

(S4-09) 原位置加熱脱着処理に関する適用可能性試験の検討

○山野辺純一¹・ブラーツ初枝¹・島田雄太郎¹・大久保敬祐¹・西田憲司¹・
土壌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）¹
¹土壌環境センター

1. 背景及び目的

土壌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（以下、ガイドラインという）等では、浄化等処理方法の適用性や試験による効果の確認が求められているものの、具体的な手順や方法は示されていない^{1),2)}。そこで（一社）土壌環境センターでは2022年度より土壌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（以下、適用性試験部会という）を設置し、適用可能性試験の標準的な方法や手順等を提案することを目的に、第28回及び第29回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会で成果を報告している。これまでの報告では、重金属のオンサイト浄化や塩素化エチレン類の原位置生物処理に関する室内試験フロー例を検討した。適用性試験部会は、第2期として2024年度も活動を継続し、対象を他の措置技術に拡大して試験方法や手順の検討を進めている。本稿では、第三種特定有害物質が浄化可能な措置技術である原位置加熱脱着処理（以下、原位置加熱処理という）に着目した。原位置加熱処理は、ガイドラインにも最新技術として記載されており、第一種特定有害物質、水銀、PCB及びこれらの複合汚染にも対応できる技術である³⁾。今回、現場土壌を用いた原位置加熱処理の適用可能性試験について検討を行い、その試験フローを現段階の案として例示した。また今回検討を行った原位置加熱処理は、加熱により対象物質を脱着・分解して除去するものであり、化学処理や生物処理を補助する用途で加温を適用するケースは対象としない。

なお、適用性試験部会では、本稿の他に原位置化学処理（還元分解）や透過性地下水浄化壁（吸着）に関する適用可能性試験の検討^{4),5)}結果についても報告しているので、本稿と合わせて参考にされたい。

2. 原位置加熱処理の技術概要

原位置加熱処理は、土壌を加熱し対象物質を脱着・分解させる方法である。本技術の原理としては、土壌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⁶⁾。さらに高温で加熱した場合は、酸化・熱分解による対象物質の浄化が可能となる⁷⁾。本章では近年、報告が比較的多い2つの技術を例に挙げ紹介する。

2.1 熱伝導加熱法⁸⁾

本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し、浄化範囲内の対象物質の揮発性や移動性を向上させるものである。気化・揮発もしくは地下水に溶出した対象物質は、吸引井戸により回収する。また加熱温度によっては、対象物質の分解を目的にした場合もある。図-1に熱伝導加熱法の概略図を示す。熱伝導加熱法は、砂質土だけでなく、透水性の低い粘性土層にも適応でき、汚染源に原液が存在するような対象物質でも浄化可能である。対象物質がVOCの場合では、加熱により対象範囲の温度を100℃

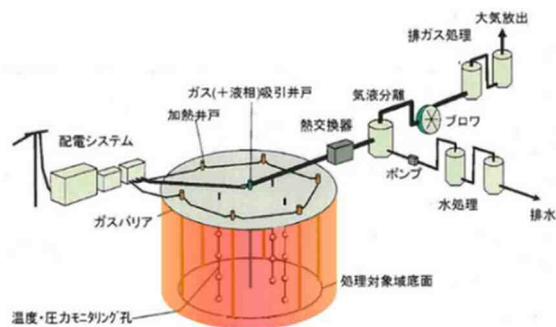


図-1 熱伝導加熱法の概略図⁸⁾に一部加筆

程度まで上昇させる。加熱されたVOCは、地温の上昇に伴い、蒸気圧が上昇する。この現象により、透水性の低い地層中であっても水蒸気と共に移動し、吸引井戸から回収される。また、300℃以上の高温を設定することも可能であり、沸点の高い水銀やPCB・多環芳香族炭化水素（PAHs）・ダイオキシン類にも対応できる^{8),9),10)}。

Study on applicability tests for in-situ thermal remediation

Junichi Yamanobe¹, Hatsue Braatz¹, Yutaro Shimada¹, Keisuke Ohkubo¹, 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）土壌環境センター
TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

2.2 電気抵抗加熱法^{11), 12)}

電気抵抗加熱法は、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する方法である。このため、土壌の比抵抗値が低いシルトや粘土層を効率的に加温できる技術であり、土壌の細孔部に存在する対象物質等の地下水への溶出や気化を促進することが可能である。対象物質を含むガスや地下水を土壌ガス吸引や揚水により地上で回収する場合の概略図を図-2に示す。加温により地下水へ溶出した対象物質の回収に揚水井戸を用いる場合、透水性の低い粘性土層が対象になる等溶出した対象物質を含む地下水の回収が難しいと想定される時は、現地試験や実績、シミュレーション等を行い、対象土壌より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。一方、電気抵抗加熱法は、土壌温度のコントロールが容易なため、生物分解や化学分解等を併用した原位置浄化が可能であり、透水性の低い土壌が対象となる場合にも有効である^{6), 11)}。なお、土壌の比抵抗値が極端に高い場合には、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。

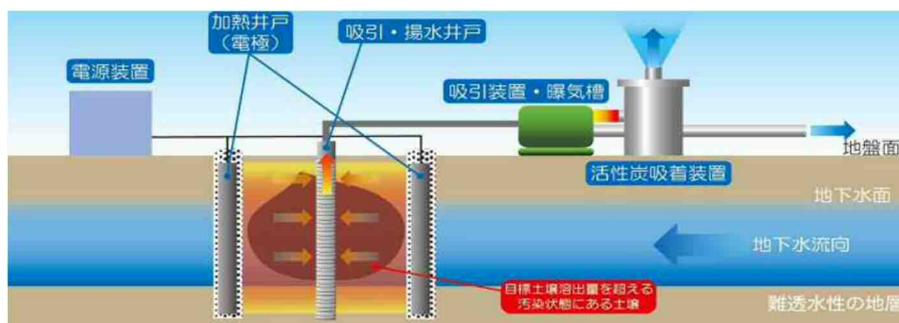


図-2 電気抵抗加熱法の概略図¹¹⁾

3. 原位置加熱処理の適用事例

原位置加熱処理の適用性試験方法を検討するにあたり、実際のサイトで原位置加熱処理が適用された熱伝導加熱法及び電気抵抗加熱法の処理対象物質及び加熱温度の調査を行なった。表-1に原位置加熱処理を実施したサイトの例を示す。

表-1 原位置加熱処理を実施したサイトの例

加熱方法	対象物質	加熱温度	概要
熱伝導加熱法	VOC・ベンゼン	100℃	不法投棄現場：汚染土壌中に熱伝導加熱ヒーターと吸引井戸を設置し、100℃に加熱した。加熱により対象物質を土壌より脱着・回収し目標値（第二溶出量基準）を達成した ¹³⁾ 。（サイト概要 深度 GL-10.3 m、土質：砂、砂礫、廃棄物含有粘土）
	VOC・PCB ・ダイオキシン類等	325℃	ガス製造・貯蔵施設跡地：汚染土壌中に熱伝導加熱ヒーターと吸引井戸を設置し、段階的に325℃まで加熱した。加熱により土壌より対象物質を脱着・回収し、一部は分解することで浄化した ⁹⁾ 。（サイト概要 深度 GL-5.5 m、土質：砂、礫、燃え殻等）
	水銀	167～450℃	化学工場跡地：室内試験にて450℃で汚染土壌を加熱し、対象物質を脱着・回収し97%低減した。また、原位置にて汚染土壌中に熱伝導加熱ヒーターと吸引井戸を設置し、167℃まで加熱し土壌より対象物質を脱着・回収し67%低減した ¹⁰⁾ 。（サイト概要 未記載）
電気抵抗加熱法	VOC	60℃	原位置加熱処理の実証実験：地上部に電源装置と、汚染土壌中に電極井戸を設置し、60～65℃に加熱した。観測井より採取した地下水中の対象物質の濃度より、分配係数や拡散係数を用いる解析方法について検討した ¹⁴⁾ 。（サイト概要 深度 GL-7.0 m、土質：粘土）
	ベンゼン・油等	100℃	稼働中のガソリンスタンド：電気抵抗加熱ヒーターと吸引井戸を設置し、100℃まで加熱した。加熱により土壌中の汚染物質を脱着・回収し浄化した ¹⁵⁾ 。（サイト概要 深度 GL-15.85 m、土質：砂質シルト、砂利等）

4. 適用可能性試験の検討対象物質

適用可能性試験の対象物質は、土壌汚染対策法の対象物質である第一種特定有害物質、水銀、PCBとした。

5. 適用可能性試験の目的

原位置加熱処理では、その特性上、各現場土壌における処理可能な加熱温度の把握が重要となる。本稿で述べる適用可能性試験の目的は、加熱温度による処理後土壌の浄化目標達成の確認である。

6. 適用可能性試験フロー例

原位置加熱処理の適用可能性試験の試験フロー例を図-3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。以下、各段階の内容について述べる。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。



6.1 試験前の確認

原位置加熱処理が適するサイトであるか、適用可能性試験の実施は妥当かを判断するため、以下に示す項目について、調査もしくは既存の資料等により現地条件の確認を行う¹¹⁾。

- ・ 基準不適合物質の種類、範囲及び深さ
- ・ 土壌溶出量 (VOC、水銀、PCB)、土壌含有量 (水銀)
- ・ 浄化目標
- ・ 土質区分、自然含水比、湿潤密度、透水係数¹³⁾
- ・ 地下水位、流速、流向
- ・ 地中障害物 (配管等) や埋設物 (廃棄物を含む) の有無
- ・ 土壌の比抵抗値 (電気抵抗加熱法の場合)

図-3 原位置加熱処理の試験フロー例

6.2 試料の採取

ボーリングマシン等により対象深度の土壌を採取する。以下に確認項目を示す。

・ 試料の採取

浄化対象となる場所・深度から土壌を採取する。1～5 kg 程度が目安となる。例えば、温度3 ケース、時間3 ケースとし、土壌量が各 200 g の場合、合計 1.8 kg 程度必要となる。土壌量は試験装置の規模等により調整する。

・ 試料の保存

土壌試料は、対象物質が化学変化を起こさないように密封かつ遮光できる容器へ隙間なく詰め、冷暗所で保管する。土壌採取容器の例を写真-1に示す。



写真-1 土壌採取容器の例

6.3 浄化対象の初期性状確認

前項で採取した土壌試料における基準不適合の物質・項目を測定し、溶出量や含有量を確認する。なお、試験の評価では、6.4.1 に記述する試料の調整を行った土壌試料にて対象物質の溶出量または含有量を測定し、初期値とする。

6.4 加熱試験

6.4.1 試料の調整

土壌試料中の石や礫等を除去し、写真-2に示すホバートミキサー等で均一化する。第一種特定有害物質等揮発性の物質が含まれている場合は、揮発しないようビニール袋に入れ、手で混合する等の方法で行う。均一化した後、土壌試料の含水比を測定し、自然含水比を基に自然地盤と同等の水分量へ調整する。対象物質の溶出量や含有量が事前の調査結果と異なる場合は、対象物質を土壌に添加・再分析する場合もある。



写真-2 ホバートミキサー

6.4.2 加熱条件の設定

土壌試料中の対象物質の種類や濃度等により、試験条件の加熱温度、加熱時間を定める。加熱温度は、過去の実績や対象物質の性状（蒸気圧や沸点等）を考慮し、設定する。設定温度は例えば、VOCを対象とした場合、40℃～100℃である^{6),13)}。また、水銀は90～600℃¹⁰⁾、PCBは325～600℃である^{9),16)}。

加熱時間は、浄化目標に応じて調整する。例えば土壌溶出量基準を目標とした場合は、加熱時間を3日、7日、14日として試験を行う事例等がある⁶⁾。また、浄化目標を対象物質の減少傾向で確認する場合においては、数時間の加熱試験で評価すること等がある。

6.4.3 加熱試験装置の準備

加熱処理に必要な温度・時間を維持可能な能力の加熱機器を用意する。例えば、土壌試料を100℃未満に加熱する場合は、ウォーターバスや恒温炉等を使用する。また、100℃以上まで土壌試料を加熱する場合には、電気炉やマッフル炉等を使用する。

土壌容器には、試験の規模や内容に応じた耐熱容器を用意する。例えば、土壌試料の加熱温度が100℃以下の場合では耐熱ガラス製の容器を使用する⁶⁾。また、100℃を超える高温の加熱には、ステンレス製やアルミナ製の容器を使用する。写真-3にステンレス容器及び電気炉の例を示す。

加熱試験時には対象物質を含んだ排気ガスが発生するため、排気ガス処理装置を用意する。図-4に加熱試験装置全体の模式図を示し、写真-4に排気ガス処理装置に関する各器具の一例を示す。



(a) (b)

写真-3 (a) ステンレス容器、(b) 電気炉

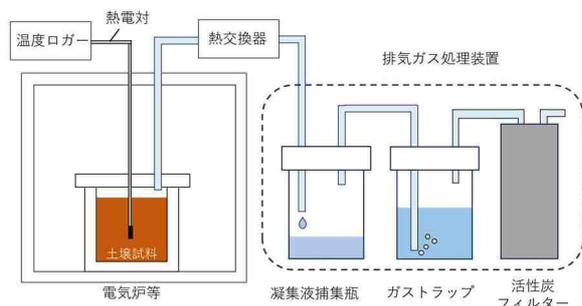


図-4 加熱試験装置の模式図



(a) (b) (c)

写真-4 (a) 凝集液捕集瓶、(b) ガストラップ、(c) 活性炭フィルター

6.4.4 加熱処理

土壌試料を前記の耐熱容器に入れ（およそ30～300g程度）、加熱機器に設置する⁶⁾。土壌試料の中心温度が設定温度になるまで加熱する。所定時間が経過した後、加熱を止め自然冷却を行い、常温となったことを確認した後に土壌試料を取り出す。加熱中は常時、温度を計測し記録する。加熱時もしくは加熱後に、排気ガスとして発生した対象物質が適切に排気ガス処理装置で処理されているか確認する。また、加熱処理は加熱温度や加熱時間を変更した複数ケースを行う場合がある。

6.5 測定

加熱処理後の土壌試料について対象物質の土壌溶出量（VOC、水銀、PCB）及び土壌含有量（水銀）を測定する。測定は、環境省告示第18号「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」もしくは、環境省告示第19号「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」に従って行う。

6.6 試験結果の評価

試験結果から原位置加熱処理による適用可能性を評価する。適用可能性の判断基準は、設定温度における加熱処理後の土壌試料の土壌溶出量及び土壌含有量が浄化目標を満足していることである。

7. 原位置加熱処理の適用可能性試験の留意点及び補足説明

原位置加熱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。

7.1 試験前の確認（試験フロー例 6.1）についての留意・補足事項

原位置加熱処理技術の加熱方法によって利用できる加熱温度が異なる為、熱脱着・分解による処理が可能な物質も異なる。電気抵抗加熱法では第一種特定有害物質に加え、油が処理可能である¹⁵⁾。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^{8),9),10)}。

7.2 加熱試験（試験フロー例 6.4）についての留意・補足事項

7.2.1 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。

表-2 加熱によって生じる変化¹⁷⁾

加熱温度	生じる変化
200～250℃	有機物の分解が始まる
～300℃	吸着水や層間水の脱水
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

7.2.2 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℃⁹⁾）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。

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

7.3 測定（試験フロー例 6.5）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⁶⁾。

7.4 適用可能性試験以外の留意・補足事項

原位置加熱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

原位置加熱処理の適用可能性試験は、同類の原位置加熱処理技術に共通で実施できるものである。しかし、各原位置加熱処理技術における現場での達成温度や脱着時間は、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評価することが重要である¹¹⁾。

・コスト

原位置加熱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。

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」¹¹⁾も参考にされたい。

8. まとめ

本稿では、原位置加熱処理のうち熱脱着・分解に対する適用可能性試験として、室内試験の試験フローをまとめ、例示した。今後、汚染の除去等の処理方法の適用可能性を確認する方法検討に際して一助になればと考える。今回提示した試験フローについて意見を聞き、議論したい。

参考文献

- 1) 環境省（2007）：土壤汚染対策法施行規則，別表第7の5の項中欄1のト、別表第7の5の項中欄2のホ。
- 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) 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），Appendix_22.
- 4) 藤井雄太，羽瀧博臣，森岡錦也，水柿貴史，三浦英俊，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）：原位置化学処理（還元分解）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，投稿中。
- 5) 山崎将義，佐藤毅，三浦英俊，森川航平，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）：透過性地下水浄化壁（吸着）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，投稿中。
- 6) 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>，2024年12月閲覧。
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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，2024年12月閲覧
- 10) 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.
- 11) 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.93-97.
- 12) 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 pp.634-639.
- 13) 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～土性に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.
- 14) 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 pp.321-322.
- 15) TerraTherm（2024）：Project:ERH Remediation of Active Gas Station, TerraTherm, <https://www.terraetherm.com/thermal-remediation-projects/erh-remediation-of-active-gas-station/>，2024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.