



## 温泉と放射能

堀内 公子<sup>1)</sup>

(平成 29 年 11 月 20 日受付, 平成 30 年 3 月 16 日受理)

## Hot Springs and Radioactivity

Kimiko HORIUCHI<sup>1)</sup>

### 要 旨

ビッグバンにより宇宙が誕生し水素のような軽い元素から核反応や星の爆発を経て鉄 (Fe), ニッケル (Ni) といった元素が出来た。60 億年以上の時を経てウラン (U), トリウム (Th) のような重い多種類の元素が生成し地球誕生の際に岩石に取り込まれた。

放射線は味も匂いも実体もなく人の五感で感知することが出来ないため人類史へは 19 世紀の終わりに登場した。現在人は自然放射線の中で暮らし、病気の診断や治療に放射線を利用し、放射線の恩恵を受けながら文化生活を享受している。

わが国は環太平洋火山帯の中にあり、多種類の温泉が湧出するが放射能泉もその一つで、全温泉の 7.7% を占める。放射能泉は天然放射性不活性ガスラドン (Rn) を基準値以上含むことによって温泉と認められたものである。Rn は U の壊変生成物で、U を多く含む風化花崗岩から放出されやすい。Rn の放出するアルファ ( $\alpha$ ) 線には神経細胞の酸素消費量を下げて鎮静化させる作用があるとみられ、放射能泉浴はリウマチ、関節炎、筋肉痛、神経炎等の痛みを和らげる可能性が示唆されている。

温泉は大地の恵みとして長く人々に利用され続けてきたが、その成り立ちや熱源として放射能と深い関わりがあり、中でも放射能泉は放射能で温泉法上の規定値を満たしている。放射能は、その性質をよく知り、適切に利用するなら怖いものではなく有益な存在である。また温泉もわが国にとって大切な限りある資源であり、正しい理解のもとに利用すれば人々の健康寿命を延ばすことに活用できる。

キーワード：放射能, 温泉, ラジウム, ラドン, トロン, 放射能泉の効能

### 1. はじめに

人類史に於ける放射能の発見は極めて大きな事件であった。人類が火の利用法を身につけたとき

<sup>1)</sup> 東京慈恵会医科大学アイソトープ実験研究施設 〒105-8471 東京都港区西新橋 3-19-18. <sup>1)</sup> The Jikei University School of Medicine Radioisotope Research Facility, Nishishinbashi 3-19-18, Minato-ku Tokyo 105-8471, Japan. Corresponding author: kmhoriuchi@gmail.com

人類と他の生物との差が明確になったと言われている。ギリシャ神話（大林ら，2005）によれば人類の文明の創造はプロメテウスが天から火を盗んで来たことに始まる。その為、放射能は人類にとって第二のプロメテウスの火にも準えられる。人類がいつ火の利用法を覚えたのか明確ではないが、山火事など自然発生した火を見つけ、恐れながらもその利点に気が付き、次第に使用するようになったのだろう。

19世紀の終わりヨーロッパ世界では自然科学の発展は限界にまで達したと考えられていた（ナダカブカレン，1990）。そうした状況の中で放射能が発見され、ラジウム（Ra）、ポロニウム（Po）等の放射性元素が発見された。放射性元素が壊変するとき、その質量は減少する。これは、物質の性質は変わっても、質量は変わらないという質量不変の法則を覆すものであった。放射性元素の発見は元素の不変則や質量の保存則、エネルギー保存則を修正し、新しい物理学、新しい科学を切り開くこととなった（竹内，1999）。20世紀に入って放射線・放射能の分野は大きく発展し、人類の繁栄の一部を担ってきた。

ここでは温泉と放射能との関係をまとめた。

## 2. 元素の誕生

自然界には90種をこえる元素が存在し、約280種の安定な核種が見出されている。天体観測と原子核物理学の進歩や大型計算機の利用により、今日ではほとんどすべての核種の生成過程が明らかにされている（ブリタニカ国際大百科事典，2017）。

今から138億年前インフレーション、それに次ぐビッグバンにより宇宙が誕生した。直ちにできたのは水素（H）だけでHの核融合によりヘリウム（He）、リチウム（Li）、重水素と言った軽い元素ができ、それら軽い元素を主体とした宇宙に漂う塵のような物質が自分自身の重みで収縮し星をつくり始め、これらのガスが収縮するとこの重力エネルギーは熱に変わり高温になる。高温になると水素燃焼、He燃焼等の核融合反応が起こり、炭素（C）が合成される。次いでCとHeから炭素燃焼により酸素（O）が合成される。大質量の恒星ではさらにネオン（Ne）、マグネシウム（Mg）、ケイ素（Si）などが合成される。中心温度がさらに上昇し、約30億Kに達すると、Siから $\alpha$ 過程によって硫黄（S）から鉄（Fe）にいたる主として質量数4の倍数の核種が多く合成される。ヘリウム燃焼や炭素燃焼過程で生じる中性子を次々に捕獲するs過程（遅い過程、進化の進んだ恒星内部での重元素合成過程）によってビスマス（Bi）にいたる核種が合成される。星の進化の最終段階で、爆発して超新星となるときの、発生する大量の中性子によって起るr過程（速い過程、中性子を約 $10^{-6}$ 秒に1個の割合で捕獲し $^{56}\text{Fe}$ より重い元素が合成される重元素合成過程の一つ）では、さらに重い元素が合成され、またこのとき陽子を捕獲するp過程（重元素合成過程の一つ）により、比較的陽子の多い核種が合成される。超新星爆発の際に起こるr過程により、Uまでの重い元素は出来たといわれている（青木，2004）。この過程の観測からUより重いカリホルニウム（Cf）の生成も確認されている（斎藤，2009）が、このメカニズムは未だ不明な点が多い（青木，2004）。一方、リチウム（Li）、ベリリウム（Be）、ホウ素（B）等の軽元素は安定性が小さいため、上記の合成過程ではなく、宇宙線が星の表面や星間空間にあるC、N、Oの原子核に衝突し、これを破碎することにより生成される。

超新星の爆発は一つの銀河では平均300年に1回の頻度で起こると推定されている。歴史的には、かに星雲（1054）、ティコ超新星（1572）、ケプラー超新星（1604）が知られている（ブリタニカ国際大百科事典，2017）。

1987年2月23日大マゼラン星雲の周辺部で、突如明るい星が輝き始めた。これが超新星1987A

であり、ケプラー超新星から 400 年振りである。世界の大望遠鏡を駆使して多くの観測成果があげられたが、カミオカンデのニュートリノ検出装置が超新星 1987A からやってきた 11 粒のニュートリノを 1987 年 2 月 23 日に検出し世界の研究者たちを驚かせたことは記憶に新しい（日本大百科全書、1993）。

地球はいろいろな核反応によって生成した塵から成り立っており、誕生以来 46 億年経過した現在では地殻には U、Th をはじめとする多種類の放射性元素が存在し、人は多くの自然放射線の中で暮らし、進化して来た。

### 3. 放射能の発見・放射能泉の歴史

1895 年の末ドイツのレントゲン (W.C. Röntgen) はクルックス管というほぼ真空状態のガラス管の中に電極を入れた装置を使って研究を続けている際、クルックス管から物質を透過する目に見えない光のようなものが放出されることに気が付いた。これが X 線の発見である。この発見に引き続いて、1896 年の初めにフランスのベクレル (A.H. Becquerel) によってウラン ( $^{238}\text{U}=\text{U}$ ) の放射能が発見された。Röntgen の論文を見た Becquerel は、蛍光を発生する物質に太陽光を当てれば X 線と同じような光を発生するのではないかと考え、黒い紙で遮光した写真乾板の上に十字架型の文鎮を置き、その上に蛍光物質であるウラン化合物を付着させた。ところが悪天候で太陽の出ない日が続いたため引き出しにしまい、数日後に取り出してみると、現像した乾板に十字架が写っていたのである。Becquerel はこれを見て、U 化合物から X 線と同じような目に見えない不思議な光線が出ていと考え、これをベクレル線と命名した。後にこのベクレル線はアルファ ( $\alpha$ ) 線、ベータ ( $\beta$ ) 線、ガンマ ( $\gamma$ ) 線の混合したものであることが分かった。この名称は現在では使われていない。

U と同じような特性を持つ物質を探して、1898 年にポロニウム (Po) とラジウム ( $^{226}\text{Ra}=\text{Ra}$ ) を発見したキュリー夫妻 (M. Curie & P. Curie) はこの特性に対し放射能という名前を付けた (鈴木, 1990)。放射能の発見に引き続き、ラザフォード (E. Rutherford) による  $\alpha$  線散乱実験等により、それまで物質の究極の単位と思われていた原子は原子核と電子からなる一定の構造をもつことが分かった。放射性元素の原子核は自然に壊変して全く別の元素の原子核になる。Ra 発見の重要性は、原子核の壊変と壊変の際に放射線とエネルギーが放出されることがわかったことにある (竹内, 1999)。

Ra の半減期 ( $T_{1/2}$ ) は 1600 年と長い、壊変すると  $\alpha$  線を放出 ( $\alpha$  壊変) してラドン ( $^{222}\text{Rn}=\text{Rn}$ ) という放射性の気体になる。Rn もまた 3.825 日の  $T_{1/2}$  で  $\alpha$  壊変して別の元素になる。放射性気体としては 1899 年にまずトリウムエマナチオン《トリウム ( $^{232}\text{Th}=\text{Th}$ ) 系列に属する質量数の異なる Rn の同位体 トロン ( $\text{Tn}=\text{Rn}$ )》が Rutherford によって発見された。Rn はその翌年 (1900 年) にドイツのドルン (E. Dorn) により発見され (阪上, 1996) ラジウムエマナチオンと呼ばれた。Ra を発見した際 Curie 夫妻は Ra に接した空気が放射能を持つことに気付いたが、その原因が分からなかった。Dorn はこの放射能が Ra の壊変で生成する放射性の気体であることを発見した。多くの科学者がこの最も重い希ガスに様々な名前を与えたが 1923 年の国際会議で、Ra の壊変によって生成することから Rn と命名された (馬淵, 1962)。天然に存在する放射性元素は多種類あるが、そのうち温泉と関連が深いのは、Rn と Ra である。Tn は  $T_{1/2}$  が 55.6 秒と短く、フィールドでの検出はなかなか困難であり、データはあまり多くない。

鉱泉水等環境試料中の Rn の存在は 1903 年英国のアレン (H.S. Allen) によって Bath の Kings Spring で認められ、同時に Rn による鉱泉水の治療効果の可能性も示唆された。次いで 1904 年オーストリアのマッヘ (H. Mache) によって Bad Gastein の諸源泉の測定結果が報告されるなど、各地

で温・鉱泉水の Rn の調査・研究がはじまった。Mache によって提案されたマッヘ (ME) 単位は、ラジウムエマナチオンの濃度を表す単位としてドイツの温・鉱泉に関する文献を中心に用いられた。ドイツ医学の流れを汲むわが国では、普通の水 (常水) と鉱水の区別を定めたナウハイム決議 (1911 年) に準じて衛生検査法指針中に鉱泉分析法の項目が定められており、この ME 単位も導入された。

温・鉱泉等の放射能が簡単に測れる測定器として泉効計 (Fontactoscope) が開発された。石谷傳市郎は単独で 1907 年 1 月 2 日～4 日にかけて修善寺温泉に滞在しわが国で最初に温泉水中の Rn 濃度測定を行った (Isitani, 1908)。初期の Rn 濃度測定には Engler・Sieveking 泉効計 (Engler and Sieveking, 1905) も用いられ、1909 年 12 月から翌年の 1 月にかけて石谷傳市郎、真鍋嘉一郎らによる福島県飯坂と兵庫県城崎温泉での測定の報告がある (Isitani and Manabe, 1910)。わが国の環境放射能の研究は温泉水中の Rn 濃度の測定から始まったと言われている (阪上, 1996; 館野, 2001)。

1931 年理化学研究所の飯盛里安博士により開発された IM 泉効計 (飯盛, 1931) は、温・鉱泉をはじめとした環境水試料の測定に大いに利用され、今世紀の初頭まで全国各地で使用され続けた寿命の長い測定器となった。

温・鉱泉の放射能はレベルは非常に異なるが測定すれば至る所に存在する。温泉や鉱泉はローマの昔から、保養地として人気があった。放射能が発見されてから、温・鉱泉が健康によいのは新しく発見された放射能という不可思議な物質のために違いないと考えられ、世界各地の温・鉱泉で放射能を測定するという一大ブームが巻き起こった。しかし、次第に冷静になって考えると放射能の高い温泉すべての療養効果が優れているとは限らず、温泉の効果はやはりその他の要素を合わせた総合的なものであるということに落ち着いてきた (中村, 1988)。

#### 4. 天然放射性核種と温泉の熱源

天然放射性核種とは、地球創成期から主に地殻 (岩石・土壌) 中に存在する放射性核種、またはその娘核種の総称である。天然放射性核種には、単独で存在するものと放射性壊変系列を構成するものがある。前者には、カリウム ( $^{40}\text{K}$ ,  $T_{1/2}: 1.27 \times 10^9$  y) やルビジウム ( $^{87}\text{Rb}$ ,  $T_{1/2}: 4.75 \times 10^{10}$  y) の他  $1.00 \times 10^{10}$  y 以上の長い  $T_{1/2}$  を有する約 10 程度の核種がある。後者には、 $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2}: 1.41 \times 10^{10}$  y),  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2}: 4.5 \times 10^9$  y),  $^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2}: 7 \times 10^8$  y), をそれぞれ親核種とする Th 系列核種, U 系列核種, アクチニウム系列核種があり、いずれも順次原子核壊変を繰り返し安定な鉛 (Pb) に至る。これらの各系列の質量数はそれぞれ  $4n$ ,  $4n+2$ ,  $4n+3$  ( $n$  は整数) で表わされる。 $4n+1$  で表わされる系列はネプツニウム ( $^{237}\text{Np}$ ;  $T_{1/2}: 2.14 \times 10^6$  y) を親核種とする Np 系列核種であるが、親核種の  $T_{1/2}$  が地球の年齢に比べ短いため、現在では天然に存在しない。

温泉と関わりを持つ天然放射性核種で重要なものは、U 系列核種及び Th 系列核種であり、親核種の U, Th は地殻の岩石の中にほぼ一様に含まれている (落合, 1996) (表 1)。これら地球誕生から地殻の中に含まれている天然放射性核種

表 1 地球物質中でのウランとトリウムの含有量 (Heier, Adams らによる)

地球物質	ウラン (ppm)	トリウム (ppm)
地殻全体	0.91	3.5
玄武岩	0.87	2.93
花崗岩	3.0	13.0

(落合, 1996)

表 2 地球の熱史に重要な放射性元素

同位体	崩解熱 ( $10^{-5}$ W/kg)	$T_{1/2}$ (億年)	濃度 ( $10^{-9}$ kg/kg)
$^{238}\text{U}$	4.96	44.7	30.8
$^{235}\text{U}$	56.9	7.04	0.22
$^{232}\text{Th}$	2.64	140	124
$^{40}\text{K}$	2.92	12.5	36.9

(Turcotte and Schubert, 2002; 田近, 2014)

は、温泉の熱源として重要な役割を担ってきた (Turcotte and Schubert, 2002; 田近, 2014) (表 2).

地球内部は高温であり、地表へ向かって熱の流れがある。その熱源の主なものとしては、①岩石中に含まれる  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  等の長寿命放射性核種の原子核壊変に伴って発生するエネルギー、②微惑星が集積して地球が成長する段階で内部に分配された運動 (重力) エネルギー、③集積するときには分散していた金属鉄が中心に集まるとき開放される重力エネルギー等があげられている (Turcotte and Schubert, 2002)。一方地球内部の温度が十分に高ければ岩石は溶融してマグマが発生し、岩石に含まれていた  $\text{H}_2\text{O}$  や  $\text{CO}_2$  などはマグマに濃集して火山ガスとして大気中に放出される。このように地球内部からの熱の流出は①火山活動、②温泉・地熱、③地震波動、④地下から地表を通過して上昇する熱 (地殻熱流量) 等によっている。

温泉の熱源の一部は地球の創成期から地殻に含まれる天然放射性核種に由来している。地球誕生以来地球内部で岩石の中に貯えられた U, Th, K 等放射性核種の崩壊熱エネルギーは地球全体の地殻熱流量  $4.43 \times 10^{13} \text{ W}$  (Turcotte and Schubert, 2002) の少なくとも 60% にはなるだろうと見積もられている (村上, 1987a)。

### 5. わが国の放射能泉

温泉現象が火山活動と密接な関係にあることは一般によく知られている。環太平洋造山帯では古い地質時代から繰り返し造山作用がおり、それに伴って生じた断層や大きな地質構造線にそって火山が噴出し、火山帯をつくっている。わが国はそうした火山帯の中にあり、温泉の多い国として知られている。温泉はわが国にとって世界に誇れる数少ない天然資源と言える。地球内部に育まれた熱源によって温められ、地表に湧出して来た温かい泉こそ温泉である。

わが国には沢山の種類の温泉が湧出するが放射能泉もその一つで、主として天然に存在する放射性核種が多く含まれていることによって温泉と認められたものである。わが国の温・鉱泉の泉質頻度分布図 (図 1) (金原, 1992) を見ると、わが国では食塩泉が 27% と最も多く、単純温泉が 25.8% でそれに続き、放射能泉は全温泉の 7.7% である。

放射能泉に含まれる放射性核種は殆どが Rn で、U 系列に属するガス成分である。Th 系列にも Rn の同位体 Tn も存在するが  $T_{1/2}$  が短いことから、Tn による天然放射能泉は存在していない。Rn は、不活性のガス成分であり、温・鉱泉水中ほとんど他の溶存化学成分との相関はなく、常に単独で存在している。

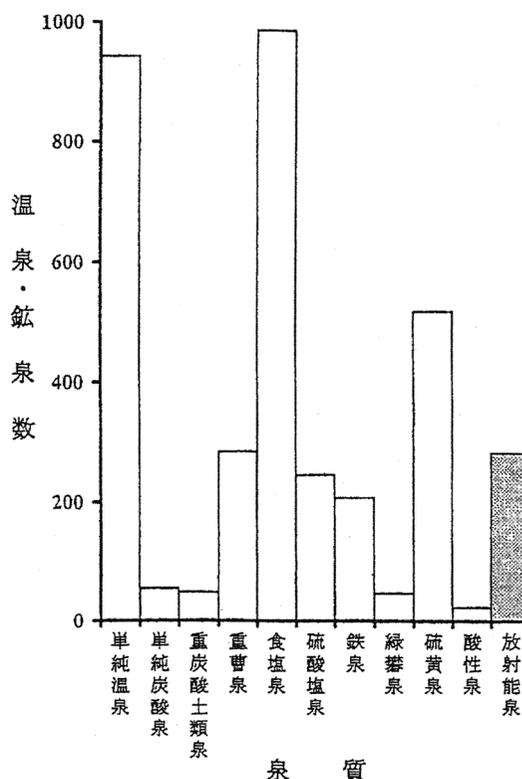
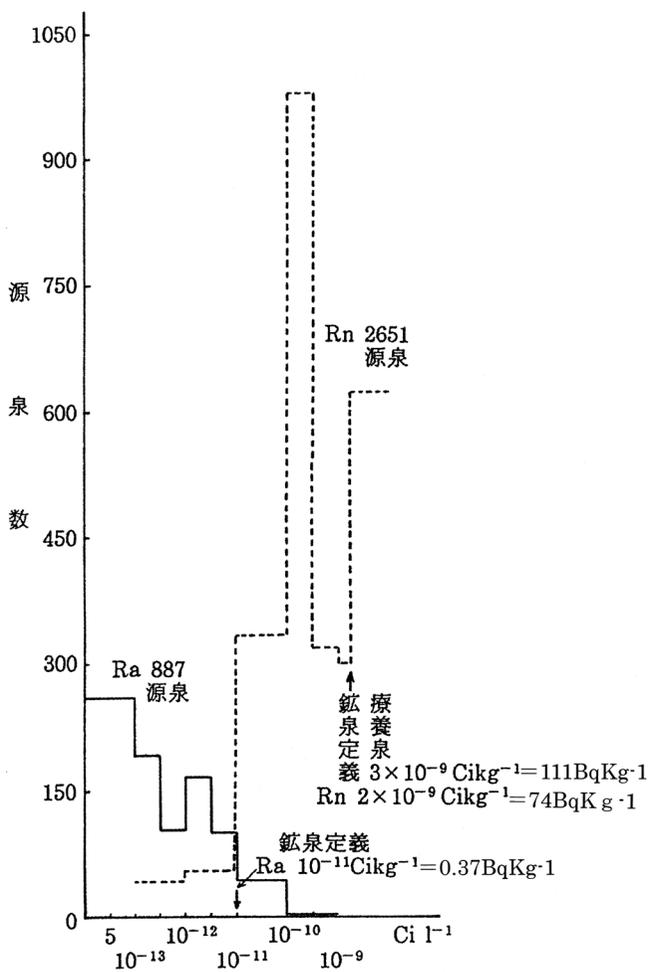


図 1 日本の温泉・鉱泉 (総数 3,659) の頻度分布 (金原, 1992; 堀内, 2001)



親核種 Ra との放射平衡量をかなり上回っていることは昔から知られてきた。わが国の両者の測定データの濃度分布を図 2 に示したが、その様子がはっきり見られる (堀内, 1981)。いずれも Rn 濃度のピークの方が 2~3 桁高くなっており、この傾向は諸外国でも同じである。

この非平衡を説明するためにラドン濃度が高い放射能泉の分布地域 (増富, 三朝, 有馬) を中心に数多くの研究がなされている (Kikkawa, 1954; 岩崎, 1968a, 1968b, 1969a, 1969b, 1969c; 佐藤ら, 1975)。温度の高い三朝, 城崎, 湯村などで同じように Rn の供給源を検討した結果, 温泉水に Rn は少なく, 高濃度の Rn を溶存した地下水が混入して含量が高くなっており, 三朝温泉山田区共同湯の Rn を含む地下水の滞留時間はほぼ 20~170 分位であった (Okabe, 1956)。Rn の供給源として温泉水が地下の浅いところにある Ra を多く含んだ温泉沈殿物層を通過することによるとの報告がある (斎藤, 1953, 1954)。しかし, 三朝温泉山田区共同湯の Rn 含量は季節的に変動し, 周囲の水田に灌水すると, Rn が増えるとの報告がある (梅本・杉原, 1959)。浅いところに Ra を含んだ温泉沈殿物が, 付近一帯に均一に分布したとしても, そこを通る水が湧出するまでに大量の Rn を溶かし込んでくるとは考え難い。そのため地表近くにある温泉沈殿物層を通った地下水の他に, さらに



(堀内 1981) より

図 2 温泉水中の Ra と Rn の頻度分布 (日本) (堀内, 1981; 村上, 1987b)



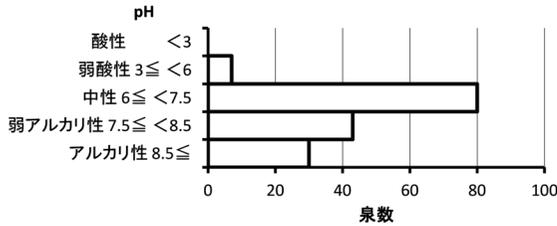


図 5 液性別に示した日本の放射能泉の頻度分布 (金原, 1992; 堀内, 1997)

とんど他の溶存化学成分を含まない単純冷鉱泉が主体である。

### 5.4 放射能泉の成因

わが国の放射能泉は火山性、非火山性温泉といった造山活動に由来する温泉ではない。温泉水中の Rn は湧出母岩である花崗岩類に由来する。そのため、わが国の放射能泉は花崗岩地帯に広く分布し、特に風化

の進んでいる西日本に多く存在する。全国の放射能泉の数を都道府県別に集計した分布図 (堀内, 2001) は、わが国の花崗岩分布地帯 (木村ら, 1993) と一致する (図 6)。Rn 濃度は花崗岩の種類、風化の度合いによって異なり、放射能泉の主体が冷鉱泉であるのは、湧出母岩がすでに花崗岩形成期の温度を失っているためと考えられる。湧出母岩との接触時間 (滞留時間) が長くなるにつれて水の pH は高くなり、温泉はアルカリ性を呈しはじめ (一國ら, 1982), Rn 濃度も高くなる。放射能泉や Rn 濃度の高い地下水は岩石と長期の接触を経た水温の低い停滞水・深層水に多いとも言われている (調枝, 1974; 金井ら, 1990; 大沼ら, 1990)。わが国の放射能泉はこうしたいわゆる地下水型の温泉が多いと考えられる。

放射能泉に含まれる Ra や Rn は他の泉質の温泉と違って元素の存在量ではなく核種の放射能強度により定められる程僅かな量である。よって温泉水が湧出してくる過程で、U や Th の多い岩石を通過する際に、壊変途中の Ra や Rn を溶かし込んでくればよいことになる。我々が浴びる自然界の放射線は地殻の諸岩石の放射性元素 (K, Th, U) に起因し、地殻物質では広義の花崗岩類が特に重要な放射能泉の源であると一般に解釈されている (古川, 1993; 湊, 2006; 今井, 2011)。しかし、実際には花崗岩の種類によって大きく異なる。放射能強度は産状よりも起源物質による制

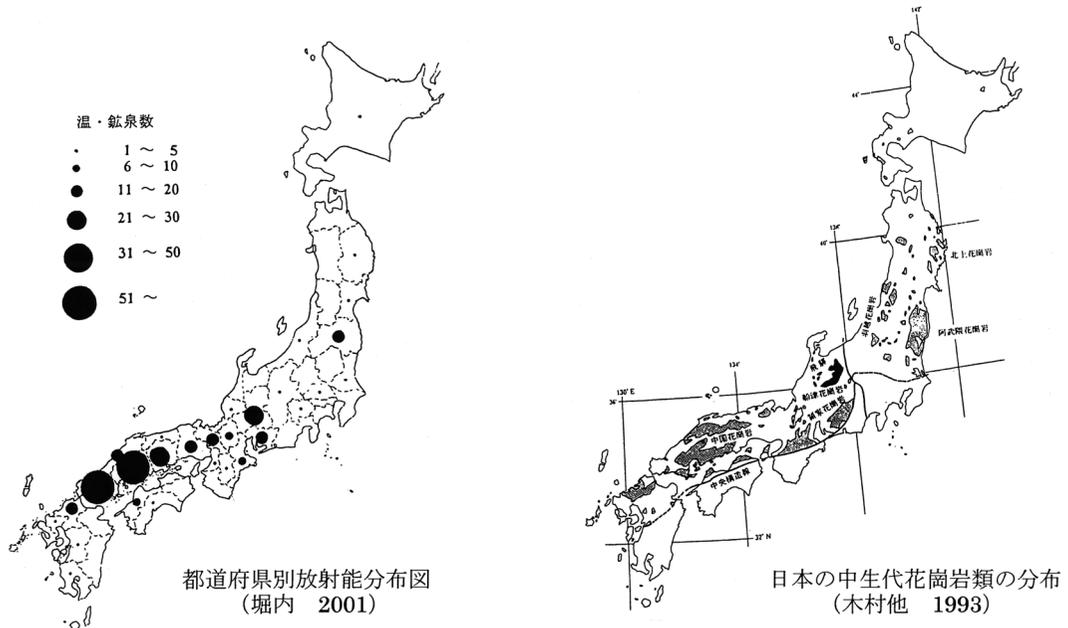


図 6 都道府県別放射能泉源泉数と中生代花崗岩類分布図 (金原, 1992; 木村他, 1993; 堀内, 1996)

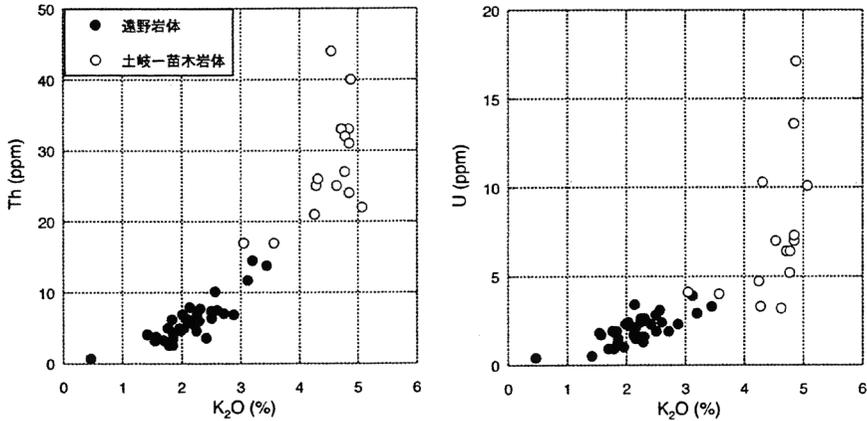


図 7 花崗岩マグマ起源の相違に基づく放射性元素量  
遠野岩体は金谷 (1974), 土岐-苗木岩体は Ishihara and Murakami (2006)

限が大きい。西日本の花崗岩が多く分布する地域、岐阜県東南部や中国地方など、放射能泉が多く湧出する地域の深層地下水の放射性元素が多いのは、花崗岩の U・Th 含有量が多いことに由来すると報告されている。

花崗岩質マグマの起源物質は、初生の玄武岩・斑れい岩から古期花崗岩・変成岩類まで変化に富んでいる。東日本における北上山地の花崗岩類は海洋地殻の溶融物と考えられるアダカイト ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が多い；花崗岩質大陸地殻の形成機構解明の鍵を握る重要な岩石) (土谷, 2008) を含み苦鉄質岩が溶融したものと考えられる。よって北上山地の花崗岩類の平均的な性質を持つ遠野地域 ( $630\text{ km}^2$ ) の  $\text{K}_2\text{O}$ , Th, U 含有量は極めて低いものに属する (図 7) (金谷, 1974 ; Ishihara and Murakami, 2006)。一方、西日本側の岐阜県土岐-苗木地方や広島地方に露出する山陽帯の花崗岩類のマグマ起源は、大陸地殻内の堆積岩や古期花崗岩類と考えられる。このように東日本と西日本の対称的に異なる起源を持つ花崗岩類は、平均値として表 3 に示す放射線量を持つと報告されている。よって同じ花崗岩地帯でもその起源によって放射線量が大きく異なってくる。

温泉水中の Rn, Tn は地殻構成物質中に含まれる U, Th に由来する Ra ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ) の壊変生成物である。Rn, Tn が岩石組織から放出される物理過程については、まだ充分には知られていない。壊変の際、約  $100\text{ keV}$  の反跳エネルギーを得て  $20\sim 70\text{ nm}$  程度の結晶構造 (造岩鉱物) から飛び出し、好機に恵まれると亀裂、空間にガスとして逸出する。その後はポーラスな土壤空隙を拡散して地上に出るか、地下水に溶けてこれと行動を共にし、地表に達するものと思われる。空隙率が大きいと拡散率は増加するが、非常に乾燥した土壤中では、固体中の細孔や割れ目への Rn, Tn 原子の再吸着が生じ放出は減少する (Andrews, 1983)。空隙や割れ目が流体 (気体または液体) で満たされていると、それらの移動に伴って移送され、その距離は  $2\text{ km}$  以上に及ぶと言われている (Megumi and Mamuro, 1974)。こうして Rn は土壤の空隙、亀裂、断層等を通して、また温・鉱泉水、湧水等の湧出に際し地上に放出され、自然界のあらゆる場に存在することになる。水は Rn を運び、また土壤や岩石の粉碎を促進し、さらに吸水の可能性を大き

表 3 花崗岩中のウラン、トリウム量

花崗岩	ウラン (ppm)	トリウム (ppm)	
遠野岩体	1.98	6.07	(n=37)
土岐-苗木岩体	7.3	27.8	(n=14)

(金谷, 1974 ; Ishihara and Murakami, 2006)

くすると考えられている (Tanner, 1964).

風化花崗岩と新鮮な花崗岩を用いて地下水中 Rn 濃度の多様性と岩石の風化度との関連が検討された。風化花崗岩の微視的表面积は新鮮な花崗岩より大きく、従って Rn 溶出効率も大きい。両者の間には正の相関が見られた。岩石表面からの Rn の溶出には壊変の際の反跳作用の寄与が考えられる (Sato and Nakamura, 1993)。

もう一つ別の放射能泉になる泉質に有馬や増富などの塩濃度の高い温泉 (有馬型温泉) がある。このタイプの温泉には Rn のほかに Ra や Th も多く含まれていて、非常に高濃度の放射能泉になる。Ra の起源は地下深部の変成岩と考えられるが、明確ではない。Ra が温泉水中に多く含まれる理由としては、有馬型温泉は炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) に飽和していることが多いということにある。Ca と Ra は同族元素なので、炭酸ガスと結合して炭酸塩として岩石や沈殿物に固定されやすいが、岩石と温泉水が飽和しているとその余剰分が温泉水に含まれるようになる (酒井・大木, 1978)。

酸性泉で有名な玉川温泉の大湧源泉にも放射性元素 Ra が含まれており、温泉湧出孔の周囲には Ra を含んだ沈殿物が存在する。これはバリウム (Ba) と鉛の硫酸塩鉱物 (重晶石: パライト) で、Ba の一部が Ra に置換される。この鉱物は北投石 (ほくとうせき) と呼ばれて 1952 年に特別天然記念物に指定されている (綿抜, 1990)。

## 5.5 人工放射性温浴泉

従来の人工 Rn 泉は主として U、あるいは Th 鉱石を浴槽中に入れ、その中に含まれている Ra から発生する Rn や Tn を湯の中に溶かし込んだものだが、その大衆性と安全のために Rn 濃度は 1~2 Bq/L 程度に低く抑えられている。

近年 Th を含んだ砂を用いて Tn 温浴水を調整し、各種の重篤ながん患者や、糖尿病患者の症状の改善、延命効果をあげている施設が紹介された (山本, 2017)。Tn 温浴の Rn 温泉との違いとして、Tn が Rn に比べ安定の鉛に至るまでの壊変過程が Rn の 8 過程に比べ 5 過程と短いこと、 $T_{1/2}$  が短いこと、空気中への拡散量が少なく呼気からの体内接種も少ないことなどが挙げられる。Tn 温浴水利用の科学的な効果を解明するための基礎研究は既にスタートしている (迫田ら, 2005)。現在天然の Tn 泉は存在していないが、人工的な温浴水であれば調整することにより常に一定の条件の利用環境を提供できること、温泉地が限定されないこと等もメリットとして挙げることが出来る。

## 6. 放射能泉の利用と効能

### 6.1 放射能泉の利用法

温泉の利用法 (大島, 1956, 1981a; 森永, 1974, 1988) としては、外国では主として入浴、飲用、吸入の三通りに利用しているが、わが国では吸入はほとんど行われていない。しかしガス体の Rn は、湯の中に溶けているより空気中に逃げ出す分が多く、入浴の際 Rn は皮膚からだけでなく呼吸器からも吸入される。飲用ではもちろん消化管からだが、吸入時には肺から吸収されて血液循環に入り、全身に拡がるかたちで Rn が体内に入ってくる。従って全身に対する利用は、飲用より効率が良い。Rn は不活性ガスであるため他の放射性物質と異なり、体内の組織と結合して沈着することはない。また、Rn は油に非常に溶け易く、食物と一緒に放射能泉を飲用すると、油脂の中に溶けながらゆっくりと吸収される。

体内に入った Rn の一部は壊変し、次々と  $T_{1/2}$  の短い別の核種に変化して体内に残る。Rn の壊変生成物はその濃度と体内にある時間に比例して多くなるが、やがて Rn の壊変生成物に固有の生物学的半減期によって排泄される。Rn の生物学的半減期は約 40 分で、呼吸によって 180 分後には

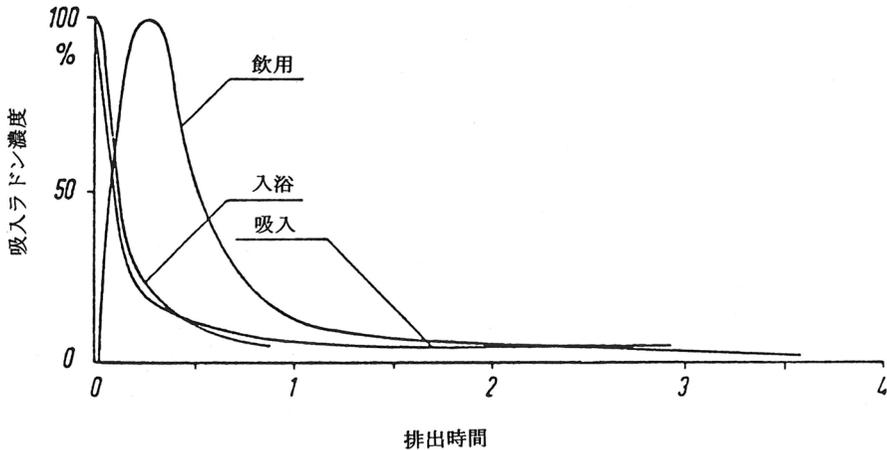


図 8 吸入後呼気に含まれる Rn 濃度 (森永, 1974)

ほとんど排出されるとの報告がある (森永, 1974)。図 8 に Rn 排出の状況を示した。

古来、放射能泉はリウマチのリハビリや鎮痛作用等の医療効果が認められ、温泉治療に利用されて来た。数多ある泉質の中で放射能泉は湯あたりを起こし易い、つまり刺激効果のある泉質である。これは一つの特徴でもあり、同時に「使い方に注意せよ」ということを示している (大島, 1981b)。しかし、医療効果を求めるにはある程度の強さ(濃度)が必要とされる。放射能泉にも種々の強さがあり、どの位の濃度の温泉をどの様な形で使ったらよいか検討されなければならない。外国では入浴療法に用いる Rn 濃度は通常 700 Bq/L 以上、一般には 1,300 Bq/L 以上が使用されている。温泉療法は 1 週間を一廻りとし、平均二～三廻り (2～3 週間) で終了し、繰り返す必要がある時には半年～1 年経ってから次のクールを行うのがよいとされている (森永, 1974)。

人間の身体は、種々の外からの刺激侵襲に対抗するだけの力を持っている。自分の病気に対抗する力、自然治癒力とか、防衛力、抵抗力等を利用して病気を治すのが温泉療法の基本である。

## 6.2 放射線の生物学的作用

放射線の生物学的効果 (山岡・小島, 2000; 石田, 1991; Draganic *et al.*, 1996; 近藤, 1998) は、組織、即ち生体を構成する細胞や細胞間物質の集合体にエネルギーが吸収されて起こり、障害機構とこれに対する防御機構とがある。放射線の吸収は密度に比例するので、エネルギーの大部分は生体の重さ約 70% を占める水に吸収され、水からのフリーラジカルと細胞を構成する化学成分との反応が主な効果となって現われる。放射線が水の中を通過したあと放射線の化学的作用は 1 ナノ秒 ( $10^{-9}$  秒) 以内に終わり次のように要約される。



また呼吸によって体内に入った酸素は赤血球によって各細胞にくまなく運ばれ、細胞に行き着くと糖分や脂肪を燃やしてエネルギー代謝を促す働きをするがその際約 2% が活性酸素に変化する。放射線による生体の障害は主として生体の構成成分である水分子の放射線分解や酸素呼吸によって生ずる種々の活性酸素種によると考えられている。活性酸素種にはスーパーオキシドアニオン ( $\text{O}_2^-$ )、過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、ヒドロキシラジカル ( $\text{-OH}$ ) などの分子種がある。これらの活性酸素種は放射線照射といった物理的刺激のみならず、大気汚染・排気ガス・紫外線・たばこ・食品添加物・食生活 (動物性脂肪)・ストレスなどによっても大量発生する。活性酸素は身体の中に侵入した細菌

やウイルスを攻撃する働きをするが、増加しすぎると正常な細胞を傷つけ酸化させてしまい癌や糖尿病、アトピー、喘息など様々な病気を発症する。生体にとって酸素と水は必要不可欠なものであるが、その反面これらの分子の反応により生じるフリーラジカルは極めて反応性に富んでいて、酸化作用と還元作用を持っている。

活性酸素種による障害を防御するために、生体はさまざまな防御機構をもっている。抗酸化系は免疫系とともに代表的な防御機構の一つで、 $O_2^-$ を $H_2O_2$ に不均化(解毒)するスーパーオキシドジスムターゼ(SOD)、さらに $H_2O_2$ を $H_2O$ に還元し、 $H_2O_2$ および脂質過酸化物を消去するなどの抗酸化酵素(予防的抗酸化物)、およびこれらの活性酸素種を直接補足して安定化する還元型グルタチオン(GSH)、還元型チオレドキシシン(Red. TRX)、尿酸、あるいはビリルビンなどの抗酸化物質(捕捉型抗酸化物)から成っている。抗酸化系防御機構は、生体内での活性酸素が過剰とならぬように制御し、生体内の安定と維持を図っている。

### 6.3 放射能泉の医療効果

放射能泉の医療効果についてはいくつかの報告がなされている(大島, 1956, 1981b; 森永, 1974, 1988)。放射能泉利用の際の、Rnの有効性はいまだ明確ではないが、近年、培養細胞あるいは動物を用いた実験からこれらの適応症について科学的説明がなされつつある(中川ら, 2008)。

その一つとして、放射線分解によって生体内に生じた少量の活性酸素が、解毒、細胞代謝、ミトコンドリア内でのエネルギー変換、酵素などのたんぱく質や生理活性物質の生合成などの種々の過程に刺激(情報伝達因子)として作用した結果と考えられている。また、SOD活性がRnの暴露によりウサギなどで増加することから、Rn療法によるSODの誘導合成の関与が示唆されている(Yamaoka *et al.*, 1993)。

温泉治療に利用されている放射能泉は、Rnとその崩壊生成物により生じた活性酸素種が、身体の細胞や組織に複雑な生化学的作用を及ぼし、各種器官の働きを活発にするとされている。その効果は臨床医学的に自律神経の鎮静、ホルモンや代謝異常の調整、鎮痛、消炎作用などと言うことが出来る。 $\alpha$ 線には神経細胞の酸素消費量を下げて鎮静化させる作用があるとみられ、放射能泉浴はリウマチ、関節炎、筋肉痛、神経炎等の痛みを和らげる可能性が示唆されている。また組織学的に放射能泉浴が副腎皮質ホルモンの分泌を高めるとも考えられている。Rn濃度を増すと鎮痛効果はあがるが、心血管や植物神経系統に反作用が起きるので、他の温泉成分と同様、適切な利用が大切である。放射能泉の効果は単に放射能だけによるのではなく他の溶存化学成分や泉温等との相乗効果である。表4に放射能泉の適応症を示した。またビタミンC、E、 $\beta$ -カロチン等を摂取すると活性酸素種を直接捕捉して安定化するとも言われているので更に多くの物理療法や食餌療法、時には薬餌療法等も併用して総合的な医療を行うことが正しい温泉療法であり、温泉療法医等に相談して利用することが望ましいとされている(山岡・小島, 2000)。

表 4 ラドン温泉療法の主な適応症

☆気管支喘息、肺気腫などの呼吸器疾患
☆関節リウマチ、変形性関節症、神経痛、変形性脊椎症
☆ベヒテレフ病(強直性脊椎炎)などの疼痛性疾患
☆肝臓疾患、消化性腫瘍、胃腸炎などの消化器疾患
☆高血圧・動脈硬化、糖尿病などの慢性退行性疾患
☆老人性疾患
☆アトピー性皮膚炎、歩行系損傷後のリハビリなど

(山岡, 2012)

#### 6.4 三朝温泉における Rn の健康影響調査

わが国でも有数の高放射能泉地域として名高い鳥取県三朝温泉で自然環境の放射線に長期間さらされた場合の疫学調査研究が行われた (Mifune *et al.*, 1992 ; Iwasaki, 1994).

三朝温泉は、鳥取県のほぼ中央部、中国山地の北麓に位置し天神川の支流三徳川の両岸の三朝、山田地域で温泉が湧出する。三朝温泉は開湯以来 850 年を経過し、代々人々が住み続けている。三朝温泉は、泉温:36~85℃, Rn 濃度:17.4~9,361 Bq/L, 平均 Rn 濃度:436.6 Bq/L の含 Rn-Na-Cl 泉, または Rn-Na-Cl-HCO<sub>3</sub> 泉地域である。この地の温泉水の湧出量は  $3.02 \times 10^6$  L/日 で、温泉に起因する Rn の大気への放出量は  $1.3 \times 10^9$  Bq/日 と推定されている。

三朝温泉で、1952 年~1988 年までの癌死が生活環境の類似した近隣地区と比較して調査された。屋外放射能は周辺地区の約 2.4 倍で浴室の放射能は 200~8,000 Bq/m<sup>3</sup> であるとされている。しかるに癌死は有為に低く環境中の Rn が健康に有害だという考えを否定するものであった。この地域の住民は多年この地で入浴, 吸入, 飲用をしているが他地域と比較し白血病, 癌, 先天性奇形などの発生率に統計的な有意差は見られていない。

#### 6.5 放射能泉利用による被曝線量

Rn の出す  $\alpha$  線は陽子 2 個と中性子 2 個からなる He の原子核と同じ構造の粒子である。 $\alpha$  線は衝突した相手を電離する能力が高いが、自分の持つエネルギーを急速に失い空気中でも数センチメートルしか進めず、物質を通り抜ける力は弱く紙一枚で止めることができる。従って入浴の際も Rn からの  $\alpha$  線は皮膚の表面で止まってしまうと考えられる。その際放出されるエネルギーと皮膚との間の作用のメカニズムは未だ明確ではないが、 $\alpha$  線による刺激効果等の説明がなされている。しかし体内に  $\alpha$  線を放出する核種を摂取した場合、その物質の沈着した組織の細胞が集中して  $\alpha$  線の全エネルギーを受けるため人体が受ける影響は大きくなる。放射能泉入浴の際の被曝線量は体内被曝を考慮すればよい。

放射能泉入浴による被曝線量は①浴室空気中の Rn 吸入による被曝線量 ②浴槽から空気中へ拡散して来る Rn が寄与する Rn の吸入による被曝 ③飲泉を摂取した際の被曝線量の総和になる。下ら (2006) は、米国学術会議電離放射線の生物学的影響に関する委員会の報告 (BRER, 1999) と、国連科学委員会報告 (UNSCEAR, 1982) で用いられた式を用いて放射能泉入浴の際の被曝線量を試算した。

増富, 三朝, 村杉の各放射能泉浴室に 1 時間 (内 0.5 時間は浴槽内) 滞在し、コップ一杯 (180 mL) の飲泉 (Rn 水) を摂取したと仮定して計算した (堀内ら, 2007, 2009)。被曝線量算出に用いた値は現地調査を行った際の値を便宜上利用しており、各温泉地を代表するものではない。温泉水は流入口の近くの浴槽から採取し、温度は浴槽の水温である。飲泉は飲泉所流入口 (蛇口) から採取した (表 5)。

表 5 被曝線量算出に用いた各放射能泉地域のラドン濃度

温泉地	測定日	泉温 (°C)	浴槽 (Bq/L)	飲泉 (Bq/L)	浴室空気中ラドン濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )
増富温泉	2005/2/8	21.0	133.7 ± 0.2	4685.5 ± 1.5	370
三朝温泉	2005/10/21	43.0	725.7 ± 0.6	362.8 ± 0.4	407
村杉温泉	2005/10/21	40.0	367.4 ± 0.3	559.2 ± 1.3	250

(堀内他, 2004 ; 2009)

表 6 放射能泉利用と放射線診断による被曝線量 (mSv)

被曝線量( $\times 10^{-3}$ )*			検査の種類 (1件当たりの実効線量) **			
増富温泉	三朝温泉	村杉温泉	歯科 X 線検査	一般 X 線検査	CT 検査	核医学検査
4.3	1.8	1.3	0.2~1.3	0.1~7.4	2.4~12	4.5~19

\*浴室に1時間滞在し(内0.5時間は浴槽内)、飲泉をコップ1杯飲用

\*\* (アイントープ手帳, 2011)

(堀内他, 2004; 2009; アイントープ手帳, 2011)

放射能という言葉から敬遠されがちな放射能泉に一回入浴し、温泉水をコップ1杯飲用した場合の被曝線量を算出した値と参考値として日常生活の中で受けることの多い放射線診断による被曝線量とを表に示した(表6)。直接 Rn 水を体内に取り込むことから飲泉の Rn 濃度が高い増富温泉が特徴的に高い被曝線量を示した。放射能泉の Rn 濃度は常に変化しており、測定する時間により、季節により、場所により、流動的であり、この値を一般化することは出来ない。しかし、放射能泉を利用すると、どの位の被曝線量になるのか、普段の生活とどの位違うのかを考えたいときの一つの目安にはなるであろう。

## 7. おわりに

1935年の「温泉大鑑」に「放射能泉の項にラジウムの放射能が医学上の効果の多いことが判明すると、温泉についても放射能が喧しく言われるようになった。温泉中にはラジウム及びその壊変物の如きガスを含有しているものが多い。一般には放射能鉱物のガス状壊変物たるエマナチオンを含むものも多く、その量の多いものを特に放射能鉱泉(ラジウム鉱泉)と呼んでいる」と記述されている。現在〇〇Ra泉の名称で親しまれている温泉もその主成分は殆ど Rn であり、昔から放射能泉の代名詞として Ra 泉と言う表現が使われて来たようである。時には放射能泉の代名詞である Ra 泉と放射能泉が結びつかない人や天然の放射能泉は身体に良いが人工の放射線は危険だと信じている人さえ居る。しかし放射線には天然も人工もない。同じ核種、同じ濃度であれば同じ作用をする。Ra も Rn も量が多くなると危険ではあるが、日本各地の昔ながらの放射能泉で行われていた湯治がそうした危険を招いたという記録はない。

寒い冬の日冷え切った体を温かい湯に沈めたとき何とも言えない幸せを感じたりする。わが国は平均寿命男性 79.55 年、女性 86.30 年の長寿国であるが、健康寿命との間に男性で 9.13 年、女性で 12.68 年の開きがある(厚生労働省, 2017)。健康寿命を延ばしていくのに温泉を活用すべきとも考えられている。これから、健康で豊かな生活を享受して行くには、放射能や温泉を正しく理解し、有効利用していくことが大切だろう。

## 謝 辞

本総説を執筆するにあたり、原稿の改善に際し査読者お二人から有益なご意見・ご指摘を頂きましたことを感謝いたします。

日本温泉科学会第 70 回那須大会におきまして「放射能と温泉」に関する講演の機会を賜りましたことを前田眞治大会会長に感謝いたします。

## 引用文献

Andrews, J.N. (1983) : Dissolved radioelements and inert gases in geothermal investigations.

- Geothermics, **12**, 67-82.
- 青木和光 (2004) : 鉄より重い元素の合成, 物質の宇宙史, 82-105, 新日本出版社, 東京.
- BRER (1999) : Broad on Radiation Effects Research (BRER ; 1999), Risk Assessment of Radon in Drinking Water, CLS/NRC Report, National Academy Press.
- ブリタニカ国際大百科事典 (2017) : 宇宙線, 小項目版, Logo Vista.
- 調枝勝幸 (1974) : 広島県における地下水の地球化学的特質—放射能泉の水質組成— 広島県衛研・公害研・研究報告, No. 21, 1-9.
- Draganic, I.G., Draganic, Z.D., Adloff, J.P. (1996) : 放射線と放射能 宇宙・地球環境におけるその存在と働き (松浦辰男, 今村 昌, 長谷川罔彦, 橋本哲夫, 朝野武美, 小高正敬共訳) 学会出版センター, 東京.
- Engler, C. and Sieveking, H. (1905) : Phys. Z., **63**, 8-11.
- 古川雅英 (1993) : 日本列島の自然放射線レベル, 地学雑誌, 868-877.
- 堀内公子, 村上悠紀雄 (1978a) : 鉱泉中のラジウム, ラドン同時定量に関する研究 その1, 温泉科学, **29**, 68-75.
- 堀内公子, 村上悠紀雄 (1978b) : ラジウム, ラドン量より求めた  $\delta Rn$  項による鉱泉中の過剰量ラドンの存在に対する一考察, 地球化学, **12**, 59-70.
- 堀内公子 (1981) : 日本の温泉の放射能, 温泉科学, **31**, 69-78.
- 堀内公子 (1996) : 特集 ラドン, 天然水中のラドン, 日本分析センター広報, No. 31, 37-45.
- 堀内公子 (1997) : 特集 温泉科学, 放射能泉, 日本分析センター広報, No. 28, 23-30.
- 堀内公子 (2001) : 日本の温泉と放射線, 日本放射線技術学会雑誌, **57**, 1462-1468.
- 堀内公子 (2004) : 日本の温泉の放射能, 原子力体験セミナー, (財)放射線利用振興協会, 7.
- 堀内公子, 滝沢英夫, 鈴木絢香, 甘露寺康雄 (2007) : 放射能泉地域のラドン濃度と利用客の被曝線量, 放射線教育, **11**, 33-41.
- 堀内公子, 坂口真智子, 後藤千春, 滝沢英夫, 鈴木絢香, 甘露寺康雄 (2009) : ピコラド (PICO-RAD) 検出器による放射能泉地域の空气中ラドン濃度測定, 社会情報学研究 (大妻女子大学紀要), **18**, 159-170.
- 飯盛里安 (1931) : 泉効計の改造とラドンの代用標準, 理研彙報, **10**, 1105-1131.
- 今井 登 (2011) : 日本の自然放射線量, 日本地質学会 News, **14**, 6-7.
- 石田健二 (1991) : 日経サイエンス, No. 4, 82-90.
- Ishihara, S. and Murakami, H. (2006) : Fractionated ilmenite-series granites in Southwest Japan : Source magma for REE-Sn-W mineralization. Resource Geology, **56**, 245-256.
- Isitani, D. (1908) : Number of Ions in the Free Atmosphere near Hot Springs, Tokyo Sugaku-Buturigakkwai Kizi 2<sup>nd</sup> Ser. 4, No. 19, 370-377.
- Isitani, D. and Manabe, K. (1910) : Sugaku-Buturigakkwai Kizi 2<sup>nd</sup> Ser. 5, No. 15.
- アイソトープ手帳 (2011) : 放射線診断による被曝線量, UNSCEAR (国連科学委員会) 2008 年報告による, 177.
- 一國雅巳, 鈴木勸子, 鶴見 実 (1982) : 水—岩石相互作用の生成物としてのアルカリ性鉱泉水, 地球化学, **16**, 25-29.
- 岩崎岩次 (1968a) : 温泉中のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の分布と強放射能泉の生成機構 (その1), 温泉工学会誌, **6**, 18-28.
- 岩崎岩次 (1968b) : 温泉中のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の分布と強放射能泉の生成機構 (その2), 温泉工学会誌, **6**, 112-114.

- 岩崎岩次 (1969a) : 温泉中のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の分布と強放射能泉の生成機構 (その 3), 温泉工学会誌, **6**, 165-168.
- 岩崎岩次 (1969b) : 温泉中のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の分布と強放射能泉の生成機構 (その 4), 温泉工学会誌, **7**, 16-24.
- 岩崎岩次 (1969c) : 温泉中のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の分布と強放射能泉の生成機構 (その 5), 温泉工学会誌, **7**, 109-114.
- Iwasaki, T. (1994) : Population, Dosimetry and Health (体質研究会主催, 1994/9, 東京), p 33.
- 金井 豊, 坂巻幸雄, 瀬尾俊弘 (1990) : 地球化学, **24**, 123-132.
- 金谷 弘 (1974) : 北上山地の白亜紀花崗岩類のカリウム・トリウム・ウラン及び帯磁率, 地質調査所報告, **251**, 91-120.
- 環境省 (1996) : 平成 6 年度都道府県別温泉利用状況, 温泉, **64**, No. 752, 10-11.
- Kikkawa, K. (1954) : The Sources of Radon to the Radioactive Springs, 地球物理, **9**, 117-126.
- 木村健二郎, 黒田和夫, 横山祐之 (1948) : 日化, **69**, 33.
- 木村敏雄, 速見 格, 吉田鎮男 (1993) : 日本の地質, 東京大学出版会, 東京.
- 金原啓司 (1992) : 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧, 地質調査所.
- 厚生労働省 (2017) : 健康日本 21 (第二次) の推進に関する参考資料, 平成 22 年度都道府県別生命表の概況, 18.
- 鉱泉分析法指針 (平成 26 年改訂) (2014) : 鉱泉の定義と分類, 1, 環境省自然環境局, 東京.
- 近藤宗平 (1998) : 人は放射線になぜ弱いのか, 講談社, 東京.
- 黒田和夫, 横山祐之 (1948) : 化学の研究, **3**, 29.
- Kuroda, P.K., Yokoyama, Y., (1948) : Bull. Chem. Soc. Jap., **21**, 52.
- 馬淵久夫 (1962) : ラドン, 化学大辞典, **9**, 537.
- Megumi, K. and Mamuro, T. (1974) : J. Geophys. Res., **79**, 3357-3360.
- Mifune, M., Sobue, T., Arimoto, H., Kondo, S. and Tanooka, H. (1992) : Cancer mortality survey in a spa area (Misasa, Japan) with a high radon background. J. Cancer Res., **83**, 1.
- 湊 進 (2006) : Distribution of terrestrial  $\gamma$  ray dose rate in Japan. 地学雑誌, **115**, 87-95.
- 村上悠紀雄 (1987a) : 放射能から火山・地熱・温泉へ I, 温泉科学, **62**, 55-72.
- 村上悠紀雄 (1987b) : 放射能から火山・地熱・温泉へ II, 温泉科学, **62**, 248-267.
- 森永寛 (1974) : 放射能泉の医学, 温泉科学, **25**, 45-54.
- 森永寛 (1988) : 放射能温泉地の医学一補遺, 温泉科学, **38**, 120-131.
- ナダカブカレン, A. (1990) : 地球環境と人間, 岡本悦司訳, 三一書房, 東京.
- 中川慎也, 片岡隆浩, 迫田晃弘, 石森 有, 花元克巳, 山岡聖典 (2008) : ラドン吸入試作装置による諸臓器中の抗酸化機能の亢進に関する研究, RADIOISOTOPES, **57**, 241-251.
- 中村 昭 (1988) : 温泉, **56**, 12-13.
- 日本大百科全書 (ニッポニカ) (1993) : 小学館, 東京.
- 落合敏郎 (1996) : 地下水・温泉の放射能探査, リーベル出版, 東京.
- Okabe, S. (1956) : Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. A, XXVIII, 39-71.
- 大林太良, 伊藤清司, 吉田敦彦, 松村一男編 (2005) : 世界神話辞典, 角川書店, 東京.
- 大沼章子, 佐藤克彦, 茶谷邦男 (1990) : 愛知県における地下水中ラドン濃度の分布, “環境ラドン”, 140-149, 東京.
- 大島良雄 (1956) : 放射能泉, 温泉療養, 創元医学新書, **40**, 大阪.
- 大島良雄 (1981a) : 温泉研究の回顧, 温泉科学, **31**, 64-68.

- 大島良雄 (1981b) : 放射能泉, 世界の温泉, 日本温泉科学研究所編, 東京.
- 斎藤和男 (2009) : 星の一生と元素合成, 山形大学理学部地球環境学科.
- 斎藤信房 (1953) : 放射性温泉沈殿物に関する研究, 学術月報資料, **39**, 37.
- 斎藤信房 (1954) : 温泉沈殿物の化学的研究, 総合研報化学編, **28**, 106.
- 酒井均, 大木靖衛 (1978) : 日本の温泉, 科学, **48**, 1, 41-52.
- 阪上正信 (1996) : 特集 ラドン, 序論 ラドン研究の源流と現状, 日本分析センター広報, No. 28, 16-22.
- 迫田晃弘, 片岡隆浩, 花元克巳, 山岡聖典 (2005) : 人工トロン温泉由来の放射能と負イオン (マイナスイオン) の諸特性, RADIOISOTOPES, **54**, 375-378.
- 佐藤 純, 横沢沖彦, 斎藤信房 (1975) : 鹿児島県垂水市猿ヶ城の温泉及びその放射性沈殿物, 温泉工学会誌, **10**, 47-60.
- Sato J. and Nakamura T. (1993) : Leaching of radon from weathered granite into water, RADIOISOTOPES, **42**, 667-675.
- 下 道國, 小柳津東, 床次眞司, 北村香織, 江尻和隆, 南 一幸 (2006) : 岐阜県の一温泉施設のラドン濃度と被曝線量試算, 温泉科学, **55**, 177-187.
- 鈴木啓三 (1990) : エネルギー・環境・生命. 化学同人, 東京.
- 竹内均編 (1999) : 放射性元素の発見, 科学の世紀を開いた人々 (上), 141, ニュートンプレイス, 東京.
- 田近栄一 (2009) : 地球環境 46 億年の大変動, 化学同人, 東京.
- 田近栄一 (2014) : 放射性熱源と惑星の進化, 放射線 RI 塾, Isotope News, 11 月号, No. 727, 35.
- Tanner A.B. (1964) : in *The Natural Radiation Environment* (J.A.S. Adams and W.M. Lowder, eds), 161-190, Univ. Chicago Press.
- 館野之男 (2001) : 放射線と健康, **78**, 岩波新書, 東京.
- 土谷信高 (2008) : アダカイトの岩石化学的多様性とその成因, 地球科学, **62**, 161-182.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G. (2002) : *Geodynamics*, John Wiley & Sons.
- UNSCEAR (1982) : UNSCEAR 1982 Report, United Nations, New York.
- 梅本春次, 杉原 健 (1959) : 鳥取県三朝温泉の化学的研究 (1), 日化, **80**, 1246-1249.
- 綿抜邦彦 (1990) : 北投石-その地球化学, 地球化学, **24**, 79-83.
- Yamaoka, K. Komoto, Y. Suzuka, R. Edamatsu, R. Mori, A. (1993) : Effect of Radon Inhalation on Biological Function-Liquid Peroxide Level, Superoxide Dismutase Activity, and Membrane Fluidity, Arch. Biochem. Biophys., **302**, 37.
- 山岡聖典, 小島周二 (2000) : 現代化学, No. 1, 24-30.
- 山岡聖典 (2012) : 放射能泉と健康, 放射能泉の安全に関するガイドブック, **36**, (株)ヒューレックス, 東京.
- 山本浩司 (2017) : 末期がんでもまず 10 年元気で共存できる条件, 青萌堂, 東京.
- 横山祐之 (1962) : マッヘ, 化学大辞典, **8**, 676.