

特集

最新の土壌・地下水浄化技術①

第三世代の原位置化学酸化技術

(株)アイ・エス・ソリューション 大澤 武彦

はじめに

筆者は日本における原位置化学酸化技術（以後、ISCOと略す：In Situ Chemical Oxidation）の変遷を、1990年より2010年までの20年間について、1990～2000年はISCO第一世代（黎明期）、2000年～2007年は第二世代（発展・充実期）そして2008年以降を第三世代（深耕期）に区分した。この区分についての根拠・背景等は後章で述べる。

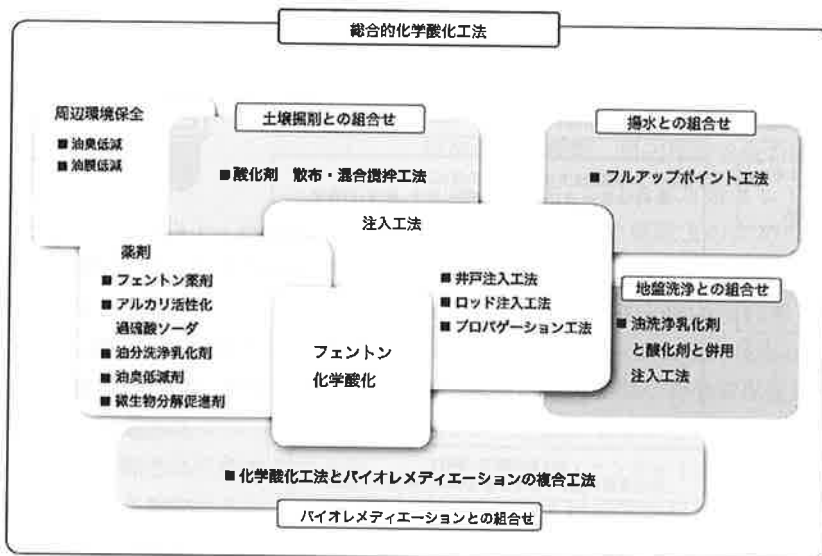
(株)アイ・エス・ソリューション（以下、ISSと略す）は社名に原位置（in Situ）を冠して2003年1月に設立され、ISCO第二世代での出立であった。

現在のISSの立ち位置はISCO第三世代の真っただ中にあり、ISSは第二世代を経て、過去8年間の浄

化工事の実績と技術の改良・改善実績を「フェントン化学酸化法をコア技術とする総合的化学酸化技術」（第1図）に結実させている。これがISSの第三世代の最新・先端のISCOであり、コアコンピタンスとして展開している。

1 原位置化学酸化法の浄化技術としての認識の変遷

1980年初頭より地下水の塩素化VOC（以下、VOCという）汚染問題が顕在化し始め、その対策が急務であった。そして、1993年に制定された環境基本法に基づき、土壌の環境基準及び地下水の環境基準が設けられた。



第1図 総合的にフェントン化学酸化法と構成する要素技術

かつて、1992～1995年にかけて土壤環境浄化フォーラムと言う任意団体（現在の社土壤環境センターの前身）が活動していた。当時1995年のフォーラムの調査研究報告書⁽¹⁾⁽²⁾では化学酸化法の位置づけはあくまでも揚水パッキ法及び土壤ガス吸引法の付帯技術であり、“原位置化学酸化”と言う独立した浄化技術としての概念を見出すことは出来ない。1996年、新たに社土壤環境センターが発足し、1997年のセンターの調査研究報告書⁽³⁾の中に“原位置化学酸化法”が見受けられ、土壤・地下水汚染の浄化技術に携わる技術者に認識され始めたと推察される。

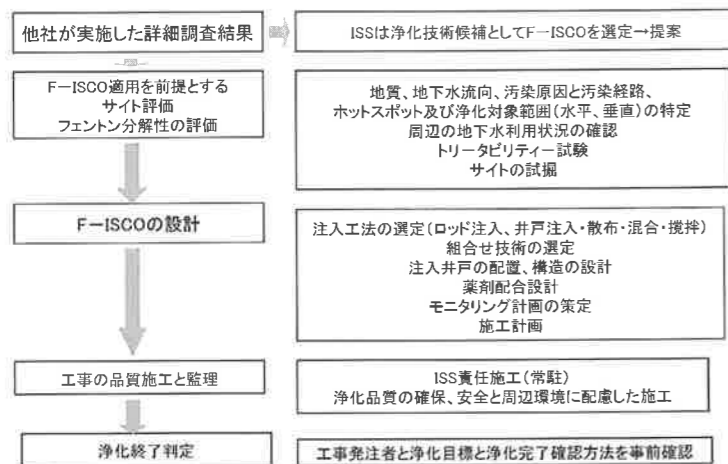
平成10年度（1998）土壤調査・対策の事例及び対応状況に関する調査⁽⁴⁾（環境庁）において初めて恒久対策技術として原位置分解（化学分解、バイオレメディエーション）、原位置抽出が掘削除去や封じ込めと同格の技術に分類された。1999年11月になると、“原位置浄化”の概念と具体的浄化技術としての“化学的分解法”が環境庁の指針・運用基準⁽⁵⁾に取り上げられ、ISCOは定法技術となった。以上の経緯から90年代はISCO黎明期と言え、第一世代ISCOと名付けることにする。

2000年代に入るや、2002年には「土壤汚染対策法」が制定された。翌2003年には、土壤汚染対策法に基づく技術解説書において、原位置で酸化剤を地中に注入する方法として具体的に「フェントン法」が示された⁽⁶⁾。2006年には、油分分解技術として、通称「油汚染対策ガイドライン」に原位置浄化－化学的酸化分解法が記載され、ISCOは油分分解技術とし

ても定法技術となった⁽⁷⁾。2005～2006年頃には原位置の概念が一般的にも認知され、汚染土壤・地下水浄化を行う企業の中にはISCOをサービスメニューに加える、海外企業からフェントン酸化技術を導入する企業も出てきた。2000年～2006年は官・民の動向から見て、ISCO・フェントンは発展・充実期で、第二世代ISCOと言えよう。

2007年以降、フェントン－ISCO（以下、F-ISCOと略す）を実施する企業が増える中で、国産技術として改良フェントン反応剤と工法の開発、地盤洗浄と複合化したISCOの開発、従来の注入や深層混合などの地盤改良工法の応用や新酸化剤（過硫酸塩）の使用などISCOを他の技術と複合させるなど、更に第二世代ISCOを深耕化させるトレンドが継続している。原位置浄化関連の研究・開発動向を「地下水・土壤汚染とその対策に関する研究集会」の発表テーマから見ると、2005年以降発表テーマ名称の中に“原位置”を含むテーマが多くなる傾向が認められ、企業が原位置浄化に高い関心を持っていることが分かる。そして今、2010年は発展・充実期を経て深耕期になり、ISCO第三世代と言え、現在の最新・先端の浄化技術である。化学酸化技術に広く目を向けると、原位置だけでなく、オンサイトで化学酸化処理など幅広い化学酸化技術が展開されている現状もあることを付け加えておく。

第1図で紹介したいいくつかの要素技術はISSのHP（URL：<http://is-solution.com/>）のライブラリーに収載しているので参照頂きたい。



第2図 F-ISCO実施におけるISSコンセプト

2 原位置浄化実施におけるISSコンセプトと実績

2-1 ISCO浄化を実施におけるISSコンセプト

原位置浄化は目には見えない汚染を対象にした浄化であるために、事前の調査において、汚染の原因と状態、範囲等を正確に把握することが重要で、その結果を設計及び施工に反映させることが原位置浄化を成功させる鍵である。

更には、一般的にF-ISCOは、3

種類のフェントン薬剤を順次地中に注入し、フェントン薬剤と汚染物質を接触させれば良く、一見簡単そうである。浄化対象地（以下、サイトと言う）は地質も汚染物質も一様に存在していない場合が多い。注入はシンプルで古風な技術と思われがちであるが、それだけに注入には熟練さが要求され、熟練度は勘と経験に依る部分が内在した暗黙知の技術とも言え、まさに実績に培われ、蓄積されたノウハウを活用することが原位置浄化を成功させる大きな鍵である。

ISSはF-ISCOを実施するにあたり、事前に得たサイト固有の地質や汚染物質などの情報をベースにして、ISSが保有しているF-ISCOに係る要素技術（第1図）からサイト及び発注者にとって最も有効な要素技術を選択し、そして適正な浄化規模の設定、薬剤設計を行い、それに基づき自ら施工を行うことで浄化品質を確保し向上させることがISSの基本コンセプトである（第2図）。浄化品質は設計から施工まで一連のプロセス毎において品質を作り込むという技術者マインドを殊更に重要視している。

2-2 フェントン原位置浄化の実績

(1) 対象サイト

ISSはこれまでに約140サイトのF-ISCOを手がけ、対象サイトはガソリンスタンド（以下、SSと略す）と工場で、その件数割合は約9:1である。SSにおいては、跡地と営業中のサイト件数割合は約2:1である。

(2) 対象媒体

浄化の対象が土壤だけのケースは16%、地下水だけのケースは18%、土壤と地下水を同時に浄化するケースが66%と全体の1/3である。

(3) 対象物質

浄化の対象物質はベンゼン（以下、Bzと略す）、燃料油（以下、TPHと言う）及び塩素化VOCである。

Bzだけの浄化は48%、TPHだけの浄化は16%で、Bz及びTPHの両方の浄化は27%で、燃料油由来の炭化水素系（Bz+TPH）の物質が90%である。VOCは10%である。主たる浄化の対象が炭化水素系の物質であることはSSサイトの浄化を多く手掛けていることによる。

3 ISSにおける第三世代の原位置化学酸化技術

ISSは2003年創立以来、ISCOによる多くの浄化を行ってきた。それぞれの浄化サイト毎で地質・土質、汚染物質の種類、汚染の程度（濃度、存在位置）や浄化の目標値、浄化期間等は様々である。その多様な要求に対応させるためにF-ISCOの実施工を通して注入技術等の改良・改善を図りながら種々の要素技術を完成させてきた。

これからは以前にも増して、技術難度の高い浄化ニーズに対応しなければならない機会が増えるであろう。そのために要素技術単独ではなく、要素技術が相互に関連性を持って繋がった「システム技術」としてISCOの総合技術化を図っている。現在、ISSは第三世代の原位置化学酸化技術として「総合的酸化化学法（第1図）」をコアコンピタンスとして展開している。第1図はISSの保有する要素技術群を表現した技術マップでもあり、図中の島の重なりは技術の繋がりを表している。有効技術を選択し、島をたどった航跡が最適浄化システムとなる。

F-ISCOでは酸化剤を原位置に存在している汚染物質と効率的に接触させる、言い換えれば酸化剤を原位置の汚染部までどのような方法で到達させるかをサイトの地質に応じて選択することが重要で、注入工法では井戸注入工法、ロッド注入工法、プロパゲーション工法及び吐出・混合攪拌工法では深層混合機による吐出混合攪拌工法の中から選択する、更には揚水技術との組み合わせであるフルアップポイント工法をも選択肢としている。薬剤応用の観点からは酸化剤の種類、周辺環境保全の観点から、SSサイト浄化に際しての油臭対策としての油臭低減剤⁽⁷⁾、地盤洗浄或いは油膜除去のための乳化剤を用意している。酸化薬剤においてはアルカリ活性化過硫酸ソーダ分解法をF-ISCOの補完技術として保有している⁽⁸⁾。はたまたF-ISCOと他の技術との複合化として、土着微生物或いは微生物分解促進剤を活用したバイオレメディエーションとの複合化、掘削された汚染土壤を敷地内（オンサイト）で化学酸化剤を散布・混合・攪拌して汚染物質を分解する土壤掘削との組み合わせをも保有⁽⁹⁾している。

ISSではダイレクトセンシング技術⁽¹⁰⁾を調査および

びISCO浄化プロセスを効率的に監視・管理する手法に応用している。

4 主要な化学酸化関連要素技術の紹介

ISSが今までに実施したF-ISCOでは井戸注入とロッド注入実績が66%と最も多く、最近では汚染土壌にフェントン薬剤を散布し混合攪拌する工法が多くなり約20%である。

ISCOにおいて透水性が悪く、更に異方性の大きな粘性土地盤にフェントン反応剤を注入することは難しいといわれている。その難点を克服し、ロッド注入法により浄化を成功させた事例を紹介する。

4-1 粘性土地盤へのフェントン反応剤のロッド注入⁽¹⁾

ボーリングロッド注入を用いたポイント注入を3次元的に高密度で実施することにより、フェントン反応剤の多量注入を実現し、塩素化VOCを分解・浄化した。

(1) 地質について

GL-11m程度まで、シルトと砂質シルトの互層で、その下位に細砂を主体とする層がある。地下水位はGL-1~1.5m程度。大部分の深度でN値は0~1と非常に軟弱な地盤。

(2) 汚染物質について

浄化対象の汚染物質はcis-1,2,ジクロロエチレン(0.1~5mg/L程度)で、細砂層まで汚染が確認されていた。

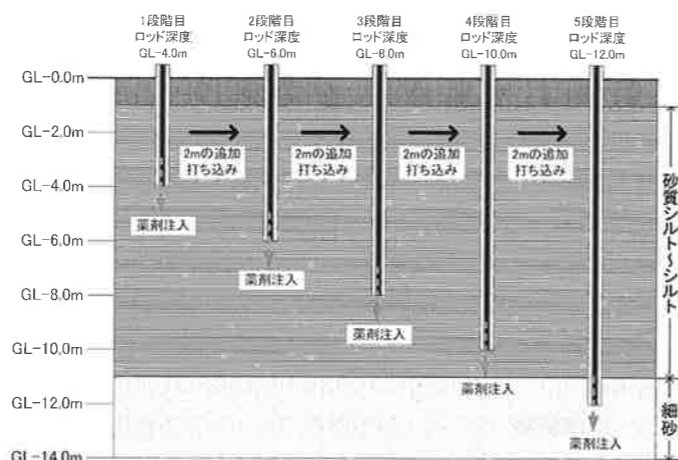
(3) 注入方法

① 平面的高密度ポイント注入(多地点同時注入)
1.25mグリッドでボーリングロッドを打ち込み、20~30地点程度で同時にフェントン反応剤を注入した(写真1)。

② 深度的高密度ポイント注入(多深度段階的注入)
汚染最浅部から薬剤を注入後、ボーリングロッドを2mずつ追加打ち込みしながら注入する方法で施工をし、所定深度に薬剤を浸透させることが出来ている(第3図)。

4-2 周辺環境保全技術

汚染土壌の浄化と言う環境を修復する行為において、工事のために周辺の空気質や水質に悪影響を与えることは絶対に避けなければならない。空気質悪化の影響要因には粉じん、ガスや臭気がある。



第3図 多深度段階的注入方法(模式図)「追加打ち込みしながらの注入」

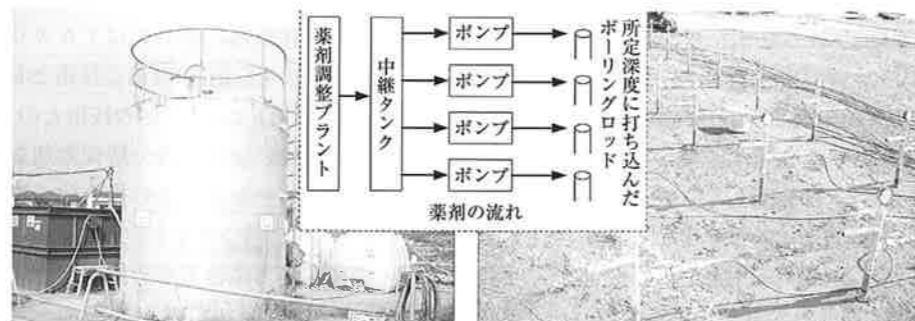


写真1 平面的高密度ポイント注入

SSにおいては土壌を掘削する際のガソリン、灯油に起因する油臭問題が近隣からの苦情となることが多く、その対策に有効な油臭低減剤を紹介する。

<ガソリンや灯油の油臭低減剤⁽²⁾>

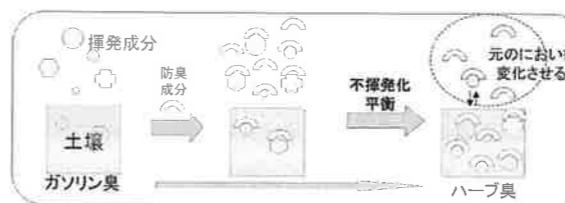
① 特徴と油臭低減メカニズム

ハーブ(ローズマリー)より抽出した精油を主成分とし、水に容易に分散する。

油臭低減のメカニズムは防臭成分が臭気成分(燃料油中の揮発成分)を不揮発化することにより、元の臭いを変化させる(第4図)。

② 使用法

- 油臭源の掘削土壌に本剤の10倍希釈液を土壌の表面に噴霧する(写真2)。
- 油臭源の地盤に本剤の10倍希釈液を注入する(写真3)。



第4図 消臭原理(模式図)



写真2 消臭剤の噴霧



写真3 消臭剤の注入

おわりに：今後の展望と課題

F-ISCOの施工は経験に培われたノウハウが積み重なった暗黙知の部分が多いことを述べたが、ISSは社外論文発表等情報を発信し、社外の方々や技術・知識の共有化を図ることにより、F-ISCO技術を形式知としたい。

ISSはこれまで原位置浄化として、F-ISCOを心柱に据えてきたが、これから、ISSは「ISCO」と「バイオレメディエーション」がお互いに緩やかな関係で複合化した新しい「Chem-Bio」という技術カテゴリーを創り、これをISS第四世代の化学酸化技術メニューの一つに行きたい。

<参考文献>

- (1) 土壤環境浄化フォーラム：第一分科会 調査・対策マニュアル 調査研究報告書、p.220 (1995年7月)
- (2) 土壤環境浄化フォーラム：第二分科会 土壤汚染対策プロセス 調査研究報告書、p.232 (1995年7月)
- (3) (社)土壤環境センター：最新の各種汚染土壌・地下水浄化プロセスの適用性の調査研究報告書(本篇)、p.14、p.16 (1997年3月)
- (4) 環境庁水質保全局：平成10年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要、p.17 (平成12年3月)
- (5) (社)土壤環境センター：土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準、pp.112-113、p.123 (平成11年2月)
- (6) 環境省監修・(社)土壤環境センター編集：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説、pp.129-130 (平成15年9月)
- (7) 中央環境審議会土壌農薬部会、土壌汚染技術等専門委員会：“油汚染対策ガイドライン-鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油問題への土地所有者等による対応の考え方-”、専門編対策-13~14、資料7-21~22 (平成18年3月)
- (8) 長野勝己・西村実・他：“S3-27 油汚染地の油臭低減対策と油臭の定量評価”、第12回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2006)
- (9) 大澤武彦・角田真之・西村実：“S2-23 化学酸化技術としてのアルカリ活性化・過硫酸法の適用性”、第16回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2010)
- (10) 長野勝己・和知剛・草場周作：“S3-18 油汚染された不飽和土壌のフェントン反応剤を用いたオンサイト浄化”、第15回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2009)
- (11) 佐藤秀之・田中正利・光畑祐司・他：“S2-27 ダイレクトブッシュFED計測技術を用いた油汚染土壌調査”、第15回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2009)
- (12) 草場周作・成島誠一・三村卓・長野勝己：“S1-12 粘性土地盤におけるフェントン反応剤による原位置浄化手法”、第14回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2008)

筆者紹介

大澤 武彦
(株)アイ・エス・ソリューション 会長
〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2-5-2
TEL: 03-5297-7288
E-mail: ohsawa@is-solution.com