



Title	CaSO ₄ とBeO熱ルミネセンス線量計素子の特性と線量測定への応用
Author(s)	都丸, 禎三
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1976, 36(9), p. 808-825
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18242
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

CaSO₄ と BeO 熱ルミネセンス線量計素子の 特性と線量測定への応用

癌研究会癌研究所物理部

都 丸 禎 三

(昭和51年3月3日受付)

(昭和51年4月5日最終原稿受付)

Properties of CaSO₄ and BeO thermoluminescent dosimeters and their application to clinical dosimetry

by

Teizo Tomaru

Department of Physics, Cancer Institute, Tokyo

Research Code No.: 203

Key Words: Thermoluminescent dosimeter, Dosimetry, ⁶⁰Co γ-rays, X-rays, Electrons

Dosimetric properties of CaSO₄: Tm foil (100M8) and BeO ceramic powder (170A, 170B, and 170L) thermoluminescent dosimeters were investigated for ⁶⁰Co γ-rays, conventional and high-energy x-rays, and high-energy electrons. Application of these dosimeters to clinical dosimetry was examined, and the results obtained are as follows:

1) Standard deviations of measured values using 20 sheets of calibrated 100M8 phosphors for ⁶⁰Co γ-rays at 1, 100, 1000, 3000, and 10000 R were 2.7, 2.5, 4, 12, and 15%, respectively. The relative thermoluminescent sensitivity of 100M8 for ⁶⁰Co γ-rays increased above 100 R. The thermoluminescent-response/R of 100M8 to 38 keV x-rays was 10.3 times greater than that to ⁶⁰Co γ-rays.

The response of the 100M8 phosphor was constant over 32 cycles of annealing and exposure to 30 R of ⁶⁰Co γ-rays, but the phosphor after the irradiation of a high dose in supralinear region of the dose-response curve showed enhancement of the response. A difference between a new and sensitized 100M8 was recognized in the supralinearity and the energy response to photons. The results of this experiment induced a relationship between the dose and sensitivity factor for various errors of the values obtained with sensitized 100M8, using the correction factors for supralinearity, and energy response of the original fresh sample to photons.

2) Standard deviations of the measured values with 170B for ⁶⁰Co γ-rays were 2.8% at 1 R, 3.2% at 100 R, 4% at 300 R, and 7% at 1000 R. Standard deviations of measured values with 170L irradiated to 1, 100, 500, and 1000 R were 3.0, 2.8, 3.2, and 4.0%, respectively. Supralinear responses of 170B and 170L appeared respectively at 30 and 100 R of ⁶⁰Co γ-rays. BeO phosphors exhibited very little

energy dependence at lower photon energies.

The sensitivity, supralinear response, and energy response of BeO phosphors to photons did not change in each cycle of repeated use.

3) 100M8 phosphor is useful for radiation dosimetry in the medium with high dose gradient such as electron build-up region for high-energy γ - and x-rays, and depth dose in water for high-energy electrons, and is applicable to measurement of the patient exposure during radiography or fluoroscopy.

BeO phosphors are available for radiation dosimetry in therapy and diagnosis, and 170L is especially useful for measurement of the patient dosage for radiation therapy.

目 次

1. 緒 言
2. 実験装置および方法
 - 2.1 素 子
 - 2.2 熱ルミネセンス計測装置
 - 2.3 グロー曲線測定装置
 - 2.4 線源および線量評価
 - 2.5 実験方法
3. 実験結果およびその考察
 - 3.1 感度およびその個体差
 - 3.2 未照射素子の熱発光量
 - 3.3 光の影響
 - 3.4 機械的刺激の影響
 - 3.5 ^{60}Co γ 線に対する supralinearity
 - 3.6 エネルギー依存性
 - 3.6.1 光子に対するレスポンス
 - 3.6.2 電子線に対するレスポンス
 - 3.6.3 光子エネルギーによる supralinearity の変化
 - 3.7 反復照射による影響
 - 3.7.1 感度変化
 - 3.7.2 Supralinearity の変化
 - 3.7.3 エネルギー依存性の変化
 - 3.8 素子の特性へのアニールの影響
4. $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ホイルおよび BeO 焼結粉末素子の取扱方法とその適用範囲についての考察
 - 4.1 取扱方法
 - 4.1.1 100M8
 - 4.1.2 BeO
 - 4.2 適用範囲とその応用例
 - 4.2.1 光子の2次電子 build-up 領域および電子線の中心軸深部線量
 - 4.2.2 ^{60}Co γ 線および高エネルギーX線の深

部線量

4.2.3 診断用X線

5. 総括ならびに結語

6. 文 献

1. 緒 言

近年、種々の熱ルミネセンス線量計 (TLD) が開発され、その形状も粉末のガラス封入型、耐熱樹脂と混合成形したホイル型、あるいは板状および棒状等種類が多い。線量測定に際しては、これらの TLD の中から、その目的に適合した素子を選択することができるが、そのためには各素子の特性を十分に把握しておく必要がある。

この実験は、市販されているホイル型の $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 素子およびガラス封入型の BeO 焼結素子を高エネルギーX線および電子線治療における線量分布およびX線診断時の患者の被曝線量の測定に使用するために行ったものである。これらの素子が、現在広く線量測定のために使用されている LiF-TLD より勝れている点は、BeO 素子ではアニールが簡単であること、 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ では熱発光の感度が高いことである。しかし、放射線治療においては比較的大量の線量を照射するので、反復照射により感度および supralinearity が変化する可能性がある。特にホイル型 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ では 400°C 以下の温度によるアニーリングが不可能であるから $\text{LiF}^{29)}$ あるいは $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Tb}^{14)}$ にみられる特性変化が予想される。特に γ 線の線量測定に用いた素子を診断用X線の測定に用いるとエネルギー依存性が変化することを示唆した中島¹⁴⁾の $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Tb}$ 素子による実験結果は重要な問題提起をしているものと考えられる。

そこで、反復照射によるこれらの特性の変化と、これらの素子を実際の線量測定に用いた結果について報告し、これらの素子の適正な使用方法について考察する。

2. 実験装置および方法

2.1 素子

特性を調べた素子は UD-100M8³⁵⁾, UD-170A, UD-170B および UD-170L でいずれも ナショナル製である。これらの素子の構成々分および物理的形状を Table 1 に示した。その他に素子の特性

Table 1 Chemical composition and physical form of examined phosphors

Phosphor	Mixed composition		Physical form
	Compound	mol %	
UD-100M8 (CaSO ₄ : Tm)	CaSO ₄ Tm ₂ O ₃	99.97 0.03	Plastic-embedded foil 8 mmφ×0.06mm*
UD-170A (BeO: Na)	BeO Na ₂ SO ₄	98.04 1.96	Glass-encapsulated ceramic powder 2 mmφ×12mm
UD-170B (BeO: Na)	BeO Na ₂ SO ₄	98.04 1.96	Glass-encapsulated ceramic powder 1.2mmφ×8 mm
UD-170L (BeO: Na, Li)	BeO Na ₂ SO ₄ Li ₂ SO ₄	97.94 1.96 0.10	Glass-encapsulated ceramic powder 1.2mmφ×8 mm

*The phosphor is pasted on an aluminum of thickness of 0.03mm.

を検討するために CaSO₄: Tm 粉末をガラス管に封入した UD-110S, ならびに BeO に Na₂SO₄ 1.96および 0.1モル%あるいは Li₂SO₄ 0.99および 0.1モル%をそれぞれ混合して作った各焼結粉末とそのガラス封入管 (2 mmφ×12mm) 素子 (メーカーに特別製造を依頼した) を用いた。

素子のアニールはメーカーの指定に従い、100 M 8 は 380°C で5分間、BeO 素子については 470°C で1時間行つた。

2.2 熱ルミネセンス計測装置

熱発光量の測定には、380°Cの熱風を素子に10秒間吹きつけてその熱発光量を測定する、熱風ジェット方式²⁴⁾を採用したナショナル製のUD-505A型を使用した。この装置には光電子増倍管の感度を照合する内部線源と測定器全体の感度を照合す

る外部線源 (特注) が備え付けられている。

2.3 グロー曲線測定装置

グロー曲線の測定にはナショナル製 UD-701 型を用いた。この装置の熱源は金属板に取付けられたヒーターに一定電圧を印加するだけで、温度上昇率を一定に制御する装置は備え付けられてないので、温度の単位時間当りの増分は一定ではない。そこでグロー曲線には単位温度上昇するのに必要な時間を 100°C で規格化した係数 (Fig. 8 参照) を求め、この補正を施した。

2.4 線源および線量評価

大部分の実験には ⁶⁰Co γ 線 (出力は S S D 50 cm で約 30R/min) を使用した。その他素子のエネルギー依存性を調べるために Mullard 社製 Linac (4.3MV X線), 東芝製 Linac (10MV X線, 8, 10, 12MeV 電子線), 東芝製診断 (電圧60, 70および80kV, 濾過板いずれもアルミニウム 2mm 相当, 実効エネルギー26, 32および38keV) および治療 (電圧 100および 200kV, 濾過板いずれもアルミニウム 0.5mm+銅 0.5mm, 実効エネルギー66および90keV) 用 X線発生装置ならびに島津製ベータトロン (12, 16, 20および25MeV 電子線) を使用した。

線量評価は ⁶⁰Co γ 線, 高エネルギー X線および電子線については医療用標準線量計 JAPM, model I¹⁰⁾¹¹⁾ を用いた。在来の X線については IONEX 線量計を使用した。⁶⁰Co γ 線に対する両線量計の線量評価値の相違は 1% 以下である。また IONEX 線量計は英国 N P L により在来の X線に対する校正が施されている。この値は米国の N B S にて校正された装置により値付けされた Victoreen 555線量計と比較した結果その相違は 2% 以内であつた。

2.5 実験方法

光照射の実験を除いて、100M 8 は黒ビニール袋, BeO ガラス封入管の各素子は厚さ 0.5mm のベークライト製ケースに入れて以下に述べる取扱いをした。

⁶⁰Co γ 線の照射は、100M 8 の場合には 5 mm 厚の 2 枚のポリスチレン板の間に挟んで、BeO

については厚さ2 cmの MixDP¹⁹⁾ 板の中に埋めて、二次電子平衡を確保して行つた。診断用および治療用X線の照射は各素子を密度 0.012g/cm^3 の1 cm厚の発泡スチロールの上に置いて行つた。高エネルギーX線および電子線の照射は MixDP ファントムを使用してそれぞれの線質についての基準深¹⁷⁾¹⁸⁾で行つた。

ファントムは30cm×30cm×30cmのポリスチレンあるいは35cm×35cm×35cmの MixDP (共に積層型)を使用した。なお、100M8の放射線照射のときには素子面を入射方向とした。

各素子の熱発光量は初期フェデングを考慮して照射24時間後に測定した。その他実験方法の詳細については実験結果の項でのべる。

3. 実験結果およびその考察

3.1 感度およびその個体差

同一製造時の素子に ^{60}Co γ 線約30Rを照射し、24時間後にその熱発光量(TL-output)を測定し、各素子の感度(レントゲン当りのTL-output)を求めた。この素子の個体差はメーカーの出荷時の検査基準に依存するが、この標準偏差は100M8(100枚)が7%、170A(25個)が4%、170Bおよび170L(各25個)が3%以下であつた。100M8および170Aについても素子毎に校正すれば測定値の標準偏差を3%以下にすることが可能である。製造時が異なるとその感度はここで得られた個体差以上の差が認められる場合がある。

3.2 未照射素子の熱発光量

熱発光量測定装置の零点調整を慎重に行つても熱発光量の測定値には誤差が含まれる。この誤差を含んだ100M8、170A、170Bおよび170L新鮮素子のアニール1時間後の熱発光量は、 ^{60}Co γ 線の照射線量に換算して、それぞれ7.0、1.2、3.1および5.9mR程度であつた。100M8の場合には素子の被曝歴が多くなるとこの値は増加を示し、 ^{60}Co γ 線の10,000Rで36mRとなつた。この原因はアニールが不十分であるために素子が増感したことおよび残余熱発光³⁰⁾の影響であると考えられる。BeO素子では被曝歴15,000Rでも

470°Cで1時間のアニールを行えば、この値に変化は認められない。

3.3 光の影響

470°Cで1時間のアニールを行つた BeO の各素子のバックグラウンドは室内光 350 lux (40W白色蛍光灯4本下170cm)を1時間曝射しても変化が認められなかつた。

100M8(20枚)はこの光曝射による熱発光量は ^{60}Co γ 線の照射線量に換算して 52.3 ± 15.5 mRで、上昇が認められた。 ^{60}Co γ 線を10,000R照射した素子では 142 ± 76 mRであつた。中島¹⁵⁾は $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 粉末で 1.13 ± 0.56 mRの熱発光量を観測している。

次に、 ^{60}Co γ 線を約30R照射してから24時間後の各素子の350 lux室内光によるフェデング効果を調べた。170Aおよび170Bの結果は、山下等³⁶⁾の BeO:Naの結果とほぼ同じで、30分の光曝射による熱発光量のフェデングはそれぞれ10%および15%であつた。170Lは BeO:Li素子³⁶⁾と同程度のフェデングを示し、その値は30分で30%であり、ナトリウムのみの添加素子170Aおよび170Bよりフェデングが大きい。100M8ではこの室内光を1時間曝射した素子と非曝射素子(各20枚)との熱発光量測定値に有意差は認められなかつた。

3.4 機械的刺戟の影響

ここで与えた機械的刺戟は BeO 素子については50cmの高さより厚さ4 cmのデコラ張り板の上に10回落下すること、100M8素子については右手親指で5回強く圧迫(10kg/cm^2)することである。

BeOの各素子はいずれもトリボロミネセンスを生じることが報告されているが³⁶⁾³⁷⁾、アニール後1時間の BeO 素子(各10個)にこの機械的刺戟を与えることにより170Aが 47.1 ± 27 mR、170Bが 39.7 ± 23.7 mR、170Lが 174.7 mRの擬信号(^{60}Co γ 線の照射線量への換算値)を生じた。これは山下等の結果³⁶⁾より大きな値である。

100M8ではこの機械的刺戟を与えることにより熱発光量は 9.5 ± 6 mR(20枚)となり、未処

理素子とは有意の差が認められるが BeO 素子より著しく小さい。

^{60}Co γ 線を30R照射した各素子にこの機械的刺激を与えて熱発光量を測定した結果、いずれの素子も未処理素子との間に有意の差は認められなかった。

3.5 ^{60}Co γ 線に対する supralinearity

各種 TLD に共通した欠点として supralinearity がある。100M8 では ^{60}Co γ 線の照射線量が100R 以下では感度は一定であるが、それ以上の線量では感度上昇が認められ、感度のばらつきも大きくなる。Fig. 1 には製造時の異なる3種類の

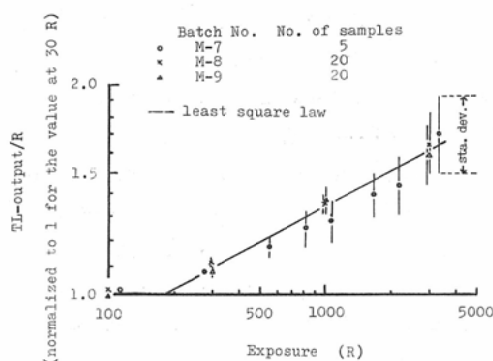


Fig. 1. TL-output/R vs. R for 100M8 phosphor irradiated with ^{60}Co γ -rays

素子について求めた supralinearity を示した。これらの等線量を照射した測定値はいずれの線量でも製造番号の相違により有意差はなく、その標準偏差は1R以上の非 supralinearity 領域で2.7%，1,000Rで4%，3,000Rで12%程度である。図中の実線は照射線量と感度上昇率のそれぞれの対数の間に相関があると仮定し、最小自乗法で求めた結果である。この値はメーカーが素子に付記した補正值と有意な差がある。

Fig. 2 には BeO 各素子の supralinearity を示した。170A, 170B および Na_2SO_4 1.96モル%添加の各素子(いずれも BeO 100モルに対し Na_2SO_4 2モルを混合して製造した素子である)の結果に相違が認められるが、このことは混合成分が同じ

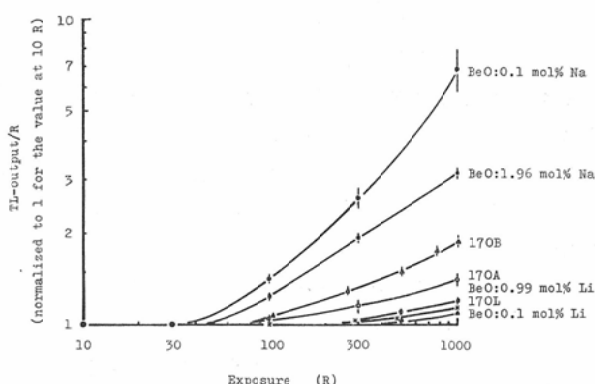


Fig. 2. TL-output/R vs. R for glass-encapsulated BeO phosphors irradiated with ^{60}Co γ -rays

でも製造時が異なると supralinearity の程度が異なることを示唆している。ナトリウム添加素子の場合には、線量—熱発光量の直線範囲は30Rまでであるが、リチウム添加素子ではこの点が改良され100Rまで感度は一定である。170L素子はリチウム添加素子と同程度の supralinearity を示し、500Rで5%，1,000Aで12%の感度増加を示す。これら素子20本による測定値の標準偏差は、170Aおよび170Bについては1R以上の非 supralinearity 領域の線量で2.8%，100Rで3.2%，300Rで4%，1,000Rで7%程度であり、170Lについては1R以上の非 supralinearity 領域の線量で3.0%，500Rで3.2%，1,000Rで4.0%程度である。

Supralinearity の程度は天然の CaF_2 と $\text{CaF}_2:\text{Mn}^{2+}$ やここに報告する BeO 素子にみられるように素子に添加する不純物の種類と量によつて異なる。BeO 素子ではナトリウムの場合には添加量の少ない素子の方が、リチウムの場合には添加量の多い素子の方が supralinearity の程度は大きい。この程度は3.6.3項 Fig. 9 に示すように照射線量1,000R以下では supralinearity の原因となるグロー曲線の主ピークに付加される高温部の熱発光の量に依存する²³⁾。これは結晶構造によるものであろうが、ナトリウムやリチウムの量がこのグロー曲線の形成にどのように寄与しているかはまだ明らかにされていない。

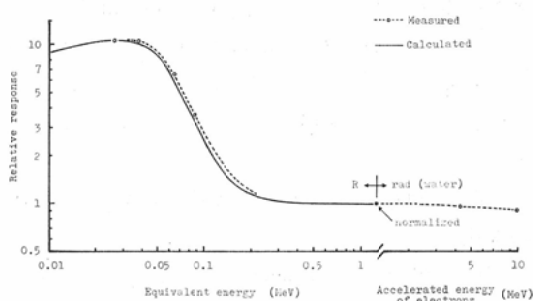


Fig. 3. Energy response of 100M8 phosphor to x- and γ -rays

3.6 エネルギー依存性

3.6.1 光子に対するレスポンス

Fig. 3 には新鮮な 100M8 素子の光子に対するエネルギー依存性を示した。横軸のエネルギーは在来 X 線では銅あるいはアルミニウムの半価層より Storm 等の減弱係数²⁶⁾を基にして求めた equivalent energy (通常実効エネルギーとよんでいる)で、高エネルギー X 線については電子の加速エネルギーで示してある。線量は前者については素子を置いた点の照射線量で、後者はその点の水の吸収線量で評価した。図中の実線は素子 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ と空気とのエネルギー吸収係数の比を ^{60}Co γ 線で規格化した値である。低エネルギー X 線に対する 100M8 のレスポンスはほぼこの計算値と同じ値を示した。高エネルギー X 線に対する 100M8 のレスポンスは ^{60}Co γ 線より小さく 10MV X 線では約 10% 低い。

Fig. 4 には BeO 素子の光子に対するエネルギー依存性を示した。実効原子番号が空気とほぼ等しい BeO 素子も低エネルギー領域で過応答を示す。実効エネルギー 90keV X 線ではガラス封入管素子の方が焼結粉末素子を薬包紙に包んで照射した素子より 1 ないし 5% いずれの素子でも過応答を示し、ガラスよりの二次電子の影響が観測された。38keV X 線の場合には両者のレスポンスの相違は実験誤差の範囲内である。エネルギー依存性の程度は 170A (170B, 170L もほとんど同じである) と Na_2SO_4 を 1.96 モル% 添加したガラス封入管素子が同程度で一番大きく、 ^{60}Co γ 線

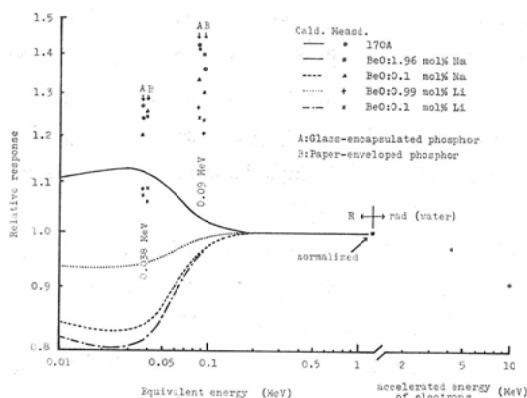


Fig. 4. Energy response of BeO phosphors to x- and γ -rays

に対する相対感度は 90keV が約 1.4, 38keV は 1.25 であり、この結果は Tochilin 等³²⁾の結果とほとんど同じである。 Na_2SO_4 0.1 モル% 添加素子の相対感度は 90keV で 1.33, 38keV で 1.20 である。 Li_2SO_4 を添加した両素子の相対感度は同程度で 90keV が 1.25, 38keV が 1.08 である。山下等³⁶⁾は BeO に対し Li^+ あるいは Na^+ を 0.5 モル% 添加した焼結素子のエネルギー依存性を調べ、実効エネルギーが 30 から 100keV の X 線に対する両素子のエネルギーレスポンスはガラス封入管素子で ^{60}Co γ 線より 30% 以上過応答を示し、ガラス管に封入しない焼結粉末では実験誤差範囲内の平坦な応答を示すと報告しており、著者の結果とは異なる。

Fig. 4 中の計算値は素子材料の BeO および Na_2SO_4 あるいは Li_2SO_4 のみの混合比から求めた素子と空気のエネルギー吸収係数を ^{60}Co γ 線で規格化した値であつて、素子自身を分析し、その成分比から求めたものではない。計算値と実測値との相違はナトリウム 1.96 モル% (170A を含む) とリチウム 0.99 モル% 添加素子では 38keV で 10 ないし 15%, 90keV では 30 ないし 35% である。ナトリウムあるいはリチウムを 0.1 モル% を添加した両素子のこの相違は 38 および 90keV 共約 30% である。

この相違の原因として Tochilin 等³²⁾は LET 効果を指摘しているが、Scarpa²⁶⁾ はエネルギー

依存性の殆んどない BeO 素子の存在を認めているので、LET 効果のみに依存するとはいい難い。LiF および $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ についての低エネルギー X 線に対する過応答の原因が高原子番号の不純物にあることが Jayachandran⁹⁾ および Thompson 等³¹⁾ によつて理論的に示されているので、BeO についても高原子番号の不純物に原因がある可能性がある。素子を封入しているガラスアンブルに原因があるとする考え方³⁶⁾ もあるが、それだけでは説明できない。ここでは総熱発光量で比較したが、あるピークの高さで線量を表示するとエネルギー依存性が変化する可能性があるので、エネルギー依存性についての理論的考察は今後の研究課題の一つである。

なお、BeO の各素子も高エネルギー X 線に対するレスポンスは ^{60}Co γ 線より低い。

3.6.2 電子線に対するレスポンス

Fig. 5 には 100M8 および 170B の電子線に対

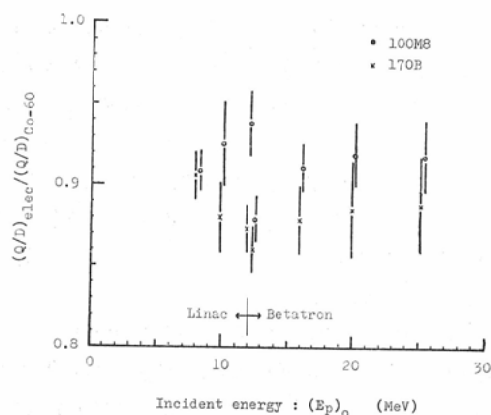


Fig. 5. Response of 100M8 and 170B to electrons relative to ^{60}Co γ -rays

Q: TL-output D: Absorbed dose in water

するレスポンスを示した。線量は素子を置いた点の水の吸収線量で評価した。TLD素子のレスポンスは ^{60}Co γ 線より電子線 (8—26MeV) の方が約10%低かった。

TLD素子は測定点の水の吸収線量で評価すると、 ^{60}Co γ 線より電子線に対するレスポンスが低い場合がある¹⁸⁾²⁵⁾。固体線量計を用いたときの

測定理論として、一般空洞理論が Burlin²⁾³⁾ により、その修正理論が Almond¹⁾ および Holt⁶⁾ 等により発表されているが、まだ確立された理論ではない。ここでは実験結果の提示のみにとどめておく。

3.6.3 光子エネルギーによる supralinearity の変化

LiF の場合、supralinearity の程度が光子エネルギーにより異なることが知られている²⁹⁾ ので、100M8 および BeO 素子についての supralinearity に対する光子エネルギーの影響を調べた。

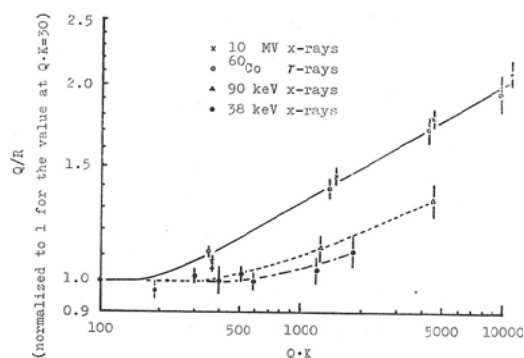


Fig. 6. Effect of photon energy on supralinearity of 100M8 phosphor
Q: TL-output
K: R/Q in linear region of the dose-response curve for ^{60}Co γ -rays

Fig. 6 は 100M8 の結果である。横軸は熱発光量を ^{60}Co γ 線の照射線量に換算して示してある。縦軸は感度比で、熱発光量が ^{60}Co γ 線30R 相当値で規格化してある。このように熱発光量を ^{60}Co γ 線相当値で表わしても (いいかえれば素子の吸収線量を同量にしても) その supralinearity の程度は光子エネルギーが低い方が少ない。

Fig. 7 は 170B および 170L の結果である。この場合も supralinearity の程度は ^{60}Co γ 線より実効エネルギー90keV X 線の方が少ない。これらの結果は LiF についての結果と同様である。

この原因を解析するためにグロー曲線を測定した。100M8 の場合にはエネルギー依存性を考慮して ^{60}Co γ 線を 1,000 R, 90keV X 線を 278

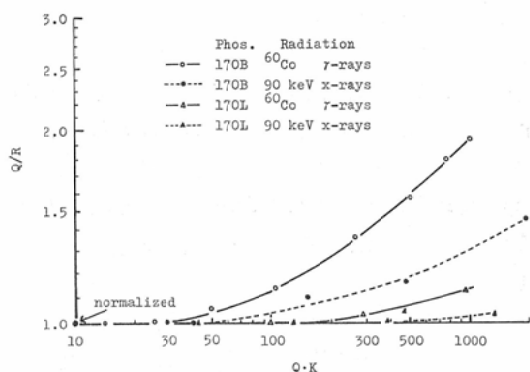


Fig. 7. Effect of photon energy on supralinearity of 170B and 170L phosphors
 Q : TL-output
 K : R/Q in linear region of the dose-response curve for ^{60}Co γ -rays

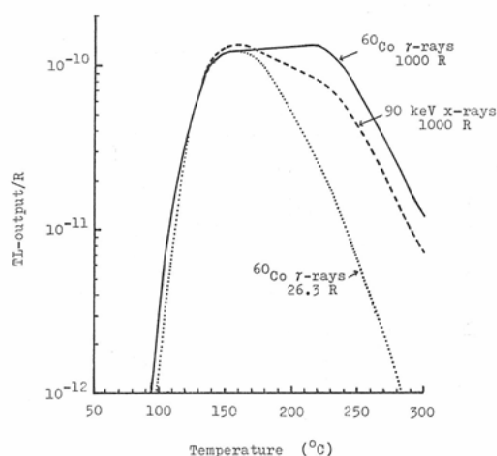


Fig. 9. Glow curves of BeO phosphors (170 B) exposed to 90 keV x-rays and ^{60}Co γ -rays

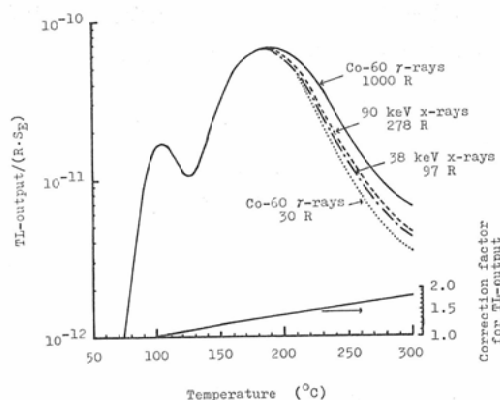


Fig. 8. Effect of photon energy on glow curve of 100M8 phosphor
 S_E : Relative sensitivity of phosphor for photon (see Fig. 3, $^{60}\text{Co}=1$, $90\text{ keV}=3.6$, $38\text{ keV}=10.3$)

R ($= 1,000\text{ R} \div 3.6$) および 38 keV X線を 97 R ($= 1,000\text{ R} \div 10.3$) 照射してから24時間後のグロー曲線を測定した。結果を Fig. 8 に示した。 ^{60}Co γ 線と比較して低エネルギーX線の方が高温部に付加される熱発光量は少ない。

Fig. 9 は ^{60}Co γ 線または 90 keV X線を $1,000\text{ R}$ 照射してから24時間後の170Bのグロー曲線である。この場合 170°C 附近の主ピークは 90 keV X線の方が ^{60}Co γ 線より高いが、高温部に付加

される熱発光量は 100M8 素子の場合と同様に ^{60}Co γ 線の方が多い。

Supralinearityの程度が光子エネルギーに依存するのは、2次電子のエネルギーすなわちLETの相違に原因があるとされている²⁹⁾。LiFの場合には重陽子線²⁹⁾あるいは α 粒子線⁶⁾のような高LET放射線では supralinearity の程度は著しく小さく、また高温部ピークが高LET放射線では多くなることが報告されている⁶⁾。CaSO₄:Tm および BeO については ^{60}Co γ 線よりLETの高い低エネルギーX線での高温部ピークの増大は認められず、 α 粒子線のようなさらに高いLET放射線によるグロー曲線との比較も含めて今後の研究課題である。

3.7 反復照射による影響

3.7.1 感度変化

Fig. 10は20枚の 100M8 素子について ^{60}Co γ 線を 30 R 照射、熱発光量の測定そしてアニールという順序の繰り返しを32回行い、各回の感度と初回との感度比を素子毎に求めた平均値である。

100M8 素子はこの実験 (30 R 宛の反復照射) では感度変化は認められなかつた。31回の平均値の標準偏差は 1.6% である。

次に 100M8 各20枚を1組として ^{60}Co γ 線を 30 R 照射 (test dose) して校正し、アニールを行

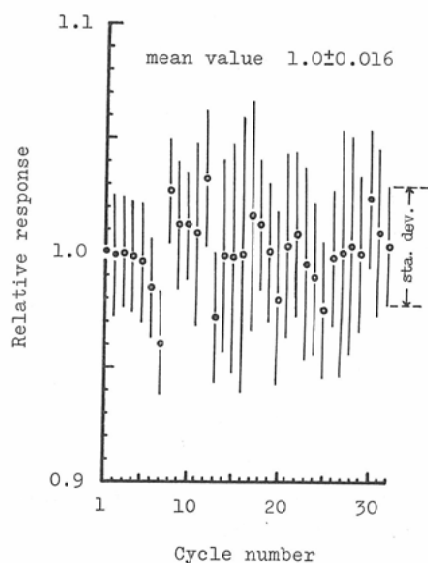


Fig. 10. Consistency of response of 100M8 phosphor over repeated cycles of use to 30 R ^{60}Co γ -ray exposure per cycle

い、続いて 330あるいは 950R 照射 (sensitizing dose) し、アニール後再び 30R を照射 (test dose) して校正することを繰り返す、その感度変化を調べた。結果を Fig. 11 に示した。縦軸は初回の test dose に対する感度 S_0 と反復照射の各回の test dose に対する感度 S との比 (増感係数, Suntharalingam 等²⁹⁾は sensitivity factor とよん

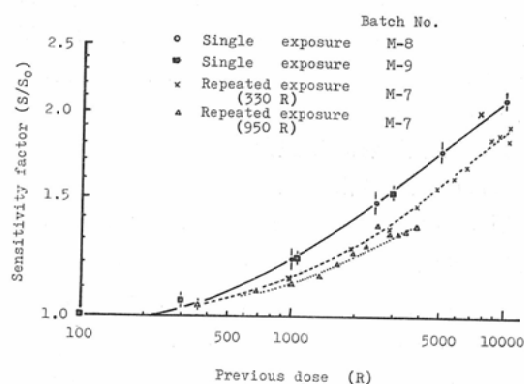


Fig. 11. Change in sensitivity factor over repeated exposure cycles of high dose using ^{60}Co γ -rays
 S_0 and S are TL-outputs for the first time and each cycle of individual sample exposed to ^{60}Co γ -rays at 30 R, respectively.

でいる)を示した図中の実線は前記実験とは異なる製造時の素子各 20 枚に 300, 1,000, 2,500 (あるいは 3,000), 5,000 および 10,000 R の ^{60}Co γ 線を 1 回に照射した後の sensitivity factor である。このような大線量による反復照射では非 supralinearity 領域の test dose で被曝が 500 R 程度で 1.1 倍、3,000 R で 1.5 倍程度の感度上昇が見られる。

これらの素子のグロー曲線を測定して調べたところ、すでに報告¹⁶⁾⁸⁴⁾されているように、反復照射による感度上昇の原因は大線量の照射により生じた高温部の電子トラップが、380°C で 5 分間のアニールでは完全に消失しないためであることを確認した。

反復照射による感度上昇は ^{60}Co γ 線より低いエネルギーの X 線でも起るが、その程度は ^{60}Co γ 線より小さい。Fig. 12 にその結果を示した。

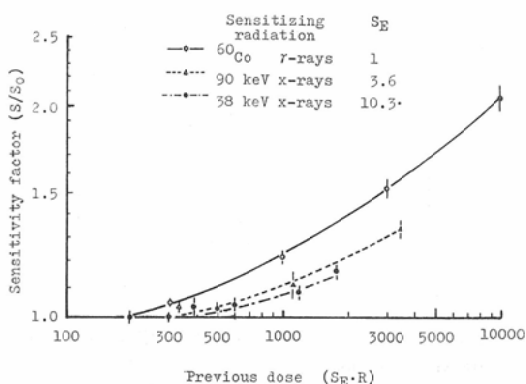


Fig. 12. Sensitivity factor to 38 and 90 keV x-rays and ^{60}Co γ -rays of sensitized 100M8 TLD tested with ^{60}Co γ -rays of 30 R

横軸は以前にうけた線量で、 ^{60}Co γ 線を 1 としたエネルギー依存性の感度 S_E を照射線量に乗じた値で、素子自身の吸収線量に比例した値と考えられる。

170B および 170L 素子についても 15 本を 1 組として 100M8 と同じ方法で ^{60}Co γ 線 30R の test dose, アニール後そして 200R あるいは 900R (170L は 500R のみ) を反復照射して各照射時と初回 30R 照射したときとの感度比を素子毎に求

め、各回の平均値を計算した。この値は Fig. 2 に示した single exposure における 170B あるいは 170L の結果と有意差は認められない。すなわち、BeO 素子の場合には 470°C で 1 時間のアニールを行えば反復使用しても同一線量には同一レスポンスを示す。

3.7.2 Supralinearity の変化

Fig. 13 に被曝歴の異なる 100M8 素子の supra-

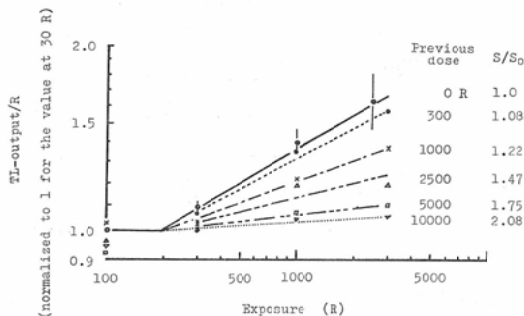


Fig. 13. Effect of previous dose on supralinearity of 100M8 phosphor

linearity を示した。100M8 素子は被曝歴により supralinearity の程度が異なる。以前に照射されている線量が多い。すなわち sensitivity factor が大きい素子の方が supralinearity の程度は小さい。未照射の素子では 3,000 R の照射で R 当りの感度は 30 R 照射時の 1.6 倍であるが以前に 1,000 R, 2,500 R, 5,000 R および 10,000 R 照射された素子では、この値がそれぞれ 1.37, 1.23, 1.12 および 1.06 である。

470°C, 1 時間アニールした BeO 素子ではこの現象は認められなかった。

3.7.3 エネルギー依存性の変化

Fig. 14 に 100M8 の光子に対するエネルギー依存性への被曝歴の影響を示した。100M8 素子の被曝歴が増加し、sensitivity factor が大きくなるとエネルギー依存性の程度は少なくなる。未照射素子の ^{60}Co γ 線を 1 とした実効エネルギー 90 keV, 66 keV および 38 keV X 線の感度比はそれぞれ 3.6, 6.3 および 10.3 であるが、sensitivity factor 1.1 (^{60}Co γ 線で 500 R, 90 keV X 線で

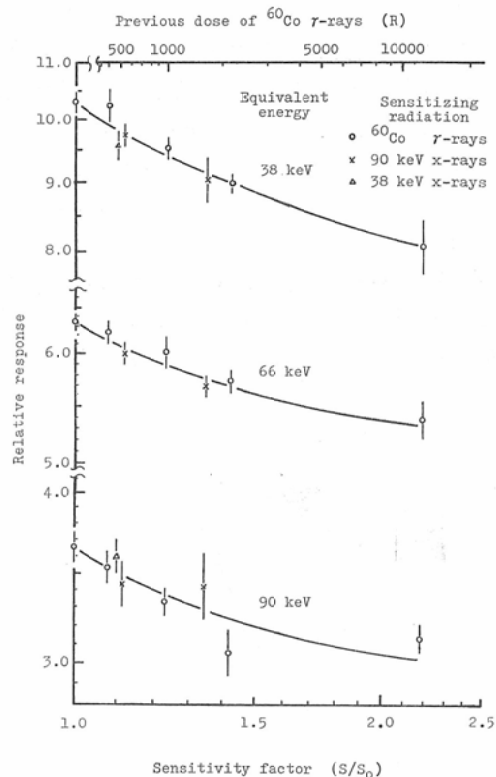


Fig. 14. Effect of sensitivity factor on energy response of 100M8 phosphor

300 R あるいは 38 keV X 線で 160 R の被曝歴) の素子のこの感度比は 3.5, 6.0 および 9.7 であり、被曝歴 ^{60}Co γ 線 10,000 R で sensitivity factor 2.2 の素子では 3.1, 5.4 および 8.0 である。この場合、素子を増感させた線質には関係なく、 ^{60}Co γ 線 30 R の test dose で調べた sensitivity factor (S/S_0) が同じなら同程度のエネルギー依存性を示す。

中島は $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Tb}$ の実験¹⁴⁾において、 ^{60}Co γ 線を 10,000 R 照射し ^{137}Cs γ 線で調べて増感が認められた素子が、38 keV X 線の検査では増感が認められなかったと述べているが、これは $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Tb}$ 増感素子の ^{137}Cs γ 線に対する 38 keV X 線の相対感度が新鮮素子より低下したことを示すもので、ここに得られた 100M8 の結果と同様である。

470°C, 1 時間アニールを行つた BeO 素子で

はこの現象は認められなかつた。

3.8 素子の特性へのアニールの影響

Pre-irradiation annealing の条件により LiF 素子の特性が変化することは Zimmerman 等⁸³⁾を始め多くの報告⁴⁾⁵⁾がある。CaSO₄:Tm 素子についてもアニール条件を変えることにより TLD のよりよい特性が得られることが期待される。そこで CaSO₄:Tm のガラス封入管(2mmφ×12mm)素子 UD-110S を使用してその特性を検討した。Fig. 15に、使用したアニール炉の最高温度 470°C

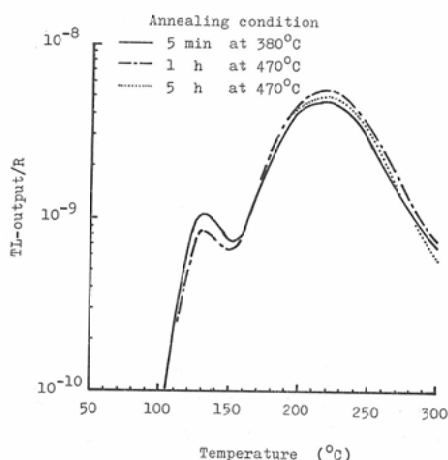


Fig. 15. Effect of pre-irradiation annealing on glow curve of CaSO₄:Tm TLD

で pre-irradiation annealing を行つた素子の ⁶⁰Co γ線を30R照射24時間後のグロー曲線を示した。アニール時間20分から1時間までは得られるグロー曲線はほとんど同じで、380°C 5分間のアニールで得られる感度より約20%高い。アニール時間が1時間以上になると感度は徐々に低下する。5時間では1時間のアニールの感度より10%低い。

次に ⁶⁰Co γ線 3,000 R照射した CaSO₄:Tm 素子を温度 470°Cでアニールを行い、この素子に30R照射しグロー曲線を調べた。結果は2時間のアニールで高温部に出現した熱発光は消失し、新鮮素子と同じグロー曲線が得られた。CaSO₄:Tm 素子も 470°C 2時間のアニールを行えば反復照射を行つても感度、supralinearity およびエネルギー

依存性に変化は認められなかつた。しかしこのアニール方法を樹脂と共に成形してある 100M 8には適用できない。

4. CaSO₄:Tm ホイルおよび BeO 焼結粉末素子の取扱方法とその適用範囲についての考察

4.1 取扱方法

4.1.1 100M 8

100M 8は素子毎に校正すれば測定値の標準偏差は3%以下であるが、取扱中に表面を汚したり、傷つけたりすると著しく誤差が大きくなる。

CaSO₄:Tm 素子は可視光に対しわずかな感受性を示す。放射線を照射した素子の室内光 350 lux 1時間の曝射による熱発光量への影響はなかつたが、山下等⁸⁴⁾の報告によれば太陽光下ではフェデングを示すから、素子には不必要な光の曝射は避けた方がよい。

100M 8素子は機械的刺激によつても擬信号を生じるが10mR程度であるから、治療時の線量測定では問題ない。

CaSO₄:Tm 素子は照射後約1日で熱発光量に急激な減少があるが、その後は1カ月間で2%程度のフェデングである⁸⁴⁾から、照射後24時間以上で測定すればよい。しかし精度を要する場合には照射後一定の時間に測定する方がよい。

100M 8素子に ⁶⁰Co γ線 100Rあるいは診断領域のX線30R以上の supralinearity 領域の線量を照射した場合には、supralinearity の補正が必要である。

380°C、5分間のアニール法を採用している 100M 8素子を反復使用する場合には次の注意が必要である。

(1) 1回に ⁶⁰Co γ線で30R以下あるいは診断領域のX線で3R以下の線量を照射している場合には反復照射による感度変化は殆んどないから、熱ルミネセンス計測装置の感度変化に注意すればよい。この計測装置の感度変化には、光の検出器の感度変化と光の通路におけるよごれによるものなどがあり、それらの合計の誤差は10%に及ぶことがある。従つて、絶対線量を測定する場合には測定系全体を照合するために、同時に既知の

線量を照射した感度照合用素子を設定する必要がある。

(2) 1回に supralinearity 領域の線量を受けると、Fig. 12に示したように次の放射線照射に対する感度は変化する。測定すべき線量が非 supralinearity 領域の線量の場合には感度が上昇し、supralinearity 領域の線量を測定する場合にはその感度上昇率の程度は低下する。またエネルギー依存性も変化する。

Fig. 16には新鮮素子に対する supralinearity の

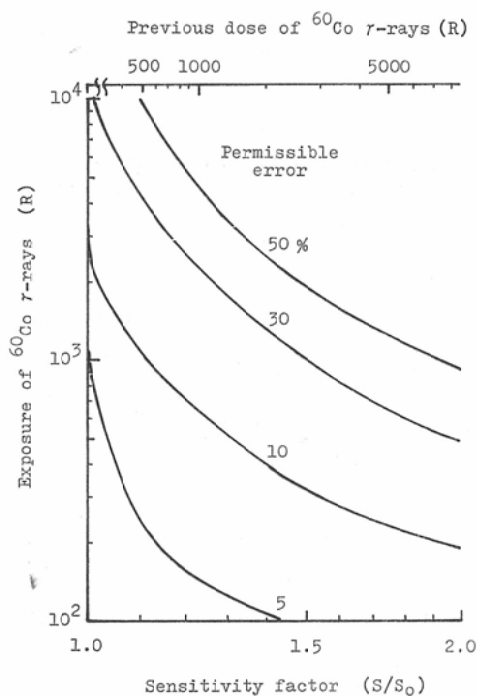


Fig. 16. Exposure of ^{60}Co γ -rays vs. sensitivity factor as parameter of permissible error in measurement using sensitized 100M8 phosphor

1.05以下の素子を使用しなければならない。一般的に放射線治療のための1回の照射線量は200Rないし500Rである。これらの線量を5%以下の誤差で評価するためには100M8素子は1ないし2回しか使用できない。ゆえに100M8素子は放射線治療の患者の線量測定のために繰り返し使用することはほとんどできない。

診断領域のX線を測定するために100M8素子を反復使用する場合、 ^{60}Co γ 線に対する感度比および supralinearity の補正に新鮮素子の値を用いたときの誤差（標準偏差も考慮した）をパラメーターとした sensitivity factor とX線の照射線量の関係を Fig. 17に示した。一般的にX線診断

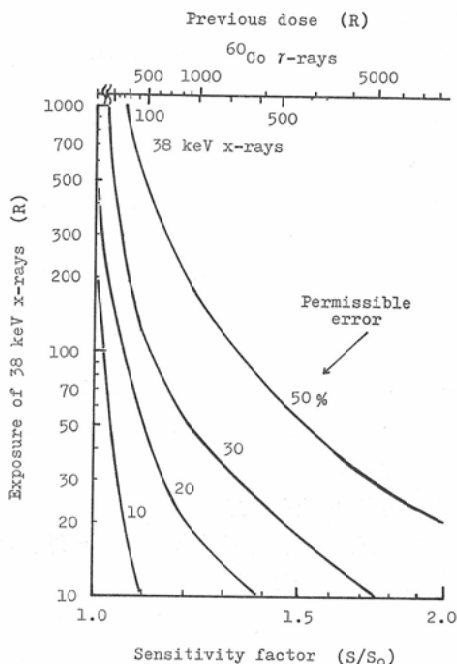


Fig. 17. Exposure of 38 keV x-rays vs. sensitivity factor as parameter of permissible error in measurement using sensitized 100M8 phosphor

補正值を用いて増感素子の測定値を補正した場合の、その標準偏差も考慮した測定誤差をパラメーターとした sensitivity factor（あるいは ^{60}Co γ 線の被曝歴）と ^{60}Co γ 線の照射線量との関係を Fig. 13より求めて示した。 ^{60}Co γ 線の400Rを測定誤差5%以内で測定するためには ^{60}Co γ 線の被曝歴では400R以下、sensitivity factor では

時の患者の被曝線量は30R以下であるから、100M8素子は増感しない。したがって、この領域の線量測定に100M8素子を繰り返し使用しても、その線量評価値は新鮮素子の誤差とほとんど同じである。

4.1.2 BeO

BeO 各素子についても個別に校正した方が測定精度はよくなる。

470°C, 1時間のアニールを行つた BeO 素子は 350 lux の室内光には感受性を示さない。しかし放射線を照射した素子は可視光の曝射によりフェデングを起すから取扱には十分な注意が必要である。

BeO 素子はトリボルミネセンスを生ずるから 1 R 以下の線量測定には取扱中不必要な機械的刺激は与えない方がよい。これらの効果はリチウムを添加した 170L 素子の方が他の素子より大きい。

BeO 素子は放射線照射5時間後までに熱発光量の約15%がフェデングする。その後は月当り, BeO : Na は3ないし5%。BeO : Na, Li は6ないし8%である³⁶⁾³⁷⁾。ゆえに BeO 素子の熱発光量の測定は放射線照射後5時間以後がよい。

170A および 170B 素子は30R, 170L 素子は100R 以上の線量を照射した場合には supralinearity の補正が必要である。

絶対線量の測定には 100M 8 素子と同様に既知の線量を同時に照射した感度照合用素子を設定の必要がある。

BeO 素子の感度および supralinearity の程度は製造時毎に相違が認められるから、製造時毎にチェックする必要がある。

4.2 適用範囲とその応用例

4.2.1 光子の2次電子 build-up 領域および電子線の中心軸深部線量

100M 8 素子は感応層が薄いので吸収線量の勾配が大きな場所の線量測定が可能である。Fig. 18 には10MV X線, 照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の2次電子 build-up 領域の組織/ピーク線量比の 100M 8 素子と直径1cm深さ2mmの shallow chamber による測定結果の比較を示した。表面附近の測定値は 100M 8 の方が低い。これは使用した shallow chamber の測定値には入射面の膜厚 2 mg/cm^2 の補正および2mmのギャップの補正がしてないためである。これらの補正をすると 100M 8 による測

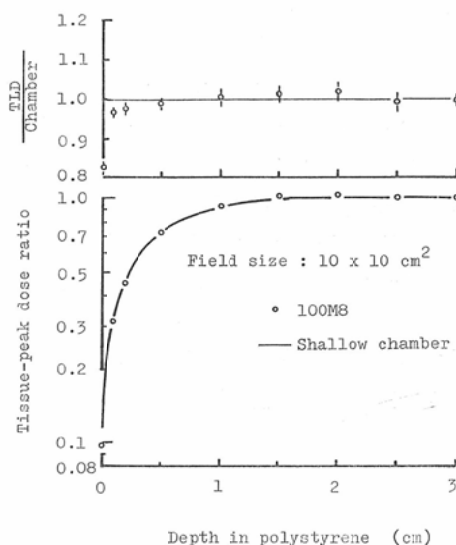


Fig. 18. Comparison of doses in electron build-up region of 10 MV x-rays obtained with 100M 8 and a shallow chamber

定値とほとんど一致する。

電子線中心軸深部線量の 前記 shallow chamber と 100M 8 による測定値は照射野の直径が 6 cm 以上ならば測定誤差の範囲内で一致する。Fig. 19 には入射エネルギー 10.4 MeV, 照射野の直径 3 cm の測定値を示した。線束と平行に置いて測定したフィルムによる値も合せて示した。電離箱の値は水中のラド変換係数 $C_E^{(7)18)}$ を用いて深部量百分率に変換した¹⁸⁾。これら3者の値にはいずれも相違が認められる。フィルムは電子線の入射角によりレスポンスが異なる¹²⁾²⁰⁾が、小照射野の場合には特にこの影響が大きく、フィルムの値は他の2つの測定器の値より信頼度が乏しい。使用した shallow chamber の有効面積は 100M 8 と殆んど同じであるが、両者の測定値の最大の相違は 7.5% である。電離箱による測定値には密度効果を始め、電子線場の擾乱の補正等が必要である。100M 8 素子は Fig. 5 に示すように 8 MeV 以上のエネルギーの電子線に対する感度はほぼ同じである。これらのことから 100M 8 の測定値の方が真値に近いと考えられる。170L の測定値も 100M 8 の値と測定誤差範囲内で一致している。しか

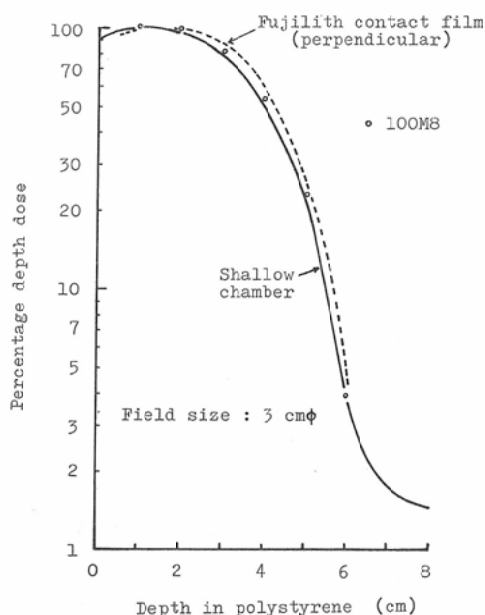


Fig. 19. Comparison of percentage depth doses of small field electrons obtained by 100M8 TLD, shallow chamber, and film dosimeters

し、LiF-TLD では低エネルギー電子線に対するレスポンスが低下する⁶⁾というデータもあるのでさらに検討を要する。しかしながら 100M8 と shallow chamber で測定した深部量百分率に 3% 以上の相違が認められた点の近傍で、両線量計が同じ値を示す点の深さの相違は 1.5mm 以内なので放射線治療の線量評価には問題はないであろう。

4.2.2 ^{60}Co γ 線および高エネルギー X 線の深部線量

100M8 素子を ^{60}Co γ 線の深部線量測定に用いると、水中では低エネルギー散乱線が存在しているので、エネルギー依存性のために過応答を示す。Fig. 20 には MixDP ファントムを用いて SSD 50cm, 照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の深部線量を 100M8, 170A, Fujilith contact フィルム²¹⁾および東芝ガラス線量計³⁸⁾で測定した値と電離による値との比を示した。100M8 は 10ないし 20cm 深部で 5ないし 7% 電離箱より過応答を示す。これは東芝ガラス線量計と同程度である。170A の測定結果は電離箱と測定誤差範囲内で一致してい

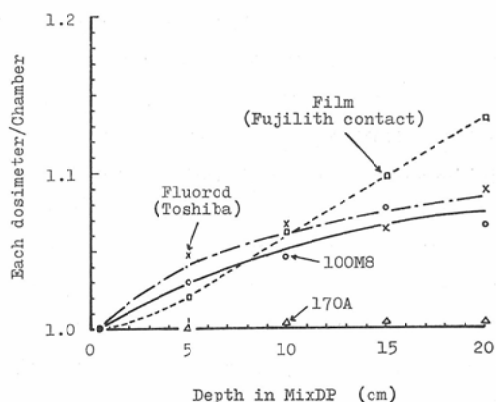


Fig. 20. Ratio of central axis depth doses measured with various dosimeters to those with ionization chamber for $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ^{60}Co γ -ray field at SSD of 50cm

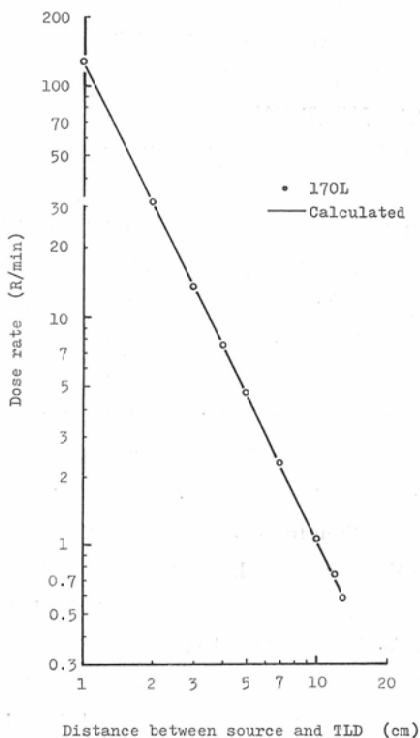


Fig. 21 Comparison of calculated and measured depth dose rates in MixDP phantom for ^{60}Co point source of high dose rate remotely controlled after-loading unit (Ralstron)

る。

Fig. 21 は 高線量率 ^{60}Co γ 線腔内照射装置の

点線源を厚さ40cmの MixDP ファントムの中央に配置したときの深部線量を 170L により測定した結果である。実線は線源より20cmの点の空気中線量を IONEX 電離箱で測定した結果を基に Meisberger¹³⁾ の water-air ratio を用いて計算した結果である。両者の結果は最大3%の相違であった。検出部の大きな電離箱では点線源近傍の線量測定は不可能であるが、検出部が小さな比較的高感度な 170L は線源から1cm近くまで補正なしに測定が可能である。1cm以下については測定法に工夫を要する²²⁾。

BeO 素子の10MV X線に対するレスポンスが水の吸収線量で評価したとき ^{60}Co γ 線に対するレスポンスより10%程度低いが、170Lの校正を10MV X線を用いて基準深で行えば170Lと電離箱による10MV X線の深部線量の測定値は測定誤差の範囲内で一致する。

4.2.3 診断用 X線

BeO 素子を診断用 X線の深部線量測定に使用する場合に入射 X線を校正してやれば Fig. 22に示すようにその測定値は電離箱の測定値と5%以内で一致する。両者の相違が5%で、治療のときの深部線量測定の相違より大きいのは診断用 X線発生装置の再現性によるものと考えている。

100M8 素子は X線診断時の患者の被曝線量測定に使用しても写真上にはその陰影を認めない。この領域の X線は散乱体の有無による線質の変化は少ない。Stenstrom 等²⁷⁾によれば実効エネルギー26keV (あるいは33keV) X線の水中10および15cm深部における実効エネルギーは約39keVであり、41keV X線では53keV といずれも約10keV その実効エネルギーが増加している。X線診断に使用する入射 X線のエネルギーを60kV (26keV) から100kV (42keV) とすれば、患者よりの射出 X線も含めてその実効エネルギーは26keV から52keV と推定できる Fig. 3から100M8の ^{60}Co γ 線に対するこのエネルギー範囲の感度比を求めると、10.3から8.3であり、この感度比にこの中央値の9.3を採用すればこの領域の X線の線量測

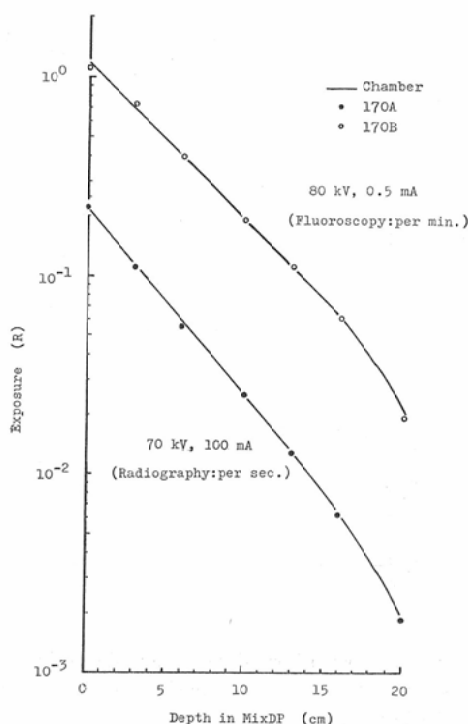


Fig. 22. Comparison of measured depth doses in MixDP phantom of diagnostic x-rays obtained with BeO TLD and ionization chamber. Phantom thickness 20cm, SSD 65cm, Field size $17 \times 25\text{cm}^2$

Table 2 Comparison of measured values of incident and exit doses for 38 keV x-rays obtained with 100M8 and ionization chamber

	Chamber R	100M8 (Q·K)	(Q·K)/ chamber
Incident	3.39	34.8 ± 1.2	10.27 ± 0.35
Incident	62.3	677 ± 25	10.87 ± 0.40
Exit	2.44	22.3 ± 0.7	9.14 ± 0.29

Q: TL-output

K: R/Q in linear region of dose-response curve for ^{60}Co γ -rays

定に100M8を使用しても±11%以内の誤差で評価できる。

Table 2は厚さ10.5cmの MixDP ファントムの80kV (実効エネルギー38keV) X線による透視時の入射面および射出面の被曝線量を100M8を

用いた測定値 (^{60}Co γ 線への換算値) と IONEX による評価値とを比較した結果を示した。 ^{60}Co γ 線に換算した入射面の 100M 8 による線量評価値は非 supralinearity 領域では電離箱の 10.3 倍であり、63.3R 照射した素子では Fig. 6 に示される supralinearity 1.03 を補正すると 10.55 倍となり共に Fig. 3 の 100M 8 の光子に対する結果と実験誤差の範囲内で一致する。射出面の線量は電離箱の 9.14 倍である。38KeV の入射 X 線が 10.5cm の MixDP ファントムを通過した後の X 線の実効エネルギーは 10keV 高くなるとすると、Fig. 3 より 100M 8 の ^{60}Co γ 線に対する 48keV X 線の感度比は 9.2 であり、これも実験誤差内で一致している。

5. 総括ならびに結語

$\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ ホイル型素子 100M 8 および BeO ガラス封入素子 170A, 170B および 170L の特性を調べ、その使用法を検討し、応用例を示した。結果を次に示す。

1. いずれの素子も個別に校正してやればその測定精度は 3% (標準偏差) 以内である。

2. BeO の放射線照射素子の熱発光量の可視光によるフェデングは大きいから取扱には十分な注意が必要である。 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ の放射線照射素子の熱発光量の可視光 (室内光 350 lux) によるフェデングは認められなかった。

3. トリボルミネセンスはあるが、治療量の線量測定には問題ない。

4. 100M 8 および BeO 素子の supralinearity は素子の吸収線量が同じでも光子エネルギーによりその程度が異なる。100M 8 素子は ^{60}Co γ 線では 100R, 200kV X 線では 70R, 80kV X 線では 30R から supralinearity が始まる。BeO 素子については線質に関係なく、170A および 170B では 30R, 170L では 100R より supralinearity が始まる。素子が上記以上の線量を受けたときには supralinearity の補正が必要である。

5. 100M 8 素子の診断領域の X 線 (実効エネルギー: 26keV—38keV) に対する照射線量当りの熱発光量は ^{60}Co γ 線の約 10 倍である。

170A, 170B および 170L の BeO 素子も診断領域の X 線に対する比感度は約 25% いずれも ^{60}Co γ 線より高い。しかしファントム内の線量測定に BeO 素子を使用する場合には入射光子に対し校正を行っておけばその線量は 3% の実験誤差範囲内で評価できる。

線量を素子を置いた点の水の吸収線量で評価した場合には、100M 8 および BeO 素子の感度は 10MV X 線および 8MeV から 25MeV までの電子線ではいずれも ^{60}Co γ 線より 10% 低い。

6. 100M 8 に対する 380°C, 5 分間のアニールは sensitization annealing なので、素子が supralinearity 領域の線量を受けると、次の非 supralinearity 領域の放射線照射では以前にうけた線量に応じた増感を示す。この増感素子は新鮮素子と比較して supralinearity の程度およびエネルギー依存性の程度共に減少する。470°C, 1 時間のアニールを行つた BeO 素子は感度および supralinearity の程度共に新鮮素子と同じである。

7. $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ 素子もアニールの条件を 470°C, 2 時間とすれば感度および supralinearity の程度共に新鮮素子と同程度の素子が得られる。しかしこの方法は樹脂と混合成形された 100M 8 には適用できない。

8. 100M 8 素子は光子の 2 次電子の build-up 領域および電子線の中心軸深部線量等線量勾配の大きな領域の線量測定や、X 線写真上に陰影を認めないことから X 線診断時の患者の被曝線量の測定などにも利用でき臨床への適応範囲は広い。BeO 素子は小線源および高線量率腔内照射等も含めた放射線治療時の患者およびファントム内の線量測定、および診断時のファントム内の線量測定に使用することができる。

稿を終るに臨み、御懇篤なる御指導、御校閲を賜つ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、御協力を頂いた入船寅二研究員、東京医科歯科大学小西圭介講師、松下電機産業株式会社中央研究所山下忠興博士に深く感謝致します。

本研究の一部は文部省科学研究費 (河村班) および

厚生省がん研究助成金(田崎班)により行われたものである。

文 献

- 1) Almond, P.R. and McCrya, K.: The energy response of LiF, CaF₂ and Li₂B₄O₇: Mn to high energy radiations, *Phys. Med. Biol.* 15 (1970), 335—342.
- 2) Burlin, T.E.: A general theory of cavity ionization, *Br. J. Radiol.* 39 (1966), 727—734.
- 3) Burlin, T.E. and Chan, F.K.: The effect of the wall on the Fricke dosimeter, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes* 20 (1969), 767—775.
- 4) Dhar, A., DeWerd, L.A. and Stoebe, T.G.: Effects of annealing and cooling processes on thermoluminescence of LiF (TLD 100): *Health Phys.* 25 (1973), 427—433.
- 5) Harris, A.M. and Jackson, J.H.: Pre-irradiation annealing of TLD Lithium Fluoride, *Health Phys.* 15 (1968), 457—461.
- 6) Holt, J.G., Edelstein, G.R. and Clark, T.: Energy dependence of the response of Lithium Fluoride TLD rods in high energy electron fields, *Phys. Med. Biol.* 20 (1975), 559—570.
- 7) ICRU report 21: Radiation dosimetry, Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV, ICRU publications, Washington, D.C. (1972).
- 8) Jähnert, B.: The response of TLD-700 thermoluminescent dosimeters to Protons and Alpha-particles, *Health Phys.* 23 (1972), 112—114.
- 9) Jayachandran, C.A.: The response of thermoluminescent dosimetric Lithium Borates equivalent to air, water and soft tissue and of LiF TLD-100 to low energy X-rays, *Phys. Med. Biol.* 15 (1970), 325—334.
- 10) 川島勝弘, 平岡 武, 松沢秀夫, 橋詰 雅: 医療用標準線量計のエネルギー依存性, *日本医放誌*, 33 (1973), 臨増号, 57.
- 11) 小西圭介, 仙貫忠夫, 松沢秀夫, 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 河内清光, 加藤 浩: 電子線測定における各種指頭型電離箱の対比較, *日本医放誌*, 33 (1973), 388.
- 12) Loevinger, R., Karzmark, C.J. and Weissbluth, M.: Radiation therapy with high-energy electrons part I. Physical considerations 10 to 60 MeV, *Radiology* 77 (1961), 906—927.
- 13) Meisberger, L.L., Keller, R.J. 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 (1968), 953—957.
- 14) Nakajima, T.: On the sensitivity factor mechanism of some thermoluminescence phosphors, 3rd international conference on luminescence dosimetry (1971), 466—479.
- 15) Nakajima, T.: Optical and thermal effects on thermoluminescence response of Mg₂SiO₄ (Tb) and CaSO₄ (Tm) phosphors, *Health Phys.* 23 (1972), 133—136.
- 16) 西台武弘, 小野山靖人, 阿部光幸, 高橋正治, 陶山純夫: 熱蛍光線量計に関する基礎的研究. 第一編 各種熱蛍光体の Glow curve について, 第二編 とくに supralinearity について, *日本医放会誌*, 33 (1973), 877—888, 889—902.
- 17) 日本医放会物理部会: 放射線治療における⁶⁰Coガンマ線および高エネルギーX線の吸収線量の標準測定法, 通商産業研究社 (1972).
- 18) 日本医放会物理部会: 放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量の標準測定法, 通商産業研究社 (1974).
- 19) 尾内能夫, 楠本五郎: 水と等価な固形 Phantom の試作, *日本医放会誌*, 19 (1959), 1012—1015.
- 20) 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 内田 勲, 梅垣洋一郎, 松川川作: 種々の測定法による電子線の深部線量測定, *日本医放会誌*, 29 (1970), 1474—1483.
- 21) 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 内田 勲: 写真フィルムによる高エネルギーX線の線量分布測定法の再検討, *日本医放会誌*, 31 (1972), 1224—1236.
- 22) 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 内田 勲: Foil 型 TLD を用いた小線源近傍の線量分布の測定, 第29回日本医放会物理部会 (1975).
- 23) 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 内田 勲: 各種 BeO 熱ルミネセンス線量計に対するエネルギー依存性, 第30回日本医放会物理部会 (1975).
- 24) Oonishi, H., Yamamoto, O., Yamashita, T. and Hasegawa, S.: Dosimeter and reader by Hot air jet, 3rd international conference on luminescence dosimetry (1971), 237—248.
- 25) Paliwal, B.R. and Almond, P.R.: Application of cavity theories for electrons to LiF dosimeters, *Phys. Med. Biol.* 20 (1975), 547—558.
- 26) Scarpa, G.: The dosimetric use of Beryllium oxide as thermoluminescent material; A preliminary study, *Phys. Med. Biol.* 15 (1970), 667—672.
- 27) Stenstrom, K.W. and Marvin, J.F.: Ionization measurements with bone chambers and their application to radiation therapy, *Am. J. Roentgenol. and Rad. Therapy* 56 (1946),

- 759—770.
- 28) Storm, E. and Israel, H.I.: Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements $z=1$ to $z=100$, Nuclear data table A7 (1970), 565—681.
- 29) Suntharalingam, N. and Cameron, J.R.: Thermoluminescent response of Lithium Fluoride to radiations with different LET, Phys. Med. Biol. 14 (1969), 397—410.
- 30) Sunta, C.M., Bapat, V.N. and Kathuria, S.P.: Effects of deep traps on supralinearity, sensitization and optical thermoluminescence in LiF TLD, 3rd international conference on luminescent dosimetry (1971), 146—155.
- 31) Thompson, J.J. and Ziemer, P.L.: Energy response of Lithium Borate thermoluminescent dosimeter, Health Phys. 22 (1972), 399—401.
- 32) Tochilin, E., Goldstein, N. and Miller, W.G.: Beryllium oxide as a thermoluminescent dosimeter, Health Phys. 16 (1969), 1—7.
- 33) 横田良助, 中島三郎: けい光ガラス線量計用ガラス, 東芝レビュー, 17 (1962), 1号 1—7.
- 34) Yamashita, T., Nada, N., Oonishi, H. and Kitamura, S.: Calcium Sulfate activated by Thulium or Dysprosium for thermoluminescence dosimetry, Health Phys. (1971), 295—300.
- 35) 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Ⅱ報) CaSO_4 : Tm TLD 素子の構造と特性, National Technical Report 18 (1972), 171—180.
- 36) Yamashita, T., Yasuno, Y. and Ikedo, M.: Beryllium oxide doped with Lithium or Sodium for thermoluminescence dosimetry, Health Phys. 27 (1974), 201—206.
- 37) Yasuno, Y. and Yamashita, T.: Thermoluminescent phosphors based on Beryllium oxide, 3rd international conference on luminescent dosimetry, (1971), 290—304.
- 38) Zimmerman, D.W., Rhyner, C.R. and Cameron, J.R.: Thermal annealing effects on the thermoluminescence of LiF, Health Phys. 12 (1966), 525—531.