



会期:2004年 4 月 9 日
会場:パシフィコ横浜会議センター

空気の電離量から分かる人体の吸収線量

荒木不次男

熊本大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

Evaluation of an Absorbed Dose to the Human Body by Measuring Ionizations in a Cavity Chamber

Fujio Araki

Department of Radiological Technology, Kumamoto University School of Health Sciences

はじめに

電離性放射線の吸収線量測定, 特に高エネルギー光子・電子線では, Bragg-Grayの空洞理論に基づく空洞電離箱が使用される。しかしながら, 電離箱線量計では吸収線量の絶対線量を直接的に求めることが原理的に不可能である。したがって, 空洞電離箱の使用に際しては標準線量計, すなわち照射線量で校正する場合は照射線量あるいは空気カーマの絶対測定が可能で一次標準器としての空洞電離箱¹⁾と, 吸収線量で校正する場合にはカロリメータやフリッケ線量計などの一次標準器²⁾, あるいはこれらと線量トレーサビリティを持つ空洞電離箱とあらかじめ比較校正する必要がある。照射線量で校正された空洞電離箱では, 空洞空気内で生成された電離イオンの電荷測定から照射線量が求められ, 吸収線量に変換される。一方, 吸収線量で校正されている場合は, 電離量の測定から吸収線量を直接的に求めることができる。空洞電離箱による吸収線量測定は, 他の検出器に比べ取り扱いが簡便でなおかつ精度が高いため臨床現場で使用される。本報告では, 空洞電離箱を用いて光子・電子線の吸収線量を測定する場合に必要な基本的な物理的事項について述べる。

1. 電離性放射線の吸収線量測定法

電離性放射線(間接電離性放射線, 直接電離性放射線)で照射された物質(人体)の吸収線量の絶対測定は, 主に以下の方法で測定される。

1-1 電離法(空洞電離箱)

荷電粒子が気体(空気)中で生成する電離イオン(電荷 nC)を測定する方法で, 一般的に臨床現場で 사용되는簡便で精度の高い方法である。実際には, 照射線量で校正された空洞電離箱を使用して物質内の照射線量が求められる。照射線量はBragg-Grayの空洞理論に

基づいて吸収線量に変換される。最近では直接的に吸収線量を求める吸収線量校正が採用され, より精度が高く, 簡便に吸収線量が得られる^{2, 3)}。

1-2 熱量計(カロリメータ)

物質(水, graphite)に吸収された放射線エネルギーを測定する唯一の直接的な方法で, 物質の温度上昇の測定から吸収エネルギーを求める。例えば, 水に1Gyの線量が吸収されたときの水の温度上昇は $2.39 \times 10^{-4}^{\circ}C$ に相当する。最近, カナダと米国では水カロリメータを用いた吸収線量測定が高精度で行えるようになった。したがって, 照射線量校正に代わって, 水カロリメータで値付けした水吸収線量校正定数が国家標準として空洞電離箱の校正に使用されている^{2, 3)}。

1-3 化学線量計(フリッケ線量計: $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ 酸化現象)

放射線照射により吸収されたエネルギーは, 吸収体のなかで化学的変化を引き起こす。この量は吸収エネルギーに比例する。最も代表的な化学線量計は, フリッケ(鉄)線量計であり, カロリメータと同様に吸収線量の絶対測定に使用される。フリッケ線量計のG値は, 放射線の吸収エネルギー100eV当たりの生成分子数を表し, 高エネルギーX線・電子線では $G=15.5$ でほぼ一定値である。

2. 放射線の量と単位

種々の放射線の量が, 国際放射線単位測定委員会(ICRU)のReport No.60⁴⁾において定義されている。下記に, 基本的な量の体系を示す。

2-1 放射線場の量(ラジオメトリック量, radiometric quantity)

放射線自体に関する量で空間を通過する放射線を定

量的に表現する。これは、放射線計測量(ラジオメトリック量)と呼ばれ、放射線計測のことをラジオメトリ(radiometry)という。ラジオメトリック量には、粒子フルエンス(率)やエネルギーフルエンス(率)などがある。

(a) (粒子)フルエンス(m^{-2})

粒子フルエンス Φ は dN を da で除した商である。 dN は断面積が da である球に入射する粒子数である(Fig. 1)。

$$\Phi = dN / da \quad \dots\dots\dots(1)$$

(b) エネルギーフルエンス(Jm^{-2})

粒子のエネルギーフルエンス Ψ は dR を da で除した商である。 dR は断面積 da の球内に入射するすべての粒子の静止エネルギーを除いた放射エネルギーの合計である。

$$\Psi = dR / da \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、放射エネルギーは $R = h\nu \cdot N$ である。

2-2 放射線と物質の相互作用の確率(相互作用係数, interaction coefficient)

微視的表現量：各種の反応断面積(σ など)

巨視的表現量：各種の作用係数(μ , S など)

2-3 放射線量(ドジメトリック量, dosimetric quantity)

放射線と物質の相互作用の確率を含めた結果量(エネルギー授受に関係する量)である。これは、線量計測量(ドジメトリック量)と呼ばれ、線量計測のことをドジメトリ(dosimetry)という。代表的なドジメトリック量には次のようなものがある。

- ・照射線量 $X = dQ/dm$ ：光子(X線, γ 線)に適用
- ・カーマ $K = dE_{ab}/dm (=K_e + K_r)$ ：間接電離性放射線(光子, 中性子)に適用
- ・吸収線量 $D = d\bar{E}/dm$ ：すべての電離性放射線に適用

2-4 相互関係

ラジオメトリック量, 相互作用, ドジメトリック量の関係をFig. 2に示す。

3. 光子と物質の相互作用

3-1 光子の線減弱係数 μ (m^{-1})

線減弱係数 μ は、入射光子が減弱体(相互作用物質)の単位厚さ Δx あたりに相互作用する割合を表し、次式で定義される。

$$\mu = -\frac{\Delta\Phi/\Phi_x}{\Delta x} \quad \text{or} \quad \mu = -\frac{\Delta E/E_x}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

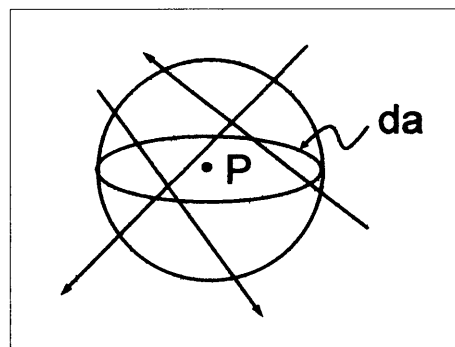


Fig. 1 球線束

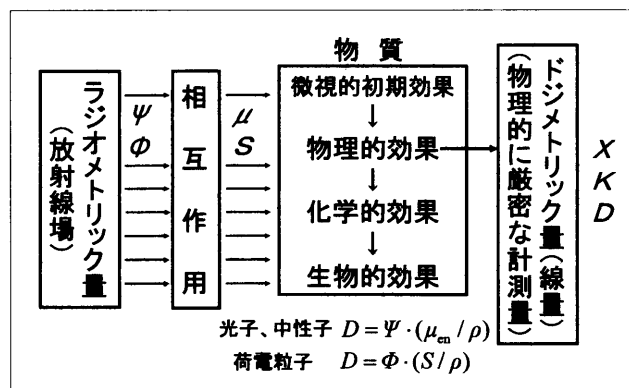


Fig. 2 相互関係

ここで、 Φ_x はFig. 3に示すように物質内の x 点における光子フルエンス、 $\Delta\Phi$ は Δx 中で光子が物質と相互作用するフルエンスを表す。同様に、 E_x は x 点における光子エネルギー、 ΔE は Δx 中で光子が物質との相互作用で失うエネルギーである。 Φ_x は以下の式で求められる。

$$\Delta\Phi = -\mu\Phi_x\Delta x \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad \dots\dots\dots(5)$$

また、 μ は以下の相互作用成分からなる。

$$\mu = \tau + (\sigma_a + \sigma_s)_c + \kappa + \sigma_{coh} + \tau_{nucl} \quad \dots\dots\dots(6)$$

τ ：光電減弱係数, σ_a ：コンプトンエネルギー転移係数, σ_s ：コンプトン散乱係数

κ ：電子対減弱係数, σ_{coh} ：干渉性減弱係数, τ_{nucl} ：光核反応減弱係数

さらに、 μ と原子反応断面積 σ (m^2/atom)の間には次式の関係がある。

$$\mu = N\sigma \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 N は単位体積当たりの相互作用物質(標的物質)の原子数(atoms/m^3)である。

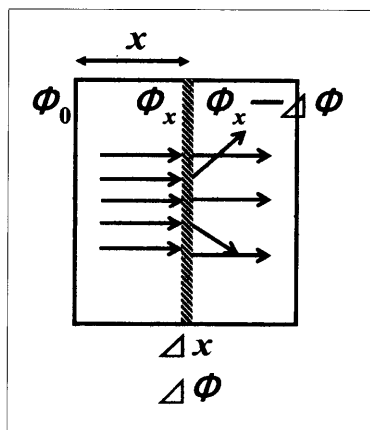


Fig. 3 物質における相互作用

3-2 光子のエネルギー転移係数 μ_{tr} (m^{-1})

Fig. 3において Φ を Ψ に置き換えると, 光子エネルギー E_x のうち, Δx 中で荷電粒子の運動エネルギー ΔE_{tr} に転移される割合 μ_{tr} は次式で表される.

$$\mu_{tr} = \frac{\Delta E_{tr} / E_x}{\Delta x} \quad (E_x = h\nu \cdot N = h\nu \cdot \Phi_x \cdot A = \Psi_x \cdot A) \quad \dots\dots\dots (8)$$

同様に, μ_{tr} は以下の相互作用成分からなる.

$$\mu_{tr} = \tau_a + \sigma_a + \kappa_a = \tau \left(1 - \frac{\delta}{h\nu} \right) + \sigma_c \left(\frac{T_{av}}{h\nu} \right) + \kappa \left(1 - \frac{2m_e c^2}{h\nu} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで, $h\nu$ は入射光子のエネルギー, δ は吸収された光子当たりに放射される蛍光X線(特性X線)の平均エネルギーである. T_{av} はコンプトン電子に転移される平均エネルギー, $2m_e c^2$ は電子対生成の消滅放射線として放出されるエネルギーである.

3-3 エネルギー吸収係数 μ_{en} (m^{-1})

光子エネルギー E_x のうち, Δx 中で吸収される荷電粒子の運動エネルギー ΔE_{ab} の割合 μ_{en} は次式で表される.

$$\mu_{en} = \frac{\Delta E_{ab} / E_x}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (10)$$

μ_{en} は μ_{tr} から荷電粒子による制動放射線の割合 g を除いた次式に等しい.

$$\mu_{en} = \mu_{tr}(1 - g) \quad \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 4に示すように, 人体を構成する物質の質量エネルギー吸収係数は, コンプトン効果が主体のエネルギー領域では物理的密度にあまり依存しない. これは, 人体を構成する物質の電子密度があまり変わらないためである.

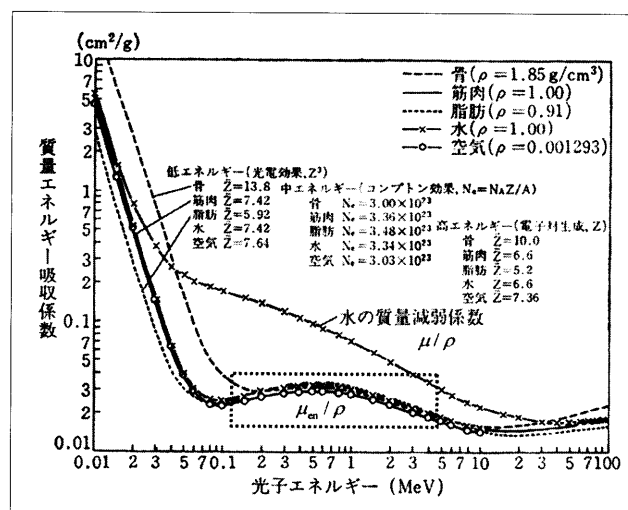


Fig. 4 骨, 筋肉, 脂肪, 水, 空気の質量エネルギー吸収係数

3-4 光子エネルギーの吸収過程

光子エネルギーの吸収過程の第一段階は, Fig. 5に示すように, それぞれの相互作用による光子エネルギーの二次電子の運動エネルギーへの変換(転移)である. この段階で, 光子エネルギーの一部が原子の励起エネルギーと対電子の静止質量エネルギー(消滅放射線)へ変換される. 次の段階は, この電子の運動エネルギーの物質中での電離と励起による消費である. ここではまた, 制動放射によって少しのエネルギーが失われる.

Fig. 6には光子および電子・陽電子の原子・分子系との各相互作用の模式図を示す.

3-5 カーマK, 吸収線量D, エネルギーフルエンス Ψ , 質量エネルギー転移係数 μ_{tr}/ρ , 質量エネルギー吸収係数 μ_{en}/ρ の関係

(a) 荷電粒子への転移エネルギー ΔE_{tr} (Gy)

ΔE_{tr} は(8)式から次式のように表される.

$$\Delta E_{tr} = E \cdot \mu_{tr} \cdot \Delta x = \Psi \cdot A \cdot \mu_{tr} \cdot \Delta x, (E = h\nu \cdot N = h\nu \cdot \Phi \cdot A = \Psi \cdot A) \quad \dots\dots\dots (12)$$

(b) カーマK(Gy)

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (J/m^2 \cdot m^2/kg = J/kg = Gy) \quad \dots\dots\dots (13)$$

(c) 吸収線量D(Gy)

$$D = \frac{dE_{ab}}{dm} = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} \quad \dots\dots\dots (14)$$

4. 荷電粒子と物質の相互作用

4-1 荷電粒子のエネルギー損失

(a) 原子の軌道電子との非弾性衝突(衝突損失): 電離

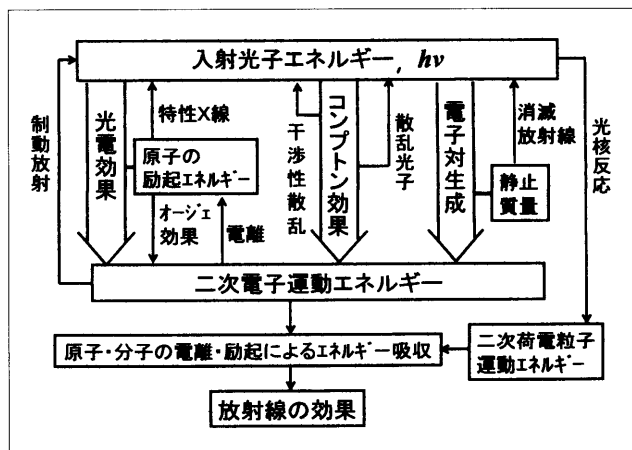


Fig. 5 光子エネルギーの吸収過程

と励起による。

- (b) 原子核との非弾性衝突(放射損失)：制動放射は主に軽い高エネルギー粒子(電子)で生じる。陽子や重い粒子では重要でない。
- (c) 原子核との弾性衝突(クーロン散乱)：入射粒子が電子の場合に生じる確率が高く、その軌道は大きく曲げられる。

4-2 質量阻止能(mass stopping power)

荷電粒子が物質中を距離 dx 通過する間に、何回も衝突〔電離(δ線を含む)、励起〕、制動放射を繰り返して、単位質量あたりに失う平均エネルギーを質量阻止能という。

$$\frac{S}{\rho} = \frac{S_{\text{col}}}{\rho} + \frac{S_{\text{rad}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{col}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{rad}} \quad (\text{MeV m}^2/\text{kg}, \text{J m}^2/\text{kg}) \quad (15)$$

全質量阻止能=質量衝突阻止能(励起+電離)+質量放射阻止能(制動放射)

Fig. 7, 8に示すように荷電粒子(+ze)は、物質(Z)中を進む間に軌道電子とのクーロン力によって電離・励起を起こして運動エネルギーを損失する。荷電粒子の相対論的質量増加を無視すれば、質量衝突阻止能(mass collision stopping power)は次式のように表される。

$$\text{荷電粒子} : \frac{S_{\text{col}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{-dT}{dx} \right)_{\text{col}} \propto \frac{z^2}{v^2} \cdot \frac{N_A Z}{A} \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 m}{E} \quad (16)$$

$$\text{電子} : \frac{S_{\text{col}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{-dT}{dx} \right)_{\text{col}} \propto \frac{1}{v^2} \cdot \frac{N_A Z}{A} \propto \frac{1}{v^2} \quad (17)$$

ここで、 Z/A (A ：質量数)は水素以外のすべての安定同位体についてほぼ $1/3 \sim 1/2$ であり、質量衝突阻止能は物質の種類にあまり依存しない。Fig. 9の挿入図のBC

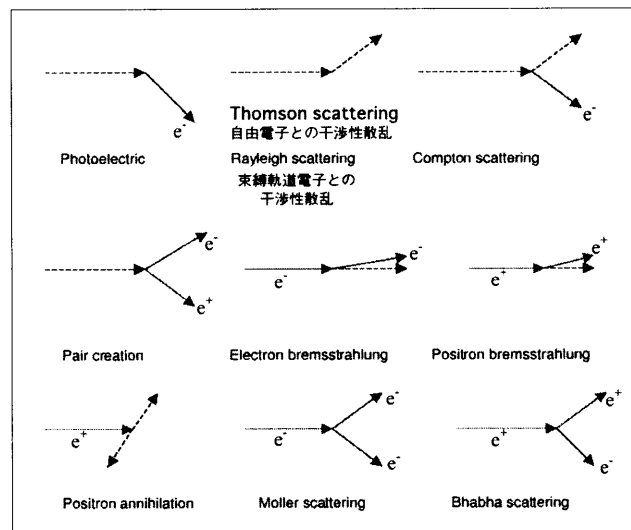
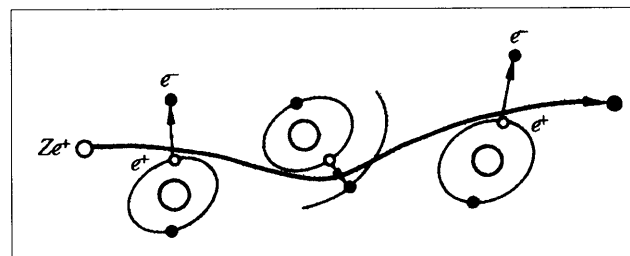
Fig. 6 光子(点線)および電子(e^-)・陽電子(e^+)の原子・分子系との各相互作用の模式図

Fig. 7 荷電粒子の原子・分子系との衝突

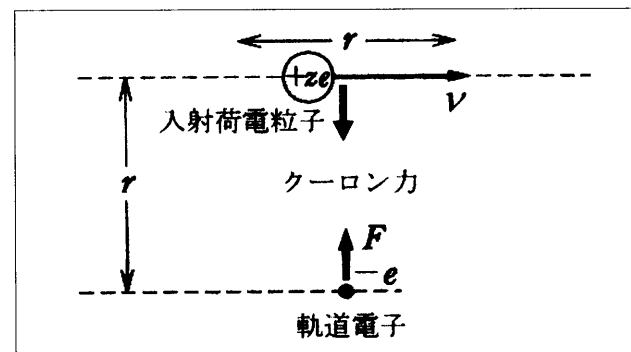


Fig. 8 軌道電子が受ける作用

領域では、エネルギー損失は $1/v^2$ に比例して小さくなる。実際には、電子は光速に近づくため相対論的質量増加が無視できず、質量衝突阻止能はベーテの次式で与えられる。

$$\frac{S_{\text{col}}}{\rho} = \frac{2\pi e^4}{m_e v^2} \frac{N_A Z}{A} \left\{ \ln \frac{m_e v^2 E}{2I^2 (1-\beta^2)} - \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} \left(1 - \sqrt{1-\beta^2} \right)^2 - \beta^4 \right\} \quad (18)$$

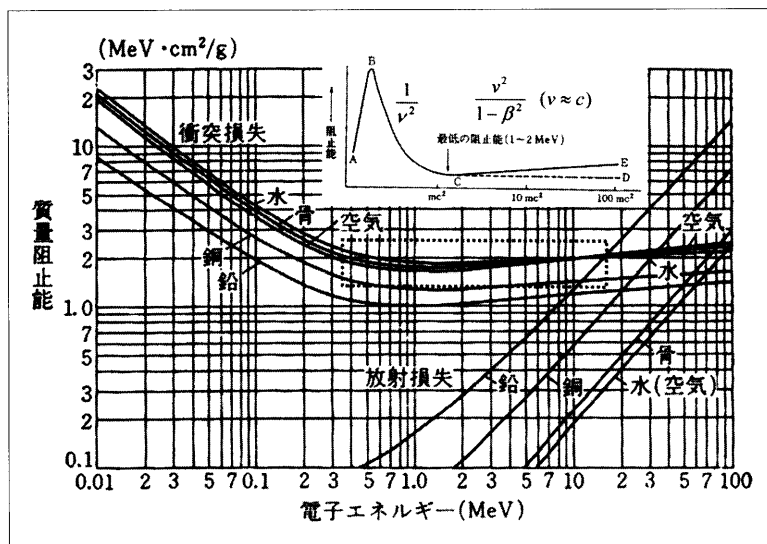


Fig. 9 電子線の衝突損失および放射損失による質量阻止能

ここで、 m_e は電子の静止質量、 e は電子の電荷、 v は電子の速度、 N_A はアボガドロ定数、 ρ は物質の密度、 A は質量数、 I は物質の平均励起エネルギー (average exciting energy) である。また、 $\beta=v/c$ 、 Δ は密度効果の補正項である。電子の速度 v が光速 c に近づくと ($\beta \approx 1$)、速度の増大とともに18(式)の \ln の項の $v^2/(1-\beta^2)$ が大きくなり、エネルギー損失は徐々に大きくなる (Fig. 9の挿入図のCE領域)。

4-3 吸収線量 D 、荷電粒子フルエンス Φ 、質量衝突阻止能 S_{col}/ρ の関係

$$D = \Phi \cdot \left(\frac{-dT}{\rho \cdot dx} \right)_{col} = \Phi \cdot \frac{S_{col}}{\rho} \quad (\text{m}^{-2} \cdot \text{Jm}^2/\text{kg} = \text{J/kg} = \text{Gy}) \quad (19)$$

ここで、 Φ は荷電粒子のフルエンス (m^{-2}) である。

5. 照射線量 X 、カーマ K 、吸収線量 D とその関係

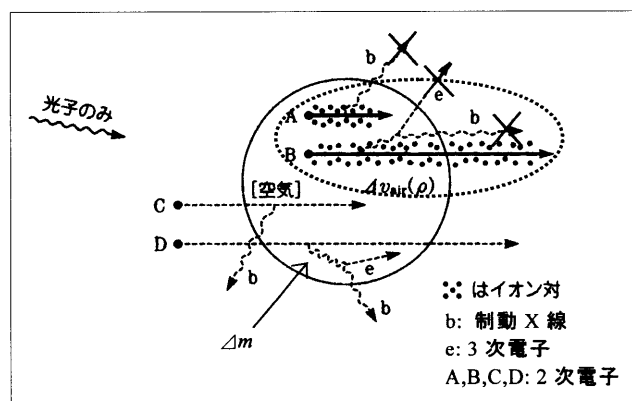
5-1 照射線量 X , exposure (C/kg)

照射線量 X は dQ を dm で除した商である。 dQ は質量 dm の空気のある容積要素内で光子により生じたすべての電子(陰電子および陽電子)が空気中で完全に静止するまでに、その空気中で生じる一方符号のイオンの全電荷の絶対値である(制動X線に起因する電離イオンは含まない…Fig. 10の×で示されている)。

$$X = dQ/dm \quad (\text{C/kg}) \quad (20)$$

照射線量とエネルギーフルエンスの関係

$$X = \frac{\Psi \cdot (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{E,air}}{(\bar{W}/e)_{air}} = \frac{\text{空気の吸収エネルギー, } D_{air} (\text{J/kg})}{1 \text{ イオン対生成当たりの平均エネルギー (J/C)}} \quad (21)$$

Fig. 10 空気容積 ΔV_{air} の照射線量, X (C/kg)

5-2 カーマ K , Kerma (J/kg=Gy)

カーマ K は dE_{tr} を dm で除した商である。 dE_{tr} は指定された物質のある容積要素内で間接電離性粒子(X線、 γ 線、中性子)によって生じたすべての荷電粒子の初期運動エネルギーの和で、 dm はその容積要素内の物質の質量である (Fig. 11)。

$$K = dE_{tr}/dm \quad (\text{Jkg}^{-1}, \text{Gy}) \quad (22)$$

カーマ=衝突カーマ(電離+励起)+放射カーマ(制動放射)

$$K = K_c + K_r \quad (23)$$

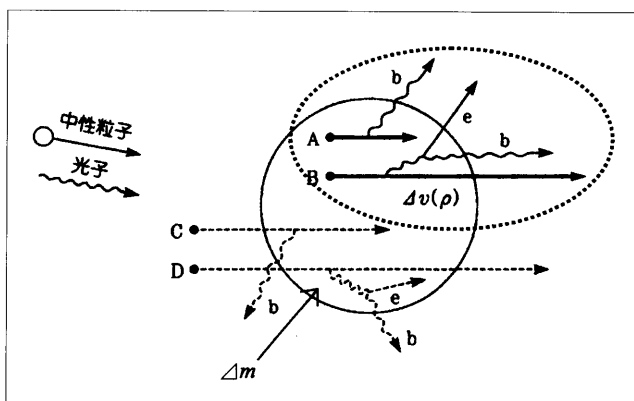
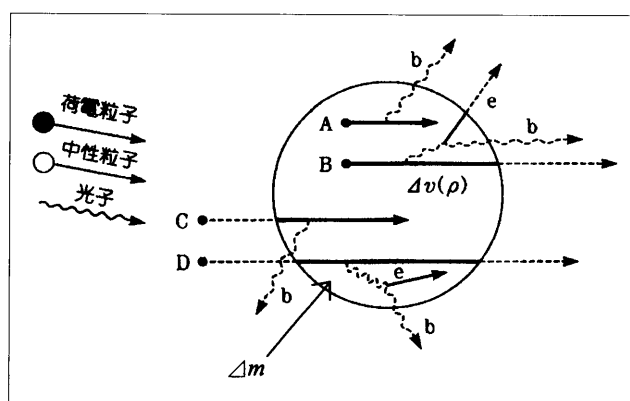
カーマおよび衝突カーマとエネルギーフルエンスの関係

$$K = \Psi \cdot (\bar{\mu}_{tr}/\rho)_{E,Z} \quad (24)$$

$$K_c = \Psi \cdot (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{E,Z} = \Psi \cdot (\bar{\mu}_{tr}/\rho)_{E,Z} \cdot (1-g) \quad (25)$$

5-3 吸収線量 D , absorbed dose (J/kg=Gy)

吸収線量 D は $d\bar{\epsilon}$ を dm で除した商である。 $d\bar{\epsilon}$ はある容積要素内の物質に電離性放射線によって付与された平均エネルギー (mean energy imparted) であり、 dm はその容積要素内の物質の質量である (Fig. 12)。

Fig. 11 容積 Δv , 密度 ρ の物質中のカーマ, $K(\text{Gy})$ Fig. 12 容積 Δv , 密度 ρ の物質中の吸収線量, $D(\text{Gy})$

$$D = d\bar{\epsilon}/dm \quad (\text{Jkg}^{-1}, \text{Gy}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

吸収線量とエネルギーフルエンスの関係

$$D = \Psi \cdot (\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,Z} \quad \dots\dots\dots (27)$$

照射線量, 衝突カーマ, エネルギーフルエンスの関係

$$X = \frac{\Psi \cdot (\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,\text{air}}}{(\bar{W}/e)_{\text{air}}} = \frac{(K_c)_{\text{air}}}{(\bar{W}/e)_{\text{air}}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$(K_c)_{\text{air}} = X \cdot (\bar{W}/e)_{\text{air}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

ただし, $(\bar{W}/e)_{\text{air}} = 33.97 \pm 0.05 \text{ J/C}$ である.

荷電粒子平衡条件が成立するとき

$$D_w = (K_c)_w = \Psi_w \cdot (\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,w} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$D_{\text{air}} = (K_c)_{\text{air}} = \Psi_{\text{air}} \cdot (\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,\text{air}} = X \cdot (\bar{W}/e)_{\text{air}} = 33.97 X \quad \dots\dots\dots (31)$$

ここで, 光子エネルギー束が空間的に一様と仮定すると $\Psi_w = \Psi_{\text{air}}$ であり,

$$D_w = D_{\text{air}} \frac{(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,w}}{(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{E,\text{air}}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

となる.

5-4 荷電粒子平衡, $K_c = D$

照射線量の測定は, 荷電粒子平衡状態で行われる (Fig. 13).

5-5 カーマ K , 衝突カーマ K_c , 吸収線量 D の関係

Fig. 14のように, エネルギー $h\nu$ の光子が容積 V 中でエネルギー T のコンプトン電子を発生し, コンプトン電子から制動放射線が発生した場合を考える. この場合, K , K_c , D に対応する ϵ_{tr} , ϵ_{tr}^0 , ϵ は(33)~(35)式で表される. ここで, ϵ_{tr} は容積 V の物質に間接電離性放射線によって荷電粒子に転移されるエネルギー (energy transferred), ϵ_{tr}^0 は同様に荷電粒子に転移される正味のエネルギー (net energy transferred), ϵ は容積

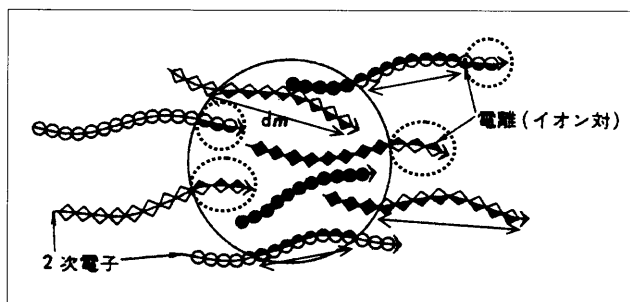
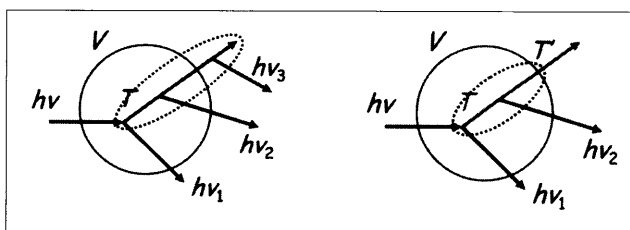


Fig. 13 照射線量の測定原理と荷電粒子平衡

Fig. 14 K , K_c , D の関係

V の物質に付与されるエネルギー (energy imparted) である.

$$K \rightarrow \epsilon_{\text{tr}} = h\nu - h\nu_1 + 0 = T \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$K_c \rightarrow \epsilon_{\text{tr}}^0 = h\nu - h\nu_1 - (h\nu_2 + h\nu_3) + 0 = T - (h\nu_2 + h\nu_3) \dots\dots\dots (34)$$

$$D \rightarrow \epsilon = h\nu - (h\nu_1 + h\nu_2 + T') + 0 = T - (h\nu_2 + T') \dots\dots\dots (35)$$

ここで, 0は容積 V 中での静止質量エネルギーの変化がないことを意味する. 高エネルギー光子では過渡電子平衡が成り立つので, K , K_c , D はFig. 15の関係になる. 低エネルギー光子における電子平衡は二次電子からの制動放射が無視でき, $K = K_c = D$ の関係にあるが, 高エネルギー光子では過渡電子平衡状態となり, $K > K_c = D/\beta$ の関係になる. すなわち, 高エネルギー光子では二次電子のエネルギーが高く, 二次電子は発生点では吸収されず, その平均飛程に一致する下流で吸収されるためFig. 15に示すように $\beta = D/K_c > 1$ の関係となる.

6. Bragg-Grayの空洞理論

Fig. 16に示すように、荷電粒子フルエンス Φ が物質 w と g を横切るとき、吸収線量比 D_w/D_g は物質 w と g の質量阻止能比に等しい。

$$D_w = \Phi \cdot (dT/pdx)_{c,w} \dots\dots\dots (36)$$

$$D_g = \Phi \cdot (dT/pdx)_{c,g} \dots\dots\dots (37)$$

$$\frac{D_w}{D_g} = \frac{(dT/pdx)_{c,w}}{(dT/pdx)_{c,g}} = \frac{(S/\rho)_{c,w}}{(S/\rho)_{c,g}} \dots\dots\dots (38)$$

添え字 c はcollision(衝突)を示す。

Bragg-Grayの空洞理論における仮定

- 媒質中で発生した電子フルエンスは空洞中で変化せず一様である(空洞は荷電粒子の場を乱さないように十分小さい)。
- 空洞中で光子の反応は無視でき、一次光子フルエンスも一様である(空洞の電離電荷は通過する荷電粒子により生成され、集められたものである)。

6-1 Bragg-Grayの空洞理論⁵⁾

物質 w の吸収線量 D_w は次式で求められる。

$$D_w = D_g \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right)_g^w = \frac{Q}{m_g} \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_g \left(\frac{S}{\rho}\right)_g \dots\dots\dots (39)$$

ここで、 $(S/\rho)_g^w$ は非制限質量衝突阻止能比と呼ばれる。これは空洞の影響が無視されており、一次電子が非常に小さいエネルギー損失事象を多数回行ってエネルギーを失う(連続的な減速)と仮定されている(δ electronsが考慮されていない)。

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_g^w = \frac{\int_0^{E_{\max}} [\Phi_E^p(E)]_w [S(E)/\rho]_{c,w} dE}{\int_0^{E_{\max}} [\Phi_E^p(E)]_w [S(E)/\rho]_{c,g} dE} \dots\dots\dots (40)$$

ここで、 E_{\max} は電子スペクトルの最大エネルギー、 $[\Phi_E^p(E)]_w$ は水中の任意の点におけるエネルギー E の一次電子フルエンス(primary electron spectrum)である。

6-2 Spencer-Attixの空洞理論^{5, 6)}

Spencer-Attixは $(S/\rho)_g^w$ の代わりに制限質量衝突阻止能比 $(\bar{L}/\rho)_g^w$ を用いた。これは、媒質から空洞に入射する全電子スペクトル(primary+ δ electrons)のエネルギー E は Δ (cut-off energy)より大きく、 $E > \Delta$ で電子平衡が成立すると仮定している。 Δ に相当する電子の飛程は空洞の大きさに相当する。

Spencer-Attixの $(\bar{L}/\rho)_g^w$ は次式で示される。

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_g^w = \frac{\int_{2\Delta}^{E_{\max}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_w dE + \int_{\Delta}^{2\Delta} [\Phi_E^t(E)]_w [S(E)/\rho]_w dE}{\int_{2\Delta}^{E_{\max}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_g dE + \int_{\Delta}^{2\Delta} [\Phi_E^t(E)]_w [S(E)/\rho]_g dE} \dots\dots\dots (41)$$

ここで、 E_{\max} は電子スペクトルの最大エネルギー、

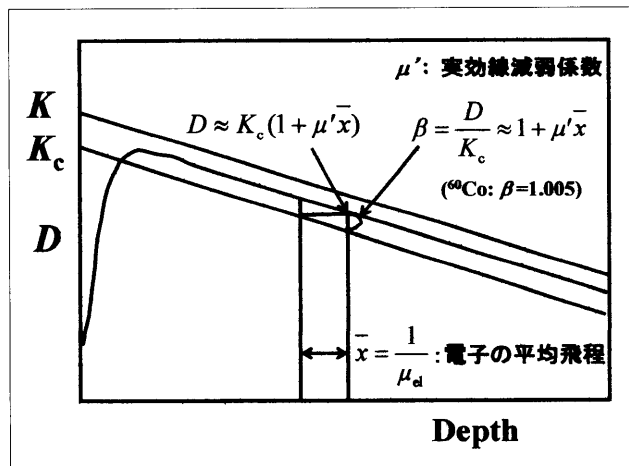


Fig. 15 K , K_c , D の関係(過渡電子平衡)

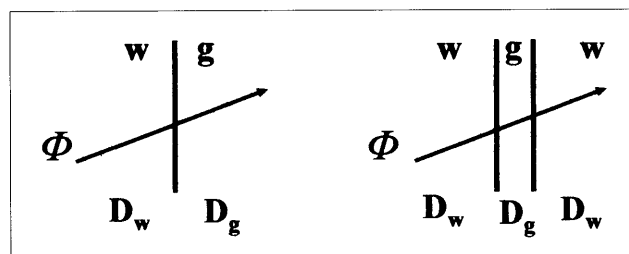


Fig. 16 Bragg-Grayの空洞理論

$[\Phi_E^t(E)]_w$ は水中の任意の点におけるエネルギー E の全電子(微分)フルエンス(primary+ δ electrons), $E > 2\Delta$ の一次電子線は $E < \Delta$ に低下することができないが、 $2\Delta < E < \Delta$ の電子線では $E < \Delta$ に低下することができる。 $2\Delta < E < \Delta$ の電子線によるエネルギー付与をtrack-endsと呼ぶ。

Nahum⁶⁾は、 $2\Delta < E < \Delta$ でのエネルギー付与を考慮して以下の簡単な近似式を与えた。

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_g^w = \frac{\int_{\Delta}^{E_{\max}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_w dE + [\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_w \Delta}{\int_{\Delta}^{E_{\max}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_g dE + [\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_g \Delta} \dots\dots\dots (42)$$

ここで、 $[\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_w$ は $E < \Delta$ に低下する全電子(微分)フルエンス(electrons/g), 円筒形電離箱 6mm ϕ では $\Delta = 10$ keVである。ここで、 $[\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_w \Delta$ はtrack-endsによる空洞へのエネルギー付与である。

7. 水の吸収線量

Spencer-Attixの空洞理論から水の吸収線量 D_w^Q は次式で求められる。

$$D_w^Q = \frac{M_Q}{m_{\text{air}}} \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{\text{air}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{air}} \prod_i P_i \right]_{Q_0} \dots\dots\dots (43)$$

ここで、 $\prod_i P_i$ は電離箱の各擾乱補正係数の積の和であ

る。電離箱の空洞空気の質量 m_{air} はコバルト照射線量校正定数 N_c から

$$\frac{1}{m_{\text{air}}} = N_c k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \dots\dots\dots (44)$$

で求められる。ここで、 k_{att} はコバルト空中校正時の電離箱壁とビルドアップキャップの吸収散乱補正係数と吸収線量と衝突カーマの比の積、 k_m はコバルト空中校正時の電離箱壁とビルドアップキャップの材質の空気不等価性に対する補正係数、 k_{cel} はコバルト空中校正時の中心電極の空気不等価性に対する補正係数である。したがって、 D_w^Q は次式から得られる。

$$D_w^Q = M_Q N_c \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}} k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right]_Q \dots\dots\dots (45)$$

ここで、 P_{wall} は壁材質補正係数、 P_{cav} は空洞補正係数、 P_{dis} は変位補正係数、 P_{cel} は中心電極補正係数である。これらは、水ファントム測定時における空洞電離箱の擾乱補正係数であり、コバルト空中校正時の補正係数 k_{att} 、 k_m 、 k_{cel} と区別する必要がある。添え字 Q は線質(^{60}Co , X線, 電子線)を表す。標準測定法 01⁷⁾で導入されたコバルト水吸収線量校正定数 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ と線質変換係数 k_Q を用いると次式で表せる。

$$D_w^Q = M_Q N_{D,w}^Q = M_Q k_Q N_{D,w}^{60\text{Co}} = M_Q k_Q N_c k_{D,X} \dots\dots\dots (46)$$

ここで、 $N_{D,w}^Q$ は任意の線質に対する水吸収線量校正定数である。 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ と k_Q は次式で与えられる。

$$N_{D,w}^{60\text{Co}} = N_c \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right]_{^{60}\text{Co}} \dots\dots\dots (47)$$

$$k_Q = \frac{N_{D,w}^Q}{N_{D,w}^{60\text{Co}}} = \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right]_Q / \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right]_{^{60}\text{Co}} \dots\dots\dots (48)$$

また、校正定数比 $k_{D,X}$ は次式で与えられる。

$$k_{D,X} = \frac{N_{D,w}^{60\text{Co}}}{N_c} = \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} k_{\text{att}} k_m \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} \right]_{^{60}\text{Co}} \dots\dots\dots (49)$$

ただし、 $(k_{\text{cel}} \cdot P_{\text{cel}})_{^{60}\text{Co}} = 1.0$ である。代表的な種々の円筒形および平行平板形電離箱に対する $k_{D,X}$ 、 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ 、 k_Q の算出に必要な物理データは標準測定法 01⁷⁾に詳細に掲載されている。

おわりに

本報告では、空洞電離箱を用いた光子・電子線の吸収線量測定に必要な基礎的事項について述べた。空洞電離箱は、測定した照射線量を吸収線量に変換するために複雑な空洞理論の知識とさまざまな擾乱補正などに対する知識が要求されるが、他の測定器に比べ簡便で、国際的な線量トレーサビリティが確立されているため、吸収線量の絶対測定の標準線量計として各国において利用されている。最近では水カロリメータによる吸収線量校正が行われるようになり、より高精度の吸収線量評価が可能になってきた。したがって、今後とも普遍的に使用される方法であると考えられる。

謝 辞

本原稿をまとめるにあたり、貴重なご意見・ご助言をいただいた国立病院機構福岡東医療センターの熊谷孝三氏ならびに群馬県立県民健康科学大学の保科正夫氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高田信久, 黒澤忠弘, 小山保二: 産業技術総合研究所における γ 線線量標準の設定. 医用標準線量, 7(2), 11-18, (2002).
- 2) IAEA International Atomic Energy Agency, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water," Technical Report Series No. 398, IAEA, Vienna (2000).
- 3) Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al.: AAPM, American Association of Physicists in Medicine, Task Group 51: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams, Med Phys, 26(9), 1847-1870, (1999).
- 4) ICRU, International Commission on Radiation Units and

Measurements: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, ICRU Report No. 60, Nuclear Technology Publishing, (1998).

- 5) ICRU, International Commission on Radiation Unit and Measurement: Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV, ICRU Report No. 35, Nuclear Technology Publishing, (1984).
- 6) Nahum AE: Water/air mass stopping power ratios for megavoltage photon and electron beams, Phys Med Biol, 23(1), 24-38, (1978).
- 7) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01), 通商産業研究社, 東京, (2002).