

## 地下水汚染のメカニズムと汚染事例

### 1. 有害物質の特性

表-1 に、水質汚濁防止法（第二条第二項第一号）で定める有害物質を示す。また、各物質および代表的な化合物の基本性状を参考資料 8 に示す。

表-1 水質汚濁防止法（第二条第二項第一号）で定める有害物質

	有害物質	土壌汚染対策法の分類
1	カドミウム及びその化合物	第二種
2	シアン化合物	第二種
3	有機燐化合物（ジエチルパラニトロフェニルチオホスフェイト（別名パラチオン）、ジメチルパラニトロフェニルチオホスフェイト（別名メチルパラチオン）、ジメチルエチルメルカプトエチルチオホスフェイト（別名メチルジメトン）及びエチルパラニトロフェニルチオノベンゼンホスホネイト（別名E P N）に限る。）	第三種
4	鉛及びその化合物	第二種
5	六価クロム化合物	第二種
6	砒素及びその化合物	第二種
7	水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物	第二種
8	ポリ塩化ビフェニル	第三種
9	トリクロロエチレン	第一種
10	テトラクロロエチレン	第一種
11	ジクロロメタン	第一種
12	四塩化炭素	第一種
13	1・2-ジクロロエタン	第一種
14	1・1-ジクロロエチレン	第一種
15	1・2-ジクロロエチレン	第一種
16	1・1・1-トリクロロエタン	第一種
17	1・1・2-トリクロロエタン	第一種
18	1・3-ジクロロプロペン	第一種
19	テトラメチルチウラムジスルフィド（別名チウラム）	第三種
20	2-クロロ-4・6-ビス（エチルアミノ）-s-トリアジン（別名シマジン）	第三種
21	S-4-クロロベンジル=N・N-ジエチルチオカルバマート（別名チオベンカルブ）	第三種
22	ベンゼン	第一種
23	セレン及びその化合物	第二種
24	ほう素及びその化合物	第二種
25	ふっ素及びその化合物	第二種
26	アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物	
27	塩化ビニルモノマー	
28	1・4-ジオキサン	

第一種：第一種特定有害物質（揮発性有機化合物(VOC)）

第二種：第二種特定有害物質（重金属等）

第三種：第三種特定有害物質（農薬等）

(1) 揮発性有機化合物の特性

表-1 の有害物質のうち、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、四塩化炭素、1・2-ジクロロエタン、1・1-ジクロロエチレン、シス-1・2-ジクロロエチレン、1・1・1-トリクロロエタン、1・1・2-トリクロロエタン、1・3-ジクロロプロペンおよびベンゼンは、一般に揮発性有機化合物（VOC）と呼ばれている（土壤汚染対策法では第一種特定有害物質に指定）。揮発性有機化合物は、揮発性が高いため一部は気化するものの、一般的には液体の状態で使用または保管され、下記の性質を示す。

- ・水に溶けにくい（非水溶性液体 NAPL：Non Aqueous Phase Liquid）
- ・分解されにくい（地下水汚染が発生した場合、長期間にわたって影響する）
- ・粘性が低い（土壤や地下水中を移動しやすい）

また、密度の違いにより、土壤・地下水中では表-2 に示すような移動特性を示す。

表-2 揮発性有機化合物の土壤・地下水中での移動特性

密度	有害物質の中の該当物質	土壤・地下水中での移動特性	
		地表から地下水面に到達するまで	地下水面に到達した後
水より密度が小さいもの（LNAPL；Light Non-aqueous Phase Liquid）	ベンゼン	粘性が低く、地下水面まで容易に浸透する。	地下水の流れに乗って地下水上面を水平方向に移動する。
水より密度が大きいもの（DNAPL；Dense Non-aqueous Phase Liquid）	テトラクロロエチレン、トリクロロエチレンなど（ベンゼン以外の揮発性有機化合物）	同上	一部は地下水上面で移動し、一部は不透水層面まで到達して水平方向に移動する。

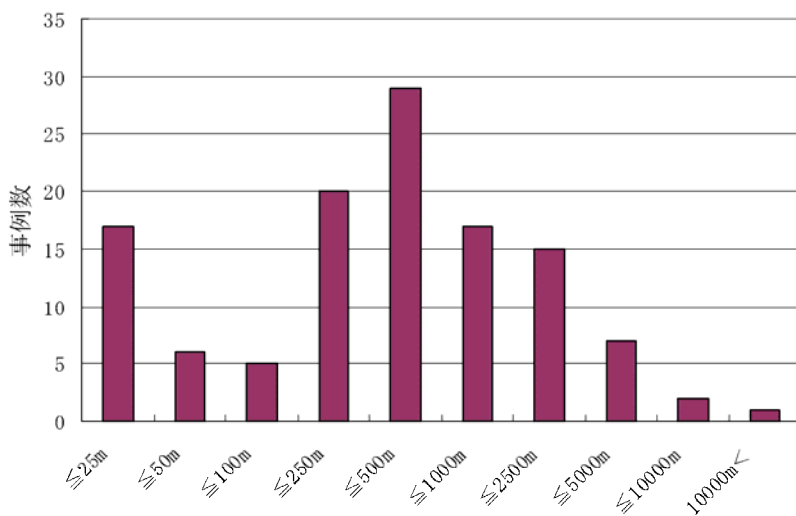


図-1 揮発性有機化合物（VOCs）の汚染の到達距離の頻度予測（汚染発生100年後）<sup>1)</sup>

(2) 重金属等、農薬等の特性

表-1 の有害物質のうち、重金属等および農薬等は、一般的には水に溶解して（水溶液として）土壌地下水を移動する。

表-3 に、重金属等および農薬等の土壌・地下水での一般的な移動特性を示す。これらの物質は、地表から地下水面まではほぼ鉛直に浸透し、地下水に到達した後は地下水とともに移動するが、分散等の影響で移動するに従い濃度は低下する。

表-3 重金属等および農薬等の土壌・地下水での移動特性

密度（水溶液の密度）	土壌・地下水での移動特性	
	地表から地下水面に到達するまで	地下水面に到達した後
一般的に、水とほぼ同等もしくはわずかに大きい。	地下水面までは、水の浸透と同様に、ほぼ鉛直に浸透する。	地下水に溶け込みながら、地下水の流れに乗って移動する。一般的に、地下水で分散するため、移動するに従い濃度は低下する。

一般的には、陰イオン性の物質（六価クロム、砒素、ほう素、ふっ素）は比較的土壌地下水を移動しやすい。更に、これら4種の物質の中でも最も到達距離が長い物質は六価クロムである。

一方、鉛、総水銀、全シアンは一般的に汚染地下水到達距離が100m以下であり、上記の4物質と比べて相対的に移動距離が短い。

これらの事例に基づき、第二種特定有害物質（重金属等）による汚染地下水の到達距離の検討においては、第二種特定有害物質（重金属等）を以下の3種に区分することとする。

それら以外の重金属等（カドミウム、アルキル水銀、セレン）<sup>1</sup>、農薬等（PCB、チウラム、シマジン、チオベンカルブ、有機りん化合物）<sup>2</sup>については、地下水汚染の到達距離に関する事例が得られていない。これらの物質による汚染地下水が到達する可能性が高い範囲は、全シアン・鉛・総水銀のグループに区分している。

（注）ここでは、土壌汚染対策法の第二種特定有害物質（1）、第三種特定有害物質（2）の区分を用いた。

表-4 重金属等の物質ごとの土壌・地下水での移動性

物質	移動性
六価クロム	・特定有害物質に指定されている重金属の中で、最も移動性が大きい。
砒素、ほう素、ふっ素	・移動性が相対的に大きく、地下水汚染の事例も多い。
鉛、総水銀、全シアン	・移動性が相対的に小さい。

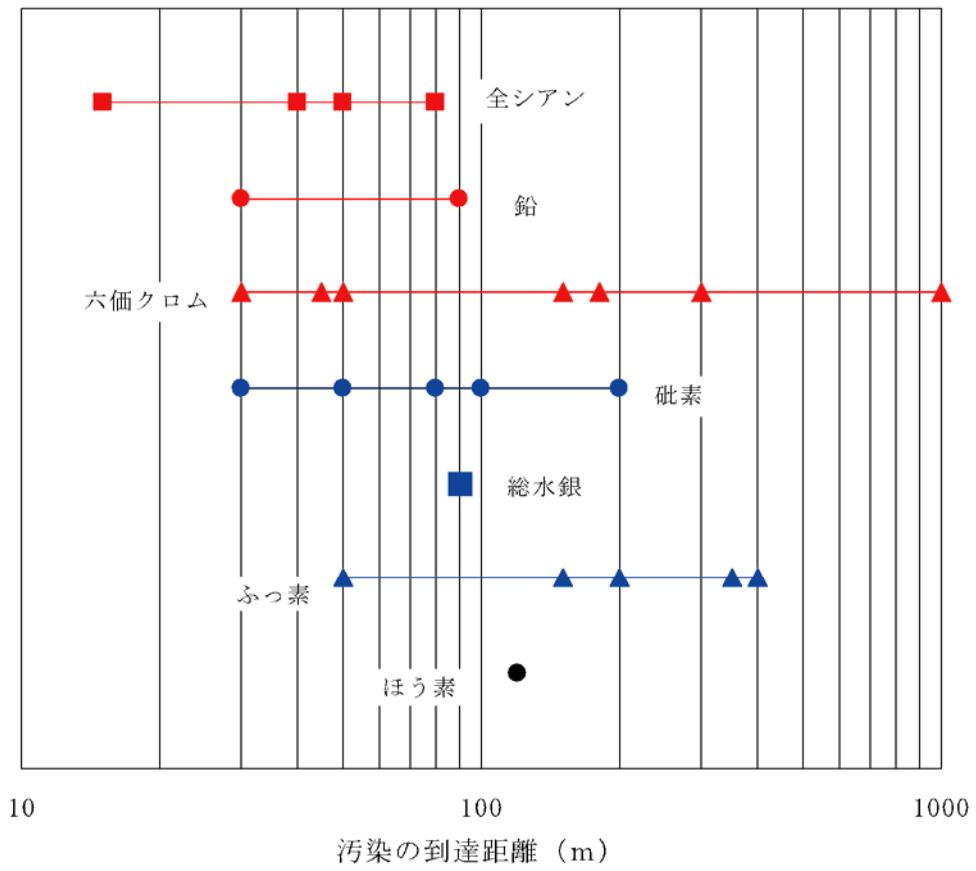


図-2 重金属等の汚染の到達距離<sup>1)</sup>

(3) アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物の特性<sup>2)</sup>

硝酸性窒素による地下水汚染を引き起こす要因は、過剰施肥、家畜排せつ物の不適正処理、生活雑排水の地下浸透、工場・事業場からの排水等が挙げられる。それら人為的に土壤に過剰負荷された窒素が土壤微生物等による無機化や硝化作用を受け硝酸性窒素に変化し、土壤中の窒素循環のバランスを崩している。植物吸収や脱窒等に利用されなかった硝酸性窒素は土壤から溶脱し、地下水に移行し汚染を引き起こす原因となる。

硝酸性窒素の性質、汚染の原因や特徴は次のとおりである。

表-5 硝酸性窒素・亜硝酸性窒素の地下水汚染の特徴

項目	特徴
性質	土壤に吸着されにくく、地下水に移行しやすい。土壤中の微生物のはたらきにより、アンモニア性窒素等が酸化されて生じる。
汚染の原因	過剰施肥、家畜排せつ物の不適正処理、生活雑排水の地下浸透、工場・事業場からの排水等
汚染の特徴	農地など汚染源そのものに広がりを持つため、汚染は広範囲に及ぶことが多い。土壤への窒素負荷を完全になくすことは、困難である。

## 2. 汚染メカニズム

ここでは、物質の種類ごとに汚染のメカニズムを示す。汚染の未然防止措置を行うとともに、万が一汚染が発生した場合には、これらのメカニズムに応じて対策方針を策定する必要がある。

### (1) 揮発性有機化合物の汚染メカニズム

揮発性有機化合物は、土壌・地下水中では表-2 に示したような移動特性を示す。施設等から漏れいし地下浸透した揮発性有害物質は、図-3～図-4 に示すような状況で地下水汚染が拡散する。

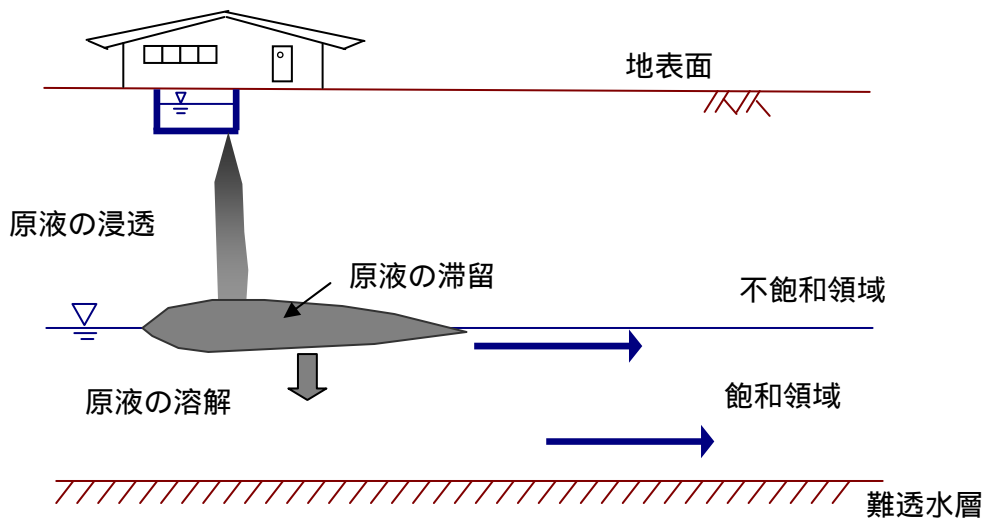


図-3 LNAPL (Light Non-aqueous Phase Liquid) による地下水汚染の拡散状況 模式図<sup>3)</sup>

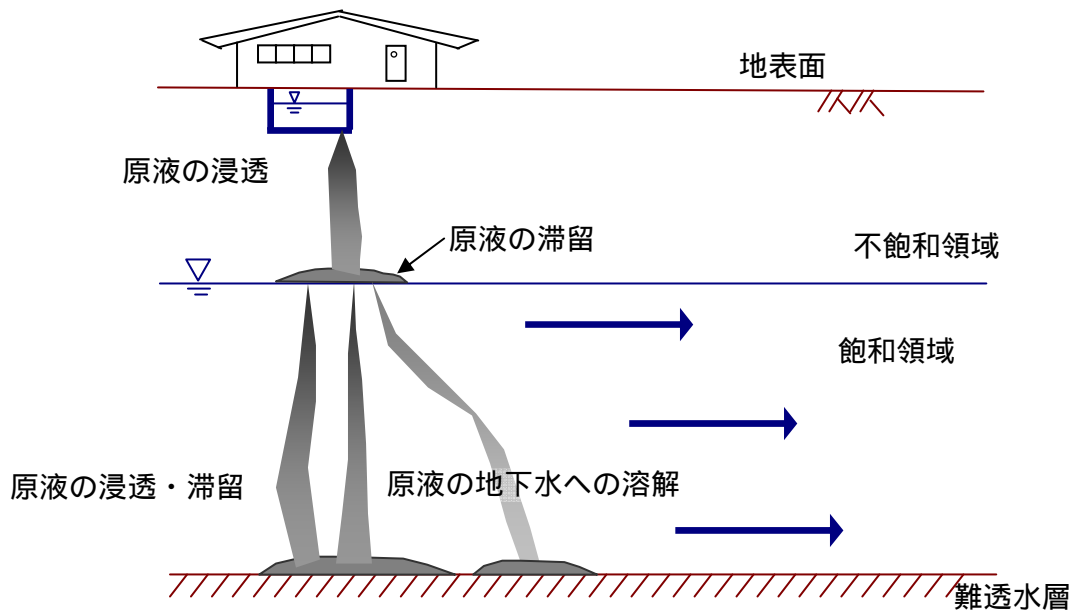


図-4 DNAPL (Dense Non-aqueous Phase Liquid) による地下水汚染の拡散状況 模式図<sup>3)</sup>

## (2) 重金属等の汚染メカニズム

重金属は、一般に土壤に吸着されやすいため、汚染は深部まで拡散しにくいという特徴がある。

重金属等を含む汚染水は、一般的に不飽和帯（地下水面より上部）をほぼ鉛直に浸透し、地下水に到達した後は、地下水の流れに乗って主に水平方向に移動する。

土壤中では、分散・拡散の影響により、移動するに従って一般的には汚染濃度は低下する。

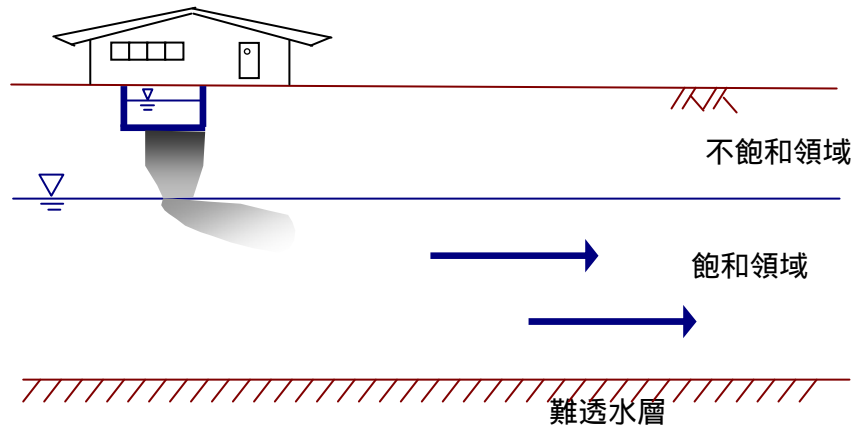


図-5 重金属等の溶液による地下水汚染の拡散状況 模式図<sup>3)</sup>

## (3) 硝酸・亜硝酸性窒素の汚染メカニズム

硝酸・亜硝酸性窒素は、土壤に吸着されにくいため、地下水に移行しやすく、一般に汚染が広範囲に及ぶという特徴がある。

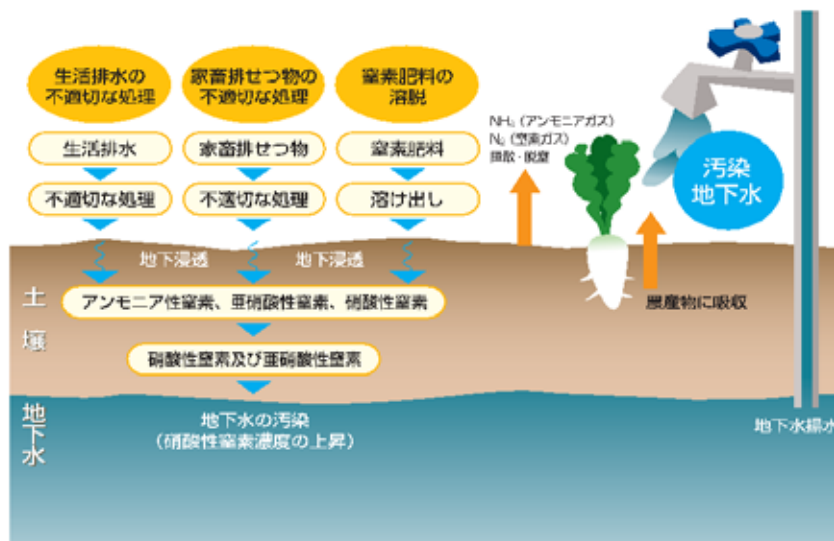


図-6 硝酸性窒素の地下水汚染のしくみ<sup>2)</sup>

#### (4) 汚染の到達距離

表-6 に、物質ごとに地下水汚染が到達する可能性が高い範囲の一般値を示す。

表-6 地下水汚染が到達する可能性が高い範囲の一般値

有害物質の種類	一般値 ( m )
第一種特定有害物質 ( 揮発性有機化合物 )	概ね 1,000
六価クロム	概ね 500
砒素、ほう素、ふっ素	概ね 250
シアン、カドミウム、鉛、水銀及びセレン並びに第三種特定有害物質	概ね 80



### 3. 汚染対策事例

ここでは、VOCに関する汚染対策事例を示す。ここに示すように、汚染状況によっては対策に多大の時間とコストがかかるため、汚染の未然防止措置が重要である。

なお、これら以外にも対策工の施工会社等から対策事例がインターネット等で公開されている。対策を具体的に検討する際には、自治体環境部局等に相談するとともに、既存事例や最新技術に関する情報を入手した上で検討することが望ましい。

#### (1) 地下水汚染（VOC）の対策事例

全国規模の地下水汚染調査は、1982年の環境庁調査に始まったが、1983年には旧厚生省が地下水を水道水源として利用している原水（井戸から揚水した地下水）の調査を行い、トリクロロエチレンによる地下水汚染が発見された。その後の地下水質調査で、水道水源井の上流で大量のトリクロロエチレンを使用する電機工場が判明した。電機工場では、部品の洗浄にトリクロロエチレンを使用しており、その配管の不備からトリクロロエチレン原液が地下浸透したことも明らかになった。

この事例では、水道水源の汚染はかなり早期に改善されたが、工場周辺民家で井戸水の使用が多かったため、当時、自治体も巻き込み、上水道の敷設に多大な労力と費用を要したこと、さらに現在は、工場敷地外の地下水は環境基準以下であるが、この状態を確保・維持するためにも以下に紹介する地下水揚水浄化が現在も実施しなければならない状況にある。

一連の調査結果に基づいて、1984年にはトリクロロエチレン使用工場の建屋下から汚染土壌を掘削除去し、さらに深井戸などから汚染地下水の揚水除去も開始した。その結果、汚染土壌の掘削除去直後には、数十 mg/L に上る地下水濃度は急激に 2 桁程度低下している（図-7）。ただトリクロロエチレンの環境基準は 0.03mg/L であり、これに比べると依然として 1 桁以上高濃度を維持していることが分かる。この地下水汚染を修復するため、主に深井戸（100m 級）を用いて汚染物質の除去を行うことになった。結果は、図-7 に描くように 15 年間の揚水で 27 トンに上るトリクロロエチレンを除去し、当初 10mg/L を超えていた工場内の浅層地下水質を環境基準値 0.03mg/L 以下にまで回復させることができた。確かに地下水揚水技術で汚染地下水を修復するには時間はかかるが、確実に汚染物質を回収することができ、地下水汚染対策には欠くことのできない技術であろう。

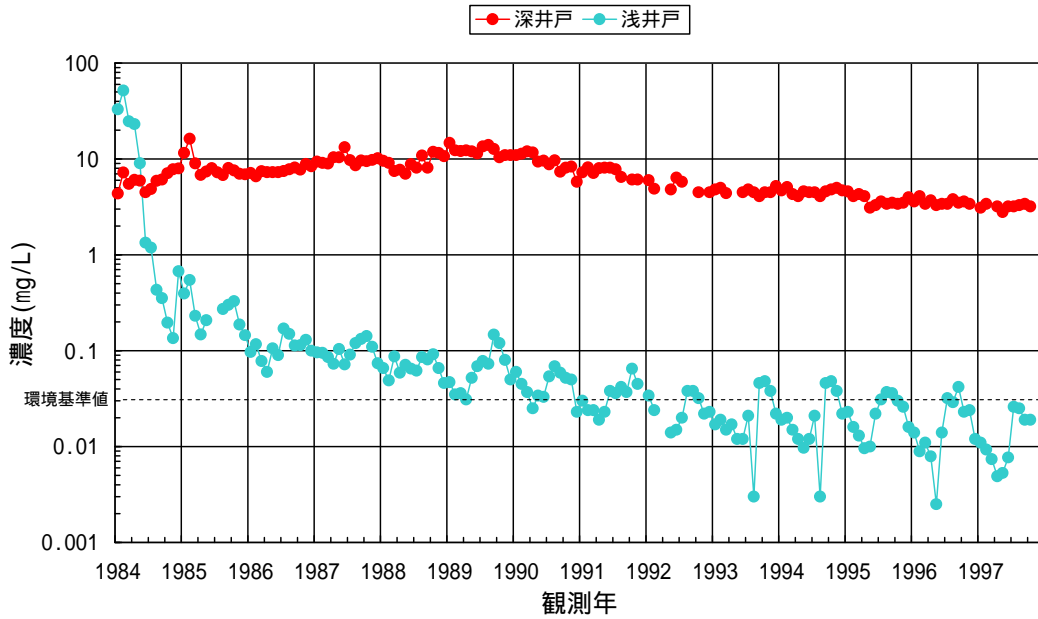


図-7 地下水揚水によるトリクロロエチレン濃度の推移

その一方で、高濃度のトリクロロエチレンが残留している深い地下水（深い土壌）濃度は、依然として数 mg/L の高濃度を維持しており、低下の兆しは見えない。そこで、2000 年から新たに深い地下水の浄化を行うため、ボーリング調査と揚水井、観測井の設置を行った。ボーリングにより得られた地下水中のトリクロロエチレン濃度の鉛直分布と井戸構造を図-8 に、揚水井や観測井の配置を図-9 に描いた。

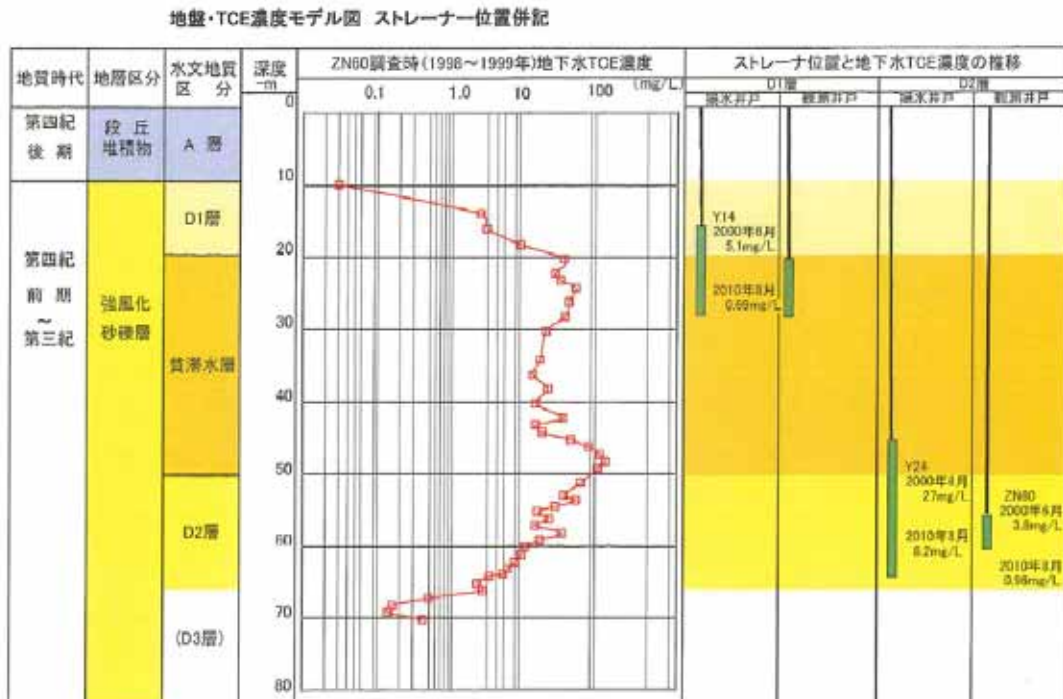


図-8 地下水中のトリクロロエチレン濃度の鉛直分布

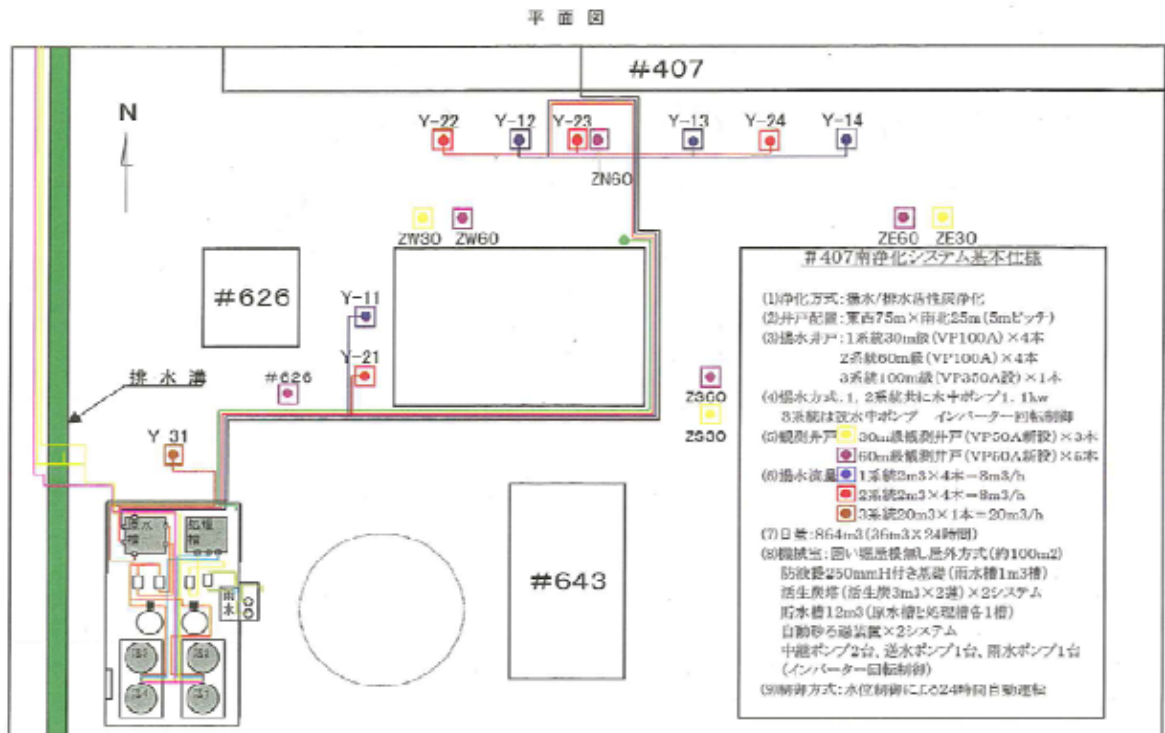


図-9 揚水井及び観測井の位置

揚水井は9本設置し、合計揚水量は36t/hrである。この揚水システムは2000年から稼働しており、その後の浅井戸(D1層)の地下水濃度を図-10に、深井戸(D2層)の地下水濃度を図-11に示した。特徴的なことは、D1層やD2層から地下水を揚水することによってY31(深井戸で深度は100m級、図-7の深井戸)のトリクロロエチレン濃度が顕著に低下し、2002年4月頃にはトリクロロエチレンの環境基準値0.03mg/Lをクリアしている。これはD1層及びD2層に滞留し、そこから100m深の地下水にまで溶け出していたトリクロロエチレンの拡散が抑制された結果であろう。

こうした対策によって、2000年4月までに29.4t、2000年4月以降2010年4月までに6.3t、合計して35.7tのトリクロロエチレンを除去することができた。これらの揚水対策は1984年から開始し現在も継続しているが、27年を経てもD1層において0.7mg/L程度、D2層において8mg/L程度の高濃度トリクロロエチレンが依然として地下水中に存在している。

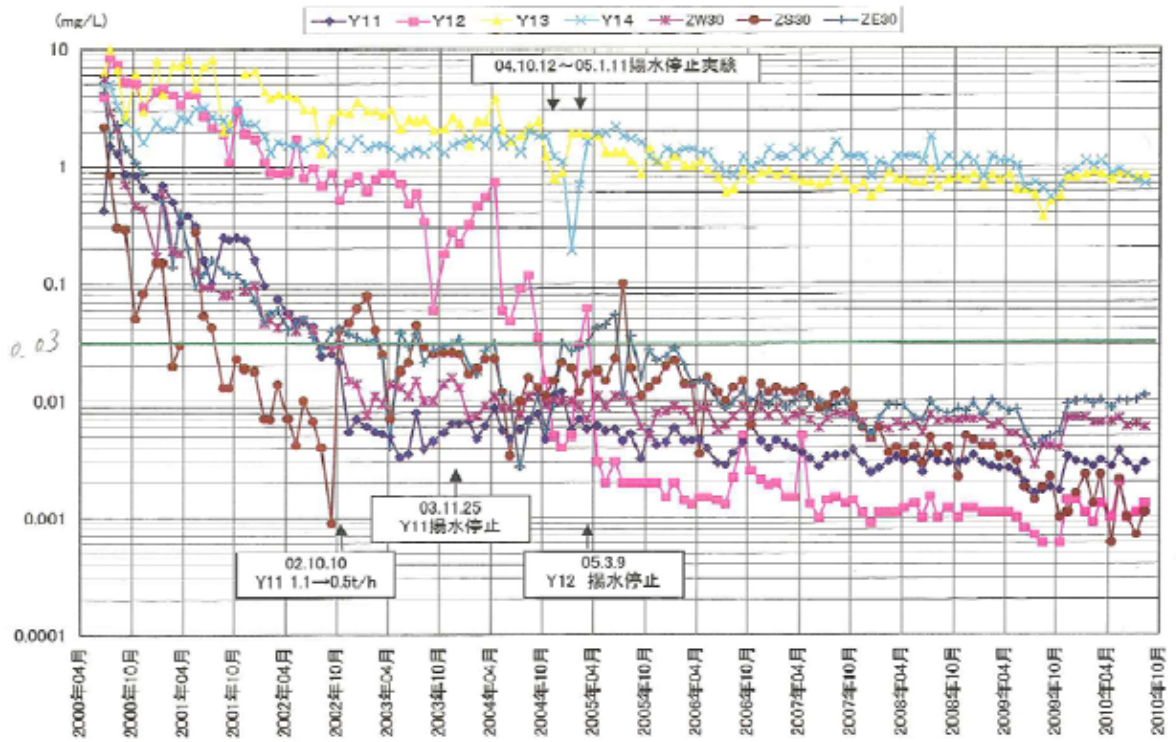


図-10 浅い帯水層（D1層）のトリクロロエチレン濃度の推移

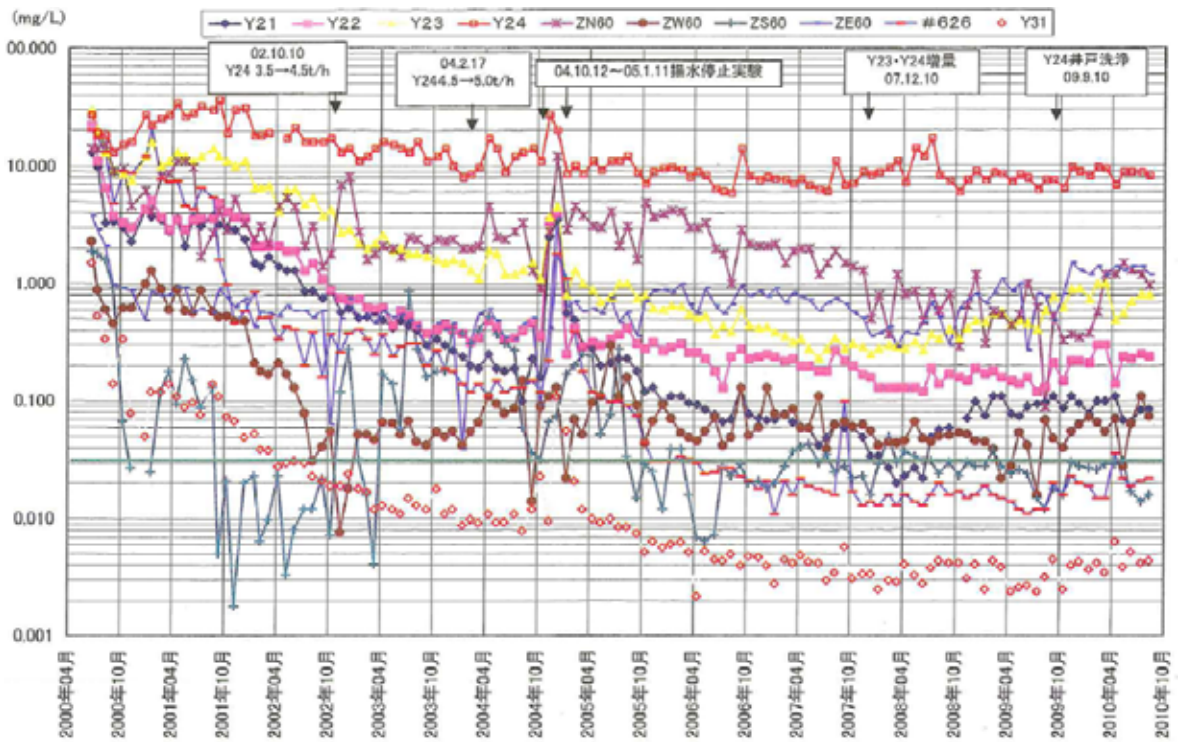


図-11 深い帯水層（D2層）のトリクロロエチレン濃度の推移

## (2) 地下水汚染（VOC）の対策事例

電話機器の洗浄にトリクロロエチレンを使用していた事業場で、土壌地下水汚染が発見された事例である。事例と同様、事例も環境省の汚染機構解明調査や新技術開発調査の一環として、現地調査などを行ってきた。本事例は、土壌ガス調査とボーリング調査を組み合わせた高濃度汚染物質の把握手法の開発と対策技術としての土壌ガス吸引を実施した現場である。

ボーリングによって得られたトリクロロエチレンの土壌濃度を図-12に、地下水揚水に伴う地下水中のトリクロロエチレン濃度の経時変化を図-13に示す。図-13には、揚水した地下水のトリクロロエチレン濃度  $C$  を時間  $t$  に対して指数関数表示を行っている。ある程度のばらつきは認めることとして、図-13中の(2)式から、トリクロロエチレン地下水濃度が環境基準値にまで減少する時間 ( $C = 0.03\text{mg/L}$  として算出) を求めると、31.2年を要することになる。

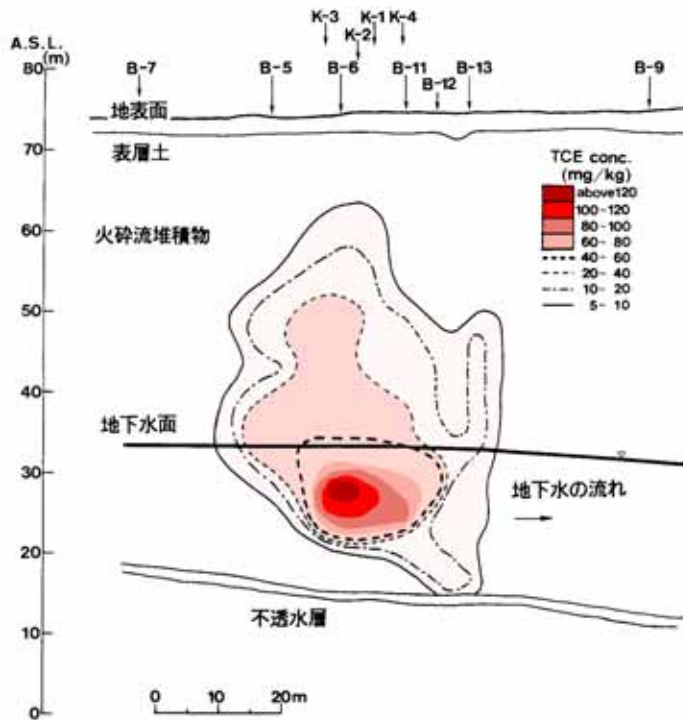


図-12 土壌中のトリクロロエチレン濃度の分布

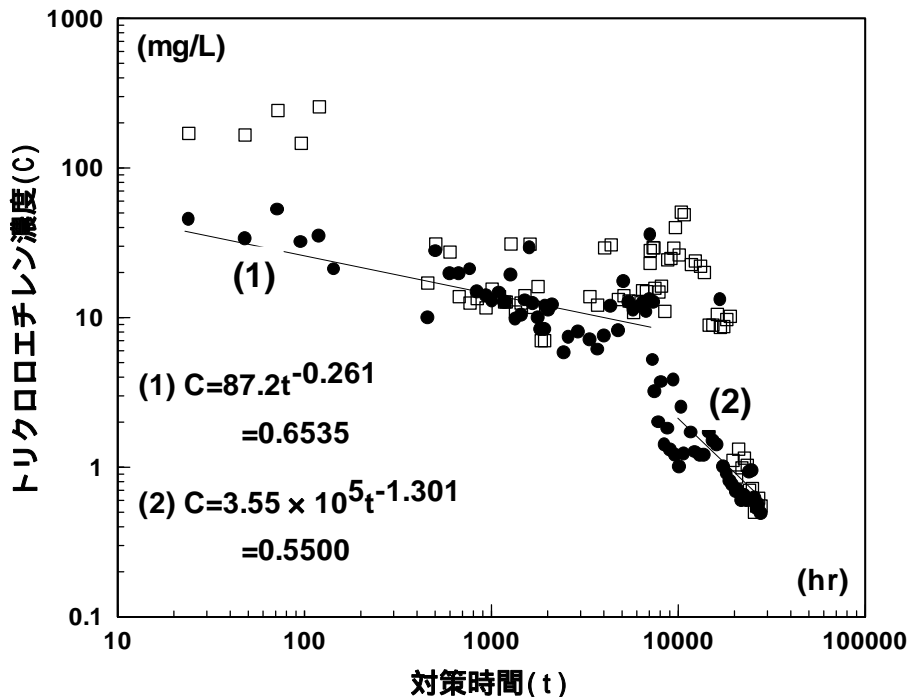


図-13 地下水揚水によるトリクロロエチレン濃度の推移

### (3) 地下水汚染対策事例に関するまとめ

土壌や地下水の水や物質の移動速度は、極めて遅い。それだけに一度汚染されるとその修復には極めて長い時間と経費がかかる。ここで紹介した事例は、いずれも地下水揚水によって汚染物質の除去を行っている。地下水揚水は、確実に汚染物質を除去できる物理的な浄化技術として定着し、普及している。

ただし、時間が掛かることは否めず、2つの事例とも汚染の状況によっては30年あるいはそれ以上の対策時間が必要としており、地下水汚染を未然に防ぐことの重要性を示している。

#### <参考文献>

- 1) 環境省 水・大気環境局土壌環境課：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン Appendix-1. 特定有害物質を含む地下水が到達し得る「一定の範囲」の考え方、平成23年8月
- 2) 環境省 水・大気環境局土壌環境課 地下水・地盤環境室：硝酸性窒素による地下水汚染対策手法技術集、平成21年11月
- 3) 地下水学会：「地下水・土壌汚染の基礎から応用、2006（平成18）年8月」
- 4) 環境省環境管理局水環境部：地下水をきれいにするために、平成16年7月
- 5) 土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について（施行通知）環水大土発第100305002号、平成22年3月5日