

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（7）

副題：空洞理論

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6月26日作成

今回は「空洞原理」ですが、既に連載しました質量阻止能と二次電子平衡を理解していれば、難しいことはありません。数式を多用しますが簡単です。

1. 空洞原理について

一般的に、ある量の物質が γ , X 線に一様に照射されているときの、その物質の吸収線量を求める方法の原理を**空洞原理**と呼びます。α 線、β 線はちょっと別に扱うことので区別ください。

空洞原理には実はいくつも理論があり、空洞の大きさや放射線のエネルギーにより適用が異なる場合もあるようですが、ここでは、最も広く応用されている「**ブラッグ・グレイの空洞原理**」を述べます。この原理により現状の放射線の吸収線量測定法はほとんど決まっています。

まず、測定対象物質に小さい空洞を持つ線量計を埋め込むことになります。対象物質に挿入する線量計ですが、その線量計の空洞には気体を満たし、電極を装備し、それを包む箱状の構造材（壁とか壁材という）があり、その壁の外に対象物質が取り囲んでいるのが電離箱測定器の標準的状态ですが、空洞原理においては、測定対象物質の中に直接的に空洞を設けて、その物質が測定器の壁になっている原理的な方法から考えます。

通常では、電離箱の充填気体は乾燥空気であり、空気を使うのは、電離を検知しやすいし、既存データもたくさんあるからです。

2. ブラッグ・グレイの原理

以下は、専門家の佐々木 洋 氏（放射線取扱主任者の国家資格にかかわる解説者）の「ブラッグ・グレイの原理」⁴⁾ の正統的な解説を引用します（同氏に引用許可を依頼したところ、文献 1) の紹介を得ました。その論旨を生かして、本連載のために一部追補して以下に掲載します）。

「I. 前言

吸収線量とは、任意電離放射線が任意物質に当たった時、その物質の単位質量当たり吸収されたエネルギーとして定義されています。本来の SI 単位は [J/kg] ですが、この単位に対してグレイ [Gy] という特別単位名称と記号とが与えられます。吸収線量の測定法として最も定義に忠実な方法は**熱量計法**です。例えば、断熱状態の水に 1.0 Gy の吸収線量が与えられた時でも、温度上昇は約 $0.24 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ にとどまり（解説 1 参照）、これを正確に測定することは容易ではありません。そのため、実用的な吸収線量測定は、ブラッグ・グレイの原理に準拠した空洞電離箱法によることが多いのです。空洞電離箱とは固体壁（グラファイトやアルミニウムなど）の中に空洞を設け、その空洞中に空気などの気体を充填したものです。

空洞の中心には細い導電性の棒状電極を配置し、これと固体壁の間に電圧を印加して電離電流を測定します。固体壁が絶縁体である場合には、内壁面に炭素などを薄く塗布し、導電性を確保します。印加電圧が低いと、電離によって生じたイオン対が再結合するので、十分な電圧をかけて、飽和電流が得られるようにします。

解説 1) 水の比熱は $1.0[\text{cal} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}] = 4.2 \times 10^3[\text{J} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$ であるから、温度上昇は $1/(4.2 \times 10^3) = 0.238 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ となる。

II. 吸収線量を求める計算式

対象物質の中に小さい空洞を作っているということで、空洞ガスと物質の界面で、二次電子平衡が成立していることが前提です。また、壁物質と書いていますが、空洞から見れば物質は壁なので、そう書いています。さらに、ここでは、空洞ガスと物質が「等価材料」の関係にあると言っているわけではありません。空洞理論の一般論です。

空洞体積 $V [\text{m}^3]$ 、空洞気体密度 $\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$ の空洞電離箱に X 線又は γ 線を照射して、電離電流 $I [\text{A}]$ を得た場合、**壁物質**中の吸収線量率 $D_m [\text{Gy}/\text{s}]$ は次式により求めることができます。

まず、X 線、 γ 線を照射して器内空気に生成したイオン対の数 N は、生成した電離電荷を $Q [\text{C}]$ 、電気素量を e として

$$N = Q / e \quad (1)\text{式}$$

(なお、単位の定義から、電流 $I = Q / t$ です。 $t ; \text{sec}$)

また、吸収線量 [Gy] と吸収線量率 [Gy/s] の関係は、定常状態では、

$$D_m / D_g = D_m' / D_g' \quad \text{です。} \quad (2)\text{式}$$

ダッシュ" ' "が時間率を示します。

器内空気における吸収線量 D_g [Gy]は、気体の W 値を W [eV]、内容積を V [m³]、密度を ρ [kg·m⁻³]、気体質量を m として

$$D_g = W \cdot N / m$$

$$D_g' = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (W \cdot I) / (e \cdot V \cdot \rho) \quad (3)式$$

$$= (W \cdot I) / (V \cdot \rho)$$

なお、 W は空洞気体中で 1 イオン対を作るのに要するエネルギー[eV]。すなわち、 W 値であって、空域の場合は 34 eV です。

連載 (5) で述べたように、質量阻止能 S_m [J·m²/kg ; S_m は一般記号] はどの物質にも依らずほぼ一定値を示します。概略的には、 $S_{g,m} = S_{w,m}$ と言うことです。

吸収線量は、阻止能に比例するから、 $D \propto S$ を、上の式入れると、

$D_g / S_g = D_w / S_w$ となります。 D_g が測定できれば、 D_w がわかります。

上記で、" w " とはか壁となる物質のことを示します。

以下では、 $w \rightarrow m$ に添え字を切り替えてお話しします。

$$D_g / S_g = D_m / S_m \quad (4)式$$

従って、(2)式 と (4)式 より、

$$D_m' = D_g' \cdot (S_m / S_g) \quad (5)式$$

(3)式を代入すると、

$$D_m' = 1.6 \times 10^{(-19)} \times (W \cdot I) / (V \cdot \rho \cdot e) \times (S_m / S_g) \quad (6)式$$

最終項 (S_m / S_g) は、壁物質の空洞気体に対する「平均質量阻止能比」であり、

= (壁物質の二次電子に対する平均質量阻止能) / (空洞気体の二次電子に対する平均質量阻止能) です。ここで、「平均」とは、吸収物質内を通過する際に単位走行距離 あたりに失う平均エネルギー損失のことを言います。(高速電子線は、物質中を彷徨う過程で、エネルギー損失の程度が不規則に変化するので平均値で見る。)

S_m や S_g は、物質の物性から計算によって求めるか (データ提供サイトもある)、既存のデータを採用することで、物質の吸収線量が求まります。

ブラッグ・グレイの空洞原理が成立する条件においては、吸収線量を求めたい物質で電流型電離箱の壁面を構成することにより、種々の物質の吸収線量を決定できます。

III. ブラッグ・グレイ原理の成立条件

以下のような条件が満たされる場合に、ブラッグ・グレイの空洞原理が成立します。

- (i) 空洞の大きさが充填ガス中での二次荷電粒子の飛程と比べて小さいこと。
(筆者注) 空洞の存在が物質内での荷電粒子の流れをかく乱させないこと—とっている。
- (ii) 電離箱の壁厚が二次粒子（電子）の最大飛程より厚く、一次放射線が乱されない程度に十分に薄い。
(筆者注) 前半は、分かりにくいですが、空洞内外（その境界）で二次電子平衡が成立する条件です。」

以上が、**ブラッグ・グレイの空洞原理**です。

簡潔に申せば、空洞理論は、線量計の充填物質（ここでは空気）の吸収線量を、平均質量阻止能比で換算して、周りを囲む対象物質の吸収線量が求められるわけです。

3. 拡張計算式；電離箱測定器の壁材がある場合

小さい電離箱測定器を物質内に挿入するといっても、電離箱内は電極もあり、電機回路も最低限設けなければならず、実際には、外套箱の中に回路を納めた型式の電離箱になります。そして、その外側に対象物質が存在していることになります。

空洞ガスの吸収線量は、上の (3) 式のごとく求まります。

壁物質の吸収線量 D_w [Gy]は、二次電子に対する壁物質及び箱内気体の平均質量阻止能を S_w 、 S_g として

$$D_w = D_g \cdot (S_w / S_g) \quad (7) \text{式}$$

これで壁材の吸収線量がわかります。

次に、壁とその外側の対象物質ですが、その界面で2次電子平衡は成立しない場合があり、ファノの定理も一般には成り立ちませんので、別のやり方で、対象物質の吸収線量を求めることをやらねばなりません。

一般の公式としてのことですが、吸収線量はエネルギーフルエンス ϕ （周りに来ている放射線の単位面積当たりの合計エネルギー量：J/m²）に質量エネルギー吸収係数 $\mu_{m,en}$ を乗じたものですから（式の導出は省略します）、

$$D \text{ [Gy]} = \phi \cdot \mu_{m,en} \quad (8) \text{式}$$

空洞電離箱周辺のエネルギーフルエンス ϕ （単位面積当たりのE流束）が均一という条件の場合において、空洞電離箱の周辺の物質の吸収線量 D_m [Gy]は、X線や γ 線に対する周

辺の物質及び壁物質の質量エネルギー吸収係数を $\mu_{m,en}$ 、 $\mu_{w,en}$ として

$$D_m = D_w * (\mu_{m,en} / \mu_{w,en}) \quad (9)式$$

$\mu_{m,en}$ 、 $\mu_{w,en}$ は、物質の物性から計算によって求めるか（データ提供サイトもある）、既存のデータを採用することで、対象物質の吸収線量が求まります。

参考までに、単位を補足しますと、

エネルギーフルエンスの単位は $[J \cdot m^{-2}]$

質量エネルギー吸収係数の単位は $[m^2 \cdot kg^{-1}]$

線エネルギー吸収係数の単位は $[m^{-1}]$

4. 壁が空気等価材料の場合

この場合は、 $(S_w / S_g) = 1$ です。それが「等価」という意味です。

従って、(7)式で、 $D_w = D_g$ となります。

あとは、(9)式で、対象物質の吸収線量を求めます。

5. まとめと補足説明

上の引用；佐々木氏の解説で、ブラッグ・グレイの空洞原理の話は完結していますが、本連載で既にお話ししました、相互作用、阻止能、二次電子平衡、電離箱、等価物質などにつきましての本連載の事前説明を振り返って整理しておきます。

- (1) ここで言っている二次電子とは、 γ 線が起こしたコンプトン効果や光電効果によって生じた高速電子を言います。
- (2) 私たちが欲しいのは、ある決まった量のある特定の物質が放射線から吸収したエネルギー量（単位は Joule/kg）です。電離箱内に充填するのは乾燥空気がほとんどですが、温度圧力補正、必要により組成チェックをして、**分母の空気量を確定**することが必要です。
- (3) 空気等価物質による壁材とは、空気とその壁材の質量阻止能が等しいということですから、 $S_{m,air} = S_{m,w}$ です。空洞気体が空気であり、壁物質がグラファイトのような原子番号の低い材料（空気等価材料のこと）を使う場合、平均質量阻止能比 (S_m / S_g) は ほとんど 1 に近いです。
- (4) 空洞電離箱法の適用にあたっては、二次電子の飛程に比較して空洞が小さく、空洞の存在が二次電子の粒子束に、大きく影響しないことが前提となっていますが、空洞を小さくすると電離電流が少なくなってしまう。また壁厚は壁物質中で二次電子の電子平衡が成立するように留意することが必要です。

(5) 体積 $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ の空洞に空気（密度 1.3 kg/m^3 ）を充填したグラフィイト空洞電離箱に γ 線を照射して、 1.0 mGy/s の吸収線量率を与えた場合、流れる電流は 0.38 nA （解説 2 参照）です。このような微小な電流を測定するためには MOSFET を用いた高感度電位計や振動容量電位計などが用いられます。

$$\begin{aligned} \text{解説 2) 空気の } W \text{ 値は } 34 \text{ eV} \text{ であるから、電流は } & [1.0 \times 10^{-3} \text{ [Gy/s]} \\ & \times 1.3 \times 10 \times 10^{-6} \text{ [kg]} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}] / [34 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ [J]}] \\ & = 3.8 \times 10^{-10} \text{ [A]} = 0.38 \text{ [nA]} \end{aligned}$$

(6) 壁物質として組織等価物質を用いれば生体組織における吸収線量（率）が決定できますが、測定対象物質と壁物質とが異なる場合には、測定対象物質に小さな空洞電離箱を挿入して測定を行い、得られた結果に測定対象物質と壁物質の質量エネルギー吸収係数比を用いて測定対象物質の吸収線量を間接的に求めることとなります。

(7) 前述の **2**、**3**、**4** を計算するために必要な、質量阻止能や質量エネルギー吸収係数は多くの物質のデータがあり、また計算も可能です（データサービス会社があります）。

参考文献：

- 1) [ブラッググレイの原理 - 第 1 種放射線取扱主任者試験対策 \(radiologist-study.org\)](http://radiologist-study.org)
物質中の吸収線量測定の関係－ブラッググレイの原理
- 2) [201223_shimizu.pdf \(komazawa-u.ac.jp\)](http://komazawa-u.ac.jp)
放射線量の国家計量標準について、清水森人 産業技術総合研究所
3. グラフィイト空洞電離箱（ガンマ線の空気カーマ標準）
- 3) [線量測定 - 放射能を正しく理解し、正しく恐れる \(seesaawiki.jp\)](http://seesaawiki.jp)
吸収線量の測定, ブラッグ・グレイの空洞原理
- 4) <https://radioisotope-f.hatenablog.com/entry/65586591>
ブラッグ・グレイの空洞原理

(連載 010 おわり)