

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（４）

副題：放射線の検知と電離箱の工夫

筆者：化学工学会 SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫

2021年6月1日作成

今回は、空洞原理とか2次電子平衡とかの議論の前に、吸収線量を測ることの難しさや不思議さについて、電離箱の型式を見ながら、認識していただきたいと思います。

1. 放射線の検知原理

連載既述のように、 α 線、 β 線などの荷電粒子は物質中を通過して、自身がまた2次電子がまわりの原子を電離して、電子とイオンの対を生成するので、それを陰陽極で集めれば電気信号になります。 γ 線や中性子線のように電荷を持たない放射線は、物質と相互作用することによって高速の荷電粒子（光電子やコンプトン電子や核反応生成電子など；これも2次荷電粒子）を生成して、その2次荷電粒子が電子とイオンの対を生成するので、電気信号を発生させるわけです。従い、原理的な検知方法は、

- ① 放射線が付与したエネルギーを感度よく測定する方法は電気信号に変換することです。多くの測定器ではこの原理を使い、電子に変換して電気信号として検出する場合があります。古くから使われており、今も有用な測定法の1つが**電離箱測定器**です。GM計数管や半導体検出器（固体内の電子-正孔対として）なども基本的にこの原理によりま

す。

ただ、他の方法もあります。

- ② 荷電粒子による相互作用は電離だけに限らず、励起を伴う発光現象や化学反応を利用することもできます。シンチレータが良い例です。

それ以外に、

- ③ 発生熱量の測定法もあります。放射線が物質中で付与したエネルギーは、ある短い時間を経て、最終的にはほとんどすべて熱に変換されます。発熱量を精密に測れば（カロリメータなどで）、エネルギー吸収量がわかります。筆者は、放射線による発熱量の精密測定が放射線の全エネルギー配分の原始データになるものと思います。ただ、ちょっとした放射線量くらいでは、発熱量はごくわずかで精密に測定するのは大変な仕事なのですが、精密熱量測定器も実際にあります。

話が逸れますが、福島第一原発事故は、核分裂連鎖反応は停止しましたが、原子炉で生成した放射性核種から出る放射線のエネルギーが、最終的にすべて熱に変わったわけです。それが「崩壊熱」と呼ばれるものですが、それを冷却する手段を失ったということです。福島事故については、いずれかの連載で触れたいと思います。

2. 境界におけるエネルギーの出入りについて

もう一つ理解しておくの良いのは、体積や質量の境界におけるエネルギーの出入りです。上で2次電子の例を引きましたが、それが典型型ですから続けます。

いま、ある物質のA領域(1ccでも、1grでも結構です)と隣り合う(面で接した)B領域を考えます。ある放射線がAに入射してきたとします。α線やβ線ならば、そのエネルギーの大部分をAに落とすでしょうが、γ線ならば電磁波なので、そのくらいの大きさのA、B領域などあつという間に通過してしまいます。つまり、γ線は、A、Bの両方に入射し、双方に少ないでしょうがエネルギーを落としたこととなります。ある放射線が、境界を跨って通過したとしても、そのこと自体は別に問題にはしません。問題になるのは、2次電子の発生場所とその2次電子が起こす電離のポイントです。

β線や2次電子は高速とはいえ、電子で質量が小さく、他との衝突や電氣的クーロン力を受けて、物質内であちこち全方向に向きを変えて彷徨します。境界付近で2次電子が発生すると、AからBへ領域を超えていく場合があります、そしてまたBからAに戻ってくる場合もあります。もちろん戻らないのもあります。BからAに入ってきて、逆のことも起こります。この時に問題になるのが、エネルギー伝達と検知のポイントです。

A領域で、放射線が2次電子を発したとしますと、そこが実質的なエネルギー伝達場所ですが、その場面のエネルギー伝達だけを測る術はありません。検知できるのは、その後で2次電子が起こす電離です。しかし、その2次電子が、AからBへ通り抜けて、双方の場所で電離を起こしたら、そのエネルギー配分はどう見ればよいのでしょうか？これが、エネルギーの境界における出入りに関する問題です。

詳しい解決法は次回でお話ししますが、「二次電子平衡」という、ある境界において二次電子の出入りのバランスが取れていると言う現象を前提にすることが解決法になるとうことです。

3. 電離箱測定器の測定原理と工夫

一般に、電離箱式測定器は、弱い放射線測定には向きませんが、γ線のみならず、α線、β線も測定でき、エネルギー依存性が良く、広く使用されています。電離箱には様々

なタイプの放射線計数器および検知器があります；電離箱の内部に、異なる種類のガスを充填するもの、液体で満たされているもの、あるいは空気に開放されているものもあります。通常、 γ 線は箱の周囲の四方八方から入射してきますが、 γ 線測定では入射窓には薄膜またはグリッドが必要（測定の安定性、外部静電誘導の回避）です。ただ、装置の入射窓の材質の違いによってさまざまな測定が可能となります。アルファ線はガラスの窓を透過しないが雲母の窓は透過するので、端窓の材質をガラスにすればベータ線のみ測定が、雲母にすればアルファ線とベータ線の合計が測定できることとなります。その他、いろいろ工夫が凝らされているものが特許にあります。

さて、電離箱の中身の話に戻しましょう。電離箱は放射線の代表的測定器ですが、「箱」と言うわけですから、ある大きさの箱の中に電極が設置されていて、かなりの高電圧がかけられるようになっており、電荷を測る電子回路が接続されています。その電離箱の構造と測定原理を見てみたいと思います。

右図1. 標準型電離箱測定器の例

右の写真は、今使われている電離箱測定器の外観です。見たところ、サーベイメータの標準型です。

名前のように、放射線によって電離されたイオンの量を測るものです。



以下で、いくつかのタイプの電離箱測定器を見ますが、「電離されたイオンの

量を測る」と言う原理は同じですが、目的と実現できる範囲が違います。

(1) 平行平板型自由空気電離箱（図2を参照ください）

これは主に X 線の照射場の照射線量や空気カーマの測定に使われるもので、空気を充填ガスとする電流型電離箱です。コリメータを通して入射する γ 線ビームによる照射線量を求めるには、 γ (X) 線の照射により一定体積の空気から放出された二次電子によって生じる電離すべてを考慮しなければなりません。しかし、これを正確に実際面で行うことは難しいので、対象体積内/外で生じた二次電子が対象体積外/内で作る電離を補償する方法をとります。その他、複雑な補正手続きを行い、照射線量を求めます。

この型の開放系の電離箱（箱でも内部ガスを封じ込めた密閉系ではなく、外界大気と連通

している型です)は自由空気電離箱と呼ばれます。要するに、こまかな補償や補正により、二次電子の漏れ込みと漏れ出を修正しているのです。

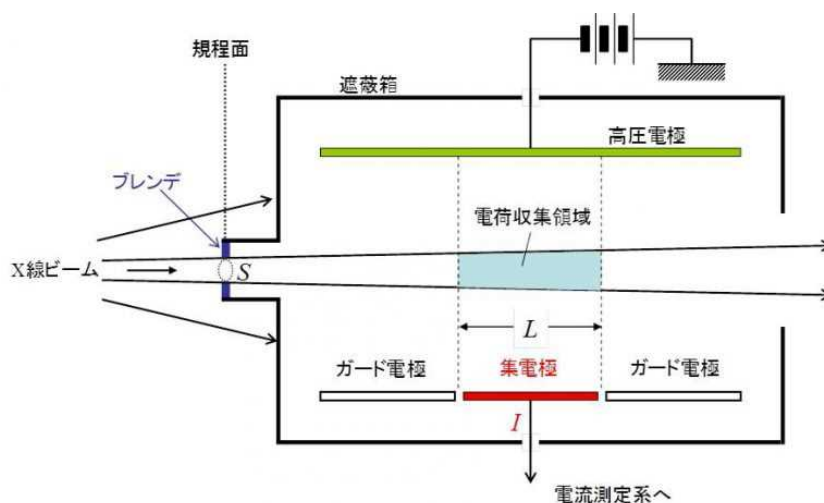


図2. 自由空気電箱の構成図

出典：参考文献1)より。

この方式は、照射線量の測定に使うものと主用途が決まっています。サーベイメータとして使えるものではありません。

(2) グラファイト壁空洞電離箱

自由空気電離箱ではγ線のエネルギーが大きくなると、**電荷補償**(対象領域の二次電子の出入りを保証すること)を行うために電離箱が極めて大掛かりになります。このために考案されたのが、電離箱の壁面を空気に近い原子番号Zをもつ物質で構成したものです(この意味は後述します)。

図3. 円筒形グラファイト壁空気電離箱
出典：参考文献5)より引用。

図3に示したような型のグラファイト壁空洞電離箱を用いて、γ線の照射線量測定が行われています。荷電粒子平衡を実現するための空気の厚さを、グラファイトの壁厚に置き換えて装置を小型化しているわけです。「荷電粒子平衡」とか「空気に

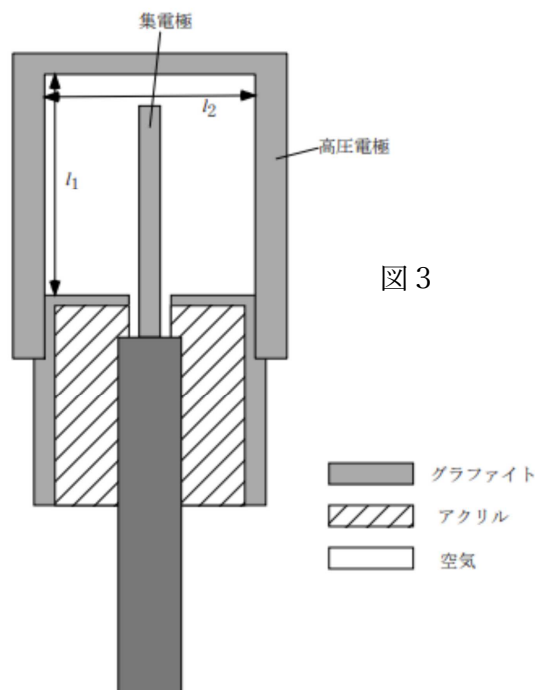


図3

図3 円筒形グラファイト壁空気電離箱の断面図。
 l_1 は空洞の深さ、 l_2 は空洞の内径を示す。

近い原子番号 Z をもつ物質」とか、下の「模擬空気」などについては後の連載で詳述します。

照射線量および空気カーマは、自由空気平行平板電離箱と同様に、検出した電荷量と空気の質量の比に基づいて求めます。模擬空気であるグラファイトと真の空気の違いは、補正係数として考慮しているということです。考え方は次の(3)と類似です。

(3) 現在の標準的な電離箱測定器 (図1の写真と下の図4を参照ください。)

サーベイメータと言うのは、身に着ける小さな個人線量計ではありませんが、携帯可能な、あちこちの場所で放射線を探って測定できるような測定器です。

固定式や車載式の環境放射線測定の様式もあります。

以下図4の電離箱について述べます。

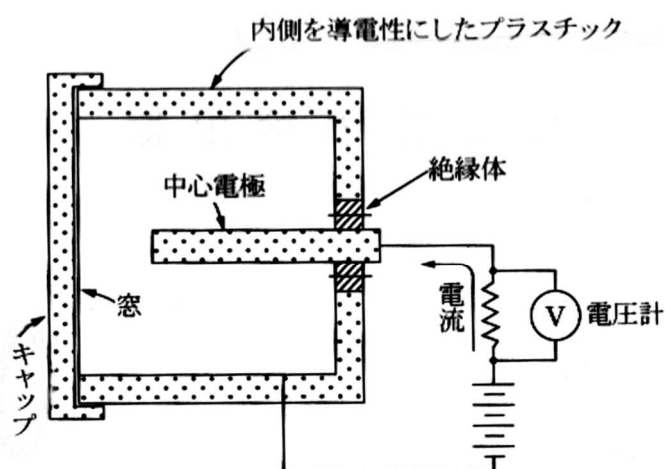


図 電離箱サーベイメータの構造

図4. 電離箱サーベイメータの構成図

出典：参考文献4) より引用。

α 線、 β 線でも測定可能（特別に工夫必要）ではありますが、この型の電離箱の重要な用途の一つは X・ γ 線による周辺線量当量（サーベイメータのこと）の測定です。

(a) 構造は、箱の内面には、電極としてアルミニウムやグラファイトなどの薄い膜を張るか、コーティングして導電性を持たせたアクリルなどのプラスチック製の筒箱に、絶縁体を挟んで中心電極が挿入してあるものが多いです。導電性材は非常に薄い膜（塗布又は蒸着法による）です。一方、プラスチック製の壁厚は、5~10 mm 程度あります。

この目的のためにはもっぱら同軸状の電極構造が採用されます。図3では、外套が円筒状になっており、その同軸中心に電極があります。通常、中心軸棒が電圧印加電極（プラス側）であり、円筒の内面が集電極（マイナス側）です。

(b) 原理は、荷電粒子が電離箱内を走ると、充填された気体分子を電離し、電子とイオンの対を多数生成します。電離された負の電荷を持つ電子は正の電極に集められ、正の電荷を持つイオンは負の電極に引き寄せられます。それで回路に電流が流れ、放射線量を求めます。個々の放射線による電荷は極めて小さいため、ふつう電離箱では多数の放射線によって平均的に流れる電流を測定します。パルス電流を測定するものではありません。

印加電圧が低いと、電子とイオンが電極に集められる前にすぐに再結合してしまう傾向があるので、電離箱には十分な電圧(通常数十から数百ボルト)を印加し、**飽和した電流値**を得る必要があります。この時、指示値が安定するまでに時間を要しますので、使用する数分以上前には電源を入れる必要があると言われます。

(c) さて本論ですが、図4は、円筒箱式になっています、測る内容物の範囲が区切られていると言うことです。箱の外は空気です。私たちが知りたいのは、外の空気環境の放射線量を知りたいわけです。他方、箱の内容物は気体です。気体であれば、色々なものが入られます。封入する気体は、アルゴンやエタン類などありますが、空気を例にとりましょう。

(d) ちょっと細かい話になりますが(電極間のイオンの動きです)、空気の場合、電子付着係数の大きい酸素が主要構成成分の一つとなっているので、電離直後の初期の段階で電子は酸素分子と結合し陰イオンを生成します。陰イオンは電子と同じく電圧印加電極に向かって移動しますが、この陰イオンの移動度は電子はだかの場合と比較してはるかに小さいので、アルゴンガスの場合での速い電流成分の形成はほとんどみられなくなりますが、この陰イオンもミリ秒オーダーの時間で電圧印加電極(正極)に到達し、この時点までの誘導電荷を積算すれば、これは電子の移動による誘導電荷の積算値と同じになります。従って、問題と言うことではありません。

γ 線測定用の同軸状の電極構造の場合、電極間空間の気体(ここでは空気)を電離させるのは、X線・ γ 線との相互作用によって主に外側の箱の壁と内面の電極(材)から放出される二次電子です。従って、電離箱測定器のエネルギー特性は外側の壁と電極の材料によって変わりますが、1 cm線量当量のサーベイにはその材料として、アクリル樹脂やアルミニウムやグラファイトのような低原子番号の材料を用いると二次電子の主な成分はコンプトン電子となりエネルギー特性の比較的平坦な特性が得られます。(注) エネルギー特性とは;放射線測定器の性能で「エネルギーの異なる一定量の放射線が測定器に入射するとき、入射するエネルギーによって感度が変わること」ですが、電離箱はおおむね一定感度です(長所)。

(e) 上記の電離箱では、いったい何を測っているのでしょうか？

電離箱の中の空気の吸収線量を測っている？直接的にはそうですが、電離箱の中が空気であればならないことはありません、アルゴンガスでもいいです。これは外界の γ 線環境を知るための標準的な電離箱測定器ですから、対象の測定物資は測定器の外の大気（空気）の放射線環境です。一方、電離箱の中で検知される空気の電離、イオン化の電気量は何によってもたらされたかと言えば、入射した放射線が空気と衝突し2次電子を起し、箱内の空気を電離したものです。

(f) 電離箱によって、吸収線量を求める計算式は次々回連載で導きます。

また、**(質量) 阻止能**、**(質量) エネルギー吸収係数**という物理用語については、次回お話しします。

(g) しかし、未だ、疑問が残ると思います。

(i) 「電離箱では、外側の箱の内面の壁材から放出された二次電子がほとんど」と言うが、ほとんどとはどういう意味か？

(ii) 二次電子平衡の成立とはどういう意味か？

(iii) 壁材が、空気等価材料だったら何が起こるのか？

(iv) 内部空気と壁材が違う（材質も違うし、密度も大いに違う）と、何が起こるのか？

(iv) この標準型の電離箱ではできないようなこと；対象物質が空気ならよいが、液体の中や、固体の中の線量はどうやって測定するのか？

(v) 特に人体の吸収線量を測るのはどうするのか？、 などがありません。

逐次解説してゆきます。

(4) 空気等価壁電離箱

上記の(2) グラファイト壁空洞電離箱について、「電離箱の壁面を空気に近い原子番号をもつ物質で構成したものが考案された」と言いました。空気に近い原子番号 Z をもつ壁物質で構成した電離箱を「**空気等価壁電離箱**」と言います。

すなわち、 γ 線による二次電子の発生は空気を構成する原子との相互作用によるものですから、仮に、電離箱の壁面を圧縮した空気で作ることができれば、これを γ 線の照射領域（電離箱より広い範囲）に置いた場合、対象体積から失われる電荷は対象体積外の圧縮空気内で生じる二次電子により対象体積内で発生する電荷で補償されます（これをどう補償するのも次回話します）。空気と言うことでは同じでも、普通の空気と圧縮空気では密度が大きいくい違うと言う差異もあります。ただし、この場

合、壁は二次電子の最大飛程より厚くなければなりません。また、実用上、圧縮空気は無理なので、空気に近い原子番号 Z をもつプラスチック等で壁を構成します。

→ この (4) は、何を言っているのか、一般人にとっては、ほとんどわからないと思います。次回に説明したいと思います。

ここで申しあげたいのは、(2) で説明しました標準型電離箱は、内部のガスを空気として、壁をアクリルなどのプラスチックにしてあるのは、「空気等価」と言うことです。とにかく、電離箱にはいろいろな型式があって進歩してきたことに留意ください。

今回は、阻止能とエネルギー吸収係数についてです。

参考文献：

- 1) [自由空気電離箱による 空気カーマ率の測定 - 放射線標準研究グループ \(aist.go.jp\)](http://aist.go.jp)
自由空気電離箱による 空気カーマ率の測定
- 2) [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)
電離箱による照射線量の測定
- 3) [電離箱 - Wikipedia](http://ja.wikipedia.org)
- 4) 書籍：放射線概論，第9版，柴田徳思 編，p363，測定技術，気体の検出器
- 5) [Microsoft Word - %Z'p",Š;12·Áfi;.doc \(aist.go.jp\)](http://aist.go.jp)
β線吸収線量標準の開発と設定に関する調査研究
- 6) [計算と測定の間にあるもの - X線・ガンマ線検出器について - \(kek.jp\)](http://kek.jp)
計算と測定の間にあるもの - X線・ガンマ線検出器について -
- 7) [ブラッグ・グレイの空洞原理 - 放射線取扱主任者試験に合格しよう！ \(hatenablog.com\)](http://hatenablog.com)
ブラッグ・グレイの空洞原理

(連載 007 おわり)