

酸化剤注入による揮発性有機塩素化合物汚染土壌地下水の原位置浄化対策 VOCに汚染されたシルト混じり埋土層におけるSPSS工法浄化事例

ADEKA総合設備株式会社 松尾 晃治 富岡 英和 篠田 功

はじめに

2010年の土壌汚染対策法の改正により搬出汚染土の適正処理が義務づけられた。掘削除去処理はコストが高いため、より低コストな鉄粉工法、酸化剤工法、バイオレメディエーション工法に代表される原位置浄化工法が注目されている。

当社では1999年よりテトラクロロエチレン、トリクロロエチレン等の揮発性有機塩素化合物(VOC)に汚染された土壌・地下水に対し酸化剤工法とバイオレメディエーション工法を適用し浄化してきた。本稿では酸化剤として過硫酸ナトリウムを用いたSPSS工法について紹介する。

SPSS工法概要

(1) 酸化剤工法

酸化剤工法概念図を図1に示す。VOCに汚染された土地に薬剤を注入する井戸を作成し、水に希釈した酸化剤溶液を注入する。地中に注入された酸化剤の化学酸化力によりVOCが分解され無害化される。強力な酸化力を得るために鉄系触媒と反応させることでラジカルを生成させるラジカル反応を利用することが一般的である。

(2) SPSS工法の特徴

当社の酸化剤工法ではSPSS(過硫酸ナトリウム)を使用している。SPSS工法の特徴を以下に示す。

強い酸化力

SPSSは同じく土壌・地下水浄化用酸化剤の過酸化水素の酸化電位(E₁ = 1.77V)より高い酸化電位(E₂ = 2.12V)を保持しており、高濃度VOC汚染(10mg/L以上)も短期間で分解可能である。鉄系触媒との反応により生成する硫酸ラジカルによりVOCを無害な二酸化炭素まで分解・無害化させる。ラジカル反応によるVOC分解概念図を図2に示す。

薬剤の持続期間が長い

SPSSは強力な酸化剤であるのと同時に比較的安定した物質であるため反応がゆっくりと進む。反応速度が速い酸化剤の場合、地中に注入直後に土壌粒子等と反応が始まり酸化剤としての効果が一部が失われてしまうためロスが大きいため広範囲に薬剤を浸透

させるのに効率的ではない。一方、SPSSの場合は反応がゆっくりと進むため、地中に注入直後に著しく酸化剤の効果が失われることはなく、酸化力を維持したまま広範囲に薬剤をゆきわたらせることが可能となる。そのため透水性の良い地層の場合では薬剤注入地点数を減らすことができ、注入施工コストと工期を圧縮することが可能となる。薬剤注入後の地下水中のラジカル反応は土壌・地下水成分にもよるが約10日間程度続く。低コスト

掘削工法と比較してコストが低い。対策深度にもよるが、深度が深ければ深いほど掘削除去と比較してコストメリットが大きい。対策深度が10mまでの場合、掘削工法と比較して約2分の1程度のコストで浄化可能である。10mよりも深い深度となると掘削工法の約3分の1程度のコストで浄化が可能となる。

工期が短い

バイオレメディエーション工法の場合だと汚染物質の分解反応に1~2年程度必要となるが、SPSS工法の場合は薬剤注入開始後2

図1 SPS工法概要

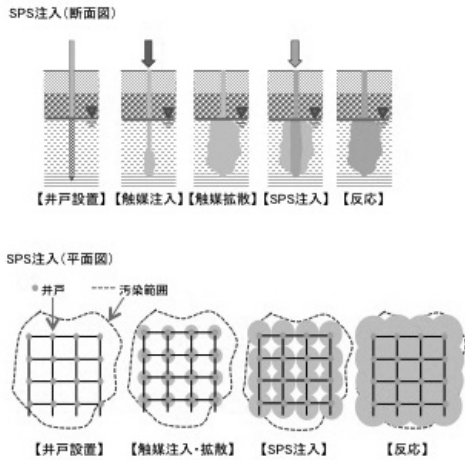
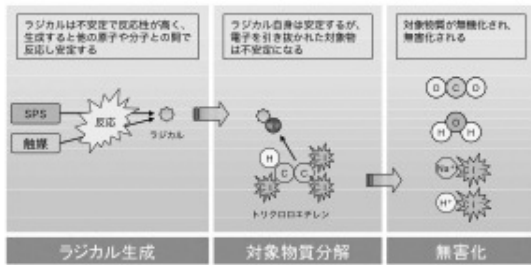


図2 ラジカル反応によるVOC分解



水頭差を利用した注入
 注入状況を写真1に示す。設置した井戸に100L~200Lのタンクを接続したタンクに薬液を貯めてから水頭差によりSPS溶液を地下水にゆつくりと浸透させた。水頭差程度の弱い圧力で注入するには理由がある。ポンプのような

機械動力により圧力をかけて注入する方法は透水性が良くかつ均質な地層であれば短時間で広範囲に薬液を浸透させることが可能であり非常に有効である。しかし当サイトのように砂とシルトが混在し、透水性が不均質な地層では、ポンプ等で圧力注入するとSPS溶液が透水性の良い方向に偏って流れていってしまう。すなわち薬剤が地中で均等に浸透しないので薬剤と汚染が接触・反応しない部分が出てしまうという問題点がある。過去にSPS溶液をポンプで圧入を開始して間もなく3m程離れたところに設置してあった観測井戸からSPS溶液が吹き上がってきたことがあった。これは地層の最も透水性の良いところに水圧がかかった結果、「みずみち」ができてしまい薬剤の大半がそこから流れたのが原因と推測される。

その点、水頭差による注入では圧力が小さく「みずみち」ができないので、透水性が不均質な地層においてSPS溶液を比較的均等に浸透させることができるというメリットがある。

6カ月程度と比較的短期間で浄化が可能である。
適用範囲
 SPS工法が効果を発揮するのは地下水が存在する飽和層である。地下水面より上部の不飽和層や透水性が悪い粘土等の不透水層に深く染み込んだVOC汚染については通常の井戸からの注入では薬剤が十分浸透・拡散しないことから別途処理が必要となる。

また、油汚染(重油)とVOCの複合汚染の場合、油が阻害物質となるためVOCの浄化は困難である。

施工事例

(1) 工事概要

東京都内のVOCに汚染された工場における浄化事例を紹介する。当サイトでは地下水基準を超過するシスー1、2-ジクロロエチレンの最高濃度は3・2mg/L。汚染の対象面積は5100㎡、サイトの対象面積は5100㎡、対象土量は13700㎡であった。対象地に570本の薬剤注入井戸を設置し、そこから地下水に

触媒とSPS希釈溶液を注入し汚染の浄化をはかった。地下水面上の汚染土壌(不飽和埋土層)については事前に掘削除去により撤去済みであったため、地下水面以下に残存した汚染土壌・地下水(飽和埋土層とそれ以深の砂層)を浄化対象とした。

(2) 注入方法
井戸の間隔
 薬剤注入井戸を2~4m間隔で設置した。井戸の間隔は汚染の存在する地質により決めた。透水性の良い砂層では井戸を4m間隔で格子状に設置し、透水性があまり良くない埋土(シルト混じり砂)では井戸を2m間隔に格子状に設置した。

薬剤注入井戸を2~4m間隔で設置した。井戸の間隔は汚染の存在する地質により決めた。透水性の良い砂層では井戸を4m間隔で格子状に設置し、透水性があまり良くない埋土(シルト混じり砂)では井戸を2m間隔に格子状に設置した。

繰り返し注入

SPS溶液を注入する場合には通常4回にわたり注入を繰り返し実施する。VOCは溶解度が低いため地下水に溶解しているものは少なく、土壌の粒子表面に吸着した状態で存在している。

汚染濃度にもよるが、粒径の大きな砂等は比較的汚染物質が吸着する量は少なく、SPSは砂粒子表面に吸着したVOCと反応しやすい。一方、粒径の小さいシルトや粘土へのVOC吸着量は多く、SPSが土壌粒子に吸着したVOCと反応しにくい。砂層であればシルトであれ、土壌に吸着したVOCは1回の薬剤注入では完全に分解できないことが多く、薬剤の効果が切れた後に土壌に残存するVOCが再び地下水中に溶出させて地下水の環境基準を超過させる。(リバウンド)

そこでSPSの注入を繰り返すことで土壌に吸着した汚染を分解しきるまで注入を繰り返す。地層や汚染濃度にもよるが、経験的には砂中心の土質の場合、4クール(1クール=触媒・SPSを注入し2週間程度静置)注入を繰り返

せば汚染がリバウンドすることなく浄化完了することが多い。

(3) 浄化結果

砂層におけるモニタリング結果砂層におけるモニタリング結果を図3に示す。砂層は注入井戸を4m間隔で設置しており4クールにわたり薬剤注入を行った。今回は第4クール前(注入開始から45日目)のモニタリングで環境基準を満足する結果となり、第4クール注入以降は環境基準を大きく下回り60日後には浄化が完了した。砂層の透水性が良く薬剤が十分到達したことで順調に浄化が完了したと考えられる。

埋土層(シルト混じり砂層)におけるモニタリング結果

埋土層(シルト混じり砂層)におけるモニタリング結果を図4に示す。工場造成時の埋土層(シルト混じり砂が中心の飽和埋土層)の土壌・地下水がシス1、2、ジクロロエチレンで汚染されていた。最大地下水汚染濃度は3・2mg/Lであった。注入井戸は地層から薬剤の浸透性を考慮して2m間隔で設置した。第3クール後も汚染のリバウンドが起こったが第

6クール後(注入開始から約100日目)で環境基準レベルまで下がり第7クール後は環境基準を満足する結果となり浄化完了した。透水性の良い砂層と比較して2ヵ月程度多く時間を要した。

1本設置されていた。観測井戸において汚染がリバウンドするのは土壌に残存した汚染が再度地下水に溶出し、それが観測井戸に到達することで明らかとなる。土質や地下水の流速等による違いはあるが、汚染残存部から観測井戸までの距離が遠いほど汚染地下水が観測井戸に到達するのに時間がかかる。

(4) 注入井戸モニタリングにより短期間での浄化を実現

本事例では地下水でcis1、2、DCEが3・2mg/L検出されていたので計画当初から、それ以上の高濃度汚染の存在が疑われた。また埋土層では透水性が良くないシルトが一部に多く混じっていたので浄化には時間がかかることが予想された。一方で短期間での浄化が要求されていたため、現地分析で注入井戸もモニタリングすることで迅速に高濃度汚染が残存するエリアをスクリーニングした。

その結果、高濃度汚染の残存するエリアを早期に把握でき、早期に対応できたため短期間での浄化を実現できた。詳細を以下に説明する。

観測井戸におけるモニタリング

浄化の進捗・完了を判定する観測井戸は1区画(10m×10m)に

通常、工期が十分に有る場合には観測井戸でリバウンドが確認された時点で、その上流に汚染が残存していることがわかり再度対策を実施する。

注入井戸における地下水モニタリング

本事例では対象面積が大きい、汚染濃度が高い、土壌の浸透性があまり良くない、加えて工期が短いという厳しい条件であった。したがって、これまで同様に観測井戸だけでモニタリングしていた場合に、観測井戸から遠い地点に残存した高濃度汚染が観測井戸に到達するのが工期終了間際だった場合、追加対策を実施する時間が足りず工期内に浄化が完了しない恐れがあった。

図3 砂層におけるモニタリング結果

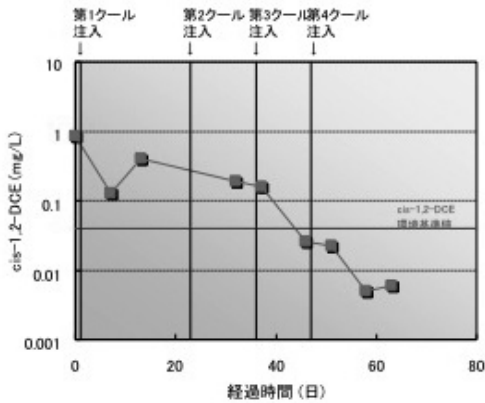


図4 埋土層におけるモニタリング結果

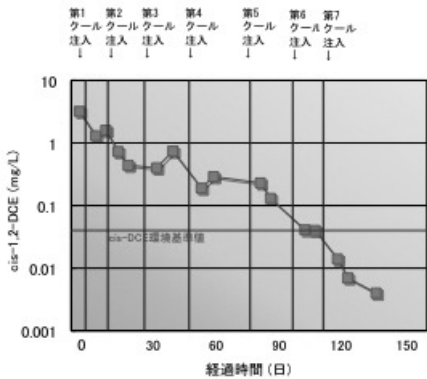


写真1 SPS 注入状況



△問い合わせ先▽
 A D E K A 総合設備(株)
 環境技術部
 T E L ..
 0 3 - 3 8 0 5 - 7 4 5 6
 F A X ..
 0 3 - 3 8 0 5 - 1 7 4 6 0

今後、も確実な浄化を実施してゆきたい。

おわりに

了させることができた。

そこで2mピッチで設置した薬剤注入井戸でもモニタリングを実施した。観測井戸は100mに1本に対して薬剤注入井戸は100mあたり最多で36本あったため、通常の観測井戸モニタリングよりも早く残存する汚染を把握することができた。

SPSの効果が切れた注入井戸において汚染がリバウンドしてきたエリアでは汚染が残っており、その濃度が高ければ高いほど高濃度汚染が残っていると判断した。また汚染がリバウンドしてこ

ないエリアでは浄化が順調に進んでいると判断した。

実際に、最後まで汚染が残っていたエリア付近の注入井戸では薬剤注入第1クール後の汚染のリバウンドが顕著に見受けられた。リバウンドした汚染濃度も高く、リバウンドするまでにかかる時間も短かった。

注入井戸モニタリング結果からのフィードバック

各クール毎に注入井戸のモニタリングを行うことで高濃度汚染が残存しているエリアをスクリーニ

ングし、その結果を次クールでの薬剤注入量の決定に反映させた。

リバウンド傾向が顕著な区画では薬剤の注入量を増やすことで浄化の促進をはかり、限られた工期内で浄化を完了することができた。

観測井戸だけのモニタリングでは汚染残存を把握するまでのタイムラグがあるため工期内の浄化は困難だったと考える。また、リバウンドが少ないエリアについては必要最小限の薬剤を注入しながらモニタリングを継続し必要以上の薬剤を注入することなく浄化を完

了させることができた。

本稿ではSPS工法の特徴と浄化事例を紹介した。VOCの浄化にあたっては高濃度汚染の分布を事前調査により正確に把握することが極めて重要であるが、実際の汚染サイトでは調査では発見されなかった高濃度汚染が浄化工事の段階で発見されるケースが多々ある。SPS工法はこのような潜在的な高濃度汚染に対するリスクにも対応することができると