

JAERI - M
89-181

放射性核種地表面移行試験装置の性能試験

1989年11月

向井 雅之・山本 忠利

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合せは、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）で複写による実費頒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, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

放射性核種地表面移行試験装置の性能試験

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

向井 雅之・山本 忠利

(1989年10月13日受理)

天然バリア中における放射性核種の移行のうち、地表面における移行を調べるための試験装置として、放射性核種地表面移行試験装置を製作した。本装置は、流入機構部、土壤槽部、流出機構部、水流速測定部、土壤水分測定部等から構成され、自然状態の地表面土壤試料を用いて試験を行うことができる。性能試験として、各部に対して個別に試験を行うとともに、実際の試験条件に近い条件で各部の連携操作を確認するための総合試験を実施した。

その結果、各部は所定の性能を十分に満たしていることが確認できた。特に、核種の移行解析に重要なパラメータである地表水流速および土壤水分については、個々の性能試験ならびに総合試験において、地表流の流速分布および土壤浸透状況に関し十分な情報を得られることができた。

Performance Test on Testing Apparatus for
Radionuclide Migration on Ground Surface

Masayuki MUKAI and Tadatoshi YAMAMOTO

Department of Environmental Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 13, 1989)

Testing apparatus for radionuclide migration on ground surface was constructed to study the radionuclide migration on ground surface which is one of radionuclide migration paths in a natural barrier. The apparatus is composed of inflow section of solution, testing section of soil sample, outflow section of effluent solution, measurement section of water velocity, measurement section of water content et al., which can test the soil sample taken from natural field undestructively. As performance tests, four tests were carried out for each section and over all test was also carried out to confirm the linking of each section on the operation of the apparatus under actual test condition.

From the performance test, it is confirmed that each section accomplishes the prescribed performance of the apparatus. As to water velocity on ground surface and water content in soil, which are important parameters to analyze the behavior of radionuclide migration, it is confirmed that sufficient information can be obtained about the distribution of surface water velocity and the infiltration of surface water, from the measurement test of each section and the overall test.

Keywords: Natural Barrier, Radionuclide Migration, Ground Surface,
Performance Test, Measurement of Water Velocity,
Measurement of Water Content

目 次

1. はじめに	1
2. 各部の機能および機器仕様	1
2.1 流入機構部	1
2.2 土壌槽部	3
2.3 流出機構部	4
2.4 コントロール部	5
2.5 水流速測定部	6
2.5.1 地表流測定部	6
2.5.2 地中流測定部	8
2.6 土壌水分測定部	10
2.7 核種移動モニタ	11
3. 性能試験の方法および結果	14
3.1 通液試験	14
3.2 水流速測定試験	14
3.2.1 地表流測定試験	14
3.2.2 地中流測定試験	15
3.3 土壌水分測定試験	16
3.4 核種移動モニタ試験	16
3.5 総合試験	17
4. おわりに	19
参考文献	19

Contents

1. Introduction	1
2. Functions of sections and specifications of devices	1
2.1 Inflow section of solution	1
2.2 Testing section of soil sample	3
2.3 Outflow section of effluent solution	4
2.4 Section for observation and control	5
2.5 Measurement section of water velocity	6
2.5.1 Measurement section of surface water flow	6
2.5.2 Measurement section of subsurface water flow	8
2.6 Measurement section of water content	10
2.7 Monitoring section of radionuclide movement	11
3. Method and result of performance test	14
3.1 Test of water flow	14
3.2 Measurement test of water velocity	14
3.2.1 Measurement test of surface water flow	14
3.2.2 Measurement test of subsurface water flow	15
3.3 Measurement test of water content	16
3.4 Monitoring test of radionuclide movement	16
3.5 Overall test for apparatus	17
4. Conclusion remarks	19
References	19

1. はじめに

原子力発電所等から発生する低レベル放射性廃棄物の処分は、海洋処分の実施が実質的に中止されているため陸地処分により行われることとなり、青森県六ヶ所村を最終貯蔵・処分施設の建設地として処分計画が進められている。最終貯蔵および処分に至る安全性の確立のためには、処分廃棄物、廃棄物容器、コンクリートピット等の人工バリアより漏出した放射性核種の環境中における移行状況を正確に把握するための手法を得るとともに、放射性核種が人間を含む環境に与える影響について正確に評価することが重要になる。

日本原子力研究所では、陸地処分における移行経路のうち、我が国の場合に特に重要なと考えられている放射性核種の地中移行に関し、自然状態の土壤を用いて施設内で行う核種移行試験（環境シミュレーション試験）を実施している¹⁾。放射性核種地表面移行試験は、最終貯蔵施設建設地の地形、地質、水文等の環境条件から、地中移行とともに重要な移行経路であると考えられる地表面移行経路に関し、通気層および帶水層核種移動試験と同様に自然状態の未搅乱土壤を対象として行う核種移行試験である。最終貯蔵施設建設地の地表面土壤における放射性核種の移行、吸着状況を土質、水流速、土壤水理状態に関連させて明らかにすることにより、低レベル放射性廃棄物の陸地処分における安全性確立のために寄与することを目的としている。

本報告書は、上記目的のため製作した放射性核種地表面移行試験装置について実施した性能試験の内容および結果をまとめたものである。

2. 各部の機能および機器仕様

放射性核種地表面移行試験装置は、①地表水および放射性水溶液を設定した方法により一定流量で供給する流入機構部、②未搅乱土壤を用いて移行試験を行う土壤槽部、③流出液の採水および排水を行う流出機構部、④これらの試験状態の監視、記録、警報を行うコントロール部、ならびに測定装置として、⑤土壤表面および土壤内部の水流速の測定を行う水流速測定部、⑥土壤水の水理状態を測定する土壤水分測定部、⑦土壤槽内および流出液中の放射性核種の移動状況をモニタする核種移動モニタより構成される（図1参照）。装置各部および機器類の機能および主な機器仕様を以下に記す。

2.1 流入機構部

(1) 機能

流入機構部は地表水（化学成分の調整を行った人工地表水）および所定濃度の放射性水溶液を、それぞれ設定した流量で土壤槽部に供給するものであり、地表水タンク、地表水ポンプ、試料液タンクおよび試料液ポンプより構成される。各機器の機能を以下に示す。

1. はじめに

原子力発電所等から発生する低レベル放射性廃棄物の処分は、海洋処分の実施が実質的に中止されているため陸地処分により行われることとなり、青森県六ヶ所村を最終貯蔵・処分施設の建設地として処分計画が進められている。最終貯蔵および処分に至る安全性の確立のためには、処分廃棄物、廃棄物容器、コンクリートピット等の人工バリアより漏出した放射性核種の環境における移行状況を正確に把握するための手法を得るとともに、放射性核種が人間を含む環境に与える影響について正確に評価することが重要になる。

日本原子力研究所では、陸地処分における移行経路のうち、我が国の場合に特に重要なと考えられている放射性核種の地中移行に関し、自然状態の土壤を用いて施設内で行う核種移行試験（環境シミュレーション試験）を実施している¹⁾。放射性核種地表面移行試験は、最終貯蔵施設建設地の地形、地質、水文等の環境条件から、地中移行とともに重要な移行経路であると考えられる地表面移行経路に関し、通気層および帶水層核種移動試験と同様に自然状態の未搅乱土壤を対象として行う核種移行試験である。最終貯蔵施設建設地の地表面土壤における放射性核種の移行、吸着状況を土質、水流速、土壤水理状態に関連させて明らかにすることにより、低レベル放射性廃棄物の陸地処分における安全性確立のために寄与することを目的としている。

本報告書は、上記目的のため製作した放射性核種地表面移行試験装置について実施した性能試験の内容および結果をまとめたものである。

2. 各部の機能および機器仕様

放射性核種地表面移行試験装置は、①地表水および放射性水溶液を設定した方法により一定流量で供給する流入機構部、②未搅乱土壤を用いて移行試験を行う土壤槽部、③流出液の採水および排水を行う流出機構部、④これらの試験状態の監視、記録、警報を行うコントロール部、ならびに測定装置として、⑤土壤表面および土壤内部の水流速の測定を行う水流速測定部、⑥土壤水の水理状態を測定する土壤水分測定部、⑦土壤槽内および流出液中の放射性核種の移動状況をモニタする核種移動モニタより構成される（図1参照）。装置各部および機器類の機能および主な機器仕様を以下に記す。

2.1 流入機構部

(1) 機能

流入機構部は地表水（化学成分の調整を行った人工地表水）および所定濃度の放射性水溶液を、それぞれ設定した流量で土壤槽部に供給するものであり、地表水タンク、地表水ポンプ、試料液タンクおよび試料液ポンプより構成される。各機器の機能を以下に示す。

① 地表水タンク

試験に使用する地表水の濃度を均一に保ちつつ、試験が開始されるまでの地表水を一時貯留する。

② 地表水ポンプ

地表水タンクより流入槽へ地表水を $0.1 \sim 60 \ell/\text{min}$ の流量で移送できる。設定流量の調整はバルブにより行う。地表水タンクの液面が設定値以下に低下した場合に警報を発するとともに自動的に運転が停止する。

③ 試料液タンク

試験に使用する放射性水溶液を調整し、試験が開始されるまでの放射性水溶液を一時貯留する。

④ 試料液ポンプ

試料液タンクより流入槽および土壤槽に放射性水溶液を 2 とおりの方法 (a. 1 点または複数点により土壤槽に直接供給する, b. 人工地表水とともに流入槽に供給する) により移送する。

2.1.2 機器仕様

① 地表水タンク

寸 法 : $1873 \text{ mmL} \times 800 \text{ mmW} \times 992 \text{ mmH}$

容 量 : 1 m^3 , 2 基

材 質 : SUS 304

そ の 他 : 搅拌器, 水温計センサ, 水位計が取り付けられている

② 地表水ポンプ

形 式 : 涡巻ポンプ

電 動 機 : 三相誘導型, 0.75 kW

吐 出 量 : $60 \ell/\text{min}$

全 揚 程 : 15 m

材 質 : ステンレス (接液部)

③ 試料液タンク

寸 法 : $565 \text{ mm} \phi \times 860 \text{ mmH}$

容 量 : 200ℓ

材 質 : ポリエチレン (接液部), 鉄および鉛 (遮蔽体)

そ の 他 : 搅拌器, 水温計センサ, 水位計が計り付けられている

④ 試料液ポンプ

形 式 : ダイヤフラム式定量ポンプ

吐 出 量 : 最大 $1 \ell/\text{min}$

吐 出 圧 : 最大 $7 \text{ kg}/\text{cm}^2$

材 質 : SUS 304 およびテフロン (接液部)

2.2 土壌槽部

(1) 機能

土壌槽部は、流入槽、土壌槽および流出槽より構成され、人工地表水および所定濃度の放射性水溶液を設定した流入方法により流入槽を通して土壌槽に供給し、土壌槽から流出した水を流出槽で集水するものであり、対象土壌として未攪乱状態で採取した地表面土壌を取り扱うことができる。各機器の機能を以下に示す。

① 流入槽

地表水タンクから移送された人工地表水および試料液タンクから移送された放射性水溶液を前述した2種類の流入方法で供給できる。流入槽と土壌槽の間のフィルターを交換することにより土壌試料へ供給する水の深度を特定し、流入側の境界条件を設定できる。

② 土壌槽

未攪乱状態で採取した地表面土壌が収納されている試料容器を装填し、放射性核種の移行状況を調べる槽である。試験に使用する各検出器は土壌槽の蓋に固定する。また、既設の傾斜台に接続し、試料の表面状況に応じて、流れと直角横方向の傾斜調節が容易にできる。

③ 流出槽

地表を流れた水と地中を流れた水中の放射能濃度を別々に調べるために、地表流出水と地中流出水とを別々に集水できる。また、流入槽と同様に、流出槽と土壌槽の間のフィルターにより流出側の境界条件を設定できる。土壌の流出が予想されるため、可動部分のない電磁流量計により地表流出水および地中流出水の流量を測定する。

(2) 機器仕様

① 流入槽

寸法 : 750 mmW × 150 mmD × 400 mmH

容量 : 33.75 ℥

材質 : 透明アクリル

構造 : 図2参照

② 土壌槽

寸法 : 750 mmW × 2512 mmD × 400 mmH

容量 : 565.2 ℥

材質 : SUS 304

構造 : 図3参照

③ 流出槽

寸法 : 750 mmW × 300 mmD × 400 mmH

材質 : 透明アクリル

構造 : 図4参照

2.3 流出機構部

(1) 機能

流出機構部は、土壤槽部から流出した水の採水および一時貯留を行うものである。各機器の機能を以下に示す。

① オートサンプラー

土壤槽部の流出槽から流出した地表流出水および地中流出水を一定時間間隔で一定量採取する。

② 流出液計量容器

流出槽から流出した水の一時貯留を行うものであり、一定の水位に到達すると水中ポンプにより排水される。既設の流出液計量容器の配管に一部改造を加え、最大流量時でも対応できる。

③ 流出液イオン分析器

流出槽から流出した水溶液中の無機イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等) を定量する。

(2) 機器仕様

① オートサンプラー

サンプル数：1ℓサンプル容器 24本

計量方法：フロートスイッチによる液面検出

計量間隔：最小2分間隔（地表水用）

材質：SUS 304 および透明塩化ビニール（接液部）

② 流出液計量容器

寸法：600 mmW × 800 mmL × 600 mmH

容量：200 ℓ

材質：SUS 304

構造：図5参照

③ 流出液イオン分析器

a. 電気伝導度検出部

測定感度： $0.1 \sim 5120 \mu\text{S cm}^{-1}$

セル容量： $0.25 \mu\ell$

セル材質：SUS 316, テフロン, 三フッ化エチレン

b. 送液部

流量範囲： $0.1 \sim 9.9 \text{m}\ell/\text{min}$

流量安定性： $\pm 0.5\%$ ($0.1 \sim 5 \text{m}\ell/\text{min}$)

接液部材質：SUS 316, ハステロイC, ルビー他

c. オープン部

方式：強制空気循環方式

温度制御範囲：室温 + 10 °C ~ 99 °C

温度制御精度： $\pm 0.12^\circ\text{C}$

2.4 コントロール部

(1) 機能

コントロール部は、運転および測定に関するスイッチ、調節等の機能を集中的に操作するとともに、各機器および運転状態の監視および記録を行い、警報の確認を行うものである。各機器の機能を以下に示す。

① 操作盤

操作内容は、地表水ポンプの起動および停止であり、監視および記録内容は、流入槽への地表水の流入流量および積算流入量、流出機構部への地表流下水の流出流量、積算流出量、また、警報内容は、地表水タンク液面低下による警報である。

② 中央操作盤

コントロール室に設置されている既設の帯水層用地中シミュレーション装置²⁾のコントロール部中央操作盤を利用して、試料液ポンプの起動および停止、オートサンプラーの起動および停止等の操作、放射性水溶液の流量表示および積算表示記録、地中流出水の流量積算表示記録等の監視、試料液タンクの液面低下警報、オートサンプラーの漏水警報等の警報を行うとともに、上記新設操作盤との配線により、地表水ポンプの起動および停止操作ができる。

(2) 機器仕様

① 操作盤

寸法 : 500 mmW × 2000 mmH × 700 mmD

電源 : AC 100 V および 200 V

絶対抵抗 : 500 Vにおいて 5 MΩ以上 (温度 20 °C, 湿度 65 %)

a. 電磁流量計

公称径 : 6 A および 25 A

ライニング材 : テフロン、ポリウレタンゴム

流量範囲 : 6 A : 0.031 ~ 1.02 m³/hr 25 A : 0.53 ~ 17.7 m³/hr

b. 流入液および流出液流量記録計

チャート速度 : 25, 50, 100 mm/hr

測定範囲 : 0 ~ 100 ℥/min

c. 流入液および流出液積算記録計

チャート速度 : 20 mm/hr および 20 mm/min

測定範囲 : 0 ~ 2000 ℥

d. 液面計

形式 : リード式

スイッチ定格 : 220 VA, MAX 1 A AC

測定範囲 : 0 ~ 1020 mm

2.5 水流速測定部

本測定部は、地表水および地中水の流速分布を測定するものであり、地表水用と地中水用の2つの測定部により構成される。

2.5.1 地表流測定部

地表水の流れおよび地表面をなるべく乱さないような測定部として、各種の測定法（テレビカメラによる浮遊粒子追跡法、赤外線カメラによる温水追跡法、レーザー流速計、超音波測定法他³⁾）を検討した結果から、測定対象となる水深（約1mm～約1cm）、流速（数mm/s～数10cm/s）を考慮してレーザー流速計を使用している。レーザー流速計は、2本のレーザー光線が交差する極微小の位置に発生する既知間隔の干渉縞を、水中に浮遊している微粒子が通過する際に発生する散乱光の周波数を測定することにより、微粒子が水と同速度で移動しているとの仮定の基に水流速を求める方法である（図6参照）。

(1) 機能

地表流測定部の構成を図7に示す。FLVプローブにより測定した微粒子の移動速度はデータ処理部による統計処理により地表水の平均流速として計算され、3次元トラバース装置による流速分布の測定結果はデジタル記録および図形表示として処理することができる。各機器の機能を以下に示す。

① FLVユニット

2本のレーザービームを発生させFLVプローブに伝送するとともに、FLVプローブ先のレーザービームの交差点に発生した干渉縞を横切る水中の微粒子により反射した散乱光をユニット内のフォトマルチプライヤーにより増幅しカウンタタイプ信号処理器に出力する。

② FLVプローブ

FLVユニットより光ファイバーで伝送された2本のレーザービームを交差させ、干渉縞を発生させるとともに、干渉縞を横切った微粒子からの反射光を集光しFLVユニットに返送する。

③ カウンタタイプ信号処理器

増幅された散乱光による電気信号のノイズを除去し、有効となるデータを分離するとともに、水中の微粒子による干渉波の散乱周波数を計測し地表水流速を求める。

④ 地表面変位計

レーザー光を利用した三角測量方式により地表面の凹凸状態を測定し、FLVプローブの焦点を3次元トラバース装置によって自動的に地表水流中に合致させるための位置データをあらかじめ収集する。

⑤ 3次元トラバース装置

地表面試料上の任意の位置における地表流の流速を自動的に測定するため、X, Y, Z各軸に取り付けられたパルスモーターをデータ処理部でコントロールすることによりFLVユニットおよび地表面変位計を移動させることができる。

(6) データ処理部

3次元トラバース装置に取り付けたFLVプローブをあらかじめ測定した地表面土壤の凹凸状態に従って自動的に移動させるとともに、信号処理器からのデータを取り込みフロッピーディスクに収録することができる。また、収録したデータを呼び出して、データ処理と簡単な図形処理を行うことができる。

(2) 機器仕様

① FLVユニット

レーザー出力 : 10 mW, He-Ne レーザー

周波数帯域 : 1 kHz~25 MHz

光電変換器 : フォトマルチプライヤー

寸法 : 170 mmW×180 mmH×800 mmD

② FLVプローブ

焦点距離 : 約 160 mm

ビーム間隔 : 30 mm

流速較正係数 : 約 3.4 (m/s)/MHz

③ カウンタタイプ信号処理器

入力電圧 : 10 mV~1 V

出力 : デジタル 10 bit, アナログ 最大 10.24 V

寸法 : 436 mmW×149 mmH×456 mmD

④ 地表面変位計

形式 : 半導体レーザー (波長 780 μm)

測定範囲 : センサから 30 mm~50 mm

分解能 : 10 μm

⑤ 3次元トラバース装置

駆動方式 : パルスモーター

ストローク : X軸: 2412 mm, Y軸: 750 mm, Z軸: 200 mm

移動速度 : X軸: 5~40 mm/s, Y軸: 5~40 mm/s, Z軸: 5~21 mm/s

移動精度 : X軸: ± 1 mm, Y軸: ± 1 mm, Z軸: ± 0.4 mm

⑥ データ処理部

a. C P U

形式 : PC-9801 VX 2

インターフェイス : デジタル I/O ボード, A/D 変換ボード

b. C R T

形式 : PC-KD 853

c. プリンタ

形式 : 24 ドットインパクトマトリックス方式

印字速度 : 120 字/秒 (HS パイカ), 45 字/秒 (漢字)

2.5.2 地中流測定部

小流量時の比較的遅い地中水の流速を測定できる測定部として、既設の帶水層水流速測定装置(パルス加熱型差温検出方式)⁴⁾を改造したものを使用している。主な改造内容は、a.測定温度差の精度を向上させること、b.画面对話方式により操作性を向上させること、c.土壤への搅乱の少ない検出器を使用すること、である。

(1) 機能

地中流測定部の構成を図8に示す。各機器の機能は以下のとおりである。

① 計測制御器

検出器の2つのセンサ間の温度差をブリッジ回路で検出し電圧に変換するとともに、データ処理部で処理できるように増幅回路で電圧の増幅を行う。また、パルス発生回路により検出器のヒータに供給する電源のタイミングをコントロールする。計測制御器のうち、ブリッジ回路の入力点数を従来の9組から45組に増加させることにより安定化させた。また、増幅回路の精度を従来の±0.1°Cから±0.02°Cに改善することにより、水流速の遅い場合に対応できるようにした。

② 電源

同時に9チャンネルのヒータに所定の電力を供給する。印加電流発生回路の精度を従来の±0.5Aから±0.05Aに向上させることにより、チャンネル毎のセンサ間の電力のバラツキを減少させた。

③ 検出器

所定の熱量を発生させるためのヒータならびに上流および下流側に配置した2本の温度センサにより構成される。水の流動がある場合には、下流側の温度センサまで運搬される熱量が、水の移流により増加するのを検出する。従来の検出器の土壤に挿入される部分の大きさを小さくすることにより、地中水の流動に与える影響を減少させた。

④ データ処理部

測定条件の設定、テスト測定、測定、水流速の計算等が行えるとともに、測定結果をフロッピーディスクに記録し、画面およびプリンタに出力することができる。これらの操作をパソコンのCRTモニタを使用した画面对話方式によって行うことにより、操作性を向上させた。

⑤ 記録部

9チャンネルの検出器の温度差測定値の経時変化を3ペン記録計3台により同時に記録することができる。チャートの起動は測定とともに開始され測定の終了とともに停止する。加熱終了時のマーカーが自動的に記録される。

(2) 機器仕様

① 計測制御器

入力インピーダンス : 100 MΩ

A/Dコンバータ : 12 bit + 符号

精度 : 0.15% + 1 bit

分解能 : 2.5 μV (10 mV フルレンジの時)

インターフェイス : RS-232C 絶縁型

a. ブリッヂ回路

形 式 : ホイストンブリッヂ型検出回路

測定温度範囲 : 20 °C ~ 30 °C

入力点数 : 90点(45組)

b. 増幅回路

形 式 : 温度差増幅回路

測定温度差範囲 : 5 °C

精度 : ± 0.02 °C

入力点数 : 18点(9組)

c. パルス発生回路

チャンネル数 : 9チャンネル

設定時間範囲 : 0~99秒

② 電 源

形 式 : 絶縁型定電流電源

出力範囲 : 0.1~3A, 0.1A毎に設定可能

精度 : ± 0.05 A

出力点数 : 9点

③ 検出器

材 質 : SUS 304

センサ形式 : セラミック

ヒータ, センサ距離 : 上流側: 20 mm, 下流側: 10 mm

構 造 : 写真1参照

④ データ処理部

a. C P U

形 式 : PC-9801VX2

メモリ : 640 Kバイト(本体), 4Mバイト(増設)

専用ソフト : 画面対話操作式測定プログラム

b. C R T

形 式 : PC-KD 853

c. プリンタ

形 式 : NM-9700

⑤ 記録部

精度 : ± 0.25 %fs

感 度 : ± 0.1 %fs

チャートスピード : 2~120 cm/min or hr (10段階)

2.6 土壌水分測定部

測定部には、ポーラスカップを使用して土壌水分張力を測定し、較正式によって土壌水分を求める方法を使用している。測定中に表面流および地中流の搅乱が生じにくい構造および測定法であり、測定後の土壌の搅乱を小さくすることができる。また、地表面近くの土壌水分は比較的速く変動するが、過渡的変化に十分追従し短時間で測定できる。

(1) 機能

本測定部は土壌水分の分布および分布の経時変化から水分移動図を求めるのに十分な36点の測定点を有し、測定値は記録計およびプリンタに出力される（図9参照）。各機器の機能を以下に示す。

① 測定本体

圧力センサからの電気信号を変換して、圧力値（水柱高）で表示する。表示チャンネルおよび測定レンジは前面のスイッチで切り替えることができる。

② テンシオメータ

土壌中に挿入したセラミックのテンシオカップ中の水と土壌水の圧力を平衡にすることにより、土壌水の圧力を圧力センサに導くことができる。

③ 圧力センサ

テンシオメータ中の圧力を電気信号に変換し、測定本体まで伝える。

(2) 機器仕様

① 測定本体

出 力 : 0~10 mV

表 示 範 囲 : pF 0~2.7 (5 m レンジ), pF 0~3.0 (10 m レンジ)

測 定 点 数 : 36 点

② テンシオメータ

耐 圧 : pF 3.0

カッブ寸法 : 8 mm ϕ × 70 mmL

材 質 : 透明塩化ビニール, ステンレス, セラミック

構 造 : 図10 参照

③ 圧力センサ

形 式 : 半導体ストレインゲージ

定 格 圧 力 : $\pm 1 \text{ kg/cm}^2$

精 度 : $\pm 0.1\% \text{ fs}$

温 度 影 韶 : $\pm 0.1\% \text{ fs}/^\circ\text{C}$

④ レコーダ

測 定 点 数 : 60 点

インターフェイス : シリアルインターフェイス (RS-232C規格に準拠)

2.7 核種移動モニタ

(1) 機能

核種移動モニタは、土壤試料に放射性水溶液を流入したときに、土壤槽の上流側と下流側、および流出機構部の配管に NaI 検出器を配備し、各測定点における放射性核種の移動フロントをモニタする。核種移動モニタの構成を図 11 に、各機器の機能を以下に示す。

① 検出部

a. 土壤槽検出部

試験装置土壤槽部の土壤槽上部に設置し、槽内土壤および流水中の放射性核種から放出される γ 線を検出し、移動変化を測定する。 ^{137}Cs と ^{60}Co とを分離測定できるのに十分なエネルギー分解能を有するとともに、検出対象物以外からの γ 線の影響を少なくするためコリメータを備えている。コリメータは槽上部の特定の位置で移動可能である（写真 2 参照）。

b. 流出液検出部

試験装置流出機構部の流出配管に接続し、流出液中の放射性核種から放出される γ 線を検出し、濃度変化を測定する。 ^{137}Cs と ^{60}Co とを分離測定できるのに十分なエネルギー分解能を有している。約 2.4 ℓ 溜られる容器内の流出液を、検出対象物以外からの γ 線を十分に遮蔽できる鉛製遮蔽容器（厚さ 5 cm）に入れて測定することができる（写真 3 参照）。

② エレクトロニクス部

検出部で検出した γ 線パルスを MCA 部に転送する前に電気的処理を行う。 γ 線パルスを任意に設定したある特定のエネルギー範囲で分別して MCA 部の MCS に転送するとともに、別系統でエネルギー情報を有する γ 線パルスを MCA 部の PHA に転送することができる。

③ MCA 部

エレクトロニクス部より転送された γ 線パルスの分析、処理、表示およびパーソナルコンピュータ部へのデータの転送を行う。a. MCS (Multi-Channel Scale), b. PHA (Pulse Height Analyze), c. データ処理・表示, d. インターフェースに大別され、それぞれ以下の機能を有している。

a. MCS

γ 線パルスを分析して単位時間当たりの γ 線パルス数の経時変化（時間スペクトル）を作成することができる。

b. PHA

ADC と PHA メモリより構成され、 γ 線パルスを分析してエネルギースペクトルを作成することができる。

c. データ処理・表示

エネルギースペクトルを較正して、核種の同定を行うことができる。また、エネルギースペクトル、時間スペクトルを表示することができる。

d. インターフェース

エネルギースペクトル、時間スペクトルをパーソナルコンピュータ部に転送することができる。

(4) パーソナルコンピュータ部

MCA部で分析したデータをパーソナルコンピュータにより処理して収録することができる。

(5) ソフトウェア部

パーソナルコンピュータ部を作動させるためのもので、コンピュータのハードウェアを作動、管理する（起動、データ交換、メモリ管理、ファイル管理など）、MCA部を作動、管理する（MCAの起動、停止、データの分析、記録、転送など）、時間スペクトルおよびエネルギースペクトルの経時変化を解析して、核種の移動変化および流出液の濃度変化を求めることができる。

(2) 機器仕様

(1) 検出部

a. NaI(Tl) 検出器

エネルギー分解能 : 8.5% (^{137}Cs に対して)

クリスタルサイズ : 2 × 2 インチ

b. プリアンプ

出 力 : 0 ~ 10 V

温度安定性 : < 0.005% / °C (0 ~ 50 °Cに対して)

(2) エレクトロニクス部

a. Amplifier & Bias Supply

アンプゲイン : 5 ~ 1250

アンプ出力 : 0 ~ 10 V

温度安定性 : 0.01% / °C 以下

b. 高圧電源

出 力 : ± 10 ~ 3000 V

安定性 : < 0.01% / hr, < 0.03% / day

c. 増幅器

ゲイン : 1 ~ 1500

時定数 : 0.5, 1, 2, 3, 6, 10 μs

d. SCA

非直線性 : ± 0.25% fs 以下

e. ビン電源

出 力 : ± 12 V 2 A, ± 24 V 1 A

長時間安定度 : ± 0.3% 以下

(3) MCA部

a. MCS

メモリサイズ : 4Kチャンネル, 20 データビット

メモリ分割 : 2分割, 4分割, 8分割

デッドタイム : 70 nsec / デュエル間

b. PHA

• ADC

入 力 : 0~10V

温 度 安 定 性 : ± 0.01 % / °C 以下

• PHA メモリ

メモリ サイズ : 8K チャンネル, 20 データビット

メモリ 分割 : 2分割, 4分割, 8分割

デッド タイム : 2 μsec + ADC 変換時間

c. データ処理・表示

エネルギー 調正 : 5 点直線近似

表 示 式 : 最大 5 スペクトラム

表 示 画 面 : 12 インチ, カラー

d. インターフェース

規 格 : RS - 232C 準拠

転送速度 : 9600 BPS

④ パーソナルコンピュータ部

a. CPU

形 式 : PC - 9801 VX4

b. CRT

形 式 : PC - KD 853

⑤ ソフトウェア部

a. オペレーティングシステム

形 式 : DS - P 01 M / MS

b. MCA エミュレーションプログラム

形 式 : DS - P 100 / MS

c. データマネージメントプログラム

形 式 : DS - PLLW / MS

3. 性能試験の方法および結果

各部の性能試験として、通液試験、水流速測定試験、土壤水分測定試験、核種移動モニタ試験を行うとともに、本試験条件における各部の連携操作の確認のために総合試験を行った。各試験の詳細を以下に記す。

3.1 通液試験

(1) 試験方法

地表水ポンプにより地表水を複数の流量で土壤槽部に供給し、流出槽、オートサンプラーおよび流出液計量容器より水がスムースに採水、排水できることを確認する。

(2) 試験結果

地表水を $4\text{ l}/\text{min}$ 、 $7\text{ l}/\text{min}$ および $15\text{ l}/\text{min}$ の流量で流下させた時の流量計の記録を図12に示す。図中の各番号の説明を以下に示す。

- ① 流入槽への地表水の流入を開始した。
- ② 流入流量を段階的に増加させ、最終的に $4\text{ l}/\text{min}$ に設定した。
- ③ 流出槽から地表流出水の流出が発生し始めた。
- ④ 流出液配管内の空気が抜けたために流速の振れが生じたと考えられる。この振れを除いた期間においては流量は非常に安定していた。
- ⑤ 流入槽への地表水の流入を停止した。
- ⑥ 地表水タンクに取り付けた搅拌器により液面計が誤動作したため地中水ポンプが停止したことによる。
- ⑦ 搅拌器の運転により巻き込まれた空気が流量計に影響したためと考えられる。

これらのことより、各設定流量、特に小流量時であっても安定して地表水の供給が行えることが確認できた。流量が大きい場合には搅拌器による空気の巻き込みに注意することにより安定して地表水を供給できるものと考えられる。オートサンプラーについては、各流量において採水間隔を10分間に設定し地表水の採水を行い、正常に作動することを確認した。また、流出液計量容器の排水ポンプについても正常に作動することが確認できた。

3.2 水流速測定試験

3.2.1 地表流測定試験

(1) 試験方法

- ① 空の土壤槽に地表水を地表水ポンプにより供給し土壤槽底部に水流を発生させ、定常に流下するまでしばらく放置する。
- ② 定常状態に到達したら水面上に発泡スチロール等の浮遊物を落下させ、単位距離を通過

するのに要する時間をストップウォッチ等を用いた手動計時により測定し、計算により水流速を求め（浮子法）、 $3 \text{ mm/s} \sim 30 \text{ cm/s}$ の範囲内に設定されていることを確認する。

- ③ 地表水水流速測定部により水流速測定設定位置の中央のなるべく水面に近い部分の水流速の測定を行う。
- ④ 地表水ポンプの流量設定を変えて水流速を変化させ、②③の測定を繰り返して行う。

(2) 試験結果

浮子法および地表水流速測定部（レーザー法）による地表水の水流速測定結果を表1に、両測定法による測定結果の相関関係を図13に示す（図中の実線は1:1の関係を示す）。なお、土壤槽底部に水流速測定用流路として、幅80mm、長さ800mmの流路を設置した。また、流速により流路の長さの設定値を変化させ浮子が側壁に付着しないうちに通過できるようにして測定した。

浮子法による測定方法は簡易的なものであり、表面張力、水面上の気流等の影響により測定値に誤差が生じ易い。また、浮子法は水面流速を測定し、レーザー法は水中に存在する微粒子の移動速度を測定する方法であるため、測定値を直接比較することはできないが、両者の測定値は概ね一致しており十分な性能を有していると判断できる。

両測定方法により測定した流速の相関関係を表した図13によれば、両測定方法の測定値は良好な直線関係を示している（図中の破線）が、レーザー流速計で測定した流速がわずかながら小さくなる傾向がみられ、その比率はほぼ0.87であった。これは層流状態の浅水流れ（水路幅に対し水深が十分浅い流れ）においては、流速深度分布の最大値が水面における流速になること⁵⁾から説明することができる。また、 $3 \text{ mm/s} \sim 30 \text{ cm/s}$ の範囲内で5段階に設定した各流速条件における個々の微粒子の代表的な流速分布ヒストグラム（図14(1)～図14(5)）によれば、最大流速設定時（287mm/s）を除き個々の微粒子の流速分布が正規分布状の分布を示していることが分かる。最大流速設定時は、流速に2つの成分が存在しそれらが重ね合わされた分布を示している。最大流速時には、水面に交差した波紋が観測されており、不規則な流速分布が存在したために生じたものと考えられる。

3.2.2 地中流測定試験

(1) 試験方法

地中流速部の性能を確認するため、次の試験を行う。

- 1) 計測制御部の設定電力を10Wにしてヒータを水中に入れ加熱し、電圧計により求めたヒータ電圧と、回路中の標準抵抗器（0.1Ω）の電圧から計算されるヒータ電流とを乗算して求めた電力計算値と設定値とが等しく測定値のバラツキがないことを確認する。
- 2) 標準温度計によって 27.5°C に設定した恒温槽に下流センサを挿入し下流温度測定を行い、測定値と設定値とが等しく測定値のバラツキがないことを確認する。
- 3) ベックマン温度計によって 27.3°C および 27.5°C に設定した2つの恒温水槽の中に上流センサおよび下流センサをそれぞれ挿入し上流と下流の温度差測定を行い、測定値と設定値とが等しく測定値のバラツキがないことを確認する。

(2) 試験結果

各測定試験結果を表2～表4にそれぞれ示す。表2に示されるように電圧および電流の測定値より計算される電力値(計算値)と設定電力(モニタの値)との差は、最大0.10W(設定電力値の1%)であり、バラツキもほとんどなかった。

温度の測定結果を示した表3によれば、測定温度は全チャンネルとも設定温度(恒温水槽の温度)より0.1°C低かった。地中水の流速を計算するために測定点の温度の絶対値を用いるわけではなく、内部調整(ソフトウェア)によって修正できるため十分の性能を有しているといえる。

2つの恒温水槽の温度差と測定温度差との比較を示した表4から明らかなように、水流速の計算に実際に用いるセンサ間の温度差測定結果は一致した。

3.3 土壌水分測定試験

(1) 試験方法

- ① 総合試験に使用する土壌を3つの容器に入れて、1つはそのまま、他の2つはそれぞれ0.25ℓおよび0.5ℓの蒸留水を加えて3種類の異なる含水率の土壌サンプルを作成する。
- ② 土壌サンプルの入った3つの容器の中に長さの異なる3本のテンシオメータをそれぞれ挿入し、ゼロ調節を行った後、土壌水分張力(ϕ)の測定を行い、測定値をpF値に変換する($pF = \log(|\phi|)$)。
- ③ 同じ土壌を使用して作成したpF値～含水率の関係を表した較正曲線(図15参照)を使用して測定値に対応するpF値を含水率に変換する。
- ④ 一方、土壌水分測定後、残った土壌を内容積100mℓのサンプル管を用いてサンプリングし、乾燥法により含水率の測定を行う。

(2) 試験結果

土壌水分測定部および乾燥法により求めた測定結果を表5に示す。テンシオメータと比較するために行った乾燥法に使用する土壌はテンシオメータの埋め込まれていた所の土壌であることが最も望ましい。また、較正曲線に使用する土壌も実際にテンシオメータが埋め込まれていた土壌を使用して作成することが望ましい。しかしながら、これらの方法は、本試験においても放射性核種を使用する試験においても実際的ではない。このため、土壌の充填率を変えた3種類の土壌サンプルを用いて較正曲線を作成し、テンシオメータの測定後サンプリングした土壌の乾燥密度に最も近い較正曲線を使用することで、誤差を減少させる方法を用いた。したがって、両方法の測定値の厳密な比較はできないものの、表5に示されているように両測定値は概ね一致しており、土壌水分測定部は十分な性能を有していると判断できる。

3.4 核種移動モニタ試験

(1) 試験方法

核種移動モニタの性能を確認するため、次の試験を行う。

- 1) 既知放射能の3核種(^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co)模擬サンプル(液体)を土壤槽検出部の鉛直下を一定の速度で通過させ、3核種の計数率の経時変化を測定し、移動変化に追従できることを確認する。
- 2) 既知濃度の3核種水溶液で満たされた流出液検出部に蒸留水を流入させながら3核種の計数率の経時変化を測定し、3核種が分離できかつ濃度変化に追従できることを確認する。

(2) 試験結果

- 1) 各核種の放射能量が約1 μCi の液体試料(直径8 cmのプラスチック容器)を土壤表面に置き、その上部に設置した土壤槽検出部を3分間当たり5 cm移動させつつ各核種の計数率を測定した結果を表6に示す。また、計数率の変化をグラフに表したものを見図16に示す。

核種の種類によって計数率変化が異なるものの ^{85}Sr で約11 cm, ^{137}Cs で約14 cm, ^{60}Co で約12 cm中心より離れると計数率が2分の1に減少し、20~30 cm中心より離れると計数率がほぼ一定になった。このことより土壤槽検出部で測定される放射性核種は土壤表面において検出器を中心とする半径30 cmの範囲であることが判明した。さらに、この範囲内に放射性核種が均一に分布している場合、測定される計数率のうち、半径20 cmの範囲内の放射性核種による全計数率に対する寄与率は ^{85}Sr で0.90, ^{137}Cs で0.74, ^{60}Co で0.75であった。

- 2) ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{85}Sr の濃度がそれぞれ 6.1×10^{-3} , 7.0×10^{-3} , $8.8 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{mL}$ の放射性水溶液を流出液検出部(内容積1500 mL)に満たし、140 mL/minの流量で蒸留水を流入させつつ各核種の計数率を測定した結果を表7に示す。また、計数率の変化をグラフにしたものを見図17に示す。

図17に示されるように、蒸留水の流入とともに3核種とも初期状態の計数率より指数関数的に減少している。検出部内の放射性核種濃度が検出限界に近い測定開始より39分以降の試験データを除いたものについて1次の回帰式による近似を行った結果、1分当たりの濃度の減少率が3核種ともに0.88となった。蒸留水の流入量と検出部の内容積から計算される濃度の希釈率は、押しだし流れを仮定した場合は一定値ではなく、毎1分ごとに0.91, 0.90, 0.89, 0.87と徐々に希釈率が増加する結果となる。一方、完全混合を仮定した場合は一定値となり、1分あたり0.91となる。測定結果はこれらの希釈率の中間的な値であると考えられることより、流出液検出容器内では、混合過程を主としているものの部分的な押しだし流れも存在することが推測できる。

3.5 総合試験

(1) 試験方法

実際に行う試験に近い条件で測定作業が行えることを確認するとともに、各部の連携操作を系統的に確認することを目的として、土壤層に土壤を充填した後、下記の手順に従って総合試験を行う。

- ① 地表流測定部を作動させ、測定用ソフトウェアによりあらかじめ設定した位置における地表面データ(凹凸状態)を地表面変位計で測定する。
- ② 土壤槽に蓋を取り付け、土壤水分測定部の検出部を土壤表面から5, 15, 25 cm下に各12

本ずつ埋設する。

- ③ 所定の流量で地表水タンク内の地表水および試料液タンク内の試料液を地表水ポンプおよび試料液ポンプにより流下させ、土壤槽内36点における土壤水分の経時変化を測定する。
- ④ 同時に、流入、流出機構部に取り付けられた電磁流量計により流量を測定する。
- ⑤ 流出槽から流出した水溶液をオートサンプラーにより採水する。
- ⑥ 土壤水分の変化が定常状態に達した後、水の供給を止めて土壤水分測定部検出部を取り外す。
- ⑦ $0.1 \ell/\text{min} \sim 60 \ell/\text{min}$ の範囲内で地表水の流量を変化させ、①で測定した地表面データを使用した地表水流速の測定を設定位置において行い、データファイルの表示および等速線図処理を行う。

(2) 試験結果

- 1) 地表面変位計による地表面位置データ取り込み設定位置(XおよびY座標)および測定データを図18および表8に示す。なお、変位計の測定値は、+が土壤表面が基準面よりも低いことを表している。

測定位置は土壤槽に蓋をした状態でも行えるように、蓋の開口部に合わせて設定するとともに、等速線図処理を行うためにXおよびY軸の間隔が一定である必要がある。また、流速の測定およびトラバースの移動に要する時間を考慮すると測定点をあまり増加させることも難しい。これらのこと考慮し、X軸に7点(310 mm間隔)、Y軸に5点(150 mm間隔)、計35の測定点を設定した。

変位計の測定値によれば、流入槽に近い部分(上流)の土壤表面が全体的に基準面よりも7~9mm低いことが読み取れる。また、流出槽に近い部分(下流)の土壤表面の左岸側(Y座標が大きい側)に、基準面よりも特に高い部分が存在することが分かる。

- 2) 土壤水分測定部のテンシオメータの埋設位置および埋設深度を図19および表9にそれぞれ示す。テンシオメータを埋設後、内部を脱気水で満たし圧力変換器を取り付け、記録計で検出器の出力電圧のモニタを行い定常状態になった後、地表水を $3 \ell/\text{min}$ の流量で流入槽より土壤槽へ流入させ、約1.5 hにわたり土壤水分の経時変化を測定した。

測定データ(電圧値)を各列ごとに土壤水分張力に変換し、あらかじめ求めておいた較正曲線(図15参照)を使用して含水率に変換し、土壤水分の経時変化をまとめた結果を図20(1)~図20(4)に示す。なお、各列の測定値は同一深度の検出器による3本の測定値を平均して求めたものである。

図20(1)~図20(4)より、土壤水分の上昇し始まる時刻が後列になるほど遅れること、埋設深度の深い検出部から順番に土壤水分が増加することが読み取れる。これらることは、地表水が土壤表面を完全に流れ出す前に、土壤を浸透し地中を通り流入槽から流出槽へと流れ出した観察結果とよく一致している。

- 3) 地表水流量を $4 \ell/\text{min}$, $7 \ell/\text{min}$, $15 \ell/\text{min}$ の3点に設定した後、それぞれの地表水の水流速の測定を行った。地表水流速測定部による各流量における地表流速分布のデータファイルおよび等速線図を表10(1)~表10(3)および図21(1)~図21(8)に示す。

1)で指摘したように、下流の左岸側(Y軸の値が675 mm)の土壤表面が高いために土壤

が露出し、測定できなかった測定点が発生した。このため、各等速線図の下流側の左岸側に流れと平行の等速線が密に表示されているが、その原因は測定できなかった測定点の測定値がゼロとされたためである。このことを考慮して各等速線図のパターンを読み取ると、上流側よりも下流側の高度が低いことを反映して下流側の流速が全般的に速くなっているものの等速線は流路幅方向に平行になっており流路幅方向の流速分布は比較的均一であることが分かった。また、流量が増加するにつれ流速が増大する傾向となっている。

土壤の凹凸により土壤が露出し、地表水流速が測定できない点が生じると、測定値がゼロとして処理されるため等速線図の作図にかなりの影響があることが分かった。このような不均一な流速分布は核種の移行にも重大な影響を与え、解析を困難にすることが考えられるため、できる限り凹凸の少ない土壤を使用することが望ましい。

4. おわりに

放射性核種地表面移行試験装置の性能試験について、各機器部および測定部の構成、機能等を含め、試験の方法、結果に区分して記述した。

地表水の移動状況を表す地表水流速に関しては、性能試験により $3 \text{ mm/s} \sim 30 \text{ cm/s}$ の範囲内の流速を十分に測定できることが確認できた。また、総合試験において自動操作で行った測定試験により、地表面の凹凸状況との関連から充分妥当性のある地表水流速分布を得ることができた。さらに、水の浸透状況を検討するために用いる土壤水分に関しては、飽和近くのローム質土壤の水分率を比較的精度よく測定できるとともに、総合試験において観測された地表水の浸透状況を十分に把握できることが確認できた。本性能試験で行った総合試験は、攪乱された土壤試料を土壤槽に充填し放射性核種を使用しないコールド試験であったがホット試験実施にあたり、核種の移行挙動と密接に関係し、解析に不可欠な水の流動状況に関するパラメータを知るために必要な試験であった。したがって、これらの結果をホット試験実施のための基盤として有効に利用することが肝要であると考えられる。

最後に、本放射性核種地表面移行試験装置の設計および製作にあたり、貴重な御助言をいただいた筑波大学地球科学系の樋根勇教授、ならびに多大な協力をいたいた三井造船エンジニアリング(株)の関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 山本忠利、大塚芳郎、小川弘道、和達嘉樹；日本原子力学会誌，30，942(1988).
- 2) 山本忠利他；JAERI-M 84-125, (1984).
- 3) 土木学会編；水理公式集、土木学会、195(1985).
- 4) 山本忠利、斎藤和明、武部慎一、和達嘉樹；JAERI-M 84-231, (1985).
- 5) 沼知福三郎、本間 仁；水工学便覧、森北出版、(1966).

が露出し、測定できなかった測定点が発生した。このため、各等速線図の下流側の左岸側に流れと平行の等速線が密に表示されているが、その原因は測定できなかった測定点の測定値がゼロとされたためである。このことを考慮して各等速線図のパターンを読み取ると、上流側よりも下流側の高度が低いことを反映して下流側の流速が全般的に速くなっているものの等速線は流路幅方向に平行になっており流路幅方向の流速分布は比較的均一であることが分かった。また、流量が増加するにつれ流速が増大する傾向となっている。

土壤の凹凸により土壤が露出し、地表水流速が測定できない点が生じると、測定値がゼロとして処理されるため等速線図の作図にかなりの影響があることが分かった。このような不均一な流速分布は核種の移行にも重大な影響を与え、解析を困難にすることが考えられるため、できる限り凹凸の少ない土壤を使用することが望ましい。

4. おわりに

放射性核種地表面移行試験装置の性能試験について、各機器部および測定部の構成、機能等を含め、試験の方法、結果に区分して記述した。

地表水の移動状況を表す地表水流速に関しては、性能試験により $3 \text{ mm/s} \sim 30 \text{ cm/s}$ の範囲内の流速を十分に測定できることが確認できた。また、総合試験において自動操作で行った測定試験により、地表面の凹凸状況との関連から充分妥当性のある地表水流速分布を得ることができた。さらに、水の浸透状況を検討するために用いる土壤水分に関しては、飽和近くのローム質土壤の水分率を比較的精度よく測定できるとともに、総合試験において観測された地表水の浸透状況を十分に把握できることが確認できた。本性能試験で行った総合試験は、攪乱された土壤試料を土壤槽に充填し放射性核種を使用しないコールド試験であったがホット試験実施にあたり、核種の移行挙動と密接に関係し、解析に不可欠な水の流動状況に関するパラメータを知るために必要な試験であった。したがって、これらの結果をホット試験実施のための基盤として有効に利用することが肝要であると考えられる。

最後に、本放射性核種地表面移行試験装置の設計および製作にあたり、貴重な御助言をいただいた筑波大学地球科学系の樋根勇教授、ならびに多大な協力をいたいた三井造船エンジニアリング(株)の関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 山本忠利、大塚芳郎、小川弘道、和達嘉樹；日本原子力学会誌，30，942 (1988).
- 2) 山本忠利他；JAERI-M 84-125, (1984).
- 3) 土木学会編；水理公式集、土木学会、195 (985).
- 4) 山本忠利、斎藤和明、武部慎一、和達嘉樹；JAERI-M 84-231, (1985).
- 5) 沼知福三郎、本間 仁；水工学便覧、森北出版、(1966).

が露出し、測定できなかった測定点が発生した。このため、各等速線図の下流側の左岸側に流れと平行の等速線が密に表示されているが、その原因は測定できなかった測定点の測定値がゼロとされたためである。このことを考慮して各等速線図のパターンを読み取ると、上流側よりも下流側の高度が低いことを反映して下流側の流速が全般的に速くなっているものの等速線は流路幅方向に平行になっており流路幅方向の流速分布は比較的均一であることが分かった。また、流量が増加するにつれ流速が増大する傾向となっている。

土壤の凹凸により土壤が露出し、地表水流速が測定できない点が生じると、測定値がゼロとして処理されるため等速線図の作図にかなりの影響があることが分かった。このような不均一な流速分布は核種の移行にも重大な影響を与え、解析を困難にすることが考えられるため、できる限り凹凸の少ない土壤を使用することが望ましい。

4. おわりに

放射性核種地表面移行試験装置の性能試験について、各機器部および測定部の構成、機能等を含め、試験の方法、結果に区分して記述した。

地表水の移動状況を表す地表水流速に関しては、性能試験により 3 mm/s ～ 30 cm/s の範囲内の流速を十分に測定できることが確認できた。また、総合試験において自動操作で行った測定試験により、地表面の凹凸状況との関連から充分妥当性のある地表水流速分布を得ることができた。さらに、水の浸透状況を検討するために用いる土壤水分に関しては、飽和近くのローム質土壤の水分率を比較的精度よく測定できるとともに、総合試験において観測された地表水の浸透状況を十分に把握できることが確認できた。本性能試験で行った総合試験は、搅乱された土壤試料を土壤槽に充填し放射性核種を使用しないコールド試験であったがホット試験実施にあたり、核種の移行挙動と密接に関係し、解析に不可欠な水の流動状況に関するパラメータを知るために必要な試験であった。したがって、これらの結果をホット試験実施のための基盤として有効に利用することが肝要であると考えられる。

最後に、本放射性核種地表面移行試験装置の設計および製作にあたり、貴重な御助言をいただいた筑波大学地球科学系の樋根勇教授、ならびに多大な協力をいたいた三井造船エンジニアリング(株)の関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 山本忠利、大塚芳郎、小川弘道、和達嘉樹；日本原子力学会誌，30，942(1988).
- 2) 山本忠利他；JAERI-M 84-125, (1984).
- 3) 土木学会編；水理公式集、土木学会、195(1985).
- 4) 山本忠利、斎藤和明、武部慎一、和達嘉樹；JAERI-M 84-231, (1985).
- 5) 沼知福三郎、本間 仁；水工学便覧、森北出版、(1966).

表1 地表流測定試験の測定結果

測定番号	流路長 (mm)	通過時間 (sec)	浮子法による 水流速(mm/s)	レーザ法による 水流速(mm/s)
1	800	2.51	306	274
2	800	2.44	328	278
3	800	2.87	279	251
4	800	5.38	149	109
5	800	5.06	158	120
6	800	5.02	159	123
7	800	12.17	65.7	60
8	800	17.68	45.2	41
9	300	8.59	35.0	43
10	40	2.95	13.6	9
11	40	3.66	10.9	16
12	40	3.15	12.7	15
13	20	3.72	5.4	6
14	10	2.75	3.6	4

注) 浮子法は、各回3~10回計時しその平均を採用している。
 レーザ法は、微粒子50~100個の平均流速として求めている。

表2 ヒーター消費電力の測定結果

チャンネル	モニタの値 (W)	電圧値 (V)	電流値 (A)	計算値 (W)	モニタと 計算値の差 (W)
1	10.0	7.38	1.35	9.96	0.04
2	10.0	7.39	1.34	9.90	0.10
3	10.0	7.36	1.35	9.94	0.06
4	10.0	7.41	1.34	9.93	0.07
5	10.0	7.41	1.35	10.00	0.00
6	10.0	7.36	1.35	1.94	0.06
7	10.0	7.37	1.35	9.95	0.05
8	10.0	7.39	1.35	9.98	0.02
9	10.0	7.36	1.35	9.94	0.06

表3 下流側センサによる温度の測定結果

チャンネル	恒温水槽の 温度 (°C)	測定温度 (°C)	水槽と 測定値の差 (°C)
1	27.5	27.4	0.1
2	27.5	27.4	0.1
3	27.5	27.4	0.1
4	27.5	27.4	0.1
5	27.5	27.4	0.1
6	27.5	27.4	0.1
7	27.5	27.4	0.1
8	27.5	27.4	0.1
9	27.5	27.4	0.1

表4 上流側の下流側センサ間の温度差の測定結果

チャンネル	恒温水槽の 温度差 (°C)	測定温度差 (°C)	水槽と 測定値の差 (°C)
1	0.21	0.21	0.00
2	0.21	0.21	0.00
3	0.21	0.21	0.00
4	0.21	0.21	0.00
5	0.21	0.21	0.00
6	0.21	0.21	0.00
7	0.21	0.21	0.00
8	0.21	0.21	0.00
9	0.21	0.21	0.00

表5 土壌水分測定試験の測定結果

測定番号	乾燥前 重量(g)	乾燥後 重量(g)	体積含 水率(%)	水分張力 (cmH ₂ O)	p F 値	体積含 水率(%)
1	98.7	58.9	39.8	-57.7	1.76	
2	88.2	52.6	35.6	-74.3	1.87	
3	99.5	59.3	40.2	-74.9	1.87	
平均		56.9	38.5		1.83	43.8
4	168.4	116.0	52.4	-59.1	1.77	
5	173.2	124.0	49.2	-34.5	1.54	
6	170.5	120.1	50.4	-25.0	1.40	
平均		120.0	50.7		1.57	48.7
7	154.1	87.7	66.4	-2.2	0.34	
8	157.2	89.5	67.7	10.2	飽和	
9	153.9	87.8	66.1	14.0	飽和	
平均		88.3	66.7		0.34	69.0

注) p F 値の体積含水率への変換には較正曲線の内、各試験の乾燥後の重量より計算される乾燥密度の最も近いものを使用した。

表 6 土壌槽検出部移動変化確認試験の測定結果

相対位置 (cm)	^{85}Sr 513kV (c p m)	^{137}Cs 662kV (c p m)	^{60}Co 1173、 1332kVの合計 (c p m)
0	2.68×10^3	3.46×10^2	1.11×10^3
5	2.30×10^3	3.55×10^2	1.04×10^3
10	1.59×10^3	2.49×10^2	7.04×10^2
15	6.56×10^2	1.48×10^2	2.90×10^2
20	2.02×10^2	8.8×10^1	1.0×10^2
25	9.9×10^1	5.1×10^1	1.2×10^2
30	7.5×10^1	5.9×10^1	— — —
35	8.1×10^1	4.6×10^1	— — —

・ MCS DWELL TIME = 10sec/ch (Sr、 Co)
20sec/ch (Cs)

・ 各核種の計数率は 3 分間の MCS データの平均値を cpm に換算した

表7 流出液検出部濃度変化確認試験の測定結果

時間 (分)	^{85}Sr 513kV (c p m)	^{137}Cs 662kV (c p m)	^{60}Co 1173、 1332kVの合計 (c p m)	測定時間 (秒)
0	2.22×10^5	1.46×10^5	5.07×10^4	60
3	1.67×10^5	1.07×10^5	3.38×10^4	60
6	9.54×10^4	6.00×10^4	2.21×10^4	60
9	5.07×10^4	3.24×10^4	1.26×10^4	60
12	3.46×10^4	2.22×10^4	8.76×10^3	60
15	2.78×10^4	1.74×10^4	6.75×10^3	60
18	2.12×10^4	1.34×10^4	5.42×10^3	60
21	1.52×10^4	9.95×10^3	4.12×10^3	60
24	1.06×10^4	6.72×10^3	2.46×10^3	60
27	7.19×10^3	4.51×10^3	1.65×10^3	60
30	4.63×10^3	3.34×10^3	1.04×10^3	60
33	3.89×10^3	2.95×10^3	7.64×10^2	60
36	2.34×10^3	1.73×10^3	3.77×10^2	60
39	1.55×10^3	1.62×10^3	4.23×10^2	120
42	1.12×10^3	1.27×10^3	2.22×10^2	120
45	9.25×10^2	1.20×10^3	2.46×10^2	120
48	7.45×10^2	1.05×10^3	2.23×10^2	120
51	5.25×10^2	9.45×10^2	1.50×10^2	120
54	5.34×10^2	8.95×10^2	1.02×10^2	120
57	3.37×10^2	7.16×10^2	1.35×10^2	120

注) 各ピークの計数率はピークのNet. と L. T. から算出

表8 地表面変位計による地表面凹凸分布の測定結果

測定番号	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)	変位計の測定値 (mm)
1	420	75	+2.02
2	420	225	+3.45
3	420	375	-0.52
4	420	525	-1.31
5	420	675	-7.32
6	730	75	+4.26
7	730	225	+6.62
8	730	375	+4.45
9	730	525	+2.12
10	730	675	-4.54
11	1040	75	+9.58
12	1040	225	+9.68
13	1040	375	+9.30
14	1040	525	+8.99
15	1040	675	+2.61
16	1350	75	+5.59
17	1350	225	+9.65
18	1350	375	+9.28
19	1350	525	+8.96
20	1350	675	+7.94
21	1660	75	+4.43
22	1660	225	+4.14
23	1660	375	+7.24
24	1660	525	+5.38
25	1660	675	+7.88
26	1970	75	+3.95
27	1970	225	+9.17
28	1970	375	+8.55
29	1970	525	+8.02
30	1970	675	+6.70
31	2280	75	+9.10
32	2280	225	+9.08
33	2280	375	+8.78
34	2280	525	+8.52
35	2280	675	+8.29

表9 テンシオメータの埋設深度と検出器番号の関係

埋設深度	検出器番号			
	1列	2列	3列	4列
25 cm	1、 4、 7	10、 13、 16	19、 22、 25	28、 31、 34
15 cm	2、 5、 8	11、 14、 17	20、 23、 26	29、 32、 35
5 cm	3、 6、 9	12、 15、 18	21、 24、 27	30、 33、 36

表10(1) 地表流流速分布の測定結果（地表水流量：4 ℓ／分）

<< データテーブル >>

番号	X 軸			Y 軸			Z 軸			流速 [mm/s]			番号			X 軸			Y 軸			Z 軸			流速 [mm/s]		
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]											
1	420	75	186	9.0	2	420	225	186	30.0	30.0	20.0	20.0	185	185	187	187	187	187	189	189	189	189	189	189	189	189	
3	420	375	185	29.0	4	420	525	185					75	75	187	187	187	187	189	189	189	189	189	189	189	189	
5	420	675	185	0.0	6	730	730	730					730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730		
7	730	225	186	12.0	8	730	375	375					10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
9	730	525	185	15.0	10	730	675	675					12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
11	1040	75	189	6.0	14	1040	225	225					14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14		
13	1040	375	188	9.0	16	1040	525	525					16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16		
15	1040	675	187	0.0	18	1350	75	75					18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18		
17	1350	225	195	5.0	18	1350	375	375					18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18		
19	1350	525	189	8.0	20	1350	675	675					20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20		
21	1660	75	188	8.0	22	1660	225	225					22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22		
23	1660	375	188	11.0	24	1660	525	525					24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24		
25	1660	675	189	8.0	26	1970	75	75					26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26		
27	1970	225	184	8.0	28	1970	375	375					28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28		
29	1970	525	184	9.0	30	1970	675	675					30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
31	2280	75	185	6.0	32	2280	225	225					32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
33	2280	375	185	8.0	34	2280	525	525					34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34		
35	2280	675	187	7.0																							

<<データテーブル>>

表10(2) 地表流流速分布の測定結果 (地表水流量: 7 ℓ/分)

番号	X 軸			Y 軸			Z 軸			流速			番号			X 軸			Y 軸			Z 軸			流速				
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]							
1	4.20	7.5	18.6	20.0	2	4.20	22.5	18.6	16.0																				
3	4.20	3.75	18.5	15.0	4	4.20	5.25	18.5	20.0																				
5	4.20	6.75	18.5	0.0	6	7.30	7.5	18.7	19.0																				
7	7.30	2.25	18.6	26.0	8	7.30	3.75	18.9	10.0																				
9	7.30	5.25	18.5	21.0	10	7.30	6.75	18.5	0.0																				
11	10.40	7.5	18.9	10.0	12	10.40	2.25	19.5	0.0																				
13	10.40	3.75	18.8	13.0	14	10.40	5.25	18.7	16.0																				
15	10.40	6.75	18.7	0.0	16	13.50	7.5	18.6	11.0																				
17	13.50	2.25	19.5	18.0	18	13.50	3.75	19.4	18.0																				
19	13.50	5.25	18.9	15.0	20	13.50	6.75	18.5	8.0																				
21	16.60	7.5	18.8	16.0	22	16.60	2.25	18.8	22.0																				
23	16.60	3.75	18.8	20.0	24	16.60	5.25	18.7	21.0																				
25	16.60	6.75	18.9	16.0	26	19.70	7.5	18.4	14.0																				
27	19.70	2.25	18.4	14.0	28	19.70	3.75	18.4	14.0																				
29	19.70	5.25	18.4	15.0	30	19.70	6.75	18.4	14.0																				
31	22.80	7.5	18.5	15.0	32	22.80	2.25	18.5	12.0																				
33	22.80	3.75	18.5	16.0	34	22.80	5.25	18.7	12.0																				
35	22.80	6.75	18.7	16.0																									

<< データ一フル >>

表 10(3) 地表流流速分布の測定結果（地表水流量：15ℓ／分）

番号	X 軸 [mm]	Y 軸 [mm]	Z 軸 [mm]	流速 [mm/s]			番号	X 軸 [mm]	Y 軸 [mm]	Z 軸 [mm]	流速 [mm/s]
				X 軸	Y 軸	Z 軸					
1	420	75	186	38.0	2	4.20	2	420	225	186	37.0
3	420	375	185	31.0	4	4.20	4	675	525	185	29.0
5	420	675	185	0.0	6	730	7	1040	730	187	51.0
7	730	225	186	51.0	8	730	3	1040	375	189	56.0
9	730	525	185	39.0	10	730	6	1040	675	185	0.0
11	1040	75	189	31.0	12	1040	2	1040	225	195	39.0
13	1040	375	188	39.0	14	1040	5	1040	525	187	33.0
15	1040	675	187	21.0	16	1350	7	1350	75	186	38.0
17	1350	225	195	36.0	18	1350	3	1350	375	194	42.0
19	1350	525	189	39.0	20	1350	6	1350	675	185	35.0
21	1660	75	188	34.0	22	1660	2	1660	225	188	39.0
23	1660	375	188	44.0	24	1660	4	1660	525	187	51.0
25	1660	675	189	41.0	26	1970	7	1970	75	184	29.0
27	1970	225	184	26.0	28	1970	3	1970	375	184	26.0
29	1970	525	184	31.0	30	1970	6	1970	675	184	27.0
31	2280	75	185	24.0	32	2280	2	2280	225	185	19.0
33	2280	375	185	18.0	34	2280	5	2280	525	187	19.0
35	2280	675	187	26.0							

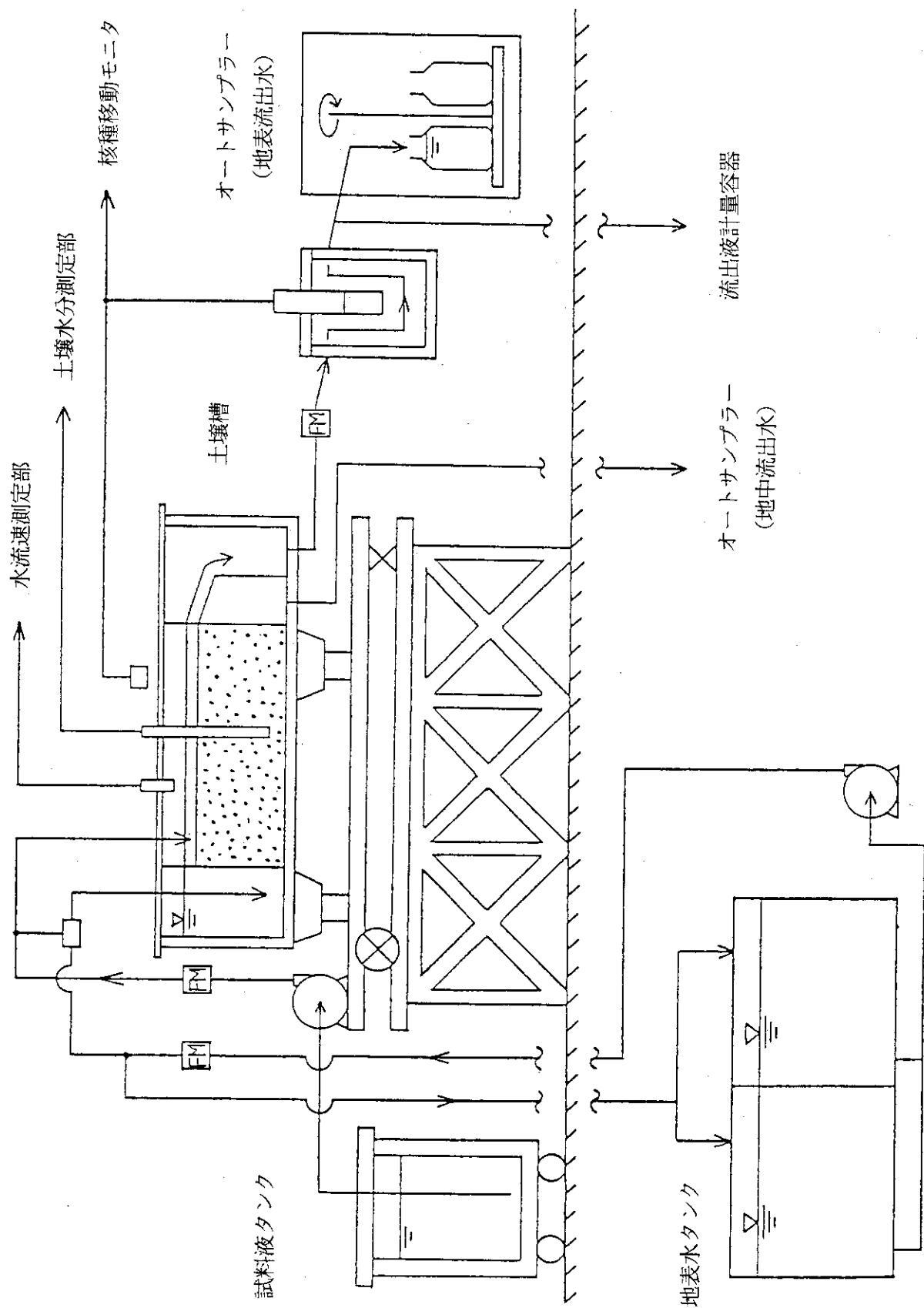


図1 放射性核種地表面移行試験装置の構成

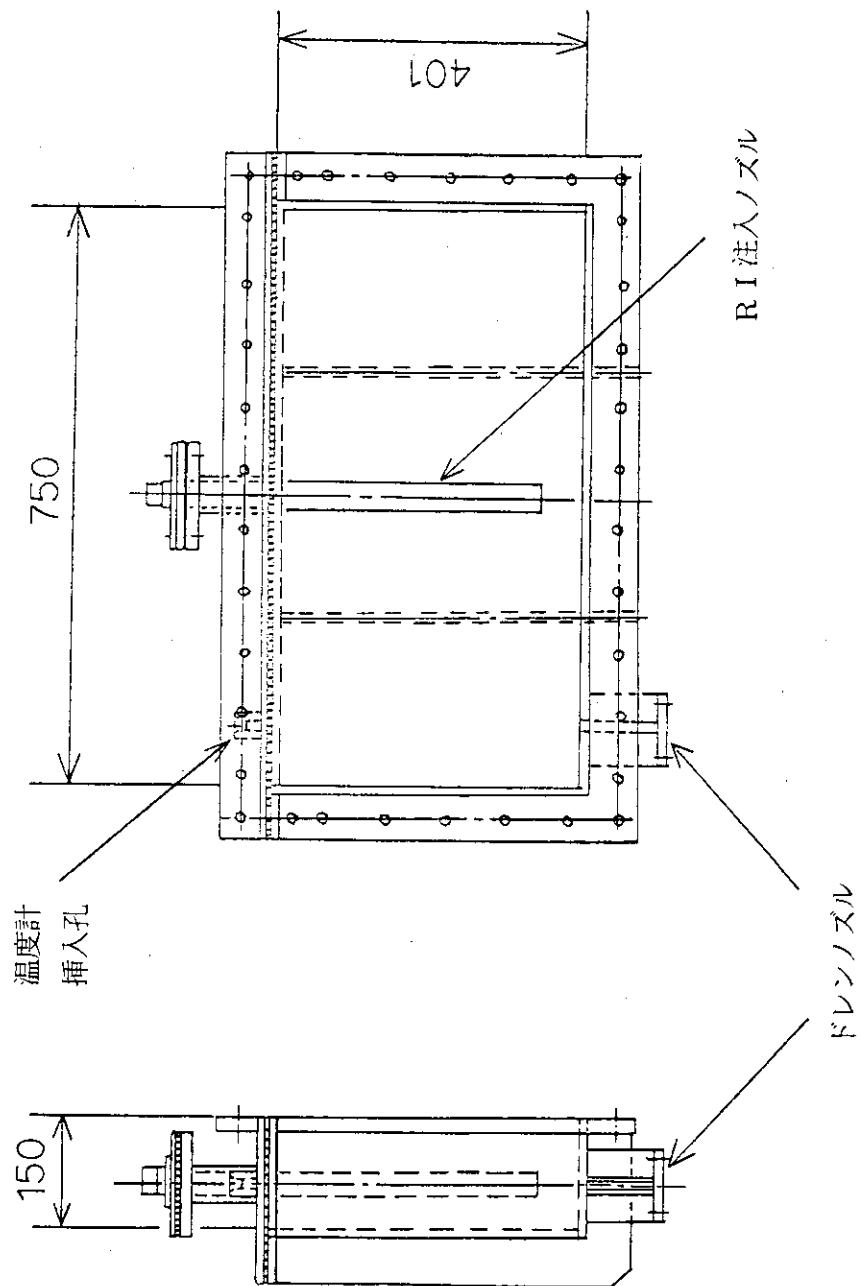


図2 流入槽の構造

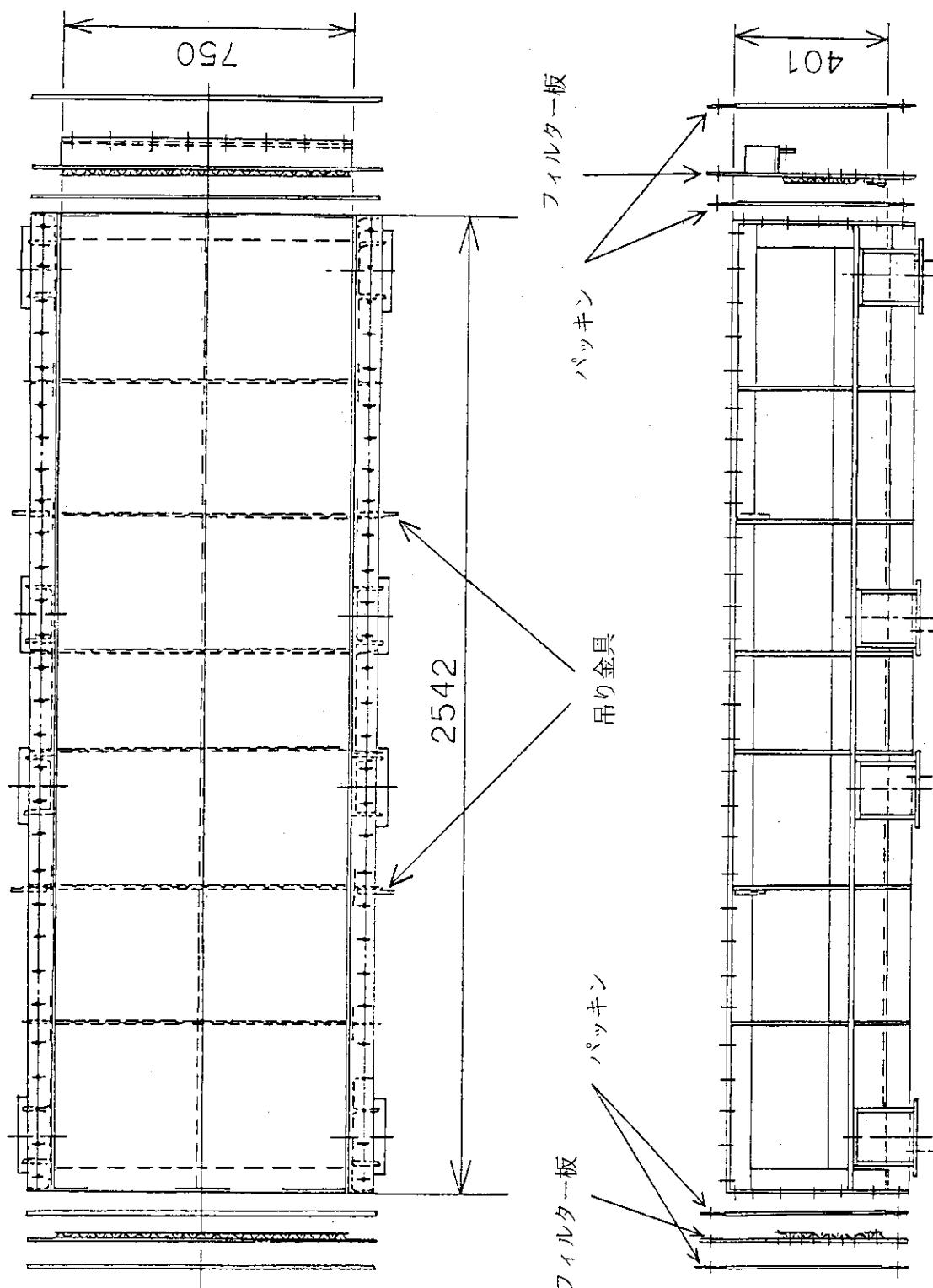


図3 上土壤槽の構造

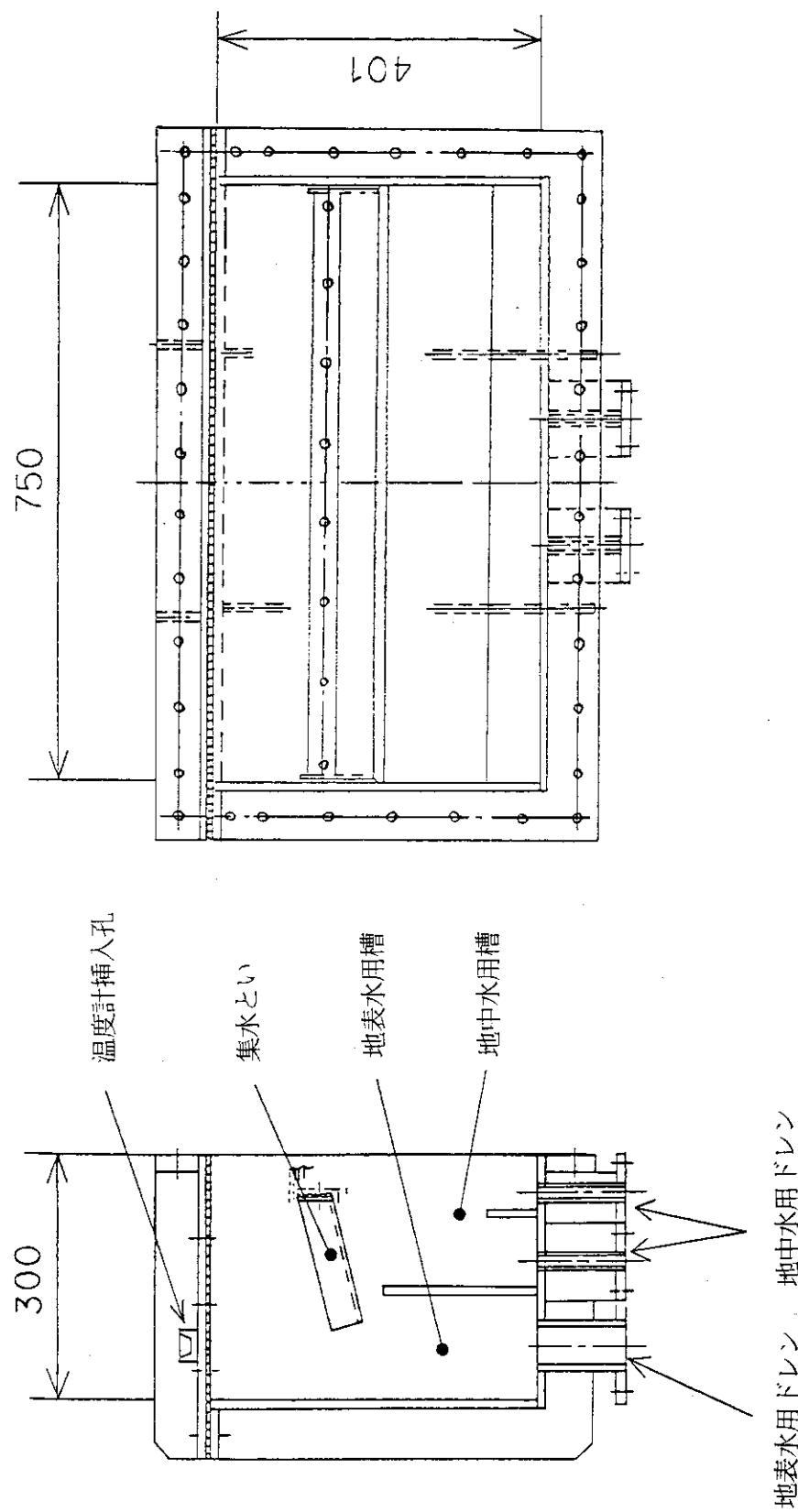


図4 流出槽の構造

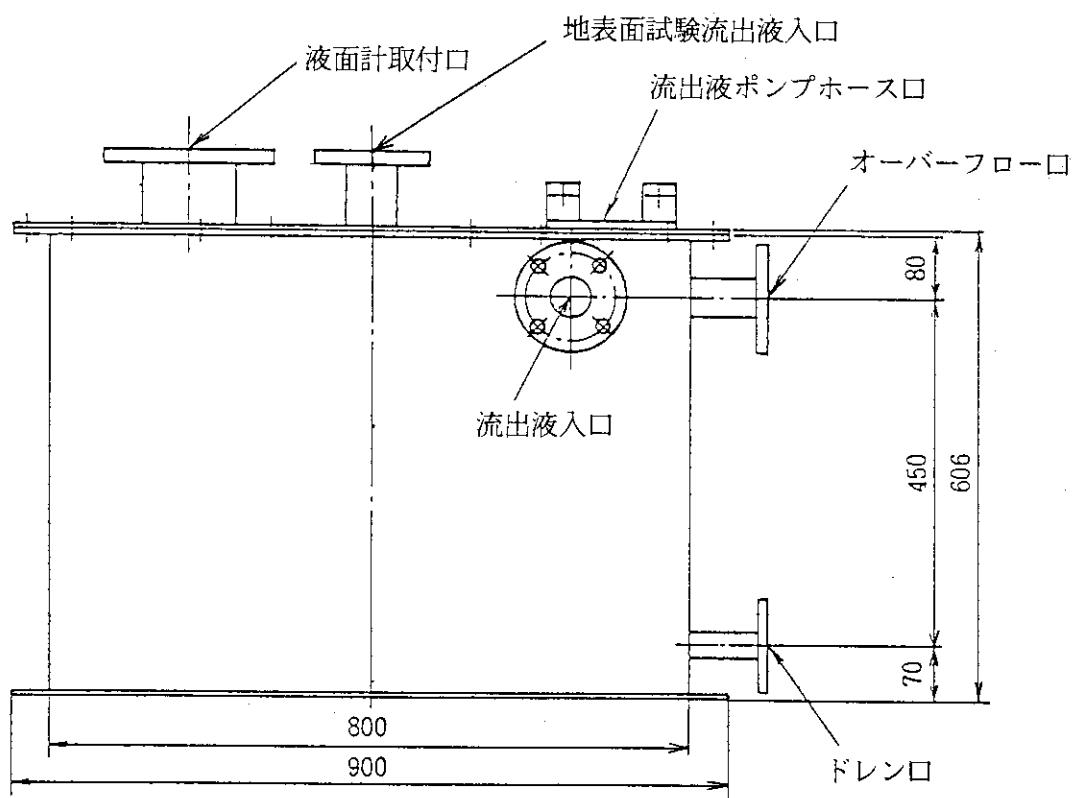


図 5 流出液計量容器の構造

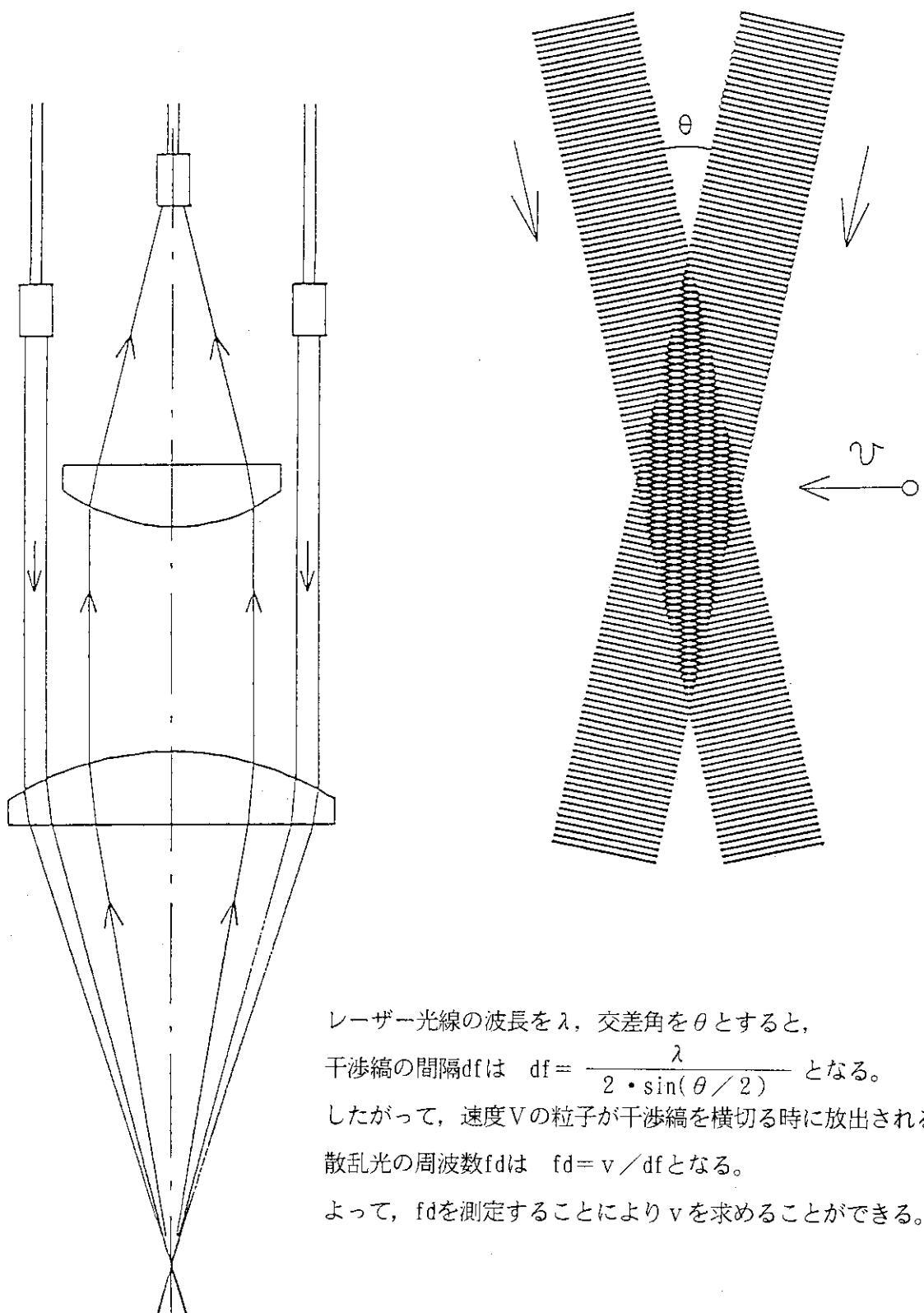


図 6 レーザー流速計の測定原理

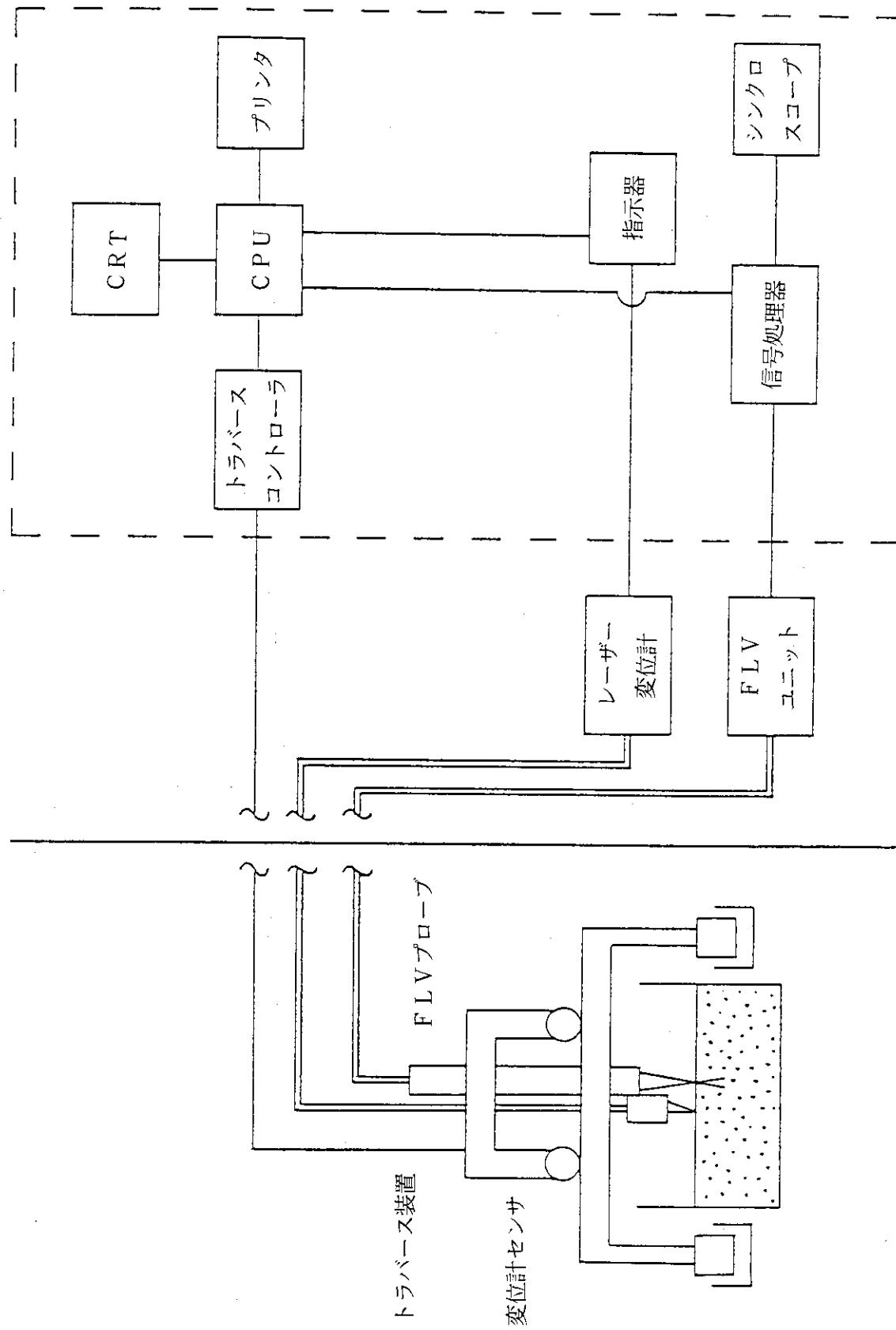


図7 地表流測定部の構成

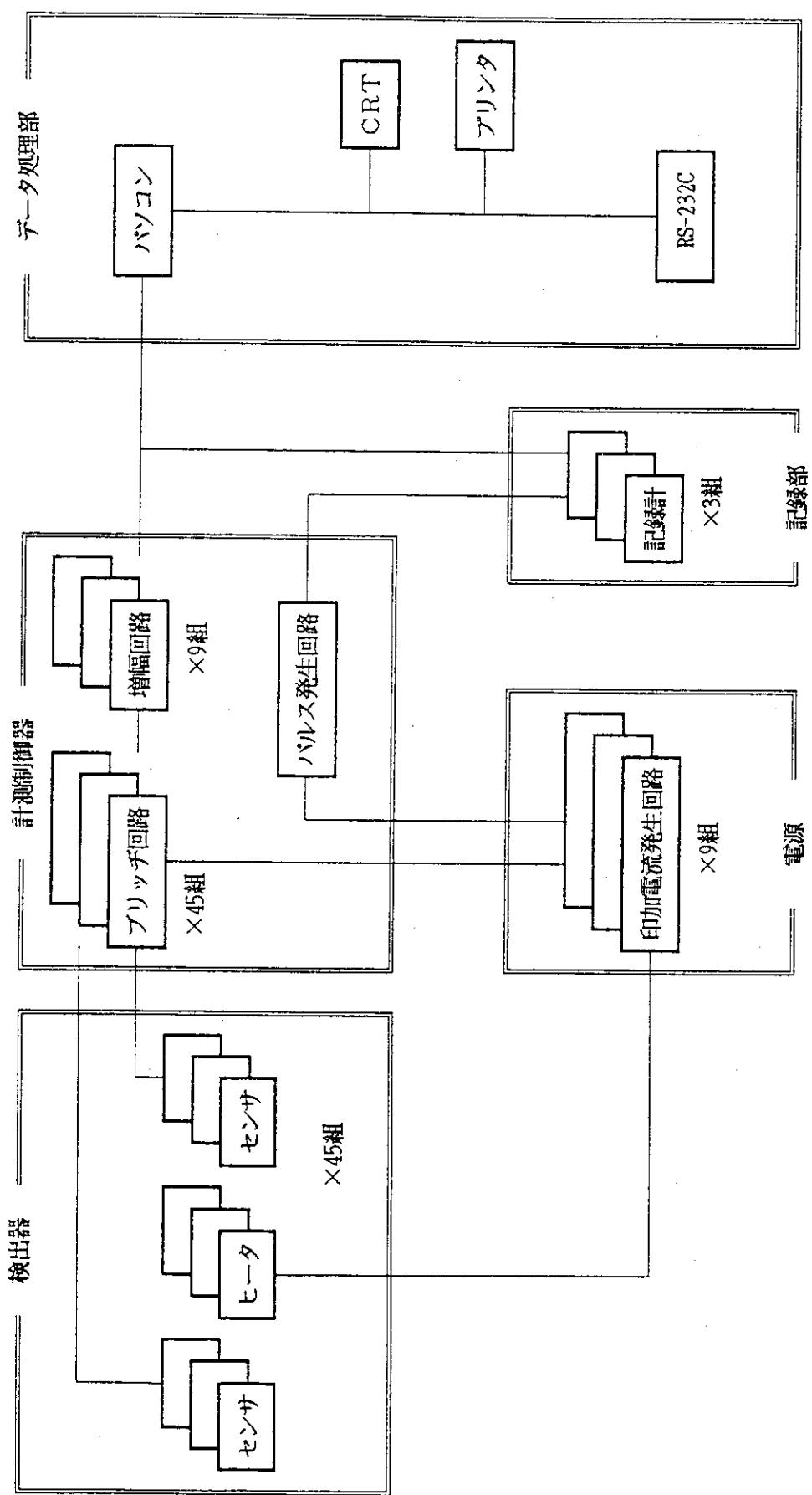


図 8 地中流測定部の構成

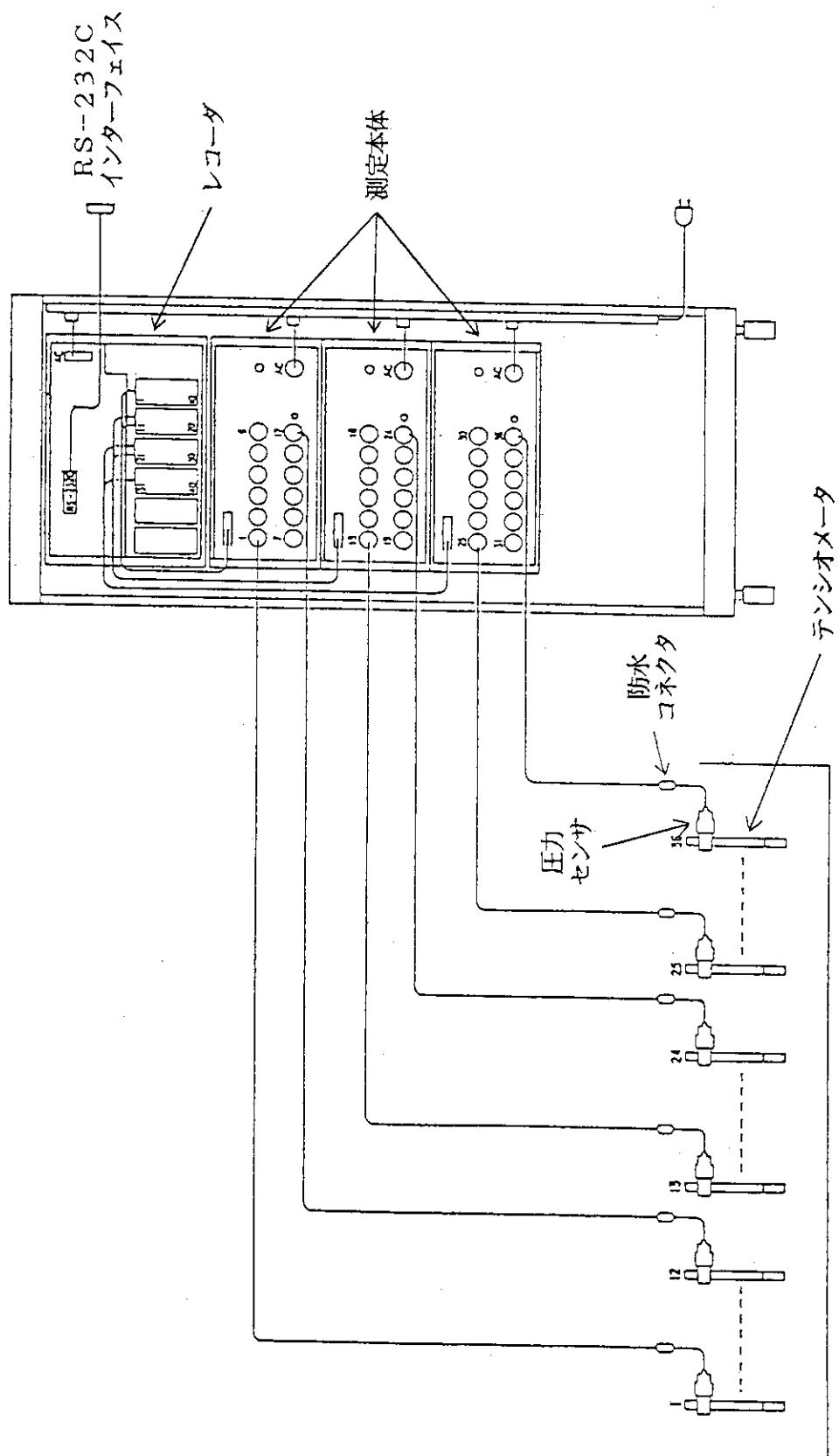


図9 土壌水分測定部の構成

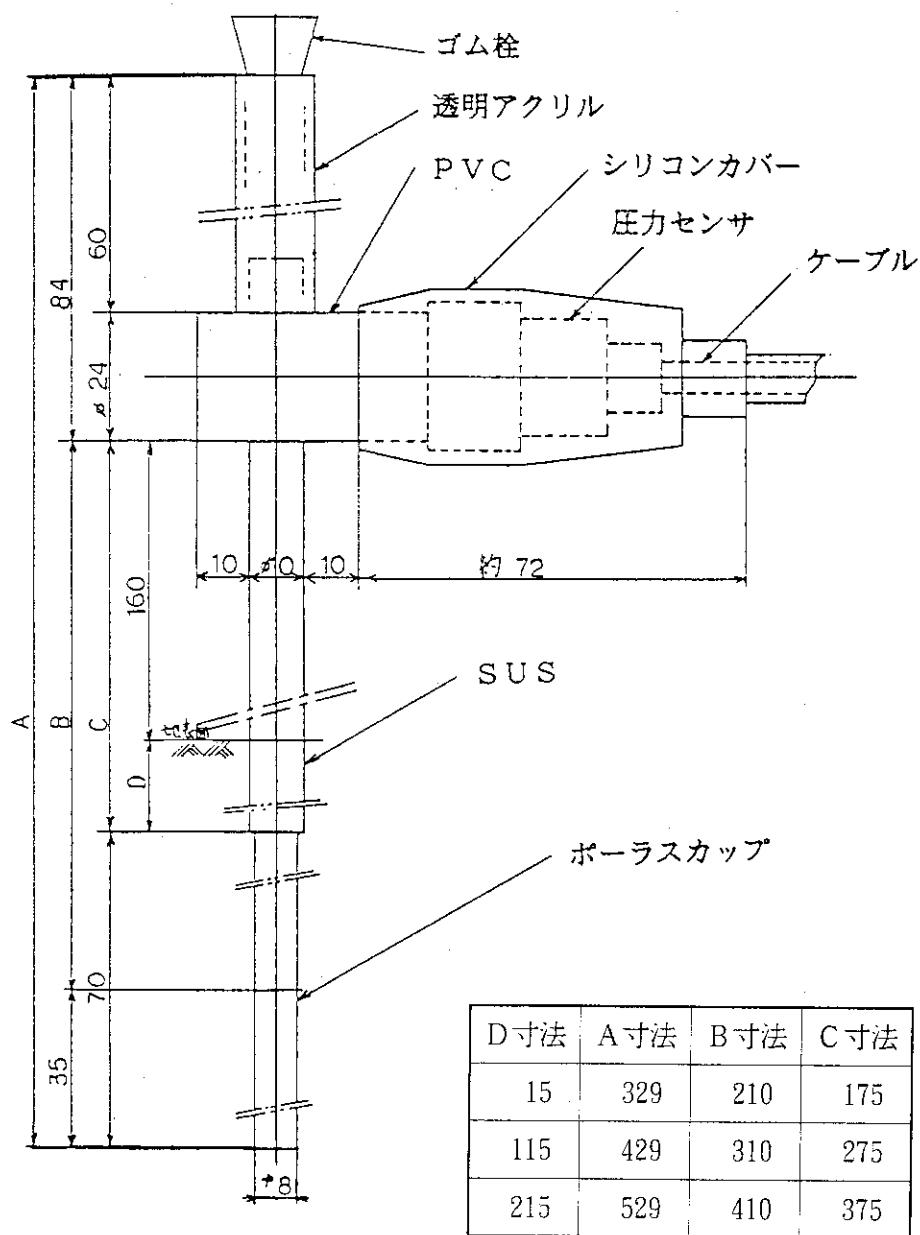


図10 テンシオメータの構造

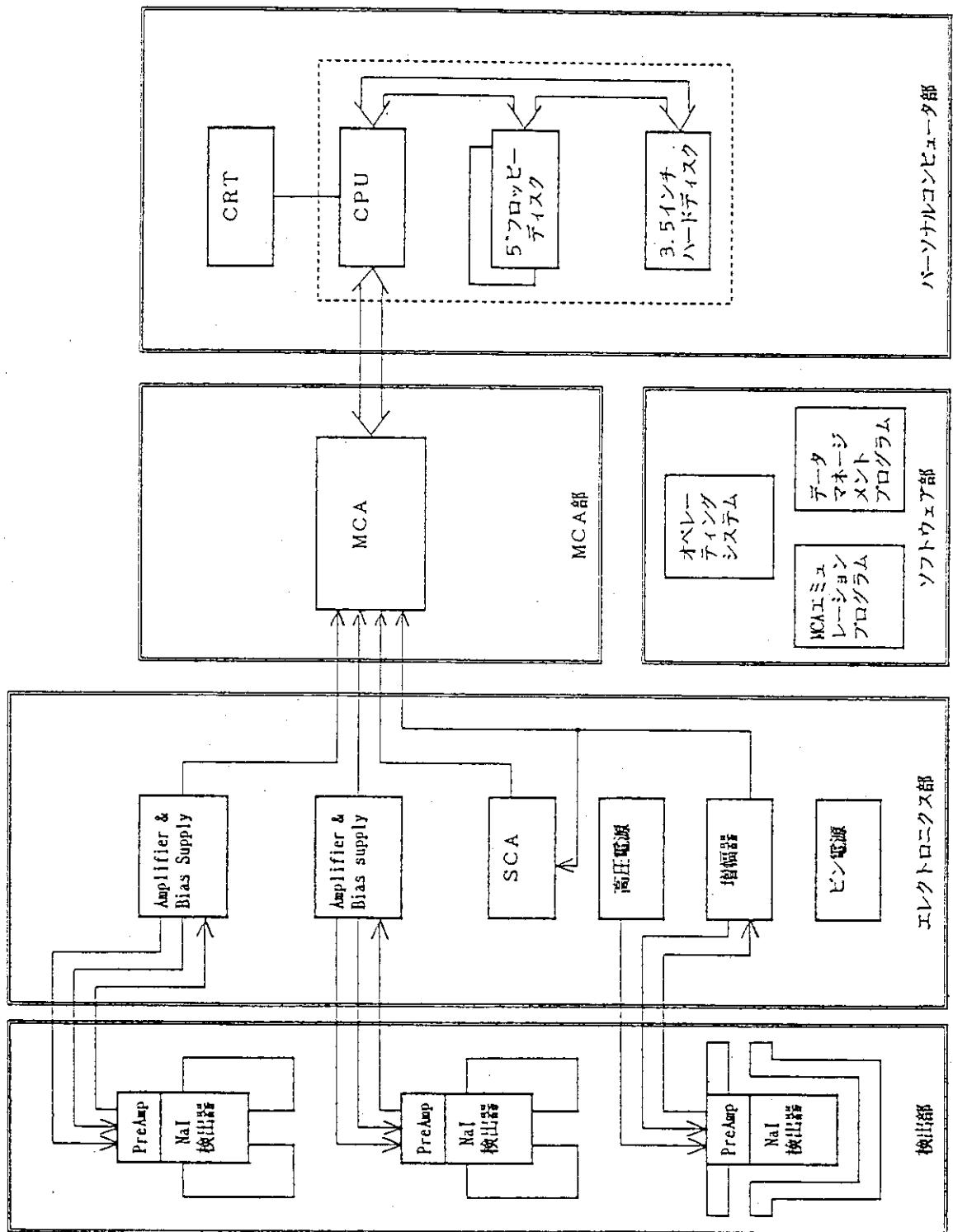


図 11 核種移動モニタの構成

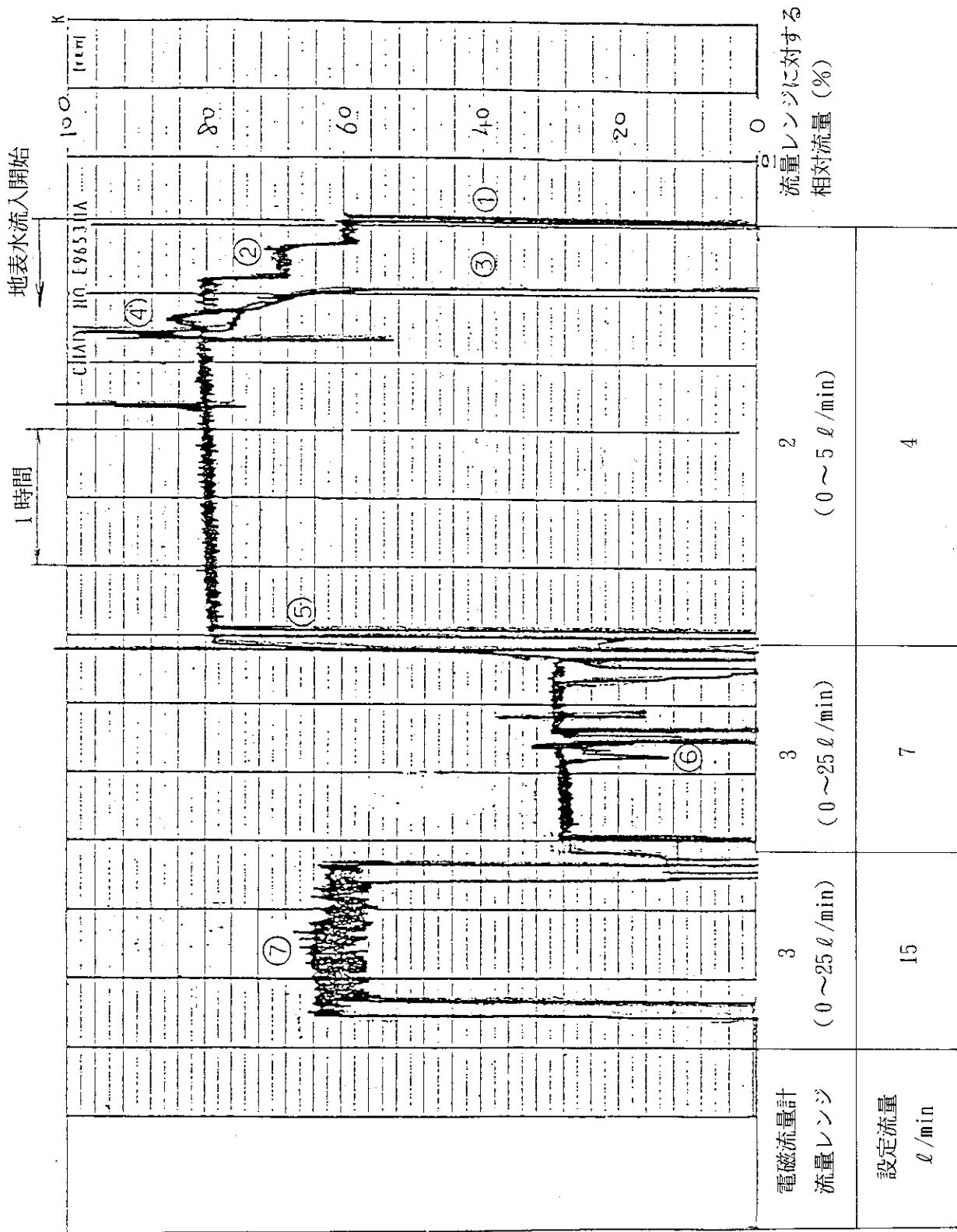


図 12 地表水の流入および流出流量記録

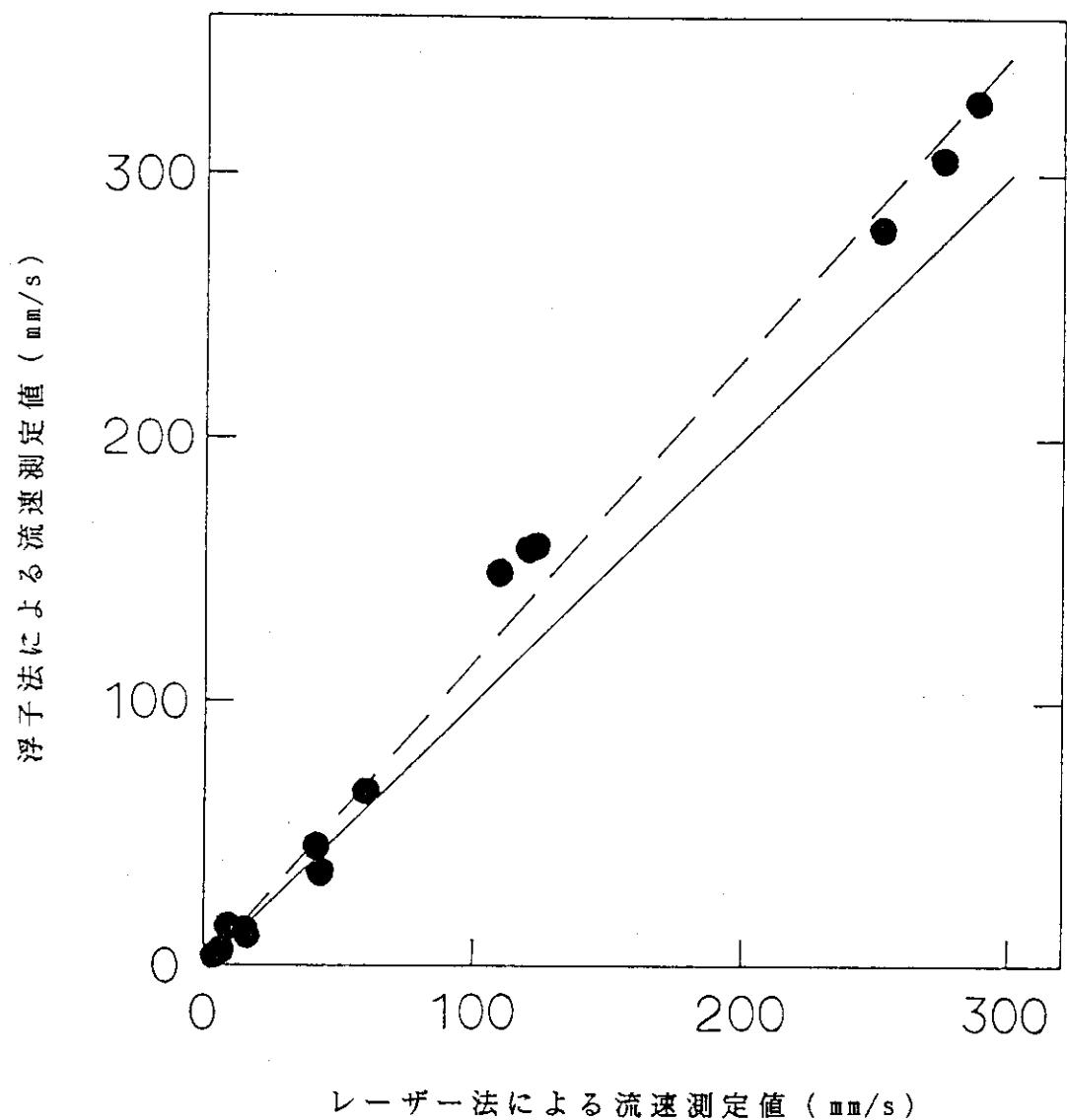


図 13 レーザー法および浮子法による測定値の比較

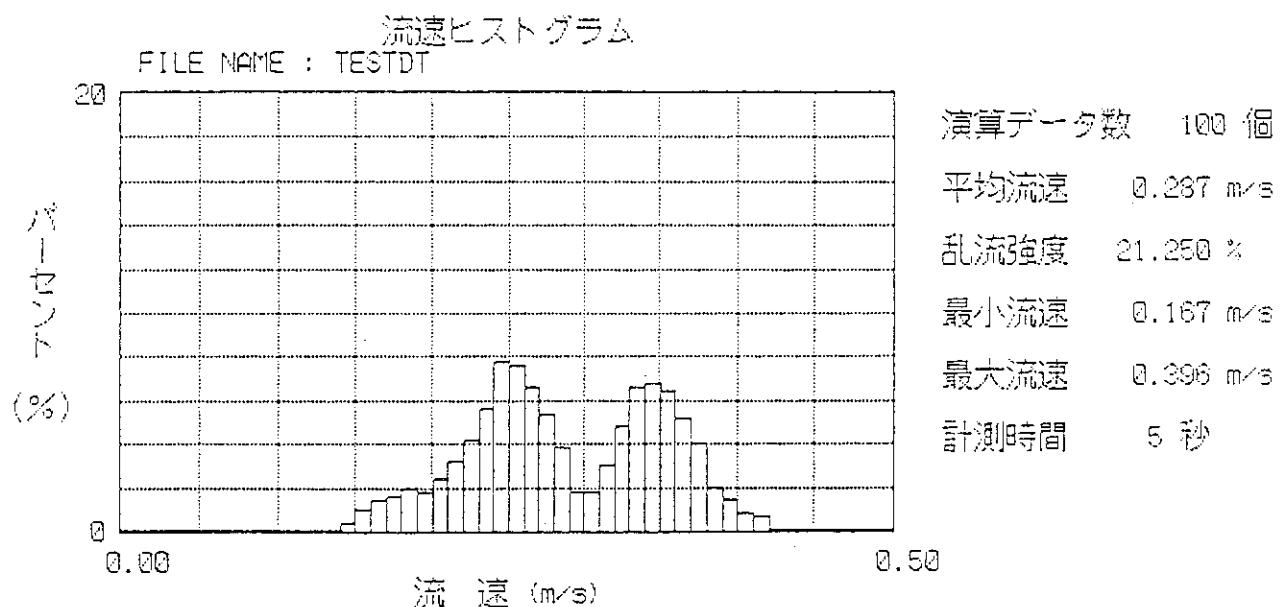


図 14(1)レーザー流速計による速度分布ヒストグラム (287 mm/s)

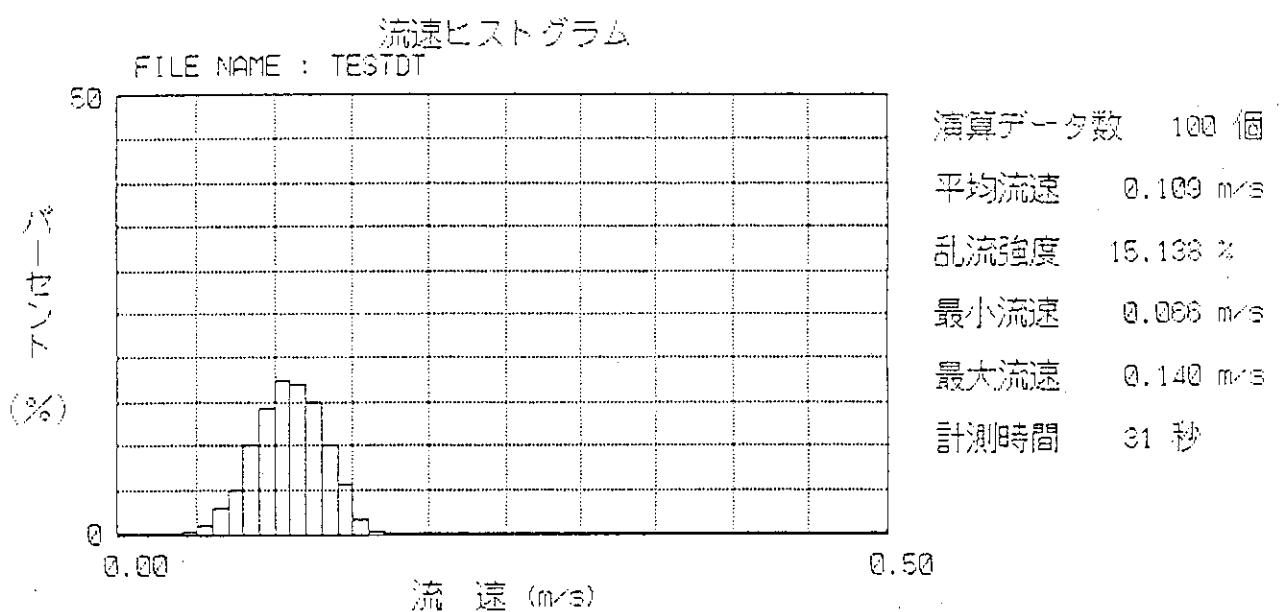


図 14(2) レーザー流速計による速度分布ヒストグラム (109 mm/s)

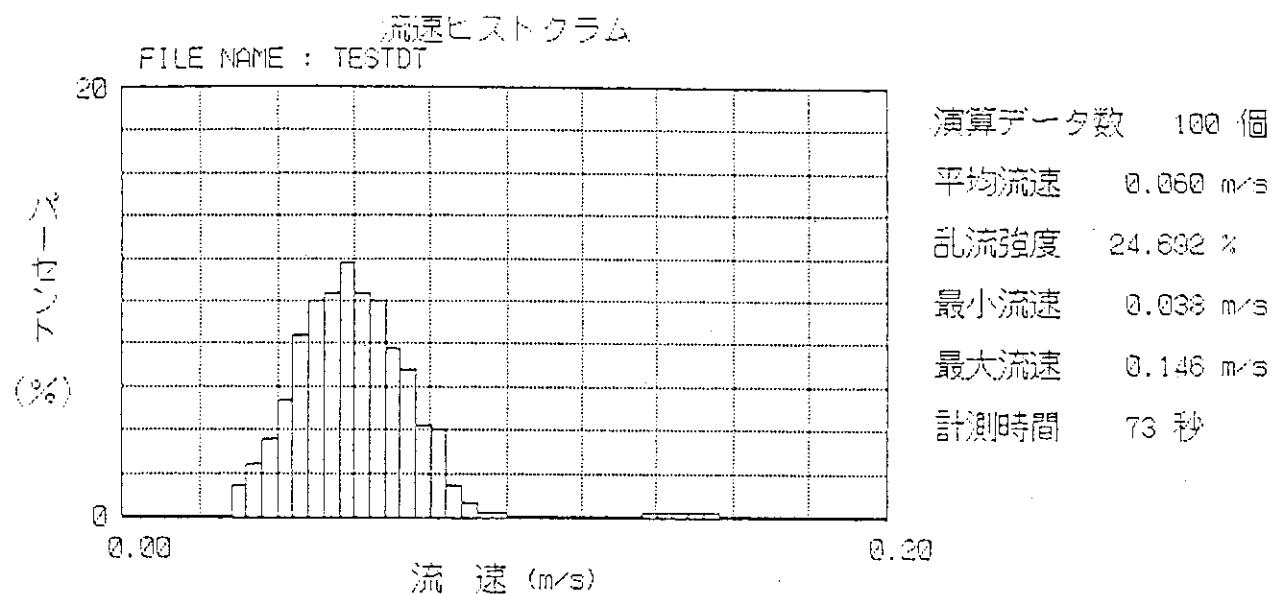


図 14(3) レーザー流速計による速度分布ヒストグラム (60 mm/s)

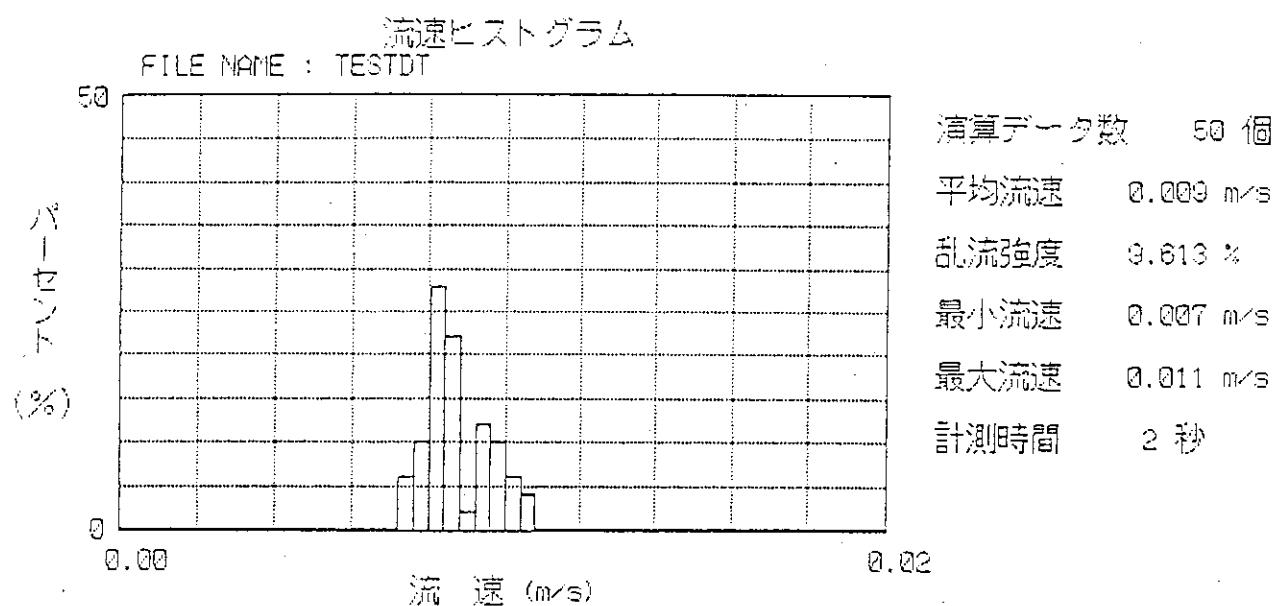


図 14(4) レーザー流速計による速度分布ヒストグラム (9 mm/s)

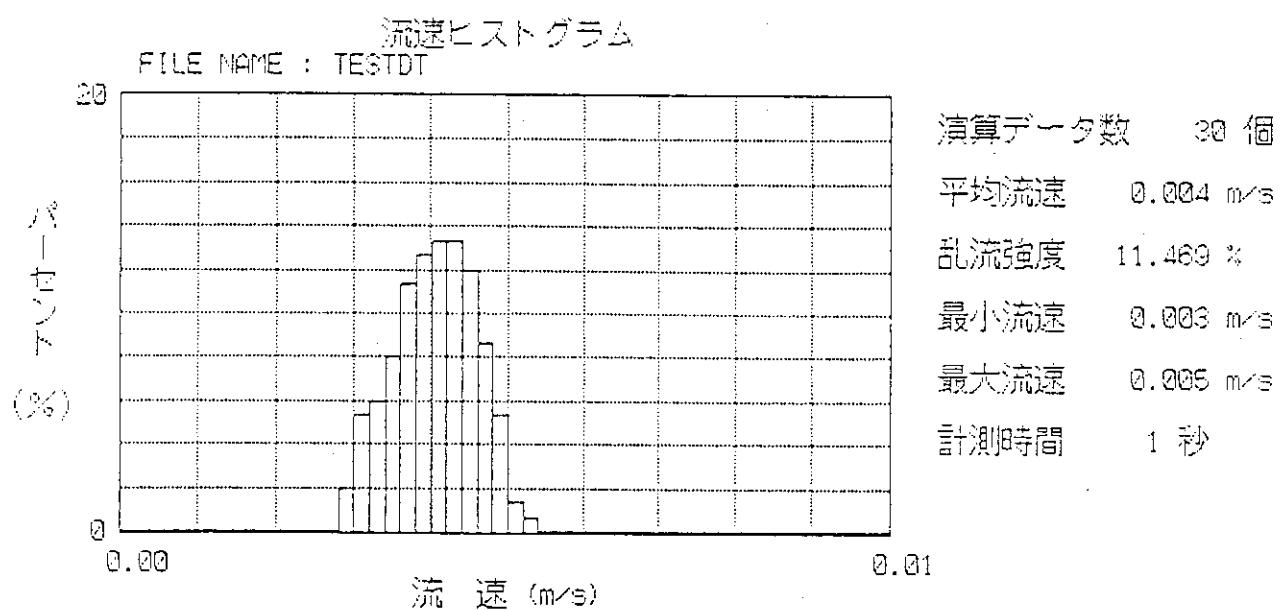
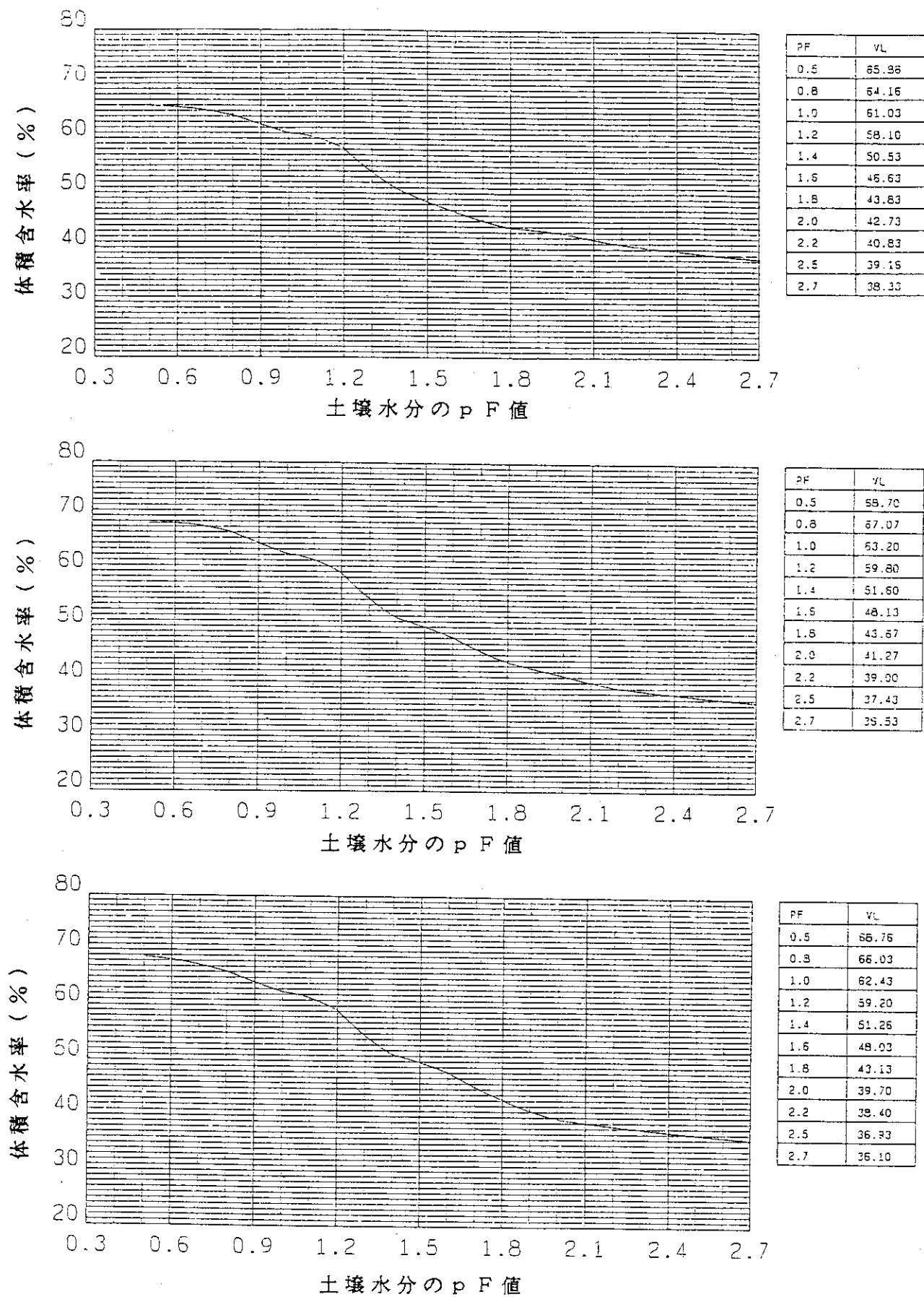


図 14(5) レーザー流速計による速度分布ヒストグラム (4 mm/s)

図 15 試験土壌の pF と体積含水率との関係曲線

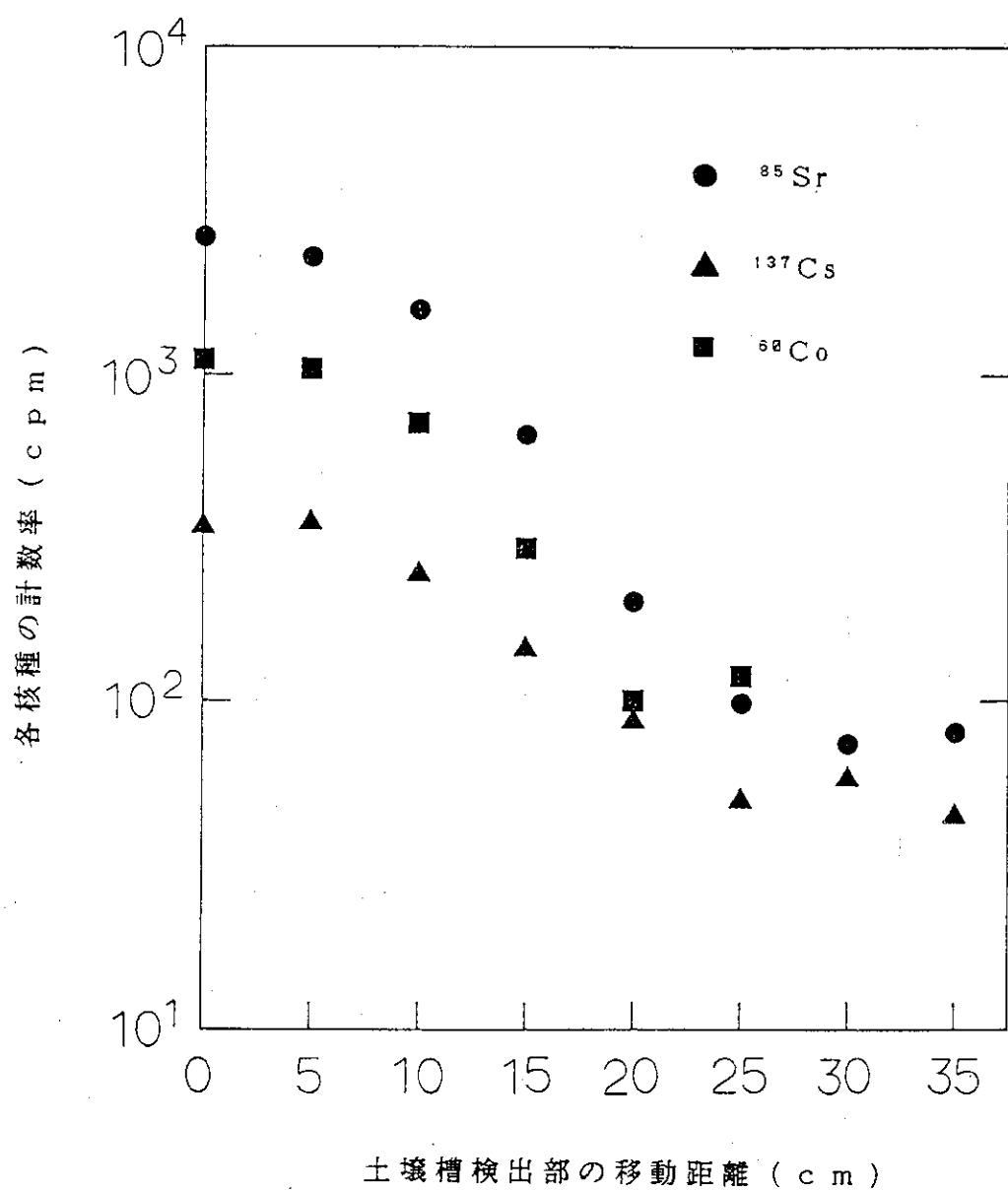


図 16 移動による各核種の計数率の変化

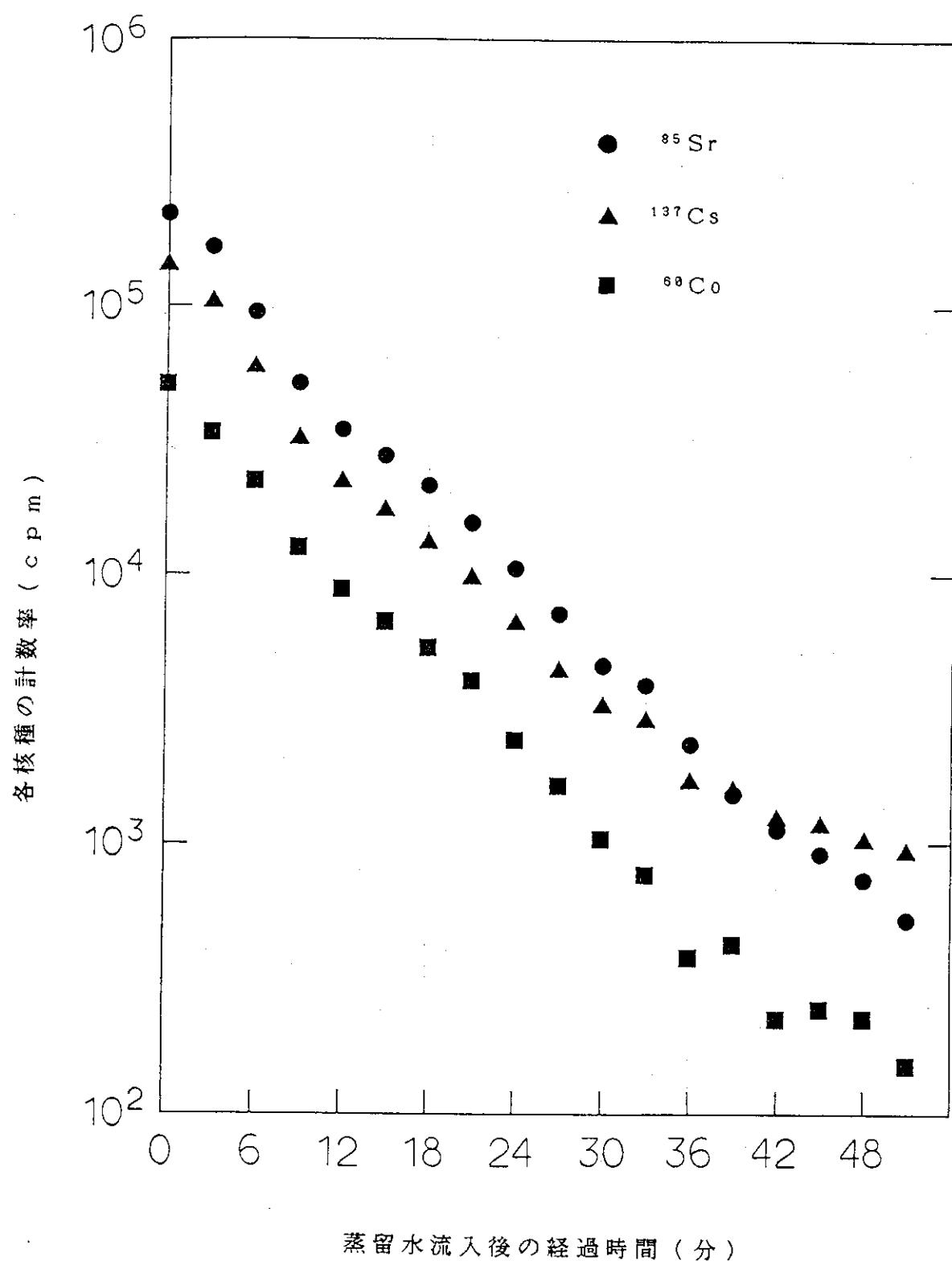


図 17 流出液の希釈による各核種の計数率の変化

右側壁からの 距離(mm)	↓	流入槽入口から ← の距離(mm)							
		1992	1682	1372	1062	752	442	132	
75		1	6	11	16	21	26	31	
225	流	2	7	12	17	22	27	32	流
375	出	3	8	13	18	23	28	33	入
525	槽	4	9	14	19	24	29	34	槽
675		5	10	15	20	25	30	35	

X軸 → 420 720 1040 1350 1660 1970 2280

図 18 地表流の流速測定番号と位置の関係

右側壁からの 距離(mm)	↓	4列	3列	2列	1列	流入槽入口 からの距離(mm)
		2171	1571	971	371	
55		36	27	18	9	
135		35	26	17	8	
215	流	34	25	16	7	流
295		33	24	検出器	15	6
375	出	32	23	番号	14	5
455		31	22	13	4	
535	槽	30	21	12	3	槽
615		29	20	11	2	
695		28	19	10	1	

図 19 土壌水分の測定番号と位置の関係

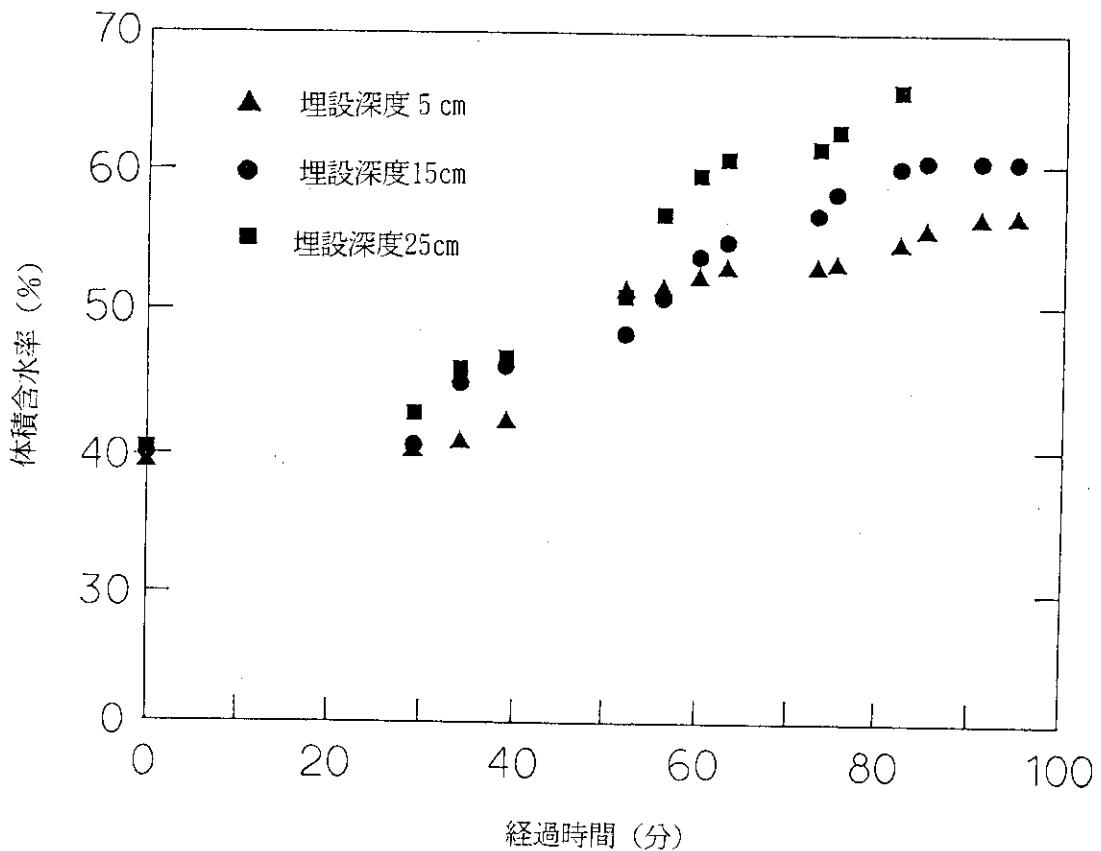


図 20(1) 土壤水分の各深度における経時変化（流入部より 371 mm）

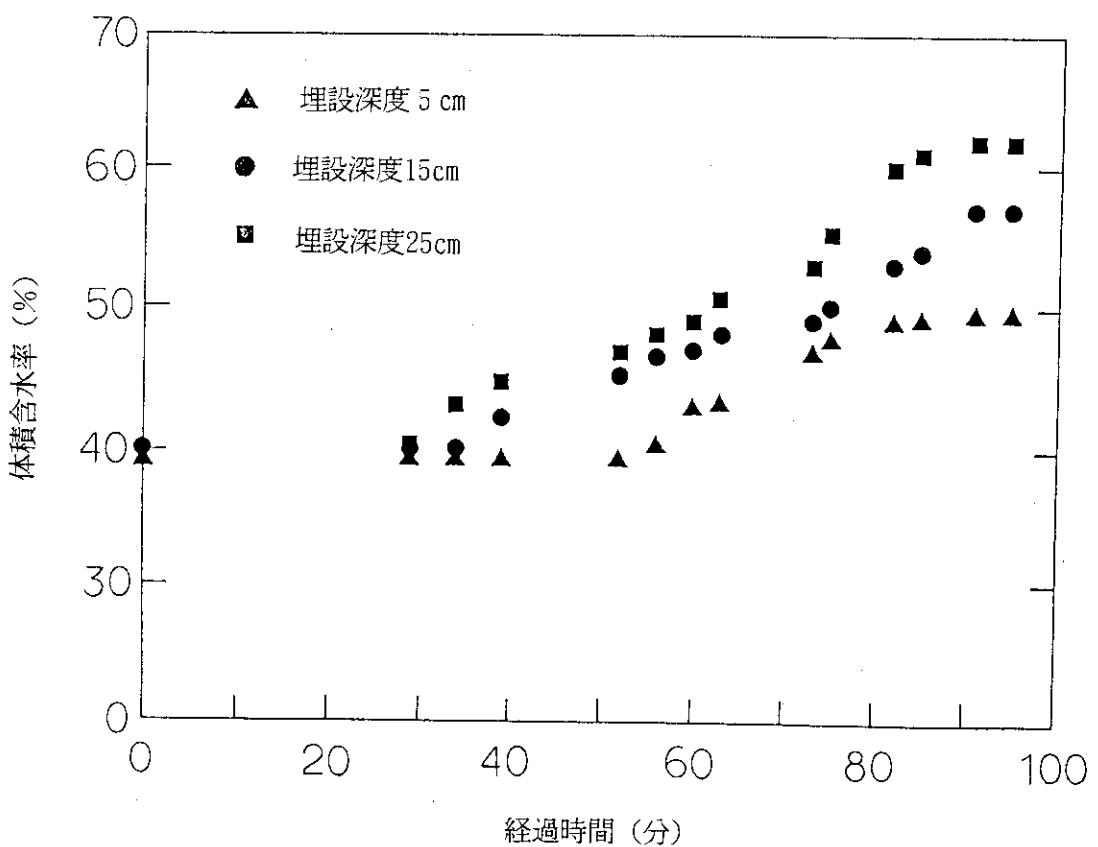


図 20(2) 土壤水分の各深度における経時変化（流入部より 971 mm）

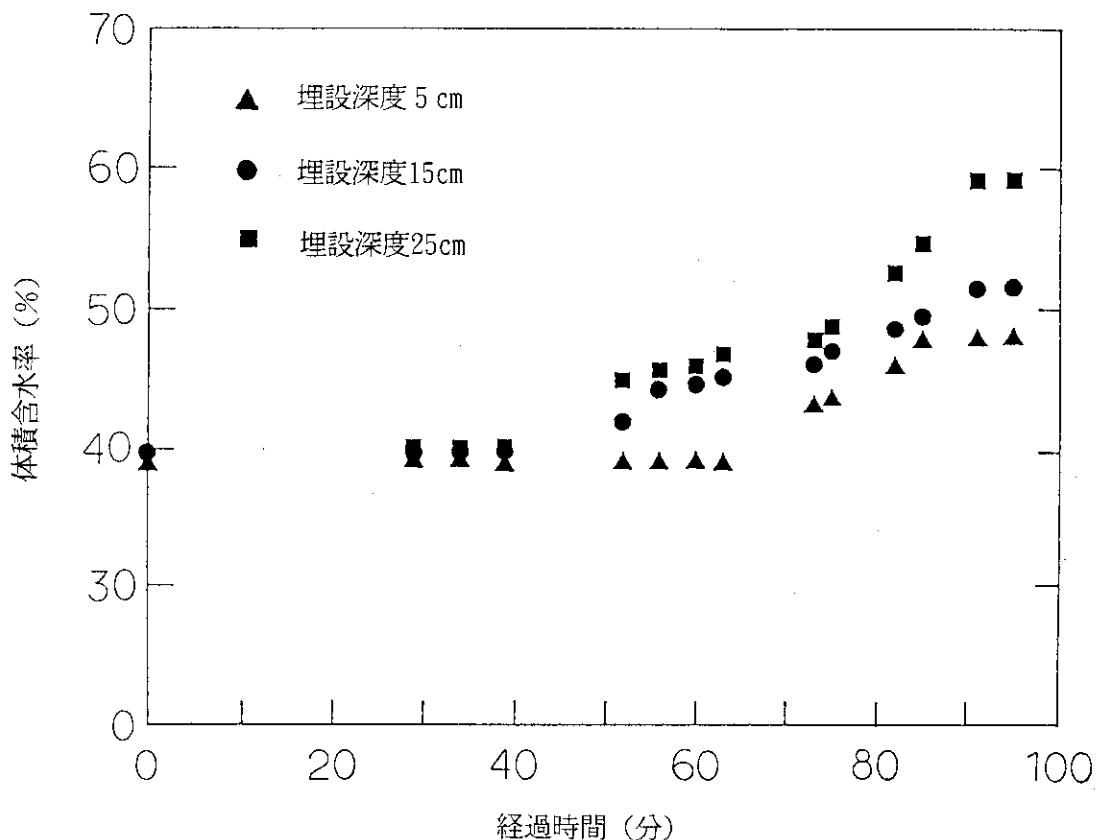


図 20(3) 土壤水分の各深度における経時変化（流入部より 1,571 mm）

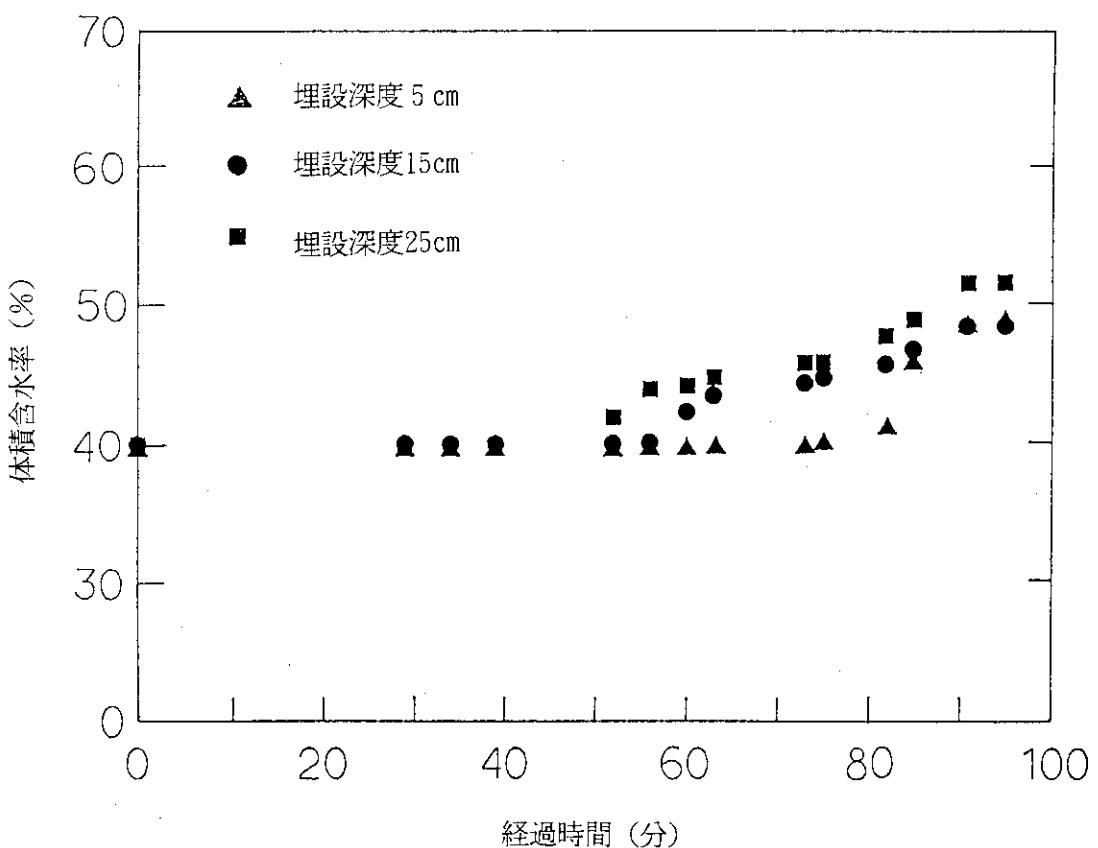


図 20(4) 土壤水分の各深度における経時変化（流入部より 2,171 mm）

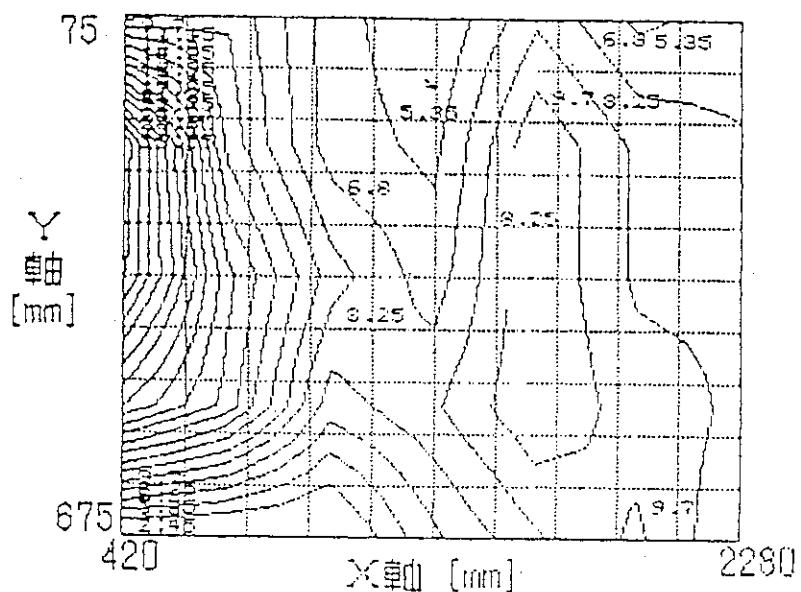


図 21(1) 地表流測定部による地表流の流速分布（地表水流量：4 ℓ／分）
(図中の数値の単位はmm/s)

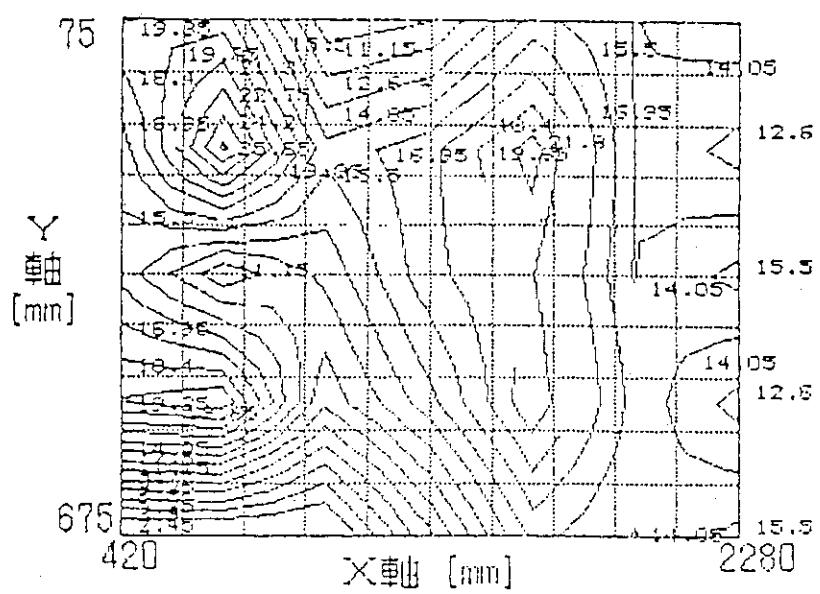


図 21(2) 地表流測定部による地表流の流速分布（地表水流量：7 ℓ／分）
(図中の数値の単位はmm/s)

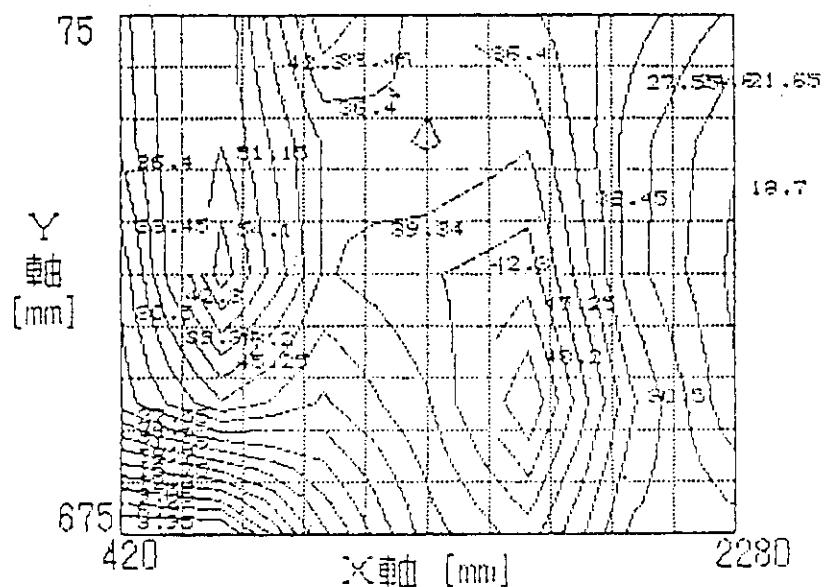


図 21(3) 地表流測定部による地表流の流速分布（地表水流量：15 ℓ／分）
(図中の数値の単位はmm/s)

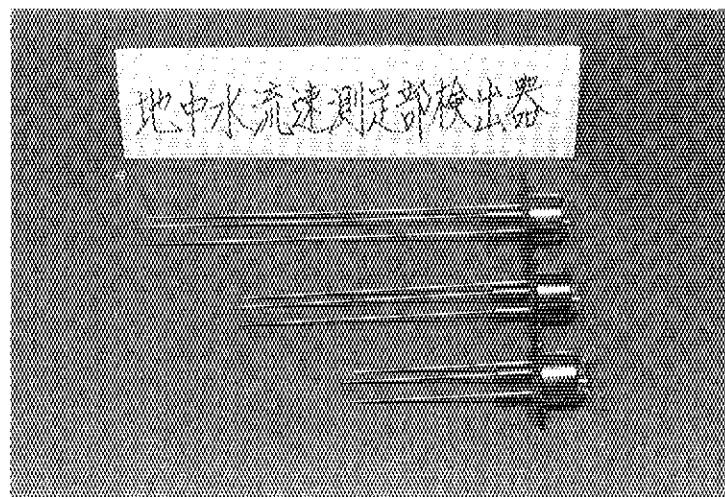


写真1 地中流測定部検出器

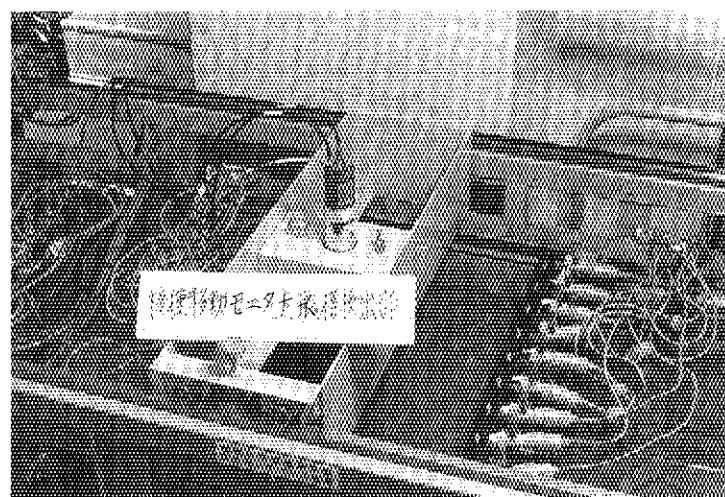


写真2 核種移動モニタ土壤槽検出部

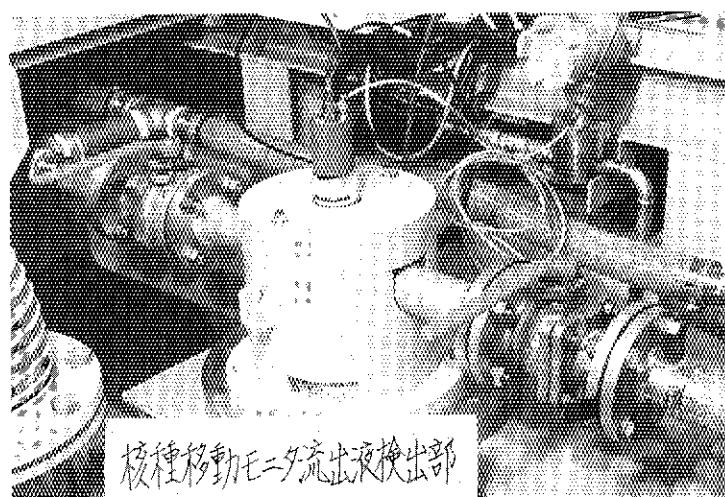


写真3 核種移動モニタ流出液検出部