

# 注水バイオスパーキング工法による 複合汚染地下水の高速浄化

高畑 陽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 水域・環境研究室 主幹研究員

豊洲新市場予定地におけるベンゼン、シアン化合物、重金属類で汚染された地下水に対して、スパーキング（空気供給）と揚水・復水処理を組み合わせて、汚染物質の抽出と微生物分解により土壌を掘削せずに浄化を行う原位置浄化技術（注水バイオスパーキング工法）を適用した。本工事では、1) 特殊スリット加工を施した鋼管を用いる打ち込み式スパーキング井戸の適用、2) シアン化合物の分解速度を高める浄化補助剤の開発、3) スパーキングと気液混合抽出の併用による地下水の高速揚水、によって約3万m<sup>2</sup>の浄化対象エリアを16ヶ月間という短期間で浄化を達成した。

キーワード：注水バイオスパーキング、バイオレメディエーション、ベンゼン、シアン化合物

## 1. はじめに

国内における土壌・地下水汚染対策の取り組みは、土壌および地下水の環境基準値が制定された1990年代に本格的に行われるようになった。2003年には土壌汚染対策法が施行され、特定有害物質による汚染状況の把握と、その汚染による人への健康被害の防止に関する措置が定められた。本法では、汚染が認められた土地は「指定区域」として公開されるが、土壌汚染が人への健康被害を生ずる恐れがあると都道府県知事が認めた場合を除いて、汚染が存在すること自体は法令違反とはならない。都市部においては地下水を飲用水として利用している地域も少ないことから、舗装や盛土などの処置を行えば人への健康リスクは低減できるため、都市部の土壌や地下水汚染が直接的に住民の健康被害に直結する事例は少ない。一方、土壌汚染対策法の制定に伴い、宅地建物取引法や不動産鑑定評価基準にも土壌汚染の有無を重要事項として記載する義務が課せられることになった。そのため、法施行後に土壌調査および対策事例が増加したが、その9割以上は、土壌汚染対策法と直接関係のない土地取引によるものとなっている。また、都市部の工場跡地等の遊休地における土地の売買では、土壌や地下水汚染の有無や、それらが存在した場合の浄化コストや浄化期間が土地取引に大きな影響を与えている。

我が国では、環境基準値が土壌汚染が「ある」もしくは「ない」と判断する唯一の指標とみなす風潮が強く、土壌汚染対策法の施行後も土壌および地下水の浄化を確実に達成できる掘削除去対策が多く適用されている。しかしながら、掘削除去対策は処理コストが高く、地価の

高い地域を除いては土地の評価額が大きく低減して売買が困難であり、土地が有効に活用されない「ブラウンフィールド<sup>1)</sup>」となることが問題となっている。

このような背景から、安易な土壌の場外搬出を抑制するため、2010年には土壌汚染対策法が改正され、原位置（非掘削）浄化技術の推進が明確に位置づけられた。近年では、地表面付近の汚染源については掘削処理を行い、地盤の深部に拡散した汚染については原位置浄化技術を用いるケースが増加している。広範囲に土壌および地下水汚染が存在していることが発覚した東京都の豊洲新市場建設予定地においても、浄化コストを低減する観点から地下水汚染については原位置浄化方法が適用されたが、従来法として広く適用されてきた揚水工法では予定した工期内に浄化を完了することが難しいと判断されたため、揚水工法に原位置酸化分解技術<sup>2)</sup>や原位置バイオレメディエーション技術<sup>3)</sup>を付加した浄化技術が適用された。

弊社は、当該予定地の地下水浄化工事において、原位置バイオレメディエーション技術である揚水循環併用バイオスパーキング工法<sup>4) 5)</sup>（注水バイオスパーキング工法）を適用し、地下水浄化期間を短縮するためのさまざまな取り組みを行った。本報ではそれらの取り組みについて紹介する。

## 2. 豊洲新市場予定地の浄化工事の概要

### (1) 豊洲新市場予定地での土壌・地下水汚染の経緯

築地市場は、世界最大級の取扱規模を誇る東京都民の食を預かる台所であり、近年では都内の主要な観光地として重要な役割を果たしている。一方、開場から約80年

が経過し、施設の老朽化や場内の狭隘化が進んだため、その移転先として2001年に豊洲地区への移転が決定された。

移転先となる豊洲新市場予定地は、都市ガスの製造工場跡地であった。都市ガスは石炭をコークス炉などで乾留して製造され<sup>6)</sup>、操業に由来して生成された複数の環境規制物質（ベンゼン、シアン化合物、ヒ素、鉛、水銀、六価クロム、カドミウム）による土壌および地下水汚染が確認されて社会的な問題となった。東京都は、専門家会議<sup>7)</sup>および技術会議<sup>8)9)</sup>を設置して、汚染土壌や汚染地下水の対策に関する総合的な汚染対策をとりまとめ、これに基づいて実施した土壌および地下水浄化工事が平成26年10月末に完了した。

## (2) 豊洲新市場の土壌・地下水浄化方法

豊洲新市場の全体予定図を図-1に示す。豊洲新市場は約40ヘクタールの敷地全域が3つの街区（5街区、6街区、7街区）に分かれている。10mメッシュ（全4,122地点）の土壌・地下水調査を実施して汚染範囲を特定し、1,475地点で土壌または地下水汚染が存在していることが確認された。

本工事では、各街区の周囲に鋼管矢板を設置して外部と完全に遮断し、ガス工場操業時の地盤面から2m下までの土は全て掘削除去して非汚染土と置換を行った。更にガス工場操業時の地盤面から2m以深に環境基準を超える土壌汚染が存在しているエリアは単位区画（10m×10m=100m<sup>2</sup>）毎に鋼矢板で囲い込み、土壌汚染が確認された深度まで掘削を行った。掘削した汚染土壌は全て6街区に搬送して、汚染状況に応じて、微生物処理（バイオパイル）、洗浄処理、中温加熱処理などの浄化技術により処理し、浄化後の土壌は埋戻し土として再利用した。一方、地下水中に環境基準を超える汚染物質が存在している区画については、地下水を汲み上げる揚水工法を基本とする原位置浄化技術が適用された。

尚、詳細な浄化技術の概要および浄化フローについては、「豊洲新市場土壌汚染対策工事の概要」<sup>10)</sup>を参照されたい。



図-1 豊洲新市場予定地の工事適用街区

## 3. 地下水浄化技術の概要

### (1) 浄化対象範囲と汚染状況

豊洲新市場土壌汚染対策工事で弊社は7街区を主に担当した。7街区の地下水汚染は、全1,311の単位区画のうち406区画でベンゼン、シアン化合物、砒素、鉛、カドミウムの単独もしくは複合汚染が存在した。本地盤は、粘性土からなる有楽町層（不透水層）の上位に砂質土、粘性土、礫混じり土砂が分布する地質構造<sup>7)</sup>となっており、地下水位から不透水層までの帯水層（平均6m）が浄化対象深度であった。

### (2) 地下水浄化対策工法の選定

本工事では、井戸から汚染地下水の揚水と復水を地下水浄化の基本とすることが求められた。弊社はこれらの浄化機能を高めつつ、微生物分解機能を付加した注水バイオスパーキング工法を浄化工法として提案し、施工予定地において実証試験を行った。その結果、東京都より7街区の地下水浄化工法として認定され、406区画のうち不透水層まで掘削を行わなかった284区画に対して本工法を適用した。

注水バイオスパーキング工法は、スパーキング（空気供給）と揚水・復水処理を組み合わせ、土壌を掘削せずに帯水層に空気（酸素）と微生物を活性化させる栄養塩等を含む水をスパーキング井戸から同時に供給して地下水を浄化する技術である。注水バイオスパーキング工法の概念図を図-2に示す。

本工法は、豊洲新市場予定地と同様の汚染が存在する石炭ガス製造工場跡地で始めて実用化され、これまでに6件の実用化実績を有している（表-1）。本工法の特長として、汚染物質の気化促進、微生物分解、揚水抽出の3つの浄化効果により、様々な汚染物質の浄化を行うことが可能である。特にベンゼンやシアン化合物などの有害物質を地盤中の好気性微生物により分解できるため、環境負荷や浄化コストを低減できる点に特長がある。

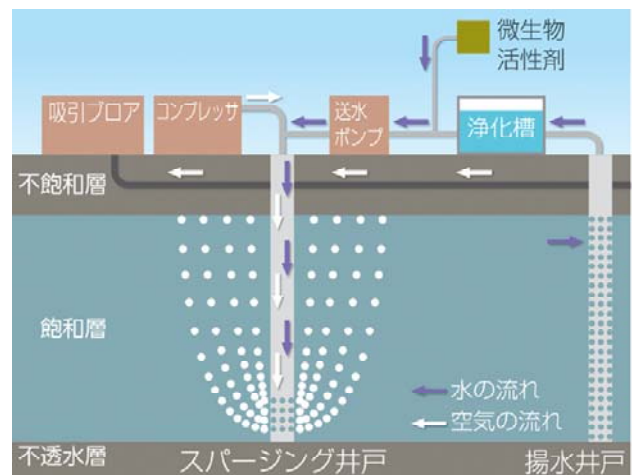


図-2 注水バイオスパーキング工法の模式図

表-1 注水バイオスパーキング工法の適用実績

浄化サイト(跡地)	浄化汚染物質	浄化土壌量	浄化期間
石炭ガス製造工場	ベンゼン	65,000m <sup>3</sup>	24ヶ月
ガソリンスタンド	ベンゼン, 灯油	3,000m <sup>3</sup>	6ヶ月
めっき工場	シアン化合物	3,000m <sup>3</sup>	12ヶ月
石炭ガス製造工場	ベンゼン, シアン化合物	80,000m <sup>3</sup>	29ヶ月
機械工場	機械油	12,000m <sup>3</sup>	12ヶ月
石炭ガス製造工場	ベンゼン	200,000m <sup>3</sup>	6ヶ月

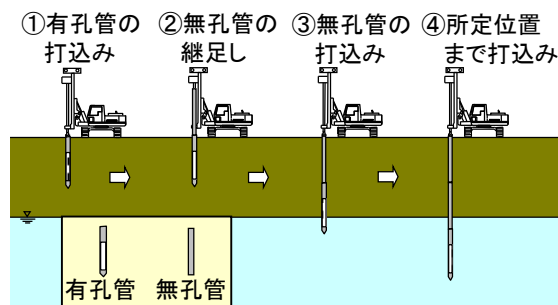
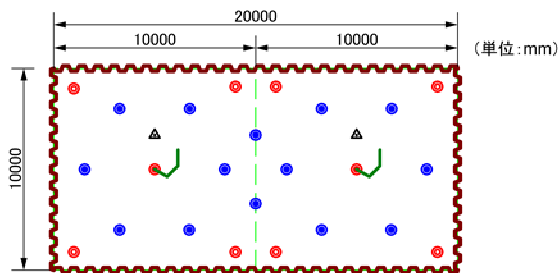


図4 打ち込み式スパーキング井戸の設置手順



凡例

- 注水スパーキング井戸
- 揚水井戸
- ▲ 観測井戸
- 地表部シート内空気回収管

図-3 浄化井戸の平面配置図 (2区画)

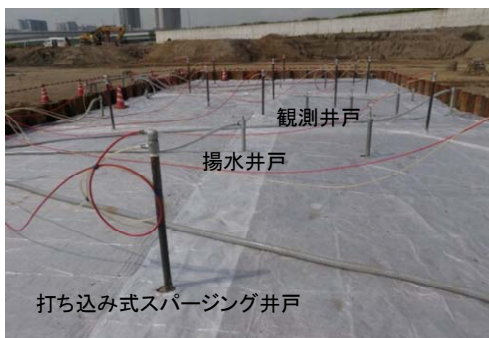


写真-1 浄化井戸の設置状況

#### 4. 工期短縮のための地下水浄化技術の改良

##### (1) 浄化対象範囲と汚染状況

本工事では汚染土壌の掘削除去対策と地下水浄化を同時並行して実施する計画であったため、注水バイオスパーキング工法の対象とした284区画を1~13区画(平均約4区画)ずつ鋼矢板により遮断して、その中に浄化装置を設置し、順次浄化を進める浄化計画となった。そのため、浄化装置の設置および撤去を含めて、全ての対象区画の浄化を工期内で収めるためには、個々の汚染物質に対しての浄化期間を短縮する工夫が求められた。そこで、以下に示す技術開発および運転管理を行い、地下水浄化期間の短縮を図った。

##### (2) 打ち込み式スパーキング井戸の適用<sup>1)</sup>

区画内の標準的なスパーキング井戸、揚水井戸、観測井戸の平面配置図を図-3に、それぞれの井戸の設置状況を写真-1に示す。スパーキング井戸は1区画あたり7本と設置本数が多く、これらを従来型のスパーキング井戸として施工した場合は施工期間が長くなり、定められた工期内で浄化を行うことが困難と判断した。そこで、ケーシングや充填材料が不要であり、使用後に引き抜いて再利用可能な打ち込み式スパーキング井戸を用いた(図-4)。本井戸は自走式ボーリングマシンを用いて直接地盤に設置可能であるため、井戸の設置時間が約1/10に短縮された。また、打設時に管内に土砂が侵入しない最適なスリット形状を持つ鋼管を開発して適用した結果、打設後の井戸洗浄が不要となり、井戸設置直後に浄化を開始することが可能となった。

##### (3) シアン化合物の浄化を促進する補助剤の開発<sup>2)</sup>

本サイトの地下水に存在するシアン化合物は、微生物に分解されにくいフェロシアン等の鉄シアノ錯体の形態で存在した。微生物分解による浄化期間を短縮するため、地下水中に存在する鉄シアノ錯体を微生物に分解し易い形態(遊離シアン)に解離する浄化補助剤の検討を行った結果、過硫酸ナトリウム(SPS)などの過硫酸塩(酸化剤)が有効なことが明らかとなった(図-5)。

本サイトの汚染地下水を用いて、SPS添加による鉄シアノ錯体の分解促進効果をバッチ試験により評価した。土粒子混じり汚染地下水にリン酸緩衝液(pH=8)が3mM(終濃度)になるように添加後、SPS無添加、SPSを終濃度で10mM添加、SPSを終濃度で20mM添加、の3条件を設定した培養瓶を準備して、30℃の恒温室で約4週間振とう培養して浄化効果を確認した。

pHを中性域を維持したまま、SPSを20mM添加した条件では培養14日目以降に鉄シアノ錯体(全シアン)の明確な減少傾向を確認した(図-6)。SPSの添加条件における硫酸イオン濃度の上昇により硫酸ラジカル反応が生じたことが示されたが、SPSを20mM添加した条件でも微生物活性の指標となるアデノシン三リン酸(ATP)がシアン分解時に上昇したことから、微生物活性が阻害されていないことが示された(図-6)。

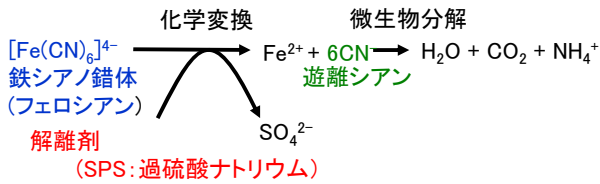


図-5 浄化補助剤のメカニズム

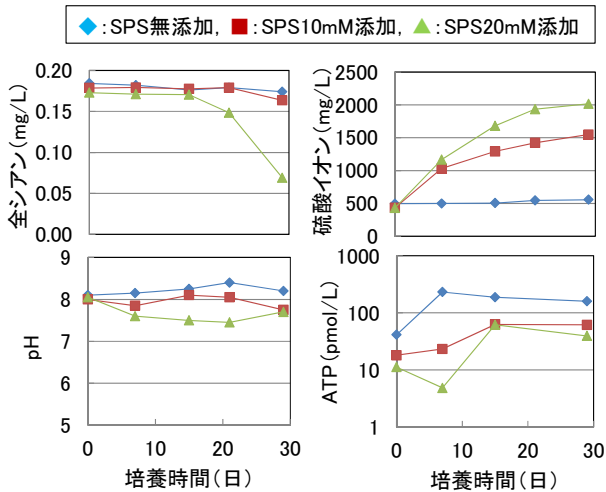


図-6 過硫酸ナトリウムを用いたバッチ培養試験の結果

この結果、SPSの濃度が地下水中で20mMになるように地盤に供給することにより、地下水の難分解性のシアン化合物を数週間で浄化できることが示された。SPSは酸化剤として他工区の浄化方法（原位置酸化分解処理）にも用いられたが<sup>2)</sup>、微生物浄化を併用する本工区では酸化剤の使用量を低減できたため、地盤内の二次的な環境負荷の抑制に貢献できた。

#### (4) 揚水機能の強化<sup>13)</sup>

注水バイオスパージング工法は、好気性微生物による浄化を主体とし、揚水・注水量をできるだけ抑えた運転管理により水処理量の縮減を目指す工法である。しかしながら、本サイトの地下水はベンゼンやシアン化合物だけでなく、微生物分解や酸化による回収ができない砒素、鉛などの重金属濃度が環境基準値を超過して存在する複合汚染地下水であったため、重金属を同時処理できる揚水機能を高めた運転管理を実施した。

揚水機能を把握するため、本サイトの実証試験により注水バイオスパージング工法の揚水性能をディープウェル工法やガス吸引併用揚水工法と比較した。試験サイトは土壌溶出量基準を超過する汚染土壌の掘削をGL-1.0mまで実施し、地下水の浄化対象範囲はGL-1.0m～GL-7.0mのシルト層および砂層とした。本試験では、2試験区画の実証試験範囲の外周に対して鋼矢板を不透水層まで打設して周囲の帯水層と隔離して、スパージング井戸、観測井戸、及び気液混合抽出可能な揚水井戸を矢板内に配

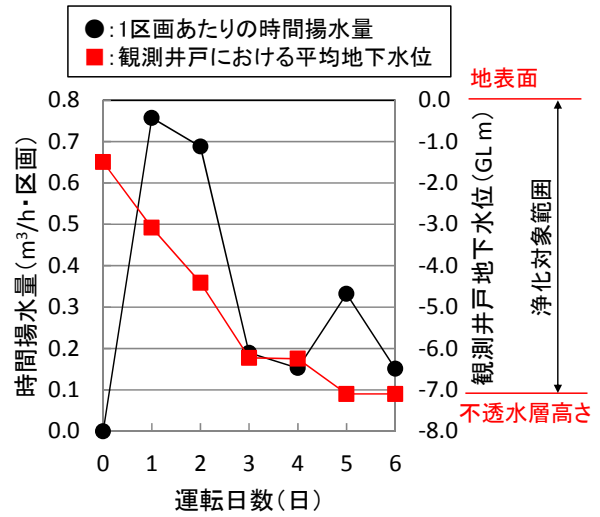


図-7 実証試験における揚水量と地下水位の推移

置した(図-3)。

コンプレッサーを用いて各スパージング井戸から200L/minの空気供給を行いながら、揚水井戸から気液混合抽出を行った。実証試験期間中の1区画あたりの時間揚水量と地下水位（観測井戸の平均値）の推移を図-7に示す。揚水（気液混合抽出）とスパージングの併用により地下水位が不透水層まで低下するために要した期間は概ね5日間であり、ディープウェル工法やガス吸引併用揚水工法と比較して2倍以上の速度で揚水が可能であることが示された。

## 5. 地下水汚染対策工事への適用

本工事では、前章で開発した要素技術を取り入れて改良した注水バイオスパージング工法を地下水汚染対策工事に適用し、図-8に示す浄化運転管理フローに基づいて数単位区画ずつ順番に浄化を実施した。

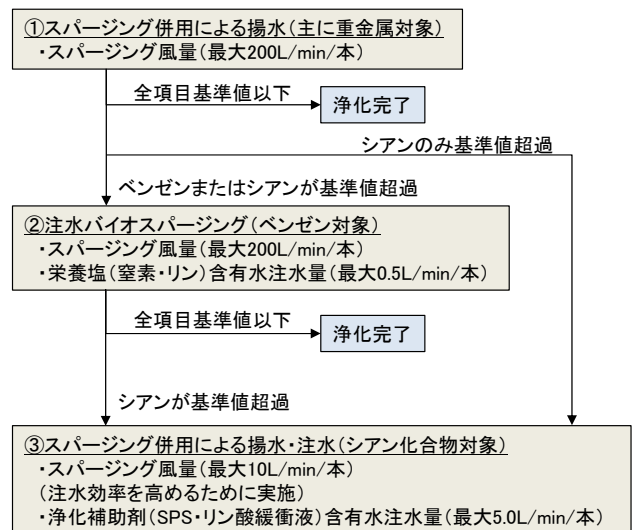


図-8 浄化運転管理のフロー図



写真-2 地下水処理プラント



写真-3 排ガス処理装置

自走式ボーリングマシンを用いてスパージング井戸、揚水井戸、観測井戸を設置後、速やかに空気および水を供給・回収する配管を行って浄化を開始した。空気はコンプレッサーユニット、注入水は送水ポンプを用いて帯水層内へ注入した。注入水には、それぞれの運転段階で適切な浄化剤を選択して加えた（図-8）。吸引ブローにて揚水井戸より気液混合で回収した汚染地下水および排ガスは、気液分離処理後に地下水は敷地内に設置した地下水処理プラント（写真-2）で下水放流基準値以下まで浄化した後に下水道へ排水し、排ガスは活性炭処理した後に大気中放出した（写真-3）。排ガスについても定期的にモニタリングを行い、管理基準を満たすことを確認した。

浄化エリアに設置した観測井戸では汚染物質濃度のモニタリングを毎日実施し、基準値以下になるまで浄化を継続した。その際、測定に時間を要する公定法と並行して簡易迅速分析法を併用し、浄化状況を日単位で詳細に把握することにより、最短期間で浄化が完了できるように品質管理を行った。

その結果、観測井戸における地下水中の対象汚染物質濃度が基準値以下になるまでの実質的な運転期間は平均して8日間であり、対象区画の全284区画の地下水浄化期間（公定分析にて対象汚染物質濃度が地下水基準以下になることを確認）は、約1年4カ月間（運転期間：平成24年8月～平成25年11月）であった。浄化が完了した区画数が最も多かった月は、平成24年12月であり、1カ月間で47区画（概ね4,700m<sup>2</sup>）の浄化を達成した。

本工事での土壌および地下水汚染対策の中で、特に複数の有害物質で汚染された地下水の浄化対策は従来技術では短期間で浄化を行うことが困難と考えられていたが、実績のある浄化技術の本サイトの地盤や汚染対象物質に合わせて適切に改良を加えたことにより、予定通り地下水汚染対策工事を完了した。

## 6. まとめ

原位置浄化技術は、掘削処理と比較して環境負荷やコストを低減できる方法として期待されてきたが、これまでは浄化期間が長くなるケースが多く、特に土地の再利用が急がれる場合には、原位置浄化の適用が難しかった。豊洲新市場予定地で実施した地下水の原位置浄化工事では、実績のある浄化技術をサイトの地盤特性や汚染対象物質の種類に合わせて適切に改良を加えて最適化することにより、掘削処理と同等以上の短期間で地下水を浄化できることを実証した。この結果は、土地の流動性が高く、短期間で浄化が求められることが多い都市部の土壌・地下水汚染エリアに原位置浄化技術を適用して早急に浄化を行うことが可能であることを示唆している。

その一方で、都市部の土壌および地下水浄化が求められているエリアの中には、汚染原因者が適切に汚染サイトを管理することにより、早急に浄化を行う必要が無い場合も増えている。このようなエリアでは、経済性が高く、二次的な環境負荷を抑えて周辺住民の健康リスクを長期的に低減できる持続性の高い浄化方法が求められており、ニーズに応じた原位置浄化技術の適用やリスク管理手法の選択が求められている。弊社では注水バイオスパーキング工法だけでなく、汚染物質の拡散をメンテナンスフリーで長期的に防止できる透過性地下水浄化技術（マルチバリア<sup>14)</sup>）、有用微生物を地盤内に導入して浄化を促進するバイオオーグメンテーション技術<sup>15)</sup>など、様々な原位置浄化技術を開発・実用化しており、ニーズに応じた工法を提供することが可能である。これまでの様々な原位置浄化工事を培った経験と豊洲新市場予定地の地下水浄化工事で得られた新たな知見を、今後の土壌や地下水汚染の修復事業に活用し、都市部の土地利用の推進に役立てていければと考えている。

## 参考文献

- 1) 保高徹生, 牧野光琢, 松田裕之: 日本におけるブラウンフィールド発生確率の推定, 環境科学会誌, Vol.21, No.4, pp.291-306, 2008.
- 2) 川端淳一, 河合達司, 瀬尾昭治, 永井文男, 樋江井夕紀夫, 小林茂生: プラスティックボードドレーンによる揚水・注水工法を用いたシアン含有地下水の原位置酸化分解浄化工事について—豊洲新市場土壌汚染対策工事への適用—, 第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演要旨集, p.548-553, 2014.
- 3) 大石力, 高畑陽, 松尾寿峰, 高橋由布子, 杉山朋靖, 中

- 寿夫：豊洲新市場土壌汚染対策工事（7街区）における地下水浄化の施工例，第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演要旨集，p.13-17，2014.
- 4) 桐山久，高畑陽，大石雅也，有山元茂，今村聡，佐藤健：揚水循環併用バイオスパーキング工法によるベンゼン汚染帯水層の浄化特性，土木学会論文集 F，Vol.65，No.4，pp.555-566，2009.
  - 5) 桐山久，高畑陽，大石雅也，有山元茂，今村聡，佐藤健：ベンゼン汚染帯水層に対する揚水循環併用バイオスパーキング工法の適用と効果の検証，土木学会論文集 F，Vol.66，No.4，pp.612-622，2010.
  - 6) 桐山久，佐藤健：石炭ガス製造工程に起因する汚染問題の概要と浄化対策の技術的課題，地盤工学会誌，Vol.57，No.7，pp.38-41，2009.
  - 7) 豊洲新市場予定地における土壌汚染対策等に関する専門家会議：豊洲新市場予定地における土壌汚染対策等に関する専門家会議報告書，2008.
  - 8) 豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議：豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議報告書，2009.
  - 9) 豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議：豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議報告書 その2，2010.
  - 10) 東京都中央卸売市場：豊洲新市場土壌汚染対策工事の概要，<http://www.shijou.metro.tokyo.jp/toyosu/siryou/pdf/siryoy1.pdf>.
  - 11) 高畑陽，松井秀岳，石井裕泰，堀越研一：土壌浄化・地盤改良に用いる打ち込み式注入管の開発，大成建設技術センター報，第45号，No.52，pp.1-6，2012.
  - 12) 高畑陽，伊藤雅子，太田綾子：過硫酸塩を解離剤として用いる鉄シアノ錯体汚染地下水の浄化促進効果の検討，土木学会第68回年次学術講演会，VII部門，pp.151-152，2013.
  - 13) 大石力，高畑陽，松尾寿峰：注水バイオスパーキング工法の揚水・注水性能，第19回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.421-425，2013.
  - 14) 根岸昌範，深澤道子，樋口雄一：マルチバリア技術による汚染地下水浄化対策，大成建設技術センター報，第38号，No.3，pp.1-6，2005.
  - 15) 高畑陽，笠井由紀，渡邊一哉，帆秋利洋：嫌気ベンゼン分解菌 DN11 株を用いる土壌・地下水の浄化技術，大成建設技術センター報，第40号，No.42，pp.1-6，2007.