

少ない井戸数で VOC 汚染地下水を効率的に浄化 地下水サーキュレーター D³

篠原 智志・伊藤 圭二郎

揮発性有機化合物（VOC）による土壌・地下水汚染の対策としては、VOC が化学反応によって無害な物質に分解できることから原位置での浄化措置が取られることが多い。筆者らは浄化措置の中でも、微生物の働きを利用する嫌気性バイオレメディエーションがコストや土地売買等を考慮した際に現実的な期間内で浄化できる方法と考えており、より効果的な施工方法の開発を行ってきた。

本稿では、地下水を人工的に循環させる特殊な井戸構造を用いて、より効率的にバイオレメディエーションを行うことができる「地下水サーキュレーター D³」（以下「本技術」という）を考案したので報告する。
キーワード：原位置浄化、バイオレメディエーション、地下水浄化、二重管井戸、揮発性有機化合物

1. はじめに

平成 30 年度に環境省が実施した地下水質測定結果のうち、継続監視調査における物質別の環境基準超過井戸の件数はテトラクロロエチレン（PCE）が 343 件で 3 番目、トリクロロエチレン（TCE）が 207 件で 4 番目に多い結果となっており、VOC 汚染が問題となっている地点は比較的多い¹⁾。また、2017 年 4 月には土壌汚染対策法の第 1 種特定有害物質にクロロエチレン（CE）が追加された。CE は親物質を PCE に限定すると、PCE や TCE から分解生成（図 1²⁾）され、毒性が高い物質として知られ、その基準値は 0.002 mg/L と親物質である PCE の 0.01 mg/L と比較して 1/5 と厳しい基準が設けられている。さらに、CE は親物質と比較して土壌に吸着されにくい性質であることも鑑みると、CE の追加指定によって、これまでより広範囲の地下水汚染が顕在化する可能性があると考えられる。

こうした背景から、今後はより広域な VOC 地下水汚染への対策が社会的ニーズになると予想される。筆者らは VOC 汚染の対策技術の中でも、経済合理性が高く低環境負荷な浄化方法である嫌気性バイオレメディエーション（以下、嫌気バイオ法）に着目し、その施工方法の改良として「地下水サーキュレーター D³」（以下、本技術）という新しい方法を検討している^{3,4)}。本技術は、隣接する井戸間の地下水を人工的に循環させ、嫌気バイオ法で必要となる地下水への薬剤供給を効率的に行うものである。これまでの検討^{3,4)}では、本技術の有効性は確認されているものの、井戸

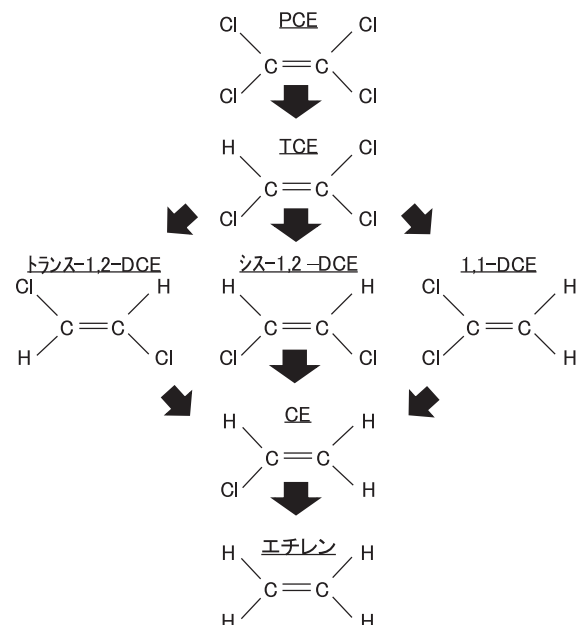


図 1 PCE が CE を経由する分解経路²⁾

を常時監視する必要があったため、常駐作業員の配置や、夜間の運転停止が避けられないことが課題であった。本稿では特殊な井戸構造によって、上記課題を解決できるか検証したので紹介する。

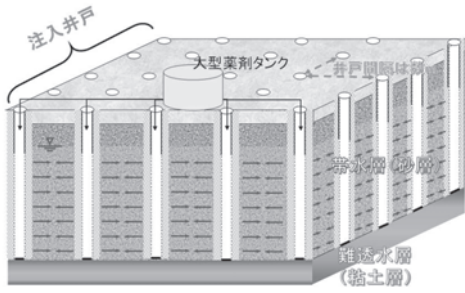
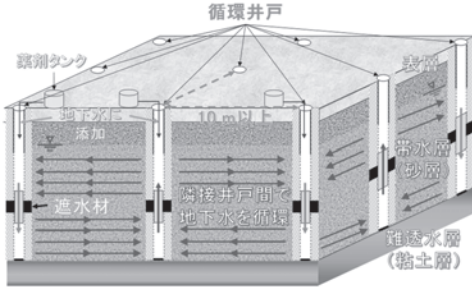
2. 地下水を循環させる仕組み

(1) 従来技術との比較と本技術の適用性

広域の地下水汚染に対応できる技術として開発した本技術と従来技術の概要を表 1 に示す。

従来技術は、注入井戸から嫌気バイオ法で必須とな

表一 従来技術と本技術の比較

工法	従来技術	本技術
概念図		
説明	注入井戸から嫌気バイオ剤（以下、薬剤）を注入し、地下水中に薬剤を浸透させる。薬剤を効率よく浸透させるために、地上で希釈して注入量を多くして注入することもある。	上部ストレーナと下部ストレーナを遮水材によって遮断した井戸を構築し、片側の井戸ではポンプにより下部の地下水を上部へ送り、隣接する井戸では上部の地下水を下部に送ることで井戸間の地下水を循環させるもの。
長所	実績が多い。	井戸ピッチを10 m以上にする事で井戸本数や配管を削減することができる。 薬剤は循環させる地下水に直接添加できるため、地上に希釈用のタンクが不要となる。
短所	4 m以下のピッチで井戸を設置することが多く、井戸本数が多くなる。 注入井戸から薬剤を注入するため、効率よく注入するために薬剤を希釈して注入量を確保する必要がある。	実績がない。 水平方向の透水係数が、鉛直方向の透水係数の3倍より小さいと適用性が低い。

る嫌気バイオ剤（食品添加物などの有機物を含み、微生物を活性化させる。以下、薬剤）を注入することによって、地下水中のVOCを分解させる方法である。この方法では、薬剤を効率的に注入するために地上で薬剤を希釈するので、地上に100 m³クラスの大型タンクが必要になり、さらに注入井戸のピッチは数mにすることが多い。

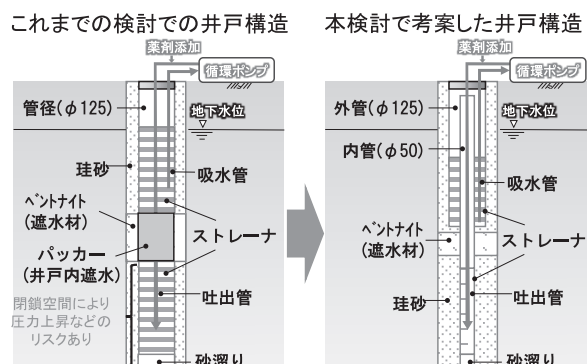
一方、本技術は地盤の透水係数が、鉛直方向よりも水平方向の方が大きいことを利用して地下水を循環させるものである。そのため、井戸ピッチを10 m以上にまで広げることや、循環地下水量に対して1%程度の薬剤を添加することが可能で、地上設備の小型化も期待できる。井戸ピッチが広くなることや地上タンクの小型化などが実現できれば、地上設備の占有面積を減少させることができるので、施工スペースに制限のある稼働中の工場などの浄化対策として有効な方法と考えている。

また、本技術に関して解析による事前検討³⁾を行ったところ、鉛直方向の透水係数に対して水平方向の透水係数が3～10倍あれば、10 mピッチの井戸配置で薬剤が均質に浸透する結果になることがわかった。地盤の水平方向の透水係数が鉛直方向の透水係数の10倍という報告⁵⁾もあり、本技術は一般的な帯水層で適用できると考えている。

(2) 特殊な井戸構造

本技術を適用するにあたり、これまでの実証試験⁴⁾で用いた井戸（従来井戸）、および今回の検討で考案した井戸（循環井戸）の詳細構造を図一2に示す。従来井戸では井戸の上下をパッカーで遮蔽する構造であったため、閉鎖的な空間が生じて圧力が増加するなどが懸念された。そのため適用時には管理者の常駐が必要になることや、夜間運転ができず浄化効率が低下するなどの課題があった。

こうした課題を解決するために考案した循環井戸では、井戸径の大きな井戸（外管）が帯水層の上部に、井戸径の小さな井戸（内管）を帯水層下部にまで打設する二重管構造となっている。ある井戸では、外管から循環ポンプで吸水した地下水に薬剤を添加して内管



図一2 井戸の詳細構造の一例

に送り、隣接する井戸ではその逆の運転を行う。これにより、一本の井戸で地盤から地下水の吸水と吐出をすることができ、同一井戸の周辺や隣接する井戸の間の地下水に人工的な流れを発生させ、薬剤を効率的に帯水層へ供給することができる。

また、内管の管頂を外管よりも低くすることで、仮に井戸内の水位が上昇しても地表面へ地下水が漏洩することがないような構造とした。

3. 本技術の現場実証試験

(1) 本技術の実証試験

実験断面図を図-3に示す。本地盤はGL-6m～11mが帯水層であり、自然地下水位はGL-4mである。帯水層の透水係数は 3.0×10^{-5} m/sであり、水平方向の透水係数は鉛直方向の透水係数の3.5倍以上と推定している⁴⁾。本来、循環井戸は複数本設置するが、本実験では1本でその性能を確認することとし、観測井戸を4本設置して評価した。循環井戸はGL-7.5～8.5mを遮水構造とし、井戸上部の地下水を井戸下部に送ることで、上部は井戸周辺の地盤の地下水をポンプによって吸水し、下部は周辺地盤に吐出することとした。

循環井戸近傍の地上部に0.8m³のタンクを置き、全有機炭素（TOC）濃度で約25000mg/Lの薬剤を貯留し、吸水した地下水（循環水）に対して1%程度添加して循環水のTOC濃度が約250mg/Lとなるようにした。循環井戸から2m、7m、14mの位置にGL-8.5～11mのみにストレーナを設けた観測井戸を設置し、7mにはGL-6～7.5mの位置にのみストレーナを設けた井戸も設置した。循環井戸での地下水の循環流量や観測井戸での薬剤濃度、VOC濃度の観測などによって本技術の適用性を評価した。

(2) 試験結果

実証試験中（約140日間）のポンプによる地下水の送水量（以下、循環流量）は、試験期間を通じて4～5m³/dayを維持し（図-4）、24時間の昼夜連続で安定した運転ができることを確認した。運転前後での各観測井戸の地下水位変化を表-2に示す。下部にストレーナを設置した井戸では、運転時に水位が上昇し、循環井戸に近いほど水位の上昇量は大きくなっている。他方、上部にストレーナを設置した井戸では水位が低下しており、帯水層の上部と下部とで異なる水位分布となっている。以上から、帯水層の上下で逆方向の地下水流れが生じていることが示唆される。

また、薬剤添加によるTOC濃度の上昇は観測井戸Cまで観測され、VOC濃度はすべての観測井戸で環境基準値以下となった（表-3）。さらに、観測井戸B下

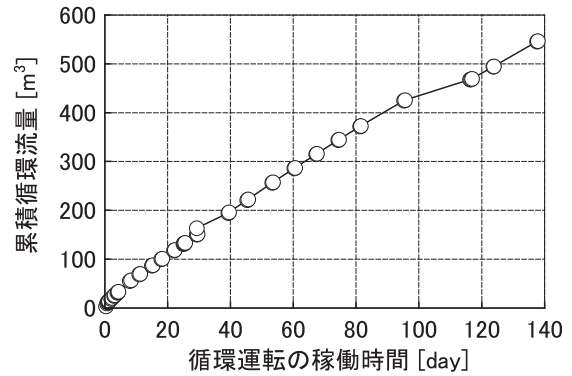


図-4 実証試験時の循環流量

表-2 循環運転時の観測井戸の水位変化

	ストレーナ位置	水位変化 [cm]
観測井戸 A	下部	8
観測井戸 B 下	下部	5
観測井戸 B 上	上部	-16
観測井戸 C	下部	3

※正の値が水位上昇を表す

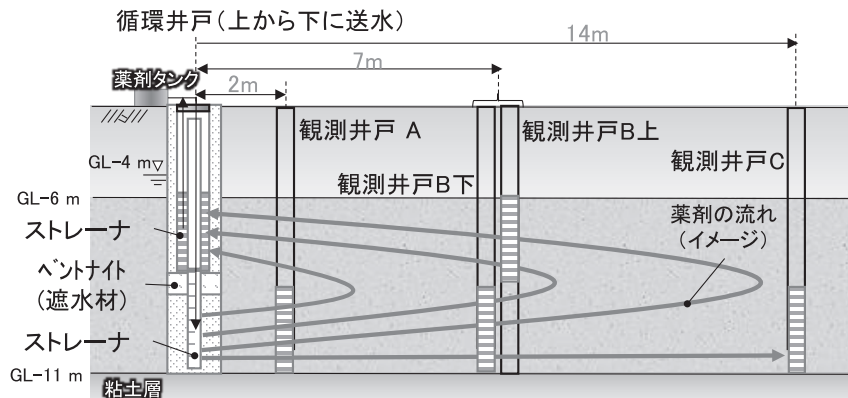


図-3 実験断面図

表一 観測井戸での TOC および VOC 測定結果 (グレーのハッチ部が基準値超過)

井戸名	分析項目	単位	試験前	1 か月後	2 か月後	3 か月後	4 か月後	5 か月後
A	TOC	mg/L	< 10	85	230	200	110	100
	PCE		≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	TCE		≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	DCE		0.095	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04
	CE		0.030	0.006	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002
B 下	TOC	mg/L	< 10	130	60	60	20	10
	PCE		≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	TCE		≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	DCE		0.054	0.057	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04
	CE		0.010	0.029	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002
C	TOC	mg/L	< 10	< 10	20*	< 10	< 10	< 10
	PCE		0.015	0.012	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	TCE		0.077	0.077	0.030	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	DCE		≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.04	0.081	≤ 0.04	≤ 0.04
	CE		≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002

*自然地下水の TOC 濃度は最大 10 mg/L 程度であったので、10 mg/L 以上は薬剤の到達と判断した

表一 4 地下水中の細菌群量 (観測井戸 B 下)

項目	0 日 (初期値)	2 か月後
	copies/mL	
デハロコッコイデス属細菌 16S rRNA 遺伝子	2.1 × 10 ¹	2.5 × 10 ³
デハロコッコイデス属細菌 bvcA 遺伝子	5.2 × 10 ⁰	4.6 × 10 ²
デハロコッコイデス属細菌 vcrA 遺伝子	7.3 × 10 ¹	2.7 × 10 ³

での VOC の嫌気性分解に寄与する細菌群の遺伝子量は、試験前後で増加していることを確認した(表一 4)。

以上より、薬剤を添加したことで、嫌気的な微生物分解が生じ VOC の濃度は低下した。また、本試験を実施した地盤条件では、循環井戸から 14 m 離れた地点まで本技術の有効性を確認することができた。

4. おわりに

経済合理性が高く、低環境負荷技術である嫌気性バイオレメディエーションに着目して考案した本技術「地下水サーキュレーター D³」の実証事例を報告した。実証試験では、24 時間安定した連続運転が可能なことや、井戸から約 14 m 離れた地点でも VOC が浄化されたことを確認した。

本技術によって、井戸の設置間隔を従来よりも広げることができることから、設置する井戸数を削減することが可能となり、地下水浄化による稼働中の工場への影響も低減できると考えられる。

今回の事例では、地下水流向の確認はしていないため、今後調査を進めていき本技術の精度を向上させる必要があると考えている。そして、本技術を積極的に提案していき、実績を重ねていくとともに、浄化物質の適用範囲拡大に向けさらなる技術開発を進めていく所存である。

J|C|MA

《参考文献》

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成 30 年度地下水質測定結果, pp.10 ~ 11, 2020.
- 2) 今中忠行監修：微生物利用の大展開, エヌ・ティー・エス, 2002.
- 3) 伊藤圭二郎ほか：クロロエチレン基準化による VOC 広域汚染に対応可能な地下水循環式嫌気バイオ法の検討, 第 23 回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.76 ~ 80, 2017.
- 4) 篠原智志ほか：VOC 広域汚染に対する地下水循環式嫌気バイオ法の現場試験による適用性評価, 第 24 回 地下水・土壌汚染とその防止に関する研究集会, pp.236-239, 2018.
- 5) 乾一幸ほか：実地盤における透水異方性調査方法について, 全土連「技術フォーラム 2012」新潟, No.16, 2012.

【筆者紹介】



篠原 智志 (しのはら さとし)
鹿島建設
技術研究所 地球環境・バイオ Gr. 研究員



伊藤 圭二郎 (いとう けいじろう)
鹿島建設
土木管理本部 プロジェクト推進部 課長