

表題：ラドン吸入による内部被ばく問題（1）

副題：概要，単位と用語

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 10 月 3 日作成（改訂）

1. はじめに

世界保健機関（WHO）が発行した屋内ラドンハンドブック（日本語版 8；文献 22）によりますと、ラドンと肺がんの相関についての調査の歴史は古く 16 世紀までさかのぼるといいます。16 世紀の欧州で鉱山労働者に呼吸器疾患による死亡が多い事が認識され始め、19 世紀に入りその疾患が肺がんであると確認されたといえます。

1900 年にドイツの Dorn がラドンを発見（※）すると、鉱山労働者の肺がんの原因としてラドンが浮上し、1950 年代にラドンが肺がんの原因であることが確証されたといえます。

（※）（Friedrich Ernst Dorn は、ドイツの物理学者、放射性物質（後にラドンと命名される）がラジウムから放出されるのを最初に発見した。なお、1897 年頃キュリーによりラジウムが発見され、同じ頃アルファ線、ベータ線が発見されている（連載 001 参照）。

1980 年代以降ラドン濃度と肺がんリスクの相関を調べる疫学調査が実施され、欧州や北米などの鉱山労働者を対象としたコホート調査（被ばくした人間のその後の追跡調査をいう）が行われ、さらにラドンの子孫核種による内部被ばくのメカニズムが明らかにされ、被ばく線量推定についてのデータが公開されてきています。

ラドン内部被ばく問題は、欧米では昔から大きな社会問題にもなっていますが、日本国内ではあまり議論されてきませんでした。しかし、最近では国内でも基準，規制づくりの動きもあります。

ラドンの内部被ばくスキームは意外に複雑であり、ラドンは世界のどこの大気中にもある物質であるにも関わらず、その存在濃度はいろいろと振れ幅が広く、その場の条件環境の影響を大きく受けます。

筆者としては、低線量放射線被ばく問題の 1 つとして、このラドン被ばく問題を取り上げてみたいと思ったものです。

2. 概要

ラドンは天然の放射性壊変系列（次節で記載します）の中で生成する天然放射性物質の1つです。世界中のどこにでも、量の多少はあれ、存在します。すべての人間が、常時、呼吸で吸い込んでいます。

ラドンは、その親核種のウラン、トリウム、ラジウムなどが地殻の土壌や岩石や建材のコンクリート、石材などの中に存在している固体状態であるのに対して、それらから生まれるラドンは気体です。ラドンは地球の地面から湧き上がってくるのが主な発生ルートですが、ラドンが発生した瞬間は地中、岩石中、建材中に居るわけですが、気体であり化学的に不活性（周期表第18族の不活性ガス、周囲の物質と全く化学反応をしないこと）であるので、じわじわと外側の気層に浸み出てきます。当然それらの物質の奥深くで生成したラドンは浸み出しにくいですが、表面近くのラドンが浸みだし、その先が大気オープンならその量、濃度はたいしたものではなく、人類誕生以来すべての人間が多かれ少なかれ被ばくしてきたものです。

しかし、ラドンが浸みだした先が、地下資源の坑道や地下空間や石造りの建物などの密閉空間では、どうしても空気中のラドン濃度が高くなります。そこで生活し、あるいは働く人にとっては、常時十分な換気をしない場合は、高濃度のラドンを空気とともに呼吸するわけであり、それが深刻な放射線被ばく問題になるケースがあります。

ラドンはアルファ線と少量のガンマ線を放出します。ラドンはそういう放射線を放出して壊変（原子核内の陽子の数が変わって元素が変わること）し、ポロニウムになり、それが続いてまた、アルファ線やベータ線の放射線を放出し、放射性的鉛、ビスマスやタリウムなどの元素に変換します。それらは壊変時にまた放射線を出します。ポロニウムは放射能だけでなく、化学的毒性もかなりひどいものです。

ラドンは不活性な気体ですから、呼吸で吸入しても大部分は吐き出されますし、半減期は数日程度で短いので、ラドンだけのリスクは低いように見えますが、ラドンの濃度が高い場合、また後続の Po, Bi, Tl, Pb（放射性的鉛）のような子孫核種（前連載（4）で説明しました）は凝縮固体（気体ではなく、凝縮し、ゲル生成や隣接した物質の表面に沈着するという）であるために、子孫核種が気管や肺内に残留した場合は、それら核種の放射線によるリスクは高いものとなるでしょう。

以上が、日常生活において、建物下の地面（これがラドンの主たる源泉）、コンクリート、石材、レンガ造りの換気の悪い密閉型住居環境のみならず、ラドン濃度が高い地域（日本は全体としてラドン濃度は低い）における「ラドンによる身体の内部被ばく問題」の概要です。ラドンは、地球上のすべての人間が今も呼吸しており、特殊な存在の天然放

放射性物質です。

ラドン問題は、ラドンそのものによる被ばくより、その子孫核種による被ばくの方が影響がずっと大きいことに留意してください。

3. 天然の放射性壊変系列

天然の放射性壊変系列につきましては、連載 015、放射線のための物理化学基礎（4）で詳述していますので参照ください。細かいことは繰り返しません。その系列には、トリウム系列、ウラン系列、アクチニウム系列があり（他にもう1つ、ネプツニウム系列がありますが、半減期が短く、現在の地球上にはほとんど存在しません）、それら全部の放射性壊変系列の原子核壊変過程でラドンが必ず生成しますし、その後の子孫核種、ポロニウム、ビスマス、鉛（放射性の鉛）、タリウムなどもすべて放射線を放出します。つまり、放射性壊変系列のすべての元素は、最後に安定体の鉛に行き着くまで、すべてが放射性元素です。それが、ラドン被ばく問題の根本的な要因となっているわけ」です。

（念のため、末尾に、ウラン系列とトリウム系列の図を添付しておきます。）

4. 環境省の解説を紹介

前連載でラドン問題の概要をお話ししましたが、ここで、環境省の一般向け解説を一部追記修正して紹介します。上述の概要とダブるところが多いですが、ご容赦ください。

<ラドン及びトロン吸入による内部被ばく問題>

ラドン（ラドン；原子記号 ^{222}Rn ）及び同位体であるトロン（ラドン；原子記号 ^{220}Rn ）はラジウム鉱石が放射性壊変をした際に発生する気体状の放射性物質で、呼吸によって人体に取り込まれます。ラドンは、 ^{238}U から始まる壊変（ウラン系列）で生成した ^{226}Ra が壊変したもの、トロンは ^{232}Th から始まる壊変（トリウム系列）で生成された ^{224}Ra が壊変したものです。半減期はそれぞれ、ラドンが約 3.8 日、トロンは約 55 秒です。（これら壊変系列については連載（4）で詳しく記述しています。）

また、天然に存在する放射線による被ばくの中では、ラドン及びその子孫核種による被ばくの割合が一番大きいといわれています。

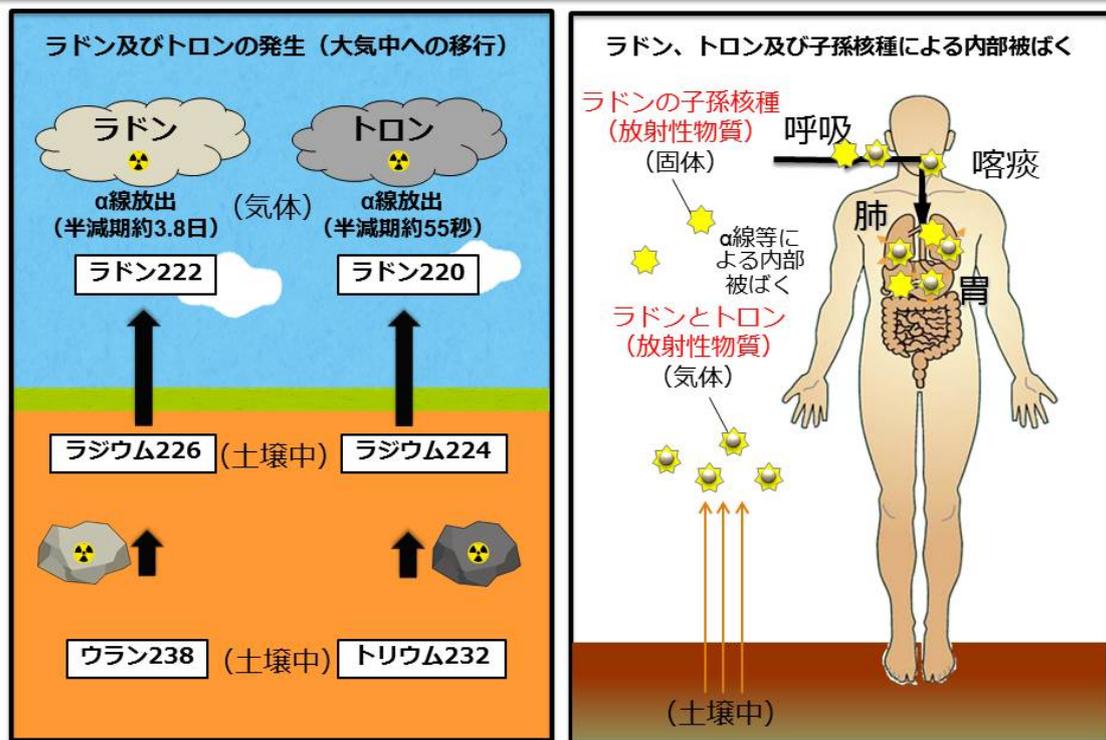
ラドン及びトロンは地面や建材（安山岩や花崗岩などの石材、コンクリート材）等から空気中に拡散するため、私たちは普段の生活において日常的に、多かれ少なかれ、ラドン及びトロンを吸い込んでいます。呼吸によって吸い込まれたラドンは肺に到達し、 α （アルファ）線を放出する（ガンマ線も出しますが、それほど強くはありません。）ため、肺

への内部被ばくが問題となります。体内に吸い込まれたラドンは更に壊変して子孫核種となり、肺や、喀痰と共に食道から消化器官に移行して内部被ばくをもたらすリスクがあります。

ラドンとその子孫核種では、内部被ばくの寄与はラドンからは小さく、ラドンから壊変した子孫核種のほうが寄与が大きくなります。これは、ラドンは気体であるため、吸い込んだとしてもすぐ呼気と共に排出されやすいのに対し、ラドンの娘核種である放射性のポロニウム218や更に壊変した鉛214等は固体状であるため、一旦吸い込むと、肺胞や気管支壁面に付着し、体外に排出されにくいことが原因です。

図1. ラドン問題の内容概略

身の回りの放射線 ラドン及びトロンの吸入による内部被ばく



今回は、ラドンとその子孫核種に関わる物理化学的な話をします。

本連載の共通の引用および参考文献；

本連載のテーマ「ラドン吸入による内部被ばく問題」では、さまざまな文献を共通的に引用または参考にしていますので、ここでまとめて示します。各連載では、その文献番号のみを注釈追記しますので、いちいち参考文献名は書きません。

- 1) <http://www.jhps.or.jp/upimg/files/radon2020.pdf>
[IAEA 新しいラドンの線量係数に関する活動 \(jhps.or.jp\)](http://www.jhps.or.jp)
- 2) [フォーラム.indd \(jst.go.jp\)](http://www.jst.go.jp) , Jpn. J. Health Phys., 53 (4), 282 ~ 293 (2018)
- 3) [54-4 表紙.indd \(jst.go.jp\)](http://www.jst.go.jp)
保健物理, 54(4), 226~230(2019)
ラドンに対する新しい線量換算係数の影響に関する技術会合（国際会議）の参加報告（特記）上記3つの文献は、弘前大学被ばく医療総合研究所、床次眞司先生の公表データから多くを引用している情報データ元です。ラドン問題の新しいデータをまとめている「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、弘前大学の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。
- 4) <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-02-05-08.html>
環境省の一般向け解説
- 5) [ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon - PubMed \(nih.gov\)](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/)
ICRP Publication115, 2011年4月, 日本アイソトープ協会による和訳
[ラドンと子孫核種による肺がんのリスク・ラドンに関する ICRP 声明](https://www.jaea.go.jp)
- 6) <https://www.niph.go.jp/soshiki/seikatsu/radon/model1.pdf>
June 2003, EPA Assessment of Risks from Radon in Homes
環境保護庁 住居内ラドンによるリスクの評価
- 7) [20210623_introduction_12.pdf \(jhps.or.jp\)](http://www.jhps.or.jp)
日本における自然放射線からの国民線量, 日本保健物理学会の委員会
- 8) [ラドン（自然環境中の放射線源）\(08-01-03-12\)-ATOMICA-\(jaea.go.jp\)](http://www.jaea.go.jp)
ラドン（自然環境中の放射線源）, ATIMICA
- 9) [sm_vol8.pdf\(jhps.or.jp\)](http://www.jhps.or.jp)
ラドンの防護規準に関する専門研究会活動報告書, 2012年10月, 日本保健物理学会

専門研究会

- 10) [ラドン-222 \(222Rn\) | 原子力資料情報室 \(CNIC\)](#)
原子力資料情報室, ラドン-222 (²²²Rn)
- 11) <https://c-navi.jaea.go.jp/ja/background/everyday-exposures-to-ionising-radiations/natural-background/radon-220-and-radon-222.html>
JAEA; 自然バックグラウンド-ラドン 220 とラドン 222
- 12) [表紙 1-4.indd \(starcats.ne.jp\)](#)
「日本の自然放射線による線量」, Isotope News, 2013年2月号
- 13) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhps1966/34/2/34_2_130/_pdf
特集 ラドンの人体への影響評価, 保健物理 = Japanese journal of health physics
34(2) 1999.06 p.128~150
- 14) [Jnuce-Vol14-1-p43-50.pdf \(aesj.or.jp\)](#)
原子力バックエンド研究, Vol.14No.1, Dec., 2007.
- 15) [ラドンの影響はどれくらい? 下 道國 \(coocan.jp\)](#)
ラドンの影響はどれくらい?, 藤田保健衛生大学, 下道國
- 16) [ラドンの規制下道國 \(coocan.jp\)](#)
ラドンの規制
- 17) [en \(jst.go.jp\)](#)
欧州諸国民の自然界からの年間被ばくの実態, 河田 東海夫
- 18) [04.gif \(616×957\) \(jaea.go.jp\)](#)
家屋内ラドン濃度
- 19) [Microsoft Word - 9 ラドンガイドライン.doc \(jhps.or.jp\)](#)
JHPS; 日本保健物理学会; ラドンに関する防護のガイドライン (検討中のもの)
- 20) [P65_Japanese.pdf \(icrp.org\)](#)
ICRP Pub. 65, 和訳, ラドン-222 に対する防護
- 21) [23_141_肺がんリスク.pdf](#)
ラドン娘核種の屋内被曝による肺がんリスク, 岩崎民子, 小林定喜, 保健物理, 23,
141~150 (1988)
- 22) http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf
Indoor Radon Handbook 屋内ラドンハンドブック, 110 ページもある

23) [02 古川.indd \(aist.go.jp\)](#)

ラドン放射能標準に関する調査研究, 古川理央著

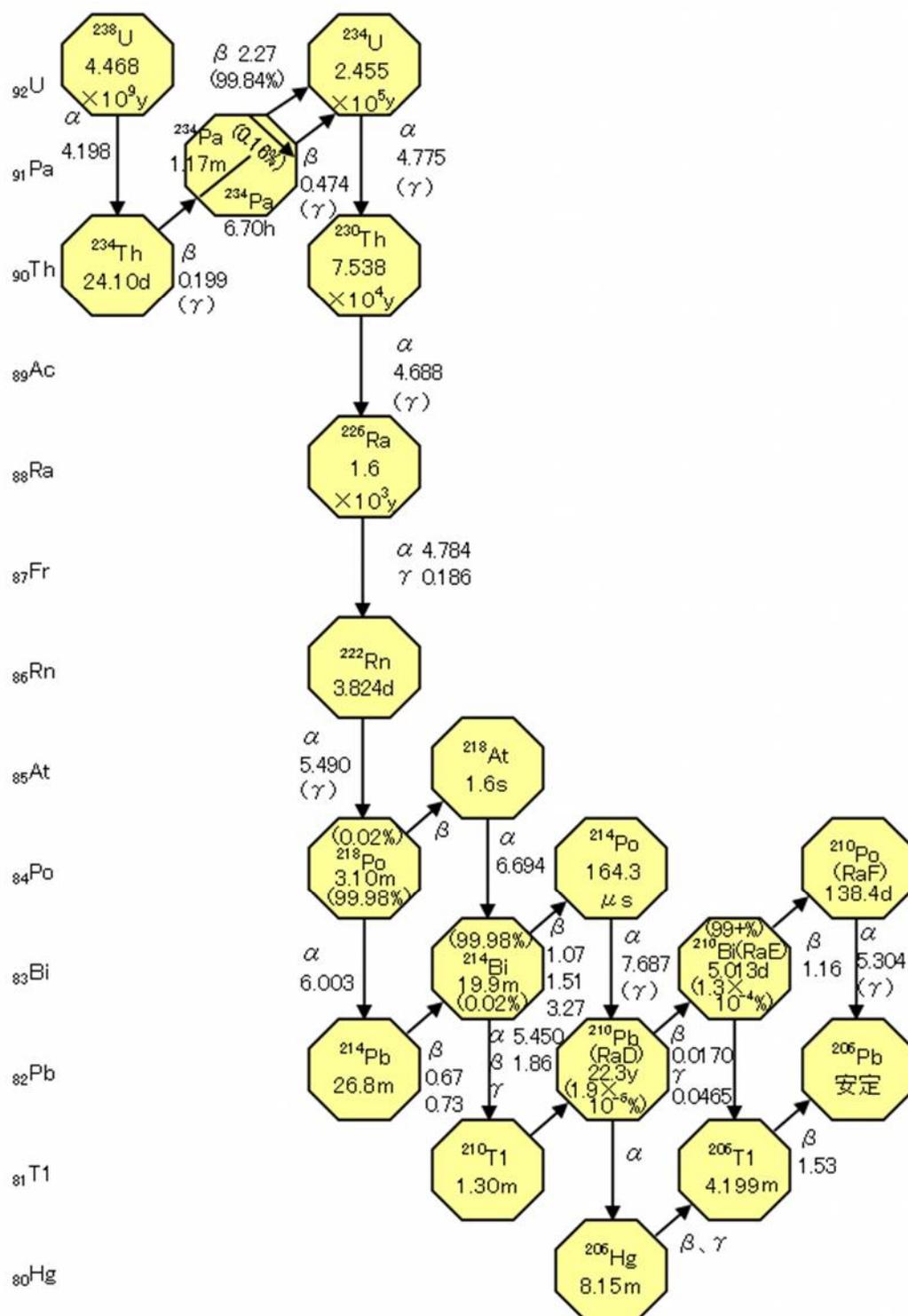
24) [anshin-kagaku.news.cocan.jp/sub060201hobutsu2002_ishikawa.html](#)

ラドンによる被ばく 一人的要因による線量増加の事例 -

放射線医学総合研究所 ラドン研究グループ 石川徹夫著

25) [呼吸気道モデル Human respiratory tract model - aerosolpedia エアロゾルペディア \(google.com\)](#)

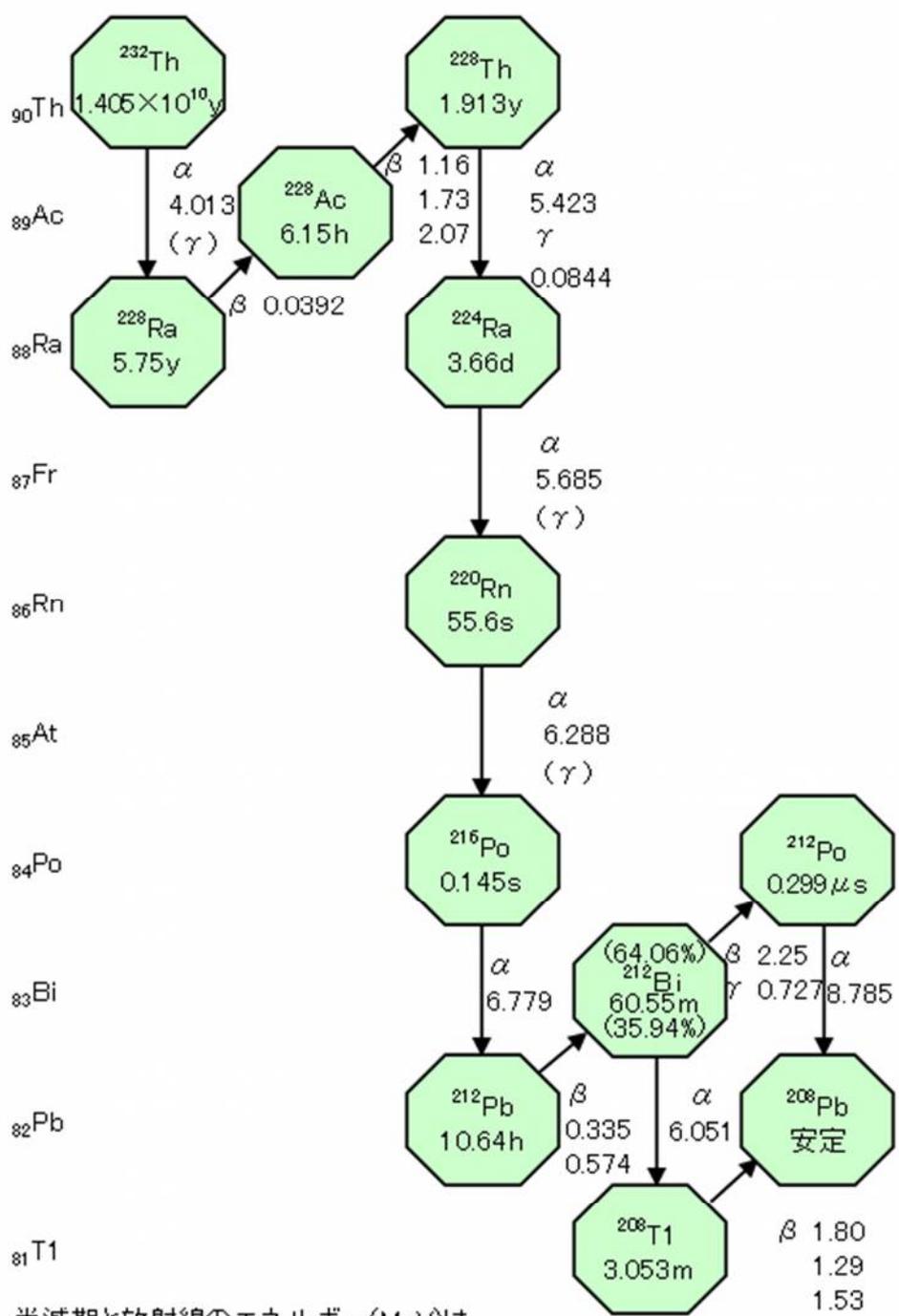
呼吸気道モデル Human respiratory tract model



半減期と放射線のエネルギー(MeV)は
 Evaluated Nuclear Structure Data File(1995年2月)

図2 ウラン(^{238}U)壊変系列

[出典] 日本アイソトープ協会(編):アイソトープ手帳、丸善(2002年7月)、p.13



半減期と放射線のエネルギー(MeV)は
 Evaluated Nuclear Structure Data File(1995年2月)

図3 トリウム(^{232}Th)壊変系列

[出典] 日本アイソトープ協会(編):アイソトープ手帳、丸善(2002年7月)、p.12