

(S4-20) 原位置加熱脱着処理に関する適用可能性試験の検討—第2報—

○山野辺純一¹・大久保敬祐¹・ブラーツ初枝¹・山崎将義¹・早澤敬一¹・西田憲司¹・土壤汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（第2期）¹¹ 土壤環境センター

1. 背景及び目的

土壤汚染対策法において実施措置として土壤汚染の除去等の措置を適用する場合、汚染除去等計画を作成するが、計画した汚染の除去等の処理方法（以下、措置技術）に関し、予め適用性の確認を行うことが規定されている¹⁾。土壤汚染対策法施行規則や同法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（以下「ガイドライン」）等では、汚染の除去等の処理方法（以下、処理技術）の適用性や、試験による効果の確認が求められているが、具体的な手順や方法は示されていない^{1),2)}。そこで（一社）土壤環境センターでは、令和4年（2022年）度より処理技術の適用可能性評価のための室内試験の方法・手順について具体例を提示するべく検討を行っている。

2024年度、従来の原位置浄化技術（生物処理や化学処理等）が適用困難な粘性土（帯水層底面の境界部等）や複合汚染に適用可能な原位置加熱脱着処理に注目し、同処理技術の適用可能性試験（室内試験）の目的、方法・手順、適用可能性の判断基準及び留意点について検討を行い、結果を第1報として報告した³⁾。本稿では、第30回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会での報告時に多くの質問を受けた技術の詳細に関して、代表的な工法例を補充してより分かり易く情報を補足すると共に、室内試験フロー例についても試験装置の詳細な事例を新たに加え、改善した内容について報告する。

なお、原位置加熱脱着処理のうち化学処理や生物処理を補助する目的で土壤に加熱を行うケースは、本検討の対象外としている。

2. 原位置加熱脱着処理の技術概要

2.1 基本原理

原位置加熱脱着処理は、土壤を加熱し浄化対象物質（以下、対象物質）を土粒子から脱着させる方法であり、原位置にて加熱を行い、対象物質を土粒子から脱着させた後、ガス吸引もしくは揚水を併用し対象物質を地上に回収する処理技術である。本技術の原理は、土壤の細孔部に存在する汚染物質に対し、加熱による地下水への溶出及び気化・揮発の促進や、ガス圧の上昇、水の粘性低下、体積膨張、水蒸気輸送等による間隙水自体の移動性の向上等、様々な要素が挙げられる⁴⁾。さらに数百℃の高温で加熱した場合は、酸化・熱分解による対象物質（VOCやPCB等）の処理も可能となる⁵⁾。図1に加熱脱着による対象物質の浄化イメージを示す。

原位置加熱脱着処理技術には、土壤の加熱方式の相違に基づき複数の施工法が存在する。図2に原位置加熱脱着処理工法の一般的な全体イメージを示す。土壤中には対象土壤を加熱する設備や蒸気の注入設備および加熱により脱着した対象物質を捕捉するための回収井戸等の設備を設置する。一方、地上部には、これらの地下設備を稼働させるための電源や蒸気等の供給設備（電源プラント等）ならびに対象物質を含む地下水・ガスを処理するための処理プラントを配置し、処理工程全体を統合的に管理するシステムを構成する。

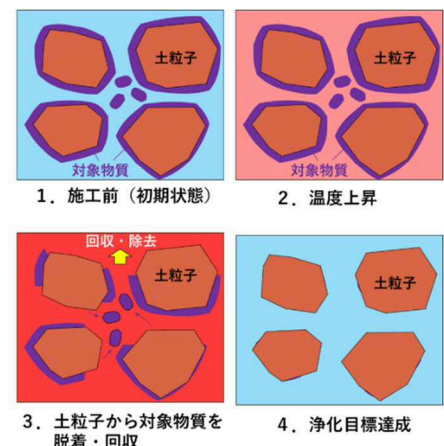


図1 加熱脱着による浄化のイメージ

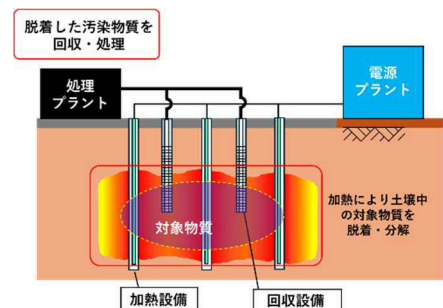


図2 原位置加熱脱着処理工法の全体図

Study on applicability tests for in-situ thermal remediation -Part 2-

Junichi Yamanobe¹, Keisuke Ohkubo¹, Hatsue Braatz¹, Masayoshi Yamazaki¹, Keiichi Hayazawa¹, Kenji Nishida¹ and Study group on applicability test of measures such as removal of soil contamination (The 2nd Term)¹ (¹GEPC)

連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5 KSビル3F（一社）土壤環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

2.2 原位置加熱脱着処理技術の種類及び適用可能性試験の対象

本稿では、代表的な原位置加熱脱着処理技術として、熱伝導加熱法、電気抵抗加熱法、加熱蒸気（スチーム）注入法の3つの工法を紹介する。表1に各工法の特徴を、図3に各工法の加熱イメージ図を示す。

表1 原位置加熱脱着技術の種類とその特徴

技術の種類 項目		熱伝導加熱法 ^{5),6),7)}	電気抵抗加熱法 ^{4),8),9)}	加熱蒸気（スチーム）注入法 ^{10),11)}
概要		地中にヒーターを設置し、熱伝導により土壌を加熱し、対象物質を揮発や移動を促進させ、抽出井戸（回収井戸）からガス吸引と地下水揚水により汚染物質を回収する技術である。 加熱温度を上げることで対象物質を分解する場合もある。	地中に埋設した電極井戸間に電流を流すことにより対象土壌自体をジュール熱で加熱させ、汚染物質の揮発や移動を促進し、抽出井戸（回収井戸）からガス吸引と地下水揚水により汚染物質を回収する技術である。	加熱蒸気（スチーム）注入法は、加熱蒸気を注入井戸から地下に注入し、地盤の温度を上昇させることで、汚染物質の揮発や移動を促進し、抽出井戸（回収井戸）からガス吸引と地下水揚水により汚染物質を回収する技術である。
加熱温度（地盤）		100℃ 以上も可能	100℃ 以下	100℃ 以下
対象地盤		砂礫、砂、シルト、粘土	砂礫、砂、シルト、粘土	透水係数が約 10^{-5} m/sec を超える砂や礫等の透水性の高い地層
対象物質（特定有害物質）		第一種特定有害物質、水銀、PCB	第一種特定有害物質	第一種特定有害物質
処理方法	加熱方法	ヒーターによる熱伝導加熱	電極によるジュール熱加熱	蒸気注入による加熱
	脱着の原理	温度による加熱脱着、水蒸気輸送による脱着	温度による加熱脱着、水蒸気輸送による脱着	温度による加熱脱着、水蒸気輸送による脱着
	対象物質の回収方法	ガス吸引、揚水	ガス吸引、揚水	ガス吸引、揚水
加熱の影響因子		地下水位や流速の大きさ	土壌の比抵抗値、地下水位や流速の大きさ	土壌の透気性、地下水位や流速の大きさ
備考		・汚染源に対象物質の原液が存在する場合でも浄化可能である。 ・流速が大きい場合等、加熱温度の達成・維持が難しいと想定される場合は、熱伝導に関するシミュレーション等を実施し確認しておくことが重要である。	・土壌の比抵抗値が極端に高い場合、十分な電気が流れず土壌が昇温しないことがあるため、適切な電源装置を用いる必要がある。 ・対象地盤が粘土層等で、地下水の回収が難しいと想定される場合は、現地試験や回収シミュレーション等を行い特定有害物質が除去できることを確認しておくことが重要である。また、浄化が期待できない場合等、必要に応じて化学分解や微生物分解との併用も検討する。	・土壌への加熱能力は蒸気の注入能力に依存し、蒸気注入能力は注入圧力が一定の場合、土壌の透水係数に強く支配される為、粘土層等の低透水性の土壌に対しては、蒸気注入による加熱脱着の適用は困難である。 ・脱着可能な温度や加熱蒸気（スチーム）の拡がり等については、現地試験やシミュレーション等を実施し確認しておくことが重要である。

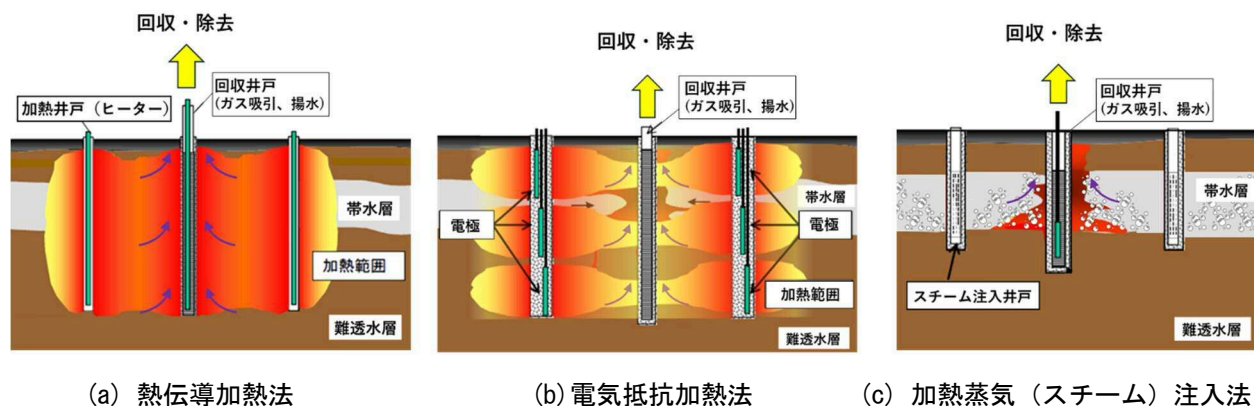


図3 原位置加熱脱着法による加熱イメージ図⁶⁾を一部加筆

これらの工法は共通して以下に記す3つのプロセスを経て処理を行う。

- 1) 土壌を加熱する（対象土壌の昇温）
- 2) 対象物質を脱着させる（対象物質の脱着）
- 3) 脱着した物質を地上へ回収する（対象物質の回収）

これらの内、工法によって異なる点は主として土壌の加熱方法である。それに伴い、適用できる土質条件や対象物質が一部異なる。そのため適用可能性を評価する際には、以下に記す3つの事項を検討し総合的に評価することが不可欠である。

- 1) 「対象土壌の昇温」では、選定した技術により土壌を所定温度まで加熱できるか。
- 2) 「対象物質の脱着」では、加熱した土壌から対象物質が脱着するか。
- 3) 「対象物質の回収」では、地下水やガスに移行した対象物質を問題なく地上へ回収できるか。

上記事項のうち「対象土壌の昇温」と「対象物質の回収」については、室内試験では実際の土壌条件を再現することが難しい。そのため、これらの評価には、工法の特性を考慮した上で、事前調査、過去の実績、各種シミュレーションおよび現地での試験・測定として土壌（土層）の比抵抗の測定（電気抵抗加熱法の場合）、透気性を把握する目的での透水試験（加熱蒸気注入法の場合）、昇温確認を目的としたパイロット試験等の実施を検討する必要がある^{8),12)}。なお、「対象物質の回収」に関して、その手段である揚水処理（揚水施設）は、ガイドラインでは適用可能性の確認事項として「揚水設備の地下水の揚水能力に係る確認」²⁾を求めている、室内試験は該当しないことから検討対象外とした。

「対象物質の脱着」については、前記3工法で加熱原理は異なるものの、いずれも土壌を昇温させることで対象物質の地下水への溶出や気化・揮発を促進する点は共通している。したがって、本稿では「対象物質の脱着」に関わる加熱温度に着目した適用可能性評価のための室内試験について検討を行うこととした。

3. 適用可能性試験の検討対象及び目的について

3.1 適用可能性試験の目的

本稿で述べる適用可能性試験は、加熱脱着処理技術を適用するに当たり、現地の土壌を用いた室内試験を行い、所定の温度で加熱処理した土壌の浄化目標達成の可否を確認し、適用可能性を評価することを目的とした。

3.2 適用可能性試験フロー例

原位置加熱脱着処理の適用可能性試験の概要フロー例を図4に、詳細フロー例を図5に示す。試験フローの作成に際しては、適用性試験部会会員企業の経験や事例、文献調査等をもとに検討した。試験フローは6つの段階からなる。そのうち「4. 加熱試験」については、さらに4つの段階に分けて詳述する。図4と図5において、第1報からの改善点および補足した箇所を赤字および下線にて示した。なお、本試験フローは標準的なものではなく、具体的な試験方法の一例を提示したものであることに留意されたい。

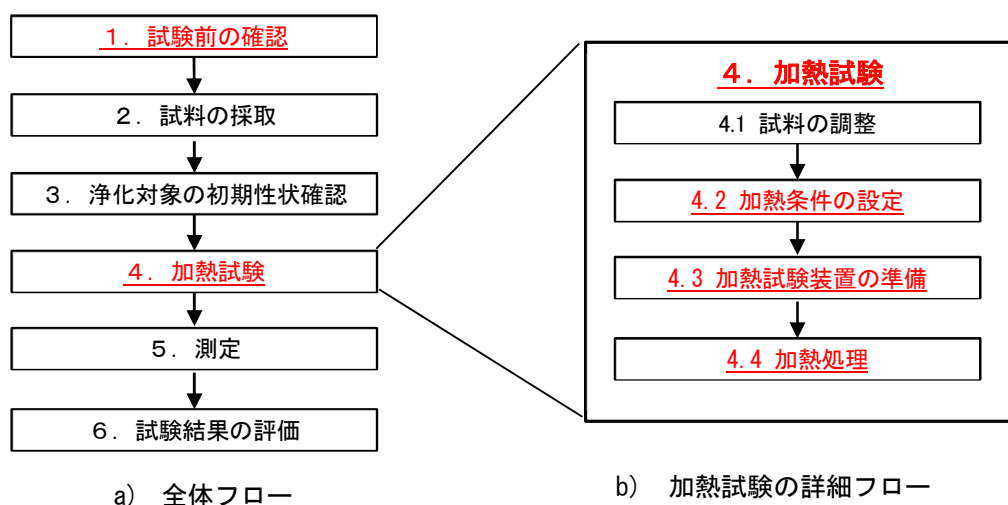


図4 原位置加熱脱着処理の適用可能性試験 概要フロー例
(赤字下線、は第1報からの改善点)



図5 原位置加熱脱着処理の適用可能性試験 詳細フロー例 (赤字下線、は第1報からの改善点)

4. 原位置加熱脱着処理の適用可能性試験の留意点及び補足説明³⁾

原位置加熱脱着処理の適用可能性試験を実施するにあたり留意すべき事項と補足事項を以下に記す。

4.1 試験前の確認についての留意・補足事項

当該技術は加熱方法（工法）によって加熱温度が異なり、処理が可能な物質が一部異なる。電気抵抗加熱法や加熱蒸気（スチーム）注入法では、第一種特定有害物質に加え、油が処理可能である^{4),10)}。また、300℃以上で加熱が可能な熱伝導加熱法ではそれらに加え、水銀、PCB、多環芳香族炭化水素（PAHs）、ダイオキシン類も処理可能である^{6),7),15)}。

4.2 加熱試験についての留意・補足事項

4.2.1 排気ガス処理について

排気ガス処理装置で処理が可能なフィルター及び活性炭を選定し、準備する。排気ガスの処理状況は、VOCの場合は検知管やPID検出器を用いて、水銀の場合は水銀蒸気検出器等を用いて確認することもできる。PCBについては、排気ガスをサンプリングしておき、試験後に分析を行い、処理が出来ているか確認することもできる。

4.2.2 加熱処理について

一般に土壌の構成鉱物や有機物は、加熱により変化を起こすことが知られている（表2）¹⁷⁾。このことから試験条件によっては土質（地盤）への影響の可能性を排除できない場合も想定される。例えば、対象物質がPCB（及びダイオキシン類）で、かつ対象土壌が泥炭等の有機質を豊富に含む場合は、300℃を超える加熱温度（例えば、325℃¹⁵⁾）により土質が影響を受ける可能性を排除できないと考えられる。この場合は、表3に記す土質試験等をあわせて行い、影響が小さいことを確認しておくことが望ましい。

4.3 測定についての留意・補足事項

対象物質が土壌より除去されたことを確認する場合において、底質調査方法に則した含有量試験によって土壌中の対象物質の全含有量を把握し、加熱処理前後の収支計算を行い、対象物質が適切に処理されたかを確認することもできる⁴⁾。

4.4 適用可能性試験以外の留意・補足事項

原位置加熱脱着処理を措置技術として決定する際は、上記の適用可能性試験結果に加え、以下の項目も考慮して総合的に判断することが望ましい。

- ・現場条件：原位置加熱脱着処理の適用可能性試験は、同類の処理技術に共通で実施できるものである。しかし、現場で実際に浄化を達成できる温度や脱着時間は、現場状況や各加熱方法の設計（熱源の配置や地下水の流れの有無等）により異なる。そのため別途、現場試験や熱解析シミュレーション等での評価が重要である⁸⁾。
- ・コスト：原位置加熱脱着処理の実施にかかる費用が、事業計画の範囲内に収まる見込みかどうかを検討しておく。
- ・工期：原位置加熱脱着処理は、粘性土の汚染や高濃度汚染であっても浄化可能だが、確認されていない濃度や揮発性物質の存在により工期が長くなる場合もある。

表2 加熱によって生じる変化¹⁷⁾

加熱温度	生じる変化
100～300℃	吸着水や層間水の脱水
200～250℃	有機物の分解が始まる
500℃～	鉱物の構造中にあるOHの脱水
900℃～	粘土鉱物の分解と再結晶

表3 加熱の影響を確認する土質試験方法等

室内試験での 土質の物理試験	（必要に応じて） 現地パイロット試験 での原位置試験
目的 土質の物理的性状を加熱 処理前後で比較し、変化 （影響）の程度（小さいこ とが前提）を確認する。	目的 工学的検討を行う際等 に、支持力や沈下量等を加 熱処理前後で比較し変化 （影響）の程度（小さいこ とが前提）を確認する。
試験方法 土粒子の密度・粒度分 析・強熱減量等	試験方法 標準貫入試験・表層の沈 下量測定・層別沈下測定等

このように実サイトでの措置を念頭に置き、前提条件や設計条件を整理して十分な事前検討をしておくことが望ましい。区域内措置優良化ガイドブックの「原位置浄化（加熱脱着）」で示されている「事前検討・措置の実施のチェックリストの例」⁸⁾も参考にされたい。

5. 終わりに

本稿では、原位置加熱脱着処理の適用可能性試験を検討するに当たり、前回発表時に多くの質問を受けた技術概要に関して、代表的な工法例を補充し、情報を補足すると共に、室内試験フロー例についても見直し、更新を行った内容について報告した。これら技術内容及びフロー例について意見を聞き、議論したい。

参考文献

- 1) 環境省（2024）：土壤汚染対策法施行規則，別表第七，<https://laws.e-gov.go.jp/law/414M60001000029/>，2026年1月閲覧。
- 2) 環境省（2022）：土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第3.1版），5.4 措置の実施，Appendix_22.
- 3) 山野辺純一，ブラーツ初枝，島田雄太郎，大久保敬祐，西田憲司，土壤汚染の除去等の措置の適用可能性試験に関する調査・検討部会（第2期）（2025）：原位置加熱脱着処理に関する適用可能性試験の検討，第30回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.465-470.
- 4) 佐藤徹朗（2023）：加熱処理法（電気発熱法ハイブリッド浄化），令和4年度土壤汚染対策オンラインセミナー，公益財団法人日本環境協会，<https://www.jeas.or.jp/dojo/business/promote/seminar/2022b.html>，2025年12月閲覧。
- 5) Ralph, B. and Myron, K. (2002) : A DESCRIPTION OF THE MECHANISMS OF INSITU THERMAL DESTRUCTION (ISTD) REACTIONS, Current Practices in Oxidation and Reduction Technologies for Soil and Groundwater and presented at the 2nd International Conf. on Oxidation and Reduction Technologies for Soil and Groundwater, ORTs-2, Toronto, Ontario, Canada, Nov. 17-21.
- 6) 和知剛，北原亘，角田真之，小松大祐（2017）：ヒーターを用いた原位置加熱浄化工法の紹介，第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.757-760.
- 7) Feng, H., Jie, G., Eric, P., Peter, James, S., Hailong, W. and Liyuan, L. (2015) : In situ remediation technologies for mercury contaminated soil, Environmental Science and Pollution Research, Volume 22, Issue11, pp.8124-8147.
- 8) 環境省（2020）：区域内措置優良化ガイドブック（改訂版）—土壤汚染対策法に基づくオンサイト措置及び原位置措置を適切に実施するために—，pp.84-87.
- 9) 佐藤徹朗，瀬野光太，長曾哲夫（2017）：VOC 汚染サイトにおける電気発熱による原位置浄化対策への影響について（その5），第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.634-639.
- 10) 溝端宏幸，松浦健一，川上智，伊藤圭二郎，河合達司，川端淳一（2007）：鉄粉法と他方法の併用による有機塩素化合物と油の複合汚染土壌の浄化促進事例～スチーム注入による地盤加熱法との併用～，第13回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.585-589.
- 11) Eva L. Davis (2023): In Situ Thermal Remediation. Groundwater Issue Paper, EPA/600/R-23/062, United States Environmental Protection Agency (EPA), June 2023.
- 12) 松谷知幸，松田秀樹，奥田和友，春日井忍，中島伸幸（2023）：産業廃棄物放置事案における VOC を対象とした原位置熱処理の適用事例～土性の違いが昇温にあたえる影響について～，第28回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.107-112.
- 13) 須網幸次，高畑陽，大久保英也，樋口雄一（2022）：VOCs 汚染土壌における加熱脱着法を用いた加熱実証試験，第27回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.321-322.
- 14) ブラーツ湊初枝（2024）：原位置熱脱着工法による土壌中の PFAS の脱離，分解技術，都市と廃棄物 Vol. 55, No. 3, pp.48-53.
- 15) 株式会社テラサーモアジア（2024）：施工実績，株式会社テラサーモアジア，https://326676f7-e5d8-4ad6-adaa-3ed5695493ea.usrfiles.com/ugd/326676_2901ad991fc947958da74b5667f106ed.pdf，2025年12月閲覧
- 16) 平田健正，中島誠（2012）：最新の土壌・地下水汚染原位置浄化技術，シーエムシー出版，pp.115-116.
- 17) 福島支援本部環境支援部，人形峠環境技術センター，再処理技術開発センターガラス固化技術開発部，放射線管理部環境監視課（2011）：土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討，日本原子力開発機構，JAEA-Research 2011-026.