

地下水調査を中心としたサイト評価と汚染地下水の拡散防止措置の手順に関する提案

奥田信康¹・○高畑陽¹・穴吹太陽¹・佐藤徹朗¹・舟川将史¹・

地下水汚染のサイト評価手法の活用検討部会¹

¹ 土壌環境センター

1. 背景および目的

事業所等における地下水汚染は、敷地内において有害物質の使用履歴が特定され土壌汚染対策法や水質汚濁防止法に関わる調査で判明する場合だけでなく、汚染の経緯や汚染源が明確ではないが自主的な地下水調査等により判明する場合もある。地下水汚染が敷地外に拡散すると、地下水を利用する場合に健康リスクが生じる可能性があるだけでなく、環境的（地下水環境の保全）・経済的（土地の価値低下や利活用の制限）・社会的（土地を所有する事業者の社会的な地位の低下、汚染地域の風評被害）な損失が生じるため、これらをできるだけ未然に防止するという観点から適切な措置を講じることが重要である。

東京都のように健康リスクがない場合でも敷地境界における管理目標値（第二地下水基準）を設けて拡散防止に関わる条例を定めている自治体もあるが¹⁾、多くの自治体では条例に基づく措置を定めていないため、土地を所有する事業者と行政が協議して土地利用状況に応じた管理目標値や措置方法を決定し、汚染地下水の拡散防止対策を行っている事例が多い。

本部会では、汚染地下水の敷地外への拡散を防止する手順を提供することを目指して、敷地境界において管理目標値を超過しないためのリスク評価方法や、その評価結果を用いて利害関係者間で適切にリスクコミュニケーションを行う具体的な手順の素案を作成した。本報では、その概要を述べる。

2. 拡散防止措置の評価フロー

地下水汚染が判明した場合に敷地外への拡散防止措置を検討していくための評価フロー（案）を図-1に示す。本手順は時系列的に現れるチェックポイント（STEP1～6）において、1) 地下水観測井戸の適正な配置とデータ取得、2) サイト概念モデル（CSM: Conceptual Site Model）²⁾の手法を活用したサイト評価による汚染状況を可視化、3) 可視化したデータやサステイナブル・レメディエーション（SR: Sustainable Remediation）³⁾を活用して作成したチェックシートを用いる利害関係者とのリスクコミュニケーション、を行うことを特徴としている。また、地下水の汚染拡散防止対策を行うための措置として、土壌汚染対策法の「地下水の水質の測定」に準じつつ、科学的自然減衰⁴⁾の考え方を導入した「地下水モニタリング措置」を新たに提案している。

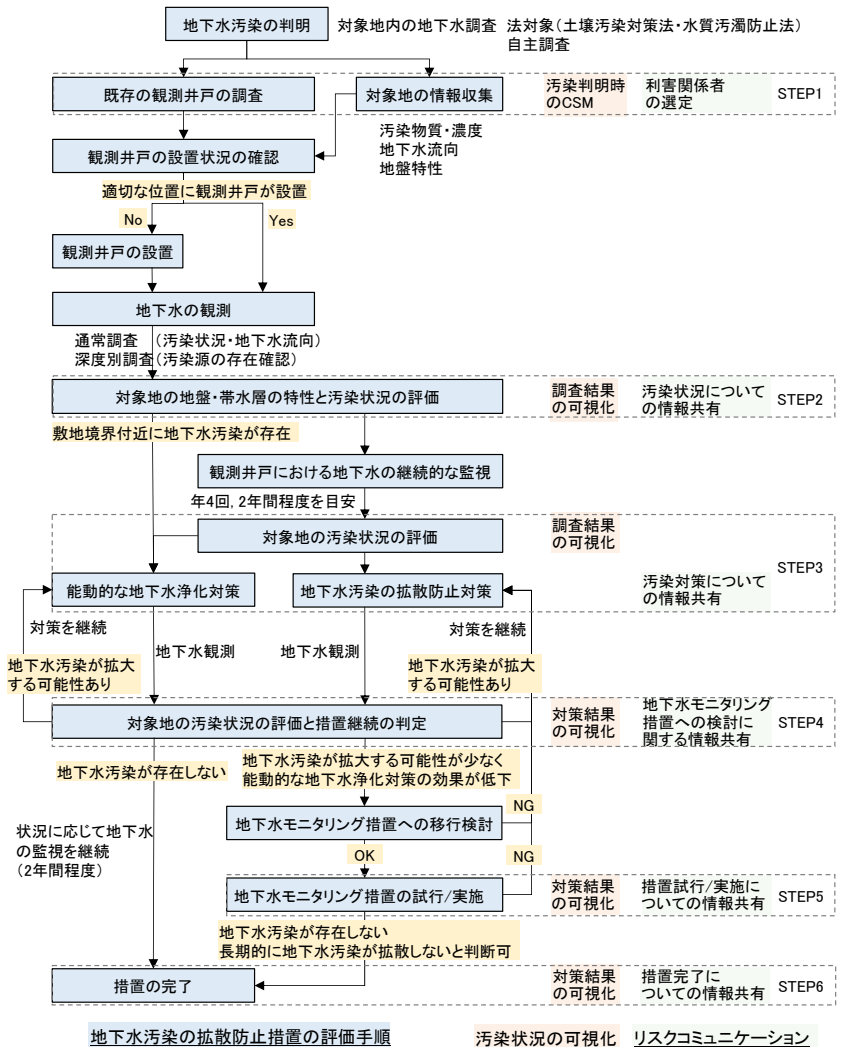


図-1 汚染地下水の拡散防止措置の評価フロー（案）

3. 地下水汚染サイトの評価

3.1 汚染判明時の CSM

適切な汚染地下水の拡散防止を行うためには、地下水汚染の存在判明後、できるだけ早い時期に汚染状況を把握することが重要である。具体的には初期段階において、(a)地下水汚染が確認できる観測井戸の位置・構造、汚染状況(物質・濃度)の確認、(b)想定される汚染源の位置、建物・地下構造物の位置、敷地境界・敷地外の近傍井戸の位置の確認、(c)地盤特性(土質、地下水流向・動水勾配)の確認、を実施する(図-2)。

一般的に、CSM²⁾を活用する評価では、曝露経路に基づき懸念されるリスク等についても評価を行うが、本案では汚染地下水が敷地外へ流出するリスクに絞って評価を行う。気中拡散などの曝露経路による人への健康リスクの可能性については、必要に応じて表層ガス調査等を初期段階で行い、その結果に応じて適切な対策を実施する。また、本案では地下水に溶解した汚染物質の挙動を評価対象としているが、土壌に付着している汚染物質の影響やその溶出挙動についてもできるだけ考慮すべきであり、観測井戸を新設する場合には可能な限り土壌調査を行って断面図(図-3)やCSMに基づく評価にその情報を反映することが望ましい。

地下水流向については、1)既存の文献の活用、2)適切に配置された井戸(地下水流向確認井戸)における観測(季節で流向が変わる可能性があるため複数回調査することが望ましい)により決定する。汚染状況や地下水の流向・流速などを評価する際に、汚染状況を把握するために観測井戸が足りないと判断される場合には次章で示す方法で観測井戸を新たに設置する(図-3)。

3.2 調査結果に基づく汚染状況の可視化

汚染判明時にその状況把握を行い、地下水調査を一定期間実施することにより、敷地内における地下水の汚染状況を再検証することが可能となる。この際にもCSMを活用して地下水汚染を可視化することで汚染状況を明確に示すことが可能であり(図-3)、地下水汚染の拡散防止措置の方針や対策方法の検討、および対策効果の確認に活用できる。また、時系列的に可視化した汚染状況を比較することで、汚染の拡散状況や対策の効果、敷地外への流出の有無を容易に確認することが可能となる。汚染状況を可視化することは、第三者に対する説明への活用だけでなく、技術者が地下水汚染の措置を検討する際の情報整理や、未熟な技術者への教育等にも活用できる。

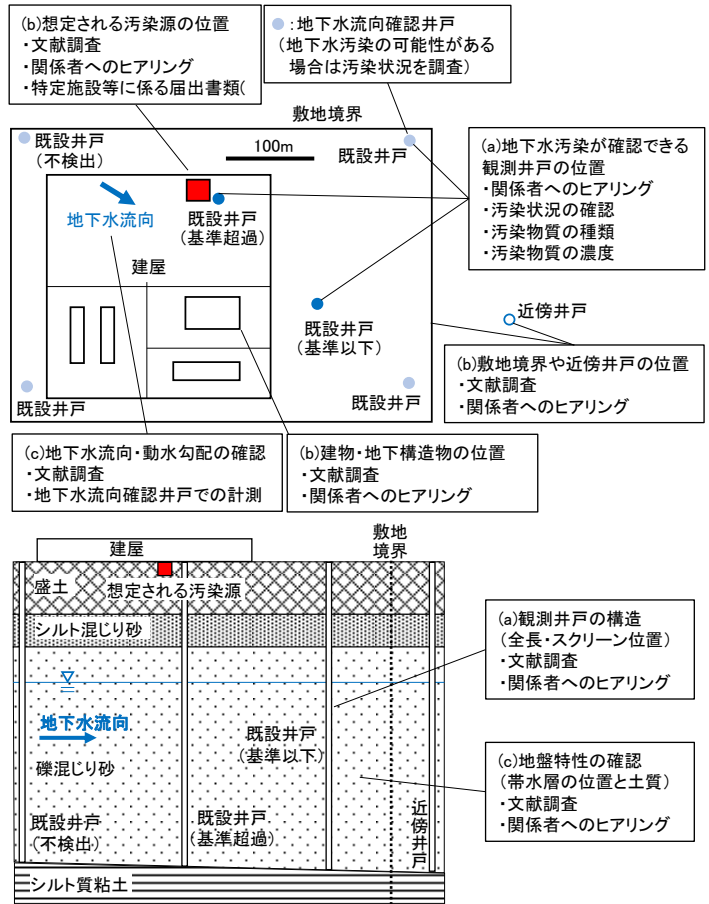


図-2 汚染判明時の調査項目 (CSM)
(上図: 平面図、下図: 断面図)

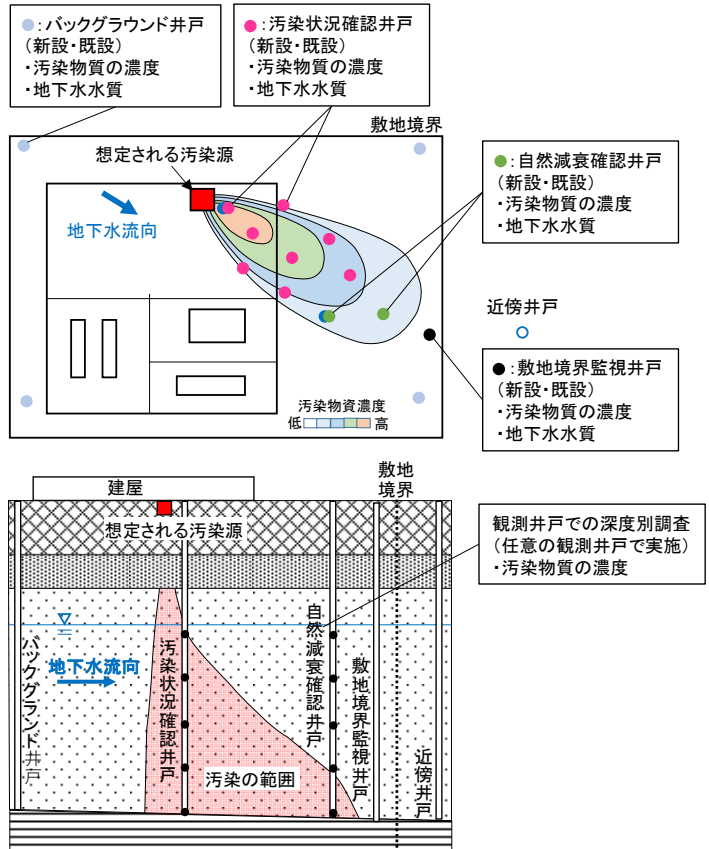


図-3 調査および対策結果の可視化
(上図: 平面図、下図: 断面図)

4. 観測井戸の設置

4.1 地下水汚染サイトの評価に必要な観測井戸の種類・設置方法・調査頻度

調査結果に基づく汚染メカニズムの可視化や地下水モニタリング措置への移行を可能とするためには、適切に観測井戸を配置して地下水を採取する必要がある。本案では、「バックグラウンド井戸」、「汚染状況確認井戸」、「自然減衰確認井戸」、「敷地境界監視井戸」の目的の異なる4つの井戸の設置を基本としている。井戸構造については汚染状況を適切に評価できれば特定の構造である必要はなく、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⁵⁾（以下、ガイドライン）に準じて設置した観測井戸を使用できる。地下水の採取は調査目的に適した深度で行う。

観測井戸の平面配置の一例を図-3に示す。4種類の井戸の本数や設置地点は、評価を行う技術者が状況に応じて適切に配置する。バックグラウンド井戸は、推定される汚染源の地下水流向の上流部に少なくとも1箇所配置する。汚染状況確認井戸は推定汚染源の地下水流向の下流側を中心に配置する。配置間隔は敷地の使用状況、地下水流速等に応じて適切な間隔を設定する。自然減衰確認井戸は汚染状況確認井戸と敷地境界監視井戸の間に少なくとも1箇所設置する。敷地境界監視井戸は推定される汚染源から地下水流向の下流部にあたる敷地境界の近傍に少なくとも1箇所設置する。尚、推定される汚染源が複数存在する場合や地下水流向に季節変動がある場合には、敷地境界監視井戸を適宜追加する。

図-1のフローにおいて、既に観測井戸が適切な場所に配置され、適切な方法で地下水汚染状況を継続して監視できている場合は、「観測井戸の設置」や「観測井戸における地下水の継続的な監視」を省略して次のステップに進むことが可能である。地下水の調査頻度はサイトの汚染状況に応じて設定すれば良いが、豊水期と渇水期を含む年4回程度を基本とする。

4.2 観測井戸における深度別の調査方法と汚染状況の評価方法

地下水汚染のメカニズムを評価する場合には、同一の帯水層であっても、その帯水層の平均的な濃度の平面分布だけではなく、地下水汚染の深度分布を把握することが有効である。国内では、帯水層全体に比較的長いスクリーン区間を設けた井戸が多く存在するため、これらの井戸を利用すれば効率的に

表-1 観測井戸における深度別の地下水調査方法

項目		採水方法	地下水バージとその後の放置期間	サンプル採取量	サンプルの不攪乱性	文献
サンプラー 浸漬方法	メンブレン膜受動式サンプラー	浸漬したサンプラー内と外部の地下水中の汚染物質濃度が平衡後に採水	バージ後に約2週間設置	約100mL	◎	6)
	機械密閉式受動型サンプラー	浸漬したサンプラーを機械的に密栓して採水	バージ後に1~2週間設置	40~350mL ※井戸径による	○	6)
	地下水連続採水装置	浸漬した内管に外管を挿入し、各深度の地下水を採水管内に密閉して採水	バージ後に約1週間設置	約1,000mL	○	7)
直接採取方法	深度別揚水法	採水位置にチューブを設置して、浅い深度から順に低流量ポンプで採水	バージ後に約1週間放置後	任意の量を採取可能	△	8)
	バックカー法	採取管の上下にバックカーを設け、小型ポンプ・採水チューブ等で採水	バージ後にpH等の安定を確認して採水	任意の量を採取可能	△	9)

深度方向の汚染分布を把握することが可能である。表-1に単孔の観測井戸を対象とした主な深度別地下水調査方法を示す。深度別の調査結果を用いて図-3に示すように土質柱状図に対応した深度別の汚染状況を可視化することにより、効率的な浄化対策の立案が容易となる。例えば、地下水汚染の下流への移動を抑えるために、汚染濃度の高い深度で揚水処理を行うことが挙げられる。

地下水モニタリング措置へ移行する場合には汚染源の影響が小さくなっていることが望ましいが、詳細な土壌調査の実施が困難な場合でも、同一帯水層における汚染物質の3次元的な濃度勾配の有無を把握することで、地下水濃度に影響する土壌汚染の有無（リバウンドの可能性の大小）を推定することが可能である。また、継続モニタリングにおける採水深度は帯水層（スクリーン）の中央部を基本とするが、汚染状況確認井戸では地下水濃度が高い深度で評価することについても検討する。なお、深度別地下水調査は、必ずしも毎回実施する必要はなく、初期の汚染メカニズムの把握や措置変更を検討する際に実施すれば良い。

5. SRを活用したリスクコミュニケーション

リスクコミュニケーションの最初の手順として、リスクコミュニケーションを行う対象となる利害関係者を選定する（図-1、STEP1）。利害関係者はステークホルダーリスト¹⁰⁾を参考に選定するが、国内であれば環境規制局（行政）や地域社会（近隣住民）が主要な利害関係者となる場合が多い。地下水汚染が発覚した時点で行政へ報告を行い、応急措置や管理目標値等の設定について協議を行う（図-1、STEP2）。少なくとも図-1に示すSTEP3以降は、措置の実施状況について選定した全てのステークホルダーと情報共有を行う。一例として、地下水モニタリング措置へ移行する場合の合意形成の手順を図-4に示す。リスクコミュニケーションを円

滑に進めるために提供するチェックシート（図-4）を活用するか、それ以外のツールを使用しても良い。図-1 に示す STEP6 では汚染が残存する状態であっても地下水モニタリング措置を終了する場合が含まれており、そのような場合の特にリスクコミュニケーションによる合意形成が必要不可欠である。

6. 地下水汚染の拡散防止措置の選択

観測井戸における継続的な地下水調査に基づいて汚染状況を評価することにより汚染地下水の拡散防止措置を検討できる。既に敷地境界まで汚染物質が到達して管理目標値を超過していることが判明した場合は、その時点で応急措置を実施すべきか検討する。具体的な汚染地下水の拡散防止措置は、汚染状況やサイト条件に基づいて「区域内措置優良化ガイドブック¹³⁾」で示される方法などを参考にして選定する。図-1 における「対象地の汚染状況の評価」の段階で地下水汚染が軽微で汚染の拡散が生じる可能性が低い場合には、原位置浄化などの「能動的な地下水浄化対策」や揚水施設などによる「地下水汚染の拡散防止対策」を行わずに「地下水モニタリング措置」の選択を行うための評価を検討できる。

「能動的な地下水浄化対策」や「地下水汚染の拡散防止対策」の実施中は適切な間隔で地下水の汚染状況を観測して評価（可視化）を行い、対策の継続の可否、対策の変更（地下水モニタリング措置への移行）、対策の終了、などの判定を行う。

7. 地下水モニタリング措置

7.1 地下水モニタリング措置を選択する契機

図-1 に示す評価フローにおける「能動的な地下水浄化対策」および「地下水汚染の拡散防止対策」を実施することにより、地下水汚染の拡散や敷地境界監視井戸において汚染物質濃度が管理目標値を超過しない可能性が高くなった場合、敷地内に管理目標値を超える地下水汚染が存在している場合でも地下水モニタリングによる受動的な対策に切り替えることは経済的な側面だけでなく環境的な合理性も高くなると考えられる。一方、安易に能動的な対策を停止することは「汚染の放置」と見なされかねないため、特に利害関係者に対して合意形成を得られるリスクコミュニケーションを行う必要がある（図-4）。以下、合意形成に必要な検討内容とその評価方法について概説する。

7.2 地下水モニタリング措置を実施するための前提条件

表-2 に示す「地下水モニタリング措置移行チェックシート」の冒頭に「①地下水モニタリング措置に移行するための前提条件」を掲げている。図-1 に示す評価フローに従って、3～6 章において述べた評価や措置を適切に実施していけば、前提条件に示している 5 項目を達成することができる。個々の項目について作成した資料を用いれば、利害関係者との適切なリスクコミュニケーションも可能になる。

7.3 地下水のモニタリング措置への移行可否の評価

地下水モニタリング措置への移行を検討する際には、能動的な対策を継続する場合と比べ、より慎重に移行への可否を評価する必要がある。表-2 の「②地下水モニタリング措置への移行可否の評価」のうち、②-1、②-2、②-4 の項目の評価概念図を図-5 に示す。移行可否の評価にあたって、②に示す全ての項目の評価を実施し

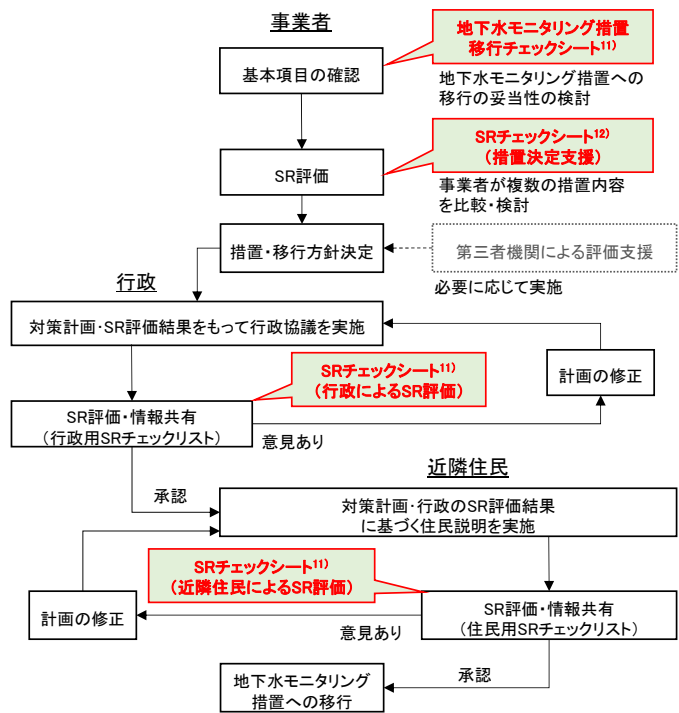


図-4 SR 評価を活用したリスクコミュニケーション実施手順（地下水モニタリング措置への変更を行う場合）

表-2 地下水モニタリング措置移行チェックシート（抜粋）

①地下水モニタリング措置に移行するための前提条件
1.サイトの地盤特性と汚染状況を調査し、汚染物質とその汚染範囲を把握している。
2.汚染源の特定と汚染地下水の拡散防止のための対策が可能な限り実施されている。
3.観測井戸が適切に配置され、地下水観測の実施体制と継続的な監視が実施されている。
4.敷地境界監視井戸での汚染物質の地下水濃度が管理目標値を下回っている。
5.利害関係者との適切なリスクコミュニケーションを実施している。
②地下水モニタリング措置への移行可否の評価
1.観測井戸での汚染物質の地下水濃度が減衰傾向もしくは平衡状態であり、地下水汚染が今後も拡散する可能性が低いことを定性的に確認している。
2.汚染源対策が実施され、汚染源からの地下水汚染への影響が小さくなっていることを汚染源付近の観測井戸における深度別調査により確認している。
3.汚染物質が自然減衰によって分解する兆候を予備スクリーニングシートによる判定により確認している。
4.地下水モニタリング措置移行後の地下水汚染状況の予測解析を行い、敷地境界監視井戸での汚染物質の地下水濃度が管理目標値を将来的に超過しないことを確認している。

て明確な判定を行う必要は必ずしも無く、サイトの状況や利害関係者との関係に応じて適切な評価項目を抽出して適切な考察を行うことが求められる。以下、個々の評価方法について述べる。

7.3.1 地下水の汚染状況の定性的な評価

観測井戸において継続的に汚染状況の経過観察を行うことにより、汚染物質濃度の経時的なデータをグラフ表示することが可能である(図-5、②-1)。ガイドラインの「地下水の水質の測定措置」における「措置の完了」における定性的な評価と同様に、数年間蓄積された各観測井戸における濃度推移のデータから、地下水濃度が上昇傾向にない、もしくは高止まりしていない、などである状態であることを確認する。特に汚染源の存在が明確でないサイトにおいては、汚染状況確認井戸において地下水濃度が大きく変動していないことや、措置後に局

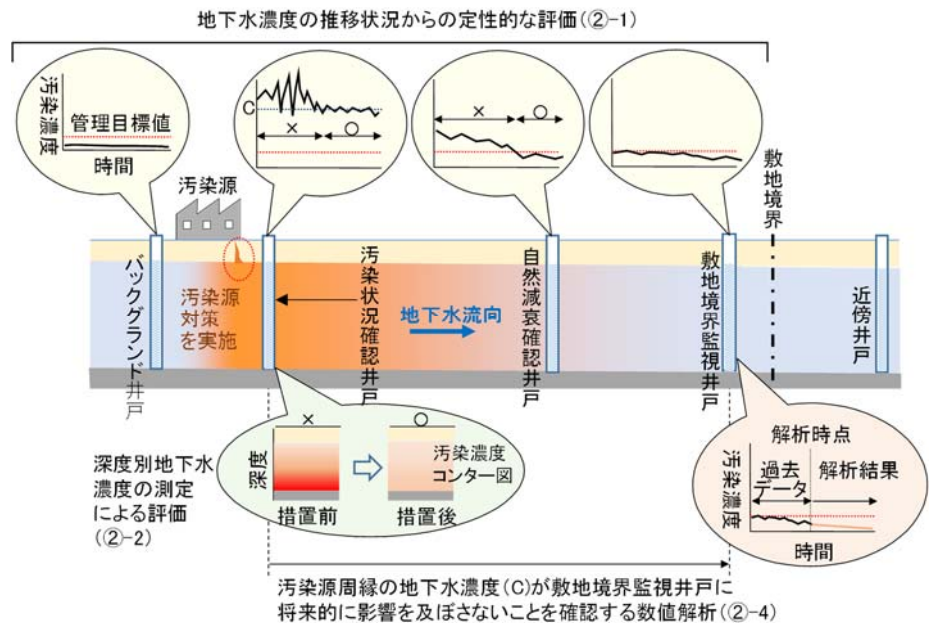


図-5 地下水のモニタリング措置への移行可否の評価の概念図

所的に地下水濃度が高い深度が存在しないことを確認することが重要である。また、汚染状況の平面的および断面的な状況の可視化した情報(図-3)を経時的に示すことで、汚染状況の範囲やその拡縮について判断できる。本評価は地下水モニタリング措置への移行について利害関係者との合意形成を行う際にも必要不可欠なリスクコミュニケーションツールとなる。

汚染物質濃度の経時的なデータをグラフ表示する際に、塩素化エチレン類のように分解生成物が生じる汚染物質を評価の対象とする場合には、個々の汚染物質別にグラフ表示すると中間生成物の濃度が上昇傾向を示す場合がある。そのため、汚染物質の挙動を全体的に把握するためには、対象汚染物質の分解生成物を含めたモデル濃度の総和量で汚染物質量の増減を確認することにより、汚染物質の相対的な挙動を確認できる。

7.3.2 汚染源の地下水への影響評価

本評価において土壌調査や観測井戸における深度別調査を行って汚染源が明確になった場合には、地下水のモニタリング措置に移行する前に汚染源の状況を再度確認することが望ましい(図-5、②-2)。汚染源近傍の汚染状況確認井戸における深度別調査を再度実施することで、深度方向における濃度差が小さくなっていることを確認する。汚染状況確認井戸において地下水中の汚染物質濃度の挙動が長期的に安定していれば、それより下流部に設置された自然減衰確認井戸や敷地境界監視井戸などの観測井戸において汚染物質濃度が急激に上昇するリスクが小さくなる。

7.3.3 汚染物質の自然減衰の確認

地下水のモニタリング措置は、汚染物質の自然減衰による分解状況を継続的にモニタリングする科学的自然減衰(MNA: Monitored Natural Attenuation)⁴⁾と能動的な浄化を停止するという点で同一の手法と位置付けられる。MNAでは汚染物質が生物学的な分解を受けて自然減衰することにより長期的に浄化が進行する点が重要視された。ベンゼンなどの炭化水素化合物は生物学的な自然減衰が生じ易く、汚染物質の拡散リスクを定量的に評価できる場合がある¹⁴⁾。塩素化エチレン類などの揮発性有機塩素化合物については、生物学的な分解が生じることによって基準値がより低いクロロエチレンなどが生成される可能性があり、そのような可能性を検証するためにも本評価が有効となる。

ベンゼンおよび塩素化エチレン類¹⁵⁾などの生物学的自然兆候の確認を行うためのチェックシート(予備スクリーニングシート)については評価が容易な最新版の公開を今後目指している。尚、地下水のモニタリング措置を適用する場合に必要な条件は敷地外に汚染地下水を拡散させないことであるため、汚染物質の土壌への吸着等の自然減衰が生じる場合も有効な浄化効果であると考え、生物学的な分解が生じない重金属等も本案では評価対象としている。

7.3.4 汚染地下水の拡散に関する予測解析

予測解析については本部会において過去に検討を行っているが¹⁵⁾、環境省が公表している「地下水汚染が到達し得る範囲¹⁶⁾」で使われている解析方法など幾つかの予測解析方法を汚染物質の将来的な挙動を予測するツールとして示すことを検討している。また、数値解析を用いなくても、自然減衰確認井戸などにおいて汚染物質が一定の相関性を示して減衰している場合もあるため¹³⁾、そのような現象が生じている観測井戸における汚染物質の挙動から将来予測を行うことも可能と考えている。

7.4 地下水モニタリング措置の試行および実施

地下水のモニタリング措置の試行については熊本市のガソリン汚染サイトで実施した事例¹³⁾がある。実際に本措置を試行もしくは実施する場合には、サイト評価の結果やそれまでの措置方法を考慮して、適切な試行方法（浄化装置を残して緊急時に稼働させるなど）の事例を示す予定である。

8. まとめ

地下水汚染が判明した場合には、土地を所有する事業者が敷地外に汚染を拡散させない防止措置について検討し、関係者間で情報共有して対策を進める必要がある。この場合、法や条例に定められている基準値に基づいた手順だけで対応を行うのではなく、リスク評価やSR評価など考え方を取り込み、サイトの汚染状況や周辺エリアの実情に応じて本案を柔軟に活用して措置を講ずることで適切かつ合理的な対応が可能になることを期待している。措置の立案や実施は専門知識を持つ技術者が行う必要があり、適切に本案を活用していくための技術者の養成や、土壌や地下水汚染に関わる有資格者が措置案について確認を行う仕組みを整備することも今後の検討課題と考えており、リスク評価の信頼性や認知度を高める取り組みを継続していくことが重要と考えている。

参考文献

- 1) 東京都：環境確保条例等の改正について、https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/chemical/soil/information/300300a20190425140409310.files/04_joureikaisei.pdf.
- 2) 奥田信康・大西絢子・白井昌洋・穴吹太陽・和知剛：地下水汚染サイト評価・対策のためのサイト概念モデルの活用について、第26回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.275-280, 2021.
- 3) 水澤克哉・加藤明・佐藤徹朗・高畑陽・サステイナブル・アプローチ部会：サステイナブル・レメディエーション（SR）の取り組みと豪州での事例紹介、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講演集，pp.274-279, 2017.
- 4) 白鳥寿一：MNAの適用に向けて、土壌環境センター技術ニュース，No.9, pp.72-77, 2004.
- 5) 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（改訂第3版），http://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man/dojo2020_1-rrr.pdf, 2019.
- 6) Thomas E. Imbrigiotta and Philip T. Harte: Passive Sampling of Groundwater Wells for Determination of Water Chemistry - Techniques and Methods 1-D8, Book 1. Collection of Water Data by Direct Measurement, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, 2020.
- 7) 瀬野光太・井上章・伊藤哲緒・佐藤徹朗：既設観測井戸における深度別不攪乱採水の有効性について、第19回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.131-133, 2013.
- 8) 佐藤徹朗・稲田ゆかり・佐藤秀之・佐藤幸孝・設楽和彦・技術標準化部会：既設観測井戸からの地下水採取について、第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.493-498, 2014.
- 9) 関陽児・内藤一樹・鈴木庸平・伊藤一誠・渡部芳夫：ボーリング孔での原位置地下水試料の採取法と留意点，資源地質，Vol.62, No.3, pp.235-247, 2012.
- 10) SUSTAINABLE REMEDIATION コンソーシアム：Sustainable Remediation White Paper - 持続可能な土壌汚染対策のために，<https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/File/SR-WhitePaper-v1.pdf>, 2019.
- 11) 高畑陽・古屋光啓・舟川将史・佐藤徹朗・CSM・モニタリングを活用した土壌・地下水汚染の管理手法検討部会：土壌・地下水汚染に対する地下水モニタリング措置の検討，第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.516-520, 2019.
- 12) 舟川将史・佐藤徹朗・日野成雄・高畑陽・サステイナブル・アプローチ部会：日本版SR評価項目を用いた浄化工法の選定事例とその課題，第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.369-374, 2018.
- 13) 環境省 水・大気環境局 土壌環境課：区域内措置優良化ガイドブック，<https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man/dojo2020.pdf>, 2020.
- 14) 津留靖尚・田島幸治・中熊秀光・高畑陽・西川雅高・中杉修身，科学的自然減衰（MNA）を導入したガソリン汚染地域における地下水中のBTXの挙動，用水と廃水，Vol.50, No.3 pp.63-71, 2008.
- 15) 日野良太・古屋光啓・佐藤徹朗・高畑陽・地下水汚染のサイト評価手法の活用検討部会，VOCs 汚染地下水の自然減衰の確認と濃度変化の予測に関する基礎的検討，第26回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.126-131, 2021.
- 16) 環境省 水・大気環境局 土壌環境課：地下水汚染が到達し得る距離の計算ツールの操作マニュアル，http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009/tool_man.pdf, 2020.