

4.4 汚染土壌と富栄養化水域の修復

汚染土壌の修復には、汚染源が石油燃料の場合には掘削と燃焼が、重金属の場合には抽出による分離と除去が採用されます。富栄養化した水域の修復には、流入する窒素とリンの排出抑制が採用されます。具体的には合併浄化槽の高度処理型への移行と、下水処理場の設備構造と運転方法の変換が採用されます。産業廃棄物による汚染環境の修復には、掘削と適切な設備による再処理が必要になります。

汚染された環境の修復は、汚染の予防に比べて費用対効果が非常に劣ります。汚染物質が拡散してしまうので、修復が必要な土壌や水域が大きく広がってしまうからです。水俣の水銀汚染は、事前に適切な排水処理設備を設置すれば数億円の費用で済んだのに、水銀が水俣湾に拡散してしまったので、数百億円もの除染費用が必要になりました。汚染環境の修復は、予防対策の不備によって生じる事故の後始末なのです。事後の環境修復に迫られた主な環境汚染は、土壌汚染と閉鎖性水域の富栄養化、および産業廃棄物による環境汚染です。そこで本稿では、この修復に採用されている対策の概要を紹介します。

1. 土壌汚染の修復

土壌汚染の主な要因は、地下に設置した石油燃料タンクからの漏洩と、化学工場から排出される化学物質の漏洩です。石油燃料タンクからの漏洩は、カナダやアメリカで多発していますが、日本では多くありません。カナダやアメリカには地下に直接埋設した古い燃料タンクが多く、年月を経てタン

クが腐食し、燃料油が地中に漏洩したのです。一方、日本は燃料貯蔵タンクを直接埋設せず、地下に作ったコンクリートのピットに設置してきました。直接埋設しないので土中の水分によるタンクの腐食が起きにくく、定期的な点検と整備にも有効でした。

1.1 石油燃料による土壌汚染の修復

石油燃料による土壌汚染の一般的な修復は、汚染土壌を掘削して専用の燃焼装置に搬入し、焼却処理して埋め戻す方法です。汚染サイトで処理できるように、車載式の燃焼装置も開発されています。しかし土壌が地中深くまで汚染された場合は、掘削が容易ではなく費用も高くなります。そこで掘削せずに、現位置で地中の微生物を使って処理する方法が開発されています。バイオレメディエー

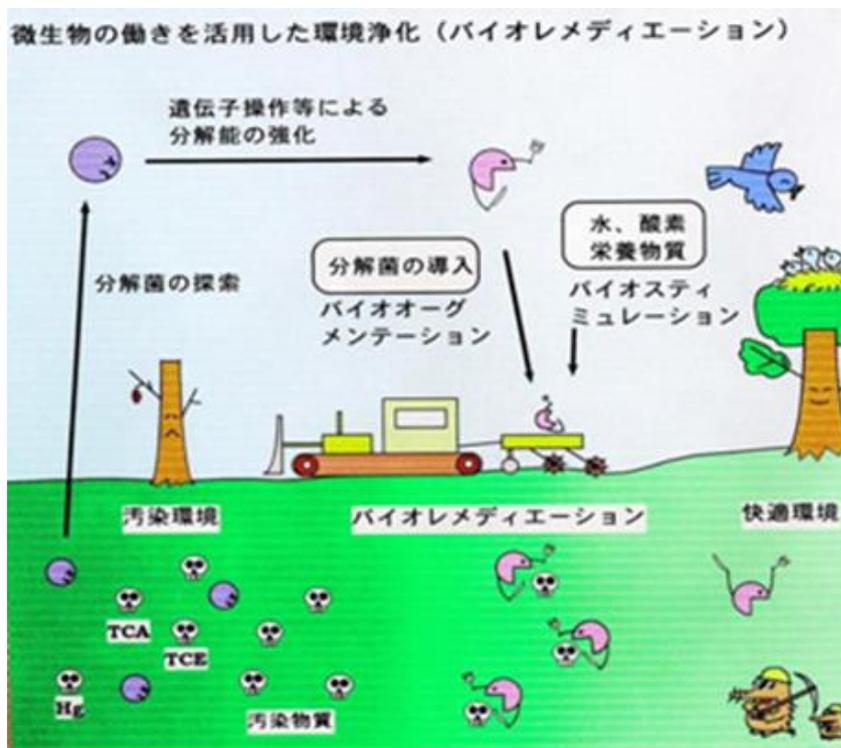


図1. バイオレメディエーションのイメージ (出典: 国立環境研究所)

ションと呼ばれ、汚染土壌に生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させる方法（バイオスティミュレーション）と、汚染物質の分解菌を新たに導入する方法（バイオオーグメンテーション）があります。燃焼や物理化学的な処理に比べて長期間を要しますが、低コストで処理できる点が有利です。現在は主にガソリンなどの燃料油や、その成分であるベンゼン、トルエン、およびトリクロロエチレンなど炭化水素系溶剤の分解処理に実用化されています。

1.2 洗剤や化学物質による汚染土壌の修復

主に化学工場から漏洩した化学物質による汚染の修復には、汚染の拡散を防止する対策と、汚染物質を分離・除去する対策が必要です。表 2 に示すように、拡散を防止する対策には液状のセメントや水ガラスで土壌を固化する技術、薬剤を用いて汚染物質を不溶化する技術、汚染土壌を加熱して固形化する技術が採用されています。しかし拡散防止は汚染物質を除去する対策ではないので、実施後も継続的なモニタリングが必要です。モニタリングで土壌への溶出基準を超える汚染が見つかった場合には、鋼矢板を利用した遮断工事や、遮水工事による封じ込め措置が行われます。

汚染物質を分離・除去する対策には、掘削して除去する方法と、掘削せずに原位置で処理する方法があります。掘削除去の場合は、洗浄して汚染物質を除去し埋め戻す方法と、埋め戻さずに最終

処分場に搬入し埋設する方法があります。

原位置処理には、表 3 に示すように無害な成分に分解する方法と、溶媒に抽出して除去する方法があります。分解は有機物を炭酸ガスと水に分解する方法なので、主に揮発性有機化合物（VOC）による汚染を対象に採用されています。バイオレメディエーションでは、主に土壌中の微生物が保有する分解能力を利用しますが、微生物や栄養分の拡散に注意する必要があります。鉄粉法では鉄粉を汚染土壌と混練し、鉄粉表面に局部電池反応を形成させます。すると還元反応でトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンの脱塩素化が進み、無害なエチレンと塩素イオンに分解されます。

溶媒に抽出して除去する方法の地下水揚水では、揚水した地下水を曝気して対象物質を分離し、活性炭などに吸着させます。アースパーキングは、コンプレッサーで土壌や地下水に空気を注入し、VOC を気化させて燃焼や吸着処理します。空気が通りやすい土壌に適していますが、空気の吹き込みによる汚染の拡散防止に配慮が必要です。電気泳動は地中に装入した電極から電流を流し、カドミウムなどの重金属類をイオン化して地下水に溶出させます。Cd 汚染土壌の修復に利用されています。高圧洗浄揚水曝気は、土粒子に吸着している汚染物質を高圧水と空気で洗浄、曝気して浄化する技術です。注入した高圧水と空気は回収し、適切に処理する必要があります。ファイトレメディエーションは、植物が根から水分と養分を吸収する

る能力を利用して、土壌から汚染物質を除去します。現在、約 400 種類の重金属高蓄積植物が発見されており、国内ではカドミウム汚染農地（水田）で、稲を用いた実績が

表 2. 土壌汚染物質の拡散防止対策（出典：国立環境研究所）

対策	技術例	対象物質		概要
		VOC	重金属	
拡散防止	固化	○	○	液状のセメントや水ガラスで固化。
	不溶化		○	硫酸第一鉄などの薬剤で不溶化。
	熔融固化	○	○	高圧電流を通電して土壌を固形化。
	封じ込め	○	○	遮断工、遮水工で封じ込める。

表 3. 汚染物質の分解・除去対策（原位置処理）

（参考：国立環境研究所資料）

対策	技術例	対象物質		概要
		VOC	重金属	
分解	酸化分解	○		地下水系に酸化剤を注入して分解。
	鉄粉法	○		鉄粉を混合し VOC を分解。
	バイオレメディエーション	○		微生物がもつ有害物質の分解能力を利用。 低コストだが長期間を要す。
	反応性バリア法	○		汚染地下水の下流域に鉄粉を含む透過壁（バリア）を設置して分解。
抽出 除去	土壌ガス吸引	○	○	地表面と地下水の間にある汚染物質を真空ポンプなどで吸引し除去。
	地下水揚水	○	○	揚水した地下水を曝気して対象物質を地下水から分離、活性炭などに吸着させる。
	エアースパージング	○		土壌中や地下水中に空気を注入、VOC を気化させて分解を容易にする。空気が通りやすい土壌に適。
	電気泳動		○	地中に装入した電極から電流を流し、重金属類をイオン化して地下水に溶出させる。
	高圧洗浄揚水曝気	○	○	土の粒子に吸着している汚染物質を高圧水と空気ですすいで洗浄・曝気して浄化。
	ファイトレメディエーション	○	○	汚染物質を含む農地や水田で対象物質を蓄積する植物を育成させ、刈り取って焼却し分離・処分。

報告されています。方法はカドミウムを蓄積した稲を刈り取り、焼却して灰からカドミウムを分離し、無害化して処分する手順です。

2. 富栄養化水域の修復

水域の富栄養化は、河川や海域でリン酸塩、硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩、ケイ酸塩などの塩類濃度が高まる現象で、その結果、植物プランクトンや藻類が増殖します。外部水域からの水の流入が少ない湾や湖沼（閉鎖性水域）で発生しやすく、藻類が異常に増殖した湖沼は緑色のアオコに覆われます。アオコは分解するとき水中の酸素を大量に消費するので、水生生物の生育が阻害され死滅する場合があります。海域では植物プラ

ンクトンの増殖で表層が赤や茶色に変わり、赤潮と呼ばれます。赤潮に覆われた海域ではプランクトンの分解で酸素が損耗し、酸欠で魚類が死滅します。特に影響が大きいのは表層に近い水面を利用する養殖漁業で、大規模な被害が発生することが珍しくありません。

2.1 富栄養化の原因

富栄養化の直接原因は塩類濃度の上昇ですが、間接原因は地上からの流入です。東京湾・伊勢湾・瀬戸内海の調査によると、生活排水の影響が3割から6割、産業排水の影響が2割から4割です。生活排水では、窒素は有機性窒素やアンモニアとして、リンは主に有機リン化合物として排出され

ます。産業排水で排水の窒素濃度が高い主な業種は、食料品製造業(食品由来)、金属機械表面処理業(アンモニアガス由来)、病院および旅館(し尿など排泄物と食品由来)です。生活排水と産業排水以外に影響を与えている排出源は、道路や田畑、山などの地表からの流出が指摘されています。

2.2 富栄養化の修復

富栄養化の原因が主に水域への塩類の流入で、発生源は生活系排水・産業排水・道路や田畑などの3種類ですから、修復も3排出源の排出抑制に集約されます。生活排水からの塩類排出を抑制する方策の一つは、排出者が設置する合併浄化槽のBOD除去型から高度処理型への移行です。既に多くのメーカーが窒素除去機能を付加した浄化槽を販売しており、既に1割以上が高度処理型になっています。高度処理型は、BOD除去型の下流に窒素やリンの除去設備を追加した構造です。

一方、下水道が普及している地域では、下水処理施設(水再生センター)の高度処理型への移行が有効です。具体的には標準活性汚泥法とは異なる反応タンクの構造や、運転方法を採用します。窒素を除去するには、生物学的窒素除去(硝化+脱窒)を進行させる運転方法を選択します。装置としては、循環式硝化脱窒法やステップ流入式多段硝化脱窒法などが採用されます。一方、リンの除去には生物学的に除去する嫌気好気活性汚泥法(AO法)と、凝集剤を添加する物理化学的な方法があります。また窒素とリンの両方を除去する場合は、嫌気無酸素好気法(A2O法)や窒素除去法+凝集剤添加といった選択をします。食品由来の産業排水については、基本的に下水処理施設と同様の処理方法が考えられますが、処理量や濃度が異なるので個別に処理工程を設計する必要があります。道路や田畑、山などの表面からの排水には、降雨時の貯留または簡易処理が検討されています。

3. 廃棄物処分場の環境汚染修復

土壌汚染や富栄養化のほかに、廃棄物処分場の環境汚染修復があります。特に産業廃棄物の処分場からは油分や重金属が漏洩しやすく、土壌汚染や地下水汚染の原因になります。1980年代に発生した大規模な事例は、香川県で発生した産業廃棄物による土壌と海域の汚染で、修復には約20年の歳月と数百億円の費用が必要になりました。

場所は瀬戸内海に浮かぶ面積が約14平方キロメートルの豊島で、この島の一角を所有する地主が廃棄物から資源を回収する名目で処分場を開設し、1982年に県の許可を得ました。ところが事業者は廃タイヤを持ち込んで野焼きを始め、後には廃プラスチック・廃油・自動車の解体で発生するシュレッターダストなど多様な廃棄物を大量に搬入して、野焼きと埋め立てをするようになりました。1987年には野焼きの黒煙と煤が島全体を覆い、激しい悪臭を放つとともに喘息患者が多発するようになりました。主な廃棄物はシュレッターダストで、地中に厚く広範囲に埋設されていました。また地中からは、環境基準の数十倍から数百倍の水銀、ヒ素、PCB、鉛、ダイオキシンなどが検出され、地下水の汚染や海洋汚染も懸念されました。

その結果、県は1990年に処理業の許可を取り消して、廃棄物を撤去する措置命令を出しました。判明した産業廃棄物の総量は約91万トンで、62万立方メートルにも達していました。修復方法としては、埋設されていた全廃棄物と汚染土壌を掘削し、島外に搬出して新たに建設した処理施設で焼却することになりました。処理期間は14年の長きにわたり、約730億円の公費が投入されました。もっと早い段階で対策が講じられれば、修復期間も費用も大幅に節減できたでしょう。

(おわり)