

第 25 回 国土技術開発賞 最優秀賞受賞

汚染地盤の加温式原位置高速バイオ浄化技術
CO₂ 排出量の少ない非掘削浄化技術「温促バイオ®」

〔受賞者〕 株式会社竹中工務店／株式会社竹中土木

〔本稿執筆〕 株式会社竹中工務店 舟川 将史, 清水 孝昭
すがぬま まさみ

株式会社竹中土木 菅沼 優巳

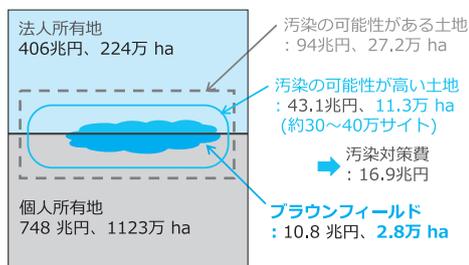
以下に、第 25 回 国土技術開発賞で最優秀賞を受賞した「汚染地盤の加温式原位置高速バイオ浄化技術」を紹介します。

1. はじめに

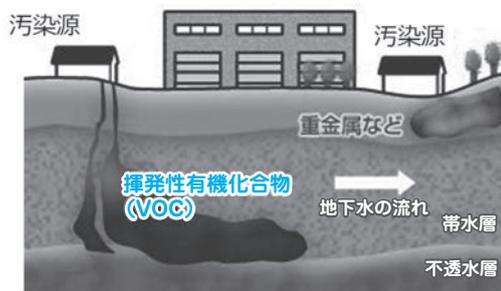
環境省の調査によると、日本国内には土壤汚染のために再開発が進まない土地「ブラウンフィールド」が 2.8 万 ha 存在すると推定されている（図－1）¹⁾。これらの土地は土壤汚染対策が実施されれば、まちづくりの視点で有効な土地である場合が多い。

土壤汚染対策法で規定されている特定有害物質のうち、第一種特定有害物質（揮発性有機化合物：VOC，以下、「VOC」という）は、その物性のために地中に浸透した場合、他の特定有害物質と比較して、汚染が深く、かつ広く拡散する特徴（図－2）を持ち、土壤汚染の規模が大きくなる傾向がある。このため、土壤汚染対策工事で最も多く採用される掘削除去・場外搬出（約 60%）では、膨大なコストが必要となり、再開発の事業採算性が見合わない場合がある。

一方、低コストの土壤対策工法として微生物により VOC を分解する「原位置浄化技術」（バイオレメディエーション）があるが、長い期間を要するために再開発の工程に合致しない場合が多



図－1 日本国内の潜在的ブラウンフィールドの試算



図－2 VOC による土壤汚染の特徴

い。これらの要因のため、ブラウンフィールドの再生が進まず、低・未利用にとどまっている。

日本は、2050 年にカーボンニュートラルを達成することを目指しており、その実現を通して「経済と環境の好循環」を創り出すことを目指している²⁾。この社会の流れを受けて、不動産分野においても低環境負荷、特に CO₂ 排出量の削減のニーズが高まっている。また、原位置浄化技術によりブラウンフィールドを再生することで経済活動の活性化を図ることが期待される。そのためには、低コストで短工期、土地利用に制約が少な

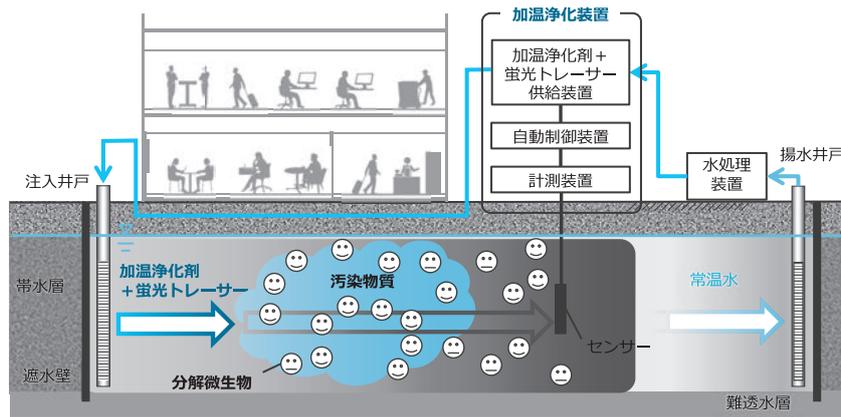


図-3 本技術の概要

く、CO₂ 排出量の削減を図れる汚染土壌浄化技術が必要不可欠であることから、本技術「温促バイオ®」を開発・展開するに至った。

2. 技術概要

本技術は、現在主流となっている大規模な汚染土壌の掘削や搬送を伴わず、地盤中に生息するVOCを分解する微生物の力を最大限に活用した低コストで地球にやさしい原位置浄化技術である。図-3に本技術を用いた場合の土壌汚染浄化の概要を示す。

本技術の特徴を次に示す。

- ・ 温水を注入して地盤をVOCの微生物分解に最適な25～30℃に加温すること
- ・ 浄化剤と併せて蛍光トレーサーを注入剤に混合することで、注入状況を可視化し、不均質な地盤内でも均一に地盤中の温度と浄化剤の濃度を制御すること

(1) 加温によるVOC浄化促進メカニズムの把握

本技術の開発を始めた時点において、地盤を30℃程度に加温してVOCの微生物分解を促進させる浄化技術の実用例はなく、VOCの微生物分解の加温促進効果や土壌からのVOC溶出促進効果の温度依存性は不明であった。そのため、土壌からVOCの溶出が促進され、効果的に微生物分解が起こる最適な温度域を把握する必要がある。

そこで、VOCの微生物分解の温度依存性(15～45℃)を把握するため、生分解バッチ試験を実施した³⁾。図-4にVOCの微生物分解の温度依存性を示す結果を、図-5に15℃と25℃の場合におけるVOCの分解試験の結果を示す。生分解バッチ試験の結果、25～30℃では国内の一般的な地盤温度に近い15℃に比べて3～8倍の分解速度向上が確認された。一方、40℃以上ではいずれのVOCも分解しないことを確認した。

また、VOCの土壌への吸着に関する指標である吸着平衡定数の温度依存特性(15～40℃)を把握するため、室内吸着平衡試験を実施した⁴⁾。図-6にVOCの土壌への吸着の温度依存性の結果を示す。室内吸着平衡試験の結果、25～30℃に加温すると土壌吸着量が5～20%低減し、土壌から地下水へへのVOC溶出促進効果を確認した。

これらの結果より、VOCの土壌からの脱離を促進させながら微生物分解が最も効果的に生じる温度帯が25～30℃であることを見出した。図-7

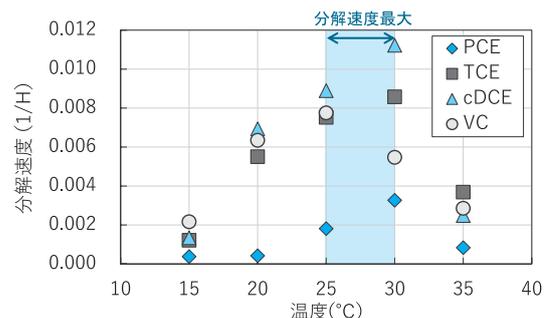
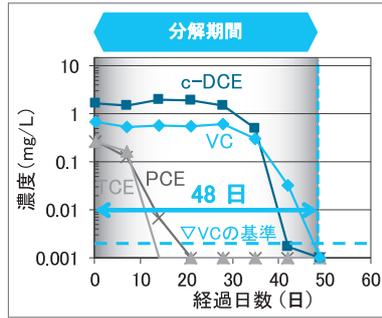


図-4 VOCの微生物分解の温度依存性

◆ 常温時：15℃



◆ 加温時：25℃

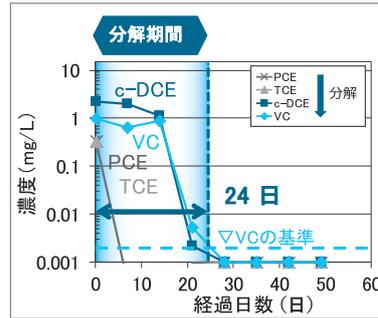


図-5 VOCの分解期間

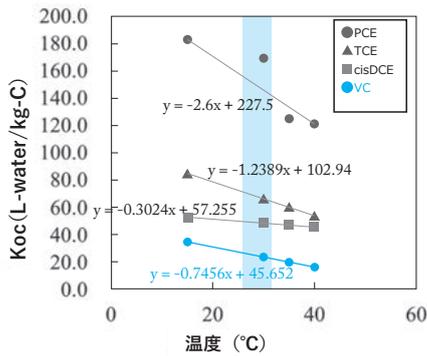


図-6 VOCの土壌への吸着の温度依存性

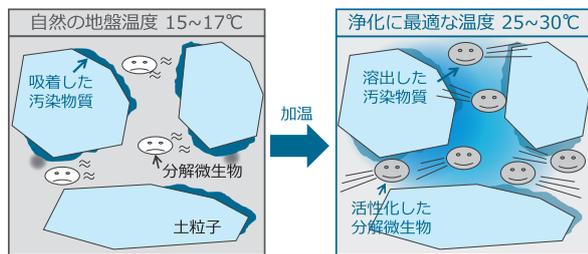


図-7 浄化促進メカニズム

に、加温によるVOCの浄化促進メカニズムの概念を示す。

(2) 蛍光トレーサーを用いた浄化剤の拡散状況の可視化と注入制御システムの開発

従来の薬剤注入技術では、地盤の不均質性が原因で、浄化剤を浄化対象範囲に均一に拡散させることは困難であった。また、浄化剤の濃度を把握するには、分析機関による機器分析を行う必要があり、現地リアルタイムに把握することが困難であった。

さらに、注入した浄化剤は地盤内に拡散するのに時間を要するため、地下水循環流量、加熱量、

浄化剤添加量を変化させた場合、従来の注入制御システムでは地盤内を微生物分解に適した条件に制御することが困難であった。このため、浄化不良箇所が存在した場合、浄化終了時の判定試験の結果を待って、改めて浄化剤を追加注入する必要があった。

そこで、浄化対象範囲の地下水温および浄化剤濃度を微生物分解に適した目標範囲内に適正に制御できる「浄化剤の見える化」と、新しい「注入制御システム」を開発した。図-8に蛍光トレーサーを用いた注入制御システムの概要を示す。

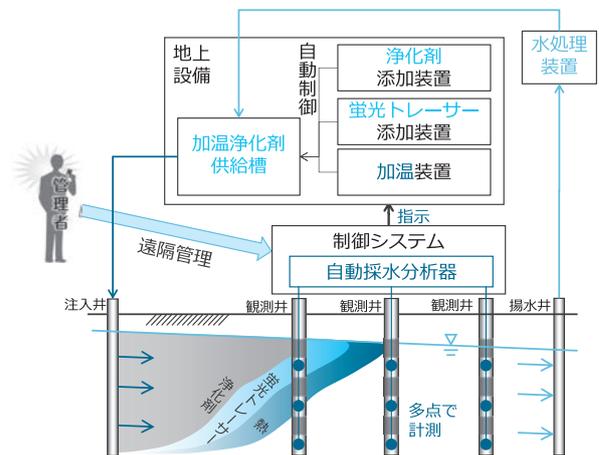


図-8 注入制御システムの概要

浄化剤の見える化は、地盤内で浄化剤と同様な挙動を示す蛍光トレーサーを指標物質として選定し、それを現地でリアルタイムに計測できる蛍光センサーシステムにより実現した。

また、各計測結果から地下水・熱・物質連成解析と類似地盤での実績に基づいた制御関数を用い

て、浄化剤の注入用の各種ポンプおよび地下水揚水用の水中ポンプの回転数、加温量、浄化剤添加量を制御するロジックをシステムに組み込むことで、新しい「注入制御システム」を実現した。

(3) 適用範囲

対象となる汚染物質は VOC であり、対象地盤は、汚染物質が広く拡散する砂質土層（帯水層）である。

3. 適用事例

国内の VOC 汚染サイトの浄化に本技術を適用した⁵⁾。図-9 に対象サイトの概要と実施状況を示す。VOC の汚染範囲は 158 m² であり、汚染は深さ 10.5 ~ 15 m の砂層に存在していた。ここに注入井戸、揚水井戸、および観測井戸を設置し、加温した浄化剤の注入と地下水の揚水を行って地盤内を加温し、浄化の進捗をモニタリングした。

(1) 蛍光トレーサーを用いた注入制御システムの効果

図-10 に浄化剤の見える化の効果を確認するため、現地で測定した蛍光トレーサーの濃度と機器分析で測定した浄化剤濃度の経時変化の結果を示す。また、図-11 に浄化対象範囲の浄化剤濃度・蛍光トレーサー濃度・地盤温度の分布図を示す。

蛍光トレーサーを浄化剤の代替指標とした浄化剤の見える化により、地盤内での浄化剤の挙動をリアルタイムで把握し、対象範囲全域について適

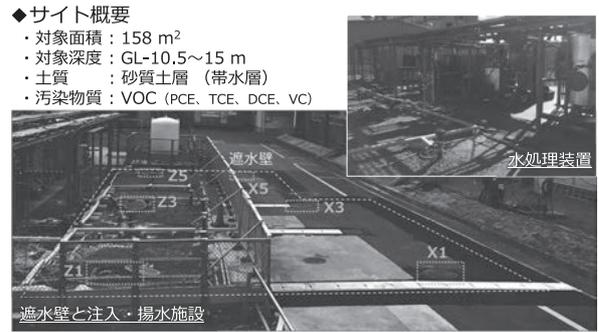


図-9 土壌汚染サイト

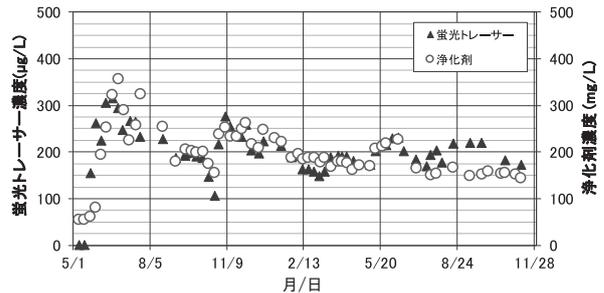


図-10 注入剤濃度とトレーサー濃度の比較

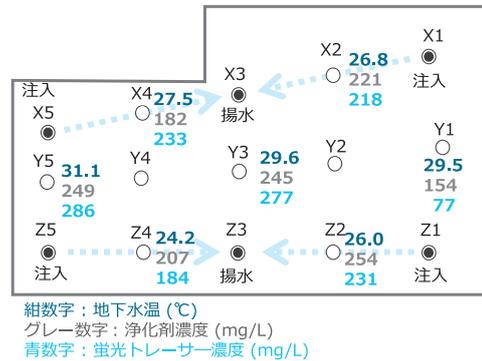


図-11 地盤温度と浄化剤の分布

正な浄化剤濃度を維持した。

一方、地盤温度について、図-12 に地盤温度

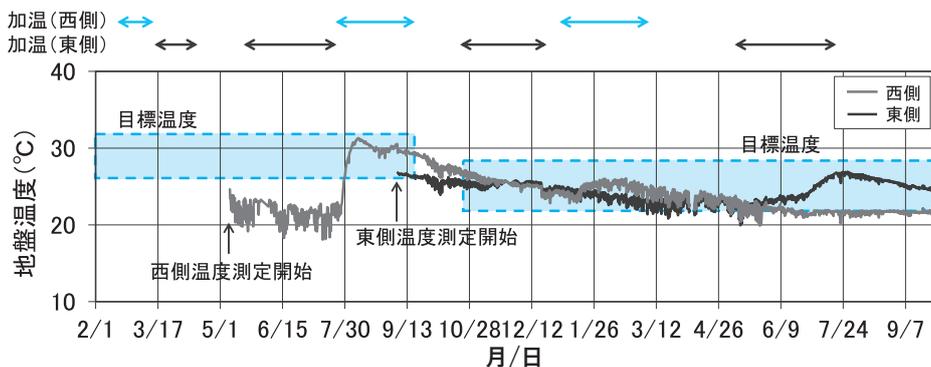


図-12 地盤の加温制御の結果

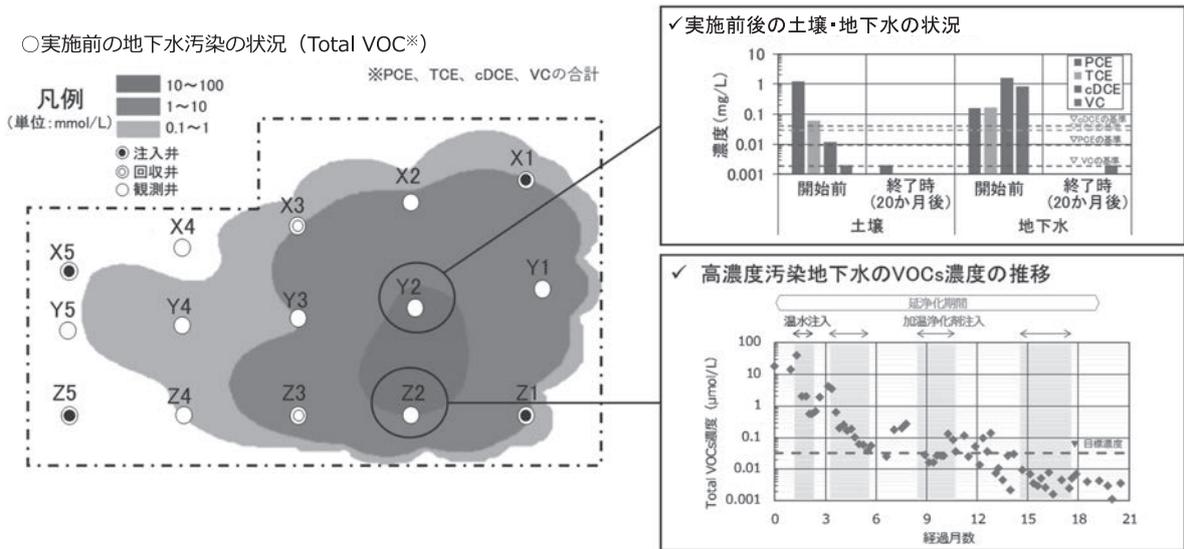


図-13 適用サイトの浄化結果

の経時変化を示す。対象範囲全域で、VOCの微生物分解に適した $29^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ および $26^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ を安定的に維持した。

(2) VOCの浄化効果

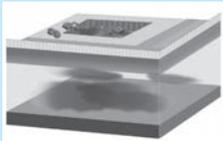
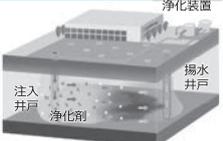
図-13に浄化結果を示す。浄化開始前は、対象範囲全域にVOCの地下水汚染が確認されていたが(図-13左)、浄化開始12カ月で地下水のVOC濃度が目標値(環境基準)以下まで低減し、その後6カ月にわたり地下水中のVOC濃度の再上昇がないことを確認した(図-13右下)。また、浄化開始前と浄化開始20カ月後の土壌中のVOC濃度を確認した結果、浄化開始後に濃度が

低減し、基準に適合していることを確認し(図-13右上)、工事を完了した。

4. 類似技術との比較

類似の土壌対策技術と比較した本技術の優位性について、実サイトでのデータを踏まえ、土壌汚染モデルサイト〔対策土量：12,000 m^3 (40 $\text{m} \times 30\text{m} \times 10\text{m}$, 深さ：5~15 m)〕にて対策期間・対策コスト・ CO_2 排出量等を比較した結果を表-1に示す。温促バイオの優位性は次の3点である。
・浄化費用を掘削除去の50%以下、従来の原位置浄化技術と比較して80%程度に削減

表-1 従来の技術との比較

技術	掘削除去(埋立処分)	従来の原位置 バイオ浄化技術	加温式原位置 高速バイオ浄化技術
概要	汚染土壌を掘削し、場外の処理場に搬出する現在主流の対策 	浄化剤を注入して原位置で浄化 	加温浄化剤を注入して原位置で浄化 
浄化期間	0.5年	4~10年	2~2.5年
コスト比*	100	46	37
CO_2 排出量比*	100	51	42
省人化	—	運用時の作業員：5~10人/週	運用時の作業員：0.5~1人/週 さらに工期短縮
対象土質	全土質対応	砂質土(透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 以上)	砂質土(透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 以上)

* 汚染土壌1 m^3 当たりの処理単価・ CO_2 排出量で表示

- ・浄化期間を従来の原位置浄化技術の50%以下に短縮
- ・CO₂排出量を掘削除去の50%以下、従来の原位置浄化技術と比較して80%程度に削減

また、デジタルセンサーや制御装置により遠隔管理が可能であるため、浄化期間中の省人化を図ることができる。さらに、地上部の建物を有効活用しながら浄化することが可能である。

5. 展開可能性について

海外においても土壤汚染、特にVOCの土壤汚染は社会問題となっており、さまざまな浄化技術の開発や展開が進んでいる。しかし、本技術のコア技術である地盤を温めて地盤中の微生物によるVOCの分解を促進する、蛍光トレーサーを用いた浄化剤の注入を制御する、という技術に類似する技術は少なく、現地環境コンサルタント等と技術連携することで、海外展開も可能であると考えられる。

本技術は、地下水を揚水井戸で揚水し、注入井戸から注入して循環させながら浄化を進めるものである。浄化完了後に地下水循環型の地中熱の建物利用システムに転用し、地上部の建物の空調熱源に利用でき、土壤汚染の対策後も有効活用が可能である。地中熱利用に供することで建物運用時の省エネ（省CO₂）にも貢献することができる。

6. おわりに

地盤に温水を注入することで加温すること、また、不均質な地盤内での浄化剤の拡散状況を蛍光トレーサーで可視化して、地盤内のVOCを分解する微生物に最適な温度と栄養源を届ける制御システムにより、従来の土壤対策技術と比較する

と、浄化費用・期間・CO₂排出量において優位性がある本技術を開発した。

欧米では、ブラウンフィールドの再生をまちのさまざまな課題を解決し活性化につなげる再開発と位置付けた取り組みにより、地域経済の好循環を生み出しているケースが多く見られる。国内でも同様の手法で、ブラウンフィールドを活気あるまちへの再生につなげる効果が期待される。本技術も、土地活用を進めながら浄化を進めるという利点を生かすことで柔軟な開発スケジュールの策定が可能となり、「まちづくり」に資するブラウンフィールドの再生に貢献していきたい。

謝辞

本技術の開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の戦略的省エネルギー技術革新プログラムの助成を受け、横浜国立大学、岡山大学と共同研究の上実施したものです。

【参考文献】

- 1) 環境省 土壤汚染をめぐるブラウンフィールド対策手法検討調査検討会：土壤汚染をめぐるブラウンフィールド問題の実態等について 中間とりまとめ、pp.15, 2007
- 2) 内閣官房：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、2021
- 3) Y. Yamazaki et al. : Temperature dependence of sequential chlorinated ethenes dechlorination and the dynamics of dechlorinating microorganisms, Chemosphere, Vol.287, 131989, 2022
- 4) 久保ら：土壤中揮発性有機塩素化合物の加温による吸着平衡および溶出促進効果の検討、第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.765-766, 2017
- 5) 山崎ら：加温原位置バイオレメディエーションによるクロロエチレン類汚染地下水浄化、土木学会論文集G（環境）、Vol.78, No.2, pp.49-60, 2022