

表題：ラドン吸入による内部被ばく問題（3）

副題：ラドン放射能の特殊性と子孫核種の物理的挙動（メカニズム）

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

今回以降は特に、弘前大学被ばく医療総合研究所、床次眞司教授の公表データ^{1), 2)}から多くを引用します。「ラドン線量換算係数の最新動向」などをはじめとして、他の文献からもデータ、見出しおよびいくつかの図表を借用していますが、これらの引用につきましては、床次眞司先生より引用の許可を直接いただいていることを明記しておきます。ただ、先生の情報、データ、図表をそのまま引用しても、一般人には何のことかわからない部分が多いですので、筆者の基礎的知識の解説を随所に挿入していますことをあらかじめお断りいたします。

今回連載（3）から（6）では、世界（日本、欧米）のラドンデータ、線量評価のやや複雑な線量推定の方法を見たいと思います。

ある場所の空間中のラドン濃度（放射能）を測定することは、原理的にはさほど難しいことではないとしても、その測定値がどういう意味を持つかということをしっかり理解するのは意外に難しいことです。ラドンはどんどん放射能を出して次の元素の核種に変化していき、さらに、その核種がまた放射能を出して変化していくからです。それもごく短い時間で起こってゆきます。しかも、ラドンは不活性気体ですが、子孫核種は凝縮性の固体です。留意すべきことは、ラドンに対して、子孫核種は固体であるためラドンの動きとは大きく異なることです。 それでは、ラドンと子孫核種の動的メカニズムを見てみましょう。

1. ラドンと子孫核種の壊変の物理的挙動

この節がラドン被ばくを理解する上で最も重要なポイントです。

図1は、ミクロな視点での絵で、ラドンが地面から発生後に、大気空間中で、子孫核種へ壊変していくメカニズムを描いています。

(1) ラドンと子孫核種の大気中での壊変メカニズム

図 1. (引用元 Fig.2, 文献 2)) 大気空間中の物理的挙動の図 (中に用語の和訳を入れている), (図的には, Rn が排出してくる地面が上になっています)

図 1.

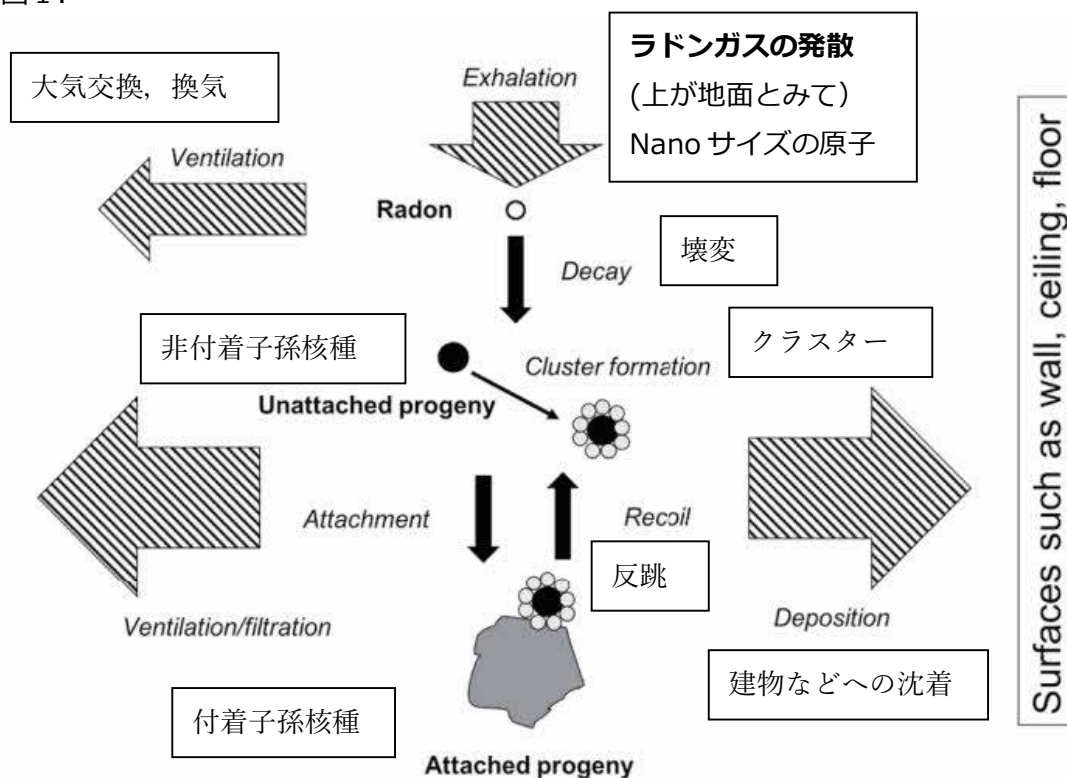


Fig. 2 Physical behavior of radon and its progeny in indoor environment.

生成直後のラドン子孫核種は拡散速度が大きく、空気中の水蒸気中にある水分子とクラスタを形成しながら物質の表面に沈着します。その物質とは空気中に浮遊しているエアロゾルであり、また屋内空間では床、壁、天井などです。エアロゾルに付着していないラドン子孫核種を非付着ラドン子孫核種 (unattached radon progeny), エアロゾルに付着したものを付着ラドン子孫核種 (attached radon progeny) といいます。

空間内ラドン濃度は一般に換気によってのみ減少するものです。屋内環境におけるラドンや子孫核種は換気や濾過によってそれらの放射能濃度が変動します。例えば室内の換気率が高くなるとラドン濃度や子孫核種濃度は一般に低くなります。なぜならば濃度の低い屋外空気が屋内に流入するためです。

非付着ラドン子孫核種は物質の表面に付着 (沈着) する性質を有することから、空気中に存在するエアロゾルに付着して付着ラドン子孫核種となります (空気中に浮遊している

ものもある)。非付着成分濃度を全成分(非付着成分と付着成分の和)の放射能濃度で除した比率を非付着成分比(f, この記号は、先に述べた平衡係数 F と混同しないように)と呼びます。

非付着成分が高い屋内環境では空気中に浮遊しているエアロゾルが少ないため、床や壁などに付着してしまい(プレートアウトと呼ぶ)、浮遊している子孫核種濃度の全量が減少します。

以上のプロセスから、**非付着成分比 f が大きくなると平衡ファクタ F は小さくなる**ということがあります。※次節で説明しますが「平衡ファクタ F とは平衡等価ラドン濃度の、ラドン・ガス濃度に対する比」です。

屋内環境における平衡ファクタ F と非付着成分比 f の間の負の相関関係を考えると、2つのパラメータによる線量評価値への影響が相殺されるので、屋内環境ではラドン濃度が **PAEC** (ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度; 次節で説明) に比べてよりよい被ばくの指標であると示されているようです。

(2) マクロ的な視点で、ラドンと子孫核種の大気空間中の放射平衡の様子

図2に、マクロ的な視点で、ラドンと子孫核種の大気空間中の放射平衡の様子を描いています。(これは筆者作成ですが、ここでは省略します。)

代わって、(参考資料; 文献24) を載せます。

屋内でエアクリナーの使用によって、線量が増加する可能性があることを説明。

エアロゾル粒子に付着していない成分(フリー成分)の比が大きい環境では、線量換算係数が大きくなる傾向がある。エアクリナーを使用すると、ラドン子孫核種がエアクリナーによって取り除かれるため、平衡等価ラドン濃度は減少する。しかしながら一方で、エアロゾル粒子も取り除かれてフリー成分が多くなる結果、線量換算係数が大きくなる。したがって、平衡等価ラドン濃度の減少によって線量が減少する一方で、線量換算係数が大きくなることによって線量が増加する効果があるため、思ったほどの線量低減効果がない場合もある。

シミュレーションモデル; 簡略のために、部屋は直方体とし、ラドンは壁及び床から一様に散逸(侵入)してくるものとした。主な計算条件としては、(1) 子孫核種に壊変したラドンがエアロゾルへ付着する確率はエアロゾルの個数濃度に依存する、

(2) 外気のラドン(子孫)濃度、エアロゾルの個数濃度は一定→これが一定速度で室内に侵入する、(3) エアクリナーは毎分120リットルの空気を吸引し、その空気中の全てのエアロゾル(付着成分も含む)、及びフリー成分の子孫核種を除去す

る、などである。 エアクリナーON

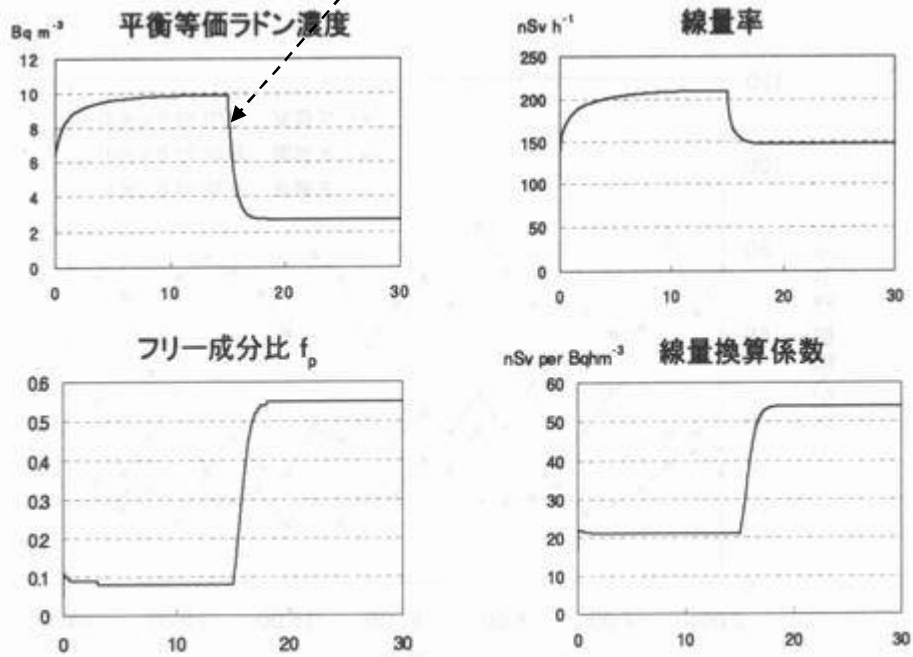


図3 エアクリナーを t=15 で動作開始させた場合の各パラメータの変化

エアクリナーを使用したことによって「空気の質」が変わったため、平衡等価ラドン濃度が減少した割には、線量は減少していないということがわかる。

2. ラドンに対する特殊な数量と単位

ラドンの挙動や線量評価を見る場合、どうしても必要になる、ラドンに対する特殊な数量と単位及び換算法をリストアップし解説しておきます。

表1. ラドンに関わる特殊な単位, 用語

用語, 単位名	記号	意味
ラドン濃度	Bq/m ³ (欧州)	環境のある時点の空气中 1 m ³ 当たりのラドン濃度; Bq ベクレル (ラドンだけ)
	mCi/L (米国)	空气中 1 liter 当たりの ミリキュリー ラドン濃度 (ラドン だけ) (換算) 1Ci は、 3.7×10^{10} Bq に等しい, 1/1000 の mCi (= 3.7×10^7 Bq)
ポテンシャル・ アルファ・エネ ルギー濃度;	J / m ³ or Jm ⁻³	ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度で表現する; ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度 (Potential Alpha Energy Concentration: PAEC) とは、体内に取り

ラドンによる「ばく露量」とみなす	(J*m-3)	<p>込まれたラドン子孫核種のうち 218Po, 214Pb, 214Bi (214Po とは放射平衡にある) の 3 核種が比較的短い時間で 210Pb まで壊変する間に放出すると期待される α 線エネルギーの総和となる。</p> <p>比較的短時間での α 線の放出では、体内に取り込まれた 3 核種が呼吸気道のみを被ばくの対象と考えられるからである。これら 3 つの核種の PAEC を合計したものがすなわちラドンの PAEC ということになる。</p>
平衡等価濃度	J / m3	<p>平衡等価濃度 (Equilibrium Equivalent Concentration: EEC) が用いられる場合がある。この濃度は、ある状態 (通常は非平衡) のラドン子孫核種濃度が有する PAEC と同量の PAEC を有するような 3 核種濃度が平衡状態にある場合を仮定した放射能濃度と定義される。</p> <p>(注意) 実際のラドン濃度は多くは、放射平衡のラドン子孫核種濃度より高い場合が多い; それは補正しないとならないということ。放射平衡は正しい値だから。</p>
平衡等価ラドン濃度	EERC	<p>EERC: equivalent equilibrium radon concentration</p> <p>平衡等価ラドン濃度 1 Bqm-3 は PAEC として表記するならば、5.6×10^{-6} mJm-3 となる。</p>
平衡係数 (平衡ファクタ)	F	<p>ラドン濃度 (分母) と平衡等価ラドン濃度 (分子) との比を表す平衡ファクタ; 言い換えれば、ラドン崩壊生成物の実際の混合物におけるポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度の、放射平衡の時に適用される濃度に対する比。</p> <p>平衡等価ラドン濃度 1 Bqm-3 は PAEC として表記するならば、5.6×10^{-6} mJm-3 となる。</p> <p>この平衡等価ラドン濃度 (普通, 実際より小さい) を実際のラドン濃度で除した比率を平衡ファクタと呼ぶ。</p>
ワーキングレベル (WL);	WL; J / m3	<p>業務中のアルファ線の濃度をエネルギーで表現;</p> <p>1 リットルの空気中に、1.3×10^5 MeV のポテンシャル・アルファ・エネルギーを放出するラドンの短寿命子孫核種の任意の混合濃度。</p> <p>1 WL = 2.08×10^{-5} J/m³ ; 根拠は下記参照</p>
ワーキングレベル	J h / m3	<p>1 作業月, すなわち 170 時間にわたって, 1WL の濃度の空気</p>

ルマンズ (WLM) ; 時間累積 WL,		を呼吸することによる累積被ばく量.
線量の概念に近いばく露量	この古い単位について	仮に3つの核種が $100 \text{ pCiL}^{-1} (= 3,700 \text{ Bqm}^{-3})$ であるとき, PAEC を算出すると $2.08 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}$ となる。 古くはこの濃度状態にある PAEC を 1WL (Working Level) と称していた。 上の濃度 WL にばく露時間を乗じた時間積分値 1WLM (Working Level Month) が用いられていた。 鉱山作業者の1か月間の労働時間が170時間であることから, 1WLM を SI 単位で表記すると $3.54 \text{ mJhm}^{-3} (= 2.08 \times 10^{-5} \times 170 \times 10^3)$ となる。
居住係数	居住パターンで, 比率	総務省統計局平成3年社会生活基本調査報告を基に、生活行動を20の分類に分け、属性(性別、年齢、職業、学生、主婦、家族構成など)の割合等を考慮しながら居住係数が求められている。

上の表の計算過程, 換算など ;

● ジュール(j): $1\text{J}=6.242 \times 10^{19} \text{ MeV}$
● ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度:
ラドン子孫核種の場合:
平衡状態のラドン $1 \text{ Bq/m}^3 = 3.47 \times 10^4 \text{ MeV/m}^3 = 5.56 \times 10^{-9} \text{ J/m}^3$ $= 5.56 \times 10^{-6} \text{ mJ/m}^3$
トロン子孫核種の場合:
平衡状態のトロン $1 \text{ Bq/m}^3 = 4.72 \times 10^5 \text{ MeV/m}^3 = 7.56 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$
● ワーキングレベル:
$1\text{WL} = 1.3 \times 10^8 \text{ MeV/m}^3$
$1\text{WL} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$
(注: WLMは, ラドンの曝露量として古くから使用されている単位で, 1WLのラドン濃度で170時間(1か月の作業時間)曝露を受けること。1WLは, $7,400 \text{ Bq/m}^3$ の平衡等価ラドン濃度)。
● ワーキングレベルマンズ:

1WLM = 3.54×10^{-3} J*h/m ³
1WLM = 6.37×10^5 Bq*h/m ³ 累積平衡等価ラドン濃度
1WLM = $6.37 \times 10^5 / F$ Bq*h/m ³ (a) 累積ラドン濃度
ラドン 1 Bq/m ³ で 1 年間 = 4.4×10^{-3} WLM in 住宅内 (b)
ラドン 1 Bq/m ³ で 1 年間 = 1.26×10^{-3} WLM in 作業場 (b)
1WLM = 4.68×10^4 Bq*h/m ³ 累積トロン ²²² の平衡等価濃度
注釈) (a) F=平衡係数, (b) 屋内に 7,000 時間/年, あるいは 2,000 時間/年 の作業で, F=0.4 と仮定 (ICRP,1993)

3. ラドン放射能（測定値）を実効線量に換算する問題

－ラドン吸入時のシーベルト換算係数－

それでは、最終的に mSv に結びつけるための原理式を学びます。

私たちは、日常生活の代表的滞在場面で、どのくらいのラドンを吸入しているのでしょうか？そして、それはどのくらいの健康指標ミリシーベルトの値となるのでしょうか？

ご存じの通り、一般人の放射線の被ばくの健康影響の目安の単位はシーベルト (Sv, mSv, mSv/hr, μSv/hr など) で表される) です。ラドンによる被ばくも同じです。

前連載で述べましたように、ある量の空気中のラドン濃度 (Bq/m³) は測定可能です。そして、その値は何 mSv なのか？という換算の問題です。西欧でも、この換算方法がラドン被ばく量と基準値や規制値に関わる議論の中心になっています。様々な機関からのデータがいろいろに振れており、そんなに確定的な数字を決めにくいと言えます。

既によく知られていますが、ある決まった放射性物質の決まったある量を通常の飲食物として体内に摂取した場合、その内部被ばく線量に換算する場合、実効被ばく線量 E (mSv) は以下で簡単に求められます。

$$E \text{ (mSv)} = \text{摂取量 (Bq)} * \text{実効線量係数 (mSv/Bq)} \quad (1) \text{式}$$

例えば、¹³⁷Cs を経口摂取した場合の、実効線量係数は、 $1.3 * 10^{-5}$ です。これらの係数は、ICRP や UNSCEAR などの国際機関が提示しているものです。ただ、上式は 1 つの放射性核種が体内に入った場合であり、その係数に影響を与える項目はたくさんあるでしょうが、1 種の核種のみ焦点を当てておけばよい場合です。

さて、類きの換算が、ラドンでも計算できなければなりません、既に述べましたように、ラドンの健康影響とは、ラドン自体の影響のみならず、ラドンの子孫核種の健康影響の総和です。ラドンの線量評価が換算おいてやや複雑になります。

ここで、広く使われている、UNSCEARの方法による線量評価について、式と用語の解説をしておきます。この線量評価は以下の因子の積で表されると言います。

(Ref. UNSCEAR 2000 より)

年間実効線量 Annual Effective Dose; $AED = Q \times F \times T \times K$ (2)式

ここで、**Q**: ラドン濃度 (Bq/m³),

F: 平衡係数 (平衡ファクター),

T: 所在時間 (h),

K: 線量換算係数 = **9 nSv/Bq h m⁻³** (**9** は現在で最新の認知データ) ,

K は空気中のラドン(気体)だけの、線量換算係数です。

平衡係数 **F** は、平衡等価ラドン濃度 (普通、実際より小さい) を実際のラドン濃度で除した比率を平衡ファクタと呼ぶ。

ラドンによる線量とは、厳密には、ラドン (Rn-222) による線量は少なく、ラドン壊変子孫核種の寄与が多くを占め、ラドンのおよそ 40 倍と言われます。その理由は、Rn-222 が希ガスのために吸気されても呼気とともに吐き出されるのに対し、壊変生成核種の方は呼吸気道に沈着して蓄積していき、そこで α 線を出して気道表皮の基底細胞に障害を与えるからです。本連載で「ラドンによる被曝」と言っていますが、実態は「ラドン壊変生成子孫核種による被曝」のことです。

Rn-222 の濃度がわかれば、それに適切なファクター (「平衡ファクター F」) を乗じることによって ラドン壊変子孫核種濃度を推定することができ、 そうして「ラドンによる被曝線量」が求められます。なお、平衡ファクター F が様々な環境や状況でいろいろ変わった値をとることは後の連載で述べます。

(連載 019 おわり)