

光子線の線量について

現在用いられている放射線の量は、ICRU の Report 60 “Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (1998)” に規定されたものです。光子線の線量 (dosimetric quantity) には、照射線量 (exposure : X) 、カーマ (kerma : K) 、吸収線量 (absorbed dose : D) の三種類が定義されています。以下に、それぞれの量の定義と、それぞれの線量が表現する物理の意味、光子線のフルエンス¹⁾ (fluence : Φ) と光子エネルギー ($h\nu$) とからの算出法、相互の関係などを概説します。

1. 光子線と物質の相互作用を表す量

単色の細い光子線束が、密度 ρ 厚さ Δx の媒質を通過したときのフルエンスの減弱の割合を $\Delta\Phi/\Phi$ とするとき、 $\{\Delta\Phi/\Phi\}/\{\rho\Delta x\}$ という比をその媒質の (そのエネルギーの光子線に対する) “質量源弱係数 (mass attenuation coefficient)” と呼び、記号 μ/ρ で表します。質量源弱係数は物質固有の量であり、光子線のエネルギー $h\nu$ の関数です。光子と物質の主な相互作用は、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、およびレーリー散乱からなりますから²⁾、それぞれの寄与分を頭に書き下して、次のように表すことにします。

$$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_C/\rho + \kappa/\rho + \sigma_{\text{coh}}/\rho.$$

但し、 τ/ρ 、 σ_C/ρ 、 κ/ρ 、 σ_{coh}/ρ は、それぞれ光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、およびレーリー散乱による寄与分を意味します。

光子の相互作用を受けた媒質中では、光子のエネルギーが物質系に移行します。その引き渡されたエネルギーのうち、“線量”として興味のあるものは、二次電子の運動エネルギーに転化するものです。光電効果の場合、放出された光電子の運動エネルギーと、残されたイオンから放出されるオージェ (Auger) 電子の運動エネルギー³⁾ は、共に二次電子の運動エネルギーですが、イオンから放出される特性 X 線のエネルギーは系外に失われます。従って、光電効果により二次電子の運動エネルギーに転化されるエネルギーの割合は、イオンから放出される特性 X 線の平均エネルギーを δ とするとき、 $\{1 - \delta/h\nu\}$ になります。コンプトン散乱では、散乱光子の平均エネルギー $h\nu'$ とイオンから放出される特性 X 線の平均エネルギー δ' とが⁴⁾ 二次電子の運動エネルギーに転化されませんから、その割合は $\{1 - (h\nu' + \delta')/h\nu\}$ になります。また、電子対生成では、生成する電子と陽電子の静止エネルギーが二次電子の運動エネルギーに転化されませんから、その割合は $\{1 - 2m_e c^2/h\nu\}$ になります。なお、レーリー散乱では、光子はエネルギーを失いませんから、その割合はゼロになります。これらの割合をそれぞれの質量源弱係数の寄与分に乗じた量；

$$\mu_{\text{tr}}/\rho = \{1 - \delta/h\nu\}\tau/\rho + \{1 - (h\nu' + \delta')/h\nu\}\sigma_C/\rho + \{1 - 2m_e c^2/h\nu\}\kappa/\rho,$$

- 1) ある点における放射線のフルエンスとは、その点を中心とする微小球の赤道断面積を da 、その微小球に入射した放射線粒子の数の期待値を dN で表すとき、両者の比 dN/da によって表される量である。
- 2) 高エネルギー光子線では、この他にいわゆる“三電子生成”や光核反応が生じる。
- 3) コスタ・クローニヒ (Coster-Kronig) 電子を含む。
- 4) 光電効果とコンプトン散乱とは、空軌道の形成され方が異なるので、放出される特性 X 線の平均エネルギーも異なる。

は、エネルギー $h\nu$ の光子線束が、密度 ρ 厚さ Δx の媒質を通過したとき、その媒質中で二次電子の運動エネルギーに転化されるエネルギーの割合 $\{\Delta T_e/(h\nu\Phi)\}$ を表す量になり、“質量エネルギー転移係数 (mass energy transfer coefficient)”と呼ばれます。

$$\{\Delta T_e/(h\nu\Phi)\}=(\mu_{tr}/\rho)\cdot(\rho\Delta x).$$

二次電子の運動エネルギーは、電磁相互作用を介して媒質の原子を電離・励起して物質の電子系に付与されると共に、制動輻射や電離・励起した原子からの特性 X 線の放出という形 (放射過程: radiative process) で系外に失われます。この放射過程で失われるエネルギーの割合を g と表すとき⁵⁾;

$$\mu_{en}/\rho \equiv \{1 - g\}\mu_{tr}/\rho,$$

を“質量エネルギー吸収係数 (mass energy absorption coefficient)”と呼びます。

2. 照射線量 (X)

照射線量は、自由空気電離箱を用いて測定される“X線の量”を基に、1928年にはじめて定義された線量ですが、その後、数回にわたって定義が修正され、現在では自由空気電離箱による実測可能性に拘束されない抽象化された量になっています。すなわち、空間の任意の場所 (空気中に限らず、物質中でも真空中でもよい) に仮想的に質量 dm の空気を考え、その空気に光子線が相互作用したら発生するであろう二次電子の総てを、無限に広い乾燥空気中に放ったときに生成するであろうイオンの全電荷量 (の期待値) を dQ とするとき、両者の比 $\{dQ/dm\}$ を照射線量と定義しています。

エネルギーが $h\nu$ でフルエンスが Φ の単色光子線束の照射線量 (X) は、以下のようにして算出されます。この点に仮想的に置かれた質量 dm の空気から発生する総ての二次電子の運動エネルギーの合計 (の期待値) は、 $dT_e = (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{tr}/\rho)_{air} \cdot dm$ であり、このエネルギーのうち $\{1 - g\}$ が、乾燥空気の電離や励起に使われることになります。二次電子が気体中にイオンを一つ作るのに要する平均のエネルギーをその気体の“W値”と呼びます。乾燥空気のW値は、 $W_{air} = 33.97$ eV です。従って、上記の二次電子が乾燥空気中に作るイオンの全電荷量は、

$$\begin{aligned} dQ &= (e/W_{air}) \cdot \{1 - g\} \cdot dT_e = (e/W_{air}) \cdot \{1 - g\} \cdot (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{tr}/\rho)_{air} \cdot dm \\ &= (e/W_{air}) \cdot (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air} \cdot dm, \end{aligned}$$

となる (但し、 e は素電荷、 $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ は空気の質量エネルギー吸収係数) ので、照射線量は次の関係で表されます⁶⁾。

$$X = (e/W_{air}) \cdot (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air}.$$

⁵⁾ 放射過程による二次電子の運動エネルギーの損失割合 g は、媒質の種類と、二次電子のエネルギー分布とに依存する量である。なお、低原子番号の物質や低エネルギーの光子では、 g の値はあまり大きくならないので、質量エネルギー転移係数と質量エネルギー吸収係数の値は、大きく相違しない (表 - 1 参照)。

⁶⁾ なお、単色でない光子線の場合は、光子のエネルギー分布 $\Phi(h\nu)$ にわたって積分した量となる (以下の表式も同様)。

照射線量の SI 単位は C/kg ですが、1928 年以來使用されてきたレントゲン (R) 単位との間には、

$$1 \text{ R} = 2.580 \times 10^4 \text{ C/kg},$$

という換算関係があります⁷⁾。

3. カーマ (K)

カーマは、光子線と中性子線の線量を統一的に表すために考案されたものです。光子線のある物質に関するカーマは、質量 dm の物質内で光子線の作用により発生する総ての二次電子の初期運動エネルギーの合計 (の期待値) を dT_e とするとき、両者の比 (dT_e/dm) で表されます。特に、エネルギーが $h\nu$ でフルエンスが Φ の単色光子線束の場合には、

$$K = dT_e/dm = (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{tr}/\rho)_m,$$

となります (但し、 $(\mu_{tr}/\rho)_m$ はカーマを評価しようとしている物質の質量エネルギー転移係数)。カーマから、二次電子の初期運動エネルギーのうち、放射過程で失われるものの寄与を除いたものを“衝突カーマ (collision kerma)”と呼びます。光子線の空気衝突カーマは、照射線量を乾燥空気の電離電荷量の代わりにエネルギーで表したものに相当します。

$$(K_{col.})_{air} = (W_{air}/e) \cdot X.$$

カーマの SI 単位は J/kg ですが、グレイ (G) という特別の単位名 (単位記号) が用意されています。但し、G はカーマの他に、吸収線量やシーマにも使われるので、カーマであることを明示するために“カーマ・グレイ”という呼び方 (俗称ですが) をする場合があります。

4. 吸収線量 (D)

ある物質の吸収線量は、質量 dm の物質 (の電子系) に放射線が付与 (impart) するエネルギー (の期待値) を $d\epsilon$ とするとき⁸⁾、両者の比 ($d\epsilon/dm$) で表されます。光子線の場合、物質電子系へのエネルギーの付与過程 (電離・励起) は、二次電子と物質との電磁相互作用によるものが殆どですから、 $d\epsilon$ は質量 dm の物質が占める領域内の二次電子の量とエネルギー分布とに依存します。しかしながら、質量 dm の物質が占める領域内の二次電子の大部分は、この領域の外で発生したものです。そのため、光子線の吸収線量の値は、吸収線量を評価しようとしている点に来ている光子線の情報だけで決めることができず、その点の周囲に、どのような物質がどのように分布し、そこにどのような光子線が作用しているかに依存します。この点は、照射線量やカーマの値が、線量を評価する点にどのような光子線が来ているか、という情報だけで決まることと著しく相違します。

⁷⁾ レントゲン単位は、標準状態の乾燥空気 1cc (1.293×10^{-3} g) に 1 esu ($[0.1c]^{-1} \text{ C}$: c は真空中の光速 $= 2.998 \times 10^{10}$ cm/s) の電離電荷を生成する光子線の量を 1R とする単位であるから、 $1 \text{ R} = [2.998 \times 10^9]^{-1} \text{ C} / 1.293 \times 10^{-6} \text{ kg} = 2.580 \times 10^4 \text{ C/kg}$ となる。

⁸⁾ 付与エネルギーは、放射線が質量 dm の占める領域に持ち込む net の運動エネルギー (flow term) と、この領域で放射線の作用で起きる核反応や素粒子反応で net に放出されるエネルギー (divergence term) とからなる。

質量 dm の物質が占める領域内で発生する二次電子の量とエネルギー分布とが、周囲の物質で発生しこの領域に流れ込んで来る二次電子のそれと一致する特別の場合（二次電子平衡が成立している場合）には、光子線の吸収線量の値は、その点の（その物質に関する）衝突カーマの値に一致します。特に、エネルギーが $h\nu$ でフルエンスが Φ の単色光子線束の場合には、

$$(D_{eq})_m = (K_{col})_m = (h\nu\Phi) \cdot (\mu_{en}/\rho)_m = \{(\mu_{en}/\rho)_m / (\mu_{en}/\rho)_{air}\} \cdot (W_{air}/e) \cdot X,$$

となります。

吸収線量の SI 単位は J/kg で、前項で述べたようにグレイ (G) という特別の単位名（単位記号）が用意されています。

5. 付録

表 - 1 $\mu/$, $\mu_{tr}/$, $\mu_{en}/$ の比較

h (MeV)	水素 (cm ² /g)			鉛 (cm ² /g)		
	$\mu/$	$\mu_{tr}/$	$\mu_{en}/$	$\mu/$	$\mu_{tr}/$	$\mu_{en}/$
0.01	0.0099	0.0099	0.0099	132	131	131
0.02	0.0135	0.0135	0.0135	83.3	69.2	69.1
0.03	0.0185	0.0185	0.0185	27.8	24.6	24.6
0.04	0.0231	0.0231	0.0231	12.9	11.8	11.8
0.05	0.0271	0.0271	0.0271	7.05	6.57	6.54
0.06	0.0306	0.0306	0.0306	4.35	4.11	4.08
0.08	0.0362	0.0362	0.0362	2.01	1.92	1.91
0.1	0.0406	0.0406	0.0406	5.51	2.28	2.28
0.2	0.0525	0.0525	0.0525	0.893	0.637	0.629
0.3	0.0569	0.0569	0.0569	0.324	0.265	0.259
0.4	0.0586	0.0586	0.0586	0.169	0.147	0.143
0.5	0.0593	0.0593	0.0593	0.108	0.098	0.095
0.6	0.0587	0.0587	0.0587	0.079	0.074	0.071
0.8	0.0574	0.0574	0.0574	0.053	0.050	0.048
1	0.0555	0.0555	0.0555	0.041	0.040	0.038
2	0.0465	0.0465	0.0465	0.029	0.026	0.024
3	0.0400	0.0399	0.0399	0.030	0.026	0.023
4	0.0355	0.0353	0.0353	0.032	0.028	0.025
5	0.0320	0.0319	0.0319	0.035	0.031	0.026
6	0.0294	0.0292	0.0292	0.037	0.033	0.027
8	0.0255	0.0253	0.0253	0.042	0.038	0.029
10	0.0229	0.0227	0.0227	0.046	0.042	0.031

表 - 2 質量エネルギー吸収係数比

hv [MeV]	$(\mu_{en}/\rho)_{air}$ [cm^2/g]	$(\mu_{en}/\rho)_{water}/(\mu_{en}/\rho)_{air}$	$(\mu_{en}/\rho)_{tissue}/(\mu_{en}/\rho)_{air}$
1.00E-03	3.56E+03	1.14E+00	1.04E+00
2.00E-03	5.26E+02	1.17E+00	1.06E+00
3.00E-03	1.61E+02	1.19E+00	1.13E+00
4.00E-03	7.64E+01	1.07E+00	1.05E+00
5.00E-03	3.93E+01	1.07E+00	1.06E+00
6.00E-03	2.27E+01	1.06E+00	1.05E+00
8.00E-03	9.45E+00	1.05E+00	1.05E+00
1.00E-02	4.74E+00	1.04E+00	1.05E+00
2.00E-02	5.39E-01	1.02E+00	1.05E+00
3.00E-02	1.54E-01	1.01E+00	1.05E+00
4.00E-02	6.83E-02	1.02E+00	1.06E+00
5.00E-02	4.10E-02	1.03E+00	1.06E+00
6.00E-02	3.40E-02	9.38E-01	9.60E-01
8.00E-02	2.41E-02	1.08E+00	1.09E+00
1.00E-01	2.33E-02	1.10E+00	1.09E+00
2.00E-01	2.67E-02	1.11E+00	1.10E+00
3.00E-01	2.87E-02	1.11E+00	1.10E+00
4.00E-01	2.95E-02	1.11E+00	1.10E+00
5.00E-01	2.97E-02	1.11E+00	1.10E+00
6.00E-01	2.95E-02	1.10E+00	1.10E+00
8.00E-01	2.88E-02	1.11E+00	1.10E+00
1.00E+00	2.79E-02	1.11E+00	1.10E+00
2.00E+00	2.35E-02	1.11E+00	1.10E+00
3.00E+00	2.06E-02	1.11E+00	1.10E+00
4.00E+00	1.87E-02	1.10E+00	1.09E+00
5.00E+00	1.74E-02	1.10E+00	1.09E+00
6.00E+00	1.65E-02	1.10E+00	1.08E+00
8.00E+00	1.53E-02	1.09E+00	1.07E+00
1.00E+01	1.45E-02	1.08E+00	1.07E+00
2.00E+01	1.31E-02	1.05E+00	1.04E+00