

地下水流動を妨げずに事業継続できる 汚染地下水の拡散防止技術

原位置で多様な複合汚染地下水に対応可能なマルチバリア工法

根 岸 昌 範

都市域の事業場などにおける土壌地下水汚染に対しては、操業中などの理由で汚染源への直接的な浄化対策を直ちに実施することが困難であることが多い。その場合、地下水を経由した汚染物質拡散の環境リスクを低減する目的で、従来であれば遮水壁を構築し地下水揚水と併用する方式が一般的であった。本稿では、汚染地下水の下流側に透水性の浄化壁を構築し、メンテナンスフリーで汚染地下水の拡散防止対策を講じるマルチバリア工法について紹介する。施工方法、汚染物質に応じた浄化剤との組合せ、実際の適用事例について概説する。

キーワード：地下水汚染、拡散防止、事業継続、浄化壁、鉄粉

1. はじめに

わが国においては、1980年代に入ると環境庁（当時）による全国地下水汚染調査などによって、トリクロロエチレン（以下TCE）、テトラクロロエチレン（以下PCE）など、それまで規制のなかった有機塩素系化合物による汚染が明らかとなった。代表的な事例では兵庫県太子町や千葉県君津市でこれら有機塩素系溶剤による土壌地下水汚染問題が顕在化し、市街地事業場におけるいわゆる「ハイテク汚染」の先駆けとなった¹⁾。その後、地下水環境基準の制定（1997年）や土壌汚染対策法の制定（2003年）などを経て、一連の法的枠組みが整備されて現在に至っている。

表—1は1990年代中ごろの、わが国における潜在的な汚染サイト数を示す。好況期に統計した事業場数であり、現在では製造工場やガソリンスタンドの一部は統廃合が進んでいるが、全国で40万か所は汚染物質を使用した履歴を持つサイトが存在すると考えられる。これらのうち、実際に汚染の修復が必要な割合を10～20%と仮定しても、数万箇所以上の汚染サイトが潜在的に存在することとなる。

市街地においては飲用に供する井戸は少ないものの、災害時協力井戸などとして、緊急時には近隣に生活用水を供給する井戸が非常に多い。そのため、土壌あるいは地下水汚染を把握したものの、操業中の建物下部など直接的な対策が取れないような場合には、地下水を経由した汚染の拡散を確実に防止することが求められる。

表—1 わが国における潜在的な汚染サイト数

稼働中の製造工場	295,288 箇所 ^{a)}
ガソリンスタンド	60,421 箇所 ^{b)}
閉鎖済みの工場跡地	48,252 箇所 ^{a)}
クリーニング店	24,700 箇所 ^{c)}
廃棄物中間処理・最終処分施設	13,705 箇所 ^{d)}
理化学系の研究所	392 箇所 ^{e)}

a) 通産省調査統計部：「工業統計表、同速報」（1995）、

b) 資源エネルギー庁：石油部流通課資料（1994）、

c) 全国クリーニング環境衛生同業組合連合会会員数（1995）、

d) 生白書（平成9年度）より、自社処分場除く、

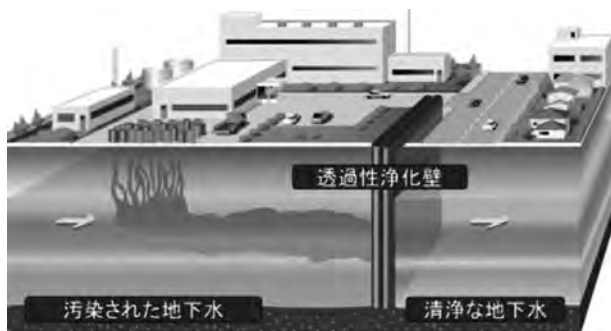
e) 日本の研究所、日刊工業新聞（1986）より

地下水の拡散防止対策技術としては、鋼矢板打設あるいはソイルセメント壁構築による遮水工法が挙げられるが、地下水流動を妨げる懸念があるため揚水対策との併用が一般的である。本報告では、汚染地下水の下流側に、地下水は通過させ汚染物質のみを除去することができる透水性の浄化壁を構築し、メンテナンスフリーで汚染地下水の拡散防止対策を講じる手法について概説する。

2. 本工法の概要

(1) 工法概要

透過性地下水浄化壁工法の概念図を図—1に示す。汚染地下水の下流側に地下水の流れを妨げずに、汚染物質のみと反応する浄化材を含んだ透水性の浄化壁を構築する手法である。必要に応じて遮水壁を併用する



図—1 透過性地下水浄化壁の概念図

場合もあり、Funnel and gate（漏斗と門の組合せ）と称されることもある。また、広義には、汚染地下水を受け止めるように連続的な反応域を注入工法などで形成する、バイオバリアなどのアプローチも浄化壁工法の一つとされる場合もある。

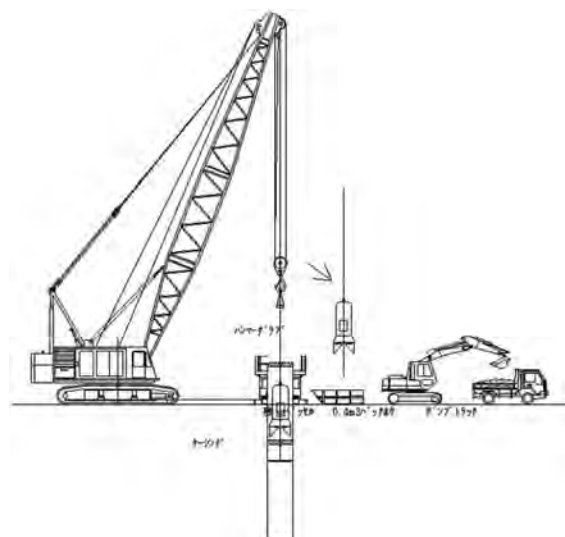
透過性地下水浄化壁を用いた地下水の原位置浄化工法に関する最初の提案は、1985年のDavid C. McMurtyら²⁾によるものと考えられる。透水性の浄化壁とスラリーによる止水壁との組合せで、地下水を原位置浄化する手法として提案している。浄化する対象物質と反応剤の組合せとしては、有機化合物に対しては活性炭、無機物および重金属等に関してはイオン交換樹脂などを提案し、他にも生物学的な手法や、破碎した石灰石による酸廃液漏出事故に対する応急対策としての適用などについて述べられている。

このように、処理対象物質に応じた様々な浄化剤あるいは浄化メカニズムを採用することが可能であり、市街地事業場だけでなく廃棄物不法投棄事案における複合汚染に対する応急対策などとしての適用性も考えられる技術である。

(2) 施工機械の構成および施工手順

基盤岩など不透水層までの深度が比較的浅く、例えば浄化壁設置対象深度がGL-7m程度までであれば、連続的なトレンチ方式での浄化壁を構築することが可能である。それより深部に施工する場合には、無水掘削が可能であるオールケーシング工法などによる杭方式の浄化壁となる。有機塩素系溶剤は例えばTCEで比重が1.46（20℃）と水よりも重いいため、難透水層が比較的浅い深度に存在する場合を除くと、汚染源位置で帯水層深部まで鉛直方向に汚染が浸透している場合が多い。実際に、杭方式の浄化壁設置深度として25mあるいは30m深さまで対応した事例がある。

図—2はオールケーシング工法による浄化壁構築の施工機械構成例である。ケーシングを圧入しながら、ハンマグラブで内部の土壌を掘削していき、計



図—2 施工機械構成の例

画深度まで達した段階で浄化材を投入する。不透水層が安定している場合には、スライム処理後に孔内をドライにして浄化材を投入することが可能であるが、ボーリングの懸念などがある場合には、孔内の水位を維持しつつ底開き方式のバケットなどで順次浄化材を投入するなどの方法をとる。

一般的な杭方式の浄化壁施工状況を写真—1に示す。浄化材は透水性を確保するための母材と汚染物質に対応した浄化剤を混合し、一定ロットごとにストックしておく。浄化材の透水性が施工対象地盤の透水係数よりも十分に大きくなるように母材の種類を選定する。写真—1(c)は、ケーシング掘削後の浄化材投入状況であるが、ケーシングを根入れする不透水層が十分に厚さがあり、ドライで材料を地上から投入でき



(a) 浄化材作成



(b) ケーシング掘削



(c) 浄化材投入



(d) 浄化壁打設完了

写真—1 浄化壁の施工状況

ている状況である。写真—1 (d) は浄化壁打設を完了し、隣接杭へ移動する際の地表面の画像である。

3. 多様な汚染物質への対応

本工法で適用できる汚染物質は多岐にわたり、対象とする汚染物質のカテゴリに応じて表—2で示すような浄化剤が適用可能である。当初は塩素化エチレン類に対して鉄粉を浄化剤として実用化したが、その後重金属類を始め、ふっ素やほう素に対しても長期的に安定化可能な浄化剤を開発してきた経緯がある。現在は、複合汚染に対しても浄化剤の組合せで対応できるため、マルチバリア工法と称している。以下に対象物質ごとの浄化剤について概説する。

表—2 浄化対象物質と浄化剤の例

対象物質	浄化剤
塩素化エチレン類	鉄粉 活性炭 徐放性有機物
重金属類	鉄粉 非晶質酸化鉄 イオン交換樹脂
ふっ素・ほう素	ハイドロタルサイト イオン交換樹脂
石油系炭化水素	活性炭 微生物分解（低分子）
難分解性有機化合物	活性炭
硝酸性窒素	徐放性有機物

(1) 塩素化エチレン類

TCE や PCE などの塩素化エチレン系化合物など、揮発性有機塩素化合物に対しては、活性炭等による吸着反応よりも、零価の金属鉄粉を利用した脱塩素分解反応の浄化壁適用例が最も一般的である。

鉄粉を利用した浄化壁の最初の報告例は、1994 年からノースカロライナ州の EPA（米国環境保護庁）実証サイトで実施した、有機塩素化合物と六価クロムに対する事例と考えられる³⁾。鉄と砂の混合体をホロシステムオーガーにより円筒杭状に深さ 3～8 m の範囲で 21 本打設し、モニタリング井戸で水質の連続観測を行った。浄化杭の設置から 3 ヶ月後には、円筒杭の中央の個所において、初期濃度 1～3 mg/L の六価クロム濃度が 0.01 mg/L 程度まで低減し、0.3 mg/L の TCE 濃度が 0.02 mg/L 程度まで低減することを確認している。わが国では、1997 年に電子部品工場の汚染サイトで実施した事例が最初のものであり⁴⁾、円柱杭方式の浄化壁を千鳥状に配置し下流側地下水をモ

ニタリングしたところ、流入濃度 10 mg/L 程度のシス-1,2-ジクロロエチレン（以下 cis-1,2-DCE）が浄化壁下流側で徐々に清浄な地下水に入れ替わり、60 日後には環境基準を満足し、100 日後には定量下限値未満まで濃度低減したことを確認した。

なお、バイオバリアとして微生物反応領域を汚染地下水の下流側に設ける方法についても、広義の透過性地下水浄化壁として捉えることができる。ポリ乳酸ナトリウム系などの各種有機資材を帯水層に供給し、地盤中にもともと存在する嫌気性微生物を活性化させ、還元脱塩素反応を利用する方法である。

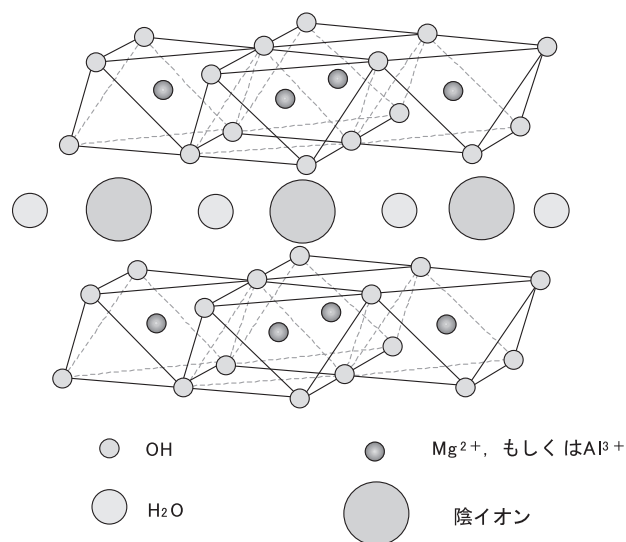
(2) 重金属汚染地下水に対する対応

揮発性有機塩素化合物の場合と同様に零価の金属鉄粉を使用して、砒素、鉛、六価クロム、カドミウムを安定化する方法が報告されている。重金属種類ごとに安定化メカニズムは異なるが、ヒ素や六価クロムなどは部分的に金属態まで還元されて安定化される報告がある⁵⁾。

その他、イオン交換性樹脂や粘土鉱物ベースの資材など、イオン交換反応で鉛やカドミウムを安定化する方法や、非晶質の酸化鉄系の材料を用いて、ヒ素を疎水性吸着あるいはヒ酸鉄（FeAsO₄）などの難溶性物質として安定化する方法などが考えられる。

(3) フッ素・ホウ素への対応

フッ素あるいはホウ素に対しては、ハイドロタルサイト様化合物などの、いわゆる陰イオン交換性の合成粘土鉱物による安定化機能の浄化壁が考えられる。フッ化カルシウム（CaF₂）の溶解度はフッ素イオンとして排水基準値（8 mg/L）オーダーであり、原位



図—3 ハイドロタルサイトの模式図

置地下水対策として環境基準を満足できる処理目標とした場合には、こうした浄化剤の使用が必要となる。図—3 にハイドロタルサイトの模式図を示す。

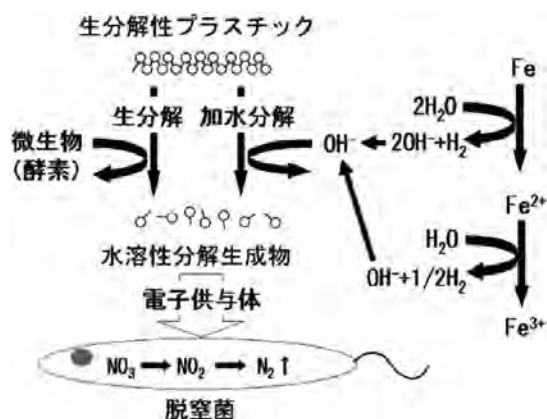
ハイドロタルサイト様合成粘土鉱物は、ヒ酸イオンやリン酸イオンなど他の陰イオン系化合物に対しても適用可能性があり、異なった層間距離になるように合成することで、陰イオン種に対する選択性の順序を入れ替えることが可能である⁶⁾。

(4) ベンゼンあるいは難揮発性有機化合物対応

ベンゼン、クロロベンゼン類、あるいはその他の難揮発性有機化合物に対しては、活性炭などの疎水性吸着を処理メカニズムとして採用することが可能である。活性炭は、ヤシ殻あるいは石炭系などの原料や製造方法で、細孔容量や細孔径分布が異なるため、対象物質に適したものを選定する必要がある。

(5) 硝酸性窒素汚染への対応

農用地などにおける過剰な施肥の影響で、帯水層中の硝酸性窒素濃度が地下水環境基準を上回るケースも報告されている。浄化壁に使用する浄化剤として、還元雰囲気を形成するための鉄粉と生分解性ポリマーを組み合わせ使用し（図—4）、微生物脱窒により硝酸イオンの拡散を防止する対策技術は実証試験が完了した段階である。



図—4 硝酸性窒素浄化のメカニズム

(6) 浄化剤の耐久性や特性に関する留意点

本工法は、設置後はモニタリング以外の維持・管理が不要になるという最大の利点があるが、浄化剤の反応性あるいは残余吸着能などの経年変化に対する適正な評価が求められる。

反応性バリアの浄化剤のひとつである鉄粉の反応性については、6年間の長期カラム試験の経過や腐食皮膜の直接観察結果などから、反応性の減衰に関する長

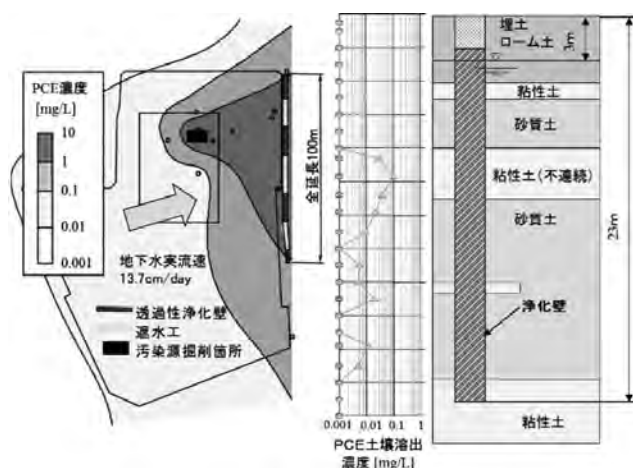
期性能曲線が提案されている⁷⁾。反応性の経年的な変化にあわせて汚染源対策を徐々に進める、あるいは初期の性能設計時に耐用年数にあわせた安全率を確保するなどの対応が必要である。

また、重金属類、フッ素、ホウ素などの吸着機能による浄化壁の耐用年数を設計するにあたっては、流入濃度に対する安定化量を推定し、浄化壁中に耐用年数に応じた浄化剤を配合すればよいことになる。留意点としては、地下水浄化壁は受動的な対策であり、選定した浄化剤は処理対象成分に対して長期的に反応メカニズムを発揮することが求められる。例えば、汚染土壌の不溶化処理における水和反応を利用した各種浄化剤などは本工法へ適用することはできない。

4. 適用事例

PCE 汚染サイトにおいて、鉄粉を使用した浄化壁を構築した事例を紹介する。本サイトは1970年頃まで脱脂剤としてPCEを工業的に使用していた。敷地周辺井戸における地下水汚染の発覚を契機に敷地内の汚染調査を実施したところ、土壌および地下水ともに使用履歴のあるPCEおよび低濃度ではあるが分解生成物であるTCE、cis-1,2-DCEが検出された。

図—5 に浄化対策の平面図および断面図を示し、以下に検討事項およびモニタリング結果について説明する。



図—5 浄化対策平面図および断面図

(1) 地盤構成と土壌汚染の分布

本サイトの地質は、工場解体後に表層約1mが盛土されており、GL-1～4mが関東ローム層、GL-4～5mが凝灰質粘土、GL-5～8mが細砂、GL-8～12mが粘土、GL-12～22mが粘性土を挟みながら砂層（細砂～粗砂）が主体で、GL-22m以深は粘性土層となっ

ていた。深度方向の土壤汚染はGL-17 m 付近まで及んでいたが、主として濃度の高い部分はGL-10 m の粘性土層内で止まっていた。

(2) 地下水流動状況

地下水は概ね北東方向の流れを示し、その動水勾配は1/160 程度であった。地盤の透水係数は 0.76×10^{-3} cm/sec であり、土壤の有効間隙率を0.3 と仮定すると、地下水の実流速は 1.6×10^{-4} cm/sec = 13.8 cm/day となった。年間の流速でおよそ50 m に相当し、地下水としては比較的早い流動状況であった。

(3) 対策の概要

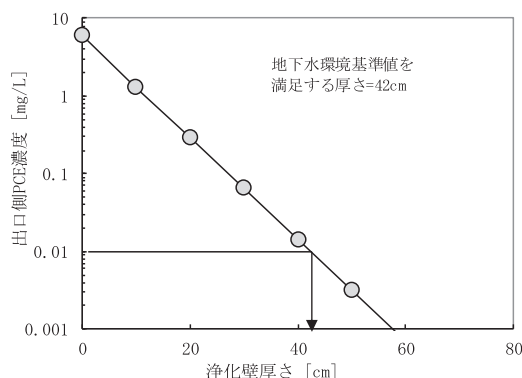
図一5に示したように、別途汚染源対策を実施するとともに、敷地境界における漏洩防止対策を延長100 m の範囲で実施することとした。これは、地下水濃度コンターから、基準値の100 倍超過 (1 mg/L) の範囲に対応する施工延長である。本サイトでは浄化壁 (浄化杭) と遮水壁を交互に配置し、それぞれの合計延長を50 m ずつとした。

(4) 浄化壁仕様の検討

浄化壁は杭方式とし、表一3で示す浄化壁諸元で設計したところ、鉄粉配合量20%の条件では図一6に示すように環境基準を満足する計算上の浄化壁厚さは42 cm となった。実際には、浄化杭の施工杭径を

表一3 設計パラメータ

敷地境界対策延長 (m)	100
浄化壁設置深度 (m)	23
設計対象物質	PCE
設計濃度 (mg/L)	5.9
設計実流速 (cm/day)	13.7
鉄粉配合量 (%)	20
脱塩素反応速度定数 (h^{-1})	0.258

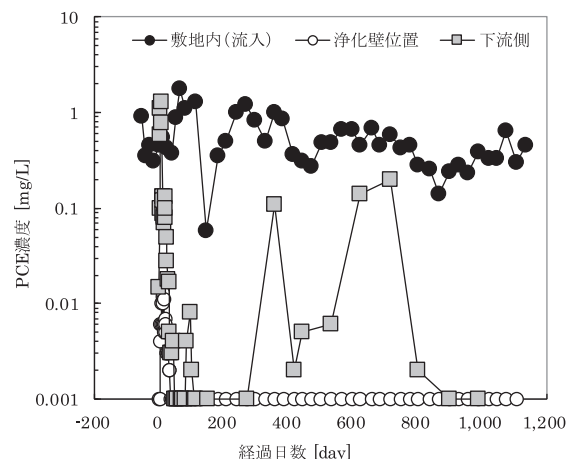


図一6 浄化壁厚さと出口側濃度の関係

φ 100 cm とし、浄化杭の杭芯間の距離を90 cm とした。このとき、ラップした部分の最も通過距離が短い場所においても44 cm と、適合性試験で計算した42 cm を上回ることになる。

(5) 地下水モニタリング結果例

図一7に地下水モニタリング経過を示す。浄化壁設置時点の起点としており、敷地内濃度はそれ以前のデータも示している。浄化壁位置では速やかに濃度低下し、数10 日経過以降は定量下限値0.001 mg/L 以下で推移している。また、浄化壁直近の下流側観測井戸では概ね100 日以内には濃度低下していた。その後、観測濃度が不安定になる期間があったが、元々の汚染範囲であり周辺の影響を受けたものと考えられ、浄化壁からの清浄な地下水供給が卓越すると再び観測濃度は低下している。図中は1,000 日後程度までのデータを示したが、その後、10 年以上経過しているが、拡散防止機能は維持していることを確認している。



図一7 地下水モニタリングデータ

5. おわりに

本稿では、事業場の操業を妨げずに汚染地下水拡散防止対策が可能な技術について紹介した。従来の遮水工のように地下水流動を妨げることなく、メンテナンスフリーで汚染地下水の拡散防止対策を講じられる利点があり、透過性地下水浄化壁工法として1990 年代後半より実績を重ねてきた。その後、汚染物質に応じた様々な浄化剤を開発することで、複合汚染を含めた対応が可能となりマルチバリア工法としている。

マルチバリア設置後は、工場設備改変時など事業者のタイミングに応じて汚染源対策を進めていくことが可能である。今後は、耐久性に関する知見を蓄積し、技術の信頼性を高める取り組みも進めていく予定である。



《参考文献》

- 1) 安田海上火災保険：土壤汚染と企業の責任，有斐閣，1996
- 2) McMurtry, D.C. and Elton, R.O.：Environmental Progress, Vol.4, 168-170, 1985
- 3) Puls R. W.：209th ACS meeting, pp.783-791 1995
- 4) Imamura S.：Proceedings of the 7th International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pp.484-487, 1998
- 5) 根岸昌範：第12回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.615-619, 2006
- 6) 亀田知人ほか：The Chemical News, No.195, pp.10-16, 2005
- 7) 根岸昌範ほか：第13回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.181-186, 2007



〔筆者紹介〕

根岸 昌範（ねぎし まさのり）
大成建設㈱
技術センター
都市基盤技術研究部環境研究室
主任研究員

