

(S4-12) 1,4-ジオキサンによる地下水汚染発見契機への対応
 ～土壌・地下水汚染への総合的な対応に関する指針（案）～

○塩谷剛¹・中島誠¹・和田卓也¹・青木鉦二¹・佐藤徹朗¹・
 土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する指針検討部会¹
¹土壌環境センター

1. はじめに

土壌汚染対策法（以下、土対法）が施行された2003年以降、土壌汚染は土対法、地下水汚染は水質汚濁防止法（以下、水濁法）により、連携を図りつつも、個別に運用されてきた現状がある。一方で、1,4-ジオキサン（以下、DXA）は、地下水環境基準および土壌環境基準が定められているものの、土対法の特定有害物質とはなっていないため、DXAによる土壌・地下水汚染に遭遇した場合の対応に苦慮していることも想定される。さらに、今後、地下水の飲用による健康リスクへの対応だけではなく、地下水環境保全の観点からの対応を求められるケースも増加してくることが予想される。このような状況に対し、（一社）土壌環境センターでは、2018年度から土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する分科会および自主部会を設置し、土壌・地下水汚染を一体として捉えた合理的な対応方法についての検討を行った¹⁾⁶⁾。2022年度からは、「土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する指針検討部会」（以下、指針検討部会）において、これまでの研究成果をもとに「土壌・地下水汚染への総合的な対応に関する指針」⁷⁾（以下、本指針）の作成を進めている。本稿では、本指針（案）のうち、DXAによる土壌・地下水汚染の特性や調査方法、事業所内・外でDXAによる地下水汚染が発見された場合の対応フローと具体的な調査内容（想定される実施者や各ステップで実施すべき調査項目およびその内容）等について報告する。なお、本指針（案）に関しては、汚染の発見契機や対象物質によって対応方法が異なるため、DXA以外については「事業所内で土壌・地下水汚染が発見された場合、事業所外で地下水汚染が発見された場合の対応内容と事業所内外の連携のあり方」⁸⁾⁹⁾について、それぞれ別途投稿しているので合わせて確認頂きたい。

2. 指針（案）のコンセプト

指針（案）のコンセプトを表1に示す。DXAは、地下水環境基準および土壌環境基準が定められているが土対法の特定有害物質とはなっていないため、「その他物質」として位置付けている。なお、DXAの特性から土壌汚染発見契機型は想定しておらず、地下水汚染の発見を契機とした「事業所外地下水汚染発見契機型」および「事業所内地下水汚染発見契機型」を想定し、それぞれの契機に応じた対応の進め方を示している。

表1 指針（案）のコンセプト⁹⁾

総合的な調査・対策の定義	土壌と地下水を一体として捉えた調査を実施し、その汚染メカニズムを把握した上で、地下水環境の保全に資するために必要となる対策を講じていくこと
目標とする土壌・地下水の状態	地下水飲用による健康リスクだけではなく、地下水環境の保全の観点から、将来的には、対象地の土壌および地下水の状態が環境基準に適合すること、さらには地下水が本来あるべき姿（人為的な負荷を受けていない状態）に到達すること ※自然由来や生態系、汚染土壌の直接摂取への対応は対象外
対象とする有害物質の区分	土対法第一種特定有害物質→「揮発性有機化合物」 土対法第二種特定有害物質、土対法第三種特定有害物質→「重金属等・農薬等」 1,4-ジオキサン→「その他物質」 ※発生源が面的・多岐にわたる硝酸性及び亜硝酸性窒素は対象外
対応の契機	「事業所外地下水汚染発見契機型」、「事業所内地下水汚染発見契機型」、「事業所内土壌汚染発見契機型」に場合を分け、それぞれの契機に応じた対応の進め方を示している。

Responding to the discovery of groundwater contaminated by 1,4-Dioxane inside or outside the workplace

- Concept of Guideline for Comprehensive Response to Soil and Groundwater Contamination -

Tsuyoshi Shiotani¹, Makoto Nakashima¹, Takuya Wada¹, Seiji Aoki¹, Tetsuro Sato¹,

Study group on guidelines for comprehensive response to soil and groundwater contamination¹ (GEPC)

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

3. 地盤環境中における1,4-ジオキサンの挙動特性

DXA は分子式 $C_4H_8O_2$ で表される環状エーテルであり、密度が $1.03 \text{ kg/L}(25^\circ\text{C})$ で水よりもわずかに大きく、解離基をもたない、常温で無色透明な液体である。DXA の沸点は 101°C で水とほぼ等しく、水や油等と無制限に混和する揮発性有機化合物である。DXA は溶剤として広く使用されてきており、過去には塩素系溶剤、特に1,1,1-トリクロロエタン (MC) の安定剤として多量に使用されてきた。表2にDXAとMCの特性を示す。DXAの有機炭素/水分配係数 $\log(K_{oc})$ は $1.23(\log(\text{L/kg}))$ と小さいため、土壌中では有機物に吸着しにくく、水と相互に分配した状態で移流・分散しやすい物質と考えられる。図1にDXAの土壌・地下水汚染の拡散状況の模式図を示す。降雨浸透がない状態が続けば、間隙水に分配したDXAが下層まで土壌間隙水中を拡散して土壌汚染範囲が広がり、不飽和帯土壌においても高濃度でDXAが存在し続ける。一方、降雨浸透がある場所ではDXAは不飽和帯に留まる場合もあるが、多くは帯水層にまで浸透して地下水中に移行する¹⁰⁻¹²⁾。これらの汚染メカニズムから、表層土壌にはDXAが残留しづらいため、表層土壌調査による浸透源の把握は困難である。また土壌中のDXAは水への分配が高いことに加えて、ヘンリー定数($0.557 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot 25^\circ\text{C}$)が低いことから、揮発しても地表付近まで上がってくる可能性が低く、土壌ガスによる検知も困難となる。さらに、帯水層に浸透したDXAは、地下水流向の下流側だけではなく、深度方向にも拡散し、一部は、帯水層下位の難透水層にも浸透する。なお、DXAがMCや油分と共存する場合、水層として拡散するだけではなく、共存物質と混和し移動するなど、単独の場合とは異なった動きをする可能性もあるため、留意が必要である。

表2 1,4-ジオキサンおよび1,1,1-トリクロロエタンの主な物理化学的性質^{10,11)}

分子式	分子量 M	密度 ρ_M	空気中での 拡散係数 D_a	水中での拡 散係数 D_w	有機炭素/水 分配係数 K_{oc}	ヘンリー 定数H	蒸気圧 V_p	水溶解度 S_b	
	M(g/mol)	(kg/L)(25°C)	(m^2/s)	(m^2/s)	(log(L/kg))	($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$)(25°C)	(kPa)(25°C)	(mg/L)(25°C)	
1,4-ジオキサン	$C_4H_8O_2$	88.1	1.03	2.3×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.23	5.57×10^{-1}	4.9	混和
1,1,1-トリクロ ロエタン	$C_2H_3Cl_3$	133.4	1.33	7.8×10^{-6}	8.8×10^{-10}	2.04	1.76×10^3	17	17

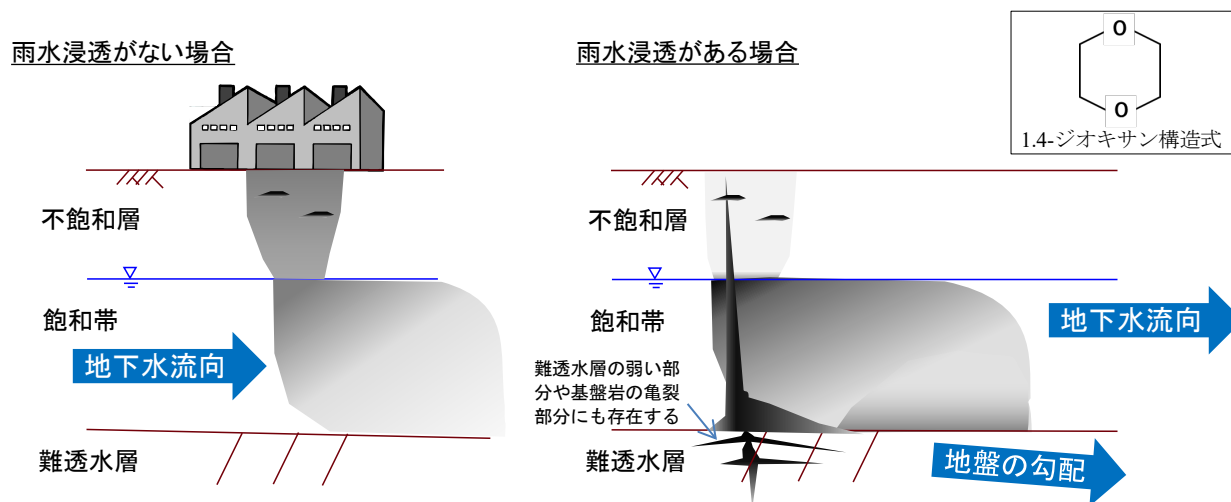


図1 1,4-ジオキサンによる土壌・地下水汚染の拡散状況 模式図

4. 指針(案)の概要

4.1 総合的な調査・対策のフロー

DXAによる事業所内地下水汚染発見契機(図2)、事業所外地下水汚染発見契機(図3)について説明する。なお、現時点の指針(案)では、DXAは表層土壌に汚染が残存しないケースもあることから土壌汚染発見契機型は想定していない。

4.1.1 事業所内地下水汚染発見契機型

契機となった井戸の汚染地下水が飲用に用いられていない場合においても、事業所内に他に飲用井戸があるかどうかについて確認する。飲用井戸が確認された場合には、当該井戸から地下水を採取し、DXAを対象に公定法による分析を行う(ステップ①飲用井戸での水質検査)。地下水中のDXAの分析方法については「昭和

ステップ① 飲用井戸での水質検査

【調査項目】

- ・ 飲用井戸での DXA 水質検査

ステップ② 事業所内既設井戸等状況調査

【調査項目】

- ・ 既設井戸の諸元及び構造に関する情報の整理
- ・ 既設井戸の井戸構造調査
- ・ 既設井戸における地下水調査

ステップ③⑧ 事業所内資料等調査

【調査項目】

- ・ 潜在的土壌汚染源範囲および汚染源からの地下水汚染経路等の推定のための地歴調査
- ・ 水文地質状況・水理特性の調査

ステップ④⑨ 潜在的土壌汚染源における土壌調査

【調査項目】

- ・ 深度方向土壌調査（土壌ガス調査や表層土壌調査は不適であるため）

ステップ⑤ 把握された土壌汚染に対する地下水調査

【調査項目】

- ・ 地下水観測井戸の設置
- ・ 観測井戸における地下水調査

ステップ⑦ 事業所内地下水汚染源絞込調査

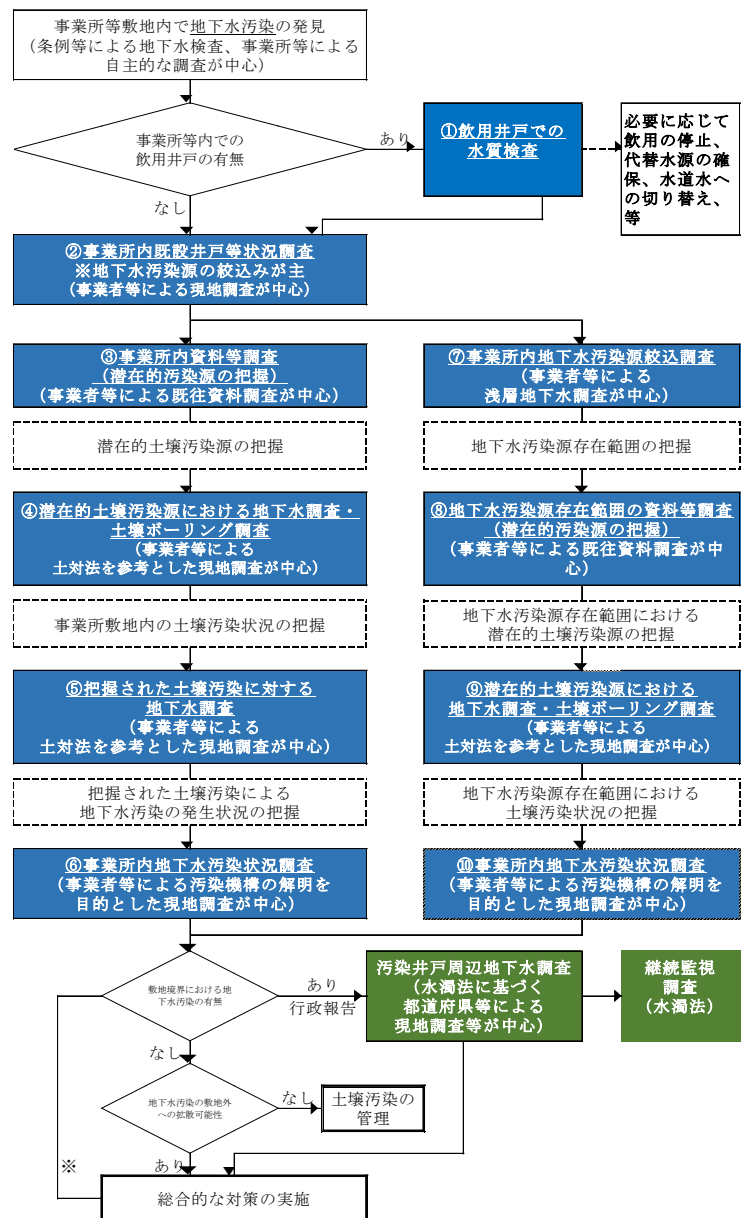
【調査項目】

- ・ 地下水調査
- ・ 地下水汚染範囲想定のための土壌ガス調査

ステップ⑥⑩ 事業所内地下水汚染状況調査

【調査項目】

- ・ 敷地境界における地下水汚染の有無
- ・ 地下水汚染の敷地外への拡散可能性



※ 総合的な対策における水質モニタリング等で敷地境界で新たな地下水汚染が確認された場合

図2 事業所内地下水汚染発見契機型の対応フロー
(1, 4-ジオキサン)

46 年環境庁告示第 59 号の付表 8」に準拠する。また、採取した地下水の前処理、採取容器、保管方法については、「既設井戸等からの地下水の採水について¹³⁾」を参考とできる。なお、飲用井戸の場合、定期的に水質検査を実施しているが、分析項目に DXA が含まれていない場合もある。次に「ステップ②事業所内既設井戸等状況調査」を行った上で「ステップ③資料等調査」を行う。ステップ③で把握された潜在的土壌汚染範囲において「ステップ④事業所敷地内の土壌汚染状況の把握」、「ステップ⑤把握された土壌汚染による地下水汚染発生状況の把握」を行い、契機となった地下水汚染による土壌・地下水汚染の状況を把握する。事業所特性（敷地面積が広大である、複数の企業が事業活動を行っている）によっては、「ステップ⑦地下水汚染源絞込調査」を先行実施し、地下水汚染範囲を絞り込み、絞り込んだ範囲を資料等調査の対象とし（ステップ⑧）、「ステップ⑨地下水汚染源存在範囲における土壌汚染状況の把握」を行うこともできる。さらに、「ステップ⑥または⑩事業所内地下水汚染状況調査」では、地下水流向下流側敷地境界における地下水汚染の有無や敷地外への拡散の可能性を評価することが主な目的となる。

4.1.2 事業所外地下水汚染発見契機型 (1, 4 ジオキサン)

水濁法による概況調査、井戸利用者からの報告等により環境基準または水道水質基準不適合となる DXA の確認が調査契機となる。契機となった井戸等の構造、地下水の採取方法、採取時の地下水の状態、当該井戸の

ステップ①井戸等の状況確認調査

【調査項目】

- ・井戸等の構造、利用等の状況

ステップ②汚染源推定調査-1

【調査項目】

- ・既往資料等調査
- ・水文地質状況・水理特性の調査
- ・土地利用の状況調査

ステップ③汚染源推定調査-2

【調査項目】

- ・汚染井戸周辺地下水調査
- ・既存井戸情報の収集
- ・既存井戸における地下水調査等

ステップ④地下水汚染範囲特定調査

- ・水濁法による周辺地下水調査

ステップ⑤汚染源事業所特定調査

【調査項目】

- ・水文地質構造・水理特定把握のための調査
- ・既設井戸地下水調査
- ・公有地や公道における調査

ステップ⑥事業所等敷地における調査・

報告の依頼

- ・調査実施や調査結果の報告依頼

ステップ⑦事業所等への立入り検査

- ・水濁法による立入り検査や協力依頼

ステップ⑧事業所内汚染源確認調査

- ・事業所内地下水汚染発見契機フロー

③～⑩を参考に実施

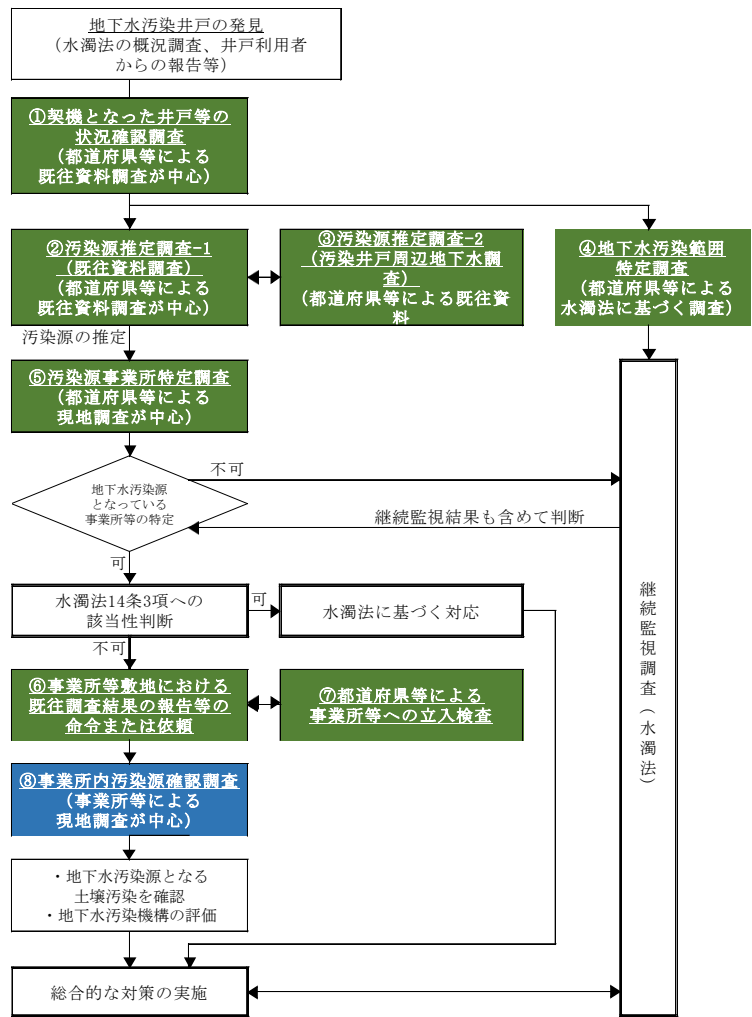


図3 事業所外地下水汚染発見契機型の対応フロー
(1, 4-ジオキサン)

利用等の状況などを確認する（ステップ①契機となった井戸等の状況確認調査）。次に都道府県等が主体となり「ステップ②汚染源推定調査-1_既往資料調査」および「ステップ③汚染源推定調査-2_汚染井戸周辺地下水調査」を行うとともに、水濁法に基づき、契機となった井戸等の周辺において地下水調査を行い、地下水汚染の広がりを確認する（ステップ④地下水汚染範囲特定調査）。さらに、汚染源の推定のために、「ステップ⑤汚染源事業所特定調査」を実施し、地下水汚染源となっている事業所等の特定をおこなう。ここで特定不可の場合には水濁法に基づく継続監視調査に移行するが、特定可能と判断された場合には、水濁法14条3項への該当性判断を行う。該当する場合には水濁法による対応が取られることになるが、該当性判断不可の場合には、都道府県等が「ステップ⑥既往調査結果の報告等の命令または依頼」および「ステップ⑦水濁法や条例に基づく立入り検査」を行う。さらに都道府県等からの依頼等を受けた事業所等が主体となり、「ステップ⑧事業所内汚染源確認調査」を行い、地下水汚染源となる土壤汚染の確認や地下水汚染機構の評価をおこなうことになる。

5. 本指針（案）における詳述内容の構成について

本指針（案）では、各調査契機に対し調査対象物質の区分毎に対応フローを示し、各調査ステップにおける調査項目に対して実施すべき項目等を示している。具体的には、各調査項目に対し、「実施すべき項目」、「望ましい項目」、「参考となる項目」に区分して、それぞれの調査内容について説明している。なお、調査内容については、土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン¹⁴等（以下、ガイドライン）の公の資料を参考とできる場合には、詳細は記載せず、指針（案）作成時点における参照先を示すこととした。

5.1 事業所内地下水汚染発見契機型（1, 4-ジオキサン）

図2に示す調査ステップ④、⑨「潜在的土壤汚染源における土壤調査」の調査項目である、深度方向土壤調査（土壤ボーリング調査）は図4のフローに示す通り行う。

【実施すべき事項】

DXA の場合、前述した通り、土壌ガス調査及び表層土壌調査では、濃度の高まり地点を把握することができないため、事業所内資料等調査等で想定した潜在的土壌汚染源の範囲に対し、雨水浸透がない場合には、土対法に準拠し、100 m²に1か所の頻度で土壌ボーリング調査を実施することを原則とする。土壌ボーリング調査の方法は、「ガイドライン App-11」を参考とできるが、DXA は深度方向にも浸透しやすいことから、調査深度は、第一帯水層下位の地層上端までを基本とする。採取した土壌に対する溶出量の分析方法は、「1,4-ジオキサンによる土壌汚染に関する技術的助言」（環水大土発第1604151号）（以下、技術的助言）に準拠する。

雨水浸透がある場合には、潜在的土壌汚染源の範囲内で、地下水調査を実施し、「地下水中の濃度の高まり地点及び契機となった井戸等の近傍」（以下、高まり地点等）で土壌ボーリング調査を実施し、その結果によっては100 m²毎の土壌調査を実施しないことも考えられる。

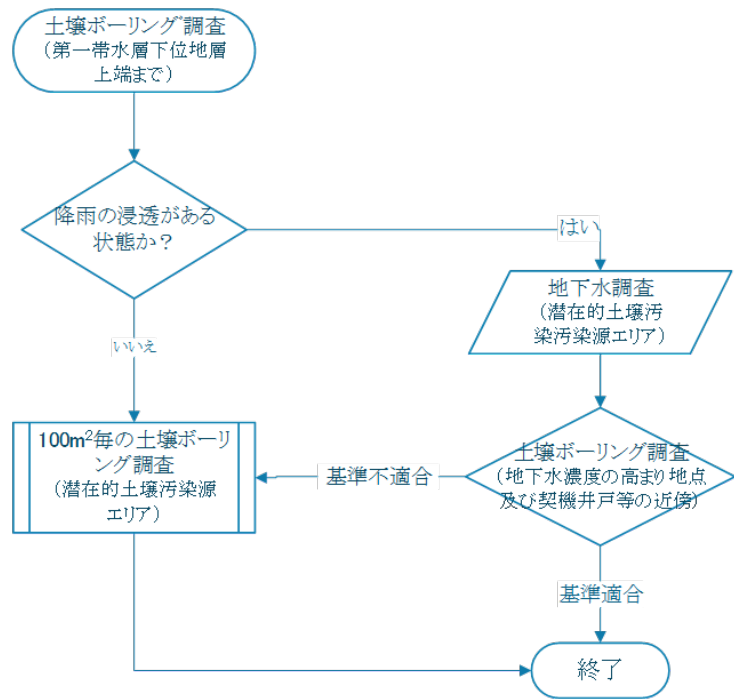


図4 1,4-ジオキサン土壌ボーリング調査フロー

【望ましい事項】

DXA の場合、難透水性の地層内を浸透し、下位の帯水層にまで汚染が拡散している事例も見られる。このため、第一難透水層の上端で土壌溶出量が確認される場合には、下位（第二）帯水層の地下水汚染状況を把握することが望ましい。下位帯水層の調査の場合、「ガイドライン App-11」に準拠し、地下水汚染の拡散を防止する方法で実施する必要がある。

【参考となる事項】

○土壌含有量調査

DXA の場合、土壌含有量基準は定められていないが、汚染要因の把握や浄化対策の検討には、含有量（全量）が参考となる。含有量（全量）の分析方法については、「底質調査方法」などを参考とできる。

○打ち込み井戸による地下水スクリーニング調査

地下水汚染の高まり地点を把握し土壌ボーリング調査地点を絞り込むため、打ち込み井戸を用いることが有効である。打ち込み井戸による調査方法は、「ガイドライン App-7」、「地盤調査の方法と解説（平成16年6月 社団法人地盤工学会）」を参考とできる。DXA の場合、地下水流向だけではなく、深度方向にも汚染が浸透していくため、地下水汚染の広がり把握するには、先ず、帯水層の上部に加え、帯水層の中心を対象とすることも考えられる。

5.2 事業所外地下水汚染発見契機型（1,4-ジオキサン）

図3に示すフローにおいて、他の物質と比較し、DXA 特有事項を以下の通り示す。

【調査ステップ②「汚染源推定調査（既往資料等調査）」】

水文地質状況・水理特性の調査において、DXA の場合、地下水汚染が広がりやすい性質を持っていることに加えて、浅部で地下水に混和（相互溶解）するとともに、深部にまで浸透する可能性が高いため、契機となった帯水層の下位の地層上端や下位帯水層の状況まで把握する。

土地利用状況調査においては、DXA の過去及び現在の使用状況や排出状況を把握する。なお、DXA は生産工程等で非意図的に副生成物として生成されることもある。また、MC には1995年まで、安定剤としてDXA が2~4%含まれていたため、MC の利用履歴についても情報を入手する必要がある。

【調査ステップ③「汚染源推定調査（汚染井戸周辺地下水調査）」】

汚染井戸周辺地下水調査における「調査対象範囲」は「技術的助言」によると、土対法の他の第一種特定有害物質に準じ、概ね1,000mとすることが適当であり、高濃度の汚染が存在する場合などはさらに広範囲に地下水汚染が拡散する可能性があることも否定できないため、汚染状況等を勘案して適宜検討することが望ましいとされている。また、土対法に示される到達距離計算ツールの計算方法を用いて、DXAの物理化学的性質に係るパラメーターを設定し、算定される地下水汚染の到達し得る範囲を用いることも可能である。

6. まとめ

今回、土壌汚染と地下水汚染を一体として捉え、地下水環境の保全を目的とした指針（案）のうち、DXAによる事業所内・外地下水汚染発見契機型における対応内容について示した。今後は、他の契機も含め将来的には土壌環境センターの技術標準とすることも視野にいれ、取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 鈴木弘明・中島誠・菊池毅・日笠山徹巳・門間聖子・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討分科会(2019):大規模地下水汚染の事例と特性,地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第25回講演集, pp.331~336.
- 2) 鈴木弘明・塩谷剛・清水裕也・中島誠・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会(2021):幾つかの自治体の条例等に見る土壌・地下水汚染の対応とその歴史,地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第26回講演集, pp.193~198.
- 3) 中島誠・佐藤徹朗・鈴木弘明・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会(2021):土壌・地下水汚染を総合的に捉えた幾つかの対応事例,地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第26回講演集, pp.281~286.
- 4) 鈴木弘明・中島誠・鈴木洋子・青木鉦二・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会(2022):地下水汚染が発見された場合の土壌汚染対策法および水質汚濁防止法による土壌・地下水汚染への対応における現状と課題,第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.36~41
- 5) 清水祐也・鴨志田元喜・菅沼優巳・藤安良昌・今安英一郎・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会(2022):地方自治体の条例における土壌・地下水汚染への対応に関する特徴,第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.137~140.
- 6) 塩谷剛・佐藤徹朗・三原洋一・駒崎光俊・瀬野光太・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する検討部会(2022):土壌と地下水を一体として捉えた土壌・地下水汚染に対する調査・対策のあり方の検討,第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.222~227.
- 7) 佐藤徹朗・鈴木弘明・中島誠・藤安良昌・青木鉦二・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する指針検討部会(2023):土壌・地下水汚染への総合的な対応に関する指針のコンセプト,第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.215~220.
- 8) 佐藤徹朗・嶋本直人・清水祐也・藤安良昌・三原洋一・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する指針検討部会(2024):事業所内土壌・地下水汚染発見契機への対応,第29回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 投稿中
- 9) 鈴木弘明・北島義裕・西川直仁・大石力・今安英一郎・土壌・地下水汚染の総合的な対応に関する指針検討部会(2024):事業所外地下水汚染発見契機への対応,第29回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 投稿中
- 10) 中島誠・日高レイ(2018):地盤環境中における1,4-ジオキサンの挙動特性に関する実験的考察,地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.283~295.
- 11) 中島誠(2023):地盤環境中における1,4-ジオキサン挙動特性に関する実験的考察,地盤工学会誌, Vol.71, No.9, pp.41~46.
- 12) 中村謙吾・伊藤玄樹・川辺能成・駒井武(2018):地圏環境における1,4-ジオキサンの土壌-間隙水への分配に関する実験的検討,土木学会論文集G(環境), Vol.74, No.2, pp.59~66.
- 13) 佐藤徹朗・稲田ゆかり・佐藤秀之・佐藤幸考・設楽和彦・技術標準化部会(2014):既設井戸等からの地下水採取について,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, pp.493~498.
- 14) 環境省水・大気環境局(2022):土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン(改訂第3.1版)