石炭ガス製造工場跡地における土壌浄化対策の基本方針策定に向けた取り組み事例

桐山　久[1]

[1]正会員　東邦ガス株式会社　生産計画部（〒456-8511 愛知県名古屋市熱田区桜田町19-18）
E-mail: kiriyama@tohogas.co.jp

石炭ガス製造工場跡地における，土壌浄化対策の基本方針策定に向けた取り組みの一事例を紹介する．本サイトは調査の結果，土壌・地下水ともに，シアン，ベンゼンなどの環境基準超過が確認された．汚染土量が多いことなどから，掘削除去・場外搬出のみでは技術面，費用面からも問題があった．そこで，技術調査や室内試験の結果を踏まえ，浄化適用性に関する最終確認のため原位置浄化工法のフィールド試験を３種類行い，いずれの工法についても相応の浄化効果を確認した．そして，汚染物質，濃度，存在深さにより対策方法を組み合わせた浄化システムを構築した．さらに，本サイトが都市部にあることに配慮する環境対策についても，きめ細かなチェックを行いながら確実に実施しており，計画どおりの浄化完了を目指して進めている．

Key Words : *coal gas, contaminated soil, management, benzene, remediation*

1. はじめに

近年，工場跡地などにおいて，過去の生産活動により発生した副産物などに起因する土壌・地下水汚染が確認される機会が増えている．その中には，石炭ガス製造工場跡地におけるベンゼンなどによる汚染事例が散見される．ベンゼンなどの有害物質は、設備の損傷などにより漏洩が発生して，土壌に浸透したものと推定される．

本報告では，石炭ガス製造工場跡地における，土壌浄化対策の基本方針策定に向けた取り組みの一つの事例について紹介する．

2. 土壌・地下水調査結果

東邦ガス(株)港明工場は，昭和 15 年～平成 10 年 3 月まで約 60 年間にわたり，石炭を主原料とした都市ガスの製造を行ってきた．この用地は，中央を南北に通っている JR 貨物線により東西工場に分かれており，合計の面積は約 25 万 m^2 である．周辺には民家が多い都市部であり，石炭を取り扱う工場としては，全国でも屈指の周辺環境保全が重要となる厳しい環境下で操業してきた工場である．

工場の操業停止に引き続いて，当時の環境庁の指針や名古屋市の指導要綱に準じて，まずは工場の履歴調査を行い，その後**図-1**に示すとおり，平面的に概ね25m間隔でボーリング調査を実施した．

その結果，平成13年の初めまでに全体の８割程度の調査を終え，概ね汚染状況を把握した。この段階までの調査地点数は246地点である．ボーリングの深さは平均して5～6mであり，1m毎に土壌試料を採取するため，１地点当たり6～7個の試料が出てくる．したがって，分析した試料数は物質により異なるが，1,600程度になる．

表-1に土壌溶出量，**表-2**に地下水の分析結果を示す．まず土壌については，環境基準の定められている有害物質のうち，鉛，砒素，カドミウム，水銀，シアンおよびベンゼンの６項目について，環境基準を超えるデータが検出された．すべての物質における最高値は，ベンゼンの26mg/L，環境基準の2,600倍であった．

また，基準を超過した試料の割合が多いのは砒素とベンゼンであり，分析した全試料の１割強が基準を超えている．このうち砒素については，その多くは環境基準の数倍以下という軽微な汚染であり，加

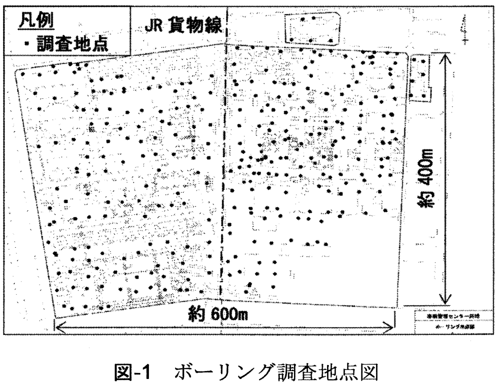

図-1　ボーリング調査地点図

表-1　土壌溶出量の分析結果

	鉛	砒素	ｶﾄﾞﾐｳﾑ	総水銀	全ｼｱﾝ	ﾍﾞﾝｾﾞﾝ
検体数	1.572	1.572	1.572	1.572	1.648	703
基準超過数	43	165	24	3	66	77
最高値 (mg/L)	0.34	0.16	0.04	0.0047	4.2	26
環境基準 (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.0005	検出されないこと	0.01

表-2　地下水の分析結果

	鉛	砒素	ｶﾄﾞﾐｳﾑ	総水銀	全ｼｱﾝ	ﾍﾞﾝｾﾞﾝ
検体数	61	61	61	61	70	74
基準超過数	3	3	0	0	17	26
最高値 (mg/L)	0.03	0.02	ＮＤ	ＮＤ	1.6	270
環境基準 (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.0005	検出されないこと	0.01

えて土壌中の含有量が低い，地下水の汚染が見られない，地表面付近に存在する操業由来の汚染との連続性がなく広く点在している，といった特徴がある．港明用地およびその周辺は埋立地であるということも含めて考えれば，地表面付近より深部の砒素汚染の多くは自然由来と推測された．

一方，地下水について環境基準を超える分析値が検出されたのは，鉛，砒素，シアン，ベンゼンの４物質である．しかし，鉛および砒素の汚染は極めて軽微かつ局所的であり，地下水汚染のほとんどはシアンとベンゼンである．また，すべての物質における最高値は，ベンゼンの270mg/L，環境基準の27,000倍であった．

この後，行政への対応，マスコミなどへの公表，周辺住民の皆様への説明といった情報公開を行い，引き続いて応急対策を行った．応急対策としては表層被覆，遮水壁の設置，さらには地下水の揚水処理を行い，まず土壌の飛散や地下水を介した汚染の拡散を防止し，周辺環境の保全を行った．

3. 室内試験

調査結果から，汚染土壌の量が20万m^3程度と非常に多く，局所的にかなり深いところまで汚染が浸透している場所もあったため，掘削除去・場外搬出処理のみでは，技術面，費用面からも問題があった．

そのため，跡地利用・周辺環境保全を考慮して浄化目標の設定を行い，単一技術ではなく，汚染物質，濃度，存在深さにより対策方法を組み合わせた浄化システムを構築する必要が生じた．そして初めに，土壌浄化技術について幅広く調査を行った．その結果，掘削土壌の加熱・洗浄処理や原位置処理については，各サイトの土質条件や汚染状況などに応じた事前の適用性検討が必要であるとの結論に達した．

引き続いて，確実かつ効率的な土壌浄化を目指して，各種の室内試験を実施した．これは，港明用地の土質条件や汚染状況を踏まえて代表的なサンプルを採取し，最適な浄化方法を確認するための試験である．

試験の対象とした物質は，シアン，ベンゼン，油類の３種類とした．この油類とは，タール系の油で多環芳香族である．我が国では，油類に対する基準は設定されていないが，海外では基準設定の例がある．また，当時環境省がガイドラインの作成に向けた検討を行っていた背景も後押しし，対策は必要と考えた．また，港明用地の汚染は，多くの場合，ベンゼンと油，シアンと油といった複合汚染であり，ベンゼンやシアンと同時に油も処理する必要があった．このような状況を踏まえ，油類についても浄化の対象と位置付け，試験を実施した．

試験結果としては，いずれの物質も500℃程度の温度で加熱処理を行えば，十分浄化ができることを確認した．一方，洗浄処理については，土質の影響もあり，浄化は可能であるものの効率的ではないことがわかった．また，原位置での浄化を視野に入れたバイオ処理については，ベンゼンや軽質油であれば，浄化が期待できることが確認できた．

港明用地の汚染のうち，一部のエリアで深部まで浸透しているものはベンゼンと軽質油であり，他の汚染は比較的浅い部分に留まっている．したがって，室内試験結果を踏まえると，浅い部分の汚染土壌は掘削して加熱処理，比較的深い部分の汚染土壌は掘削せず，原位置でのバイオ処理が適切な対策であるという結論を得た．

4. 原位置浄化工法のフィールド試験

しかしながら，室内試験では局所的な土壌サンプルを用いるため，実浄化の現場とは土質条件や汚染状況などが異なる．そこで，信頼性を高めることを目的として，港明用地内の一部においてフィールド試験を実施し，各技術の適用性確認を行った．

試験は次の三つの方法により実施した．

まず一つ目は，揚水-注水工法[1)]である．これは，地下水を循環させながら，土壌中の微生物を活性化させる栄養塩を加えることによって，物理的な洗浄効果と微生物によるベンゼンなどの分解をねらったものである．

二つ目は注水バイオスパージング工法である．これは，揚水-注水工法にエアスパージング工法を組み合わせたものであり，地下水の循環に加えて，土壌中に直接空気を注入することによって，浄化効果を高めようとするものである．

三つ目は，高圧空気を間欠的に土壌中に注入することにより，シルト分が多い難透水層の浄化をねらったパルススパージング工法である．

上記三つの工法のうち，注水バイオスパージング工法とパルススパージング工法について，その概要と試験結果について紹介する．

(1) 注水バイオスパージング工法

まず，**図-2**に注水バイオスパージング工法の模式図を示す．この工法は，地下水を揚水して浄化し，栄養塩を加えて別の井戸から注水するという揚水-注水工法に，エアスパージングを組み合わせたものであり，注水とスパージングを同じ井戸で行っているところに特徴がある．

試験を行ったのはベンゼンに汚染されたエリアであり，まずエアスパージングによる浄化を実施した．その結果，エアスパージングのみでは50日程度でベンゼンの減少速度が大きく低下したため，浄化開始後55日目から注水バイオスパージング工法に切り替えた．以降，この工法を継続し，トータルで約6ヶ月間の試験を行った．

地下水中のベンゼン濃度の経時変化を**図-3**に表した．四角の内部が試験エリアであり，地下水濃度の平面分布を示している．また，黒丸で示したS1からS5までの点は，スパージングおよび注水を行う井戸の位置を示しており，S2～S5は1辺6 mの正方形の頂点，S1は対角線の交点にある．

浄化開始前の地下水中のベンゼン濃度は，ほとんどの場所で10mg/Lを超えており，S1近傍では100mg/Lを超えている．この高濃度のベンゼンは，エアスパージングによって90%以上除去されたが，ベンゼンの減少速度が低下した浄化開始後48日の段階においても1～10mg/L程度のベンゼンが存在した．この後，注水バイオスパージング工法に切り替えた結果，再び顕著なベンゼン濃度の低下が観測されるようになり，87日後には大半のエリアで1mg/L以下に，178日後には全体の半分近くが環境基準値以下になった．また，土壌のベンゼン溶出量についても，ほとんどの場所で環境基準値以下になっていることを確認した．

本試験により，従来の原位置浄化工法では難しいとされてきた短期間での浄化が可能であることを確認できた．また，本試験における揚水-注水量は，地盤に存在する地下水量の50%程度であり，通常の揚水-注水工法と比較して，循環水量を大幅に低減できることも確認した．さらに，通常，揚水-注水を行うと，多くの注水井戸が必要になるケースが多いと考えられるが，本工法ではスパージング井戸に注水井戸の機能を持たせることにより，注水効率が向上する効果も確認できた[2),3),4),5),6)]．

本試験は前述のとおり，ベンゼンの浄化を目的としたものであるが，試験エリアはシアン化合物による汚染も見られたことから，副次的な効果として微生物によるシアンの分解も確認することができた．**図-4**に，浄化前および浄化試験終了後における地下水中のシアン濃度の分布を示す．浄化前には1mg/Lを超えていた全シアンの濃度が，試験終了後には環境基準値に近いところまで減少している．シアノ基を唯一の炭素源とする培地を用いて，地下水中の微生物の培養を行った結果，シアン分解菌の集積が確認された[7)]．よって，本サイトの地盤中には，シアンを分解する微生物が存在し，これらの微生物の作用によりシアン化合物濃度が低減したものと推測された．

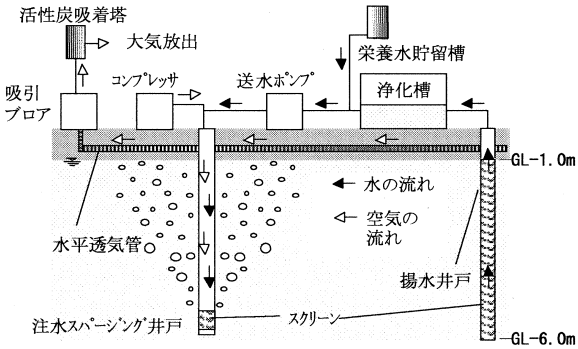

図-2　注水バイオスパージング工法の模式図

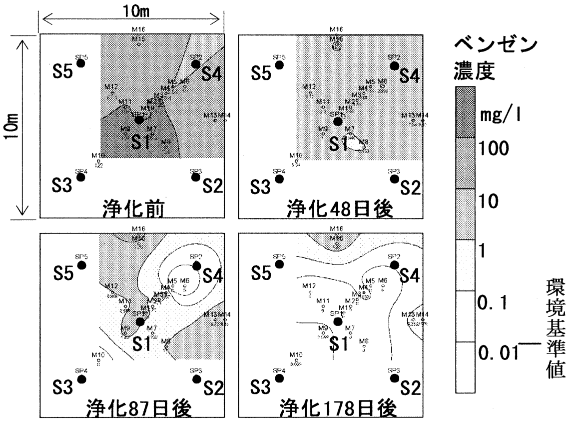

図-3　ベンゼン濃度の経時変化図

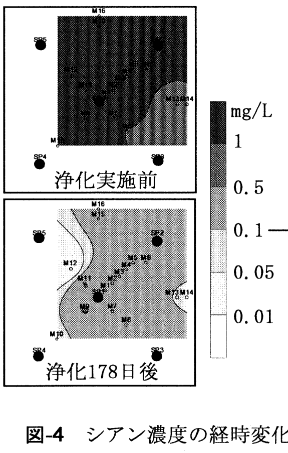

図-4　シアン濃度の経時変化図

(2) パルススパージング工法

次に，**図-5**にパルススパージング工法の模式図を示す．

試験エリアの土壌は，地表面から5m程度の深さまで砂層，その下7mまでがシルト層，その下10m程度までは砂層になっており，ベンゼンによる汚染は固結シルト層の上部，深さ10m程度まで浸透している．本試験は，このうち5～7m程度に存在するシルト層の原位置浄化を主目的としたものである．

試験方法は，まず事前準備として，通常の水平方向の揚水-注水工法により，シルト層の上下にある砂層の地下水浄化を行った．浄化前の地下水中のベンゼン濃度は2～3mg/Lであったが，約２ヶ月間かけて環境基準値以下まで引き下げた．このように，上下の砂層の地下水をある程度浄化した後，パルススパージングと通水洗浄とを併用する方法でシルト層の浄化試験を行った．

パルススパージングは，高圧の空気を間欠的にシルト層の内部に噴出させ，シルト層の間隙水を一時的に排除することによって透水性の向上を図るとともに，ベンゼンの溶出を促進させることをねらった．

通水洗浄は，シルト層の下の砂層に注水しシルト層の上の砂層で揚水することによって，シルト層に対して鉛直方向，下から上への流れを作っている．また，注水中には微生物を活性化させるための栄養塩も添加している．

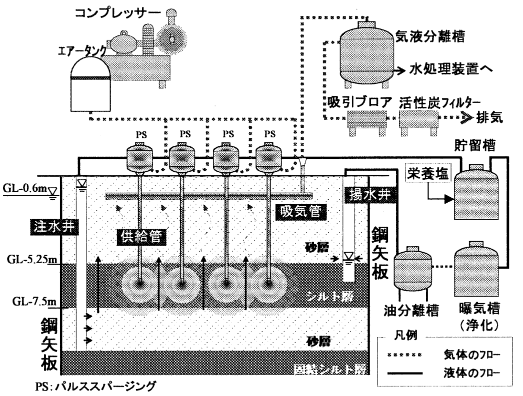

図-5　パルススパージング工法模式図

表-3　土壌のベンゼン溶出量の変化

	採取深度	砂層洗浄(mg/L)	シルト層浄化(mg/L)	
		砂層洗浄後	3ヶ月後	試験終了後
上部砂層	GL-4.0m	0. 021	－	<0. 001
	GL-5.0m	0. 17	0. 051	－
シルト層	GL-6.0m	0. 12	0. 040	0. 005
	GL-7.0m	0. 12	0. 039	0. 006
下部砂層	GL-8.0m	0. 002	－	－
	GL-9.0m	0. 002	－	0. 016
	GL-10.0m	<0. 001	－	－
分析方法		K0125の5.1、5.2または5.3.2に定める方法		

このようにパルススパージングと通水洗浄を併用しながら，約７ヶ月間試験を行った．

表-3に，試験期間中における土壌のベンゼン溶出量の変化を示した．シルト層のベンゼン溶出量の変化を見ると，事前準備を終えた時点では，深さ6m, 7mともに0.12mg/L，環境基準値の12倍であったが，洗浄開始後３ヶ月で約1/3に，７ヶ月間の試験終了時には環境基準値以下にまで低下した．

本試験では，パルススパージングの稼動により通水量が２倍程度まで増加すること，空気および栄養塩の注入などによりシルト層内においても微生物量が増加することを確認している．こうした効果もあり，通常は原位置での浄化が困難とされるシルト層においても相応の浄化ができたと考えている[8),9),10)]．

上記のとおり，いずれの工法についてもかなりの浄化効果が確認できたことから，掘削除去が難しい一部エリアの深部のベンゼン汚染については，原位置での浄化を採用することとした．

以上の結果を踏まえながら，港明用地における土壌浄化対策の基本方針を策定した．

5. 土壌浄化対策の基本方針および特徴

(1) 基本方針

表-4に土壌浄化対策の基本方針を整理した．対象物質毎に浄化方法を選定しており，地表面近くにあるシアン，ベンゼン，重質油などの複合汚染は土壌を掘削して加熱処理，一部エリアで比較的深くまで浸透しているベンゼンと軽質油については原位置バイオ処理を行うこととした．

このうち加熱処理については，対象となる土壌量が10万m^3程度とかなり多いことから，計画的かつ経済的に土壌浄化を進めることを目的として，自社で土壌の加熱処理設備を設置することとした．なお，加熱処理設備の設置場所としては，東邦ガスの空見環境センターとした．港明用地から約6kmと比較的近く，土壌の運搬も含めて効率的に土壌浄化を進められること，加熱用の燃料となるガスや電力・用水などの各種ユーティリティが整備されていることなどが，空見への加熱処理設備の設置を決めた理由である．

原位置でのバイオ処理については，第４章のフィールド試験の結果を踏まえ，揚水-注水にエアスパージングを組み合わせたものを基本とした工法で実

表-4　土壌浄化対策の基本方針

浄化対象物質	浄化方法	
シアン・ベンゼン・重質油	土壌掘削・加熱処理	浄化土壌量が多いため処理設備を自社設置
重金属（鉛、砒素等）	土壌掘削・外部委託処理	専門の処理設備を有する社外の業者に処理を委託
ベンゼン・軽質油	原位置バイオ処理	フィールド試験結果踏まえ工法を選定

施することとした．

また，地表面近くの一部には鉛や砒素などの重金属による汚染も見られるが，これら重金属汚染の土壌量は少ない．また500℃程度の能力を有する自社加熱処理設備では浄化ができないことから，重金属の種類に応じて，それぞれ専門の処理設備を保有する会社に処理を委託することとした．

図-6に港明用地の土壌浄化の全体フローを示す．土壌浄化の中心になる加熱処理については，港明用地で掘削除去した汚染土壌を空見まで運び，加熱処理設備で浄化した後，浄化土を港明に持ち帰って埋め戻し用に利用するという，土壌のリサイクル方式としている．この対策によって地表面から3m程度までにある汚染土壌を浄化し，その後，一部エリアでさらに深くまで浸透している汚染を原位置バイオ処理によって浄化している．

また，一部の重金属汚染土壌については，港明で掘削除去した後，外部に搬出している．この土壌の外部委託に伴って埋め戻し用の土壌が一部不足する場合は，購入土で賄っている．

なお，地下水汚染についても土壌汚染対策と並行して，揚水処理などの適切な対応を実施している．

(2) 対策の特徴

前述の，技術調査～室内試験～フィールド試験～基本方針の策定までは，一般的な技術評価の流れと考えられる．本節では，基本方針のうち，本サイト特有の条件を考慮した対策の概要について述べる．

浄化方法のうち土壌掘削・加熱処理については，浄化対象物質がベンゼンや油などであり，掘削工事において臭気などが大気中に拡散し，周辺地域へ影響を及ぼすことが懸念された．特に第２章でも述べたとおり，用地に隣接して多数の民家があるため，周辺環境対策は，周辺住民の皆様の環境に対する意識レベルの高さも考慮した厳しい基準を設けた[11]．

具体的な例としては，土壌の飛散防止や臭気の拡散防止，さらには騒音・振動の抑制を目的として，土壌掘削工事は仮設テント内で実施することとした．工事排水についても，油分離，凝集沈殿などにより適切に処理することとした．また，土壌の運搬時については，土壌の飛散防止や臭気の拡散防止を目的として密閉式のコンテナ車を使用することとした．仮設テントの状況を**写真-1**に，土壌運搬用のコンテナ車の状況を**写真-2**に示す．仮設テントの大きさは，幅 15m，長さ 40m，高さ 8mであり，これを２梁用いて掘削を進めている．テント内で土壌の掘削を行う際には，必要な換気を行うことによって，労働安全衛生法に定める作業環境レベルを維持している．また，排気は活性炭を通過させ，浄化後に大気に開放しており，敷地境界部における大気モニタリングは，工事期間を通じて環境基準値を満たしている．

一方，土壌運搬用のコンテナ車は，荷台開口部に耐化学薬品用パッキンがついており，自動で蓋を閉めた後に，人力にてハンドル締めを行う二重の安全機構を採用し，密閉できる構造になっている．

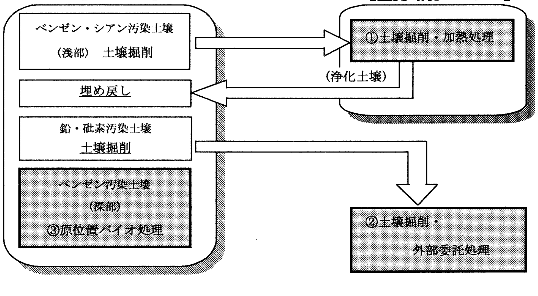

図-6　土壌浄化の全体フロー

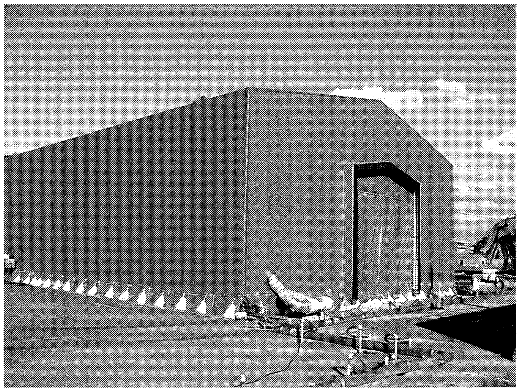

写真-1　仮設テント状況図

写真-2　コンテナ車状況図

6. おわりに

平成13年の調査結果の公表以降，各種試験の実施などを経て土壌浄化対策の基本方針を策定し，これまで概ね順調に浄化工事を進めてきた．

特に，原位置バイオ処理については，フィールド試験の結果を踏まえるとともに，シルト層の存在深さに合わせたスパージング井戸の設置，ベンゼン濃度に応じたエア注入量の変更など，実際の土質条件や汚染状況の違いに対して柔軟に対応し，確実な浄化を進めてきた．また，地域条件に合わせた環境対策についても，適宜適切なチェックを行いながら確実に実施しており，これまで周辺住民の皆様からの苦情もほとんどない．

今後も，原位置バイオ処理を含め，確実かつ効率的な浄化を推進し，計画どおり平成22年度末の浄化完了を目指していく．

参考文献

1) 吉村雅仁・白鳥寿一・桐山久・岡嶋正志：注水法による濃度低減効果とその影響因子について, 第 14 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.199~204, 2008.
2) 高畑陽・藤原靖・有山元茂：原位置試験によるエアスパージング工法の最適設計手法に関する検討, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, Ⅶ-015, 2003.
3) 高畑陽・川又睦・藤原靖・桐山久・冨成義郎：スパージング工法を用いたシアンのバイオレメディエーション, 第 10 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.525~527, 2004.
4) 高畑陽・藤原靖・有山元茂・桐山久：注水スパージング工法によるベンゼンの原位置浄化特性, 第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集, Ⅶ-242, 2004.
5) 高畑陽・大石雅也・有山元茂・桐山久：注水バイオスパージング工法によるベンゼンのバイオレメディエーション，第 11 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.232-235, 2005.
6) 高畑陽・桐山久：注水バイオスパージング工法を用いた原位置バイオレメディエーション技術, 基礎工, Vol.33, No.7, pp.37~39, 2005.
7) 高畑陽・川又睦・藤原靖・桐山久・冨成義郎：スパージングを用いたシアンのバイオレメディエーション, 第 10 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.525-527, 2004.
8) 石川洋二・西田憲司・藤井治彦・藤井研介・竹崎聡・桐山久：難透水性ベンゼン汚染土壌の原位置浄化方法, 第 10 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.225~228, 2004.
9) 石川洋二・西田憲司・藤井治彦・藤井研介・竹崎聡・桐山久：難透水性ベンゼン汚染土壌を対象とした原位置浄化技術—現地実証試験—, 土壌環境センター技術ニュース第 9 号, pp.12~18, 2004.
10) 桐山久・冨成義郎・石川洋二・竹崎聡・西田憲司・藤井治彦・藤井研介・峠和男：ベンゼンに汚染されたシルト層の原位置浄化方法, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.1397〜1399, 2004.
11) 長谷川秀文・岡嶋正志・桐山久・美濃秀章・竹崎聡・峠和男：都市部での油汚染土壌浄化工事における環境対策, 第 11 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.776-779, 2005.

EXAMPLE OF CONTAMINATED SOILS REMEDIATION AT OLD COAL GAS MANUFACTURING PLANT SITES

Hisashi KIRIYAMA

Investigation at these sites confirmed environmental standard excess of cyan and benzene in the soil and subsurface water. The large quantity of contaminated soil made remediation by excavation only, technically difficult and expensive. Therefore, technical investigations were performed on three methods of insitu remediation, and a constant remediation effect was confirmed for all methods. Furthermore, a remediation system was developed that showed contamination material, contamination density, and contamination depth.