

図3.19 LiFの主ピークに関する線量応答

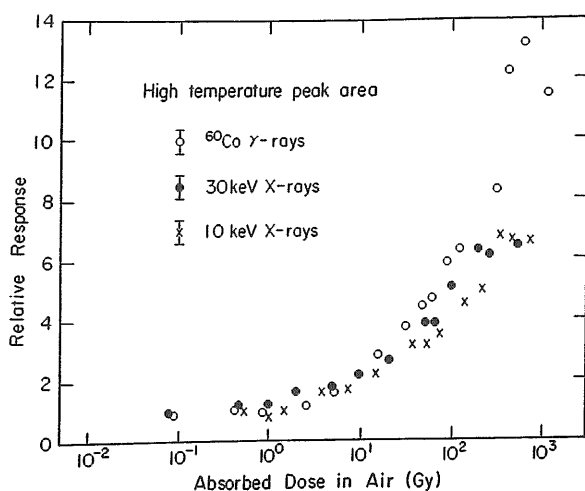


図3.20 LiFの高温ピークに関する線量応答

主ピークと高温ピークの線量応答を、図3.19と3.20に示す。主ピーク応答は、図3.17の全積分の応答値より小さなsupralinearityを示し、その値は10、30keVX線、⁶⁰Co γ 線に対してそれぞれ約1.9、2.4、3.9であった。それに対して、高温ピーク応答は強いsupralinearityを示し、その最大値は10、30keVX線に対して約6.5、⁶⁰Co γ 線に対しては約13であった。

3.3.4 ホウ酸リチウム (Li₂B₄O₇:Cu) 測定結果

3.3.4.1 グロー曲線

図3.21に、Li₂B₄O₇:CuTLDの10keVX線に対するグロー曲線を示す。毎秒2℃の加熱速度で測定した。LiFと異なり、ピークは200、300℃付近にそれぞれ1個あるのみである。照射直後は、さらに低温部にグローピークが観察されたが、数時間でフェーディングした。また、高温ピークの全面積に対する割合は無視できるほど小さく、他のエネルギーに対してもこうしたグロー曲線の形状に変化はなかった。

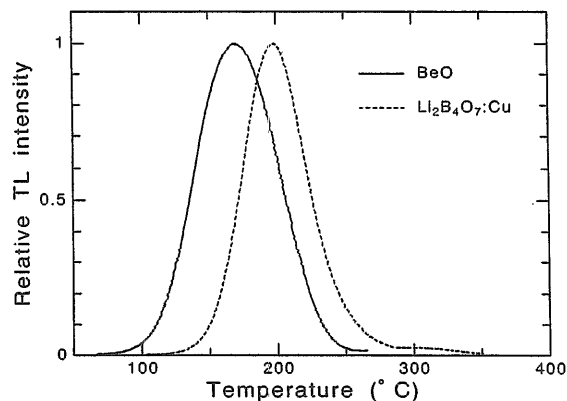


図3.21 10keVX線に対するLi₂B₄O₇:Cu、BeOのグロー曲線

3.3.4.2 エネルギー応答

図3.22に、Li₂B₄O₇:Cuのエネルギー応答の測定値と空洞理論に基づく計算値を示す。両者とも⁶⁰Co γ 線エネルギーで規格化している。低エネルギー領域の計算値は、TLDと空気のエネルギー吸収係数の比に等しい。Li₂B₄O₇:Cu中に含まれる0.05重量%の銅の影響は、計算で考慮した。同図より、測定値は計算値より8%から20%小さいことが明らかになった。Li₂B₄O₇:Cuのエネルギー応答は、粉末素子をポリエチレン袋に入れ、X線発生装置を用いて測定されており¹³⁾、その値は、30、40keVで0.8であった。Wallも、粉末素子を用いて計算値より3-10%小さい値を得ている²⁹⁾。TLDのタイプは異なるが、両文献値は本測定値とほぼ一致している。これは、平坦なエネルギー特性をもつTLDに対しては、線源スペクトルの影響は小さいためと考えられる。

また、グロー曲線の光子エネルギーに対する依存性を見るため、ピーク温度と半値幅(FWHM)を⁶⁰Co γ 線、10keVX線に対するグロー曲線から読みとった。図3.23にその結果を示す。どちらも、直線領域では光子エネルギーに依存せず、グロー曲線の変化は観察されなかった。

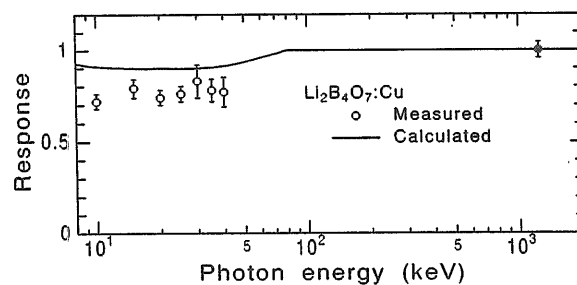


図3.22 Li₂B₄O₇:Cuのエネルギー応答
⁶⁰Co γ 線規格化しており、

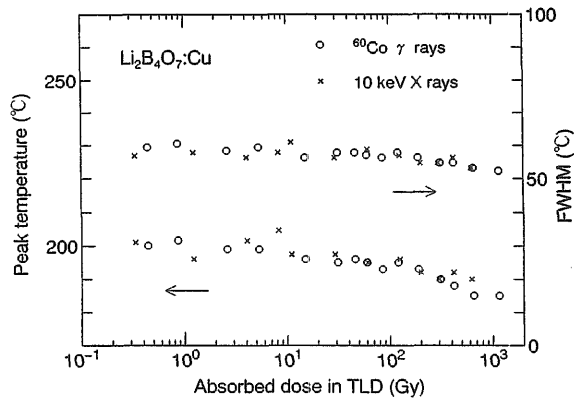


図3.23 Li₂B₄O₇:Cuのグロー曲線におけるピーク温度と半値幅

3.3.4.3 線量応答

図3.24に、⁶⁰Co γ線、10keV X線に対する線量応答測定値を示す。横軸は、TLD中の吸収線量を表す。10keV X線に対して300Gyまで、⁶⁰Co γ線に対しては650Gyまで直線性が観察され、それ以上では、supralinearityを示さずに飽和した。このとき、図3.23のピーク温度は線量とともに次第に減少し、150Gy以上になるとその減少の程度はさらに大きくなった。他方、FWHM値も線量とともにわずかずつ減少している。両図は、高温ピークの飽和により、ピーク温度が低温側へシフトすると同時に、ピーク幅が狭くなったことを示している。そして、線量の飽和領域では、高温ピークはほとんど見られなかった。

3.3.5 酸化ベリリウム (BeO) 測定結果

3.3.5.1 グロー曲線

図3.21に、10keV X線に対するBeOのグロー曲線を示す。毎秒2℃の加熱速度で測定した。形状は、エネルギーに依存せずほとんど一定であった。170℃にピーク

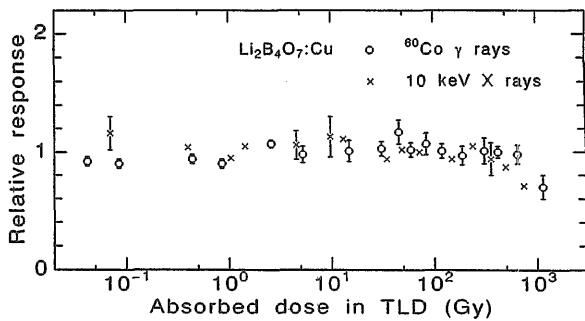


図3.24 Li₂B₄O₇:Cuの線量応答

クが1つ見えるが、実際には複数のピークからなる可能性がある。例えば、Tochilinは、Brush Beryllium社製の素子を用いて、180℃のピークと高線量で220℃のピークを観察している³⁰。Craseも、同社のThermalox 995を用いて170℃と275℃に³¹、ScarpaもConsolidated Beryllium社の数種の素子で、高温側の肩にピークをもつグロー曲線を測定している³²。

3.3.5.2 エネルギー応答

図3.25に、エネルギー応答値を示す。測定値は、空洞理論に基づく計算値より40~70%も大きい結果が得られた。しかし、測定は、BeO中の自己吸収、周りのガラスによる光子減衰、散乱そしてガラスからの2次電子の影響を受ける。そこで、そうした影響の有無を見るため、光子・電子輸送モンテカルロコードEGS4⁴⁾を用いた。計算は、1次元円柱形状で行い、光子、電子の輸送はそれぞれ1keV、10keVまでシミュレートした。その計算値は、図3.25に示すように、20keV以下では自己吸収と光子減衰により空洞理論値より小さい結果が得られたが、40keVでは一致した。つまり、測定値は、そのEGS4の結果と比べてもまだ大きいことがわかった。

また、光子の自己吸収が強いとき、蛍光をTLDのどの面から読むかに読み値は依存する。すなわち、照射面からの蛍光は、裏側の面からの蛍光に比べて強くなる。しかし、その影響は本測定の場合、小さいと考えられた。なぜなら、問題になるとすれば10、15keVだが、測定値のばらつきは図3.25に見られるように10keVエネルギーにおいても小さいからである。

さらに、蛍光の自己吸収を考慮した。なぜなら、もしその自己吸収が非常に強く、光が表面近くからのみ来る場合、読み値はガラスからの2次電子の影響を強く受ける。つまり、空洞の大きさが実質的に“小さく”なり、応答値は、“大きな”空洞として用いた質

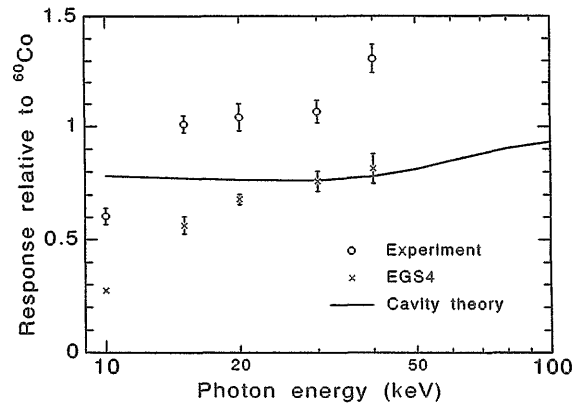


図3.25 BeOのエネルギー応答

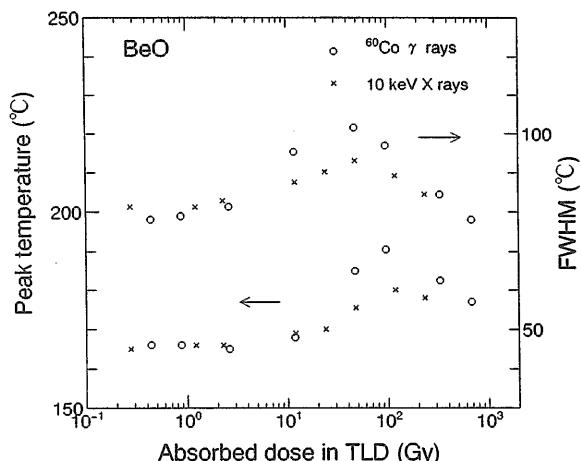


図3.26 BeOのグロー曲線におけるピーク温度と半値幅

量エネルギー吸収係数の比とは合致しなくなるからである。第2章のLiFと同様に、式(2.15)を用いて測定したBeOの蛍光に対する減衰係数は、文献³³⁾によると 2.69mm^{-1} である。一方、EGS 4計算により、0.1mmより浅い深さの線量は電子平衡状態の線量より20%よりは大きくないことを確認した。蛍光の放出を径方向と仮定し、散乱を無視すると、BeOの実効厚さ0.785mmに対する自己吸収は、式(2.14)の $\mu(E)$ を 2.69mm^{-1} で置換することにより0.42以下と計算される。結果として、ガラスからの2次電子の寄与は $(0.1 \times 0.2) / (0.785 \times 0.42) = 0.06$ 以下となり、蛍光の自己吸収は読み値に影響を与えないことを確認した。

以上より、この過大な応答は素子自身もつ特性によると考えられる。なお、同様な過大応答は、Thermaloxなど他の素子についても報告されているが^{30-32), 34)}、Scarpaによって観察されたように³²⁾、その応答値は密度、化学的純度、焼結方法に大きく依存するので、文献間で差違が見られる。しかし、その応答値はすべて計算値より大きく、しかも100³⁰⁾、60³²⁾あるいは30keV³¹⁾付近にピークをもっており、本測定においても、40keVの値が他より大きい結果が得られた。

図3.26に、毎秒2°Cの加熱速度で測定した場合のピーク温度、FWHMを示す。40keVの値がわずかに大きい、両図ともピーク形状とピーク温度は光子エネルギーに依存しないことを示している。

3.3.5.3 線量応答

図3.27に、⁶⁰Co γ線、10keVX線に対する線量応答を示す。横軸は、TLD吸収線量を表す。10keVX線に

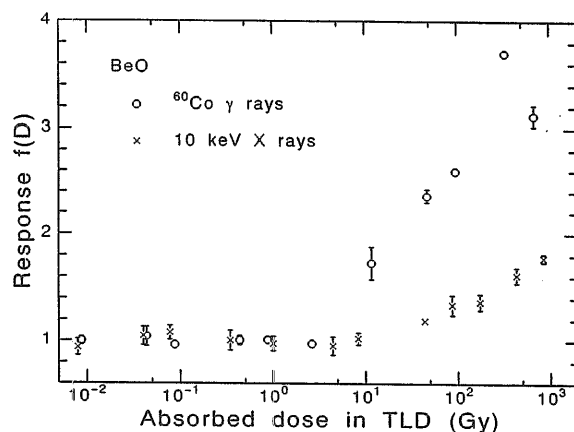


図3.27 BeOの⁶⁰Co γ線、10keVX線に対する線量応答

対する照射線量は、EGS 4の計算値を用いてBeO中の吸収線量に変換した。両応答とも2.6Gyまで直線性があり、それ以上ではsupralinearityを示している。そのsupralinearityの程度は、⁶⁰Co γ線の3.7より10keVX線の1.8の方が小さい。

図3.26のピーク温度は、10Gyまで166°Cと一定で、⁶⁰Co γ線に対して190°Cまで、10keVX線に対しては180°Cまで増大している。100Gy以上では、両方ともピークは低温側へ戻っている。他方、半値幅は、3 Gyまで一定で、50Gyで最大になり減少している。⁶⁰Co γ線に対しては50Gyと300Gyの間で半値幅の値は減少しているが、線量応答は図3.27に示すように依然増大している。この状態は、10keVX線に対しても同じである。なお、ピーク温度、半値幅とも、線量応答と同様に、⁶⁰Co γ線より10keVX線の方がその変化は小さかった。

3.3.6 硫酸カルシウム (CaSO₄:Tm) 測定結果

3.3.6.1 エネルギー応答

図3.28に、エネルギー応答の測定値と計算値を示す。空洞理論計算では、50ppm含まれるツリウムの影響は小さく無視できることを確認した。実効原子番号が大きいので、応答値も他のTLDに比べて10付近と大きい。測定値は、計算値より6%から37%大きく、その差異はTLDのばらつきより大きい。硫酸カルシウムのエネルギー応答値は、X線発生装置を用いた測定がいくつか報告されている。Lakshmananは、30mgのCaSO₄:Tm粉末を用いて25°Cと320°Cの間のグロー曲線を積分し、27.5keVで12の応答値を³⁵⁾、Pradhanは、CaSO₄:Dyの粉末を用い、25°Cから325°Cの間を積分し、19keVで11.5、29keVで10.6の値を得ている³⁶⁾。さらに、Lakshmananは25-250°C、250-290°Cの面積を別々に積分し、低温部の応答値が40keVで10.8である

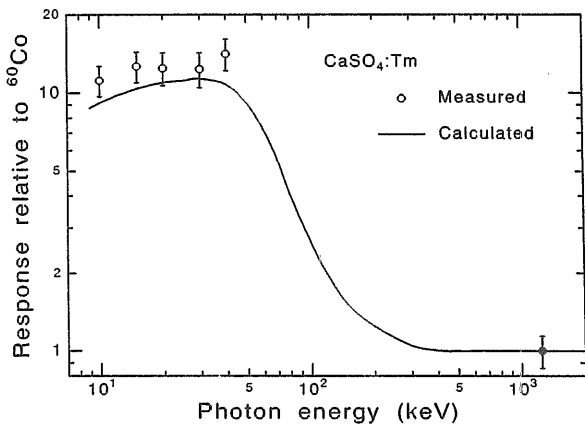


図3.28 CaSO₄:Tmのエネルギー応答

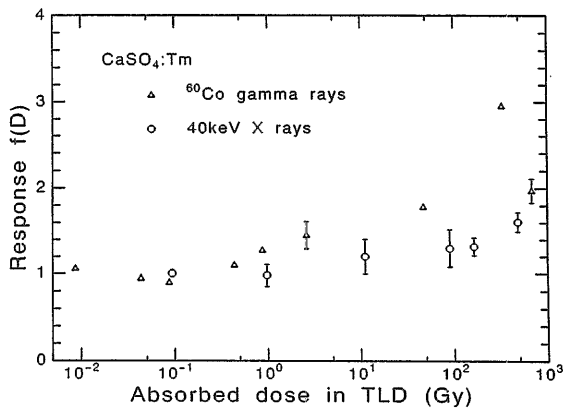


図3.29 ⁶⁰Co γ線、40keV X線に対する CaSO₄:Tmの線量応答

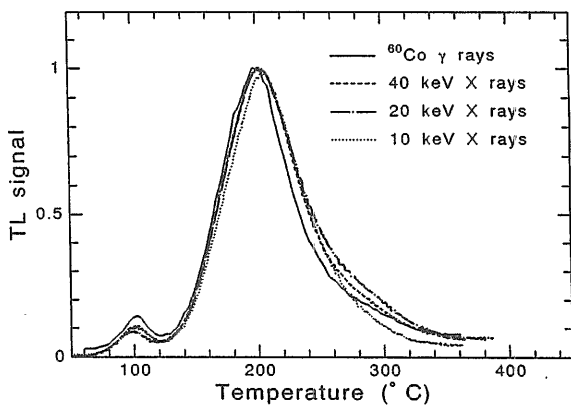


図3.30 CaSO₄:Tmにおけるグロー曲線の光子エネルギー依存性

のに対し、高温部の応答値は14であることを示した²⁰⁾。測定温度は、用いたTLリーダーと加熱速度に大きく依存するが、このことより本測定値が他文献の応答値よりわずかに大きくなった理由は、その積分領域が50-350°Cであったことから高温部分が含まれていたことと、異なる種類の線量計を用いたためと考えられる。

3.3.6.2 線量応答

図3.29に⁶⁰Co γ線、40keV X線に対する線量応答値を示す。横軸は、TLD吸収線量を表す。supralinearityが、⁶⁰Co γ線に対しては0.5Gyから、40keV X線に対しては1 Gyから現れている。直線領域は、他のTLDに比べて狭い。線量応答値の最大値は、⁶⁰Co γ線、40 keV X線に対して、それぞれ3.0、1.6であった。

3.3.6.3 グロー曲線

図3.30に、直線線量領域のグロー曲線を示す。毎秒2°Cの加熱速度で記録した。低エネルギーX線に対して、200°Cから300°C付近のピークが⁶⁰Co γ線に対するピークよりわずかに大きい。10keV X線に対しては、260°C以上のピークが他のエネルギーに対するピークより低くなった。また、図3.31(a)(b)に、線量を変化さ

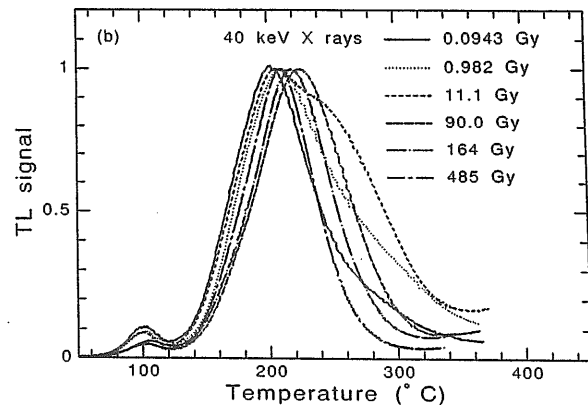
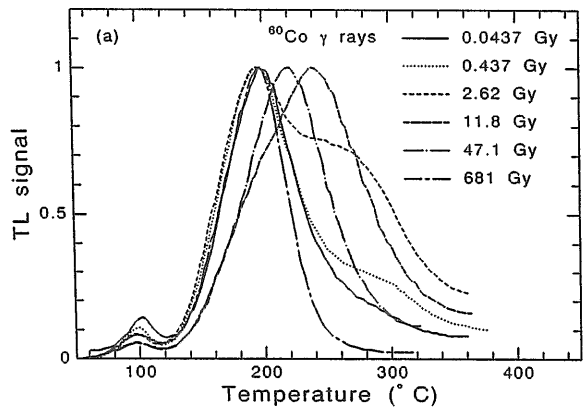


図3.31 (a)⁶⁰Co γ線、(b)40keV X線に対する CaSO₄:Tmのグロー曲線

せて⁶⁰Co γ線、40keV X線を照射した時のグロー曲線を示す。⁶⁰Co γ線に対しては、240℃付近以上の高温ピークが線量とともに増大し、ピーク位置が0.04Gyの200℃から11.8Gyの240℃までシフトしている。11.8Gy以上では、高温ピークの成長はわずかになり、全ピークは681Gyで200℃に戻っている。40keV X線に対しては、全ピークのシフトは0.09Gyの200℃から90Gyの225℃までと⁶⁰Co γ線のシフト幅より小さい。つまり、高温ピークの成長はより小さい。これは、SrivastavaがCaSO₄:Dyに対して観察した高温ピークの成長率が光子エネルギー依存性を示した挙動³⁸⁾とほぼ一致する。また、Souzaは、supralinear領域でも低温ピークは直線的に増大することを観察した³⁹⁾。しかし、図3.31(a)(b)では高温ピークは約500Gyで消えているが、線量応答はまだ増大している。これは、低温ピークもsupralinearに増大している可能性を示唆している。

3.3.7 エネルギー、線量応答の測定結果

本章において測定した各TLDのエネルギー、線量応答とグロー曲線を表3.3にまとめる。第3カラムは、ICRP tissue中のエネルギー応答値を空洞理論に基づき計算し、第2カラムの増大あるいは減少分を乗じた値で、実際に予想される応答値を示している。エネルギー応答としては、Li₂B₄O₇:Cuが最も優れており、LiFも良好な特性を示している。BeOは、ガラスがなければLiFと並ぶ特性を期待できるが、毒性があるため難しい。これらエネルギー、直線性の値は、実際に各TLDを低エネルギー光子に対して応用する上で役立つと考えられる。また、グロー曲線の測定結果より、高温ピークほど光子エネルギー、線量に関する非直線性の程度が大きいことが明らかになり、応用上、ピーク

弁別すれば光子エネルギーの影響を受けにくい線量測定の可能性が示唆された。

さらに、同表からTLDを2つのタイプに分けられることが明らかになった。1つは、Li₂B₄O₇:Cuタイプであり、低エネルギー光子に対しエネルギー応答が空洞理論値より小さい。この原因として、発光効率が低エネルギー領域では小さいことが可能性として考えられる。また、supralinearityを示さない。同じタイプに、LiF:Mg,Cu,Pがあり⁴⁰⁾、グロー曲線の特徴として、線量に影響するピークが1つということが挙げられる。

もう一方のタイプは、低エネルギー光子に対してエネルギー応答が空洞理論値より大きい。これには、発光効率が⁶⁰Co照射時より大きいことが可能性として考えられる。また、supralinearityを示し、LiF、BeO、CaSO₄:Tmがこれに属する。グロー曲線の特徴として、Li₂B₄O₇:Cuタイプと対照的に、線量に影響するピークが複数ということが挙げられる。

3.3.8 光子に対するLET計算

発光効率の光子エネルギー依存性が示唆され、線量応答の光子エネルギー依存性が明らかになったが、こうした依存性は、線エネルギー付与(LET)の違いに基づいて説明されてきた⁴¹⁻⁴³⁾。そこで、⁶⁰Co γ線と放射光でどの程度LETが異なるか計算を行った⁴⁴⁾。

光子のLETは、単一エネルギーについてさえ、その生成電子は不可避免的に広いスペクトルをもつので、厳密に決めることができない。そこで、ICRU Report 16⁴⁵⁾において定義されたLETを、SpencerとAttixの近似方法⁴⁶⁾によって評価した。

ICRUによると、LETにはTrack平均LETと吸収線

表3.3 TLDのグロー曲線と応答特性

TLD	Energy response relative to cavity theory	Energy response in tissue (10-40keV)	Linear region		Supralinearity 有無	f(D) _{max}	Dosimetric peak	
			⁶⁰ Co γ線	X線			数	低エネルギー
LiF	6%大	1.27-1.55	~5Gy		有	4.3(⁶⁰ Co γ線) 2.8(30keV) 2.0(10keV)	Plural	高温ピーク大 高温ピーク大
BeO	40~70%大	1.28-1.55	~2.6Gy		有	3.7(⁶⁰ Co γ線) 1.8(10keV)	-	変化なし ピーク→高温側
CaSO ₄ :Tm	6%~37%大	-	~0.5Gy ~1Gy		有	3.0(⁶⁰ Co γ線) 1.6(40keV)	Plural	高温ピーク大 高温ピーク大→小
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	8%~20%小	0.71-0.85	~650Gy ~300Gy		無		Single	変化なし 高温ピーク小

量平均LETがある。Track平均LETは、 $\phi(T)$ を発生電子の平衡フルーエンススペクトルとすると、

$$\phi(L) = \phi(T) \left(\frac{dT}{dL} \right) \quad (3.12)$$

$$t(L) = \frac{\phi(L)}{\int_0^\infty \phi(L) dL} \quad (3.13)$$

で計算されるtrack length分布 $t(L)$ で加重平均したLETと定義される。

$$\bar{L}_T = \int_0^\infty t(L) L dL \quad (3.14)$$

同様に吸収線量平均LETは

$$d(L) = \frac{L t(L)}{L_T} \quad (3.15)$$

で求まる吸収線量分布 $d(L)$ で加重平均したLETと定義される。

$$\bar{L}_D = \int_0^\infty d(L) L dL \quad (3.16)$$

このほか、LETにはあるエネルギー Δ より小さなエネルギーをもつ電子のみがエネルギー吸収に寄与すると仮定した場合のLETがあり、“restricted” LET \bar{L}_{Δ} と表される。

このように、光子のLETを計算するには、まず電子の平衡フルーエンススペクトル $\phi(E)$ を求めなければならない。その線源となる電子密度 $N_0(T)$ は、光子と物質との相互作用、すなわち光電効果、コンプトン効果、電子対生成による電子スペクトルを計算して求めることになる。その電子線源密度をもとに、連続減速近似を用いて計算したスペクトルが減速スペクトルである。

$$\phi(T) = \frac{1}{S_{tot}(T)} \int_T^\infty N_0(T') dT' \quad (3.17)$$

$S_{tot}(T)$ は電子阻止能を表す。しかし、ここで用いた連続減速近似モデルは、初期電子が失うエネルギーはすべて物質に与えられると見なし、2次電子が持ち去るエネルギーは無視している。ところが、2次電子の中にはまだ十分なエネルギーをもち、“かなりの”距離を移動するものがある。こうした電子は、ある体系内のLETを考える場合、その体系内でエネルギーを失わずむしろ $\phi(T)$ に含めた方がよい。そこで本方法では、Spencerらによる近似方法を用いて、電子-電子間衝突によって発生する2次電子スペクトルの計算も行った。Spencerらの方法は、Møllerの理論⁴⁷⁾を近似した次の積分方程式がもとになっている。

$$\bar{\phi}(T_0, T) = \frac{1}{S_{tot}(T)} \left\{ 1 + \int_{2T}^{T_0} dT' K^*(T', T) \bar{\phi}(T_0, T') \right\} \quad (3.18)$$

第1項は式(3.17)の初期電子スペクトルを表し、第2項が2次電子スペクトルを表す。 $K^*(T', T)$ は、

(86)

T' のエネルギーをもつ電子がエネルギー T の2次電子を発生させる確率を表している。ここで、

$$\bar{R}(T_0, T) = \phi(T_0, T) S_{tot}(T) \quad \text{とおくと、} \\ \bar{R}(T_0, T) = 1 + \int_{2T}^{T_0} dT' \{ K^*(T', T) / S_{tot}(T') \} \bar{R}(T_0, T') \quad (3.19)$$

となる。ここで、制動放射を無視すると

$$\frac{K^*(T', T)}{S_{tot}(T')} = \{ B(T') \}^{-1} \{ T^{-1} - (T' - T)^{-1} \} \quad (3.20)$$

$$\text{とおける。ただし } B(T) \text{ は stopping number といい}^{48)} \\ B(T) \approx 2 \ln(T/I_0 Z) \quad (3.21)$$

の関係が成り立つ。 I_0 は平均イオン化ポテンシャル、 Z は原子番号である。ここで、 $\tau = (T/T_0)$ 、 $\tau' = (T'/T_0)$ とおくと、

$$\bar{R}(T_0, T) = 1 + \tau^{-1} \int_{2\tau}^1 d\tau' \{ 1 - \tau(\tau' - \tau)^{-1} \} \bar{R}(T_0, \tau') / B(T_0 \tau') \quad (3.22)$$

となり、数値解析可能な式が得られる。なお、電子阻止能の計算にはEELLOSSコード⁴⁹⁾を用いたが、100eV以下では実験値との差が大きく、100eVにおける値のみ実験値を用い、それ以下は計算対象外にした。

ここで、計算方法の精度を検証するため、水中でのLETを計算し、文献値^{10) 49)}と比較した。入射放射線は⁶⁰Co γ 線、²⁴¹Am γ 線、³H β 線である。光子エネルギーは⁶⁰Co γ 線が1.25MeV、²⁴¹Am γ 線が60keV、³H β 線の最大エネルギーが18keVである。結果を表3.4に示す。カットオフエネルギー Δ の値にかかわらず文献値と $\pm 20\%$ の範囲で一致した。このことから、本方法の数MeVから数keV領域における水中での計算精度を確認した。なお、阻止能その他のデータは Z の関数になっており、 Z が水に近い物質に対してはほぼこの精度で計算できるものと思われる。

そこで、LiFに対するLETを計算した。電子のLETは、電子阻止能に等しいとし、カットオフエネルギー Δ には、100eVを用いた。TLDの光子エネルギー依存性がどういう機構で起こるのか明らかでないので、track平均LET、吸収線量平均LETのどちらが適切か

表3.4 水に対するLET計算値の比較

Radiations	Δ (eV)	$\bar{L}_{\Delta, r}$ (keV/ μm)			
		文献	Present	文献	Present
⁶⁰ Co γ rays ⁴⁹⁾	100	0.23	0.28	6.0	6.21
	10000	0.23	0.26	0.48	0.40
	∞	0.24	0.25	0.31	0.31
²⁴¹ Am γ rays ⁵⁰⁾	500			6.54	6.09
³ H β rays ⁴⁹⁾	100	4.7	4.7	11.5	11.6

断定することはできないが、ここでは単位線量あたりの応答値の増大を問題にしていることから、吸収線量平均LET $\bar{L}_{100,D}$ を用いた。計算の結果、 $\bar{L}_{100,D}$ の値は、 ^{60}Co γ 線、30keV、10keVX線に対してそれぞれ5.6、9.0、9.4keV/ μm となり、 ^{60}Co γ 線と放射光でLETに違いがあることが明らかになった。

3.4 結論

10keVから40keVまでの単一エネルギー光子に対するLiF、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ 、BeO、 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ TLDのグロー曲線を、線量を1000Gyまで変化させて測定した。そのグロー曲線のルミネセンス積分量から、エネルギー応答、線量応答を評価した。

また、各応答特性、グロー曲線の挙動から、TLDを $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ とLiFの2つのタイプに分けられることを示し、そのLiFタイプにおいて、高温ピークは、supralinear領域で線量が高くなるほど著しく増大すること、そのsupralinearityの程度は、低エネルギーほど大きくなることなどを明らかにした。

また、LET計算により、光子エネルギーが小さいほど、LETは大きい値をとることを確認した。

こうした成果は、今後の低エネルギー領域における線量測定に利用されると考えられる。また、グロー曲線などのデータは、TLDの発光効率、線量応答のLET依存性の機構解明に寄与すると考えられる。

参考文献

1. Nakashima, H., Tanaka, S., Yoshizawa, M., Hirayama, H., Ban, S., Namito, Y. and Nariyama, N., "Development of a microcalorimeter for measuring absolute intensity of synchrotron radiation," Nucl. Inst. Meth., A310, 696-702 (1991)
2. Nelson W.R., Hirayama H. and Rogers D.W. O., "The EGS4 code system," SLAC265 (1985).
3. Ban, S., Hirayama, H., Namito, Y., Tanaka, S., Nakashima, H., Nakane, Y., Yoshizawa, M. and Nariyama, N., "Measurement of photon energy absorption coefficient of air, nitrogen and argon at 30 keV," Appl. Radiat. Isot., 44, 769-772 (1993).
4. Greening, J.R., "Dosimetry of low energy x rays," In: Topics in Radiation Dosimetry, ed. F. H. Attix, Academic Press, New York (1972).
5. Scott, P.B. and Greening, J.R., "The determination of saturation currents in free-air ionization chambers by extrapolation methods," Phys. Med. Biol., 8, 51-57 (1963).
6. Randall, J.T. and Wilkins, M.H.F., "Phosphorescence and electron traps. I. The study of trap distribution," Proc. R. Soc. London., A184, 366-389 (1945).
7. Gorbics, S.G., Nash, A.E. and Attix, F.H., "Thermal quenching of luminescence in six thermoluminescence dosimetry phosphors-II," Int. J. Appl. Radiat. Isot., 20, 843-852 (1969).
8. Nariyama, N., Tanaka, S., Yoshizawa, M., Hirayama, H., Ban, S., Nakashima, H., Namito, Y. and Nakane, Y., "Development of a glow curve measuring system of TLDs and its applications," JAERI-M 92-023 (1992).
9. Yamamoto, O., Yasuno, Y., Minamide, S., Hasegawa, S., Tsutsui, H., Takenaga, M. and Yamashita, T., "Construction of a composite thin-element TLD using an optical heating method," Health Phys., 43, 383-390 (1982).
10. Braunlich, P., "Present state and future of TLD laser heating," Radiat. Prot. Dosim., 34, 345-351 (1990).
11. Svarcer, V. and Fowler J.F., "Spurious thermoluminescence and tribothermoluminescence in lithium fluoride dosimetry powder", Proc. Int. Conf. Luminescence Dosimetry, CONF-650637, 227(1967).
12. Fairchild, R.G., Mattern, P.L., Lengweiler, K. and Levy, P.W., "Thermoluminescence of Li F (TLD100): Emission spectra measurements," J. Appl. Phys. 49, 4512-4522 (1978)
13. Lakshmanan, A.R., Chandra, B. and Bhatt, R.C., "Dosimetry characteristics of thermoluminescent $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ phosphor," Radiat. Prot. Dosim., 3, 191-198 (1981).
14. Yamashita, T., Yasuno, Y. and Ikedo, M., "Beryllium oxide doped with lithium or sodium for thermoluminescence dosimetry," Health Phys., 27, 201-206 (1974).
15. Nariyama, N., Tanaka, S., Yoshizawa, M., Hirayama, H., Ban, S., Nakashima, H., Namito, Y. and Nakane, Y., "Responses of LiF TLDs to 10-40 keV monoenergetic photons from synchrotron radiation", Radiat. Prot. Dosim., 49, 451-457 (1993).
16. Nariyama, N., Tanaka, S., Nakane, Y., Asano, Y., Hirayama, H., Ban, S., Nakashima, H. and Namito, Y., "Responses of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$, BeO and $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ for 10-40 keV photons from synchrotron radiation," Radiat. Prot. Dosim., to be printed.

17. National Laboratory for High Energy Physics, "Photon Factory Activity Report 1994," KEK Progress Report 95-1 A/M (1995).
18. 物理学辞典、培風館 (1986).
19. 日本物理学会、"シンクロトン放射"、培風館 (1986).
20. Tochilin, E. and Goldstein, N., "Dose-rate and spectral measurements from pulsed X-ray generators," *Health Phys.*, 12, 1705-1713 (1966).
21. Karzmark C.J., "Lithium fluoride thermoluminescence dosimetry," *Phys. Med. Biol.*, 9, 273 (1964)
22. Takenaga, M., Yamamoto, O. and Yamashita, T., "Preparation and characteristics of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ phosphor," *Nucl. Inst. Meth.*, 175, 77-78 (1980).
23. ナショナルTLD被曝用素子 技術資料、松下電器産業株式会社
24. Horowitz, Y.S., Fraier, I., Kalefezra, J., Pinto, H. and Goldbart, Z., "Non-universality of the TL-LET response in thermoluminescent LiF: the effect of batch composition," *Phys. Med. Biol.*, 24, 6, 1268-1275 (1979).
25. Hubbell, J.H., "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 1269-1290 (1982).
26. McKeever, W.S., Moscovitch, M. and Townsend, P.D., "Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses," Nuclear Technology Publishing, Ashford (1995).
27. Fairchild, R.G., Mattern, P.L. and Lengweiler, K., "Thermoluminescence of LiF (TLD-100): glow curve kinetics," *J. Appl. Phys.*, 49, 4523-4533 (1978).
28. Budd, T., Marshall, M., People, L.H.J. and Douglas, J.A., "The low- and high-temperature response of lithium fluoride dosimeters to X-rays," *Phys. Med. Biol.*, 24, 71-80 (1979)
29. Wall, B.F., Driscoll, C.M., Strong, J.C. and Fisher, E.S., "The suitability of different preparations of thermoluminescent lithium borate for medical dosimetry," *Phys. Med. Biol.*, 27, 1023-1034 (1982).
30. Tochilin, E., Goldstein, N. and Miller, W. G., "Beryllium oxide as a thermoluminescent dosimeter," *Health Phys.*, 16, 1-7 (1969).
31. Crase, K. W. and Gammage, R. B., "Improvements in the use of ceramic BeO for TLD," *Health Phys.*, 29, 739-746 (1975).
32. Scarpa G., "The dosimetric use of beryllium oxide as a thermoluminescent material: A preliminary study," *Phys. Med. Biol.*, 15, 667-672 (1970).
33. Lembo, L., Pimpinella, M. and Mukherjee, B., "Self optical attenuation coefficient of TL glow in BeO detectors," *Radiat. Prot. Dosim.*, 33, 43-45 (1990).
34. Bacci, C., D'Angelo, L., Furetta C. and Giancola S., "Dosimetric properties of BeO TLDs under γ - and X-ray irradiation above 1 Gy," *Radiat. Effect and Defects in Solids*, 124, 203-212 (1992).
35. Lakshmanan, A.R. and Bhatt, R.C., "Photon energy dependence of sensitized TLD phosphors," *Nucl. Instrum. Meth.*, 171, 259-263 (1980).
36. Pradhan, A.S. and Bhatt, R.C., "Response of sensitized $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ phosphors and phosphor embedded Teflon TLD discs to X and gamma rays," *Radiat. Prot. Dosim.*, 2, 23-26 (1982).
37. Lakshmanan, A.R. and Bhatt, R.C., "The low- and high-temperature response of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dosimeters to X- and γ -rays," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 464-466 (1982).
38. Srivastava, J.K. and Supe, S.J., "Thermoluminescence processes in $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Dependence on stopping power," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 13, 2337-2349 (1980).
39. Souza, J.H., da Rosa, L.A.R. and Mauricio C.L.P., "On the thermoluminescence glow curve of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$," *Radiat. Prot. Dosim.*, 47, 103-106 (1993).
40. Wang, S., Chen, G., Wu, F., Li, Y., Zha, Z. and Zhu, J., "Newly developed highly sensitive LiF:Mg,Cu,P TL chips with high signal-to-noise ratio," *Radiat. Prot. Dosim.*, 14, 223-227 (1986).
41. Suntharalingam, N. and Cameron, J.R., "Thermoluminescent response of lithium fluoride to radiations with different LET," *Phys. Med. Biol.*, 14, 397-410 (1969).
42. Tochilin, E., Goldstein, N. and Lyman, J.T., "The quality and LET dependence of three thermoluminescent dosimeters and their potential use as secondary standards," *Proc. 2nd Int. Conf. Lumin. Dosim.*, Springfield, CONF-680920, 424-437 (1968).
43. Horowitz, Y.S. (Ed.), "Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry," Vols 1-3,

- CRC Press, Florida (1984).
44. 成山展照、田中俊一、"光子、電子線エネルギー付与 (LET) 計算コードの開発"、平成4年度春季(第59回)船舶技術研究所研究発表会講演集、57-60(1992).
 45. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Linear energy transfer", ICRU Report 16 (1970).
 46. Spencer, L.V. and Attix, F.H., "A theory of cavity ionization," Radiat. Res., 3, 239-254 (1955).
 47. Møller, C., "Über den Stoss zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte," Z. Physik, 70, 786 (1931).
 48. Spencer, L.V. and Fano, U., "Energy spectrum resulting from electron slowing down," Phys. Rev., 93, 1172-1181 (1954).
 49. Tanaka, S., "ELOSS: The program for calculation of electron energy loss data," JAERI-M 9151 (1980).
 50. Makrigiorgos, G. and Waker, A.J., "Measurement of the restricted LET of photon sources (5 keV-1.2 MeV) by the recombination method: theory and practice," Phys. Med. Biol., 31, 543-554 (1986).

第4章 低エネルギー光子に対するファントム内吸収線量分布

4.1 放射光実験

4.1.1 線源条件

測定は、第3章と同じく高エネルギー物理学研究所フォトンファクトリー(PF)のシンクロトロン放射光を用いて行った¹⁾。実験体系を図4.1に示す。高調波は、3.3節のTLD応答測定では無視できたが、今度はファントムの深部においてその割合が増加し、吸収線量に影響を及ぼすことが予想された。そこで第3章と同じく、高調波の散乱スペクトルをHP-Ge検出器でモニターし、モノクロメータの第1シリコン結晶の反射角をわずかにずらすことによって30keVで0.3%、10keVで0.06%までその割合を減らし、照射を行った。

また、光の電気(または磁気)ベクトルの振動方向の分布が一樣でなく偏っており、その振動面が一平面内に限られているものを直線偏光というが²⁾、偏向電磁石やWiggler磁石から発生する放射光は、一般に電子の軌道面内に直線偏光している³⁾。その割合を表す完全偏光成分強度と全強度の比を偏光度といい、次式で与えられる。

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4.1)$$

ここで、 I_{\min} 、 I_{\max} は、図4.1において、ベリリウム箔で散乱された光子束を水平面、垂直面で測定した各散乱光子強度を表す。こうして得られた偏光度は、30keVで0.84、10keVで0.83であった。

入射フォトンビームは、モニター前のタングステンコリメータを用いて、30keVで直径5.03mm、10keVで直径9.85mmの円断面にコリメートした。電離箱とファントム間の空気層18cmの間における光子減衰は、減衰係数を用いて補正した。その補正值は、10keVで10%、30keVで0.8%である。また、平均照射線量率は、空気吸収線量にして30keVで0.11Gy/s、10keVで0.52Gy/sであった。

4.1.2 線量分布測定

ファントムには、低エネルギー光子に対して軟組織等価な特性を持つ1辺30cmの平板均質ファントム(SZ-208、京都科学標本(株)製)を30cmの厚さに重ねて用いた。構成元素としてH,C,N,O,P,Clがそれぞれ8.4、68.2、3.76、15.5、0.9、13.2重量%含まれ、密度は1.072g/cm³である。炭素元素が最も多く含まれ、K吸収端が問題になる元素は含まれていない。ここで、同ファントムの軟組織等価性を示すため、10keVから50keV光子に対する質量減衰係数⁴⁾を表4.1に示す。SZ-208の光子断面積は、30keVから10keVにおいてA150やアクリル、PMMAといった他のファントムより軟組織に近いことが示されている。

実験では、ファントム中の深さ、径、方位角方向の各線量分布を、2種のTLDを挿入して測定した。用いたTLDは、第3章で応答特性を測定したLi₂B₄O₇:CuとLiF TLD(TLD-100)である。図4.2に、ファントム中の両TLDのエネルギー応答値を示す。空洞理論に基づいて計算し、各TLD中に含まれる活性元素、すなわちCu、Mgの含有も考慮している。Li₂B₄O₇:CuTLDは、非常に優れたエネルギー特性をもつことがはっきりと示されている。LiFTLDは、エネルギー、線量の各応答に関してLi₂B₄O₇:CuTLDより劣っているが、感度、再現性において勝っている。そこで、LiFTLDは、Li₂B₄O₇:CuTLDを適用するには線量があまりに低い場所、すなわち径が大きく、深さが深い位置で用いた。実験では、線量がTLDの直線域に入るよう照射時間を設定し、Li₂B₄O₇:CuTLDで0.05-300Gy、LiFTLDで0.01-0.8Gy照射した。

LiFは400℃で60分、Li₂B₄O₇:Cuは300℃で15分アニリングした後、ファントムに挿入した。照射後は、初期フェーディングを避けるため、1日以上室温に放置した上で、3.2節のTLDリーダを用いて、毎秒2℃

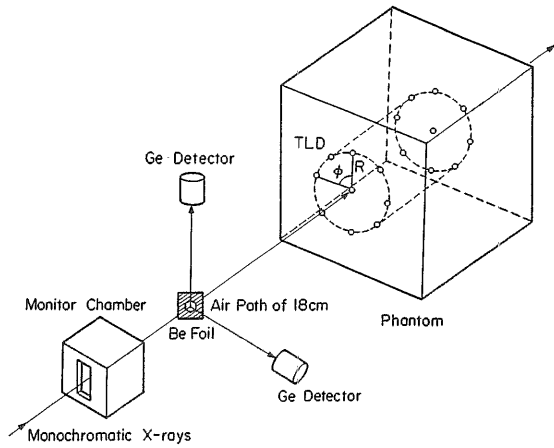


図4.1 実験体系

表4.1 ファントムの光子減衰係数 (cm²/g)

Photon energy (keV)	Soft tissue ³⁾ (ICRP)	SZ-208	Al50	Acrylic	MIX D	PMMA ⁴⁾
10	4.78	4.81	4.15	3.36	4.48	3.27
15	1.52	1.57	1.38	1.10	1.49	1.08
20	0.750	0.774	0.702	0.572	0.753	0.562
30	0.358	0.365	0.347	0.303	0.366	0.301

の加熱速度でグロー曲線を測定した。光電流と加熱温度は、デジタルデータとして記録し、熱ルミネセンス強度は、グロー曲線の全面積を積分することによって得た。読み値の誤差は約10%である。その積分した熱ルミネセンス出力を、⁶⁰Co γ線照射から導き出した校正定数を用いてTLD中の吸収線量D_{TLD}に変換した。

4.1.3 ファントム内吸収線量への変換

吸収線量D_{TLD}は、次の式によりファントム中の吸収線量D_{phim}に関係づけられる。

$$D_{phim}(x) = D_{TLD}(x) / f_{phim,TLD} \quad (4.2)$$

xはファントム中での位置、f_{phim,TLD}は図4.2で示したファントム中における各TLDのエネルギー応答である。もし、f_{phim,TLD}が光子エネルギーに依存しなければ、そうしたTLDはファントム中の吸収線量を測定するための理想的な線量計となるであろう。しかし、実際には図4.2にあるように、光子エネルギーに依存する。そこで、f_{phim,TLD}の平均として実効応答f_{eff}(x)を導入し、次の式により与えた。

$$f_{eff}(x) = \frac{\int_0^{E_{max}} f_{phim,TLD}(x) \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} E \phi(E,x) dE}{\int_0^{E_{max}} \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} E \phi(E,x) dE} \quad (4.3)$$

μ_{en}(E)/ρはTLDの質量エネルギー吸収係数、φ(E,x)は位置xでのエネルギーEの光子フルーエンスを表す。つまり、式(4.2)は、次のように書き直

せる。

$$D_{phim}(x) = D_{TLD}(x) / f_{eff}(x) \quad (4.4)$$

ここでは、式(4.3)のφ(E,x)にEGS4コードで計算した光子フルーエンスを適用し、その実効応答値を計算した。しかし、ここでフルーエンスとしてEGS4の計算値を用いることは、EGS4コードの妥当性を評価する目的に若干矛盾するかもしれない。しかし、式(4.3)に必要なフルーエンスは単に相対値であることに注目すべきである。さらに、低エネルギー光子はコンプトン散乱後もほとんどエネルギーが変化しないの

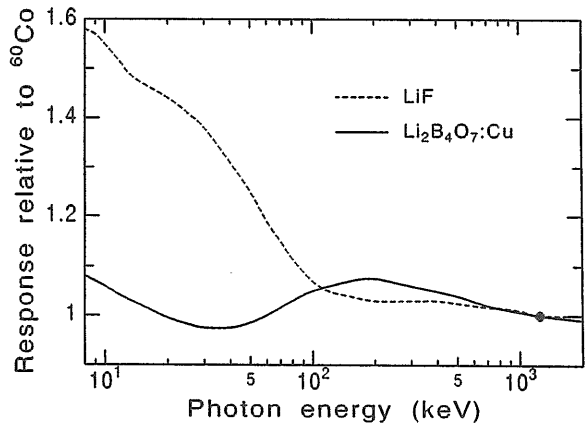


図4.2 LiF、Li₂B₄O₇:Cuのファントムにおけるエネルギー応答計算値

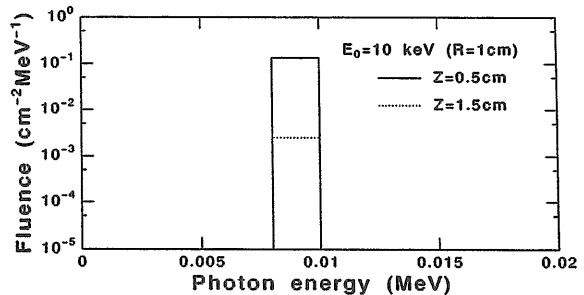
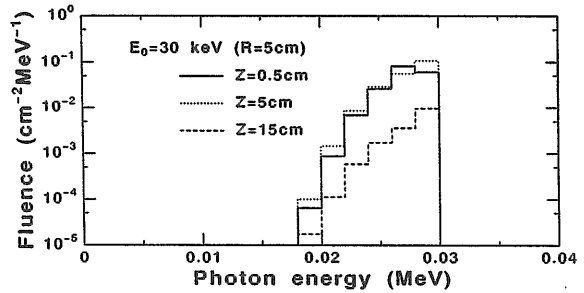


図4.3 30、10keV X線に対するファントム内光子スペクトルのEGS4計算値
Zは深さ、Rはビーム軸からの距離

で、図4.3に示すように、30keV、10keV入射光子のスペクトルは、ビーム軸からはずれたところでさえ、わずかに線源エネルギー付近に分布するだけである。そうしたエネルギースペクトルでは、図4.2のエネルギー応答はほとんど変化しない。よって、実効応答値は、EGS4の計算精度にそれほど依存しないと考えられる。

4.1.4 変換にともなう補正

TLDは、薄いといってもいくらか厚さを持つので、光子を多かれ少なかれ吸収する。そうした自己吸収の効果は、

$$(1 - \exp(-\mu_a d)) / \mu_a d \quad (4.5)$$

を用いて補正した。ここで、 μ_a は線減衰係数、 d はTLD中の光子行程長さである。しかし、ファントム中のすべての位置のすべてのTLDの行程長さを正確に評価することは不可能である。そこで、データは光子の垂直入射を仮定して補正した。垂直入射を仮定すると、補正因子は $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TLDに対して10keVで0.96、30keVで1.00、 LiFTLD に対してはそれぞれ0.75、0.98である。しかし、こうした仮定は、ビーム軸では理にかなっているが、それ以外では過小評価になる。もし等方入射を仮定すると、行程長さは、 V をTLDの体積、 S を表面積とすると、 $4V/S$ で与えられるので、 LiF の補正因子は10keVで0.64、30keVで0.97となる。その線減衰係数は、光子エネルギーに依存するけれども、スペクトルは図4.3に示すように、線源光子エネルギーに近いエネルギーをもつ光子に支配されるので、自己吸収補正の曖昧さは、線源エネルギー10keVで10%以下、30keVで無視できると評価した。

また、TLDは、ファントム中の光子スペクトルを擾乱させる可能性がある。その擾乱を最小限にするためには、ファントムと同じ光子断面積をもつ線量計を用いることが望ましい。この点で、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ と LiF は、用いたファントムと光子断面積の違いが大きくなり、また、厚さが非常に薄いので、ほぼ理想的な線量計であるといえる。結局、実験における擾乱については、いかなる補正も行わなかった。

ビーム軸には複数の $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TLDを同時に並べたので、TLDのシャドウ効果の補正を入射光子がTLDに垂直に入射すると仮定して行った。その最大値は、10keV入射に対して17%で、その誤差は10%以下である。30keV光子に対しては、その効果は小さく無視した。

4.1.5 測定結果

測定結果を図4.4、4.5に示す。ビーム中心の線量は、30keV光子に対して5cmで1桁減衰しているのに対し、

10keV光子に対しては5mmで1桁減衰している。また、角度 ϕ は、光子ビームの電場ベクトルを含む垂直面からの方位角を表し、両図で、偏光光子の非等方散乱の効果は、ビーム軸から離れたところの浅い位置でははっきりと観察されている。最大値は、 $\phi = 90^\circ$ 、すなわち電場ベクトルと垂直な方向で見られた。ビーム軸からの距離が大きいほど最大値と最小値の比が大きく、30keV光子には最大3.5、10keV光子には最大2.5であった。

4.2 モンテカルロ解析

4.2.1 EGS4コード

4.2.1.1 オリジナル版

同コードは、ITSと同じく電子・光子輸送を計算できるモンテカルロコードである。FORTRANのpre-processorであるMORTRAN言語で記述され、光子輸送は1keVまで、電子輸送は10keVまで追跡できる。光子輸送においては、光電効果、Klein-Nishinaの式を用いたコンプトン散乱、レイリー散乱、そして電子対生成が計算される。また、制動放射線、単元素に対するK軌道特性X線もシミュレーションされる。形状、入出力は、サブルーチンを自らプログラムすることによって使用するため、フレキシビリティは高い。電子輸送では、condensed history技術が用いられ、Molièreの多重散乱理論⁷⁾に基づいている。2次電子発生も考慮される。もともと高エネルギー領域用に開発されたが、近年低エネルギー用に改良が行われ、適用性が向上してきている。

4.2.1.2 低エネルギー光子用拡張版

本研究のために開発された低エネルギー光子用拡張版⁸⁾では、コンプトン散乱における電子束縛効果、および偏光効果をシミュレーションできる。オリジナルのEGS4コードは、コンプトン散乱に対して自由電子を前提としたKlein-Nishinaの式を適用していたが、図4.6に示すように、100keV以下の低エネルギー光子に対する軟組織内の輸送計算では、軌道電子の束縛効果を無視できない。コンプトン散乱の微分散乱断面積は、

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = S(x, Z) \frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} \quad (4.6)$$

の式が用いられている。 $S(x, Z)$ は非干渉性散乱関数、 x 、 Z はそれぞれ運動量輸送、原子番号、 σ_{KN} はKlein-Nishina断面積を表す。レイリー散乱は、トムソン散乱断面積 σ_T と原子形状因子 $F(x, Z)$ を用いた

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = F^2(x, Z) \frac{d\sigma_T}{d\Omega} \quad (4.7)$$

の式がオリジナルで用いられている。S(x,Z) と F(x,Z) には、それぞれHubbell⁹⁾、Hubbell and Overbø¹⁰⁾ のデータが用いられる。

偏光における方位角方向のコプトン、レイリー散乱の非等方成分は、以下の式で与えられている。

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_0^2 \left(\frac{k}{k_0}\right)^2 \left(\frac{k}{k_0} + \frac{k_0}{k} - 2\sin^2\theta \cos^2\phi\right) \quad (4.8)$$

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = r_0^2(1 - \sin^2\theta \cos^2\phi) \quad (4.9)$$

ここで、 r_0 は、古典電子半径、 k_0 、 k は入射、散乱光子エネルギー、 θ 、 ϕ は散乱極、方位角をそれぞれ表す。両断面とも、 $\phi=90^\circ$ 、すなわち光子、電子が入射波の電場ベクトルと垂直方向に散乱される場合に最大となる。現在、こうした偏光の影響を計算できる汎用コードは他にない。

EGS4では、光子断面積のうち、光電吸収とレイリー散乱断面積をStorm and Israel¹¹⁾のデータに基づいていたが、本研究第4、5章の計算の結果、PHOTXライブラリ¹²⁾の方が低エネルギーにおいて精度がよいことが明らかになり、置き換えられた。また、L

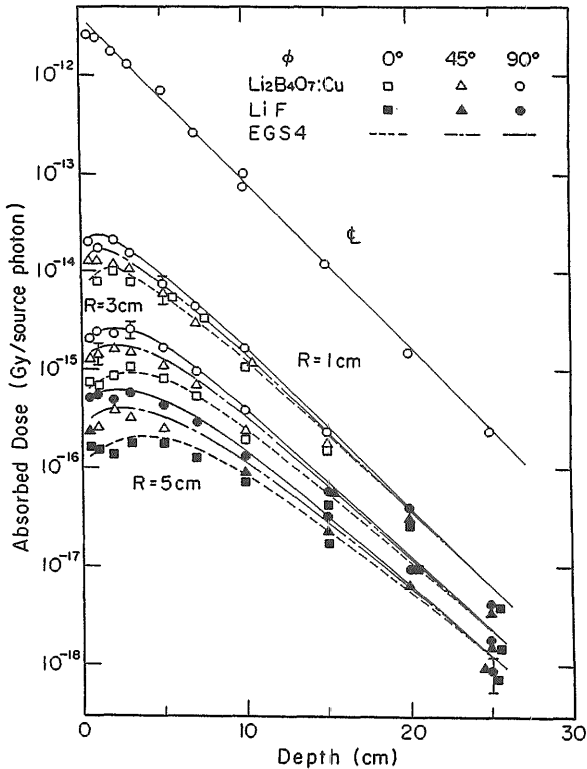


図4.4 30keV光子入射に対するファントム内吸収線量分布測定値と計算値
ビーム軸上と軸から1、3、5 cm

軌道特性X線も計算できるようになり、合わせてK、L吸収端以下の光電子輸送もシミュレーションできるようになった¹³⁾。

4.2.2 計算方法

光子輸送は、同コードで利用できる最小エネルギー1 keVまでシミュレートした。入射光子の電場ベクトルの方向は、偏光度の測定値に基づいてサンプリングした。また、電子輸送は、線量計算値がEGS4の電子カットオフエネルギーの値に依存しないことを前もって確認したので、無視した。30keVに対するエネルギー沈積は、深さ方向0.5cm、径方向0.4cm、方位角方向15度毎に積分し、10keVに対しては、深さ方向のみ0.04 cm毎に変更して積分した。光子断面積は、PHOTXを用いた。

4.2.3 計算値と測定値の比較

30、10keV光子に対する計算結果を、それぞれ図4.4、4.5に示す。偏光の影響も含め、よく実験値を再現していることがわかる。10keV線源光子に対しては、図4.5に見られるように30keV高調波成分の影響が深さ1.5cm以上で顕著に現れている。また、同図では、異なる光子断面積、すなわちPHOTXとStorm and Israelのデータを用いた計算値を、ビーム軸において

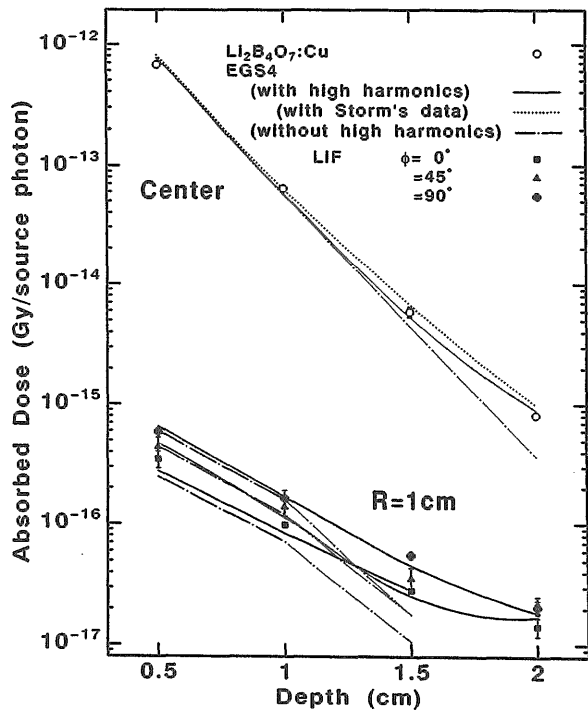


図4.5 10keV光子入射に対するファントム内吸収線量分布測定値と計算値
ビーム軸上と軸から1 cm

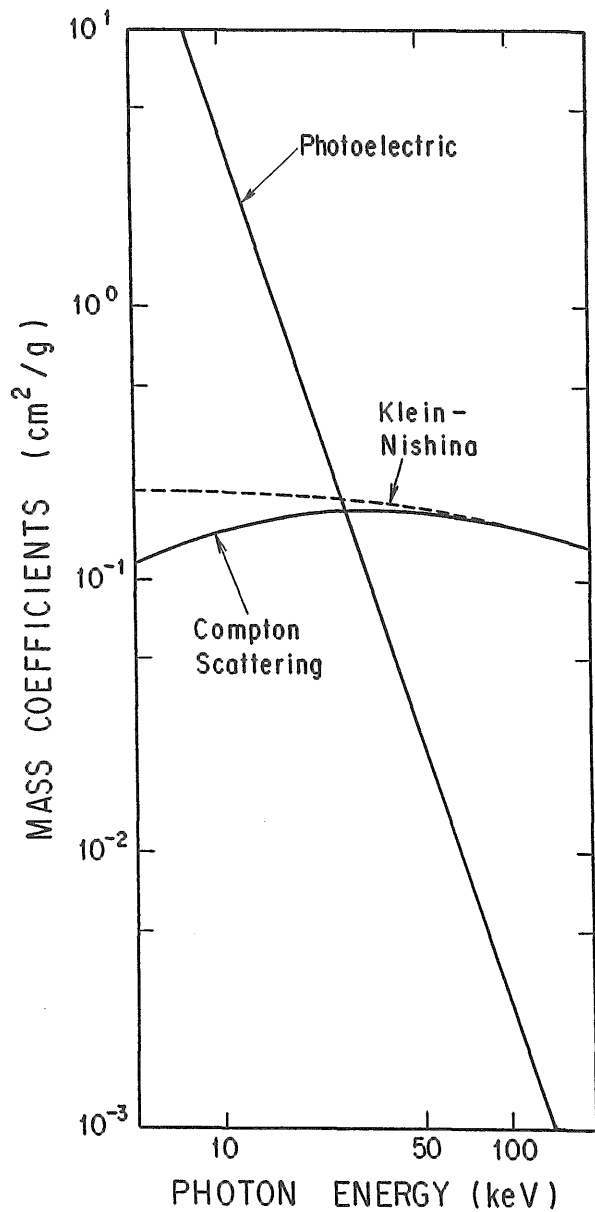


図4.6 人体軟組織の光子断面積

比較している。測定値とのよりよい一致は、深さ1.5、2.0cmで示されているように、PHOTXデータの方で得られている。ここで、さらに詳細に実験値と計算値の一致度を調べるため、両者の比を計算した。結果を図4.7、4.8に示す。深部で誤差が大きいが、30、10keV線源光子に対して、ほとんどの比は誤差内で1に等しい。とくに、10keV光子に対してはビーム軸で15%、周辺部でも25%以内の一致を示した。

4.3 結論

30、10keV単一エネルギー光子に対して、LiF、Li₂B₄O₇:CuTLDを実際に応用し、ファントム内吸

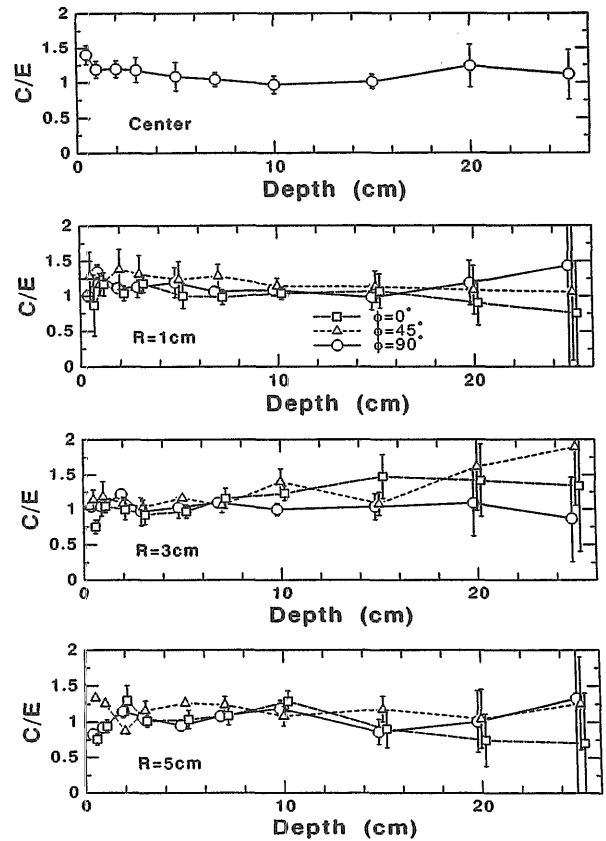


図4.7 図4.4のファントム内吸収線量における計算値の実験値に対する比

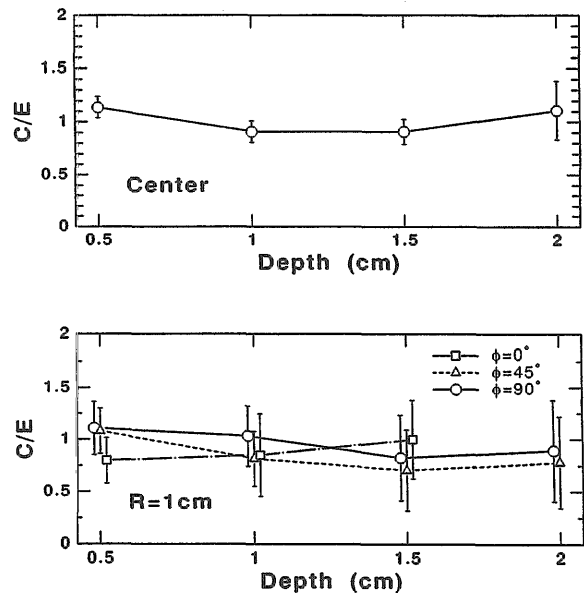


図4.8 図4.5のファントム内吸収線量における計算値の実験値に対する比

収線量分布を測定した。同時に、低エネルギー光子輸送用に拡張されたモンテカルロ輸送計算コードEGS4の計算値と比較を行い、同コードの妥当性を確認した。

応用として、冠状動脈アンジオグラフィ¹⁰⁾、外部被曝線量評価の他に、治療、診断に用いられる放射性医薬品による内部被曝線量の評価にも寄与すると考えられる。

参考文献

1. Nariyama, N., Tanaka, S., Nakane, Y., Namito, Y., Hirayama, H., Ban, S. and Nakashima, H., "Absorbed dose measurements and calculations in phantoms for 1.5 to 50 keV photons," *Health Phys.*, 68, 253-260 (1995).
2. 物理学辞典、培風館 (1986).
3. 大柳宏之、"シンクロトロン放射光の基礎"、丸善 (1996).
4. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement," ICRU Report 44 (1989).
5. International Commission on Radiological Protection, "Report of the task group on reference man," ICRP Publication 23, Pergamon Press (1975).
6. Hubbell, J.H., "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 1269-1290 (1982).
7. Molière, G., "Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I: Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb-Feld," *Z. Naturforsch.*, 2a, 133 (1947).
8. Namito, Y., Ban, S. and Hirayama, H., "Implementation of linearly polarized photon scattering into the EGS4 code," *Nucl. Inst. Meth.*, A332, 277-283 (1993).
9. Hubbell, J.H., Veigele, Wm. J., Briggs, E.A., Brown, R.T., Cromer, D. T. and Howerton, R. J., "Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross section," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 4, 471-538 (1975).
10. Hubbell, J.H. and Øverbø I., "Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross section," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 9, 69-105 (1979).
11. Storm, E. and Israel, H. I., "Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100," *Atomic Data and Nucl. Data*

Tables, A7, 565-681 (1970).

12. "PHOTX Photon Interaction Cross Section Library," DLC-136, Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory (1988)
13. Hirayama, H., Namito, Y. and Ban, S., "Implementation of an L-shell photoelectron and an L X-ray for elements into the EGS4 code," KEK Internal 96-10 (1996).
14. Nariyama, N., Tanaka, S., Nakane, Y., Hirayama, H., Ban, S., Nakashima, H., Namito, Y., Hyodo, H. and Takeda, T., "Dose measurements with TLDs in phantoms for coronary angiography using synchrotron radiation," World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Nice, France (1997).

第5章 低エネルギー光子に対する線量換算係数計算

5.1 計算条件

EGS4コードを用いて、30cm角の平板ファントム前面に、1.5~50keV単一エネルギーの光子ビームが垂直に入射した時の単位光子フルエンス当たりの0.07mm、0.02-0.10mm、10mm深さ線量を計算した¹⁾。ファントム材質として、表5.1に示すICRU球の4、10元素組成を用いた。ICRU10元素は、水素、炭素、窒素、酸素に加え硫黄、カリウム、リンなどの重い元素を若干含むが、密度はどちらも1.0g/cm³である。

表5.1 ファントム構成元素の重量%

Element	H	C	N	O	Na	Mg	P	S	K	Ca	Density (g/cm ³)
ICRU 4元素	10.1	11.1	2.6	76.2							1.0
ICRU10元素	10.2	12.3	3.5	72.9	0.08	0.02	0.2	0.5	0.3	0.007	1.0

検出器として、10keV以下の10mm深さ線量に対してはNext event surface crossing (NESX) 検出器、他はエネルギー沈積検出器を用いた。エネルギー沈積法では、検出器の厚さは平均自由行程の10分の1になるよう線源エネルギーに応じて変化させ、NESX検出器では、散乱位置から来る光子が面検出器を横切る可能性がある毎に、光子束にエネルギーと質量エネルギー吸収係数を乗じて線量を計算した。ICRP Publication 60²⁾は、光子の放射線荷重係数 W_R を1と定義しているので、計算した吸収線量は等価線量に等しい。

モンテカルロ計算のヒストリー数は、統計誤差が1%以下になるように設定した。制動輻射線や蛍光X線

は考慮していない。蛍光X線の影響については、蛍光収量、減衰係数およびエネルギー吸収係数を用いた簡易計算により、重元素を含むICRU10元素ファントムにおいても1%以下であることを確認した。また、光子断面積にはPHOTXライブラリーを、NESX検出器には、Hubbellのエネルギー吸収係数の値³⁾を用いた。電子輸送の影響はないことを確認したので、電子は発生と同時に吸収されるとした。

5.2 他計算との比較 (10~50keV)

表5.2、5.3に、それぞれ0.07mm、10mm深さ線量の計算値と文献値を示す。10keVと15keVの10mm深さ線量を除いて、平板形状の深さ線量は、球形状の深さ線量よりわずかに大きい。両形状の違いは各文献値間の差に比べて重要でないことを表している。すなわち、平板形状の評価の方が、プログラミングが単純で、大きな検出器を用いることによってたやすく小さな統計誤差を得られることから、球形状の評価より有用と考えられる。実際、測定を行う上でも容易なので、ICRU Report 47⁴⁾では個人モニタリング用に平板が採用されている。

5.3 光子断面積間の比較 (10, 15, 20 keV)

平板形状における断面積の吸収線量に対する影響を表5.4に示す。第2、4列は、Storm and Israel⁸⁾の断

面積を用いて計算した深さ線量を、第3、5列は、その深さ線量とPHOTXを用いた深さ線量計算値の比を表す。Storm and Israelの断面積を用いて計算した10mm深さ線量は、PHOTXとStorm and Israelのデータの差が4%ある10keVのエネルギーにおいて、PHOTXを用いた結果より14%ほど過大評価になっている。

5.4 単位フルーエンス当たり深さ線量

5.4.1 計算結果 (1.5~50keV)

表5.5は、0.07mm深さと0.02~0.10mm深さの単位フルーエンス当たり深さ線量を、各ファントムについて比較したものである。10keV以上で、10元素ファントムの線量は4元素ファントムの線量より2%から11%大きい。両深さの違いは10keV以上では重要でない。しかし、それ以下ではエネルギーが減少するにつれて増大し、1.5keVでファクター60と最大になる。これらの結果より、深さは低エネルギー光子に対する皮膚線

表5.4 Storm and IsraelおよびPHOTX断面積を用いた深さ線量の比較

Energy (keV)	0.07 mm depth dose (10 ⁻¹² Svcm ²)	Dose ratio	10 mm depth dose (10 ⁻¹² Svcm ²)	Dose ratio
10	6.93	0.964	0.0729	1.14
15	3.05	0.959	0.828	1.01
20	1.76	0.967	1.04	0.981

表5.2 0.07mm深さ線量の他計算との比較

Energy (keV)	Depth dose at 0.07 mm (10 ⁻¹² Sv cm ²)				
	ICRU (4 elements)			ICRU (10 elements)	
	Williams ⁵⁾ sphere	Nelson ⁶⁾ slab	This work	Nelson slab	This work
10	6.91	6.95	7.19	7.83	7.91
15	3.04	3.16	3.18	3.39	3.51
20	1.72	1.77	1.82	1.90	2.01
30	0.861	0.897	0.907	0.962	1.01
40	0.590	0.623	0.635	0.661	0.695
50	0.491	0.538	0.541	0.550	0.576

表5.5 単位フルーエンス当たり0.07mm、0.02-0.10mm深さ線量

Energy (keV)	Depth dose (10 ⁻¹² Sv cm ²)			
	ICRU (4 elements)		ICRU (10 elements)	
	0.07mm	0.02-0.10mm	0.07mm	0.02-0.10mm
1.5	0.0406	2.35	0.0430	2.45
2	3.31	12.7	3.44	12.9
3	24.6	31.9	24.4	32.0
4	28.7	31.3	29.5	32.6
5	23.7	24.8	25.1	26.2
6	18.3	18.8	19.7	20.1
8	11.1	11.2	12.1	12.2
10	7.19		7.91	
15	3.18		3.51	
20	1.82		2.01	
30	0.907		1.01	
40	0.635		0.695	
50	0.541		0.576	

表5.3 10mm深さの線量の他計算との比較

Energy (keV)	Depth dose at 10 mm (10 ⁻¹² Sv cm ²)					
	ICRU (4 elements)			ICRU (10 elements)		
	Williams sphere	Dimbylow ⁷⁾ sphere	Nelson slab	This work	Nelson slab	This work
10	0.0769	0.0708	0.0673	0.0641	0.0454	0.0427
15	0.846	0.827	0.844	0.818	0.802	0.784
20	1.01	1.00	1.03	1.06	1.05	1.10
30	0.785	0.773	0.812	0.829	0.862	0.892
40	0.614	0.608	0.652	0.664	0.665	0.710
50	0.526	0.518	0.592	0.591	0.593	0.630

表5.6 単位フルーエンス当たり10mm深さ線量

Energy (keV)	Depth dose at 10 mm (10^{-12} Sv cm ²)	
	ICRU (4 elements)	ICRU (10 elements)
6	3.24×10^{-9}	4.55×10^{-10}
8	8.99×10^{-4}	4.21×10^{-4}
10	0.0641	0.0427
15	0.818	0.784
20	1.06	1.10
30	0.829	0.892
40	0.664	0.710
50	0.591	0.630

量評価においてもっとも決定的な因子であることがわかる。表5.6では、10mm深さ線量を同様に4元素と10元素ファントムの間で比較している。元素の違いによる効果は、光子エネルギーが減少するにつれて大きくなっている。

10keV以下の0.07mm深さ線量は、英国放射線単位・測定委員会 (BCRU)⁹⁾ およびGrosswendt¹⁰⁾ によって報告されている。前者は、EGS4で10、7、5keVに対して、また指数関数を用いて簡易計算を2keVまで行い、後者は、house-madeのモンテカルロ光子輸送計算コードを用い、光子減衰係数に1977年のHubbellのデータ¹¹⁾を用いているところが異なる。しかも、当然ながら0.02-0.1mmの深さ線量はどちらも計算を行っていない。

5.4.2 実効線量との比較

ICRP Publication 51では、ICRU 4元素球ファントムに対する周辺線量当量 $H^*(d)$ を実際の放射線防護の指標として導入している。同じ意味で、平板ファントムの深さ線量を1990年のICRP勧告に基づく実効線量と比較することも興味深い。表5.7は、前出の深さ線量と、Zankl¹²⁾ とYamaguchi¹³⁾ がそれぞれ計算した実効線量を比較したものである。実効線量は、最大値を示す前後入射、すなわち身体の長軸に直角に前面から後面に向かって光子が入射する場合を示している。同表からわかるように、平板形状の10mm深さ線量は、実効線量を10~50keVのエネルギーにわたって上回っている。他方、10keV以下では比較すべき実効線量のデータがない。表5.5と5.6を比較してみると、0.02~0.1mm深さの皮膚線量は、10mm深さ線量より10keV以下で100倍以上大きく、また、その皮膚線量は、3keV付近で最大値をとることがわかった。一方、ICRP Publication 60では、等価線量から実効線量を得るの

表5.7 10mm深さ線量と前後入射時の実効線量の比較

Energy (keV)	Depth dose (10^{-12} Sv cm ²)	Energy (keV)	Zankl ¹²⁾ (10^{-12} Sv cm ²)	Energy (keV)	Yamaguchi ¹³⁾ (10^{-12} Sv cm ²)
10	0.0641	10	0.0483		
15	0.818	15	0.125	17	0.103
20	1.06	25	0.264		
30	0.829	35	0.324	29.5	0.253
40	0.664			45	0.322
50	0.591	50	0.359		

に、皮膚に対して0.01の組織荷重係数をあてている。以上より、10keV以下の低エネルギー光子に対する線量限度は、皮膚線量によって決定されると考えられる。

5.5 結論

EGS 4 コードを用いて、ICRU 4、10元素平板ファントム内の深さ線量を、1.5keVから50keV光子に対して、最新の光子断面積データであるPHOTXを用いて計算した。実効線量との比較から、平板ファントムにおける10mm深さ線量は10keV以上のエネルギー領域において実効線量より大きいことを示した。さらに、10keV以下のエネルギー領域では、皮膚線量が実効線量の大きさを決定することが示唆された。結果として、10keV以下のエネルギー領域においては、10mm深さ線量の代わりにICRU 4元素平板ファントム中の0.02mm-0.1mm深さ線量を、ICRP Publication 60が定義した実効線量の実際的な指標として推奨できることを明らかにした。

参考文献

1. Nariyama, N., Tanaka, S., Nakane, Y., Namito, Y., Hirayama, H., Ban, S. and Nakashima, H., "Absorbed dose measurements and calculations in phantoms for 1.5 to 50 keV photons," Health Phys., 68, 253-260 (1995).
2. International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991).
3. Hubbell, J.H., "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", Int. J. Appl. Radiat. Isot., 33, 1269-1290 (1982).
4. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Measurement of dose equivalents from external photon and electron radia-

- tions," ICRU Report 47 (1992).
5. Williams, G., Swanson, W.P., Kraph, P. and Drexler, G., "Calculation and analysis of photon dose equivalent distributions in the ICRU sphere," GSF Bericht S-958 (1983).
 6. Nelson, R.F. and Chilton, A.B., "Low-energy photon dose deposition in tissue slab and spherical phantoms," NUREG/CR-3425 (1983).
 7. Dimbylow, P. J. and Francis, T.M., "The calculation of dose equivalent quantities in the ICRU sphere for photon energies from 0.01 to 10 MeV," Radiat. Prot. Dosim., 9, 49-53 (1984).
 8. Storm, E. and Israel, H. I., "Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100," Atomic Data and Nucl. Data Tables, A7, 565-681 (1970).
 9. British Committee on Radiation Units and Measurements, "Conversion from air kerma to directional dose equivalent for photons below 10 keV," Radiat. Prot. Dosim., 27, 267-269 (1989).
 10. Grosswendt, B., "Conversion factors for the IAEA cube phantom for external photon irradiation," Radiat. Prot. Dosim., 29, 177-182 (1989).
 11. Hubbell, J.H., "Photon mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for H, C, N, O, Ar, and seven mixtures from 0.1 keV to 20 MeV," Radiat. Res., 70, 58-81 (1977).
 12. Zankl, M., Petoussi, N. and Drexler, G., "Effective dose and effective dose equivalent-the impact of the new ICRP definition for external photon irradiation," Health Phys., 62, 395-399 (1992).
 13. Yamaguchi, Y., "Dose conversion coefficients for external photons based on ICRP 1990 Recommendation," J. Nucl. Sci. Tech., 31, 716-725 (1994).

第6章 総括

本研究では、低エネルギー光子に対する線量評価法の発展を目的に、理論、開発および応用面にわたって、実験、解析を行った。

[理論]

空洞理論は、媒質中における線量計の応答を定量的に評価する理論であり、X線、 γ 線の線量測定の基本となる。その検証実験は従来、主に ^{60}Co γ 線に対して行われ、100keV以下のX線に対してはほとんど行われてこなかった。そこで、その低エネルギー光子に対する適用性を調べるため、熱蛍光線量計(TLD)を

テフロン、アルミニウム、銅、金箔ではさみ、X線発生装置からの30~200keV X線を照射することにより、その応答特性を測定した。その結果をBurlinの空洞理論に基づく計算値と比較したところ、テフロン、アルミニウム、銅の値が10%以内で一致したにも関わらず、金の値は38~48%の差異を示す結果を得た。そこで、モンテカルロ光子・電子輸送計算コードITSの計算値が上記の実験値と一致することを確認した上で、同コードを用いて金に対する応答値が異なった原因を調べた。

その結果、テフロン、アルミニウムの場合、TLD線量に対する媒質からの2次電子の寄与が小さいため、fの値は加重係数の精度にあまり依存しないが、金の場合はその寄与が大きく、加重係数の評価精度に大きく依存することを明らかにした。つまり、空洞が"大きい"か"小さい"かは2次電子の減衰の程度にあるのではなく、TLD線量に及ぼす影響の度合いにあることを解析により示した。そして、問題を解決するために、加重係数の計算において媒質からの2次電子の減衰を指数関数近似するのではなく、その電子がすべてTLD中に吸収される点に着目し、エネルギー透過・反射係数を用いてfの値を直接計算する方法を提案した。同方法による計算値は、実験値、モンテカルロ計算値とよく一致することを確認した。また、その適用範囲を2次電子の実効エネルギーを指標に、光子エネルギー、TLD厚さに関して示した。

[開発・測定]

既存の放射光施設あるいはX線取扱施設において利用される個人線量計は、30keV以下の光子に対する利用が考慮されていない。そこで、放射光をはじめとする低エネルギー領域の線量測定に応用するため、以下の研究を行った。

まず、実験を進める上で、放射光の大きな強度を精度よくモニターする測定手段を確立する必要がある。そのため、絶対線量を補正なしに直接測定できる透過型自由空気電離箱および全吸収熱量計を開発し、3%以内で互いの値が一致することを確認した。

線量計としてはTLDを選択し、その基本データであるグロー曲線(温度対蛍光量曲線)を測定するため、 $\pm 2\%$ の精度で $0.5\sim 5^\circ\text{C}/\text{s}$ の直線加熱を行う高性能なリーダーを独自に開発した。そして線量計として応用するためには、エネルギー、線量応答値が必須であることから、シンクロトロン放射光からの10~40keV単色X線を、人体軟組織等価な組成をもつフッ化リチウム(LiF)、ホウ酸リチウム($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$)、酸化ベリリウム(BeO)、そして高原子番号をもち環境線量測定用の硫酸カルシウム($\text{CaSO}_4:\text{Tm}$) TLDに照射し、そのグロー曲線の面積を積分することにより、各々のエネルギー、線量応答を以下のように得た。

・フッ化リチウム

エネルギー応答は、6%、主ピークと高温ピークはそれぞれ4%、17~41%空洞理論値より大きく、これより人体軟組織中のエネルギー応答は、 ^{60}Co γ 線比で1.27~1.55と考えられる。また、直線性は5 Gy付近までであり、その後、supralinearityを示した。その最大値は、 ^{60}Co γ 線、30keV、10keV X線と光子エネルギーが小さくなるほど4.3、2.8、2.0と小さい値を示した。

グロー曲線は複数のピークからなり、低エネルギーほど、また高線量ほど高温部のピークが大きく成長した。

・ホウ酸リチウム

エネルギー応答は、空洞理論値より8%~20%小さい結果を示した。これより、人体軟組織中のエネルギー応答は、0.71~0.85と考えられる。また、 ^{60}Co γ 線、10keV X線に対して測定した線量応答は、LiFと異なり、supralinearityを示さなかった。直線領域は、 ^{60}Co γ 線の650Gyに対して、10keV X線は300Gyまでしか観察されなかった。

グロー曲線は、主ピークと高温ピークからなり、線量が高くなるほどその高温ピークは飽和し次第に小さくなること、ピーク位置、半値幅の測定より明らかになった。

・酸化ベリリウム

エネルギー応答は、空洞理論値より70%も大きい値を示した。また、ガラスからの2次電子、蛍光の自己吸収の影響は無視できることを確認した。これより、人体軟組織中のエネルギー応答は、LiFと同じ1.28~1.55と考えられるが、30keV以下では、ガラス、素子による光子減衰が大きい。直線領域は、 ^{60}Co γ 線、10keV X線ともに2.6Gyまで見られ、supralinearityの程度は、 ^{60}Co γ 線の3.7に対し、10keV X線は1.8であった。

グロー曲線は、見かけ上一つであるが、線量が高くなるほどピーク位置は高温側へシフトし、半値幅も大きくなった。

・硫酸カルシウム

エネルギー応答は、空洞理論値より6%~37%大きい値を示した。直線領域は、 ^{60}Co γ 線に対して0.5Gyまで、40keV X線に対しては1 Gyまで観察され、supralinearity時の線量応答は、 ^{60}Co γ 線の3.1に対し、40keV X線は1.6であった。

グロー曲線は、多くのピークからなり、低エネルギーに対して、また高線量の場合も高温部のピークが大きく増大することを観察した。

これらの結果より、エネルギー応答、直線性、また光子減衰の点から、個人線量計として、ホウ酸リチウ

ムTLDが放射光に対して優れた特性を示すことが明らかになった。また、LiFも、照射線量が低い場合には有効であることがわかった。

また、TLDは、エネルギー応答と空洞理論値との大小関係、supralinearityの有無、グローピーク数により、2つのタイプ、すなわち、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ タイプとLiFタイプに分かれることが明らかになった。

さらに、光子に対するLET計算により、光子エネルギーが小さいほど、LETは大きくなることを定量的に示し、グロー曲線やsupralinearityの光子エネルギー依存性は、LETの影響によることが示唆された。

[応用]

実際に、個人線量計として応用するためには、ファントムにおける実験が不可欠である。また、低エネルギー X線の線量評価、たとえばアンジオグラフィ（冠動脈撮像法）など医療照射の被曝評価、あるいは計算コードのためのベンチマーク実験には、ファントムの深部線量分布が必須である。

そこで、人体軟組織等価な組成をもつ30cm角の均質ファントムに、放射光からの10、30keV単色 X線を照射し、薄型のLiF、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ 組織等価TLDを用いて、内部の吸収線量分布を測定した。その測定値と、偏光、コンプトン散乱における電子束縛効果など低エネルギー光子用に拡張された光子・電子モンテカルロ輸送計算コードEGS4の計算値を比較した結果、偏光の影響も含めて、両者はよく一致することを確認した。すなわち、低エネルギー領域における同コードおよび用いた光子断面積PHOTXの線量計算に対する精度を確認した。

そのモンテカルロ計算コードEGS4を用いて、ICRU4、10元素平板ファントム内の0.07mm、0.02-0.1mm、10mm深さ線量を、1.5keVから50keV光子に対してそれぞれ計算した。体系は、球でなくとも平板で十分なることを確認し、平板ファントムの10mm深さ線量は、10keV以上のエネルギー領域において実効線量より大きく、安全側に評価することを示した。さらに、10keV以下のエネルギー領域においては、皮膚線量が実効線量の大きさを決定することが示唆された。結果として、ICRU4元素平板ファントム中の0.02mmから0.1mm深さ線量が、10keV以下のエネルギー領域において10mm深さ線量の代わりにICRP Publication 60で定義された実効線量の実際的な指標として適当であることを明らかにした。

本研究は、従来系統的に調べられてこなかった低エネルギー光子に対する線量評価を、理論、実験および解析の面から検討を行ったところに意義がある。

理論的には、従来、漠然と問題があると考えられてきた低エネルギー領域において、系統的に吸収線量測

定方法の基礎となる空洞理論のための実験、解析を行い、その加重係数の物理的意味を明らかにすることにより、同理論の適用範囲について検証し、また新たな適用方法を提案しその範囲を広げた点で、この分野の測定に大きく寄与するものである。

実験面の成果では、放射光の絶対強度を測定する技術を実証し発展させたこと、直線加熱型のTLDリーダーを独自に開発し、単色X線を照射したTLDの応答測定値をグロー曲線に基づいてまとめたことが挙げられる。TLDの応答特性は従来から数多く測定されてきたが、10-40keVの単一エネルギー光子に対する初めての測定値という点で、標準のデータを提供した。これらは、TLDを低エネルギー光子に適用する場合に利用される。また、実際にLiF、Li₂B₄O₇:CuTLDを用いて、30、10keVの単一エネルギー光子に対するファントム内線量分布を測定したことは、同TLDの低エネルギーにおける線量測定への応用を実証し、また、放射光による被曝線量に関して重要なデータを提供した。

解析面では、汎用のモンテカルロコードITS、EGS4の低エネルギー領域における光子線量計算への適用性を実験値と比較することにより確認し、とくに、EGS4については低エネルギー領域に拡張された同コードの妥当性をはじめて実証し、偏光を含む放射光の挙動を正確に計算できることを示した点に価値がある。また、ICRPの報告に基づき、10keV以下の光子に対する0.02-0.1mm深さ線量評価を、実験的に検証したコードを用いて計算し、0.07mm深さ線量との相違を示した。また、実効線量との比較から、0.02-0.1mm深さ線量を10keV以下における実効線量の実際的な指標として示したことは、低エネルギー光子の被曝評価において一つの指針を与えたといえる。

なお、本成果は、放射光施設の大強度化にとまらぬ、ますますその利用価値も高まると思われる。さらには、放射光施設のみならず、既存の原子力関連施設における被曝線量、ガンマ発熱評価、あるいは医療用X線、RIによる線量評価に対しても応用できる。

今後の課題としては、TLDのグロー曲線や発光効率、supralinearityのLET依存性などのメカニズム説明が挙げられる。そのためには、ルミネセンス光の波長測定などに加えて、吸収線量のようなマクロなレベルではなく、マイクロなレベルのエネルギー付与を評価する手法が必要になると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり幾多のご助言とご激励をいただいた日本原子力研究所企画室の田中俊一室長に心よりの感謝の意を表します。また、同研究所の中島宏副主任研究員、中根佳弘氏、坂本幸夫副主任研究員、笹

本宣雄主任研究員、浅野芳裕氏、高エネルギー加速器研究機構の平山英夫教授、伴秀一助教授、波戸芳仁助手には同じ実験グループとして、放射光実験施設の河田洋助教授、渡辺信久助手にはビームライン担当者として、また、熱蛍光線量計の⁶⁰Coガンマ線、X線発生装置による照射では、日本原子力研究所の大久保隆氏、上沢輝夫氏、吉澤道夫氏にそれぞれお話をいただきました。篤く感謝いたします。また、研究遂行にあたりご理解、ご激励をいただいた船舶技術研究所原子力技術部の山路昭雄部長、植木紘太郎室長に感謝いたします。最後に、本論文をまとめるにあたり、ご指導いただいた大阪大学の山本幸佳教授に感謝の意を表します。

付録

ICRP、ICRU関係用語

等価線量

ICRPの1977年勧告の中で定義された線量当量と基本的に変わらないものであるが、線質係数に代わって放射線荷重係数を用いる点が異なる。吸収線量にこの放射線荷重係数を乗じて求められる。

実効線量

ICRPの1990年勧告の中で、実効線量当量の代わりに定義された線量用語で、放射線による確率的影響を評価する目的で導入された。臓器、組織の放射線感受性の相対値で荷重した等価線量をすべての臓器、組織で積分したもので、

$$E = \sum w_T \sum w_R D$$

の式から求められる。ここで、 w_T は組織荷重係数、 w_R は放射線荷重係数、 D は吸収線量を表す。

表 7.1 放射線荷重係数

放射線の種類、エネルギー	放射線荷重係数
光子	1
電子、 μ 中間子	1
中性子	E<10keV
	10keV<E<100keV
	100keV<E<2MeV
	2MeV<E<20MeV
	20MeV<E
陽子(反跳陽子を除く、E>2MeV)	5
α 粒子、核分裂片、重い原子核	20

組織荷重係数

実効線量の中で、臓器あるいは組織毎の線量当量に乗じる係数が組織荷重係数である。ICRP1990年勧告では、13の臓器および組織について組織荷重係数が与えられている（表 1.1）。

放射線荷重係数

等価線量において、身体に入射する放射線の種類、エネルギーに応じて吸収線量に乗じる。

周辺線量当量

実用的なモニタリング量として、ICRU（国際放射線単位測定委員会）が1985年に導入した。整列拡張場においてICRU球の深さdに生じる線量当量である。強透過性の放射線に対して、d=10mmがICRUから勧告されている。ここで、強透過性の放射線とは、皮膚線量当量が実効線量当量の10倍以下となる放射線を指す。また、整列拡張場とは、フルーエンスとエネルギー分布は下記の拡張場と同じ定義であるが、フルーエンスを単一の方向に整列し直した放射線場を指す。

方向性線量当量

周辺線量当量と同時に導入され、ある拡張場においてICRU球のある方向 Ω 上にある深さdに生じる線量当量である。弱透過性の放射線に対して、皮膚で0.07mm、目で3mmの深さが勧告されている。拡張場とは、フルーエンスとその角度、エネルギー分布が、問題となる体積中で、評価点と同じ値をとると仮定した放射

線場である。

個人線量当量

ICRU47で導入された個人モニタリング線量。ある適当な深さdでの人体軟組織の線量当量。弱透過性の放射線に対して、皮膚で0.07mm、目で3mmの深さが、強透過性の放射線に対しては、d=10mmがICRUから勧告されている。

計測実用量

放射線防護で用いられ、簡単なモニター機器で測定でき、過小評価しないことを確実にするため制限値より十分に安全側の評価を与える量。

参考文献

1. International Commission on Radiological Protection, "国際放射線防護委員会の1990年勧告", (社)日本アイソトープ協会 (1991).
2. 草間朋子(編), "ICRP1990年勧告—その要点と考え方—", 日刊工業新聞社 (1991).
3. 「低線量放射線の影響と安全評価」研究専門委員会, "原子力関係者のための放射線の健康影響用語集", (社)日本原子力学会 (1992).
4. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Quantities and units in radiation dosimetry," ICRU Report 51 (1993).