

Topics

日本の温泉と放射線

大妻女子大学社会情報学部
堀内公子

はじめに

環太平洋造山帯の火山帯のなかにあるわが国は世界でも極めて温泉の多い国であり、温泉は全国に分布している。もちろん世界には古代ローマ時代から温泉を利用したイタリアや、エネルギーの多くの部分を地熱や温泉に頼っているアイスランドのような国々はある。しかしわが国では毎日、新聞や雑誌を広げると温泉の広告が眼に入るし、行楽旅行といえば温泉に泊まるものと相場は決まっている。市町村が集会・保養施設を造るには温泉が欲しいと考える。温泉は資源の乏しいわが国で世界に誇れる唯一の天然資源といえるほど大切な存在であり、人々の生活と密接に結びついている。しかし、諸外国ではそうではなく、ほとんどの国で単に保養施設、医療施設の一つとして考えられている。

放射能も温泉の化学成分の一つであり、放射能が発見されるや直ちに温泉水、温泉沈殿物等のなかにその存在が確認され、医療効果や利用方法が研究されてきた。現在では放射能泉によるより明確な医療効果と人体の放射線被曝に対する安全性のメカニズム解明をめぐって新たな展開をみせている。

1. 日本の温泉

1-1 定義

わが国の温泉は「温泉法」のもとに環境省の管轄下にある。温泉法は温泉を保護しその利用の適正を図り、公共の福祉の増進への寄与を目的としている。温泉は概念的には読んで字のごとく温(あたたかい)泉(いずみ)であるが、温泉法においては「温泉とは地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他のガス(炭化水素を主成分とする天然ガスを除く)で別表(Table 1: 一部)に掲げる温度または物質を有するものをいう」と定義されている。

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)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、今日の温泉法における鉱泉の資格が決められている。表に示した限界値は常水と区別する鉱泉の定義であり

(1948)、療養泉の定義(1978)である。温度が25℃以上であるか、表の中の一成分がこれ以上あれば鉱泉、温泉の対象となる。療養泉は温泉法の対象ではなくこの限界値をどれか一成分は超えており、かつ温泉医学の経験から医治効果の期待できる温泉という考え方である。したがって温泉法第13条により、成分とともに禁忌症および入浴または飲用上の注意を掲示しなければならない。

1-2 温泉の起源

温泉の分類、成因あるいは温泉水の起源を推定する研究は地質学、地球化学、地球物理学、地熱等いろいろの分野で幅広く行われている。

地球の内部は高温を示し、地表へ向かって熱の流れがある。その熱源のおもなもとして岩石中に含まれるウラン(^{238}U , ^{235}U)、トリウム(^{232}Th)、カリウム(^{40}K)等の長寿命放射性元素の原子核崩壊に伴って発生するエネルギーがある。

一方、地球内部からの熱の流出は火山活動、温泉・地熱、地震波動、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。したがって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元素に由来しているといえる。地球誕生以来地球内部で岩石のなかに貯えられたウランやトリウム等放射性元素の崩壊熱エネルギーはかなりの量になると見積もられている。

1-2-1 火山性温泉

火山国日本には多数の温泉が湧出しているというように、温泉が火山活動と密接な関係にあることはよく知られている。Fig. 1¹⁾に第四紀火山および新第三紀火山岩地域の分布図を示した。これには東日本火山帯と西日本火山帯等の火山フロントも示されている。第四紀火山フロントの内側(日本海側)の火山活動の活発な地域では、熱い温泉が地表に分布し、地殻熱流量の大きい地域とほぼ一致している。地表から浸透した雨や地表水が火山帯の地下の高温部において熱水に混合・加温されて温泉となり、開口亀裂帯の中を熱対流で上昇して、地上に湧出する。これが火山性の温泉であ

Table 1 ナウハイム決議・温泉法別表・療養泉(1kg水中)。

A 通用しているナウハイム決議の MWの限界値(1911年)		温泉法第2条別表に示されている限界値(1948年法律第125号)		
成分	限界値	B 鉱泉 (常水と区別する限界値)	C 療養泉	
温度	+20	温度	25 以上	温度 25
全ミネラル成分	1g	溶存物質(ガス性のものを 除く)総量	1,000mg以上	溶存物質(ガス性のものを除 く)総量 1000mg以上
リチウム(Li ⁺)	1mg	遊離二酸化炭素(CO ₂), 遊離炭酸	250	銅イオン(Cu ²⁺) 1
ストロンチウム(Sr ²⁺)	10	リチウム(Li ⁺)	1	総鉄イオン(Fe ²⁺ +Fe ³⁺) 20
バリウム(Ba ²⁺)	5	ストロンチウム(Sr ²⁺)	10	アルミニウムイオン(Al ³⁺) 100
鉄(Fe ²⁺ またはFe ³⁺)	10	バリウム(Ba ²⁺)	5	水素イオン(H ⁺) 1
臭化物(Br ⁻)	5	総鉄イオン(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	10	ヨウ素イオン(I ⁻) 10
ヨウ化物(I ⁻)	1	マンガン(II)イオン(Mn ²⁺)	10	総ヒ素(Asとして) 0.7
フッ化物(F ⁻)	2	第一マンガンイオン		総硫黄[S] [HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ + H ₂ Sに相当するもの] 2
ヒ酸水素(HAsO ₄ ²⁻)または メタ亜ヒ酸(HAsO ₂)	1.3	水素イオン(H ⁺)	1	ラドン(Rn) 30×10 ⁻¹⁰ キュリー単位以上 (8.25マッヘ単位以上)
全硫黄[S] 水素硫黄HS ⁺ チオ硫酸+硫化水素)	1	臭素イオン(Br ⁻)	5	
ホウ酸(メタ)(HBO ₂)	5	ヨウ素イオン(I ⁻)	1	
二酸化炭素(CO ₂)	250	フッ素イオン(F ⁻)	2	
アルカリ度(狭義)4mval NaHCO ₃ に相当	340	ヒ酸水素イオン(HAsO ₂ ⁻)	1.3	
ラジウムエマナチオン マッヘ単位	3.5	ヒドロヒ酸イオン ₄		
		メタ亜ヒ酸イオン(HAsO ₂)	1	
		総硫黄[HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ Sに 対応するもの]	1	
		メタホウ酸(HBO ₂)	5	
		メタケイ酸(H ₂ SiO ₃)	50	
		炭酸水素ナトリウム (重炭酸ソーダ:NaHCO ₃)	340	
		ラドン(Rn)	20×10 ⁻¹⁰ キュリー単位以上	
		ラジウム塩(Raとして)	1×10 ⁻⁸ mg以上	

25°Cの由来は年平均気温が高い(台湾の南端部の値:戦前日本の領土)ためである。

る。東北地方,北海道,九州南部地域に泉温の高い火山性の温泉が多く湧出している。

1-2-2 非火山性の温泉

火山活動と無関係な地域にも地球内部の熱に由来した温泉が存在する。地殻内の熱の流れによって、堆積盆地の深い地層内に貯留している地層水が地下増温率に従って加熱され、これが温泉となる。例えば増温率が3°C/100mのときは深さ2,000mで60°Cとなり、地表温度を15°Cとすると、75°Cの熱水が得られることになる。こうした深層地下水型の温泉を非火山性の温泉という。深層地下水高温泉地域をFig. 2に示した。

1-2-3 温泉の特徴

近年わが国の温泉開発は素晴らしいテンポで進み、温泉地、源泉数ともに増加が著しく、環境省の集計報告²⁾によると1999年度の温泉地数2,893、源泉数26,270(うち32%は未利用)を数えるに至った。利用源泉の増

加は当然湧出量の増加であるが、自然湧出泉の数が1999年度は38.8%(1987年:40.1%,1957年:69.7%)と次第に減少しており、掘削・動力揚湯の占める割合が大きい。

わが国の温泉は、欧米に比べて火山に由来する硫黄泉の多いことが大きな特徴である。また酸性泉や緑礬泉、明礬泉も外国に比べて多く存在している。わが国の温・鉱泉の泉質頻度分布図をFig. 3³⁾に示した。わが国では食塩泉が最も多く、放射能泉は全温泉の約8%である。

2. 日本の放射能泉

温泉水の中に含まれる放射性成分にはラドン(Rn: ²²²Rn), ラジウム(²²⁶Ra), ラドンの放射性同位体トロン(Tn: ²²⁰Rn), アクチノン(An: ²¹⁹Rn)等が存在するが、放射能泉としてはラドンが主流である。

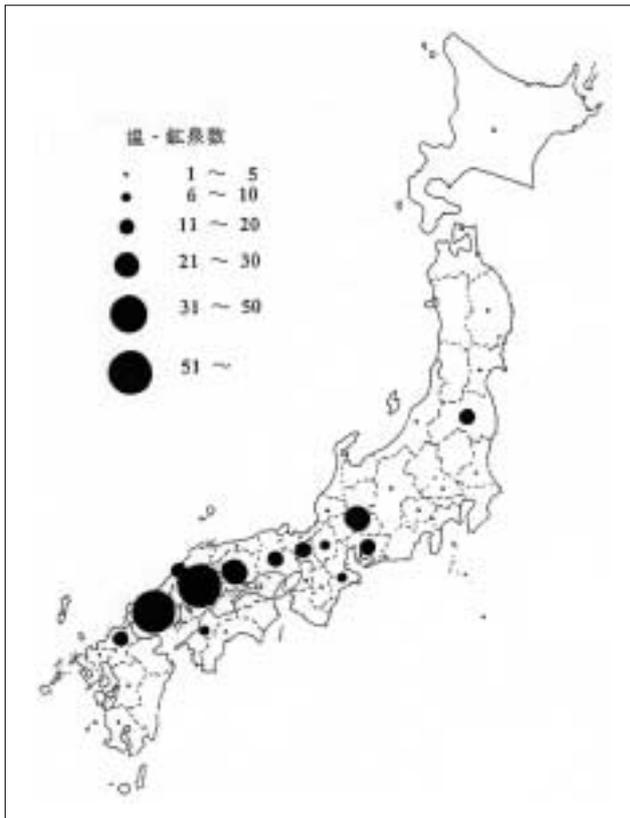


Fig. 4 都道府県別放射能泉分布図 .



Fig. 5 日本の中生代花崗岩類の分布 .
〔紫田・野沢(1982)および山田・齋藤・村田(編)(1990)による〕

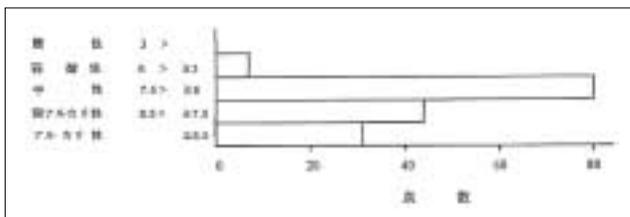


Fig. 6 液性別に示した日本の放射能泉の頻度分布 .

ラジウム塩 (Raとして) 1×10^{-8} mg以上
 ラドン(Rn) 30×10^{-10} Ci以上, 特殊成分を含む
 療養泉(放射能泉)
 (8.25マッヘ単位以上: 111Bq/l)

である .

ラドン濃度についてはナウハイム決議が3.5マッヘ(47Bq)であるのに対し5.5マッヘ(74Bq)が与えられている . その根拠は不明であるが入浴を主とするわが国と, 飲用を多く取り入れている欧州との温泉治療における基本的な利用方法の違いによるのかもしれない .

従来わが国では温・鉱泉の放射能表示はMachelにより提案されたマッヘ単位(1マッヘM.E.=水1lに含まれるラドンによる飽和電離電流が 10^{-3} e.s.u.のとき)が用いられてきた . (1Bq=27pCi, 0.074M.E.) .

2-2 放射能泉の特徴

全国の放射能泉の数を都道府県別に集計すると特徴的に西日本に多く分布し(Fig. 4), わが国の花崗岩分布地帯(Fig. 5)と一致している .

わが国の温泉の源泉1本当たり平均湧出量はほぼ100 l/minであるが, 放射能泉の場合その頻度分布を描くと20~50 l/minをピークとする非対象型を示している . また泉温については25°C以下の冷鉱泉が多く全体の86.5%をしめている . なかでも15~20°Cが最も多く, 地下水の温度領域に近い .

液性の頻度分布はFig. 6のごとくであり, 以上をまとめるとわが国の放射能泉は他の泉質の温泉に比べて湧出量は1/2~1/3と少なく, 液性は中性から弱いアルカリ性を示し, ラドン以外ほ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 .

2-3 放射能泉の成因

放射能泉の成因については昔から多くの報告がみられるが何れも定説とは言い難くいまだ研究段階である .

一般にラドン濃度の高い温泉は湧水量が少なく, 温泉水中のラドン>ラジウムの非平衡を考慮すると比較的少量の鉱水がラジウム濃度の高い放射性沈殿物など

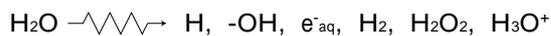
Table 2 ラドン泉の適応症 .

浴用の適応症	飲用の適応症	吸入療法の適応症
リウマチ性疾患	痛風および尿酸素質	痛風および尿酸素質
痛風および尿酸素質	リウマチ性疾患	リウマチ性疾患
動脈硬化症	慢性消化器疾患	慢性気管支炎
高血圧症	慢性肝・胆道疾患	気管支喘息
慢性肝・胆道疾患	糖尿病	
外傷後遺症		

と地下のあまり深くないところで接触し、濃いラドン含有水を生じた可能性がある。またさらには地表近くにある温泉沈殿物層を通った地下水の他に、さらに深い層に含まれる高濃度のラドンを含む地下水、すなわち「ラドン地下水」の混入等も考えられている⁶⁾。

3. 放射線の生物学的作用^{7~10)}

放射線の生物学的効果は、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%が活性酸素に変身する。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(O₂⁻)、過酸化水素(H₂O₂)、ヒドロキシラジカル(-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やっつける働きをするが、増加しすぎると正常な細胞をも傷つけ酸化させてしまい癌や糖尿病、アトピー、喘息などさまざまな病気を発症する。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、酸化反応や還元反応を起こし

やすい。

活性酸素種による障害を防御するために、生体にはさまざまな防御機構がある。抗酸化系は免疫系とともに代表的な防御機構の一つで、スーパーオキシドアニオン(O₂⁻)をH₂O₂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H₂O₂をH₂Oに還元し、H₂O₂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。

4. 放射能泉の医療効果^{11~13)}

放射能泉を利用する場合、どのような仕組みでその効果は顕れるのだろうか。

放射能泉におけるラドンがなぜ有効なのか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解明がなされつつある。

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活性がラドンの暴露によりウサギなどで増加することから、ラドン療法によるSODの誘導合成の関与が示唆されている。

温泉治療に利用されている放射能泉は、ラドン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、各種器管の働きを活発にするといわれている。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、消炎作用などということができる。α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ため、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効果がある。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。ただしラドン濃度を増すと鎮痛効果は上がるが、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、ほかの溶存化学成分や泉温等との相乗効果でもある。Table 2に放射能泉の適応症を示した。またビタミンC、

E、β-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ともにいわれているのでさらに多くの

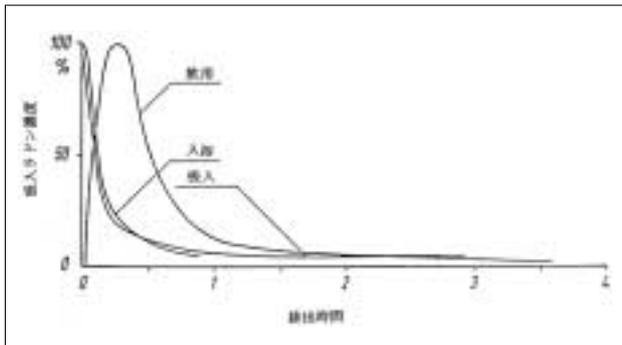


Fig. 7 摂取後呼気に含まれるラドン。

物理療法や食餌療法，とき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。

5. 放射能泉の利用法^{11~13)}

温泉の利用法としては外国では主として入浴，飲用，吸入の3通りで利用しているが，わが国では吸入はほとんど行われていない。しかしガス体のラドンは，湯の中に溶けているより空気中に逃げ出す分が多く，入浴の際ラドン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ラドンが体内に入ってくる。したがって全身に対する利用は，飲用より効率が良い。また，ラドンは油に非常に溶けやすく，食物と一緒に放射能泉を飲用すると，油脂のなかに溶けながらゆっくりと吸収される。しかしラドン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。

体内に入ったラドンの一部は崩壊し，次々と半減期の短い別の核種に変化して体内に残る。ラドンの崩壊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，やがてラドンの崩壊生成物に固有の生物学的半減期によって排泄される。ラドンの生物学的半減期は約40分程で，呼吸によって180分後にはほとんど排出されるとの報告がある。Fig. 7にラドン排出の状況を示した。

古来，濃度の高い放射能泉はリウマチのり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きた。数多ある泉質のなかで放射能泉は湯あたりを起こしやすい，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」ということをも示しているが，医療効果を求めるにはある程度の強さ(濃度)が必要とされている。放射能泉にも種々の強さがあり，どの位の濃

度の温泉をどのよう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ラドン濃度は通常700Bq/l以上，一般には1,300Bq/l以上が使用されている。温泉療法は通常一週り，平均15~20回で終了する。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。

人間の身体は，いろいろな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，自然治癒力や，防衛力，抵抗力等を利用して病気を直すのが温泉療法の基本である。

6. 三朝温泉におけるラドンの健康影響調査^{14,15)}

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。

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兩岸の三朝，山田地域で温泉が湧出する。三朝温泉は開湯以来800年以上を経過し，親代々人々が住み続けている。三朝温泉は，泉温：36~85℃，ラドン濃度：17.4~9,361Bq/l，平均ラドン濃度：436.6 Bq/lの含Rn-Na-Cl泉，またはRn-Na-Cl-HCO₃泉地域である。この地の温泉水の湧出量は3.02×10⁶l/日で，温泉に起因するラドンの大気への放出量は1.3×10⁹Bq/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200~8,000Bq/m³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ラドン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入浴，吸入，飲用をしているがまったく白血病，癌，先天性奇形などの発生率に他地域との差はみられていない。

また三朝温泉において，居住者，周辺地区居住者，理学療法士等を対象に抹消血リンパ球細胞1,000個以上の染色体の観察が行われた(total：約40,000個)。その結果，調査対象が少数であること，個人の被曝線量の推定が困難であることなどから断定的な結論は出せないとしているが，関東や関西地区の一般集団における異常頻度よりも一般に高かったと述べられている。この地域では癌死は有為に低いという前記の報告と合わせると染色体異常は増えるが癌死は少ないということになる。これは高環境放射能地域で染色体異常は増えるが健康への悪影響は観察されないという他の報告と一致している。

おわりに

従来，温泉の成分としての放射能を考えた場合，含有放射性成分による医療効果についての論議はあった

が、放射線による被曝の影響という考え方はなかった。しかし国連科学委員会から「人々が自然放射線から平均的に受けている被曝線量の1/2がラドンからの寄与による」と報告されると放射能泉のラドンをも見過ごすことはできなくなってきた。

ラドンおよびその崩壊生成物は α 線、 β 線、 γ 線を放出するので、生体とのかかわり合いも複雑でいまだ研究段階にある。放射線と生体との間に生ずる障害機構と防御機構の分子レベルでのメカニズムの解明は研究

者達の地道な努力によっていずれ明確にされるであろう。

放射能泉は古くから多くの人たちによって農繁期の疲れを癒したり、リウマチや怪我のリハビリ等で利用され続けてきた。世界に誇り得る数少ない天然のエネルギー資源：温泉は限りある資源でもある。放射線の危険性を正しく理解したうえで、これからも放射能泉がより多くの人々に愛され広く有効利用されていくことを願っている。

参考文献

- 1) 落合敏郎：温泉開発．p. 203，リーベル出版，東京，(1993)．
- 2) 環境省自然環境局自然環境整備課：温泉．69，No.4/5，(2001)．
- 3) 金原啓司：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧．地質調査所，(1992)．
- 4) 堀内公子：日本分析センター広報．28，23-30，(1996)．
- 5) 木村敏雄，速見 格，吉田鎮男：日本の地質．東京大学出版会，(1993)．
- 6) 堀内公子，村上悠紀雄：地球化学．12，59-70，(1978)．
- 7) 山岡聖典，小島周二：現代化学．1，24-30，(2000)．
- 8) 石田健二：日経サイエンス．4，82-90，(1991)．
- 9) Adloff JP，他：松浦辰男，他訳：放射線と放射能．学会出版センター，東京，(1993)．
- 10) 近藤宗平：人は放射線になぜ弱いのか．講談社，東京，(1998)．
- 11) 大島良雄：温泉科学．31，64-68，(1981)．
- 12) 大島良雄：世界の温泉．日本温泉科学研究所，東京，(1981)．
- 13) 森永 寛：温泉科学，25，45-54，(1974)；ibid：38，120-131，(1988)．
- 14) Mifune M, Sobue T, Arimoto H, et al.: J Cancer Res, 83, 1，(1992)．
- 15) Iwasaki T: Population, Dosimetry and Health(体質研究会主催，1994/9，東京)，p.33，(1994)．