

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（5）

副題：阻止能とエネルギー転移係数

筆者：化学工学会 SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫

2021年5月7日作成

前回、「(質量)阻止能」とか「(質量)エネルギー転移係数」という言葉が出て来ました。これらは放射線物理では大変重要な用語です。これ無くしては話が進みません。放射線と電子の衝突頻度は、物質内の電子密度に比例し、厳密ではありませんが、物質の密度に比例します。この法則は非常によく使われるものです。以下解説いたします。

1. 阻止能とエネルギー転移係数

今まで何回も申しましたが、放射線は結局、物質を構成する原子、分子の軌道電子と衝突して相互作用することがほとんどです。従い、電子の多い物質の方が、相互作用を起こすにはより有利なわけです。つまり、放射線から見ると、進む先の空間の電子密度が高いほどエネルギーをよく伝達でき、自分はEを早く損失します。逆に、物質から見ると、こっちの電子密度が高いほどより効率的にエネルギーを吸い取れる—換言すれば、相手の放射線の勢いを「阻止」できると言うことです。

と言うことは、空間に原子や分子がたくさん密にあり（通常の気体は蜜ではなく疎と言えます）、かつ物質の原子の電子の数が多く＝原子番号Zが高いほど電子数も多くなり、陽子や中性子も増えて原子は重たくなります。要するに、おおざっぱには、物質の密度（g/cm³）の高い方が電子密度も高く、エネルギー伝達が起こりやすいと言うことです。

ここで、用語を区別することを言っておきます。

- 荷電粒子（ α , β 線、それによって沢山起こる二次電子です）：**阻止能**を使います。
- 高E電磁波（ γ , X線；光子です）：**線源弱係数**, **エネルギー転移係数**と言う用語を使います。 γ 線も電子にEを与えるのですが、そのメカニズムがちょっと違うので、荷電粒子とは違う用語を使います。

2. 阻止能, 質量阻止能

エネルギー伝達の速さ＝損失させる速さを物質側の「**阻止能**; **S** が記号」といいます。

定義は $-dE/dx$ で、単位：Joule/cm です。

英名：Stopping Power.

図1のごとく、実線の吸収線量の曲線を見て下さい。衝突直後の短い深さを除き、放射線が物質中をある距離を進むたびに伝達する $E = \text{失う } E$ (従って傾きはマイナス) の図です。

言い換えますと、 $x=0$ の衝突直後のある短い区間を除き (この区間が後述の電子平衡に関係します)、吸収線量は阻止能に比例するということ； $D \propto S$ です。

ここで、ちょっと難しいかもしれませんが、阻止能を数式で示します。むしろこっちの方が理解しやすいのではと思います。

阻止能は、衝突によるもの (S_{col}) と制動放射 (S_{rad}) によるものに分かれてますが、後者は日常の放射線環境では小さく無視できます。前者の荷電粒子の衝突阻止能については、ベーテの式と言う有名ながあります。

$$S_{col} \propto \frac{(Z^2 e^4)}{(mv^2)} * \frac{(N * Z)}{\quad} \quad (1) \text{式}$$

<粒子側> <物質側>

この式で、一項の<粒子側>は同じ放射線で比較することがほとんど(一定値ということ)なので、ここでは飛ばします。今は二項の<物質側>が大切です。N:原子数/cm³, Z:原子番号です。つまり、<物質側>の項は物質の電子密度そのものです。これで、阻止能Sは物質の電子密度に比例すると言うことがピッタリ(1)式で表されています。

ここで、(N * Z)を書き直します。

$$N * Z \text{ (電子の数/cm}^3\text{)} = \rho * (Z/A) * N_{avg} \text{ と書けます。} \quad (2) \text{式}$$

A:質量数, N_{avg} :アボガドロ数=原子数/1 molの質量 g=質量数 g だからです。

従って、(1)式の<物質側>だけを表すと、

$$S_{col} \propto \rho * (Z/A) * N_{avg} \text{ です。} \quad (3) \text{式}$$

そして、3)式を密度 ρ で割るのです。すると、

$$S_{col} / \rho \propto (Z/A) * N_{avg} \text{ となります。} \quad (4) \text{式}$$

(4)式で、 N_{avg} は定数です。Z/A(原子番号/質量数)は、物理化学基礎をご存じならば

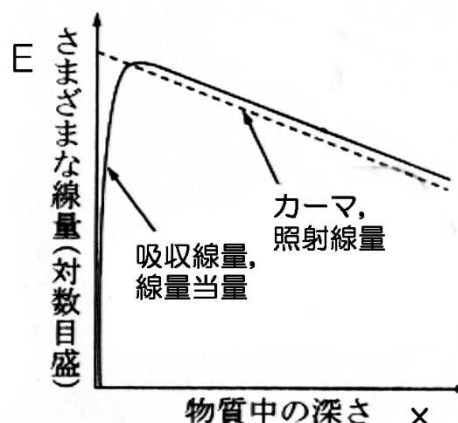


図1 空気等価物質に一方向から γ 線が入射した時の吸収線量、線量当量、カーマ、照射線量の関係。

言う必要もありませんが、 $z=1 \sim 118$ までで、およそ 0.5 です。特に、Z が近接した核種では Z/A 値は殆ど同じです。

と言うことは、 S_{col} / ρ は、物質によらず一定値だと言うことです。

これが、「質量阻止能」です。質量阻止能で見れば、同じ荷電粒子が物質に侵入した場合、原子番号 Z が近接していれば、どんな物質も同じ質量阻止能をもっていることになり、比較換算が実に簡単になります。

3. 線減弱係数, エネルギー転移係数

(1) 線減弱係数

光子 (γ 線, X線) が物質に照射されると、光電効果, コンプトン散乱, 電子対生成の 3 つの過程をおこします。その相互作用の詳細いことは省略しますが、光子は基本的に 1 回だけ軌道電子にエネルギーを付与し、自身は弱まった放射線医になります。光子の流れの全体でみると、物質中でだんだん弱まって行きます。ただ、その弱まり方が、 α 線や β 線とは違います (何回でも二次電子を生成して、不規則な軌跡を描いて弱まります)。

光子束 ϕ (光子フルエンス, 単位面積を通過する光子数; 個/ m^2) の減衰は、以下のように、1 次反応式で表され、縦軸を光子数の対数で表わすと直線的に衰弱する右下がり直線を描きます。式で示せば以下のように簡単になります。

$$-(d\phi / dx) = \mu * \phi \quad (8.6) \text{ 式}$$

ここで、N は $1cm^3$ 中の原子数で、比例定数 μ を線減弱係数といいます。

線減弱係数を密度で割ったものを質量減弱係数 $\mu_m (= \mu / \rho)$ といいます。

付け加えますと、式 (8.6) より、積分式で、光子束 ϕ の減弱は

$$\phi = \phi_0 * e^{(-\mu x)} \quad (8.7) \text{ 式}$$

で表されます。 ϕ_0 が物質へ入るときの光子束であるとして、 $\phi = \phi_0 / 2$ となる厚さを半価層 $x_{1/2}$ といいます。ちょうど、放射能の「半減期」と同じようなことです。

途中導入過程を省略しますが、上記の 3 つの光子の相互作用の内、コンプトン散乱による質量減弱係数は Z/A に比例します。1. でも申しましたが、Z/A ($\sim 1/2$) は原子番号によってあまり変化しない値なので、コンプトン散乱による質量減弱係数は、あまり物質に依存しない値となります。従って、コンプトン散乱が主であるエネルギー領域では質量減弱係数は物質にあまり依存しない値となります。

従って、電離箱の壁材として、コンプトン電子が主に生成するような物質を選ぶことになります (アルミなど)。

なお、光子が広い面積で物質に照射されるときには、物質中で散乱された光子が測定点へ入ってきます。この寄与を入れた光子束の減弱は

$$\phi = \phi_0 * B * e^{-\mu x} \quad (8.11) \text{式}$$

で表され、Bを**ビルドアップ係数**といいます。遮蔽が薄い場合や、光子束が細い場合には $B \approx 1$ であり、Bは、遮蔽の厚さや光子束の太さとともに大きくなります。

(2) エネルギーの伝達

光子が光電効果、コンプトン散乱、電子対生成などにより電子にエネルギーを与えると、電子は物質中で電離や励起を通して物質にエネルギーを与えます。この電子が物質中を進むときに原子核の電場などで制動を受けると制動放射を発生します。制動放射は物質外へ放射されるので、物質に伝達されるエネルギーは、電子に与えられたエネルギーの総和から制動放射で逃げる部分を引いたエネルギーとなります。

光子は、物質との相互作用でエネルギーを電子に転移するので、エネルギーフルエンス ϕ (光子束の単位面積当たりのエネルギーの流れ; J/m^2) の減衰は、

$$- (d\phi / dx) = \mu_{TR} * \phi$$

ここで、 μ_{TR} は **エネルギー転移係数** です。ここで N は単位体積中の原子数です。

エネルギー転移係数を密度で割った値を**質量転移係数** μ_m といいます。

4. まとめ

阻止能とは、放射線の相互作用以外ではあまり使わない独特の用語ですが、物質が放射線のエネルギーを奪い、進行を阻止すると言うような意味と理解しても良いのではないのでしょうか。英名の Stopping Power はピッタリです。

ここで、阻止能、物質の密度で割った質量阻止能、同様に γ 線の場合に使う、エネルギー転移係数、質量転移係数をまとめておきます。

表1. 阻止能;用語と記号のまとめ

	荷電粒子: α, β	光子: γ, X (※)
エネルギー損失 又は エネルギー伝達用語	阻止能 S ; ある距離を走って エネルギー損失 = 物質への付与	エネルギー転移係数 μ_{TR} エネルギーフルエンスの損失 = 物質への付与
定義, 単位	$-dE/dx$, [J/m]	$-d\phi/dx$, [1/m]
上記を物質密度で除した もの	質量阻止能 S_m [J·m²/kg] →どの物質にも依らず ほぼ一定値	質量転移係数 μ_m [m²/kg] →どの物質にも依らず ほぼ一定値

5. 空気等価物質, 材料とは

前連載で, 空気等価物質 (材料) で製作された壁を持った電離箱をお話ししました。「空気等価」という意味は, 上述のとおりで, 電離箱内部の空気の質量阻止能とその壁の質量阻止能が同じということです。材料という意味では, 空気と近接した原子番号 Z を有する物質のことです。

式で書けば, $S_{\text{air}} = S_w$ ということです。

吸収線量は, 阻止能に比例しますから, $D \propto S$ を, 上の式入れると,

$D_{\text{air}} / S_w = D_w / S_w$ となります。 D_{air} が測定できれば, D_w がわかります。

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, 上記のような物質は, 質量阻止能が空気とほぼ同等なので計算できるわけです。

参考文献 ;

- 1) [阻止能 - Wiki \(wikimedia.com\)](#) [¥]
- 2) [簡単な原理 — SRIM Tutrial 0.2 ドキュメント \(kyoto-u.ac.jp\)](#)
計算&データサイト
- 3) [飛程、阻止能、W 値 - 放射線取扱主任者試験に合格しよう! \(hatenablog.com\)](#)
用語説明
- 4) [ベータの式 - Wikipedia](#)
ベータの式の正規版