

## 低エネルギー光子に対する線量評価の研究

成山 展照\*

Study on dose estimation for low energy photons

By

Nobuteru Nariyama

### Abstract

Recently, the use of low energy photons from ultraviolet to several tens of keV has been extensively increased in synchrotron radiation and free electron laser facilities, where the beam is almost completely parallel and the intense photon sources several orders higher than that of conventional x-ray machines are available. In this context, the development of dose evaluation for low energy photons has been crucial for radiation protection, medical application such as coronary angiography, and heat stress in optical devices of the beam filters and monochromators. From this point, in this study the validity of a theory used for dose evaluation was examined for low energy photons, dosimeter responses of thermoluminescent dosimeters (TLDs) were measured using monoenergetic photons from synchrotron radiation, and furthermore by applying those results to dose measurements the dose estimation techniques were improved.

Cavity theory which is used for the estimation of the dosimeter response is fundamentally necessary for photon dose measurements. For the examination of the validity, the responses of LiF TLDs sandwiched between two Teflon, aluminum, copper and gold foils were measured for 30 to 200 keV x rays from a conventional x-ray machine and compared with the calculated based on the theory. The result showed that the discrepancies were 48% for gold, while 15% for the other media. By using a Monte Carlo transport code ITS, the response in gold was found to depend largely on the accuracy of the weighting factors used in the theory even for low energy photons because of the large influence of the secondary electrons from the medium to the TLD dose. The result clarified that the criteria whether a cavity was large or small were related to the degree of the influence of the electrons from the medium to the TLD dose, not the degree of the attenuation of the electron fluence in the TLD. For the dosimeter response, noticing that the electrons incident on the TLD are all absorbed in that for the low energy photons, another calculation method was proposed using energy transmission and reflection coefficients. The response calculated with the method agreed with the measured even for gold.

To establish the monitoring technique for the intense source of synchrotron radiation, doses measured with a parallel-plate free-air ionization chamber were compared with those with a total absorption microcalorimeter for 10-40 keV monoenergetic photons from synchrotron radiation. As a result, the agreement was obtained within 3% so that the accuracy of the chamber as a monitor was confirmed.

---

\* 原子力技術部

原稿受付 平成10年1月13日

審査済 平成10年3月11日

For the measurement of the response characteristic of TLDs for low energy photons, LiF, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, BeO and CaSO<sub>4</sub>:Tm TLDs were irradiated with 10-40 keV monoenergetic photons from synchrotron radiation. The glow curves were recorded using a thermoluminescence (TL) reader developed with a linear heating of 0.5-5°C/s with an accuracy of 2% and by integrating the area the energy and dose responses were obtained. As a result, the energy responses were found not to agree with the calculated: the measured values were larger by 6% for LiF, 70% for BeO and 8-24% for CaSO<sub>4</sub>:Tm, and smaller by 8-20% for Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu. Moreover, it was shown that the linear region depended on photon energy: that extends to 0.5 Gy for <sup>60</sup>Co gamma rays and 1 Gy for 40 keV x rays for CaSO<sub>4</sub>:Tm. For Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, the linearity extends over 650 Gy for <sup>60</sup>Co gamma rays, while 300 Gy for 10 keV x rays. On the other hand, LiF and BeO exhibited the linearity to 5 Gy and 2.6 Gy, respectively, independent of photon energy. Furthermore, except for Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, supralinearity was observed that the dose response increases above the linear region, where the maximum dose response decreased with photon energy from <sup>60</sup>Co gamma rays to 30 and 10 keV x rays. Calculations of LET (Linear Energy Transfer) for photons showed that the LET value increased with decreasing photon energy, which suggested that the dependence of supralinearity on photon energy and the disagreement between the energy response and the cavity theory were attributed to LET effect.

Using the LiF and Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu TLDs, absorbed doses were measured in a tissue-equivalent 30-cm cubic phantom irradiated with 10 and 30 keV monoenergetic photons from synchrotron radiation. Owing to the effect of linear polarization, dose dependence on azimuthal angle around the beam axis was observed with a factor of 3.5 at maximum. The measured doses agreed with the calculated with a Monte Carlo transport code EGS4: the validity of the code and photon cross section data PHOTX was confirmed for dose calculations in the low energy region.

Using the EGS4 code, the depth doses at 0.07, 0.02-0.10 mm and 10 mm in ICRU 4- and 10-element phantoms were calculated for 1.5 to 50 keV photons. The dose at 0.02-0.10 mm depth has been recommended as the estimated depth for the stochastic effect of skin in ICRP Publication 60. The calculated result showed that the depth dose at 0.07 mm and 0.02-0.10 mm became maximum at 3 to 4 keV, below which the dose decreases owing to photon attenuation. On the other hand, between the sphere and slab geometry no large discrepancies were observed, that is, the slab geometry is better owing to the simplicity. As a result, it became clear that below 10 keV the depth dose at 0.02-0.10 mm in slab was a practical index of effective dose defined in ICRP Publication 60 instead of the 10 mm depth dose.

From the results, it is concluded that an application method of cavity theory and response characteristics of the TLDs were clarified for low energy photons: technique for the dose estimation was developed and the accuracy was improved. Moreover, the dose conversion factors were provided below 10 keV, which proposed guidelines for the point of view of radiation protection for the low energy photons.

## 要 旨

近年、放射光の利用を目的としたシンクロトロン加速器や自由電子レーザー施設が国内外で増加しつつある。それらは、数十keV以下の低いエネルギーをもつ光子でありながら、通常のX線発生装置より桁違いの強度をもち、指向性が非常に優れている点で、従来の放射線にはなかった特徴を有する。このため、作業従事者に対する放射線防護上、アンジオグラフィ（冠状動脈撮像法）をはじめとする医療利用上、あるいは窓材、モノクロメータなど材料における熱負荷上、低エネルギー光子に対する精度よい線量評価が重要になってきた。このような観点から、本研究では、低エネルギー光子に対する線量評価に必要な理論の検証お

よび線量計の応答特性測定を行い、さらにそれらを線量測定に実際に応用することにより、線量の評価技術を向上させた。

まず、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る空洞理論は、光子の線量測定の基本となる。そのため、X線発生装置からの30～200keV X線を用いてテフロン、アルミニウム、銅、金媒質中の熱蛍光線量計 (TLD) 応答を測定し、空洞理論値との比較を行った。その結果、テフロン、アルミニウム、銅の場合には15%以内で両者は一致したにもかかわらず、金の場合には48%ほど異なった。そこで、光子・電子モンテカルロ輸送計算コードITSを用いてシミュレーションを行い、金の場合にはTLD線量に対するその2次電子の寄与が大きいいため、応答値が加重係数の

精度に大きく影響されること、つまり、空洞が“大きい”か“小さい”かの基準は、一般に考えられているように媒質中で発生した電子フルーエンスのTLD中における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明らかにした。さらに、低エネルギー領域では媒質から発生する2次電子はTLD中ですべて吸収される点に着目し、エネルギー透過、反射係数を用いて線量計の応答値を計算する方法を提案し、金の場合も含めて実験値と十分に一致することを示した。

次に、強度の大きな放射光に対するモニタリング技術を確立するため、その絶対強度を補正なしに測定できる全吸収型マイクロ熱量計を開発し、平行平板自由空気電離箱の値と比較を行った。その結果、±3%以内で両者の値が一致することを確認し、モニターとしての同電離箱の精度を評価した。さらに、TLDの基本データであるグロー曲線(温度-蛍光量曲線)を測定するため、±2%の精度で0.5~5°C/sの直線加熱を行うTLDリーダーを開発した。

このリーダーを用いて、TLDの低エネルギー領域における応答特性を測定するため、放射光からの10~40keV単一エネルギー光子をフッ化リチウム、ホウ酸リチウム、酸化ベリリウムおよび硫酸カルシウム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、エネルギー、線量応答値を得た。

その結果、エネルギー応答測定値は空洞理論値と一致せず、フッ化リチウムで6%、酸化ベリリウムで70%、硫酸カルシウムで8~24%測定値の方が大きく、また、ホウ酸リチウムでは8~20%測定値の方が小さくなることがわかった。また、直線領域が光子エネルギーに依存することを明らかにし、硫酸カルシウムでは $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対して0.5Gyまで、40keV X線に対しては1 Gyまで直線性が広がり、ホウ酸リチウムでは $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対して650Gyまである直線性が、10keV X線に対しては300Gyまでしか観察されなかった。他方、フッ化リチウム、酸化ベリリウムは、光子エネルギーにかかわらず、それぞれ5 Gy、2.6Gyまで直線性を示した。これらのエネルギー、線量応答値は、TLDを低エネルギー領域に应用する際に利用される。なお、ホウ酸リチウム以外は、直線領域以上で線量応答が増大するsupralinearity(超直線性)を示し、その最大値は、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線、30keV、10keV X線と光子エネルギーが低くなるほど小さい値を示した。そこで、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、supralinearityの光子エネルギー依存性あるいはエネルギー応答と空洞理論値との不一致は、LETの影響によることを示唆した。

次に、この応答特性を測定したフッ化リチウム、ホ

ウ酸リチウムTLDを用いて、放射光からの10、30keV単一エネルギー光子を人体軟組織等価な30cm角の立方体均質ファントムに照射し、内部の吸収線量分布を測定した。偏光の影響により、ビーム軸周辺部において最大3.5倍の方位角依存性が得られるなど、放射光被曝時の線量分布を明らかにした。さらに、その測定値と、コンプトン散乱における電子束縛効果および直線偏光を取り扱えるよう改良された光子・電子モンテカルロ輸送計算コードEGS4の計算値を比較してその一致を確認し、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評価した。

さらに、同コードを用いて、ICRU 4、10元素平板ファントム内の0.07 mm、10 mm深さ線量と、ICRP Publication 60により皮膚の確率的影響の評価深さとして報告された0.02-0.10 mm深さ線量を、1.5~50keV光子に対して計算した。その結果、0.07 mm、0.02-0.10 mm深さ線量は、3~4 keV付近で最大値をとりそれ以下では光子減衰により線量が減少すること、球体系の計算値との比較により体系は計算の簡便な平板で十分なこと、さらには、10keV以下では0.02-0.10 mm深さ線量が10 mm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。

これらの研究成果から、低エネルギー光子に対する空洞理論の適用方法およびTLD線量計の応答特性が明らかになり、線量評価の技術が発展し、その精度が向上した。また、10keV以下の線量換算係数が整備され、低エネルギー光子に対する放射線防護の考え方に指針が与えられた。

## 目次

Abstract .....	1
要旨 .....	2
記号表 .....	4
第1章 序論 .....	5
1.1 本研究の目的 .....	5
1.2 本研究の概要 .....	8
参考文献 .....	8
第2章 低エネルギー光子に対する空洞理論の適用性 .....	9
2.1 空洞理論 .....	9
2.1.1 Burlin以前の空洞理論 .....	9
2.1.2 Burlinの理論 .....	10
2.1.3 空洞・媒質間の組成が大きく異なる場合の加重係数 .....	11
2.2 X線照射実験 .....	12
2.2.1 方法 .....	12
2.2.2 箔厚さ決定法 .....	12

2.2.3	TLD校正	14
2.2.4	f 値測定結果	15
2.3	実験値と空洞理論値の比較	15
2.4	モンテカルロ輸送計算	15
2.4.1	f 値計算	15
2.4.2	実験とITS計算における f 値の差異の原因	16
2.4.3	加重係数の計算	16
2.4.4	電子フルーエンス減衰係数の計算	16
2.4.5	f 値の加重係数精度に対する感度	17
2.5	f 値の新たな計算法	18
2.5.1	式の導出	18
2.5.2	式の適用範囲	18
2.6	結論	20
	参考文献	21
第3章	低エネルギー光子に対する TLD 応答特性	22
3.1	放射光強度モニタリング技術の開発	22
3.1.1	全吸収型マイクロ熱量計	22
3.1.2	自由空気電離箱	23
3.2	直線加熱 TLD リーダーの開発	24
3.2.1	Randall と Wilkins の式	24
3.2.2	システム	24
3.2.3	加熱特性	24
3.2.4	光フィルターと光電子増倍管	25
3.3	放射光を用いた TLD 応答測定	26
3.3.1	エネルギー、線量応答の定義	26
3.3.2	実験条件	26
3.3.3	フッ化リチウム(LiF)測定結果	29
3.3.4	ホウ酸リチウム(Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu)測定結果	31
3.3.5	酸化ベリリウム(BeO)測定結果	32
3.3.6	硫酸カルシウム(CaSO <sub>4</sub> :Tm)測定結果	33
3.3.7	エネルギー、線量応答の測定結果	35
3.3.8	光子に対する LET 計算	35
3.4	結論	37
	参考文献	37
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	39
4.1	放射光実験	39
4.1.1	線源条件	39
4.1.2	線量分布測定	39
4.1.3	ファントム内吸収線量への変換	40
4.1.4	変換にともなう補正	41
4.1.5	測定結果	41
4.2	モンテカルロ解析	41
4.2.1	EGS4 コード	41
4.2.2	計算方法	42

4.2.3	計算値と測定値の比較	42
4.3	結論	43
	参考文献	44
第5章	低エネルギー光子に対する線量換算係数計算	44
5.1	計算条件	44
5.2	他計算との比較 (10~50keV)	45
5.3	光子断面積間の比較 (10, 15, 20 keV)	45
5.4	単位フルーエンス当たり深さ線量	45
5.4.1	計算結果 (1.5~50keV)	45
5.4.2	実効線量との比較	46
5.5	結論	46
	参考文献	46
第6章	総括	47
	謝辞	49
付録	ICRP,ICRU関係用語	49

## 記号表

## 第2章

A(E <sub>r</sub> , T)	光子により発生した初期電子スペクトル
D	吸収線量
e	電子の電荷
g	空洞の平均行程長さ
J	単位質量当たり電子が生成する電離イオンの電荷
P <sub>K</sub>	K殻で光電効果がおこる割合
R	電子CSDA飛程
S <sub>mg</sub>	電子に対する媒質と気体の質量阻止能比
S <sub>c</sub>	電子質量衝突阻止能
t	厚さ
W <sub>g</sub>	気体中でイオン対を作るのに必要な平均エネルギー
Y <sub>K</sub>	K殻蛍光収量
β	電子の実効質量吸収係数
η <sub>tr</sub> , η <sub>ref</sub>	エネルギー透過、反射係数
μ <sub>a</sub>	光子線減衰係数
μ <sub>en</sub> /ρ	質量エネルギー吸収係数
μ <sub>τ</sub>	光電効果による減衰係数
ρ	密度
Φ <sub>w<sub>r</sub></sub> <sup>e</sup> , Φ <sub>c</sub> <sup>e</sup>	平衡電子フルーエンス (媒質、空洞発生)
Φ <sub>w<sub>r</sub></sub> , Φ <sub>c</sub>	空洞内平均電子フルーエンス (媒質、空洞発生)

## 第3章

a	ビーム断面積
A	光子減衰率
C	熱容量
d(L)	吸収線量分布

E	活性化エネルギー
$E_v$	集電場値
$E_x$	照射線量率
h	熱伝達係数
$I_0$	平均イオン化ポテンシャル
$I_s$	飽和電流値
k	ボルツマン定数
$K_h$	湿度補正係数
$K^*(T', T)$	エネルギー $T'$ の電子がエネルギー $T$ の2次電子を発生させる確率
l	電極長
P	熱出力
s	頻度因子
$S_{tot}$	全電子質量阻止能
t(L)	track length分布
Z	原子番号
$\beta$	加熱速度

#### 第4章

d	光子行程長さ
$F(x, Z)$	原子形状因子 (xは運動量輸送、Zは原子番号) $x = \sin(\theta / 2) / \lambda$ $\theta$ : 散乱極角, $\lambda$ : 光子波長
$k_0, k$	入射、散乱光子エネルギー
P	偏光度
$S(x, Z)$	非干渉性散乱関数
$\sigma_C$	コンプトン散乱断面積
$\sigma_{KN}$	Klein-Nishina断面積
$\sigma_R$	レイリー散乱断面積
$\sigma_T$	トムソン散乱断面積

#### 第5章

$H_p$	個人線量当量
$H^*$	周辺線量当量

### 第1章 序論

#### 1.1 本研究の目的

近年、フォトンファクトリー<sup>1)</sup>に代表される、放射光の利用を目的としたシンクロトロン加速器や自由電子レーザー施設が国内外で増加しつつある。電子シンクロトロン加速器とは、円形の閉軌道で電子を高周波電磁場で加速、あるいは長時間一定のエネルギーで軌道内に蓄積する装置であり、電子軌道を電磁石で曲げるときに放出される電磁波が放射光である。その放射線は、紫外領域から数十keVまでの低いエネルギーをもつ光子でありながら、通常のX線発生装置より数桁大きい強度をもち、指向性が非常に優れている点<sup>2)</sup>で、従来の放射線にはなかった特徴を有する。こうした利

点から、材料、物性分野における構造解析、リソグラフィ、生物に対する放射線影響、医学における診断など多方面において、その利用が行われている。とくに、最近では第3世代放射光と呼ばれるESRF<sup>3)</sup>、APS<sup>4)</sup>、SPring-8<sup>5)</sup>といった6~8 GeVの大型施設の運転によって、さらに大強度、高エネルギーのビームが得られることになり、ますますその利用範囲も広がるものと期待されている。

一方、その利用に付随して新たな問題も生じている。第1に、放射線安全上の問題である。エネルギーが低いといえども、放射光はX線である。実験者に対する放射線防護の対策を行う必要があるが、こうした大強度で低エネルギーが主になる施設は従来なかったことから、線量評価に必要な技術およびデータが十分でない。また、アンジオグラフィ(冠状動脈撮像法)に放射光を用いる研究が進められているが<sup>6)</sup>、そうした医療診断時の被曝線量評価についても同じことがいえる。さらに、施設に目を移せば、その大型化にともない、窓材、モノクロメータなど光学素子の熱負荷<sup>7)</sup>が問題となっており、こうした放射線加熱や効果を測る尺度として吸収線量が重要となっている。このように、施設の増加、大強度化、利用範囲の広がりに歩調を合わせて、低エネルギー光子に対する線量評価技術を向上させる必要性が増大している。

そこで、その線量評価を進める上で解決しなければならない課題および満たすべき条件を、理論、開発・測定および応用面に分けて以下に述べる。

#### [理論]

まず、線量を評価するためには、その値を実測する必要がある。たとえば、被曝線量を測定する場合、人体模擬材料(ファントム)中に線量計を挿入する。しかし、通常、線量計はその材料とは異なる組成をもつので、その線量計の読み値は、直接ファントム中の線量を表わさない。さらに、その差異は低エネルギーほど増大するため、その読み値を対象とする材料内の線量に変換を行うときの精度が低エネルギーでは重要になってくる。この変換に用いられる理論は空洞理論と呼ばれ、従来<sup>8)</sup>Co $\gamma$ 線のエネルギー領域を中心に調べられてきており、100keV以下の低エネルギー光子に対する適用性については、その必要性が必ずしも高くなかったこともあり、十分に調べられてこなかった。特に、固体線量計に対して用いられてきたBurlinの空洞理論<sup>9)</sup>については、用いられている加重係数について理論上多くの議論がなされており<sup>9) 10) 11)</sup>、その適用を行うにあたっては実験による検討が必要とされている<sup>10) 12)</sup>。

#### [開発・測定]

50keV以下の低エネルギーX線の線量測定については、Greeningが指摘したように、それ以上のエネル

ギーとは異なる厳しい条件がある<sup>15)</sup>。

- (1)エネルギーが低くなるにつれて、光電効果が顕著になり、光子断面積が光子エネルギーに依存して大きく変化するようになる。したがって、エネルギースペクトルの情報がより詳細に必要となる。
- (2)低エネルギーの光子は、容器や空气中で容易に減衰するため、ある物質の吸収線量を測定する場合、測定位置の精度に大きく依存することになる。
- (3)大きな質量エネルギー吸収係数および高い照射線量率により、電離箱にイオン再結合、電場の空間電荷効果、電場ひずみ<sup>16)</sup>といった問題が生じる。

条件(1)を満足するためには、線源として単一エネルギーが理想であり、放射光を用いれば、こうしたスペクトル広がり起因する誤差を最小限にできる。条件(3)は、照射強度のモニター技術に関わってくる。すなわち、放射光施設において照射を行う場合、このように低いエネルギーで大強度の光子ビームを測定した例はほとんどない。そこで、放射光を透過型検出器たとえば電離箱を用いてモニターする場合、イオン再結合などの欠点を持たない別の原理に基づく測定器により強度の絶対値を測定し、両者の値を比較することにより、その妥当性を評価する必要がある。特に、全吸収させることが容易であること、制動放射線の影響が少ないといった性質は、熱量計などの測定器においては利点となるので、そうした測定器と比較を行うことが考えられる。

そして、線量計として何を選択するかが問題である。既存の線量計を考えた場合、たとえば放射線管理区域で作業を行う場合に用いられる個人被曝線量計は、現在30~50keVまでのエネルギー特性しか考慮されていない。熱蛍光線量計(TLD)もそのひとつである。しかし、低エネルギー光子に対する線量計としては、やはりTLDが最も適していると考えられる。その理由として、

- (1)素子自体が小さいので自己吸収や減衰、散乱の影響が少なく、フッ化リチウムやホウ酸リチウムなど人体軟組織の実効原子番号に近い素子を用いれば良好なエネルギー特性が得られる。
- (2)低線量から高線量まで広い範囲に直線性を有しており、放射光のような強度の強い線源にも適している。
- (3)通常、線量率依存性を示さない。
- (4)種々な実効原子番号をもつ素子を利用できるため、人体以外の各種材料中の吸収エネルギーを測定する場合にも適用できる。

ことが挙げられる。

(56)

TLDのエネルギー応答、直線性を調べる上で、Greeningは、LiFのX線応答に影響を与える因子として、TL物質の質量エネルギー吸収係数、活性体の割合、粒子径、線量レベル、LET、TLD中の光子減衰などを挙げている<sup>15)</sup>。このうち、LETの影響については、いくつかのTLDにおいて、発光効率、直線性の光子エネルギー依存性が指摘されてきたことに基づいている<sup>15) 16) 17)</sup>。TLD測定は、吸収エネルギーに比例した発光量を得られることを前提にしており、もし、発光効率が、校正に用いたエネルギーと対象とするエネルギーとの間で異なるとすると、空洞理論に基づきエネルギー応答を計算しても、期待した性能を得られないことになる。しかし、注意すべきことは、今まで報告された測定値の間には、かなりばらつきが見られることである。これには、いくつかの原因が考えられる。たとえば、<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 線に対する相対発光効率は、モニタリングが唯一可能な空気中のエネルギー応答を測定することによって得られてきたが、そうした測定値は、従来こうした低エネルギー領域で単一エネルギーの線源が得られなかったこともあり、ほとんどがスペクトル広がりのあるX線発生装置により行われている。つまり、最初に挙げたGreeningの条件(1)を満足していない。また、条件(2)のTLD中の光子束減衰を考慮していないものもある。加熱方法や加熱速度、発光量の積分量とピーク値のどちらを用いるか、またその積分範囲など多くの点で異なっている。さらには、グロー曲線を調べていない報告もある。グロー曲線は、加熱温度の関数としてTLDの発光強度を表した曲線で、Horowitzが述べているように<sup>18)</sup>、エネルギー応答を測定するときは、対応するエネルギーに対して、このグロー曲線と線量応答の測定をとまう必要がある。なぜなら、それらは、測定データの妥当性や発光ピークの挙動に関する情報を与えてくれるからである。しかし、グロー曲線の形状、ピーク温度は、RandallとWilkinsの式<sup>19)</sup>によって説明されるように、加熱速度に依存する。また、その面積も加熱速度に依存すると報告がなされている<sup>19)</sup>。そのため、グロー曲線を得るためには、温度再現性があり、直線加熱性の優れたリーダーが必要となる。以上、線量計として応用する上で必要な低エネルギー領域における応答特性を得るためには、こうした条件をすべてそろえて測定を行うことが求められる。

[応用]

個人被曝線量計は、常に人体に装着した状態で線量を記録することが求められる。また、被曝評価には人体の吸収線量を測定しなければならないことから、TLDを個人線量計として応用するには、実際に人体の代用であるファントムとともに使用し、線量測定を実証する必要がある。さらに、アンジオグラフィなど

医療照射の被曝評価のためには、深部の線量分布が必須である。しかし、これらも線源スペクトル、光子減衰といった前述の問題に起因して、深さ依存のスペクトル・角度分布、それにともなう自己吸収の評価方法、線量計自身による放射線場の擾乱等といった問題がからんでくる。そのため、線源としては単一エネルギーが理想であり、用いる線量計の条件として、なるべくスペクトルの影響を受けないよう軟組織等価な組成をもち、薄くホルダー等が付属していないことが必要である。

放射線管理上、低エネルギー領域における線量換算係数の整備も重要である。放射線防護上の基本原則については、国際放射線防護委員会(ICRP)が勧告を行ってきた。同委員会は、1990年に重要な勧告を行い<sup>20)</sup>、実効線量に関する防護基準、原則について大幅な変更を行った。それは、放射線荷重係数、等価線量の導入、実効線量における組織荷重係数の変更である。勧告された組織荷重係数の値を、表1.1に示す。新たに皮膚線量に0.01の組織荷重係数が割り当てられたのが特色である。このICRP Publication 60に基づく実効線量は、Zanklらにより10keVから10MeV光子に対して<sup>21)</sup>、また山口により17keVから8.5MeV光子に対して<sup>22)</sup>計算されている。

しかし、実際には、測定が著しく困難な実効線量の

代わりに、計測実用量が導入されている。国際放射線単位・測定委員会(ICRU)は、Report 39<sup>23)</sup>においてICRU球の適当な深さにおける線量当量を実効線量当量の代わりに計測実用量の基準として用いることにし、放射線場を規定し、環境線量と個人線量に分けて計測実用量を定義した。すなわち、ICRU球を用いて周辺線量当量、方向性線量当量、透過性個人線量当量、表層性個人線量当量を定義した。このICRU球というのは、ICRUがReport 19<sup>24)</sup>において人体の代わりに放射線場に置き、線量の基準を決定する概念を提示したときに、そのレセプターとしてはじめて提案した4元素(H,C,N,O)からなるファントムである。その計測実用量はICRU Report 43<sup>25)</sup>においてはじめて用語として定義され、ICRU Report 47<sup>26)</sup>は、計測実用量のうち方向性線量当量の定義を放射線入射角度との関係において明確にし、また個人モニタリングとして0.07、3、10mm深さの個人線量当量を示した。

光子フルエンスあるいは空気カーマから、そうした計測実用量であるICRU球あるいは平板内の線量に換算するための係数は、多くの研究者によって計算されてきた。ICRPもReport 51<sup>27)</sup>において、体外放射線に対する線量換算係数のデータをまとめているが、10keV以下については、考慮しておらず現在その基準がない。また、そうした低エネルギーX線に対して重要となる皮膚線量は、ICRP Publication 26<sup>28)</sup>において線量当量の評価から除外され、線量限度は0.07mm深さで別に定義されていたが、1991年にICRP内の専門委員会の報告により<sup>29)</sup>、皮膚線量は確率的効果に対しては、体全体にわたって0.02mmから0.1mmの間にある基底層の深さで評価するべきとされた。以上のような新しい基準に基づく線量計算の再評価が現在重要となっている。

その換算係数の計算に当たっては、信頼すべき計算コードおよび断面積を用いることが重要である。しかし、低エネルギーにおける輸送計算の妥当性を評価できる実験は、ほとんど行われていない。その光子輸送では、とくに、光電吸収、コンプトン散乱、レイリー散乱が関係するが、このうちコンプトン散乱では電子束縛効果を考慮しなければならず、Klein-Nishinaの式をそのまま適用できないなど、従来のエネルギー領域とは取り扱いが異なる。さらに、カーマ近似の妥当性すなわち2次電子の影響の有無を調べる必要がある。こうしたことから、ファントム内の深部線量分布などのベンチマーク実験と比較し、その精度評価を行った計算コードを、低エネルギー光子に対する換算係数の計算に用いる必要がある。

以上、低エネルギー光子に対する線量評価を進める上で必要な条件、課題を整理すると次のようになる。

表1.1 組織荷重係数

組織・臓器	組織荷重係数 $W_T$	
	ICRP 26 (1977)	ICRP 60 (1990)
生殖腺	0.25	0.20
赤色骨髄	0.12	0.12
結腸	-	0.12
肺	0.12	0.12
胃	-	0.12
膀胱	-	0.05
乳房	0.15	0.05
肝臓	-	0.05
食道	-	0.05
甲状腺	0.03	0.05
皮膚	-	0.01
骨表面	0.03	0.01
残りの組織・臓器	0.30	0.05

- 空洞理論の適用性の検証
- グロー曲線をともなったTLDのエネルギー応答、直線性の測定  
線源エネルギーは単一  
線源強度モニターと、他の原理に基づく測定器との比較  
温度再現性の優れた直線加熱TLDリーダーの開発
- 組織等価TLDのファントムに対する応用
- ICRP Publication 60に基づく10keV以下も含めた線量換算係数の計算および実効線量との比較  
計算コードと光子断面積の低エネルギー光子輸送に対する妥当性の評価

## 1.2 本研究の概要

本研究では、まず基本となる空洞理論の低エネルギー光子に対する適用性を調べるため、フッ化リチウム(LiF)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30~200 keV X線を照射して応答値を測定した。その値と空洞理論値との比較を行ったところ、不一致が見られたため、その原因を明らかにすることにした。まずモンテカルロ光子・電子輸送計算コードITS<sup>30</sup>の精度を確認し、その上で、同コードを用いて空洞理論値と測定値の差異を考察した。さらに、低エネルギー光子に対して、高原子番号物質に対しても応答値を算出できる式を、同理論に基づいて新たに提案した。

次に、放射光に対するモニタリング技術を確立するため、まず、全吸収型のマイクロ熱量計を開発し、放射光絶対強度の測定を行った。その値と平行平板自由空気電離箱の値を比較することにより、モニターとしての同電離箱の精度を評価した。また、TLDのグロー曲線を記録するため、直線加熱TLリーダーを開発し、その性能を確認した。

そのリーダーを用いて、熱蛍光線量計を実際に低エネルギー光子に対する線量測定に応用するため、人体軟組織等価な素子として広く利用されているフッ化リチウム(LiF)、ホウ酸リチウム(Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu)、酸化ベリリウム(BeO)、及び環境線量測定用であり、シリコン材料と近い原子番号をもつ硫酸カルシウム(CaSO<sub>4</sub>:Tm) TLDのエネルギー、線量応答を、シンクロトロン放射光からの10-40keV単一エネルギーを用いて測定した。各応答値は、まずグロー曲線を直線加熱により記録し、その面積を積分することにより得た。エネルギー応答値は空洞理論値に基づく計算値と、線量応答は<sup>60</sup>Co γ線に対する結果と比較した。さらに、その光子エネルギー依存性を考察するため、各グロー曲線の挙動をそのピーク大きさ、ピーク温度を用いて議論した。

次に、上記の人体軟組織等価な薄型TLDであるフッ化リチウム、ホウ酸リチウムを用いて、シンクロトロン放射光からの10、30keV単一エネルギーX線を人体軟組織等価な30cm角の立方体均質ファントムに照射し、内部の吸収線量分布を測定した。その測定値と、コンプトン散乱における電子束縛効果および直線偏光の散乱方位角に対する影響を考慮できるように、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EGS 4<sup>30</sup>の計算値を比較し、その計算精度および光子断面積を評価した。

そのEGS 4コードを用いて、ICRU 4、10元素の組成をもつ平板ファントム内の0.07mm、0.02-0.10mm、10mm深さ線量を、1.5keVから50keV光子に対してそれぞれ計算し、他の球、平板体系計算値と比較した。その結果について、1990年のICRP勧告に基づき計算された実効線量計算値と比較を行い、議論した。

## 参考文献

1. National Laboratory for High Energy Physics, "Photon Factory Activity Report 1994," KEK Progress Report 95-1 A/M (1995).
2. 日本物理学会、"シンクロトロン放射"、培風館(1986).
3. Haensel, R., "Status of the ESRF at the end of 1990," Nucl. Instru Meth. A303, 405-412 (1991).
4. Shenoy, G.K., "Status of the Advanced Photon Source project," Nucl. Instru Meth. A303, 413-420 (1991).
5. Kamitsubo, H., "8 GeV synchrotron radiation facility project in Japan: JAERI-RIKEN SPring-8 Project," Nucl. Instru Meth. A303, 421-434 (1991).
6. Hyodo, K., Nishimura, K. and Ando, M., "Coronary angiography project at the photon factory using a large monochromatic beam," In: Handbook on synchrotron radiation, Vol. 4, Elsevier Science Publishers B.V. (1991).
7. 大柳宏之、"シンクロトロン放射光の基礎"、丸善(1996).
8. Burlin, T.E., "A general theory of cavity ionization", Br. J. Radiol., 39, 727-734 (1966).
9. Horowitz, Y.S. and Dubi, A., "A proposed modification of Burlin's general cavity theory for photons," Phys. Med. Biol., 27, 867 (1982).
10. Shiragai, A., "A comment on a modification of Burlin's general cavity theory," Phys. Med. Biol., 29, 427-432 (1984).
11. Janssens, A., "The fundamental constraint of

- cavity theory," *Phys. Med. Biol.*, 29, 1157-1158 (1984).
12. Horowitz, Y.S., Moscovitch, M., Mack, J. M., Hsu, H. and Kearsley, E., "Incorporation of Monte-Carlo electron interface studies into photon general cavity theory," *Nucl. Sci. Eng.*, 94, 233-240 (1986).
  13. Greening, J.R., "Dosimetry of low energy x rays," In: *Topics in Radiation Dosimetry*, ed. F.H. Attix, Academic Press, New York (1972).
  14. Boag, J.W., "Ionization chamber," In *Radiation Dosimetry*, Vol. II, ed. F.H. Attix, Academic Press, New York (1966).
  15. Almond, P.R., McCray, K., Espejo, D. and Watanabe, S., "The Energy Response of LiF, CaF<sub>2</sub>, and Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn from 26 keV to 22 MeV," *Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, Springfield, CONF-680920, 410-423 (1968)
  16. 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).
  17. Horowitz, Y.S. (Ed.), "Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry," Vols 1-3, CRC Press, Florida (1984).
  18. 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).
  19. 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).
  20. International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991).
  21. 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).
  22. Yamaguchi, Y., "Dose conversion coefficients for external photons based on ICRP 1990 Recommendation," *J. Nucl. Sci. Tech.*, 31, 716-725 (1994).
  23. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources," ICRU Report 39 (1985).
  24. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Radiation quantities and units," ICRU Report 19 (1971).
  25. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources-Part 2," ICRU Report 43 (1988).
  26. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations," ICRU Report 47 (1992).
  27. International Commission on Radiological Protection, "Data for use in protection against external radiation," ICRP Publication 51, Pergamon Press, Oxford (1987).
  28. International Commission on Radiological Protection, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford (1977).
  29. International Commission on Radiological Protection. "The biological basis for dose limitation in the skin," ICRP Publication 59, Pergamon Press, Oxford (1991).
  30. Halbleib, J.A., Kensek, R.P., Mehlhorn, T.A., Valdez, G.D., Seltzer, S.M. and Berger, M.J., "ITS Version 3.0: The integrated TIGER series of coupled electron/photon Monte Carlo transport codes", SAND91-1634 (1992).
  31. Nelson W.R., Hirayama H. and Rogers D.W. O., "The EGS4 code system," SLAC265 (1985).

## 第2章 低エネルギー光子に対する 空洞理論の適用性

### 2.1 空洞理論

#### 2.1.1 Burlin以前の空洞理論

光子に対してある物質中の吸収線量を測定する場合、通常その材料とは異なる物質からなる線量計を挿入するが、この場合、線量計の読み値を人体内の線量に変換する時に空洞理論を用いる。これは、歴史的に気体の入った電離箱がその線量計として用いられてきたことによる。空洞理論の基礎は、Bragg<sup>1)</sup>とGray<sup>2) 3)</sup>によって築かれた。光子によって一様に照射され、その中の気体が詰まった小さな空洞のある場所では電子

平衡が成立しているような、十分に大きな媒質では、電離箱の気体中の吸収線量 $D_m$ は

$$D_s = s_{mg} J W_g / e \quad (2.1)$$

で与えられるとした<sup>4)</sup>。Jは単位質量当たり電子が生成する電離イオンの電荷であり、 $W_g$ は気体中でイオン対を作るのに必要な平均エネルギー、 $s_{mg}$ は電子に対する媒質と気体の質量阻止能比である。空洞は電子の場に何ら影響を及ぼさず、空洞中で発生した電子は無視でき、電子は微小エネルギーずつエネルギーを失う“連続減速近似”過程によってのみエネルギーを失うといった条件が必要とされる。

SpencerとAttixは、2次電子のうち、さらに電離を起こすのに十分なエネルギーをもった $\delta$ 線の存在に着目した<sup>5)</sup>。空洞内で発生したこうした電子は、空洞中でエネルギーをすべて失わず、いくらかのエネルギーをもって空洞から外に出てゆく。つまり、連続減速近似に基づく質量阻止能では、実際に空洞で吸収されるエネルギーを過大評価することになる。そこで、彼らは質量阻止能の計算には、エネルギー損失があるカットオフエネルギー $\Delta$ よりも小さい衝突のみを考慮すべきと考えた。 $\Delta$ より大きなエネルギーをもつ電子は、空洞の外に出るような飛程をもつことから、 $\Delta$ は空洞の大きさに関係した量といえる。こうした、 $\Delta$ がある値をもった阻止能は、“限定”阻止能と呼ばれる。

### 2.1.2 Burlinの理論

2.1.1は、空洞が気体で、空洞中における光子の相互作用を無視できる場合であった。しかし、空洞が固体で、しかもその寸法が空洞中で発生する電子の飛程より大きい場合には、空洞中での光子の相互作用が顕著になり、空洞中の吸収線量はこの光子相互作用によって決定されるようになる。つまり、媒質と空洞の吸収線量の比は、質量エネルギー吸収係数の比によって与えられる。Burlinは、この点に着目して、すべての大きさの空洞に対して適用できる理論を築いた<sup>6)</sup>。

光子によって一様に照射されたある媒質内の、電子平衡が成立している点における吸収線量を測定する場合、媒質内の吸収線量 $D_m$ は、線量計内の吸収線量 $D_c$ から、以下の関係式を用いて求められる。

$$f = \frac{D_c}{D_m} \quad (2.2)$$

fの値は光子エネルギー、線量計の組成、形状、寸法、媒質の種類に依存し、通常、空洞理論によって与えられる。Burlinの理論は、空洞、つまり線量計が媒質中からの2次電子の飛程に比べて小さい場合と大きい場合に分け、一般の大きさの場合には各々の成分和とするものである。つまり、

$$f(E_r) = \bar{d}(E_r) f_s(E_r) + (1 - \bar{d}(E_r)) f_i(E_r) \quad (2.3)$$

となる。ここで $f_s(E_r)$ 、 $f_i(E_r)$ はそれぞれ小さな空

洞、大きな空洞に対するfを表す。 $\bar{d}(E_r)$ は、媒質からの電子フルーエンスの空洞内での減衰に関係した加重係数である。

小さな空洞のfすなわち $f_s(E_r)$ は、2.1.1項で説明したSpencerとAttixの理論に基づいている。彼らは、空洞の大きさが電子の飛程に比べてずっと小さい場合、その電子線源に対するfの値は次の式によって求められるとした。

$$f_s(T_0) = \frac{\int_{\Delta}^{T_0} \phi_m(T_0, T) S_c(T, \Delta) dT}{T_0} \quad (2.4)$$

ここで、 $T_0$ は入射電子エネルギー、 $\phi_m(T_0, T)$ は2次電子平衡スペクトル、 $S_c(T, \Delta)$ は限定質量衝突阻止能を表す。上式は次の条件下で成り立つ。

- a. 媒質中で生じた電子スペクトルは空洞の中でも変化しない。
- b. 媒質中で生じた電子エネルギーフルーエンスは空洞の中でも減衰しない。
- c. 空洞の存在は電子平衡場を乱さない。

式(2.4)は電子照射に対する式であり、光子入射に対しては、 $f_s$ の値は式(2.4)を用いて次のように与えられる<sup>7)</sup>。

$$f_s(E_r) = \frac{\int_{\Delta}^{E_r} A(E_r, T_0) T_0 f_s(T_0) dT_0}{\int_{\Delta}^{E_r} A(E_r, T_0) dT_0} \quad (2.5)$$

$E_r$ は入射光子エネルギー、 $A(E_r, T)$ は光子によって発生した初期電子スペクトルを表す。式(2.5)の成立には、次の条件がさらに必要である。

- d. 光子場は空洞の存在によって乱されない。
- e. 空洞中の光子の相互作用は無視できる。

次に、空洞のサイズが電子飛程に比べてずっと大きい場合、Burlinはfの値を、

$$f_i(E_r) = \frac{\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_c}{\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m} \quad (2.6)$$

の式によって与えた。 $(\mu_{en}/\rho)_c$ 、 $(\mu_{en}/\rho)_m$ はそれぞれ空洞、媒質の質量エネルギー吸収係数を表す。制動放射線、特性X線の空洞からの逃げは、その係数の中で考慮されている<sup>8)</sup>。式(2.6)の成立のためには、条件dに加えて、

- f. 媒質からの2次電子は無視できる。
- g. 電子平衡場は、媒質・空洞間の境界から最大電子飛程以内の地点を除いたあらゆる地点で存在する。

条件が必要である。