

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

3J-2001 廃棄物処理システムの強靱化に貢献する  
固化式処分システムの社会実装研究  
(JPMEERF20203J01)

令和2年度～令和4年度

Practical Implementation of Cement-solidification-style Landfill Technology for  
Resilient Solid Waste Management

〈研究代表機関〉  
国立大学法人九州大学

〈研究分担機関〉  
株式会社安藤・間

令和5年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	18
要旨	18
1. 研究開発目的	18
2. 研究目標	18
3. 研究開発内容	19
4. 結果及び考察	36
5. 研究目標の達成状況	82
6. 引用文献	82
III. 研究成果の発表状況の詳細	83
IV. 英文Abstract	86

## I. 成果の概要

課題名 3J-2001 廃棄物処理システムの強靱化に貢献する固化式処分システムの社会実装研究  
課題代表者名 島岡 隆行 (国立大学法人九州大学大学院工学研究院環境社会部門教授)

重点課題 主：【重点課題⑫】社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発

副：【重点課題⑤】災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） 非該当

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

### 研究経費

90,000千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2年度：20,700千円、令和3年度：54,000千円、令和4年度：15,300千円）

### 研究体制

国立大学法人九州大学、株式会社安藤・間

### 研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 廃棄物焼却残渣、固化式処分、超流体工法、実証施工、埋立前処理、示方配合、施工性、耐久性、埋立地盤特性、環境安全性、経済性

## 1. はじめに（研究背景等）

ごみ分別の徹底、焼却処理の普及等により埋立廃棄物の無機化が進み、埋立廃棄物に占める焼却残渣の割合は8割までに増大している。さらに、2018年6月には第四次循環型社会形成推進基本計画が閣議決定され、ライフサイクル全体での徹底的な資源循環と適正処理が重要な方向性として位置づけられた。今後、静脈フローから有効利用可能な物質がすべて抜き取られ、結果として最終処分場へ搬入される廃棄物のうち焼却残渣の割合はさらに増大すると考えられる。焼却残渣の処分に最適な埋立工法の開発がますます重要となる。また、2019年5月に打ち出された環境研究・環境技術開発の推進戦略では、気候変動や災害の頻発化・激甚化に対応する廃棄物処理施設の強靱化に資する研究・技術開発が重要視されている。以上のニーズに対応可能な焼却残渣の「固化式処分システム」の技術開発と社会実装が強く求められる。

## 2. 研究開発目的

本研究では、これまで、2014～2016年度環境総合研究推進費「巨大地震に耐えうる環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究」により基礎実験を終え、2017年度～2019年度環境研究総合推進費「震災からの迅速復旧のためのレジリエントな最終処分場の実用化研究開発」の支援を受けてパイロットスケールの実験を実施した。本研究の目的は、研究の最終段階として実際の埋立地において実規模で固化式処分システムの有効性を実証し、社会実装への確実な道筋をつけることを目的とする。「固化式処分システム」とは、焼却残渣を高周波振動による超流体工法で固化しながら固化体として処分していくことにより、(1)強固な埋立地盤による高い耐震性を有し、(2)埋立廃棄物の減容化により処分容量が増量し、(3)雨水浸透の排除と有害物質の溶出低減により閉鎖から廃止までの期間が短縮し、(4)維持管理費が低減でき、(5)跡地も早期かつ高度に利用できる廃棄物処分システムである。災害発生時には固化式処分場は地盤改良をすることなく、直ちに災害廃棄物の選別施設や仮設焼却炉の設置用地となり、(6)災害に対してレジリエントな廃棄物処理システムとして迅速な復旧・復興に貢献する。

## 3. 研究目標

全体目標	<p>本研究では、これまでに実施してきた供試体を用いた室内での基礎実験、大型土槽によるパイロット試験の成果に基づき、実際の埋立地において固化式処分システムの実証施工、耐久性と環境安全性のモニタリングを実施する。最終的な目標は、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 日々刻々と変化する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理及び配合システムの構築</li> <li>(2) 日々搬入される大量の焼却残渣を効率的に処分できる高い施工性、地盤改良なしで構造物を設置できる強固な埋立地盤特性、埋立地の延命化のための減容効果の実証</li> <li>(3) 長期的な耐久性を有する埋立地盤、浸出水中の重金属等有害物質濃度を放流水質基準以下とする環境安全性の実証</li> <li>(4) 従来の最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコストでの建設、運用が可能な高い経済性の確認を行うことである。</li> </ol>
------	---

## 4. 研究開発内容

本研究では、焼却残渣を対象とした新しい処分システム「固化式処分システム」の実用化のため、実規模で実証実験を行う。研究内容と方法を以下に示す。

まず、1年度目は基本設計および運用試験を行うために必要な調査および実験を実施する。具体的には、福岡市中田埋立地における処理能力の算定（日処理量、搬入頻度、ピーク搬入量等）、固化式処分場の平面図、縦・横断面図の作図、底部集排水管周辺、法肩、法面、法尻、遮水シート固定工等、各部位を再現した型枠の製作と施工試験、選別、粒度調整等前処理フローと混練装置の確立のための機材選定と運用試験、詳細な経済性評価を実施する。

2年度目は、実証施工、耐久性と環境安全性のモニタリングを実施する。福岡市中田埋立地での配置計画（設置場所）、同埋立地の一面を使用した超流体化工法による試験施工、固化式処分場の実証施工、一層の可能な打設厚さ、打設面の接合の密着性の検討、IoTと連結した各種センサの設置と作動確認を行う。その際、施工速度、選別組成、選別精度、選別プロセスにおけるマテリアルフローとマテリアルバランスの評価を行う。実証施工後には、載荷試験による地盤支持力の計測、定期的なコアサンプリングによる固化体の耐久性調査、水収支等の水文調査、表流水および浸出水の水質分析とともに、固化式処分場周辺の環境モニタリングを開始する。

3年度目は、2年度目の実証施工後に開始した各種モニタリングを継続する。十分なデータが蓄積されたことを確認の上、実証固化式処分場を解体撤去する。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### 5-1-1. 実証施工の前提条件

実証施工する固化式処分の処理能力を実規模の1/10（焼却残渣の湿潤質量5t/日）に設定した。埋立期間を約2週間としてマテリアルフローから埋立容量を約25m<sup>3</sup>とした。構造検討では以下を考慮した。

- ・プロトタイプの振動締固め機の施工性等を考慮して埋立層厚は1mに設定する。
- ・最終処分場の構造基準に準じて遮水工、集排水設備、堅型ガス抜き管を設置する。
- ・固化式埋立層が実質、不透水層であること実証するため表流水と浸出水は別系統で集排水する。

#### 5-1-2. 運用試験

実証施工の規模に応じた処分システムを検討するため、焼却残渣の選別処理、混練、固化式埋立の各プロセスに必要な機材の運用試験を稼働中の実埋立地内（実証施工と同じ場所）で実施した。

選定した主要機材を表-0.1に、運用試験の手順を図-0.1に示す。まず、焼却灰とキレート処理済み飛灰（いずれも40mmふるい下）を西部工場で採取し性状を調べ、室内配合試験を実施して固化式処分の配合選定を行った。ただし今回の焼却残渣は水分量がかなり多い特異な事例であった。既往研究<sup>1)</sup>に基づいて設定した配合条件（焼却灰と飛灰の乾燥質量混合比3:1、セメントの乾燥質量内割添加量10%）では水分量が多過ぎて、そのままでは所定の強度が発現しない。そこで特に含水比が大きかった飛灰の混合割合を減らして焼却灰：飛灰≒12:1に変更し、さらに水分調整用の混和材として乾燥粉体の石炭灰を用いた。主な試験結果を図-0.2に、選定した配合を表-0.2に示す。焼却灰の選別処理状況を図-0.3、図-0.4に示すが、現場配合（表-0.3）は選別後の焼却灰と飛灰を用いた室内振動締固め試験により決めた。

磁力選別では質量比5.4%の鉄分が除去され、ふるい選別では40mm以上の粗雑物が約20%除去された。約20tの焼却灰の選別に要した時間から算出した処理能力は、磁力選別が約25t/時間、ふるい選別が約12t/時間と、実処分場の搬入量約50t/日を即日処理可能である。混練は強制二軸ミキサで空練り30秒、加水後の本練り2分30秒とし、型枠内での振動締固めは、振動数は120Hzで約30秒の加振とした。固化式埋立の施工は、堅型ガス抜き管周辺、フィルター材（割栗石150mm）の法肩部分、二重遮水シート工直上の3種類の型枠模型内で実施し、約3週間後に型枠を解体し固化式埋立層の出来形等を確認した（図-0.5）。各部位での施工上の問題は特になく、締固め層厚は20cmが適切であると判断された。

表-0.1 運用試験で使用した主要機材

手順	機材の名称	仕様等
選別処理	磁力選別機	電磁石 Φ700mm, 0.7m <sup>3</sup> バックハウ装着
	回転式ふるい選別機	トロンメルバケット, スクリーン Φ930mm, 網目サイズ 40mm 回転数 最高45rpm, 0.7m <sup>3</sup> バックハウ装着
混練	強制二軸ミキサ	0.5m <sup>3</sup> , 回転数 28rpm, 重量 約2.2t
固化式埋立	振動締め機	振動板750×750mm, 振動数最大120Hz, 0.066m <sup>3</sup> バックハウ装着

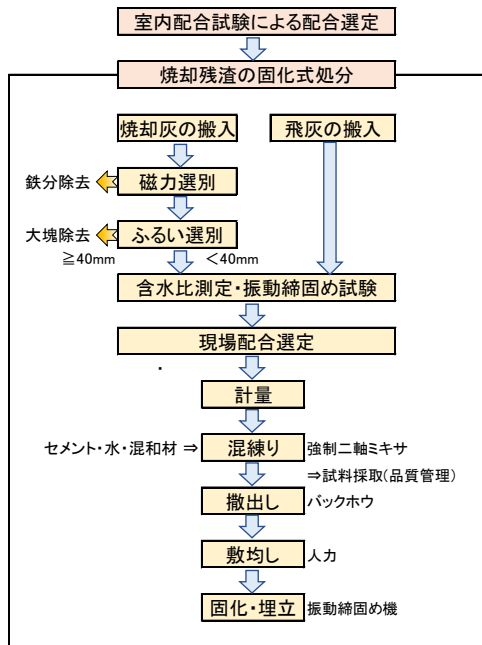


図-0.1 運用試験の実施手順

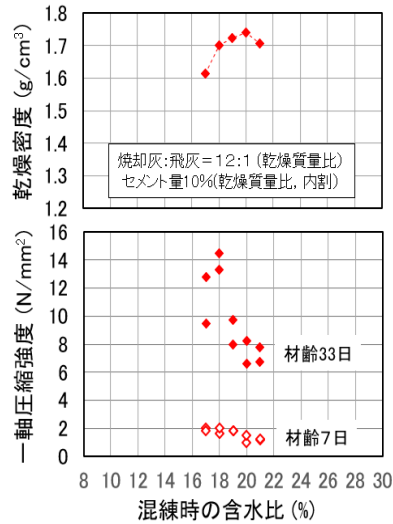


図-0.2 施工前の室内配合試験の結果

表-0.2 施工前の室内配合試験による配合選定結果

乾燥質量比 (%)			固化体含水比 の目安 (%)	混和材の添加量 [石炭灰: JIS仕様]
焼却灰	飛灰	セメント		
83.1	6.9	10.0	20	焼却残渣の含水比に応じて設定



図-0.3 磁力選別の施工状況



図-0.4 ふるい選別の施工状況

表-0.3 固化体の現場配合

	焼却灰	飛灰	石炭灰	セメント	水
灰の含水比(%)	23.7	56.4	—	—	—
乾燥質量比(%)	69.2	5.8	15.0	10.0	—
湿潤重量(kg/m <sup>3</sup> )	1,517	159	155	172	0

含水比 20%、固化体の想定乾燥密度 1.7g/cm<sup>3</sup>



ガス抜き管周辺模型



フィルター材法肩模型



二重遮水シート工の直上模型



ケースC(層厚10cm+30cm)

図-0.5 型枠模型での振動締め状況と出来形確認

### 5-1-3. 基本設計

前述の前提条件、運用試験を踏まえ、埋立容量 $25\text{m}^3$ の固化式処分場の基本設計を行った（図-0.6）。

処分場の形状は、振動締め機（ミニバックホウに搭載した振動板）の作業半径等も考慮して、底面が $3\text{m}\times 8\text{m}$ の長方形で埋立層厚は $1\text{m}$ とし、外周3辺はL型擁壁を用いた直立壁とした。1年間のモニタリング用設備も設置し、埋立完了後に最終覆土 $20\text{cm}$ を敷設し埋立層表層の劣化抑止効果等も確認する。

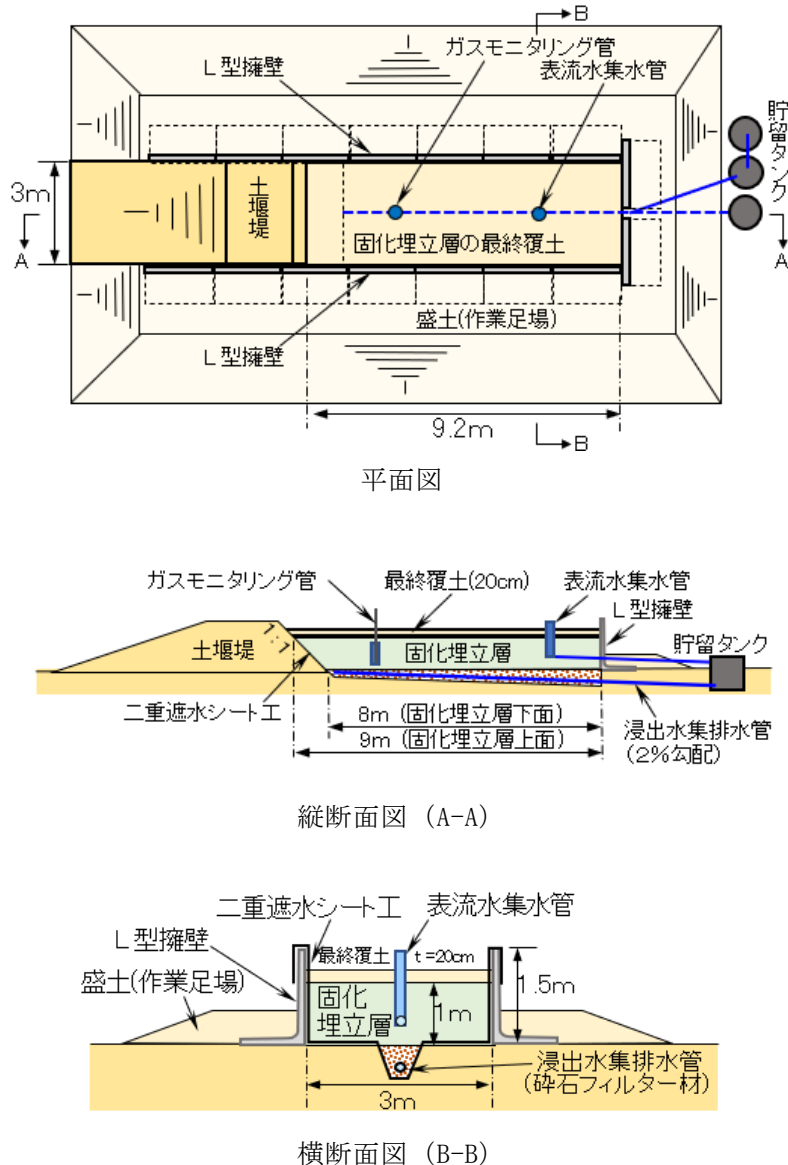


図-0.6 模擬処分場の設計図

### 5-1-4. 実証施工

#### (1) 詳細設計

実証施工する固化式処分場の詳細設計では、現地の日最大降水量（ $280\text{mm}/\text{日}$ 、前原、1991年）も考慮して集排水設備を設置した。また、浸出水 $\approx 0$ を実証するため、埋立層の外周面から雨水が浸透しないように二重遮水シート工の最上面には不透水性保護マット（アスファルト含浸シート、厚さ $4\text{mm}$ ）を使用した。

#### (2) 施工手順

実証施工の手順を図-0.7に示すが、使用機材および施工手順は運用試験と同一である。

焼却残渣は運用試験で使用した西部工場のものではなく、既往研究<sup>1)</sup>でも使用した臨海工場の焼却灰と飛灰を乾燥質量比 $3:1$ で使用し、セメント添加量は乾燥質量比 $10\%$ （内割）とした。

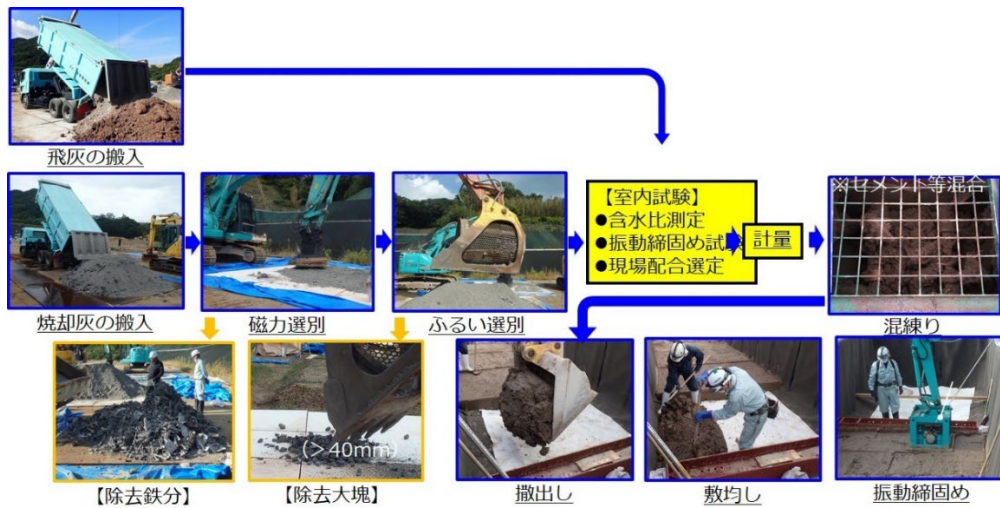


図-0.7 固化式処分の施工手順

(3) 事前の配合選定

焼却残渣を事前に臨海工場で採取し（2021年9月17日、<40mm）、焼却残渣の物理・化学試験や成分分析、固化体の室内配合試験（振動締固め試験および一軸圧縮試験）を実施して、固化式処分に適した配合条件を選定した。

表-0.4 事前検討で選定した配合条件

項目		配合等				固化体
		焼却灰	飛灰	セメント	水	
示方配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	乾燥質量	乾燥質量	148	414	合計
		999	333			1,894
現場配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	湿潤質量	湿潤質量	148	82	合計
		1,265	399			1,894

(4) 選別処理

焼却灰の選別処理では鉄分5.1%と40mmオーバーの大塊が14.5%除去された（表-0.5、図-0.8）。

表-0.5 焼却灰の選別処理結果

受入れ量	選別除去量		選別後の 焼却灰
	鉄分	>40mm	
54.20 t (6車)	2.76 t (5.1%)	7.86 t (14.5%)	43.58 t (80.4%)



図-0.8 焼却残渣のふるい選別後のサンプル

(5) 現場配合選定

現場での室内振動締固め試験（図-0.9）に基づき、複数の配合候補（表-0.6）を準備した。

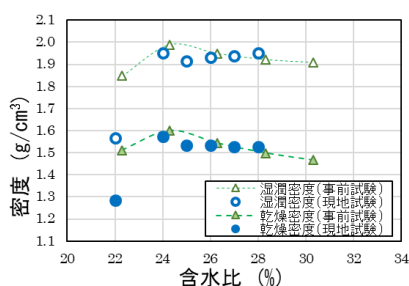


図-0.9 室内振動締固め試験結果

表-0.6 現場配合の候補例

焼却残渣の含水比		混練時 含水比 設定(%)	配合 (kg /バッチ)			
焼却灰	飛灰		水	焼却灰	飛灰	セメント
24.0 (選別後)	21.6 (搬入時)	25	20	418	137	50
		26	25			
		27	30			
		28	35			



(6) 固化式埋立

固化式埋立は、ミキサ混練3バッチ分（約1m<sup>3</sup>、幅約3m×長さ1.7m×層厚20cm）を標準的な施工単位として、埋立範囲を仕切ってして施工した（図-0.10）。日々の施工・品質管理では、混練後の埋立材料をΦ10cm×h20cmのモールドに採取しテーブルバイブレーターで締固めて締固め密度を求めた（図-0.11）。また、所定の材齢で一軸圧縮試験、透水試験、溶出試験を行い、目標値の達成を確認した。後述するモニタリング用コアボーリングで得た試料の試験とおm比較し同等の結果が得られていることを確認した。

固化式埋立による減容効果については、従来式との比較により埋立容量の消費を29%削減（図-0.12）でき、埋立地の延命化に寄与することが確認できた（既往研究<sup>1)</sup>のパイロット施工試験では23%の削減）。

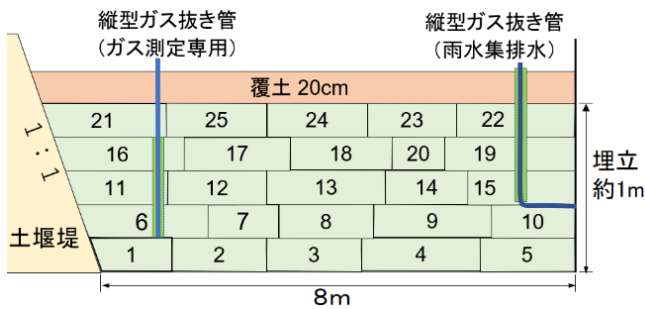


図-0.10 固化式埋立の仕切り施工の概要（縦断面）

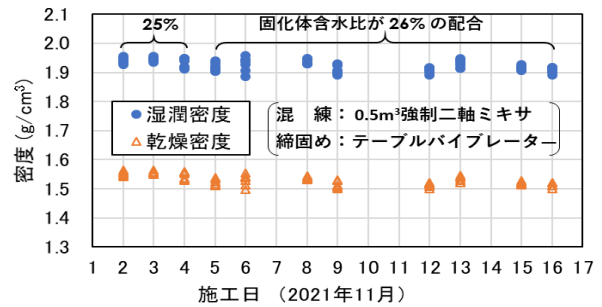


図-0.11 モールド採取試料の密度測定結果

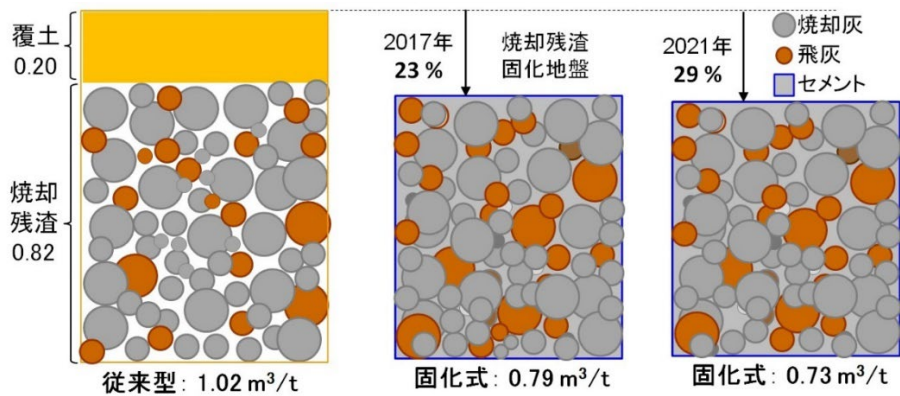


図-0.12 固化式処分システムによる減容効果

### 5-1-5. 耐久性と環境安全性のモニタリング

#### (1) 水収支、水質、ガス

図-0.13に水収支の計測データとして、360日間の積算降雨量、積算浸出水量、積算表流量を示す。積算降雨量に対する積算浸出水量、積算表流量の割合はそれぞれ、0.1%、27.5%であった。固化地盤が実質不透水層である固化式処分場において浸出水はほとんど発生しないことが実証された。わずかに発生した浸出水は、固化地盤内を浸透したものではなく、固化地盤と遮水工の境界を浸透したものと考えられる。降水量の27.5%が表流水として発生し、72.4%は蒸発するという結果となった。覆土を設けたことで、雨水の一部は覆土に保水され、覆土から蒸発したと考えられる。覆土の保水性と蒸発により、表流水の発生が抑制されることが示された。なお、前記の蒸発量は降水量から表流量および浸出水量を引いて求めたものである。蒸発量の算定式として広く用いられているペマン式を用いて気象観測データから蒸発量を算出した。その結果を図-0.13中に示す。ペマン式により求めた積算蒸発量は積算降水量の77%となり、前記の蒸発率72.4%は妥当なものであることが確認された。

図-0.14に360日間の表流水のpHおよび鉛(Pb)濃度を示す。プロットは表流水の水質、実線は積算表流量、緑の網掛けおよび赤の破線は放流水質基準値を示す。pHは22~43日目以降、放流水質基準(5.8 $\leq$ pH $\leq$ 8.6)を満足した。重金属濃度についてはここでは鉛のみを示しているが、鉛を始めとする重金属濃度は、実験開始時から放流水質基準値を大きく下回る値を示した。固化式処分場は埋立終了後速やかに水質に関する廃止基準を満足することができると考えられる。

図-0.15に335~365日目の31日間ガスモニタリング管の上端を密閉して計測したガスモニタリング管内のガス組成の経時変化を示す。従来型処分場における埋立ガスの主成分であるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の濃度は定量下限値以下であり、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の発生は認められなかった。H<sub>2</sub>の濃度は、計測開始時は定量下限値以下であったが、計測開始から16日目で1%に達し、その後1%を維持した。ガスモニタリング管の上端を密閉した状態で水素の濃度が1%で頭打ちになったことは、固化地盤内の水素濃度が1%程度であることを示唆するものと考えられる。水素ガスは固化式処分された焼却灰に含まれていた金属アルミニウムが固化式処分された焼却残渣に含まれるアルカリ性を示す水と反応することで発生したものと考えられるが、施工から1年経過した固化地盤においては、水素ガス濃度は爆発下限界(4%)を大きく下回ることが確認された。このことから埋立終了後1年程度経過すれば、発生ガスは環境安全なものになることが示された。

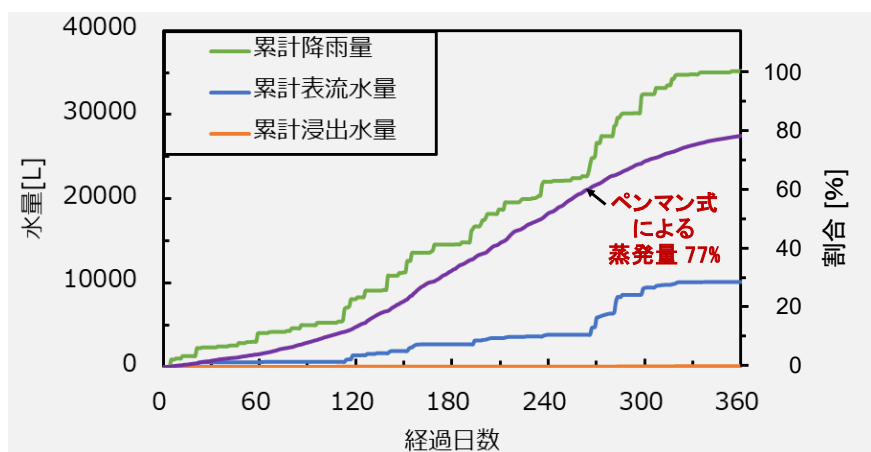


図-0.13 固化式処分場の水収支

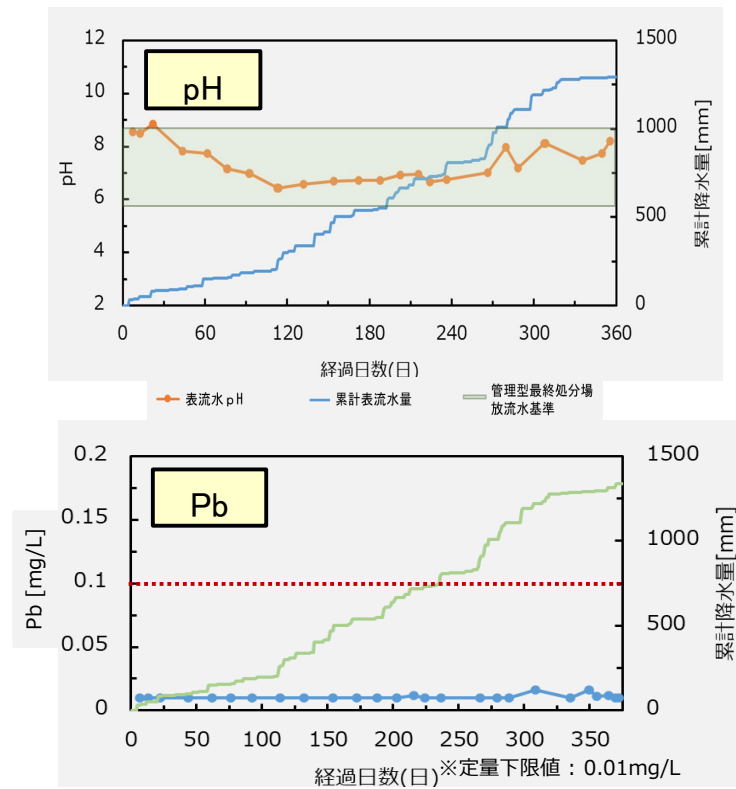


図-0.14 表流水のpH、Pb濃度

(プロット：表流水の水質、実線：積算表流量、緑の網掛けおよび赤の破線：放流水質基準値)

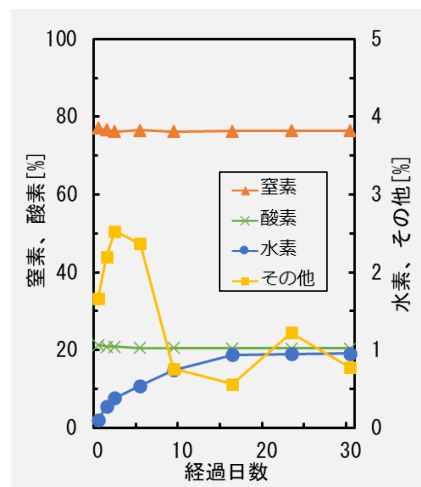


図-0.15 ガス組成

(335～365日目の31日間、ガスモニタリング管の上端を密閉して計測)

(2) 埋立層内部の温度 (IoT無線センサの適用性)

図-0.16に固化式処分場のIoTモニタリングシステム、図-0.17にIoTモニタリングで得られた内部温度データを示す。模擬固化式埋立地に埋設した小型低周波無線送信機から1年以上に亘り、埋立地内部の温度データを受信することができた。

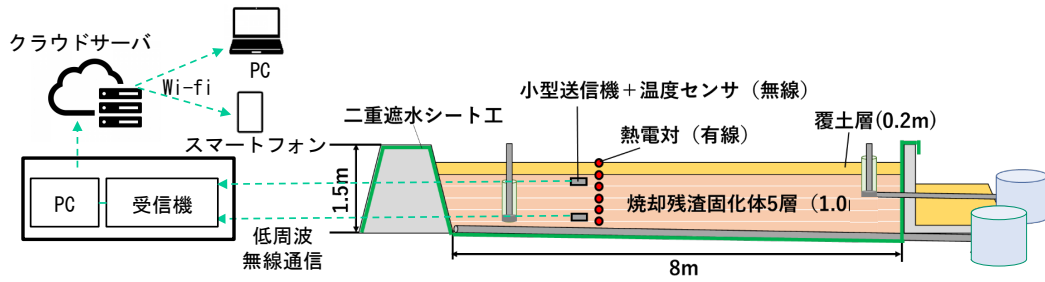


図-0.16 固化式処分場のIoTモニタリングシステム

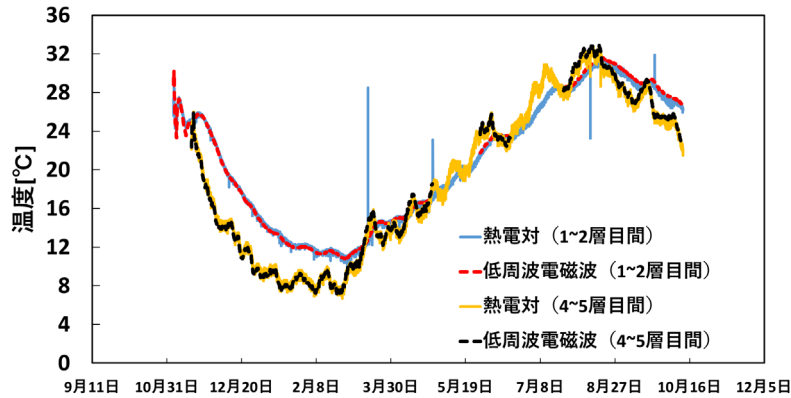


図-0.17 IoTモニタリングで得られた内部温度データ

(3) 埋立層の耐久性等

(i) 埋立層の品質 (ボーリングコア採取)

実証施工の固化式埋立の完了から約28日後、約91日後、約1年後の3回、内径100mmのコアボーリングを実施した。採取した長さ80cmまたは100cmのボーリングコアは、締固め施工時の層厚20cm毎に切断してから一軸圧縮試験、透水試験、溶出試験を実施した。ボーリングコアは大半が水平方向の打継目で分離することなく採取することができ、水平方向の打継はほぼ一体化していると考えられる。

一軸圧縮強度は図-0.18に示すように材齢によって増加しており、約40日では平均値が約5N/mm<sup>2</sup>であったが1年後には全ての試料で目標強度5N/mm<sup>2</sup>を上回った。1年後の試料の含水比は17%~23%程度で、乾燥密度は1.50~1.66g/cm<sup>3</sup>程度であった。

透水係数は、図-0.19に示すように全データが目標とする10<sup>-7</sup>cm/sオーダー以下をほぼ達成している。鉛、六価クロム、セレン、ふっ素の溶出濃度は、図-0.20に示すように環境基準値も下回っている。

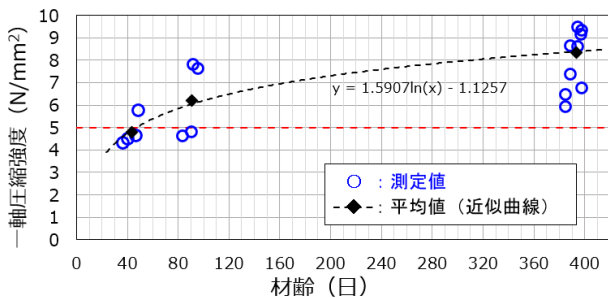


図-0.18 コア採取試料の材齢と一軸圧縮強度の関係

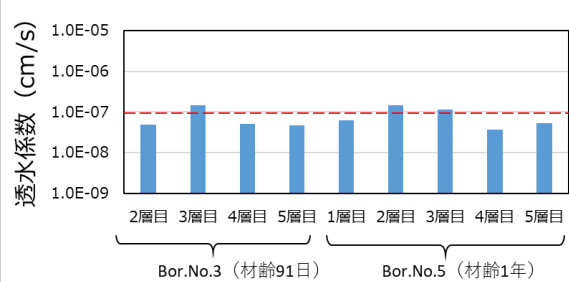


図-0.19 コア採取試料の透水試験結果

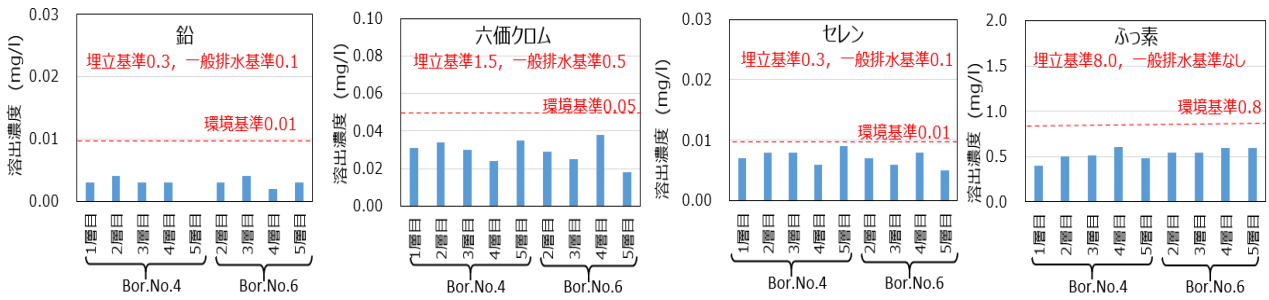


図-0.20 施工1年後のコア採取試料の溶出試験結果（環境省告示46号、2mm粉碎）

(ii) 埋立層の支持力

1年後に最終覆土を撤去して、動的平板載荷試験（小型FWD試験）を実施した。FDW試験とは重錘を自由落下させて衝撃荷重を発生させて載荷点直下のたわみ量を測定し、変位量と載荷応力の関係から得られた地盤反力係数 $K_{p, FWD}$ から、平板載荷試験の地盤反力係数 $K_{30}$ が推定できる。図-0.21に試験装置の概要、図-0.22に試験の実施状況、図-0.23に試験結果を示す。なお、礫質土を締固めた地盤でのFWD測定例<sup>2)</sup>では $K_{p, FWD}$ が1400 MN/m<sup>3</sup>以下で $K_{30}$ が700 MN/m<sup>3</sup>以下であるのに対し、今回の測定結果は大半がその値を上回っており、固化式埋立地盤の支持力の高さが確認できた。

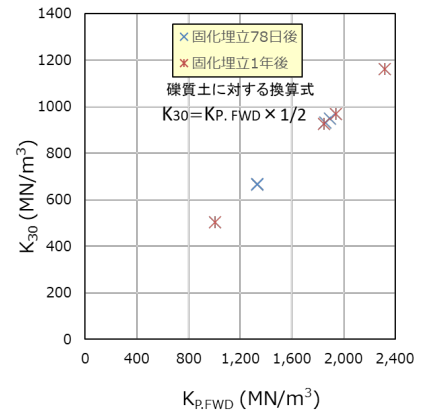
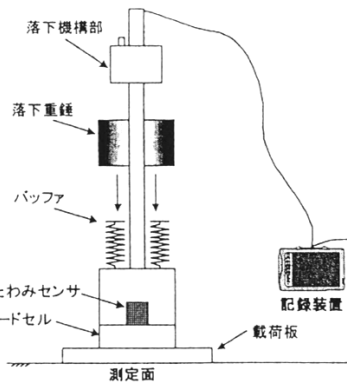


図-0.21 小型FWD試験機のご概念図 図-0.22 小型FWD試験の実施状況 図-0.23 小型FWD試験の結果

(iii) 埋立層表面の状態

施工1年後の固化式埋立層表面の状態を目視確認したが、クラックやポップアウトの発生は認められず健全な状態が保たれていた（図-0.22、図-0.24）。また、表層劣化の調査として低強度シュミットハンマー測定を行った。反発硬度から換算した円柱体圧縮強度（図-0.24）は、ボーリング採取コアの一軸圧縮強度に比べて大きめであるが、1点を除き10N/mm<sup>2</sup>以上であり表層劣化は生じていないと考えられる。

固化式処分場の横で実施した長期暴露試験（図-0.25）でも、覆土20 cmを敷設すれば1年後も表層劣化の兆候はみられなかった。

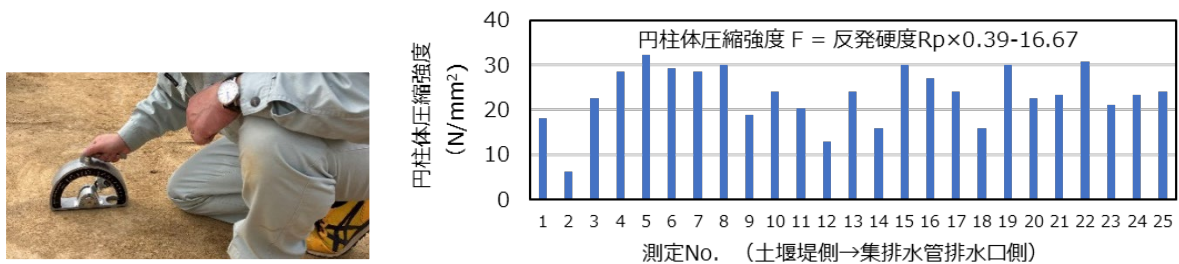


図-0.24 低強度シュミットハンマーの測定状況と測定結果

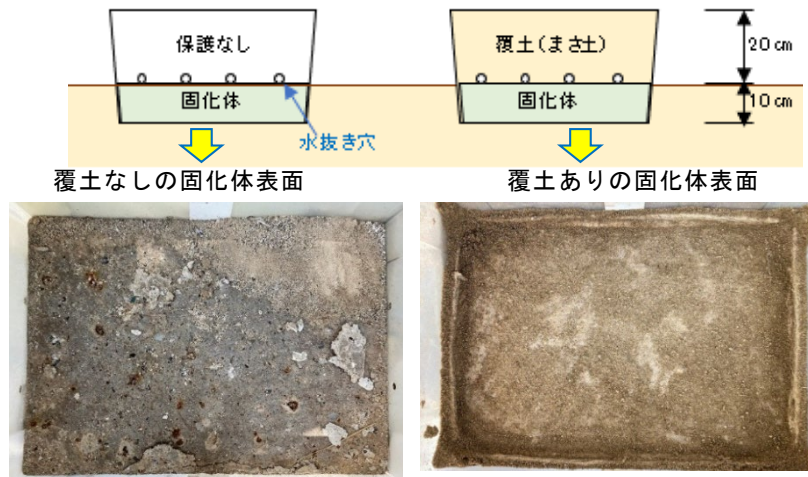


図-0.25 長期暴露試験の固化体表面観察状況（32cm×45cmプラスチックケース内、10ヶ月後）

#### (iv) 水みち調査

透水試験結果（図-0.19）から焼却残渣固化体の透水係数は不透水層相当であることが確認できたが、二重遮水シート工との境界部や鉛直打継目が水みちとなる懸念がある。そこで、固化式処分場の解体撤去時に、簡易なトレーサー試験（赤色ローダミン水溶液の浸透試験）を実施した。二重遮水シート工（上面のアスファルト含浸シート）との境界部に対しては、境界面の隙間に注射器を差し込んでトレーサーを注入し、模擬処分場の解体撤去時に遮水シート工を剥がしてトレーサーの浸透状態を調べた。鉛直打継目に対しては、 $\Phi 4\text{cm}$ のボーリング孔内にトレーサー入れ、翌日 $\Phi 15\text{m}$ のオーバーコアリングを行い、採取したコアを切断し鉛直打継目への浸透の有無を目視確認した（図-0.26）。いずれもトレーサーの浸透は確認されず、水みちの発生していないと判断した。ただし、埋立層の乾燥収縮が進行すれば打継目等開いて水みちとなる可能性もあるので、湿潤状態を保つ配慮が必要になると考えられる。

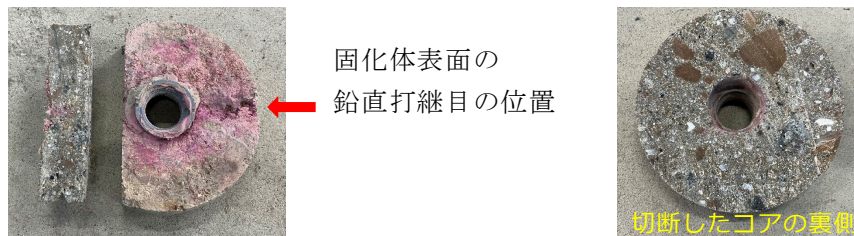


図-0.26 鉛直打継目のトレーサー孔のオーバーコアリング試料の切断後の目視観察

#### 5-1-6. 経済性の評価

本研究で実施した基本設計、実証施工、各種モニタリングの結果を踏まえ、固化式処分場のライフサイクルコストを計算し、従来型処分場との比較評価を行なった。従来型処分場と固化式処分場の相違点は、固化式処分場ではバッチャープラントの設置が必要であること、埋立方法が異なること、浸出水ではなく表流水の水処理を行うことが挙げられる。また、高度な跡地利用を想定した場合には、従来型では地盤改良を行う必要があるが、強固な地盤を形成する固化式処分場では地盤改良の必要がない。計算では、供用期間を20年と想定し、焼却残渣埋立処分量が10万tと100万tの2ケースを設定した。埋立終了から処分場の廃止までの維持管理期間は従来型で15年、固化式で3年と設定した。

図-0.27に従来型処分場と固化式処分場のライフサイクルコストの計算結果を示す。縦軸は埋立廃棄物1tあたりのライフサイクルコストである。固化式処分を適用することによって、ライフサイクルコストは埋立量10万t規模では2.0%削減、100万t規模では17.6%削減されることが確認された。固化式処分を適用することでコストの増加をもたらす主な項目は、バッチャープラント設備工事費、重機購入費、人件費、セメント及び水の購入費であった。コストの低減をもたらす項目は、水処理施設建設費（設備の簡素化による）、水処理費（維持管理期間の大幅な短縮による）

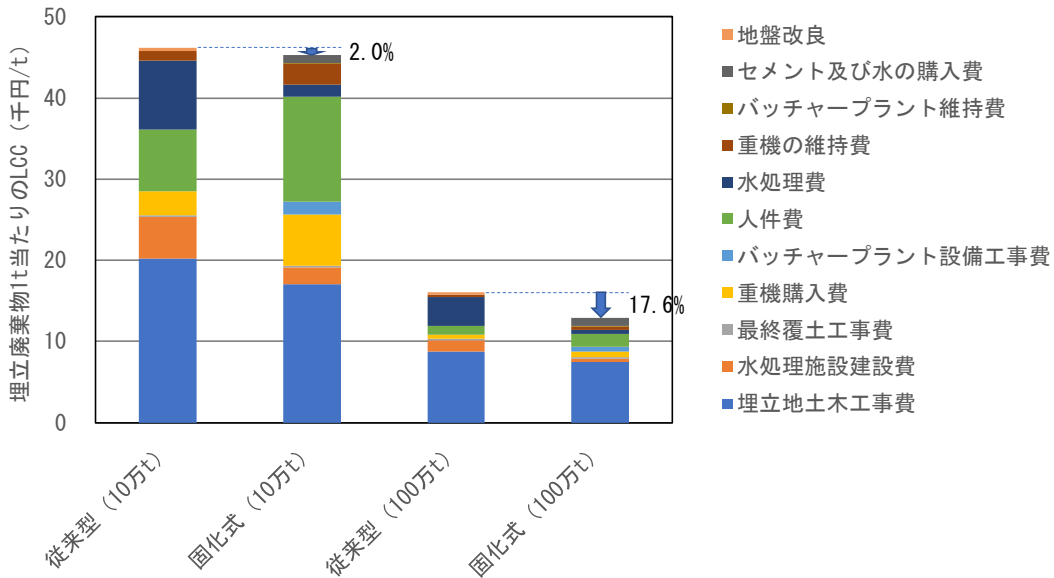


図-0.27 従来型処分と固化式処分のライフサイクルコストの比較

5-1-7. 設計施工指針案

固化式処分システムによる最終処分場建設に関する設計施工指針案は、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準じて、今回の実証施工の結果や既往研究成果も踏まえて内容を検討した。表-0.28に従来型の最終処分場との比較した指針の目次案を示す。なお、指針案の概要は、II. 成果の詳細（3-8. 設計施工指針案）に示す。

表-0.28 固化式処分場の設計施工指針案の従来型との比較

<p>従来型</p>	<p>固化式</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・中間覆土は不要</li> <li>・ガス抜き管は最小限</li> <li>・空気供給は不要</li> <li>・浸出水 ≒ 0</li> <li>・雨水はほぼ表流水に</li> </ul>
<p>&lt;目次&gt;</p> <p>設計要領</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 最終処分場の構造と形態</li> <li>2. 固化式処分場内施設配置と造成</li> <li>3. 貯留構造物</li> <li>4. 地下水集排水施設</li> <li>5. 遮水工</li> <li>6. 雨水集排水施設</li> <li>7. 浸出水集排水施設</li> <li>8. 浸出水処理施設</li> <li>9. 埋立ガス処理施設</li> <li>10. 被覆施設</li> <li>11. 管理施設</li> <li>12. 関係施設</li> </ol> <p>管理要領</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 最終処分場における管理</li> <li>2. 廃棄物の搬入管理</li> <li>3. 施設管理</li> <li>4. 埋立作業管理</li> <li>5. 環境管理</li> <li>6. 埋立終了後または跡地の管理</li> <li>7. 再生工法</li> </ol>	<p>&lt;目次(案)&gt;</p> <p>設計編</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 最終処分場の構造と形態 (埋立層の不透水性を考慮)</li> <li>2. 固化式処分場内施設配置と造成</li> <li>3. 貯留構造物</li> <li>4. 地下水集排水施設</li> <li>5. 遮水工 (上面保護材に不透水性材を検討)</li> <li>6. 雨水集排水施設 (雨水のほぼ全量が表流水)</li> <li>7. 浸出水集排水施設 (浸出水 ≒ 0を考慮)</li> <li>8. 表流水・浸出水処理施設 (水処理は簡素化)</li> <li>9. 埋立ガス処理施設 (簡素化)</li> <li>10. 被覆施設 (基本的には不要)</li> <li>11. 管理施設 (選別処理・混練施設を設置)</li> <li>12. 関係施設</li> </ol> <p>施工編</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 最終処分場における管理</li> <li>2. 廃棄物の搬入管理</li> <li>3. 施設管理</li> <li>4. 埋立作業管理 (固化式埋立の手順を記載)</li> <li>5. 環境管理</li> <li>6. 埋立終了後または跡地の管理 (固化式は早期廃止が可能)</li> </ol>

## 引用文献

- 1) 島岡隆行：震災からの迅速な復旧のためのレジリエントな最終処分場の実用化，平成29～令和元年度環境研究総合推進費終了研究成果報告書，2020
- 2) 更谷聡彦，木幡行宏，山本健一，斉藤昌之：小型FWD試験による礫質土地盤の剛性評価，土木学会第63回年次学術講演会，2008

## 5－2．環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究の主重点課題は、「⑩社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発」であり、具体的な貢献内容として以下があげられる。

固化式処分システムにより新たに創出される強固な固化地盤により、大地震や気候変動の影響による水害の頻発化・激甚化にも機能し続ける強靱な廃棄物処分場となる。また、固化地盤内には環境安全性と高度な跡地利用を保障するための各種センサが埋設されて無線通信等によりインターネットで情報管理がなされる。IoT、AI等のICT技術の活用により、施設の安全性向上、高度な埋立地盤の品質管理等を達成する。さらに、固化式処分システムは、環境安全性の向上、跡地利用便益の向上等の理由から、従来の廃棄物処理システムと比較して社会的受容性を向上させる効果があり、住民とのリスクコミュニケーションや社会・経済的側面も考慮した課題解決に貢献する。

将来、本研究成果は、従来の準好気性埋立工法とは全く異なる埋立工法の一つとして、新規建設される最終処分場の技術選定において有力な候補技術の一つとして検討がなされるようになる。現在、我が国には一般廃棄物最終処分場が1,679施設（2018年度、維持管理期間中を含む）、産業廃棄物最終処分場が1,783施設（2017年度）存在する。埋立期間が満了し、次期処分場の建設を計画する際には、本技術も候補として検討される。したがって、本技術が実用化された場合、その潜在的市場規模は計り知れない。



## 5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>本研究では、これまでに実施してきた供試体を用いた室内での基礎実験、大型土槽によるパイロット試験の成果に基づき、実際の埋立地において固化式処分システムの実証施工、耐久性と環境安全性のモニタリングを実施する。最終的な目標は、</p> <p>(1) 日々刻々と変化する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理及び配合システムの構築</p> <p>(2) 日々搬入される大量の焼却残渣を効率的に処分できる高い施工性、地盤改良なしで構造物を設置できる強固な埋立地盤特性、埋立地の延命化のための減容効果の実証</p> <p>(3) 長期的な耐久性を有する埋立地盤、浸出水中の重金属等有害物質濃度を放流水質基準以下とする環境安全性の実証</p> <p>(4) 従来 of 最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコストでの建設、運用が可能で高い経済性の確認を行うことである。</p>	<p><u>自己評価：目標どおりの成果をあげた。</u> (具体的な理由・根拠)</p> <p>以下のように各目標を達成する成果をあげたため。</p> <p><u>目標(1) 柔軟な前処理及び配合システムの構築</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・焼却残渣の日単位の性状変化に対応可能な前処理(磁力選別および篩選別)並びに配合決定(振動締め試験)のシステムを構築した。</li> </ul> <p><u>目標(2) 高い施工性、強固な埋立地盤特性、減容効果の実証</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開発目標の処理能力(5 t/日)で施工できることを実証した。</li> <li>・埋立地盤は開発目標を達成した(一軸圧縮強度<math>\geq 5 \text{ N/mm}^2</math>、有害物質溶出濃度<math>\leq</math>放流水質基準、減容効果<math>\geq 20 \%</math>)。</li> </ul> <p><u>目標(3) 埋立地盤の長期的な耐久性、浸出水水質の環境安全性の実証</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・浸出水はほとんど発生しないこと、表流水の水質は開発目標を達成すること(放流水質基準を満足)を実証した。</li> <li>・1年後のコア採取、解体調査により埋立地盤の長期的な耐久性を実証した(強度は材齢と共に増加、表層劣化もなく堅固な支持力)。</li> </ul> <p><u>目標(4) 従来 of 最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコスト</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・固化式処分は従来型に比べて高い経済性を有することが確認された。</li> </ul>

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

0件

<主な査読付き論文>

特に記載すべき事項はない。

### 6-2. 知的財産権

- 1) 三反畑勇、弘末文紀、笠博義、島岡隆行；「焼却残渣処分場、焼却残渣処分方法」、特願2023-046551、令和5年3月23日

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	21件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	2件
本研究費の研究成果による受賞	1件
その他の成果発表	0件

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

研究代表者

島岡 隆行

九州大学大学院工学研究科水工土木工学専攻博士後期課程単位取得退学、工学博士、現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門教授

研究分担者

- 1) 中山 裕文

九州大学大学院工学研究科都市環境システム工学専攻博士後期課程単位取得退学、博士（工学）、現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門准教授

- 2) 小宮 哲平

九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻博士後期課程修了、博士（工学）、現在、九州大学大学院工学研究院環境社会部門助教

- 3) 弘末 文紀

京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了、工学修士、

現在、株式会社安藤・間建設本部技術研究所所長

4) 三反畑 勇

京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了、工学修士、

現在、株式会社安藤・間建設本部技術研究所土木研究部主席研究員

## II. 成果の詳細

### 〔要旨〕

本研究の目的は、実際の埋立地において実規模で固化式処分システムの有効性を実証し、社会実装への確実な道筋をつけることである。最終的な目標は、(1) 日々刻々と変化する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理及び配合システムの構築、(2) 日々搬入される大量の焼却残渣を効率的に処分できる高い施工性、地盤改良なしで構造物を設置できる強固な埋立地盤特性、埋立地の延命化のための減容効果の実証、(3) 長期的な耐久性を有する埋立地盤、浸出水中の重金属等有害物質濃度を放流水質基準以下とする環境安全性の実証、(4) 従来最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコストでの建設、運用が可能な高い経済性の確認を行うことである。本研究で得られた成果を以下のa)～f)に示す。a)焼却残渣の日単位の性状変化に対応可能な前処理（磁力選別および篩選別）並びに配合決定（振動締め試験）のシステムを構築した。b)開発目標の処理能力（5 t/日）で施工できることを実証した。c)埋立地盤は開発目標を達成した（一軸圧縮強度 $\geq 5 \text{ N/mm}^2$ 、有害物質溶出濃度 $\leq$ 放流水質基準、減容効果 $\geq 20\%$ ）。d)浸出水はほとんど発生しないこと、表流水の水質は開発目標を達成すること（放流水質基準を満足）を実証した。e)1年後のコア採取、解体調査により埋立地盤の長期的な耐久性を実証した（強度は材齢と共に増加、表層劣化もなく堅固な支持力）。f)固化式処分は従来型に比べて高い経済性を有することが確認された。さらに固化式処分システムの設計施工指針案を提示した。

### 1. 研究開発目的

本研究では、これまで、2014～2016年度環境総合研究推進費「巨大地震に耐えうる環境安全で堅牢な最終処分場の新技術開発に関する研究」により基礎実験を終え、2017年度～2019年度環境総合研究推進費「震災からの迅速復旧のためのレジリエントな最終処分場の実用化研究開発」の支援を受けてパイロットスケールの実験を実施した。本研究の目的は、研究の最終段階として実際の埋立地において実規模で固化式処分システムの有効性を実証し、社会実装への確実な道筋をつけることを目的とする。「固化式処分システム」とは、焼却残渣を高周波振動による超流体工法で固化しながら固化体として処分していくことにより、(1)強固な埋立地盤による高い耐震性を有し、(2)埋立廃棄物の減容化により処分容量が増量し、(3)雨水浸透の排除と有害物質の溶出低減により閉鎖から廃止までの期間が短縮し、(4)維持管理費が低減でき、(5)跡地も早期かつ高度に利用できる廃棄物処分システムである。災害発生時には固化式処分場は地盤改良をすることなく、直ちに災害廃棄物の選別施設や仮設焼却炉の設置用地となり、(6)災害に対してレジリエントな廃棄物処理システムとして迅速な復旧・復興に貢献する。

### 2. 研究目標

本研究では、これまでに実施してきた供試体を用いた室内での基礎実験、大型土槽によるパイロット試験の成果に基づき、実際の埋立地において固化式処分システムの実証施工、耐久性と環境安全性のモニタリングを実施する。最終的な目標は、

- (1) 日々刻々と変化する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理及び配合システムの構築
- (2) 日々搬入される大量の焼却残渣を効率的に処分できる高い施工性、地盤改良なしで構造物を設置できる強固な埋立地盤特性、埋立地の延命化のための減容効果の実証
- (3) 長期的な耐久性を有する埋立地盤、浸出水中の重金属等有害物質濃度を放流水質基準以下とする環境安全性の実証
- (4) 従来最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコストでの建設、運用が可能な高い経済性の確認を行うことである。

### 3. 研究開発内容

#### 3-1. 実証施工の前提条件

実証施工する固化式処分場の規模や構造および施工に用いる機材等を決めるための「前提条件」は以下に示す方針に基づいて設定した。

- ① 焼却残渣の処理能力は、実処分場（実証施工を行う中田処分場での焼却残渣の平均的な1日当たり処理量は約50t）の1/10（焼却残渣の湿潤質量で5t/日）とする。
- ② 実証施工における埋立作業期間は2週間程度とする。
- ③ 固化式処分場（模擬処分場）の埋立容量は、埋立てる焼却残渣の量を処理能力（5t/日）×作業日数（10日）=50t程度として、固化処理システムのプロセス（焼却残渣の選別処理、セメントと水を加えて混練、振動締固め）を考慮したマテリアルフローを試算して決める。
- ④ 遮水工、表流水集排水設備、浸出水集排水設備、ガス抜き管等は、最終処分場の構造基準に準じて最小限必要のものを設置する。
- ⑤ 浸出水集排水設備については、固化式埋立層を浸透してくる浸出水の発生量がほぼゼロであることが実証できるように配慮して設置する。
- ⑥ その他の研究目的を達成するため、必要に応じてモニタリング用のセンサ等を設置する。

#### 3-2. 運用試験

実証施工での固化式処分システムの処理能力を実規模の1/10（焼却残渣約5 t/日）と設定して、焼却残渣の選別処理（磁力選別、ふるい選別）、混練の各プロセスに必要な機材の運用試験を実施する。さらに、施工上の課題がありそうな部位を選定し、型枠内に実大模型を作製して固化式埋立の施工試験を行う。これらの一連の試験は以下の手順で実施する。

##### (1) 施工前の配合選定

運用試験に先立ち、試験場所である実処分場（中田埋立地）に実際に埋め立てられている焼却残渣を福岡市西部工場（以下、西部工場と呼ぶ）で採取し、物理化学的特性等を確認するための試験（表-3.2.1）を行う。そして、室内配合試験（表-3.2.2、表-3.2.3、図-3.2.1、図-3.2.2）を実施して一軸圧縮強度の目標値（ $\geq 5\text{N/mm}^2$ ）が発現する配合を選定する。なお、各種試験結果は、既往研究<sup>1)</sup>で用いた福岡市臨海工場（以下、臨海工場と呼ぶ）の焼却残渣の試験結果とも比較考察する。

##### (2) 運用試験

表-3.2.4に示す資機材を使用して実施する。試験場所の中田埋立地で受け入れた焼却灰は、まず磁力選別機で鉄分を除去した後、ミキサによる練混ぜに適した材料とするために網目40mmでのふるい選別を行う。その後、選別した焼却灰（ $< 40\text{mm}$ ）と飛灰の含水比を測定し、振動締固めの室内試験を実施して、事前に実施した室内配合試験の結果と比較検討し、必要に応じて配合修正を行って現場配合を決定する。決定した現場配合で各材料を計量し、強制二軸ミキサで練混ぜ（空練り30秒、加水後の本練り2分30秒）、型枠内模型の施工範囲内にバックホウで撒き出し、人力で均一に敷き均してからプロトタイプの振動締固め機を用いて締固める。締固め時の振動数は120Hzで加振時間は約30秒とする。

型枠内模型での施工試験を実施する部位としては、底部集排水管および堅型ガス抜き管の周囲に設置されるフィルター材（割栗石150mm）の周辺部を選定した（図-3.2.3参照）。フレッシュな固化体がフィルター材の空隙に侵入すると、目詰まりの発生他に、締固めが不十分な固化体による重金属類の溶出リスクが高くなる可能性もある。そこで、空隙の大きい割栗石の表面には、固化体の侵入を防止するために厚さ10mmの不織布を敷設する。堅型ガス抜き管周辺部の模型を図-3.2.4に、フィルター材法肩部の模型を図-3.2.5に示す。試験では、固化式埋立に適した振動締固め層厚を選定するために、型枠模型の底面から10cm、20cm、30cmの3層を施工し、各層の締固め前後の高さを測定して、締固めによる沈下量等を比較することで適切な振動締固め厚さを確認する。また、締固め時間の影響等を確認するために、堅型ガス抜き管周辺模型の層厚20cmと30cmの施工では振動締固め時間を60秒、90秒、210秒延長した部分を1か所ずつ設けた（図-3.2.5）。

上記のフィルター材周辺模型の他に、遮水シート工の直上で固化体を施工しても遮水シートに損傷を与えることがないことを確認するため、遮水シート工の直上部模型を3種類（ケースA：標準的な構造として最上面に通水性の高い不織布の保護マットを敷設、ケースB：最上面に通水性の低いアスファルト含浸シートを保護マットとして敷設、ケースC：最上面の保護マット無し）を作製して施工試験を行った（図-3.2.6）。アスファルト含浸シートを最上面に敷設するケースBは、焼却残渣固化体を実質不透水層であることから、埋立層内に保有水を発生させない構造とすることを意図した模型である。

施工完了から約3週間後に型枠を取り外し、外周面等の目視観察により出来形を確認する。また、固化体のボーリングコア（Φ5cm）を採取し、一軸圧縮試験、密度測定、透水試験、溶出試験を実施し、フィルター材からの距離や締固め層厚の違いが固化体品質に与える影響等についても検討する。

表-3.2.1 焼却残渣の性状確認の試験項目

試験項目		試験方法	数量
物理試験	粒度分布	JIS A 1204に準拠	焼却灰1
	粒子密度	ケロシン法*	焼却灰1、飛灰1
	含水比	JIS A 1203に準拠	焼却灰1、飛灰1
化学試験	熱しゃく減量	環整95号に準拠	焼却灰1、飛灰1
	成分分析	蛍光X線分析(XRF分析)	焼却灰1、飛灰1

\*地盤工学会「地盤材料の試験方法と解説」の湿潤密度測定に記載

表-3.2.2 室内試験の一覧

試験名	試験方法
振動締固め試験	室内ミキサ（容量15L～50L程度）で十分に混練した試料をモールドに入れてテーブルバイブレータで締め固め、混練時の含水比と乾燥密度の関係をグラフで表し、最大乾燥密度と最適含水比を求める。今回はΦ10×20cmのモールドを使用し、試料は締固め後の高さが約10cmになるように入れた。密度は締固め後の体積と質量を測定して求めた。最適含水比の求め方等は、突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）に準じた。
一軸圧縮試験	JIS A 1216に準拠、供試体寸法はΦ10cm×h20cm、密度測定
溶出試験	2mmふるい：環告46号、有姿：JIS K 0058-1
透水試験	JIS A 1218に準拠、材齢91日で実施

表-3.2.3 室内用縦型ミキサとテーブルバイブレータによる試料作製方法

名称	型式(メーカー)	主な仕様	試験試料の作製方法
室内用縦型ミキサ	MS-30/50S (愛工舎製作所)	30L練り ドラゴンフック	焼却残渣とセメントを110rpmで30秒空練りし水を加え179rpmで4分30秒の本練りを行う。
テーブルバイブレータ	TV500×500 (エクセン)	30～75Hz	モールド（Φ10cm×h20cm）に試料を入れ下面から75Hzの振動を3分間加えて締固める。



図-3.2.1 室内用縦型ミキサの概要

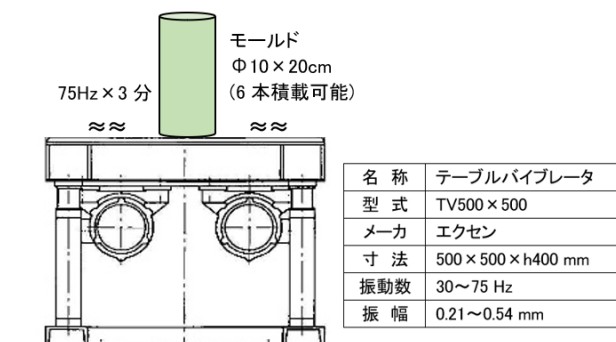


図-3.2.2 テーブルバイブレータの概要

表-3.2.4 主要資機材の一覧

手順等	資機材の名称	仕様等
型枠内 模型の 作製	フィルター材	割栗石 150mm
	堅型ガス抜き管	波型有孔管 Φ200mm, 高密度ポリエチレン樹脂
	保護マット	不織布, ポリエステル繊維, LN-1011, 厚さ10mm
	遮水シート	高密度ポリエチレンシート, 厚さ1.5mm, 引裂強さ $\geq 140\text{N}$
	アスファルト含浸シート	全層アスファルト含浸型, 厚さ4.0mm, 引張り強度 $\geq 100\text{N/cm}$
選別処理	磁力選別機	電磁石 Φ700mm, 0.7m <sup>3</sup> バックホウ装着
	ふるい選別機	トロンメルバケット, スクリーン Φ930mm, 網目サイズ 40mm 回転数 最高45rpm, 0.7m <sup>3</sup> バックホウ装着
	秤 (はかり)	クレーンスケール
混練	強制二軸ミキサ	0.5m <sup>3</sup> , 回転数 28rpm, 重量 約2.2t
	固化材	高炉セメントB種
	混和材	フライアッシュII種 (JIS), 使用目的は含水比調整
品質管理 供試体作製	室内用縦型ミキサ	MS-30/50S (愛工舎製作所)
	テーブルバイブレータ	TV500×500 (エクセン)
	モールド	サミット缶 Φ100×h200mm
	秤 (はかり)	電子天秤
埋立	振動締め機	振動板750×750mm, 振動数最大120Hz, 0.066m <sup>3</sup> バックホウ装着



図-3.2.3 従来型処分場の例 (底部集排水管及び堅型ガス抜き管周辺のフルター材設置状況)

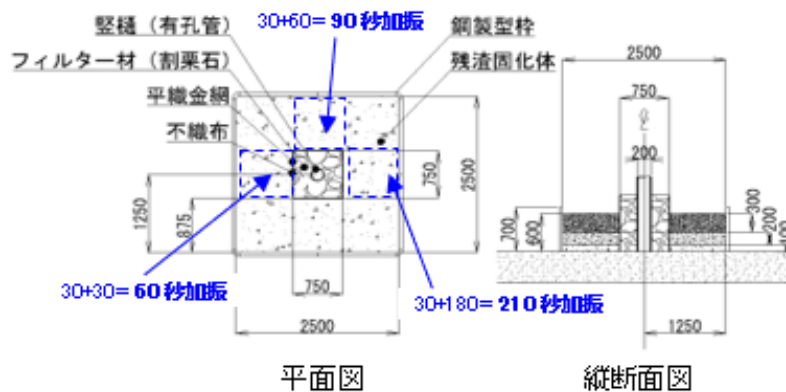


図-3.2.4 堅型ガス抜き管周辺部の実大模型 (固化体の施工層厚10cm+20cm+30cm=60cm)

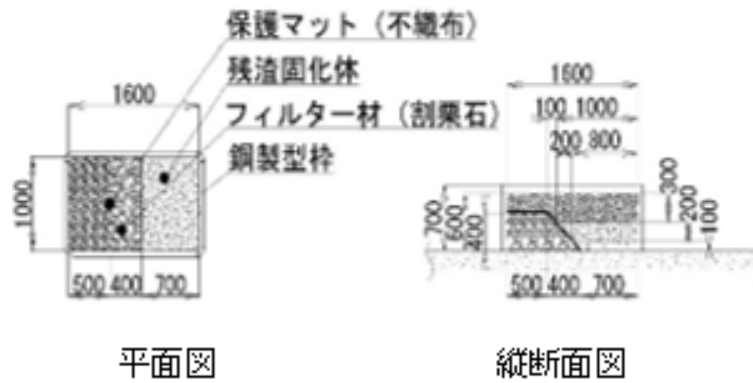


図-3.2.5 フィルター材法肩部の実大模型（固化体の施工層厚10cm+20cm+30cm=60cm）

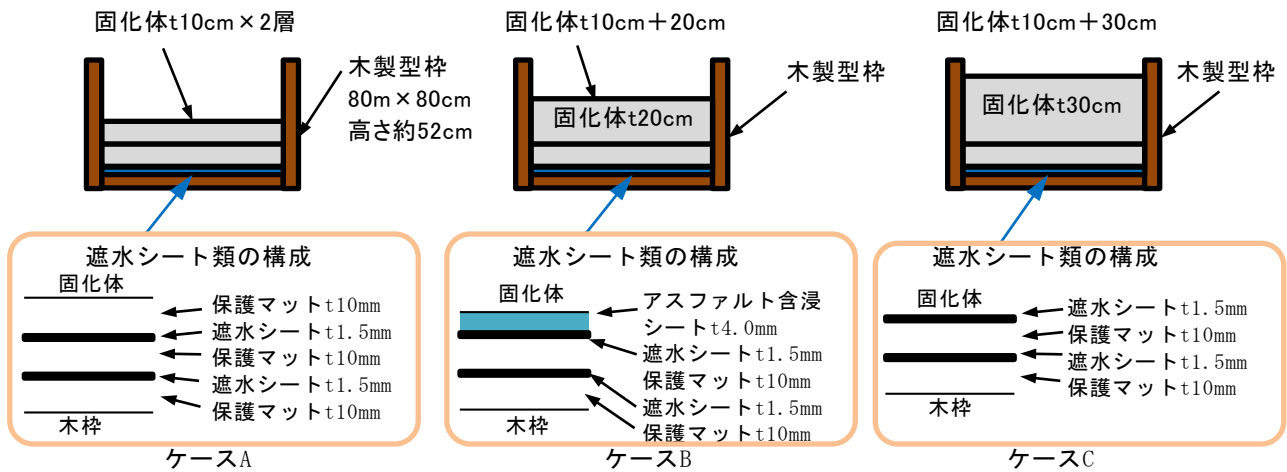


図-3.2.6 遮水シート工上部の模型3ケース

表-3.2.5 遮水シート保護材の適用性確認試験  
(木製型枠内での固化式埋立施工：内寸法80cm×80cm×高さ52cm)

ケースNo.	A	B	C	備考
上	固化式埋立2層目	層厚10cm	層厚20cm	水平打継目の状態を解体時に目視確認
	固化式埋立1層目	層厚10cm	層厚10cm	
下	保護マット	不織布厚さ10mm	アスファルト含浸シート厚さ4mm	二重遮水シート工
	遮水シート	高密度ポリエチレンシート厚さ1.5mm		
	保護マット	不織布厚さ10mm		
	遮水シート	高密度ポリエチレンシート厚さ1.5mm		
	保護マット	不織布厚さ10mm		

### 3-3. 基本設計

実証施工する固化式処分場（模擬処分場）の基本設計では、前記の前提条件および運用試験の結果を反映して構造を決めて平面図、縦断面図、横断面図を作図する。なお、固化式処分場は従来の処分場（準好気性構造）と比較して、雨水の浸透量が大幅に抑制され（実質、浸透なし）、一方で表流量が増加する（図-3.3参照）。また、底部集排水管から生物分解に必要な埋立層内に空気を供給する必要がなく、堅型ガス抜き管は実質、不要であり、必要数は従来型（準好気性構造）と比較して低減される。実証施工する固化式処分場の構造は、これらの特長をモニタリングによって検証できるように考慮して設計する。



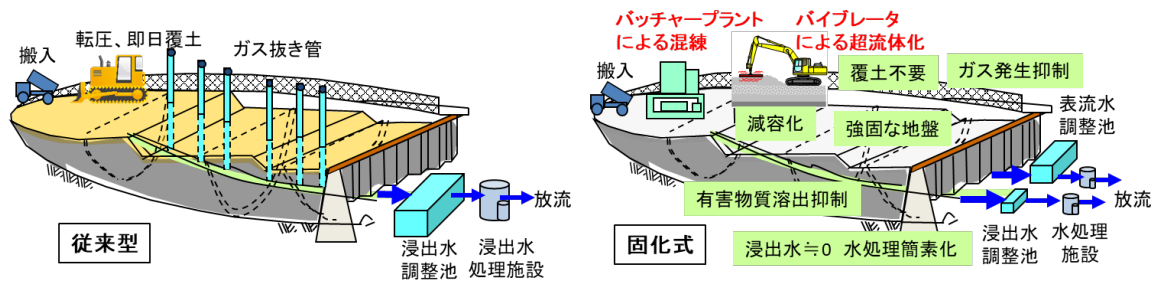


図-3.3 従来型処分場と固化式処分場の概念図の比較

### 3-4. 実証施工

#### (1) 詳細設計

実証施工する固化式処分場の細部構造は、前述の基本設計を基に以下の事項を考慮して決める。

- ・ 浸出水 $\approx 0$ を実証するために、浸出水と表流水は別系統で集水する。
- ・ 浸出水 $\approx 0$ を実証するために、二重遮水シート工最上面の保護マット等から雨水が埋立層底面の浸出水集排水管に浸透していかない構造とする。(不透水性保護マットの使用)
- ・ 雨水はほぼ全量が表流水として集排水される構造となるため、表流水集排水管の仕様は実証施工場所の日最大降雨量(過去最大値280mm/日、前原、1991年)を考慮して決める。
- ・ 発生量が微量であると思われるガスをできるだけ正確に測定できるように、ガスモニアリング用の専用測定管を設置する。なお、生物分解ガスはほぼ発生しないと考えられるので、空気の供給は不要である。
- ・ 固化式埋立層の表層劣化を抑制するための最終覆土を敷設する。なお、施工場所である実処分場で実際に即日覆土や中間覆土として使用しているものと同等の土質材料を使用する。

#### (2) 施工フロー

実証施工の手順は前述の運用試験と同様であるが、日々変動する焼却残渣の性状等にも適切に対応できるように表-3.4.1に示す測定・試験項目を設定して施工・品質管理を適切に実施する。

表-3.4.1 実証施工での測定項目

施工手順	測定・試験項目等	内容、測定頻度等
事前の配合選定	焼却残渣の性状 室内配合試験	運用試験と同じ
焼却残渣の搬入 選別処理	焼却残渣の性状	含水比測定 重金属類の溶出試験
	焼却残渣の質量 選別除去した鉄分・粗雑物の質量	選別処理の前後
現場配合選定	焼却灰・飛灰の含水比 締固め特性(振動締固め試験)	搬入時の性状が変わる毎
混練	材料の計量	バッチ毎
	練混ぜ状況	目視確認
	振動締固め試験 モールド試料作製	1回/日(配合修正毎)
運搬・敷均し	敷均し区画面積 敷均し量(混練バッチ数)	仕切り位置の確認
振動締固め	表面の仕上がり状況	目視確認(ブリージングの有無等)
	締固め層厚	レベル測量
最終覆土	層厚	レベル測量

### (3) 事前の配合選定

実証施工を開始する前に、清掃工場から事前に焼却残渣を採取して室内配合試験を実施して固化式処分の配合選定を行う。なお、運用試験では実証施工場所の中田埋立地で実際に受け入れている西部工場の焼却残渣を用いたが、焼却残渣の含水比が高く別途の事前調整が必要であったため、実証施工では既往研究<sup>1)</sup>で使用した経験のある臨海工場の焼却残渣を用いることとした。

### (4) 選別処理

焼却灰の選別処理（磁力選別、ふるい選別）には、運用試験で使用した機材と同じ仕様のものを用いて、選別処理能力や選別精度等を再検証する。

### (5) 現場配合選定

選別処理後の焼却灰（<40mm）、飛灰を用いて室内振動締固め試験を行い、必要に応じて事前に設定した配合を修正して現場配合を選定する。

### (6) 固化式埋立

固化式埋立には運用試験と同じ機材を使用する。施工規模が大きくないのでバッチャープラントは設置せず、セメントはミキサ1バッチ当り50kgで固定して25kg袋2袋を人力でミキサに投入する。焼却灰、飛灰は混練1バッチ分（セメント50kgに対する配合量）を事前に計量してフレキシブルバッグに入れておき、クレーンで吊り上げてミキサに投入する。0.5m<sup>3</sup>強制二軸ミキサでの混練は、運用試験と同様に30秒の空練り後に所定量の水を加え本練り2分30秒を行う。混練後の埋立材料はバックホウで運搬して仕切り材（H300）で仕切った範囲内に（標準的にはミキサ3バッチ分の約1m<sup>3</sup>）を捲き出して人力で敷き均し、振動締固め機で締め固める。振動締固め機による締固めは、1回当りの加振時間を約30秒とし、締固め範囲を適当にラップさせながら全体が平坦に仕上がるように繰り返す。仕切り位置にできる鉛直打継目が上下の埋立層で連続すると、そこが水みちとなって表流水が埋立層内へ浸透する可能性があるため、仕切り位置は上下の埋立層で重ならないようにする。

なお、固化式処分場での固化式埋立と並行して屋外曝露実験用の試験体を以下のように作製する。0.5m<sup>3</sup>ミキサで練り混ぜた直後の固化体を、長期曝露試験に必要な量だけプラスチック容器内に分取し、現地の試験室でテーブルバイブレータを用いて層厚10cmに締め固める。長期曝露実験用の試験体は図-3.4.1に示す4種類（ケース1：固化体表面の保護なし、ケース2：固化体表面に単粒碎石（C20-0）を20cm敷設、ケース3：固化体表面に覆土を20cm敷設、ケース4：固化体表面に保護マット（不織布10mm）を敷設）を作製し、プラスチック容器に入れたまま、厚さ10cmの固化体部分は地中に埋めて、1年間の経過観察を行う。

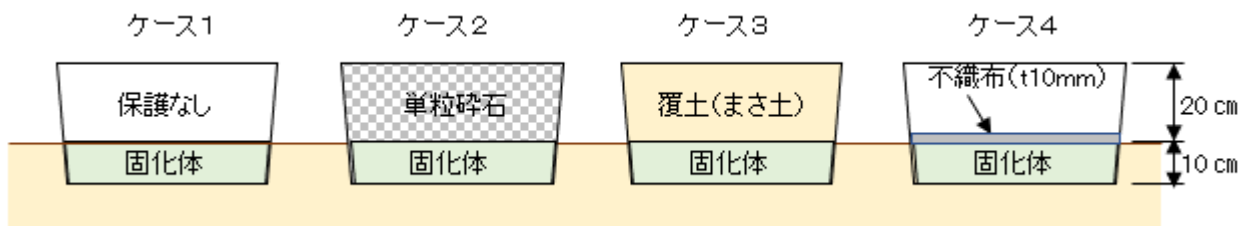


図-3.4.1 長期曝露試験用の試験体の断面図（プラスチック容器：内寸約32cm×45cm×高さ30cm）

### (7) 打継目等の密着性確認実験

固化式埋立層の焼却残渣固化体は実質、不透水層となるが、鉛直打継目、埋立層と二重遮水シート工との境界面等が水みちとなる可能性がある。そこで、鉛直打継目に対しては、実証施工する固化式処分場とは別に、図-3.4.2に示すように1.6m×1.6mの広さの型枠の内部を4分割して層厚20cmでの固化式埋立を行い、硬化後に鉛直打継目でボーリングコアを採取し透水試験を行う。

また、実証施工した固化式処分場でも、1年後の解体撤去時に鉛直打継目でΦ100mmのボーリングコアを採取して透水試験を行う。

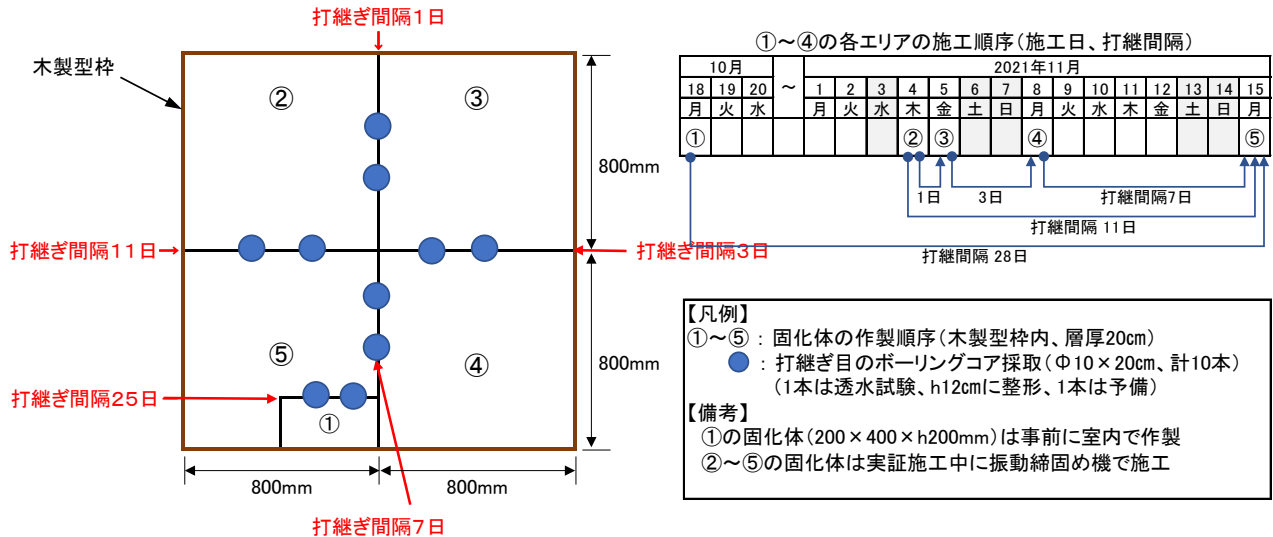


図-3.4.2 鉛直打継ぎ目の密着性確認実験の概要(平面図、施工順序)

二重遮水シート工との境界面に対しては、二重遮水シート工の最上面に不透水性保護材として敷設するアスファルト含浸シート(厚さ4mm)と固化式埋立層との密着性を確認するため、現場で混練した埋立材料を用いて図-3.4.3に示す供試体(Φ100cm×h100mm、円柱断面の中心部に幅40mm×長さ100mmのアスファルト含浸シートを埋込み)をテーブルバイブレイタの上に横置きし加振して作製し、透水試験を行う。比較のために厚さ10mmの不織布を埋め込んだ供試体、遮水シート(FPAゴムシート、厚さ1.5mm)を埋め込んだ供試体、何も埋め込んでいない供試体も作製して透水試験を行う。

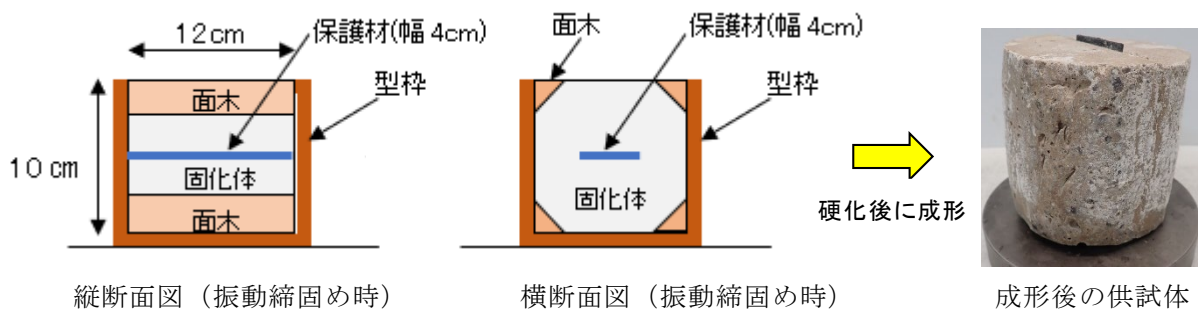


図-3.4.3 遮水シート保護材を入れた透水試験用供試体の作製手順

### 3-5. 耐久性と環境安全性のモニタリング

#### 3-5-1. 水収支、水質、ガス

実装施工で建設した固化式処分場における水収支、発生水の水質、発生ガスのモニタリングを行なった。図-3.5.1に固化式処分場に設置した浸出水集水管、表流水集水管、ガスモニタリング管を示す。固化地盤上を流れ表流水集水管から流出した水を表流水、固化地盤の下に設置した浸出水集水管から流出した水を浸出水と称した。

図-3.5.2に表流水集水管の構造を示す。浸出水、表流水それぞれの貯水タンクに水位計(水中用水位/温度計測データロガー Onset社)を設置し、水位変動から発生水量を算出した。図-3.5.3に表流水、浸出水の貯水タンクとして使用したタンクを示す。水質モニタリングについては、モニタリング開始から171日目までは各貯水タンクに溜まっていた水、172日目以降は各集水管の末端に図-3.5.4に示すように小型容器を取り付けひと雨ごとの発生水を採水した。採水した浸出水、表流水は、pHメーター(F-23,

HORIBA)及びECメーター(F-74BW, HORIBA)を用いてpH及びECを、ICP発光分光分析装置(ICP-OES 720, Agilent technology)を用いて重金属濃度を測定した。

図-3.5.5に固化地盤から発生したガスを捕集できるガスモニタリング管の写真を示す。ガスモニタリング管は内径(Φ51mm)で、管の上面部と底面部には蓋を設置しており、管の固化地盤2～4層目に該当する箇所が有孔管になっており、固化地盤2～4層目から発生するガスを捕集できるようになっている。有孔部には不織布を巻き付け、更にその上からヘチマロンで保護した。

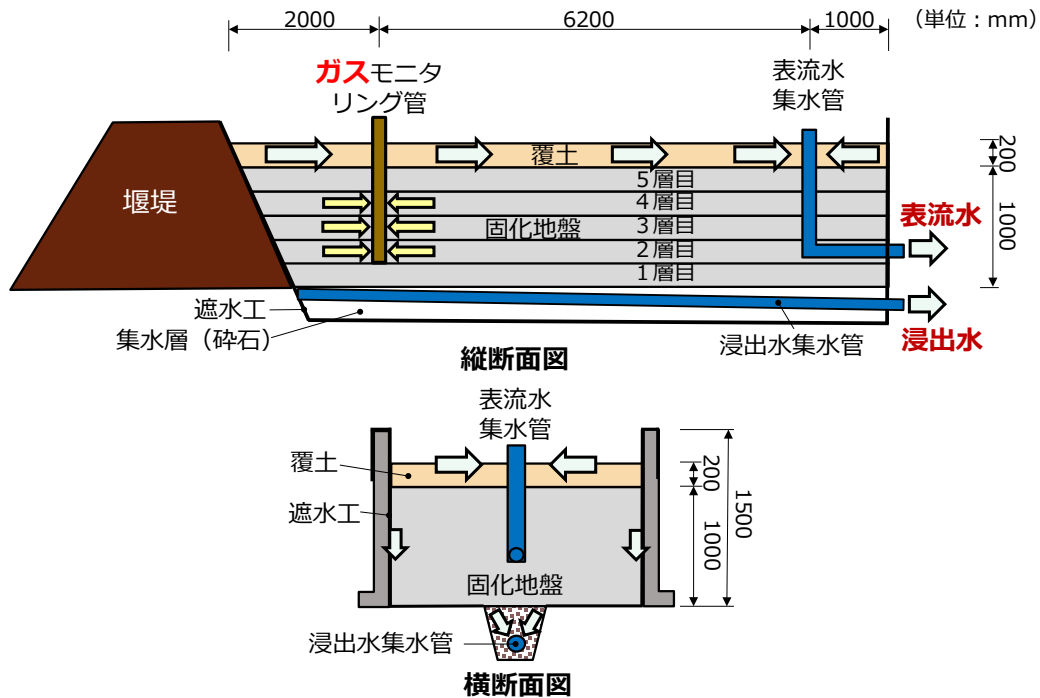


図-3.5.1 固化式処分場に設置した浸出水集水管、表流水集水管、ガスモニタリング管

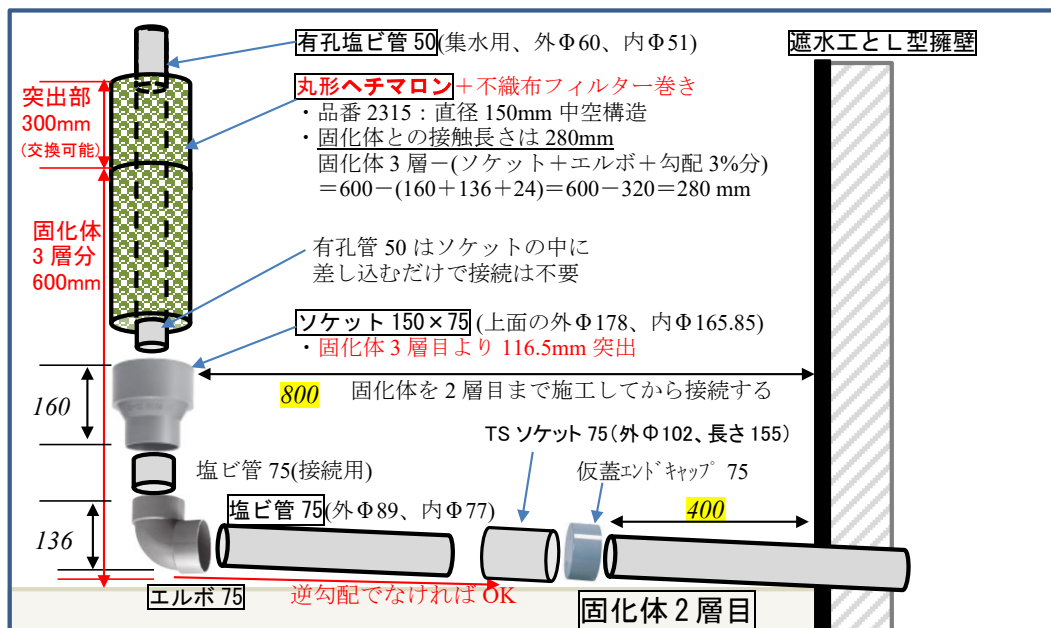


図-3.5.2 表流水集水管の構造

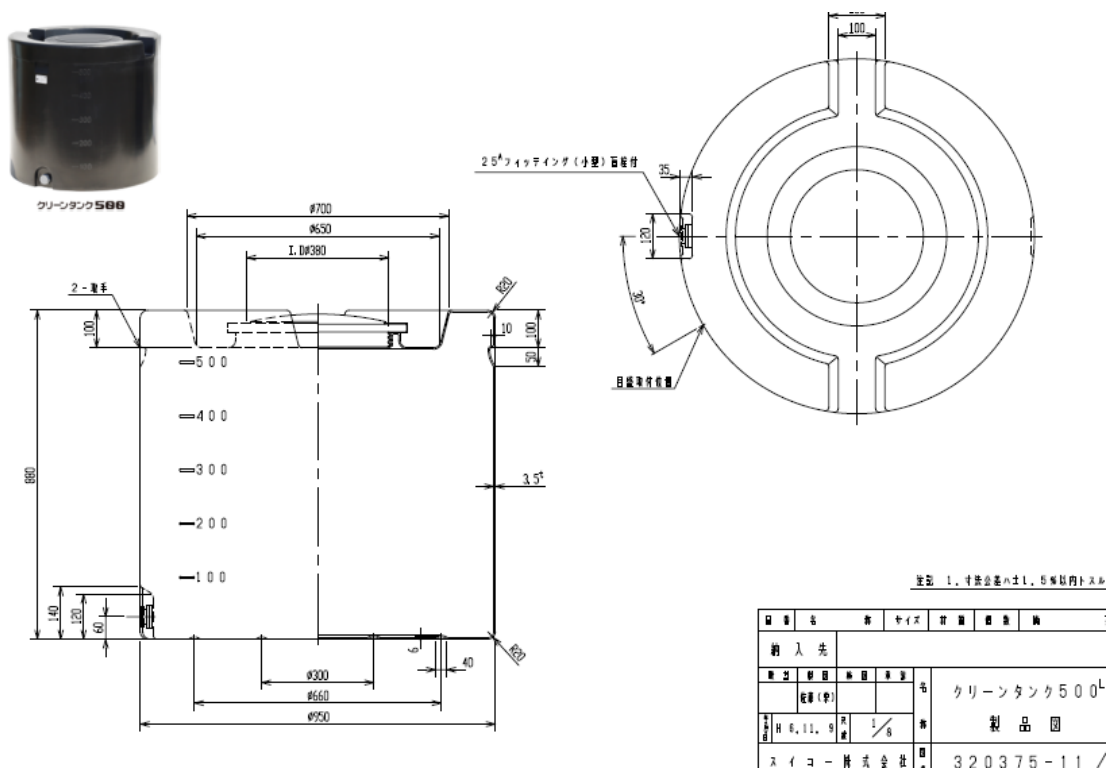


図-3.5.3 浸出水貯水タンク、表流水貯水タンクの構造



図-3.5.4 ひと雨ごとの発生水を採水するために各集水管の末端に小型容器を設置した状況

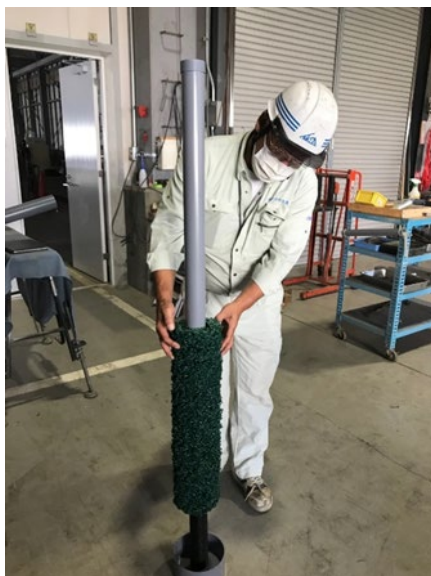


図-3.5.5 ガスモニタリング管 (左:設置前の全体像、右:設置後の地上部)

図-3.5.6にガスモニタリングの際のガスモニタリング管の構造を示す。

モニタリング開始から335日目に開始した30日間のモニタリングでは、まずガスモニタリング孔内を空気で置換した上で、図-3.5.6に示すガス採取用装置を取り付けて管内を密閉状態にし、定期的に管内のガスを採取し、管内のガス組成の経時変化を測定した。ガス採取時には小型プロペラを用いて攪拌し、管内のガスの均質化を図った。ガス採取地点は管の中心で、管の上端からの深さ52.6 cmとした。

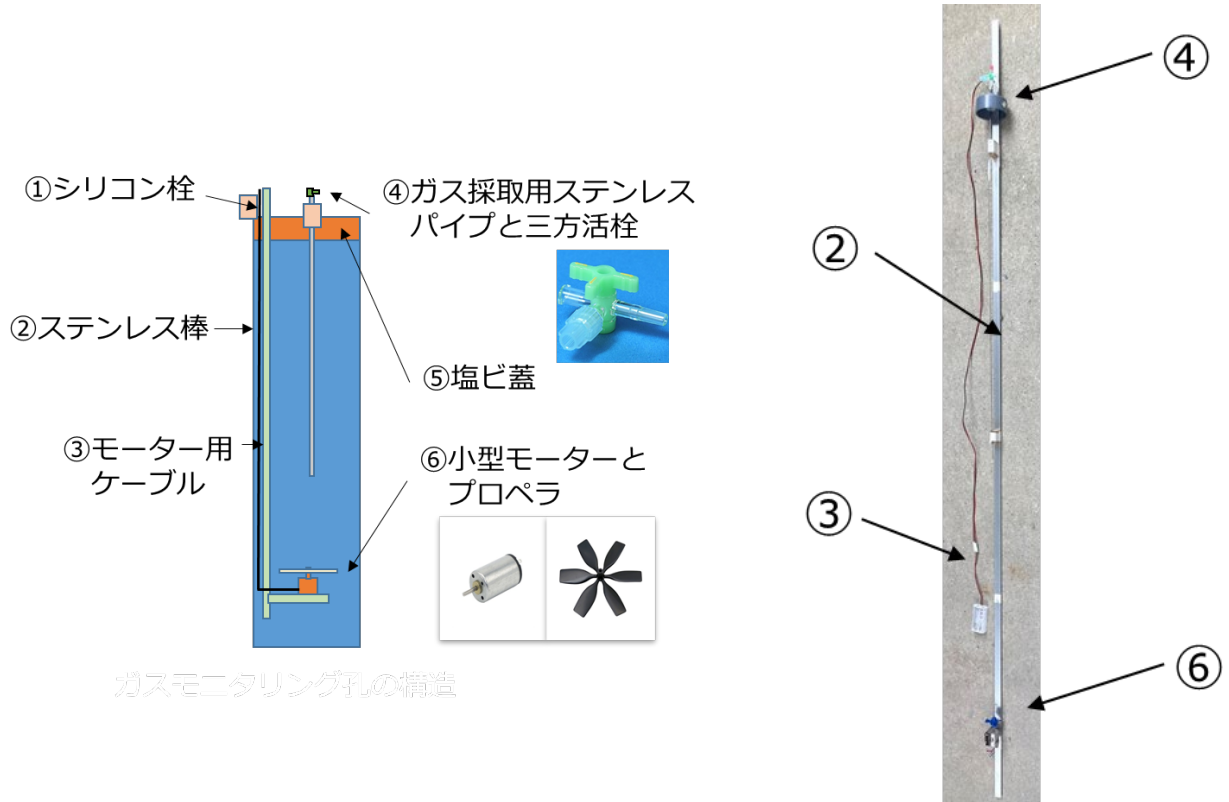


図-3.5.6 ガスモニタリング管の構造 (左：模式図、右：実物写真)

### 3-5-2. 固化式埋立層の耐久性等

#### (1) 固化式埋立層の品質（ボーリングコア採取）

実証施工した固化式埋立層の耐久性、環境安全性などを確認するため、所定の材齢で内径100mmのコアボーリングを行い、採取したコア試料を各埋立層（層厚20cm×5層）の水平打継目で切断した供試体で一軸圧縮試験、透水試験、溶出試験を実施する（表-3.5.1、図-3.5.7）。なお、施工1年後の解体直前に行うコアボーリングは固化式埋立層の全層でコア採取するが、それ以前に実施するコアボーリングは削孔長を80cmとして（その後の水収支モニタリングに影響が出ないように固化式埋立層の底面までは貫通させずに）、コア採取後にはボーリング孔をセメントベントナイトで埋める。

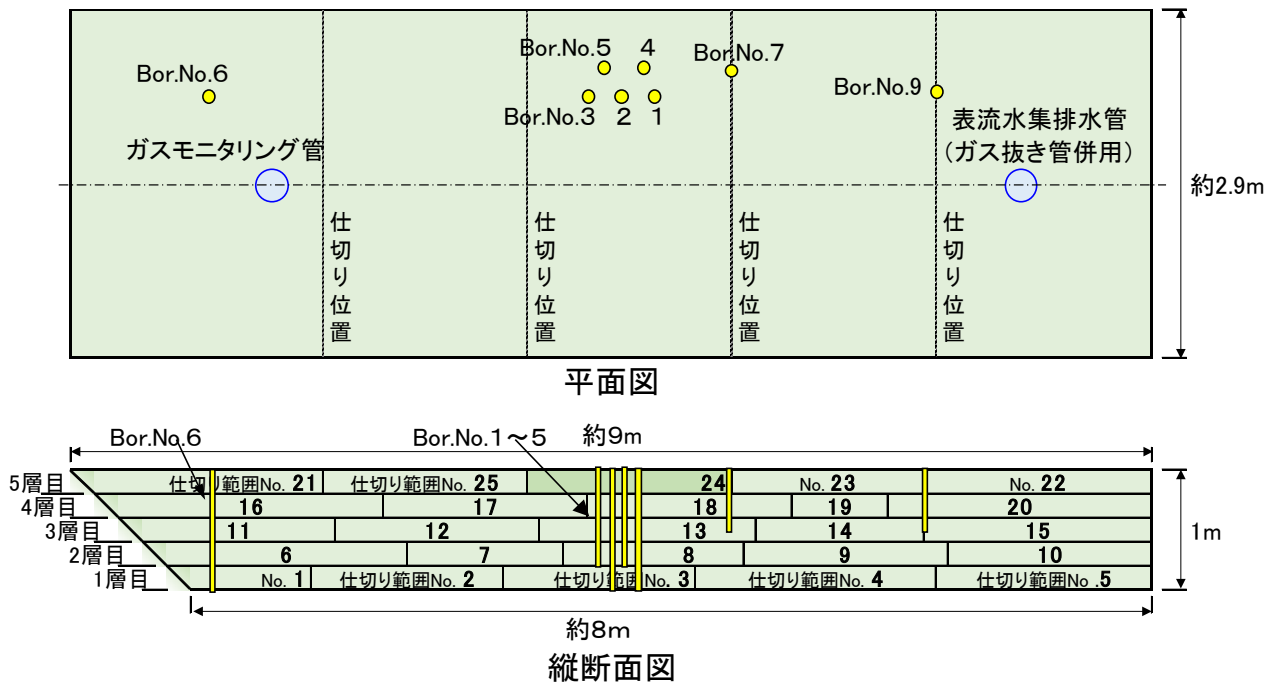


図-3.5.7 固化式埋立層の概要とコアボーリング位置（上：平面図，下：縦断面図）

表-3.5.1 コアボーリングNo. と試験の一覧

Bor. No.	コア採取時の材齢	試験項目と数量			備考
		強度	透水	溶出	
1	28日	4		4	固化埋立2～5層目 Φ100mm×L 0.8m 層別に切断して試験
2	91日	4		4	
3	91日		4		
4	1年	5		4	固化埋立1～5層目 Φ100mm×L 1.0m 層別に切断して試験
5	1年		4		
6	1年	5		5	

#### (2) 埋立層の支持力

実証施工の固化式埋立の完了から約3ヶ月後および約1年後の解体撤去時（令和5年12月5日）に、最終覆土を撤去した固化式埋立層の上面で動的載荷試験（小型FWD試験、図-3.5.8、図-3.5.9）を実施して固化式埋立層の地盤支持力（剛性）を評価する。

小型FWD試験とは人力またはキャリアで持ち運びできる程度の大きさで、重錘を人力または簡易な装置で持ち上げ、落下させることにより衝撃荷重を発生させ、このときに発生する衝撃荷重と載荷点直下のたわみ量を測定するものである。対象となる固化式埋立地盤の剛性を、予備試験により概ね把握してから、本試験にて、重錘の落下によって生じる変位が目標とする変位量（基準変位量）となるように重

錘の質量、落下高さを3段階以上選定し、変位量と載荷応力を測定する。試験にはφ300mmの載荷版を使用し、試験方法は土木学会舗装工学ライブラリー2：FWD および小型FWD 運用の手引き（2002.12）に準ずる。試験は、試験荷重の影響範囲に埋立層側面やボーリング孔が入らない位置（図-3.5.10）で3回以上行う。



#### ■仕様 本体KFD-100A

載荷板形状	φ100×15mm
重錘質量	5kg
落下高さ	50~530mm
重錘の落下機構	レバー式（ストッパー付）
最大荷重	20kN
最大変位	2.500mm
センサ	ひずみゲージ式
荷重計/ロードセル	1点
定格容量	20kN
加速度計	1点
定格容量	500m/s <sup>2</sup>
データ収録	
測定点数	2点（荷重、加速度）
測定精度	±(0.1%rdg+2digit) (23±5°C)
データメモリ	800データ/点
サンプリング速度	50μs
トリガ機能	データ（荷重値）トリガ方式 プリトリガ記録
インターフェイス	専用2線式シリアル方式
外部変位センサ接続台数	最大4台
電源	専用表示器TC-351Fより供給
使用温湿度範囲	-20~+60°C、85%RH以下
高さ	約1100mm
質量	約15kg（5kg重錘含む）

図-3.5.8 小型FWD試験装置の外観と仕様

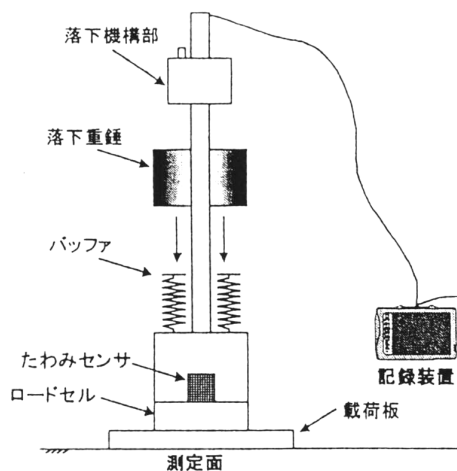


図-3.5.9 小型FWD試験器の概念

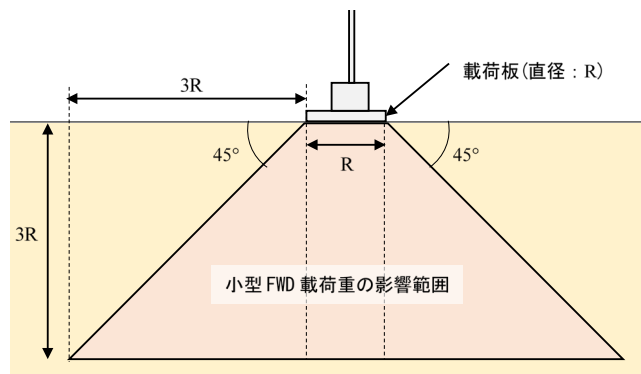


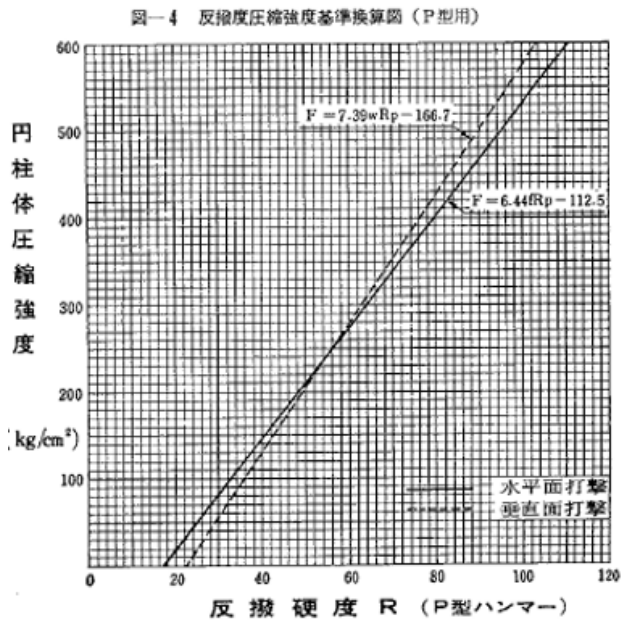
図-3.5.10 小型FWD試験の載荷重が影響する範囲

### （3）埋立層表層の状態

固化式処分場の解体時に最終覆土を撤去し埋立層表面の状態（表層劣化の有無等）を目視確認するとともに、低強度シュミットハンマー試験（図-3.5.11）を実施する。

また、実証施工時に作製して現地に設置した屋外曝露実験の試験体（表面保護なし）の表層の状態を約1ヶ月毎に経過観察する。表面保護なしの試験体の劣化が顕著になったときには、他のケースも表層保護材を取り除いて試験体表面の目視確認を行う。





反撥度数 (R) から円柱体 (シリンダー) 圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>) を推定するには、換算図 (図-4) を使用する。この換算図は、チューリッヒ連邦材料試験所、京都大学、大阪大学、立命館大学などの研究機関による実験結果に基づいて制作されている。即ち各種のセメント、骨材、その配合比、水セメント比などの条件の異なる数千個の供試体を P 型シュミット・テストハンマーで測定してその反撥度を読みとり、ただちに圧縮試験にかけて破壊して圧縮強度を測定する一連の実験データにより、反撥度数と圧縮強度の相関々係を求めて作成したものである。

図-3.5.11 低強度シュミットハンマー試験の強度判定方法 (取扱説明書の抜粋)

#### (4) 水みち調査

鉛直打継目と遮水シート工との境界では水みちの有無を確認するために赤色ローダミン水溶液による簡易なトレーサー浸透試験を実施した。外周シート境界部へのトレーサー注入は注射器等を用いて行い、解体時に埋立層の側面を観察してトレーサーの浸透状況を確認する。鉛直打継目では  $\Phi 40\text{mm}$  のボーリング孔をあけてトレーサーを入れ、翌日にオーバーコアリングによりトレーサー孔周囲の固化体を採取する (図-3.5.12)。トレーサー浸透試験の概要を図2に示す。

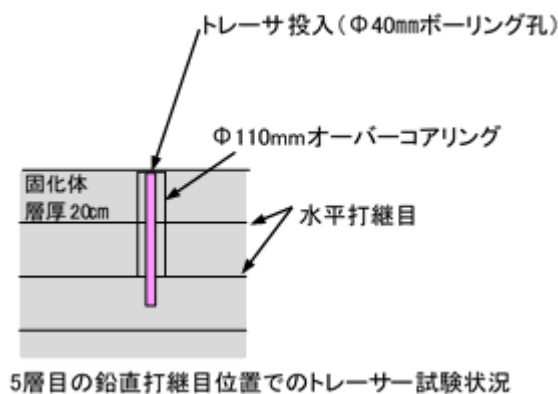


図-3.5.12 ボーリング孔を利用したトレーサー浸透試験後のオーバーコアリング

### 3-6. 低周波無線通信を用いたIoTモニタリングシステム

廃棄物埋立地内部における無線通信には低周波電磁波が適用できると考えられるが、これまでに廃棄物埋立地での低周波電磁波に関する研究事例は少ない。よって、本研究では、廃棄物埋立地内で無線通信システムを構築するために、埋立廃棄物層内における低周波電磁波の無線通信特性を調査した。廃棄物埋立地における低周波電磁波による無線通信の受信電圧への影響因子としては、(1)通信媒質（廃棄物の性状）、(2)埋立廃棄物の密度、(3)含水比、(4)通信機器周囲の鉄成分の混入割合、(5)送受信機の設置角度が考えられ、本研究ではそれらの影響を調査した。また、模擬廃棄物埋立地から長期的にデータ通信が可能であるかを検証した。

### 3-7. 経済性の評価

#### (1) ライフサイクルコスト評価

これまでの固化式処分システムのライフサイクルコスト（LCC）評価に用いた計算条件には、室内試験や比較的小規模な実験に基づく値を用いていたという課題があった。本研究では、福岡市中田処分場内において実規模で行った固化式処分の埋立前処理や施工時のデータ、施工後の水収支、水質等のデータを考慮し、固化式処分システムにおける埋立方法や水処理方法、維持管理期間等を再検討した。さらに、必要な設備や重機等の台数等の見直しを行った。さらに、最終処分場廃止後の跡地利用に移るまでの期間を含めた検討を行った。

#### (2) 計算方法

表-3.7.1に、対象とした最終処分場のライフサイクルステージにおけるLCC評価項目を示す。従来型処分場と固化式処分場について表中の費用を算出し、LCCを比較評価することとした。従来型処分場と固化式処分場の相違点は、固化式処分場ではバッチャープラントの設置が必要であること、埋立方法が異なること、浸出水ではなく表流水処理を行う必要があることが挙げられる。また、高度な跡地利用を想定した場合には、従来型では地盤改良を行う必要があるが、強固な地盤を形成する固化式処分場では地盤改良の必要がない。

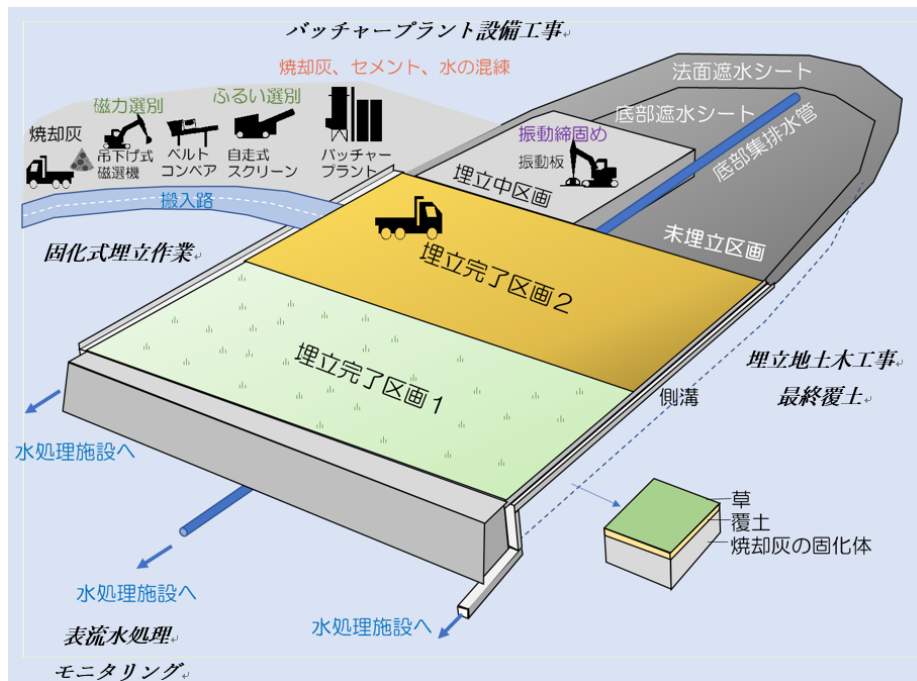


図-3.7 固化式処分場のイメージ

表-3.7.1 各ライフサイクルステージの評価項目

ライフサイクル ステージ 処分場	建設段階	供用期間	維持管理期間	廃止	跡地利用 の準備
従来型 処分場	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋立地土木工事</li> <li>浸出水処理施設建設</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来型埋立作業： 敷均し、転圧 即日、中間覆土</li> <li>浸出水処理</li> <li>モニタリング</li> <li>整備補修</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸出水処理</li> <li>モニタリング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最終覆土</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤改良： 動圧密工法</li> </ul>
固化式 処分場	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋立地土木工事</li> <li>浸出水処理施設建設</li> <li>バッチャープラント 設備工事</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固化式埋立作業： 磁力選別、篩分け、 セメント・水・ 焼却残渣の混練、 振動締固め</li> <li>表流水処理</li> <li>モニタリング</li> <li>整備補修</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>表流水処理</li> <li>モニタリング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最終覆土</li> </ul>	

\* 赤字は従来型処分場に対する固化式処分場の相違点を示

**本研究の研究対象範囲**

表-3.7.2 最終処分場の諸条件

項目	従来型 (10万t)	固化式 (10万t)	従来型 (100万t)	固化式 (100万t)
1年当たり焼却残渣埋立処分量(千t/年)	5		50	
埋立地供用年数(年)	20			
総焼却残渣埋立容量(千t)	100		1,000	
焼却残渣、焼却残渣固化体埋立処分体積(千m <sup>3</sup> )	78.8	76.9	788	769
即日・中間覆土体積(千m <sup>3</sup> )	15.8	0.0	158	0.0
埋立地容積(m <sup>3</sup> )	94.6	76.9	946	769
平均埋立深さ(m)	20			
埋立地面積(千m <sup>2</sup> )	4.73	3.84	47.3	38.4
埋立区画数	1	5	5	10
維持管理期間(年)	15	3	15	3

## a) 最終処分場の規模と焼却残渣受入量

表-3.7.2に設定した最終処分場の諸条件を示す。本研究では、従来型処分場と固化式処分場でそれぞれ年間焼却残渣埋立処分量5千t/年(10万t)、50千t/年(100万t)の2ケースを設定した。埋立深さを20m、供用期間を20年、固化式処分場における固化体の単位体積重量を1.5t/m<sup>3</sup>と設定すると、固化式処分場の埋立地容積は7.69万m<sup>3</sup>(10万t)、76.9万m<sup>3</sup>(100万t)となる。さらに、固化式処分場は、覆土が不

要であり、超流体工法を用いた振動締固めにより減容されるため、埋立地の容積を従来型よりも23%小さくすることができる。従来型処分場の埋立地容積は9.46万 $\text{m}^3$  (10万t)、94.6万 $\text{m}^3$  (100万t)となる。

#### b) 固化式埋立における各材料の配合率

表-3.7.3に実証試験における焼却灰、飛灰、セメント、水の配合率を示す。これらを元にセメント購入費等を算出した。実証試験データより、固化体の単位体積重量は1.50 $\text{t}/\text{m}^3$ であるとして計算を行った。

#### c) 雨水分配率の設定

従来型処分場と固化式処分場における、雨水の浸透（浸出水）、表面排除（表流水）、蒸発の割合を表-3.7.4に示す。従来型処分場については参考文献2)を参考に設定した。固化式処分場については実証試験において浸出水が発生しないことが示された。一方、表流水が多く発生し、埋立直後に固化体に接触した表流水の鉛濃度がやや高く、1年後には表流水水質は基準を満足した。そこで、2年間のモニタリング期間を含め埋立後3年間は表流水処理を行うこととした。表流水処理量を低減させるため、固化式では埋立区画数を20区画（1年で1区画を埋立てる）とし、埋立中および埋立後3年以内の区画から発生する表流水は、独立した雨水集水路を通して水処理施設に流れるものとした。

#### d) 区画の設定

田中の文献<sup>2)</sup>から、従来型処分場では、10万t規模では1区画、100万t規模では5区画に分割することとした。また本研究では、固化式処分場では、10万t規模では5区画、100万t規模では10区画に分割することとし、その分割には型枠工を用いて区画分けを行うこととした。区画分けにかかるコストは以下の式3.7.1で示される。

$$C_c = h \cdot l \cdot (n_c - 1) \cdot C_A \quad \dots (3.7.1)$$

ここで、

$C_c$  : 区画分けにかかるコスト (円)

$h$  : 高さ (m)

$l$  : 幅 (m)

$n_c$  : 区画数 (m)

$C_A$  : 概算標準工事費 (円/ $\text{m}^2$ )

#### e) 跡地利用のための地盤改良

従来型の処分場では、埋立終了後の跡地を高度利用するためには地盤改良が必要となる一方、強固な地盤が形成される固化式処分場では地盤改良が不要である。そこで、従来型処分場の地盤改良のために必要なコストの計算を行った。本研究では地盤改良工法として、動圧密工法を想定して計算を行った。計算方法としては、概算標準工事費に跡地利用を行う面積を乗ずることで、地盤改良コストを算出した。地盤改良コストは以下の式3.7.2で示される。

$$C_s = C_A \cdot A \quad \dots (3.7.2)$$

ここで、

$C_s$  : 地盤改良コスト (円)

$C_A$  : 概算標準工事費 (円/ $\text{m}^2$ )

$A$  : 跡地利用を行う面積 (円/ $\text{m}^2$ )

表-3.7.3 固化式埋立における各材料の配合率

項目		配合等				固化体
		焼却灰	飛灰	セメント	水	
材料の混合条件 (乾燥質量比)	焼却残渣の混合比(%)	75.0	25.0	—	—	—
	セメント混合率(内割%)	—	—	10.0	—	—
	練混ぜ材料の配合比(%)	67.5	22.5	10.0	—	—
配合選定条件	<b>焼却残渣の含水比(%)</b>	<b>25.0</b>	<b>18.0</b>	—	—	—
	練混ぜ時の含水比(%)	—	—	—	—	<b>28.0</b>
	締固め後の乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—	—	<b>1.50</b>
	締固め後の湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—	—	1.920
示方配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	乾燥質量 1,013	乾燥質量 338	150	420	合計 1,920
現場配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	湿潤質量 1,266	湿潤質量 398	<b>150</b>	<b>106</b>	合計 1,920
※ 焼却残渣の含水比には平均的な数値を適当に仮定		<b>計 1,664</b>				

		焼却残渣	セメント	水	固化体
焼却残渣 1 t 当り	材料使用量(kg)	1,000	90	64	<b>1,154</b>

				<b>固化体体積(m<sup>3</sup>)</b>	<b>0.769</b>
--	--	--	--	-----------------------------	--------------

表-3.7.4 浸出水、表流水、蒸発の割合

項目	従来型		固化式	
	埋立中区画	埋立終了区画	埋立中区画	埋立終了区画
浸出水	0.72	0.22	0	0
表流水	0	0.5	0.72	0.72
蒸発	0.28	0.28	0.28	0.28

### 3-8. 設計施工指針案

固化式処分場に特有の用語を定義し、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」(2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議)<sup>3)</sup>に準じて、固化式処分場の設計・施工指針案の骨子(主に従来型最終処分場との違いなど)をまとめる。

## 4. 結果及び考察

### 4-1. 実証施工の前提条件

実証施工の前提条件を整理して表-4.1に示す。

表-4.1 実証施工する固化式処分場の設計上の前提条件

項目	基本設計の前提条件
処理能力	約 5 t/日 (実埋立地の平均的数量の1/10) (焼却灰：飛灰 = 3 : 1)
総処理量	約 50 t (処理能力×10日間)
固化処理	セメント10%(乾燥質量比)、混練含水比25%程度、固化体の乾燥密度 $\geq 1.5\text{g}/\text{cm}^3$
埋立体積	約 25 m <sup>3</sup> (マテリアルフロー試算)
集排水設備	固化式埋立層は実質、不透水層であり、雨水はほぼ全量が表流水となることを想定 浸出水 $\approx 0$ を確認するために、浸出水と表流水は別系統で集排水 実埋立地の過去の日最大降水量等も考慮
ガス抜き管	固化体からのガスはほとんど発生せず、生物分解に必要な空気の供給は不要 竪型ガス抜き管は、構造基準で必要とされる最小限の数量 ガス抜き管のフィルター材も簡素化(施工性向上、埋立容量増加にも寄与)
遮水工	処分場の構造基準に準じて、二重遮水シート工を設置 最上面の保護マットには不透水性材料を使用(雨水浸入防止により浸出水 $\approx 0$ )

### 4-2. 運用試験

#### (1) 焼却残渣の性状確認結果

粒度、粒子密度、含水比、熱しゃく減量、成分分析(XRF分析)の結果を以下に示す。

焼却灰の0.075mm以下の細粒分含有率は、西部工場が1.0%と臨海工場の8.45%より小さい(図-4.2.1)。

粒子密度は、西部工場の方が臨海工場よりも大きい(表-4.2.1)。

含水比は、西部工場の方が高く、飛灰は約40%と臨海工場に比べ20%以上も大きい(表-4.2.1、図-4.2.2)。

焼却灰の熱しゃく減量は、いずれも10%以下で廃棄物処理法の焼却施設維持管理基準を満たしているが、西部工場の方が小さい(表-4.2.1)。

XRF分析による酸化物は、焼却灰では両工場と同様の傾向を示した。飛灰では、西部工場のカルシウムの割合が臨海工場の6割程度であった、ナトリウムとカリウムの割合は臨海工場の2.1~2.2倍であった(表-4.2.2)。元素の分析結果では、焼却灰、飛灰ともに亜鉛、銅、鉛、バリウム、アンチモンの割合が、臨海工場の2.0~4.2倍の数値を示した(表-4.2.3)。

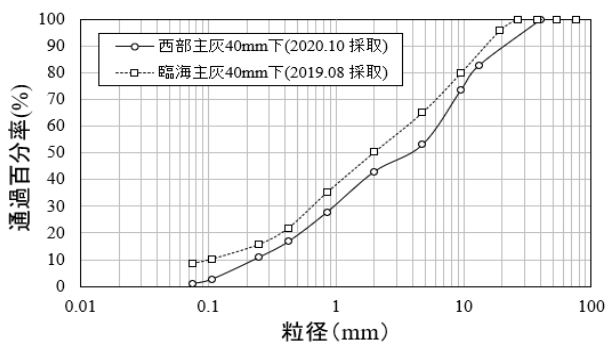


図-4.2.1 粒度分布

表-4.2.1 焼却残渣の物理試験等の結果

種別	工場	粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	熱しゃく減量 (%)
焼却灰	西部	2.60	28.2	1.1
	臨海	1.96	25.4	4.8
飛灰	西部	2.43	38.0	-
	臨海	2.06	17.9	-
備考	西部	焼却残渣採取日：2019年7月		
	臨海	焼却残渣採取日：2017年7月		



(a) 中田埋立地に搬入された西部工場の飛灰 (b) 伏谷埋立地に搬入された臨海工場の飛灰

図-4.2.2 西部工場の飛灰と臨海工場の飛灰の比較

表-4.2.2 XRF分析結果（酸化物）

灰種類	清掃工場	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
焼却灰	西部工場	24.9	10.6	4.7	1.7	0.16	2.2	36.6	2.6	3.1	1.2
	臨海工場	25.6	10.9	5.3	1.6	0.10	2.7	39.1	2.4	1.8	0.7
飛灰	西部工場	11.3	6.8	1.4	1.4	0.07	1.6	27.3	3.0	9.0	5.2
	臨海工場	10.5	4.3	0.9	0.8	0.03	0.9	44.4	2.5	4.1	2.5

表-4.2.3 XRF分析結果（元素）

灰種類	清掃工場	Cl	S	F	Zn	Cu	Pb	Cr	Ni	Ba	Sb
焼却灰	西部工場	5.7	1.97	N.D	0.92	0.36	0.19	0.09	0.02	0.35	0.06
	臨海工場	2.7	0.60		0.46	0.15	0.09	0.04	0.01	0.14	0.03
飛灰	西部工場	18.9	3.07		4.08	0.29	0.90	0.03	0.01	0.23	0.54
	臨海工場	18.1	2.40		1.36	0.07	0.28	0.02	N.D	0.07	0.17

## （2）室内配合試験による配合選定

今回採取した西部工場の焼却残渣は水分量がかなり多い（表-4.2.1）特異な事例であったが、機材の運用試験および型枠内での施工試験に使用するため、以下のような配合調整を行った。

水分量過多の焼却残渣をそのまま使用すれば、固化式処分システムの混練プロセスでの含水比が高くなりすぎて適切な配合とならない。そこで、1回目の室内配合試験では焼却灰を一度乾燥させてから使用することで対処した。しかし、実施工で焼却残渣を現地で乾燥させるというプロセスを加えることは現実的ではないので、混練時の水分量を低減させることができる配合について追加試験を行った。

1回目の室内配合試験では、既往研究と同じ配合条件で実施した。焼却灰と飛灰の混合比率は清掃工場からの発生割合と同じ（一般的に焼却灰と飛灰の乾燥質量比3：1）とし、セメント添加量は乾燥質量比10%（内割）とした。2回目の室内配合試験では、特に水分量の多い飛灰の混合率を減らすことにした。これら2回の試験結果を既往研究<sup>1)</sup>（臨海工場の焼却残渣）の結果とも比較して図-4.2.3に示す。

1回目試験（図-4.2.3（a））での振動締固め曲線の最適含水比（最大乾燥密度のときの含水比）は約14%で、既往研究（図-4.2.3（c））と比べて12%程度小さく、最大乾燥密度は1.85g/cm<sup>3</sup>と既往研究よりも0.4g/cm<sup>3</sup>程度大きい。しかし、一軸圧縮強度は図-4.2.4に示すように既往研究に比べて強度発現が遅延する傾向がみられた。材齢91日では最大で8.3 N/mm<sup>2</sup>と目標強度5 N/mm<sup>2</sup>を上回る配合もあったが、材齢28日では最大で1.2 N/mm<sup>2</sup>であった。なお、材齢28日での強度発現が想定よりも小さかったことから、一軸圧縮試験の実施を中止したケースもあり強度データは一部欠落している（図-4.2.3（a））。強度発現が遅延する要因として、西部工場の焼却残渣に比較的多く含まれていた重金属類の影響（たとえば亜鉛は遅延材の成分として利用されている等）も考えられた。

透水係数は、最適含水比よりも大きい範囲では1×10<sup>-9</sup>cm/sec以下と、既往研究（1×10<sup>-7</sup>cm/sec以下で、実質、不透水層）よりも小さかった。

再試験（図-4.2.3（b））では、焼却残渣の混合比を焼却灰：飛灰＝12：1にしたケースを実施した。なお、1回目試験で用いた焼却残渣とは別の日に採取したものを使用したため、比較のために焼却灰：飛灰

＝3：1での振動締固め試験も実施した。焼却灰：飛灰＝12：1の締固め曲線を焼却灰：飛灰＝3：1の曲線と比べると、両者で最大乾燥密度には大きな差はないが、最適含水比は20%と3%程度大きくなっている（図-4.2.3 (b)上図）。一軸圧縮強度は材齢33日で6N/mm<sup>2</sup>を超え（図-4.2.4）、1回目の試験のような固化遅延は発生していないと考えられた。

以上の結果から、固化体の目標含水比は20%として、焼却灰：飛灰＝12：1（乾燥質量比）、セメント10%（乾燥質量比、内割）、そして含水比を低減するための混和材として乾燥粉体の石炭灰を添加することとした。運用試験用の配合を表-4.2.4に示す。なお、中田埋立地で実際に使用した飛灰は、含水比が56.4%と室内配合試験のときよりも大きかったため、含水比調整用の石炭灰は15%添加した。

本配合は、型枠内での施工性確認を主目的に選定した特殊な配合であるが、後述する実証試験では、臨海工場の焼却残渣を中田埋立場に搬入して標準的な焼却灰と飛灰の混合比（3：1）で使用した。

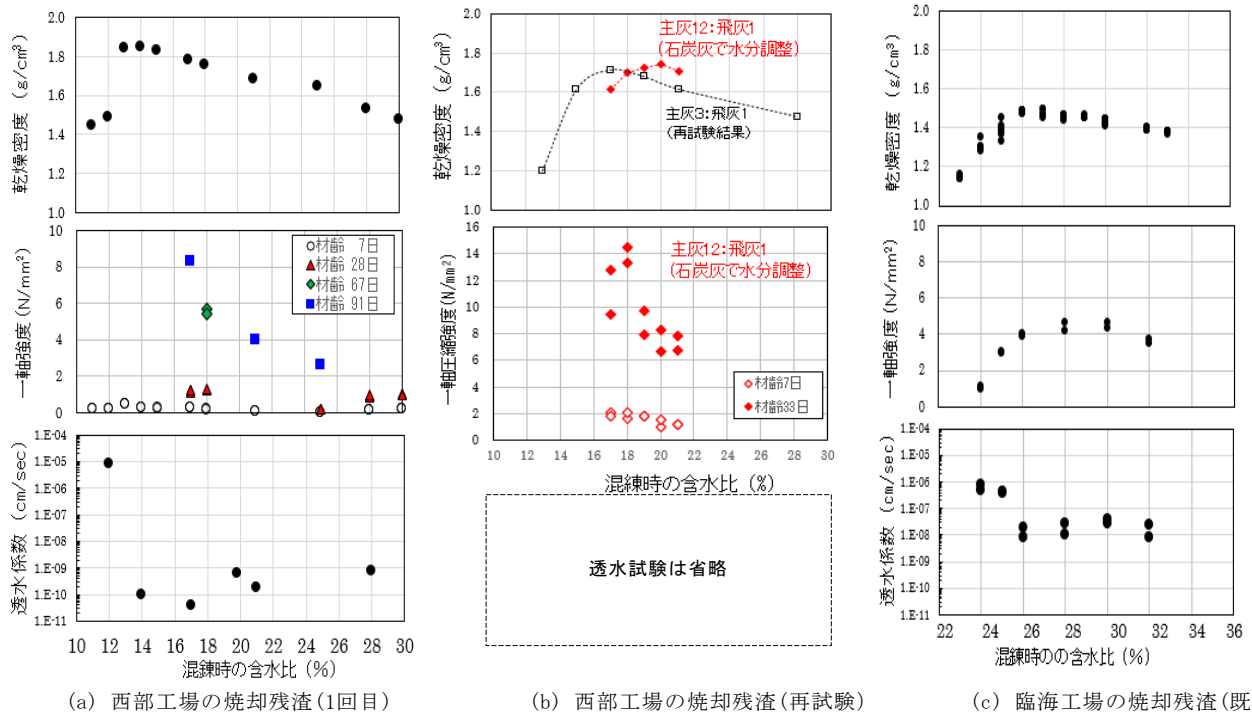


図-4.2.3 焼却残渣固化体の室内配合試験結果

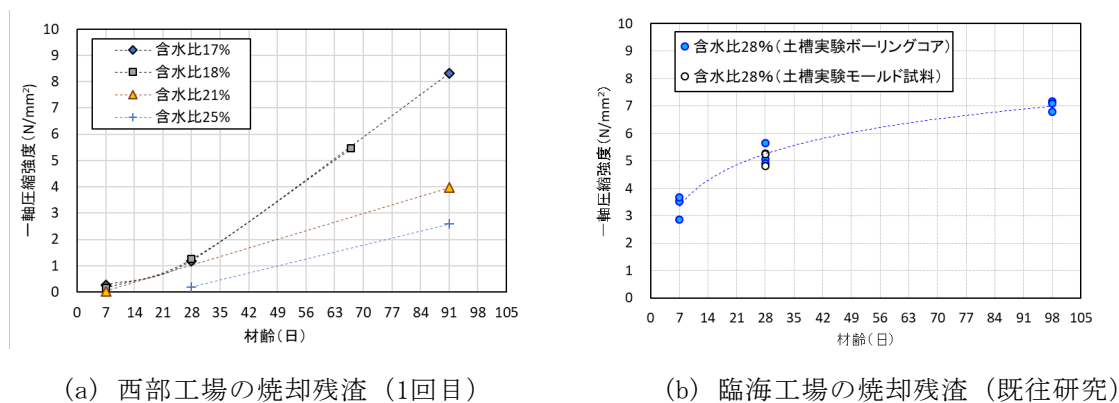


図-4.2.4 焼却残渣固化体の材齢と一軸圧縮強度の関係

表-4.2.4 固化体の現場配合

	焼却灰	飛灰	石炭灰	セメント	水
灰の含水比(%)	23.7	56.4	—	—	—
乾燥質量比(%)	69.2	5.8	15.0	10.0	—
湿潤重量(kg/m <sup>3</sup> )	1,517	159	155	172	0

混練時の含水比 20%、固化体の想定乾燥密度 1.7g/cm<sup>3</sup>



### (3) 運用試験の結果

運用試験では、西部工場から搬入された一般廃棄物焼却残渣を、強制二軸ミキサでの混練に適した状態にするため、焼却灰に対して磁力選別（図-4.2.5）とふるい選別（図-4.2.6、<40mm）を実施した。

表-4.2.5に示すように、電磁石による磁力選別では質量比5.4%の鉄分が除去され、トロンメルバケットの40mmふるい選別では約20%の大塊が除去された。選別除去率を既往データ（臨海工場の焼却灰：鉄分6.3%、振動ふるい下の大塊2.0%）と比べると40mmふるいの除去率が大きかった。焼却灰の性状の差以外にふるい選別装置の違いの影響も考えられる。なお、表-4.2.5の平均作業速度の実績から計算した日当りの処理能力は、磁力選別が $0.42\text{t/分} \times 60\text{分} \times 6\text{時間/日} = 151\text{t/日}$ で、ふるい選別が $0.20\text{t/分} \times 60\text{分} \times 6\text{時間/日} = 72\text{t/日}$ と、中田埋立地の焼却残渣の平均的な搬入量約50t/日を上回った。

次に焼却灰（選別後）と飛灰の含水比を測定し、室内での振動締固め試験を実施して固化体の現場配合（表-4.2.4）を決めた。決定した配合条件で材料を計量しミキサで混練して、バックホウで型枠模型の中に捲き出し、人力で所定の厚さに敷均し、振動締固め機（ミニバックホウ装着の振動板、750mm×750mm、振動数120Hz）によって振動締固めを行った（図表-4.2.7、図表-4.2.8）。

ミキサの混練時間は空練り30秒、加水後の本練りを2分30秒とした。振動締固め時間は30秒間（振動板の半分の面積を15秒ずつ順次ラップ施工）を標準とし、固化体表面が平滑に仕上がるように施工した。堅型ガス抜き管周辺模型（図-4.2.7）の層厚20cmと30cmの施工では、振動締固め時間を60秒、90秒、210秒延長した部分を1か所ずつ設けて、固化体表面沈下量の経時変化を測定した。層厚20cmと30cmの沈下一時間曲線（図-4.2.8）は、加振時間の異なる3か所（図-3.2.4参照）での測定値をつないだものであるが、層厚30cmの沈下量が層厚20cmとほとんど差がないことから、層厚30cmでは締固めが不十分であったことが示唆された。また、層厚20cm（混練時含水比20%）では210秒まで沈下量が増加しているが、層厚30cm（混練時含水比21%）では90秒で沈下量が収束している。撤出しから締固め開始までの経過時間や層厚の影響も考えられるが、効率的な締固めには含水比管理も重要であることが示唆された。

表-4.2.5 焼却灰の選別処理結果

項目	単位	磁力選別		
		選別前	除去分	選別後
質量	t	20.3	1.1	19.2
選別前後比	(%)	—	5.4	94.6
平均作業速度	(t/分)	0.42		
項目	単位	ふるい選別		
		選別前	篩残	選別後
質量	t	15.7	3.1	12.6
選別前後比	(%)	—	19.7	80.3
平均作業速度	(t/分)	0.20		



図-4.2.5 磁力選別状況 図-4.2.6 ふるい選別状況



図-4.2.7 振動締固め状況

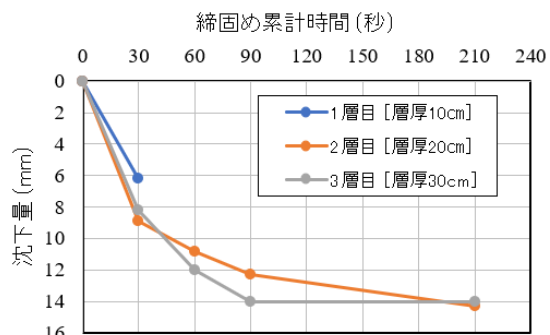


図-4.2.8 振動締固め時間と沈下量の関係

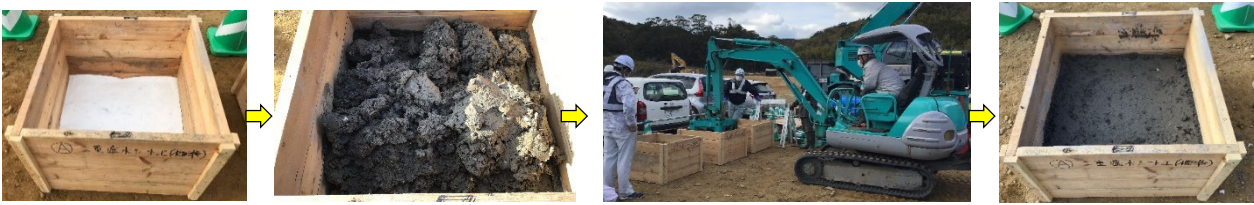


図-4.2.9 遮水シート上部模型での振動締固め状況

#### (4) 締固め層厚の観察結果

型枠解体後の埋立層側面の状態を図-4.2.10～図-4.2.11に示す。フィルター材法肩模型では、フィルター材（割栗石 $\Phi 150\text{mm}$ ）の表面に敷設した保護マット（厚さ $10\text{mm}$ ）の裏側への固化体成分の侵入は全くなかった。したがって、フィルター材として割栗石等を使用する場合でも、表面に不織布を敷けば特に問題はないということが確認できた。

なお、いずれも固化体の層厚 $10\text{cm}$ と層厚 $20\text{cm}$ の境界は一体化していたが層厚 $30\text{cm}$ の下端には豆板状の空隙が残っていた。したがって、今回使用した振動締固め機での締固め層厚は $20\text{cm}$ が適当であると考えられる。

また、遮水シート上部模型は、木製型枠の解体後（図-4.2.12）、固化体を裏返し、遮水シート等を剥がして遮水シート表面を目視観察したが、いずれケースも損傷等は認められなかった。したがって、通常の保護マット等を使用すれば、遮水シート工直上での固化式埋立も問題なく施工できると考えられる。



図-4.2.10 フィルター材（割栗石）法肩模型の出来形



図-4.2.11 縦型ガス抜き管周辺模型の出来形

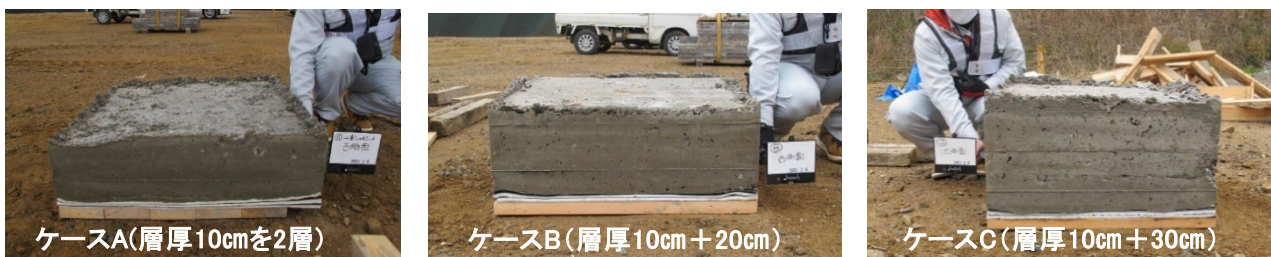


図-4.2.12 遮水シート上部模型の型枠解体後の出来形

(5) 固化式埋立層のコアボーリング結果

目視確認の終了後、固化体とフィルター材との水平接合部で3本(図-4.2.13、フィルター材法肩模型、固化体層厚20cm)、鉛直接合部の直近(以下、端部と呼ぶ)と約50cm離れた位置(以下、中央と呼ぶ)で各3本(図-4.2.14、堅型ガス抜き管周辺模型、固化体層厚=1層目10cm+2層目20cm+3層目30cm=60cm)のボーリングコア(φ50mm)を採取した。なお、端部及び中央の各3本のコアは、それぞれ振動締め時間が30秒、90秒、120秒と違いがある(前出の図-3.2.4参照)。

コアボーリングで採取したφ5cmの各コアは、図-4.2.16に示すように概ね高さ10cmごとに分割して、一軸圧縮強度試験、密度測定、有害物質溶出試験、透水試験を行った。密度測定と溶出試験は強度試験後の供試体で実施し、溶出試験と透水試験は水平接合部のコアで実施した。表-4.2.6に固化体の配合、ボーリングコア採取位置毎の施工条件、室内試験数量などを示す。

各試験の結果を以下に示すが、フィルター材直上の固化体の密度が若干小さかった点を除けば、締め層厚やコア採取位置による差は小さく、環境安全性にも問題はなかった。

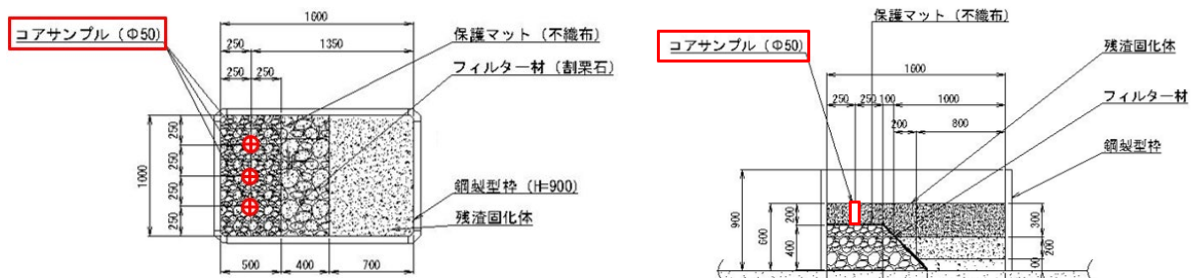


図-4.2.13 フィルター材との水平接合部でのコア採取位置(左:平面図、右:縦断)

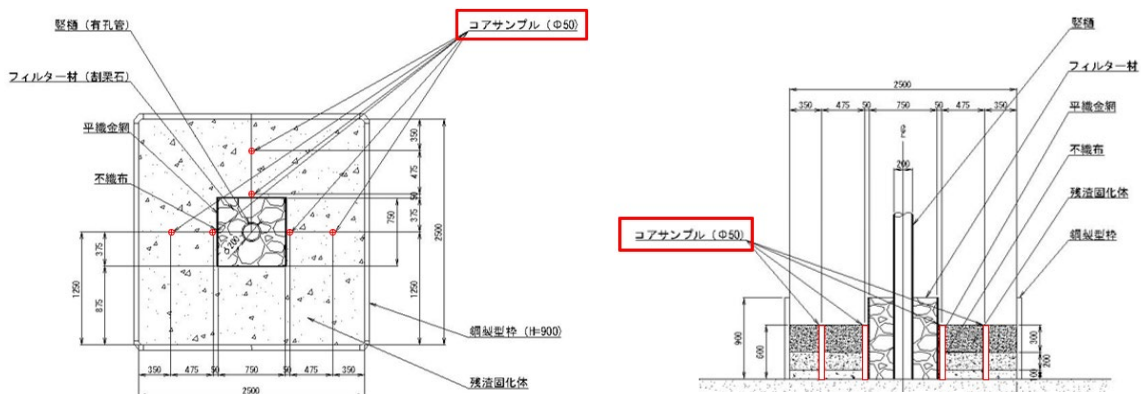


図-4.2.14 フィルター材との鉛直接合部近辺でのコア採取位置(左:平面図、右:縦断)

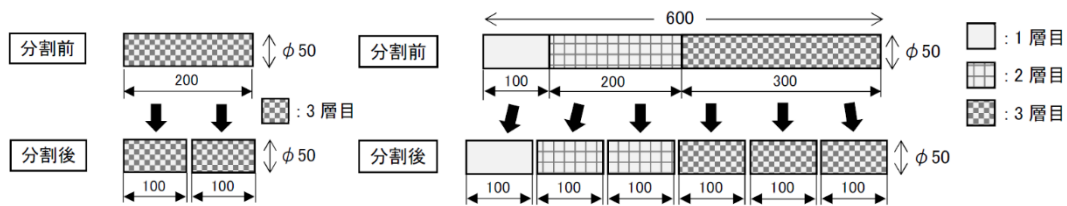


図-4.2.15 コア分割イメージ(左:水平接合部コア、右:鉛直接合部近辺コア)

表-4.2.6 焼却残渣固化体の配合、コア採取位置、室内試験の一覧

型枠模型			現場配合 (kg/バッチ)					混練時の含水比(%)	ボーリングコア採取			試験名	施工時の加振時間 (sec)	室内試験の数量			試験時の材齢(日)
略称	何層目	施工日	焼却灰	飛灰	セメント	石炭灰	水		位置	長さ(cm)	本数			密度と一軸圧縮	溶出 (2mm, 有姿)	透水	
法肩周辺	3層目	12/15	440	46	50	75	0	19.8	法肩	20	3	法-3	30	2	2	1	35
ガス抜き管周辺	1層目	12/15	440	46	50	75	0	19.8	端部	10	3	鉛-1-端	30	2	-	-	
									中央	10	3	鉛-1-中		3	-	-	
	2層目	12/16	428	45	50	75	0	19.7	端部	20	3	鉛-2-端	30+30=60	2	-	-	
													30+60=90	2	-	-	
													30+180=210	1	-	-	
													30+30=60	2	-	-	
													30+60=90	1	-	-	
													30+180=210	1	-	-	
	3層目	12/17	428	45	50	75	6.7	21.0	端部	30	3	鉛-3-端	30+30=60	1	-	-	
													30+60=90	1	-	-	
													30+180=210	2	-	-	
													30+30=60	2	-	-	
30+60=90													1	-	-		
30+180=210													2	-	-		
中央	30	3	鉛-3-中	30+30=60	2	-	-										
				30+60=90	1	-	-										
				30+180=210	2	-	-										
				30+30=60	2	-	-										
				30+60=90	1	-	-										
				30+180=210	2	-	-										

\* 1バッチ当りの固化体締固め後の想定体積は約0.3m<sup>3</sup>

i) 乾燥密度

図-4.2.16に示すように、壜型ガス抜き管周辺模型の固化体（端部及び中央）の乾燥密度は、1層目（層厚10cm）と2層目（層厚20cm）と3層目（層厚30cm）を比較すると、ばらつきはあるが全体的には大きな差はないと思われる。また、加振時間の違いによる差も明確ではなかった。なお、フィルター材法肩模型の水平接合部の固化体（3層目、コア採取位置の層厚20cm、図中の法肩-30秒）は1.63 g/cm<sup>3</sup>と鉛直接合部周辺の値よりもやや小さく、フィルター材の上面に敷いたクッション性のある保護マットの影響が示唆された。

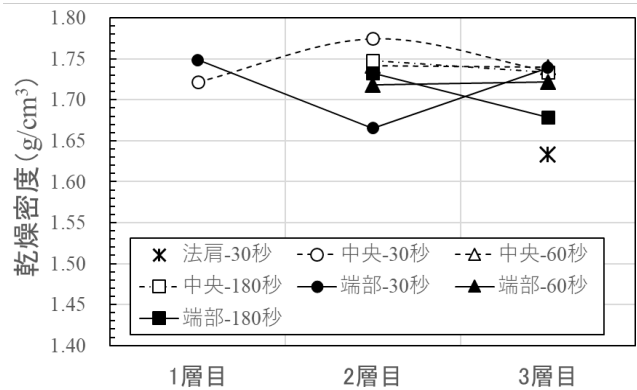


図-4.2.16 乾燥密度

ii) 一軸圧縮強度

一軸圧縮強度を図-4.2.17に示す。フィルター材との鉛直面接合部の1層目では、中央で12.0N/mm<sup>2</sup>、端部で12.5N/mm<sup>2</sup>と大きな差はなかった。2層目は中央で10.7~12.7N/mm<sup>2</sup>、端部で8.0~12.7N/mm<sup>2</sup>と、端部のばらつきがやや大きかった。3層目は中央で9.9~11.8N/mm<sup>2</sup>、端部で7.3~9.1N/mm<sup>2</sup>と、端部の強度が若干小さかった。一方、水平接合部（図中の法肩-30秒）は9.4N/mm<sup>2</sup>と鉛直接合部の中央よりやや小さいものの、乾燥密度（図-4.2.17）のような傾向はみられなかった。なお、締固め層厚や加振時間の違いによる差は認められなかった。

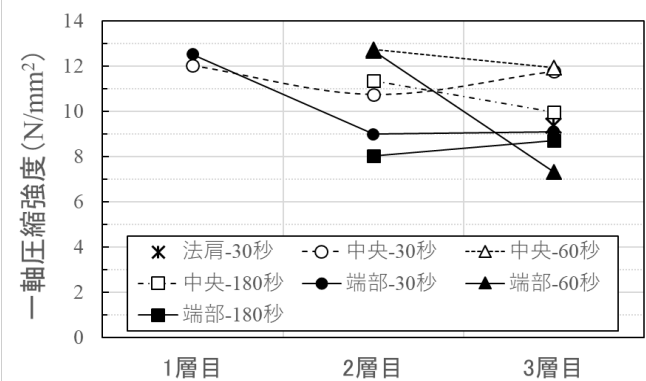


図-4.2.17 一軸圧縮強度

iii) 重金属類の溶出濃度

六価クロム、セレン、フッ素、鉛の溶出濃度は図-4.2.18に示すように、2mmふるい、有姿のいずれも環境基準を下回った。

iv) 透水係数

透水係数は $6.37 \times 10^{-10}$  cm/sと小さく、開発目標の $1 \times 10^{-7}$  cm/s（実質、不透水層）を満足した。

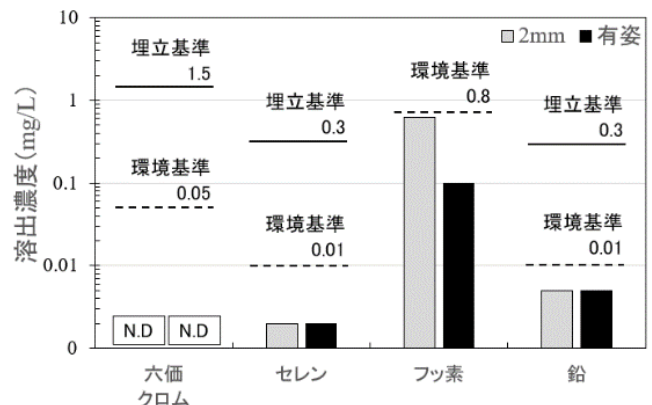


図-4.2.18 重金属溶出濃度

4-3. 基本設計

実証施工を行うための基本設計では、まず前述した前提条件に基づきマテリアルフローを図-4.3.1に示すように試算して、固化式処分場の埋立容量を25m<sup>3</sup>と設定した。そして、運用試験の結果等から主な諸元等を表-4.3.1のように設定した。なお、運用試験では施工性確認が主目的であったために、試験場所の実処分場に搬入されてきた水分量の多い焼却残渣をあえて使用した。しかし、含水比調整のために混和材を多量に使用するのには経済性の面からも好ましくないため、実証施工では既往研究と同様に臨海工場の焼却灰と飛灰を乾燥重量混合比3:1で用いることとした。

表-4.3.1を踏まえて実証施工する模擬処分場の平面図、縦断面図、横断面図を作図した(図-4.3.2)。

平面形状は、底面幅3m×長さ8mの長方形とした。固化式埋立層の厚さは1mとし、外周は集排水の上流側のみを土堰堤とし、残りの3辺は、固化式埋立に使用する振動締固め機(プロトタイプ機、ミニバックホウ装着の振動板750×750mm)の施工性等も考慮して、L型擁壁を用いた直立壁とした。水収支と水質及びガス発生を適切に把握して評価するために、表流水集排水管(堅型ガス抜き管兼用)、底面の浸出水集排水管、ガスモニタリング管(測定時以外は上蓋で閉塞)を機能別に分けて設置した。固化式埋立層を浸透してくる浸出水量と水質を適切に把握するために、二重遮水シート工の最上面の保護マットには透水性が低いアスファルト含浸シートを使用して、固化式埋立層の外周面からの通水を抑止する構造とした。固化式埋立層の表層劣化を抑制するために厚さ20cmの最終覆土を設けた。

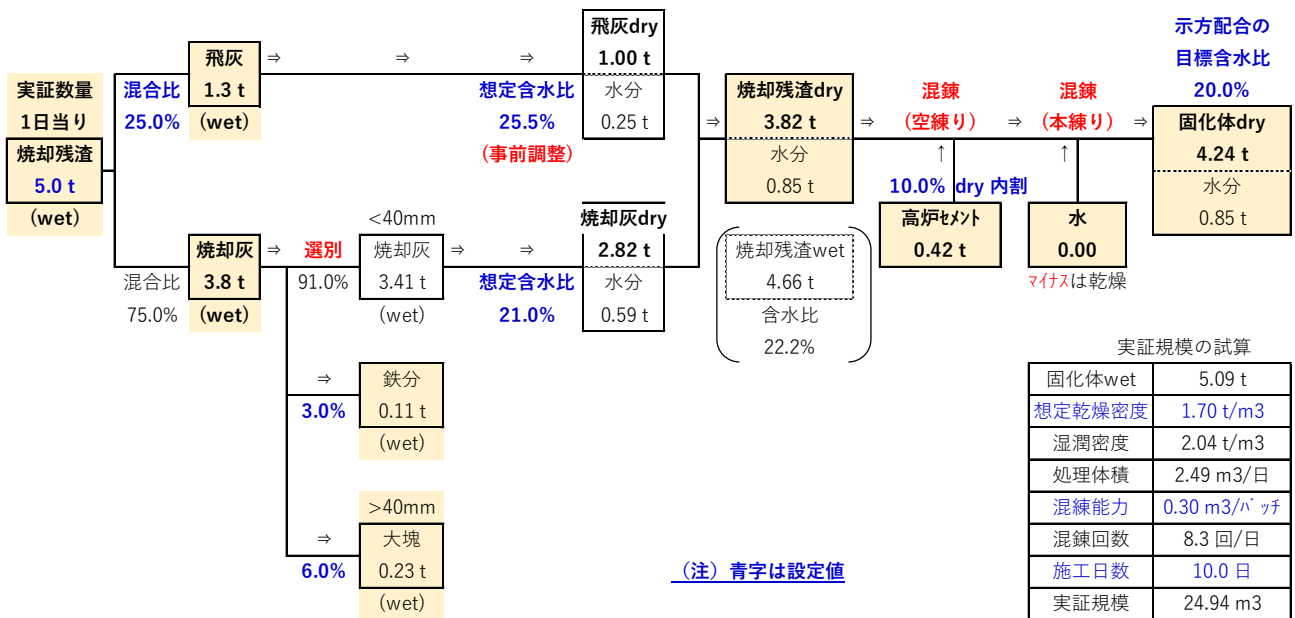
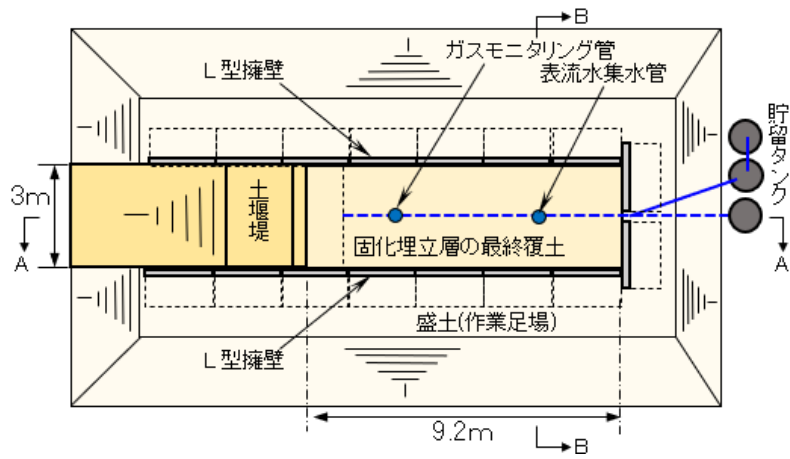


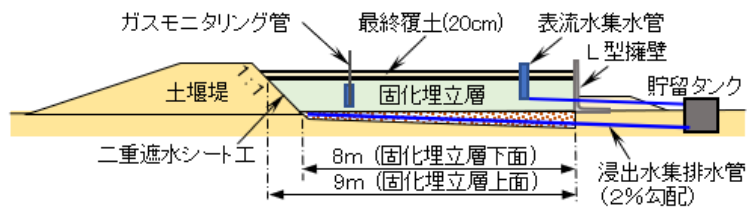
図-4.3.1 実証施工のマテリアルフローの試算結果

表-4.3.2 実証施工する固化式処分場の構造を決めるための前提条件と主要諸元等

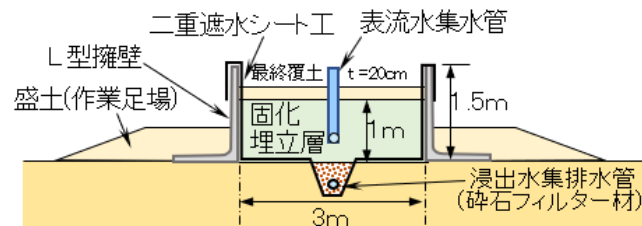
項目	前提条件	主要諸元等
処理能力	中田埋立地の平均的数量の1/10	5 t/日
処理量	処理能力×10日間	50 t (焼却灰：飛灰=3：1)
埋立体積	施工試験および既往研究成果に基づいたマテリアルフローを試算	25 m <sup>3</sup> (図20参照)
埋立厚さ	施工性等を考慮して設定	1 m (振動締固め層厚20cm×5層)
平面形状	ミニバックホウ搭載の振動締固め機の施工性等を考慮して設定	固化体の上面幅3m×長さ10m程度 (振動締固め機の届く距離が約3m)
集排水設備	固化体は実質、不透水層 雨水はほぼ全量が表流水となる 固化体を浸透して発生する浸出水≒0	表流水が速やかに集排水できる構造とする 日最大降水量280.0 mm/日 (前原, 1991年) 浸出水集排水管は浸出水≒0の検証に利用
ガス抜き管	生物分解に必要な空気の供給は不要 ガス発生量は少ないと考えられる	構造基準上で必要最小限の数量とする ガス発生量と成分を検証するために利用する
遮水工	埋立地の構造基準に準ずる 浸出水≒0が実証できること	二重遮水シート工を設置 最上面の保護マットは不透水性材料とする



平面図



縦断面図 (A-A)



横断面図 (B-B)

図-4.3.2 模擬処分場の設計図

## 4-4. 実証施工

### (1) 詳細設計

基本設計における前提条件を適切に満たすように、固化式処分場の細部は表-4.4.1のように決めた。

表-4.4.1 実証施工する固化式処分場の細部構造

細部	仕様等	概要図
表流水集排水管	鉛直部分は有孔管（塩ビ50、内径51mm） 堅型ガス抜き管を兼用（3～5層目） フィルター材は円筒中空断面樹脂製 （ヘチマロン2315、外径150mm） （不織布フィルター巻き） 水平部分は無孔管（塩ビ75、内径77mm） 浸出水集排水管とは接続しない	
浸出水集排水管	内径75mm有孔管（塩ビ75、内径77mm） フィルター材は砕石C20-0 フィルター材表面に不織布10mmを敷設 底面部に単独で設置	
ガスモニタリング管	埋立層の2～4層目のみを有孔管 （塩ビ50、内径51mm） フィルター材は円筒中空断面樹脂製 （ヘチマロン2315、外径150mm） （不織布フィルター巻き） 5層目は無孔管でフィルター材も無し （雨水浸入防止、） 外気が入らないように上蓋を付ける	
二重遮水シート工	最上面の保護材は不透水性材料 （アスファルト含浸シート4mm）	

### (2) 施工フロー

実証施工の実施フローを図-4.4.1に示す。焼却残渣は福岡市臨海工場からの焼却灰と飛灰を使用し、焼却灰（選別後）と飛灰の混合比率は乾燥質量比で3:1、セメント添加量は乾燥質量比10%（内割）とした。

事前に採取した焼却残渣で室内配合試験を実施し配合選定を行ってから固化式処分の施工に着手する。室内配合試験の際には焼却残渣の性状（組成、含水比、焼却灰の粒度、粒子密度等）も確認した。また、最終覆土に使用する土質材料についても粒度や締固め特性を事前に確認した。

施工手順を図-4.4.2に示すが使用した機材は運用試験と同一である。表-4.4.2に施工・品質管理項目を示す。

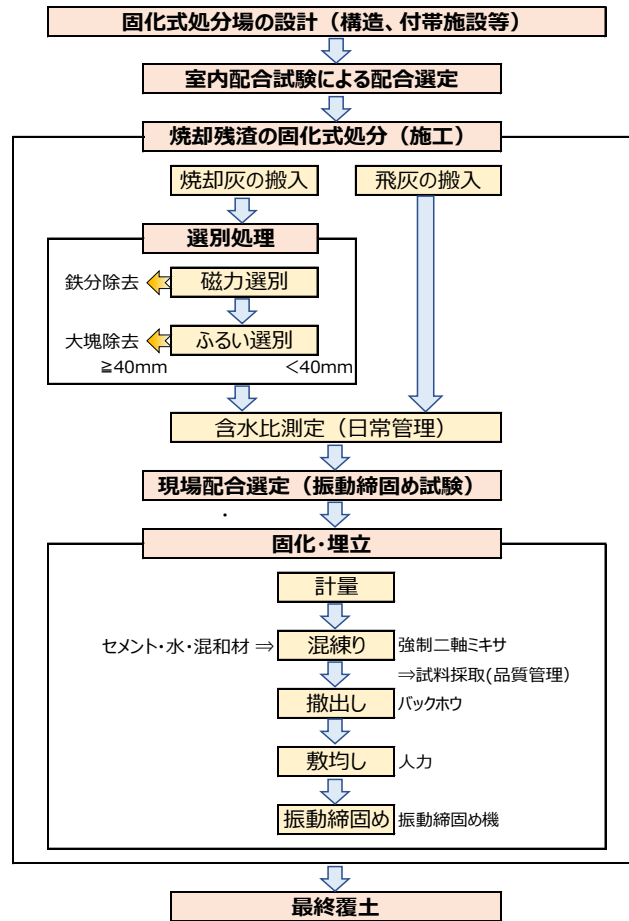


図-4.4.1 実証施工の実施フロー

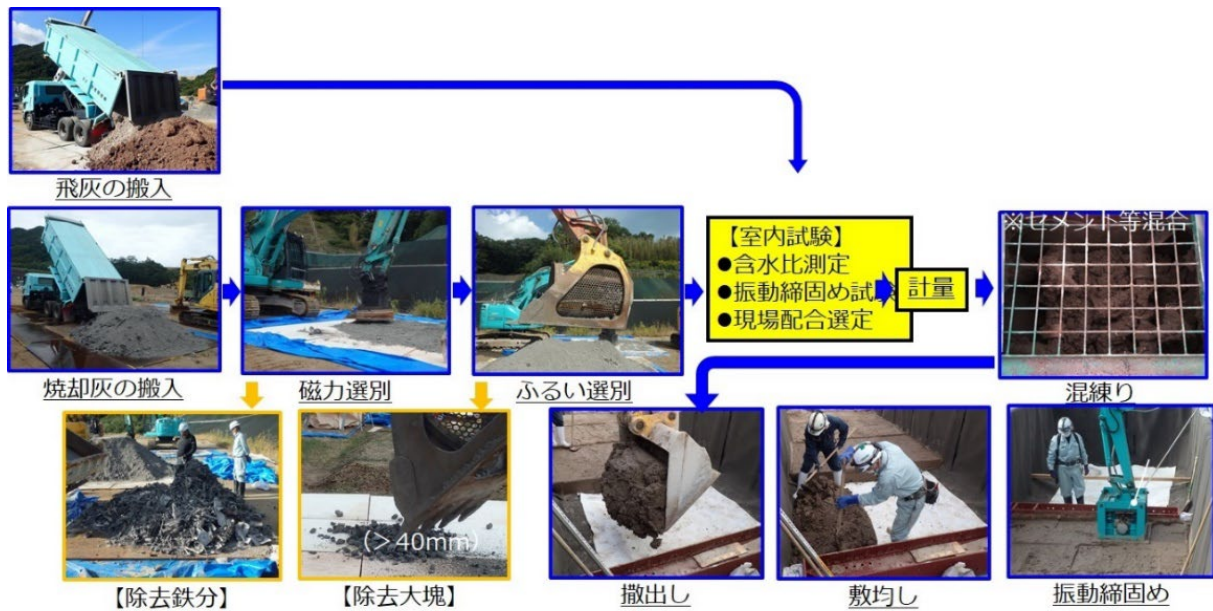


図-4.4.2 固化式処分の施工手順



表-4.4.2 実証施工における施工・品質管理項目

手順	施工・品質管理項目	測定方法等	頻度等
材料搬入	焼却灰・飛灰の質量	車両重量計	搬入毎（搬入記録）
	焼却灰・飛灰の溶出試験	環告46号	1回
選別処理	焼却灰の選別前後の重量	クレーンスケール等	選別毎（フレコンバッグ）
	選別除去した鉄分・粗雑物の重量	車両重量計等	選別毎（廃棄処理時）
現場配合選定	焼却灰・飛灰の物性（含水比等）	含水比測定試験等	1回/日
	締固め特性（混練含水比の決定）	振動締固め試験	1回/日
混練	材料の質量 （焼却灰投入はフレコンバッグ利用）	クレーンスケール等 （セメントは25kg袋毎）	バッチ毎
	練混ぜ状況	目視確認	バッチ毎
	振動締固め密度	モールド試料作製 （テーブルバイブレータ）	1回/日 材齢28日一軸圧縮試験
運搬・敷均し	敷均し面積・厚さ（高さ）	メジャー、レベル測量	区画割毎
振動締固め	締固め層厚（高さ）	レベル測量	区画割毎
	ブリージング等の有無	目視確認	随時（混練1バッチ毎）
	平坦性（仕上げ）	目視確認	区画割毎

### （3）事前の配合選定

焼却残渣（40mmふるい下）を事前に臨海工場で採取し（令和3年9月17日）、焼却残渣の物理・化学試験や成分分析を実施し、配合選定のための室内配合試験を行った。表-4.4.3には標準的な試験横目を示すが、今回は既往研究の参照データがあったので透水試験、溶出試験は省略した。

試験結果を既往研究データと対比し図-4.4.3～図-4.4.10に示す。

焼却残渣の粉体密度と含水比は既往結果に比べてやや高いが、粒度分布はほぼ同じ傾向である。成分は既往の結果と比べ、焼却灰でカルシウムと鉄の酸化物の割合が多く、飛灰でカリウムの酸化物の割合が高い。また、焼却灰は亜鉛・銅・バリウムの割合が多く、飛灰は塩素濃度が高かった。

実証施工の配合選定は、既往研究および今回の配合試験結果（図-4.4.9、図-4.4.10）に基づいて実施した。振動締固め曲線の最大密度を示す含水比（最適含水比）は、既往研究では26～27%で今回は24～25%であった。現場の施工性等を考慮すると、混練時の含水比は最適含水比+1～4%が望ましい。そこで、事前の配合選定は混練時含水比を28%として表-4.4.4のように決定した。なお、施工時には焼却残渣の含水比の変動等に応じて柔軟に配合修正を行った。

表-4.4.3 固化式処分の配合選定で実施する標準的な試験項目

試験名等	備考
土の含水比試験	JIS A 1203-2009に準拠
ケロシン法の密度試験	JIS R5201セメントの密度試験に準拠
土の粒度試験	JIS A 1204-2009に準拠
熱しゃく減量試験	環整95号に準拠
XRFによる成分分析	蛍光X線回折
重金属類の溶出試験	環告45号（ふっ素、セレン、鉛、亜鉛など）
振動締固め試験	含水比5点程度、締固め曲線を得る
一軸圧縮試験	JIS A 1216-2020に準拠
透水試験（変水位）	JIS A 1218-2020に準拠

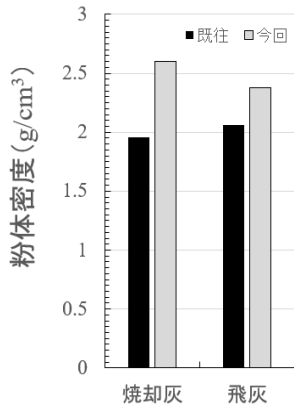


図-4.4.3 粉体密度 (臨海工)

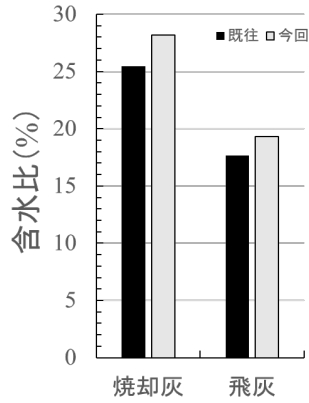


図-4.4.4 含水比 (臨海工)

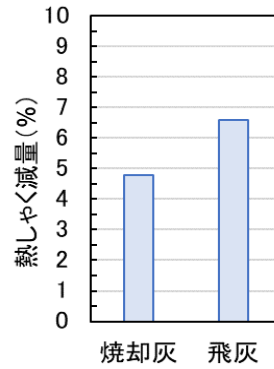


図-4.4.5 熱しやく減量

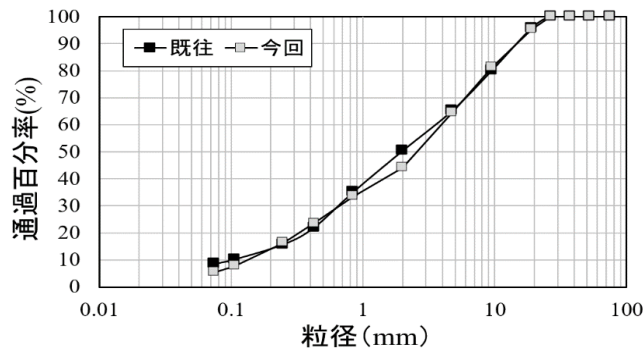


図-4.4.6 粒度分布

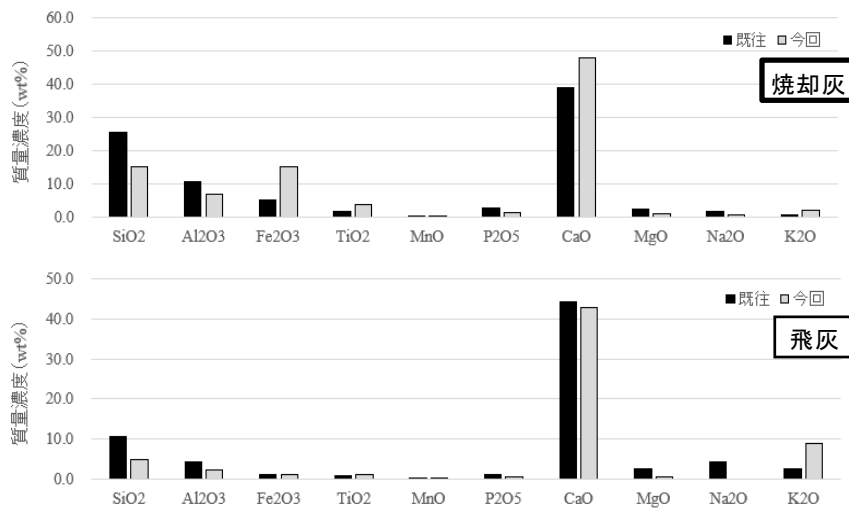


図-4.4.7 XRF分析結果 (臨海工場\_化合物)

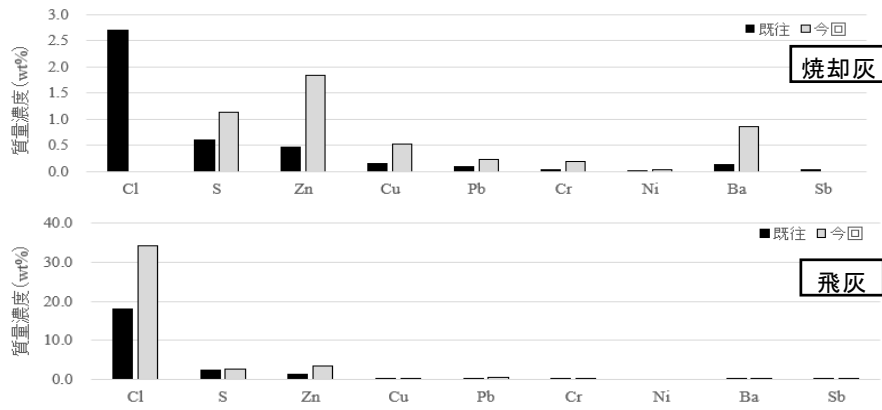


図-4.4.8 XRF分析結果 (元素)

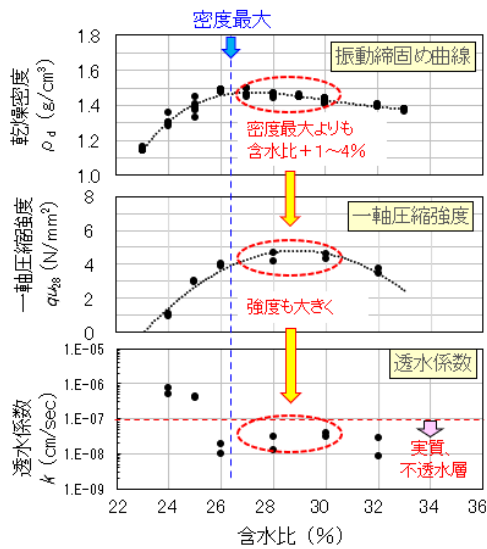


図-4.4.9 室内配合試験結果(既往)

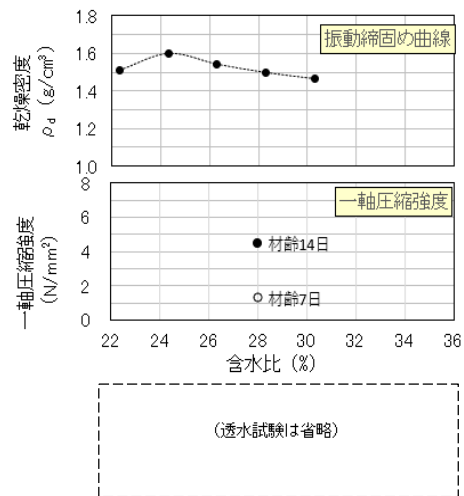


図-4.4.10 室内配合試験結果(実証施工)

表-4.4.4 事前検討で選定した配合条件

項目	配合等				固化体	
	焼却灰	飛灰	セメント	水		
材料の混合条件 (乾燥質量比)	焼却残渣の混合比(%)	75.0	25.0	—	—	
	セメント混合率(内割%)	—	—	10.0	—	
	練混ぜ材料の配合比(%)	67.5	22.5	10.0	—	
配合選定条件 (臨海工場焼却残渣)	焼却残渣の含水比(%)	26.6	19.9	—	—	
	練混ぜ時の含水比(%)	—	—	—	28.0	
	締め後の乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—	1.480	
	締め後の湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—	1.894	
示方配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	乾燥質量 999	乾燥質量 333	148	414	合計 1,894
	現場配合	材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )	湿潤質量 1,265	湿潤質量 399	148	82

(4) 選別処理

焼却灰の選別処理では鉄分5.1%と40mmオーバーの大塊が14.5%除去された(表-4.4.5、図-4.4.11)。

表-4.4.5 焼却灰の選別処理結果

受入れ量	選別除去量		選別後の 焼却灰
	鉄分	>40mm	
54.20 t (6車)	2.76 t (5.1%)	7.86 t (14.5%)	43.58 t (80.4%)



図-4.4.11 焼却残渣のふるい選別後のサンプル

(5) 現場配合選定

焼却残渣は運搬車6台分を選別処理したが含水比に大きな差はなく24%で一定とした。飛灰は受け入れた運搬車によって含水比wに2%程度の差があったので、A(飛灰w21.6%)とB(飛灰w19.4%)の2パターンの現場配合を選定することとした。そして、室内振動締固め試験の結果(図-4.4.12)に基づき各4種類、合計8種類の配合(表-4.4.6)を準備し、固化式埋立の施工・品質管理データをみながら日々最適と思われる配合を選んで施工した。

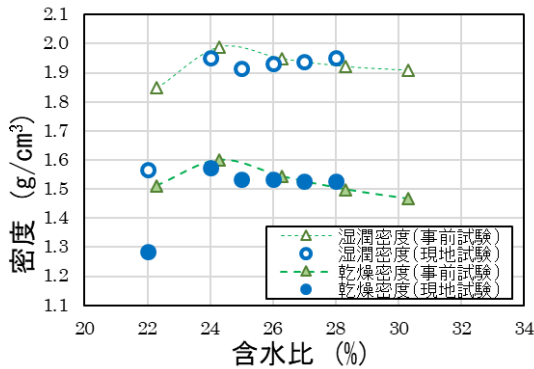


図-4.4.12 室内振動締固め試験結果

図-4.4.6 現場配合の選定(8種類の配合を準備)

ケース	混練時の 含水比 (%)	配合 (kg/バッチ)			
		水	焼却 灰	飛灰	セメント
A 焼却灰 w24% 飛灰 w21.6%	25	20	418	137	50
	26	25			
	27	30			
	28	35			
B 焼却灰 w24% 飛灰 w19.4%	25	22	418	134	50
	26	27			
	27	32			
	28	37			

(6) 固化式埋立

固化式埋立は、ミキサ混練3バッチ分(約1m³、幅約3m×長さ1.7m×層厚20cm)を標準的な施工単位として、埋立範囲を仕切板(H300)で仕切って施工した(図-4.4.13、表-4.4.7)。

日々の施工・品質管理として、混練後の埋立材料をΦ10cm×h20cmのモールドに採取してテーブルバイブレーターで締固め、試料質量を測定して振動締固め密度を求めた(図-4.4.14)。モールド試料は所定の材齢で一軸圧縮試験、透水試験、溶出試験を行い固化体の品質、環境安全性の目標値を達成していること確認した。また、試験結果は、後述するモニタリングでのボーリング採取試料の試験結果とも比較し同等の結果が得られていることを確認した。

固化式埋立による減容化については以下の結果が得られた。固化式埋立層の乾燥密度は平均1.52 t/m³で、乾燥質量1t当りの焼却残渣による埋立容量消費量はセメント添加量(乾燥質量比内割10%)を考慮した1.52×0.9=1.368t/m³の逆数の0.73m³/tとなる。一方、従来の埋立方式での焼却残渣層は現場密度試験(水置換法)により乾燥単位体積質量を求めた結果が1.22 t/m³であった<sup>1)</sup>ので、埋立容量消費量はその逆数の0.82 m³となる。さらに従来方式では即日覆土と中間覆土で埋立容量の約20%が消費されている。したがって、固化式埋立による高密度化で埋立容量の消費を29%削減(図-4.4.15)でき埋立地の延命化に寄与することが確認できた。なお、既往研究<sup>1)</sup>のパイロット施工試験では23%の削減であった。

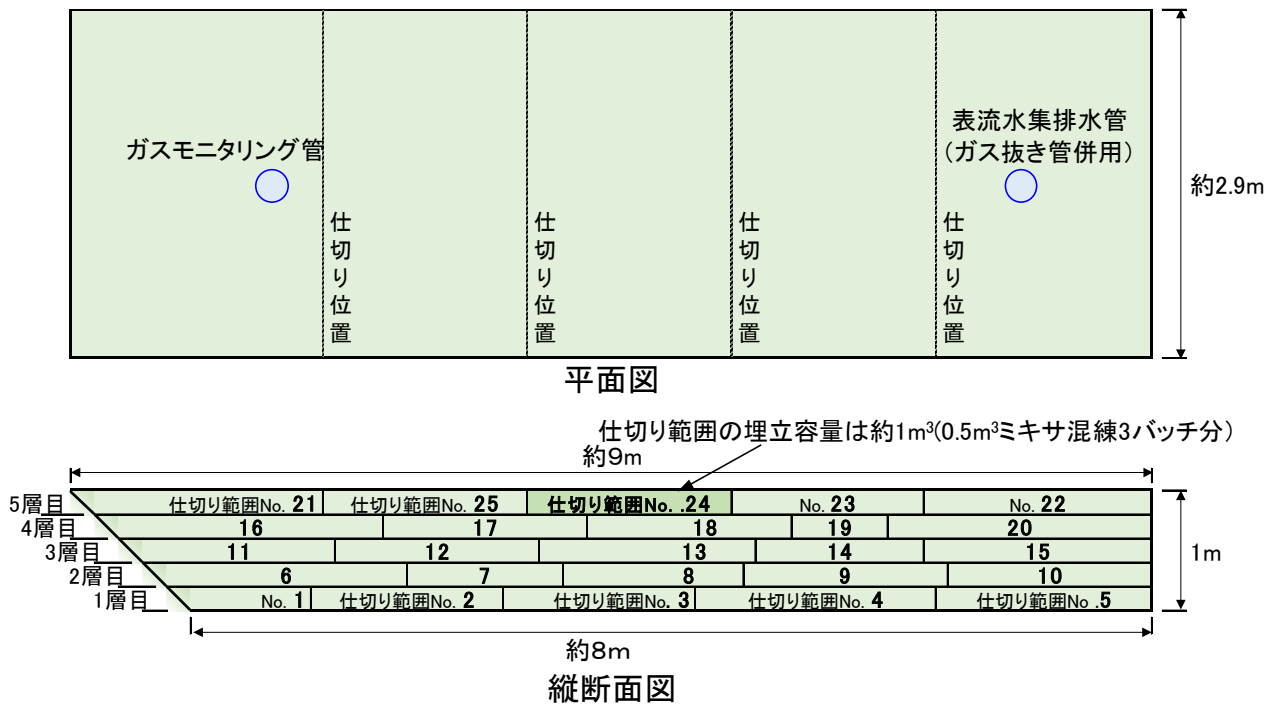


図-4.4.13 固化式埋立の仕切り施工の概要（縦断面）

表-4.4.7 固化式埋立の施工実績

層目	区画割 No.	施工日 2021年	混練 バッチ数	配合 含水比(%)
1層目	1	11/1	2	27,28
	2	11/2	3	25
	3	11/3	3	25
	4	11/3	4	25
	5	11/3	3	25
2層目	6	11/4	2	25
	7	11/4	2	25
	8	11/5	3	26
	9	11/5	3	26
3層目	10	11/5	3	26
	11	11/5	2	26
	12	11/6	3	26
	13	11/6	3	26
	14	11/6	2	26
4層目	15	11/8	4	26
	16	11/9	4	26
	17	11/12	3	26
	18	11/13	3	26
5層目	19	11/13	4	26
	20	11/13	1	26
	21	11/15	4	26
	22	11/15	4	26
	23	11/16	3	26
	24	11/16	4	26
	25	11/16	4	26

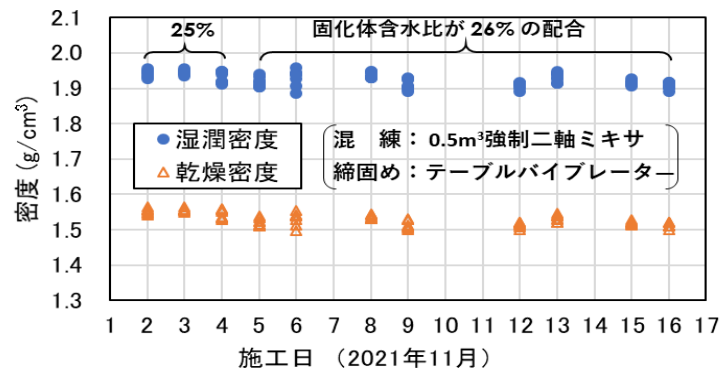


図-4.4.14 モールド採取試料の密度測定結果

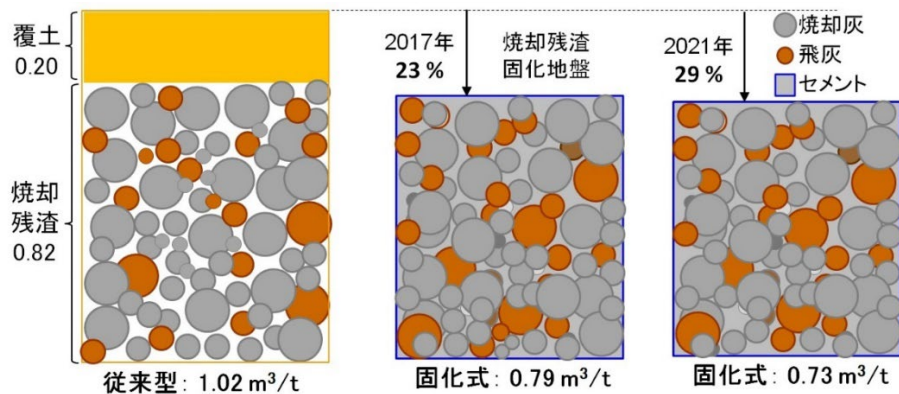


図-4.4.15 固化式処分システムによる減容効果

### (7) 打継目等の透水性確認

鉛直打継目の密着性確認実験の概要を図-4.4.16に示す。図中に示したNo. は施工完了から約3週間後にコアボーリングで採取したΦ100mm×200mmの試料番号である。コア試料の採取状況を図-4.4.17に、各試料で実施した透水試験、一軸圧縮試験の結果を表-4.4.8、図-4.4.18に示す。

打継ぎ時間間隔が1日～11日のコア試料の透水係数は、 $10^{-4}$ cm/sオーダーから $10^{-8}$ cm/sオーダーまでばらついているが、半数は $10^{-7}$ cm/sオーダー以下（実質、不透水層）であった。透水係数のばらつきが大きい要因にはコアボーリング作業の影響もあると思われるが、鉛直打継目の密着性に関しては不均質な部分もあり打継目の無い固化体（実質、不透水層）よりも透水性が高くなるということが示唆された。なお、打継ぎ時間間隔が25日でのコア試料はボーリング中に打継目で割れたため透水試験は実施しなかった。

二重遮水シート工の保護材（幅4cm）を挟み込んだΦ10cm×h10cmの固化体供試体の透水試験を実施した。アスファルト含浸シート等を挟んだ固化体供試体の透水係数は、表-4.4.9に示すように固化体だけの供試体と同等の透水係数であった。したがって、二重遮水シート工の最上面にアスファルト含浸シートを不透水性保護マットとして使用すれば、固化体との境界面から固化式埋立層内部へ雨水が浸入する可能性は低いと考えられる。

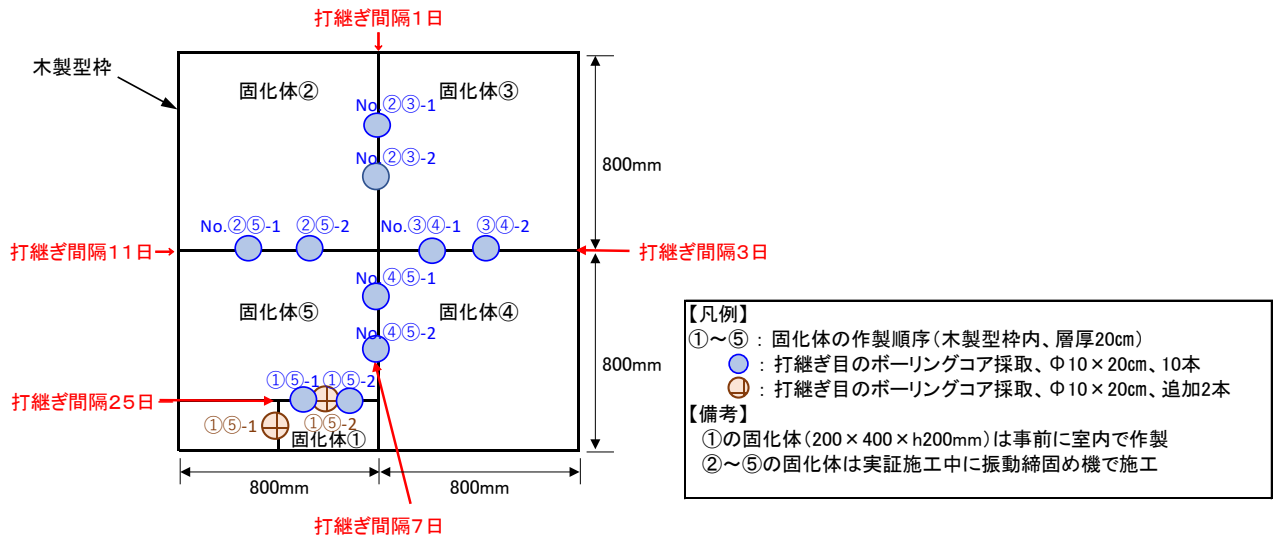


図-4.4.8 鉛直打継目の密着性確認実験の概要（平面図、施工順序）

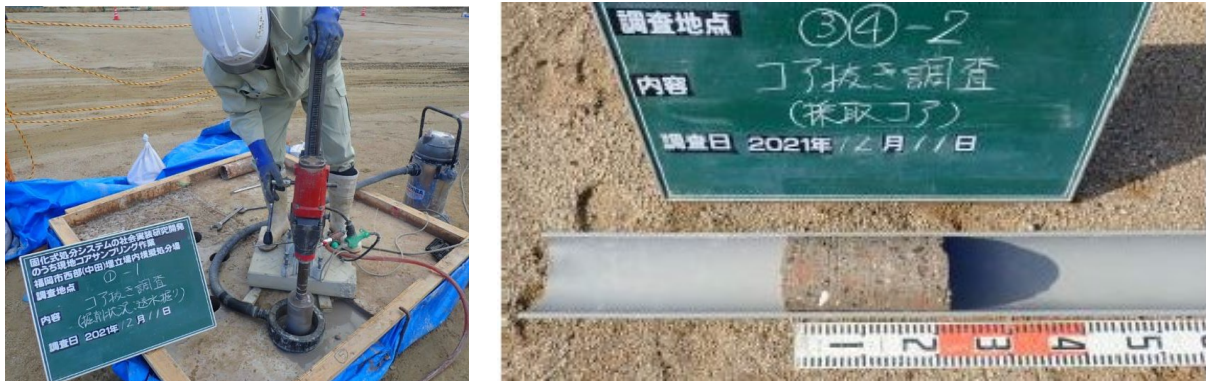


図-4.4.17 鉛直打継目コア試料の採取状況

表-4.4.8 鉛直打継目コア供試体の透水試験結果

打継ぎ間隔(日)	1日		3日		7日		11日		28日			
供試体No.	②③-1	②③-2	③④-1	③④-2	④⑤-1	④⑤-2	②⑤-1	②⑤-2	①⑤-1	①⑤-2	①⑤-3	①⑤-4
透水係数(cm/s)	$3.67 \times 10^{-7}$	$1.87 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-4}$	$8.34 \times 10^{-9}$	$1.68 \times 10^{-7}$	$7.41 \times 10^{-8}$	$1.38 \times 10^{-6}$	$1.94 \times 10^{-8}$	(供試体が打継ぎ目で割れたので試験中止)			

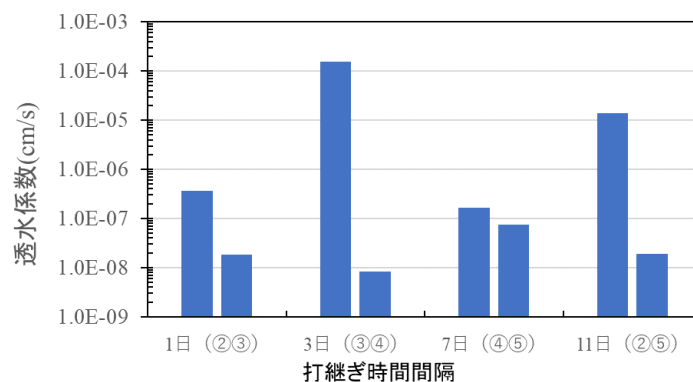


図-4.4.18 鉛直打継目コア供試体の透水試験結果

表-4.4.9 透水試験結果（保護マットの有無と材質の影響を確認）

 供試体	供試体内の挟在物の種類	アスファルト含浸シート (厚さ4mm)	無し (固化体のみ)	FPAゴムマット (厚さ1.5mm)	不織布 (厚さ10mm)
	透水係数(cm/s)	$4.38 \times 10^{-9}$	$9.79 \times 10^{-8}$	$2.38 \times 10^{-7}$	$4.39 \times 10^{-3}$
	備考	変水位透水試験 動水勾配14.2	変水位透水試験 動水勾配9.9	変水位透水試験 動水勾配9.9	定水位透水試験 動水勾配0.1

#### 4-5. 耐久性と環境安全性のモニタリング

##### 4-5-1. 水収支、水質、ガス

図-4.5.1に水収支の計測データとして、360日間の積算降雨量、積算浸出水量、積算表流量を示す。積算降雨量に対する積算浸出水量、積算表流量の割合はそれぞれ、0.1%、27.5%であった。固化地盤が実質不透水層である固化式処分場において浸出水はほとんど発生しないことが実証された。わずかに発生した浸出水は、固化地盤内を浸透したのではなく、固化地盤と遮土工の境界を浸透したものと考えられる。降水量の27.5%が表流水として発生し、72.4%は蒸発するという結果となった。覆土を設けたことで、雨水の一部は覆土に保水され、覆土から蒸発したと考えられる。覆土の保水性と蒸発により、表流水の発生が抑制されることが示された。なお、前記の蒸発量は降水量から表流量および浸出水量を引いて求めたものである。蒸発量の算定式として広く用いられているペンマン法を用いて気象観測データから蒸発量を算出した。その結果を図-4.5.2中に示す。ペンマン法により求めた積算蒸発量は積算降水量の77%となり、前記の蒸発率72.4%は妥当なものであることが確認された。

図-4.5.3に360日間の表流水のpHおよびPb濃度を示す。pHは22~43日目以降、放流水質基準（ $5.8 \leq \text{pH} \leq 8.6$ ）を満足した。Pbを始めとする重金属濃度は、実験開始時から放流水質基準値を大きく下回った。固化式処分場は埋立終了後速やかに水質に関する廃止基準を満足することができると考えられる。

図-4.5.4に335~365日目にガスモニタリング管の上端を密閉して計測したガスモニタリング管内のガス組成の経時変化を示す。従来型処分場における埋立ガスの主成分である $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ の濃度は定量下限値以下であり、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ の発生は認められなかった。 $\text{H}_2$ の濃度は計測開始時は定量下限値以下であったが、計測開始から16日目で1%に達し、その後1%を維持した。ガスモニタリング管の上端を密閉した状態で水素の濃度が1%で頭打ちになったことは、固化地盤内の水素濃度が1%程度であることを示唆するものと考えられる。水素ガスは固化式処分された焼却灰に含まれていた金属アルミニウムが固化式処分された焼却残渣に含まれるアルカリ性を示す水と反応することで発生したものと考えられるが、施工から1年経過した固化地盤においては、水素ガス濃度は爆発下限界(4%)を大きく下回ることが確認された。

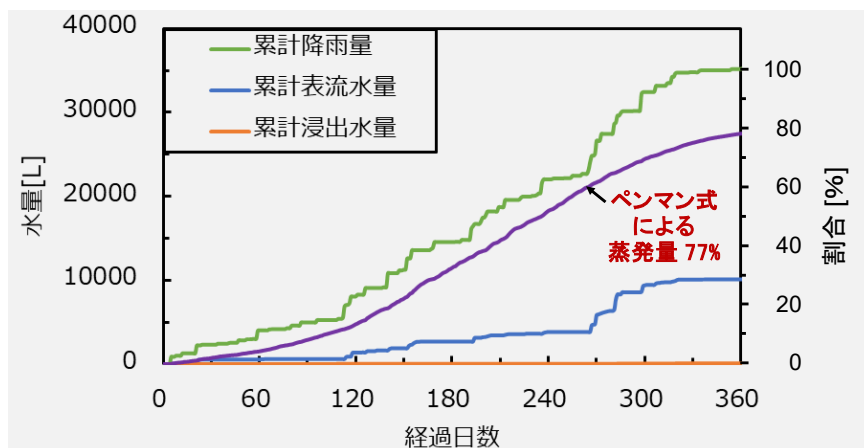


図-4.5.1 固化式処分場の水収支



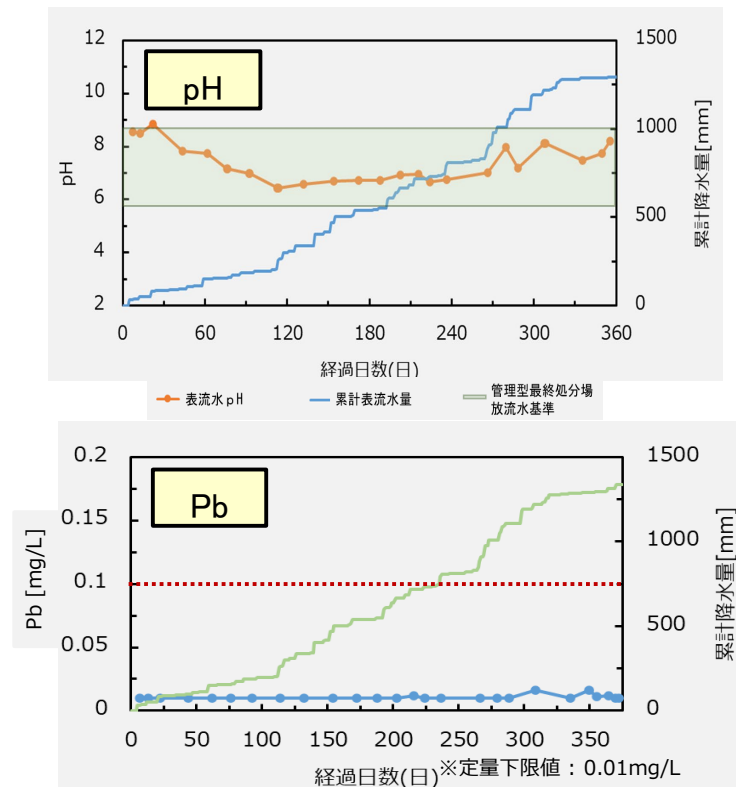


図-4.5.2 表流水のpH、Pb濃度

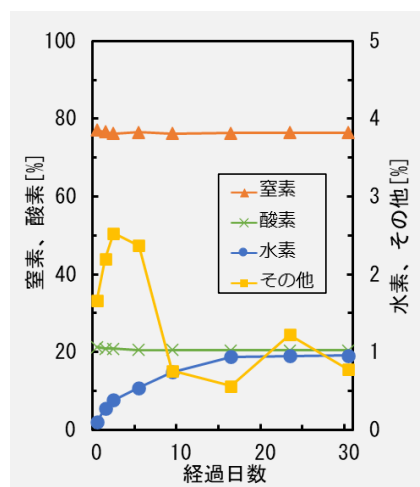


図-4.5.3 ガス組成

(335～365日目にガスモニタリング管の上端を密閉して計測)

#### 4-5-2. 固化式埋立層の耐久性等

##### (1) 固化式埋立層の品質 (ボーリングコア採取)

二重遮水シート工を撤去した際には、固化式埋立層の側面に水平打継の境界線が目視で確認された(図-4.5.13)。しかし、ボーリング採取したコアはいずれも全長がほぼ一体化しており、打継目で空隙(気泡跡)が多くなるといった傾向もない(図-4.5.4)。また、覆土撤去後に確認した固化式埋立層表面は、クラックやポップアウト等もなく良好な状態で表層劣化の兆候はなかった。

図-4.5.5、表-4.5.1、表-4.5.2にコア採取試料の一軸圧縮試験結果を示す。強度は材齢と共に増加し、平均値と比較すると材齢394日の強度は材齢44日の約1.7倍となり全ての試料が目標強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ を上回っ

た。また、混練時含水比が小さいと強度は大きくなり、埋立層下部(1~3層目)は上部(4、5層目)より強度が大きくなる傾向がある。下部は上載荷重が大きく外気温の影響も受けにくいことが要因と考えられる。

図-4.5.6にコア採取試料(Φ100mm×100mm)の透水試験結果を示す。透水係数はいずれも10<sup>-9</sup> m/sオーダー以下であり、固化式埋立層は実質、不透水層である。

図-4.5.7に示すように、鉛、六価クロム、セレン、ふっ素の溶出濃度は一般排水基準値を大きく下回り、環境基準値以下であった。

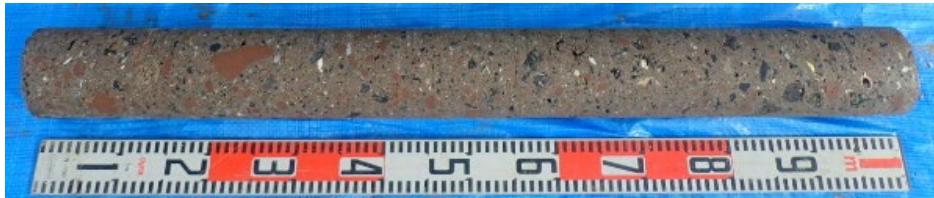


図-4.5.4 コアボーリング採取試料の例 (Bor. 5、固化式埋立の約1年後)

表-4.5.1 コア採取試料の一軸圧縮試験結果

層目	区画 No.	施工日	混練時含水比 (%)	Bor.No.1 コア試料の試験結果				Bor.No.2 コア試料の試験結果				Bor.No.4 コア試料の試験結果			
				材齢 (日)	強度 N/mm <sup>2</sup>	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	試験後含水比	材齢 (日)	強度 N/mm <sup>2</sup>	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	試験後含水比	材齢 (日)	強度 N/mm <sup>2</sup>	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	試験後含水比
5層目	24	11/16	26	37	4.29	1.51	23.6	84	4.60	1.51	25.3	385	5.90	1.50	23.3
4層目	18	11/12	26	41	4.48	1.50	24.7	91	4.80	1.54	26.0	389	8.63	1.65	17.0
3層目	13	11/6	26	47	4.60	1.57	24.3	92	7.80	1.55	25.4	395	8.58	1.61	17.9
2層目	8	11/4	25	49	5.72	1.58	25.1	96	7.60	1.55	25.3	397	9.15	1.66	16.8
1層目	3	11/3	25									398	9.33	1.64	18.6
平均値				44	4.77	1.54	24.4	91	6.20	1.54	25.5	393	8.32	1.61	18.7

表-4.5.2 コア採取試料の一軸圧縮試験結果

層目	区画 No.	施工日	混練時含水比 (%)	Bor.6 コア試料の試験結果			
				材齢 (日)	強度 N/mm <sup>2</sup>	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	試験後含水比
5層目	21	11/15	26	386	6.47	1.54	21.2
4層目	16	11/9	26	392	7.34	1.54	21.2
3層目	11	11/5	26	396	9.44	1.63	19.4
2層目	6	11/4	25	397	11.69	1.65	16.9
1層目	1	11/1	27	400	6.73	1.53	23.1
平均値				394	8.34	1.58	20.4

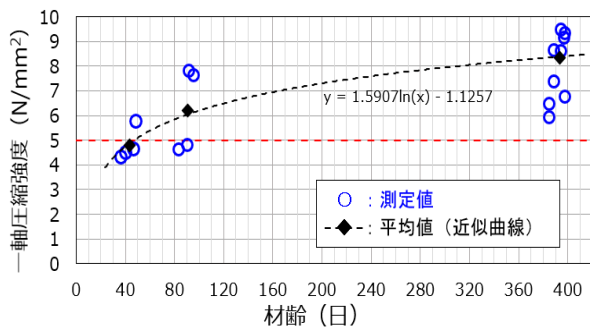


図-4.5.5 材齢と一軸圧縮強度の関係

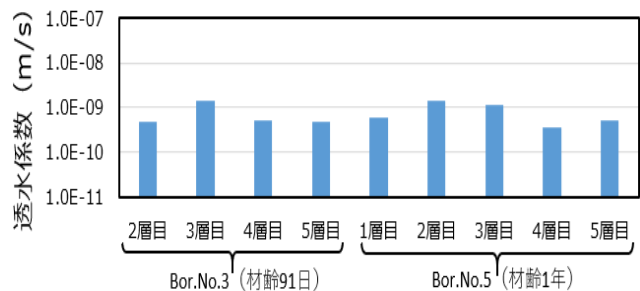


図-4.5.6 コア採取試料の透水試験結果

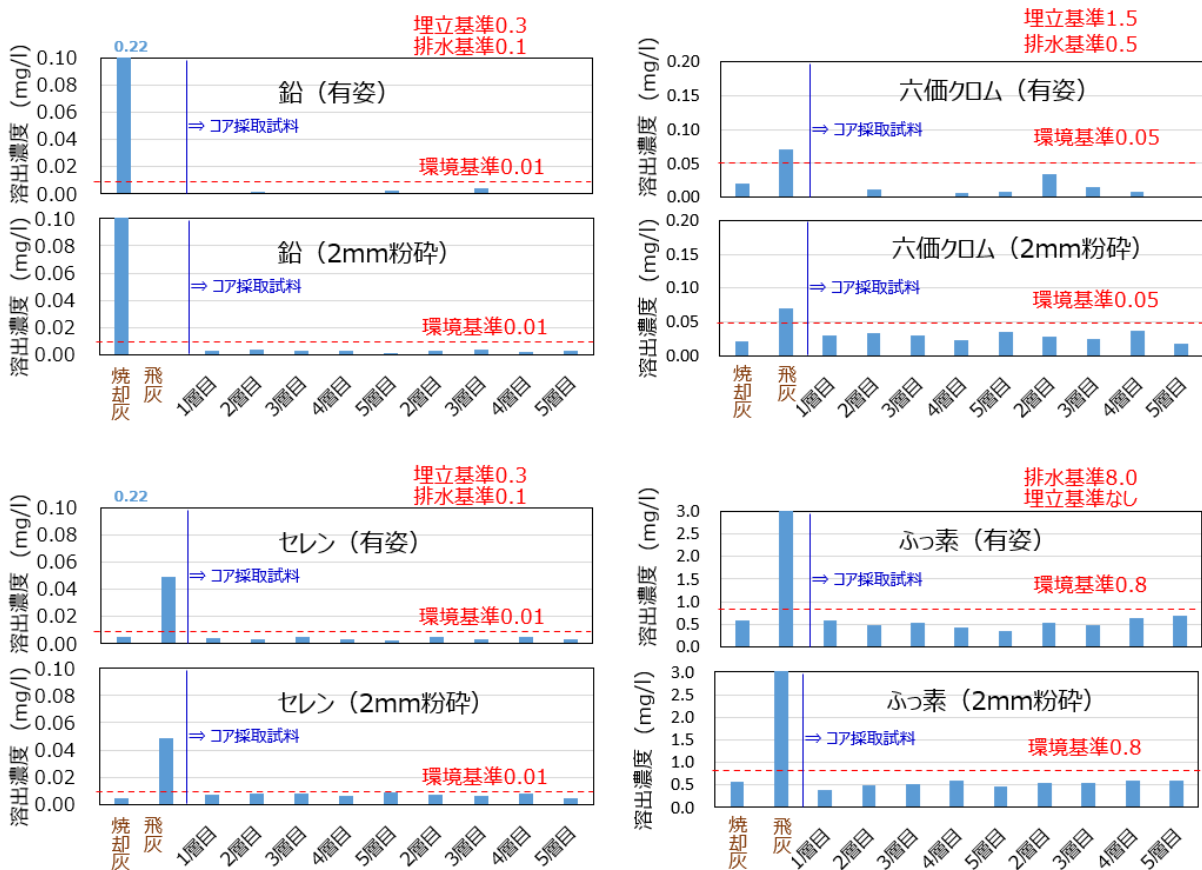


図-4.5.7 施工1年後にコア採取した試料の溶出試験結果（環境省告示46号、有姿、2mm粉砕）

(2) 埋立層の支持力

実証施工の固化式埋立の完了から約3ヶ月後および約1年後の解体撤去時に、最終覆土を撤去した固化式埋立層の上面で動的載荷試験（FWD試験）を実施した。測定位置を図1に、試験状況を図-4.5.8に、試験結果を表-4.5.3、表-4.5.4、図-4.5.9、図-4.5.10、図-4.5.11に示す。

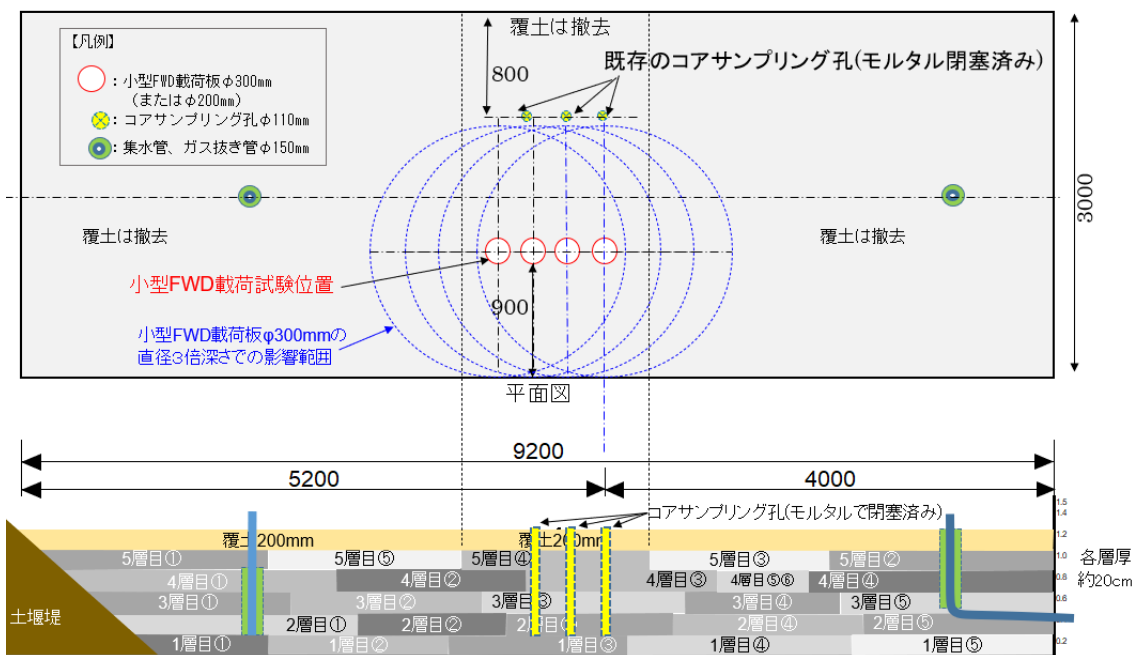
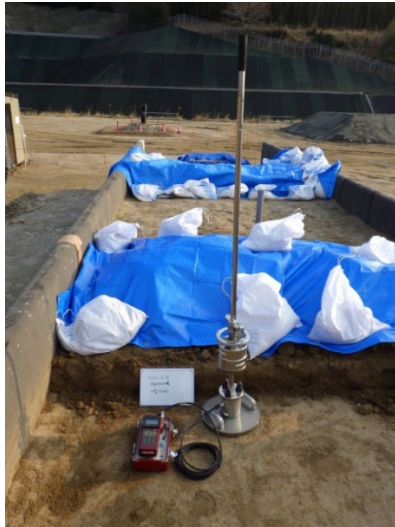


図-4.5.8 小型FWD試験の測定位置



埋立78日後

埋立約1年後

図-4.5.9 小型FWD試験の状況

表-4.5.3 小型FWD試験結果（2022年2月2日、固化式埋立78日後）

測点	載荷板径 (cm)	重錘質量 (kg)	落下高さ (cm)	荷重 (N)	変位量 (mm)	載荷応力 (kN/m <sup>2</sup> )	地盤反力係数 K <sub>P.FWD</sub> 値 (MN/m <sup>3</sup> )	地盤弾性係数 E <sub>P.FWD</sub> 値 (MN/m <sup>2</sup> )	変位量1.25mm		
									載荷応力 (kN/m <sup>2</sup> )	地盤反力係数(MN/m <sup>3</sup> )	
										K <sub>P.FWD</sub> 値	K <sub>30</sub> 相当値
1	30	15	10	3,037	0.036	43	1,207	330	2,423	1,938	969
			50	9,832	0.087	139	1,593	435			
			110	25,933	0.202	367	1,820	497			
2	30	15	10	2,815	0.071	40	561	153	1,259	1,007	504
			50	9,205	0.186	130	702	192			
			110	25,723	0.386	364	942	257			
3	30	15	10	2,764	0.030	39	1,289	352	2,899	2,319	1160
			50	9,082	0.073	128	1,775	484			
			110	25,444	0.168	360	2,145	585			
4	30	15	10	2,740	0.040	39	970	265	2,313	1,850	925
			50	9,067	0.092	128	1,401	383			
			110	25,310	0.211	358	1,707	466			
平均値									2,224	1,779	890

※ 落下高さ毎に6回測定した平均値。

※ K30相当値=K<sub>P.FWD</sub>値×1/2

表-4.5.4 小型FWD試験結果（2022年2月21日、固化式埋立約1年後）

測点	載荷板径 (cm)	重錘質量 (kg)	落下高さ (cm)	荷重 (N)	変位量 (mm)	載荷応力 (kN/m <sup>2</sup> )	地盤反力係数 K <sub>P.FWD</sub> 値 (MN/m <sup>3</sup> )	地盤弾性係数 E <sub>P.FWD</sub> 値 (MN/m <sup>2</sup> )	変位量1.25mm		
									載荷応力 (kN/m <sup>2</sup> )	地盤反力係数(MN/m <sup>3</sup> )	
										K <sub>P.FWD</sub> 値	K <sub>30</sub> 相当値
1	30	15	10	2,961	0.047	42	889	243	2,368	1,894	947
			50	9,985	0.107	141	1,320	360			
			110	23,563	0.199	333	1,679	458			
2	30	15	10	2,744	0.052	39	757	207	1,664	1,331	666
			50	9,023	0.127	128	1,004	274			
			110	23,986	0.274	339	1,237	338			
3	30	15	10	2,654	0.058	38	646	176	1,667	1,334	667
			50	8,898	0.147	126	854	233			
			110	23,943	0.280	339	1,210	330			
4	30	15	10	2,636	0.039	37	959	262	2,324	1,859	930
			50	8,852	0.102	125	1,225	334			
			110	23,862	0.200	338	1,691	462			
平均値									2,006	1,605	803

※ 落下高さ毎に6回測定した平均値。

※ K30相当値=K<sub>P.FWD</sub>値×1/2

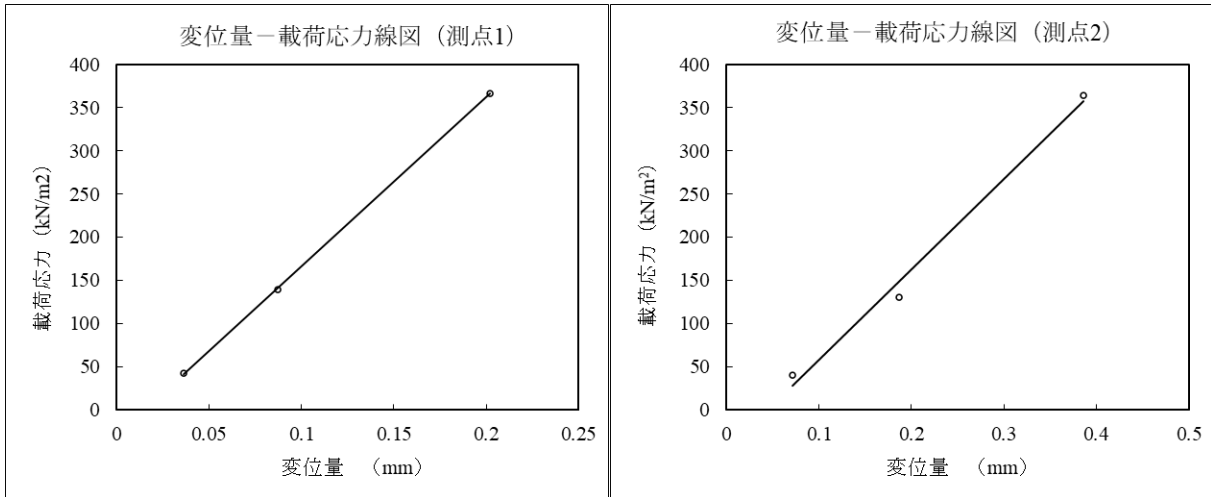


図-4.5.10 小型FWD試験結果の例（変位量－載荷応力関係、2022年2月2日、固化式埋立78日後）

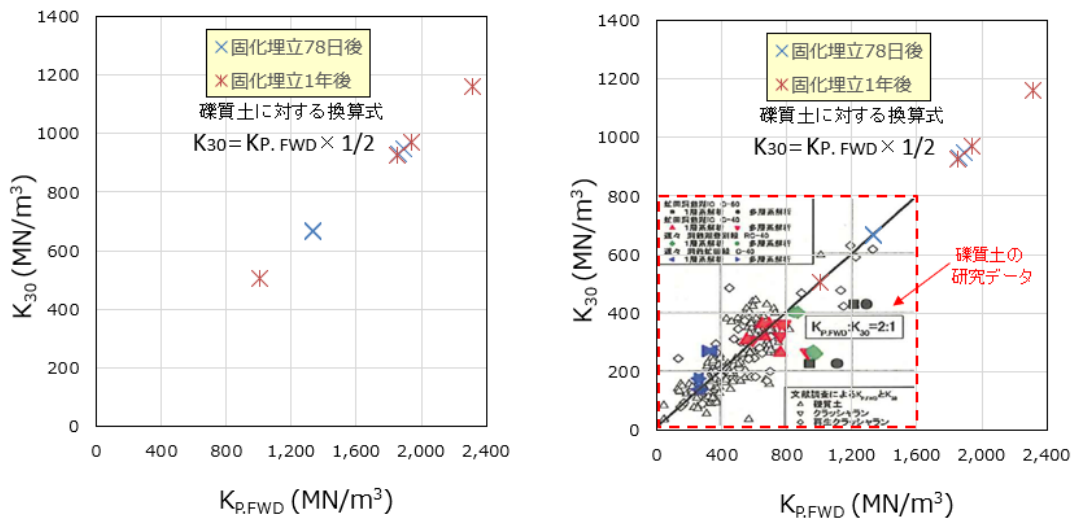


図-4.5.11 小型FWD試験結果（礫質土での試験結果との比較）

室蘭工大、更谷・木幡ら：小型FWD試験による礫質土地盤の剛性評価、土木学会第63回年次学術講演会、2008年

表-1 物理的特性

除床材・路床材	紅田測筒深径 C-80	紅田測筒深径 C-40	両筒測定別径		測筒径別径 C-40
			C-80	C-40	
粗 砂 分 (%)	88.88	71.57	85.43		71.80
中 砂 分 (%)	2.87	2.60	20.39		29.07
細 粒 分 (%)	2.251	0.522	1.179		2.133
60%粒径 D <sub>60</sub> (mm)	7.896	10.79	9.903		12.46
30%粒径 D <sub>30</sub> (mm)	1.261	2.577	2.084		2.654
特 10%粒径 D <sub>10</sub> (mm)	0.507	0.523	0.315		0.425
均等係数 U <sub>c</sub>	38.14	20.63	31.12		29.32
作曲率係数 U <sub>s</sub>	0.873	1.177	1.405		1.300
土粒子密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm³)	2.772	2.837	2.610		2.680
土質分類	GS				
最大乾燥密度 ρ <sub>dmax</sub> (g/cm³)	2.257	2.214	1.995		2.132
最適含水比 w <sub>opt</sub> (%)	5.762	5.703	10.79		8.843

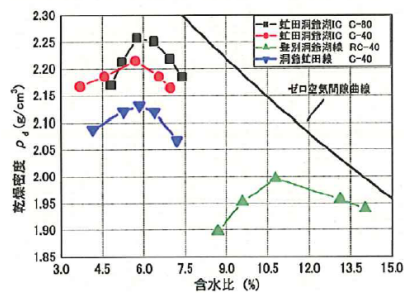


図-2 締め固め曲線

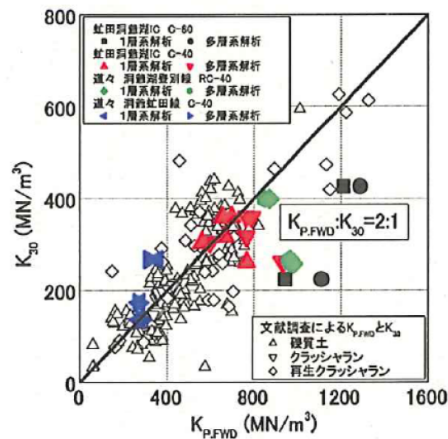


図-4 KP,FWD値とK30値

図-4.5.12 礫質地盤でのFWD試験事例

本試験で得られた固化式埋立地盤の1年後の地盤反力係数(平均値)はK30相当値で890 MN/m<sup>3</sup>である。この値は参考資料<sup>4)</sup>に示した礫質土地盤での最大値(図-4.5.12)と比較して約1.5倍であり、非常に強固な地盤であるということが確認できた。

### (3) 埋立層表層の状態

固化式処分場の解体時の状況を図-4.5.13に示す。



図-4.5.13 解体時の固化式埋立層の観察状況

長期暴露試験の表面観察の経過を図2(表面保護なし)に、約10ヶ月後に表面保護を撤去して目視観察したときの状況を図-4.5.14に示す。表面保護がない場合には、6カ月経過後ぐらいから表面にポップアウトが発生し始めた。10ヶ月経過後の目視観察では、砕石敷設と保護マット敷設のケースでも表層劣化が生じていた。しかし、覆土20cmのケースは1年後の試験終了時点でも表層劣化の兆候はなく、覆土敷設は埋立層の表層保護に対して有効であることが分かった。

低強度シュミットハンマー試験の測定状況を図-4.5.15に、測定結果を図-4.5.16、表-4.5.5に示す。

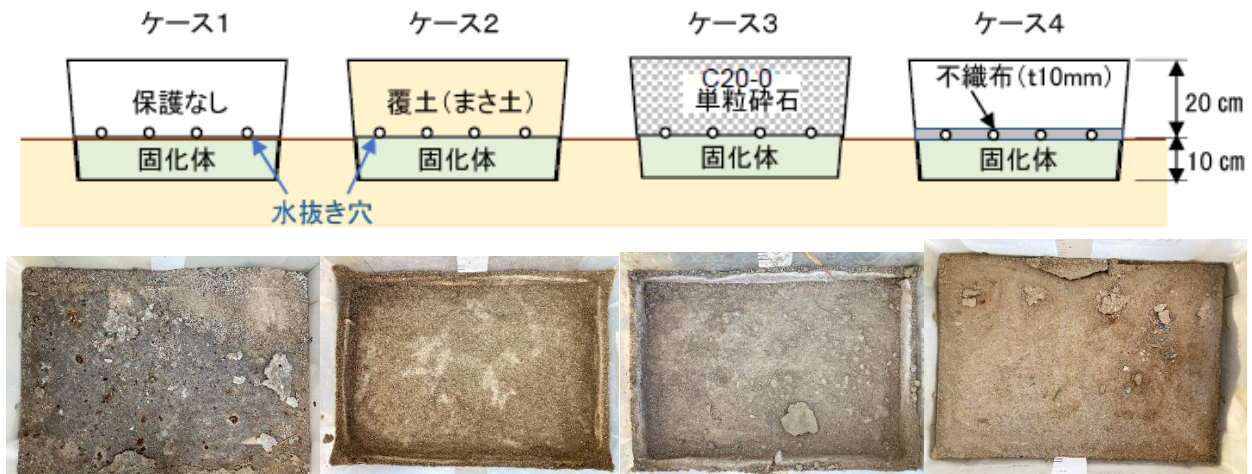


図-4.5.12 長期暴露試験の表面観察状況(約10ヶ月後)



図-4.5.13 低強度シュミットハンマーの測定状況

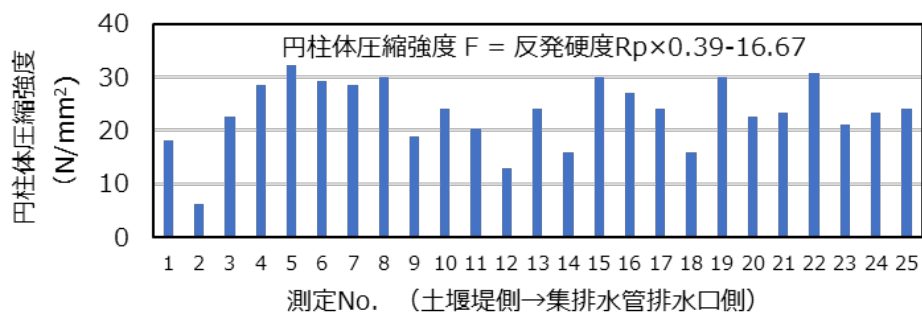


図-4.5.14 低強度シュミットハンマー試験結果（測定位置を変えて25回測定）

表-4.5.5 低強度シュミットハンマー試験結果と一軸圧縮強度（オールコア採取1年後）との比較

測定方法	測定数	平均値 (N/mm²)	シュミット／一軸圧縮
低強度シュミットハンマー試験	25	23.3	3.28 倍
一軸圧縮試験（4～5層目）	4	7.1	
【参考】一軸圧縮試験（全層）	10	8.3	2.81 倍

(4) 水みち調査

水みち調査のトレーサー浸透実験の実施概要を図-4.5.15、図-4.5.16に、トレーサー投入から1日後にオーバーコアリングして採取したNo.7コアの切断、観察状況を図-4.5.17に示す。鉛直打継目（5層目）は一体化していてトレーサー（赤色ローダミン水溶液）の浸透はみられない。一方、4層目と5層目の水平打継目は、コア採取時には分離しトレーサーが浸透していた。なお、No.9コアの鉛直打継目と水平打継目はいずれも一体化しており、いずれも打継目にはトレーサーが浸透していなかった。

固化式処分場の解体撤去時には、固化式埋立層の上面や側面、打継目、遮水シート工との境界、集排水管やガスモニタリング管周辺などの状態を目視観察した。図-4.5.18には大型ブレーカーによる解体時の状況を示す。

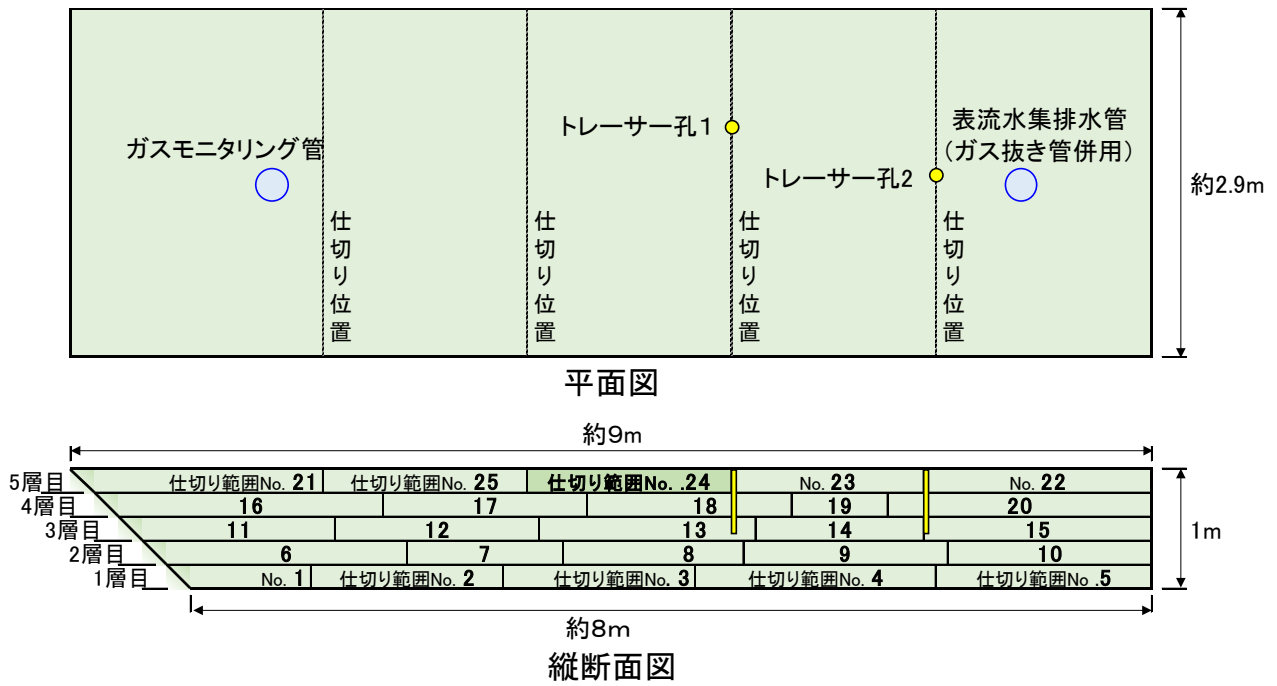


図-4.5.15 トレーサー浸透試験用ボーリング孔(内径40mm)の位置図

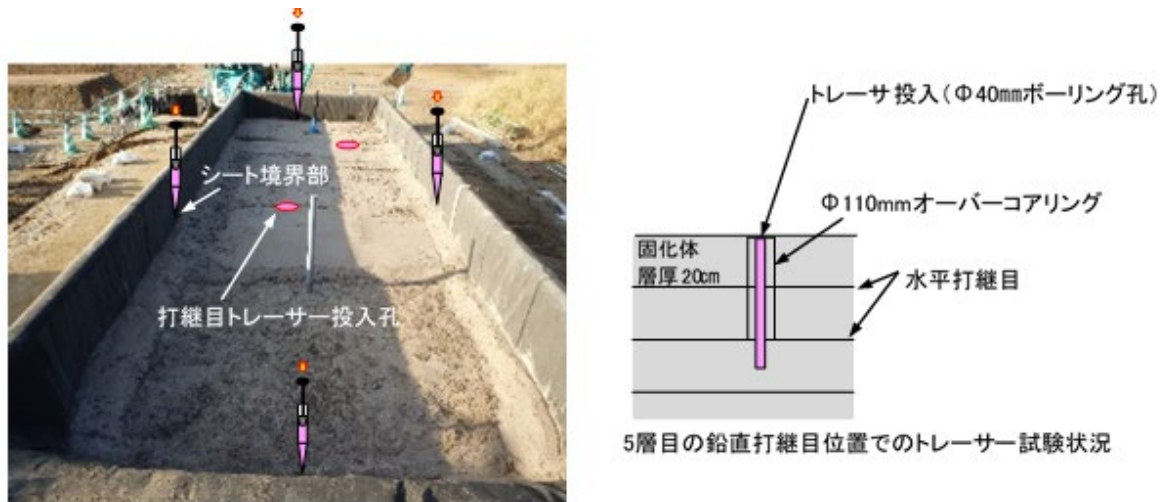


図-4.5.16 トレーサー浸透試験の実施概要



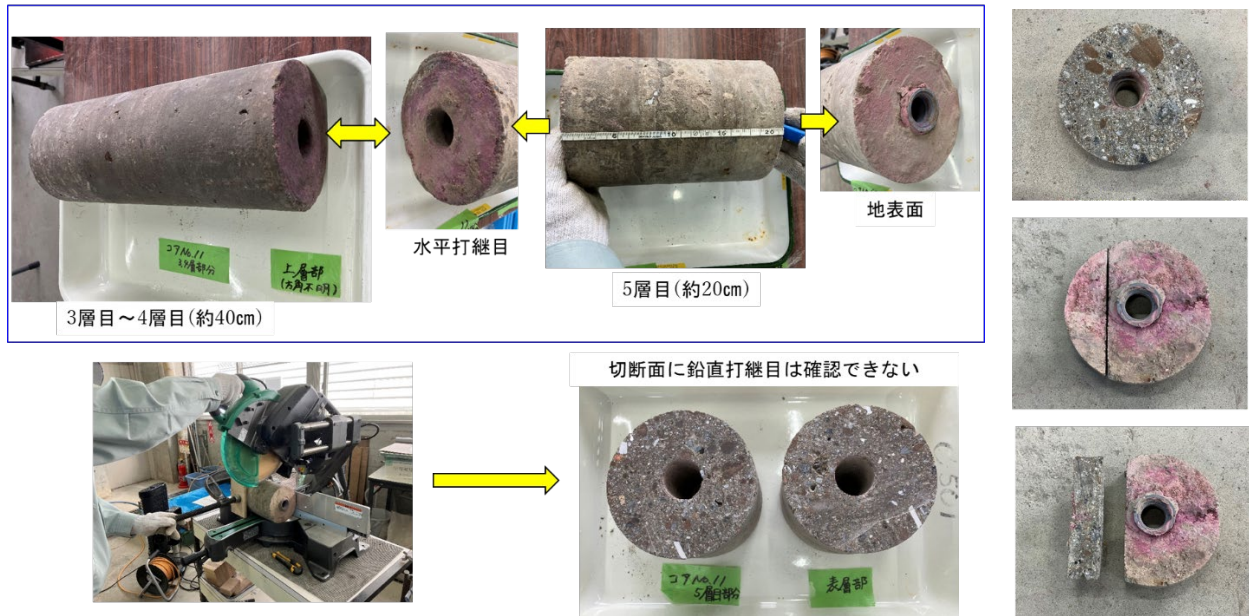


図-4.5.17 鉛直打継目で採取したコアの切断観察状況



図-4.5.18 固化式処分場解体時の埋立層の観察状況


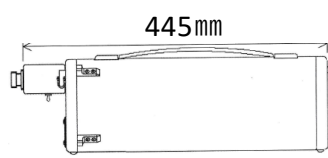
#### 4-6. 低周波無線通信を用いたIoTモニタリングシステム

##### (1) 廃棄物埋立地における低周波無線通信システム

本研究では、埋立廃棄物層内に設置したセンサで測定したデータを低周波電磁波により地上に受信機へ伝送し、地上の受信機からは携帯回線やLPWA、Wi-Fi等によりクラウドサーバーや受信デバイスにデータを伝送する通信システムの開発を目指した。

使用した通信機器を表-4.6.1に示す。小型送信機はデータロガー、送信回路、送信コイル(アンテナ)、電池で構成され、送信機に各種センサを接続することで、低周波電磁波により測定データを送信する。受信機は受信コイル(アンテナ)、受信機本体、コンピュータで構成され、測定データを回収する。

表-4.6.1 本研究で使用した低周波無線通信機器

	小型送信機	中継機
サイズ	Φ48mm×150mm	140mm×140mm×445mm
重量	1kg	6kg
電源	塩化チオニルリチウム電池	リチウムイオンバッテリー
周波数	8533Hzの低周波磁界を送受信	
図		

##### (2) 焼却灰内における受信電圧と通信距離の関係

図-4.6.1に示すように磁力選別で鉄分を除去した焼却灰を充填した木製型枠を5つ接合し、1.8m、3.6m、5.4m、7.2m、9.0mの通信距離で焼却灰層内における受信電圧を測定した。測定では、型枠内の端部に小型送信機を埋設し、反対側の型枠の端部に受信機を設置した。焼却灰内を通過した電磁波のみを測定するため、受信機を電磁波シールドで囲い、外へ透過した電磁波を受信できないようにした。

受信電圧と通信距離の関係を図-4.6.2に示す。本研究で使用した通信機器の性能では、受信電圧が受信位置(本稿では福岡市N埋立地で実験を実施)のノイズレベル0.5mVrmsの3倍に相当する1.5mVrms以上であれば通信が可能であるため、焼却灰層厚に依らず、焼却灰層を透過し、通信が可能であった。また、通信距離が長くなるにしたがって受信電圧は低下することが確認された。通信距離1.8mにおける受信電圧は空気中、焼却灰中ともに5000mVrmsであった。通信距離9.0mにおける受信電圧は空気中では70mVrms、焼却灰中では55mVrmsであり、減衰率はそれぞれ98.6%、98.9%となり、焼却灰中では空気中よりも0.3%減衰が大きくなった。送信機によって形成される磁界強度H(A/m)は式4.6.1を用いて電流I(A)、アンテナの表面積S(m<sup>2</sup>)、通信距離D(m)、各周波数ω(rad/s)、透磁率μ(H/m)、導電率σ(S/m)により求まる。

$$H = \frac{IS}{2\pi D^3} e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}D} \text{ (A/m)} \quad \dots (4.6.1)$$

空気中では上式の $\frac{\omega\mu\sigma}{2} \cong 0$ であるが、焼却灰層は空気中より透磁率μ、導電率σが大きい媒質であると推測されるため、焼却灰層内の方が大きな減衰を示したと考えられる。図-4.6.2の近似曲線は式4.6.2で表現できた。

$$y = \frac{29333}{x^3} e^{-0.0035x} \text{ (mVrms)} \quad \dots (4.6.2)$$

式4.6.2に、通信に必要な最小受信電圧1.5mVrmsを代入して、本研究で用いた小型送信機の焼却灰中での最大通信可能距離を求めると、26 mと算出された。これは全国1,698の廃棄物埋立地の平均深さ11mよりも十分に大きな値である。

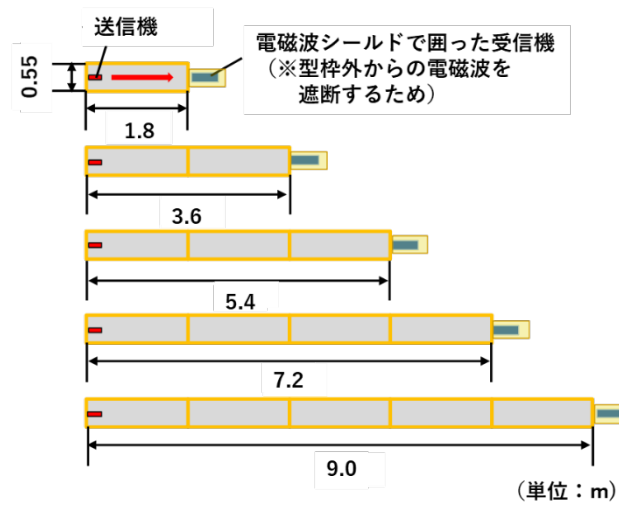


図-4.6.1 焼却灰を充填した型枠と送受信機の埋設位置

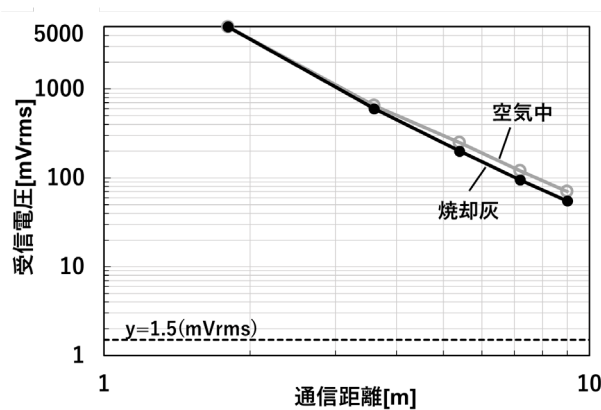


図-4.6.2 受信電圧と通信距離の関係

### (3) 焼却灰充填密度が低周波無線通信に及ぼす影響

図-4.6.1内の型枠を2つ使用し、焼却灰層の密度を $1.0\text{t/m}^3$ 、 $1.25\text{t/m}^3$ 、 $1.5\text{t/m}^3$ 、 $1.75\text{t/m}^3$ に変化させ、影響を調査した。図-4.6.3に受信電圧と焼却灰層の密度の関係を示しているが、受信電圧が変化することはなかった。測定結果より、本実験条件においては、焼却灰層の密度は低周波電磁波による無線通信に大きな影響を及ぼすことはない判断した。

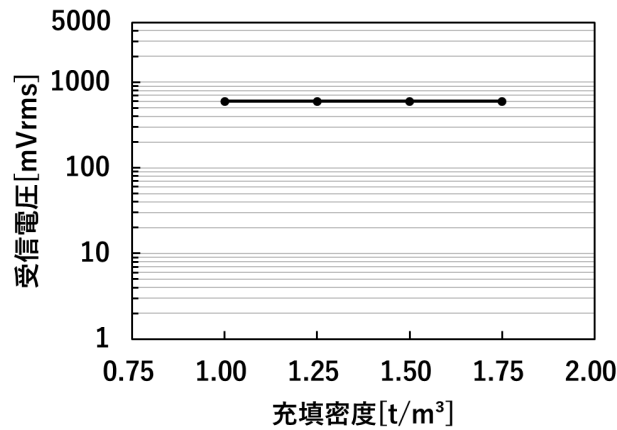


図-4.6.3 受信電圧と充填密度の関係

## (4) 焼却灰層の含水比が低周波無線通信に及ぼす影響

焼却灰層の含水比の影響を調査するため、図-4.6.1に示す木製型枠に散水し、散水前と散水後の受信電圧と通信距離の関係を比較した。散水前後の含水比は23.7%と35.1%であり、それぞれの実験条件における受信電圧と通信距離の関係を図-4.6.4に示す。散水後の焼却灰層における距離減衰率は99.0%であり、焼却灰内の距離減衰率98.9%から0.1%しか変化しなかった。加水しても焼却灰の導電率が大幅に上昇しなかったこと、低周波電磁波が水分の影響が小さい周波数帯であることが要因であると考えられる。

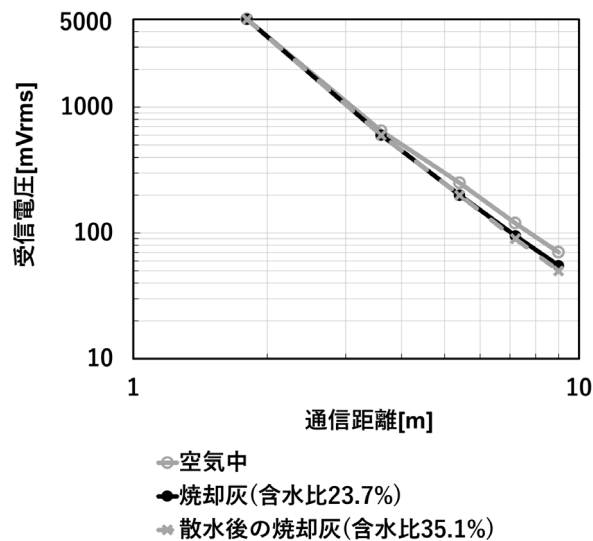


図-4.6.4 散水前後の受信電圧と通信距離の関係

## (5) 鉄屑混入が低周波無線通信に及ぼす影響

焼却灰層への鉄屑の混入が及ぼす影響を調査するため、図-4.6.5に示すように木製型枠に鉄筋（異形棒鋼：Φ1mm×400mm）を挿入し、受信電圧を測定した。磁力選別前の鉄分の質量割合は約5%であったため、焼却灰に対する鉄筋の質量割合を表-4.6.2に示すように0%、1%、2%、5%、10%に設定した。

図-4.6.6に受信電圧と鉄筋の質量割合の関係を示す。鉄筋の質量が増加しても受信電圧は大きく低下しなかったため、磁力選別を受けていない埋立廃棄物層内においても通信が可能であると考えられる。また、表-4.6.3に示すように焼却灰に対する鉄筋の質量割合が10%で、鉄筋の配列パターンを変化させた場合に受信電圧に現れる影響を調査した。図-4.6.7には各配列パターンにおける受信電圧を示す。測定結果より、送信機周囲を囲むように鉄筋を配置した条件⑤において、受信電圧は3000mVrms、S/N比は75dBとなり、最も低下した。S/N比とは信号と雑音の比であり、受信電圧VS (mVrms)、ノイズレベルVN (mVrms)

を用いて、次式4.6.3より算出した。

$$S/N比 = 10 \log_{10} \left( \frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (dB) \quad \dots (4.6.3)$$

受信電圧が低下した要因として、送信機近傍の鉄筋には渦電流が発生し、鉄筋内で熱エネルギーとして損失された可能性や送信機周囲を囲むように組んだ鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルが形成した磁界と逆向きの誘導電磁界が発生した可能性が考えられる。

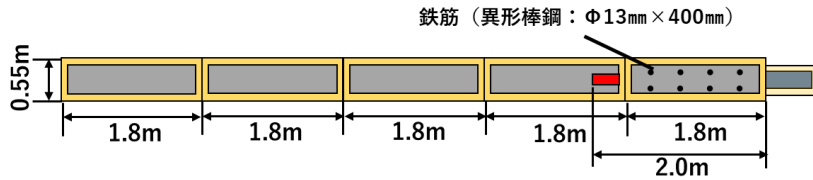


図-4.6.5 実験の概略図

表-4.6.2 鉄筋の配置図

鉄筋の焼却灰に対する質量割合(%)	鉄筋の配置図	鉄筋の焼却灰に対する質量割合(%)	鉄筋の配置図
0		1	
2		5	
10			

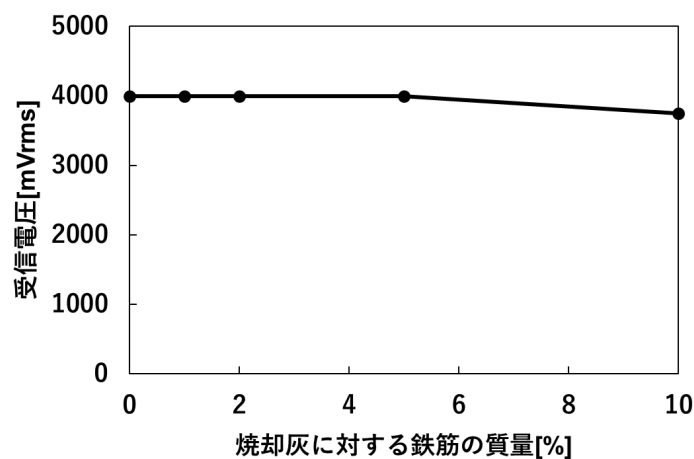
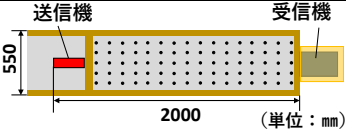
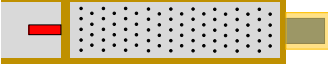






図-4.6.6 受信電圧と鉄筋の質量割合の関係

表-4.6.3 鉄筋の配列パターン

配置パターン	鉄筋の配置図	配置パターン	鉄筋の配置図
①方眼状		②千鳥格子	
③直線状		④送信機側に密集させる	
⑤送信機周囲を囲む		⑥パターン⑤を送信機から離して設置	

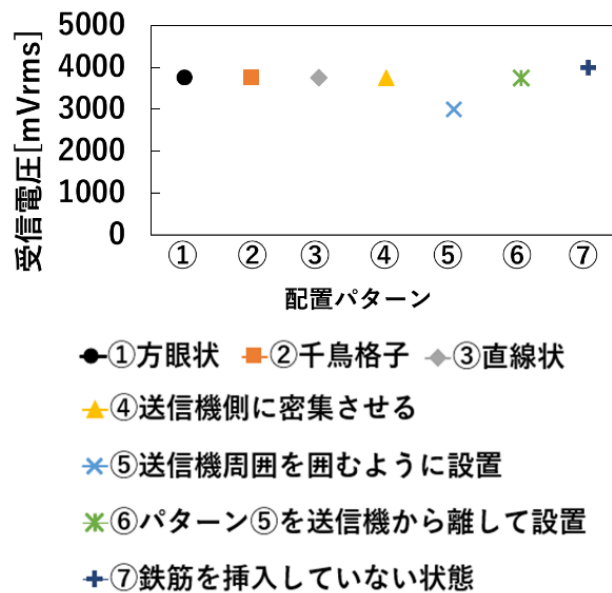


図-4.6.7 各配列パターンにおける受信電圧

#### (6) 模擬廃棄物埋立地からの通信距離と受信電圧の関係および受信機周辺環境の影響

福岡市中田埋立処分場内に模擬廃棄物埋立地を設置し、低周波無線通信の実証試験を実施した。模擬廃棄物埋立地は焼却残渣の固化体5層および覆土層で構成され、前述した焼却灰よりさらに密実に埋立てられている。本研究では、模擬廃棄物埋立地内で低周波電磁波を用いたデータ通信に関する実証試験を行うために、図-4.6.8に示すように下から1~2層目間と4~5層目間に低周波送信機を埋設した。また、模擬廃棄物埋立地から12m離れた受信機の設置地点には設置建屋が建てられており、設置建屋内に受信機や制御PC等を設置した。模擬廃棄物埋立地に埋設した小型送信機には温度センサが接続されており、長期間の無線温度モニタリングが可能であるかを検証した。図-4.6.9に低周波電磁波により送信された模擬廃棄物埋立地の内部温度を示しており、模擬廃棄物埋立地からの無線通信を約1年以上継続して受信できた。

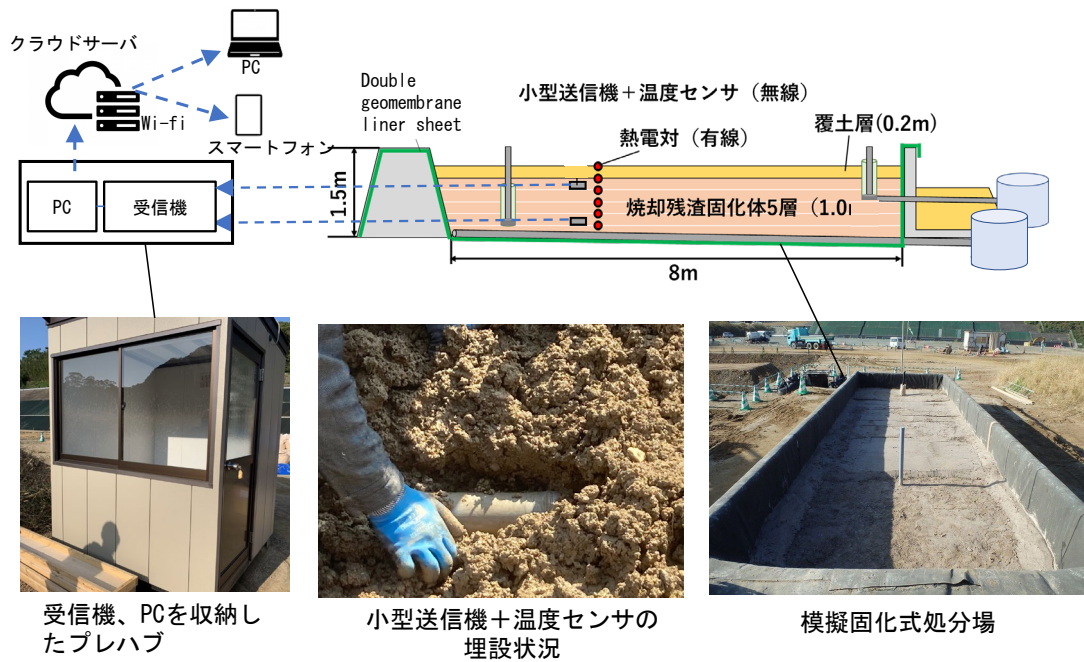


図-4.6.8 模擬固化式埋立地における低周波無線通信を利用したIoTモニタリングシステム

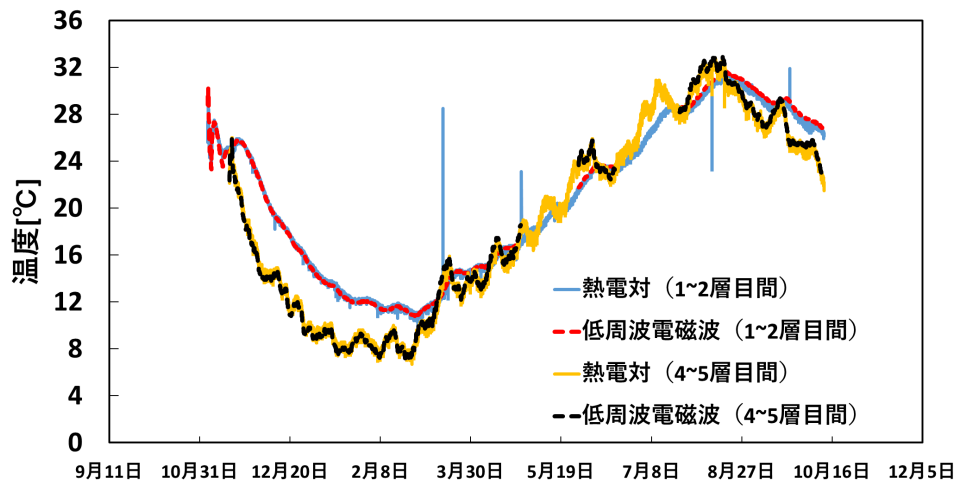


図-4.6.9 低周波無線通信を利用したIoTモニタリングシステムにより観測した模擬廃棄物埋立地の内部温度

#### (7) まとめ

本研究では、廃棄物埋立地における低周波電磁波の無線通信特性を調査し、以下の知見が得られた。

- ・ 低周波電磁波は廃棄物埋立地における無線通信に有効であり、小型送信機を埋立廃棄物層内に設置した際の通信可能距離は26mと算出された。
- ・ 焼却灰層の密度や含水比の影響による受信電圧の大幅な低下は確認されなかった。
- ・ 磁力選別を受けていない焼却灰層でも通信は可能であるが、送信機近傍に鉄屑等の金属導体が密集した場合には受信電圧が低下する可能性がある。
- ・ 受信電圧は送受信機のコイル軸が軸方向に平行であるときに最大を示し、設置角が増加するほど低下したが、通信可能距離の算出値は廃棄物埋立地の平均埋立深さの11mを下回らなかった。
- ・ 受信機周辺の設置建屋（鉄分）および電子機器の影響によるS/N比の低下が確認されたため、受信コイル（アンテナ）を本体から切り離し、屋外に設置することが望ましい。
- ・ 模擬廃棄物埋立地内から1年以上に亘り、埋立地内部の温度データを受信できた。

#### 4-7. 経済性の評価

図-4.7.1に埋立開始から跡地利用のための地盤改良までのライフサイクルコスト（LCC）の計算結果を示す。埋立廃棄物1t当たりのLCCは従来型（10万t）が46.2千円/t、固化式（10万t）が45.3千円/tとなり、従来型より固化式の方がLCCが約2.0%小さくなった。また、従来型（100万t）が16.1千円/t、固化式（100万t）が12.9千円/tとなり、従来型より固化式の方がLCCが約17.6%小さくなった。固化式では、埋立地土木工事費、水処理施設（従来型：浸出水処理、固化式：表流水処理）建設費と処理費が小さくなった一方、人件費と重機購入費が大きくなった。

図-4.7.2に各ライフサイクルステージでのLCCの計算結果を示す。建設段階においては、従来型に対する固化式の埋立地土木工事費と水処理施設建設費が小さくなっており、LCCは約13.7%小さくなった。供用期間においては、従来型に対する固化式の浸出水処理費は小さくなっているが、重機購入費や人件費、セメント及び水の購入費が大きくなっているため、LCCは約9.1%大きくなった。維持管理期間においては、従来型に比べ固化式の維持管理期間が短期間で済むことから浸出水処理費を大幅に削減することが

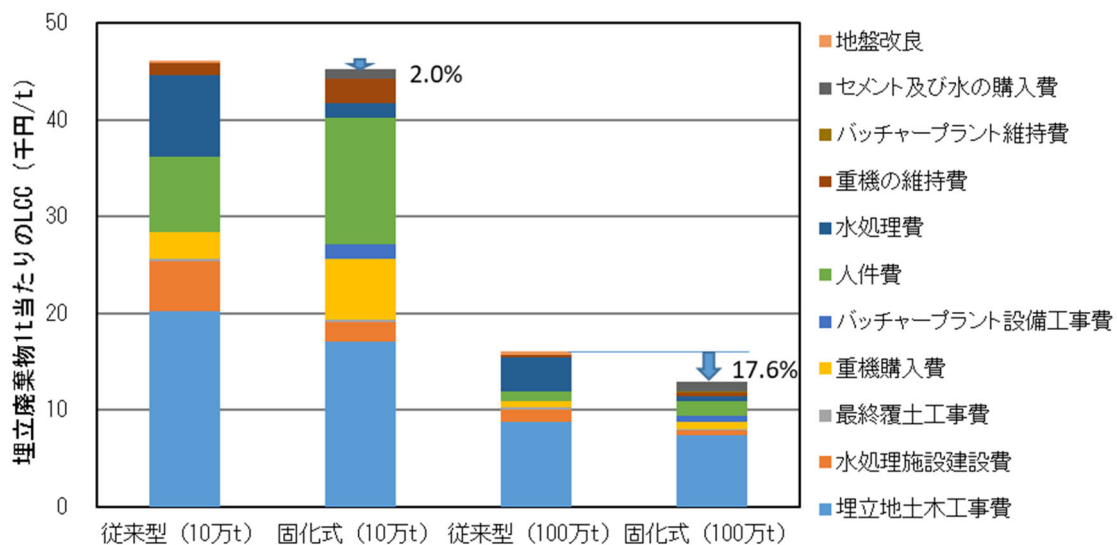


図-4.7.1 従来型処分および固化式処分における埋立開始から地盤改良までのライフサイクルコスト

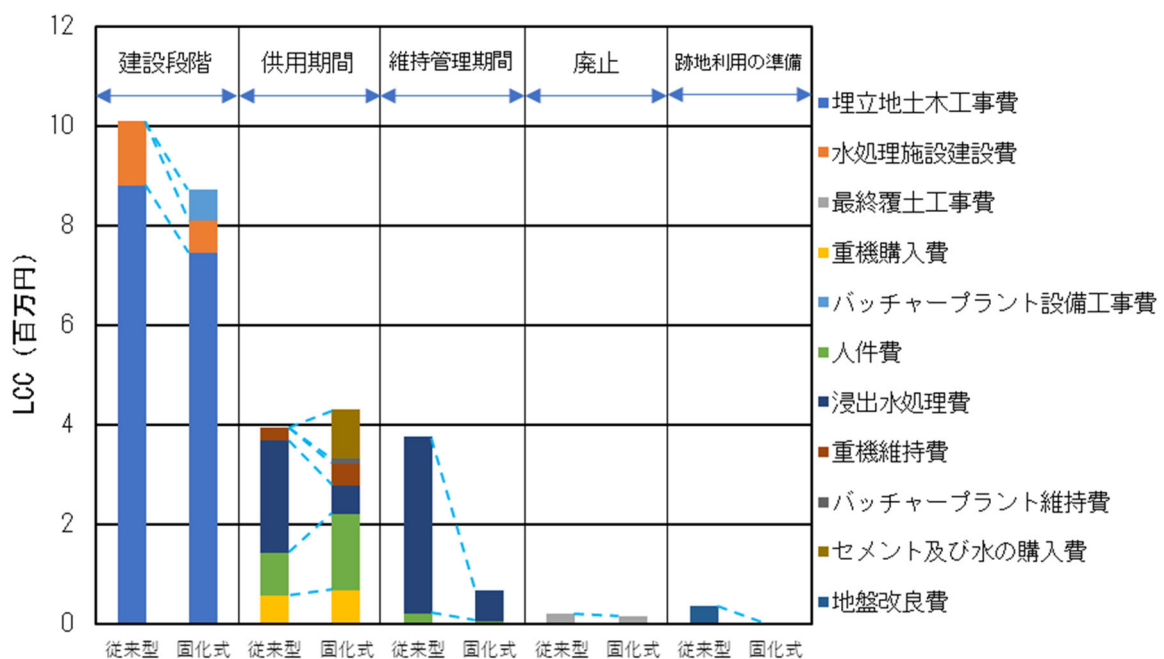


図-4.7.2 各ライフサイクルステージでのLCC



できるため、LCCは82.2%小さくなった。廃止に関しては、従来型に比べて固化式の方が処分場規模が小さいことから、最終覆土の量が少なくて済むため、若干固化式の法がLCCが小さくなったが、大きな差は見られなかった。

図-4.7.3に100万t規模の処分場で区画設定を見直した際のLCCの計算結果を示す。従来型の区画数を5区画と設定した場合のLCCの削減率は、固化式（5区画）では14.4%、固化式（10区画）では17.6%、固化式（20区画）では19.8%となった。

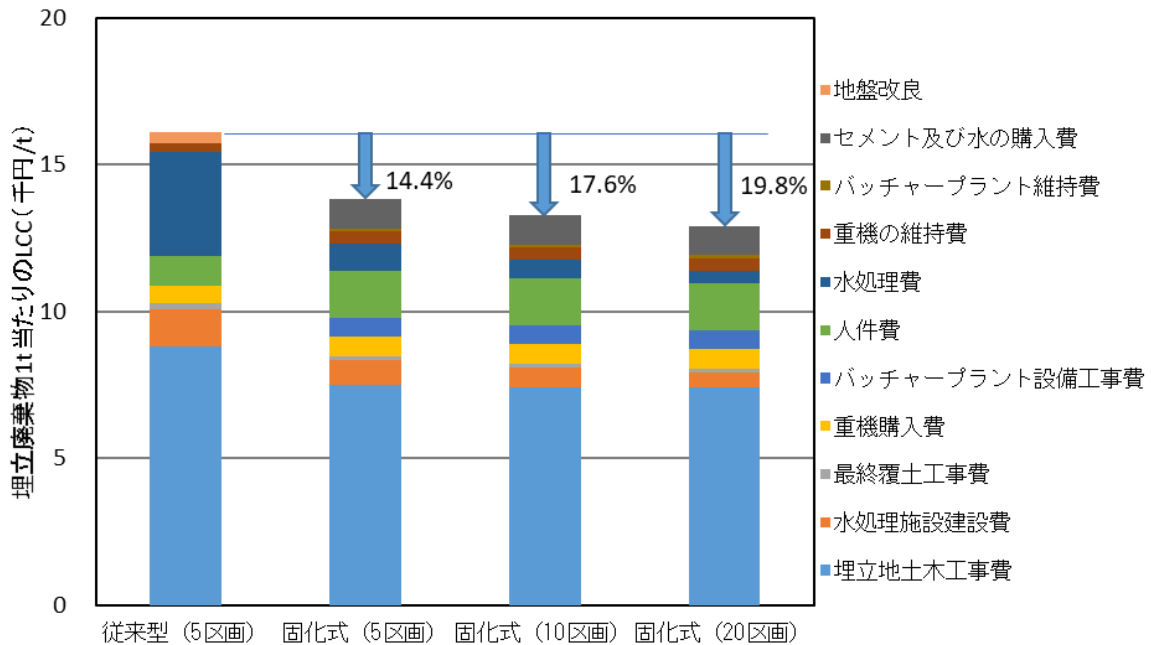


図-4.7.3 区画設定を見直した際のLCC

## 4-8. 設計施工指針案

用語の定義（固化式処分場に特有の用語を以下に示す。）

### 固化式処分システム

焼却残渣にセメント、混和材、水を加えて混合攪拌して振動締固めを行いながら埋立処分を行う最終処分場の施工システム。通常、混合攪拌（混練）の前処理として、ミキサでの混練に適さない鉄分や大きな塊（たとえば直径40mm以上の硬い燃え殻など）を焼却灰から除去する選別処理（磁力選別、ふるい選別など）を行う。

### 固化式最終処分場

固化式処分システムによって埋立を行う管理型の最終処分場。

### 固化式埋立

焼却残渣にセメント、混和材、水を加えて混合攪拌して振動締固めを行いながら埋め立てること。

### 焼却残渣固化体

焼却残渣にセメント、混和材、水を加えて混合攪拌して固形化したもの。

### 固化式処分の配合（配合選定、現場配合、配合修正）

固化式埋立を行う場合に、所定の強度などを確保するために、焼却残渣1.0m<sup>3</sup>を製造するための各種材料の質量を決めること。なお、固化式最終処分場内での固化式埋立作業に着手する前に行う場合を配合選定、事前の配合選定などと呼び、固化式埋立作業の着手時や作業中に行う場合を現場配合選定、配合修正などと呼ぶことがある。なお、混練に用いるミキサの1バッチ当りの質量で表示することもある。

### 固化式処分の室内配合試験

固化式処分の配合を選定するために室内で実施する一連の試験。室内試験用のミキサとテーブルバイブレータなどを用いて行う焼却残渣固化体の振動締固め試験、振動締固めで作製したモールド供試体を用いて所定の養生期間（通常は28日、長期強度を考慮する場合には91日など）を経て実施する一軸圧縮試験、透水試験、重金属類の溶出試験などの総称。焼却残渣の化学・物理特性を確認する試験（粒子密度、粒度、熱しゃく減量、成分分析、重金属類の溶出試験など）を実施して配合選定の参考にすることもある。

### 振動締固め試験

固化式処分の埋立材料（焼却残渣、セメント、混和材、水）をミキサで混練して一軸圧縮試験用のモールド容器などに入れ、テーブルバイブレータなどを用いて加振して締め固める試験。埋立材料の混練時の含水比を変えて複数回の試験を行うことで、突固めによる土の締固め試験方法（JIS A1210）と同様に締固め曲線などを得て、埋立材料の締固め特性を評価する。ミキサの仕様や混練時間、加振時の周波数や加振時間などは、固化式埋立の実際の施工で得られる締固め特性との相関性を考慮して決める。

### 最適含水比

締固め試験で得られた締固め曲線において、固化体の乾燥密度が最大になるときの含水比。一般的には突き固め試験（突固めによる土の締固め試験方法、JIS A1210）で得られる値を指すが、固化式処分の配合選定では振動締固めによって得られる値を用いる。なお、固化式処分に適した含水比は振動締固め試験で得られた最適含水比よりも1%～4%大きな範囲であることが多い。

**超流体工法**

非常に少ない水量で練り混ぜた粉体を振動によって締固めて硬化させる工法。固化式処分システムは超流体工法を応用した焼却残渣の埋立処分方法である。

**【補足説明】**

超流体工法とは、石炭灰硬化体（アッシュクリート）の作製技術として実用化された技術で、非常に少ない水量の粉体状材料（石炭灰、セメント、混和材の混合材）に高周波数の振動を与えると数分でプリン状の「超流体」と呼ばれる状態になり、その後、硬化し始めて約1日で脱型可能な状態になります。

（アッシュクリートType II：[https://www.ad-hzm.co.jp/solution/energy\\_saving/detail\\_03/](https://www.ad-hzm.co.jp/solution/energy_saving/detail_03/)）

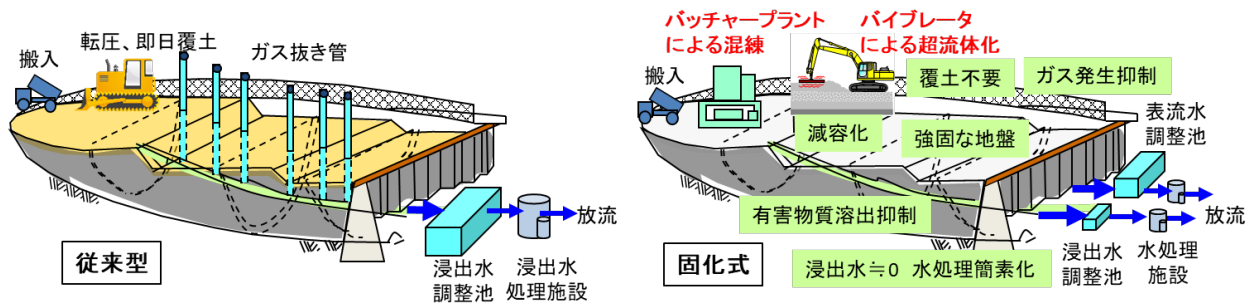
**設計編**

1. 最終処分場の構造と形態

固化式処分場の構造と形態は従来型（準好気性埋立方式等）に準じて計画する。ただし、固化式処分場の特徴（埋立層が実質、不透水層になること等）を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場の構造と形態は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準ずることを基本とするが、以下に示すような従来型処分場（準好気性埋立方式等）との違いなどを考慮する。



従来型処分場と固化式処分場のイメージ図

固化式処分システムの特徴

① 強固化	→ 耐震性の向上	→ 廃棄物処理システムの強靱化
		→ 地盤改良せずに高度な跡地利用
② 減容化	→ 埋立容量の増加(延命化)	
③ 飛散防止	→ 覆土不要	→ 埋立容量の増加
	→ 飛散による環境汚染リスクゼロ	
④ 浸透抑制	→ 浸出水量低減(固化埋立層は実質、不透水層)	
	→ 有害物質の溶出抑制	
		→ 環境汚染リスク低減
		→ 早期廃止、跡地利用の早期化
		→ ライフサイクルコスト低減

## 2. 固化式処分場内施設配置と造成

全体配置および造成設計上の検討フローなどは従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準ずるが、固化式埋立地の特徴（強固で耐震性が高く、実質、不透水層であることなど）を考慮する。以下に従来型と固化式との構造の違いなどを対比して示す。

参考までに「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」の図2.2-1を示す。

なお、固化式処分場の立地場所は陸上（山地、平地）となるが、固化式処分システムの特徴を活かして都市部の平地での立地も検討対象となる。

従来型処分場と固化式処分場の細部構造の違いなど

項目	従来型処分場（準好気性埋立）	固化式処分場
概略図		
覆土	<p>焼却灰・飛灰の飛散を防止する目的で即日覆土を行う。</p> <p>数メートル埋立てた後、1層（約50cm）程度の中間覆土を行う。</p>	<p>即日固化するため焼却灰・飛灰は飛散しない。</p> <p>雨水が浸透しないため中間（排水）そうは不要となる。</p>
ガス抜き管	<p>有機物の分解により発生する埋立ガスを大気中に排出させるガス抜き管を設置する。</p>	<p>ガスによる影響はほぼないため、ガス抜き専用管（有孔管）は設置不要となる。</p>
遮水工	<p>浸出水の埋立地外への漏洩を防止するため遮水シートを敷設する。</p>	<p>従来型と同様に、埋立地外への漏洩を防止するため遮水シートは必要となる。</p>
集排水管	<p>埋立地内部に浸透し、焼却灰・飛灰中の重金属等が溶出した水を排水するための集排水管を埋立地底部に設置する。</p>	<p>施工中の表面排水を目的に、埋立て高さに合わせて埋立地底部を通して排水するための表流水排水管を設置する。</p> <p>別途、ほぼ発生はしないが浸出水のみを対象とした集排水管を埋立地底部に設置する。</p>
排水処理	<p>廃棄物に雨水が浸透し、重金属等が溶出した浸出水を基準値未満になるまで、浸出水プラントで処理する必要がある。</p>	<p>埋立中においては、廃棄物固化体に触れる表層部分からの排水はpHが高くなる可能性がある。また、SSのコントロールのため、水処理プラントが必要となる。</p> <p>埋立完了後は、最終表面をアスファルトコンクリート等で覆うことにより、排水処理は不要となる。</p>

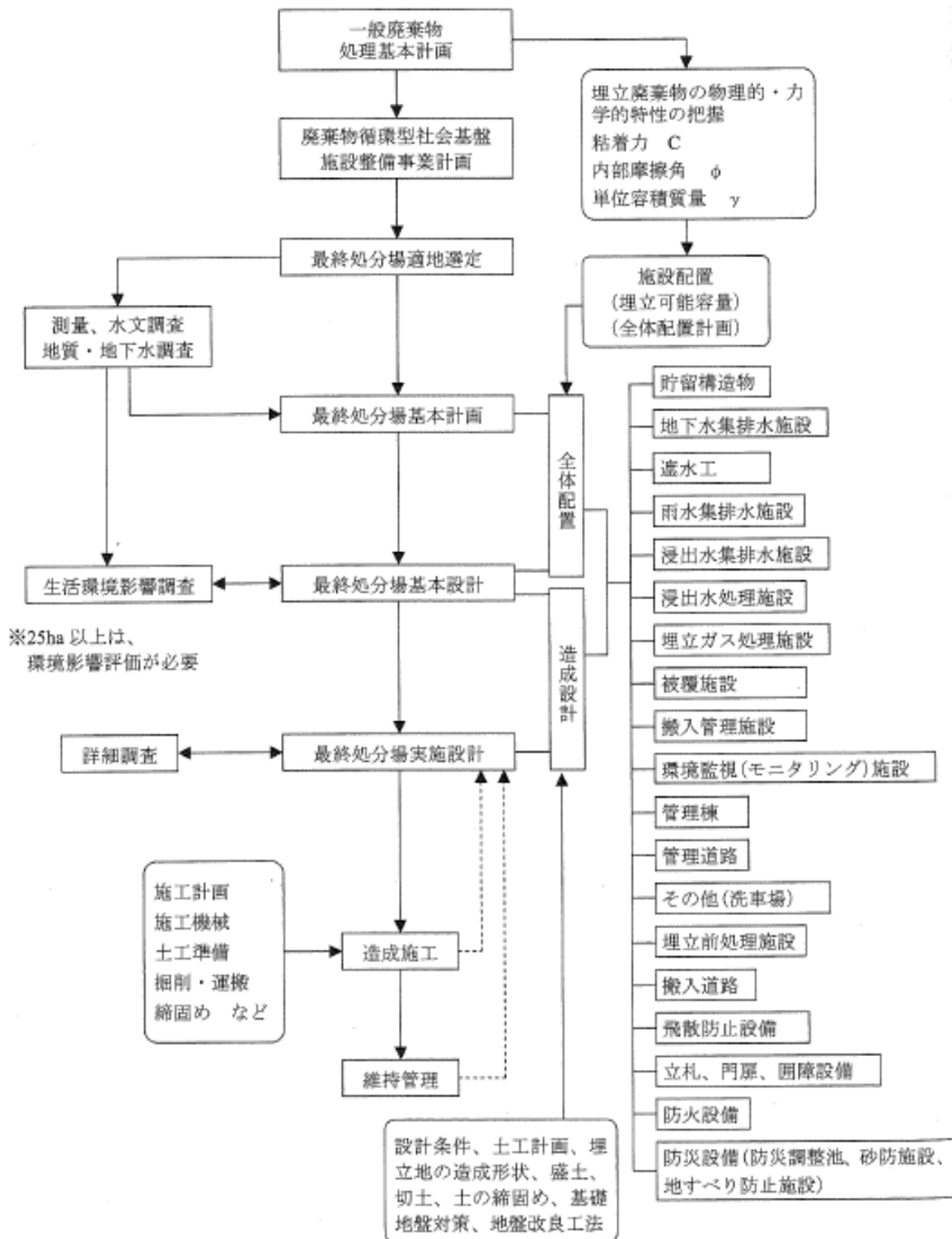


図2.2-1 全体配置および造成設計の作業フロー

3. 貯留構造物

貯留構造物は従来型（準好気性埋立方式など）に準じて設計する。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式埋立層は実質、不透水層であるので従来方式とは静水圧などの考え方が異なる場合がある。

4. 地下水集排水施設

地下水集排水施設は従来型（準好気性埋立方式など）に準じて設計する。

〔解説〕

特になし。

5. 遮水工

遮水工は従来型（準好気性埋立方式など）に準じて設計する。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式埋立層は実質、不透水層であるが、基準類に従い二重遮水シート工などを設置する。なお、内部保留水を極力発生させないことを構造とする場合には、二重遮水シート工の最上面の保護マットに不透水性材料を使用するとよい。不透水性保護マットの例としては、固化式処分場の実証施工で使用したアスファルト含浸シート（厚さ4mm）などがある。

参考までに「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」の図5.2-12、表5.2-2を以下に示す。

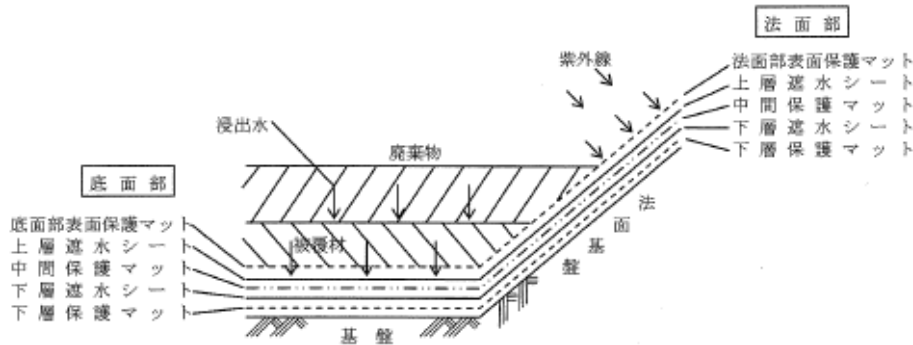


図5.2-12 二重遮水シート構造における保護マットの使用例

表5.2-2 保護マットの要求機能

項目	要求性能	法面部			中間層	底面部	
		上面		下層		上面	下層
		(A)	(B)				
引張強さ	廃棄物荷重などに耐えること	○	○	○	○	○	○
貫入抵抗	遮水シートを外傷から十分に保護できること	○		○	○	○	○
耐久性	耐候性 使用期間を通じて維持できる耐候性を有すること	○	○				
	遮光性 遮水シートの紫外線による物性低下を緩和できる遮光性を有すること	○	○				
二重シート同時損傷防止	埋立作業または埋立用作業車両により遮水シートの同時損傷を防止すること				○		
溶出性	環境を汚染する物質を溶出しないこと			○			○

(注) (A): 遮光性保護マット (B): 遮光性マット ○: 必要項目

## 6. 雨水集排水施設

雨水集排水施設は従来方式に準じて設計する。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式埋立層は実質、不透水層であるので埋立地内の表流水が増加する。埋立層と触れた表流水は浸出水として処理する必要があるため、雨水集排水施設の設置、維持管理には注意が必要である。なお、豪雨時に表流水量が急激に増加する可能性がある点にも留意する。表流水の急激な増加を抑制するために保水性のある最終覆土を敷設することなども考えられる。

参考までに「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」の図6.2-1を以下に示す。

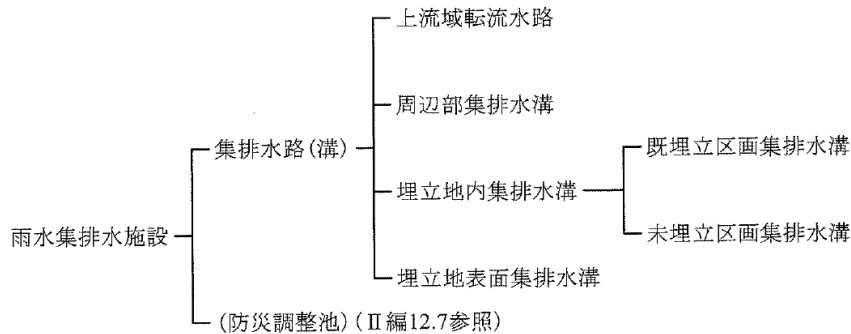


図6.2-1 雨水集排水施設の種類

## 7. 浸出水集排水施設

浸出水集排水施設は従来方式に準じて設計する。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式埋立層は実質、不透水層であるため、固化式埋立層を浸透して排出される浸出水はほぼゼロとなる。一方で埋立地内の表流水が増加する。両者（浸出水と表流水）を分離して集排水すれば浸出水集排水施設の規模を小さくすることができる。

参考までに「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」の図7.2-2を以下に示す。

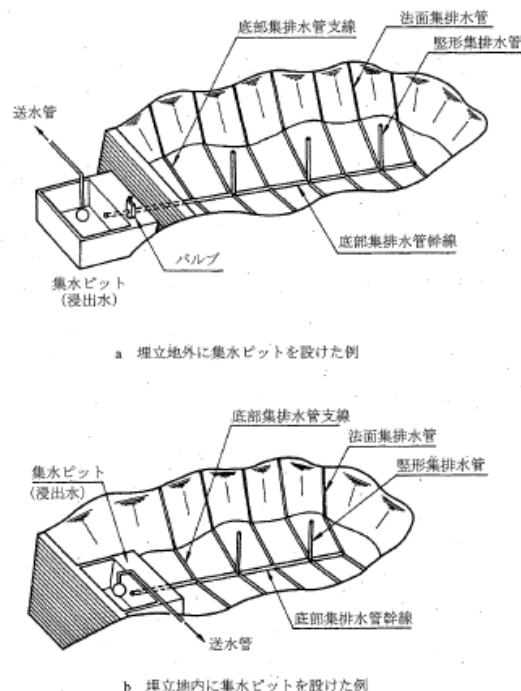


図7.2-2 浸出水集排水施設の配置概念図

## 8. 浸出水処理施設

浸出水処理施設は従来方式に準じて設計する。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

前記の浸出水集排水施設と同様に、浸出水と表流水を分離して集排水すれば浸出水処理施設の規模を小さくすることができる。

## 9. 埋立ガス処理施設

埋立ガス処理施設は、固化式処分場の特徴を適切に考慮して設計する。

〔解説〕

固化式埋立地は有機物をほとんど含まず生物分解性ガスはほとんど発生しないので、ガス抜き管は基準上の必要最小限のものを設置する。ただし、水素などが発生する可能性がある点には留意する。

## 10. 被覆施設

埋立ガス処理施設は、固化式処分場の特徴を適切に考慮して設計する。

〔解説〕

固化式埋立地は有機物をほとんど含まず生物分解性ガスはほとんど発生しないが、水素などが発生する可能性がある点には留意する。



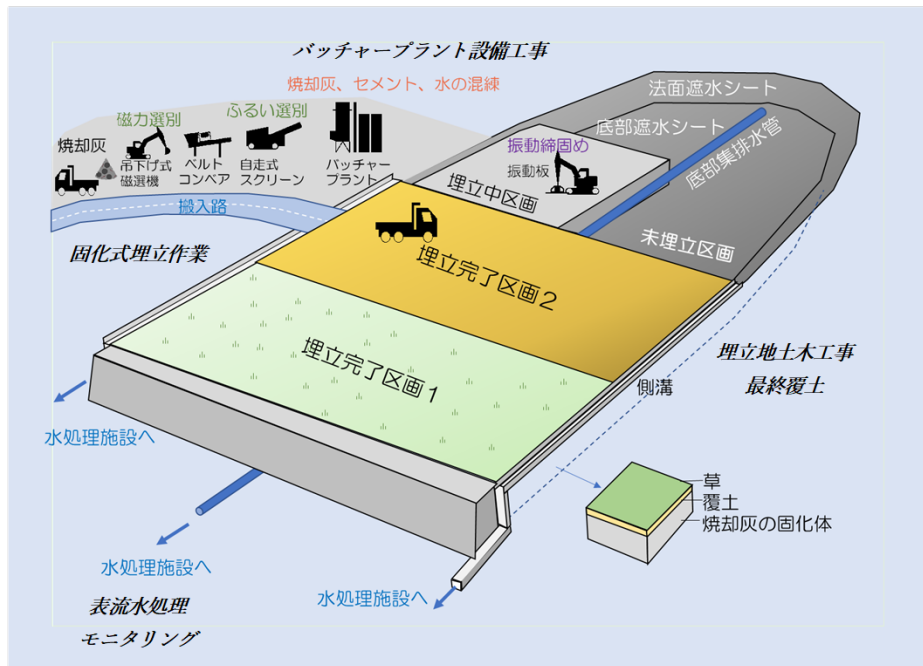
## 施工編

### 1. 固化式処分場における管理

固化式処分場における管理は従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場における管理は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準じ、従来型処分場（準好気性埋立方式など）との違いを考慮する。参考までに、固化式処分場のイメージ図を以下に示す。



固化式処分場のイメージ図

### 2. 廃棄物の搬入管理

固化式処分場における廃棄物の搬入管理は従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場における廃棄物の搬入管理は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準じ、従来型処分場（準好気性埋立方式など）との違いを考慮する。

### 3. 施設管理

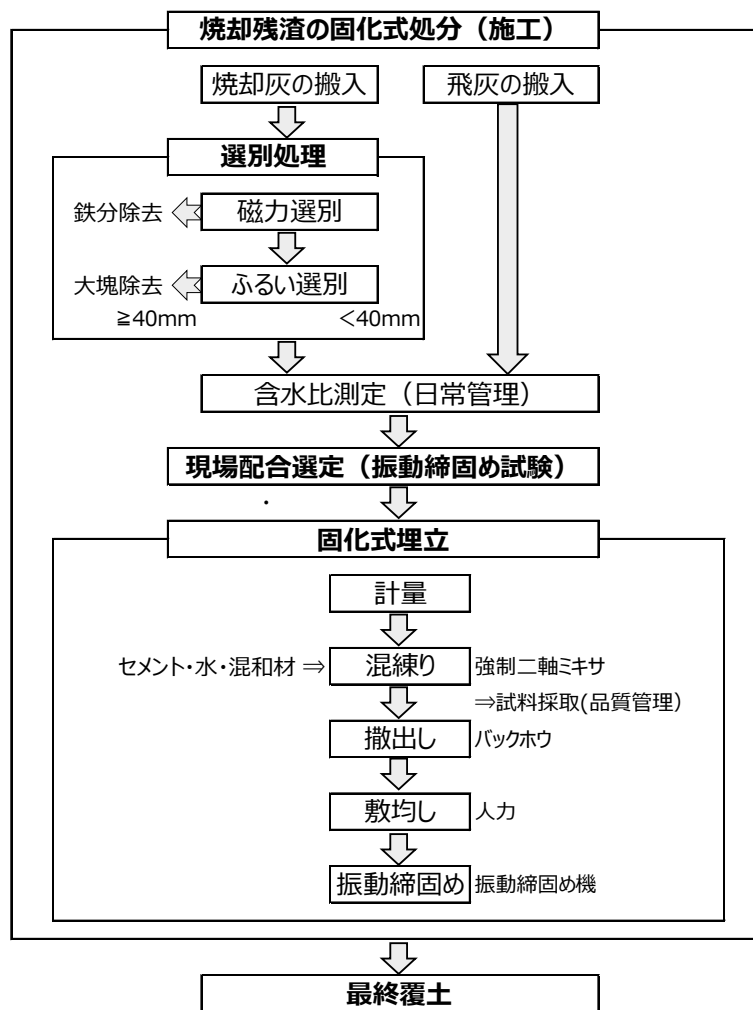
固化式処分場における施設管理は従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場における施設管理は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準じ、従来型処分場（準好気性埋立方式など）との違いを考慮する。

## 4. 埋立作業管理

固化式処分場における埋立作業管理は、以下に示す固化式処分システムの標準的な施工手順を踏まえて適切に実施する。

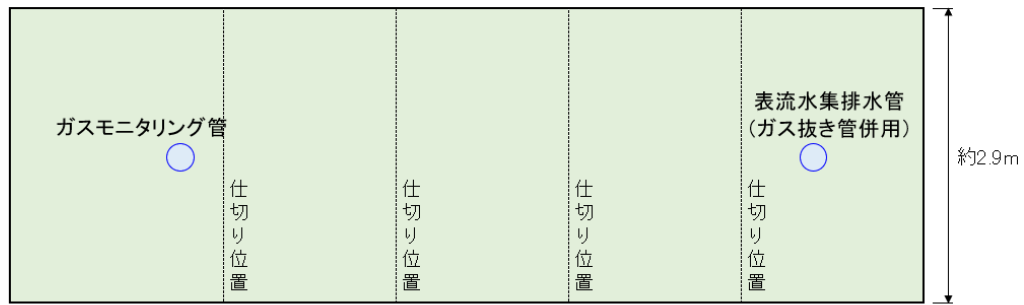


## 〔解説〕

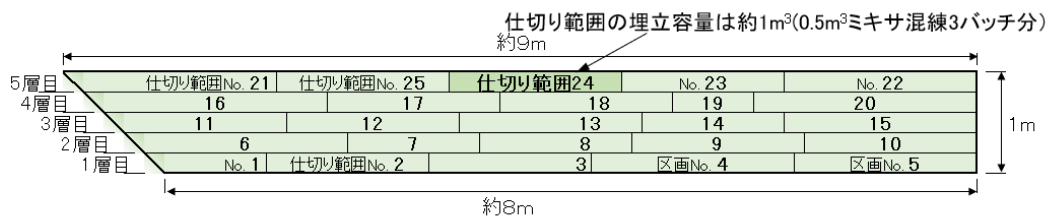
固化式処分場における埋立管理の考え方は、「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準ずるが、具体的な管理項目などは固化式処分システムの施工手順に沿って設定する。

固化式処分に用いる機材としては、焼却灰の選別処理機材（磁選機、ふるい選別機など）、埋立材量の計量および混練機材（バッチャープラントなど）、運搬機材（ダンプトラックなど）、捲出し・敷均し機材（バックホウなど）、振動締め機などが必要となる。なお、固化式埋立の標準的な作業は水平方式で行い、日々の施工範囲は混練機材の処理能力などに応じて適当な面積に仕切りながら埋め立てる。以下に固化式埋立の一例として実証施工での施工状況（平面図、縦断面図）を示す。

施工管理の項目としては、焼却灰の選別処理結果（選別能力、選別精度など）、固化式処分の配合、混練する材料の性状（焼却残渣の含水比など）、混練直後の埋立材料の性状（振動締めによるモールド供試体作製などにより密度などを把握）および所定材齢後の品質（一軸圧縮強度、透水係数、重金属類の溶出濃度など）、固化式埋立のサイクルタイム（混練時間、振動締め時間など）、仕切り範囲毎の固化式埋立層の出来形、気象条件などがある。



平面図



縦断面図

実証施工での固化式埋立状況（水平方式、仕切り施工）

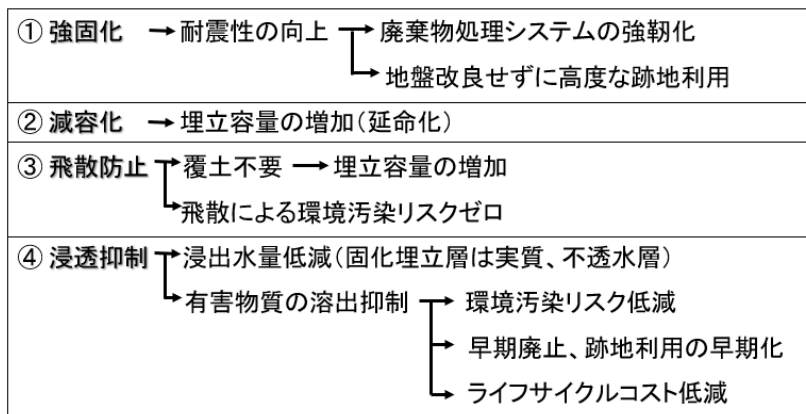
5. 環境管理

固化式処分場における環境管理は従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場における廃棄物の環境管理は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準ずるが、以下に示す固化式処分システムの特徴（従来型に比べて環境汚染リスクが低減することなど）を考慮する。

固化式処分システムの特徴



6. 埋立終了後または跡地の管理

固化式処分場における埋立終了後または跡地の管理は従来型（準好気性埋立方式など）に準ずる。ただし、固化式処分場の特徴を適切に考慮する。

〔解説〕

固化式処分場における埋立終了後または跡地の管理は「廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領」（2010改訂版、公益社団法人全国都市清掃会議）に準ずるが、前記の固化式処分システムの特徴（浸透抑制による浸出水量の低減や有害物質の溶出抑制など）により管理の簡素化および早期廃止も可能となる。

## 5. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>本研究では、これまでに実施してきた供試体を用いた室内での基礎実験、大型土槽によるパイロット試験の成果に基づき、実際の埋立地において固化式処分システムの実証施工、耐久性と環境安全性のモニタリングを実施する。最終的な目標は、</p> <p>(1) 日々刻々と変化する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理及び配合システムの構築</p> <p>(2) 日々搬入される大量の焼却残渣を効率的に処分できる高い施工性、地盤改良なしで構造物を設置できる強固な埋立地盤特性、埋立地の延命化のための減容効果の実証</p> <p>(3) 長期的な耐久性を有する埋立地盤、浸出水中の重金属等有害物質濃度を放流水質基準以下とする環境安全性の実証</p> <p>(4) 従来 of 最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコストでの建設、運用が可能な高い経済性の確認を行うことである。</p>	<p><u>自己評価：目標どおりの成果をあげた。</u> (具体的な理由・根拠)</p> <p>以下のように各目標を達成する成果をあげたため。</p> <p><u>目標(1) 柔軟な前処理及び配合システムの構築</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・焼却残渣の日単位の性状変化に対応可能な前処理(磁力選別および篩選別)並びに配合決定(振動締め試験)のシステムを構築した。</li> </ul> <p><u>目標(2) 高い施工性、強固な埋立地盤特性、減容効果の実証</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開発目標の処理能力(5 t/日)で施工できることを実証した。</li> <li>・埋立地盤は開発目標を達成した(一軸圧縮強度<math>\geq 5 \text{ N/mm}^2</math>、有害物質溶出濃度<math>\leq</math>放流水質基準、減容効果<math>\geq 20 \%</math>)。</li> </ul> <p><u>目標(3) 埋立地盤の長期的な耐久性、浸出水水質の環境安全性の実証</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・浸出水はほとんど発生しないこと、表流水の水質は開発目標を達成すること(放流水質基準を満足)を実証した。</li> <li>・1年後のコア採取、解体調査により埋立地盤の長期的な耐久性を実証した(強度は材齢と共に増加、表層劣化もなく堅固な支持力)。</li> </ul> <p><u>目標(4) 従来 of 最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコスト</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・固化式処分は従来型に比べて高い経済性を有することが確認された。</li> </ul>

## 6. 引用文献

- 1) 島岡隆行：震災からの迅速な復旧のためのレジリエントな最終処分場の実用化，平成29～令和元年度環境研究総合推進費終了研究成果報告書，2020
- 2) 田中信壽：環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理，技報堂出版，2000
- 3) 公益社団法人全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010改訂版
- 4) 更谷聡彦，木幡行宏，山本健一，斉藤昌之：小型FWD試験による礫質土地盤の剛性評価，土木学会第63回年次学術講演会，2008

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

特に記載すべき事項はない。

##### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 島岡隆行：INDUST VOL. 37 No. 9 pp. 16-21 (2022)  
「延命化と耐震性に着目した新たな最終処分場、固化式処分システム」
- 2) 島岡隆行，秋田宏行：環境浄化技術 2023. 1-2 Vol. 22 No. 1 (2023)  
「一般廃棄物焼却残渣固化式処分システムの開発 新たな概念で構築する環境安全かつ強靱な最終処分場」

#### (2) 知的財産権

- 1) 三反畑勇、弘末文紀、笠博義、島岡隆行：「焼却残渣処分場、焼却残渣処分方法」、  
特願2023-046551、令和5年3月23日

#### (3) 口頭発表（学会等）

- 1) 中村和喜，島岡隆行，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，青木貴均：焼却残渣のセメント固化における重金属による固化阻害に関する基礎的研究，令和2年度土木学会西部支部研究発表会（国内），2021年3月
- 2) 村上凜太郎，中山裕文，島岡隆行，金谷晴一：廃棄物埋立処分場の保有水を利用したエネルギーハーベスティングに関する基礎的研究，令和2年度土木学会西部支部研究発表会（国内），2021年3月
- 3) 田添智也，島岡隆行，中山裕文，金谷晴一：廃棄物埋立地における環境モニタリングのための低周波電磁波による無線通信に関する基礎的研究，令和2年度土木学会西部支部研究発表会（国内），2021年3月
- 4) 中村和喜，島岡隆行，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，青木貴均：焼却残渣のセメント固化における重金属による固化阻害に関する基礎的研究，令和3年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（国内），2021年5月
- 5) 村上凜太郎，中山裕文，島岡隆行，金谷晴一：廃棄物埋立処分場の保有水を利用したエネルギーハーベスティングに関する基礎的研究，令和3年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（国内），2021年5月
- 6) 田添智也，島岡隆行，中山裕文，金谷晴一：廃棄物埋立地における環境モニタリングのための低周波電磁波による無線通信に関する基礎的研究，令和3年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会（国内），2021年5月
- 7) 青木貴均，弘末文紀，三反畑勇，中島貴弘，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：セメント水和反応の遅延性を有する焼却残渣に対する固化式処分の適用性確認，第56回地盤工学研究発表会（国内），2021年7月
- 8) 中島貴弘，青木貴均，三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，西尾竜文，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：空隙を有するフィルター材周辺における焼却残渣固化式処分の施工性確認（その1）—焼却残渣固化体の配合選定と施工試験結果—，第75回土木学会年次学術講演会（国内），2021年9月
- 9) 青木貴均，中島貴弘，三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，西尾竜文，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：空隙を有するフィルター材周辺における焼却残渣固化式処分の施工性確認（その2）

- ー焼却残渣固化体の品質確認ー，第75回土木学会年次学術講演会（国内），2021年9月
- 10) 秋田宏行，弘末文紀，三反畑勇，中島貴弘，青木貴均一，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：一般廃棄物焼却残渣固化式処分システムの実規模試験施工，第43回全国都市清掃研究・事例発表会，2022年1月
  - 11) 中村和喜，島岡隆行，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，青木貴均：焼却残渣に含まれる重金属がセメント固化に及ぼす影響，令和3年度土木学会西部支部研究発表会，2022年3月
  - 12) 中村和喜，小宮哲平，島岡隆行，弘末文紀，青木貴均，三反畑勇：焼却残渣に含まれる重金属がセメント固化に及ぼす影響，第57回地盤工学研究発表会，22-07-3-05，2022年7月
  - 13) 中島貴弘，青木貴均，秋田宏行，三反畑勇，弘末文紀，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：焼却残渣固化式処分システムの実証施工試験（その1），土木学会第77回年次学術講演会，VII-102，2022年9月
  - 14) 青木貴均，中島貴弘，三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：焼却残渣固化式処分システムの実証施工試験（その2）ー焼却残渣固化体の性状確認ー，土木学会第77回年次学術講演会，VII-103，2022年9月
  - 15) 青木貴均，中島貴，秋田宏行弘，三反畑勇，弘末文紀，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：一般廃棄物焼却残渣固化体のモールドコアとボーリングコアの性状比較，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会，2022年9月
  - 16) 中村和喜，小宮哲平，島岡隆行，青木貴均，秋田宏行，三反畑勇，弘末文紀：焼却残渣に含まれる重金属がセメント固化に及ぼす影響，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会，2022年9月
  - 17) 島岡隆行，小宮哲平，中山裕文，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，中島貴弘，青木貴均：焼却残渣が大半を占める埋立地に適した固化式処分システムの開発 ～環境安全、レジリエント、経済的な新たな最終処分技術～，第44回全国都市清掃研究・事例発表会，II-5-92，2023年1月
  - 18) 秋田宏行，弘末文紀，三反畑勇，中島貴弘，青木貴均，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：レジリエントな廃棄物施設「一般廃棄物固化式処分システム」の社会実装への取り組み，第44回全国都市清掃研究・事例発表会，II-5-93，2023年1月
  - 19) 中村和喜，小宮哲平，梶野友貴，島岡隆行，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，中島貴弘，青木貴均：一般廃棄物焼却残渣固化式処分場における水収支、表流水水質および発生ガスに関する研究，土木学会西部支部研究発表会，2023年3月
  - 20) 小森祐輝，中山裕文，島岡隆行：廃棄物固化式処分システムのライフサイクルコスト評価，土木学会西部支部研究発表会，2023年3月
  - 21) 中島貴弘，三反畑勇，弘末文紀，青木貴均，秋田宏行，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：焼却残渣固化式処分システムの実証施工試験（その3）～固化埋立1年後の調査試験結果～，土木学会第78回年次学術講演会，VII，2023年9月（予定）

#### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 福岡市西区環境フェスタへの出展（主催：福岡市西区役所、福岡市西部3Rステーション，令和5年3月12日，福岡市西市民センター，来訪者約500名，出展ブース来訪者47名）

#### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊循環経済新聞：焼却残渣を固化処分 多くのメリットに関心 実証施工に見学者多数，令和4年1月31日
- 2) 環境新聞：耐震性と延命化に着眼した新たな最終処分場 焼却残渣固化システムの普及へ 九州大学・安藤ハザマが共同開発，令和4年2月9日

**(6) 本研究費の研究成果による受賞**

- 1) 中村和喜：令和4年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会優秀ポスター賞，令和4年5月14日

**(7) その他の成果発表**

特に記載すべき事項はない。

#### IV. 英文Abstract

### Practical Implementation of Cement-solidification-style Landfill Technology for Resilient Solid Waste Management

Principal Investigator: Takayuki SHIMAOKA

Institution: Kyushu University, Fukuoka City, Fukuoka, JAPAN

Tel: +81-92-802-3433 / Fax: +81-92-802-3432

E-mail: shimaoka@doc.kyushu-u.ac.jp

Cooperated by: Hazama Ando Corporation

#### [Abstract]

Key Words: Municipal solid waste incineration residues, Solidification disposal, Super fluid method, Demonstration construction, Pretreatment of landfilling, Composition, Workability, Durability, Landfill ground properties, Environmental safety, Economy

The objective of this research is to demonstrate the effectiveness of “Cement-solidification-style Landfill Technology” on a real scale in an actual landfill site, and to pave the way for practical implementation. The ultimate goals are as follows: (1) to construct a flexible pretreatment and determining composition system that can respond to the daily changing properties of incineration residues, (2) to demonstrate the high workability that can efficiently dispose of the large amount of incineration residues brought in every day, strong landfill ground characteristics that allow structures to be installed without ground improvement and the volume reduction effect for prolonging the life of a landfill site, (3) to demonstrate the long-term durability of landfill ground and the environmental safety that the concentrations of hazardous substances such as heavy metals in leachate are below the effluent quality standard, (4) to confirm the high economic efficiency that enables construction and operation with life cycle costs equal to or lower than those of conventional final disposal.

The results obtained in this research are shown in a) to f) below. a) The pretreatment (magnetic separation and sieve separation) and composition determination (vibration compaction test) system that can deal with daily changes in the properties of incineration residues was constructed. b) It was verified that the process can be performed with the targeted processing capacity (5 t/day). c) The landfill ground achieved its development goals (unconfined compressive strength  $\geq 5$  N/mm<sup>2</sup>, hazardous substance elution concentration  $\leq$  effluent water quality standard, volume reduction effect  $\geq 20\%$ ). d) It was verified that almost no leachate was generated and that the surface water quality achieved the development target (satisfied with the effluent quality standards). e) The long-term durability of the landfill ground was verified by the boring cores investigation and the dismantling survey after one year (strength increased with age, there was no deterioration of surface layer, and firm ground bearing capacity). f) It was confirmed that the solidification type disposal has higher economic efficiency than the conventional type. In addition, the draft of the design and construction guideline for the solidification disposal system was presented.