

令和 2 年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査結果

実施機関：株式会社竹中工務店

技術名称：クロロエチレン類を対象とする加温併用型バイオオーグメンテーション工法

調査対策区分：対策

技術の区分：原位置浄化

実証調査の評価対象物質：テトラクロロエチレン（PCE）、トリクロロエチレン（TCE）、
1,2-ジクロロエチレン（DCE）、クロロエチレン（CE）

試験期間：令和 2 年 7 月～令和 3 年 3 月

1. 技術の原理及び特徴

本技術は、嫌気条件下にて PCE、TCE などのクロロエチレン類で汚染された土壤・地下水に、クロロエチレン類を脱塩素化する微生物である *Dehalococcoides mccartyi* NIT01 株（以下「NIT01 株」という。）を投入し、土壤及び地下水汚染を浄化する原位置浄化技術である。なお、微生物を投入する際に地盤加熱技術を併用し、土壤及び地下水温度を現地の平常時よりも高い温度（ $25\sim 30^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）に加温することで、NIT01 株をはじめとする脱塩素化に寄与する微生物の活性を向上させ、一般的な土壤・地下水温度の条件（国内平均地盤温度： 17°C 程度）と比較して大幅に浄化を促進させるものである（図-1、写真-1）。

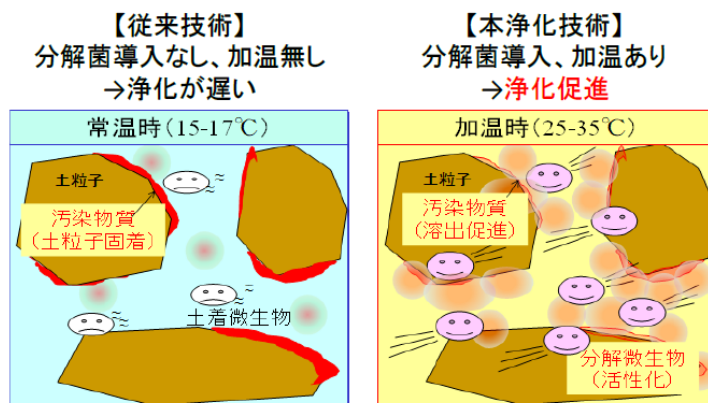


図-1 加温による浄化促進の原理

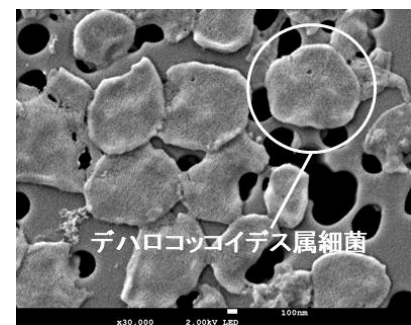


写真-1 NIT01 株の顕微鏡写真

2. コスト・環境負荷低減の考え方

クロロエチレン類で汚染された土壤・地下水に対して、栄養物質を注入して地盤中の脱塩素化微生物を活性化させて浄化する工法（バイオスティミュレーション）は従来工法として広く普及している。本技術は、従来型のバイオスティミュレーションに対して地盤を加温する工程及び分解微生物の培養液を投入する工程が付加された浄化技術（加温併用型バイオオーグメンテーション）である。そのため、従来工法と比較すると地盤加温及び利用微生物

の培養や注入に必要なコストや環境負荷が増加する。一方で、浄化期間の大幅な短縮が見込めるため、浄化期間中の現場作業に関わるコストや環境負荷の低減が期待できる。

3. 実証調査の概要

(1) 実証調査のフロー

本実証調査では、従来型（常温）バイオスティミュレーション、従来型（常温）バイオオーグメンテーション及び提案技術である加温併用型バイオオーグメンテーションの3つの試験区画を設定した。試験区画1区画あたりの対象土量は平面 $18.4 \text{ m}^2 \times$ 深さ $3.5 \text{ m} = 64.4 \text{ m}^3$ /区画とした。試験区画の平面配置、断面概要図を図-2 及び図-3 にそれぞれ示す。

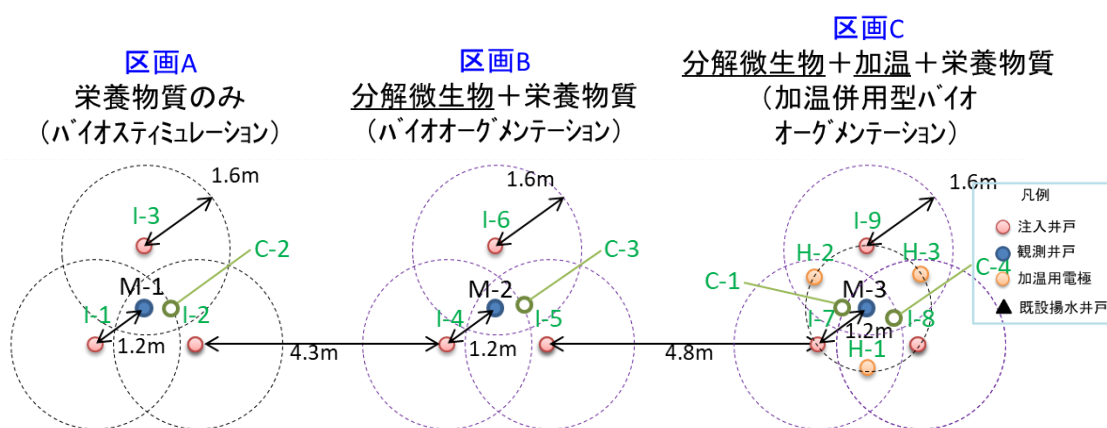


図-2 試験区画の平面配置

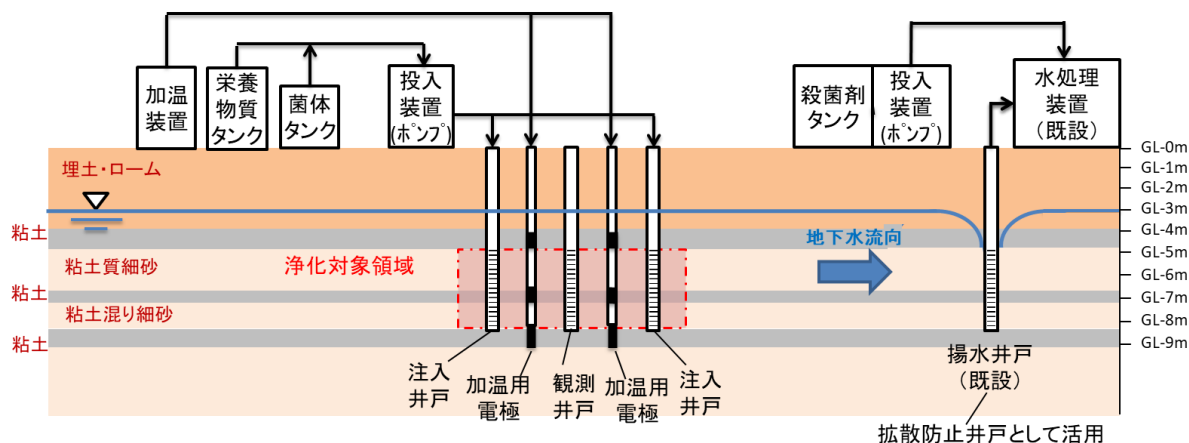


図-3 試験区画の断面配置

試験では図-4 に示すフローに従い、はじめに、実証調査場所の土壌及び地下水を調査して汚染状況を把握するとともに、注入井戸と加温装置の設置を行った、続いて設置した電加温用極に電気を印加する電気発熱法により対象地盤の加温を行った。その後、利用微生物及び栄養物質の注入を行い、地下水をモニタリングして汚染物質濃度の推移等を評価した。実

証調査終了時に土壌調査を行い、本技術の適用による汚染濃度の低減効果を評価した。

栄養物質と分解微生物培養液は、注入井戸から二重管ダブルパッカー工法にて加圧注入した。栄養物質は 120 kg/区画をそれぞれ注入した。分解微生物培養液はバイオオーグメンテーションの試験区画において 42.6 L/区画を注入した。注入した培養液中の NIT01 株の微生物濃度は 2 回の注入の平均値で 2.2×10^7 cells/mL であった。

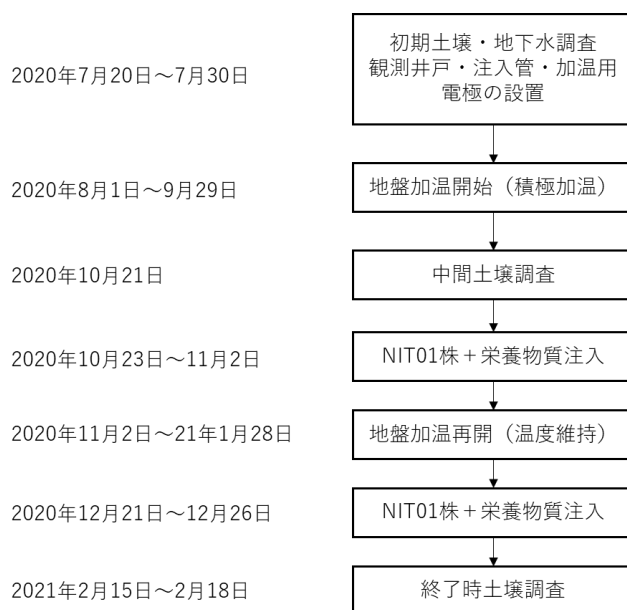


図-4 実証調査のフロー

（2）浄化対象土壌

本実証調査では細砂及び砂混りシルトの帯水層土壌（GL-4.7 m～GL-8.2 m）を浄化対象深度とした。帯水層の上部と下部には透水性の低いシルト・粘土層があり、GL-7.0 m の砂混りシルト及び GL-9.0 m の粘土にてクロロエチレン類の土壌溶出量基準の超過が確認された。

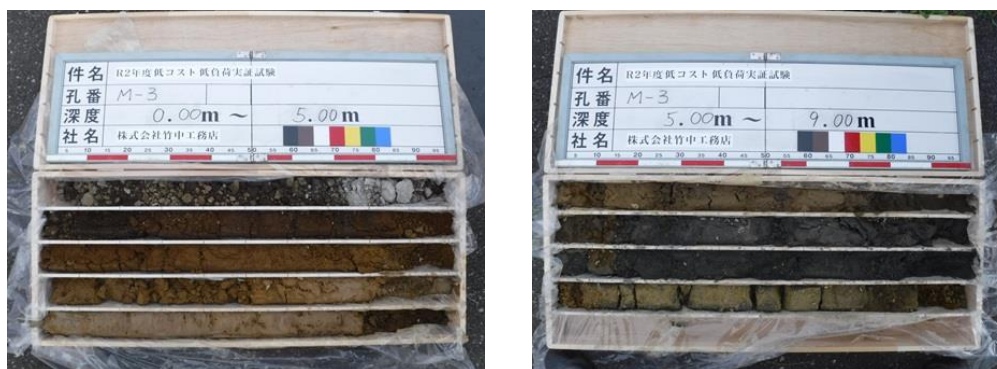


写真-2 土壌ボーリングコア全景

(3) 測定方法

測定項目・分析方法・目的、測定検体数の一覧を表-1 に示す。試験開始前の土壌試料は、各区画の中央の観測井戸設置地点におけるボーリングコアから採取した。試験終了時の土壌試料は、各観測井戸から 30 cm 程度離れた地点でボーリングを実施して土壌を採取した。地下水試料は、各区画に設置した観測井戸より揚水ポンプを設置して孔内水のパージを実施後、採水器（ベラー）を用いて観測井戸内の地下水を採取した。また、本技術の適用による環境負荷に関連する分析として、分解微生物及び栄養物質の注入作業中における作業エリアの騒音、振動及び大気中クロロエチレン類濃度をそれぞれ測定した。

表-1 測定項目及び測定数

	測定項目	分析方法	目的	測定検体数
土壌	PCE, TCE, DCE, CE	環境省告示 第 18 号	浄化効果の確認	7 箇所×15 深度 =105 検体
地下水	PCE, TCE, DCE, CE	環境省告示 第 17 号		25 回×3 箇所 +8 回×1 箇所 =83 検体
地下水	pH	JIS K0102	適正範囲 (pH が 5.8～ 8.6) を確認	25 回×3 箇所 +8 回×1 箇所 =83 検体
土壌	pH	JGS 0211	適正範囲 (pH が 5.0～ 9.0) を確認	7 箇所×15 深度 =105 検体
周辺環 境（作 業エリ ア）	騒音	JIS Z8731	施設稼働時騒音の確認	1 検体
	振動	JIS Z8735	施設稼働時振動の確認	1 検体
	大気中クロロエ チレン類濃度	有害大気汚染物 質測定方法マニ ュアルに準拠	施設稼働時の大気中ク ロロエチレン類の確認	1 検体
生態系 影響	微生物叢 (地下水)	アンプリコン解 析	栄養物質及び利用微生物 の投入による微生物 叢への影響評価	4 回× 4 箇所=16 検体
土壌	温度	T 型熱電対	地盤加温による温度変 化を確認	連続測定 (10 分ごと)
地下水	地下水位	水圧式水位計	注入による地下水位変 化を確認	連続測定 (10 分ごと)

4. 実証調査の結果

(1) 地盤加温と土壌温度の状況

試験中の地盤温度の推移を図-5 に示す。常温バイオスティミュレーションの試験区である区画 A の M-1 井戸、常温バイオオーグメンテーションの試験区である区画 B の M-2 井戸は加温を行っていない常温の試験箇所であるが、加温開始時の地盤温度が約 18°C に対して、終了時は 19.5°C 及び 19.7°C とわずかながら地盤温度が上昇した。これは、加温バイオオーグメンテーションの試験区である区画 C における地盤加熱の影響が、わずかではあるが生じているものと考えられた。一方、区画 C の M-3 井戸は電極加熱を実施した地点であり、約 2 か月間の連続加熱により地盤温度は浄化対象深度の GL-6.5 m 及び GL-7.5 m で最高 56°C 程度まで上昇した。その後、約 1 か月加熱を停止して地盤温度を 30°C 付近まで低下した後、分解微生物及び栄養物質の注入を実施した。以降は間欠的な電極加熱を実施し、加温を停止した 2021 年 1 月 28 日まで地盤温度を 26°C～32°C に維持した。

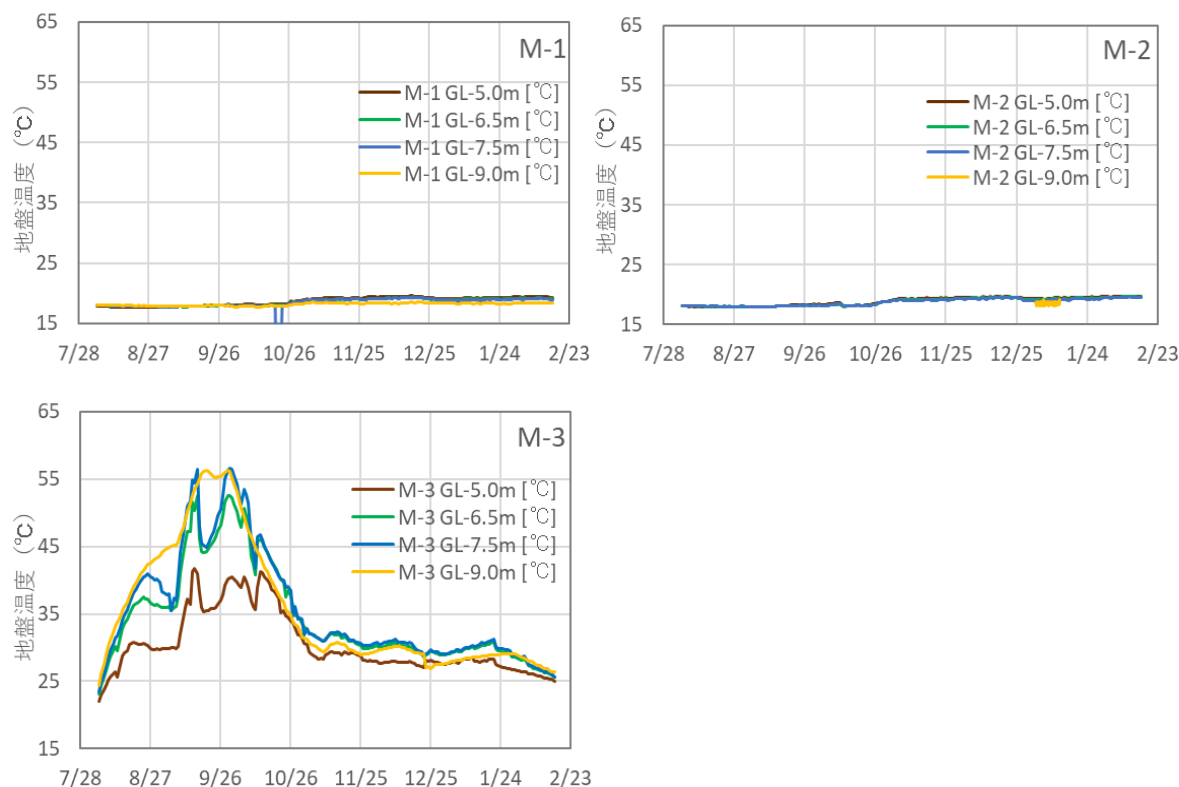


図-5 地盤温度の推移 (M-1: 常温バイオスティミュレーション区、M-2: 常温バイオオーグメンテーション区、M-3: 加温バイオオーグメンテーション区)

(2) 地下水中のクロロエチレン類の浄化効果

試験開始前の段階において、PCE、TCE、DCE、CE の各物質は、区画 C の M-3 井戸では地下水環境基準を 40～160 倍程度、区画 B の M-2 井戸では 8～110 倍程度超過していた。一方で、区画 A の M-1 井戸では他の試験区画よりも初期のクロロエチレン類が低く、PCE の

みが地下水環境基準を4倍程度超過していた(図-6)。区画CのM-3井戸では、試験開始前と比較して、地盤加温後の分解微生物と栄養物質の注入直前において地下水クロロエチレン類濃度の上昇が見られた。これは地盤を加熱することにより、土壤中に吸着しているクロロエチレン類が地下水に溶出したことによるものと考えられた。

分解微生物と栄養物質の注入後、区画CのM-3井戸ではPCE及びTCE濃度が速やかに減少し、地下水環境基準以下まで低下した。一方で、シス-DCE(cDCE)及びCE濃度はほぼ一定速度で指数的に減少し、1回目注入開始の約3か月後(91日後)にCEが地下水環境基準以下まで減少し、試験終了時にかけて基準未満の状態を維持した。一方、区画BのM-2井戸でも同様の傾向が見られたが、各クロロエチレン類の分解速度は加温バイオオーグメンテーション試験区である区画CのM-3井戸に比べて緩やかであり、試験終了時においてもCEがわずかに地下水環境基準を上回った。区画AのM-1井戸でも栄養物質の注入後にPCE濃度が減少し、他のクロロエチレン類の濃度も地下水環境基準を下回る水準で推移した。

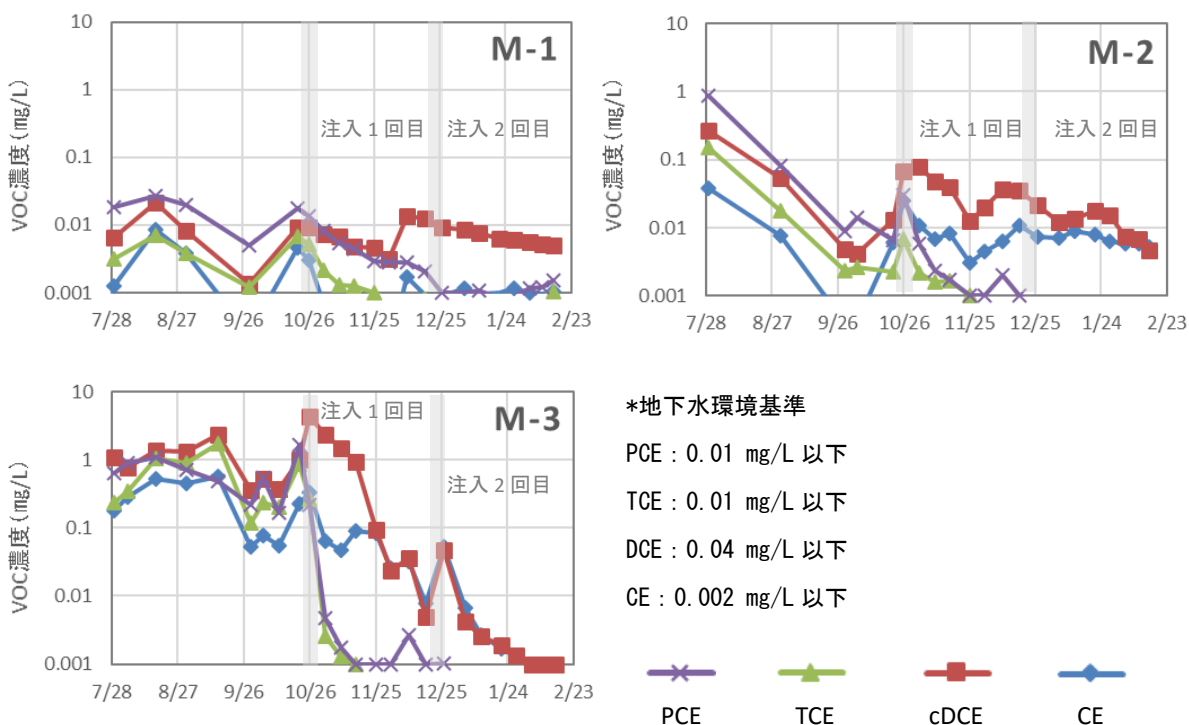


図-6 地下水中のクロロエチレン類濃度の推移

試験開始前及び試験終了時の地下水クロロエチレン類濃度を公定分析により測定した結果を表-2に示す。区画A(常温バイオスティミュレーション区)のM-1井戸では試験開始前にPCEが0.044 mg/Lと基準を超過しており、試験終了時にはCEで0.0023 mg/Lとわずかに地下水環境基準を超過した。区画B(常温バイオオーグメンテーション区)のM-2井戸では試験開始前にPCE、TCE、DCE、CEがいずれも10倍~100倍程度の基準超過であ

ったのに対して、試験終了時にはCEのみ0.0082 mg/Lと地下水環境基準を超過した。提案技術である区画C（加温バイオオーグメンテーション区）のM-3井戸では試験開始前にPCE、TCE、DCE、CEがいずれも40倍～160倍程度の基準超過であったのに対して、試験終了時はいずれも地下水環境基準を満たしていた。以上より、提案技術である加温バイオオーグメンテーションが地下水クロロエチレン類濃度の低減に最も高い効果を発揮した。

表-2 公定分析による地下水クロロエチレン類濃度

試験区	区画A 常温 バイオスティミュレーション区				区画B 常温 バイオオーグメンテーション区				区画C 加温 バイオオーグメンテーション区			
	CE	DCE	TCE	PCE	CE	DCE	TCE	PCE	CE	DCE	TCE	PCE
濃度:開始前	0.0017	0.013	0.007	0.044	0.048	0.34	0.20	1.1	0.32	1.9	0.46	1.2
濃度:終了時	0.0023	0.012	<0.003	0.002	0.0082	0.008	<0.003	<0.001	0.0003	<0.004	<0.003	<0.001

※赤字：基準超過、単位：mg/L

(3) 土壌中のクロロエチレン類の浄化効果

区画A及び区画Bでは、試験開始前、試験終了時の各ボーリング調査地点でGL-3m～GL-9mの各深度とも土壌溶出量の基準超過は確認されなかった（データ不掲載）。提案技術である加温バイオオーグメンテーション区の区画Cでは、試験開始前にはGL-7mではDCEが0.12 mg/L、GL-9mではPCEが0.0029 mg/Lと溶出量基準の3倍程度の超過が見られた（表-3）。区画Cの試験終了時の調査ではGL-7mでPCEは溶出量基準以下であったが、DCE、CEはそれぞれ0.25 mg/L、0.042 mg/Lと依然として基準を超過していた。一方でGL-9mでは各濃度の基準を満たしていた。GL-7mは粘土層にあたることから、分解微生物及び栄養物質の注入により対象地盤内に均一に行き渡らなかった可能性が考えられ、透水性の低い土層に対する均一な注入の施工方法に課題が残った。

表-3 公定分析によるクロロエチレン類土壌溶出量
(区画C 加温バイオオーグメンテーション区)

深度:GL-	開始前 (2020. 7. 20)				終了時 (2021. 2. 16)			
	CE	DCE	TCE	PCE	CE	DCE	TCE	PCE
3 m	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001
4 m	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001
5 m	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001
6 m	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001
7 m	0.0007	0.12	<0.003	0.007	0.042	0.25	<0.003	<0.001
8 m	<0.0002	<0.004	<0.003	0.001	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001
9 m	<0.0002	0.015	<0.003	0.029	<0.0002	<0.004	<0.003	<0.001

※赤字：基準超過、単位：mg/L

定量 PCR にて測定した全細菌数 (Total Bacterial 16S rRNA) 、*Dehalococcoides* 属細菌数 (*Dehalococcoides*-specific 16S rRNA) 、*Dehalococcoides* 属細菌が保持する 2 種類の CE 分解酵素遺伝子数 (*vcrA* 及び *bvcA* 遺伝子) の推移を図-7 に示す。M-3 井戸では加温を開始して地盤温度が 50℃を超えて以降に *Dehalococcoides* 属細菌数及び CE 分解酵素遺伝子数が減少する傾向が見られた。これは過度な昇温による死滅あるいは活性の低下の影響が考えられた。一方、各試験区にて分解微生物及び栄養物質の 1 回目の注入後、全細菌数、*Dehalococcoides* 属細菌数及び CE 分解酵素遺伝子数はいずれも上昇した。特に地下水中のクロロエチレン類濃度が大きく減少した加温バイオオーグメンテーション区の M-3 井戸で *Dehalococcoides* 属細菌の関連遺伝子が顕著に増加したことから、*Dehalococcoides* 属細菌数及び CE 分解酵素遺伝子数の増加と地下水クロロエチレン類濃度の減少の相関関係が示唆された。

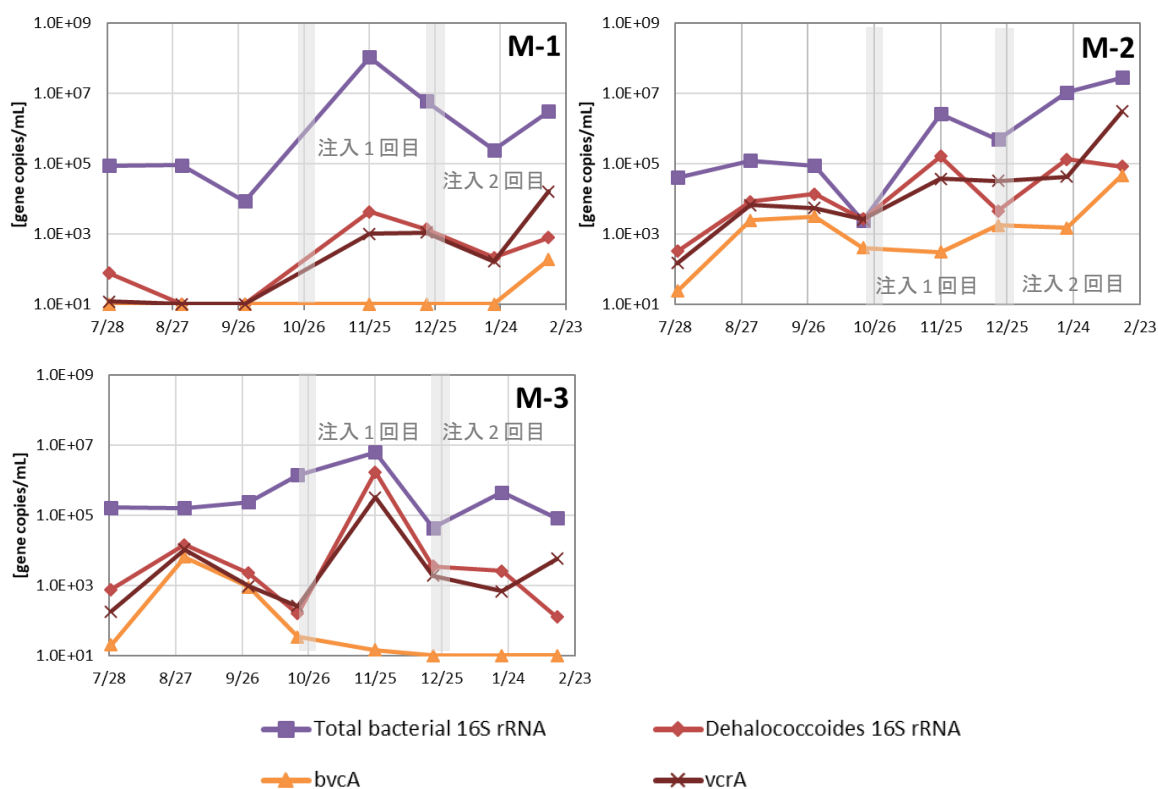


図-7 地下水中の微生物濃度の推移

(4) 環境測定結果

1) 大気中クロロエチレン類濃度

注入作業実施中の作業エリア近傍での大気中クロロエチレン類濃度は有害大気汚染物質測定方法マニュアルに準拠して測定した。測定の結果、PCE、TCE は大気汚染に関する環境基準値の 1/1000 程度と低かった。また、PCE、TCE、DCE、CE はいずれも同一敷地内の風上側で測定したバックグラウンド値と同様の水準であり、注入施工による大気中濃度の上昇は確認されなかった。以上のことより、提案技術の実施による大気中クロロエチレン類濃度への影響は十分に小さいものと判断できる。

表-4 注入作業期間中の大気中クロロエチレン類濃度

物質	施工エリア近傍 μg/m ³	大気の汚染に関する環境基準 (1年平均値) μg/m ³
PCE	0.048	200
TCE	0.17	130
DCE	0.022 未満	-
CE	0.0049	-

2) 騒音

騒音の測定は注入作業エリア近傍において JIS Z8731 に準拠した方法にて実施した。注入作業中の騒音の 10 分間の最大値は 68 dB(A)であり、特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準 (85 dB(A)) 及び技術目標の適正範囲 (70 dB(A)未満) を満たした。

3) 振動

振動の測定は騒音と同様に注入作業エリア近傍において JIS Z8735 に準拠した方法にて実施した。注入作業中の施設稼働時振動の 10 分間の最大値は 35 dB であり、振動規制法に定める特定建設作業の振動の規制に関する基準 (75 dB) 及び技術目標の適正範囲 (70 dB 未満) を満たした。

5. 技術の有効性・実用性・環境負荷

(1) 有効性：浄化期間の短縮

M-1、M-2、M-3 井戸における 4 種類のクロロエチレン類の合計モル濃度 (Total VOC : TVOC) の推移から TVOC の一次分解速度定数 (単位: day⁻¹) を算出した。各試験区の一次分解速度定数は、提案技術である加温バイオオーグメンテーション試験区の M-3 井戸で 0.073 (day⁻¹)、常温バイオオーグメンテーション試験区の M-2 井戸で 0.015 (day⁻¹)、常温バイオスティミュレーション試験区の M-1 井戸で 0.007 (day⁻¹) であり、分解微生物の投入、地盤の加温によりそれぞれ分解速度が向上することが確認された。

表-5 実証調査結果より求めた一次分解速度

	M-1 常温バイオスティミュレーション	M-2 常温バイオオーグメンテーション	M-3 加温バイオオーグメンテーション
TVOC 分解速度定数 λ (1/day)	0.007	0.015	0.073

(2) 実用性：技術の経済性

12,000 m³ の PCE (土壌溶出量で 0.5 mg/L、地下水で 5 mg/L) で汚染された帯水層 (均一な砂層) に対して本技術を適用した際のコスト試算を実施した。バイオ浄化は、注入・揚水井戸を設置して地下水を循環させ、地上に水処理プラントを設置してクロロエチレン類を含む地下水を処理し、注入水として再利用する方式とした。浄化期間は実証調査で得られた一次分解速度定数を参考に算出した。

本技術 (加温併用型バイオオーグメンテーション) と比較工法 (バイオスティミュレーション) で比較すると、本技術では、栄養物質費、浄化期間の短縮に伴う水処理設備運転に関する労務費用及び現場管理費等の費用を削減でき、一方で、加温のための費用、培養液の費用が増加すると試算された。土壌 1 m³ 当たりの浄化コストは、本技術では 17,900 円/m³-土壌であったのに対して、比較工法は 19,700 円/m³-土壌と浄化コストが 9.9%安くなる試算結果となった。また、全量を掘削除去した場合のコストは 51,600 円/m³-土壌となり、本技術の浄化コストの方が 65%安くなる試算結果となった。

(3) 技術の環境負荷 (二酸化炭素排出量)

(2) に示す試算条件において、本技術 (加温併用型バイオオーグメンテーション) と比較工法 (バイオスティミュレーション) を比較すると、本技術では、浄化期間の短縮に伴う水処理設備運転に関する電気使用量の削減により CO₂ 排出量が減少する。一方で、地盤加温に伴うガス使用及び分解微生物培養に伴う CO₂ 排出量が増加する。エネルギー使用量から算出した土壌 1 m³ 当たりの CO₂ 排出量は、本技術で 14.3 kg-CO₂/m³-土壌であったのに対して、比較工法はバイオスティミュレーションが 37.9 kg-CO₂/m³-土壌、掘削除去が 99.0 kg-CO₂/m³-土壌であり、それぞれ 62%削減、85%削減されるという試算結果となった。

(4) 結果概要

本実証調査について、技術目標と結果概要をまとめたものを表-6 に示す。

表-6 実証調査の目標及び結果概要

評価項目		技術目標	結果概要
技術の有効性	地下水中のクロロエチレン類の除去の評価	地下水環境基準未満	提案技術の区画における地下水中のクロロエチレン類濃度は、分解微生物導入から 91 日後に全て地下水環境基準未満となった。分解速度は、常温バイオスティミュレーション区、常温バイオオーグメンテーション区、提案技術の区画の順に大きくなり、提案技術が従来技術と比較して高い浄化性能を有することを確認した。
	土壌中のクロロエチレン類の除去の評価	土壌溶出量基準未満	試験前後で試験対象深度の土壌採取を行い、提案技術の区画では、砂層の深度では土壌溶出量基準未満となった。一方で、粘土層の深度では DCE、CE が依然として土壌溶出量基準を超過していた。提案工法は透水性のよい砂層の土壌中のクロロエチレン類の除去に有効であったが、低透水性の土層に分解微生物及び栄養物質を到達させる施工方法に課題が残った。
技術の経済性	低コスト性(処理コスト)を評価	24,000 円/m ³ -土壌以下(掘削除去比 57%削減)(バイオスティミュレーション比 9.5%削減)	提案技術の土壌 1 m ³ あたりの浄化コストは 17,900 円となった。従来技術である掘削除去及びバイオスティミュレーションと比較して、順に 65%、9.9%安くなり、技術目標を達成した。加えて、浄化期間が短縮されることによる間接的なコスト削減効果を考慮すると提案技術の経済性は高い。今後、分解微生物の導入量の最適化や分解微生物の高密度培養を検討することで、コストの低減が期待される。
環境への負荷	二酸化炭素排出量の削減を評価	22.2 kg-CO ₂ /m ³ -土壌以下(掘削除去比 78%削減)(バイオスティミュレーション比 4.6%削減)	提案技術の土壌 1 m ³ あたりの二酸化炭素排出量は 14.3 kg-CO ₂ となり、掘削除去比 85%低減、バイオスティミュレーション比 62%低減を確認し、目標を達成した。この要因として、掘削除去に対しては重機等の使用の削減、バイオスティミュレーションに対しては浄化期間の大幅な短縮によってプラント運転のエネルギー使用量が低減したことが挙げられる。
	周辺環境に対する低負荷性を評価	騒音・振動：70 dB 未満、大気中クロロエチレン類濃度：試験期間中に平常時より上昇しないこと ※いずれも敷地境界部にて	提案技術の施工時の騒音は 68 dB(A)、振動は 35 dB であり、目標値(騒音は 70 dB(A)、振動は 70 dB)を下回った。また、施工時の大気中クロロエチレン類濃度は大気環境基準の 1/1000 程度であり、かつ近隣での値(バックグラウンド値)と同等であったことから、騒音、振動及び大気環境汚染を生じさせる懸念は低い。