

# 平成21年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査・対策技術検討調査 及びダイオキシン類土壤浄化技術等確立調査結果

代表機関名		技術の名称	
株式会社竹中工務店		フェントン薬剤による中性領域での 原位置フラッシング工法	
技術の概要			
調査／対策	技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
対策	原位置土壤洗浄 +酸化分解	ベンゼン cis-1, 2-ジクロロエチレン	原位置

**(技術の原理)**

本技術は、汚染土壤中に酸化剤及び界面活性剤を用いた原位置フラッシングを行い、土粒子に付着した汚染物質を界面活性剤とフェントン薬剤により剥離・酸化分解し、汚染物質を含む地下水として回収する。回収した地下水とフラッシング時に回収される土壤ガスに含まれる汚染物質は、活性炭吸着で回収する工法である。

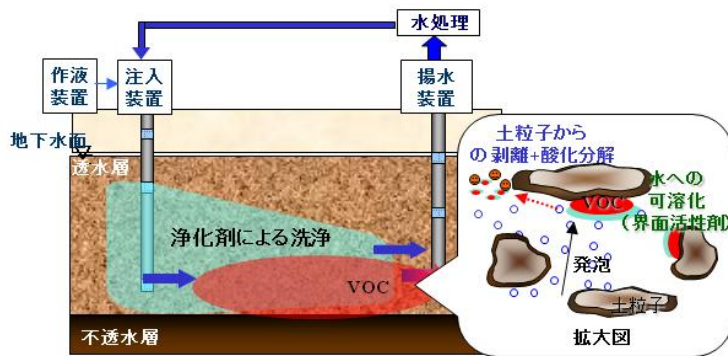


図1 技術概要

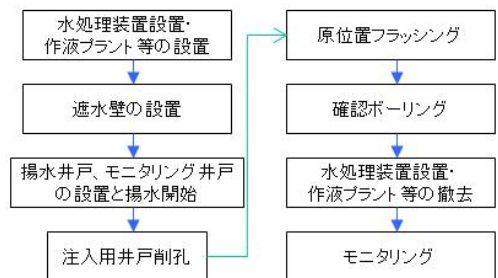


図2 フロー図

### 技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方

本工法では、原位置フラッシングに界面活性剤とフェントン薬剤を組み合わせることで浄化効率を向上させることにより揚水井戸と注入井戸の設置間隔を広げることができる。化学的酸化法のため工期は数ヶ月～1年程度必要であるが、井戸の設置間隔を広げることができるため、コストを削減できる。

また、薬剤の注入速度を10L/min以下に制御して地表への汚染物質の漏洩を防ぐため、環境負荷の低い技術である。

### 調査結果の概要

**(1) 実証調査方法**

**①実証調査条件**

ベンゼン、cis-1, 2-ジクロロエチレン（以下、cis-1, 2-DCE）による土壤汚染現場において、界面活性剤とフェントン薬剤併用による中性領域での原位置フラッシングの浄化試験を行った。また、揚水の効果、界面活性剤のみのフラッシング効果を調べる試験を実施し、界面活性剤とフェントン薬剤による浄化効果を確認した。

表 1 調査条件

実験ケース	揚水井～注入井	対象深度	対象土量	内 容
A：砂 層	井戸間隔 2.0m	GL-1.5～3.3m	14.4m <sup>3</sup>	①揚水 →②フラッシング（界面活性剤） →③フラッシング（フェントン+界面活性剤）
B：砂 層	井戸間隔 2.0m	GL-1.5～3.3m	14.4m <sup>3</sup>	
C：粘土層	井戸間隔 3.0m	GL-1.5～3.3m	21.6m <sup>3</sup>	
D：粘土層	井戸間隔 4.0m	GL-1.5～3.3m	28.8m <sup>3</sup>	
E：砂 層	井戸間隔 2.0m	GL-3.8～6.0m	17.6m <sup>3</sup>	
F：砂 層	井戸間隔 2.0m	GL-3.8～6.0m	17.6m <sup>3</sup>	

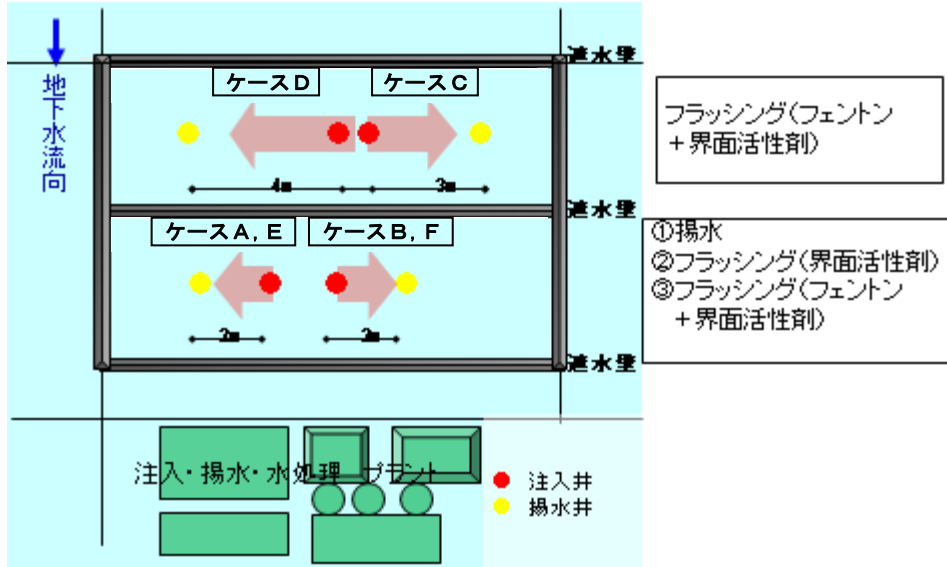


図 3 実証試験の計画平面図

②モニタリング方法

表 2 モニタリング項目

対象	測定・分析項目	測定・分析方法	頻度	試料数	
土 壤	開始時 モニタリング井戸 (2本のうち1本で 土壌分析)	第種特定有害物質	環18号	1mごと	18
		第二種特定有害物質 (アルキル水銀除く)	環告18号	1mごと	6
			環告19号	1mごと	6
		pH	JGS 0211	1mごと	6
	揚水（水洗浄）後 チェックボーリング	VOC*濃度	環告18号	ボーリング5本	30
		pH	JGS 0211	×6深度	30
	フラッシング後 チェックボーリング	VOC*濃度	環告18号	ボーリング17本 ×6深度（フラッシング 中に7本、最終時に10 本）	108
				pH	JGS 0211

地下水	揚水井戸	VOC**濃度	環告 18 号	R-1 上×35 本、R-1 下×40 本、R-2×27 本、R-3×33 本、Y-1 上×35 本、Y-1 下×44 本、Y-2×38 本	252
		pH	JIS Z 8802		252
	リチャージ水	VOC**濃度	環告 18 号	31 回×1 本	31
	モニタリング井戸	VOC**濃度	環告 18 号	40 回×2 本	80
pH		JIS Z 8802	80		
周辺環境	運転時敷地境界近辺及び作業エリア	騒音	JIS Z 8731	期間中 1 回	1
		振	JIS Z 8735	期間中 1 回	1
		大気中 VOC**濃度	固体捕集-溶媒抽出-GC-MS 法	ガス吸引(活性炭処理後) 5 回、排水処理排ガス 3 回	8
		大気環境	PID モニター	期間中 1 日 (簡易計測は自社保有機器で実施)	1
排ガス	活性炭処理前	瞬間風量	風量計	期間中 3 回×1 ヶ所	3
	排ガス中 VOC	VOC**濃度 (平成 20 年環境省マニュアルに準拠)	固体捕集-溶媒抽出-GC-MS 法	期間中 5 回×4 ヶ所	20
地盤沈下	フラッシングエリア内	沈下量	水準測量	9 ヶ所 3 回	27
透水試験	モニタリング井戸設置時	現場透水試験	地盤工学会編「地盤調査法」ボーリング孔を利用した透水試験に基づく	3 深度 (補足的に粒度・液塑性を計測)	3

※VOC : cis-1,2-DCE、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン

## (2) 土壌の処理量及び性状等

- 1) 土質 : 砂質土 (透水係数  $1 \times 10^{-4}$  cm/s 以上)、粘土 (透水係数  $1 \times 10^{-6}$  cm/s 以上)
- 2) 性状等 : cis-1,2-DCE (0.53mg/L)、ベンゼン (0.021mg/L)
- 3) 処理量 : 120m<sup>3</sup> (216 t)

## (3) 有効性についての考察

### ①除去率

処理前土壌と処理後土壌における土壌溶出量から算出した各ケースの実証調査前後の除去率は、表 3 に示すとおりであり、フラッシング (フェントン+界面活性剤) を利用した浄化試験においては cis-1,2-DCE はほとんどの場所で溶出量基準以下とすることができたが、ベンゼンにおいては初期濃度が高い場所では溶出量基準以下とすることができなかった。

また、揚水→フラッシング (界面活性剤) →フラッシング (フェントン+界面活性剤) における各工法毎の除去率を、土壌・揚水・ガスの収支から試算したものを表 4 に示す。当該結果

では、初期濃度が高いcis-1,2-DCEはフラッシング（界面活性剤）と比較してフラッシング（フェントン+界面活性剤）の除去率が高い傾向も見受けられたが、土壌汚染の空間的なバラツキ等のため、今回の実証試験では対策効果は明瞭とならなかった。

表3 浄化試験前後の土壌溶出濃度とそれから求めた除去率（浄化前⇒浄化後）

		揚水+フラッシング（界面活性剤）+フラッシング（フェントン+界面活性剤）		フラッシング（フェントン+界面活性剤）	
		井戸間隔 2m 砂層	井戸間隔 2m 粘土層	井戸間隔 3m 砂層	井戸間隔 4m 砂層
cis-1,2-DCE	濃度mg/L	0.053⇒0.0068	0.36⇒0.024	0.070⇒0.027	0.070⇒0.0004
	除去率%	87.2	93.3	61.4	99.4
ベンゼン	濃度mg/L	0.003⇒0.007	0.014⇒0.006	0.18⇒0.019	0.18⇒0.087
	除去率%	—	57.1	89.4	51.7

注：アンダーバーは溶出基準を超過したデータ

表4 井戸間隔2m（ケースA, B, E, F）の物質収支から推定した工法毎の除去率

	揚水 <sup>※1</sup>	フラッシング <sup>※2</sup> （界面活性剤）	フラッシング <sup>※3</sup> （フェントン+界面活性剤）	
Cis-1,2-DCE	砂層	63%	48%	83%
	粘土層	3%	18%	86%
ベンゼン	砂層	174%	57%	—*
	粘土層	20%	40%	28%

注 初期値 0日：着手前のチェックボーリング試料の平均値（実測）を使用

- ※1 揚水（水洗浄のみ）の想定83日：揚水のみを継続して34日から83日まで実施したと想定した場合の計算値（0日から34日までのガス及び水の1日平均回収量が、34日から83日まで続くとして算出）
- ※2 界面活性剤フラッシングの想定83日：0日～34日まで揚水、界面活性剤による原位置フラッシングを34日から83日まで実施したと想定した場合の計算値（34日から60日までのガス及び水の1日平均回収量が34日から83日まで続くとして算出）
- ※3 フェントン+界面活性剤フラッシング後83日：0日～34日まで揚水、34日～60日まで界面活性剤フラッシング、60日～83日までフェントン+界面活性剤フラッシングを実施した後のチェックボーリング試料の平均値（実測）

\*算出不可

#### ②排ガス

回収した吸引ガス量は4.46～32.4m<sup>3</sup>/hであり、吸引ガス中のcis-1,2DCE濃度は0.5未満～83mg/m<sup>3</sup>、ベンゼン濃度は0.5未満～97mg/m<sup>3</sup>であった。排ガス処理後ではcis-1,2-DCE濃度で0.01未満～0.12mg/m<sup>3</sup>、ベンゼン濃度で0.002未満～0.035mg/m<sup>3</sup>で作業環境基準以下であった。

#### ③処理水

揚水井戸からの揚水総量は67.8m<sup>3</sup>である。処理水濃度は、cis-1,2-DCEで0.004mg/L未満、ベンゼンで0.001mg/Lであり、排水基準以下であった。なお、排水処理後の汚泥4m<sup>3</sup>は、産業廃棄物として処分した。

(4) 実用性についての考察

○安定性

原位置フラッシング（フェントン＋界面活性剤）期間では、透水係数が小さい粘土層において注入効率及び揚水効率が低下する現象が認められた。

(5) 経済性についての考察

○効率性

実証調査での汚染土壌 1kg 当たりの投入エネルギーは、0.73MJ/kg であった。

作業効率は、108.8kg/人・h であった。

○経済性

実証調査（222t）における汚染土壌 1t 当たりの処理費用は、106,706 円/t と試算された。

10,000t を処理すると仮定した場合、処理費用は 15,100 円/t と試算される。（別紙参照）

(6) 周辺環境への負荷

①環境大気

○周辺大気中濃度への影響

敷地境界における大気中の濃度は、cis-1,2-DCE で 0.01mg/m<sup>3</sup> 未満、ベンゼンで 0.002mg/m<sup>3</sup> 未満、トリクロロエチレンで 0.01mg/m<sup>3</sup> 未満、テトラクロロエチレンで 0.01mg/m<sup>3</sup> 未満、1,1,2-トリクロロエタンで 0.01mg/m<sup>3</sup> 未満であった。

②騒音・振動

発生源から 10m における騒音は 60dB 以下、振動は 41dB 以下であった。

③二酸化炭素排出量

実証調査における二酸化炭素排出量は、24.3kg-CO<sub>2</sub>/t と試算された。10,000t を処理すると仮定して試算すると 15.9kg-CO<sub>2</sub>/t となる。（別紙参照）

## 検討会概評

本技術は、酸化剤及び界面活性剤を用いた原位置フラッシングを行い、土粒子に付着した汚染物質を界面活性剤とフェントン薬剤により剥離・酸化分解し、汚染物質を含む地下水として回収し、活性炭吸着で処理する技術である。

実証調査においては、cis-1,2-DCE はほとんどの場所で溶出量基準以下とすることができたが、基準値の低いベンゼンについては初期濃度が高い場所では溶出量基準以下とすることができなかった。

なお、cis-1,2-DCE について、界面活性剤のみの原位置フラッシングにフェントン薬剤を併用したことによる酸化分解の効果は土壌汚染の空間的バラツキのため、評価できなかった。このため、界面活性剤とフェントン薬剤の効率的な併用条件については未解明であり、今後様々な条件下における試験を積み重ねて、フェントン薬剤の酸化分解効果や適用可能な土壌の透水係数等に対する条件を検討することが本手法を適用していく上での課題としてあげられる。

それらの検討結果を踏まえ、より広範なサイトで施工できるよう、化学的酸化工法以下の低コストになる条件を明確にする必要がある。

### 実証試験の目標値及び評価

	評価項目	目標値	評価
浄化効果・コスト	土壌溶出量 (cis-1,2-DCE)	指定基準以下 (0.04mg/ml)	ほとんどの場所で指定基準以下となり、概ね目標を達成。
	土壌溶出量 (ベンゼン)	指定基準以下 (0.01mg/ml)	指定基準以下に浄化できなかったため、適用可能な汚染濃度範囲や薬剤効果を整理する必要がある。
	コスト	化学的酸化工法以下 (15,500円/t以下)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透水係数が <math>5 \times 10^{-4}</math>cm/s 以上</li> <li>・注入井戸と揚水井戸の間隔が 3.0m 以上</li> <li>・施工に当たり遮水壁を設置</li> </ul> 上記試算条件においては、10,000t 処理時 15,100円/t であった。 これは、化学的酸化工法以下のコストのため、限定的な適応範囲では目標を達成すると推察される。
環境負荷	土壌の pH	5～9 の範囲	期間中の pH は約 7～8 であり、目標を達成。
	二酸化炭素排出量	掘削除去以下 (32kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	掘削除去から約 50%削減し、目標を達成。
	周辺環境影響 (大気、騒音、振動)	大気環境基準等	大気環境基準に適合するなど特段の問題を生じなかったことから、目標を達成。

別紙（フェントン薬剤を利用した中性領域での原位置フラッシング工法）

1. 費用の算出

○実証対象技術のコストについて

コスト計算に当たっては、以下の条件を前提として試算している。

1) 試算前提の主要諸元

汚染土壌濃度（溶出量）	: cis-1,2-DCE 0.4mg/L 程度 ベンゼン 0.02mg/L 程度
目標処理濃度（溶出量）	: cis-1,2-DCE で 0.04mg/L 以下 ベンゼンで 0.01mg/L 以下
処理量（t <sup>※</sup> ）	: 10,000 t ※単位体積重量(t/ m <sup>3</sup> )を 1.85 とした
処理能力（t/h）	: 15.6t/h
運転時間（h）	: 8h
稼働日数（日）	: 80 日
処理時間（月）	: 4 ヶ月
処理条件	: 地盤の透水係数が $3 \times 10^{-4}$ cm/s 以上、30m×30m ×深さ 0.5～6.5m の遮水壁設置
減価償却期間（年）	: 3 年
工費の試算範囲内	: 施工費、材料費、労務費
工費の試算範囲外	: モニタリング費

2) 処理費用の算出

上記を基に本実証試験で得られたデータから経済性を試算すると以下の様に算定された。

総費用（10,000t 処理時）	151,000,000 円
処理単価	15,100 円/t

2. 二酸化炭素排出量の算出

○実証対象技術の炭酸ガス排出量について

二酸化炭素排出量の計算に当たっては、以下の前提として試算している。

※地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条一のロ（平成 14 年 12 月 19 日一部改正）”  
の排出係数一覧表の数値を用いて二酸化炭素排出量を算出した。

算定根拠

実規模プラントでの軽油使用量：12,188 L

実規模プラントでの電力使用量：228,204 kWh

算出式

$$\begin{aligned} & \text{軽油使用量 (12,188 L)} \times \text{排出係数 (2.62kg-CO}_2\text{/L)} \\ & + \text{電力使用量 (228,204 kWh)} \times \text{排出係数 (0.555kg-CO}_2\text{/kWh)} = 159,000 \text{ kg-CO}_2 \end{aligned}$$

総排出量（10,000t 処理時）	159 t-CO <sub>2</sub>
排出原単位	15.9 kg-CO <sub>2</sub> /t