

放射能環境（連載通し番号 011）

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（8）

副題：吸収線量の測定法

筆者：SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫
(化学工学会会員, 放射線影響学会会員)

2021年7月5日作成

1. 吸収線量と吸収エネルギー

放射線のエネルギーバランスについては、連載(2) で話しましたので、その繰り返しになりますが、放射線が物質（人間の身体を含む）を構成する原子と相互作用を起こした結果、放射線はその有するエネルギーの一部または全部を失い、物質に E 付与するというこ
とであり、物質側では電離現象から生じる電子・イオン電流をもって、E 吸収を検知しま
す。

従って、E の大小を比べれば、

E 損失量 > E 付与量（制動放射で外部に逃げる E） > E 吸収量（励起現象の E は含まな
い） です。（カッコ内は、不等号となる大きな要因です。他にも相対的に小さい要因はあ
りますが今は省略します。

もう少し細かく言いますと、ある一定量の物質に、放射線が入射することを考えた時、
物質に入る始点における、放射線の持つエネルギー量

≥ 物質の終点までに放射線が物質との相互作用によって失ったエネルギー量
= 電離現象によって検知された物質のエネルギー吸収量（これが物質の吸収線量です；
これを、多くの解説書では、エネルギー付与量と等しいと言っている場合が多いです）
+ 検知されないエネルギー量（ロスとも言えますが、その内容はいろいろな素過程を含
む複雑なものです）、上の不等号付きの等号条件は、その放射線が物質内ですべてのエネ
ルギーを失って終わった場合です。

2. 吸収線量の厳密な定義

一般の方々にとって「厳密な」定義はほとんど不要と思いますが、後日使わねばならな
い現象との関連もありますので、少し解説させていただきます。

定義は、質量 m [kg] の物質が吸収する平均エネルギー量が ε [J]（ジュール）である
とき、吸収線量（記号で D と記す；単位は[Gy] = [J/kg]）は、

$$D = d\varepsilon / dm$$

と定義されます。微分形で定義されているのは、物質の一定の体積ではなく、点で定義できることを示しています。これはどういうことでしょうか？放射線の物理的線量には、照射線量、吸収線量、カーマの3種類がありますが、それらの定義は皆、上式のような微分形で表されます。もう一つ、上記定義で「**平均エネルギー量**」としているのは、放射線一本一本の挙動はランダムであり、平均エネルギーとしてしか考えられないものであるからであるという説明が多いですが、ちょっと違います。これらについて以下解説します。

引用：ATOMICA より；[吸収線量に関する単位 \(18-04-02-04\) - ATOMICA - \(jaea.go.jp\)](#)

『<大項目> 原子力基礎データ (略語、元素周期表、諸単位など)

<中項目> 諸単位, <小項目> 放射能、放射線

<タイトル> 吸収線量に関する単位 (18-04-02-04)

1) 吸収線量

電離放射線と物質との相互作用の結果、物質に入射した1次放射線により2次電子が作られ、放射線のエネルギーが物質に吸収される。

物質の質量 m を変数として、その中での吸収エネルギー E との比、すなわち E/m の様子を見ると 図1 のようになる。図1 に示すように、質量 m を余り大きくすると、物質との相互作用による放射線の減衰のため、 E/m は減少する。また、質量 m を余り小さくすると、 E/m には統計的な揺らぎが現れ、図のようなばらつきが見られる。これは質量 m を極めて小さくしていくと、その質量中で相互作用が起こったり、起こらなかったりするためである。そこで、吸収線量は図1において E/m が一定値となるような量に相当するものとして定義される。小さなある一定の質量 m において測定される E/m はばらつき、ポアソン分布をするが、これらを平均すると、図1の E/m の一定値に一致する。

すなわち、吸収線量 D の定義は質量 dm 当りの平均吸収エネルギー dE のその質量 dm との比として与えられる。

吸収線量率は、時間 dt 内の吸収線量の変化 dD を dt で除したもので、吸収線量の単位時間当たりの変化を表す。

2) 比エネルギー, 吸収線量指標

物質の質量 m として小さな体積の生体の細胞、さらに小さい細胞核を考えると、質量 m 当りの吸収エネルギーに統計的な揺らぎが現れ、吸収線量は一定値として定義できなく

なる。これは図1に示す通りである。
 このような現象は、原子数を十分に含
 まない位に体積を小さくすると、単位
 体積当りの質量に統計的な揺らぎが現
 れ、密度が定義できなくなるのに似て
 いる。放射線のエネルギー吸収におけ
 るこのような統計的な揺らぎを物理量
 として定義することはマイクロドジメ
 トリ（微視的線量計測学）といわれ
 る。

DNA などへの放射線損傷を微視的
 に調べる場合このような量が必要とな
 る。統計的に揺らぐ吸収エネルギーE
 をその体積内の物質の質量 m で割
 り、 $z = E/m$ と定義し、これを“比エ
 ネルギー” (specific energy) と呼
 ぶ。この量の単位もグレイである。』
 引用以上。

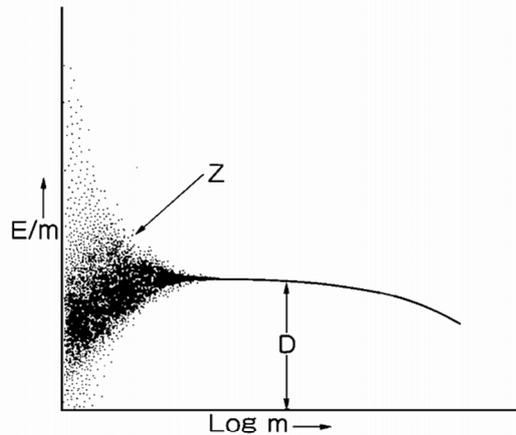


図1 吸収エネルギーEを求めた体積の質量mの
 関数として、E/mの変化を示す。
 グラフが一定の値を示す質量範囲で吸収
 線量Dは定義される。点がばらついている
 質量範囲は統計変動を考慮する必要があり、
 これには量Dではなく“比エネルギー”
 (specific energy) zが使われる。

出典：Radiation Dosimetry. Vol.1
 Fundamentals. Attix.F.H. and
 Roesch.W.d Academic press
 (1968)

さて、上の引用部分は何を言っているのでしょうか？一般人にはかなりわかりにくいと
 思います。比較例として、ある物体に周囲から一様に放射線が照射している状態と、ある
 物体に周囲から一様に遠赤外線(加熱用)が照射されている状態を比較的に見て見ましょ
 う。いずれも時間を長く定常状態にある場合を考えます。後者は熱線を受けて物体の温度
 は上がりますが、同時に物体は外側に熱を放射します。また、熱は高温から低温に移動し
 ます。従って、後者の場合は、定常状態では、物体内の温度は一定の平衡温度になりま
 す。ところが、前者の放射線による物体の吸収線量の場合は、物体内で吸収線量は、各地
 点で見た時、一定にはなりません。放射線は、物体内を進むに従いエネルギーは衰えるの
 で電離数も減りますし、エネルギーは反射もして、後ろに戻って来ることもあります（一
 般的に「ビルドアップ」という）。吸収線量 D は、ランダムに電離が起こったポイント
(点)で測られます。物体内で吸収線量は場所々々で不均一であり、吸収線量の高い点から
低い点に吸収線量 E が移動するということはありません。ただ、吸収されたエネルギーは
 やがてほとんど熱に変換します。熱は物体内に拡散して物体の温度は均一になります。し

かし、それは局所（点とも言える）が吸収したエネルギーとは違います。その物体内の局所の吸収線量が、その後の化学的変化と関係があると考えられていることです。

話が飛びますが、マイクロドジメトリ（微視的線量計測学、Micro-Dosimetry）は、核医学においてがんや腫瘍の診断と治療にとり重要な線量概念の一つになっているものです。ずっと先になると思いますが、この連載でも触れてみたいと思います。

再引用 ATOMICA より；『吸収線量は前述の通り物質の適切な大きさの質量で定義される。大きな物体の照射あるいは人の被曝を考えると、放射線はビルドアップ（散乱により吸収線量増加）や減衰の影響により場所によって異なる吸収線量をもたらす。人の被曝では何処で吸収線量が最大となるかが重要である。このため、人体模型として良く用いられる人体軟組織と等価な材質から成る 30cm 径の球において吸収線量が最大となる点での吸収線量を吸収線量指標（absorbed dose index）と呼ぶ。これは放射線防護における線量計測量であり、一般の線量計測量である吸収線量とは区別される。吸収線量指標の単位もグレイである。』

ただし、 γ 線測定の際の組織等価物質は、実効原子番号が軟組織にほぼ等しければよいですが、中性子測定の場合は、組織等価物質は軟組織とほぼ同じ原子組成であることが必要です。中性子は、本連載ではあまり重要ではありませんが、注釈です。

以上のように、吸収線量の厳密な定義は結構複雑です。外部から放射線を受ける場合、吸収エネルギーは物質の深さ、場所によって相当違うということをご認識してください。言い換えると、ある大きさの物体の表面付近と奥側を比較すると、前者の方が単位質量当たりの吸収線量は大きいということです。しかし、放射線と物質が決まったら、吸収線量は平均エネルギーとして1本で示されます。ただ、この「平均」というのは物体内の吸収線量のいろいろな高/低場所を全体として平均値して扱うということではありません。つまり、物質内の E/m の大きい側の一定値（それを平均値という言い方をする）の線量を吸収線量としているわけです。

3. 吸収線量を求める定量的計算式

物質の吸収線量を求める原理と公式は、すでに、連載（7）のブラッグ・グレイの空洞原理で説明しました。それを前提にした計算式ですので、大部分は繰り返しです。わかっている方はスキップして下さい。

ある「空気が充填された電離箱の空洞の放射線の場合」で、その場の隣の場からの影響がない（対象の場が乱されない）と仮定した時に、ある時間、 γ 線照射したとき、 Q [C(クーロン)] の電氣量が流れたとしますと、そのとき電離箱内に生成し電子-イオン対の数 N は、 $N = Q/q$ (3.1)

で与えられます。

ここで q は電子 1 個の持つ電荷(素電荷)です; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C です。

なお、1 A (アンペア, 電流の単位) は、1 秒間に 1 C の電氣量が流れたことです。

1 つの電子-イオン対を生成するのに要する平均エネルギーは **W 値** と呼ばれます。

気体の種類によって W 値は異なりますが、**電子, 2 次電子** に対して大部分の気体では 25 eV から 40 eV 程度で、He では 41 eV, Ar では 26 eV, **空気では 34 eV** です。

電子-イオン対数 N と、W 値 [単位は J (joule) に変えて] を用いて、電離箱内の気体の吸収線量 D [Gy] は、(3.1) の関係を入れて、次式で与えられます。

$$D = WN/m = WQ/mq \quad (3.2)$$

ここで m は電離箱内の気体の質量 [kg] です。

充填ガス中で生じる単位質量あたりの電子-イオン対数を N (kg^{-1}), 気体の質量を m [kg], W 値を W [J] としますと、気体の吸収エネルギー = 吸収線量 D_g [Gy : Joule/kg] は、

$$D_g = WN/m \quad (3.3)$$

で与えられます。

物質中での吸収線量 D_m (D_m が私たちが知りたい量です) と D_g の比は、物質と気体の 2 次電子に対する質量阻止能 (S で表す, $S = [dE/dx]/\rho$, ρ は物質密度) の比 (S_m/S_g) に等しいですから (下の注を参照), D_m [Gy] は次式で与えられます,

$$\begin{aligned} D_m &= D_g \cdot (S_m/S_e) = (WN/m) \cdot (S_m/S_g) \\ &= (WQ/mq) \cdot (S_m/S_g) \end{aligned} \quad (3.4)$$

※連載 (5) 表 1 の表記から言えば、質量阻止能は $S_{m,m}$ また $S_{m,g}$ と書くべきですが、引用文献では、質量を意味する $[m]$ 添え字を省略しています。

(注) 物質と気体の密度をそれぞれ ρ_m, ρ_g [kg m^{-3}], 物質と気体の 2 次電子に対する (線) 阻止能をそれぞれ $(dE/dx)_m, (dE/dx)_g$ [J m^{-1}] とする。

空洞中を飛び交う 2 次電子の飛跡の総延長を L [m], 空洞の体積を V [m^3] とすると、気体の吸収線量 D_g は、

$$D_g = (dE/dx)_g \cdot L / \rho_g \cdot V = S_g \cdot L / V$$

で与えられる.

次に、空洞が物質で満たされている場合を想定すると、そのときの物質の 吸収線量 D_m は,

$$D_m = (dE/dx)_m * L / \rho_m * V = S_m * L / V$$

となる. したがって, D_m と D_g の比は次のように, 質量阻止能の比になる.

$$D_m/D_g = S_m/S_g \quad , \text{ 以上.}$$

ここで, W, q は定数, Q と m は測定値ですから判明します. あと, (S_m / S_g) がわかれば, 物質の吸収エネルギー = 吸収線量を求めることができけるわけです.

S_m や S_g については, 多くの物質についてのデータはありませんが, いくつかのよく使う物質のデータは既知であり, また荷電粒子について, 求めたい物質中の阻止能の計算式が与えられています. また, 計算サービスサイトもあります.

4. 放射線場の強さと吸収線量との関係/質量エネルギー吸収係数

吸収線量は、基本的には、上述のようにある物質の放射線エネルギーの吸収量のことですが、放射線場の強さを表わすときにも用いられます. 通常は、注目する場所での空気の吸収線量率で表わし、単位は nGy/h (10 億分の 1 Gy/h) を普通は用います.

吸収線量率は放射線の強さが強いほど高いわけですが、吸収物質の種類と密度にも依存します. 極端な場合、真空中では放射線の強さがどんなに強くても吸収線量率は 0 です. このような特性は、「質量エネルギー吸収係数」という量で表わされます.

単位長さあたりの減弱率 μ (線減弱係数という) を質量で除した値を質量エネルギー吸収係 μ_{en} [cm^2/g] と言います. ただし, これは γ 線, X 線の場合です.

ある場所に置かれた物質の吸収線量 (吸収エネルギー) は、その場所における空気の吸収線量に質量エネルギー吸収係数の比 (注目している物質の質量エネルギー吸収係数 / 空気の質量エネルギー吸収係数) を乗じて得られます.

上が言っていることは、 γ 線, X 線のその場所における空気の吸収線量が分かれば、あとはその場所にある物質の吸収線量は質量エネルギー吸収係数の比により求められるということです. 3. は対象放射線はすべてでしたが, 4. は γ 線, X 線の場合に有効ということ.

5. 照射線量, 吸収線量, カーマの比較

放射線量の物理量には 3 つあり, 照射線量, 吸収線量, カーマの 3 つです. これらは,

放射線の線量の物理量単位ですが、測る範囲が少しずつ違っております。もちろんそれなりに意味があり、その範囲の違いが線量の意味の違いとなります。ただし、この部分は一般人にとってあまり意味がありませんし、内容も難しいので、そんな違いがあるのかくらいに認識されればよいと思います。

下表にまとめて、それぞれの測定範囲の違いを確認してみたいと思います。

表 1. 照射線量, 吸収線量, カーマの測定範囲

	照射線量	カーマ	吸収線量
線量の目的	物質に照射する線量	空気の吸収エネルギー	
定義	決めた範囲（ただし空気中だけ）で光子によって起こった全ての電気量	質量 dm なる物質中で非荷電粒子により生じた全ての荷電粒子の初期運動エネルギーの総和	質量 dm の物質中で電離放射線によって付与される平均エネルギー
単位	グレイ (Gy : J/kg)	同左	同左
測定対象の放射線	光子	非荷電粒子線 (X線・γ線), 中性子	全ての電離放射線
対象物質	空気	全ての物質; 空気の場合, 空気カーマという.	全ての物質
測定対象に含む	①光子によって領域内部で発生した電子対, ②領域内部で発生した二次電子	①物質中で生じた二次荷電粒子, ②領域内で発生した二次荷電粒子が領域外にでて領域に落とすエネルギー ③制動放射によって領域外に落とす全てのエネルギー	①電離放射線によって生じたエネルギー付与, ②領域外で発生した二次電子, ③制動放射によって領域内で発生した二次電子などによる全てのエネルギー付与
測定対象に含まない	①領域内で新たに発生した制動放射, ②二次電子によって起こった制動放射がさらに起こした電子対, ③領域外で発生した二次電子の寄与	①領域外で発生して領域内に入ってきた二次荷電粒子エネルギー	制動放射

(補足) 2次荷電粒子が再び非荷電粒子を生み出す現象(制動放射等)の影響が無視でき

ることを前提に、カーマと吸収線量は等しくなります。

放射線の強度を表わすのに空気カーマがよく使用されます。従来から、 γ 線、X線の強度を表わすのに用いられてきた照射線量は、制動放射を無視できる場合、単に単位変換により空気カーマに置き換えることができます。

6. 空気等価物質，材料とは

空気等価材料とは空気と等価な原子番号および類似の組成を有する物質で製作された電離箱の壁材などを言いますが、具体的には以下のようなものがあります。商品名の実際組成は開示されていないため、ここでは記述できません。

電離箱の壁材質およびビルドアップキャップ（ビルドアップとは γ 線の物質と衝突後四方八方に飛ぶ散乱線のことで、これをできるだけ計測器から遮断するのがキャップです）は電離箱により異なり、電離箱壁はアクリル樹脂、グラファイト(黒鉛)、ナイロン、A-150(組織等価樹脂)，および C-552(空気等価樹脂)の 5 種類が多く用いられ、ビルドアップキャップはアクリル樹脂、デルリン、ルセソチンおよびポリスチレンの 4 種類が使用されているのが多いです。組織等価材料については、次回に触れます。

なお、 γ 線による線量を測定する場合、ほとんどの 2 次電子は、 γ 線と電離箱の壁との相互作用によって発生します。これは、内部の気体に比べて壁の質量が大きいからです。しかし、上記のような空気等価材料は、質量阻止能が空気とかなり近いので計算できるわけです。

ただし、電離箱壁の材質の平均原子番号と周辺の物質の平均原子番号が大きく異なるときは、周辺物質と電離箱壁物質の境界近傍において、電子平衡が成立しないので、注意が必要です。

(連載 011 おわり)