

(0113) ヒーターを用いた原位置加熱浄化工法の紹介

○和知 剛¹・北原 亘¹・角田真之¹・小松大祐¹

¹株式会社アイ・エス・ソリューション

1. はじめに

土壌・地下水汚染対策において、原位置浄化を適用する場合でも、汚染源に存在する高濃度域の物理的除去は必要となる。物理的な撤去としては、揚水対策や土壌ガス吸引対策などがあるが、短期間に高濃度の汚染物質を除去しなければならない条件であることが多いことから、掘削除去を選択することが多く、弊社でも数多く採用している。

しかし、深い位置にある汚染土壌の掘削除去では、対策費用が非常に高額となることから、適用することが困難となることが多い。透水性の良い地層であれば揚水や薬剤注入等の方法もあるが、透水性の低い粘土やシルトに高濃度の揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds; 以下、VOCs）が存在する場合には浄化が困難となる。

2. 原位置加熱浄化工法の種類

これまで原位置浄化の適用が困難とされてきた、粘土・シルトにおける高濃度汚染、もしくは非常に深い位置での掘削除去が必要なサイトに対する技術として、原位置加熱浄化技術（In-Situ Thermal Remediation : 以下、ISTR）を米国より導入した。ISTR 技術は、単一の技術ではなく、主に以下に示す3つの技術¹⁾から構成される。それぞれの技術の特徴を図-1 に示す。

2.1 ヒーターによる加熱浄化技術

原位置熱分解/脱着技術（In-Situ Thermal Destruction / Desorption、以下 ISTD）は、今回導入した ISTR の中で中核となる技術である。粘土・シルトなど透水性の低い地盤にも適応でき、汚染源で原液が存在するような VOCs であっても浄化可能である。この技術は、地中にヒーターを設置し、熱伝導により土壌を加熱することで浄化範囲内の対象物質の揮発や流動化を促進させ、主にガスや地下水を井戸により回収または分解させるものである。

加熱温度は、浄化対象物質の種類や水理地質条件により異なるが、不飽和帯であれば最高で 300℃以上の高温まで設定することができるため、沸点の高いダイオキシン類や PCB にも対応が可能である。VOCs の場合は、飽和帯に位置する粘土・シルトに対して、加熱により 100℃まで温度を上昇させることができる。加熱された VOCs は、蒸気圧の大幅な上昇等により、地温の上昇に伴って透水性の低い地層中を移動し吸引井戸から回収される。

2.2 電気抵抗による加熱技術

電気抵抗による加熱技術（Electrical Resistance Heating、以下 ERH）は、地中に電極棒を設置して通電させることにより、土壌や地下水が電気抵抗となって引き起こされる発熱を利用するものである。加熱温度はおよそ 80℃未満で、粘土・シルトや砂などの地層に適用できる。基本的に、地層中を通電させる必要があるため、含水が著しく低い地層中では適用できない。土壌・地下水中の VOCs などの気化を促進させ、直接井戸から VOCs を回収させる方法のほか、バイオレメディエーションと組み合わせることなどで高い分解促進効果を発揮する。

2.3 スチーム注入による抽出技術

スチーム注入による抽出技術（Steam Enhanced Extraction、以下 SEE）は、設置した井戸からスチームを注入し、広く拡散させ、地盤中の温度を上昇させることで VOCs の揮発や移動を促進させ、回収井戸からガス吸引と地下水により VOCs を回収する技術である。

Introduction of In-Situ Thermal Remediation using Thermal Conductive Heater

Takeshi Wachi¹, Wataru Kitahara¹, Masayuki Kakuta¹ and Daisuke Komatsu¹ (¹In-Situ Solutions Co., Ltd.)

連絡先: 〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 2-2-2 (株) アイ・エス・ソリューション

TEL 03-5297-7288 FAX 03-5297-0242 E-mail info@is-solution.com

スチームの注入にあたっては、砂や礫などの透水性が高い地層に対して適用可能である。一般には、ISTDに比べて、井戸間隔を広く設定することが可能である。

加熱温度は100℃未満で、適用するには高い透水性を持つ地層である必要がある。

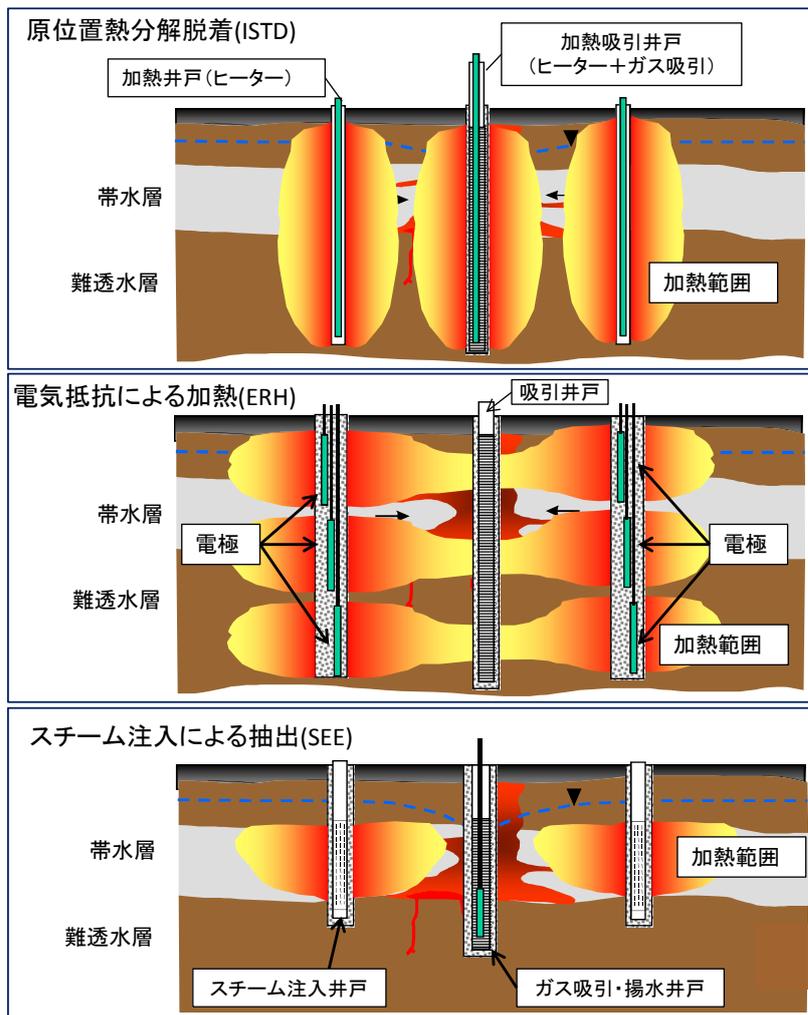


図-1 原位置加熱浄化技術 (ISTR) における加熱方法の特徴

3. ヒーターによる原位置加熱浄化技術

ここでは、3つの加熱浄化技術のうち、対象物質や地層において、より適応範囲が広い原位置熱分解/脱着 (ISTD) について詳細に説明する。

3.1 対象物質

ISTDにおいて適用可能な化学物質は、揮発性有機化合物、準揮発性有機化合物及び油類に分けられる。揮発性有機化合物は、一般的に、飽和帯・不飽和帯問わず熱脱着が可能である。準揮発性有機化合物は、沸点の低いナフタレンは飽和帯・不飽和帯ともに熱脱着が可能であるが、沸点の高い物質では、一旦地上に掘り上げて、加熱する等、同じヒーターによる加熱を用いるものの、対象物質毎に適用条件が異なっている。

適用できる化学物質については、ある程度、物質自身の物理化学特性により評価できるものの、複合汚染や特殊な物質については、事前にトリータビリティ試験により、評価することが望ましい。

① 揮発性有機化合物

トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、ベンゼン等

② 準揮発性有機化合物

ナフタレン、PCB、ダイオキシン

③ 油類

灯油、軽油、ガソリン

3.2 基本設備

ISTD 技術の基本的な井戸方式及びブランケット方式における設備構成²⁾を図-2 に示す。

(1) 汚染土壌の加熱方法

浄化対象物質に応じて、地中に鉛直にヒーターとガス吸引井戸を設置し土壌を3次元的に加熱する方法もしくは、地表にヒーターを配し上に断熱材で覆い加熱する方法がある。これ以外に、汚染土壌を地上にパイル状に掘り上げヒーターで確認する方法がある。以下に、加熱井戸を用いた工法の設備を紹介する。

① 加熱井戸及び吸引井戸

加熱井戸を一定の間隔で設置し、適切な位置に吸引井戸を配置する。

② 温度・圧力モニタリング井戸

浄化範囲内に井戸を設置し、温度または圧力センサーを設置する。温度モニタリング井戸内の温度センサーは多深度に設置する。

(2) 地上設備

① 電源設備

引込み電源、変圧器、各種装置の制御機器、非常用電源（発電機）が必要となる。

② 吸引ガス処理システム

配置された吸引井戸から回収された高温のガスや地下水は、熱交換機により冷却され、気液分離装置を通過し、ガス用活性炭を通り無害化される。可燃性ガスが浄化対象の場合には、熱交換機の前に熱酸化器により酸化させる。熱交換器やブロワー等の主要な装置はトレーラー内に格納することも多い。

③ 地表被覆

ヒーターによる熱が地表に伝導により到達すること及び、地中からのガスが地上に漏出することを防止するため、加熱範囲の地上部に耐熱コンクリートを打設する。

4. 施工事例の紹介

米国カリフォルニア州サンフランシスコ市近郊のブラウンフィールドサイトにおいて、ISTD 技術を用い、地下水面以下の締まった粘土中にテトラクロロエチレン（以下、PCE）の原液が存在するサイトを浄化した事例³⁾を以下に示す。

① サイト情報

再開発のために海沿いの鉄道貨物倉庫において、土壌汚染調査を実施したが、土地の一部に VOCs 汚染が存在していた。倉庫としての操業中には塩素化 VOCs の使用履歴はなかったが、敷地内には過去にドライクリーニング工場が存在しており、その時の漏洩と推定された。

浄化面積は 836m²、浄化深度は GL-0~6.2m で浄化土量は 5,097m³であった。

② 水理地質情報

対象地の地質は、表層約 1m までが埋土の砂であり、その下位にはサンフランシスコ湾内堆積物である有機物を含む黒褐色の泥層が認められた。泥層中には、パッチ状に中～粗粒砂が不均質に混入していた。地下水はおよそ GL-1m に存在していた。対象泥層の透水性は非常に低く、透水係数は概ね 1×10^{-7} cm/sec、間隙率が 40 %であった。

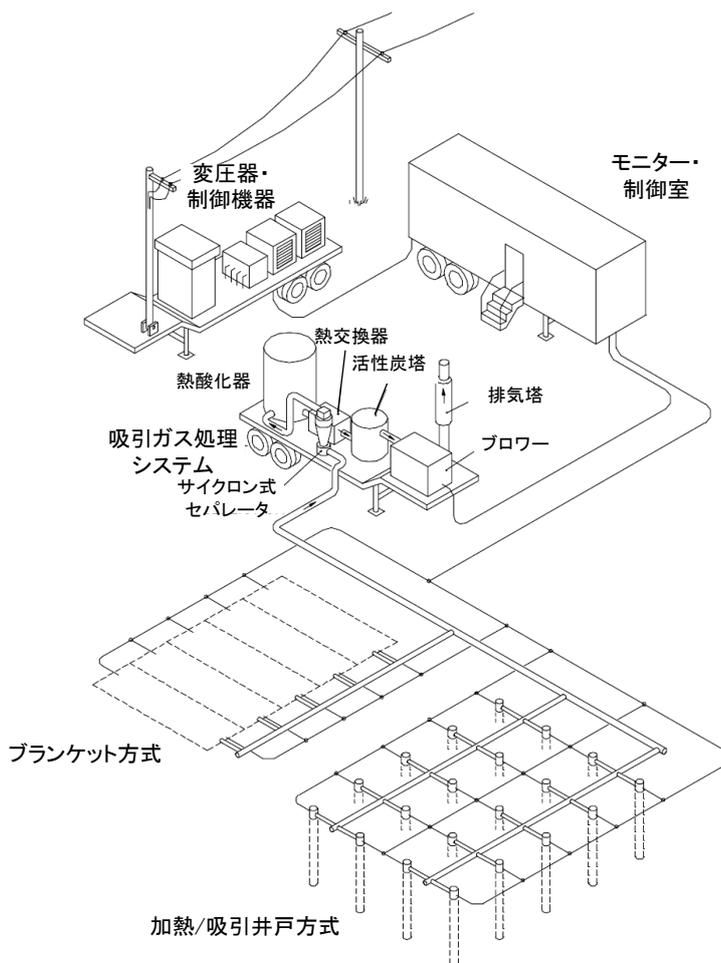


図-2 原位置熱分解/脱着 (ISTD) 装置の基本構成

③ 汚染情報

事前調査では、PCE の原液が黒褐色の泥層中に確認された。浄化前の土壌中 PCE の最高濃度は 2,700 mg/kg であり、平均 PCE 濃度は 87 mg/kg であった。

④ 浄化結果

事前の浄化設計において、加熱開始 100 日後に浄化目標（PCE では 2.0 mg/kg）に到達する結果となった。浄化前には PCE の平均濃度（サンプル数 54 試料）が 87 mg/kg であったものが、加熱後およそ 100 日では 0.012 mg/kg まで低下した。その他の VOCs についても目標を達成し、予定期間内に浄化完了となった。井戸配置と汚染物質の熱脱着イメージを図-3 に示す。

⑤ 評価

本事例は、薬剤注入が困難とされる有機物に富む泥層に存在する原液を含む高濃度 VOCs を対象とした浄化技術であり、日本国内の現行技術では、原位置浄化が難しい地層と汚染濃度である。大部分の PCE は地下水より下位に存在するため、加熱による設定温度が 100 °C であった。浄化中の効果確認のモニタリングにおいて、土壌採取は最も温度が上昇しにくいヒーター間で土壌採取を実施したが、高い浄化品質が確認できる結果となった。

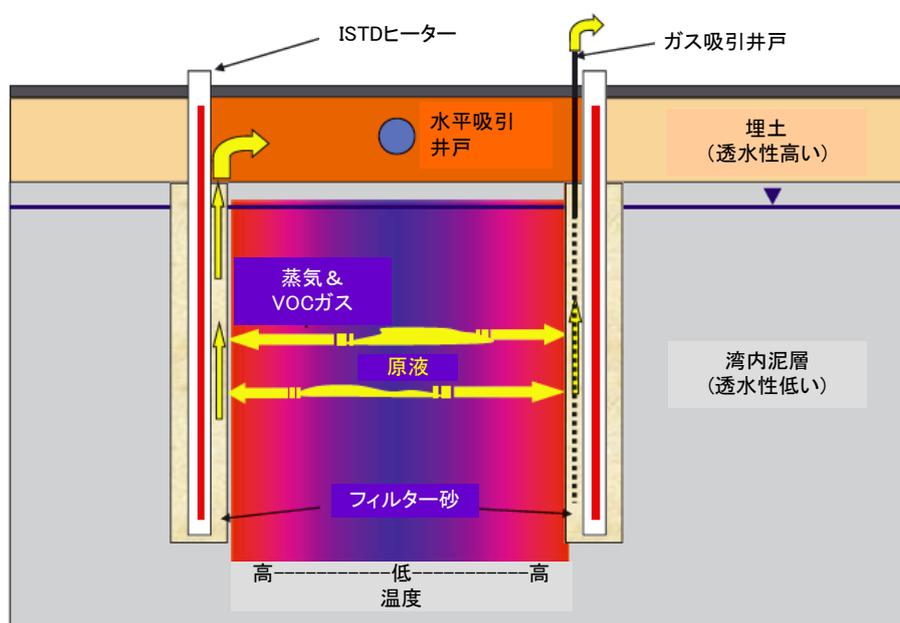


図-3 加熱によるスチームや VOC ガスの回収概念図

5. おわりに

紹介した原位置加熱浄化工法(ISTR)のうち ISTD 工法は、2017 年 8 月に国内での実サイトでの 1 号案件が施工開始となる。当該技術は、低透水性地盤中の高濃度の VOCs の原位置浄化が可能であるが、比較的大きな処理設備や各種井戸を数多く設置することが必要となるため、深度 10~15m 程度では掘削除去工法よりも割高となる可能性がある。しかし、深度がおおよそ 15m を超える深度では、掘削除去工法よりも安く施工できるようになり、適用できるサイトが増えてくる。

原位置浄化による高い品質を確保し、費用も改善できるように、今後開発を進めていく計画である。

参考文献

- 1) 和知剛・北原亘・角田真之 (2016) : 原位置加熱浄化技術(In-Situ Thermal Remediation)の紹介, 環境浄化技術, Vo.15. No.5. pp.58~62.
- 2) George L. Stegemeier, Harold J. Vinegar (2001) : Thermal Conduction Heating for In-Situ Thermal Desorption of Soils. Hazardous & Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook, Ch. 4.6-1, Oh, Chang H. (Ed.). CRC Press LLC.
- 3) Gorm Heron, John Lachance, and Ralph Baker (2013) : Removal of PCE DNAPL from Tight Clays Using In Situ Thermal Desorption, Groundwater Monitoring & Remediation 33, No.4/ Fall, pages.31~43.