

製品技術

プロパゲーション®工法による
土壌・地下水浄化

フェントン反応剤+水圧破碎を応用した原位置浄化

(株)アイ・エス・ソリューション 山内 仁

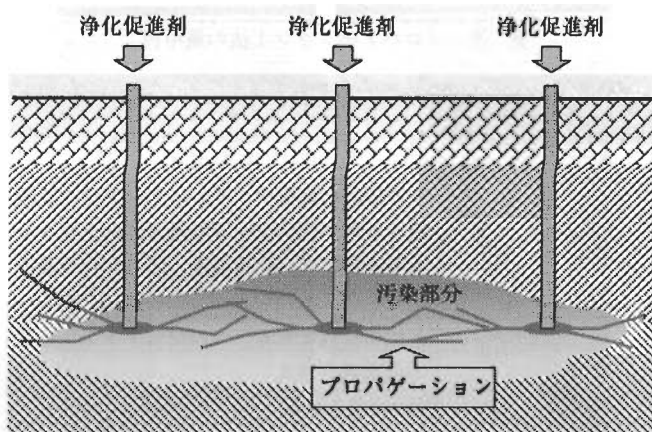
フェントン反応剤を原位置に注入して土壌や地下水の浄化を行う原位置化学酸化処理【In Situ Chemical Oxidation (ISCO)⁽¹⁾という】は、米国のサイトで広く適用され、高濃度汚染域を短期間・低コストで浄化ができる技術として評価されている。フェントン反応剤は土壌や地下水中で有機汚染化合物に接触することにより、それらを無毒な無機化合物にまで分解する効果的な化学酸化処理剤である。しかしながら、フェントン反応剤による酸化作用は短時間で終息する。また、透水性の低い地層にはフェントン反応剤が浸透し難いといった制約もある。筆者らは水圧破碎(ハイドロフラクチャー法)を応用したプロパゲーション®工法⁽²⁾を使用し、透水性の低い地層を浄化促進剤が浸透し易い地層へと改良した後、フェントン反応剤を原位置に注入する浄化を行ってきた。本論ではプロパゲーション工法によるフェントン反応剤を使用した原位置浄化の事例について紹介する。

1 プロパゲーション工法とフェントン反応剤を使用した原位置浄化の進め方

1-1 プロパゲーション工法の特徴と適用例

プロパゲーション工法は、プロパゲーションと呼ばれる砂層を原位置地盤に形成することにより浄化促進剤の汚染土壌への浸透性を向上させ、効率良く原位置浄化を行うことができる工法である⁽²⁾⁽³⁾。この工法の主要技術である砂層を形成する方法は、ハ

イドロフラクチャー法を応用したものである。一般的にハイドロフラクチャー法は、岩盤を対象として坑井内に地層・岩層が保有する応力に打ち勝つような高圧の流体(フラクチャリング流体)を圧入し、地下に亀裂(フラクチャー)を生じさせ、その亀裂を拡張・伸展させる。同時に開口した割れ目が閉じないように粒状のプロパント(支持材)を充填してプロパント層を形成し、透水性を増加させることで油井や熱水の生産量、還元量を増加させることを目的としている。プロパゲーション工法は、高圧の流体



第1図 プロパゲーション工法の浄化イメージ

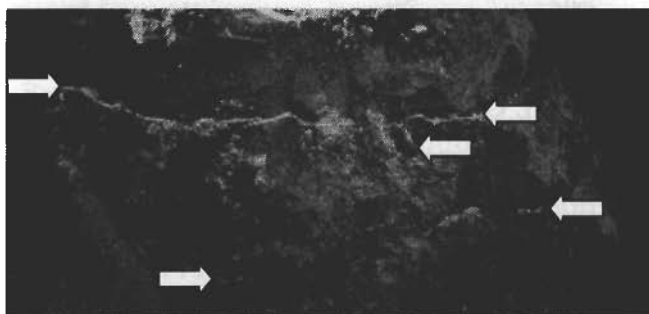


写真1 プロパゲーション工法によってできた砂層 (⇒印)

(注) プロパゲーション又はプロパゲーション工法は(株)アイ・エス・ソリューションの商標登録(第4755174)です。

に粘性流体を使用し、生じた亀裂や割れ目に支持材として砂を圧入する方法である。形成された砂層（プロパゲーション）を浄化促進剤注入のための透水層として活用する（第1図参照）。

原位置浄化を行うにあたって、プロパゲーション工法の特長や制約は以下のとおりである。また、プロパゲーション工法の適用例を第1表に示す。

〈特長〉

- ① 透水性の低い地層を透水性の高い地層へ改良でき、フェントン反応剤などの浄化促進剤の注入を容易にする。
- ② 不飽和帯において、フェントン反応剤などの浄化促進剤の通り道を作る。
- ③ 注入井戸本数を最少化し、少ない注入井戸本数で広い範囲の浄化が出来る。
- ④ フェントン反応剤以外の化学酸化剤の他、バイオレメディエーションや土壤ガス吸引法等の既存浄化技術との組み合わせが可能。

〈制約〉

- ① 深度3mより浅い地層、盛土地盤など乱された地層には適用できない。
- ② 4トン車1台分の作業範囲が必要。

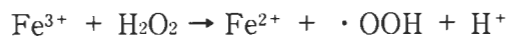
第1表 プロパゲーション工法の適用例

サイト名	浄化深度 [m]	サイトの特徴とプロパゲーション工法の効果
A	7.5~9.5	建屋内注入井戸の最少化
B	5.0	上方細粒化堆積サイクルの上部部分で比較的透水性が低いゾーンの透水性向上とフェントン反応剤の浸透促進、注入井戸の最少化
C	7.5	不飽和帯（ローム）へのフェントン反応剤の浸透路の形成
D	5.5	サイトBと同様
E	5.0	帯水層の透水性向上とフェントン反応剤の浸透促進、注入井戸数量の最少化
F	6.0	サイトEと同様

1-2 フェントン反応剤の特性

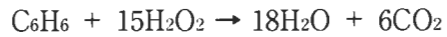
フェントン反応剤を用いた浄化は、過酸化水素水（主剤）と二価の鉄塩水溶液（助剤）を汚染された地盤中に注入し、原位置で酸化力の強いヒドロキシルラジカルを発生させ、ベンゼンあるいはTCEなどの揮発性有機化合物類を酸化分解する方法で、水処理で広く用いられている⁽⁴⁾。

(1) フェントン反応



(2) 有機物の酸化分解反応

〈ベンゼンの酸化分解〉



〈トリクロロエチレンの酸化分解〉

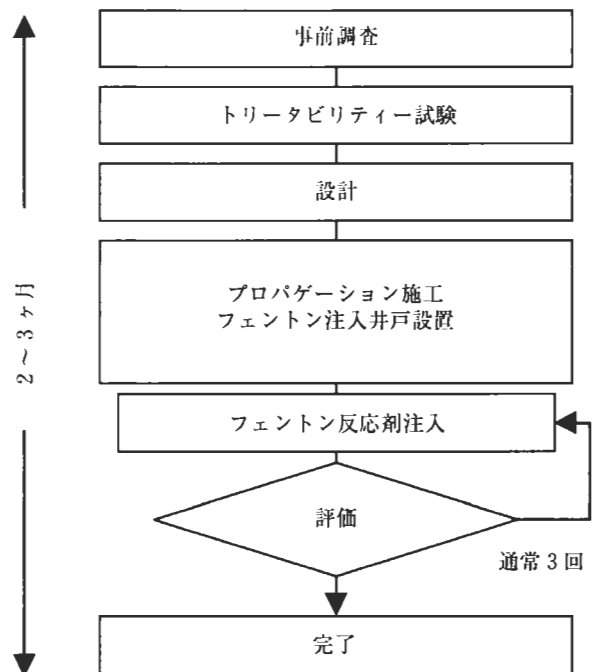


フェントン反応剤は「土壤汚染対策法」に定められた第一種特定有害物質、有機リン化合物を除く第三種特定有害物、BTEX（ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン）、PAH（多環芳香族化合物）及び燃料油系TPH（炭素数が20以下のガソリン、軽油、灯油など）を効果的に分解することが知られている。一方、フェントン反応剤による酸化分解作用は短時間で終息する。したがって、短い反応時間中にフェントン反応剤をいかに浄化対象物質に到達させて接触させるかが原位置浄化の重要なポイントとなる。

1-3 原位置浄化の進め方

フェントン反応剤による原位置浄化の決め手は、いかにして適量のフェントン反応剤を浄化対象物質に接触させるかにある。このため、浄化に当たっては事前調査及びトリータビリティ試験結果に基づいた設計と実施が必要になる。

浄化の手順を第2図に示す。



第2図 プロパゲーション工法を使用した原位置浄化の進め方

(1) 事前調査

事前調査では特に汚染原因やNAPLの存在位置、汚染の拡散経路及び浄化対策が必要な範囲を評価し、汚染の発生から現在の状況（又は調査結果）に至った経過、そして浄化対策実施後の効果についての適切なシナリオを描くことが大切である。

土壌・地下水汚染対策のための調査方法は、例えば土壌汚染対策法や関連する図書に詳しく書かれている。しかし、調査技術はいつも万能ではない。既存調査及び事前調査結果から得られたデータと上記シナリオの妥当性について常にレビューすることが重要である。

フェントン反応剤を用いた原位置浄化法ではその反応により汚染物質が分解され、注入直後は汚染物質の濃度が低下する。このため、大幅に改善されたと思われがちである。しかし、NAPLが残っていれば汚染物質は供給され続け、原位置浄化実施後も濃度が再上昇したり、濃度低下が見られなかったりする。ボーリングや分析の他に、事前調査においてNAPLを見逃さないための留意点を以下に示す⁽⁵⁾。

- ① 浄化対策の実施前に可能な限り多くの建物の設計図書、施工時の図面を収集する。
- ② 汚染の疑いがある箇所で、過去の土地の使用履歴が分からない場所は、可能な範囲において試掘を行なう。
- ③ 関係者へのヒアリングや立会いを依頼する。
- ④ 敷地外汚染やいわゆる戻り汚染について評価する。
- ⑤ 各データと汚染発生・NAPLの存在・拡散経路についてのレビューを行う。

(2) トリータビリティ試験

フェントン反応剤による浄化対象物質の分解の程度及びフェントン反応剤の注入量や注入回数を評価するための試験である。

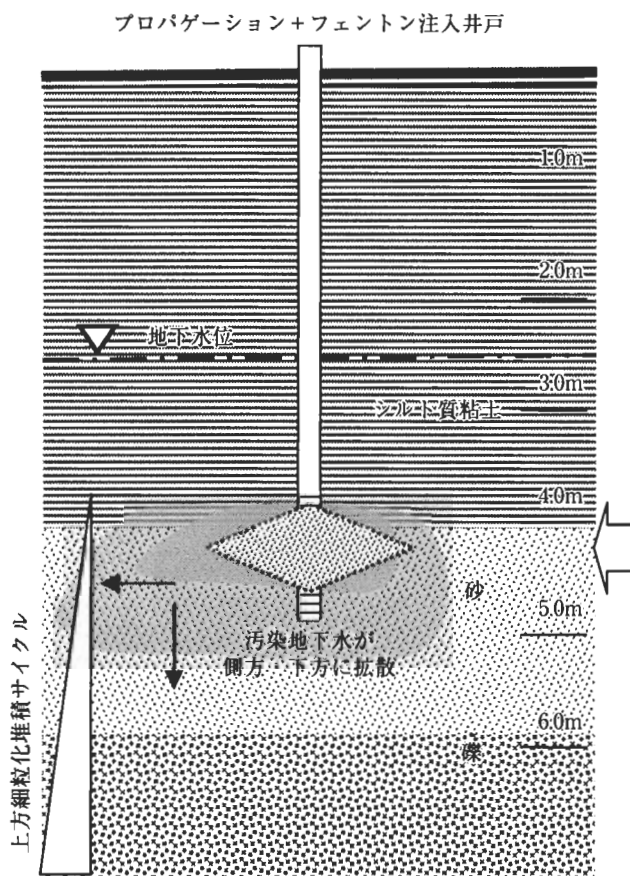
試験ではH₂O₂ 1%のフェントン反応剤を浄化対象とする地下水や土壌に添加して、浄化対象物質の分解性について評価を行っている。

第2表 トリータビリティ試験の仕様

試験系	測定	
	反応時間 6時間	
H ₂ O ₂ :1% 系	対象-1	濃度
Fe(II)/H ₂ O ₂ =1/20	反応-2	臭気

2 プロパゲーション工法の実施事例

トリクロロエチレンによる地下水汚染の浄化サイトである。対象地の地質は完新世の扇状地堆積物から構成され、礫・砂・シルト質粘土から成る上方細粒化堆積サイクルを示していた。トリクロロエチレンは地下ピットから飽和帯の土壌に浸透し、トリクロロエチレンNAPLはシルト質粘土の下部から砂の上部に滞留して地下水汚染を発生させていた。本浄化対策では、地下ピット下部に残留していたトリクロロエチレンNAPLの掘削除去を行った後、シルト質粘土下部から砂に残されていた汚染地下水の浄化を目的として、フェントン反応剤による原位置浄化を行うこととなった。しかしながら、対象地の地質は上方細粒化を示していることから下方に向かって透水性が高くなっている。このため、プロパゲーション工法を使用して浄化対象範囲の横方向（第3図⇒印）の透水性を向上させ、横方向へのフェントン反応剤の注入量の増加と浄化効果の確保を図った。



第3図 トリクロロエチレン汚染地の汚染拡散機構とプロパゲーションの位置 (⇒印)

2-1 プロパゲーションの施工手順

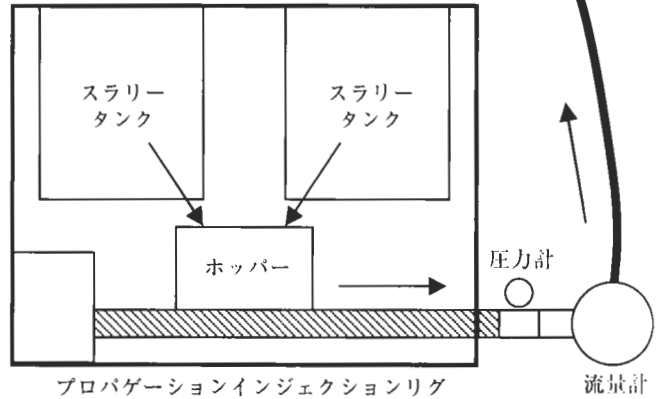
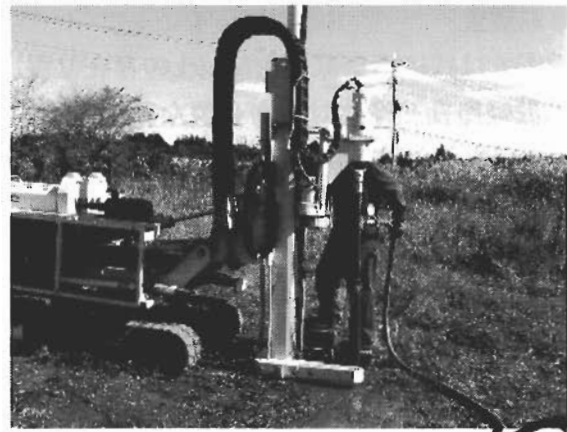
1 削孔～ウォータージェット原位置切断

ジオプローブ[®]を用いて削孔・ケーシング打ち込みを行った。以下に削孔の手順を示す。

- 1 ジオプローブ[®]を用いてφ101.6mmのケーシング打ち込みを行う。
- 2 所定の深度に達したらケーシングを50cm引き上げる。
- 3 ウォータージェットノズルを取り付けたロッドをケーシング内に差し込み、高圧水にて孔壁面に切り込みを入れる（切り込み長さ：50cm～1m程度）。

(2) フラクチャースラリーの配合

フラクチャースラリーは砂+CMC+酵素+水の混合粘性流体で、掘削孔壁面のウォータージェットによる切り込み平面に沿うような形で高圧の流体（フラクチャリング流体）として圧入して地下に亀裂（フラクチャー）を発生させる。生じた亀裂を拡張・進展させると同時に、開口した割れ目が閉じないように砂で置換して透水性を増加させる。



第4図 フラクチャースラリーのフロー

第3表 フラクチャースラリーの配合一覧

CMC 添加率 [%]	酵素 添加率 ^(注1) [%]	配合（水1リットル当たり）		
		CMC 添加量 ^(注2) [g]	砂 添加量 [g]	酵素 添加量 [g]
1.25	0.1	15	150	0.015

(注1) CMCに対する質量%、酵素は食品添加物

(注2) CMC：カルボキシルメチルセルロース、食品添加剤で土木工事やボーリング工事の孔壁安定液材 料として一般的に使用されている材料。

(3) フラクチャリング

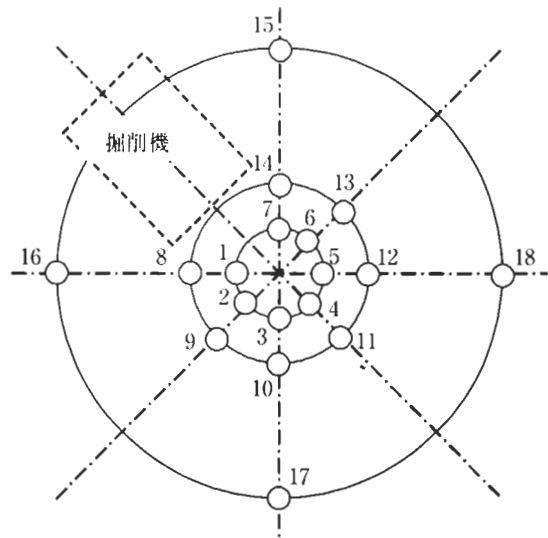
フラクチャースラリーの作製から注入までは、プロパゲーションインジェクションリグ（写真2）を用いて作業を行う。フラクチャースラリーのフローを第4図に示す。

(4) プロパゲーションの出来形計測・制御

フラクチャリングによって形成された原位置のプ



写真2 プロパゲーションインジェクションリグ



第5図 傾斜計の配置例

ロパゲーションは放射状に配列された傾斜計 (Tilt_meter) によって検知し、地表面変位の観察と施工管理 (出来形・制御) に利用している (第5図、写真3参照)。

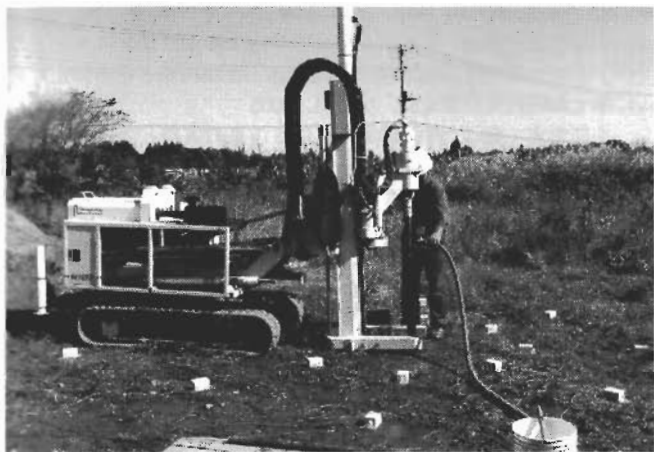
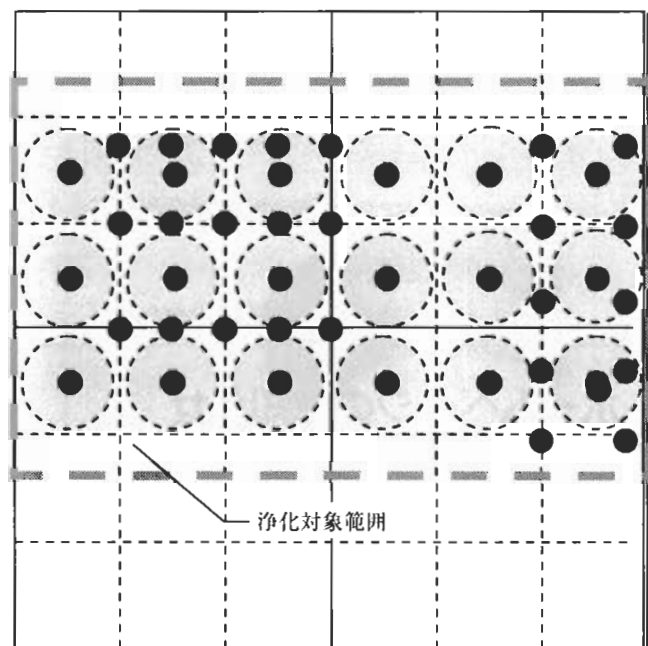


写真3 傾斜計の配置状況

(2) プロパゲーション及びフェントン注入井戸の配置及び浄化の効果

プロパゲーションと注入井戸の配置図を第6図に示す。

井戸注入だけの浄化の場合では、注入井戸の配置



- プロパゲーション [PVC50]
- 注入井戸 [PVC25]

第6図 プロパゲーションとフェントン注入井戸の配置

は通常2.0mから3.0m間隔となる。当該サイト (浄化範囲約30m×60m) では注入井戸単独の場合では約200本以上の注入井戸が必要であるとされていた。しかしながら、プロパゲーションを10m間隔で実施することにより、プロパゲーション18箇所+注入井戸25本の施工で十分な浄化効果を得ることが出来た。

当該サイトでは、約3ヶ月の現地作業で地下水濃度は基準を達成した。

3 おわりに

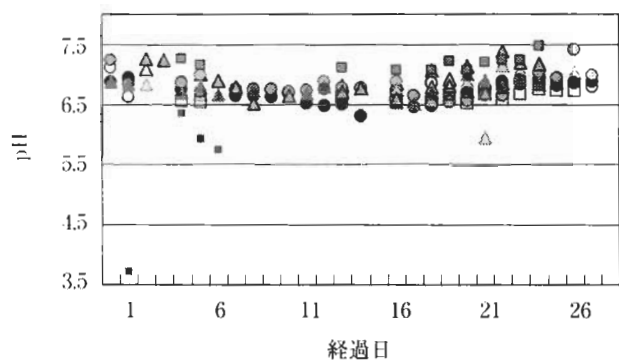
フェントン反応剤が環境へ与える影響として、クエン酸注入によるpH低下に伴う重金属の溶出促進やフェントン反応剤による配管等の腐食促進の懸念がある。

フェントン反応が効果的に進行するpHの範囲はpH3~6と言われている。クエン酸の注入により地下水のpHは一時的にpH3.5~4.5程度まで低下するが、クエン酸注入後数日で地下水のpHは元に戻ることを確認している。また、弊社実績ではpH7程度以下であれば対象物質分解に十分なフェントン反応が生じていることを確認している。したがって、pH6以下の低pH条件が長期間継続することはなく、重金属の溶出促進に対する影響は小さいと判断される。

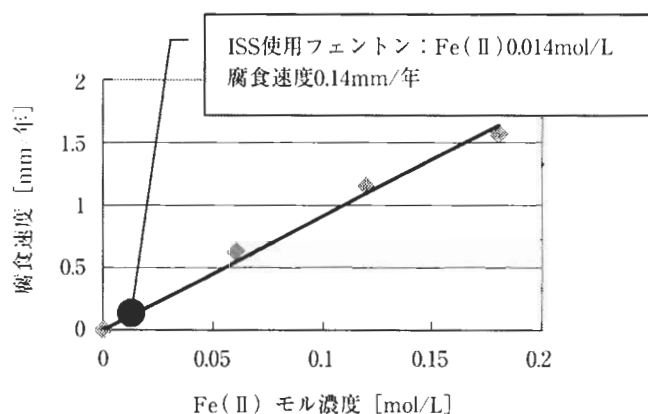
また、フェントン反応剤による金属への腐食の影響について評価する実験を行った。実験は試薬の濃度を変えたフェントン反応剤の中にSGP管 (白ガス管)・肉厚3.8mmを60日間浸透させて、SGP管の腐食量を測定した。

実験の結果、使用しているフェントン反応剤での一年当たりの腐食速度は「0.14mm/年」という推定値が得られた。実際の施工ではフェントン反応剤を使用する期間は1サイト当たり2週間から3週間程度であることから腐食の影響は更に小さいといえる。また、配管等の設備にフェントン反応剤が接しない設計・施工を行うことで腐食の影響は制御できると判断する。

近年、ガソリンスタンドの油汚染が顕在化し浄化対策の事例が多くなっている。ガソリンスタンドはその立地条件から沖積層の上に位置している場合が



第7図 フェントン浄化期間中のpHの変化



第8図 フェントン反応剤によるSGP管材腐食試験

多く、沖積層中では地下水位や油の存在深度は概ね浅い (GL-1.0~2.0m程度)。今後、同サイトへのプロパゲーション工法適用に向けて、浅い深度に対応できる技術改良を行っている。

＜参考文献＞

- (1) In Situ Remediation Technology : In Situ Chemical Oxidation, EPA 542-R-98-008 September 1998
- (2) 中間哲志・他：“ハイドロフラクチャー法を応用した汚染土壌の原位置浄化方法”、第10回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集、No.111、2004
- (3) 大澤武彦：原位置浄化プロパゲーション工法、環境浄化技術、Vol.3、No.9、2004年9月
- (4) 中間哲志・他：“フェントン反応剤によるガソリンスタンドのベンゼン・油汚染浄化”、第11回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集、No.144、2005
- (5) 中間哲志・他：“汚染現場における汚染の実際と原位置浄化の効果の検証”、第12回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集、No.107、2006

筆者紹介

山内 仁

(株)アイ・エス・ソリューション

取締役事業部長

〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2-3-16
千代田パリオビル6F

TEL : 03-5297-7288 FAX : 03-5297-0242

E-mail : yamauchi@enbiotec.co.jp

日本工業出版(株)インターネットホームページのお知らせ

当社では、インターネットのホームページを運営しております。

<http://www.nikko-pb.co.jp/>

月刊技術誌に加え更に広く情報受発信を行い、明日の技術に貢献してまいりたいと存じますので、是非一度アクセスしていただきますようお願い申し上げます。

また、合わせてe-mailによる、当社刊行物へのご意見ご要望もお待ちしております。

E-mail : info@nikko-pb.co.jp (本社) info-n@nikko-pb.co.jp (日本橋事務所)

日本工業出版(株) インターネット係 TEL : 03 (3944) 1181 FAX : 03 (3944) 6826