

S 1 - 1 8 地下水揚水および地下空気吸引による油汚染サイトの浄化事例

尾崎哲二¹・高橋裕幸²・高田史朗³・内海太陽³・丸山悠⁴・小西正郎⁴

¹アサヒテクノ (NBH 技術顧問)・²アサヒテクノ・³アステック・⁴奥村組

1. はじめに

本稿では VOCs や油分など揮発性の汚染物質による土壌・地下水汚染の浄化に有効な地下水・地下空気回収工法(以下、SKK 工法)¹⁾の概要を述べ、この工法による油汚染サイトの浄化事例について報告する。浄化事例では汚染物質が揮発性のベンゼンや揚水回収が可能な油分であったもので、汚染した地下水を揚水し、地下水面が低下した汚染部の地下空気を吸引して浄化した。およそ3ヵ月間にわたり浄化を進め、良好な結果を得た。

2. SKK 工法について

2.1 工法の概要

SKK 工法による浄化概念図を図1に示す。SKK 工法は地盤中に存在する VOCs あるいは油分などの汚染物質を地下水および地下空気により回収する原位置浄化技術である。

図1に示すように本工法では汚染範囲を鋼矢板で囲み、汚染源など濃度の高い場所に井戸(改良型バキュームウェル工法(以下、SWP 工法))^{2),3)}を設置する。地上には地下水および地下空気の処理プラントを設ける。このとき SWP 井戸は地下水面が汚染箇所より深い位置まで低下するように計画し、鋼矢板の打設深度は SWP 井戸よりさらに深くする。

この工法の基本技術である SWP 工法は真空ポンプにより井戸内を吸引(減圧)して地下水に負圧を与え、集まる地下水を水中ポンプで汲み上げる工法である。負圧となる地下水はピエゾ水頭が下がるため周辺地下水との動水勾配が大きくなる。そのため地下水の流入が増大する。そして、その集まる地下水を水中ポンプで揚水するのである。ウェルポイント工法のように真空ポンプによって揚水するのではない。負圧を維持するため井戸構造はできるだけ地下空気を吸引しないように工夫している。またこの工法では井戸設置後の洗浄が重要である。通常の井戸洗浄に加え水や圧縮空気を利用して強力に周辺地盤を洗浄するもので目詰りを防止する。

SWP 工法はその大きな揚水能力により通常、地下水位低下工法として用いられる。SKK 工法は SWP 工法のこの優れた揚水能力を生かし、真空ポンプを地下空気の吸引に利用している。それは地下水面が低下したのち吸水孔から地下空気を吸引し、同時に土壌中の揮発性物質を揮発させ回収するというものである。ただし、吸引する空気量が多量になれば井戸管内を減圧できなくなるため井戸管内の水位を制御して吸引量を抑制する。

さらに補助吸引用のパイプを井戸に沿って挿入し、これをブローで吸引して地下空気の回収を促進する。また地表に空気を遮断する措置を講じ、地下空気の圧力を下げ揮発性物質の揮発を促進させる。空気遮断措置にはコンクリートやビニールシートなどを施工するが、汚染箇所が深い場合には浅層部がその代替となる。

運転状況および浄化の進捗を確認するためモニタリングを実施する。測定項目は回収する地下水や地下空気の流量、含まれる汚染物質の濃度、また地下水位や地下空気圧などである。さらに必要に応じて公定法により土壌、地下水を分析する。

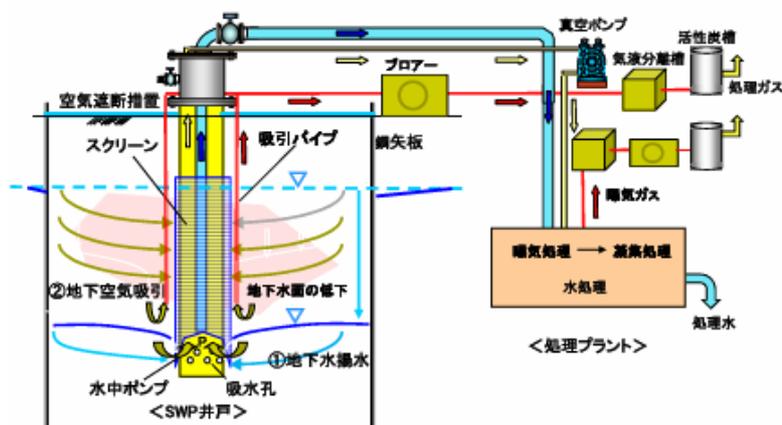


図1 SKK 工法による浄化概念図

A case of soil purification at the oil contamination site by groundwater pumping and underground air suction

Tetsuji Ozaki¹, Hiroyuki Takahashi², Shiro Takada³, Taiyo Utsumi³, Haruka Maruyama⁴, and Masao Konishi⁴

(¹ASAHITECHNO CORP. (NBH CO.,LTD), ²ASAHITEC HNO CORP., ³ASTECCO.,LTD, ⁴OKUMURA CORP.)

連絡先: 〒132-0035 東京都江戸川区平井 5-11-8 サンヨーハイツ 401 (有)アサヒテクノ 東京営業所
TEL 03-6913-9137 FAX 03-6913-9138 E-mail asahi_tokyo@apace.ocn.ne.jp / http://www.asahitechno.jp/

2.2 浄化手順

SKK 工法による浄化手順は次のとおりである。

SWP 井戸を稼働させて地下水を揚水し、地下水面を汚染箇所より深い深度まで下げる。これにより汚染した地下水は回収され、汚染土壌は地下空気に曝される状態（不飽和）となる。

地下水面の低下後、真空ポンプおよびブロアーにより地下空気を吸引する。

地下空気の吸引を一定期間続け、土壌の浄化が完了すれば浄化を完了とする。未浄化部が存在すれば清浄水による覆水を実施する。

～ の手順を繰り返して浄化を完了させる。その回数は現場の汚染状況などに応じて決める。

2.3 処理プラント

地下水および地下空気が処理プラントで処理する。その処理フローを図2に示す。

対象とする地下水には VOCs あるいは油分が含まれる。そのため前段の原水槽および曝気槽で揮発性物質を揮発させブロアーにより吸引する。吸引した揮発性物質は気液分離槽、活性炭槽を通して処理する。油分である場合には原水槽に吸着マットを浮かべ油膜を除去する。

次に地下水を反応槽へ送り残留する油分や濁りを凝集させ、シックナーで沈澱させる。処理水は排水基準を満足させて下水道等に排水し、沈澱物は汚泥（産業廃棄物）として処分する。ただし、汲み上げる地下水に濁りがなく凝集沈殿の工程が必要のない場合は省略する。また排水前にピンフロック等の SS をプレフィルターで除去したうえで活性炭槽を通過させ残留する汚染物質を除去することもある。

回収する地下空気にも VOCs あるいは揮発性の油分が含まれる。真空ポンプによる地下空気は原水槽に送って水分を落とした後、気液分離槽、活性炭槽により処理して排気する。処理ガスは検知管により 1ppm 以下に管理し、超えた場合には活性炭が破過したのものとして入れ替える。ブロアーからの地下空気は気液分離槽、活性炭槽を通して処理する。

処理プラントの凝集のプロセスでは広範な汚染物質を処理できる天然鉱物を用いている⁴⁾。この水処理剤はアルカリ土類金属と陽イオン交換容量に優れた複数の鉱物を主体とする粉末状の資材であり、凝集作用と吸着作用により多くの物質に対する処理能力が高い。汚染物質が油分の場合、前段の曝気槽においてベンゼンなどの揮発性油分は揮発させ得るが不揮発性油分は分離できない。そこで、後段の凝集のプロセスでこの凝集剤を投入し、水中に残存する油分を鉱物表面に吸着させ沈殿分離する。また、地下水に重金属類が含まれる場合も本プロセスによる処理は可能である。

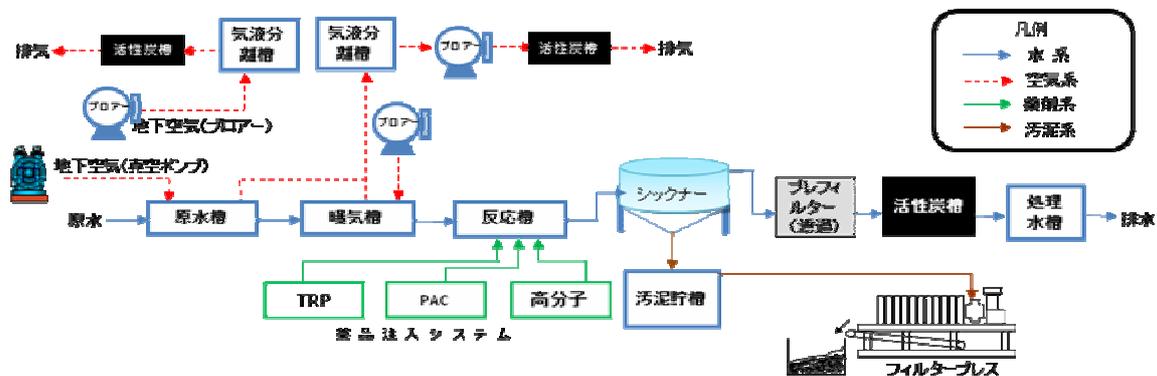


図2 処理プラントの処理フロー

2.4 モニタリング

地下水および地下空気に関するモニタリング項目の一覧を表1に示す。

地下水量および地下空気量は定期的に測定する。地下水中のベンゼンなどの揮発性物質の濃度はヘッドスペース法あるいはPIDによって測定し、地下空気中の濃度は排気部で直接に空気を吸引して検知管あるいはPIDによって測定する。また観測井戸の地下水位は手計りの水位計により測定する。

地下空気圧は観測井戸の空気圧によって持ち上がる水の高さによって測定（水柱法）する。この高さを観測井戸の圧力（負圧、水柱高による表示）とする。

表1 モニタリング一覧表

物質	採取場所	流量	濃度	地下水位 / 地下空気圧
地下水	揚水管	設置型水道メータ	検知管 (ヘッドスペース法) 又は PID	-
	観測井戸	-	検知管 (ヘッドスペース法) 又は PID	測定 (手計り水位計)
地下空気	真空ポンプ	移動式流量計	検知管又は PID	-
	ブローア	移動式流量計	検知管又は PID	-
	観測井戸	-	検知管又は PID	測定 (水柱法、圧力計)

観測井戸内の揮発性物質の濃度測定は検知管にビニールホースを取り付けて吊り降ろし、口元の手動ポンプにより吸引して測定する。あるいは同様にガスを採取して PID により分析する。

最終的な浄化状況の確認は公定法分析によって行う。地下水の採取においては清浄水を覆水したのち一定期間静置して採水する。

3. 油汚染サイトの浄化事例

3.1 汚染サイトの状況と浄化目標

対象地は汚染物質を取り扱った履歴のある施設跡地であり、更地状態にあった。10m 区画の土壌調査結果からベンゼンによる土壌溶出量および地下水の汚染が明らかになっていた。また、一部に油分含有量の高い範囲があった。これらの汚染状況を図3および表2に示す。

地盤は礫混じり土からなる埋土とその下位に分布する沖積砂層により構成される。埋土層は 1.10m ~ 2.30 m の層厚があり、10mm から 15mm 程度の角礫を多く含む砂質土でコンクリート片等の瓦礫が混入する。沖積砂層は中砂から粗砂を主体とするが細粒分も多く混入する。全般に含水量が多くて緩い地盤であるが、GL-3m あたりから締まりを見せ GL-8m 近くでシルト層に変わる。自然地下水面は GL-1.6m 近傍にあり、ある日の地下水の動水勾配が 1/358 であった。この勾配は対象地の地下水の通常の流れのものである。

浄化目標を表2のとおり定めた。

表2 汚染の概要と浄化目標 赤外線分光分析法 (IR 法)

対象物質	汚染項目	最大値	基準 (浄化目標)	汚染深度
ベンゼン	土壌溶出量	0.58mg/L	土壌溶出量基準 (0.01mg/L 以下)	GL-1m ~ -3m
ベンゼン	地下水	5.1mg/L	地下水基準 (0.01mg/L 以下)	-
油	土壌含有量	8000mg/Kg	なし (1000mg/Kg 以下)	GL-1m ~ -4m

3.2 浄化方法

浄化方法は前述の方法に準じた。SWP 井戸、観測井戸等の設置場所を図3に示す。

1) 浄化設備

汚染範囲のおよそ 800m² を鋼矢板で囲み、SWP 井戸は地下水および土壌のベンゼン濃度の比較的高い場所に1本設置した。汚染深度が GL-1m から GL-4m の区間であったことから GL-1.6m 近傍にある地下水面を GL-5m 以深に低下させることを目標とし、スクリーンは GL-3m から GL-7m の区間に取り付けた。処理プラントは鋼矢板の外部に設置し、各配管を SWP 井戸に接続した。処理プラントの処理基準は下水道排水基準とした。

ブローア吸引用の吸引パイプを井戸管近傍に1本設置した。また、空気遮断措置として地表をビニールシートで覆い、水を張った。

2) 観測井戸

観測井戸 (MW) を鋼矢板内側の隅に4本、SWP 井戸の近傍に1本、鋼矢板の外に1本設置した。また、地下空気圧を測定するため MW のほか観測井戸 (AW) を鋼矢板内部に4本設置した。

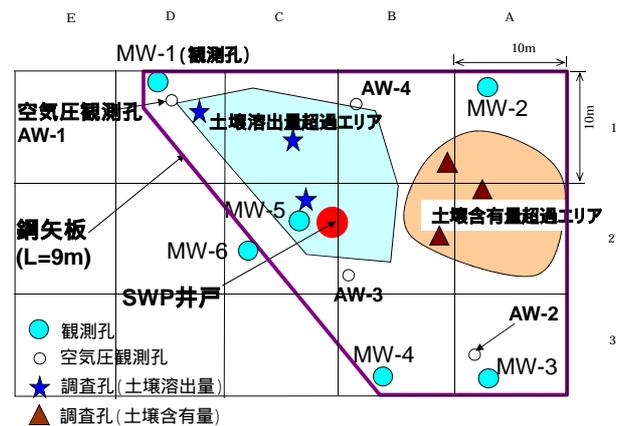


図3 浄化事例サイト状況図

3)浄化手順

井戸設置後、井戸および周辺土壌の洗浄を実施したのち浄化を開始した。

浄化では前述のように地下水を揚水し、地下空気を吸引するといった手順で進めた。ただし、週末や採水時などには運転を停止した。全体の工事期間 95 日のうち作業した日数は 59 日であり、準備期間や洗浄期間などを除けば実質の浄化期間は 46 日間であった。また作業は原則昼夜連続運転としたが、停止直前の作業日は昼間のみとした。

3.3 モニタリング結果

1)モニタリング

モニタリングで得られたデータのうち地下水位、地下空気圧のデータをグラフで示す。グラフでは SWP 井戸設置後に洗浄作業を開始した日を起点とする経過日数を X 軸としている。下記に記載する日数はこの経過日数である。

(1)地下水位

地下水位の変化を図 4 に示す。地下水位の測定は原則、作業日の朝に実施した(運転再開日には運転開始前)。

図 4 の 1 日目の水位が自然状態の水位と考えられ、すべての観測井戸 (MW) で GL-1.6m 前後を示す。6 日目から洗浄を始め 17 日に終了させた。この期間の水位は自然水位近傍を推移する。

20 日目から SWP を稼働させ浄化を開始した。プロアーは 36 日目までは稼働させず (前半) 55 日目以降に稼働させた(後半)。

前半は週末の停止期間をはさみ 3 つの浄化期間に分けられる。各浄化期間とも浄化開始時の地下水位はほぼ自然水位のレベルである。浄化開始とともに地下水位は低下して平衡状態になる。平衡状態の水位は最も高い MW-2 で GL-5.0m 近くまで低下している。次に MW-1 が GL-5.7m、MW-3 および MW-4 が GL-6.0m、そして MW-5 が GL-6.1m までの低下を示す。これらより目標とした GL-5.0m までの水位低下がすべての井戸で確認される。一方、鋼矢板の外に設置した MW-6 ではほとんど水位低下が見られない。これは SWP 工法において普遍的に見られる現象であり、実験や解析においても確認されている。

後半は 5 つの浄化期間に分けられる。なお 75 日目から 82 日目までは浄化作業を休止した期間である。各浄化期間とも浄化開始時には前半の場合に比べやや低いが、地下水位が回復している。しかし、平衡時の水位は前半に比べ大きく低下している。MW-2 では GL-5.5m から -6.0m までの範囲の低下であり、MW-1 では -6.0m から -6.3m までの、MW-3、MW-4 が -6.5m から -7.0m まで、MW-5 では -6.2m から -6.7m までの低下を示す。

後半の地下水の揚水は 52 日目から開始している。53 日、54 日と連続運転をした結果 55 日の水位は MW-2 では GL-4.1m を、MW-1 では -4.5m を、他の 3 つの観測井戸では -6.0m 前後を示した。これらは前半で観測された平衡時の水位と概ね同レベルである。しかしプロアーを稼働させた日 (55 日) の翌日 (56 日) になると MW-2

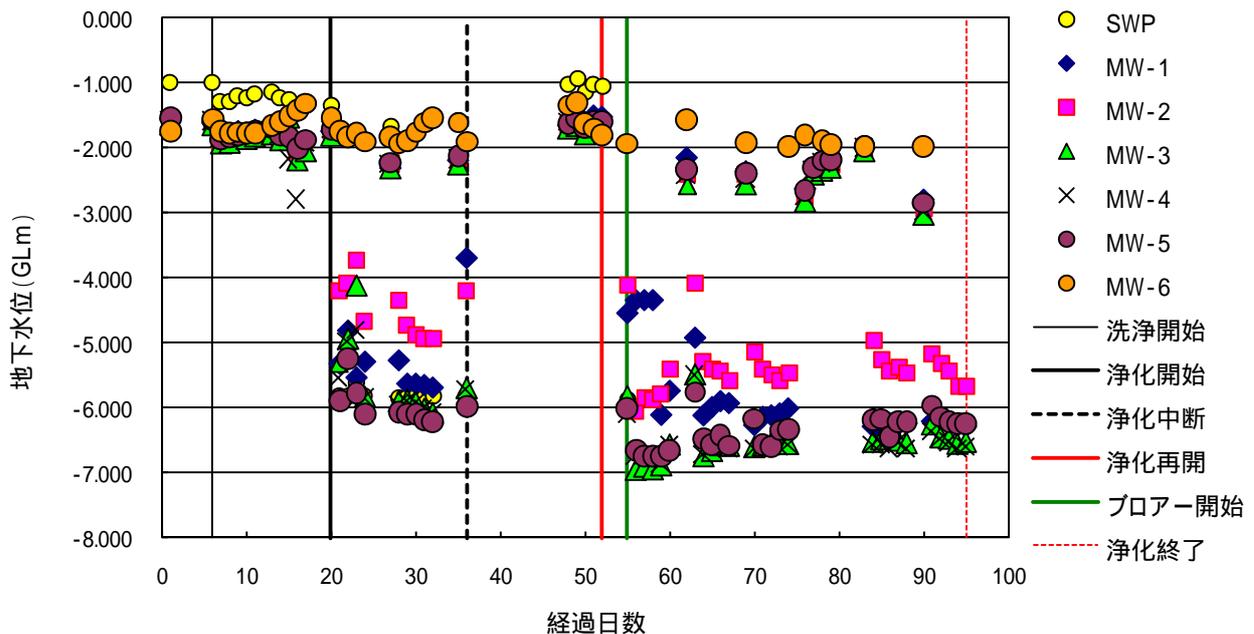


図 4 地下水位変化図

ではGL-6.0mを、MW-3では-7.0mを、MW-4では-6.7mを、MW-では-6.6mを記録する。55日目と比較すればMW-2では1m程度の、他の井戸では0.6m～1.0mの水位低下である。これはブローアによる地下空気吸引による影響と考えられる。続く4回の浄化期間においても同様の水位低下が見られた。

(2)地下空気圧

地下空気圧のデータのうち59日目、65日目、71日目および86日目のデータについて、観測井戸の地下空気圧とその井戸のSWP井戸からの離れの関係を図5に示す。

図5より4回の測定データに大きな違いはなく、SWP井戸から離れるにしたがい負圧は低下している。

図5に負圧の小さい3地点がある。7.9mの離れの地点はAW-4であり、10mはMW-1、19.3mはMW-2である。これら3地点は近傍においてシートによる遮断効果が十分機能していなかった可能性がある。しかし、これらの3地点を除けば大きな負圧が生じている。通常の土壌ガス吸引法では吸引井戸から5mの離れでは-10cm程であり、10mでは数cmとされるが、ここでは5mの離れで-100cm近くまで、15mの離れ（鋼矢板近傍）でも-10cm～-30cmの負圧が生じている。

2)地下水、土壌の分析結果

地下水および土壌を採取してベンゼンおよび油分について公定法分析を行った。

(1)地下水分析

地下水は観測井戸5本から浄化前に1回、浄化中に2回および浄化後に2回の計5回採取しベンゼン濃度を分析した。これらの分析結果を図6に示す。図6よりすべての井戸でベンゼン濃度は大きな低下を示し、48日目には基準の0.01mg/Lを下回り、97日および最終の98日にはすべての井戸で定量下限値未満であった。

(2)土壌分析

土壌はベンゼンの土壌溶出量超過の3区画から各1地点、油分含有量の高い3区画から各1地点で採取した。土壌採取回数は浄化前、浄化中および浄化後の計3回であり、各地点での3回の土壌採取は近接した孔から行った。これらの結果のうちC2区画のベンゼン土壌溶出量データを図7に、B2区画の油分土壌含有量データを図8に示す。

図7の土壌溶出量のグラフより、浄化中の48日の深度1m、2m、3mの溶出量は浄化前に比較して大きく上昇し、浄化後の76日には低下している。最終の97日には深度2m、3m、4m、5mの溶出量は基準を下回った。しかし、1mでは基準を超過した。

図7の土壌溶出量のグラフより、浄化中の48日の深度1m、2m、3mの溶出量は浄化前に比較して大きく上昇し、浄化後の76日には低下している。最終の97日には深度2m、3m、4m、5mの溶出量は基準を下回った。しかし、1mでは基準を超過した。

48日に溶出量が高くなった原因として周辺から移動するベンゼンが採取地点に濃縮した可能性が考えられる。本工法では地下水および地下空気によりベンゼンはSWP井戸に向かって移動する。そのためSWP井戸近傍にあるC2区画の採取地点では一時的にベンゼン濃度が高くなったものと推察される。しかし、時間の経過とともにベンゼンはSWP井戸に向かい移動する。そのため76日には減少し、97日には深度1mを除いて基準を下回った。浄化作業はこの時点で終了とし、深度1mの基準超過部に対しては地上部から別途対策を実施した。深度1mにおいて基準を超過したのは、溶出量の推移から判断して浄化期間が足りなかったものと考えられる。

図8の土壌含有量のグラフより浄化前8700mg/Kgであった深度2mの油分の土壌含有量は48日には1700mg/Kgに、76日には380mg/Kgに低下した。この含有量は目標の1000mg/Kgを大きく下回る。油分の含

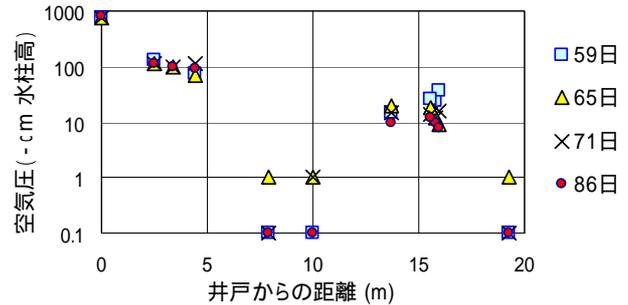


図5 地下空気圧の分布

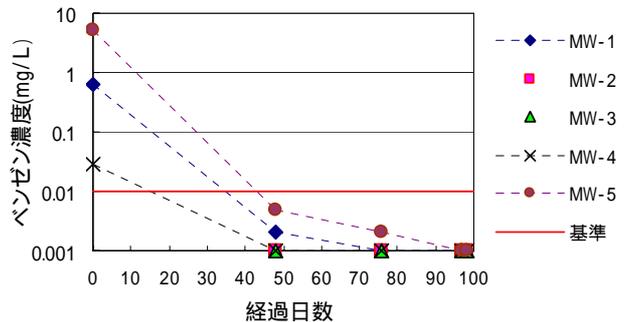


図6 地下水のベンゼン濃度

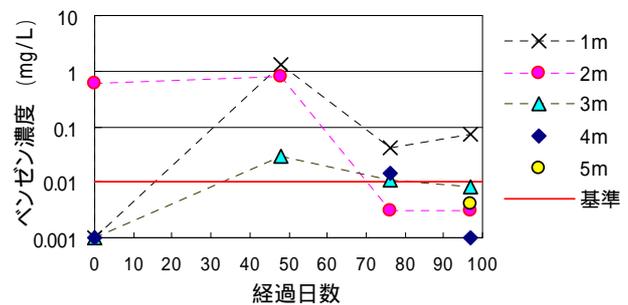


図7 ベンゼン土壌溶出量 (C2区画)

有量が顕著な低下傾向を示したのはベンゼン溶出量の場合と異なり、周辺から移動してくる油分が比較的少なかったものと推察される。浄化対象区画とした他の2区画の土壌についても同様の浄化結果が得られた。

3.4 まとめ

紹介した事例では全体工期や週末停止などの条件があり、実質46日間の短い浄化期間であった。しかし、対象地の地層が砂層であったため地下水の揚水が比較的良好に進み、地下空気の吸引ではブローアによる補助吸引が効果的であった。

まとめると次のようである。

- ベンゼンによる地下水の汚染は完全に浄化することができた
- ベンゼンの土壌汚染箇所では全般に浄化は進んだが、浅層部の一部で浄化できない箇所があった
- 油分の土壌含有量の高い箇所でも浄化が進み、目標の1000mg/Kg以下を満足した

4. おわりに

SKK工法はSWP工法の高い揚水能力と装備する真空ポンプを地下空気吸引に生かした土壌・地下水汚染の原位置浄化技術である。従来の地下水揚水法と土壌ガス吸引法を向上させた技術と言ってもよい。しかし、地下水を多量に揚水して短期間に地下水位を下げ、汚染土壌を不飽和状態にするところが本工法の要であり、ブローアを併用して地中の空気圧を下げ吸引力を高める点もこれまでになかった技術と考えている。

揮発性物質を含む土壌や地下水を地上に上げれば、これを揮発させて浄化するのが原則である。この方法が合理的だからである。本工法はこの浄化法を地中で行っているに過ぎない。本工法が掘削を伴わない、短期間で完全浄化が可能な工法になり得ると考えている。

今後、地中の負圧を高く保持できる空気遮断技術の開発、空気圧（負圧）と土壌中の揮発性物質の揮発速度との関係の整理、粘性土が混じる地層での合理的な浄化法の開発などを進めて行きたい。

参考文献

- 1) 尾崎哲二, 白川俊明, 山内大祐(2005); 真空ポンプを活用したVOCs汚染土壌の原位置浄化について、第11回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集、pp409-414
- 2) 細川土佐男, 高橋茂吉, 神野健二, 中山比佐雄, 朴崎鎬(2006); 飽和 - 不飽和浸透解析による改良型バキュームディープウェル工法の水位低下に関する検討、日本地下水学会、2006年秋季講演会講演要旨、pp84-87
- 3) 尾崎哲二, 高橋茂吉, 中山比佐雄, 神野健二(2007); 真空ポンプを利用した新しい地下水位低下工法、CEレポート、土木学会誌 vol.92 no.8 August
- 4) 高田史朗, 口舩愛, 宮西賢一, 庾炳暢, 森本一生(2005); 鉱油類汚染水処理技術の実際、第15回環境地質学シンポジウム論文集、pp25-28

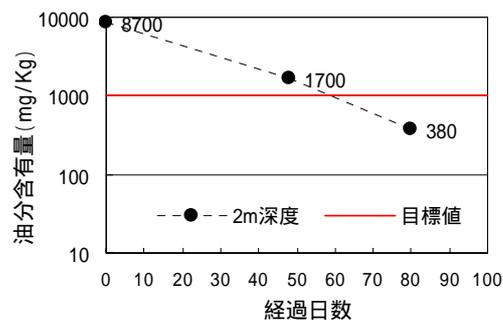


図8 油分土壌含有量 (B2区画)