

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

○奥田信康¹・大西絢子¹・白井昌洋¹・穴吹太陽¹・和知剛¹・地下水汚染のサイト評価手法の活用検討部会¹
¹ 土壤環境センター

1. 背景および目的

地下水汚染は飲用摂取等で人の健康への影響が大きく、その浄化および適切な管理は土壤・地下水汚染対策の最重要課題である。しかし、地下水汚染の状況や挙動を正確に把握するためには多くのモニタリングデータと高度な技術力・解析力、経験が必要となり、地下水汚染の合理的な対策を進める上では、適切な評価手法を活用し、発生原因や汚染物質の移動や消長を評価する必要がある。また、平成 29 年度の土壤汚染対策法の改正により、地下水汚染濃度の距離減衰の概念が対策目標値設定に取り入れられ、サイト規模で地下水汚染の挙動を把握する必要性が高まっている。これらの背景のもと、土壤環境センター 地下水汚染のサイト評価手法の検討部会では「サイト概念モデル(Conceptual Site Model)、以下 CSM と称す」の構築と活用方法について調査し、我が国の土壤・地下水汚染問題への活用を検討している。本稿では、CSM 構築の基本的な方法と地下水汚染サイトの評価に CSM を活用する利点や課題を示す。

2. 汚染サイト評価のための CSM の概要

CSM とは、土壤・地下水汚染の浄化計画等において汚染源から受容体までの汚染物質の移動の過程をわかりやすく図示あるいは文章で示したものであり、CSM を構築することで、「簡潔な方法で汚染サイトの状況を表現」「汚染源、曝露経路、受容体を明らかにし、汚染物質の輸送を制御するプロセスを説明」「全ての利害関係者に対し、サイトの汚染状況および潜在的な曝露シナリオの共通の理解を促進」を具現化し、合理的な調査・対策の推進に有効なツールとなる¹⁾。

CSM 構築の基本要素は、以下に示す「汚染物質、発生源、汚染物質の移行経路、バックグラウンド、受容体、システム境界」の 6 項目である。CSM 構築のためには、十分な情報収集が必要であり、文献調査および現地調査により過去から現在のサイト関連情報を収集し、これら 6 項目を設定するための情報を入手する必要がある。

調査の初期段階より CSM を構築する利点は、汚染源・各媒体間移行経路を把握し、受容体への影響を網羅することから、現状データ・科学的評価に基づく客観的な判断を行うことで、浄化対策だけではなく、汚染物質の存在範囲を推測し確認の必要なエリアを優先した合理的な調査計画を立案できることが挙げられる。移行経路には土壤・地下水・空気の媒体がある。特に、汚染物質は地下水を介して長期間・広範囲・有害な濃度レベルで受容体に曝露するため、的確に把握する必要がある。

基本要素	検討内容
①汚染物質の特定	土壤、地下水、空気、およびその他の媒体に存在する潜在的な汚染物質の種類・濃度レベルを把握する。
②発生源の特定	潜在的な汚染の発生源を特定する。
③潜在的な汚染物質の移行経路の特定	地下水、地表水、土壤、堆積物、生物相および空気等の環境媒体において、潜在的な汚染物質が発生源から受容体にどのように移動するのかを特定する。
④バックグラウンド評価	敷地内の汚染物質の濃度を、敷地内の活動に影響を受けていない類似した近隣地域での濃度と比較し、汚染物質のバックグラウンド範囲を特定する。
⑤受容体の特定	潜在的な汚染の影響を受ける受容体を特定する。
⑥システム境界の決定	CSM の対象範囲の決定または、システム境界を決定する。

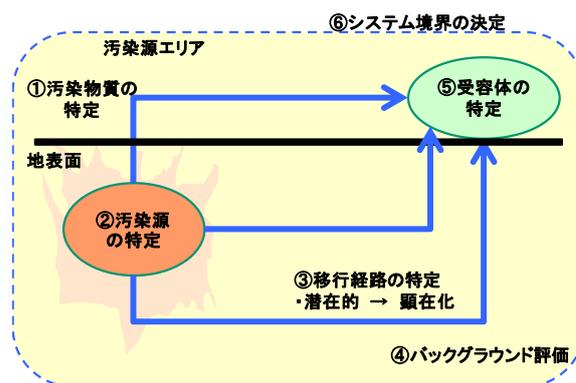


図 1 CSM 構築の基本要素

Study on a use of a site conceptual model for groundwater contamination site assessment and remediation

Nobuyasu Okuda¹, Junko Ohnishi¹, Masahiro Shirai¹, Taiyo Anabuki¹, Tsuyoshi Wachi¹,

and Study Group on Usage of Site Assessment Methods for Groundwater Contamination¹ (¹GEPC)

連絡先: 〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-5 KS ビル 3F (一社)土壤環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

3. 汚染源が判明している場合の地下水汚染のサイト評価

3.1 CSM 活用の目的

CSM 構築の初期段階で、汚染源が判明している場合の地下水汚染サイトの評価方法について示す。契機としては以下のようなケースが想定される。

- ・事業所等の移転や土地の改変に伴う土壌汚染の調査で土壌汚染を発見。
- ・使用中有害物質の漏洩事故。

上記の場合での CSM 構築の目的を緊急度順に表 1 に示す。まずは、発見された汚染物質が多量・高濃度、近傍の帯水層から有害物質が検出されている、または直下に帯水層がある場合には、地下水汚染範囲が拡大する可能性が高いので、地下水汚染の現況把握を迅速に行う必要がある。特に、汚染水の敷地外への流出の有無の確認が重要である。また、対策検討のため地下水汚染範囲の把握も望ましい。次に、現在の汚染状況として地下水汚染が無い、または、対象サイト毎に設定される許容濃度範囲である場合においても、無対策での将来予測を行うことが望ましい。さらに、積極的な対策を行う場合は、サイトの状況に応じて、必要最小限から汚染の除去までの間での対策案選定に活用することができる。

表 1 CSM 構築の目的と評価対象項目

	CSM 構築の目的	評価対象項目
1	判明した汚染源に起因する地下水汚染の汚染の現況の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・汚染水の敷地外への流出の有無 ・地下水汚染範囲
2	無対策の場合の将来の状況の予測	<ul style="list-style-type: none"> ・現在の汚染状況が許容範囲の場合、将来も問題が生じないか？
3	積極的な対策を行う場合の汚染状況の予測	<ul style="list-style-type: none"> ・現状で問題がある場合、必要最小限の対策方法は？ ・将来的な問題（リスク）を考慮して、どこまで行うべきか？

3.2 評価方法

(1) 地下水汚染による人の健康リスクの評価

地下水汚染による人の健康リスクは、汚染源から受容体となる人への曝露量と物質毎の有害性の掛け算で表される。この中で、汚染源から放出された汚染物質が受容体の人に至る経路やその経路内での濃度減衰挙動が複雑で理解が難しい。

CSM では、この部分を平面図、地質断面図、ブロックフロー図などを用い可視化することで、理解を助ける効果がある。この過程は、図 2 のように、汚染源の状態、地盤・地下水の状況、汚染物質特性の 3 つの要因に区分でき、複雑な汚染物質の挙動をわかりやすく説明することができる。

■ 要因



図 2 汚染源から受容体までの汚染物質の挙動

(2) 汚染物質・発生源の把握

汚染源では、評価対象の汚染物質の種類、濃度、高濃度範囲、土質や拡散状況を把握する必要がある。特に、汚染物質の種類により、土壌・地下水での移動特性が異なるので、汚染物質の種類の特定は重要である。主要な汚染物質の移動特性を図 3 に示す。

揮発性有機塩素系化合物 (CVOC) は、塩素化エチレンや塩素化エタンなどの塩素を含む有機化合物の総称である。CVOC は、比重が水よりも重く、水に溶けにくいいため、地下に深く浸透し、土壌や地下水中に残留する。また、粘性が低いため原液が土壌間隙中に浸透しやすく、土質の状況によっては、複数の帯水層まで多量の汚染物質が移動して広域な地下水汚染を生じることがある。

重金属等は、鉛や水銀などの比重が 4 以上の金属に加え、砒素、ふっ素、ほう素、セレンのような非金属やシアン化合物を含む。重金属等は、土壌粒子に吸着されやすいため、地表近くに保持される傾向がある。一般的には、陰イオン性の物質 (六価クロム、砒素、ふっ素、ほう素) は比較的土壌地下水中を移動しやすく、鉛、水銀は陰イオン性の物質に比べて移動距離が短い。

油分 (ベンゼンも含む) は、水に溶けにくく、分解性が低いため、まず原液の状態ですぐ地下水と共に拡がり、さらに溶解した地下水汚染が拡散する。油分は、水に浮く性質があるため、地下水表面付近を拡散し、地下水位の上下移動により、汚染が地下水位の上下の深度方向に拡散する。

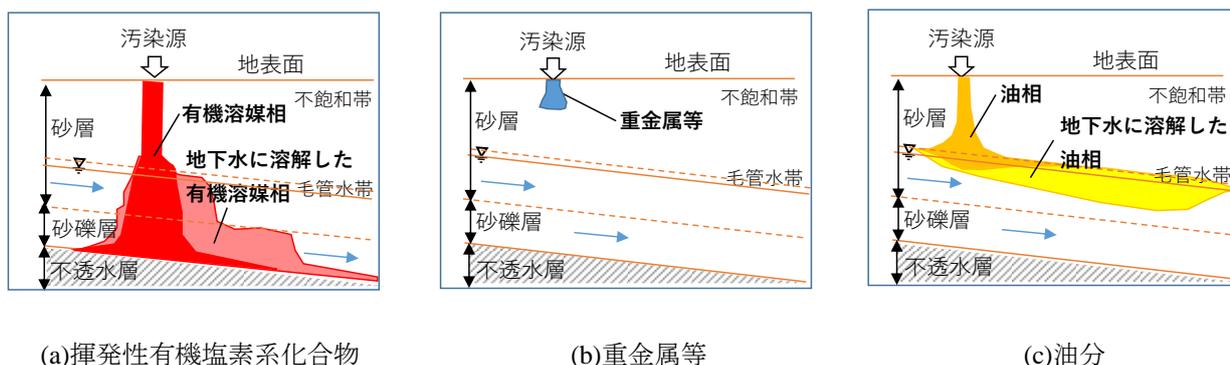


図3 汚染物質の移動特性の概念図²⁾
(参考文献2を元に作成)

(3) 調査項目

CSMを構築する上で必要な調査項目のうち、土壤汚染対策法の調査で収集可能な項目を表2に示す。かなりの部分が土壤汚染対策法に示される調査を網羅することで収集可能である。不足する項目として、地下水の状態（水位、流向、流速）、酸化・還元状態、汚染物質以外に分解や吸着に関する物質の存在・状態、自然減衰の可能性の有無、などがあげられる。

表2 土壤汚染対策法の調査で収集可能なCSM構成要素

CSM構成要素	資料収集による調査		試料採取による調査	
	土壤汚染対策法 ^{※1)}	法以外	土壤汚染対策法	法以外
1. 汚染物質の特性	ウ. 人為等由来の汚染のおそれに関する情報	—	・法対象物質の表層調査による濃度分析 ・表層に汚染を確認した場合のボーリング調査による濃度分析	・法対象外の表層調査、ボーリング調査による濃度分析 ・ブルーム把握のための調査 ・土壤、地下水、空気、表流水、底質等媒体を対象とした汚染物質の種類、濃度の特定
2. 発生源の特定	ウ. 人為等由来の汚染のおそれに関する情報	—	・10m単位区画での土壤濃度把握	・汚染規模に応じた土壤濃度把握 ・地下水濃度把握
3. 移行経路の特定	イ. 土地の用途及び地表の高さの変更、地質に関する情報	物理的/地質学的特徴の情報	・詳細調査実施時の柱状図の作成（地下水位、土質の確認）	・地下水（水位、流向、流速） ・表流水経路 ・土質構造（帯水層、その傾き、透水性） ・舗装等の被覆状況
4. バックグラウンド評価	エ. 自然由来の汚染のおそれに関する情報 オ. 水面埋立てに用いられた土砂由来の汚染のおそれに関する情報	—	・溶出量基準、地下水基準不適合時の敷地境界での地下水濃度分析	・敷地境界や敷地内の影響範囲外における濃度分析
5. 受容体の特定	・都道府県知事による飲用井戸の使用有無の調査	—	・含有量不適合、地下水飲用時のオンサイト、オフサイトのヒトが対象	・ヒトが対象
6. CSMの対象範囲の決定	ア. 土壤汚染状況調査の対象地の範囲を確定するための情報	—	—	—

※1) Appendix18-7 表-1 参照

(4) CSM構築例

テトラクロロエチレン(以下、PCEと称す)を脱脂工程で使用していた工場での地下水汚染のCSM評価事例を図4、図5に示す。調査の結果、対象地の地盤構成は図4に示すように、PCEが表層近くの不飽和地盤の土壤から検出された。現時点では、関東ローム層より下位の帯水層での地下水からPCEは検出されていないが、無対策の場合は、将来的に地下水汚染が発生し、敷地外への流出の可能性があるため、何らかの対策が必要であると評価された(図5)。

このように汚染サイトのCSMを構築することで、サイトの平面図や評価地点を含む断面図に地盤や汚染状況を重ね合わせることで、地盤・帯水層の汚染状況が把握でき、「現在、既に地下水汚染が生じているのか?」、「現在は、地下水汚染はないが、今後広がるのか?」、「地下水汚染が拡がりやすい状況にあるのか?」など、定性的な判断を行う上で必要な情報が得られる利点がある。また、土地利用・受容体の状況を考慮する場合は、地下水の飲用や利水の有無により評価地点を変更することができ、汚染源から評価地点までの距離が変化して

対策目標値が変わる場合がある。なお、距離減衰の効果を見込む場合には定量的な評価を行うために、帯水層での移動速度、土壌への吸着、帯水層中での微生物分解・生成などのより詳細な現場データを取得する必要がある。

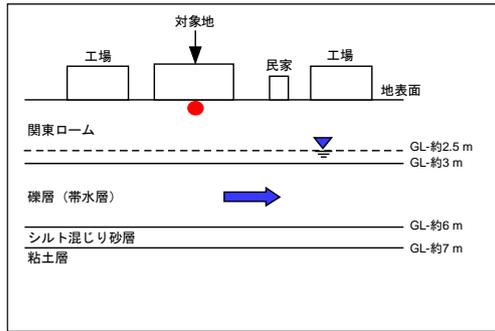


図4 予察的CSM (断面モデル)

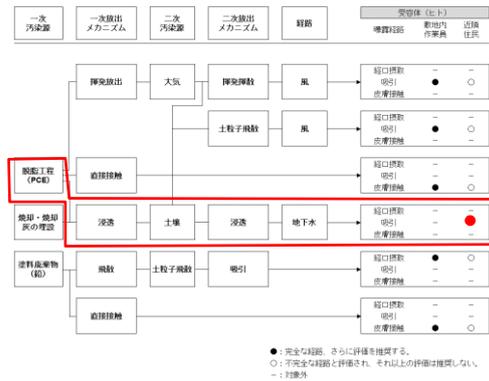


図5 曝露経路－受容体図

4. 汚染源が不明な場合の地下水汚染のサイト評価

4.1 CSM 活用目的

CSM 構築の初期段階で、汚染源が不明な場合の地下水汚染サイトの評価方法について示す。契機としては以下のようなケースが想定される。

- ・水質汚濁防止法の常時監視や揚水井戸の水質検査を契機とする地下水汚染の判明。
- ・土壌汚染調査の一環で地下水汚染が発見されたが、敷地内で明確な汚染源が特定できない場合。

上記の場合の CSM 構築の目的を緊急度順に表 3 に、想定される汚染状況の平面・断面のイメージを図 6 に示す。敷地内の観測井戸や揚水井戸で汚染物質が検出されているが、汚染源の位置や濃度などの状況が不明な状況である。まずは、既に地下水汚染の存在が確認されているので、敷地外への汚染水流出の有無の判断が最優先となる。また、対策検討のため地下水汚染範囲の把握も望ましい。次に、汚染源の探索は、汚染の原因が敷地内にあるのか、敷地外からのもらい汚染なのかの判断に寄与し得る。既知の汚染源対策を行ったが、地下水濃度が減少しない場合にも、対策の見直しの機会が得られる活用方法も考えられる。

表 3 CSM 構築の目的と評価対象項目

	CSM 構築の目的	評価対象項目
1	地下水汚染の拡大防止	<ul style="list-style-type: none"> ・汚染水の敷地外への流出の有無 ・地下水汚染範囲
2	汚染源の探索	<ul style="list-style-type: none"> ・敷地内に未知・調査漏れの汚染源が存在？ ・敷地外からのもらい汚染？
3	発見された汚染源の対策を行ったが、地下水濃度に変化がない	<ul style="list-style-type: none"> ・対策方法・対策範囲の見直し？ ・完全な汚染の除去が困難と判断する材料？

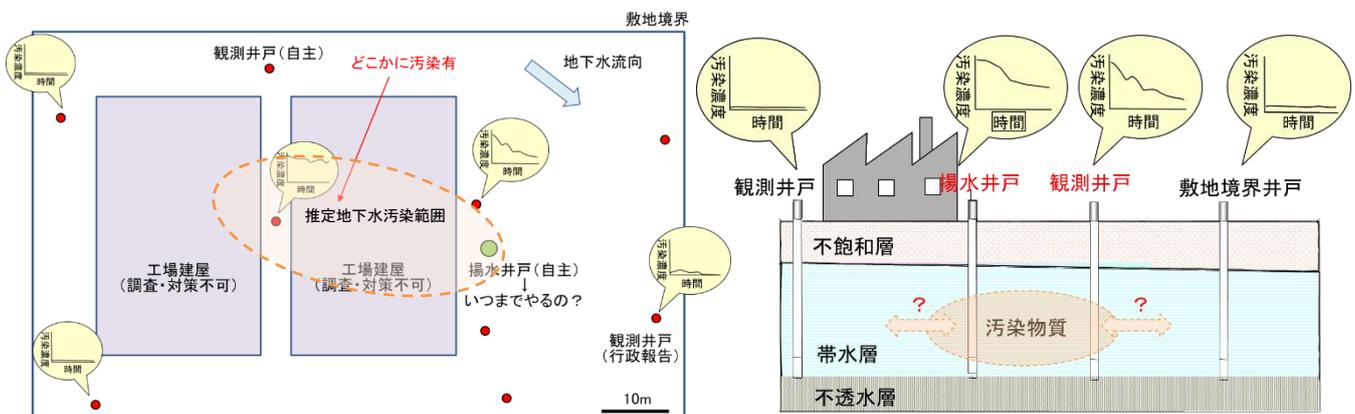


図6 汚染源が不明な場合の例 (左：平面図、右：断面図)

4.2 評価方法

(1) 基本的な評価方法

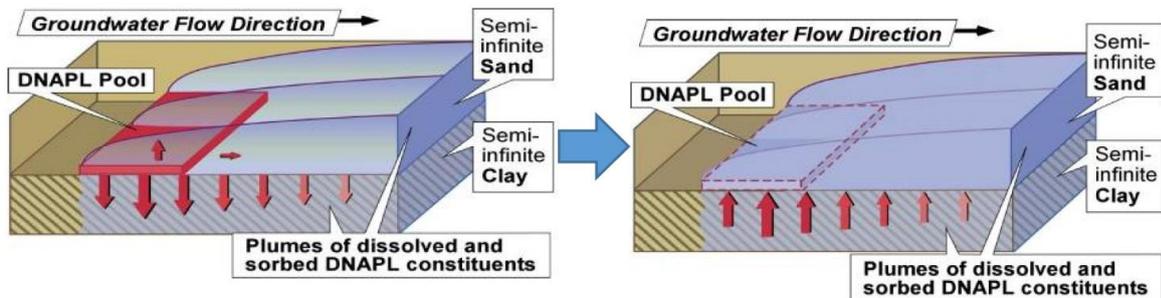
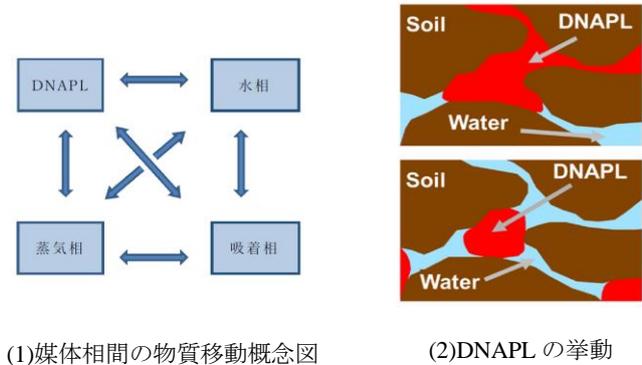
汚染源が不明な場合でも、汚染源が判明している場合と同様に、図2に示す地盤・地下水の状況、汚染物質の特定に関する情報収集を行う必要がある。地盤や地下水流動の状況が把握できたら、まずは、汚染水が敷地外へ流出する可能性について、検討すべきであると考え。検討の結果、敷地外への流出の可能性があれば、抑制対策の検討が必要となる。

なお、汚染源の探索では、地歴調査の結果などから汚染発生の可能性のある位置を推定したり、汚染水の観測点から地下水の上流方向に遡って地下水汚染の濃度分布を把握し、汚染源を推定することになるが、調査のための費用や期間がかかるのに比べ、確実に汚染源が確定できない懸念もあることに留意する必要がある。

(2) 汚染物質の地盤中での複雑な挙動の理解

汚染源が不明な場合には、汚染物質の地盤中での複雑な挙動すなわち汚染メカニズムの理解がより有用であると考えられる。汚染物質種別毎に挙動に特徴があることを図3に示したが、塩素化エチレン類などはより複雑な挙動を示すことが知られている。図7に塩素化エチレン類の地盤中の複雑な挙動のモデル例を示す。

塩素化エチレン類は、高濃度の場合には、水にほとんど溶けない非水性液体（DNAPL）・水溶液・土壌有機物への吸着・土壌間隙ガスの4種の媒体間に存在する。その中で、水溶液・土壌ガスとして存在分は移動性が高く、地下水の移動や微生物分解などにより、比較的速やかに減少する。一方、土壌粒子間隙に浸透したNAPLと土壌有機物への吸着分は移動性が低く、長期間存在し、周囲の地下水濃度が低下すると少しずつ溶出して、低濃度の地下水汚染の供給源となる（いわゆるリバウンド現象）。これらの現象のメカニズムを理解しておくことで、揚水対策を長期間行った場合に、最終的に浄化目標値を少し上回る程度の低濃度地下水汚染が継続する理由が説明でき、対策方法を見直すきっかけとできる。



(3)地下水汚染のリバウンド現象のメカニズム

図7 塩素化エチレン類の地盤中での複雑な挙動の理解³⁾

また、地下水汚染のプルーム形状について汚染物質種類による違いを把握しておくことも有用である。表4に汚染物質毎の帯水層中での平均的な拡がり程度の事例を示す。

表4 物質毎の地下水層中での拡がり程度の事例⁴⁾⁵⁾

プルームの種類	プルーム形状(m)	評価サイト数
BTEX	64×45	42
PCE等塩素化エチレン類	300×150	88
TCA、DCA等の塩素化エタン類	150×105	29
塩素イオン、塩水	210×150	25

B:ベンゼン、T:トルエン、E:エチルベンゼン、X:キシレン、TCA:トリクロロエタン、DCA:ジクロロエタン
 プルームの大きさ: 検出下限を超える範囲(1フィート=0.3mで換算)

米国での事例調査結果だが、BTEXによる地下水汚染ブルームは地下水流向方向 64m×直行方向 45m に対し、PCE などの塩素化エチレン類は、流向方向 300m×直行方向 150m と大きくかつやや細長い楕円となる傾向が報告されている。汚染源から観測点までの距離の推定も可能となる可能性があり、我が国においてもこのような事例を収集・蓄積することが有用である。なお、土壤環境センター 土壤・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会では、様々な地下水汚染事例・データの収集を活動目的の一つとして実施されており、今後、データの収集およびその有効活用を進めたいと考える。

5. まとめと今後の課題

5.1 まとめ

- 地下水汚染の評価・対策のためのサイト評価に CSM を活用することは、下記のように多くの有用性がある。
- ・地下水汚染の移動・拡大のメカニズムを科学的に説明でき、地下水汚染の拡大防止の評価に有効である。
 - ・汚染源が把握されていれば、地盤状況を適切に把握することで、将来の地下水汚染の拡がりや対策効果の予測を行うことができる。
 - ・地下水揚水処理は、高濃度の汚染水に対しては効率的な汚染除去方法であるが、揚水の濃度が低下すると費用対効果の低い方法となる。地下水対策が長期化する場合には、ある時点で対策方法の変更が必要となるが、現在はその適切な判断方法が確立されていない。この場合は、CSM 構築と自然減衰効果の予測方法を組み合わせることで、対策方法変更の必要性を評価できる可能性がある。
 - ・汚染源が不明な場合にも、CSM 構築は有用であり、汚染源把握時と同様の方法で、敷地外への拡散予測を行うことが可能と思われる。また、複数のステークホルダーが関与する際に、ステークホルダー毎に対策の要望が異なる場合があるが、CSM 構築により汚染状態に対し共有の認識を持つことで、対策方針についての合意形成に役立つことも期待できる。

5.2 今後の課題

地下水汚染サイトの有用な評価が可能な CSM 構築のためには、複数の専門知識と経験・事例が必要となる。具体的には、以下のような課題が抽出された。

- ・地下水汚染の挙動を説明するための技術項目が多く、わかりやすい整理が必要。
- ・塩素化エチレン類の地下水汚染の予測・制御に生物分解を含む自然減衰効果の評価が必要。
- ・地下水調査には高い技術力とある程度の費用は必要、しかし、現状を適切に把握しないで浄化を目指した対策を実施すると多額の費用・時間がかかる懸念がある。
- ・CSM 構築のためには十分な情報収集が必要だが、多くの情報を収集するためには費用も時間もかかる。収集が困難な情報については、評価の目的に応じた最小限の情報でも意思決定を可能とする必要がある。そのためには、定性的評価と定量的評価を目的に応じて使い分けることが有効と考える。

参考文献

- 1) ASTM E1689-95(2014) : Standard Guide or Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites
- 2) 地盤工学会(2002) : 土壤・地下水汚染の調査・予測・対策,p34,図 2-5
- 3) The Interstate Technology & Regulatory Council Integrated DNAPL Site Strategy Team (2011) : Integrated DNAPL Site Strategy: https://www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/IntegratedDNAPLStrategy_IDSSDoc/IDSS-1.pdf
- 4) American Petroleum Institute(1989) : Hydrogeologic Data Base for Groundwater Modeling API Publication No. 4476, API, Washington, DC. The database is available on diskette(Lotus or Microsoft Excel); contact the API Information Specialist at ehs@api.org.
- 5) Newell, C.J., L.P.Hopkins, and P.B.Bedient(1990) : “A Hydrogeologic Database for Groundwater Modelling,” Ground Water, Vol.28, No.5, Sept./Oct. 1990. pp.703-714.