

放射能環境（連載通し番号 006）

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（3）

副題：相互作用

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

2021年5月6日作成

今回は相互作用概論です。相互作用については、細かく言いますとキリがありませんし、読者の皆様はそんな細かいことを知る必要もないと思いますので、大要をお話しします。ご興味のある方は、いろんな参考書がありますが、例えば以下などを参照ください。

[放射線と物質の相互作用 \(08-01-02-03\) - ATOMICA - \(jaea.go.jp\)](https://www.jaea.go.jp/atomica/08-01-02-03/)

<https://www.bing.com/search?q=放射線量の概念と放射線防護+早川+恭史&go=検索&q=ds&form=QBRE>

放射線量の概念と放射線防護 早川 恭史 日本大学 量子科学研究所,

この pdf の前半がややレベルが高いですが、相互作用の詳細です。

[sec2_kimura.pdf \(osaka-u.ac.jp\)](https://www.osaka-u.ac.jp/sec2_kimura.pdf)

第2章 放射線と物質との相互作用

相互作用については、放射線の線種別に区別しておくのが良いと思います、それぞれ様子が大きく違いますので。

1. 相互作用／エネルギー伝達における用語について

代表的な用語を抑えておきますと、相互作用も理解しやすいと思いますので、触れておきます。

(1) ぶつかる／衝突する、散乱すること

放射線が物質の原子とか軌道電子に「ぶつかる」とか「衝突する」とか「散乱する」とか言いますが、それはどういうことなのでしょう？

放射線のエネルギー損失には、大分類では、衝突によるものと放射によるものと原子核反応とがあります。原子核反応によるエネルギー損失は日常的にはほぼ皆無であり本連載では扱いません。

古典力学の衝突理論では、弾性衝突（運動量保存）と非弾性衝突（ロスあり、運動量は保存ではない）がありました。それとほぼ同じことが放射線と原子の世界でも起こって

ます。ただ、用語として、衝突のパターンとして、**弾性散乱** (Elastic scattering), **非弾性散乱** (Inelastic scattering) と言う言い方が多いです。そして、**散乱** (英: scattering) という用語は、光などの波や粒子がターゲットと衝突あるいは相互作用して方向を変えられることを意味しており、これで物理的説明は十分と思います。

放射の1つである、**制動放射**とは、物質中を進行している荷電粒子が物質を構成する原子の原子核のクーロン力を受け大きな加速度を得て進路を曲げられる場合などに電磁波を放出し、その放射過程をいいます。

古典力学ではハッキリした大きさの固体粒子同士の衝突を想定しますが、こちらでは、電子は電荷を持った小さな軽量の粒子ですが波動の性格も持っており、光子は波動ですが電荷をもたない粒子の性格も持っていると言うことで相互作用の最初の様子がちょっと難しくなっています。α線は相当重く、電荷をもった粒子です、波動性はありません。

大きな傾向として言えるのは、電子の場合に限り、原子核の近くで加速度を受けて放射する制動放射が結構大きいこと、また、keV以下の放射線のエネルギー損失は、主に弾性散乱が支配的であり、keV以上になると非弾性散乱が支配的になることです。100%そうなるということではなく、傾向的なことです。

表1. 相互作用を上記の衝突用語での様式を区別しておきます。

放射線	相互作用	エネルギー損失の様式	生成物
α線	2次電子生成、放出 電離、励起	弾性散乱、非弾性散乱 同上	電離→イオン対 δ線→電離
β線	電離、励起 2次電子生成、放出 制動Eロス	弾性散乱、非弾性散乱 同上 制動放射	電離→イオン対 2次電子、δ線→電離 X線+大部分は散逸
γ線	光電効果 コンプトン効果 電子対生成 上記に伴う散乱放射 (透過)	非弾性散乱 弾性散乱 非弾性散乱(大E時のみ) 制動放射 (通り過ぎるだけ)	光電子 コンプトン電子 電子と陽電子 減弱したγ線、X線、 - L散逸

(2) 放射線が**初めに衝突するもの**

放射線が物質に衝突すると言うことは、その物質を構成している原子や分子(を作っている原子)に衝突すると言うことです。原子は約1オングストローム(約 10^{-8} cm)くらいの直径があります。その中心に極小さい原子核がありますが、原子の中の空間の大部分を占

めているのは原子の構成要員であるモヤっとした軌道電子(雲)です。放射線は、原子の中でも直進しようとしませんが、大部分を占める電子(雲)に衝突し(電子雲とは電子の空間存在確率を示しますから、衝突しない確率もあり結構大きいですが、その場合は、放射線はその原子を通り抜けることとなります)、そこで、放射線と軌道電子の間で、何パターンかのエネルギー伝達の作用を起こしますし、元の放射線の進む方向も変わります。

つまり、電離放射線(α線、β線、γ線、X線なんであれ)が最初にぶつかるのは「軌道電子(雲)」と覚えておいてください。但し、中性子線だけはちょっと違います。電子にぶつかることもありますが、多くは中心の原子核にぶつかります。これは相互作用で少し触れますが、中性子線は私たちの身近には殆どいませんのでこの連載では深く扱いません。

(3) 「荷電粒子」が含むもの

放射線に関わる著述では、「荷電粒子」という用語が多用されます。この用語が含むものはいろいろあるのでまとめておきます。「荷電」ですから電気を帯びている原子の世界の微粒子です。しかし、「高速=高エネルギーの」が明記されていないことがほとんどなので、高速荷電粒子のことです。従って、その辺にいくらでもある低エネルギーの自由電子は含みません。

高速荷電粒子は以下を含みます；α線、β線(1次電子と言う場合もある、β+線=陽電子線を含む)、2次電子、δ線(又はδ電子、2次電子のある部分を言う)、(γ線に起因して発生する2次荷電粒子としての)光電子、コンプトン電子などのことです。

また、高速陽子線(地球外では太陽からの高E陽子線が吹き荒れている、地上まで若干漏れてきていると言いますが)とか高速重荷電粒子線(例えば、がん治療に使う炭素原子核線)などがありますが、私たちの周りにある対象の放射線ではありませんので除外します。

付言ですが、「非荷電粒子」という用語は中性子線のことです。γ線、X線は、粒子線とは呼ばず、高エネルギー電磁波(光子)です。以下の相互作用で話しますが、荷電粒子、非荷電粒子、光子は、相互作用の様式が相当違うこととなります。

(4) 2次電子、2次電離、2次荷電粒子とかいう用語

荷電粒子が直接に原子を電離する過程を1次電離といい、一部はイオン対を生成しますが、その中で放出された電子のエネルギーが通常のイオン対の生成に必要なレベルより相当高い場合は、その高速電子がさらに他の原子を電離することになり、その過程を2次電離といいます。1次電離で発生した電子のうち2次電離できるエネルギーを持っている高

速電子を **δ線** (α , β , γ の次で言っている言葉) といいます。

2次荷電粒子は、上の説明のいろいろな荷電粒子で2次的なものの総称です。 γ 線が起こす光電子やコンプトン電子も2次荷電粒子に含まれます。

2. 相互作用 - 荷電粒子放射線 (α 線, β 線); 直接電離作用を起こすものです。

(1) β 線 (高速1次電子) と物質の相互作用 (β 線を先に記述します)

β 線は、3つの相互作用を行います。1つは物質中の電子あるいは原子核の電場で散乱されることで電子と衝突し、そのたびにエネルギーを軌道電子に対して付与し電離や励起を起こします。この過程で、 β 粒子は質量が小さいため、いろいろな方向に進む向きを変え、後方へも散乱されます。このような入射方向と反対の方向への散乱を後方散乱といいます。 β 粒子による電離現象は進む距離とともに指数関数的に減少してゆきます。

2つ目は、2次電子の生成 (δ 線という) です。 δ 線は、まだ高エネルギーなので、次に電離や励起を起こします。

もう一つは、電子は質量が小さいので原子核の電場により制動を受けると、大きな加速度による**制動放射** (独: Bremsstrahlung) でエネルギーを失います (減速され方向を変えると言うこと)。制動放射が別の2次電子を生じる場合もありますが、大部分の制動放射エネルギーは物質外へ放射されます。電子の制動放射によるエネルギー損失は電子のエネルギーに比例し、衝突物質の原子の原子番号の2乗にほぼ比例します。 β 線のエネルギーは最大でも3MeV程度なので制動放射に付与した割合は小さいものです。

β 線は、散乱を繰り返してエネルギーを失い、最後はただの自由電子になりますが、その過程で、表面からの物質内への到達距離 (「**飛程**」と言う) が、エネルギーの大きさに依存しますが、多くの場合判明しています。飛程の計算式もあります。

(2) α 線 (ヘリウム原子核の高速の流れ) と物質の相互作用

α 線の相互作用は、 β 線と似た面もありますが、 α 線は β 線と比べて格段に質量が大きいのので、Eを失って停止するまで直線的に走ることと、質量が大きいのので制動放射は通常無視できることです。

α 線は原子の電離や励起、さらに2次電子を起こしても方向はほとんど変わらず直線的に進みます。 β 線と同じく、 **δ 線** (2次電子のこと) を生成し、それが物質内を彷徨いながら、引き続いて電離や励起を起こします。

前回、飛程と比電離のところでは言いましたが、 α 粒子が物質中を通過する際に、エネルギーを失ってスピードを落とし、その結果物質原子との相互作用の割合が増し、終点近く

では、より多くのイオン対を作るようになります。α線は、到達距離（飛程）の最後の辺りでエネルギーを失い速度が小さくなり、電子を1個、2個と捕らえて最終的に中性のヘリウム原子となり電離作用を失うために終端部で飛跡が長くなっています。

3. 相互作用 - 光子（γ線，X線です）の相互作用；間接電離作用を起こすものです。

光子の相互作用は、β線のような荷電粒子の場合と全く異なっています。γ線と物質との相互作用には、γ線のEの小さい側から起こる順序（Eが大きくなるに従い作用が起こる割合がだんだん変わっていくということ）に書きますと、(a) 光電効果、(b) コンプトン効果、(c) 電子対生成の3つがあります。それよりもっと高いエネルギーのγ線ならば原子核と核反応を起こすこともあります。私たちの日常では無視できるのでは除外します。

(a) 光電効果

原子核と軌道電子の結合エネルギーより大きいエネルギーを持つγ線が物質に入射すると、軌道電子にその全てのエネルギーを与え、その結果電子が原子から飛び出してくる現象です。飛び出す電子を**光電子**と言います。E-Bが放出される電子の運動エネルギーとなります（ロスがあるということ）。放出された光電子はβ粒子と同じ振舞いをするようになります。

(b) コンプトン効果

エネルギーが高くなると軌道電子の束縛エネルギーが無視できるようになり、光子が物質の電子と弾性散乱を起こします。これをコンプトン効果といいます。

下図のように、飛び出すコンプトン電子（図の反跳電子）に移るγ線のエネルギーは入射するγ線のエネルギーの一部であり、散乱されたγ線はもとのγ線より低いエネルギーとなって方向を変えます。

光電効果やコンプトン効果では、原子の内殻の軌道電子が失われるので、内殻電離といいます。

(c) 電子対生成

（ここは難しいので、そういうのがある程度で結構です。）

1.02 MeV 以上のエネルギー

を有するγ線が原子の近くを通る際、原子核のクーロン電場の中で光子が消滅し、陽

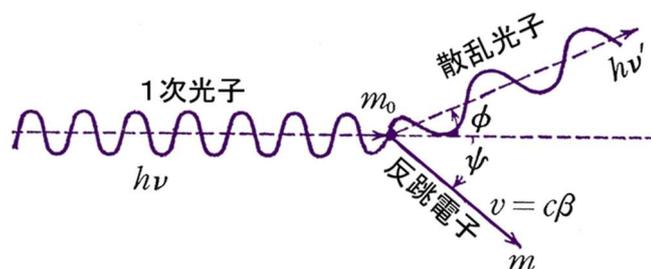


図4 鉛とアルミニウムに対するγ線の線減衰係数

電子と電子が対になって生成される現象です。また、新たに生成した陽電子は運動エネルギーを失い静止すると、近くにある電子と衝突し、エネルギーが等しい2つの光子が互いに逆方向に飛び出します。不思議なことが起こるものです。

以下の3つの効果で出て来る2次的高速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付与します。既に述べた2次電子と同じです。また、これらの光子が起こす相互作用は1放射線で1回です。多く複数回起こすものではありません。

これらの2次荷電粒子が物質中を進む時に、電離や励起を起こすことと、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が、大部分の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2次荷電粒子に与えられたエネルギー総和から制動放射で逃げる部分を差し引いたエネルギーとなります。

γ 線も散乱していろいろに方向を変えます。光子は後方散乱もあります。その散乱による補正計数をビルドアップ係数といいます。全放射線量と散乱（衝突）することなくその点に到達する放射線（直接線という）の量の比で定義しています。

(d) γ 線の減衰

γ 線は、多数本の全体で見た時、そのEと物質の密度によって決まる線減弱係数に従って、ある一定比率で物質の中でエネルギーを失い減衰していきます。 γ 線には、決まった飛程と言うものはありません。光子はEをすべて失って、最後は「無」に帰します。

総括で繰り返しますが、私たちの日常生活の被ばくで主たる責任を持っている γ 線は、物質の軌道電子との衝突で発生する2次的高速電子による電離現象によってエネルギー伝達が行われているということです。

4. 相互作用 - 非荷電粒子（中性子です）；間接電離作用を示します。

放射線としての中性子線は私どもの周囲の現実世界には余り存在しません（少しはありますが）ので、本連載ではほとんど取り上げませんが、一応書きますと、

- ① 中性子が物質の安定原子核に捕獲されて、その原子核が中性子余分の放射性核種になってしまい、 γ 線を発生する場合、上の3.の γ 線の作用に戻ります。
- ② 中性子が物質の原子の原子核と弾性衝突または非弾性衝突をする場合；原子核に一部エネルギーを伝達しますが、自分はまだかなりのエネルギーを維持しています。
- ③ 中性子が軌道電子と衝突することは殆どないようですが、多少はあります。

話が逸れますが、原子炉のように中性子を多く発生するような場所で、中性子防護のための方法は、水の壁で中性子源を遮蔽することです。理由は②現象が関係します。高校で習った「弾性衝突の運動量保存則」で、中性子は、水があれば、周囲に無数に存

在し質量が類似の水素の原子核の陽子に衝突し、つど半分ずつエネルギーを失い、どんどん早く減衰するからです。遮蔽相手が鉛のように重いと、中性子はいつまでもエネルギーを失わず、高速のままと言うことです。非弾性衝突ではエネルギー転移は少し落ちますが。

上述の3. 4. の最後になりますが、光子や中性子は、1回の衝突によって大きなエネルギーを失って、その結果荷電粒子を発生させます。そのため、荷電粒子では**単位長さ当たりのエネルギー損失（比電離）**が問題になり、非荷電粒子（光子や中性子）では**衝突断面積**が問題だと言うことです。

以上のように相互作用には、放射線の種類とその持っているエネルギーの大小によってさまざまな様式がありますが、簡単に言えば、放射線と物質の原子の軌道電子とが衝突することが、最初のエネルギー伝達の主たる役割を担っていること、衝突の内、最も議論になるのが「電離」現象だと言うことを知っておいてください。

今回は、電離箱の深い理解についてです。

（連載 006 おわり）