

JAERI-M
85-061

核種移動速度測定装置の開発(I)
通気層土壌試料中放射性核種濃度分布の非破壊的測定

1985年6月

小川 弘道・大貫 敏彦・山本 忠利・和達 嘉樹

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 H 青工業株式会社

核種移動速度測定装置の開発(I)
通気層土壌試料中放射性核種濃度分布の非破壊的測定

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
小川 弘道・大貫 敏彦・山本 忠利・和達 嘉樹

(1985年5月21日受理)

土壌中における放射性核種の移動速度を測定することを目的とし、通気層土壌試料中における放射性核種の濃度分布を非破壊的に測定するシステムを開発した。

本システムでは、土壌カラム外側において γ 線計数率分布を測定し、理論的に計算した検出器の測定効率を係数行列とする連立方程式を作成する。通気層土壌試料中における放射性核種の濃度分布は、連立方程式を解くことにより算出する。本システムに関して機能試験を行なった結果、通気層土壌試料中における放射性核種の一次元濃度分布を測定できることを確認した。

本報告は、測定システムの概要および機能試験の結果についてまとめたものである。

Development of Radionuclide Migration Monitor (I)

Nondestructive Measurement of Radionuclide Concentration
Distribution in Aerated Soil Sample

Hiromichi OGAWA, Toshihiko OHNUKI, Tadatoshi YAMAMOTO
and Yoshiki WADACHI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 21, 1985)

In order to measure the radionuclide migration rate in a soil layer, a nondestructive measuring system has been developed for the measurement of the radionuclide concentration distribution in an aerated soil sample .

The counting rate distribution of γ -ray is measured at the outside of the soil column, and the simultaneous equations whose coefficient matrix consists of theoretically calculated measuring efficiencies of detector are obtained in this system. The concentration distribution in the aerated soil sample is determined by solving the simultaneous equations. From the results of function tests, it is found that the one-dimensional radionuclide concentration distribution in the aerated soil sample can be measured by this system.

This report describes the outline of the measuring system and the results of function tests.

Keywords: Radionuclide Migration, Concentration Distribution,
Nondestructive Measurement, Aerated Soil Sample, ^{60}Co ,
 ^{85}Sr , ^{137}Cs , Performance, Environment

目 次

1. 緒 言	1
2. 測定原理および測定効率の計算法	1
2.1 測定原理	1
2.2 測定効率の計算法	2
3. システムの概要	3
3.1 全体構成	3
3.2 検出部	3
3.3 計数部	4
3.4 制御演算部	4
3.5 ソフトウェア	4
4. 機能試験の結果および考察	6
4.1 位置分解能の計算	6
4.2 濃度分布の測定	6
4.3 二次元測定についての検討	8
5. 結 論	9
謝 辞	10
参考文献	10

Contents

1.	Introduction	1
2.	Principle of measurement and calculation method of measuring efficiency	1
2.1	Principle of measurement	1
2.2	Calculation method of measuring efficiency	2
3.	Outline of system	3
3.1	Entire formation	3
3.2	Detector	3
3.3	Counter	4
3.4	Controller and calculator	4
3.5	Software	4
4.	Results of function tests and discussions	6
4.1	Calculation of resolving power	6
4.2	Measurement of concentration distribution	6
4.3	Discussion on two-dimensional measurement	8
5.	Conclusion	9
	Acknowledgement	10
	References	10

Table list

- Table 1 Peak efficiency and energy resolution of detector (A)
- Table 2 Peak efficiency and energy resolution of detector (B)
- Table 3 Measuring efficiency of 1"φx1"L detector
- Table 4 Measuring efficiency of 2"φx2"L detector
- Table 5 Measuring efficiency of 1"φx1"L detector to
radial direction
- Table 6 Dependence of radial direction concentration distribution
on counting rate

Fig. list

- Fig.1 Principle of measurement of concentration distribution
- Fig.2 Entire formation of system
- Fig.3 Structure of detector
- Fig.4 Photograph of detector
- Fig.5 Constitution of counter
- Fig.6 Photograph of counter, controller and calculator
- Fig.7 Structure of lead collimator
- Fig.8 Flow chart of data sampling program NMM1
- Fig.9 Flow chart of analyzing program NMM2
- Fig.10 Sampling points for calculation of measuring efficiency
- Fig.11 Inflow of radioactive aqueous solution
- Fig.12 Measuring appearances of concentration distribution
- Fig.13 Concentration distribution of ^{60}Co at vertical direction
(uniform inflow)
- Fig.14 Concentration distribution of ^{85}Sr at vertical direction
(uniform inflow)
- Fig.15 Concentration distribution of ^{137}Cs at vertical direction
(uniform inflow)
- Fig.16 Concentration distribution of ^{60}Co at vertical direction
(ununiform inflow)
- Fig.17 Concentration distribution of ^{85}Sr at vertical direction
(ununiform inflow)
- Fig.18 Concentration distribution of ^{137}Cs at vertical direction
(ununiform inflow)

1. 緒 言

自然状態の地層を用いて施設内で放射性核種移動試験を実施する環境シミュレーション試験は、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分に関する安全性評価を目的としており、そのための試験施設が昭和57年度に完成した。さらに、昭和58年度前半には内装機器の整備が完了し、同年度後半より日本原子力研究所敷地内の海岸砂層を対象として、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr (^{90}Sr の代用)および ^{137}Cs の放射性核種について移動試験を実施している。環境シミュレーション試験における通気層試験では、オープンカット法を用いて自然状態のまま土壌カラム内に採取した通気層土壌試料(直径30 cm, 長さ120 cm)に対して、放射性核種移動試験を行なう。

一般に放射性核種移動試験においては、放射性水溶液を流下した後に土壌層を解体し、所定量の土壌を採取して放射能測定を行なうことにより、放射性核種の吸着濃度分布を求めている^{1), 2)}。それゆえ、放射性核種の土壌への吸着濃度分布についてその時間変化を知るためには、複数の同一試料が必要である³⁾。しかし、環境シミュレーション試験のように自然状態の地層に対して実施する試験では、複数の同一試料を準備することが困難である。したがって、吸着濃度分布の時間変化を把握するためには、土壌中に分布する放射性核種に対する非破壊的な濃度分布測定法の開発が必要である。

筆者らは、これまでに小規模通気層土壌試料に対して、非破壊的な放射性核種濃度分布測定について検討を行なってきた^{4), 5)}。環境シミュレーション試験では、それらの結果に基づいて開発した非破壊的な濃度分布測定システムにより、比較的大規模な通気層土壌試料に対して放射性核種の濃度分布を測定し、放射性核種の通気層中移動速度を求める。

本報告では、同システムの測定原理および概要について述べ、実際に、直径30 cm, 長さ120 cmの通気層土壌試料に対して実施した鉛直一次元濃度分布測定の結果について報告する。

2. 測定原理および測定効率の計算法

2.1 測定原理

N個の γ 線源が存在する場合、任意の位置に設置した検出器で測定される γ 線入射率は単位面積当たり、

$$F = \sum E(j) D(j) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 F は単位面積当たりの γ 線入射率($1/\text{cm}^2/\text{s}$)、 $E(j)$ は j 番目の γ 線源に対する測定効率($1/\text{cm}^2$)、 $D(j)$ は j 番目の γ 線源における単位時間当たりの γ

1. 緒 言

自然状態の地層を用いて施設内で放射性核種移動試験を実施する環境シミュレーション試験は、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分に関する安全性評価を目的としており、そのための試験施設が昭和57年度に完成した。さらに、昭和58年度前半には内装機器の整備が完了し、同年度後半より日本原子力研究所敷地内の海岸砂層を対象として、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr (^{90}Sr の代用) および ^{137}Cs の放射性核種について移動試験を実施している。環境シミュレーション試験における通気層試験では、オープンカット法を用いて自然状態のまま土壌カラム内に採取した通気層土壌試料(直径30 cm, 長さ120 cm)に対して、放射性核種移動試験を行なう。

一般に放射性核種移動試験においては、放射性水溶液を流下した後に土壌層を解体し、所定量の土壌を採取して放射能測定を行なうことにより、放射性核種の吸着濃度分布を求めている^{1), 2)}。それゆえ、放射性核種の土壌への吸着濃度分布についてその時間変化を知るためには、複数の同一試料が必要である³⁾。しかし、環境シミュレーション試験のように自然状態の地層に対して実施する試験では、複数の同一試料を準備することが困難である。したがって、吸着濃度分布の時間変化を把握するためには、土壌中に分布する放射性核種に対する非破壊的な濃度分布測定法の開発が必要である。

筆者らは、これまでに小規模通気層土壌試料に対して、非破壊的な放射性核種濃度分布測定について検討を行なってきた^{4), 5)}。環境シミュレーション試験では、それらの結果に基づいて開発した非破壊的な濃度分布測定システムにより、比較的大規模な通気層土壌試料に対して放射性核種の濃度分布を測定し、放射性核種の通気層中移動速度を求める。

本報告では、同システムの測定原理および概要について述べ、実際に、直径30 cm, 長さ120 cmの通気層土壌試料に対して実施した鉛直一次元濃度分布測定の結果について報告する。

2. 測定原理および測定効率の計算法

2.1 測定原理

N個の r 線源が存在する場合、任意の位置に設置した検出器で測定される r 線入射率は単位面積当たり、

$$F = \sum E(j) D(j) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 F は単位面積当たりの r 線入射率($1/\text{cm}^2/\text{s}$)、 $E(j)$ は j 番目の r 線源に対する測定効率($1/\text{cm}^2$)、 $D(j)$ は j 番目の r 線源における単位時間当たりの r

線放出数 (Bq) ($j = 1, 2, 3, \dots, N$) である。

したがって、図1に示したように、測定対象とする土壌層を鉛直方向にN個のブロックに分割し、各々を独立した γ 線源と考えれば、Nヶ所の異なった位置で測定される γ 線入射率は、各ブロック中の放射性核種濃度を $d(j)$ (Bq/g)として、次のN元連立一次方程式により表わされる。

$$\begin{aligned} F(1) &= \sum E(1, j) m(j) d(j) \\ F(2) &= \sum E(2, j) m(j) d(j) \\ &\vdots \\ F(i) &= \sum E(i, j) m(j) d(j) \\ &\vdots \\ F(N) &= \sum E(N, j) m(j) d(j) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $F(i)$ は*i*番目の検出位置における単位面積当たりの γ 線入射率 ($1/\text{cm}^2/\text{s}$)、 $E(i, j)$ は*j*番目のブロックに対する*i*番目の検出位置の測定効率 ($1/\text{cm}^2$)、 $m(j)$ は*j*番目のブロックの重量 (g) ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) である。

このようなN元連立一次方程式は、測定効率 $E(i, j)$ を既知とすると、特殊な場合を除いて容易に解を求めることが可能であり、 γ 線入射率の分布 $F(i)$ から各ブロック中の放射性核種濃度 $d(j)$ を求めることができる。

2.2 測定効率の計算法

本システムでは、 γ 線検出器として、取り扱いの容易さ、ピーク効率の高さ、エネルギー分解能等を考慮し、NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた。シンチレーション検出器の場合、点線源に対して通常用いられる効率 Eff_i は、

$$Eff_i = P S \exp(-\sum \mu r) / (4\pi R^2) \quad (3)$$

である。ここで、 P はシンチレータのピーク効率、 S はシンチレータの断面積 (cm^2)、 R は点線源との距離 (cm)、 μ は検出器と点線源の間に存在する物質の線吸収係数 ($1/\text{cm}$)、 r はその物質に対する減衰距離 (cm) であり、 \sum は全要素について加算することを示している。

γ 線入射率に関する連立方程式(2)を解く際に用いる測定効率 $E(i, j)$ は、上式(3)を有限の体積に対して適用し、 P 、 S の項を除いてブロックについて平均した次式で計算できる。

$$E(i, j) = \int_{V(j)} \exp(-\sum \mu r(i)) / (4\pi R(i)^2) dV / V(j) \quad (4)$$

ここで、 $R(i)$ は*i*番目の検出位置とブロックとの距離 (cm)、 $r(i)$ は*i*番目の検出位置に対する減衰距離 (cm)、 $V(j)$ はブロックの体積 (cm^3) である。なお、測定効率計算

式(4)は解析的に解くことは非常に困難であるが、対象とするブロックを微小な部分に分割して、その平均を計算する数値積分法により計算することが可能であり、本システムにおいては、パーソナルコンピュータによる数値積分により計算した。

3. システムの概要

3.1 全体構成

本システムは、図2に示したように検出部、計数部および制御演算部から構成されており、制御演算用のソフトウェアにより作動する。

検出部は、 γ 線検出器およびそれに付属したコリメータ、駆動機等より成る。その構造を図3に、外観写真を図4に示す。計数部は、高圧電源、低圧電源、リニアアンプ、およびマルチチャンネルアナライザーを構成するADコンバータ、マルチプレクサ、プロセスメモリ等より成る。その概念図を図5、外観写真を図6に示す。 γ 線検出器より送られる信号を受けて γ 線測定を行ない、マルチチャンネルアナライザーにより γ 線スペクトルを得る。制御演算部は、図6に示したパーソナルコンピュータ(16 bit)であり、駆動機の制御、マルチチャンネルアナライザーの制御、 γ 線スペクトルの解析、測定効率の計算、濃度分布の算出および表示等を行なう。なお、検出部は、2基の通気層を並行して測定するため、A、B 2式が装備されている。

3.2 検出部

① γ 線検出器

γ 線測定用のNaI(Tl)シンチレーション検出器は、検出部1式当たり横方向に3列、縦方向に4段、合計12個が装備され、コリメータの内部に設置されている。上側3段の合計9個の検出器は、上下方向の位置分解能を重視して1" ϕ \times 1" L、最下段の3個の検出器は、位置分解能よりもピーク効率の高さを重視して2" ϕ \times 2" Lの円柱型シンチレータとした。なお、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs の放出する γ 線に対する各検出器のエネルギー分解能およびピーク効率を検出部A、Bについて、それぞれ表1および表2に示す。

② コリメータ

本システムでは、位置の分解能を上げるため、鉛製のコリメータを使用した。1式の検出部に設置されているコリメータは、横方向の3個の検出器に対して各々1基ずつ、合計4基であり、最上段のコリメータの開口部中心と最下段のコリメータの開口部中心の距離は60.0 cmである。上3段に設置された1" ϕ \times 1" Lの検出器用コリメータは、図7-Aに示したように、外形が14.9 cm H \times 28.1 cm W \times 20.3 cm L、開口部が1.0 cm H \times 2.5 cm W \times 8.35 cm Lであり、横方向の3個の開口部は中心間の間隔がそれぞれ6.0 cmである。最下段に設

式(4)は解析的に解くことは非常に困難であるが、対象とするブロックを微小な部分に分割して、その平均を計算する数値積分法により計算することが可能であり、本システムにおいては、パーソナルコンピュータによる数値積分により計算した。

3. システムの概要

3.1 全体構成

本システムは、図2に示したように検出部、計数部および制御演算部から構成されており、制御演算用のソフトウェアにより作動する。

検出部は、 γ 線検出器およびそれに付属したコリメータ、駆動機等より成る。その構造を図3に、外観写真を図4に示す。計数部は、高圧電源、低圧電源、リニアアンプ、およびマルチチャンネルアナライザーを構成するADコンバータ、マルチプレクサ、プロセスメモリ等より成る。その概念図を図5、外観写真を図6に示す。 γ 線検出器より送られる信号を受けて γ 線測定を行ない、マルチチャンネルアナライザーにより γ 線スペクトルを得る。制御演算部は、図6に示したパーソナルコンピュータ(16 bit)であり、駆動機の制御、マルチチャンネルアナライザーの制御、 γ 線スペクトルの解析、測定効率の計算、濃度分布の算出および表示等を行なう。なお、検出部は、2基の通気層を並行して測定するため、A、B 2式が装備されている。

3.2 検出部

① γ 線検出器

γ 線測定用のNaI(Tl)シンチレーション検出器は、検出部1式当たり横方向に3列、縦方向に4段、合計12個が装備され、コリメータの内部に設置されている。上側3段の合計9個の検出器は、上下方向の位置分解能を重視して1" ϕ \times 1" L、最下段の3個の検出器は、位置分解能よりもピーク効率の高さを重視して2" ϕ \times 2" Lの円柱型シンチレータとした。なお、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs の放出する γ 線に対する各検出器のエネルギー分解能およびピーク効率を検出部A、Bについて、それぞれ表1および表2に示す。

② コリメータ

本システムでは、位置の分解能を上げるため、鉛製のコリメータを使用した。1式の検出部に設置されているコリメータは、横方向の3個の検出器に対して各々1基ずつ、合計4基であり、最上段のコリメータの開口部中心と最下段のコリメータの開口部中心の距離は60.0 cmである。上3段に設置された1" ϕ \times 1" Lの検出器用コリメータは、図7-Aに示したように、外形が14.9 cm H \times 28.1 cm W \times 20.3 cm L、開口部が1.0 cm H \times 2.5 cm W \times 8.35 cm Lであり、横方向の3個の開口部は中心間隔がそれぞれ6.0 cmである。最下段に設

置された2"φ×2"Lの検出器用コリメータは、図7-Bに示したように、外形が16.9 cmH×31.1 cmW×20.3 cmL、開口部が5.0 cmφ×7.15 cmLであり、横方向の3個の開口部は中心間の間隔がそれぞれ6.5 cmである。なお、測定を効果的に行なうため、中2段のコリメータは手動操作により高さを変化できる。

③ 駆 動 機

駆動機は、検出器およびコリメータを上下に移動させるためのものであり、最大の駆動幅は60.0 cmである。最上段のコリメータの開口部中心と最下段のコリメータの開口部中心の距離は60.0 cmであり、合計120.0 cm(測定対象とする通気層カラムの長さ)の間隔について測定できる。移動速度は、0.2 cm/sおよび0.4 cm/sの2段階に変化でき、手動操作および制御演算部による自動操作により検出器を任意の位置に設定できる。

3.3 計 数 部

計数部は、高圧電源2台(1"φ×1"Lおよび2"φ×2"Lの検出器用)、低圧電源4台、リニアアンプ(利得2~2,048倍)12台および256チャンネルのマルチチャンネルアナライザ12式を構成するADコンバータ(変換利得256 ch/8V)12台、マルチプレクサ(メモリ1k)3台およびプロセスメモリ(1,024チャンネル)3台から成り、制御演算部により自動的に制御されγ線スペクトルを収集する。

3.4 制御演算部

制御演算部は、16bitのパーソナルコンピュータSEIKO-9500であり、ROM 8kbyte、RAM 512kbyteのメモリを有し、640kbyteのミニフロッピーディスクを2基標準装備している。また、測定データおよび演算結果の出力のために、グラフィックプリンタSEIKO-9515が付属している。

3.5 ソフトウェア

ソフトウェアは、データ収集用プログラムNMM1と解析用プログラムNMM2に大別することができ、使用言語はBASICである。

① データ収集用プログラムNMM1

本プログラムは、図8に示したフローチャートに従ってカラム外側において計数率分布を測定し、γ線入射率を計算する。システムの起動後、キーボードより測定時間、測定位置等の測定条件を入力して測定モードを設定する。測定モードに従って、検出器を所定の位置に移動し、マルチチャンネルアナライザを初期化した後、設定された時間だけγ線スペクトルを収集する。測定したスペクトルをミニフロッピーディスクに記録した後、次

の測定位置に検出器を移動，マルチチャンネルアナライザーを初期化した後， γ 線スペクトルを収集し，ミニフロッピーディスクに記録する。このような流れを繰り返し，すべての測定位置について γ 線スペクトルの収集，記録が終了した後，スペクトル解析を行ない，計数率分布を算出する。スペクトル解析は，Covell法⁶⁾により行ない，ミニフロッピーディスクに記録されている検出器のピーク効率および断面積を用いて求めた γ 線入射率を，測定データとしてミニフロッピーディスクに記録，グラフィックプリンタに出力する。

なお，本プログラムには，検出器の較正，エネルギー分解能およびピーク効率の測定を行なうためのプログラムCALIB1，通気層カラムの材質（塩化ビニール）および土壌の線吸収係数を測定するためのプログラムCALIB2が含まれている。CALIB2は，検出器と γ 線源の間に測定用試料を挿入して γ 線のピーク計数率を測定し，以下の式に従って試料の線吸収係数 μ （1/cm）を測定する。

$$\mu = -\ln(c/C)/L$$

ここで， c は検出器と γ 線源の間に線吸収係数測定用の試料が挿入されている場合のピーク計数率（cpm）， C は試料がない場合のピーク計数率（cpm）， L は試料の厚さ（cm）である。

② 解析用プログラムNMM2

本プログラムは，図9に示したフローチャートに従ってデータ処理を行ない，通気層土壌試料中における放射性核種の濃度分布を算出する。測定効率セットを計算するか，または前もって計算された測定効率セットをミニフロッピーディスクから読み出す。つぎに，ミニフロッピーディスクから測定条件を読み込み，データ収集時のブロックに対する測定効率を測定効率セットから計算して効率行列を作成し，データ収集用プログラムNMM1によって測定された γ 線入射率について(2)式で表わされる連立方程式を解き，濃度分布を求める。ここで，測定効率セットとは，レベル差（検出器とブロックの垂直方向の距離）0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 24, 32, 40, 54, 70, 92および120 cmに対して計算された測定効率であり，濃度分布の計算時間を短縮するためのものである。濃度分布を算出する場合には，直接測定効率を計算すると時間がかかるため，前もって計算された上記の測定効率セットから，内挿法により測定時のブロックのレベル差に対応した測定効率を計算する。

測定効率セットを作成する場合，一つのレベル差ごとに約5,000個の位置，すなわちカラム内土壌の水平方向の断面に255ヶ所（図10-A参照），検出器の内部に21ヶ所の位置（図10-Bおよび10-C参照）を仮定し，(4)式に従って数値積分を実行する。

4. 機能試験の結果および考察

4.1 位置分解能の計算

濃度分布を測定する場合のブロックの分割の仕方を決定するために、解析用プログラム NMM2 により測定効率セットを計算し、本システムの位置分解能を求めた。

測定効率セットを計算するにあたり、各物質の線吸収係数等のパラメータを以下のごとく決定した。コリメータの材質である鉛の線吸収係数は、密度 (11.3 g/cm^3) \times 質量吸収係数から、 ^{60}Co の $1,332 \text{ keV}$ の γ 線に対して $0.674 (1/\text{cm})$ 、 ^{85}Sr の 511 keV の γ 線に対して $1.757 (1/\text{cm})$ 、 ^{137}Cs の 662 keV の γ 線に対して $1.260 (1/\text{cm})$ ⁶⁾ とした。水の線吸収係数は、それぞれ 0.063 、 0.095 および $0.085 (1/\text{cm})$ ⁶⁾ とし、水分率は 0.2 とし計算した (4.2 参照)。通気層カラムは、内径 30 cm 、長さ 120 cm 、肉厚 1.0 cm であり、その材質である塩化ビニールの線吸収係数は、データ収集用プログラム NMM1 付属の線吸収係数測定用プログラム CALIB2 により測定した結果、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs の γ 線に対してそれぞれ 0.167 、 0.162 および $0.167 (1/\text{cm})$ であった。濃度分布測定に使用した土壌試料 (4.2 参照) は空隙率が約 0.4 (密度 1.57 g/cm^3) であり、その線吸収係数は、乾燥状態において CALIB2 により測定した結果、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs の γ 線に対してそれぞれ 0.054 、 0.149 および $0.132 (1/\text{cm})$ であった。測定効率セットの計算時間は約 4 時間程度であった。 $1" \phi \times 1" \text{ L}$ 検出器に対する測定効率セットを表 3、 $2" \phi \times 2" \text{ L}$ 検出器に対する測定効率セットを表 4 にそれぞれ示す。

本システムの位置分解能は、レベル差と測定効率の関係を正規分布と仮定した場合の半値幅であるとすれば、スペクトル解析の際に用いられる半値幅決定の手法⁶⁾により位置分解能を求めることができる。 $1" \phi \times 1" \text{ L}$ 検出器に対する位置分解能を表 3 から求めると、 ^{60}Co に対して約 3.0 cm 、 ^{85}Sr に対して約 2.4 cm 、 ^{137}Cs に対して約 2.5 cm となる。また、 $2" \phi \times 2" \text{ L}$ 検出器に対する位置分解能を表 4 から求めると、 ^{60}Co に対して約 16.3 cm 、 ^{85}Sr に対して約 13.7 cm 、 ^{137}Cs に対して約 14.3 cm となる。したがって、 $1" \phi \times 1" \text{ L}$ 検出器では $2 \sim 3 \text{ cm}$ のブロックに、 $2" \phi \times 2" \text{ L}$ 検出器では $13 \sim 17 \text{ cm}$ のブロックに分割して測定するのが最適と考えられる。

4.2 濃度分布の測定

本システムにより、鉛直一次元方向の放射性核種濃度分布が測定可能であることを確認するため、カラム内の通気層土壌試料中に放射性水溶液を流下させ、本システムを用いて放射性核種の濃度分布を測定した。

測定対象とした通気層土壌試料は、内径 30 cm 、長さ 120 cm 、肉厚 1.0 cm の塩化ビニール製カラム内に、日本原子力研究所東海研究所の敷地内から採取した海岸砂 (密度 2.63

g/cm³) を空隙率 0.4 で充填したもので、蒸留水をカラム上部より流下させて通気層とした。

放射性水溶液の流下実験は、複数の注射針を振動させながら土壌表面へ放射性水溶液を流下する均一流下法およびスプリンクラーを用いて同心円状に放射性水溶液を流下する不均一流下法の2種類の流下法について行なった。放射性水溶液は、⁶⁰Co、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs の混合放射性水溶液であり、担体を加えることにより化学濃度が 1.0×10^{-4} mol/l になるように調整したものを使用した。その放射性核種濃度は、均一流下法の場合には、⁶⁰Co、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs についてそれぞれ 1.2×10^{-2} 、 3.0×10^{-2} および 2.9×10^{-2} μ Ci/ml であり、不均一流下法の場合には、それぞれ 1.3×10^{-2} 、 3.2×10^{-2} および 3.0×10^{-2} μ Ci/ml であった。

それぞれの流下法により、図11のように通気層カラムの上部から放射性水溶液を 0.3 l/min の一定流量で総量 100 l 流下した後、図12に示すようにカラム側面部に沿って検出部を設置し、⁶⁰Co、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs の濃度分布を測定した。両流下法ともブロックの分割は 2.0 cm であり、計数時間を 1 時間とした。土壌の水分率は、高速中性子検出方式⁷⁾により測定したところ 0.2 であり、濃度分布の算出は、水分率が 0.2 に対する測定効率セットを用いて約 15 分で完了した。

本システムにより放射性核種の濃度分布を測定した後、比較のためにカラム内の土壌層を解体し、半径方向にはカラム中心、中心から 6.5 cm および中心から 12.5 cm の位置、深さ方向に 2 cm ずつの位置から土壌試料を採取した。採取した土壌試料は、乾燥後、10 g を測定用サンプルとして、45 ml の 0.1 N の塩酸とともに直径 8 cm のプラチック容器内に封入し、HPGe 半導体検出器により放射性核種の吸着濃度を測定した。

均一流下法についての測定結果を ⁶⁰Co、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs について、それぞれ図13～15に示す。図13～15において、実線は本システムにより非破壊的に測定した鉛直方向の濃度分布を示し、破線は土壌を採取して破壊的に測定した鉛直方向の濃度分布を示している。土壌を採取して放射性核種の濃度を測定した結果によると、均一流下法の場合には、濃度は半径方向の位置によらずほとんど一定で、深さだけに依存していたため、その平均値により鉛直一次元分布を示した。図13～15では、⁶⁰Co の場合は本システムの測定結果がわずかに高くなるものの、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs では両測定結果はかなり良く一致しており、半径方向に放射性核種が均一に分布している場合には、本システムにより一次元濃度分布が測定できることは明らかである。ただし、図13～15において、土壌層表面における放射性核種の濃度に関しては、本システムの結果が低濃度となっているが、これは通気層カラム接続用のステンレス製ボルトの影響によるものであり、ボルトの除去または吸収補正の実施により改善できるものと考えられる。

不均一流下法についての測定結果を ⁶⁰Co、⁸⁵Sr および ¹³⁷Cs について、それぞれ図16～18に示す。図16～18においては、実線は本システムにより非破壊的に測定した鉛直一次元濃度を示し、破線、点線および一点鎖線は、土壌を採取して破壊的に測定した濃度分布であり、それぞれ中心、中心から 6.5 cm および中心から 12.5 cm の位置における鉛直一次元濃度分布を示している。図16～18によれば、本システムにより測定された一次元濃度分布は、土壌層の

中心より 6.5 cm の位置の濃度分布に比較的良く一致しており、本システムの測定結果は、平均的な濃度分布を示すものの、半径方向に不均一に放射性核種が分布する場合には、二次元的な測定が必要であることを示唆している。

本システムで用いた測定効率は、理論計算によるものであったが、より高精度の測定効率を用いることにより、精度の高い測定値が得られる。高精度の測定効率を得るためには、測定効率を実測することが近道であり、土壌と同じ吸収係数を持つ材質で作製した標準線源に対して計数率を測定することによって測定効率が実測できる。標準線源により実測した測定効率は、理論計算では含めることができなかった γ 線のビルトアップをも含んだ値であり、高精度の濃度分布測定が期待できる。

4.3 二次元測定についての検討

不均一流下法に対する濃度分布測定で明らかになったように、放射性核種が二次元的、または三次元的に分布する場合、本システムによる一次元測定で得られる分布は、平均濃度である。したがって流下形態によっては、二次元的、または三次元的に測定する必要がある。本システムは、横方向に 3 個の検出器を装備しており、三次元的な測定は不可能であるが、原理的には二次元的な測定が可能である。二次元的な測定を行なう場合、放射性核種は同心円状に分布すると考え、ブロックは半径方向に 3 個に分割するのが妥当である。厚さ 2 cm、半径方向には中心から 5 cm および 10 cm の位置で分割した 3 個のブロックを仮定して、以下の検討を行なった。横方向に設置されている検出器で測定されるピーク計数率 $C(i)$ (cps) は、

$$C(i) = \sum P(i) S E(i, j) m(j) d(j) \quad (5)$$

で表わされる。ここで、 $P(i)$ は横方向 i 番目の検出器のピーク効率、 $E(i, j)$ は横方向 j 番目のブロックに対する i 番目の検出器の測定効率、 $m(j)$ は横方向 j 番目のブロックの重量 (g)、 $d(j)$ は横方向 j 番目のブロック中の濃度 (Bq/g) ($i, j = 1, 2, 3$) である。上式に用いられる測定効率は、縦方向に分割した場合と同様な計算手法により計算でき、1" ϕ \times 1" L 検出器に対して 4.1 と同じ条件で計算した横方向の測定効率を表 5 に示す。表 5 に示した測定効率は、レベル差が 0 cm に対する値であり、検出器およびブロックの番号は、中心から 1, 2, 3 とした。各々のブロックからの各検出器に対する寄与は、上式の $E(i, j) m(j)$ の値により定まり、ブロックの体積と密度の積より $m(1)$ 、 $m(2)$ および $m(3)$ の値は、それぞれ約 250, 740 および 1,240 g であるため、 $E(i, j) m(j)$ の値は、表 6 のように計算される。表 6 によると、最大の寄与を与えるブロックは、各検出器とも 3 番のブロックであり、一番外側のブロックの濃度は測定が容易であるが、内側のブロックに行くに従い測定が困難となることがわかる。

横方向 J 番目 ($J = 1, 2, 3$) のブロックの濃度を決定するためには、 J 番目のブロックの持つ J 番目の検出器に対する寄与が、 J 番目の検出器の測定誤差よりも大きいことが必要である。横方向の濃度分布を、

$$d(1) = d_0, \quad d(2) = a d_0, \quad d(3) = a^2 d_0 \quad (6)$$

と仮定すると、J番目の検出器の計数率は、

$$\sum E(J, j) m(j) a^j d_0 \quad (7)$$

に比例し、そのうちJ番目のブロックの寄与分は、

$$E(J, J) m(J) a^J d_0 \quad (8)$$

で表わされる。ここで、 d_0 は中心における濃度 (Bq/g) であり、 a は比例定数である。 $1" \phi \times 1" L$ 検出器のピーク効率および分解能の平均誤差は、Table 1 よりそれぞれ 9.1% および 12.0% であり、計数誤差を約 5% とすると、それぞれの検出器で得られる計数率は、約 25% の誤差を含むことがあり得る。この場合、濃度が求まる条件は、

$$0.25 \sum E(J, j) m(j) a^j < E(J, J) m(J) a^J \quad (9)$$

となり、一番濃度が求めにくい中心のブロックについて a を計算すると、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs について、それぞれ $a < 0.60$ 、 $a < 0.50$ および $a < 0.54$ と求められる。

以上のことにより、中心から外側のブロックに向かって、濃度が半分以下に減少して行くような分布であれば、半径方向の濃度分布が測定可能であり、半径方向に均一に分布している場合には、計数の測定精度の問題により二次元濃度分布の測定が困難である。

したがって、二次元濃度分布の測定を可能とするためには、計数率の測定精度の向上が必要であり、具体的には使用する検出器の特性を揃えることにより、計数率の測定精度が上がり、二次元濃度分布の測定が実現されると考えられる。

5. 結 論

通気層土壌試料中における放射性核種の濃度分布を非破壊的に測定するための測定システムを開発し、機能試験を行なった結果、以下の結論が得られた。

- ① 本システムの位置分解能は、約 2 ~ 3 cm である。
- ② 半径方向に放射性核種が均一に分布する場合、本システムにより一次元濃度分布が測定可能である。
- ③ 半径方向の濃度分布を測定するためには、その分布が中心から外側に行くに従い急激に減少する分布であることが必要である。ブロックが変わるごとに半分以下に濃度が減少するような分布であれば、二次元濃度分布が測定可能と考えられる。

$$d(1) = d_0, \quad d(2) = a d_0, \quad d(3) = a^2 d_0 \quad (6)$$

と仮定すると、J番目の検出器の計数率は、

$$\sum E(J, j) m(j) a^j d_0 \quad (7)$$

に比例し、そのうちJ番目のブロックの寄与分は、

$$E(J, J) m(J) a^J d_0 \quad (8)$$

で表わされる。ここで、 d_0 は中心における濃度 (Bq/g) であり、 a は比例定数である。 $1" \phi \times 1" L$ 検出器のピーク効率および分解能の平均誤差は、Table 1よりそれぞれ 9.1% および 12.0% であり、計数誤差を約 5% とすると、それぞれの検出器で得られる計数率は、約 25% の誤差を含むことがあり得る。この場合、濃度が求まる条件は、

$$0.25 \sum E(J, j) m(j) a^j < E(J, J) m(J) a^J \quad (9)$$

となり、一番濃度が求めにくい中心のブロックについて a を計算すると、 ^{60}Co 、 ^{85}Sr および ^{137}Cs について、それぞれ $a < 0.60$ 、 $a < 0.50$ および $a < 0.54$ と求められる。

以上のことにより、中心から外側のブロックに向かって、濃度が半分以下に減少して行くような分布であれば、半径方向の濃度分布が測定可能であり、半径方向に均一に分布している場合には、計数の測定精度の問題により二次元濃度分布の測定が困難である。

したがって、二次元濃度分布の測定を可能とするためには、計数率の測定精度の向上が必要であり、具体的には使用する検出器の特性を揃えることにより、計数率の測定精度が上がり、二次元濃度分布の測定が実現されることが考えられる。

5. 結 論

通気層土壌試料中における放射性核種の濃度分布を非破壊的に測定するための測定システムを開発し、機能試験を行なった結果、以下の結論が得られた。

- ① 本システムの位置分解能は、約 2 ~ 3 cm である。
- ② 半径方向に放射性核種が均一に分布する場合、本システムにより一次元濃度分布が測定可能である。
- ③ 半径方向の濃度分布を測定するためには、その分布が中心から外側に行くに従い急激に減少する分布であることが必要である。ブロックが変わるごとに半分以下に濃度が減少するような分布であれば、二次元濃度分布が測定可能と考えられる。

謝 辞

機能試験を実施する際、放射性水溶液の流下試験および通気層カラムの解体等の作業に協力して下さった環境安全研究部低レベル廃棄物処理処分研究室の大塚芳郎氏、武部慎一氏および古宮友和氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 福井正美, 桂山幸典: 保健物理, 11, 275(1976)
- 2) 山本忠利, 武部慎一, 和達嘉樹: 保健物理, 17, 3(1982)
- 3) 大貫敏彦, 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: 保健物理, 18, 11(1983)
- 4) 大貫敏彦, 小川弘道, 和達嘉樹: 計測自動制御学会北海道支部学術講演会要旨集, 45(1983)
- 5) 小川弘道, 大貫敏彦, 山本忠利, 和達嘉樹: 応用物理(印刷中)
- 6) 野口正安: “ γ 線スペクトロメトリー”, 日刊工業新聞社, 48, 224, 215, 38(1980)
- 7) T. OHNUKI, T. YAMAMOTO and Y. WADACHI: Japan. J. Appl. Phys., 23, 1124(1984)

謝 辞

機能試験を実施する際、放射性水溶液の流下試験および通気層カラムの解体等の作業に協力して下さった環境安全研究部低レベル廃棄物処理処分研究室の大塚芳郎氏、武部慎一氏および古宮友和氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 福井正美, 桂山幸典: 保健物理, 11, 275(1976)
- 2) 山本忠利, 武部慎一, 和達嘉樹: 保健物理, 17, 3(1982)
- 3) 大貫敏彦, 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: 保健物理, 18, 11(1983)
- 4) 大貫敏彦, 小川弘道, 和達嘉樹: 計測自動制御学会北海道支部学術講演会要旨集, 45(1983)
- 5) 小川弘道, 大貫敏彦, 山本忠利, 和達嘉樹: 応用物理(印刷中)
- 6) 野口正安: “ γ 線スペクトロメトリー”, 日刊工業新聞社, 48, 224, 215, 38(1980)
- 7) T. OHNUKI, T. YAMAMOTO and Y. WADACHI: Japan. J. Appl. Phys., 23, 1124(1984)

Table 1 Peak efficiency and energy resolution of detector (A)

Detector number	Nuclide	⁸⁵ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
	Energy (keV)	514	662	1332
1	Peak efficiency (%)	15.0	11.1	6.4
	Resolution (%)	11.3	9.7	6.8
2	Peak efficiency (%)	16.0	11.6	5.8
	Resolution (%)	10.8	8.9	8.1
3	Peak efficiency (%)	15.7	11.1	6.1
	Resolution (%)	10.7	8.7	6.0
4	Peak efficiency (%)	15.6	11.3	5.8
	Resolution (%)	11.4	9.4	8.5
5	Peak efficiency (%)	15.3	11.1	5.6
	Resolution (%)	10.4	8.6	6.1
6	Peak efficiency (%)	15.1	10.9	6.1
	Resolution (%)	12.2	10.3	7.4
7	Peak efficiency (%)	15.5	11.2	5.0
	Resolution (%)	11.4	9.6	7.4
8	Peak efficiency (%)	15.4	11.2	4.8
	Resolution (%)	11.0	9.2	7.4
9	Peak efficiency (%)	15.4	11.4	5.6
	Resolution (%)	10.9	8.7	8.1
10	Peak efficiency (%)	22.9	21.0	13.2
	Resolution (%)	9.4	7.6	7.7
11	Peak efficiency (%)	22.3	20.5	16.0
	Resolution (%)	10.4	8.6	8.6
12	Peak efficiency (%)	22.4	21.2	12.9
	Resolution (%)	10.4	8.8	8.9

Table 2 Peak efficiency and energy resolution of detector (B)

Detector number	Nuclide	⁸⁵ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
	Energy (keV)	514	662	1332
1	Peak efficiency (%)	16.3	11.7	6.3
	Resolution (%)	12.0	9.8	7.1
2	Peak efficiency (%)	16.2	11.2	6.2
	Resolution (%)	10.5	8.6	6.0
3	Peak efficiency (%)	16.0	11.4	5.9
	Resolution (%)	10.5	8.5	6.0
4	Peak efficiency (%)	15.8	11.0	5.1
	Resolution (%)	10.1	8.1	7.4
5	Peak efficiency (%)	16.2	11.9	5.9
	Resolution (%)	12.3	10.1	6.7
6	Peak efficiency (%)	15.9	11.7	5.1
	Resolution (%)	10.1	7.8	5.7
7	Peak efficiency (%)	16.8	11.9	4.9
	Resolution (%)	9.6	7.5	5.2
8	Peak efficiency (%)	15.7	11.6	5.0
	Resolution (%)	10.0	8.0	5.3
9	Peak efficiency (%)	16.5	11.3	5.9
	Resolution (%)	10.9	8.8	6.5
10	Peak efficiency (%)	22.0	20.3	12.2
	Resolution (%)	10.0	8.2	7.1
11	Peak efficiency (%)	20.8	18.6	11.2
	Resolution (%)	10.1	8.0	7.1
12	Peak efficiency (%)	19.2	20.0	13.2
	Resolution (%)	11.3	9.5	9.5

Table 3 Measuring efficiency of 1"φ x 1"L detector

Level(cm)	⁶⁰ Co	⁸⁵ Sr	¹³⁷ Cs
0.0	1.303×10^{-5}	8.487×10^{-6}	9.441×10^{-6}
1.0	1.161×10^{-5}	6.721×10^{-6}	7.757×10^{-6}
2.0	3.705×10^{-6}	5.743×10^{-7}	1.019×10^{-6}
3.0	1.096×10^{-6}	1.604×10^{-8}	7.644×10^{-8}
4.0	5.200×10^{-7}	9.391×10^{-10}	1.392×10^{-8}
6.0	2.184×10^{-7}	7.255×10^{-11}	2.547×10^{-9}
8.0	1.242×10^{-7}	1.733×10^{-11}	9.179×10^{-10}
10.0	7.880×10^{-8}	5.922×10^{-12}	4.154×10^{-10}
12.0	5.184×10^{-8}	2.326×10^{-12}	2.047×10^{-10}
14.0	3.449×10^{-8}	9.764×10^{-13}	1.046×10^{-10}
18.0	1.628×10^{-8}	2.027×10^{-13}	3.095×10^{-11}
24.0	1.120×10^{-8}	1.678×10^{-13}	2.418×10^{-11}
32.0	1.160×10^{-8}	4.562×10^{-13}	4.274×10^{-11}
42.0	9.936×10^{-9}	6.629×10^{-13}	4.866×10^{-11}
54.0	6.581×10^{-9}	5.947×10^{-13}	3.765×10^{-11}
70.0	3.355×10^{-9}	3.691×10^{-13}	2.112×10^{-11}
92.0	1.331×10^{-9}	1.639×10^{-13}	8.757×10^{-12}
120.0	4.379×10^{-10}	5.899×10^{-14}	3.024×10^{-12}

Table 4 Measuring efficiency of 2"φx2"L detector

Level(cm)	⁶⁰ Co	⁸⁵ Sr	¹³⁷ Cs
0.0	3.113×10^{-5}	2.233×10^{-5}	2.445×10^{-5}
1.0	3.096×10^{-5}	2.217×10^{-5}	2.428×10^{-5}
2.0	3.041×10^{-5}	2.163×10^{-5}	2.375×10^{-5}
3.0	2.942×10^{-5}	2.065×10^{-5}	2.276×10^{-5}
4.0	2.795×10^{-5}	1.924×10^{-5}	2.133×10^{-5}
6.0	2.266×10^{-5}	1.400×10^{-5}	1.606×10^{-5}
8.0	1.613×10^{-5}	8.293×10^{-6}	1.008×10^{-5}
10.0	1.041×10^{-5}	4.023×10^{-6}	5.372×10^{-6}
12.0	6.429×10^{-6}	1.831×10^{-6}	2.689×10^{-6}
14.0	3.933×10^{-6}	8.478×10^{-7}	1.350×10^{-6}
18.0	1.464×10^{-6}	1.825×10^{-7}	3.403×10^{-7}
24.0	3.610×10^{-7}	1.558×10^{-8}	4.061×10^{-8}
32.0	1.058×10^{-7}	4.610×10^{-10}	3.948×10^{-9}
42.0	5.618×10^{-8}	1.719×10^{-10}	1.960×10^{-9}
54.0	3.188×10^{-8}	1.017×10^{-10}	1.183×10^{-9}
70.0	1.468×10^{-8}	5.513×10^{-11}	5.621×10^{-10}
92.0	5.306×10^{-9}	2.110×10^{-11}	2.077×10^{-10}
120.0	1.672×10^{-9}	6.908×10^{-12}	6.645×10^{-11}

Table 5 Measuring efficiency of 1"Øx1"L detector to radial direction

Block		1	2	3
Detector				
1	⁶⁰ Co	1.511×10^{-5}	1.200×10^{-5}	1.326×10^{-5}
	⁸⁵ Sr	7.504×10^{-6}	6.514×10^{-6}	1.003×10^{-5}
	¹³⁷ Cs	9.335×10^{-6}	7.684×10^{-6}	1.065×10^{-5}
2	⁶⁰ Co	6.601×10^{-6}	9.975×10^{-6}	1.405×10^{-5}
	⁸⁵ Sr	2.540×10^{-6}	5.423×10^{-6}	1.034×10^{-5}
	¹³⁷ Cs	3.342×10^{-6}	6.435×10^{-6}	1.111×10^{-5}
3	⁶⁰ Co	3.567×10^{-7}	3.167×10^{-6}	9.392×10^{-6}
	⁸⁵ Sr	1.444×10^{-9}	1.280×10^{-6}	6.725×10^{-6}
	¹³⁷ Cs	1.403×10^{-8}	1.640×10^{-6}	7.279×10^{-6}

Table 6 Dependence of radial direction concentration distribution on counting rate

Block		1	2	3
Detector				
1	⁶⁰ Co	3.745×10^{-3}	8.923×10^{-3}	1.643×10^{-2}
	⁸⁵ Sr	1.860×10^{-3}	4.839×10^{-3}	1.243×10^{-2}
	¹³⁷ Cs	2.314×10^{-3}	5.714×10^{-3}	1.320×10^{-2}
2	⁶⁰ Co	1.636×10^{-3}	7.418×10^{-3}	1.741×10^{-2}
	⁸⁵ Sr	6.296×10^{-4}	4.033×10^{-3}	1.281×10^{-2}
	¹³⁷ Cs	8.284×10^{-4}	4.785×10^{-3}	1.377×10^{-2}
3	⁶⁰ Co	8.842×10^{-5}	2.355×10^{-3}	1.164×10^{-2}
	⁸⁵ Sr	3.579×10^{-7}	9.518×10^{-4}	8.335×10^{-3}
	¹³⁷ Cs	3.478×10^{-6}	1.220×10^{-3}	9.021×10^{-3}

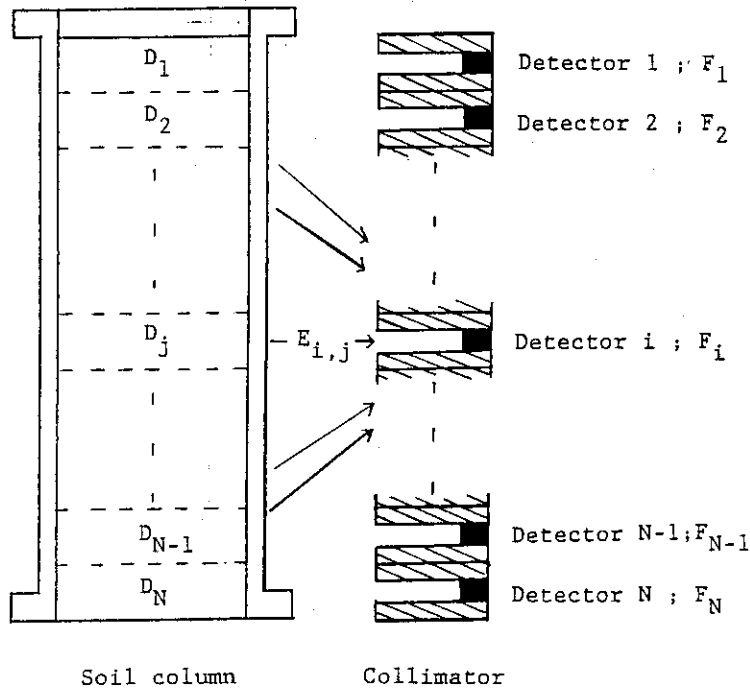


Fig. 1 Principle of measurement of concentration distribution

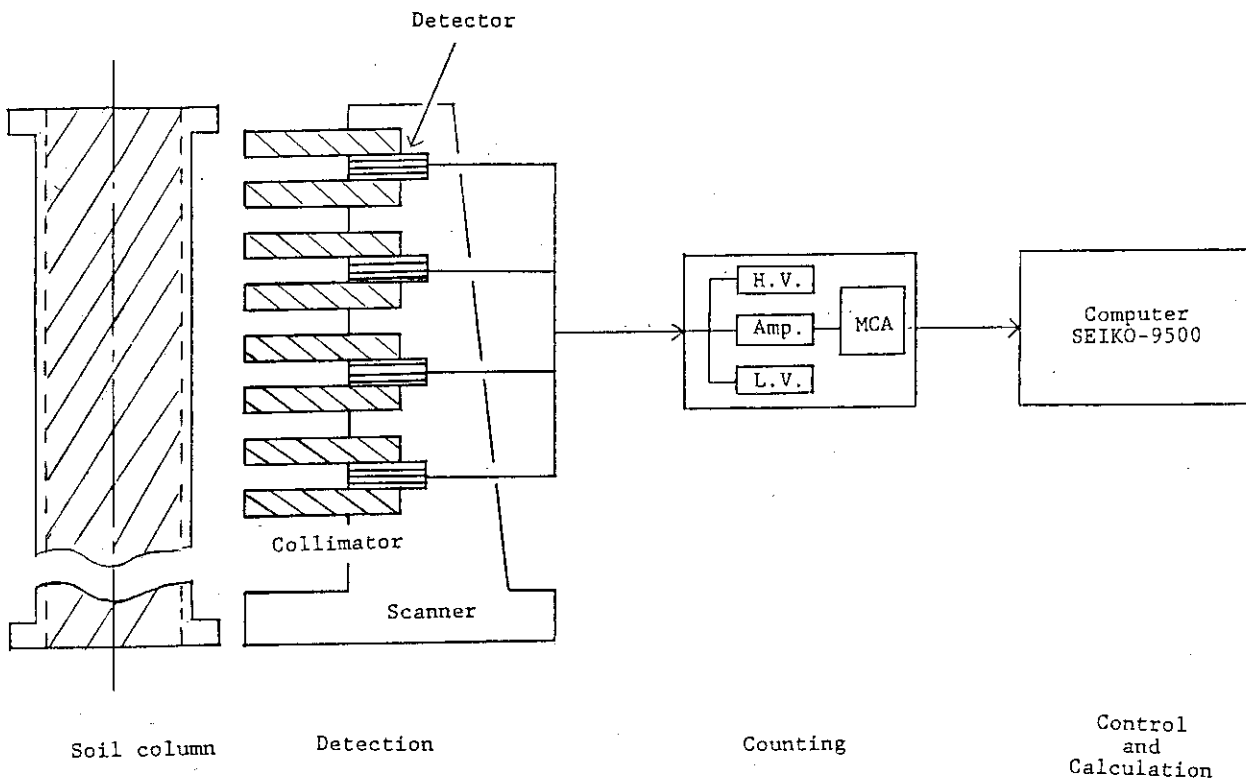


Fig. 2 Entire formation of system

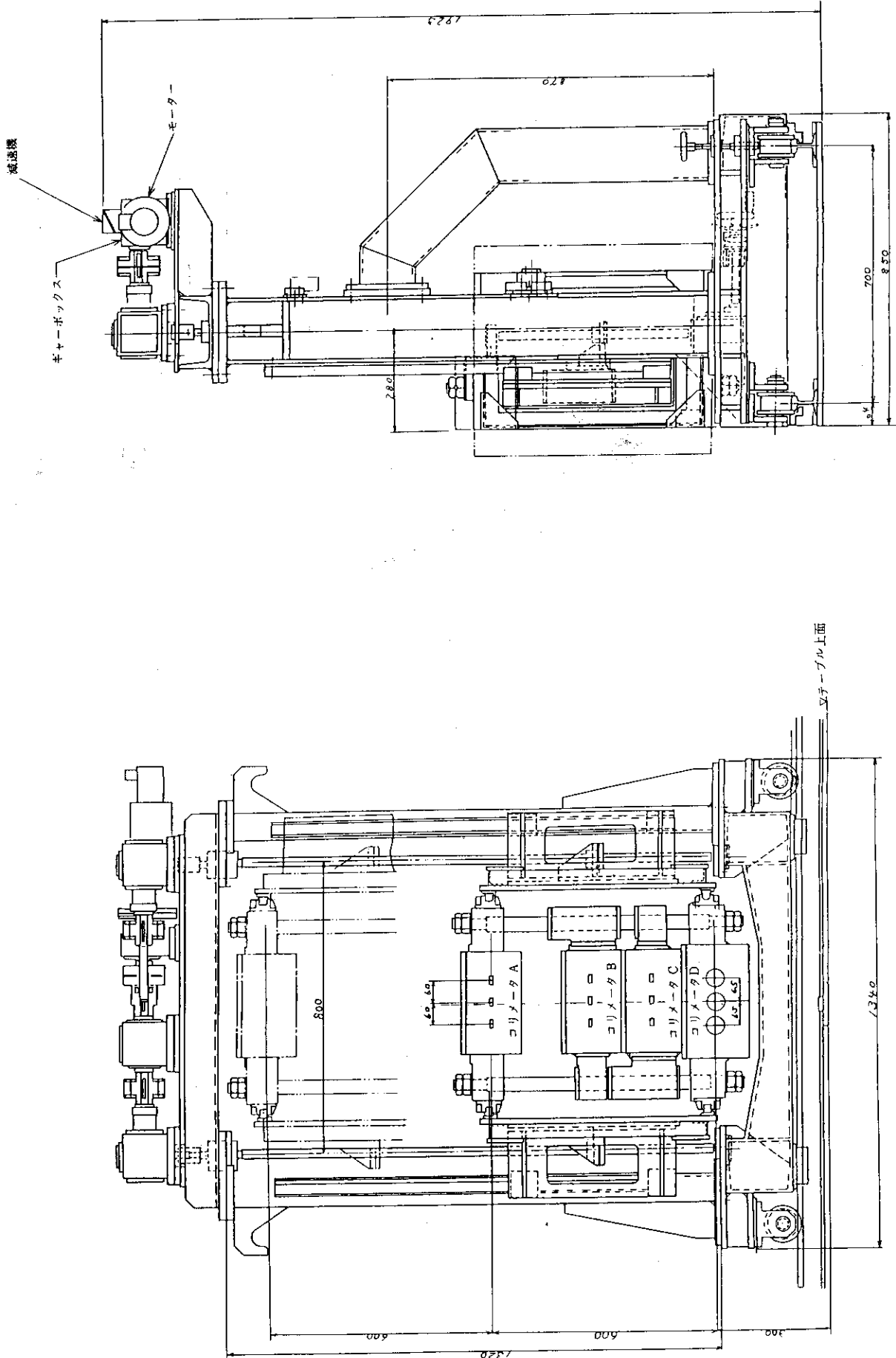


Fig.3 Structure of detector

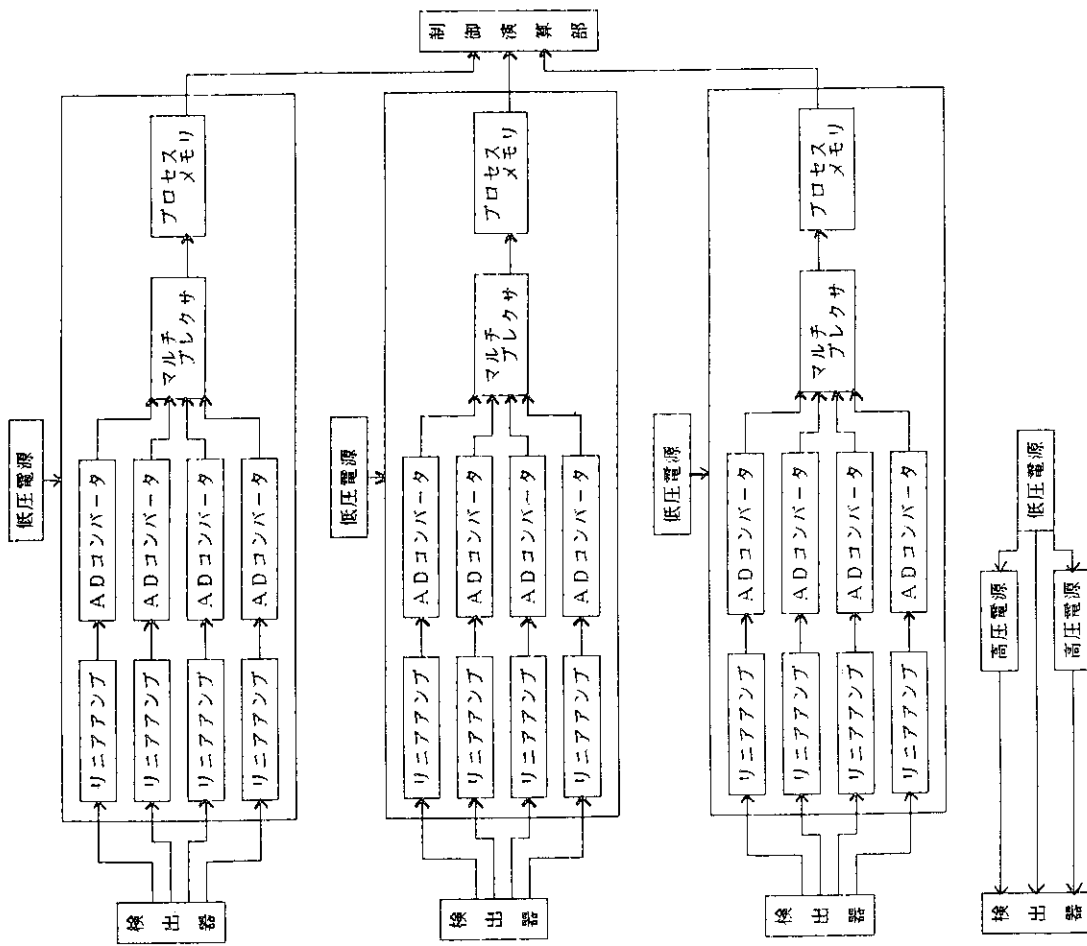


Fig.5 Constitution of counter

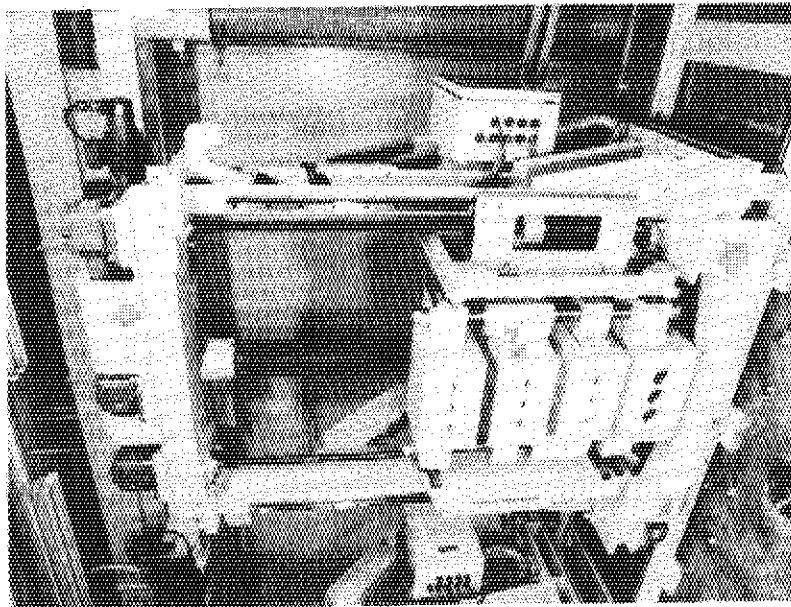
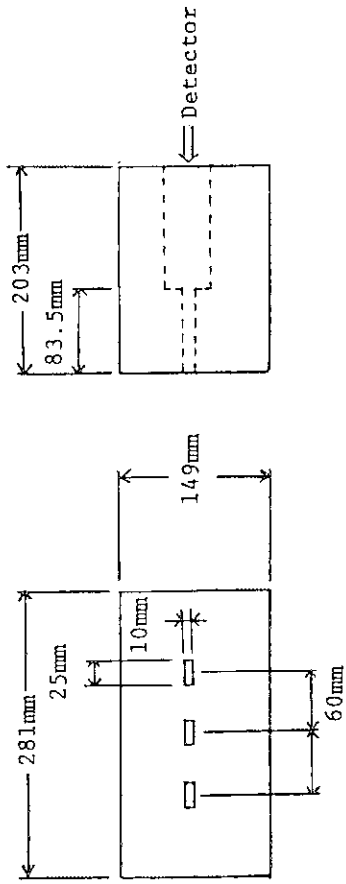
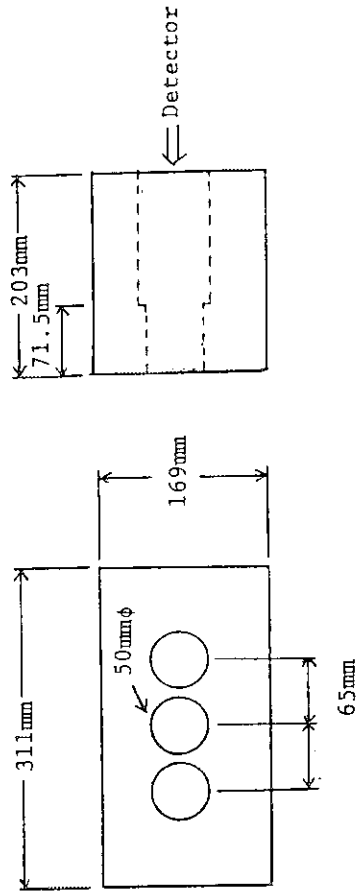


Fig.4 Photograph of detector



A ; 1"φx1"L detector



B ; 2"φx2"L detector

Fig.7 Structure of lead collimator

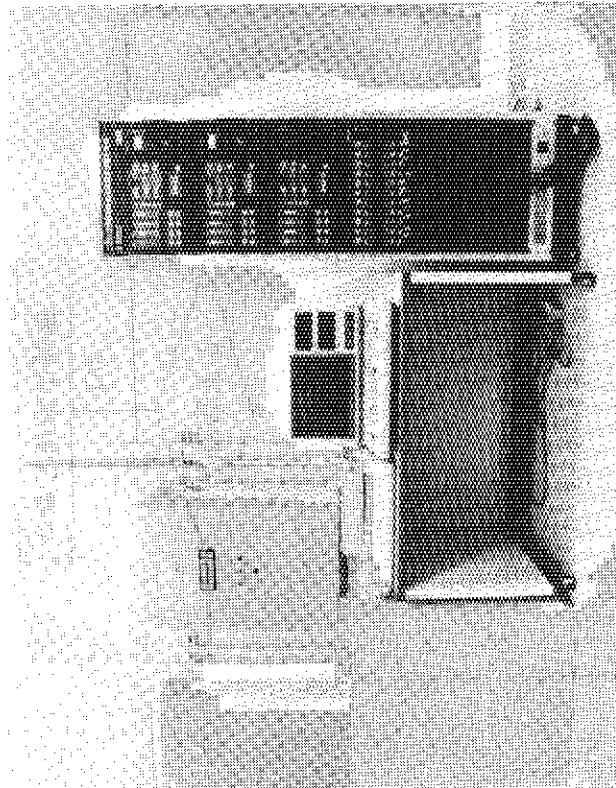


Fig.6 Photograph of counter, controller and calculator

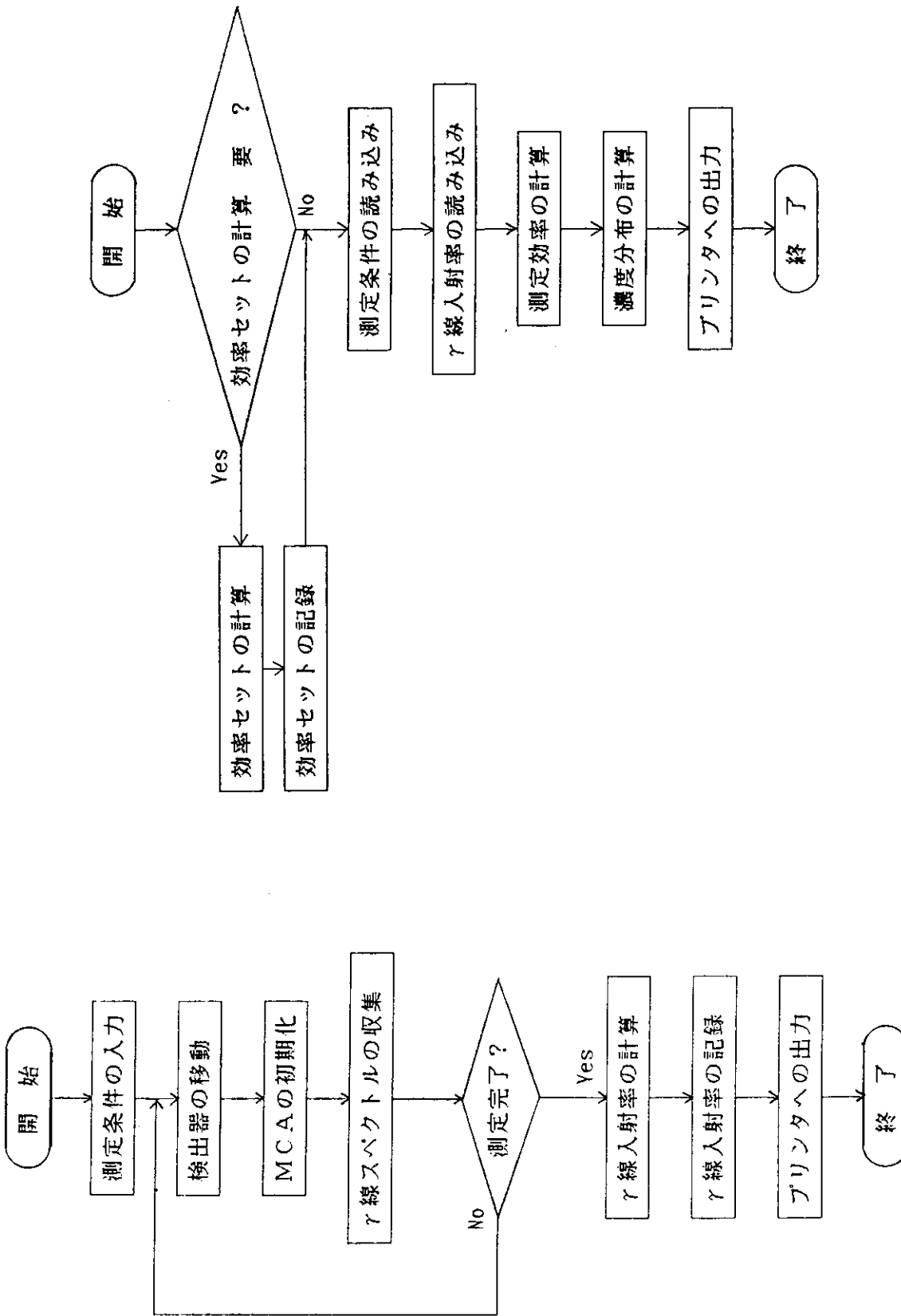
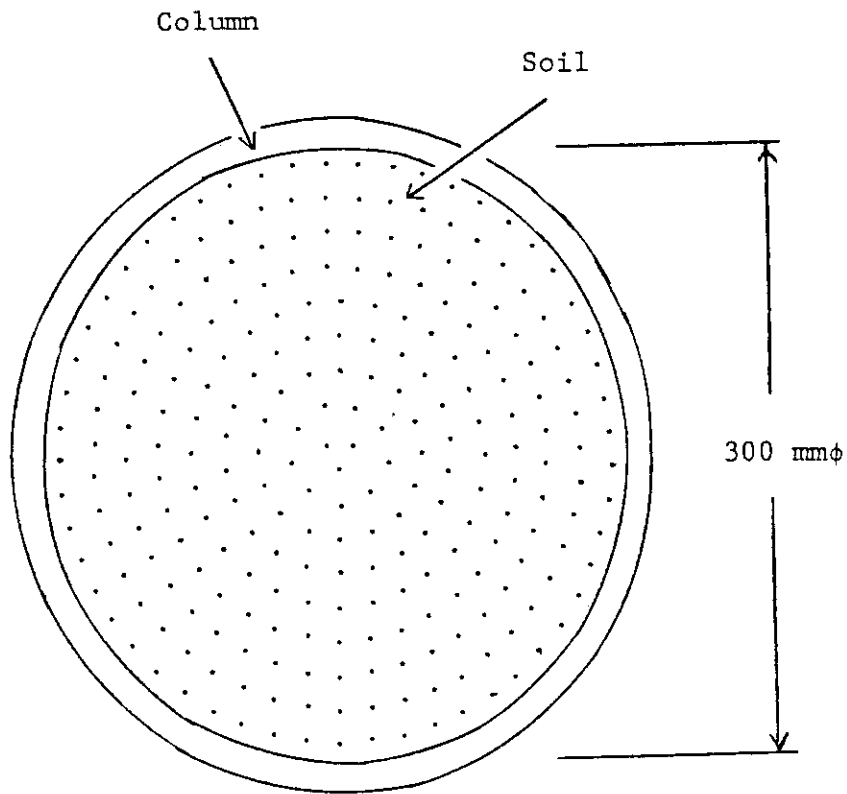


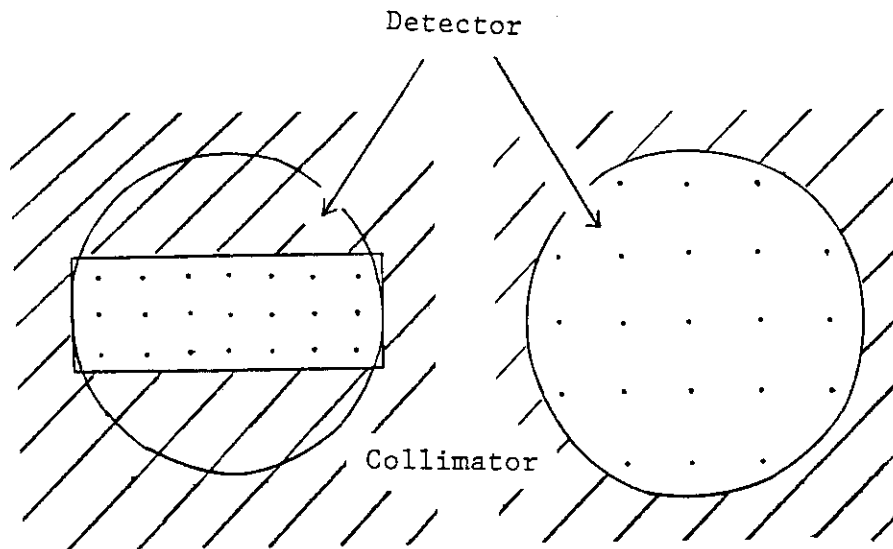
Fig. 8 Flow chart of data sampling program NMM1

Fig. 9 Flow chart of analyzing program NMM2



A; sampling points for soil

Sampling point



B; sampling points
for 1"φx1"L detector

C; sampling points
for 2"φx2"L detector

Fig.10 Sampling points for calculation of measuring efficiency

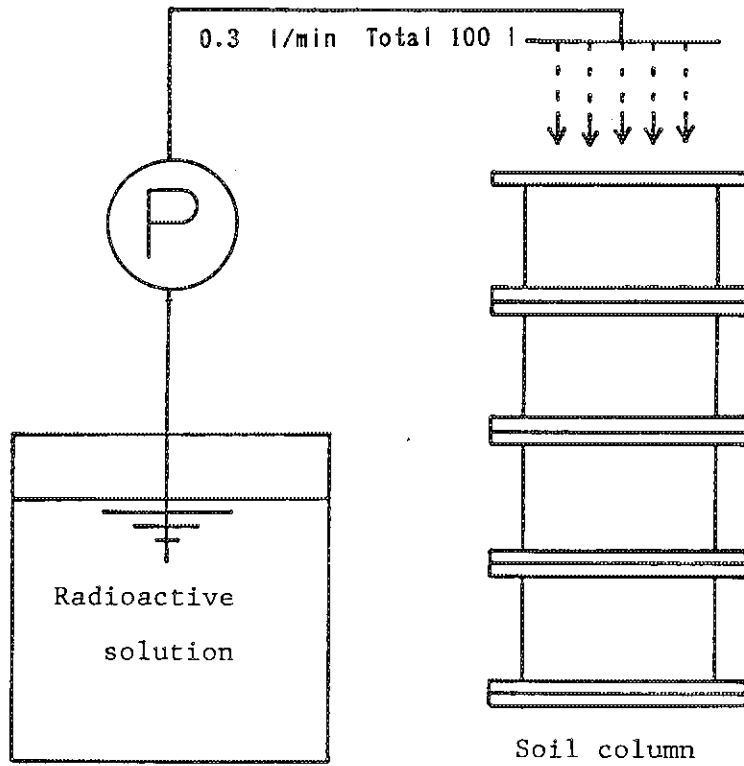


Fig.11 Inflow of radioactive aqueous solution

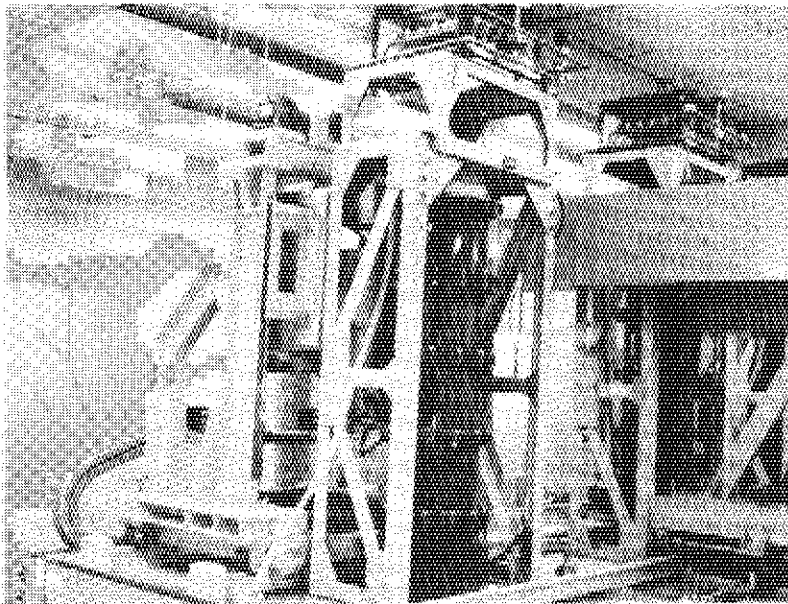


Fig.12 Measuring appearances of concentration distribution

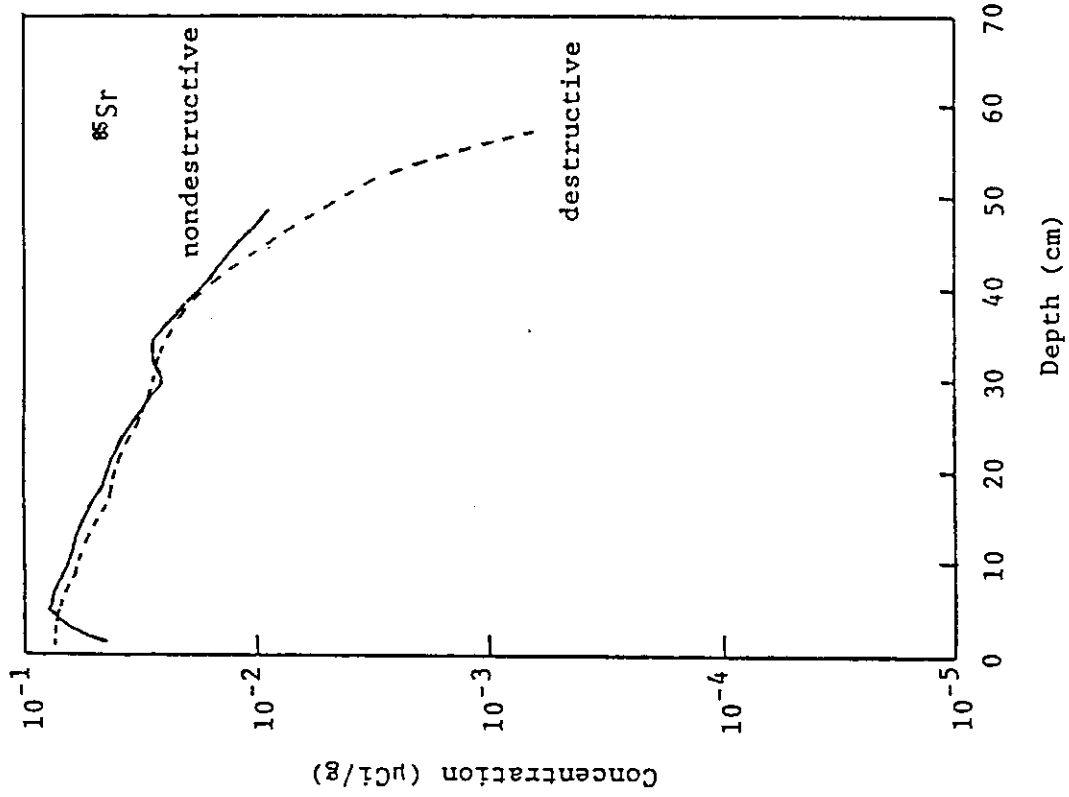


Fig.14 Concentration distribution of ^{85}Sr at vertical direction (uniform inflow)

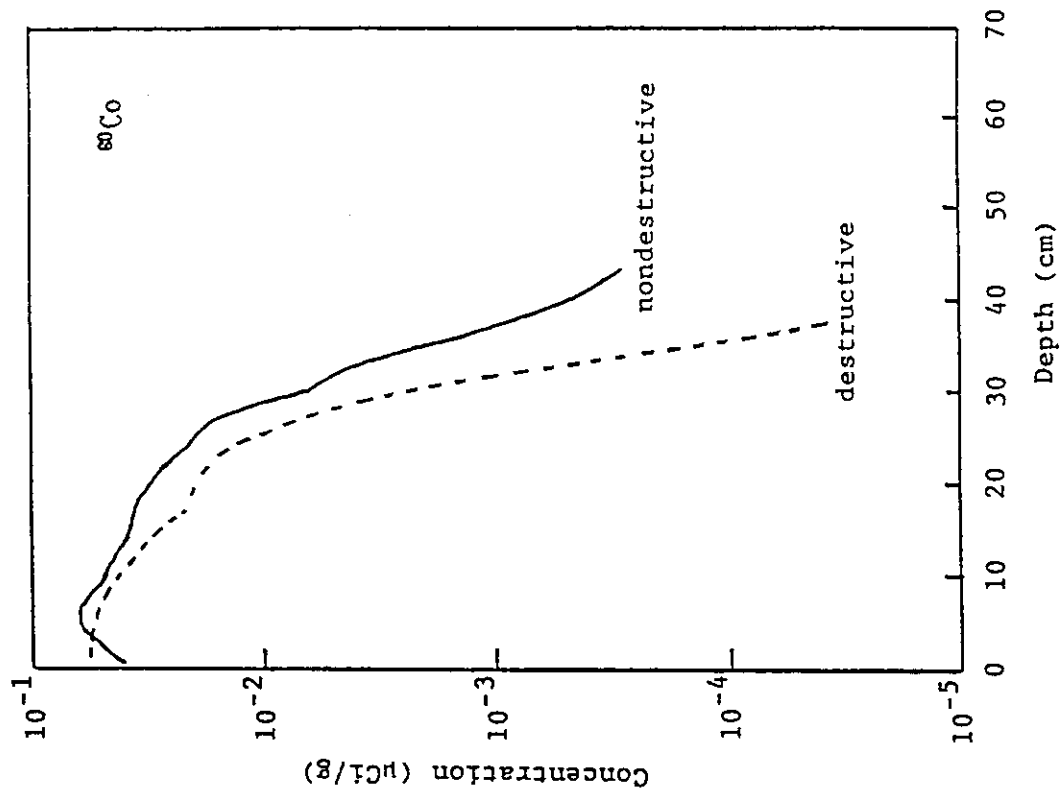


Fig.13 Concentration distribution of ^{60}Co at vertical direction (uniform inflow)

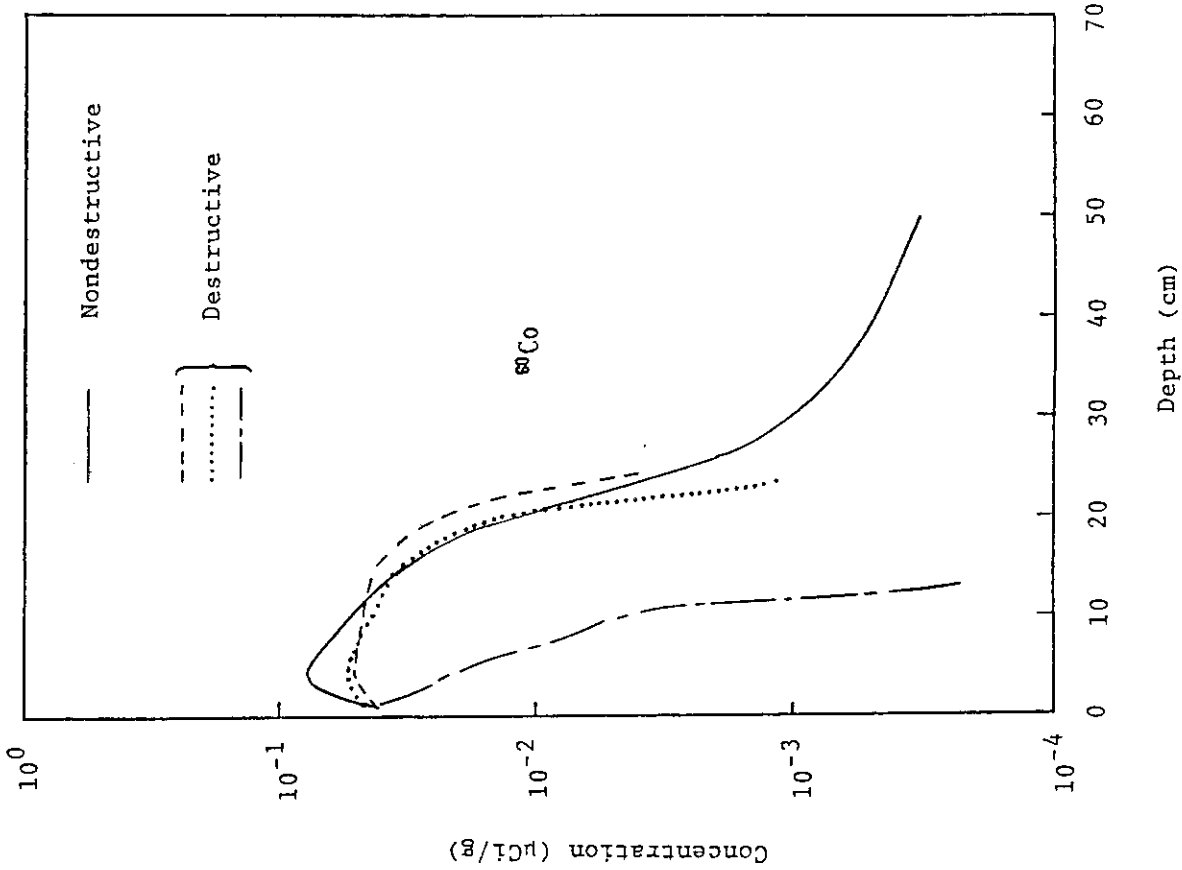


Fig.16 Concentration distribution of ^{60}Co at vertical direction (ununiform inflow)

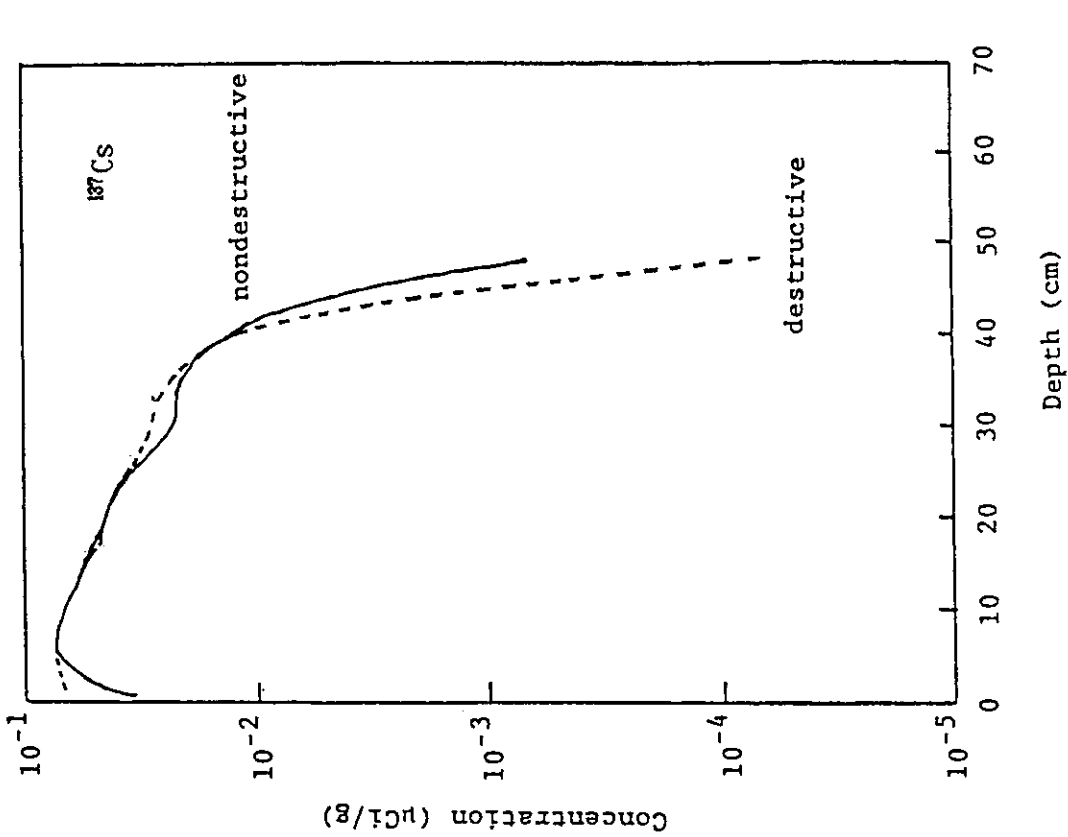


Fig.15 Concentration distribution of ^{137}Cs at vertical direction (uniform inflow)

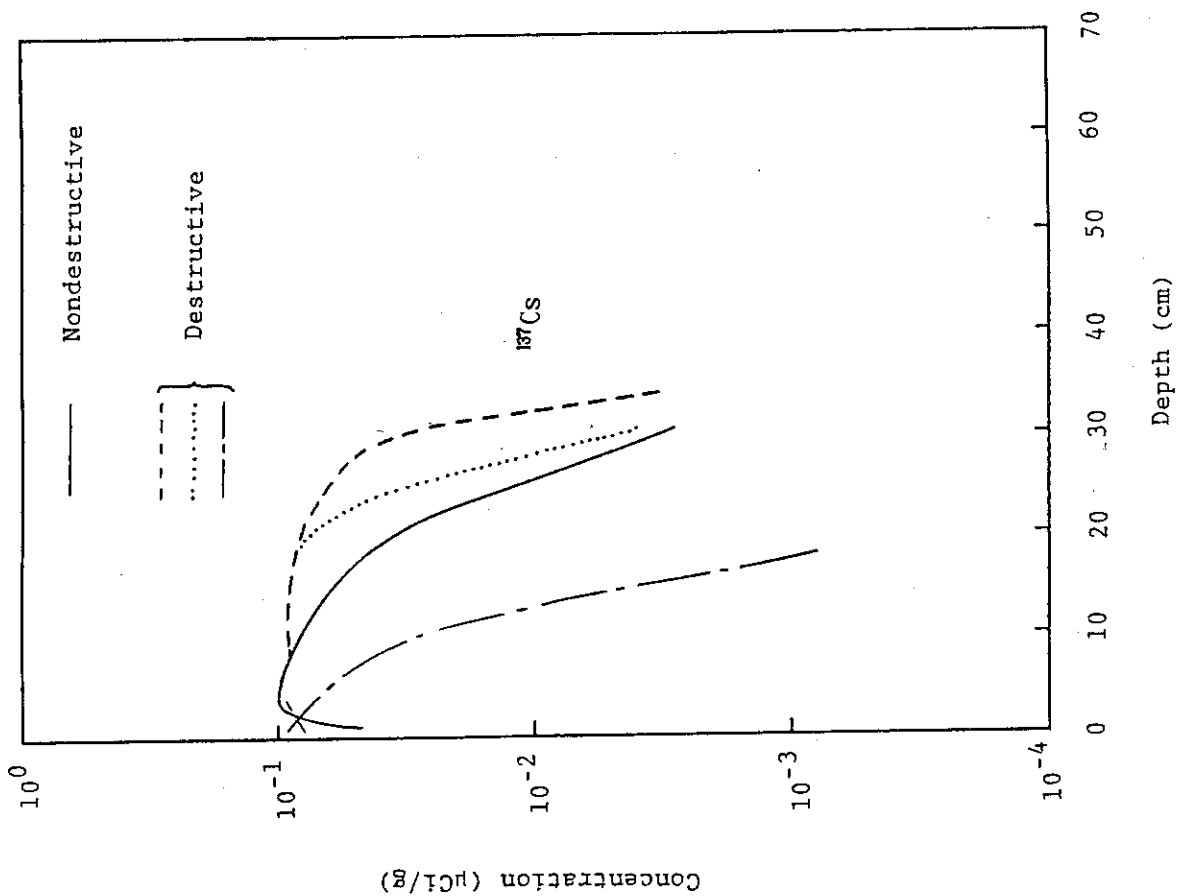


Fig.18 Concentration distribution of ^{137}Cs at vertical direction (ununiform inflow)

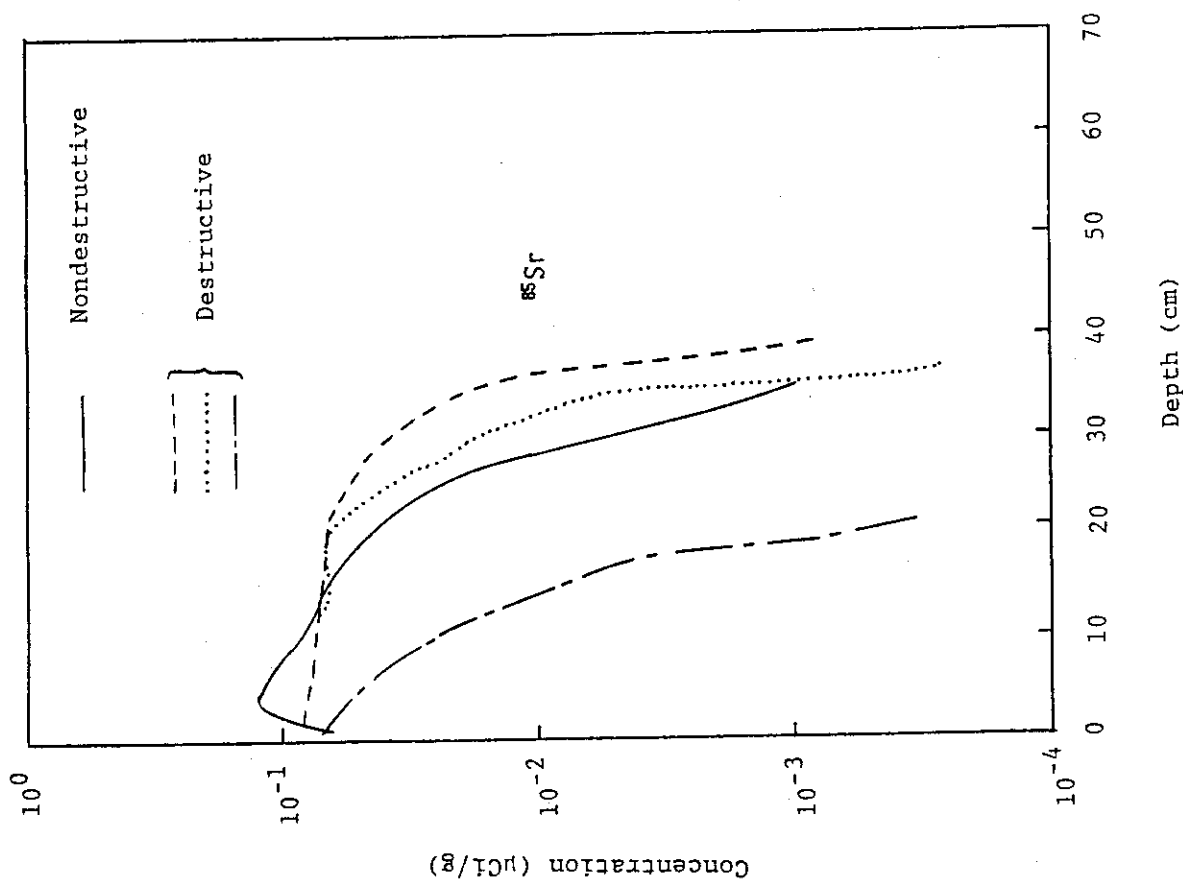


Fig.17 Concentration distribution of ^{85}Sr at vertical direction (ununiform inflow)