

注水バイオスパーキング工法を用いた 土壌地下水浄化工事

有山元茂¹・池上和広²・高畑陽³・大石雅也⁴・桐山久⁵

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土壌・環境事業部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1）

²正会員 大成建設株式会社 名古屋支店（〒450-6047 愛知県名古屋市中村区名駅一丁目1-4）

³正会員 工博 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

⁴正会員 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

⁵正会員 東邦ガス株式会社 生産計画部（〒456-8511 愛知県名古屋市中村区熱田区桜田町19-18）

地中深く達した有害物質で汚染された土壌および地下水の浄化方法として原位置浄化工法の開発が求められている。従来からある原位置浄化技術の揚水やガス吸引などの抽出処理は、高濃度の汚染に対しては有効であるが、低濃度の汚染には費用対効果が小さい。さらに微生物浄化技術は、有用微生物を利用して汚染物質を地盤内で直接分解するため、費用対効果の面で理想的な浄化方法であるが、効率的に活性化できなかったため確実性が低い。そこで、井戸から微生物活性を高める空気（酸素）と栄養塩（窒素とリン）を帯水層に同時に供給し、微生物分解性のあるベンゼンやシアンなどで汚染された土壌や地下水を浄化する「注水バイオスパーキング工法」を考案し、対象面積約15,000 m²、の原位置浄化工事を実施した。

キーワード：土壌汚染、地下水汚染、ベンゼン、シアン、スパーキング、揚水、微生物分解

1. はじめに

東邦ガス㈱の工場跡地では、昭和15年から平成10年まで石炭を主原料とした都市ガス製造を行ってきた。当地はこのガス製造のプロセスで発生した副生成物等から漏洩したベンゼン、シアンおよび油分で土壌・地下水が汚染されていた。汚染は、敷地のうち約15,000 m²に広がっており、深度も12 mの第二帯水層まで達していた。土壌汚染対策としては、掘削・良質土置換での対策がポピュラーであるが、当地の様に地中深く達した汚染土壌および地下水の浄化方法として、比較的安価な原位置浄化方法の開発が求められた。ここで、原位置浄化とは、地中で汚染物質を抽出・分解して浄化する方法である。

そこで、広範囲の地盤に対して迅速かつ確実に浄化する事が可能な注水バイオスパーキング工法を考案し、2回の実証試験を経てその有効性を確認し、本技術による浄化工事を実施した。本報告は、注水バイオスパーキング工法の概念、設計の進め方ならびに工事概要を記述したものである。尚、注水バイオスパーキング工法は、東邦ガス㈱と大成建設㈱が共同で実施した実証試験を経て開発したもので、本

技術は2005年度土木学会環境賞を受賞している。

2. 注水バイオスパーキング工法

(1) 工法概要

注水バイオスパーキング工法は、既存工法であるスパーキング工法と揚水循環工法さらに微生物浄化技術を組み合わせたハイブリッドな原位置浄化技術である。本工法は、飽和層中で気泡が拡散する時に汚染物質の気化を促進させる効果（曝気効果）と地下水中に溶存酸素・栄養塩を供給して汚染物質の好氣的微生物分解を促進させる効果（微生物分解効果）を同時に高めることが可能である。図-1の注水バイオスパーキング概念図に示す様に、栄養塩（微生物活性剤）の供給施設をスパーキング施設に付加することで、空気と液体を同一のスパーキング井戸から供給できるように改良されている。また、注水に用いる水は揚水した地下水を処理して再利用する。本工法をスパーキング工法や揚水処理工法などの従来工法と比較すると以下の長所がある。

① 低濃度から高濃度まで汚染状況に左右されず適

用でき、処理期間を従来法の1/4～1/2に短縮できる。

- ② 微生物の増殖に必要な栄養塩は、送気圧を利用して供給するため、地盤内に均一かつ速やかに供給できる。
- ③ 揚水循環処理により地盤内の有害な代謝産物の蓄積を防ぎ、微生物の分解活性を長期間にわたり維持できる。
- ④ 従来工法の循環水量が1/10以下、排水処理が生じない等により、水処理にかかるコストを1/2以下に削減できる。

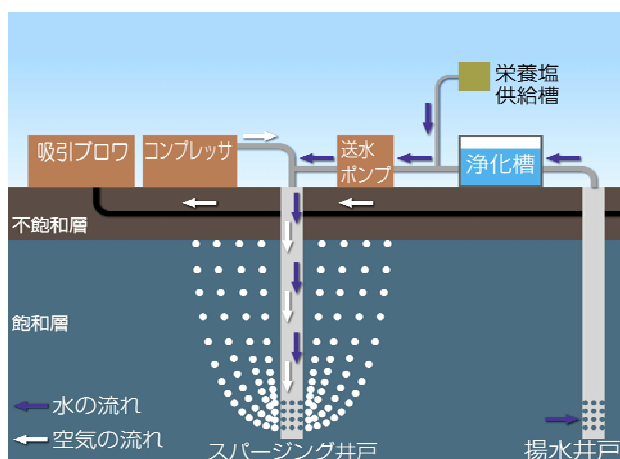


図-1 注水バイオスパーキング概念図

(2) 実証実験

実証実験は、東邦ガス㈱の工場跡地内で実施した。実験箇所の汚染はGL-6 mまでの第1帯水層でベンゼン、シアンおよび油分による汚染及び、透水性の低いシルト層を挟んでGL-8～12 mまでの第2帯水層でベンゼンによる汚染が確認されていた。

室内での適合性試験で得られた効果がフィールドでも得られる事を確認する為に、実証試験を2回実施した。第一回目は、注水バイオスパーキングの効果ならびに適用性を確認する為に実施した。さらに、第二回目は、第二帯水層への適用範囲の拡大やコストダウンを目的として実施した。以下にそれぞれの実証実験で得られた結果を示す。

a) 第1回目の実証試験（写真-1）

ベンゼンおよび油分で汚染された第1帯水層の地盤に対する注水バイオスパーキング工法の適用性を確認した。約半年間の浄化試験の終了後、ベンゼンの約98%、全シアン化合物の約94%を本工法で浄化できることが確認された。

さらに、エアースパーキングの影響半径、栄養塩

注水の影響範囲、井戸のエアー並びに栄養塩の供給能力など(3)設計手法で述べる設計の基本データを得る事が出来た。

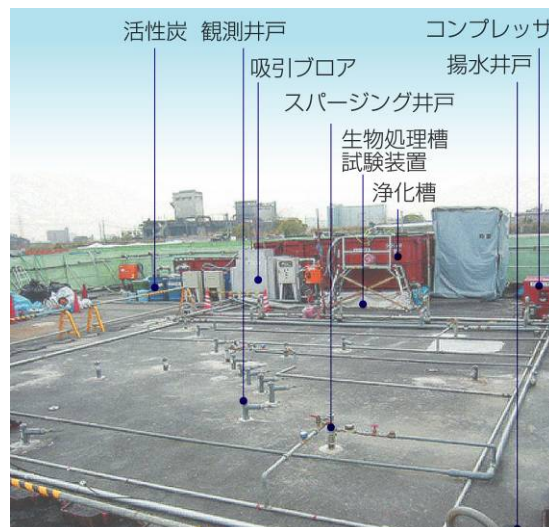


写真-1 第1回実証実験状況

b) 第2回目の実証試験（写真-2）

第1帯水層と第2帯水層を同時に浄化できるスパーキング井戸と地上部に回収したベンゼン等を含む揮発性汚染ガスの微生物処理槽の性能試験を実施した。その結果、2つの帯水層に対し1本の井戸で同時に注水スパーキングが可能なこと、第2帯水層の空気を回収するための透水性の高い通気孔（砕石杭）を打設することが有効であることが確認された。さらに、回収した揮発性汚染ガスは、栄養塩および有用細菌群を含む微生物処理槽内に直接曝気処理を行うことで、90%以上の汚染物質を除去できることが確認され、活性炭の使用量を減らすことが可能となった。



写真-2 第2回実証実験状況

(3) 設計手法

原位置浄化の標準的な進め方を図-2に示す。土

壤・地下水汚染の状況を的確に把握した後に、浄化対策工事の着手前には、室内で行う適合性試験や実際のフィールドで行う実証実験の2種類の試験を行い浄化原理の適用性、浄化の均一性、周辺環境への影響を十分に把握しておくことが重要である。また浄化工事期間中においても、適合性試験や実証実験等で得られた種々のデータに基づいて、浄化の状態や、浄化工事が地盤環境へ与える影響等についてモニタリングを行い管理する必要がある。

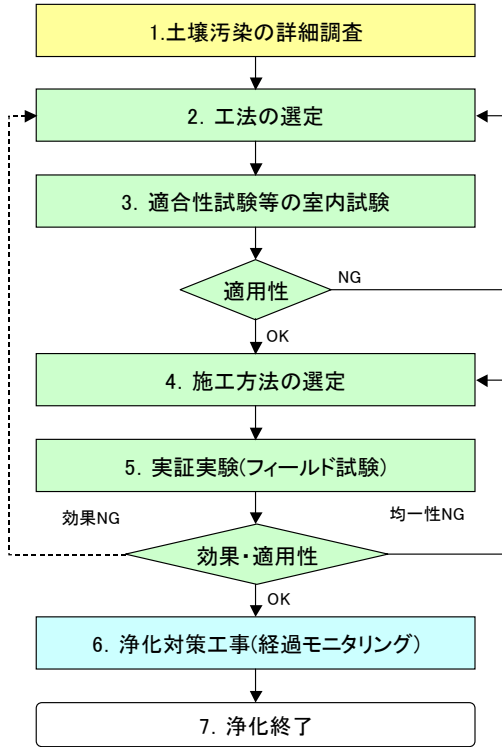


図-2 原位置浄化の標準的な手順

注水バイオスパーキングでは、適合性試験や実証実験で微生物浄化の可能性を判断する事が重要な要素であるが、ここでは効果があると判断された段階からどの様に浄化設備の設計を進めたかを示す。

実証実験で得られたデータを用いて設定した以下の主な項目について詳述する。

a) 影響範囲とスパーキング流量（エアール量）

実証実験にて実施した影響範囲試験結果を以下に示す。影響範囲試験では、エアール量をパラメーターとして、スパーキング井戸内圧力の変化、周辺モニタリング井戸の圧力を計測した。図-3に各流量に対してのスパーキング井戸内圧力変化を示す。初期流量を50 L/minとして、100、150、200 L/minと流量を変化させたところ、50～150 L/minの区間では流量-圧力の関係が比例していることがわかる。200 L/minでは、流量を増加させても圧力が上昇しない状態になっていることから、この流量では限界圧力

を超過していると考えられる。この時の周辺モニタリング井戸の圧力を図-4に示す。この図からも、150～200 L/minへの変化で近傍井戸での圧力の上昇度合いが少なく影響半径の上昇が少なくなっている。以上のことから、本サイトの砂層では、150 L/minを最適流量（最大流量）として計画を行う。物理的にエアールが行き渡る影響半径は、図-4の関係より150 L/minでは3 mであり、今回の計画にはこの影響半径を用いた。表-1に流量と影響半径の関係を示す。

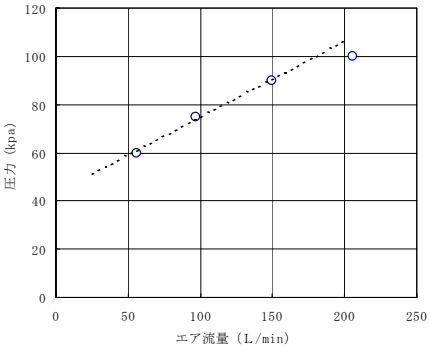


図-3 スパーキング井戸内のエアール流量と圧力の関係

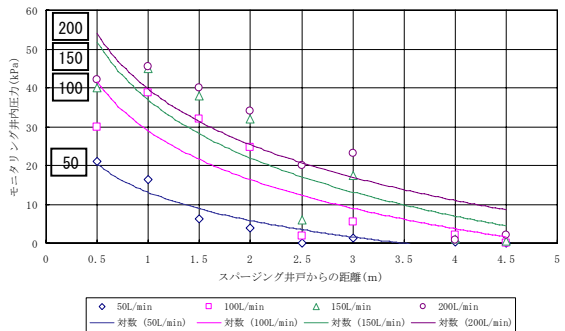


図-4 スパーキング井戸からの距離と周辺井戸の圧力

表-1 スパーキング流量と影響半径の関係

流量(L/min)	50	100	150	200
影響半径(m)	1	2	3	3

b) 注水流量（注水スパーキング流量）

注水流量をパラメーターとして、スパーキング井戸内圧力の変化、スパーキング流量の変化を計測した。図-5に注水量に対してのスパーキング井戸内圧力変化を示す。注水しない状態で70 kPaであったスパーキング井戸の圧力は、注水流量が増加するに伴って上昇し、注水流量が3 L/minまでは線形に上昇したが5 L/minで圧力が上昇しなくなった。図-6に示す注水量とエアール流量の関係からも3 L/minまでは線形に変化したが5 L/minでエアール流量の変化が見られなくなった。以上のことから、本サイトでは、3 L/minが最大注水量と考えられるので、安全の為

1.5 L/minの注水量で設計を行った。

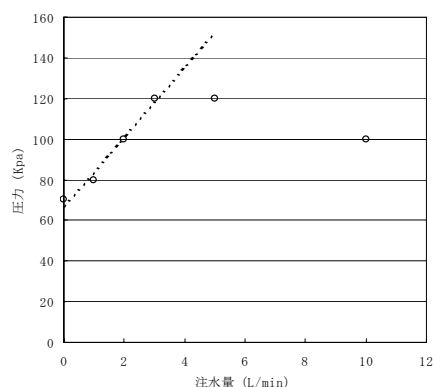


図-5 注水量と井戸内圧力の関係

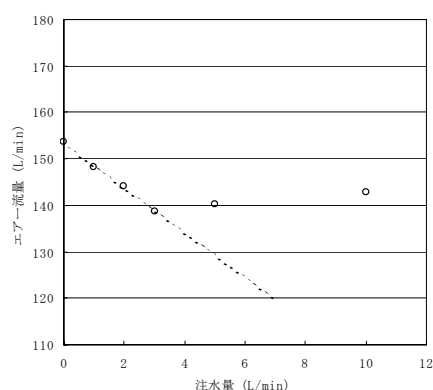


図-6 注水量とエアールームの関係

c) 運転期間の設定（浄化効果の予測）

実証実験の結果から得られたスパージングの効果予測図を図-7に示す。図に示すように、エアースパージングにおける初期エアールームについては、最初から標準流量である150 L/minにはせず、50 L/min～100 L/min～150 L/minと徐々に流量を増加させることとした。この方法により、エアースパージングによる浄化期間は長期化することになるが、汚染ガス処理設備とスパージング用井戸に対する初期の負

荷を緩和できる。よって、エアースパージングの期間は5ヶ月として、注水スパージングの期間は浄化レベルに応じて変化させることにより、7ヶ月で環境基準の10倍以下、19ヶ月で環境基準適合を達成することが可能と考えた。今回の浄化工事では、環境基準の10倍までを第一目標として、浄化期間は12ヶ月とした。一度にエリア全体の浄化運転を行うと必要な設備が大きくなる為、浄化対象エリアを2分割して施工を行う事として、24ヶ月（2年間）の運転工期とした。

3. 浄化工事

(1) 工事概要

本工事は、東邦ガス工場跡地内Aエリアの地盤深部を対象として、ベンゼンに汚染された土壌を原位置バイオ処理により浄化する工事である。

- 1) 対象エリア面積：7,000m²（遮水壁内）
- 2) 対象土層：GL-3～-6m, -8～-11.5mの砂層
- 4) 浄化対象物質：ベンゼン
- 5) 浄化目標：土壌溶出量基準の10倍以内
（最終目標は環境基準適合）



写真-3 施工状況全景

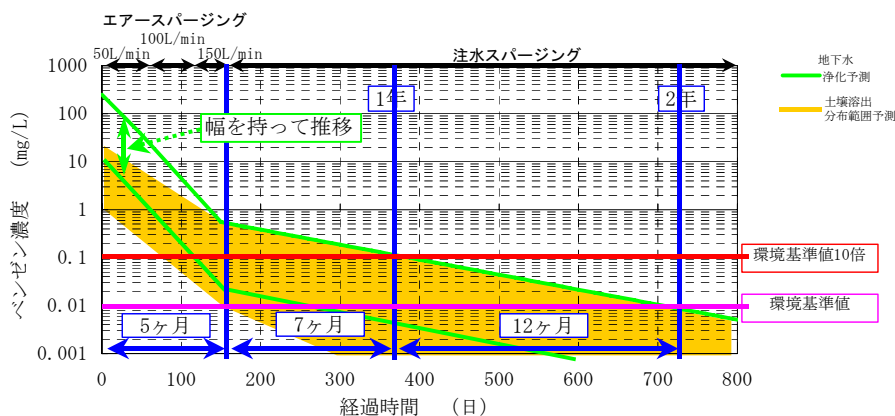


図-7 スパージング効果予測図

(2) 主要設備

注水バイオスパーキングの主要な設備は、送気設備で圧縮した空気と地下水を汲み上げて無害化した後に栄養塩を地中に送り込むスパーキング井、地中で気化した汚染物質を大気放出する前に吸引し活性炭処理を行う吸気設備からなる。さらに今回の工事の特殊性から、2つの帯水層を同時に浄化するために、二重管構造を用いて2箇所の吐出口を持つ二層スパーキング井や第二帯水層からエアーを回収する空気抽出井戸(グラベルドレーン)を採用している。

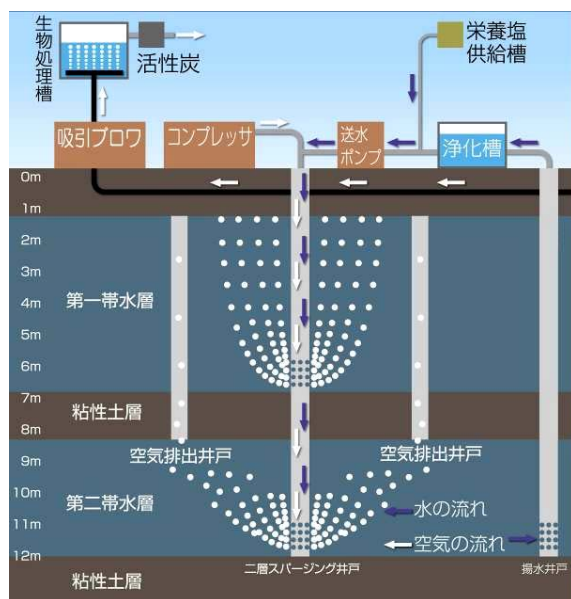


図-8 2層注水バイオスパーキング概念図

表-2 主要設備

分類	項目	仕様と数量
第1帯水層用	スパーキング井	239本(第2帯水層兼用) 削孔径φ150mm, 削孔長11.5m スクリーン長500mm 送気150L/min
	揚水井	7本 削孔径φ300mm, 削孔長6m スクリーン長4000mm
	送気設備(写真-4)	コンプレッサ 送気量35.8m³/min
	吸気設備(写真-5)	吸引プロフ 吸気71.6m³/min (送気量の2倍, 35.8m³/min×2)
第2帯水層用	スパーキング井	239本(第1帯水層兼用) 削孔径φ150mm, 削孔長11.5m スクリーン長500mm 送気150L/min
	送気設備	コンプレッサ 送気量44.7m³/min
	吸気設備	吸引プロフ 吸気89.4m³/min (送気量の2倍, 44.7m³/min×2)
共通設備	水平透気管	22本, 有孔管 東西方向敷設, 4.5mピッチ
	グラベルドレーン	80本, 全域に対してスパーキング井約4本に対して1本の割合
	水処理設備(写真-6)	処理水量1.5m³/h 両帯水層兼用総処理水量3m³/h



写真-4 送気設備



写真-5 吸気設備



写真-6 水処理設備

ここでは、本工事で採用した新規技術について説明する。

a) 二層スパーキング井

スパーキング井は、この出来が浄化工事の成否を決める本工事の要の施設である。地盤の状況をコアで確認しながら削孔を行い、スクリーン（噴出口）を適切な深度に設置する事が重要となる。また、コストダウンを行う為に、一回の削孔で上下2箇所のスクリーン（噴出口）を設置する事とし、井戸構造を二重管として、内管で深部に、外管で浅部にエア

一を送る機能を持たせる事とした。本工事では、239本とスパージングの井戸本数が多い為、この方式を採用する事でコストダウン効果は高かった。旧来の方法で2本の井戸を設置する場合と比較して、約3割のコストダウン効果があった。



写真-7 二層スパージング井

b) グラベルドレーン

粘性土で挟まれた第二帯水層をスパージングで浄化を行う事例は、今まで実施されたと言う報告は見当たらない。ここで問題となるのが、深部の帯水層で吹いたエアーを如何に回収するかである。その方法として各種の検討を行った結果、地盤改良に用いるグラベルドレーン(砕石杭φ400)を空気の抽出用井戸として用いる事とした。グラベルドレーンを中間シルト層を貫通するように設置し、第二帯水層の汚染物質を含んだ空気を砕石を通じて第一帯水層で回収するようにした。



写真-8 グラベルドレーン施工状況

(3) 工事工程

表-3に全体工程表を示す。各種設備の設置に約半年間、スパージングによる浄化は大きく2ブロックに分割して、各1年間で計2年の浄化運転を行った。

表-3 全体工程

項 目	2005年	2006年	2007年
		3	9
準備工	●		
水平透気管設置 (注水) スパージング井戸設置	●	●	
揚水井戸設置・設備・配管工事	●	●	
スパージング浄化工	●	●	●
注水スパージング浄化工		●	●
事後調査ボーリング 配管、井戸、透気管撤去		●	●
アスファルト復旧、事務所撤去片付け			●

(4) 浄化効果

浄化前と浄化後期の14ヵ月後のベンゼンの地下水濃度分布を図-9に示す。ベンゼンの環境基準は0.01 mg/Lであり、当初1,000倍以上あった地下水濃度から、ほぼ全域で環境基準適合の濃度まで低下している事が判る。このことから、本浄化手法の効果が高いことが立証された。

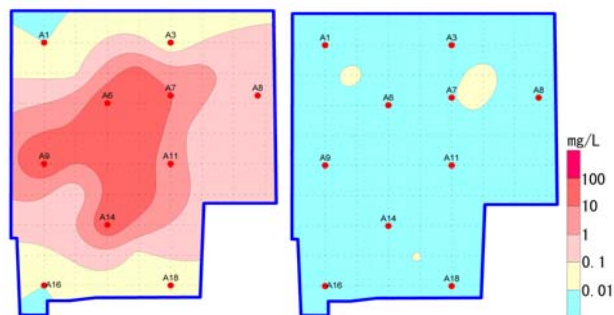


図-9 第一帯水層ベンゼン地下水濃度コンター
(右：浄化前、左：14ヵ月後)

4. おわりに

上述のAエリアでは、約7,000 m²の浄化を注水バイオスパージングを用いて実施した。この規模は、原位置浄化では、国内最大級の規模と言える。この工事に続いて、約8,000 m²のBエリアでも同じ手法で浄化を行っており、Aエリアと同様に良好な浄化効果を発揮している。

また、本工法はシアンの浄化にも有効である事が確認されている。

参考文献

- 1) US EPA 510-B-94-003, Chapter VII, Air Sparging 1994.
- 2) 高畑陽ほか：基礎工, Vol. 33, No. 7, pp. 37-39, 2005.
- 3) 高畑陽ほか：地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 第12回講演集, pp. 112-115, 2006.
- 4) 高畑陽ほか：第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, VII-015 2003.
- 5) 瀧寛則ほか：環境技術, Vol. 35, No. 4, pp-62-70, 2006.