

(S2-4) 安定型処分場における浸透水中に含有される砒素の起源調査

○岡野英樹¹・和田信彦¹・小村一行²
¹株式会社アステック東京・²大福工業株式会社

1. はじめに

ある安定型処分場の浸透水において維持管理基準値を超える砒素が確認された。この砒素の原因を把握することを目的として平成 21 年 9 月初旬～10 月中旬にかけて、既存資料調査、地表地質踏査、地下水および場内水調査をおこなったところ、処分場内に仮置きした再生骨材により土中の pH 環境が変化することによって自然地層に含有される砒素が地下水へ溶出するという、自然地層由来の重金属による汚染機構の結論を得たので報告する。

2. 経緯

平成 3 年 12 月～平成 20 年 6 月まで廃棄物の埋立工事がおこなわれた。この間の保健所のモニタリングでは維持管理基準を超過する項目は認められていない。

平成 21 年 2 月と同年 3 月の 2 回の保健所の検査にて、場内末端部での浸透水中の砒素が 0.019～0.14 mg/L と当該処分場の維持管理基準 0.01 mg/L を超過していることが判明した。

同年 3 月～4 月に処分場運営会社によって、処分場内のボーリング調査と表層土壌の分析が実施された。表層土壌からは不検出であったが、ボーリングコアでは自然地層の粘性土層と中間覆土で埋め立てた廃棄物層において砒素溶出量が環境基準を超過し、フィルターを通さないで分析したボーリング孔内水においても砒素が地下水基準を超過した。

3. 調査内容

3-1 既存資料調査

処分場内の履歴状況を把握するため、既存の資料（地形図、地質図、処分場建設前地形図、処分場建設の計画図面、建設計画時の Br 調査報告書など届出書類）を収集し、関係者からマニフェスト状況や中間覆土の土取り場所、浸透水モニタリング結果等を聞き取りにて確認した。

3-2 地表地質踏査

処分場内の地質状況等を把握するため、処分場内およびその周辺 0.25 km²程度を対象とした踏査をおこなった。踏査のさいに表層地質試料を採取し、表層地質における重金属類の全含有量を可搬型蛍光 X 線測定装置で分析し、砒素の溶出量試験をおこなった。あわせて既存調査のボーリングコアにおいて砒素溶出量が超過した試料を供与いただき、それら試料の全含有量測定を可搬型蛍光 X 線測定装置にておこなった。

3-3 地下水および場内水調査

場内にある水の状況を把握するため、地表地質踏査時に認められた流入河川等の表流水や浸透水・放流水、および既存ボーリング調査で設置された観測井の孔内水を対象に採水・分析をおこなった。

分析項目は、維持管理項目である砒素濃度と水素イオン濃度指数 pH、および溶存する各種イオン (Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) を分析した。

4. 調査結果

4-1 既存資料調査

既存資料の確認と聞き取りの結果、砒素を含むような廃棄物は処分場に搬入されておらず、また、廃棄物の飛散防止用の覆土として持ち込んだ土砂もない（覆土は場内に分布する崖錐堆積物の土砂を利用した）と判断された。

The origin geological survey into the arsenic included in the osmotic water in the least controlled landfill site
Hideki Okano¹, Nobuhiko Wada¹, Kazuyuki Omura² (¹Astec-Tokyo co. Ltd, ²Daifuku-Kougyo co. Ltd)
連絡先：〒132-0035 東京都江戸川区平井 5-21-3 ガーデン欣志ビル (株)アステック東京
TEL 03-5631-2171 FAX 03-5631-2172 E-mail h.okano@astec-geo.co.jp

4-2 地表地質踏査

4-2-1 地形

調査地は北西方向にある平野に向かって高度を減ずる標高 200 m 付近にある。尾根沿いは標高差が小さくならかな地形が続くが、調査地はそのならかな地形のなかの比較的細くて高度差をもつ谷部に造成された安定型最終処分場である。1 期埋立工事部分と 2 期埋立工事部分に挟まれる谷の中段部分には、コンクリート再処理設備で処理された径 40 mm 以下のコンクリート再生骨材が高さ約 10 m 程度の山となって置かれている。そのほか同じく再生骨材用と思われる瓦片が小規模な小山で置かれている。図-1 に処分場内の状況を示す。

4-2-2 地質

調査地付近の地質は、基盤の変成岩類をおおって中生代白亜紀に噴出した流紋岩質火山岩類が南北に分布し、西部には新生代古第三紀に貫入した石英閃緑岩が分布している。これらの上位には、新生代新第三紀～第四紀の堆積層が不整合に分布している。また、調査地付近の谷部と低地には最近の堆積物である崖錐堆積物や沖積層等が薄く分布する。処分場内には下位から火山岩の流紋岩層、円礫岩～砂岩～シルト岩よりなる堆積層、これらの地層が浸食・運搬され二次堆積した崖錐堆積物（ここまでが自然地層）、そして最上位に安定型産業廃棄物および処分場付帯施設等の人工物層が載る。図-2 に処分場内の地質平面図を示し、図-3 に既存調査結果から推定される谷方向の地質縦断面図を示す。

図-2 に処分場内の地質平面図を示し、図-3 に既存調査結果から推定される谷方向の地質縦断面図を示す。

(1) 流紋岩層 (Rhy)

調査地の全体に分布し、基盤を構成している。岩相は径 1 mm 程度の石英が点在する斑晶が少ないガラス質である。新鮮部は暗灰色を呈するが、風化～強風化部は淡褐～黄灰色を呈する。新鮮部には黄鉄鉱と思われる金属鉱物が、径 0.5 mm 以下



図-1 処分場内の状況

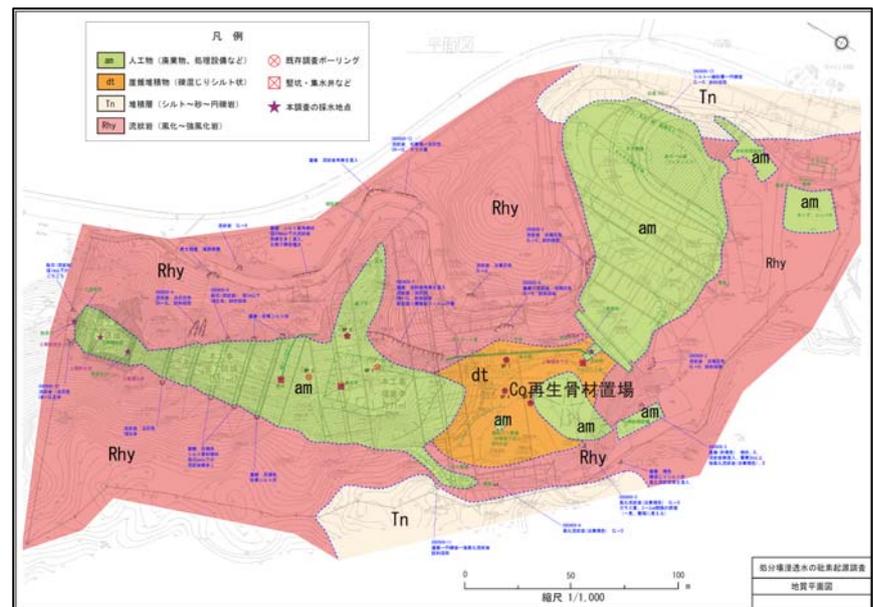


図-2 地質平面図

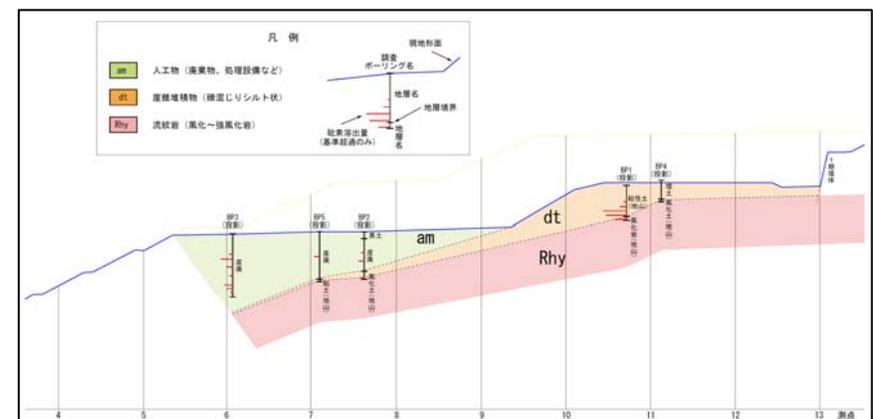


図-3 地質縦断面図

の粒状～フィルム状に生成しているのが認められる（後述の蛍光X線分析を実施）。走向N20～40°W傾斜40～50°SWの節理とやや斜交する走向70～80°E傾斜40～50°Nの開口節理が発達するが、流入粘土以外の充填物は認められない。新鮮部の岩級区分はCH～CM級であるが、風化～強風化部の岩級区分はCL～D級を示し軟岩～土砂程度に強度が低下している。調査地の尾根部にあたる南東部と西部では、流紋岩層の上位に堆積層が分布し、円礫岩が強風化流紋岩を不整合におおっているのが観察される。

(2) 堆積層 (Tn)

調査地の南東部と西部の尾根部に小規模に分布し、下位の流紋岩層を不整合におおう。岩相は下部から円礫岩～砂層・シルト層（互層状）よりなる。円礫岩は層厚1.0m以上で、堆積前に風化を受けた流紋岩や安山岩のくさり礫を主体とする。この円礫岩は、堆積層が流紋岩を削って堆積し始めたときの基底礫岩と思われる。砂層・シルト層はそれぞれ0.3～0.6m程度の層厚で一部互層状を呈し、確認した両層での層厚は1.7m以上である。一部のシルト層では、鉄の含有を思わせる赤褐色を呈する箇所が認められる。岩級区分は円礫岩がCL～D級、砂・シルト層はD級と強度は低い。

(3) 崖錐堆積物 (dt)

谷部にある処分場中段部分に分布する。地質露頭では直接に連続する地層は認められないが、流紋岩層の上位に分布するほか露頭の崖錐堆積物や、既存ボーリング調査で認められた「粘性土」記載での分布状況から、同一の堆積様式にあると推定した。つまり、流紋岩層の上位に位置し、不淘汰な礫混じりの軟質シルトから構成される地層を崖錐堆積物とした。礫は流紋岩を主体とすることから、下位の流紋岩層が風化により浸食・運搬された土砂が谷部を流下し、谷中央部の比較的なだらかな部分に崖錐として二次堆積したと思われる。

(4) 人工物層 (am)

谷部の最上位に埋設された産業廃棄物と処分場の付帯施設からなる。産業廃棄物は、安定型処分場に埋立可能である廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラスくず、がれき等からなる。コンクリート再処理設備で処理された径40mm以下のコンクリート再生骨材が高さ約10m程度の山となって置かれているほか、同じく再生骨材用と思われる瓦片が小規模な小山で置かれている。コンクリート再生骨材の山へ降った雨は、下位の崖錐堆積物と下流の2期埋立部分へ流下することになる（細粒化されたコンクリートからカルシウム成分や高pH水が溶脱する可能性がある）。

4-2-3 蛍光X線分析と土壌溶出量試験結果

分布が確認された地層での砒素の含有程度を把握する目的で、露頭表面の試料を採取し可搬型蛍光X線測定装置にて含有される重金属類の分析をおこなった。併せて、砒素の溶出量試験をおこなった。分析対象は処分場の基盤を構成する流紋岩層と、接触した雨水が処分場内に流下する可能性がある堆積層と崖錐堆積物とした。また、既存調査にて砒素の溶出超過が認められた分析残試料も参考に含有分析をおこなった。

堆積層で0.9mg/kg、崖錐堆積物で2.9mg/kgと少ない値であるが、流紋岩では最大で30mg/kgを超える全含有量が認められた。この流紋岩試料は黄鉄鉱と思われる微細な金属鉱物の生成が認められたものであり、鉄や銅の全含有量も多試料と比べて多くなっていることから、黄鉄鉱や黄銅鉱が生成していると判断される。なお、処分場内の露頭表面から今回採取した試料での溶出量は全て定量限界未満であった。

既存調査にて砒素溶出量が超過したコア試料での全含有量は、最大151.8mg/kg、最少13.4mg/kgとほとんどの試料で露頭試料よりも高めの砒素を検出した。既存コア試料の溶出量（既存調査で分析された値）と全含有量との関係を見ると、全含有量値と溶出量値が比例するように見受けられる（図-4参照）。

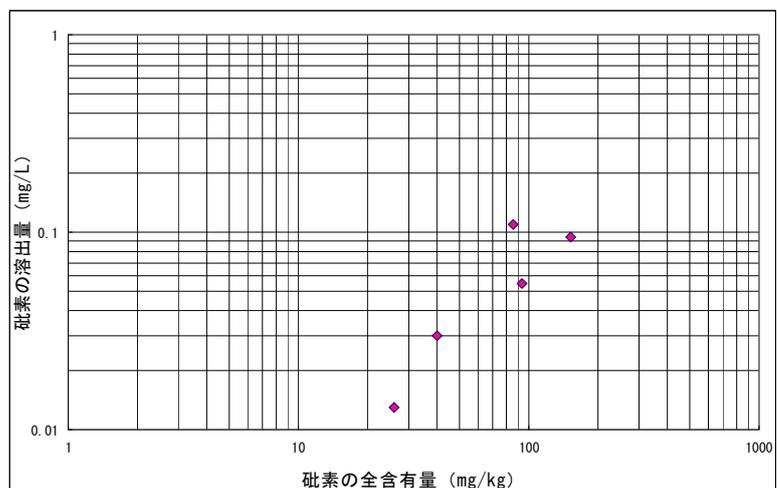


図-4 既存調査の自然地層における砒素の全含有量と溶出量の関係

4-3 地下水および場内水調査

処分場内にある水の状況を把握するため、浸透水・放流水、および観測井の孔内水を対象に採水・分析をおこなった。

4-3-1 採水時の簡易水質測定結果

電気伝導度は、浸透水や放流水で 120～150 mS/m、観測井と重機掘削後の設置井戸で 100～250 mS/m と幅を持っている。コンクリート再生骨材の山付近の観測井において高めの電気伝導度が認められる。

水素イオン濃度指数 pH は、1 期堤体下①（1 期浸透水）で pH 6.4～6.9（弱酸性～中性）を示し、コンクリート再生骨材の山の表流水が流れ込む 1 期堤体下②と谷全体の下流部にあたる 2 期浸透水・貯水池・放流水、および左岸支沢が合流部に位置する観測井で pH 7.2～7.9（中性～弱アルカリ性）を示す。

4-3-2 分析結果

観測井や重機掘削による設置井戸から得られる孔内水は、地下水として扱い今回はメンブレンフィルターによって懸濁物質 SS 等を濾過した後（フィルタリング）の試料水を検体とした。その他の浸透水や放流水は、地表水と同じく SS 等も含めた、あるがままの試料を検体とした。

砒素は、1 期堤体の浸透水である 1 期堤体下①試料とフィルタリングをした観測井の孔内水全試料で定量下限値未満であったが、それ以外の試料では環境基準を超過する 0.022～0.049 mg/L を検出した。

水素イオン濃度指数 pH は、採水時の簡易分析と同様に 1 期堤体下①（1 期浸透水）と観測井で pH が弱酸性～中性を示し、コンクリート再生骨材の山の表流水が流れ込む 1 期堤体下②と谷全体の下流部にあたる 2 期浸透水・貯水池・放流水、左岸支沢が合流部に位置する観測井で弱アルカリ性を示す。

溶存イオン分析では、試料の多くが日本での陸水に多く見られる中間組成を示すが、コンクリート再生骨材から Ca イオンと HCO₃ イオンが供給されているであろう観測井付近では中間組成のエリアから離れてプロットされる（図-5 参照）。

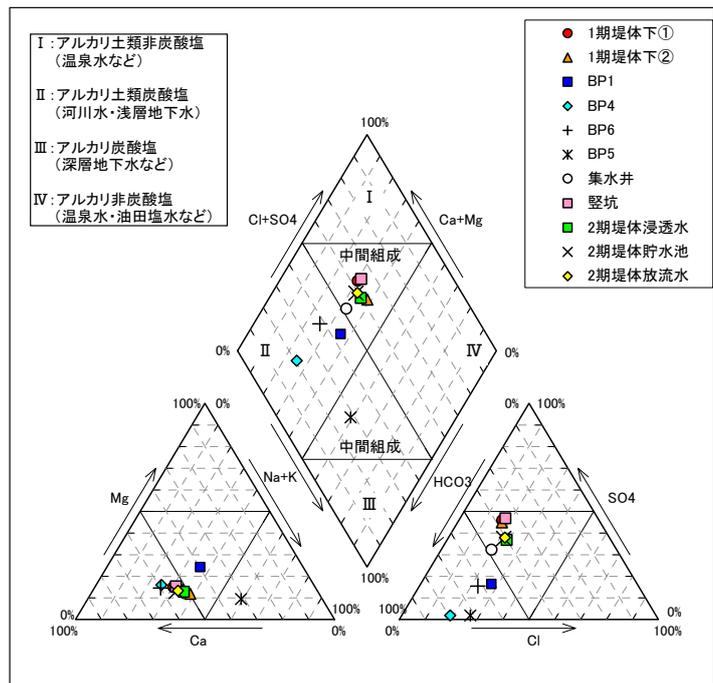


図-5 トリリニアダイアグラム

5. 考察

5-1 処分場内の地質構造と砒素の溶出について

- (1) 環境基準値以上の砒素を溶出した地層は、粘性土（崖錐堆積物）と産廃（人工物層）中の土砂である。
- (2) 崖錐堆積物での砒素超過は、浅部では認められず、深部方向でより高い値が認められる。これは既存調査で処分場内の表層土壌から検出されないことや、今回調査でも地表の地層露頭から採取した試料から検出されていないことと整合的である。砒素が地表付近では検出されず地下では検出される理由は、地表付近では風化が進み砒素が溶脱してしまい残存していない（検出されない）が、地下では風化が進まず砒素が残存している（検出される）ためと考えられる。

5-2 砒素の起源と溶出機構について

今回の調査結果から推定される砒素の起源と溶出機構は下記のとおり。

5-2-1 地質環境の状況

- (1) 地質は下位から流紋岩 (Rhy)、堆積層 (Tn)、崖錐堆積物 (dt)、人工物層 (am) が分布する。
- (2) 既存ボーリングの砒素を含有する地山の粘土層は、地質分布から崖錐堆積物 (dt) に区分される。
- (3) 流紋岩の一部には黄鉄鉱が生成し、また流紋岩と崖錐堆積物には砒素が含有される。

【砒素溶出の要因】一部に黄鉄鉱を含み砒素が共存する流紋岩が風化により浸食・運搬され、谷中央部に崖錐堆積物 (dt) が堆積した。また、流紋岩起源の土砂から溶脱した砒素が崖錐堆積物 (dt) に濃集した。なお、地表

の土壌や風化流紋岩からは砒素が溶出していないが、これは地表付近は風化の影響が大きいことにより砒素が溶脱してしまったためと考えられる（流紋岩の一部と既存調査の粘性土に砒素が含有されていることは今回、確認されている）。

5-2-2 処分場内状況について（図-6 参照）

- (1) 1期埋立時の中間覆土は、処分場の造成時に発生した崖錐堆積物(dt)の土砂を利用した。
- (2) 処分場内の中段にコンクリート再生骨材が積まれている。
- (3) 1期堤体の浸透水は中性域だが、コンクリート再生骨材置場からの表流水が流入するコルゲート井や堅坑の孔内水および2期浸透水等は弱アルカリ域（約 pH 8）である。
- (4) 崖錐堆積物(dt)分布範囲で実施した観測井の孔内水は中性域であるが、人工物層(am)での孔内水は弱アルカリ域である。
- (5) 分析にてフィルタリングした孔内水試料では、砒素を検出していない。しかし、フィルタリングされていない既存分析値では、基準超過する砒素が検出されている。

【砒素溶出の誘因と移動原理】コンクリート再生骨材への降雨からアルカリ性の表流水が発生し、崖錐堆積物(dt)と人工物層(am)の中間覆土に接触し含有される砒素が溶出した。溶出した砒素は粘土鉱物やフミン等に吸着され、浸透水や地下水の流動とともに谷下流へ移動した。

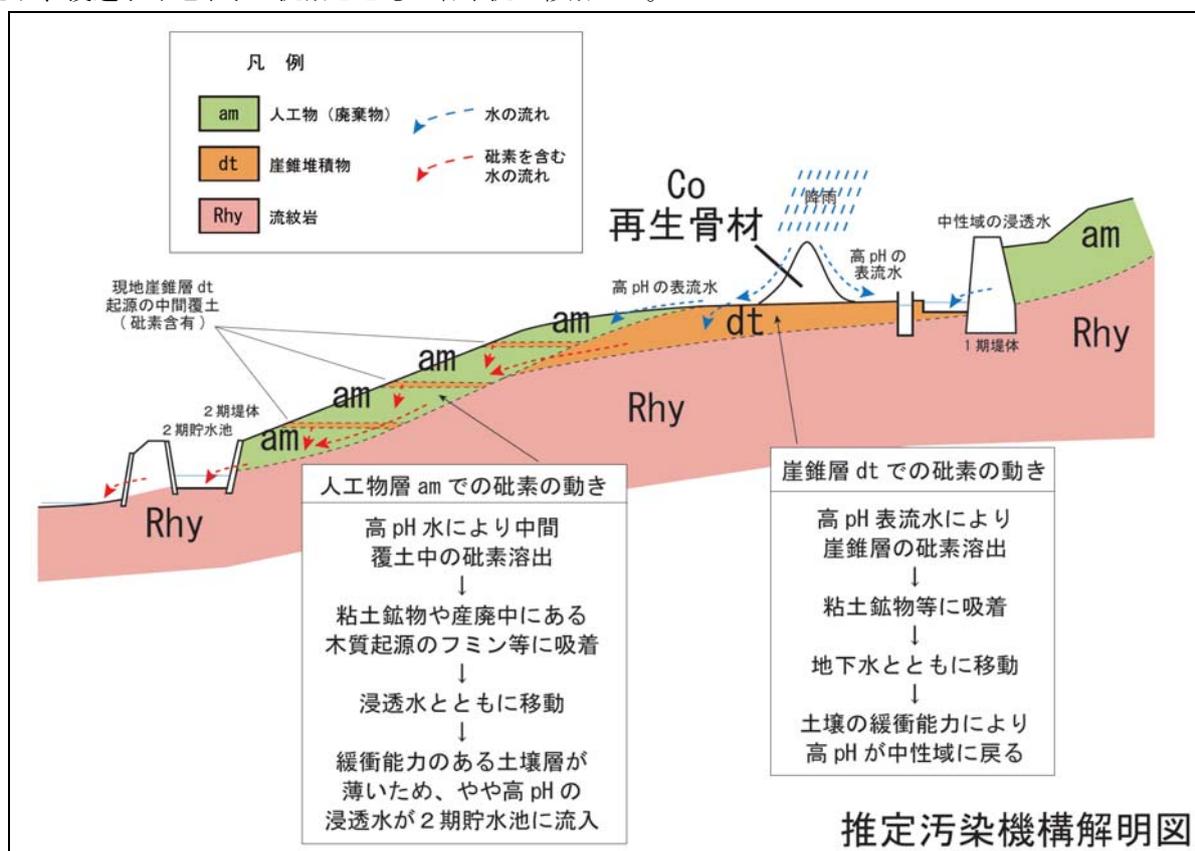


図-6 推定汚染機構説明図

5-3 対策提案

- (1) 地下環境をアルカリ雰囲気とさせている（誘因）と考えられるコンクリート再生骨材の撤去、もしくは降雨に影響されないような建屋内への移動措置。
- (2) 要因である砒素を含有する崖錐堆積物と人工物層の中間覆土を除去するのが効果的ではあるが、埋設されている廃棄物を掘削し分別して再び埋め戻したり、自然地層である崖錐堆積物を掘削除去することは膨大なコストが必要となる。そこで安価な方法として、外部へ流出する浸透水の処理をおこなう方法（有機物分解および砒素吸着剤による固定化除去）が想定される。

5-3-1 コンクリート再生骨材の処置

砒素の溶出は、このコンクリート再生骨材へ降った雨がアルカリ性となり、二次的に堆積し砒素が濃集された崖錐堆積物や人工物層の中間覆土へ流入することによって引き起こされていると思われる。よって、誘因を処置すれば溶出量を減らすことが可能になると思われる。

具体的には、再生骨材を撤去するか、現地に底盤に遮水性能を持たせた倉庫などの建屋を建築し、そこへ移動させることが考えられる。また、今後、コンクリート再生処理を再開・継続する場合には、コンクリート再生骨材が処理施設から外部環境に露出しないような設備にする必要がある。

なお、コンクリート再生骨材がどの程度の期間にわたって現在位置に置かれているかは不明確であるが、処理施設にある掲示看板によれば「平成6年2月」とされていることから、約15年間は現状が継続していた可能性がある。しかし、環境基準を超過する砒素を検出したのは平成21年2月以降である。これはコンクリート再生骨材からのアルカリ性の水が崖錐堆積物中や人工物層の中間覆土へ流入し、含有される砒素と接触し反応・溶出するまでの時間と外部へ流出するまでに時間がかかるため生じた時間差と考えられる。

5-3-2 浸透水の処理

浸透水に含まれる砒素の存在形態は、既存の分析結果と今回の採水分析結果からイオンとして溶存しているものではなく、粘土粒子等の懸濁物質（SS）やフミン等の有機物に吸着しているものと考えられる。そこで懸濁物質の除去や有機物の分解処理をおこなったうえで、分解処理に伴って再び溶け出す砒素を吸着材等で固定化させる方法で処理が可能と考えられる。また、懸濁物質と有機物を併せて除去する凝集濾過やフィルター濾過なども有効であろう。なお、対策にあたっては、各種処理方法の効率性やコストを比較のうえ、決定するのが望ましい。

（もし、粘土鉱物やフミン等の有機物が存在しない場合には、砒素が地下水や浸透水中にイオンとして存在することになり、浸透水から除去するのがより困難になると思われる。このことから粘土鉱物やフミン等の起源である地層（崖錐堆積物と人工物層）の掘削除去は、不経済だけでなく砒素吸着機構を低減させる可能性があると判断される）

5-4 まとめ

- (1)最終処分場が造成されるずっと以前に、一部に砒素を含む流紋岩が風化して崩れ土砂状となり、崖錐堆積物として谷あい中央部に堆積した。そのとき流紋岩に含まれていた砒素も土砂とともに溶脱し、崖錐堆積物の土粒子へ沈着するように濃集した。
- (2)マニフェストおよび聞き取り調査により、砒素を含むような廃棄物は搬入されていない、また、廃棄物の飛散防止用の覆土として持ち込んだ土砂もない（覆土は場内に分布する崖錐堆積物の土砂を利用した）。よって、砒素は外部から持ち込まれたものではなく、もともとの地質に含まれていたものである。
- (3)骨材として再利用するため谷中央部の平坦地に山積みしておいたコンクリートガラから、降雨等によってアルカリ分が溶け出した。そのアルカリ分が地中にしみ込み、崖錐堆積物中に含まれていた砒素を溶出させた。
- (4)溶出した砒素は土砂中の粘土鉱物やフミン（植物等の有機物が腐食したときにできる高分子化合物）などに吸着して地下水とともに流れた。
- (5)地下水中の懸濁物質（上記の粘土鉱物やフミン等）をろ過した地下水試料からは砒素が検出されておらず、ろ過しにくい砒素イオンの形態ではないことを示している。
- (6)よって、砒素が吸着した粘土粒子やフミン等の懸濁物質を処理すれば、同時に砒素も処理可能である。これらを処理する方法としては、懸濁物質の除去と有機物の分解処理をおこなって砒素を吸着剤で固定する方法や、懸濁物質と有機物を併せて除去する凝集濾過やフィルター濾過などの方法がある。効率性やコストを比較のうえ、これらの処理方法を選定するのが望ましい。

6. 文献

日本地質学会環境地質研究委員会編(1997)：砒素をめぐる環境問題—自然地質・人工地質の有害性と無害性、東海大学出版会、pp201.

以上。