

平成 18 年 3 月

短 報

## 岐阜県の一温泉施設のラドン濃度と被曝線量試算

<sup>1</sup>藤田保健衛生大学衛生学部, <sup>2</sup>放射線医学総合研究所ラドン研究グループ

下 道國<sup>1</sup>, 小柳津東<sup>1</sup>, 床次眞司<sup>2</sup>, 北村香織<sup>1</sup>,

江尻和隆<sup>1</sup>, 南 一幸<sup>1</sup>

(平成 17 年 9 月 30 日受付, 平成 18 年 1 月 17 日受理)

## Radon Concentration in Air and Water and Tentative Dose Estimation in A Hot Spring Hotel of Gifu Prefecture

Michikuni SHIMO<sup>1</sup>, Shino OYAIZU<sup>1</sup>, Shinji TOKONAMI<sup>2</sup>, Kaori KITAMURA<sup>1</sup>,  
Kazutaka EJIRI<sup>1</sup> and Kazuyuki MINAMI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fujita Health University, School of Health Sciences

<sup>2</sup>Radon Research Group, National Institute of Radiological Sciences

### Abstract

Measurement of radon concentration in indoor air and in spring water and bath was performed in a hot-spring hotel to estimate the human dose due to radon decay products. Radon concentration was 30-75 Bq/m<sup>3</sup> for indoor air, 3500 Bq/L for spring water and 260 Bq/L for bath water. The tentative diurnal dose was estimated from calculation to become 5.3 μSv for staying person and 4.1 μSv for hotel stuff, respectively. The tentative annual dose was calculated from the diurnal dose to become 60 mSv for staying person and 2.8 mSv for hotel stuff, respectively. These estimated doses are about 2 times higher comparing with world mean dose due to natural radon. It is concluded that these values are able to be ignored for consideration of human health.

Key words : Hot-spring hotel, Radon concentration, Indoor air, Hot-spring water, Tentative dose estimation

キーワード : 温泉施設, ラドン濃度, 屋内空気, 温泉水, 線量試算

## 1. はじめに

人間はたえず自然放射線を浴びており、国連科学委員会（2001）はそれによる年間の世界平均被曝線量（実効線量）を2.4 mSvと見積もっている。それらは、宇宙線ならびに地面や建造物からでているガンマ線による外部被曝と、空気や食物を吸入・経口摂取することによりその中に微量に存在している放射性物質による内部被曝とに分けて評価される。内部被曝の主な要因である $^{222}\text{Rn}$ （ラドン）や $^{220}\text{Rn}$ （トロン）とその壊変生成核種は自然環境の到るところに存在し、自然放射線による被曝線量の半分以上を占めると同委員会は見積もっている。屋内におけるラドンやトロンの壊変生成核種による被曝は人間の習慣や行動に大きく依存するが、多数の人々が時間の多くを過ごすのは建物内であるから、屋内の放射線レベルを知ることは重要となる。

一般に、地下水や湧き水にはわずかながらラドンなど放射性物質が含まれている（地下水は1 lあたり10 Bq程度である（堀内，1992））。温泉水では、水1 lあたり $^{222}\text{Rn}$ 濃度が74 Bq以上か、 $^{226}\text{Ra}$ が1億分の1 mg以上含まれる場合に、温泉法で放射能泉と定められている。なお、この放射能泉は、地下の岩石中に含まれる $^{226}\text{Ra}$ が水中に溶け込んだ場合と、直接、 $^{222}\text{Rn}$ が地下水に含まれる場合がある。水中のラドンが空気中に出てきて、それを呼吸することにより人体が影響をうけることが考えられる。また、水を飲むことによって体内に取り込まれ、影響をうけることも考えられる。いずれにしても、地下水や温泉水に含まれる放射能が人体におよぼす影響が考えられるので、それによる被曝線量を評価しておくことは必要である。

本研究では、放射能温泉の宿泊施設の空气中ラドン濃度と温泉水中のラドン濃度を測定し、湯治客（長期利用者）や施設従業員のラドンによる被曝線量の概略を知ることを目的とした。測定をした施設は、岐阜県中津川市湯之島ラジウム鉱泉保養所（以下 ローソク温泉）である。なお、ここで試算する実効線量は、一施設のある時期でのラドン濃度に基づく値であるために当該施設の確定した値ではなく、また多くの温泉施設を代表するものでもない。

さらに、放射能泉やラドン温泉の放射能による治療や療養は、医師等の指導のもとに行われるものであり、それによる線量の評価はまったく別の観点、つまり医療の視点から行われるもので、小論の被曝線量評価とは全く異なる。

## 2. 測定と測定環境の状況

### 2.1 測定場所の状況と空气中ラドン濃度

施設内の食堂、脱衣所（男性・女性各1個）、客室2部屋の計5ヶ所で、空气中ラドン濃度を測定した。ラドン測定器（後述のラドポット）の配置場所をFig. 1に示した。食堂には受付もあるため、この5ヶ所の中で人の出入りが一番多いと思われる。また、食堂にはエアコンがついていなくて、10月30日の時点で窓が開かれており、したがって空気はよく換気されていたとみてよく、脱衣所も常に窓が開いていて扇風機も回っていた。客室にはエアコンが設置されているが、宿泊者によってはあまり換気をしない場合もあるようであった。なお、窓の開閉や換気状況は、宿泊客やその時折の状況によって異なることが十分考えられ、今回の測定状態が常態というわけではなく、また測定期間（9月下旬～12月上旬）中このような状況が持続したのでもない。

空气中ラドン濃度の測定は、季節変動を考慮すると少なくとも通年測定が望ましいが、考察で後述する理由もあって、測定者側の都合により10月および11月のほぼ2ヶ月とした。測定器にはラドン・トロン濃度測定器（名称：ラドポット）を用いた。測定器ならびに同法による放射線検出法の概要は付録1に記した。9月24日にラドポットを2個ずつ部屋等に設置し、10月31日（37日間

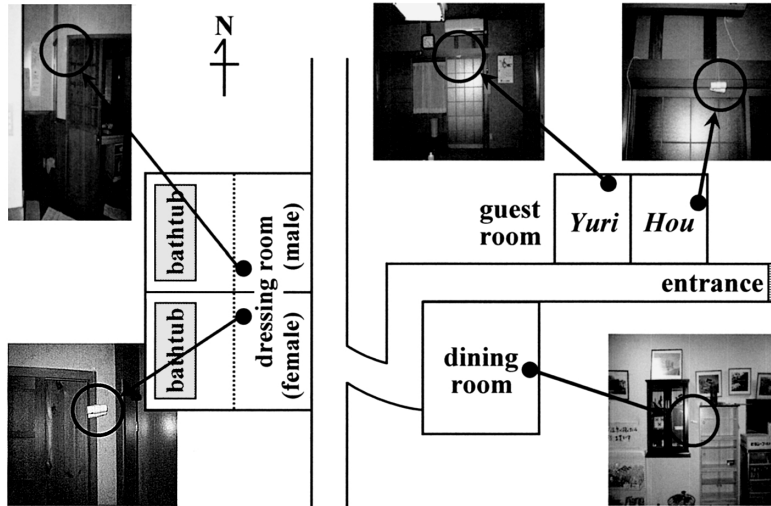


Fig. 1 Measuring room in air and setting position of Rn-Tn monitor.

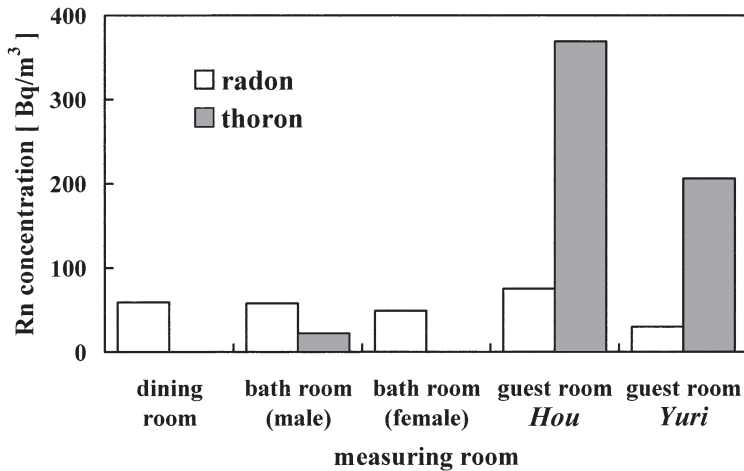


Fig. 2 Radon concentration in indoor air.

設置後に各部屋 1 個ずつ回収した。残る 1 個は 12 月 3 日 (70 日間設置後) に回収した。それぞれ回収後、直ちに放射線医学総合研究所で放射線の測定をした。このように設置時間を長くした理由は、空気中ラドン濃度が低い場合に 37 日では設置日数足りなくて測定下限以下となる場合に備えてのことである。結果的には 37 日設置でも日数は足りた。設置日数は異なっても、濃度への換算では計測値を設置日数で除去して求めているので、両者を一緒に扱い、その結果を Fig. 2 に示した。

## 2.2 温泉の状況と温泉水中ラドン濃度

源泉は、岩の間から湧き出したところに設置された密閉型コンクリート製タンクに蓄えられ、そこから 20 m 程度先でもう一度貯留槽に蓄えられた後、1 日 1 回定時に自動的に浴槽に給水される。男湯と女湯の浴室には、それぞれ 2 つの浴槽 (それぞれ 1 および 2 号泉) が設置されており、水中

Table 1 Radon concentration in spring water and bath water

Spring water & bath water	Rn in Bq/L	Ref. Spring water Rn in Bq/L
Spring water	3,500±37	4,700 (Aug 16, 95), 3,400 (Oct 25, 02) 3,900 (Apr 2, 03), 2,400 (Aug 23, 03) 3,900 (Sep 24, 03)
Water of bathtub for male 1	150±3	
Water of bathtub for male 2	8.9±0.7	
Water of bathtub for female 1	360±6	
Water of bathtub for female 2	14±0.8	
Mean of bathtub water	260±5	

ラドン濃度について2号泉は1号泉の約1/20に希釈されている。

採水日は平成15年10月30日で、源泉および浴槽（男湯1号泉、2号泉、女湯1号泉、2号泉）から水を採取した。源泉の採取時間は10月30日16時頃、男湯の採取時間は同30日20時頃、女湯の採取時間は同31日8時頃である。

水中ラドン濃度の測定には、トルエンベースの液シンを用いた液体シンチレーション法（付録2参照）を採用した。試料水は、男女それぞれ2箇所の浴槽、および源泉から採水し、各試料水について試料バイアルビンを3本ずつ作成し、大学に持ち帰って計測した。得られた濃度をTable 1に示した。なお、表中の誤差はバイアルビン試料のバラツキを示す。

### 3. 被曝線量の算定

#### 3.1 所在時間の配分

被曝線量の評価では、ローソク温泉に滞在している湯治客と施設従業員のそれぞれの所在場所における時間配分が必要である。そこで、それぞれの1日の主な時間の振り分けを推算した結果をFig. 3に示した。この推算は、著者らが湯治客と従業員の行動と状況を数日にわたり観察した上で判断したもので、全湯治客、従業員に対する綿密な行動調査によるものではない。従業員が湯治客よりも食堂にいる時間を長くしたのは、食事の支度やかたづけ、温泉の受付が食堂にあることなどに配慮した。また、脱衣所の滞在時間を長くしたのは、入浴後にお風呂の掃除をすると仮定しその時間を30分としたためである。なお、湯治客は1年間に3週間滞在し、従業員は1年間通して常在すると仮定した。

#### 3.2 被曝線量の算定

##### (1) 空気中ラドン吸入による被曝線量

空気中のラドンを吸入することによるある期間の被曝線量  $D$  [mSv] の評価式は、国連科学委員会報告によって次式で与えられる（下、2000）。

$$D = K \cdot T \cdot F \cdot Q \quad (1)$$

ただし、 $K$  は線量換算係数で  $9 \times 10^{-6}$  mSv/(Bq h/m<sup>3</sup>)、 $T$  はある場所でのある期間（たとえば、1日や1年など）の所在時間 [h] であって、所在する複数の場所に配分した時間である。 $F$  はラドン壊変生成核種のラドンに対するポテンシャルアルファエネルギーの比で、ここでは屋内の値として0.4を、屋外の値として0.5を採用した（国連科学委員会、2001）。 $Q$  は空気中のラドン濃度 [Bq/m<sup>3</sup>] で、年間平均的な被曝線量を算出する場合、年間の濃度変動状況を把握した上で代表値（平均値な

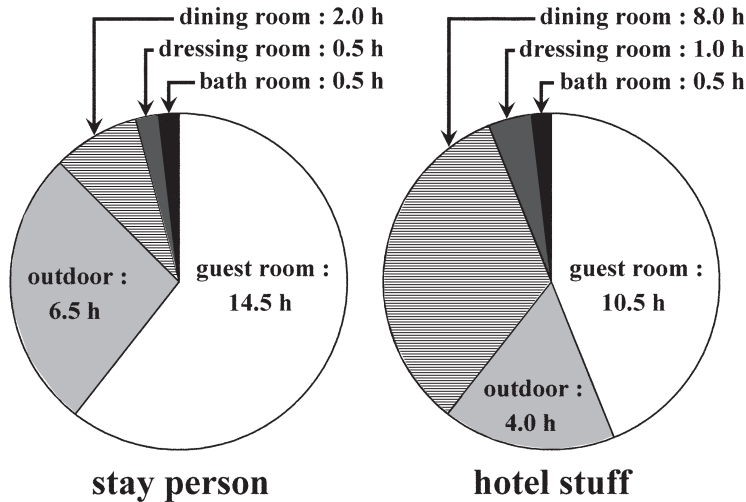


Fig. 3 Diurnal occupancy time, (a) Stay person, (b) Hotel staff.

ど)を使用すべきであるが、ここでは年間のデータがないため、秋季の実測値をそのまま使用した。

(2) 浴槽中のラドンの空気中への漏出による吸入被曝

ラドンが水中から空気に出てきて人体に影響を与えると考えたとき、空気中に出てきて寄与する割合をPとすると、それによるある期間の被曝線量  $D_a$  [mSv] は次式で計算される (BRER, 1999)。なお、D は式(1)で与えられる値である。

$$D_a = P \cdot D \tag{2}$$

文献では、水道水を家庭で使用したときにその中のラドンが室内に出て寄与する場合を対象としたもので、P は  $10^{-4}$  としている。ここでは湯殿内を対象としているため、この値は必ずしも適切ではないと思われるが、これに関するデータはないため、P は  $10^{-4}$  をそのまま使用することとした。

(3) ラドン水を飲用したときの経口摂取被曝

ラドン水を飲用したときのある期間 (通常は1年間) の被曝線量  $D_w$  [mSv] を評価する次式が提唱されている (BRER, 1999)。

$$D_w = K_w \cdot W \cdot Q_w \tag{3}$$

ただし  $K_w$  は飲用の場合の線量換算係数で  $3.5 \times 10^{-6}$  mSv/Bq, W はある期間 (1年間など) の水摂取量 [ $m^3/y$ ],  $Q_w$  飲用水中ラドン濃度 [ $Bq/m^3$ ] である。したがって、ここでは、1日に100 mL のラドン水を3週間だけ毎日飲むとすると、その総量2.1 Lがある期間 (たとえば、1年間に他の日は飲まないとした場合の1年) のWとなる。

(4) 総被曝線量

先に述べたラドン濃度および所在時間の配分をもとに、空気中ラドン吸入による被曝線量を(1)式から算出した。なお、浴室は、元来その場所にある空気中のラドン (脱衣室と同じ濃度とした) と温泉水から空気中に出てきたラドンがあり、被曝線量はそれら両方に依存する。したがって、元々その場所にある空気中ラドンによる被曝は(1)式で、浴槽中のラドンが空気中に出てきたことによる被曝については、浴槽中の濃度を用いて(2)式から求めた。また、湯治客は1日にコップ一杯 (180 mL) の源泉を滞在期間中毎日飲む (総量で3.8 L) と仮定し、それによる被曝を(3)式から推定したのは前述のとおりである。

なお、線量計算式はある期間の線量を算定する式となっているが、ここでは、同式の所在時間 T

には Fig. 3 に示した 1 日の配分時間を用いて 1 日の線量を求めた。また、年間の線量はこれに年間の所在時間を考慮して算出した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 空气中ラドン濃度の測定

ローソク温泉の屋内空气中ラドン濃度を、同期間中の本学衛生学部 5 号館のラドン濃度と比べると、5 号館の平均ラドン濃度は約  $9\text{Bq/m}^3$  であったのに対して、ローソク温泉の平均ラドン濃度は約  $54\text{Bq/m}^3$  と 5 号館の約 5.8 倍高かった。先述したように、今回の測定で得られた濃度は秋季の値であり、年間を代表する値ではない。ところで、わが国の屋内外ラドン濃度をまとめた報告 (下, 2000; 飯田, 2000) によると、秋季におけるラドン濃度は東海地方では年平均値に近く、かつ各月のラドン濃度は年平均値に対して屋内で 0.5~2 倍程度、屋外で 0.6~1.4 倍程度の幅に収まっている。したがって、今回得られた濃度も本施設の年平均値からそれほど外れていないと考えて大きな誤りはないと判断される。なお、今回は屋外空气中のラドン濃度を測定していないため、日本の屋外データをまとめた論文中の算術平均値をとって  $6.3\text{Bq/m}^3$  とした (古田, 2000)。

また、ローソク温泉の客室の 1 室はかなり高いトロン濃度が検出された。この原因として、客室の壁材が土であることからトリウムを多量に含んでいる (Yamasaki *et al.*, 1995) が考えられる。

### 4.2 各場所における空气中ラドン壊変生成核種に由来する被曝線量

濃度が同じでも湯治客、施設従業員の一日の生活パターンが違うため、それぞれの場所による被曝線量は違うことを考慮した。ただし、ラドン濃度は、部屋については 2 部屋の平均値を採用した。また、前述したように、浴室の濃度は脱衣室と同じとした。これらの結果を Table 2 にまとめた。空气中のラドン壊変生成核種だけによる 1 日の全被曝線量は、湯治客で  $5.3\mu\text{Sv}$ 、施設従業員は  $4.1\mu\text{Sv}$  となった。空气中ラドン壊変生成核種濃度の時間的・空間的変動がラドン濃度に追従すると考えると、前項の考察からその変動による幅は 0.5~2 倍程度と見積もられ、したがって被曝線量の幅も同程度と推定して、湯治客で  $2.7\sim 11\mu\text{Sv}$ 、施設従業員で  $2\sim 8.2\mu\text{Sv}$  程度の幅が見積もられる。

### 4.3 浴室における浴槽由来のラドンによる被曝線量

温泉水の交換は、男湯を採水した夜 8 時と、女湯を採水した翌朝 8 時までの夜間に自動的に行われている。したがって、相対的に朝は濃度が高く、夜は約半分まで下がると考えられ、浴槽内のラドン濃度が変動する。そこで、被曝線量計算では男湯 1 と女湯 1 のラドン濃度を平均した濃度  $260\text{Bq/L}$  を採用した。

浴槽から空气中に出たラドンを入浴中に吸入することによる被曝線量は、Table 3 に示したように、平均  $0.046\mu\text{Sv}$  と評価された。この数値は、Table 2 との比較から分かるように、これ以外に起因する被曝線量の 1/100 程度であり、ほとんど無視できる量である。

### 4.4 源泉のラドン濃度とその飲用による被曝線量

源泉のラドン濃度については、著者の一人が過去に数回測定しており、Table 1 にそれらの値を参考として示した。これによると、測定時期によって濃度が変わっており 6 回の測定でほぼ 2 倍の開き (今回の測定値に対しては 0.7~1.4 倍の開き) があるが、直近の測定値は 10% ほど高いに過ぎない。これらはすべて採水法ならびに測定法が同じであるから源泉の濃度の変化と推定される。一方、同施設の定期的測定では  $5,600\text{Bq/L}$  (2002 年 11 月 29 日 IM 泉効計による測定) とかなり高い

Table 2 Parameters and diurnal dose and total diurnal dose

(a) Stay person					
	Dose conversion factor [mSv/(Bq h m <sup>-3</sup> )]	Diurnal occupancy time [h]	F value [-]	Radon concentration in indoor air [Bq/m <sup>3</sup> ]	Diurnal dose [μSv]
Guest RM	9×10 <sup>-6</sup>	14.5	0.4	53±10	2.7±0.5
Dining RM	9×10 <sup>-6</sup>	2.0	0.4	59± 8	0.4±0.06
Dressing RM	9×10 <sup>-6</sup>	0.5	0.4	54± 9	1.0±0.2
Bath RM	9×10 <sup>-6</sup>	0.5	0.4	54± 9	1.0±0.2
Outdoor	9×10 <sup>-6</sup>	6.5	0.5	6.3	0.18
(sum)	9×10 <sup>-6</sup>	24	—	—	5.3±0.6
(b) Hotel staff					
	Dose conversion factor [mSv/(Bq h m <sup>-3</sup> )]	Diurnal occupancy time [h]	F value [-]	Radon concentration in indoor air [Bq/m <sup>3</sup> ]	Diurnal dose [μSv]
Guest RM	9×10 <sup>-6</sup>	10.5	0.4	53±10	2.0±0.4
Dining RM	9×10 <sup>-6</sup>	8.0	0.4	59± 8	1.7±0.2
Dressing RM	9×10 <sup>-6</sup>	1.0	0.4	54± 9	0.2±0.03
Bath RM	9×10 <sup>-6</sup>	0.5	0.4	54± 9	0.1±0.02
Outdoor	9×10 <sup>-6</sup>	4.0	0.5	6.3	0.11
(sum)	9×10 <sup>-6</sup>	24	—	—	4.1±0.4

Table 3 Diurnal dose due to radon emanated from bath water

Case	Radon content in bathtub [Bq/L]	Dose [μSv]	Remarks (values of factor in Eq. (1) and (2))
(1)	150	0.027	P=10 <sup>-4</sup> , K=9×10 <sup>-6</sup> , T=0.5, F=0.4
(2)	36	0.066	P=10 <sup>-4</sup> , K=9×10 <sup>-6</sup> , T=0.5, F=0.4
Mean of (1) and (2)	260	0.046	P=10 <sup>-4</sup> , K=9×10 <sup>-6</sup> , T=0.5, F=0.4

値となっているが、測定日の違いのほかに測定法も違っているため、源泉のラドン濃度に関する詳細な検討は別の機会にしたい。

1日にコップ一杯(180 mL)の源泉を飲んだときの1日の被曝線量は(3)式から2.2 μSvになった。したがって、源泉を飲用している湯治客にとっては、これがもっとも大きな被曝線量であることがわかる。前述のように、源泉濃度が0.7~1.4倍程度の変動があるとすると、飲用による被曝線量も同程度は見積もられ、1.5~3.1 μSvは十分にありうる。1年間に3週間滞在した場合、これによる年間の被曝線量は46 μSvとなる。したがって、この場合の被曝線量の変動による幅は32~64 μSv程度が見積もられる。

#### 4.5 総被曝線量

ローソク温泉で生活した場合の総被曝線量は、源泉を飲用する場合の湯治客で1日7.5 μSvとなった。前述したように、空気中ラドン濃度と源泉のラドン濃度にそれぞれの変動による幅を考慮

Table 4 Dose due to radon

	Stay person	Hotel stuff	Mean value in Japan
Diurnal dose	7.6 $\mu$ Sv	4.1 $\mu$ Sv	1.2 $\mu$ Sv
	Rn in air	5.4	
	Rn in water	0.046	
	Drinking	2.2	
Annual dose	0.6 mSv : 3 months stay		
	2.8 mSv : one year stay	1.5 mSv	0.43 mSv
Rn concentration in Japan			(used for upper column)
			Indoor : 15.6 Bq/m <sup>3</sup>
			Outdoor : 6.3 Bq/m <sup>3</sup>
Annual occupation time (UNSCEAR2001)			Indoor : 7000 h
			Outdoor : 1760 h

すると、両者は独立した事象とみなされるので $-86\% \sim +240\%$ （概数で $-90\% \sim +250\%$ ）の幅を見込めば大きくは違わないと思われる。また、線量への寄与の割合は、空气中ラドンの吸入による被曝が約70%、浴槽由来のラドンの吸入被曝は無視でき、源泉の飲用による被曝は約30%であった。源泉を飲用しない施設従業員では1日4.1 $\mu$ Svで、その幅は $-50\% \sim +200\%$ 程度と見積もられた。なお、当然ながら、総線量の評価では滞在時間の幅を加味すればさらに変動による幅は大きくなるが、ここではその指摘にとどめる。

1年間生活した場合に換算すると、滞在は3週間で、残りの期間を日本の平均的な値（0.43 mSv）（Sanada *et al.*, 1999）で過ごしたと仮定すると、0.57 mSv（0.16 mSv+0.41 mSv）となる。なお、湯治客が1年中この温泉に滞在して同じ生活を送ったとしても、1年間の被曝線量は2.8 mSvにとどまる。また、1年間滞在する施設従業員では1.5 mSvとなり、日本の平均値の3.5倍と評価されるが、これはこの施設のラドン濃度が日本の他の地域の家屋内と比べて高いことによる。これらをTable 4にまとめた。また、線量見積りの変動による幅は、1年の活動様態が変わらないとすると1日の値の幅と同じである。

これを全世界のラドンによる平均被曝線量（1.26 mSv）と比較すると、3週間滞在の湯治客では50%にも満たず、1年間滞在したとしても2.2倍に過ぎない。施設従業員では2割増し程度である。自然環境中のラドン濃度の時間変動幅と地域差が数倍程度はある（UNSCEAR, 2001）ことから全世界の平均値が大きな幅を持っていることなどを考慮すると、ここで試算した被曝線量はその変動幅に入ってしまう。また、今回使用したラドン濃度が通年の平均値でないことや、源泉濃度も変動すること（下, 2004）を考慮しても、被曝線量が大きく外れることは考えにくく、したがって被曝上は一般環境での被曝と同等と考えられ、同様に扱ってよいと判断される。

なお、湯治客がラドン療法として浴びる放射線量は全く別に評価され、ここでの被曝線量とは異なることは、前述したとおりである。

#### 4.6 トロンの影響

客室ではトロン濃度の高い部屋があったため、トロンの影響についても評価した。線量計算式は(1)を使用した。線量換算係数が異なり、 $32 \times 10^{-6}$  mSv/(Bq h/m<sup>3</sup>)（国連科学委員会, 2001）を用いた。トロン濃度は濃度の高いほう（370 Bq/m<sup>3</sup>）をとり、部屋の滞在時間とF値は同じ数値を取って算定すると、1日の被曝線量は69 $\mu$ Svとなった。この数値はラドンによる被曝線量7.6 $\mu$ Svより



高い。しかし、トロンの F 値については 0.4 (米原ら, 1995 ; Tokonami *et al.*, 2004) よりかなり小さいと推定されることから過大評価の可能性が高く, 慎重に取り扱われなければならない。また, トロン濃度とその壊変生成物の濃度はラドンに比べて空間濃度分布の差が大きいこと (米原) が知られており, またその挙動については不明で未解明な点も多いため, 正確な評価は今後の課題である。

## 5. 結 語

放射能泉として名高い岐阜県中津川市湯之島ラジウム鉱泉保養所 (ローソク温泉) でラドン濃度を測定した。秋季における施設の空气中濃度は  $30 \sim 75 \text{ Bq/m}^3$ , 温泉の源泉水濃度は  $3,500 \text{ Bq/L}$ , 湯殿の平均的濃度は  $280 \text{ Bq/L}$  であった。湯治客の 1 日の被曝線量は  $5.3 \mu\text{Sv}$  と見積もられた。また, 湯治客が 3 週間滞在し, 残りの期間は通常の環境で生活した場合の 1 年間の被曝線量を概算したところ,  $0.60 \text{ mSv}$  となった。また, 1 年間を通してここに滞在したとすると  $2.8 \text{ mSv}$  である。施設従業員の場合, 1 日の被曝線量は  $4.1 \mu\text{Sv}$  と見積もられた。また, ここで 1 年間生活する場合  $1.50 \text{ mSv}$  となった。また, 空气中ラドン濃度と源泉のラドン濃度に変動幅を考慮すると, 源泉を飲用する湯治客ではおよそ  $-90\% \sim +250\%$  程度の幅が見積もられ, 飲用しない従業員では  $-50\% + 200\%$  程度の幅が見積もられた。

湯治客の被曝線量を全世界のラドンによる平均被曝線量 ( $1.26 \text{ mSv}$ ) と比較すると, 3 週間の滞在では世界平均より低く, 通年滞在したとしても 2.2 倍であり, 施設従業員については 1.3 倍と若干高めに評価された。ラドンの低い日本の年間平均線量  $0.43 \text{ mSv}$  と比べても, それぞれ 1.4 倍, 6.5 倍, 3.5 倍である。したがって, 高い場合でも全世界平均の 2 倍程度であり, さらに自然環境中のラドンの時間変動幅と地域差が数倍程度はあることを考慮するとそれらの変動幅に入ってしまうために, 健康上は一般環境中のラドンによる影響と大差ないと推定されることがわかった。

なお, ここで試算した実効線量は, 一施設のある時期でのラドン濃度に基づく値であるために当該施設を代表するものではなく, また他の多くの温泉施設を代表するものではない。したがって, 放射能泉とその施設等における厳密な線量評価や個々の放射能泉の実効線量については, 今後の詳しい調査に待つべきである。

## 参考文献

Board on Radiation Effects Research (BRER ; 1999) : Risk Assessment of Radon in Drinking Water, CLS/NRC Report, National academy Press.

古田定昭 (2000) : 屋外のラドン濃度—人形峠を中心として, 下・山田編, 放医研環境セミナーシリーズ, No. 27, 54-63.

堀内公子 (1992) : 地球化学におけるラドン, 環境ラドン, 下・辻本編, 電子科学研究所.

飯田孝夫 (2000) : 屋外ラドン濃度, ラドンの人体への影響評価専門委員会報告書, 日本保健物理学会, 20-29.

国連科学委員会 (UNSCEAR ; 2001) : 放射線の線源と影響, 原子放射線の影響に関する国連科学委員会の総会に対する 2000 年報告書, 放射線医学総合研究所.

Sanada, T., Fujimoto, K., Miyano, K., Doi, M., Tokonami, S., Uesugi, M. and Takata, Y. (1999) : Measurement of Nationwide Indoor Radon Concentration in Japan, *J. Env. Radioact.*, **45**, 129-137.

下 道國 (2000) : 屋内ラドン濃度, ラドンの人体への影響評価専門委員会報告書, 日本保健物理学会, 12-19.

- 下 道國 (2000) : 線量評価法, ラドン・その人間への影響まで, 下・山田編, 放医研環境セミナーシリーズ, No. 27, 118-123.
- Shimo, M., Sugino, M. and Hatano, H. (2003) : Measurements of Radon Concentration in Water of Campus, Dormitory and Student Home in South area of Gifu Prefecture and Northwest area of Aichi Prefecture, *J. Journ Health Phys.* **38** (3), 261-266.
- 下 道國, 北村香織, 小柳津 東, 江尻和隆, 南 一幸 (2004) : 水中ラドン測定法に関する若干の検討と実測例, *Proc. 5<sup>th</sup> Workshop on Environmental Radioactivity*, Ed. Miura T., 86-93.
- Tokonami, S., Zhuo, W., Ryuo, H., Yonehara, H., Yamada, Y. and Shimo, M. (2003) : Instrument Performance of A Radon Measuring System with The Alpha Track Detection Technique, *Radiat. Prot. Dosim.* **103**, 69-72.
- Tokonami, S., Sun, Q., Akiba, S., Zhuo, W., Furukawa, M., Ishikawa, T., Hou, C., Zhang, S., Narazaki, Y., Ohji, B., Yonehara, H. and Yamada, Y. (2004) : Radon and Thoron Exposure for Cave Residents in Shanxi and Shaanxi Provinces, *Radiat. Res.*, **162**, 390-396.
- Yamasaki, T., Guo, Q. and Iida, T. (1995) : Distributions of thoron Progeny Concentration in Dwelling, *Radiat. Prot. Dosim.* **59**, 135-140.
- 米原英典, 馬 吉増, 青山 喬 (1995) : 屋内トロン娘核種濃度とその特徴, 下・辻本編, KURRI-TR-417, 75-91.
- Zhuo, W., Tokonami, S., Yonehara, H. and Yamada, Y. (2002) : A Simple Passive Monitor for Integrating Measurements of Indoor Thoron Concentration, *Rev. Sci. Instrum.*, **73** (8), 2877-2881.

### 付録1 ラドボットの構造と測定法

ラドボットは, ラドン<sup>222</sup>Rn とトロン<sup>220</sup>Rn の両方を識別しながら同時に測定できる市販の測定器である. その原理と諸特性は床次らによって詳細に報告されている (Zhuo *et al.*, 2002 ; Tokonami *et al.*, 2003) ので, ここではその原理を簡単に述べるに留める.

ラドン・トロンガスが入ってくる容器 (暴露容器) はラドンモニタとトロンモニタと称するモニタが一對となって, 測定器を構成している. それぞれ円筒状 (直径 35 mm, 高さ 55 mm, 体積 110 cm<sup>3</sup>, 重さ 20 g) のプラスチック製で, 二つは向かい合って両面テープで固定されている. それぞれのモニタ内部には, CR39 検出器が設置されており, ラドン・トロンと内部で生成された壊変生成物による  $\alpha$  線が検出器に当たり飛跡をつける. ラドンモニタは, 外部と空気交換のための穴がなく, わずかな隙間からラドンが入る構造であるが, そのために換気率が悪く, 半減期が約 55 秒と短いトロンはラドンモニタでは検出されない. トロンモニタは壁に直径 12 mm の 4 つの孔が均等に配置されており, 自然換気による空気の通気は良い. 孔は, セルローズ・ファイバ・フィルタで外部と隔てられている. フィルタによって微粒子のラドン, トロンの子孫核種がボットに入るのを防ぎつつ, 内部はラドンとトロンと, 内部で生まれたそれらの短寿命子孫核種の間の放射平衡を成立させる. このような構造上, 空気中のラドンとトロンは拡散によって容器内部に侵入し, ラドンモニタではラドンのみを, トロンモニタではラドンとトロンを検出する.

CR39 につけられた微小な飛跡は, 水酸化ナトリウムで 6 時間, 90°C で化学エッチングして, 飛跡部分を直径 10  $\mu$ m 程度の円錐形のピット (エッチピット) に成長させ, 光学顕微鏡で観察する. 実際には, エッチングした CR39 を読み取り装置に入れ, 50 mm<sup>2</sup> ずつパソコンに映し出して数を数えている.

計数値から濃度を求める式は, 次のとおりである.

$$Q_{Rn} = \{CF_{Tn2}(N_{Rn} - B) - CF_{Tn1}(N_{Tn} - B)\} / T(CF_{Rn1} \cdot CF_{Tn2} - CF_{Tn1} \cdot CF_{Rn2})$$

$$Q_{Tn} = \{CF_{Rn2}(N_{Rn} - B) - CF_{Rn1}(N_{Tn} - B)\} / T(CF_{Tn1} \cdot CF_{Rn2} - CF_{Rn1} \cdot CF_{Tn2})$$

(A-1, A-2)

ただし,  $N_{Rn}$ : ラドンモニタのトラック密度 tracks/cm<sup>2</sup>

$N_{Tn}$ : トロンモニタのトラック密度 tracks/cm<sup>2</sup>

$Q_{Rn}$ : 設置期間中の平均ラドン濃度 kBq/m<sup>3</sup>

$Q_{Tn}$ : 設置期間中の平均トロン濃度 kBq/m<sup>3</sup>

$CF_{Rn1}$ : ラドンモニタのラドン濃度換算係数 tracks/cm<sup>2</sup>/(kBq/m<sup>3</sup> h)=2.2

$CF_{Tn1}$ : トロンモニタのトロン濃度換算係数 tracks/cm<sup>2</sup>/(kBq/m<sup>3</sup> h)=0.1

$CF_{Rn2}$ : ラドンモニタのラドン濃度換算係数 tracks/cm<sup>2</sup>/(kBq/m<sup>3</sup> h)=2.2

$CF_{Tn2}$ : トロンモニタのトロン濃度換算係数 tracks/cm<sup>2</sup>/(kBq/m<sup>3</sup> h)=1.3

T: 設置期間 h

B: CR-39 のバックグラウンドトラック密度 tracks/cm<sup>2</sup>

である.

なお, 本稿でつけた誤差は, 計数の誤差だけである.

## 付録 2 本研究で用いた液体シンチレータ法

水中のラドンを測定する液体シンチレータ法には, 採水方法から考えると多様な方法があるが, 本研究では下ら (2003) による次の方法によった. 液体シンチレータは, トルエン (特級 500 mL) に DPO 2g, POPOP 50mg を入れて作成したカクテル (以下, カクテルと称する) である.

### (1) 源泉の採水

カクテル 3mL を入れたバイアル瓶にメスシリンダで計り取った源泉 17mL を入れて, きつく蓋をした. それを 200 回振とうした. なお, 源泉は採水容器一杯となるように絶えず水をそそぎ, それからサンプリングした.

### (2) 浴槽からの採水

カクテル 3mL を入れたバイアル瓶にメスシリンダで計り取った源泉 17mL を入れて, きつく蓋をした. それを 200 回振とうした. なお, 浴槽の下のほうの湯を湯桶一杯くみ取り, それからサンプリングした.

### (3) 放射能の測定

作成したバイアル瓶は大学に持ち帰って測定した. チャンネルは <sup>32</sup>P を選択し, 各シリンジ 5 分ずつ測定した. 濃度は次式より計算した.

### (4) <sup>222</sup>Rn 濃度計算式

試料水中の <sup>222</sup>Rn 濃度を Q [Bq] とすると, Q は次式で表すことが出来る.

$$Q = C \cdot f / (5 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot T) = 0.0062 \cdot C \cdot f \quad (A-3)$$

ただし, C: 5 分間カウント値,  $\varepsilon$ : 計数効率, V: サンプル量 [l], T: 計測時間 [s], f: その他諸条件に関する較正係数であるが, ここでは他の正された装置との 2 次較正により 1.15 とした.

なお, 本稿でつけた誤差は, 採水時の計量誤差を 1% と見積もった以外は, 計数值誤差だけである.