

(0107) サイト環境リスク評価モデル (SERAM) ツールの開発と活用事例

○奥田信康¹・佐々木哲男¹・田中宏幸¹・山田優子¹・向井一洋¹
 ・リスク評価モデル普及・ツール化検討部会¹
¹ 土壌環境センター

1. はじめに

(一社) 土壌環境センター技術委員会リスク評価モデル普及・ツール化検討部会では、わが国の土壌汚染対策におけるリスク評価の活用について普及・啓発を図るため、サイト環境リスク評価モデル (Site Environmental Risk Assessment Model: 以下、「SERAM」と略す。) の開発とツール化作業および土壌汚染対策のリスク評価におけるガイダンス (案) の作成を行っている^{1),2),3)}。

SERAM では土壌・地下水中の有害物質の媒体間移動式やリスク評価式を提案しているが、実際にリスク評価を実施する際には、それらの計算式に各種パラメーター値を入力し、複数の曝露経路ごとにヒトの健康リスクを求め、結果をまとめるなどの一連の計算作業が必要となる。これら全ての作業は、リスク評価担当者が責任を持って実施する必要があるが、手作業で一から実施すると作業の負担が大きいという問題点がある。また、信頼しうるリスク評価結果を得るためには、計算内容に間違いがないこと、計算式や使用したパラメーターが明示され、後で検証可能なことが重要となる。欧米では、その国の評価方法に沿ったリスク評価計算ツールが政府または民間企業から提供・販売され、実際の現場で活用されている⁴⁾。しかし、我が国では、リスク評価計算ツールが十分には整備されていない状況にある。

そこで、SERAM を用いたリスク評価手法を広く活用するために、SERAM の特徴や利便性を具体的に例示することが有効であると考え、計算ツールを作成し、ケーススタディを行った。

本報では、リスク評価計算ツール (以下、「SERAM ツール」と略す。) の詳細と特長について説明する。

2. サイト環境リスク評価モデル (SERAM) および計算ツールの構成

2.1 SERAM の構成

SERAM は、汚染源における土壌含有量を起点として土壌・地下水・空気の媒体間移動後の曝露濃度を算出し、評価シナリオに基づく摂取量と有害物質の毒性値を用い、ヒトの健康リスク評価を行う計算モデルである。

図-1 に SERAM で評価する曝露経路および曝露対象を示す。

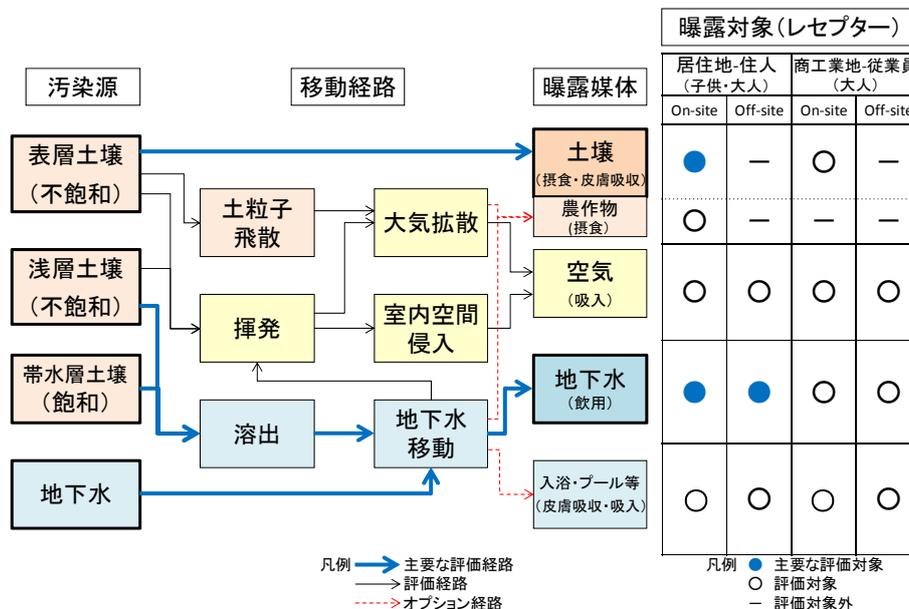


図-1 SERAM の曝露経路および曝露対象

Development of SERAM-Software and its use example for risk assessment of soil and groundwater contamination

Nobuyasu Okuda¹, Tetsuo Sasaki¹, Hiroyuki Tanaka¹, Yuko Yamada¹, Kazuhiro Mukai¹,
 and Study Group for Verification of the Risk Assessment Model¹ (¹GEPC)

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

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

SERAM では汚染源として土壌および地下水での有害物質の種類・濃度を設定し、汚染源土壌は深度別に表層土壌・浅層土壌・帯水層土壌に区分けして計算を行う。評価の対象を居住地-住人と商工業地-従業員とし、各々の曝露条件において、土壌摂食・地下水飲用・空気吸入を主たる曝露経路としたオンサイトおよびオフサイトでの有害物質曝露量の計算結果から、ヒトの健康リスクの評価を行う。また、SERAM の特徴として、これらの主経路以外に、家庭菜園で栽培された農作物の摂食経路と汚染地下水を入浴に用いた場合の吸入・皮膚吸収経路を選択可能な経路としたことが挙げられる¹⁾²⁾。

2.2 SERAM ツールの構成

1) 使用プログラム

SERAM ツールは MS-EXCEL2007 で作成し、リスク評価モデル (SERAM) で設定した計算式、各種パラメーター一覧表、およびリスク計算を行う入出力画面の複数の計算シートから構成されている。一部の操作でマクロ機能を使用しているため、動作可能な OS や EXCEL のバージョンの制限を受ける。

2) SERAM ツールの構成

SERAM ツールのメニュー画面を図-2 に、主要な計算シートの名称・目的・内容を表-1 に示す。SERAM ツールでは、画面上のボタンで関連する各シート間を移動させ、簡単な手順で一連のリスク評価計算が実行できるように作成した。メニュー画面上の主要なボタン (各々計算シートにリンク) の目的と内容を表-1 に整理した。

SERAM ツールでは、「①STEP1 : サイト条件の設定」、

「②STEP2 : 詳細条件の入力」、「③STEP3 : 計算結果評価」の3つのステップでリスク評価計算が実施できる。また、「⑦計算結果出力」では、ボタンを押すだけで、リスク評価結果一覧シート (オンサイト・オフサイト) と使用パラメーター一覧表を印刷画面で出力できるようにした。これにより、データ整理作業が大幅に軽減できると思われる。

評価方法の透明化の確保を目的として、メニュー画面から「④曝露条件のデフォルト値」、「⑤化学物質データベース」、「⑥曝露経路ごとの計算式」の全ての内容を確認できるようにした。ただし、これらの数値や計算式は計算結果に直接影響を及ぼすため、基本的には SERAM で推奨する値 (デフォルト値) および計算式を使用して評価を行うことを想定している。なお、デフォルト値や計算式の変更を行う場合は、リスク評価実施者の責任で、計算式の内容をよく理解し、サイト固有条件や現地の実測値などの根拠に基づいた上で、実施することになる。

表-1 SERAM の主要な計算シートの内容

No	シート名称	シートの目的	内容
1	STEP1	<ul style="list-style-type: none"> 曝露シナリオの設定 対象物質と汚染源濃度の入力 	<ul style="list-style-type: none"> 曝露対象・曝露経路を候補より選択 対象物質の選択と濃度入力 (土壌・地下水)
2	STEP2	<ul style="list-style-type: none"> 汚染源の詳細設定 移動媒体条件の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 汚染源の存在深度範囲・状況の設定 土壌・地下水・空気・建物・農作物・入浴のパラメーターの設定 (推奨値提示)
3	STEP3	<ul style="list-style-type: none"> リスク計算結果 (曝露量、健康リスク評価値、対策目標濃度) 	<ul style="list-style-type: none"> 曝露経路ごとに、曝露量・健康リスク評価 (リスク・ハザード比)、目標リスクとなる汚染源濃度表示
4	デフォルト値	曝露条件	曝露シナリオ毎に、曝露条件の推奨値を設定
5	化学物質データベース	評価対象有害物質の物性・毒性	評価対象物質 (土壌汚染対策法対象物質、TPH、BTEX)
6	計算式一覧表	経路別個別リスク評価計算式	土壌、地下水、屋外空気、屋内空気などの媒体中の有害物質の媒体間移行式、および曝露量推定式
7	計算結果出力	提出用リスク評価結果シートの出力	個別のリスク評価結果をワンボタンで出力する。 リスク評価結果一覧シート (オンサイト・オフサイト) と使用パラメーター一覧表を印刷画面で出力

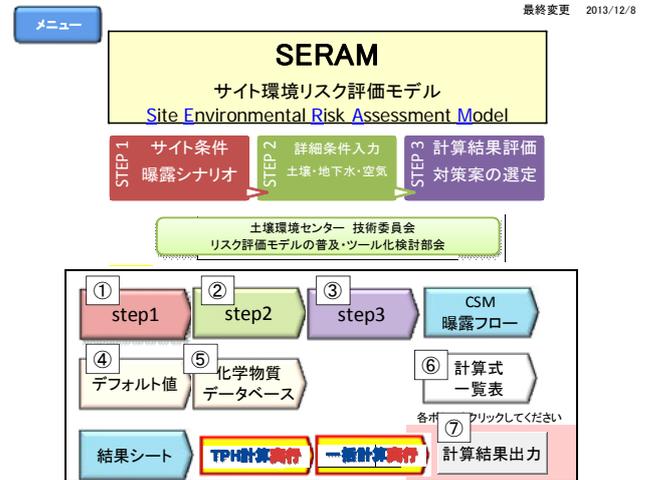


図-2 SERAM ツール メニュー画面

SERAM ツールの計算シートの構成を図-3に示す。主な計算の流れ、画面移動の関係、計算シート間のデータの流れを表している。メニュー画面からアクセスできる計算シート、入力情報および計算結果の集計シートと曝露経路図作成のためのデータ整理を行うシートから構成されている。

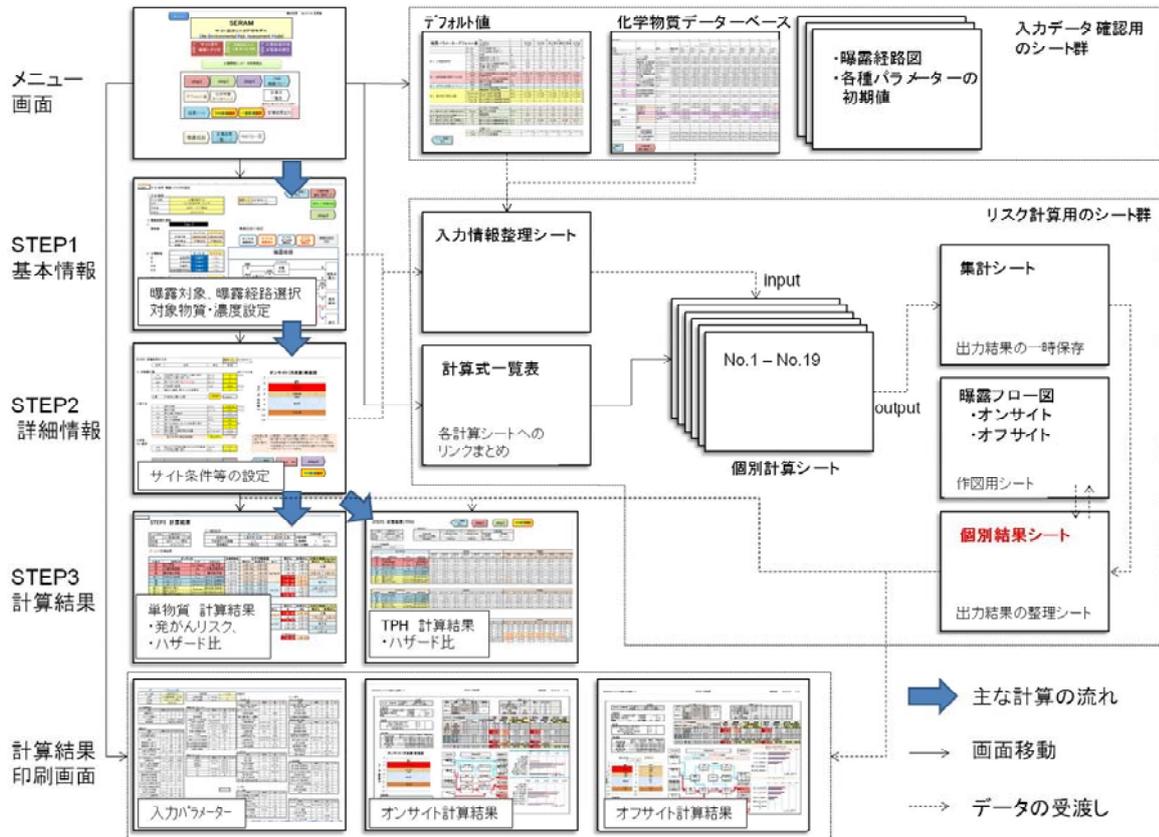


図-3 SERAM ツールの計算シートの構成

3) リスク評価結果一覧シートの特長

SERAM ツールの計算結果として「リスク評価結果一覧シート」を作成する。図-4にリスク評価結果一覧シート（オンサイト）の例を示す。このシートには、オンサイトおよびオフサイトごとに、汚染源情報、入力パラメーター、曝露経路、リスク評価結果（表・図）を記載し、リスク評価の判断に有用な情報を1枚のシートにわかり易くまとめたものである。特に、曝露経路の図では、目標リスクを超過する曝露経路を赤字で強調して表示させており、汚染源と移動経路と曝露媒体の関係が一目瞭然となる特長を持っている。

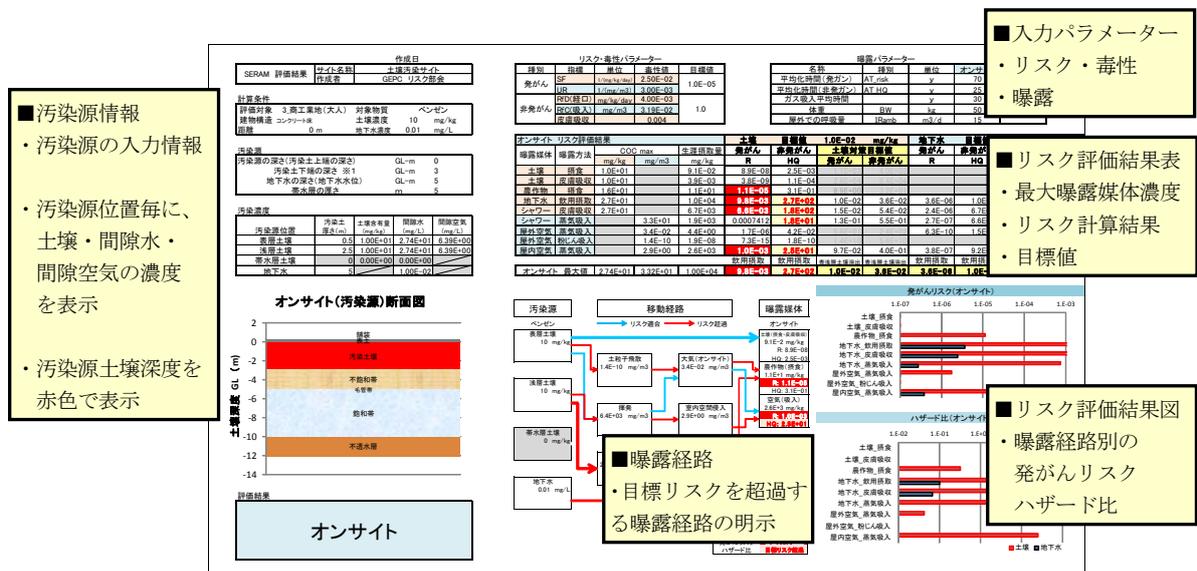


図-4 リスク評価結果一覧シートの記載内容

3. ケーススタディ

3.1 対象サイトの汚染状況

ベンゼンによる土壌汚染と地下水汚染が存在するサイトを想定し、SERAM ツールにてリスク評価計算を行った。想定サイトの汚染状況は図-5の断面図に示すように、不飽和層（層厚 5m）の表層から地下 3 m までベンゼンによる土壌汚染が存在し、不飽和層下に 5 m 厚の帯水層があり、汚染濃度は土壌が 10 mg/kg、地下水が 0.01 mg/L である。オンサイトの受容体は工業地（大人）とし、オフサイトの受容体は居住地（生涯）で汚染源からの距離を 100 m とし、不飽和層、帯水層は一樣な土質と仮定した。なお、今回のリスク評価は、全ての曝露媒体について実施した。

3.2 汚染源情報・リスク評価のパラメーター一覧表

SERAM の STEP1、STEP2 にて曝露経路の選択およびサイトデータの入力、決定を行うと、図-5 の形式で汚染源情報が整理される。図-6 では、オンサイト（汚染源）の各々の汚染土の厚さ、土壌全含有量、間隙水濃度、間隙空気濃度を示し、断面情報として、汚染源土壌の位置が赤色で示される。

本ケーススタディで用いた各種パラメーターの一覧を表-2 に示す。この表は、メニュー画面での⑦計算結果出力時に作成される。計算結果と用いたパラメーターを同時出力することで、リスク評価者のデータ整理の負担を軽減できると思われる。

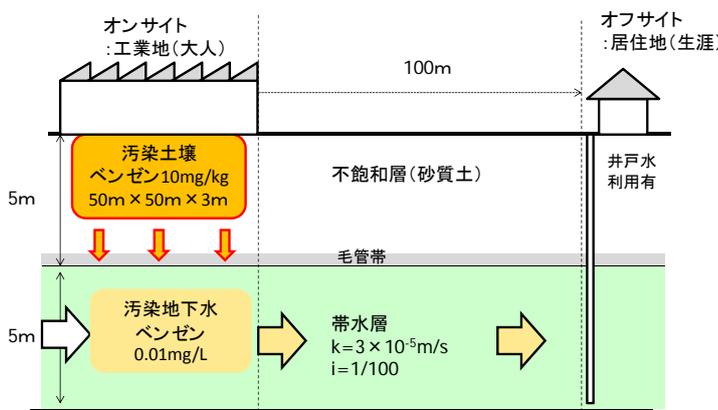


図-5 対象サイトの汚染状況（断面図）

汚染源位置	汚染土厚さ(m)	土壌含有量 (mg/kg)	間隙水 (mg/L)	間隙空気 (mg/L)
表層土壌	0.5	1.00E+01	2.74E+01	6.39E+00
浅層土壌	2.5	1.00E+01	2.74E+01	6.39E+00
帯水層土壌	0	0.00E+00	0.00E+00	-
地下水	5	-	1.00E-02	-

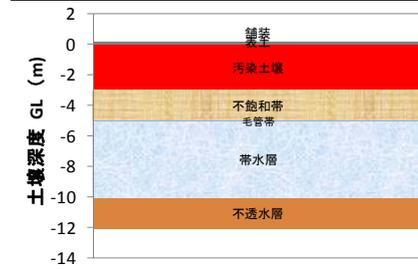


図-6 汚染源情報（オンサイト）

表-2 リスク評価に用いたパラメーター一覧

サイト名称	土壌汚染サイト	
住所	〇〇都道府県	〇〇市
作成者	GEPC リスク部会	
作成日	2013/10/3	

対象物質	ベンゼン	
土壌含有量	(mg/kg)	10
地下水濃度	(mg/L)	0.01

名称	単位	値	※
ベンゼン定数	cm ² ・H ₂ O/cm ² ・day	0.233	
飽和溶解度	mg/L	1880	
有機炭素-水分係数	cm ³ ・H ₂ O/g・OC	66.1	
土壌-水分係数	cm ³ ・H ₂ O/g・soil	0	
空気中の拡散係数	(m ² /sec)	8.8E-06	
水中の拡散係数	(m ² /sec)	9.8E-10	
気相の物質輸送定数	m/h	29.88	
分子量	g/mol	78.1	
オクターブ-水分係数	cm ³ ・H ₂ O/cm ³ ・soil	2.13	
揮発のための平均時間	year	30	
茎の生物濃縮係数(濃縮重量)	-	0	
根の生物濃縮係数(濃縮重量)	-	0	
液相の交換率	m/h	0.2	

名称	単位	値	※
汚染土の深さ(汚染土層の深さ)	m	0	
汚染土層の深さ	m	3	
地下水の深さ(地下水水位)	m	5	
汚染源の面積	(m ²)	2500	
植生や舗装-覆土による被覆率	-	0	
不飽和土層の土質	2_sand		
土壌乾燥密度	kg-soil/L-soil	1.56	
不飽和帯体積含水率	cm ³ ・H ₂ O/cm ³ ・soil	0.08	
有機炭素含有量	g-C/g-soil	0.004	
土壌裏比率	kg/L	2.65	
毛管帯の厚さ	m	0.05	
毛管帯体積含水率	cm ³ ・H ₂ O/cm ³ ・soil	0.369	
粉塵発生率	mg/m ² ・sec	6.9E-07	
表層土壌の厚さ	m	0.5	
土壌の透過度	m ²	1E-12	

名称	単位	値	※
透過係数	cm/s	3.0E-03	
動水勾配	m/m	1.0E-02	
帯水層の間隙率	-	0.41	
地下水流速	m/y	2.31E+01	
地下水湧水量	cm/y	30	
地下水方向に沿った汚染源の長さ	m	5.00E+01	
帯水層の厚さ	m	5	
土壌-水分係数	cm ³ ・H ₂ O/g-soil	0	
帯水層の有機炭素含有量	g-C/g-soil	0.004	

名称	単位	値	※
地上の大気混合層における平均風速	(m/sec)	1.2	
境界層高さ	(m)	2	
境界層厚さ	m	0.1	
汚染土の平均深さ	m	1.5	
土壌からの蒸発水の蒸発	m ³ /m ² /day	0.001	
点源の排出風量	m ³ /sec	120	
呼吸ゾーンの高さ	m	1.5	
汚染源の幅(流動方向)	m	50	

名称	単位	値	※
気体定数	Pa・m ³ /mol・K	8.3144	
土壌中温度(ベンゼン定数の温度)	K	298	
シャワー温度	K	313	
水滴の落下時間	s	1	
水滴の半径	m	0.0005	
シャワー中の水量	m ³	0.15	
バスルーム容積	m ³	15	
接触時間=シャワーを浴びる時間	h	0.25	
乾燥と着衣の時間	h	0.25	
ガス中有害物質の肺での吸収率	-	1	
シャワー中の有害物質の肺での吸収率	m ²	1.8	
曝露される皮膚の割合	-	1	

名称	単位	値	※
発がん性リスク目標値	1.00E-05		
ハザード比目標値	1		

※ デフォルト値から変更したパラメーターに●を記す。

3.3 リスク評価結果（曝露経路と健康リスク）

1) オンサイトの受容体に対するリスク評価結果

ケーススタディのリスク評価結果（オンサイト：受容体 工業地（大人））を図-7に示す。これらの図は、SERAM ツールの計算結果「リスク評価結果一覧シート」の一部である。曝露経路図では、目標リスクを超過した曝露媒体を赤色で強調し、関連する汚染源から移動経路を赤線で示している。ここで、目標リスクは、発がんリスクは 10^{-5} 、ハザード比は 1 であり、個別の曝露経路においていずれかが目標リスクを超えた場合に目標リスク超過と判定した。曝露経路図と棒グラフから、リスクの大きい曝露経路が簡単に判別できる。具体的には、リスクの大きい順に地下水（飲用）、入浴（皮膚吸収・吸入）、屋内空気（吸入）、農作物（摂食）の4つの曝露経路が、目標リスクを超過した。曝露経路図よりリスク超過した経路は、浅層土壌から溶出・浸透した汚染物質を含む地下水の影響が大きく、次に浅層土壌からの土壌ガスによるものであることがわかる。

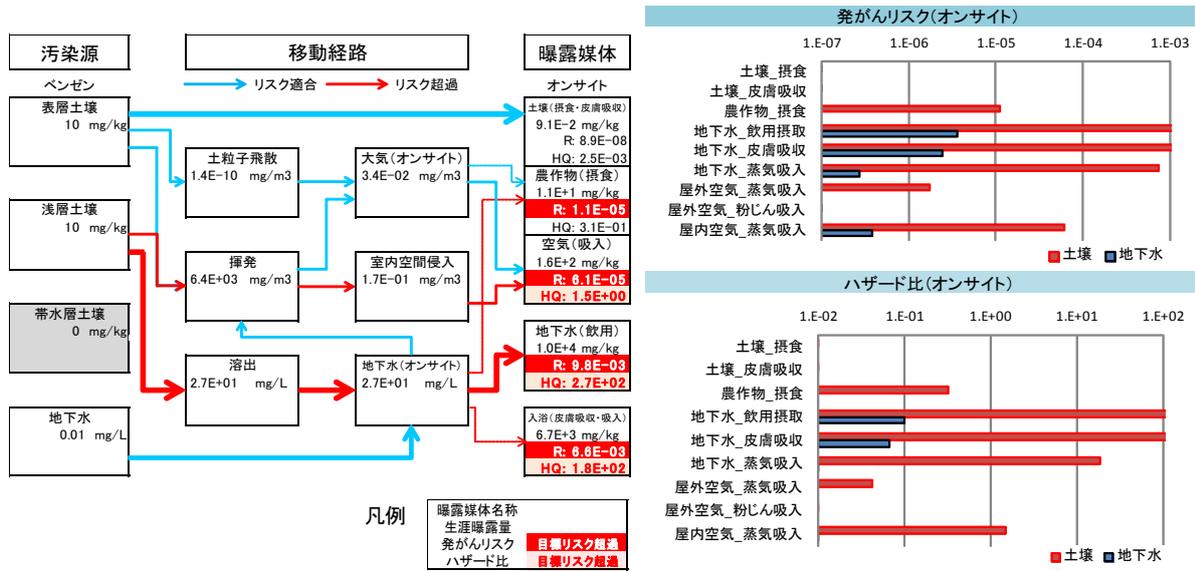


図-7 曝露経路と健康リスク（オンサイト）

2) オフサイトの受容体に対するリスク評価結果

オフサイトの受容体（居住地（生涯）・距離 100m）に対するリスク評価結果を図-8に示す。発がんリスクおよびハザード比が目標リスクを超過した曝露経路は、地下水（飲用）と入浴（皮膚接触・吸入）であった。曝露経路図より原因となる汚染源は浅層土壌であり、浅層土壌から溶出・浸透した汚染物質を含む直下の地下水から、さらにオフサイト受容体を利用する場所の地下水まで横方向に移動する経路であることがわかる。

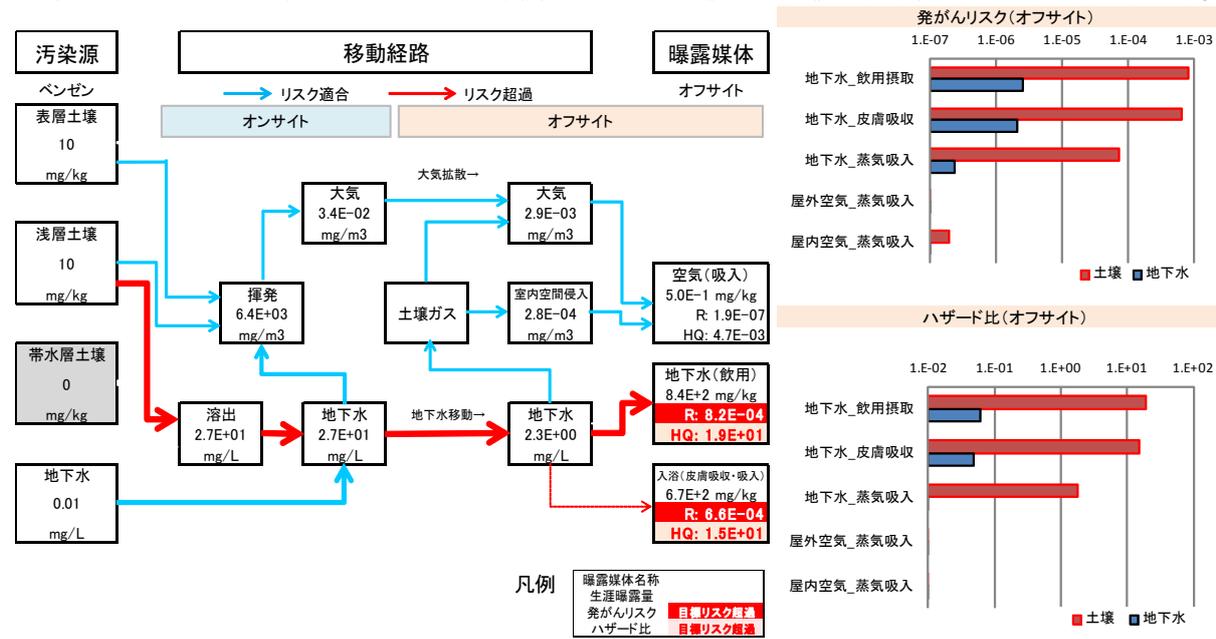


図-8 曝露経路と健康リスク（オフサイト）

3) 対策方針の検討

対策の対象を汚染源または曝露経路として対策方針の検討を行った。リスク評価結果より、各曝露経路でオンサイトおよびオフサイト受容体が目標リスクを達成できる各媒体の対策目標値を設定し、この中からサイトの現状に応じて実施可能な対策方針を選択した。なお、汚染源対策は恒久的な対策方法となるが、曝露経路対策では、汚染源からの継続的な汚染物質の流入の対策として継続的效果のある方法を選択する必要がある。

リスク評価結果より、曝露媒体ごとに目標リスクとなる汚染源または曝露経路の濃度（対策目標値）を算出した結果を表-4に示す。汚染源対策のみを行う場合は、汚染源の対策目標値の最小値が全体の目標値となり、対策が完了すると全ての目標リスクが恒久的に達成されることとなる。曝露経路対策を検討する場合には、サイトの状況に応じて濃度低減効果が高く、実施可能な対象を選定する必要がある。本サイトでは、浅層土壌から地下水への溶出による経路のリスクが高く、複数の曝露媒体に影響しており、地下水対策の必要性は高いと判断できる。また、オンサイトの屋内空気は曝露経路に地下水が含まれていないため、浅層土壌の汚染源対策を行うか、土壌間隙空気を対象とした曝露経路対策を選択することになる。

表-4 曝露経路ごとのリスク評価結果・目標媒体濃度

	曝露媒体	リスク	ハザード比	汚染源対策	対策目標値	曝露経路対策	対策目標値
オン サ イ ト	地下水（飲用）	9.8E-03	270	浅層土壌	0.010 mg/kg	地下水（オンサイト）	0.028 mg/L
	入浴（皮膚吸収）	6.6E-03	180	浅層土壌	0.015 mg/kg	地下水（オンサイト）	0.041 mg/L
	屋内空気（吸入）	6.1E-05	1.5	浅層土壌	1.6 mg/kg	土壌間隙空気	1,040 mg/m ³
	農作物（摂食）	1.1E-05	0.31	浅層土壌	8.8 mg/kg	地下水（オンサイト）	24.5 mg/L
	土壌（摂食）	8.9E-08	0.0025	不要	—	不要	—
オフ サ イ ト	地下水（飲用）	8.2E-04	19	浅層土壌	0.12 mg/kg	地下水（オンサイト）	0.33 mg/L
	入浴（皮膚吸収）	6.6E-04	15	浅層土壌	0.15 mg/kg	地下水（オンサイト）	0.41 mg/L
	屋外空気（吸入）	1.9E-07	0.0047	不要	—	不要	—

【凡例】 赤字：対策目標値設定に係る項目、網掛け部：現況リスクが目標リスクを下回る項目

以上より、本サイトにて目標リスクが達成できる対策目標は以下の選択肢に整理できる。

- ① 浅層土壌のベンゼン含有量 0.010 mg/kg 以下
- ② 浅層土壌のベンゼン含有量 1.6 mg/kg 以下、かつ、地下水（オンサイト）濃度 0.028 mg/L 以下
- ③ 地下水（オンサイト）のベンゼン濃度 0.028 mg/L 以下、かつ、土壌間隙空気濃度 1,040 mg/m³ 以下

さらに、この中からサイトの状況（経済的緊急性、技術的実現性、コストなど）に応じ、選択する。①は恒久対策となり汚染の除去と同等である。②③は対策を継続する必要があるが、①よりもコストや環境負荷の小さい対策を選定することも可能となる。リスク評価手法および SERAM ツールを土壌汚染対策に活用することで、オンサイトおよびオフサイトの汚染の状況の推定が可能になるため、よりの確な対策方法の選択や設計仕様の設定、コストや環境負荷の軽減につながる事が期待される。

4. おわりに

本報では、土壌・地下水汚染対策におけるリスク評価の活用促進の一助となるリスク評価計算ツール SERAM の内容と活用例を紹介した。土壌・地下水汚染問題の対応にリスク評価は有用であるが、まだ、広く活用されている状況にはない。リスク評価を広く活用してゆくためには、実務で使用可能な評価モデルの整備と計算に必要な各種パラメーターの充実が必要である。これに対し、(一社)土壌環境センター当部会では、モデル・計算ツールの開発、パラメーターの整備およびリスク評価活用ガイダンスの作成を進めている。現時点は、これらの情報は(一社)土壌環境センター会員限定であるが、センター会員への公開・チェック・修正を経た上で、最終的には公表できるようにしたいと考えている。

参考文献

- 1) 田中宏幸・奥田信康・佐々木哲男・原元利浩・中島誠(2011)：サイト環境リスク評価モデル SERAM による土壌汚染サイトの健康リスク評価のケーススタディ、第17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.48~53.
- 2) 奥田信康・佐々木哲男・リスク評価モデル普及・ツール化検討部会(2013)：サイトリスク評価モデル SERAM のツールの開発と活用方法、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.574~579.
- 3) 中島誠・山田優子・鈴木弘明・白井昌洋・伊藤豊・リスク評価モデル普及・ツール化検討部会(2014)：土壌・地下水汚染対策におけるリスク評価の活用についてのガイダンスの作成、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、(投稿中).
- 4) ASTM(2004)：ASTM designation: E2081-00 (Reapproved 2004), Standard guide for risk-based corrective action for protection, 95p.