

京都大学原子炉実験所
第26回学術講演会
報 文 集

1992年2月

京都大学原子炉実験所

(2) 活性炭受動型ラドンモニタの特性と応用

小出裕章 (京大原子炉)

Characteristics and Application of Passive Radon Monitor with Activated Charcoal

Hiroaki KOIDE

(Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka)

Radon(Rn-222) is one of natural radioactivities. Dose equivalent arisen from radon and its daughters is about half of that from all natural radioactivities. Besides, some human activities are increasing that seriously.

The characteristics of activated charcoal canisters are studied for the purpose of field monitoring of radon. Each canister contains 100 g charcoal. The amount of radon absorbed in the canister is determined by counting the γ rays from the daughter nuclides. Adsorption and retention characteristics for radon are determined with 2 parameters, exposure time and absorbed water weight. The lower limit of detection for radon concentration in the air is about 5 Bq/m³. For practical conditions this monitor yields results accurate to within $\pm 50\%$.

This monitor was used to measure the radon concentration in the air around the Ningyo pass where was the most famous uranium mine in Japan. The results are as followings.

Although 25 years have passed since the mine was shut down, radon is still spreading over the environment from mine entrances and tailings.

Especially at the mine entrances the radon concentration in the air is much higher than DAC.

1. はじめに

人類という生物種が最も多大な被曝を受けてきた天然の放射能はラドンとその娘核種であり、その寄与は天然放射線による被曝総量の5割に達すると考えられるようになってきた⁽¹⁾。ラドンは天然の放射能であるが故に地球上どこにでも存在し生物に被曝を与えている。その意味では、人工放射能よりもっと制御が難しい。その上、天然の放射能とはいえ、向き合い方如何によっては人為的に被曝量を増加させてしまう場合もある。たとえば近年、省エネルギーとの関連もあり建物の密閉性が向上させられてきたが、そのため一方では建築材料からしみ出してきたラドンが室内に閉じこめられて室内ラドン濃度が高くなり、居住者に無視しえない被曝を与えているのではないかと危惧されて

いる⁽²⁾。また、地底のウランを採掘することによってウラン鉱山労働者や周辺の住民に被害が生じてきたこともすでに知られている⁽³⁾。

ラドンとその娘核種の測定方法には様々なものがあり、目的に応じて選択できる。しかし、広範囲に存在する被曝源を調査するためには、何よりもまず以下の条件を満たす測定方法が必要である。すなわち安価であること、簡便であること、短期間の空気中濃度ではなく、むしろある程度の期間の平均的な空気中濃度が評価できることなどの条件である。そうした条件を満たす代表的な測定方法の一つに活性炭の希ガス吸着能を利用した受動型ラドンモニタがある。

しかし、活性炭受動型ラドンモニタは、曝露継続時間、環境の温度条件などによって、吸着しうるラドン量が異なる

るため、その特性をあらかじめ知っておかなければモニタとしての意味をなさない。そこで、原子炉実験所内で特性を調べる一連の実験を行った。本報では、その特性実験の結果を示すとともに、人形峠田ウラン鉱山周辺での実際の測定結果を示す。

II. 活性炭のラドン吸着特性と空気中濃度の評価方法

A. 使用した活性炭のニタ

使用した活性炭はラドン測定に実績があり、その特性データも数々報告されているツルミコール社製の TC-26S である⁽¹⁴⁾。

実際の測定では活性炭をプラスチック製容器（直径 93 mm、高さ 58 mm）にそれぞれ 100 g づつ詰め、モニタ用試料とした。TC-2GS は見掛けの密度が約 0.4 であり、100 g は約 250 cc に相当する。したがって容器に詰められた場合には、約 37 mm の厚さとなる。

モニタリングは、活性炭床へのラドンの捕集と、捕集したラドン（実際にはその娘核種）の測定という2段階で行う。測定にはリパースエレクトロード型N型Ge半導体検出器（相対効率 33.6 %, 半値幅 1.85 keV）を用い、ラドンと娘核種が放射平衡に達するのを待って、ラドン娘核種 Bi-214、Po-214 のγ線フォトリックを定量化することで行った。

図1に、代表的なスペクトルを示す。また、一度使用した活性炭は300℃の電気炉で3時間アニールすることで、完全にラドンを追い出すことができ、繰り返し再使用できることを確認した。

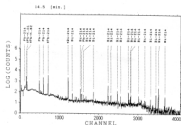


図1 Q_β検出器によるラドン検出器測定スペクトルの例

B. 活性炭によるラドン吸着の原理と

空气中濃度評価の方法

活性炭によるラドンの吸着はHenryの法則に従うとされている。すなわち、平衡状態においては

$$\frac{Q}{n} = k \cdot C \quad (1)$$

224

Q: 活性炭に吸着されるラドンの量 [Ra]

m: 活性度の重量 [g]

 k : 平衡吸附系数 $[\text{m}^3/\text{g}]$

C: 空气中ラドン濃度 [Bq/m³]

となる。kの値については、 2×10^{-2} から 6×10^{-2} 程度の値が報告されている⁽⁶⁾。本報で用いた活性炭モニタの場合、経時的にみたkの値は後に示すように、約 $2 \sim 4 \times 10^{-2}$ である。また、水分吸着による活性炭の失活を考慮すると、純粋なkの値は約 6×10^{-2} となる。すなわち、1gの活性炭は約5リッターの空気中に存在するラドンを吸着する。

かりに、活性炭がすべて空気と接触しているとなると、平衡への到達は比較的に速やかに達成されるが、その場合にはごく短時間での空気中濃度しか評価することができなくなる。それを避けるために本報で用いる活性炭もニタ試料の場合、空気と接触しているのは容器の上面だけである。したがって、水分吸着による活性炭の失活、活性炭層をとおしてのラドンの吸着・脱着現象などが関与する。そのため、平衡状態に至るまでの活性炭への吸着過程を厳密にモデル化することは難しい。

ここでは、活性炭への吸着現象は以下の微分方程式で記述できるものとする。

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha (k \cdot C - Q/m) - \lambda_s \cdot Q \quad (2)$$

三三三。

 a : 吸着の速度定数 [g/min]

λ_R : ラドンの物理的崩壊定数 $[s^{-1}]$

第1項は、平衡状態からのずれが吸着あるいは脱着に1次的に密着することを示し、第2項は吸着したラドンの物理的な減衰を示す。爆露期間中の空気中ラドン濃度(C)の変化を活性炭モニタにより評価することは原理的にできないので、実際の運用に当たってはCが爆露期間中一定と

する以外にない。その仮定のもとに(2)式を解くと次式となる。

$$Q = \frac{a \cdot k \cdot C}{(a/m + \lambda)} [1 - \exp\{-(a/m + \lambda) \cdot t\}] \quad (3)$$

以下の評価では平衡への到達が(3)式で表されるものとして議論する。

C. 原子炉実験所における特性評価実験

活性炭の特性を評価するために、京都大学原子炉実験所において、表1に示す2回の特性評価実験を行った。

表1 特性評価実験

場所	期間	ラドン濃度 [Bq/m ³]	相対湿度 [%]
CA炉室	1991年1月 1日 ～11日	50～600	約40
応用センター大講習室	1991年5月27日 ～6月 1日	4～60	約80

C-1 実験場の状況

CA炉室実験

報告者がCA炉室内で特性実験を行った当時、同じ場所において日本国内のラドン研究者による共同比較実験が行われており、そのためにCA炉室内では継続的にラドン濃度が測定されていた。その期間における電離箱測定によるCA炉室内のラドン濃度の推移を図2に示す⁽⁸⁾。

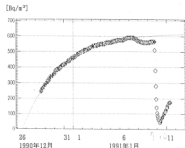


図2 CA炉室内のラドン濃度の推移

○ : 電離箱による実測濃度 [Bq/m³]

点線 : (4) 式による近似値

CA炉室は1990年12月26日夕刻に換気が停止され、一種の閉空間となった。CA炉室はコンクリート構造物であり、コンクリートの表面からしみ出して来るラドンは炉室内に次第にたまって来る。1月8日からは実験者の頻繁な立ち入りが始まり、炉室入り口ドアが頻繁に開閉されてラドン濃度が若干低下している。9日夕刻から10日朝にかけて一時的に換気が行われ、炉室内のラドンが強制的に外部に放出されたためラドン濃度は急激に低下し、換気停止後には再度の上昇を示している。

実験者の頻繁な出入りが始まるまでの期間については、コンクリートからの一定の浸透率と炉室からの一定の漏洩率によって炉室内のラドン濃度が変化するとすると、炉室内ラドン濃度の変化は(4)式で記述できる。

$$C = \frac{R/V}{\lambda} [1 - \exp\{-\lambda \cdot (t+T)\}] \quad (4)$$

ここで

- C : 炉室内ラドン濃度 [Bq/m³]
- R : コンクリート壁からの浸透率 [Bq/nis] [m³]
- V : 炉室内自由空間体積 [m³]
- λ : $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ [min⁻¹]
- λ_1 : ラドンの物理的崩壊定数 (1.26×10^{-4}) [min⁻¹]
- λ_2 : 炉室の漏洩率 [min⁻¹]
- T : ラドン濃度測定開始までの時間 [nis]
- t : ラドン濃度測定開始後の経過時間 [nis]

(4)式にR/V、 λ_1 、T₀をパラメータとしてSIMPLEX法を適用して最適値を求めた。その最適解による炉室内ラドン濃度評価値も図2に示してある。T₀の最適値は35.5時間であり、換気を停止した時刻が26日夕刻であることと良い一致を示した。また、全体に上記(4)式のモデルが現実を良く表していることも分かる。

ちなみに、 λ_2 の最適値は、 4.78×10^{-6} [min⁻¹]であり、それを漏洩の平均期に換算すれば約10日となる。

応用センター大講習室実験

原子炉応用センター大講習室における特性評価実験期間中の、電離箱によって実測された空気中ラドン濃度の変化を図3に示す⁽⁸⁾。この図は、空気中のラドン濃度が夜間高く、日中に低いという傾向を示している。5月31日夕刻から6月1日朝にかけてラドン濃度が急激に上昇しているのは、それまで一定の換気をしていたものを停止したためである。

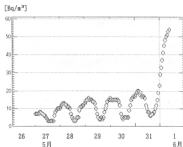


図3 応用センター大講習室における
空气中ラドン濃度の推移

C-2. ラドン吸着量の曝露時間依存性

平衡に到達するまでの活性炭のラドン吸着量の変化が(3)式で表されたとしたが、(3)式では曝露期間中の空气中ラドン濃度が一定であると仮定した。しかし、実際に曝露期間中でラドン濃度が一定に推移することなど現実にはありえず、図2、3にも示したように空气中のラドン濃度は時間的に変動している。

ここでは、活性炭の平衡への到達特性を明らかにすることを目的としており、辛い電離箱による連続的なラドン濃度の実測データが与えられているので、それによって補正を行うことが可能である。ある期間に活性炭が吸着するラドンの量はその期間の平均ラドン濃度に比例するとの仮定を設け、実際のラドン吸着量を空气中ラドン濃度が1 [Bq/m³] である時の吸着量に換算し、それを『規格化吸着量』と呼ぶことにする。

図4に曝露継続時間と規格化吸着量の関係を示す。

曝露継続時間と規格化吸着量について、 a 、 k をパラメータとしてSIMPLEX法で(3)式に適合させると、表2の値を得る。この最適値をもとにした平衡への到達過程の近似も図4に示してある。ただし、CA研究室の実験と応用センターでの実験では明白に規格化吸着量の絶対値が異なっており、それぞれ別に評価した。

ラドンの活性炭への吸着は空気中濃度との間の平衡関係で規定されていると仮定しており、もし活性炭の全量が空気と密に接触しているとすれば、活性炭によるラドンの吸

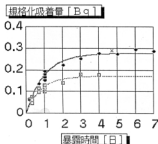


図4 特性評価実験における平衡への到達過程

● : CA研究室実験、□ : 応用センター実験
×印は応用センター実験のものであるが、曝露終了
時点で濃度の停止のため急激に濃度が上昇したものを、

表2 SIMPLEX法による最適値

	a [min^{-1}]	k [m^3/g]
CA研究室実験	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-3}
応用センター実験	5.3×10^{-2}	2.4×10^{-3}

着量はある時点における空气中のラドン濃度を色濃く反映することになる。実際には、ある程度の期間の平均的な空气中ラドン濃度を評価できるようにとの配慮のもとに、活性炭はプラスチック容器中に40 mm近い厚さをもって詰められており、上部だけが空気と接触し、ラドンは順次下層に向かって拡散、吸着して行くことになっている。しかし、それでもなお急激に空气中ラドン濃度が変化する場合には、その変化に影響を受けることは避けられない。そこで、図4に示したデータの内、ごく短時間曝露のデータと、急激に空气中濃度が変化したときのデータはSIMPLEX法への適用にあたって除外した。

図4から、一連の実験の範囲にかぎって言えば水分吸着量については特別な補正をせず、単に曝露時間だけをパラメータとしてラドン濃度を評価しても実測値と良い一致を示すことが分かる。

C-3 水分吸着量についての補正方法

ところが、CA研究室実験と応用センターでの実験が示すように、異なった環境条件における実験においては規格化吸着量の絶対値には大きな違いがあり、この違いは同実験

環境における空気中の湿度の差によって生じている。すなわち、環境中にはラドンの他にも活性炭に吸着する物質がある。その代表的な物質は空気中の水分であり、ラドンの活性炭への吸着量は、いうまでもなく曝露時間に依存するし、また空気中の湿度にも依存する。なぜなら、後に述べるように活性炭へのラドンの吸着は水分吸着と競合関係にあり、ひとたび水分が吸着した活性炭はラドンに対しては失活する。したがって、湿度が高く、水分の吸着量が多くなるほど、活性炭のラドン捕集効率は低下することになる。

図5に、曝露時間と水分吸着量の関係を示すが、C/A研究室実験に比べて、応用センター実験では同じ曝露時間でも水分吸着量が多い。C/A研究室実験は相対湿度がおよそ40%程度の状態で行われたのに対して、応用センター実験はちょうど梅雨の走りにあたり、相対湿度が80%程度の状態で行った。その違いが水分吸着量の違いに現れ、ついで活性炭によるラドン吸着量の減少として現れたのである。

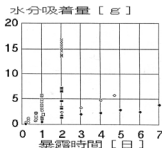


図5 各実験における曝露時間と水分吸着量
●: C/A研究室 (湿度約40%)、○: 応用センター (湿度約80%)
■: 人間材料第1個体、□: 人間材料第2個体、×: 人間材料第3個体

水分吸着が活性炭へのラドン吸着を失活させることを考慮にいれるため、水分の吸着とともにラドン吸着に有効な活性炭の量が減少するとのモデルを考える。

m [g] の活性炭があり、それは水分を ω [g] 吸着したときにラドンに対しては完全に失活し、失活する割合は水分吸着量に比例するとする。次に、 T [min] なる曝露期間に、実際には W [g] の水分を吸着し、その吸着量は時間とともに直線的に増加したものとすると、ある時刻 t での

水分吸着量 $w(t)$ [g] は

$$w(t) = \frac{W}{T} \cdot t$$

であり、一方その時点で失活せずに残っている活性炭の重量 $m(t)$ [g] は

$$m(t) = m \{1 - w(t)/\omega\} \\ = m \{1 - (W/\omega) \cdot (t/T)\}$$

となる。また、完全に失活するまでに要する時間 t_s [min] は、

$$t_s = \omega / (W/T) = \omega \cdot T / W$$

である。そこで、実際の曝露期間中に有効であった平均の活性炭重量 $\bar{m}$ は以下の2通りに分けて表される。

① $T < t_s$ (曝露期間中に完全失活には至らない場合)

$$\bar{m} = \int_0^T m(1 - t/t_s) dt / T \\ = m(1 - W/2 \cdot \omega) \quad (5)$$

② $T \geq t_s$ (曝露期間中に完全失活に至る場合)

$$\bar{m} = m \cdot T t_s / 2 / T \\ = m \cdot \omega / 2 \cdot W \quad (6)$$

したがって、(3) 式の m を $\bar{m}$ でおきかえると

$$Q = \frac{a \cdot k \cdot c}{a/\bar{m} + \lambda_s} [1 - \exp\{-(a/\bar{m} + \lambda_s)/T\}] \quad (7)$$

となり、 $\bar{m}$ は (5)、(6) 式で与えられる。このうち λ_s は物理定数、 Q 、 C 、 T 、 W 、 m は実験値として与えられるから、 a 、 k 、 ω をパラメータとして、SIMPLEX法で最適値を求めると以下の値となる。なお、この場合、人為的な換気操作による急激な濃度変化に関連したデータは除外した。

$$k = 5.80 \times 10^{-2}$$

$$a = 2.17 \times 10^{-2}$$

$$\omega = 4.17$$

上記の k の値は、活性炭 1 g あたり約 6 リッター分の空气中ラドンを吸着することを示し、活性炭を 100 g 使った今回のモニタの場合には、およそ 600 リッター分の空气中ラドンを吸着することを示す。また、 ω の値から本稿の活性炭モニタは約 4.2 g の水分を吸着するとラドンに対して

失誤することが示されている。結局、時間 T の曝露によって活性炭に吸着したラドン量が Q [Bq]、水分量が W [g]であったとすれば、次式からその曝露期間中における空気中平均ラドン濃度 C [Bq/m³]が求められることになる。ただし、両値は(5)、(6)式によって与えられる。

$$C = \frac{Q - (a/W + \lambda_p)}{a \cdot k \cdot [1 - \exp \{-(a/W + \lambda_p) / T\}]} \quad (8)$$

これまで行った実験の実測値と(8)式を用いた評価値との関係を示すと図8のごとくなる。ほとんどの場合、活性炭による評価値は電離箱による実測値に比べて±50%以内に含まれている。それから外れているものは、短時間曝露と、急激に空気中濃度が変化する場合のものにかぎられている。

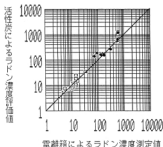


図8 活性炭からの評価値と電離箱測定値との相関
(単位はBq/m³)

Ⅲ. 人形峠における測定

日本では、かつて鳥取、岡山両県にまたがる人形峠においてウランが採れるといわれ、そこにはウラン鉱山が設置された。ところが、人形峠で採掘されるウランは害しく品位が悪く、人形峠でのウラン採掘は80年代の終わりをまですに中止されることになる。しかし、いったん掘り出された20万t²におよぶ鉱石まじりの粗土は鉱山周辺に置き去りにされてきた。そのことから環境の汚染が生じていることはすでに別稿¹⁷⁾で明らかにしたが、今回は周辺環境

における空気中ラドン濃度を測定した。

A. 調査地点、日時および結果

ラドンの捕集は鳥取県東伯郡東郷町方面の旧人形峠ウラン鉱山において表3に示す3回実施した。

表3 人形峠でのラドン捕集実験実施条件

	測定実施年月日	時間	天候
第1回目	1990年12月7日～9日	丸2日	快晴
第2回目	1991年5月11日～12日	丸1日	薄曇
第3回目	1991年8月23日～31日	丸2日	曇一時雨

捕集されたラドン量から平均空気中濃度の換算は、先に示した(8)式および関連するパラメータを用いて行った。その結果を図7に示す。原則的には図7の左側に行くほど、標高が高く、坑口に近づく。また、貯鉱場や2号坑堆積場は尾根筋あるいは斜面に当たり、覆土から事務所跡までは掘せた谷の川底に当たる。Aさん宅として最も右に示したもののだけが屋内のものであり、それ以外はすべて屋外での測定である。

B. 結果と考察

図7から、下1号坑坑口におけるラドン濃度が異常に高いことは一目瞭然としており、坑内からラドン濃度の高い空気が湧出してきていることを示している。現行の法令で放射線業務従事者に許されている濃度限度は1000 [Bq/m³]である。ところが、下1号坑坑口は坑外であるにもかかわらず、そこでの3回の測定値は7200 [Bq/m³]、22000 [Bq/m³]、14000 [Bq/m³]という値である。

ただし、今回測定したラドン濃度を法令での濃度限度と比較するためには、平衡等価係数を掛けて補正する必要がある。しかし、平衡等価係数はおそらく0.5から0.6程度の値であり¹⁸⁾、その係数を掛けたとしても下1号坑坑口の空気中ラドン濃度は現行の放射線業務従事者の濃度限度を超えている。坑口にしてなおそうなのであるから、坑内の作業現場でのラドン濃度は一層高かったはずである。

また、測定を行った鉱山跡は民有地であり放射線の管理区域ではない。管理区域から敷地境界の外に放出できる濃度限度は9 [Bq/m³]である。そうした濃度に比べて、下1号坑坑口から吹き出してきているラドンの濃度は余りに高い。

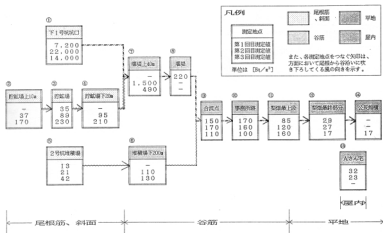


図7 人形峠日ウラン鉱山周辺の空气中ラドン濃度の分布

また、貯鉱場や塩漬場にはウラン濃度の高い鉱石固じりの残土がむき出しで放置されているにもかかわらず、それらの地点における空气中のラドン濃度は塩堤以下の谷間における空气中ラドン濃度よりも低い値となっている。その原因は、しみ出してきたラドンが尾根を越えてきた冷たい空気に巻き込まれて谷間に流れていくためと思われる。

C. ラドン以外の放射性核種による汚染の可能性

活性炭にラドン以外の放射能が吸着し、実際に測定したものがラドンではなかった可能性についても検討した。測定したのはラドン娘核種の Bi-214、Pb-214 であり、そうした核種の半減期は高々 30 分であるので、それらの核種が独立して活性炭中に存在している可能性は物理的にありえない。ラドン以外に Bi-214、Pb-214 の親核種になり得る可能性がある核種は Ra-226、あるいは U-238 である。例えば、曝露中に還帰のウラン鉱石などが微粒子となって活性炭にくっついてしまうような場合には、そうした可能

性がある。そうした可能性を排除するため、方面1号坑坑口で採取した活性炭について捕集した放射能の半減期を調べた。その結果を図8に示す。

図からも明らかのように、捕集した核種の放射能は片対数グラフ上でほぼ完全な直線を描いて減衰しており、最小自乗法で求めた衰減定数は $1.26 \times 10^{-4} \text{ [min}^{-1}\text{]}$ となる。この値を半減期に換算すれば 3.82 日となり、まぎれもなくラドン-222であることが分かる。したがって、本報の測定方法においてはラドン以外の放射能による汚染の懸念は生じていない。

D. 評価値のクロスチェック

人形峠における第3回目の測定時においては、大阪大学の福島、三藤両氏によるラドン測定が同時に行われた⁽⁹⁾。彼らによる測定は約 130 リッターのエアバッグに空気を直接採取し、それをドライアイス+エタノール温度において活性炭に吸着させた上、測定する方法である⁽¹⁰⁾。この測定方法では、ほとんど 100% 近い効率でラドンを捕集で

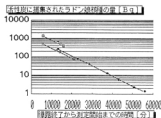


図8 捕集した放射線の減衰
●：第1測定 □：第2測定 ×：第3測定

きる。ただし、本報でのラドン測定が、ある程度の期間（8月28日朝～31日朝の92日）における平均的なラドン濃度を評価するのに対して、彼らの方法はエアバッグに採取したその時点（8月28日早朝）でのラドン濃度を評価する。両者の評価結果の比較を表4に示す。

表4 ラドン測定・評価結果の比較

評価地点	空气中ラドン濃度 [Bq/m ³]	
	本 報	福島・三陸
下1号坑坑口	14,000	88,100
堰堤	490	1,060
事務所跡	100	80.8
公民館跡	17	17.2

表4に示したとおり、本報での評価値は福島・三陸による評価値と比べて、事務所跡、公民館跡では実質的に等しく、下1号坑坑口と堰堤ではかなりの過小評価となっている。この違いはおそらくラドン濃度の日変化による。図3にも示したように早朝には空气中ラドン濃度が1日のうちで最も高くなるが、それは空気の流れがその時点で最も弱くなるからである。そして、ラドンのしみ出し点である下1号坑においては、しみ出してきた高濃度のラドンがそのまま福島・三陸のサンプリングにかかったものと思われる。それに対して公民館跡での測定では、空気の流れによって運ばれてきたラドン进行测试しており、空气中ラドン濃度の時間的な変動がそれほど小さくなく、本報での値と福島・三陸による値がよい一致を示したのもと思われる。

N. おわりに

ラドンは天然の放射能として広く公衆に被曝を与える。特に、人為的な行為がラドンによる被曝量を大幅に左右するのであるから、ラドン問題は重要である。そのためには、安価、簡便でそれなりの精度を持った測定器が必要であり、本報ではそうした目的に使用するための活性炭受動型ラドンモニタの特性を報告した。本報で使用した受動型ラドンモニタは曝露時間と水分吸着量をパラメータとして、吸着量から曝露期間中の平均空気中ラドン濃度を評価するものである。そして、ラドン濃度の極端な変化がないかぎり、±50%程度の精度でそれを評価することが可能である。

また、その活性炭モニタを利用して人形峠ウラン鉱山周辺の空气中ラドン濃度の測定を行った。その結果、すでに鉱山が廃止された現在も高濃度のラドンがしみ出してきていて、周辺に拡散していることが明らかとなった。

最後に、活性炭を提供して下さるとともに、特性について貴重なアドバイスをくださったツルミコール・品質管理の伊藤さんにお礼を申し上げる。また、人形峠周辺での測定に当たっては、現地の住民のみなさんのお世話になったことを明記し、感謝する。

【注】

- (1) UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UN (1989)
- (2) NCRP, Control of Radon in Houses (NCRP Report No. 103), NCRP (1989)
- (3) J.W.Gofman, "Radiation and Human Health", Sierra Club Books (1981)
- (4) 原子力学会ラドン族調査研究委員会, 「大気中ラドン族と環境放射能」(1985)および「続大気中ラドン族と環境放射能」(1990)など、日本原子力学会
- (5) R.L.Cohen & E.S.Cohen, Theory and Practice of Radon Monitoring with Charcoal Adsorption, Health Physics 40, 501-508(1983)
- (6) 山崎敏三、私伝
- (7) 小出裕章、人形峠周辺の汚染の実態と補遺派の建構の論議、技術と人間 18(6), 56-71(1989)
- (8) ラドン・トリウム測定研究専門委員会、ラドンとトリウム核種の共同比較、保健物理 25(4), 373-380(1990)
- (9) ウラン問題を考える会ほか、方面地区におけるラドン調査結果について 第3報、1991年11月14日発表文書
- (10) 福島初三、三陸安後様、地中から湧出するRnの測定法、第35回放射化学討論会予稿集 84-85(1990)