1 解説 低レベル放射性廃棄物の陸地処分に関する 安全性研究

環境シミュレーション試験

(日本原子力研究所) 和達 嘉樹, 山本 忠利, 武部 慎一,
大貫 敏彦, 鷲尾 方一†, 原田 芳金, 斎藤 和明

低レベル放射性廃棄物の陸地処分法には我が国の地理的, 社会的条件から, 地表近くの地中に構築した構造物中に廃棄物を処分する地中処分法が可能な方法として検討されている。この地中処分法に対する環境安全評価に寄与するため, 土壌を未攪乱で採取して放射性核種の挙動を調べる“環境シミュレーション試験”を現在計画している。本稿では, この“環境シミュレーション試験”について解説する。

I. はじめに

増大する放射性廃棄物に対処するため, 昭和51年(1976年)10月, 原子力委員会は放射性廃棄物の処分について基本方針を示した¹⁾。それによると, 低レベル放射性廃棄物の処分は, 処理の形態に応じて海洋処分と陸地処分を合わせて行うとしている。海洋処分法は深海に投棄する方法であるが, 陸地処分法は我が国の地理的, 社会的条件から, 地表近くの地中に構築した構造物中に廃棄物を処分する地中処分法が可能な方法として検討されている。この方法によれば, 通常の状態では廃棄物パッケージおよび構造物が人工バリアーとして働き, 放射性核種の漏出は起こりにくい。また万一漏出したとしても, 処分地の地層が自然バリアーとして働き, 放射性核種の生活圏への移行を阻止する。

この地中処分法について環境安全評価を行うためには, 地中での放射性核種の挙動を正確に把握する必要がある。それには, 放射性物質を用いて水文地質学的なフィールド試験を行うことが最も直接的で確実な方法である。しかし, このようなフィールド試験の実施は, 我が国では種々の理由で非常に難しい。したがって, フィールド試験に近い成果が得られるような試験システムを考える必要がある。

以上の事情から, 原研では未攪乱土壌を用いての屋内における放射性核種の移動試験, すなわち“環境シミュレーション試験”を実施し, 低レベル放射性廃棄物の地中処分の環境安全評価に寄与する計画であり, 昭和56年度から試験施設の建設に着手することとなっている。本稿は, 主として計画中の環境シミュレーション

試験について解説するものであるが, 装置の詳細については, 現在未定の部分もあることをあらかじめお断わりしておく。

II. 放射性核種の地中移動 に関する研究の現状

本章では, 放射性核種の環境中移行経路のうち, 自然バリアーを構成する通気層および帯水層中(第2図参照)での放射性核種の移動に関する従来の研究について簡単に述べておく。

低レベル放射性廃棄物の陸地処分法として, 欧米諸国では浅地中への埋設処分および岩塩坑等への処分を実施しており, 米国などでは, フィールド試験を実際の処分と並行して行なっている²⁾。しかし, このように大規模な放射性物質を用いたフィールド試験は, 我が国のように国土が狭く, 砂漠などがない国では不可能に近い。そこで, 放射性物質を用いるフィールド試験に代わって, 非放射性トレーサーによるフィールド試験および地層を再現して実際の環境をシミュレーションした試験, すなわち環境シミュレーション試験の2つの試験が非常に重要な役割を果たすことになる。特に後者の環境シミュレーション試験に相当するよう

Radiological Safety Studies on Ground Disposal of Low-Level Radioactive Wastes, Environmental simulation test, Yoshiki WADACHI, Tadatoshiki YAMAMOTO, Shinichi TAKEBE, Toshihiko OHNUKI, Masakazu WASHIO, Yoshikane HARADA, Kazuaki SAITOH.

(1981年 11月16日 受理)

† 現在, 東京大学原子力工学研究施設(Nucl. Eng. Res. Lab., Univ. of Tokyo)

な試験は、海外においては西ドイツの放射線・環境研究所(GSF, Gesellschaft für Strahlen-und Umweltforschung mbH)が行っており、水理学的見地から水および放射性核種の地中移動について調べ、すでにいくつかの研究成果を挙げている⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。

GSFで行われている種々の試験は、原研で計画している環境シミュレーション試験にとって参考になるものと考えられる。このGSFにおける試験装置としては、例えば30cmφ×100cmHのポリ塩化ビニル製カラムに、通気層の未攪乱土壌を充填し、この土壌試料に対して雨水を模擬して上部より放射性水溶液を800ml/週(処分候補地であるドイツ北部、ゴルレーベン付近における年間降水量600mmに相当)の速さで流下させて実験を行なっている。この場合には、放射性核種として¹³⁷Cs, ⁸⁵Sr, ¹⁴⁴Ceおよび¹³¹Iを用い、土壌中の浸透拡散をコリメートしたNaIシンチレータで測定している。GSFにはまた帯水層をシミュレートした装置も幾種類あり、いずれもポイント希釈法により各種トレーサーを用いてそれらの地中移動について調べている。

一方我が国では、京都大学で地中モデル装置を用いて、通気層および帯水層中の埋設セメント固化体から漏出した放射性核種の土壌中分布について調べた例⁽¹⁰⁾、原研で地中モデル装置を用いて通気層中の核種移動を調べた例がある⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾。そのほか、(財)原子力環境整備センターにおける非放射性トレーサーを用いたフィールド試験があるが⁽¹⁵⁾、いずれも本格的な試験ではない。したがって、現在のところ環境安全評価に寄与する放射性核種の地中移動モデルの作成に資するデータは充分には得られていない。

Ⅲ. 環境シミュレーション試験の概要

1. 試験の必要性

「はじめに」において述べたように、我が国では低レベル放射性廃棄物の処分は海洋処分と陸地処分により行う方針である。現在、海洋処分については環境安全評価も終り、試験的投棄を行う予定である。一方、陸地処分については調査および基礎的な研究が行われている段階で、陸地処分法の確立が急がれている。陸地処分において現在必要と考えられる主要な開発課題を第1図に示す。陸地処分は国情すなわち地理的、社会的条件に大きく左右されるものであり、我が国の場合は人口が稠密であるため、事前に十分な環境安全評価が必要となる。特に処分廃棄物から漏出する放射性核種の自然バリエーション中移動、すなわち通気層および帯水

層中における放射性核種の移動に対する正確な評価が必要となる(第2図参照)。しかしながら、前述したように我が国では放射性物質を使用するフィールド試験を実施することは不可能に近い。そのため、未攪乱土壌を採取し、放射性核種の移動試験を屋内で実施する環境シミュレーション試験が必要となってくる。

◎環境シミュレーション試験に関与する開発課題

第1図 低レベル放射性廃棄物の陸地処分における主要開発課題

2. 試験方法

低レベル放射性廃棄物の処分施設から放射性核種が万一漏出したとする。そのとき放射性核種は、第2図に示す環境中移行経路(ここでは簡略化した図を示した)に従って移行し、最終的に人体に摂取されると考える。環境シミュレーション試験は、この経路中で自然バリエーションを構成する地層(通気層および帯水層)に対し、放射性核種の移動を現実的なデータに基づいて評価する安全評価試験に相当する。この試験において対象とする放射性核種は、原子力発電所から発生する廃棄物に含まれている核種のうち、保健物理学的に重要な⁶⁰Co, ⁹⁰Srおよび¹³⁷Cs等である。陸地処分について環境安全評価を行うにあたっては、放射性核種の地

中移動に影響を及ぼす因子を明らかにするため、その因子の影響度を種々の条件下で検討しておかなければならない。例えば、井上らによって提案されている地中移動モデルに対する計算式⁽¹⁶⁾が成り立つ場合には、通気層の水による飽和度、水の浸透速度、土壌と地下水との間の核種の分配係数、地下水の流向・流速、帯水層の厚さ、核種の拡散係数、土壌の空隙率・密度および処分地点から問題となる地点までの距離等を考慮しなければならない。

第2図 放射性核種的环境中での移行経路

本環境シミュレーション試験に際して、核種の地中移動に影響を及ぼす因子として、通気層状態の土壌に対しては飽和度、水の浸透速度、核種の分配係数(あるいはそれに相当するような値)、土壌の空隙率、粒度および密度等があり、帯水層状態の土壌に対してはその他に水の流速、流向等がある。さらに全体を通して、核種の化学形および水の化学的組成が考慮すべき重要な因子となる。そしてこれらの因子について、様々な土壌に対しどの因子が核種の地中移動に影響を与えるかを定量的に調べる。そのために次のような試験手順に従って試験を行う。

- (1) 未攪乱で採取した試験土壌を第Ⅱ-4節で述べる地中シミュレーション装置(通気層用および帯水層用)に充填する。
- (2) 一定の試験条件(温度、湿度、放射能濃度、pH、流下速度等)の下で、放射性水溶液を試験土壌に流下する。
- (3) 放射性水溶液の流下中、土壌中の水の移動速度および核種の移動速度を測定する。
- (4) さらに、流出液中の放射能濃度を測定して核

種の流出量を求める。

- (5) 試験終了後、土壌中の放射能濃度を測定して核種の土壌への吸着量を求める。
- (6) 一方、試験に用いた土壌の物理的、化学的な性質を測定する。
- (7) 得られたデータから、放射性核種の地中移動評価を行う(第Ⅲ-5節参照)。

3. 土 壌 採 取

環境シミュレーション試験では、地下水位より上部の通気層土壌と地下水位中の帯水層土壌を自然状態のまま使用する。したがって通気層土壌としては、地層の微細構造、水分量、圧密特性等を乱さない未攪乱状態のものが必要である。そのための採取方法を調査、検討した結果⁽¹⁷⁾、本試験に必要な径(300または600mmφ)の土壌の採取方法には、種々の方法の中でも土壌の乱れが少なく、目による観察ができるオープンカット法が適していることがわかった(第3図参照)。一方、帯水層土壌の採取方法としては、土壌が水で飽和されている状態にあるため通気層土壌のような採取方法は必要なく、ショベル系掘削機で採取する方法が現実的である。

第3図 通気層土壌の採取法

以上の調査、検討結果に基づき、昭和55年と56年に青森県八戸および埼玉県上尾において通気層土壌採取試験を行い、通気層土壌を未攪乱状態のまま採取することに成功し、通気層の土壌採取にはオープンカット法が適当であることを実証している⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。これらの結果から、本試験における土壌採取方法は以下のとおりとなろう。

まず、自然状態の土壌を採取するにあたっては、事前に通気層と帯水層の厚さおよび地層構造を明らかにするためのボーリングを実施する。次いで通気層および帯水層土壌を前述の方法により採取する。

以下に、土壌採取の手順の概要を示す。

(1) 通気層土壌の採取

通気層土壌は未攪乱状態で採取する必要があるため、試験用通気層カラムを採取容器として用いる。

- (1) パワーショベルで採取箇所の周辺を剝土し、採取容器(通気層カラム)を垂直に立て、容器の上に圧力センサーとジャッキを乗せ、バケットで抑えて固定する。
- (2) ジャッキを操作して一定圧力で採取容器を静かに押し込んで土壌を採取する。
- (3) 採取容器の上下に蓋をして試験施設まで運び、採取容器である通気層カラム部分を通気層用装置にセットする。

(2) 帯水層土壌の採取

- (1) 通気層土壌の採取に引き続き、通気層下部の

帯水層の土壌をパワーショベルのバケットで採取し、輸送容器につめる。

- (2) 輸送容器を試験施設まで運び、土壌を帯水層用装置の帯水層槽に充填する。

4. 地中シミュレーション装置

放射性核種の地中移動を調べるために用いる地中シミュレーション装置は、試験土壌として通気層土壌を使用する通気層用装置および帯水層土壌を使用する帯水層用装置から構成されている。装置の主要部分を第4図に示す。また、第Ⅲ-1節で述べたように、これらの装置はより自然の環境条件に近い形で試験を行うため、温度、湿度をコントロールしたウェザールーム内に設置して放射性核種移動試験を行う。

第4図 地中シミュレーション装置の概要

(1) 通気層用装置

通気層用装置は、通気層カラム、放射性水溶液流下部および流出部、核種移動速度測定部、水流速測定部等からなっている。

通気層カラムは、未攪乱状態の通気層土壌を採取した多段円筒形の透明硬質プラスチック製のカラムである。カラム上部には放射性水溶液流下部を接続し、土壌表面に均一に放射性水溶液を雨状に流下することが可能である。また、カラム下部には土壌中を流下した液をフィルタを通してサンプリングする流出部を接続し、逐次流出液をサンプリングして放射能測定を行う。核種移動速度測定部はカラム側面に設置し、土壌中の放射性核種の移動速度を測定する。水流速測定部は核種移動速度測定部と同様カラム側面に設置し、 ^{252}Cf 中性子検出方式により水の移動速度を測定する⁽¹⁴⁾。

(2) 帯水層用装置

帯水層用装置は、帯水層槽、放射性水溶液流下部および流出部、核種移動速度測定部、水流速測定部等からなっている。

帯水層槽は、帯水層土壌を充填する直方体多段構造のものである。槽の一端には放射性水溶液流下部を接続し、ポイント希釈法により放射性水溶液を浸透させる。また、槽内土壌から流出した液は、槽の他端に接続した流出部のフィルタを通し、逐次流出液をサンプリングし放射能測定を行う。核種移動速度測定部は土壌中に挿入した検出器により、放射性核種の移動速度を測定する。水流速測定部はサーミスタセンサー挿入により、土壌中の水の移動速度を測定する。

5. 環境安全評価への寄与

低レベル放射性廃棄物の陸地処分の形態としては、前述のように浅地中の構造物中への処分が考えられている。この地中処分法の安全性を評価する場合、最終

的には漏出放射性核種が人間に摂取される量, すなわち人間への内部被曝線量を求めなければならない。そのためには, 放射性核種が環境中を移行する経路に従って放射性核種の環境中移行モデルを作成し, 環境安全評価を行う必要がある。

本環境シミュレーション試験では, 第2図に示した環境中での移行経路のうち, 処分構造物に隣接する自

然バリアーである通気層および帯水層中における放射性核種の移動を調べる。それとともに現在提案されている放射性核種の地中移動モデルについて調査し, 本試験結果と比較検討し, 改良を加えて地中処分時の環境安全評価に適用する放射性核種の地中移動モデルを作成する。第5図に示すように, このモデルにより自然バリアー中の放射性核種の移動量が評価できる。

第5図 環境安全評価の手順

結局, 放射性核種の人工バリアーからの漏出モデル, 放射性核種の地中移動モデル, 放射性核種の生態系移行モデルおよび放射性核種による被曝モデルとを合わせることによって得られる総合的な放射性核種の移行モデルにより, 最終的に人間への被曝線量を評価する。

以上述べたように, 本環境シミュレーション試験は, これまで評価することが困難であった通気層および帯水層中の放射性核種の移動を, 実験的な手法と解析的な手法とを組み合わせることから明確にし, 有効な放射性核種の地中移動モデルを作成することによって, 低レベル放射性廃棄物の地中処分における環境安全評価に寄与するものである。

IV. おわりに

低レベル放射性廃棄物の地中処分の環境安全評価に寄与するため, 土壌を未攪乱で採取して放射性核種の挙動を屋内で調べる「環境シミュレーション試験」について解説した。第Ⅲ-5節で述べたように, 本環境シミュレーション試験の目標は, 地中処分において自然バリアーである通気層および帯水層中の放射性核種の移

動を調べ, 有効な放射性核種の地中移動モデルを作成することにより, 処分の環境安全評価に寄与することである。

放射性廃棄物の処分に国民の同意を得るためには, 事前に信頼性ある環境安全評価の実施が必要であることから, 今後本環境シミュレーション試験のような安全評価試験の重要性がますます増加してくるものと考えられる。最後に, これらの試験は, 多分に学際的な内容からなるため, 多くの分野の人々の参加が欠かせないことを述べておく。

—参考文献—

- (1) 原子力委員会月報, 21[10], 7 (1976).
- (2) 例えば, 「放射性廃棄物の地上保管に関する安全性」研究専門委員会: 原子力誌, 19[12], 822 (1977).
Int. Symp. on Migration in Terrestrial Environment of Long-lived Radionuclides from Nuclear Fuel Cycle, Knoxville, Tennessee, IAEA-SM-2157, (1981).
- (3) MATTHESS, G., MOSER, H., PEKDEGER, A., RUST, H., RAUERT, W., SCHULZ, H.D.: 3rd Int. Symp. Underground Water Tracing, Ljubljana-Bled, GSF-R140, 149 (1976).
- (4) KLOTZ, D., MOSER, H., RAUERT, W.: "Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media", 356

- (1972), Elsevier,
- (5) BEHRENS, H., MOSER, H., WILDNER, E.: *J. Radioanal. Chem.*, **38**, 491 (1977).
- (6) JACOBI, W.: Institut für Strahlenschutz, GSF (1978), (所内報).
- (7) *idem: ibid.*, GSF (1978), (所内報).
- (8) LEVI, H.W.: Int. Symp. on the Underground Disposal of Radioactive Wastes, Otaniemi near Helsinki, IAEA-SM-243/17, (1979).
- (9) BEHRENS, H., KLOTZ, D., LANG, H., MOSER, H.: IAEA-SM-257/77p. (1981).
- (10) 森澤眞輔: 京都大学学位論文, (1977); 井上頼輝, 森澤眞輔, 馬原保典: 原子力誌, **20**(2), 133 (1978).
- (11) 武部慎一, 和達嘉樹: *JAERI-M* 8044, (1979).
- (12) 山本忠利, 武部慎一, 和達嘉樹: *Radioisotopes*, **29**, 373 (1980).
- (13) 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: *JAERI-M* 8824, (1980).
- (14) 大貫敏彦, 山本忠利, 富永 洋, 和達嘉樹: 第28回応物関係連合講演会予稿集, 27 (1981).
- (15) 科学技術庁: 安全な処理・処分のために一低レベル放射性廃棄物安全性実証試験, (1981), (広報).
- (16) 井上頼輝, 森澤眞輔: 原子力誌, **14**(1), 52 (1972).
- (17) 三井金属鉱業: 土壌採取法および土壌カラムに関する調査検討報告書, 受託調査研究, (1980).
- (18) 同 上: 土壌採取試験実施報告書, 受託調査研究, (1980).
- (19) 同 上: 土壌採取法に関する報告書, 受託調査研究, (1981).

○1982・原子力関係国際会議一覧○

(p. は本誌記事掲載ページ, [23-1]は Vol. 23, No. 1 を表わす)

Apr. 12~15	Fast, Thermal, and Fusion Reactor Experiments Conf., Salt Lake City, Utah, USA (p.806[23-11])	26~29	4th Int. Symp. on Finite Element Methods in Flow Problems, Tokyo, Japan, (p.811[23-11])
May 3~7	Seminar on Testing and Operation of Off-Gas Cleaning Systems at Nuclear Facilities, Karlsruhe, F.R. Germany (p.865[23-11])	Sep. 1~3	7th Annu. Symp. of Uranium Institute London, UK (p.115[24-2])
10~14	Int. Symp. on Management of Wastes from Uranium Mining and Milling, Albuquerque, New Mexico, USA (p.620[23-8])	6~10	7th Int. Heat Transfer Conf., Munich, F.R. Germany (p.48[23-f])
11~14	9th Int. Cryogenic Engineering Conf., Int. Cryogenic Materials Conf. and Exhibition, Kobe, Japan. (p.26[24-1])	6~10	Int. Conf. [on Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp, Belgium (p.47[24-1])
30~ June 4	Int. Symp. on Properties and Applications of Metal Hydrides, Toba, Mie-ken, Japan (p.747[23-10])	13~16	6th Int. Symp. on Contamination Control, Tokyo, Japan (p.440[6]; 673[23-9])
1~3	4th Neutron Transmutation Doping Conf., Maryland, USA (p.213[24-3])	13~17	Int. Conf. on Three Decades of Nuclear Power, Vienna, Austria (p.266[23-4])
7~11	Int. Symp. on Agrochemicals: Fate in Food and Environment Using Isotope Technique, Rome, Italy (p.666[23-9])	13~17	Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna, Austria (p.791[23-10])
21~25	Int. Symp. on Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal, Utrecht, Netherlands (p.771[23-10])	19~22	Int. Conf. on Decontamination of Nuclear Facilities, Ontario, Canada (p.752[23-10])
21~25	Int. Symp. on Radioimmunoassay and Related Procedures in Medicine, Vienna, Austria (p.865[23-11])	Oct. 11~15	Int. Symp. on Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, Munich, F.R. Germany (p.136[24-2])
July 19~23	Int. Topical Meeting on Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, Lyon, France (p.49[24-1])	31 ~Nov.3	6th Int. Acoustic Emissions Symp. 1982, Susono, Shizuoka-ken, Japan (p.89[24-1])
		Nov. 1~4	Int. Symp. on Carbon, 1982, Toyohashi, Aichi-ken, Japan (p.13[24-1])
		8~12	Int. Symp. on Recent Advances in Nuclear Material Safeguards, Vienna, Austria (p.897[23-12])
		22~26	Int. Symp. on Water Chemistry and Corrosion Problems of Nuclear Reactor Systems and Components, Vienna, Austria (p.213[24-3])