

## 土壌汚染対策法と重金属汚染土壌の浄化技術の現状と課題

### Technological Aspects of Heavy Metal-Contaminated Soil Remediation Related to Soil Contamination Countermeasures Law

藤原 靖  
YASUSHI FUJIWARA

大成建設株式会社・技術センター・土木技術研究所・生物環境研究室  
〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1  
TEL: 045-814-7226 FAX: 045-814-7257  
E-mail: yasushi.fujiwara@sakura.taisei.co.jp

*Bio-environment Engineering Section, Civil Engineering Research Institute, Technology Center, Taisei Corporation*

キーワード：土壌汚染対策法，重金属，汚染土壌，浄化技術

**Key words:** Soil contamination countermeasures law, heavy metals, contaminated soils, remediation technology

#### 1. はじめに

経済活動が活発な我が国においては、その負の面として環境負荷の増加が生じている。それは、地球環境レベルにおいても同様であるが、我々の生活の基盤とも言うべき土壌においては、土壌汚染という問題が非常に身近な問題となっている。

土壌汚染と言えば、歴史的な足尾銅山鉱毒水や神通川流域のカドミウム汚染などの農用地の土壌汚染が良く知られているが、近年では都市部の工場やその跡地での汚染が問題化してきている。これは、土地の再開発や売買に際して汚染の有無を調査する機会が増加していること、企業の環境に対する自主的な調査や地方自治体による地下水などの監視体制が充実してきたことによって顕在化してきたためである。

特に、揮発性有機化合物 (VOCs) による土壌汚染がハイトク汚染とも呼ばれ近代的な汚染として位置づけられているのに対して、重金属汚染は前述のように鉱山・精錬施設で古くからある汚染であり、都市部ではメッキ工場や蓄電池工場などの製造業の工場敷地でも多いほか、我が国の地質を反映して自然由来による場合も多い。

これまで、市街地等の土壌については「土壌・地下水汚染に係わる調査・対策指針」にしたがって、土地変更の機会に調査を行い環境基準が満足されているかどうか判断され、満足されていない場合には適切な対策を行うなどの自主的な環境保全の枠組みで対応がなされてきた。しかし、土壌汚染の顕在化による国民の健康への影響に対する懸念から、また土壌環境を保全するための明確な制度を作るために、2000年12月より「土壌環境保全対策の制度の在り方に関する検討会」により検討が進められ、中央審議会への諮問と審議およびパブリックコメント手続きを経て、2002年2月に「土壌汚染対策法案」が国会提出され、同年5月に成立・公布された。

我が国における土壌汚染対策に関する費用については、(社)土壌環境センターによる推定例<sup>1)</sup>があり、それによれば土壌汚染調査費用として2兆3千億円、土壌汚染浄化費用として11兆円と推定されている。土壌汚染対策法の公布により、これらの土壌浄化の市場規模も現実のものになると同時に様々なより効率的な汚染土壌の浄化技術の開発が必要となってきている。

そこで、本論では制定された土壌汚染対策法の概要・特徴と重金属汚染土壌の浄化技術の現状および、今後、重金属汚染土壌の浄化を進めて行く上でのバイオテクノロジーを用いた浄化技術の開発への期待と課題について、工学的な観点から以下に述べる。

#### 2. 土壌汚染対策法について

##### 2.1 土壌汚染対策法の制定の経緯と背景

1980年代の米国でのスーパーファンド法による土壌・地下水汚染の修復と浄化技術の開発が盛んになる中、1982年から実施された環境庁による全国の地下水汚染調査によって我が国においても深刻な地下水・土壌の汚染の実態が明らかになってきた。そこで、地下水・土壌汚染の未然防止が図られることになり、環境庁では1991年8月に土壌の汚染に係わる環境基準を設定し、1994年11月には重金属あるいは有機塩素系化合物に係わる土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針を策定して汚染範囲の把握と対策に関する指導を進めてきた。さらに、1997年3月には地下水の水質汚濁に係わる環境基準が設定され、1999年1月には調査・対策指針の改訂と運用基準の策定が行われた。

環境基準は遵守すべき目標であり、指針は行政指導があるものの、土壌・地下水汚染に係わる事業者が実施すべき調査、対策、報告等の内容で、事業者の自主的な取り組みに負うところが大きい。土地所有者である企業の

自主的な取組みは、企業としての環境保全に対する取組みの一環としての理由もあるが、汚染の有無が土地取引の際の不動産の価値あるいは売買の円滑化に大きな影響を及ぼすことが大きな要因である。

実際問題として、汚染した土地を環境基準に適合させるには多大な経費と期間を要する。このような問題から、生活環境に密接している市街地では何等の汚染対策が取られず放置される危険性がある。そこで、汚染した土地の利用状態や汚染地下水の利用の有無などに応じて現実に進めていくことができる汚染土壌・地下水の対策法が望まれてきた。このような状況の中で土壌汚染対策法が制定されるに至った。

## 2.2 土壌汚染対策法の概要

土壌汚染対策法は大きく八章からなり、その概要は以下の通りである。

### (1) 第一章 総則

本章は、総則として土壌汚染対策法の目的と第二章以降に示されている重要語句である「特定有害物質」と「土壌汚染状況調査」の2つについて定義している。

#### 1) 目的

土壌汚染の状況の把握に関する措置と汚染による人の健康被害の防止措置を定め、土壌汚染対策の実施を図り、国民の健康を保護する。

#### 2) 定義

「特定有害物質」とは、鉛、ヒ素、トリクロロエチレンその他の物質（放射性物質を除く）で、土壌に含まれることによって人の健康被害を生じる恐れのあるものとして政令で定めるものである。「土壌汚染状況調査」とは、特定有害物質による汚染状況の調査である。

### (2) 第二章 土壌汚染状況調査

本章は土壌汚染状況の調査に関するもので、以下に相当する土地の所有者は土壌汚染の状況について、環境大臣の指定を受けた機関（指定調査機関、後述（第五章））に調査させて、その結果を都道府県知事に報告する義務があることを示している。土壌汚染調査を実施することなく指定区域（後述（第三章））が指定されることはない。

1) 使用が廃止された「特定有害物質の製造、使用または処理をする水質汚濁防止法の特定施設」に係わる工場または事業場の敷地であった土地

2) 都道府県知事が土壌汚染により人の健康被害が生じるおそれがあると認める土地

### (3) 第三章 指定区域の指定等

本章は土壌汚染状況調査の結果、直接摂取によるリスクに係わる基準または地下水等の摂取によるリスクに係わる基準を越えていることが判明した汚染土壌を、都道府県知事が指定区域として指定・公示するとともに、指定区域の台帳を調製し、閲覧に供することを示している。

### (4) 第四章 土壌汚染による健康被害の防止措置

本章は、都道府県知事が指定区域として指定した汚染土壌による人の健康に係わる被害の防止のための措置、および指定区域となった土地の改変等による新たな健康被害に対するリスクの発生の防止、という管理について示したものである。

#### 1) 措置命令

都道府県知事は、指定区域内の土地の土壌汚染により人の健康被害が生じるおそれがあると認めるときは、当該土地の所有者等に対し、汚染の除去等の措置を講ずべきことを命ずることができる。

汚染原因者が明らかな場合であって、汚染原因者に措置を講じさせることにつき土地の所有者等に異議がないときには、上記によらず都道府県知事は、汚染原因者に対し、汚染の除去等の措置を講ずべきことを命ずることができる。

#### 2) 汚染の除去等の措置に要した費用の請求

措置命令を受けて土地の所有者等が汚染の除去等の措置を講じたときは、汚染原因者に対し、要した費用を請求できる。

#### 3) 土地の形質の変更の届出及び計画変更命令

指定区域内において土地の形質変更をしようとする者は、都道府県知事に届け出なければならない。都道府県知事は、その施行方法が基準に適合しないと認めるときには、その届出をした者に対し、施行方法に関する計画変更を命ずることができる。

### (5) 第五章 指定調査機関

本章は、第二章で述べられている環境大臣が指定する土壌汚染状況調査を実施する指定調査機関について示したものである。指定調査機関は、土壌汚染状況調査の信頼性を確保するために、技術的能力を有する調査事業者で土壌汚染状況調査を行おうとする者の申請により環境大臣が指定調査機関として指定するものである。その他、欠格条項、指定の基準、事業所の変更の届出、土壌汚染状況調査の義務、業務規程、適合命令、業務の廃止の届出、指定の失効、指定の取消しについて定められている。

### (6) 第六章 指定支援法人

本章は、土壌汚染対策の円滑な推進を図るため、汚染の除去等の措置を講ずる者に対する助成、土壌汚染状況調査等についての助言、普及啓発等の業務を行う指定支援法人について定めたものである。また、指定支援法人に関する基金の設置等の必要な事項について定められている。

### (7) 第七章 雑則

本章は、雑則として報告および検査、協議、資料の提出の要求等、環境大臣の指示、国の援助、研究の推進等、国民の理解の増進、経過措置、政令で定める市による事務の処理について定めたものである。

### (8) 第八章 罰則

本章は、土壌汚染対策法の規程に違反した場合の罰則規程について定めたものである。

## 2.3 土壌汚染対策法の特徴と今後の土壌環境保全対策のあり方

土壌汚染対策法は、水質汚濁防止法が汚染の未然防止を目的とするのに対して、過去に汚染を生じた土壌による人の健康被害を防止するための法律である。土壌汚染は、特定有害物質を取り扱った履歴がある土地が汚染している可能性が高いことから、同法では工場等の事業所を対象にしている。工場等の事業所は一般にみて操業されている時は一定の管理がなされ一般住民の立ち入りが

制限されると考えられる。そこで、操業を止め一般住民が立ち入るような用途に土地が転用される場合を想定した場合には、その際に土地の調査を義務付け、その結果の如何によって土地を指定区域として指定し台帳に載せ、人の健康被害の防止措置をとることが必要となる。

防止措置は、後述する環境リスクの低減を目的としたものである<sup>2)</sup>。防止措置として、有害物質の浄化・除去が実施された場合には指定区域の指定を解除することができる。その他の措置では指定区域の指定は解除されないが、道路、駐車場、商用地、都市公園、戸建て住宅、マンション、学校等の土地の利用形態と汚染の状況に応じて立入禁止、舗装、覆土、封じ込め等の措置を講じることにより土地を利用することができる。人の健康被害の防止措置の命令は指定区域外には発令されることはなく、また、土壌汚染状況調査を実施することなく指定区域に指定されることはない。

以上のように土壌汚染対策法は、土壌汚染の可能性の高い製造事業所を対象にし、環境リスクの低減により土壌汚染から人の健康を守ると同時に、土壌汚染に係わる土の利用に門戸を開くことを主眼としたところに特徴がある。

土壌汚染による環境リスクのとらえ方として、その概念<sup>3)</sup>を図1に示した。土壌の特質として、土壌汚染による人の健康または生活環境への影響は、汚染土壌の摂食および皮膚摂食などの「直接暴露」と地下水・公共用水、農作物等の「他の媒体を通じての暴露」がある。環境リスクとしては、人の健康の保護としての人の健康に係わるリスクと生活環境の保全としての生活環境影響に係わるリスクがある。

中央環境審議会の答申「今後の土壌環境保全対策の在り方について<sup>2)</sup>」によれば、有害物質による土壌汚染は、

放置すれば人の健康に影響が及ぶことが懸念されることから、国民の安全と安心を確保するため、その環境リスクを適切に管理し、土壌汚染による人の健康への影響を防止する必要がある、以下の基本的な考え方が取り纏められている。

- 環境リスクのうち、まず健康影響に係わるリスクを速やかに管理する必要があること、生活環境影響に係わるリスクについては、なお科学的知見の集積が必要であることを踏まえ、当面、健康影響に係わるリスクを管理することを目的とすることが適当である。
- 健康影響に係わるリスクは、汚染土壌の直接摂取リスクと地下水等の摂取によるリスクとする。
- 汚染土壌の直接摂取リスクの対象物質と基準は、土壤環境基準項目のうち人が直接摂取する可能性のある表層土壌中に高濃度で長期間蓄積する重金属等とし、汚染土壌を通じた長期的な暴露を前提とした何らかの管理が必要と考えられる濃度レベル（後述）を設定する。
- 地下水等の摂取によるリスクの対象物質と基準は、土壤環境基準における溶出基準項目と基準値とする。

直接摂取リスクに係わる基準での管理が必要と考えられる濃度レベルについては、汚染土壌の直接暴露の経路に係わる土壌含有基準として暴露される時期及びその期間の基本的な考えのもとに、有害物質毎に検討がなされている。対象とする暴露経路を摂食および皮膚接触として、暴露期間（長期）、消化管を経由する経口摂取の摂食シナリオ、土壌および巻き上げられた土壌粒子の皮膚接触により摂取量が算定された<sup>4)</sup>。

表1に土壌含有基準<sup>5)</sup>を示した。土壌含有基準に係わる測定方法はまだ定まっていないが、所謂アルカリ溶融法やふっ酸混酸による全分析法ではなく、水銀、カドミウム、鉛、砒素、ふっ素、ほう素、セレンについては

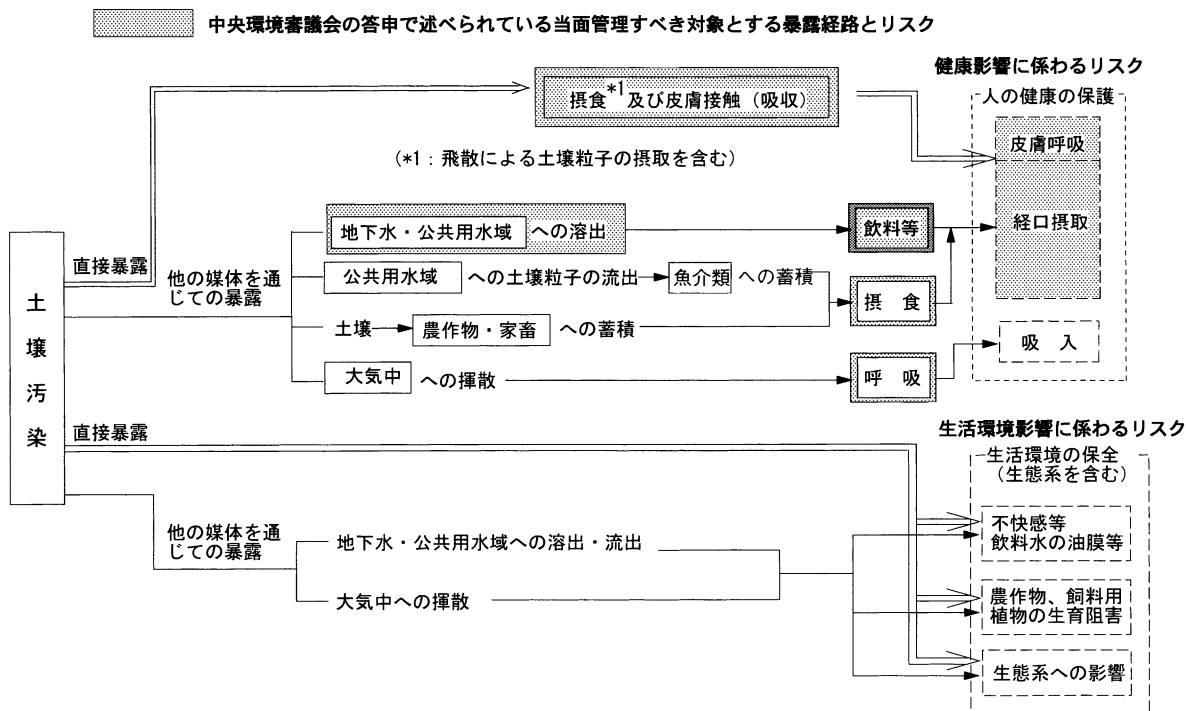


図1. 土壌汚染による環境リスクのとらえ方の概念図<sup>3)</sup>。

表1. 重金属の土壤含有基準<sup>5)</sup>.

	土壤含有基準	
	数	値 (mg/kg)
水銀		15
カドミウム		150
鉛		150
ヒ素		150
六価クロム		250
フッ素		4000
ホウ素		4000
セレン		150
シアン	遊離シアンとして 50	

1N 塩酸抽出法、六価クロムは水抽出法が提案されている<sup>5)</sup>。これは、土壤環境中での重金属化合物の形態の変化および土壤からの対象重金属の体内での摂取の実態を考慮した測定法として位置付けられている<sup>5)</sup>。

土壤汚染による環境リスクの管理に当たっては、汚染土壤に係わる土地を一定のリスク管理の下に置く必要があるため、汚染土壤に係わる土地を都道府県知事がリスク管理地として指定し、環境リスクの低減と新たな環境リスクの発生を防止する。

さらに、土地の利用状況等に応じ、種々の対策実施者により確実に実効のある環境リスクの低減を図る必要があるため、リスク管理地からの汚染の拡散を防止する必要がある<sup>2)</sup>。

土壤は水や大気と比べ移動性が低く、土壤中の有害物

質も拡散・希釈されにくいいため、土壤汚染は水質汚濁や大気汚染とは異なり、汚染土壤から人への有害物質の暴露経路の遮断により、直ちに汚染土壤の浄化を図らなくても、リスクを低減することができるという特徴を持っている<sup>2)</sup>。リスクの低減は、暴露管理（汚染土壤と接触する機会の抑制）、暴露経路遮断（汚染土壤との接触の抑制）、汚染土壤の浄化、により進める<sup>4)</sup>。

具体的な土壤汚染のリスク低減化手法例として、土壤直接摂取リスク低減化の手法例と土壤から地下水等への溶出リスク低減化手法例があり<sup>2)</sup>、その概要を図2に示した。図から分かるように、対策技術は両者に共通して、封じ込めと土壤浄化が主体である。封じ込めは、汚染土壤を掘削して不溶化あるいは固化型の処理を行った後に汚染程度に応じた封じ込め施設構造で封じ込める方法と、原位置で不溶化あるいは固化型の処理を行った後に遮水壁や覆土で封じ込める方法である<sup>2)</sup>。土壤浄化は、汚染土壤を掘削して有害物質を加熱脱着あるいは土壤洗浄などを行った後に場内に埋め戻す方法と、原位置で有害物質を分解、抽出、揚水等で除去する方法と汚染土壤を掘削・搬出する方法がある<sup>2)</sup>。

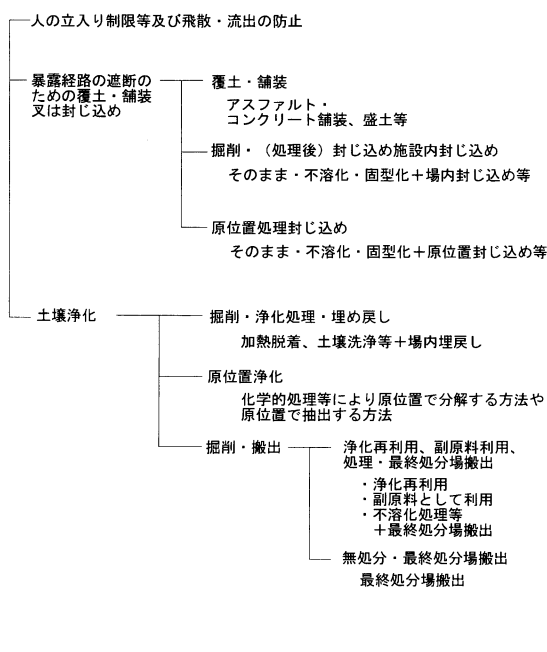
リスク管理地においては、直接摂取によるリスクに係わる基準または地下水等の摂取によるリスクに係わる基準を超える汚染土壤が存在するため、リスク管理地の土地の改変等に際しては、汚染土壤の掘削や搬出に伴う新たな汚染が発生することを防止するための措置を講じることが必要である<sup>2)</sup>。

### 3. 重金属汚染土壤の浄化技術の現状

#### 3.1 重金属汚染土壤の対策事例について

2000年度の土壤汚染調査<sup>6)</sup>では、図3に示したように重金属の超過事例は鉛、ヒ素、六価クロム、総水銀、カ

土壤直接摂取リスク低減化の手法例



土壤から地下水等への溶出リスク低減化の手法例

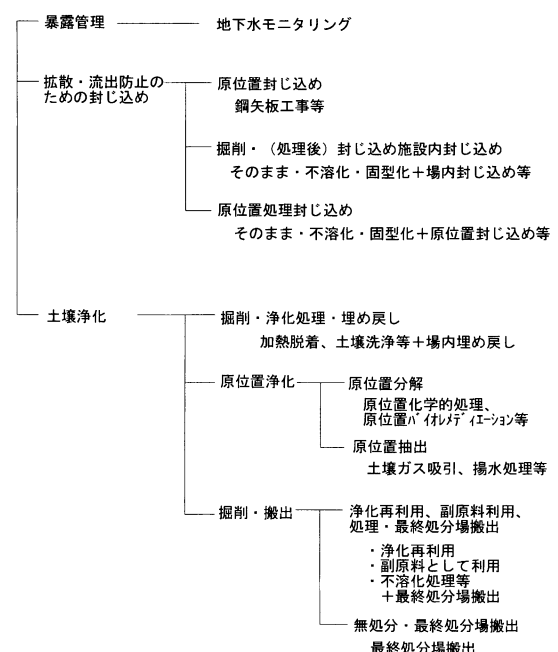


図2. 土壤汚染のリスク低減化手法例<sup>2)</sup>.

件数	環境基準項目（溶出基準項目）					
	重金属等					
	鉛	ヒ素	六価クロム	総水銀	カドミウム	セレン
調査事例（累積）	384	300	189	257	234	53
2000年度判明	72	60	41	39	27	17
超過事例（累積）	170	143	95	77	33	24
2000年度判明	45	40	26	19	6	6

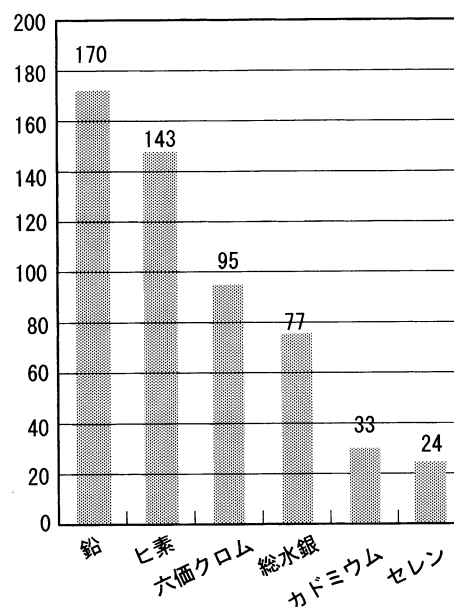


図3. 2000年度土壌汚染調査事例<sup>6)</sup>.

ドミウム，セレンの順となっている。これらの重金属汚染土壌の対策は，表2に示したように恒久対策として255件の調査例<sup>6)</sup>がある。調査例では対策の項目としては，原位置分解，原位置抽出，掘削除去，処理，封じ込め，固型化・不溶化，飛散防止，その他で，施した措置は複数の回答となっているため501の事例回答となっている。そのうち，掘削除去が131事例，その他としてあげられている最終処分場への埋立処分が138事例で，両者の合計は269事例となり，全体の約54%である。また，有害物質そのものの除去は行わず，封じ込め，固型化・不溶化，飛散防止の措置をとったものは，180事例で全体の約36%である。したがって，残りの約10%が有害物質の除去に相当するが，これはあくまでも重金属等という分類で揮発性有機化合物（VOCs）以外のものであり，シアンや農薬を含めた事例である。重金属だけでは数パーセントが熱脱着，土壌洗浄，地下水揚水などによる除去技術によって有害物質の浄化が行われてきたのが現状であると考えられる。

重金属汚染土壌の場合，掘削・搬出・良質土置換が非常に多い理由は，有害物質を効率的に除去する方法が未整備なこと，固化・不溶化後に遮水施設に封じ込める方法を採用した場合でも汚染物質が存在し続けるために，半永久的なモニタリングが必要なことや土地の有効利用が制限され，不動産価値が低いことなどが上げられる。また，我が国では汚染土壌を汚泥として，廃棄物処理場に搬入処分することに比較的大きな問題が生じて来なかったことも大きな要因として上げられる。今後，処分場の立地や処分費用の関係から，徐々に除去浄化の事例が増えていくと考えられる。

事例では，封じ込めに関する対策事例も多い結果となっている。この中には，汚染土壌を掘削して中間処理施設に搬出して不溶化などの処理を行った後に汚染土壌があった場所以外の封じ込め施設に搬入されたものが相当数あり，汚染サイトでの不溶化処理後に同一のサイト内に封じ込めが行われたものは，それ程多くないと予想

される。

以上のように，これまでの事例からは重金属汚染土壌の場合は，掘削除去・良質土による置換，除去した土壌の固型化・不溶化処理（中間処理），処理土壌の最終処分場埋立処分，という流れで殆ど対応されてきたのが実態であると考えられる。

### 3.2 重金属の土壌・地下水汚染対策技術の現状について

現状の重金属の土壌・地下水汚染対策技術<sup>7)</sup>について，以下に紹介する。なお，ここでは，掘削・良質土置換による汚染土壌の除去は，高度な技術を要しないため除外している。対策技術の選択は，技術的要因，経済的要因，土地利用等の社会的要因で行われ，汚染の程度，汚染物質の種類等に応じて総合的な視点で各種対策技術を組み合わせ実施されることが多い。

#### (1) 重金属の封じ込め技術

##### 1) 封じ込め前処理—固化

固化処理は，汚染土壌にセメント等の固化剤を混合して固型化し，物理化学的に有害物質を安定化するものである。移動性の大きな有害物質を扱う場合には，化学的不溶化技術などと組み合わせることが必要であるが，重金属一般に用いることが可能である。固化剤にはセメント系，アスファルト系，ポズラン系，珪酸塩系，熱可塑性ポリマー系などがあるが，セメント系固化剤が良く使用されている。固化は処理が簡単で安価であるが，長期的な安定性には懸念が残る場合があり，遮水工等で管理する必要がある。

##### 2) 封じ込め前処理—化学的不溶化

不溶化処理は，主に汚染土壌に各種の薬剤を混合して，重金属を難溶性の形態に変えて安定化するものである。不溶化剤は，重金属の種類に応じて選択する。硫化ナトリウム，硫酸第一鉄，次亜塩素酸ソーダ等が不溶化剤の代表的なものである。固化と同様によく用いられているが，長期的な安定性，遮水工等での管理の必要性も固化と同様の課題がある。

表2. 2000年度汚染土壌の恒久対策の実施状況<sup>9)</sup>

	件数	
	重金属等超過事例	
原位置分解	2	
バイオレメディエーション	0	
化学的分解	1	
その他	1	
原位置抽出	13	
土壌ガス吸引	2	
地下水揚水	12	
その他	1	
掘削除去	131	
処 理	14	
分 離	11	
熱脱着・揮発法	3	
土壌洗浄法	5	
その他	3	
分 解	4	
バイオレメディエーション	0	
化学的分解	2	
熱分解	1	
その他	1	
封じ込め	38	
遮断工	23	
遮水工	20	
不透水シート	8	
鋼矢板	7	
連続地中壁	6	
粘土層	4	
固化・不溶化	93	
固化	31	
不溶化	60	
その他の不溶化処理	8	
飛散防止	49	
覆土工	33	
植栽工	3	
舗装工	24	
その他	161	
最終処分場に埋立処分	138	
その他	29	
合計回答事例	255	

### 3) 封じ込め

封じ込めは、汚染土壌を環境から隔離する技術である。高濃度の汚染に対しては、固化・不溶化処理を前処理として実施する。一般的には広範囲・低濃度の汚染に対して経済的理由から採用されることが多いが、浄化を行った結果、再利用の基準までに至らなかった処理後土壌について、封じ込めが行われる場合も多い。封じ込め

構造には、汚染土壌の溶出程度に応じ、コンクリート製の容器の中に封じ込め管理する遮断型と、周辺を矢板や地中連続壁で構築する止水壁等で遮水する遮水型がある。

#### 4) 地下水中の重金属の不溶化

最近実用化されているもので、原位置対策として汚染地下水の重金属を安定化する透過性浄化壁工法がある。透過性浄化壁工法は、透水性の浄化壁を汚染地盤の地下水流向の下流側へ設け、浄化壁を通過した汚染地下水中の重金属を浄化壁内に安定化させ、汚染地下水の浄化と汚染範囲の拡大を防止するものである。浄化方法には、活性炭等での汚染物質吸着法、鉄粉や非晶質鉄酸化水酸化物を使用した酸化・還元反応での重金属安定化法<sup>8, 9)</sup>などがある。

#### (2) 重金属の除去もしくは無害化技術

除去もしくは無害化技術には、原位置対策とオンサイト対策がある。原位置対策は汚染地盤中で汚染地下水や汚染土壌中の重金属の除去や無害化を行うもので、地盤の掘削行為が限定されるものである。オンサイト対策は掘削した土壌を地上の浄化設備を用いて重金属の除去や無害化を行うものである。

##### 1) 原位置対策技術

重金属は分解できないため、実際に適用されている原位置対策法は非常に少なく、原位置抽出法としての汚染地下水の揚水・水処理が一般的で、無害化技術として原位置溶融法がある。

##### (a) 原位置抽出

汚染地下水の揚水・水処理は、間接的に汚染土壌を洗浄する効果もあるが、重金属は土壌吸着の割合が高いため、揚水・水処理による汚染濃度の減少は小さくかつ長期間を必要とする場合が多い。重金属は、水処理技術として確立されている酸化、還元、中和、凝集沈殿、濾過、吸着除去等の方法の組み合わせで処理される。

汚染地盤に電極を挿入して直流電圧をかけるとカドミウムや鉛など陽イオンとして存在するものは陰極、クロム酸イオンなど陰イオンとして存在するものは陽極へ電気泳動し電極近傍に濃縮されるので、これを除去することで浄化を行う電気泳動・浸透法がある<sup>10)</sup>。実施例があるものの重金属の水酸化物としての沈澱防止や水分補給法など解決すべき課題が多く、まだ実用化技術として確立されていない。

##### (b) 原位置溶融(原位置ガラス固化)

原位置溶融は汚染地盤に電極を差し込み通電し、交流電流により発生するジュール熱により、汚染地盤を1600~2000°Cに熱し溶融し、汚染地盤全体をガラス状の固形物に固める無害化方法である<sup>11)</sup>。強力な処理で重金属に限らず様々な汚染土壌に対応できる。処理費用が高いことが課題であるが、ダイオキシン汚染土壌で実施され始めている。また以下に述べるオンサイト処理対策として用いることも可能である。

##### 2) オンサイト処理対策技術

オンサイト処理対策としては以下の対策があげられる。このうち、実際に適用されている対策法は加熱と洗浄によるものが多い。

##### (a) 熱脱着法

熱脱着法は汚染土壌を加熱することにより、土壌から

重金属を脱着・分離する技術で、低沸点金属である水銀に適用されている。一般には、600~900°C程度の高温に加熱して水銀を蒸気化させて回収する高温加熱法<sup>12)</sup>がある。また、硫化水銀の形態をとる水銀であれば、硫化鉄の存在下で300°C以下の加熱によって水銀を蒸気化させて回収する低温加熱法<sup>13)</sup>があり、高沸点の重金属の強制的な揮発を促す塩化揮発法もある。これらの熱脱着法は、間接加熱によるロータリーキルン方式がとられることが多く、共存する物質によっては副生成物の生成が懸念されるため、排ガスの処理に留意する必要がある。規模にもよるが固定プラントで実施する場合はほとんどである。非常に強力な処理であるが、処理費用は一般的に高い。排出される清浄土は、有機物や適度な物理性などが失われており、植物生育の基盤としては、土壌改良が必要となる。

(b) 土壌洗浄法

土壌洗浄法は、汚染対策技術としては、比較的歴史が長く実績も多い技術である。土壌を機械的に洗浄して有害物質を除去する方法で、土壌を粒径に応じ分級して、有害物質が吸着・濃集している細粒部分を分離することと、有害物質を洗浄液中に溶解させることが基本技術である。

土壌洗浄法は、いくつかの工程の組み合わせにより成り立っている。例として図4に示したように、水または溶媒による攪拌・洗浄、分級、凝集沈澱等の工程からなっている<sup>14)</sup>。適用性は有害物質や土質によって異なるため事前の適合性試験によって決定されるが、基本的には砂礫混じりや砂質の粗粒な土壌が対象で、シルト分が50%を越えると洗浄は困難であり、経済的にはシルト分が10%未満が適当とされている<sup>15)</sup>。したがって、土壌洗浄法は対象土壌の粒度に非常に左右される浄化方法と言える。

洗浄には水を使用するのが一般的である。弱酸などの利用についての検討がなされているが<sup>16)</sup>、洗浄により重金属の溶解・回収を促進する半面、溶出性が持続して洗浄土が環境基準を満足できないなどの課題もみられる<sup>17)</sup>。したがって、水洗浄には限界があるため、土壌洗浄法の適用性は汚染の程度にも大きく影響されるのが現状である。しかし、重金属を除去することが可能で清浄な土を得ることができ、処理費用が比較的安価で非常に期待されている技術である。

以上のように、重金属汚染土壌の浄化技術として実用化しているものは、現段階では封じ込め施設の構築方法、封じ込めの前処理としての固化・不溶化工法、浄

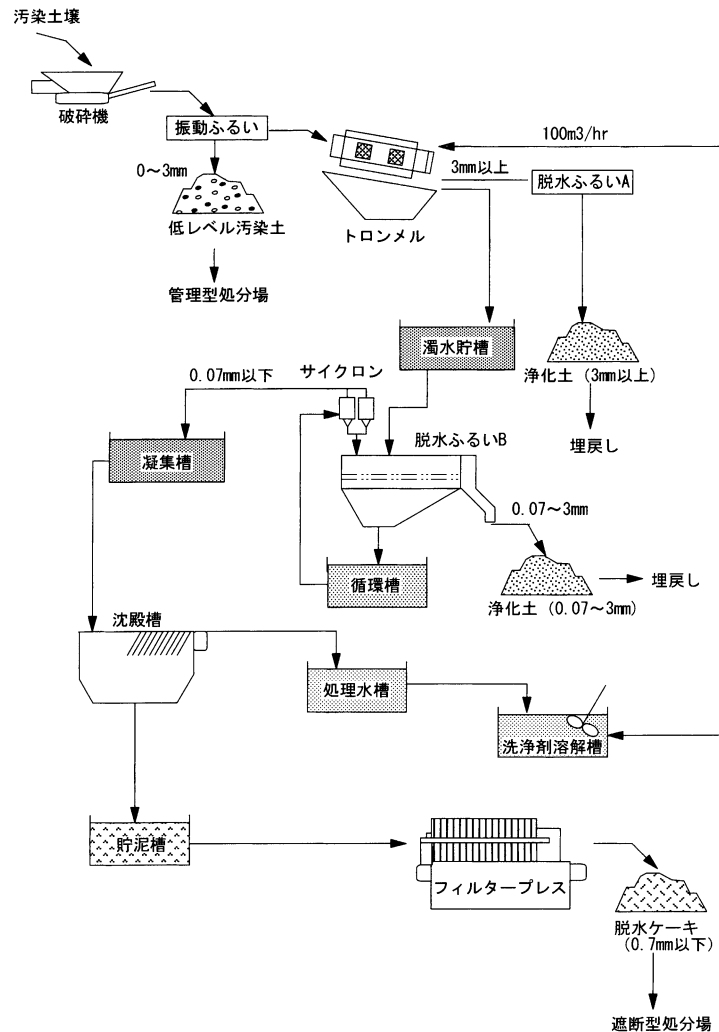


図4. 土壌洗浄法のシステム概要<sup>14)</sup>。

化工法としての揚水・水処理工法，制限付の熱脱着法と土壤洗浄法であり未整備なのが実態である。個々の技術についても課題をかかえており，さらに技術開発が進められている。

#### 4. 重金属汚染土壤のバイオテクノロジーによる浄化技術への期待と課題

先に述べたように，既存の重金属浄化技術は重金属の溶出量のみを低下させる技術（不溶化技術）も含めて非常に限定されている。その中で，重金属を除去する技術，言い換えれば含有量を減少させる技術が最も期待されている。その一つとして土壤洗浄があげられる。しかし土壤洗浄には，洗浄して抽出される重金属汚染水が必ず伴うため，重金属の汚染地下水を浄化する揚水・水処理と同様に，重金属汚染水の水処理技術が重要な課題である。また，土壤洗浄法のようなオンサイト浄化技術は，大規模な掘削作業に伴い浄化過程での土壤の改質が生じるため，理想は原位置での除去による浄化技術である。

このような状況の中で，バイオテクノロジーを用いた有害物質の浄化に関する研究が活発になっており，これらの技術の活用可能な対象物質，活用場所および活用生物について取り纏められている<sup>18)</sup>。土壤汚染対策法が適用される市街地の汚染土壤を対象にして，重金属汚染土壤の浄化技術として実際にバイオテクノロジーを適用するための場面や課題について工学的な観点から以下に述べる。

##### 4.1 水質浄化におけるバイオレメディエーション技術開発の課題

重金属汚染土壤の浄化では，図5に示したように汚染サイトで揚水した汚染地下水の浄化と土壤洗浄を行った

洗浄水の浄化に関する効率的な水処理技術としてのバイオレメディエーションが最も期待される。

水処理技術としては，物理化学的手法によるものと生物学的的手法によるものとに大別される。物理化学的手法は，沈降・浮上，ろ過・遠心，吸着・逆浸透などの物理的処理と酸化・還元，イオン交換，電気分解などの化学処理が一般的に知られている。

生物学的的手法は，一般的には好気性処理と嫌気性処理に分類されるが，重金属の処理の観点では，鉱石から金属を溶出させ回収するバイオリッチング技術や重金属を生物材料であるバイオソルベントによって回収・除去するバイオソープション (Biosorption) が相当すると考えられる。

物理化学的手法との比較において，排水等に含まれる水銀の除去技術についての研究<sup>19)</sup>では，イオン交換法では無機水銀イオンの除去に効果を発揮するものの，その他の化学形態にあるものでは溶解処理や酸化処理が必要であるが，そのためのイオン交換処理に新たな工程が必要になるなど，処理工程の複雑化や処理コストの増加が指摘されている。また活性炭法や沈澱分離法では，低濃度領域での除去限界や水銀の金属水銀化や水銀イオン化など，廃水中の水銀濃度，化合物種，除去率などに応じた複雑な工程の組合せの必要性が指摘されている。これに対して，自然界に存在する微生物の中に，水銀化合物の変換能力や除去能力を有したものがあり，これらの微生物を水銀化合物の種類や濃度に応じて活用することによる浄化技術の可能性が示されている。

六価クロムについての報告<sup>19)</sup>では，六価クロム還元細菌は常温，pH 7 付近で最大の還元速度を示すことから，亜硫酸ナトリウムなどによる化学的還元法のように大量の酸やアルカリを添加する必要がなく，嫌気条件下での反応であるため曝気の必要性もなく，細菌の呼吸による酸素消費により窒素雰囲気にして還元状態を調整す

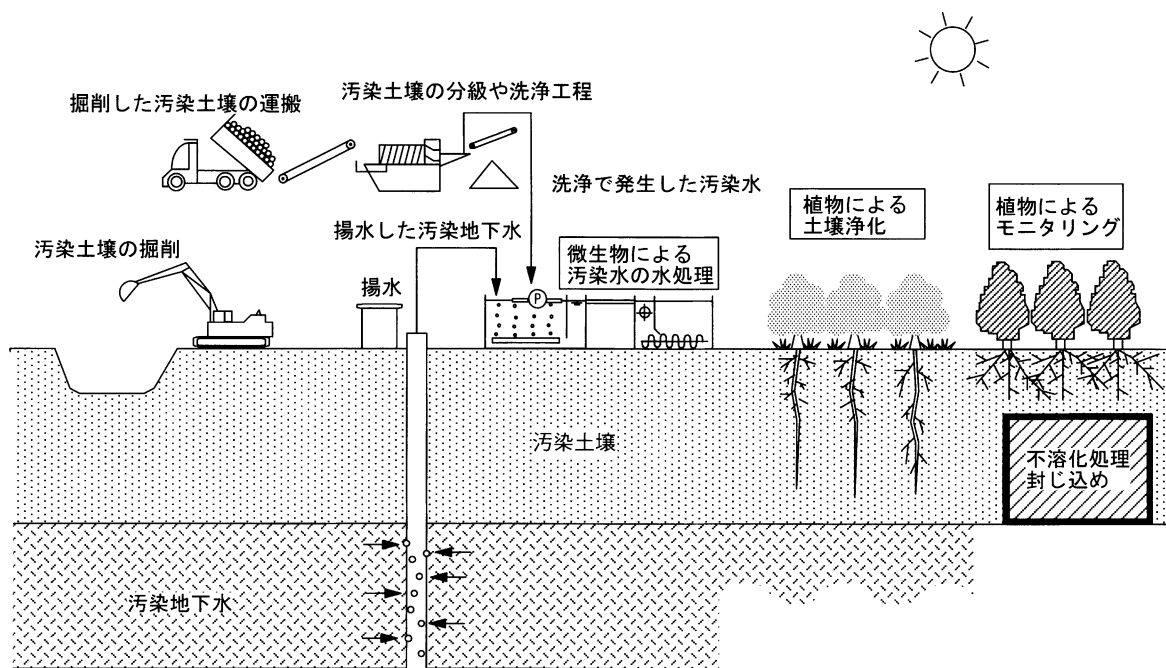


図5. 重金属汚染土壤へのバイオレメディエーションやファイトレメディエーションの適用概念図。



る必要性もないなど、エネルギー消費において非常に有利な面が指摘されている。

物理化学的処理が難しいセレンについての研究<sup>20)</sup>では、微生物が有する還元能を利用して有害かつ処理が困難なセレン酸イオン（六価）を処理しやすい亜セレン酸イオン（四価）、さらに元素状セレン（零価）に還元する手法について検討を行い、完全に還元できることを確認したことが示されている。

バイオソープションによる水処理では、汚染水中の重金属は、微生物の細胞外濃縮では微生物の生存率により影響され、細胞表面での吸着や複合体形成では微生物の生死に拘わらず機能し、細胞内濃縮の作用では微生物の増殖性が要求されるとされている<sup>21)</sup>。

微生物の有する酸化還元反応、生物学的吸着、代謝産物の作用などの様々な反応で、重金属の可溶性を高めること、逆に不動態を促進する微生物の機能を重金属の浄化、特に水質の浄化に利用することには、効果以外にもコストなど多くの利点がある。しかし、一方では、重金属濃度による微生物活性の阻害、微生物の残存率や増殖性の維持、代謝産物量の維持、複合汚染への適用性、水と菌体との効率的な分離方法、外来種の使用の是非など、今後検討しなければならない課題がある。

重金属汚染水のバイオレメディエーションについては非常に多くの研究がなされている割には、実用例が少なく、その理由として重金属の捕足能力が不十分なこと、設備設計やコスト計算を含めた工学的検討があまり行われていないこと、重金属汚染は一般に広範囲であるため一企業、一研究所レベルでの実証実験の対応ができないこと、などが指摘されている<sup>22)</sup>。バイオレメディエーションによる水処理技術開発への期待に応えるには、浄化技術としてのシステムに関する工学的な技術開発が最大の課題であると考えられる。

#### 4.2 土壌浄化におけるファイトレメディエーション技術開発の課題

植物による環境修復であるファイトレメディエーション (Phytoremediation) には、土壌から有害物質を除去し植物体中に濃縮するファイトエクストラクション (Phytoextraction) やファイトアキュミュレーション (Phytoaccumulation)、環境中の有害物質の移動性やバイオアベイラビリティを低下させ、地下水への移行や植物連鎖への浸入を防止するファイトスタビリゼーション (Phytostabilization)、有害物質の分解を行うファイトデグラデーション (Phytodegradation) やファイトトランスフォーメーション (Phytotransformation)、有害物質を代謝・同化・気化させるファイトボラタリゼーション (Phytovolatilization)、有害物質の根系で分解するライゾデグラデーション (Rhizodegradation)、有害物質を根系で捕捉するライゾフィルトレーション (Rhizofiltration) などが挙げられている。これらのファイトレメディエーションによる環境修復における機能や可能性あるいは課題については詳細な報告がなされている<sup>23)</sup>。

しかし、ファイトレメディエーションの環境修復作用や機能のうち、分解されない重金属については適用できるものが限定されると考えられる。実効あるものとしては、ファイトエクストラクションあるいはファイトアキ

ュミュレーションとファイトスタビリゼーションであると考えられる。これらの機能は原位置抽出技術に相当し、物理化学的な抽出では土壌の目詰まりの発生や、粘性土での適用が難しいなどの問題点があるが、植物本来の環境適合性により解決できる可能性がある。

重金属を吸い上げ濃縮する植物の例としてヒマワリ、アブラナ科植物、ゼラニウムが有名であるが、その他にも植物の種類は非常に多く、浄化に利用できる可能性は大きい。欧米での研究も盛んであるが、今のところ我が国では実際の土壌浄化に適用された例はほとんどないようである。土壌浄化にファイトレメディエーションを適用していく上には、重金属種毎の植物の探索、耐性、吸収量などの研究が重要であるが、植物そのものの利用法に関する技術開発が待ち望まれる。

実用的な面においては、浄化期間が長い年月を要する、土壌では 1 m 程度が、地下水では数 m が深層的な浄化限界である、気候あるいは水分条件が利用できる植物の成長を制限する、表面流去や侵食を防止するために土地の表面を改変する必要がある、有害物質がこれを含む植物を摂食した動物や昆虫を通して食物連鎖に入る可能性がある<sup>24)</sup>、などの検討すべき課題がある。

特に土壌汚染対策法では汚染土壌の浄化のみならず、土壌摂食や巻き上げられた土壌粒子の皮膚接触による人の健康被害を防止する目的から、舗装や覆土による飛散防止対策が掲げられている。したがって、図 5 に示したように、汚染土壌の表面が被覆される状況で如何に合理的に植物を利用した浄化を行っていくか、また被覆・封じ込めという機能も植物に持たせて浄化を進めることを可能にするかが今後の技術開発の課題であると考えられる。また、浄化に限らず、不溶化処理をして封じ込めた場合の漏洩モニタリング技術として重金属に対して特異な性質を持つ植物を利用するなどの適用場面も想定される。

将来的には既存の植物だけではなく、重金属の吸収・濃縮特性が大きい、収穫が容易、バイオマス量が大きい、環境適応性が良い、などの浄化用植物として高性能な植物が遺伝子組換え体として創出される可能性もある。これは、ファイトレメディエーションに限らずパブリックアクセプタンスとの関係が重要である。

ファイトレメディエーションによる浄化技術として実用化するには、植物に関する技術開発だけではなく、土壌化学、土壌物理学、地下水学、土質工学などの分野からの多面的な取組みが重要であることは言うまでもない。

#### 5. おわりに

以上述べてきたように、重金属汚染土壌の浄化は、重金属が分解できないという宿命を背負っているために、社会的にも経済的にも受け入れ易い技術が未整備である。バイオレメディエーションやファイトレメディエーションは自然浄化作用を高度利用する点で次世代の浄化技術として社会的にも受け入れ易い技術であると考えられる。しかし、個別の微生物や植物に関する研究も非常に重要であるが、研究レベルで終わらせることなく、それぞれの研究段階で実用化に向けた周辺技術を含めた幅広

い研究開発が重要である。浄化技術の研究には様々な分野の研究者・技術者が携わっているが、お互いの得意不得意とするところを如何に補完し合えるかが、今後の重金属汚染土壌のバイオテクノロジーによる浄化技術の発展の鍵になるであろう。

## 文 献

- 1) (社) 土壌環境センター. 2000. 我が国における土壌汚染対策費用の推定.
- 2) 中央環境審議会. 2002. 今後の土壌環境保全対策の在り方について (答申) 2002年 1月.
- 3) 土壌環境保全対策の制度の在り方に関する検討会. 2001. 土壌環境保全対策の制度の在り方について (中間取りまとめ) 2001年 9月.
- 4) 土壌の含有量リスク評価検討会. 2001. 土壌の直接摂取によるリスク評価等について2001年 8月.
- 5) 環境省報道発表資料. 2002. 土壌汚染対策法に係わる技術的事項について (答申) 2002年 9月20日.
- 6) 環境省環境管理局水環境部. 2002. 平成12年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要2002年 2月.
- 7) 藤原 靖. 2002. 浄化の実際—浄化技術の開発と浄化事業への適用—. 土壌の物理性 90: 33-37.
- 8) 藤原 靖, 深澤道子, 下村雅則, 根岸昌範. 2002. 透過性浄化壁による六価クロム汚染地下水の浄化. 土壌環境センター技術ニュース 4: 1-4.
- 9) 藤原 靖, 深澤道子. 2002. ヒ素汚染地下水への透過性浄化壁工法適用の際の反応剤について. 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (第 8 回講演集) 55-58.
- 10) 和田信一郎. 1999. 電気泳動・電気浸透を利用した汚染土の修復. 基礎工. 2: 26-27.
- 11) 島辺賢一郎. 1999. 原位置ガラス固化技術による汚染土壌の修復技術. 基礎工. 2: 57-59.
- 12) 島田曜輔, 本間 威, 藤原 靖. 2002. 水銀汚染土壌の間接熱脱着処理. 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (第 8 回講演集) 383-384.
- 13) 松山明人, 岡田和夫. 1999. 水銀汚染土壌の低温加熱による浄化処理技術. 基礎工. 2: 32-34.
- 14) 齋藤 章. 2001. 重金属汚染土壌の洗浄処理システム. 土壌環境センター技術ニュース. 2: 52-53.
- 15) Anderson, W.C., and P.E. Dec. 1993. Soil washing/Soil flushing. American Academy of Environmental Engineers 4.3-4.7.
- 16) 大山 将, 小山 孝, 徳永修三. 2001. ヒ素汚染土壌の特性と洗浄処理に関する基礎的検討. 第 4 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集 245-248.
- 17) 大山 将, 小山 孝. 2001. ヒ素汚染土壌のシュウ酸洗浄処理および安定化処理に関する検討. 第36回地盤工学研究発表会論文集 2581-2582.
- 18) 八木修身. バイオレメディエーションを用いた有害物質の浄化. 安全工学 41: 20-26.
- 19) 遠藤銀朗, 大竹久夫. 2002. 重金属の除去. 微生物利用の大展開. 今中忠行監修. エヌ・ティーエス 812-823.
- 20) 金属工業事業団技術開発部. 2000. 坑廃水対策技術. 平成12年度鉱害防止技術調査研究報告書 200-251.
- 21) Muraleedharan, T.R., Leela Iyengar, and C. Venkobachar. 1991. Biosorption: An attractive alternative for metal removal and recover. CURRENT SCIENCE. 61: 379-385.
- 22) 渡辺昌規. 2002. できそうでできない (?), 実用的重金属バイオレメディエーション. 生物工学. 80-5. 206-207.
- 23) 森川弘道, 高橋美佐, 河村義史. 2001. フェイトレメディエーションによる環境修復の新展開. 環境バイオテクノロジー学会誌. 1: 1-14.
- 24) Schwitzgebel, J.-P. 2001. Hype or Hope: The potential of phytoremediation as an emerging green technology. Remediation/Autumn: 64-78.