

複合式シールド工法から発生する一次処理土中の自然由来ヒ素溶出量低減対策

Measures to reduce naturally occurring arsenic concentrations in primary treated soil generated from the combined shield tunneling method

地井 直行*

Naoyuki Jii

久米 満里***

Mitsuri Kume

石渡 寛之**

Hiroyuki Ishiwata

金子 博己***

Hiroki Kaneko

要 約

新潟市発注の雨水バイパス管における複合式シールド工事で発生する一次処理土から自然由来のヒ素が溶出し、土壤環境基準（0.01mg/L）を超過することが懸念された。そこで、一次処理土を土砂として有効利用するため、ヒ素溶出量の低減策を検討した。室内試験では、細粒分にヒ素が多く含まれることから、水による土壤洗浄を実施したが、洗浄水量や回数の増加に関して現場適用性に課題があった。そのため、薬剤による pH 制御を併用した洗浄方法を検討した結果、希硫酸による pH 調整が最も高い低減効果を示し、ヒ素溶出量を土壤環境基準以下に抑えることが可能となった。この知見を基に現場泥水プラントへ洗浄・分級機（pH 制御）等から構成される土砂洗浄設備を導入したところ、全区間で土壤環境基準への適合が達成され、土砂の有効利用が可能となった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 対象工事
- § 3. ヒ素溶出量低減対策の検討
- § 4. 現場泥水プラントへの適用
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

シールドトンネル工事や山岳トンネル工事等の大規模な掘削工事に伴い発生する岩石や土壌（土砂）には、自然由来の重金属等が含まれる場合がある。重金属等の中でも報告事例が多い元素の 1 つがヒ素（As, Arsenic）である。環境基本法における土壤環境基準では、0.01mg/L という溶出基準が定められており、この基準値を上回る岩石や土壌は、基準不適合土として取り扱う必要がある。「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（2023 年版）」¹⁾によれば、そのような土壌は要管理土として区分され、必要な対策を実施しつつ盛土等として管理を行うか、受入施設等に受入条件を

満足させた上で搬出することとなっている。

今回、新潟市の雨水バイパス管を新設する複合式シールド工事において、シールド発生土（一次処理土）のヒ素溶出量が土壤環境基準（0.01mg/L）を超過する可能性があるため、土砂としての有効利用を図るにはヒ素溶出量の低減対策を講じる必要があった。一次処理土のヒ素溶出量を低減するため、重金属等汚染土壌の浄化方法として一般に採用される、水による洗浄処理（土壤洗浄法）の初期検討を行い、シールド工事の泥水処理プラントに適用する際の効率的かつ現実的な洗浄方法を実験的に検討した。そして、その実験結果に基づいた、ヒ素溶出量低減対策を現場の泥水処理プラントに新たに設置した。今回、それらの結果等について報告する。

§ 2. 対象工事

2-1 工事概要

当該工事は、新潟駅とその周辺市街地の区域（人口約 5.5 万人、約 3 万世帯・事業者数約 5 千事業所）を対象に、浸水被害の軽減を図ることを目的として、新たな雨水バイパス管を複合式シールド工法によるシールド工事で整

* 技術研究所環境技術グループ

** 技術研究所（現：技術革新部）

*** 関東土木（支）南万代（出）

備するものである。工事概要を表一に示す。

2-2 地質概要

施工区間の地質縦断面図を図一に示す。シールドマシンによる掘削時の土被りは約 11.1～14.4m であり、掘削対象の地層は主に沖積層に区分される「As1-3 層（第 3 砂質土層）」であった。土質ボーリング柱状図（標準貫入試験）においても当該深度の土質は細砂～中砂が主体であることが確認された。一方で、複数の区間において有機物を含む腐植土の存在も確認された。

2-3 土壌成分

事前のボーリング試験により、複数の区間で土壤環境基準を超過するヒ素溶出量（0.031～0.039mg/L）が確認された。また土壤環境基準未達であるがフッ素についても一部溶出が検出された。なお、新潟市においては過去の地下水質測定において地下水環境基準を超過する自然由来のヒ素の存在が報告されており²⁾、また当該工事位置である越後平野は沖積平野であるため、有機物や鉄酸化鉱物等が多く含まれ、それらがヒ素と結合することでヒ素を濃縮している可能性が指摘されている³⁾。

§ 3. ヒ素溶出量低減対策の検討

3-1 検討方針

前述の 2-2 節、2-3 節で示したとおり、掘削対象地層は概ね均質である一方、一部区間で土壤環境基準を超過するヒ素が確認された。このため、当該工事では全区間の発生土を対象にヒ素低減対策を講じる方針とした。

一般にヒ素は、礫分・砂分といった粗粒分よりも、粒径の小さい粘土鉱物などの細粒分に多く含まれる傾向がある⁴⁾。当該工事のシールド発生土に含まれるヒ素も、

主体である砂分より、微量に含まれる粘土分に多く存在していると推測された。

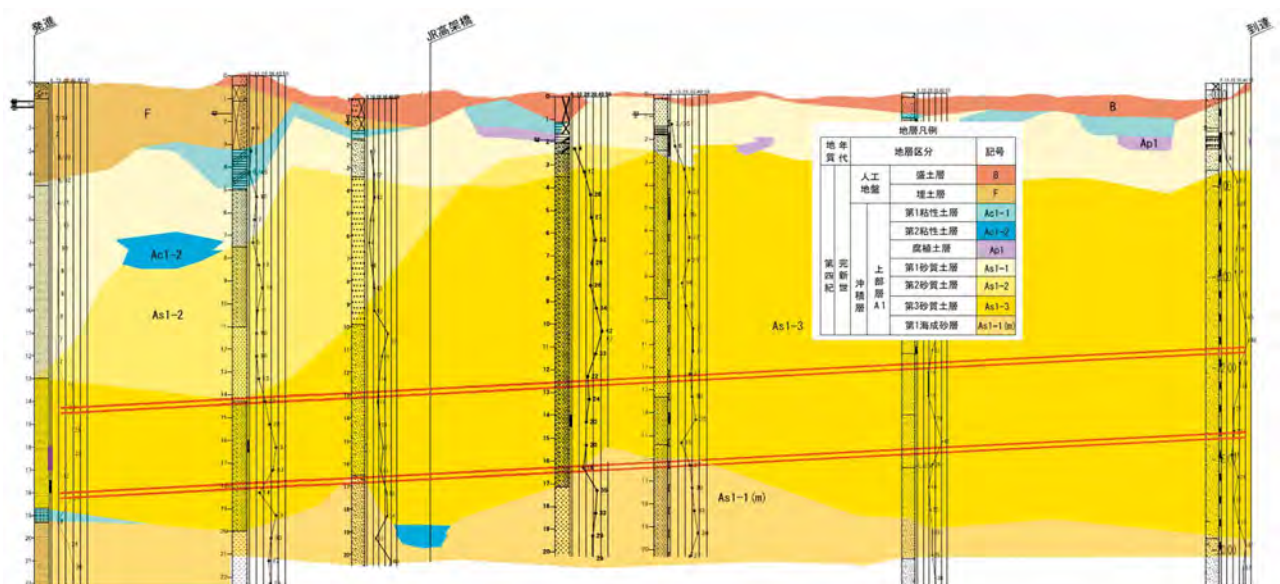
当初、シールドマシンから泥水状態で輸送されるシールド泥水に対し、土砂脱水篩装置（振動篩）による 0.075mm 分級を行い、篩上に残留した画分を一次処理土として回収する計画であった。細粒分（シルト・粘土分）を除去することで、一次処理土のヒ素溶出量が土壤環境基準（0.01mg/L）に適合すると想定していた。しかしながら、以下の 2 点から、通常の振動篩による分級処理のみでは基準適合が困難となる可能性が懸念された。

- ① ボーリング試験で得られた掘削対象地盤のヒ素溶出量が比較的高いこと（最大 0.039mg/L）
- ② 過去のシールド工事において、振動篩による分級のみでは細粒分が十分に除去できない事例があったこと

表一 工事概要

工事名称	鳥屋野・万代・下所島排水区雨水バイパス管 下水道工事
施工場所	新潟市中央区幸西 4 丁目他地内
施工者	西松・大豊・植木・池井特定共同事業体
工事内容	複合式シールド工法 (マシン：泥土圧・輸送：流体)
	シールド機外径：4,090 mm
	掘削延長：2,361 m
	発進立坑：L9.70 m×W7.16 m×H19.89 m
	到達立坑：L9.00 m×W7.00 m×H16.08 m

そこで、当該工事では、分級後の処理土に対して、洗浄・分級機を用いる土砂洗浄設備を追加実施する設計変更を提案した。土砂洗浄設備を追加実施するにあたり、土壌洗浄によるヒ素溶出量低減効果の確認および最適条件の検討を目的として、室内試験を実施した。



図一 地質縦断面図

表一2 ボーリング試料の深度毎のヒ素溶出量

深度 (GL-m)	溶出量 (mg/L)	土壤環境基準 (mg/L)
14	0.003	0.01 以下
15	0.001	
16	0.003	
17	0.006	
18	0.007	
19	0.018	
20	0.020	
21	0.008	
22	0.026	
23	0.012	
24	<0.001	

3-2 土壤洗浄（水による洗浄処理）の初期検討

(1) 試験方法

a. 原土試料の作製

立坑付近の地点で無水掘りにより採取したオールコアボーリング試料のヒ素溶出量（表一2）を踏まえ、GL-18m～GL-24mの試料を均等に混合して原土とした（写真一1）。原土中にはヒ素溶出量増加の原因となり得る数mm程度の粘土塊が目視で確認された。

b. 模擬返送泥水の作製

原土に水を添加混合した後、0.075mm篩で篩下試料（細粒分を含む泥水）を回収した。回収した篩下試料を新たな原土に添加して同様の操作を繰り返すことで細粒分を濃縮し、比重 1.19t/m³ に達した段階で模擬返送泥水とした。

c. 模擬シールド泥水の作製

原土に模擬返送泥水、添加剤（複合高分子添加剤およびバインダー分補助剤）を所定量添加し、電動ハンドミキサーで1分間攪拌して模擬シールド泥水を作製した。

d. 湿式分級および土壤洗浄

模擬シールド泥水を0.075mm篩で分級し、篩上残留物を一次処理土として回収した（写真二）。一次処理土に所定量の水を添加し、再度篩分けすることで土壤洗浄とした。洗浄水量および洗浄回数をパラメータとし、複数条件でヒ素溶出量の低減効果を評価した（表一3）。

(2) 試験結果

模擬返送泥水のヒ素溶出量は0.021mg/Lと土壤環境基準を超過した。また、模擬返送泥水を用いて作製した模擬シールド泥水では0.031mg/Lとなり、さらに高い溶出量を示した。これは、返送泥水中に濃縮された細粒分に吸着したヒ素が溶出したためと考えられる。

この結果から、現場においても返送泥水中のヒ素濃度が上昇し、掘削対象地盤にヒ素が含まれない区間であっても、一次処理土のヒ素溶出量が土壤環境基準を超過する可能性が示唆された。

土壤洗浄によるヒ素溶出量の変化を図一2に示す。土壤洗浄を行わない一次処理土のヒ素溶出量は0.026mg/Lであった。それに対して、ケース①（液固比1：1の1回



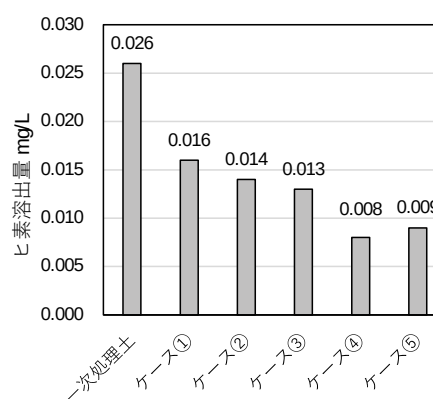
写真一1 原土試料の外観



写真二 篩上に残留した一次処理土

表一3 土壤洗浄の試験条件

試験ケース	模擬掘削土重量に対する液固比	繰り返し回数 (回)
ケース①	1 : 1	0
ケース②	2 : 1	0
ケース③	4 : 1	0
ケース④	1 : 1	4
ケース⑤	2 : 1	2



図一2 土壤洗浄試験でのヒ素溶出量

洗浄）では0.016mg/Lとなり、一定の低減効果が確認された。洗浄回数を1回に固定し、液固比を2：1（ケース②）、4：1（ケース③）へ増加させると、ヒ素溶出量はわずかに減少するものの、土壤環境基準（0.01mg/L）は満足しなかった。

一方、ケース③、ケース④およびケース⑤の結果を比

較すると、トータルの液固比（4：1）同じでも、洗浄回数を複数回に分けることで低減効果が確認され、ケース④およびケース⑤は土壤環境基準を満足した（0.008～0.009mg/L）。

このことから、一次処理土に対する土壤洗浄は、砂粒子表面に付着した細粒分を追加的に除去することでヒ素溶出量を低減でき、洗浄回数を増やすことで洗浄効果を向上させることが確認された。しかしながら、一次処理土のヒ素溶出量は掘削区間により変動するため、土壤洗浄後であっても土壤環境基準を超過するリスクが残された。また、洗浄水量や洗浄回数の増加は、現場泥水処理プラントの大型化および設備コストの増大につながる。そこで、土壤洗浄時の洗浄水に薬剤を添加することで、現場設備を大幅に変更することなく、より経済的にヒ素溶出量を低減する方法について再検討することとした。再検討にあたって、新たにボーリング試料を採取し、模擬シールド泥水の作製方法についても後述のとおり改良した。

3-3 効果的な土壤洗浄の検討

(1) 試験方法

a. 模擬返送泥水の作製

新たに採取した原土に水を添加して約40wt%の懸濁液を作製した。これを陶器製のミルにセラミックボールとともに投入し、280rpmで5分間攪拌して配管移送を模擬した（写真—3）。攪拌後、30秒間静置し、傾斜法により上水を回収した。この操作を2回繰り返した後、市販の粘土資材を添加して比重を約1.2t/m³に調整し、さらにCMC（カルボキシメチルセルロース）溶液を添加することでファンネル粘性を25秒となるように調整したものを模擬返送泥水とした。

b. 模擬シールド発生土の作製

原土に模擬返送泥水を添加し、同様に配管移送模擬処理（280rpm、5分間）を行ったものを模擬シールド発生土とした。

c. 湿式分級および土壤洗浄

模擬シールド泥水に対して、0.850mm、0.150mm、0.075mmの段階的な篩分けを行い、各篩上に残留した試料を混合して一次処理土として回収した。

一次処理土の湿潤重量に対して1.57倍の洗浄水を添加し、電動ミキサーで10分間攪拌することで土壤洗浄を行った。洗浄に使用した水および洗浄条件を表—4に示す。ケース②およびケース③では、pH5およびpH7を維持するため、3.9%の塩化第二鉄溶液を2分ごとに添加して洗浄を行った。塩化第二鉄は排水処理で一般的に用いられる酸性の無機凝集剤である。また、ケース④およびケース⑤では同様のpH条件下で、薬剤として6.2%希硫酸溶液を用いて2分ごとに添加して洗浄を実施した。

(2) 試験結果

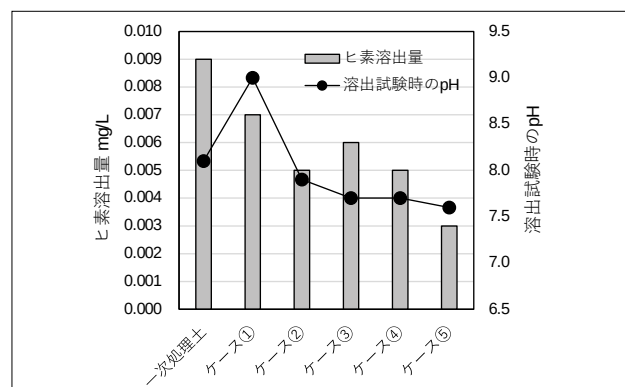
各洗浄条件におけるヒ素溶出量の変化と溶出量試験時



写真—3 配管移送模擬処理の状況

表—4 土壤洗浄の洗浄条件

試験ケース	使用薬剤	pH 条件
ケース①	—（水のみ）	—（調整無し）
ケース②	塩化第二鉄溶液	pH 5を維持
ケース③	塩化第二鉄溶液	pH 7を維持
ケース④	希硫酸	pH 5を維持
ケース⑤	希硫酸	pH 7を維持



図—3 各洗浄条件でのヒ素溶出量と溶出量試験時のpH

のpHを図—3に示す。なお、新たに採取したボーリング試料から作製した原土は、3-2節で用いた原土とは性状が異なり、原土のヒ素溶出量は0.012mg/L、洗浄を行わない一次処理土では0.009mg/Lとなった。これは、新たに採取した原土の細粒分含有率が低く、不足分を粘土材料で補ったことなどが影響し、ヒ素溶出量が相対的に小さくなったためと考えられる。

薬剤を添加しないケース①では、ヒ素溶出量が約2割低下した。溶出試験時のpHが9.0とアルカリ性を示しており、原土由来のアルカリ性によりヒ素溶出が促進された可能性がある。一方、薬剤によりpH調整を行ったケース②～ケース⑤では、いずれもヒ素溶出量が大きく低下し、溶出試験時のpHも中性域を示した。特に、希硫酸溶液でpHを調整したケース④およびケース⑤で最も高い低減効果が得られた。ケース②およびケース③で使用した塩化第二鉄は鉄イオンを含むため、添加後に酸化鉄などの化合物を形成し、ヒ素を吸着する性質を有する。

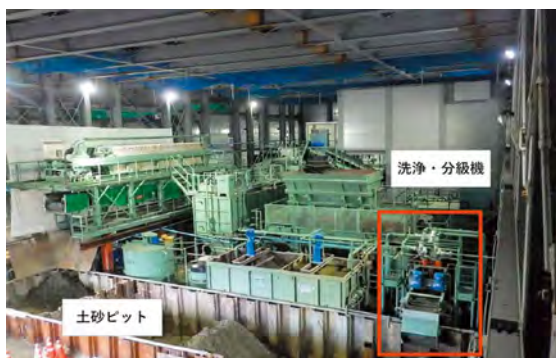


写真-4 現場泥水処理プラントの全景

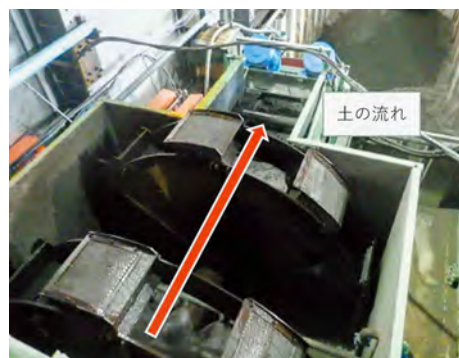


写真-5 洗浄・分級機（上から見たところ）

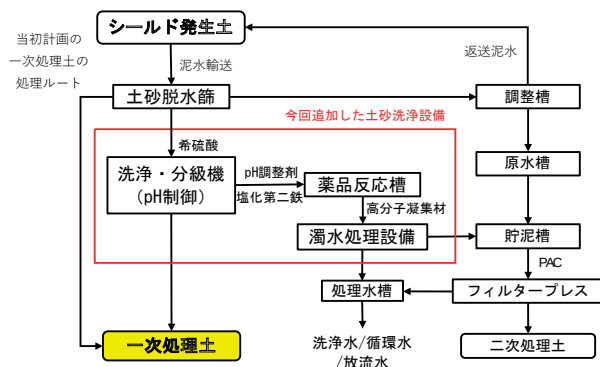


図-4 現場泥水処理プラントの全体処理フロー

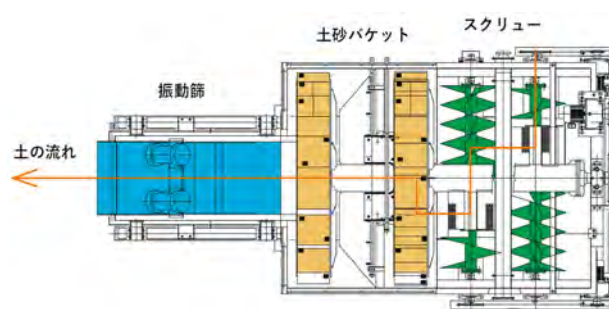


図-5 洗浄・分級機の構造

そのため、土壌洗浄時に使用したことでヒ素を吸着した酸化鉄が処理土側に残留し、結果としてヒ素溶出量が相対的に高くなったと推察される。

以上から、土壌洗浄時に希硫酸溶液を用いて pH を制御することで、現場泥水処理プラントの大幅な改修を行うことなく、一次処理土のヒ素溶出量を効果的に低減し、土壌環境基準に適合できることが実験的に示された。

§ 4. 現場泥水処理プラントへの適用

4-1 現場泥水処理プラントの処理フロー

室内試験による土壌洗浄の検討結果を踏まえ、現場泥水処理プラント（写真-4）では、当初設計である土砂脱水機装置（振動篩）による分級処理に加え、分級後の処理土の土壌洗浄を可能とする追加設備として洗浄・分級機（写真-5）を用いた土砂洗浄設備を導入する処理フローを構築した。現場泥水処理プラントにおける全体の処理フローを図-4 に示す。

追加した土砂洗浄設備は、以下から構成される。

- ① 洗浄・分級機（pH 制御）
- ② 一次処理土から除去された細粒分を含む濁水を処理する薬品反応槽
- ③ 濁水処理設備

洗浄・分級機（pH 制御）は、水車状の機構にバケット（網）が取り付けられた装置が 2 台連結された構造であり、これらが回転することで土砂を希硫酸により pH 制御し

洗浄しながら分級する機能を有する（図-5）。薬品反応槽では、排水処理剤として塩化第二鉄および pH 調整剤を添加し、後段の濁水処理設備では、高分子凝集剤を添加して粗大フロックを形成させて水処理を行う。細粒分は最終的に PAC（ポリ塩化アルミニウム）を添加した後、フィルタープレスにより脱水し、脱水ケーキ状の二次処理土として処分される、処理水については放流基準を満足していることを確認して放流する。

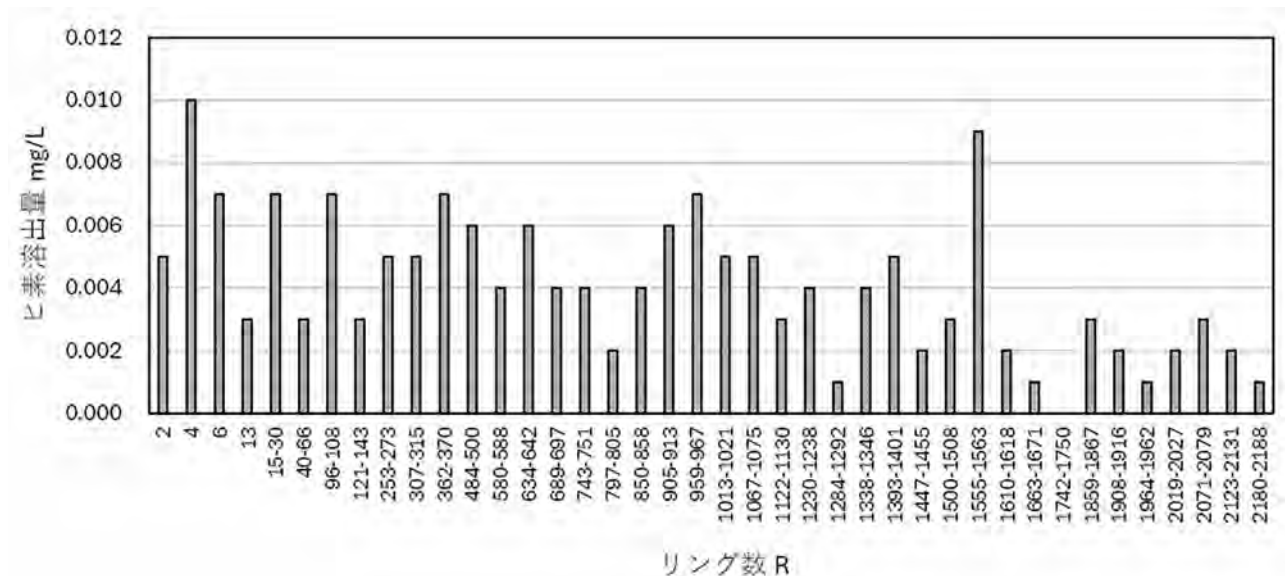
4-2 一次処理土の品質管理

洗浄・分級機による土壌洗浄後の一次処理土は、土砂ピットに集積し、一定量ごとにヒ素溶出量を測定し、土壌環境基準に適合していることを確認したうえで、場外搬出した。

ロット管理の基準としては、自然由来の土壌汚染調査において 30m 格子で深さ 1m ごとに採取する手法を参考に、 900m^3 （ $30\text{m} \times 30\text{m} \times 1\text{m}$ ）の一次処理土を 1 ロットとして品質管理を行った。なお、セグメントのリング数（R）では約 55 R／ロットに相当する。

4-3 一次処理土の品質管理結果

掘進の進捗に伴い品質管理として実施した一次処理土のヒ素溶出量を図-6 に示す。ヒ素溶出量は、定量下限値（ 0.001mg/L ）未満から 0.010mg/L であり、平均値は約 0.004mg/L であった。これにより、全掘削区間において一次処理土のヒ素溶出量が土壌環境基準（ 0.01mg/L ）



図一六 一次処理土の品質管理結果（各ロットのヒ素溶出量）

を満足していることが確認された。

また、土壤洗浄の洗浄効果を確認するため、土壤洗浄前の土砂（6R 時点）について試験的にヒ素溶出量を測定したところ、0.030mg/L と土壤環境基準を大きく上回る値を示した。この結果から、追加した土砂洗浄設備による土壤洗浄がヒ素溶出量の低減に有効であることを裏付けることができた。

§ 5. まとめ

今回、シールド工事に伴い発生する一次処理土のヒ素溶出量を低減し、土壤環境基準に適合させるための処理方法について、室内試験にて実験的に検討したうえで現場適用した。

まず、基礎検討として実施した水による土壤洗浄試験では、細粒分の除去がヒ素溶出量低減に有効であること、特に洗浄回数を複数回に分けることで効果が大きく向上することを確認した。しかしながら、洗浄水量の増加は設備規模の拡大を招くため、現場適用性の観点から課題が残った。そこで、薬剤を用いた土壤洗浄方法を追加検討した結果、希硫酸溶液による pH 制御が最も高いヒ素溶出量の低減効果を示すことが明らかとなった。塩化第二鉄を用いた場合は、生成した酸化鉄が処理土側に残留し、相対的に溶出量が高くなる傾向が確認されたことから、薬剤選定の重要性が示された。

これらの知見を踏まえ、現場泥水処理プラントに洗浄・分級機（pH 制御）を追加導入し、土壤洗浄処理を組み込んだ処理フローを構築した。その結果、一次処理土のヒ素溶出量は、全掘削区間で土壤環境基準（0.01mg/L）を満足した。ヒ素溶出量の平均値は約 0.004mg/L と良好な結果が得られた。また、土壤洗浄前の土砂では 0.030mg/L と高い溶出量が確認され、土砂洗浄設備の導

入効果が裏付けられた。以上より、洗浄・分級機（pH 制御）による土壤洗浄プロセスは、シールド工事の一次処理土のヒ素溶出量低減に対して高い有効性と現場適用性を有することが示された。

本手法は、自然由来重金属等を含む地盤を掘削する他のシールド工事においても、有効な対策技術として展開可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル改訂委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル（2023 年版），2023 年
- 2) 新潟県：新潟県オープンデータ地下水質測定結果（令和元年～5 年度），2024 年。
<https://www.pref.niigata.lg.jp/site/opendata/20220322tikasui.html>（参照 2026-02-26）
- 3) 金子正史：新潟県における自然由来のヒ素による地下水汚染の実態，平成 21 年度調査研究発表会要旨集，p.34，2009 年
- 4) A. F. Gerdelidani et al., Arsenic geochemistry and mineralogy as a function of particle-size in naturally arsenic-enriched soils, Journal of Hazardous Materials, Vol. 403, 123931, 2021.