

(0065) 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーによる土壌・地下水汚染に係わる 対策・処理技術の検討と対策上の留意点

○大橋貴志¹・菊池毅¹・山本哲史¹・黒澤典明¹・
未規制物質による土壌汚染調査・対策手法検討部会¹ ¹土壌環境センター

1. はじめに

現行の土壌汚染対策法では、特定有害物質 25 物質について土壌汚染の調査・対策手法が定められているが、現在、土壌環境基準項目の見直しに伴い、同法の特定有害物質の種類や基準の見直しに関する検討が進められているところである。また、未だ規制されていない化学物質についても、将来、土壌汚染問題が顕在化する可能性や特定有害物質の種類が見直される可能性がある。そこで、未規制物質による土壌汚染調査・対策手法検討部会（以下、検討部会という）では、これらの化学物質に対する土壌・地下水汚染の調査・対策手法について、十分に整備されていないと考えられる課題を抽出し、解決策を提示することを目的として活動を開始した。

本報文は検討部会の活動成果のうち、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーに汚染された土壌及び地下水の対策・処理技術について示したものである。

2. 検討の背景

2.1 規制動向

検討部会では、土壌汚染対策法で規制されていないが、将来、見直される可能性のある化学物質を「未規制物質」と称している。現在のところ、検討部会では未規制物質の内、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーを対象としている。これら 2 物質に関する一連の規制動向を表 1 に示す。

表 1 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーの規制動向

年月日	発本文書等	概要
平成 21 年 11 月 30 日	平成 21 年環境省告示第 78 号、第 79 号	健康保護に係る水質環境基準に 1,4-ジオキサンが追加。 地下水環境基準に 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーが追加。
	環水大発第 091130004 号 環水大土発第 091130005 号	
平成 25 年 10 月 7 日	土壌の汚染に係る環境基準及び 土壌汚染対策法に基づく特定有害物質 の見直し等について (諮問第 362 号)	環境大臣が中央環境審議会に対し、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーを含む 6 物質の基準の見直し等について諮問。 検討のため中央環境審議会土壌農薬部会に「土壌環境基準小委員会」及び「土壌制度専門委員会」を設置。
平成 26 年 9 月 16 日	環境省報道発表資料 (意見募集期間：平成 26 年 9 月 16 日～ 10 月 20 日)	土壌環境基準小委員会において、1,4-ジオキサン、塩化ビニルモノマーを土壌環境基準（溶出基準）に追加することとする第 2 次答申（案）がとりまとめられ、パブリックコメント実施。※平成 27 年 12 月 11 日に結果公開済。
平成 26 年 12 月 18 日	中央環境審議会土壌農薬部会 土壌制度専門委員会（第 2 回）開催	1,4-ジオキサンは、土壌ガス調査を適用しても、その特性から検出が困難であるため、効率的な調査が行えず、第一種特定有害物質と同等の合理的な対策を行うことが難しいこと等から、当面は特定有害物質には指定せず、汚染実態の把握に努め、併せて効率的かつ効果的な調査技術の開発を推進し、合理的な土壌汚染調査手法が構築できた段階で、改めて特定有害物質への追加について検討することが適当ではないかとされた。一方、塩化ビニルモノマーについては、汚染状況調査の実施や汚染の除去等の措置が適用可能であると考えられること等を踏まえ、土壌汚染対策法に基づく特定有害物質に追加することが適当であるとされた。
平成 27 年 10 月 9 日	環境省報道発表資料 (意見募集期間：平成 27 年 10 月 9 日～ 11 月 9 日)	土壌制度専門委員会において、土壌汚染対策法に基づく特定有害物質に 1,4-ジオキサンは指定せず、塩化ビニルモノマーは指定することとする第 2 次報告（案）がとりまとめられ、パブリックコメント実施。 ※平成 27 年 12 月 11 日に結果公開済。
平成 28 年 1 月 8 日	環境省報道発表資料	中央環境審議会土壌農薬部会「土壌の汚染に係る環境基準及び土壌汚染対策法に基づく特定有害物質の見直しその他法の運用に関し必要な事項について（第 2 次答申）」が取りまとめられ、中央環境審議会会長から環境大臣へ答申。

A Study of Remediation Technologies for Soil and Groundwater Contaminated with 1,4-dioxane and Vinyl Chloride
Takashi Ohashi¹, Takeshi Kikuchi¹, Norifumi Yamamoto¹, Noriaki Kurosawa¹ and Study group of investigation and
remediation methods for soil and groundwater contaminated with unregulated chemicals¹ (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

2.2 活動経緯

検討部会の活動は、調査ワーキンググループ（以下、WG という）と対策WG の2つに分かれて検討することとした。このうち対策WG は未規制物質による土壌・地下水汚染の処理・対策手法に関する技術的課題を抽出し取りまとめることを目標としており、本稿は2年間の活動成果を報告するものである。実施項目を以下に示す。

(1) 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーによる土壌・地下水汚染の対策・処理技術の整理

(2) 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーに対する想定ケーススタディ、処理業・運搬に関する課題検討

また、いずれの検討においても、これら2物質の物理化学的性状に留意しながら、対策・処理技術の「あるべき姿」を追求することとした。なお、平成27年12月28日付けで中央環境審議会会長から環境大臣へ答申がなされ、1,4-ジオキサンは「当面は」土壌汚染対策法の対象外になる見込みであるが、土地所有者が自主的に対策を講じたいといった場合が生じることが想定されるとの指摘がなされており、調査・対策手法の早期構築が切望されている状況である。

3. 対策WG の活動内容

対策・処理技術を検討するにあたり、まず1,4-ジオキサン、塩化ビニルモノマー及び揮発性有機化合物の物理化学的性状を国内外の文献より収集・整理しその特徴を比較検討した(4.1節)。その結果、これら2物質は揮発性有機化合物と同様に対策・処理できるのではないかと推測に至り、実際に従来対策・処理技術が適用可能かの検討を行った。その過程で、1,4-ジオキサンは、揮発性が低く、その物性を考慮した対応が必要であることが明らかになってきた。このため、国内外の文献(40件)、中央環境審議会の情報から1,4-ジオキサンの対策に関わる情報を収集するとともに、海外書籍「ENVIRONMENTAL INVESTIGATION AND REMEDIATION 1,4-DIOXANE AND OTHER SOLVENT STABILIZERS (2010)の第7章 Remediation Technologies」の内容を精査し1,4-ジオキサンの対策・処理技術に関する状況としてまとめた(4.2節(1))。また、これらの文献等調査で得られた知見をもとに、国内で起こり得る汚染ケースを想定し、その対策・処理技術や対策時に留意すべき点をまとめた想定ケーススタディ(1,4-ジオキサン3件、塩化ビニルモノマー2件)を行った(4.2節(2))。

さらに処理業・運搬も対策の一環であることから、現行の土壌汚染対策法をこれら2物質に適用した場合に特に配慮すべき課題を抽出するとともに留意点をまとめた(4.3節)。

4. 対策WG の活動結果

4.1 各物質の物理化学特性

1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーによる土壌汚染に対する対策方法の適用性を検討する上で、これらの物質の性状や特性を整理しておくことは有益である。すでに豊富な対策実績を有する揮発性有機化合物との対比で、物性を把握するため、対策WG では沸点、比重、溶解度、土壌吸着係数等、18の物性値について1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーと第一種特定有害物質の物性一覧としてまとめた。本報ではその中の代表的な物性値について表-2に示すとともに、2物質の物性値のうち、第一種特定有害物質と比較して特徴的な値を示す項目を以下に取りまとめた。

表-2 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーの代表的物性値

物質名	分子量	沸点(°C)	融点(°C)	比重	溶解度(mg/L)	ヘンリー定数(-)	土壌吸着係数Koc(推定値)(-)	外観	臭気
1,4-ジオキサン	88.11	101.32	11.80	1.03(4°C)	水と自由に混和	4.8×10^{-6}	1.23	無色の液体	淡い香気、快い臭気
塩化ビニルモノマー	62.5	-13.4	-153.8	0.9106(20°C)	8,800(25°C)	2.78×10^{-2}	24~98	無色の液体または気体	ほのかに甘い匂い
テトラクロロエチレン	165.85	121.2	-22.4	1.6227(20°C)	150(25°C)	1.49×10^{-2}	177~350	無色の液体	ややクロロホルムに似た臭気
ベンゼン	78.11	80.1	5.5	0.8787(15°C)	1,800(25°C)	5.5×10^{-3}	65, 79, 170	無色の液体	特異な芳香

【1,4-ジオキサン】

- ・比重が水と同程度である。第一種特定有害物質は、水より比重が大きく、帯水層の底に溜まりやすいとされているため、汚染拡散の状況が異なる可能性がある。
- ・水と自由に混和し、溶解しやすい特性から、地下水の流れによって汚染拡散を起こしやすい。このため、地下水や排水から汚染物質を分離、除去することは難しいが、土壌中に存在する汚染物質を揚水や洗浄工法等で回収することは比較的容易であると想定される。
- ・土壌吸着定数は、第一種特定有害物質と比較して1～2オーダー小さく、土壌に吸着しにくい性質を持つ。

【塩化ビニルモノマー】

- ・沸点が低く、常温では気体である。対策時の揮発性、拡散防止及び作業環境基準への留意が必要となるものの、土壌や地下水、排水から汚染物質を分離、除去するという点では、他の第一種特定有害物質と比較して優位と推定される。
- ・比重が水と同程度であり、またジクロロエチレン類の分解生成物として地下水中に溶解していることなどから、第一種特定有害物質とは汚染拡散の状況が異なる可能性がある。
- ・水への溶解度は『テトラクロロエチレン<トリクロロエチレン<ジクロロエチレン<塩化ビニルモノマー』の順に値が大きい。地盤中で微生物分解により脱塩素化が進むにつれ、水への溶解性が増すと推察される。

4.2 対策・処理技術の種類と適用にあたっての留意点

(1) 対策・処理技術の種類

表-3に1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーに対する従来の対策・処理技術の適用性評価及び想定される施工上の留意点等を示す。その結果、上記の2物質においては、⑥遮断工封じ込め及び⑦不溶化以外の対策手法(①～⑤)が適用可能であると考えられた。

表-3 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーに係る従来の対策・処理技術の適用性と施工上の留意点等

従来の対策手法	適用性評価※	施工上の留意点等	
		1,4-ジオキサン	塩化ビニルモノマー
①地下水の水質の測定	○	土壌溶出量基準に適合しない地点のうち、最も土壌溶出量が高い地点や観測井における地下水位の測定結果等より地下水の流れからみた下流側にある地点を観測井とすることが基本。	
②原位置封じ込め	○	鋼製矢板工法、地中壁工法、薬液注入工法及び高圧噴射式攪拌工法については適用可能。工法の選定については、現場の特性を考慮することが必要。また、封じ込めを行う場所は所定以上の遮水性と厚さを有した不透水層が連続して分布していることを確認。	
③遮水工封じ込め	○	対策後の地下水モニタリング位置の選定。遮水材料への影響の評価(遮水効力、耐久性、耐薬品性など)。	対策後の地下水モニタリング位置の選定。第一種特定有害物質よりガス化しやすいため、掘削・仮置き時に配慮が必要。
④地下水汚染の拡大防止	○	<ul style="list-style-type: none"> ■地下水揚水：適切な位置に揚水設備を設置するとともに、適切な揚水量に設定。 ■透過性地下水浄化壁：高性能の吸着材の開発や効率的な分解手法の確立が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ■地下水揚水：左記と同様 ■透過性地下水浄化壁：事前に帯水層の透水係数や地下水の流動状況及びその予測される変化等を検討。
⑤土壌汚染の除去	○	掘削・運搬・処理時の拡散防止対策(テント養生等)や作業員の暴露防止対策が必要。処理方法については適用性試験を実施し、目標とする浄化性能を達成できる処理条件を設定。	
⑥遮断工封じ込め	×	—	
⑦不溶化	×	—	

※適用性評価…○：適用可、×：適用困難

一方で上記の対策・処理技術の中には、揚水した地下水や掘削した土壌を適切に処理しなければならないものがある。また、汚染範囲が広い場合には、原位置での浄化も視野に入れる必要があり、これらに対応可能な対策・処理技術も重要と思われる。そこで、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーの対策・処理技術に関する文献調査を行い、性能及び課題等を整理した。その結果、塩化ビニルモノマーはこれまでの揮発性有機化合物と同様の対策・処理技術の延長で対応可能との見通しを得た。一方、1,4-ジオキサンは揮発性が低く、土壌に吸着しにくい特性があり、その特性に応じた対応として、地下水を揚水し地上で水処理する技術が多く確認された。1,4-ジオキサンの水処理技術については様々なものが検討されていたので以下に紹介する。

表－4に1,4-ジオキサンの水処理における各技術の浄化性能と課題について示した。酸化分解では、複数の酸化剤を使用する促進酸化において報告事例が多く、分解率としては69%以上を示した。促進酸化以外の酸化分解としてはフェントン法や過硫酸法が挙げられ、比較的高い分解率が得られている。しかしながら、これらの浄化手法は共存物質の影響を受け易いことから、サイトの特性によっては高い分解性能が得られないケースがある。

続いて吸着除去の浄化手法は、活性炭吸着が挙げられる。一般的に、1,4-ジオキサンはベンゼンなどの他の物質と比較し吸着性が低いことが指摘されているが、活性炭の種類によっては、高い吸着能を有するものがあった。しかしながら、平衡吸着量が低いため高濃度汚染への対応が課題として挙げられる。

最後に生物分解としては、微生物による生物浄化が挙げられる。1,4-ジオキサンは微生物による分解は困難であるとされてきたが、近年、1,4-ジオキサン分解菌の存在が報告されており、69%以上の分解率が得られている。生物浄化の課題としては、生物の反応ゆえに分解期間が長くなることが挙げられる。

以上の文献調査から、これらの浄化手法は、揚水地下水や汚染土壌の処理といった浄化範囲が限定的なケースに対して適用できるものと考えられる。一方で、大規模な浄化が求められる原位置浄化への展開は依然としてハードルが高いと考えているが、国内外のプロジェクトにおいて実サイトでの検証実験が進められていることから引き続き技術開発の動向を注視していく。

表－4 1,4-ジオキサン汚染水を対象とした処理技術の浄化性能と課題

分類	対策・処理技術	浄化性能(分解・除去率)	課題	参考文献
酸化分解	促進酸化	69～100%	共存物質の影響	1), 2), 3), 4)
	フェントン法	0～99.7%	余剰汚泥の発生	1), 5)
	過硫酸法	7.1～99%	共存物質の影響	6), 7)
吸着除去	活性炭吸着	14.6～98.8%	高濃度汚染水への対応、吸着速度が低い	1), 6), 8)
生物分解	生物浄化	69～100%	分解期間が長い	1), 9), 10)

(2) 想定ケーススタディ

想定ケーススタディは文献調査などから得られた知見をもとに、日本国内で起こり得る汚染ケースを想定し、汚染発生に至る背景や汚染濃度などの現場条件を設定した。次にこの条件で適用可能と思われる複数の技術を比較検討し、適用が妥当と思われる対策技術を選定した。この際、選定理由を付すとともに、対策時の留意点についても記述した。検討した5つのケースの概要を表－5に示す。また、1,4-ジオキサン汚染の対策となるケース1の内容について以下に例示する。

ケース1は大規模電子部品工場跡地における1,4-ジオキサンの原位置浄化を想定した。本ケースでは汚染発覚当初はトリクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタンを対象に揚水ばっ気処理を行っていたが、途中で1,4-ジオキサンが確認されたことを契機に処理方法を変更した事例とした。処理方法が変更となったのは、1,4-ジオキサンの揮発性が低くばっ気処理では十分に処理ができない¹⁾ためとした。対策・処理技術の比較検討では、①原位置抽出(地下水揚水)－促進酸化、②原位置抽出(地下水揚水)－活性炭吸着、③原位置分解(化学処理：フェントン法)、④原位置土壌洗浄を比較し、①と④を選定した。①の選定理由は、複数の物質を同時に分解でき、処理実績があるためであり、浄化期間の短縮が見込まれることから④を併用することとした。対策の概要を図－1に示す。汚染プルームの内側より揚水し、地上の促進酸化処理装置で1,4-ジオキサン等を分解し、その処理水を汚染プルーム周辺部へ復水するものである。

留意点として、地下水位や水質の変化をモニタリングし、揚水・注水の運転、井戸の配置の見直し等を実施することや、促進酸化の処理効率の低下を防止するため除鉄などの前処理を行うことなどが挙げられる。

表-5 想定ケーススタディ概要

ケース	対象物質	事業所の種類など	浄化に至る背景、汚染発生原因	汚染物質・濃度	対策方法
1	1,4-ジオキサン	電子部品工場 汚染面積 67,000 m ² 深度 -5~-15 m	・ 飲用井戸調査でトリクロロエチレンを検出。揚水ばっ気処理を開始したが、後に1,4-ジオキサンによる汚染も判明。 ・ 1,1,1-トリクロロエタンに安定剤として1~5%混合されていた1,4-ジオキサンが原因。	①トリクロロエチレン 飽和土壌 0.1~1.2 mg/L 地下水 0.005~2.7 mg/L ②1,4-ジオキサン 地下水 0.05~0.65 mg/L	①飽和土壌・地下水 ・ 原位置抽出 (地下水揚水) -促進酸化 ・ 原位置土壌洗浄
2	1,4-ジオキサン	産業廃棄物処理事業所の跡地 汚染面積約40万m ² 深度 最大-17 m	・ 不法投棄で浄化対策を実施済。 ・ 2009年に1,4-ジオキサンが環境基準に追加されたことを受け再度調査。 ・ 場内全域で1,4-ジオキサンによる地下水汚染が判明。	①1,4-ジオキサン 地下水 最大7.1 mg/L	①飽和土壌・地下水 ・ 原位置土壌洗浄-促進酸化
3	1,4-ジオキサン	濾過装置製造工場 汚染到達距離 汚染源より約2 km 深度 最大-60 m	・ 飲用井戸で1,4-ジオキサン検出。 ・ 不法投棄と判明。 ・ 工場内・外に地下水汚染あり、浄化開始。 ・ 9年後、さらに深部の帯水層や広範囲に汚染を確認。	①1,4-ジオキサン 地下水 最大103 mg/L	①地下水 ・ 揚水施設による地下水汚染の拡散の防止 - 促進酸化による揚水処理
4	塩化ビニルモノマー	産業廃棄物処理事業所の跡地 汚染面積 13,000 m ² 深度 -14 m程度	・ 不法投棄が判明。 ・ 燃え殻、汚泥、廃油入りドラム缶。 ・ 塩化ビニルモノマーはトリクロロエチレンの微生物分解で副次的に生成。	①トリクロロエチレン 地下水 最大1.2 mg/L ②塩化ビニルモノマー 地下水 最大0.23 mg/L	①不飽和土壌 ・ オンサイト浄化 (抽出処理：生石灰添加) ②飽和土壌・地下水 原位置分解 (生物処理)
5	塩化ビニルモノマー	紡績工場 (稼働中) 汚染面積 900 m ² 深度 -2.4~-11 m	・ 工場設備の改修工事の際に汚染発覚。 ・ テトラクロロエチレンやトリクロロエチレンの漏洩事故の記録あり。これらの物質の微生物分解により副次的に生成と推定。	①トリクロロエチレン 飽和土壌 0.2~30 mg/L 地下水 1~100 mg/L ②塩化ビニルモノマー 飽和土壌 ~0.18 mg/L 地下水 0.002~11 mg/L	①飽和土壌・地下水 ・ 原位置分解 ・ 化学処理：鉄粉 ・ 生物処理 ・ 透過性地下水浄化壁

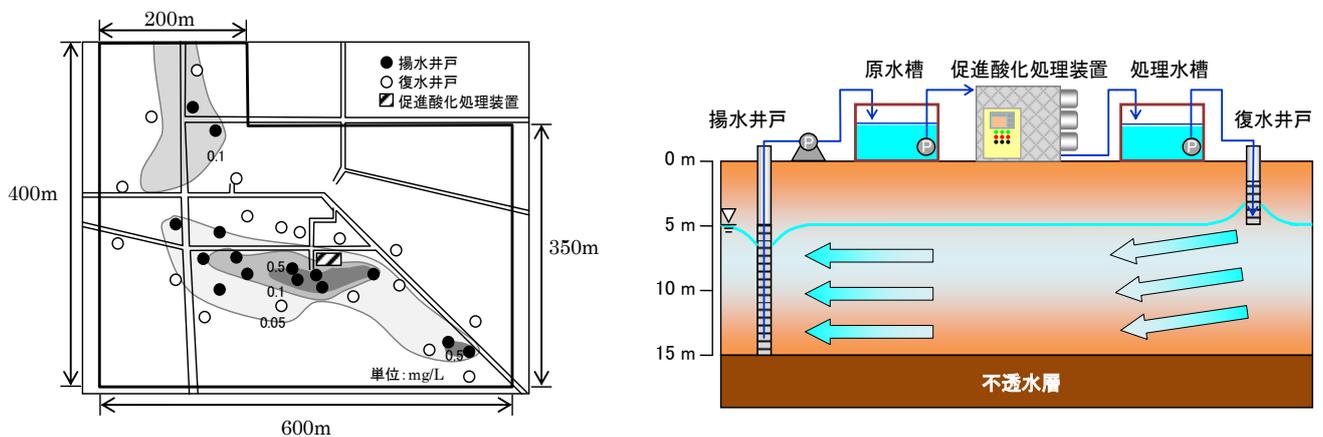


図-1 対策概要図 (ケース1)

4.3 処理業及び運搬の課題と留意点

1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマー汚染土壌の処理業並びに運搬において、これらが第一種特定有害物質と同じ分類で取り扱われるとすると、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーの各物性に配慮した処理・運搬が必要となると考えられる。そこで本報では、「汚染土壌の処理業に関するガイドライン改訂版 (改訂第2版追補)」及び「汚染土壌の運搬に関するガイドライン改訂版 (改訂第2版追補)」(以下、ガイドライン)を、これら2物質の処理・運搬に適用した場合に、特に配慮すべき課題、留意点を以下に取りまとめた。

【処理業における課題・留意点】

- a) 処理方法として、1,4-ジオキサン、塩化ビニルモノマー共に不溶化の適用は不可であり、浄化 (抽出)、浄化 (分解)、熔融が適用可能と考えられる。

- b) 飛散等及び悪臭の発散を防止する構造として、1,4-ジオキサンは水と自由に混和し、移行しやすい特性があるので、ガイドラインの雨水等に触れないための措置、外部への流出を防止するための措置を徹底する。塩化ビニルモノマーは第一種特定有害物質の中でも非常に揮発しやすいため、揮発した有害物質を含む空気によるばく露防止措置や、屋内空気を処理してから排気する、土壌を湿潤に保って揮発を抑制するなど、適正な対応が必要と思われる。
- c) 排水処理設備については、1,4-ジオキサン汚染土壌を洗浄処理すると、大部分が洗浄水へ移行すると思われ、その洗浄排水を排水・排除基準（0.5 mg/L）に適合可能な排水処理方法を用いる必要がある。塩化ビニルモノマーは排水・排除基準が設けられていないが、適正に処理することが望ましい。
- d) 大気有害物質処理設備については、1,4-ジオキサンは「有害大気汚染物質に該当する可能性のある物質」で塩化ビニルモノマーは「優先取組物質（23 物質）」であるため、排気中の大気有害物質の管理が必要と考えられる。また、1,4-ジオキサン、塩化ビニルモノマーともに、作業時のばく露防止には有機ガス用防毒マスクまたは送気マスクを使用することが望ましい。

【運搬業における課題・留意点】

- e) ガイドラインに定める運搬過程における飛散等の防止措置、積替え、保管施設における飛散等及び悪臭の発散防止措置については、第一種特定有害物質の対応に準拠することが適当である。
- f) 保管施設における排水管理について、1,4-ジオキサンは排水・排除基準（0.5 mg/L）を遵守する。塩化ビニルモノマーは排水・排除基準が設けられていないが、適正に処理することが望ましい。
- g) 保管施設における排ガス管理については、1,4-ジオキサンは「有害大気汚染物質に該当する可能性のある物質」で塩化ビニルモノマーは「優先取組物質（23 物質）」であるため、排気中の大気有害物質の管理が必要と考えられる。また、1,4-ジオキサン、塩化ビニルモノマーともに、作業時のばく露防止には有機ガス用防毒マスクまたは送気マスクを使用することが望ましい。

5. まとめ

現行の土壤汚染対策法の対象外となっている未規制物質のうち、1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーを対象とし、対策・処理技術を整理し、適用に当たっての留意点を整理した。

対策・処理技術については、2 物質ともに、地下水の水質測定や、原位置封じ込め等、従来の対策・処理技術が適用可能であるものの、原位置浄化などについては適用性確認等の課題が残されており、引き続き技術開発の動向に注視が必要である。また、処理業及び運搬に関する未規制物質の取り扱い上の留意点を整理しており、適正な処理・運搬技術の普及に期待している。

参考文献

- 1) T.K.G. MOHR *et al.*(2010): Environmental investigation and remediation: 1,4-dioxane and other solvent stabilizers, CRC Press, Boca Raton.
- 2) 吉崎ら(2009): MBR および UV/オゾン法による工場排水中の 1,4-ジオキサンの除去, 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, pp.273.
- 3) NEDO(2012): 省水型・環境調和型水循環プロジェクト 水循環要素技術研究開発 高効率難分解性物質分解技術の開発のうち難分解性化学物質分解 (H21-H25) 平成 23 年度分 中間年報.
- 4) 中本ら(2013): UV/O3 処理装置を用いた水中の 1,4-ジオキサンの分解, 環境と安全, 4(3), pp.171-176.
- 5) 秋山ら(2014): 大規模不法投棄サイトにおける 1,4-ジオキサン汚染水処理, 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.617-620.
- 6) 伊藤ら(2013): 1,4-ジオキサンによる土壌・地下水に対する調査・対策について (その 1), 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.393-396.
- 7) PeloxChem(2007): Emerging Contaminant SpotLight: 1,4-Dioxane, FMC environmental solutions peroxygen talk.
- 8) S. Woodard: A New Effective Approach to 1,4-dioxane Treatment Groundwater.
- 9) K. Sei *et al.*(2010): Evaluation of the biodegradation potential of 1,4-dioxane in river, soil and activated sludge samples, Biodegradation, 21(4), pp.585-591.
- 10) 清ら(2011): 1,4-ジオキサン分解菌を用いた汚染地下水の生物処理・浄化の可能性, 用水と廃水, 53(7), pp.555-560.