

揮発性有機化合物に汚染された地下水の 揚水処理による浄化

平田健正¹・吉岡昌徳²・江種伸之³・中杉修身⁴

¹正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

²兵庫県立健康環境科学研究所 安全科学部 (〒654-0037 神戸市須磨区行平町3-1-27)

³正会員 博(工) 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

⁴工博 (独)国立環境研究所 化学物質環境リスク研究センター (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

本稿では10年以上の長期にわたって継続している地下水揚水法による土壌・地下水浄化対策の評価を行った。また、汚染物質であるトリクロロエチレンの分解による自然減衰効果についても考察した。現場では長期にわたる揚水処理を続けた結果、汚染源及びその周辺の浅層地下水の浄化をほぼ完了した。その過程で汚染物質濃度が環境基準よりも高い時期には揚水量が増えると浄化率が上がり、環境基準を下回り始めると浄化率の向上が顕著でなくなる傾向を示した。一方、自然減衰効果としては、分解生成物のジクロロエチレン濃度がトリクロロエチレン濃度の約64%に保たれていること、および地下水濃度が環境基準値以下になるまでの修復期間が自然減衰効果により約2年は早まっていることが明らかになった。

Key Words : soil and groundwater remediation, trichloroethylene, dichloroethylene, pump and treat, natural attenuation

1. はじめに

トリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物による地下水汚染が顕在化した1982年の環境庁(当時)の地下水汚染調査から20年が経過した。我が国の土壌・地下水汚染対策は水資源や水環境としての地下水の保全を目的に進められてきたが、近年はISO 14000シリーズ取得や不動産売買に関連した土壌・地下水汚染浄化ビジネスとして注目が集まっている。さらに、2003年2月には土壌汚染対策法が施行され、土壌・地下水汚染問題は新たな局面を迎えている。

1982年の調査以降しばらくの間は汚染の実態解明および調査手法の確立が中心であったが、これらが一段落した1990年代半ばからは浄化技術の開発・実用化へと関心が移っていった。その結果、地下水揚水¹⁾、土壌ガス吸引¹⁾、エアースパージング²⁾、バイオレメディエーション³⁾、反応性バリア⁴⁾など、様々な技術が実用化されている。

その中でも地下水揚水法は最も普及している浄化技術で、これまでに多くの実績がある。ただし、水に溶けにくい揮発性有機化合物のような汚染物質を地下水揚水で除去するには非常に長い時間を要する

ことも多く、欧米では時間と経費がかかる割には効果の上がない技術として、その評価は高くない。しかし、一つの技術を初期から最終段階まで適用し続けることには限界がある、言い換えると適切な技術を組み合わせることが効率的な浄化につながるという考えが近年定着しつつある。この考えに基づくと、汚染物質を地下環境から確実に取り除く地下水揚水法は、対策の初期段階に適用して汚染物質濃度をある程度まで低下させるのに適した技術といえる。また、中小規模の事業所にとっては、長い時間を要しても確実に汚染物質を取り除くことができ、装置の構造がシンプルかつ維持管理の容易な地下水揚水法は重要な技術の一つである。したがって、様々な浄化技術が実用化されている現在においても、地下水揚水法は欠くことのできないものであり、その効果を評価することは重要である。

今回対象としたトリクロロエチレンによる地下水汚染は、1983年に発見された我が国で最も有名な事例の一つである⁵⁾。この現場では、汚染の発見直後から汚染源となった工場内で揚水処理を続けており、現在までに周辺地下水の水質回復および工場内の浅層地下水の浄化に成功している。そこで、本稿では

長期観測データを用いて、地下水揚水法を用いた浄化対策の効果について評価を行った。また、近年の観測ではトリクロロエチレンの分解生成物であるジクロロエチレン類の濃度を測定しているため、揚水処理現場におけるトリクロロエチレンの分解による自然減衰効果についても考察した。

2. 現地概要

図-1に現地概略図を示している。現地は標高10m程度の沖積平野に位置している。平野部は流紋岩質の溶結凝灰岩が基盤を成し、その上に洪積層、最上位に沖積層が分布している。洪積層と沖積層はいずれも河川により上流から運搬されてきた砂、礫、玉石などの地質である。A工場以北は礫混じり砂が多く、地表傾斜は1/300~1/500である。一方、A工場以南ではシルト分が混じりはじめ、次第に砂質シルトへ移行し、地表傾斜は1/500~1/800になる。

A工場内で行われたボーリング調査によると、現地の地質はG.L.-1.3mまでが表土、G.L.-1.3~-2.3mが砂質粘土、G.L.-2.3~-7.3mが玉石混じり砂礫、G.L.-7.3~-36mが玉石や粘性土混じりの砂礫、G.L.-36~-91mが粘土質礫、玉石、G.L.-91~-100mが粘土質砂礫である。なお、G.L.-36mからの砂礫層ではG.L.-45m以深で粘性土分が増加する傾向にある。

汚染地域はH川の旧河川敷にあり、地下水の供給源は全量がH川である。供給された地下水は主として旧河道(A工場近くを真っ直ぐ南下)に沿って流下している。T山の北面に達した地下水は、透水性の低い東へは流れず、西ないし南西方向に向きを変え、A工場南で北西からの地下水と合流する。そして、T山の西を南端まで達すると流向を南東から南に変える。地下水の流速は 2×10^{-4} cm/sec程度であり、この値と現地の平均的な動水勾配1/250からダルシーの法則を基に算出した透水係数は0.05cm/secである。

3. 汚染発見からの経緯

1983年8月に環境庁(当時)は全国15都市で実施した前年度の地下水汚染調査結果を公表し、一部の都市においてトリクロロエチレン等によって地下水が汚染されていると報じた。この報告を受けた厚生省(当時)の指導により、県は県下の水道事業者に水道原水の水質調査を指示した。本稿の対象となった町では同年12月に地下水源の水質調査を行い、2ヵ所

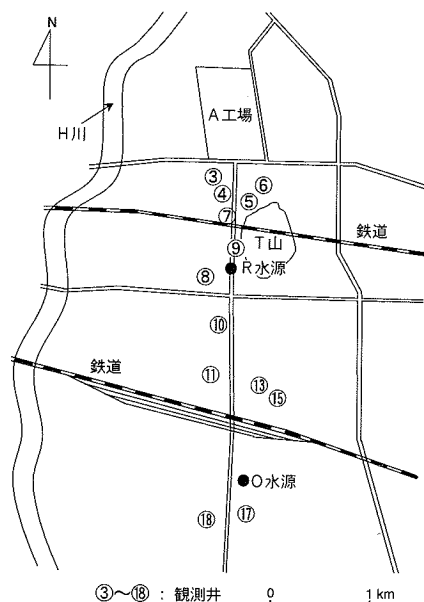


図-1 現地概略図

の水源地でトリクロロエチレン濃度が環境基準値(当時はWHOの暫定水質基準値)を超えていることが判明した。その濃度は、R水源地で0.407mg/L、O水源地で0.076mg/Lであった。これらの水源地ではただちに揚水を停止し、隣接している2市から応援給水を受けた。その後、恒久対策として水源地に曝気処理装置を設置した。ただし、R水源地では原水濃度が当初1.6mg/Lと高く、空気曝気だけでは環境基準値の3分の1に設定した処理目標値(0.01mg/L)以下にならなかったため、活性炭濾過を併用した。

1984年1月から3月までの3ヵ月間に周辺地区の427本の一般家庭用井戸から地下水を採取して分析を行った。このうち環境基準値を超えた井戸は128本で、最大値はA工場直近地区の10mg/Lであった。汚染地域は一部を除き、ほぼA工場から流下方向に一直線になっていること、また同年1月に町内の事業所を対象に行ったトリクロロエチレン使用状況調査から、A工場内に地下水汚染の原因があると推定された。汚染源があると推定されたA工場では、1984年1月から2月までの間に排水調査や地下水調査などの詳細調査を実施した。その結果、工場南側の揚水用浅井戸から42mg/L、工場南側の貯留タンク近傍の浅井戸から44mg/L、深井戸から4mg/Lが検出された。そこで、貯留タンク周辺の配管系統を検査したところ、貯留タンクに接続していた管に腐蝕によって穴が開いており、ここからトリクロロエチレン原液が漏洩していた。汚染源の特定後、工場では溶剤を切り替え、腐蝕した管の使用を中止するとともに、浄化対策として汚染土壌の除去と揚水処理を実施した。

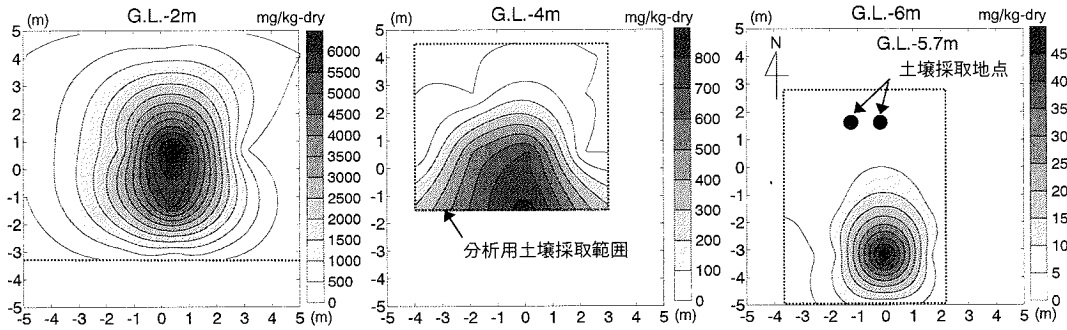


図-2 土壤調査時の土壤中トリクロロエチレン含有量

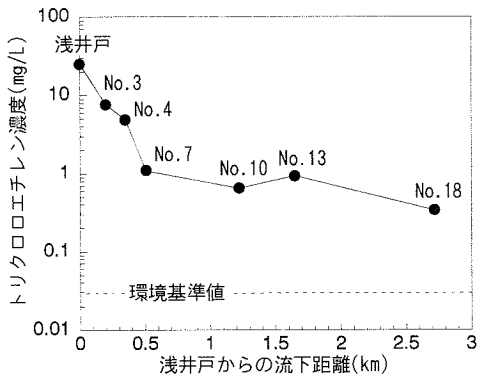


図-3 土壤除去前のトリクロロエチレン濃度分布

4. 汚染状況

図-2に汚染源特定直後の1984年5月から7月にかけて貯留タンク周辺で実施した土壤調査の結果を示している。含有量1mg/kg-dry以上のトリクロロエチレンが検出された範囲は、南北7~8m、東西9m、深さ7mに及び、最高値はG.L.-2m地点の6,600mg/kg-dryであった。なお、G.L.-7m地点から地下水が湧出したため、それ以深の調査は中止した。G.L.-2.0m地点のトリクロロエチレン含有量はそれ以深と比較して非常に高い。すなわち、トリクロロエチレン原液がG.L.-2m付近の透水性の低い砂質粘土に溜まっていたと考えられる。なお、G.L.-6m地点の含有量は上部と比べて低いが、G.L.-5.7mの深さから約100 mg/kg-dryが検出されているので、地下水面近傍にも原液が溜まっていたと推察される。

図-3に土壤除去前(1984年3月)の地下水流れの主流方向に沿った浅層地下水中トリクロロエチレン濃度分布を示している。汚染源より下流3km地点でも環境基準値の10倍以上の濃度が検出されており、地下水が広域に汚染されていた様子がわかる。

5. 浄化対策の概要

(1) 溶剤転換

工場では1970年から溶剤としてトリクロロエチレンの使用を開始した。当初の使用量は月平均9,000kgであったが、汚染が発見された当時は12,000kgに達していた。汚染発見後の1984年1月から使用工程毎に溶剤を切り替え始め、全ての工程で切り替えが完了したのは同年2月13日である。

(2) 土壤除去

1984年5月から7月に貯留タンク周辺で実施した土壤調査と平行して汚染土壤を除去することになった。トリクロロエチレン含有量が1mg/kg-dry以上の土壤を除去対象とし、その範囲は南北7~8m、東西9m、深さは地下水面までの7m、除去総量は1,007 m³に及んだ。除去した土壤は、工場北側の空き地に幅13~15m、長さ87m、深さ3mの穴を掘ってプチルゴムシートを2重に張った上に投入し、風乾によって処理した。1週間程度風乾した後、トリクロロエチレンが含有していないことを確認してから汚染されていない土壤で覆い、プチルゴムシートで密閉した。その後、表面にアスファルトを敷き対策を完了した。

(3) 揚水処理

土壤除去では不飽和帯の原液しか取り除けなかったため、帯水層の浄化は揚水処理で行うことにした。利用した井戸は前述した工場南側の浅井戸2本で、ストレーナはG.L.-6~-9mにあり、上部不圧地下水を揚水している。ただし、データが揃っているのは揚水用浅井戸だけなので、本稿ではこの井戸のデータを汚染源内の浅層地下水のデータとして利用する。そこで、以後は揚水用浅井戸を単に浅井戸と呼ぶことにする。図-4に年間揚水量の変化を示している。揚水量は年間200~400×10³m³である。揚水した地下

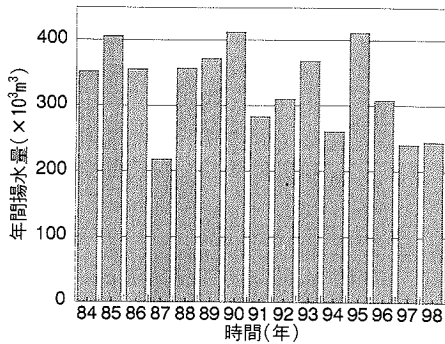


図-4 浅井戸からの年間揚水量

水は地上で曝気処理を行い、濃度を0.03mg/L以下にしてから工場用水に利用、余剰分は排水した。

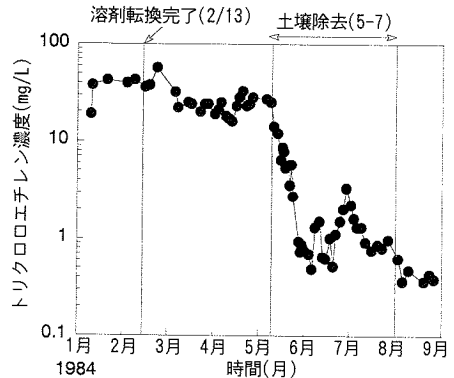


図-5 浅井戸のトリクロロエチレン濃度の時間変化(1984年1月～9月)

6. 浄化効果

(1) 溶剤転換および土壌除去効果

図-5に溶剤転換及び土壌除去期間に浅井戸から揚水された地下水中のトリクロロエチレン濃度変化を示している。なお、溶剤転換は2月13日に完了し、汚染土壌は5月7日から約3ヶ月間で除去された。

溶剤転換後も濃度の低下があまり見られないが、これはすでに多量の原液が地下に浸透していたためであり、土壌除去開始時点でも高濃度のままである。

その後、5月に始まった土壌除去の影響で濃度が急速に低下し始め、8月末には土壌除去前の約60分の1になっている。これは、不飽和帯の原液が確実に除去された効果である。ただし、土壌除去では地下水面までの土壌しか取り除けなかったため、地下水面下の原液が浅層地下水を汚染し続けていた。そのため、浅井戸の濃度は低下したものの、環境基準を満足するまでには至っていない。

(2) 揚水処理効果

a) 揚水された地下水中の濃度変化

図-6に1984年から1998年までに浅井戸から揚水された地下水中のトリクロロエチレン濃度変化を示している。土壌除去が行われた1984年の1年間で濃度が約100分の1になっている。これは、土壌除去によって不飽和帯の原液が取り除かれたこと、および汚染地下水を揚水し続けた効果である。しかし、1985年以降は濃度低下が緩慢になり、1986年から1988年までは低下傾向が見られない。その後は、再び低下を始め、1990年からは環境基準値を下回るようになり、土壌除去から13年後の1997年以降は年間を通して環境基準を満足している。

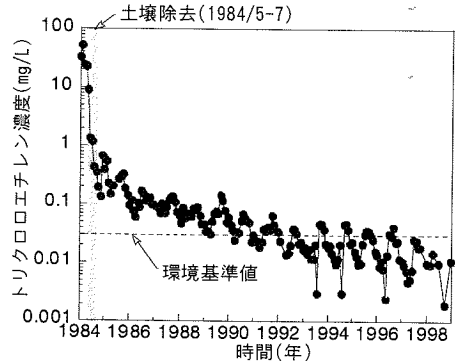


図-6 浅井戸のトリクロロエチレン濃度の時間変化(1984年～1988年)

なお、浅井戸の濃度はおおむね夏から秋にかけて上昇し、冬から春にかけて低下する季節変動を繰り返している。一般的な溶存物質の濃度は水量の多い夏に希釈効果で低下する傾向にあるが、トリクロロエチレン濃度の変化は逆である。これは、夏季の水位上昇によって、地下水面近傍に溜まっている原液の地下水への溶出が促進されたためと考えられる。このことから、環境基準をほぼ満足するようになった1992年以降も地下水面の高くなる夏から秋に濃度が上昇する傾向にあるので、地下水面近傍の原液が完全になくなったとは言い切れない。

b) 揚水による除去量

図-7に浅井戸からのトリクロロエチレン除去量を示している。1984年の1年間には約1,000kgのトリクロロエチレンが除去されているが、翌年以降は激減し、1998年の除去量は約3kgである。1998年までの積算除去量は約1,355kgになる。

揚水による浄化効果を検討するために、図-8に年間揚水量とトリクロロエチレン浄化率の関係を示している。ここで、浄化率とはある一定期間における濃度低下量を対象期間の初期濃度で割ったものとして定義している⁶⁾。なお、濃度低下量の計算には季

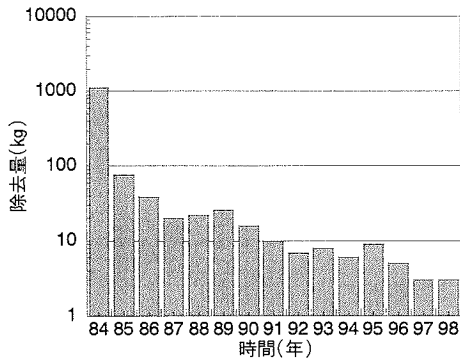


図-7 揚水によるトリクロロエチレン除去量

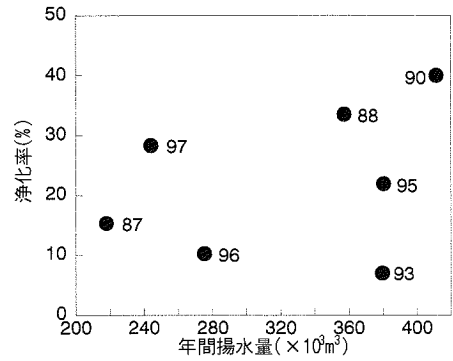


図-8 年間揚水量と浄化率

節変化を取り除いた移動平均値を用いており、浄化率がマイナスを示した1989年と1994年、およびデータの欠測で移動平均値を算定できなかった1985年、1986年、1991年および1992年は載せていない。浄化率は7%から40%の間で変化しており、平均は22%である。対象期間の半分近い年の浄化率が無いので断言はできないが、年間を通して濃度が環境基準を上回っている1990年までは揚水量が増えれば浄化率が上がり、年間を通してほぼ環境基準を下回る1993年以降にはその傾向が顕著でなくなっている。

原液の水への溶解速度は流速とともに大きくなるので⁷⁾、地下環境中でも揚水量が増えれば原液の溶解速度が上がり、原液の減少が早くなる。ただし、揚水によって地下水の流速が増すのは主に透水性の高い場所なので、透水性の低い場所の原液、例えば粘性土を多く含む層に存在する原液や流れの影響が及ばない空隙中に存在する液滴状の原液などの溶解速度は変わらない。すなわち、揚水によって透水性の高い場所の原液が取り除かれても、透水性の低い場所には原液が残っている可能性が高い。このことが揚水量と浄化率の関係に影響していると思われる。すなわち、1990年までは透水性の高い場所を含んだ地下環境中に広く原液が存在しており、揚水量が増えると原液の溶解(減少)が進むので濃度の低下が早まり、浄化率が向上した。しかし、1993年以降は残存する原液の多くが透水性の低い場所にあったので、揚水量が増えても原液の溶解(減少)は進まず、浄化率の向上が顕著でなくなったと考えられる。

したがって、本現場が適当な時期に高効率・低コスト技術に切り替えることを前提としていたならば、1990年から1993年が切替え時期だったと判断できる。

c) 周辺地下水中の濃度変化

図-9に周辺観測井中のトリクロロエチレン濃度の時間変化を示している。なお、データ数の少ない2つの水源は除外している。各井戸とも土壌除去と地

下水揚水の効果で濃度が徐々に低下していき、工場に近いNo.3, No.4, No.7井戸でも浄化対策開始から11年後の1995年以降は年間を通して環境基準値を下回るようになる。ただし、浅井戸と同様に1986年からの数年間は、季節変動による増減はあるものの、濃度の低下傾向は見られない。1987年の揚水量はその前後と比べて少なく(図-4参照)、その影響で下流へ運ばれるトリクロロエチレンが増えたことが濃度の低下しない原因と推察される。その後は揚水量が増えるので濃度が再び低下し始めている。

周辺地下水中のトリクロロエチレン濃度は浅井戸と同じように季節変化しているが、そのパターンは2つに分かれる。一つは、浅井戸と同様に夏から秋にかけて濃度が上昇するパターンで、大部分の観測井で見られる。もう一つは観測井No.5, No.6, およびNo.13で見られる夏から秋にかけて濃度が低下するパターンである。汚染源では地下水位が上昇する夏季には地下水面近傍の原液の地下水への溶出が促進されて浅井戸の濃度が上昇している。すなわち、汚染源を通過した地下水が流れている観測井ではこの影響を受けて濃度が上昇している。一方、地下水が汚染源を通過してきていない観測井No.5とNo.6では、一般的な溶存成分と同じように夏季に濃度が低下していると考えられる。これら2つの観測井と同じ挙動を示す観測井No.13も汚染源を通過した地下水の主流方向から外れており、汚染源を通過していない地下水を採水している可能性がある。

夏から秋にかけて濃度が上昇する観測井においても、濃度が0.1mg/Lを下回るようになる1991年頃からはその傾向が顕著でなくなる。これは、原液の溶出促進の影響が周辺観測井に及ばなくなったこと、すなわち浅層地下水を汚染していた原液が少なくなり、溶出量が減ったことを表している。図-10に周辺観測井の環境基準達成率の経年変化を示している。土壌除去を実施した1984年以降、1987, 1988年を除

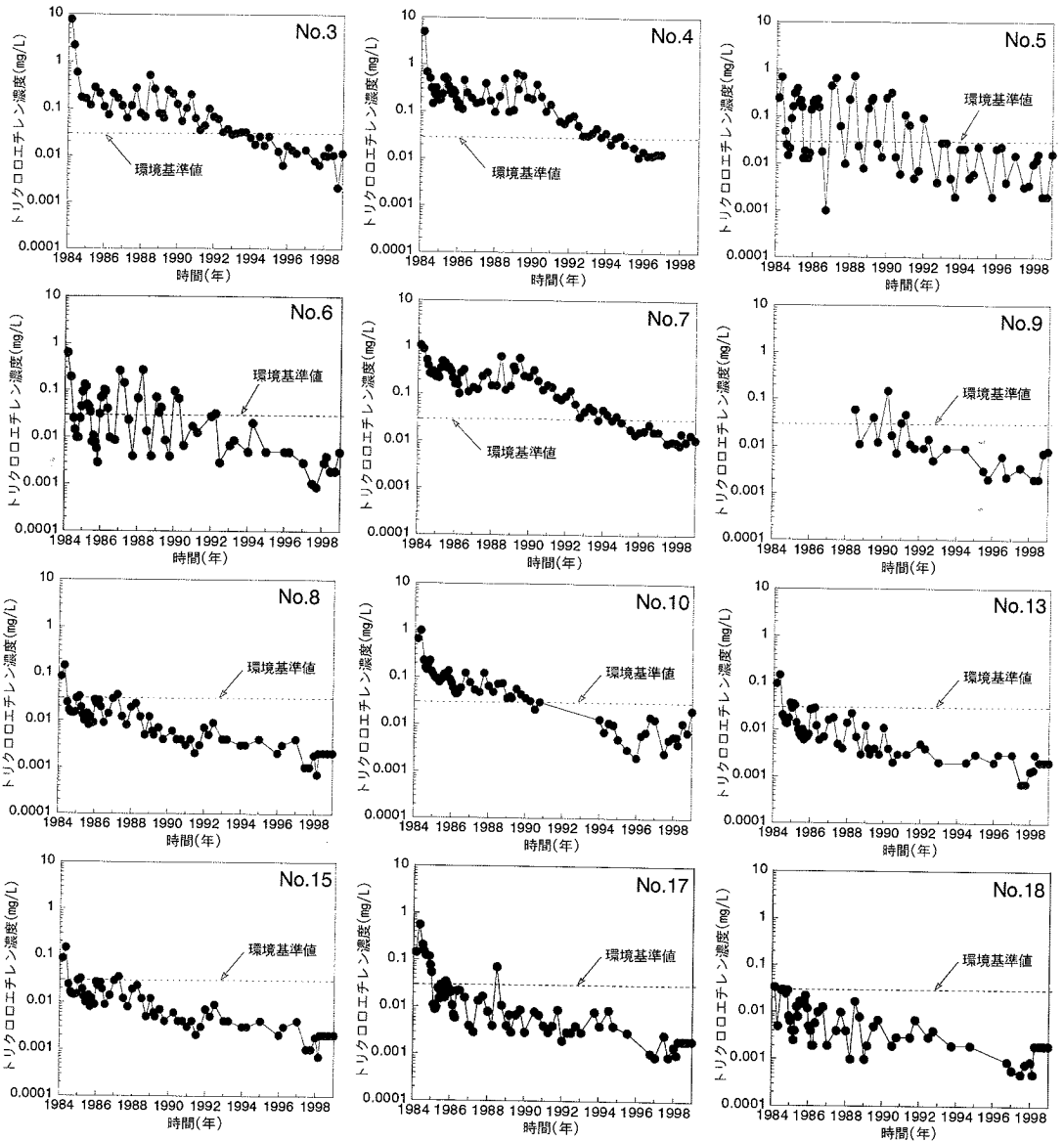


図-9 周辺観測井におけるトリクロロエチレン濃度の時間変化

いて達成率は上昇しており、1995年以降は全ての周辺観測井戸で基準を満足している。

7. 自然減衰効果

(1) 分解生成物の濃度変化

揮発性有機化合物による土壌・地下水汚染の研究が進むにつれて、地下環境中に存在しているこれらの物質は自然に分解されていること(分解による自然減衰、以下自然減衰と呼ぶ)が明らかになってきた⁸⁾。現地では1996年10月からトリクロロエチレン

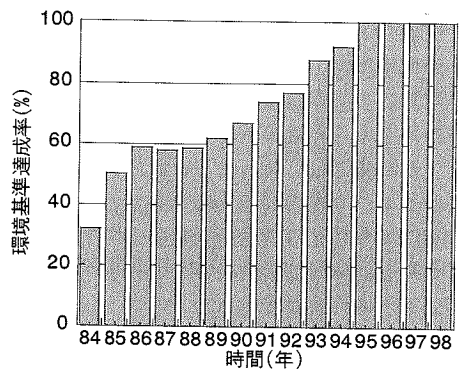


図-10 周辺観測井の環境基準達成率

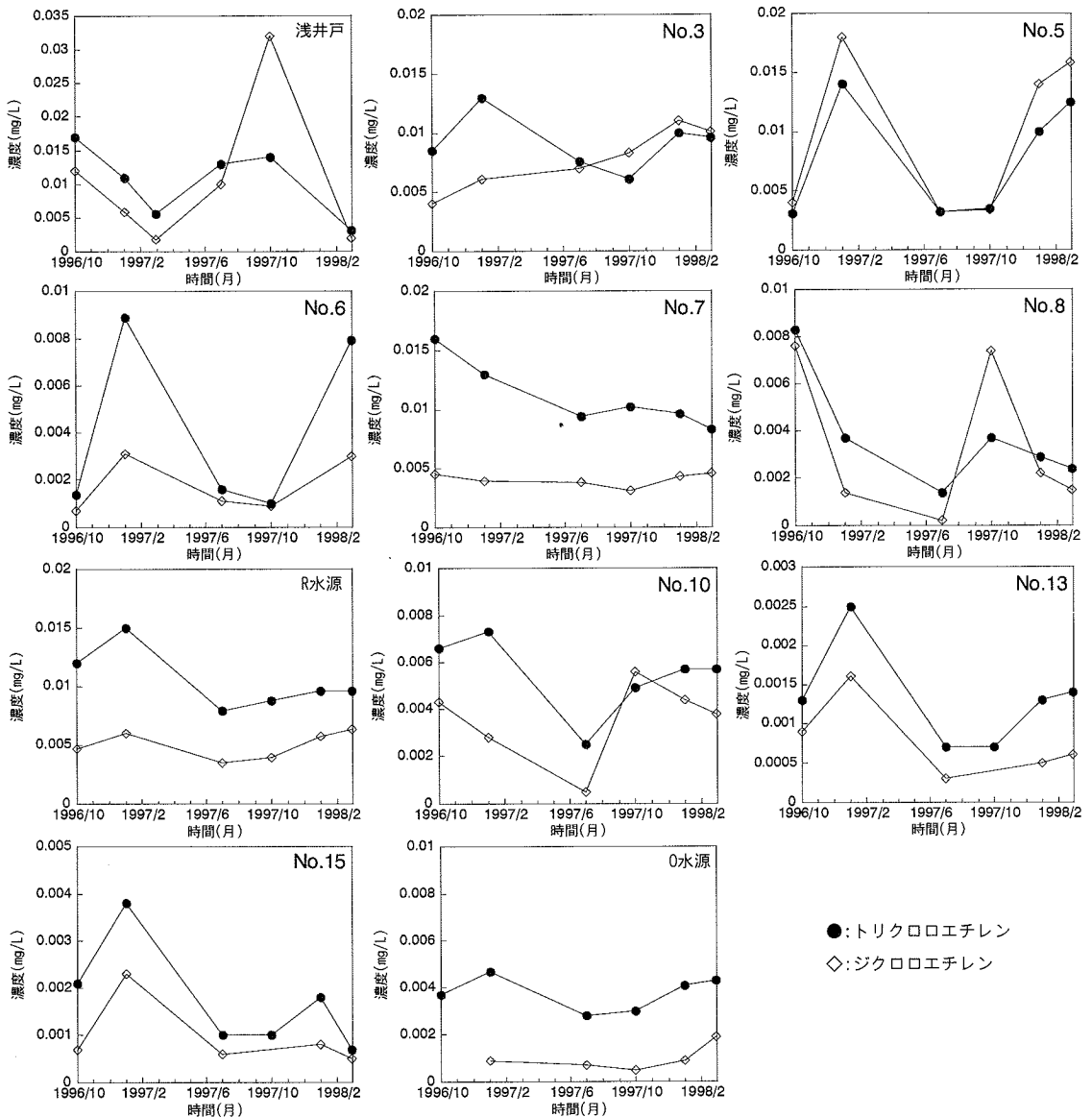


図-11 トリクロロエチレンおよびジクロロエチレン類濃度の時間変化(1996年10月～1998年2月)

の分解生成物であるジクロロエチレン類の測定を開始している。図-11にトリクロロエチレンおよびジクロロエチレン類濃度の時間変化を示している。なお、地下水中からはcis-1,2-ジクロロエチレン(以下ジクロロエチレン)のみが検出されている。

ジクロロエチレン濃度はトリクロロエチレンより低い、同じような挙動を示している。ただし、1997年7月頃に浅井戸のジクロロエチレン濃度が上昇している影響と考えられるが、観測井No.3, No.8, およびNo.10でジクロロエチレン濃度とトリクロロエチレン濃度の変化が対応しない時期がある。その後のモニタリングでは観測井No.3を除いて元に戻

っている、何らかの原因で一時的に変化したものと推察されるが、原因については特定できなかった。しかし、これを除くと概ねジクロロエチレン濃度はその地点のトリクロロエチレン濃度に依存している。

一方、汚染地下水の主流方向から外れている観測井No.5では、ジクロロエチレン濃度がトリクロロエチレンよりも高くなっている。この観測井では工場下を通過していない地下水を採水しており、水源の違いが原因と推察される。水源の違いの影響は、観測井No.5のトリクロロエチレン濃度の季節変動の幅が大きいこと、および季節変動の傾向が異なることにも表れている(図-9参照)。一方、観測井No.6と

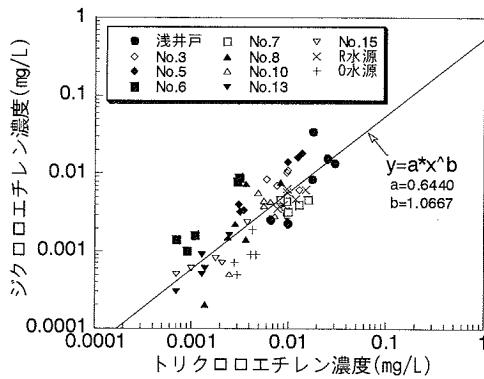


図-12 トリクロロエチレンとジクロロエチレンの濃度比

No.13における両物質の濃度比は多くの観測井と同じであるが、季節変動の幅や季節変化の傾向が異なっているため、観測井No.5と同様に他の観測井とは水源が異なっている可能性が高い。

(2) トリクロロエチレンの自然減衰効果

図-12にトリクロロエチレンとジクロロエチレンの濃度比を示している。なお、図中には汚染地下水の主流方向から外れている観測井No.5, No.6, No.13, および浅井戸と観測井No.3, No.4, No.7の特異な値を除いて求めた回帰式を載せている。両物質の濃度は両対数上で直線関係にある。トリクロロエチレン濃度のべき乗は1.07なので、今回の範囲内でほぼ1.0と考えれば、両物質の濃度比は0.64になる。すなわち、現地の地下水中にはトリクロロエチレン濃度の約64%のジクロロエチレンが存在していることになる。両物質の分子量比を使ってジクロロエチレン濃度をトリクロロエチレン濃度に換算して加えると、トリクロロエチレン濃度は実測値の1.867倍になる。これは、地下水中で生じる還元的脱塩素化によってトリクロロエチレンの約46%が分解してジクロロエチレンになっていること(分解率が約46%)を意味している。ただし、ジクロロエチレンも地下水中で分解しているので、実際のトリクロロエチレンの分解率はそれ以上であると思われる。このことは、自然減衰によってトリクロロエチレン濃度の低下が早まり、地下水が環境基準以下になるまでの期間が短縮されていることを意味している。

そこで、自然減衰がどの程度トリクロロエチレン濃度の低下を早めているか、簡単な検討を行ってみた。図-13に観測井No.3における実際のトリクロロエチレン濃度(分解有り)と両物質の分子量比を使ってジクロロエチレン濃度をトリクロロエチレン濃度に換算してトリクロロエチレン濃度の実測値に加えたもの(分解無し)の変化を示している。分解無し

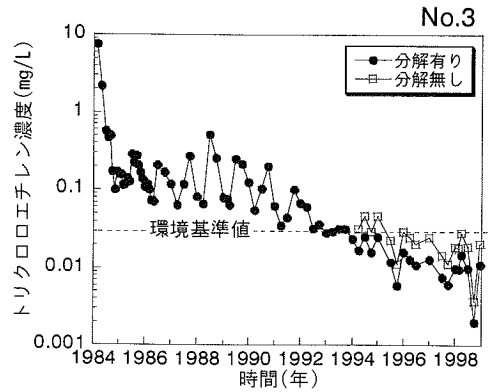


図-13 トリクロロエチレンの自然減衰効果

濃度が常時環境基準を満足するのは1996年以降であり、実際よりも2年程度遅れている。詳細には物質輸送を考慮した検討を行う必要があるが、自然減衰が汚染物質であるトリクロロエチレン濃度の低下を早めることに十分寄与しているといえるだろう。

ただし、自然減衰によるトリクロロエチレン濃度の低下は環境基準物質であるジクロロエチレンの生成を意味している。本現場で得られた分解率46%を用いると、トリクロロエチレン濃度が環境基準値の2倍を下回るまではジクロロエチレン濃度も環境基準値(0.04mg/L)を超えていたことになる。このことは、自然減衰によって汚染物質のトリクロロエチレンが減少しただけでは汚染問題の本質的な解決にはならない、汚染物質の分解生成物の挙動についても十分注意する必要があることを示している。

8. おわりに

本稿では、10年以上の長期に渡って継続している揚水処理による地下水浄化対策の評価を行った。地下水揚水法は時間と経費がかかる割には効果の上がらない技術と見なされることが多い。しかし、本現場では土壌除去の効果が大きかったこともあるが、浅層地下水中のトリクロロエチレン濃度を環境基準以下にすることに成功した。また、揚水処理を続けていく過程では、濃度が環境基準よりも高い時期には揚水量が増えると浄化率が上がり、濃度が環境基準を下回り始めるとその傾向が顕著でなくなる特徴が認められた。この関係は技術の適切な切り替え時期を判断することに利用できるかもしれない。

一方、本現場ではトリクロロエチレンと分解生成物のジクロロエチレン類の濃度比がほぼ一定(約64%)に保たれていた。この事実が全ての現場に当てはまるわけではないが、自然減衰を検討する上では

注目すべき特徴の一つと思われる。さらに、自然減衰によって地下水濃度が環境基準値を満足するまでの期間が2年程度は短縮されていることがわかった。

本現場は、揮発性有機化合物による地下水汚染の中で最も早くから知られている事例の一つであり、そのような現場で浅い地下水の浄化対策がほぼ完了したことは非常に意義あることといえる。

参考文献

- 1) 平田健正, 江種伸之, 中杉修身, 石坂信也: 土壌ガス吸引と地下水揚水を併用した地下環境汚染の修復, 環境工学研究論文集, Vol.33, pp.47-55, 1996.
- 2) 江種伸之, 塩谷剛, 平田健正, 福浦清, 松下孝: 地下水への空気注入による揮発性有機化合物の除去効果について, 環境工学研究論文集, Vol.37, pp.279-286, 2000.
- 3) 上野俊洋, 石田浩昭, 中村寛治: 嫌気性微生物を用いたバイオレメディエーションの実証実験, 土壌環境センター技術ニュース, No.4, pp.13-18, 2002.
- 4) 中島誠, 坂本大, 根岸昌範, 下村雅則: 透過性地下水浄化壁による汚染地下水の浄化効果について, 地下水学会誌, Vol.42, No.1, pp.27-45, 2000.
- 5) 小林悦夫: 地下水汚染対策—現場からの報告-兵庫県の事例-, 公害と対策, Vol.23, No.10, pp.51-57, 1987.
- 6) 平田健正編著: 土壌・地下水汚染と対策, 日本環境測定分析協会, 304p., 1996.
- 7) 村岡浩爾, 玉井昌宏, 松井俊二: 有機塩素化合物と水との二層流界面からの溶解に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.35, pp.659-662, 1991.
- 8) Hincbee, R.E., Wilson, J.T. and Downey, C.D.: Intrinsic Bioremediation, *Battelle Press*, 266p., 1995.

(2003. 5. 6 受付)

REMEDICATION OF GROUNDWATER CONTAMINATED BY VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS USING PUMP AND TREAT TECHNIQUE

Tatemasa HIRATA, Masanori YOSHIOKA, Nobuyuki EGUSA
and Osami NAKASUGI

This paper evaluated the effects of the pump-and-treat technique and natural attenuation of trichloroethylene (TCE) at a contaminated site. At this site, the pump-and-treat technique for 14 years succeeded in the decontamination of shallow groundwater. During this time, the restoration rate, which was the rate of the decrease in TCE concentration, was observed to increase with the amount of groundwater extracted while the concentration exceeded the environmental standard, but this relationship ceased when the concentration came within the standard. In the meanwhile, dichloroethylene concentrations were about 64% of the TCE concentrations and natural attenuation shortened the restoration period by 2 years.