

JAERI- M

9 1 7 1

放射性廃棄物の陸地処分に関する安全性研究(III)
—地中モデル装置および研究の概要—

1980年11月

山本忠利・武部慎一・大貫敏彦・西村敏郎*・和達嘉樹

この報告書は、日本原子力研究所が **JAERI-M** レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

放射性廃棄物の陸地処分に関する安全性研究(Ⅲ)

— 地中モデル装置および研究の概要 —

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

山本 忠利・武部 慎一・大貫 敏彦

西村 敏郎*・和達 嘉樹

(1980年10月14日受理)

放射性核種の地中移動に関する基礎的研究には、通気層および帯水層の地中モデル装置が用いられている。本報は、環境シミュレーション試験で使用する地中モデル装置の設計、製作に資するため、国内外における地中モデル装置およびそれを用いた研究の紹介に加えて、新たに製作した地中モデル装置(土壌容積:約100ℓ)を用いる研究の内容、装置の仕様および実験法について述べたものである。

* 三井金属鉱業(株)

Radiological Safety Studies on Ground Disposal of Radioactive Wastes
--- Review of Strata Model Apparatus and their Related Studies ---

Tadatoshi YAMAMOTO, Shinichi TAKEBE, Toshihiko OONUKI,
Toshiro NISHIMURA* and Yoshiki WADACHI
Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 14, 1980)

The strata model apparatus simulating an aerated and an aquifer zone are used for the basic studies on the migration of radionuclide in the ground. In order to contribute designing and making of the strata model apparatus to be used for the environmental simulation experiments, this report describes the examples of apparatus operated and results obtained, the specifications of apparatus and the experimental methods concerning newly built apparatus (soil volume: ca. 100 l), respectively.

Keywords: Strata Model Apparatus, Aerated Zone, Aquifer Zone,
Migration of Radionuclide, Environmental Simulation Experiments
Ground Disposal, Radioactive Wastes, Specifications

* Mitsui Mining & Smelting Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 地中モデル装置を用いた安全性研究に関する調査	2
2.1 通気層に関する研究	2
2.2 帯水層に関する研究	6
3. 試作地中モデル装置を用いる安全性研究の概要	17
3.1 目的	17
3.2 内容	17
3.3 成果	17
3.4 地中モデル装置の仕様	18
3.5 放射性核種移動実験法	24
4. あとがき	38
文 献	38

Contents

1.	Introduction	1
2.	Survey of safety studies by means of strata model apparatus.....	2
2.1	Studies concerning aerated zone	2
2.2	Studies concerning aquifer zone	6
3.	Outline of safety studies by means of newly built strata model apparatus	17
3.1	Purpose	17
3.2	Subject matter	17
3.3	Results	17
3.4	Specifications of strata model apparatus.....	18
3.5	Experimental methods for migration of radionuclides	24
4.	Remarks	38
	References.....	38

1. ま え が き

原子力施設から生ずる低レベル放射性廃棄物は、処理の形態に応じて海洋処分あるいは陸地処分によって行うことが原子力委員会の方針となっている。海洋処分については試験的処分の実施が昭和56年に予定されているが、陸地処分については調査、研究が行われている段階で、¹⁾当初の計画より遅れているのが現状である。

陸地処分は国情、すなわち地理的条件および社会的条件に左右されるもので、我国の場合は人口が周密なため、事前に十分な環境安全評価を行う必要がある。陸地処分の安全性試験としては、処分地における放射性核種の地中移動を評価するためホットフィールド試験を行うことが最も望ましいが、我国ではホットフィールド試験を実施することは種々の事情から困難である。それ故、放射性核種の地中移動に関する現実的なデータを得るために、ホットフィールド試験の代替として処分地の地中状態を再現した装置による環境シミュレーション試験を計画している。すなわち、処分地の地層土壌を自然状態のまま採取し、地中モデル装置に設置し、現実的な条件下で放射性水溶液を流下し、水の移動速度に対する放射性核種の移動速度を求める。

環境シミュレーション試験の実施に備えて、筆者らは試作した通気層地中モデル装置(30 cm ϕ \times 120 cm h)を用いて、通気層状態砂層中における放射性核種の移動、分布状況を調べ²⁾てきている。さらに、帯水層地中モデル装置(40 \times 120 \times 40 cm h)を試作し、同時に核種移動実験を進めている。

本報では、環境シミュレーション試験に用いる地中モデル装置(以降地中シミュレーション装置と称する。)の設計、製作に資するため、調査した国内外における地中モデル装置の概要を述べ、さらにそれを用いた研究を紹介すると共に、新たに製作した地中モデル装置(土壌容積:約100 ℓ)を用いる研究の内容、装置各部の仕様および実験法を述べる。

2. 地中モデル装置を用いた安全性研究に関する調査

処分した放射性廃棄物から漏出する放射性核種が人体に達するまでの挙動、移行を解明するために、地中の水移動および核種移動に関する安全性評価研究が各国で進められている。³⁾⁴⁾そこで、国内外における代表的な地中モデル装置を紹介し、さらにそれを用いた研究の概要について以下に述べる。

2.1 通気層に関する研究

2.1.1 京都大学^{*}の井上らによる研究^{5)~7)}

(1) 研究の目的および内容

放射性核種の通気層内での移動特性を実験的に検討し、通気層のもつ核種の保持固定能を知り、安全評価手法の確立に資することを目的としている。すなわち、通気層模型実験装置を用いて、放射性廃液が何らかの事故によって漏出した場合および廃棄物をセメント固化し直接埋没する場合について、放射性核種の砂層通気層中での移動を実験的に検討している。さらに、放射性核種の通気層中での移動を記述する基礎式を提案し、基礎実験によって必要なパラメータ値を実測した後、基礎式を数値的に解き、すでに得ている⁹⁰Srの実験結果を解釈することを試みている。

(2) 地層模型装置の概要

1) 廃液浸透実験

実験に用いられた通気層模型実験装置(第1図)は、直径50cm、高さ30cmの亚克力製フランジ管を5段積み重ねることによって構成されている。装置の上部には長さ40cmのスプリンクラーが取り付けられており、核種を含む水道水を雨滴状に供給することができる。各フランジ管には地層内温度測定用の测温抵抗体の挿入孔、試料土壌採取孔が設けられている。

模擬廃液の給水総量は204ℓ、給水時間は約14hrである。断面平均給水速度は、実験開始後12hrまでは $8.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ 、その後実験停止までは $3.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ である。給液には2連式の定流量ポンプを用いている。

2) 固化体降雨実験

実験に用いられた通気層模型実験装置(第2図)は、1)の実験で用いられたフランジ管5段に加え、同じく直径50cm、高さ10cmで内壁円筒に深さ1cmの排水溝を有する亚克力製フランジ管1段を中間に挿入することによって構成されている。後者のフランジ管はスプレーから供給される水道水がフランジ管内壁を伝って通気層中へ浸透することを防ぐため、内壁を伝って移動する水を模型通気層外へ排除するために用いるものである。装置の上部には金属製のスプレーノズルがとりつけられており、地層表面に時間的・場所的に一様な霧状

* 京都大学工学部衛生工学教室

雨水を供給することができる。

地層表面から深さ2～6cmの間に、セメント固化体の中心軸と模型通気層の中心軸とが一致するようにセメント固化体が埋没されている。スプレーノズルによる地層表面への供給水道水の総量は7,950ℓ、給水継続時間は793.5hr、その期間の断面平均給水速度はほぼ一定で $5.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ である。

(8) 研究の成果

上記1)、2)の実験では、地層流出液中の放射性核種濃度の経時変化を調べ、さらに給水停止約1日後に地層を解体し、地層内の核種分布を調べている。実験1)の模擬廃液としては、水道水に ^{90}Sr 、 ^{60}Co (塩化物)およびトリチウム水を混入した液を用いている。実験2)のセメント固化体としては、 ^{90}Sr 5 mCiおよびトリチウム水5 mCiを含んだ直径15cm、高さ4cmの円柱状固化体を用いている。

1)の廃液浸透実験においては、通気層が放射性核種を吸着し、その移動速度を低減させる効果が大いこと、 ^{90}Sr の娘核種である ^{90}Y は通気層内を ^{90}Sr 、 ^{60}Co に先がけて移動することを認め、さらに ^{90}Sr 、 ^{60}Co の通気層内での移動を予測するために、時間変換係数の考え方が適用できることを明らかにしている。

2)の固化体降雨実験においては、放射性廃棄物をセメント固化して通気層中に埋没した場合、固化体と接触する雨水浸透水中のpH値が他の水質値の変化に先行して大きく変化し、さらに地層内での ^{90}Sr の移動は、固化体周辺での土壌水分の移動パターンを反映して、地層内での ^{90}Sr の移動速度は断面平均的ではなく、固化体の下部において他に比べて大きくなることを認めている。

さらに、通気層における放射性核種移動を予測する方法(土壌水分の移動を記述する式と放射性核種の移動を記述する式との組み合わせ)によって推定した ^{90}Sr の濃度分布のパターンは、実測濃度分布のパターンと比較的よく一致することを見出している。

2.1.2 原子力環境整備センター^{*}における発電所内保管安全性実証試験⁸⁾

(1) 試験の目的および内容

原子力発電所の放射性廃棄物貯蔵設備における放射性廃棄物固化体の保管について、天災地変時の安全性を実証することを目的としている。すなわち、地崩れ等の大規模な天災地変が貯蔵設備に起った場合、固化体に損傷が起り、地中に埋没したときの固化体による放射性核種に対する保持能力を耐浸出試験により求めている。

(2) 耐浸出試験装置の仕様

本試験装置は浸出槽本体の他に、給水設備、流出水計量装置等から構成されている。

浸出槽は、直径150cm、高さ300cmのステンレス製の槽で、下部が円錐状になっている(第3図参照)。槽上部にはステンレス製のスプレー配管が取り付けられており、スプレー配管には直径0.5mmφの細孔が等間隔(150mmピッチ)であけられている。これにより、散水を槽全面に対しほぼ均一かつ雨滴状におこなうことができる。槽底部にはグリズリ(72mmピッ

* 原子力環境整備センター試験第二部

チ)が設けられており、上層の砂層および固化体を支える役目をする。散水はスプレーパイプを通して浸出槽に供給され、砂層を浸透し、模擬固化体と接触する。浸出槽からの砂層浸透水は、浸出槽下部に設けられた流出水出口を通して排水されている。

給水設備は、バルブ、流量指示計、ポンプにより流量を調節して、浸出槽へ地下よりくみあげられた地下水を供給する設備である。

流出水計量装置は、浸出槽からの排水を一旦計量容器に定量貯水し、その貯水回数をカウントすることにより自動計量することができるものである。

(3) 試験の成果

試験にはアクチバブルトレーサーとして、低あるいは高濃度の Co 、 Sr 、 Cs が添加されたセメント固化体を用いている。その埋没状態は、地下水位が埋没固化体の位置より低い場合で、常に埋没された固化体が浸透水にさらされている状態Aと、地下水位が埋没固化体の位置より高い場合で、埋没固化体が浸透水で飽和した土砂中にある状態Cの2条件で実施している。この試験においては、固化体の表面露出度もパラメーターの一つとして浸出状況を調べている。したがって、固化体トレーサー濃度、埋没状態、表面露出度の諸条件を変えて、合計5ケースの試験を実施している。なお、1ケースの試験実施期間は75日で、設定流量は 2 l/hr である。

試験における浸出槽から流出する水の含有成分の変化状況は、埋没状態A、Cにかかわらず、 Sr 、 Ca 、 Mg 、 K および SO_4^{2-} の浸出状態は比較的よく似た傾向を示し、まず浸出開始直後に多く浸出し、その後徐々に減少して一定値に近づくこと、また本試験条件(散水量 2 l/hr)では、 Sr および Mg は約1ヶ月程度でその流出水の濃度と同一か、あるいはそれ以下になることを認めている。

Na の浸出量は初め僅かに減少傾向を示したが、全体としては試験の経過に伴い増大し、 Co の浸出量は各ケースで差があったが、 Sr の浸出量は各ケース間でほとんど差がないことを認めている。

浸出比は試験条件がかわっても Sr 、 Ca および Mg は 10^{-4} のオーダーを示し、 Na と K は 10^{-3} のオーダーとなり、また状態Cの場合の浸出比は状態Aに比べて高く、 Sr 、 Ca および Mg は3~7倍、 Na および K は1.6~1.9倍程度の浸出比になることを見出している。

試験終了後に固化体下部の土砂について分析したが、使用前の土砂の分析値と有意差は見られなかったが、状態Cの場合終了後の濃度がやゝ高くなる結果を得ている。

2.1.3 農林水産省農業土木試験場の木村らによる研究^{*}

(1) 研究の内容

基礎実験的検討用の加圧透水試験装置を用いて、浅層地下水の流動と揚水による地盤沈下現象を調べている。

(2) 加圧透水試験装置の仕様

本装置の試料容器は直径 $80\text{ cm}\phi$ 、長さ 100 cm の不銹鋼製円筒である。排水は内筒と外筒に2

* 農林省農業土木試験場水利部水利第2研究室

分割されている。主な性能は次のとおりである。

最大土圧：3 kg/cm²

水位差限界：0.01 mm

土圧計：5 kg/cm²，4個

本装置全体の外観を写真1に示す。

(3) 研究の成果

地下水の流動に関し提示されているビンガム流領域と非流動領域を確認し、自然の地下水流のほとんどはビンガム流領域にあることを裏付けている。地盤沈下機構である下流側水位の低下による地層収縮を伴う透水性の変動機構と各パラメーターの範囲を求めている。

2.1.4 ^{*}ドイツGSFのH. Moser らによる研究⁹⁾

(1) 研究の内容

環境保全の研究の一環として水理学的な見地から、放射性物質、塩、色素等を含む水溶液を土壌カラムに流下し、流体のパラメーターおよび多孔性媒体の特性に及ぼす垂直方向の分散係数の影響を調べている。

(2) 土壌カラム装置の概要

本装置はプラスチック製の土壌カラム、流出速度を一定に保つための原料水容器とヘッドタンク、トレーサーをパルス注入するための流下機構、および検出器から構成されている。そのフローシートを第4図に示す。試験に使用された土壌カラムは直径10～290 mm、長さ500～4000 mm 範囲の17種類である。γ線放出核種をトレーサーに用いた試験では、コリメートしたシンチレーション検出器を用いている。また、カラム側面端子で電気伝導度を測定することにより、電解質水溶液を用いる試験ができる。ウラニウム水溶液を用いる試験ではカラムから流出した液の蛍光量を測定している。

(3) 研究の成果

粒の大きさ、形状、粗さ、angularity、充填度、および粒度分布の異なる人工および天然の多孔性媒体を用いて、垂直方向の水の分散速度と線速度との関係を調べ、分散係数と線速度との間に直線性が成り立つことを見出している。特に粒の大きさと粒度分布の均等係数が分散に影響を及ぼし、その他のパラメーター（水の温度、空隙率、粒の形状、粗さ、angularity等）も分散係数に影響することを認めている。また、分散係数は浸透性に依存しない特性値であることを指摘している。

その他の研究としては、現在ニーダーザクセン州ゴルレーベンに高レベル廃棄物の処分場を造る計画があり、西ドイツでは総合的安全評価研究のためプロジェクトが組まれている。このプロジェクトの一環として、ゴルレーベン地域の土壌を対象にした試験も行われている。¹⁰⁾ 写真2は、土壌を打ち抜いて用いている真鍮製土壌カラム（6 cmφ×25 cmh）で、これによりゴルレーベン地域の下層土について、未攪乱状態での放射性核種（¹²⁵I, ¹³¹I, ⁸⁵Sr）の吸着能を

* ドイツのミュンヘンにある放射線・環境研究所（Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH）

測定している。さらに、写真3は、 $9\text{ cm}\phi \times 100\text{ cm h}$ のプラスチック製土壌カラムを用い、攪乱状態での放射性核種 (^{125}I , ^{131}I , ^{85}Sr , ^{134}Cs) の垂直方向移動を測定している。これらの試験では、放射性水溶液の流下は、いずれもゴルレーベン地域の降水量に相当する速度で行われている。

2.2 帯水層に関する研究

2.2.1 京都大学^{*}の井上らによる研究¹¹⁾¹²⁾

(1) 研究の目的および内容

帯水層模型実験装置を用いて、放射性核種の帯水層中での移動現象をより現実に近い状態で実験的に検討することを目的としている。すなわち、帯水層模型中に放射性核種を含むセメント固化体を埋没し、セメント固化体から浸出した放射性核種が帯水層中をどのように移動するかを、主として放射性廃棄物地中処分の安全性を考える場合に重要な ^{90}Sr に注目して、実験的に検討し、さらに放射性核種の移動を予測する二つの方法について比較している。

(2) 地層模型装置の概要

実験に用いられた帯水層模型実験装置(第5図)は二重の塩化ビニル製水槽からなり、砂を充填して帯水層模型になる内側の水槽は長さ105 cm、幅40 cm、深さ55 cmである。内側の水槽と外側の水槽との間には水が満たされ、水温をコントロールすることによって、装置全体の温度がコントロールされている。また、帯水層内の5ヶ所の温度を自動的に測定し、記録できる。

帯水層への水道水の供給速度は、実験開始時は $250 \pm 20\text{ ml/min}$ であり、その後地層間隙の目づまりを生じて急激に減少し、実験開始後1ヶ月~6ヶ月は $55 \pm 5\text{ ml/min}$ 、その後さらに漸減し、実験開始後1年より実験停止までの期間は $15 \pm 5\text{ ml/min}$ の範囲をほぼ1ヶ月の周期で変動している。実験期間中の地層内温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ であり、地層内温度はほぼ均一に保たれている。

(3) 研究の成果

模型帯水層内の所定の位置に ^{90}Sr 5 mCi, ^{60}Co 100 μCi , ^{137}Cs 6 μCi を含むセメント固化体(直径19.6 cm、高さ51 cmの円柱体)を埋没して実験を行い、実験開始1280日後に地層を解体して、地層内の核種分布を測定している。実験期間中には、帯水層内での水の移動をトリチウム水をトレーサーとして実測する他、地層間隙水中の核種濃度を測定している。

地層間隙水中の ^{90}Sr 濃度は、 ^{90}Sr のセメント固化体からの大きな初期浸出の効果を反映して、実験開始直後には特に高くなり、 ^{90}Sr のセメント固化体からの浸出は、浸出開始後ほぼ400~500 dayで定常に達することを認めている。 ^{90}Sr が地層流出端に到達するに要する時間は、分配係数値とKfファクターとを用いることによりほぼ予測できることを明らかにしている。

さらに、基礎方程式を数値的に解くことにより放射性核種の移動を予測する方法、および地下水の移動をトレーサーを用いて実測することにより放射性核種の移動を予測する方法とにつ

* 京都大学工学部衛生工学教室

いて比較検討し、前者の場合に比べて後者の場合は、 ^{90}Sr の予測濃度分布は実測濃度分布とよく一致することを確かめている。

2.2.2 原子力環境整備センター^{*}における帯水層試験¹³⁾

(1) 試験の目的および内容

低レベル放射性廃棄物の陸地処分に関する安全性評価手法の確立を目途とし、帯水層における核種の挙動を調査するため、本試験で用いられている施設^{**}の十分の一の大きさのシミュレーション用帯水層装置に砂を充填し、充填密度と帯水層中の水の流速との関係を検討している。本試験の目標流速(30 cm/day)が得られた条件で、アクチバブルトレーサーを注入し、帯水層におけるトレーサー元素の挙動を調査している。また、試験終了時には砂層中のトレーサー元素の濃度分布の調査が行われ、試験結果等を本試験に反映させている。

(2) シミュレーション用帯水層装置の仕様

本装置は帯水層槽、流入槽、定量ポンプ等から構成されており、本試験用施設の十分の一の大きさである。主な仕様は次のとおりである。

帯水層槽の大きさ：600×1,000×350 mm h

流入槽の大きさ：600×120×430 mm h

流出槽の大きさ：600×100×430 mm h

各槽の材料：透明アクリル樹脂板(板厚10 mm)

定量ポンプ：吐出量50~1,500 ml/hr(東京理科器械製 MP-普及型)

砂止め用ネット：HIカルネット No 21-600(タキロン製)

本装置の断面図および平面図を第6図に示す。

(8) 試験の成果

定量ポンプでトレーサー溶液を1日当り27ℓの割合で流入槽へ供給し、121日間通液を行い、流出槽中のトレーサー元素濃度の経時変化および砂中のトレーサー濃度分布を調べている。

流出槽のトレーサー濃度変化については、Srは14日目から検出され、70日目から給液中の濃度を10倍にしたところ、74日目に破過が現われ、以後徐々に増加し、110日目からはほぼ一定となることを認めている。Coは給液中のトレーサー濃度を変えるまでは検出されず、85日目に検出され、それ以後は徐々に増加し、116日目頃からはほぼ一定となることを認めている。

次に砂層中のトレーサー濃度の分布については、Coの濃度は流入槽から流出槽へ向けて減少し、また中段では流入槽に近い方が濃度分布のコンターが流出槽側に比べ密になり、逆に下段では流出槽に近い方が流入槽側に比べコンターが密になることを認めている。これは流出槽側の中段のサンプリング位置が想定される地下水面より上にあるため、また流出槽側の下段の濃度分布コンターが密なのは、流れの影響により砂に付着するCoが少ないためであると判

* 原子力環境整備センター試験第二部

** 秋田県尾去沢において実施されている浅層地中処分に関する試験を指す。

断している。

S_r については、あらかじめ砂の有する S_r の量が多いため、それが1 M塩酸に浸出することも考えられる。 O_s については、流入槽から30cmぐらいの所までしか移動しないことを認めている。また、中段と下段ではほとんど同じような分布をすることを見出している。

本シミュレーション試験の結果から、本試験への適用性を検討することにより、本試験の試験条件が設定されている。

2.2.3 農林水産省農業土木試験場^{*}の木村らによる研究

(1) 研究の内容

浅層地下水の諸水理問題を解明するため、基礎実験的検討用の汎用装置を用いて、種々の条件での自然流動、揚水と注水による諸変化（水質、気泡の注水等）を調べている。

(2) 実験土槽の仕様

本土槽の試料槽は、長さ300cm、幅80cm、高さ120cmである。両側に長さ50cmの水層部、上面に0.06~1.0kg/cm²のゴム製加压装置が付属し、両側面は透明硬質樹脂板である。主な性能は次のとおりである。

水位変動幅：3.5 m

動水勾配の設定限界：0.05 mm

地層の可変傾度：0~0.1

ストレーナー：片面と中心線に各3ヶ所

土圧計：2kg/cm²、12個

水位測定：8ヶ所

本土槽の外観を写真4に示す。

(3) 研究の成果

試料槽の上下に粘土層をはさむ豊浦砂層について、水平条件で、動水勾配の反復変動、その条件での水圧増加などによる水の流れの実験が現在進められている。成果の一部として、提示されているピンガム流領域が明瞭に確認でき、またダルシー流領域の不安定性を認めている。

2.2.4 ドイツGSFのH. Moser^{**}らによる研究¹⁴⁾

(1) 研究の内容

トレーサーによる地下水の流速測定にポイント希釈法を適用するに際して、井戸による流れのゆがみを調べている。

(2) 三次元モデル装置の概要

本装置は帯水層槽、流入槽、流出槽、ろ過管、オーバーフロー容器等から構成されている。そのフローシートを第7図に示す。試験で用いられた帯水層槽は縦1,200~5,200mm、横

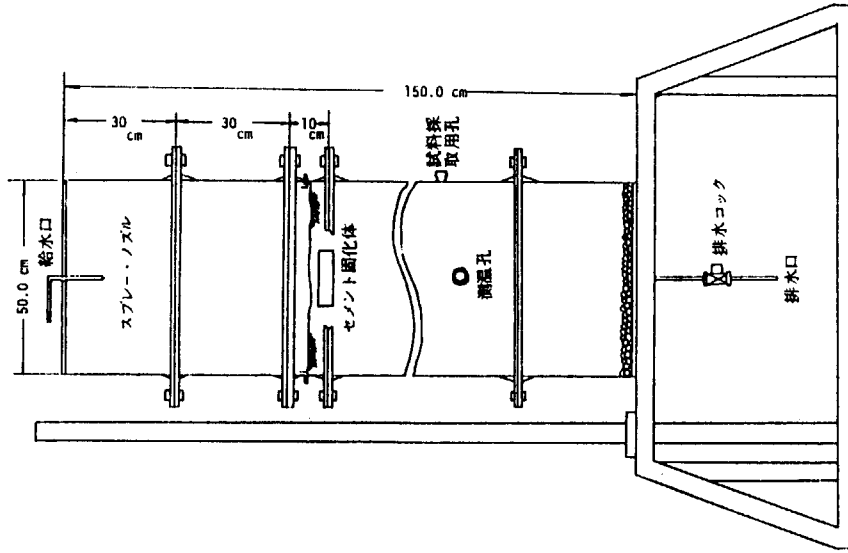
* 農林省農業土木試験場水利部水利第2研究室

** ドイツのミュンヘンにある放射線・環境研究所 (Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH)

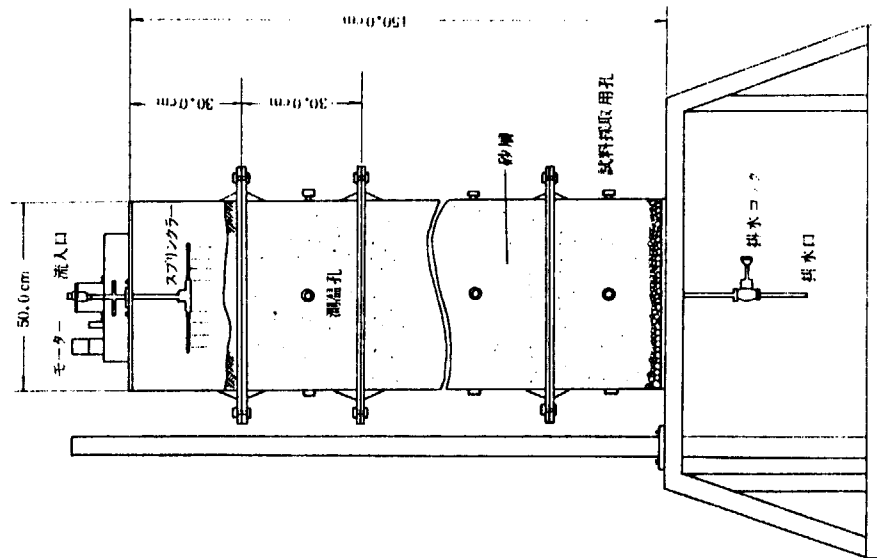
1,000~2,500mm, 高さ800~4,000mm範囲の5種類である。水の流入, 流出は, 静止層(流入層, 流出層)を通して行っている。流量はオーバーフロー容器とバルブにより調整し, 浮遊式流量計で測定している。ろ過速度を1.5mm/dayから60m/dayの間にセットし, 水の供給とヘッドにより, 上限を制御している。トレーサー実験では槽断面の速度分布を測定し, また底面と壁面での圧力を連続測定することにより, ポテンシャル分布も測定している。

(3) 研究の成果

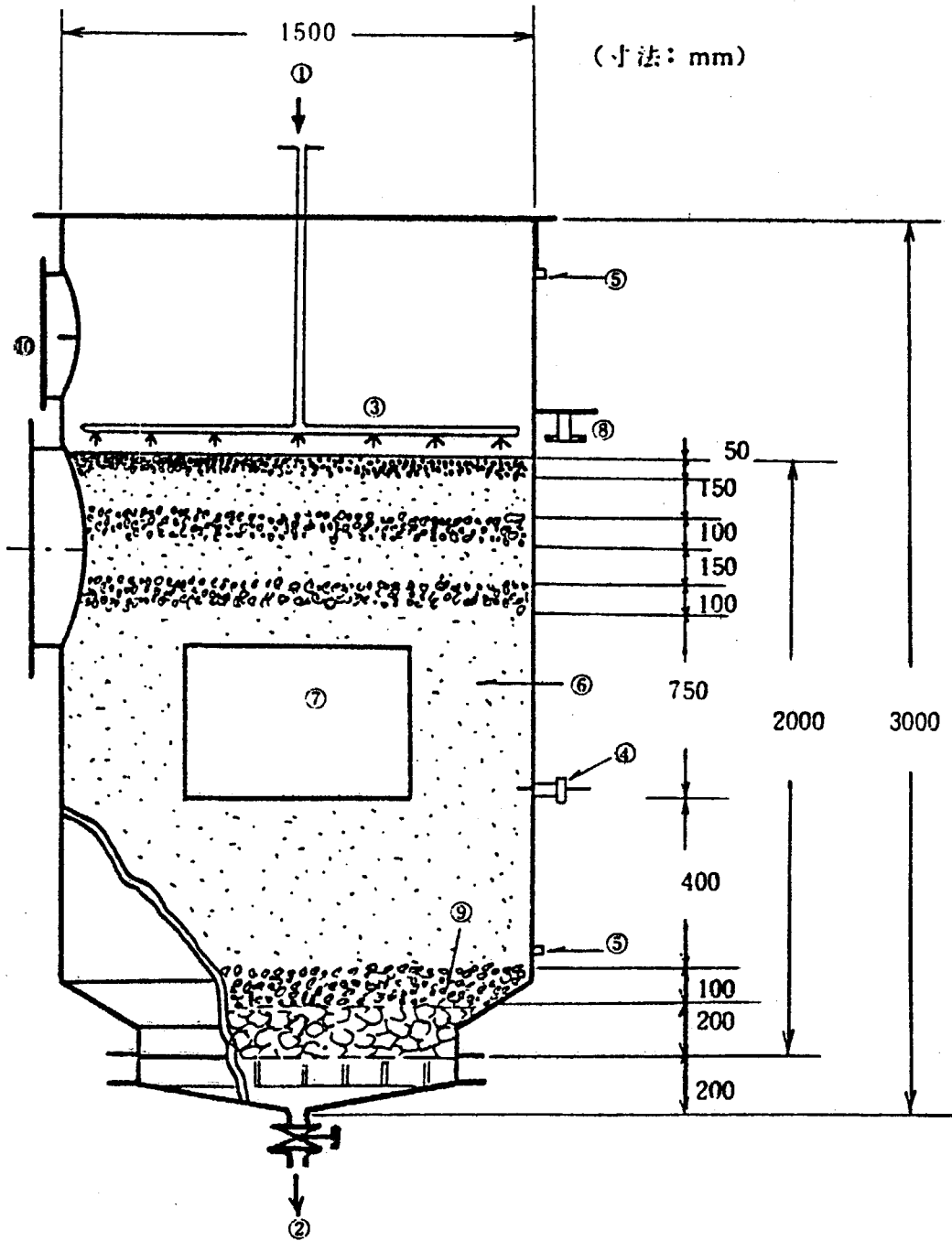
帯水層(k_1), 石英砂の充填度(k_2), 井戸の仕切り(k_3)の浸透性の中に $k_3 \leq k_2 \leq k_1$ の条件を満たす場合には, ゆがみはかなり正確に計算できることを見出している。垂直流が起こる井戸において, ピーク対ピーク法と全計数法を用いることにより, 深さと水の流出入速度を求めている。地下水の流れ方向は, 井戸にトレーサーを注入しコリメートされた検出器で調べること, 土壌によく固定される ^{198}Au は希釈体積内で均一に分布するのでトレーサーとして最適であること等を見出している。



第2図 通気層模型実験装置
(固化体降雨実験用)

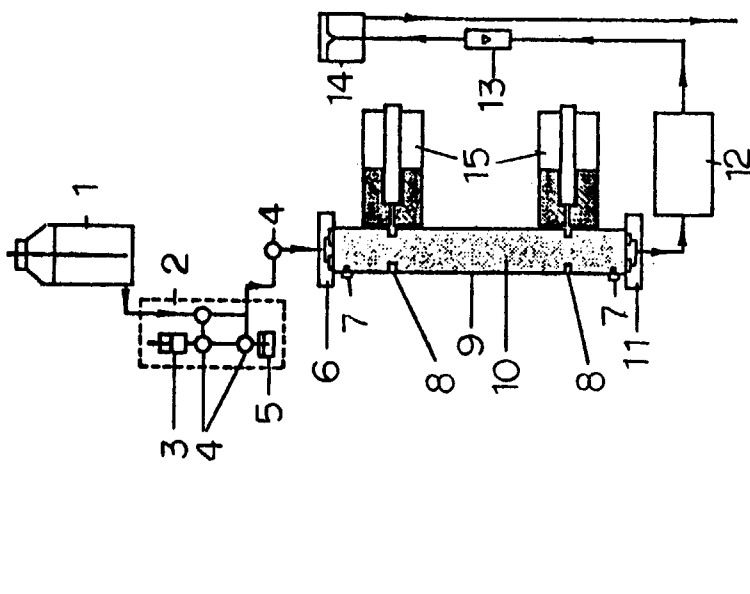


第1図 通気層模型実験装置
(廃液浸透実験用)



- | | |
|-----------|------------|
| ① 散水 | ⑥ 砂層 |
| ② 流出水 | ⑦ 模擬固化体 |
| ③ スプレーパイプ | ⑧ オーバーフロー口 |
| ④ サンプル採取口 | ⑨ 金網 |
| ⑤ レベル計取出口 | ⑩ 観測窓 |

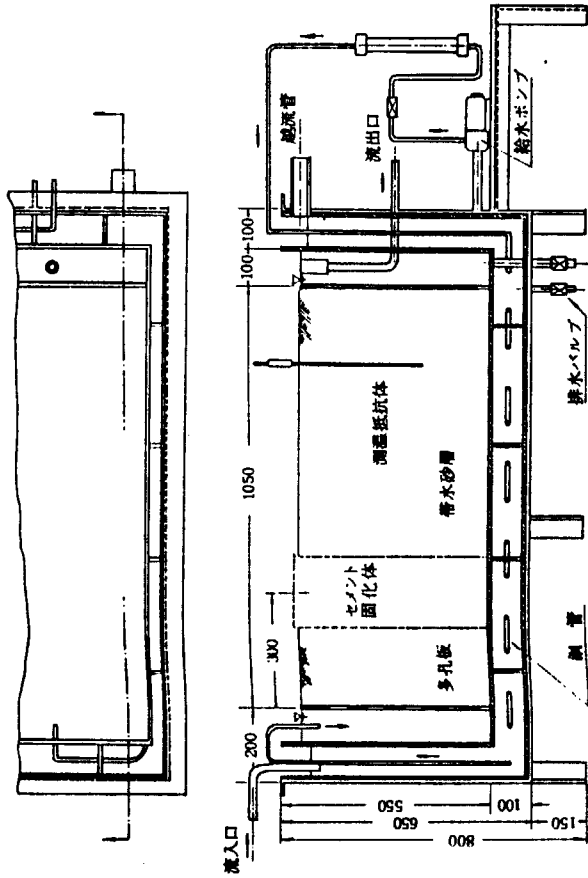
第3図 耐浸出試験装置



- 1 Mariotte vessel
- 2 Device for instantaneous tracer injection
- 3 Syringe
- 4 Valves
- 5 Tracer reservoir
- 6 Inlet distributor
- 7 Manometer connection
- 8 Electrodes for conductivity measurements
- 9 Plexiglass column
- 10 Porous medium
- 11 Outlet distributor
- 12 Fluorimeter
- 13 Discharge meter
- 14 Constant head container
- 15 Collimated radiation detector

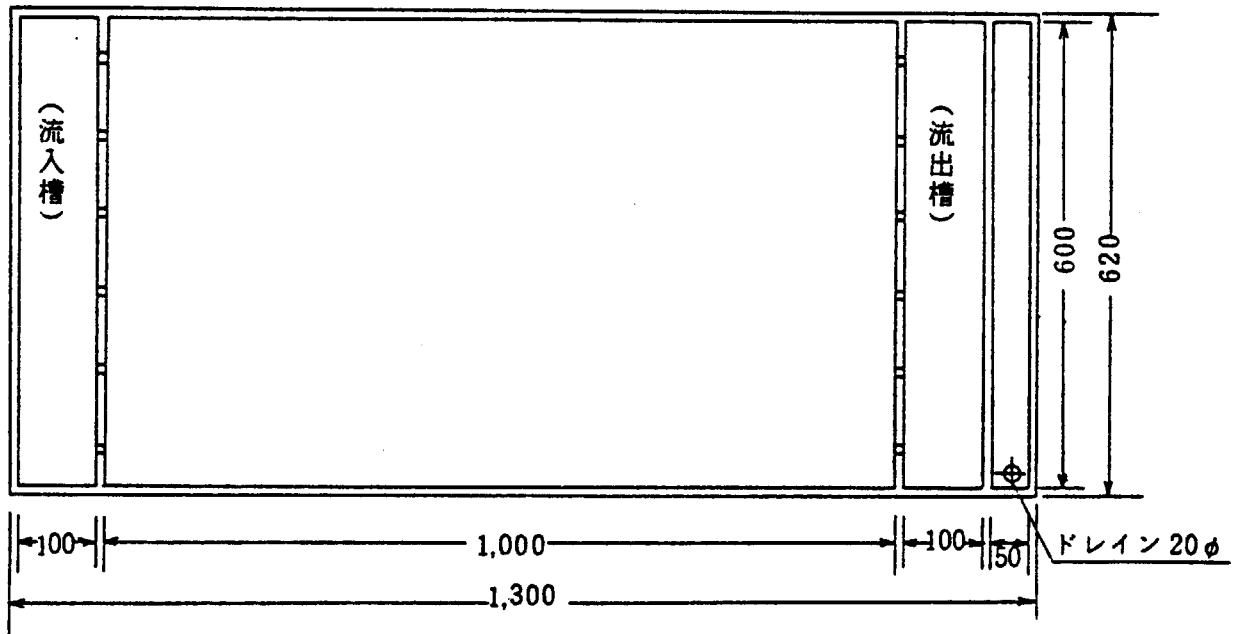
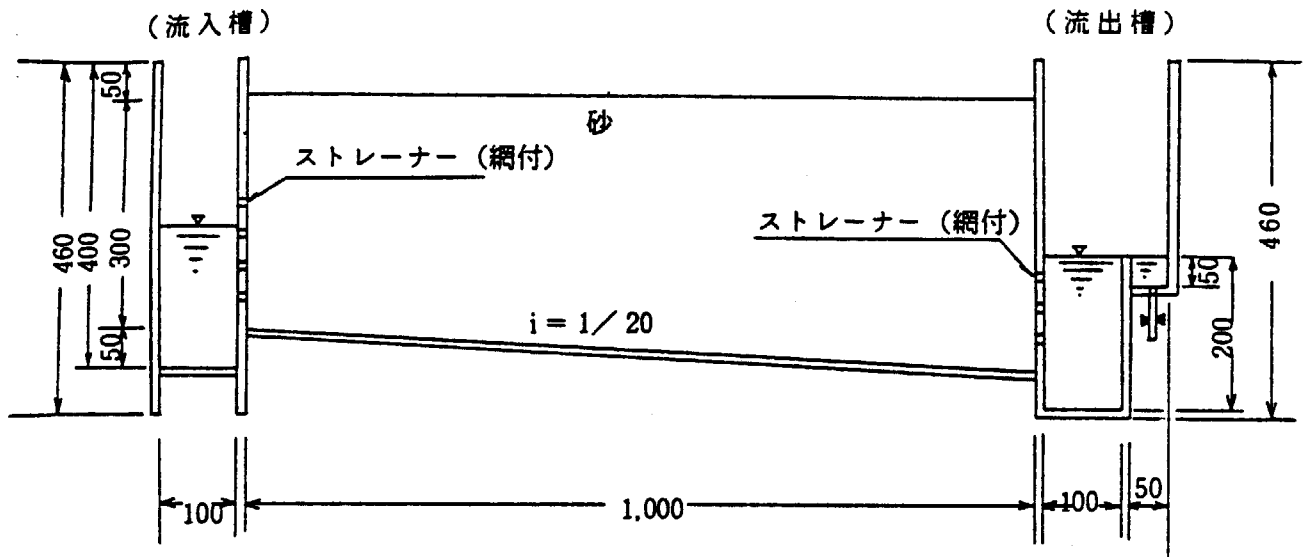
第4図 土壤カラム装置

(寸法: mm)

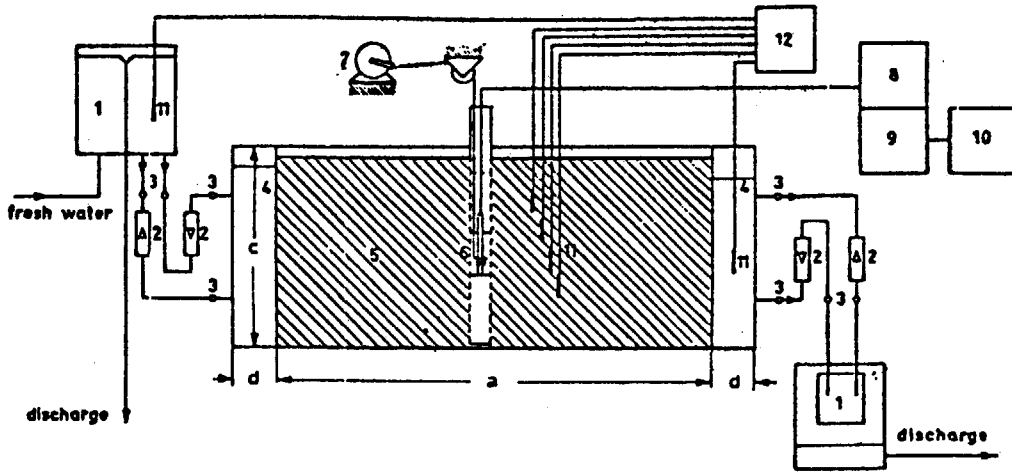


第5図 帯水層模型実験装置

(寸法 : mm)



第6図 シミュレーション用帯水層装置 (断面図, 平面図)



- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1 overflow, | 7 mixing motor, |
| 2 flow meter, | 8 scaler, |
| 3 control valve, | 9 rate meter, |
| 4 stilling chamber, | 10 chart recorder, |
| 5 aquifer (sand or gravel), | 11 resistance thermometer, |
| 6 filter tube with probe, | 12 6-point recorder |

第 7 図 三次元モデル装置

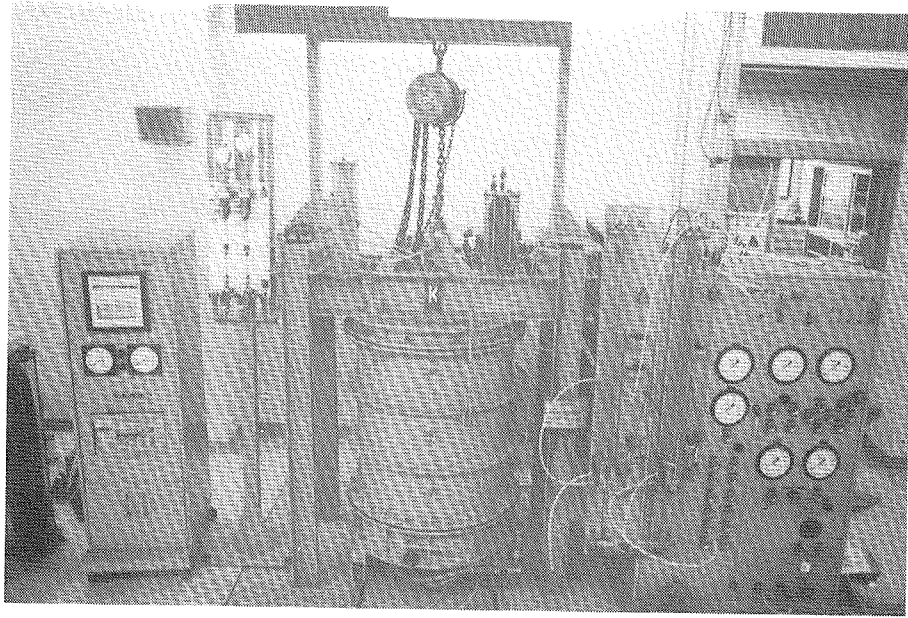


写真1 加圧透水試験装置

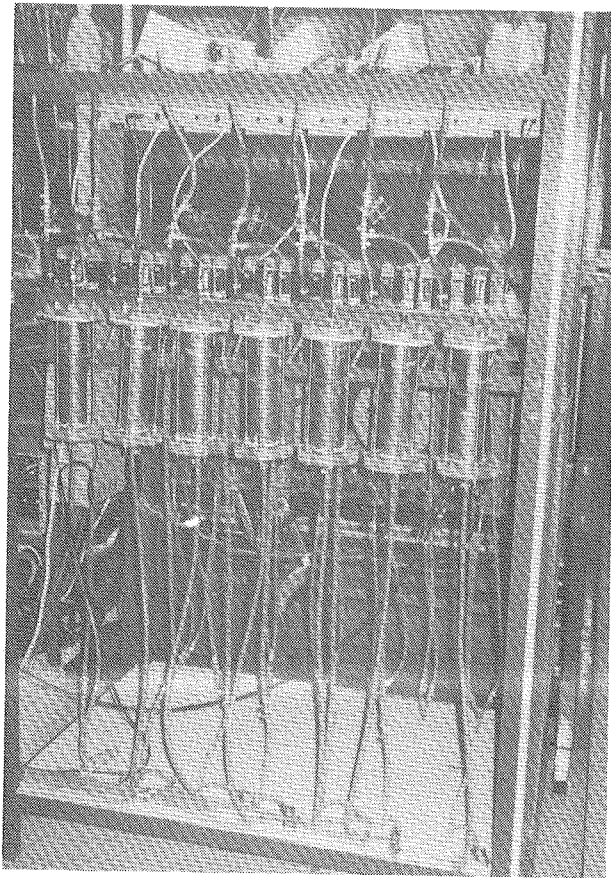


写真2 真鍮製土壌カラム

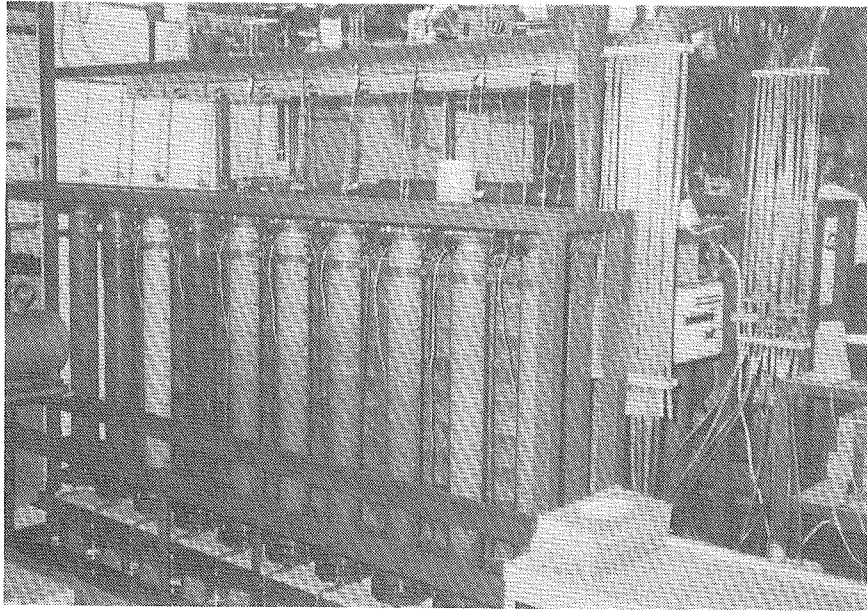


写真3 アクリル製土壌カラム

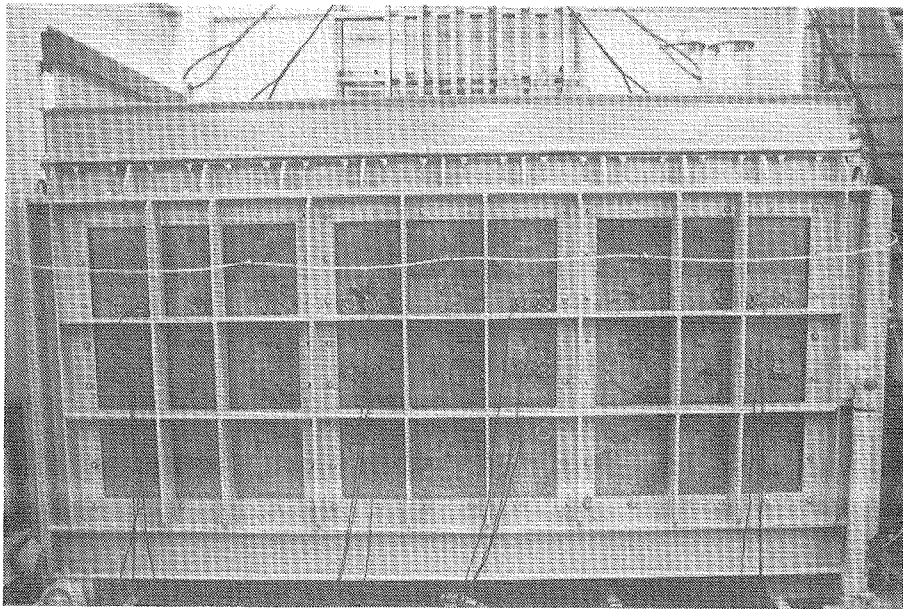


写真4 実験土槽

3. 試作地中モデル装置を用いる安全性研究の概要

3.1 目的

低レベル廃棄物の陸地処分の実施に先立ち、その安全性を確証する必要がある。そのため当研究室では、安全評価上重要な放射性核種の地中移動に関して、各種放射性核種の通気層中および帯水層中における移動、分布状況を地中モデル装置を用いて調べ、基礎的データの収集を図る。

3.2 内容

土壌容積約100ℓの通気層地中モデル装置を用いて、放射性核種 (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{85}Sr , ^{90}Sr - ^{90}Y 等) の砂層中における移動、分布状況を、核種の化学形と水の移動速度に関連して調べる。実験はスプリンクラーにより放射性水溶性を砂層表面に一定流速で散布、浸透させ、砂層中における核種の移動、分布状況を放射能測定により求める。

一方、土壌容積約100ℓの帯水層地中モデル装置を用いて同様に放射性核種の砂層中における移動、分布状況を、核種の化学形と水の移動速度に関連して調べる。実験は送液ポンプにより放射性水溶液を一定流速で帯水層槽中の砂層に流下させ、砂層中における核種の移動、分布状況を放射能測定により求める。

3.3 成果

通気層および帯水層の地中モデル装置を用いてこれまでに得られた成果の一部を以下に述べる。

通気層砂層中における ^{137}Cs および ^{60}Co の移動、分布状況を調べた結果、 ^{137}Cs は陽イオンとして砂層によく吸着し、水による移動が少なく、一方 ^{60}Co は酸性では陽イオンとして ^{137}Cs と同様な吸着挙動を示すが、中性では加水分解を受け水酸化物 ($^{60}\text{Co}(\text{OH})_2$) となり、砂層に吸着し難く、水による移動が多いことがわかった。さらに引続き、 ^{90}Sr の移動、分布状況を調べる予定である。

一方、帯水層地中モデル装置の試運転を行い、流入、流出速度と帯水層槽の傾きとの関係を調べた結果、流出速度は槽の傾きに依存せず流入速度に支配されることがわかった。さらに引続き、ホット実験を実施する予定である。

3.4 地中モデル装置の仕様

3.4.1 通気層地中モデル装置

本装置は、通気層カラム部、土壌コンディショニング部、水ポテンシャル調整部、放射性水溶液流下部、サンプリング部等の部分からなっている。

そのフローシートを第8図に、装置全体を写真5に、電気配線系統図を第9図にそれぞれ示す。

通気層カラム部、土壌コンディショニング部、水ポテンシャル調整部、放射性水溶液流下部、サンプリング部は、それぞれ次の機能を備えている。

1) 通気層カラム部

- i) 所定量の土壌を通気層カラムに充填できる。
- ii) 水および放射性水溶液を通気層カラム内土壌に上部より流下できる。
- iii) 通気層カラム内の温度および水の流速を測定できる。
- iv) 通気層カラムは各ユニット毎に解体することが可能であり、解体したユニットカラムから土壌を採取できる。

2) 土壌コンディショニング部

- i) 通気層カラム内の土壌中の空気を脱気できる。
- ii) 水タンク中の蒸留水を通気層カラム下部から逆に通水させることができる。また、スプリンクラーによりカラム内の土壌表面全体に通水することもできる。
- iii) 土壌中の空隙を水で飽和した後の水の排水が可能であり、また所定量通水後にカラム下部からの水抜きが可能である。

3) 水ポテンシャル調整部

- i) 水ポテンシャル水槽によりカラム内土壌中の水位を任意に変化させることができる。

4) 放射性水溶液流下部

- i) RIタンクの放射性水溶液を送液ポンプ P_2 により揚水し、スプリンクラーを經由してカラム内の土壌表面全体に放射水溶液を均一に散布できる。
- ii) i) の他にも、RIタンクから送液ポンプ P_2 によりヘッドタンクへ一旦揚水し、ヘッドタンクからの自然流下によりスプリンクラーを經由してカラム内の土壌表面全体に放射性水溶液を均一に散布できる。
- iii) 流量計により水の流量を測定できる。

5) サンプリング部

- i) 通気層カラムからの流出液を採取できる。

本装置の構成各部の詳細仕様は次のとおりである。

(1) 通気層カラム

1) 通気層カラム

通気層土壌中の放射性核種の移動速度を調べるための土壌カラムである。

形状 円筒形

大きさ $30\text{ cm } \phi \times 150\text{ cm h}$ (1ユニット: $30\text{ cm } \phi \times 10\text{ cm h}$)

- 材 質 透明塩化ビニル
 構造 第10図に示す。15ユニットの接続方式（ゴムパッキングによるボルト止め方式）。
 各ユニットに水流速測定用の測定孔（1ヶ所）付き。

2) 流下カラム

放射性水溶液をスプリンクラーにより流下させるため、通気層カラムの上部に取付ける。

- 形 状 円筒形
 材 質 透明塩化ビニル
 構造 第11図に示す。スプリンクラー取付可能。

3) 濾過カラム

流下放射性水溶液を濾過するため、通気層カラムの下部に取付ける。

- 形 状 円錐形
 材 質 透明塩化ビニル
 構造 第12図に示す。ステンレス製フィルター（20メッシュ $29\text{cm}\phi$ 1枚、40メッシュ $29\text{cm}\phi$ 1枚）および充填ガラス玉（ $1\text{cm}\phi$ ）付属。

4) 架台

通気層カラムおよびヘッドタンクを一体に組み込むための架台である。

- 材 質 SS41
 構造 ヘッドタンクの高さが調整できる。

(2) 土壌コンディショニング部

1) 水タンク

土壌コンディショニング用の蒸留水を貯水するタンクである。

- 形 状 円筒形
 容 量 50ℓ ($30\text{cm}\phi \times 70\text{cmh}$)
 材 質 透明塩化ビニル

2) 送液ポンプ (P_1)

水タンクから通気層カラム下部へ送液するためのポンプである。

- 形 式 マグネットドライブ方式（イワキ製MD-50型）
 流 量 最大 $50\ell/\text{min}$
 揚 程 6 m
 材 質 ポリプロピレン（接液部）

3) 流量計 (FG_1 , FG_2)

放射性水溶液の通水速度の測定に用いる。

- 形 式 浮遊式（日本特殊計器製V-S型）
 流量範囲 $\begin{cases} FG_1 (10 \sim 100\ell/\text{hr}) \\ FG_2 (5 \sim 50\ell/\text{hr}) \end{cases}$
 材 質 ガラス（テーパ管）

(8) 水ポテンシャル調整部

1) 水ポテンシャル水槽

カラム内土壌中の水位を調整する槽である。

形式	オーバーフロー方式
容量	12ℓ (20 cmφ×40 cmh)
材質	透明塩化ビニル
その他	水位調整用ジャッキ付き

(4) 放射性水溶液流下部

1) RIタンク

放射性水溶液の貯水槽である。

容量	20ℓ (30 cmφ×30 cmh)
材質	パイレックスおよびSUS304
その他	遮蔽体付き, 液面計付き。

2) 送液ポンプ (P₂)

RIタンクからスプリンクラーへ送液するためのポンプである。

形式	ピストン式 (イワキ製ストロークポンプQP型)
流量	最大 15ℓ/hr
揚程	5 m
材質	ポリプロピレン (接液部)

3) 流量計 (FG₃, FG₄)

放射性水溶液の通水速度の測定に用いる。

形式	$\left\{ \begin{array}{l} \text{FG}_3 \text{浮遊式 (日本特殊計器製 V-S型)} \\ \text{FG}_4 \text{浮遊式 (OMEGA製 V-S型)} \end{array} \right.$
流量範囲	

4) スプリンクラー

カラム内の土壌表面全体に放射性水溶液を滴下させる機器である。

構造	第13図に示す。
流量	最大 1ℓ/min
回転数	最大 60 rpm
付属品	可変抵抗器 (日本セルボ製)

5) ヘッドタンク

カラム内の土壌表面全体に放射性水溶液を自然流下させるためのタンクである。

形式	オーバーフロー方式
容量	10ℓ (20 cmφ×40 cmh)
材質	パイレックス

(5) サンプリング部

1) サンプリング用容器

土壌カラム下部および水ポテンシャル水槽からの流出液を秤量するために用いる。

容 量 1 ℓ
材 質 バイレックス

2) 測定容器

i) 流出液用容器

容 量 1 ℓ
材 質 ポリエチレン

ii) 土壌用容器

大きさ 8 cm ϕ ×4 cm h
材 質 透明プラスチック

3) 廃液タンク

実験済みの廃液を入れるタンクである。

容 量 50 ℓ (45 cm ϕ ×35 cm h)
材 質 SUS 304

(6) 付属機器および付属部品

1) 蒸留水製造器

形 式 小林理化製バーンステッド型蒸留水製造装置
材 質 ステンレス
採水容量 10 ℓ/hr

2) イオン交換水製造器

形 式 小林理化製万能連続式純水製造装置 KM-10P 型
イオン交換樹脂 デュオライド社 (米) 製, 陽イオン C-20 型, 陰イオン
A-102D 型
採水容量 100 ℓ/hr

3) 予備ポンプ (P₃~P₇)

形 式 { P₃ 榊共立機巧製 ベローズ式 プロポンプ 2000 型
P₄~P₆ イワキ製 ラボポンプ LP-15 型 (2 台), LP-20
型
P₇ 東京富林東島製 PCA-P-1 型
最大流量 { P₃ 2 ℓ/min
P₄~P₆ 15 ℓ/min (2 台), 20 ℓ/min
P₇ 10 ℓ/min

4) 配管類

i) SUS 配管 8 mm ϕ , 12 mm ϕ
ii) ビニル配管 8 mm ϕ , 12 mm ϕ , 24 mm ϕ

5) バルブ類

形式	ボール式バルブ 1/4 B, 3/8 B, 1/2 B
材質	SUS

3.4.2 帯水層地中モデル装置

本装置は、帯水層槽本体と、放射性水溶液流入部およびサンプリング部等の部分からなっている。

そのフローシートを第14図に示す。装置全体およびその配置を写真6と第15図にそれぞれ示す。

帯水層槽部、放射性水溶液流入部およびサンプリング部は、それぞれ次の機能を備えている。

1) 帯水層槽部

- i) 所定量の土壌を帯水層槽に充填できる。
- ii) 水および放射性水溶液を帯水層槽内の土壌に流入できる。
- iii) 帯水層槽内の温度および水の流速を測定できる。
- iv) 帯水層槽内の土壌を採取できる。

2) 放射性水溶液流入部

- i) 送液ポンプを用いてヘッドタンクへ水を移送できる。
- ii) ヘッドタンクから帯水層槽へ水を流入できる。
- iii) 流量計により水の流量を測定できる。

3) サンプリング部

- i) 帯水層槽からの流出液を採取できる。

本装置の構成各部の詳細仕様は次のとおりである。

(1) 帯水層槽部

1) 帯水層槽

帯水層土壌中の放射性核種の移動速度を調べるための土壌槽である。

形状	直方体
大きさ	400 × 1,200 × 400 mmh
材質	透明塩化ビニル
構造	第16図に示す。3ユニットの接続方式（ゴムパッキングによるボルト止め方式）。 通水配管付、落とし蓋付、フィルター取付用ミゾ（端から5cmの所）加工。その他水平の維持ならびに傾斜 5°迄可変可能。ガラス玉およびフィルター 2枚（50メッシュ金網）付属。

2) 架台

帯水層槽およびヘッドタンクを一体に組み込むための架台である。

材質	SS41
構造	ヘッドタンクの高さが調整できる。 (700 ~ 2,000 mm)

(2) 放射性水溶液流入部

1) ヘッドタンク

放射性水溶液をヘッド圧により、帯水層槽内の土壤に流入させるのに用いるタンクである。

形状	円柱体
容量	2 ℓ
材質	透明塩化ビニル
構造	送液配管、オーバーフロー配管および流下配管付。

2) 送液ポンプ

原料タンク内の放射性水溶液をヘッドタンクへ移送するためのポンプである。

形式	ダイヤフラム式 (イワキ製 ICF-35Z)
流量	最大 80 cc/min
吐出圧力	最大 3 kg/cm ²
材質	ポリプロピレン (接液部)

3) 流量計

放射性水溶液の通水速度の測定に用いる。

形式	浮遊式 (日本特殊計器製 MSC-1)
流量範囲	0.5 ~ 5 cc/min
材質	ガラス (テーパ管)
精度	± 2 %

4) 流入液用フィルター

放射性水溶液を帯水層内の土壤に均一に流入させること、および土壤水の逆流を防止することに用いる。

形式	金網式
材質	透明塩化ビニル (本体), SUS (網)
構造	第 17 図に示す。盲フランジ付 (1 個)

5) 原料タンク

放射性水溶液を入れるタンクである。

容量	100 ℓ
材質	ポリエチレン
構造	キャスター付

(8) サンプリング部

1) 流出液用フィルター

帯水層槽内の水を均一に流出させること、および土壤水をろ過することに用いる。

形式	金網式
材質	透明塩化ビニル (本体), SUS (網)
構造	第 18 図に示す。盲フランジ付 (4 個)

2) 測定容器

i) 流出液用容器

容 量	1 0 0 mℓ
材 質	ポリエチレン
構 造	細口

ii) 土壌用容器

大きさ	8 cm ϕ × 4 cm h
材 質	透明プラスチック

3) 廃液タンク

実験済みの廃液を入れるタンクである。

容 量	2 0 ℓ
材 質	ポリエチレン
構 造	細口

(4) 付属部品

1) 配管類

口 径	8 ~ 2 0 mm ϕ
材 質	ビニル

2) バルブ類

形 式	ボール式バルブ 3/8 B と 1/4 B
材 質	S U S

3.5 放射性核種移動実験法

3.5.1 通気層地中モデル装置

本装置の実験操作を①通気層の形成、②放射性水溶液流下実験、③サンプリング、④放射能測定、⑤実験終了後の除染および廃棄物処理の5つに分けて以下に述べる。

(1) 通気層の形成

- 1) 実験にあたっては、先ず所定量の調整済み土壌(砂)を通気層カラムに充填する。
- 2) つぎに、充填砂のコンディショニングをするため、送液ポンプ P_1 を用いてカラム下部から水タンク中の蒸留水を逆に通水する。なお、砂層中のシルト分を流出させる場合は、スプリンクラーにより蒸留水を数 cm/min の散水速度で砂層中を通水させ、コンディショニングを行う。
- 3) 通水は所定時間連続的に行う。通水完了後はカラム下部の排出用バルブ V_{16} から間隙水を抜き、通気層状態を形成させる。

(2) 放射性水溶液流下実験

- 1) 所定濃度の放射性水溶液を作成する。
- 2) 送液ポンプ P_2 、およびスプリンクラーにより、 R_1 タンク中の放射性水溶液を(1)で形成した通気層砂層上部の表面全体に一定の流量で散水する。

- 3) 流出用バルブ V 7 ~ V 9 からの流出液を連続的にポリエチレン容器 (5 ℓ) で採取する。
 - 4) その後、溶液内の濃度を均一にするために希塩酸を数滴入れ、容器をよく攪拌して 1 ℓ 分取する。
 - 5) 所定量の放射性水溶液を流下させた後、送液ポンプ P₂ を停止して、流下を終了する。
 - 6) ひきつづき、数日間放置して流出用バルブ V 7 ~ V 9 からカラム内の水を抜きとる。
- なお、水ポテンシャルを調整する場合には 1), 4), 5), 6) の実験操作は同じであるが、2) と 3) の実験操作は次のようになる。

- 2)′ 送液ポンプ P₂ を用いて R I タンク中の放射性水溶液をヘッドタンクへ揚水し、スプリンクラーにより通気層上部の表面全体に一定の流量で散水する。
- 3)′ 流出液はカラム下部のバルブ V 19 から水ポテンシャル水槽へ流出させ、一定の水位からオーバーフローした液を連続的にポリエチレン容器 (5 ℓ) で採取する。

(8) サンプルング

- 1) 通気層中の砂をサンプルングするため、カラムを一段づつ解体してサンプラーで所定の位置から採取し、所定量 (数 10 g ~ 数 100 g) をビーカーに入れる。
- 2) 採取砂の重量を天秤で測定し、測定後は、110°C で 3 時間砂を乾燥する。
- 3) 乾燥後の砂の重量を測定する。

(4) 放射能測定

- 1) 重量測定後、砂 10 g を秤量し、プラスチック容器 (8 cmφ × 4 cmh) に入れ、それに適量の希塩酸を添加する。
- 2) その後、容器をビニール袋で包装し、NaI シンチレーションカウンターあるいは GM 計数装置で砂中の放射能濃度を測定する。
- 3) また、(2) の流下実験で流出した液の放射能濃度も同様な方法で測定する。

(5) 実験終了後の除染および廃棄物処理

- 1) 実験終了後、残った汚染砂はビニール袋に入れ、ドラム缶に詰めて放射性廃棄物として処理する。
- 2) ガラス玉はポリ容器に入れ、希塩酸で除染する。
- 3) 解体した通気層カラムは希塩酸を染み込ませた布で拭き除染する。
- 4) 一方、配管、送液ポンプ、流量計、タンク等は希塩酸、水道水を通水して除染する。
- 5) 除染終了後、装置各部の表面汚染密度を GM 管サーベイメータにより測定する。

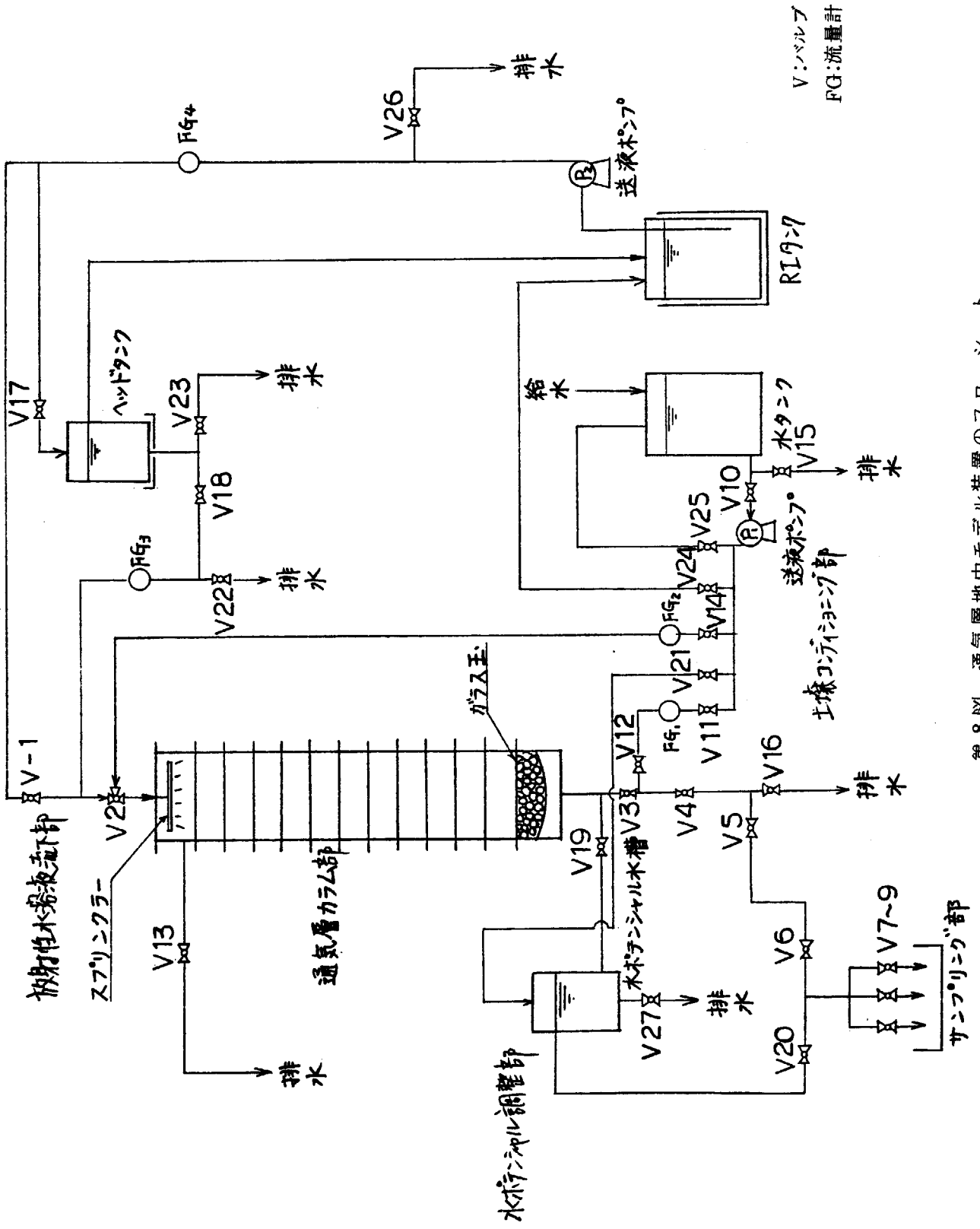
3.5.2 帯水層地中モデル装置

本装置の実験操作を①帯水層の形成、②放射性水溶液流下実験、③サンプルング、④放射能測定、⑤実験終了後の除染および廃棄物処理の 5 つに分けて以下に述べる。

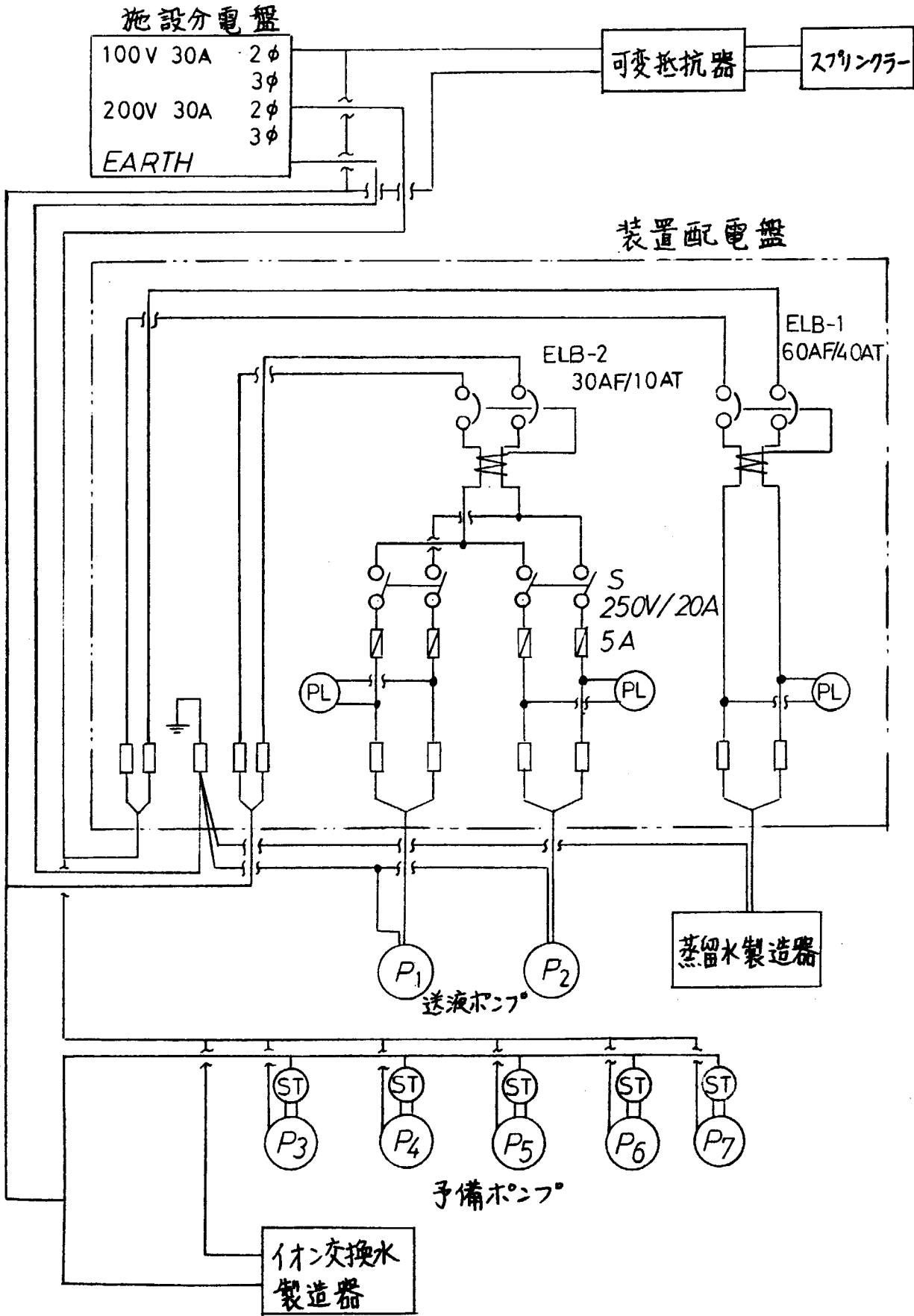
(1) 帯水層の形成

- 1) 実験にあたっては、先ず所定量の調整済み土壌 (砂) を帯水層槽に充填する。
- 2) つぎに、充填砂のコンディショニングを行うため、帯水層槽下部のバルブ V 4 ~ V 6 から、水道水を通水する。

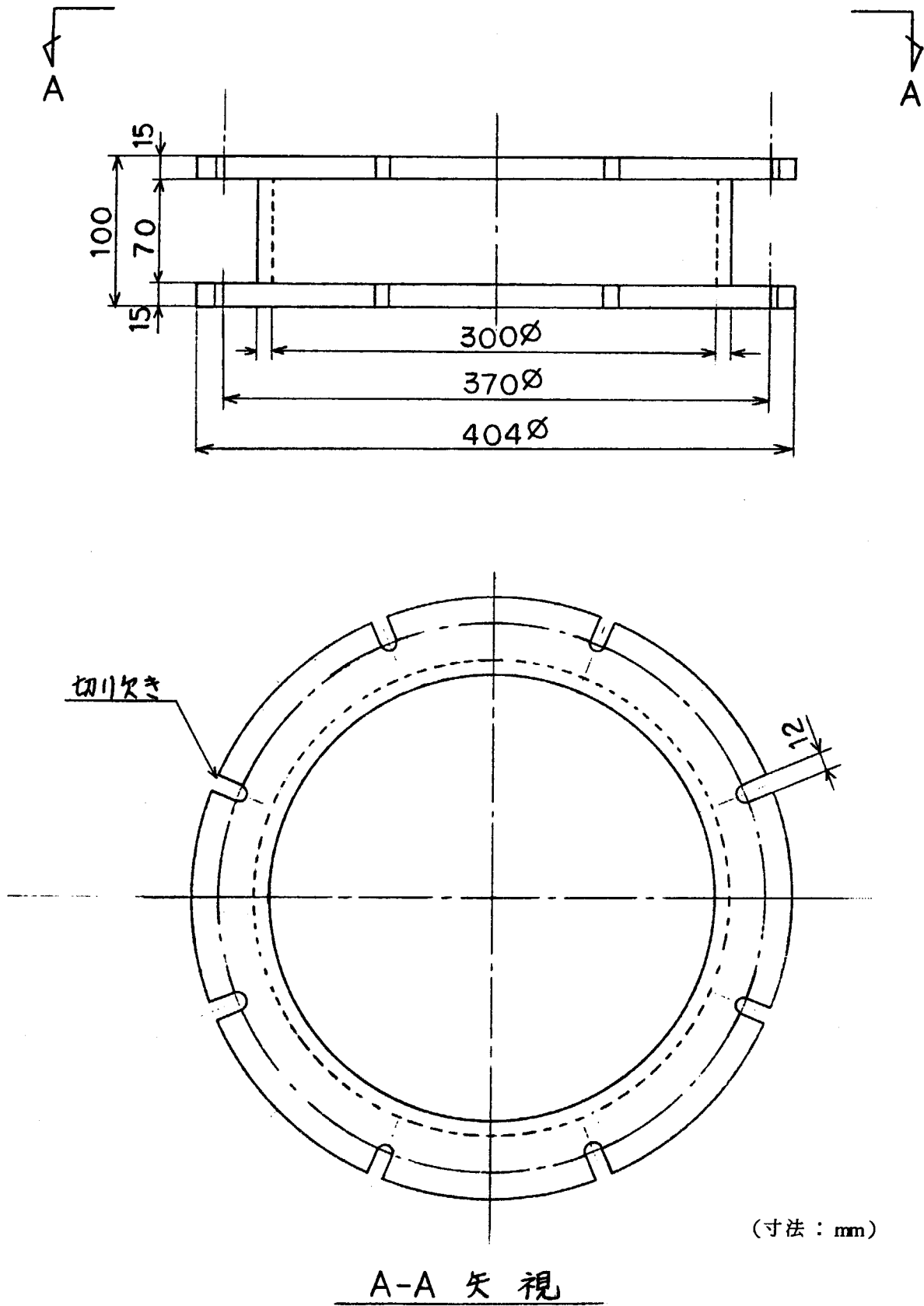
- 3) 毛管作用により砂層表面まで上昇してきた水が冠水状態になったら、通水を停止する。
すなわち、砂を帯水層状態に形成させる。
- (2) 放射性水溶液流下実験
- 1) 所定濃度の放射性水溶液を作成する。
 - 2) 流下用バルブ V 3 を閉めた状態で、放射性水溶液をヘッドタンクにオーバーフローするまで送液ポンプで揚水する。
 - 3) つづいて、流下用バルブ V 3 を開き、送液ポンプにより放射性水溶液を一定の流量で帯水層槽中の砂層に流下させる。
 - 4) 流出用バルブ V 7 ~ V 1 1 からの流出液を連続的に所定量、ポリエチレン容器 (250 ml) で採取した後、溶液内の濃度を均一にするために希塩酸を数滴入れる。
 - 5) 所定量の放射性水溶液を流下させた後、送液ポンプを停止して流下を終了する。
- (8) サンプリング
- 1) 帯水層槽中の砂をサンプリングするため、流出用バルブ V 7 ~ V 1 1 から槽内の水を抜きとる。
 - 2) 帯水層の落し蓋を取りはずし、サンプラーで砂を所定の位置と深さからそれぞれ採取し、所定量をビーカーに入れる。
 - 3) 採取砂の重量を天秤で測定し、測定後は、 110°C で 3 時間砂を乾燥する。
 - 4) 乾燥後の砂の重量を測定する。
- (4) 放射能測定
- 1) 重量測定後、砂 10 g を秤量し、プラスチック容器 ($8\text{cm}\phi \times 4\text{cmh}$) に入れ、それに適量の希塩酸を添加する。
 - 2) その後、容器をビニール袋で包装し、NaI シンチレーションカウンターあるいは GM 計数装置で砂中の放射能濃度を測定する。
 - 3) また、(2) の流下実験で流出した液の放射能濃度も同様の方法で測定する。
- (5) 実験終了後の除染および廃棄物処理
- 1) 実験終了後、残った汚染砂はビニール袋に入れ、ドラム缶に詰めて放射性廃棄物として処理する。
 - 2) ガラス玉およびフィルターはポリ容器に入れ、希塩酸で除染する。
 - 3) 帯水層槽の除染は水道水、希塩酸で行う。
 - 4) つぎに水道水、希塩酸により送液ポンプを使用して、ヘッドタンク、流量計、配管等を除染する。
 - 5) 除染終了後、装置各部の表面汚染密度を GM 管サーベイメータにより測定する。



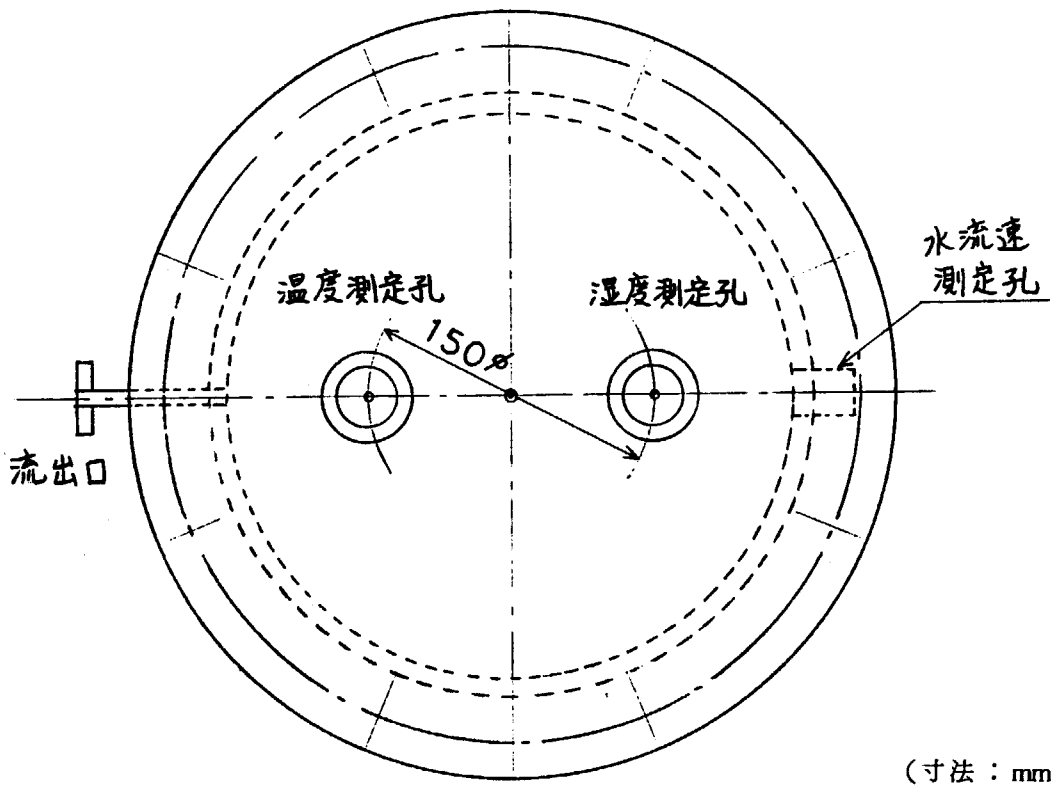
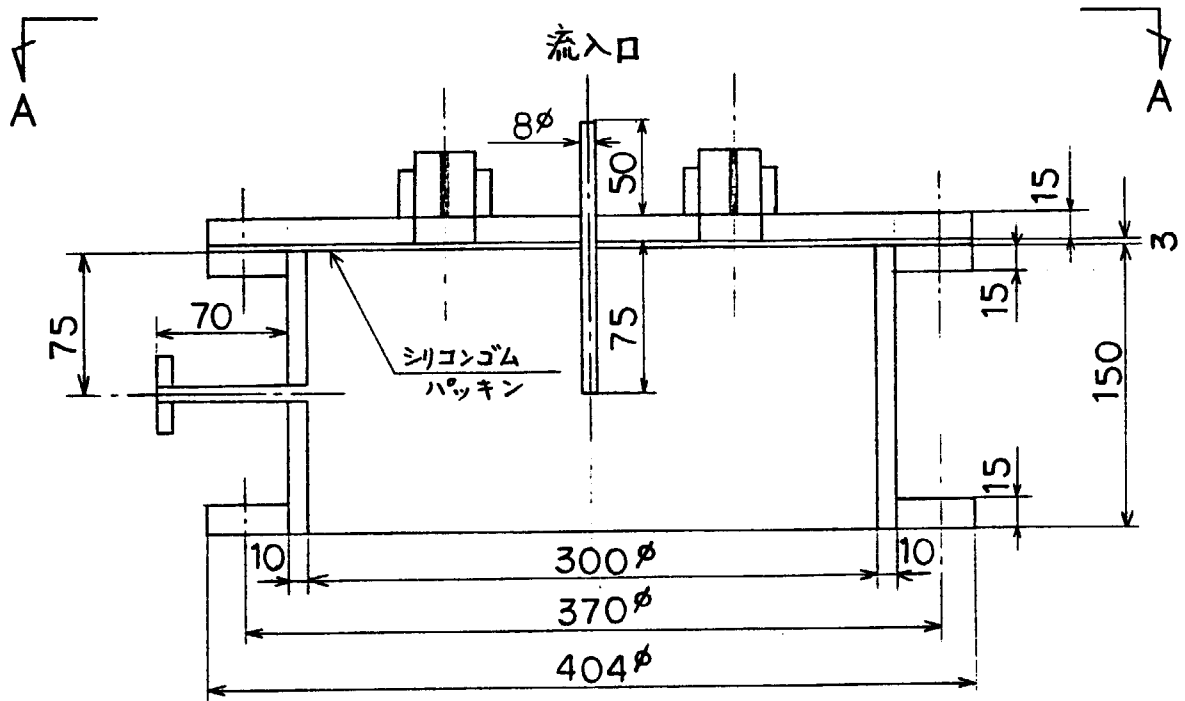
第8図 通気層地中モデル装置のフローシート



第9図 通気層地中モデル装置の電気配線系統図



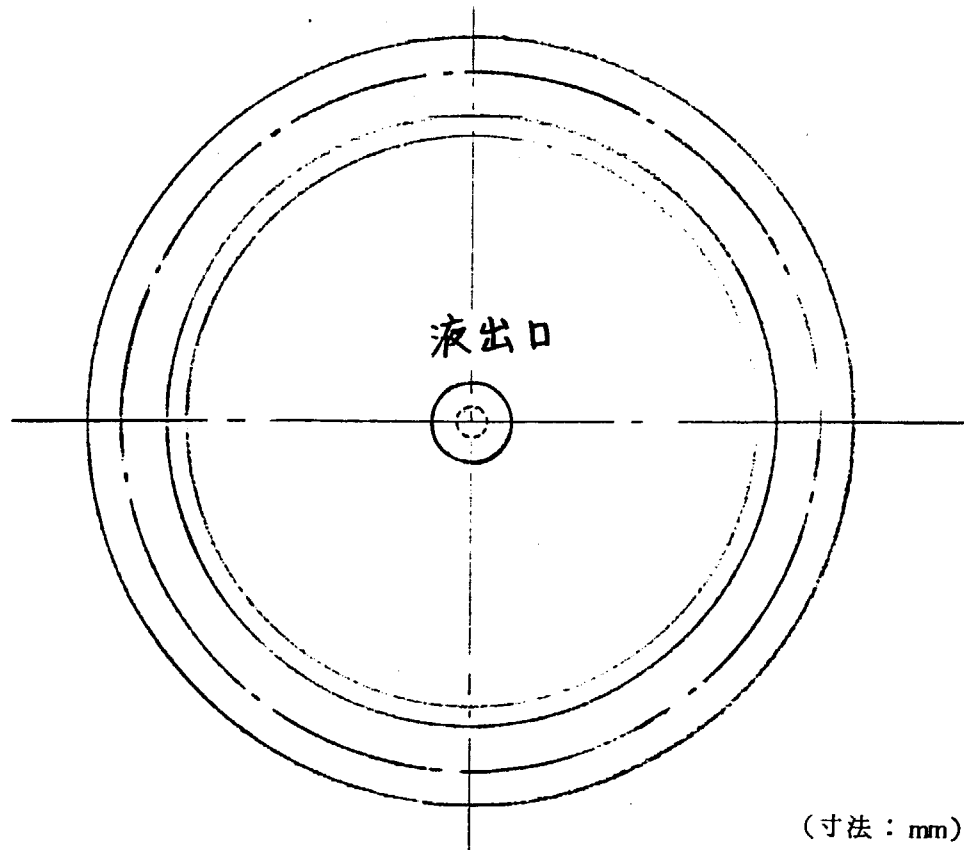
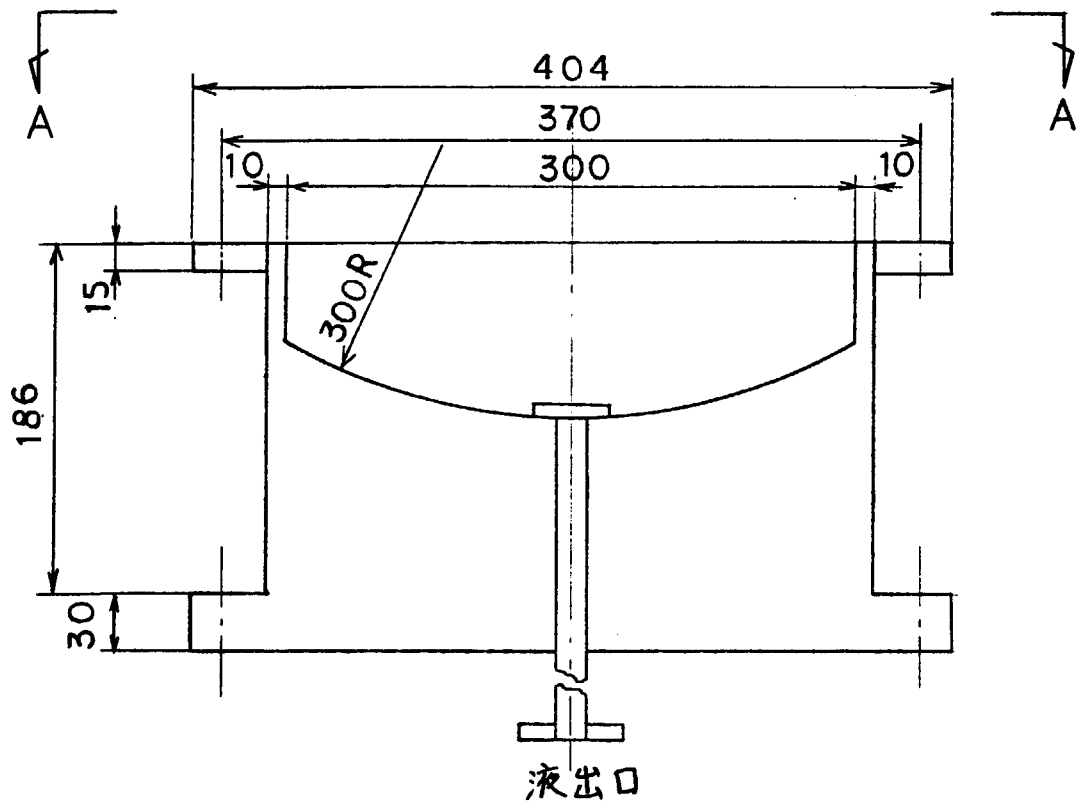
第10図 通気層カラム (1ユニット)



(寸法：mm)

A-A 矢視

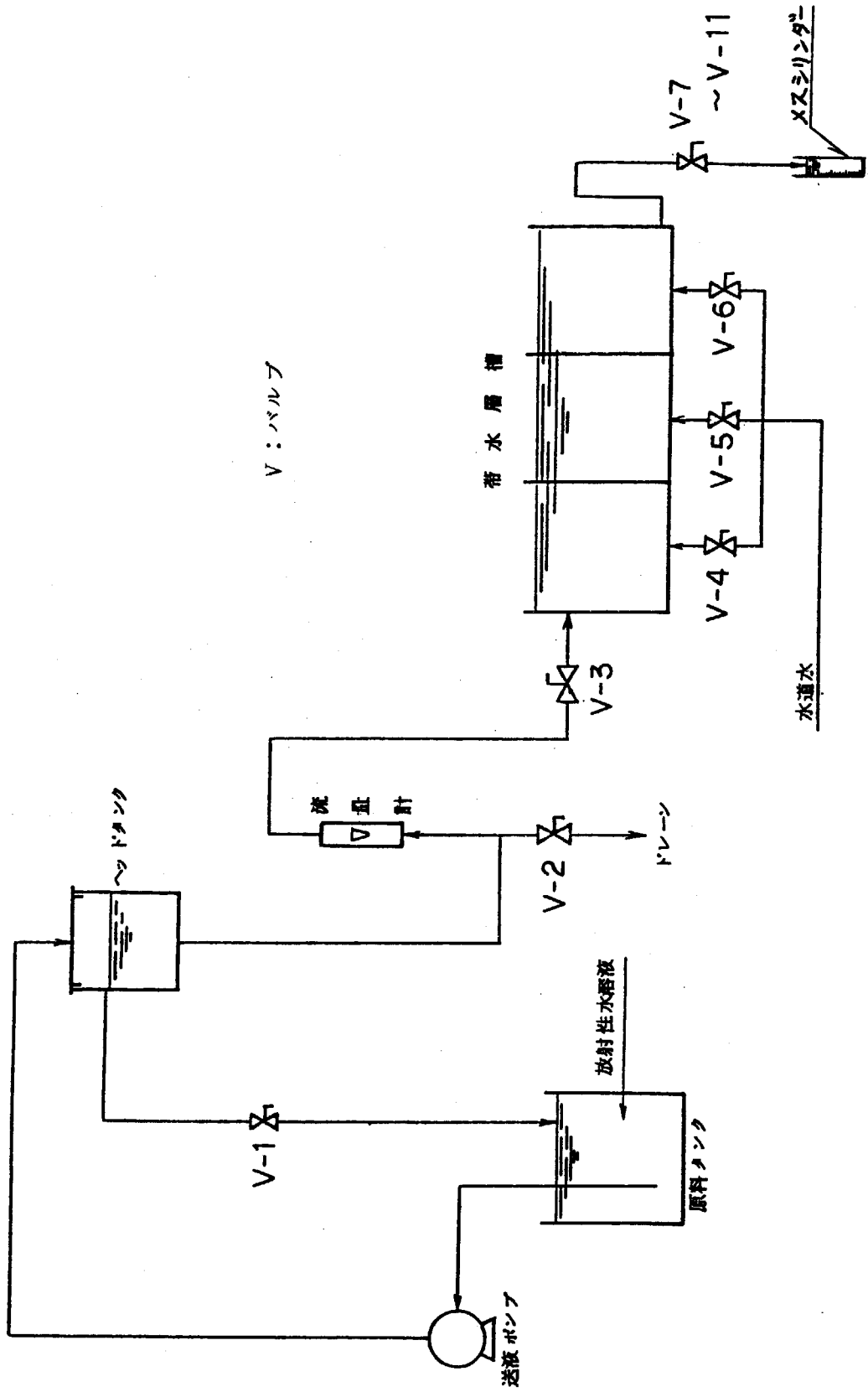
第11図 流下カラム



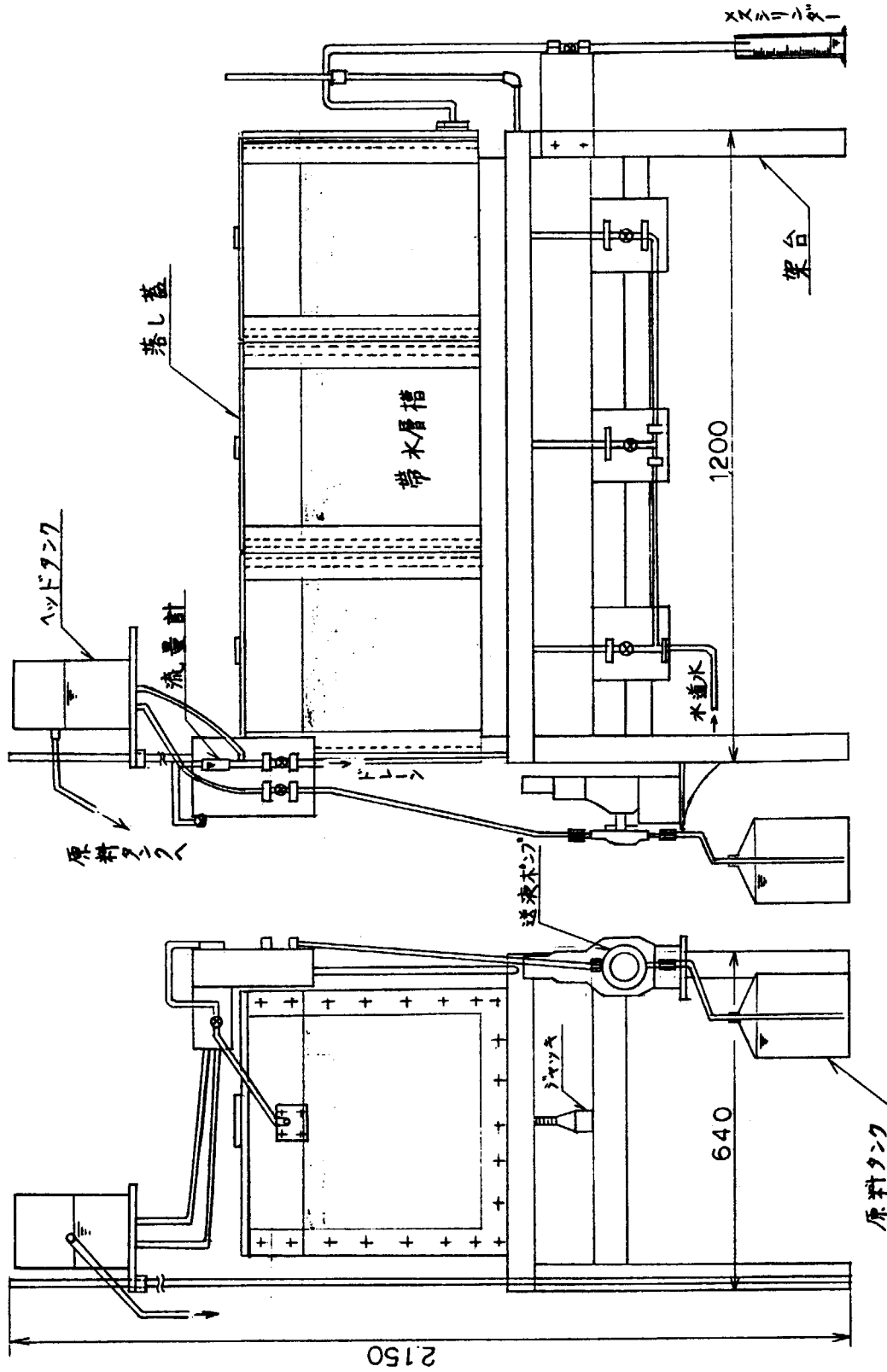
(寸法：mm)

A-A 矢視

第12図 戸過カラム

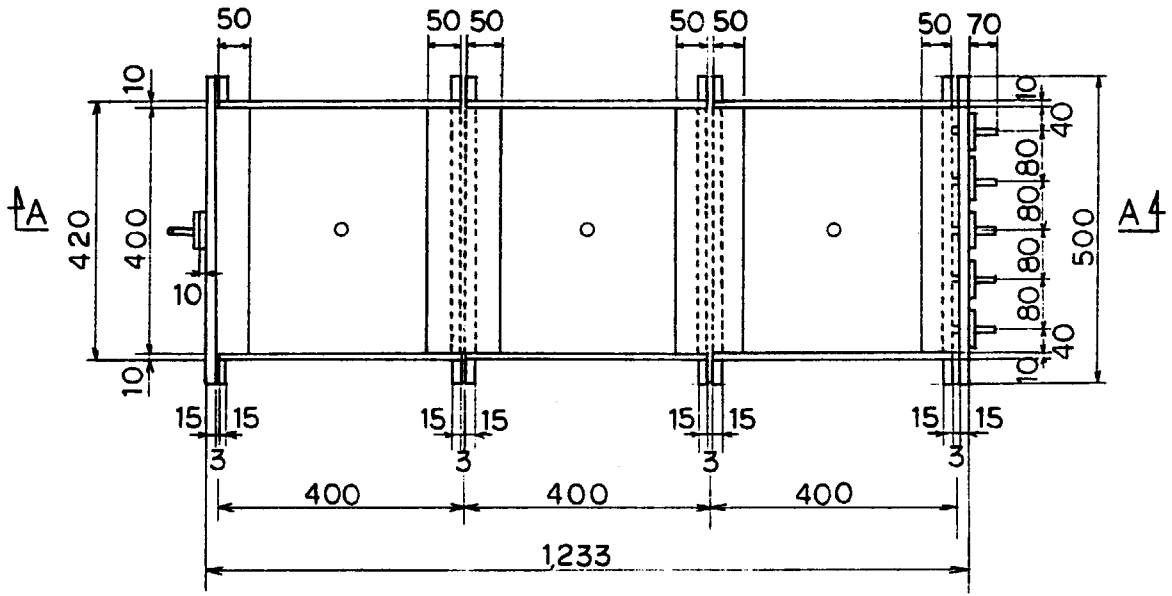


第14図 帯水層地中モデル装置のフローシート

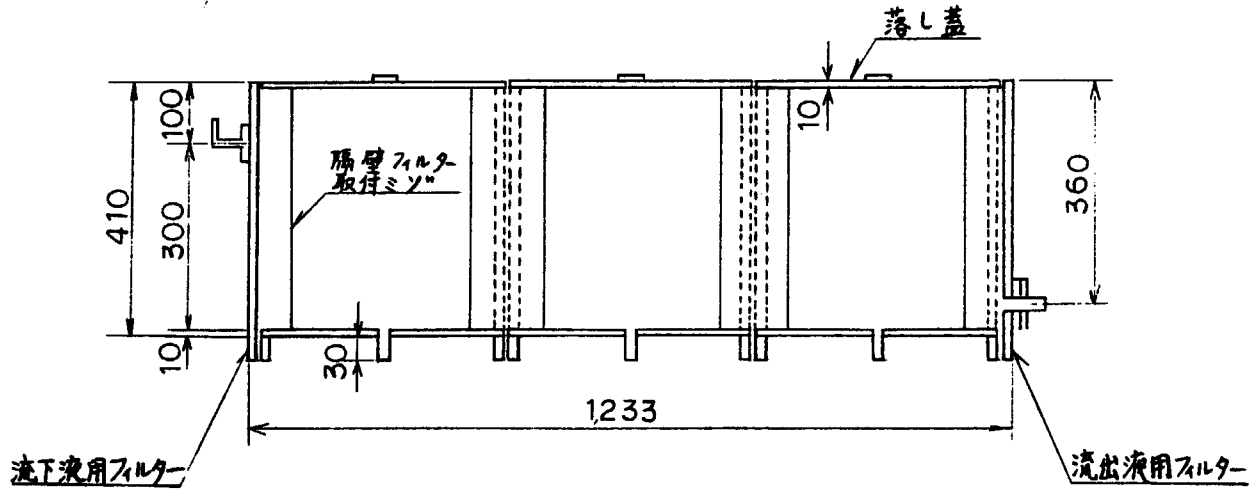


第15図 帯水層地中モデル装置の配置図

平面図



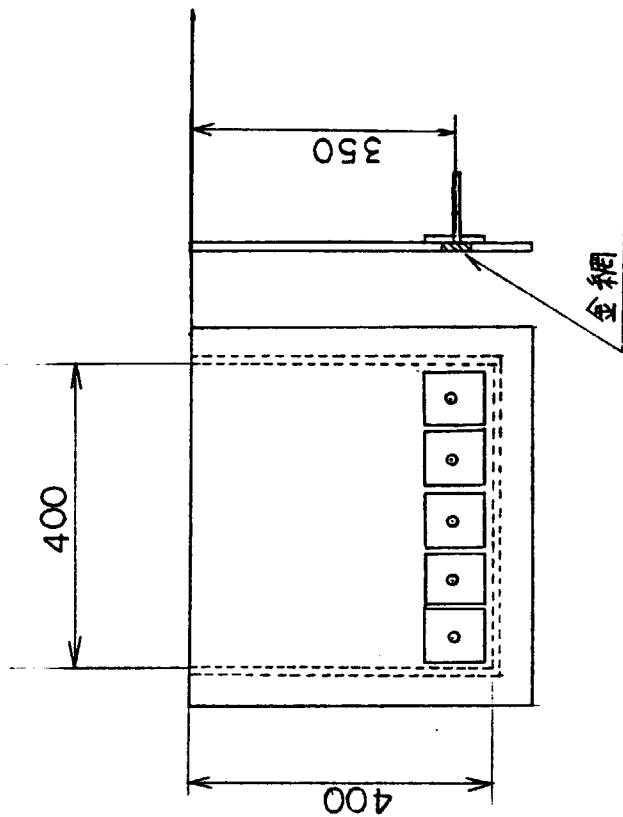
A-A 矢視



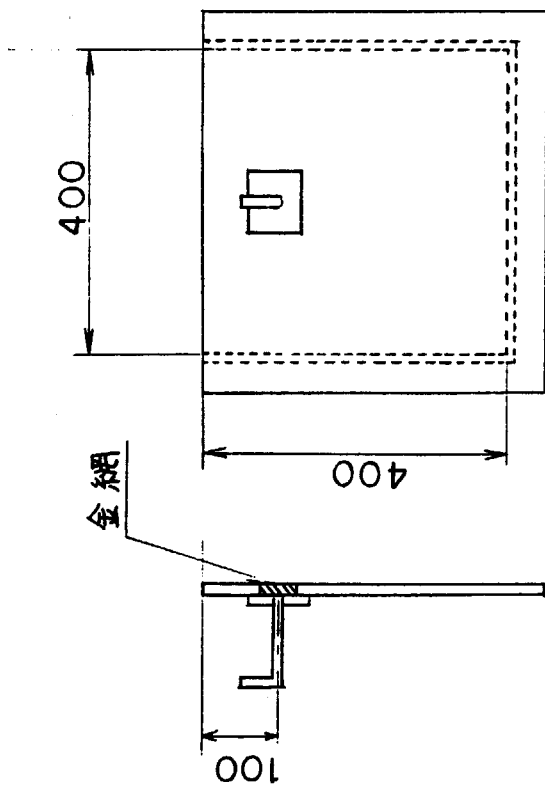
(寸法: mm)

第16図 帯水層槽

(寸法：mm)



第18図 流出液用フィルター



第17図 流下液用フィルター

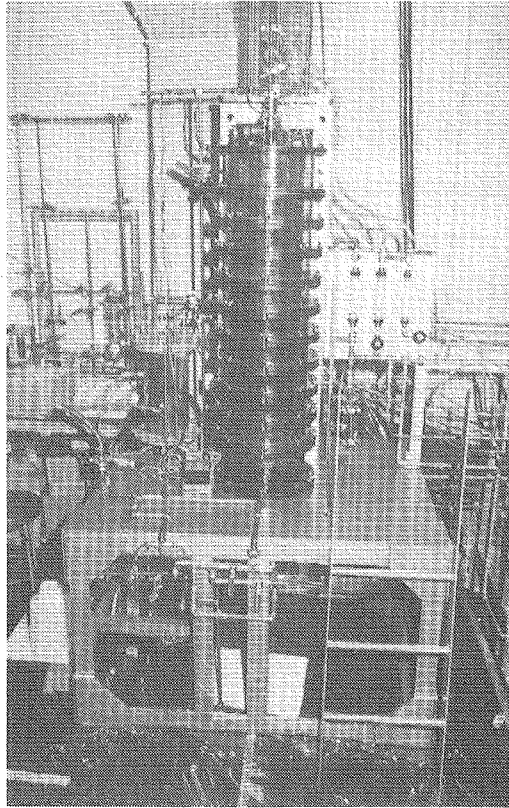


写真5 通気層地中モデル装置

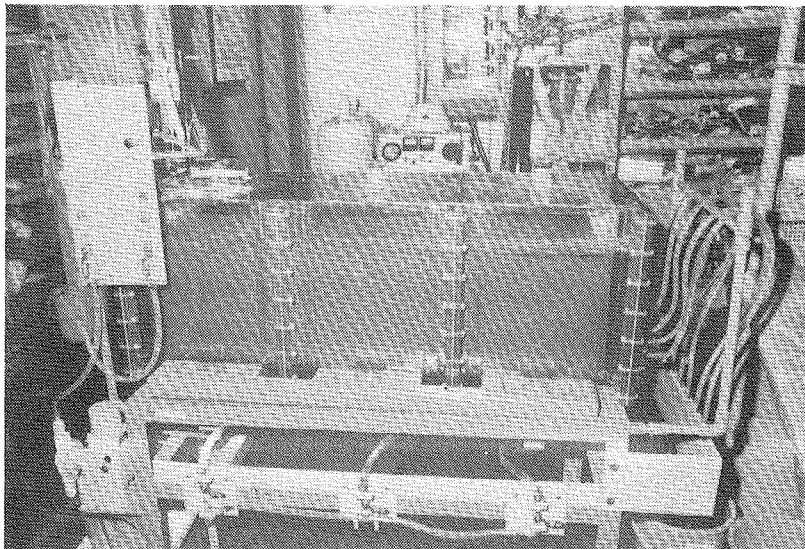


写真6 帯水層地中モデル装置

4. あとがき

以上、国内外における地中モデル装置の調査結果およびそれを用いた研究の紹介に加えて、当研究室で新たに製作した地中モデル装置を用いる研究の内容、装置の仕様および実験法について述べた。今後、本地中モデル装置を用いて、種々の条件下で放射性核種の移動実験を行い、基礎的データの集積を図るとともに、実験による経験を基にして、環境シミュレーション試験に使用する地中シミュレーション装置の設計に役立たせる考えである。

本報告書の終りにあたり、日本原子力研究所安全性試験研究センター長天野恕博士の終始変らぬ御指導に、執筆者一同深く感射するものである。

文 献

- 1) 放射性廃棄物対策技術専門部会，“放射性廃棄物対策に関する研究開発計画（中間報告）”（1976）。
- 2) 武部慎一，山本忠利，西村敏郎，和達嘉樹：第18回日本原子力学会年会要旨集，p. 177（1980）。
- 3) OECD：“The migration of long-lived radionuclides in the geosphere”（1979）。
- 4) IAEA：“Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies 1973”（1974）。
- 5) 井上頼輝，森澤真輔，馬原保典：日本原子力学会誌，17，376（1975）。
- 6) 井上頼輝，森澤真輔，馬原保典：日本原子力学会誌，18，600（1976）。
- 7) 井上頼輝，森澤真輔，馬原保典：日本原子力学会誌，20，133（1978）。
- 8) 原子力環境整備センター：放射性廃棄物安全性実証試験報告書，p. 259（1980）。
- 9) W. Drost, D. Klotz, A. Koch, H. Moser, F. Neumaier, W. Rauert：Water Resources Research, 4，125（1968）。
- 10) 和達嘉樹，前田頌：“海外出張報告書”（1979）。
- 11) 井上頼輝，森澤真輔：日本原子力学会誌，18，42（1976）。
- 12) 井上頼輝，森澤真輔：日本原子力学会誌，18，44（1976）。
- 13) 三菱金属株式会社：浅層地中処分に関する試験（帯水層試験）報告書，p. 54（1980）。
- 14) IAEA：“Isotope Techniques in Groundwater Hydrology 1974”，vol. II, p. 341（1974）。