

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（7）

副題：二次電子平衡について

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9日作成

放射線の測定原理の前提としてあるのが、二次電子平衡とファノの定理です。すこしゆっくり見て見ましょう。

1. 二次電子の越境問題－二次電子平衡について

前回、「境界におけるエネルギーの出入りについて」お話ししました。放射線が軌道電子に衝突して生成する高エネルギー荷電粒子（高速二次電子と同義）は、皆、次いで軌道電子に衝突して電離現象を起こした後に進む方向をいろいろ変えて、対象物質である少領域（例えば、1グラムとか1ccとかの領域）と隣の少領域との境界を出たり入ったり、時には行って戻っての往復もします。このような境界における無秩序な高速二次電子の侵入や侵出を許していると、正確な放射線量の測定はできません。

そこで出て来るのが「二次電子平衡」と言うものです。概略的に言いますと、電離箱の中の充填空気と壁の内表面（の付近）及び外界空気と電離箱の箱壁の外表面で、二次電子の出入りの平衡（出入りの量が同じということ）が成立していると言うのです。ここでは、電離箱の内側の壁の表面について主に議論します。

実態としては、空気中で生成した二次電子が壁の表面から壁の中へ侵入しているでしょうし、逆に、壁内で生成した二次電子が内側の空気層に出て来ているはずですが、壁の表面（の付近）で、二次電子平衡が成立しているならば（今は仮前提として）、その面でその出入り量が平衡（=同じ）と言うことですから、実質的に電離箱の空気はその壁の面から外と縁切りされていると言うことです。ならば、充填空気の中で発生した電離エネルギーを測定すれば、その空気部分の吸収エネルギーを正確に測れます。

二次電子平衡は、次回にお話しする空洞原理の基本前提ですので初めに触れました。

また、この二次電子平衡の話は、 γ 線、X線の話に限定して考えて下さい。定義がそう決まっていますし、私たちの身の回りの放射線の大部分は γ 線、X線ですから。

2. 二次電子平衡 と ファノの定理

参考文献：出典：[exposure.pdf \(3web.ne.jp\)](#)

大阪大学医学部，講座参考資料から引用（一部修正）です（著者は明記しません）。

二次電子平衡とは何故発生するのでしょうか．図 1 をご覧下さい．

(1) まず，図 1 の印や記号を説明します．

この図の想定は，空気に対して， γ 線が照射されている状況です．

真ん中のグレイ丸；対象の小領域，質量 dm [kg] の乾燥空気．

その外の白丸；隣接領域を表します．グレイ丸と白丸を合わせて空気（物質）と見る．

左からの蛇行線；光子= γ 線です．なんとなく左側だけから来ていますが，四方八方から来ていると見てください，図の書き方の都合だけです．

蛇行線と曲線の結節のやや大きい黒丸； γ 線から二次電子への E 伝達ポイントで，ここで高速（=高 E）二次電子が生成するということです．

曲線に沿ってある小さい黒丸と白丸；二次電子によって電離された電子とイオンの対です．そして，曲線の最後に切れた個所が二次電子が消滅した地点です．

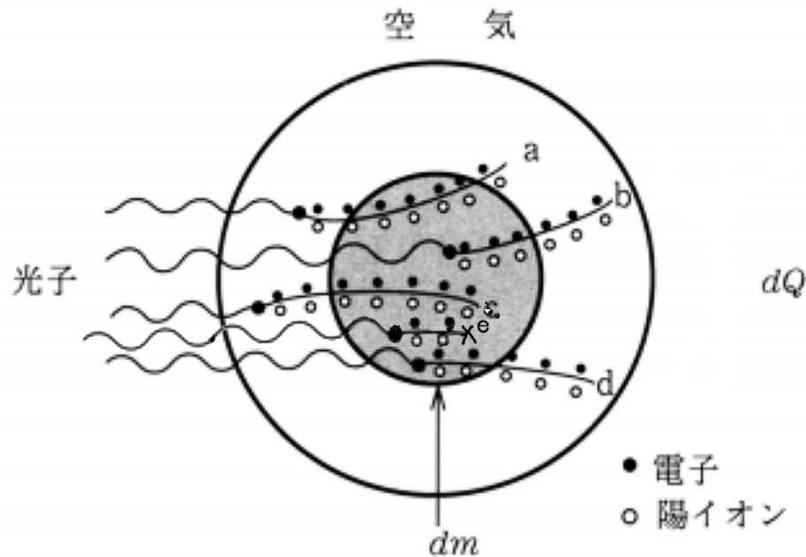


図 1: 照射線量の定義

(2) 二次電子の領域での電離区分の説明

二次電子が空気中でその運動エネルギーを完全に失うまでに空気を電離して発生したイオン対の電荷の正または負どちらか一方の符号の電気量の絶対値を dQ [C] とます．

図1で、5本の γ 線が入射し、それぞれが、対象領域の内外のどこかで二次電子を生成していますし、それによる電離も対象領域の内外のどこかで発生しています。電離が発生したことが電気量として測定されるので、その領域内外の区分が議論になるわけです。

表1 5本線を整理しますと、以下です；a, b, c, eの4パターンがあります。

| 二次電子生成／ 消失 | 領域外／内 | | 領域外／(貫通)／外 | | | 領域内 のみ | 領域内／外 | |
|---------------|-------|---|------------|---|---|-----------|--------|---|
| | 外 | 内 | 外 | 内 | 外 | 内 | 内 | 外 |
| 図1のa | | | ○ | ○ | ○ | | | |
| 図1のb | | | | | | | ○ | ○ |
| 図1のc | ○ | ○ | | | | | | |
| 図1のd | | | | | | | ○；bと同じ | |
| 図1のe | | | | | | ○ | | |

この4つ (a, b, c, e) のパターンが以下の3つの物理量の測定対象を決めています、結構ごちゃごちゃ複雑です。それを以下の表に示します。注釈として、二次電子は、原子核の大きなプラス電荷に引っ張られて制動がかかり、制動放射（電磁波）を出します。それが、また二次電子を生成することがありますが、私たちの身の回りの γ 線はEが低いので、制動放射線は小さく無視できますので考慮外です。

表2 dQ；対象エネルギーの電離測定カウンターの区分（以下の○印がカウントする）

| 二次電子生成／消失 | | | 外／内 | | 外／(貫通)／外 | | | 内 | 内／外 | |
|-----------|-------------|-----------|-----|---|----------|---|---|---|-----|---|
| 電離生成地点 | | | 外 | 内 | 外 | 内 | 外 | 内 | 内 | 外 |
| 対象； | 放射線 | 物質 dm | | | | | | | | |
| 照射線量 | γ, X | 空気 | | | | | | ○ | ○ | ○ |
| 吸収線量 | すべて | 何でも よい | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | |
| カーマ | γ, X | 何でも よい | | | | | | ○ | ○ | ○ |
| 空気 カーマ | γ, X | 空気 | | | | | | ○ | ○ | ○ |

表2で分かるように、吸収線量は、その領域内で生じた電離は、その発生源の二次電子がどの領域であろうと、すべてカウントすると言う定義です。一方、照射線量やカーマは、その領域で生じた二次電子のE（それに連なる電離が内外どこであろうと）を測定する定義です。しかし、外から来た二次電子による電離はカウントしません。

ここで、もし、吸収線量=カーマになる事があれば、上表の○印を等号で結べば、領域内の電離部分は相殺され、領域に入ってきた二次電子による電離量=領域外へ出た二次電子による電離量、となるわけで、これは二次電子の入出の平衡の根拠になるわけです。しかし、これらの電離場所の電離電荷を区別できるのでしょうか？

(3) 2次電子平衡 (荷電粒子平衡)

引用『電離電荷を電氣的に収集する場合、収集された電荷が「空気 dm 中に発生した2次電子の電離作用によって発生したイオン対」によるものなのか「dm 外から侵入してきた2次電子の電離作用によって発生したイオン対」なのかを区別できないため、本来であれば、電離箱などでは照射線量を測定できないはずです。しかし、2次電子平衡(荷電粒子平衡)という概念により、照射線量や吸収線量の測定が可能となるのです。

図2は質量 dm の空気を A~F まで横方向に配列し、左側から平行束の光子を照射した状態を表します。光子の照射により A~F までの各空気からは2次電子が放出されますが、この2次電子の飛跡を1本の線で表してみます。dm は微小であり、A~F 方向への光子の減弱を無視すると、A~F までの各空気に到達する光子数、光子のエネルギーは同じとなり、放出される2次電子の数も同じとなります。そこで、図2のように2次電子の飛跡を1本の線で表すと、2次電子の運動エネルギーも同じですから、飛程の長さ、すなわち図中の線の長さも同じになります。

2次電子の電離作用により生成されるイオン対の数は2次電子の飛程にほぼ比例すると考えられますが、例えば、飛跡 c を表す線の長さは、空気 C の中に描かれた飛跡を表す線の長さの合計に等しいことがわかります。すなわち、飛跡 c によって生成されるイオン対の数は、空気 C の中で生成されるイオン対の数に等しいこととなります。この空気 C のような状態を2次電子平衡 (荷電粒子平衡) と言います。

電子平衡がどこでも成り立つかということそうでもなく、例えば空気 A に注目すれば、空気 A 中の飛跡の長さの合計は、飛跡 a よりも短いことがわかります。このように、電子平衡が成り立つためにはある程度の空気の厚さ (2次電子の飛程程度以上) が必要です。一方、厚すぎると光子の減弱が無視できなくなり、生成されるイオン対の数は減少してしまいます。したがって2次電子平衡が成立するためには適切な厚さが必要であ

り、この厚さを（2次）電子平衡厚と言います。』

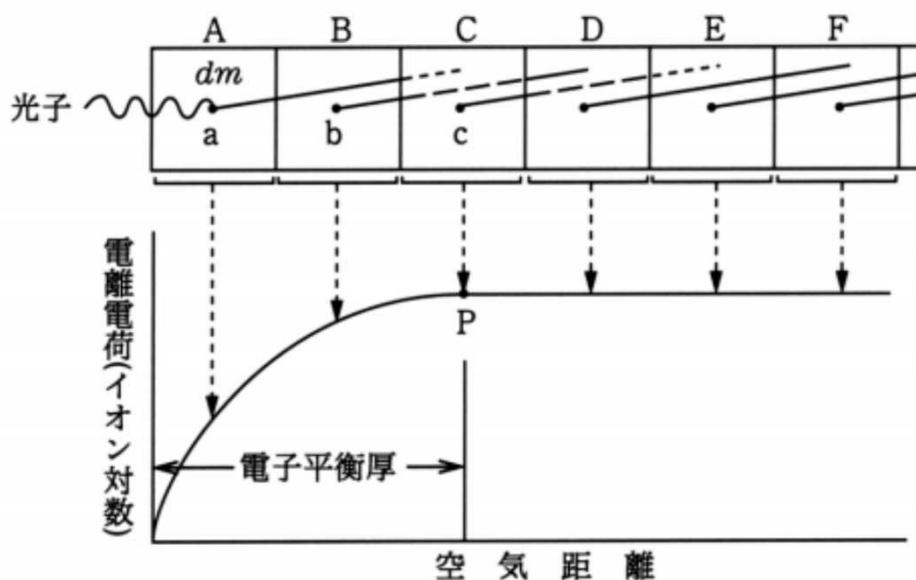


図 2: 2次電子平衡

光子のエネルギーが高すぎると電子平衡厚が厚くなりすぎ、また光子のエネルギーが低すぎると光子の減弱が大きすぎ、いずれも2次電子平衡を成立させることが非常に困難となるため、**実際に照射線量を測定できる範囲は約10keV～約3MeV程度**であると言われます。しかし、このγ線のエネルギー範囲は日常のγ線に完全に一致しますので、ご安心を。

(4) ファノの定理

引用「2次電子の発生量は物質の密度に比例しますが、一方、その2次電子の飛程は物質の密度に反比例します。したがって、次のことが成り立つでしょう：空洞とその周りの物質との元素組成が同じであれば、周りの物質から空洞内に入射する2次電子の数は、空洞の周りの物質の密度や均一性とは無関係である。これを**ファノの定理**と言います。」

これは何を言っているかと言いますと、例えば、電離箱の中の充填空気と壁材の関係において、両者の元素組成が同じであれば（これを等価材料と言う）、空気側から壁に侵入する電子数と壁側から空気に侵入する電子数とはほぼ同じと言うことです。ただ、注意していただきたいのは、壁の中で生成する二次電子数は空気中で生成する二次電子数

より圧倒的に多いとことです，しかし，壁中では飛程が短いためにわずかしき空気層には侵入しないということですが。

以上の2つ原理（二次電子平衡とファノの定理）により，線量測定的前提が築かれたと言えます。結論的には，空気充填電離箱測定器で線量を測る場合，対象物質がなんであろうと，物質表面から平衡厚み程度の深さの位置に，二次電子平衡が形成され，そこでは電子の出入りはゼロです。つまり，電離箱の外部の二次電子との隔離はできているということです。なお，この電子平衡領域の層は，電離箱内部の壁にも，外部の壁（環境大気と接している壁）にも形成されます。

また，物質の特例として，充填空気と同じ元素組成（=同じ原子番号）を持つ空気等価物質の場合は，ファノの定理より，空気と等価物質の界面で，二次電子の出入りはほぼ同じで，いわば平衡が達成されているということです。

留意事項として，表面から数ミリくらいの平衡厚みの空間はどうなっているのでしょうか？そこでは電子平衡は成立していません。壁の密度は内側の空気の密度より圧倒的に大きいので，二次電子の生成数は壁側がずっと大きいです。しかし，等価物質では界面でほぼ平衡になると言うことです。

3. 二次電子平衡のもう一つの解説

出典：放射線概論，第9版，著者編集：柴田徳思，p365より
の引用の部分（一部修正）です。

引用「内部に空気が充填され，十分な厚さの壁が**空気等価**，すなわち実効的な原子番号が空気とほぼ同じ材質で作られた電離箱（**空気等価電離箱**）が一様に γ 線に照射された時，電離箱内部の空気を通過する 2次電子の状態は，あたかも周囲が一様に照射された無限に広がった空気で囲まれているのと同様になる。しかも，電離箱の壁の厚さが2次電子の飛程よりも厚く，壁による γ 線の遮蔽が無視できるほど小さい場合，図3に示すように吸収線量は，物質の深さのある距離で，最大になり，吸収線量は近似的に空気カーマと等しくなる。このような条件を満足するとき，**2次電子平衡**が成立しているという。数十 keV から 2 MeV 程度の一般的な γ 線場では，アクリル樹脂のような空気等価物質の壁厚は 5 mm から 1cm 程度で2次電子平衡が成立すると言う。」

図3をご覧ください。「空気等価物質に一方向から γ 線が入射した時の」いろいろな線量を縦軸（対数目盛）に書いていますが，実線の吸収線量と点線のカーマだけを見てくだ

さい。

$x=0$ はその物質の表面のことで、 x が右側に進むと言うことは γ 線が物質の中に奥深く入っていくことを意味します。

ここで空気等価物質と限定した書き方になっていますが、特に制限のない一般物質と考えてください。また、一方向から入射と書いていますが、実際の物質（人体も含む）には四方八方から γ 線は降り注いで来るわけですから、そういう環境下で見なければならぬわけですが、定性的に分かり易い実験の図を描いたと言うことで、ここで出た結論は実際環境にも応用できると考えてください。

さて、カーマと吸収線量は、両方とも放射線量を表す単位（単位はグレイ：Gy = キログラム当たりのエネルギー：Joule/kg）であり、扱う放射線は γ 線で、測る対象物質に制限はないという意味では条件は同じですが、測るもの（視点）が違います。

物質の中のある小領域を考えてください。 γ 線が、その小領域とその周囲に一様に降り注いでいることを考えます。カーマは、その小領域の中で生じた、 γ 線により生成された高速二次電子（その時点でエネルギーは二次電子に伝達されている）のエネルギーの総和です。一方、吸収線量は、その小領域で生成した電離電子のエネルギーの総和です。ここで、連載（2）でお話ししました「エネルギーの伝達ポイント」を思い出してください。カーマは、二次電子の発生時点がエネルギーの伝達ポイントであるのですが、それだけはその場で直接測る術はありません（全く別の方法で測れますが、ここでは割愛します）。一方、吸収線量は、その領域で生成した電離された電子の収集によるエネルギーですから、当然測れます。

図3に戻ります。カーマは物質に入射開始から、二次電子の生成量は最大となり、奥に進むに従って、 γ 線（複数の多くの放射線数と考えてください）はEを失うので、エネルギーは弱くなり、二次電子生成量も落ち、カーマ線量は、距離に一次反比例で低下してゆきます。一方、吸収線量は、物質の表面近くでは、まだ電離作用が少ないですが、奥に進

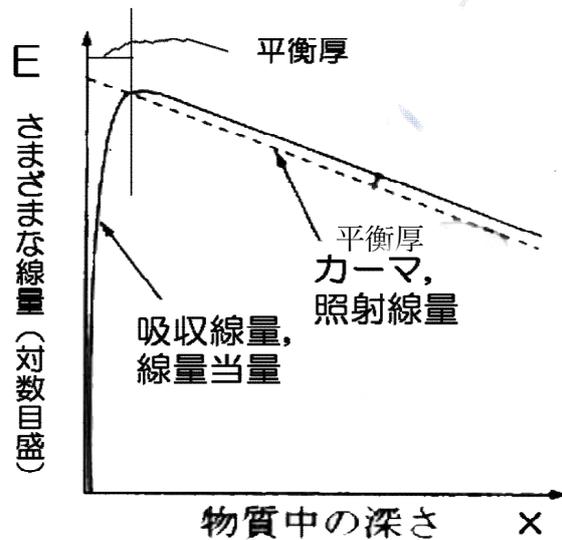


図3 0 空気等価物質に一方向から γ 線が入射した時の吸収線量、線量当量、カーマ、照射線量の関係。

むに従ってだんだん多くなり、ある深さ（これを「平衡厚」といいます）において最大になり、その後カーマの低下とともに、吸収線量も低下してゆきます。その平衡厚みだけ表面から入った地点で、カーマ=吸収線量 になるわけです。この時に何が起こるのでしょうか？ ここで、両者の測定視点の差を示しましょう。つまり、電離した地点がE伝達を具体的に表すものですから、その地点の電離を自分の線量のEとしてカウントするかどうかの区分となります。

- カーマ = (1) その領域内で生成した二次電子によるその領域内での電離 + (2) その二次電子が他領域へ侵出しそこで生成した電離、(他領域から来た二次電子は無視)、
- 吸収線量 = (3) 外部領域で生成した二次電子が侵入してきてその領域で生成した電離 + (4) その領域内で生成した二次電子によるその領域内での電離、(領域外へ出ていった二次電子は無視)、

両者が等しい時には、(1) = (4) ですから両辺で消えて、(2) = (3) となります。

これは、とりもなおさず、その領域で見ると、二次電子の Eの流出量 = E流入量 と言うことです。これが二次電子の平衡と言うものです。

但し、以下注釈が必要です。

- (i) 二次電子平衡は、入射される物資の表面（空気と物質の界面）で起こっているのではなく、平衡厚だけ物質表面から奥に入った地点で起こること、
- (ii) 平衡厚の厚さは、物質の種類や γ 線のエネルギーに依存するので一概には言えないが、その物質内での飛程の数倍くらいか。水の場合、4～6mm くらいか。
- (iii) 平衡厚より以深は、ほとんど二次電子平衡が成立している。従って、内部の空気層は、物質の外界とは縁切りされている。
- (iv) 相互作用の連載で話しましたが、二次電子は電子との衝突以外に、制動放射があり、それがさらに二次電子を生成する場合も皆無ではありませんが、私たちの世界で飛び交う γ 線のエネルギーは大体低いので、制動放射は小さく無視できます。

以下は、これらの原理に関わる解説的な文献を紹介します。飛ばしても結構です。

3. 他の文献の紹介

- (1) 出典：化学辞典 第2版「電子平衡」の解説

[電子平衡とは - コトバンク \(kotobank.jp\)](http://kotobank.jp)

電子平衡 (electronic equilibrium) とは；

引用「物体の外部から X 線、 γ 線が入射する場合、一次放射線の物体内での減衰を無視すると、物体内の表面からある深さ以上では、二次電子束が一定になる。それを電

子平衡が成立するといひ、その深さを平衡厚という。近似的には、物体中でつくられた最大エネルギーの二次電子の物体中での平均飛程に近い値をもつ。電子平衡はミクロ的にいうと、ある場所での二次電子束について、二次電子の出入りが等しいことに相当する。」

(2) 出典：ATOMICA, <タイトル>カーマ (Kerma) (18-04-02-05)

[カーマ \(Kerma\) \(18-04-02-05\) - ATOMICA - \(jaea.go.jp\)](#)

引用「カーマKは高速2次荷電粒子に与えられるエネルギーに関連した量で、定義では、1次放射線によりある物質の微小質量 dm 内に生じた、全ての荷電粒子の初期運動エネルギーの合計です。2次粒子に与えられたエネルギーは、粒子の移動に伴い微小質量 dm の外へ流出します。また、微小質量の外部で生じた2次粒子が逆に入り込むことによりエネルギーの流入があります。これらによるエネルギーの流入と流出が等しい時、荷電粒子平衡 (Charged particle equilibrium) が成り立っているといひます。この場合、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。」

(3) 文献：[計算と実測値の比較 \(kek.jp\)](#)

計算と実測値の比較 高エネルギー加速器研究機構」平山 英夫 著、より引用。

引用「**線量 (物理量)**；

吸収線量とカーマ、照射線量の関係について；

- 吸収線量は、ある領域中で放射線（放射線の種類を問わない）により与えられたエネルギー
- 領域外に持ち出されるエネルギーは対象外であり、領域外で発生した荷電粒子が領域内で与えるエネルギーは対象となる。
 - 荷電粒子が持ち込むエネルギーと持ち出すエネルギーが等しい合「荷電粒子平衡が成立している」という。
- 荷電粒子平衡が成立している場合、空気については、吸収線量 = 照射線量 となる。
- 更に、領域中での制動放射の発生による領域外へのエネルギーの持ち出しが無視できる場合（空気の場合、1MeV 以下）は、吸収線量 = カーマ となる。」

(4) 出典：[治療計画装置における物理データ \(accela.jp\)](#)

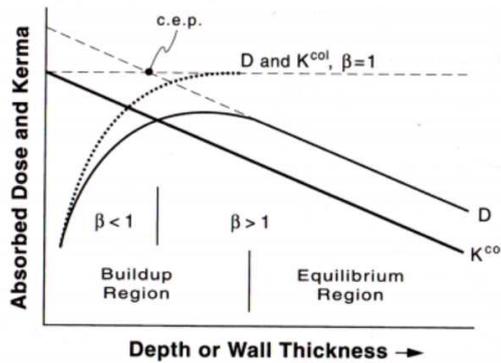
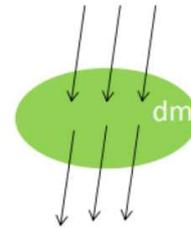
著者：黒河千恵順天堂大学医学部放射線医学教室

「電子線の物理-放射線治療を行う上で必要なこと」より転載，図4として引用。
 この絵は電子線の電子平衡であるので， γ 線による二次電子平衡とちょっと違うが，
 類似の現象を示しています。

図4 電子平衡 (Charged Particle Equilibrium: CPE)

電子平衡 (electron equilibrium)

質量 dm を占める領域内で生じた荷電粒子によって、
 その領域外で生成する電荷量と、領域外から内部
 に入射してくる荷電粒子によって領域内で生成する
 電荷量が等しい場合



ビーム中心軸上での深さ方向では
 電子平衡が成立するとは、カーマ(K)
 と線量(D)が比例することを意味する。

$$D \propto K$$

吸収線量 = カーマとなる事を図示したのが，図4です。横軸は物質の深さで，縦軸
 は対数目盛で，平衡領域でDとKの両方の線が平衡になっているということは，D
 とKが比例しており，電子が侵入して厚みの深さとともに，電子線は急速にエネルギ
 ーを失って衰えていくことを示しています。βとは，ビルドアップ係数のことす
 (後述)。

D=Kとは，図4で，2つの実線が交わる点です。この深さの位置で電子平衡が成立
しているということです。横軸のゼロ点が，高速電子線が物質に入る点です。
 電離箱をこの図に当てはめる想定をすると，横軸のゼロ点より左は，電離箱の中の空
 気層であり，ゼロ点が電離箱の壁の表面で，その壁の中の深さを横軸が表していると
 考えてください。

「ある深さ以上では，二次電子束が一定になる。それを電子平衡が成立する。」とい
 う表現と，「電子平衡が成立するとは，カーマKと線量Dが比例することを意味す
 る。D ∝ K」は同様のことを言っているものと思います。なお，この平衡圧の厚さ

は、電子線のエネルギーの大小によりますが、大体数ミリくらいと思われます（空気等価壁材の場合）。

図 4 に戻りますが、この図 4 は高速電子線が物質内部に侵入した時の厚さによるエネルギー損失の絵です。これは放射線そのものの絵ではありません、放射線（今の場合は γ 線）は電離箱の前後左右上下の四方八方からやってきて、電離箱の中にもやすやす侵入し、いくらかエネルギーは落とすでしょうが、 γ 線は余ったエネルギーで電離箱を通り抜けていきます。但し、私たちは γ 線自体がどこを通り抜けようと気にしません。気にするのは、 γ 線が物質に衝突して生成する高速二次電子の挙動です。高速二次電子が、実際に電離や励起を起こすからです。

今回は、筆者が二次電子平衡なる概念について、十分理解できなかったために、やや不消化的なことを記すことになりました。従い、今回の記事は、後日改定があるかもしれませんので、その理解で見てください。

参考文献： 上述しました。

次回は、空洞理論です。

(連載 009 おわり)