

**表題：ラドン吸入による内部被ばく問題（２）**

**副題：ラドンと子孫核種の物理化学，放射能の半減期則**

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 9 月 20 日作成

**1. 復習で－放射線の単位 3 つ**

放射線の単位については、すでに連載「放射線の単位」で紹介していますが、復習で、3つの重要な基本単位だけ列記しておきます。

表 1. 放射線の単位 3 つ

単位名	記号	通常出現の表記, または cgs 表記	内容, 意味するもの
放射能 ベクレル	Bq	Bq/kg	1 秒間に発せられる放射線の本数, ただし, 通常はガンマ線のみを測定している.
吸収線量 グレイ	Gy	J (Joule) /kg	物質の「 <u>吸収線量</u> 」, 吸収エネルギー
実効線量 シーベルト	Sv	mSv, $\mu$ Sv など	<u>健康影響指標</u> であること（線種, 半減期, エネルギー, 透過力, LET, 受け側の物質の性質などから推算されるもの）
実効線量率 というのがある.		mSv/h, mSv/y, $\mu$ Sv/h など.	「 <u>率</u> 」とは時間当たりのこと.

**2. ラドンと子孫核種の物理化学**

**(1) ラドンの物理化学定数, 性質**

すでに公開しています連載「放射線のための物理化学基礎（４）」にて、天然の放射性物質を解説し、その中で「自然の放射性物質壊変系列」を図表とともに話ししています。そこで、**ラドン** ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  = トロン) の何たるかを示していますので、ここで繰り返しは避けませんが、物理化学定数などを下の表 2. にまとめておきます。

それと、アクチニウム系列にラドンがありますが、大元の  $^{235}\text{U}$  の量が、 $^{238}\text{U}$  に比べて非常に小さく（**現在の自然存在比率**：0.72%，時間とともにこの比率は下がること）、ラド

ン問題では通常無視されます。

表 2. ラドン；3つの同位体の物理化学定数，性質，壊変系列

同位体 核種	通称	性状, 化学的性質	放射線； エネルギー(MeV)	半減期 $T_{1/2}$
$^{222}\text{Rn}$	ラドン	気体, 化学的不活性 (=他物質と 化学反応しない)	$\alpha$ 線；5.5 MeV, $\gamma$ 線；わずか	3.82 d
	壊変系列	ウラン系列の子孫核種は $^{218}\text{Po}$ , $^{214}\text{Pb}$ , $^{214}\text{Bi}$ , $^{214}\text{Po}$ , $^{210}\text{Tl}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Bi}$ , $^{206}\text{Tl}$ , 及び $^{210}\text{Po}$ , 最後安定な $^{206}\text{Pb}$		
$^{220}\text{Rn}$	トロン	(同上)	$\alpha$ 線；6.3 MeV, $\gamma$ 線；わずか	56 sec
	壊変系列	トリウム系列の子孫核種は $^{216}\text{Po}$ , $^{212}\text{Pb}$ , $^{212}\text{Bi}$ , $^{212}\text{Po}$ , $^{208}\text{Tl}$ , 最後安定な $^{208}\text{Pb}$		
$^{219}\text{Rn}$	アクチニウム系列；自然存在比率が小さいので，この連載ではほとんど取り上げ ない。			

比較のために1つコメントしますと，知られた化学的不活性ガスとしてキセノン Xe があります（写真用のストロボや映写機用のランプなどに使われています），その中の放射性同位体で  $^{133}\text{Xe}$  があります。これは核分裂（原発や原爆）で発生する FP（核分裂片）の1つとして我々の環境に現れますが， $^{133}\text{Xe}$  は半減期は5日ほどで短く（ラドンと類似），放射線はベータ線とガンマ線を放出して  $^{133}\text{Cs}$ （セシウム同位体ですが，天然に豊富にある安定なセシウムです；放射能を持つのは  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  です）に1回だけの壊変をして終わります。先の1F事故でも  $^{133}\text{Xe}$  が環境にかなり放出されていますが，1回限りの短寿命不活性ガスで，それによる健康被害はほとんどなかったと言われます。キセノンは空気より重いので静寂な大気中では下側に集まります。ちょっとでも風が吹いていれば拡散しますが。

## (2) ラドンの子孫核種の物理化学定数，性質

表 2. にラドンの放射性子孫核種について，物理化学定数を下の表にまとめておきます。これらの子孫核種の半減期は大部分は秒，分単位で短いですが，半減期が短いからと言って大丈夫などということはありません。健康影響は与えるということです。

その理解のために，下で，放射平衡の計算をします。

補足話ですが、鉛はよくγ線の遮蔽材として使われていますが、下の表3.の最下段のように、鉛は4つの安定同位体鉛の組成物ですが、これらは結局、天然壊変系列の最終生成物であり、途中の放射性鉛を、若干ですが、含んでいます。つまり、少しですが鉛金属材料自体に放射性鉛物質が含まれているということです。ただ、β線が大部分なので、大したことはないでしょう。

表3. ラドンの子孫核種のデータ表（下表は、子孫核種の全部ではない、主なもの）

核種 記号	通称	性状, 物理, 化学的性質	放射線; エネルギー(MeV)	半減期 T <sub>1/2</sub>
<sup>218</sup> Po	ポロニウム	昇華性があり, 強い放射能を持つ。内部被ばくリスクは高い。Poの <b>毒性</b> はシアン化水素(HCN)の1万倍以上と極めて強力で、ボツリヌス毒素と並び、 <u>Poは既知の物質の中で最も<b>毒性</b>の強い物質の1つである。</u> <sup>210</sup> Poは摂取すると肝臓に蓄積し、骨髄や胃腸、中枢神経系にも影響を及ぼす。また、ヒトの致死量は10 μg未満と推定されている。	α線 6.0 MeV,	3.10m
<sup>216</sup> Po	ポロニウム		α線 7.4 MeV,	1.78*10 <sup>-3</sup> s
<sup>214</sup> Po	ポロニウム		α線 7.7 MeV,	1.64*10 <sup>-4</sup> s
<sup>214</sup> Bi	ビスマス	常温で安定に存在し、ビスマス化合物には医薬品の材料となるものがある。毒性あり。	α線 5.5 MeV, γ線少々	19.9m
<sup>212</sup> Bi	ビスマス		α線 6.6MeV, γ線少々	2.14m
<sup>214</sup> Pb	鉛	化学的毒性高い, 吸入あるいは経口摂取により吸収され、鉛中毒あり。	β-線 0.7MeV, γ線少々	26.8m
<sup>212</sup> Pb	鉛		β-線 1.38MeV, γ線少々	36.1m
<sup>210</sup> Tl	タリウム	化学的毒性が強い。	β-線 1.43MeV, γ線少々	4.77m
(参考) <u>安定な鉛</u>		4つの自然崩壊系列の最期が, 4つの安定鉛である。それらは, <sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb が安定体で, その組成物が現に鉛金属として利用されているものである。		

## 2. ラドンの親核種であるウランやトリウム<sup>238</sup>の所在場所

ラドンの発生量は、土壌、岩石や建材の単位重量当たりの中で出発物質であるウランやトリウムの含有量が多い場所が多いわけです。しかし、それらの出発材料から浸みだしてくる気体ラドンの空気中の濃度は、ラドン生成場所の深さや浸みだし先の空気が存在する環境（開放とか密閉とか）にも依ります。

まずは、出発物質であるウランやトリウムの存在濃度を見てみましょう（表4）。ウランは、環境の土壌・地殻、建材中（コンクリート、レンガ、石材など）に広く存在しますが、概略的には、花崗岩質に多く含まれる傾向があります。下表にウラン濃度を示します。コンクリート中のウラン濃度は、土壌中よりも平均的に高いことになります。つまり、私たちが日常的に接しているコンクリートには相当なウランが含まれており、また、アルミのような金属材料にも結構含まれています。従って、コンクリートや石材造りの建築物では、ラドン発生量が相対的に多いということです。ただ、換気程度に大いに影響されます。

表4. ウラン濃度（放射能表示，結構場所によりフレが大きいです。）

< <sup>238</sup> U 放射能>	世界	日本
土壌中	0～0.69 Bq/g; (中央値 0.035Bq/g)	0.002～0.059 Bq/g (平均値 0.029 Bq/g)
コンクリート中		0.033～0.44 Bq/g, その構成材のセメントでは 0.041 Bq/g
アルミニウム中		0.005～0.07 Bq/g
(比較) ウラン鉱床	150～1000 Bq/g	(土壌中の数万倍以上ということ)

## 3. 空気中ラドン（ガス）の存在影響因子について

ウランとトリウムから、壊変系列の過程を経て、ラドンができるわけですが、大気中のラドン濃度に影響する因子を見てみましょう。

・家屋内への侵入経路： ラドンは床下にある地面や壁等の建材中に含まれる <sup>226</sup>Ra から生成され、大気中に移行拡散して屋内に侵入します。水道管やガス管經由もあります。

・大地を構成する土壌・岩石中でラドンは生成しますが、それらのラドンは地中からすべて大気中に浸み出してくるわけではありません。地中深いところのラドンは、浸み出す前に次のポロニウムに壊変してしまうでしょう。つまり、地面から数メートルくらいの浅い部分で生成したラドンが大気中に拡散してくるということです。

・ 空気中に浸みだし、放出されたラドンは、地表面から大気中に散逸するか、または家屋の床を通して屋内大気に侵入します。家屋の建材もラドンを放出するため、家屋構造材の種類によって屋内のラドン濃度が変化します。家屋の気密性が高いと屋内のラドン濃度は明らかに増加します。一般には、プレハブ、鉄骨、木造家屋のラドン濃度が低く、コンクリートおよびコンクリートブロックの家屋のラドン濃度が高い傾向があります。

・ 大地から出てきたラドンの散逸は気象に大きく左右され、さらに、土壌や岩石組成が地域により異なるため、大気中のラドン濃度にも地域性が認められる。花崗岩の多い西日本では比較的高く、関東ローム層に覆われた関東地方では低い値です。

・ 通風性の良好な木造家屋の多い日本は、屋内のラドン濃度が世界的に見て低いといえますが、しかし、気密性の高い近代の住宅環境やコンクリート造りの職場や事務所では、換気への配慮がなければ、わが国でも屋内ラドン濃度が高まる可能性があります。

#### 4. 放射平衡の計算

ここで、連載「放射線のための物理化学基礎（5）」で記述しています壊変法則の公式（詳しくはそちらを参照ください）を使って、**放射平衡**について復習します。

一般に、親核種の半減期が娘核種の半減期より長い場合、放射平衡が成り立ちます。そして、X→Y→Zの逐次（連続）壊変において、親核種 X と娘核種 Y が常に同時に存在し、それらの放射能が釣り合った状態のことを言います。放射平衡には、親核種と娘核種の半減期の大きさの大小により、過渡平衡と永続平衡があります。

（1）はじめは、教科書の通り紹介しますが、今回のラドン問題を例にとれば、

- 過渡平衡とは、 $^{222}\text{Rn} (T_{\text{hf}} = 3.82 \text{ d}) \rightarrow ^{218}\text{Po} (T_{\text{hf}} = 3.10 \text{ m})$  です。  
 $T_{\text{hf}}$  : 半減期で、 $\text{Rn } T_{\text{hf}} > \text{Po } T_{\text{hf}}$  で 10 倍以上の差があるときの現象です。  
つまり、過渡平衡の条件では、親と娘の放射能は、半減期に反比例して、両者の比は一定になります（図 2. の通り）。
- 永続平衡とは、 $^{238}\text{U}$  に始まって、最後の安定鉛に行きつくまでのすべての壊変系列のように、元親核種の半減期  $T_{\text{hf}}$  が、他の子孫核種（1 つ 2 つでもよい）の半減期の 1000 倍以上もあるときを言います。 $^{238}\text{U}$  の半減期は 44 億年もあるのですから、他の子孫核種は足元にもおよびません（図 3. の通り）。  
つまり、永続平衡の条件では、各核種の放射能はすべて同じということです。

こう見ると、不思議なことに、ラドンやポロニウム、ビスマスなどの原子数 N の比率は、ウランに比べて取るに足らぬ極小です。しかし、放射能 A で見てみれば、ウランもラドンも子孫核種も、放射能 A はすべて同じなのです。これが永続平衡です。

ラドンやポロニウムなどの半減期はごく短いです。だから、身体的安全は問題ないと考えるのは早計です。その放射能の絶対値は、日本などでは大した数字ではありませんが、ラドンは次々に地面から這い出てきます。小さくてもその放射能が1回で終わるのではなく、永遠に続くのです。

図 1

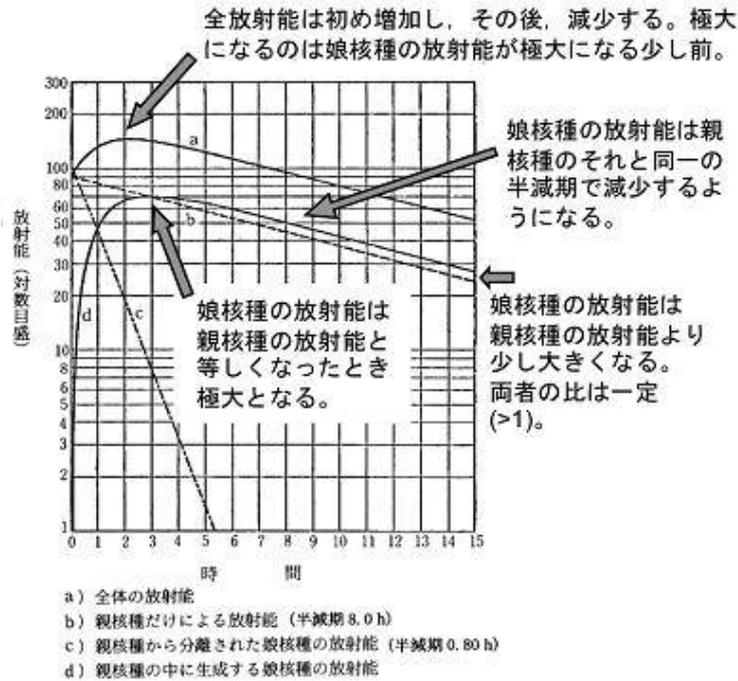
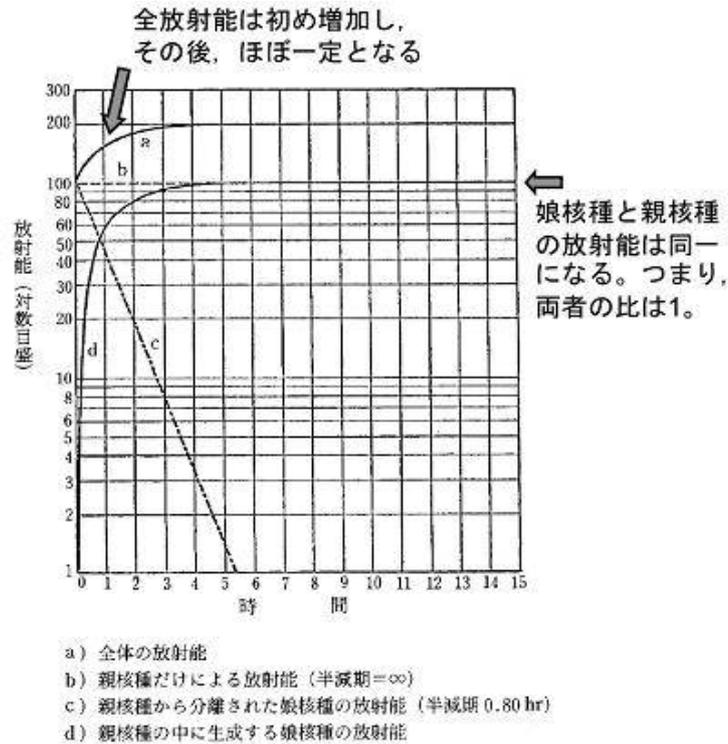


図 2



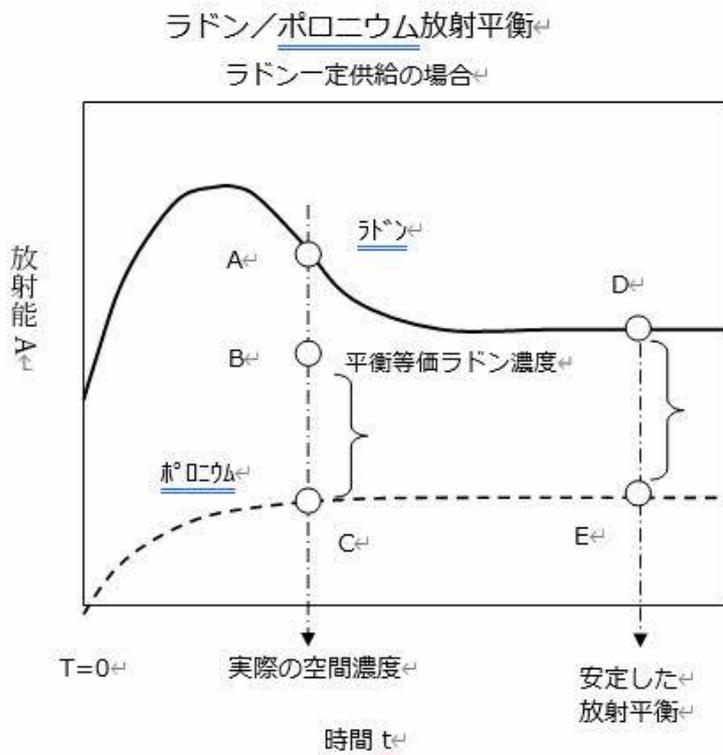
## (2) 外部から常時ラドンの供給のある場合の、ラドンと子孫核種の放射平衡

しかしながら、実際の大気中の  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{\text{hf}} = 3.82 \text{ d}$ )  $\rightarrow$   $^{218}\text{Po}$  ( $T_{\text{hf}} = 3.10 \text{ m}$ ) の壊変において注意を要するのは、過渡平衡ではあるものの、外部から「ある一定量のラドン」が常時供給されているという条件です。この時の核種の放射能の経時変化図がわからなければなりません。この経時変化図は、仮定として、ある閉じた系において、最初 ( $t=0$  の時) 大気中にある濃度のラドンだけが存在し、次に、外部からある一定量のラドンが常時供給されているという条件下で、Rn が壊変して Po 核種が増えていき、さらに時間が相当経つと、平衡状態になるという経時変化です。図示すると、下の図3です。

これが実際のラドンと子孫核種の放射平衡関係です（上述の教科書的な過渡平衡とは違います）。ただ、実際の大気においては、「ある一定量のラドン」ではなく、場所と時によってふらふらとラドン発生量はフレますので、実際は図3の平衡点の周囲で、いろいろ変動があるということです。

D と E は放射平衡関係にあります。A と C は非平衡です。B が仮定の平衡等価ラドン濃度 (PAEC ; 後述) ということになります。この関係が、次の連載 (3) で議論になります。ここが結構ややこしいです。

図3.



## 5. ラドン (Rn) 放射能の測定 (文献 8, 23)

ラドンの測定には、古くは IM 泉効計 (\*注) (放射能は電離箱と検電器で測定する) や ZnS (Ag) などが用いられ、測定感度が低かったが、1950 年頃からは放射線測定技術が進歩し、それに呼応してラドンの測定技術も大幅に向上しました。

(\*注) 温泉にラドンが含まれていることは知られている。そのラドンを測定するのに、温泉法施行規則では「温泉を登録する際には、温泉の成分分析をするためにガラス製棒状温度計、化学天秤などとともに、IM 泉効計を保有しなければならない」としている。

### (1) ラドン測定の方法

ラドンは  $\alpha$  線を放出しますが、 $\alpha$  線は単位長さあたりのエネルギー付与が大きいので、高い効率で測定できます。従い、多くのラドン濃度の測定器には  $\alpha$  線を測定する方法が採用されています。

大気中のラドンの測定法には、ポンプを用いて例えば数 10 リットルの空気を吸入するアクティブ法と測定器を大気中に静置して測定するパッシブ法とがあります。その際、ラドンの壊変で放出されるアルファ線を直接測定する方法と、娘核種等を活性炭のような吸着材などで捕集して測定して、間接的に算出する方法とがあります。

アルファ線の測定器には、固体飛跡検出器、液体シンチレーション検出器、大容量の電離箱、吸着法で捕集した娘核種等のガンマ線波高分析器、アルファ放射能用の半導体検出器などがある。

### (2) 代表的な測定器

- 電離箱を採用した測定器；空気を電離媒体として利用する通気型電離箱である。
- シンチレーション検出器を採用した検出器；静電捕集法を採用しているものがある。  
ラドンの子孫核種である  $^{218}\text{Po}$  は正に帯電する事が知られており、ラドンが崩壊した直後はほとんどが陽イオンとして空気中に浮遊することから、負電極に捕集できる。この捕集方法を静電捕集法という。
- 固体飛跡検出器を採用した検出器； $\alpha$  線等の重荷電粒子については、電離及び発光に加え、放射線損傷を利用した飛跡一つ一つの検出ができる。このような測定器を固体飛跡検出器といい、特に  $\alpha$  線については  $\alpha$  線飛跡検出器という。ATD は静電捕集法の検出器部分として使用されることがある。

(3) トロン濃度の測定法もラドンと同様である。しかし、トロンの半減期 (54.5 秒) が短いため、検出器中のガスの滞留時間を調節してラドン濃度を求めるとか、半導体検出器

によりアルファ線のエネルギースペクトルを弁別するといった工夫が施される。一般に測定試料中にはラドンやトロンが常に共存し、その割合は測定中にも大幅に変化することが多い。このため測定誤差が大きく、放射能の測定は未だに検討課題とされている。

今回は、ラドンの線量評価の難しさとその取扱いについて触れます。

(連載 018 おわり)