

2.1 ダム建設における自然由来重金属等の扱い

研究年度：令和4年度

研究分野：地質・基礎に関する調査研究

調査研究名：ダム建設における自然由来重金属等の扱い

研究者名：脇坂安彦

【要約】

環境基本法では土壤汚染によって人の健康又は生活環境に係る被害が生ずることは公害の一つとされている。このため、土壤汚染に関しては2002年に土壤汚染対策法が制定され、人の健康に有害な物質、同法では特定有害物質として26種の元素およびその化合物ならびに有機化合物が指定されている。これらの特定有害物質のうち、六価クロム化合物、水銀およびその化合物、セレンおよびその化合物、鉛およびその化合物、砒素およびその化合物、ふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物は自然界に存在するもので、自然由来重金属等と呼ばれている。土壤汚染対策法では岩石に含有されている自然由来重金属等は、対象外とされている。しかしながら、近年、ダム建設において転流工の掘削ズリ、付替道路トンネルの掘削ズリ、原石山ののり面などの発生源からの自然由来重金属等の溶出が問題とされ、対策がとられる事例がみられるようになってきた。対策がとられた事例をみると、掘削ズリそのものからの溶出が基準値を超えていること、すなわち自然由来重金属等の発生源の評価のみから対策が講じられている。本来、対策を講じるのは、自然由来重金属等の溶出の発生源から人の飲用に供せられる間のサイト概念モデルを構築してリスク評価を行い、人の飲用に供せられる時点において基準値を超えている場合とするべきである。

【キーワード】

ダム建設、自然由来重金属等、特定有害物質、土壤汚染対策法

【背景・目的】

我が国では江戸時代から佐渡（新潟県）、別子（愛媛県）、生野（兵庫県）、土呂久（宮崎県）などの金属鉱山における鉱害の記録が残されている¹⁾。明治時代に入って明治23年（1890年）に発生した足尾銅山鉱毒事件は、鉱害として大きな社会問題となった。鉱害とは鉱山が採掘、選鉱、製錬などの過程で第三者に与える害で、鉱山に起因した公害である²⁾。鉱業法第109条では鉱害の賠償義務に関して「鉱物の掘採のための土地の掘さく、坑水若しくは廃水の放流、捨石若しくは鉱さいのたい積又は鉱煙の排出によって他人に損害を与えたときは」とされており、これらが鉱害に当たるものである。

公害対策に関しては、日本の4大公害病である水俣病、第二水俣病（新潟水俣病）、四日市ぜんそく、イタイイタイ病の発生を受けて公害対策に関する日本の基本法として公害対策基本法（1967年8月3日公布、同日施行）が制定された。公害対策基本法では公害は、「事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわたる大気汚染、水質汚濁、土壤汚染、騒音、振動、地盤沈下及び悪臭によって、人の健康又は生活環境に係る被害」と定義されている。公害対策基本法は1993年11月19日、環境基本法施行に伴い統合され廃止された。環境基本法第2条第3項では公害は、「この法律において『公害』とは、環境の保全上の支障のうち、事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわた

る大気汚染、水質汚濁（水質以外の水の状態又は水底の底質が悪化することを含む。第二十一条第一項第一号において同じ。）、土壤汚染、騒音、振動、地盤沈下（鉱物の掘採のための土地の掘削によるものを除く。以下同じ。）及び悪臭によって、人の健康又は生活環境（人の生活に密接な関係のある財産並びに人の生活に密接な関係のある動植物及びその生育環境を含む。以下同じ。）に係る被害が生ずることをいう」とされている。公害対策基本法および環境基本法のいずれにおいても、土壤汚染が公害の一つとされている。

土壤中には必ず水が含まれるため、土壤汚染と地下水汚染は切り離せない関係にある。我が国では1980年代初頭から、各地でトリクロロエチレンなどの有機塩素系溶剤による地下水汚染が発見されている³⁾。トリクロロエチレンは洗浄剤として工場で使用されているもので、汚染源は工場であった。このような人為的な土壤汚染、地下水汚染の発生を受けて、土壤汚染に関して平成14年（2002年）に土壤汚染対策法が制定された。土壤汚染対策法第2条および同法施行令第1条では有害な物質が特定有害物質として指定されている。

他方、鉱毒とは鉱山あるいは製錬所によって引き起こされる水質汚濁や土壤汚染などでの原因物質の総称で、カドミウム、亜鉛、銅、砒素、硫酸イオンなどが含まれている³⁾。これらの鉱毒となる物質は鉱石、すなわち自然に存在する岩石中に存在するも

のである。これらのうち、カドミウム、砒素は特定有害物質であり、自然由来の重金属等である。なお、鉱害については、鉱業法、鉱山保安法および金属鉱業等鉱害対策特別措置法の対象となっている。

近年、ダム建設（付替道路なども含めて）においても特定有害物質である自然由来重金属等が問題となり、検討された事例がみられるようになってきた（たとえば、天ヶ瀬ダム⁴⁾、夕張シューパロダム⁵⁾、新丸山ダム⁶⁾、山鳥坂ダム⁷⁾）。

このようなことから、本稿ではダム建設における自然由来重金属等の取扱の考え方について述べることにする。

【令和3年度の研究内容】

(1) 土壤汚染対策法とその調査対象の概要

既述のように土壤汚染対策法は平成14年に制定された。法律の目的は第1条で「この法律は、土壤の特定有害物質による汚染の状況の把握に関する措置及びその汚染による人の健康に係る被害の防止に関する措置を定めること等により、土壤汚染対策の実施を図り、もって国民の健康を保護することを目的とする」とされている。

土壤汚染対策法の章および節の構成は次のとおりである。

- 第1章 総則
- 第2章 土壤汚染状況調査
- 第3章 区域の指定等
 - 第1節 要措置区域
 - 第2節 形質変更時要届出区域
- 第3節 雑則
- 第4章 汚染土壤の搬出等に関する規制
 - 第1節 汚染土壤の搬出時の措置
 - 第2節 汚染土壤処理業
- 第5章 指定調査機関
- 第6章 指定支援法人
- 第7章 雑則
- 第8章 罰則

土壤汚染対策法で調査の対象となるのは、第2章の「土壤汚染状況調査」によって規定されている。すなわち、使用が廃止された有害物質使用特定施設に係る工場又は事業場の敷地であった土地(第3条)、土壤汚染のおそれがある土地の形質の変更が行われる場合(第4条)、土壤汚染による健康被害が生ずるおそれがある土地(第5条)である。

(2) 特定有害物質と自然由来重金属等

特定有害物質は第一章「総則」の第2条第1項で「この法律において「特定有害物質」とは、鉛、砒素、トリクロロエチレンその他の物質（放射性物質を除く。）であって、それが土壤に含まれることに起

因して人の健康に係る被害を生ずるおそれがあるものとして政令で定めるものをいう。」とされ、同法施行令第1条で表-1に示す物質が定められている。表のように特定有害物質として26種の元素および

表-1 土壤汚染対策法施行令に規定されている特定有害物質。太文字は自然由来の可能性のある物質。

1	カドミウム及びその化合物
2	六価クロム化合物
3	クロロエチレン（別名塩化ビニル又は塩化ビニルモノマー）
4	二クロロ-四・六-ピス（エチルアミノ）-一・三・五-トリアジン（別名シマジン又はCAT）
5	シアン化合物
6	N・N-ジエチルチオカルバミン酸S-四-クロロベンジル（別名チオベンカルブ又はベンチオカーブ）
7	四塩化炭素
8	一・二-ジクロロエタン
9	一・一-ジクロロエチレン（別名塩化ビニリデン）
10	一・二-ジクロロエチレン
11	一・三-ジクロロプロペン（別名D-D）
12	ジクロロメタン（別名塩化メチレン）
13	水銀及びその化合物
14	セレン及びその化合物
15	テトラクロロエチレン
16	テトラメチルチウラムジスルフィド（別名チウラム又はチラム）
17	一・一・一-トリクロロエタン
18	一・一・二-トリクロロエタン
19	トリクロロエチレン
20	鉛及びその化合物
21	^ヒ 砒素及びその化合物
22	ふっ素及びその化合物
23	ベンゼン
24	ほう素及びその化合物
25	ポリ塩化ビフェニル（別名PCB） 有機りん化合物（ジエチルパラニトロフェニルチオホスフェイト（別名パラチオン）、ジメチルパラニトロフェニルチオホスフェイト（別名メチルパラチオン）、ジメチルエチルメルカプトエチルチオホスフェイト（別名メチルジメトン）及びエチルパラニトロフェニルチオノベンゼンホスホネイト（別名EPN）に限る。）
26	

その化合物ならびに有機化合物が指定されている。特定有害物質のうち、自然界に存在するのは、すなわち自然由来であるのは、カドミウム、六価クロム化合物、水銀およびその化合物、セレンおよびその化合物、鉛およびその化合物、砒素およびその化合物、ふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物である。これらのうち、カドミウム、クロム、水銀および鉛は金属元素であり、密度が 5.0 以上あるので、重金属に属している。このため、カドミウム、六価クロム化合物、水銀およびその化合物、セレンおよびその化合物、鉛およびその化合物、砒素およびその化合物、ふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物を総称して重金属等と呼ばれている。

(3) 土壤汚染対策法における調査対象と要措置区域の指定

土壤汚染対策法で調査の対象となるのは、既述のように、使用が廃止された有害物質使用特定施設に係る工場又は事業場の敷地であった土地(第3条)、土壤汚染のおそれがある土地の形質の変更が行われる場合(第4条)、土壤汚染による健康被害が生ずるおそれがある土地(第5条)である。

第3条第1項は「使用が廃止された有害物質使用特定施設であって、同条第二項第一号に規定する物質(特定有害物質であるものに限る。)に係る工場又は事業場の敷地であった土地の所有者、管理者又は占有者であって、当該有害物質使用特定施設を設置していたもの又は第三項の規定により都道府県知事から通知を受けたものは、環境省令で定めるところにより、当該土地の土壤の特定有害物質による汚染の状況について、環境大臣又は都道府県知事が指定する者に環境省令で定める方法により調査させて、その結果を都道府県知事に報告しなければならない。」(一部省略)となっている。このように第3条では特定有害物質を扱っていた工場または事業場の敷地を対象としており、人為的な特定有害物質による汚染のみを対象としている。

第4条第1項は「土地の形質の変更であって、その対象となる土地の面積が環境省令で定める規模以上のものをしようとする者は、当該土地の形質の変更に着手する日の三十日前までに、環境省令で定めるところにより、当該土地の形質の変更の場所及び着手予定日その他環境省令で定める事項を都道府県知事に届け出なければならない。」(一部省略)となっており、第2項は「前項に規定する者は、環境省令で定めるところにより、当該土地の所有者等の全員の同意を得て、当該土地の土壤の特定有害物質による汚染の状況について、指定調査機関に前条第一項の環境省令で定める方法により調査させて、前項

の規定による土地の形質の変更の届出に併せて、その結果を都道府県知事に提出することができる。」、第3項は「都道府県知事は、第1項の規定による土地の形質の変更の届出を受けた場合において、当該土地が特定有害物質によって汚染されているおそれがあるものとして環境省令で定める基準に該当すると認めるときは、環境省令で定めるところにより、当該土地の土壤の特定有害物質による汚染の状況について、当該土地の所有者等に対し、指定調査機関に前条第1項の環境省令で定める方法により調査させて、その結果を報告すべきことを命ずることができる。」(一部省略)となっており、自然由来の重金属等が対象となっているか否かについては定かではない。

第5条では「都道府県知事は、第3条第1項本文及び第8項並びに前条第2項及び第3項本文に規定するもののほか、土壤の特定有害物質による汚染により人の健康に係る被害が生ずるおそれがあるものとして政令で定める基準に該当する土地があると認めるときは、政令で定めるところにより、当該土地の土壤の特定有害物質による汚染の状況について、当該土地の所有者等に対し、指定調査機関に第3条第1項の環境省令で定める方法により調査させて、その結果を報告すべきことを命ずることができる。」とあるが、後半の「土壤の特定有害物質による汚染により人の健康に係る被害が生ずるおそれがあるものとして政令で定める基準に該当する土地があると認めるとき」に関しては、自然由来の重金属等が対象となっているか否かについては定かではない。

第6条では「都道府県知事は、土地が次の各号のいずれにも該当すると認める場合には、当該土地の区域を、その土地が特定有害物質によって汚染されており、当該汚染による人の健康に係る被害を防止するため当該汚染の除去、当該汚染の拡散の防止その他の措置(以下「汚染の除去等の措置」という。)を講ずることが必要な区域として指定するものとする。

一 土壤汚染状況調査の結果、当該土地の土壤の特定有害物質による汚染状態が環境省令で定める基準に適合しないこと。

二 土壤の特定有害物質による汚染により、人の健康に係る被害が生じ、又は生ずるおそれがあるものとして政令で定める基準に該当すること。とされ、第一号および第二号の双方に該当する場合に、「汚染の除去等の措置」が必要な区域として指定することとなっている。

第一号の環境省令で定める基準とは、土壤溶出量基準(土壤汚染対策法規則第31条第1項)および土壤含有量基準(土壤汚染対策法規則第31条第2項)である。第二号の政令で定める基準とは、

- ① 土壌溶出量基準に適合せず、地下水の流動の状況等からみて、地下水汚染（地下水から検出された特定有害物質が地下水基準に適合しないものであることをいう。以下同じ。）が生じているとすれば地下水汚染が拡大するおそれがあると認められる区域で、地下水を人の飲用に供するために用い、又は用いることが確実である井戸のストレーナー、揚水機の取水口その他の地下水の取水口、水道法に規定する専用水道のための原水として取り入れるために用い、又は用いることが確実である取水施設の取水口、災害対策基本法の都道府県地域防災計画等に基づき、災害時において地下水を人の飲用に供するために用いるものとされている井戸のストレーナー、揚水機の取水口その他の地下水の取水口、地下水基準に適合しない地下水のゆう出を主たる原因として、水質の汚濁に係る環境上の条件についての環境基本法の基準が確保されない水質の汚濁が生じ、又は生ずることが確実である公共用水域の地点のうちいずれかの地点があること（以上、土壌汚染対策法施行令 5 条第一号のイ、同第 3 条イ、土壌汚染対策法施行規則第 28 条および同第 30 条）、
- ② 土壌含有量基準に適合せず、当該土地が人が立ち入ることができる土地であること（以上、土壌汚染対策法施行令第 5 条第一号のロおよび土壌汚染対策法施行規則第 28 条第 2 項）とされている。

ここで重要なのは、土地が単に特定有害物質によって土壌溶出量基準に適合していない、または土壌含有量基準以上に適合していないだけでは要措置区域にはならないということである。土壌溶出量基準に適合していない場合は、地下水汚染が拡大するおそれがある区域に人の飲用に供するために用いる井戸のストレーナー、揚水機の取水口その他の地下水の取水口、水道法に規定する専用水道のための原水として取り入れるために用いる取水施設の取水口などが存在する場合に要措置区域となる。土壌含有量基準に適合していない場合は、その土地に人が立ち入ることができる場合に要措置区域となる。

(4) 土壌汚染対策法における自然由来の重金属等の扱い

以上のように土壌汚染対策法において、自然由来の重金属等が対象となっているか否かは不明確であるが、環境省の告示では、自然由来の重金属等の扱いは次のように変遷している。

- ① 「土壌汚染対策法の施行について」（平成 15 年 2 月 4 日、環水土 20 号）
「なお、法における「土壌汚染」とは、環境基本

法(平成五年法律第九一号)第 2 条第 3 項に規定する、人の活動に伴って生ずる土壌の汚染に限定されるものであり、自然的原因により有害物質が含まれる土壌については、本法の対象とはならない。」

- ② 環境省水・大気環境局土壌環境課「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 2 版）」（平成 24 年 8 月）

「法第 4 章において汚染土壌（法第 16 条第 1 項の汚染土壌をいう。以下同じ。）の搬出及び運搬並びに処理に関する規制が創設されたこと並びにかかる規制を及ぼす上で、健康被害の防止の観点からは自然由来の有害物質が含まれる汚染された土壌をそれ以外の汚染された土壌と区別する理由がないことから、同章の規制を適用するため、自然由来の有害物質が含まれる汚染された土壌を法の対象とすることとしている。」

- ③ 環境省水・大気環境局土壌環境課「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 2 版）」（平成 24 年 8 月）

「法において測定対象とする土壌は、破碎することなく、自然状態において 2mm 目のふるいを通過させて得た土壌とされている。

法は土壌を対象としており、岩盤は対象外としている。法の対象外とされる岩盤について、(中略)「マグマ等が直接固結した火成岩、堆積物が固結した堆積岩及びこれらの岩石が応力や熱により再固結した変成岩で構成された地盤」とした。ここで、「固結した状態」とは、指圧程度で土粒子に分離できない状態をいう。」

- ④ 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室「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)」(令和 4 年 8 月)⁸⁾

「法第 4 章において、汚染土壌（法第 16 条第 1 項の汚染土壌をいう。以下同じ。）の搬出及び運搬並びに処理に関する規制が設けられていること並びにかかる規制を及ぼす上で、健康被害の防止の観点からは自然由来の有害物質が含まれる汚染土壌をそれ以外の汚染土壌と区別する理由がないことから、同章の規制を適用するため、自然由来の有害物質が含まれる汚染土壌を法の対象とすることについては、従前のとおりである（通知の記の第 1）。」

- ⑤ 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室「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)」(令和 4 年 8 月)⁸⁾

「法において測定対象とする土壌は、中小礫、木片等を除き、土塊、団粒を粗砕した後、非金属製の 2 mm の目のふるいを通過させて得た土壌とされており、「粗砕」は土粒子をすりつぶす等の過度な粉砕を行わないこととしている（調査 19 号告示付表 2）。ここで、試料採取において岩盤を破碎して測定対象

とすることは求めていることに留意されたい（通知の記の第3の1(6)④イ）。

中略

法は土壌を対象としており、岩盤は対象外としている。法の対象外とされる岩盤について、Appendix『20. 土壌汚染対策法の適用外となる岩盤』に示すとおり、『マグマ等が直接固結した火成岩、堆積物が固結した堆積岩及びこれらの岩石が応力や熱により再固結した変成岩で構成された地盤』とした。ここで、『固結した状態』とは、指圧程度で土粒子に分離できない状態をいう。

以上の自然由来重金属等の扱いの変遷をまとめると次のようになる。平成15年時点では自然由来の重金属等は法の対象外であった。平成24年時点では自然由来であっても汚染された土壌は法の対象となった（土壌汚染対策法施行規則第10条の2（第3条第6項第一号に掲げる場合の土地における土壌汚染状況調査）において、自然由来は対象となっている）。ただし、岩盤は対象外とされた。自然由来の汚染土壌が法の対象であること、岩盤は法の対象外であることは、令和4年時点においても同様である。

(5) 地方自治体の条例などにおける自然由来の重金属等の扱い

環境省が作成している「地方公共団体における土壌汚染対策に関連する条例、要綱、指導指針等の制定状況」⁹⁾をもとに地方自治体の土壌汚染対策に関する条例等を閲覧し、各地方自治体における自然由来重金属等の扱いについてとりまとめた。表-2にとりまとめた結果を示す。土壌汚染関係の条例などがない地方自治体は、青森県、宮城県、富山県、長野県、鳥取県、島根県、高知県、佐賀県、長崎県、大分県および鹿児島県の11地方自治体である。これら以外の地方自治体には条例等が存在するが、秋田県、山梨県、山口県および熊本県の4地方自治体では、「地方公共団体における土壌汚染対策に関連する条例、要綱、指導指針等の制定状況」⁹⁾においては条例などが存在することとなっているが、インターネット上においては閲覧ができなかった。

条例などが閲覧できた自治体において、自然由来重金属等について規定されているのは、東京都、岐阜県および大阪府のみである。これら3自治体のうち、東京都および大阪府では自然由来重金属等は条例の対象外となっている。他方、岐阜県の「建設発生土自然由来重金属等汚染対策の手引き」では、岐阜県農政部、林政部、県土整備部および都市建築部が発注する工事等において自然由来重金属等に汚染された土壌等は、手引きが適用されることとなっている。

以上のように明確に条例などによって自然由来重

金属等が対策などの対象となっているのは、岐阜県のみである。ただし、岐阜県においても対象となるのは県の関連部局が発注する工事等のみとなっている。

条例などにおいて対象となるのが、人為汚染であることを明確に規定しているのは（表-2の「自然由来の扱い」が「なし」）、北海道、山形県、茨城県、群馬県、千葉県、新潟県、静岡県、滋賀県、京都府和歌山県、岡山県および広島県の12地方自治体である。

残る17地方自治体、岩手県、福島県、栃木県、埼玉県、神奈川県、石川県、福井県、愛知県、三重県、兵庫県、奈良県、徳島県、香川県、愛媛県、福岡県、宮崎県および沖縄県においては、条例などの対象として自然由来重金属等が含まれているのか否かが不明である。

(6) 岩盤に含まれる自然由来重金属等の扱いの基本的な考え方

既述のように土壌汚染対策法では岩盤に含まれる自然由来重金属等は、法の対象外である。また、地方自治体の条例等においても明確に自然由来重金属等を対策の対象としているのは、岐阜県のみである。しかしながら、環境基本法第1条「この法律は、環境の保全について、基本理念を定め、並びに国、地方公共団体、事業者及び国民の責務を明らかにするとともに、環境の保全に関する施策の基本となる事項を定めることにより、環境の保全に関する施策を総合的かつ計画的に推進し、もって現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与するとともに人類の福祉に貢献することを目的とする。」の目的に照らすと、岩盤からの自然由来重金属等の溶出が国民の健康に害を及ぼすことがあってはならない。岩盤に含まれる自然由来重金属等であっても人の健康に害を及ぼす懸念がある場合には、適切な調査・試験・解析を行って、それらの結果に基づき必要に応じて対策を講ずる必要がある。ただし、人為的に汚染された土壌からの重金属等の溶出と、岩盤からの自然由来重金属等の溶出には次に述べるように抜本的な相違がある。この相違を十分に理解したうえで、岩盤からの自然由来重金属等の調査・試験・解析を行うことが肝要である。

(7) 人為汚染土壌に含まれている重金属等と自然の岩石に含まれている重金属等の違い

人為的に汚染された土壌中の重金属等の存在形態は吸着である。

土壌における吸着とは、溶液中の物質が土壌粒子表面に集まる現象である。吸着には非イオン性物質と土壌粒子との間で生じる物理的吸着と陽荷電と陰

表-2(1) 地方自治体の条例などにおける自然由来重金属等の扱い

地方自治体	条例の有無	自然由来の扱い	自然由来・人為由来に係る条例等の該当部分
北海道	北海道公害防止条例	なし	(土壌の汚染を生じさせないための特定有害物質等の適正管理義務) 第36条 特定有害物質又は特定有害物質を含む固体若しくは液体を取り扱う者は 、土壌の特定有害物質による汚染を生じさせないよう特定有害物質等を適正に管理しなければならない。
青森	なし	-	
岩手	県民の健康で快適な生活を確保するための環境の保全に関する条例	不明	(健康有害物質の地下浸透の禁止) 第66条 何人も 、健康有害物質又はこれを含む液体を地下に浸透させてはならない
宮城	なし	-	
秋田	あり	閲覧できず	
山形	山形県生活環境の保全等に関する条例	なし	(地下浸透の禁止) 第24条 水質の汚濁に係る特定施設 (水質汚濁防止法第2条第2項に規定する特定施設を含む。以下この章及び第35条において同じ。) を設置する者は 、規則で定める場合を除き、当該特定施設から排出される汚水又は廃液 (これを処理したものを含む。) を地下に浸透させてはならない。
福島	福島県産業廃棄物等の処理の適正化に関する条例	不明	(汚染土壌の処分方法) 第四十五条 搬出された汚染土壌を県内において処分しようとする者は 、規則で定める方法により、当該汚染土壌を処分しなければならない。
茨城	茨城県生活環境の保全等に関する条例	なし	第1節 土壌及び地下水の汚染防止に関する規制 (定義) 第58条 この節において「 有害物質使用施設 」とは、規則で定める有害物質 (以下この節において「有害物質」という。) を製造し、使用し、又は処理する施設で規則で定めるものをいう。 2 この節において「 有害物質使用工場 」とは、有害物質使用施設を設置する工場等をいう。 3 この節において「 有害物質使用事業者 」とは、有害物質使用工場を設置する者をいう。 4 この節において「 有害物質使用排水特定施設 」とは、有害物質使用施設のうち、水質汚濁防止法第2条第8項に規定する有害物質使用特定施設及び同法第5条第3項に規定する有害物質貯蔵指定施設以外のものをいう。
栃木	栃木県生活環境の保全等に関する条例	不明	(特定有害物質管理基準の設定) 第19条 知事は、 特定有害物質を製造し、使用し、又は処理する施設 であって規則で定めるものの構造及び特定有害物質の管理の方法に関する基準を規則で定める (地下浸透の制限) 第21条 何人も 、「 地下浸透禁止物質 」を含む汚水を地下に浸透させてはならない。
群馬	群馬県の生活環境を保全する条例	なし	(特定有害物質による土壌の汚染のおそれがある場合の調査) 第四十五条 水質有害物質使用特定施設、有害物質使用特定施設又は有害物質貯蔵指定施設の設置者は 、第四十二条第四項若しくは水質汚濁防止法第十四条第五項の規定による点検により特定有害物質による土壌の汚染のおそれがあるものとして規則で定める基準に該当する異常を発見したとき、又は水質有害物質使用特定施設等の破損その他の事故により特定有害物質を含む水が土壌に浸透しているときは、速やかにその旨を知事に通報するとともに、規則で定めるところにより、当該特定有害物質による汚染のおそれがある土壌の特定有害物質による汚染の状況について、土壌汚染対策法第三条第一項の環境大臣又は知事が指定する者に、同項の環境省令で定める方法により調査させて、その結果を知事に報告しなければならない。
埼玉	埼玉県生活環境保全条例	不明	(土壌及び地下水汚染対策指針の作成) 第七十六条 知事は、人の健康を損なう「特定有害物質」に汚染された土壌 からの特定有害物質の大気中への飛散又は当該土壌に起因する地下水の汚染が人の健康に係る被害を生ずることを防止するため、土壌及び地下水の汚染の調査及び対策に関する指針を定める。 (汚染状況の調査等) 特定有害物質を取り扱い、又は取り扱っていた事業所を設置している者は 、現に取り扱っている特定有害物質の適正な管理に努めるとともに、土壌及び地下水汚染対策指針に基づき、その特定有害物質取扱事業所における特定有害物質による土壌又は地下水の汚染の状況を調査するよう努めなければならない。
千葉	千葉県環境保全条例	なし	(土壌汚染の防止) 第五十一条 工場又は事業場において特定物質 (特定物質を含む物質を含む。) を製造し、使用し、又は保管している事業者は 、当該特定物質による土壌の汚染を防止するため、定期的に土壌の汚染状態を調査する等当該特定物質を適正に管理するために必要な措置を講じなければならない。

表-2(2) 地方自治体の条例などにおける自然由来重金属等の扱い

地方自治体	条例の有無	自然由来の扱い	自然由来・人為由来に係る条例等の該当部分
東京	都民の健康と安全を確保する環境に関する条例	あり	(適用除外) 第二百二十二条 第一百三条から前条までの規定は、次に掲げる土壌については適用しない。 一 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律(昭和四十五年法律第百三十九号)第二条第一項に規定する農用地の土壌 二 汚染の原因が専ら自然的条件であることが明らかであると認められる場所(汚染の原因が、専ら自然的条件によるものと同程度に汚染された土砂に由来すると認められる埋立地を含む。)の土壌
神奈川	神奈川県生活環境の保全等に関する条例	不明	(土地の区画形質の変更に伴う公害の防止) 第58条 土地の区画形質の変更を行おうとする者は、当該土地の土壌の汚染状態及び当該土地に埋め立てられた物の状態に配慮し、汚染された土壌又は埋め立てられた物に起因する公害が発生しない方法により行うように努めなければならない。 (汚染土壌による埋立て等の禁止等) 第58条の3 何人も、汚染土壌を使用して埋立て、盛土その他の土地への土砂の堆積(以下この条において「埋立て等」という。)を行ってはならない。ただし、次に掲げる埋立て等にあつては、この限りでない。
新潟	新潟県生活環境の保全等に関する条例	なし	(用語) 第72条 この節において「有害物質使用等事業者」とは、工場等において有害物質を製造し、使用し、若しくは処理し、又はその保管をする事業者をいう。 この節において「特定地下浸透水」とは、有害物質をその施設において製造し、使用し、又は処理する特定施設を設置する特定工場等から地下に浸透する水で有害物質使用特定施設に係る汚水等を含むものをいう。 (有害物質等の地下浸透の防止) 第73条 有害物質使用等事業者は、当該工場等において、有害物質を含む水を地下に浸透させてはならない。 2 有害物質使用等事業者は、有害物質による土壌及び地下水の汚染を防止するため、当該工場等において、有害物質及び有害物質を含む水を適正に管理しなければならない。
富山	なし	-	
石川	ふるさと石川の環境を守り育てる条例	不明	(土砂埋立て等の規制) 第百十四条 何人も、土壌汚染対策法第二十二條第一項に規定する汚染土壌処理施設において処分する場合を除いては、規則で定める有害物質による汚染の状態が「土壌基準に適合しない土砂等を使用して、土地の埋立て、盛土その他の土地への堆積を行ってはならない。
福井	福井県公害防止条例	不明	(環境上の基準) 第五条 知事は、この条例の目的を達成するため、必要に応じ、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音等に係る環境上の条件について、それぞれ人の健康を保護し、および生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を定めるものとする。
山梨	あり	閲覧できず	
長野	なし	-	
岐阜	建設発生土自然由来重金属等汚染対策の手引き	あり	1-2 適用範囲 本手引きは、岐阜県農政部、林政部、県土整備部及び都市建設部が発注する工事等において自然由来重金属に汚染された土砂等(自然由来重金属である「カドミウム、六価クロム、水銀、セレン、鉛、砒素、フッ素、ホウ素」の含有量もしくは溶出量、もしくはその両方が環境基準に適合していない土砂等。以下、「自然由来重金属等含有土」という。)で、「土壌汚染対策法」の適用を受けないものが発生した場合、あるいは発生するおそれがある場合に適用するものとする。
静岡	静岡県生活環境の保全等に関する条例	なし	(農用地の土壌の汚染の防止等のための勧告) 第99条 知事は、農用地(農用地の土壌の汚染防止等に関する法律(昭和45年法律第139号)第2条第1項に規定する農用地をいう。以下この条において同じ。)の土壌が現に汚染されている地域及び農用地の土壌の汚染のおそれがある地域において第11条第2項に規定するばい煙発生施設、第24条第3項に規定する一般粉じん発生施設又は第33条第2項に規定する特定施設を設置する者に対し、当該地域における農用地の土壌の汚染の状態を改善するために必要な限度において、第4章及び第5章に定める規制措置のほか、必要な措置を勧告することができる。

表-2(3) 地方自治体の条例などにおける自然由来重金属等の扱い

地方自治体	条例の有無	自然由来の扱い	自然由来・人為由来に係る条例等の該当部分
愛知	県民の生活環境の保全等に関する条例	不明	<p>(土壌及び地下水の特定有害物質による汚染の防止義務) 第三十六条 鉛、砒ひ素、トリクロロエチレンその他の物質で、それが土壌若しくは地下水に含まれることに起因して人の健康若しくは生活環境に係る被害を生ずるおそれがあるものとして規則で定める「特定有害物質」又は特定有害物質を含む固体若しくは液体を取り扱う者は、特定有害物質等をみだりに埋め、飛散させ、流出させ、又は地下に浸透させてはならない。</p> <p>(土壌汚染等対策指針の策定等) 第三十八条 知事は、土壌及び地下水の特定有害物質による汚染の状況等の調査並びに土壌及び地下水の特定有害物質による汚染により人の健康又は生活環境に係る被害が生ずることを防止するために講ずべき措置に関する指針(以下「土壌汚染等対策指針」という。)を定めるものとする。</p>
三重	三重県生活環境の保全に関する条例	不明	<p>(土地の形質変更時の調査等) 第七十二条の二 土地の所有者、管理者又は占有者は、当該土地において規則で定める面積以上の土地の切土、盛土、掘削その他の規則で定める行為を行おうとするときは、当該土地における過去の特定有害物質の製造、使用その他の取扱いを行っていた工場等の設置の状況その他の規則で定める事項を調査し、その結果を記録しなければならない。ただし、非常災害時の応急措置として形質変更を行う場合又は知事が別に定める方法により、当該土地の土壌及び地下水の特定有害物質による汚染の状況を調査し、その結果を記録した場合は、この限りでない。</p> <p>(土壌又は地下水の特定有害物質による汚染発見時の届出等) 第七十二条の四 土地の所有者等は、人の健康又は生活環境に係る被害が生じ、又は生じるおそれがあるものとして規則で定める基準を超える土壌又は地下水の特定有害物質による汚染を発見したときは、速やかに当該汚染の拡散を防止するための応急の措置を講ずるとともに、当該汚染の状況及び講じた措置について、規則で定めるところにより、知事に届け出なければならない。ただし、水質汚濁防止法第十四条の二第一項の規定による届出があった場合は、この限りでない。</p>
滋賀	滋賀県公害防止条例	なし	<p>(指定有害物質使用特定施設の使用の廃止時の調査) 第49条 使用が廃止された指定有害物質使用特定施設に係る工場等の敷地であつた土地の所有者、管理者または占有者であつて、当該指定有害物質使用特定施設を設置していたものまたは次項の規定により知事から通知を受けたものは、規則で定めるところにより、当該土地の土壌の指定有害物質による汚染の状況について、土壌汚染対策法第3条第1項の指定を受けた者に規則で定める方法により調査させて、その結果を知事に報告しなければならない。ただし、規則で定めるところにより、当該土地について予定されている利用の方法からみて土壌の指定有害物質による汚染により人の健康に係る被害が生ずるおそれがない旨の知事の確認を受けた場合は、この限りでない。</p> <p>(土地の形質変更時の調査) 第50条 使用が廃止された特定施設であつて、その廃止時において同項第1号に規定する物質であつたものをその施設において製造し、使用し、または処理していたものが設置されていた工場等の敷地であつた土地において、土壌の採取その他の土地の形質の変更をしようとする者は、あらかじめ、規則で定めるところにより、当該指定有害物質使用地の土壌の指定有害物質による汚染の状況について、指定調査機関に規則で定める方法により調査させ、その結果を知事に報告しなければならない。ただし、規則で定めるところにより、当該指定有害物質使用地において予定されている利用の方法からみて土壌の指定有害物質による汚染により人の健康に係る被害が生ずるおそれがない旨の知事の確認を受けた場合は、この限りでない。</p> <p>(土地の形質変更の届出等) 第50条の2 土壌調査において土壌の+E27。</p>
京都	京都府環境を守り育てる条例	なし	<p>(汚水の地下浸透の禁止) 第35条 特定工場等の設置者は、土壌及び地下水の汚染を防止するため、当該特定工場等から規則で定める物質を含む汚水を地下に浸透させてはならない。 2 特定工場等の設置者は、汚水による土壌及び地下水の汚染が生じることがないように、適切な地下浸透防止対策を講じなければならない。</p>

表-2(4) 地方自治体の条例などにおける自然由来重金属等の扱い

地方自治体	条例の有無	自然由来の扱い	自然由来・人為由来に係る条例等の該当部分
大阪	大阪府生活環境の保全等に関する条例	あり	<p>(汚染土壌の処理)第八十一条の十八 汚染土壌を当該管理区域外に搬出する者は、当該汚染土壌の処理を汚染土壌処理業者に委託しなければならない。ただし、次に掲げる場合は、この限りでない。</p> <p>一 汚染土壌を当該管理区域外に搬出する者が汚染土壌処理業者であって当該汚染土壌を自ら処理する場合</p> <p>二 自然由来等要届出管理区域内の自然由来等土壌を、次のいずれにも該当する他の自然由来等要届出管理区域内の土地の形質の変更に自ら使用し、又は他人に使用させるために搬出を行う場合イ 当該自然由来等要届出管理区域と土壌の特定有害物質による汚染の状況が同様であるとして規則に定める基準に該当する自然由来等要届出管理区域</p> <p>ロ 当該自然由来等土壌があった土地の地質と同じであるとして規則に定める基準に該当する自然由来等要届出管理区域</p> <p>三 一の土壌汚染状況調査の結果に基づき指定された複数の管理区域の間において、一の要措置管理区域から搬出された汚染土壌を他の要措置管理区域内の土地の形質の変更に、又は一の要届出管理区域から搬出された汚染土壌を他の要届出管理区域内の土地の形質の変更に自ら使用し、又は他人に使用させるために搬出を行う場合</p> <p>四 非常災害のために必要な応急措置として当該搬出を行う場合</p> <p>五 汚染土壌を試験研究の用に供するために当該搬出を行う場合</p> <p>2 前項第二号の「自然由来等要届出管理区域」とは、要届出管理区域のうち、土壌汚染状況調査の結果、当該土地の土壌の特定有害物質による汚染が専ら自然又は専ら当該土地の造成に係る水面埋立てに用いられた土砂に由来するものとして、規則で定める要件に該当する土地の区域をいい、同号の「自然由来等土壌」とは、当該区域内の汚染土壌をいう。</p> <p>3 第一項本文の規定は、非常災害のために必要な応急措置として汚染土壌を当該管理区域外に搬出した者について準用する。ただし、当該搬出をした者が汚染土壌処理業者であって当該汚染土壌を自ら処理する場合は、この限りでない。</p>
兵庫	環境の保全と創造に関する条例	不明	<p>(土壌の汚染等の防止)第66条 土壌の汚染及び地盤の沈下の防止のための措置については、別に定めるものとする。</p>
奈良	奈良県生活環境保全条例	不明	<p>第四十条 何人も、地下水及び土壌を汚染することのないよう、有害物質を含むものとして規則で定める要件に該当する水を地下に浸透させてはならない。</p> <p>2 知事は、前項の規定に違反する行為をしている者があると認めるときは、その者に対し、期限を定めて、当該行為の停止その他必要な措置を命ずることができる。</p>
和歌山	和歌山県公害防止条例	なし	<p>(土壌及び地下水の汚染の防止等)</p> <p>第19条 工場等の設置者は、土壌及び地下水の汚染を防止するため、当該工場等から規則で定める物質及びその物質を含む水を地下に浸透させてはならない。</p>
鳥取	なし	-	土壌汚染に関する規定なし。
島根	なし	-	
岡山	岡山県環境への負荷の低減に関する条例	なし	<p>(有害物質等による土壌及び地下水の汚染の防止)第六十四条 事業者は、有害物質及び有害物質を含む水に起因する土壌の汚染又は当該汚染に起因する地下水の汚染が人の健康に係る被害を生ずることを防止するため、有害物質等を適正に管理するとともに、当該有害物質等による土壌及び地下水の汚染の防止に努めなければならない。</p> <p>(有害物質等による土壌及び地下水の汚染の発見時の届出等)第六十五条 有害物質を取り扱い、又は取り扱っていた事業所を設置している者は、当該有害物質取扱事業所の敷地内において、規則で定める基準を超える有害物質等による土壌又は地下水の汚染を発見したときは、速やかに、その旨及び当該汚染について講じた応急の措置の内容を知事に届け出なければならない。</p>
広島	広島県生活環境の保全等に関する条例	なし	<p>(土地の改変時における改変者の義務)第四十条 次の各号のいずれかに該当する行為(以下「土地の改変」という。)をしようとする者は、あらかじめ、規則で定めるところにより、土地の改変をしようとする土地に係る過去の汚水等関係特定事業場その他の規則で定める工場又は事業場の設置状況等についての調査を実施し、その結果を知事に報告しなければならない。</p>
山口	あり	閲覧できず	

表-2(5) 地方自治体の条例などにおける自然由来重金属等の扱い

地方自治体	条例の有無	自然由来の扱い	自然由来・人為由来に係る条例等の該当部分
徳島	徳島県生活環境保全条例	不明	(土壌及び地下水の特定有害物質による汚染の防止義務)第四十九条 鉛、砒素、トリクロロエチレンその他の物質で、当該物質が土壌若しくは地下水に含まれることに起因して人の健康に係る被害を生ずるおそれがある「特定有害物質」又は特定有害物質を含む固体若しくは液体(「特定有害物質等」)を取り扱う者は、特定有害物質等をみだりに埋め、飛散させ、流出させ、又は地下に浸透させてはならない。 (特定有害物質等による土壌及び地下水の汚染の発見時の届出等)第五十一条 特定有害物質等を取り扱い、又は取り扱っていた事業所を設置している者は、当該特定有害物質等取扱事業所の敷地内において、規則で定める基準を超える特定有害物質等による土壌又は地下水の汚染を発見したとき(当該汚染がその事業活動に起因するおそれがあるものである場合に限る。)は、速やかに、その旨及び当該汚染について講じた応急の措置の概要を知事に届け出なければならない。
香川	香川県生活環境の保全に関する条例	不明	(土壌又は地下水の特定有害物質による汚染の防止)第44条 何人も、鉛、砒ひ素、トリクロロエチレンその他の物質(放射性物質を除く。)で、当該物質が土壌若しくは地下水に含まれることに起因して人の健康に係る被害を生ずるおそれがあるものとして規則で定めるもの(以下「特定有害物質」という。)又は特定有害物質を含む固体若しくは液体をみだりに埋め、飛散させ、流出させ、又は地下に浸透させてはならない。
愛媛	愛媛県土砂等の埋立て等による土壌の汚染及び災害の発生防止に関する条例	不明	(事業者の責務)第3条 事業者は、その事業活動を行うに当たっては、土砂等の埋立て等による土壌の汚染及び水質の汚濁並びに災害の発生を防止するために必要な措置を講ずるとともに、県及び市町が実施する土砂等の埋立て等による土壌の汚染及び水質の汚濁並びに災害の発生防止に関する施策に協力する責務を有する。 (土砂基準に適合しない土砂等による土砂等の埋立て等の禁止等)第7条 何人も、土砂基準に適合しない土砂等を使用して土砂等の埋立て等をし、又は土砂基準に適合しない土砂等を使用する土砂等の埋立て等の用に供するために土地を提供してはならない。
高知	なし	-	
福岡	福岡県公害防止等生活環境の保全に関する条例	不明	(定義)第二条 この条例において「生活環境への負荷」とは、人の活動により生活環境に加えられる影響であって、生活環境の保全上の支障の原因となるおそれのあるものをいう。 2 この条例において「公害」とは、環境保全上の支障のうち、事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわたる大気汚染、水質の汚濁、土壌の汚染、騒音、振動、地盤の沈下及び悪臭によって、人の健康又は生活環境に係る被害が生ずることをいう。
佐賀	なし	-	
長崎	なし	-	
熊本	あり	閲覧できず	
大分	なし	-	
宮崎	みやざき県民の住みよい環境の保全等に関する条例	不明	(地下浸透の禁止)第54条 何人も、汚水に係る有害物質を含むものとして規則で定める要件に該当する水を地下に浸透させてはならない。
鹿児島	なし	-	
沖縄	沖縄県生活環境保全条例	不明	(土壌の汚染を生じさせないための特定有害物質等の適正管理義務)第36条 特定有害物質であって、又は特定有害物質を含む固体若しくは液体を取り扱う者は、土壌の特定有害物質による汚染を生じさせないよう特定有害物質等を適正に管理しなければならない。

荷電との間のイオン結合、化学結合による化学的吸着がある。化学的吸着は土壌粒子表面で行われるイオン交換反応による吸着と、土壌粒子表面で生じる配位子交換による吸着とがある。(以上、久馬ほか¹⁰⁾)。

人為由来の重金属等は水溶液中ではイオンとなっていると考えられるため、土壌粒子とはイオン交換反応による化学的吸着によって存在していると考えられる。このイオン交換反応による吸着は、スメクタイトのような膨潤性粘土鉱物の層間陽イオンのようなものである。この層間陽イオンは比較的容易に溶液中に溶出する。

他方、自然由来重金属等は岩盤(岩石)を構成している鉱物中に存在している。元素鉱物、硫化鉱物の一部を除いて、ほとんどの鉱物はイオン結合を持ったイオン性結晶として扱うことができる¹¹⁾。ダイヤモンドのような元素鉱物は共有結合によって構成されている。また、大部分の硫化鉱物も共有結合を持っている¹²⁾。ただし、完全なイオン結合による鉱物は存在せず、イオン性結晶であってもある程度の割合で共有結合性も有している。共有結合とイオン結合とでは、共有結合の方が結合力は強いとされている。鉱物中に含有されている特定有害物質たる重金属等は、鉱物結晶を構成する元素としてイオン結合または共有結合をして他の元素と結合されている。したがって、同じ重金属等であってもどの鉱物に含有されているかによって、鉱物内のそのほかの元素との結合の強さは異なる。これは鉱物の種類によってイオン結合と共有結合の割合が異なるからである。

特定有害物質の元素が人為的に土壌中にイオン交換反応によって吸着されている場合と自然状態で岩石を構成する鉱物中に化学結合されている場合とでは、溶出の様態が異なることが容易に推測される。

高橋ほか¹³⁾は北海道に分布する新第三紀中新世の川端層、軽舞層の堆積岩中の砒素の存在形態の分析をしている。その結果、川端層と軽舞層の結晶格子態は砒素全体の73~92%、川端層の吸着態は2.2~5.3%、炭酸塩態は1.6~4.1%、鉄マンガ酸化物態は3.6~6.8%、有機物態は0.2~1.4%、軽舞層の吸着態は3.9~7.3%、炭酸塩態は1.3~2.3%、鉄マンガ酸化物態は6.0~7.4%、有機物態は0.9~1.2%となっている(結晶格子態以外の割合は、高橋ほか¹³⁾の図から算出)。このように中新世の堆積岩類に含まれている砒素はイオン結合~共有結合の結晶格子態のみでなく、様々な形態として存在している。このような様々な存在形態は、完全に固結していない堆積岩特有のものと考えられる。たとえば、花崗岩のような深成岩の新鮮部での存在形態は、結晶格子態のみであると考えられる。

岩盤(岩石)を構成する鉱物は、地表面付近では

風化作用を被って様々な程度に風化している。鉱物の化学組成は風化作用によって変化するとともに、鉱物の結晶構造も変化する。このようなことから、例えば長石は風化作用を受けて、スメクタイトやカオリナイトに変化するなど、鉱物の種類も変化する。風化作用によって岩石を構成する鉱物から、元素の溶脱(溶出)が生じる。一國¹⁴⁾は風化作用による岩石からの元素の移動度は、Ca、Na>K>Si、Mg>Alの順に減少するとしている。特定有害物質の元素も風化作用によって鉱物から溶出するものと考えられるが、実態は不詳である。このように自然条件下において、風化作用によって、特定有害物質は鉱物から溶出していると考えられる。したがって、風化作用を被った時間によって、鉱物中の特定有害物質の含有量は低くなるものと考えられる。土壌は鉱物の集合体たる岩石の風化物である。

他方、風化の程度によっては、重金属等の溶出程度は新鮮岩よりも高くなっていることも考えられる。

既述の高橋ほか¹³⁾は砒素の溶出量と溶出液のpH、風化との関係を次のように述べている。砒素溶出量はpHが8.5以上になると急激に大きくなる。これは鉄酸化物・水酸化物に吸着している砒素が、Phの上昇に伴って溶出するためと考えられる。スメクタイトを多く含む川端層の未風化岩では、スメクタイト層間のNa⁺が溶出液中のH⁺と陽イオン交換反応を起こし、溶出液のpHを上昇させ、砒素の溶出量が大きくなった。風化岩ではスメクタイトの層間イオンがCa²⁺、H⁺となっているため、Na⁺の場合と比較して陽イオン交換性が低く、溶液のpHが上昇しにくい。このため風化岩では砒素溶出量は小さい。

(8) 自然由来重金属等の地質学・鉱物学

1) カドミウム(Cd)

原子番号48、原子量121.411。周期表(長周期型)の12族に属し、亜鉛族元素の一つ。親銅元素。密度8.65g/cm³。地殻中の存在量0.16ppm。1817年にF. Stromeyerによってリョウ亜鉛鉱(calamine)中から発見された。元素名はリョウ亜鉛鉱の古名cadmiaに由来。硫化カドミウム鉱も知られているが、大部分は亜鉛などの鉱石中に硫化物として産出する。人体に有毒で、腎臓を冒し、亜鉛酵素の働きを阻害する。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数0.2ppm¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾はカドミウムを含む主要鉱物としてGreenockite(CdS、硫カドミウム鉱)を示している。硫カドミウム鉱は閃亜鉛鉱と一緒に産する¹⁸⁾。

亜鉛鉱床には熱水鉱床(火山性塊状硫化物鉱床、鉱脈鉱床、塊状鉱床)と堆積層内鉱床(ミシシッピ

バレー型鉛床、砕屑岩中の層状鉛床、含銅頁岩型鉛床)とがある。亜鉛鉛床の主要鉛物鉛物は閃亜鉛鉛、ウルツ鉛で、脈石鉛物は石英、方解石、シデライト、菱マンガン鉛、重晶石、螢石などである(以上、地学事典¹⁹⁾)。螢石は後述の特定有害物質ふっ素の主要鉛物である。

成人体内の平均濃度 0.7ppm。カドミウムは酵素分子の亜鉛と置換して酵素を失活させ、大量摂取では肺機能や腎機能を損ない、骨が軟化して激しく痛む。イタイイタイ病は亜鉛精錬によって生成されたカドミウムに汚染された米が原因であった。(以上、元素大百科事典¹⁴⁾による)。

2) 六価クロム (Cr^{VI})

クロムは原子番号 24、原子量 51.9961。周期表(長周期型)の 6 族に属し、遷移元素の一つ。密度 7.14g/cm³。地殻中の存在量 122ppm。主要鉛物はクロム鉄鉛(FeCr₂O₄)で、他に PbCrO₄ や Cr₂O₃ の鉛物もある。Cr^{VI}は有毒。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 100ppm¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾はクロムを含む主要鉛物として chromite (FeCr₂O₄, クロム鉄鉛)を示している。そのほかのクロム含有鉛物として crocoite (PbCrO₄, 紅鉛鉛)、chrome ochre (Cr₂O₃, クロムオーカー)をあげている。これらのほか、宝石のエメラルドとルビーの色はごく少量のクロムに由来しているとしている。

クロム鉛床は超苦鉄質～苦鉄質岩中に胚胎する。大陸地塊に分布する層状貫入岩体中に産する層状クロマイト鉛床、オフィオライト層序の超苦鉄質岩中に胚胎するポデイフォーム型クロマイト鉛床がある。クロム鉄鉛が主要鉛物である。クロム鉄鉛に富んだクロム鉄鉛岩はかんらん岩、蛇紋岩中に産出する。日本では三波川帯や神居古潭帯の蛇紋岩に伴う(以上、地学事典¹⁹⁾)。

クロム化合物のうち価数が 6 価のものが六価クロム化合物である。代表的なものにクロム酸塩、二クロム酸塩などがある。毒性が強く、接触すると皮膚炎を起こし、高濃度のものを長時間吸入すると鼻中隔せん孔を起こす。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。

成人体内の平均濃度 0.03ppm。6 価のクロム酸イオン CrO₄²⁻や二クロム酸イオン Cr₂O₇²⁻は毒性と発がん性を持つ。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

3) 水銀 (Hg)

原子番号 80、原子量 200.59。周期表(長周期型)の 12 族に属し、亜鉛族元素の一つ。密度 14.193g/cm³。地殻中の存在量 0.08ppm。天然にはシン沙 (HgS)として産出。25℃で唯一の液体の金属。毒性が強く、水銀蒸気を長時間、吸引すると神経が

冒される。メチル水銀(HgCH₃⁺)などの有機水銀は更に毒性が強い。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 0.08ppm¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾は水銀を含む主要鉛物として Cinnabar (HgS, 辰砂)を示している。

主な水銀鉛物は辰砂で、ほかに自然水銀シュワツァイト、黒辰砂、リブングストン鉛などがある。付随する鉛物として黄鉄鉛、白鉄鉛、輝安鉛、鶏冠石、雄黄、硫砒鉄鉛などがある。脈石鉛物はおもに石英、方解石、玉髓で、オパール、重晶石、石膏、螢石、沸石、瀝青質物、粘土鉛物などである。(以上、地学事典¹⁹⁾)。以上のうち、鶏冠石、雄黄、硫砒鉄鉛は、後述の特定有害物質ふっ素の主要鉛物、螢石は後述の特定有害物質ふっ素の主要鉛物である。

液体の水銀は腸で吸収されないため、飲んでもあまり危険はない。しかし、環境中で気化しやすく、吸入すると中枢神経系にたまって毒性を現し、顔面筋肉やまぶた、手足の動きを損なう。無機塩は単陽性が高いほど毒性も強い。有機水銀は脂質によく溶け、経口摂取量の 90~100%が吸収されるので危ない。水俣病の原因物質はメチル水銀であった。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

4) セレン (Se)

原子番号 34、原子量 78.96。周期表(長周期型)の 16 族に属し、酸素族元素の一つ。密度 4.189g/cm³ (25℃)。地殻中の存在量 0.05ppm。天然には硫黄とともに単体で産出することもあるが、多くは親銅元素の硫化物中にセレン化合物として含まれる。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 0.08ppm¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾によるとセレンは親銅元素(たとえば、Cu, Ag, Au; Zn, Cd, Hg; Fe, Co, Ni; Pb, As, Bi)の硫化物に伴って産出するほか、時々、酸化物 MSeO₃、selenolite (SeO₂)として産出する。

セレン単体の鉛床はまれである。セレン鉛物にはセレン硫黄、セレン鉛鉛、硫セレン銀鉛、ナウマン鉛、セレン銅銀鉛、セレン銅鉛、クルークス鉛などがある。資源的にはセレン鉛物よりも硫化物の硫黄を同型置換するセレンが重要。比較的セレンに富むグリーンタフ地域の浅熱性金銀鉛脈がある(以上、地学事典¹⁹⁾)。

成人体内の平均濃度 0.05ppm。セレンは生命の必須元素でも、高濃度では毒性を示す。長くセレン化合物を摂取すると、爪や髪がもろくなったり、肝臓や腎臓の機能障害が起こる。他方、セレンの欠乏は心臓病を起こす。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

5) 鉛 (Pb)

原子番号 82、原子量 207.2。周期表(長周期型)

の 14 族に属し、炭素族元素の一つ。密度 11.342g/cm^3 (20°C)。地殻中の存在量 13ppm 。主要な鉱物は方鉛鉱 (PbS) で、他に硫酸塩、炭酸塩リン酸塩などの鉱物が知られている。鉛の化合物は有毒である。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 13ppm ¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾は鉛を含む主要鉱物として galena (PbS , 方鉛鉱)、anglesite (PbSO_4 , 硫酸塩鉱)、cerussite (PbCO_3 , 白鉛鉱)、Pyromorphite ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, 緑鉛鉱)、および mimetesite ($\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$) を示している。

鉛と亜鉛は伴って算出することが普通で、鉛・亜鉛鉱床として一括されることが多い。主要な鉱石鉱物は方鉛鉱で、酸化帯では白鉛鉱、硫酸塩鉱も重要である。脈石鉱物は石英、方解石の他にシデライト、菱マンガン鉱、重晶石、螢石など(以上、地学事典¹⁹⁾)。以上のうち、螢石は後述の特定有害物質ふっ素の主要鉱物である。

成人体内の平均濃度 1.7ppm 。硫黄と結合しやすい性質が鉛の毒性を生む。体内に入った鉛は酵素分子のチオール基と強く結合して機能を損なう。鉛は血中のヘモグロビン濃度を下げ、貧血を起こす。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

6) 砒素 (As)

原子番号 33、原子量 74.92159。周期表(長周期型)の 15 族に属し、窒素族元素の一つ。密度 5.778g/cm^3 。地殻中の存在量 1.8ppm 。主要鉱石は鶏冠石(As_4S_4)、石黄(As_2S_3)、アルセノライト(As_2O_3)。毒物なので取扱には特に注意が必要。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 1.8ppm ¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾は砒素を含む主要鉱物として realgar (As_4S_4 , 鶏冠石)、orpiment (As_2S_3 , 雄黄)、arsenolite (As_2O_3 , 方砒素華)をあげている。これらの他に鉄、コバルトおよびニッケルなどの砒素化合物として loellingite (FeAs_2 , 砒鉄鉱)、Saffrolite (CoAs)、niccolite (NiAs)、rammelsbergite (NiAs_2 , ランメルスベルク石)、arsenopyrite (FeAsS , 硫砒鉄鉱)、cobaltite (CoAsS , 輝コバルト鉱)、enargite (Cu_3AsS_4 , 硫砒銅鉱)、gersdorffite (NiAsS) および第四紀の硫化物 glaucodot ($(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$, グローコードト)を示している。

砒素鉱床の主要な鉱石鉱物は、硫砒鉄鉱、鶏冠石、雄黄で、まれに自然砒素、砒鉄鉱、方砒素華、スコロド石などがある。日本では金銀鉱脈、黒鉱、硫黄鉱床に砒素を多く伴うが、これらの砒素は回収されていない(以上、地学事典¹⁹⁾)。

以上の砒素を含む主要鉱物の他に黄鉄鉱 (FeS_2) にも砒素は普遍的に含まれている。Blanchard et al.

²⁰⁾によると、黄鉄鉱には $10\text{wt}\%$ までの砒素が含まれる。

黄鉄鉱は火成岩中、堆積岩(粘土質および炭素質)中の熱水変質起源の一次および二次鉱物として大きな塊または脈として産出する。黄鉄鉱は斑岩銅鉱床中の主要な硫化鉄である。黄鉄鉱は珪長質火成岩中およびスカルン中に広く副成分鉱物として産出する。黄鉄鉱は貫入岩に伴う熱水脈鉱床の主要な相である。堆積岩中における黄鉄鉱の産出の範囲は広く、石灰岩中では鉛-亜鉛-重晶石-螢石の組合せ、砂岩中の U-V-Cu 鉱物に伴って産出する。堆積岩中において黄鉄鉱と海緑石は普遍的に見つけられる。これらは、通常、浅海の還元環境下の海洋底上の泥の続成作用によって形成される。堆積岩中および低温熱水鉱床中における結晶性の低い形態の黄鉄鉱は、より一般的である。黄鉄鉱の小さな球状粒子の木イチゴ状の集合体は、フランボイダル (framboidal) と呼ばれている。黄鉄鉱は石炭中の主要不透明鉱物である。硫化鉄の形成の生物学的にもたらされる鉱物生成である。Acidithiobacillus ferrooxidans のような鉄および硫黄酸化細菌によって結晶化するのと同様に硫化物の溶解においても微生物の役割は重要である。(以上、Deer, Howie and Zussman²¹⁾による)。

成人体内の平均濃度 0.05ppm 。砒素の毒性は化合物で異なり、金属砒素と硫化物の毒性は低く、酸化物 As_2O_3 と水素化物 AsH_3 の毒性は高い。以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

7) ふっ素 (F)

原子番号 9、原子量 18.9984032。周期表(長周期型)の 17 族の非金属元素で最も軽いハロゲン元素。密度 5.778g/cm^3 。地殻中の存在量 554ppm 。海水中には 1.2ppm 存在。主要鉱物はホタル石、氷晶石 ($\text{Na}_3(\text{AlF}_6)$)、リン灰石 ($\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl})(\text{PO}_4)_3$) までで、金属イオンのふっ化物として産出する。密度 1.696g/cm^3 (25°C)。皮膚、眼などをおかす猛毒で、取扱には十分注意が必要。(以上、化学辞典¹⁵⁾による)。クラーク数 625ppm ¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾はふっ素を含む主要鉱物として fluorite (CaF_2 , ホタル石)、cryolite (Na_2AlF_6 , 氷晶石)、fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, ふっ素燐灰石)を示している。

花崗岩体の周辺または岩体自体で起こるふっ素の添加作用として、ふっ素交代作用がある。ふっ素交代作用でカリ長石が白雲母、トパーズ ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2$) に交代される。石灰質岩石にこの作用が働くと螢石が形成される(以上、地学事典¹⁹⁾)。

螢石は特に花崗岩、閃長岩およびグライゼンにおいておもに熱水生成物として晩期に結晶化する。螢

石は花崗岩質ペグマタイトにおいて幾分、普遍的な副成分鉱物となっている。蛍石は火山から噴出した塊の中の粉末状の空洞に産出する。火成岩に産出する蛍石の随伴鉱物には、気成鉱床では錫石、トパーズ、燐灰石、リシア雲母、熱水生成物では方解石、黄鉄鉱、燐灰石がある。蛍石は火成岩体と直接関係があるかどうか知られていない典型的な熱水鉱物に関連して発見される。このような熱水変質脈は重晶石、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、方解石および玉髓または石英を伴う。方解石は時々、砂岩中のセメント物質として見つかる。紫色の蛍石粒子は酸性火成岩起源および熱水鉱床起源の屑鉱物として普遍的である。(以上、Deer, Howie and Zussman²¹⁾による)。

ふっ素とわずかな量の塩素は黒雲母のOHを置換して存在し、ふっ素の量はMg/Fe比の増加とともに増加する。黒雲母中のふっ素含有量は、温度、それと平衡状態にある流体のH₂O/HF比とともに減少する。(以上、Deer, Howie and Zussman²¹⁾による)。

成人体内の平均濃度 37ppm (骨では0.2~1.2%)。ふっ化物イオンは広く天然に分布し、地下水のふっ素濃度は周囲にある鉱物や岩石の種類で決まる。ふっ素は骨や歯に必要な元素である。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

8) ほう素

原子番号5、原子量10.811。周期表(長周期型)の13族中の元素で唯一の非金属元素(金属と非金属の境界領域の元素)。他の13族の元素よりは炭素、ケイ素と化学的性質が似ている。イオン半径が小さくイオン化ポテンシャルが大きいので、共有結合性が高い。(以上、化学辞典による¹⁵⁾)。クラーク数10ppm¹⁶⁾。

Greenwood and Earnshaw¹⁷⁾はホウ酸塩としてCaSn^{IV}(BO₃)₂、Mg₃(BO₃)₂、Mg₂B₂O₅、Co^{III}₂B₂O₅、Fe^{II}₂B₂O₅、NaBO₂、KBO₂をあげている。

ほう素交鉱床は硼砂、コールマナイト、カーナイトなどのほう素酸塩鉱物が、硫酸塩、炭酸塩、塩化物などとともに塩湖の終期に化学的に沈殿したものである。日本国内には鉱床は存在しない(以上、地学事典¹⁹⁾)。

成人体内の平均濃度 0.7ppm。最近、土壌や飲料水中のほう素濃度と関節炎の発症率に相関があることがわかった。ほう素のハロゲン化物と水素化物(ボラン)は毒性が高い。(以上、元素大百科事典¹⁸⁾による)。

(9) 岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出試験

土壌汚染対策法施行規則の第6条第3項に、「土壌溶出量調査の方法は、次に掲げるとおりとする。」とあり、同項第四号にて「前三号の規定により採取

され、又は混合された土壌に水を加えた検液に溶出する試料採取等対象物質の量を、環境大臣が定める方法により測定すること。」とされている。この環境大臣が定める方法とは、検液の作成方法については環境庁告示第46号、特定有害物質の測定方法については環境省告示18号のことである。環境庁告示第46号では、試料液は、「試料(単位g)と溶媒(純水に塩酸を加え、水素イオン濃度指数が5.8以上6.3以下となるようにしたもの)(単位mL)とを重量体積比10%の割合で混合し、かつ、その混合液が500mL以上となるように」して作成される。この試料液を「常温(おおむね20℃)常圧(おおむね1気圧)で振とう機(あらかじめ振とう回数を毎分約200回に、振とう幅を4cm以上5cm以下に調整したものを)を用いて、6時間連続して振とう」して、特定有害物質を溶出させた試料液とし、遠心分離後、ろ過をして検液とする。検液について環境庁告示18号に定められた測定方法で特定有害物質の濃度を測定する。以上の検液作成方法は希塩酸を溶媒として用い、溶出も振とう機を用いてわずか6時間である。このようにこの検液作成方法は人為的汚染によって土壌に吸着された特定有害物質を対象とする場合には適切であると考えられるが、イオン結合と共有結合で他の元素と結合している岩石中の特定有害物質の溶出量を求めるには、必ずしも適切とは考えられない。しかし、現状においては、環境庁告示第46号の検液作成方法が岩石中の自然由来重金属等についても適用されている事例が多い。

「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(2023年版)」²²⁾では、「発生土を盛土等に利用する場合は、発生土からの重金属等の溶出や酸性水の発生については、発生土が置かれる環境の実態に即して把握し、評価を行う一助とするために、実現象再現溶出試験を実施することが望ましい。」として、実現象再現溶出試験が推奨されている。実現象再現溶出試験の実施に当たっては、「試験時間や費用も考慮しつつ、溶出に大きな影響を与える要素を中心に現場に近い条件を設定し、試験を行うことが重要である」とされている。具体的な実現象再現溶出試験としては、実大盛土試験、大型カラム曝露試験、土研式雨水曝露試験およびライシメーター試験、上向流カラム通水試験、不飽和カラム試験、繰り返し溶出試験(シリアルバッチ試験)、かくはん翼溶出試験、タンクリーチング試験、簡易溶出試験(56日溶出試験)、還元環境溶出試験の事例があげられている。

これらの試験はいずれも短期間で終了できるものではないため、対策工が必要となる可能性がある場合には、事業終了年度までに対策工が完了することを前提に試験を開始する必要がある。

(10) 岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出に係るリスク評価

既述のように土壌溶出量基準に適合していない場合は、地下水汚染が拡大するおそれがある区域に人の飲用に供するために用いる井戸のストレーナー、揚水機の取水口その他の地下水の取水口、水道法に規定する専用水道のための原水として取り入れるために用いる取水施設の取水口などが存在する場合に要措置区域となる。したがって、単にダム本体、原石山および付替道路などの掘削面、これらや転流工、付替道路トンネルなどから発生した掘削ブリの土捨場の特定有害物質溶出の発生源において土壌溶出量基準に適合していない場合であっても、即、要措置区域とはならない。要措置区域となるのは、これらの発生源からの地下水汚染が拡大するおそれがある区域に人の飲用に供するための井戸、取水口が存在する場合である。

土壌溶出量基準値は、「汚染土壌から特定有害物質が地下水に溶出し、その地下水を飲用することによる健康リスクに関し、以下の考え方により設定された土壌環境基準と同じ値を設定」とされ、「以下の考え方」とは、「一生涯を通じた毒性（慢性毒性）を考慮」とあり、具体的には「70年間、1日2Lの地下水を飲用することを想定し、地下水の環境基準や水道水の水質基準と同様の考え方により基準値を設定」とされている²³⁾。

このように、特定有害物質の発生源から表流水が取水口、地下水が井戸を通して、人が飲用する段階において土壌溶出量基準を超えてはならないのである。発生源から人が飲用する段階までの特定有害物質の濃度変化を把握するためには、リスク評価を行う必要がある。

「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版）」²⁴⁾では、発生源濃度区分を【高】（長期的な特定有害物質の溶出濃度が地下水環境基準値（基準値は土壌溶出量基準値と同一）の10倍を超えるなど）、【低】、【極低】に区分し、【高】の区分のものは、要対策土に区分し、【低】の区分のものは、リスク評価を行うこととなっている。【高】の区分のものが要対策土に区分されていることには疑問がある。長期的な特定有害物質の溶出濃度が地下水環境基準値の10倍を超えていても、人の飲用に供する段階で土壌溶出量基準に適合していれば、要対策土とはならないはずである。【高】の区分のものであっても、【低】の区分のものと同じく、リスク評価を行うべきであると考えられる。

「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版）」²⁴⁾では、非酸性土のリスク評価はサイト概念モデルの構築、簡

易影響予測評価、リスクレベル評価（定性的評価、（必要に応じて）サイト概念モデルの構築、定量的評価）の順に行うこととされている。

サイト概念モデルは、「発生源の場所やその大きさ、発生源から曝露地点までの曝露経路、曝露経路上の物質移行特性を図示、あるいは文章化したもので、有害物質の人への曝露量の算定や影響評価に当たっての情報整理のために作成されるモデル」²²⁾である。サイト概念モデルに含まれる要素は、発生源に含まれる物質の種類や濃度、発生源の位置、大きさ、掘削ズリなどの土捨場周辺の地形や水理地質構造、地下水の水位、流向、流速および水質（バックグラウンド濃度）の空間分布、地下水保全対象（集落、水利地点や評価地点）の位置、物質移行経路および経路上の物質移行特性（例えば透水性）などである²²⁾。

具体的なサイト概念モデルの事例として次にあげるようなものがある。

山木ほか²⁴⁾は、従来、発生源での有害物質の含有量、溶出量で評価してきた土壌・地下水汚染の影響を、周辺への影響により評価する、合理的かつ定量的なサイト概念モデルに基づく影響検討手法を開発している。山木ほか²⁴⁾は影響検討を「サイト概念モデルの構築」と「影響評価の実施」の2段階で行っている。さらにサイト概念モデルは、対応方針、現地調査計画の立案に活用することを目的に構築する「初期サイト概念モデル」と、影響評価の実施、対策の選定・設計に活用することを目的に構築する「サイト概念モデル」に区分されている。「初期サイト概念モデル」は既存資料調査などによる対象地域の地形・地質、水理特性・水質、土地利用履歴や発生源の有害物質の含有量・溶出試験結果等の情報をもとに、周辺環境への影響を想定し、現地調査計画の立案に活用するものとされている。「サイト概念モデル」は、さらに現地調査などによる発生源および摂取経路における有害物質の土壌への吸着特性、表流水や地下水の詳細な情報を加え、想定される周辺環境への影響を明確にし、影響評価の実施、対策の選定・設計に活用するものとされている。サイト概念モデルを構築した後、そのモデルを用いて重金属等の特定有害物質が敷地境界や保全対象近傍に達する場合の地下水の有害物質濃度を移流分散解析等により求め、判定基準と比較することで、定量的な影響評価が実施されている。影響評価の期間は100年間が目安とされている。山木ほか²⁴⁾は移流分散解析ソフトウェアとして、西垣ほか²⁵⁾が提案した手法に基づいた1DTRANSUを使用している。

田本・伊東²⁶⁾は、高精度化したリスク評価モデルの提案、リスク評価・対策選定マニュアルの作成を目的に、過年度に報告したリスク評価モデルの検証

を行うため、北海道内の道路建設現場においてひ素を含有する掘削ズリを封じ込めた盛土のモニタリング実験を実施し、実験現場に合わせて修正したリスク評価モデルを用いた二次元移流分散解析による解析結果について報告している。文中では明記されていないが、リスク評価モデルの構築に盛土周辺のサイト概念モデルが用いられているようである。盛土周辺の地盤モデルが設定され、Dtransu-2D/ELによる二次元移流分散解析が行われている。なお、Dtransu-2D/ELは既述の山木ほか²⁴⁾と同じく西垣ほか²⁵⁾の手法が用いられている。解析の結果、盛土および周辺地盤における100年後までの砒素濃度の変化が求められた。

新藤・河口²⁷⁾は、近年ではサイト概念モデルを用いたリスク評価を行い、地盤による重金属等の吸着や地下水による分散を考慮することで、より経済的な重金属対策が行われているとしている。リスク評価に基づく対策の検討は、地盤特性評価、ズリの溶出特性評価およびリスク評価地点について検討・評価し、重金属等の移動プロセスを把握するために調査・評価すべき対象を明らかにし、サイト概念モデルを構築することによって、合理的な対策の実施が可能となるとされている。サイト概念モデルは、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌（発生源）、発生源から敷地境界や保全対象区域までの距離・曝露経路（周辺状況）、周辺地盤の重金属等の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などの現場ごとの特性を考慮し、環境への評価するためのモデルであるとされている。リスク評価地点における重金属等の濃度の予測は、ズリから溶出した重金属等の移動プロセスを想定したサイト概念モデルに基づき、移流分散解析によって行うとされている。

ダム建設によって発生する自然由来の重金属等の溶出については、単に発生源における溶出量によって対策工の可否を判断するのではなく、発生源から人が飲用に供するまでの経路について、サイト概念モデルを構築し、的確なリスク評価を行って、対策の可否を判断するべきである。

【結果とりまとめ】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ① 土壌汚染対策法で調査対象となるのは、使用が廃止された有害物質使用特定施設に係る工場又は事業場の敷地であった土地（第3条）、土壌汚染のおそれがある土地の形質の変更が行われる場合（第4条）、土壌汚染による健康被害が生ずるおそれがある土地（第5条）である。
- ② 法の対象となっている特定有害物質のうち、自然界に存在するのは、すなわち自然由来である

のは、カドミウム、六価クロム化合物、水銀およびその化合物、セレンおよびその化合物、鉛およびその化合物、砒素およびその化合物、ふっ素およびその化合物、ほう素およびその化合物である。これらのうち、カドミウム、クロム、水銀および鉛は金属元素であり、密度が5.0以上あるので、重金属に属している。

- ③ 法による「汚染の除去等の措置」が必要な区域は、特定有害物質汚染状態が土壌溶出量基準または土壌含有量基準に適合しないこと、および特定有害物質の汚染によって人の健康に係わる被害が生じる、または生じるおそれがあること（土壌溶出量基準に適合せず、地下水の汚染が拡大するおそれがあると認められる区域に井戸、取水口などがあること、土壌含有量基準に適合せず、当該土地に人が立ち入ることができること）の双方が該当する区域である。
- ④ 制定当時の法では、自然由来の重金属等は対象外であった。平成24年には自然由来の重金属等も法の対象となったが、対象となったのは自然由来重金属等を含む土壌であって、岩盤は対象外とされている。
- ⑤ 地方自治体の土壌汚染関係の条例は、青森県、宮城県、富山県、長野県、鳥取県、島根県、高知県、佐賀県、長崎県、大分県および鹿児島県の11地方自治体を除いて制定されている。条例などが閲覧できた自治体（秋田県、山梨県、山口県および熊本県は閲覧できなかった）において、自然由来重金属等について規定されているのは、東京都、岐阜県および大阪府のみである。これら3自治体のうち、東京都および大阪府では自然由来重金属等は条例の対象外となっている。他方、岐阜県の「建設発生土自然由来重金属等汚染対策の手引き」では、岐阜県農政部、林政部、県土整備部および都市建築部が発注する工事等において自然由来重金属等に汚染された土壌等は、手引きが適用されることとなっている。条例などにおいて対象となるのが、人為汚染であることを明確に規定しているのは、北海道、山形県、茨城県、群馬県、千葉県、新潟県、静岡県、滋賀県、京都府、和歌山県、岡山県および広島県である。残る岩手県、福島県、栃木県、埼玉県、神奈川県、石川県、福井県、愛知県、三重県、兵庫県、奈良県、徳島県、香川県、愛媛県、福岡県、宮崎県および沖縄県においては、条例などの対象として自然由来重金属等が含まれているのか否かが不明である。
- ⑥ 法では岩盤に含まれる自然由来重金属等は対象外である。また、地方自治体の条例等においても明確に自然由来重金属等を対策の対象として

いるのは、岐阜県のみである。しかしながら、環境基本法第1条の目的に照らすと、岩盤からの自然由来重金属等の溶出が国民の健康に害を及ぼすことがあってはならない。

- ⑦ 重金属等は水溶液中ではイオンとなっていると考えられるため、土壌粒子とはイオン交換反応による化学的吸着によって存在していると考えられる。このイオン交換反応による吸着は、膨潤性粘土鉱物の層間陽イオンのようなもので、比較的容易に溶液中に溶出する。他方、自然由来重金属等は岩盤（岩石）を構成している鉱物中に存在している。元素鉱物、硫化鉱物の一部を除いて、ほとんどの鉱物はイオン結合を持ったイオン性結晶として扱うことができる。ただし、完全なイオン結合による鉱物は存在せず、イオン性結晶であってもある程度の割合で共有結合性も有している。鉱物中に含有されている特定有害物質たる重金属等は、鉱物結晶を構成する元素としてイオン結合または共有結合をして他の元素と結合されている。
- ⑧ カドミウムを含む主要鉱物は Greenockite (CdS, 硫カドミウム鉱)、クロムを含む主要鉱物は chromite (FeCr_2O_4 , クロム鉄鉱)、水銀を含む主要鉱物として Cinnabar (HgS , 辰砂)、鉛を含む主要鉱物は galena (PbS , 方鉛鉱)、anglesite (PbSO_4 , 硫酸塩鉱)、cerussite (PbCO_3 , 白鉛鉱)、Pyromorphite ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, 緑鉛鉱)、および mimetesite ($\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$)、砒素を含む主要鉱物は realgar (As_4S_4 , 鶏冠石)、orpiment (As_2S_3 , 雄黄)、arsenolite (As_2O_3 , 方砒素華)、ふっ素を含む主要鉱物は fluorite (CaF_2 , ホタル石)、cryolite (Na_2AlF_6 , 氷晶石)、fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, ふっ素燐灰石)である。セレンは親銅元素（たとえば、Cu, Ag, Au; Zn, Cd, Hg; Fe, Co, Ni; Pb, As, Bi）の硫化物に伴って産出する。ほう酸塩として $\text{CaSnIV}(\text{BO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Co}^{\text{III}}_2\text{B}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}^{\text{II}}_2\text{B}_2\text{O}_5$ 、 NaBO_2 、 KBO_2 がある。クロム鉄鉱に富んだクロム鉄鉱岩はかんらん岩、蛇紋岩中に産出する。日本では三波川帯や神居古潭帯の蛇紋岩に伴う。砒素を含む主要鉱物の他に黄鉄鉱 (FeS_2)にも砒素は普遍的に含まれ、Blanchard et al. ²⁰⁾によると、黄鉄鉱には10wt%までの砒素が含まれる。蛍石は特に花崗岩、閃長岩およびグライゼンにおいておもに熱水生成物として晩期に結晶化する。蛍石は火山から噴出した塊の中の粉末状の空洞に産出する。
- ⑨ 土壌汚染対策法施行規則で示された環境大臣が定める特定有害物質の溶出量を求めるための検液作成方法は、人為的汚染によって土壌に吸着

された特定有害物質を対象とする場合には適切であると考えられるが、イオン結合と共有結合で他の元素と結合している岩石中の特定有害物質の溶出量を求めるには、必ずしも適切とは考えられない。しかし、現状においては、環境庁告示第46号の検液作成方法が岩石中の自然由来重金属等についても適用されている事例が多い。

- ⑩ 「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版）」²²⁾では、「発生土を盛土等に利用する場合は、発生土からの重金属等の溶出や酸性水の発生については、発生土が置かれる環境の実態に即して把握し、評価を行う一助とするために、実現象再現溶出試験を実施することが望ましい。」として、実現象再現溶出試験が推奨されている。
- ⑪ 特定有害物質の発生源から表流水が取水口、地下水が井戸を通して、人が飲用する段階において土壌溶出量基準を超えてはならないのである。発生源から人が飲用する段階までの特定有害物質の濃度変化を把握するためには、リスク評価を行う必要がある。「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023年版）」²²⁾では、非酸性土のリスク評価はサイト概念モデルの構築、簡易影響予測評価、リスクレベル評価（定性的評価、(必要に応じて)サイト概念モデルの構築、定量的評価)の順に行うこととされている。
- ⑫ ダム建設によって発生する自然由来の重金属等の溶出については、単に発生源における溶出量によって対策工の可否を判断するのではなく、発生源から人が飲用に供するまでの経路について、サイト概念モデルを構築し、的確なリスク評価を行って、対策の可否を判断すべきである。

【今後の課題】

ダム建設に伴って発生する自然由来重金属等については、単に発生源において土壌溶出量基準に適合するか否かの発生源評価のみが行われ対策が実施されている事例が見受けられる。今後は、発生源から人が飲用に供するまでの経路について、サイト概念モデルを構築し、的確なリスク評価を行って、対策の可否を判断すべきである。

【参考文献】

- (1) 西田 正(1986)：鉱害，日本大百科全書，8，pp. 576-578。
(2) 藤縄克之(1990)：汚染される地下水，地学ワンポイント2，126p。

- (3) 加藤邦興(1986) : 鉱害, 日本大百科全書, 8, p. 878.
- (4) 寸田祐生 : 天ヶ瀬ダム再開発事業での自然由来重金属等含有岩石の処理について, 令和4年度近畿地方整備局発表会論文集, 一般部門 (安全・安心) I, <https://www-1.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2022/ol9a8v000005741p-att/anzen1-5.pdf> (2023年6月2日閲覧)
- (5) 林 誠・八柳 慎・山崎智弘 : 自然由来の重金属(ヒ素)を含んだ掘削土の処理工法事例について, <https://thesis.ceri.go.jp/db/giken/h20giken/JiyuRonbun/gt-11.pdf> (2023年6月2日閲覧)
- (6) 国土交通省中部地方整備局新丸山ダム工事事務所(H29) 岐阜県内建設発生土処理対策委員会の開催について, https://www.cbr.mlit.go.jp/shinmaru/605_oshirase/20170222/20170222.pdf (2023年6月2日閲覧)
- (7) 山鳥坂ダム工事事務所(2020) : 自然由来の重金属等(フッ素・ヒ素)の検出について ~ 基準値超過箇所の追加 ~ <https://www.skr.mlit.go.jp/yamatoso/yamatosakadam/pdf/jukinzoku/200730.pdf> (2023年6月2日閲覧)
- (8) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室(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), <https://www.env.go.jp/content/000076380.pdf>. (2023年6月5日閲覧)
- (9) 環境省 : 地方公共団体における土壌汚染対策に関連する条例、要綱、指導指針等の制定状況, <https://www.env.go.jp/water/report/h21-04/04ref.pdf>. (2023年6月5日閲覧)
- (10) 久馬一剛・佐久間敏雄・庄司貞雄・鈴木 皓・服部 勉・三土正則・和田光史(1993) : 土壌の事典, 朝倉書店, 東京, 566p.
- (11) 森本信夫・砂川一郎・都城秋穂 (1975) : 鉱物学, 岩波書店, 東京, 640p.
- (12) 中平光興(1973) : 結晶化学 無機材質研究の出発点, 講談社, 東京, 244p.
- (13) 高橋 良・垣原康之・原 淳子・駒井 武(2011) : 堆積岩からの砒素の溶出過程と風化に伴う溶出量の変化 : 北海道中央部、中新統川端層および軽舞層の例, 地質学雑誌, 117, pp. 565-578.
- (14) 一國雅巳(1992) : 風化過程における元素の移動度, 粘土科学, 32, pp. 3-7.
- (15) 大木道則・大沢利昭・田中元治・千原秀昭 編 (1994) : 化学辞典, 東京化学同人, 東京, 1730p.
- (16) Mason, B. H. (1966): Principles of Geochemistry, 3rd ed. Wiley, 329p.
- (17) Greenwood, N. N. and Earnshaw, A. (1984): Chemistry of the Elements, Pergamon Press, 1542p.
- (18) 渡辺 正 監訳() : 元素大百科事典 新装版, 朝倉書店, 東京, 685p.
- (19) 地学団体研究会 編(1996) : 新版地学事典, 平凡社, 東京, 1443p.
- (20) Blanchard, M., Alfredsson, M., Brodholt, J., Wright, K. and Catlow, C. R. A. (2007): Arsenic incorporation into FeS₂ pyrite and its influence on dissolution: A DFT study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 71, pp. 624-630.
- (21) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (2013): An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 3rd edition, The Mineralogical society, London, 498p.
- (22) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル改訂委員会 (2023) : 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル (2023年版), 165p. + 参 82p.
- (23) 環境省 : 指定基準値設定の考え方, <https://www.env.go.jp/council/10dojo/y105-02/ref02.pdf>
- (24) 山木正彦・森啓年・佐々木哲也・稲垣由紀子・塚本将康(2010) : サイト概念モデルを用いた土壌・地下水汚染の管理・制御技術、土木技術資料、52-6、pp. 6-9.
- (25) 西垣誠・菱谷智幸・橋本学・河野伊一郎(1995) : 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究、土木学会論文集、No. 511/III-30、pp. 135-144.
- (26) 田本修一・伊東佳彦(2013) : サイト概念モデルに基づく自然由来重金属汚染対策の検討について—道路建設現場におけるリスク評価と盛土モニタリング実験(その1)—、地盤工学会北海道支部技術報告集、第53号、pp. 185-190.
- (27) 新藤和男・河口達也(2013) : リスク評価に基づくトンネル掘削ズリの対策事例—自然由来重金属対策におけるコスト縮減方法—、応用地質技術年報、No. 32、pp. 99-108.