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）

令和 5 年 3 月 29 日

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

はじめに

建設工事で発生する岩石・土壌は、盛土や埋土の材料として有効利用が図られることが望ましい。一方、我が国には、自然由来の砒素や鉛などの重金属等を含む土壌や岩石が広く分布しており、このような土壌や岩石に遭遇する建設現場では発生土への適切な対応が求められる。そのため、過去には個々の現場で（ときに酸性土の問題と併せて）必要な対応が執られてきたが、土壌汚染対策法の施行を契機として問題がより重要視されるようになり、2010 年には「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(暫定版)」（以下、「マニュアル暫定版」という。）がとりまとめられるに至った。このマニュアル暫定版に、関連する法制度の改正や技術上の様々な知見の蓄積を踏まえて改訂を行ったのが、本マニュアルすなわち「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)」（以下、「マニュアル 2023 年版」という。）である。

土壌汚染対策法は、2003 年に施行された当初は人為汚染のみを規制の対象としていたが、マニュアル暫定版が公表されたのと同じ 2010 年に改正されて自然由来の重金属等も規制対象となり、同法が適用される場合、自然由来の基準不適合土壌を盛土等に活用することは実質的に難しくなった。そのため、2015 年 6 月閣議決定の規制改革実施計画では自然由来の重金属等の問題に対して緩和の必要性が提起され、2016 年 12 月の中央環境審議会「今後の土壌汚染対策の在り方について（第一次答申）」などを経て 2017 年 5 月の改正土壌汚染対策法の制定に至り、自然由来や埋立材由来（公有水面埋立法によるもの）に限って基準不適合の土壌を活用する制度が定められている。この合理化に向けた改正は、法適用外である岩砕（掘削ずり）などの発生土に関する、マニュアル暫定版に後押しされた様々な科学研究・技術開発と工事事例の蓄積が寄与したものと考えられる。マニュアル 2023 年版では、このようなマニュアル暫定版の基本スタンスを踏襲しつつも、次のような主要な改訂を行っている。

① 発生土の受入先に応じた標準的な対応方法を整理したこと
② リスクレベルに応じた最適な対策選択の考え方を整理したこと
③ 酸性水を発生する発生土(酸性土)からの重金属等の溶出事例が多いことを踏まえ、酸性土への対応をマニュアルの目的に追加したこと
④ 全含有量と溶出量の相関が低いことから、全含有量に基づくスクリーニング基準を廃止したこと

中でも①と②は、「要管理土」「要対策土」「搬出時管理土」の概念を新たに取り入れることによっている。すなわち、管理が必要となる「要管理土」は、利用環境における影響の懸念の大小により「要対策土」と「搬出時管理土」に区分されるが、この区分は発生土の性状のみによって決まるのではなく、発生土の性状と利用環境の双方によって決まる。したがって、発生土の性状と利用環境に関する調査・試験・評価を科学的に進めることが重要で、そのような調査・試験・評価を適切かつ前広に行うことによって、重金属等による環境リスクを抑えつつ、発生土の利用を最大限はかることが可能になる。今後、より積極的な要管理土の有効利用に向けて、事業者や調査・評価者など関係者が一丸となって対応していくことが望まれる。

このマニュアル 2023 年版を活用することにより、自然由来重金属等を含む岩石・土壌への対応が合理化され、発生土の有効利用がこれまでにも増して促進されることを期待するものである。

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改訂委員会
委員長　勝見　武

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

委員長　勝見　武　　京都大学大学院 地球環境学堂社会基盤親和技術論分野 教授
委　員　乾　　徹　　大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授
委　員　太田岳洋　　山口大学大学院 創成科学研究科 教授
委　員　鈴木弘明　　日本工営株式会社 基盤技術事業部 副技師長
委　員　肴倉宏史　　国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域試験評価･適正管理研究室長
委　員　保高徹生　　国立研究開発法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門地圏化学研究グループ長
委　員　阿南修司　　国立研究開発法人土木研究所 地質研究監
委　員　佐々木哲也　国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム上席研究員
委　員　川端淳一　　鹿島建設株式会社 土木管理本部土木技術部 技術管理部長
委　員　阪本廣行　　株式会社フジタ 土木本部土木エンジニアリングセンター土壌環境部エグゼクティブコンサルタント
委　員　甲斐文祥　　環境省 水・大気環境局水環境課土壌環境室　室長補佐
委　員　隅藏雄一郎　国土交通省　総合政策局公共事業企画調整課　インフラ情報・環境企画調整官

旧委員　中村雄介、水原健介、伊藤隆晃、藤田宏志（環境省　水・大気環境局土壌環境課長補佐）
　　八尾光洋、若尾将徳（国土交通省　総合政策局公共事業企画調整課インフラ情報・環境企画室長）
事務局　国土交通省　総合政策局公共事業企画調整課
　　国立研究開発法人土木研究所つくば中央研究所・寒地土木研究所

原案作成者　一般財団法人土木研究センター　地盤環境技術検討委員会技術分科会

目　次

第１章　総説
1.1 マニュアルの目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
(1) 自然由来重金属等含有土に起因する人の健康への影響のおそれが新たに発生する場合
(2) 酸性土による生活環境への影響のおそれが新たに発生する場合
(3) 本マニュアルの位置づけ
1.2 適用範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
(1) マニュアルの対象となる土
(2) 対象工事
1.3 留意事項・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
(1) 人為由来の汚染土壌と、本マニュアルで扱う自然由来重金属等含有土や酸性土との相違
(2) 本マニュアルの特徴と利用上の留意点
1.4 用語の定義と解説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11

第２章　自然由来重金属等含有土および酸性土への対応の基本事項
2.1 対応の基本的考え方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14
(1) 公共建設工事で管理や対策が必要な自然由来重金属等含有土や酸性土
(2) 要管理土の掘削の回避、減量、掘削物の利用等の原則
(3) 検討を開始する事業段階と選択可能な対応方法の例
(4) 専門家による評価の必要性と不測の事態への対応
(5) 本マニュアルに基づく対応の概要
(6) 発生土の細分方法、それらの土の特徴および盛土等に利用する場合の配慮
2.2 対応の検討の進め方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
(1) 事業計画段階
(2) 概略設計段階
(3) 詳細設計段階・施工計画段階
(4) 施工段階・維持管理段階
(5) 事業の実施にあたっての配慮
2.3 法的枠組みへの対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
2.4 地質状況の把握と発生土の性状把握・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
(1) 出現する地質状況の把握
(2) 地質区分ごとの発生土の性状把握
2.5 重金属等の起源の確認・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・35
2.6 要管理土の区分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
(1) 要管理土の判定の目安と要管理土の判定

(2) 酸性化可能性試験の特性と適用の留意点
2.7 要管理土の受入先・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
2.8 要管理土を盛土等に利用する場合の対応目標の設定・・・・・・・・・・・・・・・・42
(1) 人の健康への影響の防止に関する対応目標
(2) 生活環境への影響の軽減に関する対応目標
2.9 要管理土の発生源評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
2.10 要管理土のリスク評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
(1) サイト概念モデルの構築
(2) 設定された対応目標を満足するかどうかの評価
(3) リスクレベルの区分
2.11 対応方針の決定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58
(1) 受入先での対策の必要性の評価（総合評価）
(2) 対策工が必要な場合の対応方法の検討
2.12 構造物の機能およびその安定性の確保・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61

第３章　調査
3.1　調査の目的およびその概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
(1) 発生土が要管理土であるかどうかの評価を目的とする調査
(2) 受入先のリスク評価、工事による環境への影響および対策工の効果の確認を目的とする調査
(3) 対策工の検討を目的とする調査
3.2　事業段階に応じた調査の進め方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
(1) 事業計画段階
(2) 概略設計段階
(3) 詳細設計段階・施工計画段階
(4) 施工段階
(5) 維持管理段階
3.3　調査・試験方法
3.3.1　資料等調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76
(1) 調査の目的
(2) 調査の対象地域
(3) 調査の概要
(4) 地形・地質に関する資料収集
(5) 水理・水文特性、水質に関する資料収集
(6) 気象に関する資料収集
(7) 保全対象（予定）区域の現況に関する資料収集

(8) 発生土の移動に係る法令等、土地利用履歴および特定有害物質使用履歴に関する資料収集
(9) 当該工事に関する資料収集
3.3.2　地形・地質調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
(1) 搬出元候補地の調査
(2) 受入候補地の調査
3.3.3　水理・水文調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86
(1) 搬出元候補地の調査
(2) 受入候補地の調査
3.3.4　地質試料の採取と試験試料の調製・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 88
(1) 地質試料の採取
(2) 試料の保管
(3) 試験試料の調製
3.3.5　水質試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・90
(1) 水質試料の採取
(2) 採取容器と試料の保管
(3) 水質試験
3.3.6　地盤物性調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・92
3.3.7　要管理土の評価のための試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・94
(1) 各種試験の適用
(2) 短期溶出試験
(3) 酸性化可能性試験
(4) 全含有量試験
(5) 直接摂取のリスクを把握するための試験
3.3.8　実現象再現溶出試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・98
(1) 実現象再現溶出試験の概要
(2) 現場における溶出特性と試験条件の設定
(3) 実現象再現溶出試験を踏まえた長期的な重金属等の溶出濃度の決定
(4) 実現象再現溶出試験による酸性化可能性の判定
3.3.9　必要に応じて実施する試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・102
(1) 岩石・鉱物学的試験
(2) 移行特性試験
(3) 不溶化の性能を確認するための試験
(4) 迅速判定試験
3.4　要管理土のリスク評価における影響予測のための調査・・・・・・・・・・・・・ 106
(1) リスク評価の手順
(2) サイト概念モデルに反映させる情報とその調査

(3) 簡易影響予測に必要な情報とその調査
(4) 影響予測に必要な情報とその調査

第4章　要管理土への対応
4.1 要管理土を盛土等に利用する場合の対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・115
(1) 搬出時管理土を盛土等に利用する場合の対応
(2) 要対策土（酸性土）への対応
(3) 要対策土（低濃度）を盛土等に利用する場合の対応
(4) 要対策土（高濃度）を盛土等に利用する場合の対応
(5) リスク評価に基づく対策検討の考え方
4.2 土質改良が必要な場合の対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・120
4.3 対策工法
4.3.1 盛土に利用する場合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 122
(1) 構造安定性と排水対策など
(2) 対策工に共通する留意点
(3) 各種の対策工とその留意点
4.3.2 埋戻しへの利用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 145
4.3.3 水面埋立への利用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 146
4.4 施工時の拡散防止対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 148
(1) 基本的な考え方
(2) 仮置き
(3) 排水処理
(4) 要対策土の搬出入・移動時の対策
4.5 モニタリング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 154
(1) 施工確認モニタリングと効果確認モニタリングの目的と概要
(2) 施工確認モニタリングの基本的な考え方
(3) 施工前のモニタリング
(4) 施工中のモニタリング
(5) 施工後のモニタリング
(6) 地下水観測が困難な場所における対応
(7) モニタリング結果に異常が認められた場合の対応
4.6 施工後の管理と記録の保管・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・162
(1) 基本的な考え方
(2) 対策後の維持管理
(3) 異常時の対応
(4) 記録の作成と継承

参考資料１　本マニュアルの第 2 章以下に示す具体的方法によらない対応
参考資料２　自然由来の重金属等に関する諸情報
参考資料３　本マニュアルの考え方に基づく合理的な対応の例
参考資料４　トンネル工事および切土工事における一般的な調査と要管理土の対応のための調査との対応関係
参考資料５　環境関係法令基準値一覧
参考資料６　土壌汚染対策法における自然由来の汚染土壌（自然由来等土壌）の取扱い
参考資料７　岩石・土壌に含まれる重金属等や酸性物質の起源の確認方法
参考資料８　短期溶出試験、酸性化可能性試験と土研式雨水曝露試験との比較
参考資料９　岩石試料の一般的な試料調製手順
参考資料 10　短期溶出試験方法
参考資料 11　直接摂取のリスクを把握するための試験方法
参考資料 12　酸性化可能性試験方法
参考資料 13　実現象再現溶出試験の例
参考資料 14　移行特性試験方法
参考資料 15　不溶化処理土壌の評価方法
参考資料 16　酸性土の掘削面対策の考え方
参考資料 17　地下水経由のリスクに対する対策工の信頼性の評価
参考資料 18　不溶化処理の配合設計例
参考資料 19　管理台帳の例

第１章　総説

1.1 マニュアルの目的

本マニュアルは、公共工事として実施される建設工事（以下、「公共建設工事」という。）において、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌、あるいはそれらの混合物（以下、「自然由来重金属等含有土」という。）に起因する人の健康への影響のおそれ、あるいは掘削などに伴い、長期にわたり酸性水を発生させる岩石・土壌、あるいはそれらの混合物（以下、「酸性土」という。）による生活環境への影響のおそれが新たに発生する場合の標準的な技術的対応方法を示すものであり、周辺の環境安全性を確保しながら効率的な事業施行の推進を図ることを目的とする。

本マニュアルは、公共建設工事における自然由来重金属等含有土および酸性土による人への健康影響や生活環境への影響に関する技術的対応方法を示すものである。

(1) 自然由来重金属等含有土に起因する人の健康への影響のおそれが新たに発生する場合

建設工事の実施によって、自然由来重金属等含有土による人の健康への影響のおそれが新たに発生する場合として、

- 自然由来重金属等含有土を掘削・仮置き・運搬・搬出する場合
- 自然由来重金属等含有土を盛土、埋立に利用する場合

が挙げられる。

自然由来重金属等含有土は、地質の形成年代、形成環境を問わず多様な岩石、土壌において確認されており、公共建設工事において副次的に発生する土（以下、「発生土」という。）に、自然由来重金属等含有土が含まれる頻度は高い。これらの土は、存在自体は「汚染」ではなく、一般に周辺地下水においても特段の問題を生じていないことがほとんどである。一方、掘削によりこれらの土が置かれる環境が変化することで、重金属等が環境中に移動する場合がある。公共建設工事では取り扱う土量が一般に膨大であることから、環境に関する問題が発生するとその影響は甚大であり、国民の環境に対する関心度が高い現状からみても、「発生土」の搬出または盛土等を施工するに当たり周辺の環境安全性について、評価を行っておく必要がある。

本マニュアルでは、土壌汚染対策法の特定有害物質のうち、カドミウム（Cd）、六価クロム（Cr（VI））、水銀（Hg）、セレン（Se）、鉛（Pb）、砒素（As）、ふっ素（F）、ほう素（B）の８物質を総称して「重金属等」といい、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌あるいはそれらの混合物を、「自然由来重金属等含有土」という。

(2) 酸性土による生活環境への影響のおそれが新たに発生する場合

環境基本法では「生活環境」という用語を、常識的な意味で理解されるもののほかに、「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」をも含めた意味で用いることとしている[1)]。建設工事の実施によって、酸性土による生

活環境への影響のおそれが新たに発生する場合として、

- 酸性土を掘削・仮置き・運搬・搬出する場合
- 酸性土を盛土、埋立に利用する場合

が挙げられる。

例えば、地中の還元的な環境で形成された岩石・土壌の一部は、これらにしばしば含まれる硫化鉱物が掘削に伴って空気や水に触れて酸化分解反応により硫酸を生成し、酸性水を発生させる場合がある。雨水や地下水に接触することで長期にわたり酸性水を発生させる土を「酸性土」という。発生土からの酸性水の発生は、植物や水生生物へ影響を与えるほか、酸性水の発生に伴って重金属等の溶出が促進される可能性があり、酸性水による周辺環境への影響の発現がこれまでも自然由来重金属等含有土の発見の契機となってきた。また岩石・土壌によっては硫化鉱物の酸化に時間を要するものもあり、掘削・盛土してから数か月経過した後に酸性水を発生した事例もある。これらのことから、酸性土からの酸性水の発生に伴う生活環境への影響の軽減についても本マニュアルの対象とする。

なお、掘削に伴ってアルカリ性を呈する水を生じる土も存在する。これらについては発生機構やその長期的影響の程度に関する知見が不十分であることから、本マニュアルの対象とはしないが、例えば水質汚濁防止法の一般排水基準を満足しない排水が恒常的に公共用水域に排出される懸念があるなどの場合には、必要に応じて有識者や専門家を交えて検討を行うことが望ましい。

(3) 本マニュアルの位置づけ

本マニュアルは、公共建設工事において、自然由来重金属等含有土や酸性土に係る必要な環境安全性を確保しながら効率的な事業施行の推進を図ることを目的としたものであり、関連の法令やマニュアルを補完する形で、建設工事における技術的対応を包括的に示した。

重金属等による土壌・地下水汚染対策を取り扱う法令の主要なものとして、「土壌汚染対策法」がある。また、建設工事における関連マニュアルとしては「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版）」[3)]がある。なお、重金属等による土壌･地下水汚染に関しては、計画から維持管理までの各段階において適切な対応を行うために、地質･地盤リスクマネジメントの視点が重要になる。これについては、JIS Q 31000「リスクマネジメント－指針」を踏まえてまとめられた「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン－関係者が ONE-TEAM で対応するために」[2)]が参考になる。

土壌汚染対策法は制定当初、特定有害物質の製造、使用又は処理が行われた施設が廃止された場合の当該用地などを調査の対象としており、土壌溶出量基準や土壌含有量基準を超過する特定有害物質が専ら自然由来の可能性が高いと判断できる場合の土壌については、平成 22 年 3 月 31 日までは同法の対象外とされていた（「土壌汚染対策法の施行について」（環水土第 20 号、平成 15 年））。

平成 22 年 4 月 1 日以降、改正土壌汚染対策法の施行に伴い、自然由来の重金属等による基準不適合土壌についても同法の対象となることとなったため、当該土壌を掘削・搬出する

場合は同法の規定に基づく対応が必要となった。

さらに平成 31 年 4 月 1 日より、自然由来等土壌構造物利用施設が汚染土壌処理施設として許可を得て運営する施設の一つに加わり、自然由来の汚染土壌などの有効利用が促進されるほか、個別サイト評価のための計算ツールの公表、土壌溶出量試験および土壌含有量試験の手順が改められて試験の精度向上が図られるなどの、改正された土壌汚染対策法が全面施行された（**2.3 解説 2）**参照）。

なお、岩盤（固結した岩石）は同法の対象とされていない。すなわち、環境省によると「土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について」（平成 31 年 3 月 1 日付け環境省水・大気環境局長通知）で「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 ミリメートル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」としているので、留意されたい。法の適用に当たって不明な点は、都道府県・市町村（以下、「自治体」という。）の環境部局に問い合わせる必要がある。

「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版）」は、建設工事で遭遇する土壌汚染および地下水汚染を対象としており、人為由来の特定有害物質が土壌溶出量基準や土壌含有量基準を超過して含まれている土壌の取扱いを示している。人為由来汚染は地表面から汚染される場合が多く、調査方法も地表からの調査を中心として定められているのに対し、自然由来重金属等含有土や酸性土はこうした性状と異なる。そのため、自然由来重金属等含有土や酸性土に対しては、調査方法についても改めて整理する必要がある。

本マニュアルがこれまでの法令、マニュアルを補完している内容としては、建設工事で遭遇することの多い固結した岩石や海成堆積物、酸性土の取扱い、建設工事で構築する盛土等の長期モニタリングの方法などがあり、いずれも建設工事を進めるに当たって実際に問題となりうる事項である。

本マニュアルは発生土の利用に関連する法令、マニュアルに対して補完すべき内容を含みつつ、これまで発刊されてきた「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（暫定版）」（平成 22 年 3 月）、暫定版のフォローアップの一環として発刊された「建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック」（平成 27 年 3 月）について、蓄積された技術的知見や平成 31 年に施行された改正土壌汚染対策法の内容を踏まえて改訂したものとなっている。

【参考文献】

1) 環境省：「生活環境」の範囲について．中央環境審議会水環境部会　水生生物環境基準専門委員会（第 6 回）参考 13，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/council/09water/y094-06b.html

2) 国土交通省大臣官房技術調査課, 国立研究開発法人土木研究所, 土木事業における地質・盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における 地質・地盤リスクマネジメント

のガイドライン －関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために－. 69p., 2020, 土木研究所ホームページ, https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saisentan/tishitsu-jiban/iinkai-guide2020.html

3) 独立行政法人土木研究所(編):建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(改訂版). 鹿島出版会, 2012.

＜参考＞ 2023 年版の主な改訂点

1．暫定版公表後の対応事例の蓄積を踏まえ、内容を更新しました。主な改正点は下記の通りです。
- 発生土の受入先に応じた、標準的な対応方法を整理
- リスクレベルに応じた最適な対策選択の考え方を整理
- 酸性水を発生する発生土（酸性土）からの重金属等の溶出事例が多いことを踏まえ、酸性土への対応をマニュアルの目的に追加
- 発生土中の重金属等の全含有量と溶出量との相関が低いことから、スクリーニング基準を廃止

2．2019 年の改正土壌汚染対策法の全面施行に際し、自然由来の汚染土壌などの有効利用のためのリスク評価ツールが公表されたことから、本マニュアルの標準的な対応としてツールの利用を可能としました。

1.2 適用範囲

(1) 対象となる土

自然由来重金属等含有土および酸性土とする。

(2) 対象工事

公共建設工事であり、かつ、土壌汚染対策法、その他の発生土の移動に係る法令や条例などの適用外のものとする。

(1) マニュアルの対象となる土

本マニュアルでは、自然由来の重金属等（カドミウム（Cd)、六価クロム（Cr（VI))、水銀（Hg)、セレン（Se)、鉛（Pb)、砒素（As)、ふっ素（F)、ほう素（B)）を含む土および、掘削などに伴い長期にわたり酸性水を発生させる土を対象とする。重金属等の起源が自然由来でないものを含むと考えられるときは、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版)」[1)]を参照する。

(2) 対象工事

公共建設工事であり、かつ、土壌汚染対策法など、発生土の移動に係る法令や条例など（以下、「法令等」という。）の適用外のものへの適用を想定している。土壌汚染対策法と本マニュアルの適用対象について、**図-1.2.1** に示す。本マニュアルを適用しようとする工事における関係法令等の適用については、自治体の環境部局への確認を行うとともに、必要に応じて情報共有を行うなどの連携を図る。

なお、自然由来の重金属等を含む泥状の土については、各自治体の判断により、建設汚泥として「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」の適用を受ける可能性があるが、その取扱いについては **4.2** に示した。

本マニュアルは陸上の岩石・土壌を掘削する場合を想定して記述されているが、水底土砂を陸上で取り扱う場合においても、本マニュアルの技術的事項を参考にできる。ただし、水底土砂には人為的な汚染物質が混入している場合があるので、その取扱いには留意が必要である。なお、浚渫（しゅんせつ）土砂や建設発生土などの海域での有効利用については「浚渫土砂等の海洋投入及び有効利用に関する技術指針（改訂案)」[2)]、「海域における土砂類の有効利用について」[3)]などを参照されたい。

本マニュアルは公共建設工事への適用を想定しているが、発生土の管理など、適切な運用が可能な場合においては、本マニュアルの技術的事項に関して民間工事への適用を妨げるものではない。また、土壌汚染対策法などの法令等への対応に加えて、本マニュアルの技術的事項の一部を適用することを妨げるものではない。

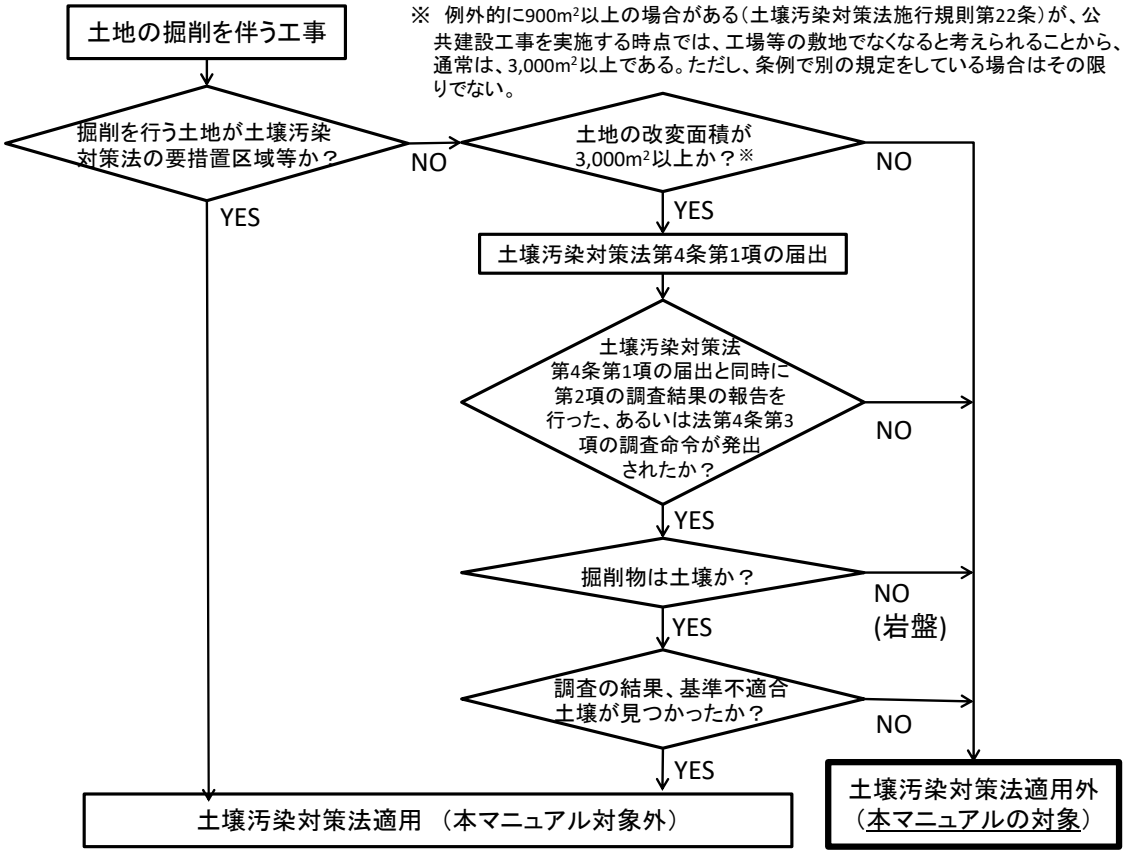


図-1.2.1　土壌汚染対策法と本マニュアルの適用対象

【参考文献】

1) 独立行政法人土木研究所(編)：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(改訂版)．鹿島出版会，2012.

2) 国土交通省港湾局：浚渫土砂等の海洋投入及び有効利用に関する技術指針（改訂案)．2013，国土交通省ホームページ，https://www.mlit.go.jp/common/001008776.pdf

3) 環境省水・大気環境局水環境課海洋環境室：海域における土砂類の有効利用に関する指針．2018，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/post_37.html

1.3 留意事項

自然由来重金属等含有土や酸性土は、人為由来の汚染土壌とはその物理・化学的特性が異なる場合があることに留意する。また酸性土からしばしば重金属等の溶出が見られることに留意する。

なお、本マニュアルに記載している技術的な対応方法は、基準として定めるものではなく、本マニュアル以外の方法の採用を妨げるものではない。

(1) 人為由来の汚染土壌と、本マニュアルで扱う自然由来重金属等含有土や酸性土との相違

自然由来重金属等含有土や酸性土は、その分布や物理・化学的特性が人為由来の汚染土壌と異なる場合があるので、それらを考慮した調査・試験・評価・対策の検討が必要である。主な相違点を以下に挙げる。

1) 酸性土による重金属等の溶出特性や生活環境への影響

天然の岩石・土壌にはしばしば黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれ、掘削などによって空気・雨水などに曝露(ばく)されると硫化鉱物の酸化分解反応によって酸性水が生じる。

例えば、黄鉄鉱の酸化による酸性水の発生機構は、以下の化学反応式で示される[1)]。

$2FeS_2$（黄鉄鉱）$+ 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4$（硫酸第一鉄）$+ 2H_2SO_4$（硫酸）…①

$2FeSO_4 + H_2SO_4 + 1/2O_2 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3$（硫酸第二鉄）$+ H_2O$…②

また、②で生成した硫酸第二鉄は、次の反応により硫酸を生成する。

$Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3$（水酸化第二鉄）$+ 3H_2SO_4$…③

硫化鉱物の酸化分解反応は、岩石・土壌の性状によっては数か月以上にわたってゆっくり進行するものもあり、施工直後は問題がなくても時間が経過してから酸性水が発生する可能性がある。なお、このような長期的な酸性化については土研式雨水曝露試験などの実現象再現溶出試験（**3.3.8** 参照）により確認できるが、酸性化可能性試験（土と過酸化水素水とを混合し、土に含まれる黄鉄鉱などの硫化鉱物を強制的に酸化分解して硫酸を生成させる試験；**3.3.7** 参照）の検液の pH により評価が可能なことが多い。

このほか、黄鉄鉱中に不純物として砒素などの重金属等を含有することがあり、黄鉄鉱の酸化分解によって溶液中に重金属等が溶出することがある。さらに、硫化鉱物は、酸化条件下ではバクテリアにより分解され、酸性水発生の反応が促進される。

以上のように、硫化鉱物の分解反応によって鉱物中に存在する重金属等が溶出するほか、酸性水に触れることにより鉱物からの重金属等の溶出が促進される場合がある（**図-1.3.1**）。

生成した硫酸を含む滲(しん)出水は、重金属等の溶出促進とは別に、pH が低いことにより魚類などの水生生物や植生に悪影響を及ぼし、現場における問題発見の契機となることがある。

一方、酸性水は土壌中の方解石などとの中和反応が同時に進行することから、土に含まれる鉱物種やその量、および土が置かれる環境条件によっては、必ずしも滲出水が酸

性になるとは限らない。したがって酸性土への対応に当たっては、必要に応じて専門家の助言を受けながら合理的に判断することが望ましい。

2) 重金属等の分布や存在形態

自然由来の重金属等は地質の影響を受けて広い範囲に分布するのに対して、人為由来の汚染物質の分布は、汚染物質の埋立、漏洩箇所などを中心に局所的に高濃度の箇所が存在する。

また、自然由来の重金属等は元来鉱物中に含まれているものが多いが、こうした鉱物が分解してしまった場合には、ほかの鉱物表面に吸着されたり、土壌間隙水に留まっている場合がある。一方、人為由来の重金属等は①人工化合物として土壌に埋積されている、または②廃液として土壌に浸透し、土壌間隙水に含まれていたり、鉱物表面に吸着されているが、①、②のいずれの場合にも、時間が経過すると化学反応を起こし、天然鉱物とは異なる化学組成を有する物質として固定される場合がある。

重金属等の概説、地質中の分布や溶出特性、毒性評価や水質基準の設定根拠などの自然由来の重金属等に関する諸情報については**参考資料２**や島田 [2)]などを参照されたい。

3) 粒径

土壌汚染対策法に基づく溶出試験では目開き 2 mm のふるいを通過したものを試料とするが、大半の発生土は 2 mm より大きい粒径の粒子を含む。岩石の粒径は溶出特性に影響を与えるが、岩石の種類・強度、掘削方法などによって、実際に岩石を盛土等に利用する場面での粒径分布が異なる。さらに岩石の種類とその置かれる環境によってはスレーキングによる細粒化が起こる（**図-1.3.1**）。このような中、岩石試料を溶出試験に供する場合の粒径調整方法について、現時点では統一的な手法は確立していない。

本マニュアルでは、粒径を全量目開き 2 mm のふるいを通過するまで破砕した試料の溶出試験（短期溶出試験；**3.3.7**）のほか、大粒径の試料を用いた試験を使用できる（実現象再現溶出試験；**3.3.8**）こととし、これらの結果を踏まえた総合的な発生源の評価を行えるようにした。

(2) 本マニュアルの特徴と利用上の留意点

本マニュアルは、上述のような性質を持つ自然由来重金属等含有土や酸性土へ対応するため、以下のような特徴を有している。

① 地質学的な手法に基づき、自然由来重金属等含有土や酸性土の分布を把握する合理的な調査方法を提案した。

② 従前より便宜的に実施されている土壌溶出量試験に準ずる試験（短期溶出試験）や土壌含有量試験に準ずる試験(直接摂取のリスクを把握するための試験)では把握できない、酸性水の発生に伴う重金属等の溶出の促進について、酸性化可能性試験（JGS 0271）や実際の現場における溶出条件を踏まえた溶出試験（実現象再現溶出試験）を用意し、長期的に溶出量が増大する可能性のある土を適切に把握できるようにした（これらの試験方法については **3.3.7** および **3.3.8** 参照)。

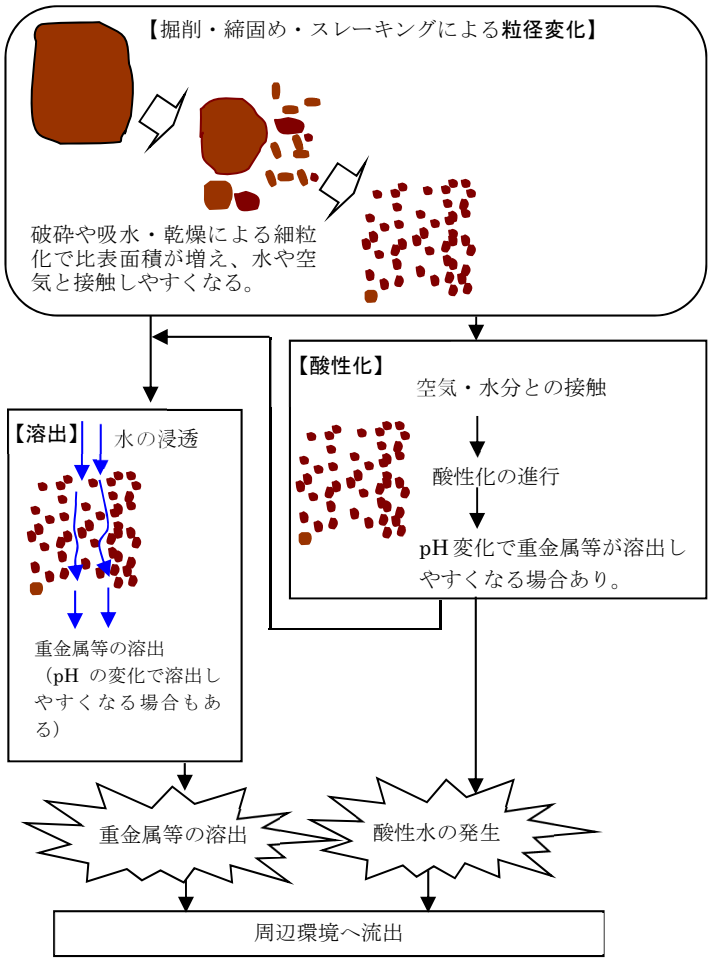


図-1.3.1　粒径変化や pH 変化による重金属等の溶出特性の変化 [3)を改変]

③ 短期溶出試験、酸性化可能性試験および直接摂取のリスクを把握するための試験においては、必要に応じて破砕調整して試料粒径を 2 mm 以下に統一しているが、岩石の場合には過度な破砕となることも考慮して、実現象再現溶出試験として、各現場における実粒径を考慮した試験の選択ができることとした。

本マニュアルは、最新の知見を反映しながら必要かつ十分な合理的対応を目指して策定したものである。例えば、土の環境安全性の評価に当たっては長期的な重金属等の溶出や酸性水の発生に配慮することで、より実態に即した評価を実施することができ、対応目標については、現場の状況に応じて設定できるようになっている。また、対策が必要な場合においても、現場ごとのリスクの程度に応じた最適な対応方法が採用できるように配慮するとともに、モニタリングや、不測の事態への対応の事前検討など、危機管理対応についても示した。さらに、本マニュアルは建設事業において、発生土の受入地となる場所の環境安全性を確保できる方法も示している。事業で土を受入する場合は、本マニュアルの内容を踏まえ、土の受入条件を適切に定めるなどにより、受入地の環境安全性を確保する必要がある。

一方、自然由来重金属等含有土や酸性土に起因する影響は複雑な機構を有しており、その解明や調査・試験・評価および対策方法の確立については今後の研究に期待する部分が大きい。本マニュアルは現時点の知見に基づいて人の健康への影響を防止するとともに酸性土の生活環境への影響を低減するための技術的対応方法を整理したものであり、将来新たに得られる知見の反映を否定するものではない。よって、本マニュアルに記載された調査・試験・評価および対策方法以外の方法の採用を妨げるものではなく、実務においては最新の合理的な知見の把握に努め、現場状況などを総合的に勘案して適切に対応されたい。また、現場条件によっては本マニュアルの第 2 章以下に示す全ての手順を適用することが合理的でない場合もある。例えば小規模工事や施工中に新たに対応が必要になった場合など、本マニュアルの第 2 章以下に示す具体的方法によらない対応を**参考資料 1** に示した。

本マニュアルでは、法令の内容や環境基準などの各種基準について令和 4 年 4 月 1 日現在の内容、数値を示したが、事業の実施に当たっては最新の法令や基準を参照し、適切に対応する必要がある。

【参考文献】

1) 桜本勇治:海成泥質岩が酸性水を発生させる可能性について. 地下水技術, Vol.36, No.4, pp.29-33, 1994.
2) 島田允堯:自然由来重金属と環境汚染－応用地質学・地球化学的データバンク－. 240p., 愛智出版, 2014.
3) 龍原毅, 乾徹, 勝見武 : 土の化学・物理と自然由来の重金属問題. 地盤工学会誌, Vol.59, No.2, p.54, 2011.

1.4 用語の定義と解説

本マニュアルでは、以下のように用語を定義する。

- **受入先または受入地**：発生土を盛土等に利用する場所。
- **受入施設等**：水面埋立地、セメント製造施設（土壌汚染対策法上の位置づけを持たないものも含む）、浄化等処理施設、自然由来等土壌構造物利用施設、管理型最終処分場など、一定の基準を満足する土の受入を行う施設など。
- **影響予測**：定量的な計算に基づく、地下水への物質移行の予測。
- **環境安全性**：環境中における、ある物質の生物に対する安全性。
- **岩石**：固結した岩盤、その掘削物（岩砕または岩ずり）および、土壌から分離された礫をいう。
- **含有量**：直接摂取のリスクを把握するための試験（**3.3.7** 参照）や土壌含有量試験によって得られる、抽出液（1 mol/L 塩酸溶液等）中の物質の量。供試した固相の単位重量当たりの溶液中の物質の質量で表す。
- **基準不適合土壌**：土壌汚染対策法において、土壌溶出量基準または土壌含有量基準のうち少なくとも一方を超過する土。
- **建設汚泥**：建設工事に係る掘削工事に伴って排出される泥状の掘削物のうち、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に基づく対応が求められるもの。自治体によってその判断基準が異なる。
- **公共建設工事**：公共工事として実施される建設工事。
- **サイト概念モデル**：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。
- **酸性化可能性**：土が酸性土である可能性。
- **酸性水**：水素イオン濃度指数（pH）が酸性の水。酸性土に起因する酸性水について、公共用水域に排水する際に一般排水基準（海域以外においては pH5.8）を下回る場合や、動植物への影響が懸念される場合には、生活環境への影響を検討し、必要に応じて対策を行う。
- **酸性土**：還元的な環境で形成された土の一部で、含まれる硫化鉱物が、掘削に伴って空気および水に触れ、長期にわたり酸性水を発生させる土。酸性水は掘削時に発生する場合も、掘削後時間が経過してから発生する場合もある。酸性土であることは、酸性化可能性試験、短期溶出試験の検液の pH（**3.3.7** 参照）や土研式雨水曝露試験などの実現象再現溶出試験（**3.3.8** 参照）により判定する。
- **自治体**：都道府県および市町村。
- **自然由来**：ある物質の存在が自然に由来すること。
- **自然由来重金属等含有土**：自然由来の重金属等を含有する土。
- **人為由来**：ある物質の存在が人為に由来すること。
- **実現象再現溶出試験**：自然由来重金属等含有土や酸性土の可能性がある土を盛土等に

利用する場合に行う試験（**3.3.8** 参照）。定められた方法はなく、土が実際に置かれる環境を想定して試験条件を設定する。土研式雨水曝露試験などが用いられる。

・**重金属等**：土壌汚染対策法における第二種特定有害物質のうち、シアンを除くもの。カドミウム（Cd）、六価クロム（Cr(VI)）、水銀（Hg）、セレン（Se）、鉛（Pb）、砒素（As）、ふっ素（F）およびほう素（B）をいう。

・**滲出水**：盛土等から表流水や地下水として滲出する水。

・**迅速判定試験**：現場で迅速に要管理土を判定する場合に行う試験（**3.3.9** 参照）。

・**水底土砂**：海洋または海洋に接続する公共用水域（河川、湖沼、ダム湖、ため池など）の水底から除去された土砂。

・**全含有量**：全含有量試験（**3.3.7** 参照）による、固体試料中の物質の濃度。供試した固相の単位重量当たりの物質の質量で表す。

・**対策工**：重金属等や酸性水が環境中に拡散することを抑制するための手立て。本マニュアルでは、効果確認モニタリングを含む。

・**第二溶出量基準**：基準不適合土壌への対策方法選定の基準となる溶出量で、土壌溶出量基準の 3 倍から 30 倍の値が定められている。

・**短期溶出試験**：試料調製方法を除き、土壌溶出量試験（環境省告示第 18 号、平成 15 年）に準拠して実施する溶出試験（**3.3.7** 参照）。試料は、**参考資料９**に従い、目開き 2 mm のふるいを全量通過するまで破砕したものを用いる。

・**地下水**：地下を流れる水。一般的には地下水面下の水。

・**地質区分**：地質を構成する岩種や成因、形成年代、形成後の風化や変質、その他の環境履歴が類似する一群をいう。地質区分は、重金属等の溶出特性、酸性化可能性などと対応するよう区分されることが望ましい。

・**地歴調査**：土地利用履歴、特定有害物質の使用履歴や廃棄・排出履歴など、土壌汚染のおそれを推定するために行う調査。

・**土**：地山の掘削物の総称。すなわち、固結した岩盤の掘削物および土壌を指し、泥状を呈するもの（泥土）を含む。土砂ともいう。

・**土壌**：非固結の堆積物。岩盤の強風化部で指圧により細片化するものを含む。

・**土壌含有量試験**：「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 19 号、平成 15 年）に基づく試験。

・**土壌溶出量試験**：「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 18 号、平成 15 年）に基づく試験。

・**バックグラウンド濃度**：施工の影響を受けない状態の、表流水質および地下水質の分析値。

・**発生土**：建設工事に伴い副次的に発生する土。

・**搬出時管理土**：受入地で置かれる環境において、設定した対応目標を満足する土。搬出時管理土を盛土等に利用するに当たり、再掘削、搬出等を行わない状態においては、

覆土等のみで環境安全性が確保できる。

・**搬出元**：発生土を掘削する場所。

・**発生源**：有害物質が拡散する源で、自然由来重金属等含有土の盛土等をいう。

・**発生源評価**：有害物質の発生源の評価。本マニュアルでは重金属等の溶出および酸性水の発生に関する評価をいう。

・**曝露経路**：発生源から人体に取り込まれるまでの、一連の物質移行経路。

・**曝露評価**：有害物質が人の体内に取り込まれる量を評価すること。

・**曝露地点またはリスク評価地点**：有害物質が人の体内に取り込まれるものとして評価する場所。

・**表流水**：地表を流れる水。盛土等の排水溝や河川などの水。

・**覆土等**：覆土、舗装やモルタル吹付けなどの表面被覆工をいう。自然由来重金属等含有土による盛土等の表層に施工することにより、通常の土と区別するとともに、土の直接摂取の防止や飛散防止をする。これに加えてのり面の安定、盛土等への水の浸入の抑制や内部環境の安定化の効果を期待する。

・**保全対象**：飲用井戸水、用地境界の地下水、公共用水域の表流水など、環境保全の目標とする対象。

・**自ら利用**：土を発生させる事業者自らが事業地内で土を利用するなどのこと。

・**モニタリング**：水質その他の監視のこと。対策工が適正に施工されていることを確認することを目的とした「施工確認モニタリング」と、対策工の効果やリスク評価結果の確認を目的とした「効果確認モニタリング」に細分される。

・**盛土等**：主として構造物としての盛土や埋土、裏込め材など。本マニュアルでは、便宜上、必ずしも構造物としての利用を想定せずに事業者の管理下に置くものも含むこととする。ただし、仮置きによる盛立ては除く。

・**要管理土**：土壌汚染対策法などの法令等の対象外の、管理が必要な土。「要管理土の判定の目安」（**2.6** 参照）に該当する土を原則として要管理土と見なす。搬出時管理土と要対策土に細分される。

・**溶出量**：短期溶出試験（**3.3.7** 参照）や土壌溶出量試験によって得られる、水溶液中の物質の濃度。溶媒の単位体積当たりの溶液中の物質の質量で表す。

・**要対策土**：要管理土のうち、搬出時管理土に該当しない土。要対策土を盛土等に利用するに当たり、対策工を施すことにより、環境安全性が確保できる。盛土等に利用しない場合は、受入施設等への搬出が必要となる。

・**リスク評価**：有害物質による人の健康への影響の有無を、発生源の大きさ（濃度）、曝露経路の有無、気象、水文、地質（地盤）構造や物質の移行特性などに基づいて定性的または定量的に評価すること。

・**リスクレベル区分**：要管理土を盛土等に利用する際、対策工の必要性の判断や対策工の選定のために、地下水経由のリスク評価結果に基づいて行う区分。

第２章　自然由来重金属等含有土および酸性土への対応の基本事項

2.1 対応の基本的考え方

要管理土の発生が見込まれる場合には、受入先およびその周辺の状況に応じて、その掘削の回避、掘削土量の低減および有効利用などの対応の検討を行う。対応の選定に当たっては、事業の工期、施工条件、事業費などの制約条件のほか、維持管理に関する事項、関係者の意向などを含めて総合的に勘案する。

なお、事業の実施に当たっては、最新の技術的知見の収集に努めるとともに、施工中、施工後に不測の事態が生じる場合も想定して、対応を検討する。

(1) 公共建設工事で管理や対策が必要な自然由来重金属等含有土や酸性土

発生土には、従来より広く有効利用の対象とされている通常の発生土のほか、掘削場所によって法令等の対象となる土や、各種試験の結果、基準を満足しない土が存在する。公共建設工事におけるこれらの対応方法に着目した分類を**図-2.1.1** に示す。

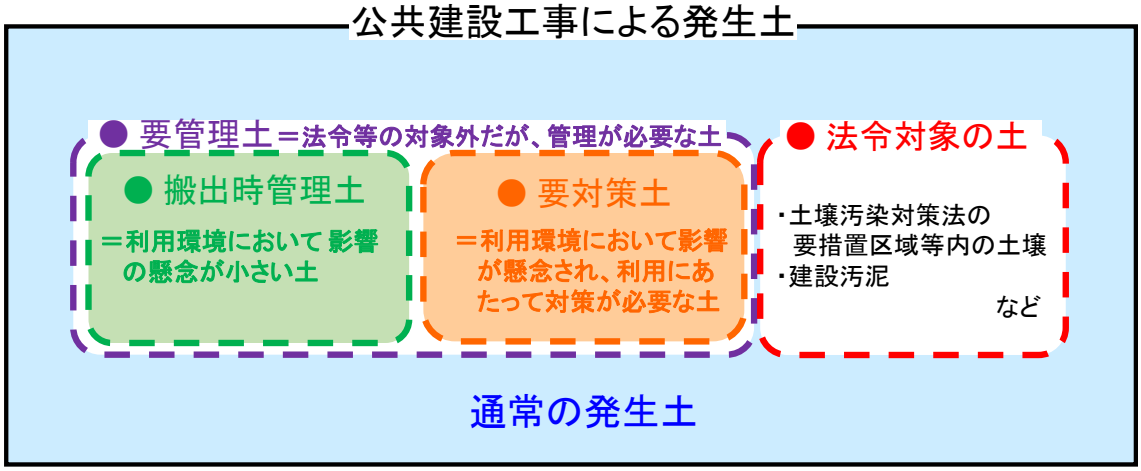


図-2.1.1　公共建設工事による発生土の分類

本マニュアルでは、重金属等の溶出、酸性水の発生、および重金属等の含有量の３つについて「要管理土の判定の目安」（**2.6**）を設け、それらの目安のいずれかあるいは複数について満足しない土（**図-2.1.1** の紫色破線内）を原則として「要管理土」と見なす。一方、「要管理土の判定の目安」を満足する土は、通常の発生土として受入先に引き渡す。その際、発生土の評価方法については、受入先と協議することが望ましい。要管理土は、土壌汚染対策法の調査方法を準用した場合に基準不適合土になる可能性が高いことから、通常の発生土として取り扱うことができず、受入先における管理などが必要な土である。

しかしながら実際の土からの重金属等の溶出現象は、土の置かれる環境に大きく依存することから[1),2)]、要管理土が必ずしも環境への影響をもたらす土とは言えない。そこで本マ

ニュアルでは、「要管理土」を、以下のように「搬出時管理土」（**図-2.1.1** の緑色塗色部）と「要対策土」（図のオレンジ色塗色部）の２つに細区分する。

「要管理土」の細区分に当たり、盛土等として土が置かれる環境を模擬して行う「実現象再現溶出試験」(**3.3.8**）の結果や、盛土等の周辺の水利用状況などを踏まえ、土が置かれる実際の環境および施工場所において重金属等や酸性水による影響が懸念されるかどうかを評価する。そして、要管理土ではあるが影響の懸念が小さい土を「搬出時管理土」、搬出時管理土でない要管理土を「要対策土」と定義する。搬出時管理土と要対策土の区分は、盛土等の方法や施工場所によって変わる。搬出時管理土は、例えば短期溶出試験結果が土壌溶出量基準値を上回るが、全含有量が著しく高くなく、さらに実現象再現溶出試験に基づいて長期的な酸性化の可能性がなく、かつ重金属等の溶出濃度が低いと評価されたものが相当する。

搬出時管理土を、想定した方法と場所で盛土等に利用する場合には、地下水・表流水に関する対策が必要なく、モニタリングも不要で、覆土、舗装、吹付けなど（以下、「覆土等」という。）によって通常の発生土と区別する。そして盛土等の維持管理の中で再掘削、搬出が行われないようにする。

一方、要対策土を盛土等に利用する場合には、地下水・表流水に関する対策やモニタリングを実施する必要がある。また、搬出時管理土と同様に、覆土等によって通常の発生土と区別する。そして盛土等の維持管理の中で再掘削、搬出が行われないようにする。万一、災害などの事由により再掘削・搬出が必要となった場合は、改めて再掘削する土の発生源評価を行う必要がある。発生源評価を行わない場合は、盛土等の建設時の評価に基づき、要管理土として取り扱うものとする。

さらに、将来において、搬出時管理土や要対策土による盛土等を掘削する場合は、その時点での発生土の性状に基づいて受入先を検討し、適切に対応する必要がある。

本マニュアルによる対応の流れは**(5)**および**図-2.1.3** を、発生土の区分と盛土等に利用するに当たっての配慮については**(6)**および**表-2.1.2** をそれぞれ参照されたい。

(2) 要管理土の掘削の回避、減量、掘削物の利用等の原則

要管理土を取り扱う際には、現場の諸条件を勘案しつつ、目標を定めて対応に向けた検討を行う。その際、環境安全性と経済性の両面を考慮した、過不足のない対応をすることが求められる。

要管理土が発生すると予想される公共建設工事で、対応が必要な発生土の量が膨大になると見込まれる場合には、発生土は建設材料として有用な資源であることなどを踏まえ、次の視点での検討が必要である。

①要管理土の掘削の回避

要管理土を発生しうる地質や地域の存在が調査により判明している場合は、事業区域や路線・線形などの見直しも含めて当該地質や地域の掘削を避けることを検討する。

②要管理土の掘削量の減量

要管理土を発生しうる地質や地域の存在が調査によって判明している場合は、工法や施工法の見直しも含めて、当該工事の掘削量を減らすことを検討する。

③要管理土の適切な現場内利用等と管理

要管理土を発生しうる地質や地域の存在が調査によって判明している場合は、現場外への搬出を避けることを検討するとともに、切り盛りバランスなどを考慮し、要管理土をリスク管理しながら適切に現場内で利用することなどを検討する。

④要管理土の適切な搬出、現場外管理

都市部のトンネル工事や、急峻な地形を持つ地域でのトンネル工事など、掘削した岩石・土壌を現場内において利用するなどが困難な場合は、a) 同一事業者のほかの事業に利用、b) ほかの公共事業者の建設工事に利用、c) 要管理土を適切に保管できる場所への運搬・管理、および d) 適切な処理施設への搬出などの方法を検討する。

要管理土への対応は、事業費に大きな影響を与える場合もあることから、事業地を選定する段階から要管理土が発生する可能性を意識する必要がある。また的確かつ効率的な対応のためには、事業の早い段階で、要管理土を発生しうる地質の適切な評価（発生土量、対象物質の濃度等、およびその分布）および受入先の状況評価（水利用、環境、および将来の管理の見通しなど）を行い、要管理土となる可能性がある地質を絞り込むとともに、受入先のリスク状況に応じた対応を行う必要がある。施工時の土の分別は、事前の地質調査と各種試験結果に基づいて実施する。その際、地質区分ごとに対応の要否を判断できる場合は地質の目視判定などによって行い、同一地質区分における対応の要否判定の結果がばらつく場合においては、一定ロットごとに行う施工時の試験によって行う。

なお、事業地の特性、事業規模、スケジュールその他の状況により、本マニュアルの全ての手順を適用することが合理的でない場合がある。本マニュアルで示す方法によらない対応については、**参考資料１**を参照する。

(3) 検討を開始する事業段階と選択可能な対応方法の例

一般的な発生土の環境安全性に関する対応の特徴や留意点を整理したものが**表-2.1.1** である。また、**図-2.1.2** に示すように事業段階に応じて検討可能な対応方法が異なる場合が多い。

例えば、事業を計画する際に、その早い段階から要管理土が発生する可能性がある地質の分布を把握できれば、事業区域や路線・線形などを見直したり問題となる地質の掘削量を減らしたり、適切な受入先を選定するなどのための時間的余裕が生まれる。対応開始の段階が遅くなると対応方法の選択肢が少なくなり、事業コストが大幅に増大する場合があることから、事業計画の初期の段階から検討することが望ましい。

一方で、事業の早期は調査も不足しがちで詳細な情報も少なく、具体的な対策を検討することが難しい場合も多いことから、事業の各段階での対応が重要となるが、その方針の決定に当たっては、最終的な事業の効率性の観点から考える地質・地盤リスクマネジメントの考え[4)]を参考にするとよい。本マニュアルの考え方に基づいて合理的な対応を行った

表-2.1.1　発生土の環境安全性に関する対応の特徴と留意点 [3] を修正

発生土の環境安全性に関する対応c	対応の特徴と留意点
サイト変更によるリスクの回避	・トータルコストが大幅に安くなる可能性 ・事業の早い段階での検討が必要
設計変更による対応が必要な土量の減量	・トータルコストが安くなる可能性 ・事業の早い段階での検討が必要
公共工事での利用（利用環境における環境安全性評価に基づく対応内容の軽減）	・必要十分な対策（場合によっては無対策）が可能 ・公共事業用地として管理するなど、長期にわたり土地利用形態の変更が起こらないことが必要 ・利用環境における環境安全性評価には、時間と専門的な知見が必要
民有地への搬出	・利用環境における環境安全性評価に加え、土壌汚染対策法に準じた評価*が必要
水面埋立地への搬出	・海洋汚染防止法が適用されるために基準値が高く、搬出後の管理が不要 ・受入可能事業が少ない
管理型廃棄物処分場や浄化等処理施設などへの搬出	・搬出後の管理が不要 ・費用が高額

* 短期溶出試験および直接摂取のリスクを把握するための試験による評価。

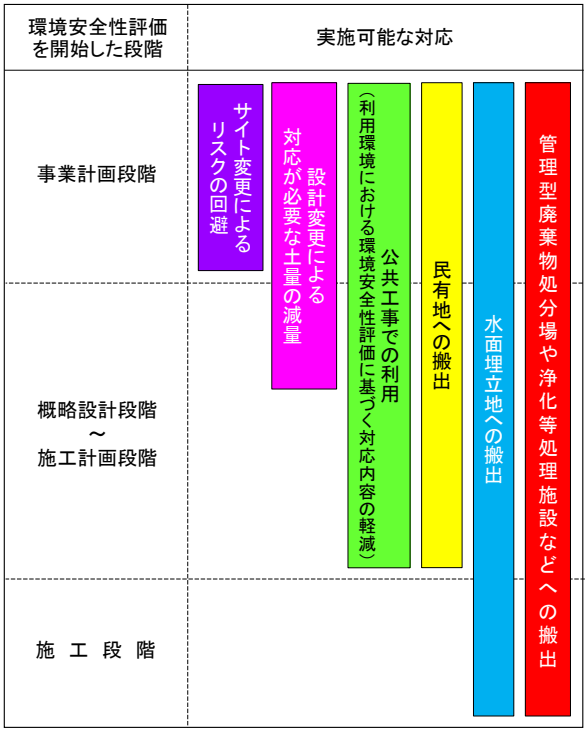


図-2.1.2　建設発生土の環境安全性評価の開始のタイミングと実施可能な対応例 [3] を修正

例を、**参考資料３**に示す。

また、要管理土への対応のための調査は、通常の建設工事のための地質調査や水文調査などと重複した範囲で実施することになるため、通常の建設工事のための調査に追加して、一体として実施することが効率的である。**参考資料４**に、トンネル工事および切土工事における一般的な調査と要管理土の対応のための調査との対応関係を示す。

(4) 専門家による評価の必要性と不測の事態への対応

発生土の環境安全性評価の検討事例は 2000 年代に入ってから急増しており、事業実施当時に十分認識されていなかった現象により、現場対応が必要となった場合もある。例えば、黄鉄鉱の酸化に伴う酸性水の発生によって重金属等の溶出や生活環境への影響が引き起こされること [5]について、異常発生当時は現場に十分周知されていなかった。またセレンの短期溶出試験結果が土壌溶出量基準値程度であった岩石を埋土に利用したところ、大規模な地下水汚染が生じたが、当時はそのような技術的知見がなかった。これらの事象は、自然由来重金属等含有土への対応におけるモニタリングの重要性を示している。

以上のことから、事業の実施に当たっては最新の技術的知見の収集に努め、慎重に検討を行うとともに、発生源評価、リスク評価や対応方法の決定に際しては、必要に応じて専門家の助言を仰ぐことが望ましい。また、施工中および施工後に不測の事態が生じる場合も想定して、モニタリングの実施やその後の対応をあらかじめ検討しておくことが望ましい。

さらに、不測の事態が生じた場合に、原因調査や対策を実施する上で発生土の移動履歴が追跡可能である（トレーサビリティーがある）ことが重要となるほか、地域住民に対する説

明責任（アカウンタビリティー）を果たす必要があることに十分留意し、事業を進める必要がある。

(5) 本マニュアルに基づく対応の概要

本マニュアルに基づく対応について以下に概説する。またその流れを**図-2.1.3** に示す。

1) 法令等の適用に関する確認

搬出元の掘削に当たり、法令等の適用対象になるかを確認し、法令等の適用がある場合はそれらに従って対応する（**2.3**）。

2) 要管理土となる地質の調査と岩石・土壌に含まれる重金属等の起源の確認

事業予定地周辺の地質調査を行い、要管理土となり得る地質の分布、土量および対象物質に関する情報を把握する（**2.4**）。また土に含まれる重金属等の起源について、自然由来であることを確認する（**2.5**）。もし重金属等の起源が人為由来である場合は、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版）」を参照して対応する。

3) 発生土が要管理土かどうかの概略評価

発生土が要管理土になるかどうか、前述のように土からの重金属等の溶出、酸性水の発生、および重金属等の含有量の 3 つに関する「要管理土の判定の目安」に基づき地質区分ごとに評価する（**2.6**）。そして要管理土にならない地質区分に関しては、その発生土は通常の発生土として扱う。また要管理土になる可能性がある地質区分に関しては、下記に示すように、要管理土として対応する。

ここでいう地質区分とは、地質の岩種や成因、形成後の時間、風化や変質、その他の環境履歴が類似する一群を指す。地質区分は、重金属等の溶出特性、酸性化可能性などと対応するよう区分されることが望ましいが、当初の調査において地質区分と重金属等の溶出特性、酸性化可能性などとの対応が不明瞭な場合は、必要に応じて区分を見直す。

4) 要管理土としての対応

盛土等に利用する可能性がない場合は、受入条件を満たす受入先に搬出する（**2.7**）。盛土等に利用する可能性がある場合は、発生土の性状把握、発生源評価を行うほか、受入候補地の選定・調査、サイト概念モデルの構築などの一連の手順を踏んで行う地下水経由のリスク評価を必要に応じて実施し、**(6)** で後述するように、要管理土を搬出時管理土と 6 つの要対策土に細分する。そして、それぞれに適した対応方法を検討する。受入候補地での対応が可能な場合は施工時に土の分別を行って、要管理土でないと判定されたものについては通常の発生土として扱う。搬出時管理土または要対策土と判定されたものについては、盛土等に利用して土を管理するか、受入条件を満たす受入先に搬出する。その際、要対策土については対策工も併せて施工して、施工確認のためのモニタリングや対策工の維持を行う（**2.7**）。

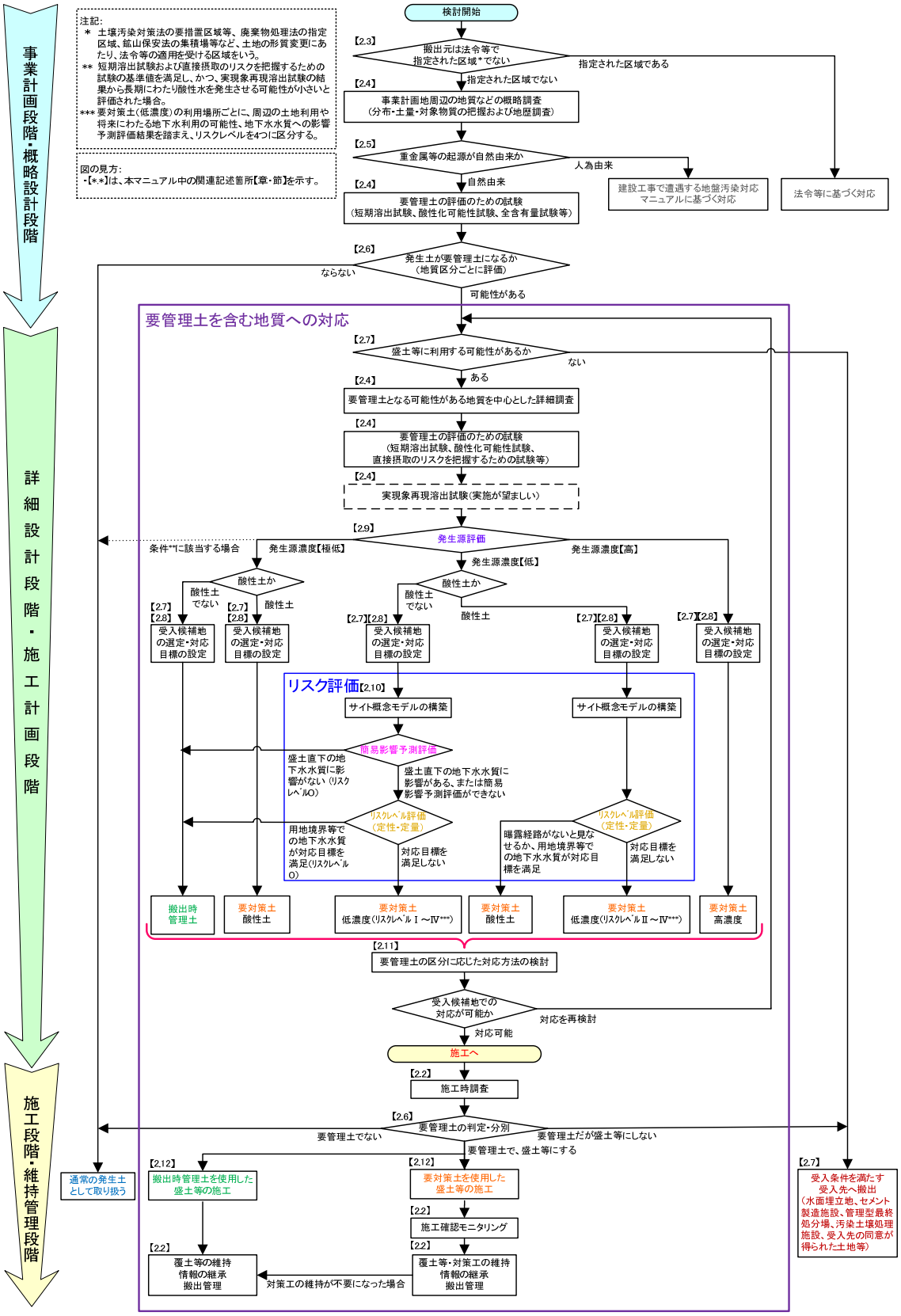


図-2.1.3　本マニュアルに基づく対応の流れ

表-2.1.2　本マニュアルにおける発生土の区分と、それらの特徴および盛土等に利用する場合の配慮

土の区分			発生源濃度区分	土の受入地のリスクレベル区分	土の特徴	土の受入地の、地下水経由のリスクに関する特徴	自然由来重金属等含有土・酸性土としての配慮			
							盛土等にする場合の配慮	地下水・表流水リスク対策	直接摂取リスク対策	管理上の配慮
発生土	通常の発生土		－	－	・重金属等の溶出量、含有量が小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・配慮不要	－	－	・配慮不要
発生土	要管理土	搬出時管理土	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響は小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・通常の発生土と区別	－	・通常の発生土との区別のための方法（覆土、舗装、吹付など）が兼ねる	・覆土等の維持、情報の継承 ・利用方法を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
			低	リスクレベル0		リスク評価に基づき、評価地点の地下水水質への影響が小さい		・必要に応じて効果確認モニタリング		
		要対策土（酸性土）	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響の可能性は小さいが、酸性水を発生させる可能性がある土	－	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重のシートやアスファルト舗装などの上部遮水工、転圧工などによる浸透抑制対策工や中和工などのいずれか 2）施工確認モニタリング		・覆土等の維持、情報の継承 ・必要に応じて対策工の維持管理 ・盛土等の形質を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
		要対策土（低濃度）	低	リスクレベルⅠ	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を満足し、かつ長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍以下、かつ全含有量が著しく高くない土で、以下のいずれかに該当するもの ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性がある土 ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土**	曝露経路がないと見なせる	・通常の発生土と区別 ・その上で、転圧や舗装を行うなど浸透抑制に配慮することが望ましい	・施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅡ		対策を実施しない場合においても、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性が少ない	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重の遮水工封じ込め、不溶化工、吸着層工など 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅢ		対策を実施しない場合に、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性がある	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど）、またはその他の対策工に加えて効果確認モニタリング 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅣ		用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する	・要対策土を極力盛土等にしない ・やむを得ず盛土等にする場合は、通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		
		要対策土（高濃度）	高	－	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を超えるか、長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍を超える、あるいは鉱石など、全含有量が著しく高い土で、以下のいずれかに該当するもの ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性がある土 ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土	－	・用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する場所で盛土等にしてはならない ・その上で、通常の発生土と区別し、対策工を施工	・必要に応じて不溶化等を実施し、第二溶出量基準を満足させた上で、以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		

＊　地下水・表流水経由のリスクへの対策工の信頼性は、対策工の設計、土の性状との関係、資材の長期耐久性、機能の多重性、地盤の変形などに対する自己修復性、施工、対策工の機能確認に関するものが考えられる。詳しくは参考資料17を参照されたい。

＊＊　酸性水を発生させる可能性がある土は、リスクレベルⅠには分類されずリスクレベルⅡ～Ⅳのいずれかに分類される。

対策工には、覆土工などによる要管理土の拡散防止と直接摂取経路の遮断、遮水工などの物理的方法による滲出水の発生抑制や地下浸透抑制、不溶化工・吸着層工・中和工・水処理工などの主として化学的方法による要管理土からの滲出水の無害化、モニタリングがあり、これらの中から現場にあったものを組み合わせて選択する（**2.11**）。

なお、要管理土の仮置き、運搬に当たっては、有害物質が拡散しないよう、必要な措置を講じる（**4.4**、**4.5**）。

(6) 発生土の細分方法、それらの土の特徴および盛土等に利用する場合の配慮

本マニュアルにおける発生土の細分方法を、**図-2.1.3** の手順にしたがって説明する。また細分された土の特徴および盛土等に利用する場合の配慮について、**表-2.1.2** に整理した。

発生土は**(1)**で述べたように、通常の発生土、要管理土に大別される。要管理土は、地質区分ごとの発生土の性状把握の結果に基づき、重金属等の溶出に関する発生源濃度を【高】、【低】、【極低】のいずれかに区分する（**2.9**）。要管理土の発生源濃度区分の概要と評価方法は**表-2.9.1** に整理した。

発生源濃度区分【高】は、重金属等の高濃度の溶出による人への健康影響が生じる懸念がある要管理土であり、長期的な重金属等の溶出濃度が地下水の水質汚濁に係る環境基準値（以下、「地下水環境基準値」という。）の 10 倍を超えると想定されるものが区分される。

発生源濃度区分【低】は、重金属等の溶出による人への健康影響が生じる可能性が不明であり、影響の検討が必要な要管理土で、【高】に該当せず、長期的な溶出濃度が地下水環境基準値を超える（基準値の 1～10 倍の濃度を想定）ものが区分される。

発生源濃度区分【極低】は、重金属等の溶出による人への健康影響が生じる可能性が小さい要管理土であり、【高】、【低】のいずれにも該当しないものが区分される。

また、重金属等による周辺の地下水水質への影響が懸念されると評価された要対策土を盛土等に利用するに当たっては、重金属等に関する地下水経由のリスクに応じてリスクレベル０～Ⅳのいずれかに区分（**2.10**）し、そのリスクレベルに応じた対策工の選定を行う（**2.11**）。**図-2.1.4** は、発生源の濃度、要管理土を盛土等に利用する場所と人家などとの位置関係によって要管理土がどのように区分されるかを概念的に示したものである。なお、厳密には発生源濃度および要管理土を盛土等に利用する場所と人家などとの位置関係に加え、要管理土を含む盛土等の場所周辺における地盤の物質移行特性が、搬出時管理土と要対策土（低濃度）のいずれかになるかどうかや、リスクレベルⅡとⅢのいずれになるかの評価に関わる。

発生源濃度区分【高】は、短期溶出試験結果が第二溶出量基準値を超えるか、実現象再現溶出試験に基づき長期的な溶出濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超えると推定される土が該当する。また、鉱石などの全含有量が著しく高い土や、酸性化可能性があるものの酸性化した際の溶出濃度の評価を行っていないために、酸性化して高濃度の重金属等が溶出する可能性が否定できない土もこれに含まれる。これらは要管理土の一種である要対策土（高濃度）に区分する（**2.9**）。要対策土（高濃度）は、人家や飲用井戸の至近距離では盛土等に

せず、対策工の選定においては、二重の遮水工封じ込めなどの信頼性の高い工法を採用するなどの配慮が必要である。詳しくは、**2.11 解説(2)**を参照する。

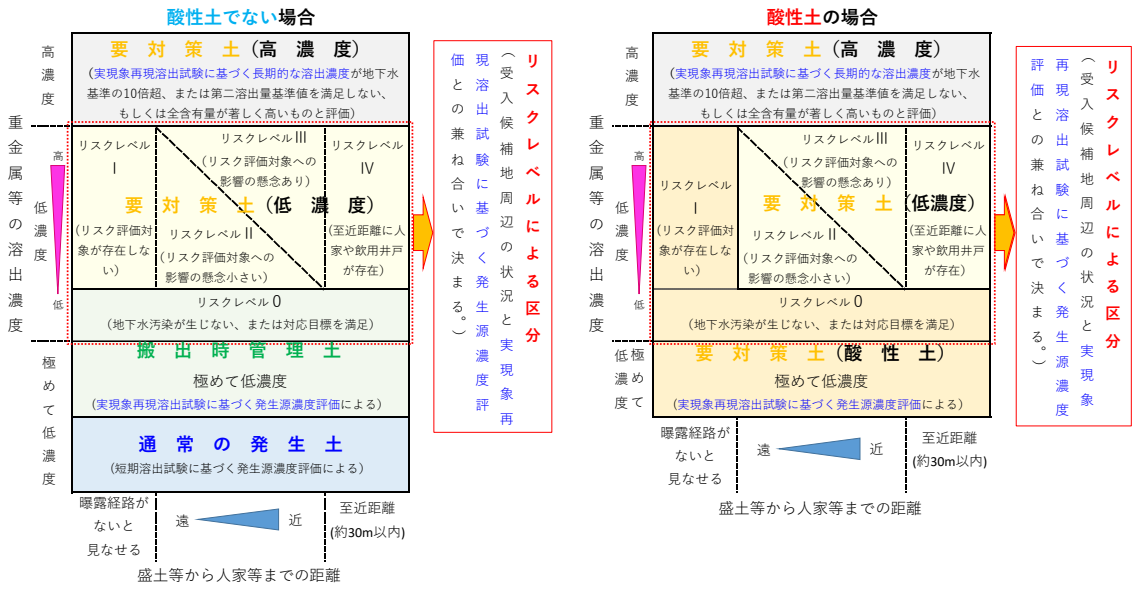


図-2.1.4　要管理土の区分の概念図

【参考文献】

1) 田本修一ほか：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験，（公社）地盤工学会北海道支部第 47 回技術報告会技術報告集，第 47 号，pp.247-250，2007.

2) 土木研究所寒地土木研究所，北海道大学：自然由来の重金属による汚染岩石の地盤汚染対策工に関する研究，土木研究所共同研究報告書，第 420 号，22 p.，2011.

3) 品川俊介：自然由来の重金属などを含む発生土の有効利用. 土木学会誌, Vol.101, No,7, pp.30-31，2016.

4) 国土交通省大臣官房技術調査課, 国立研究開発法人土木研究所, 土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における 地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン －関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために－. 69p., 2020, 土木研究所ホームページ， https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saisentan/tishitsu-jiban/iinkai-guide2020.html

5) 国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所：新滝ヶ洞溜池の水質異常に係る情報. 2003-2019，国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所ホームページ，https://www.cbr.mlit.go.jp/tajimi/suishitsu/

2.2 対応の検討の進め方

適切な事業段階（事業計画、概略設計、詳細設計・施工計画、施工、維持管理の各段階）で必要な調査を実施し、対策の必要性、対策方法、構造物の設計・施工や維持管理に至る一連の対応検討を効率的に実施する。

事業段階ごとの対応の流れを**図-2.2.1**に示す。また、以下にその概要を述べる。

(1) 事業計画段階

事業を計画する際に行われる通常の調査に併せて、法令等の適用の可能性および要管理土に関する調査を実施することが効率的である。搬出元の土地に関係する法令として土壌汚染対策法、廃棄物の処理及び清掃に関する法律、鉱山保安法などがある。法令等の適用がある場所での施工を行う場合は、自治体の環境部局や鉱業権者との調整が必要である。また要管理土に関する調査としては、まず当該地域周辺の自然由来の重金属等の全含有量や溶出に関する特徴を文献などで把握する。鉱山、温泉の周辺の地質では熱水変質などに伴い、重金属等が溶出しやすい、あるいは酸性水を発生しやすいことがあるので、それらの分布も参考になる。

事業計画段階から要管理土が発生する可能性がある地質の分布などの検討結果を戦略的環境アセスメント（SEA）などに反映することで、より合理的な事業計画の策定が可能となる。また、問題となる地質の掘削量を減らしたり、適切な受入先を選定するための時間的余裕が生まれるなど、実施可能な措置の幅が広がる（**図-2.1.2**、**表-2.1.1**）。一方、対応検討が遅くなると対応方法の選択肢が少なくなり、事業コストが大幅に増大する場合があることから、事業計画の初期の段階から検討することが望ましい。

(2) 概略設計段階

事業計画の概略が固まった後は、要管理土が発生する可能性がある地質の概況を把握し、対応方針立案の基礎となる情報を収集する。資料等調査、地質調査、試料採取、各種の溶出試験を実施し、対応が必要な地質と重金属等の種類、およびそれらの分布の概略を把握する。

試験の結果から、工事の実施に伴い要管理土が発生する懸念がある場合には、要管理土量の概略推定を行い、今後の対応方針を立案する。また、要管理土の受入候補地を検討する。さらに、受入候補地が公有水面である場合には海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律の適用を受けるほか、受入候補地の自治体でいわゆる残土条例などが制定されている場合にはその適用を受ける可能性があるため、自治体の環境部局と調整が必要である。

(3) 詳細設計段階・施工計画段階

施工場所や工法がより明確になった段階では、受入候補地のリスクの評価、対策工の設計、モニタリング計画の立案など、対応方法の決定のために必要となる情報を収集する。

対応が必要な地質に重点を置いた詳細な地質調査や試験などを実施し、その結果を建設工事や対策の設計・施工計画に反映する。そして、現場周辺の水文調査を実施し、施工前の状況を把握するとともに、現場条件を踏まえて施工時の要管理土の判定方法の検討や、要管

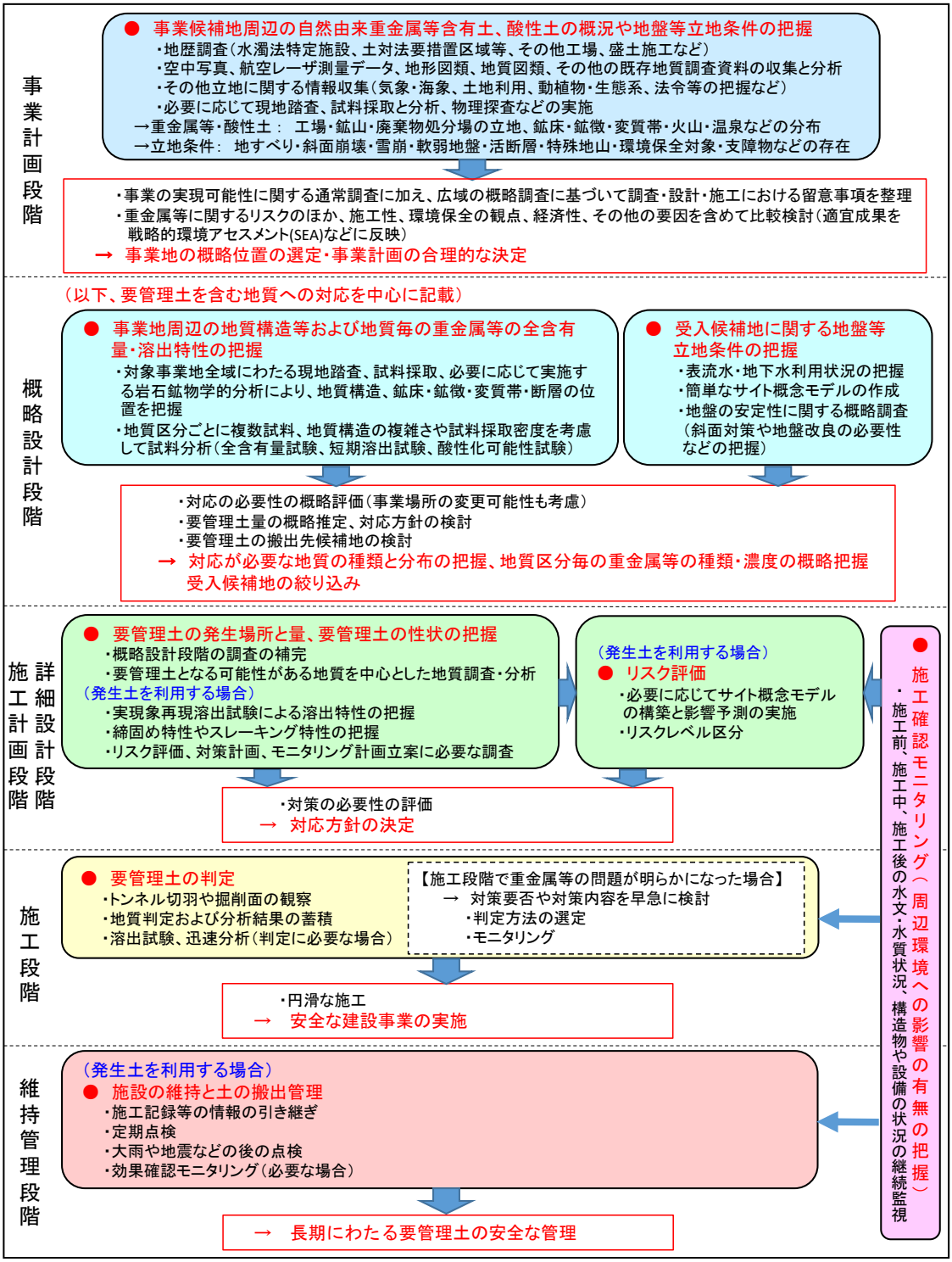


図-2.2.1 事業段階ごとの対応の流れ

理土の受入候補地におけるリスク評価の検討を実施する。また、現場の地質や施工条件などを勘案し、必要に応じて施工時に要管理土の判定に用いる迅速判定試験（**3.3.9(4)**）の実施を検討する。

調査結果などに基づき、要管理土の発生が見込まれる場合は、施工時の仮置きや運搬時の対応（**4.4**）も含めて必要に応じて現地状況に応じたリスクを回避ないしは低減する対策を選択、設計するとともに、モニタリング計画を立案し、施工による周辺環境への影響の確認などを目的とした施工確認モニタリングを開始する（**4.5**）。

(4) 施工段階・維持管理段階

施工段階では、円滑で安全な施工のために、必要に応じて地質調査、試料採取、迅速判定試験を併用して要管理土を分別する。ただし、分別を行う者はあらかじめ定める合理的な分別基準を理解し、分別作業を実行できる者とする。立案した計画に基づき対策工事を実施する。また、施工計画段階で開始した施工確認モニタリングや必要に応じて行う効果確認モニタリング（**4.5**）を維持管理段階まで継続実施する。

発生土を盛土等に利用する場合は、長期にわたる要管理土の安全な管理のために、維持管理段階において、調査報告書類、設計図類、発生土や水質などに関する各種試験結果、トレーサビリティー管理記録、施工記録などの情報を確実に管理主体に引き継ぐとともに、対策工を施した場合には、その機能が維持されていることを定期的に点検する。さらに大雨や地震などの後においても点検を実施し、機能が維持されていることを確認する。詳しくは**4.6**を参照する。

(5) 事業の実施に当たっての配慮

公共事業の実施においては、地域に与える様々な影響に配慮しながら進めていくことが社会的に要求される。特に要管理土の影響については地域住民への情報提供などに配慮する必要がある。これについては「事業者が行う土壌汚染リスクコミュニケーションのためのガイドライン」[1)]などを参照するとともに、事業地周辺の他事業における経験なども踏まえ、対応を行う。

【参考文献】

1) 日本環境協会 : 事業者が行う土壌汚染リスクコミュニケーションのためのガイドライン. 188p.，2017，日本環境協会ホームページ，
https://www.jeas.or.jp/dojo/business/promote/booklet/files/05/all.pdf

2.3 法的枠組みへの対応

自然由来重金属等含有土および酸性土への対応に当たっては、法令等を遵守し、自治体の環境部局と十分に協議した上で、これらとの整合を図る必要がある。

自然由来重金属等含有土への対応については、それが存在する場所、産状（掘削前後の物質の形状など）、発見の経緯、搬出場所などにより、その適用法令等が異なる。そのため対応に当たっては、「環境基本法」、「土壌汚染対策法」、「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」、「水質汚濁防止法」などの法令や、関連する条例などの規定を把握し、これらを遵守する必要がある。以下に、令和 4 年 4 月 1 日現在の主な法令等の概要を示す。主要な法令で定める水質、地下水質、土壌、底質の基準値については、**参考資料５**にとりまとめた。

なお、法例等の適用に当たっては最新の内容を確認する必要がある。

1) 環境基本法（平成 5 年法律第 91 号）

土壌・地下水汚染に関する法体系は、現在およ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した「環境基本法」を根幹としている。その中では、人の活動により環境に加えられる影響であって、環境の保全上の支障の原因となるおそれのあるものを「環境への負荷」、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の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染、騒音、振動、地盤の沈下および悪臭によって、人の健康または生活環境に係る被害が生ずることを「公害」と定義している。また、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「環境基準」と定義している。

土壌の汚染に関しては、揮発性有機化合物等、重金属等、農薬等の 29 項目について環境基準値が定められている。その中でも、自然由来の重金属等として存在の可能性があるカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ふっ素およびほう素の環境基準については、汚染土壌が地下水面から離れており、かつ、現状において当該地下水中のこれらの物質の濃度が地下水環境基準値を超えていない場合には、それぞれ検液 1 L につき 0.009 mg、0.03 mg、0.15 mg、0.03 mg、0.0015 mg、0.03 mg、2.4 mg および 3 mg と、通常の基準の 3 倍の値が基準値として示されている（令和 4 年 4 月 1 日現在）。なお、汚染がもっぱら自然的原因によることが明らかであると認められる場所等の土壌については環境基準を適用しないこととなっている（「土壌の汚染に係る環境基準について」（環境庁告示第 46 号、平成 3 年）参照）。

地下水の水質汚濁に関しては、揮発性有機化合物等、重金属等、農薬等の 28 項目について環境基準値が定められている。なお、汚染が専ら自然的原因によることが明らかである場合を除いて、環境基準の達成と維持が求められることに留意が必要である（「地下水の水質汚濁に係る環境基準について」（環境庁告示第 10 号、平成 9 年））。

2) 土壌汚染対策法（平成 14 年法律第 53 号）

土壌汚染対策法は、土壌汚染の状況の把握や土壌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、国民の健康を保護することを目的とした法律である。

同法による汚染の除去等の措置や汚染土壌の搬出規制は、同法の要措置区域等内の土壌に対して行われる。要措置区域等の指定は、原則として同法に基づく土壌汚染状況調査によって基準不適合土壌が確認された土地になされる。一方、自主調査によって土壌溶出量基準あるいは土壌含有量基準を超過する土壌が見つかっただけでは、要措置区域等に指定されない。

なお、同法は土壌を対象としており、岩盤（固結した岩石）についてはその適用を受けないが、自治体のいわゆる残土条例などの適用を受ける場合、および盛土等の施工後に、盛土等の材料が土壌として扱われ、土壌汚染対策法に基づく土壌汚染状況調査の対象になった場合には区域指定される可能性があることに留意する。

また、平成 31 年 4 月 1 日全面施行の改正土壌汚染対策法においては、自然由来汚染土壌の取扱いに大きな変更がなされた。本マニュアルの対象である自然由来重金属等含有土の取扱いの参考になる部分を中心とした解説を**参考資料６**に示す。

・土壌汚染状況調査と要措置区域等の指定

土壌汚染状況調査は、土壌汚染対策法第 3 条（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用地であった土地の調査）、第 4 条（土壌汚染のおそれがある土地の形質変更が行われる場合の調査）および第 5 条（土壌汚染による健康被害が生ずるおそれがある土地の調査）に基づくものがある。

特に建設工事の実施に当たっては、土地の形質の変更面積が 3,000 m^2（ただし特定有害物質使用特定施設を有する工場等は 900 m^2）以上の場合に、同法第 4 条第 1 項に基づき工事実施（形質変更の実施）の 30 日前までに都道府県知事等への届出が必要になる。そして、都道府県知事等が必要と認めた場合には、同法第 4 条第 3 項に基づき土壌汚染状況調査の命令を発出する。なお、同法第 4 条第 1 項の届出に併せて、同法第 4 条第 2 項の規定に基づき調査結果を提出することもできる。

土壌汚染状況調査については、自然に由来する汚染が地質的に同質な状態で広がっているという特性を踏まえ、汚染のおそれの由来に応じた調査方法が規定されている（土壌汚染対策法施行規則（以下、「規則」という。）第 3 条第 6 項）。具体的には自然由来汚染調査（規則第 10 条の 2）、水面埋立て土砂由来汚染調査（規則第 10 条の 3）、人為等由来汚染調査（規則第 3 条の 2～規則第 10 条）が定められている。

土壌汚染対策法における面積の算定に当たっては、平面に投影した面積で行うこととなっており、トンネルなどの面積の算出方法は、開口部を地上に投影した部分の面積の合計となる（**図-2.3.1**）。そのため、坑口部や竪坑部を除く大部分は、たとえ基準不適合土壌が存在したとしても、土壌汚染状況調査の対象にはならず、要措置区域等に指定されることもない。ただし、掘削・搬出した発生土については上記の岩盤と同様、自治体のいわゆる残土条例などの適用を受ける場合があるほか、盛土等の施工後に、土壌汚染対策法の対象になる可能性がある。

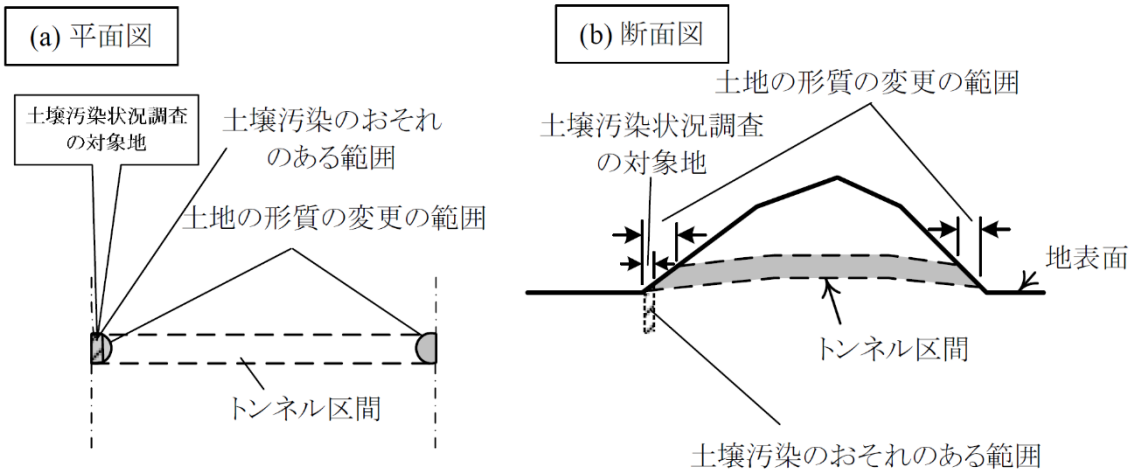


図-2.3.1　土壌汚染対策法第 4 条における土地の形質の変更範囲と調査対象地

（トンネル工事の場合の例）[1)]

また、同法の指定区域内で建設工事を行う場合は、土地の形質の変更に当たって同法による規定のほか、都道府県知事等の指示に従う必要がある。

土壌汚染対策法に基づく土壌汚染状況調査により基準不適合土壌の存在が確認された場合、あるいは土壌汚染対策法に準ずる自主的な調査により基準不適合土壌の存在が確認され、その結果に基づき同法第 14 条の自主申請を行った場合は、当該土地が要措置区域等に指定され、土壌汚染対策法の対象となる。

3) 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）

田畑などの農用地については、人の健康をそこなうおそれがある農畜産物が生産され、または農作物等の生育が阻害されることを防止し、もって国民の健康の保護および生活環境の保全に資することを目的とした「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が存在する。この中では、カドミウム、銅、砒素を特定有害物質に指定し、銅および砒素については土壌に含まれる量、カドミウムについては米に含まれる量を対象に基準が定められている。なお、これらの基準を超過する自然由来の重金属等を含む土を農用地の造成などに利用する場合は、表土(耕作土)に用いないよう適切に対応する必要がある。

4) 水質汚濁防止法（昭和 45 年法律第 138 号）

水質汚濁防止法は、工場や事業場からの排水について、公共用水域への排出や地下浸透を規制することによって公共用水域や地下水の水質の汚濁防止などを図る法律である。

自然由来重金属等含有土や酸性土への対応に当たっては同法の直接の規制を受けないが、盛土等からの排水の水質について、同法で定める一般排水基準を参考にすることが多い。

5) 海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（昭和 45 年法律第 136 号）

海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（以下、「海洋汚染防止法」という。）は、船舶、海洋施設や航空機から海洋や海底に油、有害液体物質等および廃棄物を排出することなどを規制することなどにより、海洋環境の保全等を図る法律である。

発生土を海域に埋め立てる場合は、同法の適用を受ける。同法の試験法および基準値は土壌汚染対策法のそれと異なることに留意する必要がある。

掘削した水底土砂等で水面埋立を行う場合は、海洋汚染防止法の「水底土砂に係る判定基準」の規定に基づき環境庁告示第 14 号（昭和 48 年）に定める試験を実施する。

なお、掘削した底質の受入施設等が土壌汚染対策法と同様の試験による評価を要求する場合があること、および底質を盛土した土地が将来、土壌汚染対策法の調査対象になる可能性があることに留意が必要である。

6) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）

廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下、「廃棄物処理法」という。）は、廃棄物の排出抑制および適正処理、並びに生活環境を清潔にすることにより、生活環境の保全および公衆衛生の向上を図ることを目的とした法律である。

建設工事においては、掘削時に残置物が発見される場合がある。このような場合は同法の適用を受けることがある。詳しくは「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版）」[2]および「建設工事で遭遇する廃棄物混じり土対応マニュアル」[3]を参照されたい。

また、シールド工法や地盤改良工法によって発生する泥状の掘削物等は同法の対象となる場合があるので、これらを実施する場合は事前に都道府県等の環境部局と調整することが一般的である。

廃棄物処理法における「指定区域」となった廃棄物最終処分場の跡地を掘削する場合においては、併せて「最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン」[4]を参照されたい。

7) その他の法令等

a) 鉱山保安法（昭和 24 年法律第 70 号）・金属鉱業等鉱害対策特別措置法（昭和 48 年法律第 26 号）

金属鉱山等の採掘の対象である鉱石には重金属等が濃集していることが多いため、鉱山の捨石、鉱さい、沈殿物などの鉱業廃棄物には重金属等が含まれることが多く、管理が必要な場合が多い。また、坑廃水は操業停止後も坑口等から流出する場合があり、廃水に含まれる重金属等による鉱害を防止するため、その処理を将来にわたり永続的に続ける必要がある[5]。

鉱山保安法は、鉱山労働者に対する危害や鉱害の防止などを目的とした法律である。また金属鉱業等鉱害対策特別措置法は、鉱山施設の使用終了後における、鉱害防止事業に関する諸制度を設けるなどによって、鉱害防止などを図る法律である。

これらの法律およびその関係法令により、鉱業権者等によって鉱山の鉱害防止対策を実施することになっているが、古い鉱山跡などで適切な管理がされていないこともある。また、採鉱の対象となるような地質が自然に露出していることがあり、それらを母材にした土壌は自然の状態で重金属等を多く含むことがあると考えられる。さらに、精錬所周辺では大気経由の土壌汚染が存在する場合がある[6]ことにも留意が必要である。

b) 宅地造成等規制法（昭和 36 年法律第 191 号）

宅地造成等規制法の一部を改正する法律が令和 4 年 5 月 27 日に公布され、宅地造成等規制法は令和 5 年 5 月 26 日より宅地造成及び特定盛土等規制法(以下、「盛土規制法」という。)に名称が変更される。盛土規制法は、宅地造成、特定盛土等又は土石の堆積に伴う崖崩れ又は土砂の流出による災害の防止のため必要な規制を行うことにより、国民の生命及び財産の保護を図り、もって公共の福祉に寄与することを目的とした法律である。

宅地造成工事規制区域及び特定盛土等規制区域内における宅地造成、特定盛土等又は土石の堆積に関する工事は、盛土規制法の施行に伴い整備する政令（公布：令和 4 年 12 月 23 日、施行：令和 5 年 5 月 26 日）で定める技術的基準に従い、必要な措置が講ぜられたものでなければならない。

c) 資源の有効な利用の促進に関する法律（平成 3 年法律第 48 号）

資源の有効な利用の促進に関する法律第 34 条第 1 項の規定に基づき、建設業に属する事業を行う者の指定副産物に係る再生資源の利用の促進に関する判断の基準となるべき事項を定める省令の一部を改正する省令（公布：令和 5 年 3 月 3 日、施行：令和 5 年 5 月 26 日）により、元請建設工事事業者等は、再生資源利用促進計画の作成に当たり、発注者等が行った土壌汚染対策法等の手続状況のほかに建設発生土の搬出先の盛土規制法の許可など適正を確認し、その結果を同計画とともに発注者へ提出・説明のうえ工事現場の公衆の見えやすい場所に掲示する必要がある。

d) 残土条例など

地方自治体が制定するいわゆる残土条例などによって、発生土の盛土等の施工が制限される場合がある。建設工事の実施に当たっては、掘削・仮置きを行う場所および発生土を盛土等に利用する場所における条例などを確認する必要がある。残土条例では、明記はされていなくとも、岩砕または岩ずりも対象にしている場合があることもあるので、個々に確認が必要である。残土条例などの制定状況については環境省水・大気環境局により調査され、その結果が「土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例に関する調査結果」として環境省ホームページ [7]に掲載されている。なお、環境省の調査結果以外にも関係する条例などが存在する可能性があることに留意する。

e) ダイオキシン類を含む発生土

ダイオキシン類を含む発生土に遭遇する場合においては、「建設工事で遭遇するダイオキシン類汚染土壌対策マニュアル（暫定版）」[8]を参照されたい。

f) 油汚染土

発生土に油汚染がある土地における対応については法令の適用はないものの、「油汚染対策ガイドライン」[9]が環境省より公表されているので参照されたい。

g) 温泉

温泉は地熱で温められた地下水で、このような状態の水は様々な成分を溶解させることができることから、温泉水にはしばしば高濃度の重金属等を含むことがある。また、

これらの水が地表付近で冷却される際に様々な鉱物を沈殿させることから、温泉周辺の土には自然の状態で重金属等が多く含まれる可能性があるので留意が必要である。

【参考文献】

1) 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）．2022，環境省ホームページ https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html
2) 独立行政法人土木研究所(編)：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(改訂版)．鹿島出版会，2012.
3) 土木研究センター（編）：建設工事で遭遇する廃棄物混じり土対応マニュアル．鹿島出版会，2009.
4) 廃棄物最終処分場跡地形質変更に係る基準検討委員会：最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン．2005，環境省ホームページ http://www.env.go.jp/recycle/misc/guide_wds/
5) 経済産業省：総論．鉱山保安法逐条解説，経済産業省休廃止鉱山ポータルサイト http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/mine/portal/hourei/hourei.html
6) 浅見輝男：[改訂増補]データで示すー日本土壌の有害金属汚染．アグネ技術センター，2010.
7) 環境省水・大気環境局：土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例に関する調査結果．環境省ホームページ https://www.env.go.jp/water/dojo/chosa.html
8) 独立行政法人土木研究所（編）：建設工事で遭遇するダイオキシン類汚染土壌対策マニュアル（暫定版）．鹿島出版会，2005.
9) 中央環境審議会土壌農薬部会土壌汚染技術基準等専門委員会：油汚染対策ガイドラインー鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方ー．2006，環境省ホームページ http://www.env.go.jp/water/dojo/oil/full.pdf

2.4 地質状況の把握と発生土の性状把握

事業の実施に当たっては、当該事業の発生土が人の健康や生活環境への影響の可能性があるかどうかを評価するため、できるだけ事業の早い段階で事業地周辺に出現する地質状況を把握するとともに、掘削予定の地質区分ごとに、発生土の性状を把握する。

事業の実施に当たっては、当該事業の発生土が人の健康や生活環境への影響の可能性があるかどうか、すなわち要管理土になる可能性があるかどうかを事前に知る必要がある。**2.1** で示したように、事業の早い段階で要管理土になる可能性がある地質の分布やその土量が把握できれば、対応の合理化や事業コストの縮減が可能となる。

ここで把握する発生土の性状とは、重金属等の溶出や酸性水発生に関する性質、分布や産状、地質的特徴および物理的な性質などをいう。地質の岩種、成因や形成後の時間、風化や変質、その他の環境履歴が類似する一群（ここでは地質区分という）ごとに、類似の物理・化学的性質、すなわち類似の発生土の性状を示すと考えることができる。そこで地質学的な調査に基づいて、対応が必要となる可能性がある発生土がどこからどのくらい発生するかをある程度効率的に把握できる。

(1) 出現する地質状況の把握

既存の文献・地質図類を参考に現地踏査を行い、事業地周辺に出現する地質（岩相、土質）と地質構造を把握する。事業段階が進むに応じて事業対象区域の詳細な現地踏査に加えて、ボーリング調査、物理探査などを実施し、出現する地質と地質構造をより詳しく把握する。調査結果は地質平面図および地質断面図として整理する。調査においては自然由来重金属等含有土や酸性土との関連が深い、風化、変質、鉱徴、断層、および堆積岩における泥分が多いかどうかなどに注目する。地質構造を把握することで、対象とする地質の出現位置が地質学的に推定できる。詳しくは **3.2** および **3.3.2** を参照する。

また、地質区分、および重金属等の溶出機構の推定などのため、代表的な試料について、重金属等や主成分の全含有量（全岩化学組成）、鉱物組成などの情報を可能な範囲で把握しておくことが望ましい。

(2) 地質区分ごとの発生土の性状把握

地質の種類、風化・変質の程度などと空間的な距離に基づく、比較的同質と考えられる地質区分ごとに複数の代表試料を採取・試験する。そして、掘削した発生土が人の健康や生活環境へ影響する可能性について評価するため、地質区分ごとの発生土の性状を把握する。

a) 試験を行う試料に関する基本情報

各種評価を行うに当たり、試料の基本的な情報について整理する。

具体的には、試験を行う試料の採取地点の地質図（平面図・断面図）上の位置、採取深度、ボーリングコアであればその柱状図、岩種、変質・風化の状況などを整理する。

b) 直接摂取リスクに係る重金属等濃度の把握

試験試料のうち、事業地に分布する地質を代表する試料については重金属等の全含

有量試験を、調査を補完する位置づけの試料については直接摂取のリスクを把握するための試験を実施する。全含有量試験の結果が土壌含有量基準値を超える試料については、引き続いて直接摂取のリスクを把握するための試験を実施する。

代表的な試料について、まず全含有量試験を実施してから、必要に応じて直接摂取のリスクを把握するための試験を実施する理由は以下による。

①全含有量は、試料の状態によって値が変化する各種の溶出試験の結果（土壌溶出量、土壌含有量など）より普遍的指標と考えられ、前述の**(1)**で実施する地質の特徴の把握に有効であることから、調査区域に分布する各地質を代表する試料については情報を取得しておくことが望ましい。

②直接摂取のリスクを把握する試験の結果は、原理的に全含有量試験結果より必ず小さな値になることから、全含有量試験の結果が土壌含有量基準を下回る場合は、岩石・土壌の直接摂取のリスクが小さいものと見なすことができ、直接摂取のリスクを把握するための試験を省略できる。なお、自然由来重金属等含有土は一般に重金属等の全含有量が土壌含有量基準値を下回ることが多い。

c) 地下水経由および表流水経由のリスクに係る重金属等濃度の把握および酸性水発生現象の把握

地下水経由および表流水経由のリスクに関する岩石・土壌からの重金属等の溶出現象や酸性水の発生現象は、発生土の性状のみならず、受入先で発生土が置かれる状況にも依存する。例えば、重金属等の溶出現象や酸性水発生現象は酸化還元電位に依存することが知られているが、盛土の内部は還元環境にある可能性がある[1), 2)]。

また、掘削により地盤中から掘り起こされた発生土は、時間とともにその性状が変化することがある。岩石・土壌中に含まれる黄鉄鉱の酸化に伴う酸性水の発生現象はその一例であるが、それに伴い重金属等の溶出が見られることがある。そして酸性水が発生すると、その影響は長期化する。したがって、酸性水の発生に伴って重金属等の溶出が起こると、重金属等の溶出も長期化する傾向がある。前述のように盛土等の中は還元的な環境となっている可能性があるが、盛土等を築造することによって発生土の酸化をどの程度抑制できるかについて、知見が不足している。

現状では、発生土が置かれる環境を想定した溶出濃度推定のための汎用的な試験方法は確立していない。そこで、実際の発生土が置かれる状況を想定して現場ごとに検討し、実現象再現溶出試験を実施して、発生土の溶出濃度やその経時変化に関する情報を得ることが望ましい。実現象再現溶出試験としては土研式雨水曝露試験などを実施することが多い。実現象再現溶出試験の詳細については**3.3.8**を参照されたい。

実現象再現溶出試験の実施には時間と費用がかかること、また、十分な事前調査に基づく詳細な検討が必要となることから、事業工程上、検討に時間をかけることができない場合や、調査を省略して発生土を事業地外で処理することが合理的な場合などでは、実現象再現溶出試験を実施しないこともある。

d) 物理的性状

発生土の溶出特性や盛土等の具体的な方法の検討の参考となる、締固め特性やスレーキング特性を把握する。

例えば、締固めがしやすい岩石・土壌の場合は、通常の施工によっても透水係数を低くでき、発生土と水や酸素との接触を抑制できる。すなわち、重金属等の溶出や酸性水の発生を抑制できる可能性がある。一方、スレーキングしやすい岩質の場合は、スレーキングにより長期的には発生土の比表面積が増大することで重金属等の溶出が促進される場合がある。

【参考文献】

1) 田本修一ほか：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験．地盤工学会北海道支部第47回技術報告会，pp.247-250，2007.

2) 品川俊介，阿南修司：自然由来重金属等含有岩石の大型カラム曝露試験．第49回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2033-2034，2014.

2.5 重金属等の起源の確認

土に含まれる重金属等の起源について、自然由来であることを確認しておく。

本マニュアルは自然由来の重金属等への対応についてその調査、評価および対策方法を示したものであることから、その適用に当たっては重金属等の起源が自然由来であることを確認する。

土に含まれる重金属等の起源の確認については、土地の使用履歴、地質と重金属等の分布との関連性、重金属等の存在形態、水文調査や水質分析結果などから総合的に判定する。重金属等の起源が人為由来である場合は本マニュアルによらず、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版）」[1)]を参照する。

土に含まれる重金属等の起源が自然由来であることを確認するためには、以下の点を考慮して調査をすることが有効である。ただし、これらの判断に当たっては、現場の状況を総合的にとらえる必要があることから、専門家の助言を求めることが望ましい。

●重金属等の起源が自然由来である可能性が高い場合

・有害物質使用特定施設などが立地していない、特定有害物質の漏洩記録がないなど、人為的汚染の原因となる土地利用が過去になされていない場合。

・土の全含有量ないしは溶出量について、高濃度を示す場所が土地の使用履歴とは関係せず、深部に向かって濃度の低下が顕著でない場合（ただし、鉱床・鉱脈、変質帯や温泉近傍では自然由来であっても深部に向かって濃度の低下が見られる場合もある）。

・特定の地質に特定の物質が偏在する場合。

・対象地域における地下水中の重金属等の濃度について、周辺の広域に分布する地下水中の濃度と大きな違いがない場合。

・重金属等の起源を確認するための調査（**参考資料７**）に基づき、重金属等の起源が自然由来であると考えられる場合。

●重金属等の起源が人為由来である可能性がある場合

・有害物質が天然に広く存在する鉱物形態として存在していない場合（例えば、鉛が方鉛鉱として存在する場合には自然起源であり、金属鉛の場合には人為由来である可能性が高い）。

・鉱床・鉱脈、変質帯や温泉近傍でないにもかかわらず、短期溶出試験（**3.3.7**）による溶出量が土壌溶出量基準の 10 倍を超過する場合（このような場合には、人為的汚染の可能性について慎重に検討する必要がある）。

重金属等の起源を確認するための調査については、**参考資料７**を参照する。なお、本調査は、事業計画段階に行われる通常の調査に併せて実施することが望ましい（**2.2**）。

【参考文献】

1) 独立行政法人土木研究所(編):建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(改訂版). 鹿島出版会，2012.

2.6 要管理土の区分

要管理土の区分は、短期溶出試験、酸性化可能性試験および直接摂取のリスクを把握するための試験の結果に基づき行うことを基本とする。

(1) 要管理土の判定の目安と要管理土の判定

要管理土は、自然由来重金属等含有土または酸性土のことであるが、要管理土を実務的に区分するため、重金属等の溶出、酸性水の発生、および重金属等の含有量の 3 つについて「要管理土の判定の目安」を設ける。そしてそれらの目安のいずれかあるいは複数について満足しない土を「要管理土」と判定することを基本とする。要管理土は、土壌汚染対策法の調査方法を準用した場合に基準不適合土になる可能性が高いことから、通常の発生土として取り扱うことができず、受入先における管理などが必要となることが多い土である。

●要管理土の判定の目安

以下の１から３のいずれかまたは複数に該当するもの。

1．短期溶出試験（**3.3.7**）の結果が土壌溶出量基準を満足しない、または短期溶出試験の検液の pH が酸性（おおむね 4.0 以下）を呈する

2．酸性化可能性試験（**3.3.7**）の結果が酸性化可能性基準（pH（H_2O_2)が 3.5 を上回る）を満足しない

3．直接摂取のリスクを把握するための試験（**3.3.7**）の結果が土壌含有量基準を満足しない

本マニュアルはこの「要管理土の判定の目安」に該当しない発生土の環境安全性を完全に保証するものではないが、酸性化可能性についても評価を行っていることから、通常実務的に用いられている、土壌汚染対策法の評価方法およびそれを岩石に準用した評価方法よりは安全側かつ適切な評価方法に位置づけられる。

「要管理土の判定の目安」の根拠のうち、長期的な重金属等の溶出の可能性の目安については、短期溶出試験、酸性化可能性試験と実現象再現溶出試験（土研式雨水曝露試験）との比較結果（**参考資料８**）に基づいている。

酸性水の発生に関する判定に関しては、短期溶出試験の検液の pH と、酸性化可能性試験の pH の、2 つの目安を設定する。「道路緑化技術基準・同解説」[1]によると、酸性土壌の成因としては土壌中の硫酸イオンに起因するものと、降雨に伴う塩基の溶脱に起因するものがあるが、前者が pH 1～2 程度の極強酸性を示す場合が多いのに対し、後者は低くても pH 4.2～4.5 程度の酸性である。そのため、特に硫酸イオンに起因する酸性土壌では植生の生育において注意が必要であるとされている。そこで本マニュアルでは、短期溶出試験の検液の pH がおおむね 4.0 以下の硫酸起源と考えられる酸性を対象として判定できるようにした。また、酸性化可能性試験と土研式雨水曝露試験との比較結果（**参考資料８**）に基づい

て、酸性化可能性基準を設定したが、pH(H_2O_2)が 3.5 以下を呈するものであっても必ずしも長期的に酸性水を発生するとは限らない。いずれかの判定の目安に該当するものについては、土研式雨水曝露試験などの実現象再現溶出試験により長期にわたる酸性水の発生があるかどうか、すなわち酸性土であるかどうかを評価することができる。

実現象再現溶出試験において長期にわたり酸性水を発生させる可能性が小さい（すなわち酸性土でない）と評価され、かつ短期溶出試験および直接摂取のリスクを把握するための試験の結果のいずれも要管理土の判定の目安に該当しない土は、酸性化可能性試験の結果や短期溶出試験の検液の pH によらず、通常の発生土として取り扱うことができる（**図-2.1.3**）。

要管理土の区分は、施工前の段階では地質区分別に実施する。同一地質区分において要管理土に相当するものとそうでないものが混在する場合は、その地質区分を要管理土に区分し、必要に応じて地質区分を細分して再評価を行うか、施工時に一定ロットごとに試験を実施して、要管理土かどうかを判定する。施工時に行う判定試験は、短期溶出試験、酸性化可能性試験、直接摂取のリスクを把握するための試験、別途検討する迅速判定試験（**3.3.9**）の１つまたは複数を組み合せて実施する。なお、これまでの実績から、自然由来重金属等含有土のほとんどは、直接摂取のリスクを把握するための試験結果が土壌含有量基準を満足することから、施工前の段階での分析結果に基づいて、施工時の直接摂取のリスクに関する判定試験を省略することが多い。

(2) 酸性化可能性試験の特性と適用の留意点

酸性化可能性試験は、岩石や土壌に含まれる黄鉄鉱などの硫化鉱物が水と酸素がある環境で、時間とともに硫酸を生成する反応（**1.3 解説(1)**）の潜在的な能力を把握する試験である。酸性水の影響の長期的評価に当たっては、酸性化の可能性を評価する必要がある。

酸性化可能性試験は、土と過酸化水素水とを混合し、土に含まれる黄鉄鉱などを強制的に酸化分解して硫酸を生成させ、反応後の検液の pH を測定するものであるが、「過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法」（JGS 0271）では、有機質土、高有機質土に分類される地盤材料については適用外としている。その理由として、本試験方法では通常の曝露状態では酸性化に寄与しない有機態硫黄についても酸化し、試験結果に影響を及ぼすことや、試料中の有機態炭素と過酸化水素水とが反応し、pH 緩衝能を持つ有機酸を生成することがあり、測定結果に影響を及ぼす場合があることを挙げている[2)]。

以上のことから、本マニュアルにおいても酸性化可能性試験は、有機質土、高有機質土には適用しない。

本試験の適用外となる有機質土、高有機質土を盛土等に利用する場合、酸性化可能性については実現象再現溶出試験による評価を行うなど、酸性化の可能性が小さいことを別途確認する。また、石灰系、セメント系の資材を用いて地盤改良を行う場合においてはアルカリ性を呈することから、**4.2** を参照して改良土の重金属等の溶出特性に関して確認を行う。

【参考文献】

1) 日本道路協会編：道路緑化技術基準・同解説．p.160，日本道路協会，1988.

2) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会編：地盤材料試験の方法と解説［第一回改訂版］．pp.379-388，地盤工学会，2020.

2.7 要管理土の受入先

要管理土は、必要な対策を実施しつつ盛土等として管理を行うか、受入施設等（水面埋立地、セメント製造施設、浄化等処理施設、管理型最終処分場など）に搬出する。

要管理土を盛土等に利用する場合は、要管理土の種別と受入先の状況に応じて必要な対策を行って盛土等を施工した後、適切な管理を行う必要がある。要管理土を受入施設等に搬出する場合は、受入施設等が定める条件を満足することを確認する必要がある。

要管理土は、土壌汚染対策法の調査方法を準用した場合に基準不適合土になる可能性が高いことから、受入先の状況に応じた対応が必要である。**表-2.7.1** に受入先別に要管理土の搬出・盛土等の施工の可否や留意点を整理した。ここで「盛土等」とは、盛土や埋土、裏込め材などをいうが、構造物としての利用を想定せずに事業者の管理下に置くものも含む。

表-2.7.1　受入先別の要管理土の搬出・施工の可否および留意点

受入先	公共工事など（盛土等として必要な対策を行い、将来にわたって管理）	受入施設等（水面埋立地、セメント製造施設、浄化等処理施設、管理型最終処分場など）	民有地・公共ストックヤード
搬出・盛土等の施工の可否	原則として可	受入条件を満足すれば可	受入先の合意が得られれば可
留意点	・要管理土の種別に応じた対応を行う必要がある。	・要管理土が、受入先が定める条件に適合することを確認する必要がある。	・要管理土の性状、受入先の土地または要管理土の転売時や土の再掘削時の配慮事項など、受入先に理解を得た上で、確実に管理を引き継ぐ必要があることから、適切な受入先を選定する。

1)　公共工事などの受入先で盛土等に利用する場合

発生土を公共事業などの受入先で盛土等に利用し、将来にわたって事業地内で管理を行う場合は、発生土の置かれる環境において、人の健康への影響がないこと、および生活環境への影響が小さいことを確認できれば環境安全性が確保できると考えられる。そこで**図-2.1.3** の流れに沿って、受入候補地の状況を踏まえた具体的な対応目標の設定（**2.8**）、発生源評価（**2.9**）と必要に応じてリスク評価（**2.10**）を実施し、対策の必要性の評価結果に基づき対応方法を検討する（**2.11**）。そして、発生土の搬出元と受入先の事業者間で要管理土としての維持管理に関する協議を経て対応方針を決定する。詳細は**2.8～2.12** の記述を参照されたい。

事業の実施に当たっては、地域住民や自治体などの関係者と、必要な調整を行う。跡地利用を想定しない発生土受入施設を事業者が新たに建設する場合 1)も、この区分に含

まれる。

対策工が必要な土（「要対策土」）を盛土等に利用する場合は、施工後に施工確認モニタリング（**4.5**）を実施する。モニタリングの終了条件（**4.5 解説(5)**）を満たした後、遮水構造を持つものについては対策工の維持管理を実施するとともに覆土等の維持を行い、要管理土がみだりに移動されないよう管理を行う。また、遮水構造を持たないものについては、モニタリングが終了した時点で対策工としての維持管理を終了し、覆土等の維持を行い、要管理土がみだりに移動されないよう管理を行う。

対策工が不要な土（「搬出時管理土」）を盛土等に利用する場合は、通常の発生土とは区別して搬出時管理土に覆土等によって表面保護を行った後、要管理土の再掘削や崩壊など、みだりに移動されないよう管理を行う。

なお、構造物の機能およびその構造安全性を確保（**2.12**）するための維持管理については、各種法令や技術基準類に基づいて、別途、適切に実施する。

将来、要対策土や搬出時管理土による盛土等を掘削する場合は、その時点での発生土の性状に基づいて受入先を検討し、適切に対応する必要がある。

2) 受入施設等へ搬出する場合

受入候補地が水面埋立地、セメント製造施設など（以下、「受入施設等」という。）である場合は、受入先が示す要件を満たせば、そこへ搬出ができる。受入条件は試験方法、評価基準など受入先ごとに異なる規定を設けているので確認を行い、発生する要管理土がその要件を満たすかどうかの確認が必要である。

水面埋立地では一般に、海洋汚染防止法の水底土砂に係る判定基準（**参考資料５**）が適用されることが多いが、水底土砂にかかる判定基準のための試験方法は、短期溶出試験とはその方法が異なるものの基準値が高く設定されており、自然由来重金属等含有土に関しては受入可能である場合が多い。また、受入に係る費用がほかの受入施設等に比べ安価であることが一般的であることから、要管理土の受入先として有利である。ただし、事業の実施時期によっては適切な受入先が存在しない場合もあるので、受入先に関する情報収集を積極的に行うことが望ましい。

その他の受入施設等としては、セメント製造施設、浄化等処理施設、管理型最終処分場などがある。ただし、一般に受入に係る費用が高額である。なお、大量の土砂を必要とする採石場跡地の修復事業地において、搬出事業者により必要な対策工を実施しながら跡地の埋め戻しを行った事例 [2]もあるので、必要に応じて受入施設等と交渉することも考えられる。

3) 民有地や公共ストックヤードなどに搬出する場合

受入候補地が民有地や公共ストックヤード（公共事業などの建設発生土を工事間で利用調整するための仮置き場所）などの場合、通常の発生土として搬出、利用されることとなる。その場合、搬出後に発生土の性状が変化した場合も想定して、土壌汚染対策法の基準を満足するとともに酸性土による生活環境への影響を軽減するため、要管理土

（2.6）でないことが一般的には必要である。ただし、対策工や施工後の管理などについて、受入先と十分に協議して合意に達した場合においては、搬出できる。なお、受入後に搬入した要対策土を再搬出するなどの不適切な取扱いを行う受入先を排除するよう、適切な受入先を選定する。

【参考文献】

1) 佐々木幹夫，木村裕俊，赤澤正彦，長谷川利晴：八甲田トンネルで発生する鉱化変質岩の環境対策．土と基礎，Vol.53，No.5，pp.8-10, 2005.

2) 吉川正行，水戸光昭：自然由来の重金属を含む建設発生土の処理と対策：仙台地下鉄東西線．建設リサイクル，Vol.65，pp.10-16，2013.

2.8 要管理土を盛土等に利用する場合の対応目標の設定

要管理土を盛土等に利用する場合は、人の健康への影響の防止、生活環境への影響の軽減について現場の条件を勘案して、環境安全性の確保に関する対応の目標を定める。

(1) 人の健康への影響の防止については、岩石・土壌の経口摂取、地下水経由の飲用摂取および、公共用水域に排出された滲出水の表流水経由の飲用摂取の、3 つの曝露経路に対して重金属等による人への健康影響が生じないことを目標とする。

(2) 生活環境への影響の軽減については、植生、周辺土壌や地下水質への重大な影響が生じないことを目標とする。なお、公共用水域へ排出する滲出水の pH については、水質汚濁防止法の一般排水基準を準用することを基本とする。ただし、特別な配慮が必要となる場合はその都度目標値を定める。

要管理土を盛土等に利用する場合の対応目標設定の考え方として、土壌汚染対策法は「国民の健康を保護することを目的」（第 1 条）としており、これを基本の一つとして挙げることができる。また、公共工事においては農作物を含む生物への影響を可能な限り小さくすることなど、生活環境への影響の軽減も重要な視点である。

(1) 人の健康への影響の防止に関する対応目標

人の健康への影響の防止については、①岩石・土壌の経口摂取、②地下水経由の飲用摂取および、③公共用水域に排出された滲出水の表流水経由の飲用摂取の 3 つの曝露経路に対して重金属等の有害物質による人への健康影響が生じないことを目標とする。土壌汚染対策法では、汚染土壌を固体のまま経口摂取する場合と、汚染土壌から水に溶け出した有害物質が地下水に付加され、これを飲用する場合の 2 つの曝露経路に関する基準を設けている。さらに発生土が置かれる場合では盛土等の構造物からの滲出水が表流水として公共用水域に排水され、表流水を取水してこれを飲用する場合が考えられる。

岩石・土壌の経口摂取による人の健康影響の防止に関しては、土の重金属等の含有量について、直接摂取のリスクを把握するための試験（**3.3.7**）の結果が土壌含有量基準を満足することを、対応目標の基本とする。

地下水経由の飲用摂取による人の健康影響の防止に関しては、地下水の水質について、用地境界で地下水環境基準を満足することを、対応目標の基本とする。

表流水経由の飲用摂取による人の健康影響の防止に関しては、公共用水域に表流水として排出する場合において、水質汚濁防止法の一般排水基準を満足することを、対応目標の基本とする。

以下に、3 つの曝露経路ごとの対応目標の設定の考え方について述べる。

a) 岩石・土壌の経口摂取

土壌の経口摂取の基準としては土壌汚染対策法に土壌含有量基準が設定されている。土壌含有量基準は、土を経口摂取する量を 100 mg/日（6 歳以下は 200 mg/日）と定め、摂取した土から胃酸の下で重金属等が溶出して体内に吸収されることなどを想定し、

有害物質の摂取量が土壌溶出量基準と同等となる濃度としている[1)]。

自然由来重金属等含有土については、岩石についても施工中に粉砕され、粒子あるいは粉塵(じん)として経口摂取される可能性があることを踏まえ、土壌汚染対策法の考え方を準用する。

b) 地下水経由の飲用摂取

地下水経由の曝露経路については、原則として用地境界における地下水に対して地下水の水質汚濁に係る環境基準を適用する。なお、環境基準は年間平均値で評価することとなっている。本マニュアルでは実現象を踏まえた発生源評価を行うことを基本としていることや、土壌・地下水中での物質移行を考慮することから、土壌汚染対策法の土壌溶出量基準の考え方は採用しない。

基準値は、基本的に飲用水の摂取および魚介類の食品としての摂取による人の健康への影響を想定し、生涯にわたる連続的な摂取をしても健康に影響が生じない水準を基に安全性を十分考慮して設定されている。直接飲用による影響については、特に幼少期において特定の化学物質に対する健康リスクが大きいと判断できる場合（鉛など）については、幼児の飲料水消費量に基づいて基準値を設定している[2)]。詳しくは**参考資料２**の「３．各重金属等の基準値設定根拠」を参照されたい。

地下水水質の評価地点については、現状における水利用地点ではなく、原則として用地境界とする。その理由は、隣接地に現在地下水利用がなくとも、将来飲用井戸を掘削する可能性がある、すなわち曝露地点が工事終了後に移動することが起こりうるからである。ただし、岩盤が浅所で露出する山地斜面や地下水が下流側でただちに海に湧出するなど地下水利用が困難な場所、地下水中の塩分濃度が高い臨海部埋立地、および重金属等の地下水バックグラウンド濃度が地下水環境基準値より高い地域など、すでに地下水水質が飲用に適さない場所では、評価地点を事業ごとに検討する。

c) 表流水経由の飲用摂取

実際の建設工事では盛土等からの滲出水を表流水として排水する場合がある。建設工事における盛土等は、水質汚濁防止法に定める特定事業場には該当しないが、その場合には一般に、水質汚濁防止法に定める特定事業場から公共用水域に排水する場合の基準である、一般排水基準を準用することを基本とする。

ただし、排水地点下流の水利用の状況を踏まえ、例えば、流量が少ない河川へ多量に排水する場合で、排水先の直下流で水道などの飲用水の取水を行っている場合には、事業による人の健康への影響を防止する観点から、目標の値を引き下げるなどの配慮が必要である。

(2) 生活環境への影響の軽減に関する対応目標

発生土を盛土等に利用する場合の生活環境への影響として、重金属等の溶出以外に、岩石・土壌の異常 pH の問題を挙げることができる。岩石・土壌の pH が低すぎる、あるいは高すぎることで、植物の生育への影響が発現し、場合によって枯死することもある。また、

岩石・土壌からの滲出水が表流水に流入することで、魚類への影響が顕在化した事例がある。岩石・土壌や水質が及ぼす動植物への影響については、酸性であることに加え、特定の溶出元素が影響する場合があり、例として酸性環境で可溶化するアルミニウムイオン（Al^{3+}）の影響が大きい[3]と考えられている。なお、土壌からのアルミニウムイオンの溶出は、土壌 pH が 4.0 前後まで低下すると急激に増加する[4]と言われている。

降水は、大気中の二酸化炭素が溶け込んでいるため、自然の状態で弱酸性を呈する。大気中の二酸化炭素と純水とが平衡に達した時の pH は 5.6 であり、酸性雨は一般に pH5.6 以下の雨をいう[5]。環境省[6]によると、日本国内の各地点における降水の pH（2013～2017 年度の加重平均値 ; 降水量を考慮した平均値）は 4.58～5.16 の範囲にあり、土壌の pH は一部の地点を除きおおむね 4.0～5.5 の間であった。また、酸性沈着による影響も含めて継続監視している岐阜県伊自良湖集水域の 2017 年度における降水の年加重平均 pH が 4.75 であったのに対し、河川水の年加重平均 pH は 7.0[6]であった。日本の河川水の多くが中性を保っている原因として、鉱物の溶解や生物活動に伴う硝酸イオンの吸収・分解による緩衝作用[7]などが考えられている。一方で、緩衝作用は現場の地質や土壌の種類によっても異なること、盛土等から地盤に浸透した滲出水が速やかに公共用水域に湧出するような場合もあることから、目標設定に当たっては受入地周辺の地質、土壌および地下水流動などの状況を踏まえて決定する。

なお、水域への影響を未然に防止するための pH の目標については、水質汚濁防止法の一般排水基準（例えば海域以外の公共用水域に排出されるものについては pH が 5.8 以上、8.6 以下（令和 4 年 4 月 1 日現在））を準用することを基本とする。ただし、排水先のバックグラウンド濃度が一般排水基準を満足しない場合には、対応目標をバックグラウンド濃度とするとよい。

【参考文献】

1) 中央環境審議会：土壌汚染対策法に係る技術的事項について（答申），2002，環境省ホームページ， https://www.env.go.jp/council/toshin/t10-h1407/all.pdf
2) 中央環境審議会 : 水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の見直しについて（第 5 次答申）．2020，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/press/files/jp/113983.pdf
3) 高津章子・角田欣一：陸水・生物試料中のアルミニウム分析．佐竹研一編：「酸性雨研究と環境試料分析－環境試料の採取・前処理・分析の実際－」，愛智出版，pp.92-114，2000.
4) 三輪誠・伊豆田猛・戸塚績：酸性雨による土壌酸性化と樹木影響．佐竹研一編：「酸性環境の生態学－酸汚染と自然生態系を科学する－」，愛智出版，pp.135-154，2002.
5) 小倉紀雄・一國雅巳：環境化学．p.129，裳華房，2001.
6) 環境省：越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書（平成 25～29 年度）の概要.

21p.，2019，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/press/files/jp/111140.pdf
7) 河合崇欽 : 酸性降下物による河川・湖沼の酸性化の可能性とその生態的影響.「酸性雨」編集委員会・（社）ゴルファーの緑化促進協議会編 :「新版酸性雨－複合作用と生態系に与える影響－」，博友社，pp. 183-200，1996.

2.9 要管理土の発生源評価

要管理土を盛土等に利用する場合は、要管理土の発生源評価を行い、主に重金属等の溶出特性に基づいて 3 段階の発生源濃度区分のいずれかに区分する。

要管理土を盛土に利用する場合は、地質区分ごとの発生土の性状把握（**2.4 解説(2)**）の結果に基づいて、要管理土の発生源評価を行う。発生源評価は要管理土の重金属等の実現象を踏まえた溶出特性に基づき、発生源濃度区分を【高】【低】【極低】の 3 段階のいずれかに区分する。区分の概要と評価基準を**表-2.9.1** に示す。また、要管理土に関する各種の試験結果、発生源濃度区分および土の分類との関係の例を**表-2.9.2**～**表-2.9.5** に示す。

表-2.9.1　要管理土の発生源濃度区分とその評価基準

発生源濃度区分	【高】	【低】	【極低】
区分の概要	・重金属等の短期溶出試験濃度、長期的な溶出濃度のいずれかあるいは両方が高いか、鉱石のように重金属等の全含有量が著しく高いものを含むために高濃度の溶出による人への健康影響が生じる懸念がある要管理土。 ・長期的な溶出濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超えることを想定。	・重金属等の長期的な溶出濃度は低いが、想定される盛土等の環境において地下水経由および表流水経由の飲用摂取に対して、重金属等の溶出による人への健康影響が生じる可能性が不明なため、影響検討が必要な要管理土。 ・長期的な溶出濃度が地下水環境基準値の 1～10 倍程度を想定。	・重金属等の長期的な溶出濃度が極めて低く、想定される盛土等の環境において地下水経由および表流水経由の飲用摂取に対して、重金属等の溶出による人への健康影響が生じる可能性が小さい要管理土。 ・長期的な溶出濃度が地下水環境基準値を超えないことを想定。 ・重金属等は溶出しないが酸性水を発生するものを含む。
評価基準 （実現象再現溶出試験を行う場合）	以下のいずれかに該当。 ・短期溶出試験結果が土壌汚染対策法の第二溶出量基準値を超過。 ・実現象再現溶出試験結果に基づき、長期的な重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超えると考えられる。 ・全含有量試験結果が著しく高い。	【高】に該当せず、以下に該当。 ・実現象再現溶出試験結果に基づき、長期的な重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値を超えると考えられる。	【高】、【低】のいずれにも該当しない。
評価基準 （実現象再現溶出試験を行わない場合）	以下のいずれかに該当。 ・短期溶出試験結果が土壌溶出量基準値の 10 倍を超える。 ・酸性化可能性試験結果が「要管理土の判定の目安」に該当する。 ・全含有量試験結果が著しく高い。	【高】に該当しない。	－

発生源濃度区分が【高】の要管理土は、「要対策土（高濃度）」（**図-2.1.3**、**表-2.1.2** および**表-2.9.3** 参照）に区分する。また、発生源濃度区分が【極低】の要管理土は、長期にわたり酸性水を発生させるかどうかにより、「搬出時管理土」または「要対策土（酸性土）」に区分する（**表-2.9.4** 参照）。発生源濃度区分が【低】のものについては、**2.10** の「発生源濃度区分が【低】の要管理土のリスク評価」を行い、その結果に基づき「搬出時管理土」、「要対策土（酸性土）」、および「要対策土（低濃度）」のいずれかに区分する（**表-2.9.5** 参照）。なお、「要対策土（低濃度）」については、その置かれる場所ごとに、周辺の土地利用や将来にわたる地下水利用の可能性、地下水水質への影響予測評価結果を踏まえ、4 つのリスクレベルに細区分する。詳しくは **2.10** を参照する。

表-2.9.2　表-2.9.3～2.9.5 の凡例

記号 / 評価項目	○	△	×
短期溶出試験による重金属等の溶出	土壌溶出量基準値を超えない	第二溶出量基準値を満足	第二溶出量基準値を超える
酸性化可能性試験および短期溶出試験の pH	酸性化可能性基準を満足かつ短期溶出試験の pH が低くない		酸性化可能性基準を満足しない または短期溶出試験の pH が低い
直接摂取のリスクを把握するための試験または全含有量試験	土壌含有量基準値を超えない	土壌含有量基準値を超えるが全含有量は著しく高くない	全含有量が著しく高いと専門家が評価
実現象再現溶出試験（溶出濃度評価）	重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値を超えない	重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値の 1～10 倍	重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超える
実現象再現溶出試験（酸性化評価）	長期的な酸性化の懸念がない		長期的な酸性化の懸念がある

注１）実現象再現溶出試験の「ー」は試験を実施しない場合を示す。
注２）**青字**は実現象再現溶出試験実施のきっかけを、**赤字**は発生源濃度区分の決定要因を示す。

表-2.9.3　高濃度に分類されるものの例

分類ケース / 評価項目・区分	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
短期溶出試験による重金属等の溶出	○or△	×	△	○	○or△
酸性化可能性試験および短期溶出試験の pH	○or ×	○or ×	○or ×	×	×
直接摂取のリスクを把握するための試験または全含有量試験	×	○or△	○or△	○or△	○or△
実現象再現溶出試験（溶出濃度評価）	ー	ー	×	×	ー
実現象再現溶出試験（酸性化評価）	ー	ー	○or ×	○or ×	ー
発生源濃度区分	高	高	高	高	高
土の区分 （リスク評価によらず決定）	要対策土 （高濃度）	要対策土 （高濃度）	要対策土 （高濃度）	要対策土 （高濃度）	要対策土 （高濃度）

表-2.9.4　発生源濃度区分【極低】に分類されるものの例

分類ケース / 評価項目・区分	No. 6	No. 7	No. 8-1	No. 8-2	No. 9-1	No. 9-2	No. 10-1	No. 10-2
短期溶出試験による重金属等の溶出	○	○	○	○	△	△	△	△
酸性化可能性試験および短期溶出試験の pH	○	○	×	×	○	○	×	×
直接摂取のリスクを把握するための試験または全含有量試験	○	△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△
実現象再現溶出試験（溶出濃度評価）	－	－	○	○	○	○	○	○
実現象再現溶出試験（酸性化評価）	－	－	○	×	○	×	○	×
発生源濃度区分	極低	極低	極低	極低	極低	極低	極低	極低
土の区分（リスク評価によらず決定）	通常の発生土	搬出時管理土	搬出時管理土	要対策土（酸性土）	搬出時管理土	要対策土（酸性土）	搬出時管理土	要対策土（酸性土）

表-2.9.5　表-2.9.4 の No. 8-1，No. 9-1，No. 10-1 において実現象再現溶出試験の結果が異なる場合の例

分類ケース / 評価項目・区分	No. 8-3	No. 8-4	No. 8-5 (=No. 4)	No. 9-3	No. 9-4	No. 9-5 (=No. 3)	No. 10-3	No. 10-4	No. 10-5 (=No. 3)
短期溶出試験による重金属等の溶出	○	○	○	△	△	△	△	△	△
酸性化可能性試験および短期溶出試験の pH	×	×	×	○	○	○	×	×	×
直接摂取のリスクを把握するための試験または全含有量試験	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△	○or△
実現象再現溶出試験（溶出濃度評価）	△	△	×	△	△	×	△	△	×
実現象再現溶出試験（酸性化評価）	○	×	○or×	○	×	○or×	○	×	○or×
発生源濃度区分	低	低	高	低	低	高	低	低	高
土の区分（発生源濃度区分【低】についてはリスク評価結果によって区分が変わる）	搬出時管理土 or 対策土（低濃度）	要対策土（酸性土） or（低濃度）	要対策土（高濃度）	搬出時管理土 or 要対策土（低濃度）	要対策土（酸性土） or（低濃度）	要対策土（高濃度）	搬出時管理土 要対策土（低濃度）	要対策土（酸性土） or（低濃度）	要対策土（高濃度）

発生源濃度区分は次の方法による。なお、評価に当たっては専門家の助言を踏まえて行うことが望ましい。

1)　発生源濃度区分【高】

実現象再現溶出試験を行う場合は、短期溶出試験の結果が土壌汚染対策法の第二溶出量基準値を超えるか、実現象再現溶出試験結果に基づき長期的な重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超えると評価されるか、または重金属等の全含有量試験結果が著しく高いかのいずれかに該当するものについて、発生源濃度区分を【高】に区分

する。

実現象再現溶出試験を行わない場合は、重金属等の全含有量試験結果が著しく高いか、短期溶出試験結果が土壌汚染対策法の土壌溶出量基準値の 10 倍を超えるか、検液の pH が酸性（おおむね 4.0 以下）か、または酸性化可能性試験結果が「要管理土の判定の目安」（**2.6**）に該当する（3.5 以下）かのいずれかに該当するものについて、発生源濃度区分を【高】に区分する。

長期的な重金属等の溶出濃度について、これまで実施されてきた土研式雨水曝露試験結果によれば、滲出水が酸性化すると重金属等の濃度が増大する場合が認められている。そのため、土研式雨水曝露試験の滲出水の 1 年間平均濃度が地下水環境基準値の 10 倍を超えるかどうかなど、実現象再現溶出試験（**3.3.8**）により長期的な溶出濃度を確認することが望ましい。また、酸性水の発生可能性を酸性化可能性試験と短期溶出試験の検液の pH 値により、あるいはその他の方法で評価し、酸性水発生に伴う溶出濃度の増大の可能性が小さいことを確認したものについては、短期溶出試験の濃度をもって長期的な重金属等の溶出濃度と見なして、短期溶出試験結果が土壌溶出量基準値の 10 倍を超えるものを長期的な重金属等の溶出濃度が高いものと評価する。酸性化可能性試験と短期溶出試験の検液の pH 値による方法以外の、酸性水の発生可能性評価方法の例としては、簡易溶出試験の 56 日後の検液の pH を酸性化の基準とした方法や泥岩中の硫黄とカルシウム含有量のモル濃度比[1)]、炭酸態炭素と硫化物態硫黄含有量のモル濃度比[2)]、酸性化が進行した試料の状態を模擬した試験条件で行う強制酸化試験[3),4)]による方法などがある。実現象再現溶出試験などによる酸性水の発生可能性の評価においては、水質汚濁防止法の一般排水基準で定められた pH 5.8 を参考値として試験方法ごとに基準値を定めて判断する。詳細は**参考資料 13** を参照されたい。

全含有量試験結果が著しく高いかどうかの評価については、「自然由来の汚染と判断する際の含有量（全量分析）の上限値の目安」[5)]（**表-2.9.6**）を超えているものについて、専門家に助言を求めて評価する。ただし、この上限値の目安を超えたことをもって、ただちに人為由来であるという判断にはならず、重金属等の起源の確認（**2.5** および**参考資料 7**）により評価を行う。なお、鉱石など、重金属等の含有量が著しく高いものは、通常の溶出試験などで重金属等の溶出濃度が小さかったとしても、溶出環境などの違いからわずかな溶出率の増加があると、高濃度の重金属等を溶出させる可能性があると考えられることから、発生源濃度区分【高】に区分するものである。

また、本区分に該当する岩石は、鉱石や鉱床に関連する変質岩や汚染土壌など、出現

表-2.9.6　自然由来の汚染と判断する際の含有量（全量分析）の上限値の目安（mg/kg）[5)]

元素名	砒素	鉛	ふっ素	ほう素	水銀	カドミウム	セレン	六価クロム
上限値の目安	39	140	700	100	1.4	1.4	2.0	—

※上限値の目安は、主要 10 都市で採取した市街地の土壌中の特定有害物質の含有量の統計解析結果（平均値+3σ）であるため、地質条件によっては目安を超える場合があり得ることに留意が必要

が局所的で比較的まれであることから、これらの岩石の評価に当たり、その材料に乏しい場合は周辺の地質状況も加味して行うことも可能である。その場合は専門家に助言を求めて評価する。

2) 発生源濃度区分【低】

実現象再現溶出試験を行う場合は、発生源濃度区分【高】に該当しないもののうち、実現象再現溶出試験結果に基づき長期的な重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値を超えると評価されるものについて、発生源濃度区分を【低】に区分する。

実現象再現溶出試験を行わない場合は、発生源濃度区分【高】に該当しないものについて、発生源濃度区分を【低】に区分する。

長期的な重金属等の溶出濃度について、地下水経由の人の健康への影響があるかどうかは、土研式雨水曝露試験の滲出水の 1 年間平均濃度が地下水環境基準値を超えないかどうかなど、実現象再現溶出試験（**3.3.8**）に基づいて評価する。

3) 発生源濃度区分【極低】

発生源濃度区分【高】、【低】のいずれにも該当しないものについて、発生源濃度区分を【極低】に区分する。例えば、全含有量が著しく大きくなく、かつ実現象再現溶出試験に基づき、長期的な重金属等の溶出濃度が地下水環境基準値を超えないものについては、短期溶出試験結果や酸性化可能性試験、および実現象再現溶出試験における酸性水発生の有無にかかわらず、発生源濃度区分【極低】に区分される。

【参考文献】

1) 服部修一，太田岳洋，木谷日出男：酸性水発生に関わる掘削残土の応用地質学的検討－鉱山に近接して施工される八甲田トンネルにおける岩石特性評価法－．応用地質，Vol.43，pp.359-371，2003.

2) 五十嵐敏文，大山隆弘，斉藤典之：黄鉄鉱を含む堆積岩の溶出水酸性化ポテンシャルに関する実験的検討．応用地質，Vol.42，pp.214-221，2001

3) 門間聖子，森研一郎，佐々木正春，堀修：地下鉄工事における重金属を含む海成泥岩の調査・対策事例．第 15 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.695-700，2009.

4) 福島広之，佐藤優，山本隆広：酸性化する掘削ずりの対策について－現実的な対策とその検証－，第 62 回（平成 30 年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集，環 6，2020.
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所ホームページ，https://thesis.ceri.go.jp/db/files/16258508045d22c0ba10a1c.pdf

5) 環境省水・大気環境局長：「土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について」環水大土発第 1903015 号，平成 31 年 3 月 1 日.

2.10 要管理土のリスク評価

発生源濃度区分が【低】の要管理土を盛土等に利用する場合は、受入候補地における盛土等から地下水保全対象（評価地点や周辺の水利用地点）に至る物質移動経路やその性状を反映したサイト概念モデルを構築する。そして、要管理土を無対策で盛土等に利用した場合の受入候補地での地下水経由のリスクについて、周辺の地盤状況を考慮して、設定された対応目標を満足するかどうか評価する。

また、設定された対応目標を満足しない場合、対策工を選定するに当たり受入候補地周辺の状況を考慮するため、周辺の水利用地点などのリスク評価地点における地下水経由のリスク評価結果に基づき、リスクレベルの区分を行う。

2.9 で発生源濃度区分が【低】と区分された要管理土を盛土等に利用する場合は、サイト概念モデルの構築、地下水経由のリスクに関して、**2.8(1)** で設定した対応目標を満足するかどうかの評価、およびリスクレベルの区分を行う。酸性土でない要対策土（以下、「非酸性土」という。）および酸性土のリスク評価の手順を**図-2.10.1**、**図-2.10.2** に示す。

(1) サイト概念モデルの構築

サイト概念モデルとは、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である。

サイト概念モデルは、本来的には考えられる曝露経路を網羅するものであるが、本マニュアルにおいては、対象物質が要管理土（発生源）から浸透水の移動に伴って地下水に付加され、これが地下水保全対象である水利用地点（井戸）や評価地点（用地境界など）に至るまでの物質移動経路やそれらの性状、位置関係を対象にする。

サイト概念モデルに含まれる要素は、要管理土（発生源）に含まれる物質の種類や濃度、要管理土による盛土等の位置、大きさ、受入候補地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、水利用地点や評価地点）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、影響評価に用いるモデルの仕様や、解析結果の要求精度に応じて必要な調査を実施し、その結果を適宜モデルに反映する。

サイト概念モデルの構築は、発生源、曝露経路、および保全対象の状況により、簡単なものから精緻なモデルまで考えられる。例えば、発生源から地下水の下流方向で水利用がないような単純な状況では非常に簡単なモデルとなる。ただし、単純な状況であっても情報を整理し、簡単なサイト概念モデルを構築することがリスク評価の入り口となる。また、サイト概念モデル構築時に、発生源、曝露経路、および保全対象の情報に関する不確実性を把握するとともに、サイト概念モデルとモニタリング結果が乖離した場合は、その原因を調査し、再検討を行う必要があると考えられる。

サイト概念モデルの構築に関しては **3.4** を参照する。

(2) 設定された対応目標を満足するかどうかの評価

発生源濃度区分が【低】の要管理土を盛土等に利用する場合は、まず、無対策で盛土等に利用することが可能か否かを検討するため、**2.8(1)**で設定した対応目標を満足するかを評価する。本マニュアルにおける評価は、土壌汚染対策法の自然由来等土壌構造物利用施設における、受入対象の自然由来等土壌の汚染状態に関する評価の考え方に類似するが、対応目標の設定方法や酸性土の取扱いについて異なることに留意する。具体的には対応目標について、本マニュアルでは用地境界の地下水が地下水環境基準を満足することを基本としているが、土壌汚染対策法では帯水層直上の土壌間隙水中の特定有害物質の濃度が土壌溶出量基準に示される濃度を超えないこととしている。土壌汚染対策法の施行通知[1)]では、重金属等に対し計算ツールによる簡易影響予測方法が示されており、本マニュアルでも当該計算ツールの利用を想定している。ただし、酸性土に関しては酸性化に伴って溶出濃度が増大する可能性があることを考慮し、計算ツールによる簡易影響予測評価を行うことができないこととする。

本評価は、「簡易影響予測評価」と「リスクレベル評価（定量的評価）」の 2 段階で行う。なお、簡易影響予測評価は計算ツールを用いるが、その前提により、地盤の不飽和層厚が 50cm 未満の場合や酸性土には適用しないほか、評価を省略することもできる。

1) 簡易影響予測評価

簡易影響予測評価は、土壌汚染対策法の自然由来等土壌構造物利用施設における地下水汚染防止措置の考え方（**参考資料６**）を準用し、要管理土がクラス 1-A または 1-B の基準を満足する（クラス区分については**参考資料６**の**表-1** を参照）と推定されるものについて、盛土等の直下における重金属等による地下水水質への影響は小さいと評価し、これらを本マニュアルではリスクレベル 0 とする（**表-2.10.1**）。非酸性土でリスクレベル 0 の要管理土は「搬出時管理土」に区分する。ただし、地盤の不飽和層厚が 50cm 未満の場合は簡易影響予測評価を適用できない。

クラス 1-A の評価については、鉛とカドミウムについて行うものである。土壌汚染対策法では、土壌溶出量試験の結果が基準値（鉛 0.30 mg/L、カドミウム 0.044 mg/L）未満であり、カドミウムについてはさらに受入候補地の土懸濁液の pH[2)] が 5.0 以上である場合とされている（令和 4 年 4 月 1 日現在）。本マニュアルにおいては、土壌溶出量試験の代わりに短期溶出試験や土研式雨水曝露試験などの結果を用いることが考えられる。

クラス 1-B の評価については、砒素、ふっ素、ほう素、カドミウム、セレン、および六価クロムについて、「自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツール」[3)]（以下、「サイト評価の計算ツール」という。）を利用して行う。サイト評価の計算ツールは、汚染土壌に含まれる対象物質が雨水などの浸透に伴って移動することを考慮して、土を利用してから 100 年後における帯水層に到達する直前の土壌間隙水の対象物質濃度を計算す

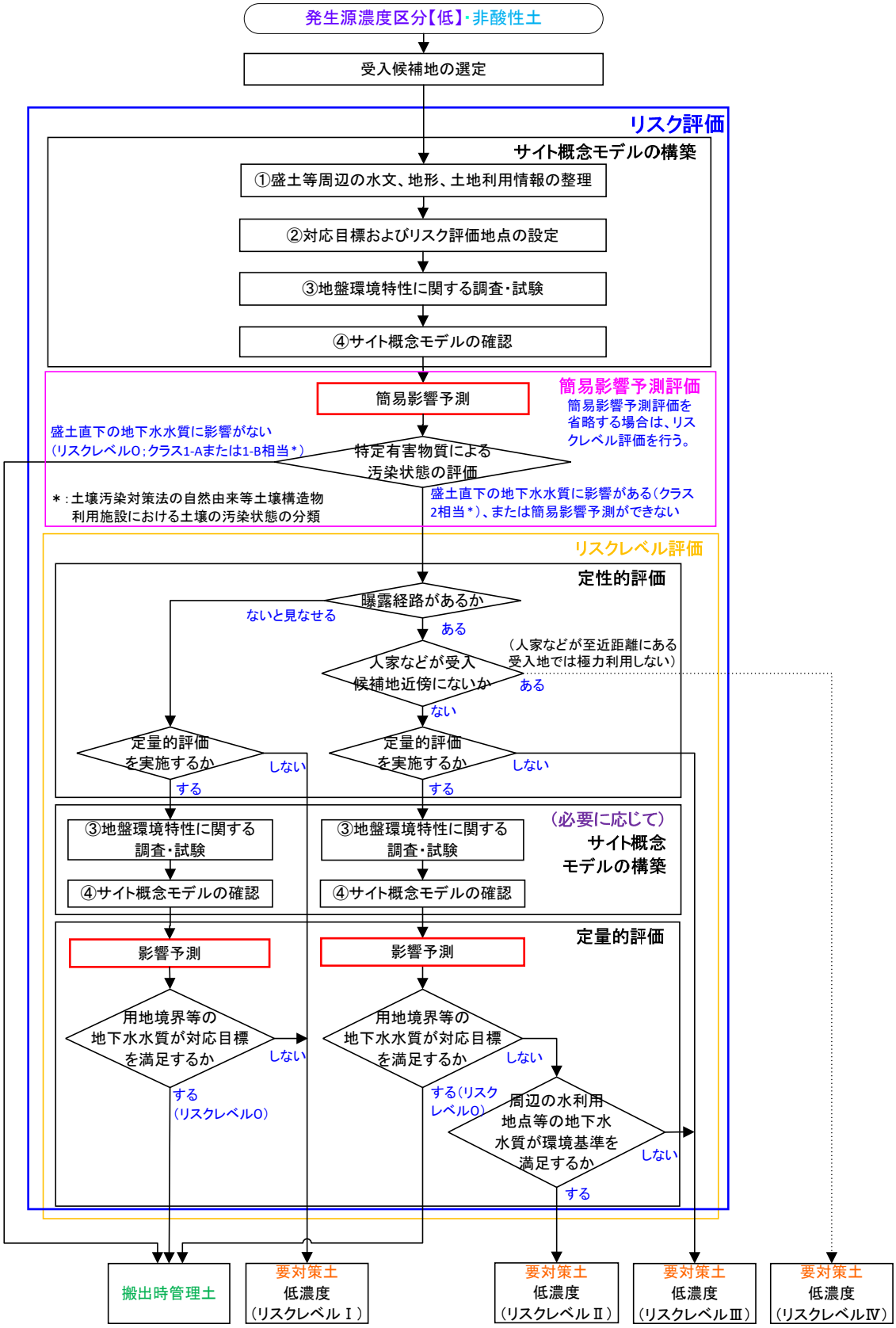


図-2.10.1　リスク評価の手順（非酸性土）

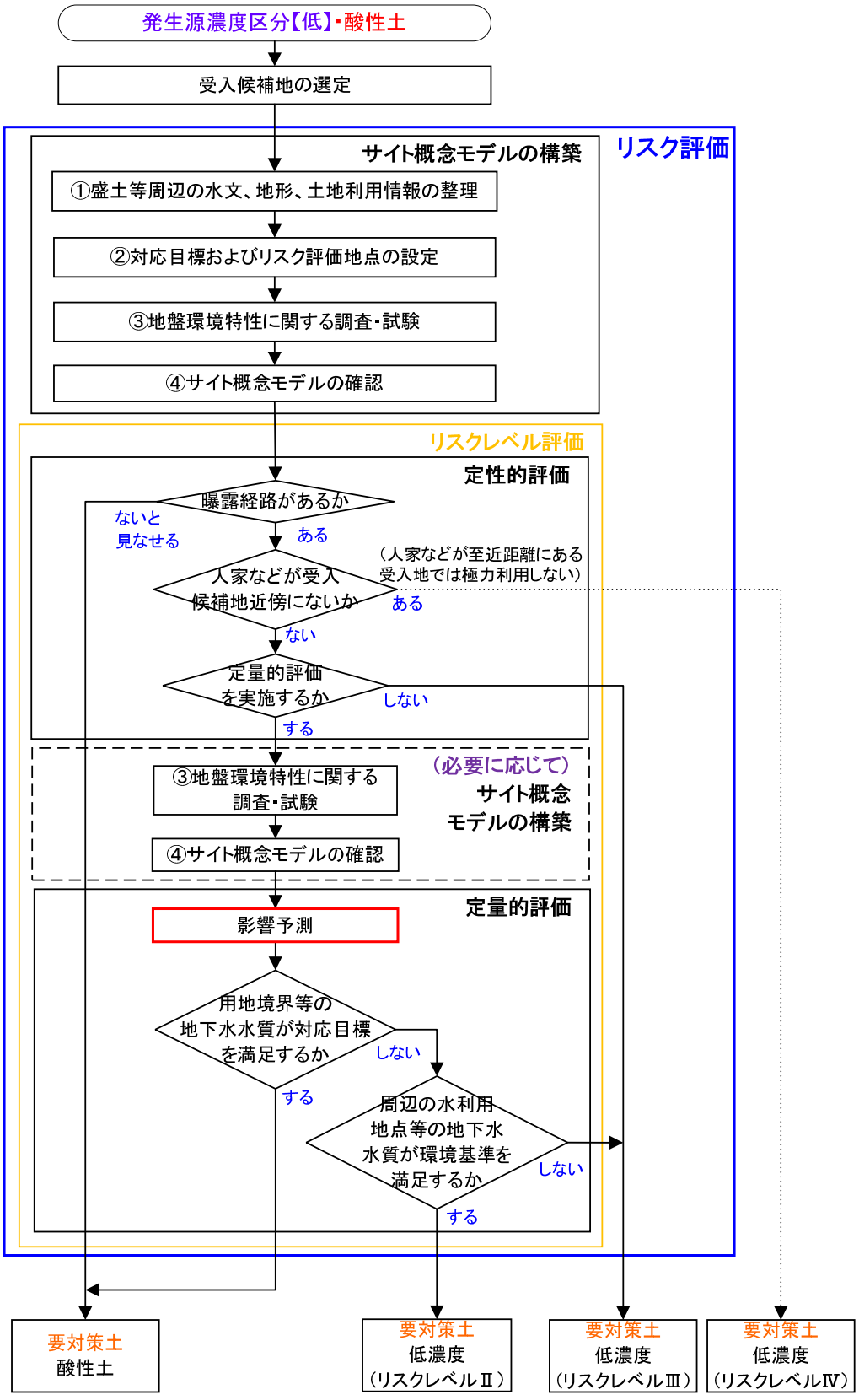


図-2.10.2　リスク評価の手順（酸性土）

表-2.10.1　リスクレベルの区分と受入候補地の状況の例

リスクレベル		受入候補地の状況の例
0	汚染した浸透水が地下水面に到達しないか、汚染地下水が用地境界内にとどまる	・受入候補地の土地利用によらず、有害物質の種類、地盤を構成する土の性質、地下水面の位置、流向、流速および盛土等と用地境界との位置関係などに依存する。
I	曝露経路がないと見なせる場所	・臨海部で地下水下流側が塩水のために、地下水飲用が将来にわたって見込まれず、地下水が海域に流出する場所 ・大河川の沿川など、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもそのフラックスに対して地下水のフラックスが著しく大きい場所で、対象物質の周辺地下水濃度が環境基準値を超えないと考えられる場合 ・岩盤が浅所に露出するなど、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもすぐに河川に復帰し、希釈によって環境基準値を超えないと考えられる場合 ・山地・丘陵など、現状で地下水飲用がなく、将来的に地下水飲用の可能性が非常に低いと考えられる場所
II	対策を実施しない場合においても、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性が少ない場所	・平野で地下水下流側に人家や飲用井戸が存在せず、地下水飲用がないと見込まれる場合 ・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在するが、必要に応じて実施する影響予測結果などから、対策を実施しない場合に、それらの場所に汚染が到達する可能性が少ない場合
III	対策を実施しない場合、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性がある場所	・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在し、必要に応じて実施する影響予測結果などから、対策を実施しない場合に、それらの場所に汚染が到達する可能性があると考えられる場合
IV	用地に隣接するか、ごく至近距離に人家や飲用井戸が存在する場所	・盛土より地下水下流方向の至近距離（おおむね 30m 以内）に人家や飲用井戸が存在する場合

るものである。計算された濃度が地下水環境基準値を超えない場合に、クラス 1-B と評価する。

サイト評価の計算ツールへの入力値（パラメータ）は不飽和層厚、分配係数、年間降水量および発生源濃度（サイト評価の計算ツールにおける「自然由来等土壌の汚染状態」）である[4),5)]。

分配係数を実験によって求める場合や発生源濃度を実現象再現溶出試験の結果を踏まえて設定する場合は、その方法や評価に当たって専門家の助言を求める必要がある。詳細については **3.4** を参照する。

2) リスクレベル評価（定量的評価）

リスクレベル評価の定量的評価によって、要管理土を仮に無対策で盛土等に利用した場合における、用地境界など **2.8(1)** で定めた評価地点の地下水水質（重金属等の濃度）が、対応目標を満足すると推定されるものについて、重金属等による地下水水質への影響は小さいと評価し、その要管理土を「搬出時管理土」に区分する。ただし、酸性土に関しては別途酸性水対策が必要なことから、その要管理土を「要対策土（酸性土）」に区分する。本評価については **(3)2)** で後述する。

(3) リスクレベルの区分

簡易影響予測評価で設定された対応目標を満足しない場合、受入候補地周辺の水利用その他の状況を把握して、水利用を想定する地点（リスク評価地点）における地下水経由のリ

スク評価結果に基づき、リスクレベルを０からⅣの５つに区分する（**表-2.10.1**）。

リスクレベル評価は、定性的評価と定量的評価の２段階によって行う。なお、定量的評価は省略することもできる。

1) 定性的評価

サイト概念モデルに基づき曝露経路がないと見なせる場合、非酸性土では「リスクレベルⅠ」とする。一方、酸性土では別途酸性水対策が必要になることから、「要対策土（酸性土)」に区分する。曝露経路がないと見なせる場合とは、地下水質が現状で飲用に適さない場所（例えば、海岸付近で塩分濃度が高い地下水や自然由来重金属等のバックグラウンド濃度が高い地下水等）、地下水の利用が困難な場所、または地下水が河川、湖沼や海にすぐに湧出して希釈されると想定される場合などである。また、地下水のバックグラウンド濃度が発生源濃度より高い場合も、これに該当する。

非酸性土、酸性土の別を問わず、受入先が人家の用地から至近距離にある場合についてはリスクレベルⅣとする。ここで「至近距離」について、万一周辺の地下水への影響が生じた場合の対応に係る時間的猶予を確保すること、および対策工実施に必要な用地幅等を考慮し、おおむね 30 m 以内とする。リスクレベルⅣでは、万一地下水への影響が起こった場合の対応が難しいことから、要管理土を極力盛土等に利用しない。

リスクレベルⅠ、リスクレベルⅣ、または要対策土（酸性土）に該当しない場合、リスクレベルⅢに区分する。

定量的評価を行わない場合は、以上のようにリスクレベルを区分する。定量的評価を行う場合は、リスクレベルⅠ、およびⅢについて、次に述べる影響予測結果に基づいて再区分を行う。

2) 定量的評価

本評価は、要管理土を仮に無対策で盛土等に利用した場合における、用地境界など**2.8(1)**で定めた評価地点の地下水水質が、対応目標を満足するかどうか、および周辺の水利用地点における重金属等による地下水水質への影響を評価するものである。なお、地下水のバックグラウンド濃度が対応目標を上回っている場合においては、対応目標の設定を変更する。

定量的評価は、2 次元または 3 次元の飽和－不飽和移流分散解析モデルによる影響評価によるか、サイト評価の計算ツールで得られた結果（帯水層直上の土壌間隙水の濃度）を入力値として、環境省が公開している「措置完了条件（目標土壌溶出量・目標地下水濃度の計算）の計算ツール」[6]（以下、「措置完了条件計算ツール」という。）の解析結果を利用して検討することも可能である。

その結果、非酸性土について、対応目標を満足するものについてはリスクレベル０と評価し、その要管理土を「搬出時管理土」に区分する。また、曝露経路はないと見なせるが対応目標を満足しないものをリスクレベルⅠに区分する。さらに、非酸性土、酸性土の別を問わず、周辺の水利用地点等における地下水水質が地下水環境基準値を超えないもの

をリスクレベルⅡ、超えるものをリスクレベルⅢに区分する。

モデルの評価期間については、土壌汚染対策法の考え方を参考に 100 年間を基本とする。モデルへの入力値（パラメータ）は、サイト概念モデルを踏まえて、文献値や必要に応じて実施する試験結果に基づいて設定する。入力値の設定および計算結果の評価に当たっては、専門家の助言を求めることが望ましい。また、分配係数を実験によって求める場合や発生源濃度を実現象再現溶出試験の結果を踏まえて設定する場合は、その方法や評価に当たって専門家の助言を求める。詳細については **3.4** を参照する。

【参考文献】

1) 環境省水・大気環境局長：「土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について」環水大土発第 1903015 号，平成 31 年 3 月 1 日.
2) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会編：地盤材料試験の方法と解説［第一回改訂版］. pp.322-328，地盤工学会，2020.
3) 環境省：自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツール．2019，環境省ホームページ，http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html
4) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツールの操作方法. 汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂第 4.2 版），Appendix_12，2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html
5) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：自然由来等土壌構造物利用施設における自然由来等土壌構造物利用施設を設置する土地の土壌の分配係数の取得方法．汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂第 4.2 版），Appendix_13，2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html
6) 環境省：措置完了条件（目標土壌溶出量・目標地下水濃度の計算）の計算ツール. 2019，環境省ホームページ，http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html

2.11 対応方針の決定

要管理土を盛土等に利用する場合は、発生土の性状把握結果および受入候補地のリスク評価結果を総合して受入先での対策工の必要性について評価する。

また、対策工が必要な場合は、リスクレベルと当該現場における各対策工の信頼性との関係、施工性、費用、工期、維持管理などの実現可能性を総合的に勘案するとともに、関係者との協議を経て、対応方針を決定する。

対応方針については、適宜、地元関係者などと情報共有する。

(1) 受入先での対策の必要性の評価（総合評価）

発生土の性状把握結果および受入候補地のリスク評価結果を総合して、下記のように対策の要否を判断する。

① 通常想定される環境において重金属等の溶出や長期にわたる酸性水発生の懸念が少なく、土壌汚染対策法の調査方法を適用した場合においても基準不適合土にならないと考えられるものは、通常の発生土として取り扱うことができる。実務的には、要管理土の判定の目安（**2.6**）に該当しないものは、通常の発生土として取り扱ってよい。

② ①に該当しないもの（要管理土）のうち、受入候補地での地下水経由のリスク評価について、設定された対応目標を満足すると評価され、かつ盛土等の施工後に土の搬出管理を行うことができる場合には、覆土等により要管理土とその他の発生土とを区別できるようにした上で地下水面より 50cm 以上の離隔を確保することにより、対策工を施工せずに盛土等にできる。このような土を「搬出時管理土」という。ただし、発生源濃度区分が【低】の搬出時管理土については、必要に応じて効果確認モニタリング（**4.3.1 解説(3)8)** および **4.5**）を実施する。

なお、上記にかかわらず、発生土が水面埋立地などの受入施設等が定める基準を満足する場合においては、そこへ搬出することが可能である。

③ ①、②のいずれにも該当しないものについては、対策を実施すれば管理下で盛土等にできる。このような土を「要対策土」という。

要対策土を盛土等に利用する場合、基本的に地下水経由のリスクへの対応が必要である。また、本マニュアルでは対策工として、要対策土の拡散防止および通常の発生土との区別のため、全ての場合で覆土等により要対策土が表面に露出しない構造とする。これにより要対策土への対応においてはその性状によらず、直接摂取のリスクに対応したものとなっている。

表流水経由のリスクについて、発生源濃度の評価結果が **2.8 (1)** で設定した対応目標（公共用水域への排水水質について水質汚濁防止法の一般排水基準など）を満足していない場合には対応が必要である。

なお、発生土が水面埋立地などの受入施設等が定める基準を満足する場合においては、そこへ搬出することが可能である。

(2) 対策工が必要な場合の対応方法の検討

対策工が必要な場合は、当該現場における各対策工の信頼性を整理してその結果と施工性や費用、工期などを総合的に勘案し、個々の現場の状況に合った最善の対応方法を検討する。対策工には、覆土工などによる要管理土の拡散防止と直接摂取経路の遮断、遮水工などの物理的方法による滲出水の発生抑制や地下浸透抑制、不溶化工・吸着層工・中和工・水処理工などの主として化学的方法による要管理土からの滲出水の無害化、モニタリングがある。**表-2.11.1** に要対策土を用いて築造する盛土が有すべき機能と対応する工種の例を示す。なお、対策工の信頼性については、**参考資料 17** を参照する。

表-2.11.1　要対策土を用いて築造する盛土が有すべき機能と対応する工種の例

機　能	工種の例
直接摂取経路の遮断	覆土工、表面被覆工、舗装工
盛土内への雨水の浸透抑制	覆土工、植栽工、転圧工、上部遮水工
重金属等の溶解や酸化反応の抑制	不溶化工
重金属等の捕捉や酸性水の中和	吸着層工、滲出水処理工、透過性地下水浄化壁工、中和工
盛土滲出水の地下浸透の抑制 および表流水としての排水	底部遮水工、排水工
対策効果の確認	内部保有水の水位観測、排水量または漏水観測、排水水質分析、地下水水質分析など
要対策土とそれ以外の土との区別（必要がある場合）	覆土工、表面被覆工、砕石敷設工など

1) 現場ごとの対策工の信頼性の整理

対策工が必要な場合は、各対策工の特性と現場条件との兼ね合いをよく検討し、当該現場における各対策工の信頼性を整理する。信頼性の種類としては、対策工そのものが持つ設計上の信頼性のほか、現場の岩石・土壌の性状との組合せによって発現する信頼性、使用する資材の長期耐久性に関する信頼性、機能の多重性、地盤の変形に対する信頼性、自己修復性の有無、施工における信頼性、および対策工の機能確認における信頼性などが考えられる。

例えば、遮水シート工はこれまで多くの実績がある方法であるが、シート表面での盛土のすべりの発生が懸念される。また軟弱地盤や地すべり地などでは、シートが損傷するリスクがある。

2) 対応方法の候補の絞り込み

リスクレベル区分と当該現場における各対策工の信頼性との関係、施工性、対応にかかる費用、および工期などを総合的に勘案して対応方法の候補を絞り込む。

発生源濃度が高い場合や、リスクレベルが高い場合は信頼性が高い対策工を選択する

（**表-2.11.2**）。

3) 搬出元と受入先の間で維持管理に関する協議

発生土の搬出元と受入先の間で要管理土としての維持管理に関する項目、内容などに関する協議を経て、対応方針を決定する。

4) 関係者との情報共有

対応方針の決定に当たっては、地域住民や自治体などの関係者と情報を共有し、必要な調整を行う。事業の円滑な進行のためには、関係者との良好なリスクコミュニケーションが重要であり、類似事例 1)などを参考に対応するとよい。

表-2.11.2　本マニュアルにおける発生土の区分と、それらの特徴および盛土等に利用する場合の配慮

（表-2.1.2 再掲）

土の区分			発生源濃度区分	土の受入地のリスクレベル区分	土の特徴	土の受入地の、地下水経由のリスクに関する特徴	自然由来重金属等含有土・酸性土としての配慮			
							盛土等にする場合の配慮	地下水・表流水リスク対策	直接摂取リスク対策	管理上の配慮
発生土	通常の発生土		－	－	・重金属等の溶出量、含有量が小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・配慮不要	－	－	・配慮不要
	要管理土	搬出時管理土	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響は小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・通常の発生土と区別	－	・通常の発生土との区別のための方法（覆土、舗装、吹付など）が兼ねる	・覆土等の維持、情報の継承 ・利用方法を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
			低	リスクレベル0		リスク評価に基づき、評価地点の地下水水質への影響が小さい		・必要に応じて効果確認モニタリング		
		要対策土（酸性土）	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響の可能性は小さいが、酸性水を発生させる可能性がある土	－	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重のシートやアスファルト舗装などの上部遮水工、転圧工などによる浸透抑制対策工や中和工などのいずれか 2）施工確認モニタリング		・覆土等の維持、情報の継承 ・必要に応じて対策工の維持管理 ・盛土等の形質を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
		要対策土（低濃度）	低	リスクレベルⅠ	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を満足し、かつ長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍以下、かつ全含有量が著しく高くない土で、以下のいずれかに該当するもの ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性がある土 ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土**	曝露経路がないと見なせる	・通常の発生土と区別 ・その上で、転圧や舗装を行うなど浸透抑制に配慮することが望ましい	・施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅡ		対策を実施しない場合においても、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性が少ない	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重の遮水工封じ込め、不溶化工、吸着層工など 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅢ		対策を実施しない場合に、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性がある	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性＊の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど）、またはその他の対策工に加えて効果確認モニタリング 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅣ		用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する	・要対策土を極力盛土等にしない ・やむを得ず盛土等にする場合は、通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性＊の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		
		要対策土（高濃度）	高	－	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を超えるか、長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍を超える、あるいは鉱石など、全含有量が著しく高い土で、以下のいずれかに該当するもの ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性がある土 ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土	－	・用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する場所で盛土等にしてはならない ・その上で、通常の発生土と区別し、対策工を施工	・必要に応じて不溶化等を実施し、第二溶出量基準を満足させた上で、以下のすべてを実施 1）信頼性＊の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		

＊　地下水・表流水経由のリスクへの対策工の信頼性は、対策工の設計、土の性状との関係、資材の長期耐久性、機能の多重性、地盤の変形などに対する自己修復性、施工、対策工の機能確認に関するものが考えられる。詳しくは参考資料17を参照されたい。

＊＊ 酸性水を発生させる可能性がある土は、リスクレベルⅠには分類されずリスクレベルⅡ～Ⅳのいずれかに分類される。

【参考文献】

1)　日本環境協会：事業者が行う土壌汚染リスクコミュニケーションのためのガイドライン. 2017，pp.70-89，日本環境協会ホームページ，https://www.jeas.or.jp/dojo/business/promote/booklet/files/05/all.pdf

2.12 構造物の機能およびその安定性の確保

要管理土を盛土等に利用する場合は、各種技術基準に準拠し、構造物の機能およびその安定性を確保する。

要管理土を盛土等に利用する場合は、重金属等や酸性水による人の健康や生活環境への影響を評価し、必要に応じて対策を講じる。その一方で、環境面への対策が土木構造物としての機能や、その安定性を損なうことになってはならない。そのため、構造物の設計に当たっては各種構造物に関する技術基準に準拠する必要がある。

代表的な構造物の技術基準類について、下記に例示する。なお、各構造物管理者が定める基準がそれぞれ存在する場合があることから、実際の設計に当たっては基準類の存在について、その都度確認する必要がある。

また、構造物の機能およびその構造安定性を確保するための維持管理については、各種法令や技術基準類に基づいて、適切に実施する。

●道路盛土

道路構造令（昭和 45 年政令第 320 号）

道路土工構造物技術基準・同解説（日本道路協会）

道路土工－盛土工指針（日本道路協会）

●河川堤防

河川管理施設等構造令（昭和 51 年政令第 199 号）

河川砂防技術基準 設計編　技術資料（国土交通省）

河川土工マニュアル（国土技術研究センター）

第３章　調査

3.1 調査の目的およびその概要

自然由来重金属等含有土や酸性土の取扱いに際し、下記の調査を必要に応じて行う。 (1) 発生土が要管理土であるかどうかの評価を目的とする調査 (2) 受入先のリスク評価、工事による環境への影響および対策工の効果の確認を目的とする調査 (3) 対策工の検討を目的とする調査

自然由来重金属等含有土や酸性土の取扱いに際し必要な調査は、(1)発生土が要管理土であるかどうかの評価を目的とする調査、(2)受入先のリスク評価、工事による環境への影響および対策工の効果の確認を目的とする調査、(3)対策工の検討を目的とする調査に大別される。**表-3.1.1** に調査の目的に応じて実施する内容を例示する。

各調査の目的および調査内容の概要を以下に示す。なお、各調査の具体的な方法は **3.3** に示す。

(1) 発生土が要管理土であるかどうかの評価を目的とする調査

a)　発生土の移動に係る法令等に関する調査

条文などの公表資料および、国や自治体が保有する台帳などによって、発生土が法令や条例などによる対象になるかどうかを確認する。これらの調査は重金属等の起源に関する調査（**(1) b)**）のうち、地歴調査と併せて行うと効率的である。

b)　重金属等の起源に関する調査

地歴調査により、有害物質を取り扱う工場、廃棄物、農薬などによる人為汚染の可能性を確認する。

必要に応じ、ボーリング調査、含有量試験、および溶出量試験の結果に基づき、有害物質濃度の空間的な偏在性や地質との関連性、および有害物質の全含有量濃度と地球化学図や鉱床図などとの比較などによって、重金属等の起源を推定する。

上記の調査によってもなお、重金属等の起源が自然由来であるか否か判然としない場合は、鉱物分析、化学形態分析、同位体分析などを用いて、重金属等の存在形態などから重金属等の起源を推定することが可能な場合があるが、これらの分析が必要な場合は、専門家の助言の下に実施することが望ましい。

本調査は、単独で実施するのではなく、地質状況に関する調査（**(1) c)**）と併せて実施することが一般的である。

c)　地質状況に関する調査

地質図やボーリングデータ、物理探査データなどの資料や、地形判読、地質踏査および必要に応じて行う物理探査を組み合わせて、地質（岩種、岩相、土質）や地質構造を把握し、地質平面図、地質断面図などにまとめる。その結果を踏まえ、試料採取のためのボーリング調査計画を策定する。なお、要管理土となる可能性がある地質に関する

表-3.1.1　調査の目的に応じて実施する項目（例）

調査の目的 ＼ 調査の内容		3.3.1 資料等調査	3.3.2 地形・地質 調査	3.3.3 水理・水文調査	3.3.4 地質試料の 採取と試験 試料の調製	3.3.5 水質試験	3.3.6 地盤物性調査	3.3.7 要管理土の 評価のための 試験	3.3.8 実現象再現 溶出試験	3.3.9 必要に応じて 実施する試験	実施の留意点
(1) 発生土が要管理土であるかどうかの評価を目的とする調査	a) 発生土の移動に係る法令や条例などに関する調査	国や自治体保有の台帳など	－	－	－	－	－	－	－	－	(1) b)の土地利用履歴調査と併せて実施
	b) 重金属等の起源に関する調査	地球化学図、鉱山位置図、土地利用履歴、論文など	(必要に応じ) 地質踏査、ボーリング調査など	(必要に応じ) 湧水調査など	(必要に応じ) 露頭試料、ボーリング試料など	－	－	全含有量試験、短期溶出試験	－	岩石・鉱物学的試験など	(1) c)と併せて実施
	c) 地質の成因や地質構造に関する調査	地形図、地質図、論文、ボーリングデータ、物理探査データなど	地形判読、地質踏査、詳細地質図、地質断面図作成など (必要に応じ) 物理探査	－	(必要に応じ) 露頭試料など	－	－	全含有量試験	－	岩石・鉱物学的試験など	(1) d)の結果をフィードバック
	d) 要管理土となる可能性がある地質に関する調査	論文など	ボーリング調査	－	主にボーリング試料	－	－	全含有量試験または直接摂取リスクの把握のための試験、短期溶出試験、酸性化可能性試験	－	迅速判定試験	(1) c)の結果を踏まえて実施
	e) 要管理土の可能性がある地質の、現場の利用条件での溶出特性に関する調査	－	ボーリング調査	－	主にボーリング試料 (必要に応じ) 重機による掘削採取	－	－	－	実現象再現溶出試験	－	発生土を利用する場合に、(1) d)の結果を踏まえて実施
(2) 受入先のリスク評価、工事による環境への影響および対策工の効果の確認を目的とする調査	a) 水利用状況、地下水の状況、表流水の状況に関する調査	地形図、地質図、ボーリングデータ、井戸台帳、河川流況など	水系図作成など (必要に応じ) 地質踏査、ボーリング調査など	水利用調査、地下水位観測、地下水流向流速調査、流量観測など	－	水質試験	－	－	－	－	本調査中の地下水観測・モニタリングは必要に応じて施工後まで継続
	b) 影響予測を行うための調査	地形図、数値標高モデル、雨量など	ボーリング調査	－	主にボーリング試料	－	透水試験など	－	－	移行特性試験	(1)および(2) a)の結果を踏まえて実施
(3) 対策工の検討を目的とする調査	a) 受入先の地盤の安定性に関する調査	ボーリングデータ、地質図、地すべり地形分布図、活断層図など	地質踏査など (必要に応じ) ボーリング調査	－	(必要に応じ) ボーリング試料	－	(必要に応じ) 標準貫入試験、粒度試験、三軸圧縮試験など	－	－	－	(必要に応じて) (2) a)の地下水に関する情報も活用
	b) 地盤材料の透水性に関する調査	－	－	－	施工で使用するものを入手	－	締固め試験、透水試験など	－	－	－	(1)の結果を踏まえて実施
	c) 不溶化性能・吸着性能に関する調査	－	－	－	施工で使用するものを入手	－	－	短期溶出試験	－	不溶化の性能を確認するための試験、移行特性試験	(1)の結果を踏まえて実施

調査（(1) d)）で実施する試料採取・分析の結果は、地質の成因や地質構造のとりまとめ結果にフィードバックする。

併せて鉱山の分布、自然由来重金属等含有土の情報などの文献調査結果を整理するとともに、調査区域に鉱山や温泉、変質帯が分布するなど、高濃度の重金属等を含有する地質が存在すると予想される場合は、必要に応じて地化学調査を実施する。これらの調査は、事業計画段階において高濃度の重金属等を含有する地質を避けるなど事業地選定の基礎資料とするとともに、重金属等の起源の推定（(1) b)）においても有用である。

d) 要管理土となる可能性がある地質の特定のための調査

地質状況に関する調査（(1) c)）の結果に基づいて、ボーリングによる試料採取を実施する。また試料は短期溶出試験、酸性化可能性試験および全含有量試験（または直接摂取のリスクを把握するための試験）の結果と地質区分やその性状との関係に基づき、要管理土の可能性がある地質を把握する。また、必要に応じて要管理土の可能性がある土を現場で判定する方法についても検討を行う。

本調査の結果は、地質状況のとりまとめ、（(1) c)）にフィードバックする。

e) 要管理土の可能性がある地質の、受入先で土が置かれる条件での溶出特性に関する調査

本調査は、要管理土を受入先で盛土等に利用する場合に実施する。

要管理土を盛土等に利用する際に、要対策土（対策が必要な発生土）であるかどうかは、受入先で土が置かれる条件に基づいて評価する必要があることから、利用条件を想定した試験（実現象再現溶出試験）を実施し、評価を行うことが望ましい。具体的には、要管理土の可能性がある代表的な試料について、土研式雨水曝露試験などにより、溶出の時間的変化の把握や実際の溶出環境に近い方法による溶出特性を把握する。

(2) 受入先のリスク評価、工事による環境への影響および対策工の効果の確認を目的とする調査

本調査は、要管理土を受入先で盛土等に利用する場合に実施する。

a) 水利用状況、地下水の状況、表流水の状況に関する調査

リスク評価に用いるもので、サイト概念モデルの構築および影響予測に用いる情報の一部である、受入候補地周辺の水理地質構造、地下水、表流水の利用実態とそれらの水質、および流況などを把握する。

また、対策工の施工の健全性およびその効果の確認を目的に行われる地下水・表流水の水質分析は、リスク評価のために行う調査と兼ねて実施し、必要に応じて施工後まで継続する。

b) 影響予測を行うための調査

本調査は、リスク評価において簡易影響予測や影響予測（定量的なモデルによる予測）を行う必要がある場合に行う。具体的には、降水量データや動水勾配を求めるための地形情報の収集、土懸濁液の pH 試験、地盤の透水試験、および地盤の物質移行特性を把

握するための試験などから、必要なものを実施する。なお、影響予測においては(1)および(2) a)で得られた情報も活用して実施する。

(3) 対策工の検討を目的とする調査

本調査は、要管理土を受入先で盛土等に利用する場合に実施する。

a) 受入先の地盤の安定性に関する調査

対策工を実施する際には、対策工が地すべり、活断層、液状化や不等沈下による変位を生じる可能性について調査を行う。具体的には、資料等調査のほか、必要に応じてサウンディング試験やボーリング試料を用いた粒度試験、力学試験などを実施する。なお、地下水位に関しては、適宜 (2) a)で得られた情報も活用する。

b) 地盤材料の透水性に関する調査

対策工の設計に当たり、地盤の透水性の把握が必要な場合に実施する。例えば、透過性地下水浄化壁や鉛直遮水壁を設ける場合や吸着層や自然地盤の吸着能を利用する場合には、難透水層の透水性とその厚さに関する情報が必要となる。具体的には現場透水試験などを実施する。

c) 不溶化性能・吸着性能に関する調査

対策工として不溶化工や吸着層工を実施する場合に、要対策土と資材との適合性を確認するために実施する。不溶化性能を確認するための試験としては、酸やアルカリを用いた不溶化処理土の安定性試験を実施する。吸着性能を確認するための試験としては、バッチ吸着試験やカラム吸着試験を実施する。なお、吸着試験は自然地盤の吸着能の把握にも用いることができる。

3.2 事業段階に応じた調査の進め方

調査は、事業全体において合理的な対応に資するよう、事業特性と事業段階ごとの目的に応じた適切な手法で計画・実施する。

事業全体の中での各事業段階における対応検討の進め方は **2.2** に示したとおりであるが、各事業段階で行う調査内容を以下に示す。

(1) 事業計画段階

要管理土が施工予定の場所から発生する可能性がある場合に、その概略分布を広域にわたり把握する。これらの要管理土の分布を道路、トンネルなどのルート選定や工事計画に反映させ、自然由来重金属等含有土や酸性土が分布しないルートまたは地点を選定することは、各種リスクを回避・低減して事業計画を合理的なものとするために重要である。

事業本来の目的上、要管理土の掘削を避けることができない場合においても、要管理土が存在する可能性を事業計画段階で把握することは、その後の調査や対策に関わる事業費、環境への負荷を軽減して設計や施工を円滑に進める上で、極めて重要である。

この段階での調査では、広域にわたって概略的な情報を得ることが必要であり、調査方法は資料等調査が主体となるが、十分な資料がない場合などには、必要に応じて現地調査を行う。

調査の結果、特に事業計画地の変更を検討することが望ましい状況は以下の通りである。その場合は、概略設計段階で行う試料採取や分析をこの段階で先行的に実施し、事業計画地の変更の必要性について精査することが望ましい。

・鉱床分布図、地球化学図、近隣の温泉の水質などの既往資料により、重金属等が土壌汚染対策法の土壌溶出量基準や土壌含有量基準を超過する濃度で分布する可能性が高いと判断される場合
・隣接工区で基準をはるかに超過する自然由来の重金属等が見つかった履歴がある場合
・事業計画地の地質が熱水変質を被っているなど、一般的に重金属等の濃度が高いと考えられる地質の場合
・重金属等が高濃度で分布しているという情報がある場合（計画初期段階のボーリング調査など）

(2) 概略設計段階

1) 概要

概略設計段階では、事業計画場所における要管理土の分布・性状を把握し、対策の要否、要管理土量、および要管理土を盛土等に利用する場合の影響を概略評価するための調査・試験を行う。その結果は、事業区域や路線・線形などの見直しも含めた対応方針の立案や要管理土が発生した場合の受入候補地の絞り込み、および事業の環境影響を把握するためのモニタリングの計画に資する。

調査方法の詳細は、**3.3** を参照されたい。

2) 要管理土となる地質の概略把握

事業計画段階における調査の結果、事業予定地内に要管理土が存在する可能性があると判断された場合には、事業予定地の地質中の重金属等の濃度などを調査し、対策の必要性を検討する。

要管理土の判別に当たっては、地質の分布と構造を把握した上で地質を区分し、地質区分ごとに重金属等の全含有量や溶出特性を把握する。そして、各地質区分についての要管理土を判定する。**図-3.2.1** に、トンネル工事を例に要管理土を判定するための調査のイメージを示す。

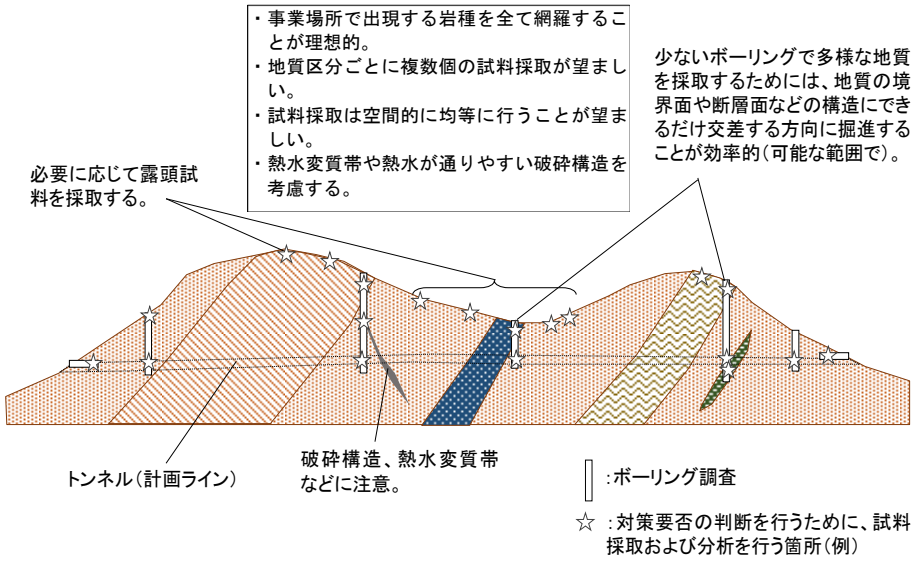


図-3.2.1　要管理土の判定のための調査イメージ

地質の分布と地質構造の把握は、地質図、地形図や既存の物理探査結果およびボーリング調査結果などを参考に、現地踏査により行う。例えば、堆積岩類では泥質岩で重金属等が溶出する事例が多いが、堆積岩類は層状をなすため、地質の傾斜や褶曲、断層などの地質構造を把握することで効率的な調査が可能となる。また、熱水変質帯や熱水が通りやすい破砕構造には重金属等が濃集することがあるが、これらは物理探査や地形的なリニアメントにより把握可能な場合がある。試料採取は、地質の分布や構造を勘案してボーリング調査地点を選定し、実施する。また、必要に応じて露頭における試料採取を行う。調査は、近接する地域においては、地質の性状（岩種、含有鉱物種、破砕度、風化や変質の程度、色、粒度、強度など）ごとに属性が類似するという考え方に基づいて実施されるが、地質は不均質性を有することがある。そのため試料採取は、近接する地域ごと、地質区分ごとに複数個行うことが望ましい。また、事業場所全体を見渡した上で、空間的に均等に試料を採取することが望ましい。例えば、同一地質が広く分布する場合でも、ある程度距離が離れている場合には、空間的な不均質を考慮して試料採取箇所を増やすとよい。

事業場所全体の状況を把握するためには、調査の初期段階において事業予定地で出現する岩種を全て網羅するように採取することが望ましい。少ないボーリングで多様な地質試料を採取するためには、地質の境界面や断層面などの構造にできるだけ直交する方向に掘進することが効率的である。また、採取試料の地質性状を詳しく記載しておき、分析結果に基づいて要管理土かどうかの判断をする際には、必要に応じて地質性状のバリエーションに着目した追加の試料採取・分析を行う。

なお、採取試料のうち露頭試料については、風化の影響により、同一地点・地質の新鮮試料と比べて重金属等の溶出特性が大きく異なっている可能性があることに注意する必要がある。例えば、露頭試料については溶出試験に利用しないこととする、あるいは、露頭採取試料と深部から採取したボーリング試料のそれぞれを分析し、風化による溶出特性の違いを検討することが考えられる。

採取試料の主な分析方法には、短期溶出試験、全含有量試験（または直接摂取のリスクを把握する試験）、および酸性化可能性試験がある。また、要管理土を盛土等に利用する場合には、事業予定地で出現する各地質の代表試料について実現象再現溶出試験を早期に開始し、溶出特性を把握することが望ましい。

分析結果は、地域ごとに地質性状が類似するグループに整理（一般的にはまず、地層名と岩種、風化・変質の度合いで整理することが多い）し、必要に応じて専門家の助言を仰ぎつつ要管理土かどうかを総合的に判断する。例えば、あるグループについて十分な数の試料分析に基づき全ての試料について要管理土でないと判定された場合は、そのグループの地質については施工時の分析をせずに通常の発生土であると判断できる。しかしながら、同じグループに整理された地質でも通常の発生土と判定されるものと要管理土と判定されるものとが混在していることもある。その場合、①追加分析や再区分など、事前調査を強化して合理的判定基準を見出す方法、②施工時に一定ロットごとに試料採取・分析を行って判定を行う方法、③そのグループの地質を全て要管理土とする方法などの選択肢がある（**図-3.2.2**）。選択に当たっては、工事の時間的、費用的あるいは現場条件による制約、調査の実現可能性などを踏まえて総合的に判断する。

なお、要管理土とされる地質が相当量存在することが判明した場合には、対策費用を試算し、場合によっては要管理土とされる地質が少ない場所へ事業場所を変更することも考えられる。

3) 要管理土量の概略推定

施工時の対応方法（工法、構造検討を含む）を検討するためにはまず、要管理土量を推定する必要がある。一般的には、ボーリングなどの調査量を増やすことで、要管理土量の推定精度を上げることが可能である。しかし、長大トンネルなど、施工計画段階までの調査で全ての地質の分析が困難な場合は、推定の精度が十分でないことに留意する。

要管理土量の推定結果を受け、盛土等に利用することを想定して場所の選定を開始する。なお、一般的に地山を掘削した場合には、容積が地山ベースよりも大きくなる。盛

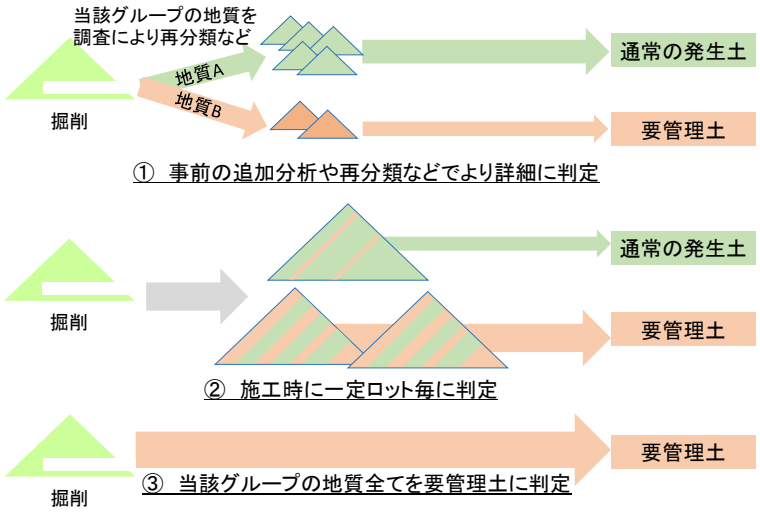


図-3.2.2　同じグループに整理された地質に要管理土とそうでないものが混在する場合の対応

土等の材料として搬出を計画する場合には、要管理土量の推定において、地山ベースではなく、適切な土量変化率を想定する必要がある。

4) 受入候補地周辺における地質調査、水理・水文調査およびモニタリング地点の検討

事業において発生土を盛土等に利用する場合、発生土が要管理土である可能性があることも考慮し、受入候補地周辺の地質調査、水理・水文調査を実施することが望ましい。盛土等の周辺への影響予測のために必要な情報として、水理地質構造、周辺の地下水利用状況の把握、地下水および表流水の状況の把握があり、受入候補地と盛土等の形状、および表流水や地下水の流動方向を推定するための地形情報から、水質モニタリング地点などを検討できる。詳しくは **3.3** および **4.5** を参照されたい。

5) リスク評価のためのサイト概念モデルの構築

リスク評価を実施するに当たり、受入候補地周辺の地質調査、水理・水文調査で取得した情報を、サイト概念モデルとしてまとめる。サイト概念モデルは、調査の進行や計画の具体化の度合いに応じて、詳細設計段階、施工計画段階で随時必要な調査を実施し、より精緻なものに更新する。詳しくは **3.4** を参照されたい。

(3) 詳細設計段階・施工計画段階

1) 概要

詳細設計段階・施工計画段階では、概略設計段階での調査を補完して要管理土の分布・性状把握の精度を高めるとともに、施工時における要管理土の判定方法を検討して「施工時調査計画」を策定するための調査を行う。また、要管理土を盛土等に利用する場合は、必要に応じてサイト概念モデルの精緻化や、影響予測に必要な入力値（パラメータ）の取得のための各種調査を実施する。さらに、対策工の設計が必要な場合には、設計のための調査を行う。

施工時調査計画は、自然由来重金属等への対応について実際の施工を行う時に何を調

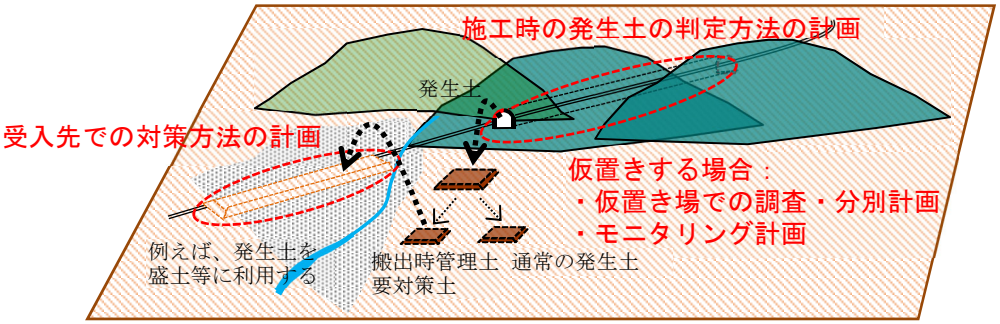


図-3.2.3　施工時調査計画の前提となる計画イメージ

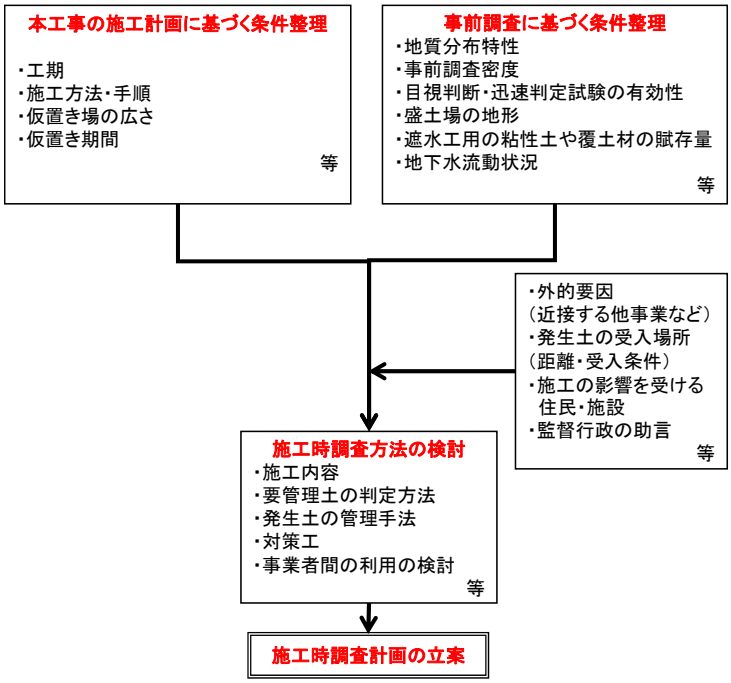


図-3.2.4　施工時調査計画策定に当たっての検討事項

査し、何を判断しなければならないか、工程やコストを精査しながら立案される計画である。概略設計段階までの調査結果を施工時調査計画に反映し、施工時の発生土の試料採取方法や頻度の決定に当たり、不足する内容に応じて追加調査を実施する。概略設計段階において把握された要管理土量を基に、盛土構造の設計変更を行う必要が生じたような場合にも、この時点で検討を行い施工時調査計画に反映する必要がある。

すなわち、施工時調査計画の立案に当たっては、本工事の施工条件（施工方法、発生土の仮置き場の面積、仮置き期間など）、対象地の環境条件など（土質、地下水流動状況、地下水位、人家までの距離など）を整理するとともに、掘削、仮置き、判定、対策工、およびモニタリングなど、要管理土への一連の対応方針を反映した工事全体の施工計画が前提になる。また、要管理土に係る施工管理計画も具体的に立案することが重要である（**図-3.2.3**）。施工時調査計画策定に当たっての検討事項を**図-3.2.4** に示す。要管理土

を盛土等に利用する場合には、受入候補地や要管理土の仮置き計画地における工事の水環境への影響を評価し、対策工の施工の健全性を確認するためのモニタリング調査（施工確認モニタリング）をこの段階から始める。

詳細設計段階・施工計画段階の調査では、施工時調査での試料採取と要管理土か否かの判定方法のフローを立案するとともに、発生土の受入先まで考慮することが重要である。特に、他事業における発生土の利用では事業者により受入基準が異なるので、この段階で利用方法に関する必要な事前協議を行っておくことが望ましい。

2) 試料採取計画の立案

調査における試料採取では、各工種（山岳トンネル、シールドトンネル、造成工事、切土工事、建築工事など）に応じてどこで、どのような方法や頻度で、発生土をどれくらい採取して分析を行うかを検討する。試料採取方法は、工種ごとに発生土の搬出方法、頻度、掘削地点の事前の目視調査結果、周辺環境などを考慮の上検討する。**表-3.2.1** は工種ごとの試料採取の方法と、その可能なタイミングについてまとめたものである。

詳細設計段階・施工計画段階での試料採取は、各工種とも地上からのボーリング以外は困難であるが、施工時においては工種ごとに試料採取のポイントが異なることを踏まえ、適切な施工時調査計画を立案できるようにする。

表-3.2.1　各工種の試料採取の方法

工種	試料採取方法	試料採取可能な段階		
		設計段階	施工計画段階	施工時
山岳トンネル	地上からのボーリング（鉛直、水平、斜め）	○	○	△
	先進ボーリング、先進導坑			○
	切羽周辺での採取			○
	仮置き場での採取			○
シールドトンネル	地上からのボーリング（鉛直、斜め）	○	○	△
	シールド機械周辺（ベルトコンベアなど）			○
	仮置き場での採取			○
造成工事・切土工事・建築工事	地上からのボーリング（鉛直、水平、斜め）	○	○	△
	掘削地点周辺での採取			○
	仮置き場での採取			○

○：用いる　△：通常用いない

3) 要管理土の判定方法の検討

施工時には、必要に応じて要管理土（搬出時管理土・要対策土）の分別のための調査を実施するが、地質区分ごとの対応の必要性評価に基づいて地質区分の目視判定を行う

場合と、短期溶出試験、酸性化可能性試験、全含有量試験または直接摂取のリスクを把握するための試験、迅速判定試験（**3.3.9**）などにより一定の土量ごとに発生土を判定する場合、およびこれらを組み合わせる場合がある。そのため、詳細設計段階・施工計画段階までに行われる試料採取・分析結果に基づき搬出時管理土・要対策土かどうかの判定の根拠を明確化しておく必要がある。搬出時管理土・要対策土を判定するための分析ロット（分析単位）は、事前調査に基づく地質的な特性、および施工内容を考慮し、通常は最低 1 日の掘削土量から 5,000 m^3 の間で実施可能な範囲に設定することが多い。

施工時調査において分析を計量証明事業所に依頼する場合、前処理などを含め最大 2 週間程度の試験・分析期間を必要とするため、その期間内に発生する発生土の仮置き場が必要となる。十分な仮置き場が確保できない場合は、例えばトンネル掘削中に切羽から先進ボーリングを実施し、そのコア分析結果に基づき土の判定をあらかじめ行っておく場合がある。あるいは、短期溶出試験や酸性化可能性試験の代わりに迅速判定試験により判定することもある。迅速判定試験の実施に当たっては、詳細設計段階・施工計画段階までに採取した試料を用いて、短期溶出試験、酸性化可能性試験あるいは全含有量試験結果と迅速判定試験方法による分析結果との比較を多数実施し、相関性があることを確認した上で、搬出時管理土・要対策土の判定基準を作成しておく必要がある。

なお、詳細設計段階・施工計画段階までに十分な調査を実施することが困難な場合や、想定とは異なる地質の存在が施工時に判明した場合には、施工時調査で試料採取・分析を行い、搬出時管理土・要対策土かどうかを判定する。そのような場合の判定方法は短期溶出試験および酸性化可能性試験とし、判定基準はそれぞれ土壌溶出量基準、酸性化可能性基準（pH3.5 を上回る）とする場合が多い。また、実現象再現溶出試験の結果を踏まえた検討結果がある場合は、これと異なるものとなる。

最後に、仮置き場に保管している発生土を現場内で盛土等に利用する場合や受入施設等へ搬出（処分または事業者間利用）する場合の品質管理という観点も重要である。例えば、要対策土の判定試験として、受入施設等が要求する試験を実施する場合もあり得る。また、要対策土であると決定したロットの土が適切に保管、搬出されるための仮置き場の養生方法や搬入搬出計画、場内で盛土等に利用する土の品質管理のための確認分析など、必要に応じて施工時調査計画に盛り込む。

4) サイト概念モデルの精緻化や影響予測のための入力値（パラメータ）の取得

要管理土を盛土等に利用する場合、リスク評価に必要なサイト概念モデルの精緻化や影響予測のための入力値（パラメータ）を取得するため、必要な調査を実施する。受入候補地が具体的になった場合は、その周辺の水理地質構造、地下水の水位、流向、流速、水質（バックグラウンド濃度）とそれらの変動について、現地調査によって把握することが望ましい。地下水観測井は、要対策土を盛土等に利用する場合はそのままモニタリング井として利用できる位置に設置するのが効率的なので、その配置を工夫する。また、観測井を設ける際に併せて試料採取を行っておくと、影響予測のための入力値を取得す

るための各種試験に活用できる。

5) 対策工の設計のための必要な調査

通常の構造物の設計に加え、対策工が必要な場合には、対策工に要求される機能を確保するための設計に必要な調査を適宜実施する。例えば、粘性土による封じ込めや吸着層工など、透水性に関する性能が要求される対策工を採用する場合には、現場での施工条件を決定するための試験施工と現場透水試験を実施し、必要な透水性を確保するための施工条件を決定することが考えられる。不溶化工を実施する場合は、現場材料を用いた配合試験試料に対し、不溶化性能を確認するための試験を行うことが考えられる。吸着層工を実施する場合は、現場で発生する要対策土や使用する予定の吸着層母材を用いた移行特性試験を実施し、吸着性能を確認することが考えられる。また、対策工の効果を確認するためのモニタリング方法について検討し、必要に応じて観測井や漏水検知装置などの配置を検討する。

さらに、要対策土を仮置きする場合は、仮置き場所における必要な対策のための調査を実施する。

(4) 施工段階

1) 概要

施工段階では、基本的には施工計画段階までに策定した施工時調査計画に基づき、要管理土と通常の発生土との分別のための調査、および工事の水環境への影響を評価して対策工の施工の健全性を確認するためのモニタリング調査を実施する（**表-3.2.2**）。

表-3.2.2　施工段階で実施する調査内容

目　　的	項目の例	対　　象	試験・分析項目（例）	備　　考
要管理土かどうかの判定	・掘削面の分析・観察 ・ボーリングコアの分析 ・発生土の分析	・切羽などの掘削面 ・施工予定の地質 ・施工に伴う発生土	・目視判定 ・重金属等の溶出試験 （事前調査で設定した基準を満足しない可能性があると判断した項目） ・pH など	・含有量試験、酸性化可能性試験などは、必要に応じて実施する。
対策工の施工の健全性の確認	・地下水・表流水の水質モニタリング	・地下水 ・排水先の表流水 ・工事排水	・対象重金属等 ・pH，EC など	

2) 要管理土の分別

要管理土（搬出時管理土、要対策土）の分別は、各現場状況に適合したフローを作成して対応する。施工時調査計画で想定と異なる状況に遭遇した場合は、必要に応じて追加調査を行う。例えば、切羽観察で想定通りの地質状況が確認された場合は施工時調査計画に基づき発生土を判定できるが、想定と異なる地質状況（想定と異なる岩種や、想

定より著しい変質、鉱脈の出現など）が確認された場合には、短期溶出試験、酸性化可能性試験、全含有量試験などを行い、対応を決定する必要がある。このように、施工段階で想定と大きく異なる状況が明らかになると、施工工程に影響するような事態になることがあるため、施工計画段階までにできる限り状況を把握するための調査を行うことが望ましい。

3) モニタリング

要対策土を盛土等に利用する場所や要対策土の仮置き場所では、対策工の施工の健全性を確認するためのモニタリング（施工確認モニタリング；**4.5**）を実施する。特に、周辺に飲用井戸などがある場合、慎重に対応する必要がある。施工前、施工中、施工後の各段階で実施する水質モニタリングにおける留意点は **4.5** を参照されたい。また、掘削場所からの排水についても水質モニタリングを行う。

(5) 維持管理段階

1) 概要

要管理土を盛土等に利用した場合は、維持管理段階においては長期にわたる要管理土の安全な管理のために必要な調査を行う。具体的には、要管理土の意図的、非意図的な拡散が起こらないよう、巡視点検や覆土等を含めた構造物の維持管理を行う。

また、要対策土を盛土等に利用した場合は、施工の健全性を確認するためのモニタリング（施工確認モニタリング）を実施する。また必要に応じて、対策の一環として対策工の効果やリスク評価結果の確認のために行う各種のモニタリング（効果確認モニタリング；**4.5**）を行う。

そして、要管理土を用いた構造物の健全性を保つための必要な対応、およびモニタリングで異常が確認された場合の調査および必要な対応を実施する（**表-3.2.3**）。

2) 要管理土を用いた構造物の点検・維持

要管理土を用いた盛土等の構造物には、施工後、長期の経年劣化のほか、解体や再掘削、侵食、崩壊などが生じ、その部分が新たな重金属等の拡散の契機となる可能性がある。そのため、定期的な点検のほか、長雨や暴風雨、洪水、地震などの発生後に点検を行い、構造物の機能保持に影響するような性状変化や形状変化などによる措置の必要がないかを確認する必要がある。

要管理土を用いた構造物の性状変化が発見された場合は、構造物の崩壊、倒壊の危険や重金属等の拡散による周辺環境への影響を防止するため、構造物の修復を行う。構造物としての安全性の観点からは目視などによる調査が考えられる。調査や措置の方法を検討するに当たり、施工報告書や記録の内容は有用となるため、**4.6** にも示すように適切に作成・継承されることが重要である。

3) モニタリング

要管理土を盛土等にした場合、施工確認モニタリングや効果確認モニタリングとして行う受入地周辺のモニタリングは、あらかじめ定めたモニタリング計画に基づき実施す

る。施工確認モニタリングについては、期間中（施工後、最低でも 2 年間以上）にあらかじめ定めた対応目標を満足しない兆候が認められない場合には、モニタリングを終了する。効果確認モニタリングについては必要な期間実施する。

4) モニタリングで異常が確認された場合の調査および必要な対応

要対策土周辺で行うモニタリングで、あらかじめ定めた対応目標を満足しない兆候が認められた場合には、まず、地下水・表流水経由の重金属等の人への健康影響を防止する観点で必要な措置を講じる。具体的には、水利用地点での水質を確認するとともに、汚染地下水、表流水の広がりを監視するためのモニタリングを充実させる。そして水利用地点での水質が確保できない、またはそのおそれがある場合には、地下水や表流水利用の中止要請や代替水源の確保を行う。また、バックグラウンド濃度を示すと考えられるモニタリング地点の水質との比較を行い、水質異常が要対策土を用いた構造物に起因する可能性がある場合には、その原因を調査する。調査結果に基づいて可能な対策を実施し、改善が認められない場合は更なる対策を検討、実施する。

表-3.2.3　維持管理段階で実施する調査内容

目　　的	項目の例	対　　象	試験・分析項目（例）	備　　考
要管理土の拡散の防止	・定期点検・臨時点検(長雨、暴風雨、地震などの後)	・盛土等の構造物の外観	・目視など	異常が認められた場合は構造物の補修を実施
対策工の施工の健全性の確認	・地下水・表流水の水質モニタリング	・地下水 ・排水先の表流水 ・工事排水	・対象重金属等 ・pH，EC など	施工確認モニタリング(施工の健全性の確認のため実施)
対策工の効果の確認	・滲出水・地下水の水質モニタリング ・漏洩モニタリング	・滲出水・地下水 ・内部保有水・漏洩水	・対象重金属等 ・pH，EC など ・水位の検知など	効果確認モニタリング（必要に応じ、対策工の一環として実施）
モニタリングで異常が確認された場合の対応	・水利用地点の水質の確認 ・汚染地下水、表流水の広がりの監視 ・異常の原因調査	・水利用地点および受入先周辺の地下水・表流水 ・盛土等ほか	・対象重金属等 ・pH，EC など ・状況に応じて選定	

3.3 調査・試験方法

調査は、資料等調査、地形・地質調査、水理・水文調査および水質試料の採取、地質試料の採取と試験試料の調製、地質・水質試料および各種材料の試験・分析を、調査の目的に応じて組み合わせて行う。

3.3.1 資料等調査

対象地域の地形・地質、水理・水文特性、水質、気象、保全対象（予定）区域の現況、対象地域およびその周辺の土地利用履歴、特定有害物質使用履歴、当該工事などに関する既存資料を収集、整理する。

(1) 調査の目的

資料等調査の目的は、対象地域の地形・地質調査、表流水・地下水などの水文調査および人為的な土壌汚染の有無を把握するための基礎資料を得ることである。

(2) 調査の対象地域

対象地域は事業地、受入候補地およびそれらの周辺とする。

(3) 調査の概要

対象地域とその周辺の広域的な地形・地質・水理・水文特性・水質・保全対象（予定）の現況、および対象地域とその周辺の土地利用履歴、特定有害物質使用履歴、当該工事などに関する既存資料を収集し、整理する。資料等調査では、事業計画地点や、設計・施工段階の留意事項の検討を行う。また、ルート選定では、問題となる地質を避けることが望ましいので、線形、経済合理性、発生土と盛土のバランス、地域状況なども含め、総合的に判断する（**図-3.3.1**）。なお、本調査は構造物の調査に先立ち行うことが望ましい。

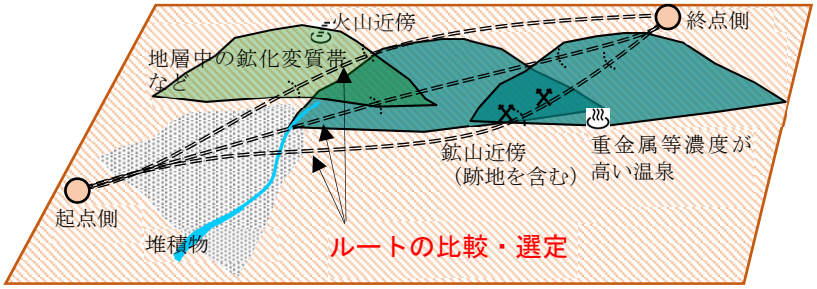


図-3.3.1　自然由来重金属等に着目した資料等調査におけるルート選定の例

(4) 地形・地質に関する資料収集

1) 一般的な地形・地質

①地形図・地形データ

地形図・地形データの収集対象例を**表-3.3.1**に示す。資料等調査は、対象地域とその周辺に関して、調査範囲に応じた縮尺の地形図・地形データを収集しておくことが必要である。

表-3.3.1　地形図・地形データの例

地形図・地形データ	発行	備考
2,500分1国土基本図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
5,000分1国土基本図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
1万分1地形図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
2万5千分1地形図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
5万分1地形図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
20万分1地勢図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
50万分1地方図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
電子地形図25000	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
電子地形図20万	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
基盤地図情報	国土地理院	URL<https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>
数値地図(国土基本情報)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
数値地図(国土基本情報20万)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
森林基本図(1/5,000)	林野庁(各森林管理署)	
土地利用図(20万分1)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
土地利用図(5万分1)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
土地利用図(2万5千分1)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
火山基本図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
地形分類図	経済企画庁、国土庁、各都道府県	土地分類基本調査
土地条件図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
数値地図25000(土地条件)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
国土数値情報　土地利用細分	国土交通省	GISホームページ(メッシュデータ、ラスタ版)
治水地形分類図(2万5千分1)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
デジタル標高地形図	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
細密数値情報(10mメッシュ土地利用)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
数値地図5000(土地利用)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
国土数値情報　土地利用細分	国土交通省	GISホームページ(メッシュデータ、ラスタ版)
活断層図(都市圏活断層図)	国土地理院	(一財)日本地図センターから入手可能
活断層分布図	東京大学出版会	「[新編]日本の活断層」
住宅地図	ゼンリン(ゼンリン住宅地図の購入には、会員登録が必要)	URL<https://www.zenrin.co.jp/product/category/top/index.html>

※国土地理院で発行している地形図・地形データの多くは地理院地図(URL<https://maps.gsi.go.jp/>)で閲覧可能。

なお、対象地域の範囲内に既存の航空レーザ測量のデータが存在する場合には、当該データを使用して詳細な地形データを作成できるため、収集しておくことが望ましい。また、無料で入手可能な航空レーザ測量データとしては、「基盤地図情報（5m メッシュ標高（DEM5A））」（国土地理院）などがある。

②地質図・地質データ

自然由来の重金属等に関する既存資料として、産業技術総合研究所による「20 万分の 1 日本シームレス地質図」、「5 万分の 1 地質図」、「地球化学図データベース」などが利用できる。対象地域を限定する場合、**表-3.3.2** に示す「地質図・地質データ」のほか、より大縮尺の情報があれば利用するとよい。

表-3.3.2　地質図・地質データの例

地質図・地質データ	発行	備考
1/200,000地質図	産業技術総合研究所	
1/50,000地質図	産業技術総合研究所、各都道府県	
20万分の1日本シームレス地質図	産業技術総合研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/seamless/>
1/50,000表層地質図	経済企画庁、国土庁、各都道府県	土地分類基本調査
地質図	各都道府県	
火山土地条件図	国土地理院	・(一財)日本地図センターから入手可能 ・地理院地図URL<http://maps.gsi.go.jp/>で閲覧可能
地質情報データベース	産業技術総合研究所	URL<https://www.gsj.jp/researches/geodb/>
地質図カタログ	産業技術総合研究所	URL<https://www.gsj.jp/Map/>
地質図Navi	産業技術総合研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>
関東平野の地下地質・地盤データベース	産業技術総合研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/kantosubsurfacegeoDB/>

③ボーリングデータ

全国のボーリングデータを収録したデータベースには、「国土地盤情報検索サイトKuniJiban」、「国土地盤情報データベース」、「国土地盤情報データベース」や「ジオ・ステーション」がある。また、各自治体で整備され、公表されているボーリングデータベースについては国土交通省「宅地防災」ホームページ中にリストがある。これらを利用してボーリングデータを収集可能である（**表-3.3.3**）。

表-3.3.3　ボーリングデータの例

ボーリングデータ	発行	備考
ジオ・ステーション（Geo-Station）	(国研)防災科学技術研究所、(国研)産業技術総合研究所、(国研)土木研究所、(公社)地盤工学会	URL<https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>
国土地盤情報検索サイトKunijiban	国土交通省、土木研究所、港湾空港技術研究所	URL<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>
国土地盤情報データベース	(一財)国土地盤情報センター	URL<https://www.ngic.or.jp/>
ボーリング資料等の地質情報	国土交通省	「宅地防災」ホームページ URL<https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000059.html>

④空中写真

国土地理院が保有する 1936 年から現在までの空中写真が国土地理院ウェブサイトから閲覧できる。撮影日が異なる空中写真により、地形・地質の改変状況や土地利用の変遷を確認できる（**表-3.3.4**）。

表-3.3.4　空中写真の例

空中写真	発行	備考
地理院地図（年代別の写真）	国土地理院	URL<https://maps.gsi.go.jp/>
地図・空中写真閲覧サービス	国土地理院	URL<https://mapps.gsi.go.jp/>
空中写真（画像データ・出力印画）	国土地理院	（一財）日本地図センターから入手可能
空中写真（1/8,000～1/40,000）	林野庁	
Google Earth	Google	使用に際しては、(1)Google利用規約、および(2)Googleマップ/Google Earth追加利用規約を参照のこと <https://www.google.com/intl/ja/help/terms_maps/>

2) 特定の地質に関する資料

鉱山・温泉・変質帯およびその周辺は、重金属等が高濃度で存在する可能性がある。また、海成泥岩は、砒素や硫化鉱物を広く含むことが知られている。さらに、蛇紋岩などの超塩基性岩は、六価クロムを含む可能性がある。このように、有害物質が特定の地質に関連づけられるものもあるため、データを収集することが望ましい（**表-3.3.5**）。地質文献データベースを活用すると、最新のデータを入手できる。

・日本の地球化学図（産業技術総合研究所）：日本全国の元素の濃度分布が記されている。

・5 万分の 1 土壌・地質汚染評価基本図（産業技術総合研究所）：土壌や堆積物中の重金属等の全含有量、溶出量のバックグラウンド濃度に関する情報が記された数値地質図である。2022 年 8 月現在、「姉崎」、「仙台」の 2 地域が公表されている。

・表層土壌評価基本図（産業技術総合研究所）：表層土壌中の重金属等の全含有量、土壌含有量、土壌溶出量に関する情報が記された数値地質図である。2022 年 8 月現在、「宮城県」、「鳥取県」、「富山県」、「茨城県」、「高知県」および「四国地域」の 6 地域が公表されている。

表-3.3.5　特定の地質に関する資料の例

特定の地質データ	発行	備考
地球化学図データベース	産業技術総合研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/>
土壌・地質汚染評価基本図	産業技術総合研究所	姉崎・仙台
表層土壌評価基本図	産業技術総合研究所	宮城県、鳥取県、富山県、茨城県、高知県、四国地域、九州・沖縄地方
統合版地質文献データベース	産業技術研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/geolis/>
地質学雑誌	日本地質学会	
応用地質	日本応用地質学会	
第四紀研究	日本第四紀学会	
地盤工学会誌、地盤工学会論文報告集	地盤工学会	
土木学会誌、土木学会論文集	土木学会	
資源地質(旧　鉱山地質)、Resource　Geology	資源素材学会(旧鉱山地質学会)	
トンネルと地下	土木工学社	
地質と調査	全国地質調査業協会連合会	
物理探査	物理探査学会	
地質調査所報告	産業技術総合研究所	鉱床調査報告書
鉱業原簿及び鉱区図	経済産業省(各地方経済産業局)	

(5) 水理・水文特性、水質に関する資料収集

水理・水文特性、水質に関する収集可能な資料としては、井戸台帳、水理地質図および河川流量などがある（**表-3.3.6**）。

・井戸台帳（国土交通省国土政策局国土情報課）：全国地下水資料台帳は、国土交通省 国土政策局 国土情報課のホームページからダウンロードできる。データは Excel VBA（マクロ）形式で水基本調査（地下水調査）ファイルを閲覧できる。データは、都道府県ごとに 1. 市町村コード順、2. 緯度の低い方から、3. 経度の昇順に並べて取りまとめられている。なお、個人所有の小規模井戸の情報については必要に応じてヒアリング

などで収集する必要がある。

・水文環境図・日本水理地質図（産業技術総合研究所）：地下水や表流水の水質、地下水位などについて記されている。

・河川の流量：国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所における水文水質の観測データが公開されている。また、都道府県等の管理機関が河川に設置している流量観測点のデータがある。対象地域内の観測点についてはもれなくデータを収集するが、対象地域に限定するとデータが得られない場合が多いので、同一水系など対象地域を囲む周辺の観測点のデータも収集することが望ましい。

・水質調査データ：環境省の水環境総合情報サイトに公共用水域水質測定データ、広域総合水質測定データ、水浴場水質測定データが収集されている。

表-3.3.6　水理特性・水質データの例

水理特性・水質データ	発行	備考
全国地下水資料台帳調査	国土交通省 国土政策局 国土情報課	URL<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/f9_exp.html>
水文環境図/全国水文環境データベース	産業技術総合研究所	URL<https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/main.html>
河川の流量	国土交通省水管理・国土保全局（水文水質データベース）	URL<http://www1.river.go.jp/＞
水質調査データ	環境省（水環境総合情報サイト）	URL<https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/index.asp>

(6) 気象に関する資料収集

建設工事に伴う水質調査の頻度の設定などを行う際、対象地域の気象条件として降水量および気温のデータを収集し、整理する。気象データは、気象庁の地域気象観測システム「アメダス（AMeDAS）」などを基に、降水量、気温、風向、風速などのデータを時間ごと、日ごと、月ごと、年ごとのデータのほか、各月・年の平年値が検索可能である。対象地域内や対象地域を囲む周辺の観測点のデータも収集する（**表-3.3.7**）。

また、道路・河川などの管理のため国土交通省や都道府県等の管理機関が保有するデータが入手可能であれば、併せて収集することが望ましい。

表-3.3.7　気象データの例

気象データ	発行	備考
気象データ	気象庁	URL<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>

(7) 保全対象（予定）区域の現況に関する資料収集

保全対象（予定）区域の現況は、保全対象となる人家・集落などの人が居住する箇所、道路・公園などの不特定多数の人が立ち入りする箇所、地下水・表流水・湧水などの利用地点および利用状況、ならびに土地利用の状況に関する資料を収集し、整理する。また、文化財・

記念物に関する情報や、自然環境条件図類も適宜収集することが望ましい（**表-3.3.8**）。

表-3.3.8　保全対象に関するデータの例

保全対象に関するデータ	発行	備考
文化財、記念物に関する情報	各自治体(教育委員会)	
自然環境条件図類	各自治体	原生自然環境保全地域、自然環境保全特別地域、国立公園特別保護地区・第一種・二種特別地域、国定公園特別保護地区・第一種・二種特別地域等
住宅地図	ゼンリン（ゼンリン住宅地図の購入には、会員登録が必要）	URL<https://www.zenrin.co.jp/product/category/top/index.html>

(8) 発生土の移動に係る法令等、土地利用履歴および特定有害物質使用履歴に関する資料収集

条文などの公表資料および、国や自治体が保有する台帳などによって、発生土が法令や条例などの対象になるかどうかを確認する。対象となる主な法令としては、土壌汚染対策法、鉱山保安法、廃棄物処理法などがある。

また、対象地域における過去の土地利用履歴、特定有害物質使用履歴などに関する資料を収集し、整理する。これらに関する収集可能な資料としては、前述の空中写真、旧版地形図、住宅地図などがある。

さらに、各自治体で整備されている土壌汚染対策法の要措置区域等の指定状況や、有害物質使用特定施設に関する台帳、各自治体の環境部局や工場などの事業者が所有する特定有害物質の漏洩記録についての資料を適宜収集する。

そのほか、登記簿謄本を基に事業所が立地していた場合に業種などを把握することに役立つことがあるので、必要に応じて収集することが望ましい。

なお、埋立や盛土による人工改変地については、対象地域周辺の自然地盤と性状が異なる可能性があることから、「**(4)　地形・地質に関する資料収集**」のデータを活用する。また、土砂の搬出元候補地に関する資料についても収集する。特に、海洋汚染防止法の基準に基づいて判定された土砂が搬入されている場合は、土壌汚染対策法の基準と異なることに留意する。

(9) 当該工事に関する資料収集

当該工事において、本調査の開始以前にすでに調査、設計、施工などが行われている場合には、それらに関する報告書および付随する図面類を収集し、上記**(4)**～**(8)**に関係する情報を整理する。また、当該工事以外に、対象地域および周辺で行われた工事に関する調査、設計、施工などの報告書および付随する図面類が入手可能な場合には、併せて収集し、整理する。

3.3.2 地形・地質調査

対象地域の地形や地質状況を把握し、要管理土の分布やその量の推定、および適切な施工に必要な地盤の安定性評価のための基礎的な情報を得る。

(1) 搬出元候補地の調査

1) 調査の目的

搬出元候補地の地形・地質調査は、事業地周辺の要管理土の分布と、要管理土量の概略を事前に把握するための基礎情報を取得する目的で行う。

地形・地質調査は事業段階に応じて適宜実施し、概略状況の把握から要管理土の絞り込みまで、無駄が生じないよう系統的な調査および試験を行う必要がある。

2) 調査概要

資料等調査に基づき、あらかじめ地質の分布状況、地質構造の概略を整理した上で、対象の事業地を包括するよう調査範囲を設定する。そして、調査範囲の現地踏査、露頭試料採取および必要に応じて実施する試料の各種分析により、地質構造および、鉱床、変質帯、断層の位置など、自然由来重金属等含有土や酸性土と関係のある地質状況とその分布を把握するよう努める。自然由来重金属等含有土や酸性土への対応の観点から、重要となる地質などについて**表-3.3.9** に示す。また**表-3.3.10** は、我が国における鉱床タイプの特徴とそれに付随する重金属等およびそれに適用できる調査方法を整理したものである。ここで示した調査方法は、鉱床調査や地熱調査などの資源調査に準じた調査手法であり、高濃度の重金属等が存在する地質を見いだすことができる。

表-3.3.9　自然由来重金属等含有土や酸性土への対応の観点から重要となる地質など [1] **に加筆**

項　目	内　　容
海成泥岩・粘土	海成泥岩や沖積層（縄文海進堆積物）などの粘土には、海水に多く含まれるふっ素、ほう素のほか、砒素やセレンが濃集している場合がある。特に、未風化部は溶出量が高くなる傾向がある。 また、海成泥岩や沖積層（縄文海進堆積物）などの粘土には木苺状黄鉄鉱が含まれることがあり、掘削により酸性水を発生させることがある。
花崗岩類	花崗岩類に含まれる白雲母・黒雲母には、ふっ素を高濃度に含有するものがある。
超塩基性岩類	超塩基性岩類は、クロムの含有量が高い地質だが、自然由来の六価クロムの溶出が認められることもある。
熱水変質部	熱水変質部には、重金属等を含む鉱物や酸性化の原因になる黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれることが多い。
断層	断層周辺は、熱水の移動経路となって重金属等の濃集が起こっていることがある。
接触変成岩	マグマの貫入に伴う接触変成岩には、重金属等の濃集が起こる場合がある。特に、母岩が炭酸塩岩の場合には重金属等の濃集が著しい。
脈	母岩に細く貫入した脈の多くは石英や長石、方解石であるが、電気石（ほう素を含む）、蛍石（ふっ素を含む）、その他の重金属等を含む場合もある。
金属鉱山・鉱床・温泉	金属鉱山は一般に重金属等が特に濃集した場所であり、地質に硫化鉱物が含まれていることが多い。また温泉も熱水活動と密接に関係するものがあることから、鉱山や温泉周辺の岩石の掘削に伴い、重金属等の溶出や酸性水の発生の可能性がある。
“焼け”・さび汁など	露頭に見られるいわゆる“焼け”やさび汁は，黄鉄鉱などの分解によって生じ、そこで酸性水の発生が起こったことを示唆する。湧水点付近の褐色化や湧水の pH にも注目する。
重金属等や酸性水に関係する地名	例）丹生（水銀の意）、金山、山元、須川、赤水沢、白水沢、赤川など

表-3.3.10　我が国における鉱床タイプの特徴と付随する重金属等元素およびそれに適用できる調査方法[2)]を修正

鉱床タイプ	地質体	形成年代	特徴	代表的な鉱山	主要な鉱石鉱物	予想される重金属汚染	適用可能な調査手法
1.　ポディフォーム型クロム鉱床	三波川帯・舞鶴帯・神居古潭構造帯などに分布する超苦鉄質岩	古生代～中生代	オフィオライトに伴う超苦鉄質岩中に産出する。形状は不規則で連続性に乏しい。	若松、広瀬、八田	クロム鉄鉱	Cr	地表地質踏査、地化学探査、重力探査、磁気探査、試錐
2.　層状含銅硫化鉄鉱鉱床	三波川帯・秩父帯・四万十帯・三郡帯・阿武隈帯・日高帯など	石炭紀～ジュラ紀	苦鉄質火山噴出岩を原岩とする変成岩に産する層準規制型の火山性塊状硫化物鉱床。鉱床の形態は、層状あるいはレンズ状を呈する。一部の鉱床は、珪長質火山岩を原岩とする変成岩に産出する。	別子、佐々連、下川、日立、柵原	黄銅鉱、黄鉄鉱、斑銅鉱、磁硫鉄鉱、磁鉄鉱、閃亜鉛鉱	Cd	地表地質踏査、地化学探査、電気探査、IP法、試錐
3.　層状マンガン鉱床	秩父帯・美濃帯・足尾帯などの中生代付加帯	石炭紀～ジュラ紀	中・古生代の堆積岩、主にチャート中に産出する。大半の鉱床は小規模である。採掘跡の数は全国で数千に達する。	野田玉川、浜横川	ブラウン鉱、パイロクロイト鉱、テフロ石、バラ輝石、菱マンガン鉱、二酸化マンガン鉱物	－	地表地質踏査、地化学探査、試錐
4.　スカルン鉱床							
4-1.　銅－鉄鉱床	北上帯・阿武隈帯等に分布する花崗岩類とその近傍	白亜紀～古第三紀	炭酸塩岩を含む地質体と花崗岩類の接触部付近に産出することが多い。鉱床の形態は、レンズ状、パイプ状あるいはポケット状を呈する。鉱石鉱物の特徴と出鉱実績から、銅鉄鉱床、亜鉛鉛鉱床およびタングステン鉱床に区分される。	釜石、八茎、赤金、大峰	磁鉄鉱、黄銅鉱、キューバ鉱、磁硫鉄鉱、鉱鉄鉱、灰重石	(As)	地表地質踏査、地化学探査、磁気探査、電気探査、電磁探査、IP法、試錐
4-2.　亜鉛－鉛鉱床	西南日本内帯に分布する花崗岩類とその近傍			神岡、中竜、秩父	閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、磁鉄鉱、磁硫鉄鉱、黄鉄鉱、赤鉄鉱、硫	Pb, Cd, As	
4-3.　タングステン鉱床				玖珂	灰重石、錫石、磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、黄銅鉱、方鉛鉱	Pb, Cd, As	
5.　深成鉱脈鉱床							
5-1.　金鉱床	北上山地の白亜紀花崗岩類分布域とその周辺	白亜紀～古第三紀	地下深所で形成されたと考えられる含金石英脈。一般に硫化鉱物に乏しいが、一部の鉱床は多量の硫砒鉄鉱を伴う。	大谷（宮城）	自然金、硫砒鉄鉱、磁硫鉄鉱、黄銅鉱、磁鉄鉱、灰重石、黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱	As	地表地質踏査、地化学探査、試錐
5-2.　多金属鉱床	白亜紀～新第三紀の珪長質貫入岩～火山噴出岩分布域	白亜紀～新第三紀	地下深所で形成されたと考えられる鉱脈鉱床。鉛、亜鉛および銅のほか、錫、タングステン、モリブデン、ビスマスおよび砒素等、多様な金属の鉱化が認められる。	明延、足尾、生野、対州、鐘打、大谷（京都）、高取	閃亜鉛鉱、黄銅鉱、方鉛鉱、錫石、鉄マンガン重石、灰重石、斑銅鉱、磁鉄鉱、硫砒鉄鉱、黄鉄鉱	Pb, Cd, As	地表地質踏査、地化学探査、重力探査、電気探査、電磁探査、IP法、試錐
6.　黒鉱鉱床	新第三紀火山岩類分布域、特にグリーンタフ地域	新第三紀	グリーンタフ地域に産する層準規制型の火山性塊状硫化物（・硫酸塩）鉱床。銅、鉛、亜鉛、金および銀の鉱化が認められる。鉱床の形態は、層状、塊状、円筒状、紡錘状あるいはドーム状を呈する。	小坂元山、花岡、松峰、釈迦内、古遠部	黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄鉄鉱、四面安銅鉱、四面砒銅鉱、斑銅鉱、輝銅鉱、磁砒銅鉱	Pb, Cd, As	
7.　浅成鉱脈鉱床							
7-1.　銅鉱床	新第三紀火山岩類分布域	新第三紀	地下浅所で形成されたと考えられる鉱脈鉱床。大半の鉱床は、鉛と亜鉛の鉱化を伴う。	阿仁、尾去沢	黄銅鉱、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、赤鉄鉱、自然銅、斑銀鉱、輝銅	Pb, Cd, As	地表地質踏査、地化学探査、重力探査、電気探査、電磁探査、IP法、試錐
7-2.　亜鉛－鉛鉱床	新第三紀火山岩類分布域	新第三紀	地下浅所で形成されたと考えられる鉱脈鉱床。大半の鉱床は、銅と銀の鉱化を伴う。	豊羽、尾太、細倉、八谷	方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、黄銅鉱、四面銅鉱、輝銀鉱、濃紅銀鉱物、赤鉄鉱、菱マンガン鉱	Pb, Cd, As	
7-3.　マンガン鉱床	新第三紀火山岩類分布域	新第三紀	地下浅所で形成されたと考えられる鉱脈鉱床。大半の鉱床は、鉛、亜鉛および銀の鉱化を伴う。	稲倉石、大江、上国、八雲	菱マンガン鉱、黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、濃紅銀鉱物、ポリバス鉱、含銀四面銅鉱	Pb, Cd, As	
7-4.　水銀鉱床	北海道北部、西南日本内帯および西南日本外帯	新第三紀	断層沿い、あるいはその近傍に発達する鉱脈・鉱染鉱床。硫化鉱物に乏しい。	常呂、竜昇殿、大和水銀、丹生	自然水銀、辰砂、黄鉄鉱、輝安鉱、鶏冠石	Hg, As	地表地質踏査、地化学探査、重力探査、試錐
7-5.　アンチモン鉱床				市ノ川、藤ノ川、中瀬、四家	輝安鉱、黄鉄鉱、硫砒鉄鉱	Hg, As	
7-6.　金－銀鉱床	新第三紀火山岩類分布域および第四紀火山周辺	新第三紀～第四紀	地下浅所で形成されたと考えられる含金銀石英脈。硫化鉱物に乏しい。	菱刈、佐渡、鴻ノ舞、串木野	エレクトラム、黄鉄鉱、ポリバス鉱、濃紅銀鉱物、含銀四面銅鉱、輝銀鉱、黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱	As	地表地質踏査、地化学探査、重力探査、電気探査、電磁探査、IP法、試錐
8.　自然硫黄鉱床及び硫化鉱床	東北日本の第四紀火山および新第三紀火山岩類分布域	新第三紀～第四紀	熱水変質を強く受けた火山岩中に、塊状あるいは鉱染状に自然硫黄と黄鉄鉱が産出する。平面的広がりは数100～1,000m、厚さは数10～150mを示す。	幌別、松尾、草津、白根	自然硫黄、黄鉄鉱、白鉄鉱	Hg, As	
9.　褐鉄鉱鉱床	北海道、東北日本、中部日本などの火山周辺地域	新第三紀～第四紀	沼沢地、湖底などで化学的な沈殿作用や鉄バクテリアなどの作用で沈殿堆積した鉄鉱床。	虻田、喜茂別、仲洞爺、倶知安、群馬	褐鉄鉱	As	地表地質踏査、電気探査、試錐

このほか、堆積岩では堆積環境とカドミウムや砒素の全含有量との関係が示唆された事例[3),4)]があり、堆積環境と溶出濃度との関係が見いだされる可能性がある。さらに海成堆積物は、陸成堆積物より硫黄の全含有量が高く（**図-3.3.2**）[5)など]、硫黄は硫化鉄鉱物として堆積物中に固定化されている[6)]ことから、酸性土である可能性が比較的高いと考えられる。

地形・地質調査では現地踏査に加え、必要に応じて地化学調査、物理探査などを実施する。そしてそれらの結果を基に要管理土となる地質を特定するための合理的な試料採取計画（ボーリング箇所の選定、調査深度など）を作成し、実施する（**3.3.4**）。なお、地化学調査が有効となるのは鉱山、温泉、変質帯といった有害物質の濃度が高い地域である。把握された情報から搬出元候補地周辺の地質平面図、断面図などを作成する。この地質平面図、断面図などから対応が必要となる地質とその分布・構造、要対策土量などをとりまとめる。とりまとめに当たっては、溶出試験など（**3.3.7**、**3.3.8**）の結果を地質平面図や地質断面図などの上に示すとわかりやすい。調査結果を施工計画に反映させるほか、必要に応じてさらなる調査の計画・実施や、事業計画の変更検討などを行う。**図-3.3.3** は、地化学調査（地質調査手法の１つ）に基づいて、自然由来重金属等含有土の掘削土量が少ないルートを選定した例である。

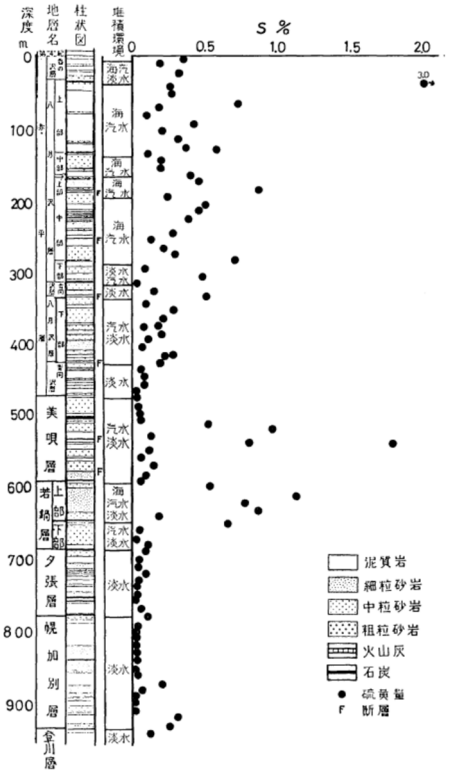


図-3.3.2　硫黄の分布と堆積環境の関係[5)]

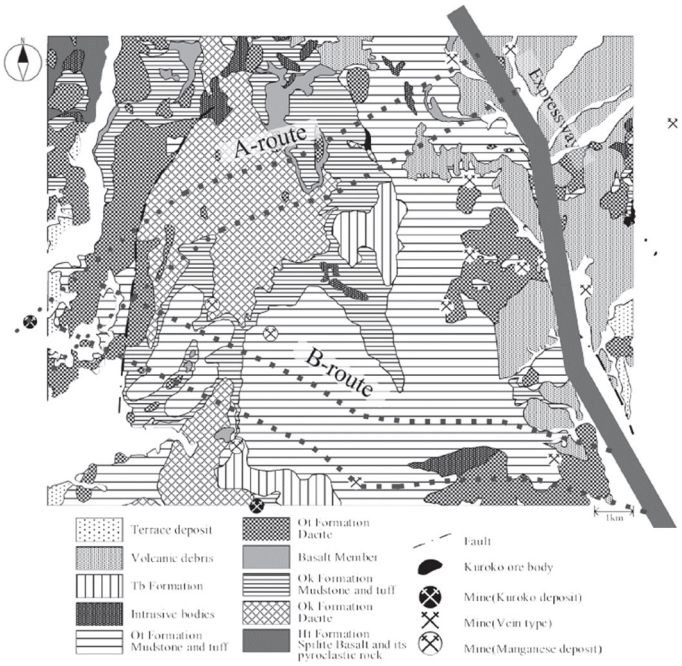


図-3.3.3　計画段階調査でルート選定を実施した事例[7)]

(2) 受入候補地の調査

1) 調査の目的

受入候補地の調査は、地質の分布と構造を把握して、要管理土を用いた盛土等の構造物の建設に必要な情報を得ることを目的とする。盛土等の構造物の建設に必要な情報としては、盛土等の地盤の安定性に関する地すべりや軟弱地盤などの存在のほか、**3.3.3** の水理地質構造の推定に資する地質（例えば、高透水性を示すと推定される礫層や開口亀裂性の地質、難透水性を示すと推定される粘土層や亀裂に乏しい岩盤、地山湧水や谷地形など）の性状や分布が挙げられる。

2) 調査概要

調査は掘削場所の調査と同様に、資料等調査（**3.3.1**）に基づき、あらかじめ地質の分布状況、地質構造を整理し、発生土の受入候補地と保全対象（予定）区域との間の曝露経路を包括するよう調査範囲を設定する。調査は現地踏査、空中写真判読などの地形判読のほか、必要に応じてボーリング調査などを実施する。

盛土等の建設予定地については、既往のボーリング調査結果や地すべり地形分布図などの資料等調査（**3.3.1**）を踏まえて地形判読や現地踏査を行い、斜面変動に対する地盤の安定性の評価や、地下水の流向・流速の推定のための調査、および発生土の受入候補地と保全対象（予定）区域を包括する範囲の水理地質構造に関する調査を行う。また、資料等調査や地形判読、および現地踏査により軟弱地盤の存在が推定される場合は、地盤物性調査（**3.3.6**）を実施する。

【参考文献】

1) 門間聖子，品川俊介：掘削岩石の自然由来重金属等リスク評価におけるサンプリング手法．地盤工学会誌，Vol.68，No.3，pp.12-15，2020.

2) 土木研究所，応用地質，大成建設，三信建設工業，住鉱コンサルタント，日本工営：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書　建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）．土木研究所共同研究報告書第 358 号，2007.

3) 丸茂克美：自然由来の重金属に起因する土壌汚染問題への地球科学的アプローチ．地学雑誌，Vol.116，No.6，pp.877-891，2007.

4) 三田村宗樹，益田晴恵：大阪周辺のボーリングコアの砒素濃度．第 8 回環境地質学シンポジウム論文集，日本地質学会環境地質研究委員会，pp.85-88，1998.

5) 狛武:第三紀堆積岩の硫黄含量と堆積環境　北海道中央部芦別川流域. 石油技術協会誌, Vol.43，No.3，pp.10-18，1978.

6) 桜本勇治:海成泥質岩が酸性水を発生させる可能性について. 地下水技術, Vol.36, No.4, pp.29-33，1994.

7) 門間聖子，細野哲久：高規格道路のルート選定における地球化学的リスク評価，応用地質，Vol.57-2，pp.58-67，2016.

3.3.3 水理・水文調査

対象地域に存在する表流水および地下水の流況、水質、および水利用の状況を把握し、リスク評価、対策の設計、およびモニタリング計画の立案などに必要な資料収集を行う。また、要対策土を盛土等に利用する場合は、受入先周辺の表流水および地下水の観測を施工中、施工後まで継続する。

(1) 搬出元候補地の調査

1) 調査の目的

搬出元候補地の水理・水文調査は、工事の水環境への影響を確認する目的で行う。水文調査および水質試料の採取は、水質のバックグラウンド濃度の把握や施工時の水質監視を適切に行うため、事業段階に応じて系統的に実施する。また必要がある場合には、施工後も調査を継続する（**4.5**）。

2) 調査概要

掘削場所の水文調査および水質試料の採取は、表流水および地下水の流況、水質、水利用の把握のため、現地調査を基本として既存井戸を用いた地下水調査を行い、必要に応じてボーリングによる地下水調査を行う。水利用の状況は現地調査、および関係者へのヒアリングによって把握する。

①表流水の調査

対象地域および周辺地域について、資料等調査によって推定された表流水の流域区分、および伏流区間を現地にて確認するとともに、確認された流域の面積を算出する。また、流域の主要地点での流量（三角堰など）を観測し、季節変化、年変化を把握する。さらに、必要に応じて表流水のバックグラウンド濃度を把握するために採水・分析（**3.3.5**）を行う。

②地下水の特性

地下水特性の調査は、一般に既存井戸、既存ボーリング孔を用いて行うが、必要に応じてボーリング調査を実施する。調査する地下水特性は、不圧地下水の水位、流向、流速、および透水係数（現場透水試験）である。また、地下水のバックグラウンド濃度を把握するために採水・分析（**3.3.5**）を行う。評価は、最も地表面からの影響を受けやすい不圧地下水を主な対象とする。

③湧水の特性

対象地域および周辺地域について湧水地点の現地調査を行う。各湧水地点では、地点の地形、構成地質・地質構造、流量（季節変化、降雨との関係）を調査する。また、湧水の水質のバックグラウンド濃度を把握するために採水・分析（**3.3.5**）を行う。

④水利用状況の調査

表流水の農業用水などとしての利用、および地下水の飲用などの利用について現地調査を行うとともに、関係者にヒアリングを行って、現地調査の補足をする。

(2) 受入候補地の調査

1) 調査の目的

受入候補地の水理・水文調査は、リスク評価に必要な基本的情報の取得、および工事の水環境への影響を確認する目的で行う。

2) 調査概要

受入候補地の調査では、表流水、地下水、および湧水の特性と、地質調査で判明した構成地質の分布・構造とを勘案し、対象地域周辺の帯水構造（地下水構造）などの水理地質構造を推定して断面図などに表現し、サイト概念モデルの構築（**2.10 解説(1)**）を行う。また、要対策土を盛土等に利用する場合は、工事実施前から表流水および地下水の施工確認モニタリングを行う。詳細は **4.5** を参照する。

3.3.4 地質試料の採取と試験試料の調製

実施予定の調査・試験の目的や、試料の代表性を踏まえた地質試料の採取を行う。また、採取した地質試料について、試験の目的に応じて適切な保管、乾燥、破砕、ふるい分け、縮分を行い、各試験に適した方法により必要な量の試験試料を調製する。

(1) 地質試料の採取

ここでいう地質試料とは、岩石・土壌試料のことである。地質試料の採取は、対象地域の地質の分布と構造に基づき、要管理土を特定するための合理的な試料採取計画を策定する。そしてその計画に基づき、ボーリングコア、工事施工箇所ののり面・切羽、掘削土（岩砕または岩ずり、および土壌）などから適宜、試料採取を実施する。地質試料を採取する際には、実施予定の試験の目的や試料の代表性に配慮する。

具体的には、試料を丁寧に観察、記載した上で、岩種の違いのみならず同一の岩種においても破砕の程度、粒度、変質の程度、および鉱物組成の違いなどを区分し、出現する地質の多様性を可能な限り網羅するよう、一般に地質区分ごとに複数試料を採取する。ただし、稀にしか出現しない地質区分の試料についてはその限りでない。同一地質区分が広く分布する場合においては、空間的な偏りがないよう、適宜採取試料点数を増やす。なお、試験・分析結果を整理する際に参考になるよう、採取した試料が全体の地質の中でどのような位置づけのものであるかを明確化しておく。例えば、出現地質区分の中で稀にしか出現しないものなのか、標準的なものなのか、破砕帯など特定の地質構造と関係したものであるか明らかにしておく。また、採取した試料と施工時に出現した地質とを類似のものと見なすための識別における特徴を明らかにしておく。

地質試料は、以後実施する試験に必要な量を確保した上で、地質試料の不均質性を考慮し、可能な範囲で多めに採取することが望ましい。採取する試料量については、再試験などの実施を見越して余裕を持っておくことが望ましい。例えば、各種溶出試験および全含有量試験を実施する場合は、おおむね 1 kg（孔径 66 mm のボーリングコアであればコア長で 20 cm 程度）以上とするとよい。また、土研式雨水曝露試験を併せて実施する場合は、おおむね 20 kg（孔径 66 mm のボーリングコアであればコア長で 5 m）程度の採取が必要である。

地質試料は、各種溶出試験、全含有量試験、酸性化可能性試験、および土研式雨水曝露試験などの実現象再現溶出試験に用いるほか、記載岩石学的な試験（岩石薄片の偏光顕微鏡観察や電子顕微鏡観察）、鉱物分析、化学分析、粒度試験、および透水試験などに用いる場合がある。これらの試験結果は、各種溶出試験、全含有量試験、酸性化可能性試験、および実現象再現溶出試験の結果と関連づけて整理することが肝要である。そのため試料の均質性を確保する観点から、適切に縮分、分割などして各種の試験に供する。

なお、一般的な試料採取方法や留意事項については、「粉塊混合物－サンプリング方法通則」（JIS M 8100）などを参考とする。

事業段階ごとのサンプリング手法については門間・品川 [1)]なども参考になる。

(2) 試料の保管

地質試料は採取後、時間とともに化学的に変化していく。特に、黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれている地質や、青灰色を示す堆積物などは、空気に触れると酸化して性状が大きく変化する場合がある。一般的に、発生土は速やかに搬出され、盛り立てられることから、分析に供する試験試料は掘削後時間を置かずに調製を行い、分析に供することが基本である。速やかに処理ができない、あるいは試験に供することができない場合、もしくは試験目的から試料の酸化による影響を最小限にしたいなどの場合は、必要に応じて酸素バリア袋に脱酸素剤とともに脱気封入する、冷蔵ないしは冷凍保管するなどの措置を講じる。なお、特段の措置を行わずに保管し採取後時間が経過した試験試料の溶出試験結果と、採取後時間を置かずに調製した試験試料の溶出試験結果は、検出される元素やその溶出濃度、検液の pH などが大きく異なる場合がある。このような違いは試料の短期的および長期的溶出特性と定性的に対応していると考えられるので、評価の目的によっては採取後時間が経過した試料も試験に用いることがある。

(3) 試験試料の調製

試験試料の調製は、各試験に適した方法により、必要な量を調製する。

採取した試料は一般に各種試験に供するが、その際、各種試験の試験試料がお互いほぼ同一と見なせる試料とするため、適切に破砕、縮分およびふるい分けの操作を行う。なお、一般的な破砕、縮分、ふるい分け方法やそれらの留意事項については、「粉塊混合物－サンプリング方法通則」（JIS M 8100）、「ふるい分け試験方法通則」（JIS Z 8815）などを参考とする。

固結した岩石など、地盤の掘削時や材料として盛土等に利用する際に破砕を行う場合の試験試料は、一定の目開きのふるいを全量通過するまで破砕して試験試料を調製する。一方、非固結堆積物や土壌など、材料を利用する際に破砕を行わない場合には、破砕を行わずに一定の目開きのふるい分けを行って試験試料を調製する。

全ての操作に共通する事項として、異なる地質試料の混合や器具からの汚染がないよう、注意を払う。また、試験目的に応じて酸化防止など、試料の取扱いに留意する。

なお、試料に含まれる化学成分の濃度は、しばしば試料の硬軟や粒径に依存していることがあるので、試料の破砕を行う場合は 1 つのロットについては必ず全量を破砕した上で縮分操作を行わなければならない。

岩石試料の一般的な試料調製手順を**参考資料９**に示す。

【参考文献】

1) 門間聖子，品川俊介：掘削岩石の自然由来重金属等リスク評価におけるサンプリング手法．地盤工学会誌，Vol.68，No.3，pp.12-15，2020.

3.3.5 水質試験

重金属等に関する地下水のバックグラウンド濃度や、工事影響および対策の効果を把握するための試験を適切に実施できるように水質試料を採取して保管し、水質試験を実施する。

(1) 水質試料の採取

表流水、地下水、盛土等からの滲出水、内部保有水などを対象に採水を行う。

日常的に使用されていない井戸（モニタリング井を含む）から採水する場合は、孔壁が安定していないことや水が滞留していることなどから採水した試料に濁りを含んでいることが多い。このため孔内の停滞水を採水しないよう、井戸内の水を揚水して井戸を洗浄し、本来の地下水水質を評価できる試料を採取するよう努める。土壌汚染対策法のガイドライン[1)]によれば、井戸内の滞水量の 3～5 倍量を目安として揚水し、急激な揚水やベーラーによる上下攪拌により水位変化や濁りが生じぬよう採水に留意し、目視または透視度計を用いて濁りの状態を確認する。さらに水素イオン濃度指数（pH）や電気伝導率、水温を測定し、水質が安定していることを確認した後に採水を行う。

井戸内の水質試料の採取は、孔内水位の中間深度（帯水層の中間部分）で採水を行う。**表-3.3.11** に、「工業用水・工場排水の試料採取方法」（JIS K 0094）に基づく一般的な採水方法をまとめた。

表-3.3.11　一般的な井戸水の採水方法（JIS K 0094 に基づき整理）

採水方法	概　要
採水器による方法	所定の深度に採水器を挿入し、地下水の試料採取を行う方法で、最も一般的な方法である。
地上式ポンプによる方法	井戸内にホースを挿入し、地上に設置した吸引ポンプで地下水を採取する方法である。
水中ポンプによる方法	サンプリング用の水中ポンプを所定の深度に懸垂し、地下水の試料採取を行う方法である。

(2) 採取容器と試料の保管

水質試料の採取に使用する容器は、試験項目に応じて対象とする物質が吸着もしくは溶出しないよう適切な容器を選択する。特に、ふっ素やほう素を試験対象とする場合には容器からの対象物質の溶出が懸念されるガラス製容器は使用せず、ポリエチレン製またはポリプロピレン製容器などを選択する。

試料の採取後は、できるだけ速やかに試験を行うことが望ましいが、試験をただちに行えない場合には、冷暗所に保存し、環境変化や時間経過による水質の変化に留意する。なお、試料の保存処理として試薬を用いて化学変化を抑制する方法もある。

また、環境中の水の分析は、一般に無ろ過で分析に供するが、採取した地下水試料に濁りが認められる場合には、試料を 10 分から 30 分程度静置した後の上澄み液を孔径 0.45 μ m のメンブレンフィルターでろ過してろ液を取り、これを検液とする。

(3) 水質試験

各種水質分析は、下記の公定法のいずれかに準拠して実施することが望ましい。

・工業用水・工場排水試験方法（JIS K 0102）
・上水試験方法（厚生省衛生検査指針、日本水道協会）
・国土調査法水質調査作業規定準則（総理府令第 14 号、昭和 32 年）
・鉱泉分析法指針（改訂）（環境庁自然保護局、温泉工学会誌、Vol.13,No.1(1978)）
・河川水質試験方法（案）[1997 年版]（建設省河川局監修）
・地下水に含まれる試料採取等対象物質の量の測定方法を定める件（環境省告示第 17 号、平成 15 年）

ただし、水質把握の目的によっては、迅速分析手法を利用することが適切な場合もある。

【参考文献】

1）環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：地下水試料採取方法，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）．Appendix-7_5，2022．環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

3.3.6 地盤物性調査

要管理土を盛土等に利用するに当たり、盛土、切土などが将来にわたり安定を維持できるように、設計に反映できる各種地盤物性調査を行う。また、影響予測を行う場合など、必要に応じて地盤の透水性などの調査を行う。

要管理土を含む盛土等や要管理土が掘削された切土は土構造物としての安定性も維持する必要がある。そのため、盛土や切土などを施工するに当たって注意を要する立地条件について地形・地質調査（**3.3.2**）や水理・水文調査（**3.3.3**）により把握するとともに、土構造物の材料となる土や岩の物理特性、力学特性についても調査・試験を行い、その結果を対策の設計に反映させる必要がある。

盛土材料としての調査事項、各種土質試験や岩石試験の方法は「道路土工－盛土工指針」[1]、「地盤材料試験の方法と解説」[2]、「地盤調査の方法と解説」[3]、「岩の試験・調査方法の基準・解説書」[4]に詳しい。

土の物理特性（含水比、湿潤密度、液性・塑性限界、土粒子の密度、土の粒度）や締固め特性として、以下の試験が行われる。

- 土の含水比試験（JIS A 1203）
- 土の湿潤密度試験方法（JIS A 1225）
- 土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205）
- 土粒子の密度試験（JIS A 1202）
- 土の粒度試験（JIS A 1204）
- 突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）

盛土の安定性照査にはせん断特性を求める必要があるが、以下の試験の中から照査時点の盛土の状態や施工条件に近い状態を再現できる方法を選び、試験を行う。

- 土の一軸圧縮試験（JIS A 1216）
- 土の三軸圧縮試験（JGS 0521～0524）
- 土の一面せん断試験（JGS 0560、JGS 0561）
- 土の繰返し非排水三軸試験（JGS 0541）

その他、使用する材料の特性に応じ、圧密試験（JIS A 1217）や、乾湿繰り返し試験、スレーキング試験などが実施される。

また、透水係数を求める試験については、盛土材料としての特性の把握に加え、影響予測のパラメータを得る目的でも実施される。透水係数を求める試験には複数の種類があり、対象とする現場条件や土質・岩質特性に応じて適切と判断される試験を実施する。一般に土に適用される方法としては室内透水試験（JIS A 1218）があり、透水係数により定水位透水試験と変水位透水試験を使い分ける。各方法を適用する透水係数の目安は、前者で 10^{-3}～10^{-5} m/s 、後者で 10^{-5}～10^{-9} m/s とされている。これに対し、現場透水試験は土と岩の両方に適用可能で、多くは地下水面下の飽和帯地盤に適用される方法であるが、「締め固めた地盤の透水試験方法」（JGS 1316）のように、不飽和帯に適用可能な方法もある。各種透水試験の

方法については、「地盤材料試験の方法と解説」[2]、「地盤調査の方法と解説」[3]、「岩の試験・調査方法の基準・解説書」[4]を参照されたい。

【参考文献】

1) 日本道路協会：道路土工－盛土工指針（平成 22 年度版）．日本道路協会，2010.
2) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会編：地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]．地盤工学会，2020.
3) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会編：地盤調査の方法と解説．地盤工学会．2013.
4) 地盤工学会岩の試験・調査規格・基準検討委員会編：岩の試験・調査方法の基準・解説書．地盤工学会, 2006.

3.3.7 要管理土の評価のための試験

要管理土の評価のために採取した地質試料について、原則として①短期溶出試験、②酸性化可能性試験、③全含有量試験または直接摂取のリスクを把握するための試験を一連のものとして実施する。

(1) 各種試験の適用

短期溶出試験は、重金属等の短期的な溶出特性を把握するための基本的な試験であるとともに、現状における試料の酸性の程度を把握することができる。また、全含有量試験または直接摂取のリスクを把握するための試験は、重金属等の直接摂取のリスクの有無を判定するほか、潜在的な重金属等の溶出の程度の把握や、地質の成因の推定や区分にも有効な試験である。さらに酸性化可能性試験は、黄鉄鉱などの硫化鉱物の酸化に伴う酸性化や長期的な重金属等の溶出特性を把握する基本的な試験である。

施工前の段階においては、当該事業の発生土が要管理土かどうか、地質区分ごとに評価する目的で、これらの試験を出現する地質区分ごとに複数試料ずつ実施する。

ある地質区分が要管理土であるか不明確である場合、地質区分を再検討して結果を整理する。施工前の検討の結果、最終的にある地質区分が要管理土であるか不明確である場合、施工中に、掘削土に対して一定ロットごとにこれらの試験の一部を実施して、発生土が要管理土かどうかの判定を行うことがある。その際、必要に応じて短期溶出試験、酸性化可能性試験、実現象再現溶出試験および直接摂取のリスクを把握するための試験にかわって迅速判定試験により評価することがある（**3.3.9**）。

(2) 短期溶出試験

短期溶出試験は、試料の破砕工程以外は「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 18 号、平成 15 年）に準拠した方法である。本告示による試験は一般に、「土壌溶出量試験」と称されている。なお、本方法は平成 30 年に検液作成方法が見直され、平成 31 年 4 月 1 日より新方法が運用されている。

短期溶出試験で用いる試料は**参考資料９**に従い、目開き 2 mm のふるいを全量通過するまで破砕したものを用いる。ただし、非固結堆積物（岩盤の強風化物、崖錐堆積物や礫層など）については、これをさらに粉砕して使用する場合を除いて、粉砕を行わずに目開き 2 mm のふるいを通過した試料を用いる。

測定項目は、調査の段階に応じて必要な項目を選定する。重金属等のほか、検液の水素イオン濃度指数（pH）、電気伝導率（EC）、酸化還元電位（Eh）、ナトリウムイオン濃度（Na^{+}）、カルシウムイオン濃度（Ca^{2+}）および硫酸イオン濃度（SO_4^{2-}）を測定しておくと、溶出特性の把握に利用可能である。短期溶出試験の詳しい手順は**参考資料 10** に示す。結果の評価は、土壌汚染対策法の土壌溶出量基準を満足するかどうか、および検液の pH が酸性でない（おおむね 4.0 を超える）かどうかで判定する。

(3) 酸性化可能性試験

硫化鉱物の酸化分解反応の速度は遅く、また地盤中の鉱物による中和能などの影響もあ

り、掘削土の酸性発現に数か月以上の時間を要することがある。そのため現状における酸性の程度より、むしろ長期的に掘削土が酸性化するか、すなわち「酸性化可能性」を評価する必要がある。酸性化可能性の評価は、「過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法」[1)]（JGS 0271）、硫黄・カルシウム比（S/Ca 比）、土研式雨水曝露試験などの各種試験結果に基づいて行われている。本マニュアルでは、要管理土の区分に当たり、「過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法」（JGS 0271）に準拠した方法を用いる。

試料は**参考資料９**の方法と同じく、乾燥させた後、破砕し、目開き 2 mm のふるいを全量通過させたものを用いる。

試料を酸化させる酸化剤として、過酸化水素水を使用する。過酸化水素水は通常 30 %に調整されたものが販売されており、これに 10 mmol/L の水酸化ナトリウム溶液を加え pH を 6 に調整する。

溶液の発泡の状況などから地質試料と過酸化水素水との反応の終了を確認し、pH 計を用いて pH の測定を行う。結果の評価は、検液の pH が 3.5 以下の場合、長期的に酸性化する可能性があるものとして判定する。

詳しい手順は**参考資料 12** に示す。

表-3.3.12　日本および世界の上部地殻などの元素平均濃度（単位：mg/kg）

		カドミウム	クロム	水銀	鉛	セレン	砒素	ふっ素	ほう素	文献
大陸地殻の平均値		0.2	100	0.08	12.5	0.05	1.8	625	10	2)
クラーク数		0.2	100	0.08	13	0.05	1.8	625	10	3)
日本列島の上部地殻の平均値			84		16.9		6.5-7.1			4)
土壌の平均元素組成	平均	0.35	70	0.06	35	0.4	6	200	20	5)
	最大	2	1500	0.5	300	12	40	700	270	
	最小	0.01	5	0.01	2	0.01	0.1	20	2	
土壌の元素組成		0.295*3	56*4	0.06	17.2*3	0.47*5	6.82*6	200	20	6)（出典*3：7)、*4：8)、*5：久保田ほか（未発表）、*6：9)、その他：5))
日本の地球化学図	平均	0.158	65.2	0.054	23.1		9.32			10)
	中央値	0.13	53.1	0.040	20.7		8			
	標準偏差	0.1	45.4	0.0468	11.8		7.51			
	最小	0.017	3.34	<0.0010	4.07		＜1			
	最大	28.9	1941	18.05	7594		2010			
参考	自然由来の汚染と判断する際の含有量（全量分析）の上限値の目安*1	1.4	Cr(VI) —	1.4	140	2.0	39	700	100	環水大土発第 1903015 号別紙
	土壌に含まれる特定有害物質の量（土壌含有量基準）*2	45	Cr(VI) 250	15	150	150	150	4000	4000	土壌汚染対策法施行規則別表第五

*1:全国主要 10 都市で採取した市街地の土壌中の含有量の平均値+3σ。測定方法は底質調査方法による。
*2:値は令和 4 年 4 月 1 日現在。測定方法は環境省告示第 19 号（平成 15 年）で、ほかの濃度と直接比較することができない。

(4) 全含有量試験

全含有量試験は、蛍光 X 線分析法や底質調査方法などの方法により含有量の総量を求めるもので、土壌汚染対策法の土壌含有量と比較して真の含有量により近いものである。試料は**参考資料９**に従い、目開き 2 mm のふるいを全量通過するまで破砕して縮分した後、めのう乳鉢で微粉砕したものを用いる。

また、地質試料中の自然由来の重金属等のバックグラウンド濃度を把握するために実施することもあり、土壌汚染対策法の施行通知（環水大土発第 193015 号；平成 31 年 3 月 1 日）には自然由来の汚染と判断する際の全含有量の上限値の目安（**表-3.3.12**）が示されている。

表-3.3.13 に全含有量の分析方法について整理した。また、全含有量はしばしば上部地殻などの元素平均濃度（いわゆる「クラーク数」など）（**表-3.3.12**）と比較するが、その場合、各物質の定量下限値が上部地殻などの平均濃度以下を確保できる方法を選択する必要がある。これを踏まえると、蛍光 X 線分析法は、砒素、鉛、および総クロムの分析に適する。また、底質調査方法は、濃縮操作を経るなどすれば 8 成分全てに対応可能である。

重金属等の全含有量測定手法については**参考資料７**の「**(1)重金属等の含有量測定手法**」を参照する。

表-3.3.13　全含有量の分析方法（一般的な例）

試験方法	分析可能な項目	全含有量分析としての適用性	特徴の比較
底質調査方法（環水大水発 120725002 号）	砒素、鉛、セレン、カドミウム、水銀、ふっ素、ほう素、総クロム	濃縮操作を経れば全ての元素で対応可能。	結果が出るまでに数週間を要し、費用も高い。
蛍光 X 線分析法（JIS K 0470 など）	砒素、鉛、セレン、カドミウム、水銀、総クロム	砒素、鉛、および総クロムに適用できる。波長分散型蛍光 X 線分析装置ではふっ素も分析可能な場合がある。	測定可能な項目や濃度範囲が限られている。結果が出るまでの期間は短く、費用も安価。

(5) 直接摂取のリスクを把握するための試験

本方法は、試料調製方法を除き「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 19 号、平成 15 年）に準拠した試験である（**参考資料 11**）。本告示による試験は一般に、「土壌含有量試験」と称され、土壌汚染対策法における土壌の直接摂取による人への健康リスクを評価するための試験である。なお、本方法は平成 30 年に検液作成方法が見直され、平成 31 年 4 月 1 日より新方法が運用されている。

本試験は 1 mol/L 塩酸溶液を用いた溶媒抽出試験（六価クロム化合物、シアン化合物を除く）であるため、全量分析ではないことに留意する。結果の評価は、土壌汚染対策法の土壌含有量基準を満足するかどうかで判定する。

【参考文献】

1) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会編：地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]．pp.379-388，地盤工学会，2020.

2) Mason, B.: Principles of Geochemistry, 3rd ed. Wiley, 1966.

3) 地学団体研究会編：新版地学事典．平凡社，1996.

4) Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y.: Young upper crustal chemical composition of orogenic Japan Arc. Geochemistry Geophysics and Geosystem, 1, Paper No. 2000GC000083, 2000.

5) Bowen, H. J. M.: Environmental Chemistry of the Element. Academic Press, 1979.

6) 浅見輝男：[改訂増補]データで示すー日本土壌の有害金属汚染．アグネ技術センター，2010.

7) 浅見輝男，久保田正亜，南沢究：土壌中のカドミウム，アンチモン，ビスマスなどの重金属元素の自然界値．日本土壌肥料学会誌，59，pp.197-199，1988.

8) Takeda A., Kimura, K. and Yamasaki, S.: Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agricultural use. Geoderma, 119, pp.291-307, 2004.

9) 日本土壌協会：土壌汚染環境基準設定調査ーカドミウム等重金属自然賦存量調査解析．昭和 58 年度環境庁委託業務結果報告書，1984.

10) 今井登ほか：日本の地球化学図．産業技術総合研究所地質調査総合センター，2004.

3.3.8 実現象再現溶出試験

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。

(1) 実現象再現溶出試験の概要

試験方法が簡便で多くの試験実績がある短期溶出試験は、実際の盛土内や埋土内の環境とは大きく試験条件が異なる（**表-3.3.14**）。実際の溶出現象に近い試験結果を得るためにはより現場の溶出条件を反映した条件で試験を行うことが考えられる。

実現象再現溶出試験は、現場ごとに異なる発生土の性状や、発生土と水との接触条件、溶出環境などの影響因子を考慮して試験方法を任意に設定する試験である。本試験の実施によって、現場条件により近い条件での発生土からの重金属等の溶出、滲出水の pH やこれらの経時変化を評価できる。

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。本試験の仕様の決定や結果の評価は、専門家の助言を踏まえて行う。

表-3.3.14　短期溶出試験と現場における溶出条件の違い

固液反応条件	短期溶出試験	盛土の状況	埋土の状況
試料または材料の粒径	2 mm 以下、ただし振とうによる粒子の破砕あり	おおむね 200 mm 以下（大粒径）	おおむね 200 mm 以下（大粒径）
固液比、または累積固液比	1:10	初期は著しく大きく、時間とともに小さくなる	初期は著しく大きく、時間とともに小さくなる
水と固体との接触状況	完全飽和、多量の水と接触、水は入れ替わらない	一般に不飽和、水との接触は制限される、水は入れ替わるが施工管理条件（密度、透水性など）によって状況が異なる	一般に飽和、多量の水と接触、水は入れ替わるが施工管理条件（密度、透水性など）によって状況が異なる
酸化還元状態	酸化環境	表層は酸化的だが、内部は還元的と推定される	一般に還元的であると推定される
乾湿繰り返し・凍結融解	なし	場合による	表層を除いて一般にない
温度条件	通常室温（20℃前後）	表層は変化が大きい、積雪の有無にも左右	変化はあまりない（年平均気温前後）
溶出濃度の経時変化	考慮できない	ある	ある

(2) 現場における溶出特性と試験条件の設定

発生土から対象物質が溶出して移動（移流･拡散）する現象は、発生土や周辺の地盤に含まれる物質の種類・存在形態・存在量、発生土と水との接触条件（発生土の粒径・密度、水の浸透条件［飽和・不飽和］、および流速）、酸化還元状態、温度、および経時的な粒径変化［乾湿繰り返し・凍結融解］の有無など様々な条件に影響を受けるものと考えられる。

また反応条件として、一定量の土質試料と水などを反応容器に入れて接触させた後に溶液を取り出す方法と、一定量の土質試料が入った反応容器に水などを流して接触させなが

ら逐次溶液を取り出す方法がある。前者をバッチ式または回分式、後者をフロースルー式または連続式という。例えば、短期溶出試験、酸性化可能性試験、直接摂取のリスクを把握するための試験はいずれもバッチ試験の一種である。また、土研式雨水曝露試験や各種のカラム試験はフロースルー試験の一種である。実大盛土試験もフロースルー試験の一種ととらえることができる。

バッチ試験は基本的に 1 回の反応で溶液を取り出すので試験操作は比較的簡便であるが溶出濃度の経時変化を捉えることができない一方、フロースルー試験は反応後の溶液が逐次取り出されるので実際の盛土等の反応条件に近く、溶液濃度の経時変化の傾向（溶出トレンド）を把握するのに有利である。バッチ試験の簡便さと溶出トレンドの把握を両立させた方法として、繰り返し溶出試験（あるいはシリアルバッチ試験ともいう）がある。繰り返し溶出試験は、1 回のバッチ試験を行って固液分離を行った後の土質試料を用いて再度新しい水などを加え、繰り返し試験操作を行うものである。

実現象再現溶出試験の方法と条件を決定するに当たっては、現場における溶出特性に影響を及ぼす土の性状と環境条件を考慮し、重金属等の溶出特性に比較的大きな影響を及ぼす次の 4 点に留意する。

・試料粒度：細粒分が多いと比表面積が大きくなり溶出量が増加する可能性がある。
・曝露水量：岩石･土壌への降水浸透量が多いと総溶出量が増加する可能性がある一方、観測される濃度は小さくなる可能性がある。
・乾湿繰返し：酸化反応と細粒化が促進され、溶出性が高くなる可能性がある。
・土の密度：盛土等において土の密度が低いと水と空気の浸透能が高くなるため溶出性が高くなる可能性がある。

試験方法の選定･考案に当たって全ての条件を考慮することは難しいが、長期溶出特性の評価を行うためには、溶出トレンドが把握できる試験方法を実施するとよい。

また通常行われる室内試験は、酸化的環境で行われているが、実際の盛土や埋土の内部は低酸素で相対的に還元的な場合が多いものと推定されている。特に還元状態を評価する場合は、実大スケールの実験や脱気水などを用いた溶出試験を選択するか、微生物の還元力を利用した試験を検討する。そのほか、乾湿繰り返しの条件を考慮できる試験方法もある。

図-3.3.4 は、いくつかの試験方法について、酸化還元状態の考慮と溶出トレンドの把握の程度、および乾湿繰り返しの有無に着目して整理したものである。実現象再現溶出試験方法の例について**参考資料 13** に示す。本試験の仕様は、専門家の助言を踏まえて決定する。

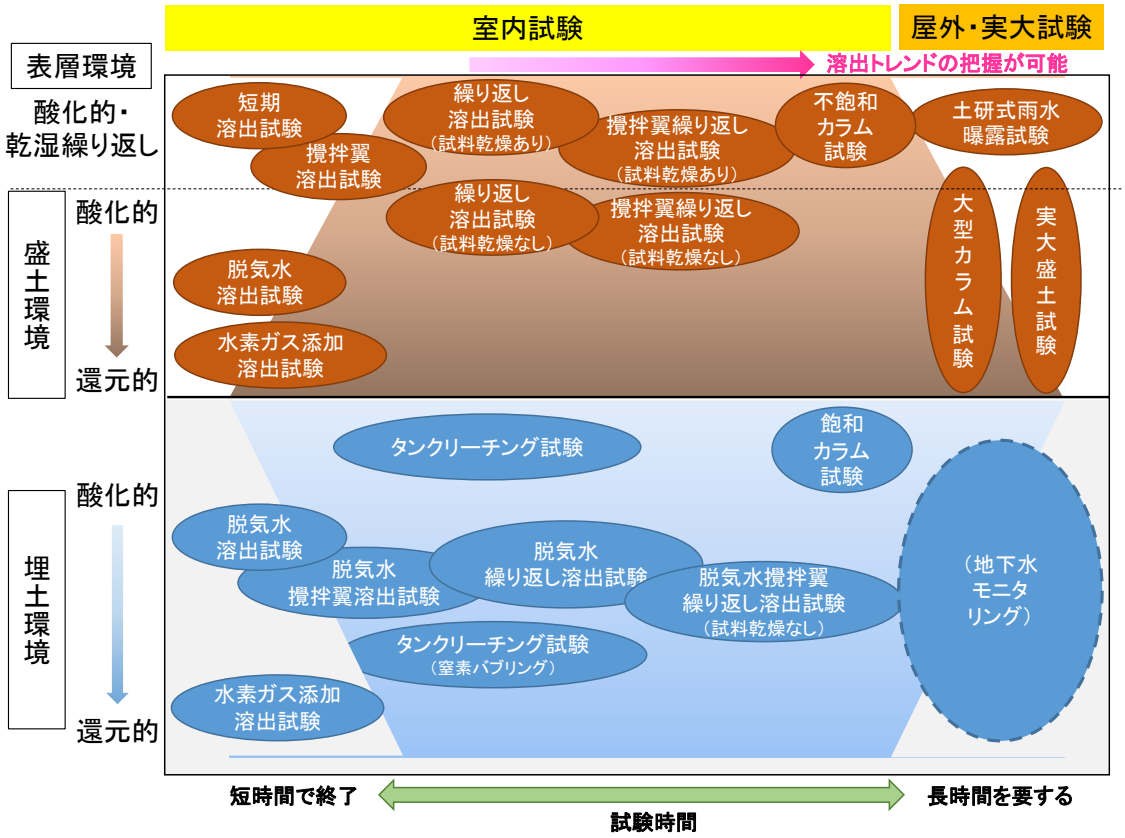


図-3.3.4　酸化還元状態の考慮、溶出トレンドの把握の程度などに着目した、既存の溶出試験の整理

(3) 実現象再現溶出試験を踏まえた長期的な重金属等の溶出濃度の決定

短期溶出試験、酸性化可能性試験、全含有量試験および実現象再現溶出試験の結果を踏まえ、溶出特性を総合的に評価する。その際、実現象再現溶出試験による検液の重金属等の濃度を直接地下水環境基準や土壌溶出量基準などと比較することによる評価については、必ずしも可能であるとは限らないことに留意する。

例えば実大盛土試験は、その溶出環境が実際の盛土とほぼ同じと見なすことができ、採取された滲出水の濃度やその経時変化は実際とかなり近いものと想定される。したがって、実現象再現溶出試験結果を基に地下水環境への影響評価を行うことが適切であると考えられる。

土研式雨水曝露試験は、その溶出環境が実際の盛土よりかなり酸化的であり、かつ、乾湿繰り返しを強く受けるため、かなり過酷な試験条件であると考えられる。一方、滲出水濃度の時間的変化は、実際の盛土より供試体の厚さが薄く、また雨水の浸透が制限されていないことから、実際の盛土より短時間で起こる可能性が高いと考えられるが、溶出のトレンド（長期的に濃度が上昇するか下降するかなど）はある程度再現できるものと考えることができる。

実大盛土試験や土研式雨水曝露試験および各種カラム試験などのフロースルー試験は、

短期溶出試験に比べて実験初期の固液比が大きいことから、初期濃度は短期溶出試験より高くなる[例えば 1)]ことが一般的である。これらの試験結果の評価において、最大濃度を地下水環境基準などと比較すると安全側の評価を与える可能性があるので、発生源濃度の決定に当たり、試験方法の特性と評価の目的を勘案して試験結果の評価方法を決定する。発生源濃度の評価は、専門家の助言を踏まえて行う。

(4) 実現象再現溶出試験による酸性化可能性の判定

実現象再現溶出試験のうち、実大盛土実験や土研式雨水曝露試験など、長期間の曝露試験によって得られた滲出水の pH は、酸性化可能性の判定に利用可能である。また、「土懸濁液の pH 試験方法」[2)]（JGS 0211）に準拠した簡易溶出試験における 56 日間浸漬後の検液の pH により酸性化可能性を確認した例（**参考資料 13**）もある。

【参考文献】

1) 片山潤一，乾徹，勝見武，高井敦史：カラム浸透試験による長期通水を行った海成堆積物中の地質由来砒素の挙動評価, pp.675-682, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.4, 2020.
2) 地盤工学室内試験規格・基準委員会編会：地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]．pp.322-328，地盤工学会，2020.

3.3.9 必要に応じて実施する試験

要管理土の効率的な調査、影響評価、対策およびモニタリングのために、必要に応じて下記の試験を行う。 (1) 岩石・鉱物学的試験 (2) 移行特性試験 (3) 不溶化の性能を確認するための試験 (4) 迅速判定試験

(1) 岩石・鉱物学的試験

要管理土の事前把握のため、事業地における地質の分類、成因や分布の把握をできるだけ正確に行う必要がある。そのための最も基本的な方法は地質調査や試料採取における岩石の肉眼鑑定、地質の分布や構造の記載であるが、必要に応じて得られた岩石試料について岩石・鉱物学的な試験を実施することで、有用な情報が得られることがある。以下にその代表的な手法を示す。なお、**参考資料７**には、岩石・土壌に含まれる重金属等や酸性物質の起源の確認方法をまとめた。

1) 岩石薄片・研磨片の観察・分析

岩石を切断、研磨し、スライドグラスに貼り付けた後にさらに 0.03mm の厚さに研磨すると、岩石を構成する鉱物の多くは光を透過する。この岩石薄片を偏光顕微鏡で観察することで、岩石の構成鉱物種の鑑定、微細構造の観察ができる。これらの結果から、岩石の分類、成因の把握が可能である。観察対象が水溶性の鉱物などの場合、必要に応じて油ずり法や乾式研磨法を用いるなどの工夫をする。また、堆積物試料の場合は、水を加えてペースト状にした堆積物をガラス板に延ばした、スミアスライドを観察する。

また、薄片、研磨片の電子顕微鏡観察を行う場合もある。さらに、微小部蛍光 X 線分析装置（μXRF)、電子顕微鏡付属の元素分析装置（SEM-EDS）や電子線マイクロアナライザー（EPMA）などによって岩石の微小領域の化学分析を行うことで、岩石や鉱物中の重金属等の分布を把握することもできる。これらの情報から、岩石からの重金属等の溶出メカニズムが推定できる場合もある。

2) X 線回折分析

岩石を構成する鉱物の分析方法として、薄片観察とともに一般的な手法に X 線回折分析（XRD）がある。X 線回折分析は、粉末試料をフォルダーに充填し、細いスリットを通過させた X 線を試料に照射する。X 線の入射角を変化させたときに粉末試料中の結晶格子幅に応じて特有の回折現象が起こるが、これを観測することで、鉱物種（結晶構造）に固有の X 線回折スペクトルを得ることができる。特に、微細な結晶である粘土鉱物の分析には本方法が用いられることが多い。例えば、膨張性地山の判定におけるスメクタイトの同定などにも用いられる。

3) 全含有量分析

蛍光 X 線分析や底質調査方法などによる全含有量分析結果は、岩石種の分類、重金属

等を含む岩石種の把握に有用である。

(2) 移行特性試験

影響評価および対策工の選定のために、自然地盤、各種建設資材およびこれらの混合物の物質移行特性（重金属等の吸着性能や分配係数、遅延係数など）を把握する必要がある。

物質の移行特性を把握する試験としては、バッチ吸着試験を実施することが多い。具体的な方法[1)]は**参考資料 14** に示す。また、カラム試験による方法もある。

試験に用いる重金属等を含む溶液は、共存物質の影響を考慮できる掘削土溶出液を使用する方法[2)]が望ましいが、試験対象物質について十分な濃度の溶出液が得がたい場合は、これに試薬を添加して用いる。

(3) 不溶化の性能を確認するための試験

不溶化工の実施に当たり、不溶化の性能を確認する試験として、短期溶出試験のほか、環境の変化（具体的には pH の変化）を想定した試験方法が提案されている[3)]（**参考資料 15**）。その方法は、不溶化工を施した土壌を用いて、酸またはアルカリ溶媒による溶出試験を実施するものである。岩石への適用に当たっては、不溶化工を施した要対策土を**参考資料９**に従って全量 2 mm 以下に破砕した試料を用い、その他の操作については本試験を準用する。

(4) 迅速判定試験

現場で要管理土を判定する必要がある場合、まずは目視判定にて選別できるかどうか検討を行うが、それが困難な場合には、短期溶出試験、酸性化可能性試験、直接摂取のリスクを把握するための試験のうち、必要な試験を実施する。しかしながら、これらの方法は手間や時間、費用を要するため、例えば現地で十分な仮置きヤードが確保できないなどの制約条件がある場合は、必要に応じてこれらの試験に代えて迅速判定試験を現地にて実施する。

東京都環境局は、土壌中の重金属等の調査費用の低減化、調査期間の短縮化を目的として、簡便・迅速で優良な（精度・感度が規定の水準以上である）分析方法[4)]を公表している。

また、東京都の「土壌汚染調査における簡易分析法採用マニュアル（重金属編）」[5)]によれば、下記の事項を簡易分析法の条件としている。

・一定の精度・感度が確保されること
・実証試験結果が公定法に比べて±20 %以内に収まること
・基準値の 1/2 以下まで測定可能なこと
・公定法に比べて簡便で短時間で測定できること
・人体および環境に有害な物質を使用しないこと

なお、正確な分析値を得るために、分析対象の岩石・土壌の特性にあった試験方法を用いるよう留意する。

重金属等の基準項目に関する迅速判定試験として、適用事例の多い蛍光 X 線分析法、ストリッピングボルタンメトリー法および吸光光度法などの概要と留意点を以下に示す。

a）蛍光 X 線分析法

乾燥、粒度調整した固体試料に X 線を照射して、発生した蛍光 X 線の強度から濃度

を測定する。非破壊で多元素同時分析ができるという特徴がある。しかし、原理的に試料中の全含有量を測定するため、直接摂取のリスクを把握するための試験の結果（いわゆる土壌含有量）より高い濃度になること、六価クロムなど元素の特定の化学形態を選択的に検出できないことなどに留意が必要である。

また、対象元素を固体のまま分析する方法は蛍光 X 線分析法に限られるが、試料表面のごく狭い範囲を測定することとなるため、分析値の代表性が問題となる。改善策として、微粉砕によって試料を均質化するか、測定数を増やして値を平均化する方法が考えられる。いずれの方法が良いかは、必要とする精度とそれにかかる時間・手間の兼ね合いにより判断することが望ましい。

b）ストリッピングボルタンメトリー法

公定法に示された前処理を行い、調整した検液に電極を浸し、電極間の電流量から濃度を測定する。水銀電極を使用する方法では廃液処理に留意が必要である。

c）吸光光度法など

公定法に示された前処理を行い、調整した検液中の対象物質と呈色試薬との反応により発色した検液の吸光度から濃度を測定する（吸光光度法）。または検液中の対象物質を高温度で原子化させ、吸光度から濃度を測定する（原子吸光法）。

溶液分析を行う場合、重金属等を含有する土の対策要否判定の試験方法の手順は、①試料の風乾、②異物除去、破砕、③ふるい分け、④溶出、⑤固液分離（遠心沈降･ろ過）、⑥分析前処理、⑦分析である。迅速な試験の実施に当たっては試料採取から⑥分析前処理までに多大な労力･時間（費用）を要することも課題であり、省力化と迅速化が必要である。

目的成分を溶出させる方法に関して、公定法と同等の濃度値を得ようとする場合はできる限り公定法と同じ手順を実施する必要がある。一方、目安値や推計値を得る場合は溶出時間や手順を適宜設定するなど、目的に適した前処理方法を選択することが望ましい。

【参考文献】

1) 吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会・吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討会：吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会報告書　第 1 版. 40p.，国立研究開発法人産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門ホームページ，2022，https://unit.aist.go.jp/georesenv/res-geo/adsorption-layer/index.html
2) 北海道環境保全技術協会技術委員会：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計・施工マニュアル［第 2 版］．道環境技術レポート No.9，北海道環境保全技術協会技術委員会．pp.33-35，2021.
3) 土壌環境センター：重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方

法．土壌環境センター技術標準 GEPC・TS-02，34p，2020.
4) 東京都環境局：簡易分析法．東京都環境局ホームページ，http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/information/analysis/index.html
5) 東京都環境局：土壌汚染調査における簡易分析法採用マニュアル（重金属編）．17p，東京都環境局ホームページ，2006，http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/information/analysis/manual.files/SPHMAmanual.pdf

3.4 要管理土のリスク評価における影響予測のための調査

発生源濃度区分が【低】の要管理土を盛土等に利用する場合のリスク評価に際して構築するサイト概念モデルに、必要な情報を取得あるいは推定し、反映させる。 簡易影響予測評価を行う場合は、必要な情報を調査、試験により取得する。ただし一般値を用いることが適切である場合はそれによることもできる。 リスクレベル評価のうちの定量的評価を実施する場合は、サイト概念モデルを参考に、取得可能な入力値の精度も勘案して、適切な影響予測モデルを選択する。また、選択した影響予測モデルの入力項目について、調査・試験により取得する。ただし、一般値を用いることが適切である場合はそれによることもできる。

発生源濃度区分が【低】の要管理土を盛土等に利用する場合は、受入候補地におけるリスク評価を実施して **2.8(1)** で設定した対応目標を満足するかの評価、およびリスクレベルの区分を行う。

(1) リスク評価の手順

リスク評価の流れを、リスク評価の手順（**図-3.4.1**、 **図-3.4.2**）に従って以下に概説する。なお、リスク評価については **2.10** に示しているので併せて参照されたい。

1) サイト概念モデルの構築

本マニュアルにおけるリスク評価では、まず、地下水経由のリスクに限定して、サイト概念モデルを構築する（**(2)** 参照）。簡易影響予測では、詳細なサイト概念モデルを構築する必要はないが、簡単なサイト概念モデルとして、要管理土から保全対象までの物質移行の過程を理解しておくことが大事である。

2) 簡易影響予測を行う場合

非酸性土であって簡易影響予測評価を行う場合は、対象物質ごとに土壌汚染対策法の自然由来等土壌構造物利用施設において利用する自然由来等土壌の汚染状態の区分に準じて、要管理土をクラス 1-A 相当、クラス 1-B 相当およびクラス 2 相当のいずれかに区分する。これらの評価方法については **2.10 解説 (2)** を参照されたい。ここでクラス 1-A 相当またはクラス 1-B 相当となったものについては、盛土等の直下の地下水質に影響を与えないものと評価し、本マニュアルにおいてはリスクレベル 0 とする。

簡易影響予測評価の結果、クラス２相当（地下水水質への影響が小さくない）と評価された場合、あるいは簡易影響予測評価を行わない、もしくは酸性土である場合など、簡易影響予測評価を行えない場合は、リスクレベル評価を行う。

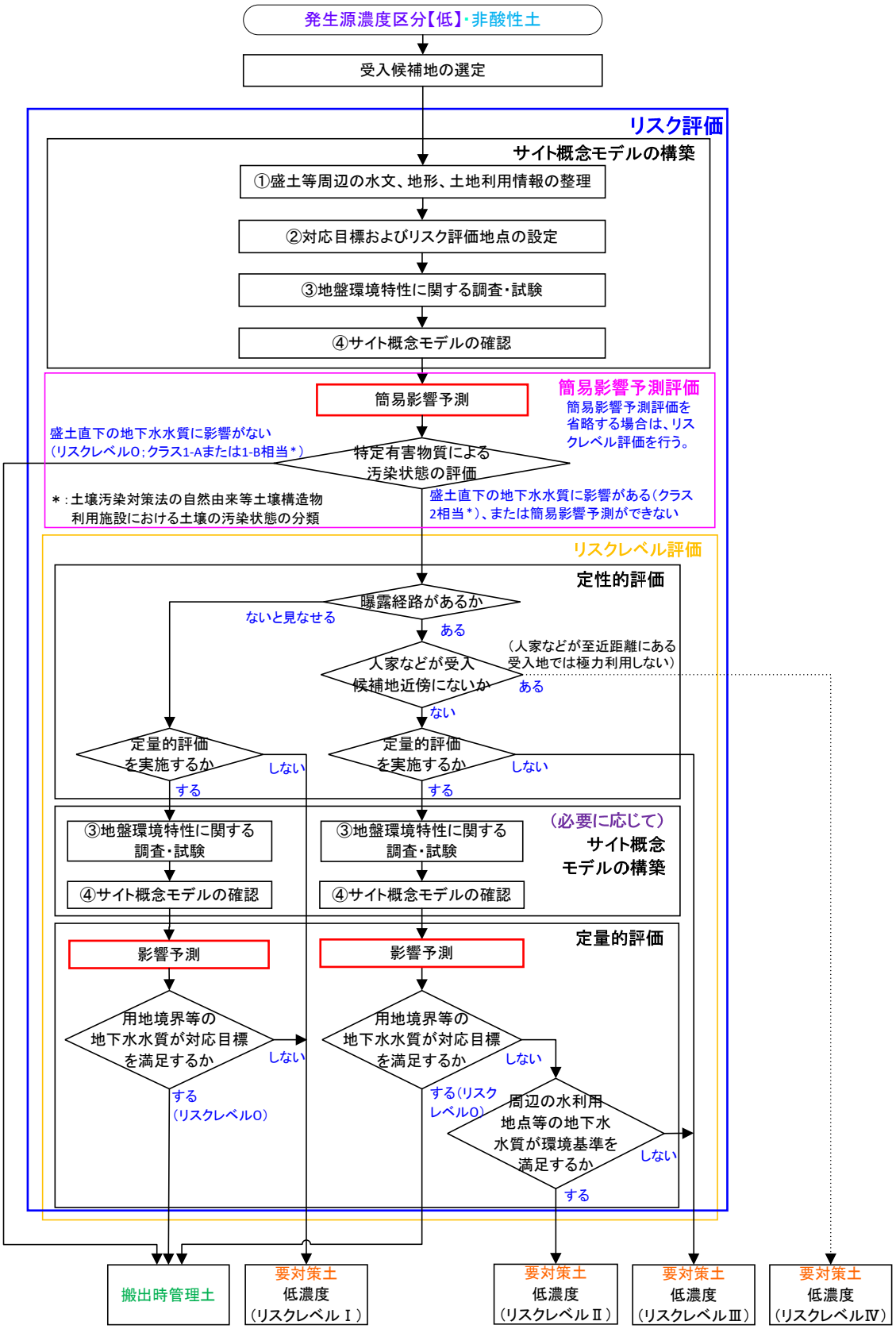


図-3.4.1　リスク評価の手順（非酸性土）（図-2.10.1 再掲）

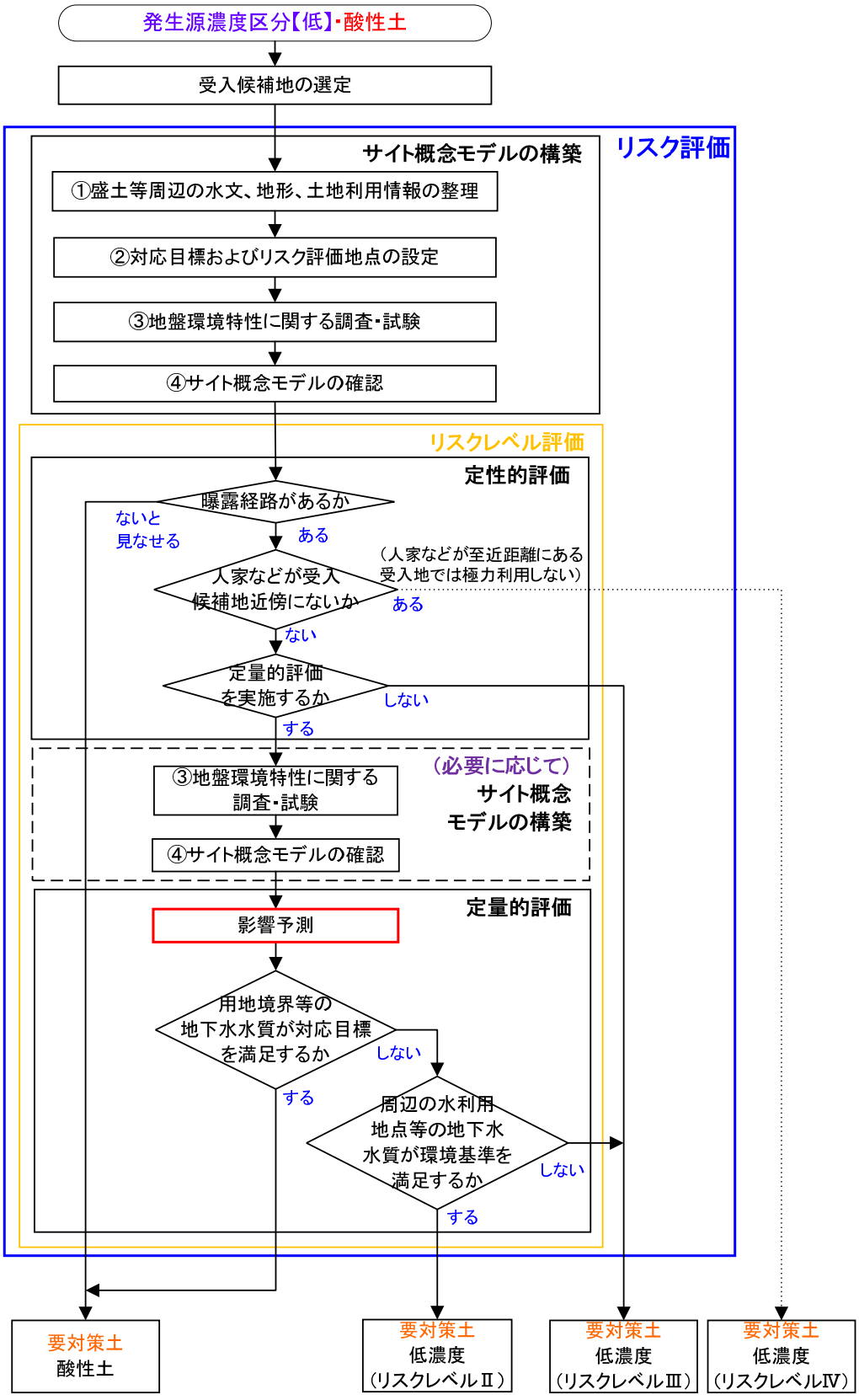


図-3.4.2　リスク評価の手順（酸性土）（図-2.10.2 再掲）

3) リスクレベル評価

リスクレベル評価は、まず定性的評価を実施する。また、定性的評価の後に定量的評価を実施できる。リスクレベル評価によって、用地境界などの地下水水質が **2.8(1)** で定めた対応目標を満足するかどうかを区分する。対応目標を満足する非酸性土はリスクレベル０とし、搬出時管理土に区分する。対応目標を満足しないものについては要対策土の受入候補地における 4 つのリスクレベル（**表-3.4.1**）のいずれか、または要対策土（酸性土）に区分する。これらの評価方法については **2.10 解説(2)** を参照されたい。

表-3.4.1 リスクレベルの区分（表-2.10.1 再掲）

リスクレベル		受入候補地の状況の例
0	汚染した浸透水が地下水面に到達しないか、汚染地下水が用地境界内にとどまる	・受入候補地の土地利用によらず、有害物質の種類、地盤を構成する土の性質、地下水面の位置、流向、流速および盛土等と用地境界との位置関係などに依存する。
Ⅰ	曝露経路がないと見なせる場所	・臨海部で地下水下流側が塩水のために、地下水飲用が将来にわたって見込まれず、地下水が海域に流出する場所 ・大河川の沿川など、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもそのフラックスに対して地下水のフラックスが著しく大きい場所で、対象物質の周辺地下水濃度が環境基準値を超えないと考えられる場合 ・岩盤が浅所に露出するなど、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもすぐに河川に復帰し、希釈によって環境基準値を超えないと考えられる場合 ・山地・丘陵など、現状で地下水飲用がなく、将来的に地下水飲用の可能性が非常に低いと考えられる場所
Ⅱ	対策を実施しない場合においても、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性が少ない場所	・平野で地下水下流側に人家や飲用井戸が存在せず、地下水飲用がないと見込まれる場合 ・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在するが、必要に応じて実施する影響予測結果などから、対策を実施しない場合に、それらの場所に汚染が到達する可能性が少ない場合
Ⅲ	対策を実施しない場合、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性がある場所	・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在し、必要に応じて実施する影響予測結果などから、対策を実施しない場合に、それらの場所に汚染が到達する可能性があると考えられる場合
Ⅳ	用地に隣接するか、ごく至近距離に人家や飲用井戸が存在する場所	・盛土より地下水下流方向の至近距離（おおむね 30m 以内）に人家や飲用井戸が存在する場合

(2) サイト概念モデルに反映させる情報とその調査

サイト概念モデル（**2.10 解説(1)**）の構築においては、下記の必要な情報を調査に基づいて取得あるいは推定し、これらをモデルに反映する。

・要管理土を含む盛土等（発生源）の位置、形状、受入候補地の用地境界

・水利用地点（表流水取水地点、井戸）、集落などの保全対象の位置

・発生源から保全対象までを包括する水理地質構造、および地下水の状況

まず、要管理土の受入候補地の状況（要管理土を含む盛土等（発生源）の位置、形状、受入候補地の用地境界）および保全対象の状況（水利用地点（表流水取水地点、井戸）、集落など）を整理する。また、発生源から保全対象までを包括する、水理地質構造および地下水

の状況について、地質図や近傍のボーリング資料、地形などの情報を基に整理する。そして、これらの空間的な位置関係が理解できるように図などにして整理する。**図-3.4.3** にサイト概念モデルの例を示す。

サイト概念モデルの構築の範囲については、盛土等（発生源）から対象物質を含む水が地下に浸透した場合に、評価期間（本マニュアルでは 100 年間とする）内に到達する可能性がある範囲を包括する必要がある。その範囲は地下水流速や対象物質、対象物質の地盤への吸着特性などに依存するが、環境省が公開している「措置完了条件（目標土壌溶出量・目標地下水濃度の計算）の計算ツール」[1)]（以下、「措置完了条件計算ツール」という。）の解析結果を利用して検討することも可能である。**図-3.4.4** は到達範囲を逆算により求めた例である。この例では、砒素の土壌溶出量が 0.1 mg/L で、帯水層は礫層、動水勾配は 1/100、発生源として地下水流向に直交する方向の道路盛土を想定して幅 1,000 m、長さ 15 m とした場合に、措置完了条件計算ツールの目標土壌溶出量の計算結果が 0.1 mg/L になるよう、評価地点までの距離の入力値を調整した。その結果、到達距離が約 850 m であることが推定された。

地下水の下流側のサイト概念モデル構築範囲については、地下水主流動方向を地表面勾配から推定し、主流動方向に対し左右 90 度（地表面の勾配が急であるなど流向が安定していると考えられる場合は左右 60 度）の範囲とする [2)]のが一般的である。さらに、地下水の調査範囲の決定においては、山地などの水理基盤が露出する場所や、河川などが不圧地下水の流動境界となることが多い [2)]ことを考慮することが合理的である。

将来の水利用の可能性については、地下水の状況、地形・地質的な条件や、現在の土地利用や都市計画などから、定性的に推定する。

構築したサイト概念モデルは、事業の進捗に伴って行われる各種調査（例えば、影響予測に必要な調査の結果など）に基づいて精緻化する。

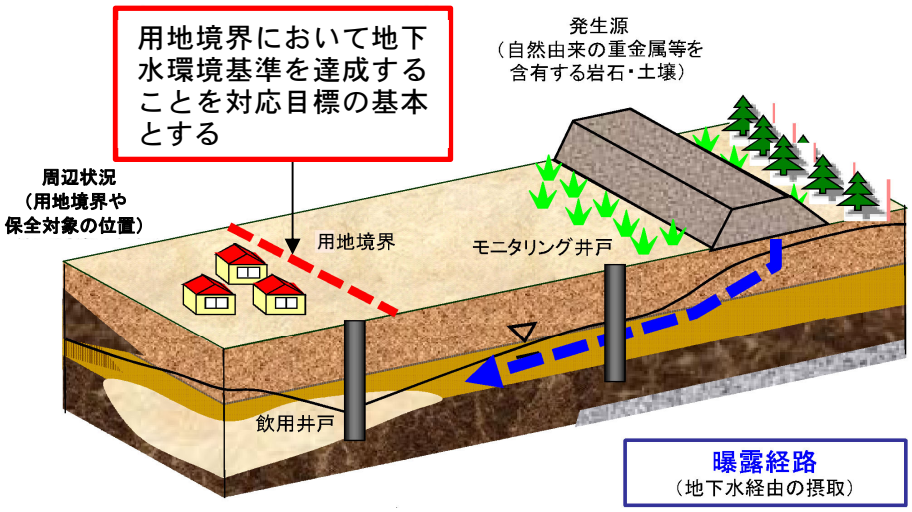


図-3.4.3　サイト概念モデルの例

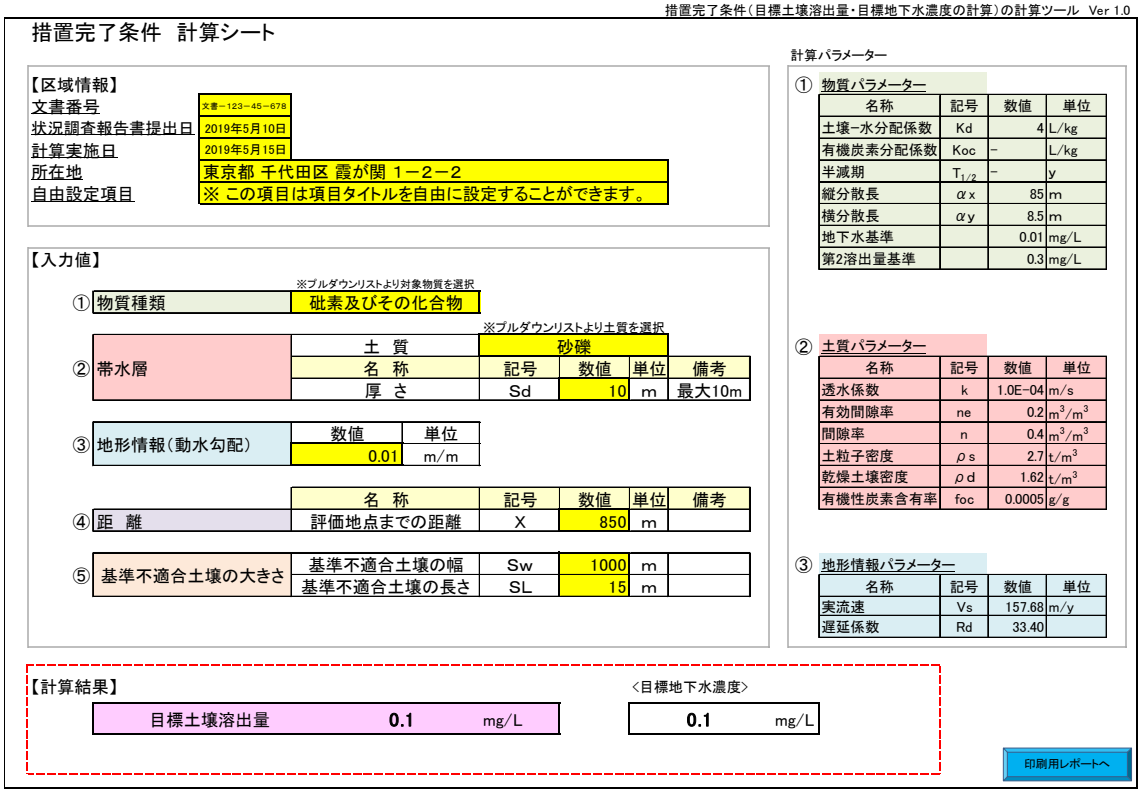


図-3.4.4　措置完了条件計算ツールの逆算により求められる、100 年間に地下水汚染が到達し得る距離の推定例 [1)]

(3) 簡易影響予測に必要な情報とその調査

簡易影響予測を実施するに当たり、下記の必要な情報を調査、試験により取得する。ただし、一般値を用いることが適切である場合はそれによることもできる。

・要管理土の短期溶出試験結果、実現象再現溶出試験の結果に基づく長期的な重金属等の溶出濃度
・受入候補地の土壌の pH、地盤の不飽和層厚、年間降雨量、対象物質に関する（土壌－水）分配係数

簡易影響予測のうち、基準値との比較を行う場合に必要な情報は要管理土の発生源濃度と受入候補地の土の pH[3)]である。発生源濃度については、土壌汚染対策法の方法 [4)]では土壌溶出量試験の結果を入力値としている。本マニュアルにおいては、短期溶出試験結果を用いることが考えられる。ただし、酸性化可能性があると評価された土については、短期溶出試験結果より実際の溶出濃度が著しく高濃度になる場合があることから、簡易影響予測を行わない。

簡易影響予測のうち、環境省がホームページで公開している「自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価

の計算ツール」[5]（以下、「サイト評価の計算ツール」という。）を使用する場合、入力項目は受入候補地の地盤の不飽和層厚、（土壌－水）分配係数、年間降水量および要管理土の発生源濃度（サイト評価の計算ツールにおける「自然由来等土壌の汚染状態」）である。

不飽和層厚は、受入候補地における水文調査（地下水位観測）の結果に基づいて設定するか、詳しい調査を行わない場合は現地で確認の上、不飽和層厚を 50 cm と設定する。なお、不飽和層厚が 50 cm 未満の場合は、サイト評価の計算ツールは利用できない。

分配係数については、サイト評価の計算ツールのデフォルト値を用いることも、手順[4),6)]を参考に実験により求めることもできる。

年間降水量については、受入候補地より最近傍の 2 地点のアメダスデータ各 10 年分、計 20 個の最大値を用いる。

要管理土の発生源濃度は前述の、「基準値との比較を行う場合」と同じである。

なお、分配係数を実験によって求めようとする場合や発生源濃度を実現象再現溶出試験の結果を踏まえて設定する場合は、その方法や評価に当たり専門家の助言を求める。

(4) 影響予測に必要な情報とその調査

リスクレベル評価のうちの定量的評価に用いる影響予測は、2 次元または 3 次元の飽和－不飽和移流分散解析モデル、またはサイト評価の計算ツールで得られた結果（帯水層直上の土壌間隙水の濃度）を到達距離計算ツールに入力するなどによって行うことができる。そのほか化学反応を考慮できる地球化学反応シミュレーションモデル（例えば PHREEQC[7)]など）もある。様々な解析モデルが存在するので、構築したサイト概念モデルを踏まえ、予測に要求する精度や取得可能な入力値の精度も勘案して、適切な影響予測モデルを選択する。また、選択した影響予測モデルの入力項目について、調査・試験により取得する。ただし、一般値を用いることが適切である場合はそれによることもできる。

影響予測に用いられる代表的なパラメータを**表-3.4.2**、**表-3.4.3** に示す。

パラメータとしては実測値を用いる方が精度向上のためには望ましい。ただし、調査項目や調査地点を増やしすぎるとコストや調査期間が膨大になり現実的でない場合もある。調査が困難な項目については、既存文献などの一般値を適用し、現場におけるモニタリングなどで安全性を検証することも考えられる。

表-3.4.2　流れを支配する代表的なパラメータ[8)]

分類	パラメータ
浸透流解析に関するパラメータ	透水係数、不飽和透水係数、水分特性曲線、有効間隙率、比貯留係数
二相流れに関するパラメータ	毛管圧力（サクション）、相対浸透率
移流分散解析に関するパラメータ	縦分散長、横分散長、分子拡散係数、屈曲率、減衰係数、分配係数（遅延係数）

表-3.4.3　土壌汚染対策法の措置完了条件計算ツールで使用するパラメータ [1)]

分類	パラメータ
物質種類パラメータ	土壌汚染範囲・汚染源幅、汚染源濃度、土壌－水分配係数、有機炭素分配係数、半減期、縦分散長、横分散長、地下水環境基準
土質パラメータ	透水係数、有効間隙率、間隙率、土粒子密度、乾燥土壌密度、有機炭素含有率
地形情報パラメータ（動水勾配）	実流速

なお、パラメータの設定に当たっては専門家の助言を参考に、実測値、既存文献など [8)]の一般値のいずれを用いる場合においても、評価が危険側にならないように設定する必要がある。

発生土からの重金属等の溶出濃度は、一般に滲出水濃度で設定する。

滲出水濃度の設定は、土研式雨水曝露試験、実大盛土実験、室内カラム試験などのフロースルー試験における滲出水濃度、繰り返し溶出試験（シリアルバッチ試験）、pH を調整した溶液を用いるバッチ溶出試験（アベイラビリティー試験）やタンクリーチング試験の濃度を基に行う。溶出試験の固液比と対象物質の濃度との関係を整理することで、これらの試験結果から、濃度の経時変化をモデルに取り込むことも可能である。

滲出水濃度を設定する場合には、上記のように様々な方法が適用できるが、どの方法が妥当であるかについて、よく検討する必要がある。例えば、バッチ溶出試験では元素によって溶出濃度の固液比依存性が異なる。特に、セレンやほう素については固液比依存性が大きい、すなわち固液比が小さい溶出初期段階では溶出濃度がかなり大きくなることが知られている。以上のことから、できる限り実現象に近い方法に基づきつつ、その他の要因（スレーキング特性、酸性化の影響など）を考慮して、やや安全側にパラメータを設定することが望ましい。

【参考文献】

1) 環境省：措置完了条件（目標土壌溶出量・目標地下水濃度の計算）の計算ツール．2019，環境省ホームページ，http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html

2) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：特定有害物質を含む地下水が到達し得る『一定の範囲』の考え方．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），Appendix_1，2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/ https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

3) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会編：地盤材料の方法と解説[第一回改訂版]. pp.322-328，地盤工学会，2020.

4) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：自然由来等土壌構造物利用施設における新

たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツールの操作方法. 汚染土壌の処理業に関するガイドライン(改訂第 4.2 版). Appendix_12, 2022, 環境省ホームページ, https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

5) 環境省 : 自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツール. 2019, 環境省ホームページ, http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html

6) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室 : 自然由来等土壌構造物利用施設における自然由来等土壌構造物利用施設を設置する土地の土壌の分配係数の取得方法. 汚染土壌の処理業に関するガイドライン (改訂第 4.2 版), Appendix_13, 2022, 環境省ホームページ, https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

7) Parkhurst, D.L. and Appelo., C.A.J.: Description of Input and Examples for PHREEQC version3 - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Groundwater Book 6, Chap. A43, 497p., 2019, USGS ホームページ, https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/pdf/tm6-A43.pdf

8) 日本地下水学会地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ (編) : 地下水シミュレーション. 技報堂出版, pp.79-104, 2010.

第４章　要管理土への対応

4.1 要管理土を盛土等に利用する場合の対応

要管理土を盛土等に利用する際は、要管理土の管理を行うとともに、必要に応じて地下水・表流水への対策を行う。 地下水・表流水への対策に当たっては、対策工の信頼性、リスクレベル、施工後の管理の容易さ、および経済性などを考慮して対策工を選定する。

要管理土を盛土等に利用する場合、要管理土の区分によって対応が異なる。本マニュアルに基づく対応の流れを**図-4.1.1** に、発生土の区分ごとの特徴や利用に当たっての配慮事項を**表-4.1.1** に示す。

(1) 搬出時管理土を盛土等に利用する場合の対応

要管理土を公共事業として管理下で盛土等に利用する場合には、発生源評価やリスク評価の結果に基づいて地下水・表流水に関する対策を不要とできる場合がある。例えば、実現象再現溶出試験の結果において長期的には滲出水濃度が地下水環境基準を満足すると考えられる場合や、地下水位が十分に低い位置にあって、地下水位までの不飽和帯中の物質移動を考慮しても、100 年間に地下水位まで汚染物質が到達しないと判断され、地下水汚染の懸念を実務上考える必要がない場合などである。このような土を「搬出時管理土」という。

搬出時管理土を盛土等に利用する場合は、覆土、舗装、吹付けなどにより、通常の発生土と区別して用いる。搬出時管理土には発生源濃度区分が【極低】のものと【低】のものが存在する。発生源濃度区分が【極低】のものについては、その安全性が実現象再現溶出試験の結果を根拠としており、モニタリングの実施は不要とする。一方、発生源濃度区分が【低】のものについては、その安全性がリスク評価の結果に基づいていることから、対策工の信頼性と受入先の状況に応じて効果確認モニタリング（**4.3.1 解説(3)8)**）を実施する。また、維持管理においては、搬出時管理土の搬出元、分析結果などの情報を引き継ぐとともに、盛土等の構造物の安定を維持する。搬出時管理土を事業用地外に搬出する場合は、性状の確認を行い、受入先の条件などに応じて必要な対応を実施する。

(2) 要対策土（酸性土）への対応

重金属等の溶出による地下水水質への影響は小さいが、酸性水が発生する可能性のある要対策土（「要対策土（酸性土）」）を盛土等に利用する場合は、地下水・表流水経由のリスクへの対策方法のうち、上部遮水工、転圧工などの浸透抑制対策を選定するのが一般的である。このほか、滲出水の中和による対策がある。

対策工の選定に当たっては、酸性水による対策工の劣化や、対策工との兼ね合いによる重金属等の溶出促進について配慮する。中和工においては中和能の持続性や、中和に伴う重金属等の溶出促進の課題があるので、慎重な検討が必要である。

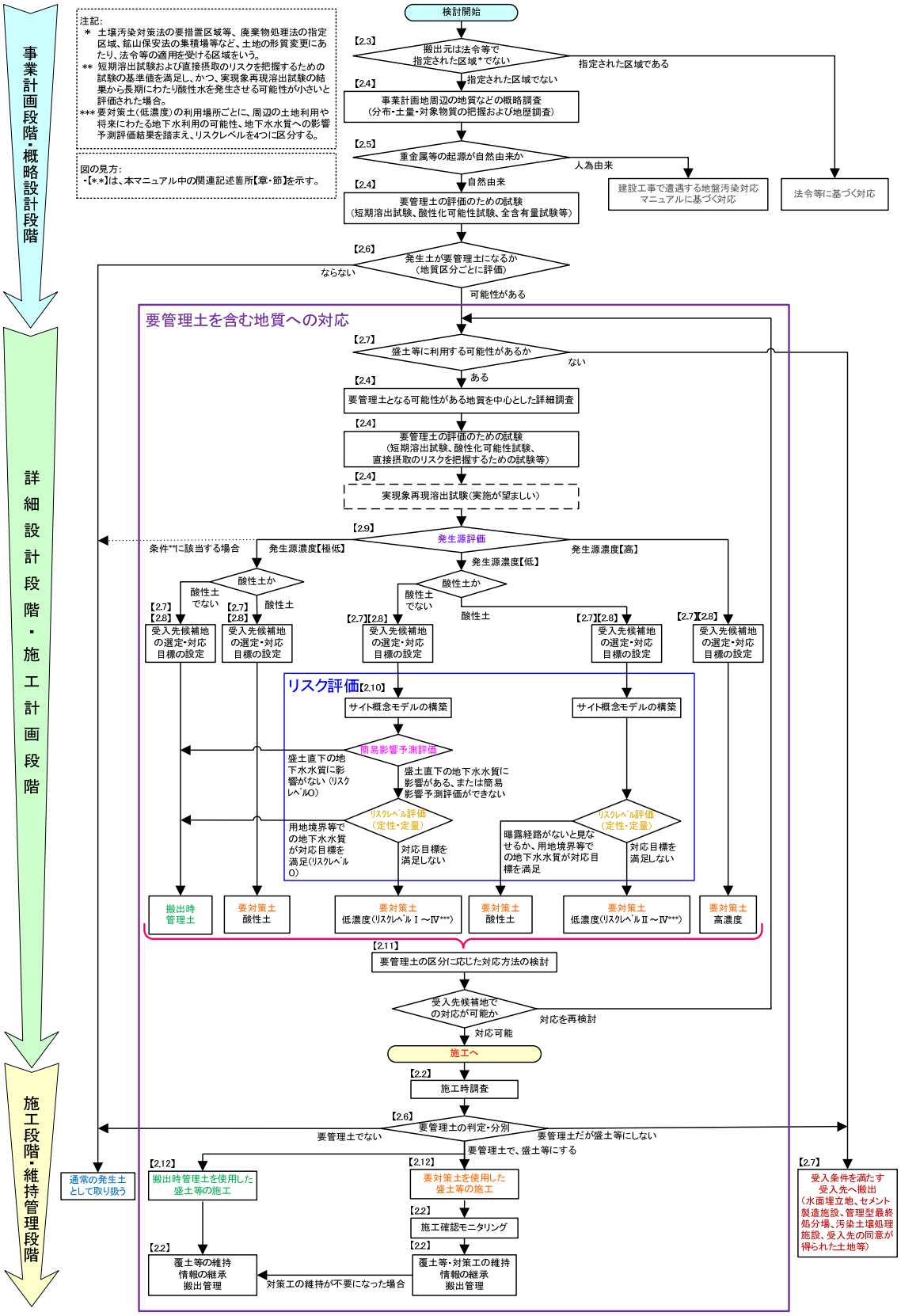


図-4.1.1　本マニュアルに基づく対応の流れ（図-2.1.3 再掲）

表-4.1.1　本マニュアルにおける発生土の区分と、それらの特徴および利用に当たっての配慮

（表-2.1.2 再掲）

土の区分			発生源濃度区分	土の受入地のリスクレベル区分	土の特徴	土の受入地の、地下水経由のリスクに関する特徴	自然由来重金属等含有土・酸性土としての配慮			
							盛土等にする場合の配慮	地下水・表流水リスク対策	直接摂取リスク対策	管理上の配慮
発生土	通常の発生土		－	－	・重金属等の溶出量、含有量が小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・配慮不要	－	－	・配慮不要
	要管理土	搬出時管理土	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響は小さく、かつ酸性水を発生させない土	－	・通常の発生土と区別	－	・通常の発生土との区別のための方法（覆土、舗装、吹付など）が兼ねる	・覆土等の維持、情報の継承 ・利用方法を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
			低	リスクレベル0		リスク評価に基づき、評価地点の地下水水質への影響が小さい		・必要に応じて効果確認モニタリング		
		要対策土（酸性土）	極低	－	個別に検討した利用方法の下で、受入先において重金属等による地下水水質への影響の可能性は小さいが、酸性水を発生させる可能性がある土	－	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重のシートやアスファルト舗装などの上部遮水工、転圧工などによる浸透抑制対策工や中和工などのいずれか 2）施工確認モニタリング		・覆土等の維持、情報の継承 ・必要に応じて対策工の維持管理 ・盛土等の形質を変更したり、受入先から搬出する場合に、自然由来重金属等含有土・酸性土として評価や管理が必要
		要対策土（低濃度）	低	リスクレベルⅠ	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を満足し、かつ長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍以下、かつ全含有量が著しく高くない土で、以下のいずれかに該当するもの ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性がある土 ・個別に検討した利用方法の下で、受入先において、重金属等による地下水水質への影響の可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土**	曝露経路がないと見なせる	・通常の発生土と区別 ・その上で、転圧や舗装を行うなど浸透抑制に配慮することが望ましい	・施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅡ		対策を実施しない場合においても、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性が少ない	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）一重の遮水工封じ込め、不溶化工、吸着層工など 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅢ		対策を実施しない場合に、人家や飲用井戸まで汚染地下水が到達する可能性がある	・通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど）、またはその他の対策工に加えて効果確認モニタリング 2）施工確認モニタリング		
				リスクレベルⅣ		用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する	・要対策土を極力盛土等にしない ・やむを得ず盛土等にする場合は、通常の発生土と区別した上で、対策工を施工	・以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		
		要対策土（高濃度）	高	－	短期溶出試験の結果が第二溶出量基準を超えるか、長期的な溶出濃度が地下水基準の10倍を超える、あるいは鉱石など、全含有量が著しく高い土で、以下のいずれかに該当するもの ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性がある土 ・重金属等による地下水水質への影響が大きい可能性があり、かつ酸性水を発生させる可能性がある土	－	・用地に隣接するか、至近距離に人家や飲用井戸が存在する場所で盛土等にしてはならない ・その上で、通常の発生土と区別し、対策工を施工	・必要に応じて不溶化等を実施し、第二溶出量基準を満足させた上で、以下のすべてを実施 1）信頼性*の高い対策工（二重の遮水工封じ込めなど） 2）施工確認モニタリング		

*　地下水・表流水経由のリスクへの対策工の信頼性は、対策工の設計、土の性状との関係、資材の長期耐久性、機能の多重性、地盤の変形などに対する自己修復性、施工、対策工の機能確認に関するものが考えられる。詳しくは参考資料17を参照されたい。

**　酸性水を発生させる可能性がある土は、リスクレベルⅠには分類されずリスクレベルⅡ～Ⅳのいずれかに分類される。

また、維持管理においては、要対策土（酸性土）の搬出元、分析結果、および対策工の設計に係る図書などの情報を引き継ぐとともに、対策工の維持管理とあらかじめ定めた計画に基づき、対策工が適切に施工されているかについて確認するためのモニタリング（施工確認モニタリング）を計画で定めた期間実施する。その後、地下水・表流水経由の対策が引き続き必要な場合は対策工の維持管理、および必要に応じて実施する効果確認モニタリングを継続し、不要な場合は盛土等の形状を維持する。なお、要対策土（酸性土）を事業用地外に搬出する場合には性状の確認を行い、受入先の条件などを踏まえた必要な対応を実施する。

酸性土の掘削面への対策が必要な場合には、掘削面における空気や水との接触の抑制や侵食防止を目的とした、のり面保護工や覆土工を基本とする。詳しくは、**参考資料 16** を参照されたい。

(3) 要対策土（低濃度）を盛土等に利用する場合の対応

発生源濃度は高くないものの、長期的に滲出水濃度が地下水環境基準を満足しない可能性がある要対策土（「要対策土（低濃度）」）を盛土等に利用する場合は、リスク評価を行うとともに、個々の受入地における各対策工の効果やその信頼性を整理し、リスクレベルに応じた対策を検討する。対策工の選定に当たっては、対策工の効果やその信頼性に加えて施工後の維持管理の容易さ、経済性などを考慮し、最適なものを選定する。対策検討の考え方に

ついては(5)で詳しく述べる。ただし、水銀を含む要対策土（低濃度）を盛土等に利用する場合は、水銀が蒸気として移動する場合があることを考慮し、対策工法の検討においては二重の遮水工封じ込めを基本とし、その他の工法を検討する場合においては水銀の移動性について評価を行うものとする。

対策工を設計するに当たり、対策工の効果の確認方法や、対策工に不具合が確認された場合の対応方法についてあらかじめ検討を行い、モニタリング方法や維持管理計画に反映する。

維持管理においては、要対策土（低濃度）の搬出元、分析結果、および対策工の設計に係る図書などの情報を引き継ぐとともに対策工の維持管理とあらかじめ定めた計画に基づき、対策工が適切に施工されているか確認するためのモニタリング（施工確認モニタリング）を計画で定めた期間実施する。その後、地下水・表流水経由の対策が引き続き必要な場合は対策工の維持管理、および必要に応じて実施する効果確認モニタリングを継続し、不要な場合は盛土等の形状を維持する。なお、要対策土（低濃度）を事業用地外に搬出する場合には、性状の確認を行い、受入先の条件などを踏まえた必要な対応を実施する。

搬出元の掘削面からの滲出水については、重金属等の溶出対策を実施する事例はまれで、のり面保護工を行うのが一般的である。

(4) 要対策土（高濃度）を盛土等に利用する場合の対応

短期溶出試験の結果が第二溶出量基準値を超えるか、または全含有量が著しく高いか、もしくは実現象再現溶出試験の結果、重金属等の長期的な溶出濃度が地下水環境基準のおおむね 10 倍以上になる可能性がある要対策土（「要対策土（高濃度）」）を盛土等に利用する場合は、万一対策工が効果を発揮しなかった場合の影響が大きいと考えられる。そのため、このような土は人家や飲用井戸などの近傍では利用できない。また、対策工としては二重の遮水工封じ込めなどの信頼性の高いものを選択する。なお、短期溶出試験の結果が第二溶出量基準値を超える要対策土（高濃度）については、不溶化工によって第二溶出量基準値を満足するようにした上で、信頼性の高い対策工を選択する。

また、維持管理においては、要対策土（高濃度）の搬出元、分析結果、および対策工の設計に係る図書などの情報を引き継ぐとともに、対策工の維持管理とあらかじめ定めた計画に基づき、対策工が適切に施工されているかについて確認するためのモニタリング（施工確認モニタリング）を、計画で定めた期間実施する。その後、地下水・表流水経由の対策が引き続き必要な場合は対策工の維持管理、および必要に応じて実施する効果確認モニタリングを継続し、不要な場合は盛土等の形状を維持する。なお、要対策土を事業用地外に搬出する場合には性状の確認を行い、受入先の条件などを踏まえた必要な対応を実施する。

(5) リスク評価に基づく対策検討の考え方

現場において環境への影響が懸念される場合は、リスク評価の結果を踏まえて対策工を選定・実施した上で、土の搬出管理を行う必要がある。その際、発生源の濃度が低いほど、万一対策工の効果が発揮されなかった場合の地下水汚染リスクは小さくなる。また、対策工

は各種提案されているが、方法ごとに現場条件との兼ね合いにより、その信頼性の程度が異なると考えられる。対策工の信頼性が高い工法ほど地下水汚染リスクが小さい。さらに、受入先の周辺状況によって、そのリスクの程度が異なると考えられ、基本的には受入先が人家や飲用井戸から遠いほどリスクが小さくなる。そこで、発生源濃度、受入先のリスクレベルとその現場における対策工の信頼性を考慮した対応が必要となる。

地下水・表流水経由のリスクに対する対策工の信頼性については、対策工の設計の考え方、岩石・土壌の性状との関係、耐久性、地盤の変形への追従性や自己修復性、万一損傷などが生じた場合の損傷などの把握しやすさや影響の大きさ、損傷などの修復性、および施工の確実性や容易性などを考慮して評価する。詳しくは**参考資料 17** を参照されたい。

効率的かつ効果的な対策工の検討のためには、事業規模（盛土量など）、および工事のタイミングや対策実施までの猶予期間などを考慮し、対策方針の検討と調査計画の策定を連動させて進める必要がある。特に、対策方針に応じて必要な調査内容が異なる場合があるため、できるだけ対応方針の検討とあわせて過不足のない調査計画を策定する必要がある。

例えば、発生源濃度区分が【低】の要対策土の対策工法として遮水工封じ込めを選択する場合は、一般に対象とする物質やその組合せに関して考慮する必要はない。一方、不溶化工や吸着層工を選択する場合は、対象とする物質やその組合せを考慮する必要があり、対策工に用いる資材を決定する前に、利用予定の土を用いた試験や資材の配合の検討が必要となることから、試料採取や事前検討の工程を考慮しなければならない。

調査試験方法には、比較的短時間で評価する方法と、実現象再現溶出試験のようにある程度の時間を要する方法がある。工事着工までの期間が限られているなどの場合は、短時間で評価できる試験方法を適用し、それに応じた対策方針を検討することがある。逆に、評価時間をかけることができる場合には、土研式雨水曝露試験、実大盛土実験などの実現象再現溶出試験を適用し、その結果に基づく合理的な対策方針を検討できる。いずれの場合も、必要とされる精度や工期を考慮して事業者が適切な調査方法を判断し、選択する必要がある。判断に際しては、必要に応じ専門家の助言を求めるとよい。

4.2 土質改良が必要な場合の対応

発生土を盛土等に利用する際に土質改良が必要な場合は、土質改良による人の健康および生活環境への影響が新たに生じないよう適切な対応を図る。

発生土を盛土等に利用する際に、その物理的性状を改良（土質改良）する目的で石灰系、セメント系などの固化材などとの混合、あるいは粒径分布の異なる土との混合などを行うことがある。土質改良を施した土は、pH などが元の状態から変化する場合があり、重金属等の溶出や滲出水の pH などが変化する可能性があることから、必要に応じて事前の配合試験を行って、短期溶出試験を実施するなどにより土の性状を把握し、改良後の性状を基に適切な対応を図る必要がある。

特に石灰系やセメント系固化材で土質改良を施した土（以下、「改良土」という。）は、混合する材料が強アルカリ性のため、アルカリ側で溶出するような重金属等（砒素、セレン、ふっ素、ほう素など）の溶出特性の変化については事前の確認が必要である。なお、改良土が周辺の土の pH に影響を及ぼす範囲については、複数の実験結果によりごく近傍の土壌にとどまる[1)]との報告がある。

建設工事で発生する泥状の掘削物については、適用される法令やその環境安全対策における留意点が異なり、建設汚泥として廃棄物処理法に基づく対応が求められる場合と、土砂として取り扱われる場合がある（**表-4.2.1**）。この判断は事案に応じて自治体が行う。そのため、建設工事で発生する泥状の掘削物の法令上の取扱いについては、都道府県等の環境部局への確認を行う必要がある。なお、建設工事で発生する泥状の掘削物のうち、建設汚泥と判断される場合に、土壌汚染対策法の要措置区域等から発生する場合は、土壌汚染対策法と廃棄物処理法の両法で取り扱わなければならないが、自治体によって対応が異なる場合があるので、担当部局と相談されたい。さらに、土砂として取り扱われる場合で、要措置区域等から発生するものは土壌汚染対策法の汚染土壌として取り扱われる。建設工事で発生する泥状の掘削物のうち土砂に関する建設工事における利用については、「建設発生土利用技術マニュアル」[5)]をあわせて参照する。

表-4.2.1　建設工事で発生する泥状の掘削物の法律的区分と対応方法の概要 [2)を改変]

区分	対応方法の概要
建設汚泥（産業廃棄物の一種）	・排出事業者は廃棄物処理法に従い、「自ら利用」、あるいは再生利用制度[3)]に基づき再生利用を行うか、適正に処分する。盛土等への再生利用の場合は、建設汚泥再生利用マニュアル[1)]の建設汚泥の処理方法に基づき処理し、必要に応じて土壌汚染対策法の措置に準じた対策を実施。 ・土質改良された建設汚泥処理土は土壌環境基準を満足させる（環境省通知[3),4)]）。
土砂	・土壌汚染対策法や条例の適用を受ける場合は、それらに従う。 ・盛土等への利用の場合は、建設発生土利用技術マニュアル[5)]の土質改良方法に基づき処理し、必要に応じて土壌汚染対策法の措置に準じた対策あるいは本マニュアルに基づく対策を実施。

【参考文献】

1) 土木研究所（編著）：建設汚泥再生利用マニュアル，大成出版社，2008.
2) 土木研究所・土木研究センター地盤汚染対応技術検討委員会（編著）：建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック．大成出版社，2015.
3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長：建設汚泥の再生利用指定制度の運用における考え方について．環廃産発第 060704001 号（平成 18 年 7 月 4 日），2006，環境省ホームページ，http://www.env.go.jp/recycle/waste/nt_060704001.pdf
4) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長：建設汚泥処理物の廃棄物該当性の判断指針について．環廃産発第 050725002 号（平成 17 年 7 月 25 日），2005，環境省ホームページ，http://www.env.go.jp/recycle/waste/kensetu_tuuti.pdf
5) 土木研究所（編著）：建設発生土利用技術マニュアル　第 4 版. 土木技術センター, 2013.

4.3 対策工法

4.3.1 盛土に利用する場合

要対策土を盛土に利用する場合は、構造物としての安定性を確保した上で、要対策土の環境安全対策として必要な機能を有する構造となるよう設計する。その際、構造物の安定性および対策効果の発揮のため、原則的には盛土内への水の浸入を抑制し、排水を促進する構造となるよう設計する。

要対策土を用いて築造する盛土が有すべき機能は、**表-4.3.1**のように分類でき、これらを適宜組み合わせることによって対策効果を発揮する。

表-4.3.1　要対策土を用いて築造する盛土が有すべき機能と対応する工種の例（表-2.11.1再掲）

機　能	工種の例
直接摂取経路の遮断	覆土工、表面被覆工、舗装工
盛土内への雨水の浸透抑制	覆土工、植栽工、転圧工、上部遮水工
重金属等の溶解や酸化反応の抑制	不溶化工
重金属等の捕捉や酸性水の中和	吸着層工、滲出水処理工、透過性地下水浄化壁工、中和工
盛土滲出水の地下浸透の抑制 および表流水としての排水	底部遮水工、排水工
対策効果の確認	内部保有水の水位観測、排水量または漏水観測、排水水質分析、地下水水質分析など
要対策土とそれ以外の土との区別 （必要がある場合）	覆土工、表面被覆工、砕石敷設工など

以下、本節では要対策土による盛土構造物の構造安定性と施工上の留意点について述べ、さらに種々の対策工を取り上げて、これらの留意点を述べる。

(1) 構造安定性と排水対策など

要対策土を盛土に利用する場合の対策工については、材料特性や現場条件に適した方法を選択するが、選択した方法にかかわらず、当該盛土構造物としての力学的安定性の確保が必要である。

特に、遮水シートによる封じ込め対策を講じるような盛土については、遮水シートの境界面ですべりが生じないように十分に留意する必要がある。

1) 構造安定性の確保

要対策土を盛土に利用する際、盛土材その他の材料特性、盛土内での使用領域や方法によっては、盛土が力学的に不安定となる可能性があるため、「道路土工－盛土工指針」[1)]などの関連基準類を参考にして、盛土の安定性について十分に検討する必要がある。

特に注意を要する立地条件の盛土（軟弱地盤上の盛土、液状化を生じるようなゆるい砂地盤上の盛土、傾斜地盤上の盛土、谷間を埋める盛土、片切り片盛り、切り盛り境部の盛土、沢埋め盛土などの浸透水の影響を受けやすい盛土、高盛土など）となる場合は、安定性確保の可否、対策方法について十分な検討が必要である。特に盛土の安定性には基礎地盤の条件や浸透水が大きく影響するため、基礎地盤の調査を慎重に行い、盛土の

沈下やすべりなどの安定性の検討を行うとともに、基礎地盤の処理や排水施設の設置・運用・管理を適切に行う必要がある。

盛土構造物の主な不安定化要因としては**表-4.3.2**のようなものがあり、これらについて設計段階で十分な検討を行い、適切に施工管理を実施する必要がある。

表-4.3.2　盛土構造物の主な不安定化要因とその対策の内容

	主な不安定化要因	対策の内容
1	遮水部材などの強度不足、異材料間の接触面摩擦力不足によるもの	遮水部材の上載土塊などの重量を考慮し、遮水部材は十分な強度と摩擦力を確保する。覆土材との境界付近は特に入念な締固めを行い、材料同士の一体化を図る。
2	盛土内での水位形成による静水圧や揚圧力の遮水部材への作用	本来、盛土構造物内には水を入れない、入った水は速やかに排出することが原則である。地山からの湧水や雨水の処理を適切に実施し、盛土内の水位が自然由来重金属等含有土や酸性土を使用した位置に達しないよう、基盤排水層やのり面の各小段に水平排水層を設けて排水処理を必ず実施する。また、覆土の安定性確保のため、覆土厚さを十分に確保するとともに、排水層を設置する。
3	のり面からの浸透水による表層崩壊、のり尻の排水不良による崩壊	
4	要対策土自体の強度不足	盛土材として使用する材料によっては圧縮性が大きいものや、強度が不足するものがある。そのため、「道路土工－盛土工指針」[1]などを参考に設計し、締固めなどの施工管理を適切に実施する。また、盛土材の不溶化や安定処理などによる土質改良も対策の 1 つである。

封じ込めに用いる遮水部材（粘性土、遮水シート、水密アスファルトコンクリート）については、覆土材との境界面で滑りを発生させない摩擦力と強度を確保する。

要対策土を使用した部分や遮水部材と覆土材との境界付近は特に入念な締固めを行い、材料同士を一体化させて、崩壊に至ることがないようにする。

盛土内での地下水位形成による静水圧や揚圧力が遮水部材に作用することや、のり面からの浸入水による表層崩壊、のり尻の排水不良による崩壊に対しては、盛土内に水が入りにくく、入った水が速やかに排水される構造とする。すなわち覆土厚の確保、締固め、排水構造の設置を十分なものとすることなどが有効である。参考までに「道路土工－盛土工指針」[1]に基づいた、要対策土を使用した盛土における排水対策の例を**図-4.3.1**に示すが、雨水や湧水について十分な排水能力を確保することが必要である。

使用する要対策土自体の強度不足が懸念される場合には、「道路土工－軟弱地盤対策工指針」[2]や「建設発生土利用技術マニュアル」[3]を参考に、締固めや土質安定処理による改良を行い、必要な強度を確保する。

2) 排水対策など

要対策土を盛土に利用する際、盛土からの排水や地下水のモニタリングなどを行い、盛土内への水の浸入抑制効果について確認する必要がある。また、仮置き時に接触した地盤への重金属等の浸透や、盛土施工時における露出状態の要対策土への降雨に伴う重金属等の溶出や酸性水の発生により、周囲にそれらの影響が及ぶことのないような対応が必要である。

盛土施工に当たっても、「道路土工－盛土工指針」などを参考に、適切な排水対策を行う必要がある。特に、降雨による盛土のり面表面の侵食防止対策が必要である。**図-4.3.2**に施工時ののり面の表面排水系統の一例を示す。盛土天端は横断勾配を取り、のり肩部はソイルセメントなどにより侵食を防止する。必要に応じてのり肩部に素掘り側溝を設け、のり面への雨水の流出を防ぐ。のり面部には適切な間隔で縦排水溝を設け、雨水をのり尻に導く。湧水箇所ではのり尻部に仮排水溝を設ける。覆土材が侵食されやすい材料の場合や高盛土となる場合は、**図-4.3.3**に示すように、盛土内に縦排水管を設け、ここを通った水を地下排水管に導いて排水するのが有効である。ただし、要対策土への水の接触を避けるため、縦排水管は要対策土部分から十分離して配置する必要がある。盛土の転圧において、施工中に降雨が予想される場合には作業終了時にローラーなどで表面を滑らかにする、防水シートで仮の覆いをするなどして雨水の浸入を最小限にする。また、降雨前にまき出した土を転圧せずに放置することは避ける。

なお、遮水部材を用いる場合は、施工中に遮水部材が傷つき、新たな水みちを作ることがないよう、慎重に施工する必要がある。

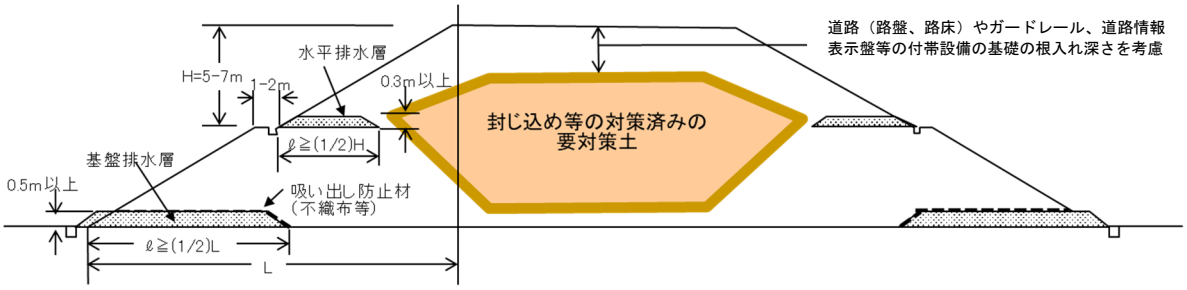


図-4.3.1　要対策土を使用した盛土構造物への排水対策の例（「道路土工－盛土工指針」[1)]を参考）

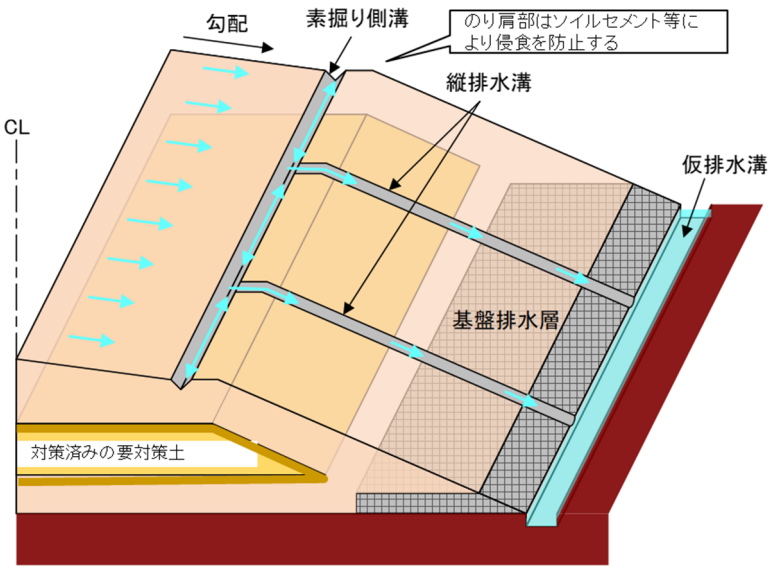


図-4.3.2　盛土施工中の排水の例

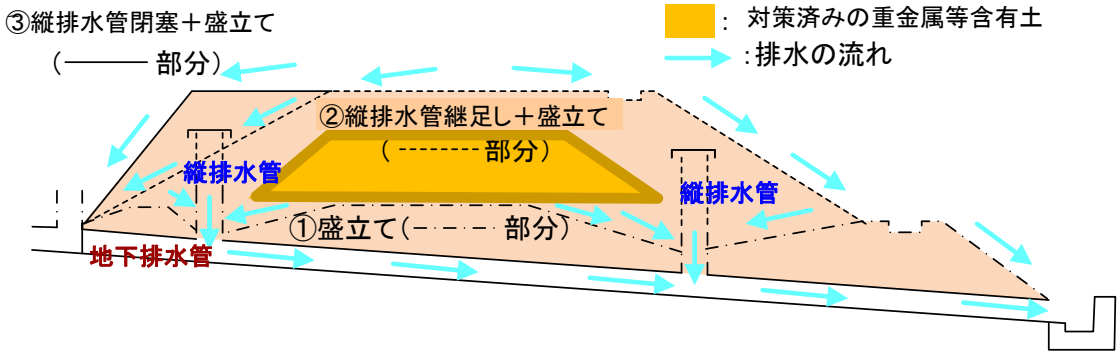


図-4.3.3　縦排水管を用いた盛立の例

(2) 対策工に共通する留意点

盛土に適用する対策工の例について**表-4.3.3** にまとめた。なお、個々の対策工の留意点は**(3)**に後述する。これらの対策工の共通の留意点としては、以下の項目が挙げられる。

・対策工の設計に当たっては、自然地盤中の物質移行特性（吸着能など）は見込まない。

・地山（自然地盤）に要対策土を盛土に利用する際において、要対策土と地山との土質の区別が難しい場合は、将来の再掘削時における両者の境界確認ができるように、境界を区別するための砕石や不織布などの材料を敷設する。

・施工中は要対策土の流出や飛散の防止に配慮する。

・要対策土の盛立施工中は、降水や表流水の要対策土内への浸入を抑制する対策（仮設的なシート敷設など）や要対策土からの表流水や滲出水の対策（側溝排水の水処理など）を行う。

・降雨等による重金属等の溶出を許容する、「滲出水処理工」を行う場合を除いて、盛土構造物の上面は降雨等による外部環境への影響を抑制するために、原則的に覆土または舗装を施す。

・覆土の厚さは、盛土等を築造した後の利用や維持管理において対策工の機能を損なわないように設定する。例えば、盛土の上部に道路および道路付帯施設、建屋や電柱などの構造物を設置することが予定されている場合には、その基礎の根入れ深さを考慮する。また、覆土に植生工を施工する場合は根が遮水層を損傷しないように留意する。根の侵入深さは植生の種類により異なると考えられる。植生の違いによる標準的な覆土の厚さについて、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」[4)]の記載に基づき**表-4.3.4** に整理した。

・対策効果の確認方法（**(3)8)** 参照）に留意して設計する。一般的には対策工の施工場所に対して、地下水の上下流の地下水水質を分析する方法が用いられるが、それ以外にも対策工に応じた確認方法を用いる。

例えば、遮水工封じ込めにおける遮水性の効果確認については、封じ込めの内部保有水の水位を井戸で確認する方法以外にも、万一の際に内部保有水の水位を上昇させないた

表-4.3.3　対策盛土の例(1)

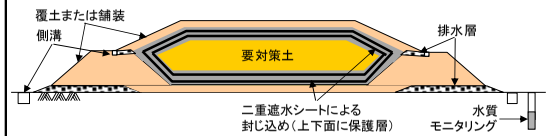
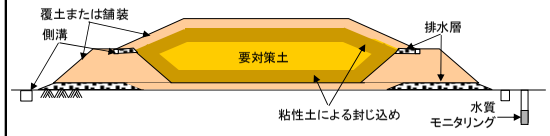
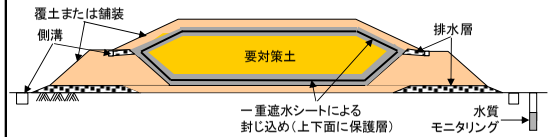
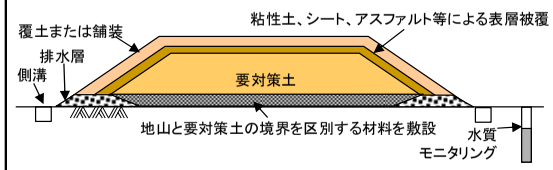
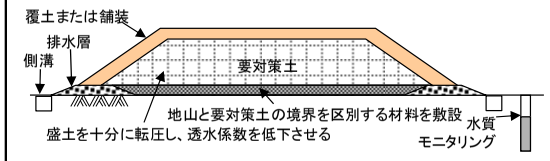
対策工種	対策のイメージ図	概要	特徴・留意点および長所・短所	想定される適用の例	事前検討項目
二重遮水工（二重遮水シートによる封じ込め）		盛土構造物の中に、周囲を二重の遮水構造とした要対策土を封じ込め、要対策土からの浸透水や滲出水の発生を防止する。	・土壌汚染対策法の封じ込め措置として挙げられた方法と同等 ・土の搬入・積層・転圧時のシート破損やシート上面での土の滑りに留意し、シート勾配を小さくするなど、構造物として安定となる設計・施工法とする ・比較的高コスト	・造成工事の掘削土による盛土 ・人の生活圏や飲用井戸等の水源が比較的近傍にある場所（近傍とは無対策の場合のリスクが大きいと推定される距離）	・要対策土の力学的特性 ・構造物に対するシートの耐久性
一重遮水工（粘性土による封じ込め）		盛土構造物の中に、周囲を粘性土による一重の遮水構造とした要対策土を封じ込め、要対策土からの浸透水や滲出水の発生を防止する。	・封じ込め材としての粘性土は現地発生土の利用も可能 ・重金属等含有土と封じ込め粘性土による構造物の安定性確保のための補助工法等が必要	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・人の生活圏や飲用井戸等の水源が近傍にない場所	・要対策土と封じ込め粘性土の力学的特性 ・封じ込め粘性土の透水性
一重遮水工（一重遮水シートによる封じ込め）		盛土構造物の中に、周囲を遮水シートによる一重の遮水構造とした要対策土を封じ込め、要対策土からの浸透水や滲出水の発生を防止する。	・土の搬入・積層・転圧時のシート破損やシート上面での土の滑りに留意し、シート勾配を小さくするなど、構造物として安定となる設計・施工法とする	・造成工事の掘削土による盛土 ・人の生活圏や飲用井戸等の水源が近傍にない場所	・要対策土の力学的特性 ・構造物に対するシートの耐久性
上部遮水工		要対策土による盛土等構造物の上部に粘性土、シート、アスファルト舗装、コンクリート舗装等による遮水工を施す。	・浸透性の低い基盤や吸着性の高い基盤の利用により、さらなるリスク低減が可能 ・土の搬入・積層・転圧時のシート破損やシート上面での土の滑りに留意し、シート勾配を小さくするなど、構造物として安定となる設計・施工法とする ・施工法は比較的低コスト	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・人の生活圏や飲用井戸等の水源が近傍にない場所	・要対策土の力学的特性 ・遮水構造物の透水性と層厚との関係
転圧工		要対策土による盛土等構造物を転圧し、締固め効果により透水性を低減し、構造物内部からの重金属等や酸性水の溶出を低減する。	・既往の土工管理に基づく管理手法の適用が可能 ・施工法は比較的低コスト ・重金属等含有土の土質により転圧効果が異なる	・造成工事の掘削土による盛土 ・下流に人の生活圏や飲用井戸等の水源がない場所	・要対策土の力学的特性 ・ブレンド材や土質改良材の添加を含めた締固め効果（透水性や溶出性等）の検討

表-4.3.3　対策盛土の例(2)

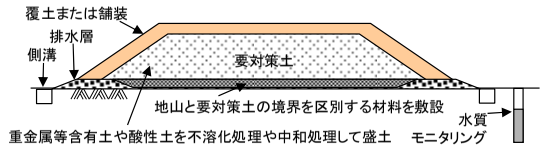
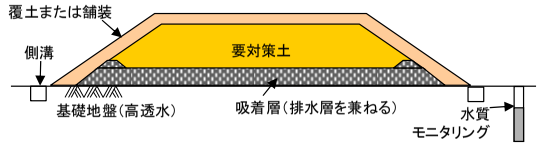
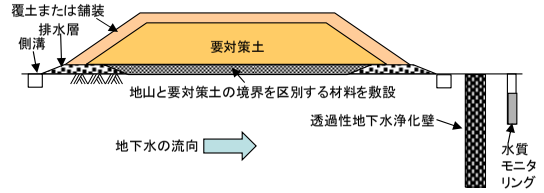
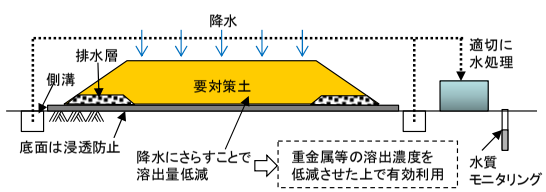
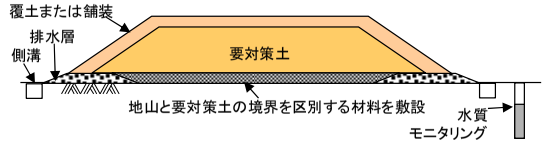
対策工種	対策のイメージ図	概要	特徴・留意点および長所・短所	想定される適用の例	事前検討項目
不溶化工・中和工		要対策土に不溶化材や中和材を添加し、重金属等や酸性水の溶出を低減する。	・施工実績は比較的多く、不溶化・中和資材も多種 ・施工法は比較的低コスト ・土の物理化学的特性や構造物の置かれる環境条件等により不溶化・中和効果やその持続性が異なる	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・下流に人の生活圏や飲用井戸等の水源がない場所	・不溶化材・中和材等の配合と不溶化・中和効果の関係を見るための不溶化・中和試験 ・想定される環境下での耐久性をみるための促進試験
吸着層工		要対策土による盛土等の構造物下面に吸着層を敷設し、重金属等の地下への浸透を防止する。	・施工実績は比較的多い ・施工法は比較的低コスト ・吸着層に現地発生土を利用したり、原地盤の吸着性能を評価することも可能 ・土の物理化学的特性や吸着材料の吸着特性により、リスク低減の効果が異なる	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・下流に人の生活圏や飲用井戸等の水源がない場所	・吸着材による効果を見るための吸着試験 ・吸着層の添加量等を設計するための繰り返し溶出試験やカラム試験等
透過性地下水浄化壁工		要対策土による盛土等の構造物の地下水流向下流側に重金属等を吸着する透過性地下水浄化壁を構築し、下流側への重金属等の拡散を防止する。	・施工実績は少ない ・重金属等の移行経路の中途に施される吸着法の位置づけ ・既存構造物からの拡散防止対策として有効 ・吸着材料については「吸着」対策の場合と同様の扱い	・造成工事の掘削土による盛土 ・下流に人の生活圏や飲用井戸等の水源がない場所	・吸着材による効果を見るための吸着試験 ・吸着層の添加量等を設計するための繰り返し溶出試験やカラム試験等
底面遮水工＋滲出水処理工		要対策土による盛土等の構造物からの表流水・滲出水の処理により重金属等を回収する。	・土構造物そのものの対策は不要 ・排水処理コストの他に排水処理で生じる汚泥の処分コストを見積もる必要 ・滲出水の処理能力と処理期間等の予測が困難	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・人の生活圏や飲用井戸等の水源が近傍にない場所	・要対策土からの溶出特性を見るための繰り返し溶出試験やカラム試験等
効果確認モニタリング		要対策土による構造物を含む地下水をモニタリングし、汚染されていないことを確認する。	・土壌汚染対策法の措置の一つとして挙げられており、もともとリスクが低い場合に最も低コストで実施可能 ・常時の地下水監視と未然防止策等の準備が必要となる	・山岳トンネルの岩ずりや造成工事の掘削土による盛土 ・下流に人の生活圏や飲用井戸等の水源がない場所	・要対策土からの溶出特性（環告第18号試験、短期溶出試験等）

表-4.3.4　植生の違いによる最終覆土の厚さ[4]に基づき整理

植生の種類	芝・低木の植樹を行う場合	中・高木の植樹を行う場合
標準的な覆土の厚さ	おおむね 50 cm 以上	おおむね 1.0 m 以上

め、封じ込め構造体外への排水ドレーンを解放しておき、降雨後の排水量により確認する方法などもある。上部遮水工では浸透量をモニタリングするための設備を用意することもある。これらの効果確認は、今後の対策工の改善にも有用である。

(3) 各種の対策工とその留意点

1) 遮水工封じ込め（粘性土、遮水シート、水密アスファルトコンクリート）

要対策土を盛土等に利用する場合の封じ込めの方法としては、土壌汚染対策法の措置に準じた二重の遮水構造による封じ込め（二重の遮水工封じ込め）のほかに、一重の遮水構造による封じ込め（一重の遮水工封じ込め）が挙げられる。これらの封じ込め対策は、地下水・表流水経由のリスクに加えて直接摂取によるリスクに対する対策効果も期待できる。また、これらの対策は、盛土内部への空気の侵入を抑制し岩石・土壌の酸化を防止する効果が付随的に期待できることから、酸性土・酸性水対策としても活用できる。

一般的に用いられる遮水シートによる封じ込め構造は、不溶化工など土そのものを改質する工法と比較して地盤変位による影響を受けやすいが、変形追従性が期待できる遮水材（ベントナイト混合土など）もある。

①二重の遮水工封じ込め（**図-4.3.4**）

a) 工法の概要と適用条件

雨水・地下水の浸透、および滲出水の発生を防止するために、二重の遮水シートなどにより封じ込めを行う対策である。二重の遮水構造は廃棄物最終処分場の遮水構造の構造基準に基づいたものであり、土壌汚染対策法の措置の一つとして３種類の構造例がガイドライン[5]で掲げられている。その例を**図-4.3.5**に示す。この構造例に基づけば、透水係数が10 nm/s(1.0×10^{-8} m/s)で厚さ50 cm以上の粘性土層、あるいは透水係数が1 nm/s(1.0×10^{-9} m/s)で厚さ5 cm以上の水密アスファルトコンクリート層は、厚さ1.5 mm以上の遮水シートと同等の性能を有していると判断されている。なお、汚染土壌への対策としては、二重の遮水シートや「粘性土（ベントナイト混合土など）＋遮水シート」

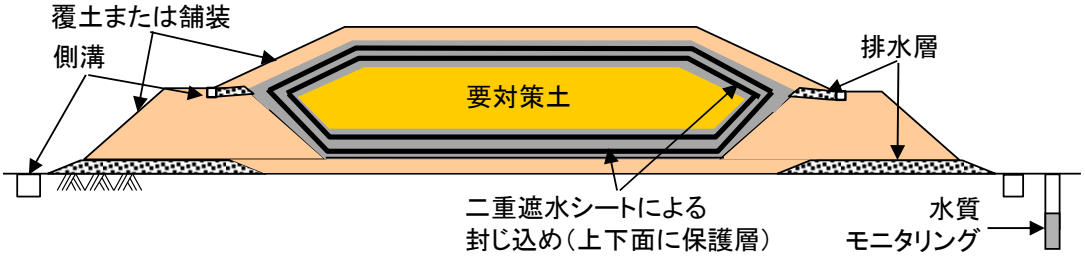


図-4.3.4　二重の遮水工封じ込めの模式図（二重の遮水シートの例）

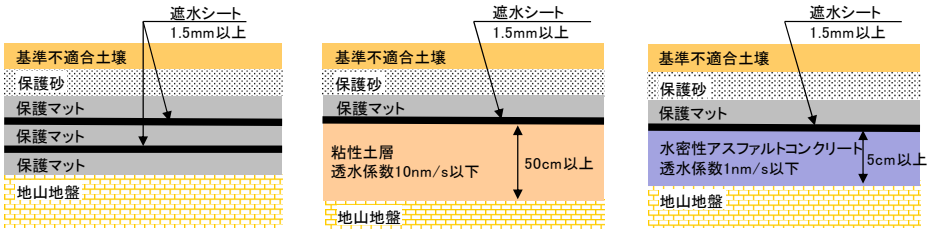


図-4.3.5　二重の遮水構造の例（基準不適合土壌を遮水構造の上部に封じ込める場合）

の構造が適用されることが比較的多い。二重の遮水構造による封じ込めの適用の詳細は「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）」5.4.3（4）1）～3）[5] を参照されたい。

b) 設計・施工上の留意点

各構造の二重の遮水工において共通の留意点は下記のとおりである。

・封じ込め内部に水が浸入すると周辺に重金属等が拡散するリスクがあるため、封じ込めを行った盛土の上面やその周辺には、降雨・表流水の浸透を抑制する構造を持ち、封じ込め層の保護を兼ねた覆い（覆土や舗装など）を施工する。
・重金属等の溶出量が第二溶出量基準を満足しない場合には、不溶化工などの処理を行い、第二溶出量基準を満足させる。
・遮水材料に影響を与えると考えられる物質が存在する場合、例えば酸性水の発生を伴う場合などは、遮水材料に影響がないことを確認する。
・遮水材料と要対策土との境界部では、遮水材料に対する保護層を設置するとともに、ずれやすべりなどが発生しないよう、十分な締固め施工が可能で、かつ排水性などを考慮した構造を検討する。
・重金属等含有土を封じ込めた周囲の盛土構造には **(1)2)** にあるような排水工を設け、封じ込め層内への水の浸入を抑制する。一方で、封じ込め層内の遮水性については、井戸で確認する方法や構造体外への排水ドレーンからの排水の有無により確認を行い、封じ込め層内への水の浸入が認められた場合は、必要に応じて排水対策を行う。
・施工中で盛土上面に遮水層がない期間は、要対策土に雨水が浸入して滲出水が排水されるため、適切に水処理をする必要がある。

遮水層に粘性土を適用する場合には、以下の点に留意する。なお、降水時に水没するなど、水が滞留するような場所では、粘性土の泥状化が懸念されるため、粘性土による遮水工の適用を避ける。

・低透水性の土質材料は粘性土のほかに、改良土やベントナイト系混合土が挙げられるが、これらの土質特性を十分に確認した上で、構造上や施工上の諸対策を講じる。
・要対策土と遮水層の粘性土による構造物の安定性確保のため、必要に応じて補助工などを検討する。

遮水層に遮水シートを適用する場合においては以下の点に留意する。なお、遮水シートの施工方法については、例えば「廃棄物処分場遮水シート取扱いマニュアル」（日本遮水工協会）[6]などを参考にするとよい。

・遮水シートは長期的な劣化や地盤の性状などを考慮して選定するとともに、封じ込め層を損壊させることのないような構造とする。
・遮水シートが紫外線などで劣化することを防ぐため、シート上面は覆土などで保護する。遮水シートを敷設する際にはあらかじめ地盤の整地などを行い、シート工は専門の施工業者が対応することが望ましい。
・盛土による対策の場合、遮水シートを用いる管理型廃棄物処分場のような、窪地構造に遮水シートを施工する場合とは異なる施工条件（平地上に急勾配の台形形状で重金属等含有土を盛土する場合など）も考えられ、遮水シート境界面でのすべりやずれの発生については特に留意する必要がある。急勾配の斜面への遮水シートの施工は避け、あらかじめ盛土の周囲を築堤し、その凹部に要対策土を受け入れるような形で封じ込めることにより、遮水シートの敷設が急勾配とならないような構造とすることが望ましい。
・施工時の気温が低いと、シート同士が溶着しにくいといった問題が生じるため、溶着不良が発生しないよう配慮する必要がある。

②粘性土による一重の遮水工封じ込め（**図-4.3.6**）

a）工法の概要と適用条件

要対策土の盛土を囲むように粘性土を敷設し、雨水・地下水の浸透の防止、滲出水の発生の防止、および溶出した重金属等の拡散を防止する対策である。土壌汚染対策法の措置における遮水工の構造に基づけば、透水係数が 10 nm/s (1.0×10^{-8} m/s) で厚さ 50 cm 以上の粘性土層は、厚さ 1.5 mm 以上の遮水シートあるいは透水係数が 1 nm/s (1.0×10^{-9} m/s) で厚さ 5 cm 以上の水密アスファルトコンクリート層と同等の性能が見込まれている。ただし、粘性土による一重の遮水構造のみでは二重の遮水構造に比べて対策工の信頼性が劣ることから、現場条件と使用する粘性土の透水性を勘案して、適用を検討する。

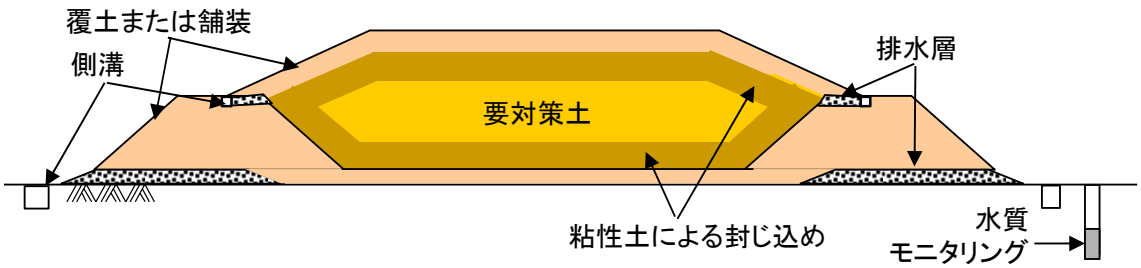


図-4.3.6　粘性土による一重の遮水工封じ込めの模式図

b) 設計・施工上の留意点

粘性土による封じ込めの適用上の留意点などについては、①の「二重の遮水工封じ込め」に前述した内容の再掲を含め以下に記す。

・封じ込め内部に水が浸入すると、周辺に重金属等が拡散するリスクがあるため、封じ込めを行った盛土の上面やその周辺には、降雨・表流水の浸透を防止する構造を持ち、封じ込め層の保護を兼ねた覆い（覆土や舗装など）を施工する。
・重金属等の溶出量が第二溶出量基準を満足しない場合には、不溶化工などの処理を行い、第二溶出量基準を満足させる。
・遮水材料に影響を与えると考えられる物質が存在する場合、例えば酸性水の発生を伴う場合などは、遮水材料に影響がないことを確認する。
・遮水材料と要対策土との境界部では、遮水材料に対する保護層を設置するとともに、ずれやすべりなどが発生しないよう、十分な締固め施工が可能で、かつ排水性などを考慮した構造を検討する。
・要対策土を封じ込めた周囲の盛土構造には(1)2)で述べたような排水工を設け、封じ込め層内への水の浸入を抑制する。一方で、封じ込め層内の遮水性については、井戸で確認する方法や構造体外への排水ドレーンからの排水の有無により確認を行い、封じ込め層内への水の浸入が認められた場合は、必要に応じて排水対策を行う。
・施工中で盛土上面に遮水層がない期間は、要対策土に雨水が浸入し滲出水が排水されるため、適切に水処理を行う必要がある。
・降水時に水没するなど、水が滞留するような場所では、粘性土の泥状化などが懸念されるため、遮水層への粘性土の適用を避ける。
・低透水性の土質材料は粘性土のほかに、改良土やベントナイト系混合土が挙げられるが、これらの土質特性を十分に確認した上で、構造上や施工上の諸対策を講じる。
・要対策土と遮水材料として用いた粘性土による構造物の安定性確保のため、必要に応じて補助工法などを検討する。

③一重の遮水シートによる封じ込め（**図-4.3.7**）

a) 工法の概要と適用条件

要対策土からの重金属等の溶出を防止するため、一重の遮水シートで封じ込めを行う対策である。ただし、一重の遮水シートのみでは二重の遮水構造に比べて対策工の信頼性が劣ることから、現場条件と使用する遮水シートの構造や耐久性および敷設の形態などを勘案して、適用を検討する。

b) 設計・施工上の留意点

遮水シートによる封じ込めの適用上の留意点などについては、①の「二重の遮水工封じ込め」に前述した内容の再掲を含め以下に記す。なお、遮水シートの施工方法については、例えば「廃棄物処分場遮水シート取扱いマニュアル」（日本遮水工協会）[6]など

を参考にするとよい。

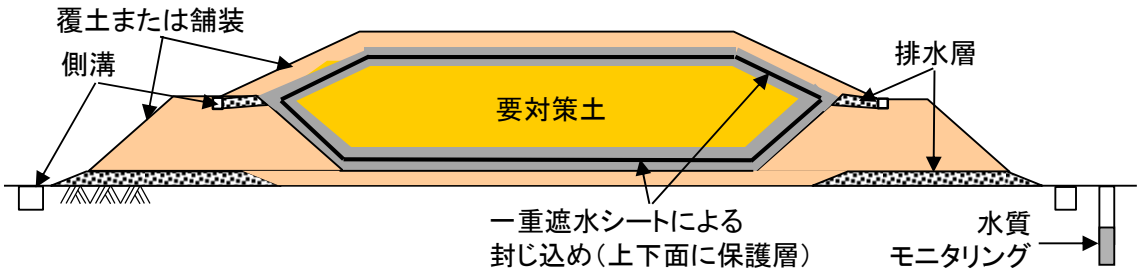


図-4.3.7　一重の遮水シートによる一重の遮水工封じ込めの模式図

・遮水シートは長期的な劣化や地盤の性状などを考慮して選定するとともに、封じ込め層を損壊させることのないような構造とする。
・封じ込め内部に水が浸入すると周辺に重金属等が拡散するリスクがあるため、封じ込めを行った盛土の上面やその周辺には、降雨・表流水の浸透を防止する構造を持ち、封じ込め層の保護を兼ねた覆い（覆土や舗装など）を施工する。
・重金属等の溶出量が第二溶出量基準を満足しない場合には、不溶化工などの処理を行い、第二溶出量基準を満足させる。
・遮水材料に影響を与えると考えられる物質が存在する場合、例えば酸性水の発生を伴う場合などは遮水材料に影響がないことを確認する。
・遮水シートと要対策土との境界部では、遮水シートに対する保護層を設置し、ずれやすべりなどが発生しないような構造を検討する。
・要対策土を封じ込めた周囲の盛土構造には **(1)2)** で述べたような排水工を設け、封じ込め層内への水の浸入を抑制する。一方で、封じ込め層内の遮水性については、井戸で確認する方法や構造体外への排水ドレーンからの排水の有無により確認を行い、封じ込め層内への水の浸入が認められた場合は、必要に応じて排水対策を行う。
・施工中で盛土上面に遮水層がない期間は、要対策土に雨水が浸入して滲出水が排水されるため、適切に水処理をする必要がある。
・遮水シートが紫外線などで劣化することを防ぐため、シート上面は覆土等で保護する。遮水シートを敷設する際にはあらかじめ地盤の整地などを行い、シート工は専門の施工業者が対応することが望ましい。
・盛土による対策の場合、遮水シートを用いる管理型廃棄物処分場のような、窪地構造に遮水シートを施工する場合とは異なる施工条件も考えられ、遮水シート境界面でのすべりやずれの発生については特に留意する必要がある。急勾配の斜面への遮水シートの施工は避け、あらかじめ盛土の周囲を築堤し、その凹部に要対策土を受け入れるような形で封じ込めることにより、遮水シートの敷設が急勾配とならないような構造とすることが望ましい。

・施工時の気温が低いと、シート同士が溶着しないといった問題が生じるため、溶着不良が発生しないよう配慮する必要がある。

2）上部遮水工（**図-4.3.8**）

a）工法の概要と適用条件

上部遮水工は、盛土の上部に粘性土などの低透水性の土質材料や難透水性舗装、あるいは遮水シートを敷設することで盛土内への雨水の浸透を防止し、重金属等や酸性水の拡散を防止する対策である。**1)** で述べた封じ込め構造において、盛土の底面から盛土構造物への水の浸入防止を想定せず（下部敷設がなく）、降水の浸入防止のみを想定した（上部遮水のみの）構造と位置づけられる。低透水性の土質材料は粘性土、改良土やベントナイト混合土が挙げられる。

盛土内部への空気の侵入を抑制し、岩石・土壌の酸化を防止する効果が付随的に期待できることから、酸性土対策としても活用できる。

廃棄物最終処分場の遮水構造の構造基準に基づけば、透水係数が 10 nm/s (1.0×10^{-8} m/s) 以下で厚さ 50 cm 以上の粘性土層や透水係数 1 nm/s (1.0×10^{-9} m/s) 以下で厚さ 5 cm 以上の水密アスファルトコンクリート層は、厚さ 1.5 mm 以上の遮水シートと同等の性能となる。

また、透水性の低い基盤や重金属等の吸着能力の高い基盤を利用することにより、さらなる対策効果を期待することも可能である。なお、遮水シートの施工に関しては、**1)①**、**1)③**で述べたとおり、遮水シート境界面ですべりやずれが発生しないよう十分に留意する必要がある。

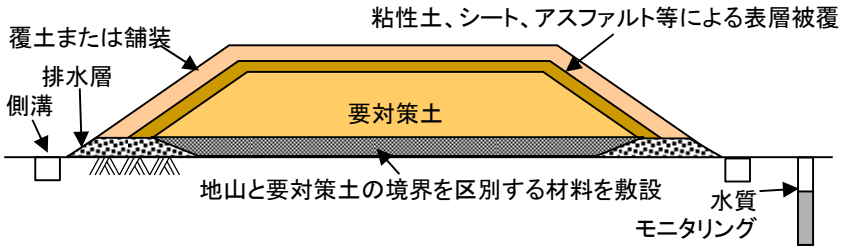


図-4.3.8　上部遮水工の模式図

b）設計・施工上の留意点

上部遮水工の設計・施工に当たっては、以下の点に留意する。

・降水等による盛土上面からの水の浸入防止の確実性や降水時における盛土底面からの水の浸入防止の確実性を検討する必要がある。なお、地下水位が高い場所や降水時に水没するような場所では適用できない。

・盛土底面において降水による地下への浸透対策ができていないため、盛土施工時における降水による地下浸透も許容できないような場合は、シートなどによる降雨時の仮

設的な被覆対策が必要であり、この場合の対象は比較的小規模な盛土構造物に限定される。

・完全な遮水性能がない被覆材料については、その透水性を勘案し、必要に応じて影響予測を実施の上、適用を検討する。

・遮水材料は、長期的な劣化や地盤の性状などを考慮して選定する。遮水シートを敷設する場合は、シートが紫外線などで劣化することを防ぐため、シート上面を覆土等で保護するほか、盛土の安定にも十分に留意する。

・遮水工の損壊を防止するために、少なくとも要対策土の流出や陥没が生じない程度に転圧する。

3）底面遮水工＋滲出水処理工（**図-4.3.9**）

a）工法の概要と適用条件

上部遮水工を設置せずに掘削した要対策土を盛土して、積極的に盛土内への降水の浸透を促し、底面遮水工と水処理によって滲出水中に溶出した重金属等を適切に回収する対策である。

水処理に当たって、少なくとも公共用水域への排水時点で水質汚濁防止法の一般排水基準を満足する必要があるが、現場状況を勘案して適切な水処理の目標を設定する。滲出水処理の設計については、要対策土の性状、現地の降水量や盛土構造などを考慮して水処理施設の仕様と処理期間を定める。

滲出水処理を継続した結果、滲出水の濃度が水質汚濁に関する環境基準値を継続して下回る状態になった場合は、その発生土を搬出時管理土として取り扱うことができる。また、発生土が土壌溶出量基準を満足するようになった場合は、その時点で通常の建設発生土として取り扱うことができる。

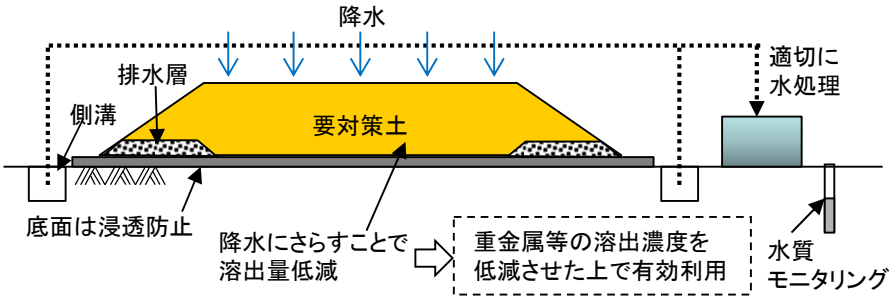


図-4.3.9　底面遮水工＋滲出水処理工の模式図

b）設計・施工上の留意点

滲出水処理工の設計・施工に当たっては以下の点に留意する。

・盛土の透水性が低い場合は盛土のり面の表流水量が滲出水量に比べて多くなり、重金属等の濃度が希釈により低減する可能性がある一方、重金属等の濃度の低減は緩やか

になると考えられる。

・盛土内への浸透水、盛土のり面の表流水ともに、確実に回収することが重要である。したがって、盛土底面は遮水工により確実に浸透防止を図り、盛土内に降水が滞留しないように遮水工上面からのり尻の側溝にスムーズに排水されるよう勾配を維持し、これらの状況が確認できるようにする必要がある。また、盛土のり尻部の安定性確保のため、のり尻部には基盤排水層やふとんかごなどののり尻工を設置する。原地盤の沈下が懸念される場合には、排水勾配が維持できるように底面の地盤改良や舗装などの対策を講じる必要がある。さらに、積極的に滲出水を回収するため、盛土内に排水ドレーンを設ける場合もある。

・回収した滲出水は適切に水処理する必要がある。水処理設備による処理方法の詳細は**4.4 (3)** を参照されたい。排水処理によって生じる汚泥の処分も必要となり、コスト計上の対象となる。

・水処理は、盛土からの滲出水を側溝で回収したものを対象とするが、強雨の際は、側溝にも直接降雨が流れ込み希釈される。降雨量によっては基準に適合するまで希釈される場合もあるので、水処理設備を通過することなく放流できるような排水経路を設けることも検討可能である。

・水処理の設計では、滲出水中の重金属等の濃度やその変化傾向、および水処理の期間の予測が課題である。そのため、土研式雨水曝露試験、カラム試験や繰り返し溶出試験などの実現象再現溶出試験により、通水量あるいは繰り返し回数（固液比から量に変換）と重金属等の濃度、およびその変化傾向を把握する必要がある。

4) 転圧工（**図-4.3.10**）

a) 工法の概要と適用条件

要対策土を盛土にする際に、盛土を十分に転圧して、その締固め効果により透水係数を所定の値以下とする対策である。また、盛土内部への水や空気の浸入を防止し、要対策土の酸化抑制効果などにより、酸性水や重金属等の溶出低減を期待するものである。要対策土の転圧のみによる対策は、転圧の厚さと転圧後の透水係数などを勘案して必要に応じて影響予測を実施の上、適用を検討する。なお、土壌汚染対策法の封じ込め措置では、透水係数が 10 nm/s (1.0×10^{-8} m/s) で厚さ 50 cm 以上の粘性土層は遮水構造の一つと位置づけられ、透水係数が 100 nm/s (1.0×10^{-7} m/s) で厚さ 5 m 以上の土層は不透水層として位置づけられている。これらは重金属等含有土を封じ込めるための構造では

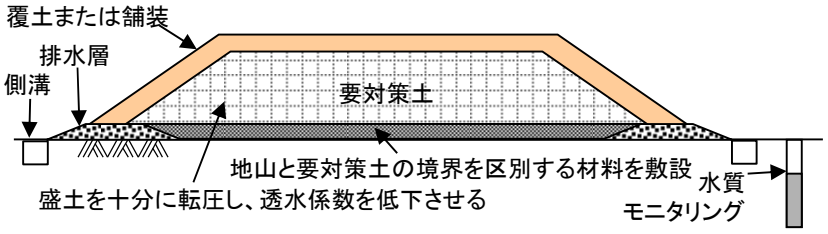


図-4.3.10　転圧工の模式図

あるが、要対策土そのものを遮水構造あるいは不透水構造と見込んだ対策として位置づけることも可能である。

b) 設計・施工上の留意点

転圧工の設計・施工に当たっては、以下の点に留意する。

・降水による盛土上面からの水の浸入防止の確実性や降水時における盛土底面からの水の浸入防止の確実性を検討する必要がある。透水性の低下を期待して粘性土を混入する場合は、盛土の安定性も十分に検討する必要がある。

・要対策土の土質により転圧効果が異なるため、粒度調整材や土質改良材の添加を含めた締固め効果の検討が必要である。

・土質として細粒分（粒径 0.075 mm 以下）がほとんどない土や、施工機械のトラフィカビリティーが得られない土などについては、ほかの土質材料（粘性土、砂質土）との混合や乾燥による含水比低下対策や、中性改質材、石灰系・セメント系改良材などを添加して土質改良を行う[7]。なお、土質、添加材、混合率、混合方法などによっては、転圧後に乾燥収縮によるヘアークラックが発生[7]する場合や、添加材のアルカリ影響により重金属等が溶出する場合があるため、室内試験などによる事前検討を行い、試験施工による検証を行った上で施工することが望ましい。

・転圧による締固めの管理を、通常の盛土構造物で行われる密度などの測定による方式で行う場合には、室内試験や試験施工では密度などの締固め管理指標と透水性との関係を把握しておく必要がある。

・転圧施工に際しては、水みちや転圧のむらがあると、透水性の高い部分に浸透水が集中する可能性があるので、特に入念な敷均し、含水比調整、転圧などが必要である。

5) 不溶化工・中和工（**図-4.3.11**）

a) 工法の概要と適用条件

要対策土に重金属等や酸性水の溶出を低減させるための材料を混合添加する対策である。不溶化工・中和工は遮水工封じ込めとは異なり、地盤変位の影響を受けにくいという特徴がある。

不溶化処理・中和処理の施工実績は土質材料を中心に比較的多く、不溶化材・中和材も多種開発されている。一方、岩砕、岩ずりへの適用については、岩の破砕による粒度調整が必要である。また、施工後に破砕やスレーキングなどによって細片化が起こる懸

念がある場合は、溶出特性が変化する可能性があるため、粒度調整方法や適切な不溶化材・中和材の選定などに配慮が必要である。

不溶化などの処理は化学的不溶化と、物理的不溶化に分けられる。前者は化合形態を溶出しにくいものに変化させる方法や吸着効果を利用して重金属等の溶出を防止する。後者は固形化により水と接触しにくくする方法などがある。盛土等に不溶化工を適用する場合、対策工の効果は要対策土の性質との兼ね合いや施工場所の条件に依存し、添加量や混合条件によっては十分な不溶化効果が得られずに再溶出する可能性がある。そのため要対策土の酸性化可能性の確認のほか、事前の試験によって適用性を確認する必要がある。

不溶化などに用いる材料としては、各種不溶化材、天然資材、セメントなどが挙げられる。各種不溶化材には、鉄系、マグネシウム系、マグネシウム・カルシウム混合系、層状複水酸化物系、レアメタル、ゼオライトなどを主成分とする材料などがある。不溶化材の機能としては、重金属等の吸着、イオン交換、錯体形成、共沈、酸化還元反応、水和・固化などを利用したものがあるが [8]、不溶化の設計に当たっては、重金属等の種類などを考慮し、事前の不溶化試験に基づき、適切な不溶化材の選定および配合の設定を行うことが望ましい。不溶化工の設計については、要対策土に不溶化材を添加した材料を溶出試験にかけ、目標とする溶出量を超えないような不溶化材の単位添加量を求め、さらに施工性などを勘案して必要に応じて現地試験などを行い、施工時の添加量を定める方法がとられる。

セメントや石灰などを材料としたものは、固化による封じ込め効果や水酸化物生成による不溶化効果が期待できるが、これらの材料は強アルカリ性のため、特にアルカリ側で溶出するような重金属等に対しては、事前の配合試験などにより、アルカリによる溶出の可能性について確認する。不溶化土を水面埋立に利用する場合は、**4.3.3** に述べるように、海水成分による各種物質の溶出特性を確認する必要がある。

要対策土（酸性土）の場合は、アルカリ材料による中和処理も可能であるが、環境条件（pH、酸化還元電位など）の変化を考慮した上で適切な材料を選定する必要がある。

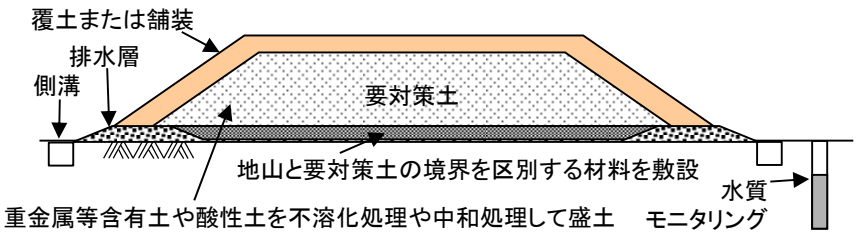


図-4.3.11　不溶化工・中和工の模式図

b) 設計・施工上の留意点

不溶化工・中和工の設計・施工に当たっては以下の点に留意する。

・pH や酸化還元電位の変化などにより重金属等の再溶出や酸性水の再発生の可能性があるため、不溶化土・中和土が置かれる環境を考慮して検討し、必要に応じて想定される環境下での耐久性を確認するための促進試験（例えば硫酸・消石灰添加溶出試験[9]など）や曝露試験（例えば土研式雨水曝露試験など）を行う。特に、酸性水の発生が予想される場合は、酸性化に伴って重金属等が溶出することのないような不溶化工の設計を行う。酸性土をしばらく仮置きする場合や、掘削時にすでに酸化が進行している場合には、初期の地山の状態と異なる性状を有することから、必要に応じて改めて試験を実施する。

・適正量を超える不溶化材の添加によって不溶化効果が低下する場合や、中和材の添加に伴って重金属等の溶出が促進される場合があることから、不溶化工・中和工の実施に当たっては、必ず配合試験を実施するなど、慎重な検討が必要である。

・不溶化工・中和工の施工に当たっては、要対策土と不溶化材・中和材との混合度合が十分に確保できるような施工方法を選定する。施工（混合）機械としては、バックホウ、スタビライザー、自走式土質改良機（混合機）などが挙げられる[10]。現場における均一な混合が確保できるよう、土質や施工機械の混合能力も考慮して添加量を決定する必要があるが、室内試験などによる不溶化・中和効果についての事前検討を行い、試験施工による混合検証を行った上で施工することが望ましい。なお、最低添加量は、セメント系固化材の場合、50 kg/m^3 程度とされている[10]。

・不溶化工の設計、施工に関する参考資料として、「人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計・施工マニュアル［第 2 版］」[8]がある。また不溶化処理の配合設計例については、**参考資料 18** を参照されたい。

6) 吸着層工（**図-4.3.12**）

a) 工法の概要と適用条件

吸着層工は、要対策土による盛土の底面に、砂質土などの母材に吸着資材を混合して築造する吸着層を敷設し、盛土滲出水が吸着層内を通過する際に重金属等が除去される仕組みの対策工である。そのため、降雨時も含めて地下水位より常に高い位置に築造する必要がある。

吸着層工は土質材料で築造される上に不飽和浸透になることから、水の流れが不均質であることを前提とした設計が求められる。水みちの発生により対策効果が減衰する可能性があるため、長期の耐久性を確保するためには、材料選定や施工方法を含めた設計全体における配慮が重要である。仮置き土などの仮設物における対策や、溶出濃度が時間とともに急減するような要対策土への対策に適している場合がある。近年、吸着層工と同様の原理の工法として、吸着マット工や吸着シート工も開発されている。

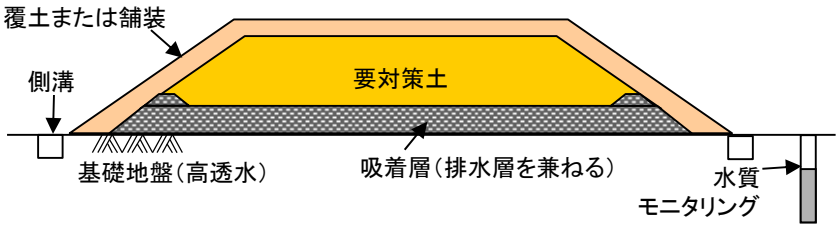


図-4.3.12　吸着層工の模式図（基礎地盤の透水性が高い場合）

吸着資材については、不溶化工と同様に様々な種類が開発されているが、要対策土の性質との兼ね合いで十分な吸着効果が発揮できない場合もあることから、要対策土の酸性化可能性の確認のほか、事前の試験によって適用性を確認する必要がある。

また、要対策土の盛土直下の原地盤の地下水位が十分に低く、原地盤に十分な吸着能力がある場合には、原地盤を吸着層と見立てた設計・施工も可能である。**参考資料６**に土壌汚染対策法の自然由来等構造物利用施設の概念を示すので参考にされたい。

b) 設計・施工上の留意点

吸着層工の設計・施工に当たっては以下の点に留意する。

・吸着層工の効果発現原理から、重金属等を含む盛土内の滲出水の全量が吸着層を通過する構造とする必要があるため、吸着層に十分な透水性が求められる。その一方で、重金属等を吸着させるため、ある程度の接触機会（滞留時間）も必要である。
・吸着層工の設計、施工に関する参考資料として、「人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計・施工マニュアル［第２版］」[8)]や「吸着層工法設計マニュアル」[11)]がある。これらによれば、吸着層の設計法には、移流分散解析評価に基づく方法と、吸着容量に基づく方法がある。
・吸着層工を効果的に用いるためには、吸着層への滲出水の流入負荷を低減する必要がある。そのためには、覆土や舗装などにより、盛土内部への浸透水を抑制することが重要である。
・吸着材料としては、市場で流通している資材が考えられるが、一般の土でも比較的吸着性能が高いものがあるため、試験などにより性能を確認した上で用いることも可能である。
・吸着層は、用いる資材とその環境条件によって対象とする重金属等の吸着能力が異なるので、短期溶出試験や実現象再現溶出試験（例えばカラム試験など）によって吸着材料による重金属等の吸着能力を把握し、さらに、環境条件（pH や酸化還元状態など）の変化を考慮した上で、適切な吸着材料を選定する必要がある。
・吸着層を含んだ影響予測を実施する場合においては、吸着試験の結果などに基づきパラメータを設定して予測を行い、盛土から漏出した重金属等の濃度が地下水や表流水などの周辺環境に影響を及ぼさない範囲であることを検証する必要がある。

7）透過性地下水浄化壁工（**図-4.3.13**）

a）工法の概要と適用条件

要対策土を用いた盛土の地下水流向下流側に透過性地下水浄化壁を設置することにより、盛土から帯水層に浸透した重金属等が下流側へ拡散することを防止する対策である。透過性地下水浄化壁は、要対策土による既存の盛土構造物に対する、後施工による吸着工として位置づけることが可能である。

b）設計・施工上の留意点

透過性地下水浄化壁の設計・施工に当たっては以下の点に留意する。なお、吸着資材

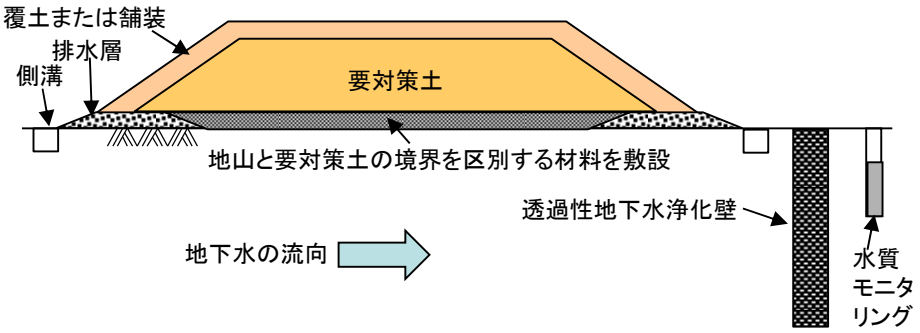


図-4.3.13　透過性地下水浄化壁工の模式図

に関しては、**6）**吸着層工の留意点を参照する。

・盛土設置範囲周辺の帯水層位置および地下水流向・流速を把握し、盛土から浸透した重金属等を効率よく的確に吸着できる位置に透過性地下水浄化壁を設置する必要がある。

・透過性地下水浄化壁の透水係数は、周辺の帯水層の透水係数と比べて十分に大きくなるようにすることが必要である。

・透過性地下水浄化壁に混合する吸着材料などは、対象とする重金属等の種類を基に選定する。また、地下水中の濃度や流速、吸着の効果を維持する期間を踏まえ、適切な配合量などを設定する必要がある。

・透過性地下水浄化壁が重金属等を含有する原地盤を置換する方法で行われる場合には、要対策土を掘削した後に吸着材料などを混合して埋め戻すことから、掘削した要対策土の仮置きや吸着材料などの混合を行う場所では、汚染の拡散を防止する対策を講じる必要がある。

・透過性地下水浄化壁を撹拌混合あるいは注入により設置する場合には、原地盤が含有する重金属等や浄化壁に用いる吸着材料などが対策実施範囲外へ流出することがないように、地下水モニタリングによる監視を実施する。また、必要に応じて揚水などの流向制御により重金属等や吸着材料の流出を防止するなど、周辺拡散防止のための対策を検討・実施する。

8) 効果確認モニタリング（**図-4.3.14**）

効果確認モニタリングは、他の対策工と組み合わせて行う対策の一種、または発生源濃度評価【低】の搬出時管理土のリスク評価結果の確認として行う水質などの監視である。

適用場面としては、対策工の効果を確認する目的でその他の対策工と組み合わせて実施する場合や、発生源評価を含むリスク評価の結果を確認する目的で単独で実施する場合が考えられる。また、発生源濃度区分が【極低】で要対策土（酸性土）に区分されたものについて、覆土による対策工をモニタリングした事例[12)]がある。

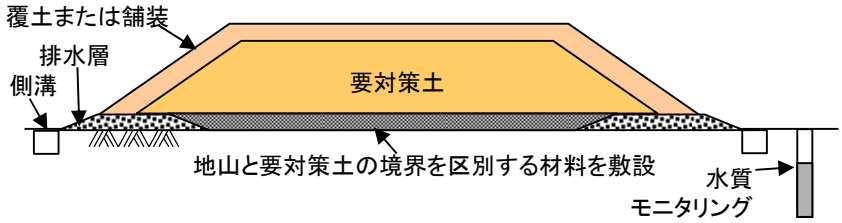


図-4.3.14　効果確認モニタリング

効果確認モニタリングの手法は、対策工全体の効果やリスク評価結果の確認を目的とするものと、対策工の一部の効果確認を目的とするものに大別できる。効果確認モニタリングの計画やその実施に当たっては、要対策土（酸性土）も含め周辺環境への影響を考慮して専門家の助言を踏まえ、必要に応じて関係者と協議して決定する。

a) 対策工全体の効果の維持やリスク評価結果の確認を目的とする手法

対策工全体の効果の維持やリスク評価結果の確認を目的とするもので、搬出時管理土のうち、発生源濃度区分が【低】のものに関するモニタリングもこれに該当する。その手法としては、地下水や表流水のモニタリングがある。地下水や表流水のモニタリングは「施工確認モニタリング」の調査について、期間を延長して行うことが多く、その技術的事項も共通する部分が多いと考えられるので、詳細については **4.5** を参照する。モニタリング期間、頻度および項目については、リスクの大きさ、現場状況や目的に合わせて適切に設定する。モニタリング期間は、影響予測に基づいて設定することも可能である。その際、監視対象物質である重金属等の種類によっては数 10 年といった著しく長いモニタリング期間が必要となる場合があるが、そのような場合は、短いモニタリング期間で目的を達成できるよう、工夫することが望ましい。例えば、遮水工封じ込めの対策効果を把握する目的であれば、封じ込め盛土内に分配係数が小さなトレーサー物質（例えば食塩）を投入しておき、その物質の濃度を測定すれば、短いモニタリング期間で対策効果の確認が可能である。また、モニタリング地点を発生源に可能な限り近づけることや、影響予測結果に基づいて、モニタリング地点での管理基準値を低く設定することも考えられる。

b) 対策工の一部の効果確認を目的とする手法

対策工の一部要素をモニタリングするもので、対策工の内容に応じて個別に項目を設定する。例えば、遮水工封じ込めにおける、漏洩検知装置による各種のモニタリング、封じ込め盛土内からの排水量、盛土内水位のモニタリングや、滲出水処理工における盛土滲出水の水質モニタリングなどが考えられる。

9) 覆土工および舗装工

覆土工や舗装工は、通常の施工を想定したもので、通常の発生土との区別、直接摂取防止の機能を有するとともに、透水係数などの設計値を規定しないものの、浸透抑制や酸化抑制の効果が見込まれるものである。そのため、リスクが小さい場面（搬出時管理土、要対策土（酸性土）および要対策土（低濃度・リスクレベルⅠ））での使用を想定している。

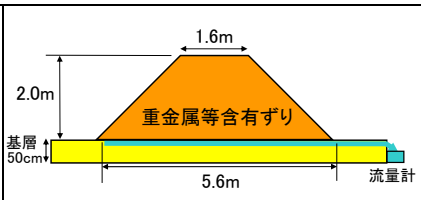
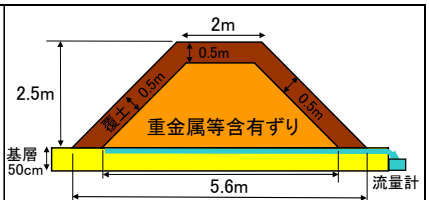
直接摂取防止の機能に関しては、要対策土を表層に露出させなければよい。覆土工では、施工性を考慮し、30 cm 程度以上の厚さを確保すればよいと考えられる。舗装工に関して、土壌汚染対策法ではアスファルトコンクリートで厚さ 3 cm 以上、セメントコンクリートで厚さ 10 cm 以上とされており、これを参考にするとよい。なお、急傾斜地など、覆土工や舗装工の施工が困難な場合は、これらの代わりにモルタル吹付工などを採用することも可能である。

浸透抑制に関しては、覆土工の表層に植生を配することにより、蒸発散による浸透抑制効果が期待できるほか、材料構成によってはキャピラリーバリアの効果により、浸透抑制効果が得られる場合もある。盛土の築造方法の違いによる雨水浸透率の比較結果（**表-4.3.5**）によると、覆土の有無、覆土材料の違い、植生の有無により雨水浸透率が大きく異なることが分かる。

酸化抑制効果に関しては、掘削岩を用いた盛土について 50 cm 厚の覆土の有無による掘削岩の pH を比較したところ、覆土工により酸性化が抑制された事例[12]がある（**図-4.3.15** および**図-4.3.16**）。また、覆土工の有無の違いによる重金属等の溶出濃度の比較実験結果によると、元素によっては覆土工を施工した場合の方が低い溶出濃度となった（**参考資料 13** の**図-5** および**図-6** 参照）[14]。このような事例から、覆土工には、盛土内部の酸化抑制などの効果があることが示唆される。

覆土工および舗装工の施工に当たっては、一般的な構造物としての品質を確保する観点から、道路土工－盛土工指針[1]（日本道路協会）や舗装設計施工指針[15]、舗装設計便覧[16]、舗装施工便覧[17]（日本道路協会）などを参考に、適切に設計・施工を行う。

表-4.3.5　異なる築造方法の盛土に関する雨水浸透率観測結果（土木研究所*）

仕様	断面構造			
	覆土	なし	砂質土50cm厚	ローム50cm厚
降水の浸透率	通年(2009.11-2010.10) 降水量 1427.0mm	32.8 %	2.6 %	10.0 %
	植生枯死期(11-3月) 降水量 382.5mm	49.2 %	3.1 %	16.0 %
	植生繁茂期(4-10月) 降水量 1044.5mm	26.8 %	2.4 %	7.9 %

＊ 本試験結果は、品川ほか [13]のデータを精査し、更新したもの。

図-4.3.15　試験盛土の解体調査における掘削面の状況 [12]

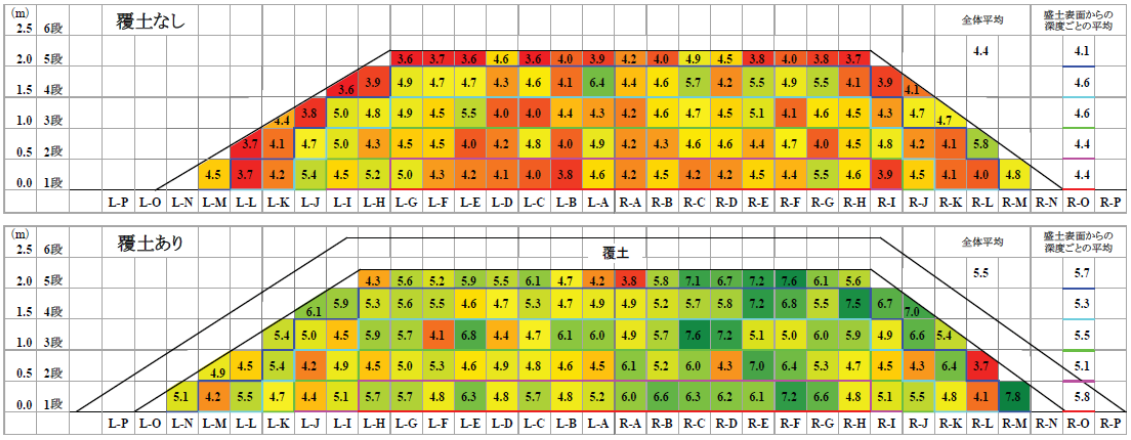


図-4.3.16　試験盛土の解体調査における pH 測定結果 [12]

【参考文献】

1)　日本道路協会：道路土工－盛土工指針（平成 22 年度版）．日本道路協会，2010.

2)　日本道路協会:道路土工－軟弱地盤対策工指針(平成 24 年度版)．日本道路協会, 2012.

3)　土木研究所 (編著) : 建設発生土利用技術マニュアル第 4 版．土木研究センター, 2013.

4)　全国都市清掃会議編：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010 改訂版．全

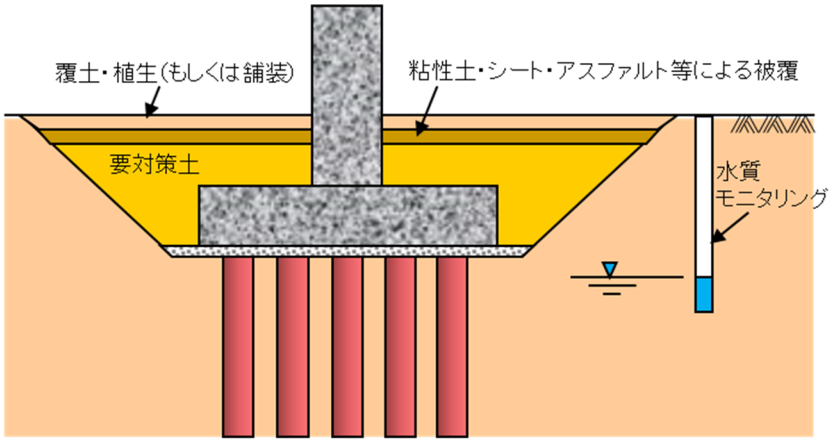
国都市清掃会議，p.27，2010.
5) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第 3.1 版）．2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html
6) 日本遮水工協会：廃棄物最終処分場遮水シート取扱いマニュアル．Ver.5-6，2002，日本遮水工協会ホームページ，http://www.nisshakyo.gr.jp/pdf/yoryo.pdf
7) 国土技術研究センター：河川土工マニュアル．pp.59-133，2009，国土技術研究センターホームページ，http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/dokouh21_03.pdf
8) 北海道環境保全技術協会技術委員会：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計・施工マニュアル［第 2 版］．道環協技術レポート No.9，北海道環境保全技術協会技術委員会，2021.
9) 土壌環境センター：重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法解説書．土壌環境センター，2008.
10) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル［第 4 版］．技報堂出版，2012.
11) 北海道環境保全技術協会技術委員会：吸着層工法設計マニュアル．道環協技術レポート No.6，北海道環境保全技術協会技術委員会，2011.
12) 福島広之，佐藤優，山本隆広：酸性化する掘削ずりの対策についてー現実的な対策とその検証ー．第 62 回（平成 30 年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集，環 6，2019.
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所ホームページ，https://thesis.ceri.go.jp/db/files/16258508045d22c0ba10a1c.pdf
13) 品川俊介，安元和己，浅井健一，中川清森，佐々木靖人：盛土の築造方法の違いによる自然由来重金属等溶出特性の比較．第 46 回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.2077-2078，2011.
14) 品川俊介，阿南修司：自然由来重金属等含有土の溶出特性に関する現地比較実験．第 55 回地盤工学研究発表会講演論文集，23-6-2-06，2020.
15) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成 18 年度版）．日本道路協会，2006.
16) 日本道路協会：舗装設計便覧（平成 18 年度版）．日本道路協会，2006.
17) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成 18 年度版）．日本道路協会，2006.

4.3.2 埋戻しへの利用

要対策土を埋戻しに利用する際には、原則として埋戻し土が地下水に直接接しない範囲で利用する。

開削トンネルや土木・建築の基礎掘削工事などにおける埋戻し土や、地中梁間の充填など構造物の一部として、要対策土の利用が可能である。要対策土を埋戻しする際には、原則として埋戻し土が地下水に直接接しないようにする。

要対策土を埋戻しする場合の例を**図-4.3.17** に示す。



**図は、上部遮水工を併用した、地下水位以浅への埋戻しへの利用例。
掘削のり面への降水や地下水の回り込みが少なく、かつ原地盤への
重金属等の吸着が見込まれる場合を想定したもの。**

図-4.3.17　橋梁基礎部への埋戻しの例

基本的には、埋戻し土が地下水に直接接しないような対策を実施する。対策については、必要に応じて現場条件や周辺環境条件を勘案した上で、最も適した方法を選定し、実施する。地下水位以浅の地盤に埋戻しを行う場合には、施工前に地下水位観測を行って、地下水位の変動の幅を十分に考慮し、原地盤の吸着特性などを評価した上で、上部遮水、転圧、不溶化、吸着、地下水のモニタリングなどの対策のうち、費用対効果などを考慮した最適な対策を講じる。これらの対策を実施する場合は、**4.3.1** の留意点を参考とされたい。

なお、やむを得ず地下水位以深の地盤に埋戻しを行う場合には、遮水構造とする。具体的には、土壌汚染対策法の汚染の除去等の措置のうち、原位置封じ込めの構造を参考にする。

4.3.3 水面埋立への利用

要管理土を水面埋立材とする場合は、要管理土の性状について受入先と情報共有をした上で、受入先が定める条件を満足することを確認する。

要管理土を水面埋立材とする場合、要管理土が、受入事業者が定める受入条件を満足することを確認する。一般的には、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第五条第一項に規定する埋立場所等に排出しようとする廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（環境庁告示第14号、昭和48年）により溶出試験を行い、「水底土砂に係る判定基準」（「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第五条第一項に規定する埋立場所等に排出しようとする金属等を含む廃棄物に係る判定基準を定める省令」（総理府令第6号、昭和48年））に示される基準値以下であることを確認する。ただし、埋立地の受入基準として、土壌汚染対策法の基準値を採用する場合や、酸性土に関する基準を設けている場合もあるので、事前に受入事業者に確認する必要がある。

海洋汚染防止法と土壌汚染対策法における溶出試験方法を**表-4.3.6**に、基準値の比較を**参考資料５**にそれぞれ示す。溶出試験方法では、前処理、固液比、ろ紙の孔径などが異なり、特に固液比が異なることによる溶出傾向の違いが報告されている[1)]。また、海洋汚染防止法の基準値は土壌汚染対策法の10倍程度であるので、海洋汚染防止法の基準値以下で埋め立てたものであっても、土壌汚染対策法の基準値を上回る可能性がある。したがって、例えば埋立地の表層土壌など、海洋汚染防止法の基準値以下で埋め立てた土地に、将来的に土壌汚染対策法の基準が適用される可能性がある場合には、注意を要する。

また、不溶化処理を施した要対策土や改良土を埋め立てる場合には、不溶化処理や土質改良に対する海水の影響を考慮する必要がある。特に石灰系やセメント系固化材による改良では、海水による長期的なカルシウムの溶脱が報告されており[2)]、カルシウムの溶脱に伴う改良土の固結性の低下と、それに付随する諸影響を考慮する必要がある。

以上のように、要管理土を公有水面への埋立材として利用する場合においては、埋立先の管理機関と埋立材の情報を共有した上で、将来の埋立地の利用目的も考慮に入れた十分な調整を図り、適切に対応する必要がある。

表-4.3.6　海洋汚染防止法と土壌汚染対策法における溶出試験方法の概要

試験方法 / 試験条件	【海洋汚染防止法】 （環境庁告示第14号）	【土壌汚染対策法】 （環境省告示第18号）
前処理、試料粒径	異物除去、5 mm以下は有姿、それ以外は粉砕後0.5～5 mm	中小礫・木片等除去、風乾-粗砕、＜2 mm（ふるい分け）
溶出溶媒、溶媒pH	純水、pH指定なし	純水、pH指定なし
固液比（重量体積比）	混合液（試料と溶媒）(mL)に含まれる試料の固型分(g)の重量体積比が3 % （混合液量500 mL以上、容器容量は溶媒の約2倍）	試料(g)と溶媒(mL)を重量体積比10 %で混合 （混合液量500 mL以上、容器容量は溶媒の約2倍）
溶出時間（hr）	6	
振とう	200 rpm、水平、振幅4～5 cm	
遠心分離	3,000 重力加速度、20 min	
ろ過	孔径1 μmメンブランフィルター （ろ紙直径やろ紙交換に関する規程なし）	孔径0.45 μm、直径90 mmメンブランフィルター （ろ過時間が30分を超える場合はおおむね30分ごとにろ紙を交換）
溶出回数	1	1

【参考文献】

1) 黒岩正夫，中川佳次，阪本廣行，桑原正彦：海防法および土対法における溶出試験結果の相関性に関する確認試験．土木学会第 72 回年次学術講演会講演集，Ⅶ-004，2017.

2) 土木研究所（編著）：建設汚泥再生利用マニュアル．大成出版社，pp.222-224，2008.

4.4 施工時の拡散防止対策

施工時の要対策土(判定前の発生土を含む)の仮置き、工事排水や滲出水の事業用地外への排出、要対策土の搬出入や移動などに当たっては、有害物質が拡散することのないように必要な措置を講じる。

(1) 基本的な考え方

施工時においては、要対策土が周辺環境に影響を及ぼさないように、対象物質の拡散防止対策を検討する必要がある。対策の実施に当たっては、要対策土(判定前の発生土を含む)を取り扱う工事実施区域、対策実施区域とその他の区域を区分し、要対策土の域外への移動を管理して制限する。対策は要対策土の風雨による飛散および流出の防止、要対策土への雨水等の浸透防止、排水などの処理、および運搬時の対応で構成され、要対策土の土質性状や重金属等の種類、濃度などを考慮した上で、適切かつ合理的な対策となるよう計画する。

要対策土の仮置き時における飛散・流出防止対策および雨水等の浸透防止対策については、事業用地内の要対策土に対する遮水シートなどによる覆いやテントなどの設置を検討する。要対策土を仮置きする地表面に対しては、滲出水の発生防止や下部地盤への浸透防止のためのコンクリートやアスファルトによる舗装を検討する。近年では水処理プラントが不要な吸着層工法、吸着マットや吸着シート（**4.3.1 解説(3)6)**）も普及しているので、その効果を確認した上で採用することもできる。さらに、風の強い地域では防風ネットなどの飛散防止工の必要性も検討する。

要対策土を借地に仮置きする場合、事業者による汚染の拡散がないことを示す必要が生じる可能性があることに留意し、必要に応じて事前および事後に土壌汚染状況調査と同様の調査を実施することを検討する。

排水などの処理については、要対策土を取り扱う区域から発生する排水（集水設備からの放出水も含む）を対象に水質管理計画を定めて適宜モニタリングを行い、適切な水処理を行う。その際、要対策土の周辺に側溝などを配して現場内で発生する水（表流水）を効果的に集水するような配慮が必要となる。水処理は**(3)3)**に示す排水基準を満足するよう実施する。

搬出入・移動時の対応については、要対策土のトレーサビリティーの確保、運搬車両からの荷こぼれ防止や汚染拡散防止のための積載量管理や荷台のシート養生、車両に付着した土砂の洗浄回収などを検討する。また、適切な搬出管理による積込み時の土砂の混合防止や、受入先への情報提供が求められる。

なお、基準不適合土壌を搬出する場合には、土壌汚染対策法における要措置区域等でない土地においても運搬及び処理に当たり、土壌汚染対策法の汚染土壌の搬出等に関する規定に準じ適切に取り扱うよう都道府県の環境部局が指導する旨、土壌汚染対策法施行通知（環水大土発第 1903015 号（第 10 の 1.））に示されている。

以下に、施工時における仮置き、排水処理、要対策土の搬出入や移動時の対策について述べる。

(2) 仮置き

要対策土を掘削してから盛土等に利用するまでの間や、処分のため事業用地外に搬出するまでの間など、一時的に要対策土の仮置きが必要になる場合は多い。また、掘削してから汚染の有無を分析し、要対策土とそれ以外の発生土に区分する場合も、分析による判定結果が出るまでは仮置きが必要となる。

一時的な仮置きであっても、要対策土に含まれる重金属等が降雨などの影響で地盤に浸透しないような対応や、必要に応じて土粒子の飛散防止の対応などが求められる。

事業用地内に場所を確保して要対策土を仮置きする場合でも、仮置き場所には地下浸透が生じないような措置を施す。施工範囲の外に仮置き場を設定する場合には、施工サイクルや掘削土量に対応した分別作業用の場所も確保し、後で要対策土を区分できるようにしておく必要がある。要対策土となった発生土を事業用地外で処分するなどの場合、受入施設等の受入能力により一度に大量の要対策土を搬出することが難しいことも想定される。仮置き後に対策の要・不要を判定する場合は、分析頻度と分析期間に加え、要対策の判定が出てから対策の実施までに要する時間も想定して、仮置き場の面積や要対策土の仮置きロット量を検討する必要がある。

仮置き方法の一例を**図-4.4.1** に示す。仮置き期間が比較的短期間の場合は、防水シートやマットによる被覆、屋根掛け、舗装・吸着層、吸着マット、吸着シートなどの敷設、および排水処理などの対策も考えられ、費用対効果を勘案して対応する。防水シートを敷設する場合は、鳥獣による穴開け、めくり、破りなどの被害防止のため、敷設時期・期間や周辺環境を考慮し、必要に応じて厚手のシートの使用や二重化などの対策を施す。仮置き期間が数年以上のような比較的長い場合の仮置き方法としては、**4.3.1 解説(3)**の例を参考とされたい。特に仮置き期間が長期にわたる場合は、施工計画段階において、その対応策やモニタリングを含めた管理方法について綿密に具体化しておく必要がある。

仮置き時には、必要に応じて担当者などを含む要対策土の情報を掲示し、その所在を明確に示しておく。

なお、要対策土の土砂粉塵の発生に対しては、重金属等の含有の有無にかかわらず、通常の粉塵拡散防止対策を講じるが、要対策土の仮置きが大気汚染防止法における粉じん発生施設に該当する場合は届出が必要となる。さらに、建設汚泥などの産業廃棄物を事業用地外に 300 m² 以上の面積で保管する場合(自治体によっては条例による上乗せ基準もある)は、積替保管の規定が適用される。その場合、自治体に対して廃棄物処理法に基づく事前の届出

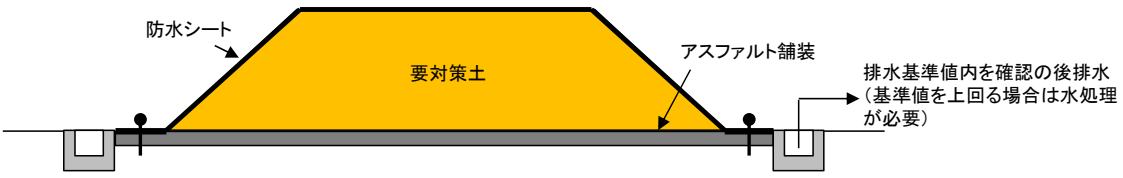


図-4.4.1　自然由来重金属等含有土の仮置き方法の一例（比較的小規模短期間の場合の例）

が必要で、かつ日平均発生量の 7 日分しか保管できないので留意する必要がある。

(3) 排水処理

1) 基本的な考え方

ここでいう排水とは、工事に伴い発生した排水や、現場内で発生し、地下浸透を含め事業用地外に排出する雨水、湧水、滲出水を総称していう。重金属等の濃度が定められた基準値を超過するような排水の処理施設は、適切に重金属等を取り除くことができる方式とする必要がある。また、重金属等だけでなく、pH や COD などの生活環境項目や地方自治体の条例に基づく規制項目についても対処が求められる場合には、それらに対応した処理施設を追加するなど、適切な対策を行うことが必要である。

滲出水の取扱においては、作業員の安全性の確保や汚染防止に対する十分な配慮が必要である。そのためには、適切な処理方法を選定し、リスクの低減に努めた対策計画を策定する。また、事前の試験などにより処理方法の効果を確認する。

一般的に重金属等を含有する排水の場合、重金属等は懸濁物質（浮遊物質(SS)ともいう。）に付着していることが多く、工事の濁水処理で通常行われる凝集沈殿処理だけで排水基準を満足する場合が多い。しかし、滲出水が基準値を超えている場合や凝集沈殿法だけでは処理しきれない場合には、**2)**に述べる処理などが必要である。排水を事業用地外の排水処理施設で処理する場合は、処理できる重金属等の種類、処理方法、運搬方法などを調査し、適切な処理施設を選定する。

なお、処理容量については、即座の増設などの対応が困難なことから、十分に余裕を持って設定することが望ましい。具体的には、計算値に対して 1.5 倍程度の容量を確保した事例がある。

2) 水処理の方法

重金属等の有害物質を含む水の処理は、無害な物質への変換や分解ができないため、排水から分離する技術が主体となる。また、重金属等の種類により適用できる処理方法が異なるため、排水の性状に適した水処理方法を採用する必要がある。

水処理として様々な方法があるが、重金属等の処理には凝集沈殿法が用いられることが多い。凝集沈殿法の前処理プロセスには、水酸化物法や共沈法などがある。例えば水酸化物法の場合は、排水に pH 調整剤（アルカリ剤）を添加することにより、pH をアルカリ側に調整し、析出した重金属等の水酸化物を凝集沈殿法により除去する。

水酸化物法の標準的な処理フローを**図-4.4.2** に示す。原水に pH 調整剤を添加・撹拌し、アルカリ領域とすることで水酸化物を析出させる。この処理水に凝集剤を添加し、沈降分離により上澄水と沈殿物に分離する。沈殿物はそのまま産廃処分するか、あるいはフィルタープレスなどで脱水処理後、産廃処分する。上澄水はさらに中和処理をして放流する。

なお、沈殿物の処分に関しては、後述の**②**を参照されたい。

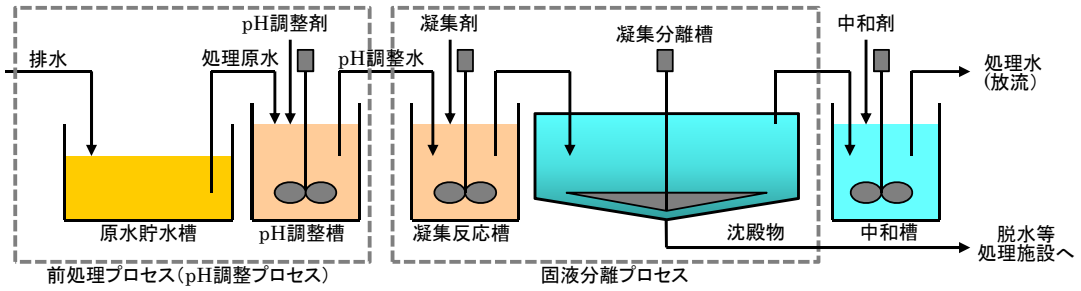


図-4.4.2　水酸化物法の標準的なフロー

①前処理プロセス

前処理プロセスにおける特徴的な原理・方法について以下に示す。

ⅰ. 水酸化物法

pH 調整剤として、水酸化ナトリウム;NaOH、水酸化カルシウム;$Ca(OH)_2$、酸化カルシウム;CaO、炭酸カルシウム;$CaCO_3$、水酸化マグネシウム;$Mg(OH)_2$、酸化マグネシウム; MgO などを重金属等を含有する排水に添加し、アルカリ性にすることにより重金属等の水酸化物を析出・沈殿させる処理方法を水酸化物法という。水酸化物法は、大部分の重金属等に対して処理が可能であり、薬剤が汎用品のため入手が容易で、ランニングコストも安価である。一般の金属類は pH が高くなると水酸化物が析出し、水中の金属イオン濃度は下がるが、酸と塩基の両方に反応する亜鉛や鉛などの両性金属は、高 pH 下において水酸化物イオンと反応して金属錯イオンとして再溶解するため、注意が必要である。

表-4.4.1 に、よく使用される石灰系とソーダ系の pH 調整剤について、それぞれの長所・短所について示した。これらの中から、現地の状況に応じて使い分ける必要がある。

表-4.4.1　pH 調整剤の種類および特徴

pH 調整剤の種類		長所	短所
石灰系	炭酸カルシウム	・粒径が多様 ・pH 8～9 程度までの反応（アルカリ性による環境影響が小さい）	・反応が遅い ・水溶液の作成が不可 ・沈殿物の発生が多量
	水酸化カルシウム（消石灰）	・最も実績がある ・反応が比較的早い	・0.1 %以上の水溶液の作成不可 ・強アルカリ性となる可能性がある ・沈殿物の発生が多量
ソーダ系	水酸化ナトリウム（苛性ソーダ）	・反応が速やかに進む ・溶液として取扱い可能 ・沈殿物の発生が少量	・強アルカリ性となる可能性がある ・劇物としての取扱い

ⅱ. 共沈法

排水に含まれる砒素、鉛、カドミウムなどは pH をアルカリ性にしないと十分に除去できない。しかし、ほかの金属などが水中に同時に存在している場合、処理対象の重金

属等が理論上の pH より 1～2 低い領域から沈殿する性質がある。この原理を利用し、共存させる金属塩としての共沈剤を添加して、重金属等を低濃度まで処理する効果的な方法を共沈法という。共沈法の反応機構は、吸蔵（包含）、吸着、難溶性塩の生成、複合多核錯体の生成など、いくつかの反応を複合させたものである。共沈剤には、一般的に塩化鉄(Ⅲ)、アルミニウム塩、鉄(Ⅱ)塩などが使用される。

ⅲ.その他の前処理の方法

キレート剤や分散剤を含む水は、pH 調整のみの水酸化物法では処理できない。この場合、キレート剤に捕捉されている重金属等をほかの無害な元素で置換し、水酸化物として沈殿させる置換法がある。

重金属等を水酸化物以外の金属塩として析出・分離除去する方法には、硫化物法、フェライト法などがある。重金属等を含む水のその他の処理法としては、イオン交換法、吸着法などがあり、重金属等の種類ごとに適した水処理方法を選定することが望ましい。

なお、セメント系の材料を使用する現場では、これらに起因して高アルカリ性の排水が排出される場合もある。この場合には炭酸ガスや酸性の pH 調整剤により適切な pH に調整する必要がある。

②固液分離プロセス

pH 調整後の固液分離プロセスは、通常の工事濁水処理における固液分離プロセスと同様であり、凝集・沈殿処理および沈殿物の分離・処理工程で構成されている。

凝集・沈殿処理において使用される凝集剤としては、無機系（アルミニウム系や鉄系など）と有機高分子系があり、重金属等の種類、粒子の大きさ、処理施設などにより使い分けられる。

分離された沈殿物は脱水処理などを行い、廃棄物処理法による汚泥として産廃処理しなければならないが、汚泥中に重金属等を含有している可能性があるので、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（環境庁告示第 13 号、昭和 48 年）の試験により、基準値を満足するかどうかの確認を行う必要がある。

3) 放流水の基準について

建設工事においては、バッチャープラントやダムの骨材プラント以外では、水質汚濁防止法の特定施設に該当しないので、水質汚濁防止法は適用されない。しかし、放流水には水質汚濁防止法に準じて一般排水基準を採用する場合が多い。地方自治体によっては条例により上乗せ排水基準を設けているところがある。

その他、河川や下水道に一定量以上放流する場合は、河川法や下水道法により協議が義務付けられており、放流先の状況などに応じて排水の管理値などについて、河川管理者などと協議する必要がある。

(4) 要対策土の搬出入・移動時の対策

要対策土を他工区の施工場所や受入施設などへ搬出入する場合は、土砂の飛散・流出対策を講じる必要がある。土砂の積込み時には、運搬中に運搬車両から荷こぼれがないように適

切な量の土を積載する。運搬車両のタイヤに土砂が付着しないようにするとともに、付着した場合にはタイヤを洗浄し、土砂を回収する。運搬中には土砂が飛散・流出などしないように、荷台を防水シートで覆うなどの対策を実施する。

発生場所からの搬出、運搬、および施工場所などへの搬入に至るまで、要対策土のトレーサビリティーを確保するため、土砂の運搬管理を実施する必要がある。土砂の運搬管理には、土砂伝票（搬出側の運搬証明、受入側の受入証明）による方法や、車載の IC タグやスマートフォンなどの携帯端末を用いて搬出側と受入側が情報（搬出場所、受入場所、時刻、土量、土砂種別など）を共有するシステムを活用する方法などがある。また、施工場所において将来、形質変更が行われる可能性もあるため、要対策土の情報（分析結果など）を受入先に提供する。

万一、運搬中に事故などがあった場合には関係者に速やかに連絡し、緊急時の対応が講じられるように、あらかじめ緊急時連絡体制図や緊急時対応マニュアルを作成し、運転手への教育を行う。

4.5 モニタリング

要対策土を盛土等に利用、または仮置きした場合などの際には、原則として、工事による水環境への影響の確認を目的とする「施工確認モニタリング」を実施する。また必要に応じて、対策工の効果や搬出時管理土に関するリスク評価結果の確認を目的とする「効果確認モニタリング」を実施する。

モニタリングは、事業用地およびその周辺の必要な箇所において、施工前、施工中および施工後にわたって実施する。ただし、対策工の効果確認のためのモニタリングは可能な時期から開始する。

モニタリングの実施にあたっては、モニタリングの目的や現地の状況を踏まえて、対応目標、モニタリング項目、方法、配置、頻度および期間を計画する。

計画した期間が経過した時点で対応目標を満足することを確認した上でモニタリングを終了する。期間内に想定と大きく異なる状況が確認された場合は、モニタリングを継続するとともに、必要に応じて対策の見直しを行うなどの措置を講じる。

(1) 施工確認モニタリングと効果確認モニタリングの目的と概要

モニタリングは、自然由来重金属等含有土に関する対応として行う、調査、設計、施工の各段階で実施してきた一連の作業の全体、またはその一部について、その妥当性を確認し、安全を担保するために重要である。

本マニュアルにおいては、モニタリングとして「施工確認モニタリング」と「効果確認モニタリング」の２つを位置づけている。

施工確認モニタリングは、工事による水環境への影響の確認を目的とし、要対策土を盛土等に利用したり、仮置きした場合などの際に、原則として実施する。また、必要に応じて掘削場所においても実施することがある。

効果確認モニタリングは、必要に応じて実施するもので、次の 2 つの場合での適用を想定している。

① ほかの対策工と組み合わせて対策工の効果を確認する場合
② 発生源濃度区分が【低】で影響予測に基づき搬出時管理土となった土を盛土等にした場合における、リスク評価結果の確認

効果確認モニタリングについては **4.3.1 解説(3)8)** を参照するとともに、その技術的事項は、施工確認モニタリングと共通する事項が多いので、必要に応じて施工確認モニタリングに関する事項に準じて、実施する。

(2) 施工確認モニタリングの基本的な考え方

施工確認モニタリングは、事業用地内の地下水や滲出水などとその周辺の河川・湖沼水や湧水、地下水（環境水）などについて行う。施工確認モニタリングは周辺環境への施工の影響を把握するために、施工前より継続実施し、対象地域における各測定項目のバックグラウンド濃度を把握する。そして、施工中および施工後のモニタリング結果が想定と異なる場合

は、必要に応じて追加調査を行ってその変化の原因を把握し、対策を見直すなどの措置を講じる。

表-4.5.1　各段階で行う施工確認モニタリングの概要

施工確認モニタリングの各段階	目　的
施工前	バックグラウンド濃度を把握し、影響予測や施工による影響の確認などに活用する。
施工中	工事による周辺環境への影響を把握し、対策工の確実な施工を確認する。また、必要に応じて重金属等の溶出や酸性水発生の把握や検討に用いる。
施工後	工事による水環境への影響について確認する。また、必要に応じて重金属等の溶出や酸性水発生の把握や検討に用いる。

表-4.5.2　施工確認モニタリングにおける周辺環境水の調査項目の実施段階と調査目的

調査項目	対象	実施段階			調査目的
		施工前	施工中	施工後	
流量	表流水、湧水	●	●	●	掘削工事に伴う濁水の影響を評価する。 水質に関する各項目の測定結果とあわせて、要対策土からの溶出現象および水-岩石反応の変化などの検討資料とする。
水位	湖沼水、地下水	○	○	◎	掘削工事に伴う濁水の影響を評価する。 地下水の水位測定は、対策工の種別により、その効果の確認に用いられる。また、水位変動に伴う水質変化の有無を把握する。
水温	表流水、湧水、湖沼水、地下水	◎	◎	◎	各計測対象の水質の基本調査項目であり、pH および EC の温度補正に必要である。
水素イオン濃度指数（pH）	表流水、湧水、湖沼水、地下水	◎	◎	◎	各計測対象の水質の基本調査項目であり、掘削工事による周辺環境水の水質変化を迅速かつ簡便に把握する。 また酸性土による影響の有無の把握や、重金属等濃度の変化の考察に用いる。
電気伝導率（EC）	表流水、湧水、湖沼水、地下水	○	○	○	各計測対象の水質の基本調査項目であり、掘削工事による周辺環境水の水質変化を迅速かつ簡便に把握する。 電気伝導率は溶存イオンの総量との相関があるため、黄鉄鉱の分解反応の進行を推定できる。
酸化還元電位（Eh）	表流水、湧水、湖沼水、地下水	△	△	△	水-岩石反応や各種元素の鉱物への吸着現象は、環境水の pH とともに酸化還元電位の影響を受けるため、生じている現象を推定するための資料とする。
浮遊物質量（SS）	表流水、湧水、湖沼水、地下水	▲	●	▲	掘削工事や掘削土の処理にともなう周辺環境水の汚濁の有無を確認する。
溶存イオン濃度	表流水、湧水、湖沼水、地下水	△	△	△	要対策土を使用した盛土等の内部や地盤中で起こっている水-岩石反応、および吸着現象を推定するための資料とする。イオン種によっては対策工の効果の確認にも用いることができる。
重金属等濃度	表流水、湧水、湖沼水、地下水	◎	◎	◎	工事の影響に伴う重金属等の拡散の有無を確認する。

◎　自然由来重金属等への対応として重点的に実施
○　自然由来重金属等への対応として実施
△　自然由来重金属等への対応として必要に応じて実施
●　一般的な工事の水文調査として実施
▲　一般的な工事の水文調査として必要に応じて実施

施工確認モニタリングは施工後まで継続するほか、リスク評価やリスクコミュニケーションの基本資料となるので、対象地域の地形・地質条件、施工場所やその立地条件を十分考慮して計画する。

モニタリングの頻度や期間については、リスクの大きさ、現地状況や対策工の確実性に応じて適切に設定する必要があり、影響予測の結果も参考にしつつ、専門家の助言を踏まえて定めることが望ましい。なお、モニタリング期間に関しては、評価技術の進歩に応じて計画変更することも可能である。

分析項目は、モニタリングの目的を踏まえて適切に選択する。各段階でのモニタリングの目的を**表-4.5.1** に、モニタリングの各項目とその対象、調査目的などを**表-4.5.2** に、モニタリング箇所の配置例を**図-4.5.1** に示す。

なお、モニタリング用の観測井から採水と水質分析を行う場合には、本来の地下水を対象とするモニタリングを前提としていることを十分に把握した上で、採水やろ過などの前処理を適切に行う。採水や前処理の方法などについては、**3.3.5** を参照されたい。

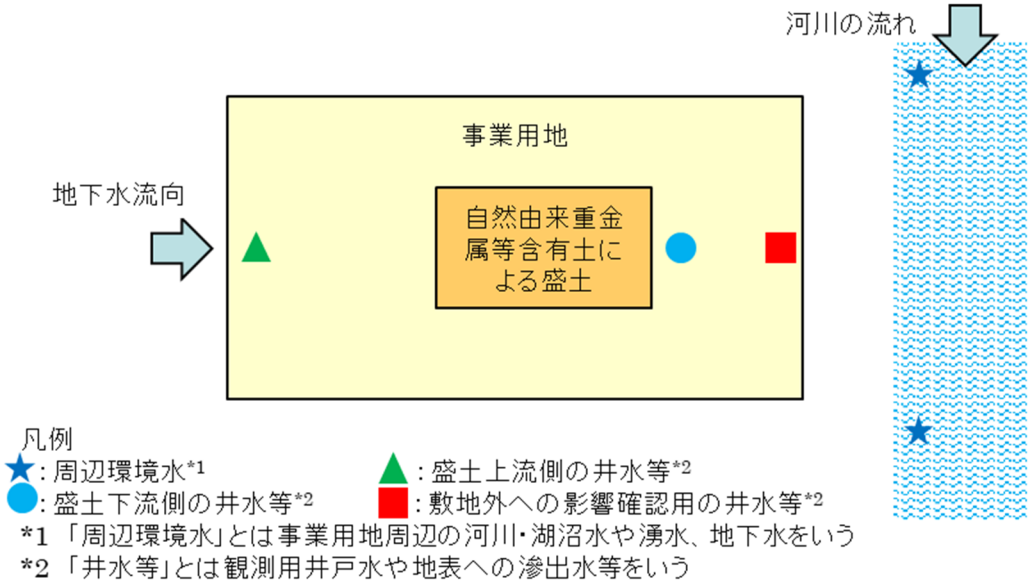


図-4.5.1　モニタリングの配置例

(3) 施工前のモニタリング

要対策土による周辺環境への影響のおそれがある場合、対象地域の重金属等のバックグラウンド濃度を把握して影響予測や施工による影響の確認に活用することを目的とし、早い時期から施工前のモニタリングを実施することが望ましい。具体的には季節変動や年変動による影響を踏まえ、施工の 2～3 年前（一般的に詳細設計段階に相当）に調査を開始することが理想的である。施工を行う用地内の地下水などの観測は、可能な範囲で早期に開始する。施工前においては、事業用地を含む周辺の環境水がモニタリングの主な対象となる。

周辺環境水のモニタリングは施工中・施工後も継続される可能性があることを踏まえ、季節変動が把握できる頻度（少なくとも四半期に 1 度）で実施する。また、河川の流量、地下水位、pH、電気伝導率などの連続計測が可能な項目については、連続計測を行うことを必要に応じて検討する。

なお、要対策土の仮置き場予定地、盛土等の予定地では、施工に伴う影響の程度を確認するために、あらかじめ表層地盤の重金属等について調査を行うことが望ましい。特に仮置き場を借用する場合は、必ず事前に調査を行う。

モニタリングの範囲や位置は重金属等の拡散速度も考慮して選定し、事業用地を含む流域の上・下流部（**図-4.5.1** の★）でモニタリングを実施する。また、地下水のモニタリングでは、既設井戸や調査に使用したボーリング孔の利用も考えられる。なお、周辺に飲用井戸などの利用がある場合は、慎重に対応する必要がある。地下水の観測井では、「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」[1)]を参考に、対象とする帯水層の深度や地下水の流向を考慮し、スクリーンの設置深度などを検討する。

さらに、実際の地盤には水みちが存在する可能性があり、汚染された地下水の移動速度に大きく影響することが考えられるため、特定の地点で異常と考えられる観測値が見られた場合には、適宜モニタリング箇所を追加する。

分析項目は、一般的には重金属等 8 物質（Cd, Pb, Hg, Cr(VI), As, Se, F, B）のほか、水素イオン濃度（pH）、電気伝導率（EC）、水温を測定する。また必要に応じて Fe、Al、酸化還元電位（Eh）、地下水の一般的な主要溶存成分（溶存イオン濃度）である Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, 珪酸塩などを測定する場合もある。これらの分析項目の調査目的については、**表-4.5.2** を参照されたい。施工前の段階で様々な項目を測っておくと、施工中、施工後に特定の項目を測定する必要が生じた際の比較データとなる。また、岩石・土壌については、地質学的・岩石学的特徴と表流水・地下水などの水質から、地球化学反応シミュレーションモデル（例えば米国地質調査所が無償供給する「PHREEQC」[2)]）により、対象地域における水質形成機構のモデルを構築しておくと、現在の水質がどのような反応系の変化を経て形成されたかを推定できる。さらに、その結果に基づいて対策の選定、設計の科学的根拠を得ることも可能であるため、シミュレーションの実施に必要な項目についてモニタリングを実施してもよい。

(4) 施工中のモニタリング

施工中のモニタリングは、工事による周辺環境への影響を確認するため、施工前のモニタリング（**表-4.5.2**）を継続するとともに、対策工の確実な施工の確認を目的として事業用地からの排水や工事中の盛土等からの滲出水を対象（**表-4.5.3**）に実施する。また、必要に応じて要対策土からの重金属等の溶出や酸性水発生の把握や検討に用いる。

事業用地内においては、法令等に準拠した工事排水の水質確認のほか、事業用地内の滲出水や湧水などについても必要に応じて適宜モニタリングを実施する。なお、滲出水や湧水の測定項目については、施工前のモニタリングや影響予測の結果に基づき設定できる。また、

周辺環境水について、要対策土からの溶出の可能性がある項目など、監視が必要な項目については施工前と同一の地点と項目でのモニタリングを継続し、工事による影響を把握する必要がある。

施工中のモニタリングの分析方法は、定期的なモニタリングでは公定法を採用することが望ましい。ただし、モニタリングの時間に制約を受ける場合や日常的なモニタリングでは、環境変化に即応できるよう迅速判定試験や代替項目の測定を適宜採用することがある。なお、迅速判定試験や代替項目の採用に当たっては、結果の妥当性を確認する必要がある。

表-4.5.3　事業用地内の湧水・滲出水に関するモニタリング調査項目の実施段階と調査目的

調査項目	対象	実施段階		調査目的
		施工中	施工後	
流量	湧水、滲出水	◎	◎	湧水や滲出水の処理が必要な場合にはその処理設備の容量の検討資料とする。また、盛土等からの滲出水量は遮水工などの効果確認に用いる。
水温	湧水、滲出水	△	△	特に盛土等の地表部における温度変化による溶出成分の変化の有無を確認する。
水素イオン濃度指数（pH）	湧水、滲出水	◎	◎	各計測対象の水質の基本調査項目であり、湧水、滲出水の環境への影響の可能性を迅速かつ簡便に把握する。 また酸性土による影響の有無の把握や、重金属等濃度の変化の考察に用いる。
電気伝導率（EC）	湧水、滲出水	○	○	各計測対象の水質の基本調査項目であり、湧水、滲出水の環境への影響の可能性を迅速かつ簡便に把握する。
酸化還元電位（Eh）	湧水、滲出水	△	△	水-岩石反応や各種元素の鉱物への吸着現象は、滲出水の pH とともに酸化還元電位の影響を受けるため、生じている現象を推定するための資料とする。
浮遊物質量（SS）	湧水、滲出水	●	▲	掘削工事や掘削土の処理にともなう周辺環境水の汚濁の有無を確認する。
溶存イオン濃度	湧水、滲出水	△	△	要対策土を使用した盛土等の内部や地盤中で起こっている水-岩石反応、吸着現象を推定するための資料とする。イオン種によっては対策工の効果の確認にも用いることができる。
重金属等濃度	湧水、滲出水	◎	◎	工事の影響に伴う重金属等の拡散の有無を確認するとともに、対策の効果を検証する。

◎　自然由来重金属等への対応として重点的に実施
○　自然由来重金属等への対応として実施
△　自然由来重金属等への対応として必要に応じて実施
●　一般的な工事の水文調査として実施
▲　一般的な工事の水文調査として必要に応じて実施

(5) 施工後のモニタリング

施工後のモニタリングは、施工に伴う重金属等の拡散の有無を確認する目的で実施し、事業用地内の観測井の水や滲出水、湧水および必要に応じて周辺環境水（河川や井戸などの水）などがモニタリングの対象となる。

なお、事業用地内の井戸水などや周辺環境水については、施工中と同様のモニタリングを行うことが望ましい。特に、自然由来の重金属等の影響が及ぶと考えられる表流水および地

下水については、事業用地を含む上・下流部でモニタリングを継続する。

要対策土の仮置きが長期間にわたる場合には、仮置き場においてもモニタリングを継続する。

モニタリングの終了判断に関して、土壌汚染対策法の規定も踏まえると、季節変動を考慮して対策工周辺で年 4 回程度の計測を行い、水位や水質がある程度一定となった状態でのモニタリング結果が対応目標を上回らない状態が 2 年間継続することの確認がなされるまで、モニタリングを継続する必要がある。ここでいう「対応目標を上回らない状態の確認がなされる場合」とは、土壌汚染対策法の「地下水基準に不適合となるおそれがないことの確認方法」[1)]に準じて判断する（**表-4.5.4**）ことが考えられる。参考として、盛土等の対策工種に合わせた施工後のモニタリングの頻度、期間と留意点の例を**表-4.5.5** に示す。

表-4.5.4　対応目標を超えることがないことの判断 [1)を改変]

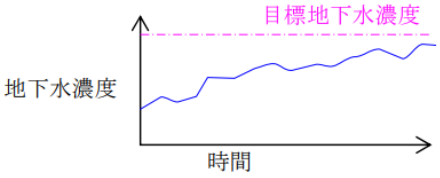
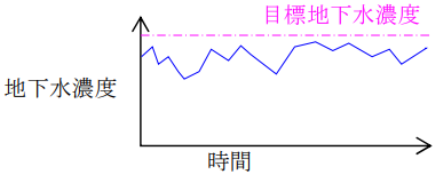
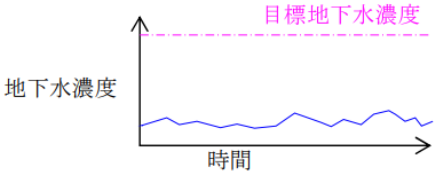
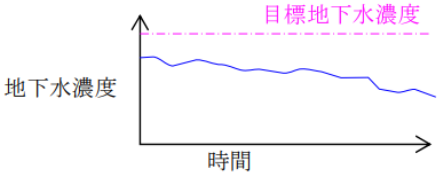
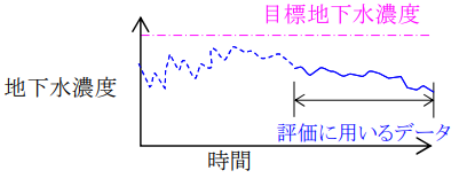
直近 2 年間において 8 回以上の測定結果における地下水濃度の変化傾向			終了の可否
①		上昇傾向にあり、目標地下水濃度を超えないとはいえない	できない
②		目標地下水濃度に近い値で変動している (①の上昇傾向及び④の低下傾向を除く)	できない
③		目標地下水濃度を下回った変動が一定レベルで継続している (①の上昇傾向を除く)	できる
④		低下傾向にある	できる
		完了条件の評価に用いるデータが低下傾向である場合を含む	

表-4.5.5　要対策土による盛土等の対策工種に合わせた施工後のモニタリングの頻度、期間と留意点

（例）

対策の方法	モニタリングの頻度・期間	留意点
二重または一重遮水工封じ込め	年 4 回以上実施し、影響予測結果を上回らない状態が 2 年間継続することの確認がなされるまで（ただし、構造物の変状などに伴う影響が認められた場合はその都度モニタリングを実施）	構造物と接触、または構造物を通過する可能性のある表流水・地下水を、そのすぐ下流側でモニタリングできるように配慮
表面遮水工 転圧工 不溶化工	年 4 回以上実施し、影響予測結果を上回らない状態が 2 年間継続することの確認がなされるまで行った上で、リスクの大きさや現場状況に応じて計画した頻度・期間（ただし 2 年経過後においても、構造物の変状や地下水環境および構造物周辺の物理化学的環境などの変化に伴う影響が認められた場合は、その都度）	構造物と接触、または構造物を通過する可能性のある表流水・地下水をそのすぐ下流側でモニタリングできるように配慮
吸着層工	年 4 回以上実施し、影響予測結果を上回らない状態が 2 年間継続することの確認がなされるまで行った上で、リスクの大きさや現場状況に応じて計画した頻度・期間（ただし、2 年経過後においても構造物の変状や、吸着層や透過性地下水浄化壁の破過などに伴う影響が認められた場合はその都度）	構造物と接触、または構造物を通過する可能性のある表流水・地下水をそのすぐ下流側でモニタリングできるように配慮
透過性地下水浄化壁工		浄化壁のすぐ下流側でモニタリングできるように配慮
滲出水処理工	処理およびモニタリング終了の時期については、処理施設への流入原水に基づく影響予測の結果を基に設定	処理期間中は処理施設への流入原水と処理後排水のモニタリングを行い、重金属等のマスバランスの把握が必要

(6) 地下水観測が困難な場所における対応

岩盤が浅所に出現する場所に要対策土を盛土等に利用する場合など、地下水観測が困難な場合がしばしばある。そのような場合には、曝露経路を踏まえ、適切な観測地点を選定して水質モニタリングを実施する。例えば、一時的に存在する盛土滲出水や、事業用地下流側において恒常的に流下する表流水の観測などを行い、水利用地点で環境基準を満足できるよう、対応目標を設定する。ただし、対応目標は一般排水基準を上回らないよう設定する必要がある。

(7) モニタリング結果に異常が認められた場合の対応

モニタリング結果に異常が認められた場合の対応については、**4.6 解説(3)**を参照するほか、飲用井戸への影響がある場合は、必要に応じて飲用自粛要請、代替水源の確保、透過性地下水浄化壁工のような対策工の施工などの対応が必要である。

【参考文献】

1) 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）．2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

2) Parkhurst, D.L. and Appelo., C.A.J.: Description of Input and Examples for PHREEQC version3 - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Groundwater Book

6, Chap. A43, 497p., 2019, USGS ホームページ, https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/pdf/tm6-A43.pdf

4.6 施工後の管理と記録の保管

要対策土を盛土等に利用した場合は、盛土等の安定性を維持するとともに、必要な対策工の機能を維持するための管理を行う。盛土等の構造物に損傷が確認されたり、対策工の機能が損なわれた場合には、その程度や内容に応じて適切な対応を図る。

また、要管理土の適切な管理のため、要管理土に関する情報を記録・保管するとともに、管理段階に承継する。

(1) 基本的な考え方

要対策土を盛土等にした場合は、要対策土を用いた盛土等の安定性を維持するとともに、必要な対策工の機能を維持するための管理を行う。なお、例えば底面遮水工＋滲出水処理工を採用した場合において、要対策土からの滲出水に含まれる重金属等が地下水の水質汚濁に関する環境基準を満足する状態が継続することが確認できた場合は、その土は要対策土ではなく、搬出時管理土として扱うことになり、対策工としての機能を維持する必要はなくなる。

搬出時管理土は地下水・表流水に関する対策が不要な土であることから、事業用地内での移動が可能である。ただし、その場合には他の土と区別できるように施工し、施工後は表面を被覆するとともに、移動に関する記録を適切に更新する必要がある。なお、搬出時管理土を事業用地外に搬出する場合においては、搬出時点で改めて本マニュアルの考え方に従って要管理土かどうかの評価を行い、適切な対応を行う。

要対策土については、原則的には盛土等の形状の変更は行わず、対策工の維持管理を実施する。なお、要対策土を使用した盛土等の一部または全部の移動、ないしは事業用地外へ搬出する場合においては、その時点で改めて本マニュアルの考え方に従った評価を行い、適切な対応を行う。

封じ込めなど、要対策土への対策を実施した後に土壌汚染対策法の区域指定を受ける場合は、その後の形質変更に制限が課せられる。事業者は、当該地の担当行政との打合せ記録および土壌汚染対策法の手続の記録を残し、使用者への周知を行うことが望ましい。なお、土壌汚染対策法第 14 条に基づき自主的に形質変更時要届出区域に申請をする場合は、同法に定める土壌汚染状況調査と同等の信頼性が求められる。また、形質変更時要届出区域に指定された際に、一定の条件を満たせば自然由来特例区域に指定され、土地の形質変更時に基準不適合土壌が当該区域内の帯水層に接しても差し支えないなどの利点があるが、自主申請の場合は、申請手続や指定後の土地の形質の変更等の手続の際に、事前に自治体の環境部局と相談する必要がある。このような場合には、「土壌汚染対策法の自主申請活用の手引き（改訂版）」[1)]を参考とされたい。

(2) 対策後の維持管理

要対策土を使用した盛土等については、施工場所に要対策土が残存することから、実施後もその機能が適切に維持される必要がある。そのため、対策の実施後は、その機能が維持で

きているか、定期的に点検する必要がある。対策工の変状などに関する監視は、目視による確認を基本とする。**表-4.6.1** には、参考までに土壌汚染対策法に挙げられている措置に関わる定期的な点検内容の例を示す[2)]。要対策土を盛土形状にした場合は、覆土のすべりや雨水による侵食、立木の繁茂の監視が必要であり、盛土などの構造物の変状や表面植生の繁茂状況、重金属等を含有した土や水の漏出がないかの確認を行う。

対策に関わる構造物の損壊のおそれがあると認められる場合には、速やかに損壊を防止するために必要な措置を講ずるなど、対策効果の維持に努めることが必要である。

特に、豪雨や地震などの被災後には、十分な点検を行うことが必要である。対策に関わる舗装、盛土、遮水工などの構造物に破損が認められた場合には、速やかに破損の修復などの対策を講じる。

表-4.6.1　対策ごとの点検の確認内容の例（土壌汚染対策法における措置の場合の例）[2)]に加筆修正

リスク防止の方法	措置の種類	点検内容
曝露管理 （直接摂取）	立入禁止措置	・囲い・シート・立て札の損壊 ・関係者以外の立ち入り ・特定有害物質で汚染された土壌の飛散・流出
曝露経路遮断 （直接摂取）	舗装措置	・舗装のひび割れや損壊 ・雨水の浸入 ・特定有害物質で汚染された土壌の飛散・流出
	盛土措置	・盛土の損壊 ・降雨による侵食・流出など
	土壌入換え措置	・覆いの損壊
曝露経路遮断 （地下水摂取）	原位置不溶化措置	・不溶化した基準不適合土壌の飛散、侵食 ・覆いの損壊、観測井の損壊・閉塞 ・地下水の水位・水質
	不溶化埋戻し措置	
	原位置封じ込め措置	・覆いの破損 ・観測井の損壊・閉塞 ・地下水の水位・水質
	遮水工封じ込め措置	
	遮断工封じ込め措置	

(3) 異常時の対応

1) モニタリング結果の異常時

施工中および施工後のモニタリング結果が想定と異なる場合、例えば、次のような観点でその原因を検討し、必要な追加調査を行って原因を推定する。そして必要に応じて周辺環境への影響に関する情報公開、地下水利用制限、モニタリング強化、対策の見直しなどの措置を講じる。

・バックグラウンド濃度の変動
・施工のタイミングとモニタリング結果の変動
・地震、豪雨、斜面変動などの発生のタイミングとモニタリング結果の変動
・事業用地外の状況の変化とモニタリング結果の変動

2) 盛土が崩壊などの損傷を受けた場合

盛土が崩壊などの損傷を受けた場合、要対策土による周辺環境への影響の軽減の観点から下記の対応を行う。早期に対応することで、周辺環境への影響は軽減できる。

・情報公開の徹底
・拡散した要対策土の回収
・対策工の応急対策
・対策工の修復
・モニタリングの強化

また、モニタリング結果に異常が確認された場合は、1)に基づき、必要な措置を講じる。

(4) 記録の作成と継承

要管理土の適切な管理を行うため、要管理土に関する調査、評価（試験結果を含む）、運搬（トレーサビリティー）、対策の設計・施工、維持管理方針およびモニタリング結果などの諸情報を記録・保管し、将来の不測の事態に備える。

要管理土を適切に対策した記録として、施工報告書を作成する。報告書への記載事項としては、例えば、計画内容、対象範囲（平面図・断面図）、対象土量、施工内容、施工および対策の完了確認結果（公定法に基づく計量証明書など）、要管理土の受入先および受入先での処理方法、搬出などに係る伝票、施工中の環境保全対策、実施期間などが挙げられる。報告書・記録の内容の例として、以下のものがある[3)]。

①調査・対策に至るまでの経緯（調査・対策の目的・方針）
②調査報告書（自然由来重金属等含有土や酸性土の状況、対策範囲の決定根拠）
③対策計画書（対策の選定の経過）
④工事開始前の検討結果
⑤工事中のモニタリング結果（周辺環境など）
⑥分析結果の証明書
⑦変更記録（対策の追加、対策範囲の変更など）
⑧事業者、関係自治体との打合せの内容
⑨自然由来重金属等含有土や酸性土の移動記録

また、調査・施工記録に基づいて、**参考資料 19** に例示するような管理台帳などを作成し、要管理土が継続して存在する間、事業者や施設管理者などが保管し、情報を共有することが望ましい。

法令等の適用と同等の扱いを求められる場合には、工事の開始から完了まで、関係自治体へ各段階で届出・報告と記録の提出が必要な場合がある。例えば、土壌汚染対策法、東京都環境確保条例の場合の提出書類には次のようなものがある。

〔土壌汚染対策法に規定する提出書類〕

・形質変更時要届出区域内における土地の形質の変更届出書（法第 12 条第 1 項に基づく届出）
・汚染土壌の区域外搬出届出書（法第 16 条第 1 項に基づく届出）
・工事終了報告書または措置の完了報告書（法第 7 条第 9 項に基づく報告）

※法第 14 条申請の場合は上記に加え、「指定の申請書」が必要となる。

〔東京都の環境確保条例に規定する提出書類〕（調査に関する届出を除く）

・汚染拡散防止計画書

・汚染処理計画書

・汚染処理または汚染拡散防止措置の完了届出書

※処理および措置の完了届出書には、実施した汚染処理または汚染拡散防止措置の内容を記載する。

【参考文献】

1) 環境省水・大気環境局土壌環境課：土壌汚染対策法の自主申請活用の手引き（改訂版）. 25p.，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/water/dojo/gl-man.html

2) 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）. pp.599-626 および pp.638-640，2022，環境省ホームページ，https://www.env.go.jp/ water/dojo/gl-man.html

3) 土木学会建設技術研究委員会 土壌・地下水対策研究小委員会：研究報告 土壌汚染対策工事への対応. pp.47-48，2006，土木学会ホームページ，http://committees.jsce.or.jp/sekou09/system/files/2006report_1.pdf

参考資料　目次

参考資料１　本マニュアルの第 2 章以下に示す具体的方法によらない対応・・・・参考 1
参考資料２　自然由来の重金属等に関する諸情報・・・・・・・・・・・・・・・・参考 3
参考資料３　本マニュアルの考え方に基づく合理的な対応の例・・・・・・・・・参考 20
参考資料４　トンネル工事および切土工事における一般的な調査と要管理土の
対応のため調査との対応関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 21
参考資料５　環境関係法令基準値一覧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 24
参考資料６　土壌汚染対策法における自然由来の汚染土壌（自然由来等土壌）
の取扱い・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 26
参考資料７　岩石・土壌に含まれる重金属等や酸性物質の起源の確認方法・・・・参考 31
参考資料８　短期溶出試験、酸性化可能性試験と土研式雨水曝露試験との比較・・・参考 51
参考資料９　岩石試料の一般的な試料調製手順・・・・・・・・・・・・・・・・参考 55
参考資料 10　短期溶出試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 58
参考資料 11　直接摂取のリスクを把握するための試験方法・・・・・・・・・・・参考 59
参考資料 12　酸性化可能性試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 61
参考資料 13　実現象再現溶出試験の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 62
参考資料 14　移行特性試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 参考 72
参考資料 15　不溶化処理土壌の評価方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 74
参考資料 16　酸性土の掘削面対策の考え方・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 76
参考資料 17　地下水経由のリスクに対する対策工の信頼性の評価・・・・・・・参考 78
参考資料 18　不溶化処理の配合設計例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 80
参考資料 19　管理台帳の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・参考 82

参考資料１　本マニュアルの第 2 章以下に示す具体的方法によらない対応

(1) 本マニュアルの第 2 章以下に示す具体的方法によらない対応を選択する場合

本マニュアルは、発生土量が多い公共建設工事を想定して、事業計画段階からの対応を示したものであるが、工事の時間的、費用的制約などのために、本マニュアルの第 2 章以下で示す方法によることが合理的でない場合がある。例えば、施工中に自然由来重金属等含有土や酸性土への対応が新たに必要になり、調査に時間を費やすことが困難な場合や、調査を行う費用や手間が対策費用に対して相対的に大きくなる場合などである。そのような場合は、以下に示す例を参考に、発生土量と発生源や受入先の環境影響や万一の際の対応のリスクの大きさを踏まえて具体的な対応方法を検討し、実施する。

(2) 対応方法の例

① 受入施設等に搬出する方法

本方法は、発生土全てを要管理土と見なし、受入施設等に搬出するものである。発生土を受入施設等が定める方法・頻度で分析する必要はあるものの、要管理土のほとんどを受け入れられるものと考えられる上、管理上の課題がない方法である。

１）予め受入施設等の候補を定める。

２）発生土について、受入施設等が定める方法・頻度で試験を実施する。受入基準を満足する場合は、そこに搬出する。受入基準を満足しない場合は、新たな受入先を探す。なお試験の結果、環境基準などの基準値を下回った場合において、「要管理土の判定の目安」（**2.6**）に照らして要管理土の判定の目安に該当しないことが確認できれば、その土を通常の発生土として搬出、利用することができる。

② 本マニュアルの第 2 章以下に示す対応に準じた方法

本方法は、施工中に発生土が要管理土かどうかを判定し、要管理土については対策工を施して盛土等に利用するものであり、調査が本マニュアルの第 2 章以下に示す対応よりも簡略である代わりにやや安全側となる対応方法である。

１）搬出元の土地について、ヒアリングや地形図、空中写真などにより、工場跡地などの人為的汚染の可能性がある土地利用履歴がないことを確認する。

２）盛土等の利用場所を定める。要管理土は、事業者が自らの用地で、あるいは受入先との合意の下に、受入先において盛土等として利用する。また、地下水下流側に人家や水利用地点が近くに存在しないなど、可能な限り重金属等の地下水経由および表流水経由のリスクが低い場所を選定することが望ましい。

３）発生土について、「要管理土の判定の目安」（**2.6**）に照らして要管理土を判定する。要管理土の判定の目安に該当しない場合、通常の発生土として搬出、利用する。

４）要管理土は、必要に応じて対策工を施した上で盛土等に利用する。対策工は、本マニュアル（**2.11** など）を参考に選択する。

５）要対策土を盛土等として利用した場合は、地下水・表流水の施工確認モニタリング

（**4.5**）を実施し、結果に異常がないことを確認する。

６）施工後の管理については、「**4.6**　施工後の管理と記録の保管」に従って実施する。

③ 環境リスクが小さいと推察される場合の方法

本方法は、発生土量、周辺地質に関する事前情報、および発生土の利用場所の状況を総合的に勘案し、発生土の利用に際して環境リスクが小さいと推察される場合に採用できる方法で、調査を簡略化した上で通常の発生土と同様に盛土等を構築するものである。本方法の適用にあたっては、施工の影響で周辺の地下水・表流水に異常が認められた場合の対応が可能であることが必要である。

１）搬出元の土地について、ヒアリングや地形図、空中写真などにより、工場跡地などの人為的汚染土壌の存在可能性がある土地利用履歴がないことを確認する。

２）当該土地近傍の、類似地質に関する試料分析結果（工事記録や学術文献などの既存資料）に基づき、当該土地からの発生土について、自然由来重金属等含有土や酸性土による環境への影響が小さいことを確認する。

３）発生土の利用場所および受入施設等の候補を定める。要管理土は、事業者が自らの用地で、盛土等に利用する。また、盛土等の地下水下流側近傍に人家や水利用地点が存在しないなど、可能な限り重金属等の地下水経由および表流水経由のリスクが低い場所を選定する。

４）施工後に万一、周辺の地下水・表流水に異常が認められた場合の対応方法を、予め検討しておく。

５）施工時に掘削ずりから、発生土の地質区分ごとに代表する１試料を採取し、分析する。そして「要管理土の判定の目安」（**2.6**）に照らして要管理土でないことを確認する。分析の結果、要管理土であると判定された場合には、盛土等へ利用せず、受入施設等へ搬出する。

６）通常の発生土として盛土等に利用する。利用に際しては、発生土の転圧、覆土、舗装など、内部への雨水の浸透抑制効果が期待できる方法、構造とすることが望ましい。

７）管理においては、発生土の搬出元に関する情報、分析試料の採取場所、試験方法および結果の情報を保管するとともに、発生土の搬出管理を行う。盛土等を掘削し、用地外に搬出する際は、適切に対応する。

８）万一、周辺の地下水・表流水に異常が認められた場合、その原因および影響範囲を調査し、盛土等による寄与が認められる場合には、４）で検討しておいた方法を基本として対応する。

参考資料２　自然由来の重金属等に関する諸情報

以下は、自然由来の重金属等を含む発生土を取扱う技術者が持つべき基礎知識について、「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(暫定版)」の 2.1、2.2 および参考資料 4 を補足・再編集したものである。なお、「**３．各重金属等の基準値設定根拠**」のカドミウムの各基準値については順次見直しがされている状況を反映させた。各種基準値については令和 4 年 4 月 1 日現在の値を示す。

１．身近に存在する自然由来の重金属等

自然由来の重金属等は、海水（ふっ素、ほう素など)、温泉水（鉛や砒素など)、お茶（ふっ素）などに含まれ、古来より我々の生活の身近に存在し、共存してきたものである。

カドミウム、クロム、水銀、セレン、鉛、砒素、ふっ素、ほう素は人間の生活に不可欠な元素であり、主に地球表層を構成する地殻から採掘され、工業的に加工され活用されている。鉄、銅などの主要な金属元素のように身近に接する元素ではないが、加工品の添加物として用いられ、それらの性能向上に欠かせない元素である。我々の健康を維持する上でも砒素、ふっ素、セレンなどは微量ながら生物の必須元素として位置づけられている。

地殻を構成する岩石・土壌にもこれらの元素は微量であるが普遍的に含まれる（**表-1**）。ここでは、これらの重金属等の地球表層における含有状況、基本的な性質、食品など身近な物質における全含有量、人体への影響、産業における利用について概説する。

表-1 自然界における主な重金属等の存在度（単位：mg/kg）

	亜鉛	ｶﾄﾞﾐｳﾑ	クロム	水銀	セレン	銅	鉛	砒素	ふっ素	ほう素
地殻の平均値（クラーク数）[1]	70	0.2	100	0.08	0.05	55	13	1.8	625	10
大陸地殻の元素量[2]	80	0.098	185	0.08	0.05	75	8	1	625	10
日本列島の上部地殻の平均値[3]	74.1	-	84	-	-	25	16.9	6.5-7.1	-	-
日本の河川堆積物の平均値[4]	118	0.158	65.2	0.054	-	30.6	23.1	9.32	-	-
日本の森林土壌(表層)の平均値[5]	50.2	0.266	22.7	-	-	21.4	16.4	6.23	-	-

(1) カドミウム（Cd）

カドミウムは原子番号 48、原子量 112.41 の元素である。地殻中のカドミウムの平均全含有量は 0.098～0.2 mg/kg 程度と比較的少ない元素であるが、鉱物中や土壌中などに天然に存在する重金属で、亜鉛、銀、銅などの金属元素とともに存在し、閃亜鉛鉱（ZnS）が主な含有鉱物とされる。海成堆積物ではカドミウム濃度が高い傾向があり、特に海成堆

積物中のリン酸塩には、15 mg/kg 程度のカドミウムが含まれることがある。亜鉛、水銀と同族元素で、亜鉛とよく似た化学的挙動を示す。硫化物、炭酸塩、酸化物のカドミウム塩類は、水に溶解しにくいが、硫酸塩、硝酸塩とハロゲン化物としてのカドミウム化合物は水溶性の高い塩類である。歴史的に鉱山開発、精錬などによって環境中へ排出されてきた元素である。日本産の米（玄米）のカドミウム平均濃度は 0.06 mg/kg 程度（CODEX 基準値*は精米で 0.4 mg/kg（令和 4 年 4 月 1 日現在））であるが、金属鉱山・鉱床周辺では水田などの土壌に蓄積し、平均値より高い濃度を示すことがある。人体への影響としては、長期の高濃度摂取で腎機能障害、骨の軟化が発生する。富山県神通川流域で発生したイタイイタイ病は、神岡鉱山からの排水に含まれていたカドミウムが農業用水路に混入し、水田土壌を汚染することにより、カドミウムの蓄積した食物や汚染水を摂取したことによって発症したものである。カドミウムは水生生物に対する毒性が比較的高いとされている。工業的活用としては電気メッキに従来使用されてきたが、近年では充電式電池や電子的用途で活用されている。

*CODEX 基準値: 国際食品規格（コーデックス規格）による基準値。FAO（国連食糧農業機関）および WHO（世界保健機関）により設置された、コーデックス委員会で策定。

(2) クロム（Cr）

クロム(Cr)は原子番号 24、原子量 51.996 の元素である。地殻中の平均全含有量は、65.2～185 mg/kg 程度である。花崗岩中では 2～60 mg/kg 程度含まれる。最も高濃度で含まれるのは超塩基性岩類や蛇紋岩類で、1,000 mg/kg を上回る全含有量を示すものもある。その他、土壌・火山灰や火山性ガス中に含まれる。クロムはマイナス二価からプラス六価の範囲の酸化状態を有する金属元素である。最も主要な含有鉱物としてはクロム鉄鉱（$FeCr_2O_4$）およびクロムスピネル（$(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$）がある。自然由来のクロムは、ほとんど三価の状態で存在する。19 世紀初め頃から、クロムを六価態（Cr(Ⅵ)）へ酸化させることによる工業的な使用が始まって以降、六価クロムが環境中に排出されるようになった。つまり、六価クロムによる汚染は人為由来であることが多い。火成岩のクロム全含有量は、マグネシウムやニッケルの全含有量と相関が高い。リン鉱石を含む堆積岩中にクロムが含有されることも多く、リン酸塩肥料が使用される耕作土中ではクロム全含有量が高い場合がある。

人体にとって三価クロム（Cr(Ⅲ)）は、グルコース（ブドウ糖）の消化を促し、インシュリンの作用を促進する必須元素とされている。六価クロムは発がん性があるとされ、呼吸器・消化器系障害や腎臓障害を生じる。工業的には、六価クロム化合物がクロムメッキ、塗料、皮革なめし剤、触媒などに活用されている。セメントには六価クロムが製造工程の中で生成し、その中に含有するが、固化時の水和反応が十分に起こると溶出しない。

(3) 水銀（Hg）

水銀（Hg）は原子番号 80、原子量 200.59 の元素である。地殻中の水銀の平均全含有量は 0.054～0.08 mg/kg 程度である。火山、金属鉱床周辺の熱水脈に介在することが多く、岩石中では硫化物の辰砂（HgS）あるいは自然水銀（Hg）などとして存在する。国産重油・石炭の水銀全含有量はそれぞれ 0.015～0.046 mg/kg、0.65～0.74 mg/kg 程度含まれるとさ

れている。水銀は常温で液体として存在する。空気中へ蒸発し、20℃での空気中飽和濃度は約 15 mg/m^3 を示す。この濃度は、労働安全衛生法における作業環境測定基準および作業環境評価基準で示す基準値（令和 4 年 4 月 1 日現在）の 300 倍に当たる。また水銀は、湖水、海水中で生物作用によって有機化し、メチル水銀（アルキル水銀の一種）に変換される。メチル水銀の水に対する可溶性は非常に高い。このため、食物連鎖を通じて大型魚類や海生哺乳類に蓄積され、マグロ、キンメダイ、クジラなどに比較的高い濃度で含まれている。無機水銀の蒸気暴露で最も感受性の高い器官は中枢神経系であり、腎臓障害なども生じる。有機水銀は無機水銀に比べ毒性が非常に強い。水俣病は、アセトアルデヒド製造工程で副次的に生成されたメチル水銀が排水を介して環境中に排出されたことにより、神経系障害が生じた著名な公害病である。工業的には、各種電極、金・銀などの抽出剤、各種計器（温度計、気圧計、血圧計、整流器）、水銀灯、歯科用アマルガムなどで活用される。

(4) セレン（Se）

セレン（Se）は原子番号 34、原子量 78.96 の元素である。地殻中のセレンの平均全含有量は、0.05 mg/kg 程度である。砂岩、石灰岩、リン灰岩などの堆積岩で 1～100 mg/kg と高い全含有量を示すものがある。石炭中にもセレンが高濃度で含まれるものがある。火成岩・変成岩では一般に低い全含有量を示す場合が多い。セレンは硫黄と同族であり、化学的にも同様な性質を示すため、天然では主に自然硫黄（S）や硫化鉱物中に少量含まれて産出する。水中ではセレン酸・亜セレン酸として存在する。セレンは藻類、魚介類、肉類、卵黄に豊富に含まれる。特に海産の魚介類には 1～2 mg/kg 程度含まれる場合がある。環境中へは、鉱業的に銅、鉛、亜鉛、リン酸塩、ウランなどの精製過程で排出されるほか、石炭燃焼の過程でも放出されやすい。リン肥料、農薬に介在して耕作土中に含まれる場合もある。人体には約 0.17 mg/kg（体重）程度含まれるとされ、必須元素のひとつとされるが、過剰摂取による皮膚の障害、末梢神経障害、胃腸障害などが生じる。工業的には光電池、照度計、整流器など電子工業でその半導体性が活用されてきたが、シリコンによる代替が進んでいる。

(5) 鉛（Pb）

鉛（Pb）は原子番号 82、原子量 207.2 の元素である。銅や金に次いで古くから人類が利用した金属の一つであり、地殻の全含有量平均値として 8～23.1 mg/kg 程度、火成岩・堆積岩とも 10～20 mg/kg 程度含有する。鉛を含む鉱物としては、方鉛鉱（PbS）が最も普遍的に存在している。土壌中では、酸性土壌よりもアルカリ土壌中で全含有量が高い傾向がある。鉛は空気中で酸化しやすく、無機化合物では二価塩として存在する場合が多い。一部は四価塩として存在する。水環境中では海水（0.08～0.4 μg/L）より河川水・湖水（1～10 μg/L）で濃度が高い傾向があり、地下水・温泉水ではこれらを上回る濃度を有することがある。土壌中では、粒子表面へ吸着するほか、鉛化合物が固体粒子や土壌中の有機物と有機金属錯体やキレートを生成するといった形態で存在する。銅、亜鉛、錫などの金属鉱床に共在して高濃度で含有されている。肺や経口により吸収された鉛化合物は種々の臓器に蓄積され、特に

骨に固定されることが多く、また貧血、消化器不全、神経・腎障害をもたらす。工業用用途では、金属鉛は鉛蓄電池、散弾、鉛管、放射線遮蔽材、活字、はんだなどに、鉛化合物は顔料塗料、ゴム塩化ビニル添加剤、農薬などに広く用いられる。

(6) 砒素（As）

砒素（As）は原子番号 33、原子量 74.922 の元素である。地殻中に広く分布する元素で、地殻の全含有量平均値としては 1～9.32 mg/kg 程度とされている。地殻中では銅・鉛・鉄などの金属と一緒に三価で存在することが多く、表層の土壌や水中では酸化した五価の状態で存在することが多い。三価の砒素は毒性が強く、亜砒酸（As_2O_3）による中毒事件がよく知られている。黄鉄鉱（FeS_2）などの硫化物に随伴して砒素が存在することが多く、硫砒鉄鉱（FeAsS）は砒素の主要な鉱石鉱物である。硫化物に含まれる砒素は、硫化物の酸化とともに亜砒酸や砒酸として水中に溶解する。溶解した砒素イオンは酸化鉄-水酸化鉄のコロイドや有機物に吸着しやすく、岩石・土壌の粒子表面に二次的に存在する。このような存在状態では、pH や酸化-還元状態の変化で周辺の水へ溶出しやすい。砒素は地下水中に溶存し、日本でもしばしば環境基準値（0.01mg/L（令和 4 年 4 月 1 日現在））を超過する事例がある。バングラデシュ、インド、中国・内モンゴルなどでは砒素を含む地下水を飲用し、大規模な健康被害が生じていることは広く知られている。地殻中での砒素の分布は火山作用、熱水作用を受けた箇所で比較的濃度が高く、海域で堆積した細粒堆積岩（泥岩など）にも一般的に含まれている。石炭中にも含まれ、石炭燃焼で大気中に放出される。温泉水でも砒素濃度が高い場合がある（岡山県奥津温泉:2.8 mg/L；北海道北湯沢温泉:1.8 mg/L；北海道定山渓温泉:3 mg/L など）。

砒素は環境中に微量ではあるが普遍的に存在するため、生物もまた砒素を保有している。海水中には約 0.002 mg/L の砒素が含まれ、藻類やプランクトンは無機砒素を取り込み、毒性の低いメチル化された有機態として蓄積しやすい。例として、ヒジキは数 10 mg/kg の砒素を含んでいる。海洋生物中の砒素全含有量は陸上生物に比べ高い傾向にある。慢性影響としては、皮膚や肝臓の異常、末梢血管障害、末梢神経障害、皮膚がん、肺がんなどが報告されている。

砒素は木材の防腐材、防蟻剤、殺虫剤などに広く用いられてきたが、近年はその有毒性を理由に代替が進み、農薬取締法に基づき登録されていた無機および有機砒素化合物の農薬は 1998 年までに全て登録が失効している。また、工業用用途では、砒素は半導体の原料、触媒、脱硫剤、ガラス添加剤などに使用されている。

(7) ふっ素（F）

ふっ素（F）は原子番号 9、原子量 18.998 の最も軽いハロゲン元素であり、空気、海水、地下水、土壌中などに存在し、海洋の魚介類・海藻などにも含まれる。地殻内の平均濃度は 625 mg/kg 程度とされ、ふっ素鉱物としては国内では主に蛍石（CaF_2）として、他に氷晶石（Na_3AlF_6）やふっ素リン灰石（$Ca_5(PO_4)_3F$）などの鉱物として存在する。また、花崗岩類の黒雲母中に高濃度で含まれることもある[5)]。海水中には 1.3 mg/L 程度が含まれる。カ

ルシウムイオンの少ないアルカリ性の地下水中で溶存しやすい傾向にあり、断層破砕帯や温泉地帯の深層地下水に環境基準値（0.8 mg/L（令和 4 年 4 月 1 日現在））を超える高いふっ素濃度を示すものがある。これに対して河川水、湖水に含まれる場合は、ほとんどが 0.1 mg/L 以下である。海域で堆積した泥質岩などにも多く含まれるほか、熱水変質の影響を受けた地域の岩石にも含まれることがある。

海水中に含まれることから、海産の魚介類、海草に多く含まれ（2～10 mg/kg 程度）、シバエビ・メザシなどで高い値（20～50 mg/kg）を示す。茶葉（緑茶・紅茶とも）は 200～500 mg/kg（乾燥状態）の高い濃度を示すが、飲用で抽出されたお茶ではその濃度が低く、0.2～0.7 mg/L 程度である。

適量のふっ素摂取は虫歯予防の効果があるとされ、欧米では水道水にふっ素添加を行っている国もある。0.9～1.2 mg/L の濃度の飲用水を継続して摂取すると 12～46 %の割合で軽度の斑状歯が発生するとされ、1.4 mg/L 以上で骨へのふっ素沈着の発生率や骨折リスクが増加するとされる。体内でふっ素は甲状腺、動脈、腎臓などで濃集し、尿から排泄される。骨や歯に吸収されたふっ素はほぼ固定される傾向にある。

ふっ素は、ふっ素ガスやふっ化水素酸などとして、虫歯予防表面処理剤、ふっ素樹脂原料、ガラスの表面加工、半導体のエッチング処理、金属表面処理、代替フロンの原料などで工業的に広く利用されている。近年、リン肥料に混在して環境中に増加する傾向がある。

(8) ほう素（B）

ほう素（B）は原子番号 5、原子量 10.811 の元素である。地殻中のほう素の平均全含有量は 10 mg/kg、海水中には 4.5 mg/L 程度含まれており、植物および動物の必須元素である。天然でのほう素は、ほう砂（$Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$）など塩湖が干上がり形成される蒸発岩中のほう酸塩鉱物として産出し、また珪酸塩鉱物では電気石属（例えば、鉄電気石：$NaFe_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$）に含まれる。海水中に一般的に含まれるため、海域で形成された細粒堆積物中に多く含まれ、海成泥岩・粘土では 100 mg/kg 程度を含むことがある。国内の河川水、地下水においては環境基準値（1.0 mg/L（令和 4 年 4 月 1 日現在））の超過は稀であり、湖沼においても超過は報告されていない。温泉水にはほう素を多く含むものがあり、含有量が 10 mg/L を超える温泉は全国で 200 以上、源泉数で 1,300 箇所以上あるとされる [6]。ほう素は pH7.5～9.0 で堆積粒子などへ吸着されやすく、土壌堆積物に吸着して存在することが多い。環境中での移動は、海水の蒸発散・火山作用で大気中に放出されるほか、海成泥質岩の風化から土壌・水域への移動などが生じる。人体への影響として中枢神経障害、腸障害、皮膚紅疹などが生じる。工業的には、鉄合金などの硬度増加剤、原子炉中性子吸収剤、ガラスや陶器への添加、金属表面処理、電気機器、印刷材料などで使用される。

【引用文献】

1) Mason, B.: Principles of Geochemistry, 3rd ed., Wiley, 1966.

2) 地学団体研究会編：新版地学事典，平凡社，1996.

3) Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y.: Young upper crustal chemical composition of orogenic Japan Arc. Geochemistry Geophysics and Geosystem, 1, Paper No. 2000GC000083, 2000.
4) 今井登ほか：日本の地球化学図，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2004.
5) 日本土壌協会：土壌汚染環境基準設定調査―カドミウム等重金属自然賦存量調査解析（昭和 59 年 3 月）―, 1984.
6) 島田允堯：自然由来重金属と環境汚染–応用地質学・地球化学的データバンク–, 愛智出版, 2014.

【参考文献】

浅見輝男：改訂増補データで示す–日本土壌の有害金属汚染, アグネ技術センター, 2010.
土木研究所・応用地質・大成建設・三信建設工業・住鉱コンサルタント・日本工営 ：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書 建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版），土木研究所共同研究報告書，No.358，2007.
化学物質評価研究機構：化学物質ハザードデータ集評価シートリスト，2001, http://www.cerij.or.jp/db/date_sheet_list/list_sideindex_cot.html.
国土交通省セメント系固化処理土検討委員会：セメント系固化処理土に関する検討最終報告書，2003.
島田允堯：自然由来重金属と環境汚染–応用地質学・地球化学的データバンク–, 愛智出版, 2014.
湊 秀雄・日本地質学会環境地質研究委員会：砒素をめぐる環境問題，東海大学出版会，1998.
産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センター：詳細リスク評価書「鉛」・「カドミウム」・「六価クロム」．http://unit.aist.go.jp/riss/crm/mainmenu/1.html，丸善，2006-2008.
The International Programme on Chemical Safety Environmental Health Criteria Monographs, Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations, 1976-2001, http://www.inchem.org/pages/ehc.html.

２．自然由来の重金属等の分布と溶出特性

岩石・土壌に含まれる自然由来の重金属等は、一般に人為由来の汚染と比較して、広範囲かつ低濃度に分布する傾向がある。しかし、火山活動・堆積作用など自然環境に影響を受けて濃集する地域がある。日本の国土は、環太平洋域の変動帯に位置しており、プレート収束帯に形成された島弧であるため、火山活動や地殻変動の活発な地帯である。このため、金属鉱山・鉱床地域・火山地帯や特定の地質には高い濃度で偏在することがある。

また、岩石中に含まれる硫化鉱物の酸化に伴い、重金属等の溶出が増大することがある。

前節では身近に存在する自然由来の重金属等の一般的な性質や含有状況などを概説したが、本節では日本における自然地層や岩石中の重金属等の分布状況について概説する。日本における各重金属等の岩種ごと、河川、湖沼、地下水、温泉など水圏ごとのより詳細な情報については、島田（2014）による解説書が参考となる。

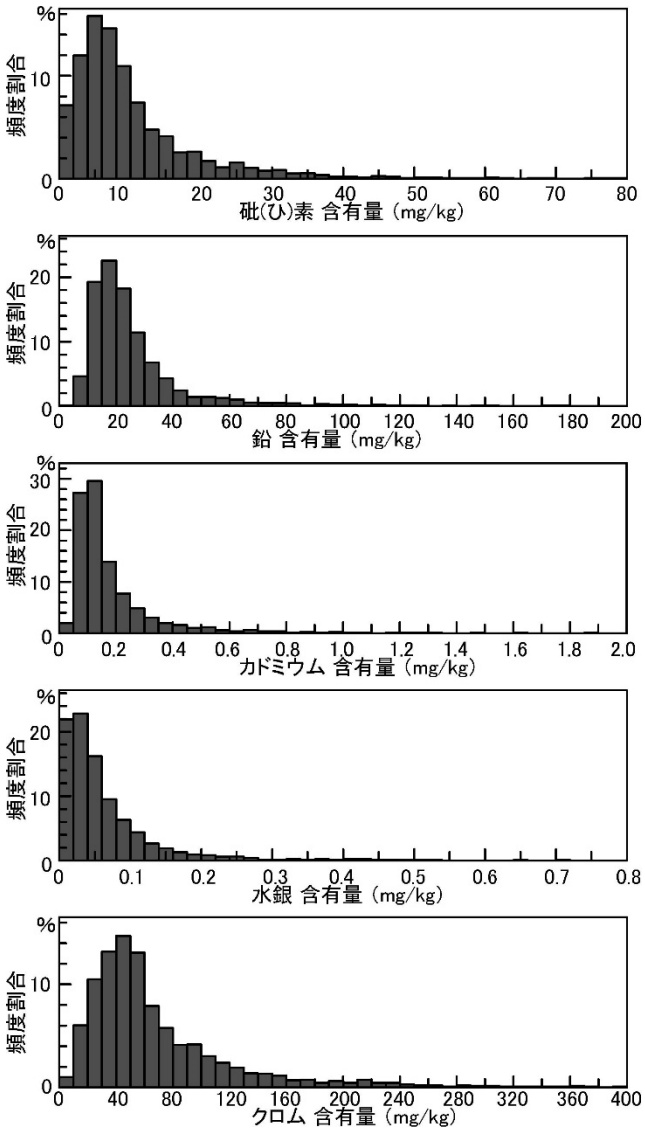


図-1　日本の河川堆積物における重金属等の濃度分布

（今井ほか[1]より作成）

ここでいう含有量は、おおむね本マニュアルの全含有量に相当する。

なお、全国元素分布（「日本の地球化学図」[1]）データベースを基にして作成した各元素の濃度分布を**図-1**、**図-2** に、重金属等を産出した記録のある鉱山の分布[2]を**図-3** に示す。

(1) 砒素（As）

砒素は、鉱脈鉱床や黒鉱鉱床などの火山活動に伴う熱水性の金属鉱床に高い濃度で含まれ、これまでも採鉱・精錬の過程で環境中に拡散し、問題となってきた。**図-2** に示す河川堆積物の砒素全含有量で高濃度を示す地域は、このような金属鉱山・鉱床（**図-3**）が位置す

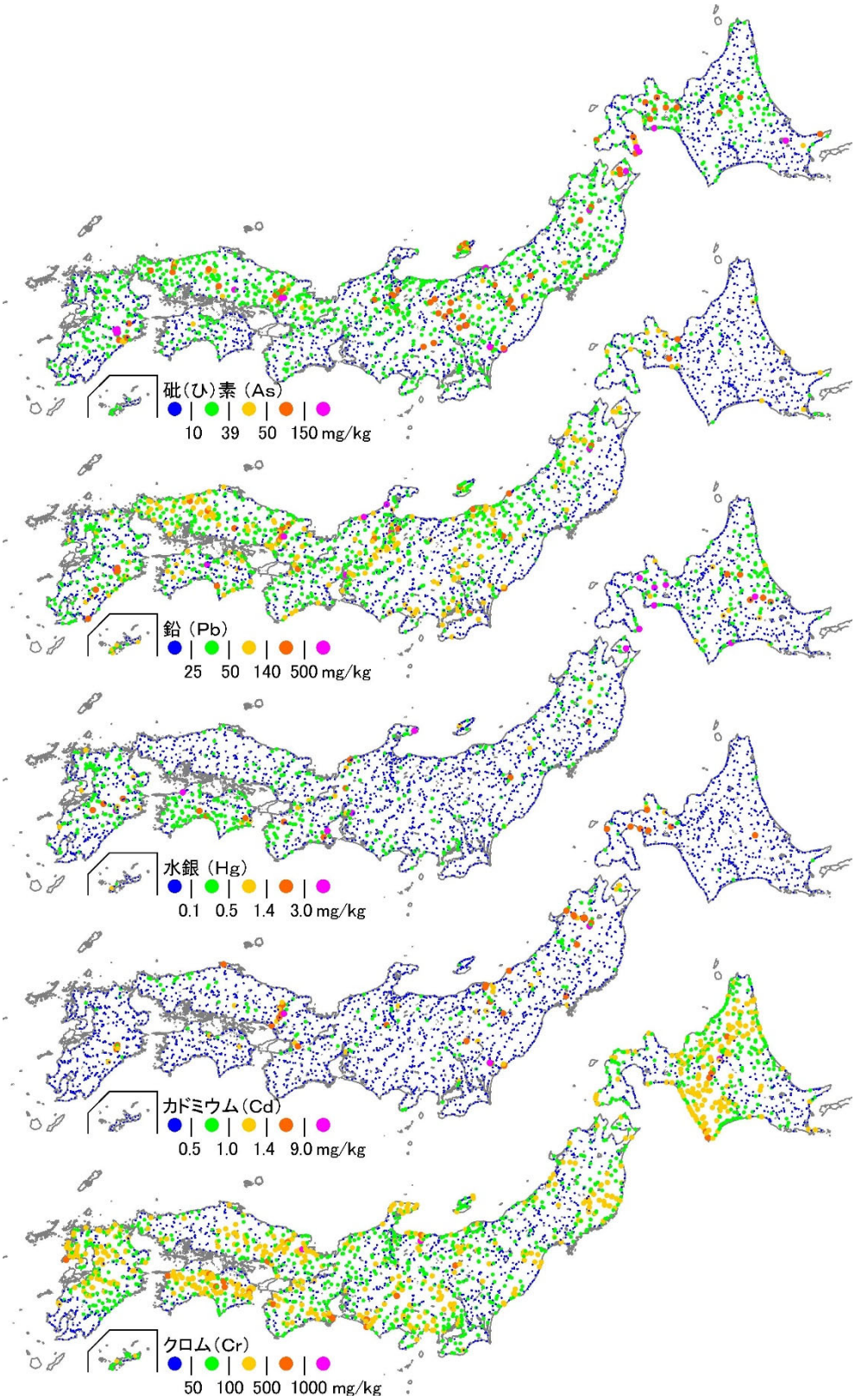


図-2　日本の河川堆積物の重金属等の含有量の分布（今井ほか [1)] より作成）

ここでいう含有量は、おおむね本マニュアルの全含有量に相当する。

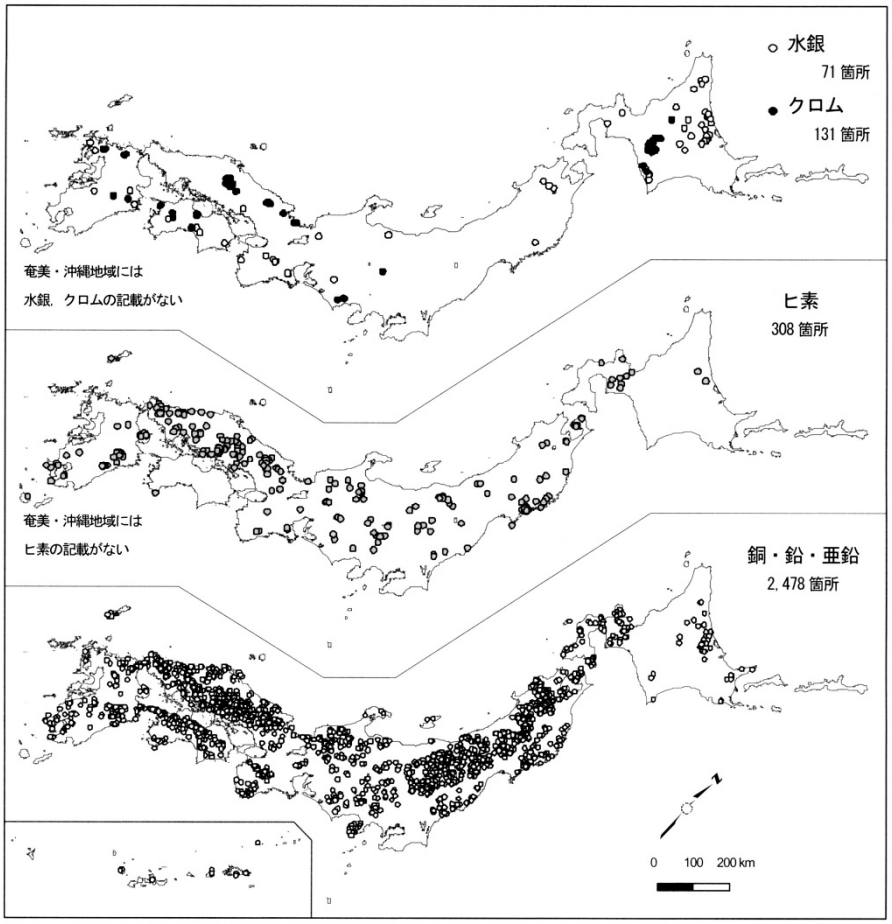


図-3　重金属等を産出した記録のある鉱山の分布 [2)]

る河川流域である。高濃度地域はこのような特異な個所に限られ、ほとんどの岩石種における全含有量は 10 mg/kg を下回る。**図-1** に示す全含有量の頻度分布をみると、数 mg/kg に最頻値があり、環境省が示す「自然的原因による含有量の上限値の目安」39 mg/kg を下回るものがほとんどである。砒素を含む地層・岩石としては、海成の堆積岩類において濃度は高くないが一般的に含まれる。海成泥質岩中には還元環境で形成される黄鉄鉱（パイライト）が含まれ、その中に砒素が随伴して含まれる。これらが風化生成物である硫酸塩となることで、地下水などへ溶出しやすくなる。酸化を受けた岩石などでは、砒素は酸化鉄-水酸化鉄、粘土鉱物、有機物などに吸着されて存在し、酸化-還元状態や pH、鉄やカルシウムなどの共存元素濃度の変化によって溶出の挙動が変化する。このように砒素全含有量のそれほど高くない堆積岩類でも土壌溶出量基準を上回って溶出する場合が多数みられる。海岸平野下の沖積層や洪積層においても自然由来の砒素がしばしば土壌溶出量基準を上回る。**図-4** に大阪平野の沖積層での事例 [3)]を示す。沖積層中の砒素全含有量は 10 mg/kg 程度までがほとんどである。一方、沖積粘土層の上端部で土壌溶出量が大きくなる傾向がみられるものの、土壌溶出量基準の 10 倍を超えることはほとんどない。

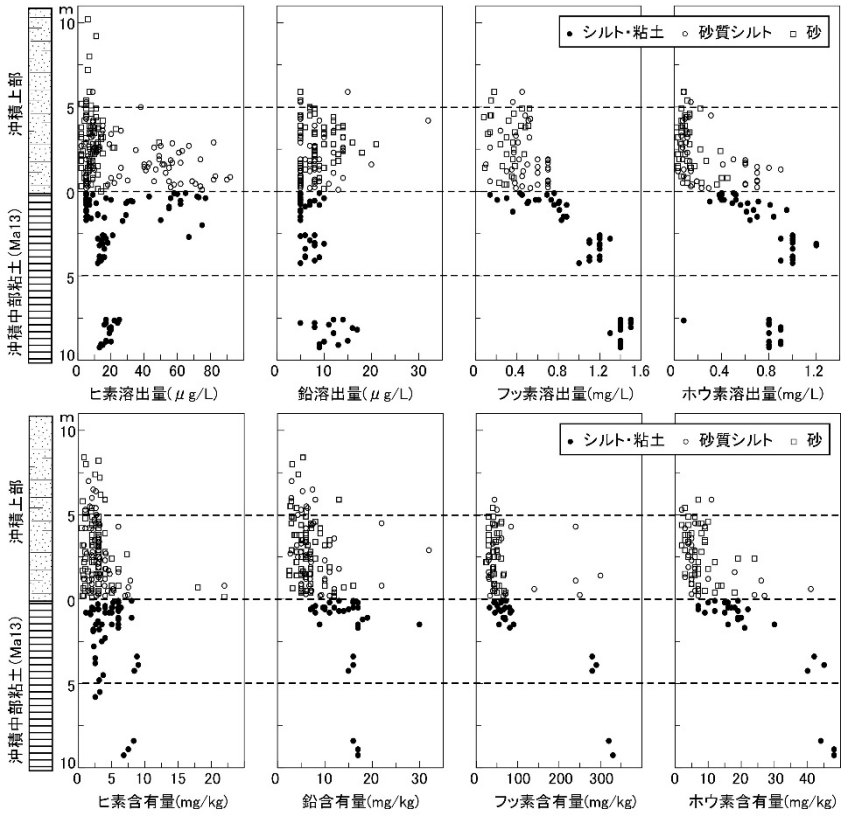


図-4　大阪平野主要部（大阪市域）沖積層の砒素・鉛・ふっ素・ほう素の溶出量・含有量の分布傾向 [3)]

大阪市内 6 地域の深度方向調査 61 孔の分析結果をまとめた。盛土での分析結果は除いてある。溶出量は土壌溶出量試験結果、含有量は底質調査方法による全含有量試験結果を示す。沖積中部粘土上限を基準として深度調整をしている。

(2) 鉛（Pb）・カドミウム（Cd）

鉛・カドミウムも砒素と類似してある種の金属鉱床に高い濃度で含まれる。鉛・カドミウムは銅、亜鉛、錫などの金属鉱床に共在する。これらを産する鉱山は国内のほぼ全域に分布していて、グリーンタフが分布する地域（黒鉱鉱床）、三波川変成岩類の分布地域（特にキースラーガー鉱床）、鉱脈型の熱水鉱床、堆積岩が火成岩によって熱変成を受けてできたスカルン鉱床がその採掘対象である。このような金属鉱山・鉱床地域では極めて高い全含有量を示すが、河川堆積物の鉛の全含有量分布でみると、その全含有量は、一般的に 50 mg/kg を下回る。**図-1** に示す全含有量の頻度分布をみると、20 mg/kg 前後に最頻値があり、環境省が示す「自然的原因による含有量の上限値の目安」である 140 mg/kg を下回るものがほとんどである。カドミウムの全含有量も多くが 0.5 mg/kg を下回り、その最頻値は 0.1 mg/kg 程度で、「自然的原因による含有量の上限値の目安」である 1.4 mg/kg を下回る。鉛の場合は、一般的な堆積岩にも低濃度で含有しているが、しばしば土壌溶出量基準を上回る。平野

部に分布する沖積層をはじめとする第四紀堆積層においても土壌溶出量基準を数倍程度超過することがある（**図-4**）。

(3) ふっ素（F）・ほう素（B）

ふっ素・ほう素はいずれも海水中に一般的に含まれる元素である。このため特に、海域で堆積した細粒堆積岩に含有することが多いが、土壌含有量基準を超過することはほとんどない。**図-4** に示す大阪平野沖積層の事例[3]でも、海成粘土層である沖積中部粘土（Ma13）で全含有量が相対的に高く、土壌溶出量基準を上回るが、その 10 倍を超えることは稀である。これは、細粒堆積物の粒子表面や含まれる有機物に吸着していたこれらの元素が比較的溶出しやすいためである。日本列島を構成する堆積岩の多くは海域で形成された地層であるため、これらの元素を含むことが多い。また、河川の河口付近の汽水域では、海水の影響を受けるため、これらの河川堆積物中にも含まれることが多い。さらに、これらの元素は熱水の影響を受けた岩石にも含まれる場合があり、特異的に全含有量が高く、かつ高い溶出量を示すこともある。

(4) 水銀（Hg）

水銀を産出する鉱山は、熱水性の金属鉱山・鉱床で、金、銀、鉛、亜鉛に随伴して分布することが多い。堆積岩などに含まれる場合にも、火山岩の隣接地域など熱水脈によって濃集したものがある。このような鉱山は北海道の北東部、東北の一部、紀伊半島から東海地域、九州南部から四国中南部などに分布し、火山活動に関連した熱水変質地帯である。このほか、断層や裂かに沿って地殻中の水銀蒸気が上昇し地下水に混入したと考えられる事例[4), 5)など]がある。河川堆積物の全含有量（**図-1**）では、一般に0.3 mg/kgより低く、最頻値は0.03 mg/kg前後である。ほぼ上記の地質条件に相当する地域で特異的に高い全含有量を示す。

(5) セレン（Se）

セレンは化学的性質が硫黄に類似するため、硫黄、硫化物中に少量含まれて（わずかに硫黄を置換して）産出される。また、セレンは生物制御により有機物（炭質物）と容易に結合する性質があるため、堆積岩中の炭質物や石炭中に含まれて産出することもある。一般的な火成岩や変成岩では比較的その全含有量は少ない。このような傾向から、日本においては、硫化物を主とする金属鉱山・鉱床周辺や炭鉱地帯などで特異的に高い濃度で分布する可能性がある。また、泥質岩などでは全含有量は著しく小さいものの溶出試験によって検出される事例がある。

(6) クロム（Cr）

クロムはマントルかんらん岩を起源とする超塩基性岩体（かんらん岩・蛇紋岩）に多く含まれ、一部にクロム鉄鉱が濃集したクロム鉱床を伴う。超塩基性岩体は、北海道南部や中国山地中央部・四国山地から九州山地にかけて帯状に分布する。河川堆積物のクロム全含有量の高い地域も、ほぼこのようなクロムを産出する鉱山周辺の河川流域に相当している。その頻度分布は、250 mg/kg 程度以下がほとんどで、40 mg/kg 前後に最頻値がある。前節で述

べたように、これらのクロムはほとんど三価クロムであって、六価クロムではない。但し、蛇紋岩での六価クロムの溶出事例も見られる[6),7)]。

【引用文献】

1) 今井登ほか：日本の地球化学図，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2004.

2) 佐々木靖人，阿南修司，伊藤政美，岩石由来の環境汚染対策研究グループ：土木分野における自然由来の重金属問題への対応，地質と調査，'06 第 2 号，pp.8-13，2006.

3) 関西圏地盤研究会：自然地盤に含まれる重金属類．新関西地盤 -大阪平野から大阪湾-2007，pp.229-232，2007.

4) 上野祐子ほか:城南区における地下水水銀汚染事例, 福岡県保健環境研究所報, Vol.30, pp.117-121, 2004, http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/12997/1/H20chikasuikaigishiryou1.pdf

5) 吉田直史ほか：石川市における地下水水銀汚染について，沖縄県衛生環境研究所報，Vol.39，pp.55-61，2005.

6) 千葉県嶺岡帯六価クロム調査班:嶺岡山系蛇紋岩帯における湧水中の Cr(VI)について，地質学雑誌，Vol.84，pp.721-727，1978.

7) 藤本千鶴，中川保祐，豊倉善夫，三好洋：嶺岡山系蛇紋岩からの六価クロムの溶出，日本土壌肥料学雑誌，Vol.50，pp.164-166，1979.

【参考文献】

土木研究所，応用地質，大成建設，三信建設工業，住鉱コンサルタント，日本工営：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書　建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版），土木研究所共同研究報告書，No.358，2007.

島田允堯：自然由来重金属と環境汚染−応用地質学・地球化学的データバンク−，愛智出版，2014.

３．各重金属等の基準値設定根拠（基準値は令和 4 年 4 月 1 日現在）

(1) カドミウム

カドミウムのヒトの経口致死量は 300～3,500 mg と推定され、成人に対して健康影響を及ぼさない摂取量は 3 mg と考えられている。カドミウムが最も影響を及ぼす器官は腎臓とされており、まず、低分子量タンパク質の尿中排泄量の増大を招き、さらにカドミウムの蓄積が増えると骨からのミネラルの再吸収を引き起こし、腎臓結石や骨軟化症が発症する。1972 年の国際連合食糧農業機関（FAO）と世界保健機関（WHO）のジョイント委員会（JECFA）では体重 1 kg 当たりの耐容 1 日摂取量（TDI）値として 1 μg/kg 体重/日、暫定耐容週間摂取量（PTWI） として 7 μg/kg 体重/週を設定しており、2005 年の見直しにおいても、現行の PTWI 値を維持することにした。この PTWI 値に基づき、水の寄与率 10 %、体重 50 kg、飲料水量 2 L/日として、2011 年 10 月 27 日より我が国のカドミウムの水質環境基準値は 0.01 mg/L から 0.003 mg/L に改正された。また、2019 年 4 月 1 日の改正土壌汚染対策法の全面施行と同時に、土壌溶出量基準が 0.003 mg/L、第二溶出量基準が 0.09 mg/L、土壌含有量基準が 45 mg/kg へと改められた。土壌含有量基準の設定値は、汚染土壌からのカドミウム化合物の摂取量が、現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定されている。

カドミウムが吸入経路による発がん性をもつ証拠はいくつかあり、国際がん研究機関（IARC）はカドミウムとカドミウム化合物を Group 1（ヒトに対して発がん性がある）に分類している（2012 年）。しかし、経口投与による発がん性に関しては、限られた知見しかない。

(2) 六価クロム

六価クロムは呼吸器・消化器系障害や腎臓障害を引き起こすとされ、1958 年に WHO により六価クロムの健康影響に基づく最大許容濃度として 0.05 mg/L （総クロムとして）が提案されて以来、2011 年の WHO 飲料水水質ガイドライン（第 4 版）においても、暫定ガイドライン値として引き続き 0.05 mg/L に設定されている。また、六価クロムに関して人の吸入暴露による肺がん発生が認められているが、経口毒性試験では顕著な毒性も腫瘍も認められていない。一方、金属クロムと三価クロムに関しては、顕著な毒性は認められないため、クロムの水質環境基準を定める際には六価のものに着目することが妥当とされている。この WHO の見解に基づき、我が国においても六価クロムの水質環境基準値は 0.05 mg/L 以下とされてきたが、2018 年 9 月に内閣府食品安全委員会において六価クロムの耐容一日摂取量（TDI）が 1.1 μg/kg 体重/日と設定されたことを勘案し、2021 年 10 月 7 日に公共用水域及び地下水の水質汚濁に係る環境基準値が 0.02 mg/L に改正された。2022 年 4 月 1 日時点では、六価クロム化合物の地下水環境基準が 0.02 mg/L、第二溶出量基準が 0.15 mg/L、土壌含有量基準値は 250 mg/kg と設定されている。

ただし六価クロムについては、大気から吸入暴露に伴う鼻粘膜等への直接的影響が懸念されるのに対し、土壌含有量基準で考慮するのは経口暴露に伴う影響であることから、汚染

土壌の飛散による影響について留意する必要がある。気道からの吸入による発がん性のため、IARC(2012)はクロム(VI)を Group1（ヒトに対して発がん性がある）に分類しているが、IARC(1990)では金属クロムとクロム（Ⅲ）は、ヒトおよび実験動物での発がん性に関しては Group 3（ヒトに対する発がん性について分類することができない）に分類している。

(3) 総水銀

我が国における現行の総水銀の水質環境基準値（0.0005 mg/L）は、魚介類の食品としての暫定的規制値（総水銀 0.4 ppm、メチル水銀 0.3 ppm）を越えない環境濃度として設定されており、これは環境水質が 0.0005 mg/L から 0.001 mg/L 程度であれば、十分な安全率を持って魚介類中の水銀含有量が暫定的規制値以下にとどまるという専門家会議での検討結果に基づいている。また、アルキル水銀の水質環境基準値は、魚介類による生物濃縮を考慮すればできるだけ低いことが望ましく、検出されないこと（検出限界 0.0005 mg/L）とされている。

1972 年の JECFA では総水銀の暫定耐容週間摂取量（PTWI）を 5 μg/kg 体重/週、メチル水銀で 3.3 μg/kg 体重/週と定めた。この PTWI のデータから、無機水銀が生体内や環境中でメチル水銀に変化する可能性も考慮し、より安全側に立った観点で総水銀の水質基準値を算出している。水銀の主な暴露は食物からであり、PTWI の 10%を飲用水の寄与率として計算すると、総水銀の飲用水の規制値は 0.001 mg/L 以下となる。2011 年の WHO の総水銀のガイドライン値として 0.006 mg/L が採用されているが、わが国ではそれ以前からより厳しい 0.0005 mg/L が採用されており、安全性と基準の継続性を考慮して現在もその値が採用されている。これに準じて、土壌汚染対策法における土壌溶出量基準は 0.0005 mg/L、第二溶出量基準は 0.005 mg/L とされ、土壌からのメチル水銀化合物の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定された要措置レベルから、土壌含有量基準は 15 mg/kg と定められている。

IARC(1993)では、メチル水銀化合物は Group 2B（ヒトに対する発がんの可能性がある）に分類されているが、現時点では発がん性に基づくメチル水銀化合物の実質安全量（VSD）等を導き出すことはできない状況にある。また、金属水銀と無機水銀化合物は Group 3（ヒトに対する発がん性について分類することができない）に分類されている。

(4) セレン

ヒトの長期間のセレン暴露による毒性影響は、爪、頭髪、肝臓でみられ、中国のデータによると、臨床生化学的徴候が 0.8 mg/日の摂取でみられる。肝臓タンパク質合成への影響も、セレンを 0.25 mg/日（全暴露経路からの総 1 日摂取量は約 0.35 mg）投与されたリウマチ様関節炎患者の小グループでみられた。セレンの毒性の臨床生化学的徴候は、食物からの平均 1 日摂取量が 4 μg/kg 体重/日の 142 人のグループでは報告されなかった。これらの結果から、ヒトの無毒性量（NOAEL）を飲用水中の可溶セレンが食物中の有機化合セレンより有毒であると仮定し、約 4 μg/kg 体重/日と推定している。一方、セレンはヒトの必須元素であり、WHO によると推奨 1 日摂取量は成人で 0.9 μg/kg 体重/日 であるの

で、NOAEL＝TDI として水質環境基準値を算出する必要がある。したがって、TDI の飲料水へ寄与率を 10%とし、体重 50 kg の人が 1 日 2 L 飲むと仮定して得られた評価値 0.01 mg/L がセレンの水質環境基準値となっている。

汚染土壌からのセレン化合物の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定すると、土壌含有量基準値の設定値は 150 mg/kg となる。

飲用水中には存在しないセレン硫化物を除き、セレンには発がん性はみられないとされ、IARC(1987)はセレンとセレン化合物を Group 3 （ヒトに対する発がん性について分類することができない）としている。セレン化合物のラットへの長期間暴露では、成長遅延と肝臓病変が引き起こされている可能性がある。

(5) 鉛

鉛は蓄積毒であるため、身体負荷増を避けなければならない物質である。JECFA は 1986 年に乳児の代謝研究で、鉛の平均 1 日摂取量 3～4 μg/kg 体重/日では血中鉛レベルの増加には関連がないが、5 μg/kg 体重/日の摂取で鉛が貯留することを示し、幼児に対する PTWI として 25 μg/kg 体重/週（TDI 相当値 3.5 μg/kg 体重/日）を設定した。これより WHO で定めた鉛の水質基準のガイドライン値は 0.01 mg/L となっている。この値は、体重 5 kg の人工栄養の乳児が 1 日に 0.75 L の飲料水を消費するものとし、飲料水からの鉛摂取量を 5 %と仮定して得られるものである。鉛に対し最も感受性の強い乳幼児を防護する値なので、幼児に対する PTWI 値により他の年齢群も防護できるとしている。我が国では、水道管に鉛管が多く使われてきたため、かつて水質環境基準は 0.1 mg/L であったが、1994 年に改定され、現在は 0.01 mg/L となっている。

汚染土壌からの鉛化合物の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定すると、土壌含有量基準値の設定値は 150 mg/kg となる。

ヒトへの鉛の発がん性は、研究数が限られているものの、鉛塩摂取と腎臓腫瘍の関係が実験的に示されており、IARC(1987)では鉛は Group 2B（ヒトに対する発がんの可能性がある）に、IARC(2006)では無機鉛化合物は Group 2A（ヒトに対しておそらく発がん性がある）、有機鉛化合物は Group 3（ヒトに対する発がん性について分類することができない）に分類されている。

(6) 砒素

世界各地で砒素汚染井戸水の摂取による慢性の砒素中毒症が発生しており、皮膚の異常・末梢性神経症・皮膚がん・末梢の循環不全などが報告されている。JECFA は、各種疫学調査に基づく砒素の PTWI 値として 15 μg/kg を設定した。これに基づき WHO では、水の寄与率 20 %、体重 50 kg、飲料水量 2 L/day として、砒素の水質基準のガイドライン値を 0.01 mg/L とした。我が国における水質環境基準では、以前は慢性中毒の危険から安全性を見込んで 0.05 mg/L 以下とされていたが、WHO での飲料水の水質ガイドラインの変更やその後の新たな知見の集積も踏まえて、1992 年に、0.01 mg/L 以下に改正された。

汚染土壌からの砒素化合物の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度とな

るよう算定すると、土壌含有量基準値の設定値は 150 mg/kg となる。

砒素と無機砒素化合物は、ヒトにおける発がん性の十分な証拠と動物における発がん性の限られた知見に基づき、IARC(2012)によって Group 1（ヒトに対して発がん性がある）に分類されている。飲料水からの砒素摂取量と発がんとの関係についてはかなりのデータが蓄積されているものの、現時点では発がん性に基づく砒素の TDI または実質安全量（VSD）を導き出すことは困難である。今後、がんを引き起こす砒素の毒性発現メカニズムが解明されることにより、砒素の基準値が変更される可能性がある。

(7) ふっ素

ふっ素は、必須元素と考えられているが、必ずしも明確な根拠は示されておらず、最小栄養学的必須摂取量も設定されていない。その一方、特に子どもにおいて、飲用水濃度 2 mg/L 以上で虫歯の予防効果が増強されることが多くの疫学研究により報告されており、この作用は少なくとも約 0.5 mg/L 以上の濃度が必要であるとされている。一方、国内外の疫学調査から、0.9～1.2 mg/L の範囲の飲料水中のふっ素濃度により、軽度の斑状歯が 12～46 % のヒトに発生することが報告されている。我が国では、1958 年の水質基準に関する厚生省令も勘案し、ふっ素の水質環境基準が 0.8 mg/L に定められ、現在に至っている。これに対し、WHO によるふっ素の飲料水ガイドラインは 1.5 mg/L、アメリカ環境保護庁（EPA）の暫定飲料水基準では 2 mg/L、EU では 1.5 mg/L となっている。

汚染土壌からのふっ素の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定すると、土壌含有量基準値の設定値は 4,000 mg/kg となる。

高濃度の飲料水濃度では、骨へのふっ素沈着が認められ、骨の内部構造変化も引き起こすことが報告されている。また、動物実験において決定的な発がん性を示すデータはなく、IARC においてもヒトへの発がん性に関し有効な知見は見当たらないとされている。

(8) ほう素

実験動物へのほう酸あるいはほう砂の短期あるいは長期間暴露実験により、雄の生殖器官への毒性が共通して認められ、精巣傷害がラット、マウス、イヌへほう酸またはほう砂を食餌または飲料水に混ぜて投与したときに確認されている。1996 年に報告されたラットを用いた催奇形性試験による最大無作用量（NOAEL）の 9.6 mg/kg 体重/日に基づき、わが国ではほう素の TDI 値として 0.096 mg/kg 体重/日を採用している。この TDI 値から水質環境基準値を求める際に、他の元素と異なる水の寄与率が使われている。ほう素の場合、食品経由に対する飲用水経由の摂取率が島嶼地域など海水淡水化を行っている地域で極めて高くなっていることから、水の寄与率は 40 %として計算される。したがって、上記 TDI 値に基づき、体重 50kg、飲用水量 2 L/日として、ほう素の水質環境基準値は 1 mg/L と算出されている。

汚染土壌からのほう素の摂取量が現行の飲用水からの理論最大摂取量と同程度となるよう算定すると、土壌含有量基準値の設定値は 4,000 mg/kg となる。

なお、ほう素に関する多くの変異原性試験では陰性の結果であり、ほう酸あるいはほう

砂には遺伝子障害性が認められず、ラットとマウスを用いた長期試験では腫瘍発生の増加は認められていない。

【参考文献】

●水質環境基準の設定根拠全般

中央環境審議会：環境基準項目等の設定根拠等，中央環境審議会（平成 16 年 2 月 26 日）「水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の見直しについて（第 1 次答申)」別紙 2，2004，http://www.env.go.jp/council/toshin/t090-h1510/02.pdf

厚生科学審議会生活環境水道部会水質管理専門委員会：水質基準の見直し等について，厚生科学審議会（平成 15 年 4 月 28 日）「水道法第 4 条第 2 項の規定に基づき定められる水質基準の見直しを行うことについて（答申）」別紙，2003，http://www.mhlw.go.jp/shingi/2003/04/dl/s0428-4e.pdf

国立保健医療科学院：WHO 飲料水水質ガイドライン 第 4 版（日本語版），2012. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/who_gdwq_japanese_4thed.pdf

●土壌汚染対策法の基準の考え方

土壌の含有量リスク評価検討会：土壌の直接摂取によるリスク評価等について，中央環境審議会（平成14年9月20日）「土壌汚染対策法に係る技術的事項について（答申）」別添資料，2001，http://www.env.go.jp/council/toshin/t10-h1407/08.pdf

土壌環境施策に関するあり方懇談会：指定基準値の設定の考え方，土壌環境施策に関するあり方懇談会（第6回）資料2，2008，http://www.env.go.jp/water/dojo/sesaku_kondan/06/mat02.pdf

参考資料３　本マニュアルの考え方に基づく合理的な対応の例

本マニュアルの考え方に基づく合理的な対応の例を**表-1** に示す。

表-1　本マニュアルの考え方に基づく合理的な対応の例

事業種	山岳トンネル工事	切土工事	治山工事
調査開始の段階	事業計画段階	概略調査段階	詳細設計段階
調査開始の契機	近傍のトンネルで長期間にわたって酸性坑排水の発生が認められていたことから、発生土からの重金属等の溶出の可能性について調査を実施。	発生土量が膨大で、大半の発生土を事業地外で利用などをする必要があったことから、発生土からの重金属等の溶出の可能性について調査を実施。	植生工のための調査中、土壌酸度測定で極強酸性土が見つかったことから、発生土からの重金属等の溶出の可能性について調査を実施。
事業の制約条件	道路改修工事のため、大まかな場所については変更できないが、道路の線形改良も含めて事業箇所の調整が可能。 また、発生土は道路盛土として利用を計画したが、急峻な地形のため盛土適地がほとんどなかった。 なお、事業地周辺には人家等はなく、リスクレベルは全般に低い。	掘削箇所、土量については変更の余地がない。また、発生土量が膨大でほとんどを当該事業以外で利用などをする必要から、受入先の調整に困難が予想された。	地すべりの頭部排土工を行い、発生土を事業地外に搬出する計画であるが、工事開始までの時間的猶予があり、調査や設計変更の余地があった。 事業地周辺には人家等はなく、リスクレベルは全般に低いと考えられるが、事業区域の流末は農業用水路であり、水質への影響が懸念された。
地質の概要	新第三紀の火山岩類で、熱水変質を伴う。	主として新第三紀の海成堆積岩類。	新第三紀の凝灰岩など（グリーンタフ）で、熱水変質を伴う。
対応の概要	＜調査＞ 地質踏査やボーリング試料の採取・分析の結果から、事業地周辺の地山には不規則に変質帯が分布することが分かった。また現道トンネルからの短尺水平ボーリングを含め、土研式雨水曝露試験を実施。 ＜評価＞ 土研式雨水曝露試験結果から、多くの試料で酸性水の発生とともに重金属等の溶出が顕著であることがわかった。 ＜対策＞ 発生土については分別の手間を考え全量対策とし、発生土量を最小に抑えられるルートに変更した。 要対策土は地すべり等の懸念がない場所を選定し、2重の遮水シート封じ込め工により対策した。	＜調査＞ 地質踏査などから地質構造を推定し、適切なボーリング配置により、出現するすべての地質を採取した。そして42の地質区分ごとに複数試料を採取・分析し、それぞれ要管理土かどうかを評価した。 また、要管理土と判定された40の地質区分について土研式雨水曝露試験を行い、発生源濃度評価を実施した。 ＜評価＞ 発生源評価および搬出先候補地におけるリスク評価の結果、要管理土のうち対策が必要な土は、その５分の１程度となる見込みで、大幅な対策コストの縮減ができることが分かった。 ＜対策＞ 搬出時管理土は、事業用地内での利用のほか、搬出時管理土の取扱について理解する受入事業者を模索している。	＜調査＞ 表土およびボーリング試料の採取・分析の結果、事業地内の表土についても高濃度の重金属等の溶出が見られた。そのため実現象再現溶出試験の位置づけで事業地内の表流水、地下水の観測を1年程度実施した。 ＜評価＞ 事業地内の小流域ごとに重金属等の溶出の程度が大きく異なるものの、流末では降雨直後を除いて水質に問題がないことが分かった。すなわち、発生土を事業地内に存置することについては総体として問題が少ないが、降雨時など、土粒子の移動に伴って重金属等が移動する懸念があるものと評価した。 ＜対策＞ 発生土を事業地内に盛土し、その上部には良質土で覆土を行うこと、また工事中の濁水対策を重点的に実施することとした。

参考資料４　トンネル工事および切土工事における一般的な調査と要管理土の対応のための調査との対応関係

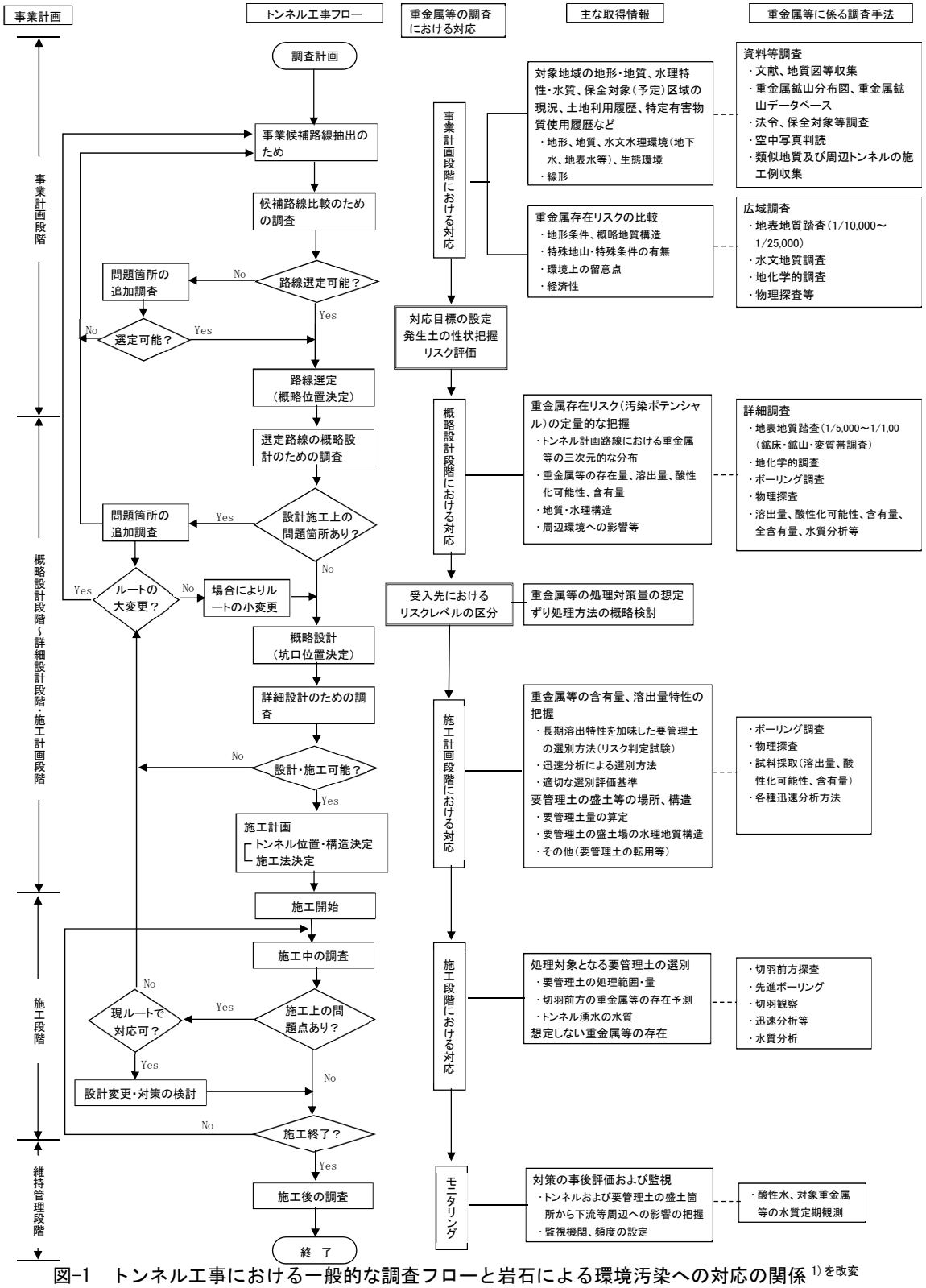


図-1　トンネル工事における一般的な調査フローと岩石による環境汚染への対応の関係 [1)] を改変

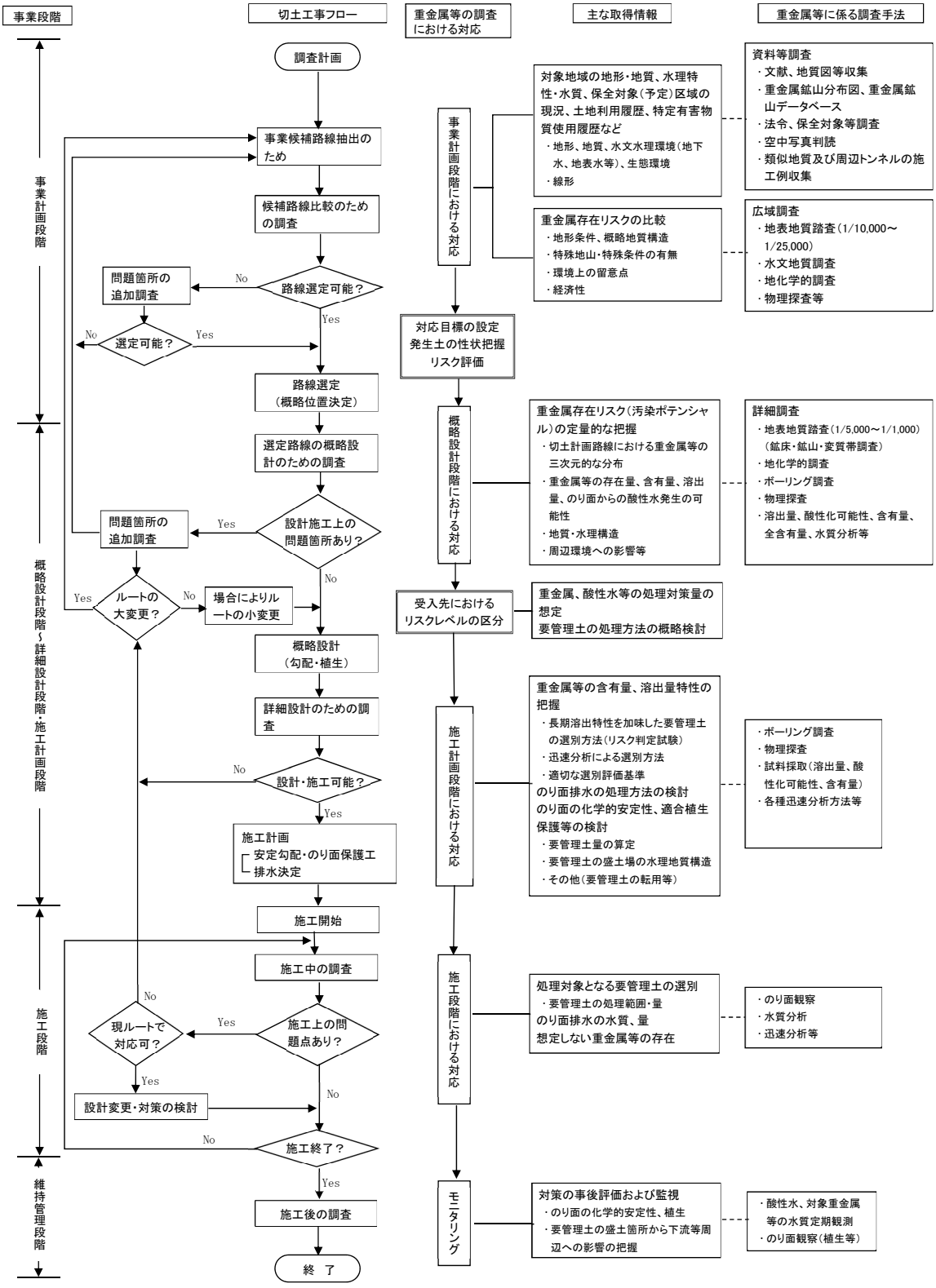


図-2　切土工事における一般的な調査フローと岩石による環境汚染への対応の関係 [1)] を改変

【参考文献】

1) 土木研究所，応用地質，大成建設，三信建設工業，住鉱コンサルタント，日本工営：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書　建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）．共同研究報告書，No.358，独立行政法人土木研究所，pp.21-22，2007.

参考資料５　環境関係法令基準値一覧

表-1　水質・地下水質関係基準(令和４年４月１日現在)

根拠法		環境基本法		ダイオキシン類対策特別措置法	水質汚濁防止法		下水道法	土壌汚染対策法
基準		水質汚濁に係る環境基準（人の健康の保護に関する環境基準）	地下水の水質汚濁に係る環境基準	ダイオキシン類環境基準	一般排水基準	地下水浄化基準	下水道法施行令	地下水基準
基準値 政令・告示等		昭和46年環境庁告示第59号別表1	平成9年環境庁告示第10号	平成11年環境庁告示第68号	昭和46年総理府令第35号別表第1	水質汚濁防止法施行規則別表第2	下水道法施行令第9条の4	土壌汚染対策法施行規則別表第2
検液の作成方法 告示等					昭和49年環境庁告示第64号	平成8年環境庁告示第55号	昭和37年厚生省・建設省令第1号	平成15年環境庁告示第17号
カドミウム及びその化合物	mg/L	≦ 0.003	≦ 0.003	－	≦ 0.03	≦ 0.003	≦ 0.03	≦ 0.003
シアン化合物（全シアン）	mg/L	検出されないこと	検出されないこと	－	≦ 1	検出されないこと	≦ 1	検出されないこと
有機燐化合物	mg/L	－	－	－	≦ 1	検出されないこと	≦ 1	検出されないこと
鉛及びその化合物	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
六価クロム化合物	mg/L	≦ 0.02	≦ 0.02	－	≦ 0.5	≦ 0.02	≦ 0.5	≦ 0.05
砒素及びその化合物	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物（総水銀）	mg/L	≦ 0.0005	≦ 0.0005	－	≦ 0.005	≦ 0.0005	≦ 0.005	≦ 0.0005
アルキル水銀化合物	mg/L	検出されないこと	検出されないこと	－	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと
ポリ塩化ビフェニル（PCB）	mg/L	検出されないこと	検出されないこと	－	≦ 0.003	検出されないこと	≦ 0.003	検出されないこと
トリクロロエチレン	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
テトラクロロエチレン	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
ジクロロメタン	mg/L	≦ 0.02	≦ 0.02	－	≦ 0.2	≦ 0.02	≦ 0.2	≦0.02
四塩化炭素	mg/L	≦ 0.002	≦ 0.002	－	≦ 0.02	≦ 0.002	≦ 0.02	≦ 0.002
クロロエチレン（塩化ビニルモノマー）	mg/L	≦ 0.002	≦ 0.002	－	－	≦ 0.002	－	≦ 0.002
1,2-ジクロロエタン	mg/L	≦ 0.004	≦ 0.004	－	≦ 0.04	≦ 0.004	≦ 0.04	≦ 0.004
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	≦ 0.1	≦ 0.1	－	≦ 1	≦ 0.1	≦ 1	≦ 0.1
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	≦ 0.04	－	－	≦ 0.4	－	≦ 0.4	－
1,2-ジクロロエチレン	mg/L	－	≦ 0.04	－	－	≦ 0.04	－	≦ 0.04
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	≦ 1	≦ 1	－	≦ 3	≦ 1	≦ 3	≦ 1
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	≦ 0.006	≦ 0.006	－	≦ 0.06	≦ 0.006	≦ 0.06	≦ 0.006
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	≦ 0.002	≦ 0.002	－	≦ 0.02	≦ 0.002	≦ 0.02	≦ 0.002
チウラム	mg/L	≦ 0.006	≦ 0.006	－	≦ 0.06	≦ 0.006	≦ 0.06	≦ 0.006
シマジン	mg/L	≦ 0.003	≦ 0.003	－	≦ 0.03	≦ 0.003	≦ 0.03	≦ 0.003
チオベンカルブ	mg/L	≦ 0.02	≦ 0.02	－	≦ 0.2	≦ 0.02	≦ 0.2	≦ 0.02
ベンゼン	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
セレン	mg/L	≦ 0.01	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	≦ 0.01
ほう素	mg/L	≦ 1	≦ 1	－	海域以外：≦10 海域：≦230	≦ 1	≦ 10 *1 ≦ 230 *2	≦ 1
ふっ素	mg/L	≦ 0.8	≦ 0.8	－	海域以外：≦8 海域：≦15	≦ 0.8	≦ 8 *1 ≦ 15 *2	≦ 0.8
1,4-ジオキサン	mg/L	≦ 0.05	≦ 0.05	－	≦ 0.5	≦ 0.05	≦ 0.5	－
フェノール類	mg/L	－	－	－	≦ 5	－	≦ 5	－
銅及びその化合物	mg/L	－	－	－	≦ 3	－	≦ 3	－
亜鉛及びその化合物	mg/L	－	－	－	≦ 2	－	≦ 2	－
鉄及びその化合物（溶解性）	mg/L	－	－	－	≦ 10	－	≦ 10	－
マンガン及びその化合物（溶解性）	mg/L	－	－	－	≦ 10	－	≦ 10	－
クロム	mg/L	－	－	－	≦ 2	－	≦ 2	－
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	mg/L	≦ 10	≦ 10	－	－	－	－	－
アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物	mg/L	－	－	－	≦ 100 *3	≦10 *4	－	－
水素イオン濃度（pH）	mg/L	－	－	－	海域以外：5.8 - 8.6 海域：5.0 - 9.0	－	－	－
生物化学的酸素要求量（BOD）	mg/L	－	－	－	≦ 160 日間平均 ≦120	－	－	－
化学的酸素要求量（COD）	mg/L	－	－	－	≦ 160 日間平均 ≦120	－	－	－
浮遊物質量（SS）	mg/L	－	－	－	≦ 200 日間平均 ≦ 150	－	－	－
ノルマルヘキサン抽出物含有量（鉱油類含有量）	mg/L	－	－	－	≦ 5	－	－	－
ノルマルヘキサン抽出物含有量（動植物油脂類含有量）	mg/L	－	－	－	≦ 30	－	－	－
大腸菌群数	個/cm^3	－	－	－	日間平均 ≦ 3000	－	－	－
窒素	mg/L	－	－	－	≦ 120 日間平均 ≦ 60	－	－	－
燐	mg/L	－	－	－	≦ 16 日間平均 ≦ 8	－	－	－
ダイオキシン類（水質）	pg-TEQ/L	－	－	≦ 1	－	－	≦ 10	－

*1 河川その他の公共の水域を放流先とする公共下水道若しくは流域下水道又は当該流域下水道に接続する公共下水道に下水を排除する場合

*2 海域を放流先とする公共下水道若しくは流域下水道又は当該流域下水道に接続する公共下水道に下水を排除する場合

*3 アンモニア性窒素に0.4を乗じたもの，亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の合計量

*4 亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の合計量

表-2　土壌・底質関係基準(令和４年４月１日現在)

根拠法		環境基本法	ダイオキシン類対策特別措置法	海洋汚染防止法	土壌汚染対策法			
基準		土壌環境基準	ダイオキシン類環境基準	水底土砂に係る判定基準	土壌溶出量基準	第二溶出量基準	土壌含有量基準	自然由来の汚染と判断する際の含有量(全量分析)の上限値の目安
基準値 政令・告示等		平成3年環境庁告示第46号	平成11年環境庁告示第68号	昭和48年総理府令第6号別表第1	土壌汚染対策法施行規則別表第4	土壌汚染対策法施行規則別表第3	土壌汚染対策法施行規則別表第5	土壌汚染対策法施行通知別紙
検液の作成方法 告示等				昭和48年環境庁告示第14号	平成15年環境庁告示第18号	平成15年環境庁告示第18号	平成15年環境庁告示第19号	平成24年環水大水発120725002号
カドミウム及びその化合物	mg/L	≦ 0.003 かつ農用地において米 1kg につき≦ 0.4 mg	－	≦ 0.1	≦ 0.003	≦ 0.09	≦ 45(mg/kg)	1.4(mg/kg)
シアン化合物(全シアン)	mg/L	検出されないこと	－	≦ 1	検出されないこと	≦ 1	≦ 50(mg/kg)	－
有機燐化合物	mg/L	検出されないこと	－	≦ 1	検出されないこと	≦ 1	－	－
鉛及びその化合物	mg/L	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.3	≦ 150(mg/kg)	140(mg/kg)
六価クロム化合物	mg/L	≦ 0.05	－	≦ 0.5	≦ 0.05	≦ 1.5	≦ 250(mg/kg)	－
砒素及びその化合物	mg/L	≦ 0.01 かつ農用地(田に限る。)において土壌 1kg につき＜15 mg	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.3	≦ 150(mg/kg)	39(mg/kg)
水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物(総水銀)	mg/L	≦ 0.0005	－	≦ 0.005	≦ 0.0005	≦ 0.005	≦ 15(mg/kg)	1.4(mg/kg)
アルキル水銀化合物	mg/L	検出されないこと	－	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	－	－
ポリ塩化ビフェニル(PCB)	mg/L	検出されないこと	－	≦ 0.003	検出されないこと	≦ 0.003	－	－
トリクロロエチレン	mg/L	≦ 0.01	－	≦ 0.3	≦ 0.01	≦ 0.1	－	－
テトラクロロエチレン	mg/L	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	－	－
ジクロロメタン	mg/L	≦ 0.02	－	≦ 0.2	≦0.02	≦ 0.2	－	－
四塩化炭素	mg/L	≦ 0.002	－	≦ 0.02	≦ 0.002	≦ 0.02	－	－
クロロエチレン(塩化ビニルモノマー)	mg/L	≦ 0.002	－	－	≦ 0.002	≦ 0.02	－	－
1,2-ジクロロエタン	mg/L	≦ 0.004	－	≦ 0.04	≦ 0.004	≦ 0.04	－	－
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	≦ 0.1	－	≦ 1	≦ 0.1	≦ 1	－	－
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	－	－	≦ 0.4	－	－	－	－
1,2-ジクロロエチレン	mg/L	≦ 0.04	－	－	≦ 0.04	≦ 0.4	－	－
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	≦ 1	－	≦ 3	≦ 1	≦ 3	－	－
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	≦ 0.006	－	≦ 0.06	≦ 0.006	≦ 0.06	－	－
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	≦ 0.002	－	≦ 0.02	≦ 0.002	≦ 0.02	－	－
チウラム	mg/L	≦ 0.006	－	≦ 0.06	≦ 0.006	≦ 0.06	－	－
シマジン	mg/L	≦ 0.003	－	≦ 0.03	≦ 0.003	≦ 0.03	－	－
チオベンカルブ	mg/L	≦ 0.02	－	≦ 0.2	≦ 0.02	≦ 0.2	－	－
ベンゼン	mg/L	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.1	－	－
セレン	mg/L	≦ 0.01	－	≦ 0.1	≦ 0.01	≦ 0.3	≦ 150(mg/kg)	2.0(mg/kg)
ほう素	mg/L	≦ 1	－	－	≦ 1	≦ 30	≦ 4,000(mg/kg)	100(mg/kg)
ふっ素	mg/L	≦ 0.8	－	≦ 15	≦ 0.8	≦ 24	≦ 4,000(mg/kg)	700(mg/kg)
1,4-ジオキサン	mg/L	≦ 0.05	－	≦ 0.5	－	－	－	－
銅及びその化合物	mg/L	農用地(田に限る。)につき土壌 1kgにつき＜125 mg	－	≦ 3	－	－	－	－
亜鉛及びその化合物	mg/L	－	－	≦ 2	－	－	－	－
ベリリウム	mg/L	－	－	≦ 2.5	－	－	－	－
クロム	mg/L	－	－	≦ 2	－	－	－	－
ニッケル	mg/L	－	－	≦ 1.2	－	－	－	－
バナジウム	mg/L	－	－	≦ 1.5	－	－	－	－
廃棄物処理令別表第三の三第二十四号に掲げる有機物有機塩素化合物	mg/kg	－	－	≦ 40	－	－	－	－
ダイオキシン類(水底土砂)	pg-TEQ/L	－	－	≦ 10	－	－	－	－
ダイオキシン類(水底土砂)	pg-TEQ/g	－	≦ 150	－	－	－	－	－
ダイオキシン類(土壌)	pg-TEQ/g	－	≦ 1000 *1	－	－	－	－	－

*1　調査指標値　250pg-TEQ/g(ダイオキシン類対策特別措置法 別表備考4「環境基準が達成されている場合であって、250pg-TEQ/g以上の場合必要な調査を実施すること」)

参考資料６　土壌汚染対策法における自然由来の汚染土壌（自然由来等土壌）の取扱い

平成 31 年 4 月 1 日に全面施行された改正土壌汚染対策法においては、自然由来汚染土壌（自然由来等土壌）の取扱いに大きな変更がなされた。土壌汚染対策法の改正点のうち、本マニュアルとも関連が深い自然由来等土壌の取扱いについて解説する。

１．形質変更時要届出区域の種類

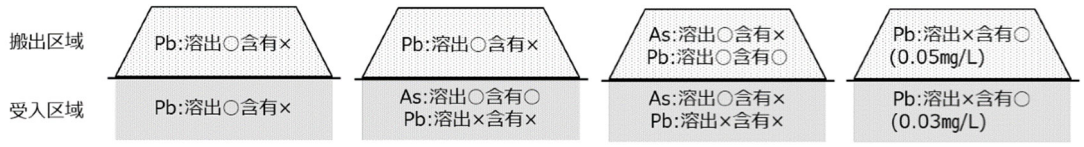
形質変更時要届出区域には、汚染の由来や管理状態によって「自然由来特例区域」、「埋立地特例区域」、「埋立地管理区域」（これらを総称して「自然由来特例区域等」という；規則第 58 条第 5 項第 10 号～第 12 号）が設定され、それぞれの特例区域には土地の形質の変更にあたっての特例が認められている。なお、自然由来特例区域等に該当しない形質変更時要届出区域を「一般管理区域」という。

自然由来等形質変更時要届出区域（自然由来特例区域および埋立地特例区域の総称）内の汚染土壌を「自然由来等土壌」と規定（法第 18 条第 2 項）し、自然由来等形質変更時要届出区域間の汚染土壌の移動ができることとしている（法第 18 条第 1 項）。そして、それが可能な条件として、次のような基準が設けられている（法第 16 条第 1 項、規則第 65 条の 2、第 65 条の 3）。

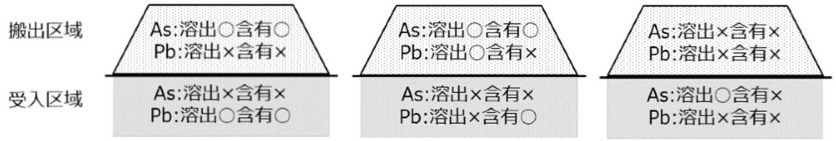
a）特定有害物質ごとに、搬出元と受入先の汚染状態が同様であること（**図-1**）。

b）自然由来の場合、搬出元と受入先の汚染状態が地質的に同質な状態で広がっていること。水面埋立て土砂由来の場合、搬出元と受入先が同一の港湾であること。

なお、自然由来特例区域内の土壌には人為汚染物質を含まないが、埋立地特例区域内の土壌には、人為汚染物質を含む可能性があることに留意が必要である。それは、水面埋立て土砂の主体を占める海底の底質には、工場等からもたらされる人為汚染物質が混入している場合があるためである。



(a)搬出元と受入先の汚染の状況が同様と見なせる例



(b)「汚染の状況が同様」と見なせない例

図-1　区域間移動における汚染の状況が同様かどうかの判断の例 [1)を改変]

２．汚染土壌の処理における、自然由来等土壌の活用

汚染土壌の処理に関しては、①浄化等処理施設、②セメント製造施設、③埋立処理施設、

④分別等処理施設への搬出に加えて、自然由来等形質変更時要届出区域内の土壌については、⑤自然由来等土壌利用施設への搬出が認められている。

自然由来等土壌利用施設として、a)自然由来等土壌構造物利用施設と b)自然由来等土壌海面埋立施設がある（汚染土壌処理業に関する省令（以下「処理業省令」という。）第 1 条第 5 号)。

a) 自然由来等土壌構造物利用施設

自然由来等土壌構造物利用施設は、自然由来等土壌を盛土材や裏込め材などとして土木構造物に利用する施設で、必要な措置が講じられ、かつ港湾の堤防や道路の盛土などの、法的な維持管理の位置づけがある施設として都道府県知事が認めたものである。

本施設で必要とされる措置（処理業省令第 4 条）に関し、地下水汚染を防止するための措置については、遮水工等が不要な場合がある（平成 31 年環境省告示第 7 号　第 2 号、第 3 号；**表-1**、**図-2** のクラス 1-A およびクラス 1-B)。また、クラス 1-B に該当するかどうかを判断するための「計算ツール」が環境省より公表されている。特定有害物質を含む液体が帯水層に到達しない状態を判断する地点は**図-3** に示すとおり、帯水層上面とされている。

なお本施設は、自然由来等土壌（基準不適合物質がシアン化合物と水銀およびその化合物を除く第二種特定有害物質（第二溶出量基準に適合のこと）に限る）以外の汚染土壌を受け入れられない（処理業省令第 5 条)。

b) 自然由来等土壌海面埋立施設

自然由来等土壌海面埋立施設は、自然由来等土壌により公有水面埋立法に基づく海面埋立てを行うための施設である。

本施設は海洋汚染防止法の水底土砂に係る判定基準に適合しない土壌を受け入れられない（処理業省令第 5 条)。

表-1 自然由来等土壌構造物利用施設における地下水汚染防止措置[2)]を一部修正

呼称	自然由来等土壌の汚染状態	地下水汚染防止措置
クラス 1-A	① 鉛及びその化合物（以下、鉛）0.30 mg/L 未満又は、カドミウム及びその化合物（以下、カドミウム）0.044 mg/L 未満であり当該施設を設置する土地の土壌に水を加えた検液中の水素イオン濃度指数が 5.0 以上の場合*。	・当該自然由来等土壌構造物利用施設の底面から帯水層までの距離***を 50 cm 以上保つ位置に当該自然由来等土壌構造物利用施設を設けること（遮水工等（クラス 2 参照）は不要）。 ・なお、クラス 2 の措置も講ずることができる。
クラス 1-B	②①を除く汚染状態であり、かつ、当該自然由来等土壌を利用した日から相当期間を経過した後、当該自然由来等土壌に含まれる特定有害物質を含む液体が帯水層に到達しない**距離を保つことができる特定有害物質による汚染状態。当該汚染状態は、計算ツールにより算定する。	・当該自然由来等土壌構造物利用施設の底面から帯水層までの距離を、計算ツールに入力した値を保つこと（遮水工等（クラス 2 参照）は不要）。 ・なお、クラス 2 の措置も講ずることができる。
クラス 2	③ 上記①、②以外の場合	・自然由来等土壌構造物利用施設が帯水層に接しないこと及び次のイ又はロに掲げる措置（以下「遮水工等）という。）を講ずること。 イ 自然由来等土壌構造物利用施設に利用する自然由来等土壌に含まれる特定有害物質が水に溶出しないように当該自然由来等土壌の性状を変更すること。 ロ 自然由来等土壌に含まれる特定有害物質を含む液体の地下への浸透による新たな地下水汚染を防止するために必要な構造として当該自然由来等土壌構造物利用施設に遮水工を設置すること。

* 検液中の水素イオン濃度指数は「土懸濁液の pH 試験方法」（JGS 0211）に基づき実施する。

** 特定有害物質を含む液体が帯水層に到達しない状態とは、帯水層直上の土壌間隙水中の特定有害物質の汚染状態が土壌溶出量基準に示される濃度に適合する状態を指している。

***「当該施設の底面から帯水層までの距離」とは、自然由来等土壌構造物利用施設の盛土等部分底面と当該施設設置範囲において確認された最も高い地下水位との距離とする。

※ クラス 1-A：新たな地下水汚染が生じない分類、クラス 1-B：相当期間、特定有害物質を含む液体が帯水層に到達しないと評価される分類、クラス 2：新たな地下水汚染が生じる可能性がある分類

※ 第二種特定有害物質（シアン化合物及び水銀及びその化合物を除く）のみ利用可能である。

※ 上部構造としては、自然由来等土壌の飛散及び流出を防止するための措置として自然由来等土壌を利用した場所の表面を土砂で 50 cm 以上覆うこと又は、これと同等以上の効果を有する方法により、当該場所の表面を覆うことが必要である。また、③のロの措置を採用する場合には、当該自然由来等土壌構造物利用施設であった施設の内部に雨水その他の水が滞留するおそれがある場合にあっては、当該場所の表面を遮水シートで覆うことその他の措置により、当該自然由来等土壌構造物利用施設であった施設の内部に雨水その他の水を滞留させないこと。

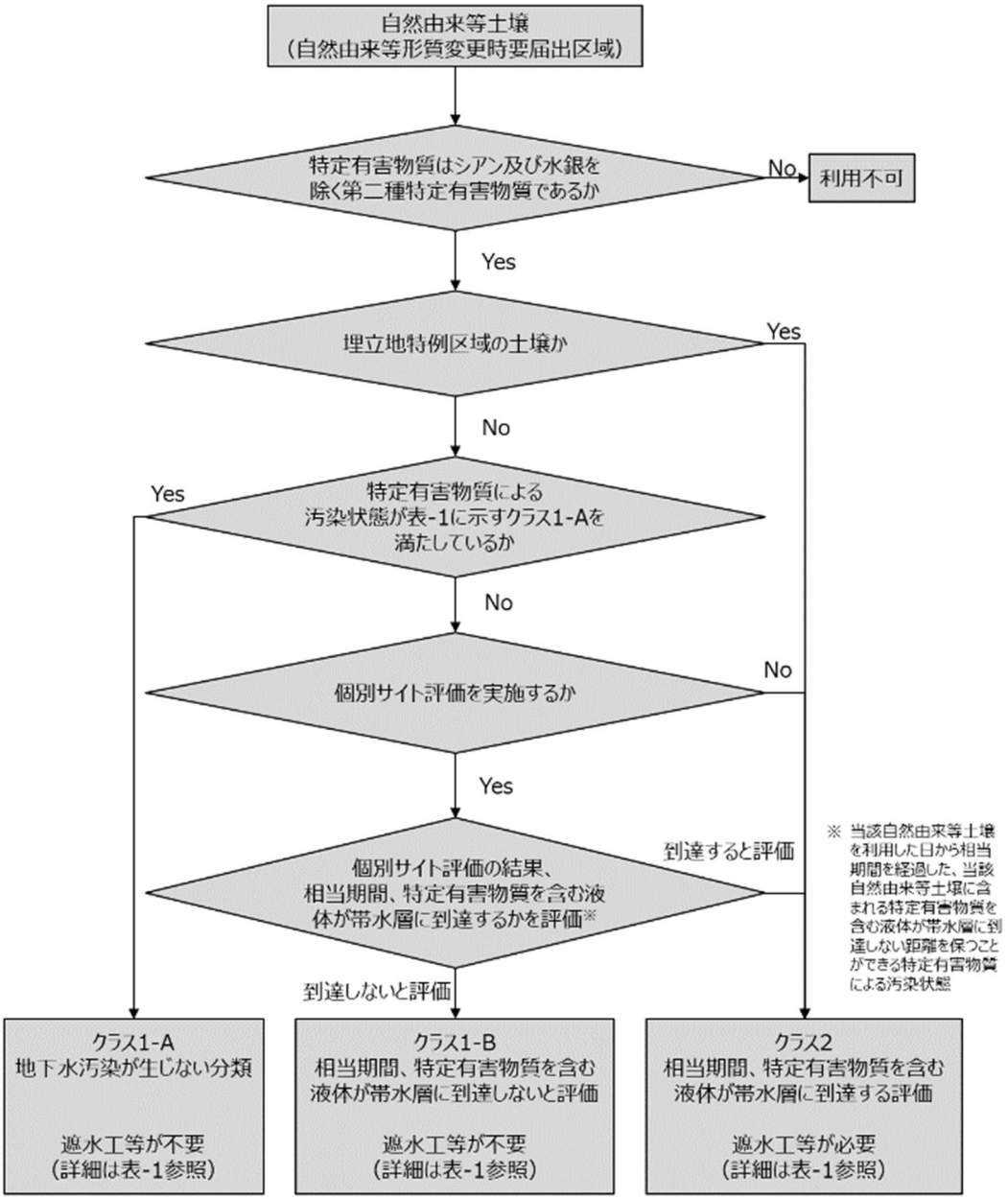


図-2　自然由来等土壌構造物利用施設における地下水汚染防止措置を決定する判断フロー[2)]

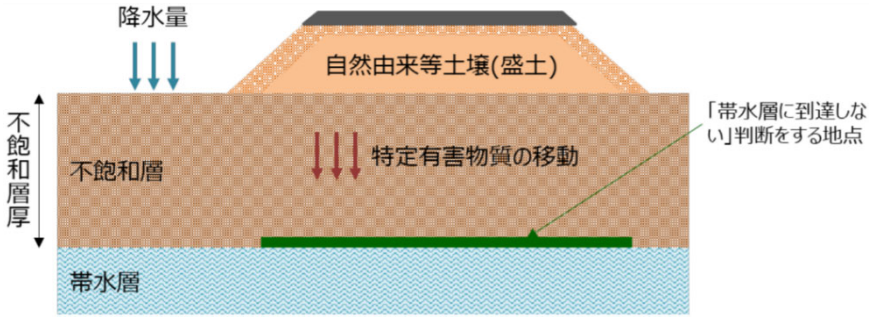


図-3　計算ツールにおける「帯水層に到達をしない」判断をするポイント[2)]

【参考文献】

1) 環境省水・大気環境局土壌環境課：汚染土壌の運搬に関するガイドライン（改訂第 4.1 版），2021，環境省ホームページ https://www.env.go.jp/ water/dojo/gl-man.html

2) 環境省水・大気環境局水環境課土壌環境室：汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂第 4.2 版），2022，環境省ホームページ https://www.env.go.jp/ water/dojo/gl-man.html

参考資料７　岩石・土壌に含まれる重金属等や酸性物質の起源の確認方法

天然の鉱物には特定の重金属等を主成分、あるいは微量成分として含むことが知られている。対象となる岩石・土壌中に特定の重金属等を含む鉱物種を確認できれば、重金属等の起源が自然由来である有力な証拠となる。

一般的には肉眼、ルーペや実体顕微鏡を用いた鉱物鑑定、偏光・反射顕微鏡を用いた岩石薄片試料やスミアスライド試料の鉱物鑑定、X線回折分析や顕微ラマン分光法などによる鉱物種の同定により、特定の重金属等を含む鉱物種の確認を行う。ここでは、上記の鉱物学的観察・分析手法による判別については説明を省略し、化学分析を主体とした分析手法とその適用事例を紹介する。

(1) 重金属等の含有量測定手法

有害な重金属等元素による土壌汚染が人為由来であるのか自然由来であるのかを明確に判定する体系的な手法は未だ確立されていない。しかしながら、重金属等元素を含む多元素の含有量を測定することで、自然由来の特徴を持った化学組成の相関が認められる場合がある。ここではその実例について紹介し、代表的な全化学組成の分析手法について解説を行う。

岩石・土壌中において自然由来の砒素やカドミウム、鉛などは鉱物態として存在するため、これらの元素が自然由来のものであるか、人為汚染に起因するものであるかを識別するためには、鉱物中に含まれる硫黄やカリウム、カルシウム、鉄、亜鉛などの共存元素の分析を実施し、重金属等元素と各元素量との相関を調べることが有効となる場合がある。例えば、鉛の溶出源がカリ長石に含まれる場合には（**図-1**）、カリウムと鉛の全含有量の間に正の相関が認められる[1)]。また、砒素と鉄の全含有量の間に正の相関がある場合には（**図-2**）、砒素は黄鉄鉱などの鉄を主成分とする鉱物として存在する可能性が高い[2)]と推定できる。

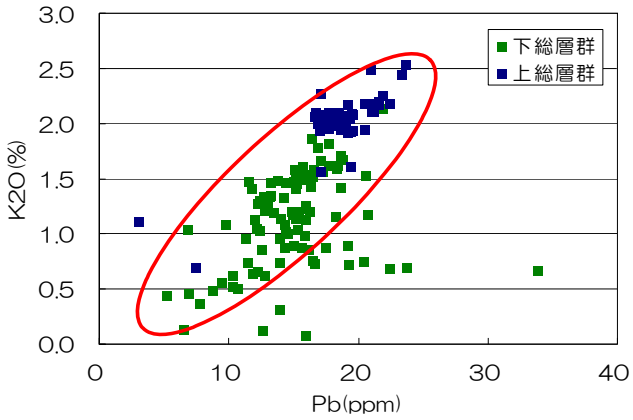


図-1　市原地域の堆積物中の鉛とカリウムの全含有量の相関[1)]

赤い円で示す相関関係から鉛の溶出源がカリ長石であることが推定される。

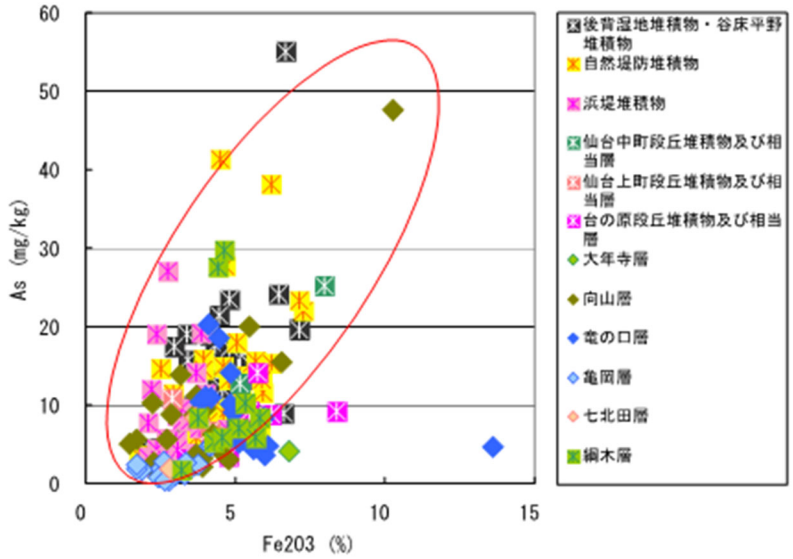


図-2 仙台市のボーリング試料中の砒素と鉄の全含有量の相関 [2)]

赤い円で示す相関関係から、砒素が鉄を含む鉱物（黄鉄鉱（FeS_2）など）に含まれることが推定される。

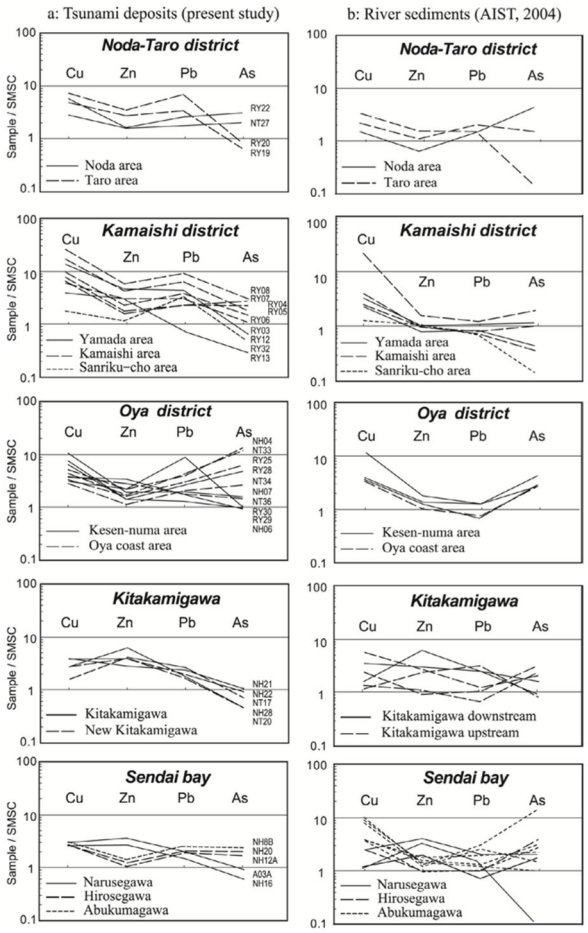


図-3 仙台湾の平均組成で規格化した重金属等（砒素、鉛、亜鉛、銅）のスパイダー図
（山田ほか（2014）図-4 を引用）[3)]

また、山田ほか（2014）[3]は 2011 年の東北地方太平洋沖地震に起因した津波堆積物を 100 試料以上測定し、砒素・鉛・銅・亜鉛の重金属等元素濃度とその規格化パターンが地域性を持つことを明らかにし、供給源を特定できる可能性を指摘している（**図-3**）。このように、対象とする重金属等の濃度に加えて、主成分元素、他の重金属等元素を同時に測定することで、自然由来重金属等の特性を把握することができる場合がある。

・　岩石・土壌・鉱物などの固体試料の全含有量分析

①　蛍光Ｘ線分析による全岩化学組成分析

蛍光Ｘ線分析法（XRF）は、試料表面にＸ線を照射することで、試料中に含有される元素（原子）から発生する蛍光Ｘ線（特性Ｘ線）を測定する手法であり、土壌中に含まれる多くの元素を検出することができるため、砒素やカドミウム、鉛などの汚染が自然由来のものか、人為汚染に起因するかを判断するための重要な情報を提供できる。

現在、蛍光Ｘ線分析装置は、高エネルギーのＸ線管球と分光結晶による波長分散を用いる大型・卓上型の波長分散型装置（WDS）と、低出力のＸ線管球を使用し、半導体検出器により電気的に蛍光Ｘ線を波長分散するエネルギー分散型装置（EDS）に分けられる。エネルギー分散型の蛍光Ｘ線分析装置は、高出力の卓上型、低出力の携帯型・ハンドヘルド型の装置が市販されている。波長分散型装置を用いた場合、測定時間は 1 試料当たり 20～50 分程度となり、一般に軽元素を主体とする主成分元素（Na, Mg, K, Ca, Fe, Si, Al など）では濃度が 0.1～0.01 wt%程度、砒素などの微量重元素（Cu～Pb）については数 mg/kg 程度が検出限界の目安となる。エネルギー分散型装置では、測定時間が数～10 分程度と短いが、それぞれ一桁程度高い濃度が検出限界となり、また波長分散型装置に比べて波長分解能が劣るため、隣り合う測定ピークが重なりやすい。蛍光Ｘ線分析における定量分析の方法として、蛍光Ｘ線強度に影響するパラメーターを理論的に計算し、含有元素を推定するファンダメンタルパラメーター法（FP 法）と、複数の標準試料を同条件で測定し、各元素の認証値・推奨値と実測データとの相関関係により検量線を作成する検量線法が用いられる。元素マトリックスや含有鉱物種が多様な岩石・土壌試料を対象とする場合、FP 法は半定量的な測定結果として、検量線法がより精度の高い定量分析結果として用いられる。一般に、岩石・土壌試料の全岩分析に用いる検量線を作成するための標準試料として、産業技術総合研究所（GSJ）や米国地質調査所（USGS）の地球化学標準物質シリーズ、日本分析化学会の土壌認証標準物質などが用いられる。検量線の作成においては、検量線試料が測定対象と類似の性質を有しており、測定対象の元素濃度が検量線範囲内にある必要がある。

また、定量分析においては、蛍光Ｘ線のピークの重なり、共存元素によるマトリックス効果（励起・吸収効果）などを補正する必要がある。例として砒素の分析の場合、As Kα 線を測定に用いると、共存する鉛が高濃度である場合、鉛の Lα 線が As Kα 線とほぼ同じ波長位置（エネルギー位置）に重なるため、よりピークの小さい As Kβ 線を用いるか、鉛の Lß 線を用いた重なり補正を行う必要がある。なお、粉末試料を用いて測定する際は、粒径や粒

子の密度に由来する効果（粒子効果）の影響を受け、分析精度や検出感度が低下することを考慮する必要がある。

蛍光X線分析法で定量分析を行う際には、測定試料の均質化のため、試料を粉末化する必要がある。粉末化においては、測定対象の元素が粉砕器具や容器、作業環境からコンタミネーションを受けることがないよう留意する必要がある。粉末化試料あるいは元試料をそのままサンプル容器に入れて測定する手法（ルーズパウダー法）、微粉末化した試料をそのまま、あるいはバインダー剤と混合し、塩ビ製あるいはアルミ製リングや専用の加圧ダイスを用いて加圧成形（油圧ハンドプレス、電動プレス機を使用）する手法（加圧ペレット法）、試料粉末を四ホウ酸リチウムなどの融剤と混合し白金ルツボを使用し 1,100～1,200 度の高温で溶融、ガラス化する手法（ガラスビード法）があり、一般にルースパウダー法、加圧ペレット法、ガラスビード法の順で測定精度が高くなる [4), 5)]。

それぞれの特徴として、砒素、鉛、カドミウムなどの蛍光（特性）X線のエネルギーが大きい元素のみを測定する場合は、試料密度の影響が小さい（発生する蛍光X線の透過力が強い）ため、より簡便なルースパウダー法でもある程度の精度で定量分析は可能である。

加圧ペレット法では、測定面を平滑にし、試料密度をある程度均一化することができるため、蛍光X線の侵入深度が浅い軽元素（Na～Fe など）の定量分析の精度が向上する。

ガラスビード法では、試料中の元素濃度が溶融により均質化され、希釈による共存元素の低減、粒子効果の除去を行うことができ、より高精度の分析が可能となる。ただし、ガラスビードの作成には白金製のルツボや高温溶融装置などの高額な装置・器具が必要となることや、溶融時の高温による砒素、セレン、硫黄などの低沸点元素の揮発が問題となる場合があるため、測定する元素とその濃度に応じて試料作成方法を選択する必要がある。

また、ハンドヘルド型の蛍光X線装置（エネルギー分散型）を使用することで、屋外の現場において岩石・土壌試料表面の重金属等元素濃度を短時間で数多く測定することが可能であり、環境バックグラウンドの計測、掘削ずりの管理、試料のスクリーニング調査などに力を発揮する [6)]。しかしながら、ハンドヘルド型装置の測定結果には、低出力のX線源を用いた大気環境での分析であるため、測定位置による不均質性、測定面の状態の違いによる不確かさ、大気により軽元素からの信号が吸収される影響があるため、それらの前提条件を十分に理解した上で使用することが望ましい。

② ICP-AES、ICP-MS による湿式分析

誘導結合プラズマ（ICP）を用いる分析法は、溶液試料を高温のプラズマ中に直接噴霧し、イオン化した元素から発生する光を分光する ICP 発光分析（ICP-AES）装置と、イオン化した元素を四重極あるいは電磁場により分別・走査し、質量数ごとに質量分析計に導入することで元素濃度を測定する ICP 質量分析（ICP-MS）装置がある。近年では汎用的に多元素を分析できる ICP-MS 装置が広く普及し、様々な地質試料を対象に微量元素分析が行われており [7)]、**表-1** に示すように公定法にも採用されている分析法である。

ICP 発光分析、ICP 質量分析による固体試料の含有量測定は、蛍光X線分析法に比べて多

くの元素を測定することができる。また、その検出限界が μg/kg～mg/kg（ppb～ppm）と低く、測定誤差が 1～2 %と精度が高い特徴がある。一方で、分析には、固体試料を溶液化する前処理が必要となる。通常は、ふっ素樹脂製ビーカーに粉末試料と高純度の酸試薬（塩酸、硝酸、過塩素酸、ふっ酸などの混酸が用いられる）を混ぜ、ホットプレート上で加熱する方法や、揮発性元素の揮散を抑え酸の沸点を上昇させて溶解を促進するためにふっ素樹脂製密閉容器を用いてホットプレート上、加圧容器を用いたオーブン内、あるいはマイクロウェーブ加熱装置を用いて加圧熱分解する手法などが用いられる。また、粉末試料と高純度のアルカリ融剤（メタホウ酸リチウム、四ホウ酸リチウム、塩化ナトリウムなど）を混合し、白金ルツボで高温溶融しガラス化した試料を酸分解し、溶液化するアルカリ融解法なども用いられる。岩石や土壌中の種類によっては、粉砕方法、溶液化方法の違いによって容器や試薬、作業環境から特定の元素のコンタミネーションが生じ、測定結果に影響する場合、あるいは有機物や難溶融性鉱物の溶け残りが生じ、不完全な全含有量値となる場合があるため、岩種や構成鉱物に応じた適切な前処理方法を選定する必要がある[8)]。

また、近年では ICP-MS にレーザーアブレーション装置を接続することで、固体試料を高エネルギーの微小レーザーで気化・極微粒化し、直接誘導プラズマに導入する手法（LA-ICP-MS）が普及している。LA-ICP-MS 分析では、mm～cm サイズの固体試料を対象に、迅速な局所微量元素濃度分析・マッピング分析を可能とするが、装置が高額である点、多くの元素で 5～20 %程度の測定誤差となる特徴がある。また、岩石や鉱物などの定量分析を行うためには、元素濃度が既知であり、測定する試料に元素マトリックスが近似あるいは一致する標準試料を準備する必要がある。現在、岩石試料の LA-ICP-MS 分析には、加圧ペレットを用いる方法[9)]、ガラスビード試料を用いる方法[10)]、融剤を使用せずガラス化する方法[11)]、などが提案されており、重金属等元素の迅速な分析に活用が期待される技術である。

・　溶液試料中の元素分析手法

地下水、建設現場における排水・滲出水など、溶液試料中の重金属等の含有量分析法については、その多くが日本産業規格（JIS）の工場排水試験方法（JIS K 0102）に準じて実施されている。なお、JIS K 0102 規格は 2021 年以降順次、JIS K 0102 規格群：工業用水・工場排水試験方法 （第 1 部～第 5 部）として工業用水試験方法（JIS K 0101）と統合・再編される予定である（2021 年 5 月 20 日に JIS K 0102-1 第 1 部（一般理化学試験方法）、2022 年 10 月 20 日に JIS K 0102-2 第 2 部（陰イオン類、アンモニウム類、有機体窒素、全窒素及び全りん）および JIS K 0102-3 第 3 部（金属）が公示）。本規格は比較的頻繁に新技術を反映した改正がなされるため、常に最新版を参照するとよい。例として、JIS K 0102:2019 では、六価クロムの分析に液体クロマトグラフィー誘導結合プラズマ質量分析法（LC-ICP-MS）が追加されている。また、令和 3 年 10 月 7 日の環境省告示第 62 号および第 63 号において、環境基準における基準値の見直しを受け、河川水などの公定法において、六価クロムの分析法からフレーム原子吸光法が削除された。

表-1 に、環境省の「地下水に含まれる試料採取等対象物質の量の測定方法を定める件」（環境省告示第 17 号、平成 15 年）別表、「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 18 号、平成 15 年）別表および、「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」（環境省告示第 19 号、平成 15 年）別表における、重金属等元素の測定方法を簡略化し、記載されている測定方法について 2022 年 3 月時点における環境省の「地下水の水質汚濁に係る環境基準について」を反映し、整理した。なお、各元素の測定方法は基準値の改正や測定技術の開発・普及状況に応じて、適宜追加・削除されるため、常に最新の法令等を確認する必要がある。なお、詳細は元の別表および各種規格を参照されたい。また、溶液試料の分析については、分析方法、採水・分析のノウハウなどについて、数多くのテキストが出版・市販されているため、それらを適宜参考にするとよい。

表-1　溶液中の重金属等元素の測定方法について（環境省告示第 17 号、第 18 号、第 19 号）

特定有害物質の種類	測定方法・規格	測定手法の種類
カドミウム及びその化合物	JIS K 0102 の 55.2、55.3 又は 55.4	電気加熱原子吸光法、ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法
六価クロム化合物	JIS K 0102 の 65.2（65.2.2 及び 65.2.7 を除く。） ※高塩分濃度試料は他に定める操作が必要。65.2.1 では 50mm の吸収セルを用いる必要。65.2.3, 65.2.4, 65.2.5 の備考 11b による場合、65.2.6 では添加回収率の確認が必要。65.2.6 では K0170-7 の 7 の a)または b)の操作を行う。	ジフェニルカルバジド吸光光度法、電気加熱原子吸光法、ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法、ジフェニルカルバジド発色による流れ分析法
水銀及びその化合物	環境庁告示第 59 号(S46)付表 1（アルキル水銀は同付表 2 および環境庁告示第 64 号(S49)付表 3）（ただし環境庁告示第 64 号付表 3 は環境省告示第 18 号のみ)	原子吸光分析法（アルキル水銀は、ガスクロマトグラフ法、薄層クロマトグラフ法）
セレン及びその化合物	JIS K 0102 の 67.2 または 67.3, 67.4	水素化合物発生原子吸光法、水素化合物発生 ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法
鉛及びその化合物	JIS K 0102 の 54	フレーム原子吸光法、電気加熱原子吸光法、ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法
砒素及びその化合物	JIS K 0102 の 61.1 または 61.2,または 61.3, 61.4(ただし 61.1 は環境省告示第 19 号のみ)	ジエチルジチオカルバミド酸銀吸光光度法、水素化物発生原子吸光法、水素化物発生 ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法
ふっ素及びその化合物	JIS K 0102 の 34.1 若しくは 34.4 又は 34.1 c)（注(6)第 3 文を除く。）（省略できる場合有り）、及び環境庁告示第 59 号(S46)付表 6	ランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法、ランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法による流れ分析法、イオンクロマトグラフ法
ほう素及びその化合物	JIS K 0102 の 47.1, 47.3, 47.4	メチレンブルー吸光光度法、ICP 発光分光分析法、ICP 質量分析法

(2) 岩石・土壌中の重金属等の存在形態の分析法

岩石・土壌中の砒素や鉛などの重金属等の形態は、間隙水、鉱物などの固体中に含有される形態と、鉱物や有機物などの表面や層間に吸着されるものに大別される。それらは、土壌

や鉱物粒間に残存する間隙水中に溶存する形態、粘土鉱物などの表面に吸着する吸着態や、鉱物結晶の層間イオンを交代し存在するイオン交換態、有機物と結合している有機物態、各種の鉱物に含まれる炭酸塩鉱物態、鉄・マンガン鉱物態、硫化鉱物態など多様な形態で存在していることが知られている(**図-4**)。

分別抽出法は、塩化マグネシウムや酢酸、シュウ酸などの溶媒を用いて、粘土鉱物表面の吸着態やイオン交換態、有機物と結合している有機物態として存在する砒素や鉛を溶媒中に移行させ、その後、硝酸などの溶媒を用いることで、鉱物の中に存在する砒素や鉛を溶媒に溶かして分析する多段階抽出による分析法である(**図-5**)。分別抽出法は、使用する溶媒によって様々な方法に分類されるが、現在では Tessier らの方法[12]や Community Bureau of Reference, Commission of the European Community の提唱した 3 段階抽出法である BCR 法[13]が広く用いられている[14]。

図-6 は鉱床地域に分布する自然由来の鉛汚染土壌と、工業活動に伴って生じた人為的鉛汚染土壌の分別抽出法による鉛分析結果である。この事例では、自然由来の鉛汚染土壌には吸着態として存在する鉛の割合が多く、工業活動に伴って生じた人為的鉛汚染土壌には炭酸塩態として存在する鉛(実際は酸化鉛として存在していると考えられる)の割合が多い[14]。

また、海成・非海成の堆積物の砒素の含有形態と分画溶出結果に基づいた自然由来・人為由来の砒素汚染土壌の判別法が提案されている。反復抽出法と呼ばれる手法では、土壌中の有害物質を吸着態として含む酸化相(風化相)をシュウ酸緩衝溶液(AOAH)などの酸性還元剤を使用して抽出し、さらに黄鉄鉱中に含まれる還元相(未風化相)を過酸化水素水での酸化処理を行った後に、再度 AOAH 溶液で抽出を行う(**図-7**)。そして、人為由来の汚染では酸化相が卓越することを利用し(**図-8**)、汚染土壌の酸化相・還元相の抽出量比を基準

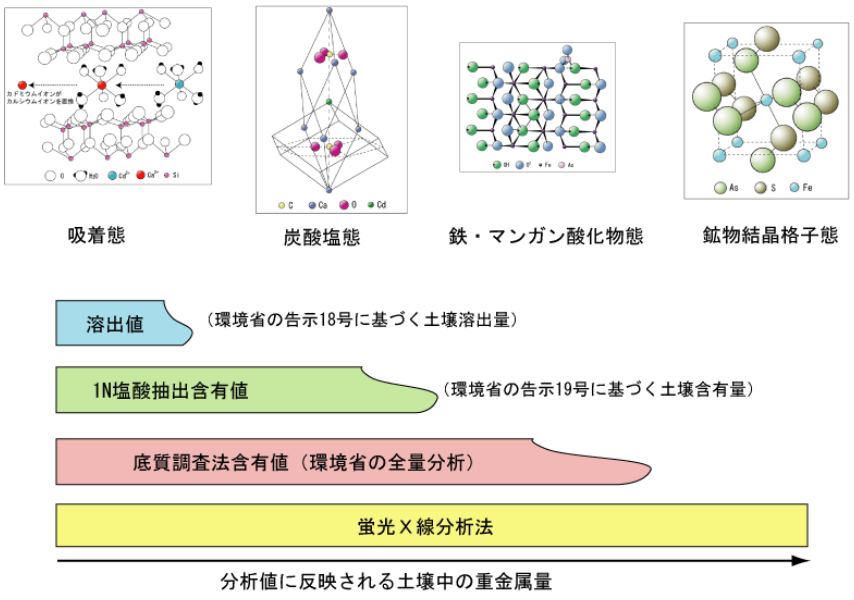


図-4 岩石・土壌中における重金属等の存在形態

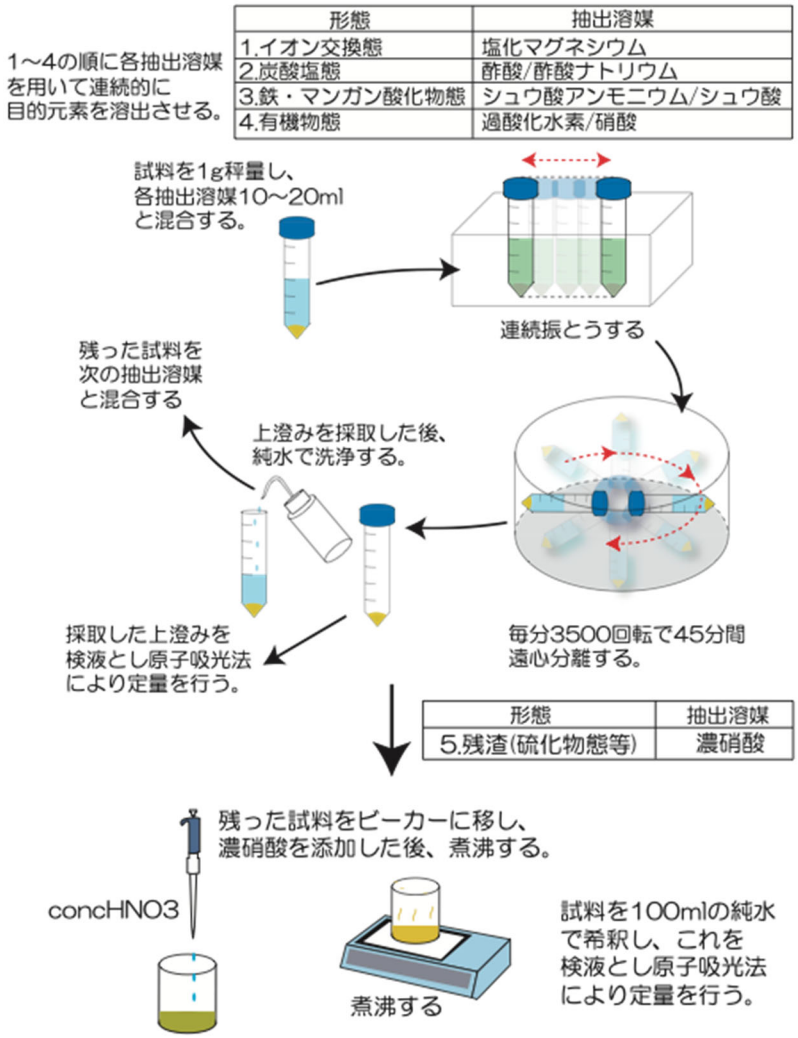


図-5　逐次分別抽出法の概要(Tessier et al., 1979, Clevenger et al., 1990 に基づく)[1)]

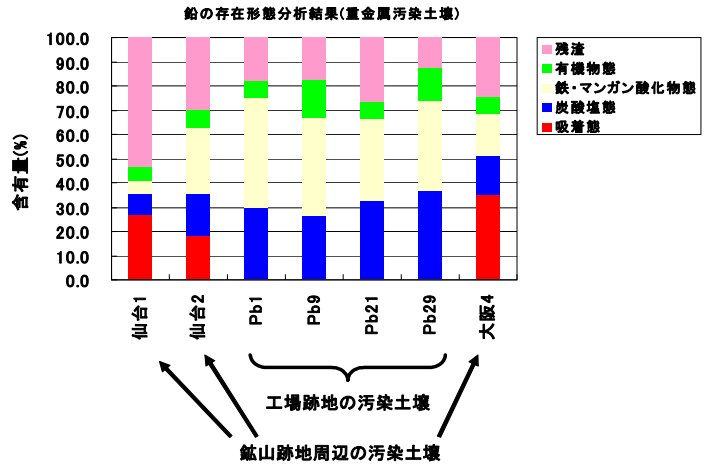


図-6　人為的汚染土壌（工場跡地）と自然由来重金属含有土壌（鉱山跡地周辺）における鉛の存在形態の違い（丸茂ほか(2003)[14)] より作図）

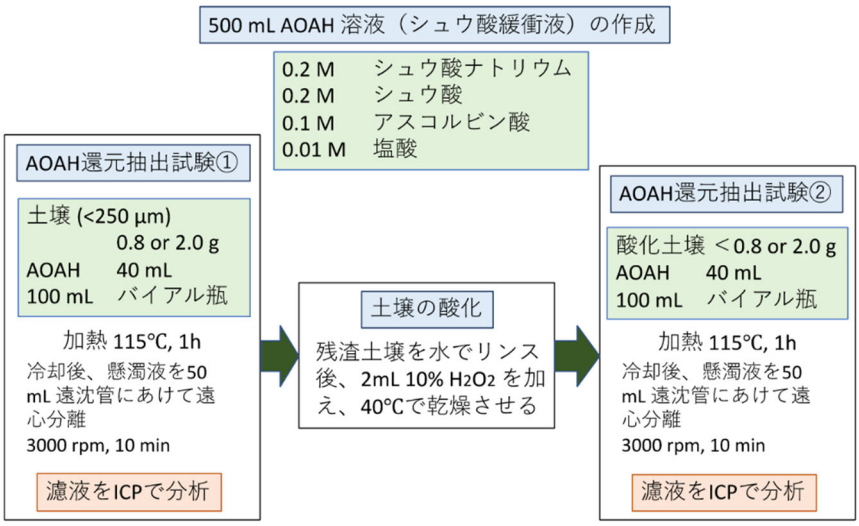


図-7　反復抽出法の実施手順 [15)]

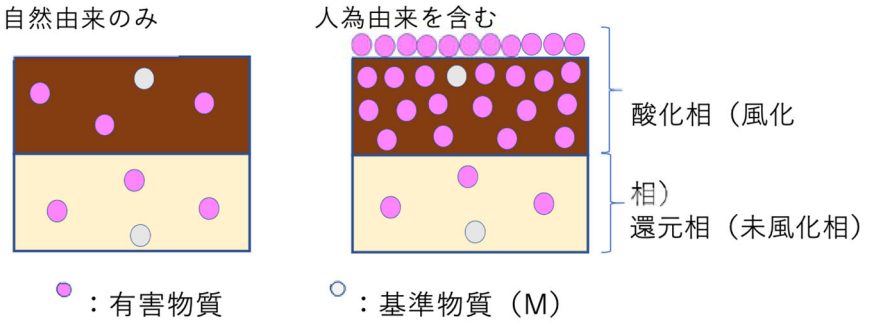


図-8　自然由来・人為由来の汚染土壌団粒表面における元素の分布様式の模式図 [15)]

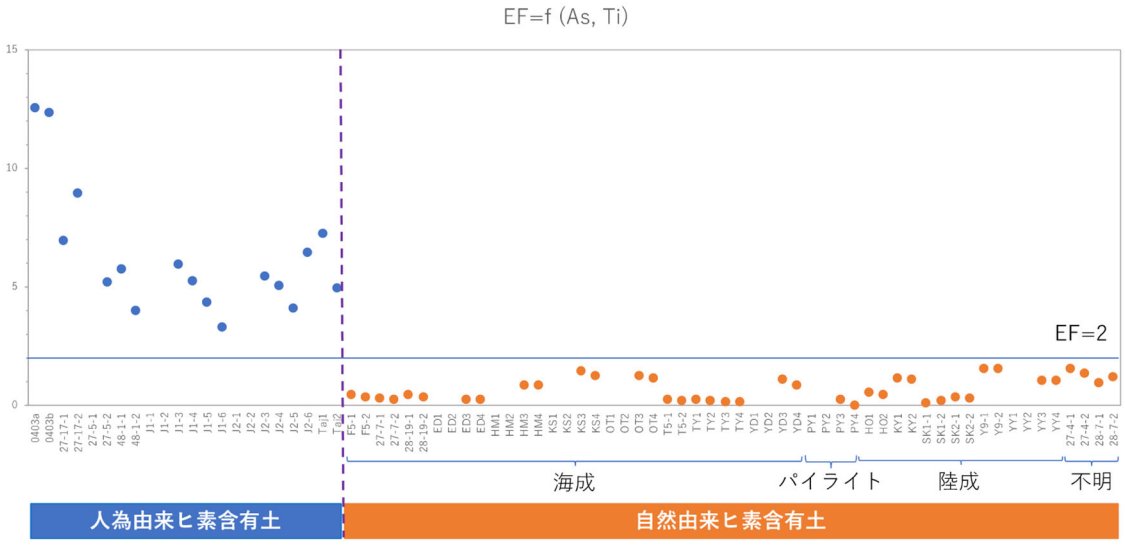


図-9　Ti を基準元素とした自然・人為由来砒素の判別結果例 [15)]

元素（Pb, Ti, Sr など）で規格化することで、自然由来と人為由来の判定を行う手法である[15]。この手法により自然由来と人為由来の砒素を判別した事例を**図-9** に示す。

(3) 重金属等の化学形態を判別する化学形態分析（スペシエーション分析）法

自然界において砒素などの重金属等は、価数（酸化状態）、無機および有機化合物体、溶存態・コロイド態、粒子形態などさまざまな化学形態で分布しており、その化学形態により、自然環境中での安定性や生物における代謝の機構（毒性）が異なるために、化学形態分析（スペシエーション分析）によりその化学形態を分離・測定することで、人為・自然由来の判別や、環境バックグラウンドとの識別を行う助けとなる場合がある。

溶液中における砒素やクロムなどの元素については、現場での予備調査やスクリーニングに用いるのに簡便な手法として、価数別の定量が可能な比色分析法が確立している[16]。ただし、比色分析法では試料の水質の違いによる溶液の着色や鉄イオンなどの共存イオンなどによる干渉が測定上問題となるケースがあるため、注意が必要である。

より信頼性の高い溶液中の化学形態に関する分析方法では、溶液試料から特定化学種を分離し、機器測定する手法を用いる。クロマトグラフィー法とは、イオン交換樹脂カラムなどを用い、水溶液・気体中におけるイオンや元素化合物を酸解離特性の違いにより分離する手法の総称であり、砒素、水銀、セレン、クロム（特に六価クロムの検出）などのスペシエーション分析に用いられている。近年では、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）、イオンクロマトグラフィー（IC）、ガスクロマトグラフィー（GC）などで化学形態別に分離した試料を、オンラインで ICP 発光分析（ICP-AES など）や ICP 質量分析計（ICP-MS）に導入し、μg/L（ppb）オーダーの高感度測定を行う手法が一般的になりつつある[17]。また、HPLC や IC に代わり、分離にキャピラリー電気泳動（CE）やマイクロチップ電気泳動（ME）を用いる手法も研究が進んでおり、試料量が少なく高速・高感度な分離・分析が可能となる事例も報告されている[17), 18)]。

なお、環境水のスペシエーション分析では、試料の前処理に注意が必要である。例えば、試料溶液の pH 調整などを行う場合、砒素の As(Ⅲ)と As(V)とで酸化還元反応が生じ、前処理前後で両者の濃度比が変化してしまう場合がある。そのため、砒素のスペシエーション分析には、いくつか推奨される前処理方法が提案されており、濾過により粒子や微生物を除去した後、各種の酸や錯形成剤を加える処理が一般的な手法とされる[19]。ただし、最適な保存法は水質により異なるため、採取後ただちに陰イオン交換カラムを用いて As(Ⅲ)と As(V)を分離する方法が最も信頼性が高いとされる[19]。また、水素化物発生装置を用いた処理では、一部の有機砒素以外はガス化されない性質があることなど、検出したい化学種に対応した適切な前処理・分離法を選択する必要がある。

固体試料中に含まれる特定元素の化学種を判別する方法としては、試料にＸ線を照射し、観測されたＸ線スペクトルにおけるＸ線吸収微細構造（XAFS）を解析する分析法が用いられる。XAFS は、測定エネルギー領域が異なる広域Ｘ線吸収微細構造（EXAFS）を解析す

る手法と、X線吸収端近傍構造（XANES）を測定する手法に分類され、主に土壌・岩石中の砒素の酸化状態（砒酸・亜砒酸の量比）の解析に用いられている。XAFS 測定は、強力かつ単色化されたX線源を用いる SPring-8 のような大型放射光施設での測定が一般的であるが、実験室系 XAFS 分析装置の開発も行われており、土壌試料中のクロムの価数の評価などの事例が報告されている[20]。

天然の岩石・土壌中に含まれる砒素は、その多くが黄鉄鉱（FeS_2）や硫砒鉄鉱（FeAsS）などの硫化鉱物や、酸化鉱物中に含まれていることが明らかとなっており、二次鉱物では砒素は主に As(V)として存在していることが指摘されている[21]。一方、人為的汚染土では、金属精錬や化石燃料由来の含有であることを特定することで、溶出する砒素が自然由来か人為由来かを判別する証拠となる。

XANES 分析法を活用し、自然由来汚染土と人為由来汚染土とを識別した研究例を紹介する（**図-10**）。重金属等を含有・溶出する海成堆積物、非海成堆積物と人為汚染土の砒素の化学形態を XANES で分析した結果、自然由来の海成堆積岩と人為由来汚染土が As(Ⅲ)、As-S の有無により明瞭に判別可能であることが示されている[15]。また、非海成の自然由来汚染土と人為汚染土は共通して As(V)のみが検出される結果となったが、本資料 **(2)** で上述した逐次分別抽出法による酸化相・還元相の溶出量比により、判別が可能とされている[15]。

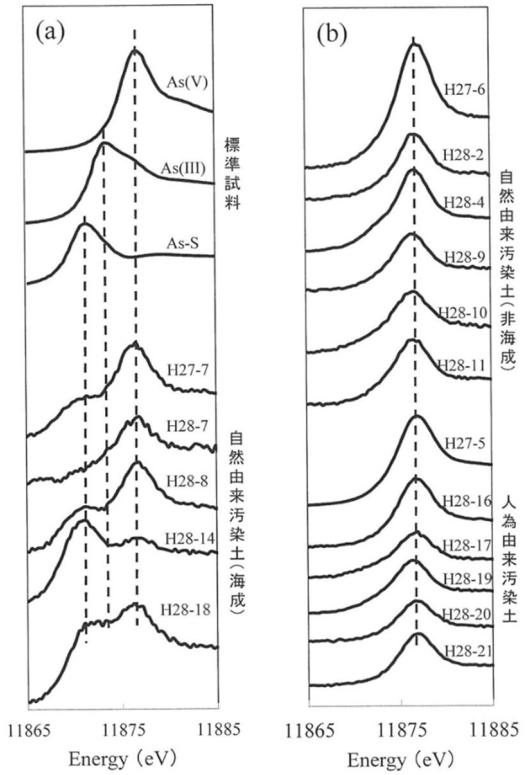


図-10 標準試料および自然（海成・非海成）汚染度、人為由来汚染度に含まれる砒素の XAFS スペクトル解析例[15]

(4) 電子線、X線、レーザーアブレーションを用いた有害物質の直接観察・分析法

岩石中に含まれる鉱物およびその風化・反応生成物中に対象とする有害物質が含まれていることを確認できれば、当該物質の溶出が自然由来である証拠のひとつとなる。

土壌物質のほとんどは可視光線を通さないため、土壌中に含まれる有害物質の直視観察を行うためには、電子顕微鏡を活用し、砒素やカドミウム、鉛を含む粒子を直視観察して形態を把握することが役に立つ。また、観察と同時にエネルギー分散型X線分析装置（EDS）を利用して、これらの粒子の化学組成を分析することにより、これらの元素が自然由来の鉱物態として存在しているか、あるいは自然界に存在する鉱物とは異なった形態と化学組成を有する化合物として存在するかを把握することができる。

例えば、鉛の存在形態の解明のためには、エネルギー分散型X線分析装置を装備した透過型分析電子顕微鏡（TEM-EDS）を用いて、鉛を含んだ物質の同定と化学分析を行うことが有効である[22]。**図-11** 左は鉄、亜鉛、鉛を含む硫化鉱物の透過型電子顕微鏡写真である。なお、電子顕微鏡は真空系下で電子を発生させて試料を観察するため、試料の準備、観察・分析の操作が複雑であり、装置も高額である。また、観察できる範囲も極微小域に限定される。

一方、X線は電子線に比べて貫通力が高く、かつ大気中でも使用できる簡便な方法（透視X線法）である。特に鉛のような重い元素からなる粒子を判定する場合、透視X線法を用いることにより土壌中の存在形態を把握できる[22]。**図-11** 右は人為汚染を受けた土壌中に含まれる金属鉛片の透過X線像である。鉄や鉛など重金属等元素を含む硫化鉱物・酸化鉱物は一般に密度（比重）が高く、また重元素によりX線の透過が妨げられるため、他の軽元素を主体とする鉱物粒子から容易に識別できる場合が多い。

真空中で電子線を径 0.1～数 μm まで絞り試料表面に照射し、試料中の元素から発生する特性X線を検出することで微小領域の元素濃度を測定する手法が、電子線プローブ微小分析（EPMA:Electron Probe Micro Analyzer）である。EPMA は試料の消耗がない非破壊分析であり、一般に 0.1～1 wt%を超える比較的高濃度の重金属等の濃度や分布を測定することができる。黄鉄鉱粒子における砒素のマッピングを行った分析例[23]を**図-12** に示す。

このほか、破壊分析となるが、サブ mg/kg（ppm）オーダーのより微量な元素濃度の分布を可視化する手法として、レーザーアブレーション質量分析法（LA-ICP-MS）が使われる。試料に径数～100μm 程度のビーム径で、高エネルギーの紫外あるいは赤外レーザーを照射することで試料をアブレーション（蒸発気化）し、極微粒子を含む気体として ICP-MS に導入・分析することで、試料中の極微量の重金属等元素の濃度や分布について、定性・定量分析を行うことができる（**図-13**）[24]。

また、X線を 10～100 μm に絞り、移動ステージを備えた微小部蛍光X線分析装置（micro-XRF あるいは μ-XRF）が開発されており、数～10 cm 程度のサイズに切断・研磨した岩石表面を対象に元素マッピング分析を行うことができる（**図-14**）[25]。元素マッピングの分解能、分析精度、定量化下限値は EPMA、SEM-EDS、LA-ICP-MS に及ばないが、他の手法に比べ大面積を比較的簡便に測定できるため、例えばボーリングコア試料における鉱物脈

や風化帯などの組織を対象に、肉眼スケールに対応する%オーダーの元素分布を知りたい場合は極めて有効であり、新鮮部と変質部における元素の溶脱や付加などを可視化することで、自然由来重金属等の溶出傾向との対応関係を把握することができる[25)]。

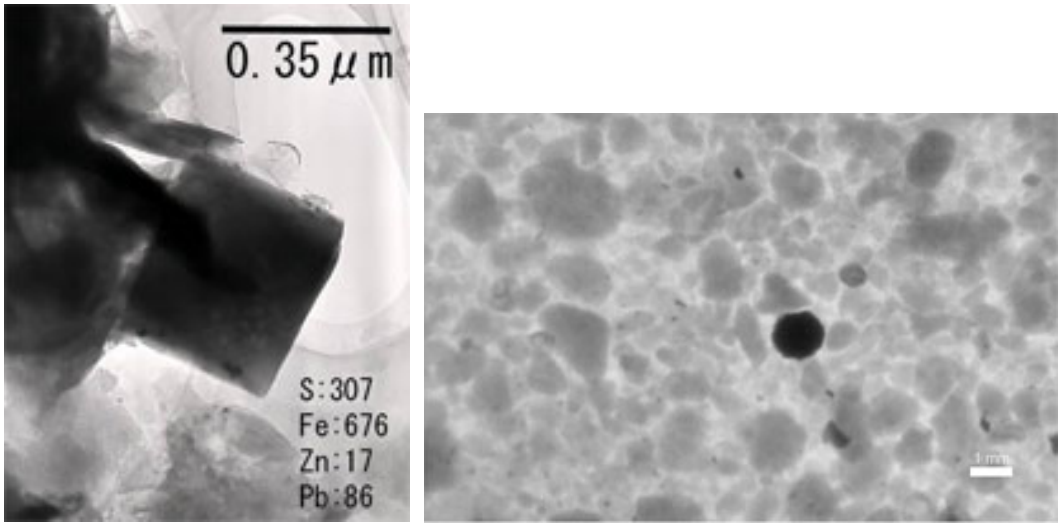


図-11 （左）鉄、亜鉛、鉛を含む硫化鉱物の透過型電子顕微鏡写真[14)]、（右）人為汚染土壌中の金属鉛（画像中央の黒色粒子）の透過X線像[22)]

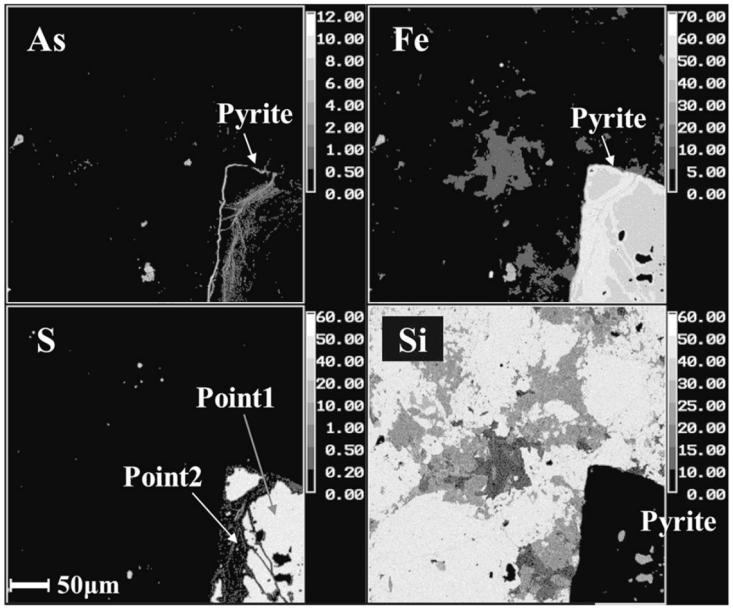


図-12 EPMA分析による砒素の溶出量が基準を超過した岩石中の砒素、鉄、硫黄、ケイ素の元素マッピング結果（小向ほか（2010）の図-6を引用）[23)]

砒素は画像右下の黄鉄鉱（Pyrite）の表面（粒子境界）と、黄鉄鉱の分解生成物（硫黄の溶脱と鉄の沈殿による）中に濃集している様子が分かる。EPMAのカラーマッピングの出力結果をモノクロ化している。スケールバーの単位は重量%。

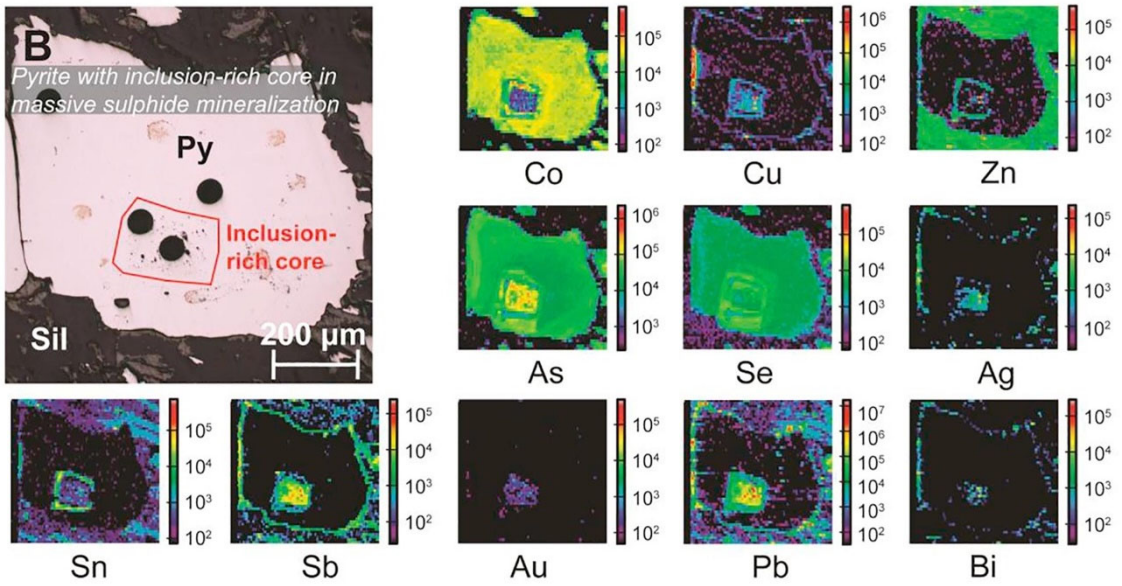


図-13　LA-ICP-MS による黄鉄鉱の元素濃度マッピングの定性分析例 [24)]

黄鉄鉱結晶中の微量な砒素や鉛、その他の微量元素の濃度や分布を可視化することができる。

スケールバーの単位はカウント数。

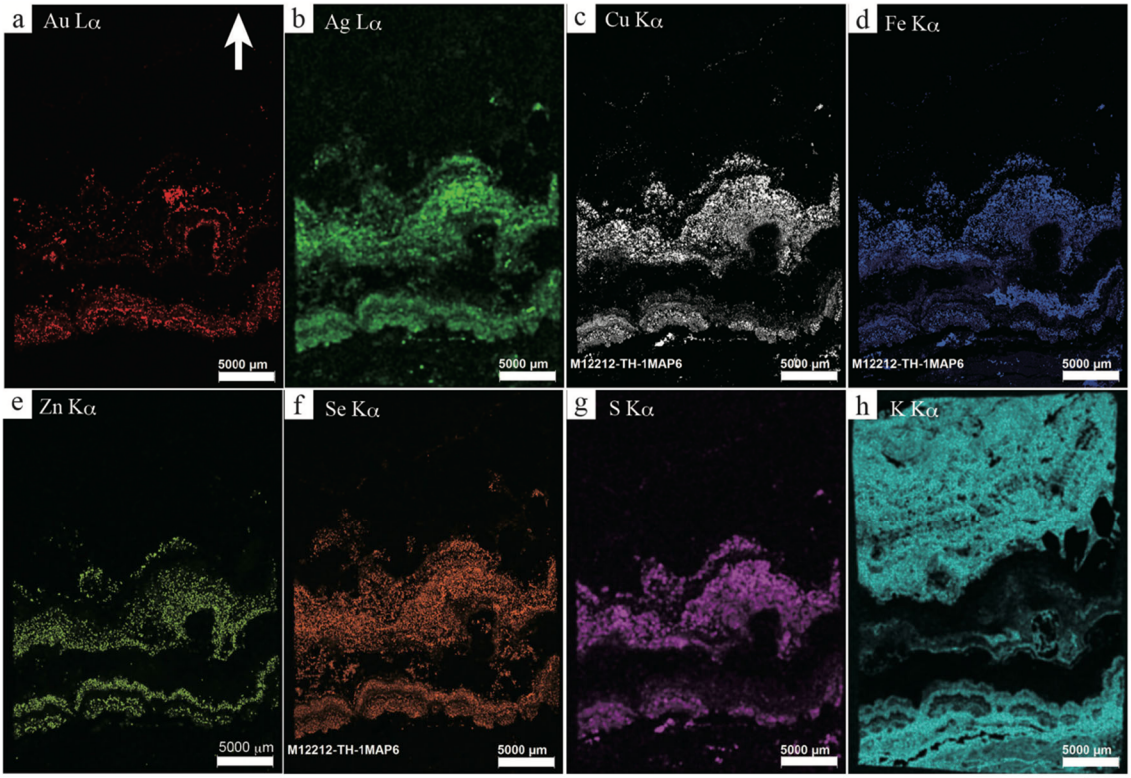


図-14 micro-XRF による菱刈鉱山鉱脈試料の岩石薄片（2.5×3.5cm 程度）スケールでの元素マッピングの例（Shimizu（2015）の Fig.8 を引用）[25)]

測定時間は 2 時間程度で、セレン（Se）の検出限界は 20-100ppm 程度となる。

(5) 同位体分析法による自然由来と人為由来物質の判別法

岩石や土壌、河川・地下水などの同位体組成を用いることで、自然由来と人為由来の物質を判別できる可能性がある。以下にその事例を紹介する。

鉛（Pb）には質量数が 204 の鉛（^{204}Pb）の他に、質量数 238 のウラン（^{238}U）が分裂する過程で生成される ^{206}Pb や、^{235}U が分裂する過程で生成される ^{207}Pb、さらに質量数 232 のトリウム(^{232}Th)が分裂する過程で生成される ^{208}Pb の同位体が存在する。こうした ^{204}Pb、^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb の存在比は、鉛の指紋であり、鉛の起源や年代測定、人為汚染の特定に活用することができる。特に ^{206}Pb，^{207}Pb，^{208}Pb の存在比は ICP 質量分析計で分析できるため、データの入手が容易である [14]。**図-15** は鉛含有量が 290～54,000 mg/kg の人為由来鉛含有土壌、公定法による溶出試験で汚染土壌として評価されてしまう千葉県市原市周辺の自然由来の鉛含有土壌、それに日本各地の鉱山周辺の自然由来の鉛について、^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb の存在比を比べた結果であり、非汚染土壌と鉛含有土壌とを識別することは可能である [14]。また、自然由来の鉛含有土壌と、人為由来の鉛含有土壌との区別も可能である。ただし、鉛同位体比を求めても区別が明瞭に識別できない場合は、鉛の全含有量などを加味することで識別の有効性が増すと考えられるため、同位体比（^{207}Pb/^{206}Pb）と鉛濃度の逆数との関係をプロットすることで人為由来と自然由来の判別が可能となる場合がある [26]。

鉛の同位体分析において、^{204}Pb、^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb のすべての同位体比を精度良く測定する場合には、表面電離型質量分析計（TIMS）やマルチコレクター型 ICP 質量分析計などが必要である。一方、これらの装置は一部の大学や国・公立系の研究機関などに設置されているものの、計量証明事業所にはほとんど配備されていないのが現状である。^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb のみの測定は通常の ICP 質量分析計でも対応できるため、一部の計量証明事業所で分析サービスが行われている。通常、質量分析により ^{204}Pb を測定するためには、^{204}Pb に

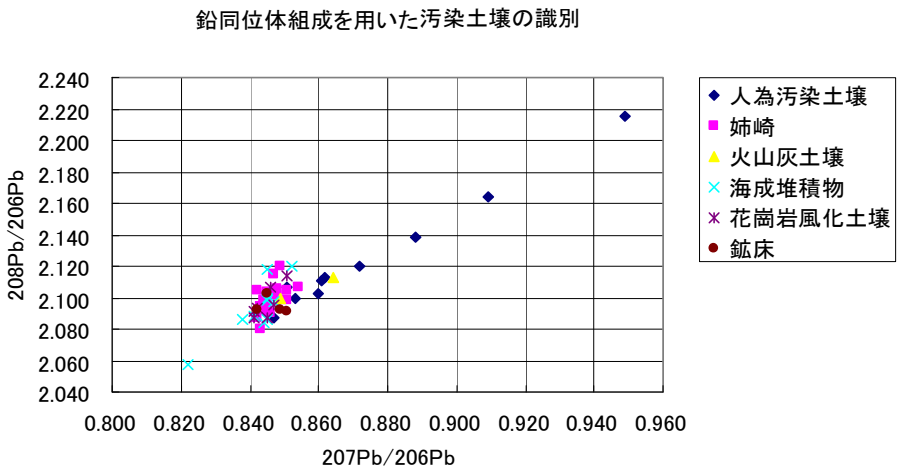


図-15 日本の様々な土壌・堆積物試料の鉛同位体組成 [1),14)] より作成

データには人為汚染を受けた土壌、姉崎地域の土壌・堆積物、関東・九州地域の火山灰質土壌、海成堆積物、花崗岩風化土壌、および金属鉱床周辺の土壌が含まれる。

干渉する ^{204}Hg を除去するため、溶液試料中の鉛を樹脂カラムなどで完全に分離抽出する前処理、あるいは同時測定した ^{200}Hg、^{202}Hg の測定値から ^{204}Hg の影響を補正する手法が用いられる。最近では、トリプル四重極型の ICP 質量分析計（ICP-MS）を使用して、^{204}Hg の同重体干渉をアンモニアガスにより反応除去する手法も提案されている。

クロムに関しても、同位体比を測定することで自然由来と人為由来の物質を判別できる場合がある[26]。クロムの安定同位体である ^{52}Cr と ^{53}Cr の偏差千分率（$\delta^{53}Cr$）を用いることで、人為由来の地下水汚染が識別される場合がある。これは一般的な火成岩・堆積岩および海水が $\delta^{53}Cr \pm 1$ ‰を示すのに対して、汚染地下水では還元環境下で Cr(IV)の選択的な還元による沈殿が生じ、同位体分別が進行して $\delta^{53}Cr$ が 1 ‰を大きく超えるためである[27]。また、六価クロム Cr(IV)が Cr(Ⅲ)に還元され無毒化していく程度の評価にも同位体比の測定が有効であるとされる[28]。

地下水など環境水中の重金属等について、自然由来か人為由来かを判別するためには、重金属等元素自体の濃度、化学形態および安定同位体比を使用する以外にも、酸素、水素、窒素、硫黄の安定同位体比を測定することで判別できる場合がある。ブラジルにおける判別例として、ふっ素濃度の高い地下水が見つかった際に、酸素、水素、窒素、硫黄の同位体比を測定することで、窒素同位体比（$\delta^{15}N$）と酸素同位体比（$\delta^{18}O$）が、汚染源の候補となる肥料の同位体比と区別されたために、地下水中のふっ素が長期間の岩石・水反応により形成された自然由来であると判断された[26), 29)]。

(6) 岩石・土壌の酸性化可能性の検証方法

地中にあった新鮮な掘削土が大気や水と反応することで、酸性水を発生させる場合がある。日本における掘削土の酸性化事例の多くが、酸素を溶存する地下水や降水が浸透した岩石中で、黄鉄鉱などの硫化鉱物や石膏などの硫酸塩鉱物が酸化・溶解し、滲出水が酸性化するという現象に由来すると考えられ、土壌分類においては硫黄化合物により強酸性となる土壌（酸性硫酸塩土壌）として定義されている[30]。酸性化の主要因となる硫黄分の起源は、火山成と海成に区分され、前者は火山活動に関連した熱水変質・鉱化作用に起源をもつ地域、後者は海水に起源をもつ堆積岩類およびその分布域に存在する[30]。岩石・土壌およびその滲出水が酸性化する可能性は、岩石・土壌中の黄鉄鉱などの酸性水の起源物質の含有量と、方解石などの炭酸塩鉱物類、長石類、スメクタイトなどの粘土鉱物類などの pH 緩衝鉱物との含有量比によって説明される[31]。実験的には、岩石中に含まれる方解石など溶解速度の速い炭酸塩鉱物が存在すると、炭酸イオンによる中和機能が働く。岩石中の黄鉄鉱などが酸化分解することで酸性水が発生しても、緩衝鉱物が消費され尽くす、あるいは石膏など中間（2 次）鉱物の晶出で反応が阻害されない限りは、発生した酸性水の pH は中性～アルカリに維持されることが確かめられている[32]。また、すでに硫化鉱物の酸化が進行した岩石や土壌においては、酸化の中間生成物としてジャロサイト（鉄明礬石）が形成される場合がある[33]。このように、岩石・土壌中の硫黄溶出源と、pH 緩衝鉱物種の同定と含有量の推定を行うことが有効であるため、本マニュアル記載の酸性化可能性試験に加えて、X 線回折分析

（XRD）、岩石薄片の偏光顕微鏡観察、SEM-EDS や EPMA による元素分析などによる鉱物分析を行うことで、酸性化の可能性がある岩石を特定できる可能性がある。

また、酸性化する岩石において、酸性水を生じる硫酸の起源となる岩石中の黄鉄鉱と、岩石中に含まれる方解石や長石類の量比を、全岩化学組成のカルシウム含有量と硫黄含有量の量比（Ca/S）として求め、酸性化可能性を判別する手法も提案されている[34),35)]。硫黄含有量・カルシウム含有量については、上述（1）に記述した蛍光X線分析による全岩化学組成分析にて実施可能である。しかしながら、対象とする岩石種で、どのような鉱物組合せが確認され、どのような反応が考えられるかを事前に検証する必要がある。例えば、pH 緩衝が期待される岩石中の炭酸塩鉱物はカルシウム炭酸塩である方解石・あられ石の他に、$CaMg(CO_3)_2$（苦灰石）、$FeCO_3$（菱鉄鉱）、$MgCO_3$（菱苦土鉱）、$MnCO_3$（菱マンガン鉱）などとして含まれる場合があり、あらかじめ炭酸塩鉱物種がカルシウム炭酸塩であることを同定し、評価する必要がある[36)]。また、炭酸塩鉱物量により pH 緩衝が支配されるような岩石では、炭酸塩鉱物量（無機炭素含有量）と硫黄含有量を測定する手法が有効である。分析手法の例として硫黄の湿式分析[37)]、密閉容器で試料を酸分解し発生した二酸化炭素の圧力測定による無機炭素分析[38)]、試料を熱分解し、炭素、窒素、水素、硫黄ガスを分離し測定する手法[37),39)]などが用いられる。

重金属等の溶出が懸念される岩石や土壌において、将来的な酸性化の可能性を判別する試験方法として、現在では通常の純水を用いた振とう試験による溶液の pH 計測と、30 %濃度の過酸化水素水（H_2O_2）を用いて岩石試料を強制酸化し、反応後の pH を測定する方法（強制酸化試験）[40)]が広く用いられている。これらの試験方法で想定される岩石・水反応として、前者の純水を用いる試験では、含有鉱物類の表面における酸化・溶解（中和）反応の関係を反映していると考えられる。一方、後者の過酸化水素水を用いる試験では、岩石中に含まれる黄鉄鉱などの硫化鉱物のほぼ全量を強制的に酸化・溶出させることで、岩石の酸性化可能性（酸化ポテンシャル）の最大量を見積もることとなる。過酸化水素水による強制酸化試験は過剰あるいは安全側への過大な見積もりとなる事例も報告されており[41)]、より長期の傾向を把握するためには、本マニュアル掲載の土研式雨水曝露試験など、より実現象に近い環境・時間スケールに対応した酸性化可能性試験による評価が望ましいと考えられる。

岩石・土壌の酸性化と酸性水の発生においては、岩石中の鉱物組成と反応面積、水の浸透速度、鉱物の酸化・溶解速度などが相互に関連するため、重金属等の溶出リスクの評価を行うためには、酸性化可能性を考慮した複合的な岩石・水反応のモデル化が必要となる。

岩石－水反応のモデル化手法として、各種の地球化学コード（熱力学計算ソフト）を用いることができる。代表的な地球化学コードとしては、アメリカ地質調査所（USGS）が開発・無償公開した PHREEQC[42)]が、溶出試験の解析に広く用いられており、反応鉱物の量比と種類、水溶液の水質・元素濃度条件、温度条件などを設定することで、水溶液中の化学種の種類や形態、鉱物種の飽和指数、イオン交換反応・表面錯体形成などの反応モデルを組み込

んだ計算をすることができる。

【参考文献】

1) 独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター：土壌・地質汚染評価基本図「5 万分の 1 姉崎」, CD-ROM，2003.
2) 独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター：土壌・地質汚染評価基本図「5 万分の 1 仙台地域」, CD-ROM，2006.
3) 山田亮一，土屋範芳，渡邊隆広：三陸海岸ならびに仙台平野における東北地方太平洋沖地震に起因した津波堆積物中のヒ素ならびに重金属類の起源，地学雑誌，Vol.123，No.6，854-870, 2014.
4) 中田英二：蛍光 X 線による堆積岩の組成分析法に関する提案 -粉末ペレット法とガラスビード法を併用した分析法の適用-，電力中央研究所研究報告書，N05063，pp.1−24，2006.
5) 山崎秀策，岡﨑健治，倉橋稔幸：エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置を用いたトンネル地山の劣化評価について-測定手法・試料作成法の違いによる定量分析精度の検討-，寒地土木研究所月報，No. 790，pp.66-72，2019.
6) 河合潤：ハンディー型蛍光Ｘ線元素センサー，材料と環境，Vol.60，pp.512−517，2011.
7) 衛蓉，池田克弥，竹内章浩，定免慶，山中克仁，猿渡英之，原口紘忞：誘導結合プラズマ発光分析及び誘導結合プラズマ分析法による湖底堆積物試料の多元素同時分析，分析化学，Vol.48，No.3，pp.365-375，1999.
8) 松本健：難溶性物質の分解法，ぶんせき，No.326，pp.60−66，2002.
9) 槇納好岐，クーフィーシン，黒木康生，鈴木敏弘，平田岳史：高速多点レーザーアブレーション-ICP 質量分析法を用いた多元素同時分析，Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan，Vol.67，No.5，pp.154-159，2019.
10) 新藤智子，杉内由香，嶋田有里奈，福岡孝昭：レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析(LA-ICP-MS) 法によるガラスビード試料の定量分析，立正大学地球環境研究，Vol.11，pp.103-119，2009.
11) 田村明弘，高丸涼，森下知晃，荒井章司：全溶融ガラスを用いた全岩化学組成の測定： EPMA と LA-ICP-MS による定量分析，日本地質学会学術大会講演要旨，第 117 年学術大会（2010 富山），P-152，2010.
12) Tessier, A., Campbell, P. G. C. and Bisson, M.: Sequential extraction procedure for the speciation of particle trace metals, Analytical Chemistry, 51, 844-851, 1979.
13) Quevauviller PH, Rauret G, López-Sánchez JF, Rubio R, Ure A, Muntau H.: Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure. Sci. Total Environ.205, 223–234, 1997.
14) 丸茂克美，江橋俊臣，氏家亨：日本各地の土壌中の重金属含有量と鉛同位体組成，資源地質，Vol.53，No.2，pp.113-123，2003
15) 東京農工大学，国立環境研究所，産業技術総合研究所，京都大学：機器分析と溶出特性試験を組み合わせた自然・人為由来汚染土壌の判定法の開発 平成 28～平成 30 年度，環境研究総合推進費 終了研究成果報告書，pp.1−92，2019.
16) 金子恵美子，磯江準一：入門講座 簡易分析法-水質分析キット-，ぶんせき，Vol.7，pp.360-365，2002.
17) 森勝伸：HPLC-MS によるヒ素、セレン及びクロムのスペシエーション，FIA 研究懇談会会誌，31，No.2，pp.115-116，2014.

18) Timerbaev, A. R.: Element speciation analysis using capillary electrophoresis: twenty years of development and applications, Chemical Reviews, Vol.113, pp.778-812, 2013.
19) 坂井啓明：ベンガル平野における天然由来のヒ素による大規模な地下水汚染の発生機構-フィールド・実験的研究の現状と今後の課題-，地球化学，Vol.45，pp.61−97，2011.
20) 宮内宏哉，中西貞博，山本孝，河合潤：実験室系X線吸収分光分析装置を用いる土壌及びプラスチック中クロムの価数評価，分析化学，Vol.58，No.4，pp.321-325，2009.
21) Semedley P.L.and Kinniburgh D.G.: A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, Applied Geochemistry, Vol.17, Issue 5, pp. 517-568, 2002.
22) 丸茂克美，小野雅弘，細川好則：可搬型X線透視装置による鉛汚染土壌分析，第 14 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要旨，CD-ROM，2008.
23) 小向雄人，塚本師子，織田隆史，丸太俊久，守田昌敏：砒素の汚染土壌の由来に関する実験的検討-土壌鉱物の EPMA マッピング分析-，環境化学，Vol.20，No.1，pp.15-19，2010.
24) Kampmann, T.C., Jansson, N.F., Stephens, M.B., Olin, P.H., Gilbert, S. and Wanhainen, C.: Syn-tectonic sulphide remobilization and trace element redistribution at the Falun pyritic Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) sulphide deposit, Bergslagen, Sweden, Ore Geology Reviews, Vol.96, pp.48-71, 2018.
25) Shimizu T.: Elemental analysis of bonanza ores of the Ryosen veins, Hishikari epithermal Au–Ag deposit, Japan, using micro X-ray fluorescence (μ-XRF), Bulletin of the Geological Survey of Japan, Vol. 66 (1/2), pp.1-14, 2015.
26) 島田允堯：自然由来重金属と環境汚染-応用地質学・地球化学的データバンク-，愛智出版，pp.1-240, 2014.
27) Ellis, A. S., Johnson, T.M, and Bullen, T.D.: Using chromium stable isotope ratios to quantify Cr(VI) reduction: lack of sorption effects. Environ. Sci. Technol., Vol.28, pp.3604-3607, 2004.
28) Blowes, D.: Tracking hexavalent Cr in groundwater, Science, Vol.295, Issue 5562, pp.2024-2025, 2002.
29) Casagrande Marimon, M. P. C., Knöller, K. and Roisenberg, A.: Anomalous fluoride concentration in groundwater – is it natural or pollution? A stable isotope approach. Isotopes in Environmental and Health Studies, Vol.43, No.2, pp.165-175, 2007.
30) 石渡輝夫，沖田良隆，斉藤万之助：北海道における酸性硫酸塩土壌の区分，分布および性状，日本土壌肥料学雑誌，Vol.63，No.1，pp.86-90，1992.
31) 鹿園直健，吉田直樹，中田正隆：北海道幌延地域の水―堆積岩反応実験による水質変化，とくに pH 変化要因の解明，応用地質，Vol. 51, No. 3, pp.112-121, 2010
32) 五十嵐敏文，斉藤綾佑，長澤俊輔，朝倉國臣，木村裕俊：カラム溶出試験による緩衝鉱物の酸性水中和現象の解明，応用地質 Vol.46，No.5，pp.256-264，2005.
33) 林久人：ジャロサイトの鉱物化学と酸性硫酸塩土壌，粘土化学，Vol.34，No.3，pp.118-124，1994.
34) 服部修一，太田岳洋，木谷日出男：酸性水発生に関わる掘削残土の応用地質学的検討-鉱山に近接して施工される八甲田トンネルにおける岩石特性評価法-，応用地質，Vol.43，No.6，pp.359-371，2003.
35) 服部修一，太田岳洋，菊地良弘：八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水溶出に関する判定手法の評価，応用地質，Vol.47，No.6，pp.323-336，2007.

36) 倉橋稔幸，田本修一，山崎秀策：環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究(2)，平成 27 年度土木研究所プロジェクト研究報告書，pp.1-20，2015.
37) 狛武，鈴木尉元，小玉喜三郎：房総半島における上総層群泥質岩中の硫黄，炭素，塩素，鉄の形態・組織と堆積環境，地質調査所月報，Vol.34，No.4，pp.191-206，1983.
38) 藤森雄一，福江正治，加藤義久，増渕和夫，笹島卓也：炭酸カルシウム含有量による地盤形成過程の評価，土木学会論文集 C，Vol.63，No.4，pp.1163-1174，2007.
39) 山崎新太郎，千木良雅弘：泥質片岩の風化メカニズム，および，風化と地すべりとの関係について：四国三波川帯の不攪乱ボーリングコアを用いた解析，地質学雑誌，Vol.114，No.3，pp.109-126，2008.
40) 地盤工学会　室内試験規格・基準委員会：過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法．地盤材料試験の方法と解説［第一回改訂版］－二分冊の１－，pp.379-388，地盤工学会，2020.
41) 田本修一，伊東佳彦，品川俊介，阿南修司：岩石由来の酸性水発生予測評価に関する検討，第 49 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1977-1978，2014.
42) Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.: Description of i Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 6-A43, pp.1-519, 2013.

参考資料８　短期溶出試験、酸性化可能性試験と土研式雨水曝露試験との比較

本マニュアルにおける自然由来重金属等含有土の溶出特性評価では、地質区分やその性状ごとに、短期溶出試験、酸性化可能性試験を実施し、双方の試験結果が目安（土壌溶出量基準、短期溶出試験の検液の pH が酸性（おおむね 4.0 以下）でない、および酸性化可能性試験の検液の pH が 3.5 を上回る）を満足するかどうかを確認し、そのいずれかもしくは双方の試験結果が目安を満足しない場合に、実現象再現溶出試験の結果を踏まえて対策の必要性を総合的に評価することとしている（**2.1**）。（なお、要管理土かどうかの評価においては、直接摂取のリスクに関する評価も加味する。）

ここでは、品川ほか[1)]のデータに基づき、同一地質試料を用いて実施した短期溶出試験、酸性化可能性試験と、実現象再現溶出試験の一種である土研式雨水曝露試験[2)]の 364 日間（以後１年間という）の滲出水の平均濃度との比較結果を示し、「要管理土の判定の目安」の妥当性を示す。

１．　試料と試験方法

試験には国内各地で採取した岩石 25 試料（**表-1**）を用いた。これらの岩石試料をハンマーで粗粉砕し、ジョークラッシャーおよびステンレス製の鉄鉢で試験に適する粒径となるよう粉砕した。主要な試験条件を**表-2** に、検液の測定方法を**表-3** に示す。各種溶出試験においては、検液のカドミウム、鉛、砒素の各濃度および水素イオン濃度指数（pH）、電気伝導率（EC）を測定した。

土研式雨水曝露試験の結果については、品川・佐々木[3)]に従い、重金属等の溶出性に関しては、１年間の滲出水の平均濃度が地下水環境基準を満足するかどうかで評価した。なお、１年間の平均濃度で評価する理由は、①土研式雨水曝露試験の滲出水の濃度変化は曝露開始からおおむね１年以内の初期に極大となり、その後時間の経過とともに濃度が低減することから、初期の濃度で評価することは安全側の評価を与えること、②地下水環境基準は

表-1　各試験の実施試料と曝露日数

試料名	岩種	曝露日数	試料名	岩種	曝露日数
SK2	硫砒鉄鉱含有鉱脈	2,191	AI	凝灰角礫岩（変質）	1,260
YN	安山岩	2,191	US	安山岩（変質）	1,260
DM	火山礫凝灰岩	2,191	TU	凝灰角礫岩（変質）	1,260
NK	泥岩	2,191	MR	安山岩（変質）	1,260
SP	砂岩	2,191	KB1	泥岩	559
TK	泥質片岩	1,344	KB2	泥岩	559
KS	砂質泥岩	1,344	KB3	泥岩	559
MB1	泥岩	1,344	KB4	砂岩・泥岩	559
MB2	泥質細粒砂岩	1,344	KR	泥岩	559
MB3	泥岩	1,344	KB5	泥岩	364
MB4	凝灰岩	1,344	AB	（変質粘土）	364
MB5	泥質砂岩	1,344	TT	極細粒砂岩	364
SE	凝灰岩	1,316			

表-2　溶出試験などの条件

試験名称	溶出条件	試料粒径
短期溶出試験	固液比 1:10、6 時間振とう HCl 水溶液(pH5.8-6.3)	<2mm
酸性化可能性試験	固液比 1:10、30% H_2O_2 溶液 反応が収束するまで静置	<2mm
土研式雨水曝露試験（図-1）	野外で試料を通過した雨水を 28 日間貯留（364 日間継続）	40～10mm

表-3　検液の測定方法

項目	測定方法
カドミウム	JIS K 0102 55.2～4 のいずれか
鉛	JIS K 0102 54.2～4 のいずれか
砒素	JIS K 0102 61.2 または 61.3
pH	JIS K 0102 12.1
EC	JIS K 0102 13

対象物質の 1 年間の平均濃度を基準としていることを参考としたことによる。

また、酸性化に関しては、1 年間の滲出水の最低 pH が水質汚濁防止法の一般排水基準の下限値である 5.8 を下回るかどうかで評価した。

２．実験結果

25 試料のうち、短期溶出試験において Cd, Pb, As のいずれかの元素で土壌溶出量基準を超過したものが 10 試料（40 %)、酸性化可能性試験において pH が 3.5 を下回ったものが 9 試料（36 %)、土研式雨水曝露試験において初めの 1 年間の滲出水の平均濃度が Cd, Pb, As のいずれかの元素で土壌溶出量基準を超過したものが 13 試料（52 %)、初めの 1 年間の滲出水の最低 pH が水質汚濁防止法の排水基準の下限値である 5.8 を下回ったものが 8 試料（32 %）であった。

なお、土研式雨水曝露試験において最低 pH が 5.8 未満となった試料は KB1 試料を除き全て、1 年間の滲出水の平均濃度がいずれかの元素で地下水環境基準を超過した。

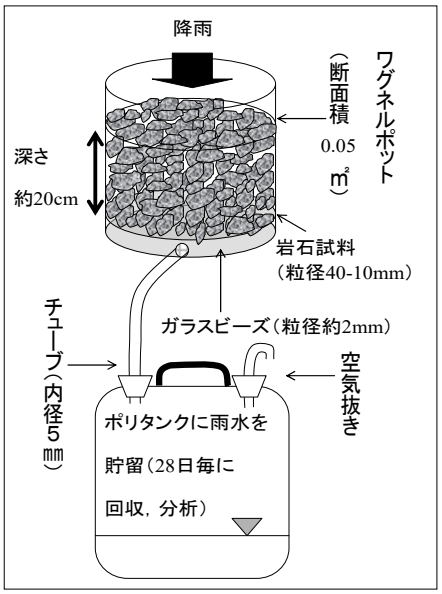


図-1　土研式雨水曝露試験の概要 [2)]

３．長期溶出特性の評価方法の検討

3.1 酸性化可能性の判定

品川・佐々木[3)]は、酸性化可能性試験で pH が 3.5 未満のものについては、長期的には排水基準の下限値である 5.8 を下回る、すなわち酸性化する可能性があるものと評価した。**図-2** に、評価に対して土研式雨水曝露試験の結果がどのようであったかを示す。

安全側に評価した 2 試料のうち YN 試料については曝露開始後約 1,000 日で酸性化した。また、DM 試料については約 2,100 日で pH が 5.3 程度まで低下したことから、長期的には酸性化したものと評価可能である。

見逃し判定をした 2 試料のうち、US 試料については pH が 4.4 と酸性を示したが、2 回目の採水時には pH が 6.8 まで上昇した。したがって、長期的には酸性化しない試料と見なすことが可能である。また、KB1 試料については見逃しの原因は明確でないものの、全体として、酸性化可能性の判定基準はおおむね妥当であると考えられる。

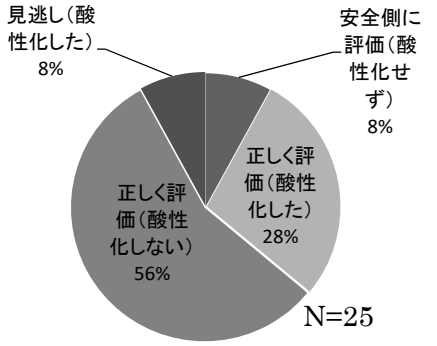


図-2　土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の最低 pH）に基づく酸性化可能性試験の評価[1)]

3.2 重金属等の長期溶出に関する判定

品川・佐々木[3)]は短期溶出試験の結果、いずれかの元素で土壌溶出量基準を超過、または検液の pH が 5.8 未満か、あるいは酸性化可能性試験の検液の pH が 3.5 未満の試料については、長期的に重金属等が溶出する可能性があるものと評価した。**図-3** に、評価に対して曝露試験結果がどのようであったかを示す。

安全側に評価した 7 試料のうち、2 試料は，前述の酸性化すると判定されたものの実際には酸性化しなかった試料である。残りの 5 試料は短期溶出試験結果（主に As）が土壌環境基準値を超過するものの、曝露試験における 1 年間の平均濃度が土壌環境基準値を超過しなかったものである。これらはいずれも泥質岩（KS, MB1, MB2, MB3 および MB5 試料）であった。

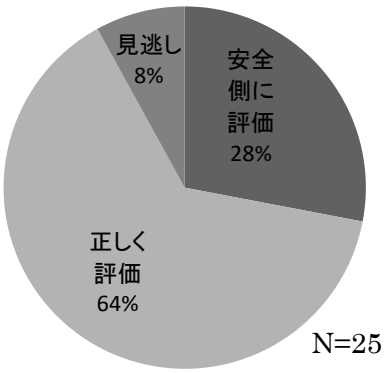


図-3　土研式雨水曝露試験結果（約 1 年間の平均濃度）に基づく重金属等の長期溶出に関する判定の評価[1)]

一方、見逃し判定をしたのは KB2（泥岩）および KB4（砂岩・泥岩）の 2 試料であった。

以上の結果からは、品川・佐々木[3)]の評価基準はおおむね妥当であると言えるものの、酸性化しない泥質岩については安全側に評価する結果となった。

４．まとめ

以上の結果、土研式雨水曝露試験結果に基づく評価を正しいものとした場合、「要管理土の判定の目安」について、酸性化に関してはほぼ妥当な、重金属等（Cd, Pb, As）の溶出に関しては若干安全側の評価を与えることから、目安として適切であると考えられる。

なお、実際の盛土内の環境は、土研式雨水曝露試験の環境に比べて酸化的でないと考えられるものの、酸性化を抑制できるかについては不明な点がある。今後は実大盛土の内部環境測定と盛土滲出水の pH 観測によって、評価の妥当性の検証が必要であると考えられる。

【参考文献】

1) 品川俊介，安元和己，阿南修司，佐々木靖人：岩石からの重金属等の長期溶出特性評価．第 47 回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.1859-1860，2012.
2) 土木研究所，応用地質，大成建設，三信建設工業，住鉱コンサルタント，日本工営：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書　建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）．土木研究所共同研究報告書，No.358，p.89，2007.
3) 品川俊介，佐々木靖人：岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出特性評価方法．土木技術資料，Vol.52，No.6，pp.10-13，2010

参考資料９　岩石試料の一般的な試料調製手順

本資料は、地盤工学会「社会実装に向けた新しい地盤環境管理と基準に関する研究委員会」の、掘削岩石評価法ワーキンググループでの検討結果[1)]を一部修正したものである。

1　適用範囲

この基準は、山岳トンネル等の建設時に発生する岩石材料（岩砕）について特定有害物質等の溶出量・全含有量特性を把握する目的で、試験試料（岩石破砕試料）を調製する方法について規定する。

2　引用規格

次に掲げる規格及び基準は、この基準に引用されることによって、この基準の規定の一部を構成する。これらの引用規格及び基準は、その最新版（追補を含む）を適用する。

JIS A 1201　地盤材料試験のための乱した土の試料調製方法

JIS A 1204　土の粒度試験方法

3　用語及び定義

この基準で用いる主な用語及び定義は、次による。

(1) 岩石破砕試料

試験に使用する岩石試料をハンマー、破砕器具等を用いて最大粒径が目標試料粒径以下になるように全量を破砕したもの。

(2) 溶出量

岩石破砕試料から溶媒中に溶出した化学物質の量。溶媒中の濃度（mg/L）で示される。

(3) 全含有量

岩石試料中に含まれている化学物質の量。単位質量当たりの量（mg/kg）で示される。

4　試料調製方法の種類

試料の調製方法は、溶出量試験に用いる方法と全含有量試験に用いる方法の 2 種類とする。それぞれの目標試料粒径は、**表-1** による。

表-1　試料調製方法の種類

調製方法	目標試料粒径
溶出量試験に用いる方法	全量 2 mm 以下
	全量 37.5 mm 以下（ただし，9.5 mm 以下の試料を除く）
全含有量試験に用いる方法	粉末試料 （全量 2 mm 以下の試料を縮分したものを使用する）

5　試料調製のための器具

試料調製のための器具は、次のとおりとする。

a)　ハンマー　岩石用のハンマーを使用する。

b)　破砕機器　岩石材料を粒径 2 mm 以下に破砕できるもの。

注記　ジョークラッシャー、金属製や瑪瑙（めのう）製の乳鉢等を使用する。金属製の粉砕部は、耐摩耗性に優れるタングステンカーバイド製等を使用することが好ましい。なお、破砕機器の材質は、分析項目や分析方法によっては不適当なものがあるので留意が必要である。また、破砕時に熱の発生が少ない機器を使用する。別の岩石材料を破砕する場合は、コンタミネーションを避けるため、破砕機器を十分に洗浄するか、最初に破砕した試料を廃棄するなどの配慮が必要である。

c)　ふるい　JIS Z 8801-1 に規定する網ふるい目開き 2 mm，9.5 mm，37.5 mm のもの。

注記　JIS Z 8801-1 に規定する金属製のものに加えて、非金属製の網ふるいを使用してもよい。

d)　試料分取器　JIS A 1201「土質試験のための乱した土の試料調製方法」の 5.1 試料の分取方法に規定するもの。

6　試料調製

(1) 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製

岩石破砕試料の調製にあたっては、粗破砕過程と破砕過程の 2 段階で実施する。

a)　粗破砕過程は、供試する岩石を大形のハンマーや破砕機器で粒径 10～50 mm 程度まで破砕する。このとき、岩石試料が水分を含む場合は、30℃を超えない温度で空気乾燥させる。

b)　破砕過程では，粗破砕された粒径 10～50 mm 程度の試料を更に破砕機器で破砕して目開き 2 mm のふるいを全量通過させる。

注記　供試する岩石材料はすべて 2 mm 以下に破砕する。粗破砕の過程で生じた目開き 2 mm のふるいを通過する試料は、直接破砕過程で作成した粒径 2 mm 以下の試料と混合する。なお、破砕の方法は、ハンマー・金属製乳鉢による人力破砕、破砕機等による機械破砕などあるが、破砕方法は特に規定しない。

(2) 溶出量試験に用いる全量 37.5 mm 以下の試料調製

a)　供試する岩石を大形のハンマーや破砕機器で破砕して目開き 37.5 mm のふるいを全量通過させる。

b)　上記試料について、目開き 9.5 mm のふるいを通過した試料を除去する。

注記　目開き 9.5 mm のふるいを通過した試料を除去せずに目開き 37.5 mm のふるいを全量通過させた試料を用いて溶出量試験を行うことも可能であるが、その場合、試験に供した試料の粒径範囲を明記しておく必要がある。

(3) 全含有量試験に用いる粉末試料の調製

a) 6(1)で調製した粒径 2 mm 以下の岩石破砕試料から縮分した試料について、瑪瑙製の乳鉢等を用いて粉末試料を調製する。

注記 粉末試料の調製は、瑪瑙製の乳鉢を用いる方法の他、ボールミルやディスクミル等の器具を用いる方法がある。試料の調製にあたっては、熱の発生が少ない機器を使用する。

7 報告事項

試料調製については、次の事項を報告する。

a) 供試する岩石の地質性状

注記 地質性状とは、岩相（岩石名）、変質や断層破砕の有無、風化の程度等をいう。

b) 供試する岩石の採取時期と試料調製日

注記 採取時期は、ボーリングコアを用いる場合、ボーリング掘削時の時期とする。また、試料の採取時期と試料調製時期に隔たりがある場合は、保管状態（保管場所、封入等の有無、温度管理の有無等）についても報告する。

c) 供試する岩石の重量

注記 重量は、2 mm 以下の試料調製の場合、g 単位とし、37.5 mm 以下の試料調製の場合、kg 単位とする（整数）。また、全含有量分析に用いる粉末試料ついては、報告の必要はない。

【参考文献】

1) 鈴木弘明，品川俊介：岩石の溶出量試験・全含有量試験のための試料調製方法の提案. 地盤工学会誌，Vol.68，No.3，pp.16-17，2020.

参考資料 10　短期溶出試験方法

本方法は、試料調製方法を除き環境省告示第 18 号（平成 15 年 3 月 6 日）に準拠した試験である。

1　試料調製

参考資料９の「**6(1)** 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製」により調製された粒径 2 mm 以下の試料を縮分して用いる。ただし、非固結堆積物（岩盤の強風化物、崖錐堆積物や礫層など）については、これをさらに粉砕して使用する場合を除いて、粉砕を行わずに目開き 2 mm のふるいを通過した試料を用いる。

a)　試料（単位 g）と溶媒（水（日本産業規格 K 0557 に規定する A3 または A4 のもの））（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 500 mL 以上となるようにする。

b)　調製した試料液を常温（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、振とう幅を 4 cm 以上 5 cm 以下に調整したもの）を用いて、6 時間連続して水平に振とうする。振とう容器は溶媒の体積の 2 倍程度の容積を持つものを用いる。

注記　振とうに用いる容器は、測定の対象となる物質が吸着若しくは溶出しない容器を用いる。

c)　a）～ b）の操作を行って得られた試料液を 10 分から 30 分程度静置後、重力加速度 3,000G で 20 分間遠心分離した上澄み液を孔径 0.45 μm で直径 90 mm のメンブランフィルターで全量ろ過し、必要な量のろ液を正確に計り取って、これを検液とする。

注記　ろ過時間が 30 分以内の場合にはろ紙の交換は行わず、ろ過時間が 30 分を超える場合には、おおむね 30 分ごとにろ紙を交換する。

2　測定及び評価

測定項目は、調査の段階に応じて必要な項目を選定する。

a)　上記 1 の試料調製により得られた検液を用いて、日本産業規格等の規格に基づき測定を実施する。

b)　短期溶出試験によって得られた重金属等の測定結果は、土壌汚染対策法の土壌溶出量基準または第二溶出量基準と比較し、評価する。
ただし、発生土の用途や目的に応じて、他の試験結果と合わせた総合的な評価が必要となる。

参考資料 11　直接摂取のリスクを把握するための試験方法

本方法は、試料調製方法を除き環境省告示第 19 号（平成 15 年 3 月 6 日）に準拠した試験である。ただし、非固結堆積物（岩盤の強風化物、崖錐堆積物や礫層など）については、これをさらに粉砕して使用する場合を除いて、粉砕を行わずに目開き 2 mm のふるいを通過した試料を用いる。

1　試料調製

参考資料９の「**6(1)** 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製」により調製された粒径 2 mm 以下の試料を縮分して用いる。

(1) カドミウム及びその化合物、水銀及びその化合物、セレン及びその化合物、鉛及びその化合物、砒素及びその化合物、ふっ素及びその化合物及びほう素及びその化合物については、次の方法による。

a) 試料液の調製

試料 6 g 以上を量り採り、試料（単位 g）と溶媒（水（日本産業規格 K 0557 に規定する A3 又は A4 のもの。）に塩酸を加え、塩酸が 1 mol/L となるようにしたもの）（単位 mL）とを重量体積比 3 %の割合で混合する。

b) 溶出

調製した試料液を室温（おおむね 25 ℃）、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、振とう幅を 4 cm 以上 5 cm 以下に調整したもの）を用いて、2 時間連続して水平に振とうする。振とう容器は、ポリエチレン製容器又は測定の対象とする物質が吸着若しくは溶出しない容器であって、溶媒の 1.5 倍以上の容積を持つものを用いる。

c) 検液の作成

b) の振とうにより得られた試料液を 10 分から 30 分程度静置後、必要に応じ遠心分離し、上澄み液を孔径 0.45 μm のメンブランフィルターでろ過し、必要な量ろ液を正確に量り採って、これを検液とする。

(2) 六価クロム化合物については、次の方法による。

a) 試料液の調製

試料 6 g 以上を量り採り、試料（単位 g）と溶媒（純水に炭酸ナトリウム 0.005 mol（炭酸ナトリウム（無水物）0.53 g）及び炭酸水素ナトリウム 0.01 mol（炭酸水素ナトリウム 0.84 g）を溶解して 1 L としたもの）（単位 mL）とを重量体積比 3 %の割合で混合する。

b) 溶出

調製した試料液を室温（おおむね 25℃）、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、振とう幅を 4 cm 以上 5 cm 以下に調整したもの）を

用いて、2 時間連続して水平に振とうする。振とう容器は、ポリエチレン製容器または測定の対象とする物質が吸着若しくは溶出しない容器であって、溶媒の 1.5 倍以上の容積を持つものを用いる。

c) 検液の作成

b)の振とうにより得られた試料液を 10 分から 30 分程度静置後、必要に応じ遠心分離し、上澄み液を孔径 0.45 μm のメンブランフィルターでろ過してろ液を採り、定量に必要な量を正確に量り採って、これを検液とする。

2 測定及び評価

測定項目は、調査の段階に応じて必要な項目を選定する。

a) 上記 1 の試料調製により得られた検液を用いて、日本産業規格等の規格に基づき測定を実施する。

測定結果は、試料の重量とこれを 105 ℃で約 4 時間乾燥して得たものの重量とを比べて当該試料に含まれる水分の量を測定し、測定された重金属等の量を当該乾燥して得たもの 1 kg に含まれる量に換算する。

b) 本方法によって得られた重金属等の測定結果は、土壌汚染対策法の土壌含有量基準と比較し、評価する。

ただし、発生土の用途や目的に応じて、他の試験結果と合わせた総合的な評価が必要となる。

参考資料 12　酸性化可能性試験方法

本方法は、試料調製方法を除き「過酸化水素水による土及び岩石の酸性化可能性試験方法」（JGS 0271）に準拠した試験である。ただし、非固結堆積物（岩盤の強風化物、崖錐堆積物や礫層など）については、これをさらに粉砕して使用する場合を除いて、粉砕を行わずに2mm 目のふるいを通過した試料を用いる。

1　試料調製

参考資料９の「**6(1)** 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製」により調製された粒径 2 mm 以下の試料を縮分して用いる。

a)　試料およびトールビーカーの質量（単位 g）をはかり、トールビーカーに入れる。過酸化水素水（30 %）（日本産業規格 K 8230 に規定するものをいう））（単位 mL）に 10 mmol/L の水酸化ナトリウム溶液を加え pH を 6 に調整し、これを溶媒とする。

b)　試料の質量×10（mL）の溶媒をトールビーカーに静かに加え、試料と溶媒とを反応させる。激しい反応が終了した後、もしくは激しい反応が生じない場合、ホットプレート、湯せん用具等を用いて時計皿で覆ったトールビーカーを内容物が沸騰しない程度に加温する。加温中は適宜、かくはん棒等を用いて内容物をかくはんする。

注記　激しい反応が起こり、内容物が吹きこぼれるおそれがある場合は、溶媒を少量ずつ時間をおいて加える、トールビーカーを流水中で冷却する、容量の大きいトールビーカーを使用するなどを行う。

c)　試料から微細な気泡の発生がみられなくなった時点で加温を終了し、内容物が室温になるまで冷却する。

注記　加温中に内容物が沸騰すると試料からの微細な気泡の発生が確認できないので注意する。

d)　冷却後、トールビーカーの内容物の質量が試料の質量の 11 倍になるまで、水をトールビーカーに加え、かくはんしたものを測定用の試料液とする。

2　測定及び評価

a)　上記 1 の試料調製により得られた試料液を用いて、pH 計により pH の測定を行う。

b)　本方法によって得られた pH の測定結果の評価は、検液の pH が 3.5 以下の場合、長期的に酸性化する可能性があるものとして判定する。

参考資料 13　実現象再現溶出試験の例

実現象再現溶出試験は、発生土の実際の利用環境に近い条件を任意に設定して行う試験である。したがって、現場ごとに適切な方法を選択して実施する。ここではいくつかの試験方法について紹介する。また、**図-1** に各種試験について、実現象再現溶出試験としてのおおよその位置付けを整理した。

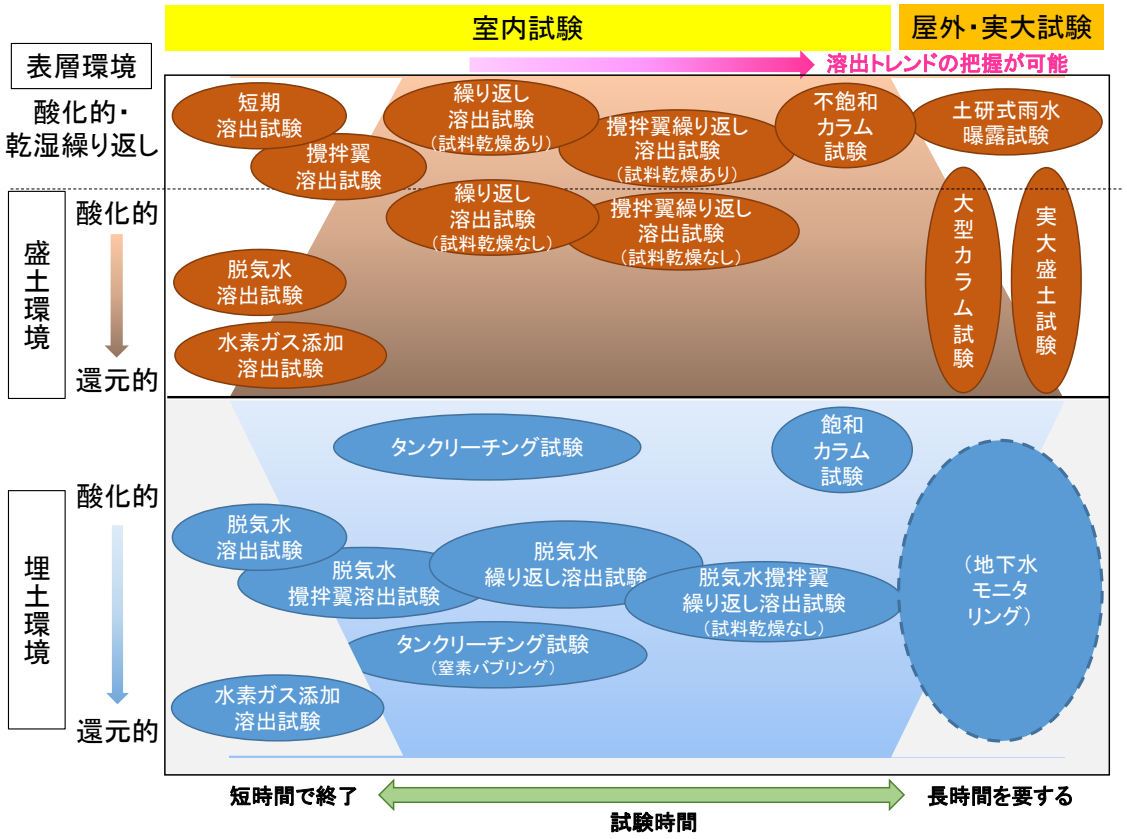


図-1　盛土等を想定した、各種試験の実現象再現溶出試験としての位置付け

1）実大盛土試験 [1~3]、大型カラム曝露試験 [4]

実大盛土試験（**図-2**）および大型カラム曝露試験（**図-3**）は、実際に盛立てを行う材料を使用して盛土または大型カラムを築造し、滲出水水質の経時変化を観測するものである。実際の盛土と類似の環境における滲出水質を把握することができることから、確実性の高い方法である。

本試験は、滲出水の地下浸透を防止する構造として、盛土またはカラムの内部へ浸透した水を集水する。集水した水は定期的に分析するとともに水質に応じて適切に処理を行う。水質分析のほか、滲出水量、盛土内の酸化還元電位、酸素濃度、土壌水分などを観測することもある。滲出水の採水にあたっては、排水工から盛土内への空気の流入がある

と、盛土内やカラム内の酸化還元状態が変化して水質に影響を及ぼすことから、排水工の構造は実際の盛土の構造に近いものとするなどの配慮が必要である。

一方、本試験方法の適用には以下の課題がある。

① 本格的な施工前に、大量の試料を採取する必要があることや、試験実施に時間と費用を要することから、適用できる場合が限定される。

② 数多くの試験を実施することは実務上困難なため、周到な事前調査に基づいて試験試料を選定する必要がある。

実大盛土試験と後述の土研式雨水曝露試験の結果の比較例を**図-5、図-6** に示す。

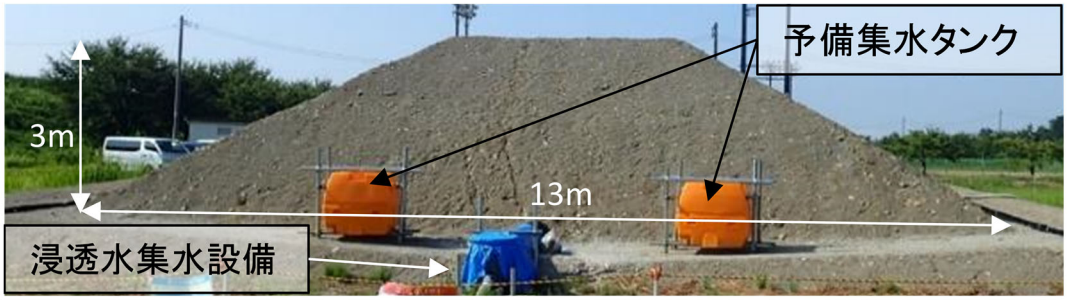


図-2 実大盛土試験の実施例

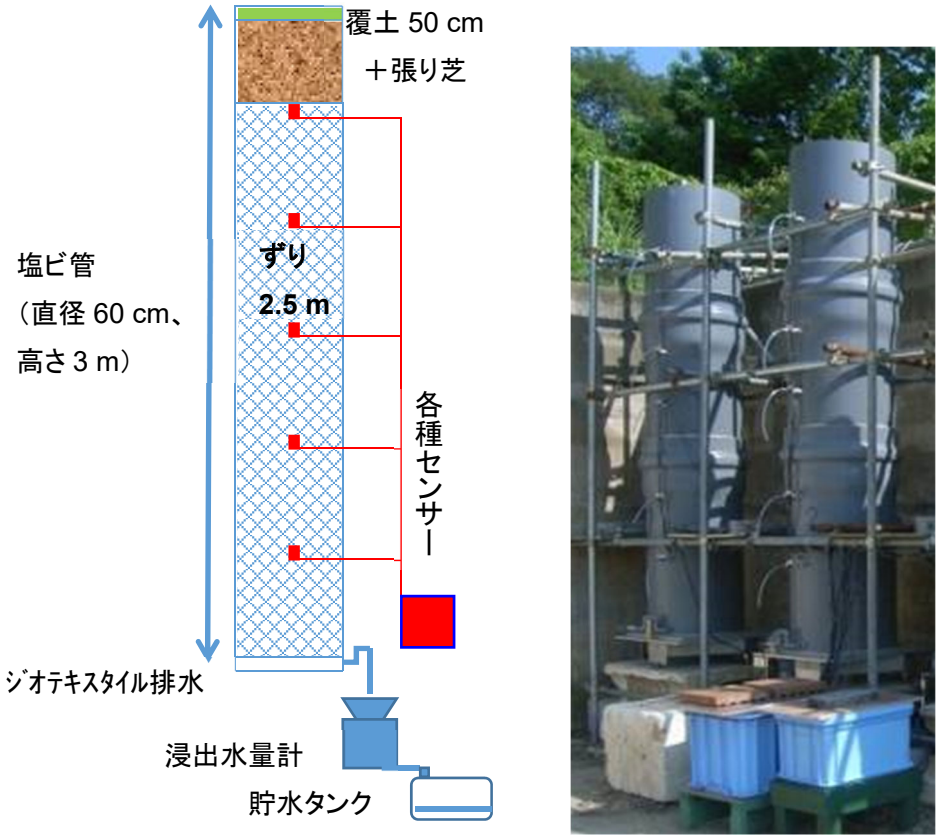


図-3 大型カラム曝露試験の実施例

２）土研式雨水曝露試験およびライシメーター試験

土研式雨水曝露試験[4]（**図-4**）は、現実の盛土場に近い条件を想定しつつ、ボーリングコア試料など比較的少ない試料量でも実施可能な、簡便な曝露試験である。

ワグネルポット（wagner pots）は、作物栽培試験用の容器であり、断面積が 0.05 m^2（1/2,000 アール）など正確な大きさで作られている。ワグネルポットに岩石（ずり）を充填し、ポットを通過した雨水をポリタンクに貯留し、定期的に分析に供する。ここでは試験試料の粒径を、発生土の実利用を考慮して最大粒径 40 mm とし、採水間隔は 28 日を標準として実施する。そして、採水量と滲出水質の分析結果を整理して長期的な溶出特性を評価するものである。

溶出特性の評価方法として、滲出水の年平均濃度を地下水環境基準値、一般排水基準などと比較することが多い。年平均値を基準値と比較するのは、水質の環境基準が年平均値で評価すること、および土研式雨水曝露試験の濃度は一般に曝露開始から半年～1 年に濃度が極大となり、その後低減することから、長期的な溶出特性評価としては安全側になると考えられるためである。また、同一試料を用いて土研式雨水曝露試験と実大盛土実験の結果を比較した事例（**図-5、図-6**）では、実大盛土実験や土研式雨水曝露試験の滲出水濃度は短期溶出試験結果より高いこと、土研式雨水曝露試験による各元素の濃度はおおむね実大盛土実験よりやや高い、すなわち安全側の評価を与えること、および溶出トレンドは元素ごとに類似の傾向であったことが示された。

なお、試料量に限りがある場合は、より小径のワグネルポット（1/5,000 アール）を用いることもある。

ライシメーター試験は、土研式雨水曝露試験と同様なものを室内に設置し、降雨の代わりに定期的に撒水して行う試験である。土研式雨水曝露試験と比較して、降雨量や降雨間隔を制御できる長所がある一方、撒水を定期的に実施する必要があるなどの手間がかかる。また雨水と実験に用いる水の化学組成が異なる点、日射、凍結、乾燥などの条件が屋外での条件と異なる点など、実験結果の解釈に留意が必要である。

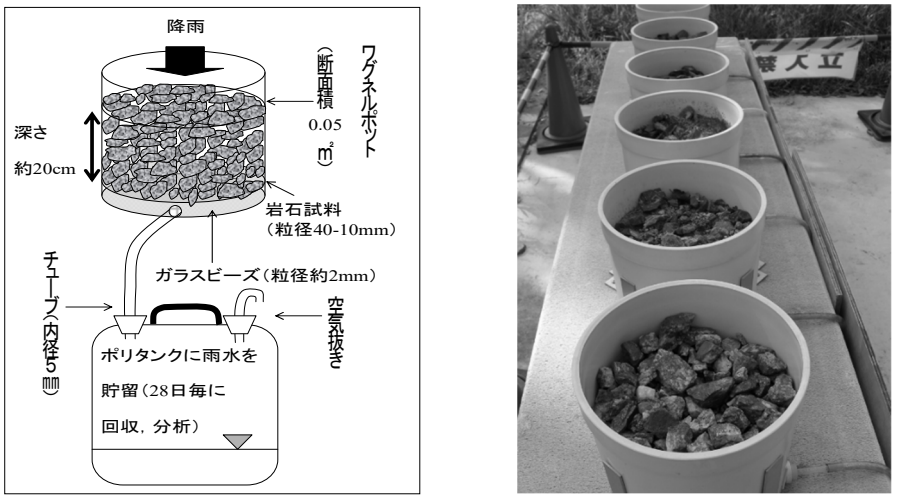


図-4　土研式雨水曝露試験装置[5]

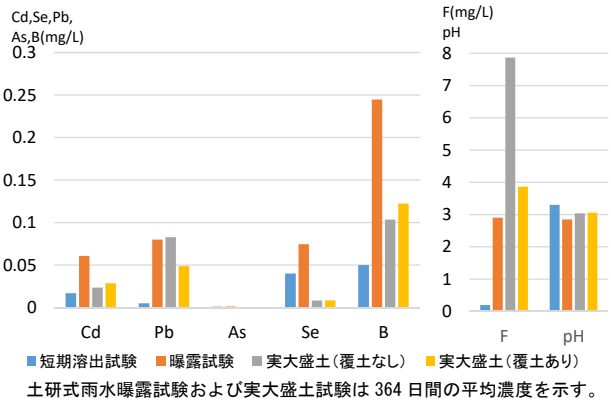


図-5　短期溶出試験、土研式雨水曝露試験および実大盛土試験結果の比較 [3)]

土研式雨水曝露試験および実大盛土試験の結果については 364 日間の平均濃度を示す。

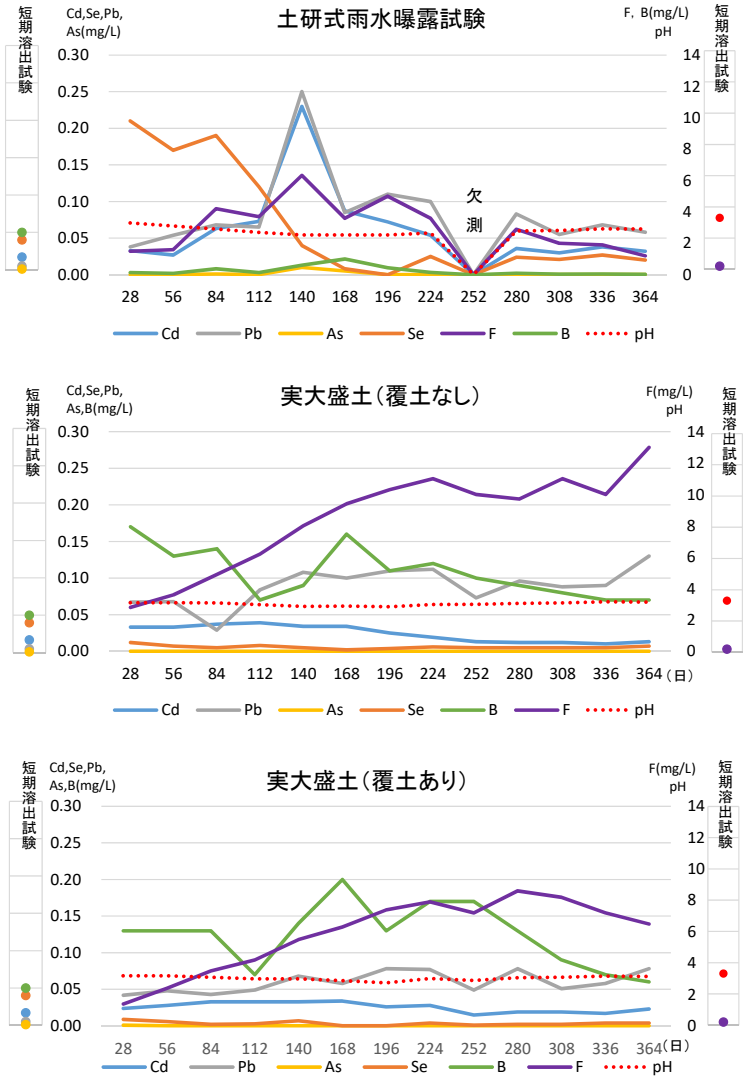


図-6　土研式雨水曝露試験（上）および実大盛土試験（下）の滲出水濃度の経時変化 [3)]

３）上向流カラム通水試験

本試験は、試料を充填したカラム下方より溶媒を注入し、カラム上方から排出された滲出水を回収する試験法であり、飽和帯での地下水中での溶出環境に近い試験である。ここでは国際標準化機構 ISO21268-3:2019「Up-flow percolation test」に準拠した方法[6]の例を参考に示す。

1　使用機器

前後にフィルターが装てんでき、試料充てん高さ 30±5 cm で試験が可能な、直径 5 cm のカラム、フィルター材（多孔板または細粒のフィルター材、および空隙径 1～20 μm のプレフィルター)、送液ポンプ（0～60 mL/h の量で調整可能なもの)、溶媒貯留槽、試料液回収容器、試料充てん用ランマー(125 g)、遠心分離器、その他の必要な機器を用意する。

2　試料調製

a) 試料は、**参考資料９**の「**6(1)** 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製」により調製された粒径 2 mm 以下の試料を縮分して用いる。

b) 試料をカラムに充てんする際は、15 層に区分し充填を行い、3 層ごとに 1 回、ランマーで締め固めを行い、試料高さが約 30 cm となるようにする。また充てんした試料の重量、含水率および充てん試料高さを記録する。

c) 室温を 22±3℃に調整した室内に装置を設置し、試料を濃度 1 mmol/L の塩化カルシウム溶液で飽和させ、16～72 時間静置する。

d) カラム流速が 15 cm/日になるようにポンプの流量を調整し、カラムに溶媒を流す。

e) 液固比（L/S）が 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10 の 7 画分に分けて採水し、それぞれの画分について対象物質を分析する。

４）不飽和カラム試験

本試験は、試料を充てんしたカラムの上部から間欠的あるいは定常的に溶媒を投入し、カラム下部より排出される滲出水を回収、分析するものである。盛土内など、不飽和帯での雨水浸透に近い試験方法であると考えられる。

五十嵐ほか[7]は、直径 5.2 cm のアクリル製カラムに粒径 2 mm 以下の岩石粉砕試料 300 g を厚さ 20 cm になるよう充てんし、週に 1 回 60 mL の脱イオン水をカラム上部から投入する実験を約半年間継続し、岩石からの硝酸態窒素や亜硝酸態窒素の溶出抑制に関する検討を行っている。

５）繰り返し溶出試験（シリアルバッチ試験）

本試験は、例えば短期溶出試験などのバッチ溶出試験を、溶媒を取り替えながら同一試料を繰り返し試験するもので、シリアルバッチ試験ともいう[8]。試験方法の概念図を**図-7** に、試験結果の例[9]を**図-8** に示す。この例のように、溶出濃度は初回の溶出時に最大値を示し、溶出回数とともに徐々に減少することが多い。実大盛土や土研式雨水曝露試験など

の現地野外実験の結果では、実験開始直後ではなく数ヶ月から 1 年程度後に最大濃度を示すことが多く、本試験の結果と若干異なる傾向があるが、比較的短時間で結果を得ることができる特徴がある。

また、本試験は吸着層工法において吸着容量による設計[10]を行う際に、発生源の単位量当たりの溶出量（設計溶出量）を求める場合や、吸着資材の性能を確認する目的で、低濃度の溶液を用いた吸着試験などにも応用される。

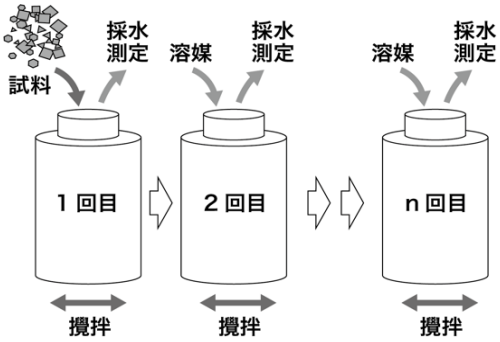


図-7　繰返し溶出試験の概念図

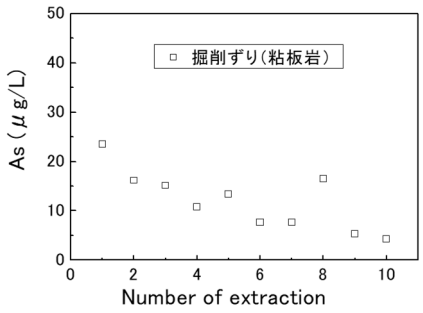


図-8　溶出回数と As 溶出量の関係[9]

６）かくはん翼溶出試験

かくはん翼溶出試験は、日本産業規格 JIS K 0058-1「スラグ類の化学物質試験方法－第 1 部：溶出量試験方法」の「5. 利用有姿による試験」の方法に基づく試験である。

本試験は、土壌の環境基準との関連を考慮し、液固比 10、溶出時間 6 時間など、環境庁告示第 46 号試験に準拠しつつ、溶出操作による試料の細粒化が起こらない方法として、かくはん翼によるかくはん方法を採用したものである。

阿南ほか[11]は、泥岩・凝灰角礫岩・軽石凝灰岩の 3 種の岩石について、かくはん翼、水平往復振とうの 2 種類の繰り返し溶出試験（泥岩は 5 回、凝灰角礫岩は 7 回、軽石凝灰岩は 8 回繰り返し）を実施し、砒素の溶出濃度の測定（**図-9**）と、試験前後の粒度分析結果を比較した（**図-10**）。その結果、かくはん翼溶出試験は水平往復振とう試験に比べて、特に 1 回目の溶出濃度が小さく、粒子破砕を起こしにくいことがわかった。

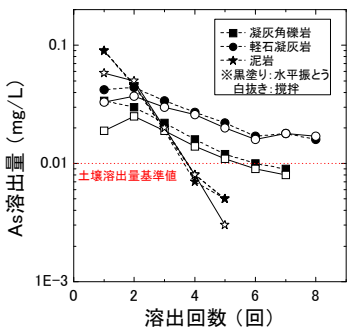


図-9　水平振とうおよび攪拌翼による繰返し溶出試験の砒素濃度の変化[11]

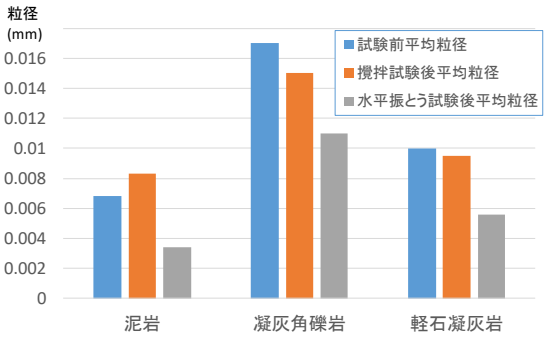


図-10　水平振とうおよび攪拌翼による繰返し溶出試験前後の試料の平均粒径[11]

7）タンクリーチング試験

タンクリーチング試験は、国土交通省大臣官房技術審議官通達（平成 13 年 4 月 20 日）「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領（案)」に基づき、一定の対象工法に対して、セメントおよびセメント系固化材を原位置もしくはプラントにおいて土と混合する改良土を対象とした、溶出試験方法である。試験方法は、塊状のまま試料 400 g 程度を、pH 5.8～6.3 に調整した蒸留水を溶媒として、固液比 1:10 で 20 ℃の恒温槽内に静置する。28 日後、溶媒水を 0.45 μm のメンブランフィルターでろ過してそのろ液を検液とするものである。この試験は、試料を溶媒中に長期間静置することから、地下水中の掘削ずりの長期溶出傾向を把握する試験として位置付けることができる。また、これらを脱気水で実施することも可能である。

8）簡易溶出試験（56 日溶出試験）

簡易溶出試験は、酸性水を発生させる可能性の高い岩相を把握することを目的として実施された試験である。試験方法は、「土懸濁液の pH 試験方法」（JGS 0211）に準拠し、10 mm 以下に破砕した試料 100 g と蒸留水 500 g をポリエチレン製の容器に入れ、3 分間振とうさせた後静置し、浸漬 10 分後、1 時間後、24 時間後、7、14、30（28)、42、56 日後の溶出水の pH を測定するものある。

服部ほか[12]は、1 時間後の溶出水の pH が基準値以下（pH≦6.0）を示した試料は 56 日後においても酸性を示すことを明らかにした。また、火山岩・火砕岩類で硫黄含有量が基準値（2.0 wt%）以下でも酸性となる岩石が少なからず認められたが、岩石判定手法（**表-11**）はおおむね妥当であると評価した。

表-11　八甲田トンネルにおける岩石判定基準値設定の概要[12]

判定項目	判定基準値	基準値設定の根拠
帯磁率（κ_{cgs}）	κ_{cgs}≧50*10^{-6}emu/cm^3 → 一般型	・基準値以上の火山岩で酸性化を示す試料がみとめられない. ・基準値以下でSを2.0wt%以上含む火山岩は非常に少ない.
溶出水のpH	1時間後のpH≦6.0 → 管理型	・1時間後の溶出水pHが6.0以下を示す試料はすべて，56日後でも酸性を示す.
火砕岩類のCr/Ni比	Cr/Ni＜2.0 → 泥岩に準拠	・火砕岩類は，Cr/Ni比が1.0前後の試料と2.0以上の試料とに大別される. ・泥岩のCr/Ni比は1.0前後で，火成岩のCr/Ni比は2.0以上である. ・Cr/Ni比が1.0前後の火砕岩類の溶出特性が泥岩に類似する.
泥岩および火砕岩類(Cr/Ni＜2.0)のS/Caモル比	S/Caモル比≧1.0 → 管理型	・S/Caモル比が増加すると溶出水のpHが低下する. ・S/Caモル比が1.0以上で溶出水が酸性化する場合が認められる.
S含有量	S≧2.0wt% → 管理型	・溶出水が酸性を示す火成岩類は，Sを2.0wt%以上含むことが多い.

9） 還元環境溶出試験

還元環境溶出試験は、盛土内や埋立地内における嫌気的な環境での溶出現象を再現する

ために行う試験である。嫌気的な環境では、重金属等の種類によって溶出量の増大が懸念される[13)~15)]。現状では実施例が少ないが、受入先の発生土の利用状況によって、実現象再現溶出試験の一つとして、試験の実施・評価がなされることが望まれる。

以下に、「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件（環境省告示第 18 号)」で示されている環境庁告示第 46 号「土壌の汚染に係る環境基準について」の付表に掲げる方法を準用した試験方法について示す。

① 脱気水溶出試験[13)]

この試験方法は、酸化反応の要因の一つである試験溶媒中の溶存酸素濃度を可能な限り低下させ、低酸素条件下で溶出操作を行う試験方法である。

試験はまず、蒸留水を約 3 L の減圧ビンに分取し、窒素ガス置換を行った簡易グローブボックス内で窒素ガスバブリング（10～20 mL/min の流量）を 1 時間行い、脱気水の作製を行う。次に、**参考資料９**の「**6(1)** 溶出量試験に用いる全量 2 mm 以下の試料調製」に従い、目開き 2 mm のふるいを全量通過するまで破砕した試料を簡易グローブボックス内で分取し、脱気水と試料とを重量体積比 10%の割合で混合し、6 時間水平振とうする。振とう後、30 分間静置し、3,000 rpm で 30 分間遠心分離した後、窒素ガス置換を行った簡易グローブボックス内で上澄み液を孔径 0.45 μm のメンブレンフィルターを装着したシリンジにより加圧ろ過し、そのろ液を検液として分析を行う。

② 水素ガス添加溶出試験[14)]

この試験方法は、還元性ガスの一つである水素ガスを利用して酸化還元電位を低下させた溶媒を用いた溶出試験方法である。

試験はまず、蒸留水に微小気泡での水素ガスバブリングを行い溶媒を作製する。次に、目開き 2 mm のふるいを全量通過する破砕試料と溶媒とを重量体積比 10 %の割合で振とう容器に封入し、試験後の酸化還元電位の上昇を抑えるため、試料封入後の振とう容器をアルミ袋に入れ脱気封入する。6 時間の水平振とう後、30 分間静置し、3,000 rpm で 30 分間遠心分離した後、0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、そのろ液を検液として分析を行う。

この試験では可燃性・引火性ガスを取り扱うため、防爆型のドラフトチャンバーなどが整備された化学実験室において、安全面に十分配慮した環境で試験を実施することを推奨する。

③ 有機物を利用した溶出試験[15)]

この試験はまず、有機物の溶解により還元性を示す溶液を利用した試験方法である。

試験方法は、0.5 mm 以下の目のふるいを通過した粉砕試料にグルコースを重量比で 0.5 %添加し、十分に混合した試料をガラスバイアル瓶に入れ、重量体積比 10 %の割合で超純水を加える。次に、バイアル瓶にブチルゴム栓をし、アルミキャップで密栓する。その後、25℃で 2 週間の静置培養をすることによって還元処理を行う。2 週間の静置培養後、6 時間振とうし、0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過を行い、そのろ

液を検液として分析を行う。

上記試験方法は、いずれも溶媒の pH を変化させずに酸化還元電位を低下させる溶出試験方法の試みである。測定項目は、調査の段階に応じて必要な項目を選定する。重金属等や水素イオン濃度指数（pH）、電気伝導率（EC）、酸化還元電位（Eh）のほか、ナトリウムイオン濃度（Na^{+}）、カルシウムイオン濃度（Ca^{2+}）および硫酸イオン濃度（SO_4^{2-}）など主要なイオン類を測定しておくと、溶出特性の把握に利用可能である。また、必要に応じて残渣の鉱物組成の分析を実施することで、酸化還元電位の違いによる重金属等の溶出形態の把握に有益である。

【参考文献】

1) 田本修一，伊東佳彦，日下部祐基，五十嵐敏文，渡邊歩，青木卓也：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験．地盤工学会北海道支部第 47 回技術報告会，pp.247-250，2007.
2) 福島広之，佐藤優，山本隆広：酸性化する掘削ずりの対策についてー現実的な対策とその検証ー，第 62 回（平成 30 年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集，環 6，2020．国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所ホームページ，https://thesis.ceri.go.jp/db/files/16258508045d22c0ba10a1c.pdf
3) 品川俊介，阿南修司：自然由来重金属等含有土の溶出特性に関する現地比較実験．第 55 回地盤工学研究発表会講演論文集，23-6-2-06，2020.
4) 品川俊介，阿南修司：自然由来重金属等含有岩石の大型カラム曝露実験．第 49 回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.2033-2034，2014.
5) 土木研究所，応用地質，大成建設，三信建設工業，住鉱コンサルタント，日本工営：岩石に由来する環境汚染に関する共同研究報告書　建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル（暫定版）．土木研究所共同研究報告書，No.358，p.89，2007.
6) 保高徹生，渡邊保貴，肴倉宏史，藤川拓朗，田本修一：上向流カラム通水試験の国際標準化と今後の展望．地盤工学会誌，Vol.68，No.3，pp.6-7，2020.
7) 五十嵐敏文，上田貴宏，洞秀幸，城まゆみ，加藤欣也，三代雅崇，工藤元：カラム溶出試験による珪藻質泥岩掘削土（ズリ）由来の硝化生成物の溶出に関する影響因子の考察．Journal of MMIJ，Vol.130，pp.60-64，2014.
8) The International Ash Working Group：Municipal Solid Waste Incinerator Residues, Elsevier, p.974, 1997.
9) 田本修一，伊東佳彦，岡崎健治，五十嵐敏文：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験（その２）．地盤工学会北海道支部第 48 回技術報告会，pp.157-160，2008.
10) 北海道環境保全技術協会技術委員会：吸着層設計マニュアル．pp.45-52，2012.
11) 阿南修司，品川俊介，倉橋稔幸，田本修一：建設発生土の適正利用に向けた環境安全性評価・対策手法の研究（発生源評価）．平成 30 年度土木研究所研究開発プログラム報

告書，土木研究所ホームページ，https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2018/pdf/pro-9.pdf
12) 服部修一，太田岳洋，菊地良弘：八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水特性に関する判定手法の評価，応用地質，第 47 巻，第 6 号，pp.323-336，2007.
13) 田本修一，倉橋稔幸：還元環境を模した溶出試験方法に関する検討，第 23 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.559-560，2017.
14) 田本修一，倉橋稔幸：還元環境を再現するバッチ溶出試験方法に関する検討，第 53 回地盤工学研究発表会講演集，pp.2173-2174，2018.
15) 野池一志，三浦俊彦，井出一貴，加藤雅彦：還元条件下における海成泥岩（土丹）からのヒ素溶出挙動，第 53 回地盤工学研究発表会講演集，pp.2229-2230，2018.

参考資料 14　移行特性試験方法

リスク評価や、吸着原理を使用した対策法の設計の検討にあたっては、原地盤の地層や吸着資材などの、重金属等対象物質に関する移行特性について、必要に応じて試験を実施し、適切な定数を設定する必要がある。

ここでは「吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会報告書」[1)]の内容の一部を紹介するとともに、土壌汚染対策法の「汚染土壌の処理業に関するガイドライン」[2)]の記述箇所を示す。

（１）吸着層工法に使用する材料等の試験方法

吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会では、吸着層工法に使用する材料等の試験方法に関し、単一のバッチ吸着試験で評価する際の課題として、以下の 3 つを挙げた。

①水との接触が吸着性能に与える影響の評価が困難であること

②試験方法が標準化されていないため、結果として得られる分配係数に影響を与え、相互比較を困難にしていること

③一般的に実施されている吸着試験の試験条件が、実現場の吸着層内の液固比と比べて非常に大きく、適切な資材等の評価が行えていない可能性があること

以上の問題を解決するため、バッチ吸着試験方法およびカラム吸着試験方法の案をとりまとめた。ここではバッチ吸着試験方法の案を紹介する。詳しくは報告書[1)]を参照されたい。

吸着層工法に使用する材料等のバッチ吸着試験方法（案）

本試験方法は、吸着材のみ、吸着材と地盤材料の混合物（これを「吸着層材料」といい、吸着層材料を適切な厚さ、密度等で層状に敷設したものが「吸着層」である）、および浸漬養生後の吸着層材料を用いた 3 種類の試験方法からなる。

試験に用いる溶液の濃度は、盛土等から吸着層に流入すると想定される重金属等の濃度（これを「目標濃度」という）に対して 10 倍（カドミウム、六価クロム、水銀、セレン、鉛、および砒素の場合）ないしは 3 倍の濃度（ふっ素やほう素の場合）に調製する。

吸着試験は、溶液量を 500mL に固定し、溶液と吸着材との湿潤液固比を 100 倍から 10000 倍までの 9 段階に設定する。すなわち、固体の量を 100 倍量変化させて試験を実施する。また同一液固比の試験を 3 つずつ行う。

吸着操作は振とう幅 4～5cm、毎分 200 回の往復振とうで、24 時間実施する。

試験によって得られた検液は固液分離後、重金属等の濃度を測定し、検液中の対象物質濃度と吸着量から吸着等温線を描く。そして一定の条件を満たす場合は近似直線の式から「目標濃度における見掛けの分配係数」を求める。

（２）汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂第 4.2 版）における記載

標記の土壌汚染対策法ガイドライン[2)]では、下記 Appendix に地盤の吸着特性を活用する際の留意点、計算方法、定数取得方法等が示されている。吸着層工法を検討する際にも参考にすることが考えられる。

- Appendix－11 自然由来等土壌構造物利用施設における留意点
- Appendix－12 自然由来等土壌構造物利用施設における新たな地下水汚染を引き起こさないための措置の決定に係る個別サイト評価の計算ツールの操作方法
- Appendix－13 自然由来等土壌構造物利用施設における自然由来等土壌による盛土部分下部の分配係数の取得方法

【参考文献】

1) 吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会・吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討会：吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会報告書　第 1 版. 40p.，国立研究開発法人産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門ホームページ，2022，https://unit.aist.go.jp/georesenv/res-geo/adsorption-layer/index.html

2) 環境省水・大気環境局土壌環境課：汚染土壌の処理業に関するガイドライン（改訂第 4.2 版）, 2022.

参考資料 15　不溶化処理土壌の評価方法

不溶化処理土壌の性能評価に関しては、土壌環境センター技術標準「重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法　硫酸添加溶出試験法・消石灰添加溶出試験法」（GEPC・TS-02）[1)]がある。以下にその一部を抜粋する。詳しくは上記を参考にされたい。

１．適用範囲

この試験は、重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性を相対的に評価する方法である。

この試験は本来、重金属等の汚染土壌を試験対象とする不溶化処理技術の検討及びその室内試験に用いることを目的としており、不溶化処理後の土壌試料について pH を一定条件で変化させたときの溶出量を相対的に評価する硫酸添加及び消石灰添加溶出試験法について規定しており、以下の 9 物質に適用される。なお、硫酸添加溶出試験は、酸性雨による暴露、消石灰添加溶出試験は、セメント構造物から溶出する消石灰に暴露される場合を想定したものである。

① カドミウム及びその化合物
② 六価クロム化合物
③ シアン化合物
④ 水銀及びその化合物
⑤ セレン及びその化合物
⑥ 鉛及びその化合物
⑦ 砒素及びその化合物
⑧ ふっ素及びその化合物
⑨ ほう素及びその化合物

ただし、シアン化合物は硫酸を添加することによって酸性になるとシアン化水素ガス（HCN）が発生するおそれがあり、溶出量を過小評価する場合がある。

備考１．本試験法は、不溶化処理の技術的な検討を目的とした一定の条件を定めた溶出試験方法であり、測定値は相対的なものとなる。従って法令、基準、他の類似試験規格との整合性はなく比較もできない。

備考２．本試験法は、以下の試料は試験適用の対象としない。

①自然地盤の土壌および建設発生土
②不溶化処理を含む措置を施す前の汚染土壌
③汚染土壌において、不溶化処理以外の措置（例えば加熱処理、洗浄処理等）を施した土壌
④廃棄物が混入していることにより全体が廃棄物であると判断されるもの

⑤溶融スラグ等、廃棄物の処理・無害化物

備考３．現場において不溶化処理を施した土壌に適用することを妨げるものではない。

（後略）

2. 試験手順（図-1）

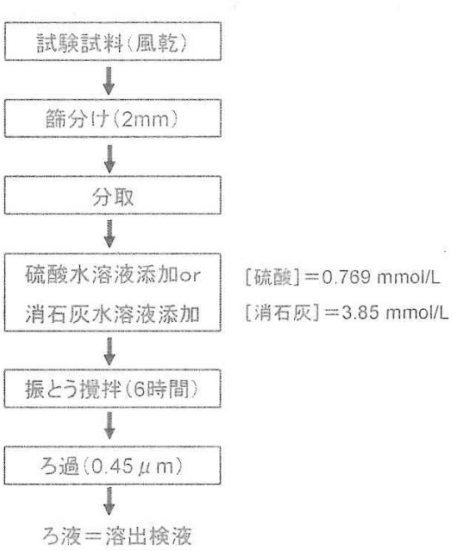


図-1 硫酸添加溶出試験法と消石灰添加溶出試験法の手順

３．結果の評価

硫酸添加溶出試験法および消石灰添加溶出試験法で得られた結果は、不溶化処理土壌の 100 年間の安定性を評価するものでも保証するものでもない。しかしながら、本試験で重金属等が溶出しない技術であれば、安定した不溶化処理効果が期待できることは容易に推察できる。また、埋め戻した不溶化処理土壌は、多少の酸あるいはアルカリに曝されたとしても、重金属等の再溶出を起こすおそれが少ないと評価することはできる。

【参考文献】

1) 土壌環境センター：重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法．土壌環境センター技術標準 GEPC・TS-02，34p，2020.

参考資料 16　酸性土の掘削面対策の考え方

酸性土の掘削面は、空気と雨水や表流水との接触による酸性化に伴って、掘削面の劣化および植生の不活着が起こり、さらには掘削面の侵食による新たな新鮮部の露出と、酸性化や侵食が進行する（**図-1**）。酸性土の掘削面対策の考え方は空気や水との接触の抑制と適切なのり面保護を行うことを基本とする。

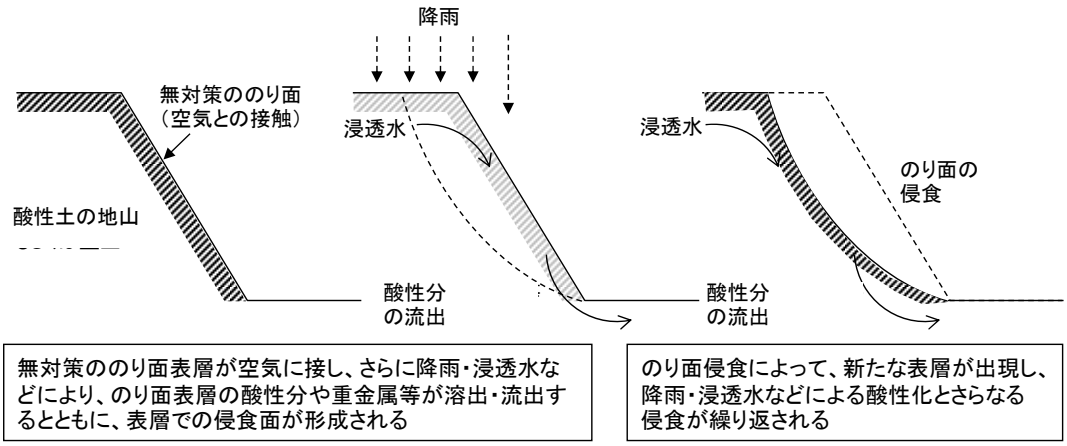


図-1　のり面の酸性化進行の模式図

(1) のり面掘削の場合

酸性化する可能性の高いのり面掘削では、のり面の安定と植生の成立を見込んだ対策を講じる必要がある。

通常の切土のり面工事においては、のり面保護工が施される。のり面保護工は、植生（のり面緑化工など）あるいは構造物（モルタル・コンクリート吹付工など）でのり面を被覆し、のり面安定の確保と自然環境の保全や修景を行うものである。酸性化する地盤における切土のり面工事では、このようなのり面保護の目的のほかに、掘削面を介しての酸性水などによる下流への影響抑止などの目的が付加される。

特に、黄鉄鉱を含有する切土のり面での緑化工においては、当初には植生が成立するものの、長期的に基盤が硫酸酸性化し、何年か後に植生が枯損するという現象が生じることがある。このような問題に対し、日本道路公団試験研究所緑化試験研究室 [1)]は多くの施工事例の調査に基づき、主要な対策として以下の 4 つを挙げている。

1）中和材でのり面の酸性対策を行い、その上に吹付工を行う（**図-2**）。

2）吹付基材に中和材を混入して用いる。

3）地山に炭酸カルシウムを混入した砕石・砂、あるいは石灰岩の砕石を張り、その上に植生工を行うことで、地山からの酸性水を中和・遮断する。

4）暗渠排水や吸い出し防止マットを設置し、地山の酸性水が植生基盤へ上昇することを防ぎ、その上に植生土土嚢工、植生ブロック工、厚層吹付工などを施す。

また、モルタル・コンクリート吹付工などの構造物工の場合は、構造物の背面側（酸性土側）にのり面内部の水が接すると、その酸性によってコンクリートなどの構造物が劣化し、のり面保護の機能を損なう可能性があるので、構造物背面側に酸性水が接しないように、適切な排水工を施すとよい。

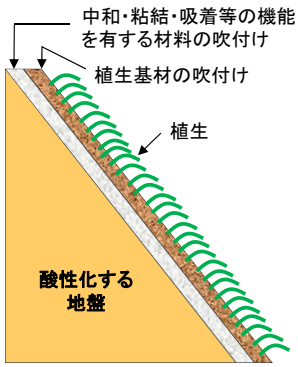


図-2　酸性化するのり面における植生工の例

(2) トンネル掘削の場合

トンネル掘削では掘削面付近の地山に含まれる硫化鉱物が酸化し、酸性水となった湧出地下水が表流水になることにより、酸性水等による影響を下流側に及ぼす可能性がある。したがって、硫化鉱物を含有するような地山の掘削断面では、湧出表流水の量を極力抑えるように遮水性の高い覆工法を選定し、覆工背面側の空隙充填やインバート打設を確実に行い、必要に応じて止水等を目的とした補助工法を採用することが考えられる。例えば、吹付コンクリートのセメント材料を耐酸性に有利な高炉セメントとする、ロックボルトをエポキシ樹脂コーティング仕様とし、充填剤を耐酸性定着剤とするなどの対策を検討した事例[2)]もある。

【参考文献】

1) 日本道路公団試験研究所緑化試験研究室：強酸性のり面等の改良に関する検討．試験研究所技術資料，No.711，日本道路公団試験研究所，140p.，1997.

2) 中村泰博・太田尾孝則：熱水変質帯における酸性化対策について．第 15 回長崎県土木部技術職員等研究発表会論文集，6p.，2009.

参考資料 17　地下水経由のリスクに対する対策工の信頼性の評価

地下水経由のリスクに対する対策工の信頼性の確保に当たっては、対策工そのものが持つ設計上の信頼性、現場の岩石・土壌の性状との組合せによって発現する信頼性の変化、使用する資材の長期耐久性に関する信頼性、地盤の変形に対する信頼性、自己修復性の有無、施工における信頼性、および対策工の機能確認における信頼性などを考慮する必要がある。**表-1** に主な対策工の特徴を整理した。

そのほか、対策工を実施する場所の地下水位やその変動、地盤の安定性（地震動、活断層の変位、液状化、地すべり、斜面崩壊、土石流、洪水、雪崩、津波などの影響）も関係する。

対策工の選定にあたっては、対策工の実施候補地において、以上の要因などを列挙するとともに、実施可能な信頼性を高めるための方策を踏まえて、各対策工の信頼性を相対評価する。また、これらの検討結果は、実際の対策工の設計、施工および維持管理に反映する。

表-1　地下水経由のリスクに対する主な対策工の特徴

工法	材料・構造等	設計の信頼性・対策工の特徴	岩石・土壌の性状との関係	長期耐久性	変形追従性	自己修復性	施工における主な留意事項	機能の確認	その他
二重遮水工封じ込め	二重の遮水シートによる浸透抑制	周囲を二重で遮水するので信頼性は相対的に高い。ただし、地盤変位を許容しない。また、斜面ではすべりの発生の懸念があるほか、施工中に強風や動物によるシート損傷のおそれがある。	一般に影響を受けない	紫外線や熱応力による劣化（覆土が必要）	引っ張りに弱い	ない	溶着不良 シートの破損	一般に内部保有水位もしくは排水量、および地下水質の観測による	例示したもの以外にも各種資材の組み合わせが考え得る。
	遮水シート/粘性土による浸透抑制	周囲を二重で遮水するので信頼性は相対的に高い。ただし地盤変位を許容しない。また斜面ではすべりの発生の懸念があるほか、施工中に強風や動物によるシート損傷のおそれがある。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	紫外線や熱応力による劣化（覆土が必要）	引っ張りに弱い	ない	溶着不良 シートの破損 含水率管理 締固め管理		
	遮水シート/ベントナイト複合ライナーによる浸透抑制	周囲を二重で遮水するので信頼性は相対的に高い。破損に対しては自己修復性が期待できる。ただし斜面ではすべりの発生の懸念があるほか、施工中に強風や動物によるシート損傷のおそれがある。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	紫外線や熱応力による劣化（覆土が必要）	多少有する	ある	シートの破損 資材の水濡れ 接合部の処理		
一重遮水工封じ込め	遮水シートによる浸透抑制	二重遮水より相対的に信頼性が劣る。また地盤変位を許容しない。また覆土のすべりの発生の懸念があるほか、施工中に強風や動物によるシート損傷のおそれがある。	一般に影響を受けない	紫外線や熱応力による劣化（覆土が必要）	引っ張りに弱い	ない	溶着不良 シートの破損	一般に内部保有水位もしくは排水量、および地下水質の観測による	部分的に異なる資材を組み合わせる場合もある。
	ベントナイト混合土による浸透抑制	二重遮水より相対的に信頼性が劣るが、変形追従性・自己修復性が期待できる。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	土圧がない条件では吸水膨張する（覆土が必要）	多少有する	ある	資材の水濡れ 含水率管理 締固め管理		
	粘性土による浸透抑制	二重遮水より相対的に信頼性が劣る。また地盤変位を許容しない。さらに粘性土は施工後も乾燥を許容しないため配慮が必要。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	乾燥によるひび割れ	あまりない	ない	含水率管理 締固め管理		
上部遮水工	遮水シートによる雨水浸透抑制	封じ込めより相対的に信頼性が劣る。また斜面ではすべりの発生の懸念がある。	一般に影響を受けない	紫外線や熱応力による劣化（覆土が必要）	引っ張りに弱い	ない	溶着不良 シートの破損	一般に地下水質の観測による	部分的に異なる資材を組み合わせる場合もある。 鎧戸工法など、不連続な断面構造も提案されている。 転圧工や吸着層工を併用することで信頼性が向上する。
	ベントナイト混合土による雨水浸透抑制	封じ込めより相対的に信頼性が劣るが、変形追従性・自己修復性が期待できる。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	土圧がない条件では吸水膨張する（覆土が必要）	多少有する	ある	資材の水濡れ 含水率管理 締固め管理		
	粘性土による雨水浸透抑制	封じ込めより相対的に信頼性が劣る。また地盤変位を許容しない。さらに粘性土は施工後も乾燥を許容しないため配慮が必要。	酸性土への適用に当たっては機能が損なわれないことを確認する必要	乾燥によるひび割れ	あまりない	ない	含水率管理 締固め管理		
	水工用密粒度アスファルトコンクリートによる雨水浸透抑制	封じ込めより相対的に信頼性が劣る。変形追従性を有する。貯水池の上部遮水工の実績では補修などの維持管理が必要。	一般に影響を受けない	紫外線、酸化や熱応力による劣化（表面保護層等が必要）	多少有する	ない	締固め管理（特に傾斜部） 打継ぎ面の処理		
底部遮水工 ＋ 滲出水処理工	各種資材による地下浸透抑制	排水管理が可能なため、信頼性は高い。使用する材料により、変形追従性や自己修復性が期待できるものもある。	（遮水工封じ込めまたは上部遮水工を参照）					一般に排水水質および地下水質の観測による	転圧工を併用することで信頼性が向上する。
転圧工	転圧による雨水浸透抑制	封じ込めより信頼性は劣る。また、盛土の緩みによる透水性の変化については知見が不足している。	締固めによる透水性の低下が期待できるか確認する必要	緩み	多少有する	ない	粒度分布 含水率管理 締固め管理	一般に地下水質の観測による	底部遮水工や吸着層工を併用することで信頼性が向上する。
不溶化工	盛土内全体での反応雰囲気の制御や物質の吸着などによる、浸透水中の有害物質濃度の低減	不溶化資材は多種あり、使用環境にあった資材を選択する。還元環境での対策効果や資材の長期耐久性に関して知見が不足している場合がある。変形追従性を有する。施工後に破砕する岩石への適用にあたっては検討が必要。	岩石・土壌の性状に合わせて資材を選定する必要	発生土の物理化学的特性などとの兼ね合いにより対策効果やその持続性が異なる。	ある	ない	資材と発生土の均質混合 地質の変化 岩石の不溶化注意	一般に地下水質の観測による	第二溶出量基準を満足しない場合には、本方法と二重遮水工封じ込めなどを併用する。
	セメント系固化材による岩石・土壌粒子と水との接触の抑制	セメント系固化材は古くから施工実績があり信頼性が高いが、施工後に破砕する岩石への適用にあたっては検討が必要。	アルカリ雰囲気による重金属等の溶出について検討する必要	高い	ある	ない	資材の均質混合 地質の変化 岩石の不溶化注意		
吸着層工	吸着層内での反応雰囲気の制御や物質の吸着などによる、浸透水中の有害物質濃度の低減	還元環境での対策効果や資材の長期耐久性に関して知見が不足している場合がある。地盤変位や地下水面下での使用を許容しないほか、吸着層内の浸透の不均質性を設計に反映する必要がある。	岩石・土壌の性状に合わせて資材を選定する必要	発生土の物理化学的特性などとの兼ね合いにより対策効果やその持続性が異なる。	あまりない	ない	資材と母材の均質混合 吸着層の透水性管理 地質の変化	一般に地下水質の観測による	上部遮水工、転圧工や底部遮水工と組み合わせることで信頼性が向上する。 滲出水処理工に応用可能。
透過性地下水浄化壁工	反応壁内での反応雰囲気の制御や物質の吸着などによる、浸透水中の有害物質濃度の低減	還元環境での対策効果や資材の長期耐久性に関して知見が不足している場合がある。	岩石・土壌の性状に合わせて資材を選定する必要	発生土の物理化学的特性などとの兼ね合いにより対策効果やその持続性が異なる。	多少有する	ない	浄化壁の透水性管理 地質の変化	一般に地下水質の観測による	地下水汚染が発生した場合の対策工として適する。

参考資料 18　不溶化処理の配合設計例

自然由来重金属等含有土の分析結果に基づいて室内試験を行い、対象物質の溶出量を目標基準以下に低減可能となる不溶化材の添加量を決定する（**図-1**）。

詳細については、北海道環境保全技術協会技術委員会 [1]および土壌環境センター技術標準化部会 [2]の資料などを参考にされたい。

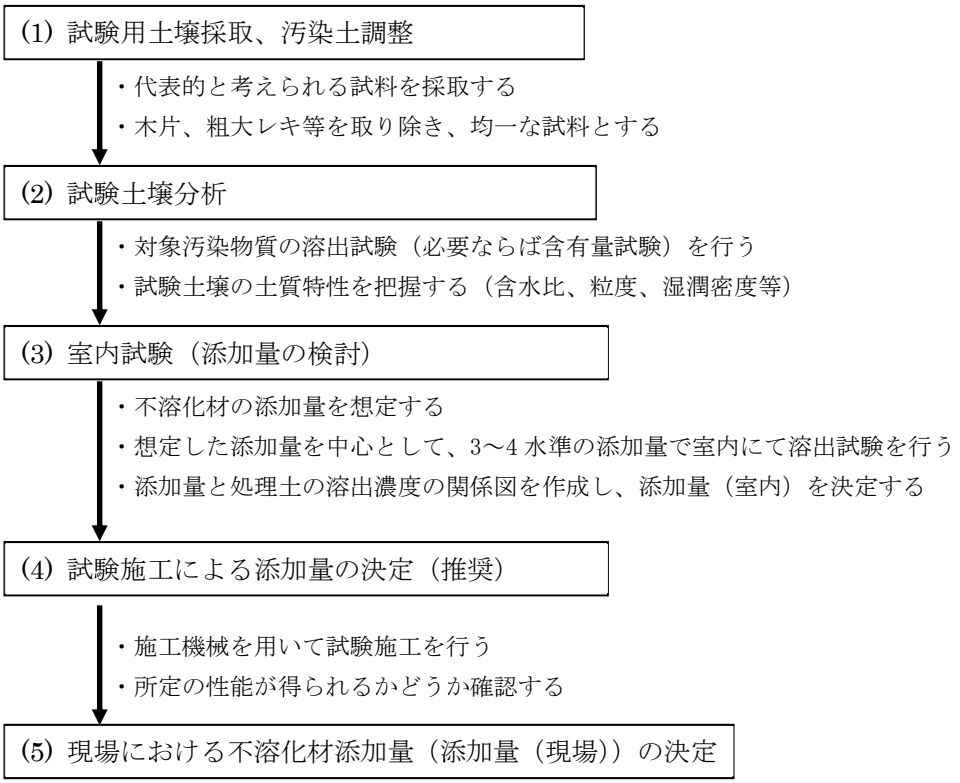


図-1 不溶化材添加量の決定方法（例）

(1) 試験用土壌試料採取、調整

採取地点は現地の状況を勘案し、汚染が認められた地点、汚染のおそれがある地点などを設定する。採取した試験土壌は、木片・粗大礫などを取り除き、乾燥や変質を受けないよう運搬・保管に留意する。

(2) 土壌分析

分析結果により、試験用土壌の土質性状を把握し、添加量を決める基礎資料とする。試験項目は含水比、粒度、湿潤密度、pH 測定、および環境庁告示第 46 号試験による溶出試験を行う（**表-1**）。

表-1　土壌の試験項目と試験方法（例）

試験項目	試験方法
含水比	JIS A 1203「土の含水比試験方法」
粒度	JIS A 1204「土の粒度試験方法」
湿潤密度	JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」
pH	JGS 0211「土懸濁液の pH 試験方法」
溶出試験	環境庁告示第 46 号試験

(3) 室内試験（添加量の検討）

不溶化効果に影響を与える要因としては、土壌の性状、不溶化材の添加量および混合性などが挙げられる。室内試験においては、必要とされる不溶化効果を発現するために選定した不溶化材を用いて不溶化材添加量を決定する。

添加量の決定方法は、初めに土壌の分析結果より得られた試験結果と不溶化材メーカーの参考データなどを考慮し、不溶化材の添加量を想定する。

次に、想定した量を中心として 3 ～ 4 水準の添加量を設定し、溶出試験を行う。溶出試験は、土壌と不溶化材を混合後、20 ℃の室内において密封容器内で一定期間養生し、環境庁告示第 46 号試験により行う。なお、試験結果が目標とする溶出量から外れた場合は、再度、添加量を増減し、溶出試験を行う。試験結果から不溶化材の添加量と不溶化処理土からの重金属等の溶出量の関係図を作成し、不溶化材混合土からの溶出量が不溶化目標溶出量を下回る、不溶化材の最小添加量（室内）を設定する。

この添加量に土質や施工機械の混合能力（精度）を考慮し、安全率を乗じた配合量を添加量（現場）とする。

セメント系固化材の場合は 50 kg/m^3 程度、石灰の場合は 30 kg/m^3 とされているが、不溶化材の主成分によって粒度や比重などが異なるため、これらの特性を考慮して添加量を決定することが望ましい[1),2)]。

(4) 試験施工

施工機械は、貧配合処理に適するものや適さないもの、また、単位時間の処理能力にも差があり、混合能力は様々である。したがって、事前に試験施工を行い、実機にて処理した汚染土の不溶化効果の確認と、工程管理に必要となる混練処理能力を把握しておくことが望ましい。

【参考文献】

1) 北海道環境保全技術協会技術委員会：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計・施工マニュアル，道環協技術レポート No.9，北海道環境保全技術協会技術委員会，2021.

2) 土壌環境センター技術標準化部会：重金属等不溶化処理の適用性確認試験手順（案）の作成および不溶化処理土壌の安定性に関する既往研究事例の調査，S3-08, 2014.

参考資料 19　管理台帳の例 [1)を改変]

搬出時管理土・要対策土管理台帳

記載年月日：　　年　　月　　日

工事名称	
発生場所	
受入場所･受入施設およびその管理者	
施工日	着工日：　　年　　月　　日、　　完工日：　　年　　月　　日
施工者名	
対応種別	a.　搬出時管理土　　b-1.　要対策土（直接摂取リスク） b-2.　要対策土（地下水・表流水リスク）　　c.　事業地外に搬出
完工時の法律上の区域指定（受入先）	Ⅰ．要措置区域　　Ⅱ．形質変更時要届出区域　　Ⅲ．区域指定なし
搬出時管理土･要対策土の性状	土量、搬出時管理土・要対策土の確認方法、有害物質の種類、分析結果を記す。
搬出時管理土･要対策土の対応方法	a.については覆土等の状況、b.については対策工法、c.については受入先の状況について記す。
対策効果確認の記録	対策効果の確認方法と調査結果（表流水・地下水、不溶化工の場合は溶出試験結果等）を記す。
モニタリングの記録	モニタリング場所、方法、結果について記す。
管理の記録	補修等の履歴や再掘削時の対応などを記す。

台帳書式内に記入できない内容は別紙として番号を付け作成すること。

【参考文献】

1）土木研究所編：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（改訂版），鹿島出版会，p.105，2012.