

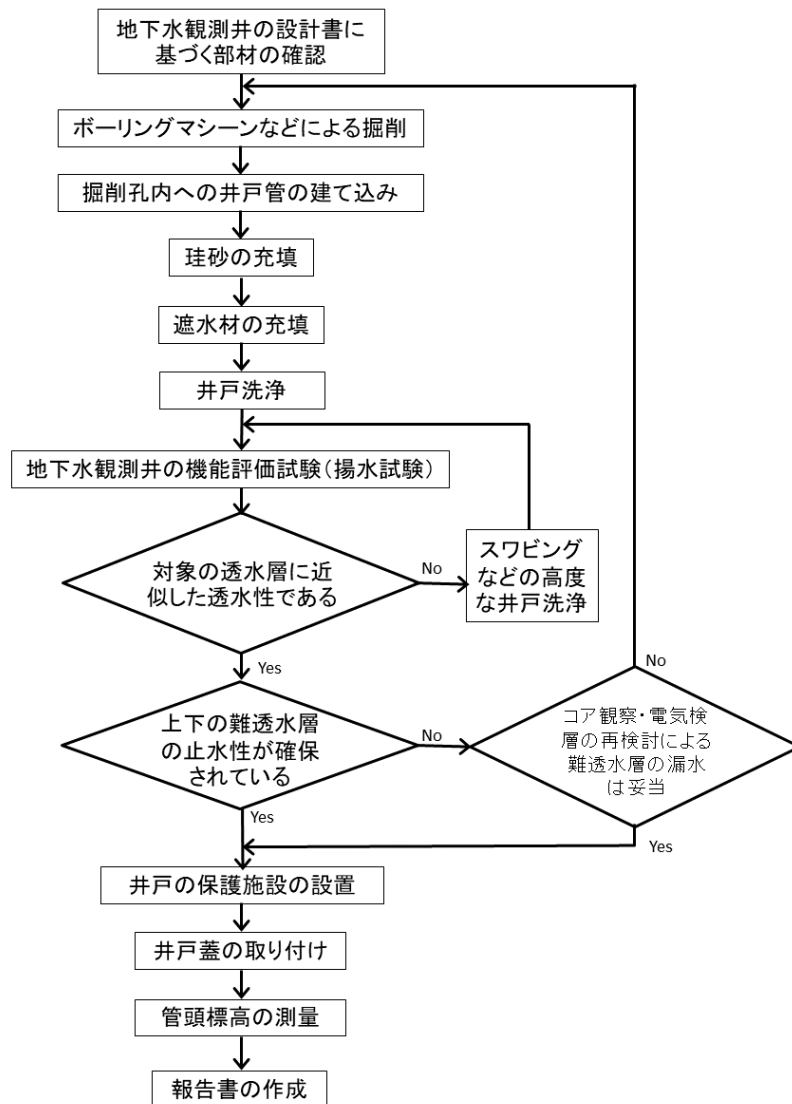
Ⅱ-4 地下水観測井の設置

1 目的と概要

各地層汚染調査地点において、透水層別に地下水の流動や汚染の濃度分布等を把握する地下水汚染調査のための観測井を設置する。

このため、設置される観測井は、対象とする透水層を流れる地下水が井戸内を滞留するなどの障害なく流動できるようにする必要がある。また、観測対象以外の層からの地下水の流入を防ぐため、一般的な井戸（図Ⅱ-27）とは異なり、掘削孔と井戸管との隙間はスクリーン区間を除きベントナイトペレットやセメントミルクによって遮水を施す^{11)・30)・31)・32)}（図Ⅱ-26）。

井戸が作成されたら井戸洗浄を行い、観測井としての機能評価試験を行い、これら結果を報告書にまとめる。



図Ⅱ-25 地下水観測井設置の手順

2 施工の手順と作成された地下水観測井の機能評価の方法

地下水観測井の設置の手順の概要を図Ⅱ-25に示す。地下水観測井の設置は、その設計書に基づく部材を確認した後、設計の孔径と深度の掘削が可能となる井戸作作用のボーリングマシンにて所定の深度まで掘削する。次に井戸管をつなぎながら掘削孔の中央に立て、掘削孔と井戸管の隙間を珪砂や遮水材で充填していく。この充填は、まずスクリーン区間の深度に珪砂を充填する。この上に遮水材としてベントナイトペレットを充填し、これ

が膨潤するのを待って、この上にセメントミルクを打ち上げる。セメントミルクの硬化後すぐに井戸洗浄を行い、揚水試験により観測井の機能を評価する。

地下水観測井の設計書に基づく部材の確認

井戸管の材質は汚染物質によって溶けたり、変形したり、汚染物質が吸着したりしないものを使用する。多くの場合、肉厚の塩化ビニル管を使用する。管同士の接合はソケットを使用せず、ねじ切りされた管を使用し（P.12 の図 I-8）、管の外側・内側ともに凹凸がなく接合できるようにする。これは、スクリーン設置深度に珪砂を地表から井戸管と掘削孔の隙間へ投入するため、井戸管のつなぎにソケットを使用すると、ソケットは管の外側に飛び出るので、この部分に珪砂が堆積し、そこで詰まり、所定深度へ珪砂が降下しないためである。スクリーン部分も同様にねじ込みで接合できるようにする。

スクリーン部分は対象とする地層の透水性の 100 倍以上の透水性を有するような水の取り入れ口を設ける。図 I-8 に示すように、井戸管に孔を開ける際は、この透水性に見合うような開口率となるようにする。

井戸管のスクリーン部分の外側に巻くメッシュは、スワビングといった井戸洗浄方法に耐えられるようなステンレス製などのような耐久性の高いものを使用する。

設計深度にスクリーンが設置できるように、管のつなぎ目に油性マジックにて番号を記入し、現地でのつなぎ間違いを防ぐようにする。この際、井戸底からスクリーンが設計通りの深度に設置できることを確認する。

井戸管と掘削孔の隙間に設置する珪砂は、対象とする地層の 100 倍程度の透水性となるように、粒子の直径がスクリーン設置深度の透水層の地層粒子の 4 倍程度のものを使用する。また、この珪砂は、泥水中を沈降するためその粒子密度は大きい方がよい。

ベントナイトペレットは、水を吸うと直ちに膨潤するが、その表面はコーティングされており、水中でこのコーティングが徐々に溶けることにより時間遅れで膨潤する。その時間差が異なる数種類のものがあるので、ベントナイトペレットを孔に投入し泥水中を沈降し所定深度に沈殿する時間を考慮してその種類を選ぶ。

ボーリングマシンなどによる掘削

汚染を他の層へ移流させないように所定の深度まで掘削する。これには、泥水を使用し掘削孔壁に薄い泥壁を付着させ、汚染水の孔内への流入を抑制する対策を行う。また、事前の地層汚染調査により汚染が見られたならば、汚染が見られる透水層全体とその直下の難透水層の途中の深度まで、スチール製のケーシングを打設し、汚染水の深部への移流を防ぐようにする（図 II-26）。なお、ケーシングの先端のビット（刃先）は P.33 の図 II-13 のように管の外側に突き出ているものは使用せず、ビットが外側に突き出していない通常のケーシングを使用する。孔内に汚染水が流入した場合は、泥水循環や泥水の交換などにより浄化する。特に、高濃度の汚染部分の下にある汚染の無い透水層の観測井を作成する際は、汚染部分を通過した時点で、泥水の汚染状況を調べ、汚染があれば泥水を交換してから掘り進むなど、汚染を下へ移流させないよう工夫する。

掘削が終わったら、ボーリング時の先端の刃先の長さや使用したロッドの長さとお本数を確認するなどし、掘削深度が設計通りとなっていることを確認する。

所定の掘り止め深度よりも浅い深度に難透水層が出てきてしまうなどにより、この難透水層を貫通した場合は、貫通した難透水層の上面からケーシングの下端までをベントナイトペレットなどで確実に遮水する。この際、貫通した難透水層の上位と下位の透水層の地下水面の差（水圧）が大きい場合は、ベントナイトペレットの代わりにセメントミルクを使用すると、セメントミルクが固まる前にこの中に水の通り道としての孔ができてしまう可能性があるため、難透水層に当たる深度にはベントナイトペレットを使用するなどし、確実に遮水を施す必要がある。

地層汚染調査時に電気検層が行えなかった深度については、井戸設置の前に検層を行う。

なお、汚染され交換した循環泥水は環境中への汚染の拡大を予防するため、法令等の基準を踏まえ、適切に処理する。

削孔内への井戸管の建て込み

井戸底に蓋を付け、井戸管をゆっくり掘削孔に挿入していく。管のつなぎはあらかじめ書いた番号を確認し、ねじ込みにて接合していく。管同士をつないだ時点で写真を撮り、つなぎ間違いのないことを確認しながら作業を進める。特にスクリーンの設置深度が設計通りとなっていることを確認する。

この後の掘削孔と井戸管の隙間の充填を行いやすくするため、最後の管の管頭部は地表よりも高い位置にな

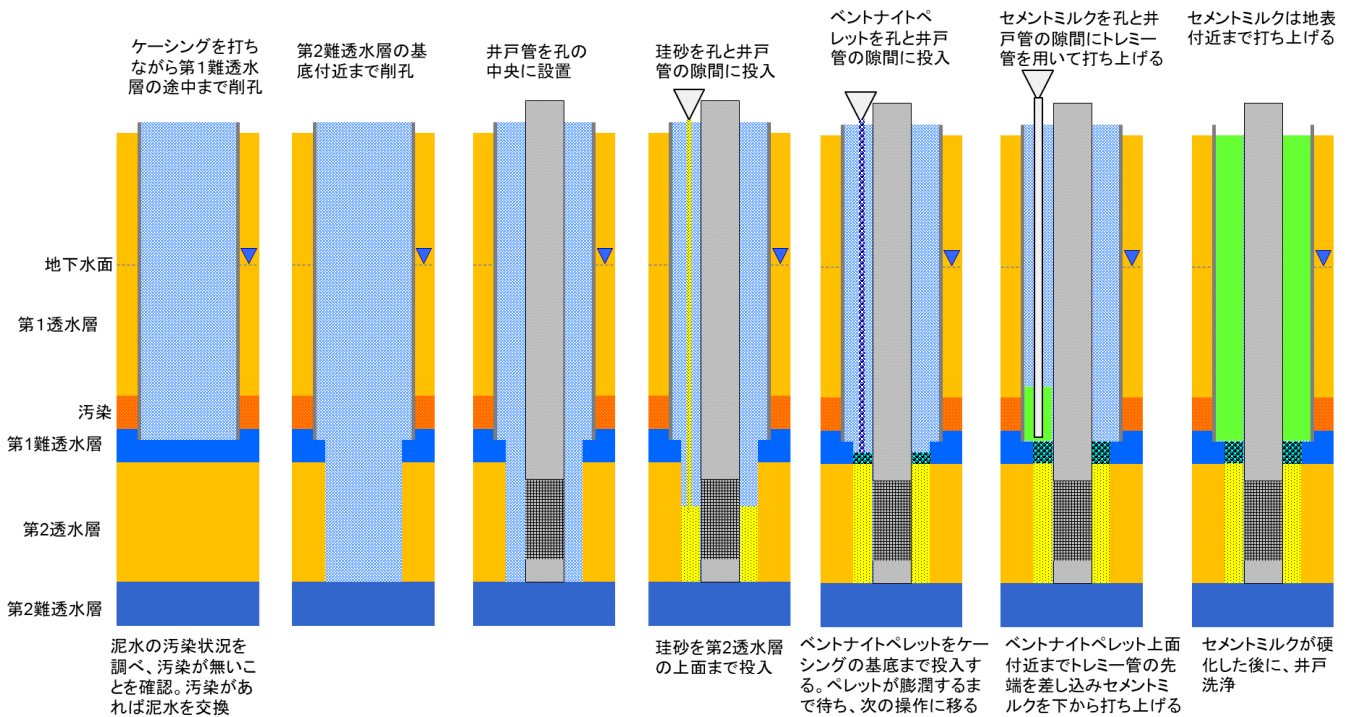


図 II-26 地下水観測井設置の手順

セメントミルクは流動性が高い状態でトレミー管を通して所定深度の最深部から打ち上げることで、井戸管と掘削孔の隙間をむらなく充填できる。

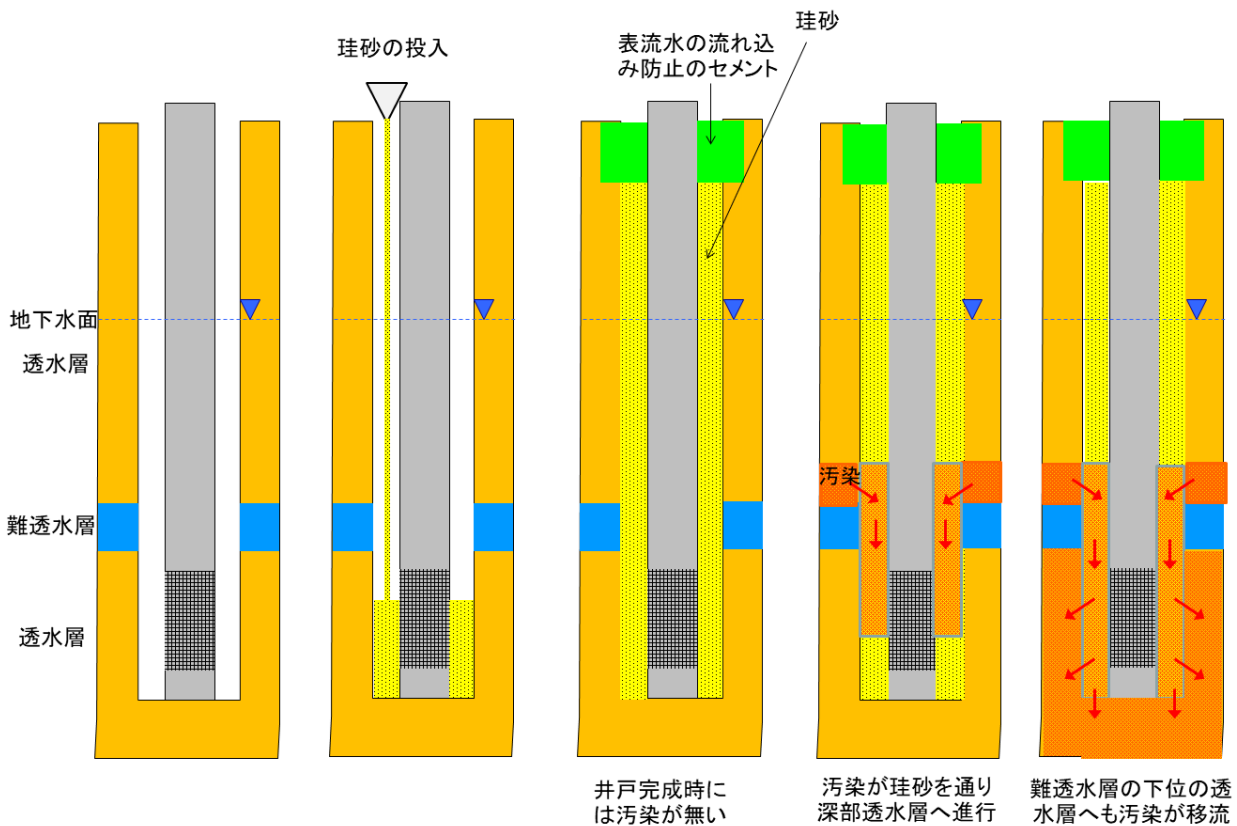


図 II-27 一般的な井戸の設置の手順

難透水層部分での止水をしない場合が多いため、汚染が移流しやすい。このため、今後は一般の井戸においても地下水採取対象の透水層よりも上の掘削孔と井戸管の隙間の部分は地下水観測井のようにセメントミルクなどで遮水するのが望ましい。

るようにする。

珪砂の充填

珪砂を井戸管と掘削孔の隙間へ地表から図Ⅱ-26のように投入する。この際、珪砂は一度に多量に投入すると途中で詰まることがあるため、少しずつ投入する。なお、珪砂が所定深度まで堆積しているか否かは重りを先端に付けた間縄などで、井戸管の周囲の数点で珪砂の上面深度を実測し、深度にむらがないかも確認する。また、珪砂の沈降速度は、泥水濃度と砂の粒径からストークスの法則により事前に概算し、この沈降を待って珪砂の上面深度の実測を行う。

遮水材の充填

井戸管と掘削孔の隙間のうち、珪砂で充填された部分の上位は、遮水材で隙間なく充填する。

珪砂の上面から上へ数十 cm の高さまで真水の地下水面があり、その地下水に塩分や PCE や TCE などの非水液が含まれていない場合には、ベントナイトペレットを珪砂の上面から数十 cm 以上の厚さで充填する。この充填も珪砂と同様に少しずつ投入する(図Ⅱ-26)。なお、ベントナイトペレットが所定深度まで堆積していることの確認には、重りを先端に付けた間縄などで珪砂の上面確認と同様に井戸管の周囲の数点で実測し、ベントナイトペレットの層の上面深度にむらがないかも確認する。

このベントナイトペレットが膨潤するタイミングを待って、その上位を流動性の高いセメントミルクで充填する(図Ⅱ-26)。その際、セメントミルクはトレミー管などを用い、その管の先端をベントナイトペレットあるいは珪砂の上面付近まで下ろし、セメントミルクを打ち上げる。地表から流し込むと、孔壁が崩壊したり、図Ⅱ-21のように隙間の途中で目詰まりを起こし隙間を完全に充填できない部分が発生し得る。このため、トレミー管の長さがベントナイトペレットの上端付近まで下ろせることを事前に確認する。

珪砂の上面に地下水面がない場合、また地下水が塩分又は高濃度の非水液を含む場合ベントナイトペレットは膨潤しないので、珪砂の層の上を直接セメントミルクで覆うようにする³⁴⁾。この際、珪砂の上に粒径の細かい珪砂を設計の厚さで投入し、その上面深度を重りを付けた間縄で確認した後、この上にセメントミルクを投入し、隙間を充填する。

遮水材としては、水中に投入すると膨潤するプラスチック製のナイスシールや乾燥した昆布を巻きつける方法もあるが、掘削孔の孔壁は一様でない場合があり、このような遮水材を使用すると遮水が不完全となった事例もあるため、一般的にはベントナイトペレットやセメントミルクを使用する。

井戸洗浄

ベントナイトペレットが十分膨潤しセメントミルクが硬化し、遮水材の効果が発揮される時間がたった後、井戸洗浄を行う。これらの前に井戸洗浄を行うと、井戸管と掘削孔との隙間の遮水材の構造を破壊し観測井を通じて、対象とする透水層と他の透水層との間に地下水の通り道が生じてしまう。こうなった場合は、井戸は作り直しとなる。

井戸洗浄の目的は、掘削孔壁についている泥壁を除去し、本来の地層の透水性を回復させることにある。

洗浄方法は、水中ポンプを井戸底付近まで降ろし揚水する方法と、気泡の噴出口を井戸底に降ろし井戸底から気泡を噴出させ、気泡が浮上する際に井戸内の水もいっしょに上昇させるエアリフトによる方法とがある。後者の方が洗浄効果が高い場合が多い。

次に、回復法などの揚水試験を井戸ごとに行い対象の透水層の透水性が再現できているかを検討する。この検討の結果再現性が悪い場合は、真空ポンプによる井戸内の減圧や、スワビングといった急激な水圧の上昇・下降を繰り返す井戸洗浄方法なども組み合わせて行う。透水性が再現できない場合は、井戸の再設置を検討する。

井戸洗浄は、揚水している水の濁りが取れ、pH、EC 及び水温の値が一定の値を示すようになるまで続ける必要がある。このため、エアリフトによる揚水の際は最後に水中ポンプで揚水する。

井戸洗浄で排出される水に汚染物質が含まれる場合は、法令等の基準を踏まえその水は適切に処理する。

地下水観測井の機能評価試験(揚水試験)

①井戸から一時的に多量の揚水を行い井戸内の地下水位の時系列的な上昇を調べることにより、井戸のスクリーン部分の透水係数を求める回復法による揚水試験などを行い、この係数がスクリーン深度の透水層の粒径から推定される透水係数と同等であるかを調べる。また、井戸設置に伴う難透水層部分の遮水能力への影響を判定するため、対象としている透水層の直上及び直下の透水層の観測井の水位も、揚水試験時に測定する。対象の透

水層の井戸を揚水した際に、その直上又は直下の透水層の井戸の水位が低下した場合、これら井戸の難透水層部分での遮水が適切に施されていないと考えられ、井戸の再設置が必要となる。ただし、難透水層の層としての止水性が十分でない場合もあり、その難透水層部分のコアの層相や電気検層結果も含めて、井戸の再設置を検討する。

②透水層の側方への連続性を確認するため、揚水試験時に同一透水層と判断した周囲の観測井の水位データも取得し、解析することにより、その透水層の透水係数・貯留係数や透水性の異方性（地層の横方向の方角の違いによる透水性の相違）を明らかにする。

***揚水試験：**観測井から揚水を行う際、時間当たりの地下水の揚水量を段階的に変え、その井戸や周囲の同一透水層及び対象の透水層の直上・直下の透水層の水位の時系列変化を観測し、対象とする透水層の透水係数や貯留係数を求める試験。浄化対策のために、揚水井から揚水速度を変えながら地下水の汚染濃度の変化を調べる方法を揚汚水試験という（P.59～61 参照）。

井戸の保護施設の設置

井戸の保護のため、井戸の周りにマス等を設置する。自動車が進入できるところでは、その車重に耐えられるなど蓋を含め強度を考慮する。マスの蓋は金属製が良い。豪雨の際にマス内に水が浸入・滞留しないように、例えばマスの蓋の高さを周囲よりも高くしたり、マスの底に砂利を敷き詰めるなどの工夫をする。現地にて井戸諸元がわかるように、井戸の諸元（井戸の名称（番号など）、地表の標高、管頭標高、井戸底の管頭からの深度、スクリーンの上端・下端の管頭からの深度）が書かれたプレートを用意し、内部に貼り付けるなどする（図Ⅱ-28）。

また、豪雨時に井戸内への雨水の流入を抑制するため、井戸の管頭は周囲の地面よりも高く立ち上げた方が望ましい。その際、井戸の保護として周囲に鉄パイプなどで囲む場合もある（図Ⅱ-29）。どのような形状にするかは現地の状況で関係者で相談し決める。

井戸蓋の取付け

井戸の設置地点が豪雨などで浸水しても、井戸の中にその水が流入しないような気密性の高い井戸蓋を取り付ける（図Ⅱ-28）。塩化ビニル管を使用する場合、現時点では、蓋の内側などにゴムやプラスチックなどのパッキンが付いたねじ込み式のキャップを使用している。この蓋部分は井戸管の塩ビ管の先端にソケット状に接合できるようにしており、塩ビ管用の接着剤にて接着する。この際、接着部から水が管の外部から入り込まないように、しっかりと接着させる必要がある。

管頭標高の測量

井戸の蓋をはずし、管の一番高い部分で、測量用の標尺を立てられる部分に油性マジックインキなどで印を



図Ⅱ-28 設置された地下水観測井の例

マンホール内のマスには井戸の緒元のプレートが貼られている。豪雨時にマス内に表流水が入ることもあるので、管頭にキャップが必要となる。地上に井戸管を立ち上げた方が望ましい。



図Ⅱ-29 地上に立ち上げた地下水観測井の例

井戸の保護用に鉄パイプで囲んである。汚染現場の中には汚染地下水が自噴する場合がある。このような場合は、管頭を立ち上げ、汚染地下水の流出を防ぐ必要がある。

付ける (P.15 の図 I-11)。この印が井戸における地下水位測定の際の基準点 (管頭) となり、この部分に標尺を立て、対象の汚染現場に設置した基準点を基に水準測量を行い、管頭標高を求める。水準測量の誤差は 1cm 以内とする。セメントミルクが十分硬化したり、ベントナイトペレットが十分膨潤するには数日かかり、管頭の高さが変わることがあるため、測量は井戸設置から数日後に行う。1 年後に再度測量すると、数 cm 値が変わることがある。また、大地震などの際には、管が動くことがあり、管頭標高が変わる場合があるため、このようなイベントの後には、再測量を行う。

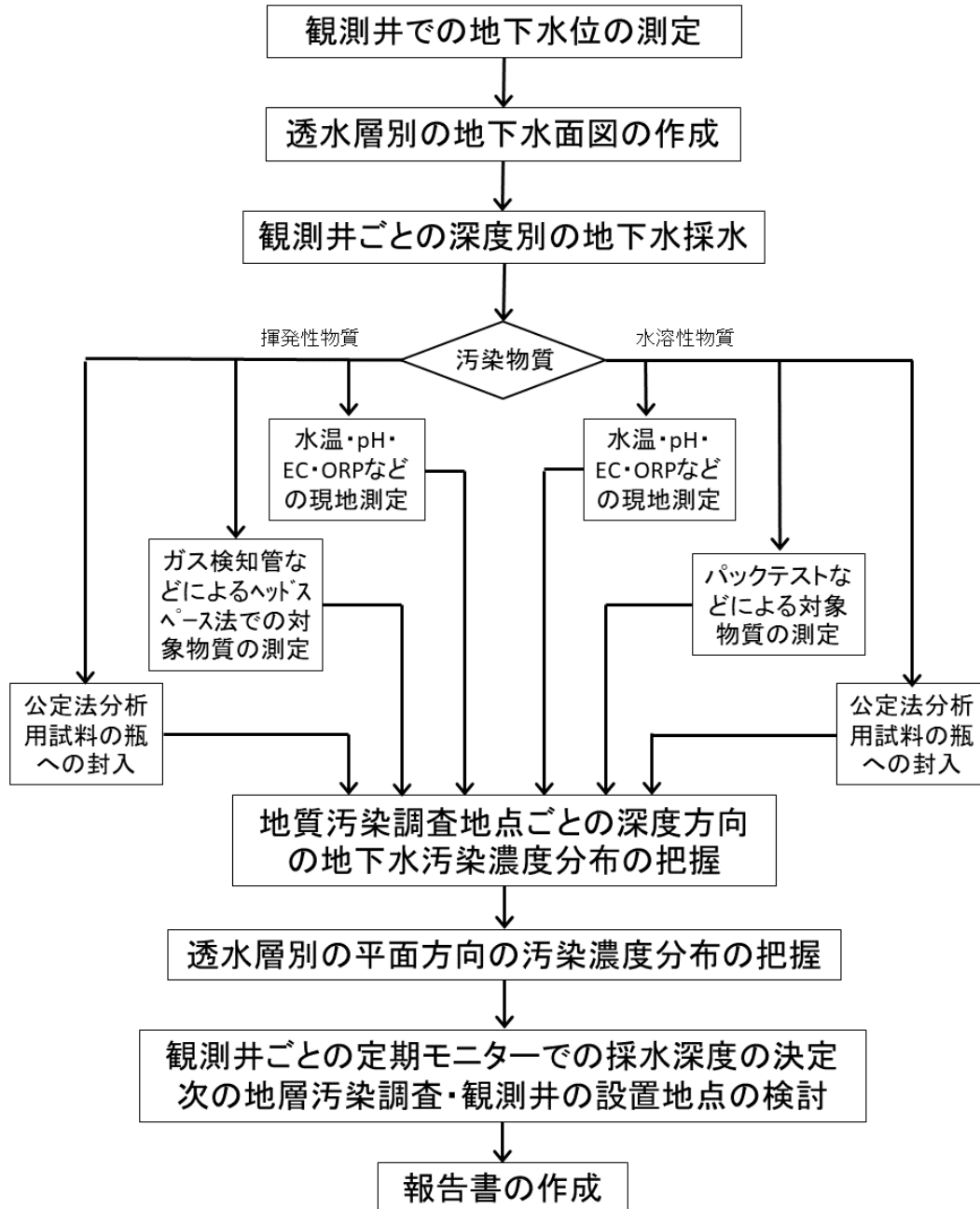
報告書の作成

井戸の設置の使用した部材の種類や数量、井戸設置の際の掘削方法、汚染の移流予防対策、掘削泥水の汚染状況、井戸洗浄時の揚水した水の水質や汚染濃度の推移、井戸設置の手順などについて詳述し、工事途中や完成後の写真、測量野帳、揚水試験時の時系列の各観測井の地下水位や揚水した地下水の汚染濃度の表などを付け観測井の機能評価試験結果などをまとめる。

II-5 地下水汚染調査

1 目的

透水層ごとの地下水の流動方向、汚染地下水の三次元的な濃度分布を把握する。



図II-30 地下水汚染調査の手順

2 調査の概要

調査の手順の概要を図II-30に示す。各地層汚染調査地点などに設置された透水層別の地下水観測井において、地下水位の測定、所定深度又は深度別に採水した地下水中の汚染物質等の濃度を測定し、透水層別に地下水面図、対象物質の汚染濃度などの地下水質の平面図（P.66の図T-5）や水文地質断面図上に地下水の汚染濃度などをまとめた図（図II-31）を作成し地下水の汚染濃度などの三次元分布を把握する。また、観測井ごとに定期モニターでの採水深度を決定し、次の地層汚染調査・観測井の設置地点を検討し、調査結果を報告書にまとめる。

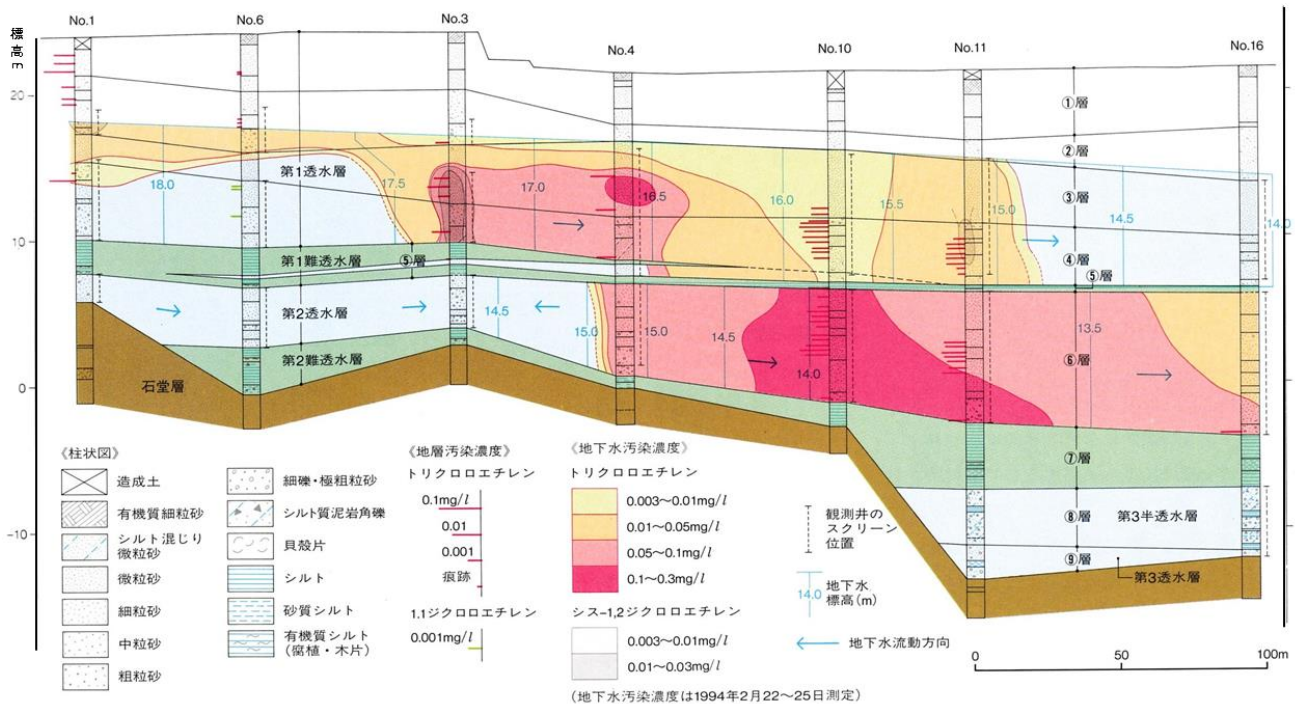


図 II-31 房総半島南部の沖積段丘面上での地質汚染断面の例

汚染物質は TCE。地層汚染・地下水汚染状況より汚染の機構が以下のように読み取れる。No.1 付近が汚染源であり、第 1 透水層の透水性の高い中粒砂主体の②層において汚染が地下水の流動によって図の右方向へ移した。下位の細粒砂層主体でやや透水性が低い③層中を右方向へ流動していた汚染が No.4 付近で停滞し高濃度となっている。この下位の透水性が高い中粒砂～粗粒砂層主体の④層では、地下水の流動によって汚染がさらに右へ流動し No.10・No.11 へ広がった。一方、第 1 難透水層は No.4 付近で急速に厚さを減じ、No.10 付近において第 2 透水層へ汚染が浸透していった。第 2 透水層はほとんどが中粒砂からなり透水性は比較的高く、汚染が地下水の流動に沿って右方向へ広がっていった (アーバンポタ 34 の文献 29 の図 15)。

3 調査の手順

観測井での地下水位の測定と透水層別の地下水面図の作成

透水層別に設置した地下水観測井において、水位計 (P12 の図 I-7) により管頭水位 (井戸の管頭から地下水面までの深度) を測定する。測定はなるべく一日で済ませる。ただし、気圧の変化に伴い地下水位が変化するので、台風や前線が通過する時などの気圧の変化が大きい日は測定を避ける。また、井戸の頂部のキャップは気密性が高く、大気圧と井戸管内の気圧が異なるため、キャップをはずすと水位が変化するので、測定の 10 分以上前にキャップをはずしておく。

現地では、測定井戸の名称、管頭からの地下水位、測定時間などを記録する。

現場の近くのアメダス観測点などで気圧変化を確認し、測定時間内に大きな気圧の変化が見られた場合は、地下水位については大気補正を行う必要がある。人為影響などで地下水位の変化が著しい場合は、その井戸に自記水位計を設置し、水位を把握する。

各観測井で得られた管頭水位は標高に換算した標高水位として地下水面図を作成する。地下水面図がうまく描けない場合には、井戸設置後に管頭標高が変化していることがあるので、管頭標高の再測量を行う。これにより地下水面図が描けるようになった事例が複数ある。また、一般井戸のうち、地下水採取層が特定できているものについては対象の透水層の水面図を作成する際、その水位も参考とする。ただし、一般井戸は P51 の図 II-27 に示すように、難透水層部分での遮水ができていないことが多く、この地下水位は必ずしも正確な値ではないことを念頭に地下水面図を作成する。

地下水面図は周辺井戸調査で作成した井戸位置図を利用し、各井戸に水位標高値を記入し地下水面の等高線図を作成する。

観測井ごとの深度別の地下水採水と地下水の汚染濃度の三次元分布の把握

深度別の地下水採水と地下水質の測定：同一透水層内でも、地層の粒径の変化に伴う地下水の流れ方や汚染物

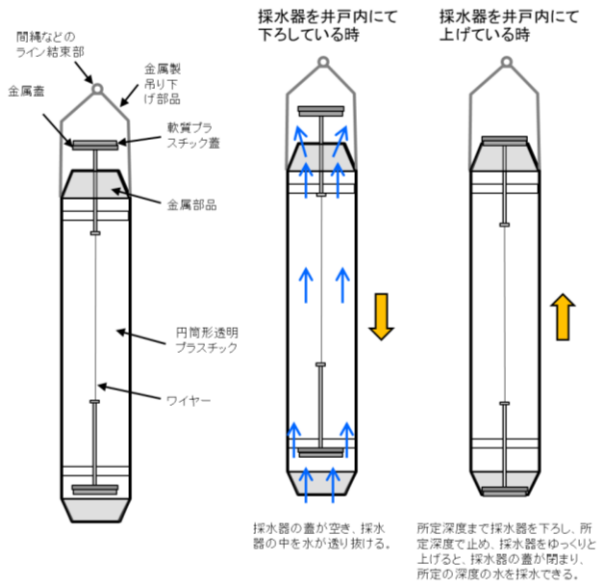


図 II-32 採水器の例

井戸内で採水器を下ろす時は上下の蓋が空き、採水器の中の水は通り抜ける。採水器を上げる時は、上下の蓋が閉まり、所定の深度の地下水を採取できる。

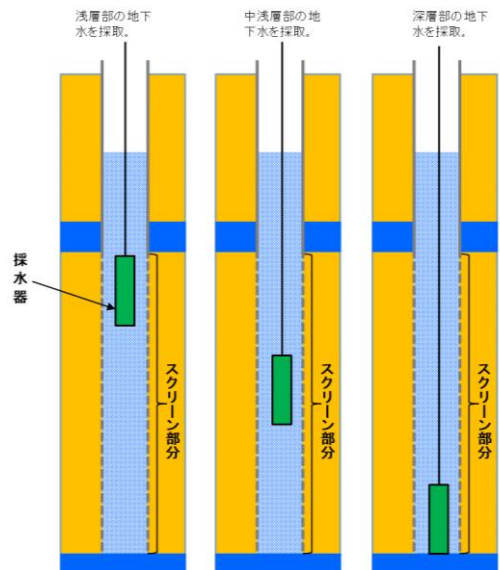


図 II-33 深度別採水の手順

スクリーン区間において浅い部分から深い方へ順に採水すると、地下水の濃度の層構造を乱すことなく採水できる。

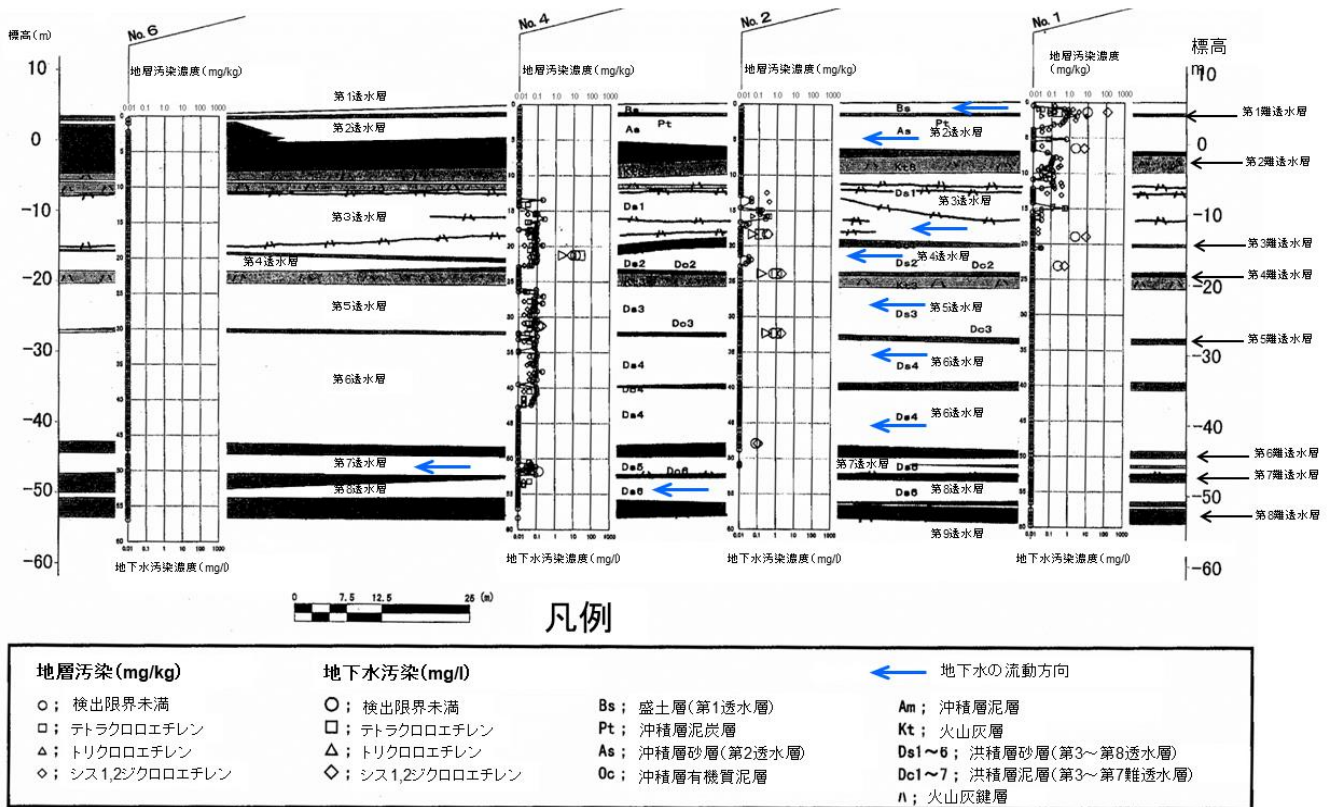


図 II-34 下総台地北部の台地を刻む谷津田における地質汚染断面⁴⁾の例

この汚染現場における地質汚染調査地点ごとの地層汚染調査及び地下水汚染調査の結果を、水文地質構造を示す断面図中にまとめたものである。これを基に汚染の深部への移流状況は以下のようにまとめられる。No.1 付近では地層汚染が地表より第3透水層の上部まで連続して見られることからこの付近が汚染源と考えられる。地下水汚染は、第1・第2透水層では No.1 以外には見られず、この層では側方への移流はほとんどない。第3透水層では、No.1・No.2・No.4 で高く、No.1 から No.4 へ側方に汚染が移流していると推定される。No.2 では、第4・第5透水層に比較的高い濃度の汚染が見られ、No.1 から No.2 までの間で第3透水層の汚染が第4・第5透水層へ移流したことが推定される。No.4 付近では第3透水層から第6透水層の中部まで地層汚染・地下水汚染が続き、第6透水層下部では汚染が見られなくなるが、第7・第8透水層の一部に汚染が見られる。

物質の比重などにより汚染物質の濃度分布は深度によって異なる場合が多い。そこで、深度方向の地下水の汚染濃度分布を把握する。これには、各地下水観測井のスクリーンの設置深度の区間内において異なる深度から採水器（図 I-7・図 II-32）により地下水を採取する（以下「深度別採水」という）。地下水の流動速度は大局的には地層の粒径に依存するので、採水はスクリーン区間内において異なる粒径の地層の重なり方を考慮し、採水深度を決める。同様な粒径の地層が厚い場合は数 m の深度間隔で採水する。房総半島での地下水の一般的な流動速度を考慮すると、井戸洗浄後に透水層内の濃度分布が井戸内に再現するには 2 日以上かかるため、深度別採水は洗浄から 1 週間後を目途に行うことが多い。

深度別採水の際、上に蓋がないベレータイプ採水器は最上部の水が他の深度の水と混合することがあり望ましくない。このため上下に蓋の付いている採水器（図 II-32）を使用する。採水は井戸のスクリーン区間において浅層部から順に深部へ向かって行う（図 II-33）。これは、一度採水器が通過した部分は、地下水質の層構造が乱されるためである。

採水器で地下水を採水するときは、所定の深度までゆっくりと採水器を降下させ、所定の深度に着いたらいったん止め、次にゆっくりとなるべく等速度に採水器を引き上げる。このとき、途中で引き上げを止めると採水器の蓋が開き異なる深度の地下水が採水器内に流入するので、引き上げを止めないように注意する必要がある。

こうして得られた所定の深度の地下水は、ロートなどを利用し泡立たぬようメジューム瓶に流し込み、気泡が入らないよう栓をし、冷暗ボックスに保管する。この際、現地で簡易分析を行うと、採水間隔を変更できるため、高濃度部分を把握しやすい。

現地簡易分析は、まず採水器中の地下水を泡立たないようビーカーに流し込む。汚染物質が揮発性の場合は、ビーカーの水を 500ml 用のメジューム瓶に入れ、P36 の図 II-19 の d-f の手順でヘッドスペースの気体をガス検知管にて濃度を測定し、物質ごとの気液平衡の関係から水中濃度に換算する。水溶性物質の場合はビーカーの水を直接パックテストにて濃度測定を行う。また、余ったビーカー内の水で、水温・pH・EC・ORP・DOなどを測定する。水温は、ガス検知管での濃度測定の際の補正計算上必要な項目である。

観測井ごとの定期的な地下水質のモニターをすべき深度は、この深度別採水による深度方向の地下水汚染濃度を把握した後に決める。

地質汚染調査地点ごとの深度方向の地下水汚染濃度分布の把握：深度別採水により得られた地下水の汚染濃度の結果を基に、図 II-31 のように地質柱状図の脇に地層汚染濃度や地下水汚染濃度を表示したり、図 II-34 のように地層汚染調査の際に作成した水文地質断面図上に地層汚染濃度や地下水汚染濃度を表示すると、水文地質構造における高濃度汚染部分の位置やその移流状況を検討することができるようになる。

透水層別の平面方向の汚染濃度分布の把握：上記作業により、モニターする深度を決めて、その深度にて定期的に地下水を採水し汚染濃度を測定する。その際、透水層ごとに地下水断面図を作成し、調査地点での地下水汚染濃度を書き入れ、汚染地下水の流動状況を把握する¹⁰⁾。P.60 の図 T-5 の第 2～第 4 透水層のように汚染の濃度表示は丸などの大きさを利用し、値は丸の中や脇に書き入れると汚染地下水の流動状況が分かりやすい³⁵⁾。濃度に大きな変化が生じた場合には、すべての井戸で再度深度別採水を行い、地下水汚染濃度の三次元分布を調べる。

観測井ごとの定期モニターでの採水深度の決定及び次の地層汚染調査と観測井の設置位置の検討

定期モニターでの採水深度については、深度別採水による深度方向の地下水汚染濃度測定において、濃度が高かった深度とする。

次に行う地層汚染調査と観測井の設置位置については、地下水の流動方向、地下水の汚染濃度分布、地質汚染の機構解明、浄化対策の方法、地下水の利用状況などを考慮し決める。

報告書の作成

地下水位の測定方法、深度別の地下水採水とその水質測定方法の手順を述べ、透水層別の地下水断面図、水文地質断面図上における深度方向の地下水汚染濃度分布図、透水層別の地下水断面図上に重ね合わせた汚染濃度分布図、観測井ごとの地下水位や汚染濃度の時系列変化グラフ、透水層別の地下水位・汚染濃度測定結果の表などを付けて、調査結果をまとめる。

トピック 2 揚水対策時の揚水井の設置位置決めと地下水汚染調査を応用した揚汚水試験の事例

本水や宙水などの汚染地下水の浄化対策としては、揚水し地上で汚染水を処理する方法が最も多く行われている。この対策は、透水層ごとに汚染地下水の濃度分布を調べ、濃い部分を明らかにし、地下水の流動方向も考慮し、揚水井の設置位置を決める。

宙水の汚染地下水の対策例が図 T-2 の上図である。この現場の汚染源付近の水文地質構造と汚染の深度方向の分布を示したものが図 T-3 である。PCE は汚染源部分から地中に浸み込み、地下水が見られない不飽和帯である関東ローム層中は、ほぼ鉛直方向に移流している。第 1 難透水層中では、深部へ行くに従い末広がりのように濃度の濃い部分は横方向へ広がって第 2 透水層中にしみ込んでいる。この図と図 T-2 から、第 1 難透水層中での移流の際には、第 2 透水層の地下水流動方向の影響を受け、図の右方向へ長く高濃度部が伸びている。第 2 透水層中では地下水の流動に従いこの図の右方向へ汚染の濃い部分が伸びている。第 2 透水層の汚染地下水は、さらに第 2 難透水層の切れ目から第 3 透水層へ移流していることがわかる。特に G 地点では第 3 透水層へ汚染が深くまで移流していることが汚染濃度分布から理解できる。汚染の機構解明や汚染の効果的な浄化にとって、汚染源付近の浅層部の汚染状況の把握が特に重要となる。

図 T-2 の青線が濃い汚染が見られた第 2 透水層の地下水面図で、赤い色の部分が第 2 透水層の地下水における 10mg/L 以上の PCE 濃度が見られた部分、この周囲の灰色は 1~10mg/L の濃度部分である。揚水井は黒丸の 3 井とした。これは PCE 濃度 10mg/L 以上の地下水汚染の範囲内において、地下水の流動方向の最も上流部分と下流部分及びその中間付近という考えに基づき設置位置を決めた。第 2 透水層はその厚さは図 T-2 に示すように 1m 程度しかないので 1 井で揚水できる量は少なく、揚水により側方に影響を与える範囲が数 m 程度と狭いことが予想されるため、3 本の揚水井の配置とした。図 T-2 の下図は揚水井で最大限揚水している最中の地下水面図である。この結果、10mg/L 以上の高濃度汚染地下水の分布範囲全体に加え、1mg/L 以上の濃度の汚染地下水の分布範囲の大部分が地下水揚水による影響範囲内にあることが明らかとなった。

本水の汚染地下水の浄化対策の例について以下に述べる。P9 の図 10 の平面方向の濃度分布を見ると、汚染源を起点として地下水の流下方向に沿って幅数 m あるいは数十 m の帯状に分布する高濃度帯が見られる。このような場合、揚水井はこの帯の中の汚染源付近と、帯の末端部及びそれらの中間付近に設置し、揚汚水試験³⁹⁾を行い、揚水量を決定していく。揚汚水試験では図 T-4 に示すように、揚水対策を行う井戸で揚水速度（1 分間の揚水量）を変えるごとに揚水の汚染濃度を測定し、濃度が高くなるような効果的な揚水速度を決定していく。

この帯を確認するためには、汚染源の近くや、汚染源から離れた揚水可能な場所で、地下水の流動方向に対し直交方向に数 m 間隔の観測井を設置し、地下水質・地下水位をモニターする。この後、濃度が高い井戸から揚水する。この帯から数 m 離れただけでも地下水汚染濃度は 2 桁以上低くなるため、仮にそこで揚水を行っても対策効果は小さい。また、浅い透水層ほど地下水の流動方向が降雨状況などにより変化するため^{36)・37)}、揚水井については、モニター結果を参考に、揚水量を変えたり、異なる井戸から揚水を行うことがある³⁸⁾。このため、モニター井戸は揚水井としても利用可能な口径にしておくことが望ましい。

なお、揚水井の周囲に人工地層や沖積層などの軟弱層が分布する場合、揚水に伴う地盤の沈下が発生する可能性があるため、揚水速度は地盤沈下の被害が出ない範囲に抑える必要がある。必要に応じ周辺住民との協議を行い、各住宅に水準点を設け定期的に観測する。もしも沈下の傾向が見られたら、揚水量を変え、地下水位がより高く維持されるようにする。軟弱層が揚水井付近に分布していない場合は、揚水井の近傍に水準点を設置し、沈下の有無を定期的に確認する。

図 T-4 の揚汚水試験の例では、60L/分で揚水した時が、汚染濃度が最も高くなったため、この量で揚水することを想定し、この濃度の揚水量の汚染水を処理できる浄化装置を検討した。その結果、50L/分を揚水できる処理装置を設置し、浄化対策を進めることとした。また、地盤沈下のモニターとして水準点を設置し、定期的に水準測量を行い地盤の沈下の有無や観測井・揚水井の地下水の水位及び水質をモニターし、各揚水井の揚水量を変えている^{38)・39)}。

このように揚水対策中には、観測井にて地下水の水位や水質、地盤の沈下のモニターを定期的に行い、揚水

トピック

井別に揚水速度の変更の検討や、揚水井を増やすなどの検討を行い、より効果的・効率的な対策となるように努めている。

揚汚水試験の際には、図 T-2 のように、揚水前と揚水中の地下水面の変化を調べ、揚水中の地下水面図において、なるべく広い面積の汚染濃度の高い部分の地下水が揚水井へ向かった流動方向となっていることを確認する⁴⁾必要がある。汚染濃度の高い部分が揚水の影響圏から外れている際には、揚水井又は揚水量を増やす必要がある。

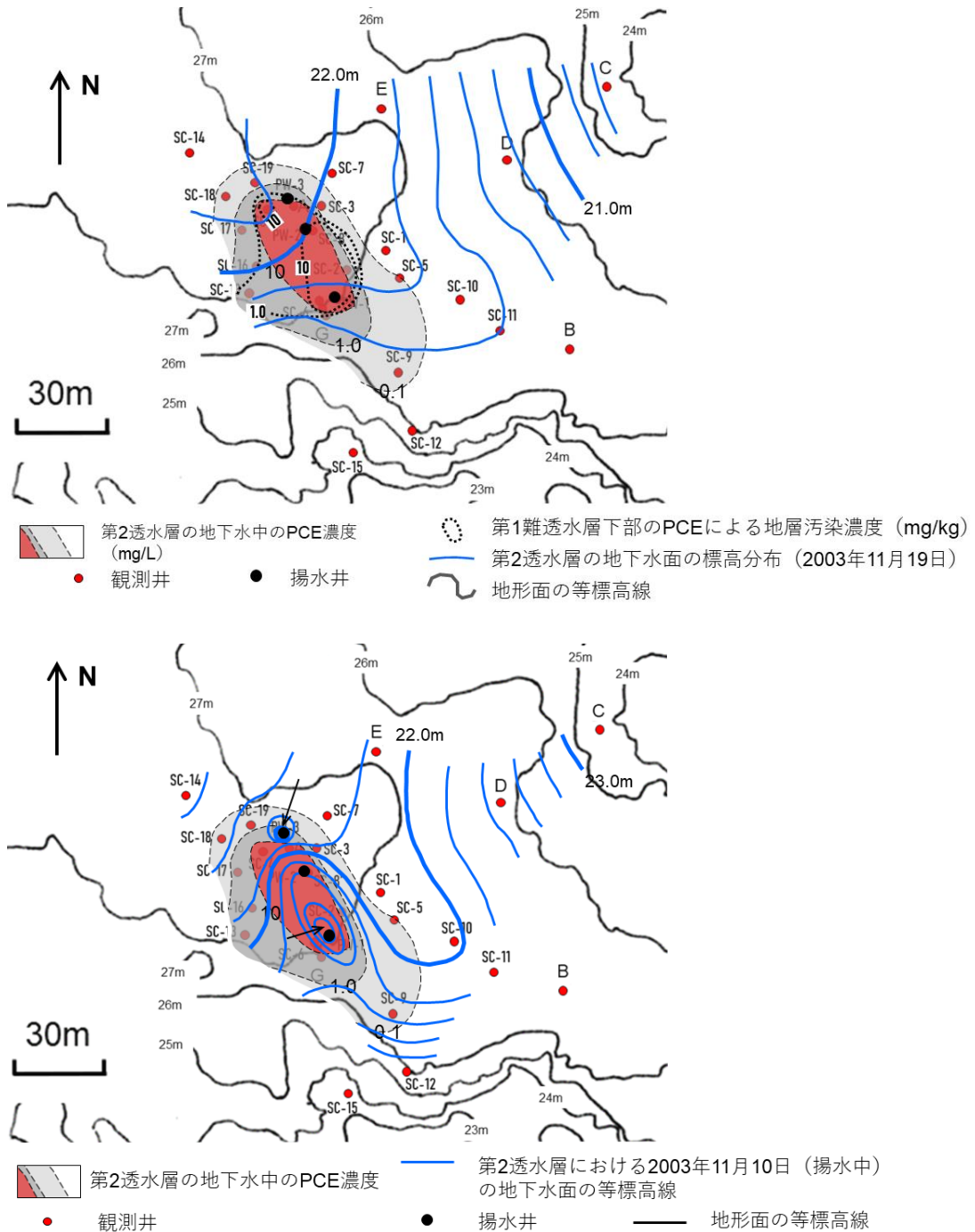


図 T-2 下総台地上での地質汚染現場における浅層部の第2透水層の揚水前の地下水面図(上図)と揚水中の地下水面図(下図)
上図には、第1難透水層下部の汚染濃度を点線で示してある。その1.0mg/kgと10mg/kgの点線内の付近が汚染源部分である。また、上図と下図の中央付近にある赤や灰色の楕円は第2透水層のPCEの汚染濃度を示す。

下図より、3地点の揚水井からの揚水により、PCE濃度の1mg/L以上の汚染部分はほぼ揚水の影響圏内に入っていることがわかる⁴⁾。

汚染源付近の水文地質断面図は図 T-3 を参照。

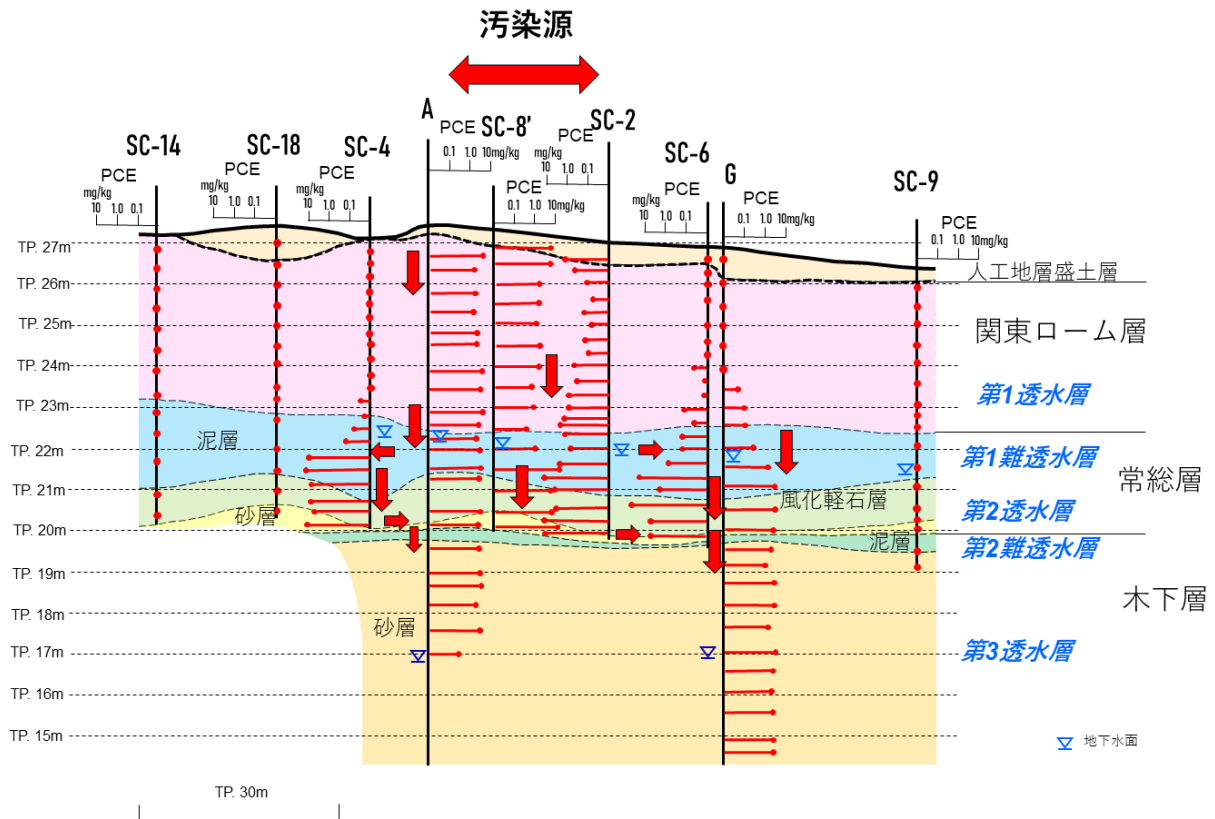


図 T-3 汚染源調査の実施例と浅層部の地質汚染機構説明例⁴⁾ (文献 41 の図に加筆)

図 T-2 の汚染現場における汚染源付近での浅層部の地層汚染調査を行った場所が SC-2、4、6、8'、9、14、18、深部までの調査を行った場所が A と G である。これにより、水文地質構造を示す断面図を作成し、各ボーリング地点での深度方向の PCE の汚染濃度を赤丸と棒で示した。また、各井戸での地下水位を地質断面図上に示した。第 1 透水層中には地下水はないが、第 2・3 透水層中には地下水面がある。第 3 透水層は上部に不飽和帯があり、この透水層の地下水は不圧地下水となっている。第 2 透水層の水面は第 1 難透水層中の高さとなり、この透水層の地下水は宙水であるにもかかわらず、被圧地下水の状態となっていることがわかる。また第 2 透水層の地下水は図の右方向へ流動していることが地下水面の分布からわかる。

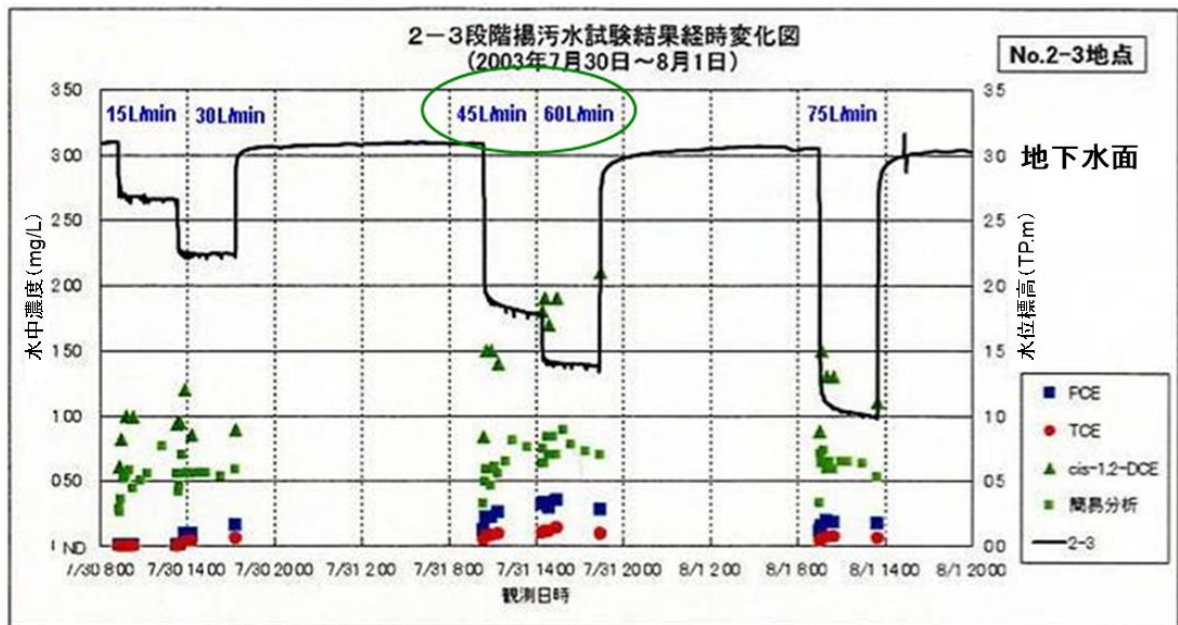


図 T-4 揚汚水試験の実施例⁴⁾

グラフの横軸は時間、縦軸は揚水井の地下水の水位と揚水の汚染濃度である。この試験を行った井戸は、P57 の図 II-34 の No.2 地点の第 3 透水層の井戸である。

II-6 汚染源地層汚染調査

1 目的

表層汚染調査において絞り込まれた汚染の地下への入口から地下水面まで及び、汚染物質の原液溜まり直下の難透水層中での汚染物質の流動経路といった詳細な地質汚染機構を明らかにし、効果的な浄化対策の立案のための情報を得る。

2 調査の概要

調査方法は地層汚染調査と同様であるが、難透水層の分布深度を考慮し、高濃度の汚染を下方へ移流させないように、慎重にオールコアボーリングを進める必要がある。

対象物質が揮発性物質で、宙水の地下水面よりも上の部分については、P.28の図 T-1 に示すように、深度別に地下空気汚染濃度をガス検知管にて測定すると、効率よく高濃度部分を把握することができる。調査手順は地下空気・表層汚染調査及び地層汚染調査と同じである。

3 調査の手順

汚染源地層汚染調査を行う際、汚染現場の状況によってはこの調査孔を利用し浄化対策のための揚水井や地下空気吸引井として利用するなど、調査・対策の全体を見据えて効率よく進める。また、調査の際、難透水層上面の高濃度汚染水を深部へ移流させないように注意深く調査を進める。

図 II-35 は PCE 汚染現場の汚染源における調査例である。高濃度の汚染が第 2 難透水層の上に存在していることから、ここでの調査深度は第 2 透水層基底付近とした。地層汚染状況から汚染の機構は以下のように読み取れる。工場建屋内の D-19～D-20 付近が汚染源であり、ここにおいて第 2 透水層まで汚染がほぼ鉛直方向に浸透した。詳しく見ると、まず第 1 透水層内にのみ 100mg/l を超える地層汚染が確認された。すなわち第 1 難透水層の上面に DNAPLs プールが確認されたことになる。また、第 2 透水層中には 10mg/l を超える地層汚染が確認され、ここには高濃度汚染が確認されたことになる。第 1 難透水層の泥炭層と第 2 透水層中の植物化石を多く含む層においては地下水の流動方向である図の左方向へ汚染が移流している。図 II-34 と合わせると、この工場建屋内において第 2 難透水層の一部より PCE が第 3 透水層へ浸透し、第 3 透水層を汚染させていったことが明らかとなった⁴⁾。

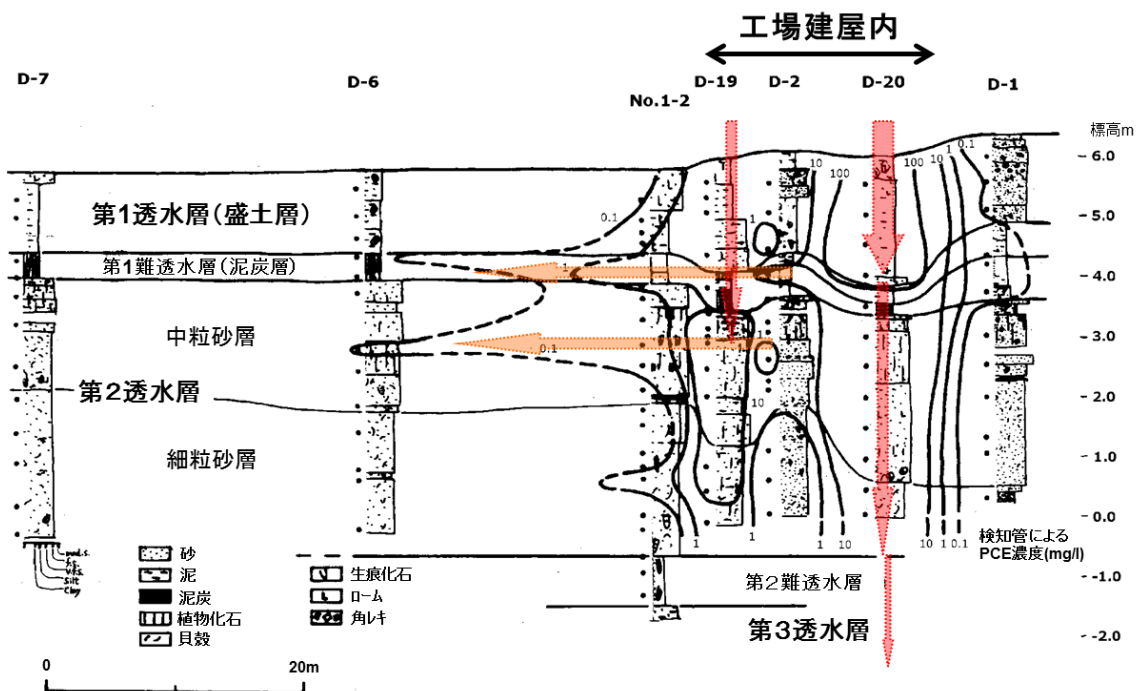
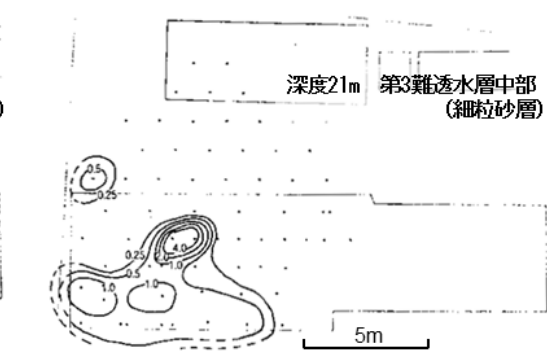
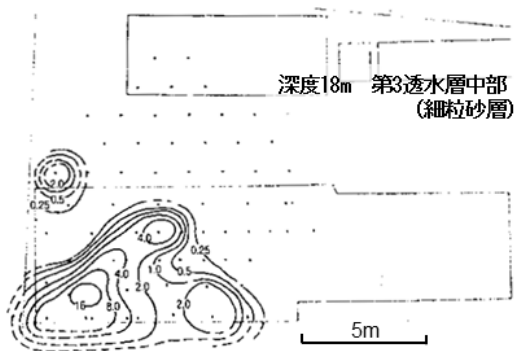
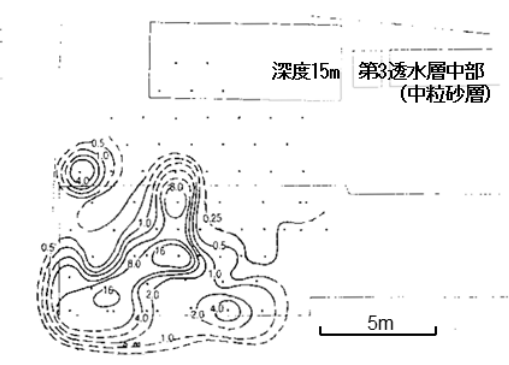
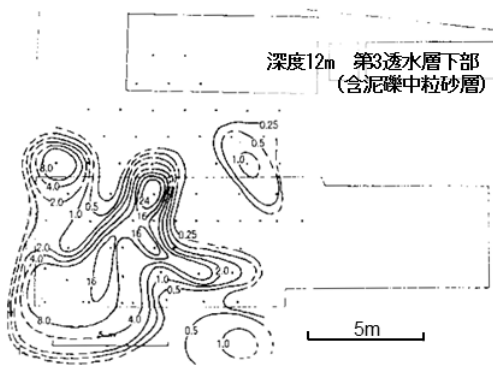
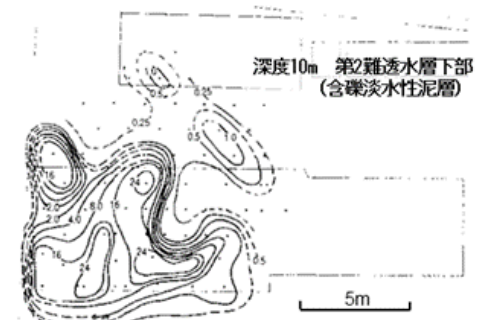
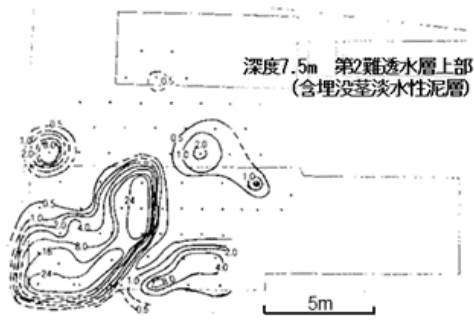
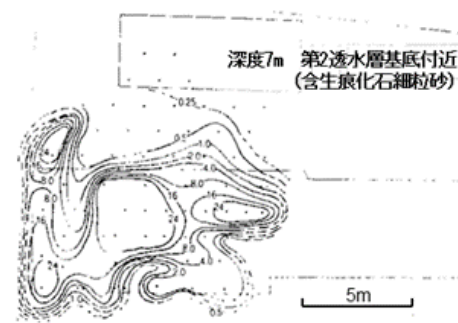
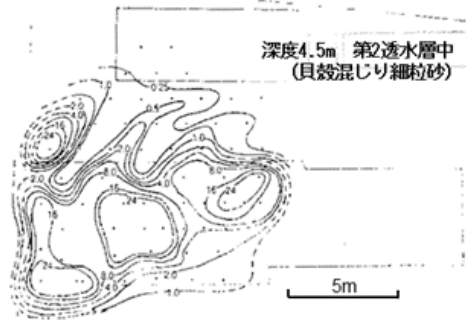
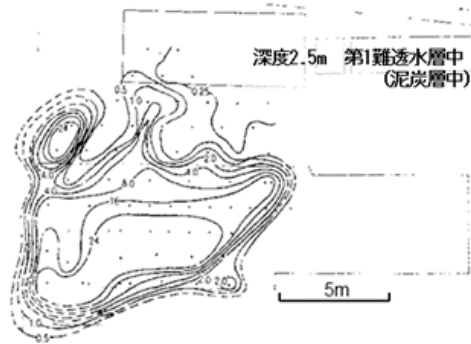
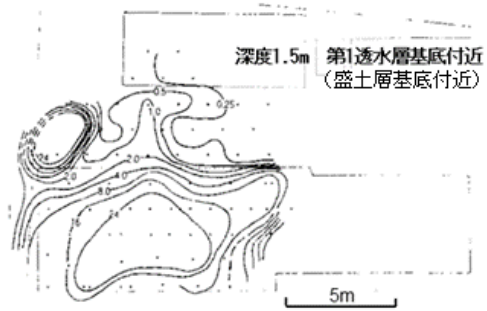
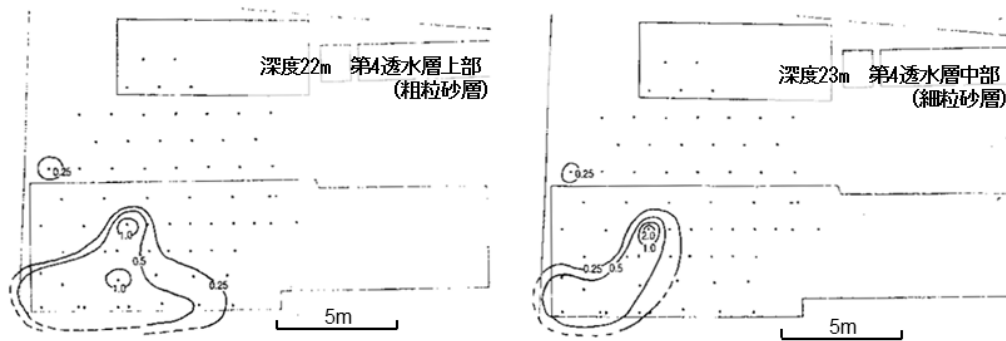


図 II-35 図 II-34 と同じ下総台地北部の台地を刻む谷津田における汚染源部分の地質汚染断面⁴⁾
赤やオレンジ色の矢印は、汚染物質の移流方向を示す。





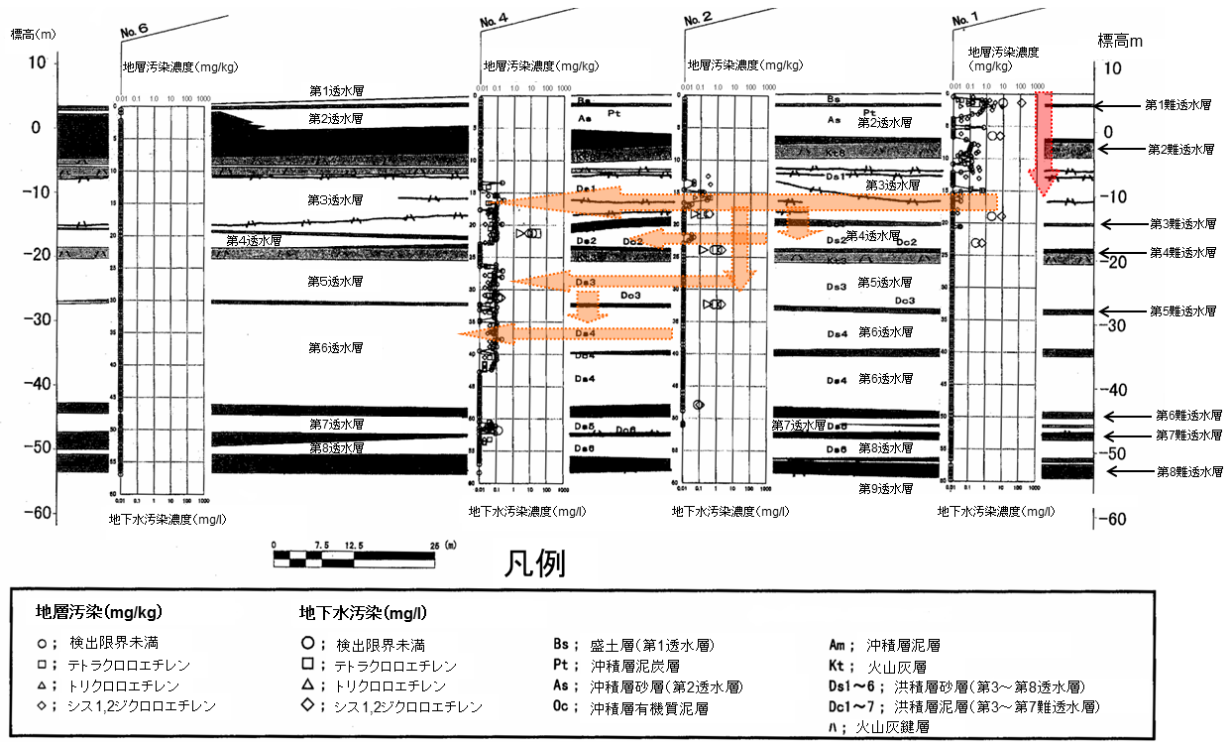
図II-36 図II-34及び図II-37の汚染源部分における深度別の汚染濃度の平面分布図

等濃度線の数字の単位は mg/L。この現場では、汚染源部分において、難透水層の直上に DNAPLs プールが見つかるとともに、難透水層の一部に高濃度の汚染が確認された。このため、汚染状況を調べながら、汚染の濃い部分については高圧噴射置換方法で地層を掘削し、その部分にセメントミルクを注入した。高圧噴射のための掘削孔は図中の黒点部分である。この孔位置で高圧噴射置換装置の先端のボーリングの刃先を回転させながら掘削していき、深度 0.5m 進むごとにボーリングロッド（鉄の棒）の側面のノズルより高圧の気体と水の混合物を噴射させながら回転させた。この時に掘削孔を中心に半径約 1m の円内の破壊された地層と水の泥水状の混合物が掘削孔より噴出するためこの混合物を 500ml のメジューム瓶に 200ml 採取し、そのヘッドスペースの気体を PCE 用のガス検知管で測定した値よりこの汚染濃度分布図は作成されたものである⁴³⁾⁴⁴⁾。ただし、一部に石油系の洗浄液も混入していることが後にわかった。PCE 用ガス検知管にとって石油系ガスは、反応に対する妨害物質なので、この図の PCE 濃度は実際よりも高い可能性がある。

図II-36は、図II-35の汚染源部分である工場建屋内の深度ごとの汚染の平面分布図である。これらより汚染源部分での汚染の3次元分布を把握でき、VOCsによる地質汚染の深部への移流過程を検討できた。すなわち、まず深度 1.5m の第1透水層の基底付近に DNAPLs プールが形成され、8mg/L を超える高濃度汚染部分が広がった。そして、この下位の第1難透水層は泥炭層のため、PCE はそのまま鉛直方向に浸透し第2透水層内へ濃い汚染は浸透して行った。第2透水層内では汚染は鉛直方向に浸透したため、高濃度汚染部分の範囲に変化はあまり無い。この下の第2難透水層である深度 7.5m での高濃度汚染部分は大きく面積を減じている。このことから、この第2難透水層が汚染の下方への移流を食い止めていたことがわかる。第2難透水層のコアからは、この泥層は淡水の湖沼に堆積した地層であること、葦の埋没茎が含まれていることがわかり、この葦の茎の細かい孔を通して汚染が鉛直方向へ浸透して行ったことが推定されている⁴⁴⁾。深度 10m は、第2難透水層中に挟まれているレキを含む透水性がやや良い層であるため、汚染の面積が広がっている。深度 12m～21m は第3透水層にあたり、汚染は深部に向かい収束していることがわかる。この調査は、高圧噴射置換工法の際に得られたもので、この工法により汚染濃度の濃い部分は取り除かれている。この汚染現場は、本水の地下水位が第1透水層中にあるため、汚染源の除去には地下空気流動による方法は不可能であること、軟弱な沖積層の泥炭層である第1難透水層と泥層である第2難透水層が高濃度に汚染され、揚水対策を行った場合地盤沈下の被害が想定できることから、汚染源の浄化には高圧噴射置換工法が採用された。

以上の調査結果から、図II-37にこの汚染現場の地質汚染機構解明結果が示されている。No.1 付近が汚染源であり、ここにおいて第3透水層まで汚染がほぼ鉛直に浸透した。この汚染は第3透水層の図の左方向へ流れる地下水流動に伴って左へ移流していった。No.2 付近にある民家のマルチスクリーン井戸や井戸のウラゴメを通して、第4・第5透水層へ汚染が深部に移流した。No.4 付近では第5難透水層の不連続部より第6透水層へ汚染が移流し左方向へ広がっていった。

対策としては、汚染源では図II-35のように第2難透水層上に DNAPLs プールが見つかったことから、工場建屋にて地表から第3透水層までの高濃度汚染地層を調べながら高圧噴射置換工法により汚染を除去した。地下水汚染濃度の高い第3・第4透水層は揚水し、その水をばっ気処理している。その際、対象地は軟弱な沖積層上にあるため、水準測量にて地盤沈下のモニターを行いながら、揚水量を調整している。地下水汚染濃度の低い第5・第6透水層については、水処理フィルターを蛇口に付けて使用していただくことで浄化を進めている⁴⁾。



図II-37 下総台地北部の台地を刻む谷津田における地質汚染機構解明結果 (文献4)に加筆)

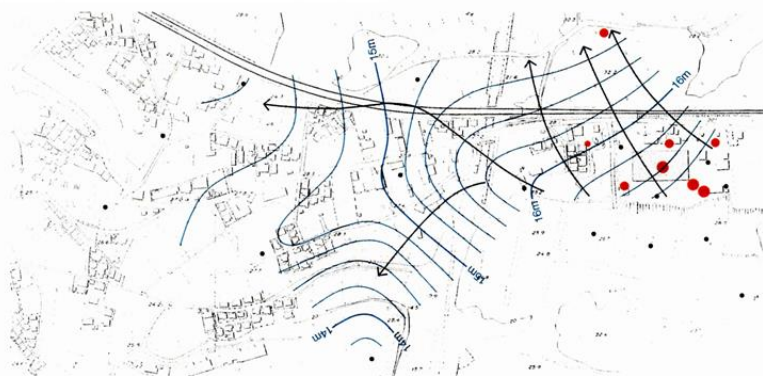
赤の矢印は汚染源での地層汚染の進行を示した。オレンジ色の矢印は、汚染源から地下水に汚染が移流し地下水汚染が進行していった過程を示した。

トピック 3 六価クロムによる地質汚染現場における複数枚の難透水層部分の汚染浸透位置の推定事例

図 T-2 は下総台地上での第 1 透水層（宙水層）、第 2 透水層、第 3 透水層、第 4 透水層の一部が六価クロムにより汚染された事例である。第 1 透水層は東北東～東南東又は南南西～南南東へ、第 2 透水層は北北西～北西又は西～南西へ、第 3 透水層は西北西へ、第 4 透水層は西南西へと層によって異なる方向に地下水が流動し、汚染物質が移流していることがわかる^{1)・35)} (図 T-5)。

第 1 透水層では 50mg/kg 以上の汚染が事業所の東部において南北方向に延びる帯状に見られた。汚染宙水はこの高濃度の帯内を南へと流れ、難透水層の切れ目から第 2 透水層へ降下していることが、図 T-5 の第 1 透水層の地下水面と地下水の汚染濃度の平面分布及び、図 T-6 の第 2 透水層の地下水面図と汚染濃度分布の図から推定される。図 T-6 の第 2 透水層中にある薄い赤の楕円部分が、その推定される浸透位置である。

第2透水層(第1帯水層)の地下水流動と地下水汚染



第3透水層(第2帯水層)の地下水流動と地下水汚染



第4透水層(第3帯水層)の地下水流動と地下水汚染



地下水水位 (1988年6月24日測定)
 地下水水位等高線 (T.P.)
 地下水の流動方向

Cr⁶⁺濃度 (1988年3月-6月測定)
 ● 1mg/l 以上
 ● 0.1mg/l 以上1mg/l 未満
 ● 0.1mg/l 未満

● 汚染された井戸
 ● 観測井

第1透水層(宙水層)の地下水面と地下水の汚染濃度の平面分布

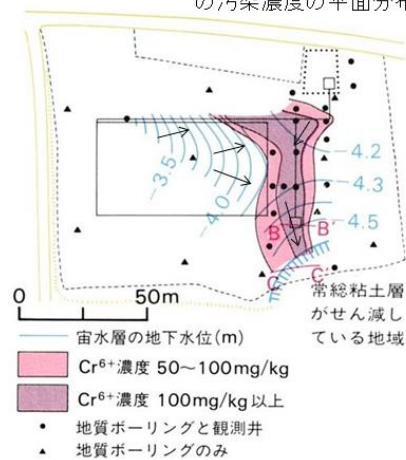


図 T-5 下総台地中部の台地上における地質汚染現場での透水層ごとの地下水面図と地下水汚染濃度分布³⁵⁾
 (アーバンクボタ 27 の文献 35 の図 4 の一部と図 9 に加筆)

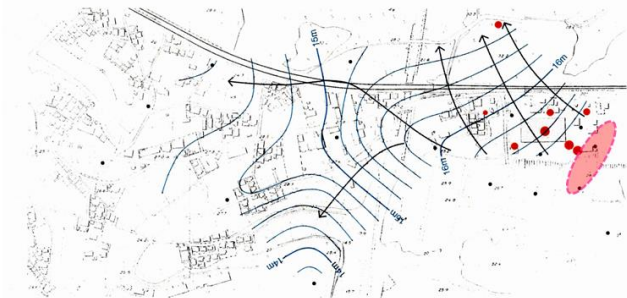
トピック

図 T-5 の第 2 透水層と第 3 透水層の地下水面図と汚染濃度分布の図から、これら透水層に挟まれる難透水層における汚染の浸透位置が、図 T-6 の第 3 透水層中にある薄い赤の楕円部分と推定される。

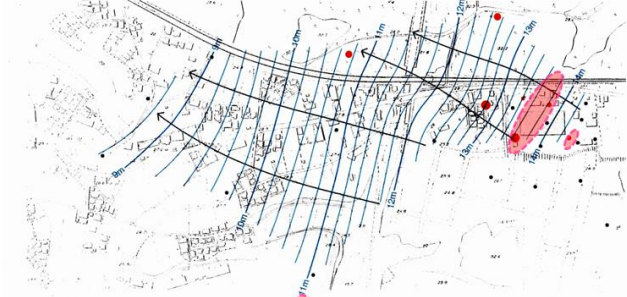
図 T-5 の第 3 透水層と第 4 透水層の地下水面図と汚染濃度分布の図から、これら透水層に挟まれる難透水層における汚染の浸透位置が、図 T-6 の第 4 透水層中にある薄い赤の楕円部分と推定される。

以上のような各透水層内の汚染の動きや、難透水層における汚染の浸透部分を 3 次元的に示したものが図 T-7 である。このようにして、汚染の深部への移流の過程である汚染機構を解明することができる。このような地下での汚染の進行状況が分かれば、汚染地下水を効果的に除去する方法を検討できるようになる。

第2透水層(第1帯水層)の地下水流動と地下水汚染



第3透水層(第2帯水層)の地下水流動と地下水汚染



第4透水層(第3帯水層)の地下水流動と地下水汚染

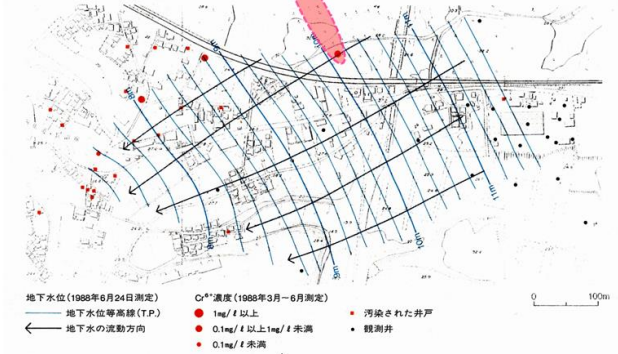


図 T-6 直上の難透水層における汚染物質の浸透部分の推定位置

薄い赤の楕円部分が推定される浸透位置。図 T-5 の透水層ごとの地下水面・地下水汚染分布図より推定。(アーバンクボタ 27 の文献 35 の図 9 に加筆)

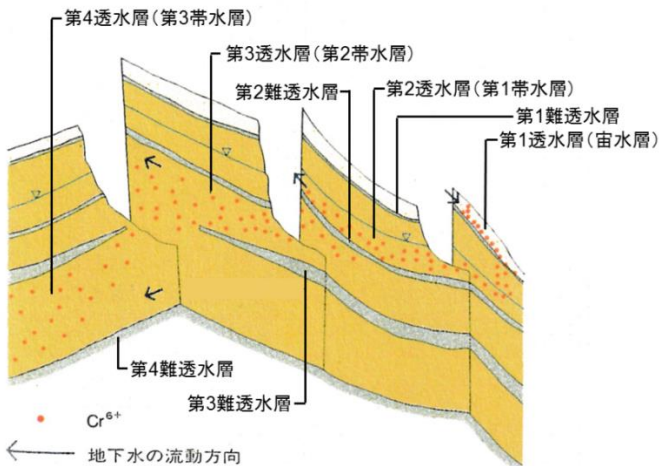


図 T-7 汚染機構解明の例

図 T-5・図 T-6 より、汚染が難透水層の切れ目などから下位層へ移流し、各透水層の異なる地下水の流向によって拡がっていったことを模式的に示した¹⁾35)。 (アーバンクボタ 27 の文献 35 の図 10)。

II-7 地質汚染機構の検討と浄化対策の立案

調査位置図・汚染源調査位置図の作成

P13 の図 I-9 のように対象地全域の井戸が入る縮尺の地形図に、調査したすべての井戸や表層汚染調査結果の濃度分布、地層汚染調査位置、地下水観測井、地下水揚水井、地下空気吸引井などの位置を記入した汚染調査位置図を作成する。また、汚染源付近の表層汚染調査結果の濃度分布、汚染源地層汚染調査位置、浄化対策井などの位置を記入した汚染源調査位置図を作成する。

地下水面図・地下水汚染濃度分布図の作成

P60 の図 T-2 のように調査位置図上に透水層ごとの地下水面図を描き、井戸位置にその透水層の汚染濃度を表示（円の大きさや数字などで表現する）する。また、この図面より作成した透水層とこの一層上の透水層の2層の地下水面図と汚染濃度分布より、その間の難透水層のどの場所から汚染が下位の透水層へ浸透したのかを推定し図で示す（P61 の図 T-3）。

調査現場全体の地質汚染機構の検討

調査の位置図上に、汚染源や地層汚染調査地点を通り地下水の流下方向及びこれに交差する方向の断面線を引き、この線に沿って鍵層を頼りに透水層・難透水層の連続性や層の厚さの変化が表現された水文地質断面図を作成する。ここには地層汚染調査地点の地質柱状図と深度ごとの汚染濃度、断面線付近の観測井や民間井戸のスクリーン位置を投影して表示する。P57 の図 II-34 では、火山灰鍵層を基に作成された水文地質断面図上に、地層汚染・地下水汚染調査結果としての深度ごとの地層汚染濃度と透水層別の地下水汚染濃度を表示している。この図面を基に地質汚染機構を検討した結果が P65 の図 II-37 である。

汚染源付近の地質汚染機構の検討

汚染源調査位置図上に、最も浅層部の高濃度汚染部分や地層汚染調査位置を通り、浅層部の地下水の流動方向あるいはこれに交差する方向の断面線を引き、この線に沿って鍵層などを頼りに透水層・難透水層の連続性や層の厚さの変化が表現された水文地質断面図を数枚作成し、深度ごとの地層汚染濃度や地下水汚染濃度を書き入れ、地質汚染機構解明を検討する。

P62 の図 II-35 では、地層汚染調査地点の地質柱状図と深度ごとの地層汚染濃度測定点を投影し地層汚染濃度分布とともに、汚染の移流方向を矢印で示している。

P61 の図 T-3 では、水文地質断面図上に地層汚染濃度分布と透水層別の地下水面の位置を入れ、地下水の流動状況を示し、浅層部での地質汚染機構を示した。

P63~64 の図 II-36 や P28 の図 T-1 のように深度ごとの平面方向の汚染の濃度分布図を作成すると、三次元的な汚染の広がりや透水層・難透水層の汚染分布に与える影響を検討できる。

このような図面から汚染源における浅層部での詳細な地質汚染機構の検討ができる。なお、対策時のボーリングや掘削の際には、地層の種類や汚染濃度といったデータをなるべく取得し、詳細な地質汚染機構が明らかとなると効果的・効率的な浄化に結び付くことが可能となる。また、対策の有効性や妥当性を担保するものともなる。

地質汚染機構のまとめと浄化対策の考え方

透水層ごとの汚染分布（P66 の図 T-5）や透水層直上の難透水層部分での汚染の浸透部分（図 T-6 や P63~64 の図 II-36）を示し、図 T-7 や P65 の図 II-37 のように全体の地質汚染機構解明の検討結果をまとめる。これを基に透水層・難透水層ごとに、汚染の濃度や規模、地下水の利用状況、対策期間、費用などを考慮し浄化対策について検討し、まとめる。

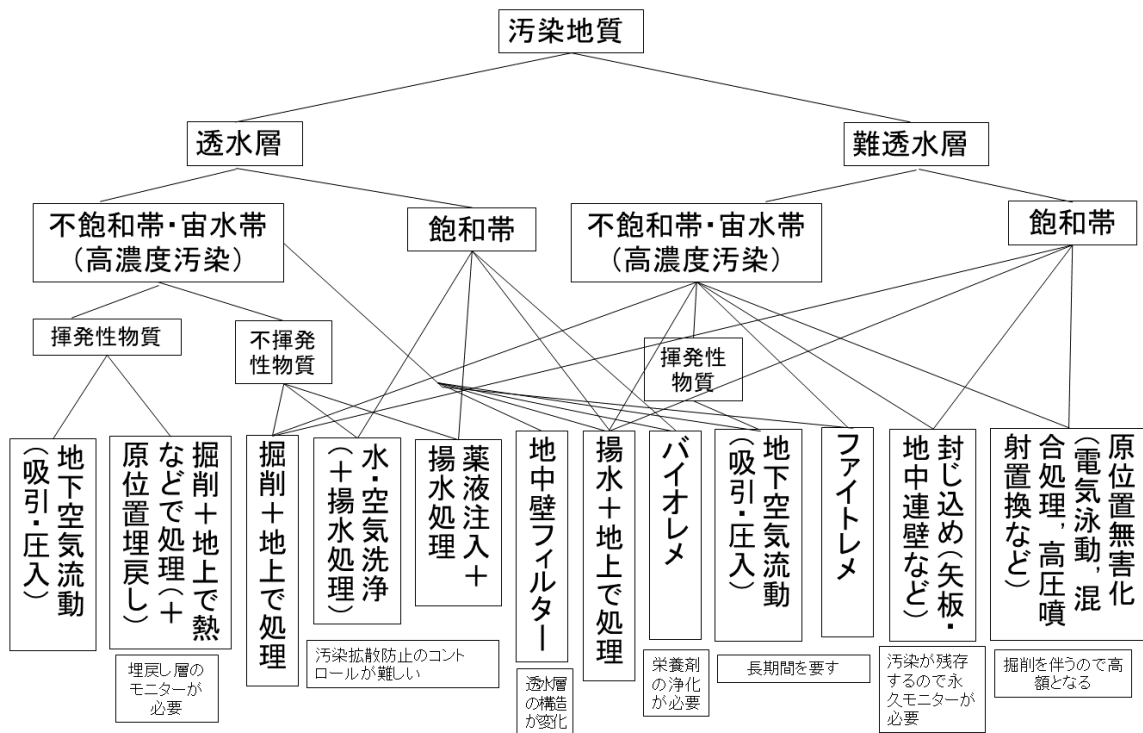
汚染浄化対策の考え方として重要なことは、以下の点である。

①地質汚染機構解明に従って汚染の進行状況を層別に把握し、層別にどこでどのような対策を行うのかを計画する。

②各透水層の状況を把握できるモニタリングシステムの構築が必要である。このモニターにより、はじめて対策のコントロールも可能となる。

③汚染源の浄化を優先する。ただし、健康被害の阻止などの社会的要請が優先されることもある。

④各透水層の高濃度汚染の帯の分布を把握し、そこで汚染地下水の浄化を行う。この汚染の帯の外での揚水



図Ⅱ-38 地質環境及び汚染物質の特徴と浄化対策方法の選定の考え方

浄化対策は、まず対象とする地層の透水性により大きく異なる。次に対象とする層における地下水の存在状態（飽和帯か不飽和帯か）により異なる。さらに、汚染物質の揮発性によって異なる。また、対策方法によってはメリット、デメリット、副作用がある。この他、対策期間、費用、社会条件、メンテナンス費用なども考慮し決めていく。対策を進めている中で、モニター結果から、揚水井を変えたり、方法を変えたりすることがある。

バイオレメ：バイオレメディエーション（微生物を利用した浄化方法） ファイトレメ：ファイトレメディエーション（植物を利用した浄化方法）

などの対策は、非常に効率が悪い。

⑤対策方法の選定時には、効果だけでなく副作用も含めて検討する。例えば、還元的な透水層において、酸化環境に変えるような対策を行うと、水酸化鉄が発生し、地層の透水性が悪くなり、浄化が進まなくなったり、モニターができなくなったりすることがある。バイオレメディエーションでは、栄養物質の注入により地下水質が変わり、異臭を発生するようになることがある。また、中和剤の注入により、湧水にこの物質が混入し魚が死滅した例もある。このような副作用についても、モニターを行うことで、その予兆の早期発見や、副作用に対する対策の検討が可能となる。

⑥モニターがされていない、あるいはモニターが少ないような対策には要注意である。モニターを行わずに、シミュレーションのみに基づく対策は、失敗に気づかず、汚染が移流していたり、副作用を助長し飲用できない地下水のままとなることにつながる。これは、地層は等方均質ではないことが原因である場合が多い。シミュレーションどおりに対策が進むことは少なく、対策中のモニター結果を踏まえて、シミュレーション方法や、対策方法の修正を行うことになるのが通例である。

⑦対策や既存地下構造物に伴う二次汚染の移流を防ぐ、又は把握する必要がある。これについても、透水層ごとのモニターにより把握でき、対応方法の検討が可能となる。

⑧地下水の揚水対策においては、上位の透水層の汚染が難透水層を挟んだ下位の透水層へ流動しないように地下水面をコントロールする。汚染源付近にある最上位の透水層は、不圧状態にあるため、揚水による地下水位の低下域が横方向に拡がりにくい。これに対してこの下位の被圧地下水状態の透水層の地下水は、横方向に広い

範囲で水位低下が起り易い。このため、不圧地下水の状態の汚染の濃い地下水塊の一部は、下位の透水層の水位よりも高くなる可能性がある。このような場合、上の汚染が下へ浸透しやすくなるため、被圧地下水の水位が不圧地下水の水面よりも高くなるようにコントロールする必要がある。

⑨汚染現場内に利用井戸がある場合は、フィルターなどで汚染地下水を浄化し利用を続けるようにする。

⑩対策終了時に対策前の水文地質構造・地下水流動を復元することが、地下水の持続的利用上重要である。

⑪飲める地下水に復元することが、健全な水循環上必要なことである。

参考までに、図Ⅱ-38 に、汚染された地層の性質別に浄化方法を示した。まず汚染されている地層の透水性によって、浄化方法が大きく異なる。次にその地層が飽和帯の中にあるのか、不飽和帯の中にあるのかによって浄化方法が異なる。さらに汚染物質が揮発性なのか否かによっても浄化方法は異なる。

千葉県内での現状としては、透水層に関しては、不飽和帯における揮発性物質の場合は地下空気流動が最も多く行われている。これは、流体を多く流動させることができるため、浄化効率が良いためと考えられる。不飽和帯中における不揮発性物質の場合は掘削除去が多い。飽和帯においては、揚水し地上で汚染水を処理するのがほとんどである。一部で多数の観測井による厳重な管理の下でバイオレメディエーションも行われている。

難透水層における浄化方法については、汚染物質の移動が少ないため、飽和帯・不飽和帯や汚染物質の揮発性に関わりなく掘削除去が多い。しかし多額の費用がかかることから、汚染された難透水層の上下の透水層において揚水又は地下空気流動を長期間行うことによって浄化が進んでいる事例が出てきている⁴⁾。

資試料の保存

浄化がうまく進まない時に、その原因を検討しなくてはならないため、各種調査結果や図面・報告書、オールコアの一部は浄化が完了するまで保管する。地質柱状図やコア記載シートで記録されていても、その時点で認識されていない鍵層や地層の透水性に関わる現象が埋もれていることがしばしば経験するためである。同様に、土壌汚染対策法の調査や企業が主体となって行う調査においても、コアや各種調査結果は可能な範囲で保管し、透水層の側方への連続性が正確となるように努める。これら資試料は効果的な浄化対策を担保するものともなるからである。

浄化完了後は、すべての鍵層・透水層・難透水層が揃っているこの現場の代表的な地点のオールコアは可能な範囲で保存し、一部のコアについては剥ぎ取り標本として残しておく、地質環境問題の発生時にボーリングの本数を減らせるので、長い目で見て効率的な対応といえよう。

用語説明：

地質汚染： 土壌汚染（土壌層の汚染）、地層汚染（地層の汚染）、地下空気汚染（地下空気の汚染）、地下水汚染（地下水の汚染）を総称した名称。なお、汚染とは人為行為によって環境の質に有害な変化がくわえられたことである。人為行為によって有害な変化が加えられた地質を汚染地質と呼ぶ。また、自然現象により有害となった地質を有害地質と呼ぶ。有害地質の中でも高濃度で純度の高いものは資源として採取されたり、薬の原料となったりする。

汚染物質は一般に重力や地下水流動の影響を受けながら、地表から地下深部へ浸入してくる。この時、まず地表付近の地層を母材として生物活動などにより生成された土壌が汚染される。次に土壌層の下位に分布する地層と地下空気が汚染される。さらに汚染物質が深部へ透過していき地下水面下の地下水が汚染される。汚染源の多くは、地下水面よりも上位に存在し、降雨などを契機に涵養された水に溶け込み深部へ供給され続けることになる。このため、地下水汚染は汚染源が無くなるまで続くことになる。地下水の汚染を取り除くためには、汚染源の浄化と汚染地下水の浄化が重要となる。浄化には、汚染源部分をそっくり取り除く場合もあるが、この費用は一般に非常に高額であるため、非常に濃度が濃い部分にのみ適用される場合が多い。従って、汚染源部分での高濃度の濃集部分を見出すことが重要となる。汚染物質が流体であれば揚水や地下空気吸引により、流体を動かすことが可能で、この方法は安価にすむ。特に、地下水よりも地下空気を流動させる方が安価に短時間に浄化が進められている場合が多い。

透水層： 液体・気体に関わらず流体が透過しやすい地層。透水層のうち地下水で満たされている部分を帯水層、地下空気が流動している部分を透気層とも呼ぶ。地下水汚染の機構解明や浄化には、透水層の構造・透水層中の流体移動が重要となる。

難透水層： 気体・液体といった流体が通りにくい地層。千葉県内では粗粒シルトよりも細粒なシルト層・粘土層がこれに相当する。

アクイタード： 透水層と難透水層との中間的な流体の通過しやすさの性質をもつ地層。千葉県内では極細粒砂層や粗粒シルト層がほぼこれに相当する。

土壌・土壌層： 母材である地層を基に、気候を背景として生物活動によって熟成されたもの。腐植物を含み母材の地層とは色調・硬さが異なる。緑色植物を生育させる能力である肥沃度を有することで、母材の地層とは本質的に異なる。母材の地層の表層部の土壌化した部分を土壌層と呼ぶ。

地層粒子： 地層を構成する粒子。粒子の大きさの区分は 2 の指数となる。レキは直径 2^1mm 以上、砂は直径 $2^1\text{mm}\sim 2^4\text{mm}$ 、泥は直径 2^4mm 未満である。泥の中でも $2^4\text{mm}\sim 2^8\text{mm}$ をシルト、 2^8mm 未満を粘土と呼ぶ。さらに、レキは巨レキ (2^8mm 以上)、大レキ ($2^8\text{mm}\sim 2^6\text{mm}$)、中レキ ($2^6\text{mm}\sim 2^2\text{mm}$)、細レキ ($2^2\text{mm}\sim 2^1\text{mm}$) に細分される。砂は極粗粒砂 ($2^1\text{mm}\sim 2^0\text{mm}$)、粗粒砂 ($2^0\text{mm}\sim 2^1\text{mm}$)、中粒砂 ($2^1\text{mm}\sim 2^2\text{mm}$)、細粒砂 ($2^2\text{mm}\sim 2^3\text{mm}$)、極細粒砂 ($2^3\text{mm}\sim 2^4\text{mm}$) に細分される。シルトは粗粒シルト ($2^4\text{mm}\sim 2^5\text{mm}$)、中粒シルト ($2^5\text{mm}\sim 2^6\text{mm}$)、細粒シルト ($2^6\text{mm}\sim 2^7\text{mm}$)、極細粒シルト ($2^7\text{mm}\sim 2^8\text{mm}$) に細分される (P34 図 1-2)。

地層対比： 離れた地点間で、地層の側方（横方向）への連続性を目で追って確認できないとき、同じ地層であることを何らかの方法で確かめること。

鍵層： 泥層・砂層などの一般に見られる地層ではなく、火山灰層や貝殻層などの特有な特徴を有する地層。その特徴から地層の側方への連続性を追うことができるため、地層対比の根拠となる。

引用文献

- 1) 佐藤賢司・古野邦雄・原 雄・奥田庸雄・高梨祐司・楡井 久, 1983, 下総台地における6価クロム地下水汚染機構. 地質学論集, 日本地質学会, 23号, 105-113.
- 2) 楡井 久・佐藤賢司・古野邦雄・森崎正昭・香川淳・佐藤徳樹・鈴木喜計・手塚裕樹・伊藤哲也, 1994a, 多層集水井戸による地質汚染の深層化. 第4回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 31-36.
- 3) 高嶋恒太・高信勝巳・本田崇・飯島章夫・石田真弓・佐藤賢司, 2003, 開析谷を有する下総台地でのTCE汚染分布と地下水汚染機構. 第13回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 61-66.
- 4) 秋田昌寛・清水健一・宇野嘉伯・青木勝宏・風岡 修・酒井 豊・楠田 隆・西川順二・楡井 久, 2001, 印西市浦部地区での地質汚染の機構解明調査事例, 第11回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 39-44.
- 5) 楡井 久・佐藤賢司・古野邦雄・鈴木喜計, 1994b, 環境における地質単元. 地質学雑誌, 日本地質学会, 第100巻, 425-435.
- 6) 楡井 久, 1995, 君津市内箕輪の地質汚染 ①有機塩素系溶剤による地質汚染とは. アーバンクボタ, No.34, 10-14.
- 7) 伊藤哲也・山濱 裕・須藤雅彦・和田直之, 1996, 地質汚染模型の製作. 第6回環境地質学シンポジウム論文集. 日本地質学会環境地質研究委員会, 215-220.
- 8) 楡井 久, 1989a, 環境資源としての地下水—21世紀への贈り物—. シンポジウム「地層汚染と地下水汚染」. 日本地質学会・日本地質学会関東支部, 1-24.
- 9) 楡井 久, 1989b, 地層汚染・地下水汚染調査のための地下地質解明. 第1回地下水汚染調査技術研修会テキスト, 日本地質学会関東支部, 47-59.
- 10) 佐藤賢司・楡井 久, 1989, 6価クロムによる地層汚染・地下水汚染調査研究と対策. シンポジウム「地層汚染と地下水汚染」. 日本地質学会・日本地質学会関東支部, 117-133.
- 11) 品田芳二郎, 1989, 地層汚染と地下水汚染調査法1—オールコアリングによる地層中の有機塩素化合物の調査—. 第1回地下水汚染調査技術研修会テキスト, 日本地質学会関東支部, 101-122.
- 12) 楡井 久・佐藤賢司・鈴木喜計・古野邦雄・品田芳二郎, 1993, 6・4 地下水汚染調査法. 水収支研究グループ編「地下水資源・環境論—その理論と実践—」, 共立出版株式会社, 213-225.
- 13) 上砂正一, 2002, さまざまな浄化手段の実例. 第8回地質汚染シンポジウム 地質汚染と土壌汚染対策法, 日本地質学会環境地質研究委員会・財団法人環境地質科学研究所・NPO 法人売買対象地質汚染調査浄化研究会, 12-23.
- 14) 日本地質学会環境地質研究委員会, 1997, 大地のいたみを感じよう 地質汚染 Geo-pollutions. リーフレットシリーズ②, 日本地質学会.
- 15) 古野邦雄・高中二三夫・佐藤賢司・楡井 久, 1991, トリクロロエチレンによる地下水汚染シミュレーション. 第1回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 87-90.
- 16) 高嶋 洋, 2002, 市町村での地質汚染対策事例 野田市の例. 第8回地質汚染シンポジウム 地質汚染と土壌汚染対策法, 日本地質学会環境地質研究委員会・財団法人環境地質科学研究所・NPO 法人売買対象地質汚染調査浄化研究会, 53-60.
- 17) 日本瓦斯協会, 1954, ガス工業 (下巻), 丸善株式会社.
- 18) 檜山知代・鈴木喜計, 1997, 有機塩素系化合物による地質汚染現場の地下空気汚染調査 (その2). 第7回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 21-26.
- 19) 風岡 修・吉田 剛・鈴木恵佐夫・藤ヶ崎稔・高倉 歩, 2014, DNAPLsとLNAPLsとの複合汚染現場での地層汚染ガス濃度の3次元分布—10m四方の画一的な地中ガス調査では把握できなかった高濃度汚染例—. 第24回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染—医療地質—社会地質学会, 85-88.
- 20) 鈴木喜計・磯辺光一・渡邊達男・矢野 勝・村田順一・佐藤賢司・楡井 久, 1989, 有機塩素化合物による地質

汚染簡易調査法. 公害と対策, 1505-1512.

- 21) 岩本広志, 2003, ガス漏れ検知用の穿孔ツール「棒突」と, 環境分野への応用スクリーニング手法. 第13回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 41-44.
- 22) 岩本広志, 2002, 地質汚染現場における機構解明調査法 とくに有機塩素系化合物の現地簡易分析法について. 第8回地質汚染シンポジウム「地質汚染と土壌汚染対策法」, 日本地質学会環境地質研究委員会・財団法人環境地質科学研究所・NPO 法人売買対象地質汚染調査浄化研究会, 24-32.
- 23) 岩本広志・宇澤政晃・山口秀幸・鈴木喜計・楡井久, 1994, 地質汚染調査法(その1)ー泥水による“孔内共洗い汚染”が起こった時の地層汚染の濃度評価についてー. 第4回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 257-262.
- 24) 高島英世・檜山知代・池田秀史・宇佐美潤・風岡修・楠田隆・加藤晶子, 2008, 同一帯水層内の地層汚染濃度変化と地層構成ーボーリング調査時のコンタミ防止技術に基づくー. 第18回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染ー医療地質ー社会地質学会, 63-66.
- 25) 楡井久, 2003, 第3者による地質汚染審査の重要な役割. 第13回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 161-166.
- 26) 楠田隆・風岡修・古野邦雄・佐藤賢司・酒井豊・香川淳・香村一夫・森崎正昭・加藤晶子・石渡康尊・笠原豊・仁平雅子・楡井久, 2002, 地質汚染診断における分析用試料のサンプリング方法ー環境地質学的・層序学的観点の重要性ー. 第12回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 97-100.
- 27) 千葉県水質保全研究所地質環境研究室, 1989, 有機塩素化合物測定のための地質試料採取方法. 第1回地下水汚染調査技術研修会テキスト, 日本地質学会関東支部, 111-112.
- 28) 風岡修・楠田隆, 2002, 千葉県内の地質汚染機構解明とこれに基づく浄化対策の例ー下総台地谷津田での有機塩素系化合物による地質汚染の例ー. 第8回地質汚染シンポジウム「地質汚染と土壌汚染対策法」, 日本地質学会環境地質研究委員会・財団法人環境地質科学研究所・NPO 法人売買対象地質汚染調査浄化研究会, 33-52.
- 29) 千倉地質汚染調査チーム, 1995, 南房総のクリーンな町ー地質汚染浄化に成功した千倉町ー. アーバンクボタ, No.34, 50-59.
- 30) 藤田和行・積田清之, 1992, 地下水観測井仕上げ留意事項. 第2回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 7-12.
- 31) 日暮淳・上砂正一・平沢裕史・小林滋・桜井康雄・宮崎修, 1992, 地下水汚染調査におけるさく井技術. 第2回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1-6.
- 32) 佐藤賢司・森崎正昭・楡井久, 1995, 地質汚染現場における帯水層単元と観測井の設置について. 第5回環境地質学シンポジウム論文集. 日本地質学会環境地質研究委員会, 191-194.
- 33) 一般社団法人全国さく井協会, 2021, さく井工事施工指針. <https://www.sakusei.or.jp>shishin.pdf>
- 34) 亀山瞬・吉田剛・荻津達・木村満男, 2013, 油で汚染された宙水槽でのベントナイトペレットが膨らむ条件. 第23回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染ー医療地質ー社会地質学会, 165-170.
- 35) 佐藤賢司・稲生義彦・楡井久, 1995, 地下水汚染の現場からー汚染機構の解明と対策の確立のためにー. アーバンクボタ, No.28 2刷, 58-61.
- 36) 佐藤賢司・村田順一・森崎正昭・楡井久. 1997, 地質汚染現場にみられた人為的地下水変動と地質汚染の拡大. 第7回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 51-54.
- 37) 伊藤直人・風岡修・吉田剛, 2020, 地質汚染現場で観測された地下水流動方向の変化ー下総台地中央部, 八千代市北部の例ー. 第30回環境地質学シンポジウム論文集, 社会地質学会, 35-38.
- 38) 村越道弘・飯高次夫・篠田正彦・秋田昌寛・清水健一・田中良郎・青木勝宏・宇野嘉伯・風岡修・酒井豊・楠田隆・八槇明子・西川順二・庄山公透・小倉孝之・楡井久, 2007, 印西市浦部地区での地下水汚染の浄化対策事例. 第17回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染ー医療地質ー社会地質学会, 175-180.
- 39) 品田芳二郎・岩本広志・鈴木喜計・佐藤賢司・楡井久, 1991, 「バリヤ井戸」ー汚染地下水処理に至る調査と施工の環境地質学的アプローチー. 第1回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 71-76.

- 40) 青木勝宏・田中良郎・宇野嘉伯・村越道弘・飯高次夫・篠田正彦・秋田昌寛・清水健一・風岡 修・酒井 豊・楠田 隆・八槇明子・西川順二・楡井 久, 2007, 地下水汚染に関する浄化対策検討の事例. 第 17 回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染—医療地質—社会地質学会, 169-174.
- 41) 風岡 修・吉田 剛・伊藤直人・小島隆宏・八武崎寿史, 2022, VOCs により汚染された難透水層の浄化対策例: 下総台地での事例. 第 32 回環境地質学シンポジウム論文集, 社会地質学会, 3-8.
- 42) 風岡 修・酒井 豊・村越道弘・篠田正彦・楠田 隆・笠原 豊・楡井 久・清水健一・細谷 有・田口善彦・秋田昌寛・石井 亮・青木勝宏・大洞輝雄・伊藤孝和・濱本知美・田中良郎・安藤純一・鈴木真人・加来文隆・西川順二・庄山公透・小倉孝之・八槇明子, 2008, 下総台地北部印西市浦部地区の透水層区分と地下水質—新しい地下水調査法である地下水質検層と地質単元—. 第 17 回環境地質学シンポジウム論文集, 地質汚染—医療地質—社会地質学会, 181-186.
- 43) 田中 武・楡井 久・秋田昌寛・清水健一・細谷 有・田口善彦・石井 亮・酒井 豊・風岡 修・楠田 隆・鈴木真人・加来文隆・西川順二, 2001, 有機塩素化合物による高濃度に汚染された軟弱層の除去対策施工例—高圧噴射置換浄化工法—. 第 11 回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 45-50.
- 44) 風岡 修・酒井 豊・楠田 隆・楡井 久・田中 武・清水健一・細谷 有・田口善彦・秋田昌寛・石井 亮・大洞輝雄・伊藤孝和・浜田成久・安藤純一・鈴木真人・加来文隆・西川順二, 2001, 有機塩素化合物による地質汚染の汚染源での 3 次元的地質汚染濃度有分布と地層分布—千葉県印西市下総台地谷津田での例—. 第 11 回環境地質学シンポジウム論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 51-56.
- 45) 殿界和夫, 1995, 飲料水源としての地下水. アーバンクボタ, No.34, 表紙ウラ.
- 46) 風岡 修・吉田 剛・伊藤直人・小島隆宏・八武崎寿史, 2002, VOCs により汚染された難透水層の浄化対策例: 下総台地での事例. 第 32 回社会地質学シンポジウム論文集, 社会地質学会, 3-8.

おわりに

この手順書は、汚染された地下水を効果的に浄化するために、昭和 53 年～令和 4 年に環境研究センターが関わって実施されてきた機構解明調査の経験を踏襲し作成されたものである。汚染サイトは、地質条件・社会的条件が多様であり、同じ条件の場所は無いと言ってよい。また、技術も日々前進している。このため今後、より良い方法が見つかれば、その方法も積極的に取り入れ、浄化に向けた調査に取り組んでいただきたい。また、成功・失敗にかかわらずその取組と結果を記録としてなるべく残していただきたい。

地質汚染現場における汚染機構解明調査の手順
ー地下水汚染の浄化対策としてー

令和5年8月発行

発行 千葉県環境研究センター

千葉県市原市岩崎西 1-8-8

作成担当 千葉県環境研究センター地質環境研究室

風岡 修・吉田 剛（電話 043-243-0261）