

土 壤 ・ 地 下 水 分 野

原位置浄化プロパゲーション®工法

低コスト・短工期・原位置で汚染土壌・地下水を浄化

(株)アイ・エス・ソリューション 大澤 武彦

現在、土壌浄化ビジネスの大半は土地取引に於ける売却前の土地の汚染診断調査、汚染修復工事に関わるものである。土地取引に関わる汚染土地の修復にはコストが少々高くとも、修復期間を短くすることが優先され、掘削土壌をサイト外にて処理・処分するOff-Site処理が採用されることが多い。

最近では掘削した汚染土壌の場外搬出先に制約が出てくること及び修復の費用対効果が以前に増して意識される傾向にあり、汚染物質を分解或いは分離するなどの浄化を目指したOn-Site処理（汚染サイトで掘削した汚染土壌を洗浄、加熱分離或いはバイオレメディエーションをして、現地に埋め戻す）又はIn-Situ（汚染土壌を掘削することなしで、その場即ち原位置で汚染物質を分解、分離浄化する）処理が採用される機運が出てきている。

今までも、In-Situ（原位置）処理の汎用技術として土壌ガス吸引法、揚水バッキ法が多く使われてきているが、その対象のほとんどは揮発性有機塩素化合物に限られている、修復に長期間を要する、その上機械・装置の維持費がかかるなどの難点がある。

そこで、原位置処理技術でも短期浄化、低コスト、VOCや石油系の油分などの多様な有機汚染物質に対応可能であり、建物直下の汚染や深部の汚染にも対応できる原位置化学酸化処理が注目され始めている。

米国では原位置化学酸化処理【In Situ Chemical Oxidation (ISCO) ⁽¹⁾⁽²⁾という】が高濃度汚染地又は高濃度汚染源の濃度を短期間・低コストで減ずる事が出来る新興技術として評価されている。米国では多くのサイトで使われているが、原位置化学酸化処理にも技術的課題はあり、酸化剤を汚染源まで確実にデリバリーし、いかにデリバリー先で酸化剤を効率

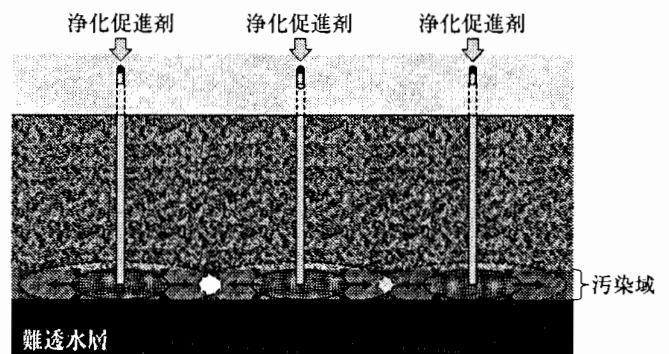
的に分配することであるとしている。

(株)アイ・エス・ソリューション⁽³⁾ (In Situ Solution Co.,Ltd) は日本に於いて必ずや原位置浄化技術の時代が来ることを予見・期待し、2003年1月末に会社設立と同時に、前述のISCOに較べ酸化剤を効率的に分配でき且つ多様な機能を有する「原位置プロパゲーション浄化工法」を米国ERFS社⁽⁴⁾より技術を導入し、独占使用権を得ている。現在2件の実績を有している。「プロパゲーション」はISSの商標登録（第4755174）ある。

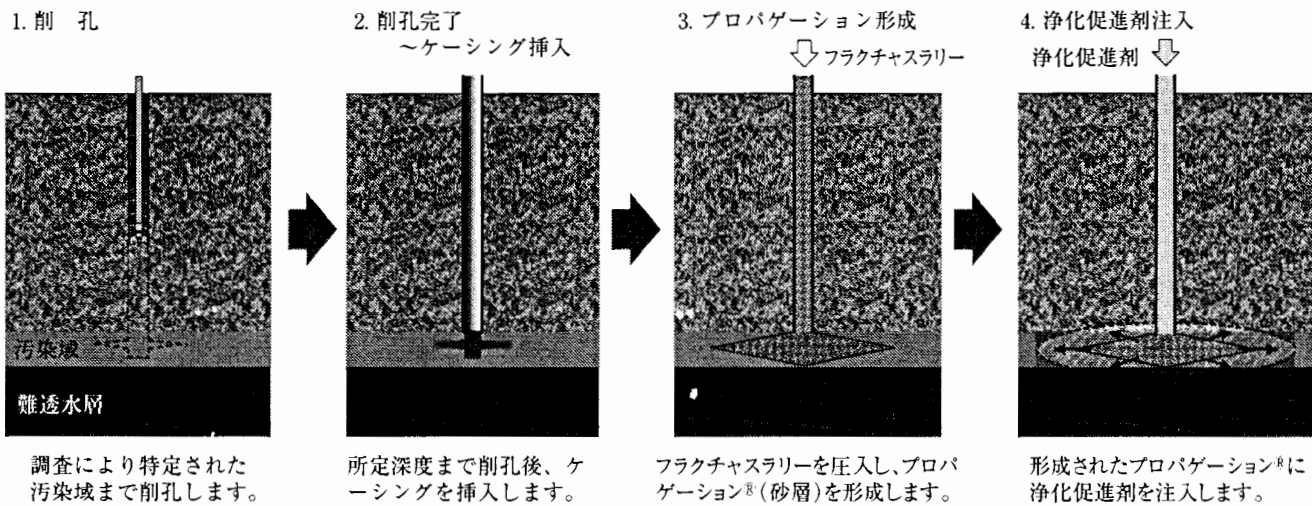
1 プロパゲーション施工法の概要

1-1 プロパゲーションとは

プロパゲーションとは、化学酸化剤などの浄化促進剤を汚染ブルームに到達させ、広い範囲に滲出させる機能を有する透水性の高い砂層を言う⁽⁵⁾。このプロパゲーションを活用して汚染物質を化学的或いは生物学的に分解促進させる浄化技術を原位置プロパゲーション浄化工法という（第1図）。



第1図 プロパゲーション®工法の浄化イメージ



第2図 プロパゲーション®の施工手順

1-2 施工の手順と用いる材料、機械

本工法は、①削孔、②高圧ジェット先行切削、③フラクチャスラリー圧入（フラクチャリング）、④浄化促進剤注入の一連の手順で行う（第2図）⁶⁾。削孔には米国G社製の打撃式掘削機を用いている。

プロパゲーションを形成させる③のフラクチャリング工程の際にもちいるフラクチャスラリーの材料には粒径1.0～1.5の濾過用の砂とCMC（土木材料として一般的に使われている）、酵素及び水を混合したものをを用いる。CMC溶液は砂を分散して圧送するためのキャリアー媒体となる。地中に圧入されたフラクチャスラリー内では、CMCは酵素により分解され、やがてスラリー中のCMCは無くなり、砂だけからなるプロパゲーションとなる。

一つのプロパゲーションの大きさ（直径）は注入フラクチャスラリー量を変えることにより、直径5m～8m程度、厚土1cm～2cmのプロパゲーションを作ることが出来る。地盤の3mより浅いところでフラクチャスラリーを注入した場合、スラリーが地上に吹き上げることがあるので、プロパゲーションは3mより深いところに形成する。

本作業工程の砂スラリーを圧入する機械がISSプロパゲーションリグ（写真1）で、4tトラックに積載し工事サイトへ運び施工に供する。

2 原位置プロパゲーション浄化工法

原位置プロパゲーション浄化工法は不飽和層地盤の汚染及び地下水汚染の浄化に適用することが出来る。不飽和層地盤では、汚染プルームの水平面積を覆うように、第1図⁶⁾、第2図⁶⁾に示したプロパゲーションを複数つくる。

地下水中の汚染物質を浄化する場合には、地下水面の直上にプロパゲーションをつくる。

出来上がったプロパゲーションに浄化促進剤を注入し汚染物質を浄化するので、浄化促進剤の選択は浄化工法設計上重要な点である。

現在、本浄化工法で用いる浄化促進剤としては、一つは化学酸化剤及びバイオレメディエーションを促進させる薬剤である。



写真1 プロパゲーションリグ

米国におけるISCOでの化学酸化剤ではフェントン氏薬剤、過マンガン酸カリウム、オゾンが多く用いられ、その中ではフェントン氏薬剤が最も多く用いられている。

原位置プロパゲーション浄化では薬剤の即効性、環境での残留性の少なさから、化学酸化剤としてはフェントン氏薬剤を用い、バイオレメディエーションを促進させる薬剤では徐放性酸素供与製剤或いは徐法性水素供与製剤を用いている。

2-1 原位置プロパゲーション浄化工法の特徴

本浄化工法の特徴は

- ① 施行から浄化までのプロセスが第2図に示す簡易な施工の上、化学酸化を適用するため従来工法より低コスト、短期間での原位置浄化が出来る。
- ② 建物直下の汚染浄化に適用できる。
- ③ 少ない井戸本数で広い範囲の浄化が出来る。
- ④ ホットスポット(周辺より高濃度な汚染部分)の浄化に適している。
- ⑤ 透水性の低い地盤の浄化に適用できるなど他の浄化工法では浄化が困難な場所にも適用できる。
- ⑥ 店舗の営業或いは工場の操業を続けながら工事が出来る。
- ⑦ プロパゲーションは既存技術【井戸注入化学酸化、バイオレメディエーション、鉄粉還元法、土壌ガス吸引法】の効率化・促進化に貢献する。

2-2 プロパゲーション浄化工法と注入薬剤

プロパゲーション浄化工法において化学酸化分解系の薬剤を使用するのか、それともバイオレメディエーションを促進させる薬剤を選択するかの評価及び注入条件の設計は、トリータピリティー試験結果に基づくことは勿論であるが、達成浄化目標値、許される浄化期間、浄化対象の汚染物質が飽和層か不飽和層に存在するのか、建物の直下に在るのか、その汚染物質の種類と濃度、浄化サイト近隣に井戸があるのかなどの浄化にかかわる諸条件を考慮して決める。

ISSがプロパゲーション浄化工法実施に使用する薬剤について略説する。

(1) 化学酸化を目的とするフェントン反応⁷⁾

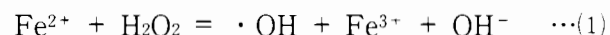
2価のFeと過酸化水素とから非常に分解反応性の高いヒドロキシルラジカル($\cdot\text{OH}$)が生成する反応を1984年H.J.H.Fentonにより確認されたが、反応機構が証明されず1930年まで工学的な利用がされないままであった。1930年以降廃水処理に利用され、米国では1900年代になり原位置での土壌・地下水汚染浄化に適用されている。

① 土壌・地下水汚染浄化でのフェントン反応の有利性

- 過酸化水素は低コストで、それ自身の反応生成物は水と酸素であり、取扱には十分注意しなければならないが、安全な化学物質である。
- 注入作業工程は制御しやすい。
- 分解速度は速く、数時間から数週間である。
- フェントン反応により毒性のある副産物は生成しない。
- 汚染物質の分解率を制御することにより、本反応の次のステップとしてバイオ処理或いはMNAを組み合わせたことが出来る。

② フェントン反応⁸⁾

- フェントン反応では過酸化水素と2価のFeイオンが反応し、強力な酸化能力を有するヒドロキシルラジカルが生成する。



- (1)式と(2)式の反応は繰り返しの反応であり、3価のFeイオンと過酸化水素との反応の結果、過ヒドロキシルラジカルが生成する。過ヒドロキシルラジカルは過酸化水素と過マンガン酸塩との中間の弱い酸化剤である。



- ヒドロキシルラジカルはほとんどの炭化水素と速やかに反応して、最終的に二酸化炭素を生成する。塩素化炭化水素化合物との反応の最終は塩化物を生成する。

③ プロパゲーション浄化工法で使用するフェントン氏薬剤

プロパゲーション浄化工法ではフェントン氏薬剤として、過酸化水素(31%溶液)硫酸第1鉄、クエン酸(食品添加物用)を用いている。

(1)、(2)式のフェントン反応の最適pHは3.0~4.5で

あり、本浄化工法ではクエン酸溶液をpH調整剤として、硫酸第1鉄溶液、過酸化水素の注入に先行して注入をしている。各薬品の注入濃度、注入量、注入回数は具体的なサイト条件及びトリータビリティ試験に基づき決めている。

サイトの汚染の程度、浄化目標値によっては注入を複数回行う他、リバウンド現象が認められる場合には再度注入することがある。

(2) プロパゲーション浄化工法と原位置バイオレメディエーション

バイオレメディエーションの1手法であるバイオスティミュレーションは微生物が増殖する生息環境を作る事が大事である。石油系化合物等を好気性微生物で浄化するのであれば地下水中を好気状態（酸素が存在する状態）にすればよく、TCEやPCEなどの塩素系炭化水素を嫌気性微生物による脱塩素反応を利用するのであれば、脱塩素を促進させる水素供与体が存在する環境を作ることである。

プロパゲーションを地下水へ効率的かつ広範囲に薬剤を注入することにより、微生物の生息環境をコントロールすることができる。

① プロパゲーション浄化工法と好気性バイオレメディエーション

徐放性酸素供与製剤は石油系の物質など生物分解性の有機化合物に汚染された土壌・地下水の好気性バイオレメディエーションを促進させる薬剤として用いる事が出来る。

徐放性酸素供与製剤とは化合物が緩やかに分解しながら酸素を生成する物質で、過酸化水素 (H₂O₂)、過酸化カルシウム (CaO₂) 又は過酸化マグネシウム (MgO₂) がある。

一般にORC[®]という商品名で市販されているものは過酸化マグネシウムが主成分である。使用の多くはスラリーを井戸へ注入している。この井戸注入をプロパゲーションを使って注入すれば一度で、効率的かつ広範囲を酸素リッチな環境とすることが出来る。

② プロパゲーション浄化工法と嫌気性バイオレメディエーション

一般にHRC[®]という商品名で市販されている徐放性水素供与製剤はポリ乳酸エステルを主成分としている。TCE、PCEなどの塩素系炭化水素を還元状態で脱塩素をする微生物が存在する汚染ブルームに徐放性水素供与製剤を注入すると、乳酸が分解され、生成された水素が脱塩素反応部位に付加する。この反応が順次起こり、最終的にはPCEやTCEはエチレンやエタンになる。

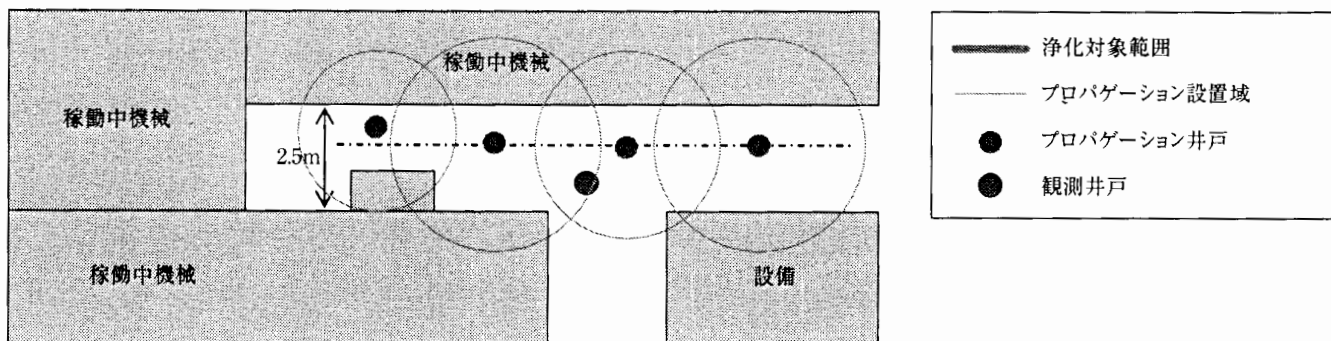
徐放性水素供与製剤をプロパゲーションを使って注入すれば一度で、効率的かつ広範囲に水素供与体が存在する環境を作ることが出来る。

これについては次章で実施事例を紹介する。

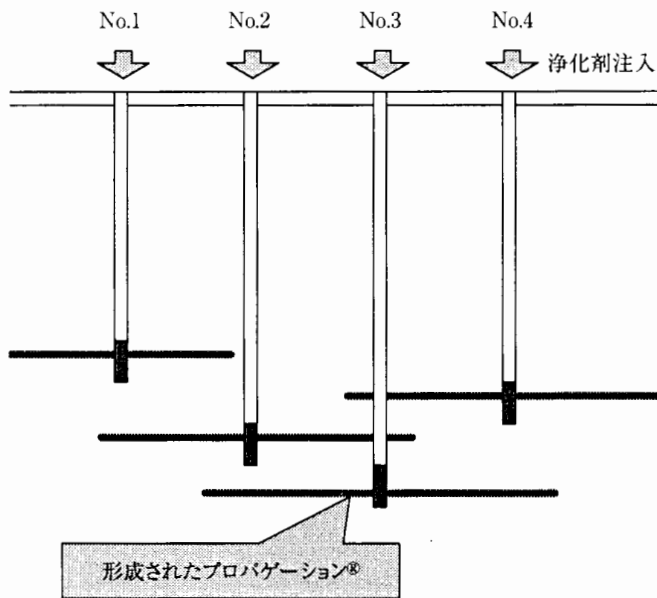
3 プロパゲーション工法の実施事例⁽⁶⁾

本工法を稼動中の工場建屋直下の汚染土壌浄化に適用した事例を紹介する。

このサイトは稼動中の生産機械ラインが設置されている工場建屋直下がTCE、cisDCEで汚染されており、既設建屋及び生産活動に影響を与えることなく原位置で汚染浄化が可能なプロパゲーション工法の適用が望まれた。現在、プロパゲーションの施工と徐放性水素供与製剤の注入が完了し、モニタリングを開始したところである。第3図にプロパゲーション



第3図 建屋直下に配置されたプロパゲーション[®]の平面位置図



第4図 プロパゲーション®工法の浄化イメージ

の低下が予測されたため、深度の浅い順に設置した。

設置されたプロパゲーションの直系は5.0m~8.0m程度で、施工後のチェックボーリングにより出来形の確認を行った(写真2)。徐放性水素供与製剤が設置されたプロパゲーションにそれぞれ注入されていることは観察時の色と臭いにより確認している。

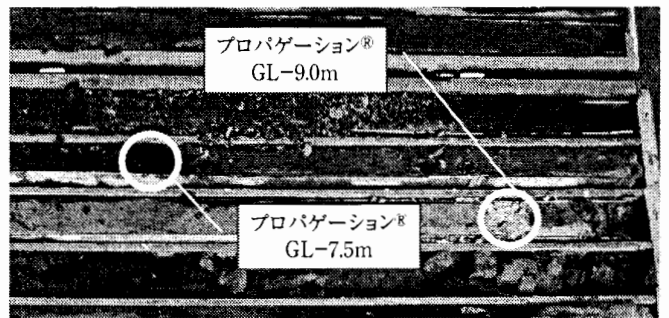
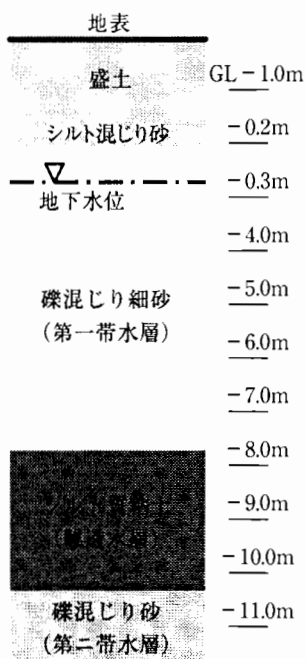


写真2 チェックボーリングによるプロパゲーション®の確認



第5図 プロパゲーション®工法の浄化イメージ

の配置を、第4図にプロパゲーションの設置断面を、第5図に現地盤の土質柱状図を、第1表にプロパゲーションの出来型を示す。プロパゲーションはGL-7.5m~9.5mの位置に汚染地盤の濃度に応じて設置深さを変え、4箇所を設置した。プロパゲーションの施工に際して、フラクチャースラリーの圧入時に先行削孔された孔跡からのスラリーの逃げに伴うフラクチャースラリーの圧力

今後、本サイトでは観測井戸で地下水の採水を実施し、「汚染物質の濃度の経時データ」を収集して、プロパゲーションによる浄化効果の確認を行う計画である。

4 おわりに

本稿の「原位置浄化プロパゲーション工法」は米国より技術導入をして日も浅いにも拘らず、技術を紹介させて頂いた方には興味ある技術であるとの評価を頂き、手ごたえを感じている。興味を持っていた点は当該技術が原位置浄化技術であること、プロパゲーションを薬剤などのデリバリー手法とした場合、汚染の対象、汚染場所に応じた各社独自の薬剤が注入でき、更には他の浄化技術との組み合わせなど多面的活用の可能性があるということであろう。

今後、当社は実績を積みながら、技術を蓄積し、さらに改善を重ね、皆様の理解と評価を得て、汚染土壌・地下水における日本流の浄化技術にする所存である。

<参考文献>

- (1) In Situ Remediation Technology : In Situ Chemical Oxidation, EPA 542-R-98-008 September 1998.

第1表 プロパゲーション®の出来形

No.	プロパゲーション 設置深度 [GL-m]	フラクチャースラリー 注入量 [L]	注入砂量 [kg]	プロパゲーション 直径(推定) [m]	パイルメーション 促進剤の注入量 [kg]
A	7.5	1,000	140	5.0	120
B	9.0	2,800	360	8.0	320
C	9.5	1,750	180	5.5	260
D	8.5	2,100	270	7.0	400

- <http://www.epa.gov/swertio1>
- (2) A Physical/Chemical・Remediation Technology Chemical Oxidation, In-Situ.
http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technology/remed/phys_chem/phc-43.asp
- (3) <http://www.enbiotec.co.jp/iss>
- (4) www.erfs.com
- (5) 中間哲志・山内仁・安原雅子・西村実・大澤武彦：“ハイドロフラクチャー法を用いたVOCsおよび油汚染土壌の浄化方法”、第59回 年次学術講演会、土木学会、2004年。
- (6) 中間鉄志・山内仁・安原雅子・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に関する研究集会、2004年、7月。
- (7) Soil Treatment in-situ chemical oxidation of contaminated soils (using hydrogen peroxide)
<http://www.h2o2.com/applications/hazardouswaste/soil.htm>
- (8) 2 The 4 Technology Solutions, NEW APPLICATIONS OF REDOX REACTIONS FOR IN-SITU GROUNDWATER, REMEDIATION
<http://2the4.net/ThreeRedox.htm>

- (9) <http://www.regenesis.com/products/orc/>
- (10) <http://www.regenesis.com/products/hrc/>

筆者紹介

大澤 武彦

(株)アイ・エス・ソリューション

代表取締役 社長

〒135-8073 東京都江東区青海2-45

タイム24ビル

TEL : 03-5531-0080 FAX : 03-5531-0081

環境と産業・経済の共生を追求するテクノロジー

クリーンエネルギー

体
裁

- 創刊年月日：1992年(平成4年)9月1日
- 発行日：毎月1日発行
- 発行部数：18,000部
- 判型・総頁：B5判・96頁
- 定価：1,900円
(本体1,810円 送料別)
- 年間購読料：12冊 19,000円(税・送料込)

年間購読のお申し込みは
販売直通



日本工業出版

本社 〒113-8610 東京都文京区本駒込6-3-26 日本工業出版ビル
 TEL.03(3944)1181(代) FAX.03(3944)6826
<http://www.nikko-pb.co.jp/> e-mail:info@nikko-pb.co.jp

編集方針と特色

無限と思われた地球資源と環境に対し、SOSが発せられようとしています。そこで、今まで通りの経済成長を維持し、より豊かな文明生活を支えるためにはその基盤となるエネルギー源、とりわけクリーンなエネルギー源確保のため、エネルギーの開発と有効利用が火急の課題となって参りました。

本誌は、このような情勢のもと、エネルギー問題をなるべく広い視野にたち、経済性・環境保全・技術課題から、システム導入・メンテナンス・関連法規の解説に至るまで幅広い内容を編集するよう心がけ、興味ある話題の提供と見やすい、分かりやすい本づくりに邁進致します。



大阪営業所 〒541-0046 大阪市中央区平野町1-6-8-705
 TEL.06(6202)8218 FAX.06(6202)8287

日本橋事務所 〒103-0004 東京都中央区東日本橋3-5-7 ワタナベビル4階
 TEL.03(3808)1021 FAX.03(3808)1023

中国事務所 〒350001 福建省福州市鼓楼区湖东路宏利大厦
 東側公寓樓13階F座
 TEL.(FAX).0591-7855622

