

高圧噴射攪拌を用いた原位置浄化技術の開発

北 詰 昌 義 塩 尻 大 輔

概 要

土壌・地下水汚染の原位置浄化のためには、地盤中に浄化材を対象有害物質と有効に接触させることが必要であるが、難透水性のシルト、粘土が汚染部位の場合は、浄化材を汚染部に到達させることが難しい。

高圧噴射攪拌工法は、土質に大きく左右されることなく、広範囲に浄化材を到達させる方法として有効である。しかしながら、そのまま適用すると、汚染物質を含む排泥を伴いその処理に手間と費用がかかる問題があった。

本稿は、排泥の減少と効率的な薬剤接触を目的とした原位置浄化用の高圧噴射攪拌工法を開発し、実際の汚染サイトで原位置バイオレメディエーションを試みた結果を報告するものである。

Development of In-situ Soil and Groundwater Remediation Using the High-pressure Jet Stirring Method

Abstract

For in-situ purification of soil or groundwater contamination, it is necessary that the pollutant comes into good contact with the purification materials in the ground, but this is difficult where the pollution is contained in clay or silt with low water permeability.

The high pressure jet stirring method is effective in helping purification materials arrive at the polluted zone without being greatly affected by soil type. However, when this method was applied traditionally, the process was difficult to handle and costly with the large amounts of discharge sludge containing the pollutant.

This paper develops a improved method of high-pressure jet stirring for in-situ purification aimed at reduction in the amount of sludge discharged, efficient contact with the purification materials, and reports the results of in-situ bioremediation at the actual pollution site.

キーワード： 土壌汚染、地下水汚染、
噴射攪拌、原位置浄化、
ダイレクトセンシング、
バイオレメディエーション

§1. はじめに

土壌・地下水汚染の原位置浄化において、地盤中に浄化材を対象有害物質と均一かつ有効に接触させることが重要かつ課題となる。透水性が高い砂礫層であれば井戸からの自然注入や低圧注入で対応できるが、難透水性のシルト、粘土層に汚染がある場合は、一時的に近傍地下水の浄化は達成できたとしても、リバウンドする例が稀ではない。

地盤中に浄化材を到達・接触させるのに用いられる方法として、攪拌、注入、噴射攪拌が挙げられる。機械攪拌では、攪拌翼を回転して機械力で汚染部位に浄化材を接触させるが、大深度では大型重機が必要となることから建屋内や狭隘地での適用は困難である。二重管ストレナ工法やダブルパッカ工法等を用いた注入工法を採用する場合、シルト、粘土層への浄化材の接触は狭い範囲に留まる。

噴射攪拌工法は、土質に大きく左右されることなく、広範囲に浄化材を到達させる方法として有効である。

しかしながら、高圧かつ短時間で薬液を噴射するため、大量の排泥を伴うことになる。浄化対象である「汚染土砂」を地上に排出することは、処理コストや環境面で大きな問題と言えよう。

このような背景から、筆者らは、排泥を出さず、効率的に浄化材を接触させることができる高圧噴射攪拌工法を用いた原位置浄化のためのシステムを開発し、実際の汚染サイトでバイオレメディエーションの実証を試みた。

§2. 原位置浄化高圧噴射攪拌システムの開発

浄化材を汚染地盤に高圧で噴射攪拌することにより、注入法では難しいシルト・粘土層への注入も可能にする。

汚染の取残しを無くすため、事前に正確に汚染範囲を把握し、さらに施工後の浄化材の到達確認手法も含めたシステムを目指した。具体的には、以下の手順で実施した。

- ① ダイレクトセンシング技術を活用して、土壌汚染部位の土質性状・汚染範囲を正確にとらえた上で、浄化材を接触させる深度、範囲、浄化材数量を決定する。
(事前調査・計画・設計)
- ② 浄化材を高圧で設定深度の地盤に噴射することによって地盤を円盤状に切削し、排泥を出さずに汚染部に浄化材を接触させる。
(無排泥高圧噴射攪拌)
- ③ 地盤内の浄化材の到達・接触状況をダイレクトセンシングにより確認し、未到達部位の再注入を行う。
(到達確認調査)

まず、高圧噴射攪拌施工に使用する機械・資材は大部分従来のものであるが、排泥を出さず地盤内圧を高めて割裂を促進させるため、噴射ロッド周りからの排泥を抑えるパッカーを備えた新規口元管を開発・製作した。

さらに、電気検層(地盤比抵抗測定)技術を応用した電気伝導率(EC)ダイレクトセンシング技術を用いることで、省力化・高密度調査による高精度・低コスト化を実現した。

高圧噴射攪拌プラントと口元管の概要を図1に示した。

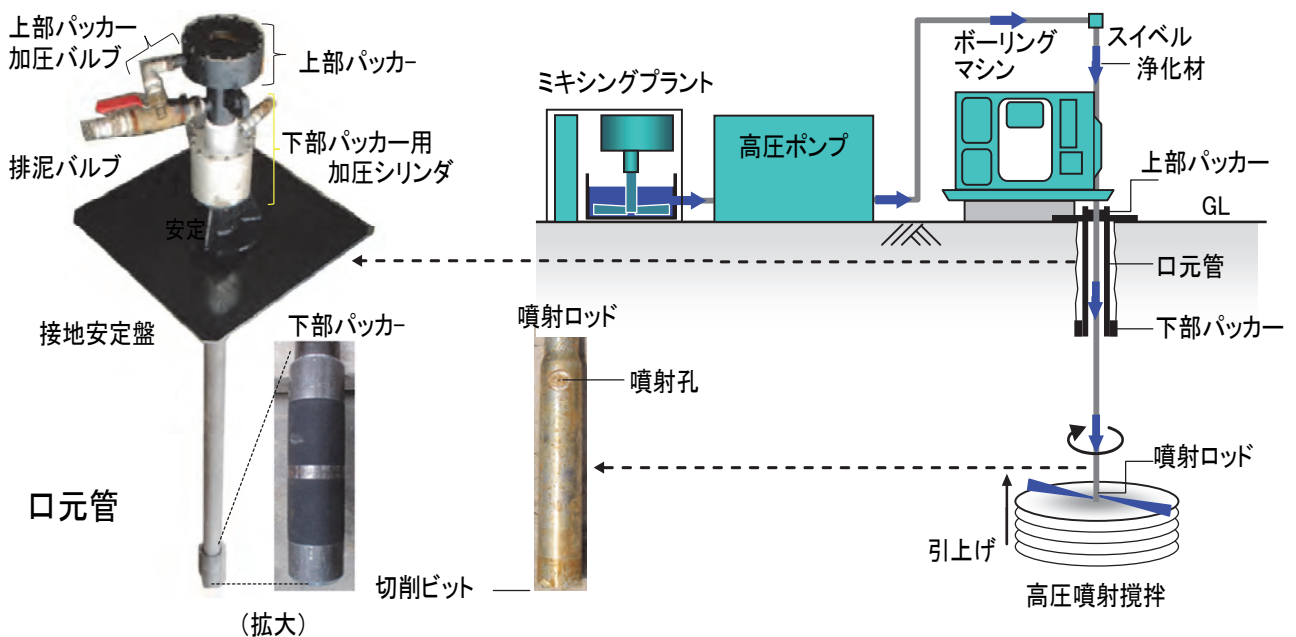


図1 高圧噴射攪拌プラント・口元管の概要

§3. 実証試験の方法

3.1 実証サイトの概要

現地は丘陵谷部に造成された操業中の機械工場内である。その敷地内の実証サイトの平面図を図2に示した。土質は砂質土と粘性土が互層になった複雑な地盤である。GL-14m 付近からN 値が 50 を越すシルト・粘土層あるいは岩盤になる。地下水位は概ね GL-2~-3m である。

浄化対象物質はトリクロロエチレン(TCE)とシス-1,2-ジクロロエチレン(cDCE)である。

表1に概要を示した。

約 10 年前から揚水処理を実施し、地下水高濃度部分が次第に縮小しているが、土壌溶出量では、シルト、粘土層に汚染が残留している傾向が認められている。

表1 対象物質分布概要

調査位置	調査項目	最高濃度 (mg/L)	深度 (m)
試験区(A)	土壌溶出量	cDCE ; 0.75	9.0
		TCE ; 0.13	9.0
MW-A	地下水濃度	cDCE ; 18.4	—
		TCE ; 0.15	—
試験区(B)	土壌溶出量	cDCE ; 1.32	11.5
		TCE ; 1.32	11.3
MW-B	地下水濃度	cDCE ; 0.68	—
		TCE ; 0.15	—

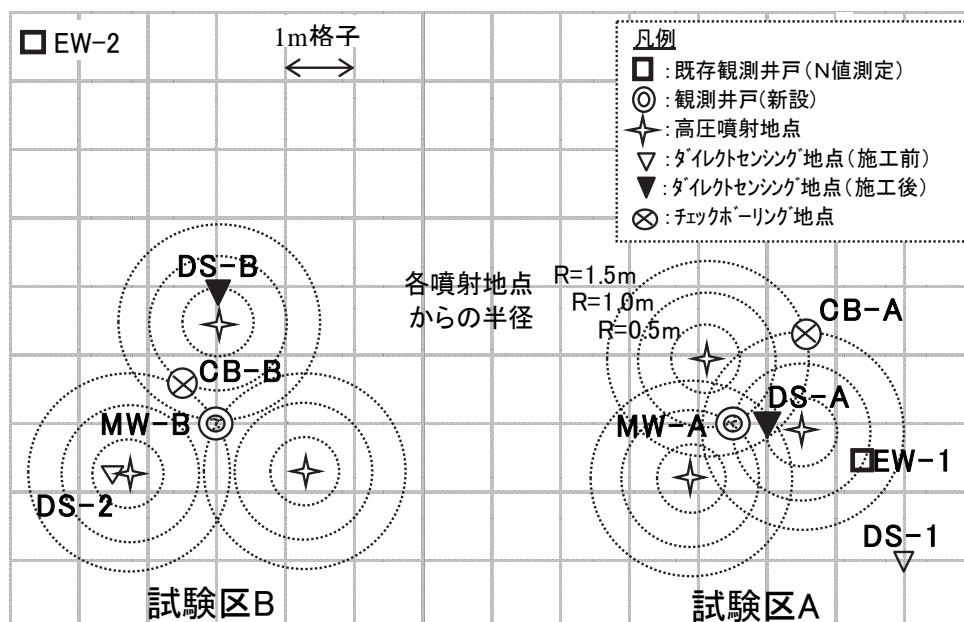


図2 実証サイト平面図

3.2 実証試験方法

(1) 試験区および噴射攪拌の仕様

試験区 A では、MW-A から 1.0m 離れた 3ヶ所から噴射攪拌を実施した。範囲は汚染が認められる GL-3.5~5.0m および GL-7.0~-11.5m とした。浄化材は、植物油乳化物主体の微生物栄養剤を使用した。

試験区 B では、硬く締まったシルト・粘土層において、噴射攪拌が有効であるかを確認した。そのために、試験区 A の場合より噴射量を 30~50%増量し、口元管下部パッカーを改造し、地山との密着性を高めた。さらに、排泥を出さないよう口元管周りを保護管とセメント・ベントナイトにより固定してから施工した。

観測井戸 MW-B から 1.5m 離れた 3ヶ所から噴射攪拌を

実施した。深度範囲は N 値がやや高い GL-8.0~-13.0m とした。噴射条件は土質によるが、噴射量 80~120L/分、40MPa、ロッド引上げ 10cm ピッチとした。

(2) 浄化材到達評価

浄化材の地盤中での到達確認は、施工前後の EC を比較することで評価した。

小型自走式ボーリングマシンのロッド先端に EC プローブを装着し、地盤中に貫入して EC を測定した。施工前の地盤の EC は土質により差はあるが、砂質土で 20 mS/m、粘性土で 50 mS/m 程度であったのに対し、使用した栄養剤の EC は 300 mS/m 程度の値であることから、噴射直後では、到達した場合は明確に EC が高くなる。

(3) 土壌および地下水浄化効果評価

噴射施工 6 ヶ月以降に噴射位置から到達したと推測される地点でチェックボーリングを実施し、TCE と cDCE の土壌溶出量を比較した。また、地下水モニタリングにより浄化効果を評価した。

§4. 実証試験の結果

4.1 試験区 A の結果

(1) 浄化材の到達状況(試験区 A)

噴射位置から 0.5m 離れた DS-A で噴射施工直後に測定した EC 測定結果を施工前の DS-1 に重ねたグラフを図 3 に示した。

GL-6.5m~11.0m の範囲でシルトを含めて一様に EC が上昇しており、噴射攪拌範囲とほぼ一致した。したがって、浄化材は少なくとも半径 50cm 以上に到達し、汚染部位と接触したと評価できた。

(2) 土壌浄化効果(試験区 A)

2 つの噴射攪拌位置から等距離で 1.5m 離れた CB-A のチェックボーリングの各深度の TCE と cDCE の溶出量測定結果を施工前の MW-A の測定結果と比較したグラフを図 4 に示した。

施工前 MW-A では、cDCE が GL-4.0m、GL-7.5~9.0m (最高値 0.75mg/L)、GL-10.5m で基準超過し、TCE は -9.0m (最高値 0.13mg/L)、GL-11.0m で超過していたが、6 ヶ月後には CB-A において、TCE は全深度で基準を満足し、cDCE は同じ深度において基準の 4 倍以下 (最高値 0.15mg/L) に低下した。

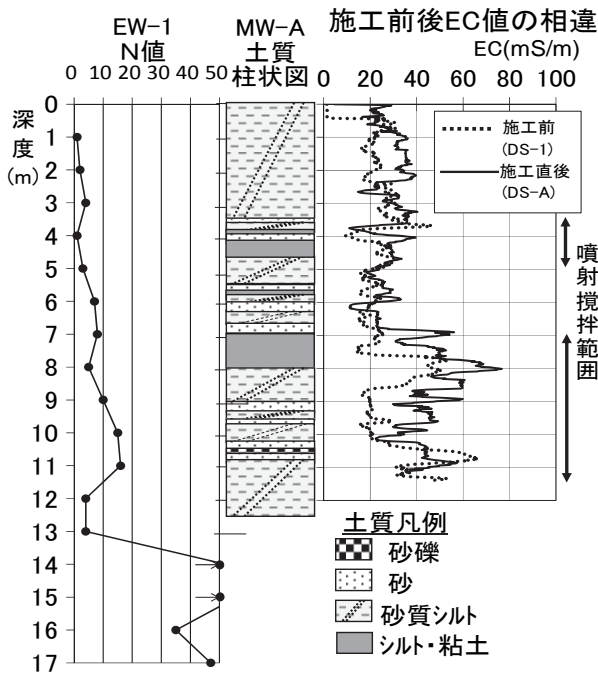


図 3 試験区 A 浄化材到達状況

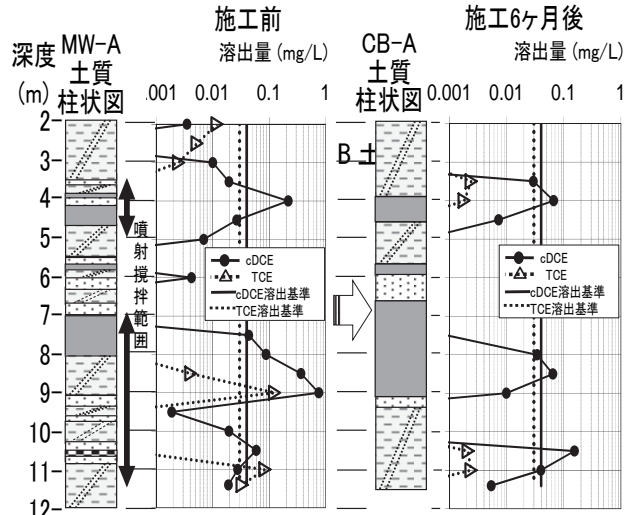


図 4 試験区 A 土壌浄化効果

以上の結果から、高压噴射により浄化材は、直径 3m 以上の範囲に拡がり、シルト質の地層にも適用できる可能性が高いと評価できた。

なお、土質により口元管周囲から排泥が上昇し、排泥計量では噴射量の約 13%が地上に排出した。地山と下部パッカーの密着性が不完全であったことが原因と考えられた。

4.2 試験区 B の結果

(1) 浄化材の到達状況(試験区 B)

噴射位置から 1.0m 離れた DS-B で噴射施工直後に測定した EC 測定結果を施工前の DS-2 に重ねたグラフを図 5 に示した。

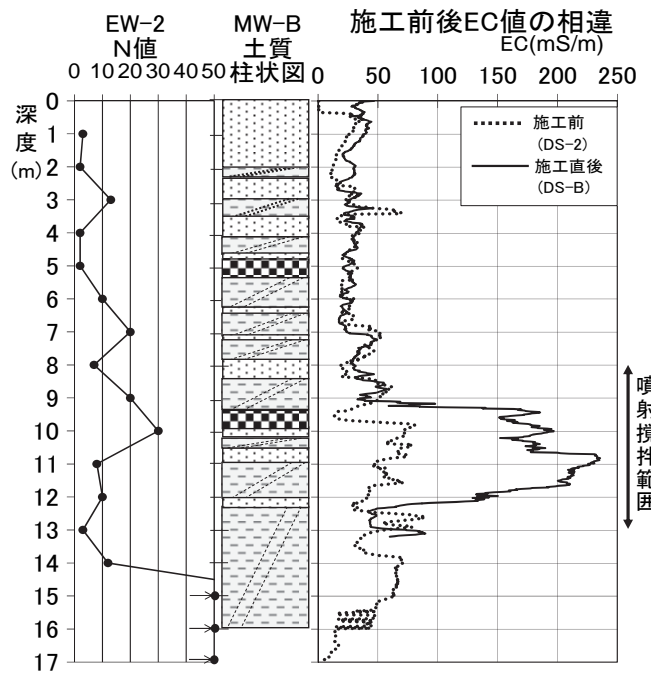


図 5 試験区 B 浄化材到達状況

GL-9.5~12m の範囲で明確に EC が上昇しており、砂礫からシルトおよび N 値が 30 に近い硬く締まった砂質シルトまで土質に関わらず、浄化材は少なくとも半径 50cm 以上に到達し、汚染部位と接触したと評価できた。

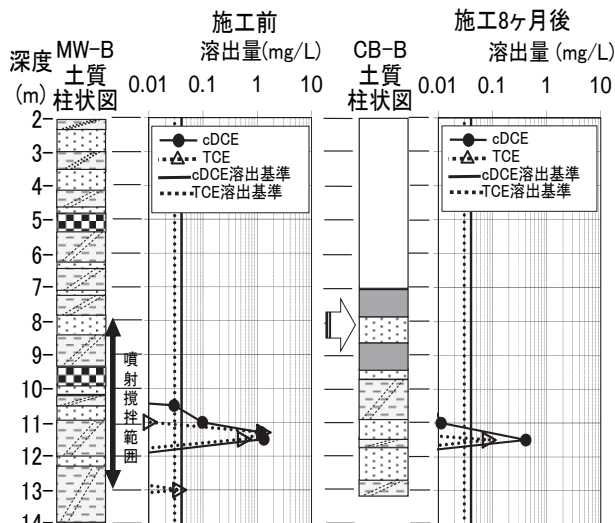


図6 試験区B 土壌浄化効果

(2)土壌浄化効果(試験区B)

噴射位置から 1.0m 離れた CB-B のチェックボーリングの各深度の TCE と cDCE の溶出量測定結果を施工前の MW-B の測定結果と比較したグラフを図6に示した。

施工前 MW-B では、cDCE が GL-11.0~11.5m (最高値 1.32mg/L) で基準超過し、TCE は GL-11.3~11.5m (最高値 1.32mg/L)、GL-13.0m で超過していたが、8ヶ月後には CB-B において、cDCE は GL-11.5m で 0.41 mg/L、TCE も同深度で 0.09 mg/L に低下していた。

以上の結果から、高圧噴射により浄化材は、直径2m以上の範囲に拡がり、硬く締まったシルト層にも適用できると評価できた。

4.3 地下水浄化効果

観測井戸 MW-A では、図7に示した観測井戸モニタリング結果から、2013年7月に施工し、2015年2月時点で cDCE、TCE とも地下水基準を満足した。試験区 A 施工直後の急激な濃度上昇は、噴射攪拌による洗出し効果によるものと推察される。

また、MW-B では、図8に示した観測井戸モニタリング結果から、施工後8ヶ月で cDCE が 0.68 から 0.05mg/L まで低下した。

以上の結果から、浄化材が到達し難いシルト・粘土層においても高圧噴射を行うことで、浄化材の到達・洗い出し効果によって汚染物質が早期に分解されたと考えられた。

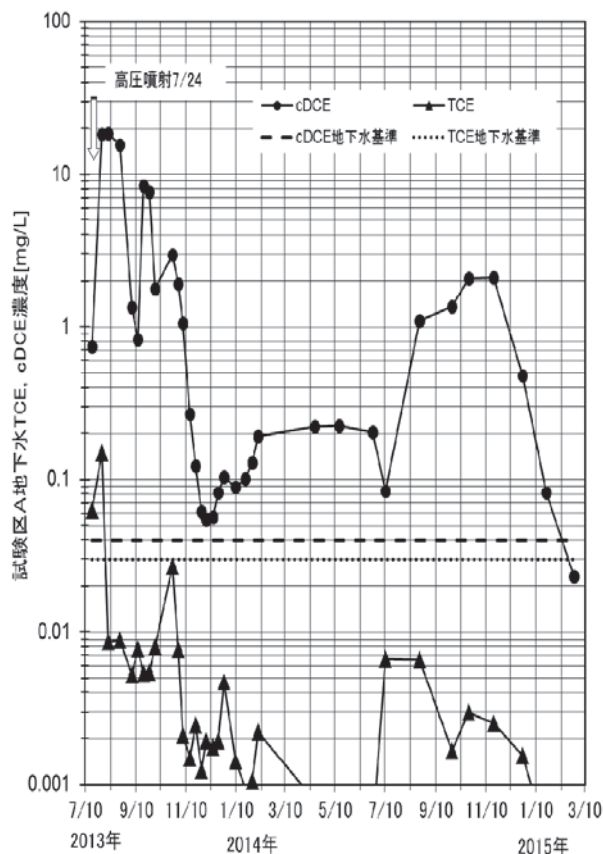


図7 地下水浄化効果(試験区A)

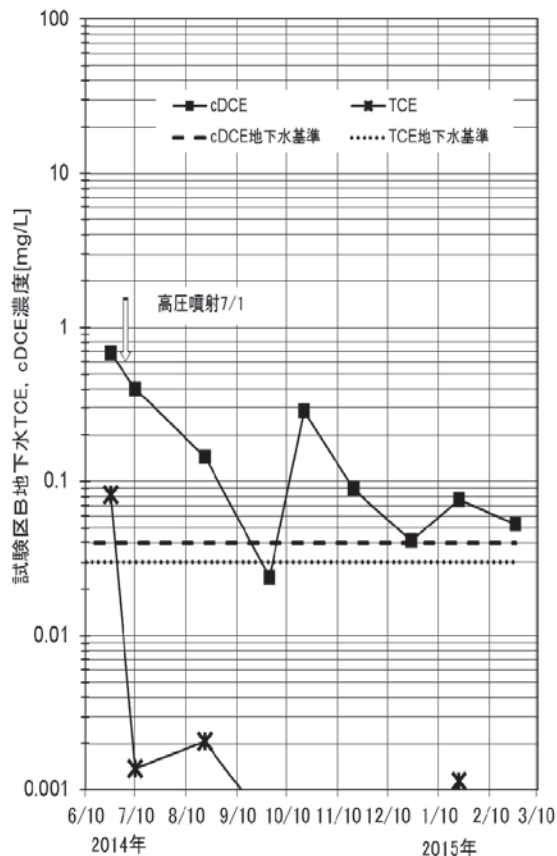


図8 地下水浄化効果(試験区B)

§5. まとめと今後の展望

従来の注入工法と比較して、開発したシステムの優位性と課題を以下にまとめた。

【優位性】

- ① 難透水層でも浄化材を到達させることができ、浄化が可能である。
- ② 新規口元管により、排泥を地上に出さずに浄化材を無駄なく接触させることができ有害物質を含有する可能性がある排泥の処分が不要となる。
- ③ ダイレクトセンシング技術の活用により、汚染位置を正確に確認し、施工後の浄化材の到達範囲を迅速に評価できる。

【課題】

噴射予定深度の地層が軟弱な場合、“水みち”を形成する可能性があるため、至近距離での連続施工には注意を要する。

【今後の展望】

本システムの特長・優位性を発揮できる狭隘地、建屋内、操業中事業所等の VOC・石油汚染対策工事に適用していく。浄化材・土質により、噴射施工の仕様を最適化するため、今後も施工経験を積み、フィードバック改良を続けていく。

謝 辞

今回の技術開発に当っては、共同研究者として、東興ジオテック株式会社の佐久間孝夫、熊沢章、岡田宙および株式会社アイエスソリューションの和知剛、小松大祐(敬称略)の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。



ひ と こ と

足掛け3年に渡り、実サイトにおいて土壌・地下水汚染の原位置浄化実証試験の貴重な機会を得た。

噴射攪拌・ダイレクトセンシング等の専門技術者との共同開発の結果、使い易く信頼度の高い浄化材注入技術が開発できたと思う。