

強力な真空力を利用した
VOCs汚染土壌の浄化技術の開発

尾山白千高
崎内川葉橋
哲大俊政茂
二祐明孝吉

強力な真空力を利用した VOCs汚染土壌の浄化技術の開発

尾崎 哲二¹・山内 大祐¹・白川 俊明¹・千葉 政孝²・高橋 茂吉³

¹国際航業株式会社 地盤環境エンジニアリング事業部 (〒102-0085 東京都千代田区六番町2番)

²リコーエレメックス株式会社 品質管理本部 (〒464-0075 愛知県名古屋市中千種区内山2-14-29)

³有限会社アサヒテクノ (〒024-0322 岩手県北上市和賀町岩崎新田5地割16番81)

1. はじめに

揮発性有機化合物(以後、VOCs)による土壌汚染対策では多くの工法が実施されている。対策工法には大きく区分して掘削除去して浄化あるいは処分する工法と原位置で浄化する工法がある。このうち掘削除去をともなう工法では、浄化を現地でおこなう場合にも場外に搬出して浄化や処分をおこなう場合にも二次汚染のリスクが伴う。汚染土壌を場外搬出する場合にはそれ自体が汚染の拡散であるとも言われる。そのため、掘削除去によらない原位置での浄化法が「オンサイト処理の原則」¹⁾として推奨され、その開発が求められている。

今回、VOCsによる汚染土壌を強力な真空力を利用して浄化する原位置浄化工法を開発した。この工法は地下水低下工法の一つであるスーパーウェルポイント^{2), 3)}工法(以後、SWP工法)を利用したものであり、ここでは、その原理と実施した浄化事例を紹介する。

2. 浄化の原理

2.1 原位置浄化工法の既存技術について

原位置でVOCsを浄化する工法には、VOCsを物理的に地上に回収して処理する工法と地盤中で分解する工法がある。このうち前者には地下水揚水法、土壌ガス吸引法およびエアースパーキング法などがある。

地下水揚水法は井戸からVOCsを含む汚染した地下水を汲み上げることによってVOCsの回収を図るものである。汚染した地下水を回収すれば汚染されていない周辺の地下水が汚染土壌に浸透し、土壌からこの地下水にVOCsが排出されるから地下水を何度も揚水すれば土壌も浄化されるとの考えにもとづいている。しかし、この工法によって地下水中のVOCs濃度はあるレベルまで低下するが、短期間の運転では土壌溶出量基準までの低下は難しいことが知られている。この工法が地下水の流速

や流向を強制的に変えるため水みちがつくられてしまうことや、VOCsの土壌から地下水への排出がなかなか進まないことがその理由として考えられている。そのため、地下水揚水法は地下水・土壌の浄化対策としてよりも緊急的なバリア井戸として利用されることが多い。

土壌ガス吸引法は不飽和帯に存在するVOCsを分離回収する方法として用いられる。これは、土壌中に井戸を設けここから土壌中の空気を吸引して空気中に含まれるVOCsを回収するものである。空気の吸引によって汚染されていない空気が新たに地中に入り、これに土壌からVOCsが揮発してまた吸引されるという仕組みである。土壌中の空気は負圧となるためVOCsは不飽和帯においても飽和帯においても揮発しやすい状態となる。

一方、地下水揚水法によってはVOCsの分離回収に時間的な制約があることからエアースパーキング法が実施されている。飽和帯に空気の気泡を送り込みVOCsを気泡に揮発させ回収するという工法である。VOCsを含む気泡は上昇して不飽和帯に達すればガス吸引によって回収される。

土壌ガス吸引法やエアースパーキング法はVOCsを土壌から除去する工法として地下水揚水法に比べ経験上浄化効率が高いことが知られている。このことはVOCsの原位置での物理的回収にはその揮発性を利用した工法が効果的であることが示唆される。地上での地下水中のVOCsの分離回収には、この揮発性を利用した処理工法が用いられることが多い。

2.2 本工法の原理

2.2.1 揚水井戸の構造

本工法の揚水井戸はSWP工法のものと同じ構造であり、井戸管内を真空ポンプで吸引するとともに底部に設置した水中ポンプにより地下水を揚水する工法である。本工法における井戸構造図を図-1に示す。

図-1に示すように建て込んだ井戸管の上部は閉じた構造(上蓋付き)をしており、上蓋には水中ポンプから

の揚水管が通過し、井戸管内の空気を吸引するための配管がわずかに挿入される。井戸管の下端は砂溜を確保し、その上部に通水孔を設ける。通水孔の下端から自然状態の地下水面近くまで井戸管を囲むように、独立して巻線のスクリーンが取り付けられる。掘削孔と井戸管の空隙のスクリーン部にはフィルター材として砂利等が、その上部には止水のため粘土等が充填される。

2.2.2 SWP工法

SWP工法では地下水の揚水は水中ポンプによっておこなう。水中ポンプは通水孔のやや上部に設置されるが、負圧や土砂の混入にも耐えられる水中ポンプを使用する。井戸管内のガス吸引は地上に設置した真空ポンプにより井戸管の上蓋から挿入された配管を通しておこなう。

地下水揚水法ではいわゆるディープウェル工法を用いて地下水が揚水されるが、この工法は重力排水のため揚水量には地下水位による制限がある。すなわち地下水位が水中ポンプ近くまで低下すると揚水量が減少する。しかし、本工法の場合、井戸管内の空気吸引により井戸管内部の地下水を負圧状態に保たせ周辺地下水との間に大きな動水勾配を生じさせるため、重力排水の限界を超える多量の地下水が井戸管に流入する。その結果、井戸周辺の地下水面の低下がきわめて大きくなり不飽和帯が拡大する。この時の地下水位面がいわゆる対数曲線にはならず直線的な形状になることが特徴である。

このSWP工法のもとになった工法にバキュームディープウェル工法(図-2参照)がある。この工法の井戸管内の空気を吸引して同時に地下水を揚水する方法は本工法と同じであるが、スクリーンが独立しておらず井戸管の一部として設けられていて地下水面がスクリーンの位置まで低下すると空気が井戸管内に入り込み真空度が低下して揚水量が著しく低下するという欠点があった。SWP工法はバキュームディープウェル工法の弱点である空気の井戸管内への入り込みをできるだけ防ぐため、上記のスクリーン構造の工夫を図ったものである。すなわち、井戸管の低部に通水孔があるため地下水が井戸管内に流入する位置を下げ、低い地下水位まで有効に揚水できるもので地下水位がスクリーンの位置に達し空気が入り込んでも空気は井戸管とスクリーンの隙間から上昇するため通水孔から入り込みにくいのである。ただし、空気が全く入り込まないのではなく、井戸周辺の地下水位が低下すれば空気が入り込む場合も生じる。この場合、地下水揚水と同時に空気を吸引することになる。

2.2.3 本工法

本工法はSWP工法と同じシステムであるが、その目的が地下水揚水とともに不飽和帯の空気を吸引することにある。前項の最後で述べたように周辺の地下水位が低下すれば地下水揚水とともに空気の吸引が可能となる。本工法はこの特徴を利用するものであり、今回の場合、

井戸管内の真空度や揚水量のコントロールが必要であった。

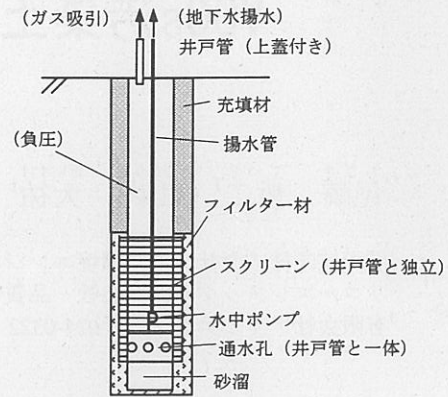


図-1 井戸構造図

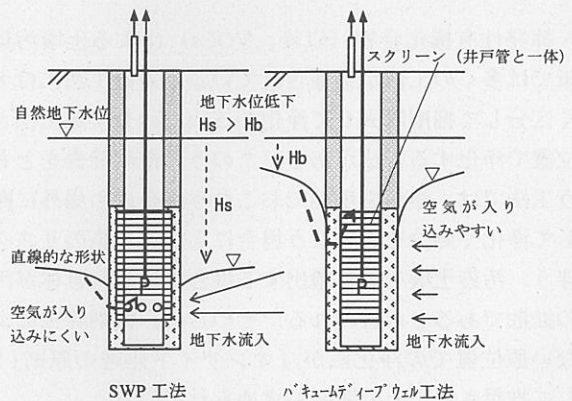


図-2 井戸比較

3. 浄化事例

3.1 対象地の地質および地下水

対象地は北から南に流れる河川の山地部から平野に開く左岸部に位置する。東側の山地は花崗岩により形成され、付近が山地の末端にあたることから河川の浸食により取り残された花崗岩の残丘が対象地の南北にみられる。花崗岩上面には河川跡として谷の存在が推定され、地盤はこの花崗岩を基盤としてその上の砂層主体の洪積層および表層部の盛土により構成される。地層の層序表を表-1に示す。地下水は洪積層および花崗岩上部の風化部に存在し、これらは一体となって帯水層を形成していると考えられる。地下水面は地表から7 m 付近にあり、その流れは花崗岩上面の谷地形に沿って概ね東から西に向かって流れていることが推定される。また、地下水の賦存量は比較的少ない地盤と判断される。

3.2 汚染状況

対象地では工場敷地の境界付近におよそ東西約40 m、南北約15 m の範囲にトリクロロエチレン(以下、TCE)による汚染が確認されている。対象地の平面図を

図-3に示す。この汚染はかつて同地の旧工場で使用していたTCEによる汚染であり、図-3に示す2つの汚染区域のうちA区域は旧工場の排水路からの漏出による、B区域は旧工場の汚染源からの拡散によるものと推定されている。

両区域の土壌調査結果についてA区域で4本の、B区域で3本のボーリング孔のTCE土壌溶出量を図-4に示す。ただし、B-5、B-6およびB-7は後述する地下水揚水法による対策中に調査している。図-4のA区域のB-2およびB-5はTCEの漏出地点近傍と推定される地点である。TCEは深度2 m~3 mの浅い深度で高濃度を示し、地表から深度12 mまでのほとんどの深度で土壌溶出量基準を超える。最高濃度はB-2では深度2.4 mの0.22 mg/L、B-5では深度1.5 mの180 mg/Lである。一方、近傍のB-3、B-4の浅層部ではほとんど確認されず深度5 m以深で比較的高い濃度を示す。B-3の最高濃度は深度8 mの0.22 mg/Lである。B-4では深度6 m以深の10 m、14 mを除く深度で確認されるが、どの深度においても基準を超えない。この2孔の汚染状況は近傍で漏出したTECが深度5 m以深に達し、これが地下水の流れによって水平に拡散しているものと推定される。地下水ではB-2、B-3、B-4においてTCEおよびシス1,2-ジクロロエチレン（以後、cis-1,2-DCE）が確認される。TCE濃度はすべての孔で地下水基準（0.03 mg/L以下）を超え、最高値はB-3の9.6 mg/Lである。しかしcis-1,2-DCEはすべての孔で基準（0.04 mg/L以下）を超えない。

B区域では3本のボーリングとも同様の汚染状況を示し、表層から深度3 mまではTCEが確認されるものの土壌溶出量基準を超えない。濃度は深度4 mから上昇して基準を超え、深度7 m近くでピークとなり、それ以後は低下して深度11 mで基準未達となる。この区間ではほとんどの深度で基準を超える。最高濃度はすべての孔で深度7 mにおいて出現しB-1で1.4 mg/L、B-6で0.382 mg/LそしてB-7で0.227 mg/Lである。この汚染状況は工場内の汚染源から降下したTCEが地下水の流れによって拡散した結果であると推察される。地下水ではB-1においてTCEおよびcis-1,2-DCEが確認されTCE濃度は15 mg/Lと地下水基準を超えるが、cis-1,2-DCEの濃度は基準を超えない。

両区域の東側の敷地境界付近における地下水観測孔（W-1~W-6）では、すべての観測孔でTCEおよびcis-1,2-DCEが確認され、TCE濃度は各孔とも地下水基準を超え、最高濃度はW-2の19 mg/Lである。

3.3 浄化施設

3.3.1 地下水揚水法による浄化施設

対象地の汚染状況を踏まえ、VOCsの敷地外への拡散を防止することおよびその回収を目的に地下水揚水法に

表-1 地層の層序表

地層	記号	層厚(m)	深度(-m)
表土・盛土	B	1~1.5	1~1.5
粘土(洪積層)	Dc	0.5~1.0	1.5~2.5
砂(洪積層)	Ds	3~5	4.5~7.5
花崗岩(強風化, マサ)	G3	1~3	5.5~10.5
花崗岩(風化)	G2	0.5<	6.0~11.0<
花崗岩(未風化)(推定)	G1		

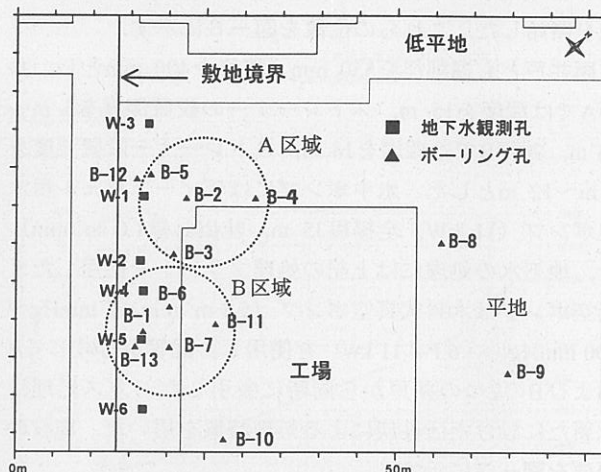


図-3 対象地平面図

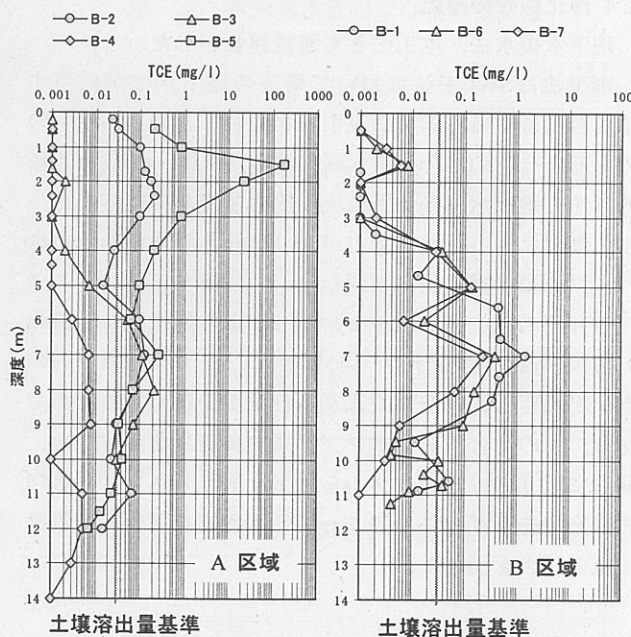


図-4 土壌調査結果

よる対策をおこなった。平成11年12月から地下水観測孔を転用して2本の井戸（W-1、W-2）により、平成12年12月からは4本の井戸（W-3、W-4、W-5、W-6）を追加して平成15年12月まで地下水を揚水した。

各井戸の設置場所を図-5に示す。井戸口径はすべてφ100 mmとし、ポンプには吸上げ式（真空式）を用いた。井戸深度は12 mあるいは13 mであり、スクリーンの設置は深度4 mから10.5 m~12 mの区間とした。これ

らの区間は地下水が存在する砂層あるいは礫まじり砂層および風化花崗岩に対応する深度である。ポンプによる吸い込み口はスクリーンの最下部に設置した。地上では回転噴霧式の処理プラントにより汚染水からVOCsを分離して活性炭により吸着処理した。

3.3.2 本工法による浄化施設

地下水揚水法に続き平成15年12月からはA区域、B区域に本工法による揚水井戸（井戸A、B）を設置し、浄化を開始した。これらの位置を図-6に示す。

両井戸とも掘削径を550 mm、管径を400 mmとし、井戸Aでは深度を15 m、ストレーナーの設置深度を5 m～13 m、井戸Bでは深度を14 m、ストレーナー設置深度を5 m～12 mとした。水中ポンプにはディープウェル用水中ポンプ（11 kW、全揚程35 m、吐出し量1.0 m³/min）を、地下水の処理には上記の処理プラントを使用した。真空ポンプは水封式真空ポンプ（5.3 m³/min×3 mmHg～600 mmHg × 6 P×11 kw）を使用し、配管を分岐してAおよびBの2つの井戸から同時に吸引した。ガス処理には新たに設けた活性炭による処理装置を用いた。施設の概要を図-7に示す。

3.4 浄化施設の運転

地下水揚水法、本工法とも連続運転とした。

本工法はSWP工法において周辺の地下水位が低下する場合には空気も同時に吸引できる特徴を利用したものである。今回の場合、帯水層の厚みが3 m～4 mと比較的うすく地下水位の低下は比較的容易であった。また、水処理プラントの処理能力が50 L/minと制限があるためバルブを絞って揚水量を制限した。

各井戸の水位をレベルセンサーにより通水孔から概ね3 mの高さにコントロールした。これは、井戸管内の水位が高くなれば空気の入り込む量が少なくなるためであり、この場合、真空ポンプが高い真空度を示すため、配管に取り付けたバルブから外気を取り入れて井戸管内の真空度を下げることによって地下水位を下げ、空気吸引量の増大を図った。

3.5 結果

3.5.1 地下水位

地下水位の低下状況について揚水前の自然地下水位を図-5に示し、本工法開始前（地下水揚水法による揚水中）と開始後の地下水位を図-6に示す。等高線の数値は対象地の仮ベンチマーク（地表より約1.5 m低い）を基準とした深度を示す（以下、同様）。

図-5から自然状態では地下水が東から西に向かい流れている。これが地下水の水理基盤となっている花崗岩の上面の傾斜に沿う流れであることが推察される。図-6の地下水揚水法の運転中（本工法運転開始前）の等高

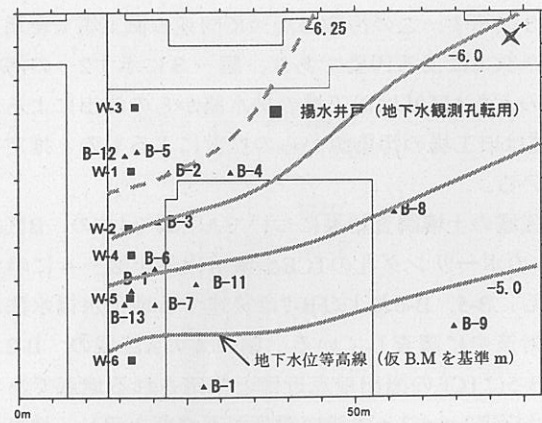


図-5 揚水井戸の設置場所および自然水位

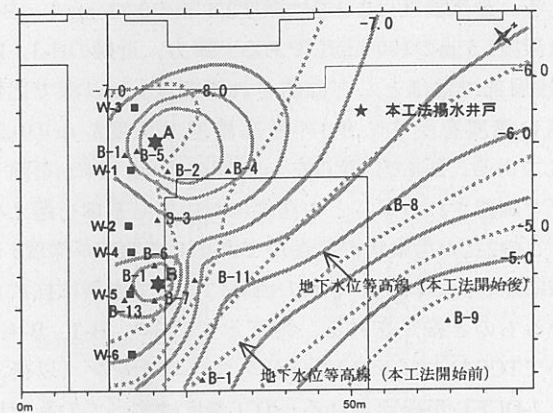


図-6 本工法の設置場所および本工法運転前後の地下水位

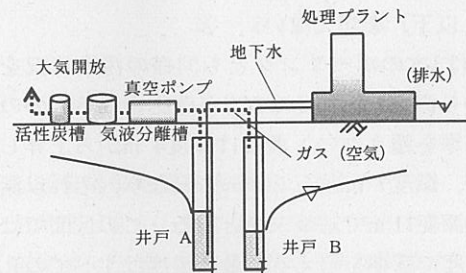


図-7 施設の概要

線ではその間隔が狭くなり地下水が集水されている。しかし、その効果は井戸周辺に限られ、敷地外の地下水を大きく敷地内へ戻す流れとはなっていない。一方、図-6の本工法の運転中（本工法開始後）においては地下水位低下が顕著であり、境界外の地下水が敷地内へ戻されているようすがわかる。

この違いを図-8に示す。図-8の地下水位のラインは井戸A、井戸Bを横切る観測井戸の水位を結んだものである。地下水揚水法による地下水位に比較して本工法による地下水位が大きく低下している。

3.5.2 揚水量

揚水量について地下水の揚水を開始した平成12年12月からの月別の揚水量および累積量を図-9に示す。図-9より当初の2本の揚水井戸による揚水量がおよそ50

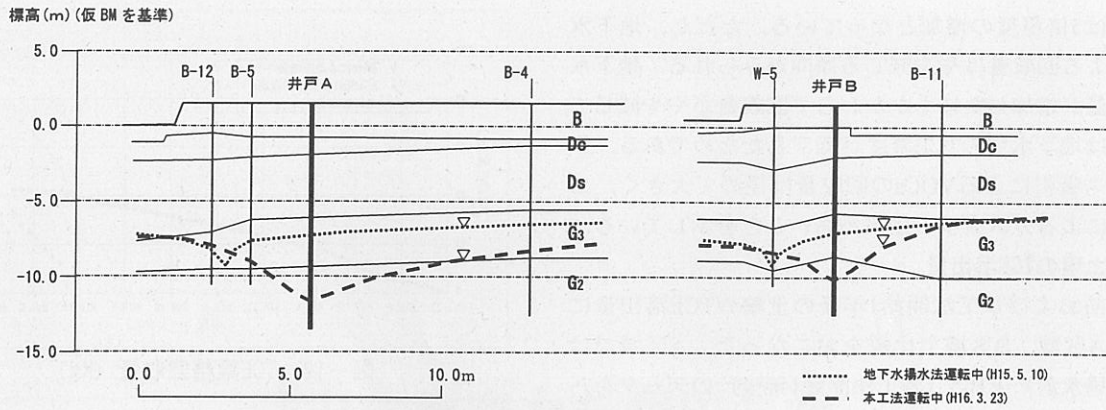


図-8 地下水位比較図

m³/月～100 m³/月の範囲にあり、揚水井戸が6本になった平成12年11月からは平均的には前者の2倍以上のおよそ200 m³/月の揚水量となっている。本工法になってからの増加はさらに顕著であり400 m³～500 m³/月の揚水量である。この量が揚水量に制限を加えた条件であることを考慮すれば、本工法による揚水量増加の効果は明らかである。

3.5.3 地下水中のTCE濃度

地下水中のTCE濃度の変化について、A区域の観測孔(3本)のデータを図-10に、B区域の観測孔(3本)のデータを図-11に示す。図-10より、3本の観測孔とも当初10 mg/Lを超える濃度を示すが揚水開始後は低下して10 mg/Lを下回る。揚水井戸を6本としてからはW-1、B-3はゆるやかな低下傾向を示し本工法開始時(平成15年12月)に至る。一方、W-3は急激に低下して1 mg/Lを下回る濃度となって推移する。本工法の開始後、W-1における濃度低下は明らかで平成16年10月4日のデータでは0.3 mg/Lを下回る。B-3についても低下の傾向を示し、W-3では地下水基準0.03 mg/Lを下回る濃度まで低下する。

図-11のB区域では3本の観測孔は当初A区域と同様に10 mg/Lを超える濃度を示すが、6本の揚水井戸となつてからはゆるやかな低下傾向が見られる。本工法を開始してからはW-4(P)のデータに大きな濃度低下が見られる。ただし、これが明らかな低下を示しているものか、あるいは単なる変動であるのかの判別は難しい。

3.5.4 TCE回収量

TCEの回収量を図-12に示す。地下水揚水によるTCE量は揚水量にTCE濃度(原水濃度-処理水濃度)を乗じて、ガス吸引による場合には回収するガス量にガス中のTCE濃度を乗じて求めた。

図-12よりTCEの累積回収量は、地下水揚水法による対策期間においては地下水の揚水量のグラフと同様の単調増加の傾向を示す。これは地下水量に比例した回収量が得られているため、揚水した水に含まれるTCE量がほぼ同じ濃度であることを示している。

地下水揚水法から本工法に変更した平成15年12月からTCEの回収量は急激に増加し、それまでの回収量に比べ

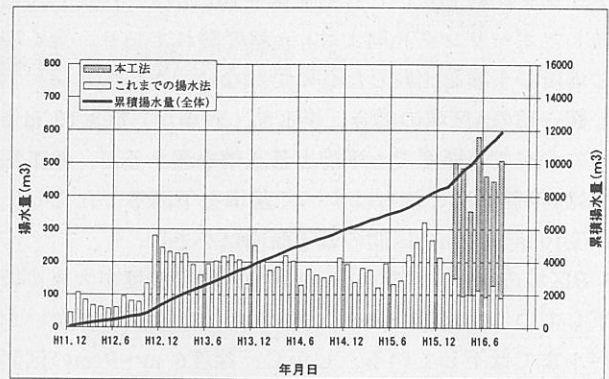


図-9 月別揚水量および累積揚水量

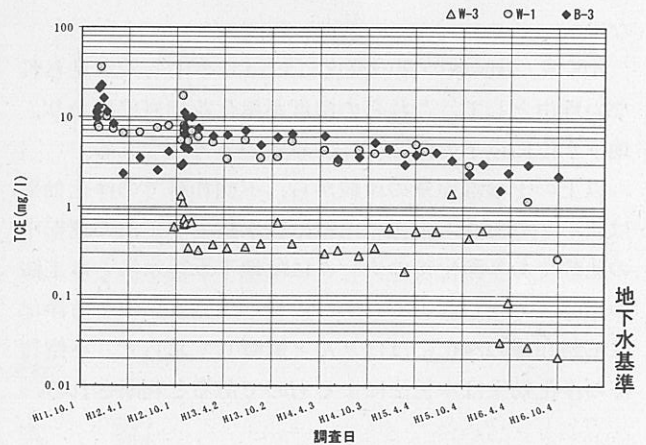


図-10 地下水中のTCE濃度変化図 (A区域)

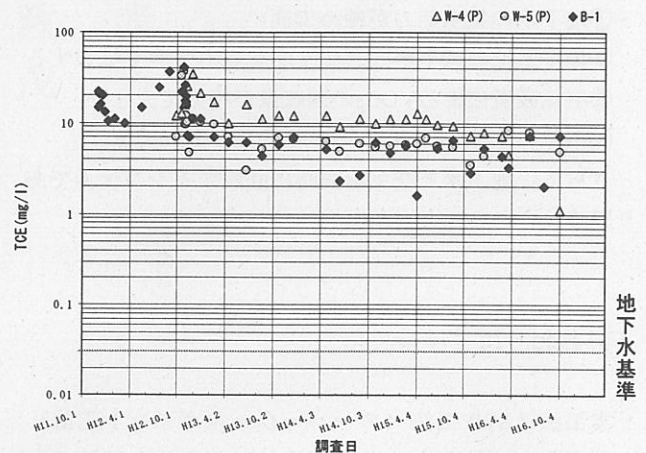


図-11 地下水中のTCE濃度変化図 (B区域)

全体では5倍程度の増加となっている。ただし、地下水揚水による回収量はやや減じる傾向がみられる。地下水の揚水量が増加したにもかかわらず回収量がやや減じているのは地下水中のTCE濃度が低下したためである。一方、ガス吸引によるVOCsの回収量は極めて大きく、この工法によるガス吸引の効果が高いことを示している。

3.5.5 土壌のTCE溶出量

揚水前および本工法開始1年後の土壌のTCE溶出量についてA区域、B区域で比較をおこなった。A区域ではB-12（揚水前）とB-5（本工法開始1年後）のデータを、B区域ではB-1（揚水前）とB-13（本工法開始1年後）のデータを比較した。これらを図-13に示す。ただし、比較したボーリング孔同士は1 m程度離れており、全く同じ場所の土壌を比較したものではない。

図-13のA区域の場合、揚水前、表層から深度10 mまでのすべての深度で土壌溶出量基準を超えるが、本工法開始1年後ではこれらはすべて基準を下回る。ただし、深度10 m～12 mの区間の低下傾向は小さい。

B区域の場合、深度3 m～9 mの区間で濃度が大きく低下している。深度3 m～6 mの区間では検出されないレベルまで低下している。しかし、深度6 m～9 mの区間では基準レベルで残留する。深度9 m～11 mの区間では濃度が前後で逆転している深度もあり効果は明らかではない。

A区域、B区域の深い深度において浄化効果が見られない理由として、これらの深度が風化花崗岩部にあり、地下水水位以下の飽和帯にあるためと考えられる。

以上の土壌溶出量の比較から、不飽和帯での浄化効果は明らかである。上記の比較は揚水前と本工法の運転中の比較であり浄化後のデータには地下水揚水法と本工法の影響が考えられる。しかし、地下水揚水法による浄化は不飽和帯の浄化にはほとんど影響しておらず、不飽和帯の浄化効果は本工法によるものと判断される。

3.6 まとめ

本工法についてまとめれば以下のとおりである。

- ①地下水の集水能力が極めて高い
- ②地下水位の低下が大きく不飽和帯も大きく拡大する
- ③空気吸引によるVOCsの回収量が極めて大きい
- ④不飽和土壌中のVOCsの浄化効果が高い

さらに、地下水と空気を同時に回収するシステムであり経済的であることも挙げられる。

4. おわりに

本工法はSWP工法（スーパーウェルポイント工法）を利用した工法であり井戸構造はSWP工法と同じであ

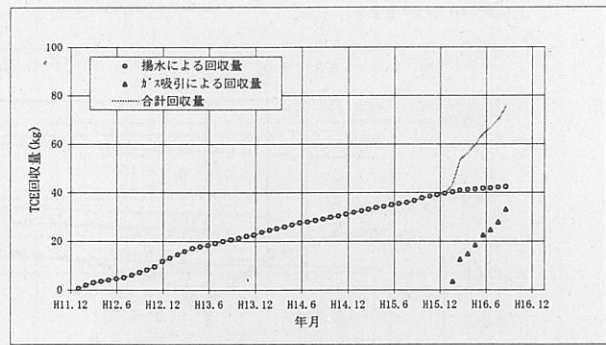


図-12 TCE累積回収量 (Kg)

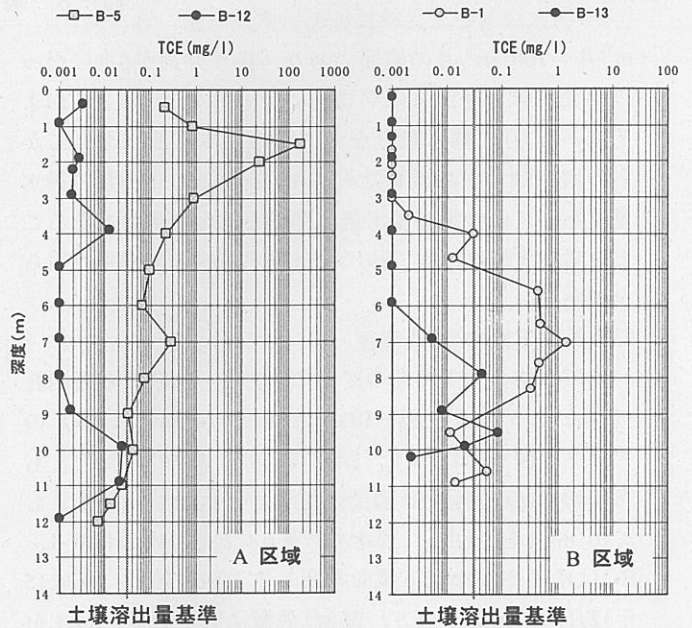


図-13 土壌溶出量比較

る。SWP工法を地下水位低下工法として利用した場合、井戸管への空気浸入は好ましくない。しかし、本工法では地下水位を下げ空気を積極的に吸引することを目的とした。今回、現場の条件を踏まえ井戸管内の真空度や地下水位をコントロールして良好な結果を得ることができた。

今後、回収する地下水や空気のモニタリングとともに運転に関わるデータを取得し、運転技術の確立を目指したい。

参考文献

- 1)三木博史 (2004)：日本はどうしますか？ 土壌汚染対策技術は大丈夫ですか？，土木学会誌，10月号，Vol.89，p.016.
- 2)地盤環境技術研究会編(2003)：土壌汚染対策技術，日科技連，pp.321~324.
- 3)有限会社アサヒテクノ：パンフレット，スーパーウェルポイント工法