

表題：放射線を測るための放射線の特殊性（2）

副題：相互作用と吸収線量の理解のための前提的知識（続）

筆者：化学工学会 SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫

2021年5月15日作成

前回に続き、相互作用と吸収線量の理解のための横串的な事前知識をお話します。

1. エネルギー伝達の検知ポイント（単なる伝達ポイントとは違うこと）

相互作用とエネルギー吸収を理解するうえで、必要なのは「エネルギー伝達の検知ポイント」です。その意味は、放射線から物質へ、ある量のエネルギーが伝達されたことが検知できるポイントのことです。エネルギー伝達の概要を言いますと、放射線は物質の原子の電子雲に衝突し、1つは、放射線が直接に電離を起こす場合、2つは、放射線がまず高速高エネルギーの2次電子を発生させ、その2次電子が原子の電子雲とぶつかって、電離、励起を起こす場合です。

ここで、放射線が2次電子（又はγ線では、光電子とかコンプトン電子とか言われる高E電子も含む）を発した時には、その地点で明らかにエネルギーは伝達されたわけですが、その現象場面だけの検知方法で満足する良いものはありません。エネルギー伝達を検知できるのは1次電子や2次電子などが引き続いて電離現象を起こした時です。電離はイオン対をつくるので電極で集め、その電流からエネルギー量を求められます。

要するに、一義的には、検知できるのは、電離が起こった地点で、それがエネルギー伝達の検知ポイントと理解しておいてください。

2. 放射線のエネルギーバランスについて

前回、相互作用のイントロで話しましたように、放射線のE付与と物質側のE吸収があり、エネルギー収支では、付与 = 吸収 とすると分かり易い感じがしますが、実際は両者が等しいと言うためには、付与とか吸収とかのエネルギーをどのように定義して測って決めたものかを明示しなければなりません。まがきで触れましたように、エネルギーはいろいろのところロス（散逸）があるからです。今回、申し上げておきたいのは、吸収エネルギーは、一義的には、物質内で起こる「電離」現象を捕まえて換算したエネルギー量であ

ることです（他のエネルギー測定法もあり、何を捕まえるかで少し違いますが）。

そうだとしますと、エネルギー付与量 > エネルギー吸収量 です。

もう少し細かく言いますと、ある一定量の物質に、放射線が入射することを考えた時、物質に入る始点における、放射線の持つエネルギー量 \geq 物質の終点までに放射線が物質との相互作用によって失ったエネルギー量 = 検知された物質のエネルギー吸収量（これをエネルギー付与量と言っている場合が多いです）+ 検知されないエネルギー量（ロスとも言えますが、その内容はいろいろな素過程を含む複雑なものです）、ということです。ここで不等号付きの等号条件は、その放射線が物質内ですべてのエネルギーを失って終わった場合です。

ただ、「検知されないエネルギー（ロスとも...）」と書きましたのは、エネルギーの捕まえ方によります。たとえば、カロリメーターで、放射線を照射しているある領域の発生熱量を完全断熱下で精密に測ったとしますと、放射線の損失エネルギーは最終的にはすべてその物質の中の熱に変わりますので、ロスはほぼ無いことになります（理論的に完全 100% ではないですが）。話がちょっと飛びますが、やがて起こる化学反応や生化学反応は、これらのエネルギーのほんの一部がもたらしているものと理解しておいてください。

今後の本連載において、放射線の定義関連記事の大部分は、この認識で記述します。このように見ておいた方が難しい線量の理屈を理解しやすいと思います。

ただ、電離現象は、先々、皆様が心配する DNA 変質に結び付く可能性は高いですから、電離現象が続いて引きこす変化を注意深く見なければならぬことは言うまでもありません。

4. 比電離, 飛程, LET と 透過力

これらの用語は、電離放射線が物質中を移動する時の、エネルギー損失の程度に関連した指標です。これらは、相互作用における E 伝達に強く関係するものですが、線種によって、また放射線の持つ E によって異なります。

表 1. 簡単に言うと下表です。

	単位	説明
飛程	cm	放射線が物質内を到達する距離; 飛跡の (延長した) 長さを飛程という。

比電離	イオン対数/cm	経路 1cm あたりのイオン対の総数
LET	keV/ μ m	線エネルギー付与；飛程の単位長さ当りに平均して失うエネルギー

なお、上述 3. の「飛跡」と「飛程」とは違うことなので区別してください。

以下で少し細かく解説します。

(1) 飛程, 最大飛程

飛程とは電子、陽子、アルファ線などの荷電粒子が物質中を進むとき、電離作用によりエネルギーを失い遂には粒子は停止しますが、停止するまでの距離、すなわち、飛跡の（延長した）長さを飛程といいます（長さ単位：m, cm, mm などあり）。

電子は、その進路の終わりに近いところでは、非常に屈曲して進むので、進路に沿って全飛程の長さを測り、これを特に「真飛程」という用語もあります。

透過 β 線（ある厚さの物質を通りぬけ入射側とは反対側に出た場合）の数がゼロになる厚さをこの β 線のその物質における最大飛程と呼びます。この最大飛程は厚さを面密度 $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ の単位で表せば、どの物質についてもほぼ同じぐらいの値になります。

表 2. 飛程のデータ

線種	エネルギー eV	空气中	水中	
α 線	4 eV	25 mm	0.03 mm	
	7.7 eV	86 mm	0.09 mm	
β 線	18 keV トリチウム	0.5 cm		
	100 keV	0.11m		
	500 keV	1.5 m		
	1 MeV	3.7 m	0.4 cm	
	2 MeV	8.5 m		
	2.3 MeV 最大	10 m		

(2) 透過力 (γ 線の場合のみ)

γ 線, X 線自体に、飛程はない。物質との相互作用で決まる線源弱係数より、比率一定で γ 線は弱まります。その程度を透過力と言います。

α 粒子・ β 粒子と比べると透過能力は高いですが、電離作用は弱いです。

ガンマ線の遮蔽には、比重の重い物質（鉛，鉄，コンクリートなど）が使われますが，一般によく利用される鉛（密度：11.3g/cm³）では、10 cmの厚さで約 1/100 - 1/1000 に減衰されます。ガンマ線は透過力が大きい上、電荷を持たないので電磁気力を使って方向を変えられないため、ガンマ線からの防護は他の放射線と比較して難しいものです。空气中を数 10m から数 100m 飛びます。空気分子に衝突して減弱すること。

(3) 比電離

イオン化の強さは、ある物質中を荷電粒子が単位長さ進むときに生ずるイオン対の数で定義され、単位長さあたりの電離数を**比電離(度)**と言います。（単位：個/mm）

比電離度は放射線の種類やエネルギーによって変化します。α線の場合は、α線が1 atmの空气中を進む場合、約 10⁴ 個/cmの気体分子と衝突します。α線が気体分子と衝突したとき、気体分子の軌道電子を励起する以外に、電離により、軌道電子をはじき気体分子を正にイオン化することもあります。

同じエネルギーを持つβ粒子は 30～300 個/cmのイオン対しか作りません。

また、荷電粒子の電離によるイオン対の生成率は速度に反比例し、放射線と物質の相互作用に占める電離作用の割合は、高エネルギーの領域では減少し、非荷電粒子線の場合も事態は同様です。

なお、大気圧の空气中で、生成されたイオン対は、遅かれ早かれ再結合して熱となって消費されます。電流を測るためには、電極を入れて、再結合の前にイオンを集めることをやるわけです。

表3. 比電離のデータ；吸収体の厚さを面密度(mg/cm²)で表示すると、物質によらないイオン対数を示すので、分かり易い。

線種	エネルギー eV	空气中 空気 mm あたり イオン対数	空气中 1.00mg/cm ² あたり イオン対数	水中
α線	3 eV		32,000	
	5 eV		22,000	
	7.7 eV		16,000	
β線	0.146 keV	770 極大		
	10 eV	110		
	18 keV トリチウム			

	100 keV	15		
	500 keV	6.4		
	1 MeV	5.9		
	2 MeV	5.9		

(4) LET : 線エネルギー付与

電離性放射線が物質中を通過する際、飛跡に沿って、飛程の単位長さ当りに平均して失うエネルギーを線エネルギー付与 (LET; Linear Energy Transfer ; 単位 : $J * m^{-1}$) といいます。これを放射線の線質の違い (特に生物学的影響の差異) を知る指標として重要なものです。

各種の放射線のうち、X線、 γ 線は LET が小さいので低 LET 線といい、 α 線、中性子線、その他重荷電粒子、核分裂破片の LET は大きいので高 LET 線と言います。物質の LET が同じであっても放射線効果に差があることがあります (生物効果につきましては後日の話となります)。放射線の線量単位は 1kg 当りに吸収されるエネルギーの総量 $1Gy = 1 J/kg$ といったようにきわめて巨視的なものであるのに対し、実際の生物体内では、電離のミクロな空間分布の違いによって、同一線量であってもその放射線から与えられる効果が異なってくるので、このような指標が必要になってくるのです。

表4. 水中における LET のデータ

放射線のLET (線エネルギー付与率)		
Linear Energy Transfer		
水中におけるLETの例		
放射線	エネルギー MeV	LET keV/ μm ; 水中
α 線	1	264
α 線	10	56
陽子線	1	28
陽子線	10	4.7
δ 線		8~30
β 線(電子)	0.01	2.3
β 線(電子)	0.1	0.4
β 線(電子)	1.0	0.2
X線	0.03	2.0
γ 線	1.3	0.3
γ 線	^{60}Co (1.33)	0.2
		アイソトープ手帳より

最後に、放射線全体の透過力の比較で、環境省の絵がありましたので、分かり易いですから、以下図1. に引用します。

エネルギー伝達と**相互作用**については次回、次々回にお話しします。

出典：[環境省_放射線の体内での透過力 \(env.go.jp\)](http://env.go.jp)

図1. 放射線の**対外**と**体内**における透過力 (下図の表題は「**対外**」が抜けている.)



参考文献：(その1), (続) を通じてのもの.

- 1) [2012012_TRACER_TADA - Bing](#)
連載：線量 - 第3回—
- 2) [放射線量の概念と放射線防護 早川 恭史 - Bing](#)
大学講義資料；[放射線量の概念と放射線防護 - Nihon University](#)
- 3) [sec2_kimura.pdf \(osaka-u.ac.jp\)](#)
第2章 放射線と物質との相互作用

(連載 005 おわり)