廃棄物処分場における有害化学物質の 安全管理技術と漏洩防止システム

駒井 武*・中山紀夫*

Risk Management and Advanced Barrier System for Preventing Leakage of Hazardous Chemicals in Waste Landfills

Takeshi KOMAI* and Norio NAKAYAMA*

Abstract

Risk management for waste disposal sites and the leakage prevention of hazardous chemicals are quite important issues to improve the subsurface environment system including soil and groundwater. The existing techniques for monitoring and controlling chemicals in waste landfills are summarized to clarify the breakthrough for the future research and development. Considering the problems in waste sites and the urgent situation of leakage or spill of hazardous chemicals, we are developing the advanced barrier system for control of hazardous chemicals. The system consists of the active electrochemical barrier for detecting and cleaning contaminants, the soil metamorphic physical barrier, and the high precision technique for monitoring contaminant transport.

The developed techniques will be applied to subsurface environment for controlling hazardous chemicals and for repairing contaminated soils. In addition, the numerical model for predicting contaminant transport and assessing barrier techniques has been developed, using the original concept of multiphase fluids with physical and chemical interactions between solution and porous media.

Key Words: waste disposal site, waste landfill, groundwater contamination, barrier system, risk management

* 資源環境技術総合研究所 安全工学部

Department of Safety Engineering, National Institute for Resources and Environment

1. はじめに

近年、各種廃棄物の処理・処分に伴う環境問題が顕在化し始めており、特に廃棄物処分場や市街地周辺での土壌・地下水汚染については、今後取り組むべき急務の課題である。廃棄物処分場においては、安定型および管理型最終処分場の周辺での土壌・地下水汚染の事例が日本各地で指摘され、その安全性や立地条件を含めて社会的に大きな問題となっている。一方、市街地においても、事業所の周辺を中心とした土壌汚染、地震など自然災害による有害化学物質の漏洩などの事例が指摘されているところである。

一般に、地盤環境における有害化学物質の汚染は、大気圏や水圏の環境問題と比べた場合直接的な計測や評価が困難なために、汚染レベルの把握が遅れたり、浄化対策を実施することが困難になるなどの特徴がある。これは、地盤環境中を浸透する地下水の挙動と、地盤環境を構成する土壌や岩盤など多孔質体の特性に原因していると考えられる。すなわち、地盤環境は土壌や岩盤などの多孔質体、地下水および地下水に含まれる化学物質などにより構成される複雑なシステムであり、その内部で起こる様々なプロセスに関しても不明な点が多い。したがって、地下水挙動の研究に加えて、地盤中の有害物質制御・遮蔽技術、地盤環境修復技術、地盤環境特性評価、環境リスクの管理など、さまざまな観点からのアプローチが必要である。

筆者らは、廃棄物処分における化学物質安全管理技術の確立を目指して、地盤環境に適した有害物質漏洩防止システムおよび監視技術について研究を進めている。本稿では、廃棄物処分場における有害化学物質の安全管理技術についてまとめるとともに、開発中の漏洩防止システムのコンセプトについて紹介する。また、地盤環境における環境特性解析・評価の手法について述べる。

2. 地下水と廃棄物処分

地盤環境では、地下水は溶解成分とともに多孔質体の間隙をきわめてゆっくりとした速度で移動し、その過程で地下水中の化学物質や土壌粒子と

の間で物質交換を生じる。その結果、化学物質の一部は平衡分配や表面吸着により多孔質体の内部に捕集され、また環境中で分解を受けにくい有害物質は長期間地盤環境中に保持される。このような環境中挙動は、大気圏や水圏などの環境媒体ではみられない特有のものであり、いったん有害物質による汚染が生じると環境修復がきわめて困難になることを示している。

近年問題となっている土壌・地下水汚染の多くは、有機塩素系化合物や重金属などの有害化学物質に起因している。これらは、環境中での分解速度がきわめて小さい、あるいは地盤環境中に残留されやすいなどの特徴をもっている。化学物質が難水溶性の場合は、漏洩箇所の近傍の土壌や岩盤内に保持され、長期間にわたり汚染された状態が継続する。一方、水溶性の化学物質は地下水とともに地盤環境中を浸透して帯水層に到達し、比較的短時間のうちに飲料水や工業用水を汚染する。いずれの場合でも、地下水をキャリアーとする環境汚染のために、特定サイトにおける汚染状況を予測・評価するためには、まず地下水挙動を十分に把握することが重要である。

廃棄物の最終処分場は、処分される廃棄物の安定性などに応じて、以下の3種類に分類されている。まず、安定型の処分場は、ガラス、金属など反応性をもたない、いわゆる安定5品目を対象としたもので、地盤に対して廃棄物は直に埋め立てられる。次に、管理型の処分場は、上記以外の品目で溶出基準により有害物質の溶出がない廃棄物を対象としたもので、地盤の表面にゴムシートなどの漏洩防止対策を行い、さらに浸出水について水処理が実施される。また、遮断型の処分場は、溶出試験で一定濃度以上の有害物質が確認された廃棄物を対象としたもので、遮水コンクリート壁（厚さ15cm以上、一軸圧縮強度250kg/cm²）を用いて外界との地下水の遮蔽をはかっている。

3. 処分場における管理技術の動向と問題点

3.1 漏洩防止技術

上記の分類のうち管理型や遮断型の処分場では、処分される廃棄物中の有害化学物質が外部に漏洩するのを防止するための構造あるいは施設を

設置する必要がある。最も一般的に適用される方法は、埋立地内の浸出水を外部に漏らさない遮水工である。管理型の処分場では、遮水シートが用いられることが多い。平成7年度に最終処分場の構造基準の一部強化が行われ、それ以降では遮水シートの二重ライナー化や粘土層を用いた遮水が適用されている。最近設置されている処分場では、複数のゴムシートによるライナー構造を使用している例もみられる。一方、遮水材としては透水係数が小さいベントナイトなどの粘性土の使用が検討されているが、実際にはそれほど多く適用されていない。

次に、浸出水の対策としては、排水効率を高めて水処理にゆだねる方式や、処分地内に流れ込む水量を低減する方式がとられている。前者は処分場底部に地下水の集排水管を埋設し、集積した浸出水中の有害成分を処理する方式であり、遮水シートをライナー構造として集排水する方式も考案されている。一方、後者の方法は、諸外国と比べて降水量が多いわが国では一般的ではないが、環境リスクと水処理コストの低減のため、今後積極的に取り組む課題のひとつであろう。この他、土壌中の微生物の機能を利用して、廃棄物および浸出水中の有害物質を埋立地内で生物学的に処理する方式も検討され、一部の処分場で試験的に適用されている。

以上のように、管理型の最終処分場では遮水シートと浸出水処理を中心とした安全環境管理が行われているが、複雑な現場条件では必ずしも十分ではないという指摘もある。特に、長期使用による機材の劣化や維持コストの増大、わが国特有の気象条件や立地環境などが問題となっている。したがって、これらの問題を克服するとともに、より高度な遮蔽機能を有する次世代型の管理技術を開発することが肝要である。

3.2 モニタリング技術

廃棄物処分場の環境管理を推進するため、有害物質の挙動および漏洩を監視するモニタリング技術を整備する必要がある。従来の有害物質の監視には、集排水管により集積する浸出水や二重シート間で採取される水の水質分析による方法などがある。また、電気抵抗や微小電流の変化により遮

水シートの破損の有無を検知する方法、電位や比抵抗の多次元的な変化から遮水シートの破損箇所を特定する漏洩検知システムも考案されている。破損個所が特定されれば、遮水工の強化や地盤修復などの対策を実施することが可能となり、より効果的な環境管理が期待できる。しかし、このような漏洩検知システムは研究開発の段階であり、処分場において実用化された例はほとんど報告されていない。

表1は、従来のモニタリング技術の特徴をまとめたものである。これまでに、地層中の地質構造や地下水の状態を把握するために、弾性波や電磁気などを用いた探査技術が開発されている。しかし、地盤中の微小な亀裂や水みちなどを検知するには測定精度が十分でなく、処分場のモニタリング技術として実用化されたものはない。一方、比抵抗の3次元的な変化から地盤中の汚染物質の流路や濃度分布を可視化する試みも行われているが、いまだ基礎研究の段階である。したがって、埋立処分場のような層状の複雑な構造でも適用できる高精度モニタリング技術の開発を進めるとともに、地盤環境における微小構造の評価技術や有害物質の挙動予測のための解析技術確立する必要がある。

3.3 有害物質除去・地盤修復技術

以上は未然防止を目的とした管理技術であるが、処分場における有害物質の除去や漏洩箇所の修復も重要な対策技術である。また、将来的には処分場跡地の再利用のため、汚染土壌の現位置浄化についても検討を行う必要がある。有害物質の除去については、浸出水の処理が行われているのみで、固体廃棄物や周辺の土壌を対象とした浄化対策はほとんど行われていない。これは、土壌などの地盤環境では有害物質を効率的に捕集することが困難なこと、有害物質の除去割合が十分でないことなどの理由による。そのため、地盤環境や処分場の遮蔽構造に適した新たな概念を有するシステムを開発する必要がある。

表2は、地盤修復に関わる諸技術の特徴をまとめたものである。代表的な汚染土壌の遮蔽・修復技術としては、放射能を含む廃棄物を対象としたガラス固化法が用いられており、土壌と廃棄物の

表1 モニタリング技術の特徴と適用性（従来技術と本提案システムの比較）

	本提案(比抵抗+弾性波)	電磁波など	コアボーリング	漏洩検知センサ
原 理	地盤の電氣的性質と弾性波の伝播特性を利用した位置標定手法	地盤の電氣的性質を利用した位置標定手法	採取したコアサンプルを直に観察する手法	漏洩物質を予め埋設したセンサーで検知
従来の主な用途	資源探査や地層探査等に用いられる	資源探査や地層探査等に用いられる	資源探査や地層探査等に用いられる	地下水の分析など
手 法	(1)弾性波の速度分布の差でき裂集積位置を確認 (2)電氣抵抗分布の差で汚染水の浸出の有無を確認	電磁波の強度分布の差で汚染水浸出の有無を確認	コアサンプルを採取し、汚染水の含有の有無を直に観察する	産業施設・処分場建設前に施設周辺に設置
可能性	2段階評価で高精度の位置標定が可能	高精度の標定が可能、波の減衰が大きいという欠点も	精度を上げるには多数のボーリングが必要	精度を上げるには多数のセンサー設置が必要
地盤損傷の可能性	非破壊検査	非破壊検査	開けた孔が汚染物質漏洩の経路にも	建設前に設置するため非破壊
非常時の対処	容易	容易	比較的容易 (大災害の際には動力確保不可能)	予め設置しないと不可能
コスト	安価	安価	非常に高額	高額

表2 漏洩防止・修復技術の特徴と適用性（従来技術と本提案システムの比較）

	本提案		その他	
	アクティブバリア	人工熱変成岩盤	ガラス固化	多重バリア
原 理	電氣化学特性を利用した汚染物質の吸着・分解法	土質や軟岩の熱的性質を利用した地盤固化手法	高圧電流により土壌を丸ごと熔融させる手法	施設周辺のシートや膜で汚染物質漏洩を抑える
主な用途	不純物除去のフィルターとして利用されている	従来はなし	汚染物質の原位置封じ込め	
手 法	電極での酸化・還元反応により汚染物質を捕集、分解する	発熱剤を用いて漏洩箇所を人工的バリアで囲う	汚染物質を含む土壌をガラス状にする	予めバリアを多重構造にする
可能性	有害物質漏洩の検知と除去を同時に行うことが可能。有害物質を選択的に捕集し、無害化することが可能	土質及び軟岩を高温高圧で固化し、人工熱変成岩体を作り、地下水などの侵入を完全に遮断可能	漏洩で汚染された土壌全体を覆うことが必要。漏洩が大規模に生じると困難	地震などの大災害では破壊の可能性も
必要な装置	小規模電源で可能	小規模の装置で可能	大規模電源が必要	(施設建設時に予め設置)
非常時の対処	比較的容易	容易	漏洩が大規模に生じると困難 大規模電源が必要なので地震等の際には不適	予め設置しないと不可能
コスト	安価	安価	高価	高価

全体を溶融させて周辺環境との隔絶をはかるものである。この方法は、溶融に適した地盤特性の限定や発生ガスの処理、大電流を流すための大規模な施設や環境影響などの問題があり、一般・産業系廃棄物の処分場にそのまま適用できるものではない。さらに、地震などの緊急時を想定した場合、漏洩箇所の修復はできるだけ簡便な方法によることが求められる。

4. 有害物質漏洩防止システムの開発

4.1 研究開発の目標と全体システム

以上の背景や現状をふまえ、管理型の最終処分場における化学物質安全管理を目指した有害物質漏洩防止システムの研究開発を行っている。有害化学物質としては重金属と有機塩素系化合物を対象とし、これらの監視、捕集、分解および遮蔽を含めた高度なシステムを構築することとした。

図1は、本研究の開発目標と期待される効果を示したものである。この漏洩防止システムは、主として地震などの緊急時に有害物質の漏洩が確認された場合の適用を想定しているが、平常時のより高度な遮蔽機能をもつ廃棄物処分場のコンセプト

トとしても応用できるように技術開発を進めている。また、地盤環境の特性評価技術を中心として、漏洩監視技術、有害物質拡散防止技術および漏洩部修復技術を複合化することにより、従来にない高度な有害物質漏洩防止システムを構築することに大きな特徴がある。

本システムは、図2に示すように4つの要素技術から構成されている。まず、自然災害などで処分場や貯蔵施設において有害物質の漏洩が認められた場合は、高精度モニタリング技術を用いて漏洩位置を精密に評定する。次に、監視型アクティブバリアーおよび人工熱変成バリアーを用いて有害物質の漏洩防止をはかる。さらに、地盤環境の特性を評価するとともに、モニタリング技術や遮蔽技術などの効果を解析するため、環境特性評価技術を開発する。図3は、それぞれの要素技術を埋立処分場に適用することを想定した場合の配置例を示したものである。図に示すように、本システムは平常時における有害物質の除去や遮蔽に使用できるほか、非常時における漏洩箇所の修復にも適用可能である。

以下、それぞれの要素技術の内容について簡単に紹介する。

図1 本研究の開発目標と波及効果

研究の概要

図2 有害化学物質漏洩防止システムの研究概要

図3 有害物質漏洩防止システムの適用例

4.2 要素技術

(1) 監視型アクティブバリアー

電気化学反応を利用して土壌や軟弱地盤などの環境媒体中において有害化学物質を選択的に捕集し、さらに電極反応によりこれを無害化する監視型アクティブバリアーに関して研究を行う。

具体的には、アクティブバリアーに使用する電極形状（メッシュ型、多孔性型）の影響と電位制御方法の選定について基礎的実験を行っている。また、化学物質捕集特性について検討を行い、地盤環境に適用するための技術的基礎を構築する。さらに、有害物質の捕集効果、分解性などの電極反応に関する電気化学的な実験や電極材料の選定を行い、地盤環境中における化学物質の捕集および無害化のための基盤技術を確立させる。

(2) 人工熱変成バリアー

反応性化学物質を用いて高温、高压反応により局所的な人工熱変成岩盤を形成し、周辺環境との物理的な隔絶を可能にする遮断技術に関して研究を行う。

具体的には、局所的な人工熱変成岩を形成する遮断技術について、周辺環境との物理的な隔絶を可能にする反応性物質の選定とその遮蔽効果について基礎的検討を行っている。また、局所的熱変成帯を形成する過程での反応性物質による土壌中の熱伝導性および土粒子間の結合メカニズムを解明し、金属イオンを含む模擬水溶液に対する遮蔽効果の基礎的実験を行う。さらに、反応性物質による土壌・岩盤等環境媒体の変質・固化の性状を確認し、有害物質を遮蔽するための基盤技術の確立を行う。

(3) 高精度モニタリング

弾性波法と比抵抗法を組み合わせ地盤環境中における有害物質の漏洩位置評定および濃度分布の予測を可能にする高精度モニタリング技術に関して研究を行う。

具体的には、高精度の弾性波トモグラフィーと比抵抗トモグラフィーの組み合わせによる地盤中の水みちと金属イオンの検知実験、および三次元解析手法による基礎的検討を行っている。地盤中の水みちの検出では、巨視的には弾性波を使用し、

微視的な部分は比抵抗を用いて、三次元的な標定が可能になるようにする。金属イオンの検出には比抵抗を用い、電気伝導度の微小な変化を解析して化学物質の濃度分布を求める。さらに、弾性波と比抵抗の両媒体を複合したジオトモグラフィ技術の高度化と、現場条件に適した高精度モニタリング技術の確立を行う。

(4) 地盤環境特性評価

上記の各要素技術のシステム化、並びに環境媒体における化学物質の移流・分散特性および要素技術の効果を検証する環境特性評価技術に関して研究を行う。

具体的には、環境媒体における化学物質の移流・分散特性について、環境媒体と地下水および有害物質の間の物理的、化学的相互作用を考慮した解析・評価手法について基礎的な検討を行っている。図4は、開発中の移流・分散解析手法のコ

図4 地盤環境特性評価手法のコンセプト

ンセプトを示したものである。従来の浸透流解析に加えて、地下水中の化学種の反応、環境媒体との吸着・脱離、他の環境媒体との間の分配平衡など、いわゆる反応解析が可能なアルゴリズム（図5に計算の流れ図を示す）となっている。また、廃棄物処分場の地盤環境に特有な三次元形状、不飽和領域においても使用できるように改良を加えている。

また、地盤環境における化学物質の吸着・脱離過程に関して模擬実験を行うとともに、廃棄物処分場の地盤特性を把握するための解析的検討を行う。さらに、有害物質の反応性、分散性に関して、実際の地盤環境を模擬した中規模スケールの地盤環境モデル実験を行い、地盤環境における漏洩防止技術の効果について実証的な検討を行う。

以上の要素技術と解析・評価技術を統合化し

て、次世代型の有害物質漏洩防止システムの基本コンセプトを提案することが、本研究の最終的な目標である。

5. まとめ

廃棄物処分場における有害物質の遮蔽技術、モニタリング技術および地盤修復技術などの現状を中心に述べるとともに、それぞれの問題点や今後の方向について総括的に論じた。周知のように、各種廃棄物の処理・処分に伴う環境問題が顕在化しており、今後特に廃棄物処分場などの汚染問題が深刻化することが予想される。これに対処するため、筆者らは高度な有害物質漏洩防止システムの開発について実験的、解析的な検討を開始している。この遮蔽技術は、地盤環境における有害物質の挙動を監視し、合理的な制御を行うことを特徴としており、次世代型の管理技術としての実用化を目指している。現在、地盤環境の解析・評価手法の開発や漏洩防止技術に関する基礎的な実験などを中心に鋭意検討を進めている段階であり、その研究結果については別の機会に報告することとしたい。

参考文献

- 池口 孝(1997)：廃棄物埋立処分に関する地下水汚染問題とその対応、地下水学会誌、**39**(3)、187-199。
 金子直哉(1995)：現位置ガラス固化法について、環境管理、**31**(3)、229-235。
 厚生省(1995)：廃棄物最終処分場の構造に関する技術基準の強化について、平成7年12月、衛環第284号。
 駒井 武(1996)：反応を伴う多孔質体混相流れの解析、混相流シンポジウム96予稿集、234-238。
 駒井 武(1997)：地盤環境における有害化学物質の移流分散シミュレーション、安全工学、**36**(5)、422-426。
 瀬戸政宏(1995)：トンネル掘進に伴う比抵抗分布の変化、土木学会平成7年度春季大会予稿集、186-190。
 土木学会(1992)：廃棄物処理におけるリスクとその管理、広域処分場小委員会、1-45。
 中杉修身(1990)：廃棄物処理・処分と水質汚染、水質汚濁研究、**13**(3)、134-138。

図5 浸透流解析と反応解析の統合化アルゴリズム

- 古市 徹(1993):埋立処分場のモニタリングシステム
についての考察、廃棄物学会誌、**4**(1)、29-34.
- 松藤康司(1997):廃棄物埋立の微生物分解と工学的応
用、化学生態シンポジウム、1-16.
- 山河照彦(1997):電気化学的汚染土壌浄化法につい
て、環境管理、**31**(3)、262-268.
- 朝日新聞記事(1995):環境重視の管理型処分場が完成
(黒磯)、平成7年3月1日朝刊.
- 日刊工業新聞記事:廃棄物処分場汚水漏れを検知、平
成9年7月11日朝刊.
- Lyman A.K.(1990): Compaction of Soils by Means of
Explosives, Civil Engineering (USA), **101**(4),
205-210.
- Piver, W.T.(1997): Evaluation of Health Risks for Con-
taminated Aquifers, Environmental Health Perspec-
tives, **105**(1), 127-143.
- U.S.EPA(1995):Manual, Groundwater and Leachate
Treatment Systems, EPA/540/2-84.
- Zyvoloski G.A.(1986): Int. J. Numerical Methods in En-
gineering., **23**, 1101-1108.
- (受付:1997年9月30日、受理:1998年4月6日)