

本資料は 年 月 日付けで登録区分、

変更する。 01.10-4

[技術情報室]

堆積場周辺の ラドン濃度に関する研究

(ラドン校正用チェンバーを用いた校正手法の検討IV)

(動力炉核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1997年3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 IJ1615 97-002
1997年 3月

堆積場周辺のラドン濃度に関する研究
ラドン校正用チェンバを用いた校正手法の検討 (IV)

黒澤 龍平 *

要旨

人形峠事業所で運用されているラドン校正チェンバでの校正手法について、将来的なニーズも視野に入れながら、昨年度までの研究成果をふまえ検討を行った。

設計・建設段階での限定されたpassive型モニタの校正法については、現設備でも充分であると考えますが、例えばpassive型のモニタの動的特性までも考慮した校正手法の高度化に対する要求及び近年開発される新しい形式のラドン測定器に対応しうるような多様化された校正手法の確立に対する要求は将来的には充分起こりうるものである。

よって、これらの将来的に起こりうる要求に対して考えられる問題点について昨年度までに行った研究成果をふまえ、それらのうち特に重要度の高い課題、すなわちラドン濃度のコントロール手法及び濃度変動に敏感に検知し表示しうるラドン濃度測定器などの、最低限必要と思われる設備・付加機能について具体的に検討を行い、考察を行った。

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：080D0160

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

	page
1. 目的	
1. 1 ラドンチェンバの具備すべき機能	..... 1
1. 2 現チェンバーの問題点	..... 2
2. 付加機能	
2. 1 チェンバ内信号系	..... 5
2. 2 ラドン供給源	..... 6
2. 3 ラドン濃度測定系	..... 8
3. 静電捕集ラドンモニター	
3. 1 モニターの構成	..... 10
3. 2 捕集部・検出部	..... 12
3. 3 表示部	..... 13
3. 4 コントロール機能	..... 15
4. 今後の研究と結論	..... 17
表 Table.1 人形峠における実験条件	..... 20
図 Fig.1 端子板配置図	..... 21
Fig.2 ラドン発生率試験配置図	..... 22
Fig.3 比例増幅器	..... 23
Fig.4-1 単一波高弁別器	..... 24
Fig.4-2 計数率計	..... 25
Fig.5 α スペクトルの測定値	..... 26
Fig.6 SPD の α スペクトルの計算の概念図	..... 27
Fig.7 種々の物質の α 粒子に対する阻止能	..... 28
Fig.8 種々の物質中の α 粒子の飛程対エネルギーの関係	..... 29
Fig.9 ^{218}Po の α スペクトルの計算値	..... 30
Fig.10 ^{214}Po の α スペクトルの計算値	..... 31
Fig.11 測定装置配置図	..... 32
Fig.12 ^{218}Po の減衰曲線	..... 33

1. 目的

1. 1 ラドンチェンバの具備すべき機能

ラドン濃度測定器を校正するためにラドンチェンバは不可欠の装置であるが、どのような機能を組み込むかはそのチェンバが対象とする測定器の形式や使用目的で異なるばかりでなく、設計時の思想によっても変化し必ずしも一定ではない。しかし一般的にはチェンバ内のラドン濃度は設定値もしくはそれにちかい値に固定され、それに加えて種々の気象条件も設定できるようになっている。また内容積は 1 m^3 位という小型の装置から 20 m^3 を超えるものもある。

人形峠に設置されているチェンバは設置されている位置が海拔 700 m の高地でありそのため海面気圧と等価となるようにレンジの広い気圧コントロール装置が付随している点が国内の常識上の特徴であるが、世界的常識からいえばウラン鉱山用のラドン濃度測定器の場合にはこの程度の気圧差（海面気圧より高い気圧を含め）は必要であると認識されている。また気温や湿度についてはある程度の範囲で選択できるようになっている。しかしながら本チェンバでは正規のラドン濃度の monitoring は行わず、チェンバ内にラドンを封入した後ラドン濃度をいわゆる grab sampling で採取し、そのまま密閉状態で放置し例えば24時間後の校正目的の曝露の終了直前に再び sampling を行うなどの方法が採られている。このため両 sampling の間のラドン濃度に関する情報が欠落するばかりでなく、濃度異常に対し迅速に対応することができない。このようなことから応答性の良い active 型のラドン濃度モニターで常時濃度の monitoring を行うと共に、濃度変動を検出しそれを一定値に保つシステムが必要と考えられる。このチェンバ内ではラドン濃度は格別のリークがない限り放射性壊変によって減少し増加することは考えられていない。従って濃度コントロールとはいうものの濃度上昇のためのシステムが当初の基本的要素となるであろう。ラドン濃度測定器の動特性を求めるには、ステップ状の濃度変化を与え、それに対応する応答を観測する必要がある。この方式を passive 型でか

つ積分形式のラドン濃度モニターの特性試験に適用することはやや困難で、ステップ状の濃度変化を与えた後、応答時間に対応したいくつかの曝露時間でラドン曝露を止めて評価しなければならない。しかし active 型のモニターや passive 型でも時間経過に対する濃度変化が求められるような微分形式のモニターの試験には欠くことのできぬ試験方法である。このような試験のためにはラドン濃度変化を follow できるようなモニターをチェンバ内に設置する必要がある。またこのような濃度変化を与える代わりに、曝露中のチェンバ内に測定装置を出し入れできる装置、いわゆるポートを具備することも一つの考えではあるが、これはチェンバ内気圧が外部気圧と等しい時でないとう適用が困難である。ポートの代わりに供試測定器を気密容器に入れチェンバ内で開封し一定時間後再び同容器内に戻し容器内のラドンをチェンバ外の空気で置換する方法をとることも可能でこれならば気圧差があっても実現できる。しかしながらこのような方式をとるにしてもチェンバ内の状態をチェンバ外に伝達するためにチェンバ内外を結ぶケーブルや配管類を設置していなければならないが現状では不十分である。

チェンバ内のラドンのみならずラドン娘核種をも測定器の性能試験の対象として利用することもチェンバの有効利用上は必要なことである。しかしチェンバ内の容積上の制約がありまたエアロゾルの投入を行わなければならないその汚染対策も考えねばならぬので必ずしも簡単ではない。このような目的のためには娘核種の濃度モニターを設置する必要がある。単一濾紙を使ったラドン娘核種個別濃度連続モニターは実現できないが ^{218}Po の濃度と ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 両者の PAEC の和は求められるのでそのようなモニターも、エアロゾル濃度計と共に設置すれば万全であろう。また同時にエアロゾルや娘核種を除去する除塵装置やエアロゾル投入装置などもチェンバの具備すべき機能ではあるがこれらをすべて取り入れるにはかなりの容積を必要とする。

1. 2 現チェンバの問題点

前項でも述べたように現チェンバはラドンに対しては閉鎖された容器で温湿度のコントロールはできるもののチェンバ内のラドン濃度の monitoring はしていなかった。近年アルファガードをチェンバ内に設置したりシンチレーション方式の TEL を設置して内部の濃度を monitoring するようになってきたがこれらは main の測定器ではなくまた応答特性も余り良くない。それはこのチェンバがラドン封入後濃度コントロールを行わない、いわゆる decay 型のチェンバであるからで、チェンバのリークさえなければ物理的な壊変による濃度低下しか起きないと期待されているからである。短時間の曝露の場合はラドン濃度の変化率はそれ程大きくなく、一日について 82.42% 程度の減少に過ぎぬため例えば 24 時間の曝露に対し (濃度×時間) の値は、積分型モデルで計算すると $0.9146C_0$ (濃度・day) となるがそれを簡略化して封入時と曝露終了時の濃度の平均値と曝露時間の積としても $0.9171C_0$ (濃度・day) となり 0.27% 多く見積もるに過ぎない。しかし供試ラドン測定器の指示値が必ずしも (濃度×時間) に比例するとは限らず、例えば濃度測定器のラドン取り込み速度がそれまで取り込まれた量と周辺のラドン濃度に比例するであろう飽和取り込み量との差に比例するような場合 (活性炭モニターがそれに該当する) は、周辺のラドン濃度の変化が取り込み速度に影響し、濃度が一定に保たれている時と異なったパターンを示すことになる。また、decay 型のチェンバで長時間の曝露を行うと開始時と終了時の濃度比が大きくなり一種の動的な試験を行っていることになり passive 型モニターの取り込み速度が極端に遅いと理論上静的な試験と異なることになる。また本来 passive 型モニターでも実際に使用している場を模擬した空間でその動的特性を実験的に確かめる必要があるにもかかわらずいままって行われていないのもこのようなチェンバがないためである。一方、近年では passive 型のラドンモニターであってもラドン濃度の時間的変化を記録し得るような形式もありこの場合は必ず動的な試験を行う必要がある。また active 型の場合については当然のことであるはあるが動的特性は必須の試験対象である。このような試験方式を採用する場合にはまず第一に応答速度の速

い連続的なラドン濃度測定装置を準備しそれをチェンバ内に導入することが必要である。この装置は正確なラドン濃度を表示するのに越したことはないが必ずしも必要ではなく、それよりも濃度変化に対する応答性や安定性が重要で、正確なラドン濃度は grab sampling によって求めそれと比較し補完的な運用をすればよいと考えられる。このような濃度測定装置を使用すれば当初のラドン封入量の調整も可能でチェンバ内を予定したラドン濃度に設定することも容易となるであろう。

ラドン濃度に対する線量限度はラドン娘核種の平衡等価濃度で表されている。従ってチェンバ内外に平衡等価濃度モニターを常置しておく必要があると思われる。チェンバ内はラドンのみと考えられるので簡単な WL モニターで充分であろうがチェンバ外についてはトロン娘核種の影響を排除できるモニターが必要で少なくともチェンバの使用中は運転しておく程度の安全上の配慮を行った方がよい。チェンバの構造から問題はないと思うがこのようにして蓄積したデータは何か問題が指摘された時に極めて有効である。

このように考えるとチェンバ内にいくつかの測定装置を設置しその信号を取り出したりまた外部よりコントロールなどのために信号を送る必要があり、チェンバ内外を接続する配線、配管を常設しておかねばならない。配管については現在何本かが設置されているが配線については全く考えられておらずチェンバ内に設置した商用交流電源栓もわずかである。これらの配線はそれぞれ目的によって異なり単に接続できれば良いような場合（通常のビニール線）、多少信号の混入が防げればよい場合（シールド線）、良質な信号を伝達する必要がある場合（同軸ケーブル）、高電圧を供給する場合（高圧ケーブル）などがありそれぞれに（）内のような種類の配線が適用されねばならない。一方、これらの配線がチェンバの壁を貫通する際は、チェンバの気密性を保つと共に内圧を外圧より 1/10 気圧程度高くする要求が起きることを考慮してハーメチックシールされたコネクターなどを圧力差に適応した形で使用する必要がある。現在ラドンはウラン鉱石を貯留したシリンダー状容器に空気を送りそれをテドラ

ーバックで受け、それよりチェンバ内に注入している。しかしコントロール目的の場合は一定濃度に近い含ラドン空気を必要な時間チェンバ内に送らねばならない。そのためにはチェンバ内に注入しない時でも常時空気を発生容器に送るがその時の含ラドン空気は外気中に捨てる必要がある。また濃度を上昇させる時は濃度を付加しかつチェンバ内の気圧を一定に保つ必要から発生容器に送る空気にはチェンバ内の空気を使用し一方濃度を下げるときにはチェンバ内の空気を外に捨てると共に外気を容器内に送り込むかあるいはあらかじめ大型のテトラバックに空気を封入しチェンバ内に置きそれより必要に応じてチェンバ内に空気を送りラドン濃度を予定の濃度まで低下させることになる。チェンバ内ラドン濃度の立ち上げの時はシリンダ状の容器を長時間密閉し高ラドン濃度の空気を一時的に注入することになるがシステムとしては同じ形態になるであろう。

2. 付加装置

2. 1 チェンバ内信号系

信号系を計画する際に使用するラドン濃度測定装置の原理的な検出方法は決めたものの、コントロールシステムとしての具体的な構成は未だ確定したわけではなく従ってチェンバ内外を結ぶ信号系の必要数を決めることはできなかった。しかしながら常識的に信号線の種類と必要とする本数とを将来を含めて次のように選んだ。高電圧配線はRG-59uの予定であったがケーブルがかたくチェンバ内外の配線が実施し難くまたそれ程高い電圧を必要とするケースも無いと考え58uとしコネクタのみBNC-HVコネクタを使用した。従って特に高い電圧が必要な場合は別に考えることになる。本数は4本で数としてはやや多いが出力信号を1KV弱の高圧配線に重畳させるようなケースに備えた。信号配線には同軸ケーブルRG-58uを使用し配線数を8本とした。チェンバ内外の端末はBNC-Rとし内外共にBNC-Pで確実に接続できるようにした。信号配線でも同軸ケーブルを必要としない場合がある。例えば指示計を引き出したり直流信

号を送ったりする時は単に S/N を良くするためシールド線で充分である。このようなケースはやや多いであろうことと正負ともに共通アースから浮かす必要がある場合も多いと考え 8 本のシールド線を準備した。端末には 10 組のピンジャック用のレセプタクルを使用し、そのうち 2 系統は、チェンバを貫通するときは一本であるが端末の端子は二つ並列になるよう配線した。これは同一信号を 2 分したり一本にまとめたりして利用するようなケースを想定している。また小電力の送受を考え 12 本の 24 芯ビニール線による配線を行った。この配線を識別しやすいよう 2 種類に色分けしたジャックターミナルに接続した。一方アース線はピンジャック、BNC コネクタの何れとも共通としそれとは別に 3 本のアース用のビニール線を配置しジャックターミナルに接続しさらにチェンバ壁面にも接続した。これらの配線は全てチェンバの壁面のフランジに取り付けた厚さ 3mm の真鍮板に設置した hermetic-seal の connector を介してチェンバ外に取り出されている。hermetic-seal-connector には O-ring が取り付けられているが通常の真空用とは逆にコネクタの上側に O-ring が取り付けられた型を選びチェンバ外からネジ止めするようにした。これはチェンバ内圧が外圧と等しいか高くなるかの何れかであると考えられたからで内外圧の圧力差でコネクタに圧力が加えられ取り付け部の気密性を高くすることができるためである。コネクタへの接続は高圧系と同軸系は BNC-P によって行ったが、その他はコネクタの電極へ配線を直接半田付けした。またアース線はコネクタ接地部と真鍮板とを別に銅線で結んだ上その部分をアース線に接続し完全を期した。ケーブル両端のターミナル箱はチェンバ内では台上の端にチェンバ外では外壁に固定した。

配線の大半は大学で行い現地で組立を行ったが 31 回線の処理に大分手間取った。しかし配置後チェンバを密封し内圧を海面圧に上げ 20 時間程放置したが内圧の変化は全くなく気密性は良好なものと認められた。

端子の概略図を示す。(Fig. 1)

2. 2 ラドン供給系

差し当たりチェンバ内の decay によるラドンの減少分を補充することおよび任意時刻にラドン濃度をステップ状に上昇させることを考える。チェンバ内濃度を減少させるには前記のように濃度変動量の少ない時はチェンバ内に置いた大型のテドラバックよりチェンバ内に送りまた大幅に変更する時は外気を圧力調整後チェンバ内に取り込み、それに相当するチェンバ内の空気をノズル等を経て外気に放出すれば良いであろう。ただ内圧を高くした時のチェンバよりの放出方法について単にノズルから放出すれば十分なのかどうかは今後検討する必要がある。

ラドンを補充する際の供給量はラドン濃度検出用のモニターに時定数があるので時間制御を加味するため一定割合であることが望ましい。即ち供給時の流量を一定と考えるならば一定濃度を保たねばならない。従って最も簡単な機構はラドン供給源に常時一定流量の空気を流し必要に応じてチェンバ内に一定時間供給する方法である。この際多少のラドン濃度の変動は生ずるかも知れないが長い時間について平均すれば大略一定であろうことが期待される。現在人形峠で使用されているウラン（ラジウム）を含む砂状物質は固体ラドン源と考えられ汚染のおそれが少ないので性能はともかくとして安全な線源と考えられる。しかしながら使用中線源容器内に空気の流路ができるため状況が変化すると発生量が変わるおそれがあり将来は多段構造にすべきであろう。しかしさしあたり今の状態でどの程度のラドン発生率になるかを調べた。この時の実験配置を Fig. 2 に示す。

この実験では、流量1.10l/分で10分間、また1.03l/分で10分間の2回ラドン発生容器に空気を流しラドンを発生させそれぞれを別のテドラバックに採取しその濃度を測定したところ、 879Bqm^{-3} と 618Bqm^{-3} となりそれぞれ 0.97Bq min^{-1} 、 0.64Bq min^{-1} の発生率となった。両者の差は予想よりは大きかったが、両者の平均 0.80Bq min^{-1} を平均発生量としそれと線源の推定ラジウム濃度が 0.6Bqg^{-1} と推定される5.6kgのラドン発生源からのラドンの解放割合を求

めると3.2%となった。この数値が代表的な値という訳ではないがこの形式の発生器を用いる限りこの程度の割合となろう。もしこの容器内の線源物質の面積を空気の流れの方向と直角の方向へ広げる代りに発生器の内部に円筒の上下が金網になった分割器を何段か挿入すればラドン解放割合は数%以上になるものと期待される。この容器のラドン供給量は $161 \cdot 10^{-2} \sim 106 \cdot 10^{-2} \text{ Bqs}^{-1}$ なのでチェンバの容積を 7.5 m^3 とすると、初期ラドン濃度が $1023 \sim 674 \text{ Bqm}^{-3}$ の場合この発生器から常時ラドンを供給し続ければチェンバ内ラドン濃度を一定値に保つことができる。ただこの場合はチェンバ内にこの発生器を設置しチェンバ内空気を発生器に送入しながらラドンを供給し続けることになる。従ってこの程度の発生器を数本準備して必要に応じて増減することになる。またチェンバ内のラドン濃度を著しく低く保つ場合はラドン発生量の少ない発生器を使うことが必要である。流路の切換は三方電磁弁を使用しラドン濃度測定器の指示値とラドン濃度設定値の差によって一定時間動作させることになるであろう。

2.3 ラドン濃度測定系

ラドン濃度を連続的に測定する方式には電離箱法（平均電流方式）、シンチレーション・セル法などラドンと2種類の娘核種が放出する主として α 線を測定する方式と電界捕集法、2フィルタ法など一定条件下でラドンより生成した娘核種を測定する方式がある。また近年パルス方式の電離箱測定器が作られているが、これを強制通気状態で使用した時マイクロフォニック雑音が完全除去できるか否かは不明である。今回のような目的に使用するためにはラドン濃度の変化に対して迅速に追従できる装置でなければならない。そのため最も理想的な形式はラドンのみの α 線を検出する方式であるが今のところそのような装置はない。従って半減期の短い ^{218}Po のみを検出する方式を採用する他はない。2フィルタ法は湿度などの環境の影響は受けないものの感度を上げるには流量を増す必要があり測定場を乱すおそれがある。またフィルタ上に娘核種を集めるのでフィルタ内での吸収と空気層の吸収によりエネルギー分解能はそれ

程高くない。それに対し電界捕集法に半導体検出器を組み合わせると検出面に娘核種を直接集めることができるため極めて高いエネルギー分解能が得られた電界を与える容器の大きさや流量の関係についてもそれが ^{218}Po の半減期に見合う滞留時間に(例えば半減期の1/3~1倍位の時間)に対応していれば良く従ってそれ程高流量である必要はないしまた感度も流量にそれ程依存しない。ただ捕集しようとしている ^{218}Po の電荷を持った非付着成分の極性は正であるため負の電荷を有する水分子が容器内に多量に残っていると負電圧を与えた検出面に達する前に水分子と衝突しその電荷を失うことがある。そのため十分除湿すると共に非付着成分の移動速度を高くしなければならない。これらを考慮した上で電界捕集法による連続方式のラドン濃度モニタを採用することとした。

電界捕集法では回路構成の都合から検出器側を接地側にとり容器外壁に正の高圧を与えることになる。このため取り扱いに危険がないよう容器外壁のさらに外側に絶縁した別の容器を設置しいわば二重構造にしなければならない。それと共に高インピーダンスの検出器をシールドし誘導による雑音を抑制する必要がある。このため高圧はインピーダンスの低い乾電池(新しくて見掛けの抵抗の低いもの)により付加することにした。このため余りにも高い電圧の電池を使うことは出来ず一方上述の理由から高い電界強度が要求されるため電極容器を小型にすることにした。これらを考慮してpassive型の静電捕集方式のラドンモニタを改造して使用することにした。検出器は検出面の大きさが重要という訳ではなく見掛け上の全電極面つまり検出器前面の幾何的な全面積中に有効検出面が占める割合が大きいことが望まれる。また強制的に娘核種を集めいわば常時汚染を蓄積させているので長時間使用すると ^{210}Po の付着量が無視できなくなる。エネルギー分解能が高いためエネルギーの低い ^{210}Po の α 線はそれ程問題にはならないがやはり或程度使用したら交換することを考慮して価額面からも選ばねばならない。このようなことからセラミック板をはずしたいいわゆる裸のシリコン・フォトダイオード(SPD)を検出器として採用した。SPDは本質的にはPN接合型の半導体検出器であるがsurface barrier方式に比べて厚い

dead layerがあることならびに当然のことではあるが感光性があることが放射線検出器として使用する上の難点となる、しかし今回のような使用方法であれば両者共それ程問題にはならない。ラドン娘核種を α 線検出器で測定する場合には本来 ^{218}Po 、 ^{214}Po の2核種とトリウム系列の ^{212}Po の合計3核種を弁別して測定する必要があるが本研究の場合は比較的濃度の高いラドンを取り扱いトロンは殆ど無視できることから波高弁別は ^{218}Po のみを対象とし ^{214}Po は波高弁別回路の上限出力、いわゆる surplus 出力によって測定し ^{212}Po は考慮しないこととした。本来は ^{218}Po のみを対象にすれば良いが ^{214}Po の計数は過去(20~30分位以前)の平均的な ^{218}Po 沈着率即ちラドン濃度を示していると考えられることからそれと比較することによりラドン濃度の時間的変化の傾きを推定することが可能となる。表示回路は制御系を動かすことを考えアナログ方式とし長い時定数を採用したが低い α 線のラドン濃度を測定対象とする時は時定数を非常に大きくしなければならずデジタル方式に変更する必要がある。

3. 静電捕集ラドン・モニター

3.1 モニターの構成

2.3に述べたようにモニターの検出容器として passive 型静電ラドンモニターの容器を流用した。passive 方式の場合と異なり検出器の位置が高くなるので有効容積は約1.34lと多少大きくなる。有効容積と感度は比例的関係にあり、そのため必要な電界強度を保ちながら大きくすれば良いので娘核種除去用のろ過部を容器外に設置しさらに外側電極を容器の底まで延長すれば約2lに増加させることも可能である。検出器は容器の遮光性がよいことからSPDをそのまま裸で使用することにし、その出力を charge sensitive preamp. で増幅した。検出器から前置増幅器までケーブルで接続することも可能であるが noise を低減するため前置増幅器を金属シャーシ内に密封した上容器の上部の空きスペースに収納した。このスペースはもともと電池が収納されていた部分である。従って電池は容器外に設置することになった。この出力をさらに比例増幅器によ

って増幅し波形を変換して単一チャンネルの波高分析器に導いた。単一チャンネルの波高分析器は伸長増幅器と2つの波高分析器からなり、両分析器の逆同時出力が取り出せるようになっている。これらのうち charge sensitive preamp. は専用のIC (クリアパルス CS-507) を使用して組み立てた。増幅器の clipping 方式はもともと delay line clipping であったがこれを廃し C-R clipping とし簡単な pole zero cancellation を加えた。また波高分析器の上限出力を外部に取り出すため emitter follower 回路を付加した、増幅器単一波高分析器およびこの後の計数率計は何れも古いトランジスタ方式でユニット化された装置をベースに回路変更を行った。現在のIC化された装置でも変更を加えられぬことはないが、トランジスタ方式の方が技術的に容易である。計数率計はユニットパルスの中を延長し低計数率の指示ができるようにした。

容器内に試料空気を導入する場合できるだけ除湿することが必要でありしかも相当量の空気中の水分を除去しなければならないので無水塩化カルシウム (CaCl_2) と無水硫酸カルシウム (CaSO_4) とを入れた除湿管を直列にし試料空気を流した。30°Cにおける両者の乾燥剤としての効果は乾燥後の絶対湿度が CaCl_2 で $2 \times 10^{-1} \text{g/m}^3$ 、 CaSO_4 で $4 \times 10^{-3} \text{g/m}^3$ とされている。 CaCl_2 は6水塩までであり CaSO_4 は2水塩までなので CaCl_2 の方が除湿総量は多い。しかし上記のように除湿能力は CaSO_4 の方が高い。上記の湿度は平衡時の数値でありこの実験では毎分1l程度の試料空気を流しているため絶対湿度はそれ程低くならず $1.1 \sim 1.2 \text{g/m}^3$ (海面気圧時) または $0.27 \sim 0.50 \text{g/m}^3$ (周辺気圧時) となった。絶対温度 T k における絶対湿度 $A \text{ gm}^{-3}$ と水蒸気張力 $e \text{ mb}$ との関係は $A = 217e/T$ である。また実験時の15°Cにおける飽和水蒸気張力 E は 17.04mb なので上記の相対湿度 $e/E \times 100\%$ はそれぞれ $8.6 \sim 9.3\%$ 、 $2.1 \sim 3.9\%$ となる。チャンバ内の気圧を変化させた時絶対湿度は急激に下がったがその原因が気圧変化にあったのかどうかは不明である。使用した絶対湿度計は気圧が 900mb に変わっても出力電圧が 0.5mV (0.04g/m^3) 変化するだけだとされているので湿度計には問題ない筈であるが何れにしても過度的な現象のように思われる。実験時の記録を

Table. 1 に示す。

絶対湿度計は測定容器の排出気流側に取り付けられている。除湿した試料空気は容器内でワットマン GF/F フィルターで娘核種を除去した後、電極の一部を形成する金網を通して測定空間に入る。ろ過用のフィルタを容器内に設置した理由は除去後直ちに測定空間内に試料空気を導入するためであるが、流量が $1\text{ l}/\text{分}$ であり必ずしも容器内に設置する必要はなく容器外で inline type のフィルタホルダで除去しても問題はないし、またその方が測定空間を広くでき感度を上げることが出来る。また測定容器外に電子式質量流量計と前述の絶対湿度計を設置した。このようなモニターでは流量範囲も広くなくさらにフィルタの目づまりも少なくまたたとえ目づまりしても排気側の気圧は測定容器外側の気圧とほとんど同じなので浮子式流量計でも校正さえしておけば使用することが充分可能である。

3. 2 捕集検出部

検出器として SPD であるハママツフォトニクス製の $300\mu\text{m}$ wafer thickness type の S-3204-04 を使用した。この SPD の有感部の大きさは $18 \times 18 \text{ mm}$ 、外側のセラミック基板を含んだ大きさは $25.5 \times 25.5 \text{ mm}$ である。逆バイアス電圧は最大 100V であるが 70V 以上で depletion layer の厚さは増加せず静電容量は約 140pF とされている。検出体の表面は陽極でありこれを接地側に接続すると一種の静電シールドがほどこされたことになりもし検出体の裏面を接地面近くに密着させることが出来れば安定性は増す筈であるが、本検出部の場合は容器内壁と検出体表面との電位差により正に荷電された娘核種を捕集するため検出体表面に負電圧を与えた方が有利であり、さらに検出体の背面は容器内壁からかなり離れた状態で保持されているので陽極を接地しても特に安定性が増すわけではない。従って検出体の表面側即ち陽極に負電位を与え背面側を負荷抵抗を通して接地した。このようにすると抵抗には常時リーク電流しか流れずその両端の電圧は非常に低くなり従って結合コンデンサーにリー

クがあっても初段のFETのゲートに与えられる余分の直流電圧は無視される。このようにしても検出体の外周部（セラミック部）の電位は検出体表面と恐らく等電位となっているためその部分にも娘核種が付着する。

そのため検出器の見掛けの表側の面積と検出部（有感部）の面積比が小さいほど感度は低くなる。S-3204-04の場合この比は49.8%となる。

有感部の面積は大きい方が容器内の等電位線は平坦になるが感度への影響は少ない。

そのため例えばS-2662-02（有感部：7.5×20mm、外形10×24mm、面積比62.5%）の方が感度が高くなると考えられる。S-2662-02の場合の逆バイアス電圧は最大50Vであり30V以上ではdepletion layerの増加はなく静電容量は110pF（12Vで120pF）とされている。従ってS-2662のdepletion layerの厚さはS-3204の大略1/17の180 μ mと考えられるが α 線の検出には問題ない。

検出部容器の直径は140mmで底部は金網状金属で形成されその下側にP₂O₅除湿剤容器を設置出来るようになっていたが、active型では除湿容器を試料空気の流路内に取り付けるため、この部分に娘核種除去のためのフィルタを組み込んだフィルタホルダーを設置した。しかし前述のようにフィルタホルダーは容器外に置くことが出来るので、検出容器の底面の金網の位置をもっと下げることが可能である。しかし容器側面の金属壁を下端まで延長しなければならない。このようにすれば検出部容器は46%程度増加し感度もそれだけ上昇するが側面の金属壁を延長するには金網をはずして金属円筒を接続して延長しさらにそれに再び金網を取り付けるなど工作が容易でなかったため今回は実施しなかった。

SPDの出力はコネクターを介して検出部容器の上部のcharge sensitive preamp.に接続されている。このpreamp.はクリアパルス製の専用ハイブリッドICと専用のプリント基板によって組み立てられている。feedback condenserは1pF、並列抵抗は1000M Ω である。従って6MeVの α 粒子に対する出力電圧は0.266V、出力パルスの減衰時間は1msecとなる。逆バイアスは上記

の理由から負としたため preamp. 入力は正、従って出力は負パルスとなった。

(入出力の位相は逆になる) この IC の出力は負パルスに対する余裕度はあまりなく、従って次段の入力インピーダンスを高くとる必要があった。

3.3 表示部

比例増幅器として旧型のトランジスタを流用した。これは回路そのものを利用するのではなく増幅器ケースやコントロール類を利用するためである。この増幅器が作られた当時は delay line clipping が流行していたためこの増幅器でも使われていたが増幅器の入力パルスの時定数が長いため初めに短いパルスに変換する必要がありまた前述で述べたように使用した IC の特性から入力インピーダンスを高くせねばならぬので preamp. 出力を C-MOS のデュアルリニア IC MC34182P の同相の入力端子に接続した。入力抵抗は 47k である。また、増幅器出力を波高弁別するためパルスの decay time 小さくかつかなり高い波高にしなければならぬので上記の IC と次段の IC との間にポール:ゼロ:キャンセレーション回路を入れそれにより 1ms の時定数を 15us の時定数に変換 ($0.01\mu \times 100k$ より $0.01\mu \times 1.48k$ へ変換) した後増幅し出力インピーダンスを下げて 2.2k の直列抵抗を経て全直列抵抗 1.6k の分圧型増幅度コントロールを通して次の旧来の 2 段の amp. に導いた。その回路を Fig3 に示す。この増幅器出力を単一チャンネル波高弁別器に接続した。この弁別器のチャンネル幅は最大分析波高の $1/10$ でありこれで十分とも考えられたが場合によってはもう少し広いチャンネル幅が必要になることもあり得るので上限波高選別器のバイアス電圧の範囲を SW の切り換えで拡張されるようにした。また単一チャンネルだと ^{218}Po の α 線のみしか測定対象になし得ないが前述の通り ^{214}Po の α 線も測定の対象とすることも有り得ることおよび取り扱うラドン濃度が比較的高くトロン濃度は完全に無視し得ることから波高弁別器の上限選別回路の出力パルス (surplus) を ^{214}Po の α 線の出力として指示回路に送るため emitter follower により逆同時回路と切り離して出力できるようにした。この波高弁別回路を Fig. 4-1 に示す。

単一チャンネル波高分析器の二つの出力即ち ^{218}Po の計数と ^{214}Po の計数を 2 台の計数率計に接続した。この計数率計の最高感度のレンジは 300count/分であったためパルス幅を決定する静電容量を変更し 30count/分と 100count/分がフルスケールになるように改造したが適当な無極性のコンデンサーが手元になく電解コンデンサーを使用していたため中途半端になってしまった。これについては近日中に変更する予定である。これは電解コンデンサーを使用したためリークが多く予定のパルス幅が得られなかったものと推定される。このような低計数率のパルサーは市販されていないので試験のためには専用のパルサーを作る必要がある。この計数率計の指示針にはリレーの動作点の設定用のアナログ指針があり指示計の針がそれに触れると接点が閉じるようになっている。これを利用すればリレーを動作させコントロール回路を動かすことができる。この計数率計の時定数回路は最高 20 秒でありそれを長くする必要があるが指示計の統計誤差は時定数の逆数の 2 乗に比例するため同一精度をえるためには時定数を 10 倍または 100 倍に延長しなければならない。10 倍は良いとして 100 倍は非実用的な時定数のように思われる。20 秒の場合に使用されているコンデンサーの容量は 760uF であり今回は 940uF 付加して約 40 秒としたが 200 秒にするには 6800uF を付加しなければならない。

単一チャンネル波高分析器の下限は ^{218}Po の α 線スペクトルの形に依存する。ラドン娘核種は検出体表面には付着するが SPD の depletion layer のために低エネルギー側に広がりを持つ。従って上限については実験により簡単に求められるが下限は適切な方法で決定しそのチャンネル幅に入る α 線の割合を計算しなければならない。これについては後項に述べる。Fig4-2 に計数率計の回路図を示す。

3.4 コントロール機能

使用した検出器の ^{218}Po の α 線に対するスペクトルを Fig5 に示す。 ^{218}Po と ^{214}Po の α 線のピークはゆるやかな裾を引いているように見えるがこれは縦軸

が対数目盛だからである。このスペクトルから当該 SPD の deadlayer の厚さを求めることができる。即ち Fig. 6 において d を検出器表面の deadlayer の厚さとする。検出器表面に付着した ^{218}Po 又は ^{214}Po からその法線と角度 θ_1 と $\theta_1 + d\theta$ の間に放出された α 線は d によって吸収を受けその差は、

$$e_{(E)}d \frac{1}{\cos(\theta_1 + d\theta)} - e_{(E)}d \frac{1}{\cos \theta_1}$$

となる。ここで $e_{(E)}$ はエネルギー E における SPD 素材の dE/dx である。一方この範囲内に ^{218}Po や ^{214}Po の α 線が放出される割合は、

$$\frac{1}{2\pi} \{ \cos \theta_1 - \cos(\theta_1 + d\theta) \}$$

となる。 dE/dx についてはペーテの式ではなく別に計算された Al についての表と同じく Al に関する α 線エネルギーと最大飛程についての実験値を使用する。(Fig. 7, Fig. 8) Al と Si の dE/dx の比については原子番号が殆ど同じであり従って dE/dx については大略比例関係があるとすれば初め Al の等価の厚さ d を仮定して計算し必要に応じて Si に換算すれば良い。Al と Si の比については原子質量数が原子番号に比例しているわけではないので 1 とはならない。 d は ^{218}Po と ^{214}Po の α スペクトルのピークに相当するそれぞれのチャンネルの差が両者のエネルギーの差に大略等しいとして 1 チャンセルあたりのエネルギーを求め ^{214}Po のピークのチャンネルのエネルギーを求め ^{214}Po の α 線の実際のエネルギーとの差から deadlayer の大略の吸収量を求める。それより ^{218}Po の α 線に対するエネルギー吸収量を推定し両者のエネルギー差に代入してその値を補正して deadlayer の厚さ d を推定する。この場合の d は基準エネルギー (^{218}Po 又は ^{214}Po の α 線のエネルギー) に対するエネルギー吸収量として求められるのでそれを Al の厚さに変更して求める。これより $\theta = 0$ の角で入射した ^{214}Po の α 線の検出面に入射した時のエネルギーを求める。これを基準とし dE/dx の値を Fig. 7 から読み取りそれに従って入射エネルギーを ΔE ずつ低くしながら $\Delta E / 2$ 低くなった時の dE/dx を $e_{(E)}$ に代入し、

$$e_{(E)} d \frac{1}{\cos(\theta_1 + d\theta)} - e_{(E)} d \frac{1}{\cos \theta_1} = \Delta E$$

となる $d\theta$ を求め

$$\frac{1}{2\pi} \{ \cos \theta_1 - \cos(\theta_1 + d\theta) \}$$

からその角度内に入る α 線の割合を求める。 ΔE については整数チャンネルに相当するエネルギーを選ぶ。このようにして $\theta = 0$ の時のエネルギーを Ec' とした時 ($Ec' - n \Delta E$) と n 回目のエネルギーとして α 線の入射割合を求め、それがピークチャンネルの例えば $1/20$ とか $1/100$ になった時の $Ec' - n \Delta E$ と測定されたスペクトルのそれに対応するチャンネルと比較し両者が一致するよう d を修正する。それを再び代入して ($Ec' - n \Delta E$) と入射割合を求める。 d が求められているので RaC' の α 線エネルギーに相当する Al 中の飛程から $d/\cos \theta$ を差し引いた残存飛程と $Ec' - n \Delta E$ が Fig. 8 と一致することを確認しそれが異なっていれば $e_{(E)}$ を微調整する。このような手順で ^{218}Po と ^{214}Po の α 線に対するスペクトルを計算すると Fig9, Fig10 となる。両者の和と Fig5 は極めて良く一致するがしかしそれは上記の $1/20$ または $1/100$ までは当然である。しかしそれ以下のエネルギーについても良く一致することがわかる。この d を Si に変換するには 1.075 を乗ずることになる。 ^{218}Po のピークに相当する channel 数は 254 でチャンネル幅を 28 channel とした。これに上記の関係より設定したこのチャンネル幅に対する ^{218}Po の α 線の効率を求めると 46.76% となった。さらに測定用容器の容積のうち検出器の下部の金属網までの部分 1.34 l (円筒の体積の 88% : 有効電力範囲)、電荷を持った RaA の割合を 87% 、検出器の厚さ部分を含めた有効面積比 38.03% を入れて計算すると実験時のラドン濃度 101 Bg/m³ に対し 13.7 counts/分となり実測値 14 count/分と極めて良く一致することがわかった。この場合の総合感度は 0.013 countmin⁻¹/Bqm⁻³ であるが検出器及測定容器に前項のような改良を加えるとこの約 1.8 倍となり 0.022 countmin⁻¹/Bqm⁻³ の感度を得られることになる。一方ラドンチェンバー内のラドン濃度を例えば

175Bq/m³程度 (ICRP Publication 65にもとづく 3mSv/年の被曝量に相当するラドン濃度) とすると約 2.3countmin⁻¹となりこれを+20%の標準偏差で測定しようとする5分間の時定数を与えれば良いことになるがアナログ的には多少無理があるのでデジタル方式とし10分間ごとに設定値と照合するような方式の方が実用性があるように思われる。アナログ方式の時定数の限界は100秒位であり500Bqm⁻³以上のラドン濃度ならばアナログ方式でコントロールできるものと考えられる。測定装置の配置図をFig. 11にまたこの装置で測定された²¹⁸Poの減衰曲線をFig. 12に示す。

4. 今後の研究と結論

ラドンチェンバー内のラドン濃度のコントロールはチェンバ有効利用のためには避けて通れないテーマの一つである。コントロールには一定濃度にコントロールする方式と任意の時刻に任意の濃度が保てるような方式とがあるが、後者は技術的に難しく前者が当面の目標となる。コントロールを行う場合はラドンチェンバ内のラドン濃度を連続的に測定する必要がある。極言するとラドン濃度が正確にまた連続的に測定することができればラドンチェンバなど無くてもラドン濃度測定器の一応の校正は可能である。しかし、チェンバには選定された気象条件を連続的に与えることができる能力も必要で、これも種々の環境にモニターを設置する上で極めて重要な条件付与事項である。従ってチェンバ無しには一般的な用途に対するモニターの校正はできないが、個人的な考えではラドン濃度の安定性と濃度を保証するシステムも同様に重要であって少なくとも連続的にラドン濃度の測定ができる時定数の短い従って active 方式のラドンモニターを1台若くは2台をラドンチェンバ内に設置することが必要である。このために検出法としては技術的にラドンのみもしくは²¹⁸Poをターゲットにして濃度評価が行われる方式を探れば良く、それらをどのような方法で他の核種から分離し確認するかを考えさえすればこの目的に適合した方法が得られることになる。そのために電界捕集法を選び、取扱上の安全を考えて

passive 型の電界捕集型のラドンモニターをベースに一応の成果を得た。感度を上げるには捕集電圧を高くし捕集容器を大きくすれば良いが、取扱う人に対する安全性と回路の安全性から今回の大きさにとどめることも必要であろう。このため低ラドン濃度に対しては測定時間を長くせざるを得ず、アナログ方式の限界となり、今後はデジタル方式で考えねばならない。また ^{218}Po の半減期は約 3 分で、そのための制約が生ずるがチェンバの容積と投入し得るラドン量の安全上の制限からチェンバ内ラドン濃度の変化率を大きくすることは困難であるし、また無意味ではないかと考えられ、従って 3 分強の半減期による指示の遅れは問題にはならない。一方チェンバ内で行われる実験は多岐に亙る可能性があり、チェンバ内外を結ぶケーブルを考えねばならない。これを全く欠いていたことがこのチェンバの欠点の一つと思われたが、これについては一応解決できたかに思われる。ただ配線の技術的な部分は素人が行ったこともあって一応見通しが必要であろう。ラドンモニターはいまのところ感度を数十% 高くすることが可能であるがそれ以上は本質的に不可能である。従って時定数を長くすることで精度と感度を上げることになる。若し短い時定数が必要ならば、検出容器の容量を現在の 3 ~ 4 倍程度にすれば良い。この場合捕集電圧は 1000V 程度になるが、充分注意して装置を設計すれば危険性はないものと思われる。しかし今のところ絶縁性の良い適当なカバー容器が見当たらないようである。

この研究を終えるにあたり動燃人形峠の関係者の御協力を感謝する。

Table.1 人形峠における実験条件

	αガード (Bq/m ³)						流量 L	湿度計 mA	温度 °C	湿度 %RH	気圧 mmHg	絶対湿度 g/m ³
	A		B		C							
13:24	完全に密閉する						0.510	0.080	15.2	49.6	696	0.63
13:27	Rn封入開始						0.510	0.075				0.59
13:42	762 ± 82	65 ± 17	369 ± 55									
13:45	ブローにより気圧アップ											
13:46						0.565	0.190	15.1	52.0	763	1.51	
13:52	1400 ± 132	667 ± 77	916 ± 101			0.575	0.170	14.7	48.9	762	1.35	
14:02	1220 ± 124	1070 ± 106	1340 ± 130			0.575	0.170	14.7	50.7	763	1.35	
14:12	1200 ± 136	1310 ± 128	1470 ± 140			0.565	0.165	14.7	50.5	763	1.31	
14:22	1490 ± 147	1310 ± 138	1190 ± 137			0.565	0.165	14.7	51.0	764	1.35	
14:32	1250 ± 146	1180 ± 135	1270 ± 144			0.560	0.170	14.8	51.2	765	1.35	
14:42	1410 ± 156	1310 ± 151	1270 ± 150			0.565	0.170	14.8	51.2	765	1.35	
14:52	1230 ± 147	1350 ± 157	1320 ± 148			0.560	0.170	14.9	51.0	765	1.35	
14:56	RaA, RaC 10sec, 0.03K Baseline=330.5 width=499.5											
15:02	1280 ± 148	1300 ± 156	1160 ± 145			0.560	0.170	14.9	50.0	765	1.35	
15:12	1270 ± 149	1270 ± 161	1370 ± 153			0.560	0.170	14.9	51.0	765	1.35	
15:22	1230 ± 148	1510 ± 171	1230 ± 154			0.550	0.170	14.9	50.9	764	1.35	
15:32	RaA, RaC 40sec, 0.03K Baseline=330.5 width=499.5											
15:32	1270 ± 151	1380 ± 154	1260 ± 154			0.550	0.170	14.9	50.8	764	1.35	
15:42	1600 ± 168	1110 ± 150	1210 ± 153			0.555	0.170	14.9	51.2	764	1.35	
15:52	1260 ± 154	1390 ± 168	1170 ± 151			0.555	0.170	15.0	51.2	764	1.35	
16:02	1290 ± 164	1390 ± 169	1380 ± 168			0.555	0.170	15.0	51.2	764	1.35	
16:12	1400 ± 163	1300 ± 160	1370 ± 164			0.555	0.170	15.0	51.2	764	1.35	
16:22	1160 ± 157	1250 ± 168	1350 ± 166			0.555	0.170	15.0	51.1	764	1.35	
16:32	1340 ± 158	1200 ± 162	1290 ± 168			0.565	0.165	15.0	51.0	764	1.31	
16:42	1180 ± 158	1210 ± 152	1000 ± 147			0.570	0.165	15.0	51.1	764	1.31	
8:35	1170 ± 151	1130 ± 149	1140 ± 151			0.550	0.145	15.0	52.4	764	1.15	
8:45	1110 ± 149	1330 ± 159	1350 ± 162			0.570	0.145	15.0	52.3	764	1.15	
8:55	1060 ± 146	1130 ± 151	1250 ± 159			0.570	0.140	15.0	52.1	764	1.11	
9:05	1170 ± 151	1140 ± 145	1120 ± 145			0.570	0.140	14.9	52.1	764	1.11	
9:15	1120 ± 151	1180 ± 157	1150 ± 159			0.560	0.140	15.0	52.3	764	1.11	
9:25	1040 ± 141	1170 ± 155	1070 ± 145			0.570	0.140	15.0	52.3	764	1.11	
9:35	1290 ± 156	1200 ± 152	1220 ± 155			0.555	0.140	14.9	52.0	763	1.11	
9:45	1000 ± 139	968 ± 141	986 ± 141			0.570	0.140	14.9	51.9	763	1.11	
9:55	1190 ± 151	994 ± 143	936 ± 140			0.550	0.140	14.9	51.9	763	1.11	
10:03	濃度を下げはじめ。											
10:05	1270 ± 160	1130 ± 151	180 ± 152			0.490	0.020	14.7	48.0	692	0.16	
10:15	971 ± 136	890 ± 141	953 ± 138			0.480	0.035	15.0	48.4	693	0.28	
10:25	894 ± 146	752 ± 134	734 ± 128			0.485	0.050	15.4	50.7	693	0.40	
10:35	625 ± 123	622 ± 117	769 ± 130			0.490	0.050	15.4	49.6	692	0.40	
10:45	593 ± 114	699 ± 124	580 ± 113			0.490	0.050	15.2	50.4	692	0.40	
10:55	379 ± 102	499 ± 108	385 ± 101			0.490	0.050	15.1	50.3	692	0.40	
11:05	462 ± 102	280 ± 83	395 ± 95			0.490	0.050	15.0	50.0	692	0.40	
11:15	190 ± 79	263 ± 82	344 ± 91			0.490	0.050	14.5	50.1	692	0.40	
11:25	221 ± 76	201 ± 74	281 ± 81			0.490	0.050	14.9	50.0	691	0.40	
11:35	201 ± 71	233 ± 76	254 ± 75			0.490	0.060	14.9	50.2	691	0.48	
11:45	83 ± 59	147 ± 63	125 ± 63			0.490	0.060	14.9	50.2	691	0.48	
11:55	141 ± 59	135 ± 59	139 ± 60			0.480	0.065	14.9	49.9	691	0.51	
12:05	130 ± 55	126 ± 55	155 ± 58			0.485	0.065	14.9	50.0	691	0.51	

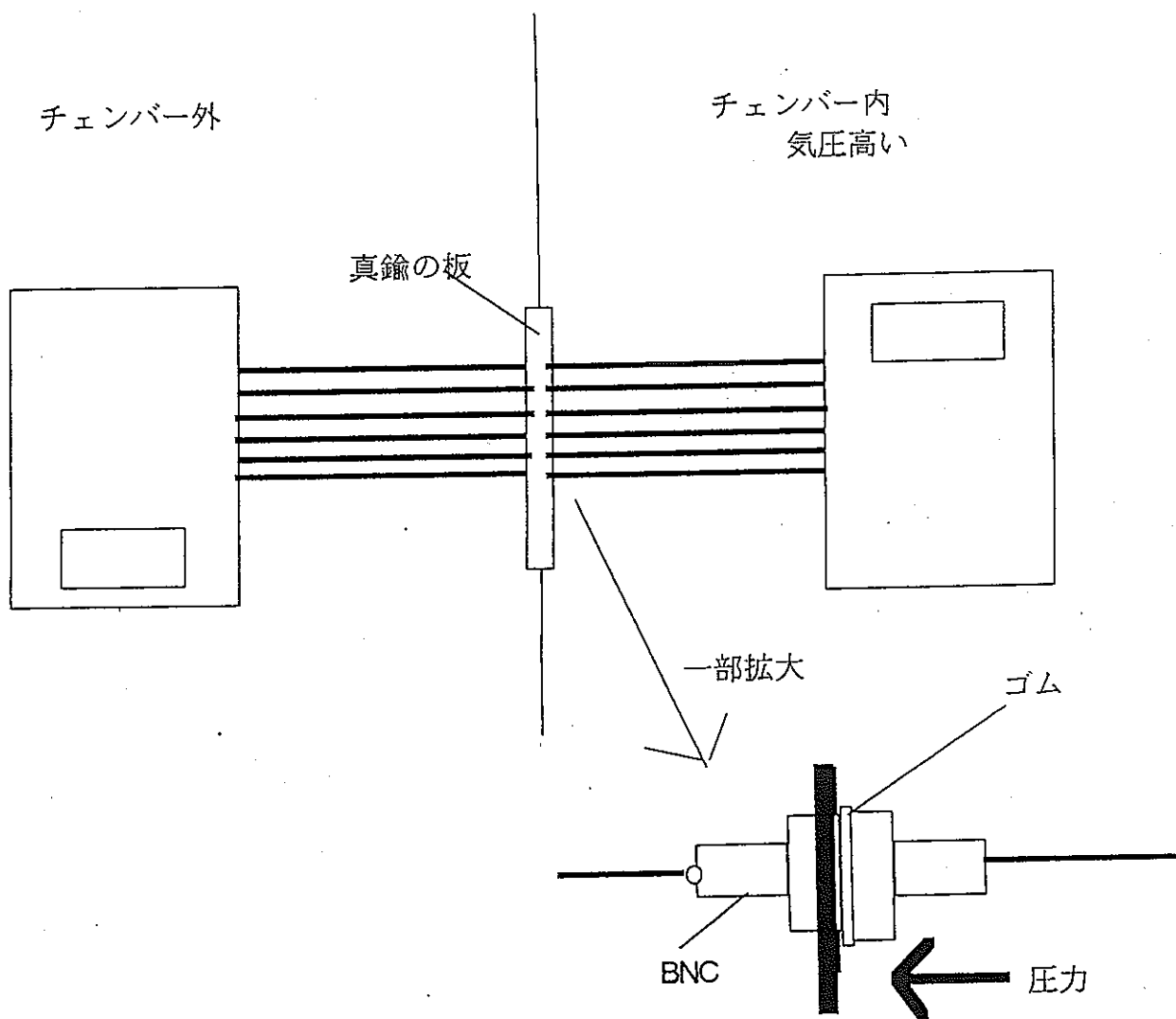
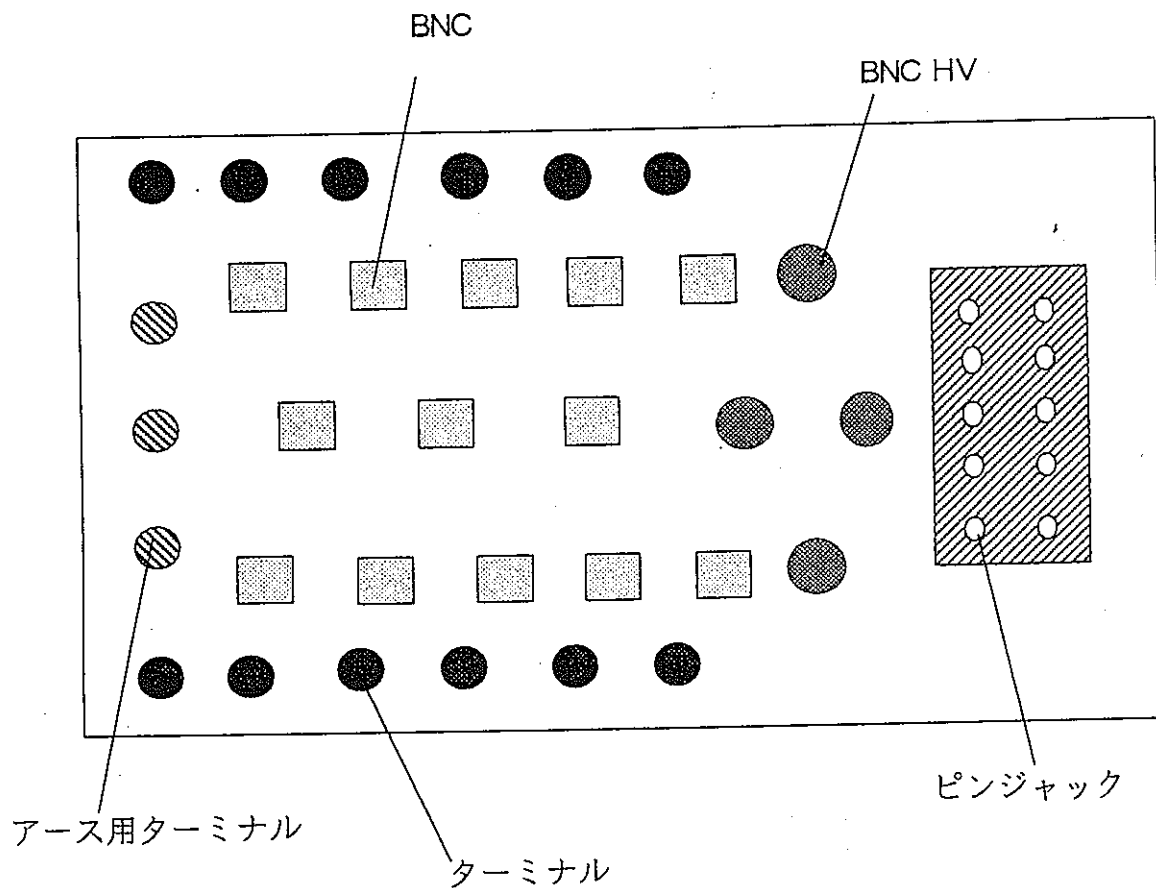


Fig.1 端子板配置図

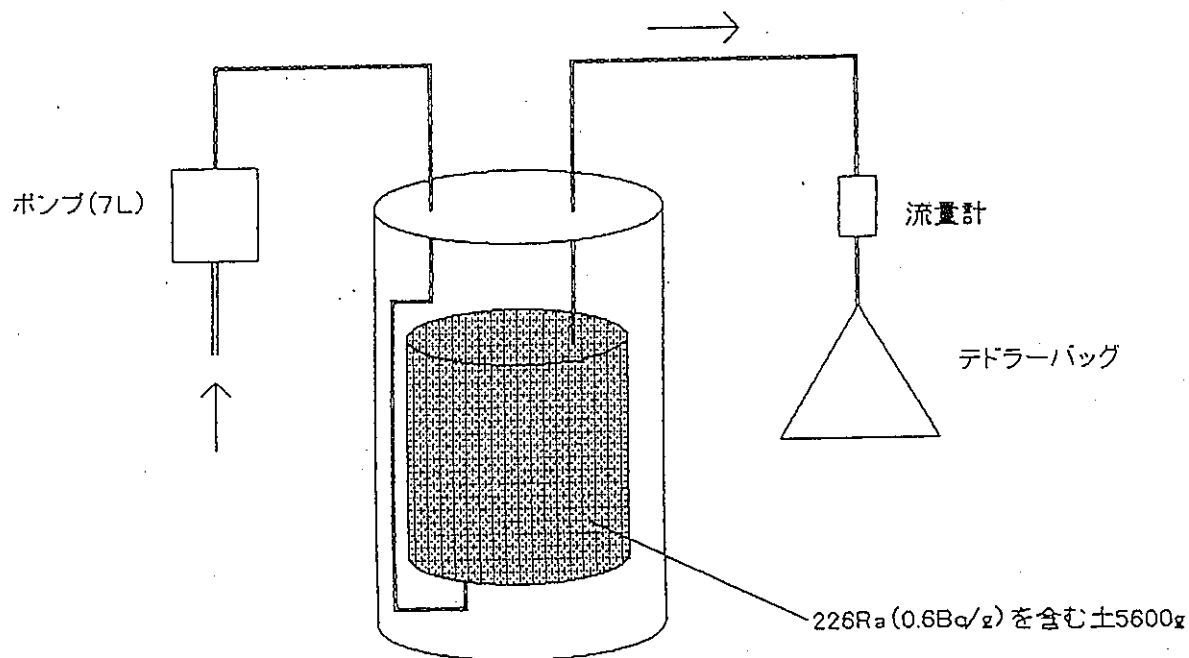
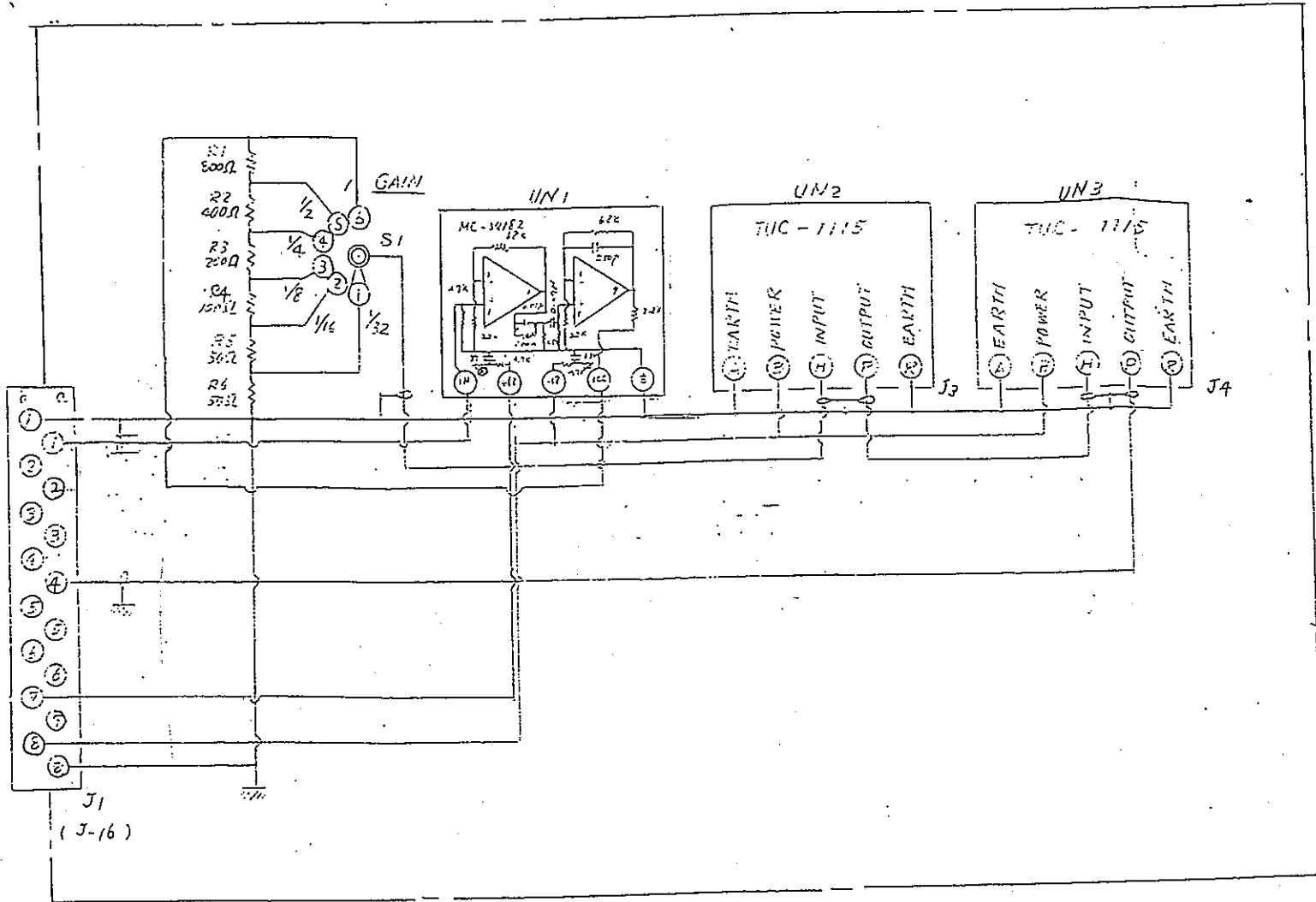


Fig.2 ラドン発生率試験配置図

直線增幅器 (PVA-1105)



23

Fig.3 比例增幅器

波高分析器

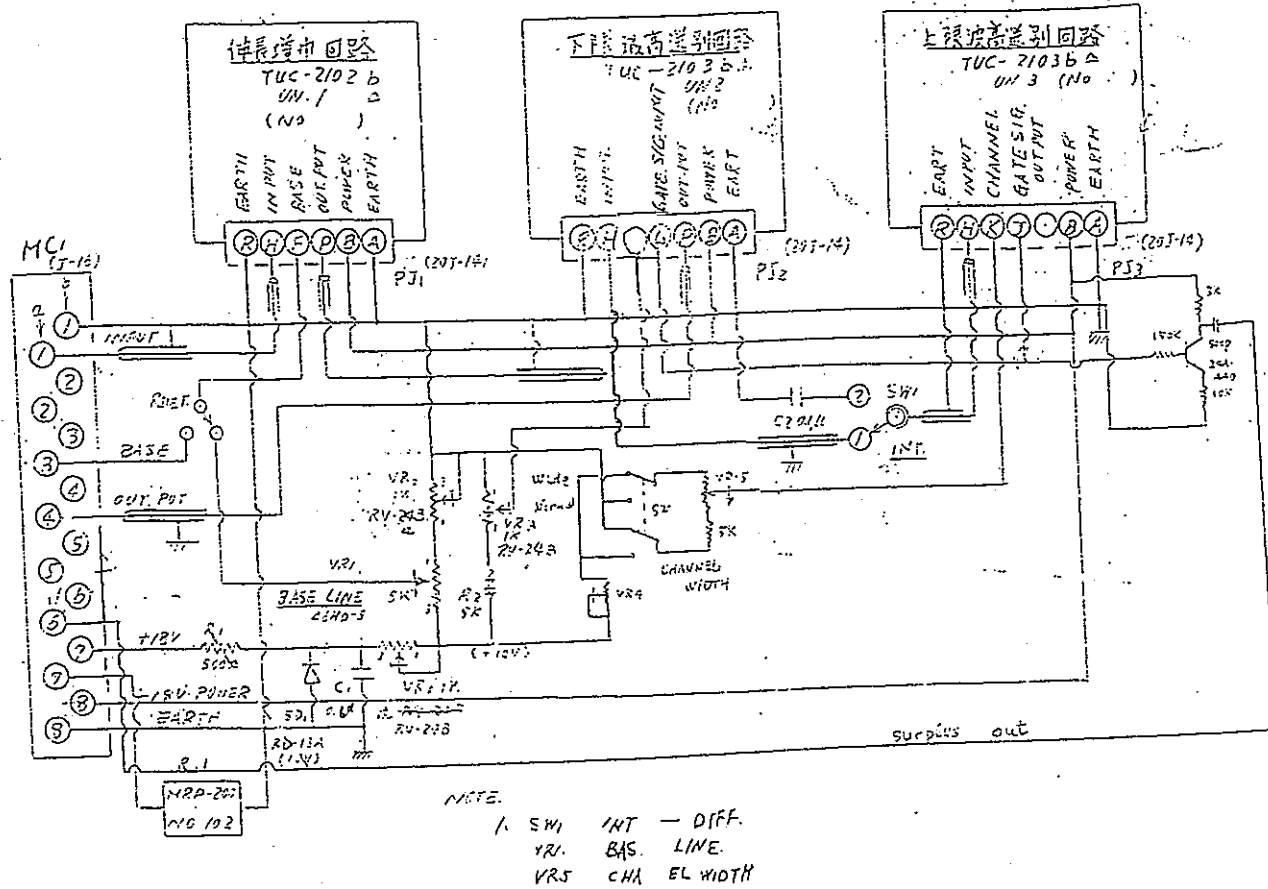
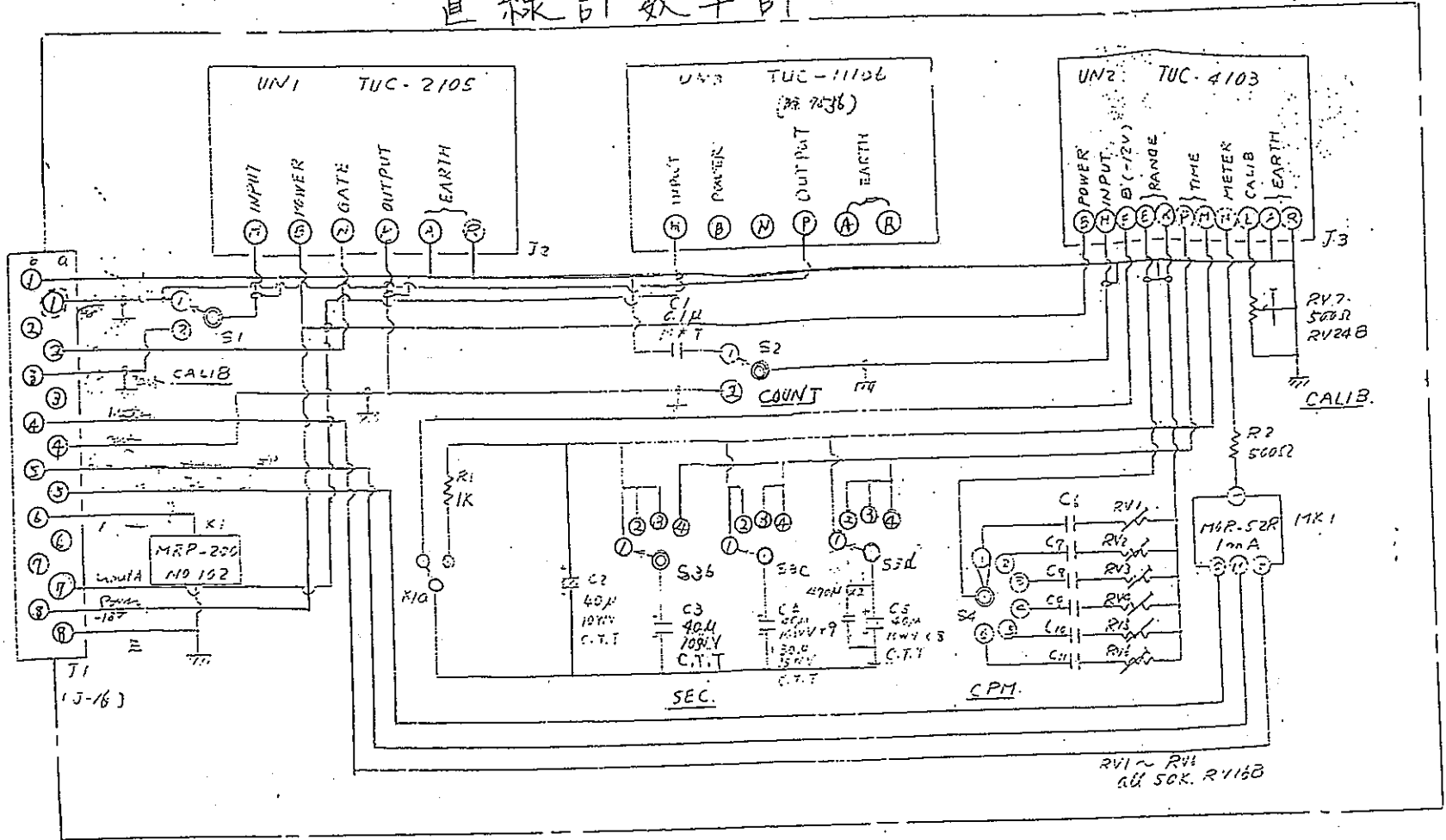


Fig 4-1 單一波高選別器

直線計數率計



	RANGE	CAP	TYPE	
C5	0.3K	0.27μ ± 0.05μ	MSAY-1272 + MSAY-1272	±5%
C7	1K	0.22μ	MSAY-1224	
C3	3K	0.027μ ± 0.007μ	MSAY-1273 + MSAY-1273	
C9	10K	0.022μ	MSAY-1233	
C10	0.03K	0.004μ		
C11	0.1K	0.22μ		

Fig 4-2 計數率計

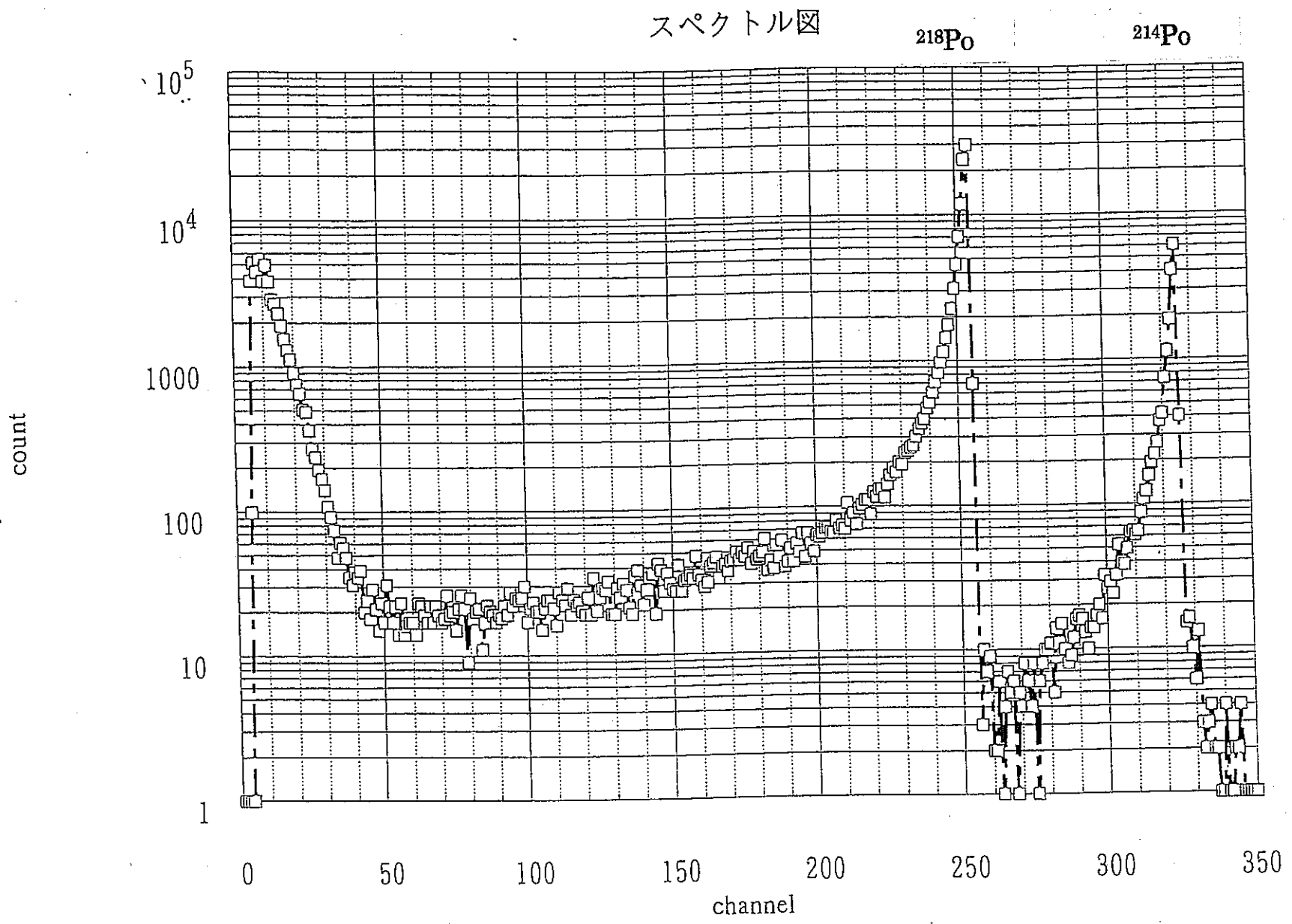


Fig.5 α スペクトルの測定値

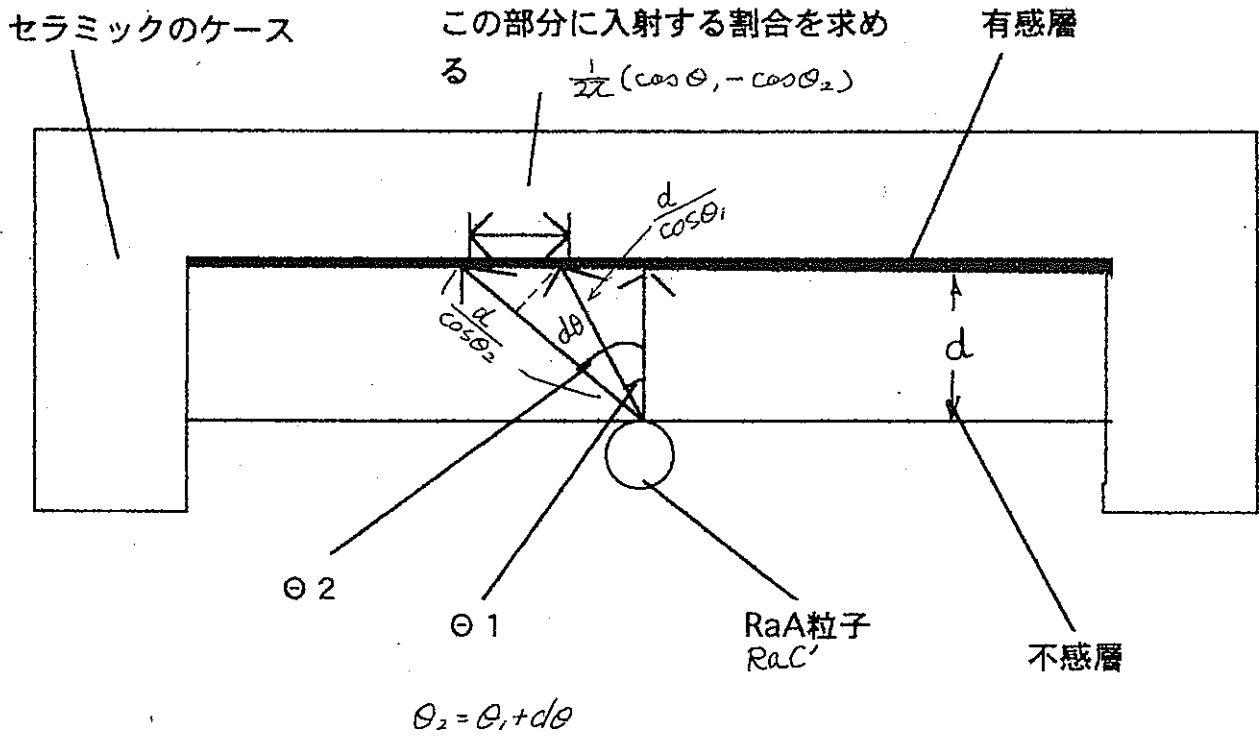


Fig.6 SPD の α スペクトルの計算の概念図

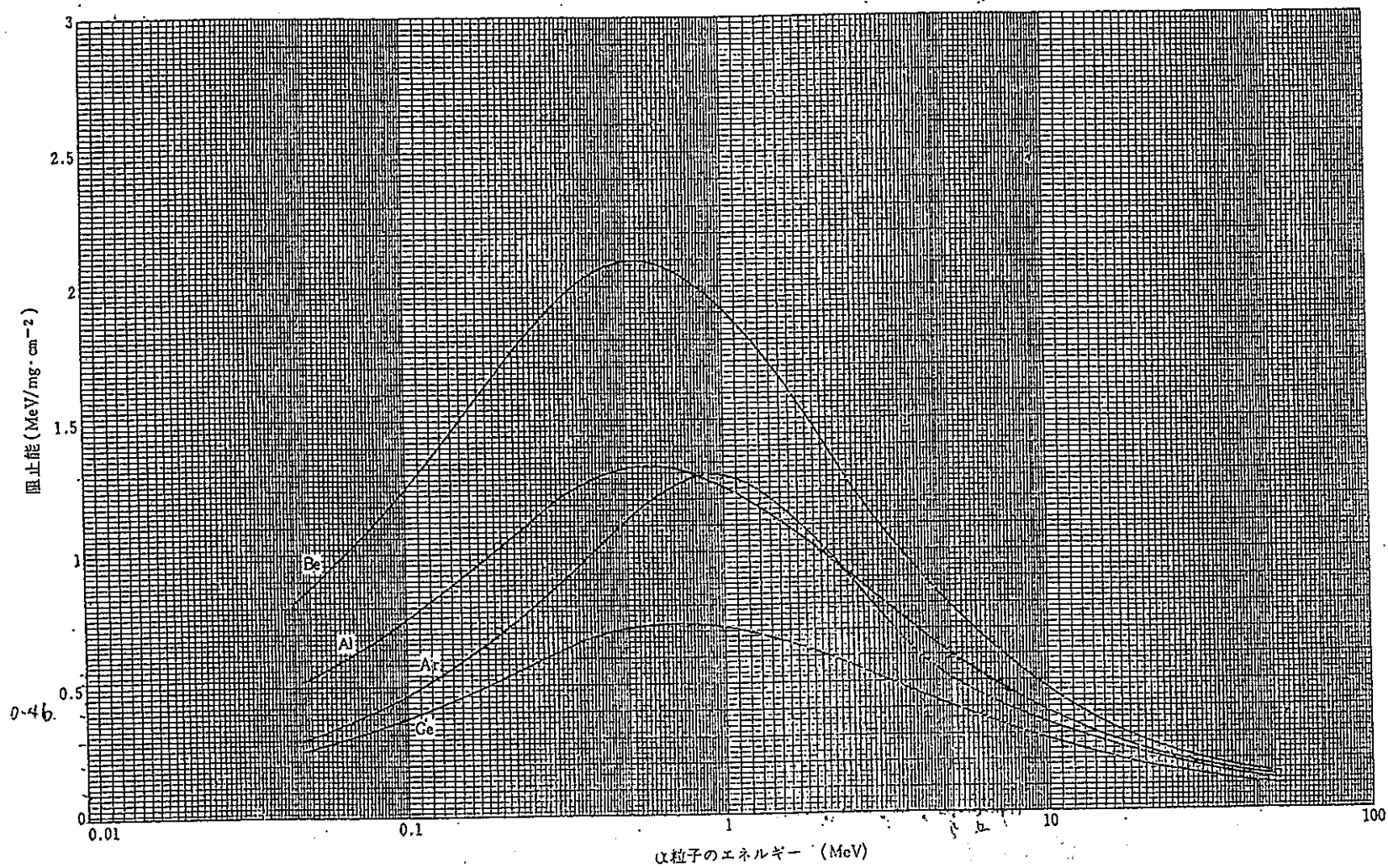


Fig.7 種々の物質のα粒子に対する阻止能

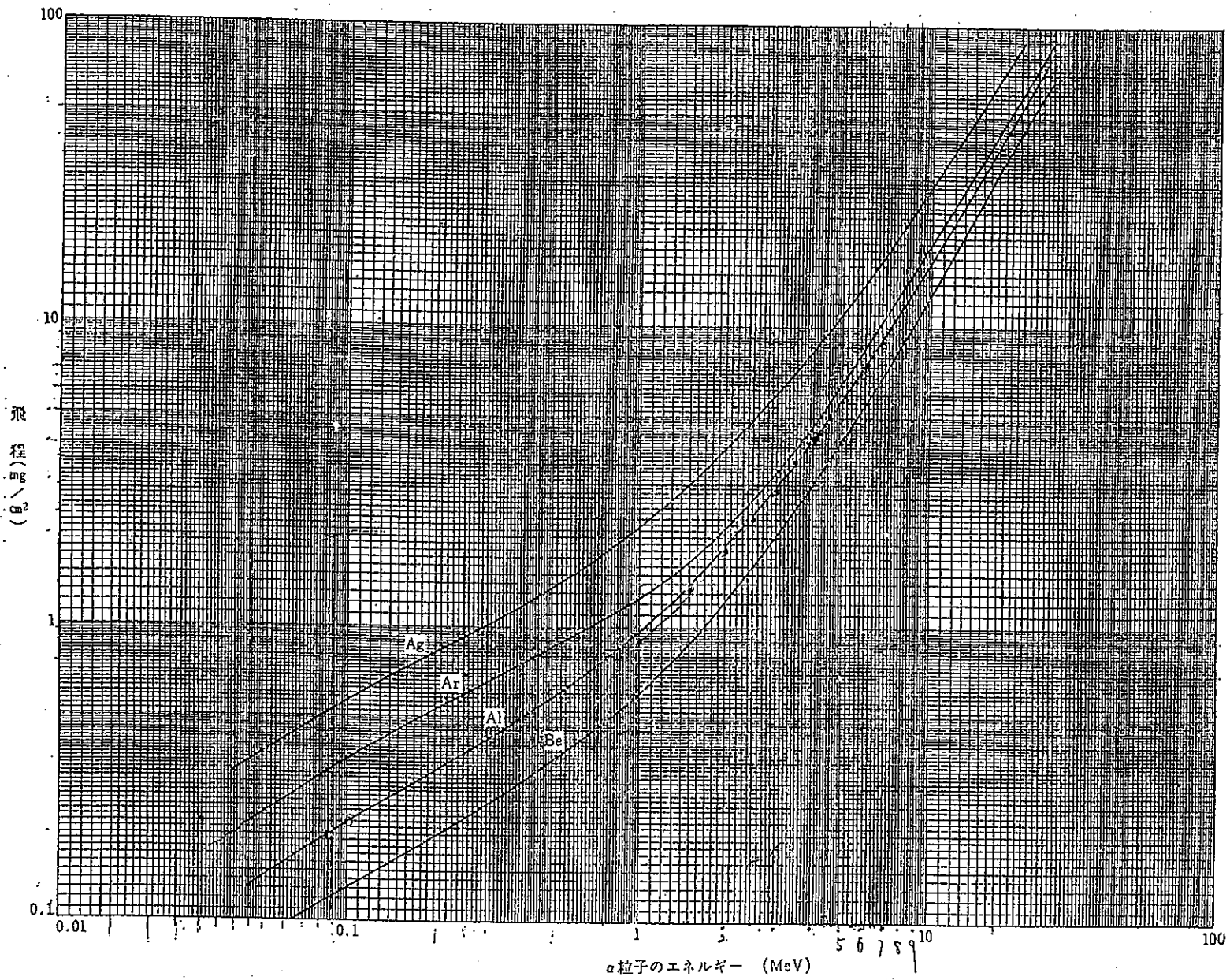
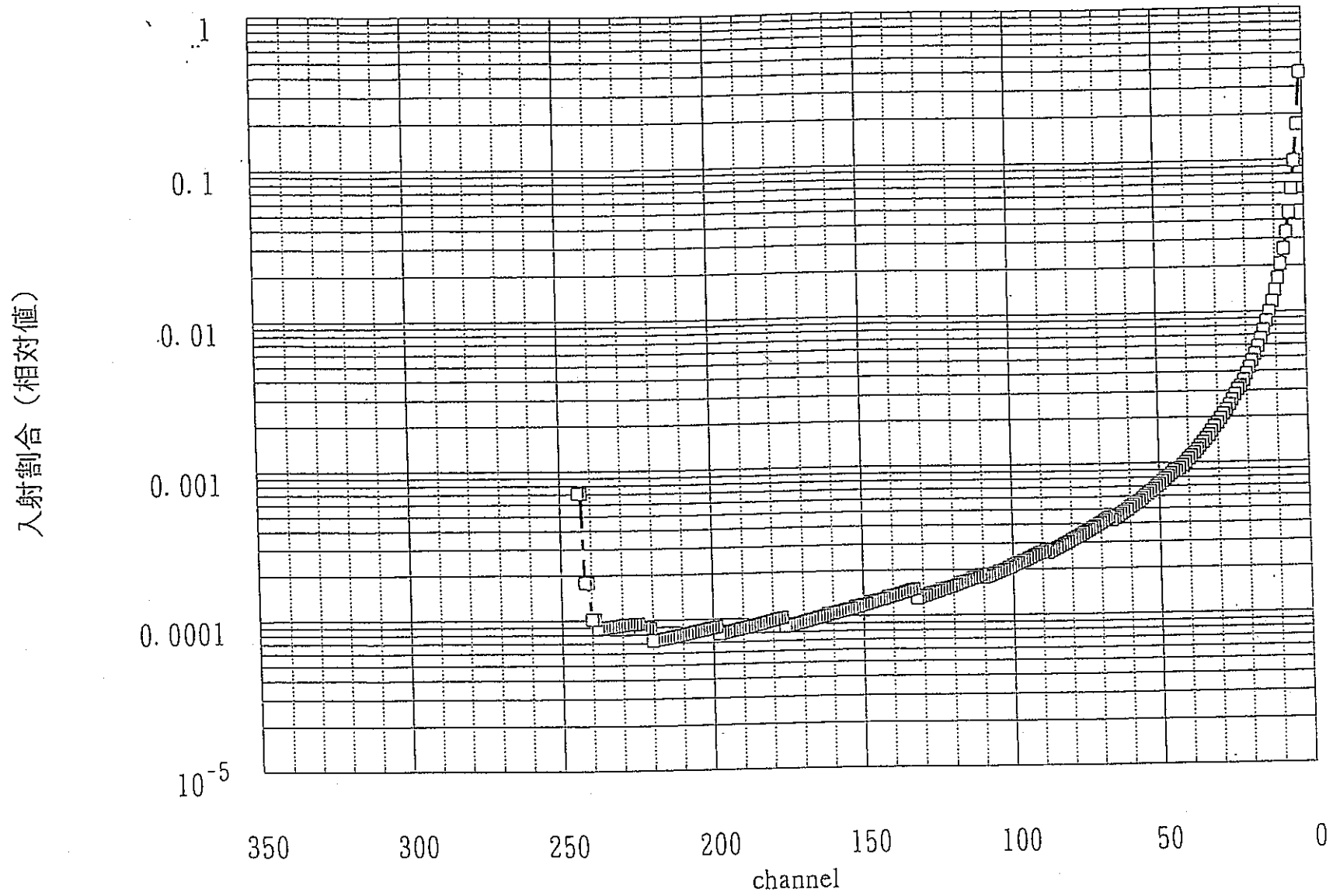


Fig.8 種々の物質中の α 粒子の飛程対エネルギーの関係 (点線は G.W.Gobeli の実測による)

RaAのスペクトル図

Fig.9 ^{218}Po の α スペクトルの計算値

RaC' のスペクトル図

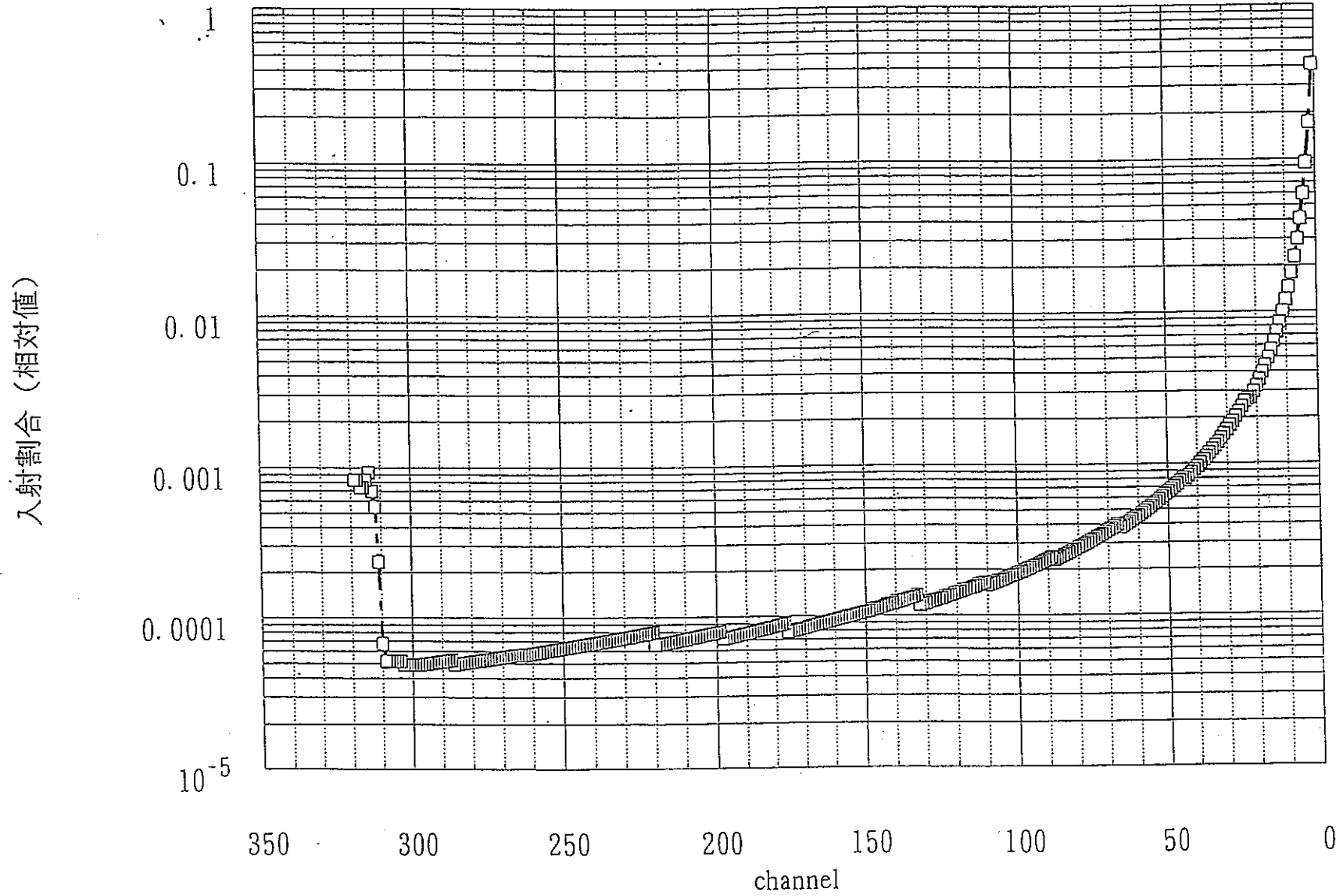
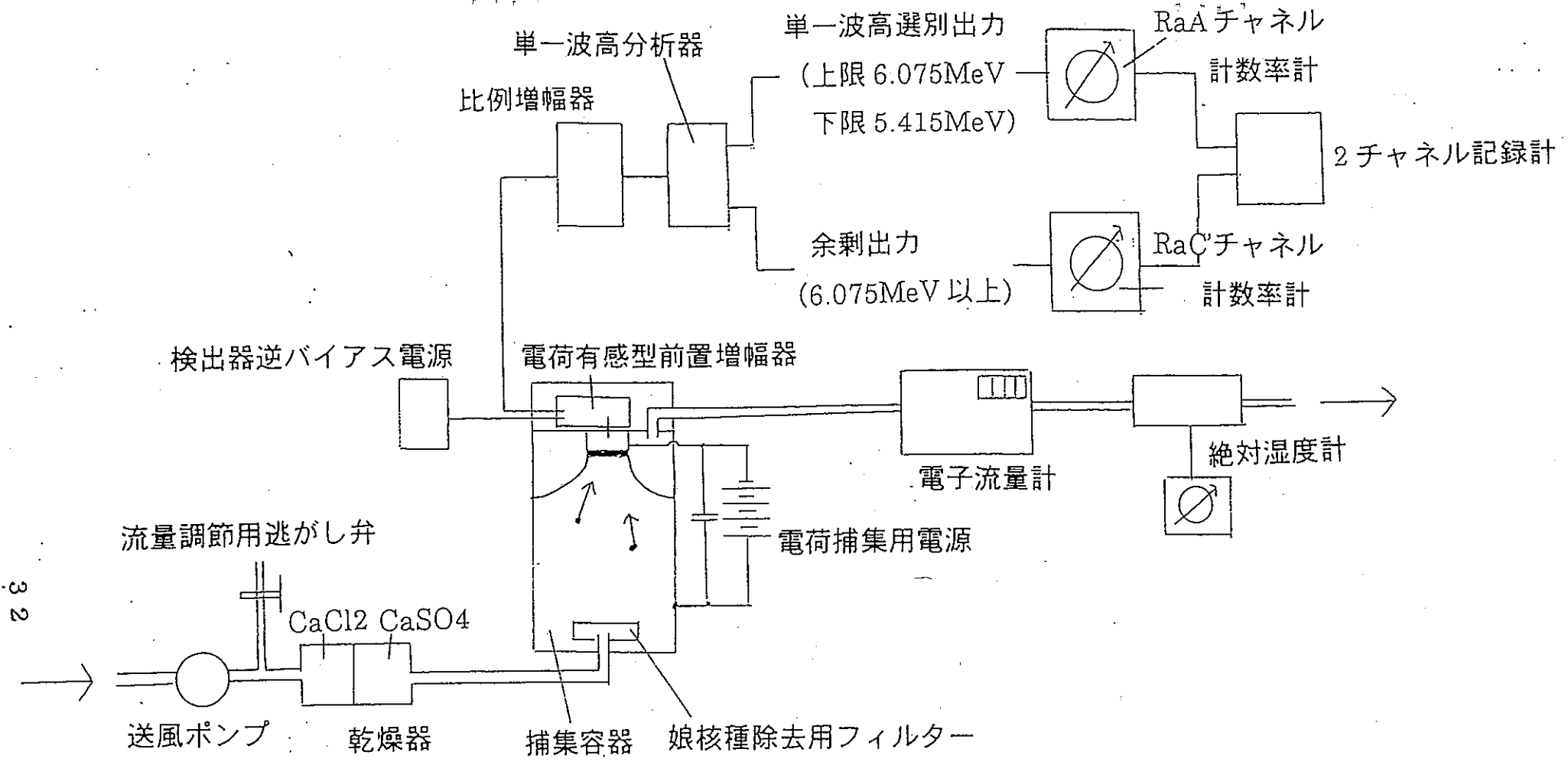


Fig.10 ^{214}Po の α スペクトルの計算値



32

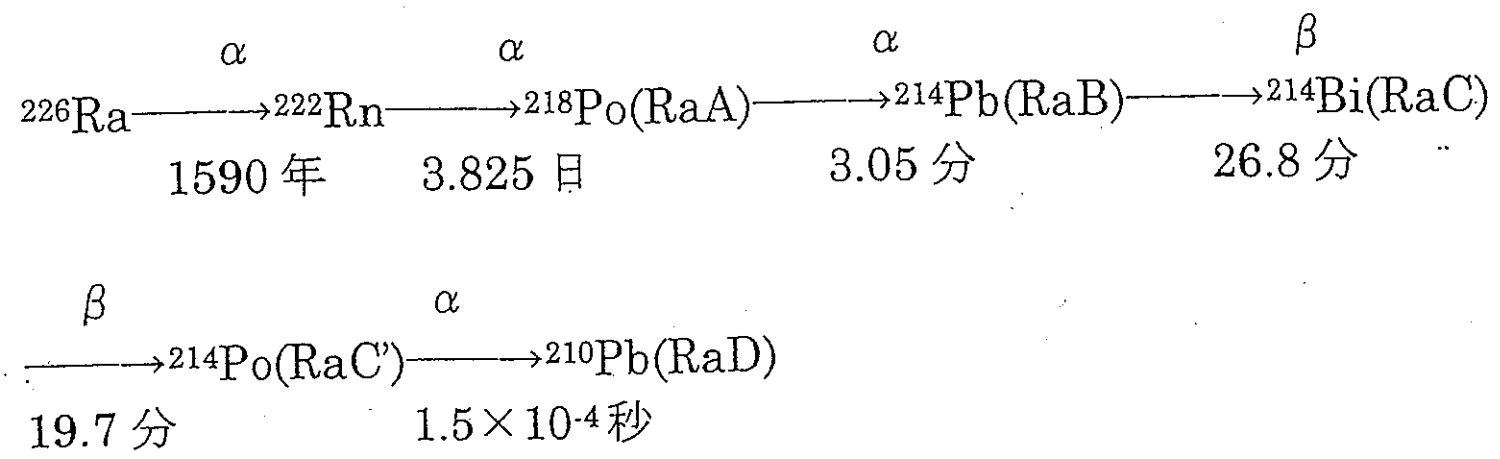


Fig.11 測定装置配置図

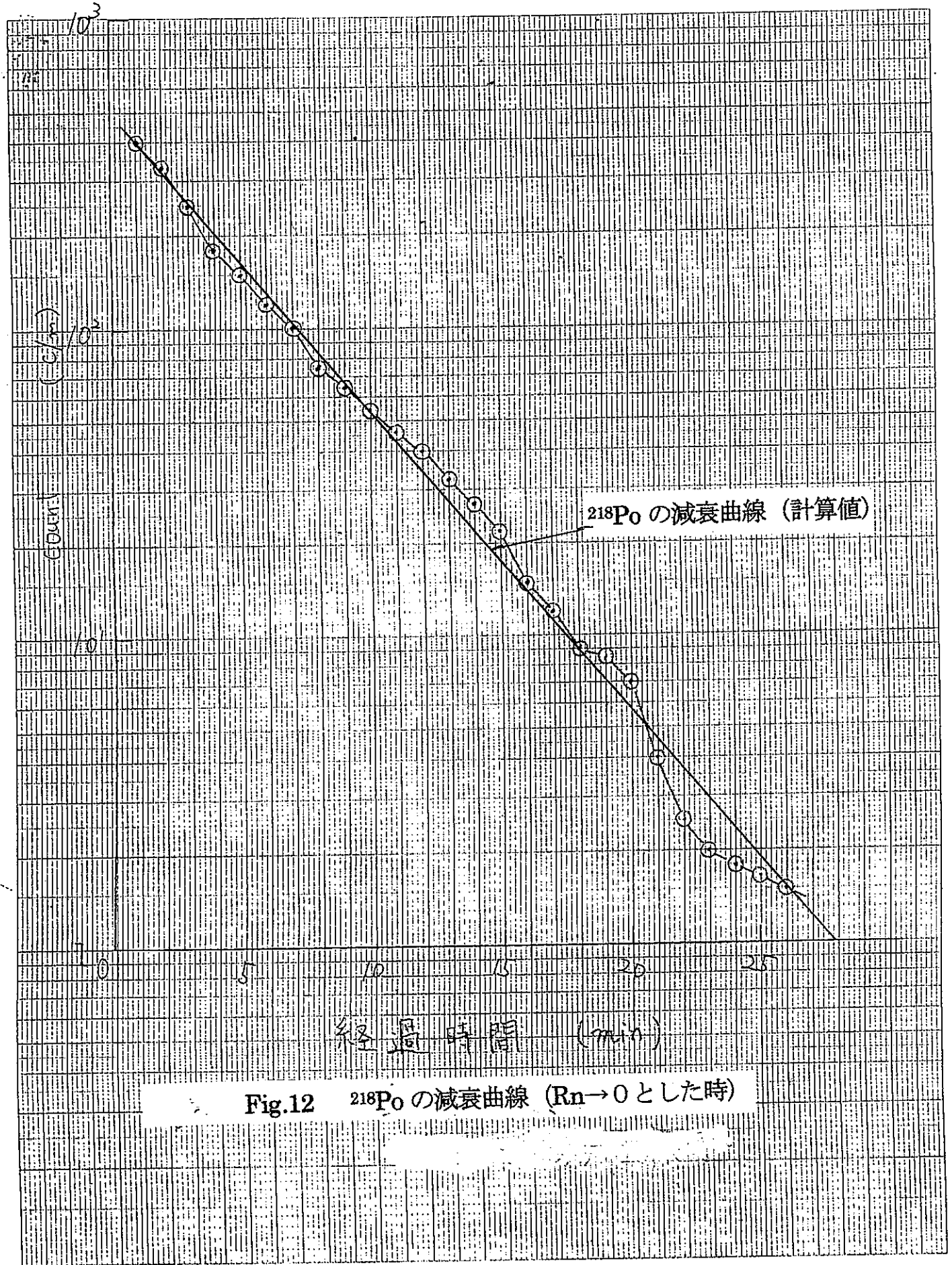


Fig.12 218Po の減衰曲線 (Rn→0とした時)