

(0074) ライフサイクル CSM 手法の活用方法の検討

○奥田信康¹・宮田 彰¹・白井昌洋¹・折茂芳則¹・大西絢子¹・サステイナブル・アプローチ検討部会¹
¹ 土壌環境センター

1. 背景および目的

土壌汚染に起因する対象サイトでのヒト健康への影響のリスク評価を実施するためには、評価対象サイトの状況を的確に把握することが極めて重要である。現実の汚染問題では、複雑な地盤や汚染状況に加え、周辺環境への影響の有無や現在及び将来の土地利用など、具体的な対策案の検討を進める前の前提条件の整理が重要となる。これら個別サイトの種々の問題を整理する上で、サイト概念モデル (Conceptual Site Model: CSM) の構築が有効であり、海外においても様々なアプローチ方法が検討・活用されている¹⁾。

土壌環境センター技術委員会サステイナブル・アプローチ検討部会の CSM 検討 WG では、平成 28・29 年度活動として、リスク評価を活用して複雑な日本の土壌汚染問題の解決に寄与することを目的として、ライフサイクル CSM 手法に着目し、国内の汚染対策事例をベースとした 3 つのケーススタディを実施した。今回は、そのうちの 1 事例についてライフサイクル CSM 手法の具体的な活用方法を紹介する。

2. ライフサイクル CSM 手法

CSM 手法に関し、ASTM E1689-95 (2014)¹⁾において、「CSM は、修復プロジェクトの全ての段階を通して、体系的計画ツールとして適用されるべき」と明記されている。つまり、CSM は、修復プロジェクトの様々な段階に対応した複数の形を有する必要がある。

米国環境保護庁 (U.S.EPA) では、環境修復の最適管理事例として、環境浄化のステップに対応したプロジェクトのライフサイクル CSM の活用²⁾が提案されている。これは環境修復プロジェクトの進行段階を 6 つのステージに区分し、各々について適切な CSM の特性や必要事項を整理したものである。CSM は、検討の目的に応じて変化するものであり、新たな情報を加えることでより実現象に近づけ、詳細な検討が可能となるものである。作成者ごとにいろいろな形式が存在することになるが、代表的な場面について必要となる情報を漏れなく収集し、多くの人が理解しやすい形式で図化されると共通の理解が進むことが期待でき、有用な方法であると考えられる。各ライフサイクル CSM の活用のタイミングと使用目的の概要を表 1 に示す。

表 1 CSM ライフサイクルステージ

環境浄化ステップ	ライフサイクル CSM 名称	解説 ²⁾
サイト評価	予察的 CSM	プロジェクトマイルストーンまたは既存のデータに基づく成果物。計画的な取り組みの基礎となる体系的な計画に先立って開発
	ベースライン CSM	ステークホルダーの合意あるいは相違を文書化するために使用されるプロジェクトマイルストーンまたは成果物、データギャップ、不確実性及びニーズを特定する。体系的な計画の成果
サイト調査	サイト特性評価 CSM	新しいデータとしての CSM の反復的な改善は、調査作業中に利用可能になる。テクノロジーの選択と是正の意思決定をサポート
対策方法選定	対策設計 CSM	対策の設計中の CSM の反復的改善。対策設計の基礎と技術的詳細の開発を支援
対策実施	修復/緩和 CSM	対策実施中の CSM の反復改善;是正措置の実施と最適化の取り組みを支援し、クリーンアップの目標を達成するための文書を提供
建設後の活動	修復後 CSM	包括的サイト CSM の物理的、化学的、地質学的及び地質学的情報は、再利用計画をサポートする。施設内の管理と現場に残された廃棄物を文書化する。その他の主要サイト属性

Investigation of application method of life cycle Conceptual Site Model

Nobuyasu Okuda¹, Akira Miyata¹, Masahiro Shirai¹, Yoshinori Orimo¹, Junko Ohnishi¹,
and Sustainable Approach Reserch Working¹ (¹GEPC)

連絡先: 〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-5 KS ビル 3F 一般社団法人土壌環境センター
TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

3. ケーススタディ「某医療機器製造工場における土壌調査・対策事例」

土壌汚染対策法が施行される以前に実施された土地売却時における自主調査結果をベースに、調査・対策実施内容を CSM ライフサイクルステージの予察的 CSM、ベースライン CSM、サイト特性評価 CSM 及び対策設計 CSM までの段階に当てはめ、ライフサイクル CSM 手法の具体的な活用を試みた。

3.1 サイト概要

1) サイトの状況 (図 1)

昭和 60 年代前半に操業を開始した医療機器製造工場 (敷地面積 9,500 m²) において、工場閉鎖時に不動産開発会社への土地売却が予定されていたため自主的に調査を実施。工場における主な作業工程は脱脂 (テトラクロロエチレン: 以下 PCE)、塗装 (鉛含有)、焼却であった。

2) 周辺状況 (図 2)

対象地は工業、商業及び住居地域が混在した地域であり、対象施設に隣接する土地利用は食品工場、印刷業、染色業及び印刷業である。最寄りの民家は北側約 25 m にある。なお、対象地周辺では、地下水の飲用利用はないとのことである。

3) 周辺の水文地質状況

対象地のある地域は台地上に位置し、海拔高度は約 25 m である。対象地で実施したボーリング調査結果によると、対象地の地質構造は、地表面下 3 m 程度までは関東ローム層で、その下位には礫層 (地表下 3~6 m 程度) があり、さらにシルト混じり砂層 (地表下 6~7 m)、粘土層 (地表下 7 m~) が続いている。第一帯水層は浅層部の礫層であり、地下水位は地表下 2.5 m 程度であった。

対象地周辺における浅層地下水に関する資料は確認できなかったが、表流水及び浅層地下水は図 2 に示すように対象地の西側を南西から北東へ流れる川に沿った流向であると推定される。

4) 自治体による地下水調査結果

対象地がある自治体では地下水の水質測定を実施しており、浅層地下水における広域な PCE 汚染が確認されている。汚染原因は明確にはなっていないが、対象地の上・下流側で PCE 地下水汚染が確認されており、対象地における PCE 地下水汚染の影響は否定できない。

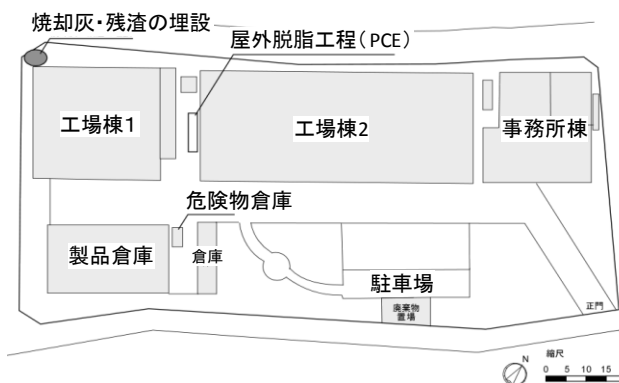


図 1 敷地配置図

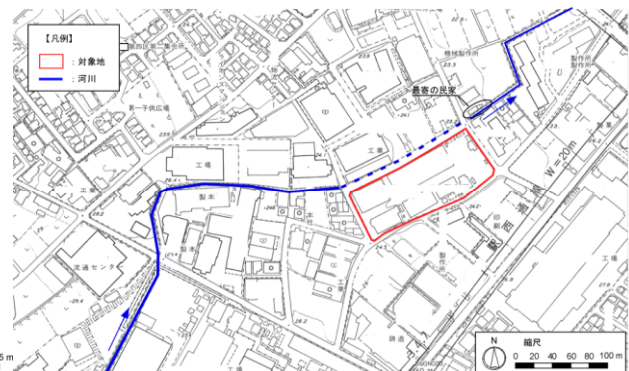


図 2 対象地周辺図

3.2 サイト評価

3.2.1 予察的 CSM

入手したボーリング柱状図を基にした対象地の断面モデルを図 3 に示す。担当者へのインタビューの結果、対象地における潜在的な汚染物質は PCE、鉛及びダイオキシン類であり、以下に示す土壌・地下水汚染のおそれを引き起こす可能性がある事項が確認された。

- 1) 鉛含有塗料カスの廃棄：塗装工程で鉛含有塗料を使用し、塗料カスを廃棄物置場周辺に投棄していた。
- 2) 焼却・焼却灰の埋設：工場棟 1 の西側敷地境界部で、脱脂工程で使用したウエス等の焼却をピットで行っており、焼却灰及び焼却残渣をピット内で埋設していた。
- 3) PCE を使用している屋外脱脂工程：工場棟 1 と工場棟 2 の間の屋外エリアにおいて、PCE を含む脱脂剤を使用した脱脂作業を行っていた。使用当時は、作業場所は舗装されていたが、舗装には亀裂が入っており、浸漬容器からこぼれた脱脂剤は地下に浸透していた可能性がある。

上記の情報をベースに曝露経路-受容体図 (図 4) を作成した。この図より、対象地において潜在的に懸念される環境媒体は、大気、土壌及び地下水であると推定された。対象地における考慮すべき経路は、揮発揮散による吸引、土粒子飛散による経口摂取および直接摂取による皮膚接触であると考えられる。最も可能性が高

い受容体と曝露経路は、PCE 含有溶剤を使用した脱脂工程を行っている従業員に対する揮発揮散の経路であると考えられた。地下水飲用がないことから、曝露対象は敷地内の作業員のみとした。

以上の内容を踏まえ、CSM 開発のための基本要素の検討結果を表 2 にとりまとめた。

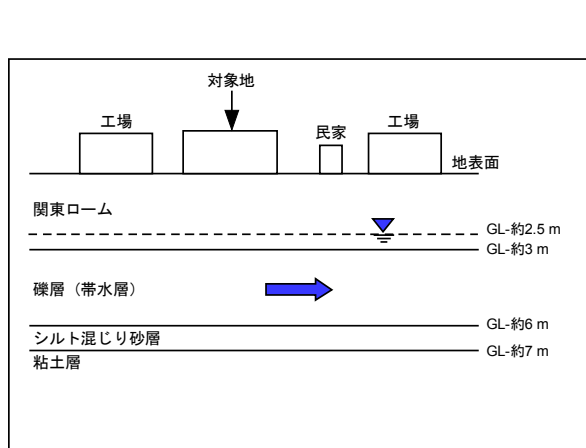


図 3 予察的 CSM (断面モデル)

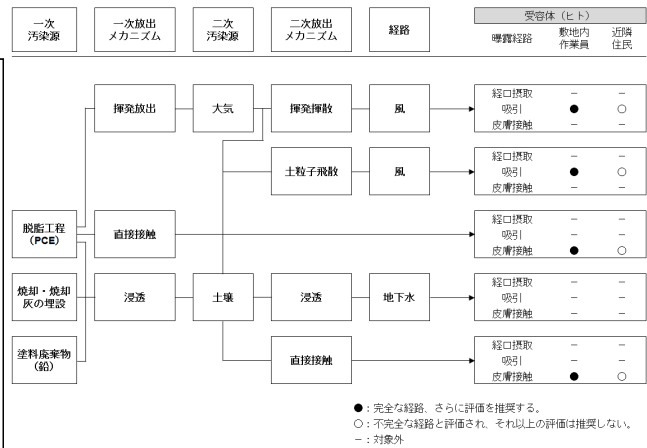


図 4 曝露経路-受容体図

表 2 CSM 開発のための基本要素の検討結果

基本要素	概要	理由
汚染物質の特定	<ul style="list-style-type: none"> 土壌、地下水、空気中存在する汚染物質として、工場で使用されたテトラクロロエチレン及び鉛と、敷地内での焼却による副生物質としてダイオキシン類が考えられる。 周辺の工場で使用された汚染物質による汚染の可能性もある。 	地歴調査により、工場での使用物質が判明した。周辺には種々の工場が存在している。
発生源の特定	<ul style="list-style-type: none"> 工場内の推定発生源 (3ヶ所)。PCE を使用した脱脂工程、PCE をふき取ったウエスの焼却灰・残渣埋設場所、鉛含有塗料カス廃棄場所 自治体実施の地下水水質測定の結果、広域 PCE 地下水汚染が確認。 	地歴調査の聴き取りにより、有害物質の使用場所が判明している。
潜在的な汚染物質の移行経路の特定	<ul style="list-style-type: none"> 汚染物質の移行経路は、揮発揮散による吸引、土粒子飛散による経口摂取及び直接摂取による皮膚接触が考えられる。 対象外の移行経路：地下水飲用、農作物からの経口摂取、シャワー等による皮膚接触の経路の可能性はない。 	地下水の飲用、農業用としての利用はないことが判明している。
バックグラウンド評価	<ul style="list-style-type: none"> 既存のバックグラウンドデータは入手できなかった。 	調査未実施のため。
受容体の特定	<ul style="list-style-type: none"> 敷地内：現在は工場の操業を停止しており、受容体はないとする。 敷地外：下流側に民家があるため、オフサイトの住民が受容体。 生態系受容体は対象外とする。 	地歴調査により、下流側の状況が把握できている。
システム境界の決定	<ul style="list-style-type: none"> 敷地境界部から 150 m と仮定する。 	調査等を未実施のため、対象地周辺図を取得した範囲を対象とする。

3. 2. 2 概況調査

1) 表層土壌調査

表層土壌調査の調査仕様は「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針 (平成 11 年、環境省)」である。

土壌ガス調査では第一種特定有害物質 11 項目のうち PCE のみが 19 地点中 7 地点 (0.25~3.16 vol ppm) で検出された。第二種特定有害物質では、溶出量試験 (9 項目) と含有量試験 4 項目 (カドミウム、鉛、砒素及び総水銀 全含有分析) を対象とした表層土壌調査 (表層~地表下 0.15 m) を実施した。30 m 格子 (5 地点混合) 9 試料中 1 試料で鉛含有量 (全含有分析) のみが 689 mg/kg と当時の判定値 (調査・対策指針での含有量参考値 600 mg/kg) を超過し、さらに個別分析の結果 2 地点 (980 mg/kg 及び 680 mg/kg) で判定値を超過していた。

2) 絞込み調査

鉛汚染の範囲を特定するために絞込み調査を実施した結果、10 地点中 1 地点で判定値の超過が確認され、平面的な汚染範囲が特定された。(鉛全含有量の判定値超過箇所 合計 3 地点)

3) 埋設焼却灰調査

脱脂工程で使用したウエス等の焼却及び埋設場所にてボーリング調査 (1 地点 1 試料: 0.5 m) を行った結果、ダイオキシン類が判定値 (土壌環境基準: 1,000 pg-TEQ/g) を超過し、濃度は 9,600 pg-TEQ/g であった。

3.2.3 ベースライン CSM

表層調査結果を基に曝露経路－受容体図の修正を行った(図5)。以下に、ベースライン CSM によるサイト評価結果を示す。

1) 鉛含有塗料カスの廃棄

塗装カスの廃棄に起因する鉛汚染は、他の汚染とは隔離されていること、かつ含有量のみが評価基準を超過していたことから、直接摂取による単独の曝露経路であることが確認された。概況調査では平面分布の特定ができたことから、詳細調査(サイト特性評価 CSM)で汚染深度の特定を行う必要がある。

2) 焼却・焼却灰の埋設

焼却・埋設場所でダイオキシン類が判定値を超過していたため、地下浸透による深部への汚染拡散及び地下水汚染の可能性が確認された。詳細調査(サイト特性評価 CSM)で汚染範囲及び深度の特定を行う必要がある。

3) PCE を使用している屋外脱脂工程

PCE は屋外脱脂工程以外にも焼却灰の埋設ピット周辺及び製品倉庫棟でも確認され、広範囲に及んでいる可能性が確認された。詳細調査(サイト特性評価 CSM)で汚染範囲及び汚染深度の特定ならびに地下水への影響の確認を行う必要がある。

3.3 サイト特性評価 CSM

ベースライン CSM の評価をもとに深度方向調査を計画・実施し、対象サイトの具体的な汚染状況を把握した。

1) 鉛含有量ボーリング調査

鉛の全含有量が判定値を超過した3地点に対して、地表下5mまでのボーリング調査を実施したところ、3地点とも全深度で判定値以下(濃度:8~39 mg/kg)であった。したがって、鉛汚染範囲は平面110 m²×深さ0.5 mであることが特定された。また、地下水位は地表下約1.5 mであったが、いずれの試料でも鉛は不検出であった。したがって、鉛汚染は表層のみ(裸地)に分布していることが確認された。

2) 埋設焼却灰調査

概況調査の検出地点の周辺の絞込み調査及びボーリング・地下水調査を実施した。絞込み調査の結果、いずれの試料からもダイオキシン類の基準超過は確認されなかった。また、焼却灰は地表下0.75 m付近以深では確認されなかった。以上より、ダイオキシン類汚染範囲は平面50 m²×深さ0.75 mであることが特定された。

3) PCE 浅層ボーリング調査

PCE による敷地内での浅層(表層から地表面下3 m)における土壤汚染の拡がりを確認するために浅層ボーリング調査(39地点)を実施した(図6 地質断面計画図)。ボーリング結果よりA~Cの地質断面を確認した。敷地内深度3 mまでの基本的な地質構造は、盛土層と下位の粘性土及び砂・礫混じり粘性土となっている。また、地下水位はKBM(仮ベンチマーク) -1.7 m~-0.22 mであり、概ね北東向きであることが確認された。地下水位コンターを図7に示す。

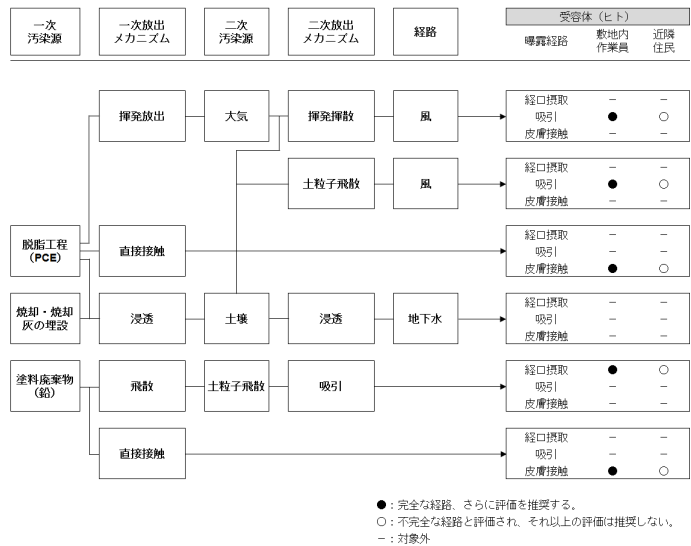


図5 曝露経路－受容体図(修正版)

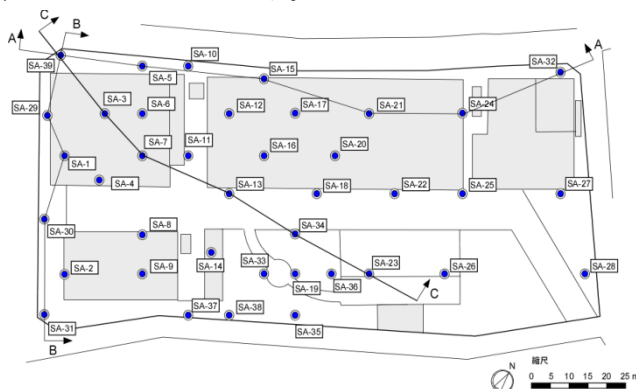


図6 地質断面計画図

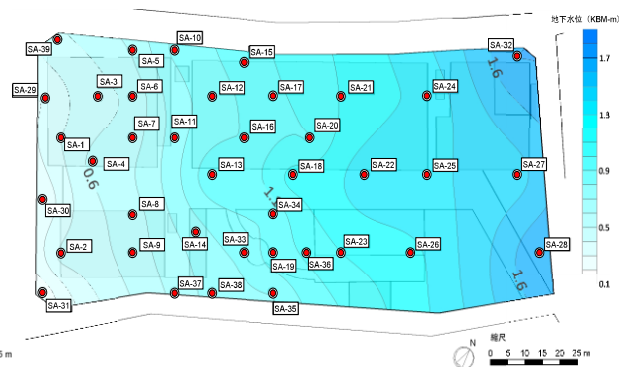


図7 地下水位コンター図

土壤汚染の深度分布を評価するために各地点4深度（0.5 m、1.0 m、2.0 m 及び 3.0 m）の土壤を採取し溶出量試験を実施した。その結果、39 地点中 12 地点（156 試料中 24 試料）で溶出量基準(0.01 mg/L)超過が確認され、PCE 濃度は 0.002 mg/L (SA-17 : 0.5 m) ~0.22 mg/L (SA-3 : 0.5 m) であった。5 地点で深度 2.0 m の試料において基準超過が確認され、全地点とも深度 3.0 m は基準以下であった。その後、深度 2.0 m で基準を超過した 5 地点で追加ボーリング調査を実施した結果、深度 4.0 m 及び 5.0 m では PCE はいずれも基準以下であった（図 8）。地下水試料は全地点から 39 試料採取した。地下水分析の結果、39 地点中 34 地点で PCE の地下水基準(0.01 mg/L)超過が確認され、濃度は 0.003 mg/L (SA-21) ~0.41 mg/L (SA-3) であった（図 9）。

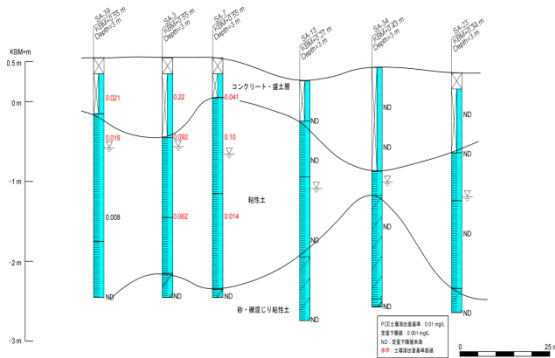


図 8 PCE 土壤分析結果 (C 断面)

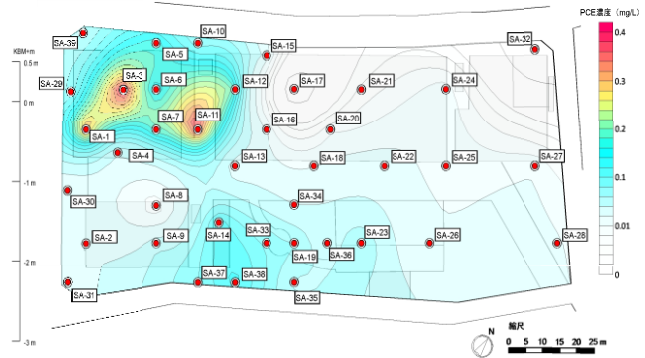


図 9 PCE 地下水濃度コンター図

4) PCE 対策範囲

PCE の土壤溶出量基準超過エリアは汚染源として特定されている敷地西側角に限定されていたが、地下水基準超過エリアはほぼ敷地全域であった。自治体が行っている地下水の水質測定結果によれば、対象地の地下水上流側を含む周辺では PCE による広域の地下水汚染が存在し、また、PCE 地下水濃度が相対的に高い範囲が敷地の西側と東側に分かれていることが確認された（図 9 参照）。

行政との協議より「土壤溶出量基準超過エリア以外での PCE 地下水汚染は広域の PCE 地下水汚染の影響を受けていること」が認識されて、その結果として「PCE 土壤汚染の面積が広域地下水汚染と比較して小さく、かつ、敷地内の地下水汚染の原因として敷地内の土壤汚染と広域地下水汚染の影響が分離できないことから、土壤溶出量基準超過エリア以外の地下水汚染については対象会社の責任範囲外としてよい」と判断された。

行政との協議に基づき確定した PCE 土壤・地下水汚染に対する対策範囲を図 10 に示す。当時は土壤汚染対策法の単位区画という概念はなく、中点法（基準超過地点と基準以下地点の中点を対策範囲とする）が一般的であったため、対策範囲の設定には中点法を用いた。その結果、対策深度が 1.5 m の範囲（図中の黄色ハッチ）と 2.5 m の範囲（図中の赤色ハッチ）の 2 区画となり、対策土量は合計で 3,405 m³（黄色範囲：面積 720 m²×対策深度 1.5 m=1,080 m³、赤色範囲：面積 930 m²×対策深度 2.5 m=2,325 m³）となった。

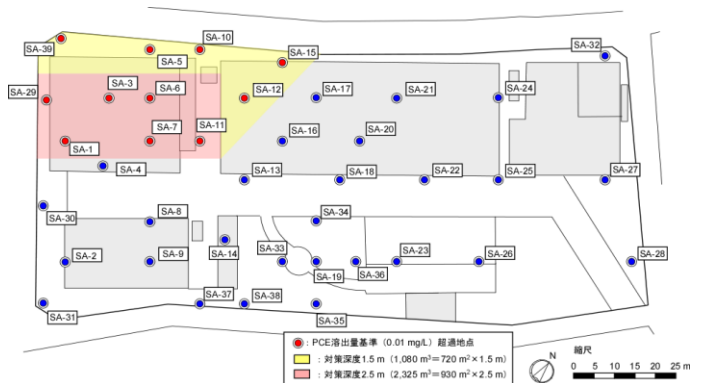


図 10 PCE 対策範囲

3.4 対策設計 CSM

対象地における対策方法検討のため、汚染物質ごとの確認事項について整理を行った。

1) 鉛（含有量）及びダイオキシン類

鉛及びダイオキシン類とも土壤汚染のみが確認され、対策深度は表層付近（0.5 m 及び 0.75 m）であった。両物質とも土壤含有量のみが基準を超過しているため、曝露対象は従業員のみであり、敷地外の住民に対する影響はないことが確認された。ダイオキシン類の一部を除き大半が裸地であるため、曝露経路遮断のためには、被覆あるいは掘削除去を行う必要がある。

上記の結果、対象地は不動産開発会社への売却が検討されており、不動産開発会社から汚染土壤を完全に除去することが条件であったことから、対策工法として掘削除去を選択し、行政に承認された。

2) PCE

PCE 汚染による土壤汚染は汚染源と想定された敷地西側付近に限定されており、汚染範囲は面積 1,650 m²、土量 3,405 m³となった（一部、ダイオキシン類汚染範囲と重複）。地下水汚染は敷地のほぼ全域で確認され

たが、対象会社の責任範囲は土壌溶出量基準超過エリアのみと判断された。なお、対象地では飲用井戸はない。

上記の結果、調査終了時点では土壌・地下水汚染に対する曝露を受ける対象が存在しない状況であったが、対象地は不動産開発会社への売却が検討されているため、土壌汚染の対策方法には土壌溶出量基準超過土壌の掘削除去を選択した。具体的には、土留め兼遮水用に鋼矢板を打設し、バックホウ等で汚染土壌を掘削。掘削面（側面及び底面）分析により基準適合を確認。掘削土は内袋付きフレコンバックに充填し場外搬出とする。

地下水汚染の対策方法は、汚染土壌を掘削除去した後に遮水壁内に残留する対象エリア内の汚染地下水の全量を汲み出すことで、敷地内汚染土壌からの溶出分の対策を完了としてよいと行政より承認された。具体的には、土壌掘削後に遮水壁内部に残留する水中ポンプで汚染地下水を全量揚水除去し、揚水した汚染地下水は敷地内に設置した簡易排水処理施設にて活性炭処理し、処理水は地下水環境基準以下を確認し下水放流する。

汚染地下水処理後、掘削箇所を清浄土で埋め戻し、遮水壁を除去して対策完了となる。

3) 対策工法決定のための調査項目

対策工法を決定するために、対策を実施する前に、不透水層を確認するためのボーリング調査、地下水の化学特性試験、簡易排水処理施設の処理能力試験（破過試験等）の検討・追加調査を実施した。

4. 考察

各ステップのCSM構築に必要な情報と調査方法、及びとりまとめ上の留意点について下表に整理する。

表3 本ケーススタディにおけるライフサイクルCSM構築のための留意点

プロジェクト目標のステージ	ライフサイクルCSMの名称	必要な要素	着目点	具体的な調査手段	とりまとめの留意点	ケーススタディの事例
サイト調査	予察的CSM	対象地の基本情報	・対象地の事業内容 ・土地利用の履歴	・地歴調査 ・登記簿謄本の変遷整理 ・旧地形図の変遷比較 ・航空写真の変遷比較	・敷地平面図 ・施設の配置図 ・廃棄物置き場、埋設位置等の確認 ・過去の土地利用	工場解体に伴うフェーズ1調査およびフェーズ2調査により状況が確認されている。
		有害物質等の使用履歴	・対象地の事業内容 ・使用薬品等の履歴	・施設届出資料 ・ヒアリング	・有害物質使用場所の確認 ・廃棄物置き場、焼却場所、埋設位置等の確認 ・可能性のある汚染物質を想定する。	工場解体に伴うフェーズ1調査およびフェーズ2調査により状況が確認されている。
		水理地質情報	・地層区分 ・地下水位 ・透水層の位置	・ボーリング調査 ・現場透水試験 ・粒度試験	・対象範囲の地質断面図（概略でも可）を作成するため最低2箇所のボーリングが必要。 ・地下水位、帯水層の情報があればベター。	工場解体に伴うフェーズ1調査およびフェーズ2調査により状況が確認されている。
		潜在的な汚染物質の移行経路	・対象地と民家の位置関係 ・用水路の経路 ・地下水流向 ・水利用の実態 ・敷地内への立入の容易さ ・希少動植物の分布	・農業用水台帳の閲覧 ・水道施設台帳の閲覧 ・井戸調査 ・地下水位観測 ・レッドデータブック調査	・水理地質との関連を検討し、汚染物質の移行経路を想定する。	・周辺に民家はありますが、地下水利用はないことである。 ・粉塵等の発生による周辺住民への影響を考慮した。
		受容体の想定	・住民の有無 ・敷地内への立入りの可否 ・周辺の生態系など	・周辺環境調査	・汚染物質の影響を受ける可能性のある受容体を想定する。	工場内の従業員および周辺住民
	ベースラインCSM	予察的CSMに同じ	・現場条件に関する利害関係者の意見 ・追加調査の必要性評価	・ヒアリング ・土壌汚染調査 ・地表ガス調査 ・地下水汚染調査 ・水質分析（バックグラウンドを含む）	・不確実性の仮説、データギャップ、関係者のニーズを加味して、予察的CSMを修正する。	・初期段階の調査により、VOC、鉛およびダイオキシン類による汚染が確認されている。 ・汚染源がほぼ特定されている。
サイト評価	サイト特性評価CSM	各種調査データの関連性	・サイト固有の緊急対応の必要性 ・ヒト健康リスク ・生態系リスク	---	・地質学的、水理学的、化学的データの統合	・追加調査により平面および深度方向の汚染範囲が特定された。 ・地下水汚染の原因として、対象地の操業に起因する汚染と地下水の上流からのもらい汚染が確認された。
対策方法選定	対策設計CSM	対策設計の最適化	・水理地質条件 ・汚染物質の濃度、分布範囲 ・対策工の特性 ・対策完了レベルの設定	・対策方法選定に必要な追加調査 ・水質モニタリング	・今後の土地利用を考慮する。 ・対策目標を明確にする。	・自治体との協議により基本的な方針を決定した。 ・今後の土地利用を考慮した工法を選択した。
対策実施	修復/緩和CSM	対策最適化の改善策	・現場で遭遇した条件の変化への対応 ・原位置処理および現場外処理の修復実施方法の最適化	・対策効果改善に必要な追加調査 ・水質モニタリング	・本件では修復/緩和CSMは該当しなかった。	・掘削時に掘削面が基準以下であることを確認した。 ・もらい汚染があるため、対策後のモニタリングは実施しなかった。

5. まとめ

土壌・地下水汚染対策にCSMを適用することで、汚染サイトの汚染源の現状、汚染物質の挙動、曝露を受ける可能性などの可視化促進が期待できる。汚染物質を適切に管理し、健康被害の未然防止を徹底した上で、対象地の状況に応じた複数の対策案を準備できれば、その中から最適な方法の選択が可能になる。ライフサイクルCSM手法はこれらを支援する有用な手法の一つである。今後、種々の場面で活用するためには、具体的なCSM構築の手順の確立、評価に必要な各種パラメーターの入手方法及び現場での調査方法、有用な活用事例の充実などの活動が必要となるため、引き続き検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) ASTM E1689-95 (2014) : Standard Guide or Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites
- 2) U.S.EPA (2011) : Environmental Cleanup Best Management Practices : Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model (EPA 542-F-11-011) July 2011