

(S1-02) 原位置浄化のために必要な診断および過硫酸による地下水処置事例

○比嘉一葉¹・尾崎和宏¹・和知剛¹
¹株式会社エンバイオ・エンジニアリング

1. はじめに

原位置浄化は、低コストであることや環境負荷が少ないことが特徴としてあげられる。その一方で、対象地の水理地質構造を踏まえて詳細な汚染の分布を十分に把握した上で、適切に汚染物質と薬剤を接触させる施工技術選定、浄化設計が要求される。

本稿では、掘削除去後にリバウンドした揮発性有機化合物（以下、VOCs）による地下水汚染を対象とし、浄化のための事前調査から地下水対策を実施した。施工全体のフローを図-1 に示す。

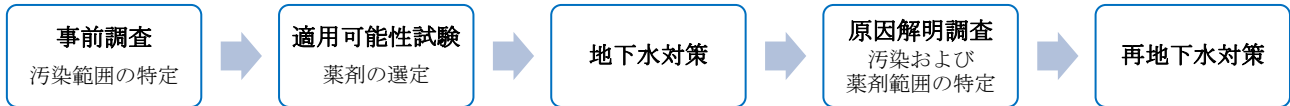


図-1 施工全体のフロー

事前調査では対象地の土壌分析に加え、特定深度の地下水を簡易に採取可能なツールを使用し、地下水中の VOCs の詳細分布の把握後、適用可能性試験で薬剤の選定を実施した。事前調査および適用可能性試験の結果を踏まえ地下水対策を実施したが、1 区画で地下水 VOCs の基準不適合が確認された。そこで再び原因解明調査として VOCs と薬剤の詳細な分布の特性を実施した。原因解明調査と事前調査の情報を合わせて再施工の設計および施工を経て地下水 VOCs の基準適合を確認した。

2. 対象地の概要

対象地では以前、A 区画、B 区画、C 区画でテトラクロロエチレン（以下、PCE）およびその分解生成物による土壌・地下水汚染が存在した。そのため、A 区画 9.0m、B 区画 5.0m、C 区画 7.0m まで掘削除去を実施し、掘削完了直後の地下水モニタリングでは全区画で VOCs の基準適合を確認した。しかし、2 年間モニタリング開始後に A 区画、B 区画、および C 区画において PCE、トリクロロエチレン（以下、TCE）、cis-1,2-ジクロロエチレン（以下、cis-1,2-DCE）、クロロエチレン（以下、CE）の基準不適合が確認された。

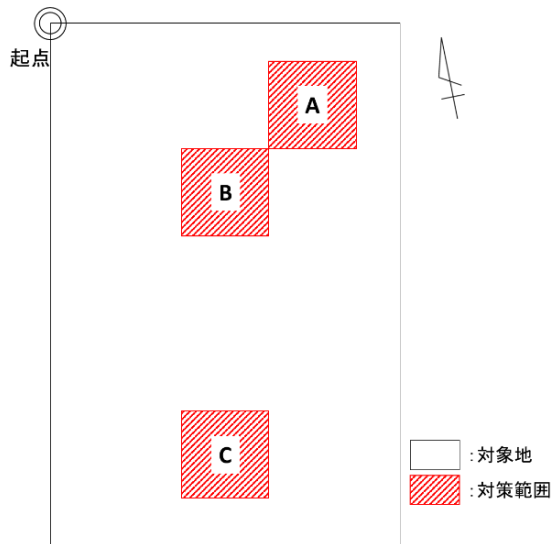


図-1 対象地の概要

表-1 モニタリング結果

		基準	掘削完了後	1回目	2回目
		A区画	PCE	0.01	0.0005
	TCE	0.03	<0.001	0.004	0.003
	1,1-DCE	0.1	<0.002	<0.002	-
	cis-1,2-DCE	0.04	0.008	0.071	0.033
	CE	0.002	<0.0002	0.0004	0.0002
B区画	PCE	0.01	0.0012	0.0059	0.013
	TCE	0.03	0.001	0.003	0.005
	1,1-DCE	0.1	<0.002	<0.002	-
	cis-1,2-DCE	0.04	0.009	0.013	0.030
	CE	0.002	<0.0002	<0.0002	0.0022
C区画	PCE	0.01	0.0011	<0.0005	0.0012
	TCE	0.03	0.001	<0.001	<0.002
	1,1-DCE	0.1	<0.002	<0.002	-
	cis-1,2-DCE	0.04	0.007	0.011	0.018
	CE	0.002	<0.0002	0.0048	0.032

The Important Factors of In-Situ Groundwater Remediation: Better Skills at Evaluating and Understanding Site Investigation Results

Kazuha Higa¹, Kazuhiro Ozaki¹ and Takeshi Wachi¹ (¹Enbio Engineering)
 連絡先：〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 2-2-2 神田パークプラザ 8 階
 (株) エンバイオ・エンジニアリング
 TEL 03-5297-7288 FAX 03-5297-0242 E-mail k_higa@enbio-eng.com

3. 事前調査

3.1 土壌調査

対象地の地質情報の取得および土壌の VOCs の有無を確認するため、ボーリングマシンを使用してボーリング調査を実施した。A 区画については 13.0m、B 区画については 7.0m、C 区画については 9.0m までサンプリングした。分析は、ガス検知管法を用いてサンプリングした土壌の PCE を測定し、数値が検出された深度でのみ PCE、TCE、1,1-DCE、cis-1,2-DCE、CE を公定法による分析を実施した。表-2 に土壌分析結果を示す。分析の結果、全区画で土壌の VOCs 汚染は確認されなかった。

3.2 地下水調査

VOCs の分布を調査するために、特定深度ごとの地下水調査を実地した。地下水サンプリングについては、スクリーン・ポイント式地下水サンプラーを使用し、掘削除去範囲の深度ごとの PCE、TCE、1,1-DCE、cis-1,2-DCE、CE の公定法による分析と、掘削除去範囲および掘削除去深度以深の pH 測定を実施した。特定深度の地下水のサンプリング方法およびスクリーン・ポイント地下水サンプラーの概要図を図-2 に示す。

表-2 土壌調査結果

土壌中のVOCs(単位:mg/L)							
試料名	採取深度 (GL: m)	PCE ガス検知管 (133LL)	1,1-DCE	cis-1,2- DCE	PCE	TCE	CE
A区画	1.0	不検出	—	—	—	—	—
	2.0	不検出	—	—	—	—	—
	3.0	不検出	—	—	—	—	—
	4.0	不検出	—	—	—	—	—
	5.0	不検出	—	—	—	—	—
	6.0	不検出	—	—	—	—	—
	7.0	不検出	—	—	—	—	—
	8.0	不検出	—	—	—	—	—
	9.0	不検出	—	—	—	—	—
	9.5	不検出	—	—	—	—	—
	10.0	0.9	不検出	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	10.3	0.5	不検出	0.029	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	11.0	不検出	不検出	0.0035	<0.0002	<0.0002	<0.0002
12.0	不検出	—	—	—	—	—	
13.0	不検出	不検出	0.0033	<0.0002	<0.0002	0.0002	
B区画	1.0	不検出	—	—	—	—	—
	2.0	不検出	—	—	—	—	—
	3.0	不検出	—	—	—	—	—
	4.0	不検出	—	—	—	—	—
	6.0	不検出	—	—	—	—	—
C区画	2.0	不検出	—	—	—	—	—
	3.0	不検出	—	—	—	—	—
	6.0	不検出	—	—	—	—	—
	7.0	不検出	—	—	—	—	—
	8.0	不検出	—	—	—	—	—
9.0	不検出	—	—	—	—	—	
基準値			0.1	0.04	0.01	0.03	0.002
定量下限値			0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002

- STEP1 打込み (DRIVING)**
組立てられたスクリーン・ポイント式地下水サンプラーを、プローブロッドを使用して対象深度まで打ち込む。
- STEP2 対象範囲へスクリーン設置 (DEPLOYMENT)**
操作棒でスクリーンを押さえ、外管のみを引上げる。
- STEP3 サンプリング (SAMPLING)**
ポリチューブで対象範囲の地下水をサンプリングする。(※スクリーン部分より上は外管により機械的な中空シールで覆われている。)
- STEP4 埋め戻し (GROUTING)**
スクリーンとロッドを引上げながら高圧のグラウドポンプでグラウド材を注入する。

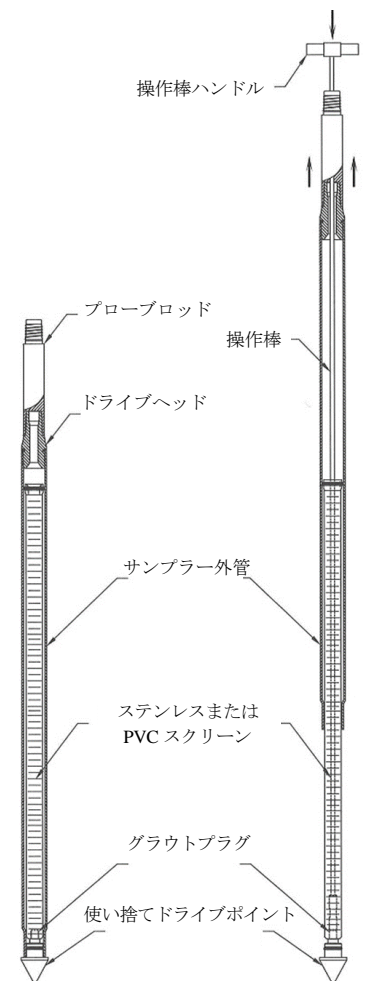


図-2 特定深度の地下水のサンプリング方法とスクリーン・ポイント式地下水サンプラーの概要

地下水調査の結果を表-3 に示す。A 区画では掘削除去範囲で PCE、cis-1,2-DCE および CE の基準不適合が確認され、10.0m～11.0m で pH1 を示していた。また、B 区画では PCE、C 区画では cis-1,2-DCE、CE が掘削除去範囲で基準不適合となっていた。

表-3 地下水調査の結果

地下水中のVOCs(単位:mg/L)								pH
試料名	採取深度 (GL- m)	PCE ガス検知管 (133LL:単位ppm)	1,1-DCE	cis-1,2- DCE	PCE	TCE	CE	
A区画	観測井戸		<0.0002	0.021	0.017	0.0049	<0.0002	7.8(18℃)
	5～6	1.9	<0.0002	0.042	0.0074	0.0025	0.0016	8.9(19℃)
	8～9	5	0.0004	0.23	0.012	0.0054	0.0067	7.8(18℃)
	10～11	—	—	—	—	—	—	10.0(19℃)
B区画	観測井戸		<0.0002	0.012	0.011	0.0053	<0.0002	6.9(18℃)
	3～4	1.2	<0.0002	0.025	0.0050	0.0060	<0.0002	8.8(19℃)
	6～7	—	—	—	—	—	—	7.4(19℃)
C区画	観測井戸		<0.0002	0.0080	0.0005	0.0006	0.013	8.2(19℃)
	2～3	1.8	<0.0002	0.033	0.0023	0.0017	0.0090	8.1(18℃)
	5～6	2.5	<0.0002	0.086	0.0018	0.0019	0.0054	8.1(18℃)
	10～11	—	—	—	—	—	—	7.6(18℃)
基準値			0.1	0.04	0.01	0.01	0.002	
定量下限値			0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	

3.3 事前調査についての考察

A 区画においては、最高 pH10.0 の地下水が確認された。これは、既存掘削除去工事で使用した遮水材による影響だと考えられる。地下水がアルカリ性の場合、VOCs 分解が可能な薬剤が制限されるため、地下水対策については地下水がアルカリ性であることを考慮しなければならない。本施工ではアルカリ性条件下で VOCs の分解が可能である過硫酸を使用することが好ましいと推測した。

4. 対策内容

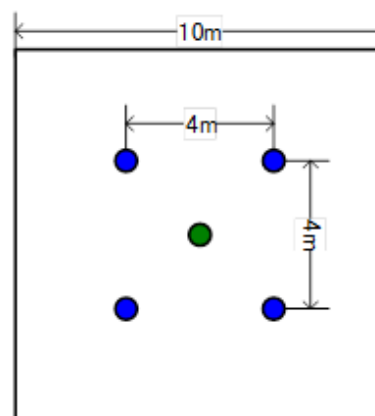
4.1 対策方法

対策前に対象地の地下水に含まれる VOCs について薬剤の適用性試験を実施した。試験する薬剤は地下水が pH10.0 であったことから過硫酸とし、活性化過硫酸法による分解の有効性とその分解に最適な過硫酸の活性化法について確認した。その結果、最も VOCs の減衰率が大きかった過硫酸のキレート活性化法を採用することとした。

A 区画、B 区画、C 区画の井戸の仕様を表-5 に、井戸配置図を図-3 に示す。過硫酸を 5wt%、キレート活性化剤を過硫酸に対して 0.004 モルになるよう調整し、1 井戸あたり 5 L/min の流量で注入した。

表-4 井戸の仕様

区画	井戸仕様
A	井戸深度：GL-9.50m 口径：φ 50m スクリーン上端深度：GL-3.00m スクリーン下端深度：GL-9.50m
B	井戸深度：GL-6.00m 口径：φ 50mm スクリーン上端深度：GL-3.00m スクリーン下端深度：GL-6.00m
C	井戸深度：GL-8.00m 口径：φ 50mm スクリーン上端深度：GL-3.00m スクリーン下端深度：GL-8.00m



● : 観測井戸 ● : 注入井戸

図-3 井戸配置図

4.2 モニタリング

モニタリング地点は既存観測井戸とし、注入後の地下水分析を実施した。その結果、A区画でPCEの基準不適合が確認された。B区画、C区画については基準適合となっている。表-5にモニタリングの結果を示す。

表-5 モニタリングの結果

		基準	注入後1回目	注入後2回目	注入後3回目
A区画	PCE	0.01	0.017	0.016	0.012
	TCE	0.03	0.004	0.004	0.003
	1,1-DCE	0.1	<0.001	<0.001	<0.0001
	cis-1,2-DCE	0.04	0.014	0.016	0.015
	CE	0.002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
B区画	PCE	0.01	<0.001	<0.001	<0.001
	TCE	0.03	<0.001	<0.001	<0.001
	1,1-DCE	0.1	<0.001	<0.001	<0.001
	cis-1,2-DCE	0.04	<0.001	<0.001	<0.001
	CE	0.002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
C区画	PCE	0.01	0.001	<0.001	<0.001
	TCE	0.03	<0.001	<0.001	<0.001
	1,1-DCE	0.1	<0.001	<0.001	<0.001
	cis-1,2-DCE	0.04	0.001	0.001	0.002
	CE	0.002	<0.0002	<0.0002	<0.0002

5. 原因解明調査

5.1 原因解明調査の結果

モニタリングより基準不適合だったA区画についてVOCsが基準不適合となった原因と解明するために、事前調査でも使用したスクリーン・ポイント地下水サンプラーで地下水中のVOCsの範囲および過硫酸の滞留分布の特定を実施した。図-4に地下水調査結果を示す。

調査の結果、深度9.0m～10.0mではPCE、cis-1,2-DCE、CEは検出されず、過硫酸は10,000ppm残留していた。また、深度4.0m～5.0mでもPCE、cis-1,2-DCE、CEは基準適合となっており、過硫酸は100ppm残留していた。また、事前調査において取得した柱状図と照らし合わせると、シルト質上に過硫酸が多く残留しており、VOCsの濃度も基準適合となっていた。なお、TCE、1,1-DCE、およびCEは定量下限値未満であった。

5.2 原因解明調査の考察

原因解明調査の結果を踏まえて、A区画でPCE、cis-1,2-DCE、CEが基準不適合だった原因として、深度9.0m～10.0mでのみ過硫酸濃度が残留して

注入後の地下水中VOCsと過硫酸濃度(mg/L)

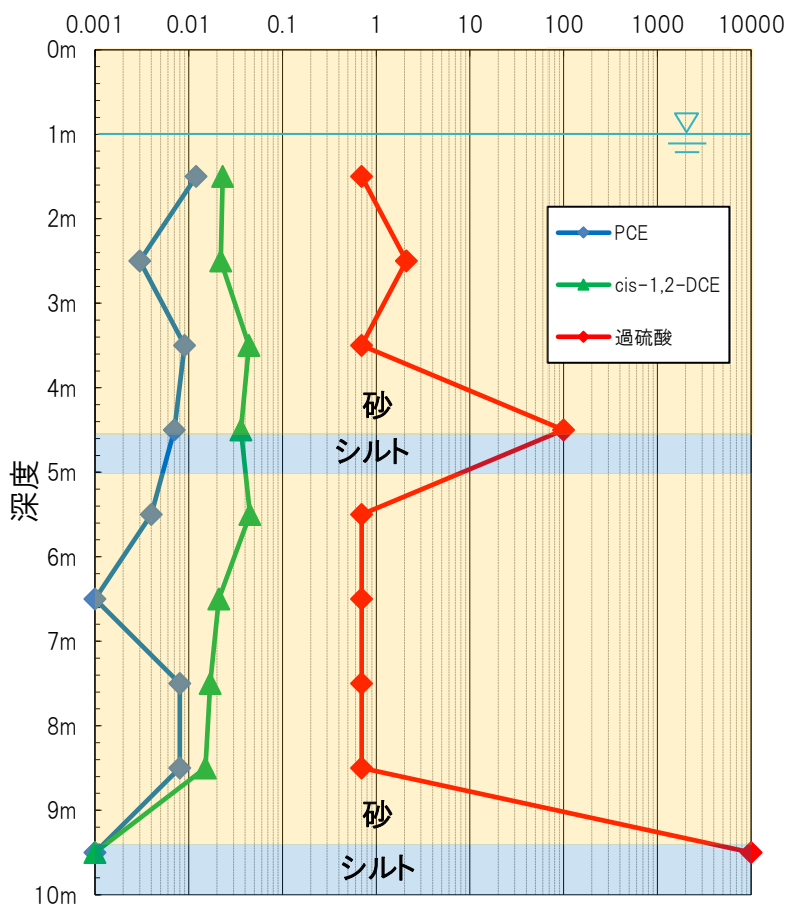


図-4 地下水調査結果

いること、PCE、cis-1,2-DCE、CE が不検出であったことから、A 区画の帯水層の透水性が高かったため、側方（区画全体）へ過硫酸が拡散されずに、下方（深度 9.0m～10.0m 付近のシルト質）まで浸透してしまったことが推測された。そこで A 区画の再注入にあたっては前回の注入時よりも高い圧力で注入することで、過硫酸を側方へ拡散させて A 区画全体の VOCs 濃度を減少させることとした。

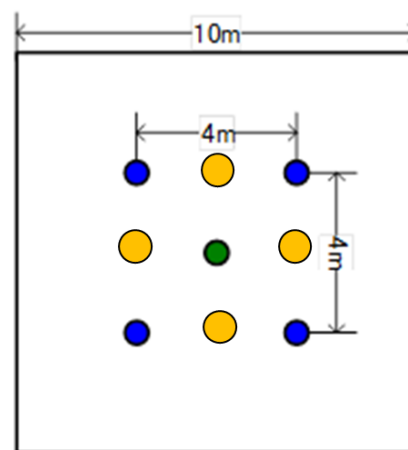
6. 追加注入

6.1 対策方法

原因説明調査の結果をもとに再注入を実施した。井戸の仕様を表-6 に、井戸配置図を図-5 に示す。過硫酸およびキレート活性化剤の濃度は変更せず、既存井戸を 8 L/min、新規井戸を 3L/min の流量で注入し、区画全体に薬剤を浸透させた。

表-6 井戸の仕様

区画	井戸仕様
A (既存)	井戸深度：GL-9.50m
	口径：φ 50mm
	スクリーン上端深度：GL-3.00m
	スクリーン下端深度：GL-9.50m
A (新規)	井戸深度：GL-4.00m
	口径：φ 50mm
	スクリーン深度：GL-2.00m～4.00m



●：観測井戸 ●：注入井戸 ●：新規注入井戸

図-5 井戸配置図

6.2 モニタリング結果

再注入後、再び観測井戸にてモニタリングを実施した。注入後 1 回目で A 区画の VOCs の基準適合が確認された。また、1 週間後に、A 区画、B 区画および C 区画のモニタリングの結果も基準適合が確認された。2 年間モニタリング 1 回目を 1 カ月後に実施したが全区画で基準適合となっている。

表-7 モニタリングの結果

		基準	注入後1回目	注入後2回目	モニタリング1回目
A区画	PCE	0.01	<0.001	<0.001	0.007
	TCE	0.03	<0.001	<0.001	0.001
	1,1-DCE	0.1	<0.001	<0.001	<0.001
	cis-1,2-DCE	0.04	<0.001	<0.001	0.010
	CE	0.002	<0.0002	<0.0002	0.0002
B区画	PCE	0.01	-	<0.001	<0.001
	TCE	0.03	-	<0.001	<0.001
	1,1-DCE	0.1	-	<0.001	<0.001
	cis-1,2-DCE	0.04	-	<0.001	0.002
	CE	0.002	-	<0.0002	<0.0002
C区画	PCE	0.01	-	0.001	0.001
	TCE	0.03	-	<0.001	<0.001
	1,1-DCE	0.1	-	<0.001	<0.001
	cis-1,2-DCE	0.04	-	0.008	0.009
	CE	0.002	-	<0.0002	<0.0002

7. 考察・まとめ

本施工について、事前調査および原因解明調査で正確な対象地の情報を取得したことが全区画で基準適合に至った要因であると筆者らは考える。本施工での重要事項を下記にまとめる。

(1) 事前調査について

事前調査では、掘削除去範囲の VOCs の濃度および分布、そして地下水の性質を特定することができ、その情報を元に対象地地下水の VOCs に対応する適切な薬剤の選定をすることができた。

対象地では地下水が最高で pH10 を示しており、バイオレメディエーション工法やフェントン剤による浄化は困難なサイトであると推測した。そこで、地下水がアルカリ条件下でも VOCs の分解活性を持つ過硫酸を使用することとし、B 区画および C 区画の VOCs を基準適合とすることができた。

(2) 原因解明調査について

原因解明調査では、VOCs と過硫酸の深度ごとの分布を事前調査で得られた地質の情報と踏まえて、再注入の設計を実施することができた。1 回目の注入では過硫酸の注入流量を 5L/min とし、B 区画と C 区画の VOCs を基準適合まで減少させることができたが、A 区画においては PCE が基準適合に至らなかった。これは、過硫酸の残留濃度と地層の透水性から、区画全体へ過硫酸が拡散されずに、注入井戸の下端付近に集中して過硫酸が浸透してしまったことが推測され、再注入においては、既存注入井戸に加えて新規井戸を設置し、注入流量を、既存井戸を 8.0L/min、新規井戸を 3.0L/min に設定し注入することで、過硫酸を狙った深度に拡散させることに成功し、A 区画の VOCs の基準適合に繋がった。

参考文献

1) 小川えみ、和知剛、草場周作(2013)：過硫酸による VOCs の分解性評価，第 19 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会，S1-14.