

講座

土壌汚染対策技術の現状と実例

4. 物理的な土壌汚染対策技術

浅田 素之 (あさだ もとゆき)

清水建設技術戦略室

大山 将 (おおやま しょう)

㈱鴻池組大阪本店 土木技術部

三浦 俊彦 (みうら としひこ)

㈱大林組技術研究所

江種 伸之 (えぐさ のぶゆき)

和歌山大学准教授 システム工学部

4.1 はじめに

本章では、3章で紹介された土壌汚染対策技術のうち、対策技術として採用されることが比較的多い、物理的な対策技術、すなわち、封じ込め・固化・不溶化技術、洗浄技術、地下水揚水、土壌ガス吸引技術の具体的内容について記述する。また、ブラウンフィールドに対する安価な浄化対策法として近年注目されている植物を用いたファイトレメディエーション技術を紹介する。

4.2 物理的な対策技術の具体的内容

4.2.1 封じ込めの具体的内容

(1) 封じ込めで考慮すべき要因

封じ込めは、汚染土壌を隔離して、土壌中の汚染物質が地下水経由または飛散により環境へ拡散しないように、地盤内で長年月にわたり安全に保管することを目的とした対策技術である。汚染土壌を原位置で封じ込める方法と、造成した構造物に掘削した汚染土壌を封じ込める方法がある。封じ込め方法および構造は、汚染土壌の性状および封じ込め場所の条件などに応じて、適切に実施することが重要である。

重金属の場合、鉛、水銀、カドミウム等は陽イオンとして、また六価クロムや砒素、セレン等は陰イオンとして水に溶解し、水の流れとともに拡散する。陽イオンは比較的土粒子に吸着されやすく拡散しにくい、陰イオンは吸着されにくく移動しやすい特徴を持つ。拡散する可能性のある汚染物質を封じ込める場合には、遮水性の確保と影響要因について、十分な配慮が必要となる。

図-4.1に、封じ込め構造の調査・検討項目を示す。構造物の強度・遮水性や変形追随性等の力学的性質に加えて、遮水構造の長期耐久性の検討が重要である。耐久性への影響要因として、浸出水水質やガス、微生物の作用等がある。特に、重金属の不溶化剤や、有機塩素化合物の分解資材を添加している場合、遮水構造物に与える影響の検討が必要である。また、長期的な遮水性を確保するため、遮水体そのものに吸着性能を持たせて、汚染物質の外部への拡散を抑止する技術も研究されている。

(2) 原位置封じ込め

原位置封じ込めは、汚染地盤を原位置で封じ込める方法である。この方法は、掘削搬出を行わない点で、工事

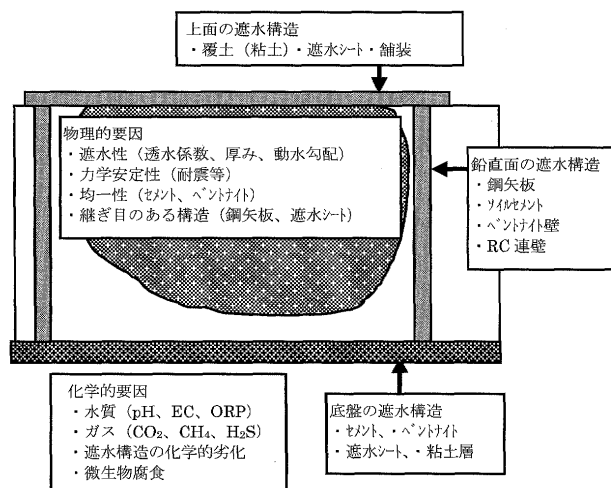


図-4.1 封じ込め構造の調査・検討項目

中の環境拡散リスクが小さく、コストが比較的安い反面、汚染物質が残るため、区域指定が解除されず、跡地利用の制約や土地の価値において不利になる場合がある。汚染土壌の下に不透水層(厚さ5m以上、かつ透水係数 10^{-7} m/s以下)が分布する場合に適用可能で、鉛直遮水壁をその遮水層まで根入れする。さらに、降雨等の浸透によって封じ込め内部の地下水位が上昇しないように、上面は厚さ10cm以上のコンクリート層、または厚さ3cm以上のアスファルト層を施し、必要に応じて土による覆いの措置を行う。

原位置封じ込めの鉛直遮水には、一般に従来の建設工事で実績のある土留め遮水壁が適用される。鉛直遮水壁は、厚さが5m以上でかつ透水係数が 10^{-7} m/s以下の地層と同等以上の遮水効果を持つ必要がある。表-4.1に、主な鉛直遮水工の種類と特徴を示す。鉛直遮水工は、施工性と遮水性能だけではなく、長期安定性や汚染物質との化学反応等についても考慮する必要がある。RC連続壁は、高強度の堅牢な止水壁を作ることができるが、一般に高価であるため施工例は少ない。また、底版の不透水層が一部欠損している場合には、水平方向にセメントベントナイトで底版に遮水層を造成する工法も開発されている。遮水壁を不透水層まで根入れせず、壁の配置や深さを適切な形状にして、封じ込め機能を確保することも研究されている¹⁾。

(3) 遮水工封じ込め

遮水工封じ込めは、汚染土壌を掘削除去し、別途造成した遮水構造の処分施設の中へ運搬し、封じ込める方法である。遮水施設は、汚染土壌対策現場内に設置される場合と、別の敷地に設置される場合がある。遮水工封じ込めは、原位置封じ込めと比較して、処分施設の底面に遮水層を容易に造成できることや、廃棄物処分場等で実績があり遮水性の信頼性が高い。

遮水工の構造は、①複合遮水工、②アスファルトコンクリート遮水工、③シート遮水工の三つに分類される。

- ① 複合遮水工 難透水性の粘性土で遮水層をつくり、その上に遮水シートを設置し、その上にシート保護マットを敷くものである。
- ② アスファルトコンクリート遮水工は、水密性アスファルトコンクリートによって遮水基盤層をつくり、その上にシートと保護マットを敷くものである。
- ③ シート遮水工は、二重シート構造によって遮水す

表—4.1 原位置封じ込めにおける鉛直遮水工

◎：有利、○：普通、△：要検討

種類	施工法の概要	遮水性能	礫質地盤への対応	深さ	コスト
鋼矢板土留壁	鋼矢板の継手部をかみ合わせながら地中に打設し、壁体を構築。	○	△	△	○
ソイルメント壁	多軸ミガーあるいはトレンチャー型の削孔攪拌機を用いて土中を掘削、セメントミルクと掘削土砂を混合、H鋼等を挿入して壁体を構築。	◎	○	○	○
ベントナイト壁	原位置の土とベントナイトを混合・攪拌、ベントナイトの膨潤性により難透水性遮水壁を構築。	◎	○	△	○
RC連続壁	ベントナイト安定液等で壁面崩壊を防ぎながら掘削し、鉄筋籠を挿入後、コンクリートを打設して壁体を構築。	◎	◎	◎	△

るものである。

表—4.2にそれぞれの遮水工の概要と特徴を示す。遮水施設は地下水位よりも上に設置されることが望ましく、上面からの降雨・流水等の浸入を防止するため、コンクリートやアスファルトにより覆う必要がある。

4.2.2 不溶化の具体的内容

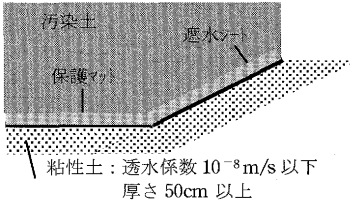
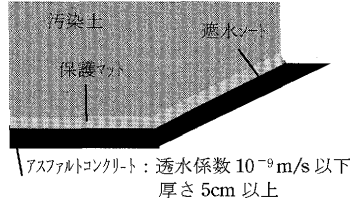
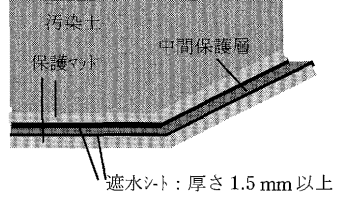
不溶化は、セメントや薬剤を汚染土に混合することによって、汚染土中の有害物質を難溶性の形態または毒性の低い形態へと物理・化学的に変化させて、地下水や大気への拡散を防ぐ方法である。不溶化は、低濃度のVOCsや油汚染土を対象とした研究例もある²⁾が、一般に重金属汚染土を対象とする。重金属汚染土の処理方法には、不溶化以外にも、掘削して最終処分場やセメント工場へ搬出する方法や、洗浄や加熱等により土中から除去する方法等があるが、不溶化はこれらの方法に比べて、汚染物質の除去はできないが、コストやエネルギーがかららない現実的な方法として、施工実績が多い。

土壌汚染対策法の中で、不溶化は、重金属等を含有する地下水等の摂取リスクに係る措置として規定されている。VOCや農薬等の処理方法としては認められていない。また、重金属等でも、含有量基準を超えている場合は、直接摂取リスクに対する措置(盛土や土壌入換え等)を行うことが必要であり、不溶化は適用できない。

不溶化処理が適用されるのは、重金属等の溶出量が基準値を超過した土壌を対象に、地下水等の摂取リスクを低減する場合である。

重金属等で第二溶出量基準以下の汚染土に対しては、「原位置不溶化」、または「不溶化埋戻し」の措置を行うことができる。「原位置不溶化」とは、汚染地盤に不溶化薬剤を注入または攪拌する方法である。「不溶化埋戻し」とは、汚染土を掘削し、地上のプラント等で不溶化薬剤と汚染土を混合し、原位置に埋戻す方法である。両

表—4.2 遮水工封じ込めの構造と特徴

		複合遮水工	アスファルトコンクリート遮水工	シート遮水工
概要図				
構造上の制約		平らで強固な基礎地盤が必要。地山からの湧水処理のため集配水管敷設が必要。	十分な転圧と地山からの湧水処理のため強固な破石基盤が必要。	下地は遮水シート保護のため、凸凹がないように仕上げる。
使用材料		土質材料とベントナイトの混合土、遮水シート、保護マット(遮光性不織布)。	アスファルトコンクリート(専用プラントまたは配合品)、遮水シート、保護マット(不織布)。	遮水シート、保護マット(遮光性不織布)、中間保護層(不織布など)。
遮水性	外力に対する耐久性	施工厚さが比較的大きいため、重機作業や汚染土投入時の損傷が発生しにくい。	材料自体の強度が大きく、重機作業や汚染土投入時の損傷が発生しにくい。	外力に対する耐久性が小さいため、下地及び上面に保護工が必要。
	変形追随性	ある程度の地盤沈下に対し、変形追随性を有する。	ゆっくりした変形には追随性があるが、大きな引張り・せん断には抵抗できない。	伸びが大きいため、下地地盤の変形に追随しやすい(局所的段差には対応できない)。
	遮水性確認	施工後の確認は困難。	電氣的漏洩検知システム等で確認可能。	電氣的漏洩検知システム等で確認可能。
施工性		大規模な処分場に適する。	平面施工が容易。	規模や形状に左右されにくい。

講 座

措置とも、不溶化材は、有害物質との反応を進めるために溶液状で添加することが多く、この場合地盤強度の低下を招くことがあるため、セメント等の固化材を併用するのが一般的である。そのため、不溶化材の選定には、不溶化剤と有害物質の反応だけではなく、土質改良用の固化材との反応も考慮しなければならない。また、不溶化剤やセメント系材料の混合により、土質や物質によっては、対象以外の重金属の溶出量が増大する例もあるため、事前の適用可能性試験の段階で注意が必要である。

一方、第二溶出量基準を超えた汚染土は、遮水構造へ封じ込めを行う前処理として、汚染土を不溶化して、第二溶出量基準に適合させる必要がある。封じ込めは、原位置封じ込めと遮水工封じ込めのどちらでも適用できる。

不溶化は汚染土中の重金属を除去せずに、不溶化された状態で残存させる技術であるため、指定区域の解除にはつながらない。また、不溶化措置後は、封じ込めの有無にかかわらず、不溶化処理土の周縁の地下水の下流側1箇所以上に観測井を設け、1年に4回以上地下水の水質を定期的に分析し、地下水基準に適合した状態が2年間以上継続する必要がある。

重金属等の不溶化材には、カルシウム系（セメントを含む）、マグネシウム系、鉄系、りん酸系、キレート剤、硫化物系、セリウム系等多くの種類がある。表—4.3に重金属の主な不溶化材を示す。不溶化の効果は、汚染土中の重金属の種類や濃度、存在形態だけではなく、土質や土のpH、酸化還元電位、共存物質、有機物含有量等が影響する。そのため、適用の際には、事前の適用可能性試験を実施して、不溶化剤を選定することが望ましい。また、一般に不溶化材は、汚染土中に存在する重金属量

よりも多く投入されるため、不溶化薬剤の毒性や地下水による拡散も十分な注意を必要とする。近年では、自然の粘土鉱物や無害な廃棄物材料を利用する不溶化材も提案されており^{3),4)}、不溶化処理時の環境影響をできるだけ抑えた手法が検討されるようになってきている。

4.2.3 洗浄技術の具体的内容

(1) 洗浄技術の種類

土壌洗浄は土壌から有害物質を分離・除去する技術で、①現地もしくは定置式のプラントで土壌を機械的に洗浄・分級する土壌洗浄法（Soil Washing）、②水などを地盤中に注入もしくは循環させ、有害物質を回収・除去する原位置フラッシング（Soil Flushing）、③有機溶媒等に有害物質を溶解させ抽出する溶媒抽出法（Solvent Extraction）の3種類がある。現在、多くの企業が土壌洗浄技術を独自に開発もしくは海外から技術導入し、実用化されている。

現場への適用が進められているプラントによる土壌洗浄法を中心に、その原理、適用性、処理方法について詳述する。

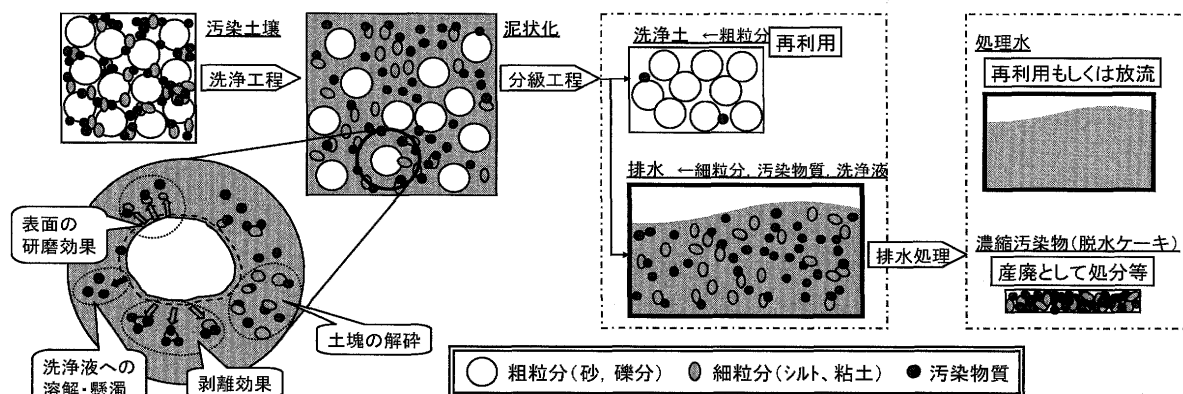
(2) 洗浄プラントによる土壌洗浄法

一般に、汚染物質は土粒子表面に多く存在し、相対的に比表面積の大きい細粒分の方が、粗粒分に比べて汚染物質の含有量が高くなる傾向がある。土壌洗浄法はこの特徴を利用しているもので、図—4.2に示すように、土壌に水などの洗浄液を加えて機械的に洗浄することで、①粗粒分表面に存在する汚染物質を剥離・洗浄、②団粒化した土粒子を解砕、③洗浄液中に汚染物質を溶解・懸濁、などの物理的・化学的作用により、有害物質を液相に移行させ、湿式分級により汚染濃度の高い細粒分（シルト、粘土分）を分離し、粗粒分を清浄土として回収する。分離された細粒分を含む洗浄排水（泥水）は、排水処理、脱水処理を経て、脱水ケーキ等の濃縮汚染物として排出される。濃縮汚染物は、産業廃棄物として処分するか、金属回収等の二次処理に回される。

洗浄プラントによる処理は湿式作業であり、粉塵の飛散や非意図的な化学物質の生成等による二次汚染が生じにくい。大量の処理が可能で、トロンメルや振動ふるい機などの汎用設備を組合せて現地でプラントを構築することも容易であるため、オンサイト処理に適している。

表—4.3 重金属の主な不溶化材

分類	重金属等	不溶化材
陽イオン	鉛、カドミウム、水銀	カルシウム系（セメントを含む） 硫化物系、キレート剤、リン酸系、
陰イオン	砒素、セレン	カルシウム系（セメントを含む） 鉄系、マグネシウム系、セリウム系
	シアノ	鉄系、マグネシウム系
	六価クロム	鉄系（還元）
	フッ素、ホウ素	カルシウム系（セメントを含む） マグネシウム系、セリウム系



図—4.2 土壌洗浄法の概念図

また、土壤洗浄法単独では浄化困難な場合でも、他の浄化技術の前処理工法としても有効な技術である。

土壤洗浄法は、細粒分が少ない土壌ほど、浄化土壌の回収率が高く、汚染土量を大幅に減容化できるため、浄化コストの低減につながる。一般的には、細粒分が50%未満の土壌が適用限界といわれ⁵⁾、経済面から勘案すると細粒分30%未満の土壌が適している。

土壌中の有機物量も浄化性能に大きく影響する。ピートやその他の天然の有機物を多く含む高有機質土の場合、汚染物質が吸着しやすく、有機物がフルイの目詰まりや比重分離の妨げになるなど分級性能に支障をきたす場合がある。

洗浄プラントによる土壤洗浄法は、重金属等汚染や、油類などの有機化合物汚染への適用例が多く、重金属等と油の複合汚染、農薬、PCB、ダイオキシン類などにも適用可能である。

重金属等の汚染は、吸着、錯体形成、共沈等により、土粒子表面に多く存在する場合が多く、細かい粒子ほど含有量が高くなる場合が多いため、土壤洗浄法が最も適しているとされる。しかし、粒径ごとに明確な濃度差が認められない場合や、特定の粒径に特異的に汚染が存在する場合もある。重金属等は土壌中で様々な形態で存在するため、事前に①粒径別濃度、②吸着形態、③化学的形態（錯体、溶解性等）を把握することが望ましい。また、洗浄が可能か否かは適用性確認試験で確認する必要がある。

燃料油や機械油などによる油汚染土壌への土壤洗浄法の適用性は、濃度だけでなく、油種や土壌中での状態に影響される。ガソリン、軽油などの低粘性の油であれば土壤洗浄法の適用性は高いが、C重油、潤滑油、タール等の粘性の高い油汚染の場合では、通常の洗浄・分級方法では浄化が困難なため、溶媒や界面活性剤などの薬剤の使用^{6),7)}、土粒子表面を研磨する作用のある特殊洗浄機の使用⁸⁾、アルカリ水と微細気泡により、吸着した油を土粒子から分離する気泡連行法⁹⁾などの土粒子に強固に吸着した油を分離する方法などの工夫が必要になる。

油膜・油臭の原因にもなる軽質成分の洗浄土への残留、土粒子内に油が含浸して浄化が困難、水と油が乳化（エマルジョン化）し、油水分離が困難などの問題が生じる場合がある。この場合には、分級方法、洗浄土の水切りや分離油の回収方法など設備面の最適化や補助工法の併用などを検討する必要がある。最近では、前処理として

土壤洗浄を行った後、バイオ処理等により残留した油分を分解するなど、他工法と組合せて浄化する事例が見られる。

掘削を伴う土壤浄化工事は、工場等の構造物の解体後に行う場合が多いほか、過去の不適切な廃棄物の取扱いなどにより、土壌中に、コンクリートガラ等のがれき類、鉄筋等の鉄鋼製品、ガラス屑、鉄鋼スラグや石炭ガラなどの残さ、などの異物が混入している場合がある。

オーバーサイズのがれき類や鉄鋼製品は、乾式分級や磁力選別などで事前に分別することが可能であるが、細かく粉碎されたがれき類などの異物は分別が困難であり、一部の異物が洗浄工程に入ってしまうことになる。異物の混入した洗浄土は、土壌として扱われない場合があるので留意が必要である。

(3) 土壤洗浄処理の流れ

図-4.3に土壤洗浄法の処理フローの例を示す。基本的な流れは、前処理、洗浄工程、分級工程の順で進む（洗浄と分級を同じ工程で行う場合もある）。分級後の排水は排水処理され、処理水は洗浄液として再利用もしくは放流され、凝集沈殿により生じたスラッジは脱水処理し、脱水ケーキ状で産業廃棄物として排出することになる。

a) 前処理 効率的な土壤洗浄処理を行うためには、粒度調整が必要となる。土壤洗浄の対象となる土壌は、おおむね100 mm以下で、オーバーサイズは別途処分するか、粉碎して洗浄処理を行う。廃棄物等の異物が混入している場合、この段階で極力分別しておくことが望ましい。前処理に使用する設備としては、振動スクリーン、グリズリ、多段式乾式フルイ機、磁力選別機などがある。

b) 洗浄工程 洗浄工程では、汚染土壌に水などの洗浄液を添加し、回転や振動などの作用を加えることで、土壌の解砕および洗浄を行う。細粒分の少ない砂礫など単純な分級処理で洗浄できる土壌の場合は、湿式振動フルイやトロンメルなどの汎用的な機械を使用することができる。粘土等が礫分に強固に付着していたり、土塊が混合しているには、ドラムウォッシャーなどの強い攪拌力を加えることのできる機械を使用して解砕する必要がある。土粒子が高粘性油分でコーティングされている場合や、粗粒分の表面に重金属が強固に吸着している場合など、解砕するだけでは洗浄が困難な場合は、土粒子表面を研磨する作用のある骨材研磨機などの特殊洗浄機を使用するなどして対処することができる¹⁰⁾。

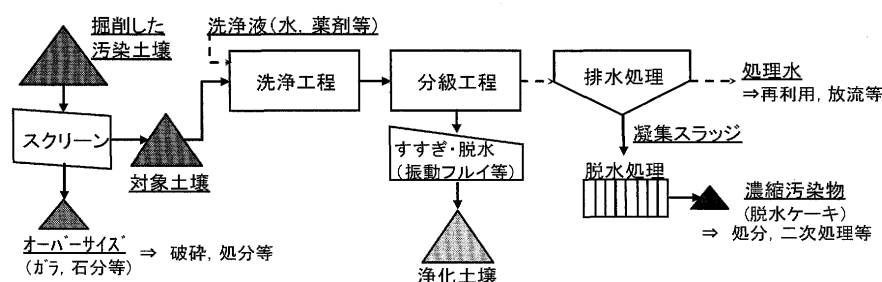


図-4.3 土壤洗浄法の処理フロー例

講 座

c) 分級工程 洗浄工程で解砕されて泥状になった土壌は、分級工程で洗浄土となる粗粒分と、汚染物質の濃縮した細粒分を含む排水（泥水）とに分離される。分級は湿式振動フルイ機、スパイラル分級機、比重分離装置、サイクロン、遠心分離機などを単独もしくは組み合わせて使用する。土壌と重金属の分離を目的として、金属精錬などに用いられる浮遊選鉱法（泡沫分離）を用いる場合もある。

分級工程で細粒分の分別精度が悪いと、砂による配管詰まり、排水処理への負荷の増大、脱水ケーキ量の増加などの支障を招く恐れがある。また、水切りや濯ぎが不十分な場合、汚染物質を含んだ水が間隙水として洗浄土に残留して品質を低下させる。対象となる土壌の性質に合わせて、適切な分級方法を選定するとともに、濯ぎを十分に行うことが必要である。しかし、過度に濯ぎを行うと排水量が増大するため、適用性確認試験や試験施工等で適切な水量等を検討し、プラントの設計を行うことが望ましい。

d) 排水処理 排水処理は、凝集処理、沈降分離、処理水の pH 調整、沈降スラッジの脱水処理が基本的な流れとなる。凝集剤の選定、キレートや活性炭吸着、油水分離などの設備付加など、排水に含まれる有害物質に合わせて適切な処理方法を選択する必要がある。最終的に排出される脱水ケーキは汚染物質を高濃度に含むものであるため、産業廃棄物として適切に処分することが必要である。油汚染土壌の処理では、脱水ケーキを焼却処分する場合もある。

土壌洗浄法では大量の水を使用するため、大規模な排水処理設備が必要となり、洗浄プラントの中で最も敷地を占有する設備の一つである。オンサイト処理する場合には、現地の土地利用条件を勘案した上で、設備を設計することになるが、洗浄プラントは屋外に設置される場合が多く、洗浄ヤード内の雨水は基本的にはそのまま放流はできない。また、洗浄土の品質保持のために使用水量が増加する場合もあるため、排水処理能力は 1 日の使用水量に降雨や水量増大の影響を加味した余裕を持った能力にする必要がある。

(4) 実施例¹¹⁾

表—4.4 に、ダイオキシン類汚染土壌に対して土壌洗浄法を適用した事例の、洗浄土、分離水、脱水ケーキのダイオキシン類濃度を示す。

焼却灰由来、農業由来、PCB 由来のダイオキシン類汚染土壌に対して、質量比で土 1 に対して合計 5 の水を加え、土をスラリー状とし、4～5 回の洗浄を実施した。洗浄処理を数段に分けて実施することにより、洗浄土の回収率は下がるものの、1 400～9 000 pg-TEQ/l の汚染土壌を、8.6～310 pg-TEQ/l（環境基準 1 000 pg-TEQ/l）に浄化できた。ダイオキシン類は脱水ケーキに濃縮する。また、ダイオキシン類は土粒子に強く吸着するため、分離水のダイオキシン類濃度は 2 pg/l 程度に抑えられる。なお、表には示さないが洗浄土の回収率は 56～71% であった。ダイオキシン類汚染土壌は、重

表—4.4 ダイオキシン類汚染土壌の洗浄処理結果

汚染土壌 pg-TEQ / g	洗浄土 pg-TEQ / g	分離水 pg-TEQ /	脱水ケーキ pg-TEQ / g
1,400	8.6	2.0	2,500
1,800	75	2.0	7,500
9,000	310	2.3	19,000

注； TEQ 毒性等量（Toxicity Equivalency Quantity）

ダイオキシン類異性体の毒性を、2,3,7,8-テトラクロロジベンゾ-1,4-ジオキシンの毒性を基に合算・表記した量。

金属汚染土壌に比べて、洗浄処理しづらい汚染物質であるが、洗浄処理により確実に浄化費用を低減することができる。

4.2.4 地下水揚水と土壌ガス吸引の具体的内容

(1) 地下水揚水

地下水揚水処理技術は、地下水汚染の汎用的な物理対策技術である。無機化合物、有機化合物どちらにも対応可能であるが、対象物質は主に揮発性有機塩素化合物を代表とする DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquid) である。

地下水あるいは汚染物質原液をポンプあるいはブローで汲み上げ、曝気処理等の水処理装置により地下水中に溶け込んだ汚染物質をガス化・分離した後、ガス処理を行って処理する技術である。地下水浄化技術として実績が多く、土壌ガス吸引法と併用されることも多い。また、汚染の拡散を防ぐバリア井戸として、汚染域の下流側で用いられることもある。

設計上考慮しなければならない点は、十分な透水性があり、地下水を揚水できる地盤かどうかという点である。地下水位低下工法は、通常透水係数が 10^{-6} m/s 以上の地盤に適用され¹²⁾、基本的に砂層が対象となる。そのため、地下水揚水処理技術も、 10^{-6} m/s 以上の地盤に適用できる。透水係数が 10^{-6} m/s 以下の難透水性地盤については、集水能力が著しく減少し、浄化効率が減少する。また、シルト、粘土層には、地下水汚染で問題となる揮発性有機塩素化合物が吸着、浸透しやすく、いったんシルト、粘土層に吸着された VOC は、地下水を揚水しても地盤から除去することが困難となる。したがって、シルト、粘土層が多い地盤条件では、掘削除去、あるいは原位置浄化技術等を検討すべきである。

また、我が国では、地下水の注入に関して非常に厳しい基準が定められており、いったん揚水した地下水を水処理装置で浄化した上で放流することが必要である。処理水量を減少させるため、遮水壁等による遮水工法と併用される場合も多い。遮水壁を併用することで、浄化目的を達するために揚水しなければならない地下水量を低減することができる。

地下水揚水による浄化対策では、難透水性地盤がどの深度にあるかを知ることが重要となる。DNAPL は水より比重が大きく（例えばトリクロロエチレンの密度は 1.46 g/cm^3 ）、地下水面を通過して、難透水層にまで達し、滞留、浸透するため、スクリーンを難透水層の直上

に設置することで回収効率を高められるためである。設計に際しては、難透水層の上部までスクリーンを設置できるよう考慮する。

地下水揚水処理工法では、ウェルポイント工法とディープウェル工法が利用できる。ディープウェル工法は、掘削部の内側ないし外側に深井戸（ディープウェル）を設置し、ウェルに流入する地下水を水中ポンプにより排水する工法で、特に、透水性の良い地盤（通常、砂地盤～礫地盤）の地下水処理に有効である。ウェルポイント工法は、長さ約0.7～1 m、径6 cm程度のストレーナーをもつ吸水管に径約4 cmの揚水管を取り付け、これを0.7～2 mピッチで帯水層に打設してヘッダーパイプを通じ真空度をかけて、地下水を吸引する工法である。透水係数の比較的大きい砂層から小さい砂質シルト層程度までの地盤に適用できる。1本あたりの揚水量は土質によるが、数l～数十l/minである。理論的にはヘッダーパイプから約10 mの水位降下が得られるが、実際の可能水位降下は4～6 mである¹²⁾。そのため、ウェルポイントの適用は、汚染範囲が4～6 mの地盤条件に限られる。ウェルポイントは、土壌ガス吸引法へも適用可能である。

(2) 土壌ガス吸引

土壌ガス吸引法は、不飽和帯に設置した井戸（以下、吸引井）から真空ポンプやブロアなどを使用して土壌ガスを吸引し、土壌ガスに含まれる揮発性の汚染物質を回収する技術である。土壌ガスを吸引することで不飽和帯に負圧が発生するので、汚染物質原液、土粒子に吸着した状態、土中水に溶存した状態の汚染物質の揮発が進む。揮発をより進めるために、地盤に空気や水蒸気を送気したり、地盤をヒーターで加熱したりすることもある。汚染が帯水層までおよんでいる場合は、吸引井戸内部に揚水ポンプを設置し、地下水の揚水も併せて行う二重抽出法が適用される。

土壌ガス吸引法では、汚染物質の揮発速度を高めれば、効率的になる。そのためには、地盤に空気を吹き込んで汚染物質に接する空気量を増やすことが考えられる（エアスパーキング）。また、汚染物質の蒸気圧やヘンリー定数は温度とともに高くなるので、地盤の温度を上げれば汚染物質の揮発量が増える。このため、地盤に水蒸気を吹き込む、地盤をヒーターで加熱することが行われる。

土壌ガス吸引法のシステム設計では、吸引井配置、吸引量、吸引圧を決める。このため、通常は透気試験を実施して、地盤の透気係数や土壌ガス吸引時の影響半径を算定する。土壌ガス吸引の影響半径は地質毎に異なり、シルトで6 m未満、火山灰質粘性土で7～12 m、砂質土で8～20 m、礫質土で30～40 mという報告がある¹³⁾。

透気試験の結果と汚染分布をもとに、吸引井の配置や運転吸引圧、吸引量などの設計を行う。吸引井は、原則として土壌ガス濃度が最も高濃度の地点またはその近傍に設置する。ただし、1本の吸引井で対象範囲をカバーできない場合には、影響半径を考慮して複数の吸引井を設ける。吸引井のスクリーンは単一層に設置し、透気性

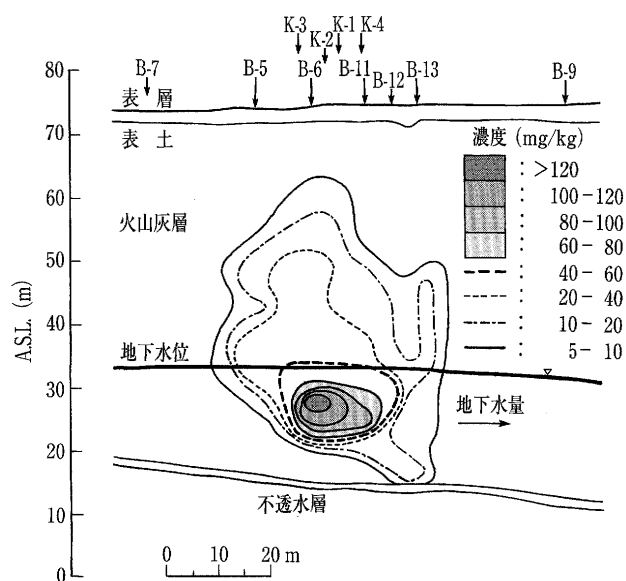
の異なる層にまたがらないようにすることが重要である。また、不飽和帯での負圧発生に伴う地下水面の上昇を抑えるために、スクリーンを地下水面から離れたほうがよい。地下水面付近に汚染がある場合には、地下水面近くにスクリーンを設けなければならないが、この場合には地下水揚水を同時に行って、水位を下げる必要がある。また、地表面付近に汚染がある場合や地表面を通した大気流入で影響半径が小さくなってしまう場合には、地表面を被覆しなければならない。

(3) 実施例¹⁴⁾

対象地域は、標高80 m程度の台地とその南北に分布する標高20～30 mの沖積低地から構成されている。台地部では、地表面から2～3 mまでは黒ぼくと赤ぼくのローム層、その下位には火砕流堆積物が50 m以上の厚さで分布している。この堆積物は空隙の多いほぼ均質な地層であり、不圧地下水が形成されている。地下水面は地表面下約40 mの深さにある。図—4.4に、トリクロロエチレン含有量の鉛直分布を示す。含有量最大値は地表面下46 m地点の138 mg/kgに達し、地下水濃度も同じ地点で294 mg/lを観測した。

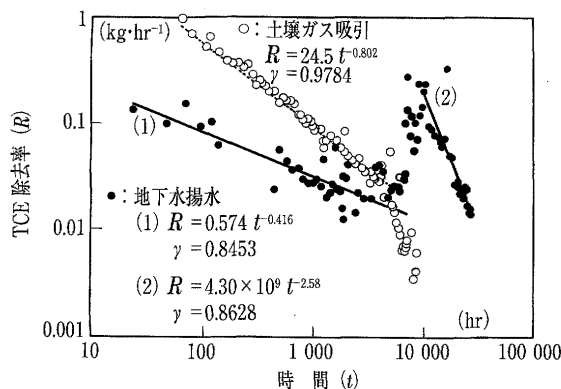
現場では、吸引井が汚染源のほぼ中心付近に2本と汚染源の上下流部にそれぞれ1本の計4本設置された。不飽和帯と飽和帯の両方が汚染されていたので、二重抽出法が採用され、スクリーンは地表面下31～60 mに設置された。土壌ガス吸引の影響半径は10～11 mであり、上下流部に設置された2本の吸引井の間隔が13.8 mであることから、4本の吸引井による総影響範囲は33.8 mに及び、10 mg/kgを超える汚染範囲（約40 m）の80%以上をカバーしている。

土壌ガス吸引圧は0.6気圧であり、定常状態の吸引ガス流量はおおよそ100 l/minであった。地下水揚水量は、高濃度の汚染地下水が回収される開始当初は曝気処理装置の能力を考慮して4本で合計2～3 m³/hrの汲み上げを行った。その後は合計16.5 m³/hrに上げ、全体的に



図—4.4 土中トリクロロエチレン含有量¹⁴⁾

講 座



図—4.5 土中ガス吸引と地下水揚水の除去率の時間変化¹⁴⁾

地下水濃度が低下してからは合計28.9 m³/hrにした。

図—4.5に土中ガス吸引と地下水揚水による汚染物質除去率の時間変化を示す。地下水揚水(●)に関しては、7000時間以降の揚水量増加の影響で除去率が一旦上がるが、ともに浄化が進むにつれて除去効率が落ちている様子が理解できる。

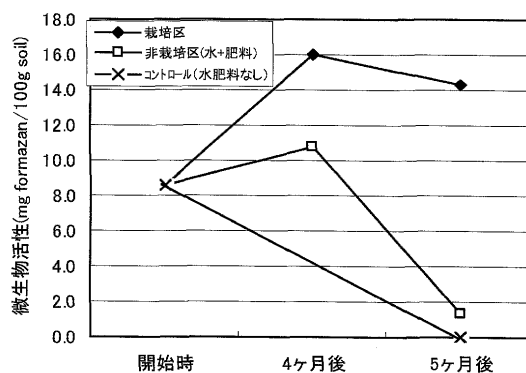
いずれのガス吸引井からも吸引初期には数千 ppmV のトリクロロエチレンが除去されていた。濃度の将来予測を行ったところ、5000 ppmV から500 ppmV まで1桁減少するのに101日、さらに500 ppmV から50 ppmV までは2420日かかると見積もられた。

揚水量は前述のように7060時間後と10100時間後に2回増やした。7000時間後を過ぎるあたりから濃度の減少率が大きくなっている。地下水中のトリクロロエチレンについても、土中ガスと同じように濃度の将来予測を行った。濃度減少率が増す10100時間以降のデータを使い、地下水濃度が環境基準値の0.03 mg/lにまで減少するのに要する時間を求めると31.3年となった。

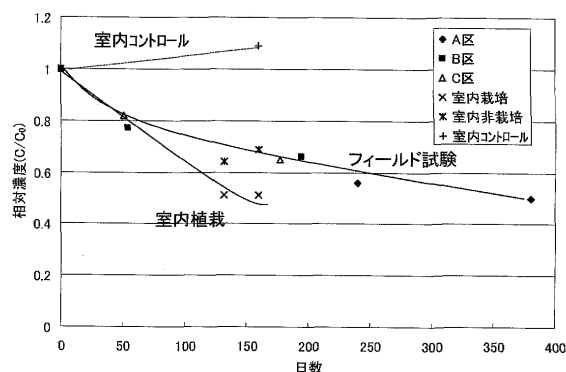
4.3 ファイトレメディエーション

ファイトレメディエーションは、草本類や木本類の植物、根圏微生物を用いて、土壌、汚泥、底泥、地下水等の汚染物質を固定化、あるいは低減する方法である。ランドファーマーミング(畝を作って耕耘し、微生物活性を高めて浄化する方法)等、これまでのバイオレメディエーションは、物理化学的な浄化技術よりは低コストであるものの、最低限の土壌の掘削や定期的な重機による耕耘が必要とされる。これに対してファイトレメディエーションは最低限の散水、施肥を実施すれば良いため、ランドファーマーミングより低コストで実施できる可能性がある。また基本的に掘削や耕耘の必要がないために、ランドファーマーミングと比べてさらに近隣環境に与える影響は低く、また浄化中の景観も良い。これらのメリットは、油汚染によりブラウンフィールド化されている土地に対する対策に、有効な浄化技術であるといえる。

一方、植物を利用するために、浄化期間はバイオレメディエーションよりも長くなり、また植物の根が届く範囲が浄化範囲であると考えられている。そのためファイトレメディエーションを適用するには、その対象となる



図—4.6 植物の存在による土壌微生物活性の違い



図—4.7 現場実証試験での油分濃度の推移

土地の汚染状況や拡散防止対策、今後の利用予定等を考慮しなければならない。

ファイトレメディエーションは、その地域の気候に合った植物で、更に汚染油種や濃度に耐え得る種類を選択する必要がある。また、できるだけ根系が広く深く生育する種が有利と考えられる。そのため浄化を検討する際には、そのサイト周辺の植生調査を行い、適用可能な植物を検索することが望ましい。

油汚染土壌の浄化は、植物自体の油分吸収よりも、その植物根圏周辺に生息する微生物の働きが大きいといわれている。植物の根圏からの分泌物や、根が張ることによる通気性の向上が土壌微生物の活性を上げている。

図—4.6は、ポット(植木鉢)を用いた試験における土壌中の微生物活性を測定した結果である。植物を植えていない系と比較すると、植物が存在することにより土壌中の微生物活性が顕著に上昇していることが確認された¹⁵⁾。

ファイトレメディエーションは、浄化深度が根長に依存し年単位の工期がかかるうえ、気候の影響を受けやすく浄化効果を保証しにくい。そのため、油汚染に対する日本での浄化工事としての適用例の報告はまだないが、現場での試験は精力的に行われている。

現場試験結果の一例を図—4.7に示した。試験はA、B、Cの3区で実施され、対象は重質油である。ファイトレメディエーションを適用すると、植物を生育させた区画の油分濃度が低下している。浄化の期間は通常のパイオレメディエーションよりも非常に長くかかっている。しかし、植物を生育させることにより約1年で重質油

が半減した事実は、ブラウンフィールドのような用途の限られる土地には有効な技術であるといえる。

4.4 ま と め

土壌汚染対策法が改正され、土壌掘削除去よりも、原位置浄化対策が重視されつつある。また、対策費用が土地の評価額より高くなり、資産価値がつかず、ブラウンフィールド化している事例が多くなりつつある。本章で紹介した物理的対策、および消極的な浄化対策を検討する事例の増えることが予想される。リスクとコストを適切にバランスさせ、浄化対策を進めることが、技術者には、より一層求められることになるだろう。

参 考 文 献

- 1) 三木博史・古本一司・桑原正彦・原田健二・吉原重紀・久保正顕・森田博夫・岡本真作・山本親志：不透水層に根入れしない鉛直遮水壁の封じ込め効果に関する検討，第3回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 277～282, 1999.
- 2) 保賀康史・藤長愛一郎・奥村正孝：油分含有汚染土壌の不溶化処理に関する基礎的検討，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，Vol. 54, pp. 532～533, 1999.
- 3) 湊 秀雄・和田信彦・森本辰雄：天然鉱物資源による重金属類の不溶化2—原理と理論—，*Proceedings of the 10th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, pp. 245～248, 2000.
- 4) 古根川竜夫・吉田幸平・白石 勝：スベント・カーバイドによる六価クロム不溶化処理，第40回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2601～2602, 2005.
- 5) 大北康治・伊藤克彦・鈴木重孝・久保弘明：土壌洗浄法の概要とその適用について，廃棄物学会誌，Vol. 5, No. 1, pp. 79～86, 1994.
- 6) 漆原知則・峠 和男・誓山 真・川内 武・田口信子：油汚染土の有機溶媒洗浄に関する基礎実験，第5回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 221～224, 1997.
- 7) 近藤健介・古屋 聡・松尾 淳・小杉剛史：分級・洗浄処理の高機能化—油汚染土壌への適用例—，第10回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 140～143 2004.
- 8) 渡辺輝文・川口謙治・西村良司・伊藤 浩：磨砕処理による油汚染土壌の浄化，第8回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 213～216, 2002.
- 9) 今立文雄・横山 満・川端淳一・岩本晃敏・福井鉄平：環境負荷低減型油汚染土壌の浄化技術—連続式気泡連行装置の開発—，第8回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 327～328, 2002.
- 10) 笹本 譲・上田進一・有田昌義：高性能土壌洗浄システムの開発と適用，土壌環境センター技術ニュース，No. 4, pp. 41～42, 2002.
- 11) 飯塚芳雄・芹澤貞美・相澤 渉・八巻 淳：ダイオキシン類汚染土壌の洗浄浄化の検討，第13回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp. 237～240, 2007.
- 12) 土質工学会：根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—，現場技術者のための土と基礎シリーズ19, 1991.
- 13) 平田健正・前川統一郎監修：土壌・地下水汚染の原位置浄化技術，シーエムシー出版，2004.
- 14) 平田健正・江種伸之・中杉修身・石坂信也：土壌ガス吸引と地下水揚水を併用した地下環境汚染の修復，土木学会環境工学研究論文集，33, pp. 47～55, 1996.
- 15) 浅田素之・田崎雅晴・米村惣太郎・渡辺泰一郎：ファイトレメディエーションによる油汚染土壌の浄化試験，第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，2007.