

テトラクロロエチレンの高濃度汚染サイトに対するバイオレメディエーションの適用と効果

和知 剛¹、安里光波留¹、森保友樹¹
(1. エンバイオ・エンジニアリング)

1. はじめに

狭小な土地での土壌・地下水汚染対策においては、低コストで効果的な工法が求められるが、特に原液が存在するような高濃度の汚染対策においては、掘削除去や揚水対策等の物理的な対策以外に方法がないとされてきた。弊社でも高濃度汚染源対策においては、基本的に掘削除去を主とした工法を選択する。しかしながら、予算的な問題で土壌の掘削除去や重機による鉄粉や酸化剤等の攪拌混合が適用できないケースでは、対策に着手できず、その土地は塩漬けとなることが多い。

弊社では、原液を含む高濃度のテトラクロロエチレン（以下、PCE）で汚染されたクリーニング跡地において、2017年以降、微生物分解促進剤を繰り返し注入するバイオレメディエーションを実施中であり、本発表では、事前調査から現在進行中のバイオレメディエーションによる原位置浄化のモニタリングの途中経過について紹介する。

2. 事前調査

本報で紹介する事例は、元々クリーニング事業として PCE を使用しており、既存調査により土壌および地下水ともに、高濃度の PCE を主とした分解生成物に汚染されていた。対象地の対策範囲は図 2.1 のように狭小であり、面積は 100m²に満たない。事前調査は、土壌ガス調査の目玉である BI-1 およびドライ機近傍の BI-2 で現状の汚染濃度を確認するとともに、低コストで施工が可能な注入井戸からの繰り返し薬剤注入によるバイオレメディエーションを念頭に実施した。地質の構成は、概ね図 2.2 に示すとおりである。

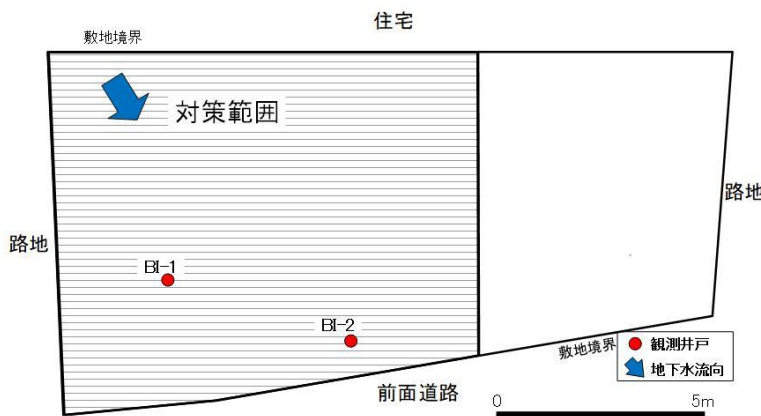


図 2.1 対象地の平面図

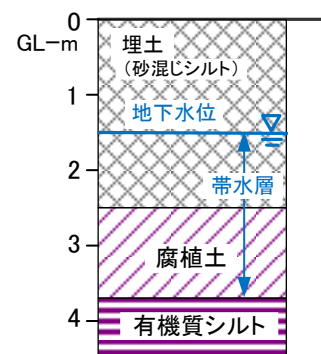


図 2.2 対象地の地質

2.1 汚染状況の確認

本サイトでは、事前調査により腐植土を中心に高濃度の PCE 等で汚染された地下水が存在していることが確認された。地下水の汚染濃度は、BI-1 では PCE が 29mg/L、トリクロロエチレン（以下、TCE）が 7.7mg/L、シス-1,2-ジクロロエチレン（以下、cis-1,2-DCE）が 56mg/L、1,1-ジクロロエチレン（以下、1,1-DCE）が 0.15mg/L およびクロロエチレン（以下、CE）が 12 mg/L であった。また、BI-2 では PCE が 140mg/L、TCE が 16mg/L、cis-1,2-DCE が 36mg/L、1,1-DCE が 0.086mg/L および CE が 19 mg/L と 2 箇所とも非常に高い濃度であることが分かった。また、腐植土を主とする帯水層では、PCE の土壌溶出量は BI-1 で最大 4.3gm/L および BI-2 で最大 150mg/L が確認された。

Case study for application methods and effectiveness for in-situ bioremediation with high concentration of tetrachloroethylene contaminated site

Takeshi Wachi¹, Miharu Asato¹, Yuki Moriyasu¹

(¹EnBio Engineering, Inc.)

連絡先：〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 2-2-2 (株)エンバイオ・エンジニアリング

TEL 03-5297-7288 FAX 03-5297-0242 E-mail info@enbio-eng.com

2.2 揚水汲み上げ試験

対象地では、地下水の揮発性有機塩素化合物（以下、CVOCs）濃度が高いことから、揚水対策を組み合わせた工法を検討するために、2カ所の観測井戸（BI-1、BI-2）において、低流量サンプリングポンプ等を用いて地下水の汲み上げ試験を実施した。試験の結果、2地点とも汲み上げから約2分後に2リットル程度の汲み上げたところで、地下水が涸れる結果となった。地下水が主として腐植土層に存在しており、透水性が高くないこと等を総合的に検討すると、本施工の際には、1つの井戸から連続的に大量の地下水を揚水することが困難であると判断した。そのため、帯水層に設置する注入井戸20本の井戸のうち、PCE濃度の高い井戸において、可能な限り揚水することとした。

2.3 トリータビリティ試験

2.3.1 試験の仕様

本試験では、土壌および地下水に含まれるPCEおよび分解生成物を対象として、現地採取した試料を用いて、バイオレメディエーション促進剤（0.1%乳酸ナトリウム）による嫌気条件下の微生物分解を室内試験で行った。

本試験の試験仕様を表2.3.1および表2.3.2に示す。試験試料時の調製状況を図2.3.1に示す。

表 2.3.1 試験系仕様

対象	測定項目	測定時期	分析方法
土壌 地下水	PCE、TCE、1,1-DCE cis-1,2-DEC、CE	初期値、30日目、60日目、 90日目、120日目	ヘッドスペース GC-MS 分析

表 2.3.2 測定時期および分析方法仕様

試験系	乳酸ナトリウム使用量	測定項目	連数
対照区	0%wt	PCE、TCE、1,1-DCE	3
反応区	0.1%wt	cis-1,2-DCE、CE	

2.3.2 試験の手順

本試験での手順は①土壌・地下水の調製、分抽を行い、②濃度調製されたPCE、TCE、cis-1,2-DCE、1,1-DCEおよびCEの初期値を室内分析し、③バイオレメディエーション促進剤を添加する。その後、設定した測定間隔ごとに、④添加後室内分析を行う。

2.3.3 トリータビリティ試験結果

図2.3.2にトリータビリティ試験（以下、TR試験）における土壌（固相）と地下水（水相）の結果を示す。土壌および地下水の対照系では、時間の経過における脱塩素反応が認められなかったものの、反応系では、土壌および地下水ともに、PCEおよびTCEにおいては基準適合まで分解したことが確認された。cis-1,2-DCEおよびCEについては、120日後に基準適合とはならなかったが、両物質とも分解が途中で停止するような現象は認められなかった。

また、現地採取した試験試料からは、*Dehalococcoides* 属細菌も検出されたことから、対象地のCVOCsは無害なエチレンへの分解が可能であると判断した。

これらの結果より、対象地の浄化対策は、微生物分解促進剤の注入による原位置浄化の効果が高く、現地で適用することとした。

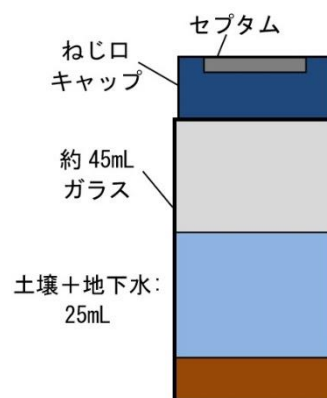


図 2.3.1 試験調製試料

3. 揚水対策

地下水を対象とした薬剤注入用の井戸20本を設置した（図3.1）。観測井戸を合わせて合計22本の井戸において、検知管による現場簡易分析を実施し、PCEが検出された16本の井戸において、地下水を揚水し場外処分を行った。揚水処理した水は合計1トンとなった。

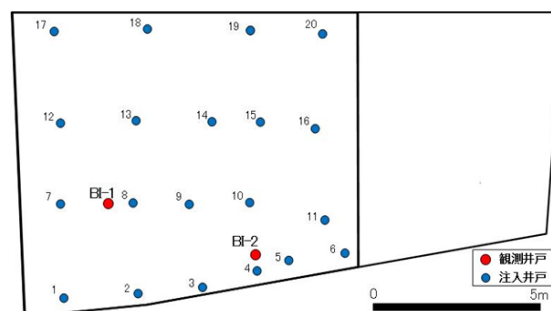


図 3.1 対象地における井戸配置図

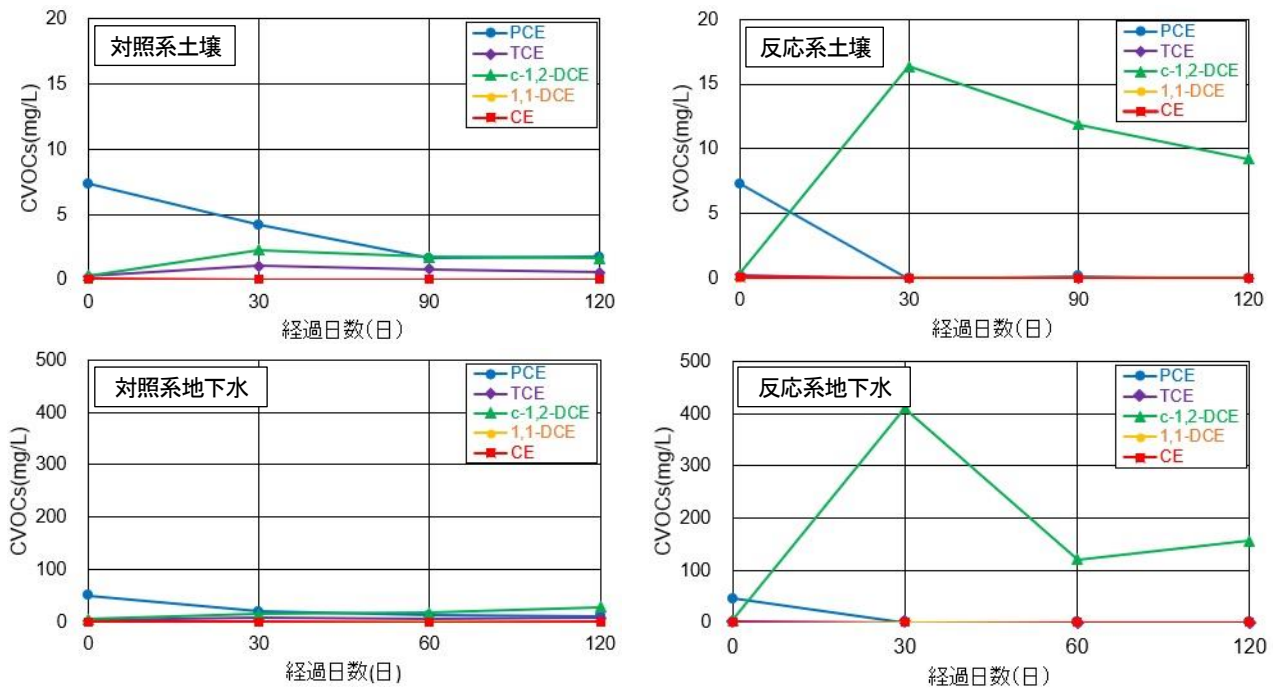


図 2.3.2 TR 試験における土壌・地下水濃度変化

4. バイオステミュレーション

4.1 使用薬剤

本サイトにおいては、これまでに 3 種類の薬剤を年 1 回、20 本の注入井戸から小型ポンプにより注入した。浄化開始 1~3 年目にかけては、ポリ乳酸グリセロールおよびトール油脂肪酸を主とする薬剤ならびに、三糖以上の糖類およびペプチドおよび脂肪族のカルボン酸からなる薬剤を使用し、4~7 年目以降はビール酵母と乳酸ナトリウム等から成る薬剤を使用した。1 年目は 412kg、2~7 年目はおよそ 260kg の薬剤の原液を希釈し注入した。

4.2 注入井戸を用いた浄化効果確認調査

薬剤注入直前に全 22 地点の井戸から地下水を採取し、検知管を用いたヘッドスペースガス分析を実施し、最新の地下水汚染濃度に応じて薬剤を振り分け注入を行った。浄化 1 年目から 2 年おきの 4 時期における地下水のヘッドスペースガス濃度 (PCE 検知管) を図 4.1 に示す。

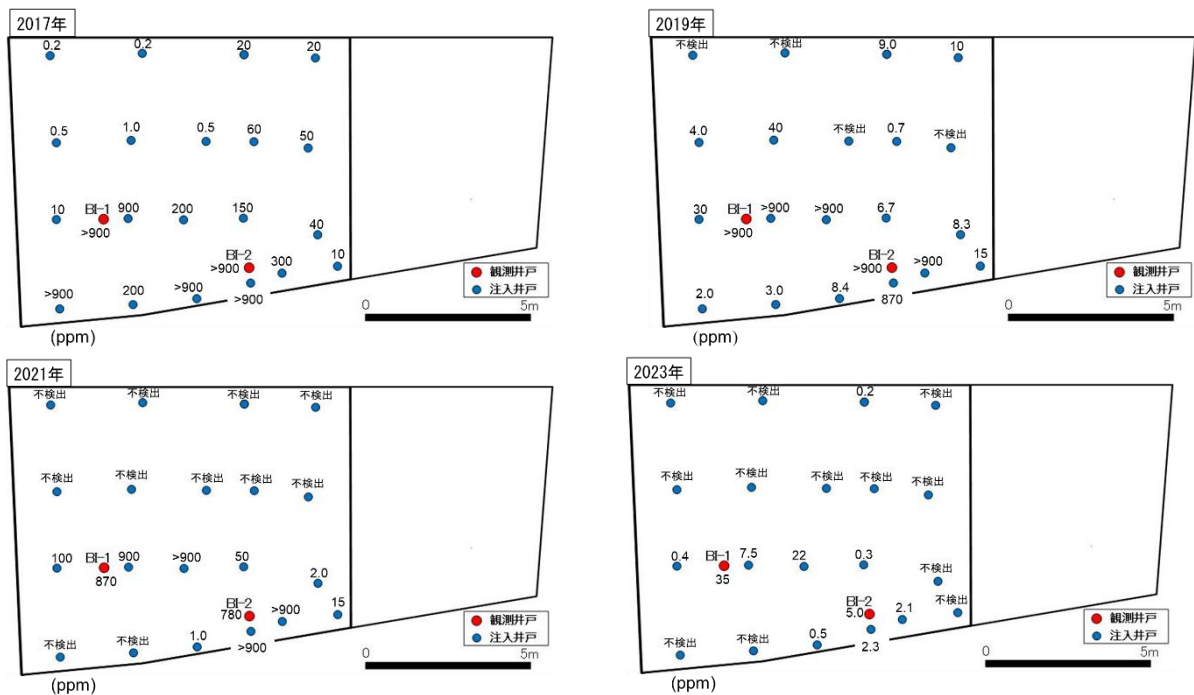


図 4.1 注入井戸を用いた地下水のヘッドスペースガス分析の濃度分布

4.3 地下水モニタリング結果

対象地では、BI-1 および BI-2 の 2 地点において、年 4 回の頻度で公定分析による地下水モニタリングを実施している。各観測井戸の CVOCs 濃度の変化を図 4.2 および図 4.3 にそれぞれ示す。

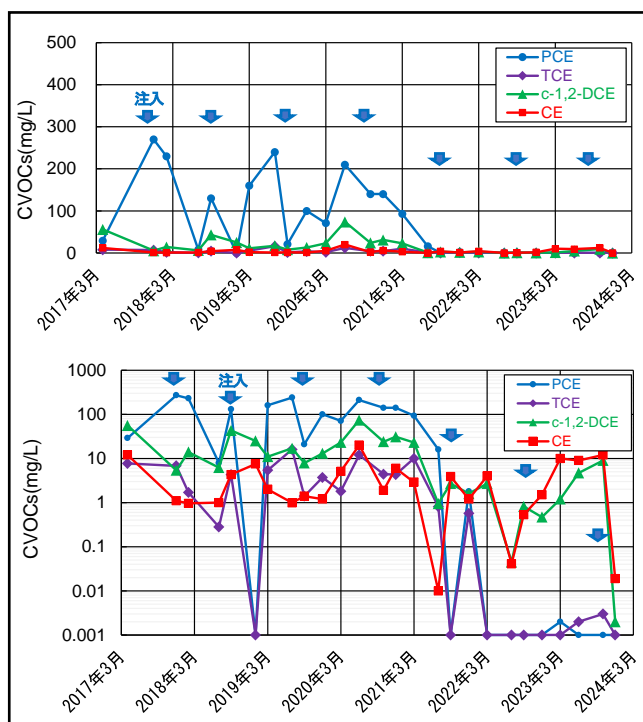


図 4.2 BI-1 における地下水 CVOCs 濃度の経時変化

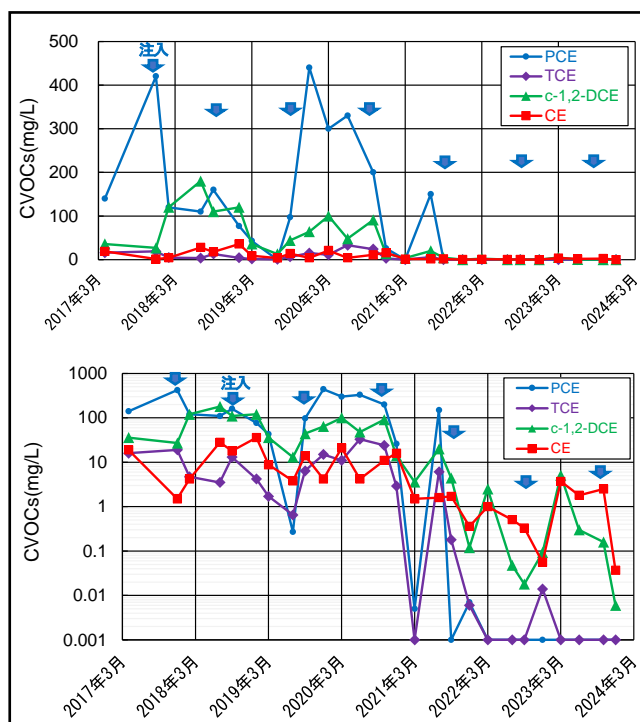


図 4.3 BI-2 における地下水 CVOCs 濃度の経時変化

5. 考察

対象地では、年間 1 回の薬剤注入工事の直前に、浄化範囲の面的な汚染分布を迅速な検知管分析で評価し、相対的に高濃度地点を重点的に、年間の予算により限られた薬剤を配分し注入してきた。対象地では、浄化前に、敷地境界付近に地下水 PCE で 140mg/L が存在しており、敷地外からの戻り汚染の影響や局所的な高濃度地点の有無を把握する上でも、高密度に設置した注入井戸を使って浄化の進行状況をモニタリングすることは効果的であり、現状の地下水 CVOCs 濃度に応じて限られた薬剤を配分することができた。

2 箇所の観測井戸の水質（図 4.2～図 4.3）をみると、注入前は 280～420mg/L の PCE が存在しており、注入開始 3 年後のモニタリングまでは 100mg/L を超える PCE が確認されていたが、注入開始 4 年後には PCE は検出下限値（0.002mg/L）未満を維持している。最新のモニタリング結果（2023 年 12 月）では、2 箇所とも cis-1,2-DCE が基準適合となり、基準不適合を示すのは CE のみとなり、BI-1 で 0.019mg/L、BI-2 で 0.037mg/L となった。これらの濃度推移をみると、PCE から CE において還元脱塩素反応がスムーズに進行しており、CE の蓄積も認められていない。

6. まとめ

一般的に、原液が存在するような高濃度 PCE 地下水汚染に対して、バイオレメディエーションは効かないと言われている。本サイトの 3 年目までのモニタリング結果をみると、100～300mg/L の PCE が検出され顕著な低減傾向は認められておらず、この時点では浄化効果がないとの評価は妥当だと言える。しかし、4 年目以降、PCE は急激に濃度が低下し基準適合となり、他の分解生成物も低減が進んでいる。本サイトでは、時間をかければ原液レベルの地下水 CVOCs も基準適合レベルまで原位置で浄化できることを示すことができた。

弊社では、別のサイトにおいても、同レベルの地下水 PCE に対して、同様に 3～4 年の薬剤の繰り返し注入で基準適合となった実績があることから、本報告のサイトが特殊で唯一なサイトとは考えにくい。

高濃度の地下水汚染であっても、事前に、原位置バイオレメディエーション工法が適用できるサイトを多方面（地質、微生物、原液の拡散およびプルームの移動性等）から精度高く見極める方法を検討する余地があり、今後、サイト条件によっては、浄化工法の選択肢となる可能性があるものとする。