

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（1）

副題：相互作用と吸収線量の理解のための前提的知識

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31日作成

この表題の内容は、およそ以下のようなものです。

- ◆ (1) 相互作用と吸収線量の理解のための前提的知識,
 - ◆ (2) 相互作用と吸収線量の理解のための前提的知識（続）,
- 上の2つは、本論の「相互作用」と「吸収線量」の理解のための、いわば、横串で見た共通的前提的知識の話です。
- ◆ (3) **相互作用**,
 - ◆ (4) 代表的な測定器－**電離箱**についての深い理解,
 - ◆ (5) 放射線の測定の原理－**空洞理論と二次電子平衡**；ここが放射線で最も分かりにくいところですが、狐につままれることにならないようお願いします,
 - ◆ (6) **吸収線量の測定法**,
 - ◆ (7) **人体の吸収エネルギー**の測定について,
 - ◆ (8) 最後は、放射線の**エネルギーの配分**です。これは上の前提的知識をもう少し推し進めた話です。物質のエネルギー吸収量を「電離」現象に焦点をあてて測るのが今の放射線量測定の基本です。しかし、本来持っている放射線の高エネルギーはいろいろに分配されており、どういう比率で何に分配されたのかが文献ではあまり明示されていません。行く末は、皆様が心配するDNAへの影響につながりますので、難しい問題なのですが、そのあたりを探ることが目的です。

本表題を見ていただくにあたり、物理化学の基礎的事項；原子核の核種と同位体、放射線の発生源、壊変様式と放射線の法則、放射線の種類とか性質、 α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線の5種の実体（どんな核子か、電子か、電磁波かということ）などについてご確認が必要な方は、「放射線に関わる物理化学の基礎」を別途連載で出す予定ですので、必要によりご参照ください。

1. はじめに

放射線に関わる専門書やウェブサイトが多数ありますが、放射線なるものを理解したい、あるいは測りたい場合に知っておかないと何を言っているのかわからないことが結構多いです。特に一般人にとっては殆どわからず通り過ぎるだけではないでしょうか。ここでは、放射線の理解の前提となる、その土台に足場を築きたいと思うものです。

幼稚な例を引いて申し訳ありませんが、例えば空気を充満した2つの密閉空気箱、あるいは水を封入した2つの密閉水槽があったとしますと、このそれぞれ2つ容器を密着して隣接して置いておいても、仮にその中を激しく攪拌などをしていたとしても、片方の容器から他方の容器に空気や水が「漏れて」隣に移動してしまうと言うようなことは、私たちの自然界では起こりません。想像することもできないでしょう。

ところが、放射線の世界では、エネルギーや微粒子が、境界を超えて出たり入ったりすることが普通にあるということです。放射線のエネルギー測定において、理解しづらいのはその点です。1つの容器の中に入ってきて作用した放射線を測ろうとしても、本来こちらの容器にあったものが隣に漏れ出たり、隣からエネルギーが漏れて来たりするので、何を測っているのかわかりません。従って、ある物質空間の境界領域（例えば、1グラムと言う質量の境界）を区切って、その物質の放射線吸収エネルギーを測定するためには測定方法や装置、測定器の工夫をしなければならないわけです。

もう1つ例を引きたいと思います。500Wの電子レンジに、いったん炊いたが食べ残って冷えた残飯200gをお皿に入れて、レンジで暖めます。2分間のレンジのスイッチを入れました。程よく暖たまったと思います。レンジは定格では、500W、2分間（入力エネルギー）をマイクロウェーブにしてレンジ箱内に照射します。マイクロウェーブになる前に電力を電磁波に変換するロスがあり、そのマイクロウェーブはある効率によりお米中の水分子を振動・回転させて温度を上げ、つれてお米が昇温しますが、電磁波はお米の層を透過するものもあれば、レンジの壁に吸収されたりは反射されたりします。水分の一部は蒸発するでしょうし、お米が熱を外に逃がす部分もあります。いろいろなエネルギーロスがあり、食べたいお米に与えられた「正味のエネルギー量」を測定するのは容易ではありません。強いて言えば、お米の重さ、水分量、温度の最初と最後のデータを精密に測り、その差が正味のエネルギーでしょうか？しかし、細かく見れば、お米の温度は均一ではなく、熱容量も柔らかい粒とおこげでは違います、それも時間とともに変化します。モタモタしているとデータは霧消します。

上の例のようなことが、放射線の線量測定において存在することを留意しておいていただきたいと思います。

2. 原子の世界におけるエネルギーに関わるデータ

原子はとにかく小さいです。日常生活で、その1個1個にお世話になる事はありませんが、この連載の放射線の話とは、原子核から発生する放射線の1個、1本の活動の話です。また、放射線は検知感度が非常に高いので、たった1本でも検知できます。化学分析の精度など足元にも及びません。それくらい小さいけど敏感な世界なのです。

(1) 原子の世界の単位と定数：

極微小粒子用のいくつかの特別な単位がありますので、定数とともに下表に引用。

単位, 定数の名称		記号	数値
エネルギー	電子ボルト	eV	1eV = 1.6×10^{-19} Joule
1個の電子についての単位；1 eV とは、電気素量 e（下記）をもつ荷電粒子が、1Vの電位差を抵抗なしに通過するときに得るエネルギーのこと。 通常エネルギー単位；ジュール Joule (J)			
アボガドロ数	Avogadro Number	N_A	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
光速度（真空中）	Light velocity	c	$3.00 \times 10^8 \text{ m/sec}$
電子の電荷 （電気素量）	Elementary charge 1個の電子の電気量	e	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
陽子の質量*	Proton mass	m_p	$1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中性子の質量* *静止質量として	Neutron mass	m_n	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$; 中性子の方が陽子よりわずかに重い。
電子の質量	Electron mass	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; 陽子の1/1800；超軽いこと。
感覚的には、 $m_n = m_p + m_e$ くらいです。			

(2) エネルギー格差：以降、「エネルギー」は時々「E」と略します。必要な時のみエネルギーを使います。

本表題の主題である相互作用を理解するにあたり、知っておくと良いことは、ミクロな世界の**微粒子の結合エネルギーの大小関係**です。強固なエネルギーで結びついた微粒子塊に、小さなEを持った粒子がぶつかっても相手はびくともしないでしょう。逆に、弱いエネルギーで結びついた微粒子の固まりに、大きなEを持った粒子がぶつかったならば、相手は分裂するでしょう。そういう強弱の見方ができるように、結合エネルギーを比較しておきたいと思います。

- 原子核内の核子間（陽子，中性子など）の核子 1 個当たりの結合力: **8 MeV**
- (発生始点の) 放射線の E : 全体の範囲 ; **1 keV ~ 8 MeV** ; これ以下，以上の放射線はありません。放射線の強弱の差は 8,000 倍も違うのです。
線種ごと ; α 線 : **4 ~ 8 MeV**, α 線 が平均的には一番大きい。
 β 線 : **0.01 ~ 3 MeV**,
 γ 線 : **0.01 ~ 2 MeV**, β 線と γ 線は範囲では似たようなもの。
X 線 : **0.1 keV ~ 数百 keV**, X 線は γ 線と重なる範囲がありますが，それは，X 線は γ 線とは発生機構が違うからです。

これら E は放射線が不安定原子核から発射される時のエネルギーです。核種ごとに発射する時の放射線の E 値はすべて判明しています。その不安定核種が体内にあるならば，その E を身体はもろに受けますが，線源が体外にあるならば，その放射線は，まず色々な物質（空気とか，水とか）に衝突して E は多少弱まった状態で，私たちの身体に届くこととなります。1 本 1 本の E は弱まっても，数が多ければ，E は大きくなりますことは言うまでもありません。

- 原子内の核と軌道電子の結合力 : 外殻電子 : 数 eV,
内殻電子 : 数十 eV
- 原子のイオン化エネルギー（第一イオン化） : 5 eV ~ 20 eV
(上記とほぼ同じ)
- 分子 ; 原子と原子 (C-H, O-H, N-H, C=C, C=O など) の結合力 :
3 eV ~ 7 eV

とすることで，私たちの日常世界の原子や分子の結合エネルギーレベルは真に低いです。言い換えれば，日常世界の化学的変化は容易に簡単に起こっているということです。放射線の微粒子が衝突した時に何が起きるか，起きないかが想定できるのではと思います，

3. 相互作用とは（イントロとエネルギー用語）

放射線は並べてエネルギーが高く（高速で），透過力もそれなりに大きく，物質にぶつかると，放射線はその高エネルギーの一部を物質に必ず与えます。物質から見れば，放射線のエネルギーのある量を吸収することになります。つまり，放射線と物質の原子の間で，**エネルギーのやり取りの作用**が起こります。これを物理学では「**相互作用**」と言います。この連載表題の主テーマ（次回）です。

ここで、相互作用の物理でよく出て来るエネルギーの移動用語を整理しておきます。

- 放射線側から見た時；エネルギー付与，逆に，放射線は物質の中を進むに従ってエネルギーを物質に与えて，自分はエネルギーを次第に失う＝損失することになるので；エネルギー損失，
- エネルギー付与 と 付与エネルギー（一応定義されている） と逆になった言葉があります。一般人には差異を理解不能ですが，前者だけで結構です。
- エネルギーの受け渡しや交換の表現；エネルギー伝達，エネルギー転移，
- 物質側から見た時；エネルギー吸収，
と言う用語を使います。

4. 放射線の初めから終わりまで

(1) 初期エネルギー

放射線は，不安定核種の原子核から発します。不安定核種（**RI** と略します）の数は核種図からもわかりますが，千を優に超えます。RIごとに特定の放射線が出ますが，その放射線の種類とエネルギーはすべて判明しています。そして各線種ごとのE範囲は前回書きましたが，並べて高いものです。

エネルギーが高いということは，粒子であれば，スピード早いこと（運動エネルギー； $1/2*mv^2$ ），電磁波（光子）であれば，振動数が大きい（ $E = h*v$ ）ということ。光子は波動と粒子の性格を併せ持っており，振動数が大きい電磁波は，粒子としてとらえられる運動量も大きくなります。この辺につきましては，別途の連載「物理化学の基礎」をご参照ください。

(2) 物質の原子との衝突

放射線は，真空中では，クーロン力を受けない限り，わき目を振らず直進しますし，Eを放出することはありません。しかし，物質に衝突しその中の原子に衝突すると，その原子にEを付与し，そこで進路方向が変わることが多くあります。ただ，物質の中には，それこそ無数の原子がうようよ居るわけですので，衝突する原子もあれば，衝突しないのもあり，数では衝突する方がずっと少ないでしょう。衝突しない原子あるいは見かけ上衝突しても相互作用を起こさない場合は，放射線はそこを通りすぎるだけです。

(3) 1本の放射線の相互作用での頻度（回数）について

放射線と物質の原子との衝突の頻度はどのくらいでしょうか？ただ，注意いただきたいのは，放射線と物質の原子との衝突回数のごとであって，放射線が2次（的）電子を生成し，それが物質の原子と衝突する回数は含みません。

荷電粒子一個あたり生成される2次電子は、以下のデータが報告されています。

- アルファ粒子 \rightarrow 十個以下 (60 ~ 100 eV)
- ベータ粒子 \rightarrow 数 % のみ (通常検出不可能)

頻度の大小関係は、エネルギーが高い方が多いのは当然として、同じ E ならば、 α 線 $>$ β 線 $>$ γ 線 です。 γ 線は、基本は1回で相当部分のエネルギーを電子に付与します。 α 線は下図のように密度濃く相互作用します。

(4) 放射線の物質中の飛跡図

放射線が物質中でどう彷徨うかの実際の「飛跡」の図1とその挙動シミュレーション図を(5つ)を添付します。

図1. 荷電粒子(ここでは α 線, β 線; γ 線の図示は無い)の物質内の飛跡

1回放出された電子が、再び(電離)電子を放出しているのが2次電子。

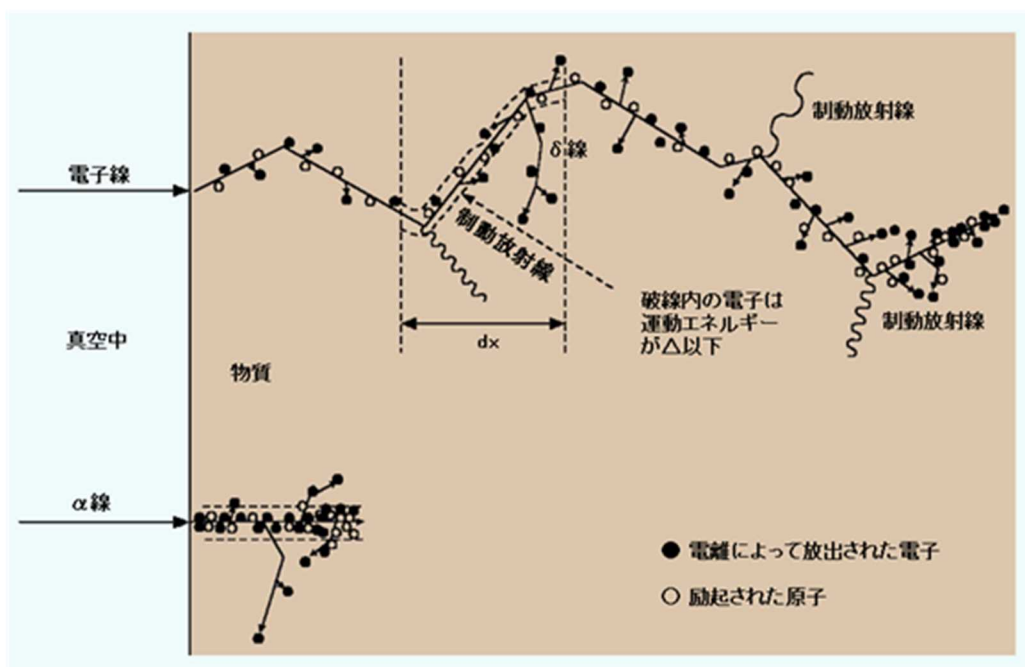


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

下に添付の5枚の図は、現 星薬科大学 所属の 廣瀬 農 様(資料公開時は、東京大学大学院 農学生命科学研究科 放射性同位元素施設/放射線植物生理学研究室 所属)より転載の許可をいただいたものです。

PHITS(※)による放射線挙動シミュレーション:

- 1) 粒子による飛跡の違い,
- 2) 物質による飛跡の違い,

- 3) 粒子によるエネルギー付与パターンの違い,
- 4) 放射線のエネルギーと飛程 (1),
- 5) 放射線のエネルギーと飛程 (2).

※ **PHITS とは?** あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードです。

これらの図は放射線が物質に衝突し侵入した時の飛跡です；線種の違い，相手の物質の違い，エネルギーの違い，付与パターンの違い，飛跡と付与点のばらつき具合などについて各図に説明がありますのでよくわかると思います。各図で，横軸の長さの目盛りがまるで違うことに注意ください。

(5) 放射線の終わり

放射線はそのエネルギーすべてを相手に与えた後は，自分自身は何の力もないタダモノに帰します； α 線→普通のヘリウム原子（風船を膨らませるガス）， β 線→どこにでもいる平の自由電子， γ 線，X線 →「無」です。

このような1本の放射線の一生は，時間的には真に短いものです。発してから死ぬまで，おそらく1秒の数分の一にも満たないオーダーの時間と思います。ただ，これは放射線だけの一生の時間です。後に続く2次電子生成，電離，励起，イオンの変化（失活や中和が大部分です），熱への変換，化学変化，生化学変化（DNA変質など）は，ずっと長い時間（と言っても人間生活に比べれば短いですが）をかけて進むことを忘れないようにしてください（将来の連載で論じます）。

以上で，放射線の生きざまを大体お分かりいただけたでしょうか。

5. 電離と励起

相互作用を議論する時に，**電離，励起現象**を抜きにして論旨を進めることはできません。放射線に関するすべての著述は，放射線のエネルギー吸収における主役として扱います。ここで，電離，励起とは何か，どの様にして起こり，結果はどうなるかを話します。

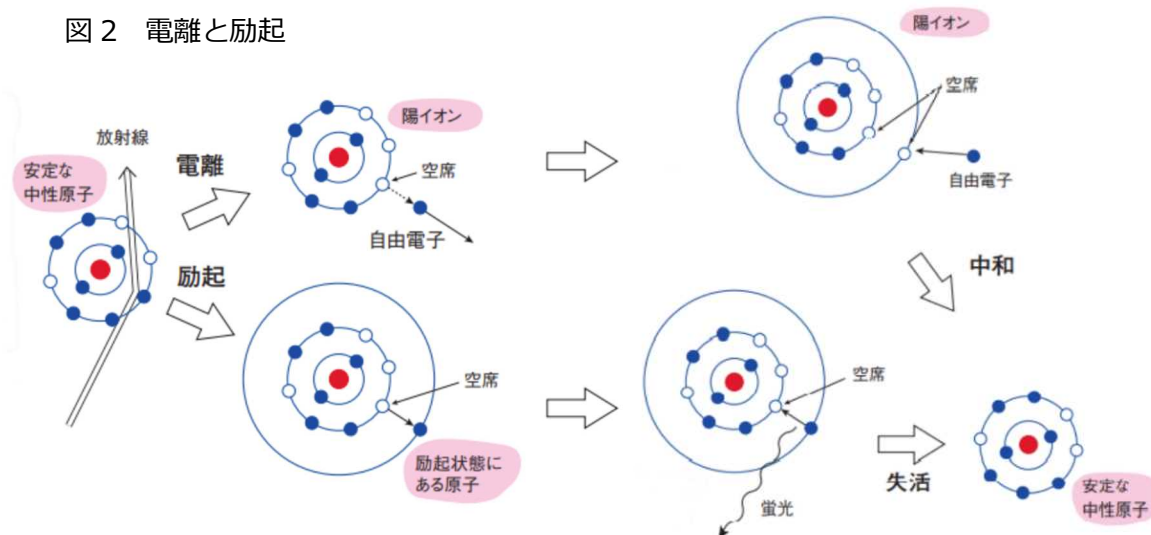
荷電粒子（とりあへず， α 線， β 線，2次電子と考えて下さい）が物質中を進むとき，荷電粒子は物質中の原子の軌道電子とのクーロン相互作用（+/-の電気を持っているので，引力や斥力が働く状況）によりエネルギーのやり取りが起こります。この相互作用により物質中の原子を電離したり励起したりします。ただ，この2つの現象が主役と言えますが，2つだけがエネルギーを受け取ったわけではありません，他にいくつもE伝達ポイントがあることを付け加えておきます（後で説明します）。

電離とか励起とかを聞くと何か次に爆発でも起こりそうな印象かもしれませんが，これ

らの現象に要するエネルギーは小さいもので、私たちの日常生活でも身体の中でも様々な化学的、生物学的原因により普通に起こっている現象です。

もう少し詳しく話します。図2をご覧ください。

図2 電離と励起



[暮らしの中の放射線（目次）\(kek.jp\)](#) page 24 より引用（その修正図です），
冊子；暮らしの中の放射線，放射線科学センター。

(1)電離

電離とは、正常な原子の軌道電子（束縛電子ともいう）を1つ原子外へ跳ね飛ばし、原子はプラスイオンと独立的な電子の対に分かれることです（ほどほどに跳ね飛ばすと言うことです、うまく対になれる程度に）、図2参照。

もう少し物理的に言いますと、十分大きなエネルギーを吸収して電子が原子核の引力圏外まで出た状態、すなわち原子が電子を失うことを電離といいます。電離によって束縛を解かれる電子は、一般には原子中の外殻電子（外側を回っている軌道電子）です。また、電離に要するエネルギーを電離エネルギーといい、軌道電子と原子核の結合エネルギーに等しいです。一般に、気体の原子の束縛電子の電離エネルギーは10~20eVの範囲内にあります。水素の例を言えば、電離（イオン化）エネルギーは13.53eVであり、水素原子がそれ以上のエネルギーを吸収すると水素イオンと自由電子が生成されます。

電離作用によって生成した正イオンと自由電子は検電器や電離箱で直接検知・測定することができます。そのため放射線の電離作用は放射能の検出、測定に広く利用されていま

す。ただ、上述のような気体の原子の電離現象とは違い、固体や液体における電離作用は、複雑になりますのであまり触れません。

また、放射線の電離作用は、一般に、電離、解離、再結合、中和、失活（図2参照）などの関係する事象が総合した働きです。電離が起こった、さあ大変だと言うような単純なものではありません。

(2) 励起

励起とは、外殻の軌道電子を1つ原子外へ跳ね飛ばさないまでも、エネルギー順位の低い軌道から高い軌道へ持ち上げる現象です。原子は励起状態になります（図2参照）。

物理的に言いますと、原子が電子（β線）や外部の原子核（α線）との衝突によって、あるいは波長の短い電磁波（γ線）を吸収することによって基底状態からエネルギーの高い状態に移ることを**励起**されるといいます。励起状態は一般に寿命が短く（ 10^{-8} s程度）、電磁波（光）を出して基底状態に戻ってしまいます。その電磁波は弱く、ほとんど散逸してしまいます（熱などになることです）。

6. W値－電離作用の指標

放射線が気体を通過すると陽イオンと自由電子が生成されます。この際、正イオンと自由電子対、1対あたりの平均生成エネルギーを**W値**（eV単位）といえます。数種の気体について求められた複数の粒子線のW値を表1に示します。

表1. W値の例

表1 いくつかの気体のW値（eV）

気体	β線	α線	イオン化エネルギー
He	42.3	42.7	24.5 (He → He ⁺)
N ₂	34.9	36.6	{ 15.8 (N ₂ → N ₂ ⁺) 24.5 (N ₂ → N ⁺ + N)
O ₂	30.9	32.5	{ 12.5 (O ₂ → O ₂ ⁺) 20.0 (O ₂ → O ⁺ + O)
CH ₄	27.3	29.2	{ 14.5 (CH ₄ → CH ₄ ⁺) 15.5 (CH ₄ → CH ₃ ⁺ + H)
CO ₂	33.0	34.5	{ 14.4 (CO ₂ → CO ₂ ⁺) 19.6 (CO ₂ → CO ⁺ + O) 28.3 (CO ₂ → C ⁺ + O + O)
空気	34.0	35.5

[出典]富永 健、佐野博敏：放射化学概論[第2版]、東京大学出版会(1999年)p77から転載

荷電粒子線の場合には、気体のW値は30～35eV程度です。（多くの気体におけるW値は22～43eVの範囲にあり、平均値は30eV近辺です。）
なお、W値が荷電粒子の種類によって大きく変わらない理由は、物質中における荷電粒子の直接効果（衝突電

離) に比べて、二次効果、つまり直接効果で生じた電子 (二次電子) の効果が大きいと考えられています。

また、原子によってイオン化エネルギーはいろいろ変わるのに、その変化に対応して W 値も変化すると予想されますが、これらの気体の W 値は 30~35eV 程度で大きな変化が見られません。これは電離作用にまでは至らない励起作用の寄与が大きいためではないかと指摘されています。

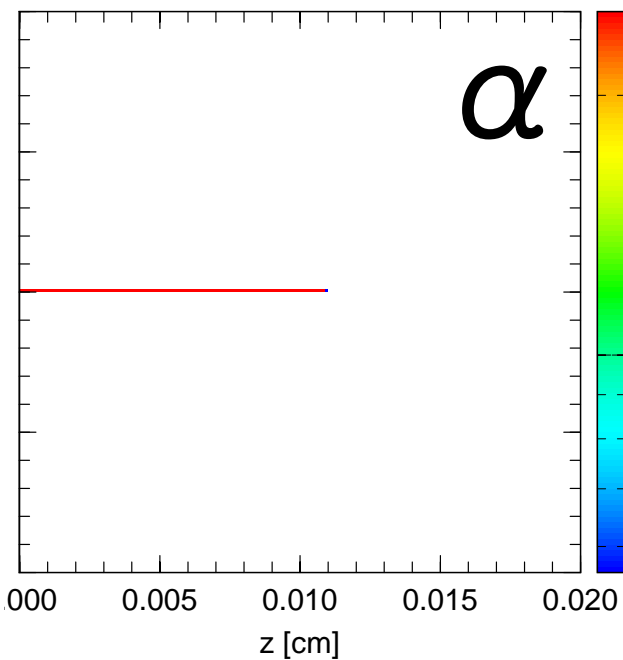
参考までに、固体の半導体の場合、シリコン結晶での禁制帯幅 (気体におけるイオン化エネルギーに対応するもの) は 1.12eV ですが、アルファ線の場合の ϵ 値 (W 値に対応するもの) は 3.6eV です。

以下に、放射線挙動シミュレーション (5 枚) を添付します。

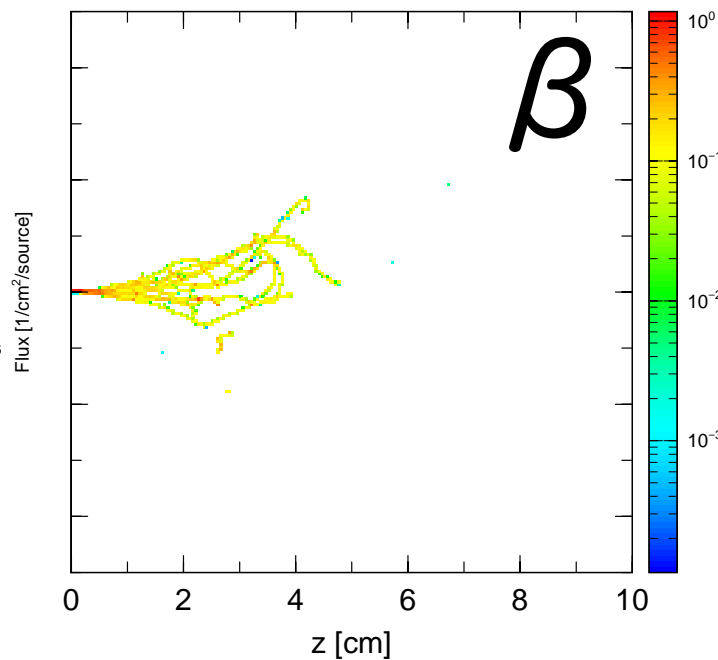
(連載 004 おわり)

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

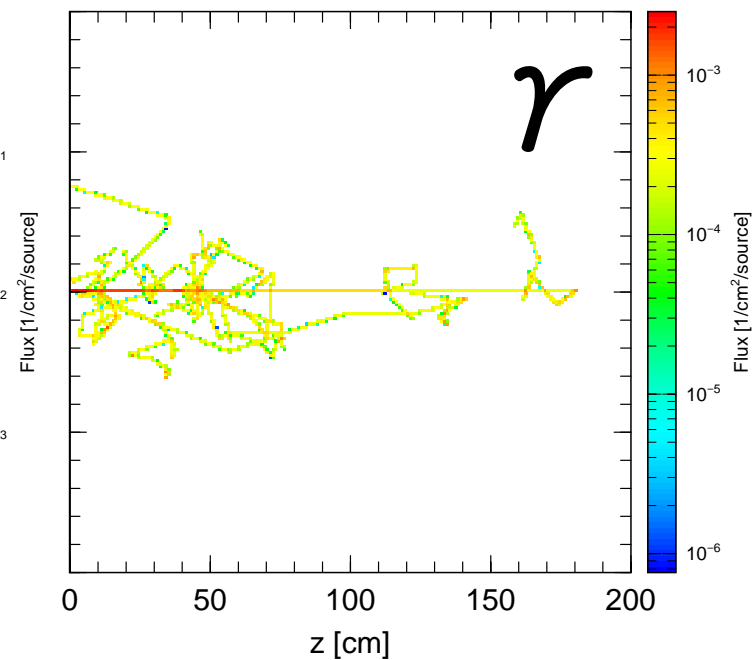
1) 粒子による飛跡の違い



10MeV(10000keV)の α 線の飛跡 (水中)



10MeV(10000keV)の β 線の飛跡 (水中)



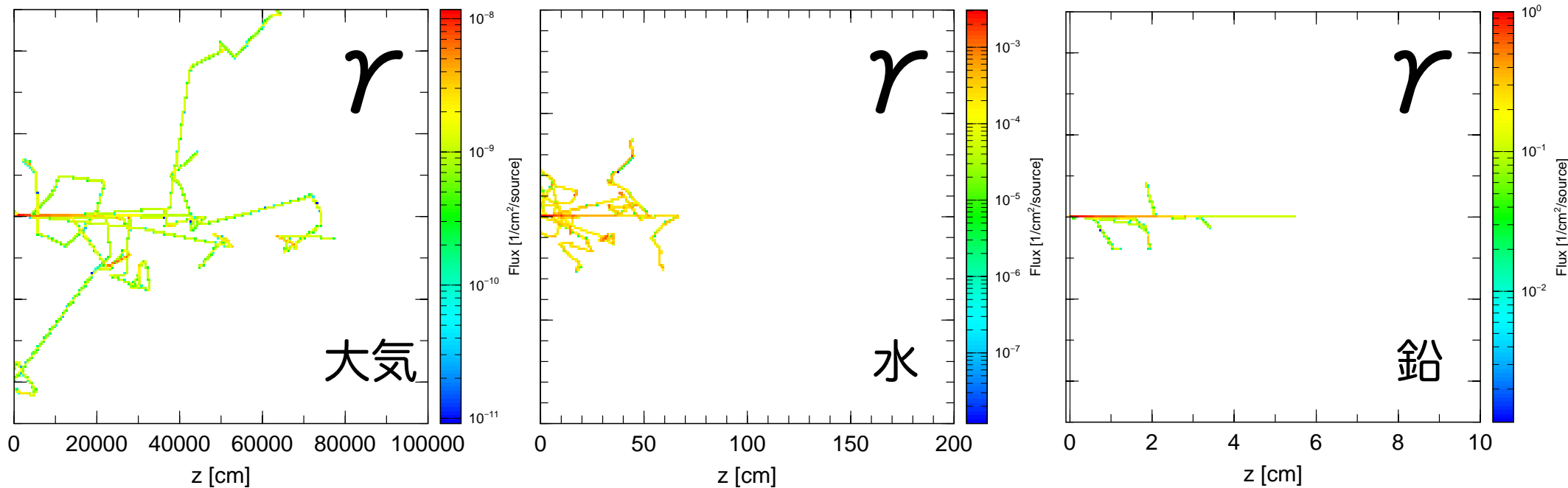
10MeV(10000keV)の γ 線の飛跡 (水中)

各粒子10回試行した際の飛跡を表示。同じ運動エネルギーでも、粒子によって到達距離は大きく異なる。

α 線は飛程は短い、狭い範囲に集中してエネルギーを与える。
逆に γ 線は広い範囲に少しずつエネルギーを与える。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

2) 物質による飛跡の違い



1MeV (1000keV) の γ 線の飛跡 (大気中)

1MeV(1000keV)の γ 線の飛跡 (水中)

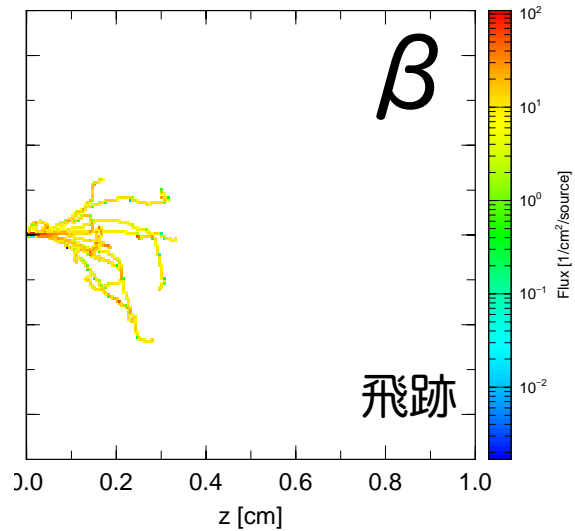
1MeV(1000keV)の γ 線の飛跡 (鉛中)

同じ粒子・同じ運動エネルギーの放射線でも、通過する物質によって到達距離は異なる。

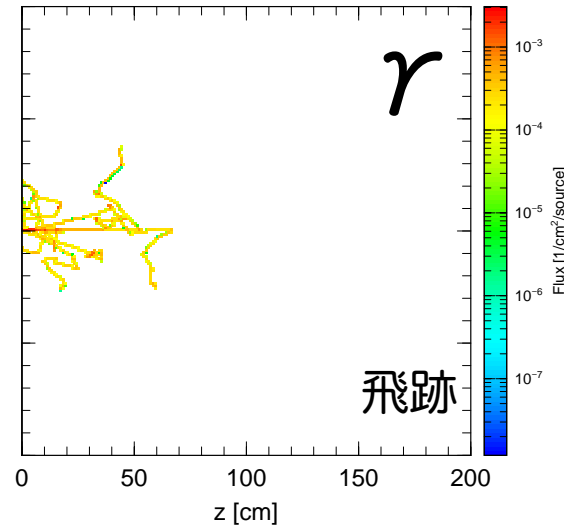
※特に低エネルギー (数keV~数十keV程度) の光子線は原子番号の影響を大きく受ける。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

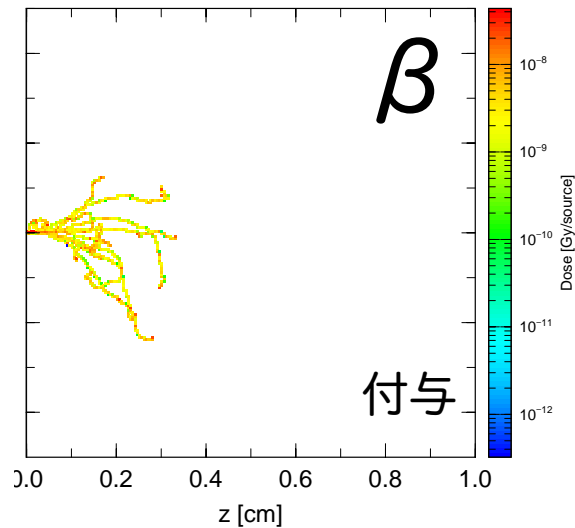
3) 粒子によるエネルギー付与とパターンの違い



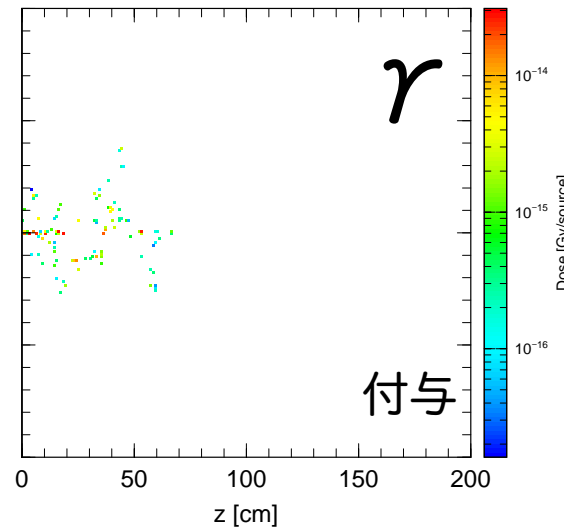
1MeV(1000keV)の β 線の飛跡 (水中)



1MeV(1000keV)の γ 線の飛跡 (水中)



1MeV(1000keV)の β 線のエネルギー付与 (水中)



1MeV(1000keV)の γ 線のエネルギー付与 (水中)

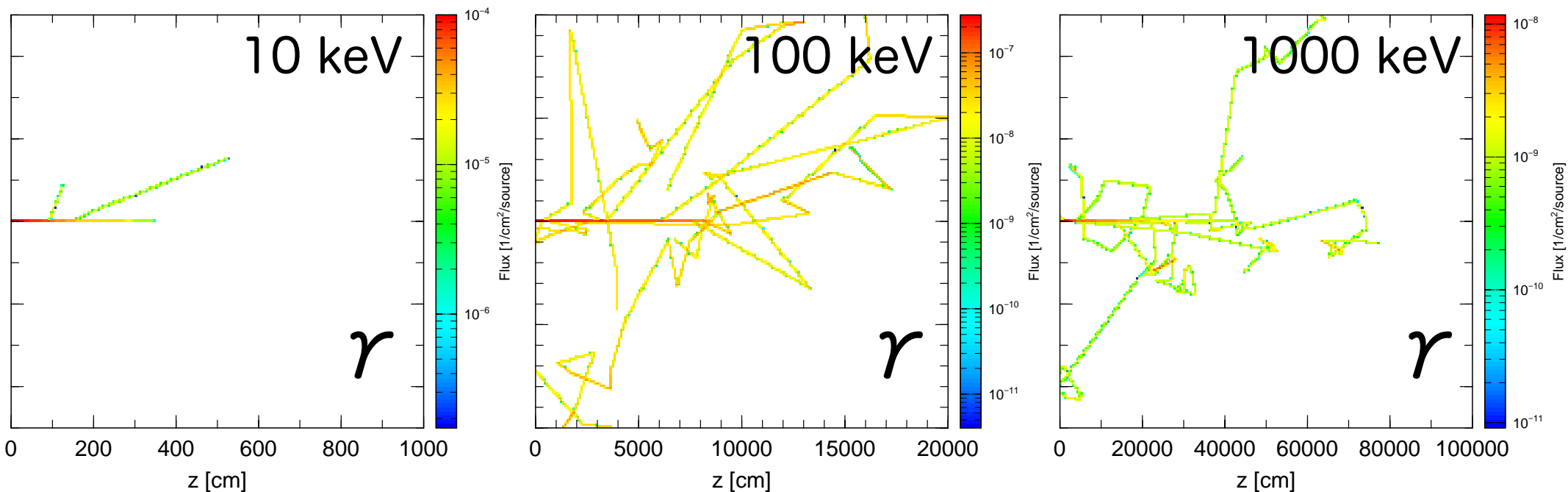
β 線 (電子) は物質中の飛跡 (通過経路) に沿ってエネルギーを付与する。

γ 線 (光子) は飛跡そのものにはエネルギーを付与せず、弾き出した電子にエネルギーを付与し、弾き出された電子が物質にエネルギーを付与する。

このため、光子のエネルギー付与は広範囲に点状 (より正確には短い線状) に散らばる。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

4) 放射線のエネルギーと飛程 (1)



10keVの γ 線の飛跡 (大気中)

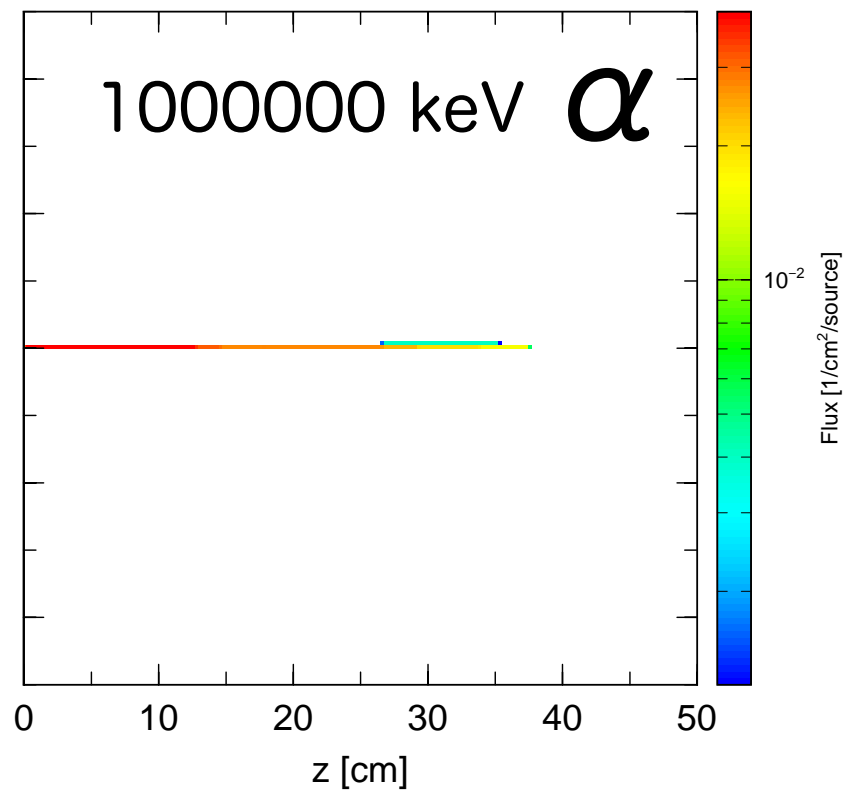
100keVの γ 線の飛跡 (大気中)

1MeV (1000keV) の γ 線の飛跡 (大気中)

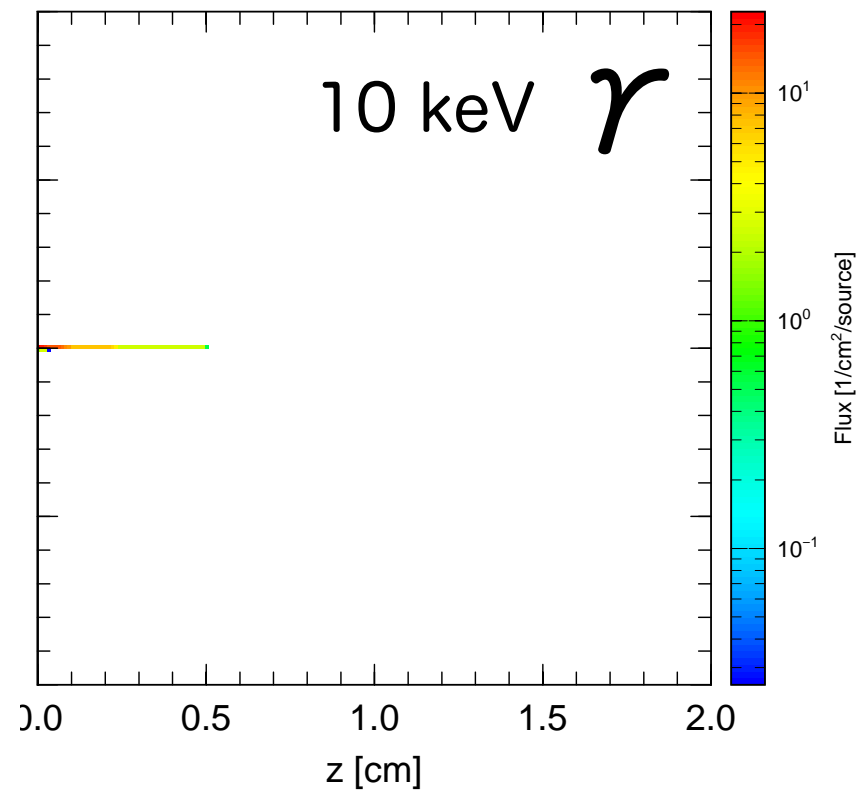
同じ粒子の放射線であっても、エネルギーによって飛程は異なる。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

5) 放射線のエネルギーと飛程 (2)



1GeV(10000000keV)の α 線の飛跡 (水中)



10keVの γ 線の飛跡 (水中)

透過性の高い γ 線 (光子) であっても、10keV程度のエネルギーでは水中飛程が1cmに満たない。透過性の低い α 線であっても、1GeV程度のエネルギーがあれば水中を数十cm進むことができる。