



～令和4年度土壤汚染対策オンラインセミナー～

加熱処理法（電気発熱法ハイブリッド浄化）



防災環境事業部 環境リスク 佐藤徹朗

2023/02/01～02/14



1. 原位置浄化の現状と課題
2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績
4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例
 - 4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例
 - 4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例
 - 4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
 - 4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
5. 加熱処理法の今後の展望



1. 原位置浄化の現状と課題

2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴

3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績

4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例

4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例

4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例

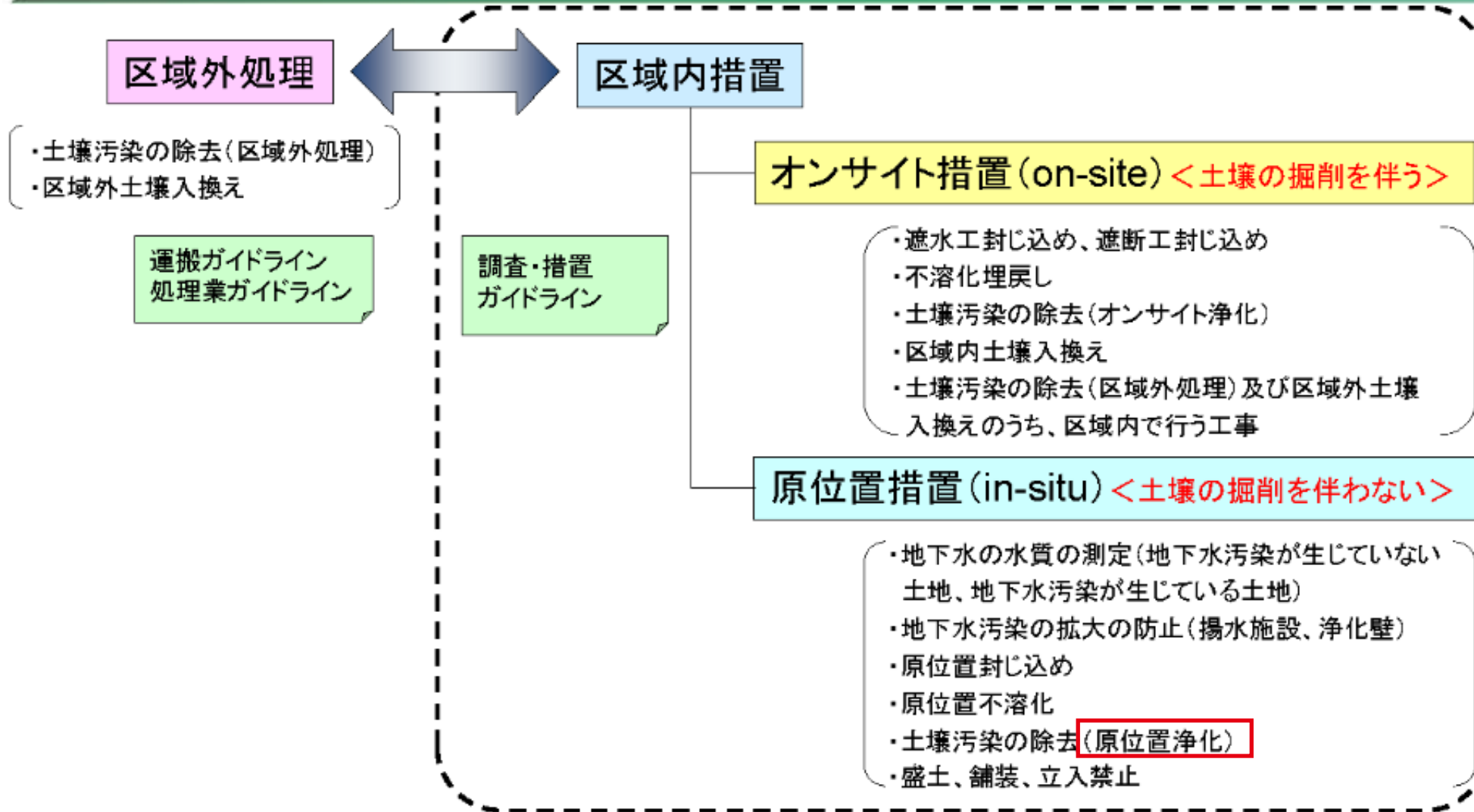
4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例

4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例

5. 加熱処理法の今後の展望



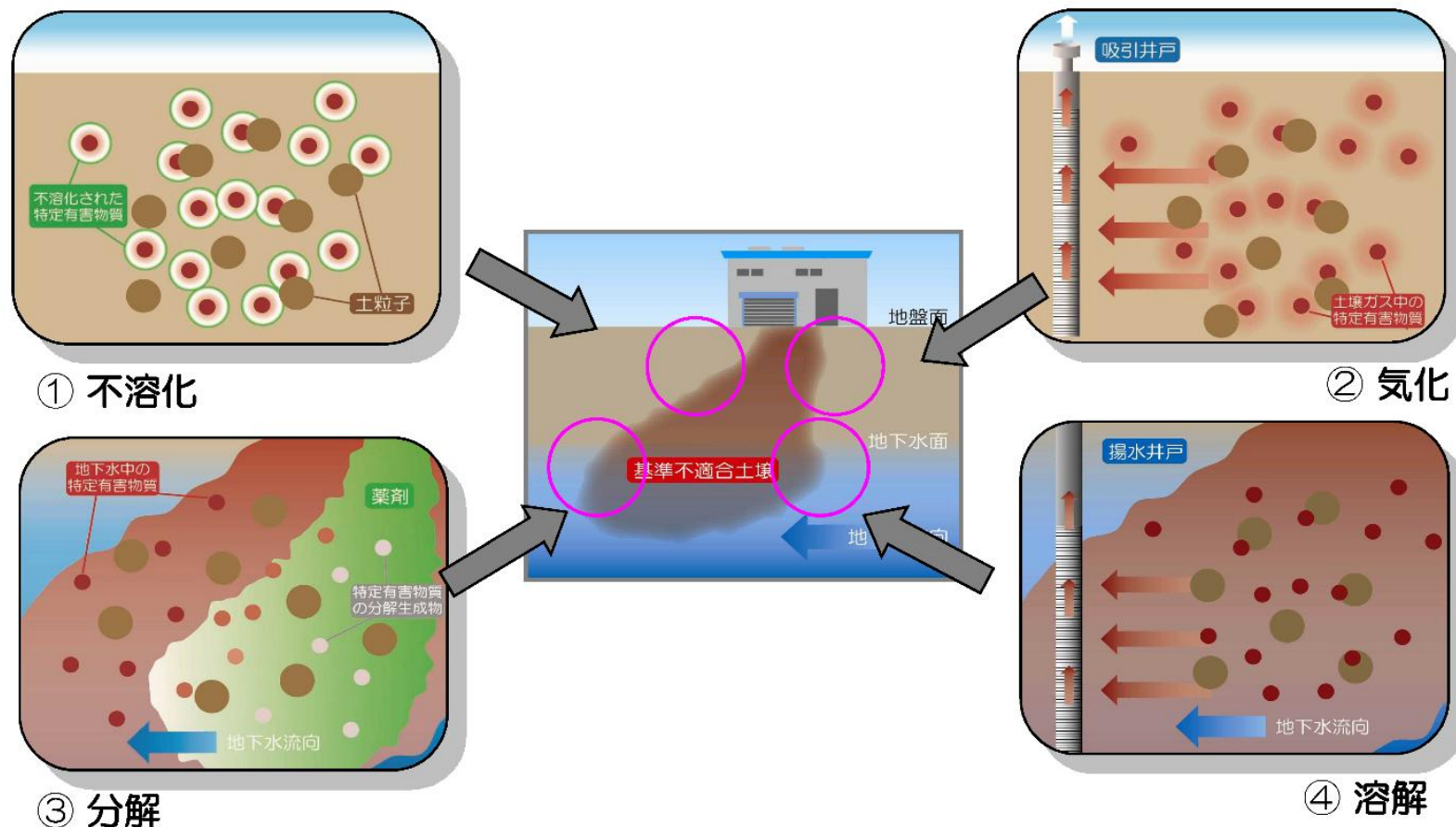
1. 原位置浄化の現状と課題 土対法における原位置浄化の位置づけ



本セミナーでは、
原位置浄化とし
ての加熱処理法
について説明し
ます。

※区域内措置優良化ガイドブック（改訂版）（令和2年4月 環境省）より抜粋

1. 原位置浄化の現状と課題 原位置措置のメカニズム



図ー4 土壤汚染に対する措置のメカニズム

※区域内措置優良化ガイドブック（改訂版）（令和2年4月 環境省）より抜粋

- ①「不溶化」は、特定有害物質を水に溶けないような状態に変化させる方法です。固化も同様な方法です。
- ②「気化」は、揮発性のある特定有害物質が気化した状態になった部分を抽出する浄化方法です。土壤ガス吸引法と呼ばれる原位置浄化法が代表的です。
- ③「分解」は、化学物質や微生物等を用いて特定有害物質そのものを分解する浄化方法です。化学処理（還元分解や酸化分解）、生物処理等が代表的で、オンサイト浄化や原位置浄化が可能です。第一種特定有害物質の分解については、分解生成物も特定有害物質である場合があるので注意が必要です。
- ④「溶解」は、特定有害物質が溶解（ないしは微細な状態で地下水に移流）した地下水を汲み上げた上で特定有害物質を除去するなどして浄化する方法（抽出の一つ）です。地下水揚水法が代表的な例です。



1. 原位置浄化の現状と課題 加熱処理法の位置づけ

土壌汚染の除去	オンサイト浄化	熱処理		○	水銀、シアン化合物	○	掘削した基準不適合土壌を加熱することにより特定有害物質を抽出又は分解した後、埋め戻す方法です。
		洗浄処理		×	○	○	掘削した土壌を機械的に洗浄して特定有害物質を除去した後、埋め戻す方法です。
		化学処理		○	△シアン化合物	○	掘削した基準不適合土壌に薬剤を添加し、化学的に特定有害物質を分解した後、埋め戻す方法です。
		生物処理		○	△シアン化合物	△	基準不適合土壌を掘削し、微生物により特定有害物質を分解、浄化した後、埋め戻す方法です。
		抽出処理		○	×	×	基準不適合土壌を掘削し、真空抽出、あるいは添加剤を添加して土壌温度を上昇させることにより特定有害物質を抽出し捕集した後、埋め戻す方法です。
		磁力選別*2		×	△ほう素を除く。	×	基準不適合土壌を掘削し、磁性吸着材（鉄粉等）を混合して、特定有害物質を吸着させた後、これを磁石で回収し、特定有害物質を除去した後、埋め戻す方法です。
	原位置浄化	原位置抽出	土壌ガス吸引	○	×	×	吸引装置で土壌中に含まれる特定有害物質を回収する方法です。
			地下水揚水	○	○	○	地下水に溶け込んだ特定有害物質を地下水とともに汲み上げるにより、回収する方法です。
			エアースパージング	○	×	×	地下水の中に空気を送り込み、地下水中に含まれる特定有害物質の揮発を促進させ、揮発したガスを回収する方法です。
			加熱脱着*2	○	△水銀	△PCB	土壌中に加熱井戸を設置し、土壌を加熱し、土壌中の特定有害物質の液相への溶出を促進させ分解若しくは抽出、又は気相への揮発を促進させ抽出し回収する方法です。
		原位置分解	化学処理	○	△シアン化合物	△	薬剤を添加し、化学的に特定有害物質を分解する方法です。
			生物処理	○	△シアン化合物	△	微生物により特定有害物質を分解する方法です。
		ファイトレメディエーション		△	△	△	植物により特定有害物質を吸収する方法です。
		原位置土壌洗浄		○	○	○	基準不適合土壌に水や薬剤等を注入して、特定有害物質を溶け出させた後、揚水等によって回収する方法です。

*1 ○:全ての物質に適用可、△:一部の物質に適用、×:適用できない、-:対象外
*2 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(改訂第3版)には掲載されていないが、最新技術として参考を示す。

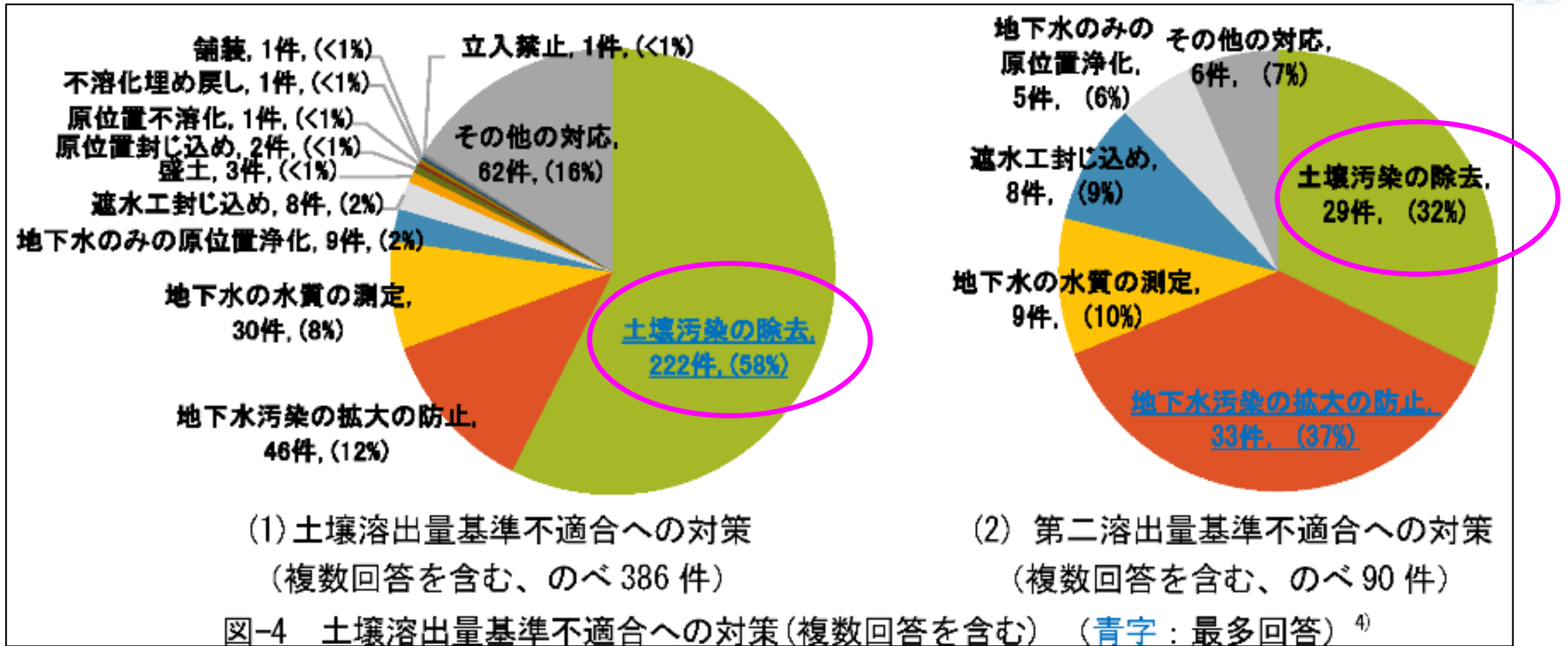
ガイドブックでは、加熱脱着は、「土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改定第3版）」には記載されていないが、最新技術として参考に示す」とされています。加熱脱着は、原位置抽出に位置づけられていますが、加熱処理法の効果は、有害物質の抽出だけではなく、昇温による化学分解や微生物分解の促進、土壌間隙水自体の移動性の向上が起きます。

⇒ 原位置浄化全般の適用性や
確実性を向上する技術
(ハイブリッド浄化)

※区域内措置優良化ガイドブック（改訂版）
（令和2年4月 環境省）より抜粋



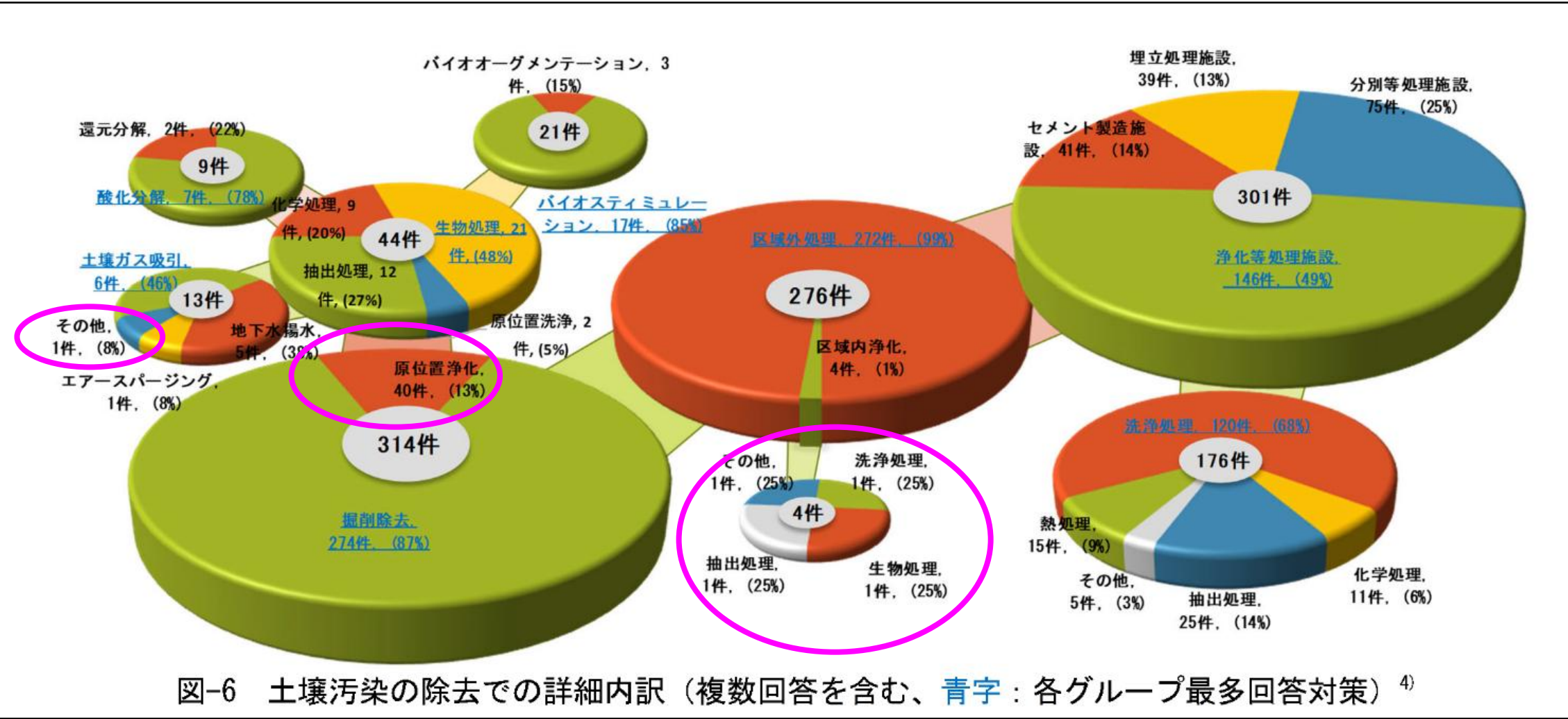
1. 原位置浄化の現状と課題 土壤汚染対策の施行状況



※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（2022年）講演集（pp248から抜粋）



1. 原位置浄化の現状と課題 原位置浄化の施行状況



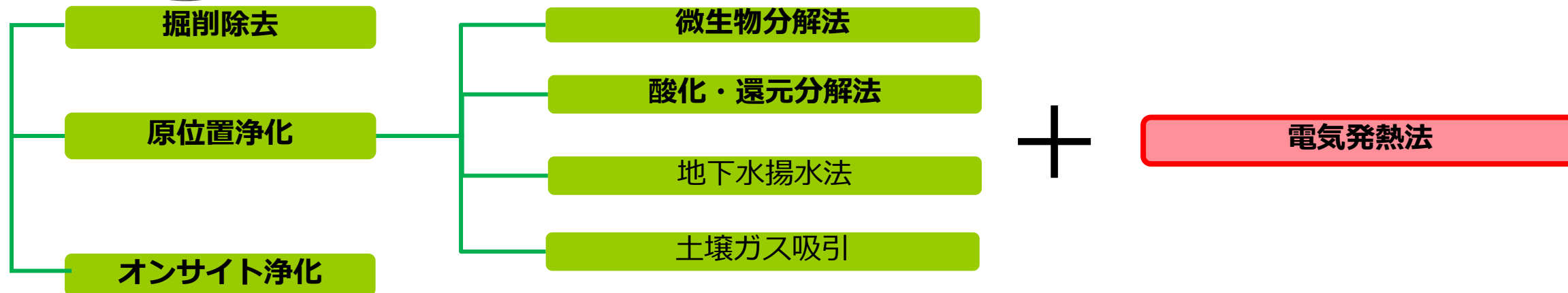
※第27回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会（2022年）講演集（p249から抜粋）

1. 原位置浄化の現状と課題 原位置浄化技術の推移



土壌・地下水汚染浄化（フェーズⅢ）

原位置浄化の適用性拡大、確実性・信頼性向上に向けて



微生物分解法（バイオスティミュレーション）



VOC・汚染対策用
栄養剤(K.O.シリーズ)



栄養剤による原位置浄化の様子

地下水揚水法

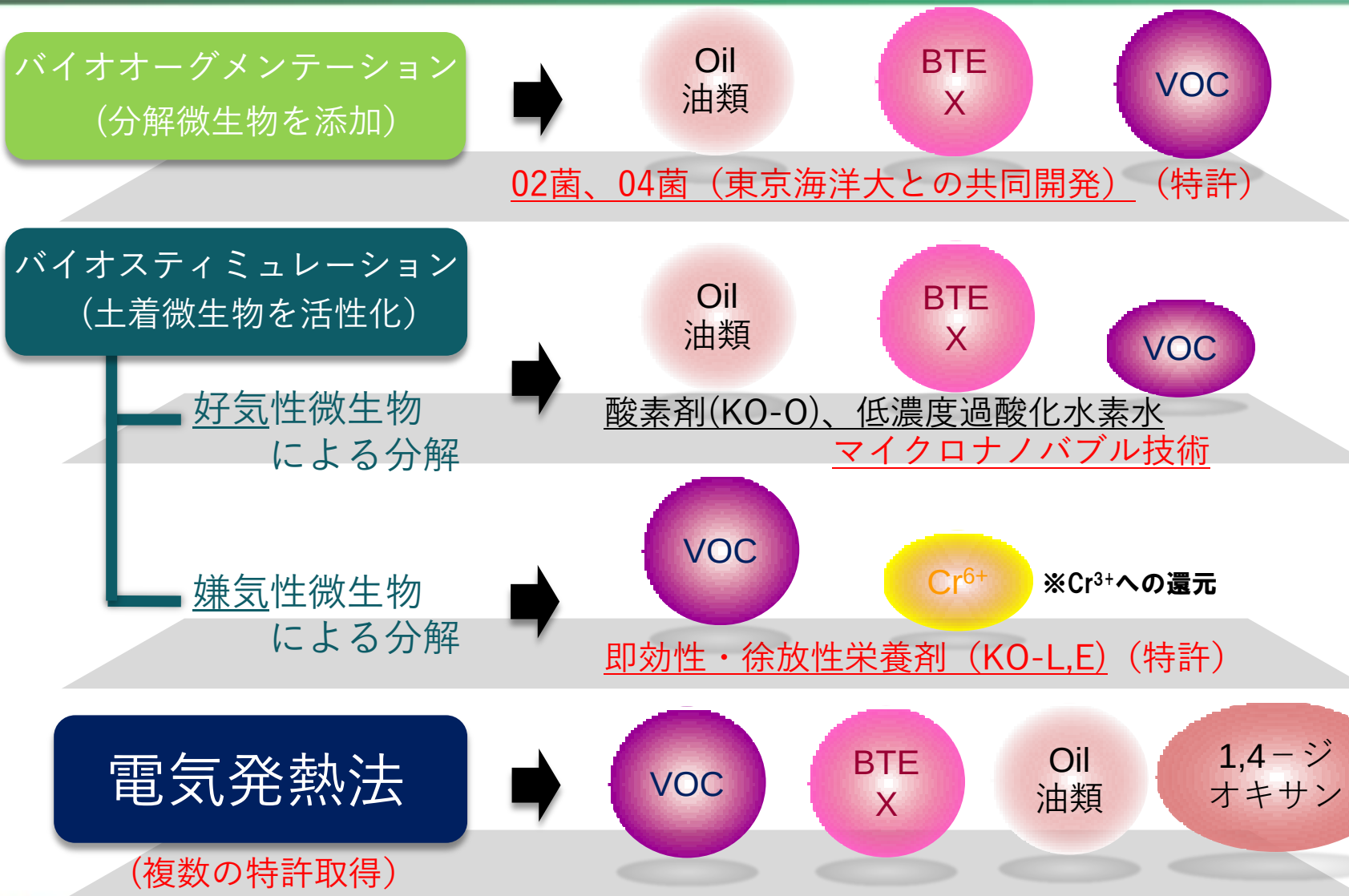


土壌ガス吸引法





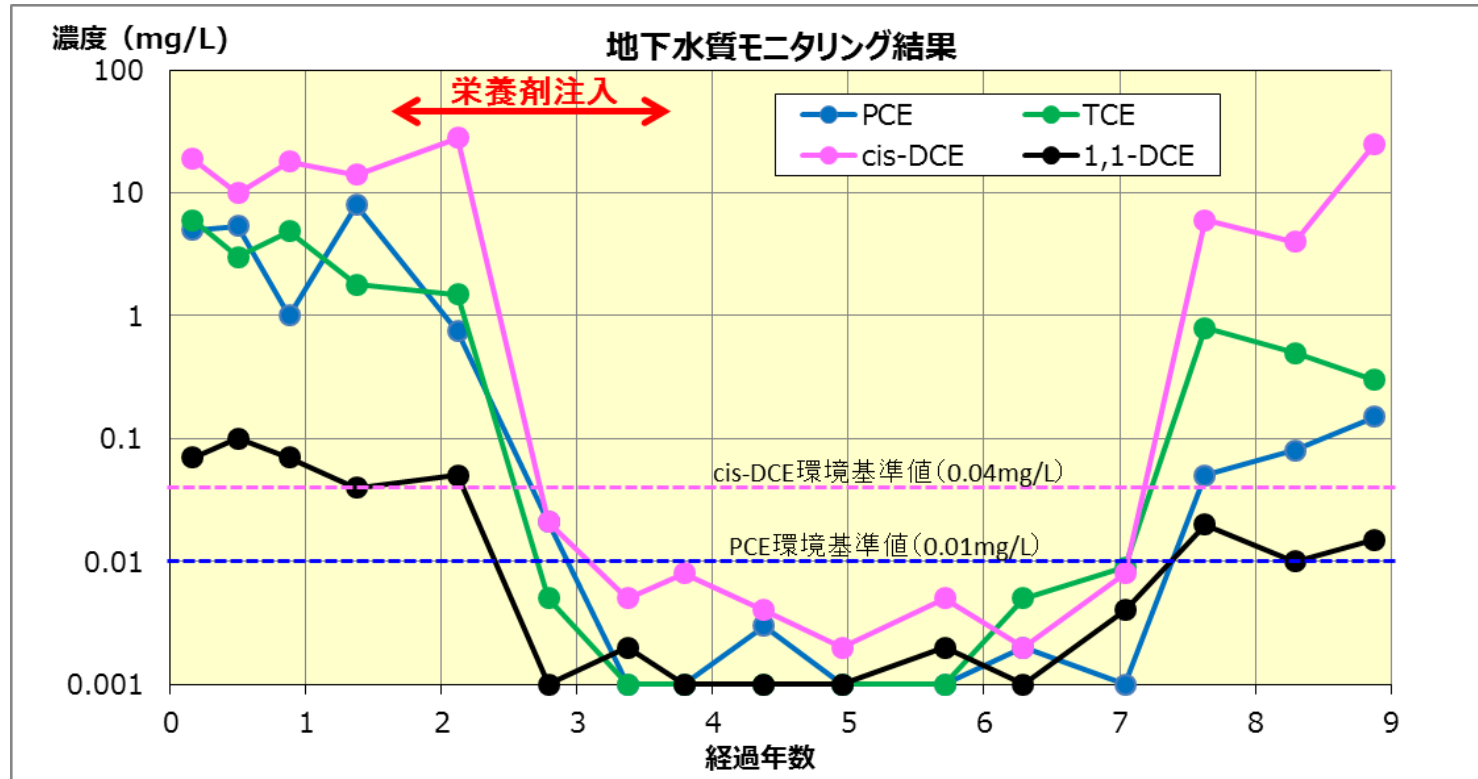
1. 原位置浄化の現状と課題 バイオレメディエーション



原位置上科の課題
が浮き彫りに

- ・地下水への溶出・気化の促進
- ・水蒸気輸送等による移動性の向上
- ・微生物分解や化学分解速度の上昇

1. 原位置浄化の現状と課題 原位置浄化の問題（リバウンドとは？）



実サイトでのリバウンド事例

不十分、又は誤った「評価・計画・施工」による土壌浄化が原因で

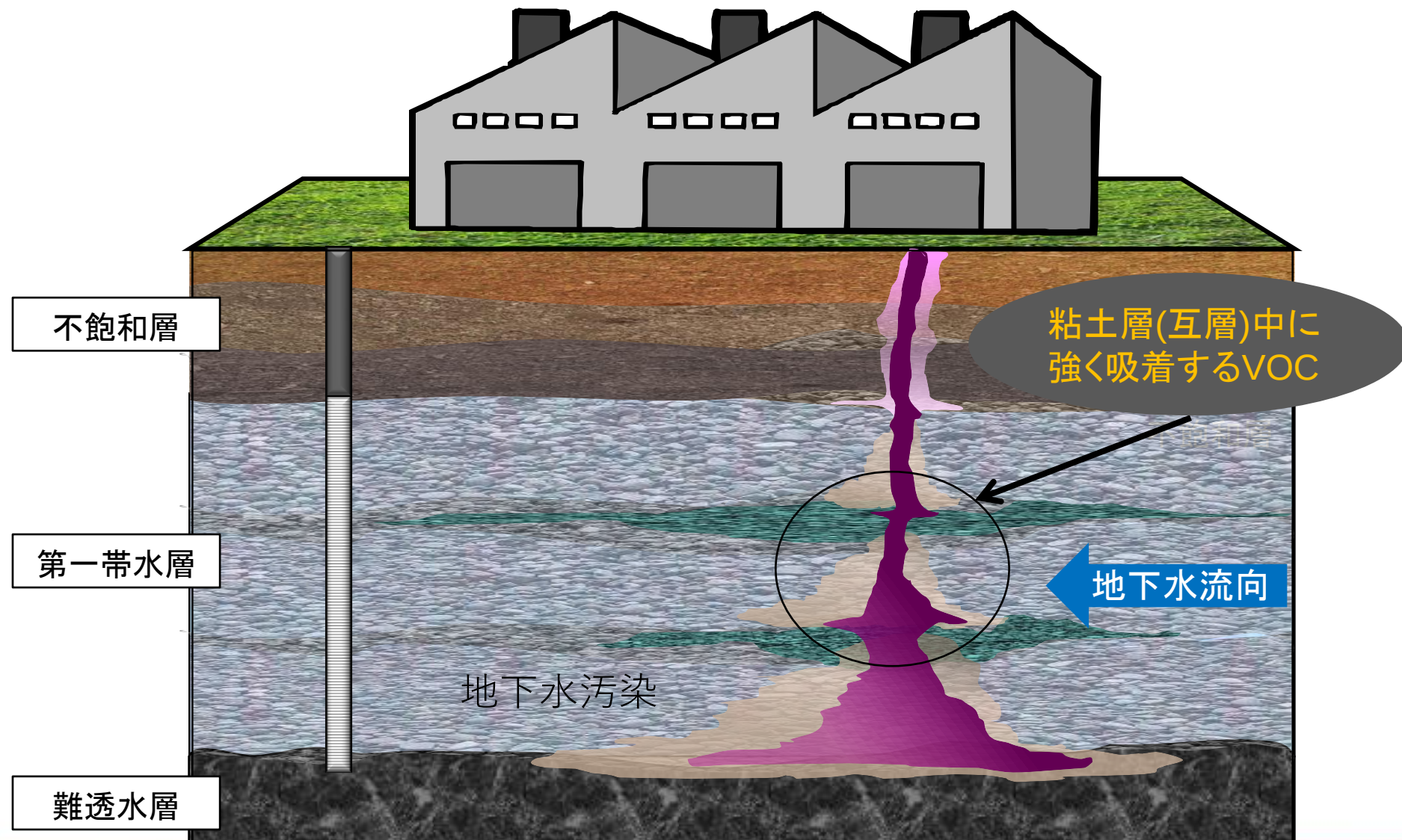
- ・対策完了後に地下水中の汚染物質濃度が上昇すること

⇒特に栄養剤注入によるバイオフィティミュレーションでは、微生物による分解促進効果が持続するため工事完了数年後にリバウンドすることもある。

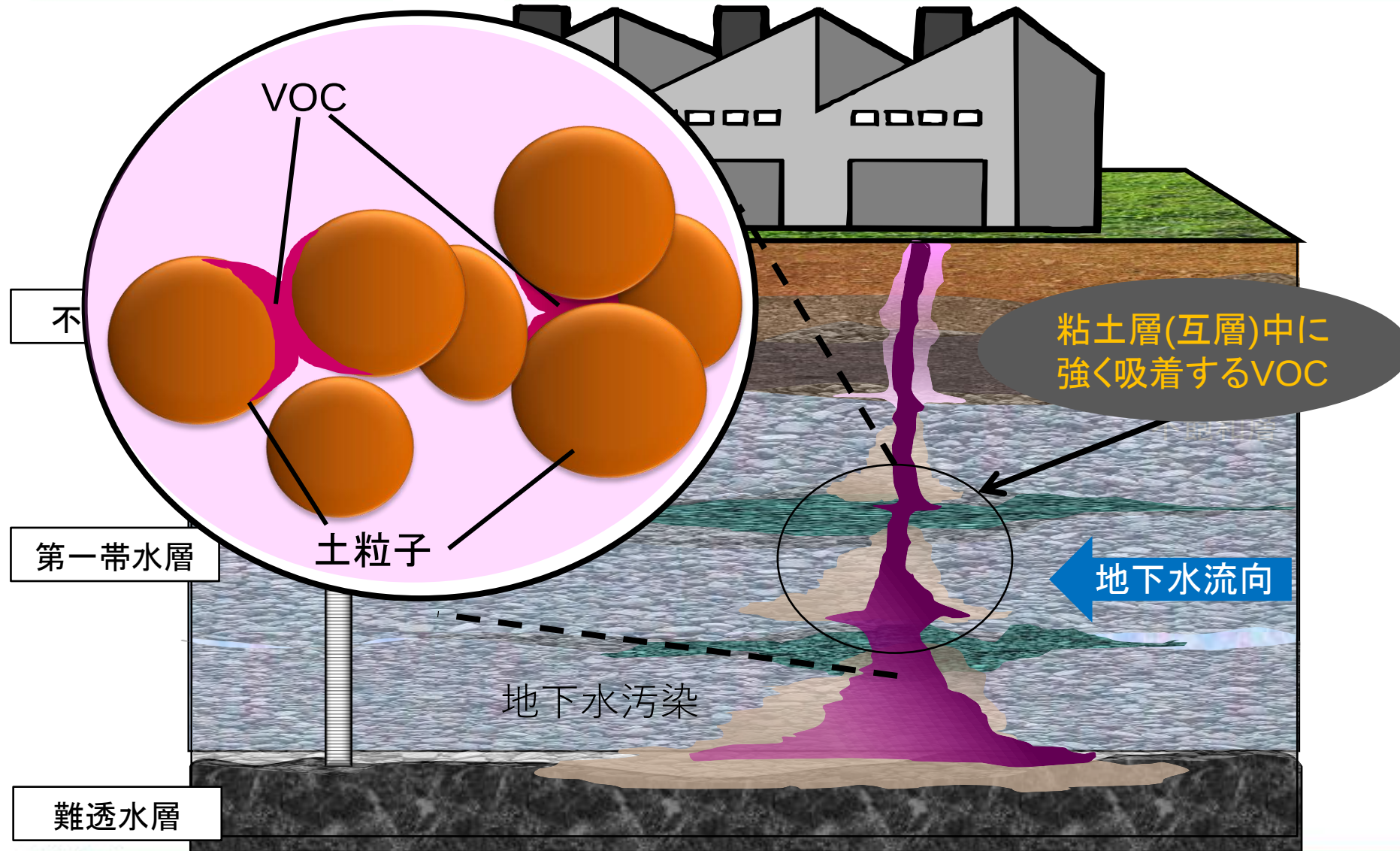
- ・揚水対策を実施しているが、10数年継続しても基準値以下にはまで低下しないこと

いずれの場合も、土壌細孔部に汚染物質が残っていることが要因（具体的には？）

1. 原位置浄化の現状と課題 リバウンドの原因

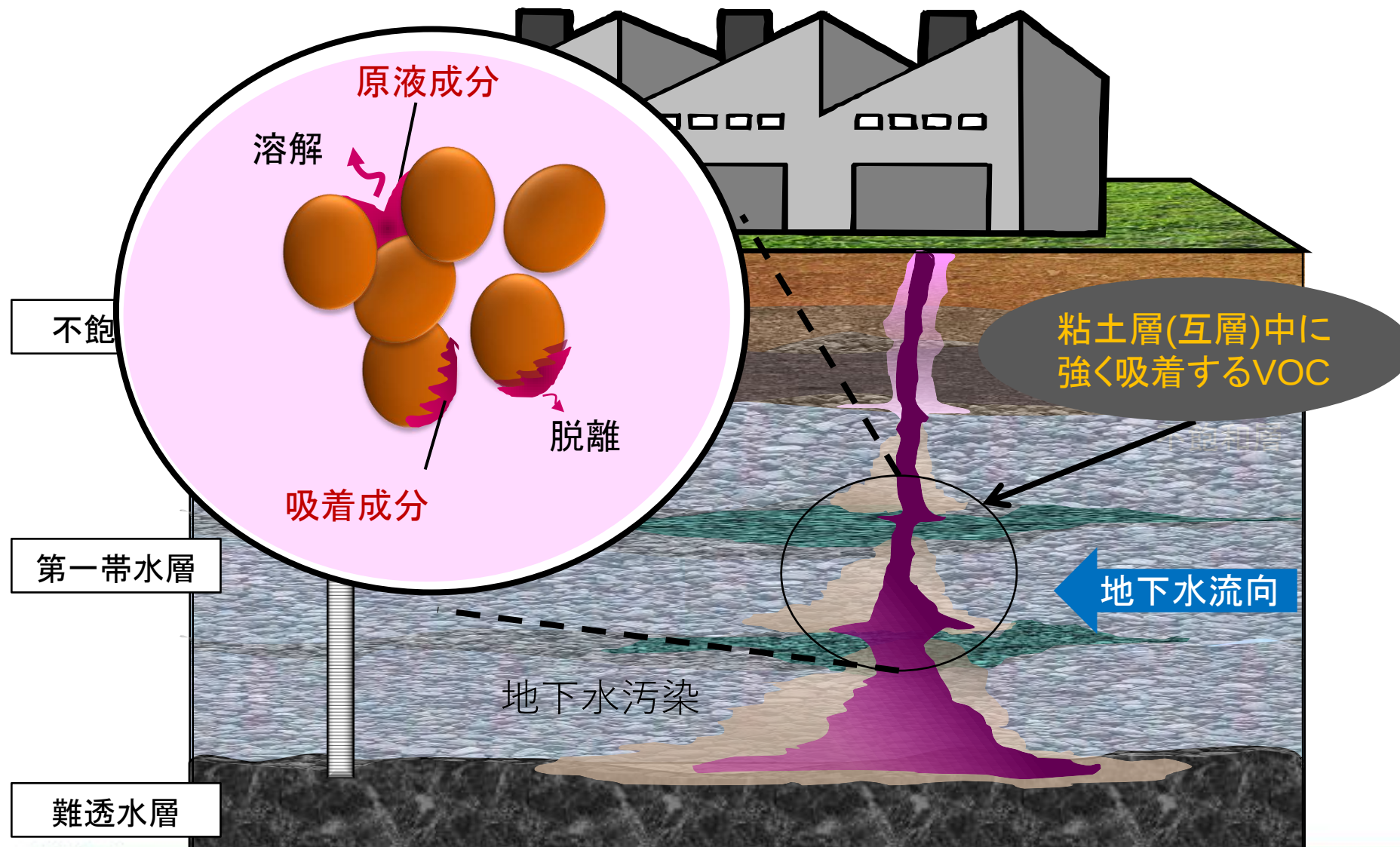


1. 原位置浄化の現状と課題 リバウンドの原因



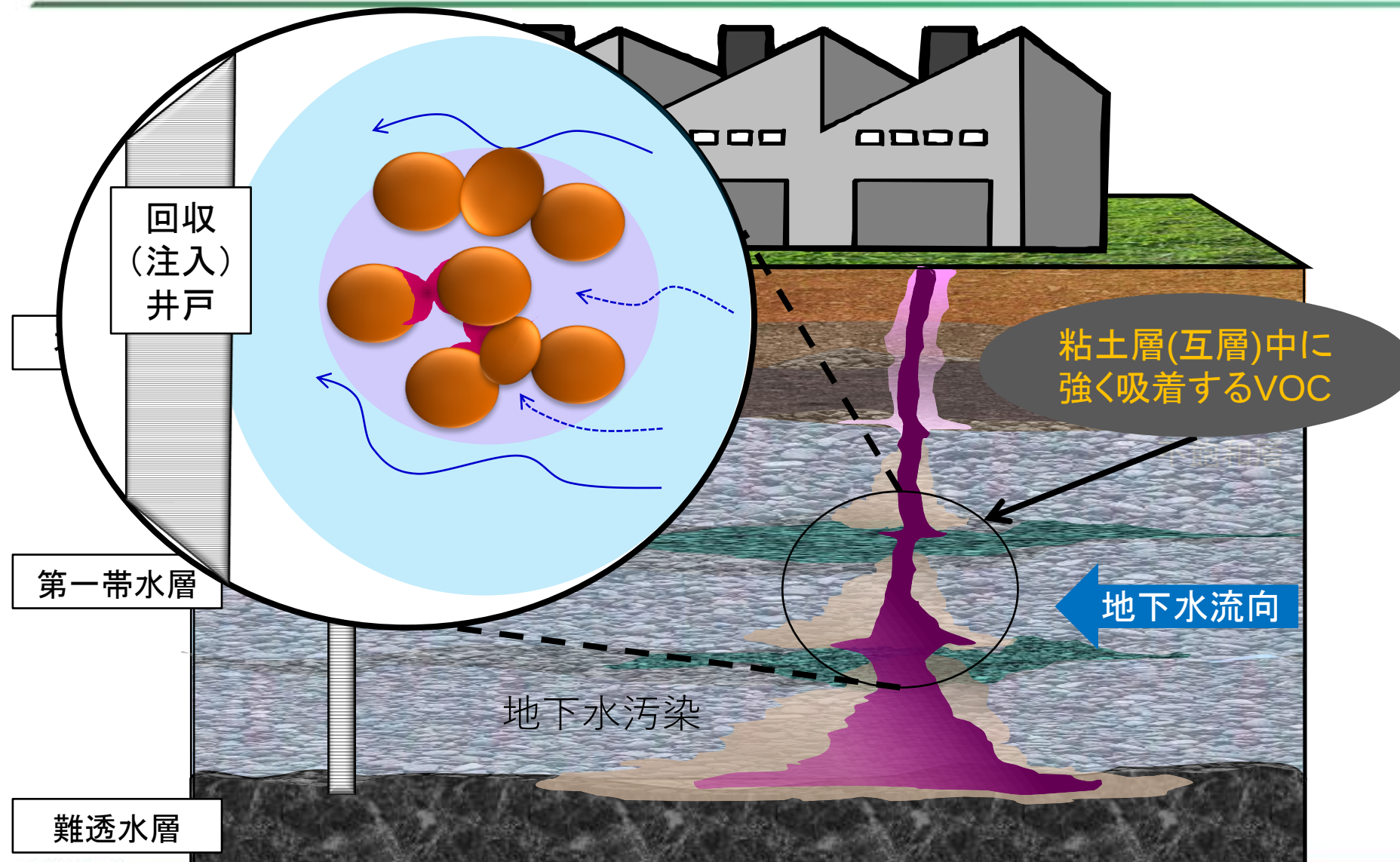
- ①汚染物質の浸透性：
微細な土壌間隙、
袋小路上の土壌間隙
まで浸透する。
- ②非平衡脱着溶解：
土壌吸着成分の脱
離や原液・沈殿成分
の溶解が遅い。
- ③地盤の不均一性：
低透水部では地下水
は流れにくく、
薬剤も届きにくい。

1. 原位置浄化の現状と課題 リバウンドの原因



- ①汚染物質の浸透性：
微細な土壌間隙、
袋小路上の土壌間隙
まで浸透する。
- ②非平衡脱着溶解：
土壌吸着成分の脱
離や原液・沈殿成分
の溶解が遅い。
- ③地盤の不均一性：
低透水部では地下水
は流れにくく、
薬剤も届きにくい。

1. 原位置浄化の現状と課題 リバウンドの原因



- ①汚染物質の浸透性：
微細な土壌間隙、
袋小路上の土壌間隙
まで浸透する。
- ②非平衡脱着溶解：
土壌吸着成分の脱
離や原液・沈殿成分
の溶解が遅い。
- ③地盤の不均一性：
低透水部では地下水
は流れにくく、
薬剤も届きにくい。



1. 原位置浄化の現状と課題 従来の原位置浄化技術の限界

粘土層やシルト層に汚染があると

- ・ 揚水や薬剤注入（栄養剤、酸化剤）では土壌の浄化ができない。
⇒ 掘削除去は、高額な対策費用の発生、操業の休止が伴う
- ・ 土壌浄化ができない場合には、汚染地下水の拡散防止を継続する。
⇒ 継続的な維持・管理コストの発生、敷地内土壌汚染の拡大



維持管理費用で操業継続が困難、土地取引や開発を断念、塩漬けの土地を保有し続ける必要
企業活動に多大な影響

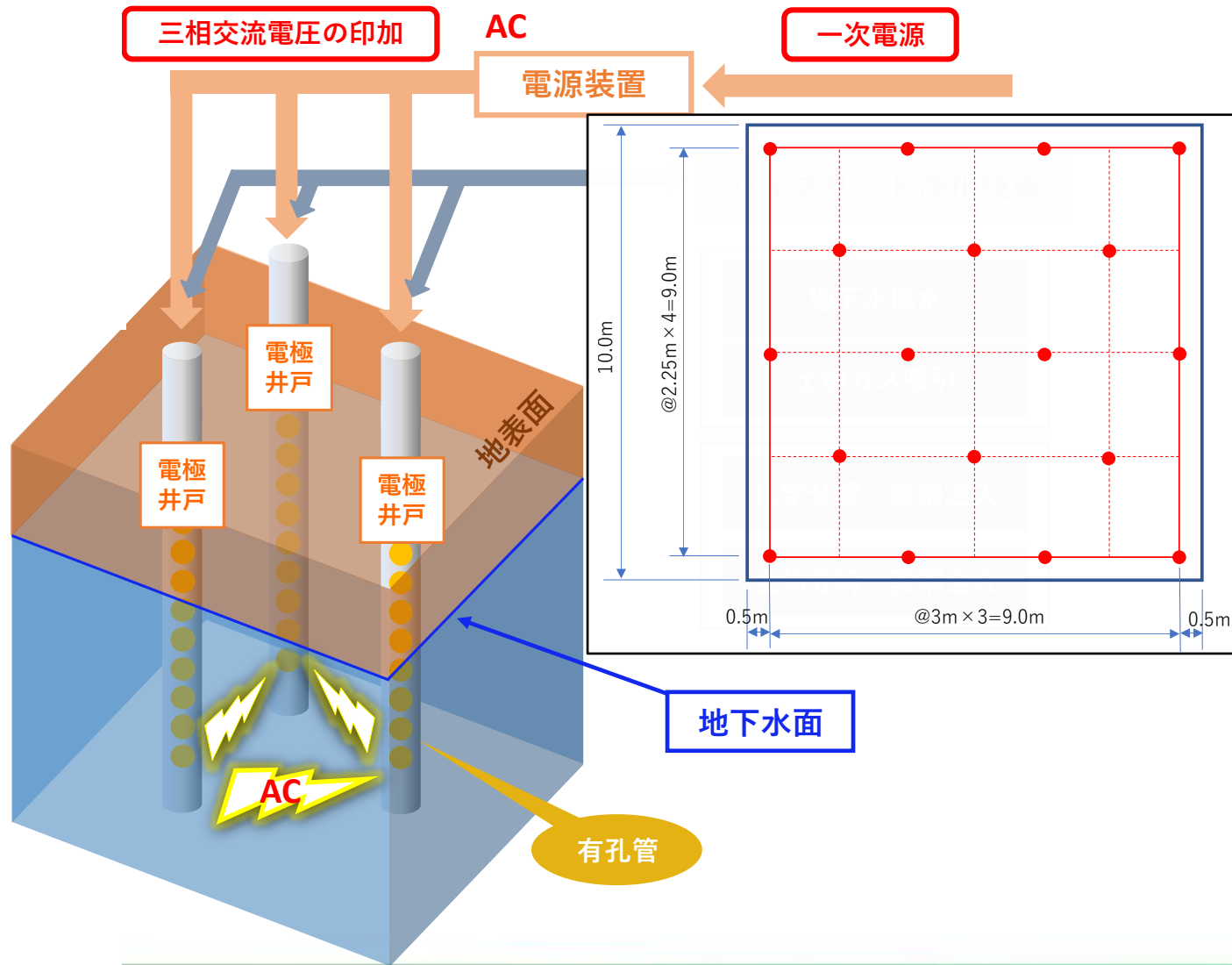
このような中「**電気発熱法ハイブリッド浄化**」が注目されています。

- ・ 加熱処理法に位置づけられる**VOCや1,4-ジオキサンを対象とした原位置浄化技術**
- ・ 従来の原位置浄化技術と異なり、特に粘性土に浸透した汚染物質に対し有効な浄化方法
- ・ 帯水層だけでなく、不飽和帯に対しても有効
- ・ 操業を継続しながら施工が可能（事業継続に対する影響を最小化）
- ・ バイオ・揚水、ガス吸引と比べると**浄化期間が短い**（土地取引にも対応可能）



1. 原位置浄化の現状と課題
2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績
4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例
 - 4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例
 - 4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例
 - 4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
 - 4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
5. 加熱処理法の今後の展望

2. 電気発熱法の原理及び特徴 加熱処理法としての電気発熱法



- ・ 地盤に電極井（ $\phi 40\text{mm}$ 程度の鋼管）を三角形の対になるように配置
- ・ 電源装置で三相交流電圧（25～200V）を印加

電極間に電流が流れ、抵抗体となる土壌自体をジュール熱で昇温（30～90℃）する技術

電気抵抗加熱法的一种であるが、他の加温の方法（スチームやヒーター）と区別するため電気発熱法と称している



2. 電気発熱法の原理及び特徴 電気発熱法の特徴と効果

○特徴（他の加温法：ヒーターやスチームと比べると）

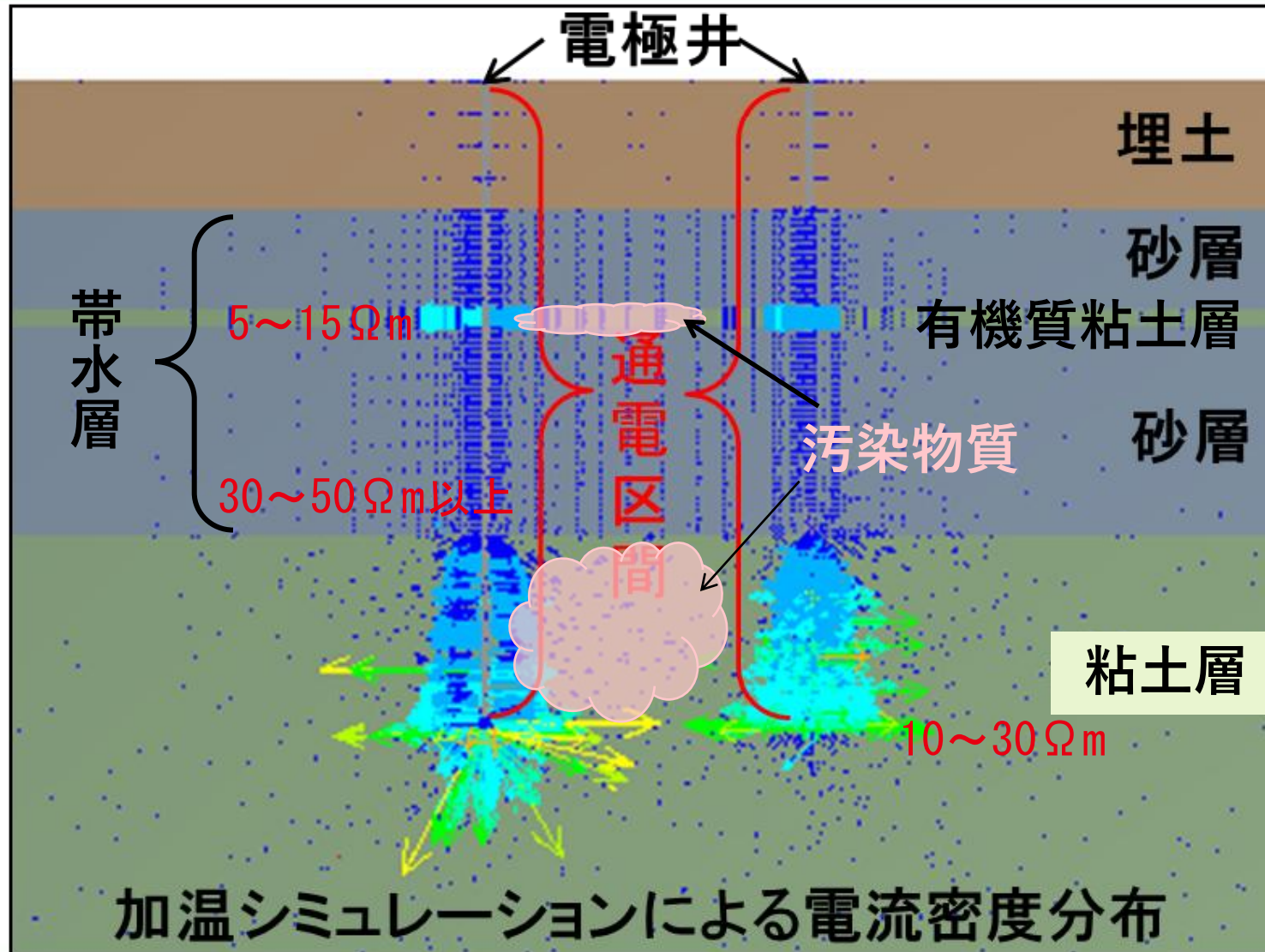
- ・ 電気抵抗の低い粘土層のほうが電流が流れやすいので昇温しやすい（スチームでは加温が困難）
- ・ 熱伝導ではなく、土壌自体を発熱させるため均一に昇温できる
- ・ 印加電圧を調整することで、任意温度でのコントロールが可能
- ・ 熱効率が良く、昇温に必要な消費電力が熱伝導（ヒーター）と比べ小さい

○土壌浄化に対する効果

- ・ 土壌の細孔部に存在する汚染物質自体の地下水へ溶出や気化を促進
- ・ 加温によるガス圧の上昇、水の粘性低下、体積膨張、水蒸気輸送等による土壌間隙に存在する間隙水自体の移動性の向上
- ・ 至適温度にまで加温・保温することで、VOCの「微生物分解」、「化学反応」の促進

粘土層に浸み込んだVOCや難分解性物質に対する有効な浄化手法

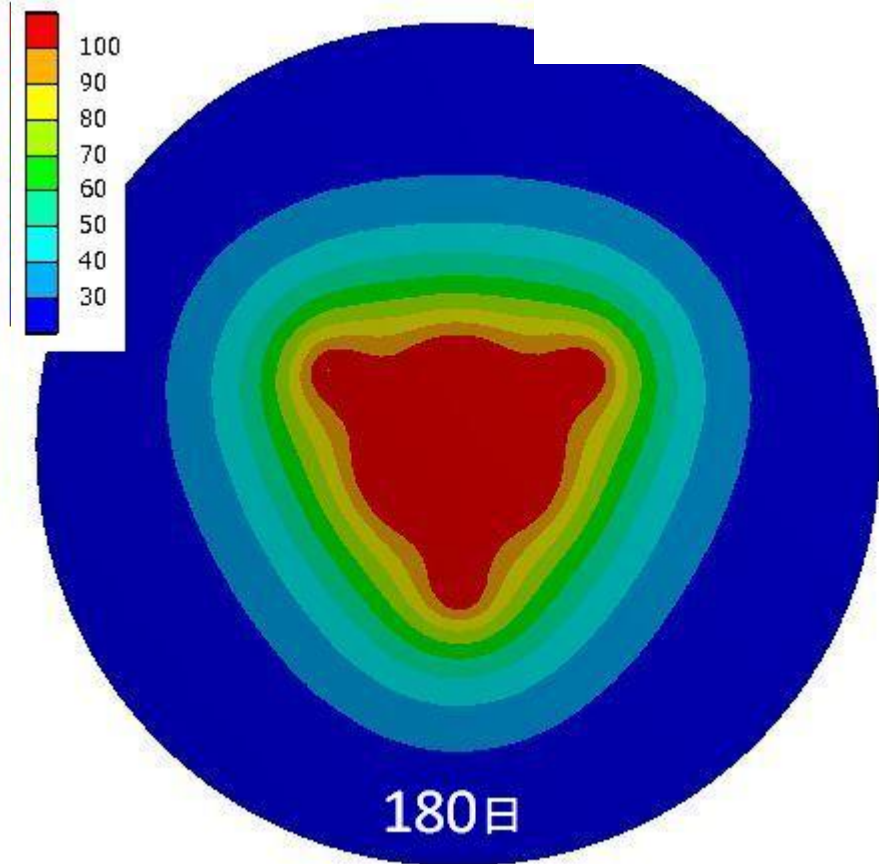
2. 電気発熱法の原理及び特徴 粘土層に対する有効性



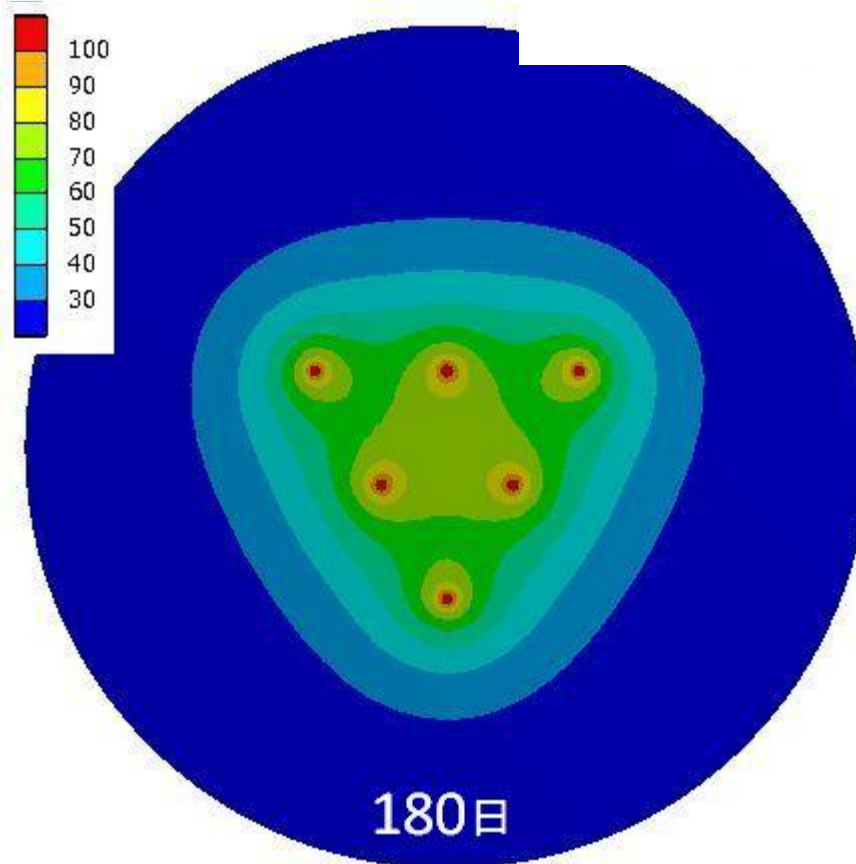
VOCは長年の年月をかけ、粘土粒子の細孔部にまで浸透して存在

- 従来の原位置浄化技術は、基本的に水を介して進むため、粘土層に対して効果は期待できない。
⇒揚水では出てこない、注入法では薬剤が行き渡らない。
- 電気発熱法は、土壤自体を抵抗体として発熱する技術であり、砂質土より粘性土のほうが電気抵抗が小さいため電気が流れやすい。
⇒粘性土のほうが昇温しやすい（従来の工法とは反対の特徴）

2. 電気発熱法の原理及び特徴 均一な温度上昇が可能



【電気発熱法による加温】



【熱伝導による加温】

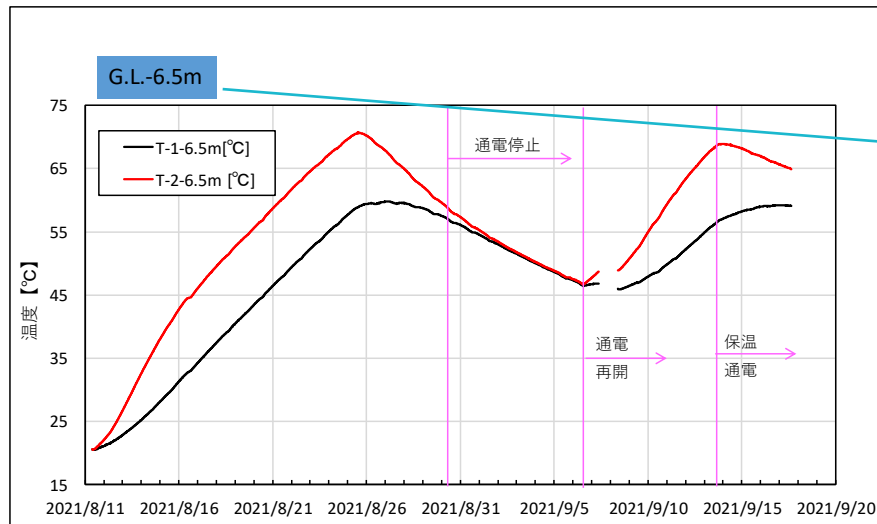
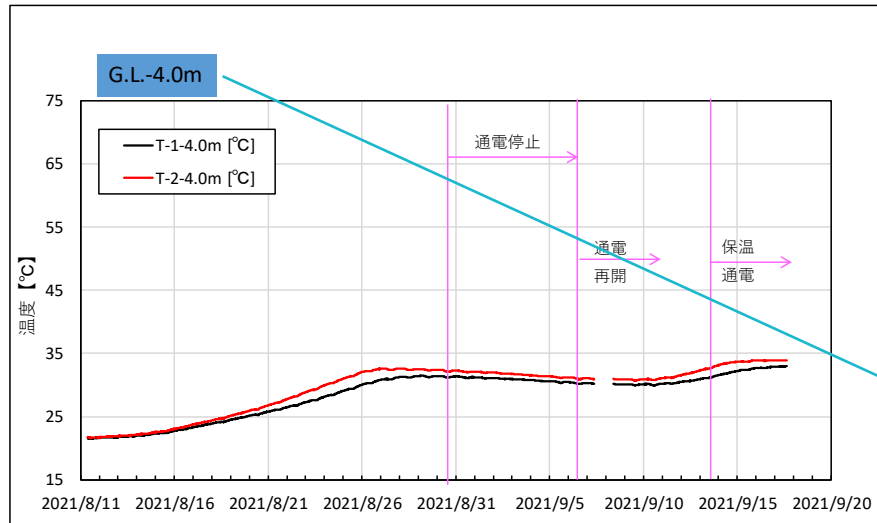
左図は、電気発熱法と熱伝導で同じ電力量を投じた場合の温度変化を解析した結果



熱伝導では、電力を投入し続けても、電極周辺でしか温まらない。
電気発熱法では、電極間の土壌自体が発熱することで昇温することから、均一且つ少ない電力で温めることができる。



2. 電気発熱法の原理及び特徴 任意の温度でのコントロールが可能



粘土層は50℃以上にしつつ、帯水層であり知るとなじり砂礫層は、30～35℃程度に保つ必要があった。



- ・電極構造（通電深度）及び電極配置を事前の熱解析に設計
 - ・印加電圧の調整
 - ・非通電期間の設定
- 等により、土壌温度を三次元的にコントロールすることも可能となる。



2. 電気発熱法の原理及び特徴 浄化に必要なとなる電気代

【浄化事例1】 飽和帯の粘性土層におけるテトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、シス-1,2-ジクロロエチレンによる土壌・地下水汚染

○浄化期間：5か月、電気代：3,360円/ m³（浄化汚染土量）

【浄化事例2】 ローム層におけるベンゼン、トルエン、キシレンによる土壌汚染

○浄化期間：6か月、電気代：2,880円/ m³（浄化汚染土量）

【浄化事例3】 ローム層におけるトリクロロエチレン、ジクロロエチレン、クロロエチレンによる土壌汚染

○浄化期間：10か月、電気代：1,910円/ m³（浄化汚染土量）

【浄化事例4】 飽和帯の粘性土層におけるテトラクロロエチレンによる土壌・地下水汚染

○浄化期間：10か月、電気代：5,160円/ m³（浄化汚染土量）

※テトラクロロエチレンの土壌溶出量が50mg/Lと高濃度であったことから時間を要した

【浄化事例5】 飽和帯の粘性土層におけるベンゼンによる土壌・地下水汚染

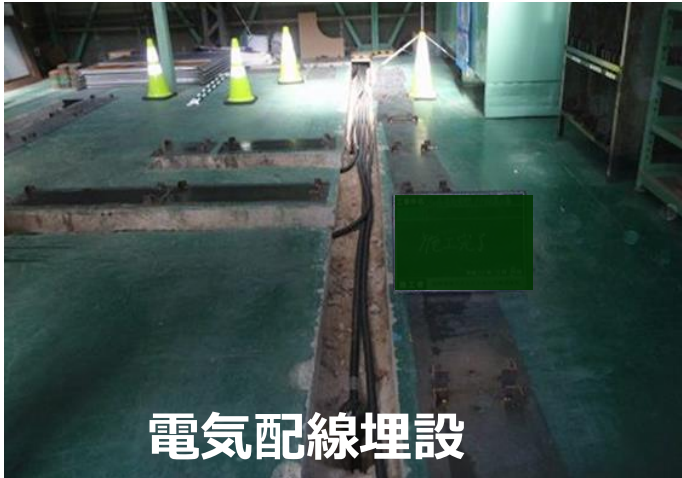
○浄化期間：14か月、電気代：6,730円/ m³（浄化汚染土量）

※ベンゼンの土壌溶出量が24mg/Lと高濃度であったことから時間を要した

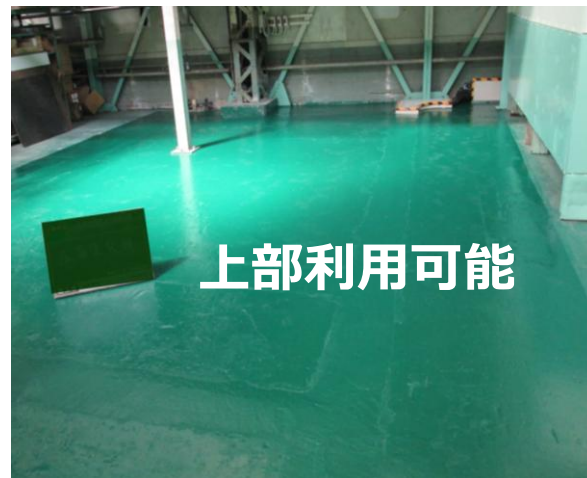
2. 電気発熱法の原理及び特徴 作業中の工場の施行が可能



電極井戸設置



電気配線埋設



上部利用可能



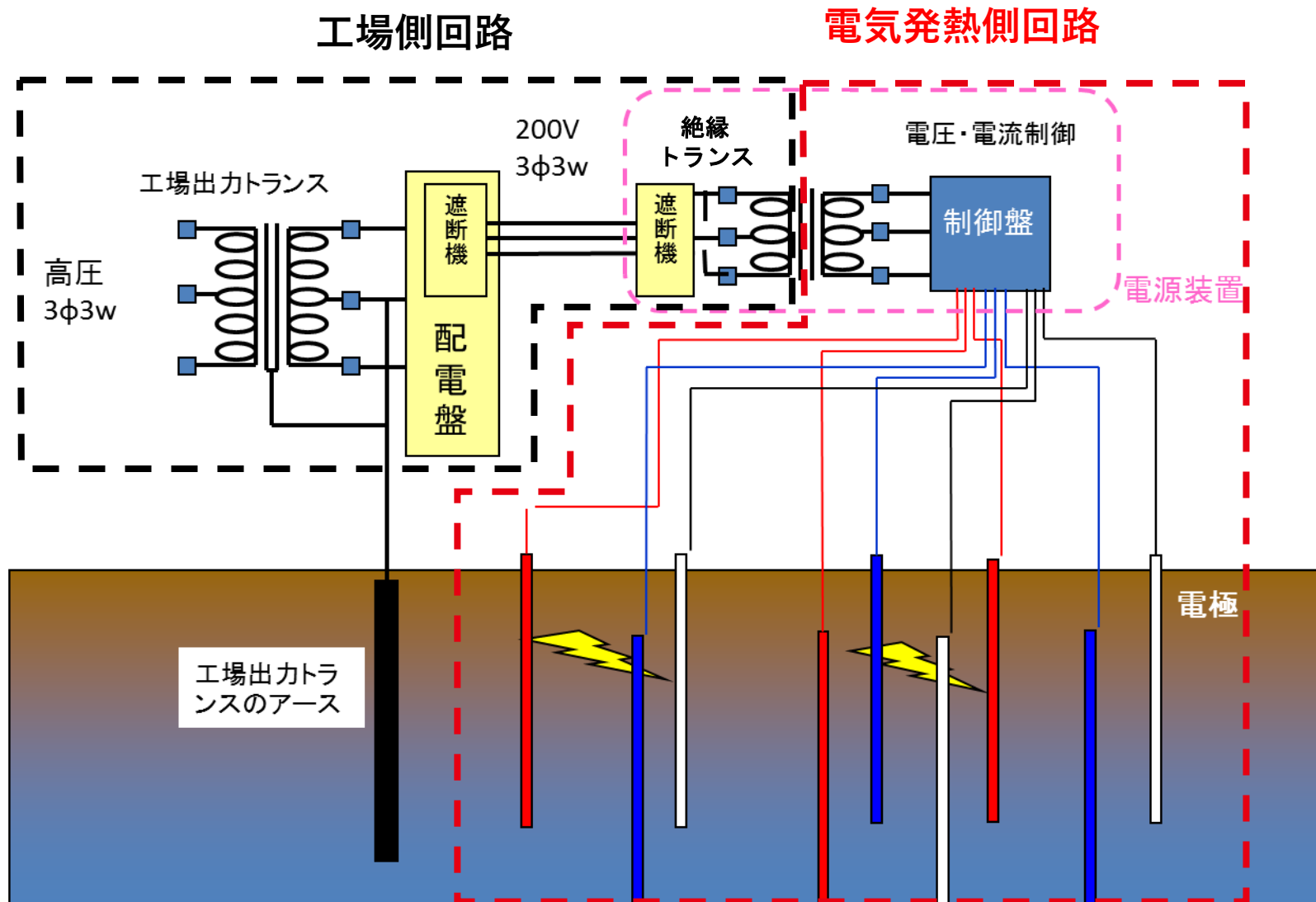
電源装置



電極井戸設置

- ・ 電極井戸（ $\phi 40\text{mm}$ 程度の鋼管）は、自走式ボーリングマシンで設置（人力で実施した事例もあり）
- ・ ピットや工場設備などの障害物を避けて設置することも可能（電極井戸は均等に配置できなくても、均一に加温することが可能）
- ・ 井戸・配線を埋設することで上部利用も可能
- ・ 電源装置・ガス回収装置等の設置スペース（最小 10m^2 程度）があれば実施可能（装置は全天候型で屋外に設置することも可能）
- ・ 10m区画の浄化に対し、工場で一般的に使用される電気容量（三相200V、100～200A程度→対策対象の層厚による）で浄化対策が可能

2. 電気発熱法の原理及び特徴 安全性



電源装置では、絶縁トランスを介して地盤に通電

工場側の電力供給回路と電極井戸とは電氣的に切り離しているため、電気が工場側の回路に流れ込む（迷走電流）ことはない。
⇒これまでの施工実績でも問題となったことはない

交流電氣を利用

地下配管やタンクの腐食（電食）は発生しない



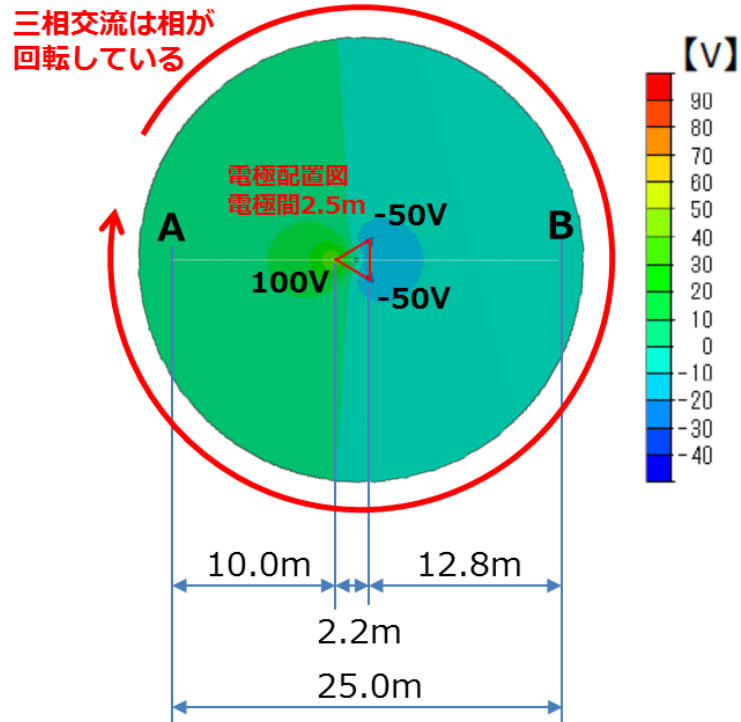
2. 電気発熱法の原理及び特徴 安全制御装置

機 能	仕 様	効 果
一次漏電ブレーカー	①三相交流 200V 20A ②20Aの漏電感度：30mA	①過電流時、一次漏電ブレーカー遮断 ②漏電時、一次漏電ブレーカー遮断
絶縁トランス 4kVA	③漏れ回路防止 ④トランス温度検知	③漏れ電流の未然防止 ④トランスの過熱時、一次漏電ブレーカー遮断
電力制御回路 (20A×3回路)	⑤回路内ヒューズ ⑥異常制御検知	⑤回路内過電流発生時電極通電停止 ⑥制御異常発生時一次漏電ブレーカー遮断
土壌温度上限制御	⑦土壌温度検知	⑦設定した土壌温度到達時一次漏電ブレーカー遮断
電極出力端子	⑧ヒューズ 20A	⑧電極過電流発生時、熔断して電極通電停止
フロートスイッチ	⑨フロート式表層水位検知	⑨洪水時、一次漏電ブレーカー遮断
非常停止	⑩非常停止ボタン	⑩非常時、一次漏電ブレーカーを強制的に遮断
遠隔監視システム	⑪各電極電流値・土壌温度・電極温度の測定・監視	⑪遠隔で通電のON・OFFも可能

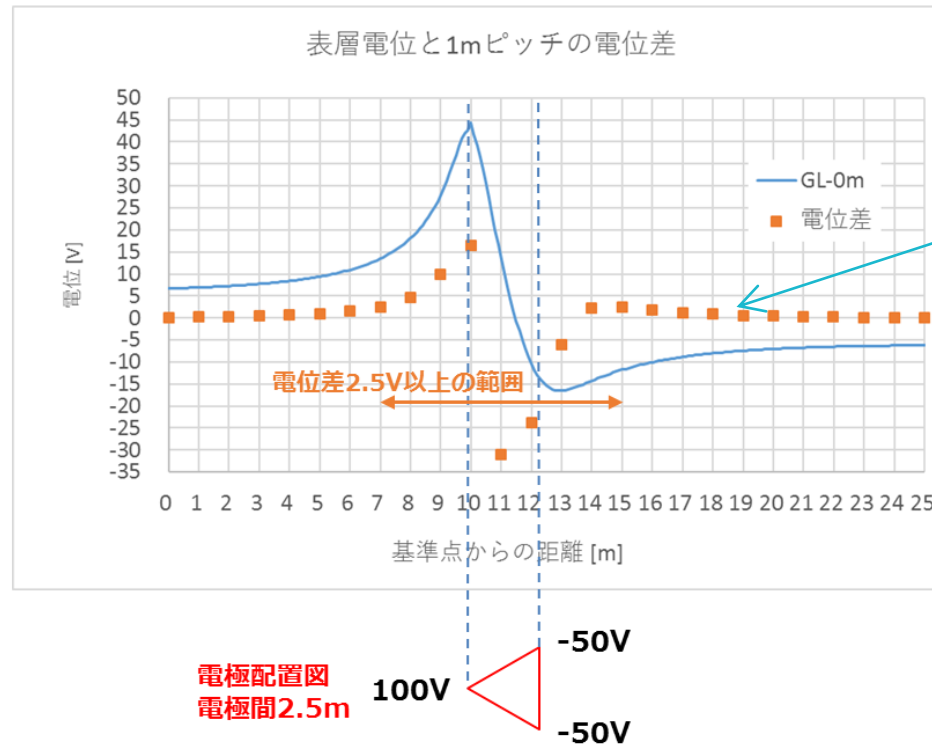
2. 電気発熱法の原理及び特徴 人体への影響（１）



三相交流の瞬時値(実効値100V) 表層電位



A-B断面電位図



電極間に100Vの三相交流を印加した場合の表層における電位のシミュレーション結果

※は、人の両足の幅、約1m間の電位差

通電エリアから3～4m程度離れば、第1種の接触状態（次ページ参照）である2.5V以下となり、感電事故の懸念はない。
なお、通電エリア内で作業を行う場合、一時的に通電を停止することも可能



2. 電気発熱法の原理及び特徴 人体への影響（2）

接 触 状 態		許容接触 電圧	場 所
第1種	・ 人体の大部分が水中にある状態	2.5V 以下	浴槽、プール、水槽、池、沼
第2種	・ 人体が著しく濡れている状態 ・ 金属製の電気機械装置や構造物に人体の一部が常時触れている状態	25V 以下	浴槽、プール周辺、池の周辺、トンネル工事現場などの湿気や水が著しく存在する場所
第3種	・ 第1種、第2種以外の場合で、通常の人体状態において接触電圧が加わると、危険性が高い状態	50V 以下	住宅、工場、事務所などの一般的な場所
第4種	・ 第1種、第2種以外の場合で、通常の人体状態において接触電圧が加わっても危険性の低い状態 ・ 接触電圧が加わるおそれが無い場合	制限なし	電路に人が触れるおそれのない場所、あるいは、隠蔽場所

出展：(社)日本電気協会の「低圧電路地絡保護指針」
中央労働災害防止協会「低圧電気取扱安全必携 特別教育用テキスト」

出展：高橋健彦博士 著
「図解接地技術入門 昭和61年発行」

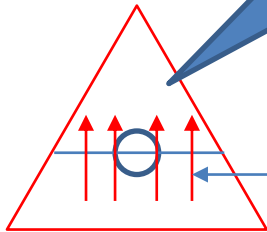
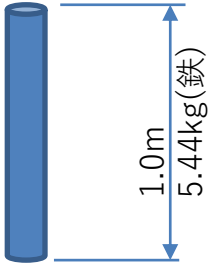
接触電圧：大地に立っている人が充電部に触れて電撃を受けたとき、人体に加わる電圧
許容接触電圧：人が接触しうる状況に応じて、許容しうる接触電圧

2. 電気発熱法の原理及び特徴 電食

直流による電蝕は、その電気量からファラディの法則にしたがって腐食量が理論的に計算できる。
鋼管を埋設した場合の電蝕量の計算例を以下に示す。

金属	原子価	化学当量	0.605A,半年間の電気量 により電解される量[g] F=96500C/mol
鉄	2	27.92	2760
銅	2	31.77	3140

埋設鋼管
呼び径50A=Φ0.0605m
長さ=1m
断面積=0.0605m²



土壌電流：40A

通電断面積2.5m×1.7m=4m²
電流40A(計画電流)
電流密度40÷4=10A/m²
鋼管電流0.0605×10=0.605A

交流による電蝕の程度を調査した例は少ないが、室内試験データを示す。
腐食比とは、直流電流密度の腐食量(理論値)に対して、同一の交流電流密度の腐食量の割合[%]

金属	交流電流密度 50Hz [mA/cm ²]	媒体	直流に対する 腐食比 [%]	金属	埋設鋼管に交流を流した場合の腐食量[g]
鉄	7.7	中性土壌	0.04	鉄	2760 × 0.04/100 = 1.1g
	15.5	中性土壌	0.04	銅	3140 × 0.08/100 = 2.5g
	46.5	中性土壌	0.05		
銅	15.5	中性土壌	0.08		

出展：高橋健彦博士 著「図解接地技術入門 昭和61年発行」



1. 原位置浄化の現状と課題
2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績
4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例
 - 4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例
 - 4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例
 - 4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
 - 4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
5. 加熱処理法の今後の展望

3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 ハイブリッド浄化の必要性



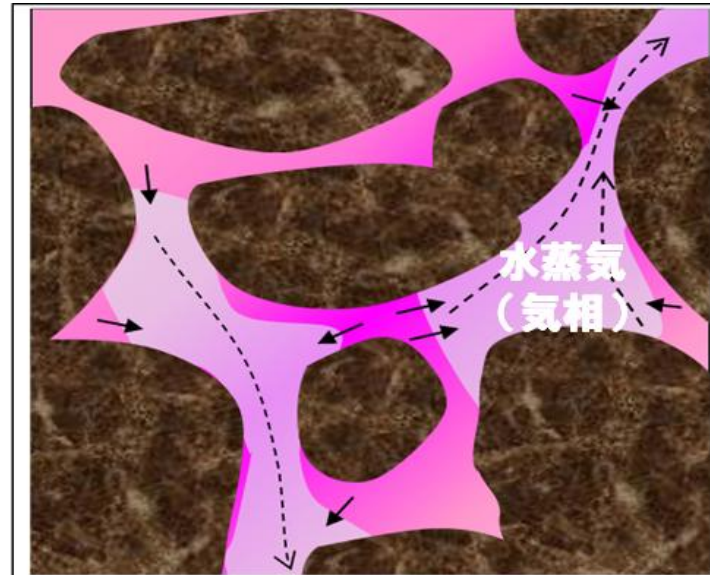
○電気発熱法による粘土層の昇温

複数の浄化事例により、粘土層に浸透したVOCの
原位置土壌浄化技術として電気発熱法の有効性を確認

- ・ 土壌細孔部に浸透したVOC自体の地下水や土壌ガスへの移行促進
- ・ 水蒸気輸送等による土粒間隙水自体での移動性の向上
- ・ 土壌含有量(全量分析)の低下⇒リバウンドリスクの低下

土壌ガス中や地下水中に移行したVOC等の
効果的な回収（分解）方法＝ハイブリッド浄化の開発が必要

- ・ 加温による不飽和帯粘土層からのVOCのガス（水蒸気）回収
- ・ 加温(30～40℃)による微生物分解速度の上昇
- ・ 熱活性条件下（50～70℃）における過硫酸ナトリウムによるVOC
1,4-ジオキサン、難分解物質の分解
- ・ 帯水層に介在する粘土層に存在するVOCの揚水による回収



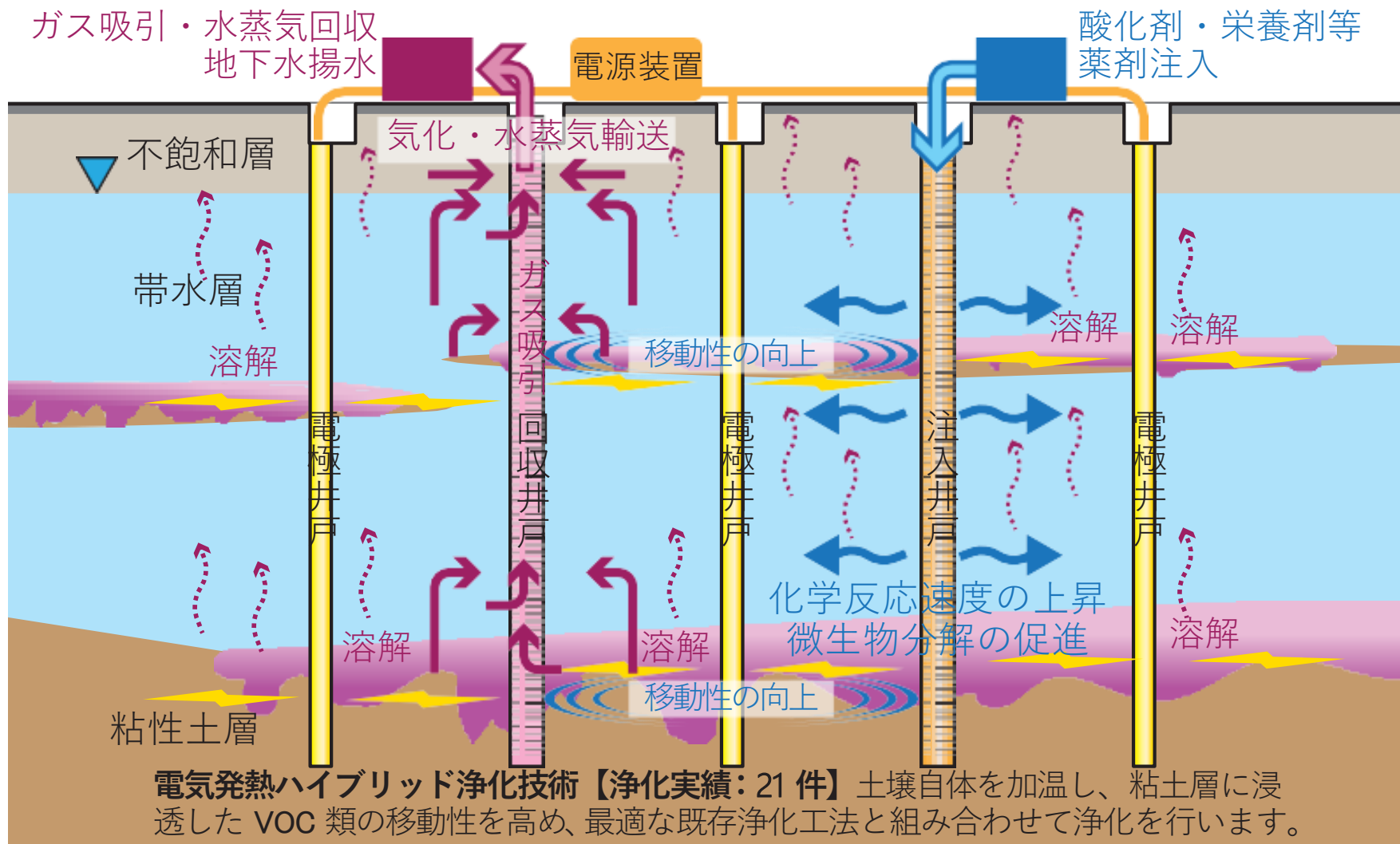
- ・ 水蒸気の発生や水の膨張により、連続した気相が形成される。
 - ・ 水に任意にとける1,4-ジオキサンは水蒸気や空気とともに移動する。
 - ・ 原液状に存在する1,4-ジオキサンも温度上昇により水に溶解する。
- ⇒ガス（水蒸気）吸引により系外へ



3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 ハイブリッド浄化の開発状況

ハイブリッド 浄化	概要及び効果
物理的回収	・ 土壌温度を40～90℃として、土壌ガス、地下水、水蒸気を回収 →土壌間隙から地下水や土壌ガスに移行したVOCを回収することでリバウンドリスクが低減 水の体積膨張や水蒸気の発生により間隙水自体の移動性が高まる効果が大いいため、土壌温度を汚染物質の沸点にまで上昇しなくても十分な回収が可能
化学分解	・ 土壌温度を50℃程度に維持して、過硫酸ナトリウム溶液を注入 →土壌間隙から地下水に移行したVOCを分解することでリバウンドリスクが低減 鉄塩を使用することなく熱的に発生するラジカル（熱活性過硫酸）により、 1,4-ジオキサンなど難分解性の有害物質の分解が可能 通常の地下温度で鉄触媒を用いるより、酸化剤の注入量を1/5～1/10に減らすことが可能
微生物分解	・ 土壌の昇温速度を1日0.5℃に制御し、30～40℃程度で維持し、栄養剤（有機資材）を注入 →土壌間隙から地下水に移行したVOCを分解することでリバウンドリスクが低減 現地に生息する嫌気性微生物が、温度に対し馴化することで、脱塩素化の速度をもとものの 地下水温度（18℃前後）より高めることも可能

3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 ハイブリッド浄化のイメージ



- 物理的回収、化学・微生物分解により、VOCの複合汚染や1,4-ジオキサン、油、難分解性物質の浄化が可能
- 既存の浄化設備の利用、進行中の浄化対策を促進することが可能（過去の対策が無駄にならない）



3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 水蒸気輸送

塩素化エチレン類

- ①37mlガラス瓶に実汚染土壌（シルト主体）30gを分取

②初期値としてTCEとcis-DCEの溶出量試験と含有量試験（底質調査法を参考）及び含水率を測定

③残りの試料瓶の蓋に約3mmの穴をあけ、40℃、60℃にて養生

④3日、7日、14日後に溶出量、含有量、含水率を測定

養生温度	試験区分	分析項目	初期値	3日後	7日後	14日後	定量下限値	単位
40℃	溶出量	cis-DCE	0.002	ND	ND	ND	0.001	mg/l
		TCE	0.001	ND	ND	ND		
	含有量	cis-DCE	0.06	0.01	ND	ND	0.01	mg/kg
		TCE	0.27	0.06	0.07	ND		
	含水率		25.7	23.2	19.8	10.3	-	(%)
60℃	溶出量	cis-DCE	0.002	ND	ND	-	0.001	mg/l
		TCE	0.001	ND	ND	-		
	含有量	cis-DCE	0.06	ND	ND	-	0.01	mg/kg
		TCE	0.27	0.04	0.01	-		
	含水率		25.7	16.0	1.6	-	-	(%)

揚水及び有機資材注入によるバイオスティミュレーションを数年間実施

- ・薬剤注入後、地下水中の塩素化エチレンは、一旦は基準値以下になるものの、cis-1, 2-DCEがリバウンド
- ・ボーリング調査では、VOCの溶出量は基準値以下

加熱処理法の適用性を検討

溶出量は適合しているもののTCEが含有していることを確認（リバウンドの要因）



室内試験の結果、40℃、60℃ともに含有量が低下し水蒸気輸送による浄化が可能であることを確認



現地パイロットにより電気発熱法の現地適用性を確認後、現在、浄化対策を実施中



3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 水蒸気輸送

1,4-ジオキサン

- ①37mlガラス瓶に実汚染土壌※（粘土主体）30gを分取
- ②初期値として1,4-ジオキサン（溶出）及び含水率を測定
- ③残りの試料瓶の蓋に約3mmの穴をあけ、13℃、40℃、50℃にて養生
- ④2日、4日、7日、10日、13日後に溶出量及び含水率を測定

養生温度	試験法	初期値	1日後	4日後	7日後	10日後	13日後	単位
13℃	溶出量	0.18	0.22	-	0.18	-	0.13	mg/l
	含水率	26.3	25.5	-	25.7	-	24.7	(%)
40℃	溶出量	0.13	0.10	0.070	0.031	0.013	0.009	mg/l
	含水率	24.7	23.1	21.6	20.6	16.4	14.7	(%)
50℃	溶出量	0.18	0.12	0.025	0.007	<0.005	-	mg/l
	含水率	26.3	24.0	19.2	14.9	9.1	-	(%)

※試験土壌の粒径分布

礫分(%)	砂分(%)	シルト分(%)	粘土分(%)	最大粒径(mm)
0.0	3.9	48.3	47.8	2

室内試験の結果

- ・50℃で養生した場合、10日間で定量下限値未満となり、40℃で養生した場合でも、7日間で0.05mg/L以下
- ・13℃（対象地の平均的な土 壌温度）では、有意な低下は起こらなかった。

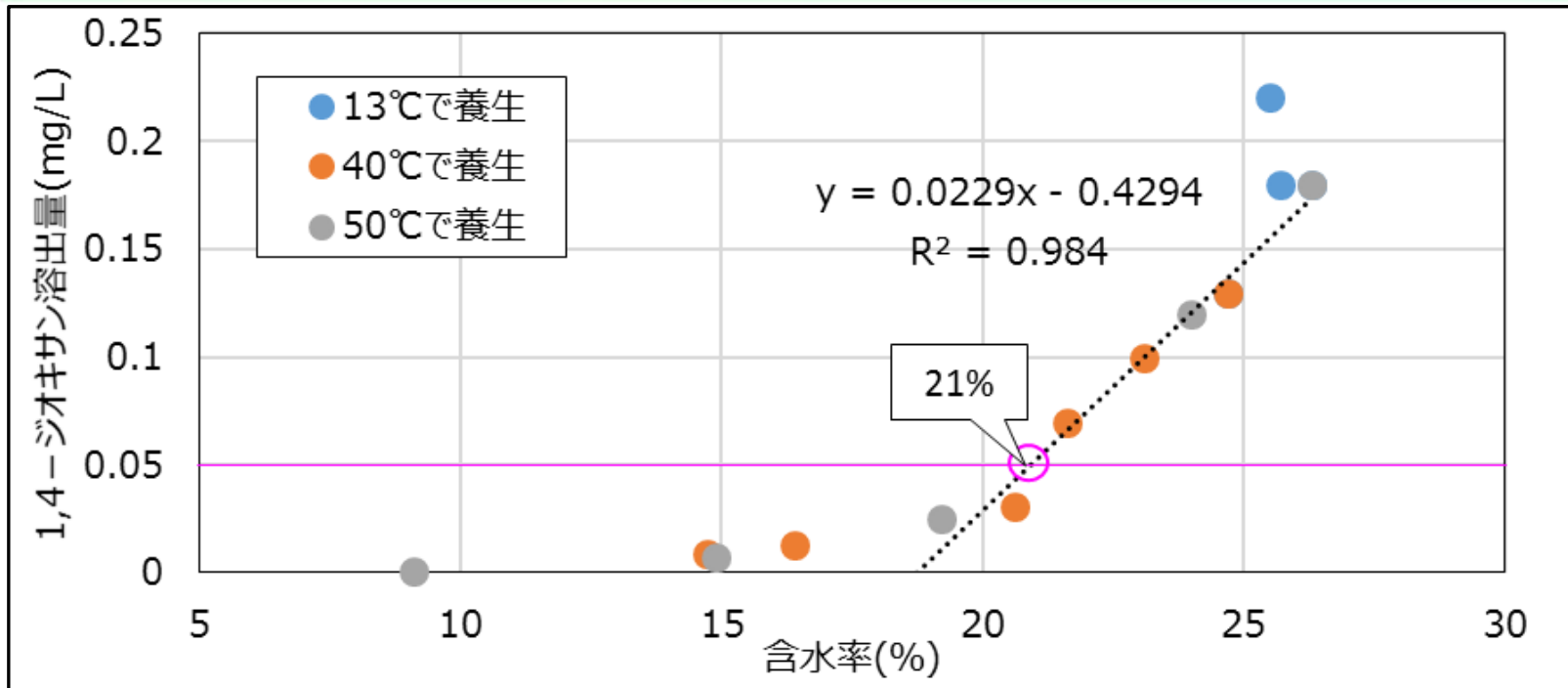


塩素化エチレン類と同様に、1,4-ジオキサンに対し、水蒸気輸送による浄化が可能であることを確認



現地パイロット試験により、電気発熱法（50℃）＋水蒸気回収によるハイブリッド浄化の適用性を確認したが、予算の関係上、本施工に移行せず

3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 水蒸気輸送



1,4-ジオキサン溶出量と土壌含水率の関係を上図に示す。

- ・ 養生温度に関わらず、1,4-ジオキサン濃度と含水率には一定の直線関係が見られる。
⇒ 溶出量の変化は、1,4-ジオキサンの揮発ではなく、水蒸気輸送の効果が支配的と考えられる。

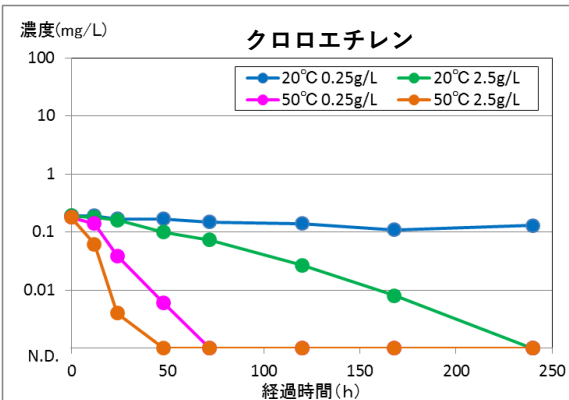
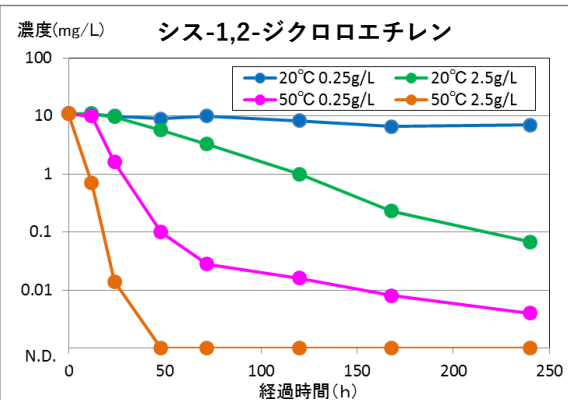
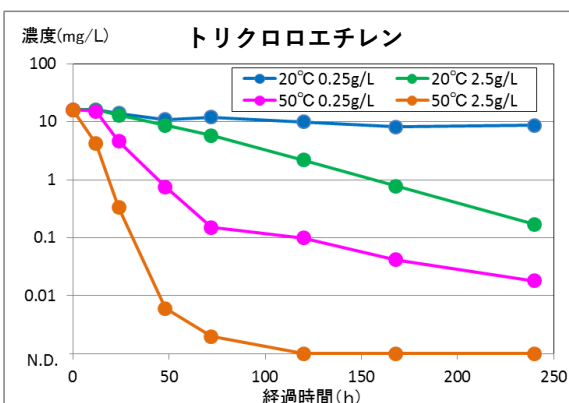
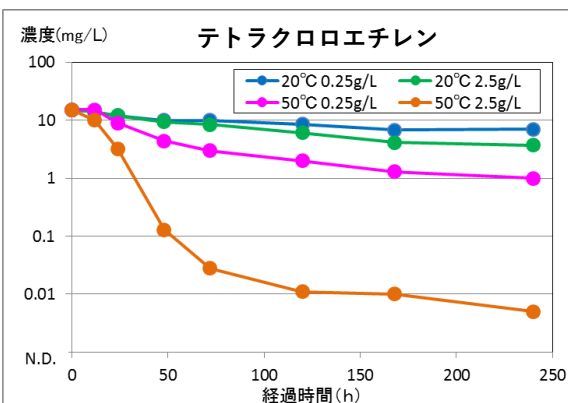
- ・ 良い直線関係が見られる溶出量が0.05mg/L以上のデータを用いて回帰計算すると
〈1,4-ジオキサン溶出量〉 = $0.0292 \times \langle \text{含水率} \rangle - 0.4294$ $R^2 = 0.984$ (1)

(1) 式より、0.05mg/Lになる際の含水率は21%となり、5 %程度の含水率低下で、浄化目標値の達成が示唆

3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 熱活性過硫酸

塩素化エチレン類

- ①汚染サイトから採取した地下水1L対し、SPSを2.5g、又は0.25g添加
- ②20℃、又は50℃で養生し、12h、1日、2日、3日、5日、7日、10日後に、地下水中濃度を測定



室内試験の結果

- ・PCEについては、20℃では、ほぼ低下しない
50℃では、基準値以下にまで低下
- ・TCE,cis-DCE,VCMについては、
20℃でも2.5mg添加の場合、低下したが、
50℃で0.25g添加の場合よりも低下量が小さい

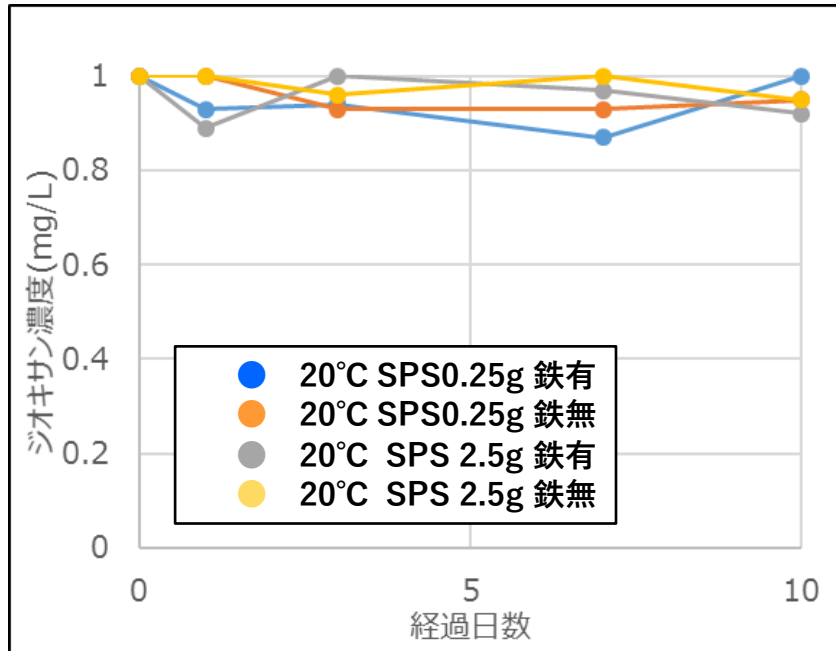
- ↓
- 過硫酸ナトリウムは、熱活性条件下で酸化力の強いラジカルを生成するため、フェントン反応のように鉄塩を添加する必要がない
 - 温度上昇によりラジカル反応が進むため、常温（地下水温：20℃）の場合の1/10以下の薬剂量で分解可能



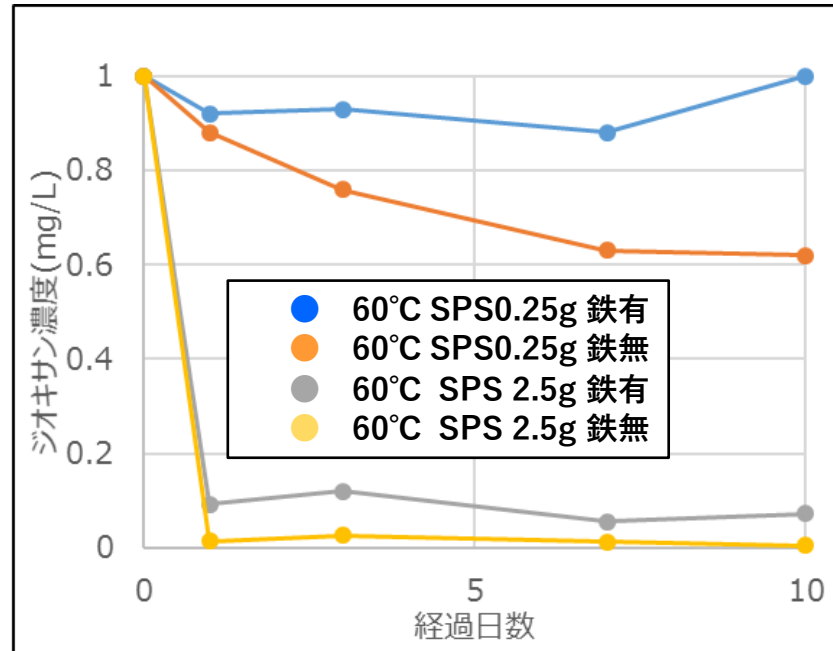
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 熱活性過硫酸

1,4-ジオキサン

- ①汚染サイトから採取した地下水1Lに対し、SPSを2.5g、又は0.25g添加※鉄触媒を添加の有無も評価
- ②20℃、又は60℃で養生し、1日、3日、7日、10日後に、地下水中の1,4-ジオキサン濃度を測定



20℃で養生



60℃で養生

室内試験の結果

- ・20℃では鉄塩存在下でも分解は確認されなかった。
- ・60℃では、SPSを2.5g添加した系では鉄塩なしでも、地下水環境基準以下にまで分解した。

↓
1,4-ジオキサンに対し、熱活性過硫酸による化学分解が可能であることを確認

↓
現地パイロット試験により、電気発熱法を用いることで実汚染現場への適用が可能であることを実証済



3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 熱活性過硫酸

PCB（ポリ塩化ビフェニル）

- ①PCB試薬を用いて、各置換体が0.5mg/Lになるように試験溶液を調整

②過硫酸ナトリウムをが1%になるように添加し、50℃、60℃、80℃で養生

③7日後に過硫酸ナトリウムを再添加

④7日後、14日後、再添加した7日後、45日後に溶液中のPCBを測定

		7日後		14日後		再添加7日後		再添加45日後	
		濃度mg/L	分解率	濃度mg/L	分解率	濃度mg/L	分解率	濃度mg/L	分解率
50℃	テトラPCB	0.15	70.6%	0.062	87.8%	<0.005	100%	<0.005	100%
	ペンタPCB	0.29	42.0%	0.18	64.0%	0.021	96%	0.008	98%
	ヘキサPCB	0.31	24.4%	0.24	41.5%	0.079	81%	0.017	96%
	ヘプタPCB	0.42	2.3%	0.35	18.6%	0.26	40%	0.17	60%
60℃	テトラPCB	0.10	80.4%	0.035	93.1%	0.02	96%	0.017	97%
	ペンタPCB	0.19	62.0%	0.097	80.6%	0.069	86%	0.036	93%
	ヘキサPCB	0.28	31.7%	0.21	48.8%	0.16	61%	0.067	84%
	ヘプタPCB	0.41	4.7%	0.33	23.3%	0.29	33%	0.11	74%
80℃	テトラPCB	0.14	72.5%	0.099	80.6%	0.009	98%	0.028	95%
	ペンタPCB	0.21	58.0%	0.16	68.0%	0.02	96%	0.037	93%
	ヘキサPCB	0.24	41.5%	0.21	48.8%	0.058	86%	0.051	88%
	ヘプタPCB	0.32	25.6%	0.29	32.6%	0.099	77%	0.046	89%

室内試験の結果

- ・養生温度を80℃とすることで、7 塩素置換体のPCBも89%分解
- ・4、5、6 塩素置換体の場合、養生温度が50℃が最も分解率が高く、4 塩素置換体のPCBは、定量下限値未満にまで分解



実汚染地下水でも再添加なしで、90%以上分解することを確認したため、電気発熱法＋過硫酸ナトリウム注入での原位置浄化が可能と考えられる。



3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 技術別の実績

ハイブリッド技術	件数	温度（℃）	浄化期間	使用電力量（kWh）
ガス吸引（水蒸気回収）	11	50～90	2～14か月	4,000～146,000
揚水	1	55～65	18か月	99,000
ガス吸引＋揚水	4	40～70	5～13か月	46,000～58,000
微生物分解	3	30～45	5～12か月	18,500～31,000
熱活性過硫酸	2	50	5か月	51,000～90,000

- ・国内で既に21サイトでの浄化完了実績（現在は、2サイトで進行中）
- ・多くは、民間の操業中の工場であるが、売却案件や廃棄物不法投棄場所での実績もあり
- ・ハイブリッド浄化の方法や浄化期間、施工費用は、汚染物質の種類やサイト条件により異なる



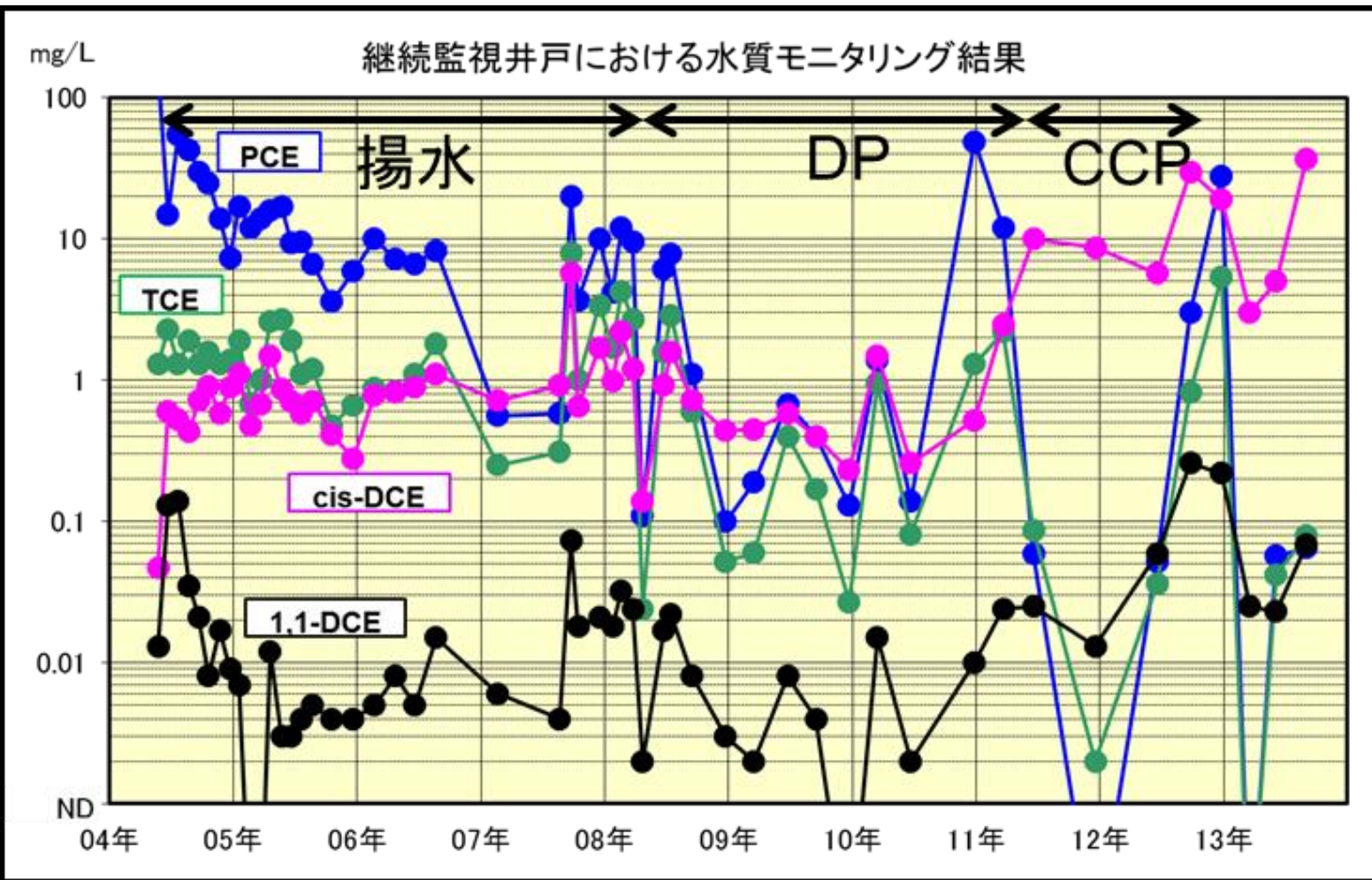
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化 対象物質毎の実績

浄化対象物質	件数	浄化工法
ベンゼン（トルエン・キシレン）	7	ガス吸引:6件 熱活性過硫酸：1件
塩素化エチレン類 （クロロエチレンも含む）	12	ガス吸引:3件 ガス吸引+揚水：4件 揚水：1件 バイオスティミュレーション：3件 熱活性過硫酸：1件
1,4－ジオキサン	2	ガス吸引（水蒸気回収）：2件



1. 原位置浄化の現状と課題
2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績
4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例
 - 4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例
 - 4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例
 - 4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
 - 4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
5. 加熱処理法の今後の展望

4-1. 原位置浄化事例（1） バイオ実施サイトへの適用事例



サイト条件（沖積低地）

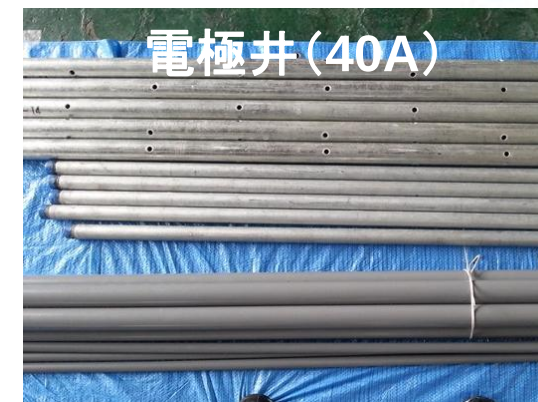
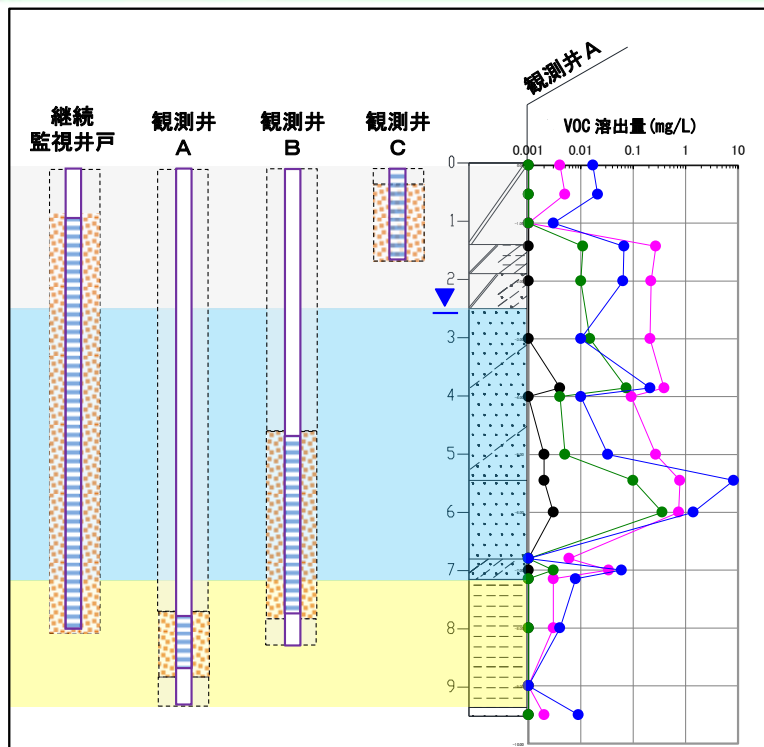
- ・ PCE、TCEによる土壌・地下水汚染サイト（飽和帯の粘土層における土壌浄化）
- ・ 操業中の工場建屋内で、掘削除去や鉄粉攪拌の適用は不可
- ・ 頻繁にフォークリフトが走るため、上部利用を制限できない。

バイオによる浄化状況

- ・ 超多点ダブルパッカー工法(DP)や高圧噴射攪拌工法(CCP)を用いた栄養剤注入を実施。
- ・ 使用履歴物質であるPCEやTCEは、リバウンドを繰り返し、分解生成物であるcis-DCEは、高濃度で推移

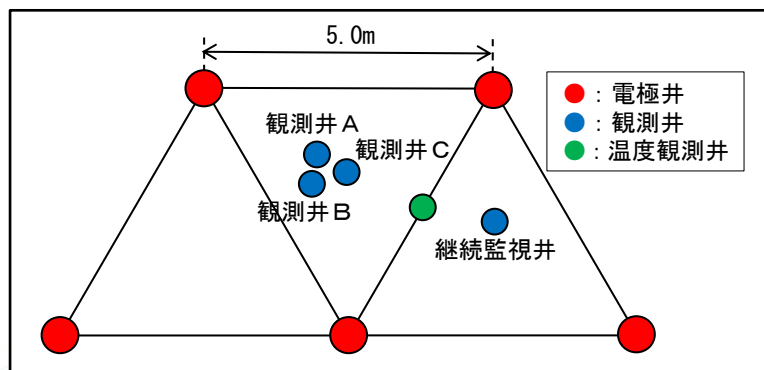
4-1. 原位置浄化事例（1）

バイオ実施サイトへの適用事例

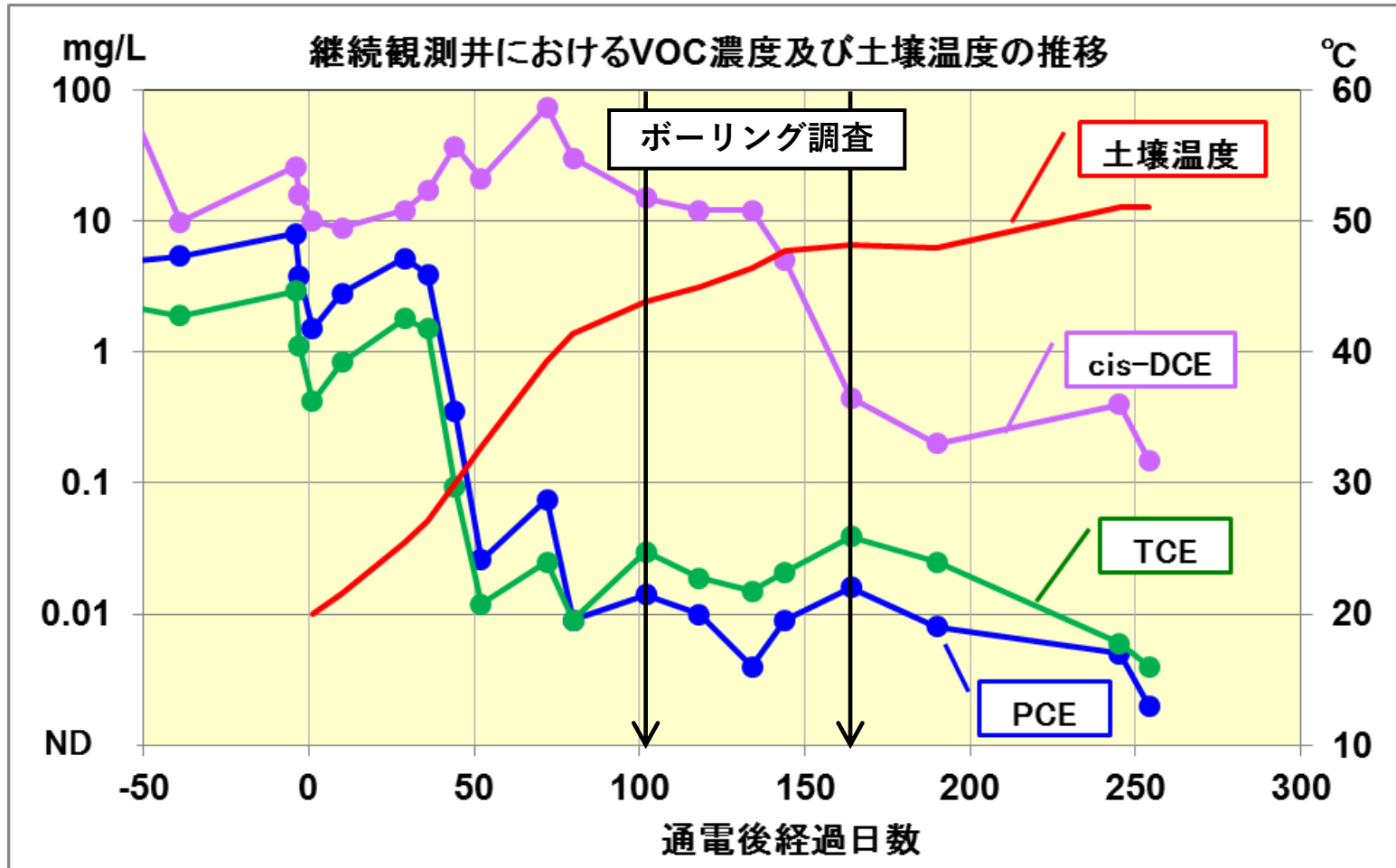


電気発熱法による対策の概要

- ・ 電極井の設置深度は9.0mとし、ガス吸引も可能な構造
- ・ 電極井戸は、5.0m間隔に5本設置
- ・ 地下水(観測井A,B)、土壌ガス(観測井C)、温度監視用井戸を設置
- ・ 約2ヵ月で40°Cまで上昇し、ガス吸引によるVOC回収量の増加や微生物分解の促進を確認。



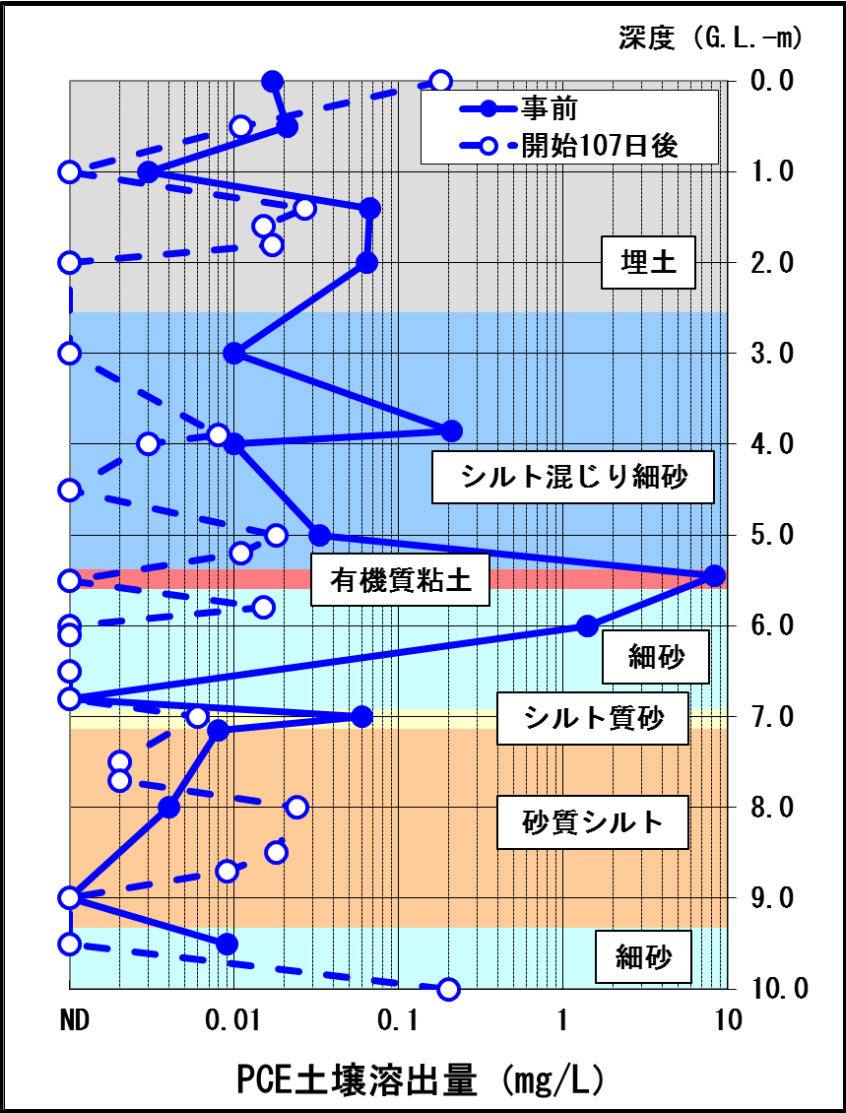
4-1. 原位置浄化事例（1） バイオ実施サイトへの適用事例



電気発熱法適用後の地下水濃度の推移

- ・ PCE、TCEについては、土壌温度が30℃を超えたあたりから顕著に濃度が低下
- ・ PCE、TCEについては、通電開始から100日程度で地下水基準程度にまで低下し、約8か月後に基準値以下
- ・ 既往の対策では濃度低下しなかったcis-DCEについても、通電開始から140日程度から濃度低下し、その後も基準値の数倍程度で推移

4-1. 原位置浄化事例（1） バイオ実施サイトへの適用事例



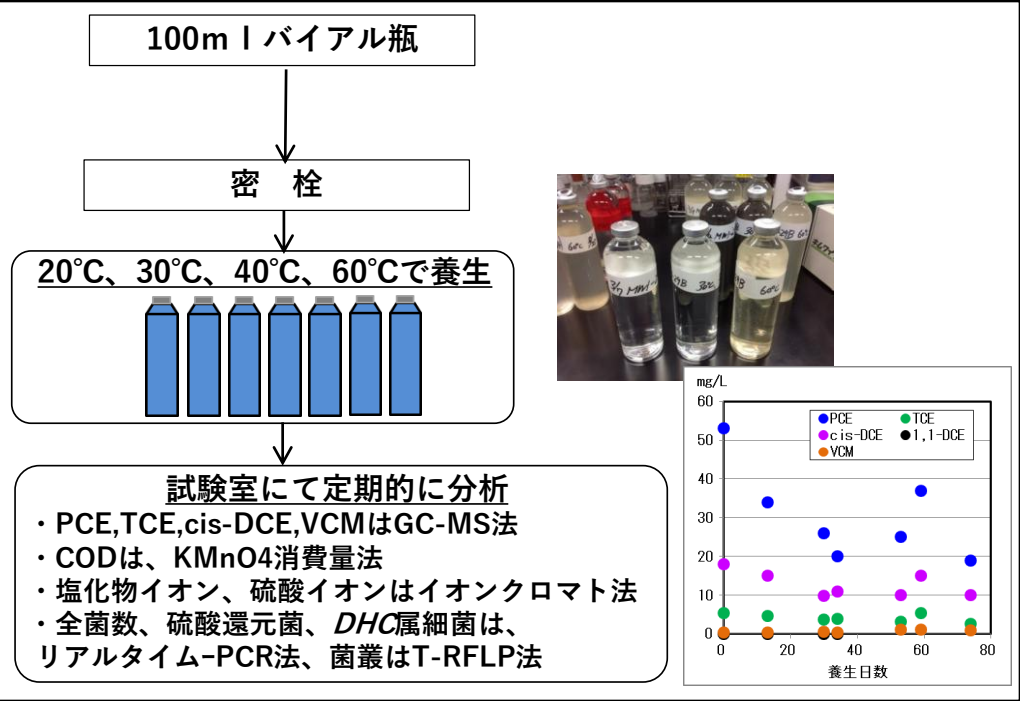
G.L.-5.5m付近の土壌含有量(底質調査法参考)の変化

	PCE	TCE	cis-DCE	VCM
107日後	1.5mg/kg	0.3mg/kg	5.6mg/kg	0.031mg/kg
169日後	<0.01mg/kg	<0.01mg/kg	<0.01mg/kg	<0.01mg/kg

電気発熱法の土壌浄化に対する効果

- ・ 電気発熱適用前には、揚水による物理的な回収や微生物分解が進まず、深度5.5m付近の有機質粘土層に10mg/L近くのPCEが存在し、リバウンドの要因となっていた。
- ・ 通電開始107日で、PCE、TCEは溶出量基準値程度にまで減少した（左図参照）。一方で、含有量は確認されたため（上表）、土壌加温による対策を継続した。
- ・ 対策を継続した結果、通電開始後169日で、含有量も定量下限値未満となり（上表参照）、リバウンドリスクは解消された。

4-1. 原位置浄化事例（1） バイオ実施サイトへの適用事例

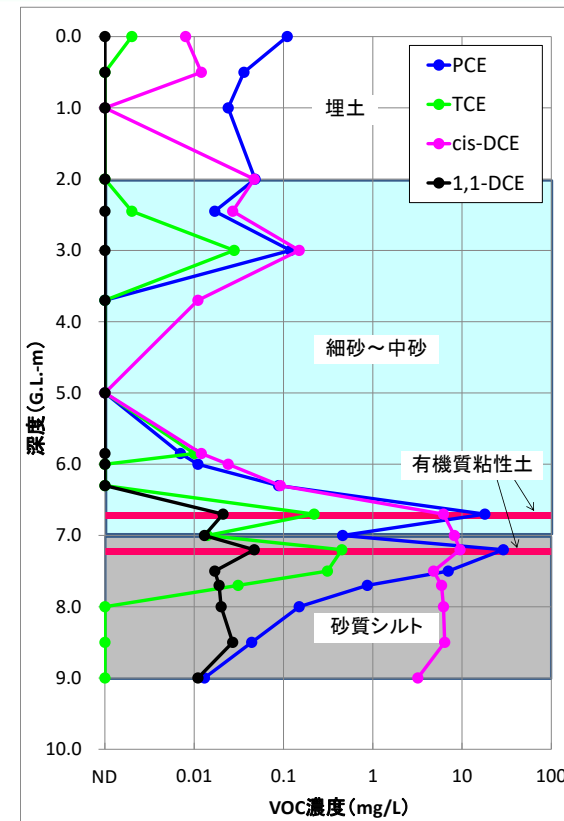
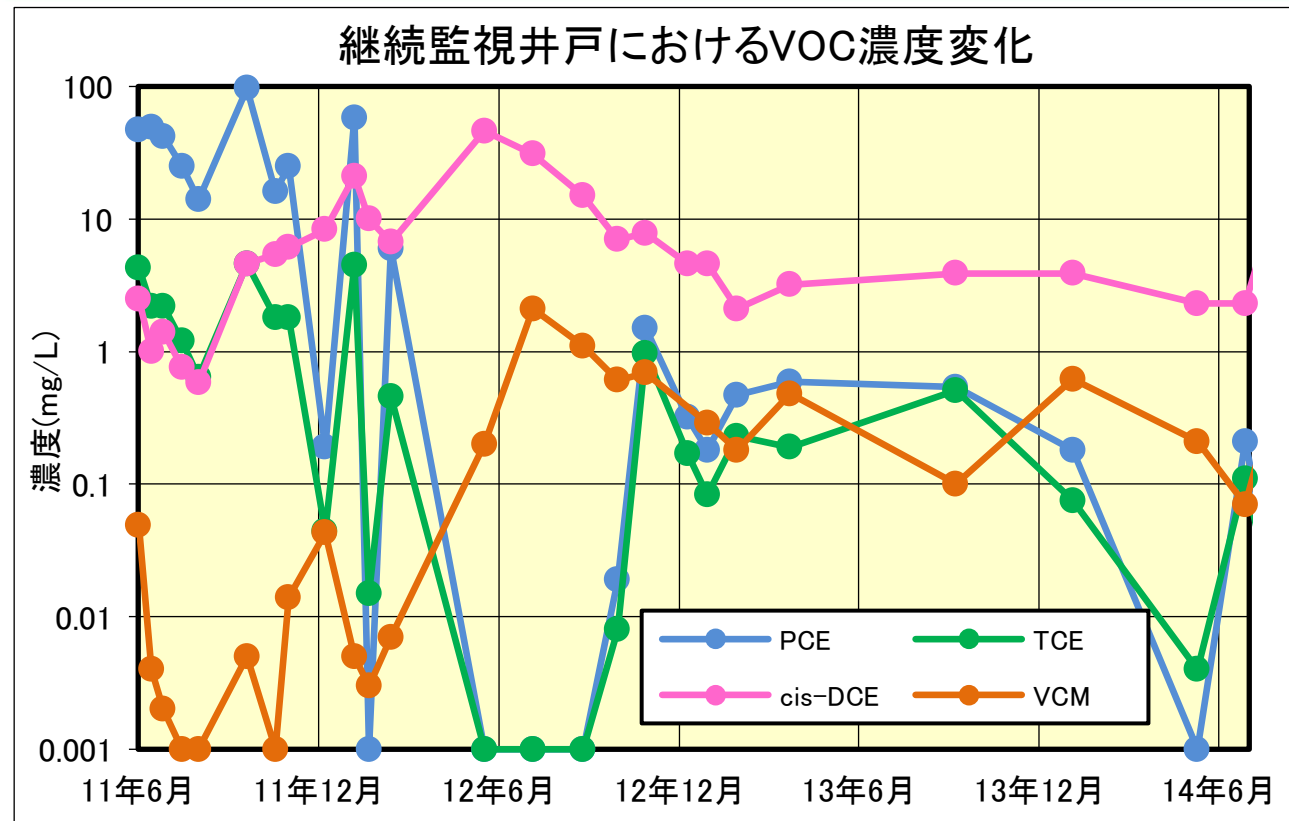


		室内試験①	室内試験②	室内試験③	室内試験④
採水時の状況	PCE(mg/L)	53	17	20	0.31
	水温(℃)	19.0	32.5	37.9	44.3
	ORP(mV)	-18	-185	-229	-164
	真正細菌総数(copies/mL)	5.2×10^5	1.6×10^6	6.6×10^5	9.5×10^5
	硫酸還元菌数(copies/mL)	2.4×10^3	1.2×10^3	6.3×10^2	1.2×10^3
	DHC属細菌(16S)(copies/mL)	9.2×10^3	1.8×10^4	9.9×10^3	2.8×10^4
	tceA 遺伝子(copies/mL)	1.8×10^3	2.7×10^3	3.9×10^2	1.5×10^3
	bvcA 遺伝子(copies/mL)	4.0×10^3	4.5×10^3	3.0×10^3	1.6×10^4
室内試験によるPCE分解速度	vcrA 遺伝子(copies/mL)	7.2×10^3	1.8×10^4	4.9×10^3	7.6×10^3
	20℃で養生	0.014	0.11	—	—
	30℃で養生	0.022	0.44	—	—
	40℃で養生	—	—	0.44	0.72
	60℃で養生	0.040	0.009	0.047	0.061

室内試験から算出したPCEの分解速度は、発熱前（水温19.0℃で採取）と比べ、地下水温が32.5℃、37.9℃の時に採取した地下水では約30倍、地下水温が44.3℃の時に採取した地下水では約70倍に増加した。一方、水温19.0℃で採取した地下水を30℃、60℃で養生した場合に、分解速度に変化はなかった。これらのことから、土壌温度が徐々に上昇することで、DHC属細菌等が温度に対し馴化・活性化し、微生物による分解速度が上昇したとも考えられる

バイオの既適用サイトへの土壌加温の適用が有効且つ効果的

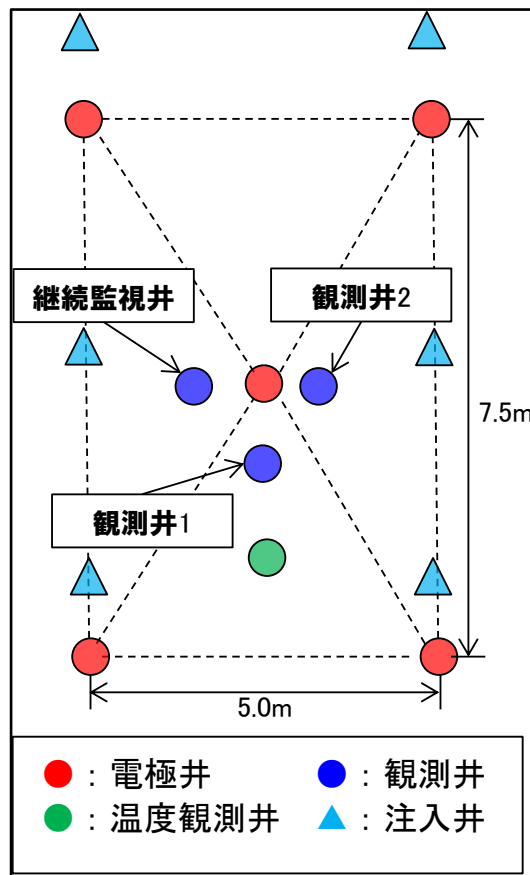
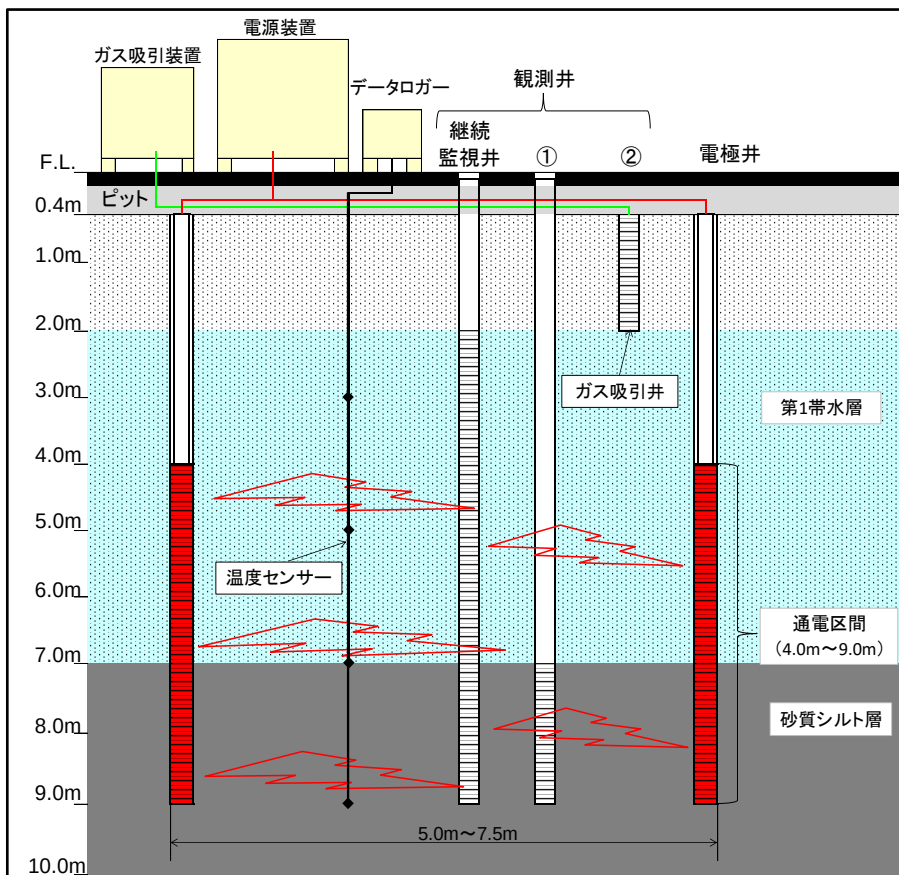
4-2. 原位置浄化事例（2） 熱活性過硫酸適用サイト



サイト条件（沖積低地）

- ・ 操業中の工場におけるPCE、TCE、cis-DCE、VCMによる土壌・地下水汚染サイト
- ・ 過去に酸化剤注入（フェントン）、バイオレメディエーションによる対策を実施したが、帯水層下位に存在する有機質粘土層とシルト層にVOCが残存し、地下水中のVOCがリバウンド

4-2. 原位置浄化事例（2） 熱活性過硫酸適用サイト



電気発熱法による対策の概要

- ・ 電極井を5.0m～7.5m間隔に5本設置
- ・ 電極井口径：40A
通電深度：GL-4.0～9.0m

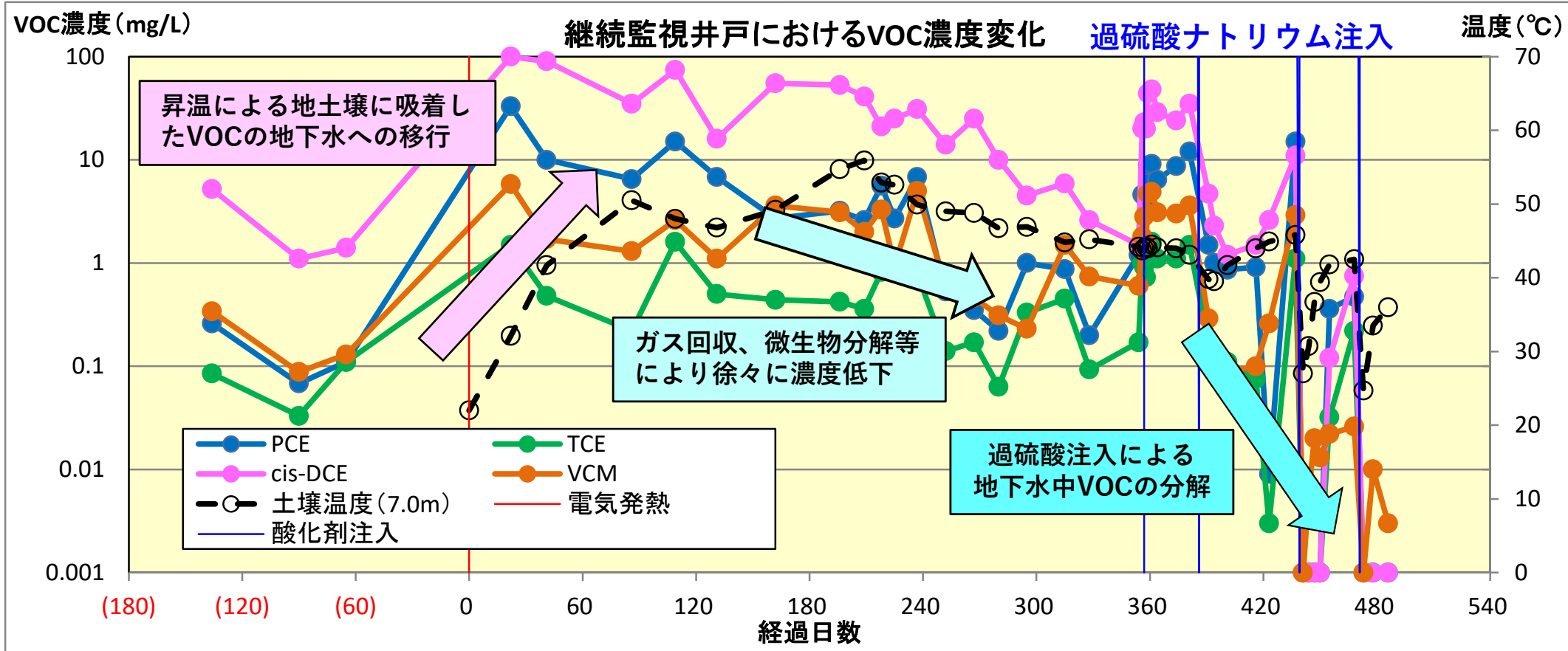
通電開始から約2ヶ月で土壌温度は40℃以上にまで上昇し、地下水中のVOC濃度が上昇（土壌中VOCの地下水への溶出が促進された結果）

地下水中のVOCは、微生物分解及びガス回収により徐々に濃度低下するものの、浄化達成に長期間必要と予測



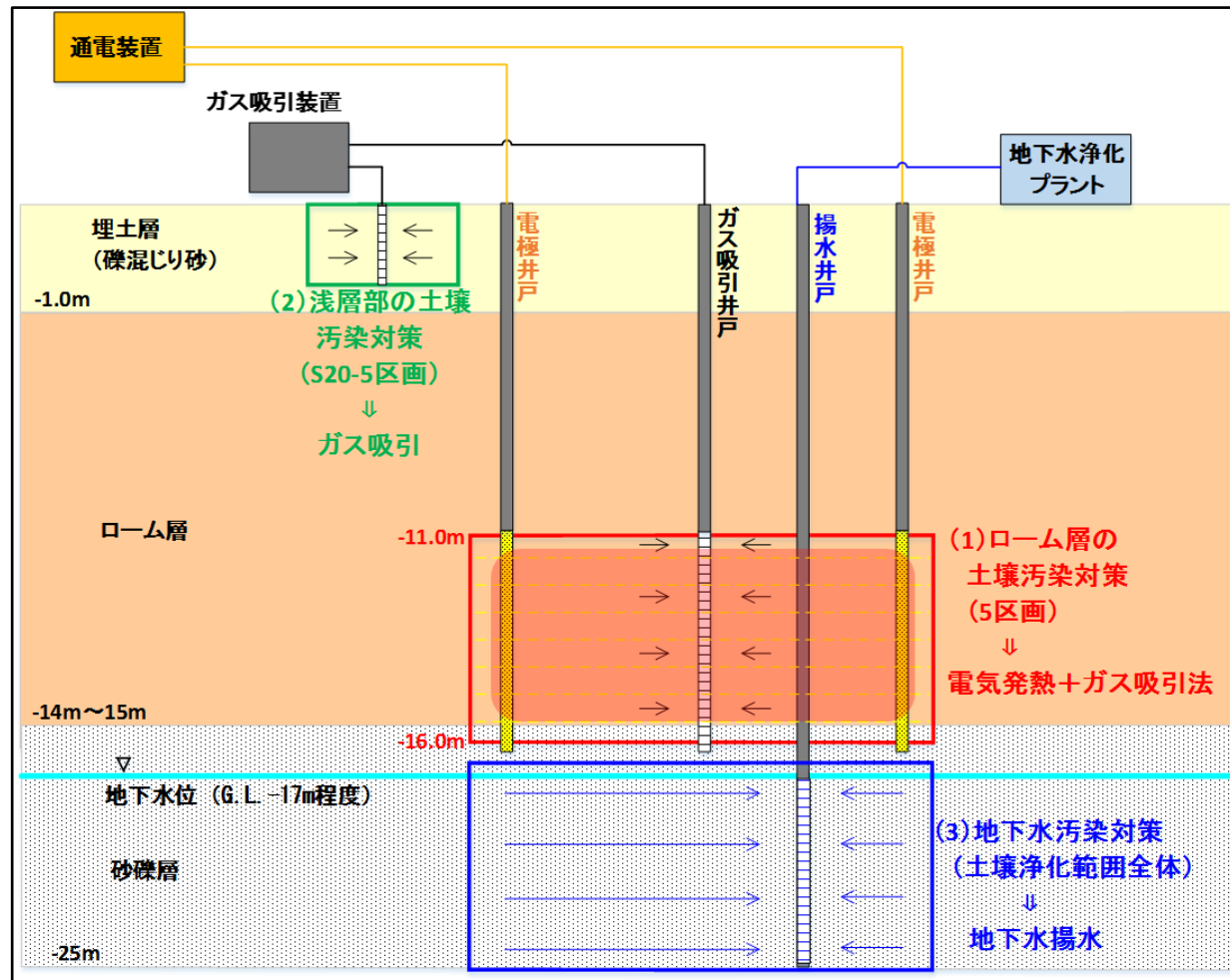
化学分解とのハイブリット浄化による地下水汚染の早期浄化を計画・実施

4-2. 原位置浄化事例（2） 熱活性過硫酸適用サイト



- ・ 過硫酸ナトリウム溶液注入を発熱開始後12ヶ月、13ヶ月、15ヶ月、16ヶ月の計4回実施
- ・ 注入は、DP注入井戸6箇所から実施（注入量：SPS2kg/土壌1m³、注入深度：GL-4.0～9.0m）
⇒ 注入後地下水中のVOC濃度が顕著に低下し、リバウンドも確認されなかった

4-3. 原位置浄化事例（3） 不飽和への適用事例（水蒸気回収）



サイト条件

- ・ 操業中の工場におけるTCEによる土壌・地下水汚染
- ・ 土壌汚染はローム層に存在し（TCEで基準値の100倍以上）、下位の第一帯水層でもTCEの地下水汚染が発生（帯水層の砂礫層には土壌汚染なし）
- ・ 土壌汚染対策深度は、G.L.-11～16m、地下水位はG.L.-17m程度

これまでの対策の経緯

- ・ 地下水に対しては、敷地境界でのバリア揚水
- ・ 土壌に対しては、鉄粉混合による対策を一部実施

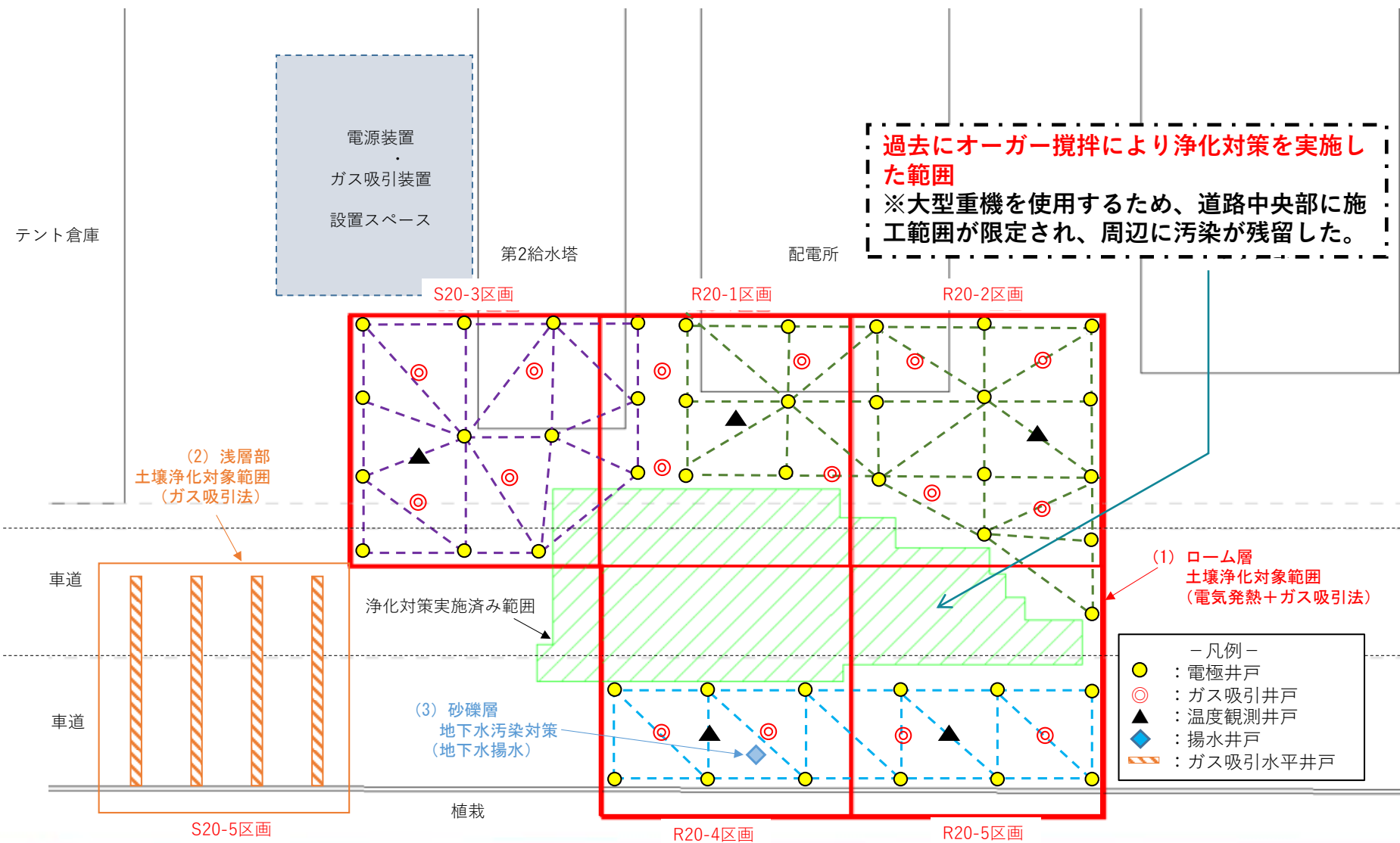
対策エリアの利用状況

- ・ 土壌汚染が残っている範囲は、敷地境界の工場内の道路上で、一部工場建屋直下にも存在する。
- ・ ロームの浅層部には汚染はなく、掘削除去や鉄粉攪拌では費用対効果が低い

埋土⇒ガス吸引、帯水層地下水⇒揚水
ローム層⇒電気発熱法＋土壌ガス吸引（水蒸気回収）



4-3. 原位置浄化事例（3） 不飽和への適用事例（水蒸気回収）



設備配置

- ・ローム層土壤汚染（5つの単位区画）に対し、
電 極 井：43本
ガス吸引井：16本
温度観測井：5本
電源装置：3台
- ・埋土層土壤汚染に対し、
ガス吸引水平井戸：4本
- ・地下水汚染に対し、
揚水井戸：1本

遠隔監視

- ・電気使用量、電極電流、
使用電力及び土壌温度
の推移

4-3. 原位置浄化事例（3） 不飽和への適用事例（水蒸気回収）



データ監視画面

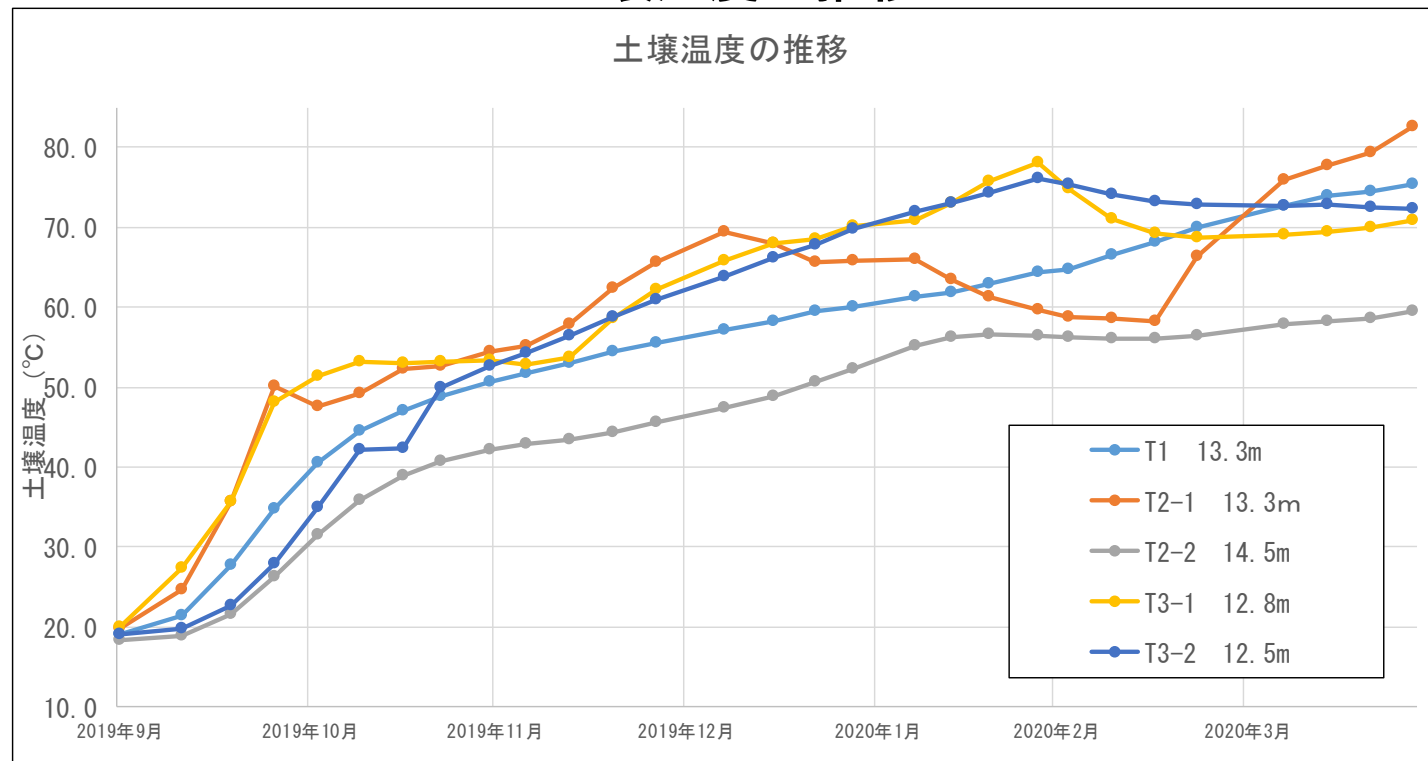
《電気使用量》

《使用電力推移》



土壌温度の推移

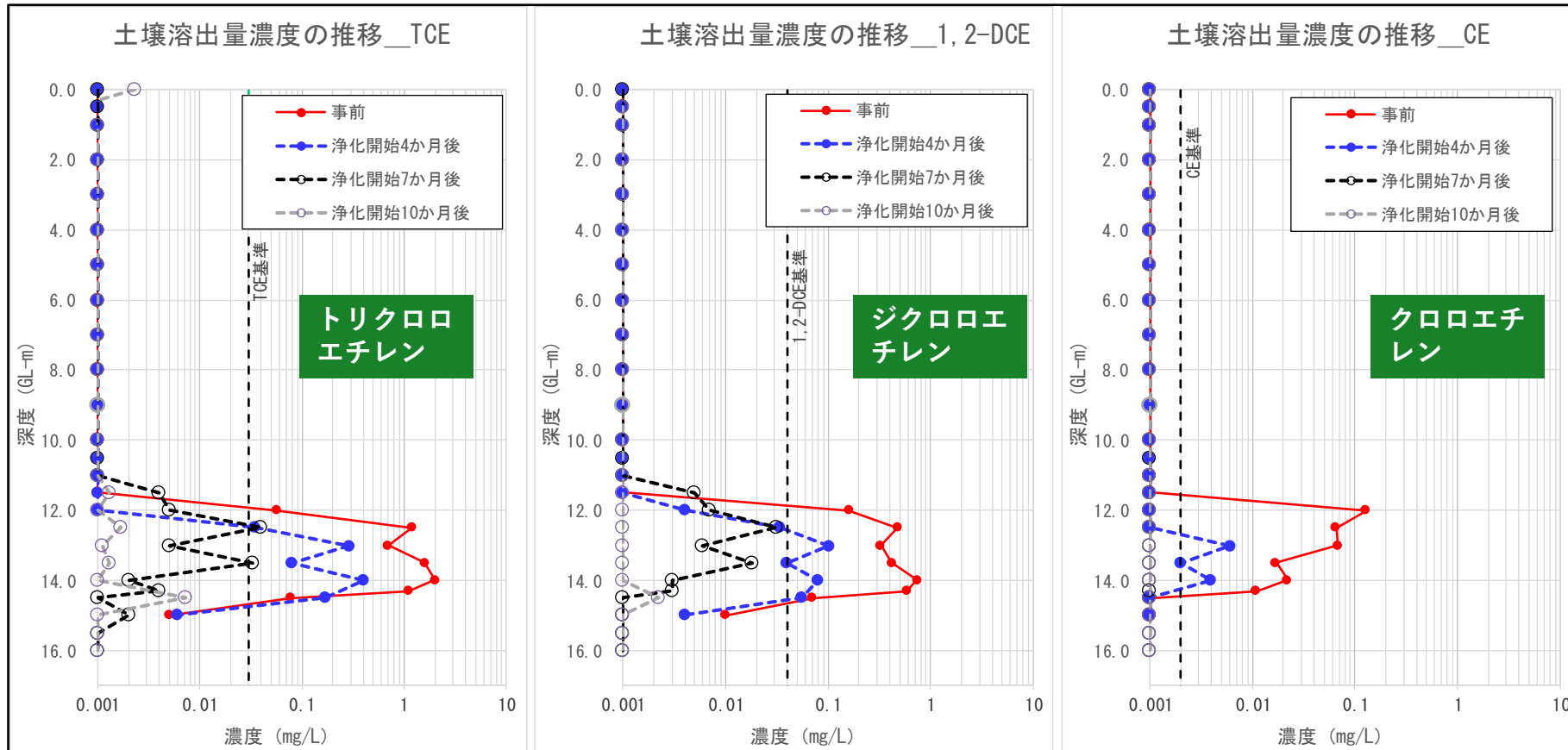
土壌温度の推移



土壌温度の推移

- ・通電期間中は、データ監視盤により、電気使用量や土壌温度の推移、各電極の電流値などを監視し、必要に応じ印加電力等を制御しながら土壌温度をコントロールした。
- ・約3か月でおおむね目標とした60～80℃まで温度上昇した。

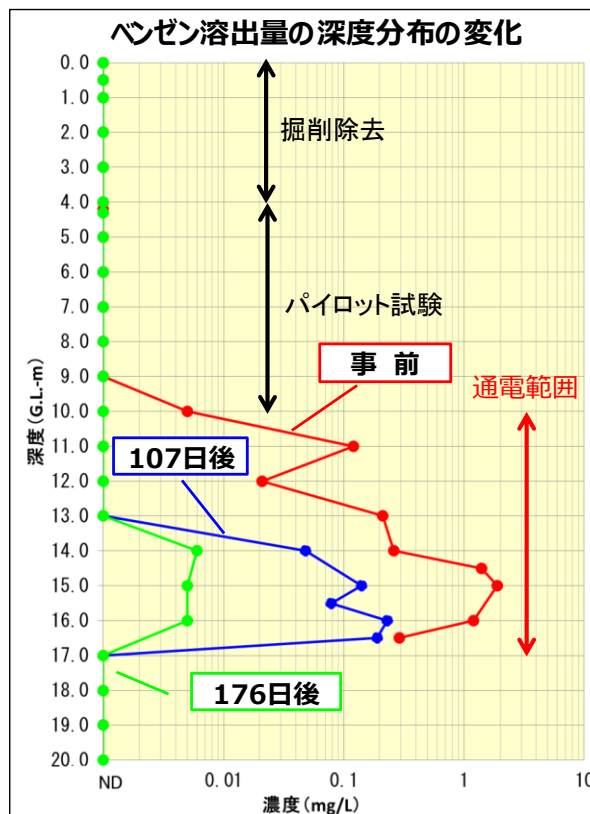
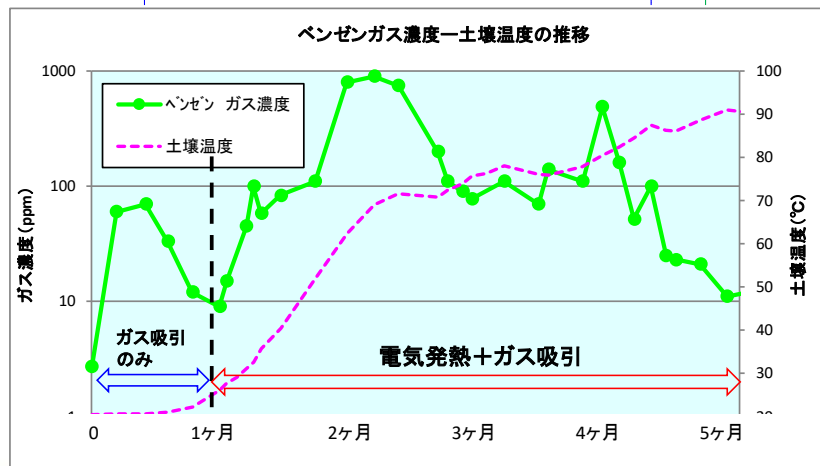
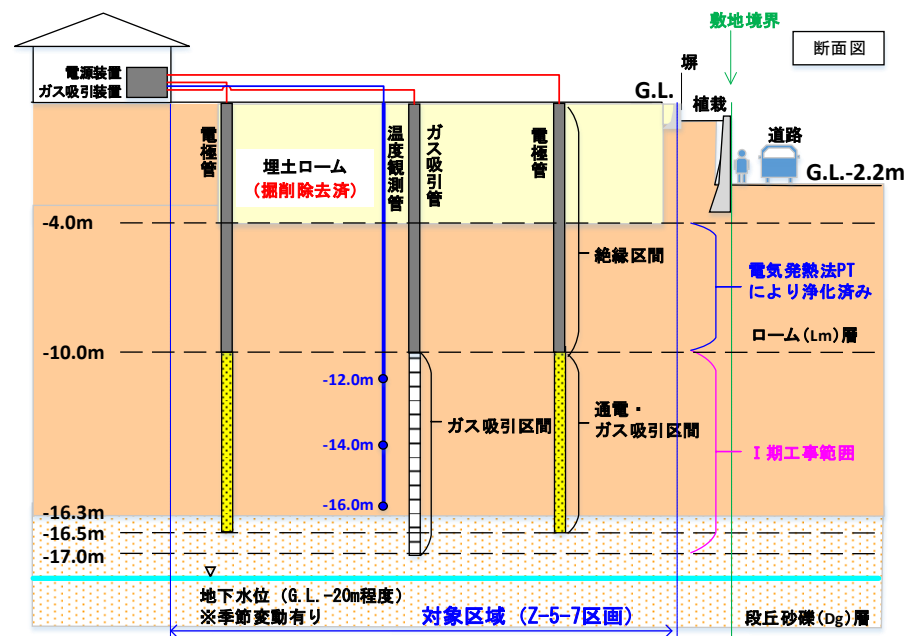
4-3. 原位置浄化事例（3） 不飽和への適用事例（水蒸気回収）



土壌溶出量の推移

- ・ TCEを親物質とし、1,2-DCEやVCMの基準超過があり、TCEは基準値の100倍超過
- ・ 発熱後に気化した VOC や水蒸気を回収することで浄化が進捗
- ・ 対策開始後、
4か月:基準値の10倍程度
7か月:基準値と同程度
10か月:ほぼ定量下限未満

4-3. 原位置浄化事例（3） 不飽和への適用事例（水蒸気回収）

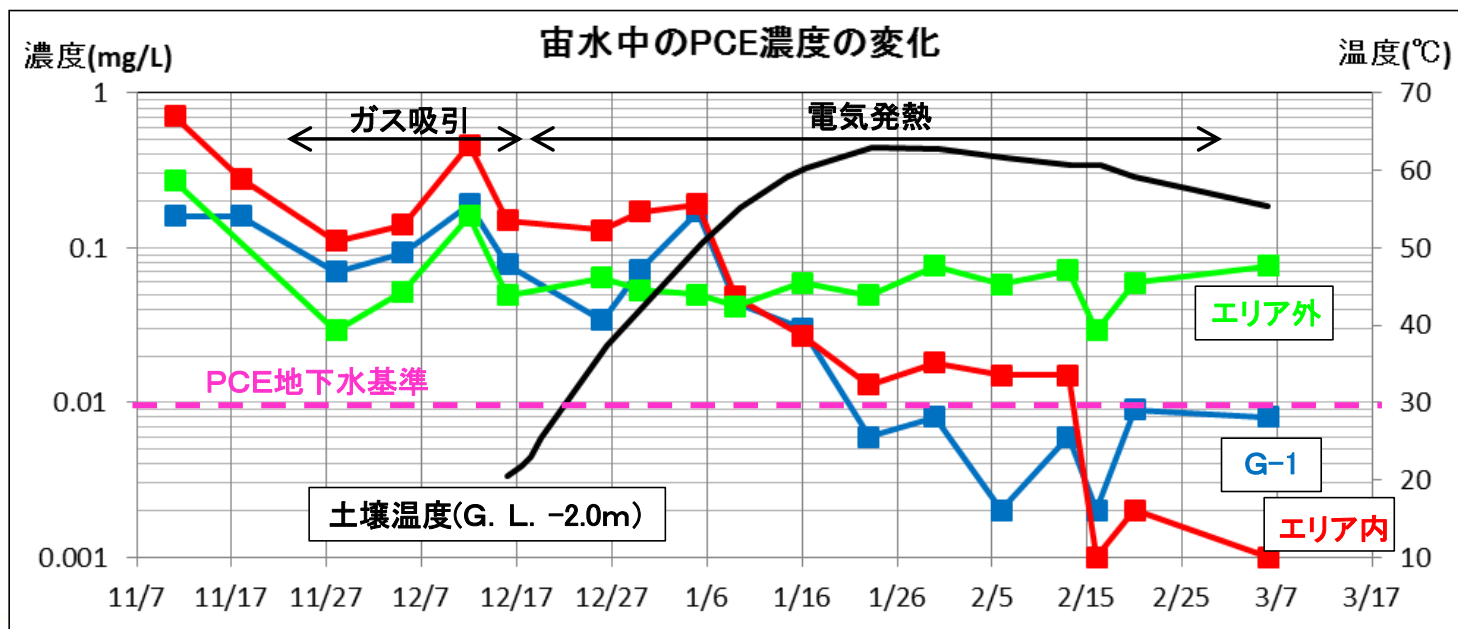
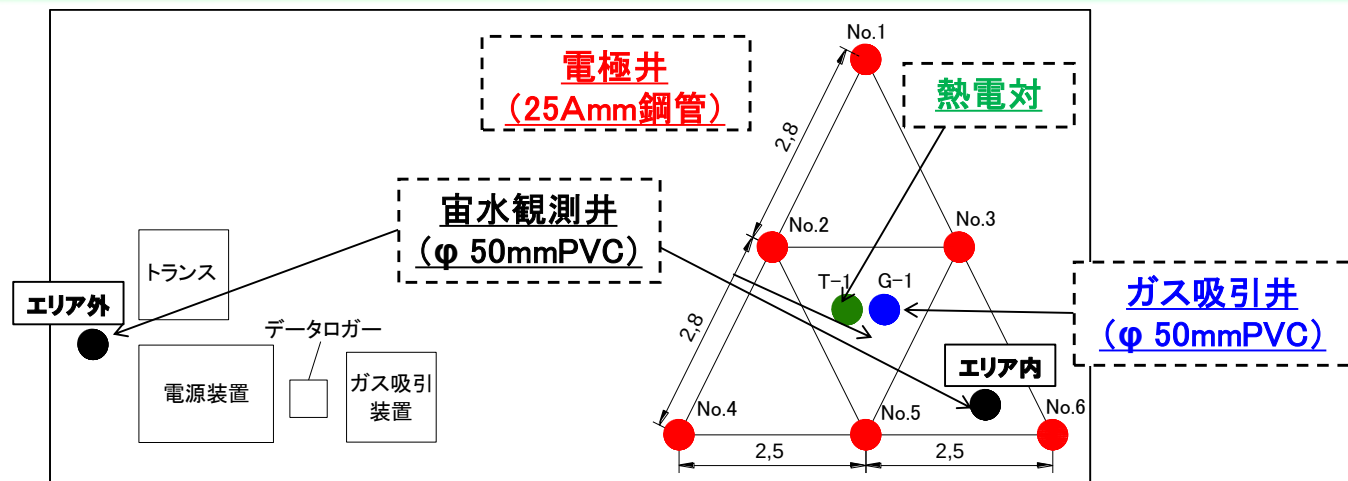


- 対象深度：G.L.-10.0～16.5m
- 土質：ローム層（不飽和帯）
- 利用状況：操業中の工場建屋
- 浄化項目：ベンゼン・トルエン・キシレン

塩素化エチレン以外への適用性

- ・ 当初、ガス吸引のみとしたが、回収ガス中のベンゼン濃度が低下したため土壌加温を開始
- ・ 土壌温度の上昇とともに回収ガス中のベンゼン（トルエン、キシレン）濃度が約100倍に上昇
- ・ 回収ガス中のベンゼン濃度が安定した107日後のボーリング調査の結果、ベンゼンの残存を確認
- ・ 更に土壌温度を上げると、回収ガス中のベンゼン濃度は一旦上昇し、その後低下
- ・ 176日後のボーリング調査の結果、全深度で溶出量基準に適合

4-4. 原位置浄化事例（4） 宙水への適用事例（水蒸気回収）



パイロット試験

宙水に対する浄化効果を評価するため発熱エリア内・外の観測井において、1週間に1回水質モニタリングを実施

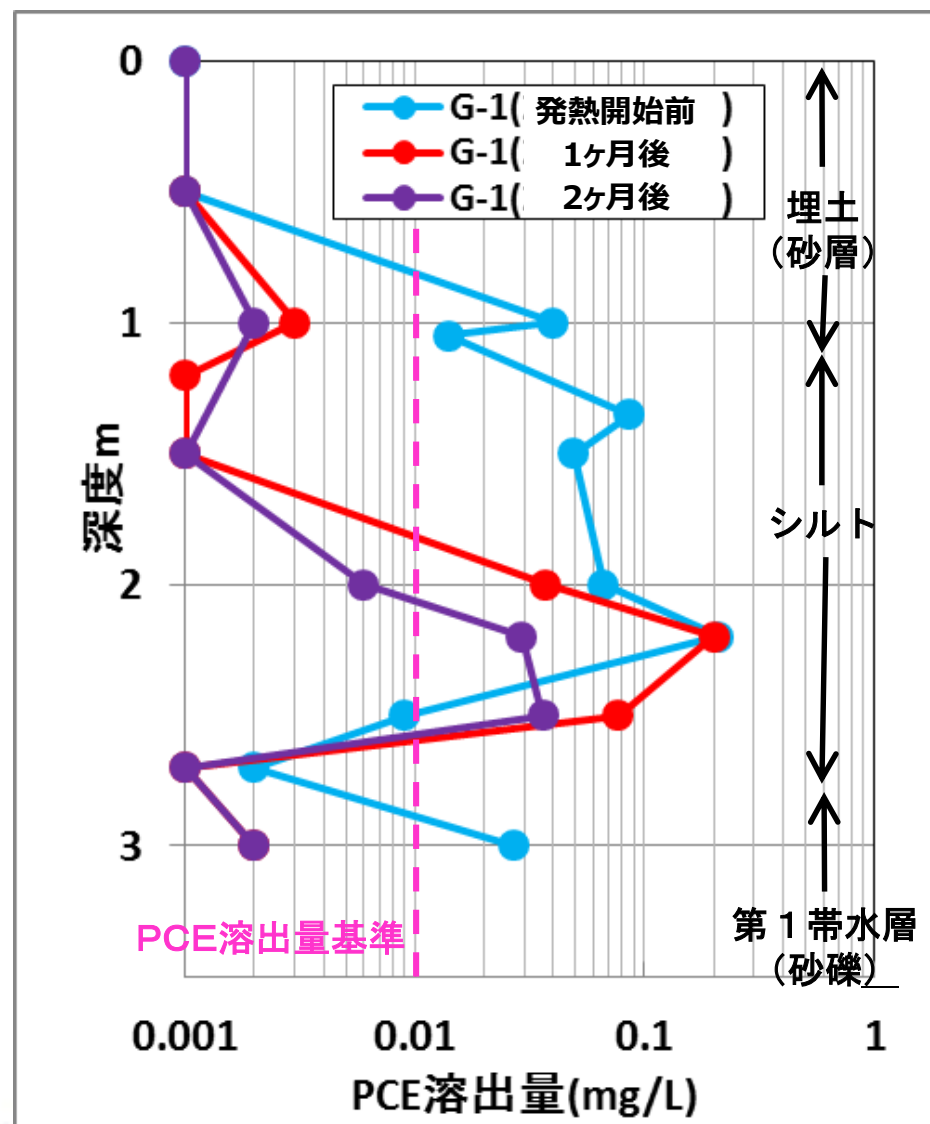


- ・ガス吸引対策では、宙水に対する浄化効果は認められなかった。
 - ・土壌発熱開始から約2ヵ月（50℃に達してから約1ヵ月）で、PCE濃度が地下水基準以下にまで低下
- 宙水汚染に対し、電気発熱法ハイブリッド浄化が可能と判断



ボーリングによる浄化効果の確認

4-4. 原位置浄化事例（4） 宙水への適用事例（水蒸気回収）



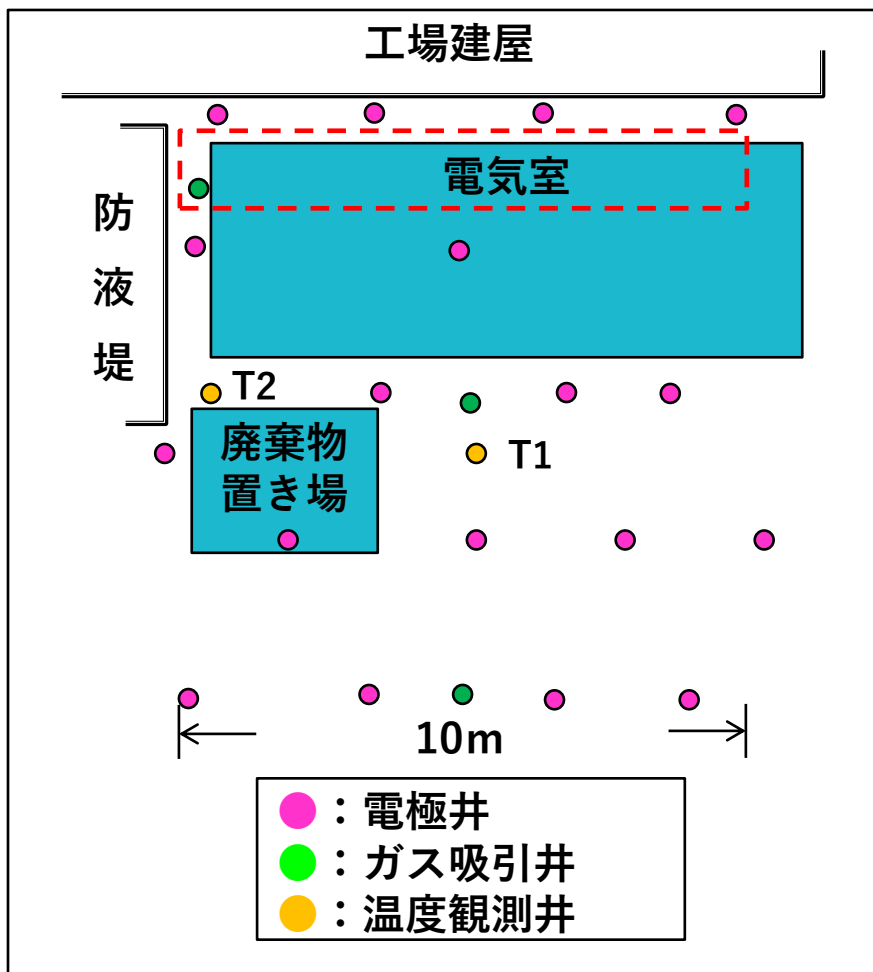
土壌溶出量基準への適合状況を評価するため、ボーリング調査を発熱開始前（ガス吸引後）、電気発熱法適用1か月後及び2か月後に実施し、現場溶出量試験を実施

- ・ 発熱法適用前・後の土壌温度の推移
深度1.0m：15.5℃→40.9℃(2ヵ月後)
深度2.0m：20.6℃→60.6℃(2ヵ月後)
深度3.0m：21.5℃→50.6℃(2ヵ月後)
- ・ 土壌発熱開始から約2ヵ月（50℃に達してから、約1ヵ月）で、深度2.0m付近までは、溶出量基準以下にまで低下。更に深い深度でも溶出量が低下
- ・ リバウンドの要因となる含有量の低下も確認

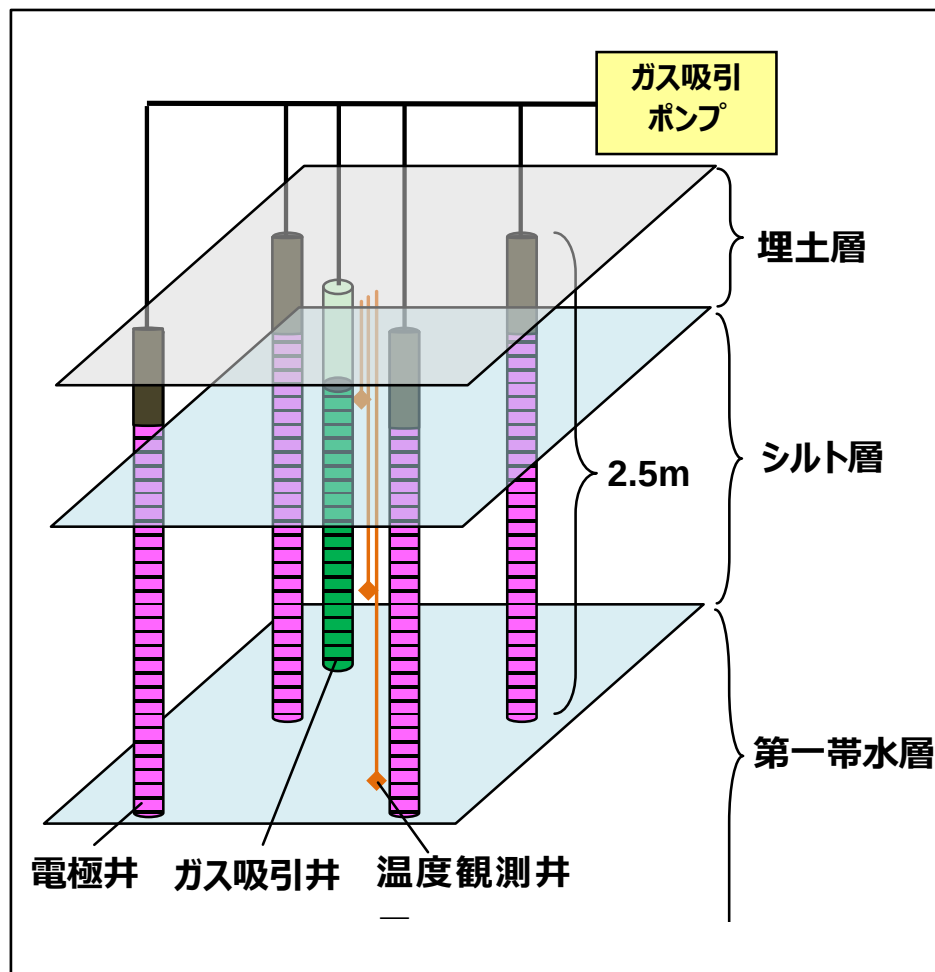
ガス吸引によるシルト層の浄化は困難
電気発熱によるシルト層の浄化が可能

これらの結果を踏まえ本対策への移行が決定

4-4. 原位置浄化事例（4） 宙水への適用事例（水蒸気回収）



【平面図】

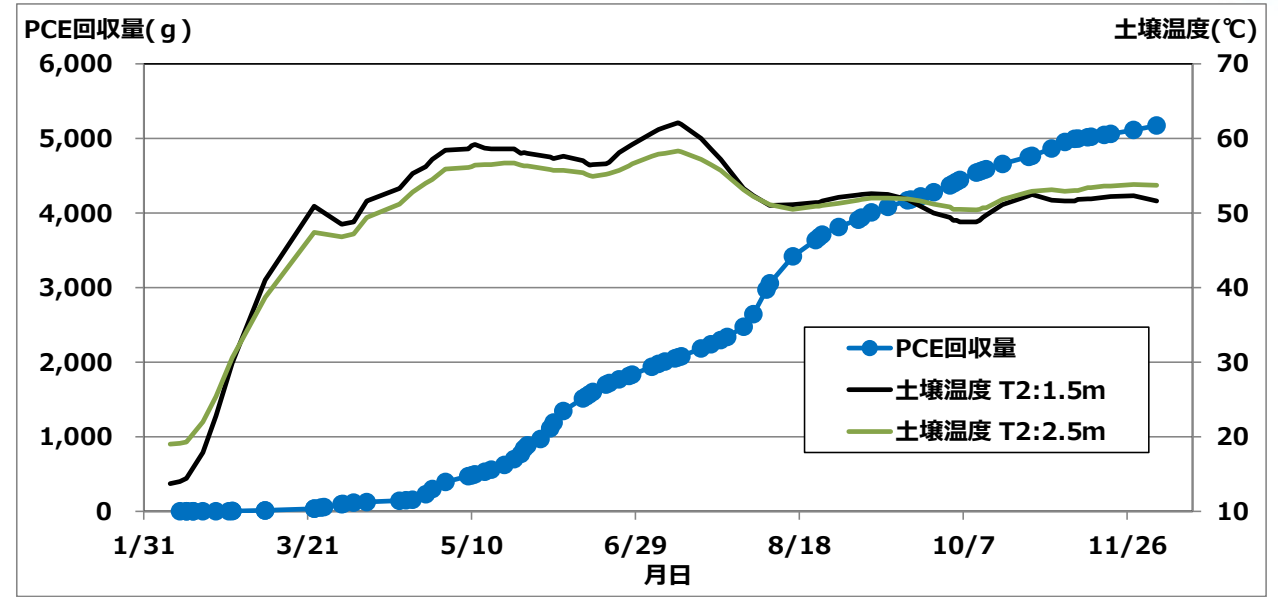
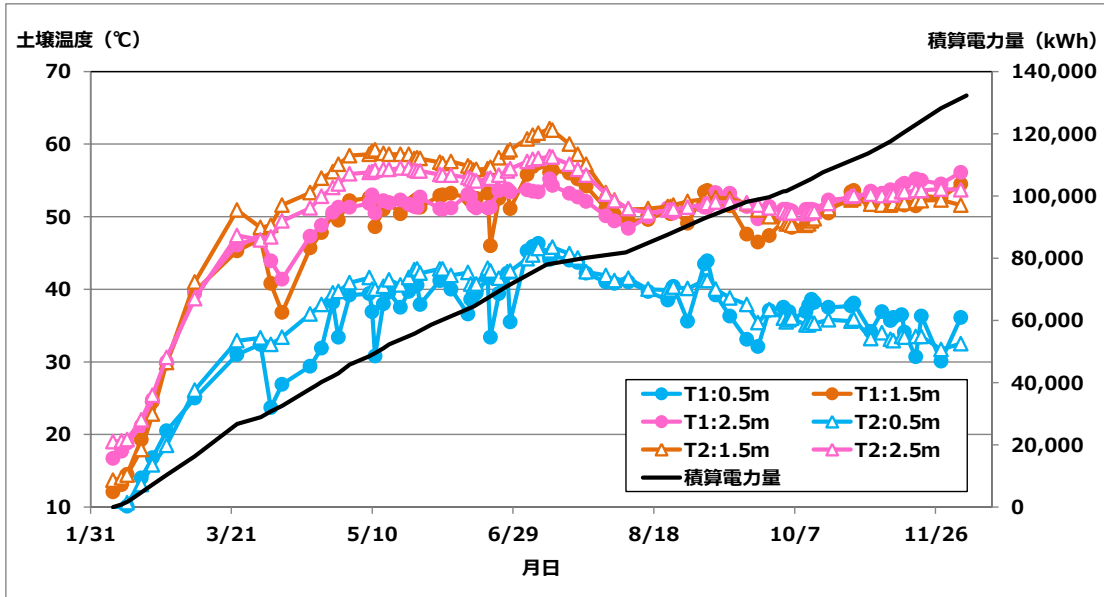


【断面図】

施工上の課題

- ・ 電気室や工場建屋のため、電極井を均等に配置することができない。
 - ・ 電気室内の室温上昇を抑えるため深度50cm以浅の土壌温度を40℃以下とする必要がある。
- ↓
- ・ 電気室内にも1箇所電極井を設置し、土壌温度を制御できるようにした。
 - ・ 電極井から宙水を回収できる設備とし、電気室内での工事を可能な限り少なくした。

4-4. 原位置浄化事例（4） 宙水への適用事例（水蒸気回収）

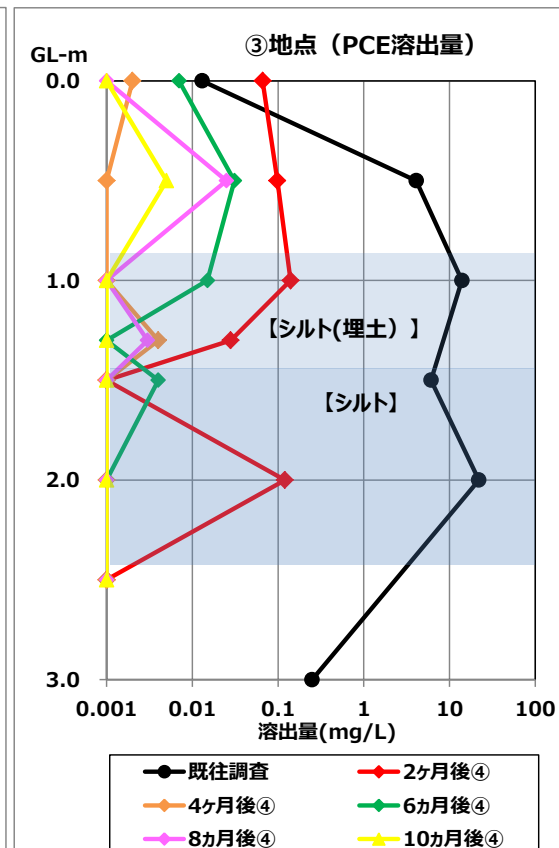
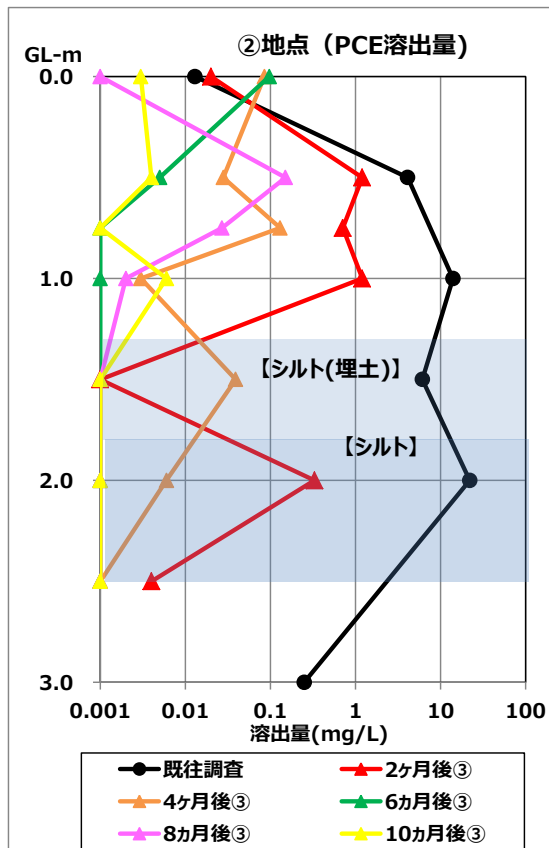
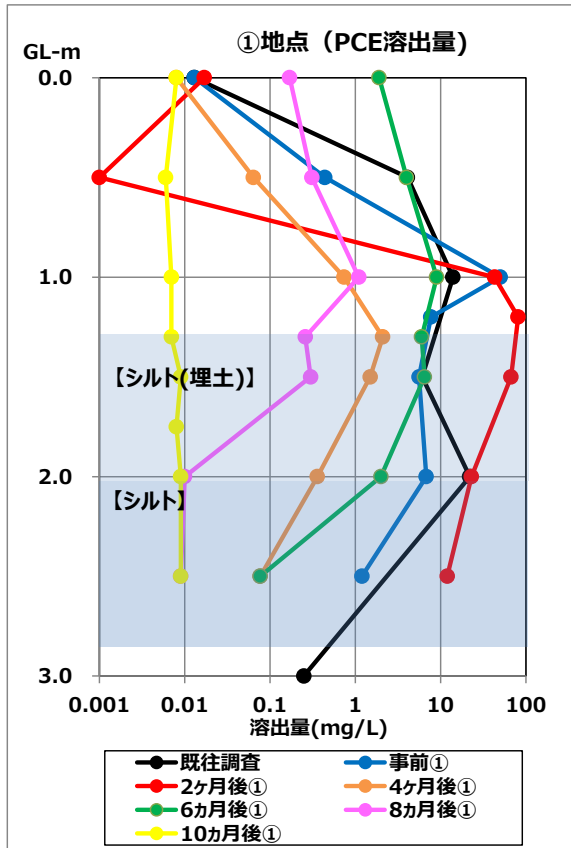


- ・ 浄化期間の後半では、地点間及び深度（1.5m及び2.5m）での温度差がなくなり、シルト層については均質に昇温した。
- ・ 深度50cm以浅については、ほぼ40℃以下にコントロールできた。

- ・ 土壤温度を50℃程度で維持することでPCE回収量が増加した。
⇒ 回収ガス中のPCE濃度の上昇だけではなく、ガス吸引量自体が増加したことも要因
- ・ 浄化期間後半に回収量が減少した。
⇒ ボーリング調査（次項）結果のとおり、土壌中のPCE自体が減少したことが要因



4-4. 原位置浄化事例（4） 宙水への適用事例（水蒸気回収）



既往調査(●)では、PCEが溶出量で50mg/L以上で確認

電気発熱法による浄化開始後、2か月毎にボーリング調査を実施

地点によりばらつきはあるものの、10ヶ月(●)では、全ての地点で全深度、溶出量基準値以下となった。
⇒含有量も減少し、リバウンドリスクも低いと判断

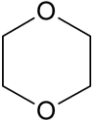
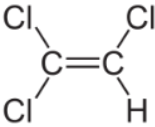
微生物分解生成物のVCMは浄化期間中不検出であったため、物理的な回収により浄化進んだものと考えられる



1. 原位置浄化の現状と課題
2. 加熱処理法としての電気発熱法の原理と特徴
3. 電気発熱法ハイブリッド浄化（水蒸気輸送・化学分解・微生物分解）とその実績
4. 実サイトにおける電気発熱法ハイブリッドによる浄化事例
 - 4.1 バイオ適用サイトでの浄化事例
 - 4.2 熱活性過硫酸を利用した浄化事例
 - 4.3 不飽和帯を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
 - 4.4 宙水を対象（水蒸気輸送）とした浄化事例
5. 加熱処理法の今後の展望

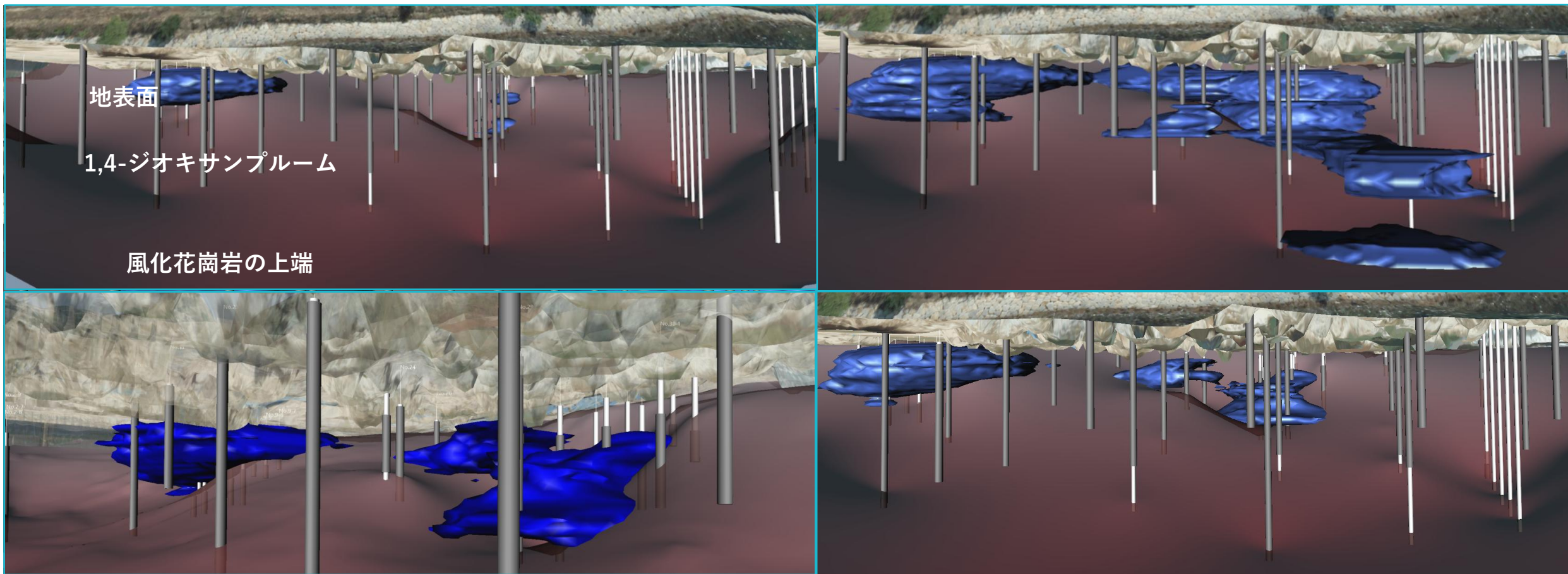


5. 加熱処理法の今後の展望 1,4-ジオキサン^①の物性

	1,4-ジオキサン	トリクロロエチレン
構造	$C_4H_8O_2$ 	C_2HCl_3 
分子量	88.1	131.4
融点	11.8 °C	-84.8 °C
沸点	101.1°C	86.9°C
比重	1.03(20°C)	1.46 (25°C)
蒸気圧	37 mmHg(25°C)	69 mmHg(25°C)
ヘンリー定数	0.29Pa m ³ /mol(20°C)	998Pa m ³ /mol(25°C)
分配係数(log Pow)	-0.27	2.42
解離定数	解離基なし	解離基なし
水溶性	水に任意に混和	1,280 mg/L(25°C)
土壌吸着定数(log Koc)	1.23	1.83

- 融点が高い
⇒低温になると流動性が低くなる
- 比重が水よりわずかに大きく、解離基を持たない、水と任意の割合で混和する
⇒平面方向にも深度方向にも汚染が広がる
- ヘンリー定数が小さい
⇒水が共存するとガス調査が難しい
- 土壌吸着定数が小さい
⇒表層土壌に留まりにくい

5. 加熱処理法の今後の展望 土壌・地下水汚染の特徴



実汚染サイトにおける地下水中の1,4-ジオキサンブルームの変化（可視化モデル）

※地下水汚染ブルームは深度別の地下水調査結果を用いたもの

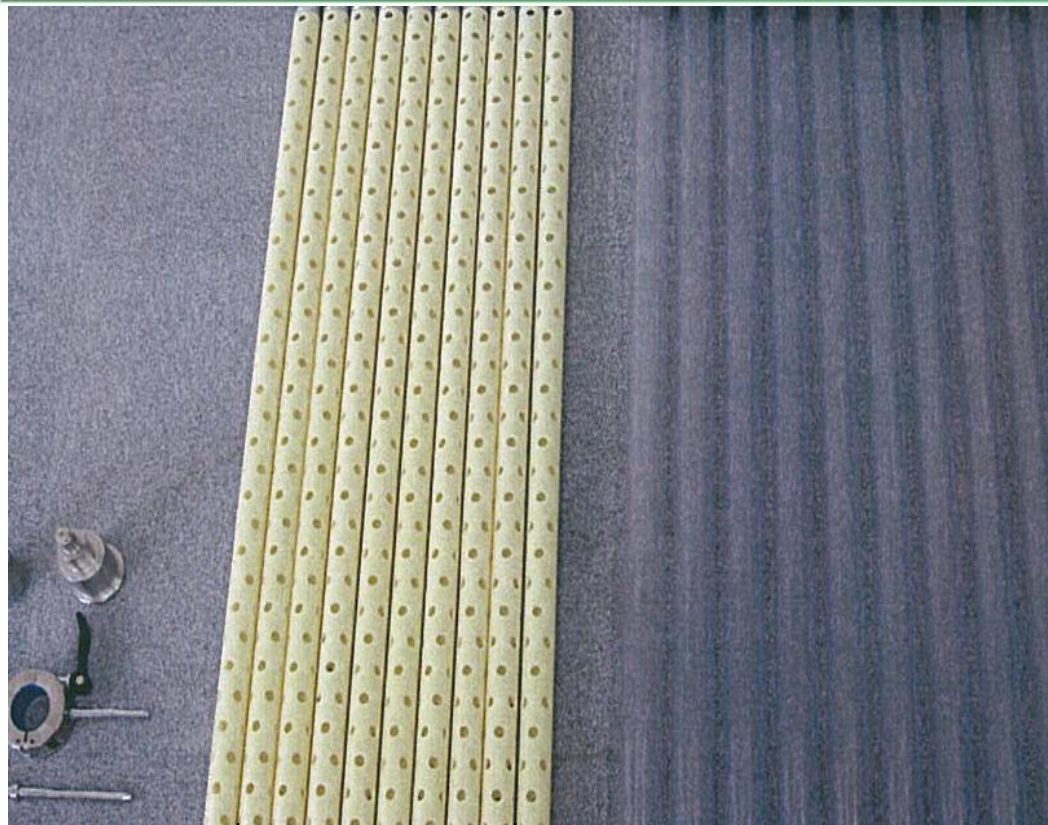


5. 加熱処理法の今後の展望 調査における留意点

1,4-ジオキサン物質特性とこれまでの経験からの「調査における留意点」

- 資料等調査において、副生成物の履歴の把握が難しい
- 地盤中で揮発しても間隙水に再吸収されるため土壌ガス調査による絞込みが難しい
(第一種特定有害物質とは異なる点)
- 表層土壌で止まらずに地盤下部に浸透していく
(第二種・第三種特定有害物質とは異なる点)
- 地下水とともに移動しながら深部にも拡散するため、汚染源に残らない場合がある、
難透水層の下部まで汚染が到達することがある
(解離基は持たないが、水と混和し、比重もわずかに重いという1,4-ジオキサン特有の物性による)
- 水文地質調査では、下部の帯水層も対象にする必要がある。
- 生物分解・化学分解に対し安定なため、自然減衰は見込めない
(ベンゼンや塩素化エチレンとは異なる点)

5. 加熱処理法の今後の展望 深度別地下水調査の有効性



内管

外管



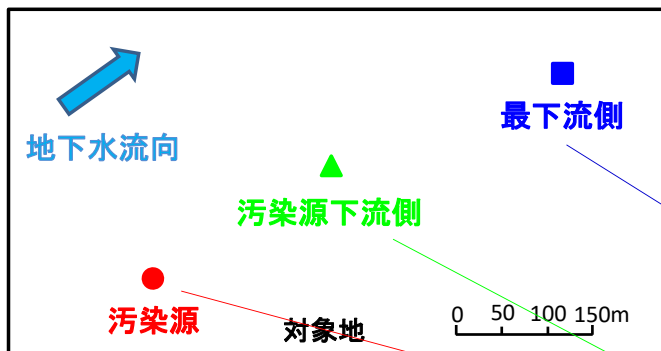
採取方法

- ①井戸洗浄や滞留水のパージ
- ②観測井戸内に、ストレーナー付きの内管を1ずつ繋ぎながら挿入
- ③地下水が安定するまで静置（1週間程度）
- ④内管の外側に外管を挿入し、各深度（1m毎）の地下を採水管内に密閉
- ⑤内管と外管を共に引き上げ、各深度毎に水封状態にある採水管を切り離して、地水を採取する。

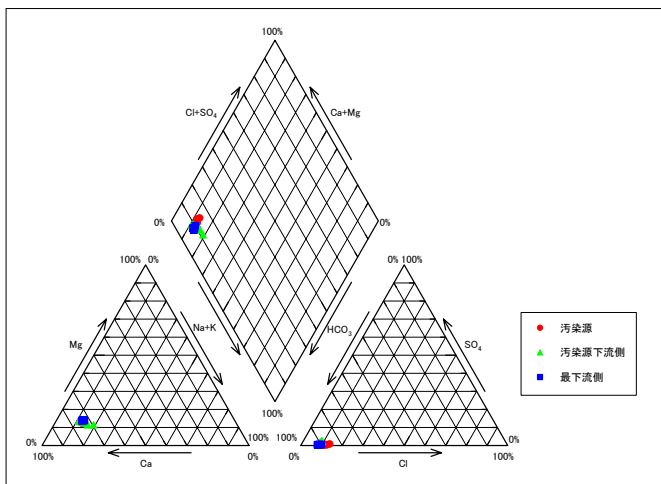


同一帯水層の地下水を乱ことなく、深度毎（1.0m毎）に採取することが可能

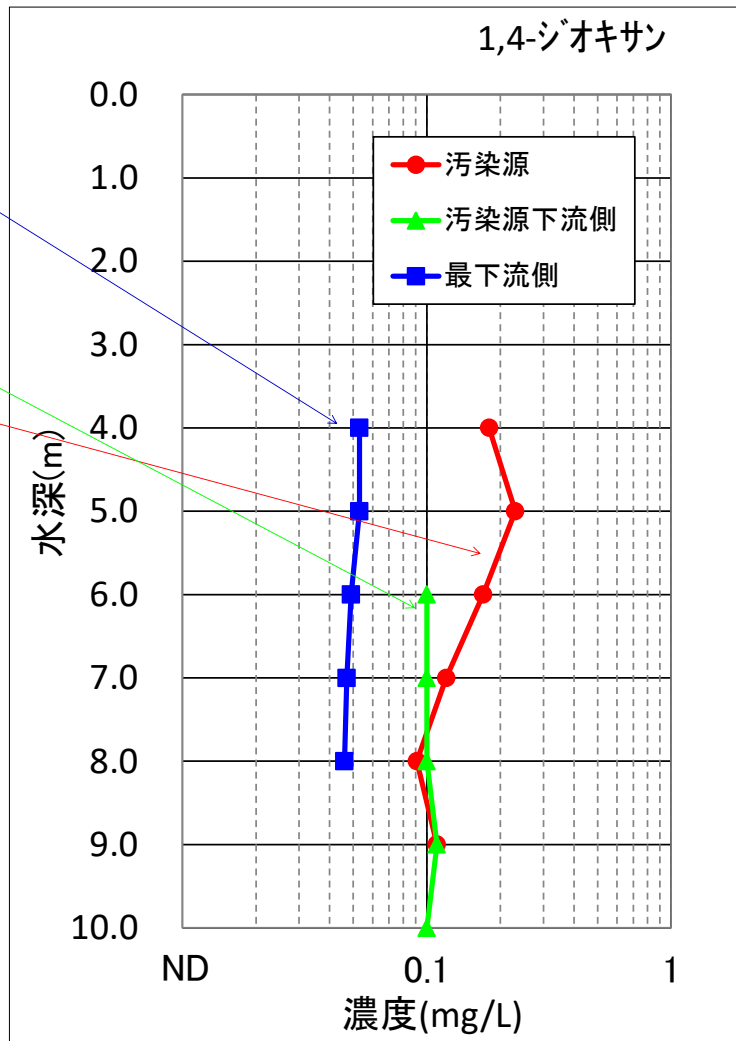
5. 加熱処理法の今後の展望 深度別地下水調査の有効性



観測井配置



地点別トリリニアダイアグラム



地下水中1,4-ジオキサンの深度分布

- ・ 下流側の2地点（■▲）では、同一の帯水層において、1,4-ジオキサン濃度に深度方向の濃度勾配は確認されなかった。
- ・ 汚染源の観測井戸（●）では、濃度勾配（最大2倍程度）が確認された。
- ・ 主要溶存イオン濃度では、全地点・深度ともに水質の差はほとんどなかった

汚染源における1,4-ジオキサンの濃度勾配は、水塊の違いではなく、浅層部からの浸透によるものと考えられる。

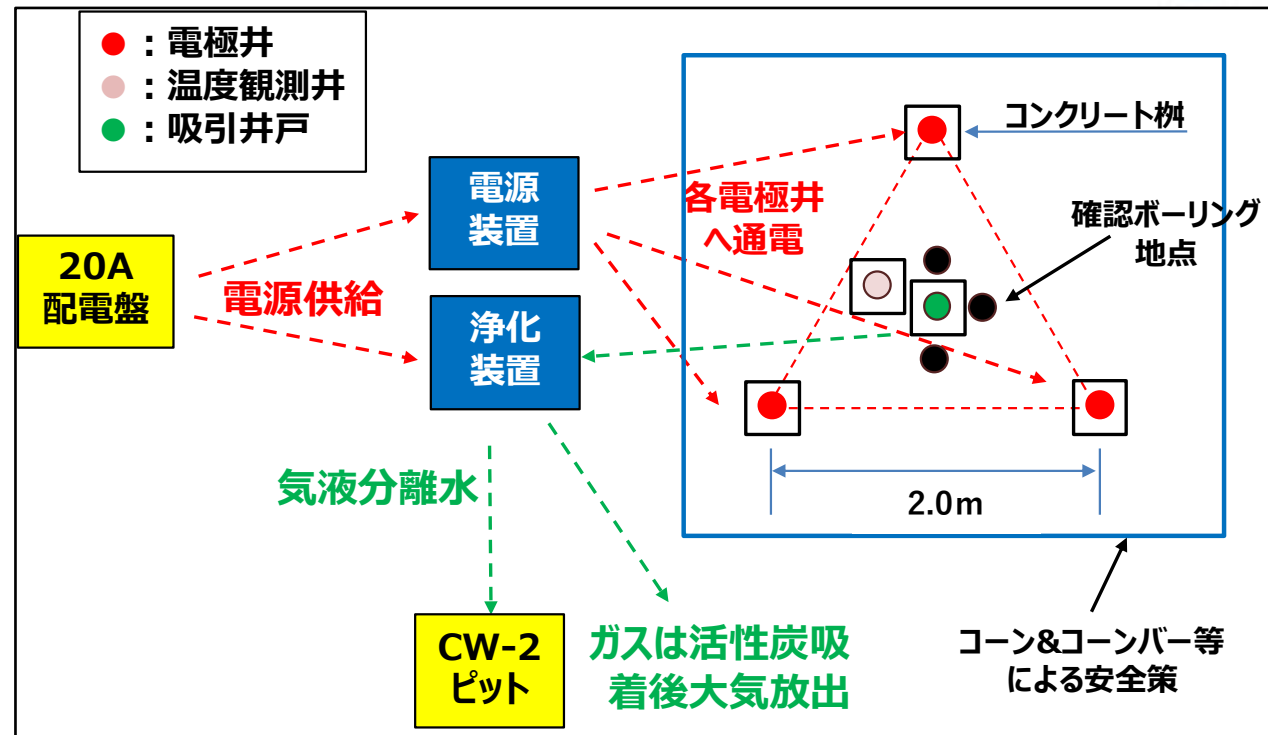
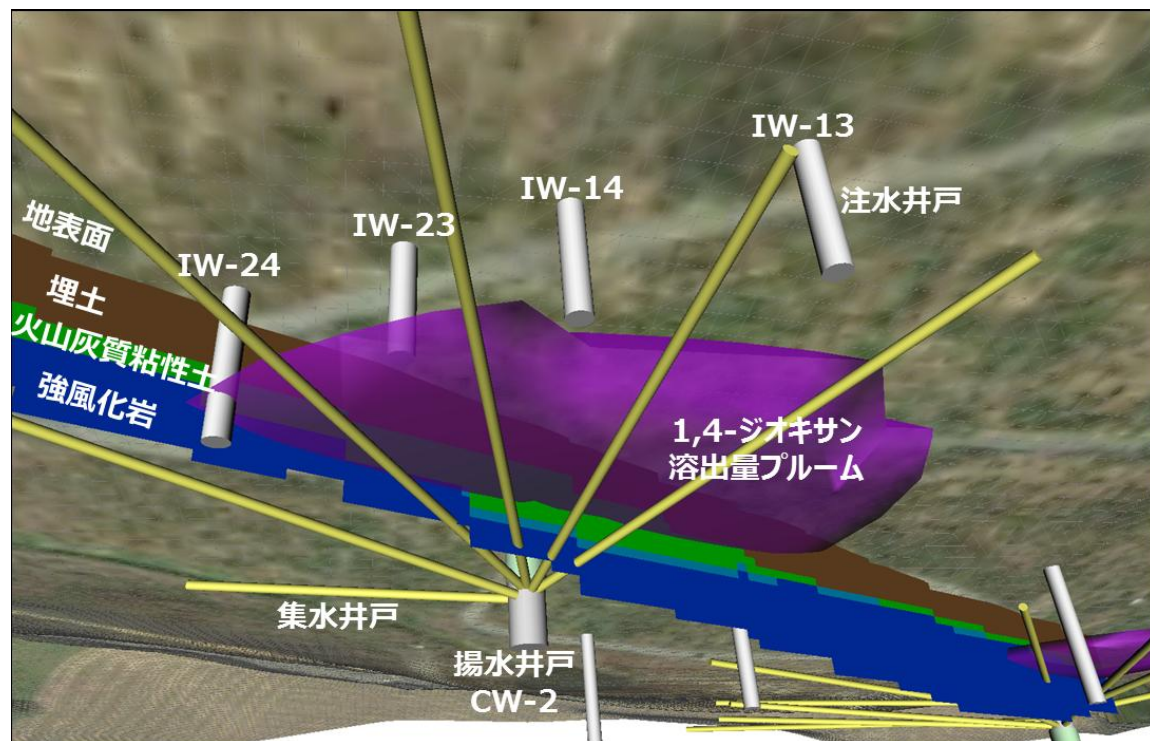
平面分布だけではなく、深度分布を把握することで汚染の浸透源の推定が可能



5. 加熱処理法の今後の展望 原位置浄化の適用性

浄化工法		留意する特性	既存工法の課題
物理的 手法	ガス吸引	・ ヘンリー定数が小さい ($0.29 \text{ Pa m}^3/\text{mol}$) ・ 蒸気圧が低い ($37\text{mmHg}$) ・ 水と自由に混和する ・ 土壌吸着係数が小さい ($\log \text{KOC}:1.23$) ・ 凝固点が高い (11.8°C)	・ 真空吸引での回収は困難である ※ 含水が高いと効果は更に悪くなる
	揚水		・ 不飽和帯や透水性が悪い地層には適用できない (土壌間隙水に入り込んだ1,4-ジオキサンの回収が困難) ・ 温度が低くなると、移動性が極端に低下する
化学的 手法	酸化分解	・ 加水分解に対し安定 ・ 水中でのOHラジカルとの反応については、 現在利用できるデータはない ・ 水中においてオゾンによる分解は受ける	・ 化学反応に付随する効果（例えば、フェントン法におけるスパージング）が期待できない ・ フェントン法など鉄触媒を用いたラジカル反応による 浄化事例が少ない（事前に適用性の確認が必要） ・ 土質や共存物質によっては、十分な分解効果が得られない場合がある
	還元分解		・ 鉄粉での浄化実績はない
生物学的 手法	好気分解 還元分解	・ 微生物に対し難分解	・ 好気分解する菌も確認されているが、土壌・地下水 汚染浄化への実用化はされていない

5. 加熱処理法の今後の展望 加熱処理法

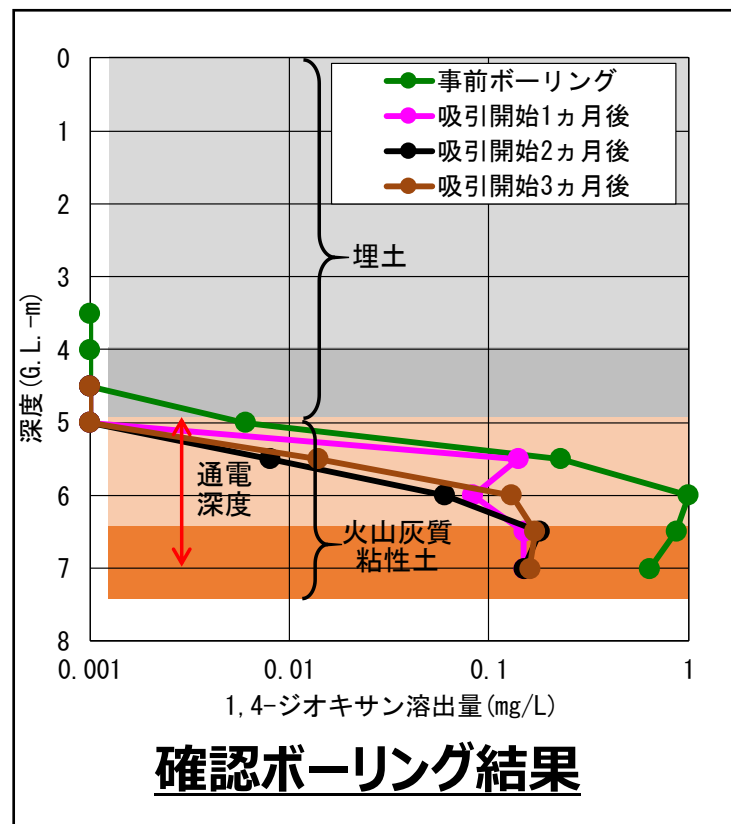
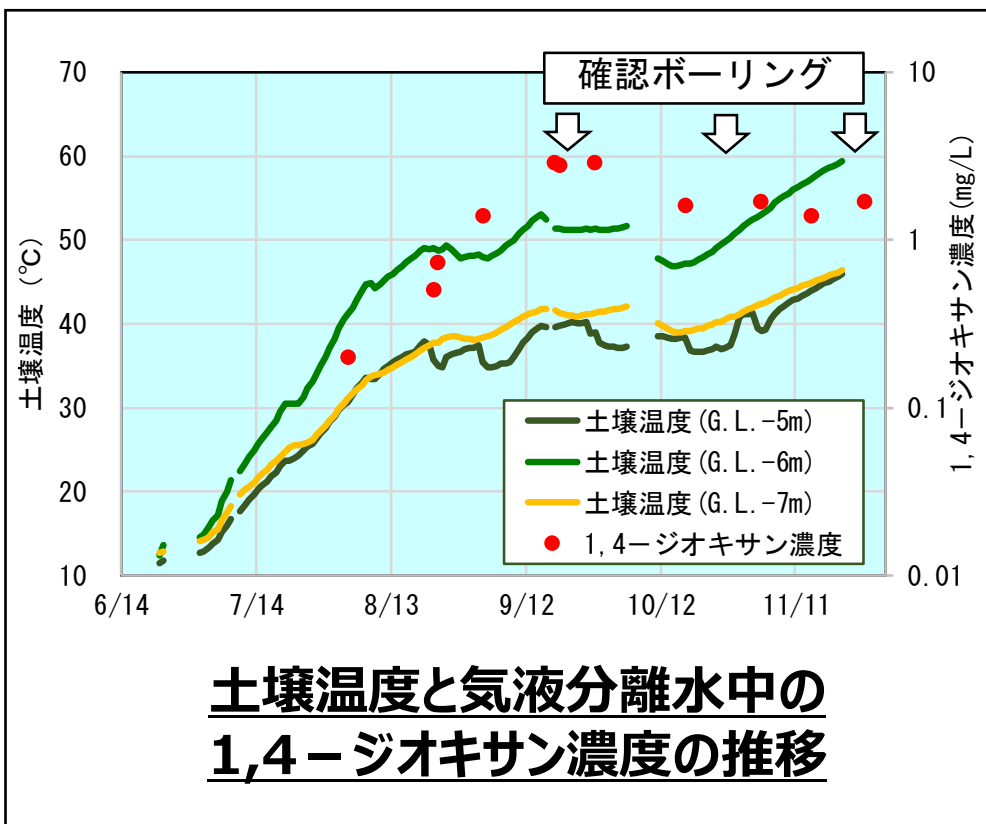


水平井戸による揚水対策が実施されていたが、地下水への1,4-ジオキサンの供給源は、深度4～8mに堆積する火山灰質粘性土層に存在しているため、浄化期間が長期にわたると予測された。

⇒現地パイロット試験を実施

※使用できる電力量が20Aであったため、小規模な範囲で実施

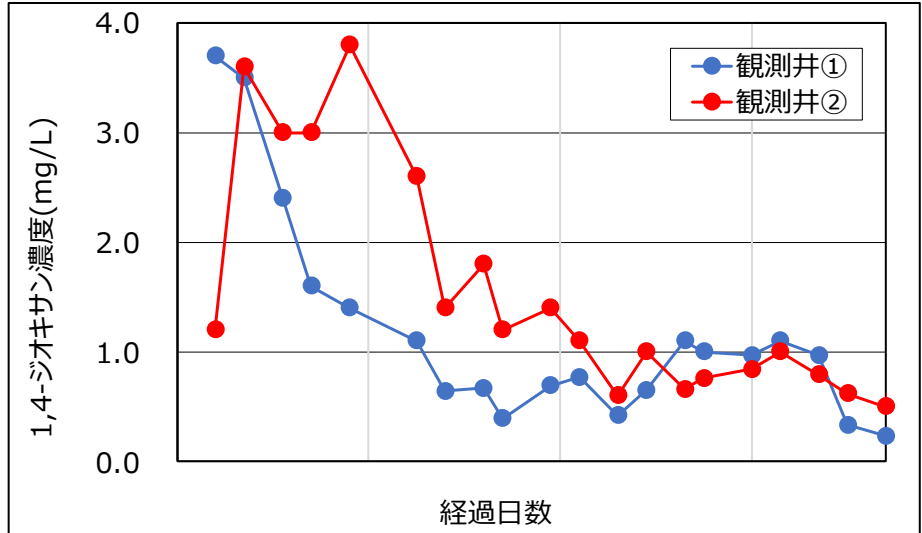
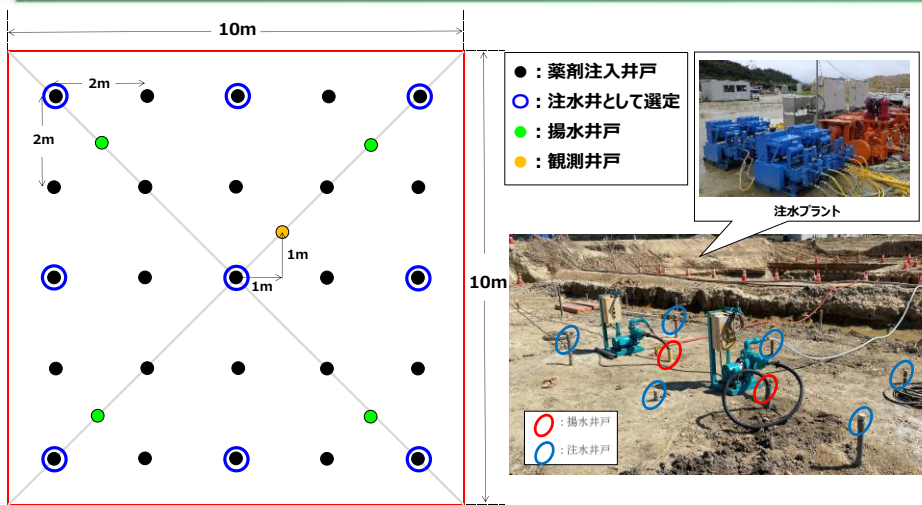
5. 加熱処理法の今後の展望 加熱処理法



- ・ 気液分離水中の1,4-ジオキサン濃度は、発熱前の20倍以上に上昇
⇒ 水蒸気輸送の効果
- ・ 発熱可能な平面範囲や深度が限定され、試験期間中に土壌溶出量が0.05mg/L以下とならない深度もあった。
- ・ 深度6m以浅は、DXA溶出量が定量下限値未満にまで低下、その時点においても、気液分離水中のDXA濃度は高い状態が継続し、DXAの回収が継続していた

水蒸気回収による
土壌浄化が可能

5. 加熱処理法の今後の展望 注水・揚水



深度 G.L.m	1,4-ジオキサン溶出量 (mg/L)		
	揚水対策前	注水前	注水後
0.0	—	<0.005	<0.005
-0.5	<0.005	<0.005	—
-1.0	<0.005	<0.005	<0.005
-1.5	<0.005	<0.005	—
-2.0	—	<0.005	<0.005
-2.5	0.014	0.005	—
-3.0	—	0.016	0.007
-3.5	0.11	0.086	—
-4.0	—	0.16	0.048
-4.5	0.21	0.22	—
-5.0	—	0.24	0.044
-5.5	0.12	0.21	—
-6.0	—	0.070	0.042
-6.5	0.25	0.025	—
-7.0	—	0.010	0.035
-7.5	0.007	<0.005	—
-8.0	—	<0.005	0.024
-8.5	<0.005	<0.005	—
-9.0	—	<0.005	<0.005

対策方法

砂質シルト層を対象にしたダブル
パッカー用のスリーブパイプを揚水
井戸の四方に配置し、注水を併用し
た揚水対策を実施
(2つの単位区画を対象施工)

水質モニタリング結果

観測井戸におけるDXA濃度は、約
2ヵ月間で両区画とも対策目標値以下

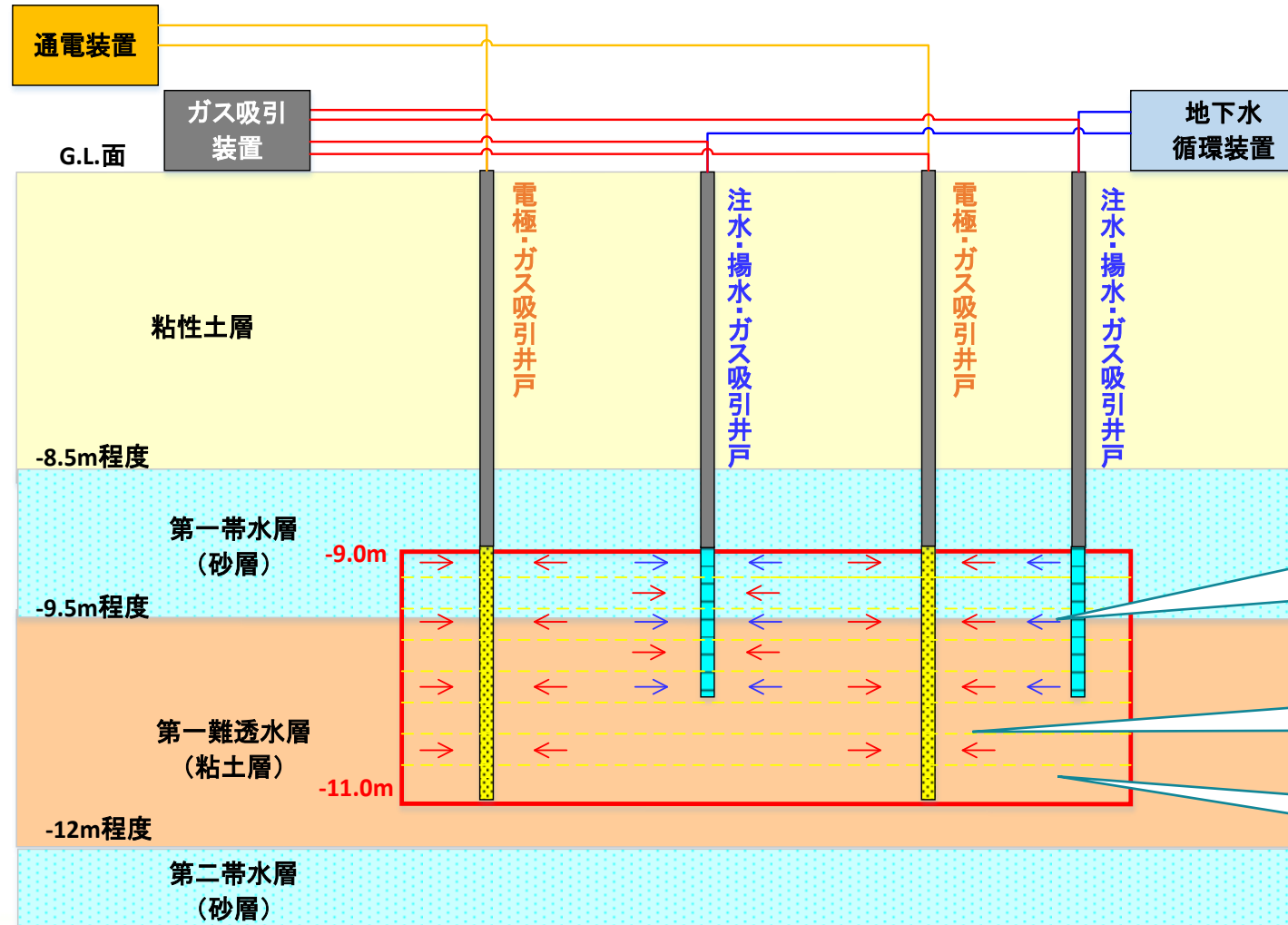
ボーリング調査結果

対策後に実施した確認ボーリングで
は砂質シルト層のDXA溶出量は、全
ての深度で0.05mg/L以下

DXAの土壌浄化では、注水の効果が
大きいことがわかった。これは、DXAが
土壌吸着しにくく、水に混和すると
いった特性によるものと考えられる。

5. DXAを対象とした原位置浄化 加熱処理法の今後

注水・揚水とのハイブリッド



電極井戸から3相交流電流を印加し、対象土壌を60～80℃まで昇温することで、VOCの溶解、間隙水の移動性を向上させる。
更に、揚水した地下水をばっ気処理後、注水する（地下水循環）ことで、VOCの回収効率を更に高める

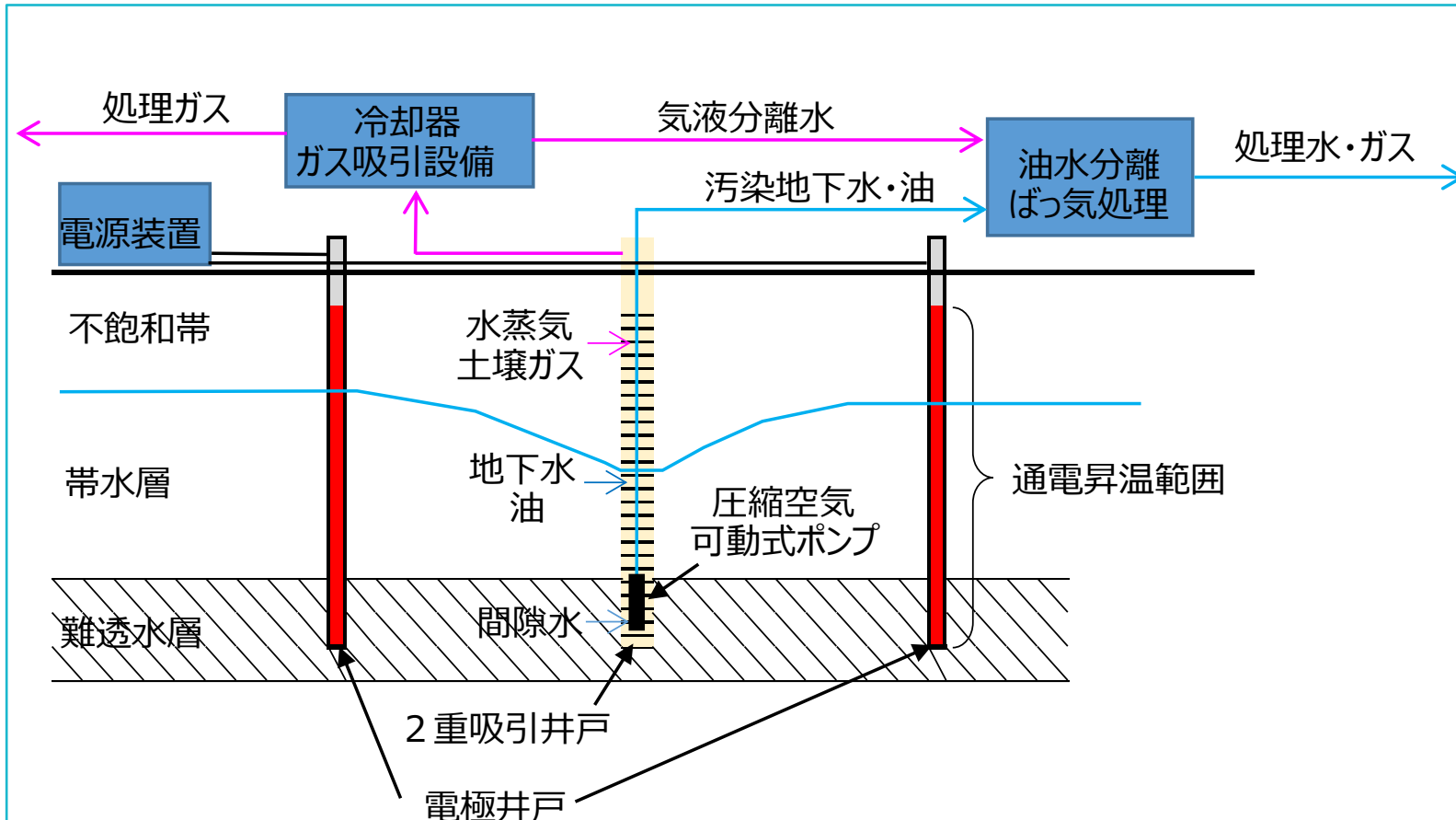
地下水の注水・揚水により、地下水中へ溶出するVOCの回収

ガス吸引により、気化するVOCの回収

通電による土壌温度の上昇

5. DXAを対象とした原位置浄化 加熱処理法の今後

油類が共存するサイトでの原位置浄化



【地下部】

- ・ 地下を40～90℃に昇温
(浄化対象物質に応じて設定)
- ・ 2重吸引井戸構造の対策井戸から地下水及び土壌ガスを同時に吸引
- ・ 電気発熱法を併用し、揚水後も温度を一定に保持
- ・ 通電エリアでは、水中ポンプは利用できないため、圧縮空気可動式ポンプを使用

【地上部】

- ・ 吸引ガスは、活性炭吸着後に大気へ放出
- ・ 気液分離水は、ばっ気処理後排水
- ・ 地下水は、油水分離し、鉱油類は、回収・性状に応じ適切に処分

ご清聴ありがとうございました。



情報をつなげる力で、
人・社会・地球の未来をデザインする

