

# ラドンと環境問題

## — 地球化学について —

金井 豊<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

『ラドン』は古くて新しい話題である。地質学や地球化学の分野では、温泉や断層・地震予知などでよく知られている。最近になって『ラドン』が私達の話題に再び登場するようになったのは、アメリカの環境保護庁 (EPA, Environmental Protection Agency) のレポートの中で、生活環境におけるラドンによる肺癌発生の可能性が高く、多くの住宅がその危険性にさらされていると警鐘を鳴らしてからであろう。EPA では、一般公衆向けにラドンについてのパンフレットを作成し、ラドンとはどういうものなのか、どの様にして生活をしたら危険性を低くすることができるか等について解説している (第1図参照)。このような動きは、国内でも新聞記事やテレビなどで紹介されているので (例えば第2図), それを見た人も多いことだろう。それによると、アメリカの住宅では平均して1/3の住宅で1日にタバコを10本喫煙するのと同

程度の肺癌の危険性があるという。また、年間約13万人の肺癌による死亡者の内、約5千から2万人の人がラドンによる肺癌で亡くなっていると推定している。

さらに、国連の機関でもラドンの危険性を再評価する動きが見られ、世界的にもその実態把握の研究が盛んになりつつある。

一方、わが国における動きとしては、以前から様々な機関において環境放射能なるものが測定されていた。当地質調査所でもウラン探査の時代にはカウンターを抱えて各地の放射能レベルを調査して歩いたこともあった。また、空間線量率としては、阿部 (1982) が全国を精力的に調査している。しかし、わが国におけるラドンについての調査はバラバラにしか行われておらず、系統的・統一的行われた例はない。このため、個々に測定されたデータの信頼性にも疑問が投げかけられているのが実態である。この状況を改善する目的で、新たに幾つかのグループがラドン測定器の国際的な検定を行ったり、さ

ラドンの危険度評価 (EPA)

ラドン濃度			ラドンによる 肺ガン死数推定値 (1000人中)*	ラドンレベルの 比較	他のリスクとの 比較	勧告 (文から引用)
Bq/m <sup>3</sup>	pCi/l	WL <sup>★</sup>				
7400	200	1	440-770**	屋内平均の 1000倍	非喫煙者リスクの 60倍以上 タバコ1日4箱 (パック)	↑直ちに低減対策実施 (一時転居)
3700	100	0.5	270-630	屋内平均の 100倍	胸部X線撮影回数 年20,000回 タバコ1日2箱	
1500	40	0.2	120-380	屋内平均の 100倍	胸部X線撮影回数 年20,000回 タバコ1日2箱	} 0.1WLより出来るかぎり低 くするよう数ヶ月以内に対策 実施
740	20	0.1	60-210	屋内平均の 100倍	胸部X線撮影回数 年20,000回 タバコ1日1箱	
370	10	0.05	30-120	屋内平均の 10倍	胸部X線撮影回数 年20,000回 非喫煙者リスクの 5倍	} 0.02WL以下にするよう 数年以内に対策実施
150	4	0.02	13-50	屋内平均の 10倍	胸部X線撮影回数 年200回 非喫煙者の 肺ガン死リスク	
74	2	0.01	7-30	屋外平均の10倍	胸部X線撮影回数 年200回 非喫煙者の 肺ガン死リスク	↓ (肺がんリスクあり) しかし、 低減策は実施困難
37	1	0.005	3-13	屋内平均レベル	胸部X線撮影回数 年200回	
7.4	0.2	0.001	1-3	屋外平均レベル	胸部X線撮影回数 年20回	

\* 70年被曝し続けるとしての推定値

\*\* 10年被曝では 140~420

★ WLはワーキングレベル濃度の単位で、空気1リットル中に1.3x10<sup>5</sup>MeV相当のα線濃度をいう (1WL~2.08x10<sup>-5</sup>J/m<sup>3</sup>)

第1図 アメリカ環境保護庁が示したラドンの危険度評価 (U. S. E. P. A., OPA-86-004 (1986): 放射線科学 (1987) に加筆)。



らの元素名にはそれなりの意味があるのであろう。中国語では、第0族の元素は全て「気」で示され、ラドンは「氡」である。ちなみに、ウラン・トリウムはそれぞれ「鈾」「鈷」で表示される。

このようにラドンが「・ン」で終わることから、一時流行した怪獣の名前を連想する様な感があるだろう。そのことからラドンを怪獣になぞらえ、地球の環境破壊をもたらした人類を懲らしめる話を空想したが、その結末は、ラドンを人類もウルトラマンも撃退することはできず、一つしかない地球上でお互いに共存していかなければならないということであった。すなわち、相手のことをよく知って共存共栄することが重要と考えられる。そのためのデータを以下に示してラドンを身近な存在と考える手だてとしたい。

名前：ラドン (radon)

原子記号：Rn

原子番号：86

質量数：222

質量：222. 017573

発見：20世紀の初め 1900年にドルン (Dorn) により発見される。ちなみに、希ガス元素発見の歴史の中では最後で、Ar (1884, ラムジ・レーリにより発見)、He (1895, ラムジ, クレーヴェも彼とは別に発見)、Kr・Ne・Xe (1898, ラムジ・トラヴァース) と19世紀末に相次いで発見されている。

系列：ウランを祖先とし、親はラジウムである。娘にはポロニウム、孫には鉛・ビスマス等がある。兄弟 (同位元素) には、トリウムを祖先とするトロン (トリウム系列)、アクチノウランを祖先とするアクチノン (アクチノウラン系列) が存在しており、何れも「ラドン」ではあるが、ここではウランを祖先とする「ラドン」をラドンと呼び、そのほかはトロン・アクチノンと呼ぶことにする。特に問題となるのはラドンとトロンである。

半減期：3. 825日。

放射線：5. 490MeVの $\alpha$ 線を放出する。 $\alpha$ 線は、 $\beta$ 線や $\gamma$ 線と異なり物質を透過しにくい、その分物質に対するエネルギー効果が大きい。また、微弱ながら0. 512 MeVの $\gamma$ 線も放出する。

沸点：-61. 8°C

融点：-71°C

密度：9. 96 kg・m<sup>-3</sup>

溶解度：水に対する分配係数

0. 508 (0°C) 0. 353 (10°C) 0. 263 (20°C)

0. 216 (30°C)

トルエンに対する分配係数 (よく溶ける)

18. 5 (0°C) 14. 76 (10°C) 11. 83 (20°C)

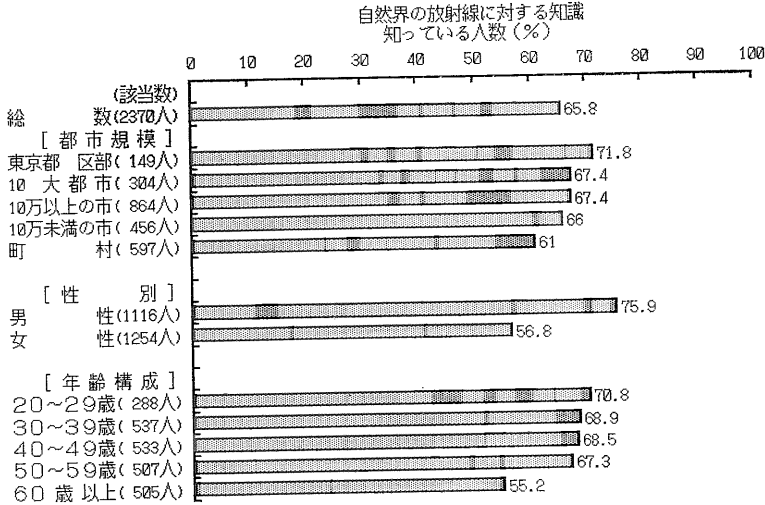
9. 55 (30°C)

### 3. ラドンと人間との関わり

さて、ラドンと人間との関わりのはじめは、不幸なことに「病気の元」としてであった。16世紀にヨーロッパのウラン鉱山に働く労働者に奇病が発生した。その原因は不明のままだったが、1932年にチェコスロバキヤの科学者はラジウム・エマナチオン (=ラドン) が最有力候補であることを指摘したという。その後、鉱夫の疫学的追跡調査等がなされ、総合的な研究結果からラドンやその娘核種による肺癌リスクの推定・被曝限度の評価などがなされるようになった。現在、放射線防護に関する国際的な機関であるICRP (国際放射線防護委員会) では、Publication 32 (以下 Publ. と省略する) として「作業員によるラドン娘核種の吸入の限度」を刊行してその限度を勧告しているし、同様に Publ. 50 では「屋内におけるラドン娘核種への被曝による肺癌リスク」を報告している。一方で自然放射線としてのラドンの評価を、UNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科学委員会) や BEIR (アメリカ科学アカデミー) 等でも報告書として提示しており、ラドンに対する関心は今や世界的なものとなっている。

ラドンはもともと自然界に存在しており、一般大衆に対する環境放射線による被曝の一部となっている。自然界の放射線の内訳を大別すると、(a)宇宙線によるもの、(b)大地の放射性物質によるもの、(c)体内に取り込まれた食品中の放射性物質に由来するもの、(d)呼吸により取り込まれた放射性物質に由来するもの、の四つになろう。1988年のUNSCEAR報告によると、それぞれによる被曝量はおおよそ0. 36, 0. 41, 0. 34, 1. 28 mSv\* (合計約2. 4 mSv) で、呼吸によるものが自然界から受ける放射線量の半分以上を占めている。今まで「人間が一年間に平均して自然放射線から受ける線量当量は約100mrem (=約1 mSv)」といいならわされてきたが、それは主として(a)(b)の観点からしか見ていなかったためである。また、以前の1982年UNSCEAR報告書では、(d)も計算にいれて一人当りの平均年実効線量当量として2. 0mSvという数値を出していたが、1988年の報告ではそれが見直され、2. 4mSvと大きく修正された。この違いの主な原因はラドンの影響を正しく評価したためだという。いかにラドンが重要であるかが想像できよう。

\* mSv (ミリ・シーベルト)：放射線による生物学的な効果を考慮した線量である線量当量のSI単位で、従来のrem単位で100mremに相当する。



第5図  
自然放射線に関するアンケート結果.

ところで、この環境放射能についての面白い調査結果がある。1987年に総理府(1988)が行った原子力に関する世論調査では、「私達は、普通でも大地や宇宙などから放射線を受けている」という設問に対し、「知っている」と答えた人が65.8%、「知らない」と答えた人が34.2%であったという。年代別の答を第5図に示したが、20代の若い人でも70%程度というのは、喜ぶべきか、悲しむべきか――。

#### 4. ラドンによる人体への影響

人体に対してラドンが危険であるとされる原因は、何といってもそのα粒子にあることは間違いないのだが、しかしそれだけではない。ウラン系列に属するラドン(<sup>222</sup>Rn)は半減期約3.8日で壊変して次々と娘核種を生じていく(第6図)が、どちらかというとその娘核種のほうにより高い危険性が秘められている。1982年の国連科学委員会報告では、ラドンによる実効線量当量を1とすると、トロン(Tn:トリウム系列に属する<sup>220</sup>Rn)によるものが0.5、トロン娘核種によるものが10、ラドン娘核種によるものが50に相当するとしており(下, 1986)、ラドン娘核種による影響がいかに大きなものであるかがわかる。

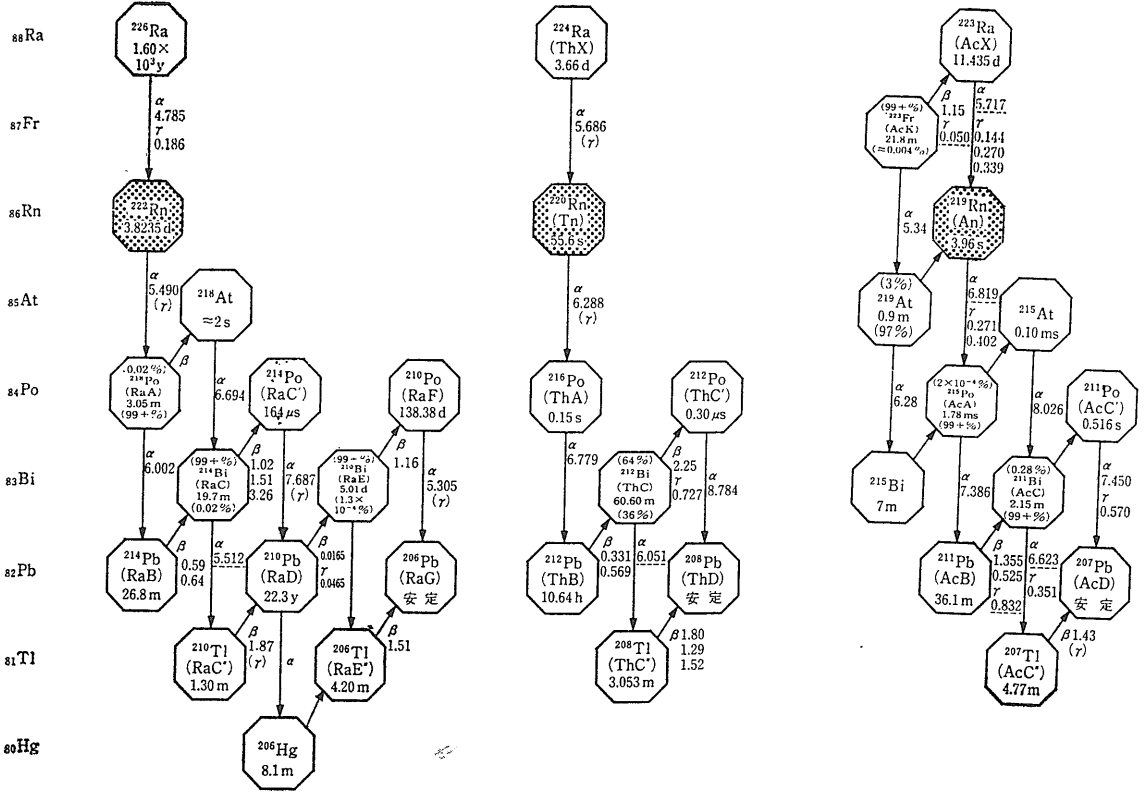
しかし、その娘核種の多くは半減期が短かったり、いろいろな物質に吸着しやすかったりして、なかなかその測定は容易ではない。そこで、これらの娘核種を包括して同等の効果を有するラドンに換算して考える平衡等価ラドン濃度(EEC)や、娘核種が放出するα線のエネルギーの総和で示すポテンシャルアルファエネルギー濃度(PAEC)という概念が生じた。調査結果に示されたラドン濃度が、ラドンそのものの濃度なのか、それとも平衡

等価ラドン濃度なのか混乱することが多く、健康への評価を行うためには正しく明記されたデータを使用しなければならない。この評価には、第7図に示したように幾つかの手順があり、その際のパラメータもケースバイケースで値が異なることが多い。従ってその状況に見合ったデータを揃えておくことが必要であろう。

ラドンによる肺癌・もしくは健康を損ねるモデルは、過去におけるウラン鉱山の鉱夫の追跡調査によって得られたデータに基づき幾つかの仮説の上でモデル化されたものであるが、例としてICRP Publ. 50で紹介されているものを以下で紹介しよう。

実際に肺に対してどの程度の線量が当たっているのかは、肺の気管支上皮と肺組織とについて、標準的な人間の呼吸量と行動パターン、例えば一日の内ラドン濃度がどの程度の屋内に何時間、屋外に何時間ということから推定されている。このモデルでは、平均して自宅内に一日の0.65、他の屋内に0.20、屋外には0.15の割合で生活しているとしている。

このようなモデルで計算された肺癌になるリスク・頻度・余命の損失の大きさを、 $10^5 \text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{y}^{-1}$ の一定レベルにおいて被曝した場合について第1表に示した。男性と女性とでは、男性の方がリスクが高く、余命の損失も大きいと推定されている。ラドンの被曝量が多くなるほどリスクも高く、余命も大きく損失するが(第8図)、線量に対しほぼ直線的に余命が減少している。また、タバコを吸う人と吸わない人とではその程度が異なっており、喫煙は、肺癌誘発の促進並びに相乗作用があるとみられている。その作用の程度を第9図に示したが、一日に10本のタバコを吸う人は、非喫煙者と比べ3~4倍危険性が高くなるといえる。また、年間被曝量が少ない程、

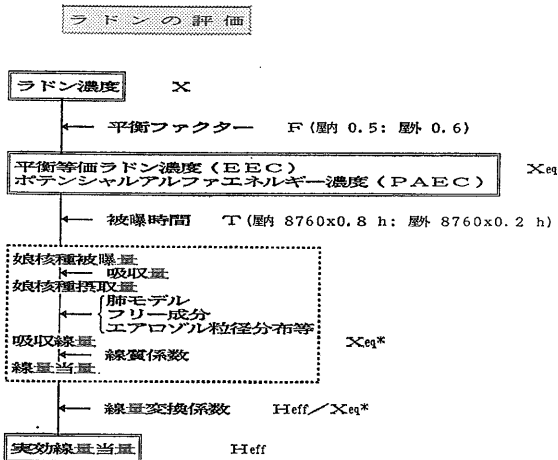


ウラン系列 (4n+2)

トリウム系列 (4n)

アクチニウム系列 (4n+3)

第6図 ラドン・トロン・アクチノンの壊変様式。



第7図 身体に対するラドン評価の流れ図。

第1表 年  $10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$  (0.16 WLM) の一定レベルでの  $^{222}\text{Rn}$  娘核種による慢性屋内被曝による肺癌の生涯リスク増加分 Rr, 頻度増加分 Fr, およびこれによる余命の損失  $\Delta Lr$  (ICRP Publ. 50 Tab. 11: 岩崎・小林 (1987) による).

絶対リスク	標準集団 <sup>a</sup> (非喫煙者+喫煙者)			
	男性 $L_0=70a$	女性 $L_0=75a$	合計 $L_0=72.5a$	非喫煙者 <sup>b</sup> $L_0=76a$
生涯リスク Rr (%)	0.42	0.09	0.26	0.06
頻度 Fr, 年当たり $10^6$ 人				
当たり件数	60	12	36	8
余命の損失 $\Delta Lr$ , (日数)	20	8	14	5.5

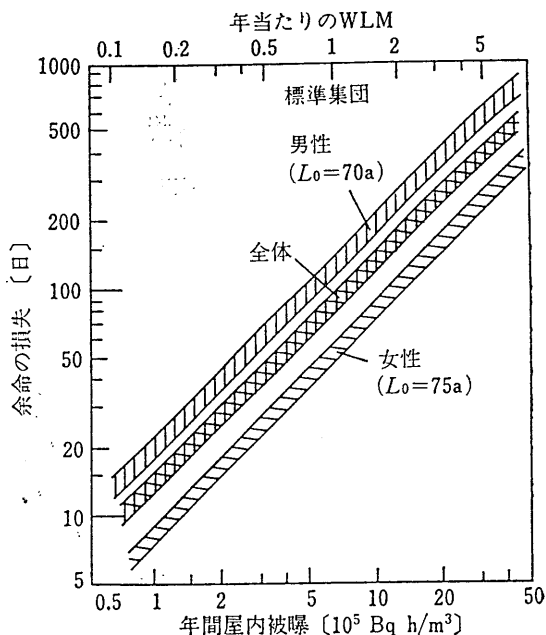
<sup>a</sup> 基準となる年間肺癌発生頻度:

$F_0$  (男性) = 年当たり  $10^6$  人当たり 600 例

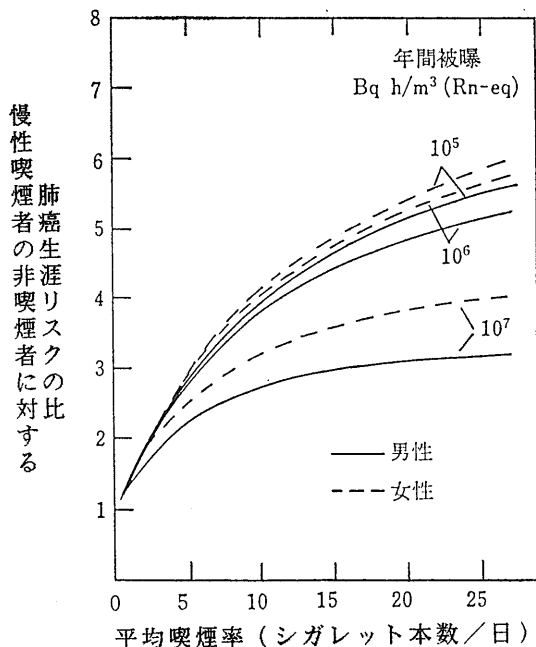
$F_0$  (女性) = 年当たり  $10^6$  人当たり 120 例

<sup>b</sup> 非喫煙者の標準集団, 基準となる年間肺癌発生頻度:

$F_0$  = 年当たり  $10^6$  人当たり 80 例, 男女平均



第8図 一定濃度のラドン娘核種を吸入して生じた肺癌に起因する余命の損失 (ICRP Publ. 50 Fig. 14: 岩崎・小林 (1987) による). 出生時の余命の損失として推定している.



第9図 タバコを吸う本数と慢性喫煙者の非喫煙者に対するラドンによる肺癌生涯リスクの比の関係 (ICRP Publ. 50 Fig. 13: 岩崎・小林 (1987) による). ラドンの年間被曝量・性別によって喫煙の相乗効果が異なっている.

性別では女性の方ほどタバコによる効果が高いことが示されている。

このようなモデルは、ウラン鉱夫の疫学的調査から求められた肺癌のリスク係数を一般大衆用に補正して使用しているが、平均的な生活をする一般大衆の生涯被曝量は、ウラン鉱山労働者における肺癌発生頻度の増加が検出可能なレベルの1/2~1/5にしかならないという(岩崎・小林, 1987)。現在、低線量放射線の長期的な被曝による効果は確率的影響とされているが、それを示す実証的なデータが少なく、データの蓄積が待たれている現状では、単なるモデルに過ぎない感もある。また、肺癌を引き起こす原因は、タバコが主因と考えられる(アメリカ公衆衛生局では肺癌による死者の内85%がタバコによるものとしている)が、この他にもニトロソアミン・ベンツピレンのような化学薬品やアスベストのような粉塵もあり、なかなか複雑な問題である。しかし、このようなモデル化は高濃度ラドンによる肺癌の危険性を定量化しようと試みたということで評価できよう。

### 5. ラドンの測定法

環境中のラドンの濃度測定は、ラドンの濃度のみならずその娘核種も評価対象となるために娘核種濃度も測定することがある。その主な測定項目と単位(下・飯田, 1990)を、第2表に示した。これらの測定方法は、測定核種・検出方法・捕集方法等の組合せによって多種多様であるが、定常的なモニタリング使用の観点から、測定に動力源を必要とするアクティブ法と必要としないパッシブ法とに大別される。測定法の詳細については、下・飯田(1990)に簡潔にまとめられているので、ここでは一覧表(第3表)にして概要を示すにとどめる。

最近では簡単に使用できるラドン計が販売されている(第10図参照)。アメリカでは住宅内のラドン濃度に対する関心も高く、ラドン濃度が低くないと不動産が売れないということで、不動産会社からの要請でラドン計が開発されたという話もあるほどである。

### 6. わが国におけるラドン濃度測定

全国規模の屋内ラドン濃度の測定は、欧米の各国で実施もしくは実施中であり、カナダ・ドイツ・イタリア・オランダ・北欧諸国・イギリス・アメリカにおける測定結果を第11図に示した。一方、わが国においては主だったところでも20を越える研究機関・大学・事業所等でラドン濃度測定が行われている。全国調査は放射線医学総合研究所のグループが中心となって行われているが、中

第2表 ラドン関係の測定に関連した用語とその単位 (下・飯田 (1990) による)。

放射能核種濃度	Rn, RaA, RaB, ……., RaF 濃度 ( $Q_N^R, Q_A^R, \dots$ )	$Bq \cdot m^{-3}$
	Tn, ThA, ThB, ThC 濃度	$Bq \cdot m^{-3}$
	平衡仮定娘核種濃度	$Bq \cdot m^{-3}$
特殊濃度	平衡等価ラドン濃度 ( $\chi$ )	$Bq \cdot m^{-3}$
	$\chi = Q_N \cdot F$ [Fは平衡ファクタ]	
	Rn $\chi^R = (0.0278 Q_A^R + 0.138 Q_B^R + 0.101 Q_C^R) / 0.267$	
	Tn $\chi^T = (3.32 Q_B^T + 0.315 Q_C^T) / 3.64$	
	ワーキングレベル ( $\omega$ )	WL
	Rn $\omega^R = (0.0278 Q_A^R + 0.138 Q_B^R + 0.101 Q_C^R) \times 10^{-3}$ $= 0.267 \times 10^{-3} \chi$	
	Tn $\omega^T = (3.32 Q_B^T + 0.315 Q_C^T) \times 10^{-3}$ $= 3.64 \times 10^{-3} \chi$	
	ポテンシャルアルファエネルギー濃度 ( $C_J, C_M$ )	
	$C_J = 2.08 \times 10^{-5} \omega$	$J \cdot m^{-3}$
	$C_M = 1.3 \times 10^8 \omega$	$MeV \cdot m^{-3}$
照射量/暴露量	積算濃度 ( $\bar{\chi}$ )	$Bq \cdot h \cdot m^{-3}$
	ワーキングレベルマンス ( $\bar{\omega}$ )	WLM
	$IWLM = 170 WL \cdot h$	
	積算ポテンシャルアルファエネルギー濃度 ( $\bar{C}_J, \bar{C}_M$ )	
	$\bar{C}_J = 3.54 \times 10^{-3} \bar{\omega}$ $\bar{C}_M = 2.2 \times 10^7 \bar{\omega}$	$J \cdot h \cdot m^{-3}$ $MeV \cdot h \cdot m^{-3}$

第3表 ラドン濃度の測定法の概要と検出限界。

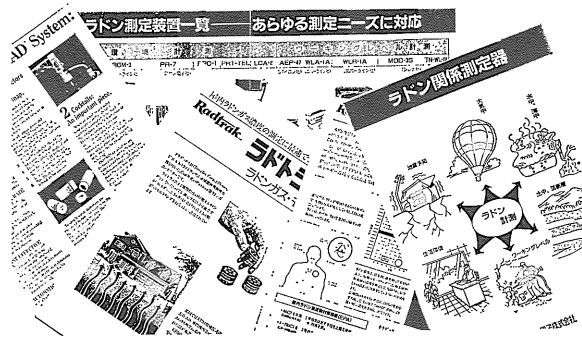
測定法	概 要 と 特 徴	検出限度/ $Bq \cdot m^{-3}$
〔アクティブ法〕		
電離箱法	電離箱に封入し、電離電流を測定。古典的だが簡便で高精度。安定性もよい。	40
通気式電離箱法	電離箱に通気しながら測定。簡便で安定している。実時間での測定が可能。	1
網電極電離箱法	電離箱内に網型の電極を配してパルス測定を行う。	18.5
シンチレーションセル法	壁に ZnS (Ag) が塗布されており、光電子増倍管で検出。使用が簡単。	40
2段フィルター法	前段のフィルターで娘核種を除去し後段で容器内で生じた娘核種を捕集・計測。	0.1
通気式静電捕集法	静電場を用い、帯電した娘核種を捕集し、ZnS (Ag) シンチレータで $\alpha$ 線計測。	0.5
液体シンチレータ法	有機液体シンチレータにバブリングによって溶かし込み、そのまま液シン・カウンタで計測。	3
活性炭法	冷却した活性炭で捕集した後、脱着して計測。操作が煩雑で捕集効率に要注意。	0.05
〔パッシブ法〕		
Bare 法	固体飛跡検出器* を空气中に吊し、 $\alpha$ 線のトラックを検出。	~10
カップ法	固体飛跡検出器* をカップの底に配し、口にフィルターを取り付ける。	~10
静電捕集法	帯電成分を電極に濃縮・捕集して、固体飛跡検出器* で検出。	~1
TLD法	静電捕集された核種により、TLD素子が被曝。素子は再利用可能だが、効率が湿度に依存。	~5
活性炭法	活性炭に吸着させ、娘核種からの $\gamma$ 線を計測。簡便だが、湿度の影響を受ける。	~10

\*: PC (Polycarbonate), CN (Cellulose Nitrate), CR-39 (Allyl Diglycol Carbonate)

間報告で全国の平均値が一方のグループは $28Bq/m^3$ 、他方は $10Bq/m^3$ と大きな隔りがある状況であり(朝日新聞 1988年10月12日付夕刊, 1990年7月15日付日曜版等), 屋内・外のラドン濃度について全国をカバーするようなデータ 1991年10月号

タは未だに出ていない。

このような統一的なデータを出す上で、計器の校正は重要な問題である。現在、京大原子炉実験所等が中心となって同一の場所で測定してデータを出す比較共同研究



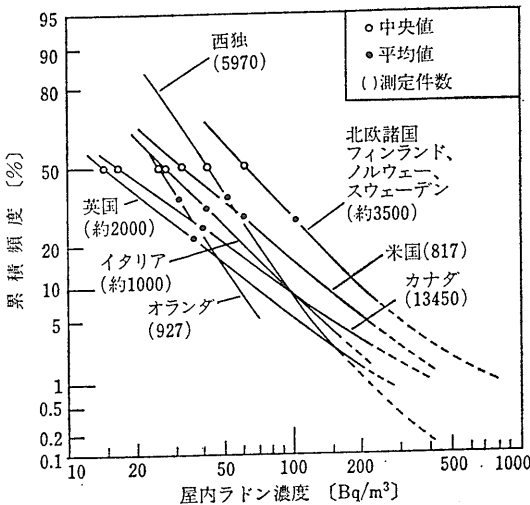
第10図 環境問題がクローズアップされて、市販されるようになったラドン測定器の広告例。

宅からコンクリート等の無機系の建築材料を使用した住宅に変わり、また、アルミサッシ等で住宅の機密性が良くなり空調設備が整って、自然換気や窓を開放することが著しく減少してきたためである。

欧米では、地下室がよく利用されることも一因である。空気中のラドン濃度が実際私達の周りでもどう変化しているのか、試しに測定してみたところ、当所の8階の部屋よりも地下室での濃度が高く、屋外では地面直上は8階のベランダより高濃度であることが示された(金井・阿部, 1990)。また、建築研究所ではモデル家屋を造り、生活活動に伴うラドン濃度の変化や速度を調べているが、地下室に開けられた穴が大きな進入口となっている。

日本ではそれほどでないが、外国では建材としてウラン濃度の高い石や土を使用していることも一つの問題点である。不燃建材としてよく使用される石膏ボードは、原料として磷酸石膏・天然の石膏・脱硫石膏等が使用されるが、磷酸石膏は原料物質の一つである磷鉱石中にしばしばウランが濃集していることから一般にラジウムの含有量が極めて高く、製品の放射能はこれらの材料に由来する。最近ではラジウムの少ない製品が製造されるようになり、伊藤・浅野(1987)によると昭和56~60年に製造された製品は10年前の1/10以下のラジウム濃度になっているという。

また、珍しい例では、家事に用いられる天然ガスや井戸水からくる例もあるという。



第11図 海外諸国における屋内ラドン濃度の測定結果 (ICRP Publ. 50 Fig. 2: 岩崎・小林 (1987) による)。ラドン濃度と頻度とは対数正規分布をしている。

が行われており、ようやく各グループのデータが比較検討可能となってきた(1987年の共同研究では13機関の参加があったという)。しかし、手法は多様で JIS のような基準測定法の制定・利用とまでには至っていない。今後、操作の簡便性・精度・安定性等の優れた基準測定法の確立が望まれている。

### 7. ラドンの起源

ラドンはラジウムから生じるので、屋内ラドン濃度が高くなるのはラジウムが存在、もしくはその元となるウランが存在するためであるが、大地に元々存在していた親核種を起源と考えれば昔から一定水準の濃度であったはずである。それが改めて近年問題となってきたのは、住宅構造が変わってきたためである。すなわち、木造住

### 8. 住宅でラドンに対処する方法

ラドンによる環境汚染が問題となってから、6.で示した諸外国で全国調査が行われ、さらにラドン濃度を規制すべく対策レベル・天井値などが制定されている(第4表)。一方、わが国ではこうした規制は未だ行われていないが、全国調査の一部では、アメリカでの規制値をはるかに超えるところもあるという。早急な全国調査とそれに基づいた対応策が望まれるところであるが、ここでは住宅におけるラドンの対処法を幾つか紹介しよう。

- (1) 室内にいるときは、全ての窓を開け、ファンを回して空気の流れを盛んにする。
- (2) 地下室のような高ラドン濃度区域へ立ち入るときには特に重要で、かつまた、その立ち入り時間を最小限にするよう努める。
- (3) 床下に空間があれば、一年中四方八方に開けておき、床下からの進入を防ぐ。
- (4) 喫煙を止め、特に室内での喫煙を慎む。そうすることで、同居者全員の肺癌になる危険性を減少することができる。



第4表 各国における対策レベルと天井値 (黒沢 (1988) による).

国 別	対策レベル EEC-Rn, Bq/m <sup>3</sup>	天 井 値 EEC-Rn, Bq/m <sup>3</sup>
カナダ	—	75
フィンランド	360	70
ポーランド	—	20
スウェーデン	400	70
英 国	200	50
米 国	150	100
ソ 連	—	70
ICRP	~200	100 ( : 10mSv/年)

(天井値: 将来はこの値内におさめるべきだと考えられるレベル)

- (5) これから住宅を建設しようとする場合には、ラジウムを多く含む建材を使用しない。
- (6) また、床下から直接湧き出るラドンを防ぐため、床下の土壌が露出しないようコンクリートや樹脂フィルムで覆う。

これらは簡単にできるものもあれば、費用の負担増や省エネルギーとならないものもあってそう簡単ではないが、できるものから取り組むことが大切であろう。

### 9. ラドンと温泉

ラドンと温泉との関わりは古くてしかも深い。それはラドンが大地から生まれ、温泉も大地から湧き出るからであろう。日本鉱泉誌 (1954) によると、「鉱泉」とは地中から湧出する泉水で、多量の固形物質またはガス状物質、もしくは特殊の物質を含むかあるいは泉温が源泉周

囲の年平均気温より常に著しく高温を有するものをいう、と定義されており、25℃以上を「温泉」としている。ラドン・ラジウムから定義される鉱泉は、ラドンに関して1リットル中に  $20 \times 10^{-10}$  キュリー以上であるか、ラジウムを  $1 \times 10^{-8}$  ミリグラム以上含有するものである。さらに、1リットル中に  $30 \times 10^{-10}$  キュリーのラドンを含むか、または  $1 \times 10^{-10}$  グラム以上のラジウムを含むものを「放射能泉」としている (最近では、「放射能泉」に関するラジウムの規定が外され、ラドンに換算することになっている)。

多くの場合、放射能泉の示す放射能は溶存するラドンによるものである。世界においてラドン濃度の高い温泉を第5表に示したが、日本では山梨県の増富温泉が有名である。ここはラドンのみならずラジウムも高濃度である。温泉地のバス停には、高濃度ラドン・ラジウム発見の看板が立っている (写真1)。また、著者が調査に行ったときにはちょうど「キュリー広場」の旗がたくさん立てかけられており、放射能泉というある種の温泉気分を一層引き立てていた。

ラドン濃度の高い温泉・鉱泉は各地に分布しており、これらは主として、基盤の花崗岩に由来すると考えられている。福島県東部地域の湧水を調査した結果 (金井・阿部 (1990)) では、花崗岩に関連する湧水 (G) は、結晶片岩 (S)・第三紀層 (T)・火山岩屑 (V) 等のものよりもラドン濃度が高いことが示されている (第12図)。また、杉原 (1968) は日本鉱泉誌 (1954) に記載された61の温泉群の平均ラドン量と平均ラジウム量との関係を調べ、両者の間に正の相関を認めている。一般に、温泉中のラドン量はラジウムの平衡量よりも多く、ラドンの気体としての特質・放出率などに強い関心が払われている

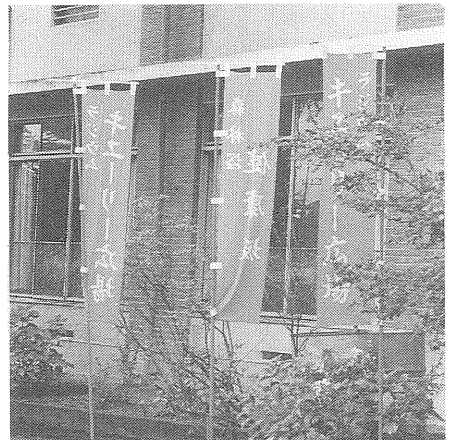
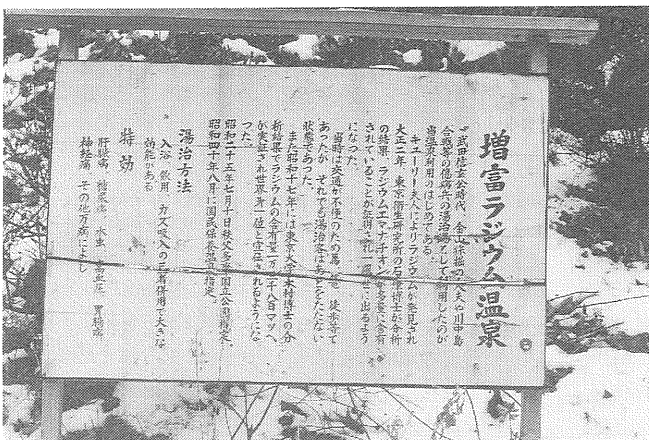


写真1 世界でも有数の高ラドン濃度鉱泉の山梨県増富鉱泉。バス停の所に温泉の由来を示す看板がある。また、ラジウムを発見したキュリーにちなんで「キュリー広場」の旗がたなびいていた。

第5表 世界における高ラドン濃度温泉 (御船 (1984) に加筆).

温 泉 地	源 泉	国	泉 温 (°C)	ラドン (nCi/l)
Oberschlema	Hindenburg*	ド イ ツ	—	4,909
増 富 (山 梨)	No. A-9*	日 本	14.5	3,365
増 富	No. 49	日 本	22.0	3,356
池 田 (島 根)	No. 8	日 本	15.0	1,574
Lurisia		イタリヤ	10.0	1,146
Oberschlema	Bismark	ド イ ツ	—	1,091
Lacco Ameno	Sorgenta Santa Restituta	イタリヤ	59.7	1,019
池 田	No. A-9	日 本	16.0	1,000
Brambach	Witten	ド イ ツ	—	825
Joachimstal	Gruben	チェコスロバキヤ	—	745
増 富	No. A-8	日 本	—	713
池 田	No. 2	日 本	—	538
増 富	上河原 (下の湯)	日 本	19.0	488
Lacco Ameno	Fonte Greca	イタリヤ	60	452
Therma	Artemis	ギリシア	50.4	274
三 朝 (鳥 取)	松原の井水*	日 本	24.0	269
三 朝	ひすいの湯*	日 本	42.6	255
増 富	上の湯	日 本	12.6	241
増 富	栗平 No. 1	日 本	19.0	232
Volde Marillo		スペイン	—	218
Therma	Apollo	ギリシア	45.4	203
Pytigorsk	Mt. Betan	ソ 連	10—11	180
増 富	大 柴	日 本	23.2	132
増 富	栗 原 No. 3	日 本	19.4	129
Kammena Vourla	Metaxa	ギリシア	38.1	127
Therma	Moustafa lintza	ギリシア	43.0	127
Merano		イタリヤ	5.0	125
Gastein	Fledermaus	オーストリア	36.6	124
増 富	丹生沢	日 本	23.5	120
Salenosiswortsope		ブルガリア	—	113
増 富	栗 平 No. 1	日 本	20.0	111
Kammena Vourla	Papastoatoy	ギリシア	41.4	102
Lacco Ameno	Romana	イタリヤ	60	99
三 朝	郡是 鶯の湯	日 本	42.6	92
Therma	Kratsa	ギリシア	46.8	87
恵 那 (岐 阜)		日 本	10.0	81
柿 の 木 (島 根)	No. 2-A	日 本	22.2	74
三 朝	山田区共同湯	日 本	65.0	64
Gastein	Mesil	オーストリア	37.0	59
Gastein	Sophien	オーストリア	38.1	59
Gastein	Mitteregg	オーストリア	31.0	55
Gastein	Reisacher	オーストリア	39.5	53
Gastein	Elisabeth	オーストリア	46.3	51

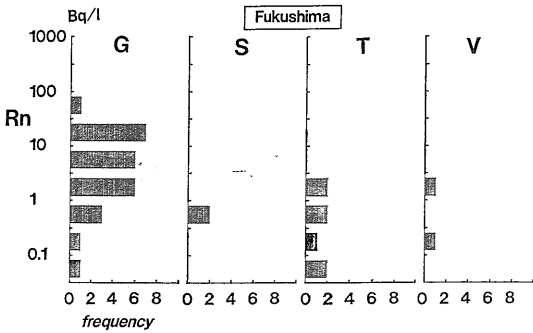
\*: 現存せず

(1 nCi·l<sup>-1</sup> = 37 Bq·l<sup>-1</sup>)

(第10節参照).

ところで、鉱泉は療養にも利用される。放射能泉の療養泉としての適応症は、日本鉱泉誌 (1954) によると浴用の場合、慢性関節リウマチ・慢性筋肉リウマチ・神経痛・神経炎・痛風・尿酸素質・尿酸結石・外傷性後遺症殊に癒痕による疼痛・創傷・動脈硬化症・慢性胃腸カタル・慢性胆道炎・貧血・老衰現象・慢性皮膚病等が挙げら

れ、禁忌症としては、発熱を伴う急性炎症性疾患・急性関節リウマチ・肺結核・重症の心臓病・腎臓病・精神病・脳溢血の傾向ある患者・出血中の胃潰瘍または十二指腸潰瘍等としている。一方、飲用としても慢性関節リウマチ・慢性筋肉リウマチ・神経痛・痛風・尿酸素質・尿酸結石殊に尿砂・神経痛・神経炎・慢性胃腸カタル・慢性胆道炎等に適応され、禁忌症には出血中の胃潰瘍または



第12図 福島県東部地域における湧水中のラドン濃度。G・S・T・Vはそれぞれ花崗岩・結晶片岩・第三紀層・火山岩層の地質と関連した湧水を示している。

十二指腸潰瘍・肺結核・心臓性及び腎臓性浮腫等がある。また、吸入療法もあり、慢性関節リウマチ・慢性筋肉リウマチ・痛風・神経痛・気管支カタル・偏頭痛によいとされている。

ソ連では天然ラドン泉による治療の他に、人工のラドン泉を積極的に療養に使用しており、そこでは患者が医師による診断を受け、治療に必要な温泉や気候・サナトリウムなどが選択されるという(北川, 1981)。わが国でも飲用に供したり、また、人工ラドン温泉として個室を作るところもある(写真2参照)。ちなみに、生涯にわたって毎日2リットルの水を飲み続けるとして、WHOが飲用水基準として勧告しているラジウム濃度は4pCi/l (=148 mBq/l)であり、放射線障害防止法による排気中ラドン濃度限度は  $9 \times 10^{-6} \text{Bq/cm}^3$  (=9Bq/m<sup>3</sup>=9mBq/l)、ラジウム濃度限度が  $5 \times 10^{-8} \text{Bq/cm}^3$  (=0.05Bq/m<sup>3</sup>=0.05 mBq/l)で、排水中のラジウム濃度限度を  $3 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$  (=300 Bq/m<sup>3</sup>=300 mBq/l)と規定している。

温泉医学の視点からラドンを眺めると、ラドンの体内滞留時間は短く、その生物学的半減期は10-30分程度であり、ラドン浴後3-4時間で生体内では殆ど0になるという(古野, 1979; 森永, 1974)。肺から、また、一部は皮膚から体内に入ったラドンは血液に入り、類脂質に富んだ器官に送られ、内分泌腺や神経組織などに作用し、細胞の代謝・酵素や他のタンパク質の生合成及びミトコンドリア内でのエネルギーの転換などの過程を刺激するものと考えられている(森永, 1989)。このような、ホルメシス(hormesis)といわれるプラスの刺激作用は、保健物理の国際誌である Health Phy-

sicsにも示されており、実験動物の成長と発育・白血病の発生減少・傷の治癒・修復機能の活性化等多数の実例を Luckey は報告し、Hickey は修復効果を考慮して、線量(D)と線量効果(E)との関係を  $E = a - bD + cD^2$  で示されるモデルを提案している(山県, 1985; 服部ほか, 1990)。

また、放射線の効果の疫学的調査として、異なるレベルの自然放射線に曝された集団の死亡率の比較も行われているが、各県単位や三朝温泉・増富温泉等の住民の調査では有意の差は認められていないという。御船(1981)は三朝温泉地の長年月在住者の末梢血液像を調べ、正常な日本人のそれと比べて格別な異常を認めておらず、また、北山・的場(1966)は、三朝の放射能泉利用住民に心電図異常所見が有意に少ない例を報告している。

しかし、実際にラドンが体によいのかについては、何ともいいがたい。断定的な結論は出せないとしながらも、三朝温泉地域住民の染色体型異常の頻度が関東・関西一般地域の住民よりも高いという報告もある(森永ほか, 1985)。環境問題のところで述べたように、たとえ微量でも放射線は有害である(ICRPによると確率的影響は  $E = b'D + c'D^2$  で示され、しきい値が無いとしている)という立場に立てば体に悪いし、「毒をもって毒を制す」「毒薬変じて薬となる」の立場に立てばそれなりの効果があるということになる。ただ、温泉の場合にはいろいろな複合作用があり、温熱・水・空気の湿度・転地の効果等も無視できないであろうから、単にラドンだけからは判断できない。



写真2 (左) コップが添えられて飲用に供される温泉水。はるばる遠方から車で来て、大きなポリタンクにこの水をくんでいく人もいる。(右) ラドンカプセルなる個室浴場。

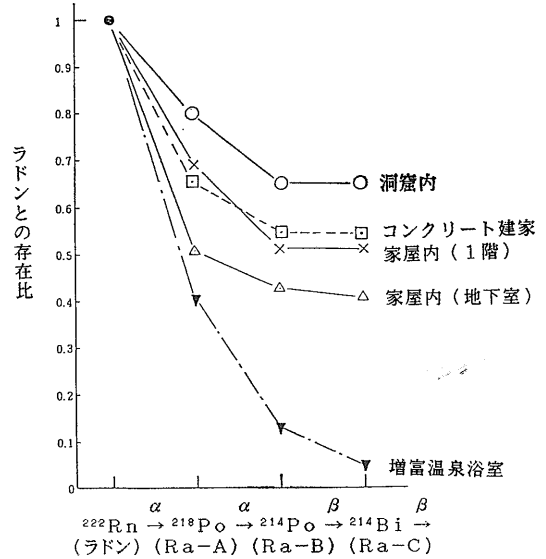
### 10. ラドンの地球化学

地球化学的にみたラドンの話題は多種多様で、著者のカバーできる範囲をはるかに越えているので、ここでは独断と偏見で選択した2、3の話題を紹介したい。

その一つは、ラドン娘核種の分布についてである。ラドン娘核種は半減期や化学的性質がいろいろ異なっており(第6図参照)、空気中ではエアロゾル等の浮遊粒子に付着したものや付着せずにそのまま(フリー成分)で存在するものもある。George (1972) はニューヨークの屋内外でのラドンとその娘核種の分布を調べている。国内でもそうした研究例があり、笠井(1988)の結果を第13図に示した。場所によって存在比が異なることは、ラドン濃度と平衡当量ラドン濃度の算出のファクターが異なることを意味し、線量評価の上で注意が必要となる。また、娘核種の放射非平衡はそれを規制する要因が何であるかを研究することで、大気地球化学での新しい知見を提供することが期待される。

ラドンは地表から出ているわけだが、その放出率がいろいろと測定されている。Barretto et al. (1972) は各種岩石からの放出率を求めている。土壌からの放出率の測定例も多く、Wilkening et al. (1972) は多くのデータをまとめている。それらは土壌の種類やその時の気象状況によって変動するが、 $0.2\text{--}52\text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲の値が報告されている。日本でも、石井ほか(1988)、堀内ほか(1990)らが都内や増富温泉、岐阜県東濃地域で測定し、 $1.5\text{--}106\text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  の値を報告している。Megumi and Mamuro (1974) は六甲山と生駒山の風化花崗岩土壌の粒度分けを行い、それぞれ41-290、13-56という値を出しているが、エマネーションパワー(=エマネーション率/(濃度×壊変定数))は粒度に依存しないことを報告している。これらのデータは自然界におけるラドンの挙動をモデル化する場合に重要なものであり、多くのデータの蓄積が望まれる。

さらに、放出のメカニズムを詳細に研究した例もある。 $\alpha$ 線放出核種が壊変するときに、壊変核種は反跳作用を受ける。ラドンもラジウムの $\alpha$ 壊変核種で、反跳を受けている。反跳を受けた原子は、結晶格子からの束縛が緩められて移動し易くなり、時として結晶表面から飛び出すことがある(反跳距離は数十nm程度と見積られる)。実際にKrishnaswami and Seidemann (1988) は、岩石や鉱物からのラドン及びアルゴンの放出量を調べ、一様にラジウムが分布すると仮定して粒子の表面積と反跳距離とから計算される反跳放出ラドン量よりもはるかに多いこと、並びにより大きな反跳効果のあるアルゴンに比べてラドンが多いこと等から、ラジウムが粒子の表面に不均



第13図 各種環境下におけるラドン娘核種の分布(笠井(1988)に加筆)。

質に分布していると推定している。また、 $\alpha$ 粒子によるエッチングで結晶格子に通りができ、その後の溶出を容易にしているメカニズムや微細な隙間を通路とするモデルも提案されている(Fleischer, 1982; Rama and Moore, 1984 等)。ラドンは気体であるため、拡散の効果も大きい。また、Semkow (1990) はラドンの放出を球形・円筒形・穴のある球形等の形状を仮定して、放出率のモデル化を試みている。しかし、ウラン鉱石や放射能泉のようなケースではかなり多量のラドンが放出されており、この多量のラドン放出の現象をうまく説明できるような単純なモデルはなく、今後の研究が期待されている。

### 11. 終わりに

ラドンは、今後とも人類と深く関わりあっていく核種であり、ないがしろにできないものである。近年、環境問題で騒がれて、海外では住宅での天井値や規制濃度が制定される段階まで来ているのに、わが国ではまだ十分な実態さえ把握されていない。今後、人間活動の広がりにつれて、地下道・トンネル・地下街の他、大深度地下空間の利用が開発されようとしているが、その際にはこうしたラドンの問題を考慮しなければならないだろう。また、個人住宅でも、地下室の建築に対する指針が示され実質的な許可が出された(読売新聞 1989年10月27日付朝刊)ため、さらに一般的な関心事となるであろう。いずれにしても十分な調査に基づいた行政的な規制が必要と考えられよう。

また、いままで主としてラドン（ウラン系列の  $^{222}\text{Rn}$ ）について述べてきたが、トリウム系列のトロン（ $^{220}\text{Rn}$ ）についても検討しなければならない。トロンによる影響はラドンの約 1/5 と見積られているが、調査数も少ないため今後の詳細な調査を待って、正しく評価されなければならない。今後の研究が期待される分野である。

ところで、このようにラドン・トロンが肺癌を引き起こす可能性があるからといって、ラドン・トロンに対していたずらに恐怖心だけで臨むのは、正しい態度とはいえない。ラドンもトロンも人間生活における様々な hazard の一部分であり、それら全てを含めた総合的な評価と制御・管理の対象として、正確な実状を把握する必要が大きいことはいうまでもない、そのための本格的な研究はまだスタートしたばかりだからである。

前にも述べたように、少なくとも特殊な労働環境の場合を除いては、ラドンやトロンによる現実の健康被害は大規模な長期にわたる疫学的調査によって、しかも多くの仮定のもとに初めて議論が可能となる程度のものである。普通の市民の日常生活において、ラドン・トロンからの被曝を完全にゼロにすることはまず無理なことであるし、逆に放射能泉浴の場合のように身体的・心理的側面を含めた総合的効果としてみるとプラスに働く場合も少なくないだろう。

ラドン・トロンに限らず一般の放射性物質に対していえることだが、当然のことながら無用の放射線は絶対に避けなければならない。放射線の利用にはそれなりの歴史があり（写真3参照）、そのメリットとそれによるデメリットとを総合的に判断して、対処することが肝要であろう。繰り返しになるが、ラドン・トロンは何処にでも在るものだし、将来においてもおそらく同様であろう。極端に敵対視するよりも、ラドン・トロンの特性、すなわち不活性ガスであり、しかも放射壊変の時計を持つ等の特性を認め、時間のパラメータを有する有効なトレーサとして利用することが、ラドンとの共存の道ではなからうか。こうした特異性を上手に活かすことで、科学の発展に大きく寄与できるものと考えている。

最後に、本稿をまとめるうえで当所地質標本館坂巻幸雄氏、並びに地殻化学部三田直樹氏から貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝申し上げる。また、読者諸兄が放射能・放射線に関して認識を新たにし、恐怖感よりも親しみを僅かながらでも感じて頂ければ幸いである。

#### 参 考 文 献

- 阿部史朗 (1982): わが国における自然の空間放射線分布の測定。保健物理, vol. 17, p. 169-193.  
Barretto, P. M. C., Clark, R. B. and Adams, J. A. S. (1972):



写真3 国内でのラジオアイソトープ利用 50 周年を記念した記念切手。図柄は、視覚的にとらえた放射線と RI 利用を開拓した仁科芳雄博士である。彼を讃え、彼の誕生日（生誕100周年）の1990年12月6日に発行された。

Physical characteristics of radon-222 emanation from rocks, soils and minerals: its relation to temperature and alpha dose. *The Natural Radiation Environment II*, p. 731-740.

Fleischer, R. L. (1982): Alpha-recoil damage and solution effects in minerals: uranium isotopic disequilibrium and radon release. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 46, p. 2191-2201.

古野勝志 (1979): 放射能泉水の応用と呼気中への radon の排出について。岡山大学温泉研究所報告, vol. 49, p. 1-6.

George, A. C. (1972): Indoor and outdoor measurements of natural radon and radon daughter decay products in New York city air. *The Natural Radiation Environment II*, p. 741-750.

服部 禎男・根本和泰・石田健二・御園生淳・菅沼浩敏・石井敬一郎・山岡聖典 (1990): 放射線ホルミシス。日本原子力学会誌, vol. 32, p. 688-696.

堀内公子・石井 忠・村上悠紀雄 (1990): 液体シンチレーションカウンターによるラドン逸散率の測定。1990年度日本地球化学会年会要旨集, p. 114.

石井 忠・堀内公子・村上悠紀雄 (1988): オープンバイアルダイナミック法による地表より放出されるラドン濃度の測定。第25回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p. 65.

伊藤和男・浅野賢二 (1987): 屋内ラドン濃度への建築材料の寄与。第15回放射環境セミナー「生活環境におけるラドン濃度とそのリスク」, p. 36-39.

岩崎民子・小林定喜 (1987): ICRP Publication 50 の概要紹介。Isotope News, 1987 (11), p. 22-27

金井 豊・阿部喜久男 (1990): 福島県東部における温泉・鉱泉中のウラン・ラジウム・ラドンについて。第202回地質調査所研究発表会。

- 笠井 篤 (1988): 居住環境中ラドン濃度と被曝線量に関する国内外研究の現状. 第 25 回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p. 210-218.
- 北川 宏 (1991): ソ連の放射能泉と人工ラドン泉. 温泉科学, vol. 31, p. 94-95.
- 厚生省大臣官房国立公園部編 (1954): 日本鉱泉誌. 青山書院, 東京, 785p.
- 北山 稔・嶋邦和 (1966): 循環系に及ぼす放射能泉の疫学的研究. II. 岡山大学温泉研究所報告, vol. 49, p. 1-6.
- Krishnaswami, S. and Seidemann, D. E. (1988): Comparative study of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ar}$  and  $^{37}\text{Ar}$  leakage from rocks and minerals: implications for the role of nanopores in gas transport through natural silicates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 52, p. 655-658.
- 黒沢龍平 (1988): 生活環境におけるラドン濃度とそのリスク. *Isotope News*, 1988 (3), p. 8-10.
- Megumi, K. and Mamuro, T. (1974): Emanation and exhalation of radon and thoron gases from soil particles. *J. Geophys. Res.*, vol. 79, p. 3357-3360.
- 御船政明 (1981): 放射能泉と三朝温泉. 温泉科学, vol. 31, p. 80-93.
- 御船政明 (1984): ギリシアの放射能泉について. 温泉工学会誌, vol. 19, p. 1-6.
- 森永 寛 (1974): 放射能泉の医学. 温泉科学, vol. 25, p. 45-54.
- 森永 寛・御船政明・古野勝志 (1985): 三朝温泉地の自然放射能と住民の末梢血染色体異常について. 岡山大学温泉研究所報告, vol. 56, p. 1-4.
- 森永 寛 (1989): 放射能温泉医学の歴史と現状. *Isotope News*, 1989 (3), p. 24-27.
- Rama and Moore, W. S. (1984): Mechanism of transport of U-Th series radioisotopes from solids into ground water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 48, p. 395-399.
- Semkow, T. M. (1990): Recoil-emanation theory applied to radon release from mineral grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 54, p. 425-440.
- 下 道国 (1986): ラドンによる肺線量. *Isotope News*, 1986 (10), p. 2-5.
- 下 道国・飯田孝夫 (1990): ラドン・トロンとその娘核種. 日本分析センター広報, No. 18, p. 12-29.
- 総理府内閣総理大臣官房広報室 (1988): 原子力に関する世論調査. 原子力委員会月報, vol. 33, p. 9-34.
- 杉原 健 (1968): 温泉の Ra 含量と Rn 含量との関係について. 温泉科学, vol. 19, p. 54-60.
- Wilkening, M. H., Clements, W. E. and Stanley, D. (1972): Radon 222 flux measurements in widely separated regions. *The Natural Radiation Environment II*, p. 717-730.
- 山県 登 (1985): 放射能と温泉. 温泉科学, vol. 35, p. 78-81.

KANAI Yutaka (1991): Environmental problem and geochemistry of radon.

<受付: 1990年11月28日>

## 中国の資源情報(2)

### 日中共同の淮南炭田劉庄炭鉱の探査に成果挙がる

<中国地質鉱産報>1991. 2. 25から

中国の煤田地質局と日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が共同し, 高分解地震探査と試錐探査を結合した方法を採用して淮南炭田の劉庄炭鉱を精査・探鉱し, それによって試錐探査作業量が類似炭鉱の場合よりも 125,000m 節約され, 探査・探鉱期間が7年に短縮され, 探鉱費が 1,000万円ほど節約されただけでなく, 中国もしくは世界の炭田探査史における幾つかの“初めて”が実現され, 中国における炭田の探査技術とその近代化が世界の歩みに乗り始めたといえる。

淮南炭田の劉庄炭鉱の精査・探鉱は, 中国の炭田地質事業における初の外国との共同精査・探鉱項目であった。この精査・探鉱事業はわずか5年の短い期間に 90 km<sup>2</sup> の炭鉱の範囲内に試錐井123#, …, 掘進延長 93,952 mを完了し, 地震探査測線の総延長は479km, 物理的測定点は19,629地点に達し, これらの結果は“精査地質報告”にまとめられて提出され, 工業鉱量11.5億 t の石炭が把

握されたとのことである (訳者注: “工業鉱量”とは, カテゴリー C<sub>1</sub> 以上の鉱量の合計, 1965年制定)。

今回の日中共同探査は, 喜ぶべき地質的成果と経済的効果をもたらしただけでなく, 中国で, 或は世界的にも炭田探鉱史上いくつかの“最初”を記録したのである。すなわち, 中国での炭田探鉱史上初めてデジタル地震計が使用されて, 広範囲の探鉱に適用され, また地震探査資料に対して中国で初めて特殊処理 (三次元断面処理など) が行われて, その効果は世界の先進諸国に比肩できる信頼度を備え, さらに地震探査法を用いて賦存深度 400m から 500m の主要可採炭層の位置, その炭層の炭丈の変化傾向, 落差 20m 以上の断層, 主採炭区では落差 15m 以上の断層, 地震断面では落差 8m の断層点を中国では初めて明らかにすることができたが, これは世界の先進諸国でも稀にしか見られない精度とのことである。そして, 地震探査深度 (1,000m 以浅) での定量的解釈の精度は誤差が中国では初の 1%台にまで下がった。

(岸本文男訳)