



## 調査結果の概要

### (1) 実証試験方法

#### ①実証試験条件

解離剤を用いたバイオスパーキングの効果を検証するため、従来のバイオスパーキングと、解離剤を用いたバイオスパーキングの各工程を計画し、状況を監視しながら適宜必要な修正を加えて試験を行った。(表1)

表1 実証試験条件

工程	注入	注水速度	風量	解離剤濃度	期間
1 従来のバイオスパーキング	空気*1	—	20L/min	—	2週間
	注水(栄養塩+リン酸緩衝液)+空気*2	360mL/min →100mL/min*3	20L/min →10L/min以下*4	—	6週間
2 解離剤を用いたバイオスパーキング【本技術】	注水(栄養塩+リン酸緩衝液+解離剤)+空気	200mL/min	10L/min以下	20mM	18週間*5

\*1 汚染サイト内のシアン濃度が安定するまで、開始から2週目までは空気のみをスパーキングを行った。また、スパーキング期間中にpHの低下が見られたため、運転2週目終了後に20時間のリン酸緩衝液のみ注水期間を設けた。

\*2 注水スパーキング(注水(栄養塩+リン酸緩衝液)と空気を同時供給)の開始後2週目までにpHの低下が見られたため、3週目の1週間は、スパーキングを停止し、リン酸緩衝液を注入する注水期間とし、4週目から注水スパーキングを再開した。

\*3 計画より揚水速度が遅いため、注水スパーキング4週目から、注水速度を100ml/minに変更した。

\*4 pHの低下を抑制するため、注水スパーキング4週目以降は、風量を10L/min以下に設定した。

\*5 当初計画期間13週間+自主延長期間5週間

#### ②モニタリング方法

本技術による解離剤の効果を検証するため、表2に示す項目について、図2-1～2-2に示す地点でモニタリングを実施した。本技術において解離剤の対象となる鉄シアノ錯体は、全量を検出できる分析法がないため、地下水においては全シアン濃度と遊離シアン濃度の推移の変化から、土壌については底質調査法及び公定法によるシアン含有量と、全シアン溶出量、遊離シアン溶出量の推移の変化から、それぞれ評価することとした。

表2 モニタリング項目一覧

目的	項目	注入地点	測定地点	頻度	方法
浄化効果	地下水	SP	観測井: M1～M4 揚水井: E1～E4 サイト外井戸: AF-3	浄化開始前	公定法(告示17号)
				浄化中週1回	JIS
	土壌	SP	観測井: M1～M4 揚水井: E1～E4	浄化開始前	公定法(告示18号)
				浄化中週1回	JIS
				浄化終了後	公定法(告示19号) 底質調査法*1
環境負荷	排気ガス	SP	活性炭吸着塔前	浄化中週1回*2	公定法
	地下水	SP	観測井: M1～M4	浄化中1日1回	公定法
	処理水	SP	水処理設備後の放流水	浄化中週1回	公定法
	騒音	SP	発生源から5m、10m*3	浄化中1回	公定法
	振動	SP	発生源から5m、10m*3	浄化中1回	公定法

\*1 土壌中の鉄シアノ錯体(鉄塩)を含むシアン含有量の測定を目的として実施。

\*2 他に、1日1回の検知管測定を実施。

\*3 試験サイトの敷地境界では道路騒音の影響が大きいため、発生源から5mを装置近傍、10mを敷地境界と仮定して実施。

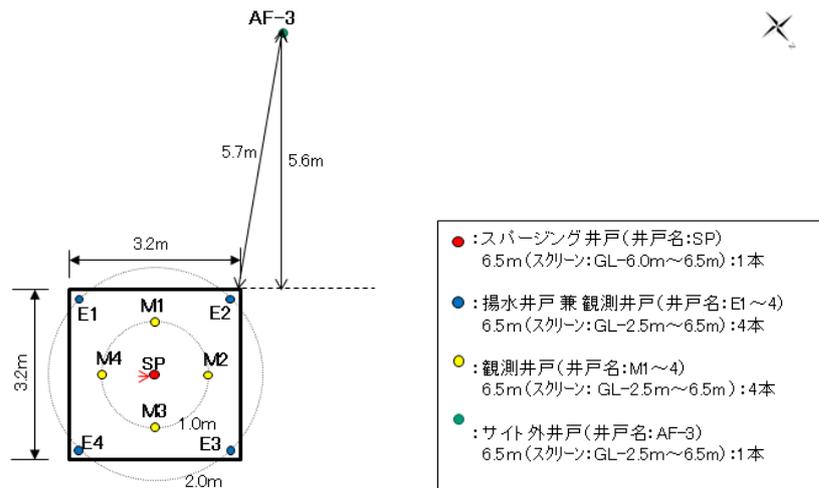


図 2-1 地下水、土壌のモニタリング地点

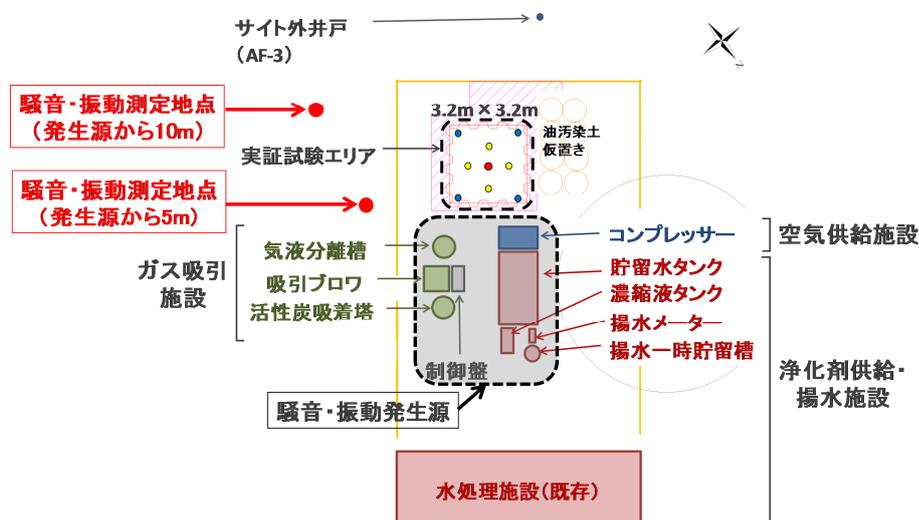


図 2-2 騒音振動モニタリング地点

(2) 浄化対象土壌量及び性状等

- ①土質：砂質土
- ②性状等：土壌含有量(シアン) <math>< 1\text{mg/kg}^{\*1}</math> 土壌溶出量(シアン) <math>< 0.1\text{mg/L}^{\*2}</math>
- ③土壌量：40 m<sup>3</sup> (面積 3.2m x 3.2m x 深度方向 3.9m (GL-2.6~6.5m))

\*1 底質調査法による。 \*2 公定法による。

(3) 結果

1) 有効性について

①除去率

ア. 地下水

浄化期間を通じた地下水中の全シアン濃度の推移は、図3に示すとおりであった。浄化前、従来のバイオスパージング終了時、解離剤を用いたバイオスパージング終了時の各時点における地下水濃度は、表3のとおりであり、計8井戸の平均を取ると、浄化前 0.15mg/L に対し、浄化後 0.07mg/L となり、除去率は 53% となった。

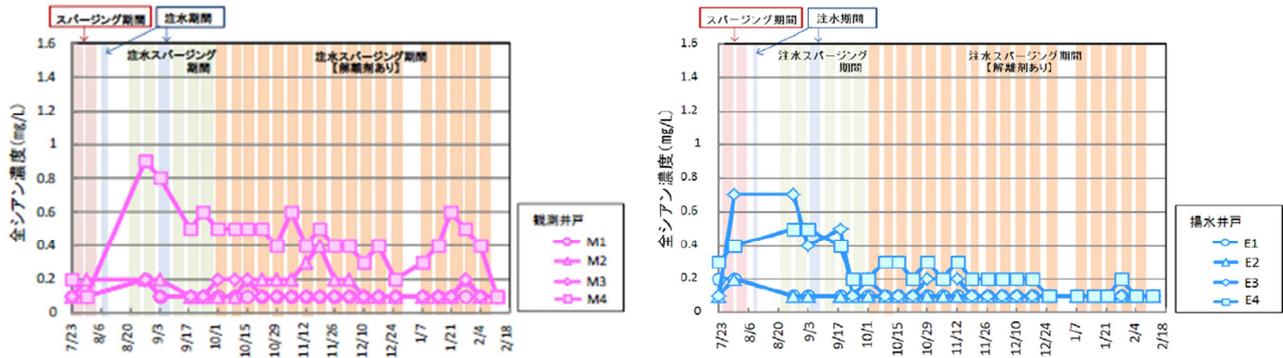


図3 浄化期間を通じた地下水全シアン濃度の推移  
〔観測井戸：左図、観測井戸兼揚水井戸：右図〕

表3 試験中の各段階における地下水中の全シアン濃度 (mg/L)

		浄化前	従来のバイオスパー ジング終了時 【8週間後】	解離剤を用いたバイオ スパージング終了時 【18週間後】
観測井	M1	0.1	0.1	<0.1 (0.08)
	M2	0.1	0.1	0.1
	M3	0.1	0.2	<0.1 (<0.02)
	M4	0.2	0.5	<0.1 (0.07)
揚水井	E1	0.2	0.1	<0.1 (0.07)
	E2	0.1	<0.1 (0.09)	<0.1 (0.05)
	E3	0.1	0.2	0.1
	E4	0.3	0.2	0.1
平均		0.15	0.19	0.07

注) ( )内は、定量下限を0.02mg/Lとして測定した場合の参考値。

平均値の算出に当たって、公定法定量下限未満(<0.1mg/L)の場合は、この値を使用した。

#### イ. 土壌

浄化前の土壌含有量、土壌溶出量について、公定法及び底質調査法による分析結果は、すべての地点で検出下限以下であり、評価はできなかった。

一方、図3に示すように、浄化期間中の一部地点(M4)において浄化停止期間を挟んで地下水濃度が再上昇するなど、土壌中におけるシアン供給源の存在が示唆された。そこで、土壌中の鉄シアノ錯体(鉄塩)含有量について、自主的に公定法及び底質調査法以外の方法＝アルカリ超音波抽出法\*での測定を行った結果、表4の結果が得られた。この結果をもとに各地点の平均除去率を算出すると、61%となる。

\*野口ら, 分析化学 vol. 61, No. 12, p1079-1084, 2012

表 4 浄化前後の土壤含有量 (mg/kg)

測定地点		浄化前		浄化後*	測定地点		浄化前		浄化後*
		底質調査法	アルカリ 超音波抽出法	アルカリ 超音波抽出法			底質調査法	アルカリ 超音波抽出法	アルカリ 超音波抽出法
SP	G.L -3.0m	<1	0.43	0.05	E1	G.L -3.0m	<1	4.13	0.63
	G.L -4.0m	<1	0.91	0		G.L -4.0m	<1	0.12	0.09
	G.L -5.0m	<1	0.26	0		G.L -5.0m	<1	0	0
	G.L -6.0m	<1	0.20	0		G.L -6.0m	<1	0	0
M1	G.L -3.0m	<1	0.27	0.84	E2	G.L -3.0m	<1	0.19	0.35
	G.L -4.0m	<1	0.13	0.14		G.L -4.0m	<1	8.15	0.31
	G.L -5.0m	<1	0	0.02		G.L -5.0m	<1	0	0
	G.L -6.0m	<1	0	0		G.L -6.0m	<1	0	0
M2	G.L -3.0m	<1	0.11	0.09	E3	G.L -3.0m	<1	0.24	0.34
	G.L -4.0m	<1	0.50	0.07		G.L -4.0m	<1	0.51	0.12
	G.L -5.0m	<1	0	0		G.L -5.0m	<1	0.18	0
	G.L -6.0m	<1	0	0		G.L -6.0m	<1	0	0
M3	G.L -3.0m	<1	0.27	0.17	E4	G.L -3.0m	<1	0.69	1.20
	G.L -4.0m	<1	0.21	0.04		G.L -4.0m	<1	0.17	0.07
	G.L -5.0m	<1	0	0		G.L -5.0m	<1	0	0
	G.L -6.0m	<1	0	0		G.L -6.0m	<1	0.09	0
M4	G.L -3.0m	<1	0.36	1.88	平均	<1	0.52	0.20	
	G.L -4.0m	<1	0.32	0.83					
	G.L -5.0m	<1	0.16	0.05					
	G.L -6.0m	<1	0	0					

\* 従来のバイオスパーキングと、解離剤を用いたバイオスパーキングの全ての期間を終了した時点をいう。  
浄化後土壌は、各井戸の近傍でボーリングしたものを測定した。

## ②解離剤効果

表 3 の結果から、解離剤なしのスパージング期間と、解離剤ありのスパージング期間との間で、地下水中の全シアン濃度の浄化効果を比較したところ、解離剤の有無に関わらず地下水濃度の変化なしが 1 地点 (M2)、従来のバイオスパーキング終了時に浄化前よりも増加した地点が 3 地点 (M3, M4, E3)、地下水濃度が段階的に減少した地点が 4 地点 (M1, E1, E2, E4) となり、多くの地点で解離剤を用いたバイオスパーキング期間によって地下水濃度が低下する結果が得られたものの、解離剤ありと解離剤なしの間での浄化効果 (浄化速度) の違いについては判断できなかった。

一方、試験サイトの汚染地下水のみを用いた室内試験においては、解離剤を添加した場合の方が解離剤を添加しない場合よりも浄化速度が速い傾向が認められた。

## ③処理水、副生成物など

揚水後の汚染地下水の処理水の全シアン濃度は、浄化期間を通してすべて検出下限以下であった。この汚染地下水の処理に伴って発生した少量の汚泥は、産業廃棄物として適切に処理された。

## 2) 実用性について

### ①安定性

従来のバイオスパーキング及び解離剤を用いたバイオスパーキングの工程を通して延べ 2,497 時間の運転時間において、スパージング井戸の管内圧力が徐々に大きくなったものの、目詰まり等のトラブルはなく運転が継続された。ただし、栄養塩濃縮液の送液ポンプ及びチューブ内において、析出物による詰まりが数回見られたため、適切な濃縮液の濃度を設定する必要がある。

②安全性

運転期間を通じて排ガスのシアン化水素濃度は検出されなかった。また、矢板外の観測井（AF-3）においては、試験期間中を通して全シアン濃度、遊離シアン濃度の変化は認められなかった。

3) 経済性について

①効率性

実証試験における土壌 1 m<sup>3</sup>当たりの投入エネルギー効率は 914 MJ/m<sup>3</sup>、5.5 人・日/m<sup>3</sup>であった。

②経済性

実証試験における土壌 1 m<sup>3</sup>当たりの対策費用は、292 千円/m<sup>3</sup>と試算された。実規模として 5,000 m<sup>3</sup>のシアン汚染サイトで浄化対策を行うと仮定した場合の費用は、15 千円/m<sup>3</sup>と試算された（別紙参照）。

4) 周辺環境への負荷

①二酸化炭素排出量

実証試験における二酸化炭素排出量は、0.13t-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>であった。実規模として 5,000 m<sup>3</sup>のシアン汚染サイトで浄化対策を行うと仮定した場合の排出量は、0.02t-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>と試算された（別紙参照）。

### 検討会概評

本技術は、シアン汚染サイトにおいて、微生物分解が困難なシアン化合物（鉄シアノ錯体）を解離剤によって遊離シアンに化学変換させ、微生物分解を促進することにより、浄化期間の短縮を目的とした技術である。

実証試験では、地下水に関しては、一定の除去効果が認められた。土壌に関しては、浄化前の土壌溶出量、土壌含有量が、公定法では検出下限値以下であり評価できない結果であったが、土壌含有量について公定法以外の方法で自主的に分析したところ、土壌含有量の低減傾向が認められた。しかし、いずれの媒体についても解離剤の効果は確認されなかった。なお、地下水濃度の変動状況から、土壌中におけるシアン供給源が存在することが示唆されたが、その実態は確認されていない。

室内試験においては、解離剤を用いることにより全シアン濃度低下の促進につながるデータが得られていることから、浄化対象サイト内の土壌の状態（土壌含有量等）を十分に調査した上で、改めて解離剤の効果を実証することが望まれる。

#### 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	地下水濃度	地下水環境基準未満	計 8 箇所 の測定地点のうち、5 箇所 で達成したが、残りの 3 箇所 においては達成できなかった。土壌中の汚染実態に適した施工方法を選択する必要がある。
	土壌溶出量	土壌溶出量基準未満	公定法では、浄化前土壌の溶出量が不検出であり、評価はできなかった。
	土壌含有量	土壌含有量基準未満	公定法では、浄化前土壌の含有量が不検出であり、評価はできなかった。なお、公定法以外の方法で検討したところ浄化前土壌で含有量が検出され、平均で 6 割程度の土壌含有量低減効果が得られる可能性が示唆された。
	処理コスト	13 千円/m <sup>3</sup> 以下 (揚水から 50%削減)	実証試験で得られたデータを基に実規模 5,000 m <sup>3</sup> の汚染サイトで浄化対策を行うとした場合の試算額は 15 千円/m <sup>3</sup> となり、目標を達成できなかった。
環境負荷	二酸化炭素排出量	5.8kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 以下 (揚水から 80%削減)	実証試験で得られたデータを基に実規模 5,000 m <sup>3</sup> の汚染サイトで浄化対策を行うとした場合の試算値は 15.7kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> となり、目標を達成できなかった。
	周辺環境に対する負荷	排ガス：シアン化水素 未検出	浄化期間を通して不検出となり、目標を達成した。
		排水：排水基準未満	浄化期間を通して基準値未満を維持し、目標を達成した。
		騒音：75dB 以下	最大で 58dB となり目標を達成した。
振動：検出されず		敷地境界までの距離を 10m 取ることにより目標を達成できる。	

別紙（難分解性シアン化合物に対する原位置浄化対策技術）

※以下の試算は、実証試験と同等の解離剤注入量で浄化効果を発揮できる対象土壌条件及び適用方法（注入方法、注入箇所等）が整えられたと仮定した場合の試算である。

1. 費用の算出

○実証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た。

1) 試算前提の主要諸元

汚染土壌濃度（溶出量）	: 0.2mg/L（シアン）
汚染土壌の性状	: 透水係数 $10^{-6}$ m/s の均一な細砂層
目標処理濃度（溶出量）	: 土壌溶出量基準以下（不検出）
処理量（ $m^3$ ）	: 5,000 $m^3$
解離剤注入速度（L/min）	: 12.6L/min
解離剤注入時間（h）	: 24h/d×280d
その他の処理条件	: 汚染帯水層=1,000 $m^2$ ×深度方向 5m（G.L-1~-6m） 地下水中シアン濃度 0.2mg/L ガス供給風量 10L/min/本×24h
工費の試算範囲内	: 直接工事費のみ

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ように算定された。

総費用	75,415 千円
処理単価	15 千円/ $m^3$

○従来技術のコストについて

上記の汚染土壌の条件で揚水注水工法を適用した場合のコストは、以下のように試算された。

総費用	127,756 千円
処理単価	26 千円/ $m^3$

2. 二酸化炭素排出量の算出

○実証技術の二酸化炭素排出量について

二酸化炭素排出量の計算にあたっては、上記 1. の条件を前提として試算した。

※地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条第一項（平成 18 年 4 月 1 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。

総排出量	78.7t-CO <sub>2</sub>
排出原単位	0.02t-CO <sub>2</sub> / $m^3$

○従来技術の二酸化炭素排出量について

上記 1. の汚染土壌の条件で揚水注水工法を用いて処理した場合の二酸化炭素排出量は、以下のように試算された。

総排出量	288.5t-CO <sub>2</sub>
排出原単位	0.06t-CO <sub>2</sub> / $m^3$