

(0047) 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

○高畑陽¹・古屋光啓¹・舟川将史¹・佐藤徹朗¹・

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¹

¹ 土壌環境センター

1. はじめに

平成31年4月に施行された土壌汚染対策法の改正では、要措置区域の地下水の下流側かつ要措置区域の指定の事由となった飲用井戸等より地下水の上流側において、措置実施後に地下水基準に適合することを評価する地点（評価地点）を設定し、本地点で地下水基準に適合するために当該要措置区域において達成すべき土壌溶出量（目標土壌溶出量）及び地下水濃度（目標地下水濃度）を定めることが可能となり、当該要措置区域の観測地点において土壌溶出量や地下水濃度が基準値を下回らない場合の措置が認められるようになった。東京都は地下水中の汚染物質濃度が定めた値を超えて拡散するリスクを防止するための独自の条例を制定し¹⁾、この中で地下水のモニタリングを重要なリスク評価手法と位置づけている。このような国の法改正や地方自治体における制度見直しの動きがある一方で、敷地内の土壌汚染対策を実施して、地下水汚染が一部残存する状況であっても敷地外への汚染の拡大を抑えられる状況であることを行政と協議しながら、自主的な措置として敷地内に設置した観測井戸において定期的な地下水モニタリングを行っている事例もある。このような地下水汚染の拡散防止を目的としたモニタリングを行う場合には、法や条例の手法を参考にしながら行政や周辺住民と合意形成を図りながら地下水モニタリング措置を進めていくことが重要と考えられるが、その標準的な指標となる手順は存在していない。

「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」の中の「モニタリングの活用方法検討WG（以後、本WG）」では、過去に検討してきた様々な知見を取り入れながら、汚染の拡散を防ぐための地下水モニタリング措置を導入する際の様々な検討事項をまとめて、地下水モニタリング措置の導入を考えている関係者がステークホルダー間で合意を容易に行うことが可能な評価ツールを構築していくことを平成30年度より開始した。本報では、自主的な措置として地下水モニタリング措置を採用していく際の考え方について概説すると共に、揮発性有機塩素化合物に対する自然減衰の評価方法やSR評価を考慮した地下水モニタリング措置導入の際のチェック方法について詳述する。

2. 自主的な地下水モニタリング措置に用いる観測井戸の設置方法

民間の事業所等が周辺の地下水汚染の防止を目的とした自主的な措置として地下水モニタリングを実施する場合、汚染物質が敷地境界から地下水を介して拡散するリスクを防止することが重要であることから評価地点として複数の観測井戸を設置する必要がある、合理的な範囲で汚染源対策を実施した後に図-1に示す「バックグラウンド確認井戸」、「対策効果確認井戸」、「自然減衰確認井戸」、「敷地境界観測井戸」を地下水が拡散する恐れが最も高い地点に設置して評価を行う。また、地下水流向が正確に把握できていない場合には、「地下水流向確認井戸」を設置して継続的に観測することによって正確な地下水流向を求める。バックグラウンド確認井戸は、地下水の汚染範囲にある観測井戸の地下水質を比較して自然減衰（特に微生物分解）の兆候を把握するために用いる。対策効果確認井戸は、汚染源（NAPLなど汚染物質自体）の影響を直接的に受けない汚染源周縁部に設置した観測井戸で、汚染地下水の到達距離を予測する場合などに使用する。自然減衰確認井戸は、地下水の汚染範囲の増減傾向の確認や汚染物質が揮発性有機塩素化合物などの場合に親物質の分解生成物の挙動を確認して親物質の分解速度の推定を行うために用いる。敷地境界観測井戸は基準適合確認井戸であり、その管理値については周辺の土地利用状況に応じて行政等と協議して決定することを基本と考えている。

尚、地下水流向の季節変動や帯水層の特性に合わせて、地下水の流下方向以外にも適宜、観測井戸の設置が必要となる場合もあると考えられるが、設置条件等については今後検討していく予定である。

Examination of measures using groundwater monitoring methods for soil and groundwater contamination
Yoh Takahata¹, Mitsuhiro Furuya¹, Masafumi Funakawa¹, Tetsuro Sato¹, and Study group on application of
conceptual site model and monitoring methods for soil remediation in Japan¹ (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

TEL03-5215-5955 FAX03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

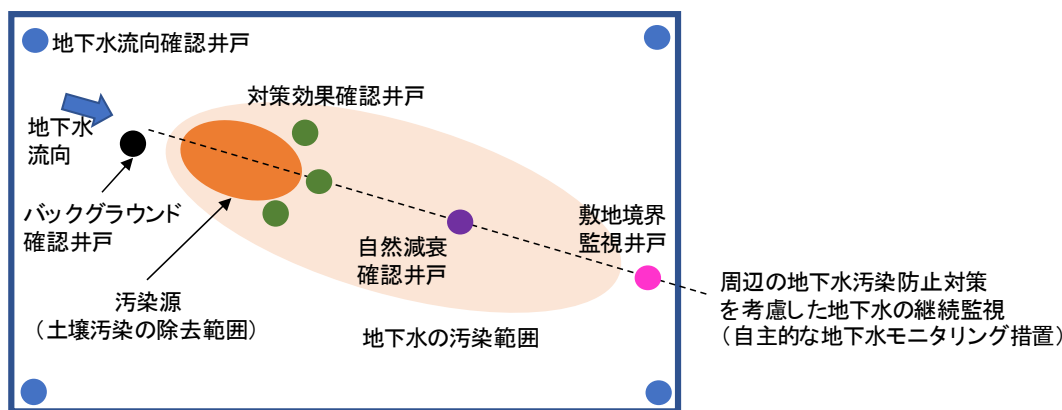


図-1 モニタリング地点の概略平面図

3. 地下水モニタリング措置の評価方法および合意形成方法の検討

地下水を継続的に監視していく措置が「汚染サイトの放置」と誤解されないためには、適切な科学的評価とステークホルダー間で納得できる合意形成を行うことが必要であり、この考え方は過去のMNA（科学的自然減衰）検討²⁾を行った際の理念と共有するものである。過去に策定したMNAへの移行ステップを参考にして、地下水モニタリング措置の評価および合意形成のフローをまとめた素案を図-2に示す。①から③の条件達成や合意形成の条件については、今後の本WGの中で判定方法を決定していく予定である。

本WGでは国内で多く存在すると推測される表-1の事例を対象として、揚水処理に替わる措置として地下水モニタリングを適用するために実施する各評価方法の検討に着手した。本報では図-2の赤字で示した評価項目について本WGの中で検討した内容を詳述する。

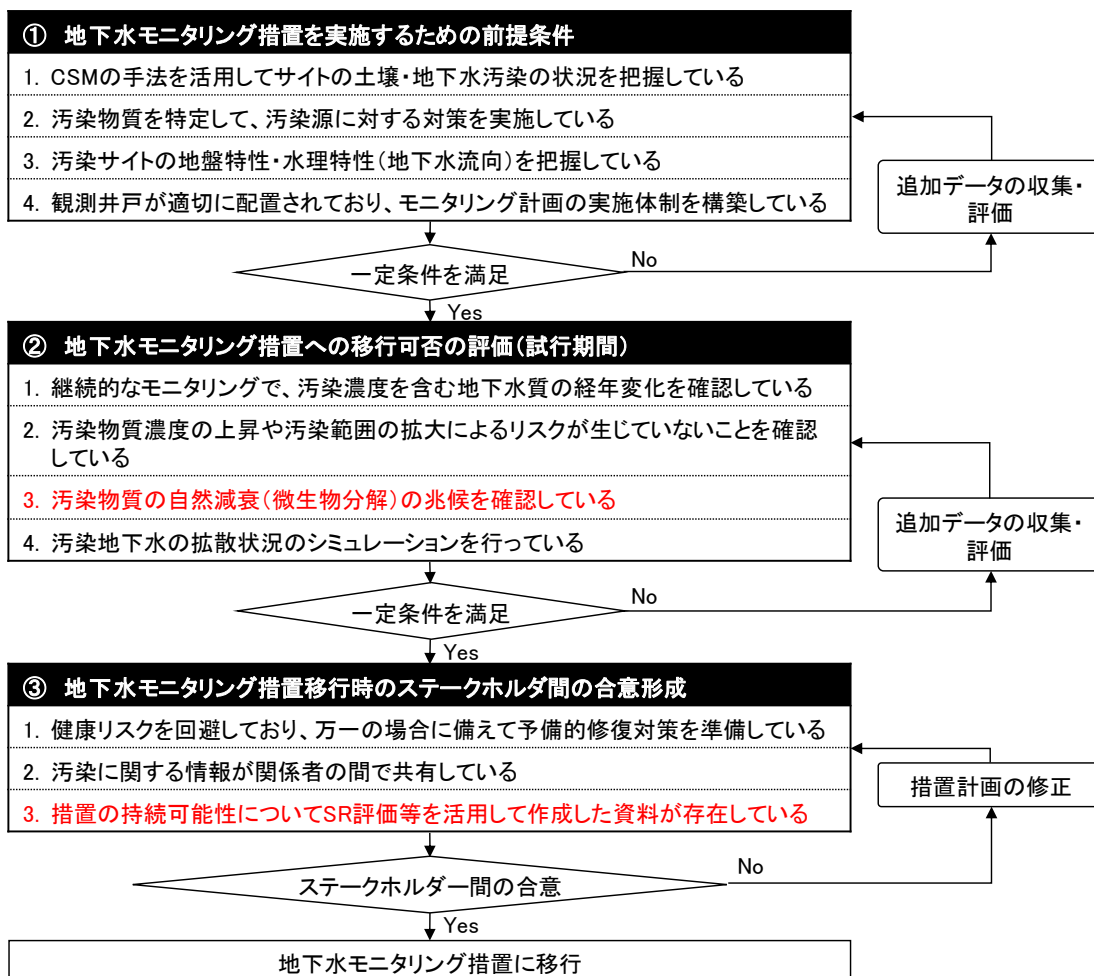


図-2 地下水モニタリング措置の評価および合意形成のフロー（案）

表-1 評価方法の検討を行う際の条件

汚染サイト	民間事業所の敷地内における土壌・地下水汚染(土壌汚染対策法の対象外)
汚染物質	第一種特定有害物質(トリクロロエチレンなどの塩素化エチレン類を想定)
措置実施状況	地下水汚染を敷地外に拡散させないために汚染源における継続的な揚水対策を自主的に実施
評価実施者	汚染原因者(汚染原因者から委託を受けた浄化計画者もしくは浄化実施者)
ステークホルダー	行政および周辺住民(措置変更の際の協議先)

3.1 自然減衰の兆候の確認方法

過去のMNA部会で提案したMNAプロトコール³⁾には、汚染域およびバックグラウンド領域における地下水中の特定の項目を分析することによって、微生物分解による自然減衰が生じる可能性を判定するための予備スクリーニングシートが存在した。揮発性有機塩素化合物を評価するための予備スクリーニングシートは、米国空軍と米国環境保護局の研究者が共同開発したツール⁴⁾をベースに作成され、国内の揮発性有機塩素化合物汚染サイトについて評価が実施された事例がある³⁾。一方、本評価シートは開発から約20年が経過しており、その間に揮発性有機塩素化合物の微生物分解(嫌気微生物による脱塩素化)の知見が多く蓄積されると共に、遺伝子検出技術を用いた生物学的なモニタリング手法が廉価で一般的な方法となった。そのため、本WGにおいて、自然減衰の兆候を確認する評価シートの見直しに着手した。

本検討のため、揮発性有機塩素化合物の嫌気微生物による脱塩素化の可能性を室内試験により検討した事例について会員企業から情報収集を行った。揮発性有機塩素化合物(主に塩素化エチレン類)で汚染された実汚染地下水に栄養物質を加えて培養を行った室内試験について、栄養物質を添加する前の地下水の性状、分析結果に基づくスクリーニングポイント、および培養後の微生物分解(脱塩素化)の可否を示した結果の一覧を表-2に示す。尚、微生物分解の可否については培養期間中に親物質から子物質への明確な変換が生じているものを「○」、変換が不明確ものを「△」、変換が生じていないものを「×」とした。

予備スクリーニング評価では15点以上であれば微生物分解が起こる条件としているが³⁾、今回は各試験で分析項目が限られていたことからこの条件を満たしているサイトはサイトLおよびMのみであった(表-1)。7ポイント獲得していても脱塩素化が生じないサイト(表-1、サイトGおよびK)があった一方で、2ポイントであっても脱塩素化が生じるサイト(表-1、サイトOおよびP)があることが判明した。

今回収集した19サイトの事例に基づき、過去に作成された予備スクリーニングシートの評価項目と近年多用されている遺伝子解析の結果について、分析項目と生物学的な脱塩素化の関係について再評価した結果を表-3に示す。この結果から、幾つかの項目はほとんど分析されていないことが示された。また、硫酸イオンのように多くの試験で分析されながら脱塩素化との傾向が確認できない分析項目が存在し、濃度設定などの見直しが必要と考えられた。予備スクリーニングシートの評価項目の中では、硝酸塩、酸化還元電位、クロロエチレン(VCM)が自然減衰の兆候を効果的に把握できる分析項目であることが判明した。また、予備スクリーニングシートの評価項目の測定数が少ない場合でも、遺伝子解析を用いることによって脱塩素化の兆候を直接的に判断できているサイト(サイトO~S)が存在した。その一方で、スクリーニングポイントが高く培養試験で脱塩素化が確認されたサイトでも、培養前の地下水中の有用遺伝子数が検出限界以下で計測された事例があった(サイトA、L、およびN)。この原因として、遺伝子解析手法(ゲノムDNAの回収方法やPCR条件)が異なっているため、低濃度域における有用遺伝子数の検出感度に差が生じている可能性が考えられた。

今後、実汚染サイトでの地下水分析結果と実汚染サイトでの微生物分解(自然減衰)の関係についても事例を収集していく必要があると考えており、検討を進めていく予定である。

3.2 地下水モニタリング措置移行のためのチェックシートとSR評価

汚染原因者が敷地内で土壌・地下水汚染対策のオプションの一つとして地下水モニタリング措置を活用していくにあたって、過去に土壌環境センターで検討されてきたMNAプロトコールやSR評価項目⁵⁾をブラッシュアップして、全てのステークホルダーが容易に判断可能なチェックシートの作成を目指している。その中で、地下水モニタリング措置を導入することによって得られる利点(環境面、経済面、社会面から評価した持続可能性)をステークホルダー間で容易に認識できるチェックシートの素案を作成した(表-4)。本案は、過去に作成したMNAプロトコールのチェック項目とSR評価項目から、地下水モニタリング措置に関連した重要な項目を抜粋してまとめたものである。

今後、地下水モニタリング措置に移行するために必要なチェック数の判定や、個々の項目について重み付けを行うかについて検討を進めていく予定である。

表-2 サイト別の室内試験における予備スクリーニング評価結果

分析項目*	サイトA	サイトB	サイトC	サイトD	サイトE	サイトF	サイトG	サイトH	サイトI	サイトJ	サイトK	サイトL	サイトM	サイトN	サイトO	サイトP	サイトQ	サイトR	サイトS	
溶存酸素(mg/L)	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	0.9~6.4	未測定	4~5	未測定	未測定	1.4	<0.1	0.1~2.8	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	
硝酸性窒素(mg/L)	<0.1	3.3	<0.1	0.2	0.5	<0.1	11	未測定	未測定	10	13	<0.1	0.1	<0.1	未測定	0.5	未測定	未測定	未測定	
溶解性鉄(mg/L)	23	0.8	0.3	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	
硫酸イオン(mg/L)	11	24	34	32	29	99~340	25	未測定	未測定	180	7.3	29	62	38	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	
酸化還元電位(mV)	-7	312	未測定	未測定	-51	100~200	67	400	未測定	18	390	-127	-400 ~250	未測定	35	未測定	未測定	未測定	-50~0	
pH	6.4	6.3	未測定	未測定	7.5	7前後	6.9	6~7	7.0	6.6	5.9	6.5	7.3~8.2	6.4	未測定	9.7	未測定	未測定	7.1	
全有機炭素(mg/L)	3.2**	0.8**	未測定	3.1**	15**	未測定	0.8**	未測定	未測定	18**	未測定	2.0**	60	7.8	未測定	18	10	10~20	10~20	
水温(°C)	8.2	8.0	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	19.6	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	
PCE(mg/L)	<0.001	<0.001	2.3	<0.001	<0.001	0.065	0.78	<0.001	<0.001	<0.001	0.025	0.095	<0.001	0.004	0.35	<0.001	<0.001	0.10	<0.001	
TCE(mg/L)	0.030	1.2	<0.001	0.29	<0.001	0.009	5.4	0.62	220	0.003	0.53	0.062	<0.001	1.7	<0.001	<0.001	<0.001	0.10	<0.001	
cisDCE(mg/L)	0.084	<0.001	0.62	0.076	0.27	0.059	0.007	未測定	91	4.9	0.22	0.22	1.5	0.44	1.2	0.83	0.50	11	0.20	
VCM(mg/L)	0.59	<0.001	未測定	0.006	0.068	未測定	<0.001	未測定	5.8	1.4	未測定	0.020	1.7	0.014	未測定	<0.001	0.060	未測定	0.030	
複合汚染の有無	無	無	無	無	無	有†)	有††)	無	有†††)	無	有††††)	無	無	無	無	無	無	無	無	
スクリーニングポイント	13	3	5	9	10	9	7	0	4	8	7	16	16	11	2	2	4	7	6	
遺伝子項目	DHC菌***	非検出	非検出	未測定	未測定	2.3×10 ³	検出	非検出	未測定	3.6×10 ³	4.1×10 ²	検出	非検出	検出	非検出	1.0×10 ²⁻⁴	検出	1.0×10 ²	検出	5.8×10 ²
	vcrA***	非検出	非検出	未測定	未測定	2.8×10 ³	未測定	非検出	未測定	7.2×10 ³	非検出	未測定	非検出	未測定	非検出	4.0×10 ⁴	9.5×10 ⁵	9.0×10 ³	検出	1.6×10 ⁴
	bvcA***	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	1.4×10 ³	未測定	未測定	未測定	未測定	未測定	5.0×10 ³	非検出	8.0×10 ²	未測定	1.0×10 ⁴
脱塩素化確認	PCE脱塩素化	-	-	○	-	-	○	×	-	-	-	×	○	-	-	○	-	-	-	-
	TCE脱塩素化	○	×	○	○	-	○	×	○	○	-	×	○	-	○	○	-	-	○	○
	cisDCE脱塩素化	○	×	×	○	○	○	-	×	△	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	VCM脱塩素化	○	×	-	○	○	-	-	-	△	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○

*メタン、アルカリ度、塩素イオン、BTEX、エチレン/エタン、クロロエタン、1,1-DCEは予備スクリーニング分析項目であるが全ての検討で未測定。PCEは分析項目ではないが表示。

** 溶存性有機炭素濃度を表示

†) 四塩化炭素・ベンゼン、 ††) 1,1-ジクロロエチレン・1,1,1-トリクロロエタン・1,1,2-トリクロロエタン汚染、 †††) ベンゼン、 ††††) 四塩化炭素

***DHC: デハロコクコイデス属細菌16S rRNA遺伝子数、非検出: 1.0×10²copies/mL未満

■: スクリーニングポイントとして加点、●: スクリーニングポイントとして減点、■: 有用遺伝子が検出、■: 未測定

表-3 室内試験の結果から考察される分析項目と生物学的な脱塩素化の関係

分析項目	汚染域での濃度	ポイント	分析項目と脱塩素化の関係
溶存酸素	0.5 mg/L未満	3	測定件数が少なく(室内試験のためと推測)判断不可
	0.5超過, 5.0 mg/L未満	0	
	5.0 mg/L以上	-3	
硝酸塩	1 mg/L未満	2	値が高いと脱塩素化が停滞
2価鉄	1 mg/L超過	3	測定件数が少なく判断不可
硫酸塩	0.5 mg/L未満	0	高濃度だと脱塩素化が進行する根拠が確認できなかった
	0.5 mg/L超過	3	
メタン	0.5 mg/L超過	3	測定件数が0で判断不可
酸化還元電位(ORP)	50mV未満	1	値が高いと脱塩素化が停滞する場合が多い
	-100mV未満	2	
水素イオン濃度(pH)	5 < pH < 9	0	中性でも脱塩素化が停滞する場合があった
	5 > pH > 9	-2	
全有機炭素(TOC)	20 mg/L超過	2	特定の傾向はみられなかった
水温	20°C超過	1	測定件数が少なく判断不可
アルカリ度	バックグランド値2倍超過	1	測定件数が0で判断不可
塩素イオン	バックグランド値2倍超過	1	測定件数が0で判断不可
BTEX	0.1 mg/L超過	2	測定件数が0で判断不可
TCE	汚染物質がPCEでTCE存在	2/0	VCMが確認される場合は脱塩素化が進行する場合が多い
cisDCE	存在する/しない	2/0	
VCM	存在する/しない	2/0	
エチレン/エタン	0.01 mg/L超過	2	測定件数が0で判断不可
	0.1 mg/L超過	3	
クロロエタン	検出する/しない	2/0	測定件数が0で判断不可
1,1-DCE	検出する/しない	2/0	測定件数が0で判断不可
遺伝子	DHC菌	検出する/しない	脱塩素化との高い相関関係がみられた
	vcrA	検出する/しない	脱塩素化との高い相関関係がみられた
	bvcA	検出する/しない	測定件数が少なく判断不可

■: 脱塩素化の進行可能性を判断するために有効と考えられた分析項目

表-4 地下水モニタリング措置移行時の持続可能性評価を行うためのチェックシート（案）

1	地下水モニタリング措置以外の対策工法と比較し、経済合理的で積極的な対策工法が無い。(経済)
2	二酸化炭素の排出量削減が見込める。(環境)
3	エネルギー使用量削減が見込める。(環境、経済)
4	資源使用量の削減が見込める。(環境、経済)
5	汚染物質による地下水環境への影響評価を行い、特に生態系への影響が小さいことを確認している。(環境)
6	汚染物質を含む排水の下水道放流量の削減が見込める。(環境)
7	騒音・振動・悪臭の発生低減が見込める。(環境)
8	遠隔分析システム等を利用し、モニタリング計画の効率化が図られている。(経済)
9	近隣に(災害用井戸を含む)地下水飲用井戸が無いことを確認している。(経済)
10	地下水源や公共用水域への汚染物質の影響を評価し、近隣住民等への健康影響が小さいことを確認している。(環境・社会)
11	ステークホルダーを特定し、地下水モニタリング措置への移行について合意形成がなされている。(社会)
12	自治体に情報を開示し、サイトの土壌対策に関し適切な指導・助言を得ている。(社会)
13	近隣住民に対し情報を開示・共有し、地下水モニタリング措置移行に対する理解が得られている。(社会)
14	地下水モニタリング措置移行に関し、第三者的な立場の機関に意見を聴取している。(社会)
15	異常時(天災等)対応体制が整備されている。(環境、経済、社会)
16	モニタリング記録の保存方針や情報公開に対する方針が明確である。(社会)
17	地下水モニタリング措置の移行による地価への影響が少なく、ある程度自由な土地利用が可能となる。(経済)
18	地下水モニタリングを継続する井戸の配置は適切かつ土地利用に影響が少ない配置となっている。(経済)

4. まとめ

今後も図-2の地下水モニタリング措置の評価および合意形成のフロー案の中の各評価方法について検討を進めて行く予定である。特にCSMを活用した汚染状況の可視化、汚染源周縁の汚染地下水の到達距離の予測シミュレーション、観測井戸の設置方法（位置および仕様）の評価手法の開発やケーススタディの実施が重要と考えており、検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 東京都 HP : <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/information/dojou-kentou.html>.
- 2) 白鳥寿一：MNAの適用に向けて、土壌環境センターニュース，No.9, pp.72-77, 2004.
- 3) 谷口紳ら：MNAプロトコール（我が国なりの技術的判断基準）の提案、第9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.454～457, 2003.
- 4) T. H. Wiedemeier et al: Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water, USEPA, EPA/600/R-98/128, p.29, 1998.
- 5) 舟川将史ら：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.