解 説

Passive 型ラドン濃度測定器について

飯 田 孝 夫*¹

(1985 年 11 月 2 日 受理)

Passive Integrating Radon Monitor

Takao IIDA*¹

KEY WORDS : passive, integrating, radon monitor, track detector, bare, cup, electrostatic collection, TLD, activated carbon, photographic film, electret, calibration factor, detection limit

1. はじめに

近年, 生活環境中でのラドン (^{222}Rn), トロン (^{220}Rn) とその娘核種の吸入による肺の内部被曝線量は, 自然の放射性核種等から受ける全被曝の大きな割合を占めると報告されている^{1~3)}。このため, ラドンとその娘核種によるヒトの各集団の被曝線量を早急に求めることが世界的に強く求められている。

ラドンとその娘核種の吸入による肺の内部被曝線量を推定するには, 生活環境中の平均的なラドン濃度レベルを測定する必要がある。この種の測定には, 長期間の積分測定が可能で, 小型, 安価, 取り扱いが容易な Passive 型ラドン濃度測定器が適している。Passive 型ラドン測定器は種々のタイプが考案されている。検出器で大別すると, (i) 固体飛跡検出器, (ii) TLD, (iii) 活性炭, (iv) 写真用フィルム等である。

欧米では, これらの Passive 型ラドン濃度測定器が家屋内のラドン濃度の測定に使用されている^{4~16)}。日本でも生活環境中での日本人のラドンとその娘核種による被曝を求める目的で, 放射線医学総合研究所や放射線影響研究所を中心に, 全国の家屋内外のラドン濃度レベルのサーベイが進められている。種々のタイプの Passive 型ラドン測定器がラドン濃度のサーベイに使用されている

ので, OECD-NEA が中心になって, Passive 型ラドン測定器の国際的な相互比較がヨーロッパ, 北米, 太平洋地区で実施された¹⁷⁾。

著者らは, 数年来, 固体飛跡検出器の一種である硝酸セルロースフィルムを用いた高感度の積分型ラドンモニターの開発研究を行ってきた^{18~20)}。ここでは, これらの経験も含めて, 種々の Passive 型ラドン濃度測定器の概要を紹介する。

2. 固体飛跡検出器を用いたラドン濃度測定法

ラドン濃度測定には, ポリカーボネイト (Polycarbonate, 略して PC), 硝酸セルロース (Cellulose Nitrate, 略して CN), CR-39 (Allyl Diglycol Carbonate) の 3 種類の固体飛跡検出器が使用されている。これらの固体飛跡検出器を用いたラドン測定法には, (i) Bare 法, (ii) Cup 法, (iii) 静電捕集法がある²⁰⁾。第 1 表にこれまでに報告されている各方法の特性を示す。

固体飛跡検出器上に得られるトラック密度と積分ラドン濃度の関係は次式で与えられる。

$$X_{\text{Rn}} = \frac{1}{E} \left(\frac{N}{A} - \frac{N_b}{A_b} \right) \quad (2.1)$$

ここで, X_{Rn} は積分ラドン濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}$), E は校正定数 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}$), A は計数面積 (cm^2), N は A 内のトラック数, A_b はバックグラウンドの計数面積 (cm^2), N_b は A_b 内のバックグラウンド・トラック数である。式(2.1)からわかるように, 第 1 表の校正定数が多いことは装置の検出感度が高いことに対応

*1 名古屋大学工学部原子核工学教室; 名古屋市中千種区不老町 (〒464)

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University; Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464.

第1表 固体飛跡検出器を用いた Passive ラドン濃度測定法

測定法	検出器	較正定数 ($\frac{\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}}$)	積算時間	検出下限 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	参考文献
Bare 法	CN	6.8×10^{-3}			21)
	CR-39	10.0	1 カ月	7.4	22)
	CN	1.58			5)
	CR-39	8.2			23)
	CN	2.1			24)
	CR-39	4.2			25)
Cup 法	CN	1.16			26)
	CR-39	3.4	1 カ月	12.3	27)
	CR-39* ¹	2.5	1 カ月	29.6	22)
	CR-39* ²	4.2	1 カ月	14.8	22)
	PC	0.68	3 カ月	3.7	28)
	CN, CR-39	15.0	3 カ月	3.7	29)
	CR-39	1.9~4.3			30)
	CR-39	4.0			23)
	CN	3.2			31)
	CR-39	7.0	3 カ月	2.6	32)
	CN	3.1	2 カ月	4.9	33)
静電捕集法	CR-39* ³	2500	1 日	8.5	34)
	CN	87	1 カ月	0.4	35)
	CN	52	2 カ月	0.7	18, 19)

*¹ membrane-covered cup

*² filter-covered cup

*³ エレクトレットを用いて静電捕集

している。

積算時間 T (hr) 内の平均ラドン濃度 $\bar{C}$ ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) は

$$\bar{C} = \frac{X_{\text{Rn}}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T C(t) dt \quad (2.2)$$

と表せる。ここで、 $C(t)$ は時刻 t のラドン濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) である。第1表の検出下限は50%の標準偏差で求められる平均ラドン濃度を示している。式(2.1)と(2.2)から、平均ラドン濃度の検出下限は較正定数だけでなく、積算時間、計数面積、バックグラウンド等にも依存していることがわかる。

トラック密度の計数法としては、光学顕微鏡(400倍程度)で観察し、写真撮影した後計測するか、画像解析装置が用いられる。または、大面積を計測するためマイクロフィッシュ・リーダーが用いられる^{19,24,28)}。この他に、トラックを自動的に計測する方法として、固体飛跡検出器に $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 粉末を塗布し、トラックに詰まった

シンチレーター量を α 線源を用いて計数するシンチレーション法³⁶⁾や、CN フィルムにアルミニウム蒸着マイラ膜を重ね、高電圧を印加したときに生ずるスパークを計数するスパーク・カウント法がある。

以下、固体飛跡検出器を用いた Bare 法、Cup 法、静電捕集法について詳しく述べる。

2.1 Bare 法

この方法は適当な大きさの固体飛跡検出器を壁などに掛け、直接空気に曝すだけである。固体飛跡検出器上には近傍空気中のラドンおよびその娘核種からの α 線によってトラックが形成される。SAMUELSSON ら⁵⁾や ABU-JARAD ら³⁷⁾や米原ら²⁵⁾は実際にこの方法で家屋内のラドン濃度の調査を行っている。

Bare 法の原理は簡単であるが、検出器として CR-39 を用いる場合には問題がある。CR-39 は感度がよく、自然に存在する核種からの α 線はすべて検出できる³⁸⁾。こ

のため、CR-39 表面に沈着するラドン娘核種からの α 線によってもトラックができる。通常環境条件下では、CR-39 上にできるトラックの大部分が空気中に存在するラドンやその娘核種からの α 線によるよりは、表面に沈着したラドン娘核種からの α 線によるものである^{37,39)}。ラドン娘核種が CR-39 の表面に沈着する割合は、室内のラドン濃度よりも、フィルムの帯電状態、空気中のエアロゾル濃度、換気速度等に大きく依存する。このため、CR-39 を用いた Bare 法で得られた結果の信頼度は低い。実際、国際相互比較でも Bare 法の結果はばらつきの幅が大きい。

CN フィルムは約 4 MeV 以下の α 線が入射したときのみエッチピットのできるトラックを形成する⁴⁰⁾。CN フィルムを Bare 法に使用すれば、表面に沈着したラドン娘核種からの α 線に不感のため CR-39 より有利である。しかし、第 1 表からわかるように、CN の較正定数は CR-39 に比べて約 1/5 と減少し、Bare 法は Cup 法に比べて感度がよいという利点は CN フィルムではない。CN フィルム上のトラック密度からラドン濃度に変換するとき、Bare 法ではさらに不確定な要素が入る。すなわち、CN フィルム上のトラックはラドンだけでなくその娘核種の α 線によってもできるので、トラック密度は平均的な平衡ファクターに依存してしまう。

上述以外に Bare 法は、空気に固体飛跡検出器を長期間直接曝すので紫外線等により検出器自身の材質が変質しやすいことと、トロンとその娘核種からの α 線によってもトラックが生じてしまう欠点がある。

2.2 Cup 法

この方法は内容積が 100~200 cm³ 程度の Cup の形状をした容器を用いる。固体飛跡検出器は Cup の底面に付け、Cup の口にはフィルターを取り付ける。このため、フィルターでラドン娘核種は除去され、Cup 内にはラドンだけが入る。Cup 内に短寿命のトロン (55 秒) が流入するのを防ぐため、フィルターの代りに特殊な膜を用いたり^{14,22)}、フィルターの開口面積を減らす^{15,32,33)}等の工夫で、換気率を小さくしている装置も報告されている。

Cup 内部で、ラドンが崩壊して生成されるラドン娘核種は free 状態 (エアロゾルに付着していない状態) にあるので、短時間で Cup 内面に沈着する。Cup 底面の固体飛跡検出器はラドンからの α 線以外に、Cup 内面に沈着しているラドン娘核種からの α 線によってもトラックを形成する。この Cup 法は Bare 法のような不確定な要素が入りにくいので、積分ラドン濃度とトラック密度の関係は比較的よい。

現在、この Cup 法が屋内ラドン濃度測定的主流になっている。とくに、Terradex 社の Type F²²⁾ と URBAN らが開発した装置²⁸⁾が欧米では家屋内の高レベルラドン濃度調査に使用されている^{6~8,11,16)}。しかし、両タイプとも、トロンの影響の除去は不十分である。

第 1 表に掲げた Cup 法は較正定数が記述されている論文だけを発表年順に選んでいる。これら以外にも、ラドン濃度調査に利用されている Cup 法は多く存在している^{10,13,15)}。第 1 表の較正定数は研究者によって差がある。この違いは用いられている固体飛跡検出器の違いと Cup の形状の差による。しかしながら、Cup の形状は、ラドンとラドン娘核種の α 線の飛程を考慮して選択されているので、検出器が CN と CR-39 の場合の較正定数は $1 \sim 4 \times 10^{-3}$ の間に大部分入っている。PFLIGERS-DORFFER ら²⁹⁾は 15×10^{-3} 、黒澤ら³²⁾は 7×10^{-3} と大きな較正定数を報告しているが、用いている Cup の形状にそれほど差がないので、この理由は不明である。

Cup 法の欠点は較正定数が小さいため、十分高い検出感度を得られないことである。第 1 表の検出下限は 50% の標準偏差で測定できると推定されているラドン濃度であって、この値まで測定可能であることを示す値ではない。たとえば、較正定数が 4.2×10^{-3} の固体検出器の入った Cup を 14.8 Bq/m³ のラドン雰囲気中に 2 カ月間放置したとする。このとき、固体飛跡検出器の 17.25 mm² の面積中²²⁾に得られるエッチピットはわずか 15 tracks である。CR-39 の場合、バックグラウンドは 1 cm² 当たり数十から数百存在している^{27,32)}。これらの事実からも、検出下限近くの実測の測定は困難であることが理解できる。

この Cup 法のなかで、URBAN ら²⁸⁾は固体飛跡検出器として PC を用いている。PC は化学エッチングでは α 線のエッチピットを得ることが困難なので、エレクトロケミカル・エッチングを行っている。それでも PC は α 線に対して感度が低いので、 0.68×10^{-3} と小さな較正定数しか得られていない。しかし、マイクロフィッシュ・リーダーを用いることで、計数面積を 2 cm² と広く取り、3 カ月間の平均で 3.7 Bq/m³ と比較的高い検出感度を報告している。この装置を 3.7 Bq/m³ のラドン雰囲気中に 3 カ月放置してもわずか 11 tracks である。バックグラウンドは約 20 tracks/cm² 存在している²⁸⁾。それゆえ、実際に実用に耐えうるデータのラドン濃度レベルは十数 Bq/m³ 以上である。

2.3 静電捕集法

Cup 法は構造上、高い検出感度を得ることができない。自然大気中のラドン濃度レベル (約 4 Bq/m³) まで

第1図 静電捕集積分型ラドンモニター

精度よく測定するには、何らかの方法でラドン娘核種を濃縮捕集する必要がある。

第1図に著者らが開発し、実際に生活環境中でのラドン濃度測定に利用している積分型ラドンモニターを示す¹⁹⁾。この装置は次の原理でラドンを測定している。容器内へはフィルターを通してラドンだけが流入する。装置の換気率は 0.75 hr^{-1} であるので、容器内部のトリウム濃度は外部の1%以下である。ラドンは α 崩壊して $\text{RaA}^{(218\text{Po})}$ を生成する。 RaA は崩壊直後大部分正に帯電しているので、静電場によって負の電極に捕集される。電極上で崩壊した RaA からの α 線は固体飛跡検出器に入射してトラックを作る。固体飛跡検出器を捕集電極面から1cm離しているので、固体飛跡検出器上には一様に分布した、径の比較的小さいエッチピットが得られる。

静電捕集法では RaA を電極上に捕集するので、第1表に示すように、較正定数はCup法に比べて1桁以上大きい。第1図の装置を自然大気レベルの 4 Bq/m^3 のラドン雰囲気中に2カ月間放置すると、 0.5 cm^2 の計数面積中に150 tracksを得る。このときのCNフィルムのバックグラウンドは10~30 tracksであるので、十分精度よくラドン濃度を測定できる。

この方法の欠点は静電捕集用の電池が必要となり、Cup法に比べて構造も複雑で、大型の装置になってしまうことである。このため、Passive測定法の安価で取扱いが容易という特徴は減じられる。もう一つの問題点は、静電場による RaA の捕集効率が空気中の湿度に依

存することである^{41,42)}。KOTRAPPAら³⁴⁾はこの問題に十分な解答を与えていない。著者らは、ラドンを吸着しなくて、除湿能力の大きい五酸化リン (P_2O_5) で容器内の湿度を取り除いている^{18,19)}。

3. TLDを用いたラドン濃度測定法

TLD素子を最初にPassiveラドン濃度測定に利用したのはGEORGE⁴³⁾である。COWPERら⁴⁵⁾は装置を大型化し、検出下限を下げている。KOTRAPPAら³⁴⁾は捕集電極にエレクトレットを利用した装置を開発している。これらの測定装置は屋内のラドン濃度レベルを1週間程度の積算時間で十分測定可能である。GEORGEらの開発した装置は、実際にNYBERGら⁸⁾やSWEDJEMARKら¹²⁾によって、家屋内のラドン濃度測定に利用されている。第2表に、いままでに報告されているTLDを用いたラドン測定法の特徴をまとめて示す。

TLDを用いたPassiveラドン測定法はすべてが静電捕集法を利用している。そのため、装置の内容積は1.5~10 lと比較的大きい。容器内部の捕集電極上にTLDを取り付け、その上をアルミ蒸着マイラーでおおう。ラドンの崩壊で生成された RaA^+ はアルミ蒸着マイラー面に捕集される。TLDは捕集されたラドン娘核種からの α 線や $\beta\cdot\gamma$ 線に照射される。環境中の γ 線や宇宙線によるバックグラウンドレベルは、容器の外側に取り付けられた同一形状のTLDで求める。TLDのラドン娘核種による被曝量 (mR/hr 単位の出力) を、較正実験で決められた定数を用いて、ラドン濃度レベルに変換する。

TLD法は静電捕集を利用しているので、TLDの出力には湿度依存性がある。実際、GEORGEら^{43,44)}とCOWPERら⁴⁵⁾は湿度依存を報告している。GEORGEらは除湿にシリカゲルを用い、1週間ごとに交換している。他の研究者は湿度対策を行っていない。

TLD法は第2表からもわかるように、固体飛跡検出器を用いた静電捕集法より感度は悪い。しかし、固体飛跡検出器よりも、取扱いと読取りが簡単で、TLDは再使用できる。TLD法の検出下限はCup法と同程度かそれよりもよく、1週間程度の積分測定に適している。

TLD法の欠点は、静電捕集法を利用しているので、測定装置が比較的大型であることである。TLDは環境中のバックグラウンド γ 線や宇宙線に被曝するため、ラドン濃度の検出下限を大きく下げることはできない。積算時間を長くとっても、バックグラウンドも時間とともに増加するので、検出下限をそれほど改善できない。このため、通常の測定では1~2週間の積算時間が用いられている。

第2表 TLD, 活性炭等を用いた Passive ラドン濃度測定法

検出器 (素子)	積算時間	検出下限 (Bq・m ⁻³)	参考文献
TLD	LiF	1週間	3.7 (43, 44)
	CaF ₂ :Dy	1週間	1.5 (45)
	CaF ₂ :Dy	1日	34 (34)
	LiF	1週間	11.1 (8)
	CaF ₂ :Dy	1週間	37 (46)
	CaSO ₄ :Dy	1日	30 (47)
	CaSO ₄ :Tm	3カ月	3.7 (32)
活性炭		1-3日	3.7 ^{*1} (50)
		3日	20 ^{*2} (51)
		3日	7.4 (9, 52)
		1週間 ^{*3}	100 ^{*4} (53)
		1日	7.4 (54)
		1日	55, 56)
ZnS(Ag)+写真フィルム	170時間	1,480	57)

*¹ 理論的推定値*² 活性炭中に入れた TLD (CaF₂:Dy) で測定*³ 活性炭中にシリカゲルを入れ除湿*⁴ 測定誤差が 18.5% のときの値

除湿問題は、固体飛跡検出器を用いた静電捕集法と同じく、P₂O₅を除湿剤に用いれば解決できる。

4. 活性炭を用いたラドン濃度測定法

活性炭を用いた Passive ラドン測定法は、恵ら⁴⁸⁾と COUNTNESS⁴⁹⁾により、地表面からのラドン放出量の測定に初めて利用された。GEORGE ら⁹⁾と岩田ら⁵⁵⁾は活性炭を用いる方法で屋内のラドン濃度測定を行っている。この方法は非常に簡単で、活性炭 100~200 g を容器に入れ、測定したい場所に放置するだけである。活性炭法の検出下限、積算時間、活性炭の量と厚さ等の理論的検討は COHEN ら⁵⁰⁾が行っている。

いままでに報告されている活性炭を用いたラドン測定法の特性を第2表にまとめて示す。活性炭法は他の測定法に比べ、検出下限はそれほどよくない。この理由は、測定原理上積算時間を長くとれないためである。

活性炭を用いたラドン測定法は、他の Passive 測定法と測定原理が違っている。他の Passive 法は検出器自体を放置するのに対して、活性炭法は次の手順で行われる。活性炭を入れた容器を一定期間放置後、容器をシールし、活性炭を均一に混合する。ラドンと娘核種が平衡になる時間を待って測定をする。測定は低バックグラウンド内で NaI(Tl) 検出器を用いて、²¹⁴Pb の 242, 295,

352 keV と ²¹⁴Bi の 609 keV の γ 線の全吸収ピークを計数する。計数値から較正定数を用いてラドン濃度に変換する。活性炭へのラドンの吸着量は水蒸気の吸着量の増加とともに減少するので、較正定数は活性炭の重量増加を指標として決定されている⁵²⁾。

活性炭法によるラドン濃度測定には多くの限界がある。活性炭はラドンだけでなく、水蒸気も吸着する。しかも、水蒸気の吸着により、吸着されていたラドンが脱着されてしまう^{52, 55)}。さらに、ラドン吸着量は温度にも依存している⁵⁴⁾。活性炭を放置している間に、一度吸着したラドンが脱着したり、崩壊するので、活性炭法で測定されるラドン濃度は、放置期間中の完全な積分濃度になっていない。原理上、測定終了近くのラドン濃度に影響されやすい^{52, 54)}。この欠点を改善するため、STRANDEN ら⁵¹⁾は TLD 素子を活性炭内に入れることで、ラドン積分濃度を求めようと試みている。

活性炭法の積算時間は、水蒸気の吸着やラドンの崩壊のため、長くとることができない。活性炭法の積算時間は通常 1~3 日である。GUSTAFSSON ら⁵³⁾は活性炭中にシリカゲルを混入させることで、積算時間を 1 週間まで延ばしている。

活性炭法には上述のような欠点はあるが、測定法が簡

第3表 Passive ラドン濃度測定法の比較

測 定 法		Rn 濃度 (Bq/m ³)		
		10 ⁰	10 ¹	10 ²
固体飛跡検出器	Bare 法		←	-----
	Cup 法		←	
	静電捕集法	←		
T L D 法 活性炭 法			←	
			←	

便で、安価であり、活性炭の再使用が可能であるので、広範な短い積算時間の比較的高レベルのラドン測定に適用している。

5. その他のラドン濃度測定法

Passive ラドン濃度測定法には、上述以外に、検出器として ZnS(Ag)+写真フィルムを用いた静電捕集法がある。この装置は最初の Passive 測定法で、COSTA-RIBEIRO ら⁵⁷⁾が鉱山内の個人またはエアモニター用に開発した。その装置の特性も第2表に示す。検出下限は他の方法に比べてよくない。

ラドン濃度ではなく、被曝評価に直接関係のあるラドン娘核種濃度を測定する装置の開発も行われている。これらの装置は完全な Passive 法でなく、フィルター上にラドン娘核種を捕集するため、吸引用の小型ポンプを使用している。積算時間は1週間程度である。フィルター上のラドン娘核種からのα線の検出には、積算的な検出器である CN フィルム^{58,59)}、TLD^{60~62)}、エレクトレット⁶³⁾等が用いられている。これらの装置の大部分は鉱山内のラドン娘核種濃度の測定を目的に開発されている。検出下限は 5~10×10⁻⁴ WL*² と比較的良好なので、屋内のラドン娘核種の測定に十分利用できる。しかし、これらの装置はポンプを使用しているので電源を必要とし、小型化が困難である。

ポンプを使用しない完全な Passive 法で、ラドン娘核種の平衡ファクターを直接測定しようとする試みも最近なされている^{4,31,64)}。

6. ま と め

固体飛跡検出器、TLD、活性炭、写真フィルム等を用いた Passive ラドン濃度測定法について述べてきた。第3表に各測定法の測定可能範囲を示す。測定誤差が比較的大きな範囲は破線で示している。

固体飛跡検出器を用いた測定法のうち、Bare 法は非常に簡便である。しかし、検出器に CR-39 を用いる場合、検出器表面に沈着したラドン娘核種からのα線を大部分測っている。このため、CR-39 を用いた Bare 法で得られる結果の信頼度は低い。CN フィルムを用いた Bare 法は CR-39 のような欠点は少ないが、校正定数は小さく感度は悪い。

Cup 法は積分ラドン濃度とトラック密度の間の関係はよい。現在、屋内ラドン濃度測定的主流になっている。Cup 法の欠点は、校正定数が小さいため、十分な高い検出感度を得られないことである。

静電捕集法は、検出感度が高く、自然大気中のラドン濃度レベルまで精度よく測定できる。しかし、電池や除湿剤が必要となり、Cup 法に比べて構造も複雑で、大型化し、取扱いが少し面倒である。

検出器に TLD を用いる方法は静電捕集法を利用しているので、固体飛跡検出器を用いた静電捕集法と同じ欠点を有している。TLD はバックグラウンドγ線や宇宙線にも被曝するので、積算時間を長くして検出下限を大きく下げることとはできない。TLD 法は固体飛跡検出器より読取りが簡単であり、1週間程度の積分測定に適している。

活性炭を用いた測定法は、検出感度はそれほどよくないけれど、安価で測定が簡便である。活性炭の積算時間は、水蒸気の吸着やラドンの崩壊のため、1~3日程度の期間しかとれない。

以上のことから、どのような環境のラドン濃度を、ど

*2 1WL は、空気 1/ 当り 1.3×10⁵ MeV ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度である。この 1WL は、3.7×kBq の濃度のラドンがその娘核種と放射平衡にある場合の、その娘核種のポテンシャル・アルファ・エネルギーに相当する。

れくらの期間間隔で、どれくらの規模の測定をするかによって、採用すべき測定法が限られてくる。密閉度の高い家屋内や鉱山内では 40 Bq/m^3 以上のラドン濃度が期待できるので、Cup 法、TLD 法、活性炭法で測定可能である。しかし、自然大気中や換気の十分行われている家屋内では数 Bq/m^3 程度であるので、精度よく測定するには、固体飛跡検出器を用いた静電捕集法しか適していない。

人間の生活環境中のラドン濃度は場所と季節によって大きく違っている。それゆえ、Passive 法でラドン濃度を測定しようとする場合、その研究目的と対象とするラドン濃度レベルに合った測定法を、その手法の欠点もよく認識して、選択すべきである。

参 考 文 献

- 1) UNSCEAR; Ionizing radiation : Sources and biological effects (1982).
- 2) ICRP Publication 39; Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation, Pergamon Press, New York (1984).
- 3) NCRP Report No. 78; Evaluation of occupational and environmental exposures to radon and radon daughters in the United States (1984).
- 4) 小林定喜; ヨーロッパにおける屋内ラドン濃度調査の現況, 保健物理, **20**, 198 (1985).
- 5) C. SAMUELSSON, R.B.R PERSSON and E. HOLM; Measurement of radon and radon daughters in various Scandinavian environments, Proc. Second Special Symposium on Natural Radiation Environment, Bombay, p. 575 (1981).
- 6) R.L. FLEISCHER, A. MOGRO-CAMPERO and L.G. TURNER; Indoor radon levels in the northeastern U.S. : Effects of energy-efficiency in homes, *Health Phys.*, **45**, 407 (1983).
- 7) H.W. ALTER and R.A. OSWALD; Results of indoor radon measurements using the Track Etch ® method, *Health Phys.*, **45**, 425 (1983).
- 8) P.C. NYBERG and D.E. BERNHARDT; Measurement of time-integrated radon concentrations in residences, *Health Phys.*, **45**, 539 (1983).
- 9) A.C. GEORGE, M. DUNCAN and H. FRANKLIN; Measurements of radon in residential building in Maryland and Pennsylvania, U.S.A., *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 291 (1984).
- 10) A.D. WRIXON, L. BROWN, K.D. CLIFF, C.M.H. DRISCOLL, B.M.R. GREEN and J.C.H. MILES; Indoor radiation surveys in the UK, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 321 (1984).
- 11) A. WICKE; Exposure of the population to radon daughters-problems associated with the assessment of the annual dose, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 337 (1984).
- 12) G.A. SWEDJEMARK and L. MJÖNES; Radon and radon daughter concentrations in Swedish homes, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 341 (1984).
- 13) G. SCIOCCETTI, F. SCACCO, P.G. BALDASSINI, L. MONTE and R. SARAO; Indoor measurements of airborne natural radioactivity in Italy, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 347 (1984).
- 14) R.L. FLEISCHER and L.G. TURNER; Indoor radon measurements in the New York capital district, *Health Phys.*, **46**, 999 (1984).
- 15) F. ABU-JARAD and J.H. FREMLIN; Seasonal variation of radon concentration in dwellings, *Health Phys.*, **46**, 1126 (1984).
- 16) C.T. HESS, R.L. FLEISCHER and L.G. TURNER; Field and laboratory tests of etched track detectors for ^{222}Rn : Summer-vs-winter variations and tightness effects in Maine houses, *Health Phys.*, **49**, 65 (1985).
- 17) J.C. MILES, E.J. STARES, K.D. CLIFF and J. SINNAEVE; Results from an international intercomparison of techniques for measuring radon and radon decay products, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 169 (1984).
- 18) Y. IKEBE, T. IIDA, M. SHIMO, H. OGAWA, J. MAEDA, H. HATTORI, S. MINATO and S. ABE; Evaluation of radon concentration and f -value in natural environment with α -track detectors, *Health Phys.*, (in printing).
- 19) 飯田孝夫, 池辺幸正, 前田 淳, 服部隆利, 阿部史朗; CN フィルムを用いた積分型ラドンモニター, 放射線, **11**, 41 (1984).
- 20) 飯田孝夫; 固体飛跡検出器を用いたラドン濃度測定法, 放射線科学, **27**, 217 (1984).
- 21) R.L. ROCK, D.B. LOVETT and S.C. NELSON; Radon-daughter exposure measurement with track etch films, *Health Phys.*, **16**, 617 (1969).
- 22) H.W. ALTER and R.L. FLEISCHER; Passive

- integrating radon monitor for environmental monitoring, *Health Phys.*, **40**, 693 (1981).
- 23) S.W. SKINNER and P.C. NYBERG; Method for the calculation of radon response characteristics of integrating detectors, *Health Phys.*, **45**, 544 (1983).
 - 24) I. MÄKELÄINEN; Calibration of bare LR-115 film for radon measurements in dwellings, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 195 (1984).
 - 25) 米原英典, 木村 博, 青山 喬, 御船政明, 阪上正信, 菅原 努; 生活環境におけるラドン平均濃度の測定, 日本放射線影響学会講演要旨集, p. 153 (1985).
 - 26) R.L. FRANK and E.V. BENTON; A diffusion chamber radon dosimeter for use in mine environment, *Nucl. Instrum. Method*, **109**, 537 (1973).
 - 27) R.L. FLEISCHER, W.R. GIARD, A. MOGRO-CAMPERO, L.G. TURNER, H.W. ALTER and J.E. GINGRICH; Dosimetry of environmental radon: Methods and theory for low-dose, integrated measurements, *Health Phys.*, **39**, 957 (1980).
 - 28) M. URBAN and E. PIESCH; Low level environmental radon dosimetry with a passive track detector device, *Rad. Protect. Dosimetry*, **1**, 97 (1981).
 - 29) P. PFLIGERSDORFFER, W. HOFMANN and E. POHL; Applicability of nuclear track detectors to the measurement of environmental levels of radon and decay products, Proc. 11th Int. Conf. Solid State Nuclear Track Detectors, Pergamon Press, Oxford, p.539 (1982).
 - 30) J.C. MILES and E.J. DEW; A passive radon gas detector for use in homes, Proc. 11th Int. Conf. Solid State Nuclear Track Detectors, Pergamon Press, Oxford, p.569 (1982).
 - 31) T. DOMAŃSKI, W. CHRUSCIELEWSKI and A. ZÓRAWSKI; Method of radon and decay products equilibrium factor measurement with the use of passive track detectors, *Rad. Protect. Dosimetry*, **8**, 231 (1984).
 - 32) 黒澤龍平, 斎藤泰秀, 戸部光則, 佐藤直紀; Passive型積算ラドン計とラドン平均濃度, 日本保健物理学会第20回研究発表会要旨集, p.73 (1985).
 - 33) 服部隆利, 飯田孝夫, 池辺幸正; CN フィルムを用いた積分型ラドンモニター, 日本原子力学会秋の分科会予稿集, p.86 (1985).
 - 34) P. KOTRAPPA, S.K. DUA, N.S. PIMPALE, P.C. GUPTA, K.S.V. NAMBI, A.M. BHAGWAT and S.D. SOMAN; Passive measurement of radon, and thoron using TLD or SSNTD on electrets, *Health Phys.*, **43**, 399 (1982).
 - 35) 黒澤龍平, 山本英明; 固体飛跡検出器による環境中のラドン濃度の測定, 第16回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p.110 (1979).
 - 36) J.C.H. MILES, S.T. GATLEY and K.D. CLIFF; Trial of a passive radon dosimeter for miners in Wheal Jane mine, *Rad. Protect. Dosimetry*, **5**, 95 (1983).
 - 37) F. ABU-JARAD; Variation in long-term radon and daughters concentration with position inside a room, *Rad. Protect. Dosimetry*, **3**, 227 (1982).
 - 38) 林 孝義; 固体飛跡検出器としての CR-39 プラスチック, 応用物理, **49**, 705 (1980).
 - 39) 飯田孝夫, 池辺幸正; トラック法による大気中ラドン娘核種の沈着率の測定, 保健物理, **18**, 29 (1983).
 - 40) T.M.J. KNÖFEL, I.A. SACHETT, A. MARQUES, J.B. MARTINS and O.A.P. TAVARES; Critical rate of energy loss for registration of charged particles in cellulose nitrate, *Nucl. Instrum. Method*, **171**, 339 (1980).
 - 41) J. PORSTENDÖRFER and T.T. MERCER; Influence of electric charge and humidity upon the diffusion coefficient of radon decay products, *Health Phys.*, **37**, 191 (1979).
 - 42) S.K. DUA, P. KOTRAPPA and P.C. GUPTA; Influence of relative humidity on the charged fraction of decay products of radon and thoron, *Health Phys.*, **45**, 152 (1983).
 - 43) A.C. GEORGE; A passive environmental radon monitor, HASL 325, p.25 (1977).
 - 44) A.J. BRESLIN and A.C. GEORGE; An improved time integrating radon monitor, Surveillance du Radon Monitoring, OECD, p. 133 (1979).
 - 45) G. COWPER and M.R. DAVENPORT; An instrument for the measurement of long-term

- average radon levels, Proc. Advances in radiation protection monitoring, Stockholm, 26-30 June (1978).
- 46) R.A. WASHINGTON and W.J. COURNEYA; The measurement of low concentrations radon in air, *Health Phys.*, **45**, 559 (1983).
- 47) T. NIEWIADOMSKI and E. RYBA; Development of TL instruments for simultaneous radon and radon daughter monitoring, *Rad. Protect. Dosimetry*, **6**, 67 (1984).
- 48) K. MEGUMI and T. MAMURO; A method for measuring radon and thoron exhalation from the ground, *J. Geophys. Res.*, **77**, 3052 (1972).
- 49) R.J. COUNTESS; ^{222}Rn flux measurement with a charcoal canister, *Health Phys.*, **31**, 455 (1976).
- 50) B.L. COHEN and E.S. COHEN; Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption, *Health Phys.*, **45**, 501 (1983).
- 51) E. STRANDEN, A.K. KOLSTAD and B. LIND; The ETB dosimeter, a passive integrating radon dosimeter combining activated charcoal and TLD, *Rad. Protect. Dosimetry*, **5**, 241 (1983).
- 52) A.C. GEORGE; Passive, integrated measurement of indoor radon using activated carbon, *Health Phys.*, **46**, 867 (1984).
- 53) J. GUSTAFSSON and O. HILDINGSON; Radon measurements in dwellings using activated charcoal, *Rad. Protect. Dosimetry*, **7**, 203 (1984).
- 54) H.M. PRICHARD and K. MARIEN; A passive diffusion ^{222}Rn sampler based on activated carbon adsorption, *Health Phys.*, **48**, 797 (1985).
- 55) 岩田悦夫, 阪上正信; “活性炭吸着法による室内ラドンの測定, 大気中のラドン族と環境放射能” (岡部 茂編集), 日本原子力学会 (1985).
- 56) 岩田悦夫, 阪上正信; 活性炭吸着法による室内ラドン放射能レベルの簡易測定, 日本放射線影響学会講演要旨集, p.154 (1985).
- 57) C. COSTA-RIBEIRO, J. THOMAS, R.T. DREW, M.E. WRENN and M. EISENBUD; A radon detector suitable for personnel or area monitoring, *Health Phys.*, **17**, 193 (1969).
- 58) J.A. AUXIER, K. BECKER, E.M. ROBINSON, D.R. JOHNSON, R.H. BOYETT and C.H. ABNER; A new radon progeny personnel dosimeter, *Health Phys.*, **21**, 126 (1971).
- 59) P. DUPORT, A.M. CHAPUIS and J. PRADEL; Appareil individuel pour la dosimetrie des descendants du radon, Proc. Advances in radiation protection monitoring, Stockholm, 26-30 June (1978).
- 60) D.M. MCCURDY, K.J. SCHIAGAR and E.D. FLACK; Thermoluminescent dosimetry for personal monitoring of uranium mines, *Health Phys.*, **17**, 415 (1969).
- 61) S.F. GUGGENHEIM, A.C. GEORGE, R.T. GRAVESON and A.J. BRESLIN; A time-integrating environmental radon daughter monitor, *Health Phys.*, **36**, 452 (1979).
- 62) D.F. REGULLA, B. HAIDER, J. HUBER and W. JACOBI; Radon daughter monitoring with thermoluminescent detectors, *Nucl. Instrum. Method*, **175**, 233 (1980).
- 63) P. KOTRAPPA, S.K. DUA, P.C. GUPTA, N.S. PIMPALE and A. H. KHAN; Measurement of potential alpha energy concentration of radon and thoron daughters using an electret dosimeter, *Rad. Protect. Dosimetry*, **5**, 49 (1983).
- 64) R.L. FLEISCHER; Theory of passive measurement of radon daughters and working levels by the nuclear track technique, *Health Phys.*, **47**, 263 (1984).