

### 健康へのラドン効果の考察

下 道國

ラドンについて、ラドンを含んだ温泉の健康に関する内容と線量等について本誌で二度記述した。今一度、ラドンがどのように人体にかかわるかを考察してみたいと思う。なお、ここではラドン長寿命子孫核種とトロンとその子孫核種は対象としない。

ラドンは原子番号が86の希ガスで、希ガスの仲間では最も重い元素である。希ガスであることは、通常では化学反応をしないから、不活性で化学的に安定した元素であることを意味している。ラドンは、地中に広く微量に存在しているラジウムから生まれて、地中を移動して地表面から大気中に散逸している。ラドンは放射性であり、その半減期は3.84日であるから、4日未満で初期の半分の量となる。ラドンは、それから生まれたポロニウム、そのポロニウムから生まれた鉛、さらにビスマスといった金属元素をつくる。図1に示した短寿命子孫核種は、親のラドンとともに大気中に存在しているが、その存在状況は大気の状態によって変動し、親のラドンと子孫核種は、濃度が等しい平衡状態から平衡度がずれた非平衡状態（ラドン濃度を1としたとき、子孫核種濃度が0.8~0.4程度）にある<sup>1</sup>。我々は、このような空気を呼吸していることになる。

日常生活では、自然放射線による被ばくの中で、ラドン（正確には、その子孫核種）による被ばくが1/4~1/3程度占めると算定されている<sup>2</sup>。では、その人への影響のメカニズムはどのようになっているのであろうか。先述したように、ラドンとその子孫核種を含んだ空気を、毎回、呼吸で体内に取り入れている。肺の容積は成人で1リットル(L)ほどで、1時間の呼吸量は約1平米(m<sup>3</sup>)である。わが国の屋内ラドン濃度は約16Bq/m<sup>3</sup>であるが、これを原子数でみると、壊変定数が $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ であるから $16 \text{ Bq/m}^3 \div (2.1 \times 10^{-6}) = 7.6 \times 10^6 / \text{m}^3$ となり、1立米当たり760万ほどの原子があることになる。ラドンは希ガスであるから気道に沈着することも、また体内物質と化学的な反応することなく、大半は吸気されても呼気となって排出されると考えられる。そこで、ラドン濃度は体外と肺内で同じであると考えると、肺内のラドン原子数は7,600である。

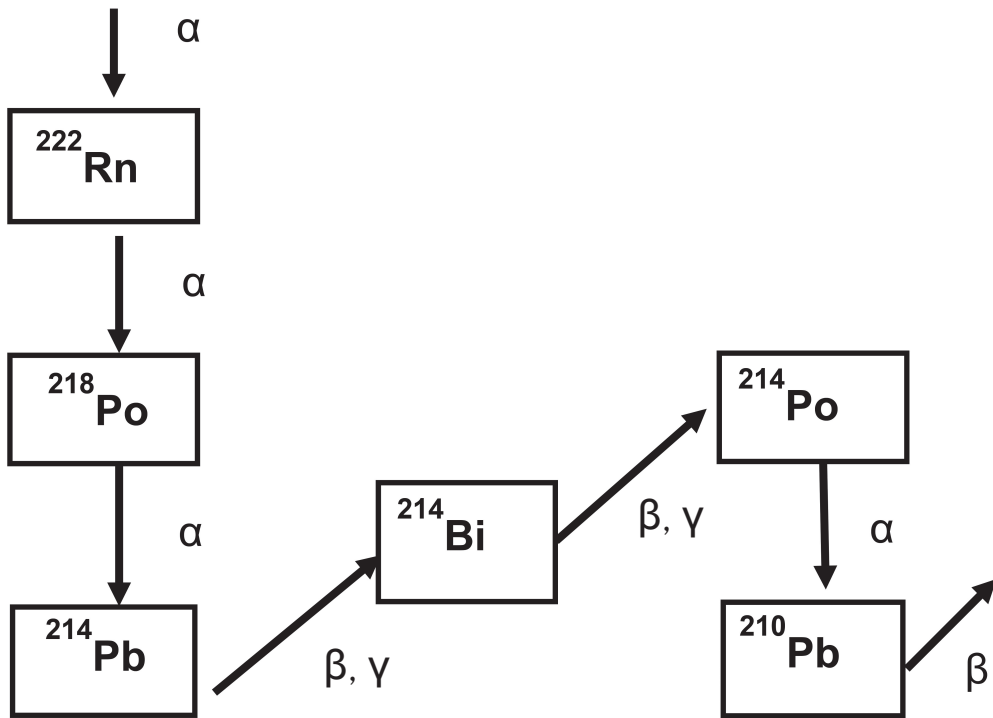


図1 壊変図  $\alpha$ : アルファ壊変、 $\beta$ : ベータ壊変、半減期  $^{222}\text{Rn}$ : 3.84日、 $^{218}\text{Po}$ : 3.10分、 $^{214}\text{Pb}$ : 26.8分、 $^{214}\text{Bi}$ : 19.9分、 $^{214}\text{Po}$ : 0.16ミリ秒、 $^{210}\text{Pb}$ : 22.2年、 $^{218}\text{Po}\sim^{214}\text{Po}$ : 短寿命子孫核種、 $^{210}\text{Pb}\sim$ : 長寿命子孫核種

そのごく一部のラドンが血液や体液に取り込まれると思われるものの、その量的な知見はない。ラドンが血液やリンパ液など体液を通じて体内に入ったとき、水や、特に脂肪に溶けやすい性質から脂肪に関連した細胞に取り込まれていくのではないかとと思われる。

子孫核種の大気中濃度はラドン濃度の40～80%であるが60%として、原子数に直すと  $1\text{ m}^3$  当りポロニウム218は2600、鉛214は22,000、ビスマス214は17,000ほどである（壊変定数はそれぞれ  $3.7 \times 10^{-3}$ 、 $4.3 \times 10^{-4}$ 、 $5.8 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  である）。子孫核種の方は金属原子として単体の原子のままか、エアロゾルに付着して微粒子となっている。それらが鼻から吸入された後、鼻腔、咽頭、気管、気管支を通る間に、ほとんどが気道の表面や鼻毛や繊毛などに沈着・付着してしまう。付着した粒子は粘液によって徐々に嚥下されるが、その間に放射性壊変を起こし、放射線が周辺の細胞をヒットすると考えられる。なお、呼気で体外に排出される割合が極めて小さいことは、呼吸器模型の計算からわかる<sup>3</sup>。

図1でわかるように、放射性壊変によって核種はアルファ線とベータ線を出す、同時にガンマ線を出す。これらの放射線が細胞内の諸物質をヒットする

ことになるが、ダメージを与える対象は遺伝子を持つ DNA と考えられる。ここで、ラドンおよび子孫核種のポロニウム218とポロニウム214から出るアルファ線のエネルギーは、それぞれ5.49MeV、6.00MeV、7.69MeVであるから、それらは体内では、40 $\mu$ m、50 $\mu$ m、70 $\mu$ m 程しか走らず、1つの細胞を、多くて2、3の細胞をヒットするに過ぎない。子孫核種の鉛214とビスマス214から出るベータ線のエネルギーは、0.671MeV、0.728MeV、1.51MeV、1.54MeV、3.27MeV などであるが、アルファ線の100倍程度走るのので、多くの細胞に当たることとなる。ガンマ線は、子孫核種の鉛214とビスマス214から多数出るが、その主なエネルギーは、0.295MeV、0.352MeV、0.609MeV、1.12MeV、1.765MeVなどで、細胞と反応して消滅する場合もあれば、体外に出ていくものもある。これらの放射線を見比べた場合、体に与えるエネルギー密度が大きいのは、走る長さの短いアルファ線であり、ベータ線やガンマ線はその1/100程度以下であるから、3つの放射線が混在している場合では、体内で考慮すべきはアルファ線ということになる。ちなみに、線量評価では影響度の違いを考慮して放射線に重みを付けているが、その放射線加重係数は、ベータ線とガンマ線の1に対してアルファ線は20と大きくしている。

放射線が細胞にダメージを与える概略的な構図は、DNA のボンドを切ることで説明されるが（図2参照）、その場合、放射線が直接作用するケース（直接作用）と細胞内の水分子を解離してOHラジカルを作り、それがDNAに作用するケース（間接作用）が考えられる。直接作用と間接作用とでは、間接作用の方が出現頻度は多い（60%程度）とされているが、2重螺旋の鎖を2本とも切断するのは直接作用によると考えられている。なお、間接作用は放射線以外の様々な原因でも生じていて、その原因を特定することはできない。また、アルファ線とベータ線がつくる2次電子は、エネルギーが低いために作用する力は小さいと考えられることから、どれほどの効力を持つのか不明であるが、その効果の程度を知っておくことも必要であろう。

不活性ガスであるラドン自体が、放射性でなく化学的な作用で生体にプラスの効果をもたらすのだろうか。効果をもたらすとした場合、メカニズムはどう考えればよいのだろうか。化学的な作用だけでなく、放射性を伴った相乗作用が特別な効果があるのだと考えるのであろうか。このような考えは、これまでにない新しい考えである。それを実証するにはどうすればよいのか。否、そうではない、既にラドン浴などによって実証されているのではないか、という声がある。

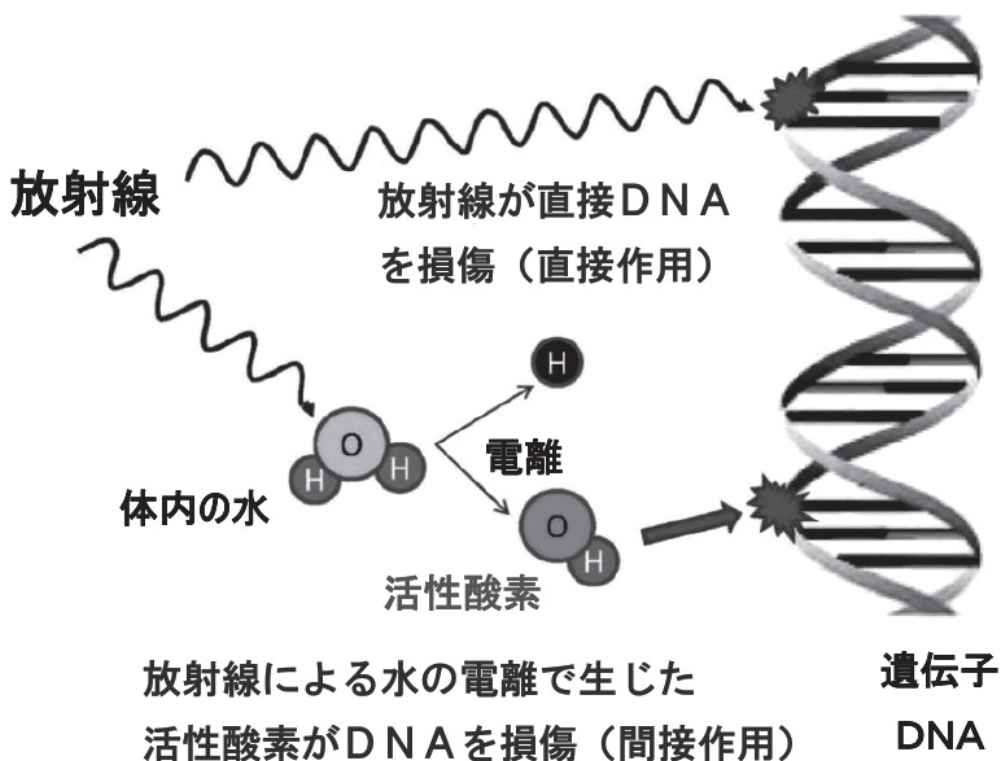


図2 放射線の作用図

する。

ラドンのプラスの効果を示す例がいくつかある。

- (1) オーストリアのバドガシュタインのハイルシュトレインでは、トンネル内でのラドン浴療法が医師の指導による定量的な管理の下に行われていて、強直性脊髄炎、慢性関節リウマチなどの関節炎、気管支喘息などの呼吸器疾患、尋常性乾癬などの皮膚疾患等に対する有効性が公表されている（ラドン濃度：44,000Bq/m<sup>3</sup>、温度：37-41.5℃、湿度70-100%<sup>4</sup>）。その効果は、トンネル内の高温と身体運動などを併せることによって出現すると報告されている。
- (2) 鳥取県三朝温泉では、癌の発生率が鳥取県の他地域よりも小さいという疫学データが学会等で発表されている。また、同温泉は島根県池田温泉、岐阜県湯之島ラジウム鉱泉保養所、秋田県玉川温泉などとともに、健康維持のため訪れる客が多いとされている。なお、玉川温泉はラドン含有温泉として知られているが、湯泉のラドン濃度は高くなく、実際には岩盤浴（線量の高い岩盤（2-7μSv/時）の上に寝る）が主である。いずれの温泉も入浴

表1 ラドン浴、温泉浴等の例

	バドガシュタイン	三朝温泉	フォンテネオローゼ研究所
方法	トンネル内ラドン浴	温泉浴（+飲用、吸引） 単純放射能線	実験施設（ラット； 500匹）
濃度	44,000Bq/m <sup>3</sup>	430Bq/L（max：9,100）	7,400Bq/m <sup>3</sup>
暴露量	45分/日×10回/3週		生涯暴露
指導	医師の指導		
効能	強直性脊椎炎、慢性関節 リウマチなどの関節炎、 気管支喘息などの呼吸器 系疾患、尋常性乾癬など の皮膚疾患等	神経痛、筋肉痛、慢性消 化器病、皮膚病、胃腸病、 婦人病、三朝地区はがん 発生率が低い	肺癌の発生率低下 （一般環境との相対 リスク：0.65）
研究	TGF-β1（細胞増殖抑制 因子、痛み軽減、運動機 能改善）の顕著な増加但 し、高温と運動併用		癌発生率の検証

時間等は入浴者に任されており、定量的評価はできない。

- (3) ラドンの入った湯（ラドン温水浴；ラドン濃度は不明）とラドンの入らない湯（水道水温水浴）の場合の頸部痛患者の疼痛比較試験結果がある<sup>5</sup>。それによれば、いずれの場合も、温水浴中は疼痛しきい値がほぼ同様に上昇していたが、3週間（1回の入浴時間は不明）で温水浴を停止した後では、水道温水浴の患者はしきい値が下がったのに対して、ラドン温水浴の患者のしきい値はさらに上昇を続け、明らかに差が出たグラフが示されている。ただし、ラドン濃度は3,000Bq/Lと示されているが、総入浴時間などが示されていないので、定量的評価は不明である。
- (4) フランスのフォンテネオローゼ研究所で、自然環境の300倍程度のラドンを含んだ空気ですラットを生涯飼育して、肺癌の発生率を調べた研究がある<sup>4</sup>。それによれば、飼育した500匹中3匹に肺癌が発生したが、自然環境濃度（25Bq/m<sup>3</sup>）で飼育した1,290匹中12匹に肺癌が発生した割合と比較して、肺癌発生比は0.65と有意であるとしている。フォンテネオローゼ研究所の実験は、自然のラドン濃度の300倍程度の雰囲気です生涯飼育（2～3年）した時点でバドガシュタインでのラドン浴や三朝温泉に代表される温泉浴とは条件が異なる。むしろ、後述する放射線ホルミシスに類した実験と言え

よう。

はじめの3例は、ラドン浴（空気中のラドンガスを吸う行為）とラドン温水浴（湯に浸かる行為、水中から出たラドンを吸う行為も含まれる）を述べているが、両者は行為として違うことに注意したい。ラドン浴は、呼吸によりラドンを吸入する行為であり、バドガシュタインではその濃度が大変高い（屋外大気濃度の1万倍、屋内大気濃度の千倍程度）。一方、温水浴では、温水の濃度が1リットル当たり数千ベクレルとしても、浴場の空気中濃度は1立米当たり数百ベクレル（通常の屋内空気濃度の10~20倍程度）にしかならない<sup>6</sup>。もちろん、その空気に暴露する時間が関与するため暴露時間の情報が重要であるが、バドガシュタイン以外は入浴者に任されているようである。なお、水中のラドンが直接皮膚から体内に入る可能性については言及されていないが、果たして、皮膚の防御作用から考えてそのような摂取の可能性はあるのだろうか。

一方、国際放射線防護委員会（ICRP）のPublication 115（2015）は、欧州・米国・中国などの比較的屋内濃度の高い住宅に住んだ人の長期間にわたる12,000のデータを集めてプール解析し、肺癌の可能性を示すリスクが100Bq/m<sup>3</sup>当たり1.09であるとした研究報告を採用している<sup>7</sup>。100Bq/m<sup>3</sup>は、わが国の屋内ラドン濃度の6倍ほどの濃度で、バドガシュタインのような高濃度に比べるとはるかに低い濃度であるが、生涯にわたるような超長期の連続暴露をすると、発癌の可能性が高まることを示している。この結果は、後述する放射線ホルミシス効果の考え方と整合しない。

このように、高濃度（高線量率）で短時間の暴露（総線量はそれほど多くない）、低濃度（低線量率）で短期の暴露、あるいは長期の暴露など、条件はいろいろであっても総線量はあまり変わらないのであるが、結論は異なっている。これらについて、少なくとも共通の知見と互いに矛盾しない論理での説明が求められる。

ラドン浴と類似の効果として「放射線ホルミシス効果」がある（両者は、同じ効果とする考えもある）。これは、ミズーリ大学教授のTラッキー博士が多数のデータに基づいて提唱した<sup>8</sup>ことから有名になり、その後、世界中で発表された論文数は1000を遥かに超えるといわれるが、論文の質はどうであろうか。放射線ホルミシス効果は、自然放射線レベルよりも数倍から数十倍ほど高い程度の「低線量率」での継続的な放射線被ばくは、生体にとってプラスの効果があるとする考えである。国内のいくつかの診療所・クリニックでは、医師の指導の下にホルミシス療法が行われていて、癌治療等で効果のあることが複数例

紹介されている<sup>4</sup>が、その定量的関係は必ずしも明らかでない。

放射線ホルミシスのメカニズムは、概ね次のように考えられる。まず、細胞内に低線量放射線が照射されたとき、細胞内の水がイオン化される。その直後、活性酸素（水酸基ラジカル）が大量に発生する。活性酸素は、生体の維持活動には必要な物質ではあるが、一方では害を与える物質でもある。その結果、それを緩和するための抗酸化酵素を作る遺伝子にスイッチが入る。それにより、抗酸化酵素が生産され、活性酸素の除去が始まる。ホルミシスでは、この一連の過程が「適度（細胞にとって、放射線によるプラスとマイナスの効果があるが、プラスの効果の方が大きい）」であり、生体がより活性化している時がホルミシス期間と考えることになる。線量が高くなって活性酸素の発生が増加し、その除去が追い付かなくなると、よい影響よりも危険性が増していく（プラスよりマイナスの効果が大きくなる）こととなる。定性的にはこのように考えられるが、線量と効果を関連付ける定量的関係はどのようなであろうか。

放射線ホルミシス効果は、自然放射線レベルよりも数倍から数十倍ほど高い低線量率放射線による継続的な被ばくで、生体にとってプラスの効果があるとしている。ここで留意しなければならないのは、現在の知見では、生体に損傷あるいは効果を与えるのは、もちろん放射線であって、それらを発する原子核（あるいは原子）自体であるとは考えていないことである。この点から「ラドンの効力」を考えると、効果を与えるのはラドンから出るアルファ線のはずである。そうであれば、アルファ線を出す核種（アルファ核種）であれば、ラドンでなくても、例えばラジウムでもウランでも同様の効果があってもよいはずであるが、過去の実情・調査や研究からアルファ核種はすべて重大なダメージを与えると認識されている<sup>9</sup>。したがって、ラドンから出るアルファ線が特別ということはないゆえに、ラドンによるプラスの効果があるとする考えには、前述したことであるが、ラドンが元素として何らかの効力を発していると考えざるを得ない。

ラドン効果と放射線ホルミシスは似ているが、ラドン効果がラドンとアルファ線の局所的な効果を考えていると思われるのに対して、放射線ホルミシスは外部からの放射線も含めた全身被ばくでの効果とを考えているように見られる。外部から照射された放射線はガンマ線やエックス線であるので、それらの作用はアルファ線ほど局所的ではない。線量は、ラドンの場合は局所で高線量であるのに対して、放射線ホルミシスでは局所で低線量である点でも違っているが、両者の生体への作用メカニズムは同じと考えてよいのかどうか、現在の知見では明快な説明はないようである。

表2 高線量・低線量放射線による実験

	坂本澄彦	小島周二	服部禎男*
放射線	エックス線	ガンマ線	エックス線
線量率	1.7mGy/s		
照射時間	1～2分、11回		
総線量	1,100mGy	500mGy	100～500mSv
対象	臨床、(マウス)	マウス	マウス
照射部位	全身	全身	全身
効果など	免疫能力向上、 遠隔転移抑制、 腫瘍抑制、 腫瘍治癒率向上	細胞内抗酸化物質の 増加、 肝炎症状抑制、 免疫物質産生抑制	SODなどの重要酵 素の増加、 過酸化脂質濃度の低 下など

\*実際は、当時、電力中央研究所の山岡聖典研究員らによる共同研究

ラドン浴と放射線ホルミシスに直接関連しないが、放射線効果に関する研究がいくつかある。わが国における研究例を簡単に表2にまとめた。

元東北大学教授の坂本澄彦博士の研究は注目される。坂本博士の研究を簡単に言えば、高線量率で短時間照射（1回1～2分）をしたもので、線量率ではホルミシスで考えられる線量率の少なくとも千倍以上の高い線量率でラットに照射をして、免疫賦活作用やがん転移抑制などを系統的に調査している。また、臨床研究もしていてその結果は、(1) 0.1-0.15グレイの全身照射は癌に対する免疫能力を高める、(2) 低線量全身照射は癌の遠隔転移を抑制する可能性がある、(3) 悪性リンパ腫では、低線量全身照射で主要を抑制する可能性がある、(4) 低線量全身照射は、局所照射の効果を増して腫瘍の治癒率を高める、とまとめられている<sup>4</sup>。しかし、博士自身が、線量率が違い過ぎるので、この研究は放射線ホルミシスを説明するものではないとしている。

東京理科大学の小島周二教授や、岡山大学の山岡聖典教授らの研究も注目に値する。両教授は、現在なお現役として活発に研究し、成果を公表されているので、ここでは説明をしないが、表2には、小島教授の成果および電力中央研究所名誉特別顧問の服部禎男博士が注視している山岡教授らの研究のごく一部<sup>4</sup>も併せて載せた。

以上に見たように、放射線の人体にかかわる影響・効果の実験や疫学的調査・研究を見渡すと、一部の基礎的で系統だった研究を除いて、特に、ラドン浴・



ラドン温水浴の関連では、バドガシュタインで定量的な関係が示されているものの、その他は定性的な説明に終わっている。また、影響にかかわるメカニズムも一般的で概略的な説明で終わっており、放射線に特有のメカニズムではない。つまり、放射線も他の物質と同様に、少量では細胞に刺激を与えることでプラスの効果があり、多量になると細胞に害を与えるという点では同じであるとする考えに立っていると思われる。

しかし、「ラドンの効能」を言うのであれば、少なくとも文中でも記した次の項目、すなわち、

- ① ラドンの体内取り込み（呼吸器および消化器からの摂取）のメカニズム
- ② ラドンの皮膚からの吸収はあるか
- ③ ラドンの（器官および細胞レベルでの）体内分布
- ④ 体内で（ラドンから）発生する2次電子の効力
- ⑤ 希ガス元素であるラドンとアルファ線との相乗作用があるか
- ⑥ ラドンの効能症例研究における線量・効果関係の定量的評価
- ⑦ 細胞レベルにおける放射線ホルミシスの定量的評価
- ⑧ 「ラドン効果」は「放射線ホルミシス」と同じメカニズムと考えてよいか

等が解明されることが必要と思われる。

著者自身は、ラドン効能や放射線ホルミシスに疑念を抱いてはいるが、と言って全面的に否定するものではない。また、放射線の影響に関するICRPの見解並びに防護上での対応を理解して支持はするが、と言って盲目的に追従するものでもない。また、100mSv以下の低線量・低線量率の範囲での発癌メカニズムについては、閾値の問題も含めて未解決と考えている。このような点も含めて、現在、多くの研究者や実務者が合意している放射線の人体への影響に対する考え方と矛盾しないような、また前述した疑問に対する解答も含めて、実証的で定量的な研究の進展を期待するものである。

#### 参考文献

1. 日本保健物理学会：ラドンの人体への影響評価専門委員会報告書、2000。
2. 下 道國、真田哲也、藤高和信、湊 進：日本の自然放射線による線量、ISOTOPE NEWS、No. 706、2月号、23-32、2013。
3. Takahashi k. and Kawamura S：Technical Report of Institute of Atomic Energy, Kyoto University, No. 205, 1986..
4. ホルミシス臨床研究会編：「医師が進める放射線ホルミシス2 ラドン浴の実践」2009。

5. Deetjen, P. : Biological and therapeutical effects of Radon, in “Radon and Thoron in the Human Environment” (Eds. Katase A and Shimo M), World Scientific, pp515-522, 1998.
6. 下 道國、他 : 岐阜県内の一温泉施設のラドン濃度と被曝線量試算、温泉科学、55(4), 177-187, 2006.
7. ICRP : “Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon” ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40, 2010.
8. T. D. ラッキー : 「放射線ホルミシス」(松平寛通監訳)、ソフトサイエンス、1990。
9. 松岡 理 : 「プルトニウム物語 その虚像と実像」テレメディア、1992。

(藤田保健衛生大学客員教授)

