

光子の線量概念と実効線量への換算係数との関係 - ICRP90年勧告の実施にあたって

Concepts of Dose for Photons and Relations between Conversion Factor to Effective Dose -At the Enforcement of the Regulation Based on 1990 ICRP Recommendation

高エネルギー加速器研究機構

平山 英夫

概要

ICRP90年勧告を取り入れた放射線障害防止法の施行に伴い、実効線量の評価法が話題にのぼっている。特に光子の場合は、別表に空気カーマ当たりの実効線量への換算係数が示された事から、改めて“空気カーマ”と“空気吸収線量”はどう異なり、どの様にして計算するのかという質問も出されている。

光子については、上記以外に“線量概念”に関係する量として、“空気衝突カーマ”や“照射線量”があるが、これら諸量の関係が必ずしも明確に理解されていない事が混乱を引き起こしている要因になっている。また、ICRP や ICRU における空気カーマの扱いにおいても混乱が見られる。

本解説は、これら諸量を定義に立ち返って説明し、実効線量への換算に対する理解を深める事を目的としたものである。

1 はじめに

ICRP90年勧告を取り入れた放射線障害防止法において、光子の実効線量 (AP 入射) への換算係数が、空気カーマ当たりで示された事から、空気カーマとはどういうものかという質問が出されている。法令に取り入れられた換算係数の表示の仕方は、ICRP が光子については単位カーマ当たりの実効線量の形でデータを出している事に起因しているものである。

光子を対象とする“線量”としては、空気カーマ以外にも従来用いられていた空気の吸収線量や空気衝突カーマあるいは照射線量がある。これらと“空気カーマ”の関係は、必ずしも明確に理解されているとは言いがたい状況にある。測定に関する議論や、計算においてしばしばこれらの概念が混同されて使用されたり、間違っているとらえられている例がある。この様な混乱は、ICRU のレポートにおいても見られるし、それを引用して防護量を提起している ICRP のレポートにおいても見られる。今回の法令改定に伴い出されている質問の背景もこの理解の不十分さに依るところが多いように思われる。

光子についての線量概念に関係するこれらの諸量の理解は、改訂された放射線障害防止法に基づき“実効線量”を計算する上でも重要な事である。以下では、空気カーマ、空気衝突カーマ、空気吸収線量及び照射線量の定義と相互関係、それぞれの量の算出法とそれらを用いた実効線量換算係数について解説を行う。

2 光子の物質中での反応とエネルギー付与

2.1 光子の全断面積

良く知られているように、物質中での光子の主な反応は、光電効果 (photoelectric effect)、干渉性散乱 (coherent scattering)、非干渉性散乱 (incoherent scattering) 及び電子対生成 (原子核場 (pair creation) 及び電子場 (triplet creation)) であり、物質中での光子の減衰は、これらのマクロ反応断面積の和

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{coh} + \mu_{incoh} + \mu_{pair} \quad (cm^{-1}) \quad (1)$$

により支配される。 μ を線減衰係数 (linear attenuation coefficient) と呼ぶ。干渉性散乱は、レイリー散乱と呼ばれ、散乱後の光子のエネルギーは変わらず、散乱角度は前方方向が中心である。その意味で、減衰への寄与は少ない。非干渉性散乱は、自由電子との散乱として扱われる場合には、コンプトン散乱と呼ばれる。光子のエネルギーが低くなると自由電子との散乱として扱うことができなくなり、散乱相手の電子の束縛効果を考慮する必要がある。このような場合も含めて、非干渉性散乱と呼ばれている。 μ を密度で割ったものを質量減衰係数 (mass attenuation coefficient, $\mu_m (cm^2/g)$) という。 μ_m は、物質による違いが少ない事から、減衰係数のデータは、質量減衰係数として示される事が多い。

最新の質量減衰係数 [1] を、第 1 表に示す。

2.2 エネルギー移行係数とカーマ

2.2.1 エネルギー移行係数

光子は、間接電離放射線という名の通りそのままでは物質にエネルギーを付与する事はない。物質に対するエネルギー付与は、あくまで光子の反応によって生じた電子 (陽電子を含む) によるものである。光子に関しては、後で述べるエネルギー吸収係数の様な便利な係数が古くから存在した事から、上記の基本的な事を忘れがちである。しかしながら、カーマと吸収線量の関係や、その算出法、あるいはその算出の前提条件を考える場合には、電子に立ち返って考える事が必要となる。

各反応では、元の光子のエネルギーがすべて電子に移行するのではなく、そのエネルギーの一部は、元の光子とエネルギーが異なる二次光子に移行する。光電吸収では特性 X 線が、非干渉性散乱では、散乱光子が、電子対生成では、陽電子の消滅線がこの様な二次光子である。

レイリー散乱は、エネルギーの移行には寄与しないので、光子の反応に伴い平均として電子に移行する割合を示すエネルギー移行係数は、

$$\mu_{tr} = f_{photo}\mu_{photo} + f_{incoh}\mu_{incoh} + f_{pair}\mu_{pair} = \frac{\bar{E}}{h\nu_0}\mu \quad (2)$$

で表される。ここで、 $h\nu_0$ は、入射光子のエネルギー、 \bar{E} は、1 回の衝突の衝突で光子が失う平均エネルギーであり、

$$\left. \begin{aligned} f_{photo} &= 1 - \frac{X}{h\nu_0} \\ f_{incoh} &= 1 - \frac{\langle h\nu \rangle + X}{h\nu_0} \\ f_{pair} &= 1 - \frac{2m_e c^2}{h\nu_0} \text{ for pair creation} \\ &= 1 - \frac{2m_e c^2 + X}{h\nu_0} \text{ for triplet creation} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- X : 光子の 1 回の反応に伴い放出される特性 X 線のエネルギーの合計の期待値
- $\langle h\nu \rangle$: 非干渉性散乱光子の平均エネルギー
- $m_e c^2$: 電子の静止質量

である。

エネルギー移行係数は、光子に関する反応断面積からのみ計算する事が可能である。当初は、特性 X 線については K X-線しか考慮されていなかったが、最新の検討ではカスケードに放出される特性 X 線の影響も取り入れられている。また、非干渉性散乱では当初は考慮されていなかった反跳電子の発生に伴う特性 X 線についても上記の様に含めるようになった。また、陽電子が飛行中に消滅する効果についても考慮されるようになった。これらについては、1993 年の Seltzer の論文 [2] で詳しく述べられている。

エネルギー移行係数は、次章で述べるエネルギー吸収係数を導出する過程で論じられる事が多く、データそのものは少ない。1961 年の Berger の論文 [3] では、Al と Fe についてのみ“制動 X 線によるロスを見捨てたエネルギー移行係数”として示されている。Hubbell の 1969 年のレポート [4] では、18 の元素と空気と水のエネルギー移行係数が μ_K として示されている。Higgins 等 [5] は、29 の元素と 14 の物質に対するエネルギー移行係数を NIST のレポートで公表している。Hubbell が、最新の検討 [2] を組み込んだエネルギー移行係数のデータを学術雑誌に公表したい旨を文献 [6] 中で述べているがまだ実現していない。今年中には、出版したいという意向が表明されている [7]。

2.2.2 カーマ

カーマは、次式で定義される。

$$K = \frac{\Delta E_{tr}}{\Delta m}. \quad (4)$$

ここで、 ΔE_{tr} は、 Δm 中で、光子の様な間接電離放射線によって、電子等荷電粒子に与えられた最初の運動エネルギーの総和である。カーマの単位は、グレイ (Gy=J/kg) である。

(2) 式から明らかのように、質量エネルギー移行係数 (μ_{tr}/ρ cm²/g) にエネルギーフルエンス ($h\nu_0\Phi$ MeV/cm²) を掛ける事により、カーマを計算する事ができる。

$$\begin{aligned} K &= \mu_{tr}/\rho \times h\nu_0\Phi \text{ (MeV/g)} \\ &= 1.602 \times 10^{-10} \mu_{tr}/\rho \times h\nu_0\Phi \text{ (Gy)} \end{aligned} \quad (5)$$

ICRP 74[8] で実効線量や等価線量の表示に使用されている空気カーマ (Table A.1) は、ICRU- 47[9] に基づいており、1982 年の Hubbell の質量吸収係数 [10] (次章で説明) と Seltzer が評価した g 値 (電子のエネルギーの内、制動 X 線に移るエネルギーの割合の平均値。同じく次章で説明。Private communication となっており、Table A.1 に 1-g の形で示されている。) から得られた質量エネルギー吸収係数を使用している。一方、同じレポートにおいて実用量の表示に使用されて空気カーマ (Table A.21) は、脚注からは 1995 年の Hubbell 等の質量エネルギー吸収係数 [6] と先の g 値を使用しているように読みとれるが、 K_a/Φ の値から判断すると、この様にして求めた空気カーマでなく、1995 年の Hubbell 等の質量エネルギー吸収係数を用いた空気衝突カーマ (次章で説明) である。¹

第 1 表に、空気に対する 1982 年の Hubbell の質量エネルギー吸収係数、ICRU 47(Table A.1) の 1-g の値、両者から求めた質量移行係数及び Higgins 等の文献中 [5] の質量移行係数を示す。

¹実効線量の計算と周辺線量当量等の実用量の計算が異なったグループによって行われたという経緯があるにせよ、ICRP の同じレポート中で、異なった概念の量が同じ名前で使用され、かつその元となっている係数についても、異なった時点での値を使用しているという事には疑問を持たざるを得ない。

2.3 エネルギー吸収係数と衝突カーマ及び吸収線量

2.3.1 エネルギー吸収係数

光子の反応により生成した電子は、物質中で弾性散乱により方向を変えながら電離や励起によってエネルギーを失い、物質にエネルギーを付与するが、そのエネルギーが高くなると共に、制動 X 線を発生する確率が高くなる。制動 X 線は、光子の反応に伴う二次光子同様に電子に比べて飛程がはるかに長いので、エネルギー付与という観点から見ると光子反応による二次光子と同様に扱う必要がある。電離や励起に伴う電子のエネルギー損失を衝突損失 (collision loss) と言い、制動 X 線の発生に伴う電子のエネルギー損失を放射損失 (radiation loss) と言う。衝突損失と放射損失が等しくなるエネルギーをクリティカルエネルギー (E_c) と言い、近似的に

$$\varepsilon_c = \frac{800}{Z + 1.2} \text{ (MeV)} \quad (6)$$

で表す事ができる [11]。

電子の制動 X 線放出によるエネルギー損失の割合 (電子のエネルギーの内、制動 X 線に移るエネルギーの割合の平均値 g) を考慮した係数をエネルギー吸収係数、 μ_{en} と言い、次式により定義される。

$$\mu_{en} = \mu_{tr}(1 - g) \quad (7)$$

g を計算するには、光子の反応の結果生じた電子の挙動とその過程で生じる制動 X 線の割合を評価する必要がある。エネルギー吸収係数については、Hubbell 等による系統的な研究 [3, 4, 5, 6, 10, 12, 13] がある。最も新しい計算結果 [6] は、米国 NIST のホームページからダウンロードする事ができる。(http://physics.nist.gov/ の Physics and Reference Data)

上記に含まれている空気の質量エネルギー吸収係数を第 1 表に示す。最新の空気の質量エネルギー吸収係数は、同じ表中の 1982 年の Hubbell のデータに基づく質量エネルギー移行係数と比較すると、本来大きい値でなければならない質量エネルギー移行係数の方が小さい場合があることがわかる。また、エネルギーの低い領域で、Higgins 等の質量移行係数と異なる場合がある。これは、最新のデータが、各反応の断面積を含め再評価されたものである事による。

g の値は、物質により大きく異なる。第 1 表から明らかな様に、空気の場合には、1 MeV 以下の光子では 0 であり、同じ質量減衰係数を用いて評価した場合には、エネルギー吸収係数とエネルギー移行係数は同じ値でとなる。

第 1 表 空気の質量減衰係数、質量エネルギー移行係数、 $1 - g$ [9] 及び質量エネルギー吸収係数 [6, 10]

Energy (MeV)	μ_m (cm^2/g)	μ_{tr}/ρ^{*1} (cm^2/g)	$1 - g$ [9]	μ_{en}/ρ [10] (cm^2/g)	μ_{tr}/ρ [5] (cm^2/g)	μ_{en}/ρ [6] (cm^2/g)
0.01	5.120	4.640	1.00	4.640	4.742	4.742
0.015	1.614	1.300	1.00	1.300	1.334	1.334
0.02	0.7779	0.5255	1.00	0.5255	0.5391	0.5389
0.03	0.3538	0.1501	1.00	0.1501	0.1538	0.1537
0.04	0.2485	0.06694	1.00	0.06694	0.0684	0.06833
0.05	0.2080	0.04031	1.00	0.04031	0.0410	0.04098
0.06	0.1875	0.03004	1.00	0.03004	0.0304	0.03041
0.08	0.1662	0.02393	1.00	0.02393	0.0241	0.02407
0.10	0.1541	0.02318	1.00	0.02318	0.0233	0.02325
0.15	0.1356	0.02494	1.00	0.02494	0.0250	0.02496
0.20	0.1233	0.02672	1.00	0.02672	0.0267	0.02672
0.30	0.1067	0.02872	1.00	0.02872	0.0287	0.02872
0.40	0.09549	0.02949	1.00	0.02949	0.0295	0.02949
0.50	0.08712	0.02966	1.00	0.02966	0.0297	0.02966
0.60	0.08055	0.02953	1.00	0.02953	0.0296	0.02953
0.80	0.07074	0.02882	1.00	0.02882	0.0289	0.02882
1.0	0.06358	0.02787	1.00	0.02787	0.0279	0.02789
1.5	0.05175	0.02552	0.996	0.02545	0.0256	0.02547
2.0	0.04447	0.02354	0.995	0.02342	0.0236	0.02345
3.0	0.03581	0.02073	0.991	0.02054	0.0207	0.02057
4.0	0.03079	0.01886	0.988	0.01866	0.0189	0.01870
5.0	0.02751	0.01765	0.984	0.01737	0.0177	0.01740
6.0	0.02522	0.01678	0.980	0.01644	0.0168	0.01647
8.0	0.02225	0.01565	0.972	0.01521	0.0157	0.01525
10.0	0.02045	0.01500	0.964	0.01446	0.0150	0.01450

*¹Hubbell の 1982 年の質量エネルギー吸収係数と、ICRU 47 Table A.1 の $1 - g$ を使用して求めた値

第1図に、第1表に示されている質量吸収係数、質量移行係数を最新の Habbell 等の質量吸収係数との比の形で示す。作成された時期により、値が変化していることが良く判る。

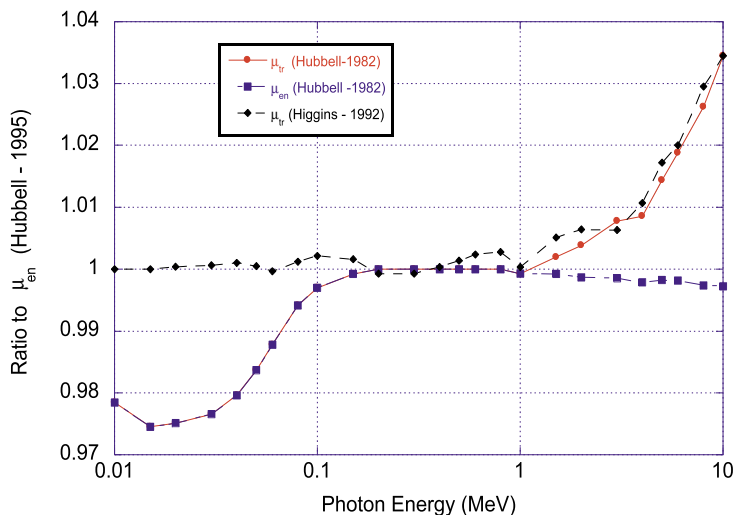


図 1: 公表されているエネルギー移行係数とエネルギー吸収係数の比較例。

2.3.2 衝突カーマ

衝突カーマ (collision kerma) は、微小領域中で、光子の様な間接電離放射線によって電子等荷電粒子に与えられた運動エネルギーの内、衝突損失により失われるエネルギーの総和である。

質量エネルギー吸収係数は、光子の反応により生じた電子のエネルギーの内、衝突により失うエネルギーのみを考慮した係数であるので、質量エネルギー吸収係数にエネルギーフルエンスを掛ける量により、衝突カーマを計算する事ができる。

$$\begin{aligned}
 K_C &= \mu_{en}/\rho \times h\nu_0 \Phi \text{ (MeV/g)} \\
 &= 1.602 \times 10^{-10} \times \mu_{en}/\rho \times h\nu_0 \Phi \text{ (Gy)}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

2.3.3 吸収線量

物質中に吸収されるエネルギーである吸収線量は、次式で定義される。

$$D = \frac{\overline{\Delta E}}{\Delta m}
 \tag{9}$$

$\overline{\Delta E}$ は、ある物質中の Δm に付与されたエネルギーの平均値である。吸収線量の単位もグレイである。

微小領域でのエネルギー吸収を考える場合には、領域外部で生成した電子が当該領域に入って来て付与するエネルギー吸収や、領域内で発生した電子が、領域外まで移動しエネルギーの一部を領域外で失うという効果を考慮する必要がある。微小領域外部で発生した電子等荷電粒子による領域内へのエネル

ギー流入量と、微小領域で発生した荷電粒子が領域外に持ち出すエネルギーが等しい場合に“荷電粒子平衡”が成立していると言う。

荷電粒子平衡が成立している場合には、衝突カーマと吸収線量は等しいと考えられるので、質量エネルギー吸収係数にエネルギーフルエンスを掛ける事により、吸収線量を計算する事ができる。

$$\begin{aligned} D &= K_C \\ &= 1.602 \times 10^{-10} \times \mu_{en}/\rho \times h\nu_0\Phi \text{ (Gy)} \end{aligned} \quad (10)$$

カーマと衝突カーマ及び吸収線量の関係については、Carlsson が詳しく論じている [14]。

空気の場合、1 MeV 以下の光子では、 $g = 0$ なので、同じ質量減衰係数に基づいて求められた質量移行係数と質量減衰係数は等しくなり、荷電粒子平衡が成立している場合には、カーマ、衝突カーマと吸収線量の計算値は等しくなる。また、10MeV でもカーマと衝突カーマ及び吸収線量の違いは、4%以下である。

2.4 照射線量

照射線量は、歴史的に最も古くから用いられている量であり、光子の量を空気の電離量で測定したところに由来している。カーマや吸収線量は、任意の物質に適用できる概念であるが、照射線量は、空気に対してのみ定義された量である。1cm 線量当量の導入に伴い、実用量として使用される事は少なくなったが、光子の測定において最も基本的な量である事には変わらない。

照射線量は、次式で与えられる。

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (11)$$

ここで、 ΔQ は、質量 Δm の空気中で光子により発生した電子が空気中で衝突損失により作る正負いずれかのイオンの電荷量の和である。従って、照射線量は、空気の衝突カーマと対応する量である。

$$X = \frac{e}{W}(1-g)K_a = \frac{e}{W}K_C. \quad (12)$$

ここで、 W は、電子が空気中に 1 個のイオン対を作るのに必要な平均エネルギーで、乾燥空気では、33.97 J/C (=33.97 eV/e) である [9]。照射線量の単位は、C/kg である。旧単位のレントゲン (R) は、この電荷量が、0°C 1 気圧の空気 1cm³ (0.001293g) 中で、1esu のイオンとなるような光子の量であり、1R = 2.58 × 10⁻⁴C/kg である。

荷電粒子平衡が成立している場合には、領域外で生成した電子により領域内で発生する電荷量と、領域内で生成した電子が領域外で発生する電荷量が同じと考えられるので、領域内の電荷量を測定する事により、照射線量を測定する事ができ、 W 値を介して照射線量を吸収線量に変換する事ができる。

ICRU 47 (Table A.1) では、照射線量に関して、“The exposure, X, is not accurately determined at energies above 3 MeV since there is significant departure from electronic equilibrium.” という注がついており、3 MeV 以上については値が示されていない。しかしながら、照射線量の定義からするとおかしな表現である。定義上の照射線量は、カーマと同じく荷電粒子平衡を前提とするものではない。荷電粒子平衡はあくまで、測定時の問題である。測定を問題とするのであれば、カーマの方が遙かに問題がある。エネルギーが高くなると、荷電粒子平衡が成立していたとしても、カーマを厳密に測定する事は非常に難しくなる。

3 カーマ、衝突カーマと吸収線量の関係

この章では、実際に吸収線量を測定する場合にどのようなことが起きるのかをモンテカルロシミュレーションを使って検討してみることにする。

6 MeV の並行ビーム光子が真空中に接した Al 板に入射したときの Al 中のカーマ、衝突カーマ及び吸収線量を第 2 図に示す。この図は、電磁カスケードモンテカルロ計算コード EGS4[15] を用いて計算したものである。カーマと衝突カーマは、質量エネルギー移行係数 [4] 及び質量エネルギー吸収係数 [6] と 1mm 単位の平板の境界面での光子束から、吸収線量は、1mm 厚さの領域中の吸収エネルギーから求めた。

第 3 図に、1mm の Al 板への荷電粒子の形でのエネルギー流入量と流出量の差を示す。真空中からの入射であるために、Al 面の表面近くでは、荷電粒子の流出量の方が多く、吸収線量は、カーマや衝突カーマより小さい。1cm より深い領域では、その差が小さくなり、吸収線量との差は小さくなる。荷電粒子平衡が厳密に成立していれば、吸収線量は衝突カーマと一致するはずであるが、第 3 図から明らかなように厳密には成立しておらず、この領域では逆に流入量の方が流出量より多いために、吸収線量の方が衝突カーマより大きい値となっている。上記の例では、真空中からの入射としているが、実際には、線源のケースや途中の空気が存在し、そこで発生した二次電子が存在するため、表面近辺の状況はより複雑となる。

測定方法にもよるが、一般的には吸収線量を測定するためには荷電粒子平衡が成り立たねばならない。上記の例のように、体系中であっても厳密な荷電粒子平衡が成立する事は難しい。厳密に成立している場合でも、光子のエネルギーが高いと制動放射の寄与が大きくなるのでカーマと吸収線量は等しくはならない。

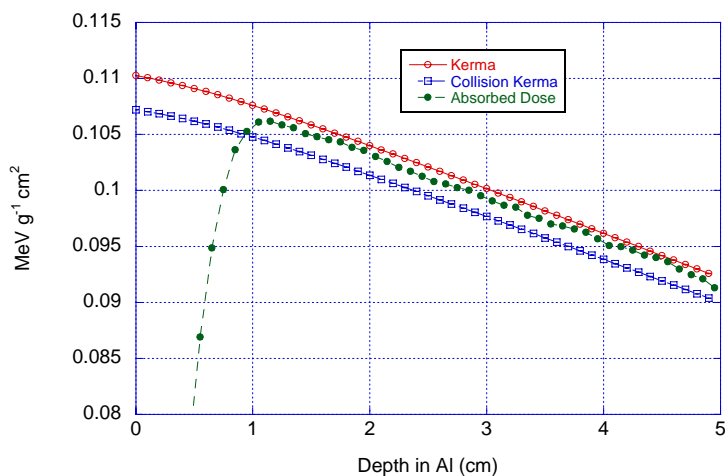


図 2: 6 MeV 光子並行ビームによる Al 体系中のカーマ、衝突カーマ及び吸収線量。

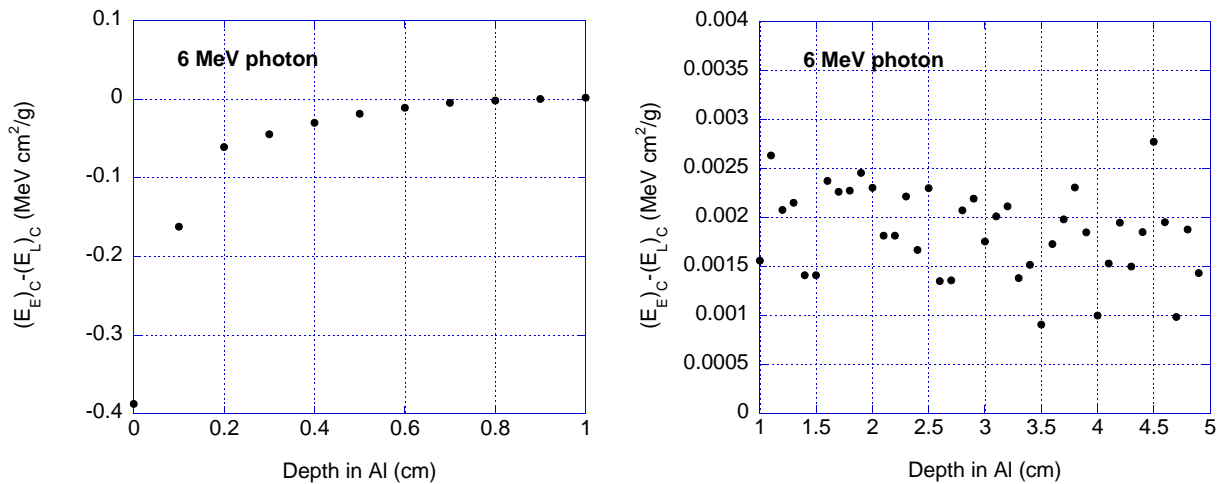


図 3: 1mm の領域への荷電粒子によるエネルギー流入 $((E_E)_C)$ とエネルギー流出 $((E_L)_C)$ の差。

4 実効線量 (AP) 換算係数

この章では 2 章で議論した定義に戻ってカーマから実効線量 (AP) への換算を行う際の現在の問題点について説明を行う。

ICRP90 年勧告を取り入れた改正放射線障害防止法では、空気カーマ (グレイ) 当たりの実効線量 (AP) 換算係数が別表第 4 に与えられている。しかしながら、これまで説明した様に、別表 4 中の空気カーマは、1982 年の Hubbell[10] の質量エネルギー吸収係数と、Seltzer が評価した g 値を基に求めた質量エネルギー移行係数から求めた空気カーマを使う事を前提にしたものであり、様々な計算において用いる上では、適切な形になっているとは言い難い。

ICRP 74[8] の Table A.1 に示されている光子の単位フルエンス当たりの空気カーマを用いて求めた光子束 ($\Phi \text{ cm}^{-2}$) 当たりの実効線量 (AP) 換算係数を第 2 表に示す。第 2 表には、最新の μ_{en}/ρ [6] を使用して求めた空気衝突カーマ (K_C , グレイ) 当たり、照射線量 (X , R) 当たりの実効線量 (AP) 換算係数も参考のために掲載している。

5 おわりに

空気カーマ、空気衝突カーマ及び照射線量は、荷電粒子平衡に関係なくその場における光子の量を表しており、その意味では実効線量を表す基準として使用する事が可能である。しかしながら、計算においてそれぞれの量を求める際には、使用する質量エネルギー移行係数や質量エネルギー吸収係数によって、同じ光子フルエンスでも値が異なるという問題が生じる。したがって、放射線防護の基本に関わる量は、どの様な量を基にして提起すべきかという観点でみるならば、中性子の場合と同様単位フルエンスあたりの換算係数の形で表すべきである。

謝辞

本解説をまとめるにあたっては、高エネルギー加速器研究機構の柴田徳思氏、波戸芳仁氏、日本原子力研究所の山口恭弘氏、坂本幸夫氏及び京都大学の秦和夫氏から貴重な情報とコメントを頂きました。

第2表 実効線量 (AP) 換算係数

Energy MeV	K^{*1} $\text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$	Φ^{*2} $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$	K_C^{*3} $\text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$	X^{*3} $\text{mSv}\cdot\text{R}^{-1}$
0.01	0.00653	0.0485	0.00639	0.0560
0.015	0.0402	0.125	0.0392	0.343
0.02	0.122	0.205	0.119	1.042
0.03	0.416	0.300	0.406	3.557
0.04	0.788	0.338	0.772	6.763
0.05	1.106	0.357	1.088	9.531
0.06	1.308	0.378	1.295	11.34
0.08	1.433	0.440	1.423	12.47
0.10	1.394	0.517	1.391	12.19
0.15	1.256	0.752	1.253	10.98
0.20	1.173	1.004	1.172	10.27
0.30	1.093	1.508	1.092	9.566
0.40	1.056	1.996	1.056	9.251
0.50	1.036	2.466	1.037	9.084
0.60	1.024	2.908	1.023	8.962
0.80	1.010	3.727	1.009	8.839
1.0	1.003	4.483	1.003	8.786
2.0	0.992	7.490	0.998	8.743
4.0	0.993	12.02	1.004	8.795
6.0	0.993	15.99	1.013	8.874
8.0	0.991	19.92	1.020	8.935
10.0	0.990	23.76	1.024	8.970

*¹ 表1の μ_{tr}/ρ を使用して求めたカーマ、告示別表第4の値

*² ICRU Report 47[9] の Table A.1 に掲載されている光子フルエンス当たりの空気カーマを使用して求めた値

*³ 表1中最新の μ_{en}/ρ [6] を使用して求めた空気衝突カーマ又は照射線量

参考文献

- [1] Photon Interaction Cross Section Library, *Radiation Shielding Information Center Data Package DLC-136/PHOTX*, National Institute of Standards and Technology.
- [2] Seltzer, S. M.: Calculation of Photon Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients, *Rad. Res.* **136**, 147-170(1993)..
- [3] Berger, R. T.: The X- or Gamma-Ray Energy Absorption or Energy Transfer Coefficient: Tabulation and Discussion, *Rad. Res.* **15**, 1-29(1961).
- [4] Hubbell, J. H.: Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV, *NSRDS-NBS 29* (1969).
- [5] Higgins, P. D., Attix, F. H., Hubbell, J. H., Seltzer, S. M. , Berger, M. J. and Sibata, C. H.: Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients, Including In-Flight Positron Annihilation for Photon Energies 1 keV to 100 MeV, *NISTIR 4812*(1992).
- [6] Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M.: 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).
- [7] Private communication.
- [8] Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, *Annals of ICRP* **26**, No.3/4(1996).
- [9] Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, *ICRU Report 47*, 15 April 1992.
- [10] 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).
- [11] Berger, M. J. and Seltzer, S. M.: Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons, *NASA-SP-3012*, National Aeronautics and Space Administration (1964).
- [12] Hubbell, J. H. and Berger, M. J.: Sec. 4.1: Attenuation Coefficients, Energy Absorption Coefficients, and Related Quantities, in *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Vol. 1, R. G. Jaeger, ed. (Springer, Berlin), 167-184(1968).
- [13] 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, *Rad. Res.* **70**, 58-81(1977).
- [14] Charlsson, G. A.: Theoretical Basis for Dosimetry, in *The Dosimetry of Ionizing Radiation*, Vol. 1, pp.1-75, Academic Press, INC. (1985).
- [15] Nelson, W. R., Hirayama, H. and Rogers, D. W. O.: "The EGS4 Code System", *SLAC-265*, Stanford Linear Accelerator Center (1985).