

ベンゼンおよび油汚染を対象とした原位置浄化技術

The in situ remediation technologies for benzene and other petroleum hydrocarbon (TPH)
contaminated site

橋本 勇郎

Toshiro Hashimoto

中間 哲志

Tetsushi Nakama

(株) エンバイオ・エンジニアリング

(〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町

2-2-2 神田パークプラザ 8階)

The in situ remediation technologies are much cost effective and less environmental impact than conventional treatment such as excavation and removal method. The authors have many experiences of in situ remediation project at the gas station and oil reservoir contaminated by benzene and other petroleum hydrocarbons. In our actual cases, this report introduces practicalized in situ remediation technologies including chemical oxidation using the Fenton's reagent, bioremediation, pump & treat and their combination method that we called hybrid method.

1. はじめに

ベンゼンおよび油による土壌地下水汚染は、ガソリンスタンドや石油製品を取り扱う事業所等で多く確認されている。筆者らもガソリンスタンドや油槽所においてベンゼンおよび油汚染の浄化対策に数多く関わってきた^{1),2),3)}。ベンゼンや油汚染を対象とした浄化工法として、従来から掘削除去や揚水曝気などの工法が多く適用されてきた。筆者らは、従来工法に加えて化学酸化やバイオレメディエーションなどより効率的な原位置浄化工法を中心にベンゼンや油汚染の対策を行ってきた。原位置浄化工法には、掘削除去と比較して低コストかつ環境負荷が小さいという長所があり、方法によっては地上に構造物があってもそのまま浄化することが可能である。

本報告では、ベンゼンおよび油で汚染された土壌地下水に対して実績のある原位置浄化工法を紹介する。

2. 原位置浄化工法

2.1 フェントン反応を用いた工法

化学酸化反応の一種として、フェントン反応が広く知られている。

フェントン反応は、2価鉄 [Fe (II)] が過酸化水素 (H_2O_2) をヒドロキシルラジカル ($\cdot OH$) とヒドロキシルアニオン (OH^-) に分解する反応である。ヒドロキシルラジカルは非常に強い酸化力を有し、油やベンゼンといった有機物質を酸化分解し、水や二酸化炭素が生成する。(図1参照)

【フェントン反応剤】

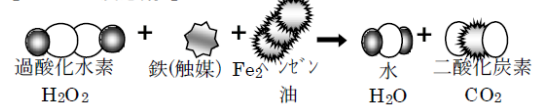


図1 ベンゼンおよび油に対するフェントン反応

A) バックホウを用いた攪拌混合

土壌粒子に吸着しているベンゼンや油に対してフェントン反応剤を効率的に接触させるために、重機による混合攪拌を行う。

バックホウでは、主に地表面から3m程度(地下タンクの深さ)までの浅層部を対象とし、対策範囲の土壌をほぐしながら、薬剤をポンプで散布し、土量に対して約3割~5割のフェントン反応剤を攪拌混合する(写真1)。

攪拌混合完了後は高含水状態となるためセメント等の地盤改良材による地盤強度の復旧が必要となる。

高濃度の油汚染土壌を対象に施工する場合、フェントン反応によるベンゼンや油分の分解に加えて、ヒドロキシルラジカルで土粒子から油分が剥離される。剥離された油分は、オイルスキマー等を用いて回収し、産業廃棄物として処理する。



写真1 バックホウによるフェントン反応剤攪拌混合

B) 柱状改良機を用いた攪拌混合

地表面から3mを超える深層部での攪拌混合では柱状改良機を使用している。この重機は、セメントを用いた地盤改良工事で一般的に用いられているものであり、従来の地盤改良工事で使用している設備（ミキシングプラントや送液ポンプ）についてもフェントン反応剤の移送に用いて注水量を制御している。

施工方法としては、円形の攪拌翼（写真2）を回転させ、フェントン反応剤を噴射しながら鉛直方向に攪拌・掘進していく（写真3、図2）。本工法による施工深度は最大で地表面から20mまでを施工した実績がある。

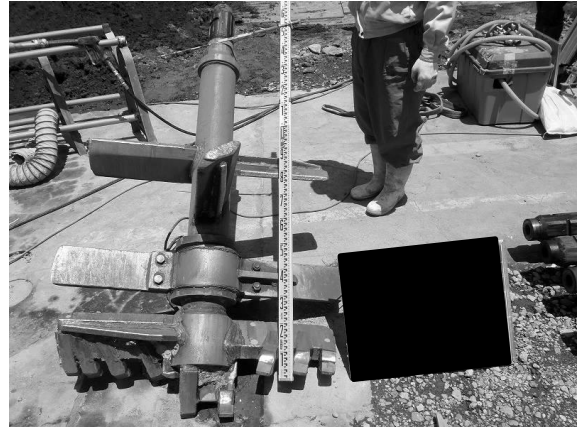


写真2 柱状改良に用いられる攪拌翼



写真3 柱状改良機によるフェントン反応剤の攪拌混合

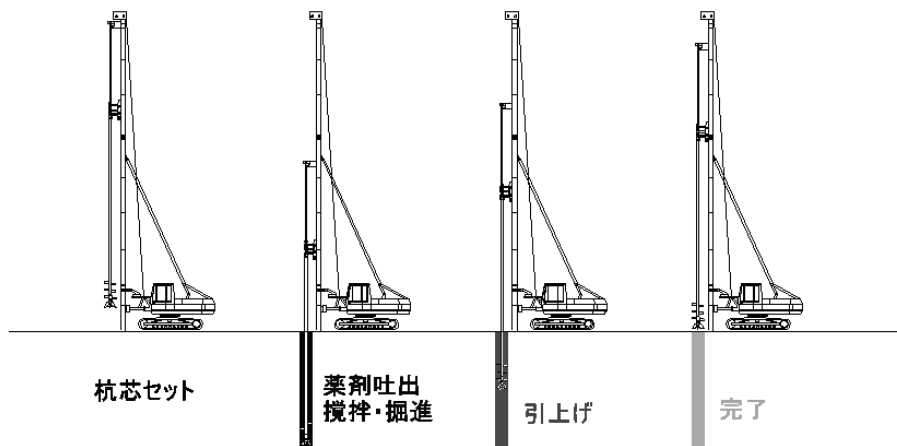


図2 柱状改良機による施工模式図

フェントン反応剤の混合攪拌完了後は、バックホウによる攪拌混合と同様に高含水率状態となるため、セメント等の地盤改良材による地盤強度の復旧が必要となる。地盤改良工事も同一の柱状改良機を使用するので、連続的に施工することができる。

C) フェントン反応剤の原位置注入・回収（土壌洗浄）

地下水中のベンゼンおよび油に対しては、フェントン反応剤を帯水層へ注入する工法も数多く行ってきた。フェントン反応剤を帯水層に注入する方法としては、鉄製の注入ロッドを地中に打ち込

みロッドの先端部から薬剤を吐出させる工法と注入井戸を設置した後にダブルパッカーを用いて所定の深度に薬剤を注入する工法（写真4、図3）

がある。注入ロッドで注入する工法は、透水性が良く、かつ均質の地層に向いており、打撃式の自走型ボーリングマシンを用いて打設と注入を行う。

（写真5、図4）。井戸を設置してダブルパッカーで注入する工法は、透水性が不均質な地層でも所定の深度に注入することができる。

狭隘なスペースで注入工事を行う場合は、ハンディタイプの注入管の打設機を用いて注入管の設置を行うことが可能である（写真6）。



写真4 ダブルパッカー施工状況

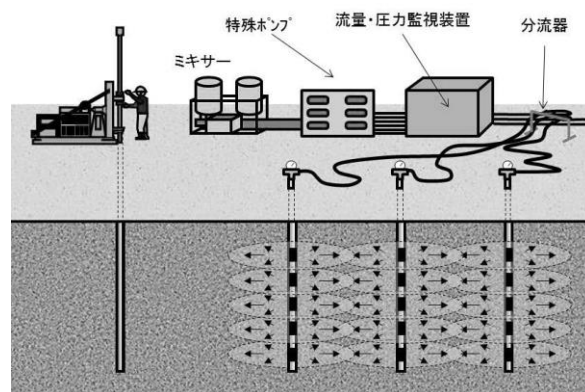


図3 ダブルパッカー施工模式図

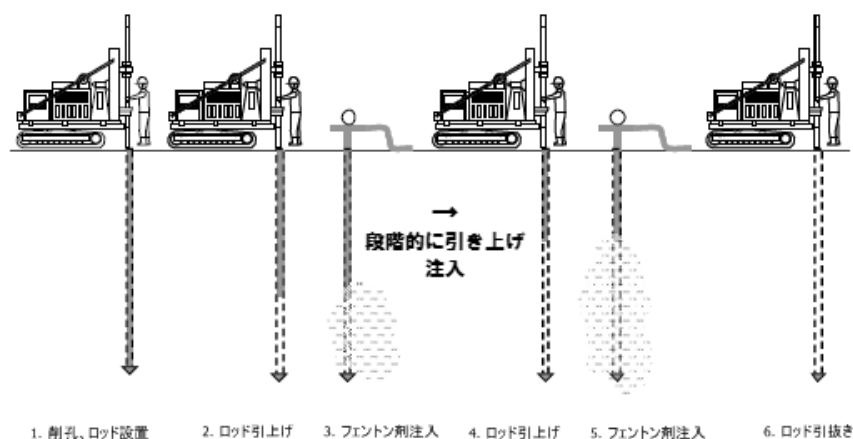


図4 ロッド注入の施工模式図



写真5 フェントン反応剤注入状況



写真6 狭い敷地内での施工状況

2.2 揚水処理工法

揚水井戸を設置し、ベンゼンおよび油汚染を地下水と共にポンプで汲み上げ、土壌および地下水を浄化する。汲み上げた地下水中の油は、油水分離槽で分離・回収される（図5）。地下水中のベンゼンは、曝気槽で曝気により気化され、活性炭に吸着させて回収する。汚染源対策として汚染物質の高濃度地点に揚水井戸を設置して汚染源の浄化を目的とする場合と、敷地境界付近に揚水井戸を設置して敷地外への汚染拡散防止を目的とする場合がある。この工法は、井戸や処理装置の設置工事を除き無人で運転を行う事ができる。したがって、揚水処理装置を置く適度なスペースがあれば、営業中のガソリンスタンドでも揚水処理は可能となっている。

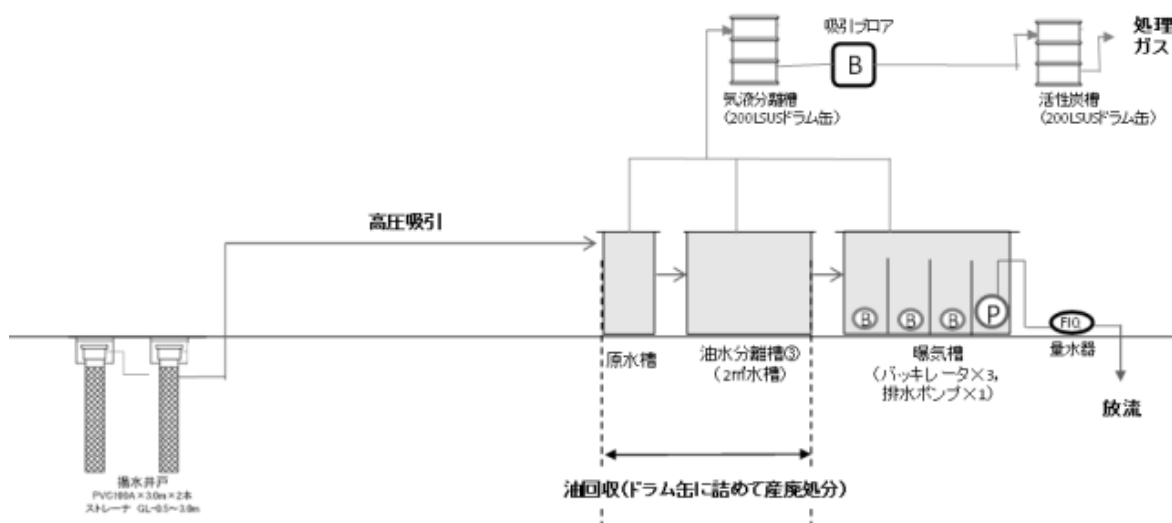


図5 揚水曝気処理フロー

2.3 バイオレメディエーション

バイオレメディエーションとは、ベンゼンおよび油汚染を微生物分解により浄化する工法である。

バイオレメディエーションには「バイオスティミュレーション」と「バイオオーグメンテーション」の2つの手法がある（図6参照）。

バイオスティミュレーションは栄養塩と酸素を浄化対象地へ供給して好気環境を作ることで、地中に元々生息しているベンゼンや油を分解できる微生物を活性化させる手法である。バイオオーグメンテーションは分解能力が優れた微生物を、栄養塩と一緒に対象地へ投入したうえで酸素を供給して好気環境を作り、油などの汚染物質を分解する手法である。

バイオレメディエーションは、油汚染の油臭・油膜対策に特に高い効果がある。この工法は、時間の経過とともに微生物活性の影響範囲が広がるので、構造物によって栄養塩や酸素などを直接注入することのできないエリアや構造物の直下の浄化も可能である。

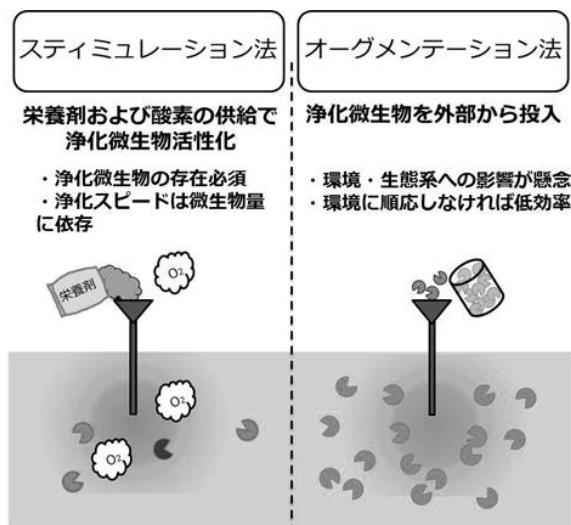


図6 バイオレメディエーションの分類

3. ハイブリット工法

前述した原位置浄化工法には、それぞれに特徴があり、長所短所がある。

著者らは、対象汚染物質の種類や濃度、浄化対象地の地質構造に応じて、化学酸化工法とバイオレメディエーションや土壌洗浄などの工法をそれぞれの特徴を考慮して組み合わせることにより土壌地下水汚染浄化の最適化を図っている。

A) 化学酸化+バイオレメディエーション

フェントン反応剤を用いた化学酸化工法は、短い工期で浄化が可能である反面、浄化を成功させるには汚染物質とフェントン反応剤との速やかで確実な接触が必要不可欠である。またフェントン反応剤は、ベンゼンや油の中でもガソリン、軽油などの軽質分は分解できるが、重油や潤滑油などの重質分を分解することは困難である。一方、バイオレメディエーションはフェントン反応と比較して分解速度が遅く、工期が長くなる短所を持つ反面、分解反応が長く持続するためフェントン反応剤では薬剤が届かない範囲や分解が難しい油種（重油や潤滑油）の分解も可能である。

この2つの工法は相互補完しあえるため、組み合わせることによって浄化対象の幅を広げることができる⁴⁾。

土壌汚染対策法において原位置浄化工法の措置完了条件は、地下水の基準適合を2年間継続することとされている。地下水汚染がある場合、フェントン反応剤を用いた原位置浄化のあとに、バイオレメディエーションを組み合わせることにより、分解能力が持続するためより確実な浄化が行える。

B) フルアップポイント工法 (揚水処理+化学酸化)

フェントン反応剤を用いた化学酸化工法は、対象地が透水性の悪い地層や粘性地盤の場合、薬剤が移動しにくく、浄化効率は著しく低下する。

揚水処理工法は、物理的に地下水から汚染物質を除去する方法で地下水浄化の実績は多い。しかし、その浄化期間はフェントン反応剤を用いた化学酸化工法よりも断然長く、特に油が対象の場合、長期間の工期を設定する必要がある。

そこで、揚水処理とフェントン反応剤の注入という2つの工法を併用することにより、対象地盤へのフェントン反応剤の浸透と拡散を促進させることができ、工期の短縮が図れる。

具体的には、複数の注入井戸からフェントン反応剤を同時に注入し、注入地点間でウェルポイント等による真空揚水を併用して行うことにより、対象地が透水性の悪いシルトや細砂等の粘性地盤の場合でも、フェントン反応剤の注入効率を改善することができる。(写真7、図7)。

逆に、対象地の透水性が高く、対象地内の広範囲に汚染物質が拡散している場合でも、地下水の流れの上流側からフェントン反応剤を注入し、下流側で真空揚水により地下水を回収するという様に、地下水の流向を利用する事で、油汚染でも効率的に浄化を行うことができる(図8)。



写真7 フルアップポイント工法 施工状況

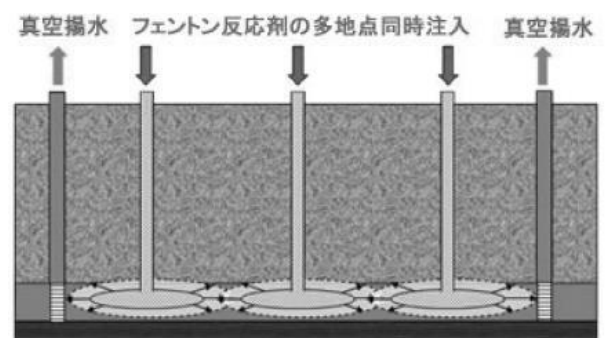


図7 フルアップポイント工法 施工模式図1

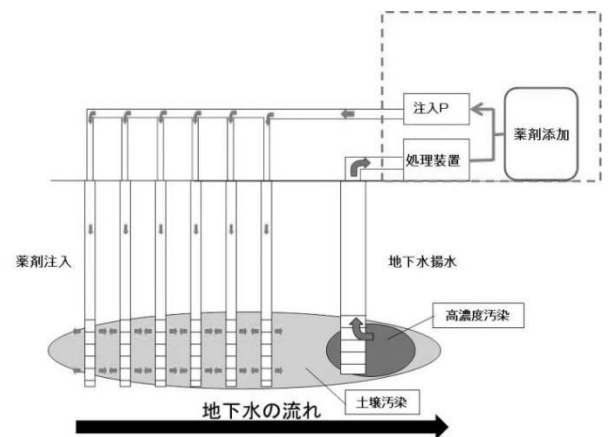


図8 フルアップポイント工法 施工模式図2

4. まとめ

筆者らは、汚染物質の種類や濃度、地質構造に応じて最適な原位置浄化技術を選択することで、土壌地下水汚染の浄化に取り組んできた。

また、原位置浄化工法にとって難易度の高い透水性の悪い地盤や高濃度汚染での施工に対しても、各工法を組み合わせたハイブリット工法を用いることで、より確実に浄化対策を行うことを可能としてきた。

複数の原位置浄化技術を組み合わせることで、様々な条件に適応できる施工技術を実用化してきた。数多く手がけてきたガソリンスタンドの浄化工事で培った技術を製油所等の広大なエリアへの適用など、浄化工事の対象範囲を広げている。

今後は、エネルギー供給構造高度化法に基づいて設備の停止なども予想され、その跡地の有効活用が求められる中、より低コストで安心な対策工法が求められている。この様な世の中のニーズに応えられるように更なる浄化技術の開発に努めて参りたい。

引用文献

- 1) 中間哲志 他, 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, 2005
- 2) 上村宏允 他, 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, 2011
- 3) 中間哲志 他, 第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 2012
- 4) 小松大祐 他, 第 21 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 2015