

原位置熱脱着工法の技術概要

1. システム

原位置熱脱着工法（ISTD）のシステム模式図を図1に示す。

原位置熱脱着工法（ISTD）は地盤中に設置する電気ヒータにより伝導加熱し、土壤中の汚染物質・液体を気化[※]し、ガスはブロワで吸引し排ガス処理して大気に放出する。液相の場合は排水処理する。処理場所の表面には断熱コンクリート等のガスバリアを設置し、有害物質の拡散防止の他、エネルギーロス・雨水の侵入防止も兼ねる。また、温度モニタリング井戸、圧力モニタリング井戸が設置される。

※処理温度は対象物質により異なる。

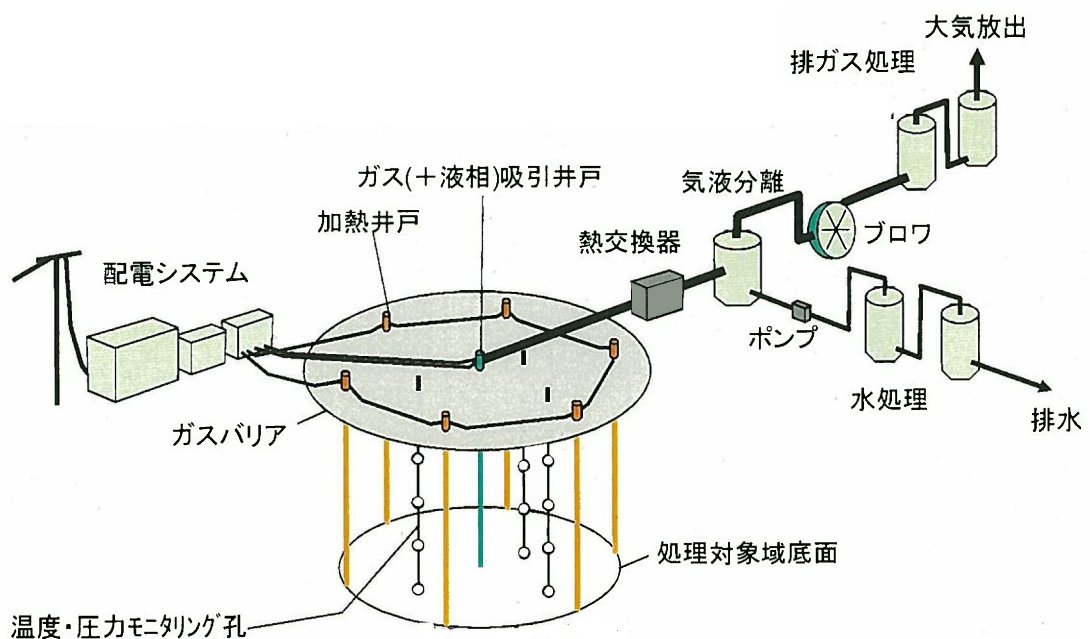


図1 ISTDの模式図

2. 加熱井戸

電気ヒータは加熱井戸に挿入される。加熱井戸の配置は、図2のように原則として正三角形の頂点に配置される。加熱井戸の間隔は、処理温度により設定する。実際の加熱井戸の設置状況、ガスバリアの状況等を図3に示す。

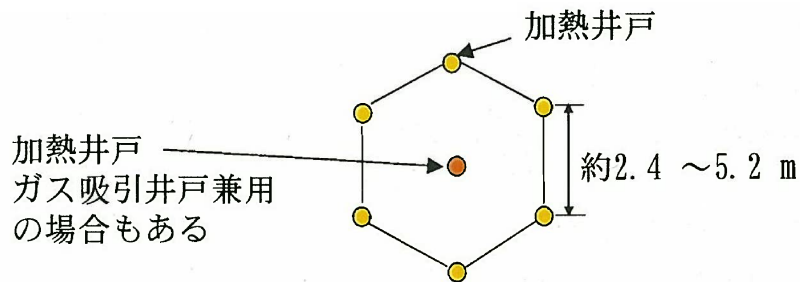


図2 基本的な加熱井戸の平面配置



図3 加熱井戸、ガスバリア、温度モニタリング井戸（熱電対）

3. 電気ヒータ

ヒータは図4のように、加熱井戸の鋼管の中に納められている。ヒータ周辺の直径30cm程度の部分では、速やかに500℃以上の高温となり、時間経過とともに加熱井戸間の温度も熱伝導によって上昇する。

加熱井戸間の温度分布及び残存水分率は図5のとおりである。水分がなくなるまではt1のように100℃の状態が続き、水分がなくなるとt2、そしてt3のように急速に温度が上昇すると考えられている。

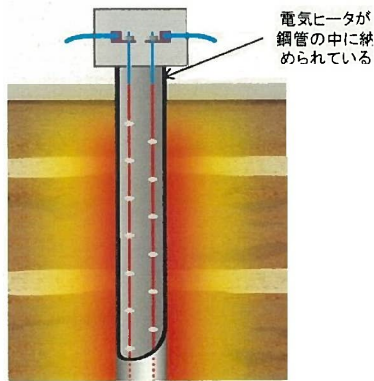


図4 電気ヒータ

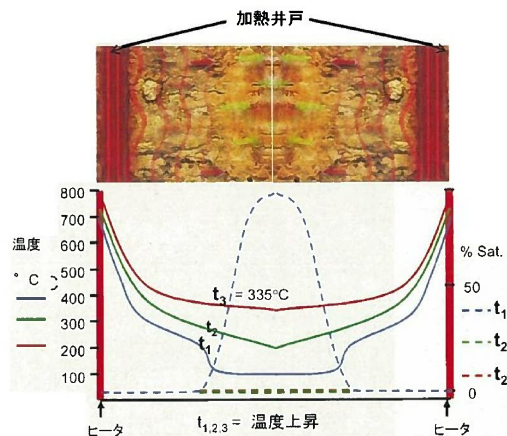


図5 ヒータ間の温度分布及び残存水分率

4. ヒータ間隔及び処理温度（初期判断基準）

ヒータの間隔及び処理温度については、表1に示すように対象物質によって目安がある。実際のヒータ配置は、処理対象域の形や土層分布を勘案し、シミュレーションを行い決定する。

表1 ヒータ間隔及び処理温度初期判断基準（目安）

対象物質例	浄化目標	処理温度 (°C)	ヒータ間隔 (m)	
			地下水面上	地下水面下
CVOCs、ベンゼン、トルエン、ガソリン	<1mg/kg	~100	5.2	4.6
ガス製造工場DNAPL	安定化	100	4.6	3.7
ナフタレン	<1mg/kg	100	4.6	3.7
ディーゼル油	<10mg/kg	200	3.7	現場毎に検討
PCBs、DXNs、クレオソート、ガス製造工場DNAPL	<0.001mg/kg	335	2.4	現場毎に検討

処理温度・ヒータ間隔は**初期判断基準【目安】**

処理温度が100°C超の場合、処理対象内の水分は全て蒸発させることが必要

5. 加熱オペレーション

図6の例のように、対象域の温度が目標温度に到達後は、所定期間が経過するまでその温度を保持する。

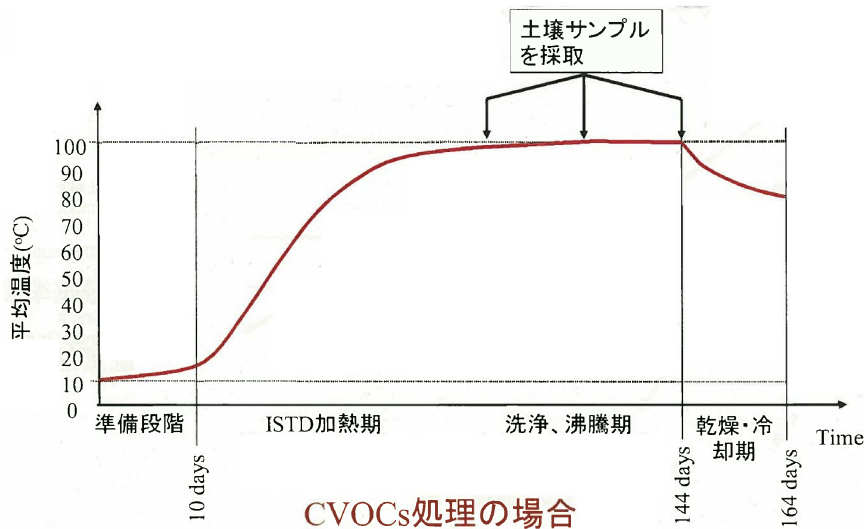


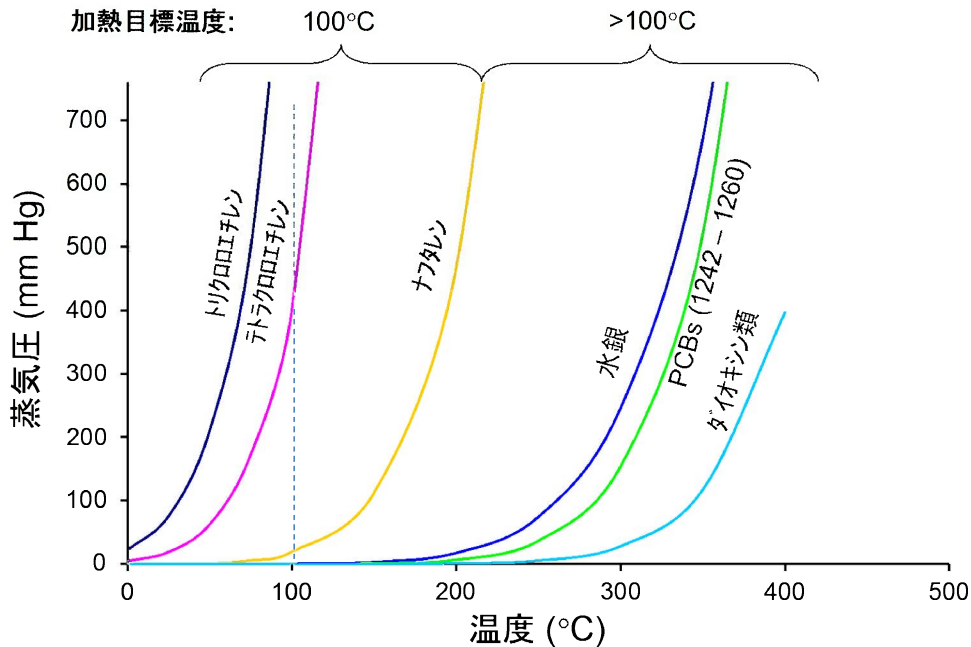
図6 加熱オペレーション（準備段階～加熱期～洗浄、沸騰期～乾燥冷却期）

6. 加熱による浄化のメカニズム

(1) 温度上昇による蒸気圧の増大

図7のように、加熱井戸で加熱することにより、蒸気圧が増大する。ガス化した有害物質を吸引・地盤内から除去が可能となる。

加熱(温度上昇)により蒸気圧は指数的に増大する

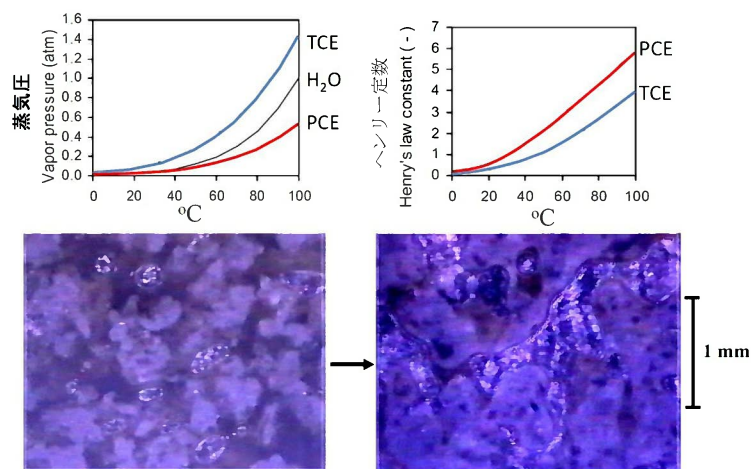


(2) 水蒸気蒸留による有害物質の除去

温度上昇に伴い VOC の蒸気圧は上昇する。左下のグラフに示すように、TCE は水より蒸気圧が高いが、PCE は同一温度下でも水より蒸気圧が低い。しかし、右下グラフのように PCE、TCE のヘンリー定数は温度上昇に伴い増大し、水相よりも気相に移りやすくなる。

VOCs及び軽量なSVOCs – 100°C

– 蒸発及び水蒸気による除去 (Steam Stripping)



帯水層中では温度上昇に伴い、気相は連続相を形成し、VOC ガスは連続相を通過して移動する。また水は、気化に伴い体積が 1600 倍程度に増大し、土壌間隙からガスを追い出すこととなる。この過程を図 8 に示す。

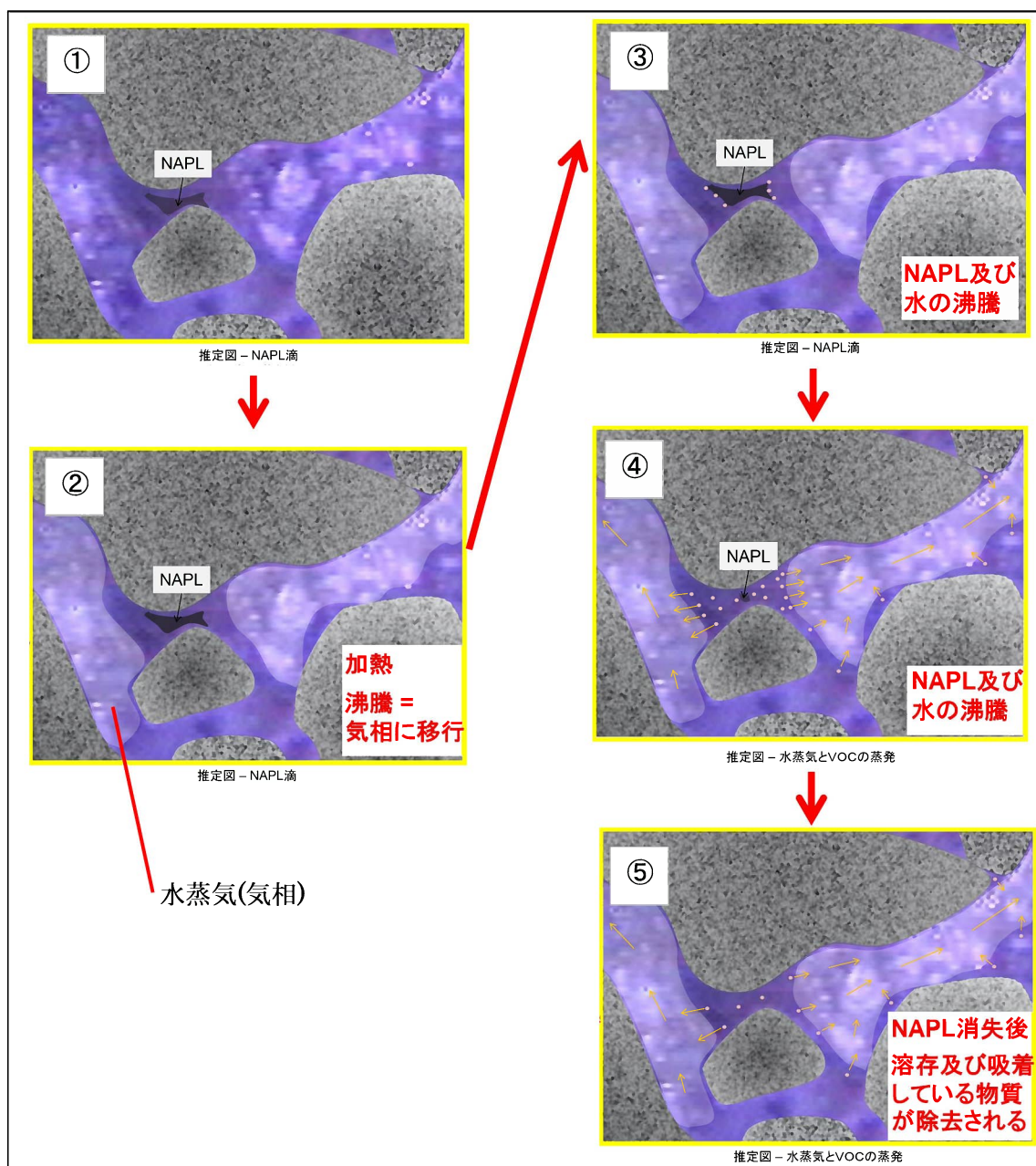


図 8 蒸気及び水蒸気による除去推定図

- ①加熱開始
- ②水が沸騰、気相が連続相を形成
- ③NAPL の沸騰
- ④NAPL の水蒸気(気相)への移行
- ⑤NAPL 消失後、溶存及び吸着している物質が除去される

(3) 温度上昇による粘度低下

図9の例のように、業務用のボイラーその他の燃料、灯油など、高粘度のものも加熱することで粘度が低下することがわかる。高粘度の有害物質も加熱井戸で加熱することにより粘度が低下し、物理的に除去することが可能となる。

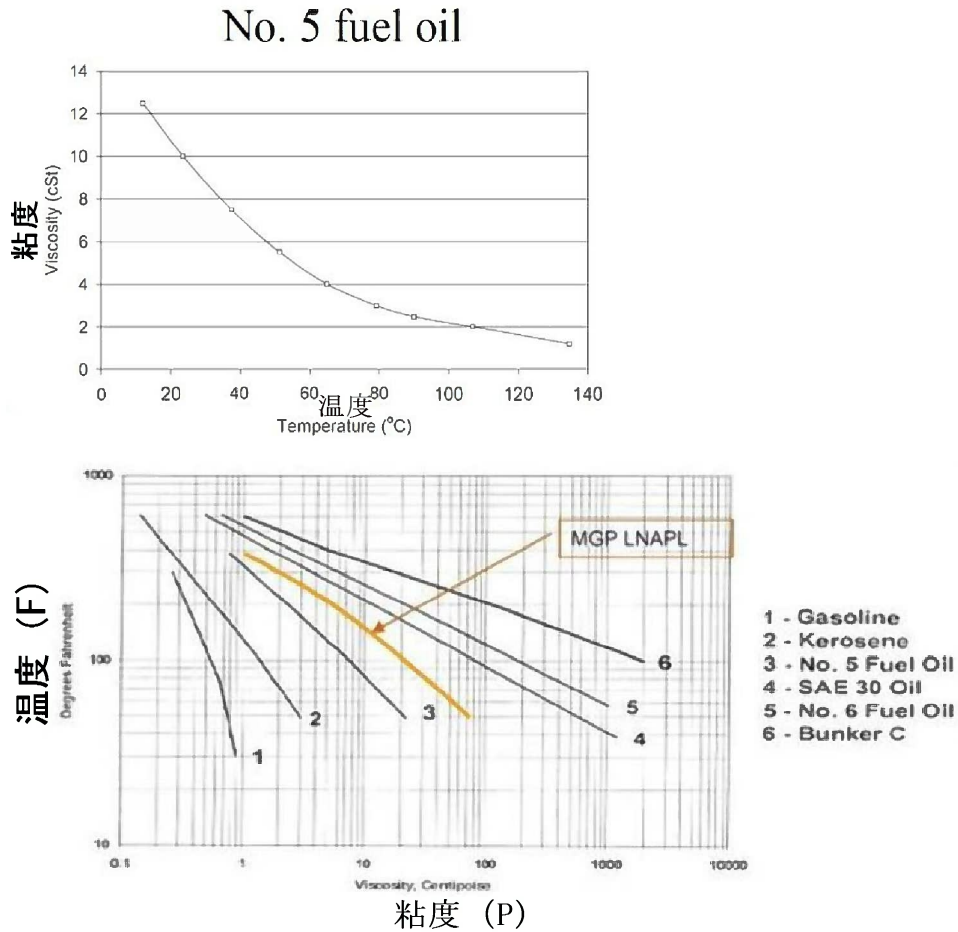


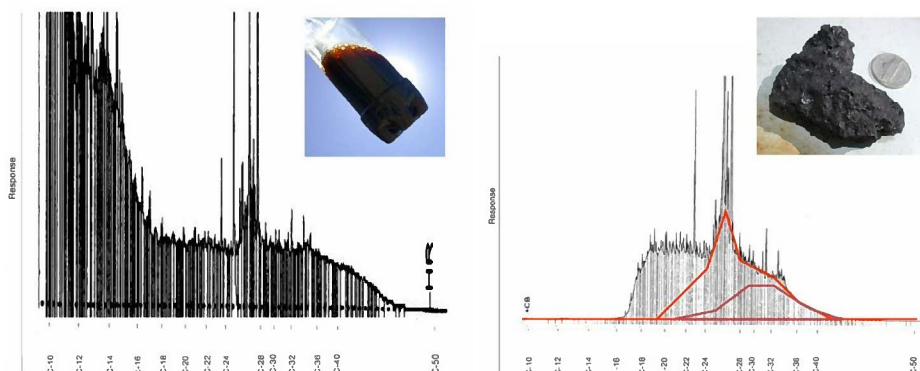
図9 高粘度物質における粘度と温度の関係

(4) 加熱による NAPL (非水溶性液体) の熱化学的な安定化

下図のように、100°Cの加温条件では、炭素数 16~18 以下の軽質油は、揮発性の高い塩素化 VOC と同様、加温や減圧によりガス態で回収されることが、North Adams, MA のガスプラントにおける段階的な加温処理事例で確認されている。

処理前の土壤中汚染の
典型的クロマトグラム

処理後の土壤中に残る成分の
クロマトグラム



(5) 土壌中での酸化分解または熱分解

100℃超の処理では、対象物質のほとんどが土壌中で分解される。処理期間中のガス吸引により、土壌中での再合成は生じない。

平成 20 年度環境省が「低コスト・低負荷型土壌汚染調査対象技術検討調査及びダイオキシン類汚染土壌浄化技術等確率調査」において実施された IPTD（パイル式熱脱着／分解法）の実証試験（以下、「環境省実証試験」という。）では、処理槽内温度 325℃で 95%以上のダイオキシン類の分解率が確認されている。

平成20年度環境省調査(実証試験)でのDioxins分解のマス・バランス

項目	総量 (ng-TEQ)	割合 (%)	備考
処理前	5.60E+06	100	
処理槽内での分解量	5.36E+06	95.724	
処理槽からの排出量	4.36E+04	0.779	排ガス処理
処理後	1.96E+05	3.497	

7. 排ガス・排水処理装置の例

図 10 は、VOCs の対策における排ガス・排水処理の例であり、活性炭吸着となっている。

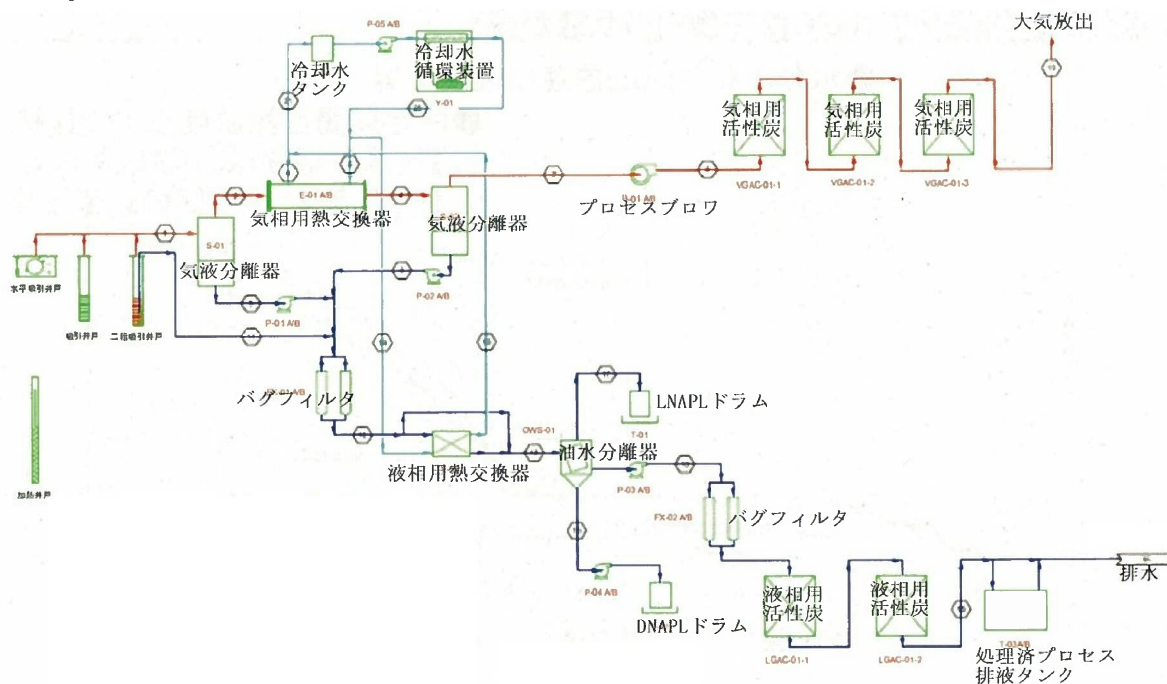


図 10 排ガス・排水処理装置例

図 11 は、環境省実証試験を行った時に用いた塩素系準揮発性有機化合物（ダイオキシン類・PCB 等）対象の排ガスユニットの例である。

排ガス中の有害物質は、熱酸化機を通して加熱分解し、さらに活性炭吸着槽で除去される仕組みとなっている。活性炭吸着槽とその後段にあるブロウが複数段になっているのは、万が一に備えてのバックアップ機能とメンテナンス時でも処理を継続できるようにしたものである。

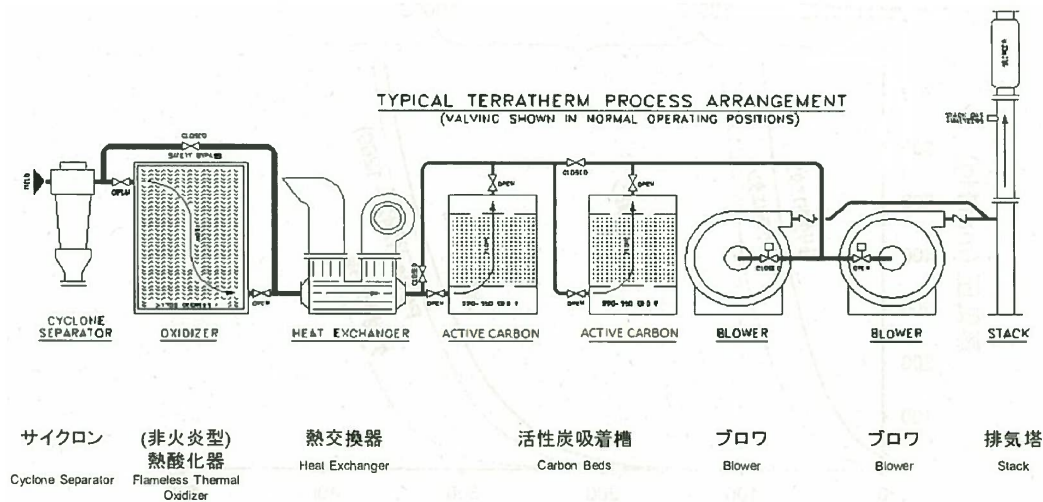


図 11 排ガス処理ユニット例

なお、PCB・油が存在している場合には、排ガス処理の前段で熱酸化器を設置することが想定される。熱酸化器は欧米では広く使用されている無炎熱酸化装置で、予熱されたセラミック媒体内において、排ガスに空気・補助燃料を混合して通し、セラミックからガス状混合物への熱移動によって有機化合物を無害な副生成物（二酸化炭素・水等）とするもの。環境省実証実験では排ガス中のダイオキシン類濃度は最高で $0.000083\text{ng-TEQ/Nm}^3$ であった。

図 11 の排ガス処理ユニットを用いた環境省実証試験では、特にトラブルもなく安定した運転ができ、昇温、降温制御も問題なかったと報告されているが、活性炭吸着装置のドレン対策とサイクロンダストが微量ではあるがダイオキシン類の濃度が 720ng-TEQ/g と高濃度であったという報告があるので、詳細検討時に留意したい。

8. 熱伝導による加熱のメリット

熱伝導による加熱のメリットは主なもので次の4点と考えられている。

- ① 土壌の熱伝導率は、土質（砂礫・砂・シルト・粘土）が異なっても、3倍以内であるため、土質に関係なく浄化することが可能である。一方、透水係数・透気係数は土質により 1,000,000 倍以上変動するため、揚水処理・土壌ガス吸引、薬剤注入等の方法では処理困難に陥ることがある。電気伝導度も土壌により 200 倍以上変動するとされている。
- ② 熱伝導による加熱では、汚染物質の取り残しがなく、岩盤クラック中の有害物質も除去が可能など、浄化対象域全てに対応することが可能。
- ③ 加熱井戸直近の土壌は水分の蒸発により乾燥状態となり、透気性が向上するため、透水係数・透気係数が低い地層でも問題なく原位置で浄化することが可能。
- ④ 加熱ヒータは、低温～高温まで温度を簡単に制御することが可能であるため、汚染物質、土質等、現場の状況に合わせて浄化することが可能。

9. ISTD の有利な点と不利な点

有利な点	不利な点
○厳しい基準を達成可能 ○掘削工事が不可能又は困難な場合も施工可能 ○複合汚染の浄化が可能 ○地層が複雑であったり、粘土など透水係数が低い場合も浄化可能	●現場の条件によっては、他の技術等の方が低コストになることがある ●高沸点揮発性有機化合物（SVOC）を含有する現場では、水の浸入をコントロールする必要がある ●加熱井戸の設置が可能な場所でなければならない

10. 実績

米国他 5 大陸で 50 件以上の実績がある。次頁以降に以下の事例資料を示す。

①ISTD 事例 カルフォルニア州 リッチモンド

②ISTD 事例 ニューヨーク州 シラキユース

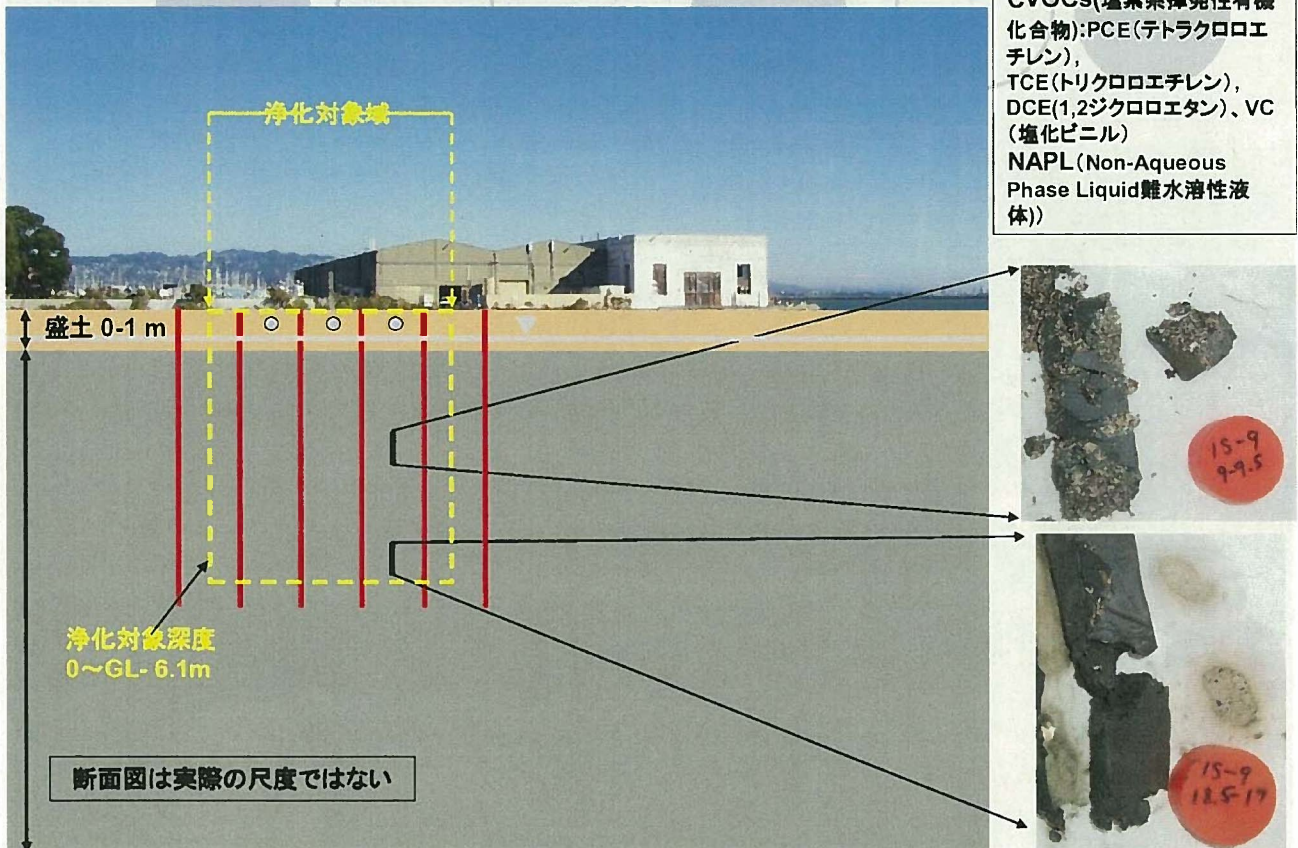
①ISTD 事例 カルフォルニア州 リッチモンド

対象物質	加熱期間	土量(m ³)	地盤	浄化前	浄化後	備考
PCE etc.	4 か月	5,120	底質汚泥	2,700mg/kg	0.2mg/kg	海面水位以下

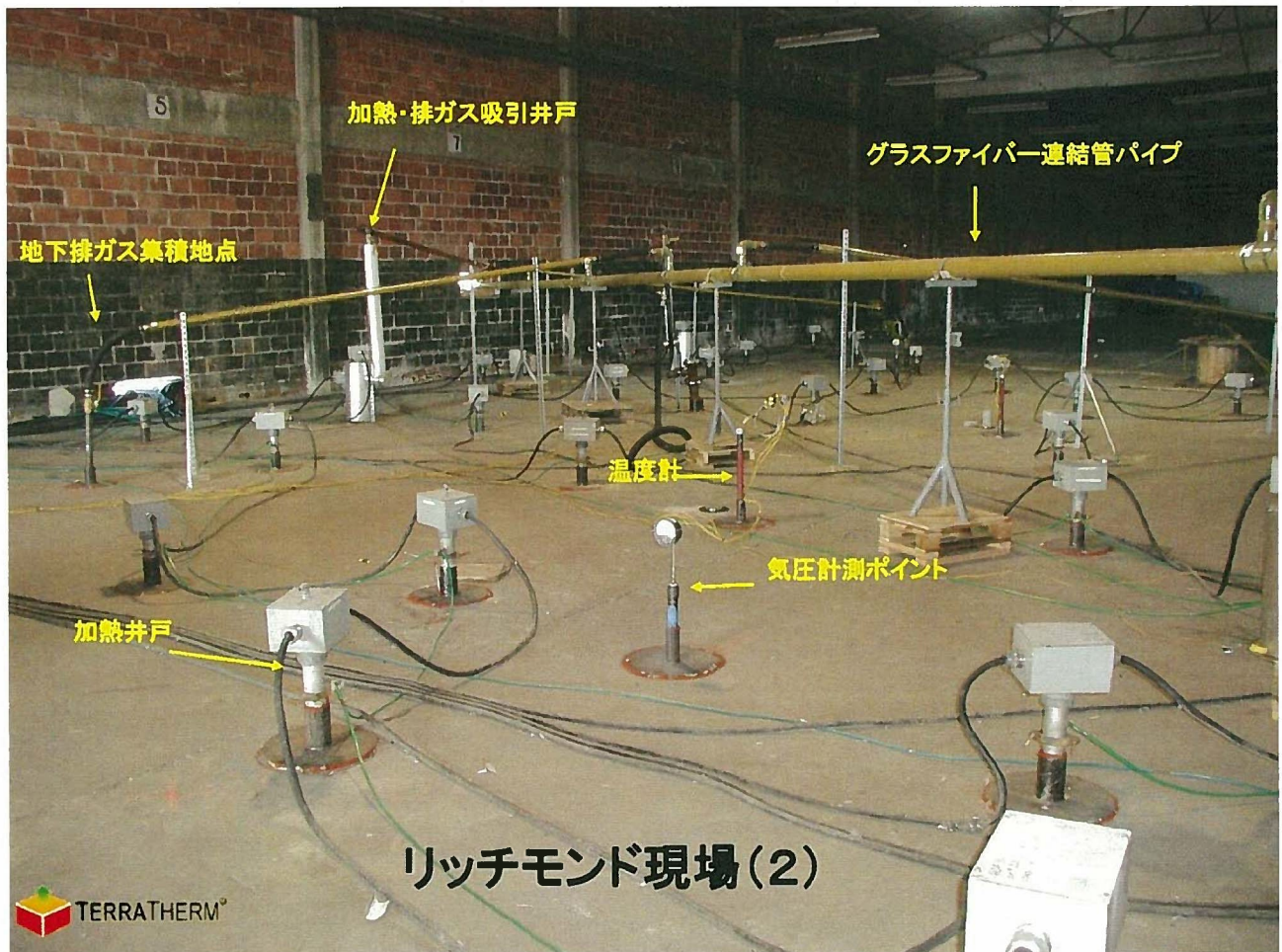


2018/5/25

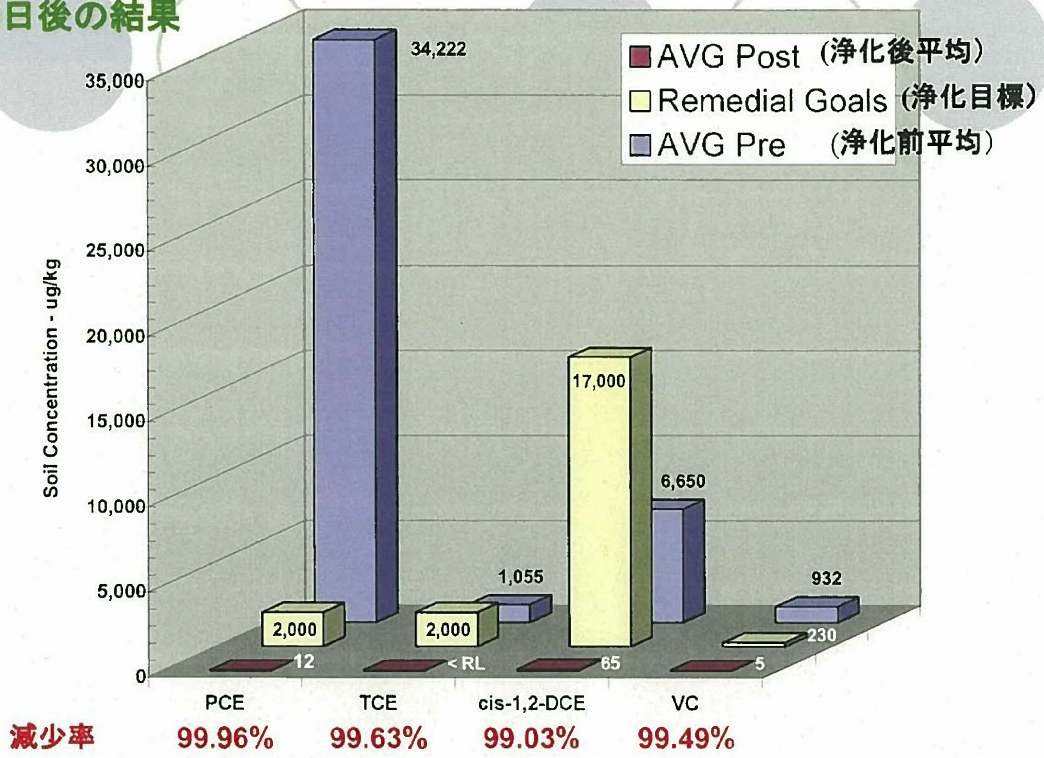
リッチモンド現場断面図



リッチモンド現場 (1)



リッチモンド現場 熱処理110日後の結果



2018/5/25



ターミナル1に計画された、350の集合住宅地域とウォーターフロント公園



2018/5/25

②ISTD 事例 ニューヨーク州 シラキユース

対象物質	加熱期間	土量(m ³)	地盤	浄化前	浄化後	備考
PCE etc.	10 か月	12,400	鋳物砂等埋 土、泥灰土	3,630mg/kg	3.8mg/kg	地下水面 GL-0.6~-1.2m

原位置熱脱着工法 (ISTD) によるVOC浄化事例



汚染現場の概要

- 工場跡地: ラジエーターとボイラー、ドライクリーニング用の機械を製造していた。→塩素化VOCに汚染
- 工場閉鎖後、10年間放置されていたが、商業施設として開発することになった。
- 地下水面下の粘性土上に高濃度のVOC汚染が存在していた。
- 有機分を多く含む地層。
- 4か所でDNAPLが見られ、内1か所は掘削し、残りの3か所の汚染度に加えられ、原位置熱脱着によって浄化工事が行われた。
- 1年後から始まる再開発に間に合うように浄化を完了しなければならないという時間的制限が設けられていた。
- 浄化工事と並行して、建設工事も行われた。





TERRATHERM®

解体工事全景

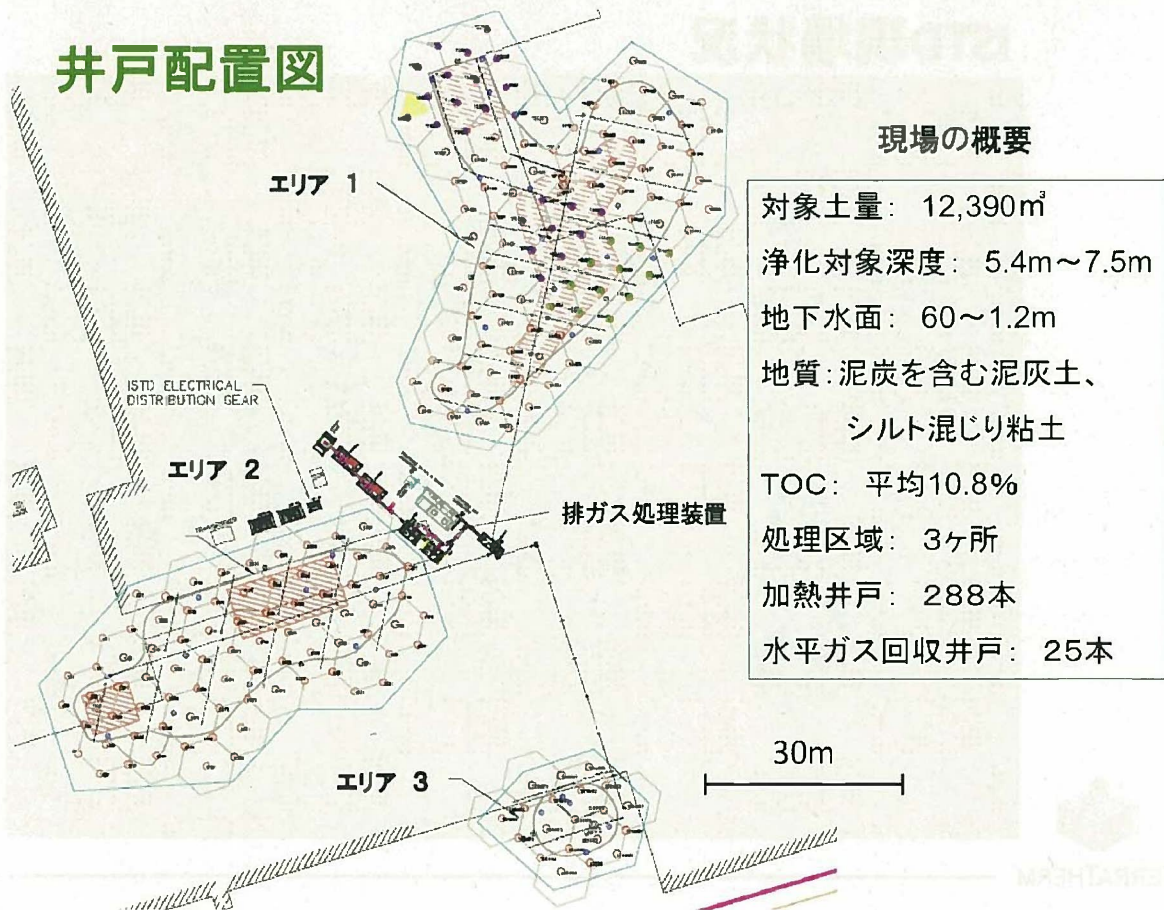


TERRATHERM®

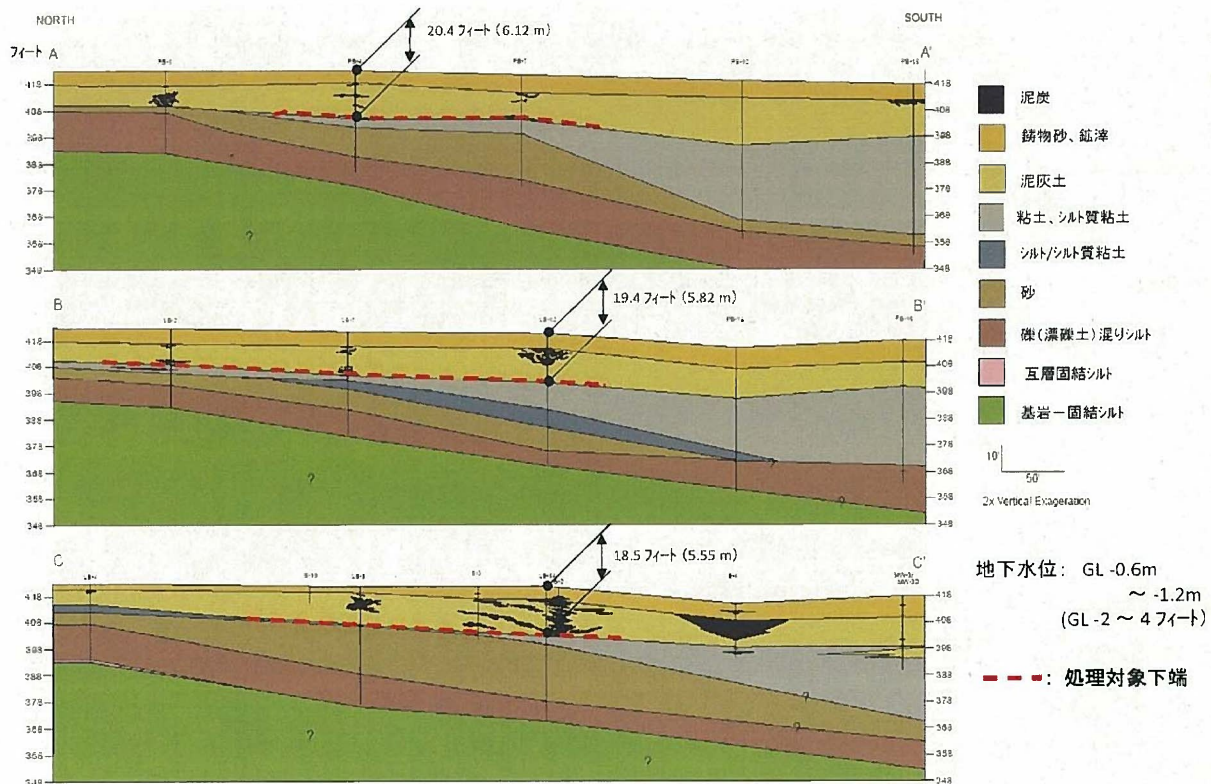
現場全景



井戸配置図



ミドラー街 断面図



ISTD現場状況



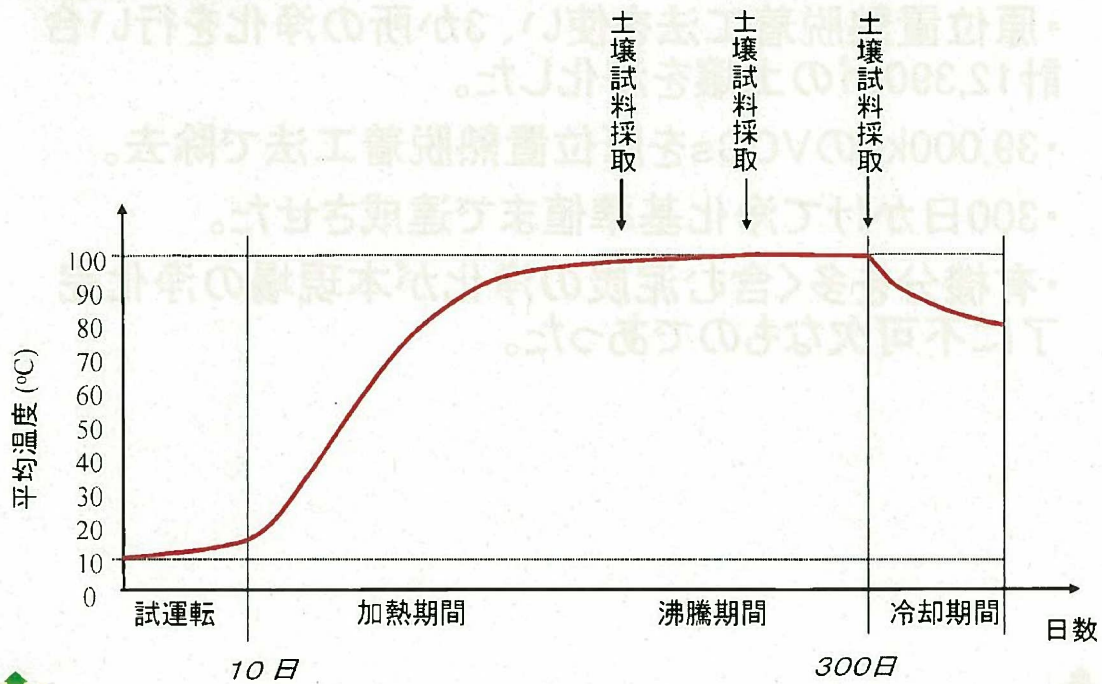
処理前濃度

対象物質 (mg/kg)	基準値	浄化前
テトラクロロエチレン	5.6	3,630
トリクロロエチレン	2.8	57.9
クロロエチレン	0.8	0.96
トランス-1,2-ジクロロエチレン	1.2	2.9



TERRATHERM®

温度の推移



TERRATHERM®

Nov. 2006

Sep. 2007

浄化後濃度

対象物質	基準値 (mg/kg)	浄化後		
		エリア 1	エリア 2	エリア 3
テトラクロロエチレン	5.6	5.322	3.379	2.845
トリクロロエチレン	2.8	1.148	0.918	0.450
クロロエチレン	0.8	0.663	0.329	0.577
トランス-1,2-ジクロロエチレン	1.2	0.741	0.360	0.458



TERRATHERM®

サマリー

- ・原位置熱脱着工法を使い、3か所の浄化を行い合計12,390m³の土壌を浄化した。
- ・39,000kgのVOCsを原位置熱脱着工法で除去。
- ・300日かけて浄化基準値まで達成させた。
- ・有機分を多く含む泥炭の浄化が本現場の浄化完了に不可欠なものであった。



TERRATHERM®