

# 平成19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汚染土壤浄化技術等確立調査結果

代表機関名		技術の名称	
大成建設(株)		脱酸素スパージング工法による揮発性有機塩素化合物の原位置バイオレメディエーション技術	
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	スパージング+微生物分解	トリクロロエチレン, シス-1, 2-ジクロロエチレン	現場

## (技術の原理)

注水バイオスパージング工法とは、スパージング\*井戸からガスと液体を同時に注入し、汚染物質の気化を促進しながら、微生物に必要な栄養を帯水層に供給し、微生物による汚染物質の分解（バイオレメディエーション）を促す浄化技術である。揮発性有機塩素化合物を浄化対象とする場合、嫌気微生物による脱塩素化を促進させるため、窒素ガスなどの不活性ガスをスパージング井戸から圧入すると同時に、有機物を溶解させた栄養水を注入する（脱酸素スパージング工法）。スパージングにより高濃度域の揮発性有機塩素化合物を気化回収し、帯水層中の揮発性有機塩素化合物濃度を微生物浄化に適する濃度まで低減する。また、栄養水はスパージングの吐出圧を利用して高効率に帯水層に注入し、目詰まり等による注入効率の低下の防止を図る。帯水層全体に脱塩素化に必要な有機物が供給された時点で工学的浄化を停止し、揮発性有機塩素化合物の嫌気微生物による脱塩素化により浄化を図ろうとするものである。

※スパージング：帯水層に気体を供給し、揮発性有機化合物の揮発および微生物による分解を促進させる浄化技術。

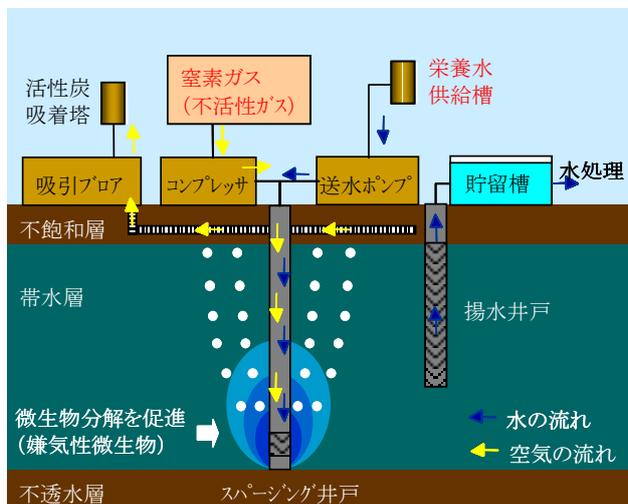


図1 浄化工法の模式図

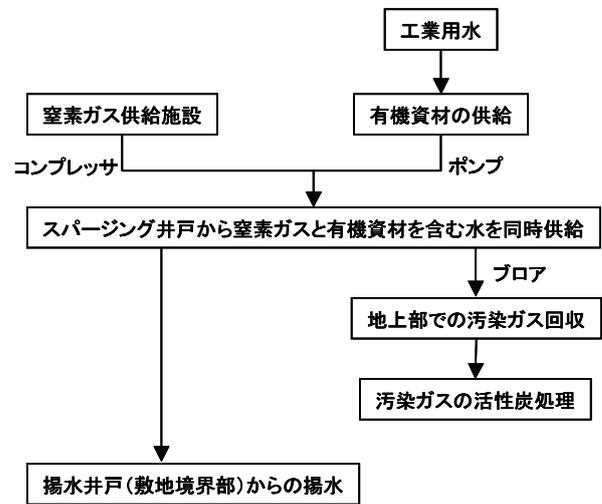


図2 実施フロー図

## 技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方

汚染物質が地盤深部に到達した場合の土壤浄化対策技術として、掘削を伴わない原位置浄化技術が施工制約の少ない手法として着目されている。揮発性有機化合物の原位置浄化工法を行う場合、汚染状況及び土質状況に応じた技術の選択が必要である。特に、透水性が低く、高濃度の揮発性有機化合物で汚染されている地盤は微生物を利用する浄化が難しいと考えられてきた。物理的浄化技術と微生物浄化技術の利点を活かした浄化技術（注水バイオスパージング工法）を開発することにより、浄化期間が短縮化され、コストやエネルギー消費量の縮減に資すると考えられる。

## 調査結果の概要

本技術は、微生物による汚染物質の分解により浄化を完了するものである。このため、掘削を伴う浄化技術と比べ浄化に長い期間を要するものであり、実証試験を実施した汚染現場では1年程度の期間が必要である。以下に示す内容は、浄化の中間段階にあたる注水バイオスパーキング工法までの調査結果であり、本技術による浄化の最終結果では無い。

### (1) 実証調査方法

#### ① 実証調査条件

本試験ではスパーキング工と有機物の注入工（注水バイオスパーキング工）の効果確認を実証調査の目的とする。

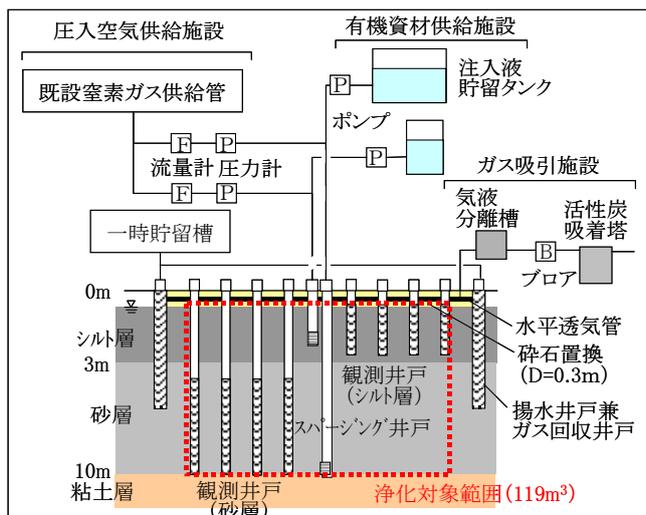


図3 実証試験装置の断面図

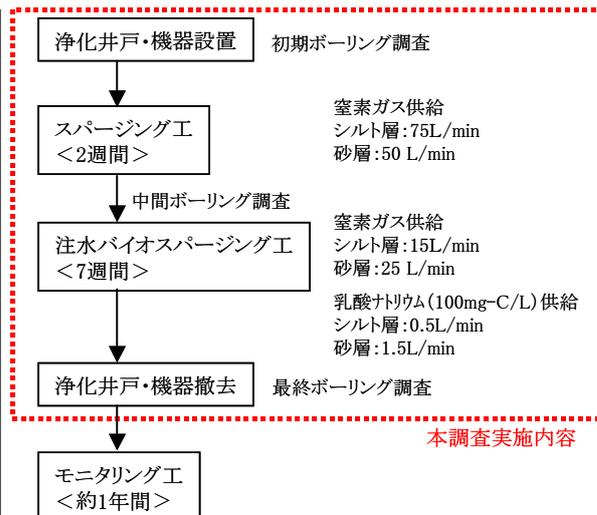


図4 実施調査フロー

#### ② モニタリング方法

表1 モニタリング方法

測定対象	サンプリングポイント	分析項目	頻度	実施箇所
吸引ガス	活性炭吸着塔前 活性炭吸着塔後 実証試験サイト上	揮発性有機塩素化合物	3回/日×50日	3箇所
		硫化水素	1回/日×50日	
		メタン	1回/日×50日	
地下水	観測井戸	水温, pH, DO, ORP, EC	10回	16箇所
		全菌数		8箇所
		DHC菌検出		
地下水・揚水	観測井戸 揚水井戸	揮発性有機塩素化合物	10回	24箇所
		TOC, IC		
		トレーサー(Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> )濃度		
		塩化物イオン濃度		
土壌	砂層観測井戸設置位置 (2回目、3回目は 観測井戸の近傍)	揮発性有機塩素化合物	3回	初期・最終ボーリング 8箇所×6深度 (シルト層3深度、砂層3深度) 中間ボーリング 7箇所×6深度 (シルト層6深度)
		pH		
		TOC, IC		
		含水量・強熱減量		
		トレーサー(Br <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> )濃度		
		塩化物イオン濃度		
周辺環境 モニタリング	試験サイト近傍 敷地境界	騒音	1回	2箇所
		振動		

### (2) 土壌の処理量及び性状等

土壌の処理量は約 120m<sup>3</sup> (240t) であり、主要な汚染物質はトリクロロエチレン（初期地下水濃度：

2.24mg/L) とシス-1,2-ジクロロエチレン (初期地下水濃度: 2.63mg/L) である。土質は、-3m までがシルト層で、-3~-10m が砂層であった。

### (3) 有効性についての考察

#### ① 除去率

スパージング工 (実施時間: 20 時間 (2~6 時間/日)、圧入室素量: 100m<sup>3</sup>) による各揮発性有機塩素化合物の除去率を地下水濃度 (観測井戸 2 点の平均値) から算出した。注入バイオスパージング工における除去率については、実施期間が 1 か月であったことから明確な結果を得ることができなかった。

表 2 揮発性有機塩素化合物の除去率等

浄化区域	スパージング井戸からの距離				総除去率****	
	0~0.5m範囲	0.5~1.0m範囲	1.0~1.5m範囲	1.5~2.0m範囲		
面積比率 (%)	6	19	31	44		
テトラクロロエチレン*	初期濃度 (mg/L)	0.025	0.022	0.015	0.036	48
	除去率 (%)**	85	80	45	32	
	相対除去率 (%)***	5	15	14	14	
トリクロロエチレン	初期濃度 (mg/L)	1.473	1.092	2.431	3.962	17
	除去率 (%)**	74	43	10	2	
	相対除去率 (%)***	5	8	3	1	
シス-1,2-ジクロロエチレン	初期濃度 (mg/L)	2.581	2.720	3.484	1.723	28
	除去率 (%)**	82	49	43	0	
	相対除去率 (%)***	5	9	13	0	
塩化ビニルモノマー	初期濃度 (mg/L)	0.293	0.299	0.628	0.840	41
	除去率 (%)**	90	62	36	27	
	相対除去率 (%)***	6	12	11	12	

\* 砂層の初期PCE濃度は環境基準値以下であったため、シルト層の値のみで算出

\*\* 除去率は、浄化開始前の濃度に対する20時間スパージング実施後の各揮発性有機塩素化合物濃度の平均値から算出

\*\*\* 相対除去率=除去率×面積比率

\*\*\*\* 総除去率=Σ(各範囲の相対除去率)

#### ② 排ガス・排水

地上部で回収した吸引ガスにはスパージング開始 10 分後に約 40ppm の揮発性有機塩素化合物濃度が確認されたが、スパージング時間の経過と共に吸引ガス中の揮発性有機塩素化合物濃度が急激に減少し、スパージング実施 7 日目にはスパージング開始時から吸引ガス中の揮発性有機塩素化合物濃度が検出されなかった。

注水バイオスパージング工の実施期間中にスパージング井戸から 2.5m の地点に設置した 8 本の揚水井戸からスパージング井戸からの栄養水の注入と同時に揚水を行った。4 週間経過後、スパージング井戸からの総注水量 12kL に対して、1.5 倍の 18kL の揚水を実施した。揚水中の揮発性有機塩素化合物の平均濃度は約 4mg/L であり、場内の水蒸気蒸留処理施設で適切に処理した。

#### ③ 副生成物

嫌気微生物の脱塩素化の過程で、シス-1,2-ジクロロエチレンや塩化ビニルモノマーが生成する可能性があるが、注水バイオスパージング工開始から 4 週間までに副生成物の生成は確認されなかった。

### (4) 実用性についての考察

注水バイオスパージング工の実施期間中、目詰まり等の影響による注入効率の低下を受けずに高速注水が可能であることを延べ運転時間 150 時間 (6 時間/日) まで確認している。一方、地上部に不均質な低透水性地盤が存在する場合には、局所的な地盤沈下を誘発することもあり、これを抑制するためには、窒素圧入量に対する井戸内圧力の監視強化やスパージング影響範囲内での空気回収井戸の設置を施す必要がある。

## (5) 経済性についての考察

### ① 効率性

本実証調査における汚染土壌 1kg あたりの投入エネルギー効率は約 0.6MJ/kg であった(本実証試験を実施した汚染現場では窒素ガスは高圧配管から直接地盤に供給することができるため、窒素生成・供給に関するエネルギーは試算の対象外とした)。

本実証調査における作業効率は、135kg/人・h であった。

### ② 経済性

本実証調査における汚染土壌 1 t 処理するのに必要な費用は 75,000 円であった。

汚染土壌 10,000t を処理すると仮定した場合の処理費用は、約 10,000 円/t と算出された(算出根拠は別紙参照)。

## (6) 周辺環境への負荷

### ① 環境大気

帯水層供給後の排ガスは、地上に設置した吸引管から回収して活性炭処理を行い、全量を吸着除去していることを日常管理によるガス濃度測定により確認した。

### ② 排水

揚水した汚染地下水については密閉貯留槽で保管し、工場内の揮発性有機塩素化合物汚染水の処理施設で適切に処理した。

### ③ 騒音・振動

作業環境における騒音はコンプレッサ、吸引ブロア、ポンプの音に伴う 71dB 程度であり、敷地境界での規制値超過は確認されなかった。工場由来の振動が浄化装置の振動を上回っており、浄化施設の運転による振動の増加は確認されなかった。

### ④ 二酸化炭素排出量

浄化対象土壌を 10,000t とした場合の二酸化炭素排出量は、4.92kg/t と算出された(算出方法は別紙参照)。

### ⑤ その他

浄化には帯水層に存在する嫌気性微生物を利用するため、生態系への影響は小さいと想定される。また、これらの微生物の活性化に用いる有機資材や地盤に注入する窒素ガスは、地盤に対しての影響は小さいものと考えられる。

## 検討会概評

本技術は、スパージング井戸から窒素ガスと液体を同時に注入し、汚染物質の気化を促進しながら、微生物分解に必要な栄養を地盤に供給して揮発性有機塩素化合物を浄化する技術である。

本技術の有効性については、注水バイオスパージングまでの効果を評価した。嫌気微生物による最終的な脱塩素化効果を確認するため、今後も引き続き長期間のモニタリングが必要である。

本実証試験の地点はスパージング工で効率的に除去可能な高濃度の汚染物質が滞留していなかったため、スパージング工による除去効果を明確に確認することはできていないが、実施時間 20 時間、圧入窒素量 100m<sup>3</sup> での各揮発性有機塩素化合物の除去率は、テトラクロエチレン 48%、トリクロエチレン 17%、シス-1,2-ジクロエチレン 28%、塩化ビニルモノマー 41% であり、スパージング効果(各揮発性有機塩素化合物濃度の低減)による浄化期間の短縮の可能性が示された。

地上部に不均質な低透水性地盤が存在する場合には、局所的な地盤沈下を誘発する可能性があるため、窒素圧入量に対する井戸内圧力の監視強化等、地盤沈下防止対策を講じる必要がある。なお、本実証試験では地盤沈下を防ぐために、窒素圧入量を抑制したため、窒素のスパージングだけでは微生物分解に必要な還元的雰囲気確保できた範囲は限定的であった。

## 1. 費用の算出

### 1) 試算前提の主要諸元

汚染土壌濃度（溶出量）	: 平均 10mg/L (TCE)
目標処理濃度（溶出量）	: TCE および cis-1,2-DCE を環境基準値以下
処理量	: 10,000t (1000 m <sup>2</sup> × GL-1~-6m の帯水層)
浄化設備設置・撤去期間	: 90 日
浄化運転期間	: 60 日 (8 時間/日)
モニタリング期間	: 360 日間
処理条件	: スパーキング井戸 50 本、揚水井戸 8 本
工費の試算範囲内	: 浄化施設費、運転費、人件費、モニタリング費
工費の試算範囲外	: 運搬費
※浄化が完了するまでのモニタリング期間は本実証試験で求められていないため、過去の浄化事業での平均的な脱塩素化期間（1 年間）をモニタリング期間として試算した。	

### 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）	99,300,000 円
処理単価	9,930 円/t

## 2. 二酸化炭素排出量の算出

二酸化炭素排出量の計算に当たっては、上記の費用算出と同条件とし、“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）”の排出係数の数値を用いて算出した。

算出根拠	ガス供給に伴う電力使用量	9,100kW
	ガス処理に伴う電力使用量	2,100kW
	水供給に伴う電力使用量	1,200kW
	揚水・水処理に伴う電力使用量	63,700kW
	その他の工事に関連する電力使用量	12,600kW
	合計	88,700kW

算出式 使用電気量（88,700kW）×排出係数（0.555kg-CO<sub>2</sub>/kW）=49,200kg-CO<sub>2</sub>

総排出量（10,000t 処理時）	49.2t
排出原単位	4.92kg/t