

PNC J1615 98-001

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 0 1. 10. -4
[技術情報室]

堆積場周辺の ラドン濃度に関する研究

(平衡等価ラドン濃度測定器の校正について)

(動力炉核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1998年2月

早稲田大学
理工学総合研究センター

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)

PNC  J1615 98-001
1998年 2月



堆積場周辺のラドン濃度に関する研究
(平衡等価ラドン濃度測定器の校正について)

黒澤 龍平 *

要旨

現在市販されている平衡等価ラドン濃度測定器においては、その濃度計算過程はほとんどの場合がブラック・ボックスであり、それによって得られたデータの質や測定環境中のラドン娘核種濃度の変動に対する測定器の応答等、重要な情報や特性を、使用者が自ら実験によって推定・確認することが必要となる。

本研究では、市販の平衡等価ラドン濃度測定器の実用的な校正手法とその際に留意すべき事項について、理論的な説明に基づいた提案を行った。また、それに関して、実験的な検証を行った結果、ラドン娘核種濃度の変動と測定器の応答に関して、理論的な推定と良い一致を見ることができた。

本報告書は、早稲田大学理工学総合研究センターが動力炉・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：090D0158

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 中島裕治

*早稲田大学理工学総合研究センター

目次

1. 緒言	…1 頁
2. 市販の PAEC-monitor	…2
3. 早大方式の PAEC-monitor	…7
4. ラドン濃度の変化に対する monitor の特性	…10
5. 実測例	
5.1 PAEC-monitor の基本的関係	…14
5.2 PAEC-monitor の均一性	…15
5.3 実験場所としてのテントの特性	…16
5.4 テント内での実験	…16
5.5 過渡的な変化	…17
5.6 その他の特性	…19
6. 結論	…20
謝辞	…22
図 Fig.1～Fig.34	…23～50
表 表1～表8	…51～58

1. 緒言

良く知られているようにラドン娘核種濃度は個別濃度もしくは Potential Alpha Energy Concentration (潜在的アルファエネルギー濃度) (以下 PAEC) で表わされる。PAEC は個別濃度が娘核種の activity を濃度の尺度としているのに対し、娘核種の原子数濃度を尺度とした単位である。ラドン娘核種の PAEC は ^{218}Po (以下 RaA) の原子数濃度に RaA が放出するであろう α 線のエネルギー (例えば 6.00255MeV) を乗じた値と RaA と、 ^{214}Pb (以下 RaB) および ^{214}Bi (以下 RaC) の原子数濃度の和に ^{214}Po (以下 RaC') が放出するであろう α 線のエネルギー (例えば 7.68709MeV) を乗じた値を加算した数値を尺度としている。RaA と RaC' の α 線のエネルギーについては幾つかの測定値が発表されているが両者の比は大略 0.781 である。また RaC は約 0.04% の割合で 5.505 と 5.444MeV の α 線を放出する。これらを考慮すると上述の 7.68709MeV を等価的に 7.68622MeV として計算すれば良く、エネルギーの比は $6.00255/7.68622=0.78095\approx 0.781$ となる。人がラドン娘核種を吸入した時、呼吸器官内壁に付着する同原子の数は娘核種の見掛けの粒子径分布が同じならば当然その濃度に比例する。また、呼吸器に対するリスクはターゲットとなる細胞の種類によって異なり必ずしも α 線のエネルギーに直接比例するわけではないが、細胞に与えるリスクの相対的な大きさはエネルギーとは無関係ではなく比例的な関係が予想される。従って娘核種濃度を個別濃度ではなく PAEC で表現する方がリスク評価上有効ではないかと考えられている。このため PAEC の測定法が開発されたが我が国ではウラン鉱山の坑内環境の radiation control について初期段階で当時の IAEA の基準であったラドン濃度を尺度として採用し、PAEC について事業者も監督官庁も全く省みなかったため直接 PAEC を求める方法は研究されていなかった。又ラドン研究の主流がリスク評価ではなく娘核種そのものの実態の評価に傾いていたため、最近になってリスク評価が必要な状態になっても国内の測定器では何等の有効な対応がとれていないばかりか研究者自身も評価方法については十分な知識が欠如しているような状況になってしまった。

PAEC の単位は SI 系では J/m^3 が標準である。しかし古くからの慣習により WL も併用されている。さらに通常の放射線核種の濃度単位との整合性から平衡等価濃度 (以下 EEC) として Bq/m^3 が使われることもある。

2. 市販の PAEC-monitor

近年連続測定方式の PAEC 測定器が海外より供給されるようになった。このような測定器を以下 PAEC-monitor と呼ぶことにする。このような測定器の開発は半導体検出器に代表される α 線検出器が一般に普及するようになったことと無縁ではない。それはこの検出器が入射した α 線のエネルギーに比例した電荷を生成しそれを電圧パルスとして取り出すことができるばかりでなく、比較的低い逆バイアス電圧で使用でき、かつ光による妨害の少ない種類を作ることが可能となったためである。即ち連続的に娘核種を捕集しながら測定するため光に曝される可能性があり、いわゆる light tight 型の検出器が必要で、また RaA と RaC' の α 線のエネルギーが異なりそれに対応するため長時間の捕集により半減期の長いトロン娘核種である ^{212}Pb (以下 ThB) がフィルター上に蓄積しその娘核種の ^{212}Bi (以下 ThC) や ^{212}Po (以下 ThC') の α 線がラドン娘核種の α 線に比して無視できぬようになり、加うるに ThC の α 線のエネルギー (6.09~5.30MeV 平均 6.05MeV) が RaA の α 線のエネルギーに近く通常の α 線スペクトロメトリーでは区別できず ThC' の α 線 (8.784MeV) の数から推定する (0.5608 倍) 必要があるためエネルギー弁別性が要求されるからである。

この検出器を使用し一定濃度のラドン娘核種を捕集しながら RaC' の α 線の計数率を測定すると次第に増加するが遂には大略一定の値となる。(Fig.1) この状態を平衡状態と呼びこれに達するまでの時間は捕集した娘核種の種類によって異なる。また平衡状態における壊変率は捕集時の娘核種それぞれの原子数で表わした捕集率に等しくなるので、平衡状態での RaC' の壊変率は RaC' の α 線にもとづく PAEC に比例し、従ってこれに RaA の α 線にもとづく PAEC 即ち RaA の原子数で表わした捕集率と RaA/RaC' の α 線のエネルギー比 (前述の 0.781) の積を加算すると全娘核種の PAEC に比例した数値が求められる。市販されている PAEC-monitor の大部分はこの方式を採用している。RaA、RaB、RaC の捕集率を 1dpm/min とすると平衡状態での RaA より RaC'、RaB より RaC'、RaC より RaC' に壊変する一分間毎の割合はそれぞれの核種の壊変定数の逆数即ち 4.3858、38.7941、28.4355 dpm となる。一方 RaA の場合も全く同じで RaA の壊変率は 4.3858 でその 0.781 倍即ち 3.4247dpm が上記と等価の計数率となる。

RaA、RaB、RaC の初期濃度をそれぞれ $C_{a,0}$ 、 $C_{b,0}$ 、 $C_{c,0}$ dpm/l、採取流量を v l/min とすると平衡時におけるそれぞれを源とした RaA および RaC' の放射能 $i_{aa\infty}$ 、 $i_{ac\infty}$ 、 $i_{bc\infty}$ 、 $i_{cc\infty}$ は以下の式で計算される。即ち

RaA → RaA について

$$i_{aa\infty} = v C_{a,0} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_a t} dt = C_{a,0} \frac{v}{\lambda_a} \quad \dots (1)$$

RaA → RaC について

$$\begin{aligned}
i_{ac\infty} &= \nu C_{a,0} \int_0^{\infty} \lambda_b \lambda_c \left(\frac{e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} + \frac{e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right) dt \\
&= C_{a,0} \frac{\nu}{\lambda_a} \quad \dots (2)
\end{aligned}$$

RaB→RaC について

$$i_{bc\infty} = \nu C_{b,0} \int_0^{\infty} \lambda_c \left(\frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_c - \lambda_b)} + \frac{e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_b - \lambda_c)} \right) dt = C_{b,0} \frac{\nu}{\lambda_b} \quad \dots (3)$$

RaC→RaC について

$$i_{cc\infty} = \nu C_{c,0} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c t} dt = C_{c,0} \frac{\nu}{\lambda_c} \quad \dots (4)$$

となる。

今連続してラドンの娘核種を採取しながら計数し T_M 分間毎に計数を読み出すシステムを考える。採取流量を ν l/min、RaA チャンネルと RaC'チャンネルの計数効率をそれぞれ η_a 、 η_c 、また RaA、RaB、RaC それぞれの濃度を C_a 、 C_b 、 C_c dpm/l さらに RaA と RaC' の α 線のエネルギーを E_a 、 E_c MeV、 n 回目の観測回の RaA チャンネルの計数を I_{aan} 、また同回の RaC'チャンネルの計数 I_{cn} のうち採取時の娘核種が RaA、RaB、RaC であり計数時 RaC'であったそれぞれの計数を I_{acn} 、 I_{bcn} 、 I_{ccn} とする。 $(I_{cn} = I_{acn} + I_{bcn} + I_{ccn})$ また採取開始から ($n=1$) その回の計数を開始するまでの経過時間を T_E 分とすると、 $T_E = (n-1)T_M$ となるので

$$I_{aan} = C_a \nu \eta_a \left[\frac{1}{\lambda_a} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_a} e^{-\lambda_a T_E} (1 - e^{-\lambda_a T_M}) \right\} \right] \quad \dots (5)$$

$$\begin{aligned}
I_{acn} &= C_a \nu \eta_{ca} \lambda_b \lambda_c \left[\frac{1}{\lambda_a (\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_a} e^{-\lambda_a T_E} (1 - e^{-\lambda_a T_M}) \right\} \right. \\
&\quad + \frac{1}{\lambda_b (\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_b} e^{-\lambda_b T_E} (1 - e^{-\lambda_b T_M}) \right\} \\
&\quad \left. + \frac{1}{\lambda_c (\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_c} e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M}) \right\} \right] \quad \dots (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{bcn} &= C_b \nu \eta_c \lambda_c \left[\frac{1}{\lambda_b (\lambda_c - \lambda_b)} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_b} e^{-\lambda_b T_E} (1 - e^{-\lambda_b T_M}) \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\lambda_c (\lambda_b - \lambda_c)} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_c} e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M}) \right\} \right] \quad \dots (7)
\end{aligned}$$

$$I_{cen} = C_a \nu \eta_c \left[\frac{1}{\lambda_c} \left\{ T_M - \frac{1}{\lambda_c} e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M}) \right\} \right] \quad \dots (8)$$

となる。これらの計算はそれぞれの娘核種濃度がステップ状に C_a 、 C_b 、 C_c dpm/l だけ増加した場合の計数の増加分の時間的変化をも示している。 T_E が十分大きくなると上記各式は平衡状態になる。その時の計数を $I_{a,\infty}$ のように n を ∞ に変えて表わすと

$$\frac{C_a}{\lambda_a} = \frac{I_{a,\infty}}{\nu \eta_a} \quad \dots (9)$$

$$\left(\frac{C_a}{\lambda_a} + \frac{C_b}{\lambda_b} + \frac{C_c}{\lambda_c} \right) = \frac{I_{a,\infty} + I_{b,\infty} + I_{c,\infty}}{\nu \eta_c} \quad \dots (10)$$

の関係が得られる。また C_a/λ_a 、 C_b/λ_b 、 C_c/λ_c は 1 l 中の RaA、RaB、RaC の原子数濃度なので

$$\left(\frac{I_{a,\infty}}{\nu \eta_a} E_a + \frac{I_{a,\infty} + I_{b,\infty} + I_{c,\infty}}{\nu \eta_c} E_c \right) / 1.3 \times 10^5 = WL \quad \dots (11)$$

となって WL 単位で表した PAEC となる。(11) 式はまた

$$\left(\frac{I_{a,\infty}}{\nu \eta_a} \times 0.781 + \frac{I_{a,\infty} + I_{b,\infty} + I_{c,\infty}}{\nu \eta_c} \right) \times E_c / 1.3 \times 10^5 = WL \quad \dots (11')$$

とすることもできる。

以上の式から市販されている PAEC-monitor のように T_M を 60 分とすると $I_{aen} + I_{bcn} + I_{cen}$ は $n=3$ 即ち T_E が 120 分から 180 分までの観測回で平衡値の約 95% に達することがわかる。一方捕集された娘核種が平衡状態にある時採取を停止するか、あるいは採取は続けるものの娘核種濃度を 0 にするとフィルター上の放射能はゆっくり減少する。このときの減衰曲線は、上記の場合と同じ記号を使い、さらに採取停止時又は濃度を 0 にする直前のフィルター上の RaA、RaB、RaC の壊変率を i_{a0} 、 i_{b0} 、 i_{c0} dpm として

$$I_{aan} = \int_{T_M(n-1)}^{T_M n} \eta_a i_{a,0} e^{-\lambda_a t} dt = \eta_a i_{a,0} \frac{e^{-\lambda_a T_E} (1 - e^{-\lambda_a T_M})}{\lambda_a} \quad \dots (12)$$

$$\begin{aligned}
I_{acn} &= \int_{T_M(n-1)}^{T_M n} \eta_c i_{a,0} \lambda_b \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} \right. \\
&\quad \left. + \frac{e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} dt \\
&= \eta_c i_{a,0} \lambda_b \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_a T_E} (1 - e^{-\lambda_a T_M})}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a) \lambda_a} + \frac{e^{-\lambda_b T_E} (1 - e^{-\lambda_b T_M})}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b) \lambda_b} \right. \\
&\quad \left. + \frac{e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M})}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c) \lambda_c} \right\} \quad \dots(13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{bcn} &= \int_{T_M(n-1)}^{T_M n} \eta_c i_{b,0} \lambda_b \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_c - \lambda_b)} + \frac{e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} dt \\
&= \eta_c i_{b,0} \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_b T_E} (1 - e^{-\lambda_b T_M})}{(\lambda_c - \lambda_b) \lambda_b} + \frac{e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M})}{(\lambda_b - \lambda_c) \lambda_c} \right\} \quad \dots(14)
\end{aligned}$$

$$I_{ccn} = \int_{T_M(n-1)}^{T_M n} \eta_c i_{c,0} e^{-\lambda_c t} dt = \eta_c i_{c,0} \frac{e^{-\lambda_c T_E} (1 - e^{-\lambda_c T_M})}{\lambda_c} \quad \dots(15)$$

となることがわかる。

ここでは前述と同様に $n=1$ を採取を停止しもしくは濃度を 0 とした時から始まる観測回としている。 i_{a0} 、 i_{b0} 、 i_{c0} が採取停止直前に平衡状態になっていたとするとそれらは C_a/λ_a 、 C_b/λ_b 、 C_c/λ_c に等しい。この場合計数率がはじめての計数率の 5% にまで減少するのは I_{aa} と I_{cc} を除くと前述と同様 T_E が 120 分から 180 分までの観測回である。この場合も前例と同じように娘核種それぞれの濃度がステップ状に C_a 、 C_b 、 C_c dpm/l だけ減少した時の減衰曲線も表わしている。従って娘核種を連続的に捕集しながら計数している場合娘核種濃度が増減すれば平均して 2.5 時間後までに追従するので急速な response さえ望まなければ PAEC の測定に利用できることになる。しかしながらこのような方式では T_M を短くしても特性に変わりがなくこのままの方式で response の速度をあげることは不可能である。

現在市販されている PAEC-monitor の過渡特性は調べた範囲ですべてこの方式になっている。従ってこの方式の過渡特性を幾つかの見地から図示する。

毎分 1 dpm の割合でラドン娘核種を捕集しながら計数を続けると娘核種それぞれの半減期に対応する時間経過後平衡値に達する。その壊変率の変化を Fig.1 に示す。図から

わかるように平衡値の 95%に達するまでの時間経過は RaA→RaA : ~12.5 分、RaA→RaB : ~120 分、RaA→RaC : ~160 分、RaB→RaC : ~120 分、RaC→RaC : ~90 分位である。

Fig.1 の場合と同様に毎分 1 dpm の RaA、RaB、RaC (図中で A、B、C で表示) を捕集しながら 1 時間毎にそれより過去 1 時間の RaC (又は RaC') (図中で C で表示) の壊変率 (dph) を式(6)、(7)、(8)より求め Fig.2 に示す。またこれとは逆に時刻 0 で RaA、RaB、RaC が共に 1dpm でありその後娘核種の捕集を行わずフィルター上の娘核種が RaC (又は RaC') として減衰する状況を考え 1 時間毎の壊変率 dph を求めると Fig.3 となる。これらは (13)、(14)、(15) より求められる。Fig.2 および Fig.3 からわかるように 1 時間毎の壊変率の変化は娘核種ごとにより異なるため、RaA : RaB : RaC の壊変率の比を 1 : 1 : 1、1 : 0.6 : 0.4、1 : 0.3 : 0.1 の三種類として RaC'にもとづく PAEC の変化を求めることにし、時間毎の壊変率即ち相対的な PAEC の平衡状態 (長時間経過した時の飽和値) での PAEC との比を求め Fig.4、Fig.5 に示す。Fig.5 の娘核種の初期値は上記の娘核種の濃度比で捕集を続け平衡状態に達した時の状態で上記の壊変率の比をそれぞれ λ_a 、 λ_b 、 λ_c で除した相対値である。Fig.4、Fig.5 の値に RaA の壊変率から求めた RaA のエネルギーにもとづく PAEC を加えると見掛け上の全娘核種の PAEC が求められるが RaA のエネルギーにもとづく PAEC と RaC'のエネルギーにもとづく PAEC が表示されている実際の時刻は同一でないため必ずしも正確な評価値という訳ではない。RaA を加算するにはその原子数濃度に両者のエネルギー比 0.781 を乗ずる。第一回の観測ではこの平衡値より僅か小さくなるが 10^{-4} のレベルなので必ずしも考慮する必要はない。RaA に関する PAEC を加算して計算した結果を Fig.6、Fig.7 に示す。この結果は娘核種の濃度比にそれ程依存しないので 3 種の濃度比について平均した結果を Fig.8、Fig.9 に示す。従って Fig.8 および Fig.9 の曲線は簡略化した PAEC-monitor の過渡応答曲線となる。

3. 早大方式の PAEC-monitor

前項で示したように市販の PAEC-monitor の応答速度はかなりおそく目的によっては不十分なことも起こり得る。殊にトロンの PAEC の場合には式 (7) や (14) から予想されるように応答時間は非常に長く 12 時間以上に達するため濃度の時間的変化を求めることは事実上不可能である。早大では従前より応答速度の早い方式を独自に開発し使用してきた。これについて簡単に説明する。

計数の方法そのものは市販の PAEC-monitor と基本的に同じであるが例えば n 回目の観測回の計数値のみならず $(n-1)$ 、 $(n-2)$ 、 $(n-3)$ 観測回の計数 (場合によっては $(n-2)$ 回までで良い) を使用して計算を行う。

即ち、RaA、RaB、RaC (=RaC') を採取しながら RaC' の activity を時間間隔 T で測定した時の n 、 $n-1$ 、 $n-2$ 、 $n-3$ 回目の観測回の計数を C_{cn} 、 $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ 、 $C_{c(n-3)}$ として RaC' の α 線に係わる PAEC (RaA として捕集された核種が RaC' として壊変すると考えたときの PAEC 即ち RaA の原子数濃度に RaC' の α 線のエネルギーを乗じた値。RaB、RaC 何れも同じ) に比例する数値 C_{cn0} を求めると

$$C_{cn0} = C_{cn} - C_{c(n-1)} \{ \text{Exp}(-\lambda_a T) + \text{Exp}(-\lambda_b T) + \text{Exp}(-\lambda_c T) \} + C_{c(n-2)} \{ \text{Exp}(-(\lambda_a + \lambda_b) T) + \text{Exp}(-(\lambda_b + \lambda_c) T) + \text{Exp}(-(\lambda_c + \lambda_a) T) \} - C_{c(n-3)} \{ \text{Exp}(-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c) T) \} \dots \quad (16)$$

となる。ここで λ_a 、 λ_b 、 λ_c は RaA、RaB、RaC の壊変定数である。一方トロンの系列に対しては同様に ThB、ThC の壊変定数を λ_b 、 λ_c 、ThC の activity に対応する計数を上記と同様に C_{cn} 、 $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ とすると

$$C_{cn0} = C_{cn} - C_{c(n-1)} \{ \text{Exp}(-\lambda_b T) + \text{Exp}(-\lambda_c T) \} + C_{c(n-2)} \{ \text{Exp}(-(\lambda_b + \lambda_c) T) \} \dots \quad (17)$$

となる。今 RaA、RaB、RaC の半減期をそれぞれ 3.040min、26.89min、19.71min、ThB、ThC の半減期をそれぞれ 10.64h、60.55min とし、ラドンの系列の場合は $T=60$ 、45、30、20min について、トロンの系列の場合は $T=4$ 、3、2、1.5、1.0、0.5h について計算すると次式 (18) ~ (31) のようになる。

ラドンの系列

$$T=60\text{min} : C_{cn0} = C_{cn} - 3.3419945 \times 10^{-1} C_{c(n-1)} + 2.5818849 \times 10^{-2} C_{c(n-2)} - 2.9549434 \times 10^{-8} C_{c(n-3)} \dots \quad (18)$$

$$T=45\text{min} : C_{cn0} = C_{cn} - 5.1898531 \times 10^{-1} C_{c(n-1)} + 6.4427350 \times 10^{-2} C_{c(n-2)} - 2.2537812 \times 10^{-6} C_{c(n-3)} \dots \quad (19)$$

$$T=30\text{min} : C_{cn0} = C_{cn} - 8.1073694 \times 10^{-1} C_{c(n-1)} + 1.6134686 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} - 1.7189945 \times 10^{-4} C_{c(n-3)} \dots \quad (20)$$

$$T=20\text{min} : C_{cn0} = C_{cn} - 1.1025632 C_{c(n-1)} + 3.0698212 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} - 3.0915977 \times 10^{-3} C_{c(n-3)} \dots \quad (21)$$

トロンの系列

$$T=4\text{h} : C_{cn0} = C_{cn} - 8.3469726 \times 10^{-1} C_{c(n-1)} + 4.9391060 \times 10^{-2} C_{c(n-2)} \dots \quad (22)$$

$$T=3\text{h} : C_{cn0} = C_{cn} - 9.4985928 \times 10^{-1} C_{c(n-1)} + 1.0476984 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \dots \quad (23)$$

$$T=2h : C_{cn0}=C_{cn}-1.1310081 C_{c(n-1)}+2.2224100 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (24)$$

$$T=1.5h : C_{cn0}=C_{cn}-1.2638128 C_{c(n-1)}+3.2368169 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (25)$$

$$T=1h : C_{cn0}=C_{cn}-1.4400892 C_{c(n-1)}+4.7142443 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (26)$$

$$T=0.5h : C_{cn0}=C_{cn}-1.6772884 C_{c(n-1)}+6.8660355 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (27)$$

ラドンの系列

RaA より RaC に壊変した分を引き去った場合に適用

$$T=60min : C_{cn0}=C_{cn}-3.3419831 \times 10^{-1} C_{c(n-1)}+2.5818467 \times 10^{-2} C_{c(n-2)} \quad \dots (28)$$

$$T=45min : C_{cn0}=C_{cn}-5.1895032 \times 10^{-1} C_{c(n-1)}+6.440919 \times 10^{-2} C_{c(n-2)} \quad \dots (29)$$

$$T=30min : C_{cn0}=C_{cn}-8.0966712 \times 10^{-1} C_{c(n-1)}+1.6068126 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (30)$$

$$T=20min : C_{cn0}=C_{cn}-1.0921031 C_{c(n-1)}+2.9555852 \times 10^{-1} C_{c(n-2)} \quad \dots (31)$$

今 C_{cn} 、 $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ 、 \dots を観測時間 T 内での計数値と考える。前項で述べたように平衡状態では以下の関係が成立している。即ち $C_{cn} \dots$ がすべて" T "であった時の C_{cn0} を計数効率 η_c で除すと観測時間内にこの数 (I/η_c) に相当する原子数の娘核種、例えば (RaA+RaB+RaC)が捕集されていたことになる。従ってこれに RaC'の α 線のエネルギー $E_{CR}=7.6862MeV$ を乗ずると、RaC'にかかわるエネルギー濃度単位の量が求められ、これを採取流量 v l/min と観測時間 T min の積で除せば、エネルギー濃度 MeV/l が求められる。これに (5) および (9) 式などから求めた RaA の原子数濃度と RaA の α 線エネルギー $E_{AR}=6.0024MeV$ の積を加算するとその時間内のラドンの平均エネルギー濃度が求められる。これらのエネルギー濃度を $1.3 \times 10^5 MeV/l$ で除せば WL がまたこれを RaC'にかかわる濃度単位の時は $2.5408 \times 10^4 mWL$ でまた RaA も加算されている時は $2.6622 \times 10^4 mWL$ で除せばそれぞれ RaC'にかかわる $EE_{CRN}(Bqm^{-3})$ または全娘核種に関する $EE_{CRN}(Bqm^{-3})$ が求められる。このため $I=1$ とした時の C_{cn0} は感度を示す定数と考えられるので感度定数 K_C と呼ぶことにする。一方 (1)、(5) および (9) 式などからわかるように n 回目の観測回での RaA の計数を C_{an} とすると、平衡状態では RaA の α 線に対する計数効率をと η_a し $(C_{an} / \eta_a \cdot v \cdot T) \times E_{AR}$ がその観測回での RaA に関するエネルギー濃度となりそれを $1.3 \times 10^5 MeV/l$ で除せば WL がまたこれと上述の RaC'にかかわるエネルギー濃度の WL と合算すれば全娘核種の n 回目の観測回の WL が求められる。4 回法の計算では n 回目と $(n-1)$ 回目の 2 観測回の平均的濃度が求められるため RaA の場合も C_{an} と $C_{a(n-1)}$ の 2 観測値の平均から計算した方が整合性の上から好ましい。一方、 K_C を使用したときの RaC'の α 線にかかわるエネルギー濃度は $[C_{cn0} \cdot E_{CR}/(\eta_c \cdot v \cdot T \cdot K_C)]$ として計算される。

C_{cn0} は 4 個の観測値を使用して計算するためその誤差の推定値に誤差伝播の考えを導入する。即ち今 C_{cn} 、 $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ 、 \dots の計数がすべて N_C であったとすると、それぞれの係数の自乗の和の平方根に $N_C^{1/2}$ を乗じた値が誤差の推定値となる。この係数の自乗の和の平方根を K_E とし誤差定数と呼ぶことにする。同じ条件 (各測定回の計数が等しい) での計数の限界 N_{c0} は、求められる C_{cn0} に相当した計数が $K_C N_{c0}$ であり、誤差 (標準偏差)

が $K_E \sqrt{N_{C0}}$ となるので、求められた計数を統計的に有意な値にするためには、相対誤差が計数の $1/3$ 以下にすれば良いと考えて

$$K_E \sqrt{N_{C0}} \leq \frac{1}{3} K_C N_{C0} \quad \dots(32)$$

から

$$N_{C0} \geq 9 \left(\frac{K_E}{K_C} \right)^2 \quad \dots(33)$$

となる。ラドンの系列について RaC' の α 線に対する計数効率 20%、流量 10l/min、トロン系列について ThC' の α 線に対する計数効率 20%、流量 80 l/min、ThC' に関する分岐比 (ThC の β 壊変比) を 64.07% とし幾つかの観測時間 T に対する上記の N_{C0} 即ち測定限界に相当する WL と平衡等価濃度 (EEC_{RN}、EEC_{TN}) および K_C 、 K_E を求め表 1 に示す。

これよりラドンの系列については T: 30 分、トロン系列については T: 2 時間以上の観測時間が必要であること、またラドンの系列については、流量 v は 10 l/min より多く 15 l/min 位が望ましいことなどがわかる。(表 1 の関係を Fig.10、Fig.11 に示す)

早大方式の PAEC-monitor の動特性については次のように考える。通常の動特性がそうであるように娘核種濃度がステップ状に変化したとしその変化分のみを取り出すことにする。従って増加する場合は当初の娘核種の濃度は 0 で、第 1 回目の観測では C_{cn} のみ計数値がありその他の $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ … は 0 となる。第 2 回目の観測では C_{cn} と $C_{c(n-1)}$ のみ計数され他は 0 となる。従って (18) ~ (21) 式にそのような条件を入れて計算することになる。また濃度が減少する場合は当初娘核種濃度は平衡状態になっていてそれが 0 になったとする。この場合は初め C_{cn} のみ (12) ~ (15) 式に従って減少するが $C_{c(n-1)}$ 、 $C_{c(n-2)}$ 、… は平衡時の状態を保つ。次の観測回に入って $C_{c(n-1)}$ が同様減少するが $C_{c(n-2)}$ と $C_{c(n-3)}$ は平衡時の状態を保つなどとして計算を行う。今ラドンの系列について T=30 分の場合の計算の結果を Fig.12~Fig.14 に示す。立ち上がりの場合には第 1 回観測回では当然低くなるが第 2 回になるとかなり改善されるものの娘核種の存在比によっては過修正が起きる。しかし Fig.4 に比して動的な応答は著しく改善されている。立ち下がりの場合も同様で第 2 回には過修正されて負となり第 3 回になっても僅かながら影響を残しているがやはり Fig.5 に比して応答曲線は著しく改善されている。観測時間を延長して 1 時間にした場合を Fig.15、Fig.16 に示す。過修正の程度は減少するが応答時間は長くなり Fig.4 や Fig.5 に較べて相当改善はなされてはいるものの画期的と言う程ではない。従って早大方式はラドンの系列については短い観測時間により速い response を望む時に有効な手段であると言えよう。

4. ラドン濃度の変化に対する monitor の特性

前項でも述べたように PAEC-monitor の動特性は本来娘核種濃度の変化に対応する特性なので、前述の各項で仮定したように娘核種濃度のステップ状の変化に対する応答関数として表わされる。しかしながら現実には親核種であるラドン濃度の変化に伴う娘核種濃度の変化に追従して指示が変化することが多く従って実用上はそのような仮定に基づいた計算を行う必要がある。しかし、トロンの場合はトロンの半減期が短く ThB 濃度変動すると考えられるためこのような計算を加える必要はない。一方ラドンの場合はラドン濃度の上昇によって娘核種濃度も増加するが、ラドンから生成された娘核種の一部は器物に付着して失われたり、またエアロゾルに付着して粒子状の性質が強くなり気体であるラドンと同一行動をとらなくなるなどの為、ラドン濃度の変化のみから娘核種それぞれの濃度変化を求めることは困難である。そのためラドンから生成した娘核種それぞれの濃度の平均値は周辺の諸条件によって変わるが、生成曲線を決定する定数はラドンとその娘核種の壊変定数のみで器物やエアロゾルへの付着速度は含まないものとする。器物への付着速度を考慮すると平衡に達する時間は当然短くなるが周辺の諸条件によって変化するので一般化することはできない。

今前項の例と同様に毎分 v の流量で娘核種がフィルター上に集められているとすると、その時の形態は

- I. ラドンから生成した RaA をフィルター上に捕らえそれが $RaA \rightarrow RaB \rightarrow RaC \rightarrow$ と壊変する。これをこの順に i_{aa} 、 i_{ab} 、 i_{ac} とする。
- II. ラドンから RaA を経て生成した RaB をフィルター上に捕らえそれが $RaB \rightarrow RaC \rightarrow$ と壊変する。これをこの順に i_{bb} 、 i_{bc} とする。
- III. ラドンから、RaA、RaB を経て生成した RaC をフィルター上に捕らえそれが $RaC \rightarrow$ として壊変する。これを i_{cc} とする。

となり、従って RaA の activity i_a は、 $i_a = i_{aa}$ 、RaB の activity i_b は $i_b = i_{ab} + i_{bb}$ 、RaC の activity i_c は $i_c = i_{ac} + i_{bc} + i_{cc}$ 、となる。ラドン濃度が C_{n0} 増加したとしその増加分による娘核種の濃度変化を考える。ラドンより生成する RaA の粒子数 n_a は時刻 t について

$$n_a = C_{n0} \left\{ \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_a - \lambda_n)} + \frac{e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_n - \lambda_a)} \right\} \quad \dots(34)$$

なので、フィルター上での収支は $\lambda_n \ll \lambda_a$ 、 $e^{-\lambda_n t} \cong 1$ と考えて

$$\frac{dn_a}{dt} + \lambda_a n_a = C_{n0} \left(\frac{1}{\lambda_a} - \frac{e^{-\lambda_a t}}{\lambda_a} \right) v = \frac{C_{n0} v}{\lambda_a} (1 - e^{-\lambda_a t}) \quad \dots(35)$$

$\therefore i_{aa} = \lambda_a n_a$ なので

$$\frac{di_{au}}{dt} + \lambda_a i_{au} = C_{n0} v(1 - e^{-\lambda_a t}) \quad \dots (36)$$

i_{ab} については同様にして

$$\frac{di_{ab}}{dt} + \lambda_b i_{ab} = \lambda_b i_{au} \quad \dots (37)$$

また i_{ac} については

$$\frac{di_{ac}}{dt} + \lambda_c i_{ac} = \lambda_c i_{ab} \quad \dots (38)$$

となる。ラドンより生成する RaB の粒子数 n_b は時刻 t において

$$n_b = C_{n0} \lambda_a \left\{ \frac{e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_a - \lambda_n)(\lambda_b - \lambda_n)} + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_n - \lambda_a)(\lambda_b - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_n - \lambda_b)(\lambda_a - \lambda_b)} \right\} \quad \dots (39)$$

なので、フィルター上の収支について $\lambda_n \ll \lambda_a$ 、 $\lambda_n \ll \lambda_b$ 、 $e^{-\lambda_n t} \cong 1$ として

$$n_b = C_{n0} \lambda_a \left\{ \frac{1}{\lambda_a \cdot \lambda_b} - \frac{e^{-\lambda_a t}}{\lambda_a(\lambda_b - \lambda_a)} - \frac{e^{-\lambda_b t}}{\lambda_b(\lambda_a - \lambda_b)} \right\} \quad \dots (40)$$

$\lambda_b n_b = i_{bb}$ なので

$$\frac{di_{bb}}{dt} + \lambda_b i_{bb} = C_{n0} \lambda_a v \left\{ 1 - \frac{\lambda_b e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_b - \lambda_a)} - \frac{\lambda_a e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_a - \lambda_b)} \right\} \quad \dots (41)$$

となる。 i_{bc} については

$$\frac{di_{bc}}{dt} + \lambda_c i_{bc} = \lambda_c i_{bb} \quad \dots (42)$$

となる。ラドンより生成する RaC の粒子数 n_c は時刻 t において

$$n_c = C_{n0} \lambda_a \lambda_b \left\{ \frac{e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_a - \lambda_n)(\lambda_b - \lambda_n)(\lambda_c - \lambda_n)} + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_n - \lambda_a)(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_n - \lambda_b)(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} - \frac{e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_n - \lambda_c)(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} \quad \dots (43)$$

なので、フィルター上の収支について $\lambda_n \ll \lambda_a$ 、 $\lambda_n \ll \lambda_b$ 、 $e^{-\lambda_n t} \cong 1$ として計算すると

$$n_c = C_{n0} \lambda_a \lambda_b \left\{ \frac{1}{\lambda_a \cdot \lambda_b \cdot \lambda_c} - \frac{e^{-\lambda_a t}}{\lambda_a(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} - \frac{e^{-\lambda_b t}}{\lambda_b(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} - \frac{e^{-\lambda_c t}}{\lambda_c(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} \quad \dots (44)$$

さらに $\lambda_c n_c = i_{cc}$ なので収支を表す方程式は

$$\frac{di_{cc}}{dt} + \lambda_c i_{cc} = C_{n0} \nu \left\{ 1 - \frac{\lambda_b \cdot \lambda_c e^{-\lambda_b t}}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} - \frac{\lambda_a \cdot \lambda_c e^{-\lambda_a t}}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} - \frac{\lambda_a \cdot \lambda_b e^{-\lambda_c t}}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} \quad \dots(45)$$

となる。これらの微分方程式の解法は極めて容易であるが求められた関係式はかなり煩雑である。このような計算法の他に次のような解法も考えられる。どちらの方法によっても同じ解が得られる。

ラドンにより生成した RaA がフィルター上に捕集され、それが RaA として壊変する。或る時刻における RaA の壊変数はそれより τ と云う前の時間に捕集された RaA のうちその時間 $d\tau$ に壊変する数の和となる。この場合捕集時の RaA の量は (36) 式のように

$$C_{n0} \nu \{1 - e^{-\lambda_a(t-\tau)}\}$$

となるので i_{aa} は

$$i_{aa} = \int_0^t C_{n0} \nu \{1 - e^{-\lambda_a(t-\tau)}\} e^{-\lambda_a \tau} d\tau \quad \dots(46)$$

となる。このように捕集された RaA は RaB となり壊変するその量 i_{ab} は

$$i_{ab} = \int_0^t C_{n0} \nu \{1 - e^{-\lambda_a(t-\tau)}\} \cdot \lambda_b \left\{ \frac{e^{-\lambda_b \tau}}{(\lambda_b - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_b \tau}}{(\lambda_a - \lambda_b)} \right\} d\tau \quad \dots(47)$$

となりさらに RaC として壊変する量 i_{ac} は

$$i_{ac} = \int_0^t C_{n0} \nu \{1 - e^{-\lambda_a(t-\tau)}\} \lambda_b \cdot \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_c \tau}}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} + \frac{e^{-\lambda_c \tau}}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} + \frac{e^{-\lambda_c \tau}}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} d\tau \quad \dots(48)$$

となる。さらに RaB についても同様にして (41) のように

$$i_{bb} = \int_0^t C_{n0} \nu \left\{ 1 - \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} e^{-\lambda_a(t-\tau)} - \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_b)} e^{-\lambda_b(t-\tau)} \right\} e^{-\lambda_b \tau} d\tau \quad \dots(49)$$

また RaB として捕らえられ RaC として壊変する量 i_{bc} は

$$i_{bc} = \int_0^t C_{n0} \nu \left\{ 1 - \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} e^{-\lambda_a(t-\tau)} - \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_b)} e^{-\lambda_b(t-\tau)} \right\} \\ \times \lambda_c \left\{ \frac{e^{-\lambda_c \tau}}{(\lambda_a - \lambda_b)} + \frac{e^{-\lambda_c \tau}}{(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} d\tau \quad \dots(50)$$

となる。また RaC についても (45) 式のように

$$i_{cc} = \int_0^t C_{n0} \nu \left\{ 1 - \frac{\lambda_b \cdot \lambda_c e^{-\lambda_a(t-\tau)}}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)} - \frac{\lambda_a \cdot \lambda_c e^{-\lambda_b(t-\tau)}}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_a \cdot \lambda_b e^{-\lambda_c(t-\tau)}}{(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c)} \right\} e^{-\lambda_c \tau} d\tau \quad \dots(51)$$

となる。これも前式と同様定積分そのものは容易であるが関係式は煩雑である。

前述のように $i_c = i_{ac} + i_{bc} + i_{cc}$ などであるがここで前述したように娘核種の平衡時の存在比を導入する必要がある。即ちラドンの濃度を示す壊変数 C_{n0} に係数 K_B 、 K_C を次のような考えのもとに与えることになる。平衡状態での娘核種濃度はすべて C_{n0} に等しくなるがそれを観測時の娘核種濃度比 $1:K_B:K_C$ に等しくさせるため i_b に係わる C_{n0} に K_B を i_c に係わる C_{n0} に K_C を乗ずることにする。従って (39)、(40)、(41)、(42)、(49)、(50) の各式に K_B を (42)、(51) の 2 式に K_C を乗じて計算する。また i_a 、 i_b 、 i_c などは時刻 t における activity であるため観測時間内の計数はその時間について積分する必要がある。ラドン濃度が変化した時の時刻を 0 としその観測回の開始時間を T_S 、一観測回の時間を ΔT_S とすると n 回目の観測回についてその間の係数に対応する壊変数は RaA の α 線に対し

$$I_a = \int_{T_S + \Delta T_S(n-1)}^{T_S + \Delta T_S n} i_{aa} dt \quad \dots(52)$$

RaC' の α 線に対し

$$I_c = \int_{T_S + \Delta T_S(n-1)}^{T_S + \Delta T_S n} (i_{ac} + K_B i_{bc} + K_C i_{cc}) dt \quad \dots(53)$$

となる。 I_a 、 I_c に RaA と RaC' の α 線に対する計数効率 $\eta_a \eta_c$ を乗ずればそれぞれの計数 C_A 、 C_C が求められる。即ち

$$C_A = \eta_a I_a \quad \dots(54)$$

$$C_C = \eta_c I_c \quad \dots(55)$$

となる。

5. 実測例

5-1. PAEC-monitor の基本的関係

大部分の PAEC-monitor は簡単な多重波高分析器を有しこれにより RaA、RaC'、ThC' の α 線を 3 群 (チャンネル) に分別し計数する。その α 線の波高分布の例を Fig.17 に示す。これは Pylon 社の製品の例であるが他のメーカーの場合も大略同一である。これからわかる如く上記の α 線は波高分析法によって或程度は分離可能であるが、 α 線のスペクトルの低エネルギー側の裾が隣のチャンネルに混入することは避けられない。またこれは波高分析器で選択した波高範囲内に対象とした α 線のすべてが入る訳ではないことも意味している。また ThC が存在するとその α 線のエネルギーは RaA のそれに近く、通常のエネルギー分析では完全に分離することはできず、従ってそれを含めて RaA の α 線の検出波高のチャンネルの幅を選定し、ThC' の α 線の計数から ThC の α 線の計数を推定し、RaA の α 線のチャンネルの計数からそれを差し引く例が多い。

これ等について市販の monitor でどのように扱っているかは不明である。RaA のチャンネルに入る RaC' の α 線の計数は RaC' のチャンネルの計数が十分多い時、モニターの採取を止め 30 分以上経過後 RaA のチャンネルの計数と RaC' の α 線の計数即ち RaC' のチャンネルの計数を比較すれば良い。この際、ThC' のチャンネルに計数があれば RaA のチャンネルから引き去らねばならないが、その割合は上記の時間から数時間以上経過した後 RaA のチャンネルと ThC' のチャンネルの計数を比較すれば良い。ThC の α 線の分岐比は 35.93% で、ThC' の α 線の計数との比は 0.56079 : 1 であるが前述のように検出器に入射した当該エネルギーの α 線のすべてをチャンネル内で計数している訳ではない。このような場合の計数効率採有用フィルターの娘核種捕集部分の大きさ、フィルターと検出器との間隔、検出器の有効部分の大きさ、および α 線のスペクトルとスペクトル上での波高弁別の位置から計算で推定するか標準の検出器と比較して推定するか何れかであるが信頼できる諸データが求められれば前者の方が正確である。

種々の補正を行った後の RaA のチャンネルの計数と RaC' の計数は前項に述べたように大幅に異なりその比は最大で 16.33 となる。この RaA と RaC' の計数の比は娘核種の存在比に依存する。RaA、RaC'、ThC' それぞれのチャンネルの計数を A、C、T とし、ThC の計数はすべて RaA のチャンネルに含まれていると考え、また C には RaA から生成した RaC' の計数が含まれているとする。RaA と RaC' の存在比が 1 の時平衡状態にあると考えその時の平衡を表す数 E が同じく 1 となるとすると E は

$$E = \frac{C - (A - T \times 0.5608)}{(A - T \times 0.5608)} \bigg/ 16.33 = \frac{1}{15.33} \left\{ \frac{C}{(A - 0.5608T)} - 1 \right\} \quad \dots (56)$$

となる。E そのもので表示しても良いがこの数値に RaB と RaC の RaA に対する存在比が含まれているためそれを例えば測定している空間の空気が換気されていると仮定し 1 換気要する時間に変換した方が理解し易い。それを Fig.18-1 に示す。

(56) 式の A、C、T の計数はそれぞれ同一の観測回での RaA、RaC'、ThC' の計数

を意味するが、これらが表示している計数と実際の娘核種の濃度との間に時間的ずれのあることは先に述べた通りである。このうち A と T は補正の必要上同一観測回の中で処理すべき計数であるが、RaC'は捕集された RaA、RaB、RaC が RaC'の α 線を放出するまでに時間的遅れがあり、Fig.1 から推定されるように RaA で 80 分、RaB で 60 分程度 $\{(1-e^{-\lambda t})\}$ までの時間と考えられるので、C については次の観測回の計数を使うべきである。しかし未来のデータは使えないので当該観測回の C の計数と 1 観測回前の A と T の計数 A'、T'を使って (E:Pro.E)

$$E = \frac{1}{15.33} \left\{ \frac{C}{(A' - 0.5608T')} - 1 \right\} \quad \dots (56')$$

とし、C の観測回での平衡値とすると平衡の実体を良く表わすものと考えられる。また PAEC 指示のずれもあってこの平衡値は計算時の時刻での平衡状態を示していると解釈される。実測値を Fig.18-2 に示す。表 7 のデータによる同図の Pro.E の方が個別濃度から同一手法で計算した平衡値に近いし、また除塵器の効果も良く表わしている。しかし Tracerlab の monitor(WLM)の計算機構ではこのような補正は行っていないように思われる。

5.2 PAEC-monitor の均一性

PAEC-monitor の多くは自動化されていてその内部での計算機構など不明の部分が多い。従って何種類かの monitor についてその外見的な性能を比較しおよその性能を認識しておく必要がある。通常 monitor としての性能はその静的な特性に限られていて、しかもそれが標準と合致すれば良しとし、若し合致しない時は簡単な補正係数で対応しようとする傾向がある。しかしながら本来その monitor の機構的問題と関連させて議論し本質的な対応を考えるべきである。

Fig.19 に動燃人形峠などで使用している PAEC-monitor の比較を示す。このうち WLX は Pylon 社の monitor で環境技研が所有する装置である。WLM と WLX は良く一致している。PAEC に関する限り両者の機構に大きな差のないこと、および実験場が京大の原子炉実験所内の CA 棟で aerosol の多い状態であったためと考えられる。これに対し AM は人形峠で考えた自動測定器で表示濃度の差もさることながら濃度変化が上記 2 者に比して 1 時間近く先行しているのは機構的な理由によるものと考えて良い。

Fig.20 は同じ Pylon 社の製品間の差で分析センターの monitor の方の RaA に対する実際の計数効率が環境技研のそれに比して高いのではないかと考えられる。静的なデータの差はともかく分析センターの monitor の方の立ち上がり立ち下がり共に速いように思われる。

Fig.21 については両者の校正上の問題があるように思われるが原因については不明

である。ただこのような事実があるため単に校正定数のみで補正をすることは無理ということになる。

5.3 実験場所としてのテントの特性

当初ラドン濃度が比較的高くかつ安定していて、その上測定器をレベルの低い野外とレベルの高い実験空域との間で簡単に往復させ得る場所として人形峠の見学坑道を考えていた。この坑道は地表に近いので盤圧は非常に少なく崩落のおそれは殆どないと考えていたが、危険という理由で実験のためこの坑道を使うことはできなくなった。そのため同じ人形峠の通称ハチマキ山に仮設テントを設置し、その中で実験することになった。テントの大きさは Fig.24 に示してある。仮設テントの密閉性は余り良くなく、またラドン源は地下より地表を通して供給されるラドンであるため外部の気象条件の影響を受け易い。テント内のラドン濃度と PAEC の安定性を約 5 日間にわたって調べた結果を Fig.22 に示す。これによるとラドン濃度については約 10 倍、PAEC については 20 倍の変動が起こり得るがそれは 1 週間の単位であり半日程度のスパンではそれ程大きく変動することはないであろうと考えられた。この変動の原因は気圧変動が主であると考えられる。またこのテントの内部に娘核種濃度をコントロールするため市販の除塵器を置くことにした。これは家庭用のもので室内の煙などのエアロゾルを除去する装置でエアーリフレ W (EH357-H) と呼ばれている。この除塵器を使用したときの PAEC に与える効果を調べるためテント内で運転しその給排気中の PAEC を測定した。その結果を Fig.23 に示す。狭いテント内で運転するため給気側の濃度が減少するばかりでなく排気側にテント内の空気が混入するためこの結果から除去率を計算することはできないが、少なくとも 1/20 位に PAEC を下げ得るものと考えられた。またテント内の平均的 PAEC は、約 1/5 にまで下げ得ることもわかった。処理流量 (v) についてはカタログでは $3\text{m}^3/\text{min}$ 位とされているが、実測すると Fig.24 に示したように $1.08\text{m}^3/\text{min}$ 位となりテントの全容量 (V) 14.86m^3 から V/v は 13.77 分となる。PAEC はラドン娘核種の全量にかかわる濃度なので、その半減期を 35 分と仮定すると、Fig.23 の下段の式から平衡時の PAEC は初めの 21.4% となることがわかり、実験と良く一致した。初めこの除塵器はそれ程の効果はないと考えていたが予想以上の効力があるので実験に使用することとした。また使い方によっては娘核種の平衡比を制御できるのではないかと考えられる。

5.4 テント内での実験

12 月 8 日～12 月 10 日にかけてのテント内の実験作業項目を表 2 に示す。ラドン濃

度はアルファガードにより測定した。使用した PAEC-monitor は Pylon 社の製品でその理由は RaA、RaC'、ThC'それぞれの ROI の計数が表示され解析に便利なためである。またラドン娘核種の個別濃度は早大の半導体検出器と MCA により測定した。

実験期間中のテント内のラドン濃度の変化を Fig.25 に示す。濃度変化は一見周期的で約 14 時間で変化する。最低値を示すのは午前 3 時頃である。気象的原因で地表からのラドンの供給量に変化するのではないかと考えられる。また同様に PAEC の変化を Fig.26 に示す。2 台の Pylon 製 PAEC-monitor のうち 1 台を常時テント内に設置し、他を表 2 に示したようにテント内に出したりまたテント内に入れたりして PAEC の変化を測定した。また半導体検出器によって娘核種の個別濃度を測定しそれを PAEC に変換して図上にプロットした。この濃度と monitor の測定値とは時間的に少なくとも 1 時間の差があり monitor の方が遅い時刻を示している。

テント内のラドン濃度 PAEC および RaA 濃度と RaC'の計数の全実験期間を通じての変化を Fig.27-1、27-2 に示す。テント内の PAEC および RaA 濃度は除塵器を作動させると変化するその運転期間を同時に示した。除塵によって RaA 濃度は急激に減少しその後はラドンより生成する RaA の量と除塵率との平衡の状態に移るためラドン濃度とグラフ上で平行することが予想される。その傾向は見られるが細部については同一の状態とは言い難い。また RaA 濃度と PAEC が平行し除塵後は両者が近接することから PAEC 中の多くは RaA によるもの即ち娘核種の RaA と RaB+RaC の間の平衡比が極めて小さくなっていることが予想される。これは Fig.18-2 でも示されている。

5.5 過渡的な変化 (応答特性)

PAEC-monitor にステップ上の娘核種濃度の変化を与えたときの monitor の応答特性を Fig.28-1、28-2、Fig.29-1、29-2、Fig.30-1、30-2、30-3、30-4、Fig.32-1、32-2 に示す。それにそれ等の特性を相対値として規格化した図を Fig.31-1、31-2、31-3、31-4、Fig.33-1、33-2 に示す。

Fig.28-1 は monitor をテント外からテント内へ、Fig.28-2 はテント内からテント外へ移動したときの内外 2 台の monitor の RaA、RaC'の計数の時間的変化である。Fig.28-1 については RaA の変化は 2 時間経てばテント内の monitor のそれと平行状態になるが、RaC'の方は 4 時間を必要とすることがわかる。一方 Fig.28-2 は始めに除塵器を動かしていたため 2 台の monitor の指示値は同時に平行して減少し、その後 1 台の monitor をテント外に取り出したので、平行からずれて急激に濃度が下がっている。RaC'の計数についても明白ではないがそのような傾向が見られる。それは RaC'の計数の変化がその減衰曲線に近くそれに対して除塵の速度が速いため計数の減衰曲線に大きな差が生じなかったのではないかと考えられる。またもう一つの可能性は RaA の ROI に RaC'の計数が混入

したためとも考えられその場合は 1/10 程度と推定される。

Fig.29-1 および 29-2 は除塵器を動かした時のテント内に設置した monitor の RaA、RaC'の計数と表示された PAEC の変化を示す。除塵を開始すると RaA の計数は直ちに減少するが RaC'の計数は始めの 1 時間はゆっくりと変化し以後急速に減少する。一方 RaA の計数のうちのラドンから短時間に生成している計数の割合が無視できなくなり減少曲線は緩やかになる。一般的に RaC'の計数に RaA の濃度増加の影響が出るのはおそくなるので、Fig.29-1 のように A と C'が平行状態で下がることはなく Fig.29-2 の 10 時 30 分以降のように両者の間隔がせばめられるものと考えられる。12/9 の除塵時のラドン濃度は比較的安定しているのでラドンの濃度変動は考慮しなくとも良いが 12/8 は必ずしも無視することはできない。RaA と RaC'の計数にはそのときの両者にかかわる娘核種の濃度について 1 時間程度の差がありそれを考慮して提案した平衡比 E を図上にプロットすると除塵により平衡比が減少し 12/8 は上昇し 12/9 は一定の値を保っている状態がわかる。12/8 の上昇の理由はラドン濃度の減少に伴い RaA 濃度が減少し RaC'の計数の追従がおくれたためと解釈される。

Fig.30-1~30-4 は PAEC-monitor の過渡的な動特性を実測するため、2 台の PAEC-monitor のうち 1 台をテント内に固定設置し他の 1 台をテント外からテント内へ又はテント内からテント外へと移動して両者の指示値 (PAEC ここでは WL 値) を測定したもので、さらにその比を求め両者が共にテント内にあるときの指示値との比で規格化した場合が Fig.31-1~31-4 に示されている。2 台の PAEC-monitor をテント内に設置した時両者の指示値は同一でなくテント内外へ移動させた monitor の方が低い値を示すことが多いが常にそうなるとは限らない。これは設置場所の濃度差のためではないかと推定される。それは Fig.28-1、28-2 で両 monitor の RaA と RaC'に対する計数の比が定常状態で大略一定であり従って両者の指示値の差は単に感度の差のみであると考えられるからである。感度差は流量の設定誤差、フィルターと検出面との幾何的位置関係などで生ずる。規格化された相対的变化から、変化が始まってから即ちステップ状の濃度変化が始まってから濃度の 1/2 に達するまでの時間を推定すると Fig.31-2、Fig.31-4 についてはそのままの状態推定でき 1.3 時間となり、Fig.31-1 と Fig.3-3 については多少形状を修正することにより同じく 1.3 時間が得られる。計算値である Fig.6、Fig.7 の結果より 50%に達する時間を求めるとそれぞれ 1.25~1.30、1.25 時間となり良い一致を示す。除塵器のデータからでも求められるが除塵前後の WL 値の差を求めることは難しい。除塵後の WL 値として平衡比 E の減少がとまり安定値に転じた時の WL 値を使うとすると一応納得し得る計算にはなるがこの場合は比較的高い濃度を差し引くことになり誤差が大きく正確には求められない。Fig.29-1、Fig.29-2 について一応求めるとそれぞれ 1.2~1.3、0.8~1.0 時間となる除塵器の処理能力即ち流量がもう少し多ければかなり正確に求められるものと思われる。

Fig.32-1 は RaA の計数を含まない RaC'のみの計数について測定された数値をそのま

まにプロットしたデータであり一方 Fig.32-2 は 32-1 のデータを早大の 3 回法（1 時間測定の場合は 4 回法でも 3 回法でも差は殆どない）で処理してプロットした図である。両者は大略同じ形状であるが 32-2 の方が 2 台の monitor の指示値の差は少ないように思われる。この両 monitor の指示値を定常状態で規格して再プロットした図が Fig.33-1、Fig.33-2 である。前者について 50%値を求めると 1.4h 後者は 1.1h となる。Fig.33-1 については Fig.4 の、Fig.33-2 については Fig.15 の計算値を同時にプロットしてある。Fig.33-1 についてはテント外での RaC'の計数が 0 にならずまた Fig.33-2 についてはテント内に入れてから 1~2 時間付近のデータの変動が大きいように思われる。

5.6 その他の特性

Fig.34 に RaA の計数とラドン濃度の関係を示す。本来 RaA の計数 A とラドン濃度 R の関係は、比例的な関係は予想されるものの周辺の気象的条件やエアロゾルの状況や器物の配置などにより影響されるため完全な比例性はないものと考えられている。比較的同一の条件と考えられる除塵をしていない時のテント内での測定値の比例性は少ないが求められてたデータによるとラドン濃度が 400Bqm⁻³ 付近で屈曲点が見られそれより高濃度では

$$A=307.7R^{0.6668} \quad (R>400) \quad (57-1)$$

低濃度では

$$A=2.531R^{1.105} \quad (R<400) \quad (57-2)$$

が両者の関係をもっとも良く表現しているようである。この他にも例えば

$$A=265+3.13R \quad (57-3)$$

などでも一応フィットされることがわかった。このうち 57-1 はラドン濃度が高くなると娘核種の平衡性が低くなり RaA そのものもしくは A の ROI に混入する RaC'や ThC'の計数が減少するためとも考えられるがたしかめている訳ではない。除塵状態での RaA の計数とラドン濃度の関係は除塵の条件によって変わるためそれ程意味を持たないが

$$A=1.1R \quad (57-4)$$

と簡単に表せぬこともない (57-2) か (57-3) と (57-4) の間の差が RaA に対する除塵効果ということになるがそれ程正確な関係ではない。ただ除去に関する時定数はこの関係より 10 分位になるので Fig.23 の 13.77 分と矛盾はしない。何れにしても同じような条件下でも RaA の計数からラドン濃度を求めることは難しいと云えよう。

6. 結論

PAEC-monitor の動特性についてステップ状の正または負の入力があった時の monitor の応答特性と応答特性を改善するための手法についてまた monitor の α 線の種類ごとの (ROI 別の) 出力を利用しての平衡比の算出手法などについて述べると共にその具体的な測定法やその結果などについて検討を行った。

現在市販されている PAEC-monitor はすべてラドン娘核種濃度に関する PAEC を 1 時間の間隔で表示している。それは monitor の構成が簡単になりかつ高感度になるので低流量で済むためであるがその改善法に関する認識もないことも理由の一つではないかと考えられる。1 時間間隔の測定の場合は表示しなければならない入力変化値の 80% が表示されるまでに要する時間は 2 時間である。(Fig. 4, Fig.5) また PAEC の構成要素の一つである RaA の計数ともう一つの RaC' の計数の間の時間的な差が 1~2 時間 (平均的に 1.5 時間) あり、両者そのままを基礎的なデータとして加算、除算などの計算をすることに無理があるのでこれを修正する必要があるが何故かそれは行わず却って無駄な推算を行っている例が見られる。

ラドンの PAEC の場合には 1~2 時間の遅れがあることさえ認識していれば良く、娘核種の存在比が極端に不平衡になっていない限り PAEC の時間的な変化を現実の値に変換する際に注意さえすれば済むといえるかも知れないが、不平衡の場合は RaA と RaC' の計数を同一の租上で扱うこと自身が問題を孕んでいるものと考えられる。またトロンの PAEC の場合には一観測時間を非常に長くとらなければラドンの場合と同一の手法を採用することができず、それが実用的なトロンの PAEC-monitor を製作し得ない理由の一つになっているものと思われる。このような状況を勘案し以前より早大で提案しているデータの処理法を加えたがこの方式はもともと一観測時間を短くして応答速度をあげる目的で考えられたため、観測時間が 1 時間の場合には画期的な効果は期待できないことは明らかなので、今回測定したデータからではこれ以上の比較はできずその方式を適用する際に必要な定数などを提示するためにとどめた。ただトロンの PAEC の測定にはこの方法以外には考えられずその具体的な適用と実地例とその解析が望まれる。ラドン娘核種の個別濃度を求める理由には娘核種の PAEC の算定のみならず娘核種が呼吸器官に沈着した際に問題となるであろう細胞による放射線量の推定などが含まれている。従って個別濃度ではなくとも娘核種を半減期や放出エネルギーに基づいて 2 分割しその両者の比を利用して良く、このためこの報告書に平衡比の概念をとりれた。ここでいう平衡比は RaB と RaC の粒子濃度の和と RaA の粒子濃度の比を平衡状態で 1 になるようアレンジした値である。この数値は、RaB と RaC の半減期はそれ程大きく違っては居らず従って壊変定数も類似の値となり RaB と RaC の放射能濃度と RaA の放射能濃度の比を同じようにアレンジした場合の平衡比と非常に近い数値となる。被曝評価上問題となるのは放出エネルギーが同じならば粒子濃度であるため本報での平衡比の方が実状を良く表わしていると云えよう。ただ従来類似の方法では同一観測時間帯のデータを基に計算している

が、これは前述のように誤りで、本報でも述べたように RaC'の計数を 1 時間過去に遡らせる必要があり、実際に一測定回前の RaA と ThC'の計数を使って平衡比を計算すると良い結果が得られることを示すことができた。この平衡比は状態の変化を良く表現しているように思われ応用面は広く動的特性の概念の一つとして利用されるべきものと考えられる。ただこの場合一測定回過去のデータであるがそもそも従来の測定器が認識した RaA と RaC'の計数には少なくとも 1 時間の差があり若し RaA と RaC'との計数を或る時刻に表示するのであれば計数を読み取った 1 時間前の時刻として PAEC や平衡比を 1 時間前に読み取った RaA の計数と現在の時刻に読み取った RaC'の計数から計算して表示しなければならない。この点現在の PAEC-monitor は誤りを犯していると云えよう。ただ RaA が RaA の α 線を放出する相対的な数は全娘核種が RaC'の α 線を放出する数に比して無視し得るほど少ないので大して大きな誤差の原因にはならないようである。

動的特性を求めるためには娘核種濃度が高くかつ安定した系と濃度が極めて低い系の間で供試測定器を移動させれば良い。さらに前者の系の濃度の安定性を monitor で監視する必要がある。この方法による実験は一応成功したが高濃度側から低濃度側に移した時に RaA の計数が完全に減少しない例があり恐らく RaC'の計数の一部が RaA の領域で計数されているものと思われる。これはこの種の実験に入る前に monitor を高レベルの娘核種濃度の chamber より濃度 0 の領域へ移すか又は計数は停止させずフィルターの捕集のみを停止させればこの混合比を実測することが可能であった。今回の実験では大略の推定は可能であったが正確な数値は得られなかった。また ThC'の計数より RaA の領域で計数されている ThC の計数についても同様の方式で求められるものの、実測値としては求めることができず必要に応じて推定値を使用した。これ等は今後修正されるべき問題である。

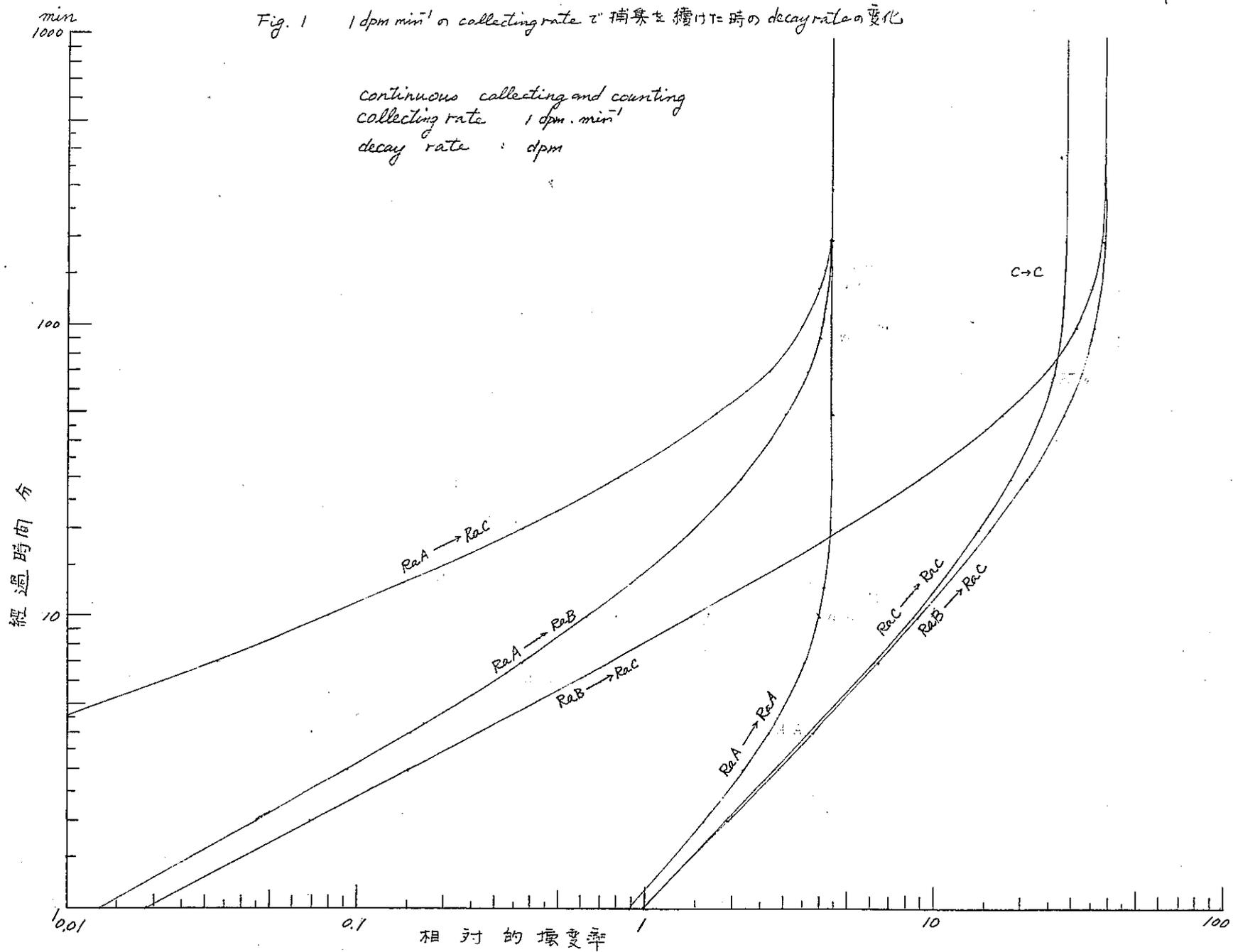
除塵器については予想以上に有効であったが除塵された試料空気がテント内に環流はされるものの完全に混合せず安定した状態を作り難かった。除塵器の有効な使用法は娘核種の個別の濃度を異なった状態に移行させそれを安定に保つことにある。しかしながら移行させることは比較的短い時間で可能ではあるがその状態を保つことは娘核種の半減期が実験の周期に比して比較的長いので困難であり結局環流させず除塵後の試料空気を適当な容器に流入させそれを測定に利用した方が有効なように思われた。これについてはさらなる検討が必要である。

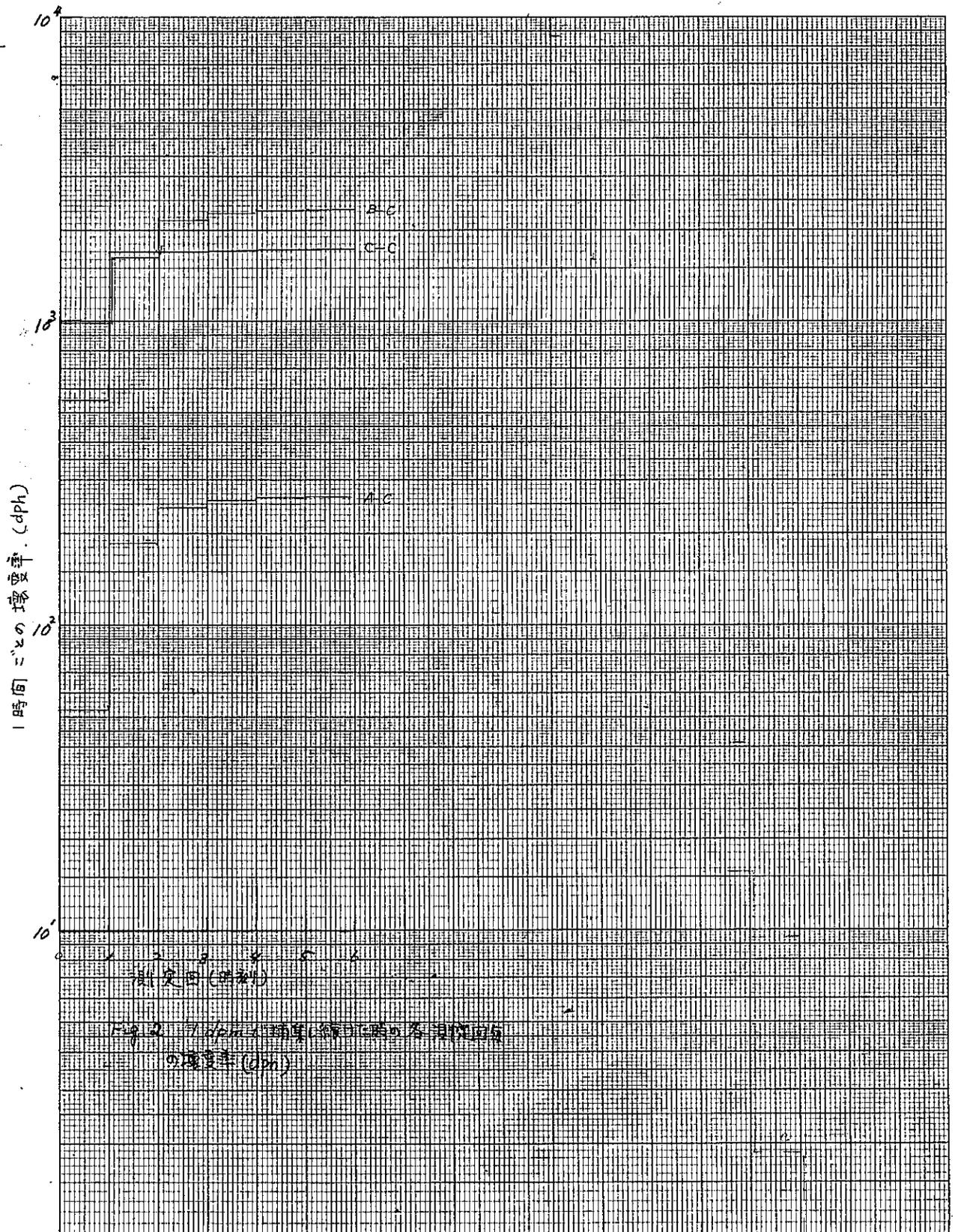
動特性に分類し得るか否か問題ではあるが或る測定域で測定中ラドン濃度のみがステップ状に変化した場合についての PAEC-monitor としての応答特性も検討の対象にする予定であった。この計算方法は本報中に述べられているが娘核種濃度の存在比に影響するパラメーターを入れていないため計算された時間的变化は現実の場合と多少変わることおよび実験そのものが難しいため実計算には至らなかった。しかしながら実際面ではこのような場面も起こり得るし、monitor のデータの解析上検討すべき対象ではあるので今後の課題とすべきものと考えられる。

謝辞

本実験を進めるにあたって動燃人形峠の安全管理課の絶大な協力を受けたことを感謝する。

Fig. 1 1 dpm min^{-1} の collecting rate で 捕集を 續けた 時の decay rate の 変化





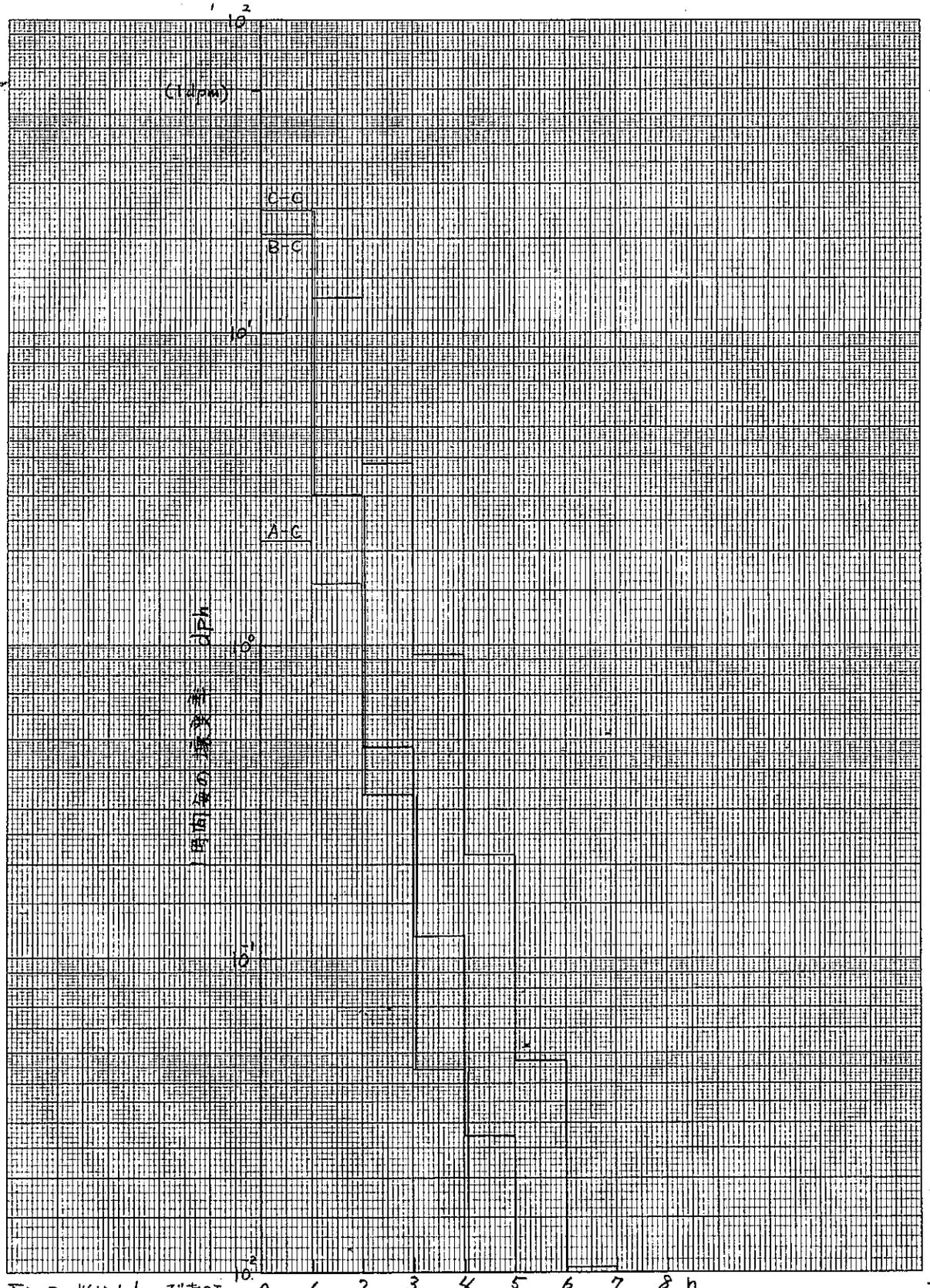


Fig.3 始め 1 dpm だった
 娘核種の減衰時の各測定
 回毎の衰変率 (dph)

Rac channel

立上り

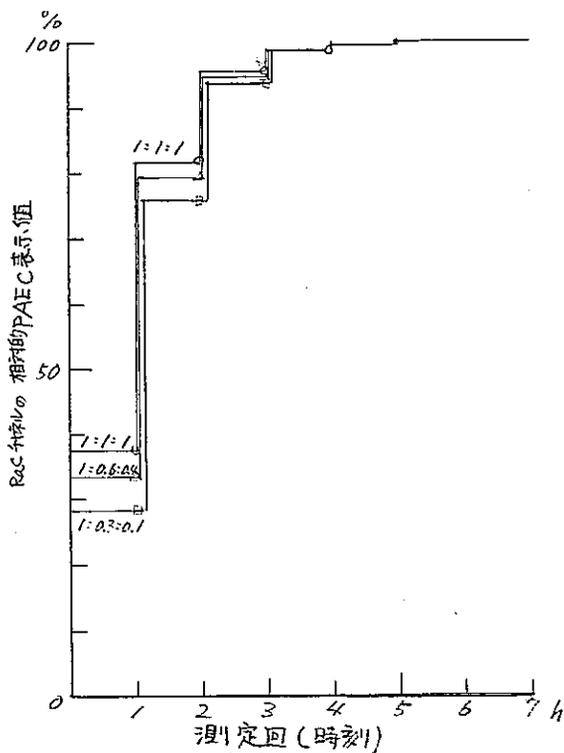


Fig.4 種々の根核種濃度比に対する Racチャンネルの相対的PAECの時間的変化(立上り曲線)

立下り

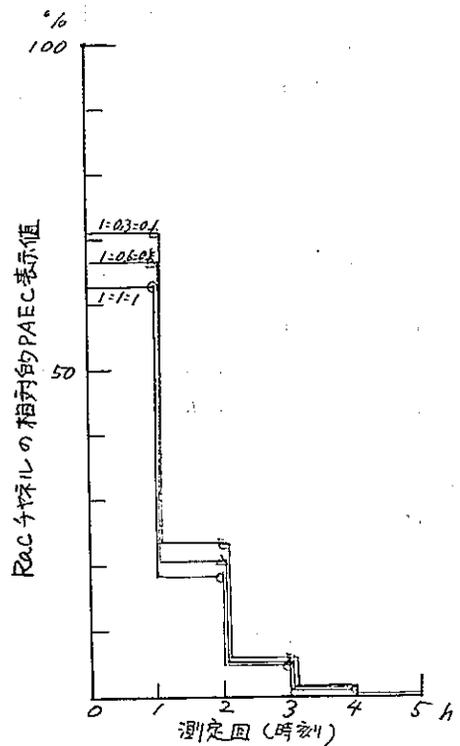


Fig.5 種々の根核種濃度比に対応する平衡状態を初期値とする Racチャンネルの相対的PAEC表示値の時間的変化(立下り曲線)

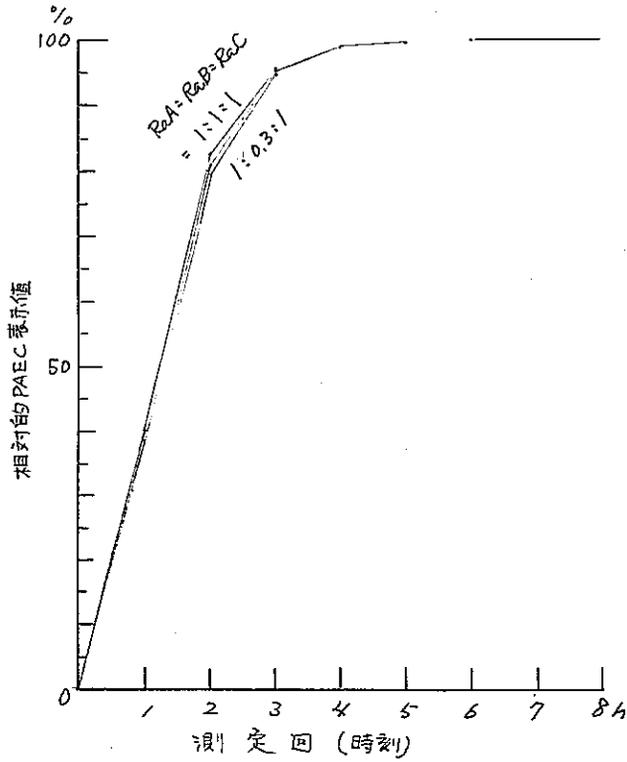


Fig.6 種々の親核種濃度比で捕集を続けT=時の各測定回における全PAEC表示の相対値の変化(立上り曲線) (元のPAEC相対値は100%)

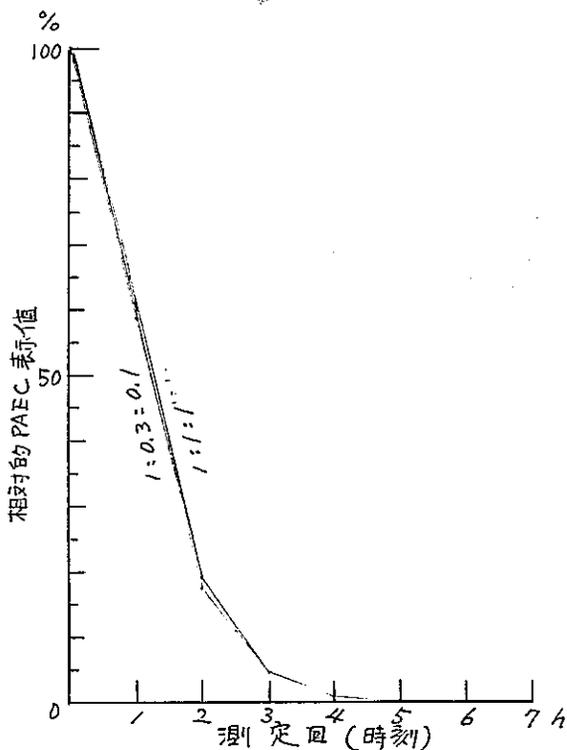
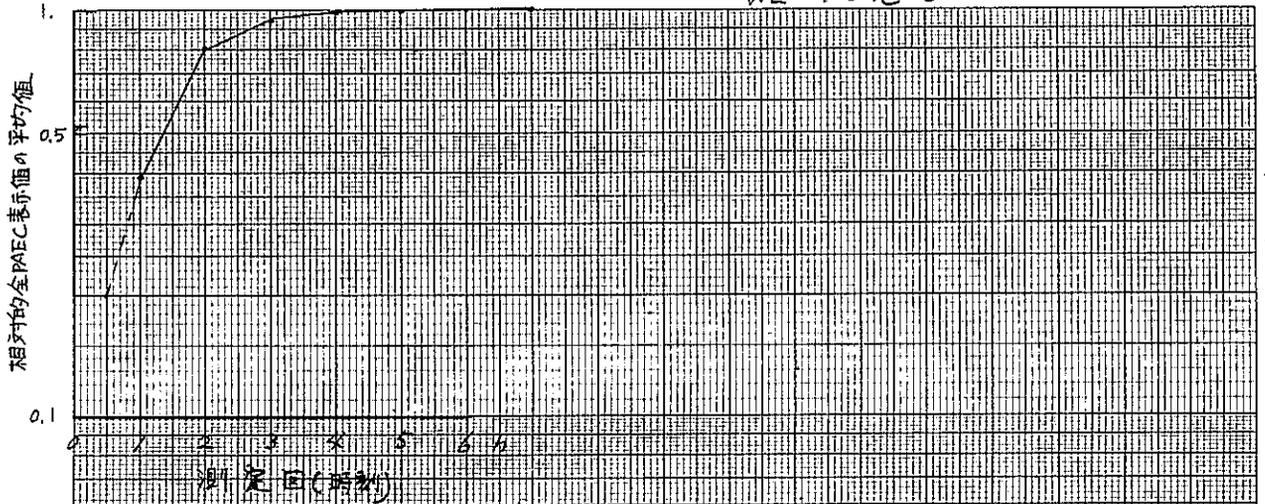


Fig.7 種々の親核種濃度比平衡状態を捕集し止め停止した後の各測定回における全PAEC表示の相対値の変化(立下り曲線) (元のPAEC相対値は100%)

WL 平均値 60m



測定回(時刻)

Fig. 8 娘核種の捕集しから一時間毎に 10 個 (1 時間) の計数値より PAEC を求める場合の相対的 PAEC 平均値の変化 (直上) 曲線) (直上 PAEC 3.110)

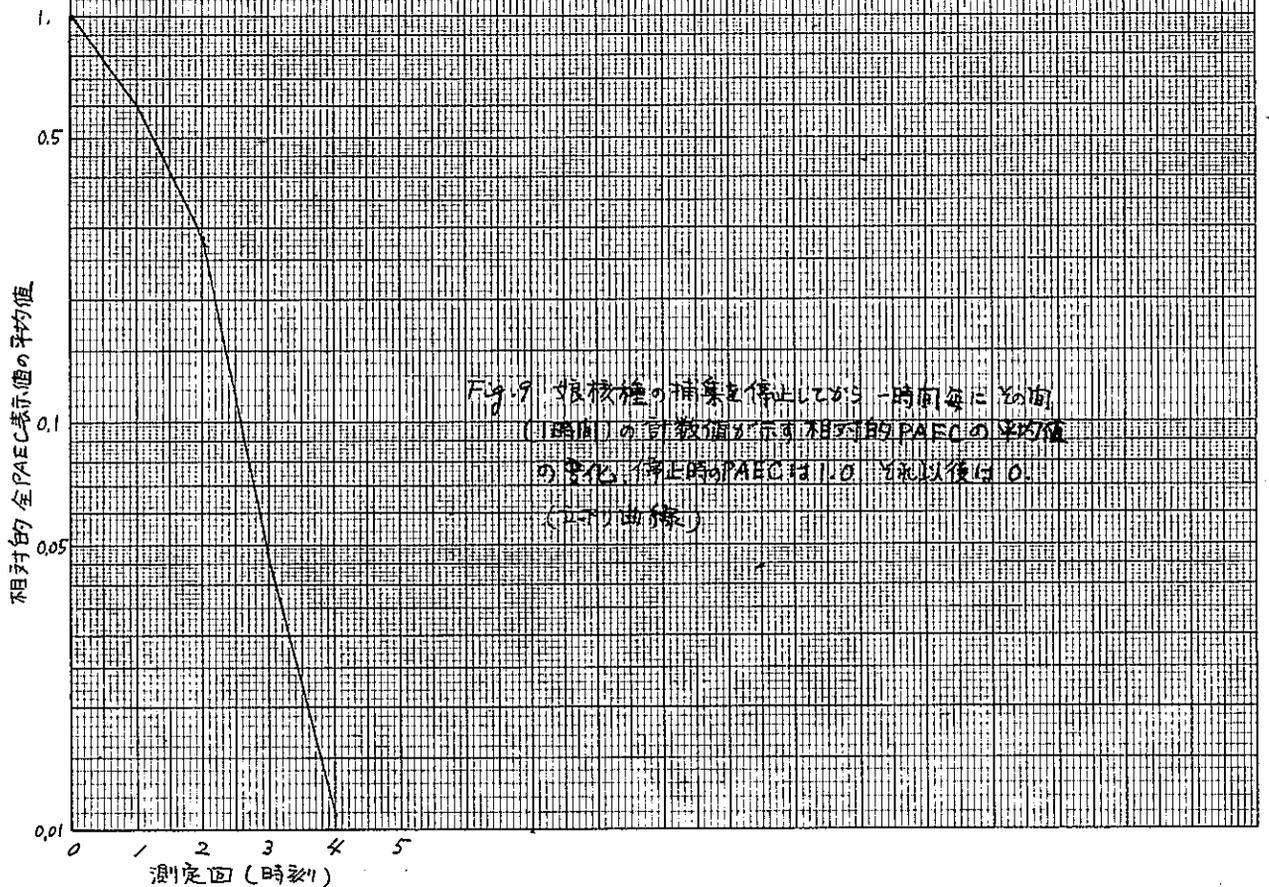


Fig. 9 娘核種の捕集を停止してから一時間毎に 10 個 (1 時間) の計数値が示す相対的 PAEC の平均値の変化 (停止時の PAEC は 1.0 以下以後は 0. (直上) 曲線)

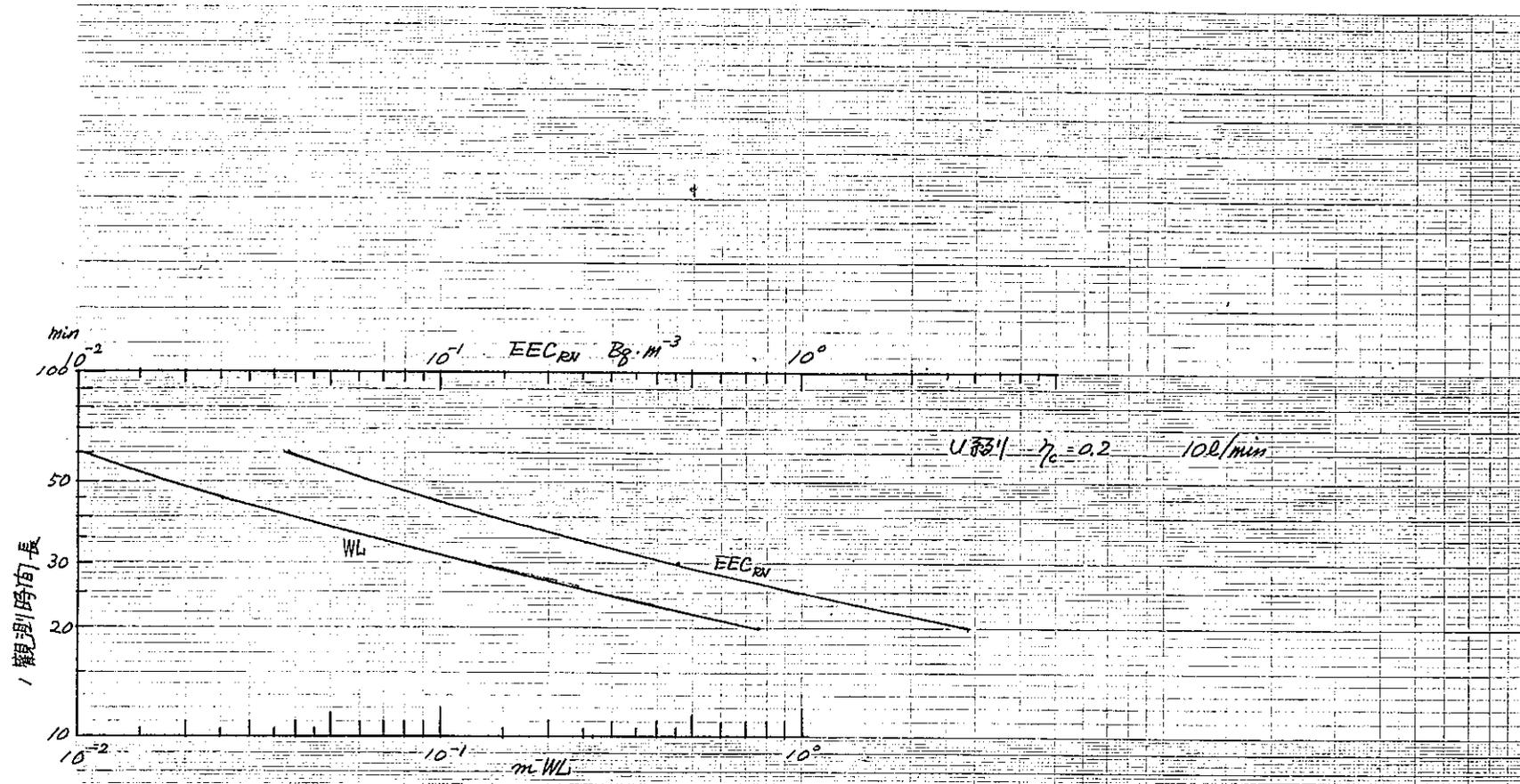


Fig. 10 観測時間の長さと測定限界の関係 (U系列)

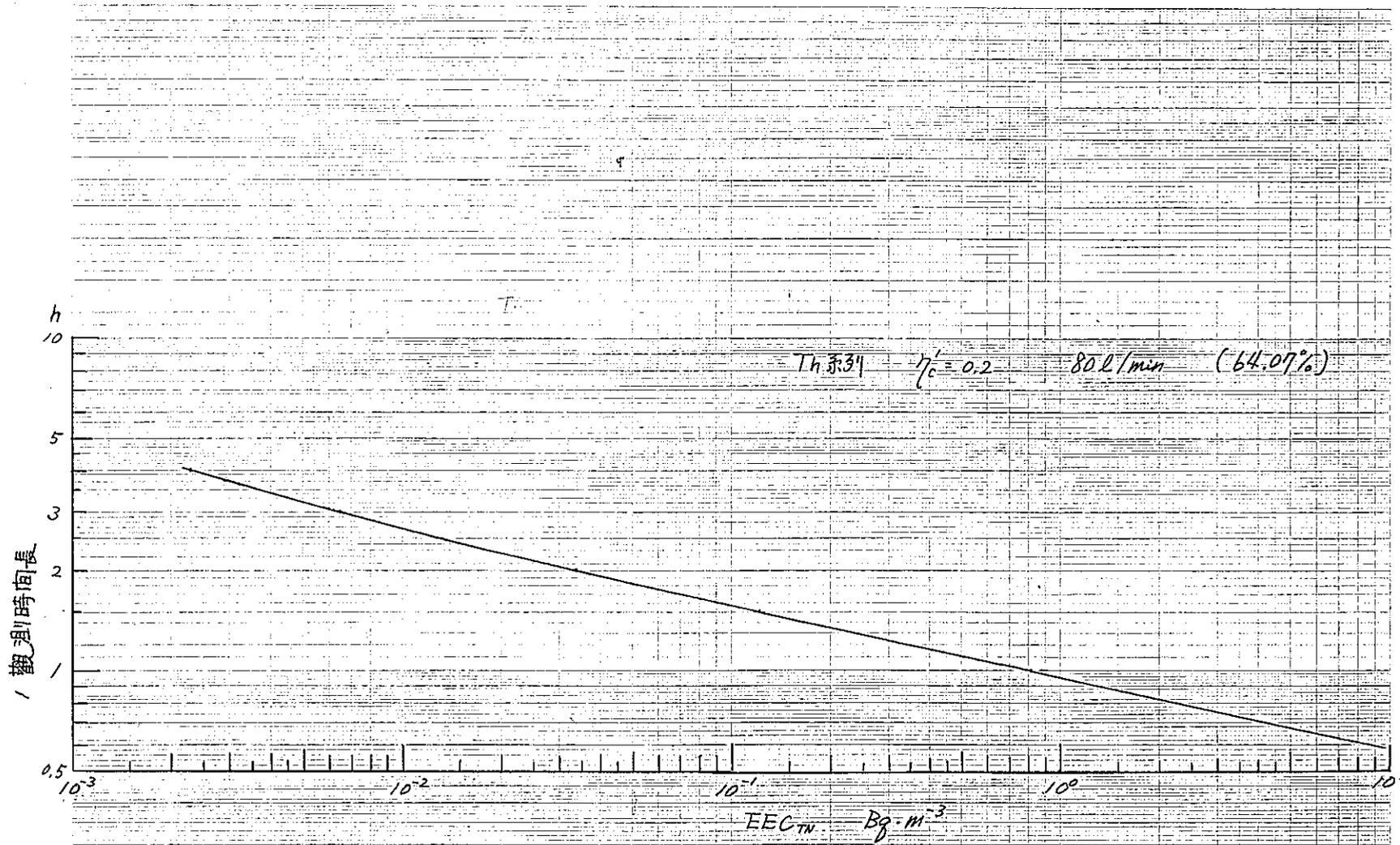


Fig. 11 観測時間の長さとの測定限界の関係 (トロン系列)

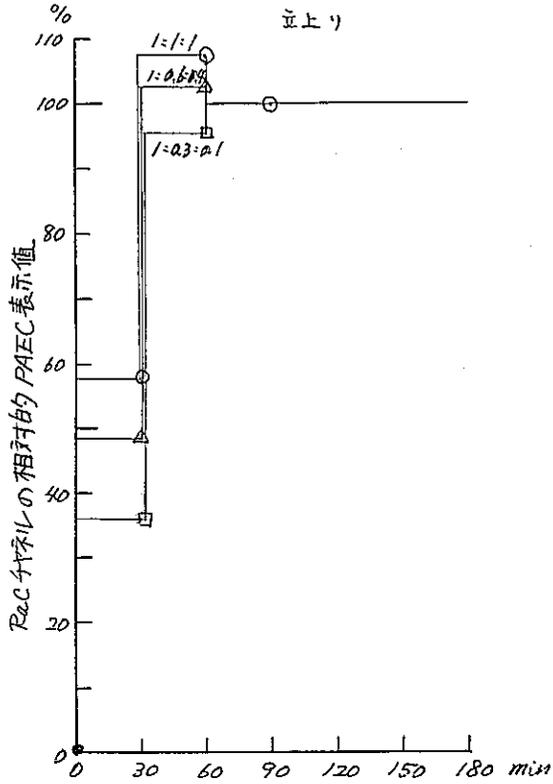


Fig. 12 早大方式の立上り特性 (Rac'分れの計)

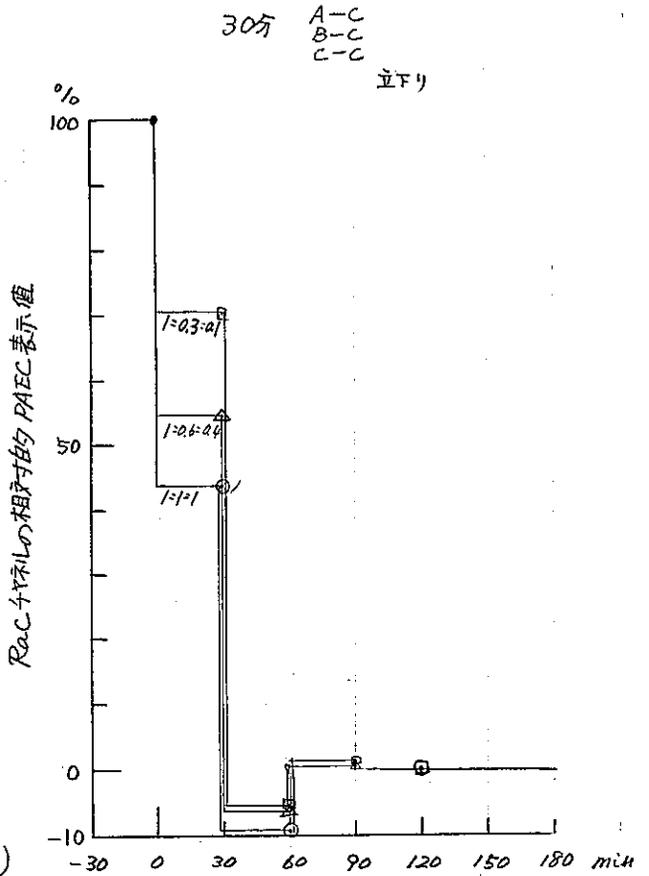


Fig. 13 早大方式の立下り特性 (Rac'分れの計)

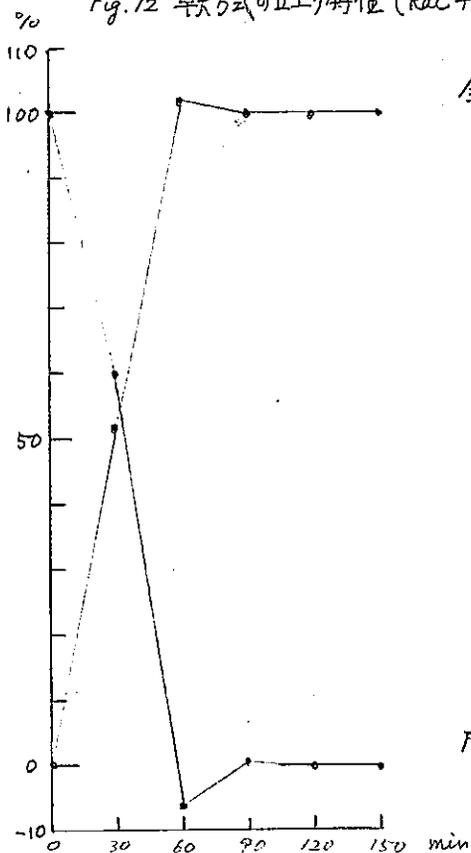


Fig. 14 早大方式の立上り立下り特性 (Rac', Rac'分れの計および母核種存在比の平均値)

30分間(観測時間)の時の
種々の娘核種存在比における立上り立下り特性

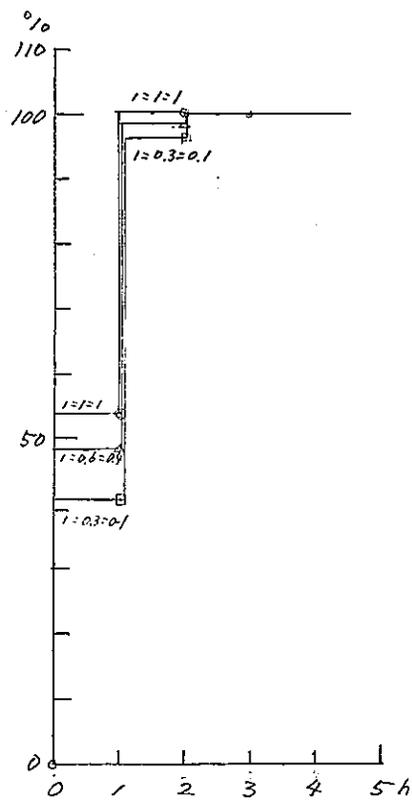


Fig. 15 早大式の立上り特性 (Rac' 4種)

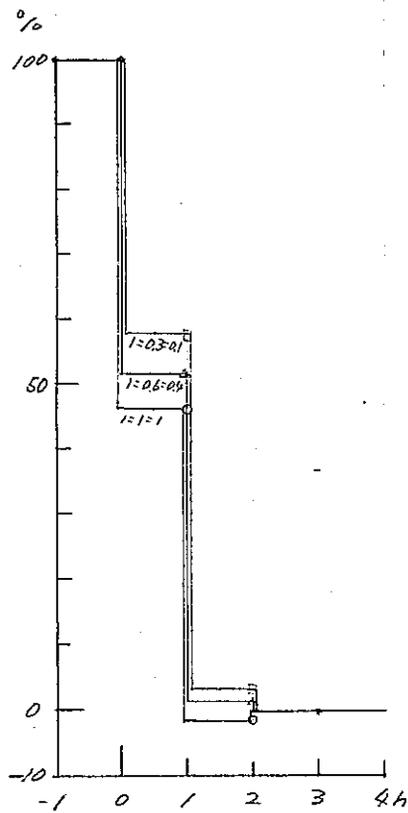


Fig. 16 早大式の立下り特性 (Rac' 4種)

観測時間を1時間とした時の種々の掘核種存在比に対する立上りと立下りの特性。

スペクトル図1

α 線スペクトル

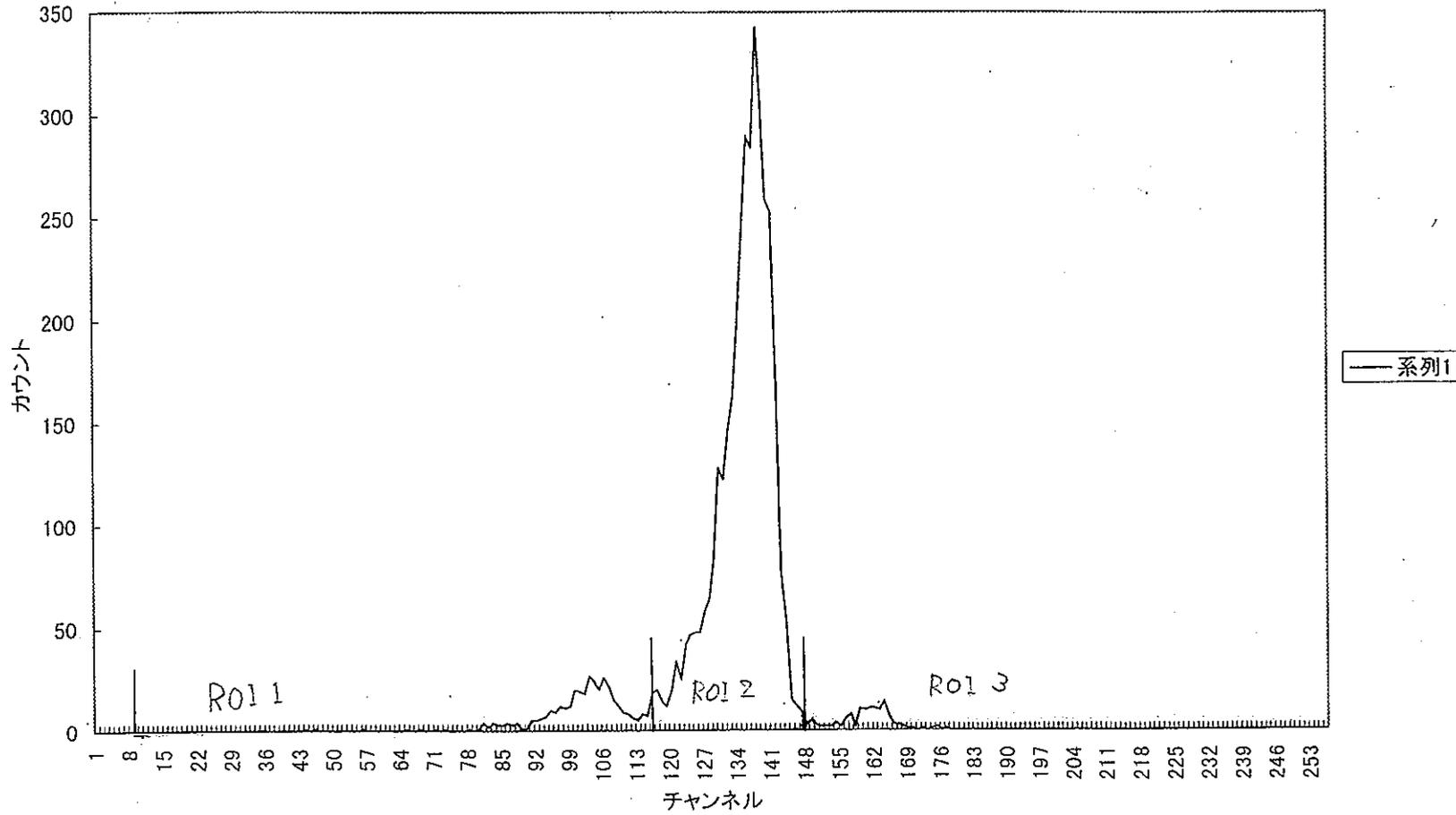
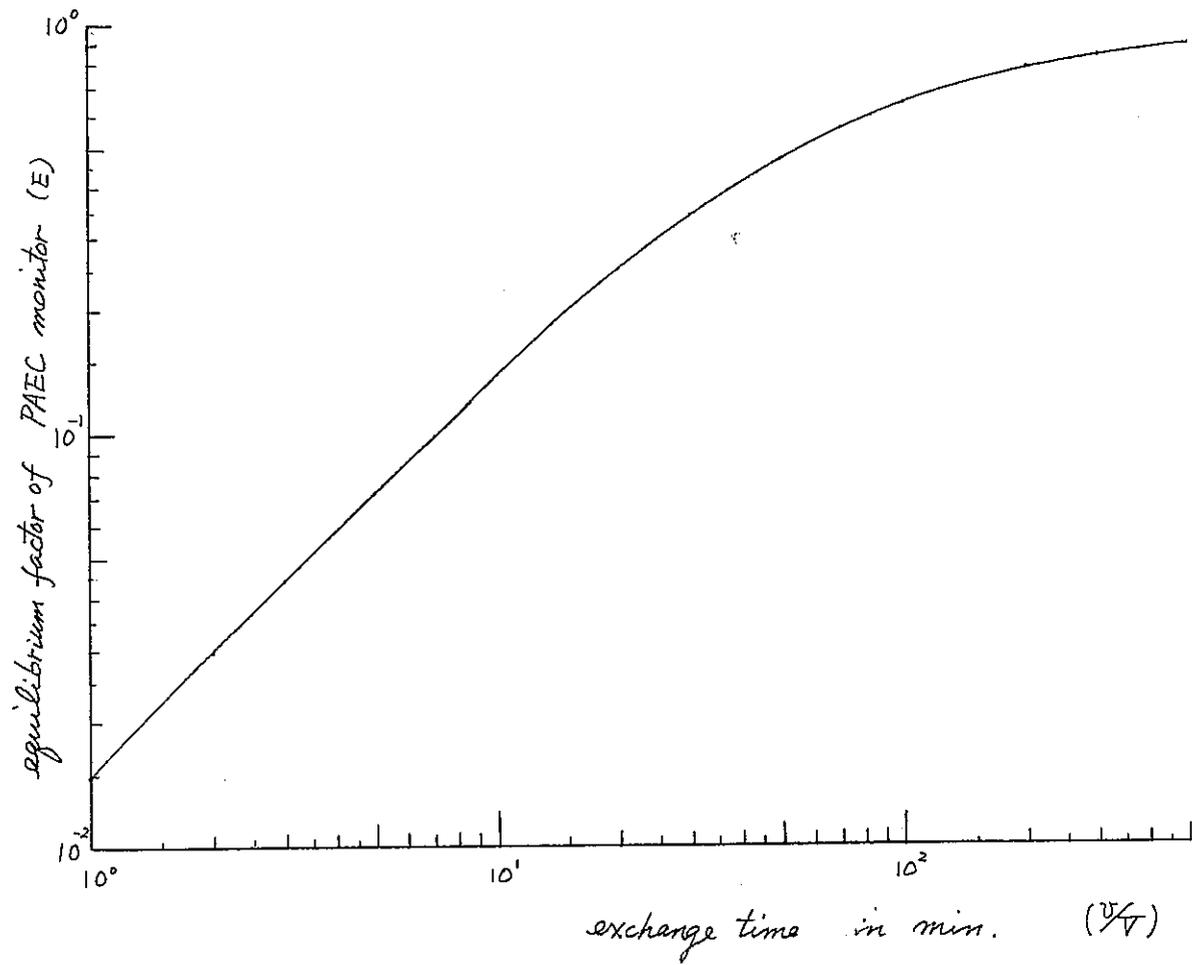


Fig. 17 PAEC-monitorで測定された α 線スペクトルの例 (Pylon)

33



$$E = \frac{1}{15.33} \left\{ \frac{C}{(A - 0.5608)} - 1 \right\}$$

Fig. 18-1 計算式(右記)で計算した平衡係数と空気が交換されていると仮定した時の交換時間の関係

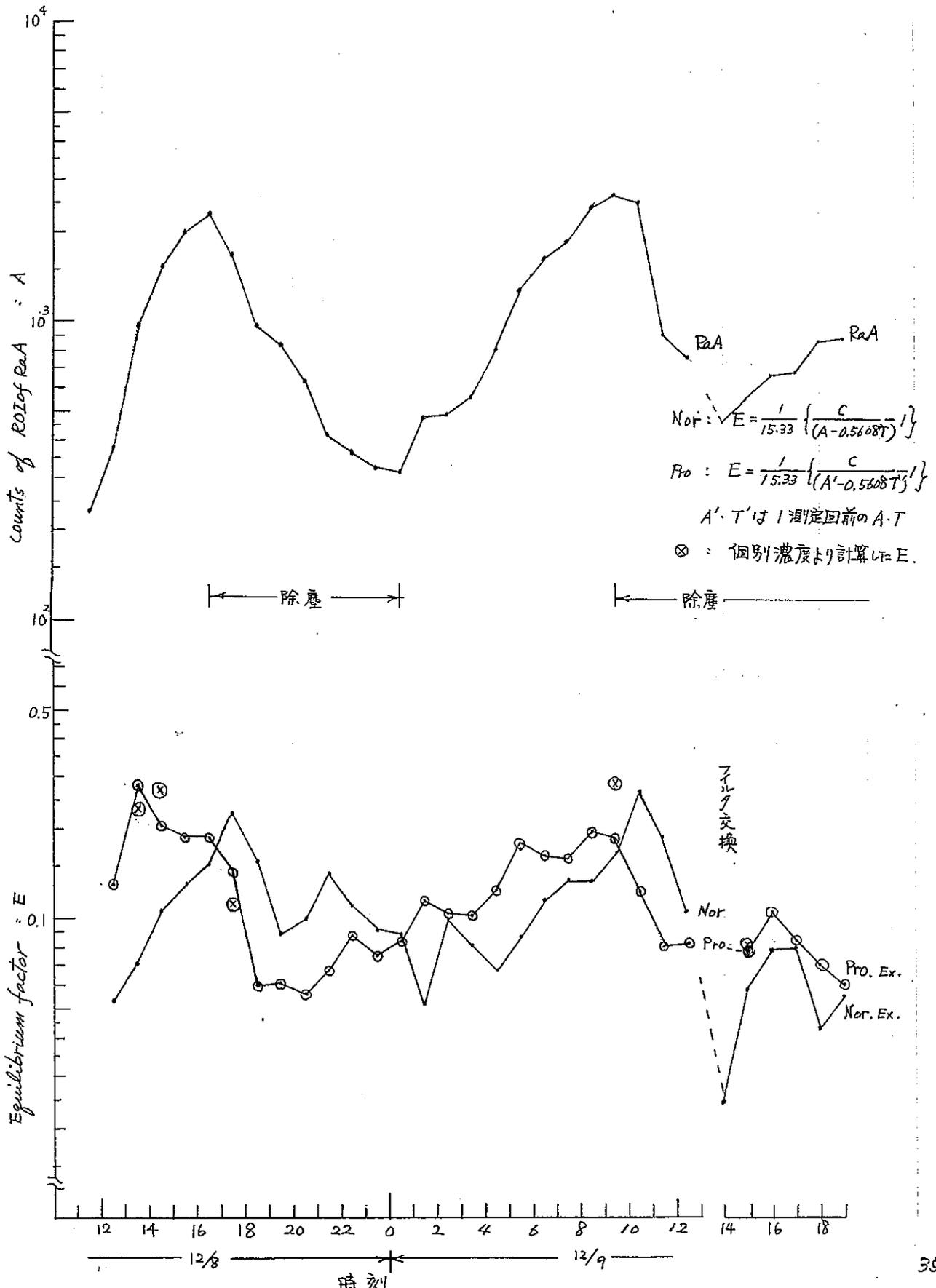


Fig. 18-2 平衡比の測定法と従来の式との比較

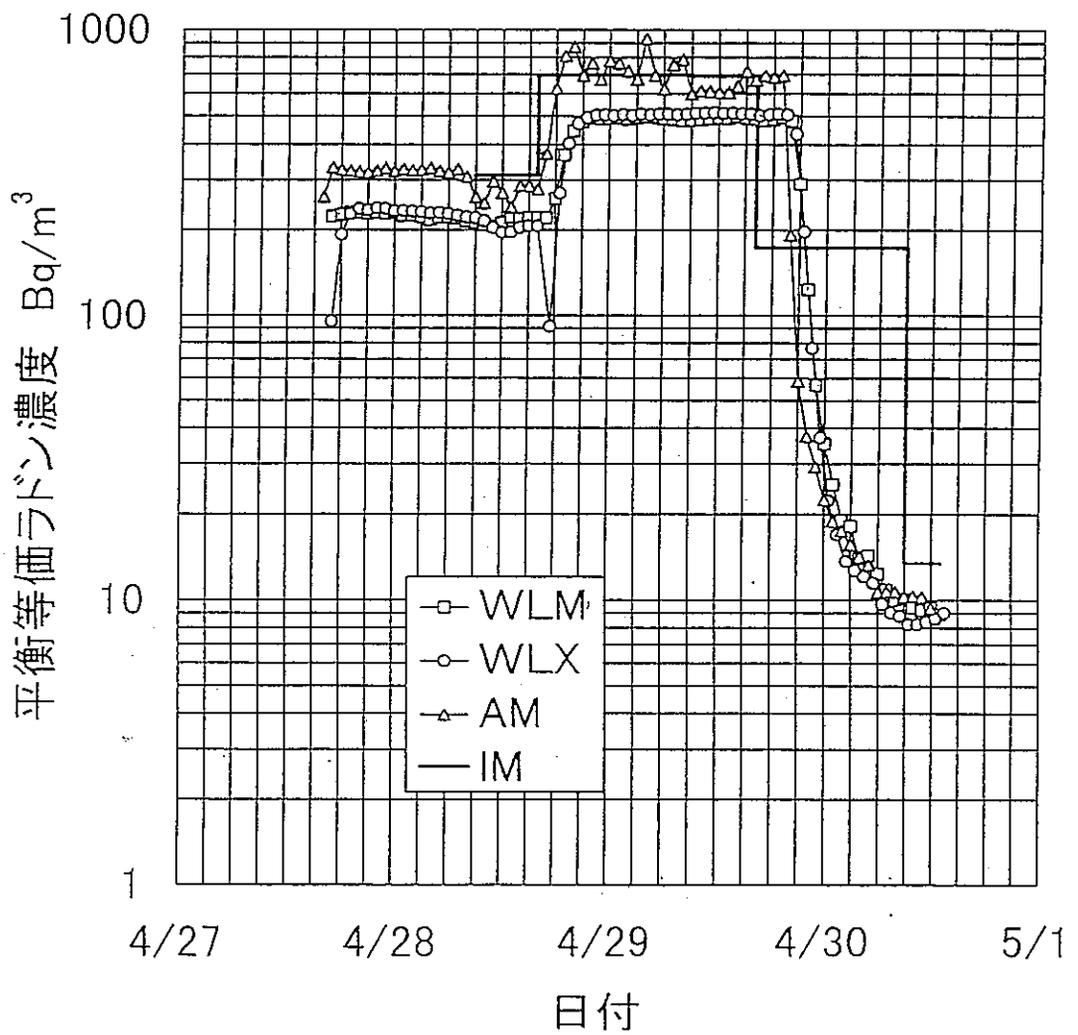


Fig. 19 後のPAEC-monitorの特性

- WLM : Tracerlab 社の WL-monitor
- WLX : Pylon 社の WL-monitor
- AM : 動力燃人形峠に南築した自動測定期器
- IM : 動力燃人形峠に製作した積分型モニター

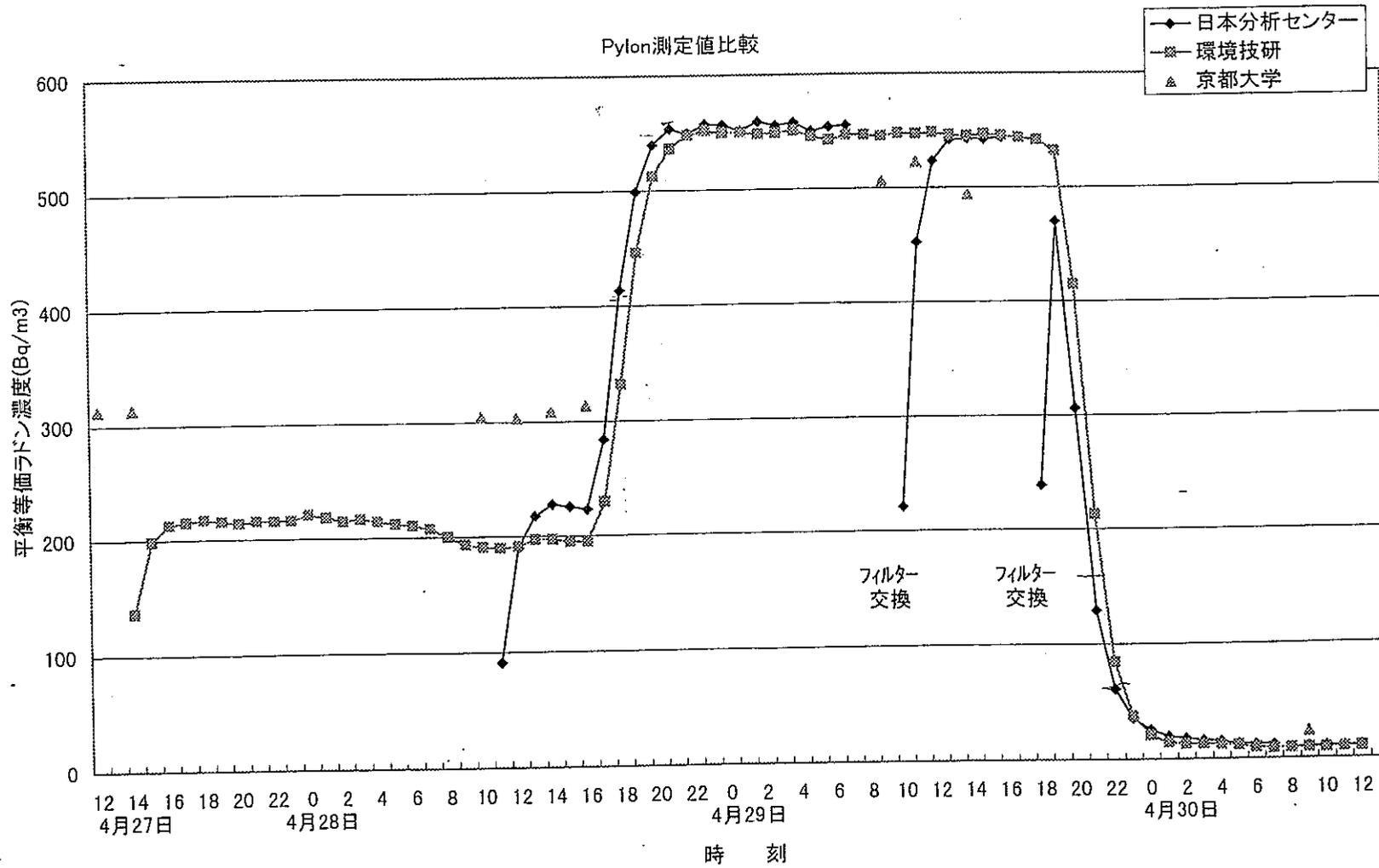
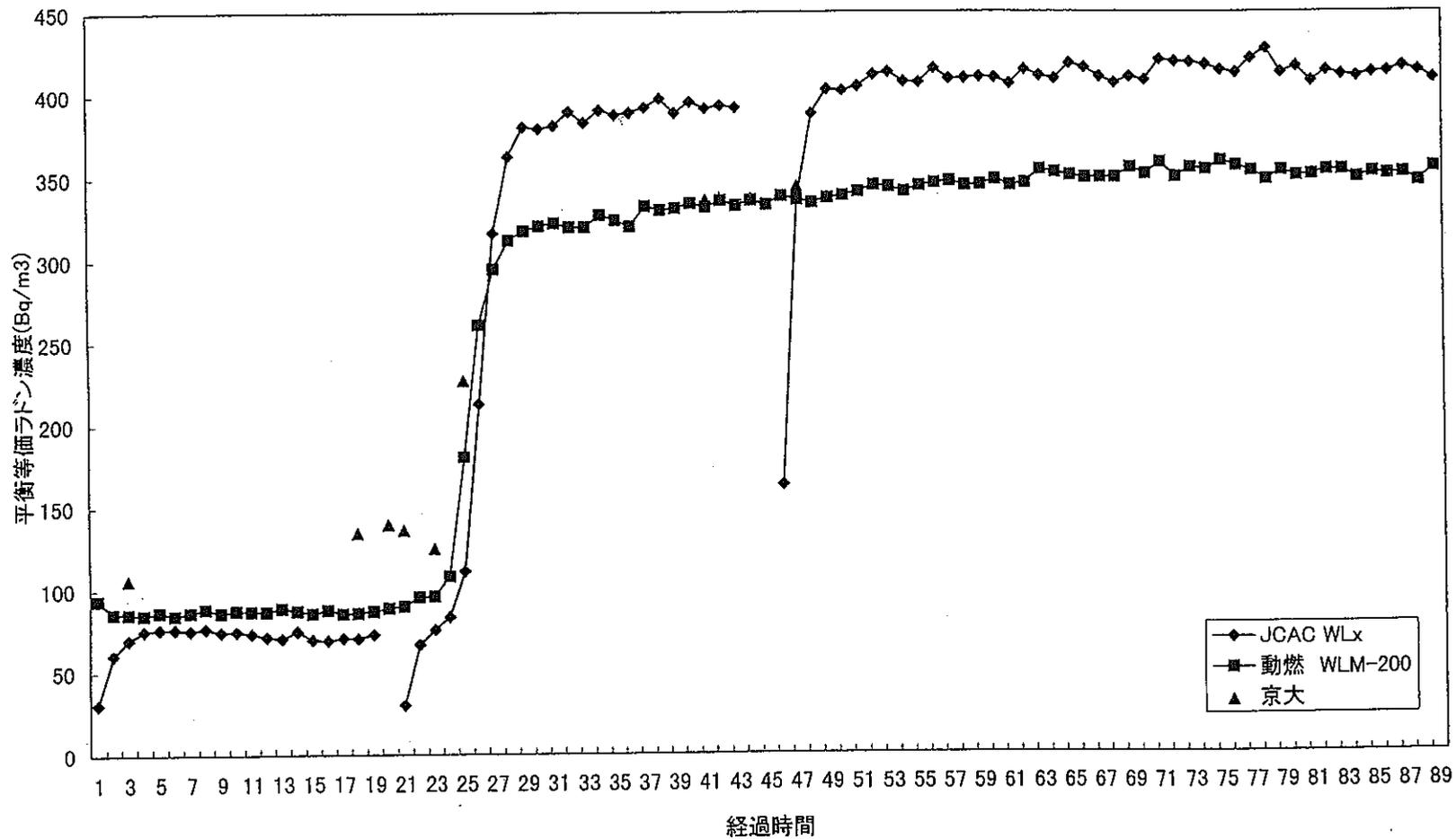


Fig. 20 京都大学原子炉実験所CA棟での比較実験
 (同一のPyloniza monitorの比較
 京大:個別の濃度測定器による測定値)



平衡等価ラドン濃度の変化

Fig. 21 京都大学原子炉実験所CA棟での比較測定

日本分析センターのPylon社製モニターと 動燃のTracerlab社製モニターの比較

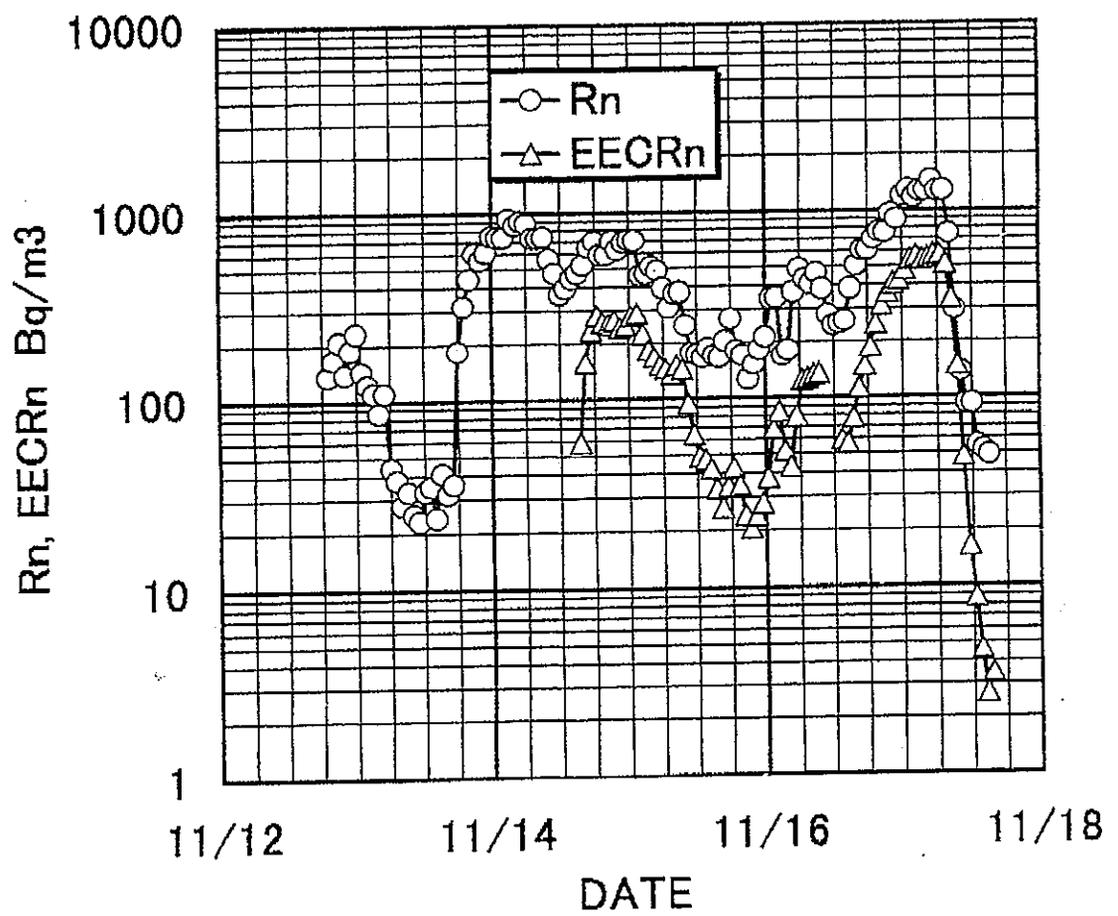


Fig. 22 . 動燃人形峠内仮設テント内のラドン濃度とPAECの時間的安定性

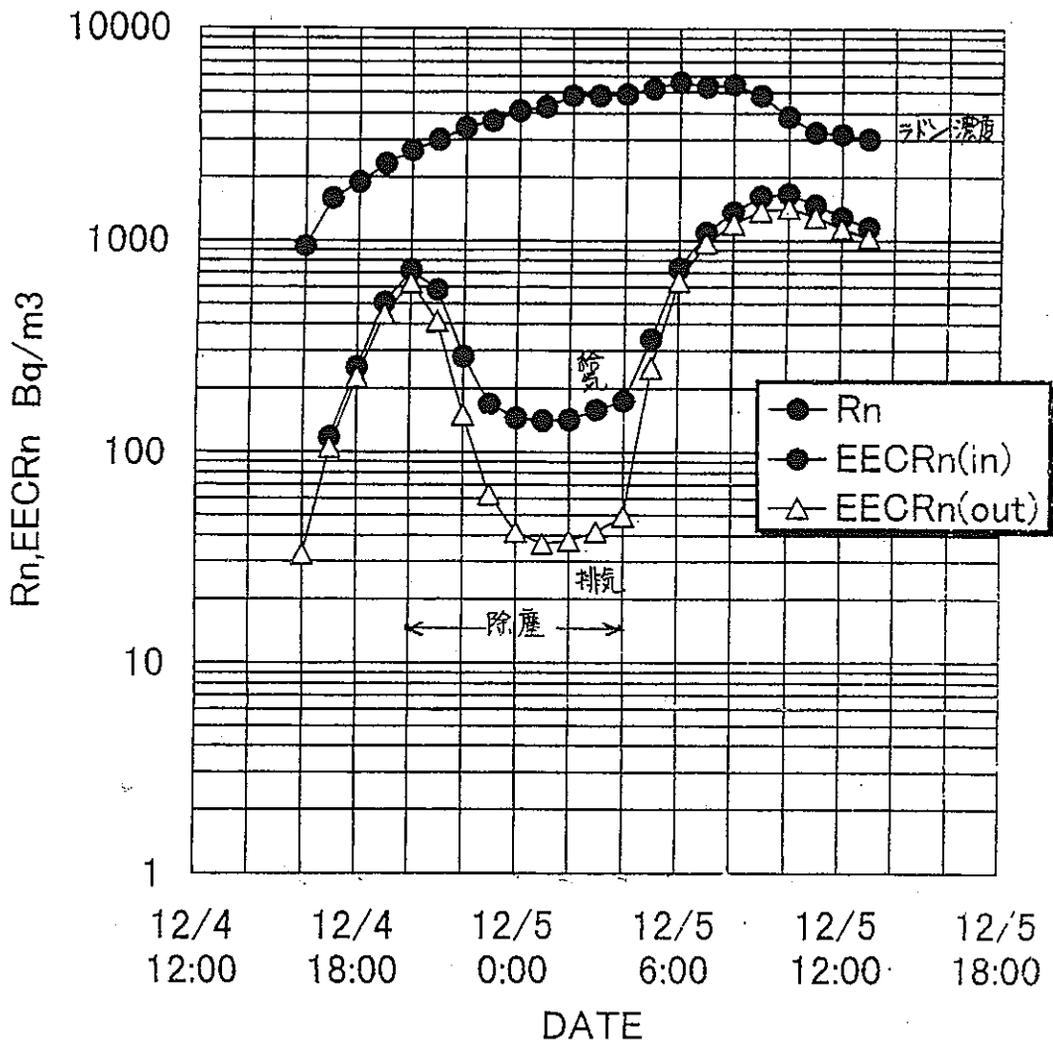


Fig. 23 入風時仮設工室内の除塵器の試験結果

● 給気側 △ 排気側

平均的な全銀核種 (EEC) の半減期 約35分 $\lambda = 0.0198 \text{ min}^{-1}$

$$\frac{dI}{dt} + \left(\frac{V}{\tau} + \lambda\right)I = \lambda C_0 \quad C_0 = \text{Rn濃度}$$

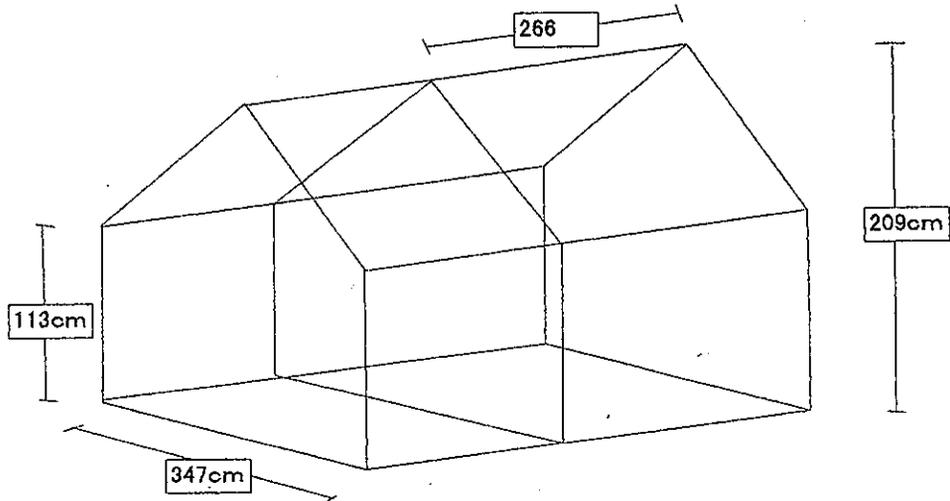
$$I = \frac{\lambda}{\left(\frac{V}{\tau} + \lambda\right)} C_0 (1 - e^{-\left(\frac{V}{\tau} + \lambda\right)t})$$

$$t \rightarrow \infty \quad I = \lambda / \left(\frac{V}{\tau} + \lambda\right) \approx 0.214$$

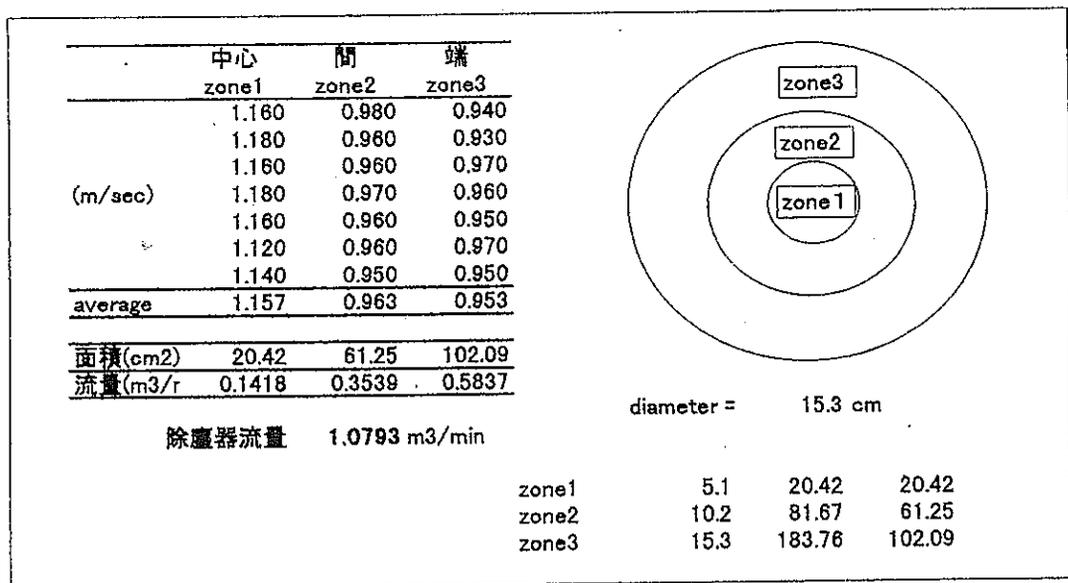
$$EEC_{Rn \text{ in}} = \frac{154.1}{718.8} \approx 0.214$$

$$(140.7 + 142.4 + 158.7 + 174.6) \div 4 \approx 154.1$$

容量



$$\text{容量} = (113 + 209) \times 347 / 2 \times 266 = 14.86 \text{ m}^3$$



$$I = I_0 e^{-0.0726z}$$

$$1.0793 / 14.86 \approx 7.263 \times 10^{-2} \rightarrow \text{時間数 } 13.71 \text{ 分}$$

Fig. 24 人形時仮設テントの概形と
除塵器の処理流量

Graph1

Radon

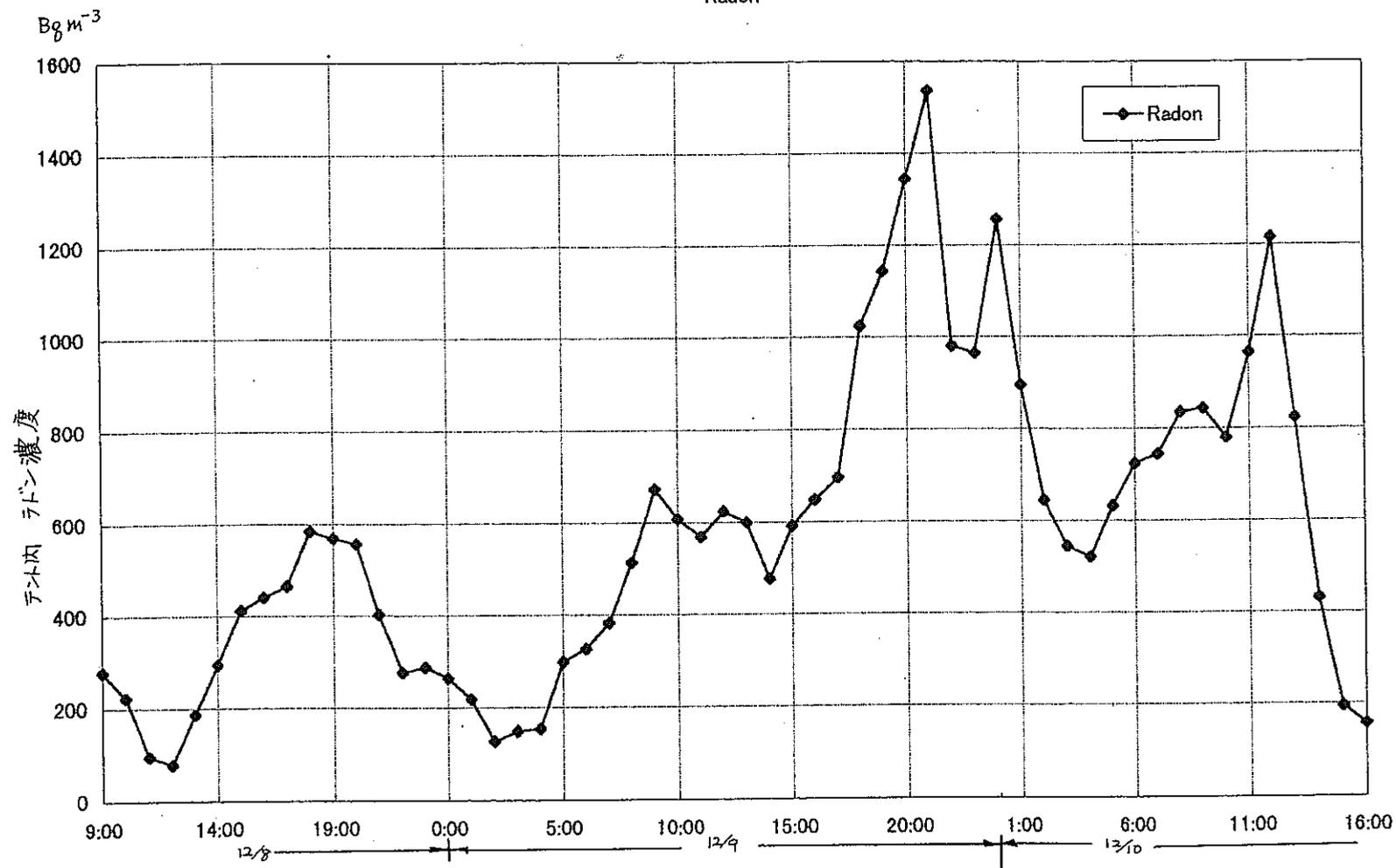


Fig. 25 仮設テント内のラドン濃度の変化

Graph3

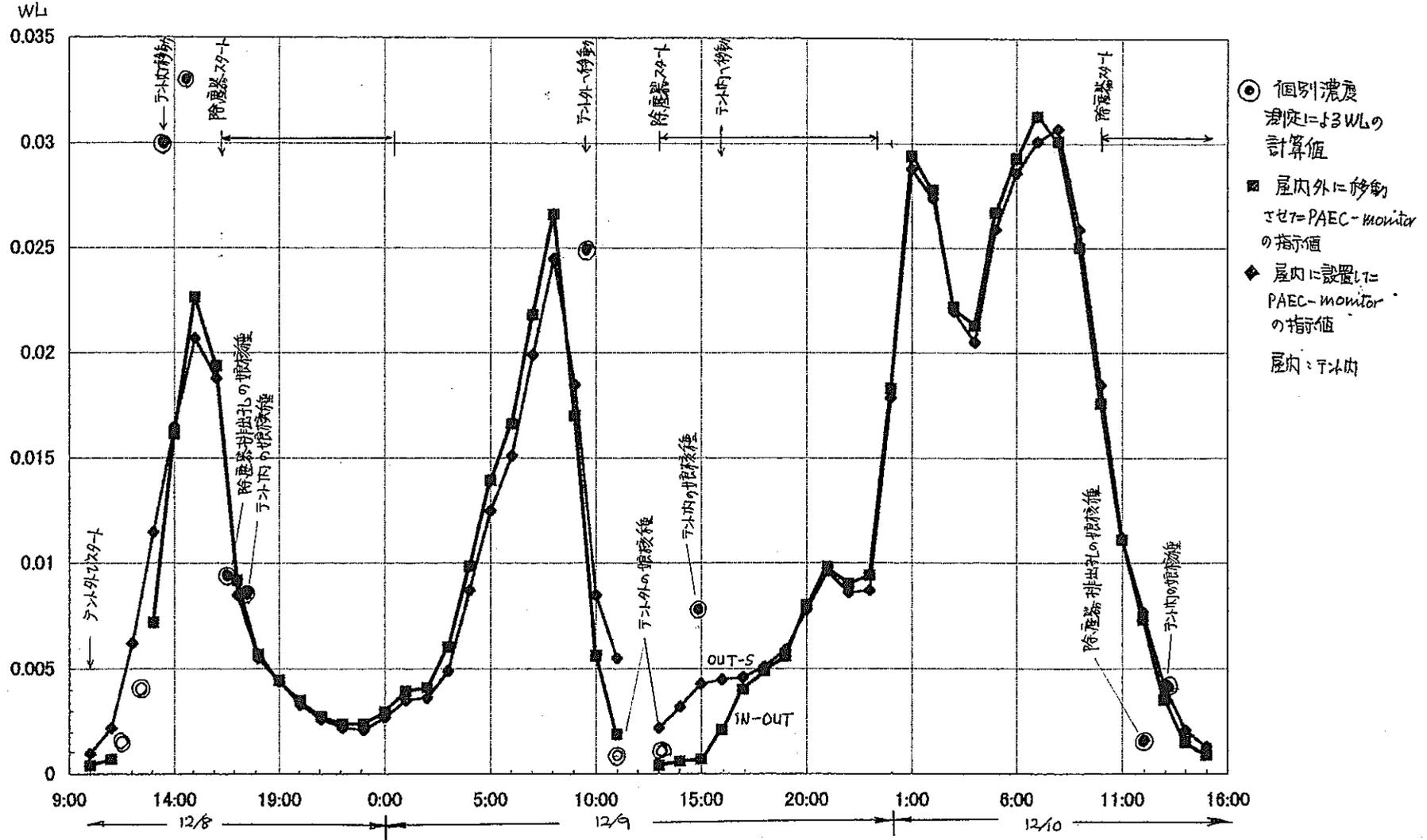


Fig.26 假设デント内のPAEC-monitorの指示値の変化 -1-

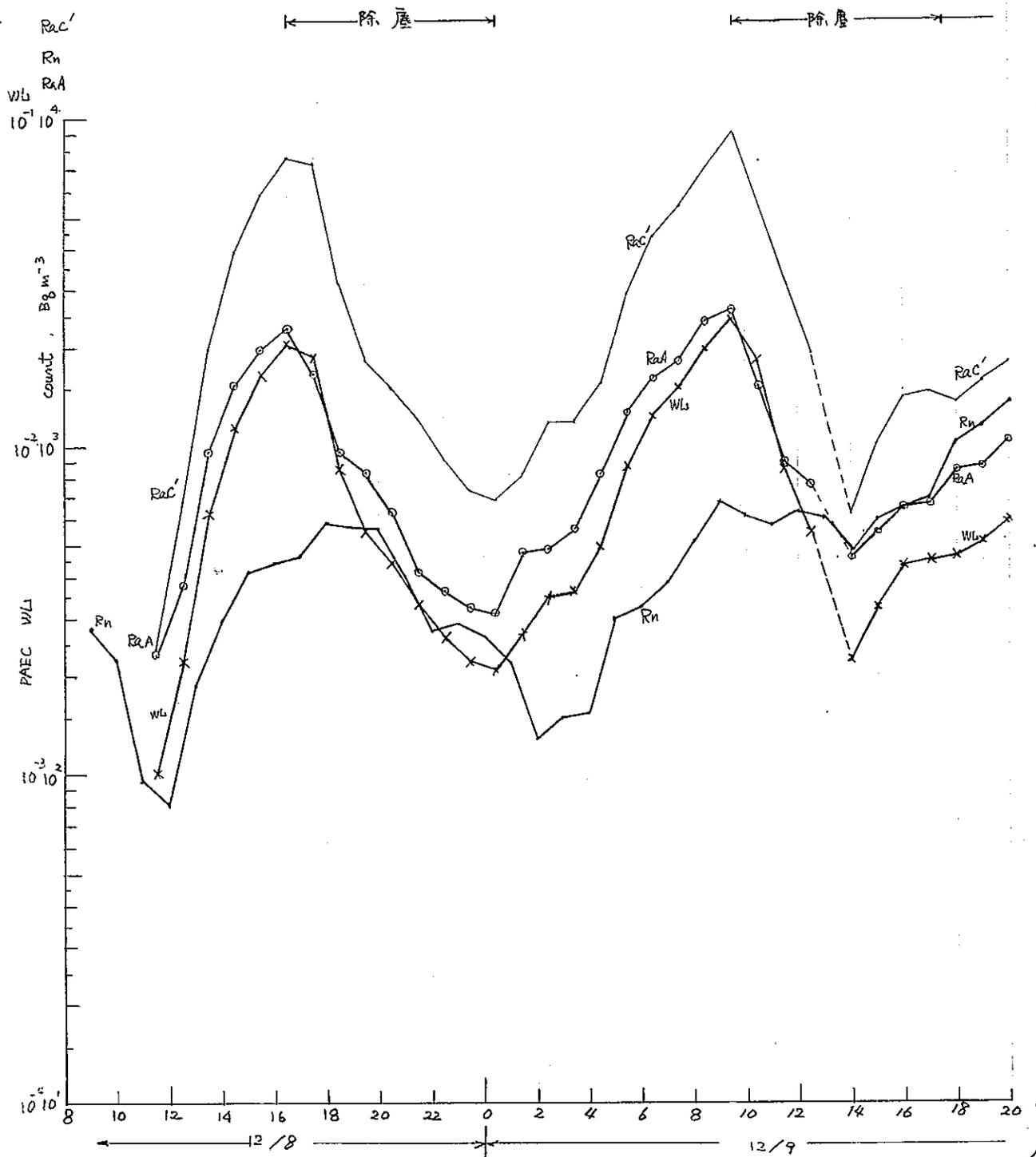


Fig 27-1 テレ内のラドン・RaA・RaC'濃度およびPAEC(WL)の時間的变化

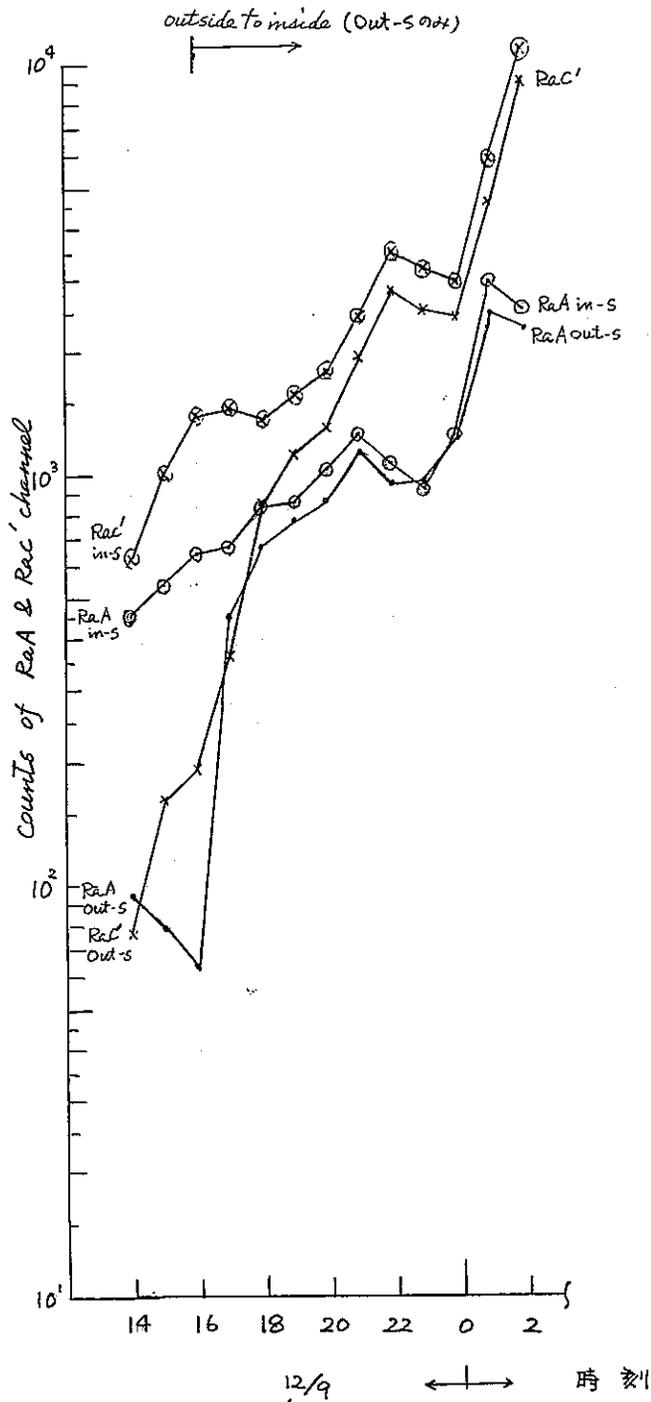


Fig. 28-1

PAEC-monitor を室内に入れた時

out-s 室内外に動いた monitor, in-s 室内に固定した monitor の指示値

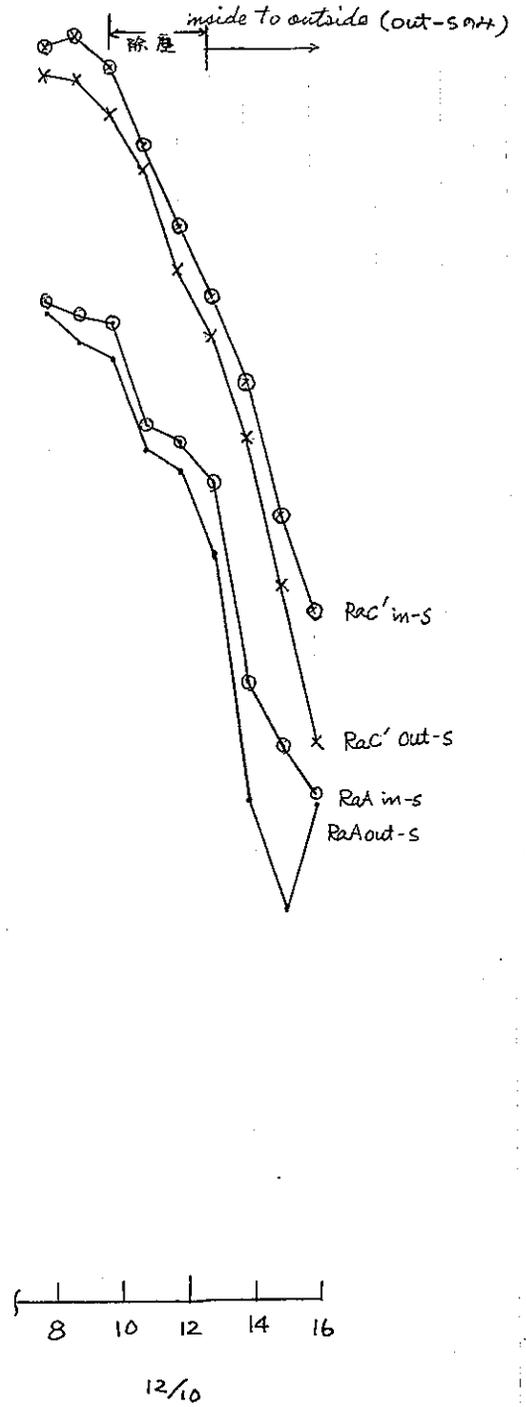


Fig. 28-2

室内に取り出した時の RaA, RaC' の ROI の計数変化

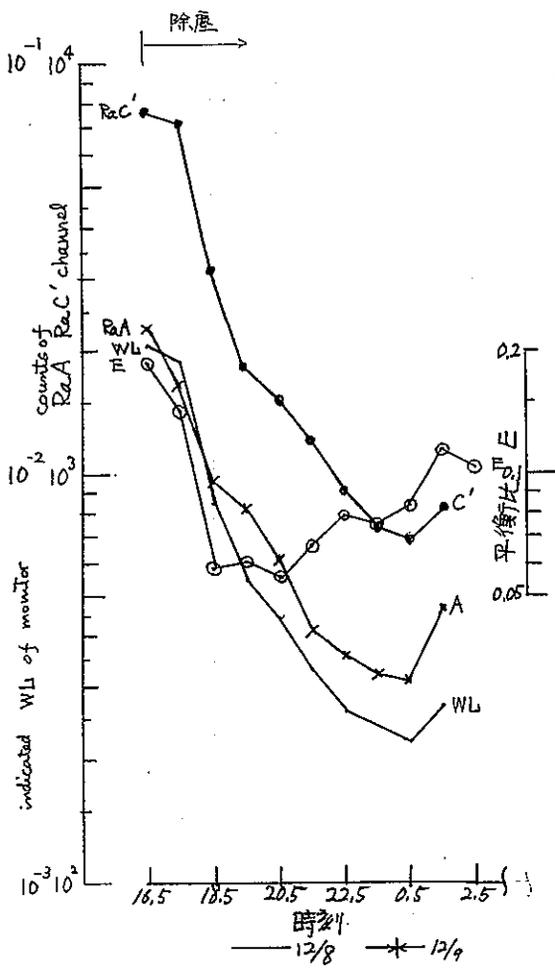


Fig. 29-1

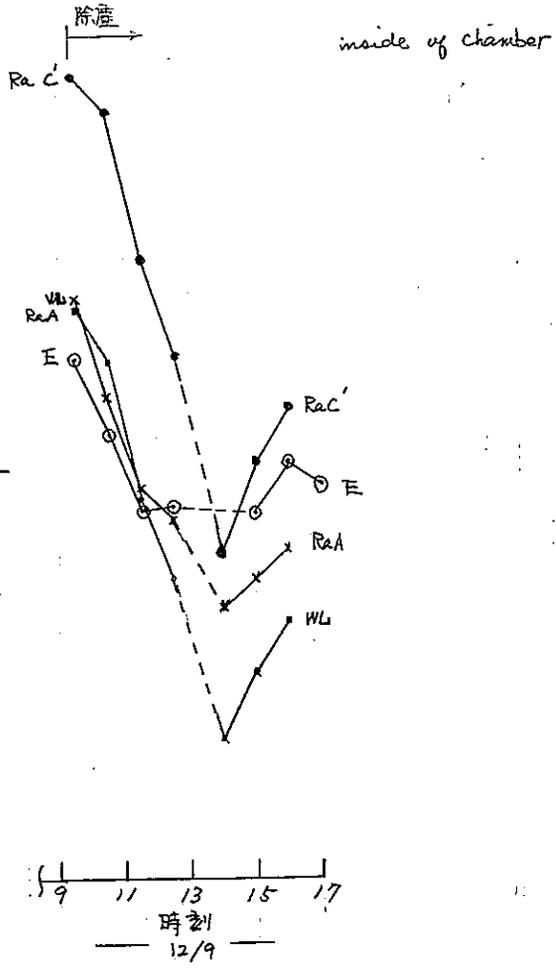
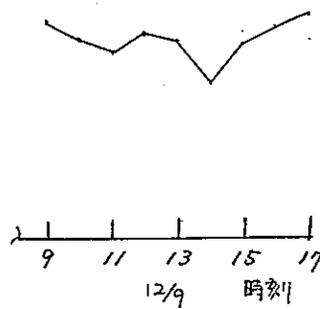
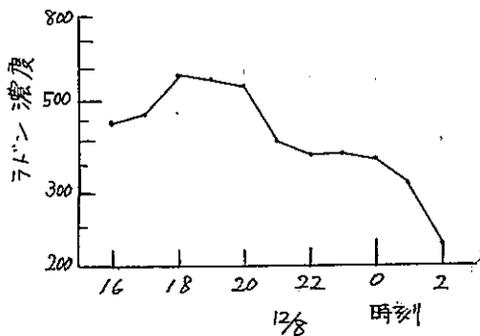
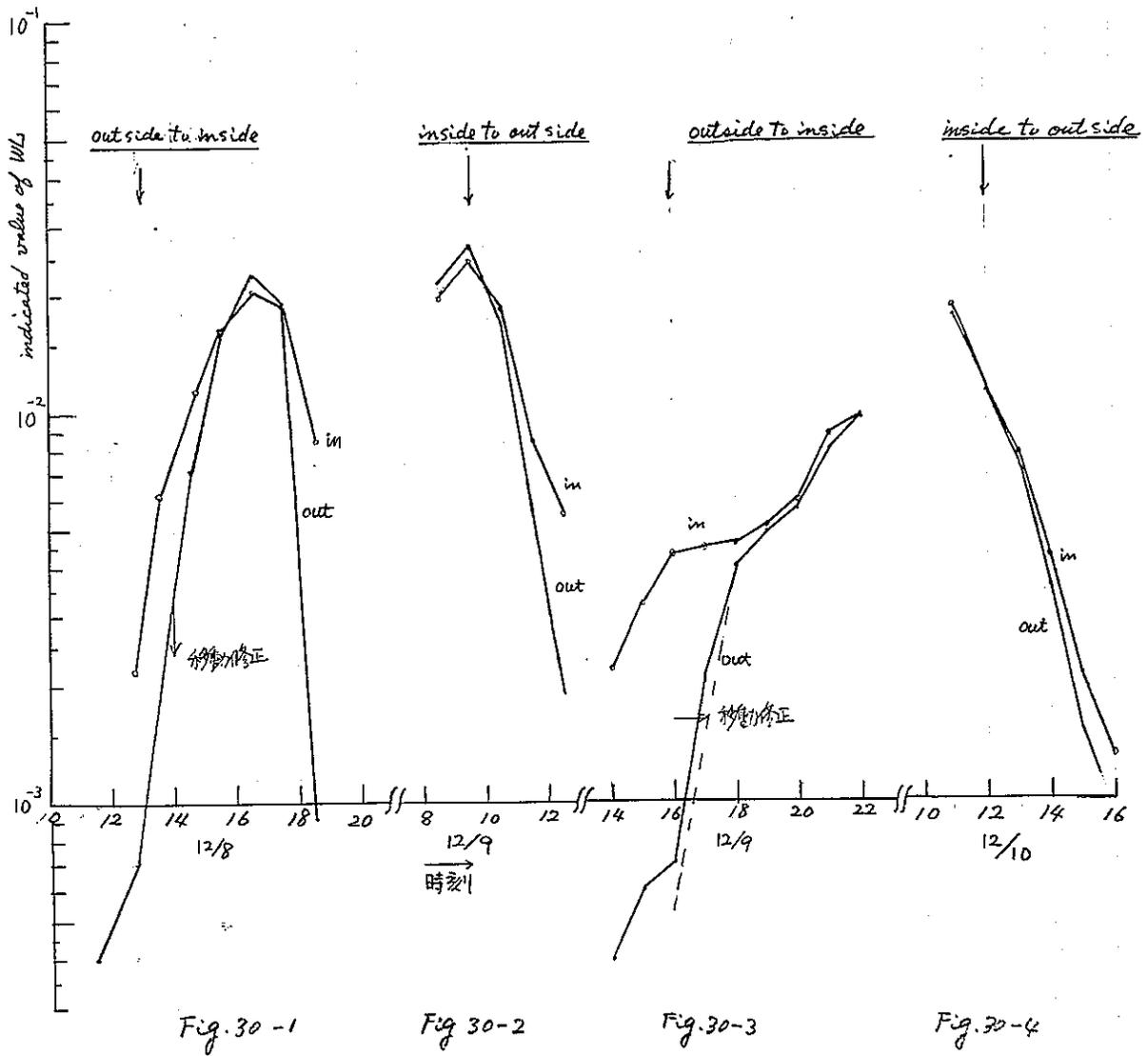


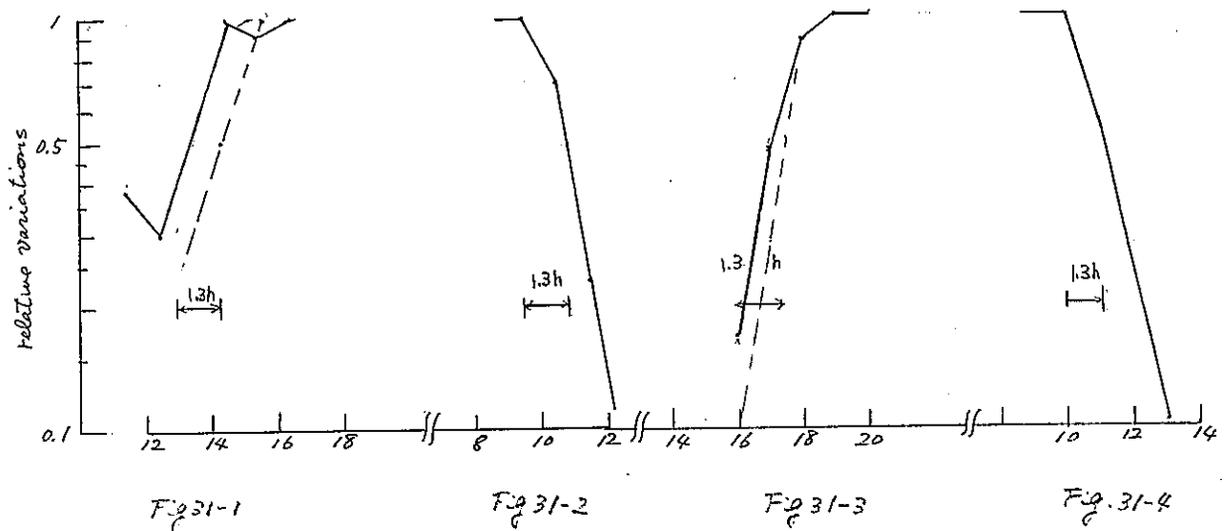
Fig. 29-2

除塵器を動かした時の室内に固定した PAEC-monitor の RaA, RaC の ROI, 平衡比 E と WL の値の変化およびフロン濃度の変化(下図)





PAEC-monitor をテント外から内部へ入った時と出た時の monitor の指示値の変化と テント内に設置した固定の PAEC-monitor の指示の比較とその相対値(下図)



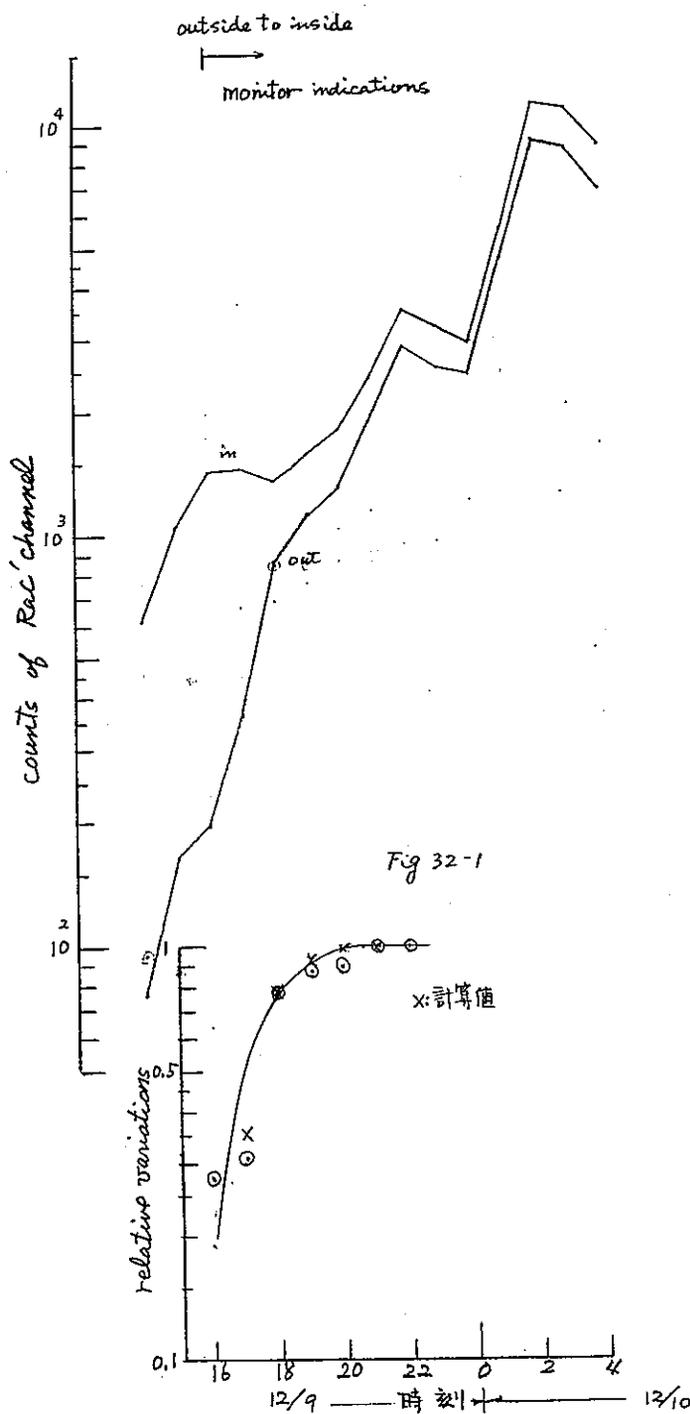


Fig. 33-1 PAEC-monitor を用いた内へ入射時の Rac' 計測の
計数の変化と其の相対値

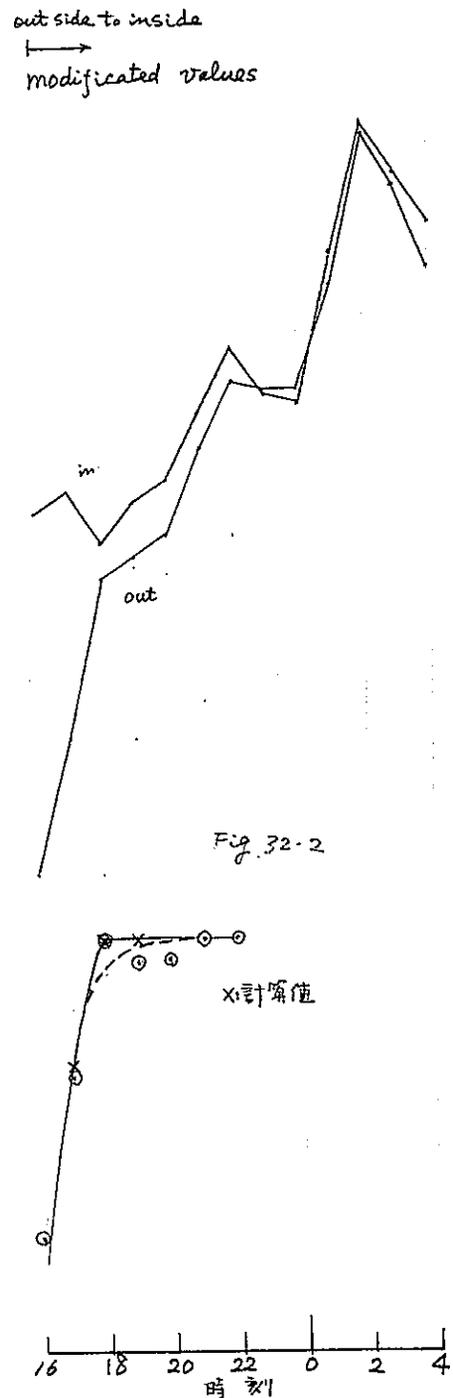


Fig. 33-2 33-1 のデータを早大式 (3 回法) で処理した
時の計数の変化と其の相対値

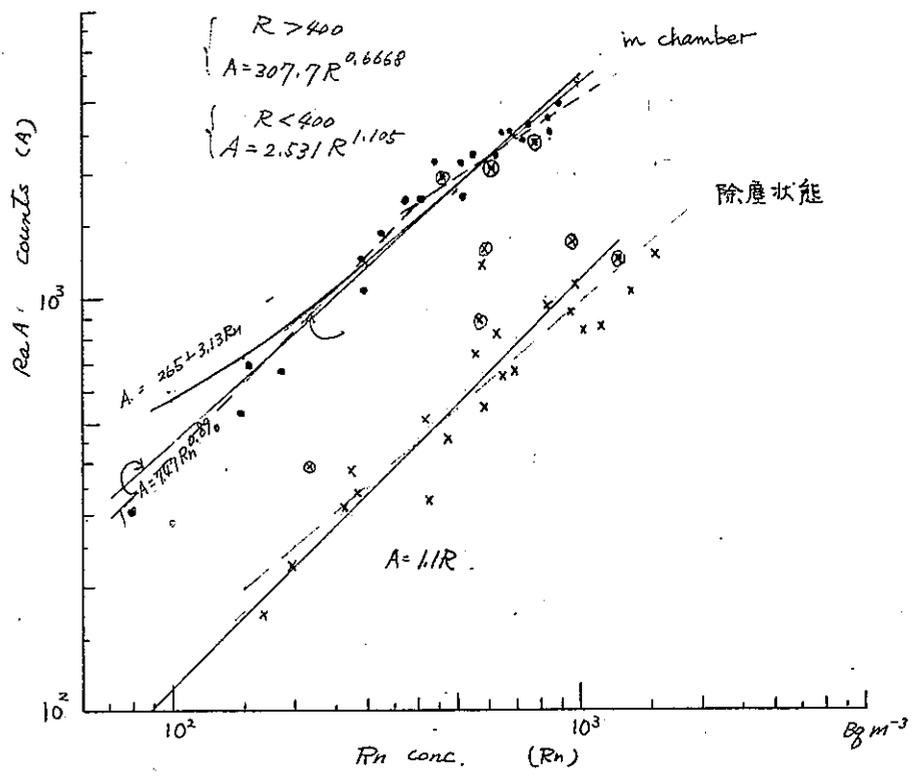


Fig. 34 仮設室内のPAEC-monitor
 のRAのROIの計数とラドン濃度の関係.
 in chamber: 除塵器停止状態.

表1. 早大式の PAEC monitor の感度

ラドンの系列 (4回方式)						
1 計数回 の時間 (T)	感度定数 K_c	誤差定数 K_E	RaC' 系列の 測定限界の計数 (相対誤差 $\pm 33\%$)	RaC' 系列の測 定限界時の濃度 WL	RaC' 系列の測 定限界時の濃度 EECRN $Bq m^{-3}$	備 考
60 min	0.69162	1.05468	20.93	10.31 μ WL	3.874×10^{-2}	(RaA+RaB+RaC)に よる RaC' の計数
45 min	0.54544	1.12849	38.53	25.25 μ WL	9.485×10^{-2}	
30 min	0.35044	1.29743	123.4	0.1216 mWL	4.566×10^{-1}	
20 min	0.20133	1.52014	513.1	0.7585 mWL	2.849×10^0	
ラドンの系列 (3回方式)						
60 min	0.69162	1.05468	20.93	10.31 μ WL	4.324×10^{-2}	(RaB+RaC)に よる RaC' の計数
45 min	0.54546	1.12848	38.52	25.31 μ WL	1.061×10^{-1}	
30 min	0.35101	1.29668	122.8	0.1210 mWL	5.075×10^{-1}	
20 min	0.20345	1.50998	495.7	0.7328 mWL	3.072×10^0	
以上 (RaC') $\eta_c = 0.2$ $v = 100 \cdot \text{min}^{-1}$ EECRN : $1 Bq m^{-3} \approx 2.6623 \times 10^{-1} \text{ mWL}$ として計算						
トロンの系列 (3回方式)						
4 h	0.21469	1.30352	331.8	8.097 μ WL	2.229×10^{-3}	(ThB+ThC)に よる ThC' の計数 ThC' の β 増変分岐 比 = 64.07%
3 h	0.15491	1.38319	717.5	23.35 μ WL	6.427×10^{-3}	
2 h	0.091233	1.52597	2518.	0.1229 mWL	3.383×10^{-2}	
1.5 h	0.059869	1.64377	6785.	0.4416 mWL	1.215×10^{-1}	
1 h	0.031335	1.81557	30212.	2.949 mWL	8.119×10^{-1}	
0.5 h	0.0093152	2.06996	44440.	86.77 mWL	2.388×10^1	
以上 (ThC') $\eta_c = 0.2$ $v = 800 \cdot \text{min}^{-1}$ EECRN : $1 Bq m^{-3} \approx 3.6330 \text{ mWL}$ として計算						

表2 入形峠 屋内での実験順序

12月8日	10:30 WLモニタを屋外でスタート
	11:30 娘核種測定(屋外)
	12:30 娘核種測定(屋外)
	13:30 WLモニタをチェンバ内へ 娘核種測定(チェンバ内)
	14:30 娘核種測定(チェンバ内)
	16:30 除塵機スタート 娘核種測定(排出口)
	17:30 娘核種測定(チェンバ内)
12月9日	9:30 WLモニタを屋外へ 除塵機スタート(8時間) 娘核種測定(チェンバ内)
	11:00 娘核種測定(屋外)
	12:30 WLモニタを停止、フィルター交換
	13:00 WLモニタを屋外でスタート
	13:30 娘核種測定(屋外)
	15:00 娘核種測定(チェンバ内)
	16:00 WLモニタをチェンバ内へ 除塵機再スタート(8時間)
12月10日	10:00 除塵機再スタート
	12:00 娘核種測定(排出口)
	13:00 娘核種測定(チェンバ内) WLモニタを屋外へ
	除塵機停止
	16:00 WLモニタ停止

表3 除塵器の給排気データ

DATE	Rn Bq/m3	EECRn(給気) Bq/m3	EECRn(排気) Bq/m3	
1997/12/4 15:00			32.5	
1997/12/4 16:00	940		105.4	
1997/12/4 17:00	1592	117.8	226.8	
1997/12/4 18:00	1896	250.8	445.9	
1997/12/4 19:00	2320	506.3	629.6	除塵器ON ↓
1997/12/4 20:00	2672	718.8	411.9	
1997/12/4 21:00	3008	582.1	150.4	
1997/12/4 22:00	3424	282.2	62.7	
1997/12/4 23:00	3680	169.1	41.5	
1997/12/5 0:00	4096	145.1	36.4	
1997/12/5 1:00	4288	140.7	37.7	↓ 除塵器OFF
1997/12/5 2:00	4832	142.4	41.7	
1997/12/5 3:00	4832	158.7	49.5	
1997/12/5 4:00	4896	174.6	249.3	
1997/12/5 5:00	5216	338.8	638.6	
1997/12/5 6:00	5600	734.6	977.0	
1997/12/5 7:00	5312	1093.1	1205.2	
1997/12/5 8:00	5440	1371.1	1388.7	
1997/12/5 9:00	4832	1628.6	1434.7	
1997/12/5 10:00	3840	1672.7	1299.4	
1997/12/5 11:00	3248	1483.4	1145.2	
1997/12/5 12:00	3184	1294.7	1032.3	
1997/12/5 13:00	3024	1155.4		

娘核種濃度 表4 テント内の個別の娘核種濃度

date	time	条件	RaA (Bq/m ³)		RaB (Bq/m ³)		RaC (Bq/m ³)		EEC-Rn (Bq/m ³)		mWL _L
12/8	11:28	屋外	12.29 ± 3.65		7.89 ± 2.37		2.08 ± 1.72		6.15 ± 1.39		1.64 ± 0.37
12/8	12:30	屋外	50.49 ± 7.40		17.00 ± 3.60		3.36 ± 2.51		15.35 ± 2.10		4.09 ± 0.56
12/8	13:29	チェンバ内	361.62 ± 19.97		116.77 ± 9.99		37.68 ± 7.16		112.54 ± 5.86		29.96 ± 1.56
12/8	14:27	チェンバ内	355.40 ± 19.64		118.92 ± 10.71		66.56 ± 8.03		123.97 ± 6.35		33.00 ± 1.69
12/8	16:30	除塵器排出口	67.28 ± 8.55		41.28 ± 5.79		18.16 ± 4.35		35.27 ± 3.43		9.39 ± 0.91
12/8	17:30	チェンバ内	154.46 ± 12.85		22.01 ± 5.07		10.92 ± 3.57		31.72 ± 2.98		8.44 ± 0.79
12/9	9:24	チェンバ内	261.96 ± 16.80		78.20 ± 9.49		68.41 ± 7.36		93.85 ± 5.67		24.98 ± 1.51
12/9	10:53	屋外	10.25 ± 3.35		2.47 ± 1.51		0.81 ± 1.06		2.66 ± 0.88		0.71 ± 0.23
12/9	13:29	屋外	4.63 ± 2.27		7.17 ± 1.92		-0.09 ± 1.29		4.16 ± 1.11		1.11 ± 0.30
12/9	14:55	チェンバ内	166.25 ± 13.43		15.06 ± 4.90		11.55 ± 3.46		29.62 ± 2.88		7.88 ± 0.77
12/10	12:03	除塵器排出口	16.71 ± 4.26		5.97 ± 2.28		2.45 ± 1.67		5.77 ± 1.34		1.54 ± 0.36
12/10	13:00	チェンバ内	70.97 ± 8.68		13.05 ± 3.43		2.66 ± 2.31		15.20 ± 2.00		4.05 ± 0.53

表5 テント内のラドン濃度の推移

Rn

Nr.	Date	Time	Radon	error	Temperature	Air pressure	Humidity
90	12/8	9:00	278	23	9.88	932.5	89.0
91	12/8	10:00	223	23	13.25	932.4	91.0
92	12/8	11:00	97	16	11.75	931.6	90.0
93	12/8	12:00	80	13	12.12	930.8	92.0
94	12/8	13:00	187	18	13.81	929.6	89.0
95	12/8	14:00	294	24	12.25	928.9	83.0
96	12/8	15:00	412	30	11.69	929.3	83.5
97	12/8	16:00	440	32	11.88	929.1	86.5
98	12/8	17:00	464	34	11.69	929.0	84.5
99	12/8	18:00	584	39	10.69	929.3	85.0
100	12/8	19:00	568	40	10.94	930.1	87.5
101	12/8	20:00	556	40	10.69	930.9	87.5
102	12/8	21:00	402	34	9.75	931.1	85.0
103	12/8	22:00	276	28	9.25	931.4	85.5
104	12/8	23:00	288	26	9.00	931.0	86.5
105	12/9	0:00	264	25	8.56	931.2	85.5
106	12/9	1:00	219	23	7.44	931.9	83.5
107	12/9	2:00	128	18	5.66	932.6	81.0
108	12/9	3:00	149	18	4.88	933.2	82.5
109	12/9	4:00	154	18	4.53	932.7	85.5
110	12/9	5:00	298	25	4.44	933.4	85.5
111	12/9	6:00	326	27	4.12	934.0	85.5
112	12/9	7:00	382	30	3.95	934.4	86.0
113	12/9	8:00	512	35	4.09	935.4	86.5
114	12/9	9:00	672	41	4.28	935.5	85.0
115	12/9	10:00	608	42	7.22	935.5	89.0
116	12/9	11:00	568	39	9.12	934.6	90.5
117	12/9	12:00	624	42	8.38	933.9	84.0
118	12/9	13:00	600	40	9.44	933.2	87.5
119	12/9	14:00	476	36	8.88	933.5	83.5
120	12/9	15:00	592	40	8.94	933.8	85.0
121	12/9	16:00	648	42	7.97	934.0	82.0
122	12/9	17:00	696	45	6.66	934.4	82.5
123	12/9	18:00	1024	56	5.75	934.8	83.5
124	12/9	19:00	1144	60	5.41	935.1	85.5
125	12/9	20:00	1344	65	5.03	934.8	85.5
126	12/9	21:00	1536	72	4.62	934.6	86.0
127	12/9	22:00	980	60	4.38	934.4	86.0
128	12/9	23:00	964	57	4.25	933.8	87.0
129	12/10	0:00	1256	62	4.12	933.5	87.0
130	12/10	1:00	896	56	3.86	933.1	86.0
131	12/10	2:00	644	46	3.55	933.1	85.5
132	12/10	3:00	544	40	3.16	933.1	84.5
133	12/10	4:00	520	39	2.34	933.1	83.5
134	12/10	5:00	632	42	2.44	933.3	85.5
135	12/10	6:00	724	45	2.12	934.0	85.0
136	12/10	7:00	744	48	2.00	934.2	86.0
137	12/10	8:00	836	50	2.22	934.8	86.0
138	12/10	9:00	844	51	3.92	934.9	85.5
139	12/10	10:00	780	50	4.78	934.8	86.0
140	12/10	11:00	964	55	4.88	934.4	84.0
141	12/10	12:00	1216	60	6.03	933.7	84.0
142	12/10	13:00	824	54	5.88	933.4	79.0
143	12/10	14:00	430	40	4.44	933.8	76.5
144	12/10	15:00	195	26	3.91	934.6	75.5
145	12/10	16:00	157	20	1.46	935.2	75.0

表6 テント内の娘核種濃度表示値 WLM

ABC

	RaA	RaB	RaC	estimatedRr	WL
104421	20	8	3	36	0.0020
105921	31	10	3	59	0.0025
112921	27	11	5	45	0.0028
122921	33	13	5	57	0.0032
122921	96	26	7	209	0.0069
12/8	144700	179	179	179	0.0477
	150221	156	135	116	0.0346
	153221	159	114	82	0.0284
	163221	130	105	85	0.0266
	173221	79	79	79	0.0210
	183221	60	40	26	0.0098
	193221	55	23	10	0.0057
	203221	48	18	7	0.0045
	213221	23	15	10	0.0037
	223221	17	11	7	0.0027
	233221	25	9	4	0.0023
	243221	25	9	3	0.0022
	13221	43	11	3	0.0030
	23221	29	15	8	0.0037
	33221	27	16	9	0.0039
	43221	66	20	6	0.0052
	53221	105	41	16	0.0102
	63221	104	59	33	0.0143
	73221	103	70	48	0.0173
	83221	160	92	53	0.0224
	93221	130	108	89	0.0274
	103221	77	77	77	0.0205
	113221	50	41	33	0.0104
12/9	123221	66	24	9	0.0060
	133221	74	19	5	0.0052
	143221	66	15	3	0.0042
	153221	84	12	2	0.0042
	163221	72	17	4	0.0047
	173221	81	13	2	0.0042
	183221	87	12	2	0.0043
	193221	100	13	2	0.0048
	203221	118	15	2	0.0055
	213221	119	30	8	0.0082
	223221	74	34	15	0.0082
	233221	92	30	10	0.0077
	3221	219	27	3	0.0101
	13221	254	93	34	0.0233
	23221	137	107	84	0.0270
	33221	109	89	73	0.0226
	43221	121	75	46	0.0183
	53221	193	87	39	0.0213
	63221	158	103	67	0.0253
	73221	178	109	67	0.0267
	83221	158	116	84	0.0288
	93221	125	101	81	0.0255
	103221	136	90	59	0.0221
	113221	90	54	33	0.0133
12/10	123221	98	36	13	0.0090
	133221	54	23	10	0.0057
	143221	23	11	5	0.0027
	153221	18	6	2	0.0015

表7 ティン内に設置(固定)した WLX PAEC-monitor の指示値
Sheet 中

Time	RaA ROI	RaC' ROI	ThC' ROI	Rn (WL)	Tn (WL)	Rn error (%)	Tn error (%)	Temperature	pressure
112840	231	243	7	0.0010	0.0000	14.94	86.26	7	94
122840	379	680	7	0.0022	0.0000	13.36	98.80	8	94
132840	963	1990	8	0.0062	0.0000	12.46	100.00	7	94
12/8 142840	1529	3976	13	0.0115	0.0000	12.21	100.00	6	94
152840	1988	5908	24	0.0185	0.0000	12.12	86.22	5	94
162840	2299	7630	35	0.0207	0.0000	12.08	60.24	5	94
172840	1677	7335	43	0.0188	0.0000	12.10	45.57	5	94
182840	961	3156	46	0.0085	0.0000	12.30	35.05	4	94
192840	826	1811	30	0.0055	0.0000	12.51	42.22	4	94
202840	622	1508	45	0.0044	0.0000	12.85	33.46	4	94
212840	412	1212	47	0.0033	0.0000	12.86	32.44	3	94
222840	361	915	37	0.0026	0.0000	13.10	36.10	3	94
232840	322	734	30	0.0022	0.0000	13.34	39.80	2	94
2840	311	698	26	0.0021	0.0000	13.40	42.78	2	94
12840	475	822	29	0.0027	0.0000	13.09	40.69	0	94
22840	489	1186	34	0.0035	0.0000	12.84	38.13	0	94
32840	558	1195	40	0.0036	0.0000	12.80	35.10	-1	94
42840	803	1569	42	0.0049	0.0000	12.58	34.72	-1	94
52840	1275	2924	29	0.0087	0.0000	12.30	46.41	-1	94
62840	1613	4394	45	0.0125	0.0000	12.19	37.35	-2	94
72840	1818	5437	52	0.0151	0.0000	12.14	35.42	-2	94
82840	2401	7175	63	0.0199	0.0000	12.09	33.09	-1	94
92840	2623	9152	77	0.0245	0.0000	12.06	30.60	-1	94
102840	1511	7414	88	0.0185	0.0000	12.10	27.15	0	94
112840	898	3247	90	0.0085	0.0000	12.30	25.06	2	94
12/9 122840	772	1909	83	0.0055	0.0000	12.50	25.44	2	94
フィルタ交換									
Time	RaA ROI	RaC' ROI	ThC' ROI	Rn (WL)	Tn (WL)	Rn error (%)	Tn error (%)	Temperature	pressure
13/9 140011	458	623	5	0.0022	0.0000	13.33	100.00	2	94
150011	541	1005	4	0.0032	0.0000	12.93	100.00	2	94
160011	649	1409	12	0.0043	0.0000	12.68	76.47	1	94
170011	672	1468	12	0.0045	0.0000	12.65	77.45	0	94
180011	841	1374	15	0.0046	0.0000	12.63	63.74	0	94
190011	874	1592	15	0.0051	0.0000	12.56	65.88	0	94
200011	1044	1799	13	0.0059	0.0000	12.48	77.41	-1	94
210011	1280	2454	18	0.0078	0.0000	12.35	64.50	-1	94
220011	1082	3505	18	0.0096	0.0000	12.27	78.09	-1	94
230011	928	3204	12	0.0086	0.0000	12.31	100.00	-2	94
11	1250	2950	27	0.0087	0.0000	12.30	48.98	-2	94
10011	2990	5592	29	0.0179	0.0000	12.11	59.94	-2	94
20011	2544	11264	39	0.0288	0.0000	12.04	96.01	-2	94
30011	2230	10886	48	0.0274	0.0000	12.04	53.31	-2	93
40011	1759	8802	40	0.0220	0.0000	12.07	56.72	-3	93
50011	2209	7634	51	0.0205	0.0000	12.08	39.59	-3	93
60011	2428	9975	53	0.0259	0.0000	12.05	43.51	-4	94
70011	2646	11099	94	0.0286	0.0000	12.04	28.06	-4	94
80011	2753	11711	83	0.0301	0.0000	12.03	31.06	-4	94
90011	2542	12184	88	0.0307	0.0000	12.03	30.10	-3	94
100011	2416	10046	98	0.0259	0.0000	12.05	26.80	-1	94
110011	1379	7528	91	0.0185	0.0000	12.10	26.71	-1	94
12/10 120011	1270	4153	103	0.0112	0.0000	12.21	23.92	0	94
130011	952	2800	109	0.0077	0.0000	12.34	22.99	0	94
140011	322	1717	75	0.0042	0.0000	12.67	26.49	-1	94
150011	226	817	76	0.0021	0.0000	13.31	25.94	-1	94
160011	171	482	75	0.0013	0.0000	14.01	25.94	-4	94

表8 テント内外に設置位置を動かした PAEC-monitor (WLX) の指示値
Sheet 外

Time	RaA ROI	RaC' ROI	ThC' ROI	Rn (WL)	Tn (WL)	Rn error (%)	Tn error (%)	Temperatu	pressure
112933	31	120	3	0.0004	0.0000	18.38	100.00	11	94
122933	57	211	2	0.0007	0.0000	15.01	100.00	13	94

Time	RaA ROI	RaC' ROI	ThC' ROI	Rn (WL)	Tn (WL)	Rn error (%)	Tn error (%)	Temperatu	pressure
143245				0.00718		9.7			
153245				0.01814		9.3			
163245				0.02265		9.2			
173245				0.01937		9.3			
183245				0.00917		9.6			
193245				0.00568		9.9			
203245				0.00445		10.1			
213245				0.00348		10.4			
223245				0.00273		10.7			
233245				0.00237		11.0			
3245				0.00237		11.0			
13245				0.00296		10.6			
23245				0.00393		10.2			
33245				0.00411		10.2			
43245				0.00601		9.8			
53245				0.00982		9.5			
63245				0.01395		9.4			
73245				0.01662		9.3			
83245				0.0218		9.2			
93245				0.0266		9.2			
103245				0.01701		9.3			
113245				0.00561		9.9			
123245				0.00189		11.3			

フィルタ交換

Time	RaA ROI	RaC' ROI	ThC' ROI	Rn (WL)	Tn (WL)	Rn error (%)	Tn error (%)	Temperatu	pressure
140103	94	76	1	0.0004	0.0000	17.63	100.00	5	94
150103	79	164	1	0.0006	0.0000	15.52	100.00	5	94
160103	63	196	2	0.0007	0.0000	15.18	100.00	5	94
170103	455	367	9	0.0021	0.0000	11.28	68.76	6	94
180103	686	868	3	0.0040	0.0000	10.27	100.00	5	94
190103	777	1129	12	0.0049	0.0000	10.04	63.43	5	94
200103	867	1310	15	0.0056	0.0000	9.91	56.43	5	94
210103	1140	1964	14	0.0080	0.0000	9.64	62.41	4	94
220103	951	2868	20	0.0098	0.0000	9.52	52.66	4	94
230103	972	2533	21	0.0090	0.0000	9.57	49.91	4	94
103	1213	2434	17	0.0094	0.0000	9.55	56.98	4	94
10103	2492	4645	28	0.0183	0.0000	9.28	46.19	4	94
20103	2281	9145	37	0.0294	0.0000	9.17	46.19	3	94
30103	2083	8736	46	0.0278	0.0000	9.18	37.78	3	94
40103	1679	6964	50	0.0222	0.0000	9.22	33.85	2	94
50103	1959	6319	54	0.0213	0.0000	9.23	31.77	2	94
60103	2239	8150	77	0.0267	0.0000	9.18	26.71	2	94
70103	2368	9035	64	0.0293	0.0000	9.17	30.28	2	94
80103	2565	9603	66	0.0313	0.0000	9.16	30.03	2	94
90103	2161	9568	101	0.0301	0.0000	9.16	23.45	3	94
100103	1953	7811	120	0.0250	0.0000	9.20	21.18	4	94
110103	1182	5708	98	0.0176	0.0000	9.28	22.90	5	94
120103	1059	3283	83	0.0111	0.0000	9.45	24.15	5	94
130103	651	2234	70	0.0073	0.0000	9.68	25.82	5	94
140103	165	1249	62	0.0035	0.0000	10.34	26.95	1	94
150103	88	544	57	0.0015	0.0000	11.72	27.71	0	94
160103	161	227	70	0.0009	0.0000	12.92	25.16	-2	95