特集>>>　解体とリサイクル，廃棄物処理

汚染土壌対策
戦略的な土地活用を支援する「サステナブルレメディエーション」に基づく評価ツールの開発 SGRT-T

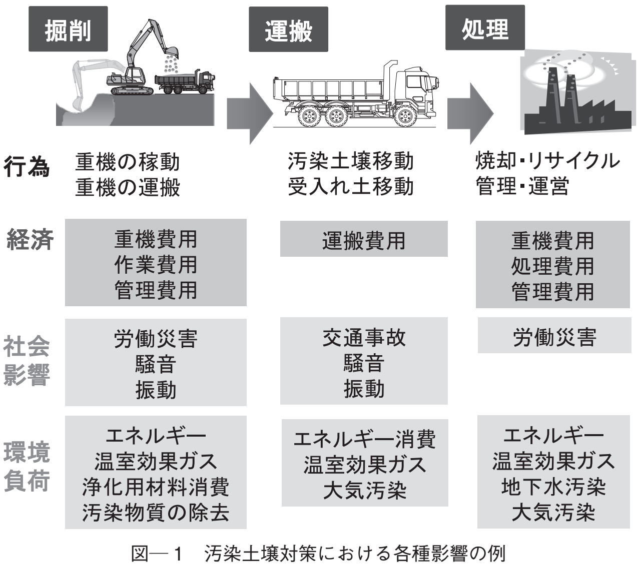
古川靖英・舟川将史

汚染されたサイトの土地利用や汚染土壌対策時の対策技術の選択において，これまでは対策費用や施工期間などの経済的側面が重視されてきたが，近年，環境・社会・経済の三側面から総合的に対策技術を評価する「サステナブルレメディエーション」の考えに基づく手法が注目されている。本報では，海外のサステナブルレメディエーションにおけるツールや国内の関連ツールについて概説し，国内で運用を開始した評価ツール「SGRT-T」(Sustainable Green Remediation Tool-T)（以下「本評価ツール」という）の概要と，モデルケースにおける試算例を示す。

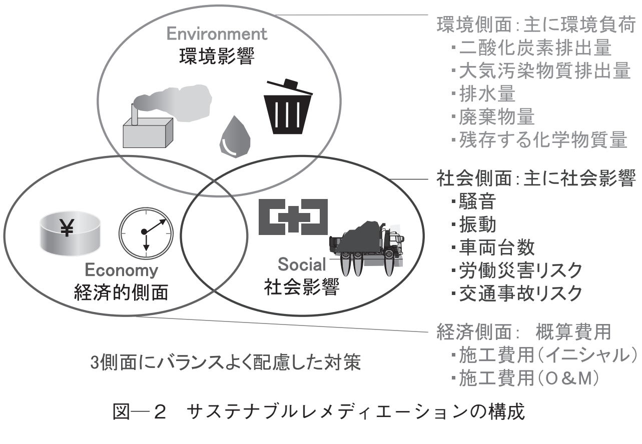
キーワード：土壌汚染，ブラウンフィールド，VOC，サステナブルレメディエーション

1. はじめに

有害な化学物質で汚染された土壌汚染サイトは現在でも国内各地に存在し，社会的な問題となっている。汚染されたサイトの土地利用や土壌汚染対策時の工法選択においては，対策費用や施工期間などの経済的側面が重視されており，確実性の高い掘削除去が優先して選択されている現状にある。この一方，土壌汚染対策には原位置浄化や封じ込めなどの方法もあり，サイトの利用状況や対策後の土地活用に併せた技術選択を行うことが重要である。また，汚染土壌対策においては**図—1**に示す通り，経済的側面のみならず，使用した燃料に伴う温室効果ガスの排出や排水などの周辺環境負荷，労働災害リスクや騒音，振動などの社会影響も問題となることが知られている。欧米では，環境・社会・経済の三側面から総合的な判断を行い，各種ステークホルダーのニーズにあった，より合理的な対策法を導き出す考え方に基づいた土壌汚染対策の意思決定の手法として，“サステナブルレメディエーション”が導入されつつある（**図—2**）。これは，人の健康リスクや生態リスクなどの低減だけでなく，措置に伴う外部環境負荷，さらにその後の土地利用も含めた社会的な影響を考慮した上で，より持続可能な土壌汚染対策選択の意思決定を行うことを目的とする問題解決手法である。以上の背景を踏まえ，本報ではサステナブルレメディエーション評価用のツールについて概説するとともに，コスト，二酸化炭素排出量などの環境影響の側面や交通事故リスクといった社会影響の検討材料を加味した評価例を示す。



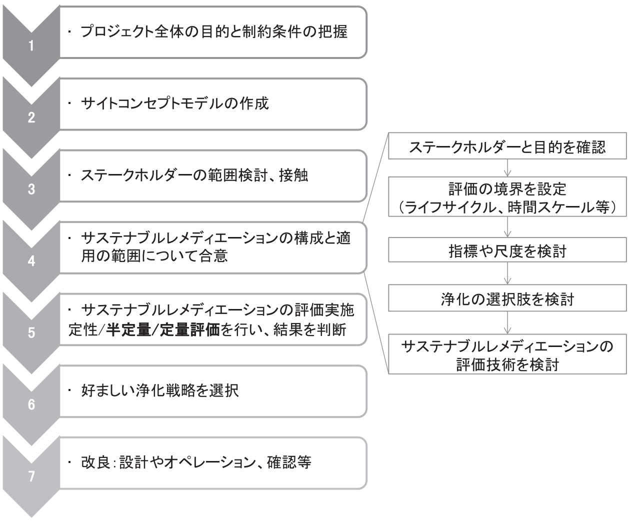
図—1　汚染土壌対策における各種影響の例



図—2　サステナブルレメディエーションの構成

2. 既存の汚染土壌対策評価用ツール

サステナブルレメディエーションの基本的な進め方のフローの例を**図—3**に示す。この中で実施されるサステナビリティ評価について，定性評価については比較的簡単な実施が可能であるが，半定量評価や定量評価については多大な労力を必要とする。そこで，各国の行政や個別の企業（主に環境コンサルタント）は，評価を簡便化すべく，独自の評価ツールの開発を進めている。例として，無償での取得が可能であり，関連情報が公開されている代表的なツール（SRT TM，Sitewise）の概要を**表—1**に示す。両ツール共に Microsoft Excel のスプレッドシート上に構築されたものであり，入力データと出力結果の確認がしやすいという特徴がある。SRT は，Risk-Based Corrective Action（RBCA）の“Tier”の概念に基づいた評価を行う[1]。SRT では，Tier1 および Tier2 の計算が可能であり，前者は簡便な評価に適しており，詳細あるいは多数のデータが得られない場合にも結果を得ることが可能である。評価対象の浄化技術は，主に原位置浄化であり，土壌浄化では 1）掘削除去，2）土壌ガス吸引，3）加温処理が，地下水の浄化技術では 1）揚水処理，2）促進型バイオレメディエーション，3）反応性浄化壁，4）原位置化学的酸化，5）長期モニタリングの評価が可能である。これらの基本情報はデータベースとしてツールに含まれている。一方，SiteWise は，全体のプロセスを調査，対策のための活動，対策のためのオペレーション，長期モニタリングの 4 つに区分したライフサイクルアセスメントが基本となっている[2]。浄化技術ごとのデータベースを有しておらず，浄化において想定される輸送や材料など，ユーザーが持つ数量データを入力することで，評価項目の計算基礎となる排出物，消費物の量を計算する。これら 2 つのツールは，**図—3**のフローのサステナブルレメディエーションの評価実施時（主に半定量評価〜定量評価）のフェーズで使用されるものであるが，使用されているパラメーターが海外のものであり，単位もヤードやマイルなど，国内事例での適用は困難な状況にある。



図—3 サステナブルレメディエーションのフロー例

表—1 既存の評価用ツールの概要

ツール名		SRT^{TM}	Sitewise
作成		Air Force Center for Engineering and the Environment（AFCEE），2010	U.S.Navy Facilities, U.S.Air Force, Battele 他，2010
概要		対策技術の基礎情報が準備されており，デフォルト値を利用した初期スクリーニング評価が可能	全体プロセスを 4 つに区分した LCA を基本としたツール
評価項目	経済	○ 対策技術のコスト	−
	環境	○ エネルギー，大気汚染，地下水	○ エネルギー，大気汚染，水使用量，資源消費量
	社会	○ 安全／事故リスク	○ 事故リスク

一方，国内においても関連する評価ツールの開発は進められており，土壌環境センターでは汚染土壌対策時の二酸化炭素排出量を算出するツール COCALA を，東京都や産総研は環境負荷の算出ツールを開発している。COCALA は，土壌汚染措置の $LCCO_2$ 排出量を評価するソフトウェアであり[3]，同センターでは「サステイナブル・アプローチ部会」の中でも，サステナブルレメディエーションに関する情報の収集を行っている。一方，東京都環境局と産業技術総合研究所は 2015 年 3 月に「土壌汚染対策における環境負荷評価手法ガイドライン」[4] を公表し，この中で土壌汚染の措置に対して，複数の環境負荷を容易に定量評価できるツール[5] 紹介を行っている。本定量評価ツールは日本における複数の環境負荷を評価できる最初のグリーンレメディエーション評価ツールとして位置づけられ，今後の展開が期待される。これらの国内版ツールは各種の環境負荷の算出に有効なツールではあるものの，他の二つの側面（社会影響，経済的側面）の評価は現時点では困難であること，また，簡易な適用が難しいことから，筆者らは国内の原単位を使った総合的な本評価ツールを開発した。

3. サステナブルレメディエーション用の本評価ツール

本評価ツールの概要を図―4に示す。本ツールは三つの側面を総合的な視点で判断し，土地の保有者や関連するステークホルダーの要望に沿った技術を選択することを目的としている。複数の汚染対策技術に対し，サイトの対象面積や汚染深度，透水係数といった基本情報と，個別技術の薬剤使用量などを入力することにより，環境側面・社会側面・経済側面の中の重要な指標を簡易に算出するツールである。先述したSRT TMの算出の考え方をベースとし，国土交通省土木工事積算基準や産業環境管理協会が開発したLCAシステム（MiLCA ver.1.1），国内特有のパラメーターが使用されている[6)]。本ツールではVOCによる汚染土壌の対策技術のうち主要な10種類に関する外部環境負荷（SO_2，NOx，PM_{10}，CO_2排出量，廃棄物量，原材料）や事故リスク（労働災害リスク，交通事故リスク），対策費用の概算算出等の結果が算出される。主に以下のような場合に適用が可能である。

・対策が必要な土地に対し対策技術の比較や対策方針を検討・提案する場合
・複数の事業所から優先的に対策すべき事業所を選択する場合
・工事着工前の近隣住民への説明会等の資料作成時

4. 算出事例

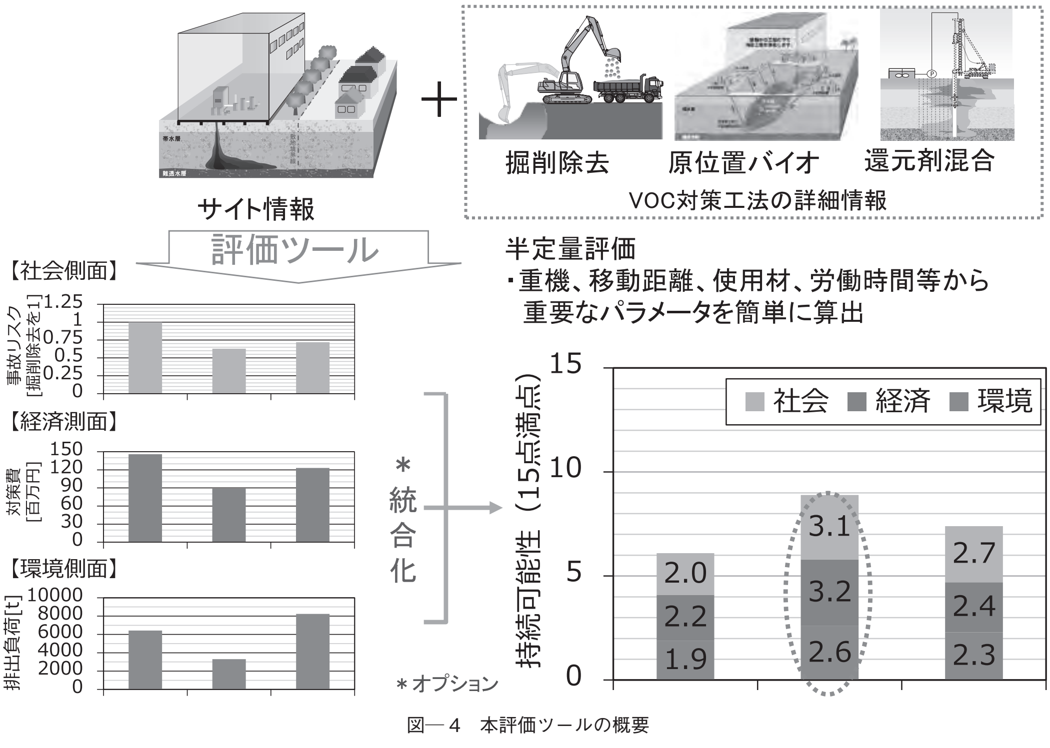
本ツールの概要を示すことを目的として，モデルサイトの算出条件（1）を基に各種パラメーターの算出を行った結果を（2）に示す。

（1）算出条件

表―2に示すサイト条件を元に各出力パラメーターの算出を行った。対策技術は，①掘削場外搬出処理，②地下水揚水（曝気処理），③原位置バイオスティミュレーション工法の3つとした。各対策技術のシステム境界として，本報では使用重機の製造に関わる負荷は，相対的に低いため，重機等の製造に関わる環境負

表―2 モデルケースの算出条件

項目	数量
土地面積	6,000 m^2
汚染エリア面積	2,000 m^2
汚染深度	G.L. − 2.0 ～ 10.0 m
対象汚染土量	16,000 m^3
土地用途	工業専業地域 地下水利用なし
汚染物質	トリクロロエチレン（以下，TCE）
汚染濃度	最大 3 mg/kg 平均 0.3 mg/kg 地下水平均 0.3 mg/L
土質	すべて粘土混じり砂 透水係数：3 × 10^{-5}m/s



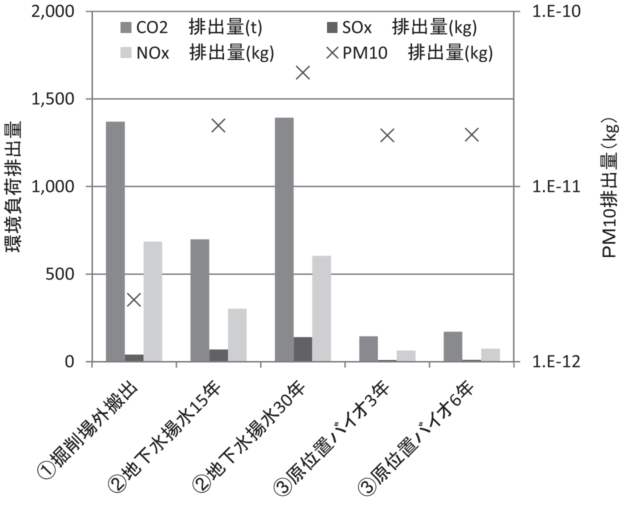
図―4 本評価ツールの概要

荷はシステム境界から外し，重機の運搬－設置－稼動－撤去までを対象とした。なお，①掘削場外搬出処理は，150 km 陸送した箇所での処理とし，対策期間を半年とした。②地下水揚水（曝気処理）は，揚水井戸4本による揚水処理が15年または30年継続するものとした。また，③原位置バイオスティミュレーションは注入井戸の間隔を4 m とし，160本の注入井戸による嫌気性浄化用薬剤の注入が3年間または6年間継続するものとし，試算を行った。その他，交通事故の発生リスクの確率等は既報[6]と同様な計算式，数値を用い算出した。

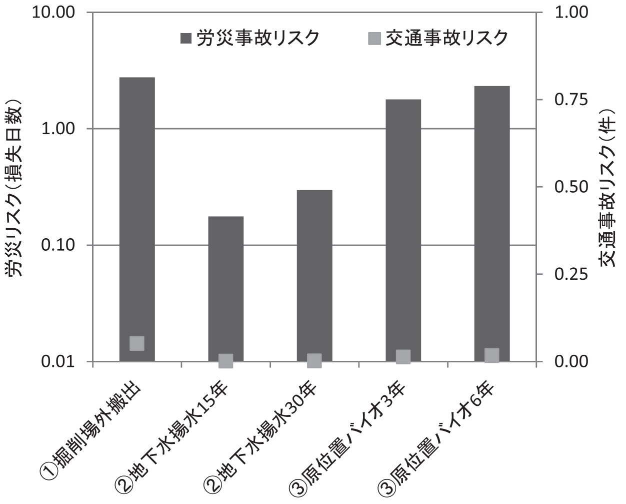
(2) 算出結果

本評価ツールによる算出結果の例を**図―５～７**に示す。①掘削場外搬出は確実な対策が可能である一方で，②地下水揚水15年や③原位置バイオの2倍以上の二酸化炭素を排出していることが示されている。他の環境負荷も同様に高い数値を示しているが，②地下水揚水も期間が30年を超えると，①掘削場外搬出と同程度の環境負荷を与える恐れがあることが示された。また，社会影響のうちの労災事故リスクについては，本事例の結果では①掘削場外搬出と③原位置バイオがそれほど変わらない結果を示した。これは③原位置バイオにおいて注入井戸の本数が多く，これに関わる工数が大きいことが原因である。さらに，経済的側面では①掘削場外搬出に対し，他の対策技術は0.6以下という数値を示し，経済的負担という意味では②地下水揚水や③原位置バイオの優位性が示された。

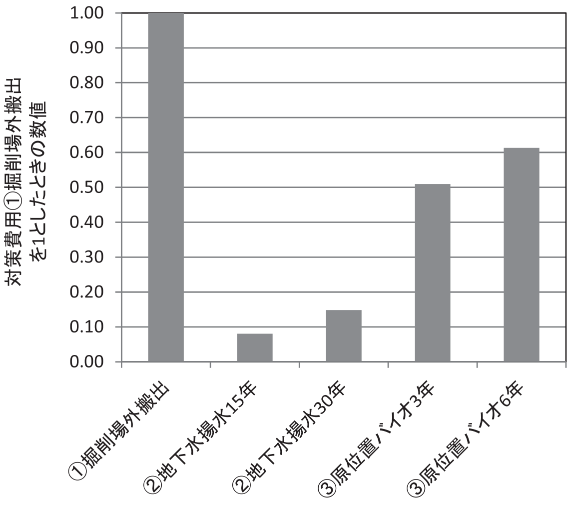
このようにサステナブルレメディエーションの評価においては，3つの側面の中に含まれる多数のパラメーターを用いた様々な議論を行うことが特徴である。**図―５～７**のような結果を用いた上で，さらに統合化や重みづけを行うことで，最適な対策技術の選択を行うことも多い。いずれにしても，多数のパラメーターの算出には時間や費用がかかることから，簡便なツールの存在が必要である。



図―５ 環境負荷の算出結果例



図―６ 社会影響の算出結果例



図―７ 経済的側面の算出結果例

5. おわりに

現在，サステナブルレメディエーションに関しては ISO 規格の策定（Guidance on Sustainable Remediation）が検討されており，同時に諸外国の土壌汚染対策の指針等に新たに「持続可能性に配慮した対策」の記述を加えようとする動きもある。一方，国内でも東京都環境局は環境基本計画の中で，最適な土壌汚染対策を選択する際に「対策実施に係る全ての過程での環境負荷の低減（環境面）とともに，コストの削減（経済面）や近隣住民等の理解促進（社会面）などの視点を踏まえ，事業者による合理的な対策の選択を促すための手法を検討していく」としている[7]。また，各種のステー

クホルダーからの意見を収集することを目的の一つとして，産業技術総合研究所が中心となって，SR コンソーシアムを立ち上げている[8]。本評価ツール SGRT-T はこれらの国内外の動きを見据えたものであり，今後，実サイトでの適用や実データとの比較検証を行う中で，さらなる改良を重ねていく予定である。

《参 考 文 献》

1）U.S. Air force, SRT Sustainable remediation tool user guide, Air force center for engineering and the environment（AFCEE）web site（2010）
2）U.S. Navy Facilities Engineering Command（NAVFAC）, the U.S. Army, the U.S. Army Corps of Engineers（USACE）, Battelle, SiteWise Version 2 User Guide, June（2011）
3）大村啓介，川浪聖志，九石優，星野隆行，土壌汚染調査・対策における $LCCO_2$ の算出とその特性，第 18 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（2012）
4）東京都環境局，独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門：土壌汚染対策における環境負荷評価手法ガイドライン，東京都ホームページ
https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/attachement/Guidline2015-03-14.pdf,（2015）
5）Yasutaka Tetsuo, Hong Zhang, Koki Murayama, Yoshihito Hama, Yasuhisa Tsukada, Yasuhide Furukawa, Development of a green remediation tool in Japan, Science of The Total Environment（2016）
6）古川靖英，保高徹生，大村啓介，小林剛，揮発性有機化合物実土壌汚染サイトを題材とした簡便な費用ベースのサステイナブルアプローチ手法の試み，土木学会論文集 G，69 巻 7 号，p.461-471（2013）
7）東京都環境局，東京都環境基本計画 本文，p.89
https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/basic/2016keikaku_zenbun.pdf（2016）
8）産総研コンソーシアム Sustainable Remediation：https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium_index.html

[筆者紹介]

古川　靖英（ふるかわ　やすひで）
竹中工務店
技術研究所　エコエンジニアリング部
主任研究員

舟川　将史（ふなかわ　まさふみ）
竹中工務店
環境エンジニアリング本部
主任