

資料

論文受付
2014 年 3 月 18 日

論文受理
2014 年 5 月 12 日

Code No. 141

光子の物質に対する質量エネルギー転移係数

加藤秀起

藤田保健衛生大学医療科学部放射線学科

はじめに

光子の物質中における減衰・吸収に関する係数には、線減弱係数(linear attenuation coefficient: μ)、線エネルギー転移係数(linear energy transfer coefficient: μ_{tr})および線エネルギー吸収係数(linear energy absorption coefficient: μ_{en}) (単位はいずれも m^{-1} または cm^{-1}) があり、通常は物質の密度で除した質量減弱係数(mass attenuation coefficient: μ/ρ)、質量エネルギー転移係数(mass energy transfer coefficient: μ_{tr}/ρ)、質量エネルギー吸収係数(mass energy absorption coefficient: μ_{en}/ρ) (単位はいずれも m^2/kg または cm^2/g) の形で表される。これらはそれぞれ、物質中の光子フルエンス、カーマ(kerma)、吸収線量の計算などに用いられ、放射線計測において重要な因子である。この三つの係数のうち μ/ρ および μ_{en}/ρ は Seltzer ら^{1,2)}によってデータベース化されて提供されており、広く利用されている。しかし、 μ_{tr}/ρ のデータは Hubbell ら^{3,4)}によって数十個の元素などに

ついて報告されているが、 μ/ρ や μ_{en}/ρ のようなデータベースとして整理されてはいない。

今回、Seltzer らによる μ/ρ 、 μ_{en}/ρ データに合わせ、光子エネルギー 1 keV から 20 MeV まで、原子番号 1 から 92 の元素および線量計測に関係する 48 の化合物・混合物に対する μ_{tr}/ρ を算出してデータベース化し、任意データを検索できるソフトウェアを作成した。本稿では、 μ_{tr}/ρ の算出方法、算出結果およびデータ検索ソフトウェアの概要について報告する。

1. 方法

1-1 元素に対する質量エネルギー転移係数の計算
質量減弱係数 μ/ρ は次式で計算される。

$$(\mu/\rho) = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

σ_{pe} は光電効果断面積

Photon Mass Energy Transfer Coefficients for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest

Hideki Kato

Faculty of Radiological Technology, School of Health Sciences, Fujita Health University

Received March 18, 2014; Revision accepted May 12, 2014

Code No. 141

Summary

Photon mass energy transfer coefficient is an essential factor when converting photon energy fluence into kinetic energy released per unit mass (kerma). Although mass attenuation coefficient and mass energy absorption coefficients can be looked up in databases, the mass energy transfer coefficient values are still controversial. In this paper, the photon mass energy transfer coefficients for elements Z=1-92 were calculated based on cross-sectional data for each photon interaction type. Mass energy transfer coefficients for 48 compounds and/or mixtures of dosimetric interest were calculated from coefficient data for elements using Bragg's additivity rule. We additionally developed software that can search these coefficient data for any element or substance of dosimetric interest. The database and software created in this paper should prove useful for radiation measurements and/or dose calculations.

Key words: photon interaction, secondary electron, mass energy transfer coefficient

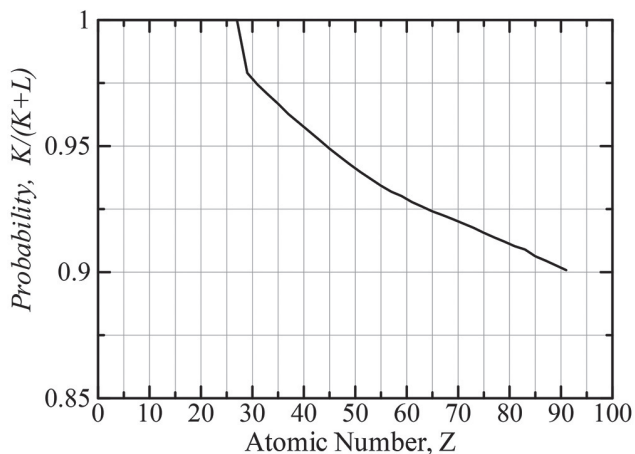


Fig. 1 Probability that the photoelectric effect at the K-shell will occur at photon energies greater than the K-edge.⁶⁾

σ_{coh} は干渉性散乱断面積

σ_{incoh} は非干渉性散乱断面積

σ_{pair} は電子対生成断面積(閾エネルギー 1.022 MeV 以下では $\sigma_{\text{pair}}=0$ である)

σ_{trip} は三対子生成断面積(閾エネルギー 2.044 MeV 以下では $\sigma_{\text{trip}}=0$ である)

である。これらの詳細なデータは Berger ら⁵⁾によって提供されている。

厳密にはこれら五つの断面積に光核反応断面積 $\sigma_{\text{ph.n.}}$ を加える必要があるが、現在のところ正確な値が不足している¹⁾ことと、今回想定している 20 MeV 以下のエネルギー範囲では、ほとんど無視できることから(1)式では $\sigma_{\text{ph.n.}}$ は省略した。

(1)式を基にして、質量エネルギー転移係数 μ_{tr}/ρ は次式で計算される。

$$(\mu_{\text{tr}}/\rho) = f_{\text{pe}}\sigma_{\text{pe}} + f_{\text{incoh}}\sigma_{\text{incoh}} + f_{\text{pair}}\sigma_{\text{pair}} + f_{\text{trip}}\sigma_{\text{trip}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式の f_{pe} , f_{incoh} , f_{pair} , f_{trip} は各相互作用が起こった時、その相互作用を起こした光子のエネルギーのうち二次電子に転移されるエネルギーの割合であり、それぞれについて以下に述べる。

1-1-1 f_{pe}

f_{pe} は光電効果を起こした光子のエネルギー E_0 のうち、二次電子に転移されるエネルギーの割合であり、次式で計算される。

$$f_{\text{pe}} = 1 - X/E_0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 X は放出された特性 X 線の平均エネルギーである。

特性 X 線の放出については、いわゆるカスケードを考慮して評価する必要があるため、以下のように光子

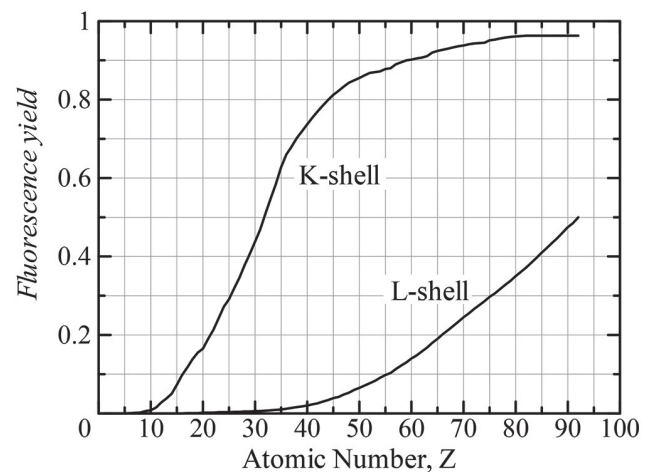


Fig. 2 Fluorescence yields of K-shells and L-shells.⁷⁾

エネルギー領域を分けて X を計算した。

K 吸収端以上の光子エネルギー領域では次式(4)で計算した。

$$X = E_K \cdot K_f K / (K+L) + E_L \cdot L_f L / (K+L) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 E_K および E_L はそれぞれ K 特性 X 線および L 特性 X 線の加重平均エネルギー、 K_f および L_f はそれぞれ K 特性 X 線および L 特性 X 線の蛍光収率、 $K/(K+L)$ は K 殻で光電効果が起こる割合、 $L/(K+L)$ は L 殻で光電効果が起こる割合である。

E_K , E_L , $K/(K+L)$, $L/(K+L)$ は Storm らのデータ⁶⁾, K_f , L_f は Fink らのデータ⁷⁾を使用した。 $K/(K+L)$ および K_f , L_f と原子番号 Z との関係を図. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 において、 $Z=27$ 以下の元素に対しては $K/(K+L)=1.0$ である。

K 吸収端未満かつ L 吸収端以上の光子エネルギー領域では次式(5)で計算した。

$$X = E_L \times L_f \quad \dots\dots\dots(5)$$

L 吸収端未満の光子エネルギー領域に対しては、M 特性 X 線エネルギーは非常に小さく無視できるため $X=0$ とした。

1-1-2 f_{incoh}

f_{incoh} は非干渉性散乱を起こした光子のエネルギー E_0 のうち、二次電子に転移されるエネルギーの割合であり、次式で計算される。

$$f_{\text{incoh}} = 1 - (E' + X)/E_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 E' は散乱光子の平均エネルギーで、次式(7)で計算できる。

$$E' = \int_0^\pi E_1(\theta) \cdot \frac{d\sigma_{KN}}{d\theta} \cdot 2\pi \sin\theta \cdot S_m(x) \cdot d\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$E_1(\theta)$ は θ 方向への散乱光子エネルギーで、次式で計算される。

$$E_1(\theta) = \frac{E_0}{1 + (E_0 / m_0 c^2) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式で、 m_0 は電子の静止質量、 c は光速である。

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\theta} \cdot 2\pi \sin\theta \cdot S_m(x) \text{ は } \theta \text{ 方向へ散乱される確率である。}$$

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\theta} \text{ はクライン・仁科の微分断面積、} S_m(x) \text{ は非干渉性}$$

散乱関数、 x は次式で与えられる momentum transfer である。

$$x = \frac{\sin(\theta/2)}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{12.4}{E_0(\text{keV})} \quad \dots\dots\dots (9)$$

非干渉性散乱の対象となるのは主に外殻軌道電子であり、それに伴って発生する特性 X 線のエネルギーは E_0 に比べて極めて低い。したがって(6)式の放出される特性 X 線の平均エネルギー X は、 $X=0$ とした。非干渉性散乱関数は Hubbell ら⁸⁾のデータを用いた。

1-1-3 f_{pair}

f_{pair} は電子対生成を起こした光子のエネルギーのうち、電子および陽電子に転移されるエネルギーの割合であり、次式で計算される。

$$f_{\text{pair}} = 1 - 2m_0 c^2 / E_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $2m_0 c^2$ は電子の静止エネルギーである。

電子対生成の起こる閾エネルギー 1.022 MeV 以下の E_0 に対しては $\sigma_{\text{pair}}=0$ であるため、(10)式は適用されない。

1-1-4 f_{trip}

f_{trip} は三対子生成を起こした光子のエネルギー E_0 のうち、電子および陽電子に転移されるエネルギーの割合であり、次式で計算される。

$$f_{\text{trip}} = 1 - (2m_0 c^2 + X) / E_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

三対子生成は光子と軌道電子のクーロン場の間で起こる電子対生成である。三対子生成がどの軌道で起こるかの確率は不明であること、軌道電子の空位に伴って発生する特性 X 線のエネルギーは E_0 および $2m_0 c^2$ に比べて小さいこと、20 MeV 以下の光子エネルギー領域では三対子生成の相互作用断面積は電子対生成断面積

および非干渉性散乱断面積に比べて小さいことなどから、(11)式の X は、 $X=0$ とした。

三対子生成の起こる閾エネルギー 2.044 MeV 以下の E_0 に対しては $\sigma_{\text{trip}}=0$ であるため、(11)式は適用されない。

以上に述べた計算方法によって、原子番号 $Z=1$ から 92 までの元素について、光子エネルギー $E_0=1$ keV から 20 MeV までについて質量エネルギー転移係数、 μ_{tr}/ρ を算出した。

1-2 化合物・混合物に対する質量エネルギー転移係数の計算

2 種類以上の元素から構成される化合物および混合物に対する質量エネルギー転移係数は、質量減弱係数と同様に、以下に示す Bragg 加法則⁹⁾に従って次式によって算出することができる。

$$(\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{med}} = \sum_j \omega_j (\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{med},j} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 ω_j および $(\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{med},j}$ は j 番目の構成元素の重量比率および質量エネルギー転移係数である。

Bragg 加法則を用いて、文献 1 に示されている空気、水をはじめとする線量計測に関係する 48 の化合物・混合物に対する質量エネルギー転移係数、 μ_{tr}/ρ を算出した。各化合物・混合物の組成、元素の重量比は Seltzer ら¹⁾のデータを用いた。

2. 結 果

2-1 元素に対する質量エネルギー転移係数

原子番号 74 のタングステン($_{74}\text{W}$)を例に結果を示す。

2-1-1 f_{pe} , f_{incoh} , f_{pair} , f_{trip} の計算結果

$_{74}\text{W}$ について(3)、(6)、(10)、(11)式によって算出した f_{pe} , f_{incoh} , f_{pair} , f_{trip} を Fig. 3 に示す。横軸は光子エネルギー、縦軸は各相互作用についての光子から二次電子に転移されるエネルギーの割合 f_{pe} , f_{incoh} , f_{pair} , f_{trip} である。

f_{pe} は、K 吸収端および L 吸収端で不連続となって値が小さくなり、吸収端より光子エネルギーが高くなるに従って 1.0 に近づく傾向にある。L 吸収端未満のエネルギー領域では値は 1.0 である。

f_{incoh} は光子エネルギーに対して連続的に変化し、光子エネルギーが低くなるほど値は 1.0 から大きく低下している。

f_{pair} と f_{trip} は重なっているが、これは(11)式で $X=0$ としたためである。両者とも相互作用が起こる閾エネルギーで値が最も低く、光子エネルギーの上昇とともに

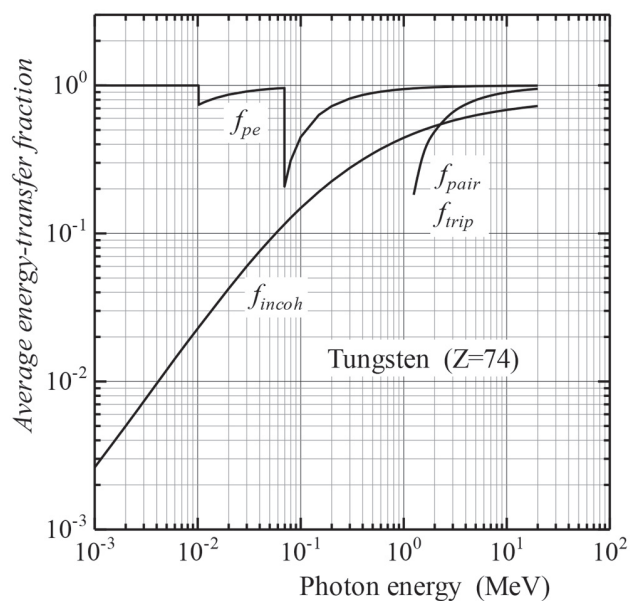


Fig. 3 Average energy transfer fractions for the photoelectric effect, f_{pe} , incoherent scattering, f_{incoh} , pair production, f_{pair} , and triplet production, f_{trip} for tungsten ($Z=74$).

1.0 に近づいている。

$_{74}\text{W}$ に対する光電効果、干渉性散乱、非干渉性散乱、電子対生成、三対子生成の質量減弱断面積⁵⁾を Fig. 4 に、各相互作用断面積に f_{pe} , f_{incoh} , f_{pair} , f_{trip} を乗じた質量エネルギー転移断面積を Fig. 5 に示す。それぞれ横軸は光子エネルギー、縦軸は断面積である。干渉性散乱はエネルギー転移が行われないので Fig. 5 には現れない。

2-1-2 質量減弱係数、質量エネルギー転移係数、質量エネルギー吸収係数

Fig. 4 および Fig. 5 に示した断面積を全相互作用について合算したものが全断面積(質量減弱係数: μ/ρ および質量エネルギー転移係数: μ_{tr}/ρ)である。 $_{74}\text{W}$ に対する μ/ρ , μ_{tr}/ρ および Seltzer ら¹⁾による質量エネルギー吸収係数, μ_{en}/ρ を Fig. 6 に示す。L 吸収端を超えるエネルギー領域では、 μ/ρ と μ_{tr}/ρ の値に明確な差異が確認できるが、L 吸収端以下ではこのグラフ上では識別できない程度の差異である。また、 μ_{tr}/ρ が μ/ρ と μ_{en}/ρ の間の値をとることが Fig. 6 から確認できる。

2-2 化合物・混合物に対する質量エネルギー転移係数

(12)式に示した Bragg 加法則を用いて算出した、空気および水の質量エネルギー転移係数 (μ_{tr}/ρ) を Table 1 に示す。比較のため、Seltzer ら¹⁾から引用した質量減弱係数 (μ/ρ)、質量エネルギー吸収係数 (μ_{en}/ρ) も同 Table

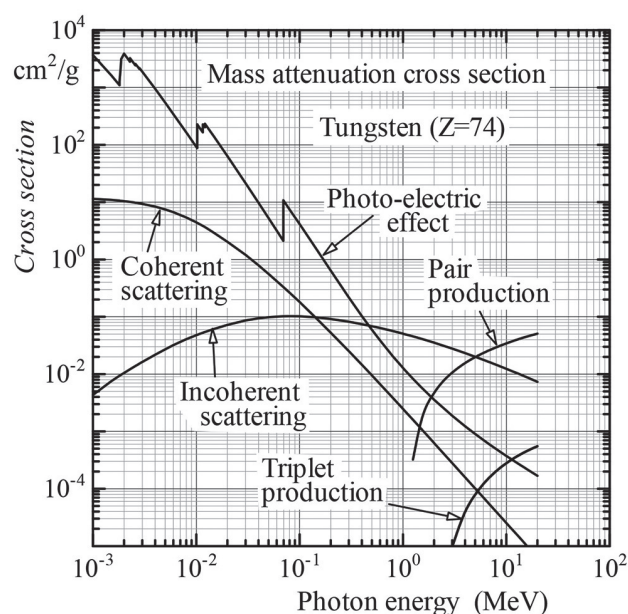


Fig. 4 Photon mass attenuation cross sections for tungsten ($Z=74$).⁵⁾

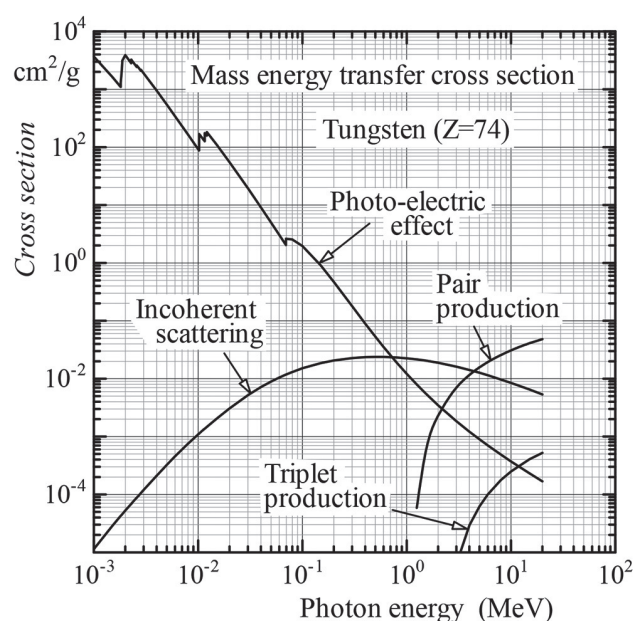


Fig. 5 Photon mass energy transfer cross sections for tungsten ($Z=74$).

に示した、空気の 3.2029 keV における不連続はアルゴン (Ar) の K 吸収端によるものである。

3. データ検索ソフトウェアの概要

原子番号 $Z=1$ から 92 までの元素、空気や水など線量計測に関係する 48 種類の化合物・混合物について計算された質量エネルギー転移係数, μ_{tr}/ρ および Seltzer

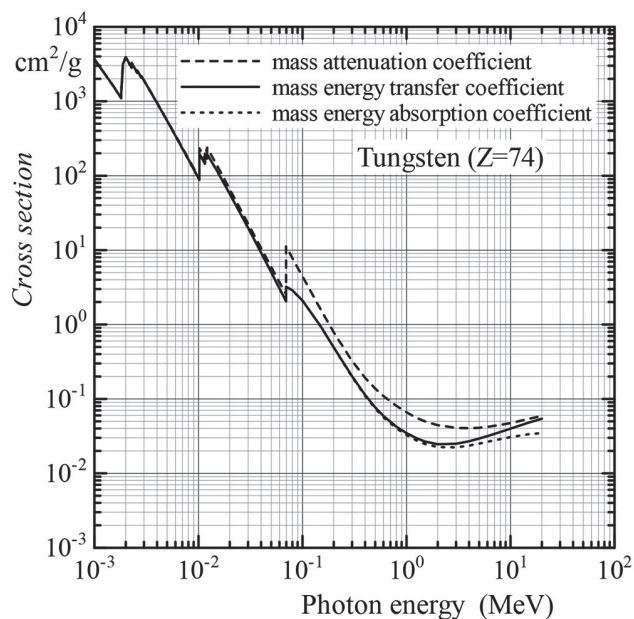


Fig. 6 Photon mass attenuation coefficient,¹⁾ mass energy transfer coefficient and mass energy absorption coefficient¹⁾ for tungsten (Z=74).

ら¹⁾によって提供されている質量減弱係数, μ/p , 質量エネルギー吸収係数, μ_{en}/p のデータベースを作成し, それらを検索するソフトウェア, mu-4 を作成した. 使用したプログラミング言語は Microsoft Visual Basic 6.0 である. 対応光子エネルギー範囲は 1 keV から 20 MeV までとした. mu-4 の画面を Fig. 7 に示す.

目的の元素もしくは物質を選択すると, データ表とグラフが同時に表示される. 任意の光子エネルギーを入力すると, そのエネルギーに対応する μ/p , μ_{tr}/p , μ_{en}/p が log-log 直線補間によって計算され表示される. また, Bragg 加法則を用いて新規の化合物・混合物のデータを作成する機能なども有している.

4. 考 察

質量エネルギー転移係数, μ_{tr}/p の計算過程で簡略化した部分について考察する.

4-1 f_{pe} の計算について

光電効果に関する f_{pe} の計算の中で, (4)式によって放出される特性 X 線の平均エネルギー X を求める際, K 特性 X 線および L 特性 X 線エネルギーにそれぞれ加重平均値を用いた. K 特性 X 線については K 吸収端が各元素で単一エネルギーであるので K_{α} , K_{β} の加重平均エネルギー E_K を用いたことに問題はない. しかし, L 特性 X 線については, 各元素で L 吸収端は L_I , L_{II} , L_{III} の 3 点存在し, 各吸収端の上下で放出される特性 X

線エネルギーの加重平均値 ($E_{L_{I,II,III}}$, $E_{L_{II,III}}$, $E_{L_{III}}$) は異なる. このため厳密には各 L 吸収端に対して L 特性 X 線の加重平均エネルギーを対応させて X を計算すべきであるが, 計算過程が非常に複雑になるため, 本稿では L 吸収端を L_{III} の 1 点と仮定し, L 特性 X 線エネルギーとして $E_{L_{II,III}}$ を用いて X を算出した. これは Fig. 3 の f_{pe} のグラフにも表れている. 3 点の L 吸収端に対応する $E_{L_{I,II,III}}$, $E_{L_{II,III}}$, $E_{L_{III}}$ に大きな差異はないため, 上記のような計算の簡略化を行ったことによる計算結果への影響は無視できると考える.

4-2 f_{incoh} の計算について

非干渉性散乱に関する f_{incoh} の計算[(6)式]の中で, 相互作用で空位となった軌道電子への電子遷移の際に放出される特性 X 線エネルギーを $X=0$ と仮定した. 「方法」でも述べたように, 非干渉性散乱が起こるのは最外殻軌道が主であり, これに付随して発生する特性 X 線エネルギーは, 相互作用を起こす前の光子エネルギー E_0 に比べて無視できるほど小さい. したがって本計算で $X=0$ と仮定したことによる影響はない.

4-3 f_{trip} の計算について

三対子生成に関する f_{trip} の計算[(11)式]において, 上記の f_{incoh} の計算と同様に三対子生成に付随して発生する特性 X 線エネルギーを $X=0$ と仮定した. 三対子生成は軌道電子のクーロン場で起こる電子対生成であるが, どの軌道電子で起こるかの確率データは文献に見当たらない. しかし, 例えば K 軌道電子で起こった場合でも, 付随して発生する特性 X 線のエネルギー X は, 三対子生成が起こる閾エネルギー (2.044 MeV) および $2m_0c^2$ に比べてはるかに小さいことは明らかである. したがって(11)式において $X=0$ としたことによる影響はないと考えられる.

4-4 他文献の μ_{tr}/p との比較

本稿で計算した空気に対する μ_{tr}/p と, Hubbell ら³⁾, Higgins ら¹⁰⁾ の μ_{tr}/p との比較を Table 2 に示す. Hubbell の値(1969 年)は 10~20 keV で本稿の値および Higgins の値(1999 年)より小さくなっている. これは主に, 1969 年から 1999 年の間に相互作用断面積データが再評価されたことに起因している¹¹⁾. 本稿で算出した μ_{tr}/p と, Higgins らの μ_{tr}/p は, 低エネルギー領域から高エネルギー領域までよく一致している.

質量エネルギー転移係数, μ_{tr}/p は, これまで各相互作用断面積から質量エネルギー吸収係数, μ_{en}/p を計算する過程で論じられることが多く¹¹⁾, 元素および各種物

Table 1 Table of mass attenuation coefficients,¹⁾ mass energy transfer coefficients and mass energy absorption coefficients¹⁾ for air and water

Photon energy (MeV)	Air, Dry (near sea level)			Water, Liquid		
	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{tr}/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{tr}/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.0000E-03	3.606E+03	3.602E+03	3.599E+03	4.077E+03	4.071E+03	4.065E+03
1.5000E-03	1.191E+03	1.189E+03	1.188E+03	1.376E+03	1.373E+03	1.372E+03
2.0000E-03	5.279E+02	5.266E+02	5.262E+02	6.173E+02	6.158E+02	6.152E+02
3.0000E-03	1.625E+02	1.616E+02	1.615E+02	1.929E+02	1.918E+02	1.917E+02
3.2029E-03	1.338E+02	1.329E+02	1.328E+02			
3.2029E-03	1.483E+02	1.459E+02	1.458E+02			
4.0000E-03	7.788E+01	7.638E+01	7.636E+01	8.278E+01	8.194E+01	8.190E+01
5.0000E-03	4.027E+01	3.933E+01	3.931E+01	4.259E+01	4.191E+01	4.188E+01
6.0000E-03	2.341E+01	2.271E+01	2.271E+01	2.465E+01	2.407E+01	2.405E+01
8.0000E-03	9.921E+00	9.448E+00	9.446E+00	1.037E+01	9.921E+00	9.912E+00
1.0000E-02	5.120E+00	4.744E+00	4.742E+00	5.329E+00	4.947E+00	4.943E+00
1.5000E-02	1.614E+00	1.334E+00	1.334E+00	1.673E+00	1.374E+00	1.373E+00
2.0000E-02	7.779E-01	5.392E-01	5.389E-01	8.096E-01	5.507E-01	5.503E-01
3.0000E-02	3.538E-01	1.537E-01	1.536E-01	3.756E-01	1.557E-01	1.556E-01
4.0000E-02	2.485E-01	6.834E-02	6.832E-02	2.683E-01	6.951E-02	6.946E-02
5.0000E-02	2.080E-01	4.099E-02	4.097E-02	2.269E-01	4.226E-02	4.223E-02
6.0000E-02	1.874E-01	3.042E-02	3.041E-02	2.058E-01	3.193E-02	3.190E-02
8.0000E-02	1.662E-01	2.408E-02	2.406E-02	1.836E-01	2.598E-02	2.597E-02
1.0000E-01	1.541E-01	2.327E-02	2.325E-02	1.707E-01	2.547E-02	2.546E-02
1.5000E-01	1.356E-01	2.497E-02	2.496E-02	1.505E-01	2.765E-02	2.764E-02
2.0000E-01	1.234E-01	2.674E-02	2.673E-02	1.370E-01	2.969E-02	2.967E-02
3.0000E-01	1.068E-01	2.875E-02	2.872E-02	1.187E-01	3.195E-02	3.192E-02
4.0000E-01	9.549E-02	2.953E-02	2.949E-02	1.061E-01	3.282E-02	3.278E-02
5.0000E-01	8.712E-02	2.970E-02	2.966E-02	9.687E-02	3.303E-02	3.299E-02
6.0000E-01	8.055E-02	2.958E-02	2.953E-02	8.956E-02	3.289E-02	3.284E-02
8.0000E-01	7.074E-02	2.889E-02	2.883E-02	7.866E-02	3.213E-02	3.206E-02
1.0000E+00	6.358E-02	2.796E-02	2.789E-02	7.072E-02	3.110E-02	3.103E-02
1.2500E+00	5.687E-02	2.675E-02	2.665E-02	6.323E-02	2.974E-02	2.965E-02
1.5000E+00	5.175E-02	2.558E-02	2.547E-02	5.754E-02	2.844E-02	2.833E-02
2.0000E+00	4.447E-02	2.359E-02	2.345E-02	4.941E-02	2.621E-02	2.607E-02
3.0000E+00	3.581E-02	2.076E-02	2.057E-02	3.969E-02	2.300E-02	2.282E-02
4.0000E+00	3.079E-02	1.894E-02	1.870E-02	3.403E-02	2.091E-02	2.066E-02
5.0000E+00	2.751E-02	1.770E-02	1.740E-02	3.031E-02	1.946E-02	1.916E-02
6.0000E+00	2.522E-02	1.683E-02	1.647E-02	2.770E-02	1.842E-02	1.806E-02
8.0000E+00	2.225E-02	1.571E-02	1.524E-02	2.429E-02	1.707E-02	1.661E-02
1.0000E+01	2.045E-02	1.507E-02	1.449E-02	2.219E-02	1.626E-02	1.568E-02
1.5000E+01	1.810E-02	1.434E-02	1.353E-02	1.941E-02	1.528E-02	1.445E-02
2.0000E+01	1.705E-02	1.415E-02	1.310E-02	1.813E-02	1.494E-02	1.388E-02

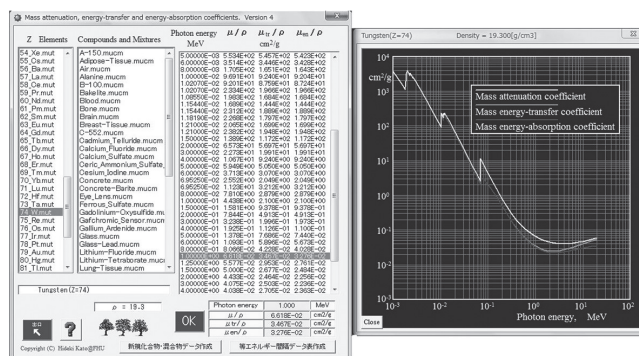


Fig. 7 Image showing the software, mu-4, and searching mass energy transfer coefficient for selectable elements or substances.

Table 2 Comparison of mass energy transfer coefficients for air calculated in current study with those of Hubbell, et al.³⁾ and Higgins, et al.¹⁰⁾

Photon energy (MeV)	Air, Dry (near sea level) $\mu_{tr}/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$		
	Current study	Hubbell ³⁾	Higgins ¹⁰⁾
1.0000E-03	3.602E+03		
1.5000E-03	1.189E+03		
2.0000E-03	5.266E+02		
3.0000E-03	1.616E+02		
3.2029E-03	1.329E+02		
3.2029E-03	1.459E+02		
4.0000E-03	7.638E+01		
5.0000E-03	3.933E+01		
6.0000E-03	2.271E+01		
8.0000E-03	9.448E+00		
1.0000E-02	4.744E+00	4.61E+00	4.742E+00
1.5000E-02	1.334E+00	1.27E+00	1.334E+00
2.0000E-02	5.392E-01	5.11E-01	5.391E-01
3.0000E-02	1.537E-01		1.538E-01
4.0000E-02	6.834E-02		6.84E-02
5.0000E-02	4.099E-02		4.10E-02
6.0000E-02	3.042E-02		3.04E-02
8.0000E-02	2.408E-02		2.41E-02
1.0000E-01	2.327E-02		2.33E-02
1.5000E-01	2.497E-02		2.50E-02
2.0000E-01	2.674E-02		2.67E-02
3.0000E-01	2.875E-02		2.87E-02
4.0000E-01	2.953E-02		2.95E-02
5.0000E-01	2.970E-02		2.97E-02
6.0000E-01	2.958E-02		2.96E-02
8.0000E-01	2.889E-02		2.89E-02
1.0000E+00	2.796E-02		2.79E-02
1.2500E+00	2.675E-02		
1.5000E+00	2.558E-02		2.56E-02
2.0000E+00	2.359E-02	2.36E-02	2.36E-02
3.0000E+00	2.076E-02	2.07E-02	2.07E-02
4.0000E+00	1.894E-02	1.89E-02	1.89E-02
5.0000E+00	1.770E-02	1.78E-02	1.77E-02
6.0000E+00	1.683E-02	1.68E-02	1.68E-02
8.0000E+00	1.571E-02	1.57E-02	1.57E-02
1.0000E+01	1.507E-02	1.51E-02	1.50E-02
1.5000E+01	1.434E-02		
2.0000E+01	1.415E-02		

質に対する μ_{tr}/ρ をデータベース化されたものは公表されていない。 μ_{tr}/ρ は光子フルエンスをカーマに換算する際などに不可欠な係数であり、本稿で作成したデータベースおよびその検索ソフトウェア mu-4 は、放射線計測において有用である。

5. 結 語

原子番号 Z=1 から 92 までの元素および線量計測に関係する 48 の化合物・混合物に対する質量エネルギー

転移係数 μ_{tr}/ρ を算出してデータベース化し、任意データを検索できるソフトウェアを作成した。これまで μ_{tr}/ρ をまとめた形で公表した文献などではなく、本データベースおよび検索ソフトウェア mu-4 は放射線計測分野において有用と考える。

データベース、データ検索ソフトウェア mu-4 は下記のサイトからダウンロードできる。

<http://www.fujita-hu.ac.jp/~hid-kato/freesoft.html>

参考文献

- 1) Seltzer SM, Hubbell JH, 前越 久 監. 光子減弱係数データブック. 放射線医療技術学叢書(11). 京都: 日本放射線技術学会, 1995.
- 2) Hubbell JH, Seltzer SM. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest (NISTIR 5632). National Institute of Standards and Technology, Washington D.C. 1995.
- 3) Hubbell JH. Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV (NSRDS-NBS 29). National Bureau of Standards, Washington D.C. 1969.
- 4) Seltzer SM. Calculation of photon mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients. Radiat Res 1993; 136(2): 147-170.
- 5) Berger MJ, Hubbell JH, Seltzer SM, et al. XCOM-Photon cross sections database (NBSIR 87-3597). National Institute of Standards and Technology, Washington D.C. 1998.
- 6) Storm E, Israel HI. Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100. Nuclear data Tables 1970; A7: 565-681.
- 7) Fink RW, Jopson RC, Swift CD. Atomic fluorescence yields. Rev Mod Phys 1966; 38(3): 513-540.
- 8) Hubbell JH, Veigele WJ, Briggs EA, et al. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections. Physical and Chemical Reference Data 1975; 4(3): 471-538.
- 9) ICRU. Report 37. Stopping powers for electrons and positrons. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda MD, 1984.
- 10) Higgins PD, Attix FH, Hubbell JH, et al. Mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients including in-flight positron annihilation for photon energy 1 keV to 100 MeV (NISTIR4812). National Bureau of Standards, Washington D.C. 1992. (cited from reference 11)
- 11) 平山英夫. 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. 日本原子力学会誌 2001; 43(5): 427-432.

問合先

〒 470-1192 豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98
 藤田保健衛生大学医療科学部放射線学科 加藤秀起