

令和6年度

PFOS等の濃度低減のための対策技術実証
試験委託（土1現地）

実証結果報告書

PFOS・PFOAを含む土壌のロータリーキルン式熱分解
処理による濃度低減技術

（略称：ロータリーキルン式熱分解処理技術）

令和8年2月

株式会社鴻池組

目 次

実証結果報告書	1
1. 実証試験の概要	2
1.1 原理と特徴	2
(1) 技術開発の背景	2
(2) 実証技術の原理と課題	3
(3) 実証技術の実用性	4
1.2 技術の対策目標	4
(1) 技術目標	4
(2) 実証技術の経済効率性および環境保全	5
2. 実証試験結果	6
2.1 実証試験方法	6
(1) PFOS・PFOA を含む土壌試料の掘削および環境保全対策	6
1) 掘削概要	6
2) ヤードの整備	6
3) 掘削範囲および掘削方法	6
4) 濃度管理	11
5) 出来形管理と管理値	12
6) 写真管理	12
7) 主要機材および主要資材	13
8) 安全対策	14
9) 排出物等の処理・処分方法	15
(2) PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減	15
1) 実証試験の条件	15
2) 実証試験設備	15
3) 実施フロー	15
4) 濃度低減フロー	16
5) 使用数量	17
6) 分析項目と分析数量	17
7) 安全対策	20
8) 排出物等の処理・処分方法	20
9) その他	20
2.2 実証試験結果	21
(1) PFOS・PFOA を含む土壌試料の掘削および環境保全対策	21

1) 概要	21
2) 掘削土量	22
3) ベントナイト混合土 配合試験結果	22
4) ベントナイト混合土 施工結果	22
5) 耐水シート敷設	24
6) 産業廃棄物発生量	25
7) 現地視察	25
8) マスコミ対応	25
9) 地元対応	25
(2) PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減	26
1) 概要	26
2) 運転管理データ	26
3) 分析結果	28
4) 処理後土壌の土質試験結果	33
5) 排出物等の処理・処分	34
6) 現地視察	34
7) 熱分解処理試験における課題・トラブル	34
8) 分解効率を計算するための投入・排出物量のデータ	34
3. 実証試験の評価項目	38
3.1 対策技術の有効性	38
(1) 熱分解処理による PFOA の濃度低減効果	38
(2) PFOA 含有量および溶出量の分析結果について	39
3.2 対策技術の新規性・将来性	41
(1) 熱分解処理による PFOA の分解効率について	41
(2) PFOA 分解効率の検証	42
3.3 対策技術の経済効率性	43
3.4 対策技術の環境保全	44
(1) 熱分解処理における排ガスおよびばいじんについて	44
(2) 二酸化炭素排出量について	44
3.5 対策技術の適用条件	45
4. 当該技術の今後の展望	47

1. 技術の概要

実証する「PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減技術」は、土壌汚染対策法における汚染土壌処理施設のうち、既存の浄化等処理施設（浄化（分解-熱分解））を活用し、PFOS・PFOA 等を含む土壌をロータリーキルン炉内で約 1,000 °C の高温で熱分解処理するものであり、排ガスに移行した PFOS・PFOA 等についても二次燃焼室で 850 °C 以上、2 秒以上の滞留時間を確保し、熱分解する。これまでに PFOA 含有土壌に対して熱分解処理実証試験を実施しており、処理後土壌、排ガス等で問題無く良好な結果が得られている。

1.1 原理と特徴

（1）技術開発の背景

PFOS および PFOA はストックホルム条約（POPs 条約）の附属書 B（制限）および附属書 A（廃絶）に掲載されている、いわゆる POPs 条約対象物質である。これらが土壌中に高濃度に含まれ、溶出性も非常に高い状態にある場合、その濃度低減技術としては、PFOS および PFOA の特性を示さなくなるように破壊又は不可逆的に変換されるような方法が望ましいと考え、PFOS・PFOA 等を高濃度に含む（溶出する）土壌の高温熱分解処理について検討を進めてきた。実務的には、土壌汚染対策法における汚染土壌処理施設で、同じ POPs 条約対象物質であるダイオキシン類等を含む土壌の処理が可能な、既存の浄化等処理施設（浄化（分解-熱分解））を活用することで、初期費用を抑えつつ、安全・安心を確保したうえで、PFOS・PFOA 等を高濃度に含む（溶出する）土壌の高温熱分解処理が可能であると考えた。そこで、今回の実証試験では、安全かつ速やかに処理することを主眼として、土壌汚染対策法に基づく汚染土壌処理業者が保有するロータリーキルン式熱分解処理設備（浄化等処理施設（浄化（分解-熱分解））を活用することとした（**図-1**）。

なお、今回の実証試験で使用したロータリーキルン式熱分解処理設備では、ロータリーキルン炉内で約 1,000 °C、二次燃焼室で 850 °C 以上、2 秒以上の滞留時間を確保した熱分解処理を行っている。「PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」（以下「技術的留意事項」という。）では、PFOA 含有廃棄物を焼却処理する際の燃焼ガス温度を 1,000 °C 以上（約 1,100 °C 以上を推奨）とされているが、「技術的留意事項」で想定されている処理前廃棄物の PFOS・PFOA 含有量（10,000 mg/kg、混焼率 3.0 %）に対し、PFOS・PFOA 等を含む土壌の含有量は比較的到低濃度（0.001 mg/kg～最大 10 mg/kg 程度）であると想定されることから、二次燃焼室の燃焼ガス温度の条件を 850 °C 以上としても処理後の各排出物（処理後土壌、ばいじん、排ガス）に含まれる PFOA 濃度は「技術的留意事項」に記載の「管理目



図-1 実証試験に使用する設備

「標準参考値」を達成できるものと見込み、これまでに PFOS・PFOA 含有土壌に対して熱分解処理実証試験を実施し、処理後土壌、排ガス等で問題無く良好な結果が得られている。また、ダイオキシン類等を含む土壌についても合計で 90,000 t 以上^{※3}の処理実績を有する。以上より、ダイオキシン類等の POPs を含む土壌を実際に熱分解処理している既存設備を活用して技術実証を行うことで、PFOS・PFOA 等を高濃度に含む（溶出する）土壌の熱分解処理が処理方法の選択肢のひとつとして活用されることが期待される。

（2）実証技術の原理と課題

〔実証技術の原理〕

本技術のロータリーキルン式熱分解処理設備フロー図を図-2 に示す。ロータリーキルン炉内（土壌投入口付近温度約 650 °C、土壌排出口付近（バーナー付近）温度約 1,000 °C、約 1.5 時間滞留）で土壌中の PFOS・PFOA 等はほぼ全て分解またはガスとして揮発する。排ガスへ移行した PFOS・PFOA 等は、二次燃焼室内（バーナー炎温度約 1,700 °C、出口ガス温度 850 °C 以上、2 秒以上滞留）の再加熱で PFOS・PFOA 等を分解する。その後、排ガスは冷却塔で水噴霧により 170 °C 付近まで急冷後、バグフィルタを通過し、煙突から排出される。バグフィルタ手前で粉末活性炭および重曹を吹き込むことにより、排ガス中に残留した PFOS・PFOA 等の有害物質やフッ化水素等の酸性ガスを除去する。吹き込んだ粉末活性炭等はバグフィルタで捕集し、ばいじんとして回収する。ばいじんは廃棄物として管理型最終処分場で処分する。

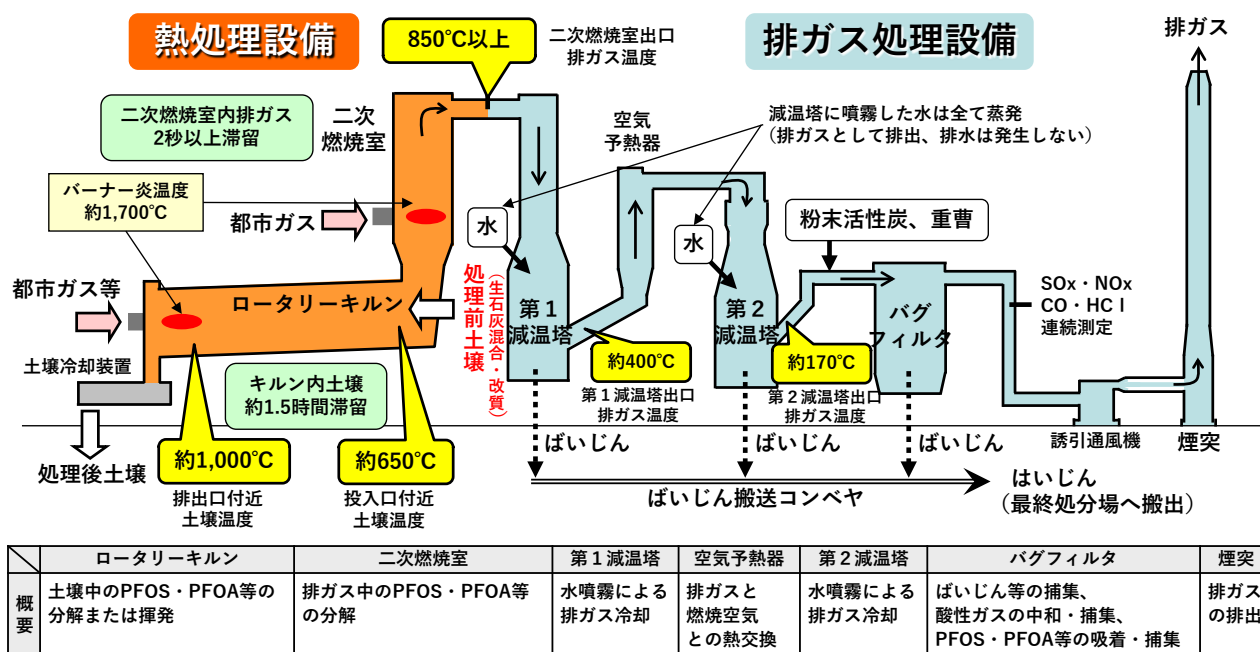


図-2 ロータリーキルン式熱分解処理設備フロー図

〔解決すべき課題〕

本技術は、今回の汚染土壌処理施設を運営する事業者が独自に実施した実証試験において、PFOS・PFOA を含んだ土壌への適用性を確認しているが、本実証試験のより高濃度の PFOS・PFOA 等を含む（溶出する）土壌に対しても、ロータリーキルン加熱温度約 1,000 °C、燃焼ガス温度 850 °C 以上（二次燃焼室出口排ガス温度）で問題無く処理ができることを確認するとともに、処理設備の各所への負荷を確認する。

(3) 実証技術の実用性

1) 適用濃度範囲

PFOS および PFOA の溶出量が数 mg/L オーダーの土壌まで対応可能

2) 適用条件

おおむね 30 cm 以上の大きさの岩石、鉄筋、ゴミ等の粗大異物の混入が無いこと。

PCB 含有量 40,000 mg/kg 以下および油分 5 %以下であること (汚染土壌処理業許可の要件)。

3) 対策能力

72 t/日 (汚染土壌処理施設としての許可処理能力は 110 t/日)

4) 対策効果

処理後土壌の PFOS および PFOA 溶出量 50 ng/L 以下

1.2 技術の対策目標

(1) 技術目標

表-2 実証試験における技術目標と評価方法

項目	目的	目標値	評価
PFOS + PFOA 濃度	PFOS + PFOA 濃度の除去の評価	処理後土壌の PFOS + PFOA 濃度: 50 ng/L 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価
		ばいじん (バグフィルタ) の PFOS + PFOA 濃度: 50 ng/L 以下	
		排ガス (煙突) の PFOS + PFOA 濃度: 60 ng/ m ³ N 以下	
処理コスト	低コスト性を評価	430,000 円/ m ³ 以下 (215,000 円/ t 以下)	実証試験データを基に評価
環境への負荷	燃料・電気使用等による二酸化炭素排出量の削減を評価	1,656 kg-CO ₂ / m ³ 以下 (828 kg-CO ₂ / t 以下) ※実証試験計画時の試算結果	実証試験データを基に評価
	周辺環境に対する低負荷性を評価	排ガス (煙突) のフッ化水素濃度: 5 mg/ m ³ N 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価

- 備考
- 1 排水は発生しない。
 - 2 騒音・振動については、実証試験を実施する設備の設置位置周辺は工業専用地域であり、騒音・振動の規制区域外であることから評価外とした。
 - 3 処理量 3 t/h の試験で上記評価を行うものとする。

処理後土壌、ばいじん (バグフィルタ) および排ガス (煙突) の PFOS + PFOA 濃度の目標値を全て達成することを、技術目標とする。

上記目標の評価のために測定する項目の他、熱処理に伴う副生物質の挙動等のデータを採取することは、将来的な規制や環境影響の把握等に対して有用な情報となり得ると考えられることから、参考項目として排出物以外の測定対象試料を追加し、PFOS・PFOA 以外の一部 PFAS も測定対象として含め、各 PFAS の溶出量と含有量を測定することとする。各測定は直鎖体・分岐異性体を区別して測定する。

(2) 実証技術の経済効率性および環境保全

従来技術は産業廃棄物処理施設における焼却処理として、本技術との処理費および二酸化炭素排出量の比較を行った。いずれも掘削除去した対象土壌を既存施設に受け入れてからの処理となることから、掘削・運搬、処理後物の埋立処分、および廃フレコンの焼却処分に係るコストは同等とし、対象土壌の処理に係るコストのみを比較した (参考として、今回の実証事業における掘削・埋戻し、運搬に係る費用をベースとして施工費も算出している)。また、既存施設での処理を前提としているため、設備等に係る初期費用は比較の対象としない。

二酸化炭素排出量についても、掘削・運搬、処理後物の埋立処分、および廃フレコンの焼却処分にお

ける排出量は同等とし、対象土壌の熱処理に係る排出量のみを比較した。従来技術については、産業廃棄物の焼却処理時の排出係数（焼却処理時のCO₂排出量にはIDEA v3.5による値を用いた）に処理対象量を乗じて算出した。本技術の二酸化炭素排出量については、実証試験の処理条件をもとに算出した。

2. 実証試験結果

本実証試験では、岡山県内某所の対象サイトにて PFOS・PFOA を含む土壌を掘削・袋詰めの上、運搬して試験に供した。土壌試料は、前述した既存の汚染土壌処理施設に運搬し、同施設内のロータリーキルン熱処理設備にて実証試験を実施した。以下にその詳細について述べる。

2.1 実証試験方法

(1) PFOS・PFOA を含む土壌試料の掘削および環境保全対策

1) 掘削概要

- 掘削場所：岡山県内某所
- 実証試験実施場所面積：2,934 m²
- 掘削表面積：528.3 m² (対象範囲 19 区画+法面掘削にかかる 11 区画)
掘削土量：約 682.6 m³、1,406.15 t ⇒ 計 1,448 袋、2.06 t/m³
(汚染土壌処理施設計量分 1,402.16t + 大林組様提供分 3.99t)

2) ヤードの整備

- 雨水排水用ポンプや仮設ハウスの電源として低圧電気を引き込んだ(緊急用として発電機を常設)。
- 施工管理を行う職員詰所および倉庫用の仮設ハウスを設置した。
- 道路面には H=2m の万能板を設置する。出入口にはパネルキャスターゲートを設置した。
- 通路部および仮置きヤードに敷鉄板を敷設した。既設シートに係る部分はシートが損傷しないようにコンパネ等で養生して敷設した。
- 掘削時の湧水に備えて PFOS 等含有水用水槽 (10 m³)、雨水排水用ノッチタンク (2 m³)、散水・洗浄用の高圧洗浄機および水タンクを設置した。
- 実証試験実施場所より東に約 150 m の場所に通勤車両用の駐車場を整備した (敷鉄板敷設)。

3) 掘削範囲および掘削方法

図-3(a) および **(b)** に掘削平面図、**図-4** に K-1 区画の掘削イメージ図、**図-5** に大型土のう製作治具を、**図-6** に掘削範囲平面図、**図-7** に掘削範囲断面図を示す。

(1) 掘削範囲は事前に環境省・運営事務局と協議の上決定した下記の 19 区画とした。基本は GL より 1.5 m の掘削であったが、調査結果で 1.5~2.0 m に比較的高濃度の PFOS 等が検出されている 4 区画は 2.0 m まで掘削した。当初計画では、D-4、J-2、K-1 の 3 区画も GL-2.0m まで掘削予定であったが、想定よりも単位体積重量が大きく、巨礫により余掘りが生じたため数量が過大になることが掘削途中で予測されたため、協議 (10/28 委員アドバイザリ会議にて最終決定) の結果、D-4 は GL-1.64m まで、J-2 および K-1 は GL-1.5m までに変更した。また、GL-2m 付近が高濃度の E-3 については GL-2.1m に変更した。

- ① GL-2.1m まで掘削：E-3 の 1 区画
- ② GL-2.0m まで掘削：D-3, E-1, J-1 の 3 区画 (J-1 は 5m×3.5m)
- ③ GL-1.64m まで掘削：D-4 の 1 区画
- ④ GL-1.5m まで掘削：A-4, B-3, B-4, D-2, E-2, E-4, J-2, K-1 の 8 区画
(J-2 は 5m×3.5m、K-1 はおおよそ 3.5m×3.5m)

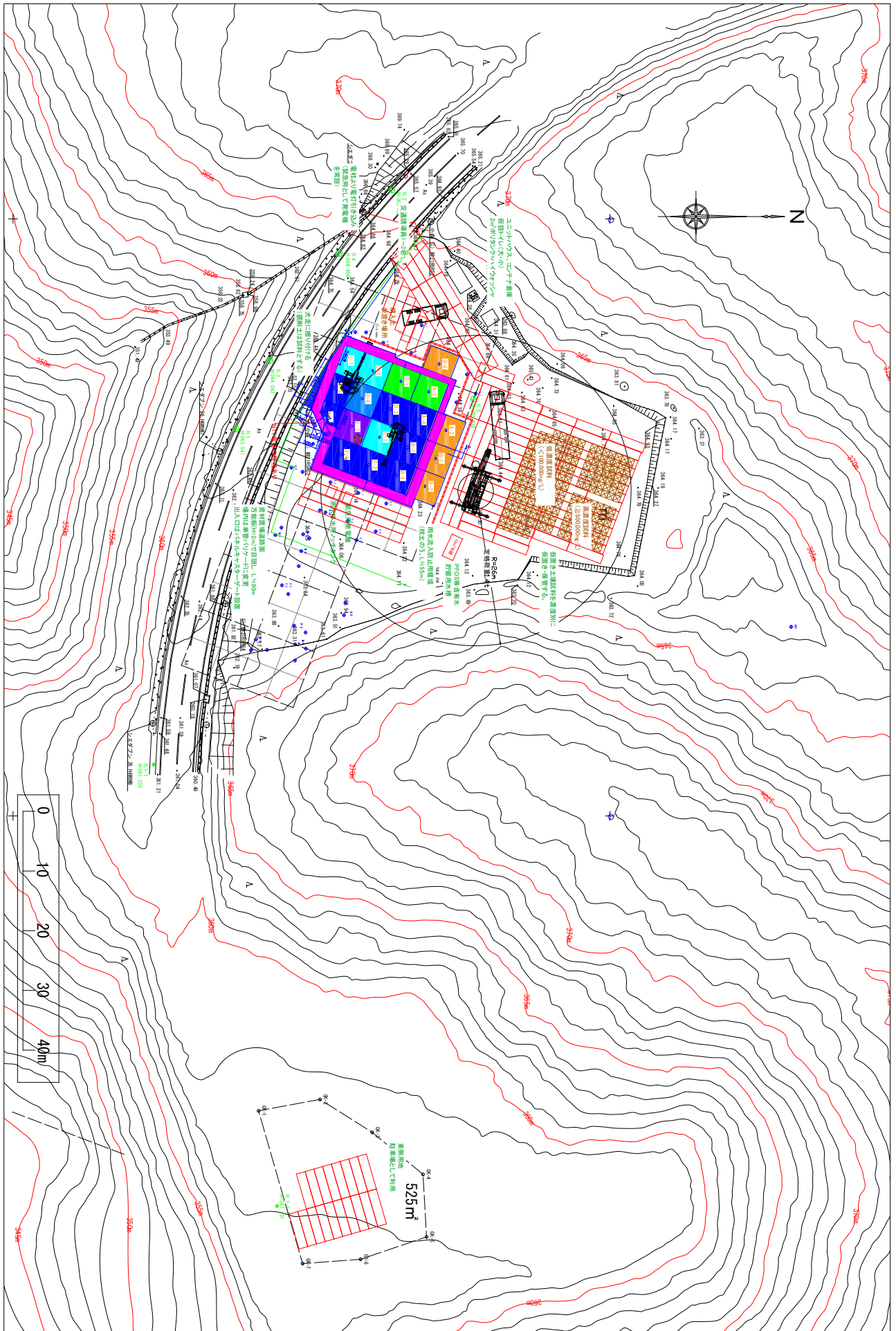


図-3(a) 土壌試料の掘削平面図

- ⑤ GL-1.0m まで掘削：A-3, D-1 の 2 区画
 - ⑥ GL-0.5m まで掘削：A-2, B-1, B-2, G-4 の 4 区画
 - ⑦ 法面掘削に係る区画：A-1, C-1, C-3, G-2, F-1, F-3, H-2, H-4, I-2, K-2, L-1 の 11 区画
(A-2, B-1, B-2, G-4, J-1, J-2, K-1 にも法面あり)
- (2) 上記①, ②の区画の GL-1.5m の端面を、③の区画については GL-1.0m の端面を法尻として 1:1 で法勾配にて掘削した。ただし、道路側の 3 区画 (J-1, J-2, K-1) については、道路損傷防止のため表層の端面を法肩として 1:1 で掘削した。J-1 区画の道路面は、既設水路のシールクンクリートが掘削範囲にかかることから、元の掘削範囲を極力維持するべく、シールクン端部を法肩として、法勾配を調整した。K-1 区画については、東南角に NTT 電柱の控柱を交わすため、表層端面を法肩として 1:1 で掘削するとともに、**図-4** のように隅切りして掘削を行った。

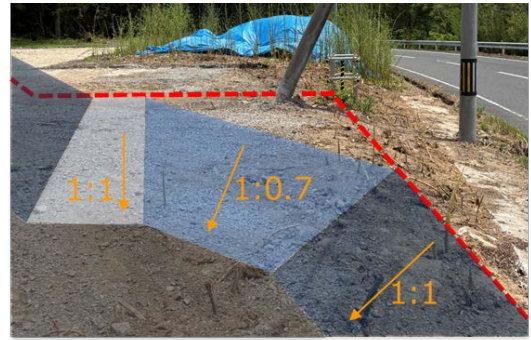


図-4 K-1 区画の掘削イメージ図

- (3) ④の区画は他の掘削対象区画に接していない面は直掘りにて GL-0.5m まで掘削した。
- (4) 埋戻しは都度行わず、掘削完了後に実施した。
- (5) GL-1.5m まで掘削・床付け完了後、①の区画について GL-2.0m まで掘削した。直掘りにて掘削後、床付面に吸出し防止シート (t=10 mm) を敷き、速やかに購入土^{*1}にて埋め戻した (30 cm 以下の厚さで敷き均して転圧した)。
- (6) 土壌試料は、区画毎の想定濃度を踏まえて下記の濃度別に区分して掘削した。おおむね 50 cm 毎に掘削・袋詰めした (鋤取り掘削による精緻な管理は行っていない)。
 - (a) 低濃度試料：<100,000 ng/L
 - (b) 中濃度試料：100,000~500,000 ng/L
 - (c) 高濃度試料：≥500,000 ng/L
- (7) 土壌試料の掘削は 0.8m³ 級バックホウおよび 0.28m³ 級バックホウ各 1 台と、大型土のう製作治具「瞬作」(**図-5**) を用いて、内袋付フレコンバッグに 1 トン程度ずつ充填した。袋詰めした土壌試料は、25t ラフタークレーン相番にて仮置および搬出時の揚重作業を行った。また、0.1m³ 級アイオン 1 台を用いて、巨礫をおおむね 30 cm 以下に破碎した。



図-5 大型土のう製作治具

- (8) 土壌試料を詰めたフレコンバッグは 1 袋ずつクレーンスケールで重量を計量し、袋番号、掘削した区画番号、深度とともに記録した (フレコンバッグにスプレーで袋番号、区画番号と深度を記載、その内容をエクセルに計量結果、想定濃度とともに記録して管理した)。
- (9) 土壌試料を詰めたフレコンバッグは、敷鉄板で養生した仮置きヤードに濃度別に 2 段積みにて仮置きした。
- (10) 掘削した土壌試料は、上記 (a)~(c) の濃度別に 10t 平トラックにて随時搬出・運搬^{*1}した。25t ラフタークレーンを用いて積み込み、積み込み後は荷台をシートで覆い養生した。
- (11) 掘削作業期間中、作業終了時には雨水浸透防止用シート #3000 にて覆い、雨水はセンサ付きポンプ^{*2}にてノッチタンクを介して排水した。バックホウのバケットやクローラ、振動ローラなど、PFOS 等含有土壌と直接接触する機械については、日々付着した土壌をケレン棒等で清掃した。
- (12) 掘削完了後、床付面には吸出し防止シート (t=10 mm) を、法面部には GL-0.5m までブルーシート原反 (#3000) を敷設し掘削範囲明示とした。GL-0.5m より上はベントナイト混合土の止水性向上のためブルーシート原反による掘削範囲明示は設置していない。

- (13) GL-0.5m まで購入土（真砂土）※³にて埋め戻した（30 cm以下の厚さで敷き均して転圧した）。
 なお、GL-1.5m までは外周地盤は法切りして掘削した。GL-2.0m 部は直掘りにて掘削し、床付け後即埋戻し・転圧を行った。特に道路に隣接する J-1 区画については道路沿いの側溝およびシールコンクリートの変状を監視しながら掘削し、変位がないことを確認した。
- (14) 土質改良機等の設備を搬入し、ベントナイト混合土を現地にて調製し、GL-0.5～0.2m の 30 cm をベントナイト混合土※³、⁴、表層 20 cm を保護層※³として購入土にて埋め戻した。
- (15) 敷鉄板等の仮設備を撤去した後、既設シート※⁵は全て撤去し、新しい雨水浸透防止シート（耐水シート#7000）にて掘削範囲および既設シート敷設範囲をすべて覆った。なお、現地盤の高さに復旧することを基本とするが、雨水が滞水しないように排水勾配を考慮して復旧した。

※1：本事業の対象土壌は法的には汚染土壌ではないが、「管理土」として扱うこととし、搬出土壌は管理票を発行して適切に管理した。

※2：ポンプの電源は商用電源を用いた。停電等の電源喪失に備えて、非常用発電機を常設した。

※3：埋戻土、ベントナイト混合土の母材、保護層は全て同じ購入土（真砂土）を用いた。

※4：ベントナイト混合土

- ・透水系数：室内で $k \leq 1.0 \times 10^{-8}$ m/s、現場で $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s

（ため池整備（築堤盛土材料）における「遮水材料」相当の透水系数を想定）

- ・母材：購入土、ベントナイト：膨潤力 10 mL/2g 以上を使用し、配合試験により配合を決定した。
- ・土壌試料搬出完了後、現地に土質改良機等を搬入・設置してベントナイト混合土を調合した。

※5：既設シートは、緊急対策を実施した事業者の所有物であるため、折り畳んで仮置き・保管した。

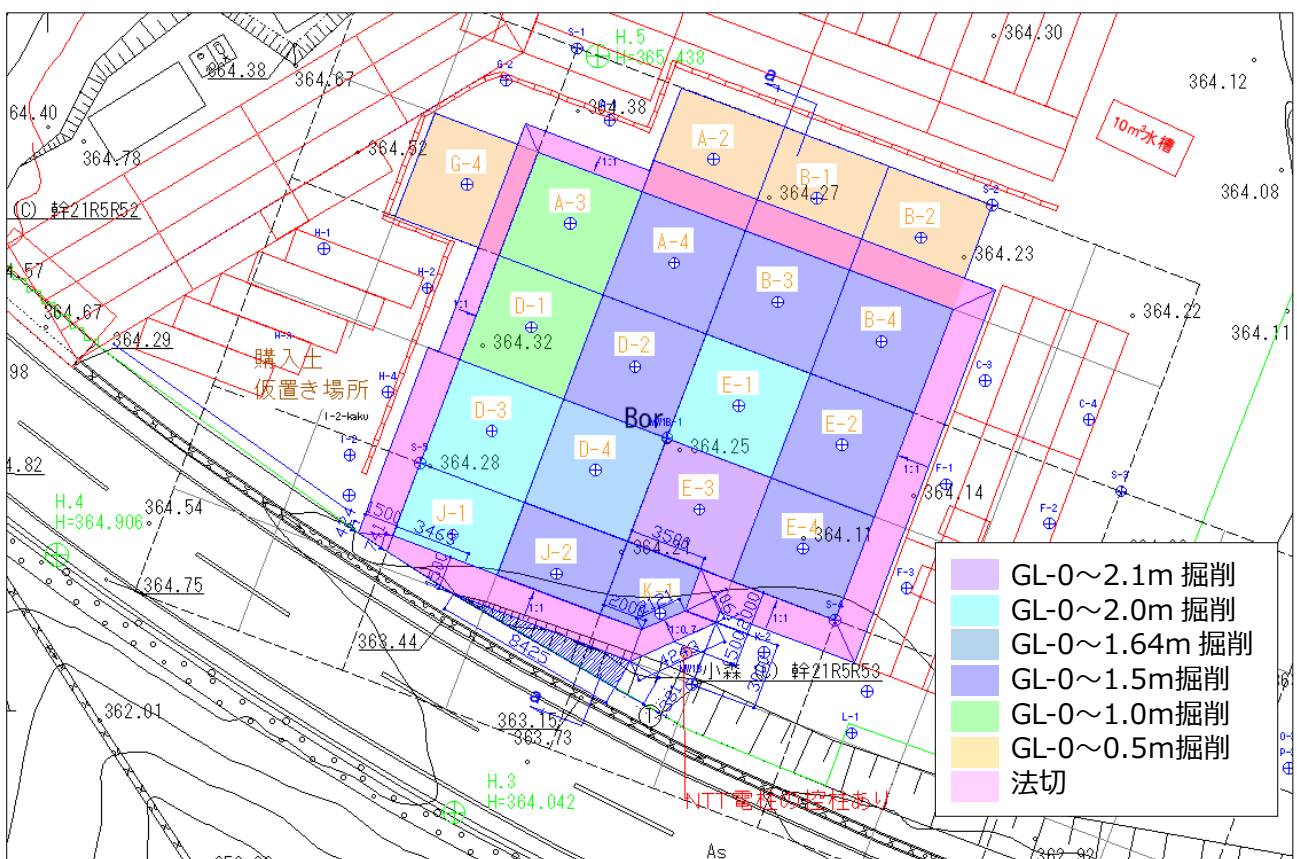


図-6 掘削範囲平面図

Q-Q断面

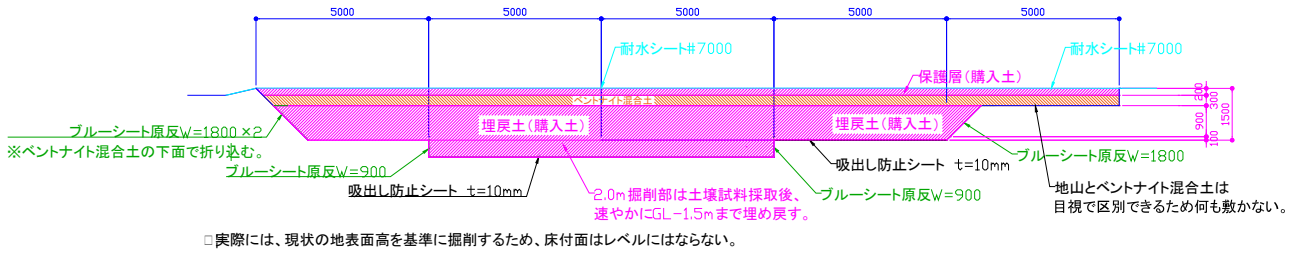


図-7 掘削範囲断面図

4) 濃度管理

図-8 に現地の調査結果と掘削対象範囲を、表-3 に調査結果を基に計算した想定濃度と各ブロックの掘削土量の一覧を示す。前述の想定濃度3区分に分類して土壌試料を掘削・管理した。

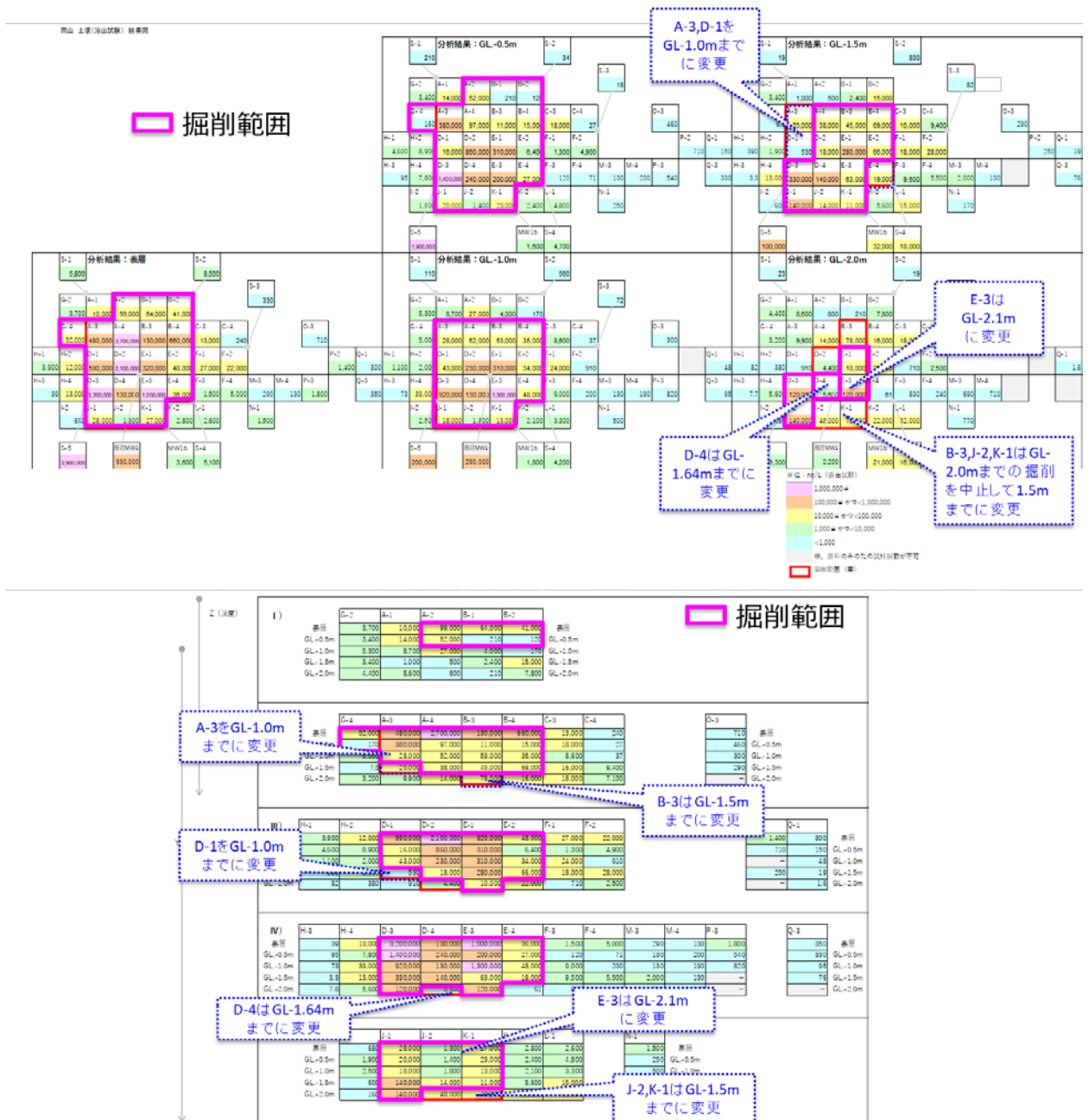


図-8 土壌調査結果と掘削対象範囲

表-3 想定濃度と各ブロックの掘削土量想定

区画	最終の掘削範囲				表層～0.5		GL-0.5～1.0		GL-1.0～1.5		GL-1.5～2.0		
	掘削深度 H(m)	掘削 表面積(m ²)	平均面積 A(m ²)	土量(m ³) V=HXA	想定濃度 (ng/L)	土量(m ³)	袋数	想定濃度 (ng/L)	土量(m ³)	袋数	想定濃度 (ng/L)	土量(m ³)	袋数
A-1法面	1.0	5	2.5	2.5	12,000	1.9	4	11,350	0.6	2	4,850	0	0
A-2	0.5	17.5	18.75	9.375	75,500	9.4	19	39,500	0	0	13,750	0	0
A-2法面	1.5	7.5	3.75	5.625	75,500	3.1	7	39,500	1.9	4	13,750	0.6	2
A-3	1.0	2.5	2.5	2.5	430,000	12.5	25	204,000	12.5	25	26,500	0	0
A-4	1.5	2.5	2.5	3.75	1,398,500	12.5	25	74,500	12.5	25	45,000	12.5	25
B-1法面	0.5	17.5	18.75	9.375	32,105	9.4	19	2,105	0	0	3,200	0	0
B-2	0.5	17.5	18.75	9.375	20,560	9.4	19	1,145	1.9	4	7,585	0.6	2
B-2法面	1.5	7.5	3.75	5.625	20,560	3.1	7	1,145	1.9	4	7,585	0.6	2
B-3	1.5	2.5	2.5	3.75	70,500	12.5	25	32,000	12.5	25	49,000	12.5	25
B-4	1.5	2.5	2.5	3.75	337,500	12.5	25	25,000	12.5	25	52,000	12.5	25
C-1隅角部	1.5	2.25	0.75	1.125	20,560	1.1	3	1,125	0	0	0	0	0
C-2法面	1.5	7.5	3.75	5.625	15,500	3.1	7	13,300	1.9	4	12,300	0.6	2
D-2	1.0	2.5	2.5	2.5	303,000	12.5	25	29,500	12.5	25	21,765	0	0
D-3	2.0	2.5	2.5	4.0	1,480,000	12.5	25	545,000	12.5	25	124,000	12.5	25
D-4	1.64	2.5	2.5	4.1	2,300,000	12.5	25	1,160,000	12.5	25	625,000	12.5	25
E-1	2.0	2.5	2.5	5.0	185,000	12.5	25	185,000	12.5	25	135,000	12.5	25
E-2	1.5	2.5	2.5	3.75	315,000	12.5	25	310,000	12.5	25	295,000	12.5	25
E-3	1.5	2.5	2.5	3.75	27,200	12.5	25	20,200	12.5	25	50,000	12.5	25
E-4	1.5	2.5	2.5	3.75	600,000	12.5	25	750,000	12.5	25	681,500	12.5	25
F-1法面	1.5	7.5	3.75	5.625	31,500	12.5	25	37,500	12.5	25	33,500	12.5	25
F-2	1.5	7.5	3.75	5.625	14,150	3.1	7	12,650	1.9	4	21,000	0.6	2
G-2隅角部	1.0	7.5	0.333	0.333	810	3.1	7	4,560	1.9	4	9,250	0.6	2
G-4	0.5	20	21.25	10.625	3,550	0.3	1	0	0	0	0	0	0
H-2法面	1.0	5	2.5	2.5	26,085	10.6	22	2,585	0	0	2,504	0	0
H-4法面	1.5	7.5	3.75	5.625	26,085	1.9	4	2,585	0.6	2	2,504	0	0
I-2法面	1.5	5.25	2.625	3.938	10,450	1.9	0	5,450	0.6	0	1,950	0	0
I-2隅角部	2.0	17.5	17.5	35	10,450	3.1	7	23,400	1.9	4	26,000	0.6	2
J-1法面①	1.5	3,580	1,940	2,910	1,290	2.2	5	2,200	1.3	3	1,550	0.4	1
J-1法面②	1.5	2,306	1,153	1,729	24,000	0.44	1	19,000	8.8	18	79,000	8.8	18
J-2	1.5	17.5	17.5	26.25	24,000	2.8	6	0	0	0	0	0	0
J-2法面	1.5	7.5	3.75	5.625	24,000	1.7	4	0	0	0	0	0	0
K-1法面①	1.5	12.25	11.125	16.688	1,350	8.8	18	1,600	8.8	18	7,900	8.8	18
K-1隅切り法面部	1.5	3.376	1.5	2.25	1,350	3.1	7	1,600	1.9	4	7,900	0.6	2
K-1法面②	1.5	0.75	0.375	0.563	25,000	5.6	12	18,000	5.6	12	12,000	5.6	12
K-1隅角部	1.5	2.25	1.125	1.688	25,000	2.3	5	0	0	0	0	0	0
K-1掘り付け部	0.3	5.82	1.94	0.58	25,000	0.8	2	0	0	0	0	0	0
K-2法面	1.5	7.5	3.75	5.625	25,000	0.58	2	2,250	1.9	4	3,850	0.6	2
L-1隅角部	1.5	2.25	0.75	1.125	2,600	3.1	7	0	0	0	0	0	0
合計	-	-	479.5	662.804	3,700	1.1	3	0	0	0	0	0	0
合計	-	-	-	-	263.30	540	-	193.13	391	-	154.13	317	-
合計	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,348	袋	-
合計	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,483	袋	-

※想定濃度は、各ブロック上下の分析結果の平均値
 ※土量3m³未満の法面、隅角部は、少量のため便宜上層別管理はせず
 表層～0.5mブロックに全て含む計算とする。
 ※巨礫の影響により法面等で余掘りが生じているため、実際の掘削土量は682.6m³
 ※単位体積重量：2.0 t/m³ (実測では、2.06t/m³)
 ※当初計画は、696.1m³、1,392.2t、1421袋。
 単位体積重量の増加とフレコン破損等のロスを考慮して10%割増の1570袋を準備。
 1421×1.1=1563 ……10袋単位のため1570袋
 ※ は、掘削実施中に、数量調整のために掘削深度を変更したものの、

濃度区分	土量(m ³)	土量(t)	実績土量(t)	実績袋数
≥1,000,000ng/L	50.0	112.5	270.24	280
500,000～1,000,000ng/L	62.5	135.6	384.89	399
100,000～500,000ng/L	171.3	342.5	751.02	769
<100,000ng/L	379.1	758.1	1,406.15	1,448
合計	662.80	1,325.6	1,406.15	1,448

※うち、熱処理試験分
1,402.16 t

5) 出来形管理と管理値

出来形管理項目と自主管理値を表-4に示す。

掘削する19区画の中心点および4隅(区画格子の交点)の現地盤の地盤高を実測して基準高とした。その基準高と床付け面の同地点の地盤高の差から掘削高さを計算した。なお、各区画ともおおむね50cm毎に掘削して濃度別に分けたが精緻な管理(出来形管理)は実施していない。

表-4 出来形管理項目と管理値

項目	測定方法	頻度	自主管理値
掘削範囲平面寸法 (法肩部の平面寸法)	巻尺、リボンロッド	GL-1.5mまで床付完了時	計画寸法以上
床付け面の平面寸法	巻尺、リボンロッド	GL-1.5mまで床付完了時 GL-2.0m床付完了時	計画寸法以上
掘削高さ(床付面地盤高)	オートレベル、箱尺	GL-1.5m および GL-2.0m 床付完了時	計画深さ以上
埋戻し面の基準高	オートレベル、箱尺	GL-0.5mまで埋戻完了時 GL-0.3mまで埋戻完了時 GLまで埋戻完了時	-50mm(J-1区画方向に排水勾配をとる。)
ベントナイト混合土厚	メータスタッフ	6箇所(1カ所/100m ²)	計画厚さ以上
耐水シート敷設面積	巻尺	施工完了後	なし

6) 写真管理

表-5 に示す撮影箇所にて工事写真を撮影した。

表-5 工事写真撮影箇所一覧

区分		写真管理項目		摘要
		撮影項目	撮影頻度	
全景 (着手前・完成)	着手前	全景もしくは代表部写真	1枚以上	
	完成	全景もしくは代表部写真	1枚以上	
施工状況	掘削・袋詰状況	全景もしくは代表部写真	掘削各段階で適宜 (濃度区分別)	掘削状況は動画も撮影
	埋戻し・転圧	全景もしくは代表部写真	各段階で適宜 転圧は巻出1層毎	
	ベントナイト混合土	全景もしくは代表部写真	各段階で適宜	
	シート養生状況	全景もしくは代表部写真	各段階で適宜	
	土壌試料	保管、積み込み・搬出	各段階で適宜	
	その他(仮設等)	全景もしくは代表部写真	各段階で適宜	
安全管理		各安全設備	種類毎に1枚以上	
		交通誘導員	1枚以上	
使用材料・使用機械		受入検査、使用数量、全景	品目ごとに1枚以上 検収は各段階で適宜	
出来形管理	出来形管理項目	表-4の項目	段階毎	
	不可視部	掘削明示材敷設など	適宜	
	耐水シート	全景、敷設箇所寸法検測	施工完了後	
	安全設備	敷鉄板、万能板など	種類毎に1枚以上	
品質管理	ベントナイト混合土	母材性状、配合試験、現場 品質管理試験	試験毎に適宜	
災害	被災状況	被災状況および規模	都度	災害、事故がなかった ため写真はなし
事故	事故報告	事故の状況	都度	

7) 主要機材および主要資材

表-6 に主要機材、表-7 に主要資材の一覧を示す。

表-6 主要機材一覧

項目	内容	単位	数量	備考
0.8m ³ 級バックホウ	掘削・埋戻し	台	1	クレーン付
0.28m ³ 級バックホウ	掘削・袋詰め・埋戻し	台	1	
0.1m ³ 級アイオン	巨礫の破碎	台	1	
25t ラフタークレーン	内袋付フレコンバッグ等の揚重	台	1	
1t 振動ローラ	GL-0.5~2.0m 掘削部の転圧	台	1	
大型土のう製作治具	瞬作、NETIS ; CG-220014-A	台	1	
クレーンスケール(荷重表示計)	ひょう量 3000kg	台	1	バルコ重量測定
自走式土質改良機	20t、振動スクリーン付	台	1	遮水層造成用
0.8m ³ 級バックホウ	ベントナイト混合土積み込み	台	1	遮水層造成用
0.28m ³ 級バックホウ	ベントナイト混合土敷均し	台	1	遮水層造成用
水槽	10m ³	台	1	遮水層造成用
加水装置		台	1	遮水層造成用
4t 振動ローラ	ベントナイト混合土・保護層の転圧	台	1	遮水層造成用
4t ダンプトラック	ベントナイト混合土場内運搬	台	1	遮水層造成用
ポータブルトラックスケール		台	1	遮水層造成用
電子天秤		台	1	遮水層造成用
水槽	10m ³ 、PFOS 等含有水貯留用	基	1	
上水用タンク	ハウオッシャー用、2m ³ 程度	槽	1	
ノッチタンク	雨水排水用、2m ³ 程度	基	1	
ポンプ等	ハイウオッシャー、水中ポンプ等	式	1	
現場監視用カメラ	防水型 Web カメラ(ソーラー仕様)	式	1	

表-7 主要資材一覧

項目	内容	単位	数量	備考
敷鉄板	5'×20'×t=22	枚	126	レンタル
掘削箇所・仮置きヤード養生用シート	ブルーシート#3000	式	1	20*20:3 枚 15*15:6 枚 +a
土壌試料用土のう	内袋付フレコンバッグ	枚	1,570	破損等のロス分含む
購入土	埋戻し用	m ³	726	真砂土使用(岡山県北区下足守にて採掘した清浄土)
バント付混合土母材	遮水層用母材			
保護砂	埋戻し用			
ベントナイト	赤城(ホーゲン製)	t	23	
吸出し防止シート	APS-10(合成繊維・白色、t=10mm) w=2m×L=10m	本	18	GL-1.5 および 2.0 の床付面敷設
ブルーシート原反	#3000、w=1800×100m	本	1	
"	#3000、w=900×100m	本	2	
本設用シート	耐水シート#7000、10m×10m	枚	24	2000 m ² 分(ロス率 1.2)
シート用固定具	ペグ、5寸釘、シート止用ワッシャー	式	1	
仮囲い材料	安全鋼板、単管、クランプ、A型バリケード(ほか)	式	1	

8) 安全対策

(1) 周辺環境対策

- 掘削場所は既設シートを撤去した後、新しい浸透防止シートで養生して、雨水浸透および飛散を防止した。作業中は当該箇所のシートを剥ぎ、作業終了後は再び浸透防止シートで養生した。
- 掘削に使用する重機についても、毎日作業終了時にバケットに付着した土壌を除去した。極力土壌試料とクローラが接触しないように敷鉄板等で重機足場を確保して掘削を行った。
- 内袋付フレコンバッグに詰めた土壌試料は、仮置きヤードに2段積みで保管し、作業終了時には浸透防止シート(#3000)で覆った。
- GL-0.5mに30cm厚でベントナイト混合土を施すことで、遮水機能を向上させて雨水浸透によるPFOS等の拡散抑制を図った。
- 掘削および土壌試料搬出完了後、既設シートを全て撤去し、覆土範囲と既設シート敷設範囲全体を耐水シート#7000にて覆い、雨水浸透防止を徹底した。シートはペグや釘等で固定するとともに既設のモルタルブロックを利用して固定し飛散防止を図った。

(2) 土壌試料の運搬

内袋付フレコンバッグに充填した土壌試料は、25tラフタークレーンもしくはクレーン付バックホウを使用して10t平トラック(実際には12t~15t車を台車として使用、1車当たり11袋)に積み込んだ。充填時に計量した重量を確認しながら過積載にならないように積み込んだ。積み込み後、遮水性を有するシートで積荷を覆い、実証試験を行う施設まで運搬した。

(3) トラブル発生時の対応

トラブル発生時の対応は、直ちに作業を停止して応急措置を講じるとともに、トラブルの原因究明と問題の解決を優先して行うこととした。その際、PFOS等を含む水の漏洩や土壌の飛散のないように留意し、安全を確認した後に作業を再開する。さらに、緊急時連絡体制に基づき関係各所に速やかに連絡・調整を図ることとした。

※連絡体制：現場 → 現場管理者および管理技術者

→ 現場の協力業者に応急措置・対応を指示

→ トラブルの内容、必要に応じて緊急連絡網に従い行政機関、関係機関、店社に連絡・報告

(緊急時連絡体制図を作成、掲示し、連絡体制を周知徹底)

(4) 現場の常時監視

防水型 Web カメラを設置し、夜間や閉所時でも、担当者および店社の関係者が現場状況を確認できるようにした。

9) 排出物等の処理・処分方法

- ・ 湧水等の PFOS 等を含む排水は回収して、汚泥として PFOS・PFOA 含有廃棄物処理が対応可能な廃棄物処理業者に処理を委託することとした。※湧水等は発生しなかったため、処理はなし。
- ・ 表層などの伐開により生じる草木等は、事業系一般廃棄物として処分した。
- ・ 不要となったシート等は廃プラスチックとして、コンパネ等は木くずとして、それぞれ産廃処分した。

(2) PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減

1) 実証試験の条件

時間当たりの土壌処理量：3 t/h（許可上は最大 4.6 t/h）

処理順序：低濃度試料 ⇒ 中濃度試料 ⇒ 高濃度試料 ⇒ 低濃度試料 の順に処理

総土壌処理量：1,402.16 t（汚染土壌処理施設における受入時の計量実績）

ロータリーキルン炉出口温度：約 1,000 °C

ロータリーキルン炉滞留時間：約 1.5 時間

二次燃焼室出口ガス温度：約 860 °C（850 °C 以上を保つ）

2) 実証試験設備

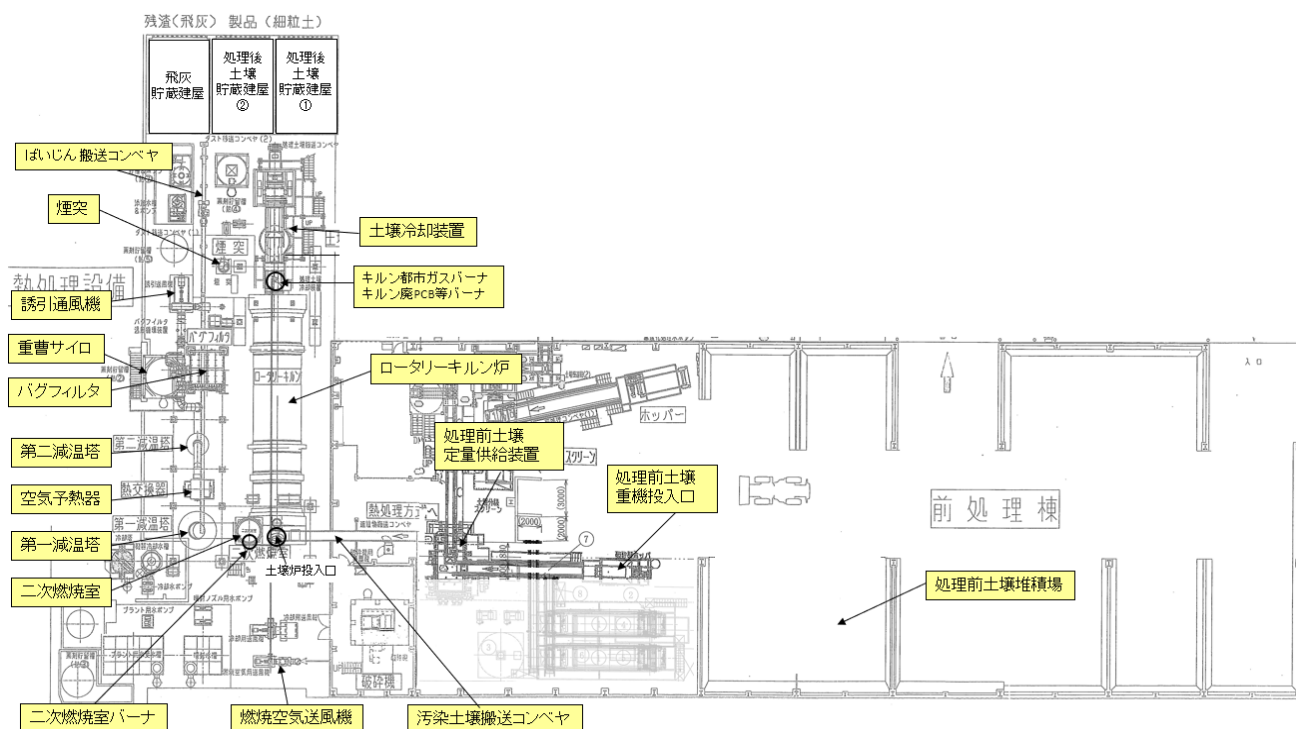


図-9 実証試験設備平面図

3) 実施フロー

【土壌試料の運搬、受入・保管、前処理の手順】

- (1) 内袋付フレコンバッグに入れた実証試験用の PFOS・PFOA を含む土壌試料を、掘削場所から陸

- 路にて処理施設まで運搬車両（10tトラック）で運搬した。低濃度試料から順番に搬出した。
- (2) 土壌試料は、処理施設で受入計量後、保管建屋内（前処理棟）で保管した。
 - (3) 保管建屋内は負圧設備により負圧にした状態を保った。
 - (4) 開封した土壌試料は、濃度区分別に生石灰（7wt%）による改質、分級等の前処理を実施し、全体が均質になるように混合した（PFAS 対応として十分な量の生石灰を投入・混合）。

【熱分解処理試験の手順】

- (1) 試験は低濃度、中濃度、高濃度、低濃度（残り）の順に行った。
- (2) 処理前土壌を重機により投入口から投入し、定量供給装置を経て、熱分解処理設備へ投入した。
- (3) 土壌試料の処理を始める際、最初は 1.5 t/h の処理量から始め、熱分解処理設備の各機器に異常が無いことや、排ガス濃度連続測定器の数値（SOx 等）に異常が無いこと等を随時確認した。異常がなければ、実証試験の計画条件である処理量 3.0 t/h まで表-8 のとおり段階的に処理量を上げる。処理量を上げたことが原因と考えられる何らかの異常が発生した場合は、直近の異常が確認されなかった処理量で実証試験を実施することとした（異常は確認されなかった）。

表-8 試験用試料処理開始後の処理量計画

試験用試料処理開始後経過時間 (h)	0~1	1~2	2~3	3~
設定処理量 (t/h)	1.5	2.0	2.5	3.0

- (4) 各濃度範囲の土量と処理期間は下記のとおりである。全体で約 22 日間の連続運転となった。
 - (a) 低濃度試料：<100,000 ng/L : 748.05 t ⇒約 11.5 日間（9.6 日+1.9 日）
 - (b) 中濃度試料：100,000~500,000 ng/L : 383.87 t ⇒約 5.8 日間
 - (c) 高濃度試料：≥500,000 ng/L : 270.24 t ⇒約 4.1 日間
- (5) 熱分解処理設備にて熱分解処理を実施した。処理実施期間中に、所定のサンプリング位置および頻度で処理前土壌、処理後土壌、排出ガス、ばいじん等の試料採取を実施した。
- (6) 採取した試料は、PFOS・PFOA 等に関する項目等の分析を実施した。処理後土壌については、土壌汚染対策法に基づく浄化確認調査を併せて実施した。
- (7) 分析の結果から試験結果を評価した。
- (8) 処理後土壌は、PFOS+PFOA 濃度が目標値を達成していること、かつ、土壌汚染対策法に基づく浄化確認調査の結果が基準に適合していることを確認後、汚染土壌処理施設が属する事業者が管理する敷地内で盛土材等として利用することとした。
- (9) ばいじんは、産業廃棄物として当該事業者が管理する管理型最終処分場で処分した。

4) 濃度低減フロー

図-2 に示したフロー図のとおりで熱分解処理試験を実施した。ロータリーキルン炉内（土壌投入口付近温度約 650 °C、土壌排出口付近（バーナー付近）温度約 1,000 °C、約 1.5 時間滞留）で土壌中の PFOS・PFOA 等はほぼ全て分解またはガスとして揮発する。排ガスへ移行した PFOS・PFOA 等は、二次燃焼室内（バーナー炎温度約 1,700 °C、出口ガス温度 850 °C 以上、2 秒以上滞留）の再加熱で PFOS・PFOA 等を分解する。その後、排ガスは冷却塔で水噴霧により 170 °C 付近まで急冷後、バグフィルタを通過し、煙突から排出される。バグフィルタ手前で粉末活性炭および重曹を吹き込むことにより、排ガス中に残留した PFOS・PFOA 等の有害物質やフッ化水素等の酸性ガスを除去する。吹き込んだ粉末活性炭等はバグフィルタで捕集し、ばいじんとして回収する。

5) 使用数量 ※ただし使用数量は土の状態により変動する。

○電力使用量 150 kW/t

○使用水量 1 m³/t

○燃料 都市ガス 200 m³N/t

○薬品 **表-9** に示すとおり。

表-9 各薬剤の添加箇所と役割について

薬剤名	標準添加量	添加場所	役割
粉末活性炭	5 kg/t	バグフィルタ手前	有機化合物等の除去
重曹	5 kg/t	バグフィルタ手前	酸性ガスの除去・中和
35%塩化カルシウム溶液	10 kg/t	ロータリーキルン入口	塩化揮発法による鉛等重金属類含有量低減のための塩素源 ※1
39%塩化第二鉄溶液	40 kg/t	処理後土壌への散布	土壌の色味調整、重金属の安定化
1号消石灰	20 kg/t	処理後土壌（冷却後）	処理後土壌の改良、pH調整 ※2
生石灰	70 kg/t	土壌の前処理（篩い前）	土壌の改質
重金属安定化剤	2 kg/t	ばいじんの調湿時	重金属類の不溶化

※1：35%塩化カルシウム溶液については、本実証試験の土壌試料が鉛汚染土壌ではなく塩化揮発法が不要なため、添加していない。

※2：1号消石灰については、今回前処理において必要十分量の生石灰を添加しており、処理後土壌にも未反応の石灰が十分に含まれていることから、今回は添加しない（1号消石灰の添加箇所はPFAS分析用の処理後土壌の採取箇所より後段のため、PFAS測定結果への影響はない）。

○設備の規格

ロータリーキルン：内径 3.47 m×長さ 17.4 m 回転数 0.6 rpm

二次燃焼室：主缶体内径 1.8 m×高さ 8.5 m 容積（出口温度計までのダクト含む）22.57 m³

○設備の専有面積

約 1,100 m²（既存設備）

○設備機械の設置搬入の簡便性・装置の可搬性

実証試験に供する処理設備は、拠点型の汚染土壌処理施設のため、装置を移動はできない。

6) 分析項目と分析数量

表-10 に測定項目・方法一覧を、**表-11** に測定数量一覧を、**図-10** に試料採取箇所位置図を示す。

なお、今回の処理前土壌の分析において、PFAS等の含有量と溶出量の測定結果が逆転する事象が認められたため、処理前土壌の PFOA 含有量および溶出量について、抽出操作の妥当性を確認するための試験を追加で実施している。詳細は「**3. 実証試験の評価項目、3.1（2）**」にて詳述する。

表-10 測定項目・方法一覧

対象物質			PFAS関係												フッ化水素	都市ガス使用量		電気使用量	
			PFOA (C8-PFCA)				PFOS (C8-PFSA)				その他PFAS ※1								
測定内容			溶出	含有	水	ガス	溶出	含有	水	ガス	溶出	含有	水	ガス	ガス	溶出	含有		
投入物	処理前土壌 ①	低 1回目	●	●			●	●											
		低 2回目	●	●			●	●											
		低 3回目	●	●			●	●											
		低中 4回目	●	●			●	●											
		中 5回目	●	●			●	●											
		中高 6回目	●	●			●	●											
		高 7回目	●	●			●	●											
		高低 8回目	●	●			●	●											
	粉末活性炭 ⑧	1回目	●	●			●	●											
工業用水 ⑨	1回目			●				●											
排出物	処理後土壌 ②⑩	低 1回目	●	●			●	●											
		低 2回目	●	●			●	●											
		低 3回目	●	●			●	●											
		低中 4回目	●	●			●	●											
		中 5回目	●	●			●	●											
		中高 6回目	●	●			●	●											
		高 7回目	●	●			●	●											
		高低 8回目	●	●			●	●											
	ばいじん	第1減温塔 ⑤	低 1回目	●	●			●	●										
			中 2回目	●	●			●	●										
			高 3回目	●	●			●	●										
		第2減温塔 ⑥	低 1回目	●	●			●	●										
			中 2回目	●	●			●	●										
			高 3回目	●	●			●	●										
	バグフィルター ⑦	低 1回目	●	●			●	●											
		中 2回目	●	●			●	●											
		高 3回目	●	●			●	●											
	排ガス	バグフィルター手前 ③	低 1回目			●				●				●	●				
中 2回目					●				●				●	●					
高 3回目					●				●				●	●					
煙突 ④	低 1回目			●				●				●	●						
	中 2回目			●				●				●	●						
	高 3回目			●				●				●	●						
分析方法 ※2			A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	E	F	G	H	H
目的 ※3			P	Q	Q	R	P	Q	Q	R	S	S	S	S	T	U	U	V	V

なお、各所のばいじん採取は、排ガス測定とタイミングを合わせて同時にドラム缶に採取し、そこから分析試料を分取した。

※1：その他PFAS PFCAs (C4~C7、C9~C14、C16、C18)、PFASs (C4~C7、C9~C12)

※2：分析方法

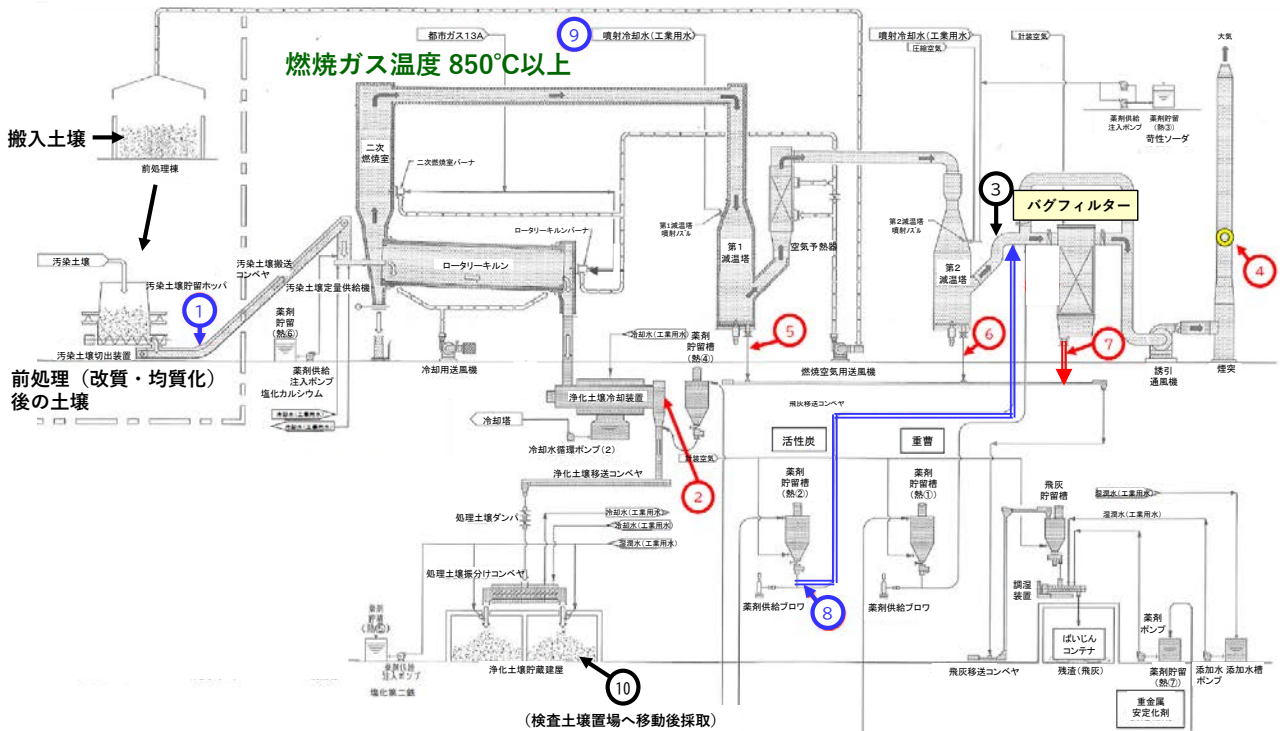
- A：「土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法（溶出量試験）」またはその準用
- B：「土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法（含有量試験（全量分析）」またはその準用
- C：令和2年環水大発第2005281号・環水大土発第2005282号 付表1またはその準用
- D：「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項（令和4年9月 環境省）」資料5またはその準用
- E：JIS K 0105 7.3 (2012)
- F：平成15年3月6日環境省告示第18号（土壌溶出量調査に係る測定方法）による
- G：平成15年3月6日環境省告示第19号（土壌含有量調査に係る測定方法）による
- H：積算メーターによる

※3：目的

- P：PFOS・PFOAに関する濃度低減効果の確認、ばいじんについては最終処分場浸出水への影響評価
- Q：PFOS・PFOAに関する分解効率の確認
- R：PFOS・PFOAに関する分解効率の確認、排ガス濃度の評価
- S：副生物質に関する挙動等の確認（参考）
- T：分解処理に伴い生じる排ガス中のフッ化水素（HF）に関して適正に処理されていることの確認
- U：処理後土壌の土壌汚染対策法に基づく浄化確認調査のため
- V：二酸化炭素排出量の評価

表-11 測定数量一覧

項目	測定項目	測定回数	測定箇所	試料検体数	
濃度低減効果	処理前土壌	PFOS・PFOA、その他PFAS（溶出、含有）	3	1	3
		PFOS・PFOA（溶出、含有）	5	1	5
	処理後土壌	PFOS・PFOA、その他PFAS（溶出、含有）	3	1	3
		PFOS・PFOA（溶出、含有）	5	1	5
	ばいじん	PFOS・PFOA、その他PFAS（溶出、含有）	3	3	9
		PFOS・PFOA（溶出、含有）	-	-	-
	排ガス	PFOS・PFOA、その他PFAS	3	2	6
		PFOS・PFOA	-	-	-
粉末活性炭	PFOS・PFOA、その他PFAS（溶出、含有）	1	1	1	
工業用水	PFOS・PFOA、その他PFAS	1	1	1	
環境負荷	排ガス	フッ化水素	3	2	6
	処理後土壌	土壤汚染対策法に基づく特定有害物質（26項目）（溶出、含有）	8	1	8
	二酸化炭素	都市ガス使用量	1	-	-
		電気使用量	1	-	-



青字：投入物 赤字：排出物 黒字：その他

① 処理前土壌（前処理後） ② 処理後土壌（PFAS分析用） ③ 排ガス（バグフィルター前）
 ④ 排ガス（バグフィルター後） ⑤ ばいじん（第1減温塔下） ⑥ ばいじん（第2減温塔下）
 ⑦ ばいじん（バグフィルター下） ⑧ 粉末活性炭 ⑨ 工業用水 ⑩ 処理後土壌（土対法26項目分析用）

図-10 試料採取箇所位置図

7) 安全対策

(1) 周辺環境対策

- ・ 汚染物質の漏洩が生じないように、排ガス処理設備を適切に運転管理した。
- ・ 処理土壌が飛散しないように適切に湿潤化して排出した。

(2) 作業環境対策

- ・ 処理施設内では、所定の保護具を着用した上で作業を行い、ばく露の防止を図った。

(3) 土壌試料の搬入

- ・ 土壌試料の入った内袋付フレコンバッグは10t 平トラックにて運搬した。運搬時は遮水性を有するシートで覆った。
- ・ 土壌試料は処理施設で受入計量後、負圧を維持した保管建屋内（前処理棟）で保管した。
- ・ 開封した土壌試料の改質、分級、均質化混合は負圧を維持した建屋内で実施し飛散防止対策を行った。

(4) トラブル発生時の対応

トラブル発生時は、設備の運転マニュアルにしたがって装置の停止もしくは待機状態として、トラブルの原因を究明することとした。トラブルが生じた問題を解決し、安全を確認した後に、処理設備を再稼働させる。さらに、緊急時連絡体制に基づき関係各所に速やかに連絡・調整を図ることとした。

※連絡体制：処理設備運転責任者 → 応急措置を作業員に指示

→ 管理技術者へ連絡 → 対応を指示（処理設備運転責任者もしくは担当者）

→ トラブルの内容、必要に応じて緊急連絡網に従い行政機関、関係機関、店社に連絡・報告（緊急時連絡体制図を作成、掲示し、連絡体制を周知徹底）

8) 排出物等の処理・処分方法

- ・ 処理後土壌は、PFOS+PFOA 濃度が目標値を達成していること、かつ、土壌汚染対策法に基づく浄化確認調査の結果が基準に適合していることを確認後、汚染土壌処理施設が属する事業者が管理する敷地内で盛土材等として利用した。なお、土壌汚染対策法に基づく浄化確認調査の結果が不適合となった場合は、当該事業者が管理する管理型最終処分場で処分することとしたが、不適合の土壌は発生しなかった。
- ・ ばいじんは、当該事業者が管理する管理型最終処分場へ搬出し、埋立処分した。
- ・ 廃フレコンについては、廃プラスチックとして焼却処分した。

9) その他

土壌試料の定量供給装置、ロータリーキルン、処理後土壌の冷却装置および排出設備は適切に運転管理を行い、土壌試料が堆積・滞留しないように管理した。

2.2 実証試験結果

(1) PFOS・PFOA を含む土壌試料の掘削および環境保全対策

1) 概要

掘削場所：岡山県内某所

作業工程	・ 25/9/29	土壌試料掘削開始
	・ 10/9	土壌試料搬出開始
	・ 10/29	土壌試料掘削完了、埋戻しを開始
	・ 11/5	土壌試料搬出完了
	・ 11/6	GL-0.5m まで埋戻し完了
	・ 11/10～	ベントナイト混合土施工開始
	・ 11/11	キャリブレーション
	・ 11/12, 13	ベントナイト混合土調製・敷均し・転圧
	・ 11/14	覆土
	・ 11/17～	仮設（敷鉄板、安全設備など）撤去、耐水シート敷設
	・ 11/26	施工完了
	・ 11/27	自治体の現地確認
	・ 12/5	耐水シート補強（固定用治具の増し打ち）



図-11 土壌試料掘削状況



図-12 土壌試料仮置き・保管状況



図-13 巨礫破碎状況



図-14 土壌試料積込・搬出状況

2) 掘削土量

表-12 掘削土量一覧

区分	熱分解処理試験		他社提供分		合計	
	重量(t)	袋数	重量(t)	袋数	重量(t)	袋数
低濃度試料 ($<100,000\text{ng/L}$)	748.05	766	2.97	3	751.02	769
中濃度試料 ($100,000\sim 500,000\text{ng/L}$)	383.87	398	1.02	1	384.89	399
高濃度試料 ($\geq 500,000\text{mg/L}$)	270.24	280	-	-	270.24	280
合計※	1,402.16	1,444	3.99	4	1406.15	1,448

※ 熱分解処理試験の重量は、汚染土壌処理施設での計量結果（精算数量）、他社提供分は現地での計量結果による。

3) ベントナイト混合土 配合試験結果

- ・試験実施場所：地水開発 株式会社（土質センター） 〒311-0105 茨城県那珂市菅谷 4527
- ・試験条件：透水試験方法：変水位法
ベントナイト：赤城（ホージュン製）
添加率：7%，10%，13%（母材の乾燥重量比）の3配合
供試体締固め度：母材の Dc 95%
- ・管理目標値：現場管理目標値（透水係数） $k \leq 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
室内試験管理目標値（透水係数） $k \leq 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
- ・管理基準値：配合試験の結果を表-13 に示す。
ベントナイト（赤城）の添加量は 149 kg/m^3 となった。

表-13 ベントナイト混合土管理基準値

管理項目	管理基準値	備考
ベントナイト	赤城：膨潤率 10 mL/2g 以上	ホージュン製
添加率 (%)	7.9 以上	試験結果より
締固め度 Dc (%)	95.0 以上	試験結果より
現場密度 $\rho_d (\text{Mg/m}^3)$	1.738 以上	$\rho_{d\text{max}} \times 0.95$
含水比 W (%)	11.9 付近	(湿潤側目標)

4) ベントナイト混合土 施工結果

- ・含水比：混合土の最適含水比 11.9 % 付近（湿潤側目標）になるように加水・調整
- ・ファンネル粘性試験：ベントナイトの目標添加率 7.9% が確保されているかファンネル粘性試験にて確認。計 3 回測定し、いずれの結果も満足していた。
①11/11AM：8.7% ②11/12AM：8.7% ③11/13AM：8.6%
- ・メチレンブルー吸着試験：ベントナイトの目標添加率が確保されているか確認するため、11/11 に混合した試料を試験室にてメチレンブルー吸着試験を実施。
測定結果：①10.6%、②11.6%、③11.6%、平均 11.3% ⇒ベントナイト添加率 7.9% 以上を確認
- ・ベントナイト混合土現場密度試験：RI 密度測定器を用いて、任意の全 10 カ所を計測し、平均 99.6% の値を示し、ベントナイト混合土の締固め度管理値の 95% 以上であることを確認した（表-14）。

表-14 密度試験結果

測点 (区画)	湿潤密度 ρ_t Mg/m ³	乾燥密度 ρ_d Mg/m ³	含水比 ω %	締固め度 Dc %	空気間隙率 Va %	飽和度 Sr %
E-4	2.002	1.787	12.0	97.7	11.1	66.0
G-4	1.960	1.743	12.4	95.3	12.5	63.4
D-1	2.002	1.782	12.3	97.4	10.8	67.2
A-4	2.032	1.802	12.7	98.5	9.0	71.9
E-3	2.130	1.895	12.4	103.6	5.0	82.5
B-4	2.065	1.843	12.0	100.8	8.3	72.9
K-1	2.067	1.828	13.1	99.9	7.1	77.0
J-2	2.068	1.840	12.4	100.6	7.8	74.6
J-1	2.044	1.826	11.9	99.8	9.3	70.1
D-3	2.091	1.876	11.4	102.6	7.7	73.6
平均値	2.046	1.822	12.3	99.6	8.9	71.9
最大値	2.130	1.895	13.1	103.6	12.5	82.5
最小値	1.960	1.743	11.4	95.3	5.0	63.4
N 数	10	10	10	10	10	10
標準偏差 σ	0.049	0.045	0.467	2.488	2.186	5.597

- ・ 透水試験：現地でブロックサンプリングしたベントナイト混合土について、試験室にて透水試験を実施した結果、透水係数は平均で $k=3.15 \times 10^{-8}$ m/s で、管理目標値である 1.0×10^{-7} m/s 以下であることを確認した（表-15）。

表-15 透水試験（変水位）結果

	G-4 エリア①	G-4 エリア②	G-4 エリア③	平均
透水試験方法	変水位	変水位	変水位	
透水係数 m/s	3.38×10^{-8}	2.71×10^{-8}	3.37×10^{-8}	3.15×10^{-8}



図-15 ベントナイト混合土調製・敷均し



図-16 ベントナイト混合土転圧状況

5) 耐水シート敷設

図-17に耐水シート（#7000）の敷設平面図を示す。既設ブルーシートを全て撤去し、耐水シートを敷設した。当初予定通り、10m×10mのシートを24枚使用し、敷設面積は2,156 m²であった。

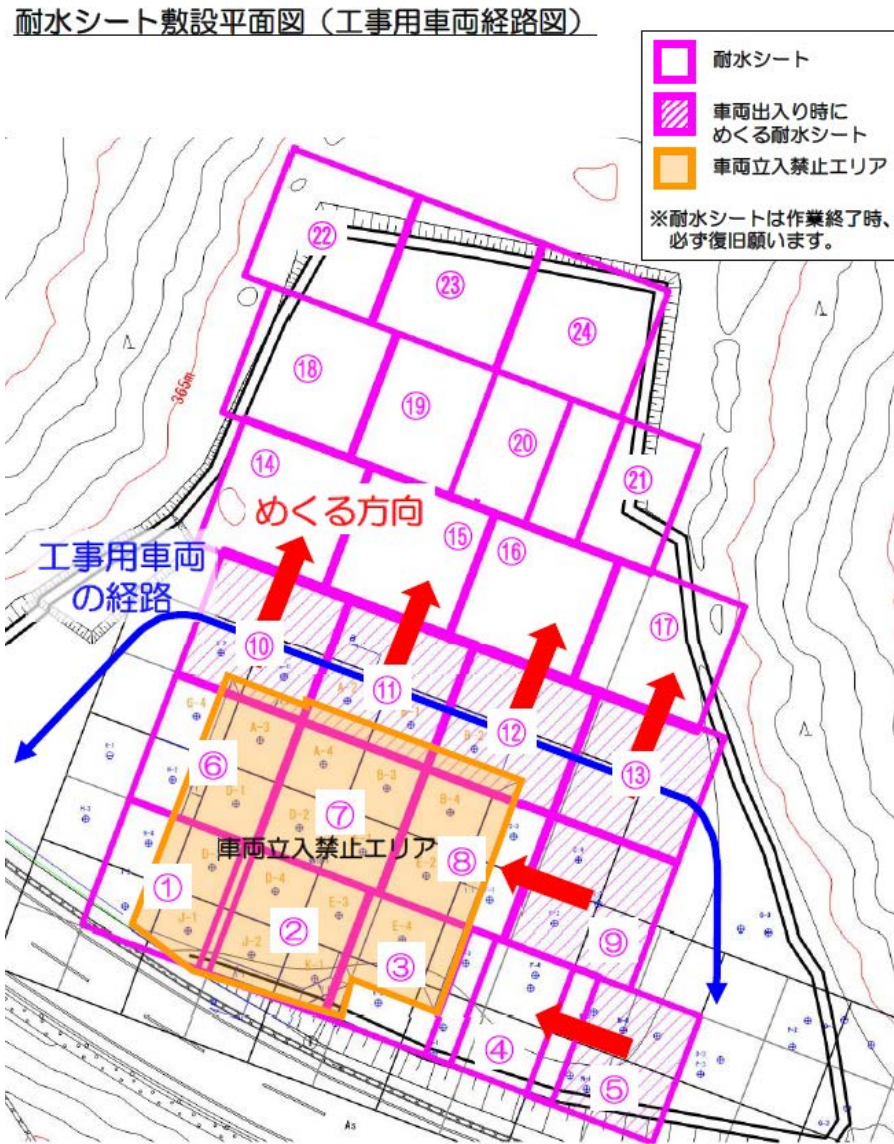


図-17 耐水シート（#7000）敷設平面図



図-18 耐水シート敷設完了

6) 産業廃棄物発生量

- ・PFOS 等含有排水 : 発生無し
- ・廃プラスチック : 4 m³ (運搬・処理を委託)
- ・木くず : 4 m³ (運搬・処理を委託)
- ・混合廃棄物 : 4 m³ (運搬・処理を委託)

7) 現地視察

- ・1回目 25/10/6 13:00～

横浜国立大 小林先生、国立環境研究所 小坂先生、
環境省 長谷川係長
岡山県 環境文化部循環型社会推進課 上原総括副参事
自治体 檜寄課長、宮田課長、清本課長補佐
建設技術研究所

- ・2回目 25/10/15 13:00～

座長：平田先生、和歌山大学：江種先生、大阪府立環境農林水産総合研究所：矢吹先生
環境省 須賀室長、環境省 中国四国地方環境事務所 環境対策課 木村氏
岡山県 環境文化部循環型社会推進課 藤本課長、上原総括副参事
自治体 檜寄課長、宮田課長、清本課長補佐
建設技術研究所



図-19 掘削場所現地視察1回目



図-20 掘削場所現地視察2回目

8) マスコミ対応

- ・25/9/19 : OHK 岡山放送、NHK 岡山放送局、山陽新聞
- ・25/9/30 : OHK 岡山放送、NHK 岡山放送局、山陽新聞、KSB 瀬戸内海放送、
共同通信社岡山支局、RSK 山陽放送
- ・25/10/22 : RNC 西日本放送

9) 地元対応

- ・現地での工事期間中、地元の方々からの苦情や要望は特に寄せられなかった。

(2) PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減

1) 概要

- ・実施場所：土壌汚染対策法における汚染土壌処理施設
- ・試験期間：25/11/5 11:00 ～ 11/26 21:50 (約 21.4 日)
- ・処理土量：1,402.16 t
 - (a) 低濃度試料：<100,000 ng/L : 748.05 t ⇒約 11.5 日間
 - (b) 中濃度試料：100,000～500,000 ng/L : 383.87 t ⇒約 5.8 日間
 - (c) 高濃度試料：≥500,000 ng/L : 270.24 t ⇒約 4.1 日間

表-16 熱分解処理試験の試験工程

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26								
区分	低	低	低	低	低	低	低	低	低	低	中	中	中	中	中	高	高	高	高	高	低	低	低							
イベント	▲11:00処理開始					▲排ガス測定(低)					▲0:48 低濃度⇒中濃度 ▲20:00中濃度⇒高濃度					▲排ガス測定(中) ▲排ガス測定(高)					▲23:00高濃度⇒低濃度 ▲									
	▲現地視察 1 回目										▲現地視察 2 回目										▲インスペクション用サンプル採取 (処理後土壌・BF後ばいじん)									
																					▲21:50処理完了▲									

2) 運転管理データ

図-21 および図-22 に、ロータリーキルンの運転管理トレンドグラフを示す。

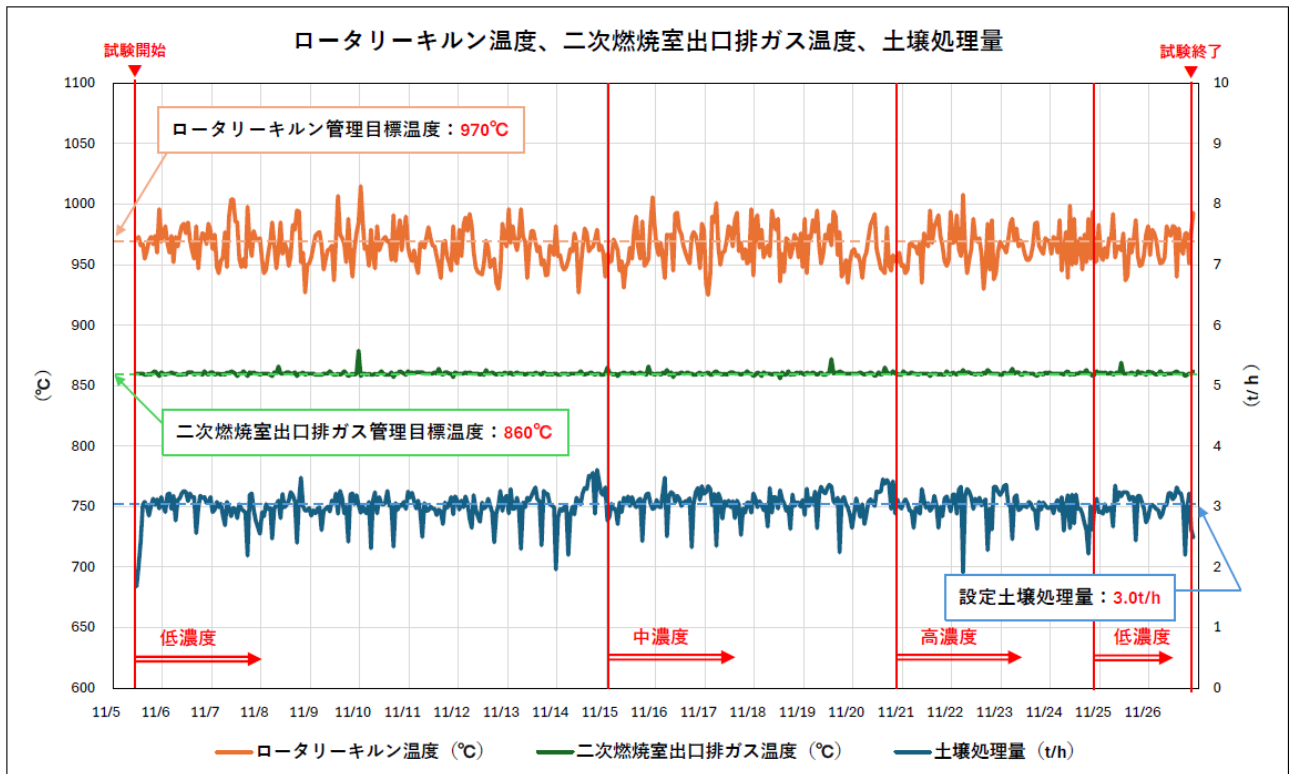


図-21 ロータリーキルン運転管理トレンドグラフ
(ロータリーキルン温度、二次燃焼室出口排ガス温度、土壌処理量)

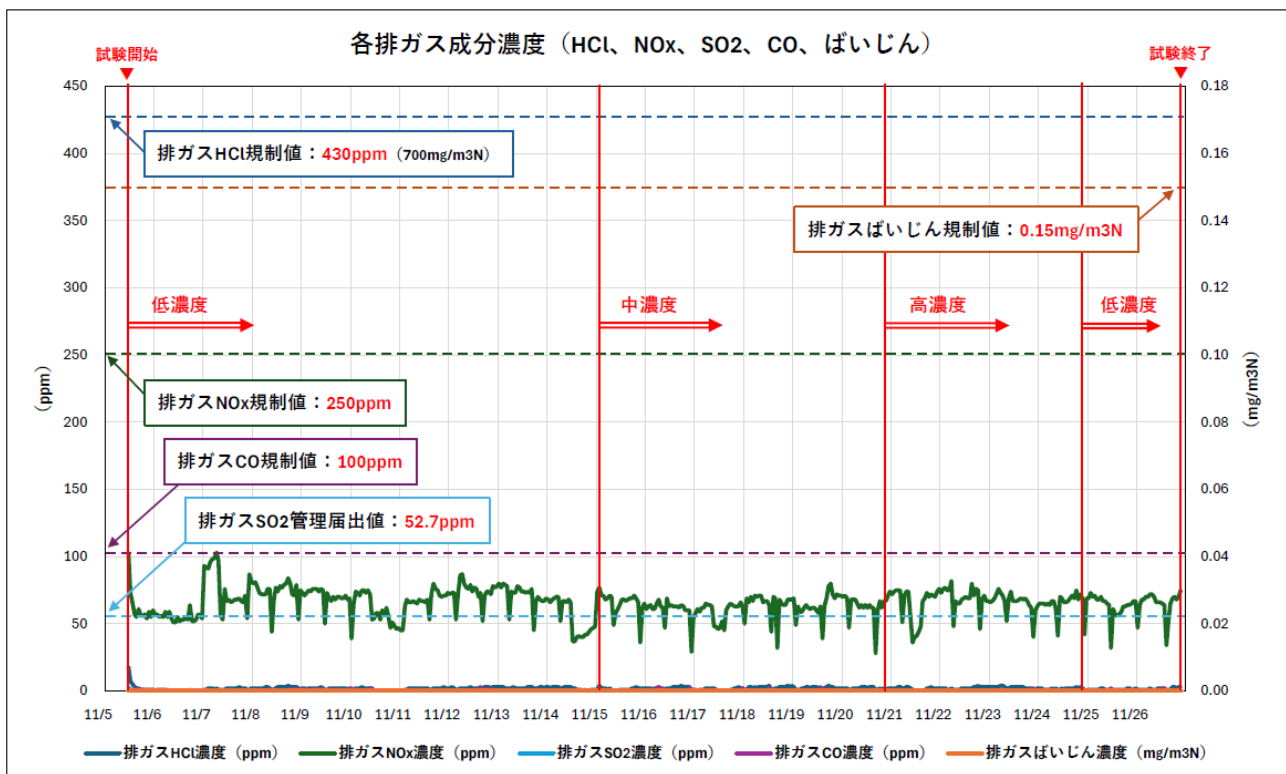


図-22 ロータリーキルン運転管理トレンドグラフ
(各排ガス成分濃度：HCl、NO_x、SO₂、CO、ばいじん)

- ・ 土壌処理量は、設定値の 3 t/h 弱でおおむね安定していた。
低濃度：2.903 t/h、中濃度：2.776 t/h、高濃度：2.767 t/h
- ・ ロータリーキルン温度は、管理ポイントの管理目標温度である 970 °C 前後 (930~1020 °C) で安定していた。
- ・ 二次燃焼室出口温度は、管理目標温度である 850 °C 以上 (860 °C) を確保していた。
- ・ 処理試験期間中、排ガスの管理項目全てにおいて、規制値もしくは管理届出値未滿を満足した。



図-23 土壌試料開封状況

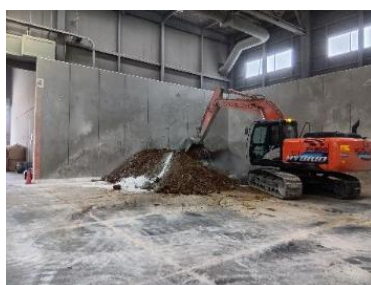


図-24 生石灰混合状況



図-25 改質後土壌試料



図-26 土壌試料投入状況



図-27 ロータリーキルン



図-28 処理後土壌

3) 分析結果

(1) 処理前土壌 (表-17)

- 土壌試料に含まれる PFAS は、おおむね PFOA が主体で、PFOS は全検体で定量下限未満であった。一部の検体で、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFNA が検出された。
- PFOA の溶出量は、低濃度試料で 35,000~44,000 ng/L、中濃度試料で 76,000 ng/L、高濃度試料で 140,000 ng/L であった。中濃度、高濃度ともに想定された濃度よりも低い値を示した。これは、土壌試料中に含まれていた薬分を全て破砕して混合していることから希釈されたためと考えられる。
- PFOA の含有量は、低濃度試料で 230~270 ng/g、中濃度試料で 480 ng/g、高濃度試料で 1,300 ng/g で、溶出量から想定される濃度 (溶出値の 1/100) よりも小さい値を示した。これについては、「3. 実証試験の評価項目、3.1 (2)」において考察する。

表-17 処理前土壌分析結果一覧

試料名	【含有】 低濃度	【溶出】 低濃度	【含有】 低濃度	【溶出】 低濃度	【含有】 低濃度	【溶出】 低濃度	【含有】 低・中濃度	【溶出】 低・中濃度	【含有】 中濃度	【溶出】 中濃度	【含有】 中・高濃度	【溶出】 中・高濃度	【含有】 高濃度	【溶出】 高濃度	【含有】 高・低濃度	【溶出】 高・低濃度
	処理前土壌 1回目	処理前土壌 1回目	処理前土壌 2回目	処理前土壌 2回目	処理前土壌 3回目	処理前土壌 3回目	処理前土壌 4回目	処理前土壌 4回目	処理前土壌 5回目	処理前土壌 5回目	処理前土壌 6回目	処理前土壌 6回目	処理前土壌 7回目	処理前土壌 7回目	処理前土壌 8回目	処理前土壌 8回目
試料中濃度単位	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L
C4 PFBA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C5 PFPeA	-	-	< 0.8	140	-	-	-	-	2	440	-	-	2	460	-	-
C6 PFHxA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	60	-	-	< 0.8	80	-	-
C7 PFHpA	-	-	1	230	-	-	-	-	3	570	-	-	4	780	-	-
C8 PFOA	230	35,000	230	43,000	270	35,000	340	48,000	480	76,000	520	93,000	1,300	140,000	500	94,000
br-PFOA	< 0.8	210	< 0.8	240	1	230	1	300	3	570	3	640	5	770	2	440
Total-PFOA	230	35,000	230	44,000	270	35,000	340	48,000	480	76,000	520	94,000	1,300	140,000	500	95,000
C9 PFNA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	1	< 40	-	-
br-PFNA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
Total-PFNA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	1	< 40	-	-
C10 PFDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C11 PFUnDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C12 PFDoDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C13 PFTrDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C14 PFTeDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C16 PFHxDA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C18 PFODA	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C4 PFBS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C5 PFPeS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C6 PFHxS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
br-PFHxS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
Total-PFHxS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C7 PFHpS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C8 PFOS	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40
br-PFOS	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40
Total-PFOS	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40	< 0.8	< 40
C9 PFNS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C10 PFDS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C11 PFUnDS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
C12 PFDoDS	-	-	< 0.8	< 40	-	-	-	-	< 0.8	< 40	-	-	< 0.8	< 40	-	-
溶出液pH(水温:℃)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(21)	-	12.6(21)	-	12.7(21)	-	12.6(21)	-	12.6(21)

※赤枠の結果を分解効率等の考察に使用。

(2) 処理後土壌 (表-18, 19)

- ・ 処理後土壌は、一部の検体で PFBA の溶出が微量に検出されたものの、その他の項目については全て定量下限未満で、技術目標である PFOS+PFOA 溶出量 50 ng/L 以下を満足した。
- ・ 土壌汚染対策法に基づく特定有害物質について、溶出 26 項目および含有 9 項目の全てにおいて基準を満足しており、処理後土壌は土質材料として再利用可能であることが示唆された。

表-18 処理後土壌分析結果一覧

試料名	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】	【含有】	【溶出】
	低濃度 処理後土壌 1回目	低濃度 処理後土壌 1回目	低濃度 処理後土壌 2回目	低濃度 処理後土壌 2回目	低濃度 処理後土壌 3回目	低濃度 処理後土壌 3回目	低・中濃度 処理後土壌 4回目	低・中濃度 処理後土壌 4回目	中濃度 処理後土壌 5回目	中濃度 処理後土壌 5回目	中・高濃度 処理後土壌 6回目	中・高濃度 処理後土壌 6回目	高濃度 処理後土壌 7回目	高濃度 処理後土壌 7回目	高・低濃度 処理後土壌 8回目	高・低濃度 処理後土壌 8回目
試料中濃度単位	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/L
C4 PFBA	-	-	< 0.02	0.3	-	-	-	-	< 0.02	< 0.2	-	-	< 0.02	0.2	-	-
C5 PFPeA	-	-	< 0.05	< 0.2	-	-	-	-	< 0.05	< 0.2	-	-	< 0.05	< 0.2	-	-
C6 PFHxA	-	-	< 0.01	< 0.2	-	-	-	-	< 0.01	< 0.2	-	-	< 0.01	< 0.2	-	-
C7 PFHpA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C8 PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
br-PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C9 PFNA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
br-PFNA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
Total-PFNA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C10 PFDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C11 PFUnDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C12 PFDoDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C13 PFTrDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C14 PFTeDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C16 PFHxDA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C18 PFOA	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C4 PFBS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C5 PFPeS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C6 PFHxS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
br-PFHxS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
Total-PFHxS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C7 PFHpS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C8 PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
br-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C9 PFNS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C10 PFDS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C11 PFUnDS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
C12 PFDoDS	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-	< 0.01	< 0.1	-	-
溶出液pH(水温:℃)	-	12.5(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)

※赤枠の結果を分解効率等の考察に使用。

表-19 処理後土壌分析結果一覧（その2：土壌汚染対策法に基づく特定有害物質）

測定項目 測定回数 濃度区分 試料採取日	溶出量 mg/L								(参考) 土対法 基準
	1回目 低濃度 11/5~8	2回目 低濃度 11/8~10	3回目 低濃度 11/10~13	4回目 低・中混合 11/13~16	5回目 中濃度 11/16~18	6回目 中・高混合 11/18~21	7回目 高濃度 11/21~24	8回目 高・低混合 11/24~26	
	クロロエチレン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	
四塩化炭素	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.002 以下
1,2-ジクロロエタン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.004 以下
1,1-ジクロロエチレン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.1 以下
1,2-ジクロロエチレン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.04 以下
1,3-ジクロロプロペン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.002 以下
ジクロロメタン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.02 以下
テトラクロロエチレン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.01 以下
1,1,1-トリクロロエタン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	1 以下
1,1,2-トリクロロエタン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.006 以下
トリクロロエチレン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.01 以下
ベンゼン	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.01 以下
カドミウム及びその化合物	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003 以下
六価クロム化合物	0.02	0.01	0.02	0.02	<0.01	0.03	0.01	<0.01	0.05 以下
シアン化合物	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	不検出
水銀及びその化合物	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005 以下
セレン及びその化合物	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.01 以下
鉛及びその化合物	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01 以下
砒素及びその化合物	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01 以下
ふっ素及びその化合物	0.61	0.58	0.57	0.56	0.52	0.78	0.50	0.56	0.8 以下
ほう素及びその化合物	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1 以下
シマジン	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	0.003 以下
チオベンカルブ	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.02 以下
チウラム	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	0.006 以下
ポリ塩化ビフェニル	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	不検出
有機りん化合物	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	不検出
溶出液 pH (水温: °C)	10.9 (21.7)	11.1 (22.3)	11.2 (21.6)	11.6 (23.4)	11.8 (21.2)	11.5 (21.9)	11.7 (22.7)	11.7 (22.8)	

測定項目 測定回数	含有量 mg/kg								(参考)
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	
カドミウム及びその化合物	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	45 以下
六価クロム化合物	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	250 以下
シアン化合物	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	50 以下
水銀及びその化合物	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	15 以下
セレン及びその化合物	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150 以下
鉛及びその化合物	<10	<10	<10	13	13	14	12	10	150 以下
砒素及びその化合物	<5	6	<5	5	5	<5	<5	<5	150 以下
ふっ素及びその化合物	220	220	190	220	230	220	190	150	4000 以下
ほう素及びその化合物	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	4000 以下

(3) 粉末活性炭・工業用水 (表-20)

- 粉末活性炭は、PFAS 全項目について、溶出・含有ともに定量下限未満であった。
- ガス冷却に使用する活性炭処理後の工業用水は、PFOA が検出されたものの 0.1 ng/L と極めて低濃度で、その他の項目については全て定量下限未満であった。

(4) ばいじん (表-21)

- ばいじんについて、低濃度、中濃度、高濃度それぞれの試料の排ガス測定と同じタイミングで採取した。
- 低濃度、中濃度、高濃度それぞれについて、バグフィルタ前のばいじんの PFOS+PFOA 溶出量の目標値である 50 ng/L 以下を満足した。
- 第 1 減温塔のばいじんについては、PFOA は検出されず、低濃度時に短鎖の PFPeA の溶出および PFNA、PFBS の含有が、高濃度時に PFPeA の溶出が検出された。

表-20 粉末活性炭および工業用水分析結果一覧

試料名	【含有】	【溶出】	工業用水 (活性炭通 水処理後)
	粉末活性炭	粉末活性炭	
試料中濃度単位	ng/g-dry	ng/L	ng/L
C4 PFBA	< 0.02	< 0.2	< 0.2
C5 PFPeA	< 0.05	< 0.2	< 0.2
C6 PFHxA	< 0.01	< 0.2	< 0.2
C7 PFHpA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C8 PFOA	< 0.01	< 0.1	0.1
br-PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
Total-PFOA	< 0.01	< 0.1	0.1
C9 PFNA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
br-PFNA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
Total-PFNA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C10 PFDA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C11 PFUnDA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C12 PFDoDA	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C13 PFTeDA	< 0.5	< 0.1	< 0.1
C14 PFTrDA	< 0.5	< 0.1	< 0.1
C16 PFHxDA	< 0.5	< 0.1	< 0.1
C18 PFOA	< 0.5	< 0.1	< 0.1
C4 PFBS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C5 PFPeS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C6 PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
br-PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
Total-PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C7 PFHpS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C8 PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
br-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
Total-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C9 PFNS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C10 PFDS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C11 PFUnDS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
C12 PFDoDS	< 0.01	< 0.1	< 0.1
溶出液pH(水温:°C)	-	12.3(21)	

- 第2減温塔のばいじんについては、PFOAの溶出および含有が検出され、土壌試料の濃度に応じて増加する傾向が認められた。その他、PFOAよりも短鎖のPFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpAが検出された。
- バグフィルタのばいじんについては、PFOAの含有量が低濃度で検出されたほか、PFOAよりも短鎖のPFBA、PFPeA、PFHxAの溶出が検出された。また、低濃度・中濃度時に短鎖のPFBSも検出された。

表-21 ばいじん分析結果一覧

試料名	【含有】 低濃度 ばいじん	【溶出】 低濃度 ばいじん	【含有】 中濃度 ばいじん	【溶出】 中濃度 ばいじん	【含有】 高濃度 ばいじん	【溶出】 高濃度 ばいじん	【含有】 低濃度 ばいじん	【溶出】 低濃度 ばいじん	【含有】 中濃度 ばいじん	【溶出】 中濃度 ばいじん	【含有】 高濃度 ばいじん	【溶出】 高濃度 ばいじん	【含有】 低濃度 ばいじん バグフィ ルター	【溶出】 低濃度 ばいじん バグフィ ルター	【含有】 中濃度 ばいじん バグフィ ルター	【溶出】 中濃度 ばいじん バグフィ ルター	【含有】 高濃度 ばいじん バグフィ ルター	【溶出】 高濃度 ばいじん バグフィ ルター
	第1減温塔	第1減温塔	第1減温塔	第1減温塔	第1減温塔	第1減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔	第2減温塔
試料中濃度単位	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L	ng/g- dry	ng/L
C4 PFBA	< 0.02	< 0.2	< 0.02	< 0.2	< 0.02	< 0.2	< 0.02	0.2	< 0.02	0.3	< 0.02	0.3	< 0.02	0.3	< 0.02	0.2	< 0.02	0.3
C5 PFPeA	< 0.05	0.3	< 0.05	< 0.2	< 0.05	0.2	< 0.05	0.2	< 0.05	0.3	< 0.05	0.2	< 0.05	< 0.2	< 0.05	0.2	< 0.05	0.3
C6 PFHxA	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.2	< 0.01	0.2	< 0.01	0.2	< 0.01	< 0.2	< 0.01	0.2	< 0.01	< 0.2
C7 PFHpA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	0.1	< 0.01	0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C8 PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	1.0	0.01	1.2	0.06	7.7	0.02	< 0.1	0.01	< 0.1	0.06	< 0.1
br-PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFOA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	1.0	0.01	1.2	0.06	7.7	0.02	< 0.1	0.01	< 0.1	0.06	< 0.1
C9 PFNA	0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
br-PFNA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFNA	0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C10 PFDA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C11 PFUnDA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C12 PFDoDA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C13 PFTrDA	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.1
C14 PFTeDA	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.5	< 0.01	< 0.1
C16 PFHxDA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C18 PFODA	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C4 PFBS	0.04	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	0.01	< 0.1	0.19	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C5 PFPeS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C6 PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
br-PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFHxS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C7 PFHpS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C8 PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
br-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
Total-PFOS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C9 PFNS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C10 PFDS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C11 PFUnDS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
C12 PFDoDS	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.1
溶出液pH(水温:℃)	-	12.7(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.6(22)	-	12.7(22)	-	12.7(22)	-	12.8(22)	-	12.8(22)	-	12.7(22)

※赤枠の結果を分解効率等の考察に使用。

(5) ガス分析結果 (バグフィルタ手前および煙突排ガス、表-22)

- 煙突排ガスについては、試料の濃度に関わらず、技術目標である 60 ng/m³N 以下を満足した。
- 低濃度試料時は、バグフィルタ手前、煙突排ガスともに、全項目について定量下限未満であった。
- 中濃度試料時は、バグフィルタ手前の2回目でもPFOAが検出されたものの、煙突排ガスでは定量下限未満であった。
- 高濃度試料時は、バグフィルタ手前でPFOAが2.3~2.6 ng/m³N程度検出されたが、煙突排ガスでは1回目にPFOAが1.0 ng/m³N検出されたものの、技術目標は十分に満足する結果であった。
- フッ化水素については、試料の濃度に関わらず定量下限未満で、技術目標の5 mg/m³N以下を満足した。

表-22 排ガス分析結果一覧（バグフィルタ手前および煙突排ガス）

試料名	酸素濃度12%換算値											
	低濃度 排ガス BF手前 n-1	低濃度 排ガス BF手前 n-2	中濃度 排ガス BF手前 n-1	中濃度 排ガス BF手前 n-2	高濃度 排ガス BF手前 n-1	高濃度 排ガス BF手前 n-2	低濃度 排ガス 煙突 n-1	低濃度 排ガス 煙突 n-2	中濃度 排ガス 煙突 n-1	中濃度 排ガス 煙突 n-2	高濃度 排ガス 煙突 n-1	高濃度 排ガス 煙突 n-2
	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³
試料中濃度単位	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³
C4 PFBA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
C5 PFPeA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
C6 PFHxA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3	< 2	< 2	< 2
C7 PFHpA	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
C8 PFOA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	1.0	2.3	2.6	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	1.0	< 0.9
br-PFOA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
Total-PFOA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	1.0	2.3	2.6	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	1.0	< 0.9
C9 PFNA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
br-PFNA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
Total-PFNA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C10 PFDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C11 PFUnDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C12 PFDoDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C13 PFTrDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C14 PFTeDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C16 PFHxDA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C18 PFODA	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C4 PFBS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C5 PFPeS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C6 PFHxS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
br-PFHxS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
Total-PFHxS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C7 PFHpS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C8 PFOS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
br-PFOS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
Total-PFOS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C9 PFNS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C10 PFDS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C11 PFUnDS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
C12 PFDoDS	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 0.8	< 0.8	< 0.9	< 0.9	< 1	< 1	< 0.9	< 0.9
フッ化水素 (mg/m ³)	< 0.5		< 0.5		< 0.5		< 0.5		< 0.5		< 0.5	
酸素(PFAS測定時：%)	9.6	10.2	10.7	11	11.5	10.6	11.7	12.2	9.7	9.6	10.8	11

※赤枠の結果を分解効率等の考察に使用。



図-29 ばいじん採取状況



図-30 BF 前排ガス採取



図-31 煙突排ガス採取

4) 処理後土壌の土質試験結果

表-23 に処理後土壌の土質試験結果一覧を、図-32 に処理後土壌の粒径加積曲線を示す。

土質分類としては、細粒分まじり礫質砂 (SG-F) で、発生土利用基準に準拠して改良土として測定したコーン指数は 2,500 kN/m² 以上 (貫入不能) と高い値を示している。同基準の土質区分としては、第 1 種建設発生土 (第 1 種改良土) に相当し、一般的な地盤材料として十分に再利用可能なものと判断される。

表-23 処理後土壌の土質試験結果一覧

項目		結果	備考	
一般	土粒子の密度 ρ_s	Mg/m ³	2.690	
	含水比 w	%	7.90	
粒度	石分 (75mm以上)	%	0	
	礫分 (2~75mm)	%	44.9	
	砂分 (0.075~2mm)	%	49.6	
	シルト分 (0.005~0.075mm)	%	2.1	
	粘土分 (0.005mm未満)	%	3.4	
	最大粒径	mm	37.5	
	均等係数		22.2	
	60%粒径	mm	2.89	
	50%粒径	mm	1.65	
	30%粒径	mm	0.57	
10%粒径	mm	0.13		
分類	地盤材料の分類名	細粒分まじり礫質砂	JGS 0051	
	分類記号	SG-F		
コーン指数	コーン指数 q_c	kN/m ²	2,500 以上 (貫入不能)	発生土利用基準「改良土」の測定方法に準拠 (9.5mm以下試料、3層25回突き固め)

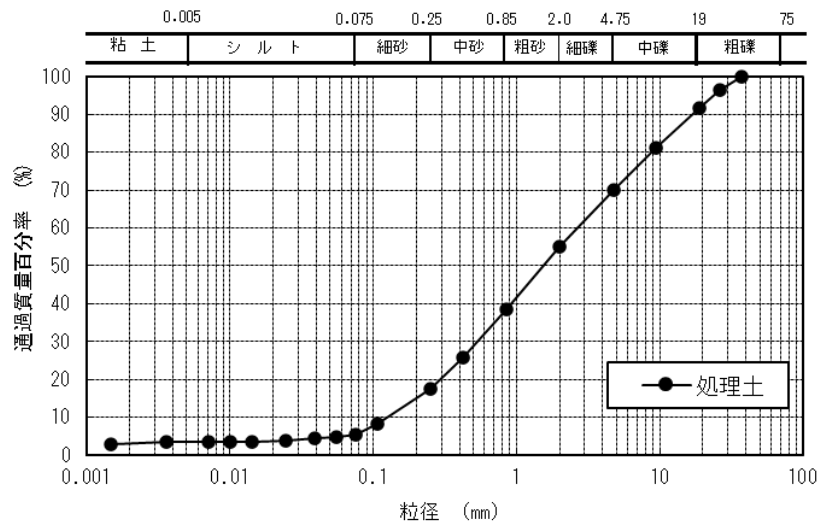


図-32 処理後土壌の粒径加積曲線



図-33 コーン指数試験状況 (貫入不能)

5) 排出物等の処理・処分

- ・ 処理後土壌：1,313.13t 管理型最終処分場内の覆土等として再利用
- ・ ばいじん：58.67t 管理型最終処分場に埋め立て処分
- ・ 廃フレコン：1,444袋分 選別破碎（中間処理）⇒焼却処理

6) 現地視察

- ・ 1回目 25/11/10 13:00～

座長：平田先生、和歌山大学：江種先生

環境省 築山室長補佐

建設技術研究所

- ・ 2回目 25/11/12 9:00～

横浜国立大：小林先生、国立環境研究所：倉持先生、中央大：山村先生、

大阪府立環境農林水産総合研究所：矢吹先生

環境省 築山室長補佐

建設技術研究所



図-34 処理施設現地視察1回目



図-35 処理施設現地視察2回目

7) 熱分解処理試験における課題・トラブル

ロータリーキルン炉による熱分解試験にあたっては、試料の閉塞などのトラブルが起きないように生石灰による前処理（改質）を確実にを行い、均質化を図った上で実施した。運転中も定量供給装置の清掃を定期的に行うなどしたため、大きなトラブルもなく、試験を完了することができた。ロータリーキルン炉による処理については、処理対象物の前処理が極めて重要であり、受け入れる処理対象物の性状に応じて適切な薬剤添加量を決定し、前処理を行うことが求められる。

8) 分解効率を計算するための投入・排出物量のデータ

低濃度試料、中濃度試料、高濃度試料、それぞれについて、PF0Aの分解効率を計算するための投入物量および排出物量を以下に示す。

(1) 低濃度排ガス測定時の投入・排出物量（実績ベース）

投入・排出物量一覧

投入物			排出物				
① 処理前土壌	⑧ 粉末活性炭	⑨ 工業用水	② 処理後土壌	排ガス（乾き）	ばいじん		
				④ バグフィルター後	⑤ 第1減温塔	⑥ 第2減温塔	⑦ バグフィルター
2,903kg/h	5kg/h	1,910L/h	2,579kg/h	7,590m3N/h	7.500kg/h	4.835kg/h	95.000kg/h

以下、各物量の算出方法等を示す。

工業用水使用量

粉末活性炭、重曹使用量

	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
第1減温塔	1,340L	1,330L	1,340L	1,290L	1,325L/h
第2減温塔	590L	580L	590L	580L	585L/h
合計	1,930L	1,910L	1,930L	1,870L	1,910L/h

粉末活性炭： 5 kg/h

重曹： 8 kg/h

各ばいじん回収量

	採取時間		回収重量	時間あたり発生量
第1減温塔	11:00~15:00	240分	30kg	30 / (240 / 60) = 7.500kg/h
第2減温塔	11:00~15:00	240分	19.341kg	19.341 / (240 / 60) = 4.835kg/h
バグフィルター	11:00~15:00	240分	380kg	380 / (240 / 60) = 95.000kg/h

合計： 107.335kg/h

各ばいじんの合計 107.335kg/h の中には、粉末活性炭 5 kg/h および重曹 8 kg/h が含まれる。

したがって、処理前土壌由来のばいじん発生量は、 $107.335 - (5 + 8) = 94.335$ kg/h

処理前土壌 含水率・強熱減量測定結果（強熱減量は105°C乾燥後の重量に対する970°C1.5時間加熱後の重量減少率）

2025.11.13 6:00に採取の処理前土壌（低濃度）を用いて測定

含水率 (105°C、3.0h)	容器重量(g)	乾燥前容+試(g)	試料重量(g)	乾燥後容+試(g)	水分重量(g)	含水率(%)	(1-含水) (%)
	140.68	440.84	300.16	422.45	18.39	6.13%	93.87%
強熱減量 (970°C、1.5h)	容器重量(g)	強熱前容+試(g)	試料重量(g)	強熱後容+試(g)	強熱減量(g)	強熱減量(%)	(1-強熱) (%)
	107.74	207.87	100.13	199.95	7.92	7.91%	92.09%

処理前土壌投入量、処理後土壌発生量

処理前土壌投入量（湿重量）

11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
3,030kg	3,070kg	3,260kg	3,010kg	3,093kg/h

処理前土壌投入量（乾重量）：【処理前土壌投入量（湿重量）】×【（1-含水）】

$$= 3,093 \times 0.9387 = 2,903\text{kg/h}$$

処理後土壌発生量（乾重量）：【処理前土壌投入量（乾重量）】×【（1-強熱）】

－【処理前土壌由来のばいじん発生量】

$$= 2,903 \times 0.9209 - 94.335 = 2,579\text{kg/h}$$

排ガス流量（乾き） 7,590m3N/h（実測値）

(2) 中濃度排ガス測定時の投入・排出物量（実績ベース）

投入・排出物量一覧

投入物			排出物				
① 処理前土壌	⑧ 粉末活性炭	⑨ 工業用水	② 処理後土壌	排ガス（乾き）	ばいじん		
				④ バグフィルター後	⑤ 第1減温塔	⑥ 第2減温塔	⑦ バグフィルター
2,776kg/h	5kg/h	1,933L/h	2,412kg/h	7,430m3N/h	8.571kg/h	9.966kg/h	117.143kg/h

以下、各物量の算出方法等を示す。

工業用水使用量

粉末活性炭、重曹使用量

	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
第1減温塔	1,310L	1,320L	1,330L	1,320L	1,320L/h
第2減温塔	610L	600L	610L	630L	613L/h
合計	1,920L	1,920L	1,940L	1,950L	1,933L/h

粉末活性炭： 5 kg/h

重曹： 8 kg/h

各ばいじん回収量

	採取時間		回収重量	時間あたり発生量
第1減温塔	11:00~14:30	210分	30kg	30 / (210 / 60) = 8.571kg/h
第2減温塔	11:00~14:30	210分	34.881kg	34.881 / (210 / 60) = 9.966kg/h
バグフィルター	11:00~14:30	210分	410kg	410 / (210 / 60) = 117.143kg/h

合計： 135.680kg/h

各ばいじんの合計 135.680kg/h の中には、粉末活性炭 5 kg/h および重曹 8 kg/h が含まれる。

したがって、処理前土壌由来のばいじん発生量は、 $135.680 - (5 + 8) = 122.680\text{kg/h}$

処理前土壌 含水率・強熱減量測定結果（強熱減量は105°C乾燥後の重量に対する970°C1.5時間加熱後の重量減少率）

2025.11.17 12:00に採取の処理前土壌（中濃度）を用いて測定

含水率 (105°C、3.0h)	容器重量(g)	乾燥前容+試(g)	試料重量(g)	乾燥後容+試(g)	水分重量(g)	含水率(%)	(1-含水) (%)
	138.97	439.19	300.22	416.99	22.20	7.39%	92.61%
強熱減量 (970°C、1.5h)	容器重量(g)	強熱前容+試(g)	試料重量(g)	強熱後容+試(g)	強熱減量(g)	強熱減量(%)	(1-強熱) (%)
	146.01	246.21	100.20	237.50	8.71	8.69%	91.31%

処理前土壌投入量、処理後土壌発生量

処理前土壌投入量（湿重量）	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
	3,100kg	2,990kg	3,090kg	2,810kg	2,998kg/h

処理前土壌投入量（乾重量）：【処理前土壌投入量（湿重量）】×【（1-含水）】

$$= 2,998 \times 0.9261 = 2,776\text{kg/h}$$

処理後土壌発生量（乾重量）：【処理前土壌投入量（乾重量）】×【（1-強熱）】

－【処理前土壌由来のばいじん発生量】

$$= 2,776 \times 0.9131 - 122.680 = 2,412\text{kg/h}$$

排ガス流量（乾き） 7,430m3N/h（実測値）

(3) 高濃度排ガス測定時の投入・排出物量（の実績ベース）

投入・排出物量一覧

投入物			排出物				
① 処理前土壌	⑧ 粉末活性炭	⑨ 工業用水	② 処理後土壌	排ガス（乾き）	ばいじん		
				④ バグフィルター後	⑤ 第1減温塔	⑥ 第2減温塔	⑦ バグフィルター
2,767kg/h	5kg/h	1,883L/h	2,415kg/h	7,250m3N/h	8.571kg/h	10.818kg/h	112.000kg/h

以下、各物量の算出方法等を示す。

工業用水使用量

粉末活性炭、重曹使用量

	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
第1減温塔	1,270L	1,290L	1,260L	1,280L	1,275L/h
第2減温塔	610L	600L	600L	620L	608L/h
合計	1,880L	1,890L	1,860L	1,900L	1,883L/h

粉末活性炭： **5 kg/h**

重曹： 8 kg/h

各ばいじん回収量

	採取時間		回収重量	時間あたり発生量
第1減温塔	11:00~14:30	210分	30kg	30 / (210 / 60) = 8.571kg/h
第2減温塔	11:00~14:30	210分	37.862kg	37.862 / (210 / 60) = 10.818kg/h
バグフィルター	11:00~14:45	225分	420kg	420 / (225 / 60) = 112.000kg/h

合計： 131.389kg/h

各ばいじんの合計 131.389kg/h の中には、粉末活性炭 5 kg/h および重曹 8 kg/h が含まれる。

したがって、処理前土壌由来のばいじん発生量は、 131.389 - (5 + 8) = 118.389kg/h

処理前土壌 含水率・強熱減量測定結果（強熱減量は105°C乾燥後の重量に対する970°C1.5時間加熱後の重量減少率）

2025.11.21 6:00に採取の処理前土壌（高濃度）を用いて測定

含水率 (105°C、3.0h)	容器重量(g)	乾燥前容+試(g)	試料重量(g)	乾燥後容+試(g)	水分重量(g)	含水率(%)	(1-含水) (%)
	141.16	441.49	300.33	419.33	22.16	7.38%	92.62%
強熱減量 (970°C、1.5h)	容器重量(g)	強熱前容+試(g)	試料重量(g)	強熱後容+試(g)	強熱減量(g)	強熱減量(%)	(1-強熱) (%)
	125.92	226.06	100.14	217.61	8.45	8.44%	91.56%

処理前土壌投入量、処理後土壌発生量

処理前土壌投入量（湿重量）	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	平均
	2,980kg	3,060kg	2,930kg	2,980kg	2,988kg/h

処理前土壌投入量（乾重量）： 【処理前土壌投入量（湿重量）】 × 【（1 - 含水）】

$$= 2,988 \times 0.9262 = \mathbf{2,767kg/h}$$

処理後土壌発生量（乾重量）： 【処理前土壌投入量（乾重量）】 × 【（1 - 強熱）】

$$- \text{【処理前土壌由来のばいじん発生量】}$$

$$= 2,767 \times 0.9156 - 118.389 = \mathbf{2,415kg/h}$$

排ガス流量（乾き） **7,250m3N/h**（実測値）

3. 実証試験の評価項目

3.1 対策技術の有効性

(1) 熱分解処理による PFOA の濃度低減効果

表-24 に低濃度試料、中濃度試料、高濃度試料それぞれの PFOS・PFOA 分析結果一覧を示す。今回の試料は、PFOS が定量下限未満であったことから、以下、PFOA について述べる。

PFOA 溶出量として、前処理後の低濃度試料が 44,000 ng/L、中濃度試料が 76,000 ng/L、高濃度試料が 140,000 ng/L であったのに対して、熱分解処理による処理後土壌は、低濃度・中濃度・高濃度のすべてのケースで PFOA 溶出量は定量下限未満 (<0.1 ng/L) となり、技術目標の PFOA 溶出量 50 ng/L 以下を十分に満足し、本技術の有効性が確認された。

ばいじんについても、第2減温塔ばいじんでは PFOA が低濃度・中濃度・高濃度のそれぞれで少量検出 (最大で 7.7 ng/L) されたものの、その他は全て定量下限未満 (<0.1 ng/L) で、処理後土壌同様に技術目標の PFOA 溶出量 50 ng/L 以下を十分に満足した。

排ガスについては、高濃度試料処理時に PFOA が 1.0 ng/m³N 検出されたものの、その他は定量下限未満で、技術目標の PFOA 濃度 60 ng/m³N 以下を十分に満足した。フッ化水素については、バグフィルタ前の段階で低濃度、中濃度、高濃度ともに定量下限未満となり、技術目標の 5 mg/m³N 以下を十分に満足した。

今回の分析結果より、土壌試料に高濃度で含まれる PFOA は、ロータリーキルンおよび二次燃焼室でそのほとんどが熱分解・除去されていることが示唆され、本技術が PFOA を含む土壌の濃度低減のための処理方法として有効であることが確認された。

表-24 主たる試料の PFOS・PFOA 分析結果一覧

				処理前		処理後					排ガス	
				土壌	土壌	ばいじん				③ 排ガス	④ 排ガス	
				① 処理前 土壌	② 処理後 土壌	⑤ 第1 減温塔 ばいじん	⑥ 第2 減温塔 ばいじん	⑦ バグ フィルタ ばいじん		バグフィル ター前	バグフィル ター後	
低 濃 度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m ³ N	< 0.8	< 0.9	
		PFOA ng/g-dry	230	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	PFOA ng/m ³ N	< 0.8	< 0.9		
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○		
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化	< 0.5	< 0.5		
		PFOA ng/L	44,000	< 0.1	< 0.1	1.0	< 0.1	水素	< 0.5	< 0.5		
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○		
中 濃 度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m ³ N	< 0.9	< 1		
		PFOA ng/g-dry	480	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	PFOA ng/m ³ N	1.0	< 1		
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○		
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化	< 0.5	< 0.5		
		PFOA ng/L	76,000	< 0.1	< 0.1	1.2	< 0.1	水素	< 0.5	< 0.5		
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○		
高 濃 度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m ³ N	< 0.8	< 0.9		
		PFOA ng/g-dry	1,300	< 0.01	< 0.01	0.06	0.06	PFOA ng/m ³ N	2.6	1.0		
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○		
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化	< 0.5	< 0.5		
		PFOA ng/L	140,000	< 0.1	< 0.1	7.7	< 0.1	水素	< 0.5	< 0.5		
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○		
技術目標				処理後土壌・ばいじん PFOS+PFOA 溶出量 50ng/L以下			排ガス (バグフィルター後 (煙突)) PFOS+PFOA 濃度 60ng/m ³ N以下 フッ化水素濃度 5mg/m ³ N以下					

(2) PFOA 含有量および溶出量の分析結果について

表-25 に処理前土壌の PFOA 溶出量、含有量、および溶出量から想定される含有量の一覧を示す。

本実証試験の処理前土壌の PFOA 含有量は、本来は溶出量の 1/100 の値よりも大きい値となるはずであるが、溶出量から想定される含有量のおおむね 5~7 割程度の測定結果となった。

表-25 処理前土壌の PFOA 分析結果と溶出量から想定される含有量一覧

試料名	【溶出】 低濃度 処理前土壌 1回目	【含有】 低濃度 処理前土壌 1回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 1回目	【溶出】 低濃度 処理前土壌 2回目	【含有】 低濃度 処理前土壌 2回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 2回目	【溶出】 低濃度 処理前土壌 3回目	【含有】 低濃度 処理前土壌 3回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 3回目	【溶出】 低・中濃度 処理前土壌 4回目	【含有】 低・中濃度 処理前土壌 4回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 4回目
試料中濃度単位	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry
PFOA	35,000	230	350 以上	43,000	230	430 以上	35,000	270	350 以上	48,000	340	480 以上
br-PFOA	210	< 0.8	2.1 以上	240	< 0.8	2.4 以上	230	1	2.3 以上	300	1	3.0 以上
Total-PFOA	35,000	230	350 以上	44,000	230	440 以上	35,000	270	350 以上	48,000	340	480 以上
試料名	【溶出】 中濃度 処理前土壌 5回目	【含有】 中濃度 処理前土壌 5回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 5回目	【溶出】 中・高濃度 処理前土壌 6回目	【含有】 中・高濃度 処理前土壌 6回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 6回目	【溶出】 高濃度 処理前土壌 7回目	【含有】 高濃度 処理前土壌 7回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 7回目	【溶出】 高濃度 処理前土壌 8回目	【含有】 高濃度 処理前土壌 8回目	【含有】 溶出量から 想定される 含有量 8回目
試料中濃度単位	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/L	ng/g-dry	ng/g-dry
PFOA	76,000	480	760 以上	93,000	520	930 以上	140,000	1,300	1,400 以上	94,000	500	940 以上
br-PFOA	570	3	5.7 以上	640	3	6.4 以上	770	5	7.7 以上	440	2	4.4 以上
Total-PFOA	76,000	480	760 以上	94,000	520	940 以上	140,000	1,300	1,400 以上	95,000	500	950 以上

このような結果となった原因として、以下の 2 点が考えられる。

- ① 本実証試験では、高濃度の試料を分析する場合、抽出液を分取後にサロゲート内標準物質を添加しているため、抽出操作時の影響が補正しきれずに、含有量を過小評価している。
- ② 0.3%アンモニアメタノールを溶媒として固液比 1 : 4 で 3 回抽出を行い、抽出液を混合して分析試料としているが、抽出回数 3 回では土壌中の PFOA を抽出しきれしていない。

【原因①について】

環境省の暫定測定方法では、抽出前にサロゲート内標準物質を添加するが、高濃度の試料の場合 LC-MS/MS の測定レンジに収まるように抽出液を希釈する必要がある。この場合、抽出前に添加した内標準物質の濃度が希釈後に検量線の範囲内の濃度となるように、通常より多めに添加する必要がある。今回の土壌試料のような数 100~数 1,000 ng/g オーダーの場合、使用する内標準物質は通常の 500 倍程度を添加する必要があり、高価な内標準物質の価格が分析単価に上乗せされることになる。そのため、本実証試験では、3 回抽出した抽出液を定容・分取後にあらためて内標準物質を添加することで、多量の内標準物質を使用せずに済むように、内標準物質添加のタイミングを変更した。内標準物質を溶媒抽出後の抽出液に添加した場合、サロゲート回収率による補正対象は抽出以降となり、溶媒抽出の効率等は補正されない。そのため、溶媒抽出の効率が低い場合、定量値が過小評価される可能性があり、今回含有量の結果が溶出量から想定れる濃度よりも低くなった要因となったことは否定できない。その一方で、高額な内標準物質を多量に用いて分析を行うことは、分析単価の高騰を招くことから現実的ではないと事前に判断したものである。高濃度試料における内標準物質の添加のタイミング等の考え方については、今後の研究に委ねたいと考える。

【原因②について】

本実証試験の土壌試料は、PFOA を高濃度に含む稀有な試料であり、通常の抽出方法では十分に PFOA 濃度を評価できない懸念がある。そこで、今回の含有量想定結果の確からしさを考察するために、以下の追加測定を実施した。

- (1) 0.3%アンモニアメタノールによる 3 回抽出後の試料について、4 回目、5 回目の抽出を行い、PFOA 含有量を測定。また、抽出方法の比較として高速溶媒抽出により同試料の含有量を測定。
- (2) 溶出試験実施後の試料について、2 回目、3 回目の溶出試験を行い、PFOA 溶出量を測定。

それぞれの結果を表-26、表-27 に示す。分析試料は、最も高濃度であった処理前土壌 7 回目を使用した。

含有量については、3 回抽出の結果は前述の結果 (1,300 ng/g) とほぼ同等の値であった。4 回目抽出で 230 ng/g、5 回目抽出で 210 ng/g となり、3 回抽出では十分に土壌に含まれている PFOA 全量を抽出しきれていないことがわかる。通常の 3 回抽出で得られた結果は、5 回目までの結果の合計を分母とした場合の 8 割程度であった。なお、比較で実施した高速溶媒抽出による測定には特に優位性は認められなかった。

溶出試験の方も、含有量測定と同様に、2 回目、3 回目の溶出操作でも PFOA が検出され、1 回の溶出操作による溶出量は、3 回溶出の合計を分母とした場合の 8 割程度であった。

溶出試験は固液比 1 : 10 で水と混合し、6 時間振とうで水に移行した対象物質の濃度を評価するための試験であり、全量を水に溶出させることを目的としていない。そのため、2 回以上の溶出操作で対象物質が検出されることに何ら違和感はない。しかしながら、含有量測定は土壌に含まれる対象物質の全量を把握するための試験であり、本実証試験の土壌試料については、暫定測定方法の抽出方法では含有量の全量を評価できないことがわかった。本試料の本来の PFOA 含有量は、溶出量の 1/100 の値よりも大きい値となるはずであり、少なくとも溶出量の 1/100 の値の方が本来の含有量に近い値ではないかと考えられる。

表-26 繰り返し抽出時の含有量測定結果

試料名	【含有】 処理前土壌 7回目 抽出1~3回	【含有】 処理前土壌 7回目 抽出4回	【含有】 処理前土壌 7回目 抽出5回	【含有】 抽出5回 の合計	抽出5回の合 計を分母とし たときの抽出 1~3回の抽 出割合	【含有】 処理前土壌 7回目 高速溶媒抽出 N=1	【含有】 処理前土壌 7回目 高速溶媒抽出 N=2
試料中濃度単位	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/g-dry	ng/g-dry	%	ng/g-dry	ng/g-dry
PFOA	1,400	230	210	1,840	76.1	1,800	1,300
br-PFOA	8.0	0.9	1.0	10	80.8	< 200	< 200
Total-PFOA	1,500	230	210	1,940	77.3	1,800	1,300

表-27 繰り返し溶出試験時の溶出量測定結果

試料名	【溶出】 処理前土壌 7回目 溶出1回目	【溶出】 処理前土壌 7回目 溶出2回目	【溶出】 処理前土壌 7回目 溶出3回目	【溶出】 溶出3回 の合計	溶出3回の合 計を分母とし たときの溶出 1回時の溶出 割合
試料中濃度単位	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	%
PFOA	200,000	32,000	13,000	245,000	81.6
br-PFOA	800	140	40	980	81.6
Total-PFOA	200,000	32,000	13,000	245,000	81.6
溶出液pH(水温:℃)	12.8(20)	12.7(20)	12.7(22)	-	-

3.2 対策技術の新規性・将来性

(1) 熱分解処理による PFOA の分解効率

PFOA の分解効率について、「媒体ごとの容量（あるいは重量）×PFAS 濃度」の式で算出した PFAS 量を、投入側・排出側それぞれで合算した総投入量と総排出量を用いて、「 $\{1 - (\text{PFAS 総排出量} / \text{PFAS 総投入量})\} \times 100 (\%)$ 」の式で算出した（ただし、計算に用いた PFOA 含有量は溶出量から想定される濃度（溶出値の 1/100）よりも小さい値であることに留意が必要）。

なお、処理前土壌の PFOA 以外の PFAS の含有量は定量下限未満または極微量であったため、分解効率の評価対象は PFOA のみとした。

「2.2 実証試験結果（2）8）」に示した投入・排出物量データおよび表-24 の分析結果をベースに PFOA の分解効率を試算した結果を表-28 に示す。定量下限未満の結果の場合は、定量下限値を用いて計算を行った。

表-28 各濃度の PFOA 分解効率

		投入・排出物量	PFOA濃度	PFOA量 μg/h	PFOA量合計 μg/h	分解効率 %		
低濃度	投入物	① 処理前土壌		2,903 kg/h	230 ng/g-dry	667,690	99.995	
		⑧ 粉末活性炭		5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		667,690.241
		⑨ 工業用水		1,910 L/h	0.1 ng/L	0.191		
	排出物	② 処理後土壌		2,579 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	25.790		PFOA排出量 35.403
		⑤ 第1減温塔ばいじん		7.500 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.075		
		⑥ 第2減温塔ばいじん		4.835 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.048		
		⑦ バグフィルターばいじん		95.000 kg/h	0.02 ng/g-dry	1.900		
	④ 排ガスバグフィルター後		7,590 m ³ N/h	1 ng/m ³ N ※	7.590			
中濃度	投入物	① 処理前土壌		2,776 kg/h	480 ng/g-dry	1,332,480	99.998	
		⑧ 粉末活性炭		5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		1,332,480.243
		⑨ 工業用水		1,933 L/h	0.1 ng/L	0.193		
	排出物	② 処理後土壌		2,412 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	24.120		PFOA排出量 32.907
		⑤ 第1減温塔ばいじん		8.571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086		
		⑥ 第2減温塔ばいじん		9.966 kg/h	0.01 ng/g-dry	0.100		
		⑦ バグフィルターばいじん		117.143 kg/h	0.01 ng/g-dry	1.171		
	④ 排ガスバグフィルター後		7,430 m ³ N/h	1 ng/m ³ N ※	7.430			
高濃度	投入物	① 処理前土壌		2,767 kg/h	1,300 ng/g-dry	3,597,100	99.9989	
		⑧ 粉末活性炭		5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		3,597,100.238
		⑨ 工業用水		1,883 L/h	0.1 ng/L	0.188		
	排出物	② 処理後土壌		2,415 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	24.150		PFOA排出量 38.855
		⑤ 第1減温塔ばいじん		8.571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086		
		⑥ 第2減温塔ばいじん		10.818 kg/h	0.06 ng/g-dry	0.649		
		⑦ バグフィルターばいじん		112.000 kg/h	0.06 ng/g-dry	6.720		
	④ 排ガスバグフィルター後		7,250 m ³ N/h	1 ng/m ³ N	7.250			

※定量下限未満の結果については、定量下限値を用いて計算

PFOA の分解効率は、低濃度：99.995 %、中濃度：99.998 %、高濃度：99.9989 %と、いずれも 99.99 %（4 ナイン）以上であった。なお、「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」では、適正な分解処理として、原則 99.999 %（5 ナイン）以上の分解効率を要件としているが、本実証事業

の対象は土壌であること、排ガスやばいじんが技術目標（技術的留意事項に示されている管理目標値）を大きく下回って満足していること、また、処理前土壌の PFOA 含有量が溶出量から想定される濃度よりも低いことを踏まえると、十分な分解効率が確保されているものと考えている。

（2）PFOA 分解効率の検証

PFOA 排出量の算出結果の内訳を見ると、低濃度の PFOA 総排出量 35.403 $\mu\text{g/h}$ のうち処理後土壌の PFOA 量が 25.790 $\mu\text{g/h}$ で、比率にして 72.8 % を占めている。同様に中濃度は 73.3%、高濃度は 62.2% であり、PFOA 含有量の測定結果が定量下限未満であるにもかかわらず、処理後土壌の PFOA 量算出結果が分解効率の算出結果に対して支配的な影響を与えている。これは、一般的な廃棄物焼却炉の残渣発生率が 2 割程度であることに對し、土壌の熱分解処理設備の場合、廃棄物焼却炉における残渣に相当する処理後土壌の重量が、処理前土壌に対して乾燥ベースで約 9 割の重量を維持したまま排出されることに起因する。

一方、PFOA の沸点は約 190 $^{\circ}\text{C}$ であり、本実証試験の熱分解処理設備は、投入した土壌が最高温度 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 付近となるロータリーキルン炉内を約 1 時間滞留することから、炉内に投入された土壌中に含まれる PFOA は、ほぼ完全に熱分解したか、もしくは揮発して排ガス側に移行したものと考えられる。すなわち、排出された処理後土壌に PFOA が残留していることは考えにくく、真の PFOA 含有量は限りなく「0」に近いものと推察される。仮に、処理後土壌の PFOA 濃度に「0」を代入して分解効率を試算すると、低濃度で 99.9986 %、中濃度で 99.9993 %、高濃度で 99.9996 % となり、中濃度、高濃度のケースで「5 ナイン」の結果が得られる（表-29）。

表-29 各濃度の PFOA 分解効率；処理後土壌「0」とした場合

			投入・排出物量	PFOA濃度	PFOA量 $\mu\text{g/h}$	PFOA量合計 $\mu\text{g/h}$	分解効率 %
低濃度	投入物	① 処理前土壌	2,903 kg/h	230 ng/g-dry	667,690	PFOA投入量 667,690.241	99.9986
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		
		⑨ 工業用水	1,910 L/h	0.1 ng/L	0.191		
	排出物	② 処理後土壌	2,579 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量 9.613	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	7,500 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.075		
		⑥ 第2減温塔ばいじん	4,835 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.048		
		⑦ バグフィルターばいじん	95,000 kg/h	0.02 ng/g-dry	1,900		
④ 排ガスバグフィルター後	7,590 m ³ N/h	1 ng/m ³ N ※	7,590				
中濃度	投入物	① 処理前土壌	2,776 kg/h	480 ng/g-dry	1,332,480	PFOA投入量 1,332,480.243	99.9993
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		
		⑨ 工業用水	1,933 L/h	0.1 ng/L	0.193		
	排出物	② 処理後土壌	2,412 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量 8.787	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	8,571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086		
		⑥ 第2減温塔ばいじん	9,966 kg/h	0.01 ng/g-dry	0.100		
		⑦ バグフィルターばいじん	117,143 kg/h	0.01 ng/g-dry	1,171		
④ 排ガスバグフィルター後	7,430 m ³ N/h	1 ng/m ³ N ※	7,430				
高濃度	投入物	① 処理前土壌	2,767 kg/h	1,300 ng/g-dry	3,597,100	PFOA投入量 3,597,100.238	99.9996
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050		
		⑨ 工業用水	1,883 L/h	0.1 ng/L	0.188		
	排出物	② 処理後土壌	2,415 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量 14.705	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	8,571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086		
		⑥ 第2減温塔ばいじん	10,818 kg/h	0.06 ng/g-dry	0.649		
		⑦ バグフィルターばいじん	112,000 kg/h	0.06 ng/g-dry	6,720		
④ 排ガスバグフィルター後	7,250 m ³ N/h	1 ng/m ³ N	7,250				

さらに、処理前土壌の PFOA 含有量を溶出量から想定される濃度（溶出値の 1/100）を代入して試算すると、低濃度で 99.9992 %、中濃度で 99.9996 %、高濃度で 99.9996 %となり、全てのケースで「5 ナイン」となる（表-30）。

今回の実証試験では、排ガスの二次燃焼室出口温度を 850 °C以上（860 °C）の条件で処理を行ったが、高濃度試料の処理においても十分な分解効率を達成したことから、燃焼ガス温度 850 °C以上であっても、確実に土壌中の PFAS が熱分解処理できるものと評価している。

表-30 各濃度の PFOA 分解効率；処理後土壌「0」、処理後土壌を溶出量の 1/100 とした場合

			投入・排出物量	PFOA濃度	PFOA量 µg/h	PFOA量合計 µg/h	分解効率 %
低濃度	投入物	① 処理前土壌	2,903 kg/h	440 ng/g-dry	1,277,320	PFOA投入量	99.9992
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050	1,277,320.241	
		⑨ 工業用水	1,910 L/h	0.1 ng/L	0.191		
	排出物	② 処理後土壌	2,579 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	7.500 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.075	9.613	
		⑥ 第2減温塔ばいじん	4.835 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.048		
		⑦ バグフィルターばいじん	95.000 kg/h	0.02 ng/g-dry	1.900		
		④ 排ガスバグフィルター後	7,590 m³N/h	1 ng/m³N ※	7.590		
中濃度	投入物	① 処理前土壌	2,776 kg/h	760 ng/g-dry	2,109,760	PFOA投入量	99.9996
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050	2,109,760.243	
		⑨ 工業用水	1,933 L/h	0.1 ng/L	0.193		
	排出物	② 処理後土壌	2,412 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	8.571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086	8.787	
		⑥ 第2減温塔ばいじん	9.966 kg/h	0.01 ng/g-dry	0.100		
		⑦ バグフィルターばいじん	117.143 kg/h	0.01 ng/g-dry	1.171		
		④ 排ガスバグフィルター後	7,430 m³N/h	1 ng/m³N ※	7.430		
高濃度	投入物	① 処理前土壌	2,767 kg/h	1,400 ng/g-dry	3,873,800	PFOA投入量	99.9996
		⑧ 粉末活性炭	5 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.050	3,873,800.238	
		⑨ 工業用水	1,883 L/h	0.1 ng/L	0.188		
	排出物	② 処理後土壌	2,415 kg/h	0.00 ng/g-dry ※	-	PFOA排出量	
		⑤ 第1減温塔ばいじん	8.571 kg/h	0.01 ng/g-dry ※	0.086	14.705	
		⑥ 第2減温塔ばいじん	10.818 kg/h	0.06 ng/g-dry	0.649		
		⑦ バグフィルターばいじん	112.000 kg/h	0.06 ng/g-dry	6.720		
		④ 排ガスバグフィルター後	7,250 m³N/h	1 ng/m³N	7.250		

3.3 対策技術の経済効率性

従来技術の焼却処理（混焼炉、混焼率 3 %）とのコスト比較を表-31 に示す。

本実証事業では、提案時の処理単価である 215,000 円/t がベースとなる。今回の実証試験の条件であるオープン掘削、ベントナイト混合土を含む埋戻し、内袋付フレコンバッグへの充填および運搬を含んだ施工コストは 250,000 円/t となる。

本技術の処理コストは従来技術に比べて約 28 %低減することが可能で、専焼炉であるため処理期間も大幅に短縮することができる。なお、従来技術の焼却処理にあっては、現状で PFOS・PFOA 等を高濃度に含む土壌を受け入れている施設は限定的で、処理対象物の性状によっては表に記載したよりも処理費が高値に振れる可能性もある。

英国およびヨーロッパにおける PFAS 汚染土壌の熱処理コストは 1m³ 当り約 450~2,000 ユーロ（2019~2021 年、運搬費用含まず）と報告¹⁾されており、仮に単位体積重量 1.5 t/m³、1 ユーロ 130 円（2021 年）、物価上昇を 20%見込んで換算すると、約 46,800~208,000 円/t となる。また、米国 EPA が 2024 年 4 月に公表した「PFAS の破壊及び処分に関する暫定ガイダンス、第 2 版」によれば、ハロゲンを

含む有害廃棄物（液体、汚泥、固体）の熱処理コストは、1,300～1,889 ドル/t（2022年時の価値に換算）と報告²⁾されており、単純に現在のレート（1ドル155円として）で日本円に換算すると、201,500～292,800円/tとなり、同程度のコストとなっている。対象物の性状、濃度、処理条件などが不明なため単純には比較が難しいが、現状ではPFASを高濃度に含む土壌や廃棄物を適正に熱分解処理するためのコストは20～30万円/t程度の範囲にあると考えられる。

なお、処理コストは、処理対象土壌がある程度まとまった土量（たとえば5,000t以上）であったり、前処理に手間をとらない性状（PFAS濃度、土質、含水比など）であれば、現状よりも下げられる可能性がある。また、本実証事業では3t/hの処理速度で処理したが、使用した既存設備は許認可上4.6t/hまでの処理能力を有していることから、処理対象の土壌のPFASの濃度レベルや性状によっては、処理速度を上げることが可能であり、コストダウンにもつながるものとする。

表-31 従来技術とのコスト比較

項目	本技術 (ロータリーキルン式熱分解)	従来技術 (焼却処理)
施設タイプ	専焼炉	混焼炉(混焼率3%想定)
処理量 [t]	1402.16	1402.16
日当り処理量 [t/日]	65.5 (改良後で72t/日)	3.0～6.0 ※処理能力100～200t/日
1t当たりの 処理コスト※1 [円/t]	215,000	300,000～
処理コスト [円]	301,464,400	420,648,000～
1t当たりの 施工費※2 [円/t]	250,000	345,000～
施工費※ [円]	350,540,000	483,745,200～
運転期間 [日]	21.4日 受入後に前処理：1日間、翌日より処理可能 処理後土壌保管：30日間 (分析で基準適合なら搬出)これらを含めると 搬入から2か月弱を要す。	100t/日施設：468日 200t/日施設：234日 (いずれも混焼率3%時) ※廃棄物処理施設で産業廃棄物として処理する 場合、マニユフェスト交付から180日以内に最 終処分を終了する必要があり、受入施設可能な 施設が限定もしくは分散する必要がある。

※1 処理後物の処分費を含む。

※2 今回の実証試験における掘削・埋戻し、運搬の直接工事費をベースに算出したもので、分析やモニタリング費用等は含んでいない（今回の掘削は、オープン掘削で土留を使用していないほか、湧水処理などの費用も発生しなかったことから、必要最小限で施工できたことに留意のこと）。

3.4 対策技術の環境保全

(1) 熱分解処理における排ガスおよびばいじんについて

「3.1 対策技術の有効性」で述べたとおり、排ガスおよびばいじんのいずれについても、処理目標を十分に満足するPFOS+PFOA濃度であり、周辺環境への影響はないことが確認された。

(2) 二酸化炭素排出量について

表-32に実証試験計画時（技術目標設定時）と実績ベースの二酸化炭素排出量の算定条件を示す。

計画時からの変更点としては、単位体積重量が大きくなった点（2.0 t/m³⇒2.06 t/m³）、処理土量が増えた点（696.1 m³・1,392.2 t⇒680.7 m³・1,402.16 t）があげられる。実績ベースの電力および燃料使用量、使用水量、薬剂量は実際に使用した数値を用いる。

都市ガスのCO₂排出係数は、試算時はAIST-IDEAに掲載されている都市ガスの燃焼エネルギーの値を採用していたが、実績ベースでは、汚染土壌処理施設が契約するガス会社が公表している25℃、100kPa時の排出係数2.09kg-CO₂/m³を0℃、101.325kPaの状態に換算している。電力のCO₂排出係数は、試算時はAIST-IDEAに掲載されている日本全国の平均値を採用していたが、実績ベースでは汚染土壌処理施設が契約する電力会社が公表している排出係数0.419kg-CO₂/kWhを使用した。

表-32 二酸化炭素排出量の算定条件

項目	実証前の試算		実績ベース	
	使用量	排出係数	使用量	排出係数
電力	150 kW/t	AIST-IDEA_ver.3.5 気候変動 IPCC 2021 GWP 100a without LULUCF	47.2 kWh/t	0.419 kg/kWh
都市ガス	9,000 MJ/t (200 m ³ N/t)		5,613 MJ/t (124.7 m ³ N/t)	2.25 kg/m ³ N (0.05 kg/MJ)
水	1 m ³ /t		0.699 m ³ /t	試算と同値
粉末活性炭	5 kg/t		1.78 kg/t	
重曹	5 kg/t		2.85 kg/t	
35%CaCl ₂ aq	10 kg/t		なし	
39%FeCl ₃ aq	40 kg/t		25.5 kg/t	
消石灰	20 kg/t		なし	
生石灰	70 kg/t		71.3 kg/t	
重金属安定化剤	2 kg/t		0.39 kg/t	
土壌の単位体積重量	2.0 t/m ³		2.06 t/m ³	
処理した土壌	696.1 m ³ ・1,392.2 t		680.7 m ³ ・1,402.16 t	

表-33 に二酸化炭素排出量の算定結果を示す。掘削・埋戻し、運搬、処理後物の処分なども考慮して算出した。二酸化炭素排出量は、技術目標の約半分となった。電力が想定約の約3割、都市ガスが想定約の約6割と、大幅に減ったことで大幅に排出量が減っている。都市ガス使用量が減った要因としては、土壌中に礫が多く、全て40mm以下に破碎して混合して熱分解試験に供していることから、熱伝達効率が向上したことが一つの要因として寄与しているものと考えられる。

表-33 二酸化炭素排出量の試算結果

項目	実証前の試算（計画時） = 技術目標	実績ベース
二酸化炭素排出量	1,656 kg-CO ₂ /m ³ (828 kg-CO ₂ /t)	851 kg-CO ₂ /m ³ (412.9 kg-CO ₂ /t)

3.5 対策技術の適用条件

本技術のPFASに係る適用範囲については、今回の試験では濃度に関わらず技術目標を十分に満足する処理後土壌、排ガスの測定結果が得られており、今回の最大濃度であるPFOA溶出量140,000ng/Lを超える土壌でも十分に処理が可能と考えられる。

処理対象物の受入条件については、1.1 原理と特徴、(3)2)に記載したとおり、①おおむね30cm以上の大きさの岩石、鉄筋、ゴミ等の粗大異物の混入が無いこと、②PCB含有量40,000mg/kg以下および油分5%以下であること、となっている。基本的には土壌として取り扱いができる性状であれば処理は可能であり、例えば高含水の泥状のものであっても前処理により改質することで処理は可能となる。

今回の実証試験では、既存の汚染土壌処理施設の通常の処理条件である、「ロータリーキルン炉の入口温度約650℃、出口温度約1,000℃で、滞留時間1.5時間」、「二次燃焼室出口温度850℃以上

（860℃で管理）で、滞留時間 2 秒以上」で、PFOA を高濃度に含む土壌の熱分解処理が可能であることを実証した点に大きな意義があると考えている。なお、二次燃焼室は入口部にバーナー（火炎温度約 1,700℃）が設置され、出口温度が 850℃以上となるよう、出口温度の管理温度を 860℃としてバーナーを運転管理している。したがって、二次燃焼室内温度はおおむね 860℃以上が確保されており、「二次燃焼室 850℃以上」を担保している。

また、前処理で土壌の改質のために添加した生石灰の効果にも注目している。土壌試料をアルカリ性にすることで、PFOA が加熱時に揮発しにくく土壌に留まりやすくなるため、ガス化を抑制して土壌近傍での熱分解が促進されるほか、生石灰や水和後の消石灰が土壌とともに粉塵として排ガス中に存在することで、PFAS 分解により生じるフッ化水素や他の酸性ガスが捕捉・中和される効果も期待される。

4. 当該技術の今後の展望

本実証試験により、既存の汚染土壌処理施設のロータリーキルン式熱分解処理設備を用いて、ロータリーキルン出口温度約 1,000 °C、二次燃焼室出口ガス温度 850 °C以上 (860°Cで管理) の条件で、主に PFOA を含む土壌を、周辺環境に影響を与えることなく、確実に熱分解処理ができることが確認された。

「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」では、燃焼ガスの温度が PFOS で 850°C以上、PFOA で 1,000°C以上 (好ましくは 1,100°C以上) とされているが、本実証試験では、ロータリーキルンでは 650~1,000°Cで土壌を加熱し、二次燃焼室出口ガス温度を 850°C以上 (860°Cで管理) の条件において、バグフィルタ手前でも技術目標の PFOA 濃度 60 mg/m³N 以下を十分に満足する結果を得ており、効果を実証することができている。今回供した土壌試料の PFOS は定量下限未満であったが、技術的留意事項に示された焼却処理温度が PFOA に比べて PFOS の方が低いことを踏まえ、仮に PFOS が含まれている土壌であっても本実証試験の処理条件で十分に処理することができるものと推察される。

現時点においては、土壌中の PFAS に関する法的規制や環境基準は定められていないものの、今後、国内外の規制等の動向を踏まえ、一定の基準等が整備される可能性がある。本技術は、将来的な PFAS 対策のニーズの高まりを見据えた場合において、既存設備を特段改良・更新することなく有効活用することが可能であり、PFOS・PFOA を含む土壌の適正処理に資する有用な処理技術となり得ると考えている。

今後は、処理条件の最適化や適用範囲の整理等を進め、本格運用を実施していく予定である。

ロータリーキルン炉は、セメント製造、石灰製造、金属材料の焙焼、廃棄物処分など幅広く用いられている汎用の加熱設備である。今回の実証試験では、既存の浄化等処理施設 (浄化 (分解-熱分解)) のロータリーキルン炉で、前述のロータリーキルン出口温度約 1,000 °C、二次燃焼室出口ガス温度 860 °C (850 °C以上) の運転条件を変更することなく処理が可能であることを実証した。同様のロータリーキルン炉を有する他の汚染土壌処理の許可施設についても、本実証試験の処理条件と同等以上であれば、PFAS を含む土壌の処理に活用できる可能性がある。土壌汚染対策法に基づく汚染土壌処理業者一覧 (令和 8 年 1 月 30 日現在) によると、ロータリーキルン炉などの熱処理施設を有する許可施設は 27 施設あり、これらの施設が活用できる可能性がある。ただし、このうち 20 施設はセメント製造施設であり、専焼炉ではないことは留意が必要である。したがって、同様のロータリーキルンを有している施設で今回と同じ温度条件で処理する場合であっても、各々の施設によって設備の仕様は異なるため、実処理に先立ち実証試験等を行い、処理後土壌、ばいじん、排ガス、廃水等の PFAS 濃度を確認し、処理の確実性を確認することは必須と考える。さらに、施設のある場所の行政や周辺住民などとの合意形成も必須であり、社会的にコンセンサスを得た適切な処理施設を活用することが求められるものとする。

【参考文献】

- 1)Concawe(2024) : PFAS Soil Treatment Processes - A Review of Operating Ranges and Constraints, Report No. 8/24, p55.
- 2)US. EPA(2024), : Interim Guidance on the Destruction and Disposal of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances and Materials Containing Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances-Version 2, AppendixD(Table D-1).
- 3)環境省(2026) : 土壌汚染対策法に基づく汚染土壌処理業者一覧 (令和 8 年 1 月 30 日現在)、<https://www.env.go.jp/content/000374071.pdf> (2026. 2. 13 閲覧)