

改正土壤汚染対策法に対応する原位置浄化技術の開発

In-Situ Purification Technology that Corresponds to the Soil Contamination Countermeasures Law Revision

奥田 信康*1 古川 靖英*2

梗概

土壤汚染対策法の施工上の課題「法に基づく土壤汚染状況調査件数の割合が小さいこと」、「掘削除去の偏重」、「不適正処理による汚染拡散の懸念」の改善を目的とし、改正土壤汚染対策法が2010年4月より施行された。これにより、これまで主流であった掘削除去が抑制され、代わりに原位置浄化工法の採用件数が増加すると予測される。本報告では、改正土壤汚染対策法のポイントを整理し、これに対応する原位置浄化技術として、揮発性有機化合物（VOC）を浄化対象とする「DCM-e工法」および、油分およびVOCを浄化対象とする「原位置フラッシング工法」の2つの技術について工法の特徴と実施例を紹介した。

キーワード：改正土壤汚染対策法, 原位置浄化技術, VOC, 油分

Summary

The Soil Contamination Countermeasures Law revision was enforced in April 2010. Expected to increase the number of employed in-situ cleaning method instead of the law which was the major excavation. In this report, we point to organize the revision of the Soil Contamination Countermeasures Law, and introduced the features of embodiment situ purification technologies. First is “DCM-e Method” to purify for volatile organic compounds (VOC) and the second is “in situ flushing method” for cleansing oil and VOC.

Keywords: Soil Contamination Countermeasures Law revision, in situ remediation technology, VOC, oil

1 はじめに

2010年4月より「改正土壤汚染対策法」が施行され、一定規模以上の形質変更時の届出、規制対象区域を2つに分類することによる対応方針の明確化、処理業者の許可制度の新設などによる搬出汚染土壤の適正処理の確保などが盛り込まれた。また、資産除去債務に関する新会計基準が2010年4月の同時期に適用されることで、企業は操業中の土地に関しても将来を見越しての対応を迫られることとなるため、居ながらできる土壤浄化方法への関心が高まっている。これに対し竹中工務店および竹中土木のグループでは、土壤中に含まれる有害物質を適正かつ合理的に処理し、その後の土地利用を行う全ての人に対して安全・安心な環境を提供することを目的とし、様々な土壤汚染対策技術を用意し、特にニーズの高まるオンサイト浄化技術の開発・適用拡大を推進している。

本報告では、土壤汚染対策法の改正内容を概説し、竹中独自の原位置浄化技術を紹介する。

2 土壤汚染対策法の改正内容と当社の対応技術

2.1 土壤汚染対策法の目的

土壤汚染対策法（平成14年法律第53号、平成22年4月改正）は、人為的原因により土壤中に含まれる汚染物質による人への健康被害を防ぐという観点で、汚染の調査や浄化対策などを命じる法律である。

土壤汚染対策法は、土壤の特定有害物質による汚染の状況の把握に関する措置及びその汚染による人の健康被害の防止に関する措置を定めること等により、土壤汚染対策の実施を図り、もって国民の健康を保護することを目的

*1 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

*2 技術研究所 Research & Development Institute

としている（法第1条）¹⁾。

2.2 法改正のポイント¹⁾

改正前の規定では、人への健康被害とは、鉛やヒ素などの重金属を含んだ土壌を吸い込んだり、トリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物（VOC）で汚染された地下水を飲んだりするケースを想定している。（1）有害物質を取り扱っていた工場が廃止したとき、（2）土壌汚染による健康被害の恐れがあると都道府県知事が認めたときだけが調査の対象になっていた。汚染の調査の契機がごく限られ、法律が対象にする範囲が非常に狭いことは、当初から指摘されていた。改正土壌汚染対策法の手続きフローをFig.1に示す。

これに対し、土壌汚染対策法改正のポイントは、

（1）土壌汚染状況の把握のための制度の拡充

- ・ 3000m²以上の土地改変時の事前届出義務化

（2）規制対象区域の分類等による措置内容の明確化

- ・ 区域の分類化(要措置区域, 形質変更時要届出区域)
- ・ 必要な対策（指示措置）の明確化
- ・ 調査の省略の承認（ギブアップ規定）

（3）搬出土壌の適正処理の確保

- ・ 汚染土壌の運搬に manifests 制度の導入
- ・ 汚染土壌の処理に業許可制度の創設
- ・ 自然的原因基準超過土を場外搬出する場合には汚染土壌として扱うことの明示などである。

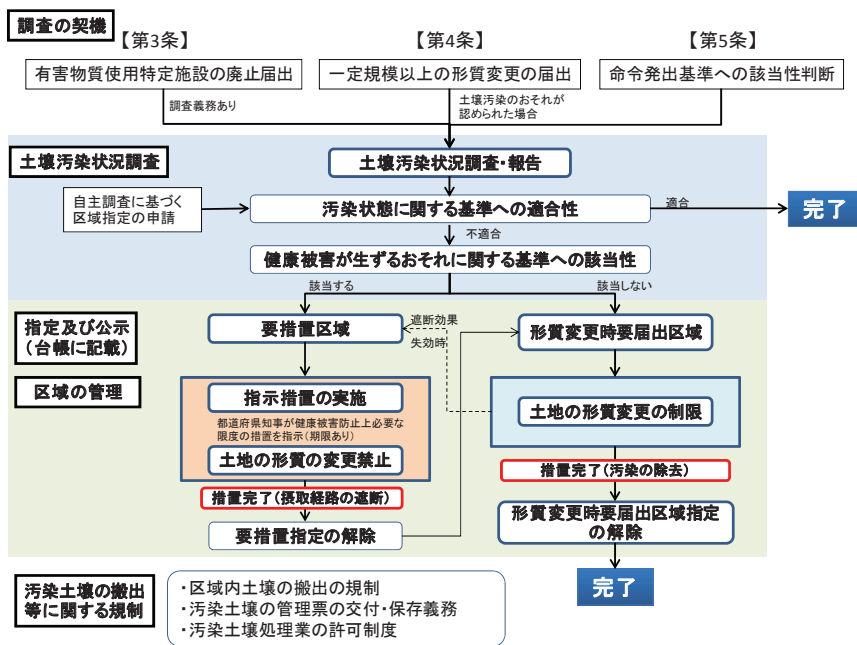


Fig.1 改正土壌汚染対策法の手続きフロー¹⁾
Soil Contamination Countermeasures Law Revision amendment process flow

2.3 改正土壌汚染対策法への対応技術

竹中の土壌汚染対策技術の一覧をFig.2に示す。対策方法は、対象土壌を掘削せずにそのままの場所で処理する原位置浄化工法、対象土壌を掘削してから場内で浄化するオンサイト浄化工法、掘削後に敷地外の処理施設等へ搬出する方法に分類される。土壌汚染対策対象の有害物質は、指定基準の26物質に加え、ダイオキシン類・油類であり、物質毎に有害性や物理・化学性状が異なる。これらの対策では、物質各々の特性に応じ、個別に適正な処理方

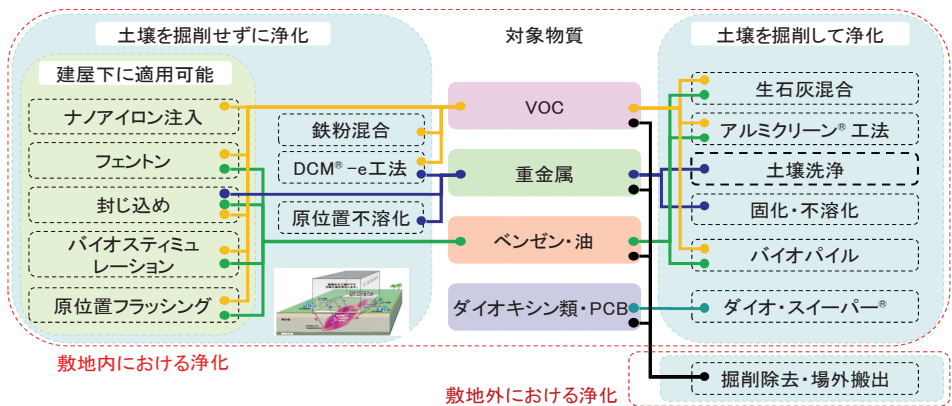


Fig.2 土壌浄化技術の一覧
List of Soil remediation technologies

法を採用する必要がある。

VOC（揮発性有機化合物）、ベンゼン、油類は、比較的移動性が高くかつ化学的または生物的分解が可能であることから、原位置工法（分解・抽出）およびオンサイト工法（分解・抽出）が適用できる。一方、重金属類は、移動性が低く、金属元素を分解することはできないため、掘削除去に代わる浄化方法としては、オンサイト工法（土壌洗浄など）に限定される。また、ダイオキシン類は有機物であるが、常温・常圧の条件下では化学的にも生物的にも分解は困難であり、浄化方法としては、高温熱分解処理（オンサイトまたは敷地外の処理施設）に限定される。

以下、竹中で開発した原位置浄化技術として、VOCに対応したDCM-e工法およびVOC、ベンゼン・油を対象とする原位置フラッシング工法について説明する。

3 原位置浄化技術1－DCM-e工法

3.1 技術の概要

DCM-e工法とは、一般的な地盤改良混合処理機を使用したVOC汚染の原位置浄化技術である。土壌の汚染部まで地盤改良混合処理機を貫入させ、攪拌翼等の先端から浄化材を吐出し、汚染土壌と浄化材を均一に混合することで土壌浄化を行う工法である。さらに、攪拌混合による地盤強度の低下に対しては、浄化材と同時に混合するセメントで地盤強度を回復させる。Fig.3に本工法の概要図を示す。

本工法の特徴は、以下の通りである。

- ①砂質土地盤および粘性土地盤に対応可能
- ②浅層から40m程度の深層まで対応可能
- ③高濃度VOC汚染に対しても原位置浄化が可能
- ④浄化材の混合による地盤強度低下の回復が可能
- ⑤還元処理において汎用セメントの適用が可能
- ⑥低騒音・低振動で掘削土の搬出を伴わない環境配慮工法
- ⑦短工期かつ経済的な浄化工法

3.2 適用範囲

本工法の適用範囲をTable 1に示す。環境基準の百倍程度以下の中濃度VOC汚染土壌が対象の場合には、（還元＋固化）処理による土壌浄化処理方法を用いる。

環境基準の数千倍～数万倍程度の高濃度VOC汚染土壌が対象の場合には、酸化処理により汚染濃度を中濃度まで低下させた後に、（還元＋固化）処理により環境基準レベルまで低下させる2段階の処理方法を用いる。高濃度VOCに対して、従来の金属系還元剤を用いた場合には、6ヶ月程度の浄化期間を要していたが、過酸化水素による酸化処理を事前に行うことで、3ヶ月以上の浄化期間短縮が可能となった²⁾。

3.3 実施例

高濃度VOC汚染地盤における原位置浄化施工事例を以下に示す³⁾。

3.3.1 汚染状況

浄化対象エリアの代表的な土層構成および深度別の汚染分布状況をFig.4に示す。高濃度汚染範囲は、GL-3～-11mのシルトおよびシルト質粘性土を主体とした地盤である。浄化対策前の溶出量は、トリクロロエチレン（以下、TCE）：浄化対象区間平均 7.6mg/l、テト

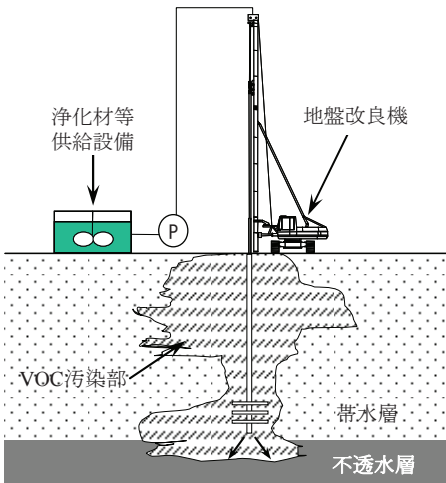


Fig.3 DCM-e工法の概要図
Explanation of DCM-e method

Table 1 DCM-e工法適用範囲
Coverage of DCM-e method

環境基準に対する濃度	中～低濃度VOC	高濃度VOC
	100倍程度以下	10,000倍程度
浄化手順	(還元＋固化) 処理	
浄化材	酸化剤	酸化処理 ↓ (還元＋固化) 処理
	還元剤	鉄塩（触媒） ＋ 過酸化水素
	固化材	金属系還元剤（高活性鉄粉など） 低アルカリ性・汎用セメント

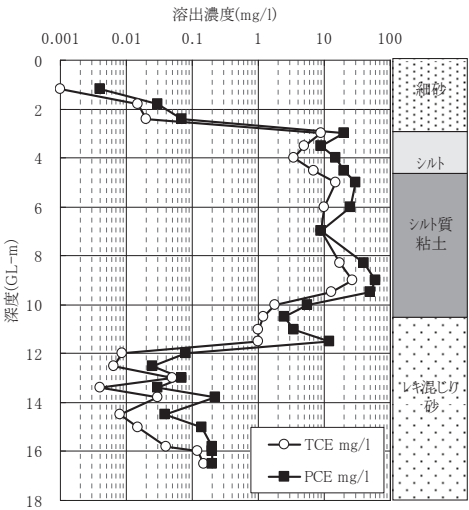


Fig.4 深度別汚染状況（汚染物質濃度は平均値）
Pollution situation according to depth

ラクロロエチレン（以下、PCE）：浄化対象区間平均52.6mg/l、汚染深度はGL-12m程度、浄化土量は約130m³である。

3.3.2 浄化剤

今回使用した浄化材の一覧をTable 2に示す。酸化処理用として、触媒には鉄塩（FeSO₄・7H₂O）とリン酸を用い、酸化剤には、35%過酸化水素を用いた。還元処理用として、還元剤には高活性鉄粉スラリーを用い、固化材としてマグネシア系の低アルカリセメントを用いた。

3.3.3 施工方法

施工機械は単軸で回転軸先端に、上下2枚の掘削攪拌翼が取り付けられている。この2枚の攪拌翼の正逆回転機構により均質な攪拌が可能な地盤改良混合処理機（攪拌翼直径800mm、改良面積0.5m²、改良可能深度12m）を用いた。用いた施工機械をPhoto 1に示す。浄化施工は、初めに過酸化水素を混合する酸化処理を行い、反応期間半日～1日程度で中濃度程度まで濃度を低下させ、引き続き高性能鉄粉スラリー（地盤強度回復のため固化材も併用）を混合することで還元分解反応により基準値以下まで低下させた。効果の確認はチェックボーリングを行い、7日、90日後の溶出濃度および90日後の地盤の一軸圧縮強さを確認する手順とした。

3.3.4 施工結果

Fig.5に汚染物質の濃度変化を示す。TCE、PCE共に初期濃度は大幅に基準を超過していたが、最初の酸化処理で大幅に濃度が低減し、その後の還元処理1週間後でいずれも環境基準値を満足するまで低減した。同時に、TCEおよびPCEの分解により生成する1,2-シスジクロロエチレン（以下、cis-DCE）についても、環境基準を満足する状態であった。

Fig.6に地盤強度の経時変化分布を示す。浄化対策前の原地盤一軸圧縮強さは、平均60kN/m²であった。浄化時の攪拌混合により強度は、約1/10の平均5.0kN/m²程度まで低下した。回復目標値を人が立って歩ける強度20kN/m²の設定に対し、処理90日後には平均56kN/m²と目標値を上回る原地盤強度までほぼ回復させることができた。

以上より、酸化処理後に固化材を併用した還元処理を行うことで、高濃度VOC汚染土に対しても浄化効果と地

Table 2 浄化剤の組成
Composition of purification materials

酸化 処理	鉄塩（FeSO ₄ ・H ₂ O）	15	kg/m ³
	リン酸（85%以上）	2	l/m ³
	過酸化水素（35%）	100	l/m ³
	水	36.5	l/m ³
還元 処理	高活性鉄粉スラリー	10	kg/m ³
	マグネシア系セメント	75	kg/m ³
	水	75	l/m ³



Photo 1 DCM-e工法での施工機械
Mixing machine for DCM-e method

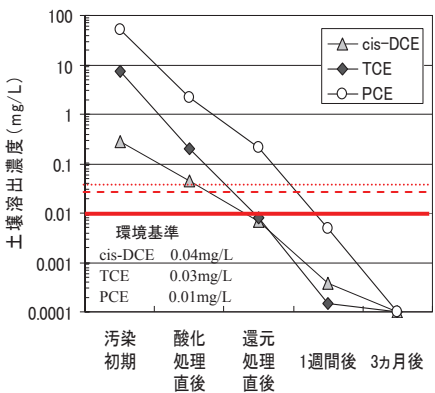


Fig.5 汚染物質の濃度変化（平均値）
Change in concentration of contaminant
注：赤線は、各物質の環境基準

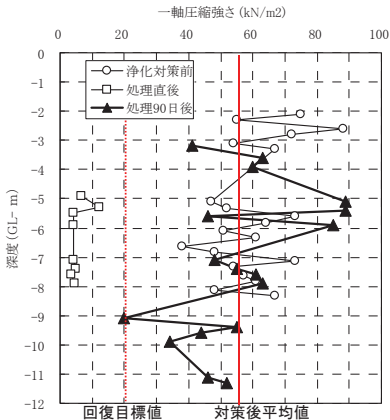


Fig.6 深度方向の地盤強度分布
The ground strength distribution of direction of depth

盤強度の回復を十分に確保することができ、VOC汚染土壌の原位置浄化技術の有効性を確認することができた。

4 原位置浄化技術2ー原位置フラッシング工法

4.1 技術の概要

原位置フラッシング工法とは、ガソリンなどの燃料油や揮発性有機化合物で汚染された土を掘り起こさずに原位置で浄化することで「工場や事業所などを稼働しながら浄化したい」「原位置で浄化したい」というニーズに応える技術である。工法の概要をFig.7に示す。

施工手順は、注入井戸より汚染範囲に水または界面活性剤や溶媒等の水溶液を注入し、揚水井戸から汚染物質を含んだ地下水を回収する方法である。排水は、地上にて水処理後、注入水に再び利用する⁴⁾。室内試験の結果、洗浄剤として界面活性剤と酸化剤（過炭酸ナトリウムや過酸化水素）の併用が有効であることを確認している⁵⁾。

また、現地における施工条件を決定するため試験施工用プラント（Fig.7左上）を保有し、これにより本施工のための迅速な評価を行い、サイトに最適な設計を提供できる。

本工法の特徴は以下の通りである。

- ①界面活性剤と酸化剤の併用による処理効率の向上
- ②省スペースな設備で原位置浄化を行うため、稼動中工場や狭い敷地で施工可能
（浄化対象土量が1,000m³以下であれば、装置設置面積は100m²程度で対応可能）
- ③掘削除去と比較して周辺への環境負荷が低く、ローコスト
- ④土質条件によっては、注入用井戸ー揚水用井戸を設置する間隔が6～8mと長く、建屋下への適用が可能

4.2 実施例

ガソリンスタンドにおいて、ベンゼン濃度の低減とガソリンの回収を目的として行った浄化事例を示す（対象土量：200m³）。21日間の施工で、地中のガソリンの約8割を回収して土中の油分濃度を低減させ、ベンゼン濃度については対象エリアのおよそ8割の範囲について環境基準を達成した⁶⁾。

4.2.1 汚染状況

対象サイトは本施工実施の直前に閉鎖されたガソリンスタンド跡地である。当初は、対策範囲の全域に単管ロッド注入方式によるフェントン処理にて対策を完了させる予定であったが、不飽和部に比較的高濃度のガソリンが存在することが判明し、補助工法として原位置フラッシングを実施した。汚染状況としてはGL-1.5～3.0m付近にガソリンが拡散し、土壌TPH濃度は1,100～7,100mg/kg-dry soilであった。代表的な土質柱状図をFig.8に示す。透水係数（単孔式透水試験）は3×10⁻²cm/sであった。

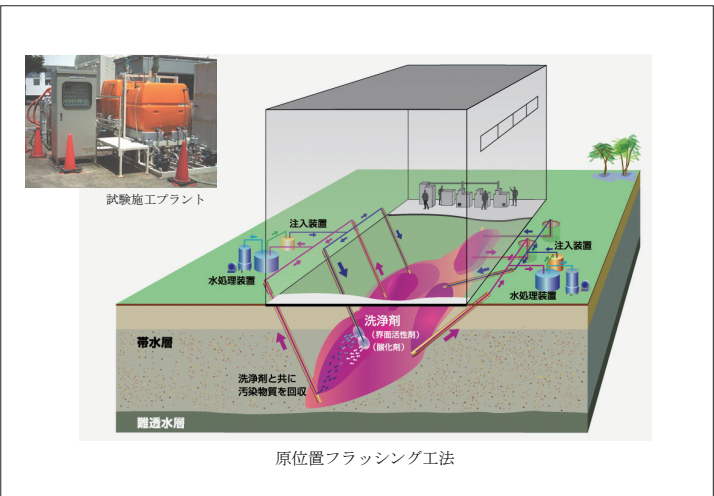


Fig.7 原位置フラッシング工法の概要
Explanation of In-situ Flushing method

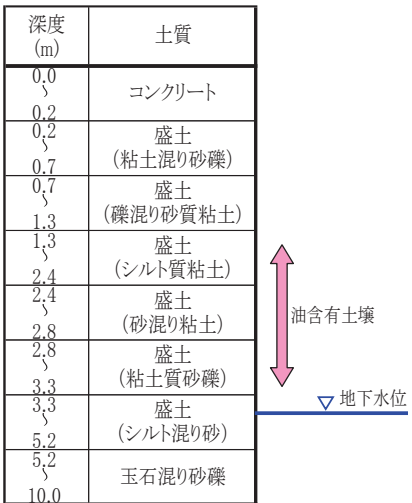


Fig.8 土質柱状図
Soil boring loga

4.2.2 施工方法

原位置フラッシング試験の平面図をFig.9に、井戸断面図をFig.10に示す。試験は井戸設置後、初期の10日間はR1, R3, R4から水を注入し、R2およびピットより揚水した。各井戸の注入圧力は、水洗浄期間中0.01MPa（各井戸の注水量は600L/hr）であった。その後、原位置フラッシング期間（8日間）には、R1とR3から洗浄剤（界面活性剤0.05%と過酸化水素1.0%）を注入し、R2, R4より揚水した。

この期間は、注入圧力0.01MPaで注入し、合計注水量は35m³（各井戸250L/hr）であった。フラッシング期間の循環水量は間隙の1.5倍量に相当する。

4.2.3 実施結果

井戸A2～R2間で土壌試料採取を行った結果を事前調査時の結果とともにTable 3に示す。施工前に最高で7,100mg/kg-dry soilであった土壌TPH濃度は、水および洗浄剤によるフラッシングで500mg/kg-dry soil以下まで低減できた。GL-1.5～4.0mの全体平均では約1,900mg/kg-dry soilであった土壌TPH濃度が、約360mg/kg-dry soilまで低減した。

一方、H2においてはGL-3.0～3.5mで2,000mg/kg-dry soil、GL-3.5～4.0mで2,700mg/kg-dry soilという値が検出された。土質ごとの粒度分布から透水係数を算出した結果、Table 4の結果が得られた。透水性の高い層（GL-2.4～2.8m、GL-2.8～3.3m）の下部に存在する透水性の低い層（GL-3.3～5.2m）には、洗浄剤の通過が困難であったためと推測される。今後の検討事項として、同様なサイトにおける注入—揚水方法の改善が挙げられる。

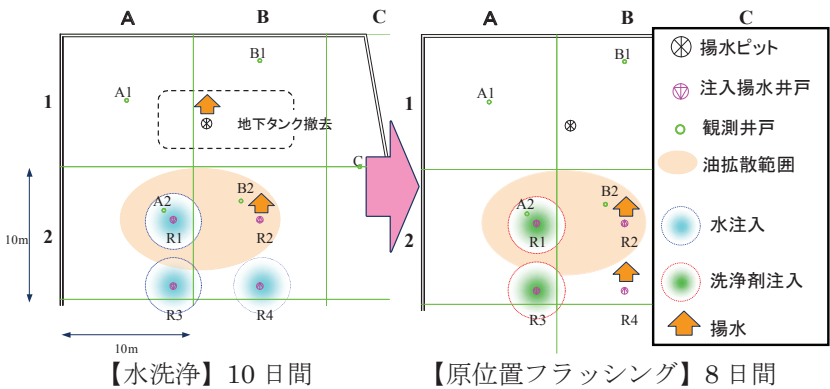


Fig.9 原位置フラッシング試験の平面図
Plan of In-situ Flushing examination

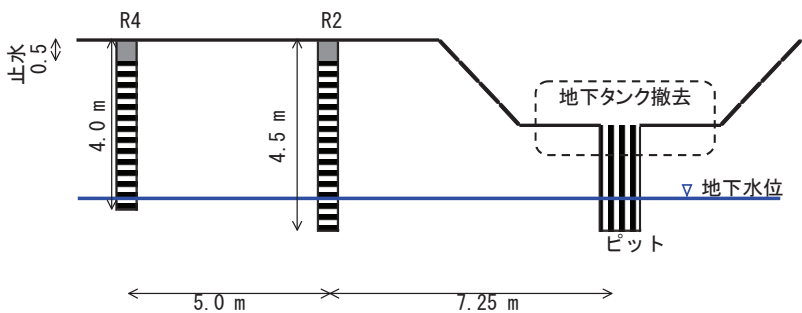


Fig.10 井戸断面図
Cross section of wells

Table 3 土壌TPH濃度
Soil TPH concentration (TPH: Total Petroleum Hydrocarbon)

深度	土壌TPH 濃度 (mg/kg-dry soil)							
	施工前		施工後					
GL-	A2	B2	H4	H3	H2	H1	H5	HM0
0.0～1.0m	190	130	160	150	130	150	86	250
1.0～1.5m	160	120	100	190	100	110	140	210
1.5～2.0m	1100	6000	180	330	290	170	120	180
2.0～2.5m	320	3400	110	140	170	200	190	150
2.5～3.0m	320	7100	190	400	140	140	200	310
3.0～3.5m	350	110	350	150	2000	410	160	160
3.5～4.0m	170	330	130	110	2700	160	390	580
4.0～4.5m	120	230	150	150	140	130	130	150
4.5～5.0m	130	90	100	130	170	120	210	180

Table 4 土質ごとの透水係数算出結果
Result of Permeability coefficient of various soil by
Presumption calculation equation

深度 (m)	土質	D20 (mm)	透水係数 k (cm/s)
0.0～0.2	コンクリート	—	—
0.2～0.7	盛土 (粘土混り砂礫)	0.025	6.1E-05
0.7～1.3	盛土 (礫混り砂質粘土)	0.004	2.0E-06
1.3～2.4	盛土 (シルト質粘土)	0.002	5.4E-07
2.4～2.8	盛土 (砂混り粘土)	2.0	2.2E-01
2.8～3.3	盛土 (粘土質砂礫)	0.58	2.2E-02
3.3～5.2	盛土 (シルト混り砂)	0.12	1.1E-03

$D20 < 0.03 : k = D20^{1.87} \times 10^{-1.22}$
 $D20 > 0.03 : k = D20^{2.38} \times 10^{-0.44}$

5 おわりに

竹中工務店および竹中土木では、土壤汚染対策技術を“ジオクリーン・ワークス[®]”と総称し、ニーズの高まるオンサイト浄化技術の開発・適用拡大を推進している。本報告で紹介した「原位置フラッシング工法」と、バイオスティミュレーション（汚染土壤に元々生息する分解菌を活用して土壤を浄化する方法）を組み合わせたさらに効率のよい原位置浄化技術の研究開発も進めており、フラッシング後のバイオスティミュレーションの有効性について確認済みである。

今後もこれらの技術を活用し、あらゆる種類の汚染物質に対して、土地利用計画に応じた合理的かつ適切な対策工法を選定し実施することで、改正土壤汚染対策法に対応した原位置浄化工法の適用拡大に努める所存である。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局 土壤環境課：「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暫定版」，環境省，2010.7
- 2) 近信明，奥田信康，石橋正光：「中・高濃度VOC汚染の原位置浄化技術:DCM-c工法」，基礎工，2005.7
- 3) 奥田信康，石橋正光，斎藤聡，古川靖英，木村玄，岩本宏：「VOC汚染土壤の原位置浄化技術」，土壤環境センター技術ニュース No.10，pp.14-19，2005.7
- 4) Diane S Roote, P.G. : Technology Status Report In Situ Flushing (TS-98-01)，GWRTAC，pp.2，1998.11
- 5) 大村啓介，古川靖英，奥田信康，田中良隆：「油含有土壤の原位置洗浄に関する研究」，第15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S3-13，pp.314-317，2009.6
- 6) 古川靖英，大村啓介，奥田信康，清水孝昭，向井一洋：「油含有土壤の原位置フラッシング工法の検討」，土木学会，第65回年次学術講演会講演概要集Ⅶ-194，pp.387-388，2010.9