

浄化の実際

—浄化技術の開発と浄化事業への適用—

藤原 靖*

Practical Remediation Technology

— Development and Application Status of Remediation Technology —

Yasushi FUJIWARA*

Technology Center, Taisei Corporation 344-1, Nase-cho, Totsuka-ku, Yokohama 245-0051

1. はじめに

浄化技術は、広義には汚染の発見とその状態の把握、適切な浄化手法の検討と浄化過程の予測、浄化作業の実施とモニタリングという一連の浄化事業全体にかかわる技術の全てが含まれる。この一連の流れでの浄化技術は、1) 汚染調査技術、2) 汚染評価技術、3) 汚染対策技術に分けることができる。以下にこれらの各技術について概説する。

2. 汚染調査技術

2.1 汚染調査の基本方針

汚染調査・浄化対策の基本方針は、調査対象・目的によって異なる。平成11年1月に環境省が策定した“土壌・地下水汚染に係わる調査・対策指針”においても、以下に示す3つのケースについて、それぞれ調査の基本方針が設定されている。

- a) 地下水汚染の発見を契機とする場合
(地下水汚染契機型)
 - ・行政が保有するモニタリング井戸や水源井戸が中心
- b) 土壌・地下水汚染の発見を契機とする場合
(汚染発見型)
 - ・汚染原因がある程度判明
 - ・使用場所や廃棄場所等の追跡、汚染機構の仮説、汚染源の三次元分布把握
- c) 現況把握を契機とする場合
(現況把握型)
 - ・汚染が無いことの証明
 - ・使用履歴等での汚染可能性の仮説、概況調査

2.2 調査技術

汚染調査は、地下水、土質、地質調査などの地盤調査と汚染物質の濃度調査を合わせて実施する。地下水調査は、汚染物質の分布や浄化対策の立案にあたって非常に重要である。特に地下水の流向や流速が問題となる場合が多く、高度な調査・評価技術と経験・判断を必要とする。したがって、調査費用も多額になる場合が多いため、調査結果を逐次判断しながら、経験を踏まえて効率的な調査がなされている。調査技術には以下のようなものがある。

- a) 表層ガス調査 (揮発性有機化合物, 検知管, ポータブルガスクロなど)
- b) 表層土壌調査 (概況調査, 5地点混合法, 現地簡易分析および室内分析など)
- c) ボーリング調査 (土層構成, 汚染深度, 汚染物質に応じた機器・方式など)

3. 汚染評価技術

汚染評価技術は、調査結果を踏まえ特定のサイトでの1) 汚染機構の把握、2) 汚染物質の存在量の把握、3) 汚染の進行および対策後の浄化効果の予測、4) リスク評価に関係する技術である。

土壌中・地下水中に汚染物質がどのような形態で存在しているのかを把握することが重要である。酸化還元電位、pH、共存物質、粘土鉱物の種類、有機物等により、汚染物質、特に重金属は様々な化学形態や存在形態をとるため、間隙水や地下水への溶出量が異なる。揮発性有機化合物においても、分解程度や中間生成物などを評価する上で重要な情報となる。わが国の環境基準はすべて溶出試験の結果によって定められており、総体としては存在形態を反映した評価と考えられる。

*大成建設株式会社技術センター 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1
キーワード: 浄化技術, 土壌汚染, 地下水汚染, 重金属, 揮発性有機化合物

上述のような土壌の物理・化学的な情報のみならず、土壌生物学的な情報ならびに地下水の水文学的な情報を得ることで、現在の濃度分布を通して汚染機構を把握する。さらに、将来どのように汚染範囲が変化していくのか、あるいは各種の対策を適用した場合に、どのように浄化が進展していくのかの予測が、汚染対策技術の選定と適用方法を検討する際に非常に重要で、浄化事業の成功の鍵を握っている。

リスク評価は、人への危険度と被害の程度から算定する。わが国では、最近、ダイオキシン類対策特別措置法での汚染土壌摂取を経路とした土壌環境基準が設定された経緯を踏まえ、土壌の含有量リスクの評価が検討され、要措置レベルが算定されている。すべての汚染サイトを環境基準以下に浄化することは不可能であり、浄化の優先順位を決定するためにもリスク評価のような考え方も必要である。

4. 汚染対策技術

我が国においても最近相次いで土壌・地下水関連の法律・基準が整備されつつあり「土壌・地下水汚染に係わる調査・対策指針」が策定された。それに呼応し、企業のISO14000等の国際環境基準への適合などの関係から、汚染サイトでの浄化対策の実施が増加してきている。以下に重金属と揮発性有機化合物に分けて、汚染対策技術について概説する。

4.1 重金属類の汚染対策技術

重金属は、環境中での移動性が比較的低いため、固化・不溶化後に遮水施設に封じ込める方法が一般的に行われて来た。しかし、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、土地の有効利用が制限されること、不動産価値が低いことなどから、今

後は汚染物質を除去・高度安定化する対策技術が望まれている。

一方、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無いために、汚染土を掘削・搬出して良質土と土壌置換を行う場合が多い。特に重金属汚染の場合、汚染物質の除去による浄化が行われることは非常に少ない。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。浄化土壌の再利用、社会経済的に合理的な評価がなされれば、汚染土壌の対策事業が進展していくものと考えられる。

重金属類の土壌・地下水汚染対策技術の種類を、図1に示した。対策技術には封じ込め対策と浄化対策（汚染物質除去や高度安定化技術）がある。ここでは、掘削・土壌置換による汚染土壌の除去は除外している。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合わせて実施されることが多い。

4.2 重金属類の封じ込め対策技術

(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形化し、物理化学的に汚染物質を安定化するものである。移動性の大きな汚染物質を扱う場合には、不溶化技術などと組み合わせることが必要であるが、重金属等の汚染物質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、ポゾラン系、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。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り、遮水工等で管理する必要がある。

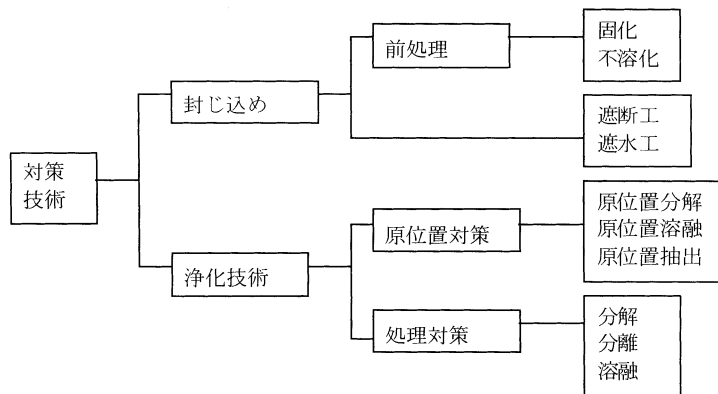


図-1 重金属類の浄化対策技術

(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。固化と同様に良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。

(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あるいはスラリーウォール等で不透水層を構築して遮水する遮水型がある。

4.3 重金属類の浄化対策技術

浄化対策には、原位置対策と処理対策がある。原位置対策は汚染地盤中で汚染地下水あるいは汚染土壌の浄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。処理対策は掘削した土壌を地上の浄化設備を用いて浄化するもので、掘削土を対象とし、オンサイト浄化とも呼ばれる。

4.3.1 原位置対策技術

重金属類の場合には、後述する揮発性有機化合物と異なり、シアン、硝酸性窒素、農薬など以外は分解できない。そのため、実際に適用されている原位置対策法は非常に少なく、実際には汚染地下水の揚水・水処理が一般的である。

最近実用化されているもので、原位置対策で汚染地下水の重金属を安定化、あるいは硝酸性窒素を分解・脱窒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下流側へ設け、浄化壁を通過した汚染地下水を浄化し、下流側の浄化を図る方法である。浄化方法には、活性炭等での汚染物質吸着法、酸化・還元反応での重金属安定化法、生物分解反応での分解法がある。六価クロムなどの重金属では、酸化・還元反応による安定化で、硝酸性窒素では、生物分解反応による脱窒で汚染地下水を浄化するものである。

(1) 原位置分解

生物分解および化学的分解法により、原位置で汚染物質を除去する技術であり、シアンやPCB等が対象とな

る。わが国で実施された例は無く、研究段階である。

(2) 原位置溶融（原位置ガラス固化）

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1,200~1,300℃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方法である。強力な処理で重金属類に分類される全物質に対応できる。処理費用が高いことが大きな問題であるが、ダイオキシン汚染土壌で実施され始めている。

(3) 原位置抽出

汚染地下水の揚水・水処理が一般的である。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。汚染物質は、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。

4.3.2 処理対策技術

処理対策（オンサイト処理）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（焼却）と洗浄によるものが多い。

(1) 分解処理

熱分解と化学分解が一般的で、PCB、農薬等の有機化合物に用いられる。今後、生物分解も期待されている。熱分解（焼却）法は、800~1,000℃で行われる場合が多く、触媒、酸化・還元剤も併用される。非意図的生成化学物質の生成があることもあり、適切な排ガス処理設備を備えた固定プラントで実施されることが多い。

化学分解は、土壌・地下水に薬剤を添加し、化学的に分解を行う方法である。農薬類を含む土壌・地下水に対しては、次亜塩素酸・過酸化水素水と鉄を使用するフェントン法等による酸化処理、光化学的処理、触媒分解などがある。

(2) 分離処理

熱脱着法と土壌洗浄法がある。熱脱着法は汚染土壌を加熱することにより、比較的沸点が低い物質を土壌から脱着・分離する技術である。水銀等の低沸点金属を対象とする熱脱着法では400~600℃、PCBや有機成分も分離することに使用される水蒸気注入法では300~700℃、高沸点の重金属の強制的な揮発を促す塩化揮発法では800~1,000℃で行うことが多い。熱分解と同様に、副生成物の生成やオフガスの処理に留意する必要があるが、規模にもよるが固定プラントで実施することがほとんどである。非常に強力な処理であるが、処理費用は一般的に高い。

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

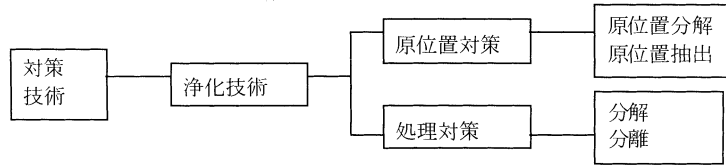


図-2 揮発性有機化合物の浄化対策技術

害物質を除去する方法で、土壌を粒径に応じ分級して、汚染物質が吸着・濃集している画分を分離すること、汚染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おり、水または溶媒による洗浄工程、篩い分離・比重分離等による分級工程がある。適用性は汚染物質や土質によって異なるため事前の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ある。処理費用が比較的安価で期待されている技術である。

(3) 溶融処理

原位置溶融と同様である。

4.4 揮発性有機化合物の汚染対策技術

揮発性有機化合物による土壌・地下水の汚染対策は、物質の移動性が高く、かつ分離・分解しやすい特性から、汚染物質を除去する浄化技術が主体である。重金属等との複合汚染の場合には、浄化技術の併用がある。

揮発性有機化合物汚染の浄化対策は、重金属類の汚染とは異なり、汚染が顕在化してきたのが最近であり、現在においても新しい浄化技術が開発され実施されている段階である。揮発性有機化合物の土壌・地下水汚染対策技術の種類を図2に示した。

浄化技術のうち、地盤の掘削を行わない原位置対策と掘削した土壌や揚水した地下水の処理対策（オンサイト浄化）について以下に紹介する。これらの対策法は実際に適用されているものであり、事例が増加している。

4.4.1 原位置対策技術

(1) 原位置分解

原位置分解技術には、生物分解（バイオレメディエーション）を利用した方法と化学的分解を利用した方法がある。生物分解は、微生物が持つ化学物質の分解能力を利用して、環境中に放出された有害化学物質を分解・無害化する技術である。ガソリンで汚染された帯水層を浄化するためにアンモニア、リン酸および過酸化水素を地中に注入した例から始まり、近年揮発性有機塩素化合物でも、メタン資化性細菌と栄養源を注入した方法が実証されている。本方法は温度、地質、濃度等の影響を十分

に考慮する必要がある。

化学分解を利用した方法には、汚染地下水中の揮発性有機塩素化合物を鉄粉（零価）で脱塩素する方法があり、国内外で実施例が増加している。適用方法は、汚染地下水を対象とした鉄粉（零価）と珪砂の混合層に地下水を通過させる前述の透過性浄化壁法や高濃度汚染土壌を直接浄化する場合や地下水流速が遅い場合に、鉄粉を直接土壌に混合する方法などがある。

(2) 原位置抽出・土壌ガス吸引法

土壌ガス吸引法は汚染物質の揮発性を利用したものであり、不飽和帯に存在する汚染物質を強制的に吸引除去し浄化するもので、良く用いられている方法である。基本的には土壌中に吸引井戸を設置し、真空ポンプ・ブローワーにより、その吸引井戸を減圧し気化した汚染物質を地上に導き、活性炭で吸着除去する真空抽出法である。さらに空気を注入し、揮発を促進させ吸引するベンティング法がある。

汚染が帯水層まで及んでいる場合には、吸引井戸内部に水中ポンプを設置しガス吸引と揚水も行う二重吸引法やウェルポイント法を利用したガスと地下水の両方を吸引する方法がある。また、飽和帯に空気を注入し地下水からの揮発を促進させ吸引するスパージング法がある。

これらの方法は、砂質や砂礫混じりの比較的透気係数が高い地盤に適用できるが、地層の状況、深度、地表面の状況に応じて、吸引範囲・吸引圧等を適切に設計する必要がある。粘土質などの細粒分に富む地盤では、実用的ではない。そのため、深層混合処理法で生石灰を混合攪拌することで、地盤の温度を上昇させ揮発を促進し、土層攪拌で透気性を高めて汚染物質を抽出する工法が実用化されている。

(3) 原位置抽出・地下水揚水法

汚染地下水を揚水し汚染物質を除去、回収することにより地下水および土壌の処理を行なうものである。揚水した地下水は、暴気処理等の方法で処理する。揚水井は、土壌ガスおよび地下水汚染の最高濃度付近に設置する。揚水した汚染地下水の処理方法としては、暴気処理、活性炭吸着処理および化学分解が行われる。

4.4.2 処理対策技術

(1) 分解

熱分解、化学分解、紫外線分解等の技術があり、重金属等の汚染の項で前述した技術が使用できる。しかし、揮発性有機化合物の場合は、ガスとしての分離が容易なことから、現場において土壌の熱分解・化学的分解が用いられることはほとんど無く、固定プラントへ搬入することが一般的である。

生物分解技術は、ベンゼン等の炭化水素系の汚染には良く用いられている。特にベンゼン等の軽質油では分解が容易なことから、ランドファームのような簡便な手法が有効で、各地で実施されている。

(2) 分離

掘削した汚染土壌に対して風力乾燥、加熱処理等の処理を施し、汚染物質の除去・回収等を行なうものである。風力乾燥は掘削した汚染土壌の自然乾燥や盛土内に

配管を設置し強制的に注気・吸引することにより乾燥させるものである。加熱乾燥は、加熱装置に汚染土壌を供給し、汚染物質を揮散させる方法である。また、生石灰を混入し、反応熱を利用して揮散させる方法も有効である。揮散させたガスは、活性炭吸着や化学分解法により処理する。

5. おわりに

我が国における浄化技術の一般的な状況を紹介した。法制度および環境に対する世論の高まりから、浄化事業が増加している。しかし、汚染地盤の浄化事業自体には投資効果が少なく、土壌・地下水の環境保全のための浄化事業の発展を取り巻く環境は追い風ばかりではない。今後の浄化事業の発展には、信頼性が高くコストの低い浄化技術の確立が望まれている。

質疑応答

諸泉（岡山大）：

(1) 浄化の工期の長さはどうか？ (2) 吸引井戸などに関して、現場でシミュレーションは行われているか、その有効性は？

藤原：

(1) 工事の内容にもよるが、都市開発などの場合は数ヶ月のなかできれいにしてしまう場合もある。ISO関連で企業が自分の土地について行う場合は、自分たちの環境計画を立て、工期を1, 2, 3と分ける場合や、そのなかでプライオリティーをつけて、まずモニタリングからと言う場合もある。全般的に、工期は早いと言えるかもしれない。(2) シミュレーションの実用性については、2次元でどう変わっていくかなどは、実務レベルでツールとして普及している。ただ、2相流などについては、研究面での課題が残されている。

前村（ダイヤコンサルタント）：

重金属汚染地下水に用いた場合の浄化壁の耐用年数は？

藤原：

透過性浄化壁は、粗粒な物質に零価の鉄粉を10～20%程度混合して構築する。もともとこの技術は、揮発

性有機塩素化合物の分解に用いられていたもので、それに含まれている鉄粉の腐食反応によって、分解が行われる。揮発性有機塩素化合物の場合、流入濃度に対して流出濃度がある割合で減衰する。この割合は有機塩素化合物の透過壁のなかでの滞留時間で異なるので、滞留時間を層厚などで調整する。浄化目標を、流入濃度に対する流出濃度の割合を0.01とかで設定する。有機塩素化合物の場合には、耐久性はほぼ地下水中の溶存酸素による鉄粉の消費量に近いものになるので、(理論上は例えば200年といったように)長い。ところがこれを重金属の浄化にこれを用いると耐用年数の考え方が違ってくる。最初は、流入濃度に対して流出濃度はゼロになる。すなわち、流出濃度が検出限界以下になる。しかし、ある時間を経ると徐々に重金属の流出濃度が増加する。それが地下水の環境基準を越える濃度になった点をブレイクスルー(破過点)と考えている。この場合、それまでに流入した負荷量に対して、零価の鉄粉がどれだけ消費されたかで、浄化壁の安定化量を求めて耐久性を算定する。簡単に言うと、吸着モデルで計算する。この耐用年数は、重金属の種類、浄化剤によっても異なる。実用的には、実流速5cm/日、5ppm程度とする場合、20年を耐用の目安にしている。この期間は、3年以上の長期のカラム試験や原位置における実証試験から推定している。