

# 有機塩素化合物による土壌・地下水汚染の調査と浄化対策

深田 園子・片桐 憲一\*

平成 10 年春に名古屋の松下電気、東芝の工場内で地下水から環境基準を大幅に上回る有機塩素化合物が検出されたことが新聞をにぎわして以来、有機塩素化合物による汚染の調査とその対策が全国規模で急速に進んでいる。日さくでは約十年前から有機塩素化合物による汚染の調査を行い、ここ 2~3 年浄化対策も手がけており、ここにその手法を紹介する。

## 1. 有機塩素化合物による汚染の特徴

たとえば六価クロムなどによる重金属汚染は、重金属が土壌に吸着されやすい性質を持つため、汚染は比較的表層にとどまっておき、表層土の分析結果から汚染状況や汚染範囲を特定することができる。しかし、トリクロロエチレンなど有機塩素化合物は、①揮発性である、②水より比重が大きい、③粘性が小さい、④水への溶解度が小さい、という性質を持つため、地表から浸透すると不飽和帯を自重によって鉛直浸透し(②、③の性質)、地下水面付近でいったん浸透速度が小さくなる(④)が、徐々に地下水中に移動し、帯水層の下限に溜まりやすい(②、④)。水への溶解度は小さいが、一たん地下水に入った物質は、地下水の流れにしたがって、移流・拡散する。不飽和帯を浸透しながら、一部は土壌空气中に揮散し、土壌空気汚染を引き起こす。

汚染されてから間もない場合は、物質は不飽和帯にとどまっているが、工場の跡地など汚染が古く調査時には物質を使用していない場合、土壌汚染はなく地下水のみが汚染されていることもある。

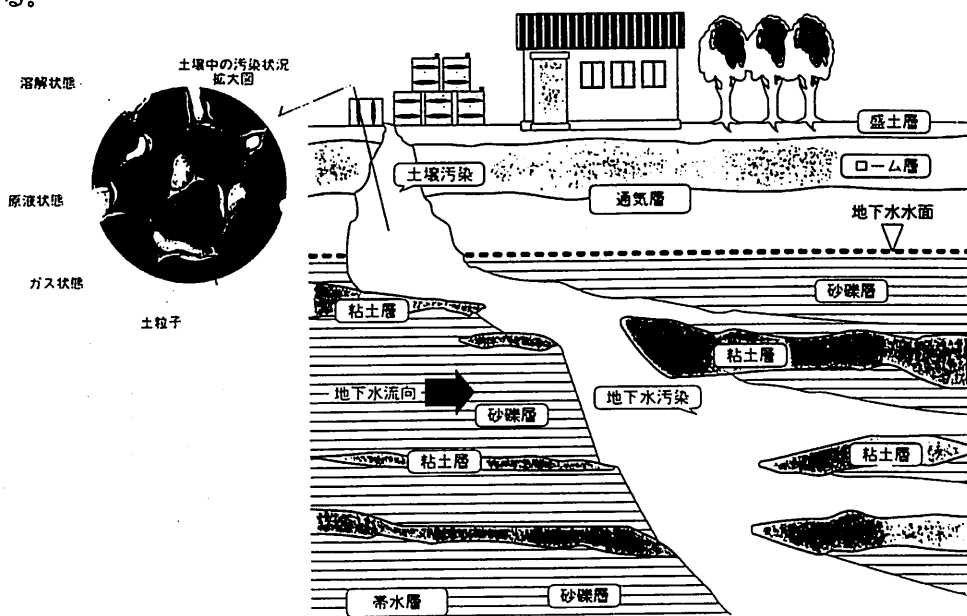


図 1 地下水汚染のしくみ(環境庁、1997)

\* 株式会社 日さく

## 2. 調査の流れ

以前は地下水汚染の判明を契機に汚染源調査が進められることが多かったが、平成 10 年春以降、事業所内に井戸がなく、地下水汚染の有無が不明な場合にも「汚染がない」証明のために調査を行うことが増えてきた。

地下水汚染が判明している場合は、まず周辺の井戸の水質調査、井戸構造調査、汚染物質を使用している(していた)事業所等の聞き取り調査、既存資料整理を行い、汚染範囲をの把握と調査範囲の絞り込みが行われる。しかし、筆者の経験では、この作業だけで汚染源をつきとめることはまず不可能である。汚染範囲を特定できるような好都合な位置に井戸がないし、既存井戸はたいてい複数位置にスクリーンが設置されているので、汚染されている帯水層が特定できない。事業所等では聞き取り調査を拒否されたり、使用場所や期間・使用量の正確な記録が残っていないこともめずらしくない。

そこでボーリングを実施して、土壌および地下水の汚染状況を調査するわけだが、有機塩素化合物は地層中での水平方向の移動性が小さいので、汚染源をはずしてボーリングを行うとまったく汚染物質が検出されない。ボーリング調査を効率よく行うためには、次に紹介する表層土壌ガス調査で汚染源を特定することが重要である。

「汚染がない」証明をするためには、表層土壌ガス中に有機塩素化合物が全く検出されないことを確認する。

調査の流れは環境庁の「有機塩素系化合物等に関わる土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針」に詳しく説明されている。

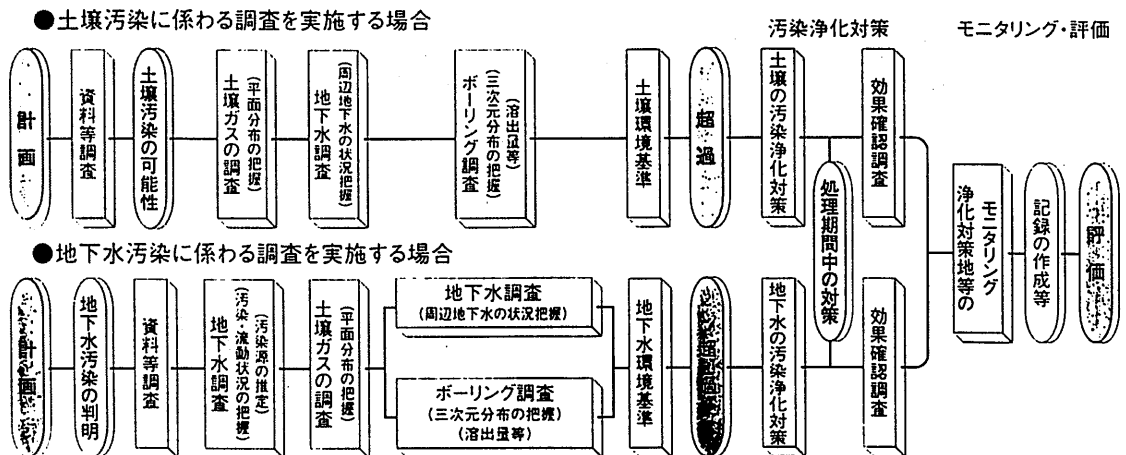


図 2 土壌・地下水汚染調査のフロー

### 3. 表層土壌ガス調査

#### 3.1 調査手法の選定

トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどが沸点が低く、常温でも揮発しやすい性質を利用して、汚染土壌や地下水から地下空気へ揮散した成分を分析し、その濃度分布から汚染源を特定する手法である。

土壌ガス調査の方法はサンプリングや分析の方法により表 1 のように分類される。土壌ガス調査が始められた当初は検知閾法で実施されていたが、携帯用分析機器の進歩により、現在は広域調査には中感度以上のものが適用される。

筆者らは通常、吸着/熱脱離/GC 法(通称モビラボ法)を採用している。あるていど汚染範囲が絞り込まれ、ガス濃度が高い場合には検知管法を併用し、効率を上げている。モビラボは分析機器を車両に搭載したシステムで(図 3)、その特徴は以下のとおりである。

①吸着剤によって土壌のガス成分を濃縮採取するため(図 4)、土壌ガスを直接導入するガスクロマトグラフ分析に比べて、100 倍以上の検出能力を有する。

②PID ガスクロマトグラフ分析器には、2 種類の PID を搭載している(10.2eV と 11.7eV)。このため、対象物質の最適感度での同時分析が可能であるとともに、分析成分同定のための付加的信息も得ることができる。

③昇温分析が可能な PID ガスクロマトグラフ分析機を採用することにより、恒温分析では検出が困難な成分に対しても、分析・同定が可能となる。

④現地で分析結果が迅速に得られるので、以後の調査計画を現地で立案することができる。



図3 モビラボ

表1 土壌ガス調査手法の比較

	感度	定量	同定	時間代 表性	現場熟 練度	経費	現場電 源	調査時 間
フィンガープリント法	高	不	難	大	低	高	不要	長
採取ガスクロ法	中	可	可	小		中		中
ポ・タフ・ル・ス法	中	可	可	中	高	高	要	短
モビラボ法	高	可	可	小	高	高	要	短
検知管法	低	可	難	小	低	安	不要	短

(中杉,1993 を一部削除)

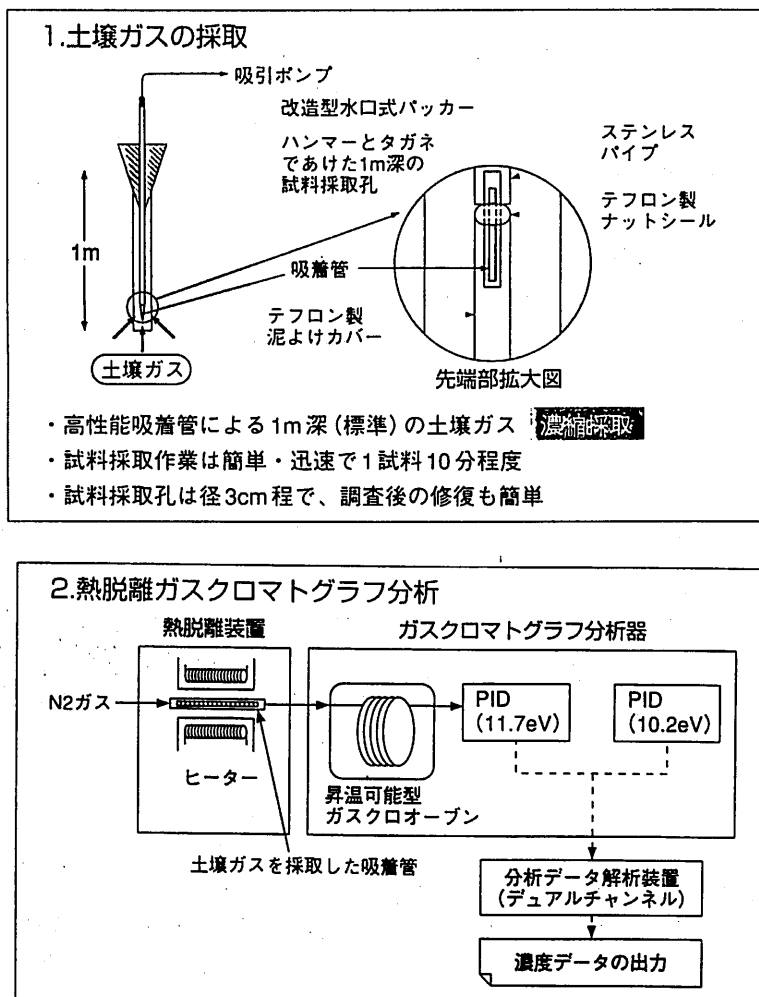


図4 モビラボ法による土壌ガス調査

### 3.2 調査事例

この事業所は過去にトリクロロエチレン(以下、TCE)を使用しており、既存井戸から TCE が検出された。事業所全域をカバーするように 50m メッシュに区切った交点でガス調査を行い、TCE ガスの最高濃度は 8ppm、高濃度帯は過去に TCE を使用していた場所から約 60m 離れた地点ということが判明した。実際に TCE を使用していた場所はすでに設備を撤去し、その時に深度 1~2m まで土壌の掘削を行った経緯があり、土壌中の TCE は揮散したり、除去されてしまった可能性が大きい。そして、汚染源から離れた地点に汚染された土壌ガスが残っているのではないかと考えられた。

その後土壌ガス調査の最高濃度地点付近でボーリングを実施したところ、表層土壌中に TCE は存在せず、地下水位付近に TCE が分布することがわかった。このことから、TCE はすでに帯水層まで到達し、地下水の流れによって汚染源と考えられる旧使用場所から下流側に拡散していると判断された。このような事例では、地下水の浄化対策は旧使用場所ではなく、現在の最高濃度地点で実施するほうが効率的である。

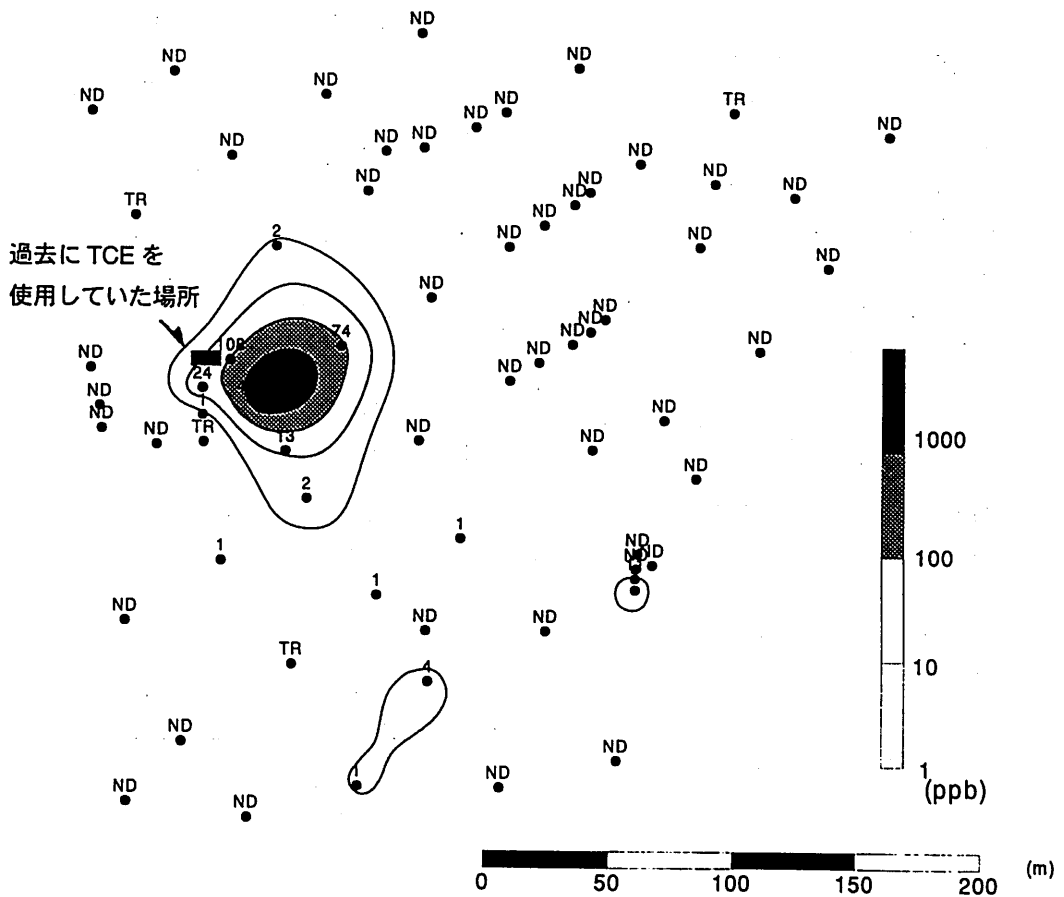


図 5 土壌ガス濃度分布図(TCE)

#### 4. ボーリング調査

土壌ガス調査は汚染源を特定する 1 次調査であり、地下での汚染物質の存在状況を把握するためには、汚染の最高濃度地点、いわゆる「ホットスポット」でボーリング調査を行う。汚染の 3 次元的な広がりを把握するには複数のボーリングが必要となる。

##### 4.1 コアボーリングと分析

地層試料の分析を行うおもな目的は 2 つあり、①地下何mまで汚染が進行しているか、とくに帯水層まで汚染物質が浸透しているかどうかを確認する、②土壌環境基準を超過していないか判断することである。

②の目的のためには環境基準に定める方法(以後公定法とよぶ)で分析を行う必要があるが、公定法分析は分析結果を得るまで最低 1 日かかり、現地で分析頻度の決定やボーリングの掘止めの判断をする際に不都合である。また公定法分析は 1 検体あたりの費用が高価で、汚染状況を詳細に知りたい場合は分析点数が増加するので膨大な費用がかかる。そこで、現地で簡易分析を行い、公定法分析を補完するのが一般的である。現場簡易分析は、公定法の振とう時間を短縮し、ヘッドスペースガスを携帯用のガスクロマトグラフにて現地で分析する方法である。

実際にボーリング調査を行った例を図 6 に示す。調査地は TCE、MC を使用した履歴のある事業所で、ボーリング地点は汚染源付近である。不飽和帯、帯水層中の両方から TCE が検出され、この付近で TCE が浸透したことを示している。しかし、MC はまったく検出されなかった。

帯水層中で使用履歴のないシス-1,2-ジクロロエチレン(cis-1,2-DCE)が検出されているが、この物質は TCE の分解生成物であり、帯水層中で TCE の嫌氣的微生物分解が進行していることを示唆している。

ボーリング孔は水質監視用の観測孔として仕上げることが多い。この場合には一つの帯水層を対象とした観測孔にすることが重要である。

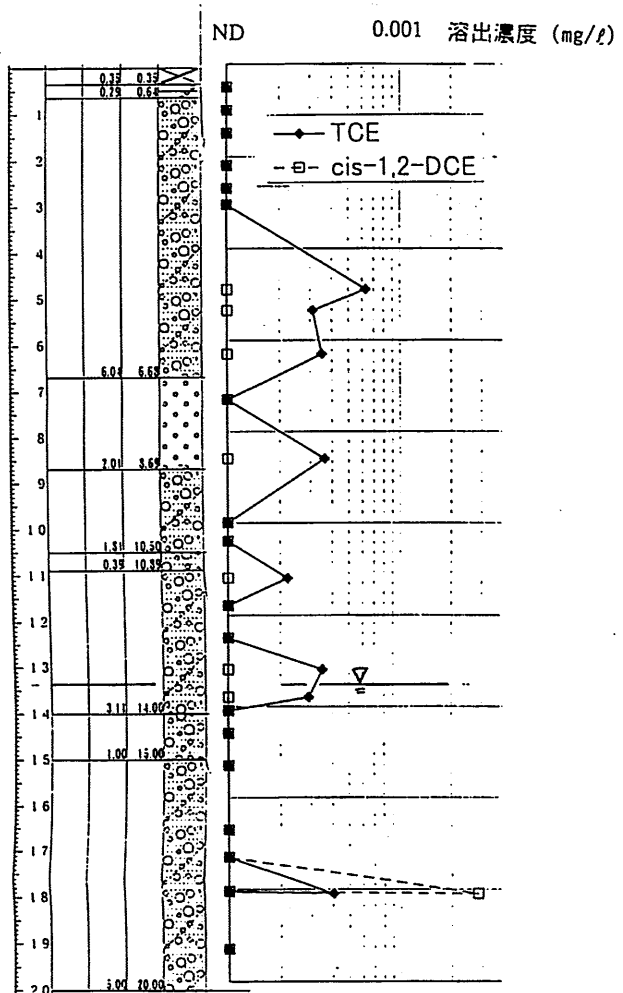


図 6 ボーリング調査結果



## 4.2 新しいボーリング技術

汚染調査ではコアをなるべく水にさらさず、迅速に、安価にボーリング調査を行うことが要求される。そして調査の性質上、工場などの屋内でも容易に掘削ができることが望まれる。筆者らは、車両やクローラに搭載した機動性のあるボーリング機を導入しているのでここに紹介する。

### (1)打撃式簡易ボーリング機(ミュール)

不整地走行用のバギーに搭載したハンマーユニットタイプの簡易掘削機である。小型で仮設が必要ないので、工場の建物内でも簡単に掘削できる。掘削方法は油圧ハンマー方式でエア・泥水を使用しな。コア径は最大 38mm で礫径が小さい場合には N 値 30 以上の砂礫も掘削可能である。コアは専用のプラスチックチューブに入ってくる。掘削孔は VP 管や鉄管を挿入して、5 章で紹介する土壤吸引孔に仕上げるのが可能である。

#### 機械緒元

長さ：3037mm 幅：1461mm 高さ：1892mm

重量：885kg

ハンマー打撃回数：30 回/秒 回転数：125rpm

トルク：403Nm

#### 掘削能力

掘削可能土層：N 値 30 以下の地層・  
30cm 以下のコンクリート

掘削深度：14m(実績)

最大掘削孔径：75mm(ノゾ)

コア径：38mm、28mm

最大掘削速度：14m/日(実績)



図7 打撃式簡易ボーリング機(ミュール)

### (2)中空オーガー型掘削機(ホロウステムオーガー)

ミュールよりも大口径で深度 30m まで掘削が可能。コアの採取はもちろん、掘削中に地下水の採取が行える。掘削径が 220mm あり VP65 管を挿入した後、砂利充填が十分に行える。掘削速度は関東ローム層で 13m/日の実績がある。ここに紹介した小型ホロウステムオーガーは平成 10 年 10 月に日本で最初に使用されたものである。

#### 機械緒元

長さ：2750mm 幅：1320mm 高さ：2050mm(ドッキング時)、3700mm(ドリル時)

重量：2800kg

トルク：1000Nm

### 機械緒元

長さ：2750mm 幅：1320mm  
高さ：2050mm(トラッキング時)、3700mm(ドリル時)  
重量：2800kg  
トルク：1000Nm

### 掘削能力

掘削可能土層：N値 50 程度までの地層  
掘削深度：30m(実績)  
最大掘削孔径：220mm(ノコア)  
コア径：60mm  
最大掘削速度：14m/日(実績)  
観測孔仕上げ(最大)：VPφ65mm



図8 ホロウステムオーガー

## 5. 浄化対策

比較的浅層の土壌(不飽和帯)中と地下水中の浄化対策は全く手法が異なり、区分される。浄化工法の一覧を表2に示す。

### 5.1 土壌浄化

#### ①掘削除去

土壌浄化工法でもっとも単純なものは、掘削除去(土壌の置き換え)である。これは、掘削規模が大きいと掘削費・掘削残土の処理費(産業廃棄物として処理)が膨大になる。

#### ②土壌ガス吸引

不飽和帯中の汚染物質を強制的に気化・吸引する方法で、対策効果は1～数ヶ月の短期間で現れる。

#### ③固化(不溶化)

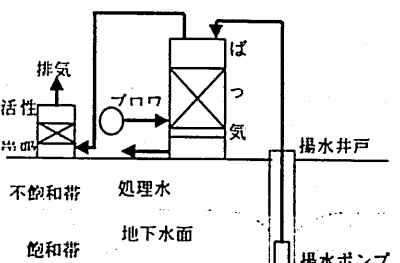
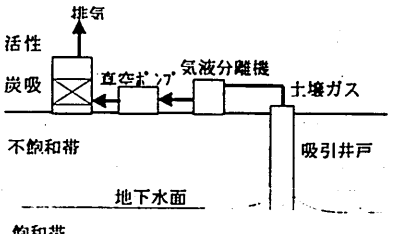
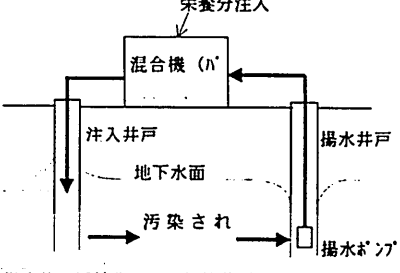
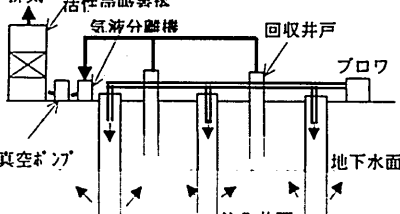
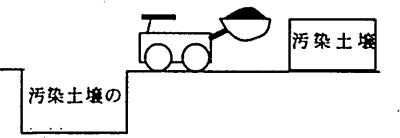
グラウトを注入したり、地盤を加熱してケイ酸鉱物をガラス化し汚染物質を地層中に封じ込める方法で、重金属による汚染現場で実績がある手法である。

### 5.2 地下水浄化

いったん水に溶解出した有機塩素化合物の浄化は、水中の汚染物質を大気中に揮散させ、排ガス中の活性炭に吸着させて除去する方法がもっとも多く行われている。最近では微生物による原位置浄化(バイオフィエーション)や、浄化剤を地中に埋め込む浄化壁といった新しい技術が開発されている。



表2 代表的な土壌・地下水浄化法

浄化手法名	浄化方法	浄化概念図
地下水揚水法	<p>汚染地下水を揚水し、対象物質を除去・回収することにより地下水の処理を行う技術である。対象物質を確実に除去・回収できる技術であり、揚水によって汚染地下水が広域に拡散することを防止するバリア井戸としての効果を持たせることもできる。なお、揚水した汚染地下水は、ばっ気処理・活性炭吸着等の方法で処理する。</p>	
土壌ガス吸引法	<p>不飽和帯に存在する対象物質を強制的に吸引除去し、汚染処理を行う技術である。具体的には、ボーリングにより吸引用パイプ(吸引井戸)を設置し、真空ポンプにより減圧して気化した対象物質を吸引井戸内部に集め、地上に導いて土壌ガス中の対象物質を活性炭に吸着除去させるなど適正に処理するものである。本法は、現地で土壌を掘削することなく対象物質を除去するものであり、対策後の現地回復が容易である等の特徴を有する。</p>	
バイオ・レメディエーション法	<p>微生物が持つ化学物質の分解能力を利用して、有害化学物質を分解・無害化する汚染修復技術である。例えば、トリクロロエチレンによる地下水汚染対策としては、一般の土壌・地下水中に存在する微生物(メタン資化性菌)の分解能力を活用し、栄養分を与えること等によりその増殖・活性化を図りトリクロロエチレンを分解・無害化するものである。我が国における適用事例はまだないが、実証試験等が進められている。</p>	
エア・スパーキング法	<p>汚染地下水中に、注入井戸を通して空気を注入することにより揮発性の物質を揮発させ、揮発した汚染物質を注入した空気とともに回収井戸から回収し、活性炭等を用いて除去するものである。本法は、土壌ガス吸引法と同様、現地で土壌を掘削することなく対象物質を除去するものであり、対策後の現地回復が容易である等の特徴を有する。</p>	
土壌掘削法	<p>汚染土壌を掘削し、掘削した汚染土壌を現地内または現地外において風力乾燥・加熱処理・不溶化处理等の適切な処理を行うことにより、対象物質の除去・回収を行うものである。本法は比較的短期に実施でき、また高濃度汚染土壌の除去をあらかじめ行った後に以下の浄化工法の手法によって対策を実施することにより、より効果的な汚染浄化が期待できる。</p>	

### ①揚水ばっ気

一般的な揚水ばっ気法は表2に示したように、揚水井戸、ばっ気装置、活性炭吸着塔から構成され、処離水の濃度、水量によって浄化施設の規模が変わるが、費用は1基あたり2千万円以上と高価である。著者らは簡易型の井戸内ダブルエアレーションシステムを開発し現在実証試験を行っている(図9、特許申請中)。この方法は比較的汚染濃度が低い小規模汚染に対応するもので、従来型にくらべコストを1/4以下に抑えることができる。

### ②浄化壁

平成10年度になって学会等で成果が発表された工法。酸化鉄の浄化壁を地下水の通り道に敷設し、地下水は浄化壁を通過する間に浄化される。工事は大規模で、費用は億単位である。

エアスパージング、バイオレメデーションについては表2を参照されたい。

## 6. おわりに

今回紹介したように、土壌・地下水汚染調査は地質調査のセンスと化学分析技術とが兼ね備わってはじめて目的である汚染源の特定と浄化が行える、特異な調査分野である。通産省から電気・電子工業界に汚染調査の通達がでて以来、表層土の分析(ガス分析ではない)のみ、地下水分析のみの部分的な調査も随分行われているようであるが、適切な時期に必要な調査を行うことは、汚染の拡大を防ぎ、浄化期間を減少させ、最終的にはトータルコストを抑えることが可能であると考えている。

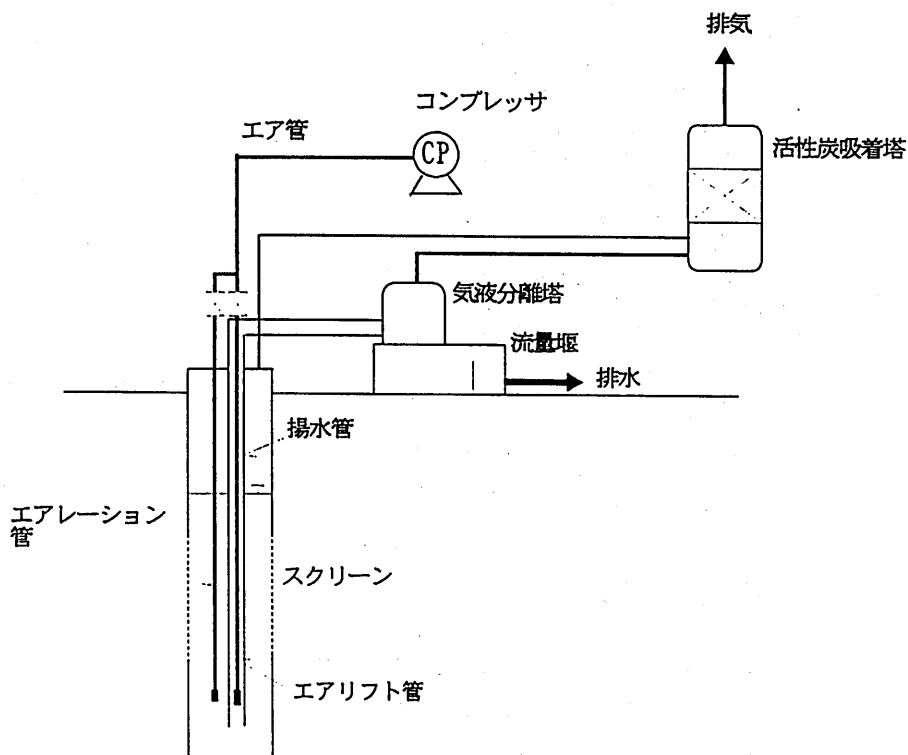


図9 井戸内ダブルエアレーション地下水浄化法概念図