

## (S3-5) オゾンマイクロバブルによる地下水浄化工法の適用事例

○高木一成

地盤環境エンジニアリング株式会社

## 1. はじめに

昨年の研究集会で筆者らは、オゾンマイクロバブル(以下 OMB という)による地下水浄化工法の概要と、揮発性有機塩素化合物および燃料油による二つの汚染地下水を使用した室内適用性試験結果等について発表を行った<sup>1)</sup>。本稿では、実際のサイトへの OMB の適用事例を紹介する。

## 2. 浄化の原理

オゾンによる水処理は、水道水や食品の殺菌・消毒や工場廃水の脱色・脱臭などの目的で行われている。いずれもオゾンおよびオゾンが水中で自己分解する際に生成される OH ラジカルが、その強い酸化力で有機物(微生物や有害物質)を分解する効果を利用している<sup>2),3)</sup>。

オゾンによる地下水浄化では、この酸化力を利用して地下水中の VOC や油を二酸化炭素や水などに分解しようとするものである(図-1 参照)。

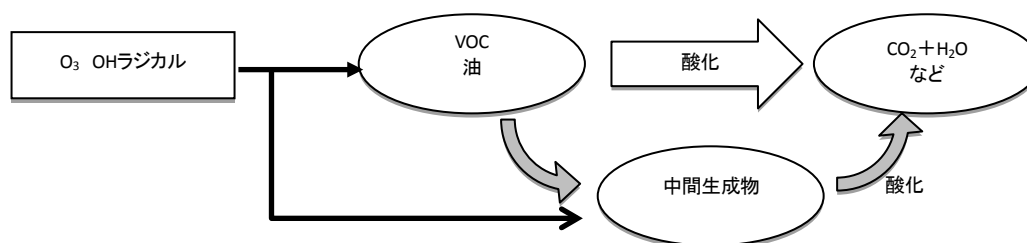


図-1 浄化原理の概念図

また、本工法ではオゾンをマイクロバブル化して地下水に添加することとした。マイクロバブルは直径が概ね 50 $\mu\text{m}$  以下の微細な気泡のことであり、通常の気泡と比較して浮上速度が遅い、同体積の気泡(群)を比較した場合に径が小さくなるほど表面積が大きくなる、などの性質がある<sup>4)</sup>。したがって、地下水浄化に OMB を使用した場合、水中でのオゾンの滞留時間が長くなることで分解効果が持続し、かつ汚染物質とオゾンとの接触機会が増えて、効率的に分解することが可能になると考えられる。また、マイクロバブルが土粒子から汚染物質を剥離する効果や、マイクロバブルが地下水中で収縮・圧潰する際に気泡内部の圧力や温度が上昇し、これによる化学物質の分解効果があるとも言われている<sup>5)</sup>。

## 3. 浄化工法の概要

筆者らが採用した工法では、OMB を汚染された地下水に添加する際、地中に直接マイクロバブルを吹き込むのではなく、マイクロバブル含有水を地下水中に注入する。マイクロバブル含有水は原則として汚染源に設置した揚水井の地下水を用いて作る。すなわち、次に示す三段階での浄化を行う。

- ①汚染源に揚水井を設置し、汚染物質を地下水と共に回収する
- ②揚水した地下水中の汚染物質を地上の設備で OMB により浄化する
- ③浄化した地下水にさらに OMB を添加しつつ地盤に注入し、地中の VOC を分解する

化学的酸化力による地下水浄化工法としては、いわゆるフェントン法が主流であるが、汚染源に薬剤を注入することで、汚染を拡散させることが心配される場合もある。これに対して本工法では汚染源では揚水を行い、OMB 含有水の注入は汚染源の周囲に行うことで、動水勾配は汚染源に傾く。したがって、汚染の拡散を防ぎ

In Situ Chemical Oxidation using Ozone Micro Bubbles Full-Scale Applications

Kazushige Takagi (Geo-Environment Engineering)

連絡先：〒114-0023 東京都北区滝野川 5-7-7-204 地盤環境エンジニアリング株式会社

TEL 03-5394-7230 FAX 03-5394-0540 E-mail contact@jkeng.co.jp

つつ地下水の浄化を促進できると考えられる。

図-2 に浄化工法の概要図を示す。次章以降にサイトでの施工事例を記すが、いずれも既存の調査結果によって判明している汚染源に揚水井を設け、周囲の OMB スパージング井から OMB 含有水を注入している。これまで実施したサイトでは揚水井は 1 本、スパージング井は 6～12 本とし、スパージング井 1 本当たりの注入量は 1～4L/min 程度としている。

オゾン発生量は 20～30g/h 程度、揚水した地下水の処理に 3～4L/min、OMB 含有水の作成に 1～2L/min と、計 5L/min 程度のオゾンを使用している。

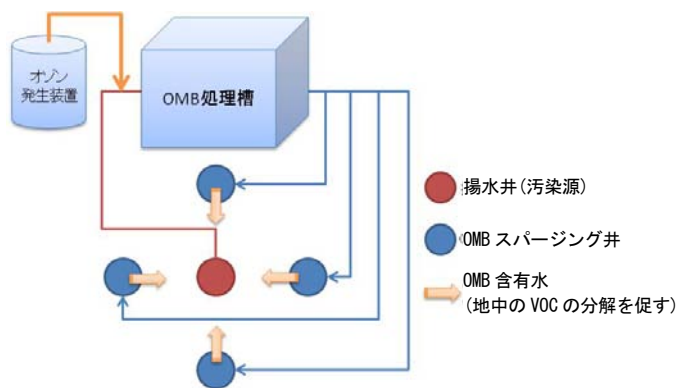


図-2 OMBによる浄化工法の概要図

#### 4. 実サイトでの施工事例

##### 4.1 揮発性有機塩素化合物による汚染サイト

###### (1)サイト概要

サイトは機械工場の一角であり、既存の調査で土壌からテトラクロロエチレン(PCE)が、地下水からは PCE、トリクロロエチレン(TCE)、シス-1,2-ジクロロエチレン(cis-1,2-DCE)および塩化ビニルモノマー(VC)が環境基準を超える濃度で検出された。浄化対策として、土壌を対象とした土壌ガス吸引法と、地下水を対象とした水素供給剤によるバイオレメディエーション法を実施してきた。

これらの対策により、土壌の浄化は順調に進み、地下水についても、PCE は最大 9mg/L であったものが環境基準程度まで、TCE は最大 0.64mg/L であったものが環境基準を下回るまでになったが、cis-1,2-DCE は 1mg/L 前後の濃度で推移し、VC も環境基準を超える濃度であることが判明した。

###### (2)地下水モニタリング結果

約 1 年半にわたり、OMB の注入を継続したところ、図-3 に示す通り観測井では cis-1,2-DCE が 1.1mg/L から 0.012mg/L まで低下し、VC が 0.41mg/L から不検出となった。一方、PCE は浄化開始前に 0.2mg/L であったものが、2011 年 6 月～7 月にかけて最大 1.6mg/L、2012 年 12 月～1 月にかけて最大 0.71mg/L と初期濃度よりも上昇した。実はこれらは装置の運転状況と関連しており、ポンプの故障等で OMB の注入を一時中止した後の再運転時に濃度の上昇が観測されたものである。PCE は cis-1,2-DCE や VC の元となる物質であり、サイトで使用していた物質でもある。このことからサイトの地盤中には土粒子に吸着されるなどして PCE の高濃度部が依然として存在しており、OMB の注入停止→再注入というある種の刺激と、マイクロバブルによる汚染物質の剥離効果によって、地下水中に再溶出したものと推定される。

なお、図-4 に示す通り揚水井では cis-1,2-DCE と VC の濃度はほぼ横ばい、PCE については上昇する傾向にあるが、これは OMB 注入による汚染物質回収効率の上昇によるものと考えられ、地中に存在する汚染物質の OMB による分解効果と相まって、浄化が促進することが期待される。

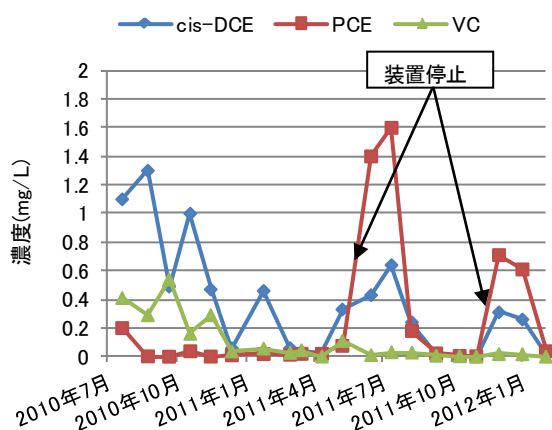


図-3 モニタリング結果(観測井①)

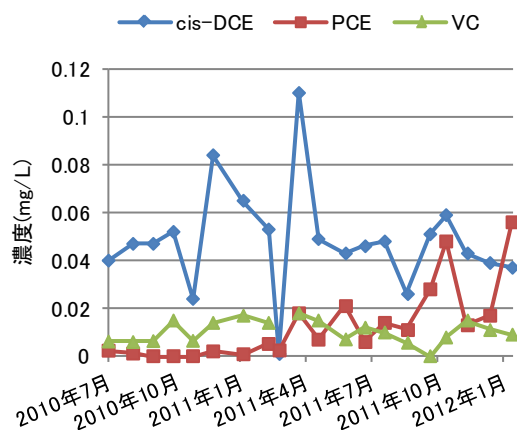


図-4 モニタリング結果(揚水井①)

## 4.2 油類による汚染サイト

### (1) サイト概要

サイトは営業中のガソリンスタンドであり、既存の調査で地下水中からベンゼンが環境基準を超過する濃度で検出された。既存の調査およびモニタリングの結果、敷地中央部の B-1 ではベンゼンが最大 0.25mg/L、敷地境界付近の B2-1 では 0.083mg/L の濃度であった。周囲の追加調査の結果から汚染範囲は連続しておらず、2つの区域に分離していると考えられた。また、大規模な漏油の記録はなく、観測井に油層等は認められないことから、汚染状況は比較的軽微と考えられた。

揚水井はベンゼンの濃度が最も高かった B-1 近傍に設置し、ベンゼンが検出された観測井の周囲に OMB スパージング井を設置した。なお、本サイトでは周囲の食品関係の工場等で浅層の地下水を利用していることから、関係者と協議の上、薬剤を使うバイオレメディエーションやフェントン法ではなく、OMB スパージングを採用した経緯がある。

### (2) 地下水モニタリング結果

図-5 に各井戸のベンゼン濃度の推移を示す。B-1 および B-2 が敷地中央部、B2-1、B2-2 は敷地境界付近の観測井である。

浄化用の揚水井を掘削した直後に各井戸のベンゼン濃度を測定したところ、揚水井は 0.25mg/L、B-1 は 0.16mg/L、B2-2 は 0.021mg/L であった。B-2 は不検出、B2-1 は 0.003mg/L と、調査時に比べ濃度が低下していた。その後、本格的な浄化運転の開始前にオゾンの添加量や注入量を調整している間に、揚水井および B2-2 でもベンゼンは不検出となり、浄化を開始した際にベンゼンが基準を超過していたのは B-1 で 0.21mg/L であった。なお、揚水井で濃度が大きく低下したのは、透水性の良好な部分のベンゼン濃度が低いことで、揚水した地下水全体の濃度が希釈されたためと考えられる。

浄化開始後は最初のモニタリングで全地点ベンゼンが環境基準を下回った。一部の地点では定量下限値をわずかに上回る濃度で検出されることもあるが、環境基準を満足している状態が継続している。そこで、装置の運転を一旦停止しモニタリングによりリバウンドの有無を確認することを計画している。

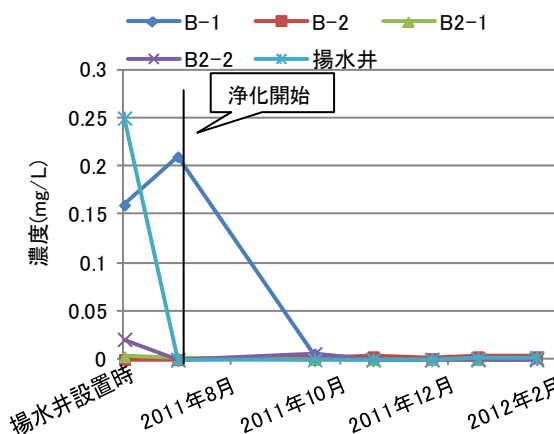


図-5 ベンゼン濃度の推移

## 4.3 揮発性有機塩素化合物およびトルエン・キシレンによる汚染サイト

### (1) サイトの概要

サイトは機械工場の一角であり、過去に部品の洗浄や塗装を行っていた。既存の調査では TCE が最大 560mg/L、cis-1,2-DCE が最大 15mg/L で検出されるなど、地下水中の VOC は高濃度であった。また、環境基準項目や土壌汚染対策法の特定有害物質ではないが、トルエンやキシレンも最大 3mg/L 程度の濃度で検出されていた。

本サイトでは長期にわたり揚水・活性炭吸着による浄化を実施し、観測井の TCE および cis-1,2-DCE の濃度は 1~2mg/L 程度まで低下してきたものの、その後は横ばいの状態であった。また、揚水井では TCE が 0.6mg/L 程度まで低下したものの、cis-1,2-DCE は 4mg/L 程度までしか低下せず、最近ではむしろ上昇に転じる傾向も見られた。そこで、既存の揚水井を流用し、浄化工法を OMB スパージングへと切り替えて浄化の促進を試みた。図-6 に観測井の、図-7 に揚水井の地下水モニタリング結果を示す。

### (2) 地下水モニタリング結果

OMB スパージングを開始した直後に、観測井では TCE および cis-1,2-DCE が大幅に上昇した。また、これまで観測井では検出されていなかったトルエン・キシレンも 3~4mg/L 程度の濃度で検出された。揚水井では TCE のみ濃度が上昇し、cis-1,2-DCE とトルエン・キシレンは濃度が低下したが、翌月のモニタリングではいずれも上昇したことから、OMB スパージング開始後に VOC やトルエン・キシレンの濃度は上昇したとみてよいと思われる。

これは、マイクロバブルによる汚染物質の剥離効果と、スパージング初期における押し出しの効果によるものと考えられる。また、一時的とはいえ、これまでの傾向とは逆に揚水井の TCE が cis-1,2-DCE を上回る 7.9mg/L まで上昇したことは、地中に依然として cis-1,2-DCE の親物質である TCE の高濃度部が存在することを示唆し

ている。したがって、今後も浄化装置の運転と地下水のモニタリングを継続する必要がある。

なお、浄化開始後はいずれの物質も濃度が低下する傾向にあり、観測井の TCE はこれまでで最も低い 0.14mg/L まで低下した。その他の項目は浄化開始前よりも高い濃度で推移しているが、これは上に示した剥離効果による汚染物質の回収効率の上昇の結果であり、浄化を継続することで次第に濃度が低下していくものと考えられる。

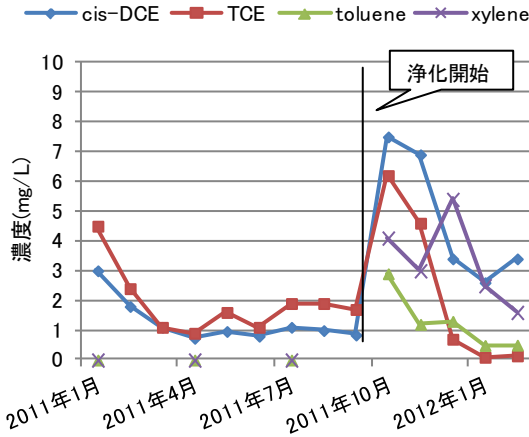


図-6 モニタリング結果(観測井②)

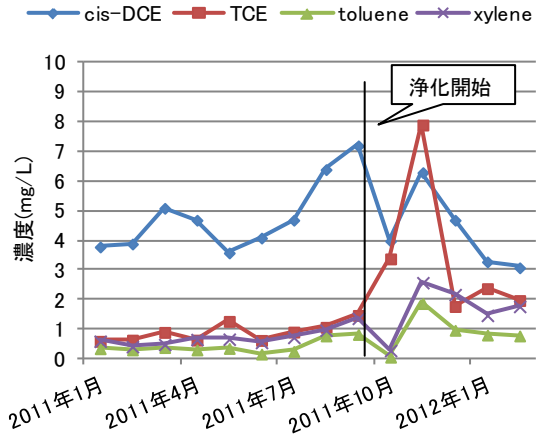


図-7 モニタリング結果(揚水井②)

## 5. まとめ

本稿では OMB による地下水浄化工法の実サイトへの適用事例を三つ紹介した。特徴的なのは揮発性有機塩素化合物および揮発性有機塩素化合物+トルエン・キシレンを対象としたサイトで、OMB スパーキング開始時あるいはスパーキングを一時停止した後の再開時に地下水濃度が上昇したことである。いずれも PCE や TCE の使用履歴があったサイトであるが、調査時には分解生成物である cis-1,2-DCE や VC が高濃度で検出されていた。それが OMB スパーキングをきっかけとして、元の物質である PCE や TCE の濃度が上昇したことから、土粒子に吸着するなどして地中には依然として PCE や TCE が残留していたことが明らかとなった。

これらのサイトはこれまでバイオレメディエーションや揚水・活性炭吸着による浄化を実施しており、VOC 濃度はある程度低減していたが、濃度が下げ止まってきたため、浄化を促進する目的で OMB スパーキングを開始した経緯があり、図らずも従来の工法によって地中の汚染物質を完全に分解するあるいは取り去ることの難しさを示したといえる。

このようなサイトでも、OMB スパーキングでは汚染物質の剥離効果および押しだし効果により地中の汚染物質を回収する効率を上げつつ、地中に存在する汚染物質を酸化分解することで、浄化が進むことが期待される。また、汚染物質の存在量が少ないサイトや汚染物質を吸着しにくい地質の場合には、二番目に紹介した燃料油に由来するベンゼンを対象としたサイトのように、短期間で良好な結果を得ることも見込まれる。

## 参考文献

- 1)高木一成(2011): オゾンマイクロバブルによる地下水浄化工法について, 第17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, p161~164
- 2)日本オゾン協会(2009):オゾンハンドブック
- 3)海賀伸好(2008):オゾンと水処理
- 4)上山智嗣,宮本誠(2009):マイクロバブルの世界
- 5)高橋正好:マイクロバブルおよびナノバブルの基礎と工学的応用, 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 水環境工学研究グループホームページ, <http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/26env-fluid/pdf/takahashi.pdf>, (2011年閲覧)