

周辺および個人線量当量標準の設定に向けた調査研究

森下 雄一郎*

(平成19年11月9日受理)

A survey to establish ambient and personal dose equivalent standards in the X- and γ -ray field

Yuichiro MORISHITA

1. はじめに

空気を直接又は間接に電離することのできるX線, γ 線, 中性子線またはイオンビーム(陽子線, α 線, 重粒子線)などは一般に放射線と呼ばれている。放射線のひとつの重要な特徴は物質を透過できること, そしてその結果物質内部にエネルギーを付与できることにあるが, この透過やエネルギー付与といった現象は扱う物質の種類, 放射線の種類, 放射線のエネルギーによって大きく異なる。したがって, これまでに開発されている放射線の利用方法はこの違いを利用したものになっている。

例えば, 医療におけるがん治療は主要な放射線利用のひとつであるが, 脳腫瘍などの外科的に治療できないような腫瘍に対しては透過性の高い γ 線を四方八方からピンポイントで集中照射することで, がん細胞を死滅させる(ガンナイフ)。また, 前立腺がんのように外科的な取り扱いが可能であるが, 手術後の生活の質が大きく損なわれる場合には, ^{125}I のような半減期の短い(59日)低エネルギー γ 線源(30 keV)を小さなカプセルにつめて, がん細胞部分に埋め込むような放射線治療もなされている。このような低エネルギーの γ 線は透過性が低いので, 周りの臓器に影響することなく, がん細胞のみを攻撃できる。また, 重イオンや陽子ビームは, 停止するときに非常に大きなエネルギーをがん細胞に与えるので(ブラッグピーク), 大型加速器で相対論的エネルギーまで加速したイオンビームによるがん治療も行われるようになってきている。これら以外にも, γ 線はX・ γ 線に比べて透過性が弱いので眼球腫瘍の治療に使われているし, ホウ素の熱中性子捕獲により生成される α 線を脳腫瘍の治療に利用している例などもある。

医療におけるこれらの治療以外にも, 医療診断, 原子

力発電, 非破壊検査, 滅菌, 微細加工, 品種改良など様々な分野で放射線は利用されている。ここで使用される放射線は種類もさることながら, 光子線(X・ γ 線)に限ったとしても, 1 keV程度の軟X線から10 MeVを超える線まで約4桁違うエネルギーの範囲にあるし, またその線量率についても 10^{-9} Gys $^{-1}$ から 10^5 Gys $^{-1}$ (Gyはグレイと読む。線量については次に述べる。)と実に14桁違う量を計測しなければならない。

放射線が様々な利用されている一方で, 健康な人間が放射線を浴びた場合, 白血球が減少するといった急性の症状から, 晩年に白血病やがんなど重い病気にかかる可能性もある。こうした放射線による障害を防止するためには, 放射線取扱者個人の被ばく線量や作業場所の放射線量を測定し, 線量が許容可能な限度を超えないように適切に管理する必要がある。こうした放射線の測定や管理は放射線防護と呼ばれている。放射線防護においても, 先ほど同様広範なエネルギーと線量を持つ多様な放射線の線量を測定できなければならない。

こうした背景から, 産業技術総合研究所(産総研)は国の一次標準機関として, 線量に関する標準を, X線標準^{1),2)}, γ 線標準³⁾, α 線標準⁴⁾, 中性子標準⁵⁾, 放射能標準⁶⁾として開発, 維持, 標準供給を行っている。本報告書ではこの中でも特にX線標準の現状について報告した後, X線および γ 線領域における放射線防護上必要な周辺線量当量および個人線量当量標準を設定していく上での基礎的事項などについて報告する。

2. 放射線の線量を表す単位

放射線線量測定では様々な単位をもつ「線量」が存在し, 目的に応じて使い分けられている。ここではX線および γ 線計測で主に用いられる線量の単位について紹介する^{7),8)}。

* 計測標準研究部門 量子放射科

2.1 粒子束 (Flux)

粒子束 (フラックス) ψ [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] は, ある時間 dt [s] の間に, ある面積 dS [m^2] を垂直に横切る粒子数 dn として

$$\psi = \frac{dn}{dt dS} \quad (1)$$

で定義される. フラックスを時間積分した量はフルエンズ $\phi = \int \psi(t) dt$ [m^2] と呼ばれている. フラックスは線量を表す単位としては直感的に理解しやすい単位であり, 半導体検出器など放射線の数計測するような検出器に対して便利な単位である.

2.2 照射線量 (Exposure)

照射線量は X 線が空気と与える電離作用に着目した単位である. 照射線量 X [Ckg^{-1}] は光子線が質量 dm [kg] の空気と相互作用した結果生じる正または負の電荷の絶対値 dQ [C] を用いて

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2)$$

で定義される. 照射線量の定義では次の二点に注意する必要がある. まず, dm の中で生成された二次電子が dm の外に出てイオン化を起こし電荷を生成する場合, dQ にはこの電荷も含まれる. 実際の測定では, dm の中で生成された二次電子が dm の外で生成させた電荷と dm の外で生成された二次電子が dm の中で生成させた電荷が等しくなるような条件下で行われる (二次電子平衡). このため注目した領域で生成された電荷を測定すればよい. 次に, 制動放射などで入射光以外の光が放出され, この光が二次電子を生成する場合, dQ にはこの電荷は含まれない. そのため放出光によって生成された電荷を補正しなければならない.

2.3 吸収線量 (Absorbed dose)

質量 dm [kg] のある物質に, 放射線によって与えられたエネルギーの平均が dE [J] であった場合, 吸収線量 D は

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (3)$$

で定義される. 吸収線量の単位記号は [Jkg^{-1}] であるが, 特別に [Gy (グレイ)] が割り当てられている. 照射線量が空気に対して定義されていたのに対して, 吸収線量は物質の定めがないことに注意が必要である. 二次電子平衡が成り立っている条件下では空気の吸収線量 D_{air} と照射線量の関係は次式で表される.

$$D_{air} = \frac{W}{e} X \quad (4)$$

ここで W/e はひとつのイオン対を作るのに必要な平均エネルギーであり, 標準空気に対しては 33.97 [J/C] が使われる⁹⁾.

2.4 カーマ (Kerma)

カーマ K は, 光子や中性子のような電荷を持たない間接電離放射線によって, 物質の単位質量あたりから発生した電子やイオンなどの荷電粒子の, 各発生時における運動エネルギーの総和である. 着目している微小領域を占める物質の質量を dm [kg], この領域内で発生した二次荷電粒子の初期運動エネルギーの総和を dE_{tr} [J] とすると,

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (5)$$

で定義される. カーマは吸収線量同様, 対象とする物質を定めていないので, 空気が対象の場合は空気カーマ K_{air} などと表記する. カーマの単位記号は [Jkg^{-1}] であるが, 特別に吸収線量と同じ [Gy] が割り当てられている. 空気カーマに寄与するほとんどの二次電子はさらにイオン化を引き起こし三次, 四次と高次の電子を生み出す. この電子の総電荷量は照射線量の dQ に等しい. しかし一部の二次以上の放出電子は制動放射によってエネルギーを失い, このエネルギーはそれ以降の電子生成に寄与しない. この電子生成に寄与しないエネルギーの割合を g とすると, $(1-g)dE_{tr}$ が放出電子生成に寄与するエネルギーとなる. したがって最終的に $(1-g)dE_{tr}/(W/e) = dQ$ の電荷が生成されることになるので, 照射線量と空気カーマは次の関係を持つ.

$$X = K_{air} \frac{1-g}{W/e} \quad (6)$$

この g の値は X 線領域では実質的に 0 と考えてよく, 1 MeV の線でも 0.0025 程度である.

2.5 線量当量 (Dose equivalent)

人体に対する放射線の影響は, 吸収線量が等しくても, 放射線の種類, エネルギーおよび照射条件によって異なってくる. そこで, 放射線防護のために, 被ばくの影響をすべての放射線に対して共通の尺度で評価する量を定めたものが, 線量当量 H であり, 次式で定義される.

$$H = Q(L)D \quad (7)$$

ここで, D は組織に対する吸収線量, $Q(L)$ は線質係数 (Quality Factor) であり, 次の式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 Q(L) &= 1 & (L < 10) \\
 &= 0.32(L - 2.2) & (10 \leq L < 100) \\
 &= \frac{300}{\sqrt{L}} & (L \geq 100)
 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、 L [$\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$]は線エネルギー付与と呼ばれる量で、単位距離あたりに放射線が失うエネルギーである。線量当量の単位記号は $[\text{Jkg}^{-1}]$ であるが、特別な記号[Sv(シーベルト)]が割り当てられている。放射線がX線、線または線の場合は $Q(L)$ は1であるので、1 Gyは1 Svに等しい。

3. X線標準の現状

産総研放射線標準研究室では、空気カーマと照射線量の標準をX線のエネルギーに応じて軟X線標準(管電圧10-50 kV)、中硬X線標準(管電圧40-300 kV)として別々に維持、管理および標準供給を行っている。表1は各標準について利用可能な線質、空気カーマ率、不確かさおよび校正条件についてまとめた。線質については後述する。

X線の標準を二つに分けている理由はX線のエネルギーが異なるため、光電効果などで生じる二次電子の飛程が大きく異なることに起因している。電子の最大飛程 R [gcm^{-2}]は物質によらず

$$R = 0.41E^{1.38} \tag{9}$$

で近似できる¹⁰⁾。Eは光子のエネルギーであり[MeV]の単位で測った値である。ここで例えば軟X線、中硬X線、

線の典型的なエネルギーに対応する電子として30 keV、200 keV、1.3 MeVの電子の飛程を比較すると、30 keV電子は2.5 cm、200 keV電子は35 cm、1.3 MeVの電子は450 cmと桁違いに違うことがわかる(空気の密度を 0.00129 gcm^{-3} として計算した)。この違いはそのまま測定装置の大きさに反映されるが、線では大きくなりすぎるために別の原理を利用した測定が行われている(詳細は文献1を参照)。X線領域については測定原理や測定器の構造は軟X線、中硬X線標準で同じなので、以下では中硬X線標準を例にとって説明する。

3.1 X線光源と線質

ここではまずX線場を作るための装置と方法について説明する。X線はX線管と呼ばれる装置で発生させる。X線管では赤熱させたフィラメントから発生する熱電子を40-300 kVの電圧差(管電圧と呼ぶ)で加速してやり、タングステンなどの金属標的に衝突させる。金属と衝突した電子は急激な減速により制動放射X線を放出する。このとき放出されるX線のスペクトルは管電圧 V に相当するエネルギーを最高値($E_{\text{max}} = eV$)として、光子のエネルギー0まで広範囲に分布する。この連続X線を、アルミ、銅、錫、鉛の薄い板(フィルターと呼ばれる)に通すとスペクトルの低エネルギー部分は高エネルギー部分に比べて大きく減衰するのでスペクトルを変化させることができる。当然のことながら、管電圧が同じであっても、フィルターの厚さが違えばスペクトルの分布は違ってくる。このようなスペクトルの分布がX線場の特性を決めており、特定のスペクトル分布を線質と呼んでいる。

表1 産総研で供給可能なX線の線質指標一覧と校正条件

	線質指標	管電圧(kV)	管電流	空気カーマ率	校正距離	不確かさ
軟X線	QI=0.4	30, 40, 50	0.30 mA	2.5×10^{-6} $1.0 \times 10^{-2} \text{ Gys}^{-1}$	1 m	0.7 - 2.0 %
	QI=0.5	20, 30, 40, 50				
	QI=0.6, 0.7	15, 20, 30, 40, 50				
	QI=0.8	10, 15, 20, 30, 40				
	BIPM	10, 25, 30, 50,				
中硬X線	QI=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8	40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250	0.2 - 15 mA	9.0×10^{-9} $2.0 \times 10^{-3} \text{ Gys}^{-1}$	1.2, 1.5, 2, 3, 4, 5 m	1.2 - 1.5 %
	QI=0.9	175, 200, 225, 250				
	BIPM	100, 135, 180, 250				
	ISO線質 ^{a)}	40 - 300				

^{a)}2007年度中に標準供給を開始する予定

線質を特徴づけるために使用される指標のひとつに半価層がある。あるフィルター（付加フィルターと呼ばれる）を使って照射線量を測定したときに、この照射線量が半分になるまでフィルターを追加していく。このとき追加したフィルターの厚さを半価層と呼び、銅やアルミの厚さで1 mmAlのように表現する。さらにフィルターを追加して照射線量を1/2から1/4にしたときのフィルター厚さを第二半価層として第一半価層に追加して線質指標とする場合もある。

日本国内ではQI (quality index) 線質とよばれる線質が古くから使われている。QIとは半価層同様線質を特徴付ける指標で次のように決まっている。

$$QI = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{max}}} \quad (10)$$

ここで、 E_{eff} [keV]は実効エネルギーと呼ばれる量である。ある線質の半価層に対してそれと同じ半価層を持つ単色X線のエネルギーとして実効エネルギーは定義されている。物質中での単色X線のフラックスは $\exp(-\mu_m(E)x)$ で減衰するので、

$$\mu_m(E) = \frac{\log 2}{x} \quad (11)$$

をみたとす E が実効エネルギーとなる。ここで $\mu_m(E)^{11}$, x はそれぞれ、質量減弱係数[cm²g⁻¹]と物質の厚さ[gcm⁻²]である。

海外の標準研究所でもその国独自の線質を設定し校正サービスが提供されている。したがって、各国ではそれぞれ違った線質で校正や測定が行われている。そのため、A国のA線質で校正した測定器をB国に持ち込みB線質で測定した場合、結果は正しい値にならない。正しい値を得ようとするばB国で再度校正を行わなくてはならないがこれは二度手間である。またA国とB国の国家標準を相互に比較する場合にも、わざわざ使う可能性のない他国の線質を設定しなくてはお互いの標準を比較できない。こういった不便さを取り除くために世界中で共通に取り扱える線質が決められている。ひとつはISO 4037-1で定義されている4種類の線質¹²⁾で、狭スペクトルシリーズ、広スペクトルシリーズ、高カーマシリーズ、低カーマシリーズがある。もうひとつは国際度量衡局 (BIPM) で設定されている1種類の線質¹³⁾である。産総研でも2006年にBIPM線質と狭スペクトルシリーズを設定している。他の線質についても2007年度中に設定して供給を開始する予定となっている。

3.2 平行平板型自由空気電離箱

線質の決まったX線場は平行平板型自由空気電離箱で決定される。図1は産総研で管理されている平行平板型自由空気電離箱の写真とその概略図である。X線はブレンデでコリメートされ電離箱に入射する。ブレンデから集電極のA面までの距離 (32 cm) は二次電子の飛程 (200 keVの電子の最大飛程は35 cm) と同程度であり、電離箱の外側で生成された電子が集電極まで到達できないように設計されている。従ってブレンデを通過したX線は集電極に至るまでに進行方向に関しては二次電子平衡条件を満たすと期待できる (A面から集電極領域に入ってくる電子とB面から出て行く電子の量がつりあっている)。X線と相互作用する自由空気の体積は集電極の長さ L [m] とブレンデの穴の面積 S [m²] で決まるので、電離体積中の空気の質量 m [kg] は

$$m = \rho_0 SL \frac{273.15P}{1013.25(273.15+T)} \quad (12)$$

となる。ここで、 T [] と P [hPa] は電離箱内の空気の温度と圧力であり、 ρ_0 は0, 1気圧における乾燥空気の密度である (1.293 kgm⁻³)。X線方向に関しては電子平衡条件にあるので、集電極で測定される電流 I から照射線量率は第0近似として $\dot{X} = I/m$ と求めることができる。実際には種々の補正が必要であるのと、照射線量率をブレンデの規定面のところで定義しているの、照射線量率は

$$\dot{X} = \frac{I}{m} k_{\text{loss}} k_h k_{\text{att}} k_d k_{\text{pol}} k_p k_{\text{sc}} k_e k_b k_L \quad (13)$$

となる。ここで式(13)中のそれぞれの補正係数は以下のような量である。

- (1) k_{loss} : 再結合と拡散による電荷損失に対する補正係数
- (2) k_h : 湿度による電離量の変化に対する補正係数
- (3) k_{att} : 規定面 - コレクタ電極中心でのX線の減衰に対する補正係数
- (4) k_d : 電離箱の電荷収集電界の歪みに対する補正係数
- (5) k_{pol} : 極性効果に対する補正係数
- (6) k_p : 遮蔽壁前面を透過したX線の影響に対する補正係数
- (7) k_{sc} : 電離箱内で、散乱されたX線による電離電荷に対する補正係数
- (8) k_e : 二次電子が電極に衝突し、エネルギーの一部が電離電荷生成に寄与しないことに対する補正係数
- (9) k_b : ブレンデで散乱されたX線の影響に対する補正係数
- (10) k_L : ブレンデの縁を透過したX線の影響に対する補正係数

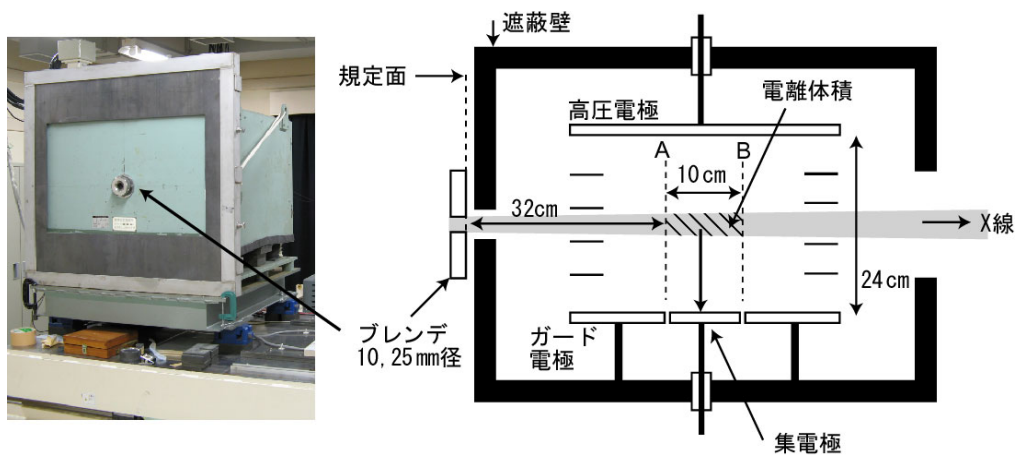


図1 平行平板型自由空気電離箱の写真とその概略図

これらのうち(1)から(6)の補正は実際の電離箱で測定が可能であるが、(7)から(10)の補正については測定が困難であり、EGS5 (Electron Gamma Shower Version5)¹⁴⁾やMCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code)¹⁵⁾などのモンテカルロシミュレーションを使って評価している。照射線量率と照射時間 t [s] から照射線量は

$$X = \dot{X} t \quad (14)$$

となる。また式(6)を使うと空気カーマの値も得ることができる。さらに式(4)を使うと空気の吸収線量が得られるように見える。しかし、電離箱に入射したX線の進行方向と垂直な方向に関しては二次電子平衡が成り立っていないため、式(4)はそのまま適用できないことに注意する必要がある。

3.3 校正業務

ここでは日々行われている校正業務について説明する。校正では校正事業者が二次標準として用いているキャビティーチェンバーと呼ばれる電離箱を主に校正する。この電離箱の基準面が平行平板型自由空気電離箱の規定面に一致するように電離箱同士を並べて設置する。そして、まず平行平板型自由空気電離箱を用いて線量を測定し照射線量率 \dot{X} を決めた後、キャビティーチェンバーで測定して電流 I_{cav} を得る。この二つの値の比をとって校正定数 C

$$C = \frac{\dot{X}}{I_{cav}} \quad (15)$$

を報告する。

校正する電離箱の空気容量は大きなものでは15000 mlにも達する。標準電離箱の電離体積は最大で約50 mlであ

り、約300倍測定される電流が異なる。そのため電離体積が800 mlの電離箱を参照用標準器として用いる。この参照用標準器を年に一度以上平行平板型自由空気電離箱で校正し、その校正定数である M 値 [kg^{-1}]

$$M = \frac{\dot{X}}{I_{ref}} \quad (16)$$

を記録する。式(16)で I_{ref} は参照用標準器の出力電流を表す。そして参照用標準器と校正すべき電離箱を比較して得られる電流比 I_{ref} / I_{cav} に M 値を乗ずることにより校正定数を得ている。

3.4 トレーサビリティーと国際比較

産総研で確立されている平行平板型自由空気電離箱による空気カーマ標準は、3.3で説明した校正方法で登録事業者・校正事業者に渡る。校正事業者も同様の方法で校正を行い標準がさらに広く社会に伝わる。このような校

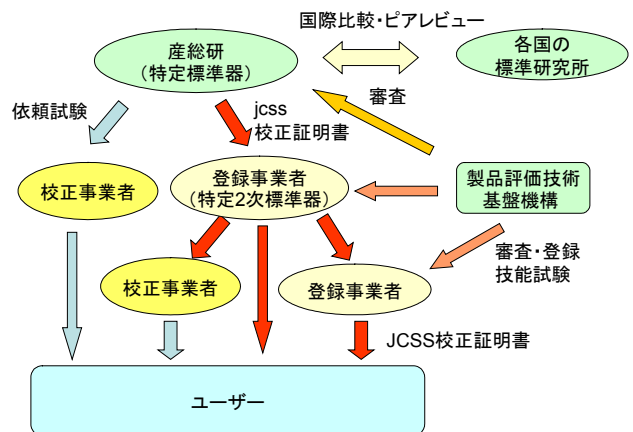


図2 日本国内のトレーサビリティーの体系図

正の連鎖の結果、一般で使われる計測器の信頼性が国家標準までたどれるようになってきている(図2参照)。校正にはJCSS (Japan Calibration Service System) 校正と依頼校正の二種類がある。JCSS制度では校正を行なう各事業者(登録事業者と呼ぶ)は校正能力などについて第三者機関である独立行政法人製品評価技術基盤機構の審査を定期的に受けており、一定水準以上の技術水準が期待できる。

国内にトレーサビリティがある一方、国外でのトレーサビリティ、すなわち、産総研の値と世界各国の標準研究所の値の同一性は国際比較を通じて確かめられる。産総研では2004年にBIPMに産総研の軟X線用平行平板型自由空気電離箱を持ち込み、BIPMの標準電離箱と直接比較を行った。その結果、産総研とBIPMの電離箱で測定したBIPMのX線場の空気カーマ率の値が0.2%以内で一致した¹⁶⁾。また、中硬X線領域では、複数の仲介電離箱にそれぞれの標準研究所で校正定数を与えるやり方で国際比較が2005年にISO狭スペクトルシリーズで2006年にBIPM線質で行われた。前者はヨーロッパ各国との多国間相互比較で、後者はBIPMとの二国間相互比較である。詳しい結果は後日発表される予定である。

4. 線量当量標準の確立に向けて

1節で述べたように有効で安全に放射線を利用するためには、放射線従事者の放射線被曝量を測定し、被曝量を適切に管理しなくてはならない(放射線防護)。この放射線防護をどのように行っていかを勧告しているのが国際放射線防護委員会(ICRP: International Commission on Radiological Protection)で、各国ではその勧告¹⁷⁾に則った放射線防護の運用がなされている。放射線防護ではある量の放射線被曝が人間の健康にどういった影響を及ぼすかが関心の対象であるため、これまで紹介した純物理的量よりは生物学的な知識を取り込んだ量を取り扱うことになる。以下では放射線防護量が物理量とどのような関係になっているかを紹介した後、今年度以降に順次線と中硬X線領域で設定することになっている周辺線量当量および個人線量当量標準について報告する。

4.1 放射線防護量

4.1.1 等価線量 (Equivalent dose)

放射線防護で扱われる量は基本的に被曝した臓器がうける吸収線量である。しかし吸収線量が同じであっても、放射線の細胞レベルでの人体への影響は放射線の種類やエネルギーによって異なる。ある組織・臓器 T に対する

放射線の影響を表す量は等価線量 H_T [Sv; Jkg⁻¹] と呼ばれ、

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (17)$$

で定義される。ここで、 R は放射線の種類、 w_R は放射線荷重係数、 $D_{T,R}$ は組織・臓器 T について平均化された放射線 R に起因する吸収線量である。 w_R の値は式(8)とおおよそ合うように選ばれており、光子(X・線)だけを扱う限り1である。等価線量は特定組織・臓器の確率的影響(線量に対する閾値が存在しないと考えられているガン、白血病、遺伝病など)を評価するのに使われる。

4.1.2 実効線量 (Effective dose)

各組織が同じ等価線量の被曝を受けたとしても、確率的影響の現れる確率は臓器に依存することが知られている。臓器ごとの影響の起こりやすさを組織荷重係数 w_T で考慮し、全身が均一に被曝したときと同一尺度で被曝の影響を表す量として実効線量 H_E [Sv; Jkg⁻¹] が

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (18)$$

で定義されている。 w_T は1に規格化されており

($\sum_T w_T = 1$)、臓器ごとに値が決められている(例えば

生殖腺は0.2、肺は0.12)。

実効線量と等価線量に対して年間および一定期間の制限線量を設定することで、実際の放射線防護は行われている。しかし、人体内部での吸収線量を測定することはできない。そのためICRUは次に紹介する量を測定可能な量として定義している¹⁸⁾。

4.1.3 1 cm線量当量, 70 μm線量当量

光子線の線量当量は理想的なX・線場に対して定義されている量である。まず、放射線場は、あらゆる点で均一の強度であり、すべての放射線は同じ方向を向いていなくてはならない(普通、実際に設定される放射場では強度は場所に依存するし、点光源に近いので平行光線ではない)。このような理想的な放射線場(拡張・整列場と呼ばれる)に比重1 gcm⁻³の組織等価物質(酸素76.2%, 炭素11.1%, 水素10.1%, 窒素2.6%)で作られたICRU球と呼ばれる直径30 cmの球を置いたときに、球の放射線方向から1 cm (70 μm) 深さでの“線量当量”を1 cm周辺線量当量(70 μm周辺線量当量)と呼び、 $H^*(10)$ ($H^*(0.07)$)であらわす。ここで1 cm周辺線量当量が“線量当量”で定義される奇妙さを感じるかもしれないが、ここで使われる“線量当量”は2.5で定義される線量当量で

あり、X線を取り扱う限り吸収線量のことである。したがって、理想的な拡張・整列場を作り、ICRU球をその放射場に置いて、深さ1 cm (70 μm)での吸収線量を測れば $H^*(10)$ ($H^*(0.07)$)が得られることになる。このことは拡張・整列場はもちろん、70 μmに比べて十分小さな検出器(この検出器はあらゆる角度からやってくる放射線に対して均一の感度を持たねばならない)の作製が可能であることを前提としている。しかし、そのような検出器は筆者の知る限りない。また $H^*(10)$ ($H^*(0.07)$)を実際に測定する試みはあるようであるが、今のところ測定できたという報告もない。とどのつまり等価線量、実効線量、1 cm周辺線量当量、70 μm周辺線量当量はすべて定義されているだけで測定できない量である。

ではどうやってこれらの量を導き出すかという、拡張・整列場にICRU球を置き、その深さ1 cm (70 μm)での吸収線量をモンテカルロコードで計算することは容易にできる。また人間ファントムをそのような放射線場に置いたときの等価線量、実効線量も計算できる。このような計算から、あらゆる光エネルギーで実効線量 H_E は $H^*(10)$ より小さくなるのが確かめられており、 $H^*(10)$ が H_E の安全側の評価を与えることが判っている。日本では $H^*(10)$ を H_E の実用量として用いることに決まっている。また皮膚の等価線量は $H^*(0.07)$ 、目の水晶体の等価線量は $H^*(10)$ と $H^*(0.07)$ を比較して適切なほうを(安全を見込むなら大きいほうを)選ぶことになっている。

モンテカルロ計算の結果、2節で紹介した物理量(フルエンス、照射線量、空気カーマ、空気吸収線量)から $H^*(10)$ ($H^*(0.07)$)への変換係数が計算できる。図3は照射線量から周辺線量当量への変換係数の一例である。線標準のエネルギー領域(660-1330 keV)では変換係数のエネルギー依存性が小さいのに対して、中硬X線領域

(20-220 keV)では非常に強いエネルギー依存性を示すことがわかる。

線量当量には、実際には周辺線量当量のほかに個人線量当量及び方向性線量当量も定義されている。個人線量当量は個人の被爆量を測定する量で、 $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ と表記される。個人線量当量はICRU球ではなく、ICRUスラブファントム(30x30x15 cmの人体ファントム)や円柱状ファントム(指・腕)に対して定義されている。方向性線量当量はICRU球内の測定点と球の中心を結ぶ線と拡張・整列場のなす角 α が0度でない場合(0度の場合は周辺線量当量)の線量当量で、 $H'(10, \alpha)$ 、 $H'(0.07, \alpha)$ と表記される。

4.2 線量当量の国内外の現状

現在産総研で管理されている標準は空気カーマと照射線量標準であり、線量当量標準については周辺、個人を含めて今後逐次設定される予定となっている(この本文はそのために書かれている)。しかしながら現状でも放射線防護はガラスバッジやサーベーターを使って現実に行われている。これらの計測値はいったいどの標準にトレーサブルになっているのだろうか? 現在日本では線量当量は各校正事業者が産総研から供給される空気カーマ標準を使って独自の方法で設定してよいことになっている。JIS Z 4511では、空気カーマにある一つの変換係数をかけて線量当量を得る方法が紹介されているし、技術力があれば図3の変換係数を使って求めてもよいことになっている。いずれにしても空気カーマに変換定数をかけているだけなので、日本の線量当量は産総研の空気カーマにトレーサブルということになっている。アメリカでも日本と同様の体系がとられているようである。

一方、ヨーロッパ各国では多くの国で線量当量が国家標準として整備されている。そして現在EURAMET内で14カ国と1国際機関が参加して個人線量当量の国際比較が行われている最中である。

日本国内での線量当量に関する問題は、産総研に線量当量の標準がないため、日本で使われている線量当量が諸外国の値と比べてどのようにになっているかを調べることができないこと、それぞれの校正事業者が独自の方法で校正に使用する放射線場を評価し、独自の方法で空気カーマを線量当量に変換しているため、校正事業者間に違いが生まれる可能性があること、と思われる。そこで産総研で線量当量標準を立ち上げ、こういった問題点を解消することが今回の目的である。

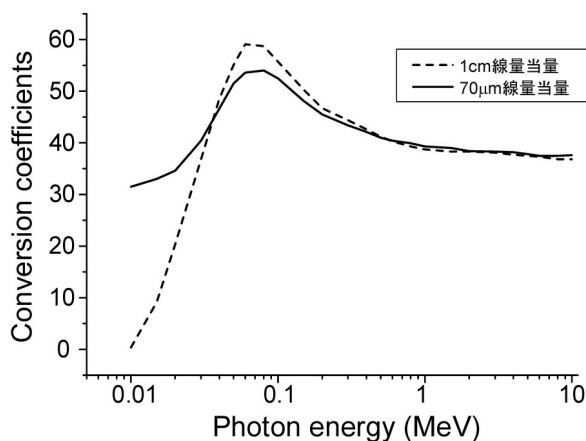


図3 照射線量から $H^*(10)$ 及び $H^*(0.07)$ への変換係数

4.3 スペクトル測定

図3の変換係数はエネルギーに依存しているので一般的な放射線場で線量当量標準を設定するには、光子のエネルギーを分解したフルエンス（空気カーマでも照射線量でも良いが以下ではフルエンスを例にとる）を求める必要がある。放射線場のエネルギー分布はGeやCdTeなどの半導体検出器で測定できる^{19),20)}。半導体検出器ではpn接合の半導体に逆バイアスを印加して、電流のキャリアは存在しないが、電場がかかっている空乏層と呼ばれる領域をつくる（固体版の電離箱のようなもの）。ここに放射線が入射するとイオン化が起きて、その電子を電場で集めて電荷アンプで増幅し、波高分布を記録することでスペクトルが得られる。このスペクトルを解釈してやれば、エネルギーを分解したフルエンスが得られるが、解釈にはいくつか注意が必要になるので、実測したスペクトルを用いて以下に説明する。

図4は¹³⁷Csの660 keVの単色線がGe検出器で測定したときのスペクトルである。660 keVに見られるピークは入射線が空乏層内で光電効果を起こしその全エネルギーが電子-正孔対（一对生成するのに約3 eV必要）を作るのに消費された事を示すピークである。¹³⁷Csは単色線源にも関わらず、470 keVより低エネルギーで連続エネルギー分布が観測される。これは空乏層内での入射線のコンプトン散乱を示す。コンプトン散乱では入射線 E_{in} と散乱線 E_{out} のエネルギーは

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{1 + \beta(1 - \cos \vartheta)} \quad (19)$$

の関係であらわれ、電子へのエネルギー付与 E_{trans} は

$$E_{trans} = E_{in} - E_{out} = E_{in} \left\{ \frac{\beta(1 - \cos \vartheta)}{1 + \beta(1 - \cos \vartheta)} \right\} \quad (20)$$

となる。ここで β は電子の静止質量 m_0 で計った入射線のエネルギー（ $\beta = E_{in} / m_0 c^2$ ）、 c は光速、 ϑ は線の散乱角である。コンプトン散乱が起こったときの最大エネルギー付与 E_{trans}^{max} は式(20)で $\vartheta = \pi$ の時であるから、 $E_{trans}^{max} \approx 475$ keVとなる。このエネルギーはちょうど図4の連続分布の高エネルギー側の端に相当しており、コンプトンエッジと呼ばれる。コンプトン散乱による最小エネルギー付与は0であるので、図4の連続分布は660 keVの線が一部のエネルギーを付与した結果と解釈できる。

検出器の空乏層に吸収されなかった線の一部は通過後コンプトン散乱を起こして再度空乏層に入射しエネルギー付与する場合もある。この場合、式(19)で $\vartheta = \pi$ とすると、コンプトン散乱後の線のエネルギーは $E_{out} \approx 184$ keV

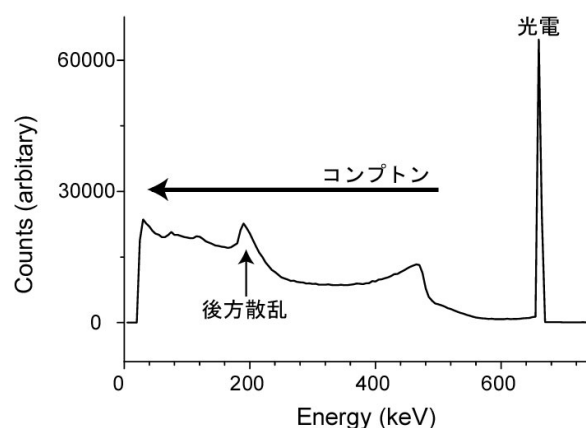


図4 ¹³⁷Csの660 keVの線スペクトル

となる。これは図4の200 keV付近に見られるピークに相当し、後方散乱ピークと呼ばれる。後方散乱では必ずしも $\vartheta = \pi$ である必要はないので高エネルギー側にテールを引くピークとして観測される。

上に紹介した以外にスペクトルの連続部分に寄与している線の成分として、散乱線が考えられる。これには¹³⁷Cs線源のホルダー、ビームコリメーター、検出器に至るまでの空気層、実験室の壁による散乱などが考えられる。線量当量を求めるにはこれらの成分も特定しなくては行けない。

測定されたスペクトルの縦軸は、入射線が空乏層でエネルギー付与を起こした事象数を表す。この事象が起きる確率は、コンプトン散乱および光電吸収の断面積と空乏層の厚みで決まっているので、検出器の面積あたりに何個の線が通過したかを見積もることができる（これがフルエンスである）。

実際には、測定している照射装置の物理的形狀や構成物質を考慮したモンテカルロ計算により測定スペクトルを再現することにより、フルエンスを見積もる。再現の仕方としては光源部分からすべての過程を計算していく方法と、単色の線が検出器に入射したときに得られるスペクトルを様々な線エネルギーに対して予め計算しておき（応答関数と呼ぶ）、計測されるスペクトルを応答関数で畳み込む方法が考えられる。後者の方法では光源がどのようなスペクトル分布になっていたとしても任意のエネルギーの応答関数で畳み込めるメリットがある。

放射線場のエネルギーを分解したフルエンス $\phi(E)$ が決まると、線量当量は

$$H = \int C(E)\phi(E)dE \quad (21)$$

から得ることができる。実際にはエネルギースペクトルを毎回測定してフルエンスを決定することはできないの

で、標準電離箱で空気カーマを測定する。空気カーマとフルエンスは

$$K = \int E\phi(E) \frac{\mu_w}{\rho} dE \quad (22)$$

の関係があるので、この式からフルエンスが計算でき、式(21)から線量当量が計算できる。

5. まとめ

放射線標準研究室では2007年度中に線領域で、2008年度に中硬X線領域で周辺線量当量を、そしてそれ以降に個人線量当量を標準供給していく計画である。今報告書ではその設定に必要な放射線標準の背景および中硬X線標準について調査・報告した。また、線量当量標準の設定に必要な事柄についても報告した。線量当量標準設定の核心は放射線場のエネルギースペクトルの縦軸を正確に求めることに尽きるが、うまく測定できるようになれば検出器だけ持ち運べば、産総研以外の放射線場も診断できるようになる。X線標準のトレーサビリティの体系では校正された電離箱、電流計、温度計、圧力計などを使うことになっているが、肝心の放射線場は校正事業者の設定した場を使うことになっている。産総研も含めて校正事業者間で放射線場がどの程度違いがあるのか、そしてその違いが校正に及ぼす影響はどの程度あるのかといったことはよく疑問として提示されることである。こういったことにも、今回得られる成果を応用できればと考えている。

参考文献

- 1) 齋藤則生, 黒澤忠弘, 森下雄一郎, 加藤昌弘, 「放射線標準の現状と展望」計測標準と計量管理 Vol. 57, No. 3 (2007) 22(印刷中)。
- 2) 納富昭弘, 「軟X線標準場の概要と高品質化に関する調査研究」産総研計量標準報告 Vol. 2, No. 4 (2004) 627。
- 3) 高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘 「空気カーマ標準の設定」産総研計量標準報告Vol. 1, No. 2 (2002) 439。
- 4) 加藤昌弘 「線吸収線量標準の開発と設定に関する調査研究」産総研計量標準報告Vol. 3, No. 4 (2005) 633。
- 5) 原野英樹 「中性子フルエンス標準に関する調査研究」産総研計量標準報告Vol. 2, No. 4 (2004) 587。
- 6) 柚木彰 「医療用¹²⁵I密封小線源の線量及び放射能標準に関する調査研究」産総研計量標準報告Vol.4, No.3 (2006) 201。
- 7) ICRU report No. 60, fundamental quantities and units for ionizing radiation (1998).
- 8) ICRU report No. 33, Radiation quantities and units (1980).
- 9) ICRU report No. 31, Average energy required to produce an ion pair (1979).
- 10) L. Katz and A. S. Penfold, Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption, Rev. Mod. Phys., Vol. 24 No.1 28 (1952) 28.
- 11) J. H. Hubbell and S. M. Seltzer, Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, NISTIR 5632 (1995).
- 12) ISO 4037-1:1996(E), X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy- Part1:Radiation characteristics and production methods.
- 13) P. J. Allisy-Roberts, D. T. Burns and C. Kessler, Measuring conditions used for the calibration of ionization chambers at the BIPM, Rapport BIPM -04/17 (2004).
- 14) <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>
- 15) <http://mcpn-green.lanl.gov/index.html>
- 16) 納富昭弘 「軟X線空気カーマ標準の高度化」産総研 TODAY Vol. 5, No. 9 (2005) 30。
- 17) ICRP Publication 60, Recommendations of the international commission on radiological protection, adopted by the commission on November 1990, Annals of the ICRP, 21, Nos. 1-3 (1991).
- 18) ICRU report No. 39, Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources.
- 19) G F. Knoll, 放射線計測ハンドブック (日刊工業新聞社, 2001)。
- 20) 中村尚司, 放射線物理と加速器安全の工学 (地人書館, 1995)。