

本資料は 〇/ 年 〇月 〇日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

堆積場周辺のラドン濃度に関する研究 (積分型ラドンモニタの特性に関する研究)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年 2 月

早稲田大学理工学研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術協力室



堆積場周辺のラドン濃度に関する研究

(積分型ラドンモニタの特性に関する研究)

黒澤 龍平*

要 旨

人形峠事業所において、堆積場周辺等における大気中ラドン濃度のモニタリングに使用している積分型ラドンモニタの特性を確認するため、一般的なラドンモニタの特性について調査するとともに、人形峠事業所で使用している積分型ラドンモニタの特性試験を実施し、これらのデータの比較検討を実施した。

本報告書は、早稲田大学理工学研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：040D0220

事業団担当部課室および担当者：人形峠事業所 安全管理課 伊藤 公雄

* 早稲田大学理工学研究所



目 次

1. 緒 言	1
2. ラドンモニタの構造と動作原理	3
3. ラドンモニタの実例	20
4. モニタのまとめ	36
5. Passive 型 monitorの較正	39
6. テストチャンバー	39
7. 試験法	41
8. 実験結果	47
9. 較正法に関する考察及び結言	48
10. TLD Passive Rn monitor の特性	50
11. 結 論	51

堆積場周辺のラドン濃度に関する研究
(積分型ラドンモニタの特性に関する研究)

平成5年2月26日

早稲田大学 黒沢龍平

1. 緒言

ラドンの平均濃度を簡単に測定するためいわゆる Passive型のラドンモニターが広く利用されている。一般的に Passive型という意味は一切の電力を使用しないというように理解されているが、必ずしもそうではなく単に試料採取に電力を使用せずまたある程度の時間外部電力の供給を受けずに測定が可能な場合でも同じようにPassive型と呼んでいる。したがってbattery駆動のcounterを使用したとしてもPassive型と呼ぶことも有り得る。前者のような理解のもとではモニターの性能がかなり制約されてしまうが、後者の場合だと検出系の制約が少なくなり種々の用途に適合したモニターを製作することが可能となる。

Passive型モニターは正確にラドン濃度などが求められることも必要だが、本来は簡便さが重要であり、多くの測定点のデータを有機的に処理して、主としてラドン濃度の空間的な分布などを把握するために使われるべき測定器である。しかしながら簡便であるため細部についての議論が不足しているように思われる。そのため取扱方法が不適切な場合もあり、殊に校正時に問題があるものと考えられる。

早大で開発した TLDを使用したラドンモニターは検出部に薄い通常 β 線用とされているTLD素子を使用し、 α 線を検出すると同時にそのために引き起こされる感度の低下を大型容器と静電捕集法の組合せにより補償するよう設計されている。検出器にTLD素子を使用することによって、硝酸セルローズやポリカーボネイトなどの飛跡検出器によって α 線を検出する際の煩わしさを避けることが可能となった。しかしこれを現場に適用するにあたっていくつかの問題が生じた。一つはこのモニターを製作した旧アサノ電子がフィルター部の製作に手抜きを行い、本来ミリボアーSMの両面に強度補強用のEPM2000フィルターを接着剤により接着するよう指示してあったのを無視して単に重ね合わせただけとし、さらに金属プレートとゴムパッキングによって容器本体に固定するようになっていた部分を金属テープで貼り付けるように変更してしまった。このような場合にはミリボアーSMをEPM2000より大きくし、SMフィルタ自身を容器本体に貼り付ける必要があったのを、単に体裁のみを整えて納入したようである。この結果、モニターのラドン交換時間が予定の20分をかなり下回っていたように思われる。これはメーカーがノウハウを無償と思っていること

にも原因があろう。さらにこの種のモニターでは容器内の水蒸気量によって感度の变化が起きることが予想されている。その影響を少なくするには電場強度を強くする必要があり、安全と思われる範囲で高電圧の電池を採用するとともに塩化カルシウムなどの乾燥剤を容器内部に設置する予定であった。しかしこのモニターを設置する百葉箱が小さく、モニターをかなり傾斜させねば設置もしくは取り出すことができず、設置時には良いとして取り出し時(TLD素子の交換時)には溶けた乾燥剤が容器内にこぼれる恐れが生じた。このためやむを得ず乾燥剤の効力の寿命と関係なく長時間の曝露が可能となったが問題を残すこととなった。さらにTLD素子の感度の不均一性、経年変化、モニターの較正法などの問題もあったのでこれらに関し検討することとなった。

一般にPassiveとは測定に一切の電力を消費しない意味とされているが、必ずしもそのような狭義の意味ではなく、測定試料を動力によって捕集するのではなく拡散のような自然力によって集めるという広い意味で使う場合もある。Pylonの model PRD-1などはその一つである。これを発展させると例えば静電捕集型ラドンモニターの検出部を半導体検出器とし、その出力をRaA、RaC'、ThC'の α 線に対応する波高値で3分割し、それを時間分割されたMOS-IC-memoryに入れると有効なラドンモニターが得られるはずである。トロンの除去が確実ならば、波高弁別を行わなくともよく、時間的遅れはあるものの情報量の多いモニターが得られる。3 l程度のモニター容器を使用した場合 $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ のラドン濃度に対し1 channel方式(RaA+RaC')で4時間ごとに約18countsが得られる。1 lの容器に簡単な半導体検出器を設置した場合でも6時間ごとに約6countsとなる。したがって日変化をある程度把握しながら、小型のbatteryのみで2~4週間使用できるモニターを製作できるが、今のところこの種の製品は見当らない。しかし従来の積算型のモニターよりは多くの情報が得られるであろう。

2. ラドンモニターの構造と動作原理

2.1 モニターの形式

passive 型と呼ばれるモニターの形式は、空気試料の採取にエネルギーを消費せず自然法則、たとえば拡散などによって試料を採取する方式である（検出に多少のエネルギーを必要としても passive 型と呼ばれている）。そのため多量の空気試料を採取することができず、したがって感度は当然低くなり、所定のラドン濃度まで測定するには長時間放置（曝露）しなければならない。しかしエネルギー消費がなく、ポンプ類などによる騒音もまったくなく、しかも構造が簡単で価格も安いので広い地域の住宅などを対象にした環境測定に適しているといえよう。その反面、感度が低いばかりでなく試料の取込みに動力採取のような定量性が期待できないため、感度の安定性に欠ける点がある。これに対し試料の採取にエネルギーを使用する方式を active 型と呼ぶ。active 型式のラドンモニターは高感度で信頼性も高く、ラドン濃度の時間的変動も把握できるが、住宅内での使用には形状が大きく、また試料吸引のためのポンプの騒音が嫌られること、さらには価格が高く多数の測定点を設定しにくいこともあって、何等かの理由で詳細な測定を必要とする場合は別として、通常の住宅内でのラドン濃度評価に使用され

ることではない。

passive 型式のラドンモニターは、原則としてろ過機構を有する容器とその中に設置した検出器によって構成されている。容器の材質は価格の点からプラスチックの場合が多いが、安定性を見地からいえば金属の方が良い。容積は 20 cm^3 程度から 7 l 程度の製品まで種々である。ろ過機構としては、通常フィルタが使われている。フィルタの種類も多く、孔径の小さなメンブランフィルタからガラス繊維ろ材に至るまで広範囲の製品が使用されている。フィルタの目的は、これによって空気中のラドンのみを通過させ、娘核種や他の粒子状物質を阻止するとともに、容器の容積とも関連して容器内に流入するラドンの速度をコントロールすることにあるが、多くのラドンモニターはこのコントロール機能を見捨てて設計されているように思われる。

容器内の適当な位置に検出器が設置されている。検出器としては通常 α 線の検出と検出器に入射した α 線の数が記憶できるような、たとえば硝酸セルロース、CR-39、マクロフォルなどの飛跡検出器や TLD 素子、また半導体検出器とメモリー用 IC の組合せなどが使用されている。

測定する対象はラドンおよび容器内でラドンより生成した娘核種から放出される α 線である。ラドンは不活性の気体なので容器内に一様に拡がっていると考えられるが、娘核種は後に述べるように、人為的な電場を与えぬ限り拡散によって容器内壁に付着しているものと考えられる。ただプラスチック製のように局部的に帯電する可能性のある容器の場合は、娘核種の付着分布の一様性が失なわれ、時として感度に影響するものと考えられるが、これに関する詳細な検討を行った例は見えていない。また、感度を高くするため検出器と容器内壁の間に適当な電位を与え、その多くが正の電荷を有するラドンから生成した直後の娘核種(^{218}Po)を検出器付近に集める方式がある。このために電池などが用いられるが、ポテンシャルを与えているのみということから passive 型の範疇に入れている。電池の代りにエレクトレットを使用した例もある。電場を与えない時は、壁に付着した娘核種から放出される α 線と容器内のラドンの α 線の両者を検出することになるので、容器の大きさを α 線の飛程以上に大きくすると感度は低下するが、電場を与えた場合は強制的に娘核種を集めることができるため、大型の容器を使う傾向にある。

2.2 フィルタの機能

多くのラドンモニターではフィルタを介して外気と容器内のラドンが流出入し両者間の平衡が保たれる。容器内のラドンやトロン濃度を推定するため、フィルタを通過するラドンの割合がフィルタの両側すなわち容器内外のラドン濃度の差に比例すると考えると、フィルタの面積を $S \text{ m}^2$ 、ラドンの通過に対するフィルタの抵抗を $R \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 、容器内外のラドン濃度を $C_1, C_0 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 、容器の容積を $V \text{ m}^3$ 、ラドン(またはトロン)の壊変定数を $\lambda_n \text{ s}^{-1}$ として時間 $t \text{ s}$ について

$$\frac{dC_1}{dt} + \left(\lambda_n + \frac{S}{RV} \right) C_1 = \frac{S}{RV} C_0 \quad (1)$$

が成立する。 $S/RV = B_v$ とし、さらに $t=0$ で $C_1=0$ と考えると、式(1)より、

$$C_1 = \frac{B_v}{(\lambda_n + B_v)} C_0 (1 - e^{-(\lambda_n + B_v)t}) \quad (2)$$

となり、定常状態では、

$$C_1 = \frac{B_v}{(\lambda_n + B_v)} C_0 \quad (2')$$

となる。ここで、 B_v の選択が問題である。ラドンモニターはラドン濃度の測定器なので、

$$C_1 \doteq C_0$$

の関係が期待され、また歓迎せざる存在であるトロンに対しては、

$$C_1 \ll C_0$$

の関係も同時に期待される。ラドンとトロンの壊変定数はそれぞれ $2.098 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $1.247 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。したがって容器内のトロン濃度を容器外の $1/100$ にするためには式(2')より $B_v = 1.26 \times 10^{-4}$ とする必要がある。その時の容器内のラドン濃度は、

$$C_1 = 0.984 C_0$$

となり、外気のそれより 1.6% 程度低くなる。また容器の容積 V が小さくなれば同じ B_v を与えるため S/R を小さくしなければならない。 B_v をどの程度にするかは測定する場所のトロンとラドンの濃度比を考慮して定めねばならないが、これは予想されないことが多い。多くのラドンモニターではこれについての配慮に欠けているようである。なお、ミリポア RA (孔径 $1.2 \mu\text{m}$) で実測した R は $930 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ であった。 S をある程度に保ちつつ、 R を選択してラドンの流入速度を調整した方が良いように思われるが、適当なフィルタがなく S で調整することになるろう。

2.3 拡散付着型 (cup 型) モニターの感度

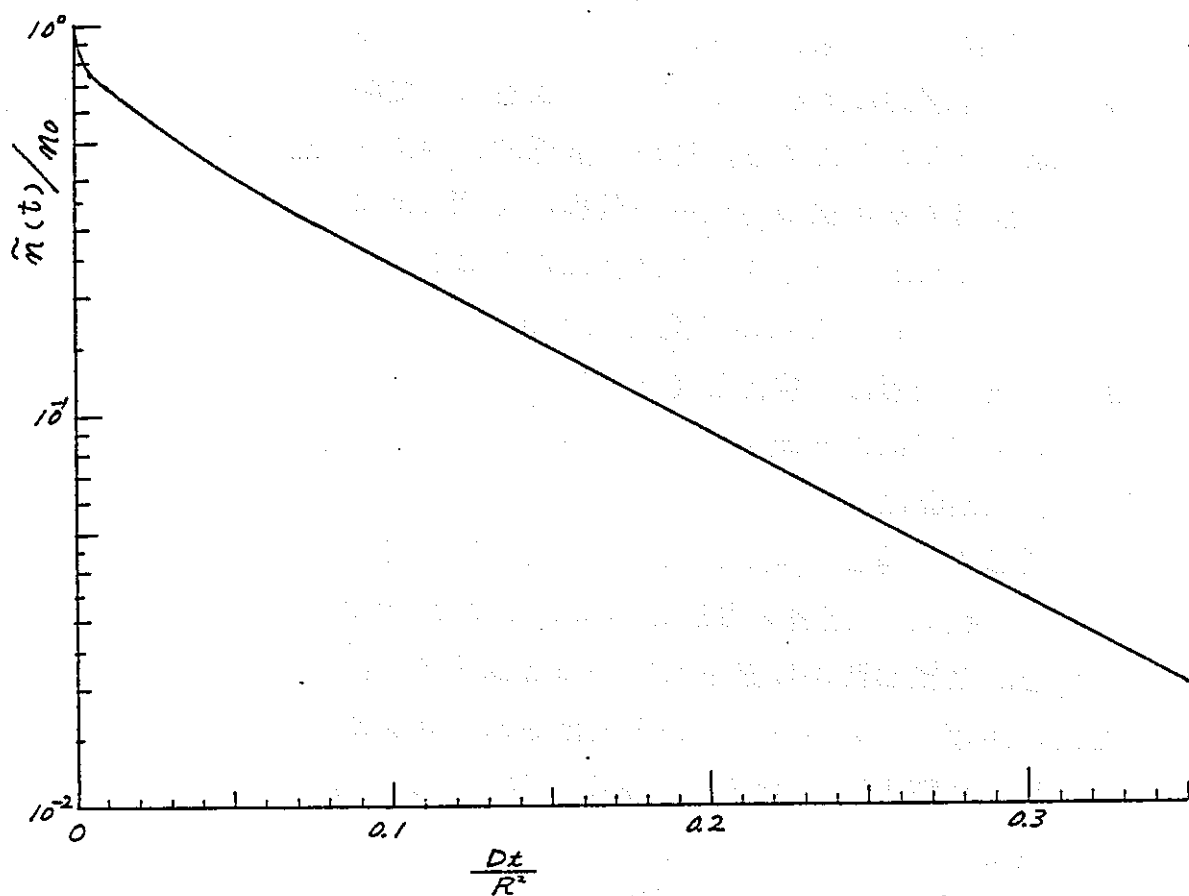
容器内で生成した娘核種は、いわゆる free 成分 (凝

結核すなわちエーロゾルに付着していない成分)である。検出器を設置し測定開始した直後はエーロゾルの濃度は外気と同様であろうが、時間とともに次第に減少し、それとともにfree成分の割合は増加し、遂には見掛上ほとんどがfree成分となるであろう。free成分は拡散速度が大きく短時間のうちに容器内壁に付着する。この型のラドンモニターは後述の理由から小型で大きくとも200 cm³程度である。いま半径3.5 cmの球を考え拡散係数を0.06 cm²・s⁻¹ (0.054 cm²・s⁻¹といわれるが実測するとこれより大きな値が得られることが多い) とすると球内壁の拡散による付着割合³⁾は

$$\frac{\bar{n}(t)}{n_0} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 D t}{R^2}\right) \quad (3)^*$$

として表わされる。ここで、 $\bar{n}_0$, $\bar{n}(t)$ は始め ($t=0$) と時間 t 後の粒子濃度、 D は拡散係数、 R は球の半径、 t は経過時間である。式(3)より約8秒で容器内のfree成分の濃度の1/2は壁面に付着することが分かる。したがって、²¹⁸Poの半減期を考慮すると、²¹⁸Poのfree成分の95%以上が容器内壁に付着するものと考えられる。そのため容器内に設置した検出器には、①容器内に浮遊しているラドン、②容器内壁に付着したラドン娘核種 (²¹⁸Poと²¹⁴Po)), ③検出器面上に付着した

* 別図



D : 拡散係数 cm^2/sec
 R : 球形容器半径 cm
 t : 時間 sec

別図. 球形容器内壁に対する拡散沈着による粒子濃度の減少曲線

ラドン娘核種、のそれぞれが放出した α 線がそれぞれの効率を持って入射する。この型式のラドンモニターの感度は上記の3種の線源からの α 線をいかに効率良く検出するかにかかっている。この感度の概念を把握するため、半径 R の半球状の容器の底面中央に検出器が設置された理想的な形状のモニターを仮定し、簡略化した計算を行うことにする。初めに直感的に半径 R はラドンの放出する α 線の空気中の飛程約4.08 cmよりやや少ない3.6 cmより小さくしなければならぬことが推定される。4.08 cmと3.6 cmの差約0.5 cm(約1 MeVに相当)の残存飛程は、検出し得る最低のエネルギーとストラグリングによる低エネルギー側への拡がりに対応する。検出器は必ずしもすべてのエネルギーの α 線に対し同じ入射角まで有効に検出する訳ではないが、ここでは概念的な把握を目的としているため、そのような理想的な検出器が設置されていると仮定する。

容器内に浮遊しているラドンから放出される α 線が検出器の微小面積 ΔS に入射する α 線の本数 I_1 は、 C_0 をラドン濃度、また検出器の法線から測った α 線の入射角を θ とし、半球の中心から距離 r と $r+dr$ の間の球殻中のラドンから放出され検出器に入射し検出される α 線の数を下記のように積分すれば求められる。ここで θ_0 は検出可能な最大の入射角(臨界角)である。

$$\begin{aligned}
I_1 &= \int_0^R \int_0^{\theta_c} C_0 \frac{\Delta S \cos \theta}{4 \pi r^2} \cdot 2 \pi r \sin \theta \cdot r d\theta dr \\
&= \int_0^R \int_0^{\theta_c} \frac{C_0 \Delta S \cos \theta \cdot \sin \theta}{2} d\theta dr \\
&= C_0 \cdot \frac{\Delta S \cdot R}{8} (1 - \cos 2 \theta_c) \quad (4)
\end{aligned}$$

一方、容器内壁に娘核種が一樣に付着していると仮定すると、その面密度は、

$$\frac{2}{3} \pi R^3 C_0 / (2 \pi R^2 + \pi R^2) = C_0 \frac{2}{9} R \quad (5)$$

となり、この娘核種から放出される α 線のうち検出器に入射し検出される本数 I_2 は、

$$\begin{aligned}
I_2 &= \int_0^{\theta_c} C_0 \frac{2}{9} R \cdot \frac{\Delta S \cos \theta}{4 \pi R^2} \cdot 2 \pi R \sin \theta \cdot R d\theta \\
&= C_0 \cdot \frac{\Delta S}{9} R \int_0^{\theta_c} \sin \theta \cos \theta d\theta \\
&= C_0 \frac{\Delta S R}{36} (1 - \cos 2 \theta_c) \quad (6)
\end{aligned}$$

となる。検出器面上に付着した娘核種のうち検出器で検出される本数 I_3 は、

$$\begin{aligned}
I_3 &= \int_0^{\theta_c} C_0 \frac{2 \Delta S}{9} R \frac{1}{2} \sin \theta d\theta \\
&= C_0 \frac{\Delta S R}{9} (1 - \cos \theta_c) \quad (7)
\end{aligned}$$

となる。検出器に入射し検出される全 α 線の数 I は α 線を放出する娘核種が2核種あるので、

$$I = I_1 + 2I_2 + 2I_3$$

$$= C_0 \cdot \Delta S \cdot R \left\{ \frac{1}{8} (1 - \cos 2\theta_c) + \frac{1}{18} (1 - \cos 2\theta_c) + \frac{2}{9} (1 - \cos \theta_c) \right\} \quad (8)$$

となる。これよりこのような条件では検出器に入射し検出される α 線の数 I は、ラドンの α 線の飛程の範囲内で R に比例し I_1, I_3, I_2 の順に少なくなることが分かる。 θ_c が 90° の時は、

$$I = C_0 \cdot \Delta S \cdot R \{0.250 + 0.111 + 0.222\} \quad (9)$$

であるが、CR-39などの臨界角でも 75° を超えることはないので θ_c を 75° とすると、⁽²⁾

$$I' = C_0 \cdot \Delta S \cdot R \{0.233 + 0.104 + 0.165\} \quad (9')$$

のようになる。臨界角の減少に対し第3項の変化が著しい。この傾向は検出器の性質や容器の形状によって多少異なるが大勢として類似する。式(9')の場合、 $R = 3.5 \text{ cm}$, $\Delta S = 1 \text{ mm}^2$ とすると、 1 n/mm^2 のエッチビット密度当たり $659 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ の積算ラドン濃度となり、たとえば 0.3 n/mm^2 を検出限界とすれば、90日間の曝露で $2.2 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ の濃度まで検出できることになる。これがこの種のモニターの感度の限界であろう。筆者が製作したモニター⁽⁴⁾の感度は 1 n/mm^2 当た

(2) 臨界角 4 MeV 以下 $\sim 65^\circ$. 7.7 MeV : $\sim 44^\circ$
 6 MeV : $\sim 51^\circ$

り $810 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ で、同一条件での検出限界は $2.7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ の濃度となっている。ここで感度に寄与する割合は容器中のラドンの α 線が45%前後、容器内壁に付着した娘核種の放出する α 線が20%前後、検出器表面に付着した娘核種の放出する α 線が30%前後であることに留意されたい。

2.4 静電捕集型ラドンモニター

娘核種を拡散付着によって捕集する場合に限界があることは前項で述べた。それ以上高い感度を実現するには active 法か静電捕集法が使用される。娘核種 ^{218}Po がラドンから生成したさい、その約88%が正の電荷を有しているといわれている⁵⁾。したがって容器内に適当な電場が作られれば、このような ^{218}Po は負電極に捕集される。移動速度はその部分の電場強度を $E \text{ V/cm}$ とし ^{218}Po を単独の正イオンと考えれば⁶⁾、 $1.41 \times E \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度となる。また酸化ポロニウムと仮定した時 $(1.86 \pm 0.11) E \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ との報告⁵⁾ もある。これらの値のみから考えれば、電場強度がそれほど高くなくとも充分機能するはずであるが、電子親和性の強い気体、たとえば H_2O , NO_2 , SO_2 などによって ^{218}Po の移

動が妨害される。水蒸気の場合は水の放射線分解によって生じた free radical の OH 基が電子を捕え負に帯電し、正の電荷を持つ ^{218}Po イオンと結合し、それを中和するためと説明されている。これを防ぐには電場強度を著しく強くして ^{218}Po の移動速度を早くし、再結合を起こす確率を低くしなければならない。ある論文⁵⁾によれば 20℃ で相対湿度 80% の状態で電極間の距離を 10 cm とした時 H_2O との結合を防ぐために 260 V/cm の電場強度を必要とするとされている。しかし実測した結果からでは、それほど電場強度の必要はないように思われるが、少なくとも 30-50 V/cm 程度は与えるべきであろう。

湿度に関する対策として除湿剤を容器内に設置すれば良いが、モニターの目的から長期間環境中に放置されるのでその間除湿能力を保持させねばならない。モニターの容積や気候条件にもよるが、除湿剤は通常 1 か月か 1 か月半程度で能力を失なうことが多いので、除湿能力が制限されても長期間使用できる除湿剤容器などを開発し、少なくとも 3-4 か月間その能力を保持させる必要がある。除湿剤として五酸化リンか塩化カルシウムが使用される。シリカゲルはラドンをわずかながら吸着するので好ましくない。

感度に影響があるとされている電子親和性のある気体として NO_2 , NO , NH_3 や SO_2 などが上記論文の中に

挙げられ、その中の NO_2 は 100 ppb 程度でも影響があるとされていた。この計算のプロセスは報告されておらず、結果のみでありその正当性について疑問があったため、 NO_2 濃度が 0 ppm の場合と 0.5 ppm の場合について ^{218}Po イオンの再結合による損失の差について簡単に比較したが、多少の差は見られるものの有意の差とは考えられず、したがって上記のような極低濃度の NO_2 の影響は疑問のように思われる。しかしこの種の問題はこの方式のモニターにとってきわめて重要であり、再度実験的に確認する必要がある。

静電捕集型のモニターは拡散付着型に比して充分過ぎるほど高感度なので、検出器の感度を多少低くしても実用性を失なうことはない。そのためエネルギー弁別性を持たせた飛跡検出器や、入射した α 線の本数の読み出しが容易な、たとえば TLD 素子などを使用することも可能である。

電場は通常高圧の乾電池によって与えられる。電力消費は装置内のリークのみならばまったくないと考えて良いが、乾電池内でリークが起きるため次第に消耗する。また野外で使用する则装置の表面でのリークが起きるためか消耗がはげしく、大略 2-3 年位しか使

用できない。電池を使用せずエレクトレットを利用することも考えられているが実用化はされていないようである。

2.5 吸着捕集型モニター

ラドンを吸着するたとえば活性炭を利用したモニターがある。活性炭はラドンを良く吸着するといわれているが、ラドンは不活性気体なので物理吸着で活性炭 (g^{-1}) と空気 (cm^{-3}) の間のラドンの分配係数はそれほど大きくなく、常温で 10^4 以下である^{7),8)}。気温が上昇すると分配係数が小さくなることは良く知られているとおりである。

活性炭吸着法で平均ラドン濃度を求める場合、基本的に全活性炭重量で平均した総ラドン吸着量が、積算中の最低ラドン濃度に対する飽和吸着量以下でなければならない。通常活性炭を適当な容器に入れ測定環境に放置しラドンを吸着させている。その時ラドンは活性炭容器の片側より拡散によって深い位置に侵透する。そのため活性炭層内にラドン濃度の分布ができ、しかも外気側の吸着量が高いため、一度吸着したラド

ンの離脱も考えられる。とくにラドン濃度が急激に低下した場合にはその危険性がきわめて大きくなる。したがって活性炭量や曝露時間についての慎重な対応が必要であるが、きわめて安直に扱われていることが多い。また、空気中の水蒸気によって一度吸着したラドンが離脱するともいわれている⁹⁾。実験的に湿気によるラドンの離脱を確認したことはないが、湿度が高くなると吸着能力は著しく低下する。これを防ぐため、活性炭容器の入気流側にシリカゲルなどの除湿剤を挿入すると良い結果が得られる。シリカゲルもラドンを吸着するが分配係数は 10^3 以下であり、この部分でラドンを吸着しても感度に影響を与えることはない。

2.6 ラドンモニターの検出器

モニターの検出器として通常飛跡検出器が使用される。この他に TLD 素子が使われることもあり、また ZnS シンチレーション検出器や半導体検出器が IC メモリーと組み合わされて使用されることもある。

飛跡検出器としては硝酸セルロース (CN) フィルムが古くから知られている。現在、Kodak-Pathe 社の LR-115 が α 線計測用の CN フィルムとして広く使われている。この検出器は透明なベース上に赤色に着色された薄い CN フィルムが貼りつけられ、エッチピットができると透明に近い穴として観察されるため、低倍率に拡大しただけで容易に計数されるようになる。

CN フィルムの欠点は約 4 MeV 以上（エッチング条件で異なる）の入射 α 線に対してエッチピットを作らないことである。また、4 MeV 以下であってもフィルムに垂直から約 45° 位までの間に入射しないと同様に検出されない。しかしこれを逆に利用してアルミ箔や空気層を入射 α 線に対する減速材とし、特定のエネルギー範囲の α 線のみを検出することも可能である。たとえば ^{218}Po の α 線 (6.0 MeV) のみを検出（実際には ^{212}Bi の α 線も検出される）するといったことが行われている。

アリルジグリコールカーボネート (ADC) モノマーの重合体で代表されるプラスチックはきわめて感度が高く、ほとんどすべての天然の核種の放出する α 線を検出することができる。また、検出可能な入射角の範囲も 70° 以上⁴⁾ にまで広がっている。この種の検出器として CR-39, TS-16 やバリオトラックなどが市販されている。このうち、TS-16（現在製作されていないという）とバリオトラックは放射線（ α 線や陽子）の検出用として製造され、製品はすぐれた安定性を示している。CR-39 はプラスチックレンズの材料で価格は

安い、放射線検出用としてはノイズ（疑似エッチビット）や性能上のムラが多いといわれている。

ポリカーボネートも検出器として使用されている。これにはマクロフォルがある。検出し得るエネルギー範囲はCN フィルムよりはるかに低い、非常に薄く丈夫なフィルムが得られるので、電気化学的エッチングが可能である。これは膜状の検出器の両側に電解液とエッチング液を浸し両者に、たとえば 800 V, 2000 Hz の交番電圧を与えながらエッチングする方法で、大略同一で非常に大きい（目視できる）特徴のある形状（金平糖のようにトゲのある円形）のエッチビットができる。このエッチングに先立って通常の化学エッチングを行い、検出面の疑似エッチビットを取り除くとともに、バルクのエッチングにより検出器の表面を削り検出可能なエネルギー範囲を拡げることがある。電気化学的エッチングは専用のホルダー類が必要なため任意の枚数の検出器をエッチングするには不便である。

TLD 素子によっても α 線を検出し、入射本数（近似的にエネルギーと本数の積）を記録することができる。この素子によって信頼性のある記録が得られれば、読み出しがきわめて簡単でかつ客観的なので飛跡検出器で見られるような煩雑さから解放されることになる。そのためには、 α 線が素子の有感部にほとんど損失を受けずに入射しなければならないので、TLD 素子の

有感部が大気に露出している必要がある。このような素子として化成オプトニクス製の MSO-5D または 10D, 松下電器産業製の UD-100 M 8 が市販されている。両製品とも α 線の検出は可能であるが, ラドンモニターの性質上長時間放置して α 線の入射本数を積算する必要があり, そのため相当量の γ 線の照射を受けるので, γ 線に対する感度が低く α 線のような粒子線に対する感度が高いような形状, すなわち素子の本体の厚さが薄く, かつ有効面積の広い素子が適しているものと思われる。上記 3 者のうち UD-100 M 8 が最もそれに近い。TLD 素子の入射した α 線に対する発光効率(エネルギー吸収に対する発光量)は, いずれの素子も γ 線に対するより 1 桁程度低く, また発光量も入射した α 線のエネルギーと完全な比例関係にはなく, 低エネルギー側 (2.5 MeV 以下, ことに 1 MeV 以下が著しい) が湾曲 (低エネルギー側の感度が低い) しているが, ラドン濃度の測定の場合には問題とならない。TLD 素子は γ 線によるバックグラウンドの妨害を受けるため, 飛跡検出器より感度は低くなる。

3. ラドンモニターの実例

3.1 モニターの選択

モニターを選択する場合にはモニターの感度も重要であるが, 近年の知見からトロンの有無も重要な検討

対象となった。一般環境中のトロン濃度は非常に低いとされていたが、わが国の関西地方の住宅内でのラドンモニターによるラドン濃度評価値の中に、時として異常に高い濃度を示す例があり、その原因は関西に多い土壁に含まれている放射性鉍物からトロンが放出されていることにありと推定された。土壁の厚さは薄く、したがってトリウム系の鉍物が存在すれば壁付近のトロン濃度はラドン濃度より遥かに高くなることが拡散理論から容易に想像される。実測された極端な例では、壁から 8 cm の距離でトロンとラドンの濃度比が 30 : 1 であり、0.8m 位の距離では 5.6 : 1 であったという。このような例から、トロンの流入をなんらかの方法で少なくし、モニター内外のトロン濃度比を 1 : 100 程度まで下げる必要があるのではないかと考えている。市販のほとんどのラドンモニターはこの点の配慮が充分なされているとはいえないようである。静電捕集方式は非常に高感度であるが、妨害気体の影響が議論されており、これについての本格的な検討が必要である。しかし感度以外の種々の利点があり、それらを考慮して選択すべきであろう。

3.2 bare 型¹⁰⁾

これは最も簡単なラドンモニターである。あまりにも簡単なので市販されてはいないのではないかと思う。これはCR-39などのADC重合体の飛跡検出器を厚紙の上に貼りつけて測定箇所放置する形式で、そのためにbare型と呼ばれている。空気中のラドンおよび娘核種と検出器上に付着した娘核種から放出される α 線がエッチピットとして検出される。(式(4)参照) 滋賀大学のグループによれば、CR-39のエッチピットの形状にはある程度のエネルギー依存性があり、 α 線のエネルギーが高い時は小さくかつくさび状になり、低くなるに従い大きくなるとされている。一方空気の移動がなければ娘核種の多くは拡散により検出面の近くに流入し検出面に付着するため、空気中のラドンと娘核種はエッチピットの形状などからある程度識別は可能だが完全な分離は無理なように思われる。

3.3 cup 型

2.3で述べた形式で、ラドンカップなどということもある。きわめて多くの種類があるが、基本的には大略同一の構造である。前項に大略の形状を述べたが、近年は比較的小容積のモニターが使われるようになった。たとえばRadtrak(図1)という商品名で売られているモニターを例にとる。これはTerradex社から発

売* されている。このモニターはラドンが入らぬよう
密封した袋に入れて送付されてくるので、使用する直
前に開封し測定すべき環境に放置する。放置（曝露）



図1 ラドトラック

穴 2.54 cm^2 ($6\text{ mm}\phi\times 9$)

* 国内では長瀬ランダウア株式会社が扱っている。

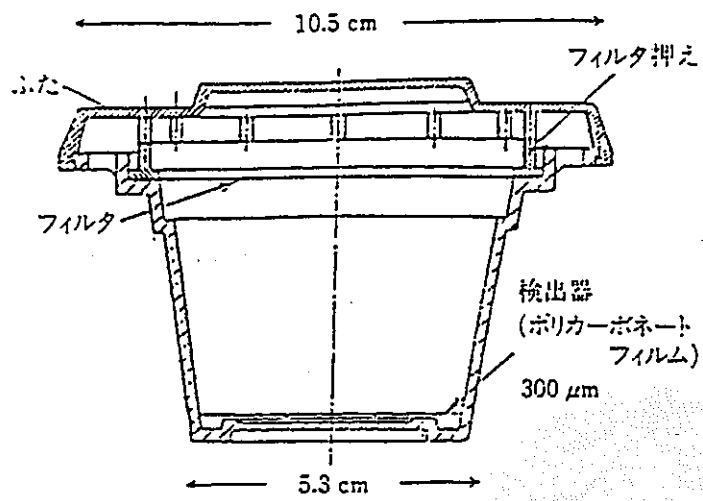


図2 西独で開発された passive 型ラドンモニター

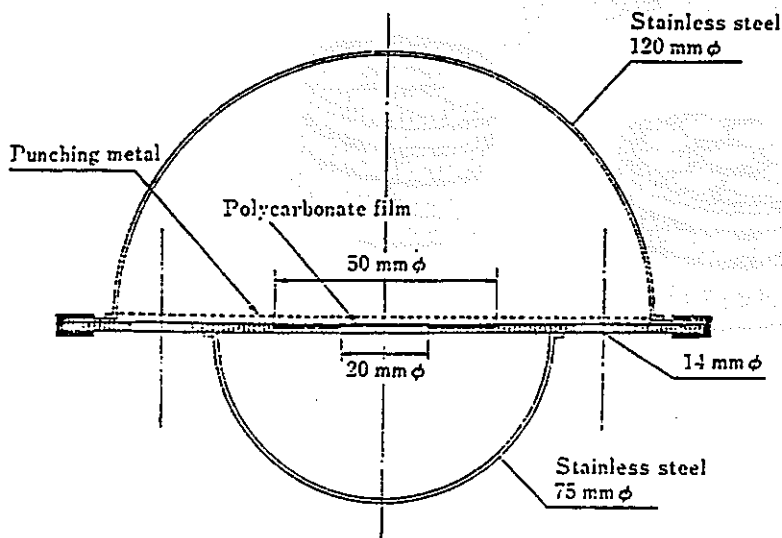


図3 ラドン・トロン弁別型ラドンモニター

時間は感度の点から3か月以上とされている。適当な曝露期間後添付されたシールでモニターの入気部分を密封し、Terradex社に送り返しそこでモニター内部の飛跡検出器(10×20 mmのバリオトラックという)を化学エッチングしエッチピットを自動計数してラドン濃度を算定する。モニター容器は導電性と思われるプラスチック製で、直径26.5 mm、高さ24 mmの円筒状容器の上部に直径6 mmの9個の穴があり、ろ紙が取り付けられている。測定し得る積算濃度は30 pCi·l⁻¹-day(1.1×10³ Bq·m⁻³-day)以上とされ、したがって3か月の曝露では12 Bq·m⁻³(0.33 pCi/l)の濃度まで数値を出すことができる。EPA(米国環境保護庁)の安全基準レベルは4 pCi·l⁻¹で、またICRPによる天井値は平衡等価ラドン濃度で100 Bq·m⁻³(ラドン濃度で大略5.4 pCi·l⁻¹位に相当)なので、それから見れば充分な感度であるが、わが国の場合はやや不足で、

6か月の曝露が必要であろう。この種のモニターは換気速度が非常に早く、したがってトロニウムが存在するとそれだけ過剰評価になるので、もしこのモニターを採用するのであれば事前に使用する環境の調査をした方が良い。9個の穴のうち、8個をふさぎ1個にしてもトロニウムに対する感度にはそれほど大きな差はないはずである。

前記のモニターより大型の例として、ドイツのカールスルーネ原子力研究所で開発したcup型のモニター(図2)にいつて説明する。このモニターの内容積は 450 cm^3 でcup内の気体の $1/2$ がグラスファイバーろ紙を介して外気と交換するのに44秒を要するという。(式(2)の B_v は $1.58 \times 10^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる)。したがって容器内のトロニウム濃度は外気の約56%に減少するに過ぎない。6か月程度の曝露期間の後1時間のブレンッチングを行い、さらに3.5時間の電気化学ニッチングをすると目視できる程度のニッチピットが得られる。ニッチング液は8N KOH 80%とニタノール20%の混合液で電解液は1N KOH水溶液である。検出体はポリカーボネート(厚さ $300\text{ }\mu\text{m}$ のマクニフォル)で電圧として2000 Hz, 800Vが与えられる。感度はラドンに

対し* $0.0218 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ ときわめて低いが、計数面積が広いため6か月の曝露で $3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ のラドン濃度まで求められる。このモニターもトロンが存在すれば過剰評価を起こす可能性がある。

放射線医学総合研究所では新しいラドンモニター¹¹⁾ (図3)を開発した。それは直径120 mmと75 mmの二つのステンレス製の半球を、底面の平面部で中心を一致させて上下に結合したような形状をしている。120 mm半球の底(75 mm半球の底面の外側)に14 mm ϕ の穴が8個あり、グラスファイバーろ紙が貼りつけられている。75 mm半球は密封され、底面に直径1 mmの穴が120 mm半球の底との間にあけられている。ラドンを含む試料空気は8個の穴から大型の半球内に侵入し、その一部がさらに1 mmの穴を通して小

* 1 n/mm^2 に対し $4587 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ 。

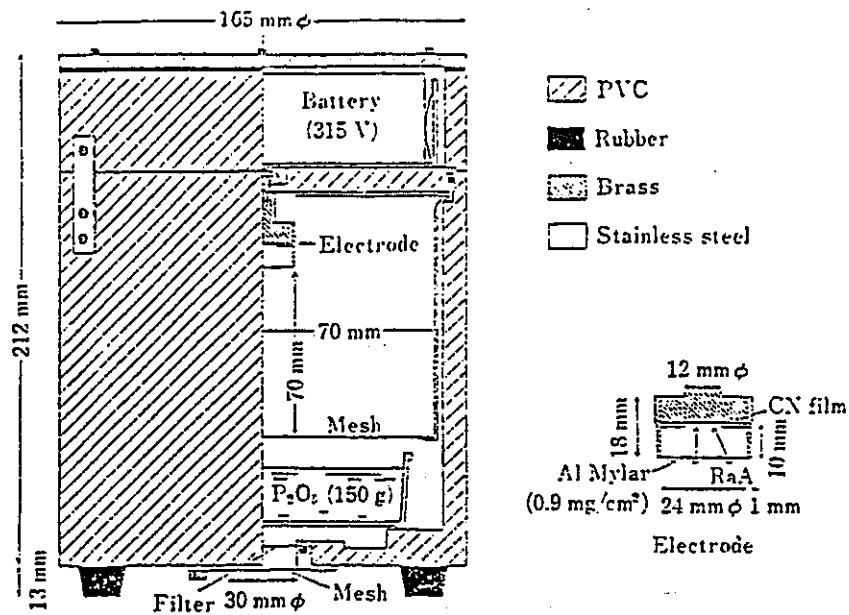


図4 静電捕集型ラドンモニター(CN フィルム使用)

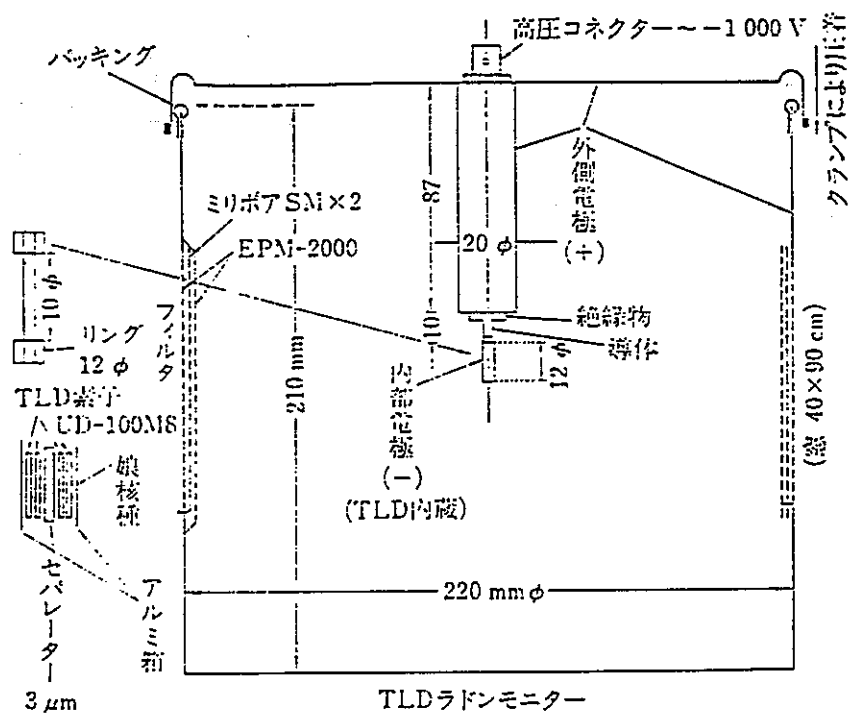


図5 静電捕集型ラドンモニター (TLD 素子使用)

さい半球に移行する。それぞれの半球の底面にポリカーボネート（三菱ガス化学製ユピロン，厚さ 300 μm ）膜が検出器として設置されている。それぞれの半球内気体の交換時間は 15.89 回/時，0.379 回/時である（ B_v : $4.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ， B_v : $1.05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ）。エッチングは 120 mm 半球の方がプレエッチング 3 時間，75 mm 半球の方が 75 分で電気化学的エッチングは両者とも 3 時間である。ラドンとトロニに対する感度は $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ に対し 120 mm 半球は 0.0299 n/cm^2 ， 0.0127 n/cm^2 ，75 mm 半球は 0.0395 n/cm^2 ， 0.00001 n/cm^2 以下とされている。このため二つのポリカーボネートのエッチピット密度からラドンとトロニの両者の濃度が分離して求められる。この測定結果を見ると，トロニが予想以上の範囲で分布しているようである。現在，ラドンとトロニの両者を区別して検出し得る passive 方式で cup 型のモニターは市販されておらず，ユニークな検出器なので紹介する。トロニ濃度がラドン濃度より著しく高い時はこの種の方法で対応せざるを得ないと思われる。

3.4 静電捕集方式

ラドンより生成した直後の ^{218}Po の大部分は正の電荷を持ち、負電極に捕集されることはすでに述べた。原理的には数 V/cm の弱い電場強度でも十分な効果があるが、電子親和性のある気体（たとえば H_2O , NO_2 , NO , SO_2 , etc）による再結合を避けるため、ある程度高い電場強度を与える必要がある。しかし高い感度を得るためには、電場を与えた部分の容積を大きくし、しかも検出部の面積を小さくしなければならぬといった構造上の制約のため、強い電場を与えることは難しい。

名古屋大学で開発されアロカ社から発売されているラドンモニター¹²⁾（図4）は内容積が11で容器内気

体の $1/2$ が交換する時間は110分
($B_v: 1.05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)である。315V
の電池（電場強度大略 45 V/cm）に
より直径12mmのアルミマイラ上に
娘核種が捕集される。このアルミマ
イラの内側にCNフィルムが設置さ
れている。娘核種から放出された6
MeVの α 線はアルミマイラと空気
層内で減速され、CNフィルムで検
出され、それ以上のエネルギーでは
検出されない。すなわち ^{218}Po と ^{212}Bi
の α 線が検出され、 ^{214}Po や ^{212}Po
(^{216}Po ?)の α 線は検出されない。
このモニターの感度は直径12mmの
CNフィルムに1日当たり100個のニ
ッチビットを作るのに $2.58 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

のラドン濃度で良いとされている。これは 1 n/mm^2 の
ニッチピット密度当たり $2.92 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ に相当す
る。検出器での弁別効果があるため、換気率によって
トロンの影響を減少させた以上の（3倍近く）トロン
除去効果がある。このモニター内には五酸化リンを使
った乾燥剤が設置されているが、その効力が2か月と
され、したがって曝露期間は2か月以内となるが、そ
れでも十分な感度を有している。

筆者が開発しアサノ電子社から発売されたモニター
(図5)は7 lのステンレス容器内に負電極を兼ねた検
出器があり、負の約1000Vが電池によって与えられ
ている。検出部はTLD素子(UD-100 M8)で、それ
によって静電捕集された娘核種の α 線や β 線が検出さ
れる。このTLD素子に5 MeVの α 線が150-170本入
射した時、1 mR相当(^{60}Co でそのTLD素子を照射し
た時の線量)の発光がある。素子の直径が8 mmなの
で、これは $3-3.5 \text{ n/mm}^2$ に相当する。このモニター
内の気体の1/2が換気する時間は17分である(B_v :
 $6.80 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) (現在フィルタ部を交換し113分にな
るよう変更しつつある)。このモニターの感度は1 mR

当たり $5.34 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}$ であるが、 γ 線のバックグラウンドの影響を受けるため、 10 mR 程度の発光量を必要とする。このTLD素子は CaSO_4 を樹脂とともにコーティングしてあり、アニーリングや測定のための加熱によって次第に着色の度を増し、感度が変化する。そのため ^{60}Co の γ 線を一定量照射し感度補正を行う必要がある。この補正により素子の感度が当初の75%程度まで低下しても充分使用することができる。

3.5 counter 方式

国内ではほとんど研究されていないし passive 型と呼ぶことに抵抗を感じるが、cup 型の飛跡検出器の代りに半導体検出器や ZnS シンチレーション検出器を使用したラドンモニターが発売されている。

フランスの Centre de Radio Protection dans les Mines で開発された Radhome P (図6) はきわめて優美な形状のモニターである。このモニターは有効面積 450 mm^2 の半導体検出器を直径 6 cm 位の半球の中に設置している。内容の詳細は不明であるが、フィルタを介してラドンやトロンをこの半球に導き、その中で生成した娘核種の α 線とともに検出しているものと推定される。この方式では、トロンの α 線のみを弁別することはできないが、 ^{212}Po の α 線は弁別できるので、トロン濃度を求めることも不可能ではない。測定したデータはマイクロプロセッサによりメモリーに保存さ

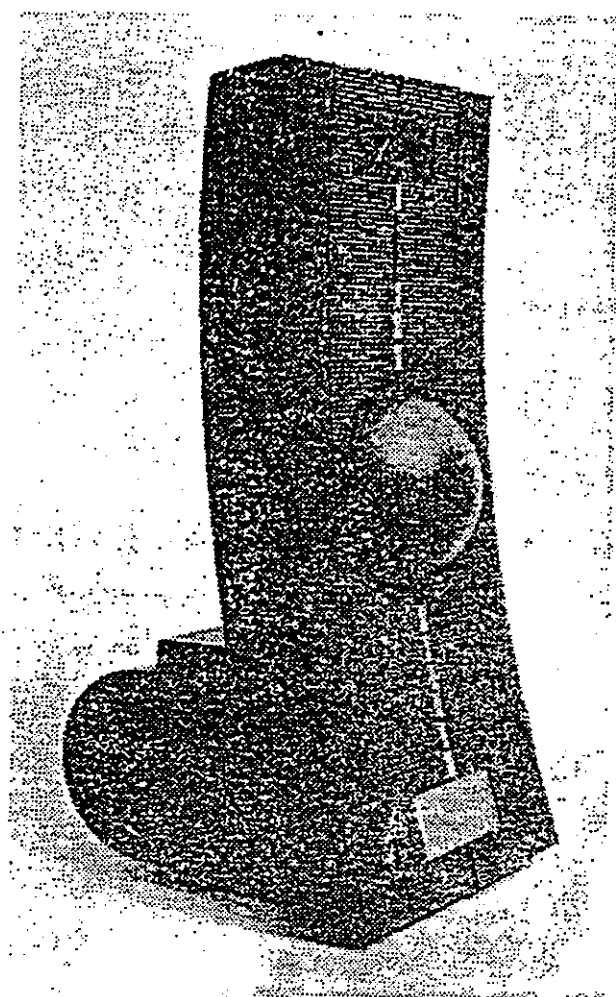


图 6 Radhome P

れ、後刻その時間経過とともに読み出すことができる。4個のリチウム電池を使用し6か月使用することができる。感度はそれほど高くなく、 $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ に対し 0.03 c/h で6時間の計測で $30 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (5.4 カウントになる) まで測定できるという。

カナダの Pylon 社から ZnS シンチレーション検出器を使用した model PRD-1 が発売されている。これも詳細は不明であるが、ポリウレタンフォームのメンブランろ材を介して 275 ml の円筒容器中にラドンを拡散によって導入する。この容器の内壁に ZnS シンチレータが塗布されている。容器内のラドン濃度は30分で外気中のラドン濃度と平衡するとされているので、交換時間は10-15分位と考えられる。ZnS の発光数は PRD-1 と接続した同社の model AB-5, Portable Radiation Monitor の光電子増倍管によって検出され、そのモニター内のメモリーに蓄積される。ポンプを使用していないので電力消費はきわめて少なく、商用電源が切れた状態でも同モニター内のバックアップ用電池で3日間以上動作を継続することができる。また、これを自動車用の蓄電池に切り換えると2-4か月の連続使用が可能である。メモリーされた情報(一定時間間隔ごとの計数)は AB-5 にプリンタを接続し打ち出すことができる。このモニターの感度は $1.25 \text{ c} \cdot \text{min}^{-1} / \text{pCi} \cdot \text{l}^{-1}$ でバックグラウンドの影響もあって、大略 $1 \text{ pCi} \cdot \text{l}^{-1}$ ($37 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) とされている。

この形式のラドンモニターはいずれも感度が低く、

わが国では物足りぬ感じがするが、時間経過に対するラドン濃度の変化状態が求められ、さらに直接計数もしくは濃度の形で読み出されるので質の高い情報を得る手段として優れている。将来、なんらかの手段で感度を上げることができれば、この種のモニターが主流となるのではないかと期待される。

4. モニターのまとめ

以上に主として passive 形式のラドンモニターについて述べた。いずれの方法にも一長一短があり万能的な方式はない。現在簡便さの点から cup 型のモニターが主流であるが、これによれば長期間のラドンの平均濃度は求められるものの、異常値が出た場合にその原因や異常の有無の確認などをするには不適當である。したがって、この種の測定は詳細な調査を行うためのスクリーニングと考えるべきであろう。被曝評価上対象となる核種はラドンやトリウムではなくその娘核種であり、したがって本来はその濃度 (PAEC) を測定すべきであるが、active 形式以外適當な方法がなく止むを得ずラドンやトリウム濃度を求めている点にも留意していただきたい。したがってスクリーニング後の調査ではラドン濃度ばかりでなく、PAEC も測定されることになろう。また passive 形式の PAEC モニターの開

発も必要だと考えられる。人が生活している空間に割り込む形でモニターを設置するため、設置場所や設置期間、さらにはモニターの形式などに制約があり、それに応じて適切な測定法を選択しなければならないが、必ずしも適切な方法が見い出せないのが現状である。将来は現在の cup 型モニターより詳細で信頼性のある情報が得られ、かつ簡易な構成のモニターが開発されるのではないかと思うが、それまでは従来の cup 型モニターに多少手を加えて調査範囲を拡げることが必要であろう。

active 形式のモニターの種類は非常に多く、被曝評価上重要な情報が得られるが、本稿ではすべて割愛した。またラドンモニターの校正法もきわめて重要なテーマであるが紙面の関係もありまったく触れぬことにした。測定法と校正法は不可分な手法ではあるが、ラドンモニターの校正は通常の放射線計測器の場合とは異なり簡易な方式が開発されていないのでその確立が急がれている。

- 1) "Dosimetry Aspects of Exposure to Radon and Thoron Daughter Products", OECD, NEA, Sept. (1983)
- 2) "Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters", ICRP Publication 50, Pergamon Press (1987)
- 3) 高橋幹二: "基礎エアロゾル工学", 養賢堂, 東京 (1972)
- 4) 黒澤龍平, 他: 早稲田大学理工学研究所報告, 117輯, 85-88 (1987)
- 5) Hopke, P.K.: *Health Phys.*, 57, (1), 39-42 (1989)
- 6) Price, W.J.: "Nuclear Radiation Detection", McGraw-Hill (1985)
- 7) 黒澤龍平, 他: 日本鉱業会誌, 79, (902) 72-77 (1963)
- 8) 黒澤龍平: 早稲田大学理工学研究所報告, 42輯, 1-11 (1968)
- 9) Starik, I.E. "放射化学の基礎", (市川, 岡下, 石渡訳), 南江堂, 東京 (1962)
- 10) 青山 喬, 他, 私信
- 11) 土居雅広, 私信
- 12) Iida, T. et al.: *Health Phys.*, 54, 139 (1988)

5. Passive型 monitorの校正

5.1. 緒言

大気中のラドン・トリウム濃度を測定する方法は、外部エネルギーの供給の有無によりActive法とPassive法¹⁾の2法に分類されている。Passive型のラドン（またはトリウム）モニタは、Active型のものに比べて比較的簡単な構造であり、小型・安価・取扱が容易といった優れた性能が着目されて、居住環境や野外のラドン（またはトリウム）平均濃度を求めるために広く利用されている^{2), 3)}。しかし、これらのモニタは湿度、大気汚染気体例えばNO₂やSO₂等の外的な要因で、検出感度の変動するともいわれている^{4), 5), 6)}。また検出器の種類や検出法の変更によっても感度が変化することがある。従って単に濃度依存性だけでなく変動要因を含めた校正を行なう必要がある。基本的なラドンモニタの校正は従来、OECD/NEAが世界中の4地点に設置した標準ラドンチャンバーを用いて行なうことになるが、いずれも遠隔地であり、常時利用することはできない。そこで国内では、いくつかのPassive型ラドンモニタについて早大・名大・京大が中心となって比較実験を行なっている⁷⁾。しかしその結果を見ると、参加機関ごとにデータ間のばらつきがあり、そのため各機関ごとにラドンに対する簡単な校正やトリウムなどの妨害気体の影響を求め、自己補正する必要があると考えられた。通常Passive型ラドンモニタの試験では長期間曝露し、その間の平均的な濃度を標準に校正を行なっているが、本研究では長期間ラドン濃度を安定させる困難な問題を避けるため、自作のテストチャンバーを用いて比較的高ラドン濃度の雰囲気内に供試のモニタを密封し、短時間に校正を終了させることにした。従って短時間の曝露によっても簡単にモニタの感度評価が行える試験法について検討し、またモニタの性能試験についても検討を加えた。これらの装置及び試験方法について述べる。

6. テストチャンバー

6. 1 構成と曝露装置

テストチャンバーは主として、モニタを収納しラドンやトリウムを一定時間曝露させる装置（以下曝露装置と記す）とラドンやトリウムを発生させる装置（以下発生装置と記す）で構成される。Fig. 7にこれらの装置の構成を示す。（図中にストップコックの位置や気流の方向を示す。）

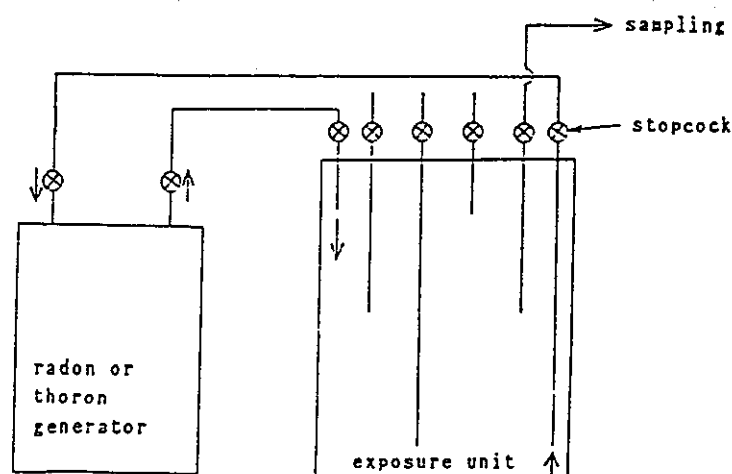


Fig. 7 The construction of the test chamber

曝露装置にはその中に数台のモニタを入れる必要があるために、比較的内容積が大きく、また封入したラドンやトロンの漏れないような容器を用いなければならない。そのため市販のステンレス製、公称 100リットルの密封容器がほぼ条件を満たしていたので、これを改造して使用した。この装置の断面図を Fig.8に示す。装置の蓋の内側には、供試モニタに影響を与えない程度の強さで内部空気を攪拌するためのファンを取り付けラドン・トロンの濃度が一様になるよう配慮した。また温湿度計のセンサー部分を挿入して、装置内の相対温度・湿度を外部より監視できるようにした。さらに内部に電源を引き込み、底部に設置した加熱板（保温器）により、例えば温水を入れたビーカーを載せ内部を高湿に保つことができるようにした。装置の蓋には、長さの異なる真鍮管6本をはんだにより溶接し、各々外部にストップコックを取り付けラドンやトロンの供給、装置内空気のサンプリングに備えた。またトロンの濃度を一様に保つことは不可能なので装置内のラドン及びトロンの濃度を連続的に測定する装置（静電捕集型 Rn-Tn モニタ）を設置する予定である。

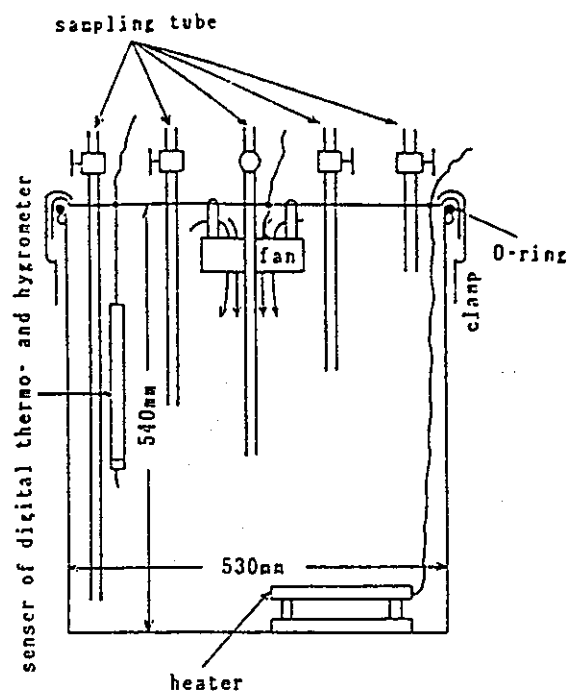


Fig.8 The sectional view of the exposure unit.

6. 2 発生装置

発生装置には曝露装置と大略同型で10リットルの気密性の高いステンレス容器を用いた。この装置の断面図をFig.9に示す。装置の蓋には入排気用の2本の真鍮管を取り付け、入気側の管を後述のラドンやトロンの発生源を載せた金網の下まで伸ばした。これによりラドンやトロンの含んだ空気が、装置の蓋の内側に取り付けたポンプ（流量：～2 l/min）により外部へ供給できるようにした。さらに吸入部分には娘核種の除去及び粉塵によるポンプの損傷を防ぐため、フィルタを取り付けた。また蓋の内側に内部濃度を一様に保つためファンを取り付けた。

ラドンの発生源にはウラン鉱石やラジウム溶液などがある。前者はトリウムの相対的含有量が少ないことからトロンの混入も殆どないと考えられるが、固体であるためラドン供給量のコントロールが困難である。後者はトリウム系列の ^{228}Ra が混入している恐れがあり、そのためラドンとトロンの混合気体が供給される可能性がある。トロンが混入するのは好ましくないで、本装置ではラドンの発生源として低品位のウラン鉱石の小粒を用いた。一方トロンはラドンモニタにとって妨害気体となるので、トロンの妨害試験を行なうような場合には専用のトロン発生装置が必要となる。トロンの発生源として固体のトリウムを含む鉱物や、トリウム溶液または化合物が考えられる。前者の例としてモナザイトがあるが、通常これにはトリウムの十数分の一程度のウランが含まれているのでラドンも発生する。従って精製されたトリウム溶液や化合物からトロンを発生させた方がよいが、これらの入手には規制があるので、今回はトロンの発生源として天然のモナザイトを含んだ試料（人工ラドン温泉器）を用いた。

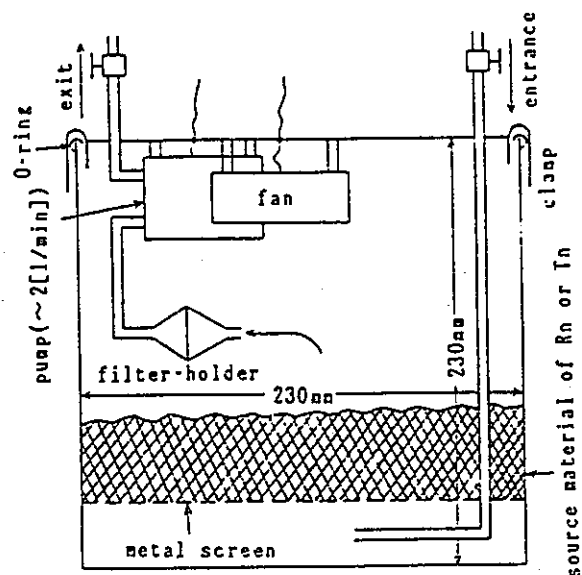


Fig. 9 The sectional view of the radon or thoron generator.

7. 試験法

7. 1 静的試験

ラドンモニタの校正用のテストチャンバーは本来ラドン濃度が一様に保たれるような循環方式でラドンを供給することが望ましい。しかし、前述のように発生源がウラン鉱石であるためラドン供給量のコントロールが難しく、またトロンが混入していると何時までも供給し続けることになるので、後述のような放置による方式を採用した。これによりトロンによる影響は殆どなくすることができたが、緒言で述べたように、モニタの曝露時間が短くなり、通常の曝露時間と大幅に異なることになった。これに対応するため試験法に検討を加えた。

この試験では、曝露装置内にラドンモニタを設置し、密封後ラドン発生装置からサンプリング管を通してラドンを内部に注入して、一定時間（1分以下）

後発生装置を曝露装置から外して、曝露装置を完全な密封状態に保ちながら1～4日間（ラドンの半減期位まで）供試モニタを曝露する。曝露装置内のラドン濃度は、1曝露期間内に4回以上測定しラドンの漏れの有無を確かめる必要がある。その際ラドン濃度測定器には基準機関とのトレーサビリティが確立したものをを用いなければならない。早大では国際比較実験を行なったルーカスセルによる濃度測定法⁸⁾（セルの内容積：～300ml）を用いた。

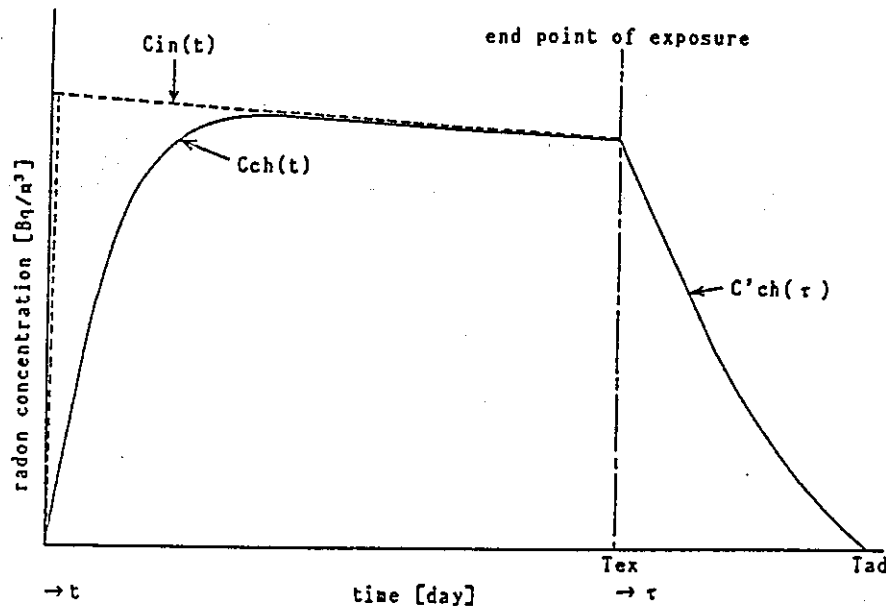


Fig.10 The variation of radon concentration on static test.

曝露期間中モニタ内に曝露装置内のラドンが流出入し、かつ時間的減衰により装置内のラドン濃度は減少するが、モニタの種類によってはラドンの流出入する速度が異なり、その速度に応じてモニタ内外のラドン濃度に差が生じる。そのため、曝露装置内に設置した時間とラドン濃度の積がモニタに対するラドン曝露量とはならない。しかし、曝露終了後モニタをラドン濃度が無視できる程度の空气中に放置すれば、これを補正することができる。Fig.10に静的試験による曝露装置内とモニタ内のラドン濃度の模式的時間変化を示す。いま時刻 t における曝露装置内とモニタ内ラドン濃度をそれぞれ $C_{in}(t)$ 、 $C_{ch}(t)$ とすれば、微小時間 dt 間のモニタ内ラドン濃度変化量 $dC_{ch}(t)$ は次の微分方程式で表わせる。

$$\frac{dC_{ch}(t)}{dt} = \frac{v}{V} * C_{in}(t) - \lambda_{Rn} * C_{ch}(t) - \frac{v}{V} * C_{ch}(t) \quad (10)$$

ここで v : モニタに対するラドンの流出入速度*（脚注参照）
 V : モニタの内容積

λR_n :ラドンの壊変定数

$v/V=B$ (モニタの換気率)、 $C_{in}(t)=C_{in}(0)*EXP(-\lambda R_n*t)$ 、 $t=0$ のとき $C_{ch}(0)=0$ とすればモニタ内ラドン濃度 $C_{ch}(t)$ は、

$$C_{ch}(t)=C_{in}(0)*[EXP(-\lambda R_n*t)-EXP\{-(\lambda R_n+B)*t\}] \quad (11)$$

曝露終了時の時刻 T_{ex} とすれば、曝露期間中のモニタ内積算ラドン濃度 I_{ex} は、

$$I_{ex}=C_{in}(0)*[1-EXP(-\lambda R_n*T_{ex})]-[1-EXP\{-(\lambda R_n+B)*T_{ex}\}] \quad (12)$$

曝露終了後モニタを装置内から取り出し、無視できる程度の低いラドン濃度の環境中に放置したとき、放置期間中の時刻 τ におけるモニタ内のラドン濃度 $C'_{ch}(\tau)$ は、

$$C'_{ch}(\tau)=C_{in}(0)*[EXP(-\lambda R_n*T_{ex})-EXP\{-(\lambda R_n+B)*T_{ex}\}]*EXP\{-(\lambda R_n+B)*\tau\} \quad (13)$$

放置時間 T_{ad} としたとき、放置期間中のモニタ内積算ラドン濃度 I_{ad} は、

$$I_{ad}=C_{in}(0)*[EXP(-\lambda R_n*T_{ex})-EXP\{-(\lambda R_n+B)*T_{ex}\}]*[1-EXP\{-(\lambda R_n+B)*T_{ad}\}]/(\lambda R_n+B) \quad (14)$$

一方、曝露装置内の積算ラドン濃度 I_{in} は、

$$I_{in}=C_{in}(0)*[1-EXP(-\lambda R_n*T_{ex})]/\lambda R_n \quad (15)$$

となる。例えば早大で製作したラドンモニタはその換気率が $1.03*10^{-4} s^{-1}$ で曝露時間を1日とすれば、 $I_{ex}=6.952*10^4*C_{in}(0)$ 、 $I_{in}=7.902*10^4*C_{in}(0)$ となる。 $T_{ad} \rightarrow \infty$ のとき $I_{ad}=7.929*10^3*C_{in}(0)$ 、モニタ内全積算ラドン濃度は $I(\infty)=7.745*10^4*C_{in}(0)$ となるため、放置時間をいくら長くしても完全な補正はできない。しかしこの場合の補正值はそれほど大きくなく、例えば $T_{ad}=$

-
- モニタに対するラドン流出入速度は、湿度及び気圧の影響では大きな変動がない限りほとんど変化しないと考えられ、一方気流の影響では変化しうるが、曝露装置内の攪拌速度が遅いのでモニタを放置する環境と曝露装置内の雰囲気とは区別しなくてもよいと考えられる。

8 hrとしてもその場合のモニタ内全積算ラドン濃度は $I(8)=7.706 \times 10^4 \cdot C_{in}(0)$ で、 $I(8)/I(\infty)=0.975$ となりモニタの精度上問題にはならない。曝露時間を長くすればそれだけ補正分は少なくなるが、1日程度の短い曝露時間でも8時間程度放置すれば、実用上ほぼ完全な校正を行なうことができる。またもしモニタの正確な換気率がわかれば(3.2節の動的試験参照)、完全に近い補正は可能である。

7. 2 動的試験

近年ラドンモニタの換気率を、トロンの影響を考慮して小さくする傾向にある。そのためモニタの応答特性を調べる必要がある。大型のモニタでは種々の方法で応答特性を求めることができるが、小容積の場合、種類によってはその測定が困難である^{**}(脚注参照)。従ってこのようなモニタの換気率を把握するため以下に述べる動的試験によるモニタの換気率の推定法を提案する。

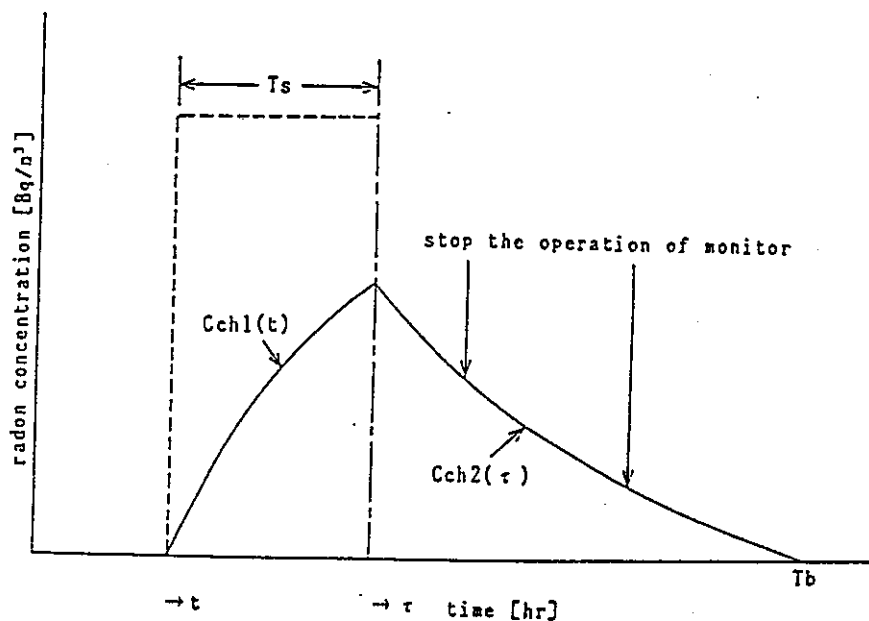


Fig. 11 The variation of radon concentration on dynamic test.

^{**} 通常モニタの換気率を測るには、ラドンを用いた方法と SF_6 を使った方法がある。前者の方法ではモニタ内部に高濃度のラドンを封入して時間経過にしたがってラドン濃度を測定し、減衰曲線から換気率を求めるためモニタの内容容積が大きい場合に限り有効で小容積のモニタには適さない。後者の方ではごく微量の SF_6 を検出すれば換気率の測定は可能なので、モニタの大きさにそれほど限定されない。しかし ECD を備えたガスクロマト測定装置が必要である。

Fig.11に示すようにモニタに対し、矩形状で短時間のラドンの曝露を行なう。その短時間の曝露の後、モニタを曝露装置から取り出して無視できる程度の低いラドン濃度の空气中に放置する。放置時間を長くすれば静的試験と同様に不足した曝露量を補正できるが、この場合はいくつかの短い放置時間を定めて各々のラドン曝露量を求め、その時の曝露量の差を利用してモニタの換気率を推定する。曝露装置内のラドン濃度を C_s 、曝露期間中の時刻 t におけるモニタ内ラドン濃度を $C_{ch1}(t)$ 、曝露時間を T_s とすれば、モニタ内のラドン濃度及びその間の積算ラドン濃度 I_{ch1} は、

$$C_{ch1}(t) = C_s * B / (\lambda R_n + B) * \{1 - \exp(-(\lambda R_n + B) * t)\} \quad (16)$$

$$I_{ch1} = C_s * B / (\lambda R_n + B) * [T_s - \{1 - \exp(-(\lambda R_n + B) * T_s)\} / (\lambda R_n + B)] \quad (17)$$

また曝露終了時を $\tau = 0$ とし、放置期間中の時刻 τ におけるモニタ内ラドン濃度 $C_{ch2}(\tau)$ と、放置時間を T_b としたときの放置期間中の積算ラドン濃度 I_{ch2} は、

$$C_{ch}(\tau) = C_s * B / (\lambda R_n + B) * \{1 - \exp(-(\lambda R_n + B) * T_s)\} * \exp\{-(\lambda R_n + B) * \tau\} \quad (18)$$

$$I_{ch2} = C_s * B / (\lambda R_n + B)^2 * \{1 - \exp(-(\lambda R_n + B) * T_s)\} * \{1 - \exp(-(\lambda R_n + B) * T_b)\} \quad (19)$$

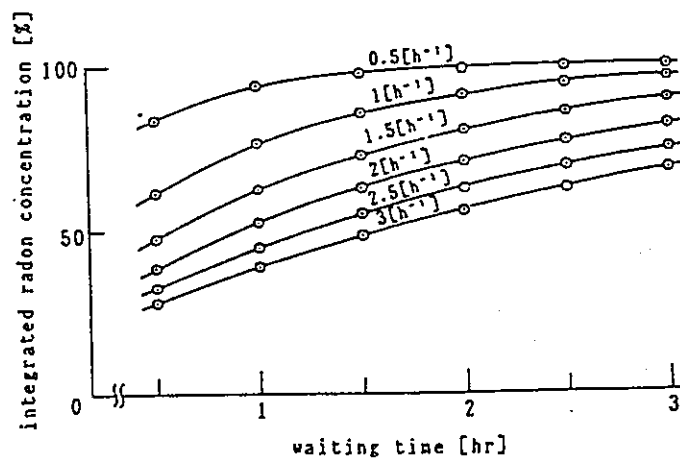


Fig.12 The relation between the waiting time and the integrated radon concentration for various ventilation rates of the radon monitor.

従って、モニタの全積算ラドン濃度 Ich は $Ich1 + Ich2$ となり、また曝露装置内の積算ラドン濃度は $Iin = Ts * Cs$ となる。Fig. 11 に曝露時間を1時間としたとき各々の換気率について放置時間とモニタ内積算ラドン濃度相対値（曝露装置内の積算ラドン濃度を100%とする）との関係を示す。この図より、例えば放置時間を30分間と3時間の場合の積算ラドン濃度相対値の比をとり、モニタの換気率との関係を求めるとFig. 13 のようになる。これによりモニタの換気率の推定が可能ではないかと考えられる。但し供試モニタの推定される換気率により適切な曝露・放置時間を選定する必要がある。

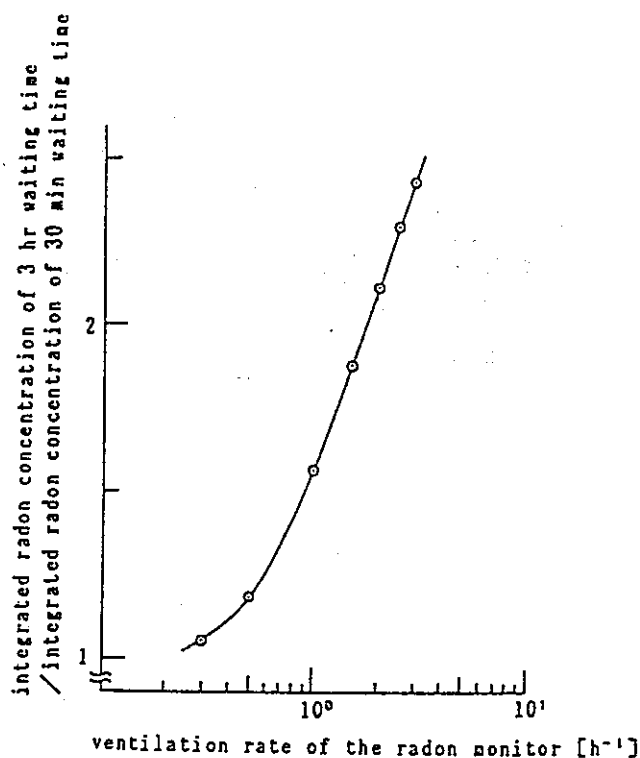


Fig. 13 The relation between the ventilation rate of radon monitor and integrated radon concentration of the testing monitor for 3 h waiting time / integrated radon concentration of the same monitor for 30 min waiting time.

7. 3 トロンの妨害試験

この場合はラドンとトロンの混在した試料空気を用いて曝露試験を行なう。あらかじめラドンモニタは静的試験によりラドンに対する感度を求めているので、この試験結果からラドンの寄与分を差し引くことによりトロンの影響分（トロンに対するモニタの感度）を把握できる。トロン及びラドンの供給方法は、トロンの半減期が短いことから循環方式でなければならない。そのため曝露期間中、曝露装置内のトロン及びラドン濃度を連続的もしくは多数回測定し、その濃度が一定であることを確認する必要がある。トロン濃度測定もルーカセル法で行なうが、ラドンの場合と多少異なるので以下にその測定法⁹⁾について述べる。

サンプリング管とシンチレーションセル間の配管系内を手動真空ポンプで真空にして（セルは予め真空にしてある）セルのストップコックを開く。そしてセルを測定装置内に設置し、測定器は測定状態にしておく。サンプリング管のコックを開き、フィルタを介して急速に試料気体を封入する。封入完了及び安定化のために、採取開始より20秒後から測定を始め、90秒間計数を行なう。その間の計数はラドンとトロンの両者に起因するので、採取開始から10分後5分間計数を行なうことによりラドンの寄与分を差し引いてトロン濃度を求める。計数効率についてはラドンのみの効率をトロンと $^{216}\text{Po}(\text{ThA})$ のエネルギー差により補正し、シミュレーションで計算して $\eta_{\text{Tn}}=1.20*\eta_{\text{Rn}}$ 、 $\eta_{\text{ThA}}=1.30*\eta_{\text{Rn}}$ （ η_{Rn} :ラドンの計数効率）とした。

8. 実験結果

曝露装置内にラドンを封入し、装置内のラドン濃度の時間的变化を調べた。その結果をFig. 14に示す。これによるとラドンはそれ自身の半減期に従って減衰しており、本装置からのラドンの漏れは認められなかった。

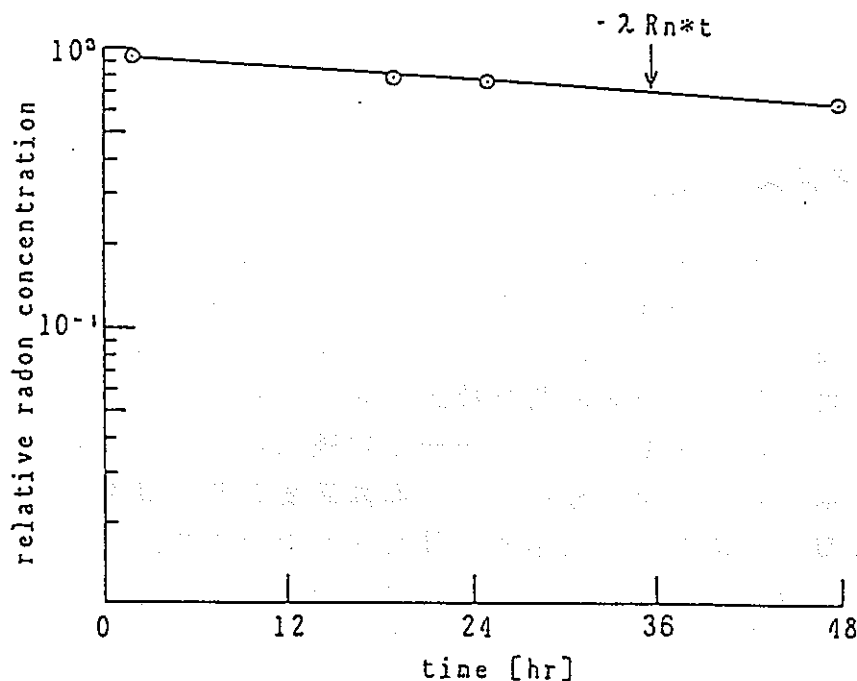


Fig. 14 The typical variation of radon concentration on static test.

またトロン発生装置を用いてラドンとトロンの混合空気を封入し、曝露装置内のラドン及びトロン濃度を測定した。その結果をFig. 15に示すが、トロン濃

度はラドン濃度の2倍程度であった。

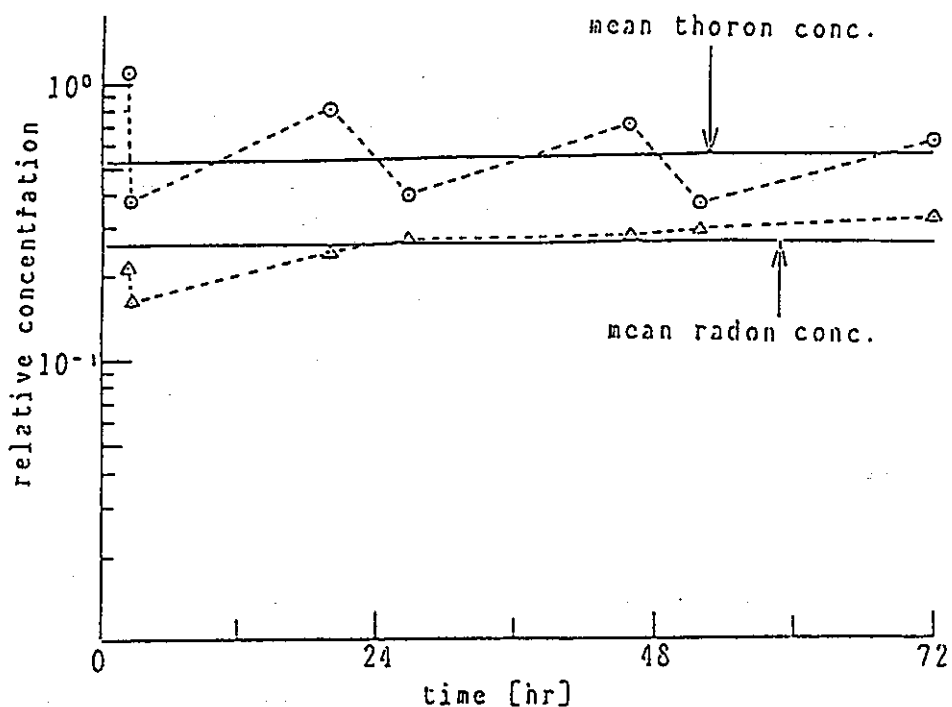


Fig. 15 The variation of radon and thoron concentration on thoron disturbing test.

9. 較正法に関する考察及び結言

Passive 型ラドン（トロン）モニタは各測定器ごとに感度が異なり、またわずかな形式上の変更によっても感度が変わることがあり、各々について校正を行なう必要がある。従って本研究では、ラドンモニタの校正の精度を上げるため、ラドン濃度を安定させ、かつ短時間で校正を終了させることを主たる目的とした簡易テストチャンバーを製作し、校正法や試験法について検討した。このテストチャンバーは大きく2つに分けられ、曝露装置と発生装置で構成されている。両者とも可搬性があり、使用場所が限定されないため、どこでも容易に校正を行えるのが特徴である。ラドンモニタの校正にあたっては、その間のラドン濃度を何回か測定するが、その測定器は必ず基準機関とのトレーサビリティが確立していなければならない。そのため早大では、前述にあるように国際比較実験で行なったルーカスセルによる濃度測定法を用いている。このセルは内容積が約 300ml であり、仮に曝露試験中に装置内の空気を4回採取したとしてもラドンの損失は全体の 0.12% 程度なので濃度評価上問題にはならない。

またこのテストチャンバーを用いれば、モニタに種々の条件を与えることも

可能である。例えばラドンモニタのトロンによる影響を調べることができる。トロンの影響はモニタの換気率によりその大小が決まるため、同じ形状のモニタでも換気率の異なるものを用いれば、ラドンとトロンの濃度を同時に求めることができる。7.2節で述べたモニタの換気率の推定も可能であろう。さらにNO₂などの電子親和性のある大気汚染気体による静電捕集型ラドンモニタの感度の変化を調べることも可能である。これらについては、この装置により今後実験を行なう予定である。

参考文献

- 1) Kotrappa P. ,Dua S.K. ,Pimpale N.S. ,Nambi K.S.V. ,Bhagmat A.M.and Soman S.D.: Passive measurement of radon and thoron using TLD or SSNTD or electrets,Health Phys.,43,339(1982).
- 2) T.Iida ,Y.Ikebe ,T.Hattori ,H.Yamanishi and S.Abe:An electrostatic integrating ²²²Rn monitor with cellulose nitrate film for environmental monitoring, Health Phys.,54,139(1988).
- 3) H.K.Alter and R.L.Fleischer:Health. Phys.,45,152(1983).
- 4) P.K.Hopke: Use of electrostatic collection of ²¹⁸Po for measuring Rn,Health Phys.,57,39(1989).
- 5) Dua S.K.,Kotrappa P.and Gupta P.C.: Influence of relative humidity on the charged fraction of decay product of radon and thoron, Health Phys.,39,152(1983).
- 6) Porstendörfer J. and Mercer T.T.: Influence of electric charge and humidity upon the diffusion coefficient of radon decay products, Health Phys.,37,191(1979).
- 7) 飯田孝夫, 阿部史朗, 山崎敬三 : ラドンとその娘核種共同比較実験 II Passive法, 日本保健物理学会第25回研究発表会要旨集, p.62(1990).
- 8) H.F.Lucas:Rev.Sci.Instrum.28,680(1957).
- 9) 黒澤龍平, 床次眞司, 橋本周 : トロン濃度測定法の研究, 第27回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p.31(1990).

10. TLD Passive Rn monitor の特性

10.1 TLD素子の特性

α 線の検出器に使用し得るTLD素子は今のところナショナル・パナソニックUD-100M8以外にない。UD-100M8は直径約8mmでアルミ基板に樹脂と混ぜた $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ が平均して約 $6\text{mg}/\text{cm}^2$ の厚さに塗られている。この素子は β 線用であるため通常電離密度の比較的低い状態で使用することを前提としている。どのような素子を使用しても本質的には差はないはずであるが、電離密度の高い α 線の場合は種々の問題を生ずる。 α 線のエネルギーに対する dE/dx の変化をFig. 16に示す。これより $0.7\sim 0.8\text{MeV}$ を極大とし、 α 線のエネルギーが増大するにしたがい dE/dx は減少し、 5MeV で約2分の1程度になる。一般的に dE/dx が大きくなり短い区間に多くの電子がトラップされるようになると、発光過程でのクエンチングが増加するといわれている。どの程度の dE/dx でこのような現象が起きるか不明であるが、この素子の入射 α 線のエネルギーに対する発光効率の関係をFig. 17に示す。この図の縦軸は、素子に25000本の α 線が入射した時の ^{60}Co の γ 線で値付けした等価発光量(mReq)である。また入射 α 線のエネルギーはこの実験時と同じ幾何的配置のもとで半導体検出器により測定した α 線のエネルギー分布より求めた平均値である。この結果を見ると一部(名工試)で云うような直線的関係ではなく、低・高両エネルギー側で湾曲していることがわかる。低エネルギー側の湾曲はUD-100M8のみならずMS0系の素子でも見られる。一方高エネルギーになるとその最大飛程が素子の有効厚さ(CaSO_4 の厚さ)以上になるため発光効率は減少する。 $6\text{mg}/\text{cm}^2$ (A1)の最大飛程に対応する α 線のエネルギーは約 5.2MeV であるが、斜に入射する α 線の割合の方が多く大略 6MeV 位からその影響が少しずつ現れることになる。このため入射 α 線のエネルギーが 9MeV に近くなると発光量と入射エネルギーとの間の比例的関係は失われるものと推定される。Fig. 17では多少その傾向が見られる。この傾向は CaSO_4 内での光の吸収によっても増長される。 ThC' の α 線(8.78MeV)について実験した場合には RaC' の α 線(7.68MeV)より発光効率が下がる傾向が見られた。

これらの素子は前述のように樹脂にモールドされているため、(アニーリングのための加熱)一(発光読み取りのための加熱)、を繰り返すうちに着色の度が増加することが知られている。また繰り返し使用による捕獲中心の増加も起きる。前者に対して発光効率は低下し後者に対しては逆に増加する。後者の現象をスーパーリニアリティと呼ぶがこれは積算照射量が $1500\sim 2000\text{R}$ を超えると起きるとされている。本研究はこのような多量の照射ではないのでこの現象は起きないものと考えているが α 線の場合は dE/dx が大きいため多少は異なるものの、同一発光量に対するエネルギー吸収量はせいぜい10倍であり発光量から推定する限り数十回の使用に耐えるであろう。一方着色による感度低下は加熱の積算時間が1時間で95%とされている。1回の加熱時間は数分であり約10回で95%、30回で90%(2.5時間で90%)になるものと考えられる。従ってこの感度変化に対応するため1測定毎に ^{60}Co により各素子について較正を行うことにした。ただ測定毎にこの較正を繰り返すと着色による感度変化を増大させることになるので2測定に1回の較正で良いのではないかと考えている。この較正の効果については次項で述べる。

10.2 TLD素子の較正

通常のTLD素子の較正と同様 ^{60}Co の標準線源により大略 120mR 程度照射する。この際UD-100M8は裸の素子であるため電子平衡をとる必要がある。電子平衡をとるため厚さ4mmのポリプロピレン板を使用している。 ^{60}Co の場合はこれより厚い方がよい筈であるが実験的にこの厚さで最大値が得られている。 CaSO_4 内での発光の吸収を考えると γ 線による較正より α 線による較正の方が原理的にすぐれているが、同一量を照射するという基本的操作が難しく非実用的であると判断されている。また素子の発光量の測定時の素子の設置状況から考えると、発光量測定そのものに多くの誤差要因があるので、実用性の方が重視されるのは当然である。 α 線による発光効率と γ 線による発光効率との関係をFig. 18に示す。この場合の相関係数は0.71であるがこれはデータが狭い範囲に分布しているため小さくなったものと考えられる。この時の同一 α 線照射量に対する発光量の頻度分布を正規確率紙にプロットしFig. 19に示す。この分布は正規分布ではなく対数正規に近いものと思われ(相対標準偏差は $\pm 10.4\%$)素子の感度に差があることが暗示されている。このデータを γ 線照射によって感度補正を行ったうえそれをFig. 20に示す。この場合は正規分

布となり平均値とその標準偏差は $184 \pm 13.5(\text{mReq})$ (相対標準偏差は $\pm 7.3\%$)となる。TLD素子の発光量測定時の誤差を考えると(大略5%あるとして) $\pm 7.3\%$ は(γ 線と α 線の2回の測定となるから $5\% \times \sqrt{2} = 7\%$ と推定される)極めて良く補正されていると言えよう。これよりこの較正法は実用上極めて有効であると結論された。

10.3 monitorの感度に影響する要因

前項で述べたようにTLD素子の α 線などに対する感度補正については十分な対応が得られた。従ってモニターの検出部についてはすべての問題は解決されたものと考えられる。またメーカーに起因するmonitor容器の空気試料交換速度に関してはフィルターの種類と面積を変えることで約100分間の交換時間とすることができた。これについてはフィルター部の図面とその見本を人形峠事業所に通知してあるので参照されたい。(Fig.21)このフィルターはミリポアーRA(口径 $1.2\mu\text{m}$)で図示のように有効面積 3.4cm^2 であり補強のためEPM-2000ガラス繊維濾紙が重ねられ、この濾紙のセットが容器の両側にはりつけられている。(有効面積は合計 6.9cm^2 となる)この程度の有効時間ならばトロンの影響は全くないものと考えられる。

このmonitorの構造はFig.5に示されている。電極間電圧を増大させれば当然のことながら捕集される正の電荷を有する。RaAの相対量は増加し、感度は上昇する。しかし或程度以上電場強度が増大すると完全な飽和に達さないまでもそれに近い状態となる。電極間電圧を -230V より -1100V まで変化させた時の相対感度の変化をFig.22に示す。この測定の時の相対湿度は $60 \sim 70\%$ と比較的高い状態であったが -780V 以上であれば5%以内の感度低下であることがわかった。しかし管理上の問題を考慮すれば -850V 以下になった電池は交換することが望ましい。

正電捕集型のモニターでは容器内の水蒸気濃度(絶対湿度)の影響を受けることが良く知られている。さらに較正時のように短時間で曝露が終わる場合は、エアロゾルが容器内壁に付着し容器内に存在しなくなるまでの間、移動速度の遅い電荷を有するエアロゾルが容器内に残留するため感度が低下する。従ってラドンに関する較正実験に際してはエアロゾルが殆どないよう例えばクリーンブース内でTLD素子を交換し封入する必要がある。湿度とエアロゾル濃度とモニターの換算係数の関係を表1に示す。この時の換算係数は発光量からラドンの積算濃度を求める係数でいわば感度の逆数である。これより湿度の影響が著しく除湿剤の封入が望ましいことがわかる。この時使用したmonitorは早大で現在使用しているmonitorで電極構造が旧アサノ電子製とは若干異なるものの、原理的には全く同種類である。標準状態での換算係数は従来 $7.09\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}/\text{mReq}$ としていた。

10.4 TLD Rn monitorについて

TLD Rn monitorの問題点について本章に述べた。この結果について以下にまとめる。

TLD素子は毎回もしくは2回に1回標準 γ 線源による照射で較正すると良い結果が得られる。

monitor容器のフィルター部を資料に示したようなフィルターのセットに変更するとトロンの影響を完全に除去することができる。

monitor容器内に CaCl_2 などの除湿剤を封入することが望ましい。そのためには大きめの百葉箱を準備すると共に除湿剤の交換のため2カ月ごとに素子交換を行う必要がある。

monitor内のTLDの交換時、特に較正のための交換時はクリーンブースのようなエアロゾルの低い場所で行うことが望ましい。これはTLDmonitor以外の全てのラドンモニターについても同様である。

11. 結論

Passive型monitorは構造が簡単であるため広く利用されているが、簡便さを求めて手を抜くケースが多くそれらを含めて詳細に特性を検討すると種々の点で問題が残っていることが多い。簡単な構造ではあるが手を抜くことは許されない。またどのような測定器でも必ず使用し得る範囲と予想し難い変動要因があり、さらに飛跡検出器に見られるように計数評価上の個人差や予想できぬ検出素子の物性の変化があり、それらを常時検討し見出し得るような体制のちとにmonitorを使用する必要がある。

表1. 相対湿度（気温～13℃）と封入時のエアロゾル濃度と
monitorの換算係数 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}/\text{mR}$ との関係

I-131濃度 $\text{n}\cdot\text{cm}^{-3}$	相対湿度 %			備考
	～30	～58	～70	
～10	5.03	6.76	9.17	
～ 10^6	4.35	8.31	8.66	

標準時の換算係数 7.09

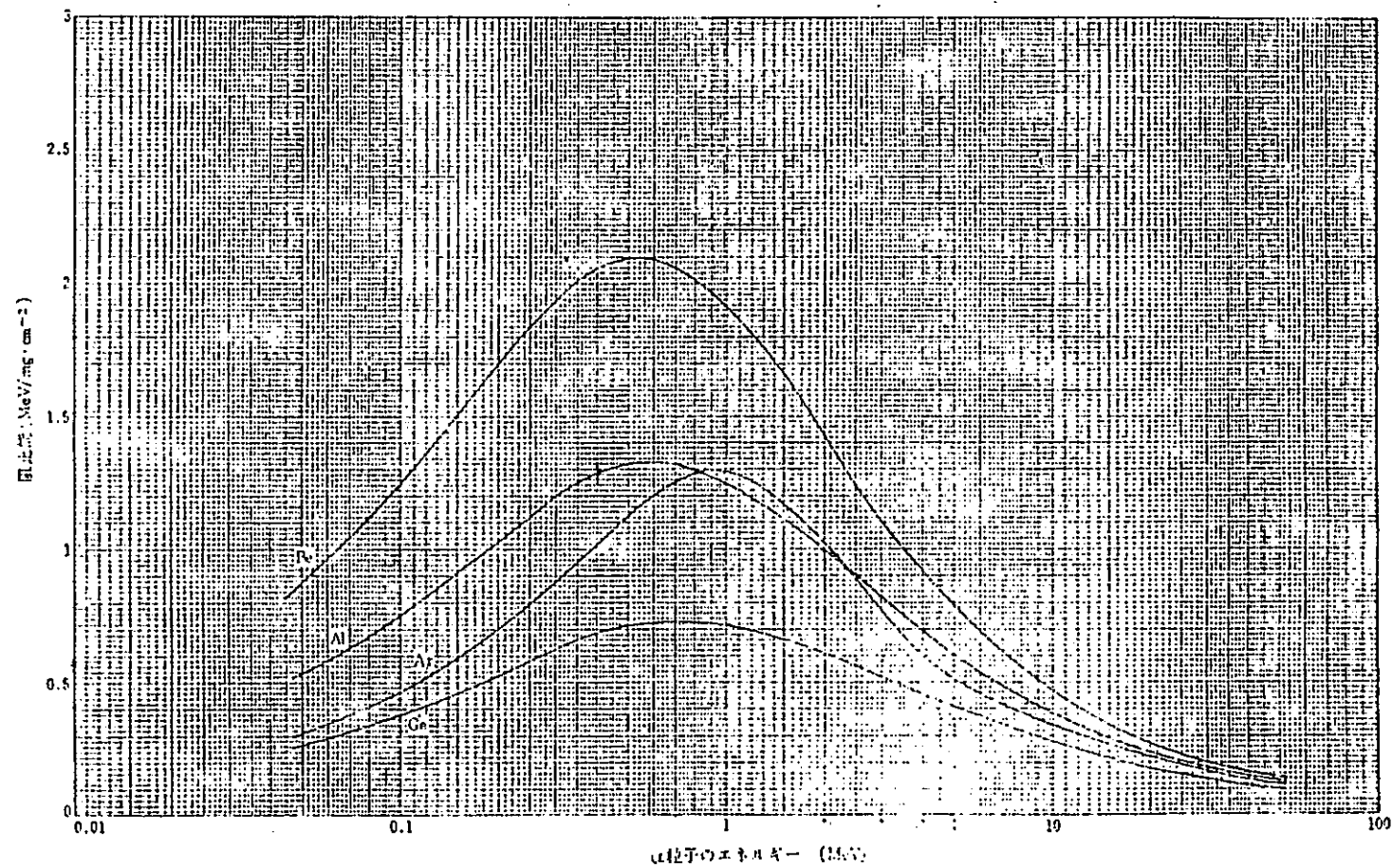


Fig. 16

種々の物質の α 粒子に対する阻止能⁹⁾

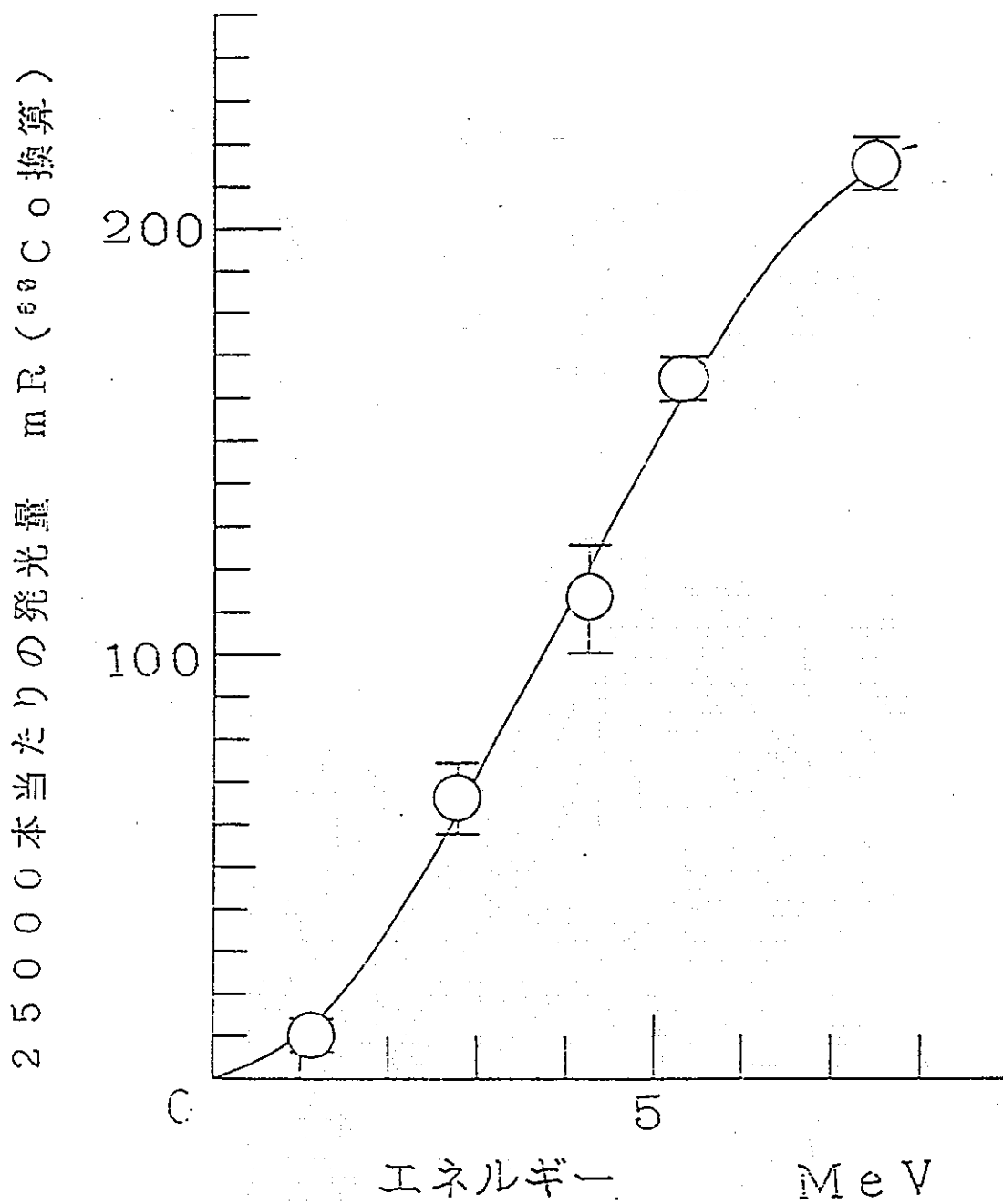


Fig.17 TLD素子UD-100M8の α 線に対する特性

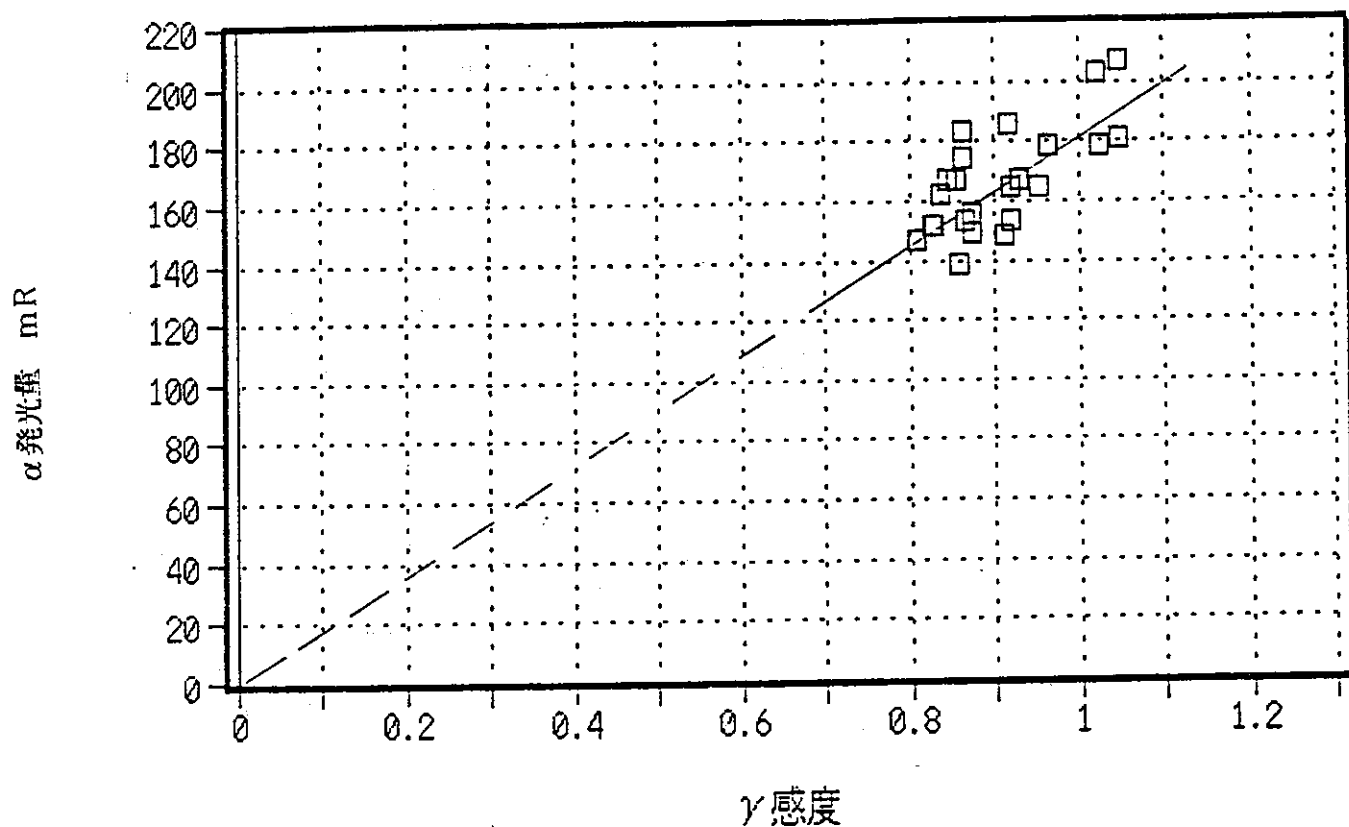


Fig. 18 TLD素子のγ線とα線に対する発光効率の関係

(相関係数 0.71)

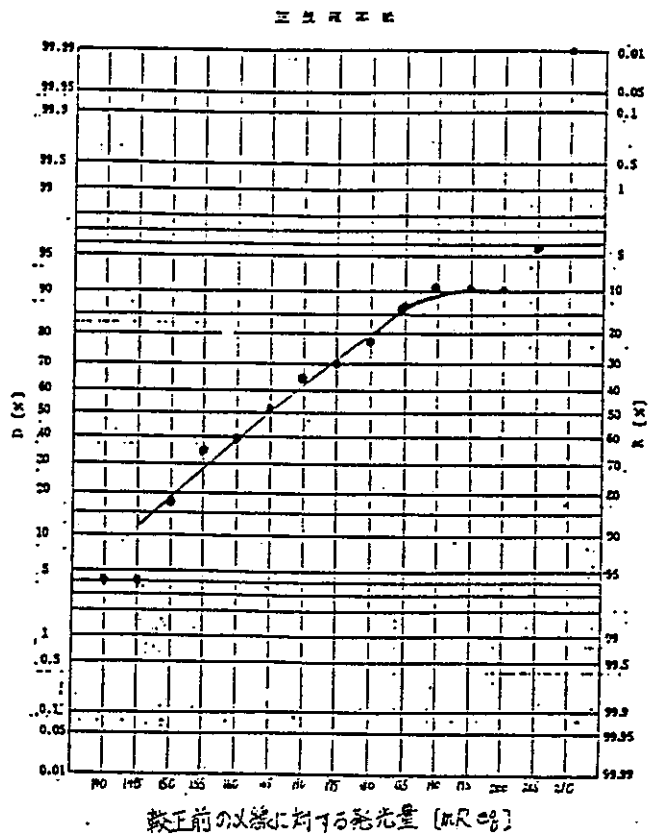


Fig. 19 校正前の α 線に対する発光量

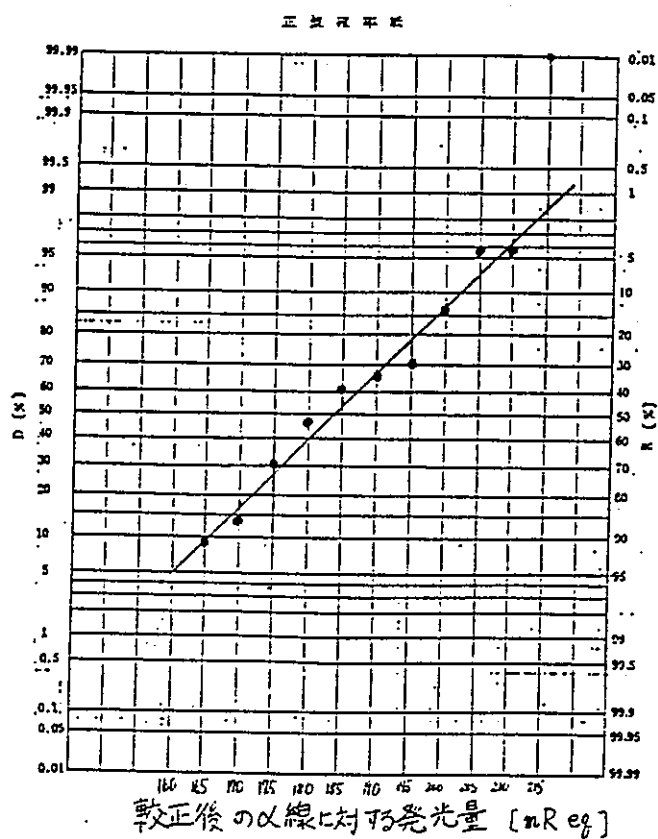


Fig. 20 校正後の α 線に対する発光量

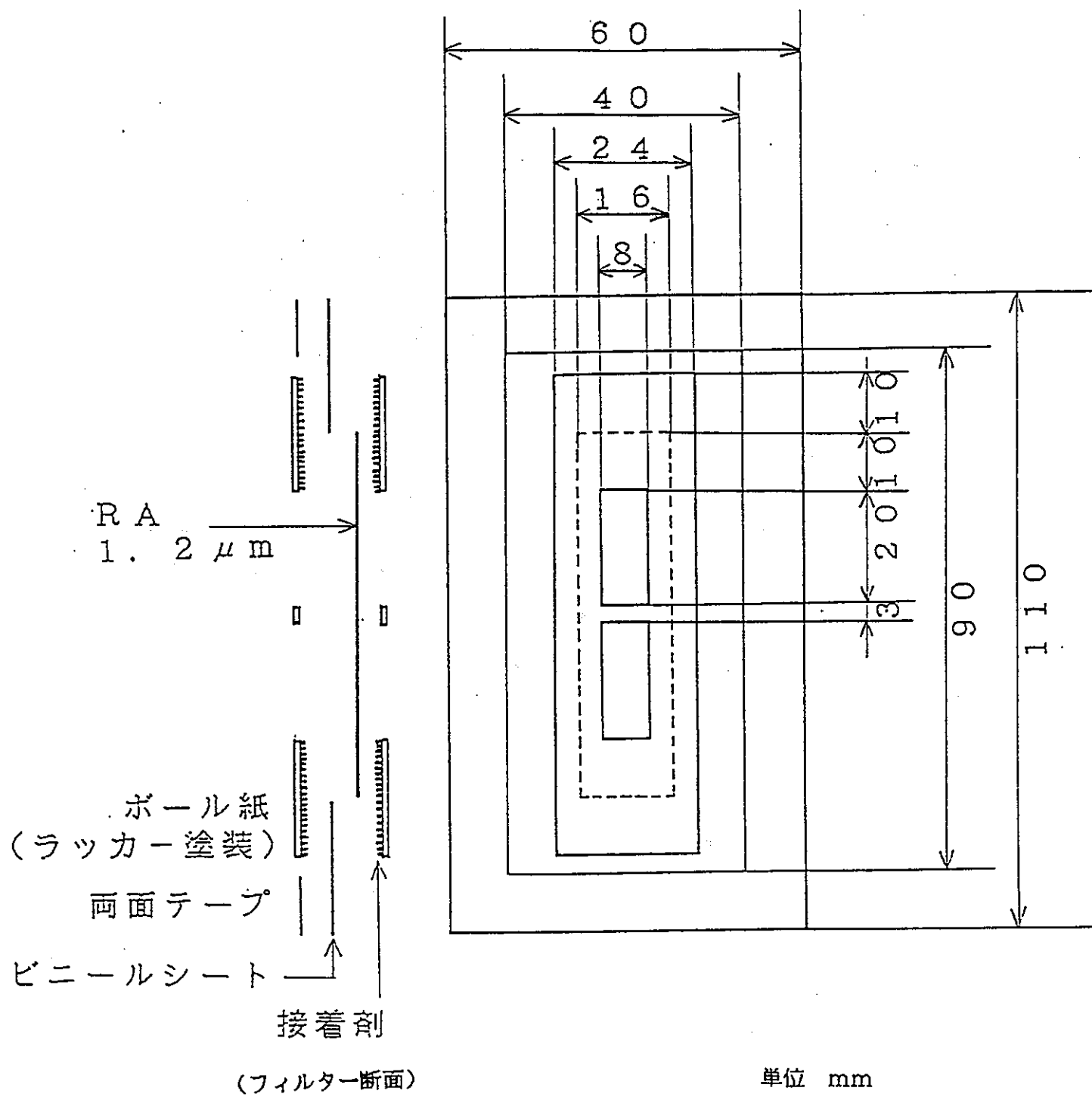


Fig. 21 フィルタの構造

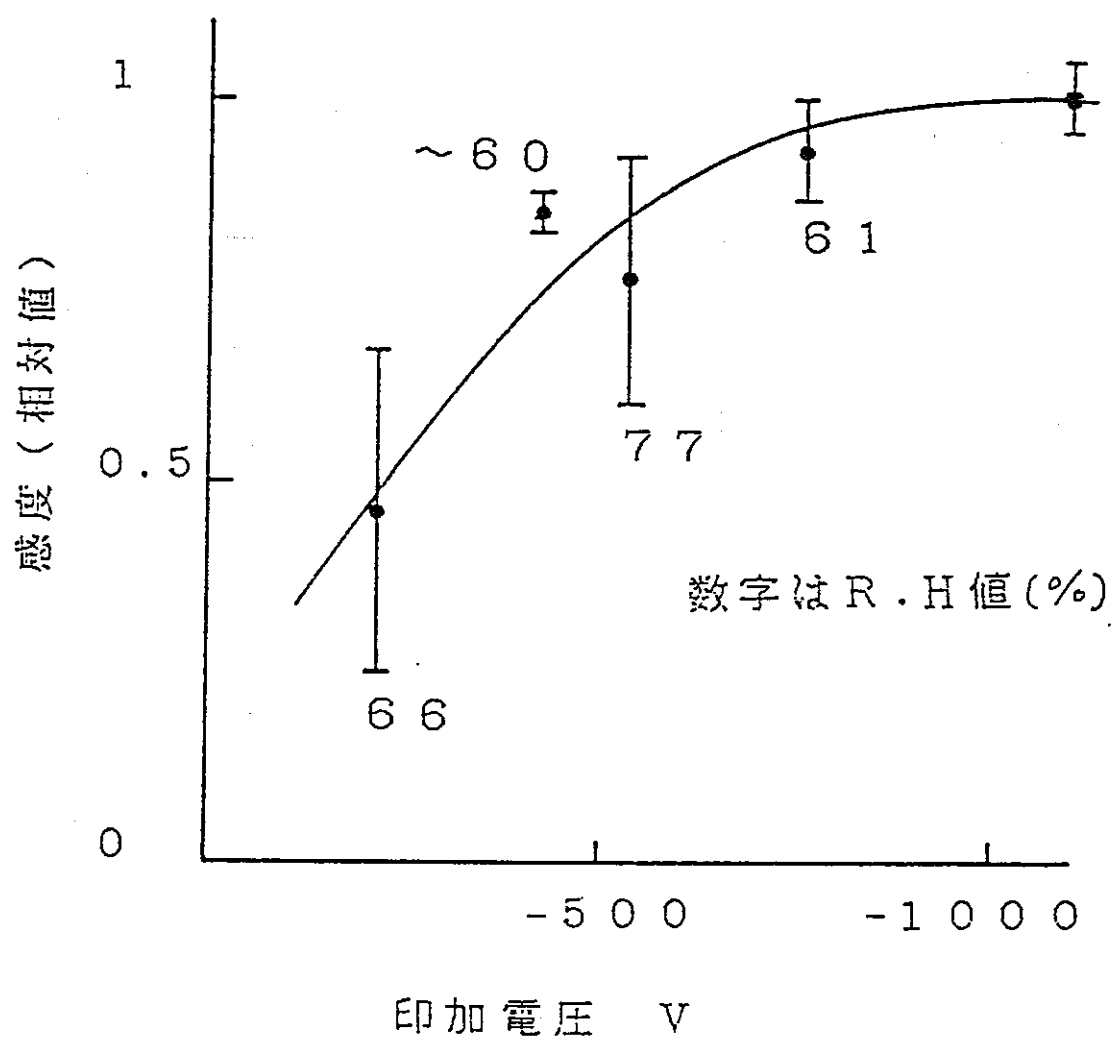


Fig. 22 ラドンモニターの特性 (電極間電圧)