方式である⁴¹⁾。UD 100M8 の TL を測定する際には, Fig. 1 の如く素子の測光側 (下側) に, 円形の穴をあけた金属板の絞りを挿入し, 絞られた穴からの TL の

みを測定することにより, 素子の実効断面積を小さくすることができる。この絞りによる測光面積の大きさは, 直径 0.7, 1, 1.5, 2 および 3mm の円である。測光面積と感度とは反比例するが, 線量率の高い線源近傍では, 小さな面積が要求され, 線源から離れるにつれ, 線量率は低くなるが測光面積は大きくて良い。種々の面積の異なる絞りを用意することにより, 線源の形状, 距離を考慮した大きさの検出器を選ぶことができる。なお, TLD 素子の TL の測定は熱発光スペクトルの安定する曝射 24 時間後⁴⁰⁾ に行った。

2.1.3. ファントム

測定はすべてファントム中で行った。用いたファントムは直径 30cm の 1~5cm 厚の MixDP と 1mm 厚のポリスチレン板である。線源はその形状にくり抜いた MixDP に埋め込み, 線源近傍はポリスチレン板に裸の UD 100M8 をはさみ曝射した。また, ファントムは全体の厚さが線源の両側が少くとも 15cm 以上になる様に配置した (Fig. 2)。実験は TLD 素子の光による影響⁴²⁾を受けない条件で行った。

2.2. 線源

実験には放射能長の異なる線状線源としてラジウム針 (3mg, 放射能長 4.5cm, 壁厚 0.5mm Pt-

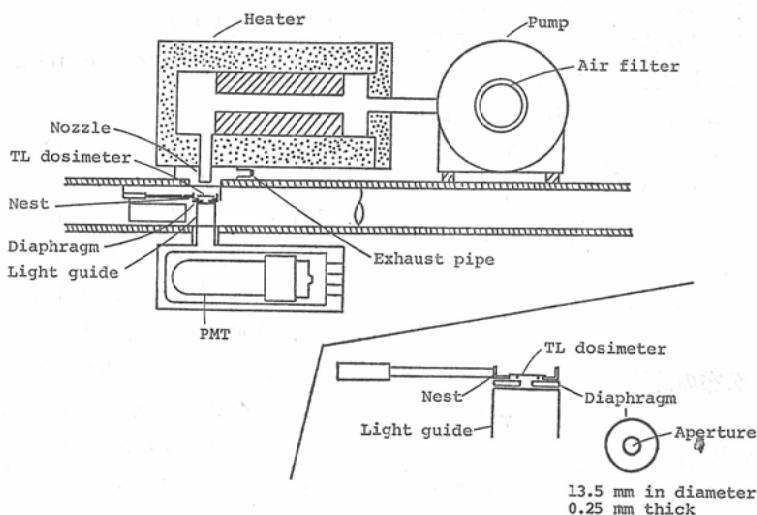


Fig. 1. Schematic diagram of TL reader (UD 505A) and diaphragm used for TL reading.

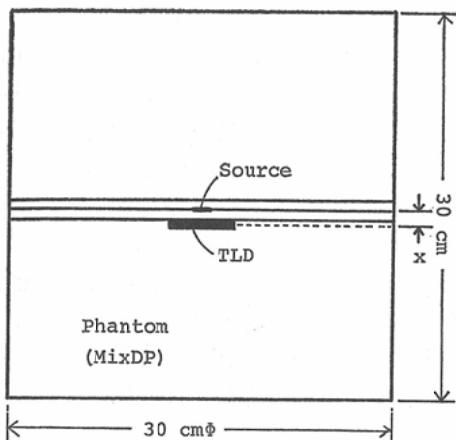


Fig. 2. Experimental arrangement of line source and TL dosimeter.

Ir), ラジウム管(10mg, 放射能長1.5cm, 壁厚1mm Pt-Ir), ゴールドグレイン(¹⁹⁸Au, 放射能長0.25cm, 壁厚0.15mm Pt), ラドンシード(²²²Rn, 放射能長0.24および1cm, 壁厚0.3mm Au)および¹²⁵Iシード(米国3M社製, 壁厚0.05mmチタニウム)を用いた。

2.3. 線量評価の方法

使用したTLD素子は、JAPM準標準線量計で値付けした⁶⁰Coγ線により、1個づつ素子と絞りとの組合せについてR当りのTLレスポンス(TL/R)で校正した。TL測定ごとのTL計測装置による感度変化は、小線源照射とほぼ同時期に⁶⁰Coγ線を照射した5~10個のTLD素子のTLにより補正した。⁶⁰Coγ線に対するUD100M8のエネルギー依存性は400keVまでの光子については同じ⁴²であるので、ラジウム針および管、ラドンシード、ゴールドグレインについては⁶⁰Co-R等価TLで評価した。¹²⁵Iシードについては後述する。

2.4. γ線線量分布の計算

測定値と比較するための線状線源のγ線線量は(1)式による数値積分法により求めた。放射能qCiの線状線源をn個の点線源に分割した場合の各点線源からの距離x_iにおける照射線量率X(R/h)は、

$$\dot{X} = \frac{q}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\phi(t_i) \text{WAR}(d_i)}{x_i^2} \quad (1)$$

となる。φは線源容器の壁による吸収を考慮した照射線量率定数(R·cm²·mCi⁻¹·h⁻¹)で、次の(2)式で表わされる。

$$\phi(t) = \Gamma e^{-\mu t} \quad (2)$$

Γは照射線量率定数、tは線源容器の厚さ、そしてμは壁物質の線吸収係数である。ゴールドグレインは直径0.5mmの線源を0.15mm厚のPtで被覆したものであるが、¹⁹⁸Auからのγ線(主に0.42MeV)の自己吸収に対する線吸収係数μには3.959cm⁻¹、Ptに対しては4.263cm⁻¹⁴³を用いて計算した。ラジウム針および管、およびラドンシードはエネルギーの異なるγ線を多数放出するのでφの計算が複雑になるので、著者らの開発した次式⁴⁴を用いた。

$$\phi(t) = 8.798 - 12.73t + 10.36t^2 - 3.761t^3 - (R \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (3)$$

ここでは、tはPt-Irの厚さ(cm)である。WAR(Water-air exposure ratio)は組織(水)による吸収と散乱を補正する項で、ゴールドグレインについてはMeisbergerら²⁹の実験式

$$\text{WAR}(d) = 1.0306 - 8.134 \times 10^{-3}d + 1.111 \times 10^{-3}d^2 - 1.597 \times 10^{-4}d^3 \quad (4)$$

を用いた。ラジウムとラドンシードについては著者ら⁴⁴の開発した

$$\text{WAR}(d) = 1.000 - 0.01161d - 0.0004435d^2 \quad (5)$$

を用いて計算した。ここで、dはγ線の透過する組織の厚さ(cm)である。

¹²⁵Iシードは直径0.8mm、長さ4.5mmのチタニウム容器内にX線マーカをはさんで2個の¹²⁵Iを含んだ球形のイオン交換樹脂が封入されている³⁷。Andersonの計算値³⁸によると、線源から1cmまでは見掛け上の吸収が殆ど無いので¹²⁵Iの線量分布は2つの点線源から距離の逆自乗則のみを考慮した計算値を用いた。

計算のための各線源の放射能およびΓは次の値を採用した。ラジウムはBrussels大学(Belgium)により±1%の精度で検定された重量(mg)を用

い、ラドンシードは電離箱（応用技研製 AE-133型）によりラジウム 1mg と等価な線量となるものを 1'mCi' として、容器の壁による吸収を考慮した(3)式により計算した。ゴールドグレインは上述のラジウムで校正した電離箱を用いて空中で測定し、 $\Gamma=2.34$ を用いて放射能を決めた。 ^{125}I シードについては、放射能は 3M 社の検定書を採用し、 Γ は Schulz らの計算値 1.284³⁰を用いた。

3. 基礎的実験

TLD 素子 UD 100M8 および 170L についての物理的特性については既に詳しい報告がある^{40, 42}。ここでは、線源の極近傍を測定するために、UD 100M8 に絞りを付けて TL を測定した場合の感度、直線性および測定精度について述べる。

密封小線源の極近傍を測定するためには、実効断面積が小さいことが必要であるが、放射線に対する感度は測光面積すなわち絞りの面積に比例する。また、測定精度は TL 量が大きいほど良くなる。絞りの大きさと感度および精度との関係を $^{60}\text{Co} \gamma$ 線について検討した。UD 100M8 は 38 keV から 10MV の X 線に対して 200R 近くまで

TL と線量は比例する⁴²。Fig. 3 は SCD 50cm, $10 \times 10\text{cm}^2$ の条件で $^{60}\text{Co} \gamma$ 線を 3.3R, 28R, および 156R 照射した UD 100M8 素子を種々の絞りを付けて測定した TL レスポンスを絞りを付ける場合（測定面積の直径 8mm）の TL を 1 とした相対感度で表わしたものである。TL 計測装置 UD 505A の‘読み’の background は ‘0.05’である。直径 0.7mm の絞りを用いた結果は、感度が低く background の影響により直線性を保てなく、誤差（変動係数）も 10~20% と大きい。直径 1mm 以上の絞りを用いた場合は、156R までは線量依存性は殆ど無く、変動係数も 3.3~156R の線量に対して 8% 以下である。図中の点線は background の影響が‘読み’の 1% 以下となる照射線量と相対 TL 量との関係を表わしている。直径 1mm 以上の絞りを用いれば、50R 以上の照射線量を曝射すれば background および素子間の誤差を考慮しても 5% 以下の変動係数で測定できる。これらの結果から、UD 100M8 は照射線量が 50~100R となるような条件で照射した。

Fig. 3 の直径 8mm の測光面積に対する各絞

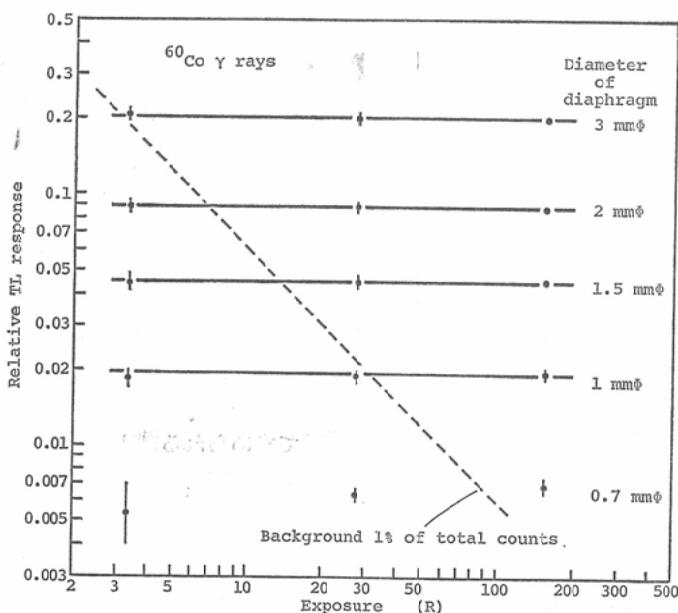


Fig. 3. Linear relationship between dose and relative TL response of UD 100M8 with diaphragm having different diameters to TL response without diaphragm for $^{60}\text{Co} \gamma$ rays.

りの相対 TL レスポンスから得られた絞りの実効直径は、設計した直径より大きく、1mm が 1.1 mm, 2mm が 2.4mm, 3mm が 3.6mm であった。これは工作上の精度および発光面と絞りの位置との距離による半影とによる影響であろう。しかし本論文では便宜上設計時の直径を用いている。

4. 検出器の実効断面積の大きさの線量分布測定値への影響

測定はすべて線状線源の中心から長径に垂直な方向について行った。

放射能長 0.25mm のゴールドグレインの線源近傍で照射した UD 100M8 を、直径 1mm, 3mm そして 8mm (絞りなし) の面積で TL を測定した結果を Fig. 4 に示す。実線は (1)式による計算値である。直径 1mm の絞りを用いた測定結果は (1)式による γ 線線量の計算値とほぼ一致するが、線源近傍では測光面積が大きいほど低い値となる。線源から 0.24cm の所では直径 1mm の測定値を 1 とすると、3mm は 0.92, 8mm は 0.56

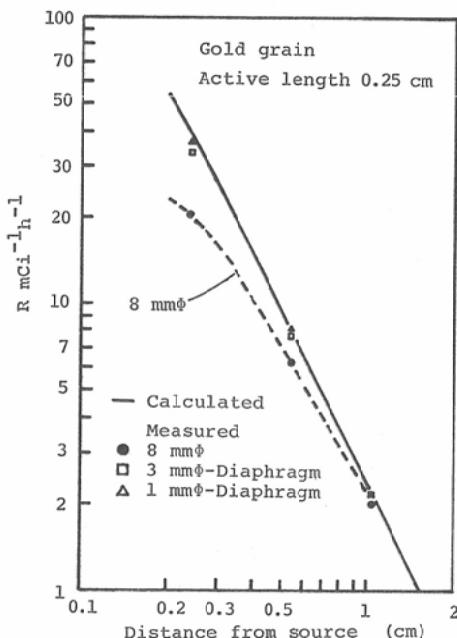


Fig. 4. Dose distributions measured by UD 100M8 with different diameters in direction perpendicular to long axis of gold grain. Solid line is calculated from equation (1).

と低い値になる。線源から 1cm の点では測光面積による影響は殆どない。検出器の断面積が線源近傍の線量測定の重要な因子であることを示している。

点線源について電離箱の大きさが線量分布の測定値に与える影響に関する報告⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾では、電離箱の形状 (shape factor) と線源からの距離 (distance factor) とを関数として検出効率を論じている。密封小線源の場合、線源の形状は線状であり、これらの結果をそのまま使用することはできない。UD 100M8 は発光層の厚さが 60 μm であるので電離箱で論じられている shape factor のうち検出器の厚さの項は無視できる。

線状線源に対する UD 100M8 の幾何学的な検出効率 (幾何学的効率) を計算した。計算は線源の放射能長と検出器の断面積そして線源からの距離の逆自乗則を考慮し、線源の直径の大きさは無視した。また、線源の近傍を問題としているので組織による吸収、散乱は無視した。

放射能長 l の線状線源と半径 r の円板状検出器が Fig. 5 の如く配置されているとする。理想的

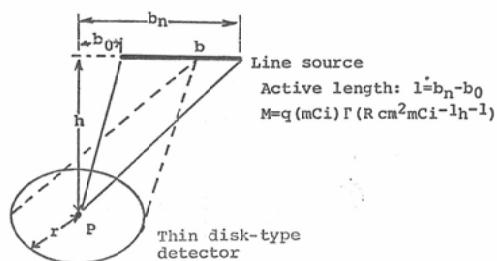


Fig. 5. Geometry and symbols used in calculation of geometrical efficiency.

な検出器 ($r = 0$) による点 P の線量 I_a は、

$$I_a = \frac{M}{lh} \left(\tan^{-1} \frac{b_n}{h} - \tan^{-1} \frac{b_0}{h} \right) \quad (5)$$

で求められる。 M は点線源から 1cm の点での照射線量率、 h , b_0 , b_n は Fig. 5 に示した幾何学的条件である。半径 r の円板状検出器を用いて測定した線量 I_m は、

$$I_m = \frac{M}{lh} \times \int_{b_0}^{b_n} \log \frac{(r^2 - b^2 + h^2) + \sqrt{(r^2 - b^2 + h^2)^2 + 4b^2h^2}}{2h^2} db \quad (6)$$

となる。式(5)と(6)から、円板状検出器の幾何学的効率 f は次式で与えられる。

$$f = \frac{I_m}{I_a} \quad (7)$$

(7)式により計算した円板状検出器の幾何学的効率と、直径の異なる絞りを付けた UD 100M8 の TL の測定結果から得た幾何学的効率との比較を Fig. 6 および 7 に示す。測定値による幾何学的効率は(実測値)/(γ 線線量計算値)から求めた。Fig. 6 は線源の近傍である線源中心から 0.25 cm において放射能長 0.25 cm (ゴールドグレイン) と 4.5 cm (3mg ラジウム針) の線源について、種々の直径で測光した測定値と(7)式による計算値とは良く一致している。点線源に近い放射能長 0.25 cm のゴールドグレインに対する円板状検出器の幾何学的効率は直径 8mm では 0.53 であるが、放射能長 4.5 cm のラジウム針に対しては 0.81 であり、線状線源の放射能長が大きいほど、直径の大きさによる影響は少ない。

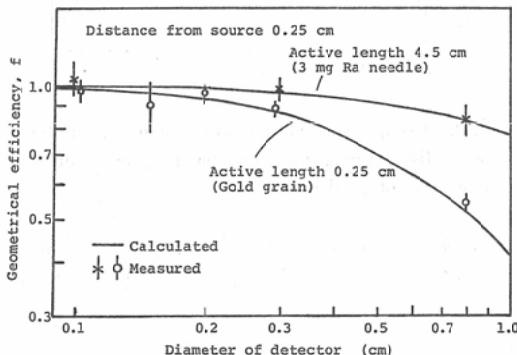


Fig. 6. Geometrical efficiency of thin disk-type detector for line source in comparison with experimental values as a function of diameter.

円板状検出器の大きさが測定値に与える影響の大きい放射能長 0.25 cm のゴールドグレインについて、直径 1, 3 および 8mm の測光面積で測定した幾何学的効率と線源からの距離との関係を(7)式による計算値と比較した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 6 同様、測定値と(7)式による計算値は良く一致している。このことより(7)式を用いて計算した幾何学的効率により、線源の放射能

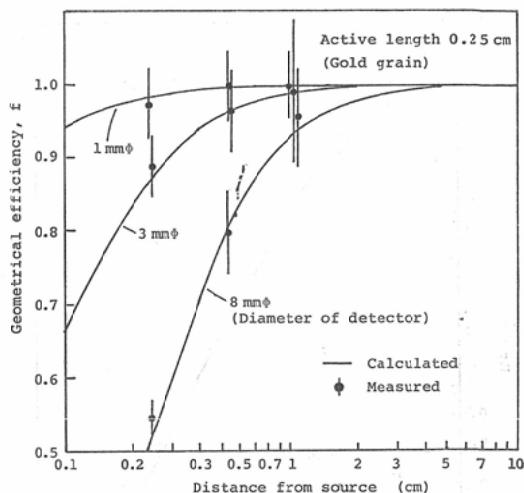


Fig. 7. Geometrical efficiency of thin disk-type detector for line source in comparison with experimental values as a function of source-detector distance.

長と線源からの距離に応じて、UD 100M8 の TL 測定時に用いる絞りの大きさを選ぶことができる。

5. 応用

フォイル型 TLD 素子 UD 100M8 を用いた線量分布測定において、測光面積による測定値の相違を(7)式による幾何学的効率の計算結果を用いて補正できることを Fig. 6 および 7 で証明した。UD 100M8 を用いて線源の近傍を測定した例について報告する。

5. 1. ラジウム管

Fig. 8 は放射能長 1.5 cm の 10 mg ラジウム管についての UD 100M8 および UD 170L による測定値と、(3)および(5)式を用いた(1)式による γ 線線量の計算値との比較である。UD 100M8 は直径 1 および 3 mm の絞りと、絞りを付けない 8 mm で TL を測定した。放射能長が 1.5 cm の場合、絞りの直径 1 mm による測定値は計算値と良く一致しているが、直径が大きくなると測定値は計算値より小さくなる。(7)式による幾何学的効率は、線源から 0.25 cm の点では測光面積の直径が 1 mm で 0.994, 3 mm で 0.949, 8 mm では 0.764 であり、この値を用いて検出器の大きさの

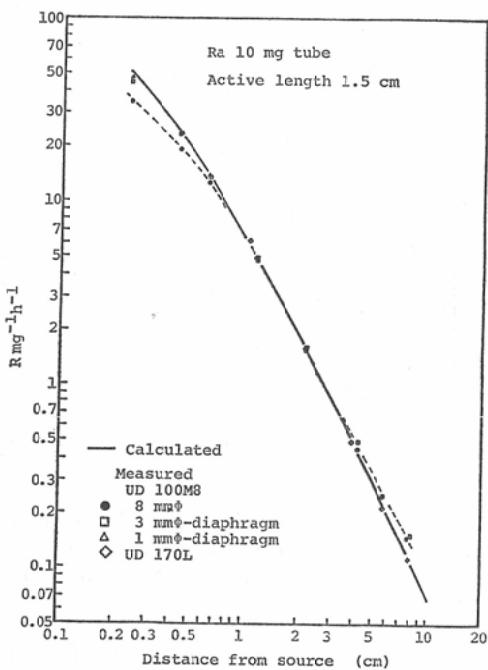


Fig. 8. Dose distributions measured by UD 100M8 with different diameters and UD 170L in direction perpendicular to long axis of radium tube. Solid line is calculated from equation (1).

補正をすることができるが、1mm 直径の絞りを用いればこの位置で幾何学的補正をすることなく測定できることがわかる。線源から 2cm 以上の点では UD 100M8 による結果は計算値より大きくなる。これは UD 100M8 にエネルギー依存性があるので、散乱線に対する感度が大きくなるからである。実効原子番号が小さく、エネルギー依存性の少ない UD 170L による測定値は線源から 1~10cm の点で計算値と良く一致している。

5. 2. ゴールドグレイン

点線源に近い放射能長 0.25cm のゴールドグレインの線源から 1cm 以内の線量を直径の異なる絞りを用いて測定した結果については既に述べた。Fig. 4, 6 および 7 に示したように放射能長が短いほど、円板状検出器の大きさの影響は大きい。

Fig. 9 は UD 100M8 に直径 1mm の絞りを付けて TL を測定し、(7)式による幾何学的補正

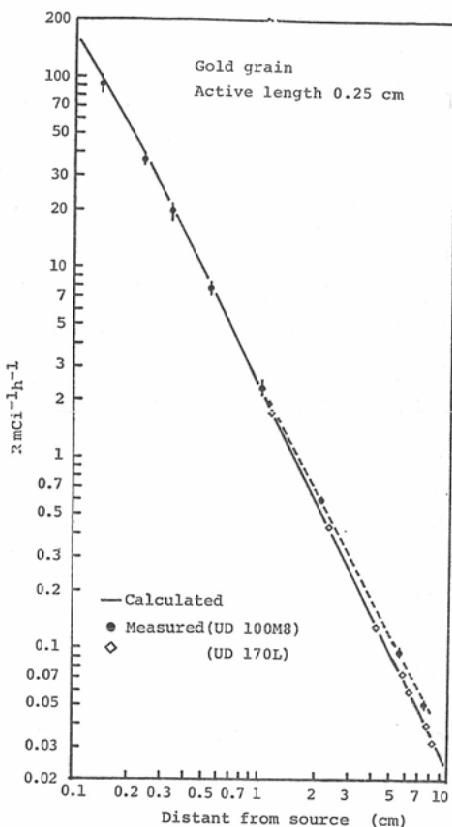


Fig. 9. Comparison of measured and calculated dose distributions in direction perpendicular to long axis of gold grain.

をした結果である。測定に用いた線源の放射能は 7~14mCi であり、曝射時間中の線源の減衰の補正には半減期 2.697 日⁴⁵⁾を用いた。線源から 1cm 以内の線源近傍では測定値と計算値とは良く一致しているが、1cm 以上の点ではラジウム同様 UD 100M8 の測定結果はエネルギー依存性により計算値より高い値を示している。この場合も UD 170L の測定結果は計算値と良く一致している。ゴールドグレインの場合、線源から 1cm 以内では一次β線および制動X線による影響があるという報告³⁾があるが、今回の測定結果では、線源から 1.4mm (線源壁から 1mm) 以上離れた点では、このような現象は認められなかった。

5. 3. ^{125}I シード

^{125}I シードは直径 8mm、長さ 4.5mm のチタニ

ウム容器にX線マーカーを狭んで2個の ^{125}I を含んだ球形のイオン交換樹脂が封入されていて、2個の線源間隔は3mmと報告されている³⁷⁾。しかし10個の ^{125}I シードについてオートラジオグラフィとX線写真により調べた結果、2個の線源間隔が1.2mmから3mmまでのシードがあることが確認された。2個の線源間隔が2.2mmの ^{125}I シードについて、UD 100M8を用いて測定した結果をFig. 10に示す。 ^{125}I の放射能は米国3M社の公称値を用いた。UD 100M8による測定値は、線源から3mm以下の点では直径1mm、5.4mmの点では2mm、10mmの点では3mmの絞りを用い、各々(7)式による補正を行つた結果である。 ^{125}I の放出する光子の平均エネルギーは28keVであり、UD 100M8の28keVの光子に対する感度は $^{60}\text{Co} \gamma$ 線の10.9倍⁴²⁾であるので、測定値はこの感度比を用いて補正した。Fig. 10にはオートラジオグラフにより観測された2個の線源間隔の最小値(1.2mm)と最大値(3mm)を点

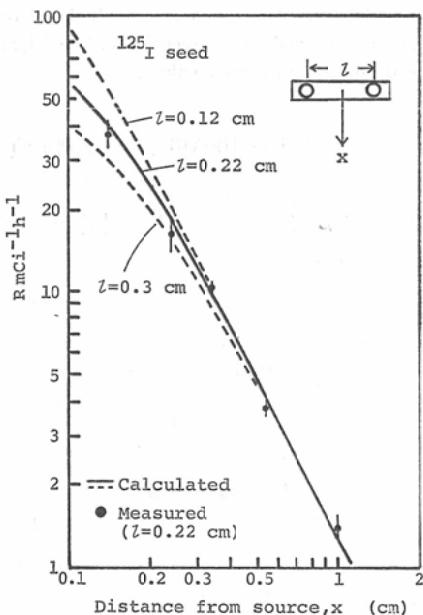


Fig. 10. Comparison of measured and calculated dose distributions for ^{125}I seed which ^{125}I resin spheres are 2.2mm apart. Broken lines show calculated values for seed having spaces of 1.2 and 3mm.

線で示してある。測定結果は線源から5mm以内での2個の線源間隔による線量の差を区別することができる。線源から5mm以上では線源間隔による線量への影響は殆どない。

5.4. ラドンシード

ラドンシードは直径0.8mm、壁厚0.3mmの金管に ^{222}Rn ガスが封入されている。この容器からは二次電子と共に一次 β 線も放出されていると報告されている¹⁾⁻³⁾。放射能長0.24cmのラドンシードについて測定した結果がFig. 11である。図中の I_γ の実線は(3)および(5)式を用いて(1)式により計算した γ 線線量分布である。(7)式による幾何学的効率の補正をしたUD 100M8の測定結果は γ 線線量の計算値より大きい。これは、 ^{222}Rn の崩壊生成物から放出される β 線による寄与と考えられる。測定値と γ 線線量の計算値との

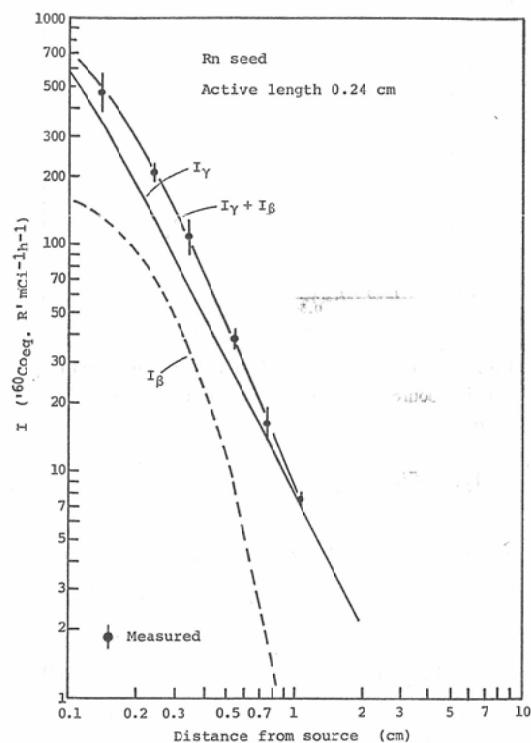


Fig. 11. Dose distributions in perpendicular to long axis of radon seed. I_γ (γ -ray dose) and I_β (β -ray dose) are calculated from equations (1) and (8), respectively.

差から得られた β 線による寄与を点線(I_β)で示した。ここで得られた線状線源についての I_β のデータに距離の逆自乗則による補正をして、点線源についての線量分布を求めた。その結果はFig. 12に示す如く、次式のような指数関数で近似できる。

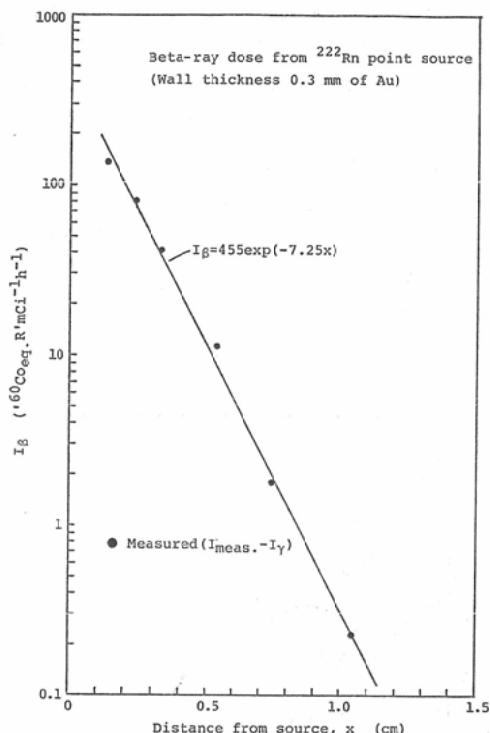


Fig. 12. Beta-ray dose distributions around radon point source subtracted I_γ from measured total dose.

$$I_\beta = 455 \exp(-7.25x) \quad (\text{R}' \text{ mCi}^{-1} \text{h}^{-1}) \quad (8)$$

x は線源からの距離(cm)である。 I_γ を γ 線線量とすると、ラドンシードによる組織内の線量は、

$$I = I_\gamma + I_\beta \quad (9)$$

となる。

Fig. 13は今回の実験のために特別に作られた放射能長1cmのラドンシードについての結果で、 I_γ は(1)式による γ 線線量の計算値、 I_β は(8)式を放射能長1cmについて積分して求めた β 線

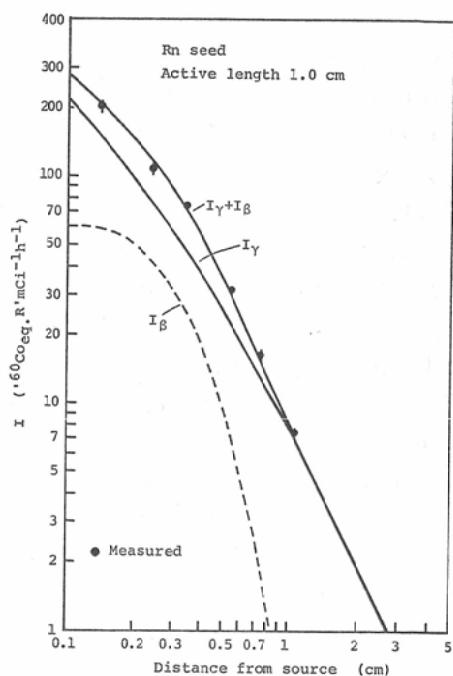


Fig. 13. Dose distributions in direction perpendicular to long axis of radon seed having 1 cm of active length. I_γ and I_β are calculated from equations (1) and (8), respectively. $(I_\gamma + I_\beta)$ is compared with measured values.

線量で、丸印はUD 100M8による測定値である。放射能長の異なるラドンシードについても(8)式による β 線線量を考慮した計算値と測定値とは良く一致している。

従来のラドンシードについての線量評価では、 β 線による線量寄与が考慮されていないので、腫瘍に与える線量は線源から0.5cm以内では γ 線線量のみの計算値よりも45%程度低く評価されていたと考えられる。

6. 考 察

フォイル型TLD素子UD 100M8のTL測定時に絞りを付けることにより検出器の実効断面積を小さくして、小線源近傍の線量分布を測定する方法について述べてきた。また、(7)式により線状線源の放射能長、検出器の直径と線源からの距離による検出器の幾何学的効率の相違を計算することができる。Fig. 14は点線源、放射能長0.25

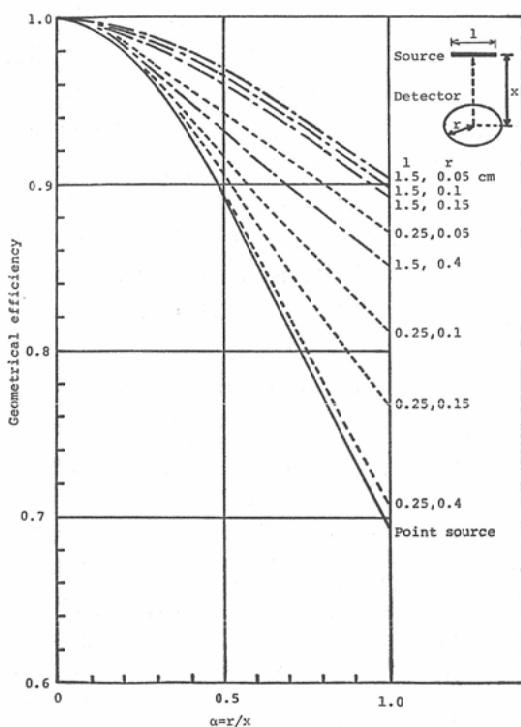


Fig. 14. Geometrical efficiency of thin disk-type detector in direction perpendicular to the center of long axis as a function of geometrical factor, $\alpha=r/x$.

および 1.5cm の線状線源について、(7)式により各種の半径を持つ円板状検出器の幾何学的効率を計算した結果である。縦軸は幾何学的効率 f 、横軸は検出器の geometrical factor, $\alpha=r/x$, である。 r は検出器の半径, x は線源・検出器間距離である。点線源に対して f が 0.99 (0.98) となる α は 0.14 (0.20) である。直径 1mm ($r=0.5$) の検出器では、 x が 3.6 および 2.5mm 以上であれば検出器の大きさによる影響はそれぞれ 1 および 2% 以下となるが、 x が 1mm の極近傍では f が 0.98 となるためには $r=\alpha x=0.02$ となり、直径 0.4mm の検出器が必要となる。3 項で述べた如く、本方法では直径 1mm 以上でないと使用できない。実際の密封小線源治療では、放射能長が 0.25cm (ゴールドグレインなど) 以上の線状線源が一般に用いられている。放射能長 0.25cm の線源について x が 1mm の点における直径 1mm

の検出器の f は 0.94 (Fig. 7) である。線源の極近傍の測定では、幾何学的効率と共に位置の精度が測定値に大きく影響する。放射能長 0.25cm の線源から 1mm の点で 0.1mm 距離を間違えると 14% の誤差ができる。これは直径 1mm の検出器の幾何学的効率よりもはるかに大きい。線源の極近傍の測定には幾何学的な厳密さが要求されるであろう。Ruden ら³⁰⁾は直径 1mm, 厚さ 0.1mm の LiF テフロンチップで ⁹⁰Sr アプリケータについて測定して、線源から 2mm 以下の点では測定結果が計算値と一致しないと報告している。UD 100M8 は発光層の厚さが 0.06mm であるので深さ方向の位置による誤差はより少ないと考えられる。

Table 1 に幾何学的効率が 0.98 となるのに必要な線源からの距離を、放射能長と検出器の直径との関係で表示した。放射能長 3cm 以上では幾何学的効率は殆ど変化しない。

Table 1. Distance from source required to obtain geometrical efficiency of 0.98 in direction perpendicular to the center of long axis.

Diameter of detector (cm)	Active length of line source (cm)			
	0	0.25	1.5	3.0
Distance from source (cm)				
0.1	0.25	0.21	0.13	0.13
0.2	0.50	0.48	0.29	0.26
0.3	0.75	0.72	0.48	0.42
0.8	2.0	2.0	1.86	1.50

UD 100M8 に絞りを付けて TL を測定する際、絞りの直径が大きい方が素子間のバラツキは小さい。検出器の大きさと線源からの距離を考慮して、絞りの大きさを選べば精度良く測定できる。

7. 結論

フォイル型の TLD 素子 UD 100M8 ($\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$) により密封小線源の極近傍の線量分布を測定する方法を開発した。照射した素子の TL を測定する際、円形の絞りを付けて検出器の実効断面

積を小さくすることにより、検出器の大きさによる測定値への影響を小さくすることができる。ラジウム針および管、ゴールドグレイン、ラドンシードおよび¹²⁵I シードについて線源の中心から長径に垂直な方向の線量分布を測定した。また、線状線源の放射能長、円板状検出器の大きさと線源からの距離による幾何学的効率を計算し、測定値から得た結果とを比較した。その結果は以下の通りである。

1) ⁶⁰Co γ 線により、線量と絞りを付けた場合の相対 TL 量との直線関係は、直径 1mm 以上の絞りを用いれば 3 から 156R まで確認された。TL 計測装置の background の影響を 1% 以下にするためには、50R 以上の照射線量が必要である (Fig. 3)。

2) (7)式により計算した薄い円板状検出器の幾何学的効率と測定値から得た値は良く一致し、放射能長が既知の線源については、幾何学的効率を補正することができる。また、geometrical factor (Fig. 14) により有効な絞りの大きさを選ぶことができる。

3) 直径 1mm の絞りを用いれば、検出器の大きさの影響が 2% 以下で、線源の放射能長に関係なく、線源から 0.25cm 以上の点を測定できる (Fig. 14 および Table 1)。

4) ゴールドグレインについて β 線の漏洩が報告されているが、今回の測定では線源壁から 1mm 以上の点では、 β 線による影響は検出されなかった (Fig. 9)。

5) ラドンシードについては、線源から 1cm の距離まで β 線の影響が測定された。測定値を基に β 線線量を算出する経験式を開発した (Fig. 11, 12, 13)。

6) ¹²⁵I シードはチタニウム容器に封入された 2 個の線源の間隔が 1.2 から 3mm まであることが確認された。線源から 5mm 以内の点の線量は 2 個の線源間隔により大きく異なる。本方法による測定結果は 2 線源間の距離による線量分布の違いを選別することができる (Fig. 10)。

7) UD 100M8 はエネルギー依存性があるの

で線源から 1cm 以内の線源近傍にのみ用いることができる。線源から 1cm 以上の点では検出器の大きさによる影響は小さいので実効原子番号が軟組織に近い TLD 素子 UD 170L (BeO : Li) の測定値は計算値と良く一致した。

御懇篤なる御指導、御校閲を賜った尾内能夫部長ならびに東京女子医大田崎瑛生教授に深甚なる謝意を表します。また、本研究に御援助、御協力を頂いた都丸楨三および内田勲研究員に深く感謝します。

文 献

- 1) Neary, G.J.: The absorption of the primary beta radiation from radium in lead and platinum and the specific gamma-ray dose rate at a filtration of 0.5 mm of platinum. Brit. J. Radiol., 15: 104, 1942
- 2) 塚本憲甫, 尾内能夫: ラドンシードから放出される β 線および γ 線の全エネルギー, 日本医学会誌, 14, 567—571, 1954
- 3) Henschke, U.K. and Lawrence, D.C.: Cesium-131 seeds for permanent implants. Radiology, 85: 1117—1119, 1965.
- 4) Fedoruk, S.O., Johns, H.E. and Watson, T.A.: An improved clinical dosimeter for the measurement of radiation. Radiology, 62: 177—182, 1954
- 5) Dove, D.B.: Effect of dosimeter size on measurements close to a radioactive source. Brit. J. Radiol., 32: 202—204, 1959
- 6) Kondo, S. and Randolph, H.L.: Effect of finite size of ionization chambers on measurements of small photon sources. Rad. Research, 13: 37—60, 1960
- 7) Failla, P.M. and Failla, G.: Measurement of the dose in small tissue volumes surrounding point sources of radioisotopes. Rad. Research, 13: 61—91, 1960
- 8) Attix, F.H. and Ritz, V.H.: A determination of the gamma-ray emission of radium. J. Research N.B.S., 59: 293—305, 1957
- 9) Smocovitis, D., Young, M.E.J. and Batho, H.F.: Apparent absorption of the gamma rays of radium in water. Brit. J. Radiol., 40: 771—777, 1967
- 10) Wootton, P., Shalek, R.J. and Fletcher, G.H.: Investigation of the effective absorption of radium and cobalt 60 gamma radiation in water and its clinical significance. Am. J. Roentgenol., 71: 683—690, 1954
- 11) Meredith, W.J., Green, D. and Kawashima, K.: The attenuation and scattering in a

- phantom of gamma rays from some radionuclides used in mould and interstitial gamma-ray therapy. *Brit. J. Radiol.*, 39: 280—296, 1966
- 12) Hale, J.: The use of interstitial radium dose tables for other radioactive isotopes. *Am. J. Roentgenol.*, 79: 49—53, 1958
 - 13) Van Dilla, M.A. and Hine, G.J.: Gamma-ray-diffusion experiments in water. *Nucleonics*, 10(7): 54—58, 1952
 - 14) Evans, R.D.: Evaluation of the beta and gamma radiation due to extended linear sources of radium. *J. Ind. Hygiene Toxicol.*, 28: 243—256, 1946
 - 15) Rossi, H.H. and Colvet, R.: An ionization chamber with high spatial resolution. *Phys. Med. Biol.*, 17: 227—231, 1972
 - 16) Klevenhagen, S.C.: An experimental study of the dose distribution in water around ^{137}Cs tubes used in brachytherapy. *Brit. J. Radiol.*, 46: 1073—1082, 1973
 - 17) Tochilin, E.: A photographic method for measuring the distribution of dosage from radium needles and plaques. *Am. J. Roentgenol.*, 73: 265—271, 1955
 - 18) Loevinger, R. and Spira, J.: Dosimetry of multiple radiation fields by superposition of photographic films. *Am. J. Roentgenol.*, 77: 869—872, 1957
 - 19) Williams, K.D. and Cooper, J.F.: Photographic representation of isodose patterns by isodensity tracing. A preliminary report. *Am. J. Roentgenol.*, 89: 515—516, 1967
 - 20) Shalek, R.J., Stoval, M.A. and Sampiere, A.: The radiation distribution and radioactive seeds. *Am. J. Roentgenol.*, 77: 863—868, 1957
 - 21) Malsky, S.M., Amoto, C.G., Reid, C.B., Speckels, C. and Maddalalone, L.: In vivo dosimetry with miniature glass rods. Part I. Physical aspects and recent development. *Am. J. Roentgenol.*, 85: 568—573, 1961
 - 22) Roswit, B.: In vivo dosimetry with miniature glass rods. Part II. Clinical applications in radiation therapy. *Am. J. Roentgenol.*, 85: 574—582, 1961
 - 23) Friedman, M., Hodara, M. and Hine, G.J.: Fluorod dosimetry close to radium and cobalt 60 sources. *Radiology* 78: 29—43, 1962
 - 24) Hine, G.J., Hodara, M. and Friedman, M.: Accuracy of fluorod dose measurements. *Radiology*, 78: 44—48, 1962
 - 25) Hine, G.J. and Friedman, M.: Isodose measurements of linear sources in air and water by means of an automatic isodose recorder. *Am. J. Roentgenol.*, 989—998, 1950
 - 26) Ter-Pogossian, M., Itter, W.B. III. and Aly, S.M.: Comparison of air and tissue doses for radium gamma rays. *Nucleonics*, 10(6): 50—52, 1952
 - 27) Cole, A., Moor, E.B. and Shalek, K.J.: A simplified automatic isodose recorder. *Nucleonics*, 11(4): 46—48, 1953.
 - 28) Fowler, J.F.: Solid-state dosimeters for in-vivo measurements. *Nucleonics*, 21(10), 60—64, 1963
 - 29) Meisberger, L.L., Keller, R. and Shalek, R.J.: The effective attenuation in water of the gamma rays of gold-198, iridium-192, cesium-137, radium-226 and cobalt-60. *Radiology*, 90: 953—957, 1968.
 - 30) Schulz, R.I., Chandra, P. and Nath, R.: Determination of the exposure rate constant for ^{125}I using a scintillation detector. *Med. Phys.*, 7: 353—361, 1980
 - 31) Cameron, J.R., Daniels, F., Johnson, N. and Kenney, G.: Radiation dosimeter utilizing thermoluminescence of lithium fluoride. *Science*, 134: 333—334, 1961
 - 32) Cameron, J.R., Zimmerman, D., Kenney, G., Bach, R., Bland, R. and Grant, R.: Thermoluminescent radiation dosimetry utilizing LiF. *Health Phys.*, 10: 25—29, 1964
 - 33) Ponnuni Kartha, K.I., Kenney, G.N. and Cameron, J.R.: An experimental determination of the absorption and radium, cobalt 60 and cesium 137 gamma rays. *Am. J. Roentgenol.*, 96: 66—69, 1966
 - 34) Hendee, W.R.: Thermoluminescent dosimetry of beta depth dose. *Am. J. Roentgenol.*, 105: 157—164, 1969
 - 35) Scallan, J.E., Sondhaus, C.A., Snyder, S.L., Feder, B.H. and Gunn, W.G.: Permanent interstitial therapy using low energy and long half-life radiation sources. *Am. J. Roentgenol.*, 105: 157—164, 1969
 - 36) Ruden, B.I. and Bengtson, G.: TLD measurements of dose distribution around a beta-ray applicator. *Phys. Med. Biol.*, 19: 186—195, 1974
 - 37) Krishnaswamy, V.: Dose distribution around an ^{125}I seed source in tissue. *Radiology*, 126: 489—491, 1978
 - 38) Anderson, L.L.: Dosimetry for interstitial radiation therapy, In *Handbook of interstitial brachytherapy*, Hilaris, B.S. ed., Acton Mass.

- Publishing Science Group, 87—115, 1975
- 39) Boyer, A.L.: A fundamental accuracy limitation on measurements of brachytherapy sources. *Med. Phys.*, 6: 454—456, 1979
- 40) 山下忠興, 大西 肇, 安野信剛, 竹永睦生, 山本理: 熱けい光線量計(第2報) CaSO_4 : Tm TLD 素子の構造と特性, *National Technical Report* 18, 171—180, 1972
- 41) Oonishi, H., Yamashita, O., Yamashita, T. and Hasegawa, S.: Dosimeter and reader by hot air jet, 3rd International Conference on Luminescent Dosimetry, 237—248, 1971
- 42) 都丸禎三: CaSO_4 と BeO 热ルミネッセンス 線量計素子の特性と線量測定への応用, 日本医学会誌, 36, 808—825, 1976
- 43) Storm, E. and Israel, M.I.: Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100. *Nuclear Data Tables* A7: 565—581, 1970
- 44) Onai, Y., Irisone, T. and Tomaru, T.: Calculation of dose distributions in radiation therapy by a digital computer. II. Computation of dose distribution in radium therapy. *Nippon Acta Radiol.*, 28: 1629—1636, 1969
- 45) Table of isotopes, 7th ed., Lederer, C.M., Shirley, V.S. eds., Lawrence Berkeley Lab., Univ. of California, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1978