

光子フルエンス・照射線量・吸収線量などの相互関係

基礎データ

電子素量 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [C]} = 4.80 \times 10^{-10} \text{ [esu]}$

$1 \text{ [C]} = 2.998 \times 10^9 \text{ [esu]}, \quad 1 \text{ [esu]} = 3.336 \times 10^{-10} \text{ [C]}$

$1 \text{ [eV]} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ [erg]} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [J]}$

$1 \text{ [J]} = 10^7 \text{ [erg]}$

$W = 33.97 \text{ [eV]}$ (W 値)

(空気中に1イオン対を生成するに要する平均エネルギー)

照射線量の単位 R と C/kg の関係

1 [R]は標準状態の空気 1 cm³中に1 [esu]（静電単位）の電離を起こす照射線量である。[esu]を[C]に変換し、空気 1 cm³を重さ[kg]に変換すると、次式のとおり[C/kg]の単位に変換できる。

$$\begin{aligned} 1[R] &= 1 \left[\frac{esu}{cm^3_{air}} \right] = \frac{1}{2.998 \times 10^9} \left[\frac{C}{cm^3_{air}} \right] \\ &= \frac{1000}{2.998 \times 10^9 \times 0.001293} \left[\frac{C}{kg_{air}} \right] = 2.58 \times 10^{-4} \left[\frac{C}{kg} \right] \end{aligned}$$

照射線量と空気吸収線量の関係

荷電粒子平衡が成立している場合，（ $h\nu < \text{数MeV}$ ）

照射線量を“単位重さ当たりの空気中に生じるイオン対数”に換算する。それに W 値（空気中に1イオン対を生成するに要する平均エネルギー）を乗じると、空気が吸収したエネルギー（空気吸収線量）が算出される。

$$1[R] = \frac{1}{0.001293} \left[\frac{esu}{g} \right] = 773.4 \left[\frac{esu}{g} \right] = \frac{773.4}{4.80 \times 10^{-10}} \left[\frac{\text{イオンpair}}{g} \right] = 1.61 \times 10^{12} \left[\frac{\text{イオンpair}}{g} \right]$$
$$\Rightarrow 1.61 \times 10^{12} \times 33.97 \left[\frac{eV}{g} \right] = 1.61 \times 10^{12} \times 33.97 \times 1.602 \times 10^{-12} \left[\frac{erg}{g} \right] = 87.6 \left[\frac{erg}{g} \right] = 0.876 [rad]$$

$$1 \left[\frac{C}{kg_{air}} \right] = \frac{1}{1.602 \times 10^{-19}} \left[\frac{\text{イオンpair}}{kg} \right]$$
$$\Rightarrow \frac{1}{1.602 \times 10^{-19}} \times 33.97 \times 1.602 \times 10^{-19} \left[\frac{J}{kg} \right] = 33.97 \left[\frac{J}{kg} \right] = 33.97 [Gy]$$

この場合、厳密には“空気吸収線量”ではなく、“空気衝突カーマ”であるが、荷電粒子(電子)平衡状態では、空気衝突カーマ = 空気吸収線量 となる。

照射線量と物質 (*med*) の吸収線量の関係 (単一エネルギー γ 線の場合)

照射線量と空気吸収線量は前述の関係にある。

空気と空気以外の物質との吸収線量の比は、次式のようにそれらの質量エネルギー吸収係数の比で表すことができる。

$$1[R] \Rightarrow 0.876 \times \frac{(\mu_{en}/\rho)_{med,h\nu}}{(\mu_{en}/\rho)_{air,h\nu}} [rad]$$

$$1\left[\frac{C}{kg}\right] \Rightarrow 33.97 \times \frac{(\mu_{en}/\rho)_{med,h\nu}}{(\mu_{en}/\rho)_{air,h\nu}} [Gy]$$

吸収線量 D と光子フルエンス Φ の関係 (単一エネルギー γ 線の場合)

光子フルエンスに光子エネルギー $h\nu$ とそれに対する空気の質量エネルギー吸収係数を乗じると、空気が吸収するエネルギーが算出され、空気吸収線量に換算できる。

$$D_{med} \left[\frac{keV}{g} \right] = \Phi [cm^{-2}] \times h\nu [keV] \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{med,h\nu} \left[\frac{cm^2}{g} \right]$$

$$D_{med} \left[rad = \frac{100erg}{g} \right] = \Phi [cm^{-2}] \times h\nu [keV] \times 1.602 \times 10^{-9} \left[\frac{erg}{keV} \right] \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{med,h\nu} \left[\frac{cm^2}{g} \right] \times \frac{1}{100}$$

$$D_{med} \left[Gy = \frac{J}{kg} \right] = \Phi [cm^{-2}] \times h\nu [keV] \times 1.602 \times 10^{-16} \left[\frac{J}{keV} \right] \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{med,h\nu} \left[\frac{cm^2}{g} \right] \times 10^3 \left[\frac{g}{kg} \right]$$

照射線量 X と光子フルエンス Φ の関係 (単一エネルギー γ 線の場合)

“吸収線量と光子フルエンスの関係” に “空気吸収線量と照射線量の関係” を当てはめると、次の関係が求まる。

$$X[R] = \Phi[cm^{-2}] \times hv[keV] \times 1.602 \times 10^{-9} \left[\frac{erg}{keV} \right] \\ \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air,hv} \left[\frac{cm^2}{g} \right] \times \frac{1}{87.6} \left[\frac{R}{erg/g} \right]$$
$$X \left[\frac{C}{kg} \right] = \Phi[cm^{-2}] \times hv[keV] \times 1.602 \times 10^{-16} \left[\frac{J}{keV} \right] \\ \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air,hv} \left[\frac{cm^2}{g} \right] \times 10^3 \left[\frac{g}{kg} \right] \times \frac{1}{33.97} \left[\frac{C/kg}{J/kg} \right]$$

照射線量 X と光子フルエンス Φ の関係 (連続スペクトルX線の場合)

連続スペクトルを持つX線束の総光子数は

$$\Phi = \int_0^{E_{max}} \phi(E) dE \quad \text{で算出できる。}$$

E_{max} : 最大光子エネルギー (管電圧に等しい)

$\phi(E)$: 単位面積を通過するエネルギー $E[\text{keV}] \sim E + \Delta E[\text{keV}]$
に含まれる光子数 $[\text{cm}^{-2}]$

このX線束のフルエンスと照射線量は次式の関係がある。

$$X[R] = \frac{1.602 \times 10^{-9}}{87.6} \int_0^{E_{max}} \phi(E) \times E \times (\mu_{en} / \rho)_{air,E} dE$$

$$X \left[\frac{C}{kg} \right] = \frac{1.602 \times 10^{-13}}{33.97} \int_0^{E_{max}} \phi(E) \times E \times (\mu_{en} / \rho)_{air,E} dE$$