

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 終了研究成果報告書

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

(3J173001)

平成 29 年度～令和元年度

Practical Development of Resilient Landfill for Prompt Recovery Restoration from Earthquake

九州大学 島岡 隆行

令和 2 年 5 月

## 目 次

I. 成果の概要	1
1. はじめに (研究背景等)	2
2. 研究目的	2
3. 研究方法	3
4. 結果及び考察	7
5. 本研究により得られた主な成果	13
6. 研究成果の主な発表状況	14
7. 研究者略歴	17
II. 成果の詳細	18
要旨	18
1. はじめに	18
2. 研究目的	18
3. 研究方法	20
3. 1 埋立用材の調整	20
3. 2 施工性及び埋立地盤特性	24
3. 3 耐久性及び環境影響評価	28
3. 4 経済性評価	30
4. 結果及び考察	47
4. 1 埋立用材の調整	47
4. 2 施工性及び埋立地盤特性	58
4. 3 耐久性及び環境影響評価	66
4. 4 経済性評価	74
4. 5 まとめ：研究目標達成度	76
5. 本研究により得られた成果	78
6. 国際共同研究等の状況	79
7. 研究成果の発表状況	79
8. 引用文献	83
III. 英文 Abstract	84

**I. 成果の概要**

**補助事業名** 環境研究総合推進費補助金 次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業  
(平成 29 年度～令和元年度)

**所管** 独立行政法人 環境再生保全機構

**研究課題名** 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

**課題番号** 3J173001

**研究代表者名** 島岡 隆行 (九州大学)

**累計国庫補助金額** 33,450 千円  
(平成 29 年度 : 13,950 千円、平成 30 年度 : 9,500 千円、令和元年度 : 10,000 千円)

**研究期間** 平成 29 年 4 月 1 日～令和 2 年 3 月 31 日

**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、埋立前処理、示方配合、施工性、埋立地盤特性、耐久性、環境影響、経済性

**研究分担者** 中山 裕文 (九州大学)  
小宮 哲平 (九州大学)  
弘末 文紀 (株式会社安藤・間)  
三反畑 勇 (株式会社安藤・間)  
小松 和史 (三友プラントサービス株式会社)

## 1. はじめに（研究背景等）

一般廃棄物の排出量の減少、資源化率と焼却率の増加が相まって、最終処分される廃棄物に占める焼却残渣の割合は実に 90%に達している。最終処分場の確保は依然として困難であり、埋立地の延命化に向けて、焼却残渣の有効利用が進められているが、セメント工場等が立地されていない地域においては埋立処分を継続せざるを得ない状態にある。また、震災が多発する中において、被災時にも機能を損ねない強靱な廃棄物処理施設の整備が急務となっている。被災後は、迅速な復旧復興対応が求められており、最終処分場においては、被災直後の片付けごみの受入先として、また災害廃棄物の仮置場、資源化のための仮設施設の設置の場所としての利用が望まれる。従来の廃棄物最終処分場（以下、処分場）における埋立処分技術では、処分場が廃止されるまでの長期に亘って浸出水、埋立ガス等の管理が求められ、さらに地盤の支持力不足、不同沈下等のため高度な跡地利用が難しいという問題がある。これらを改善するとともに、環境安全かつ強靱で、さらにはプラスの価値を生み出す強固な地盤を創出する新たな最終処分技術の開発が望まれる。

## 2. 研究目的

本研究では、平成 26～28 年度環境研究総合推進費により実施した「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」の研究成果である『固化式処分システム』を社会実装することを目的に、「埋立用材の調整」、「施工性と埋立地盤特性」、「耐久性と環境影響評価」、「経済性評価」の 4 課題について研究を行った。

固化式処分システムとは、石炭灰固化技術「超流体工法」<sup>1)</sup>を廃棄物焼却残渣に応用したものである。具体的には、焼却残渣にセメントと水を添加して混練し、混練物を埋立地に敷均し、高周波振動を与えて締め、固化地盤として埋立処分するものである。固化式処分システムの適用により、(1)強固な埋立地盤の強固化による耐震性の向上、(2)埋立廃棄物の減容化ならびに廃棄物の飛散防止に伴い覆土が不要になることによる廃棄物埋立容量の増加または埋立地の延命化、(3)雨水浸透の排除と有害物質の溶出低減による処分場の早期廃止、(4)維持管理期間の短縮による維持管理費の低減、(5)跡地の高度利用が期待される。特に、(1)及び(5)

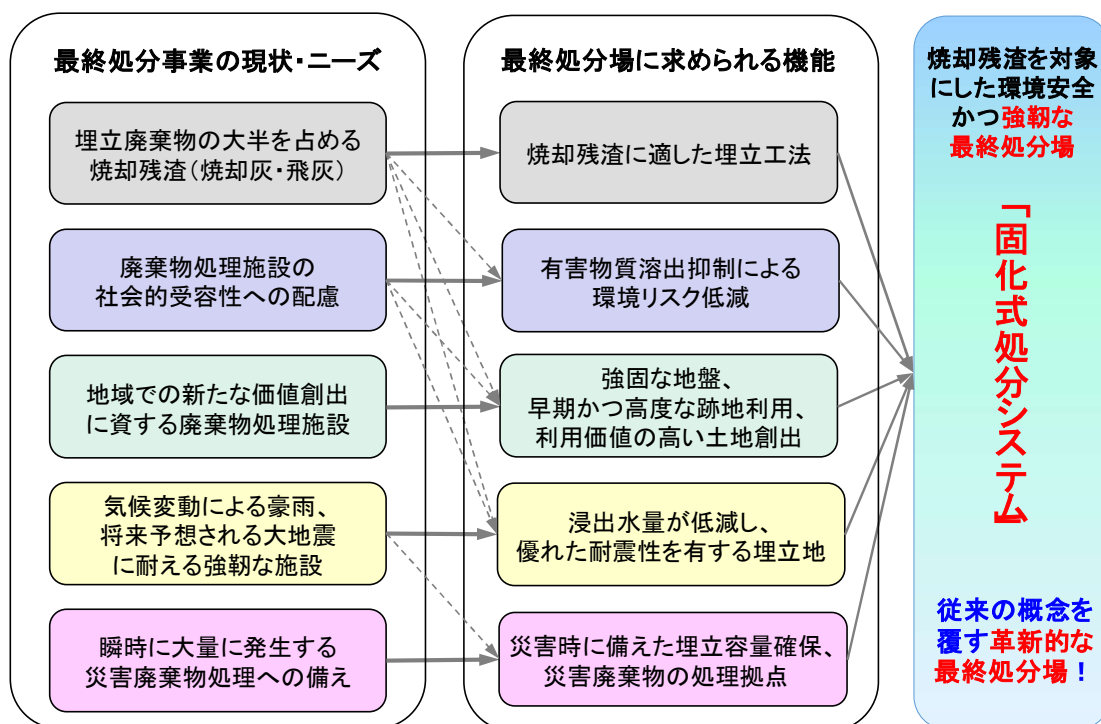


図 2.1 研究の背景及び目的

表 2.1 開発目標

項目	開発目標
減容化率	20%以上
一軸圧縮強度	5 N/mm <sup>2</sup> 以上
透水係数	1 × 10 <sup>-7</sup> cm/s以下
有害物質溶出量	放流水質基準以下
ライフサイクルコスト	従来型処分以下

により、震災発生時には固化式処分場をただちに災害廃棄物の中間処理施設として活用でき、固化式処分場は迅速な復旧に資するレジリエントな廃棄物処理システムの構築に大きく貢献するものと期待される。

表 2.1 に本研究における開発目標を示す。固化式処分の適用による埋立層の減容化率は 20%以上（従来型処分場における覆土の体積率以上）、固化式処分埋立地盤の一軸圧縮強度は 5 N/mm<sup>2</sup>以上（高度な跡地利用に十分な強度）、透水係数は 1 × 10<sup>-7</sup> cm/s 以下（実質上不透水層）、有害物質溶出濃度は放流水質基準以下（水処理なしで放流可能）、固化式処分システムのライフサイクルコストは従来型処分以下（従来型処分よりも経済的に有利）と設定した。

### 3. 研究方法

#### 3. 1 埋立用材の調整

##### (1) 磁力選別及び篩選別による鉄分及び大寸法固形物（混練不適物）の除去

固化式処分システムにおいては、前処理として、鉄分とミキサーによる混練に不適な大寸法固形物の除去が必要である。そこで、図 3.1.1 に示すように、磁力選別機及び篩選別機（40mm メッシュ）を用いて焼却残渣から鉄分及び大寸法固形物を除去する埋立用材調整方法の実証試験を行った。具体的には、F 市 F 最終処分場において、F 市 R 清掃工場から搬入された焼却残渣（焼却灰：運搬車 6 台分＝約 51 t、キレート処理済み飛灰（以下、飛灰と呼ぶ。）：運搬車 2 台分＝約 17 t）を対象に、磁力選別機及び篩選別機を使用し、焼却残渣を鉄分、大寸法固形物（粒径 40 mm 以上）、選別後の焼却残渣（粒径 40 mm 以下）に選別し、それらの発生割合を計量するとともに、選別処理に要する時間を計測した。

##### (2) 一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

焼却施設や排出日により性状が異なる焼却残渣に対して最適な配合を適切に決定できる指標等を明らかにすることを目的とした。F 市 R 清掃工場から排出された焼却残渣（焼却灰、キレート処理済み飛灰（以下、飛



図 3.1.1 最終処分場で実施した一般廃棄物焼却残渣の粒度調整の実証試験

灰と呼ぶ。))を試料とし、試料の最大粒径、配合(焼却灰、飛灰及びセメントの混合比、混合物の含水比)、混練ミキサー、締固め装置等が異なる種々の条件で室内配合試験等を実施し、焼却残渣固化体の乾燥密度、一軸圧縮強度、透水係数、有害物質溶出量を確認するとともに、変動する焼却残渣の性状に対応した最適な示方配合を得るための方法を検討した。

### (3) 産業廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

固化式処分システムが産業廃棄物焼却残渣(以下、産廃灰と呼ぶ。)にも適用可能かを検討した。3種類の産廃灰(産廃ロータリーキルン焼却灰2種、木質バイオマス焼却飛灰1種、何れも10mmふるい下)を試料とし、産廃灰の性状(粒度分布、元素組成、有害物質の含有量及び溶出量)を把握するとともに、室内配合試験を実施し、産廃灰の振動締固めに適した配合条件等を検討した。また、室内配合試験で作製したモールド供試体を用いて産廃灰固化体の乾燥密度、一軸圧縮強度、有害物質溶出量、透水係数を把握した。さらに、石炭灰の添加やキレート剤の添加が固化体の一軸圧縮強度、有害物質溶出量、透水係数に及ぼす影響についても検討した。

### (4) バッチャープラントの検討

固化式処分システムにおいては、焼却残渣とセメントと水を効率よく混練するためのバッチャープラントが必要となる。そこで、埋立模型槽を用いた施工試験等で得られた施工性のデータに基づき、実規模のバッチャープラントについて検討した。

## 3. 2 施工性及び埋立地盤特性

### (1) 固化式処分の施工性

二重遮水シート方式の一般廃棄物最終処分場の底面及び法面を模擬した構造を有する埋立模型槽(内寸4m×1.7m×高さ1.7mの鋼製タンク)を用い、固化式処分を模擬した施工試験を実施し、施工性(実用的な施工手順及び施工能力等)を確認した。図3.2.1に施工試験で作製した固化式処分埋立模型槽(以下、固化式埋立模型槽と呼ぶ。)の断面図を示す。

基礎地盤の上に遮水シートを敷設し、その上に保護層を設け、その上に固化式処分を模擬した施工により焼却残渣を充填した。焼却残渣はF市R清掃工場から排出されたものであり、3.1.1(1)の選別後の焼却灰及び飛灰を用いた。焼却灰と飛灰を乾燥質量比3:1(清掃工場における排出比率を想定)で混合したものに、セメント(高炉セメントB種)と水(水道水)をセメント添加率が10%、含水比が28%となるように添加し、強制二軸ミキサー(公称容量100L)を用いて混練した。厚さ約12cmで混練物を槽内に敷均し、その上から振動板を当てて高周波振動を15~30秒間与えて締固め、1層(層厚約10cm)とした。これを層厚が90cm

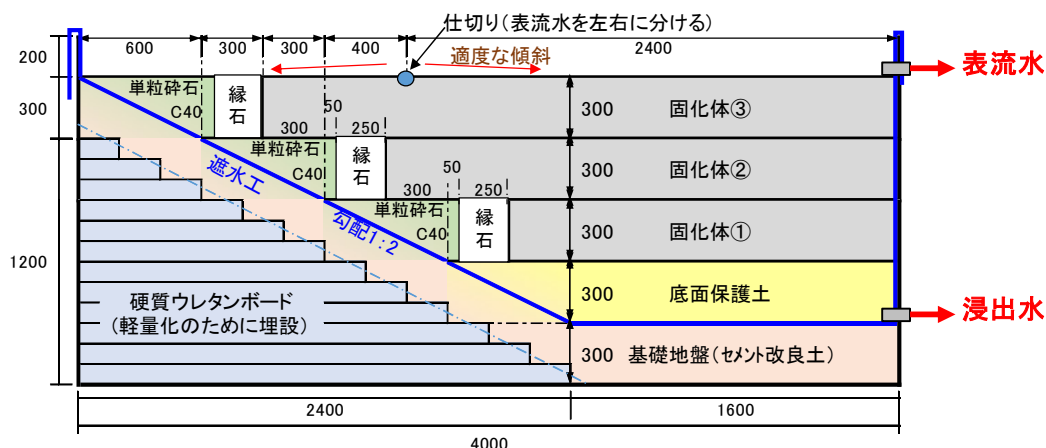


図 3. 2. 1 固化式処分埋立模型槽の断面図

になるまで繰返し、固化式埋立模型槽を作製した。

比較対象として従来型処分埋立模型槽（以下、従来型埋立模型槽と呼ぶ。）も作製した。底面構造は固化式埋立模型槽と同様であり、保護土層の上に焼却灰と飛灰を乾燥質量比 3:1 で混合したものをプレートコンパクタで層厚約 10 cm 毎に締固め、これを層厚が 90 cm になるまで繰返し、従来型埋立模型槽を作製した。

## (2) 固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果

単位質量の焼却残渣の埋立処分により消費される埋立地の容量を埋立容量消費量と称し、固化式処分と従来型処分の埋立容量消費量の比較により、固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果を評価した。固化式処分の埋立容量消費量  $C_S$  [ $\text{m}^3/\text{t}$ ] は、固化式埋立模型槽における焼却残渣固化体層の体積  $V_S$  [ $\text{m}^3$ ]、使用した焼却残渣の乾燥質量  $m_S$  [ $\text{t}$ ] を用い、式 3.2.1 により求めた。従来型処分の埋立容量消費量  $C_C$  [ $\text{m}^3/\text{t}$ ] は、従来型埋立模型槽における焼却残渣層の体積  $V_C$  [ $\text{m}^3$ ]、使用した焼却残渣の乾燥質量  $m_C$  [ $\text{t}$ ] を用い、式 3.2.2 により求めた。従来型処分については、実際の処分場においては埋立容量の約 20% が覆土で消費されることを考慮し、1.25 を乗じた。

$$C_S = \frac{V_S}{m_S} \quad \dots (3.2.1), \quad C_C = \frac{V_C}{m_C} \times 1.25 \quad \dots (3.2.2)$$

## (3) 固化式処分埋立地盤の強度、透水性、有害物質溶出濃度

固化式埋立模型槽の作製中に、埋立層の高さが底面保護土表面から①20～30cm、②40～50cm、③70～80cm になった時に、固化式埋立模型槽に充填する混練物の一部を採取し、モールドに充填して振動板の上に固定し、高周波振動を与えて締固め、その後 20℃一定で封緘養生し、所定の材齢（7、28、98、207、469 日）となった固化体供試体を対象に、一軸圧縮強度（JIS A 1216）、有害物質溶出濃度（JIS K 0102）、透水係数（JIS A 1218）を測定した。また、固化式埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプル（送水式、 $\phi$  50 mm）（材齢 28、98、207、469 日）についても同様に一軸圧縮強度及び有害物質溶出濃度を測定した。

## (4) 固化式処分埋立地盤の孔隙構造

固化式処分埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプルを対象に孔隙構造の把握を行った。マイクロ X 線 CT 法で把握できる直径 47  $\mu\text{m}$  以上の孔隙をマクロ孔隙、マクロ孔隙よりも小さな孔隙をミクロ孔隙と称した。ミクロ孔隙は水銀圧入法によって測定した。

### 3.3 耐久性及び環境影響評価

#### (1) 固化式処分が遮水シートに及ぼす影響

固化式処分の施工時に遮水シートに有害なひずみ等が発生しないかを検証することを目的に、固化式処分埋立模型槽の二重遮水シートにひずみゲージを貼り、動ひずみ計を用いて、施工試験中のひずみを測定した。

#### (2) 固化式処分埋立地盤における未燃分腐敗の可能性及び内部ガス圧による破壊の可能性

固化式処分埋立地盤には焼却残渣由来の未燃分（有機物）が含まれており、固化体内の微生物の活動による未燃分の腐敗に伴うガス発生により、固化体内部のガス圧力が上昇し、固化体に亀裂（破壊）が生じることで、固化体の強度及び環境安全性に悪影響を及ぼすことが懸念された。そこで、未燃分腐敗の可能性に関する検討及び内部ガス圧による固化体破壊の可能性に関する検討を行った。

#### (3) 長期耐久性及び環境影響評価

固化式処分場の長期耐久性及び環境影響を明らかにすることを目的に、固化式処分の施工試験によって作製した固化式埋立模型槽を対象に長期モニタリングを行った。

耐久性に関しては、埋立地盤の表層の観察、定期的に採取されたボーリングコアサンプルを用いた埋立地盤の深度方向の鉱物組成の把握を行った。

環境影響に関しては、固化式処分場の維持管理期間（発生水の水処理が求められる期間）や水処理施設及び調整池の設計に資する情報の取得を目的に、固化式埋立模型槽の水収支及び発生水の水質の把握を行った。

図 3.2.1 に示すように固化式埋立模型槽の地表には仕切りを設け、仕切りより左側の表流水は碎石層へ流入し、仕切りより右側の表流水は表流水集水管へ流入するように地表に適度な緩勾配を与えた。碎石層へ流入した水は遮水シート上を流下し、浸出水集水管へ流入するようにした。従来型埋立模型槽についても、同様に地表に仕切りと緩勾配を設け、表流水集水管及び浸出水集水管を設置した。表流水集水管及び浸出水集水管から流出した水を、それぞれ表流水及び浸出水と称することとした。

固化式及び従来型埋立模型槽の横には貯水タンクが設置されており、タンクへ流入する表流水及び浸出水を定期的に採水し、水質を分析した。また、貯水タンクに水位計を設置し、表流水及び浸出水の発生量を計測するとともに、雨量計により降水量を計測し、水収支を把握した。

固化式処分場の埋立地盤の間隙水の水質を明らかにすることを目的に、固化式埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプルを圧搾し、抽出された細孔溶液の水質を把握した。また、固化式処分場における埋立ガス発生状況を明らかにすることを目的に、一定期間密閉したボーリング孔内のガス組成を分析した。

### 3.4 経済性評価

固化式処分システムの経済性評価を行うため、固化式処分システムを導入した最終処分場（以下、固化式処分場と呼ぶ。）のライフサイクルコスト（以下、LCC と呼ぶ。）を推定し、従来型の最終処分場（以下、従来型処分場と呼ぶ。）と比較評価した。

埋立容量（10 万 m<sup>3</sup> と 100 万 m<sup>3</sup> の 2 ケース）、供用期間（20 年）を設定し、これらの条件に基づき、埋立廃棄物量、セメント添加量、浸出水量を計算するとともに、前処理工程、最終処分場の規模、浸出水処理施設、重機・設備、電力・燃料使用量に関する計算を行った。以上を踏まえ、埋立廃棄物 1 トンあたりのインシヤルコスト及びランニングコストを計算し、両者の和を埋立廃棄物 1 トンあたりの LCC とした。固化式処分における配合時のセメント添加量や含水率は施工試験時の実績値を参考に設定した。

図 3.4.1 に固化式処分場の前処理工程と必要設備を示す。固化式処分は、清掃工場から搬入された焼却残渣から混練不適物（鉄くず及び大寸法固形物）を取り除き、バッチャープラントに運搬し、焼却残渣とセメントと水を配合して混練し、ダンプカーで埋立地に運搬し、敷均した混練物に上から振動板を当てて、振動締固めを行うものとした。一方、従来型処分は、清掃工場から搬入された焼却残渣をブルドーザで転圧することのみとした。

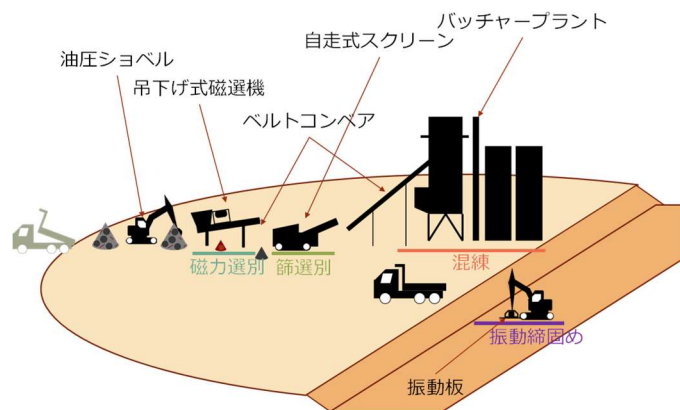


図 3.4.1 固化式処分場の前処理工程と必要設備



## 4. 結果及び考察

### 4. 1 埋立用材の調整

#### (1) 磁力選別及び篩選別による鉄分及び大寸法固形物（混練不適物）の除去

最終処分場に搬入された焼却残渣（焼却灰、飛灰）の選別を行った結果、焼却灰については6.4%が鉄分、2.0%が大寸法固形物（粒径 40 mm 以上）として除去され、選別後の焼却灰（粒径 40 mm 以下）は91.6%であった。飛灰については1.2%が大寸法固形物として除去され、選別後の飛灰は98.8%であった。また選別速度は、最終処分場に搬入された焼却残渣の即日選別が十分に可能な速度であることが確認された。

#### (2) 一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

様々な条件で室内配合試験を行った結果、焼却灰と飛灰の配合を乾燥質量比 3 : 1（清掃工場における発生比率を想定）とした場合、セメント添加率を 10% にすることで、開発目標を達成できることが確認された。また、配合選定における重要なファクターである配合時の含水比は、振動締固め曲線の乾燥密度が最大となる含水比+1~4%の範囲内に設定すれば良いことを明らかにした（図 4.1.1、図 4.1.2 参照）。さらに、異なる振動締固め装置を用いて振動締固め試験を行った結果、固化式処分における最適な示方配合の選定は、小型テーブルバイブレータを用いた室内振動締固め試験において乾燥密度が最大となる含水比を指標として行うことができることを示した。

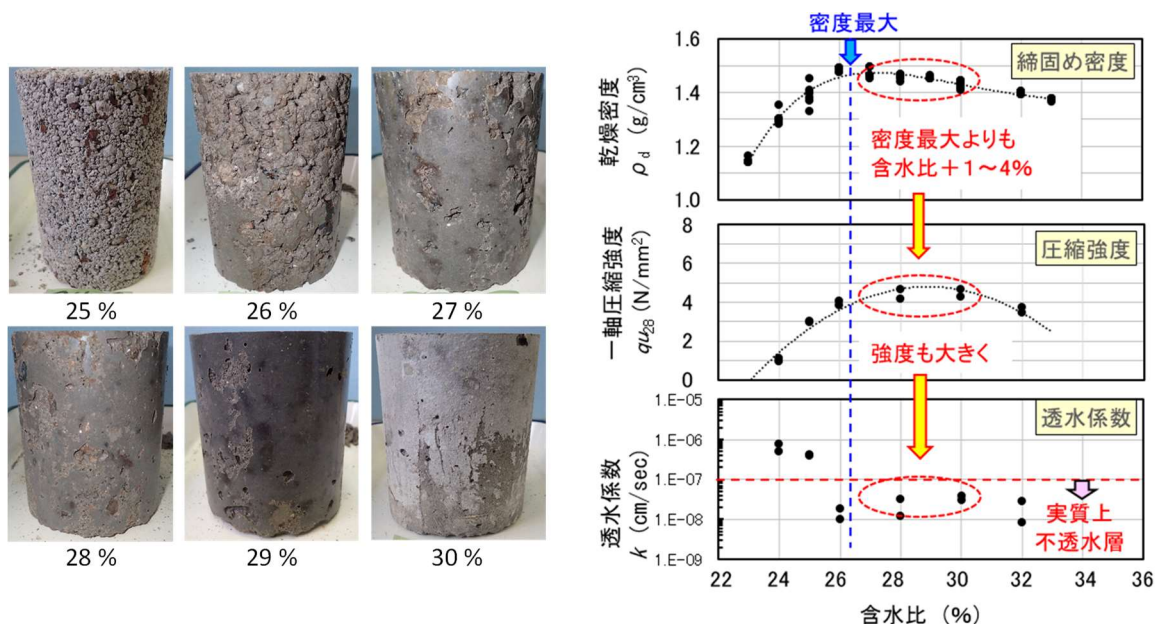


図 4.1.1 配合時の含水比による固化体の相違 図 4.1.2 固化体の性状と配合時の含水比の関係

#### (3) 産業廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

3 種類の産廃灰は性状のばらつきが大きく、産廃灰の振動締固めに適した含水比や固化体の一軸圧縮強度に大きなばらつきがみられた。一般廃棄物焼却残渣の場合と同様にセメント添加率を 10% とした場合、産廃灰固化体の一軸圧縮強度、透水係数、及び有害物質溶出量は開発目標を達成することができなかったが、セメント添加率を 20% 程度にすることで、全ての産廃灰の固化体で強度、透水性、有害物質溶出量の開発目標を達成することができることを明らかにした。さらに、石炭灰の添加により、一軸圧縮強度の大幅な増加ならびに有害物質溶出量の大幅な低減が図れ、セメント添加量の削減を図ることができることを示した。

#### (4) バッチャープラントの検討

実規模バッチャープラントの試設計を行った。埋立模型槽を用いた固化式処分の施工試験結果等に基づき、ミキサーの要求能力を 15 m<sup>3</sup>/h に設定し、1 m<sup>3</sup> 練りの強制二軸ミキサーを選定し、主要諸元を決

めた。今後は実際の処分場での固化式処分の実証試験等を行い、固化式処分の施工方法を確立した上で、要求される施工能力に適合したコンパクトなプラントの実用化を目指す。

## 4. 2 施工性及び埋立地盤特性

### (1) 固化式処分の施工性

埋立模型槽を用いた固化式処分の施工試験により、実用的な施工手順及び施工能力等を確認するとともに、一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工が問題なく可能であることを確認した。

### (2) 固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果

図 4.2.1 に従来型処分及び固化式処分の埋立容量消費量を示す。埋立容量消費量は従来型で  $1.02 \text{ m}^3/\text{t-ash}$ 、固化式で  $0.79 \text{ m}^3/\text{t-ash}$  であった。固化式処分の適用により埋立容量消費量を 23% 程度削減できること（減容化率 23%）が示され、これは開発目標（20% 以上）を達成するものであった。

### (3) 固化式処分埋立地盤の強度、透水性、有害物質溶出濃度

図 4.2.2 に固化体の一軸圧縮強度と材齢の関係を示す。固化体の一軸圧縮強度は、材齢とともに増加し、469 日目における強度は、供試体で  $8.5 \sim 9.1 \text{ N/mm}^2$ 、ボーリングコアサンプルで  $7.2 \text{ N/mm}^2$  に到達した。固化地盤の強度は開発目標（ $5 \text{ N/mm}^2$  以上）を達成するものであった。

固化体供試体の飽和透水係数は  $1.9 \times 10^{-9} \sim 3.5 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$  を示し、開発目標（ $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  以下）を達成した。固化式処分埋立地盤は実質上不透水層であることが確認された。

図 4.2.3 に固化体の有害物質溶出濃度の代表例として、鉛の溶出濃度を示す。固化体の溶出試験の結果、

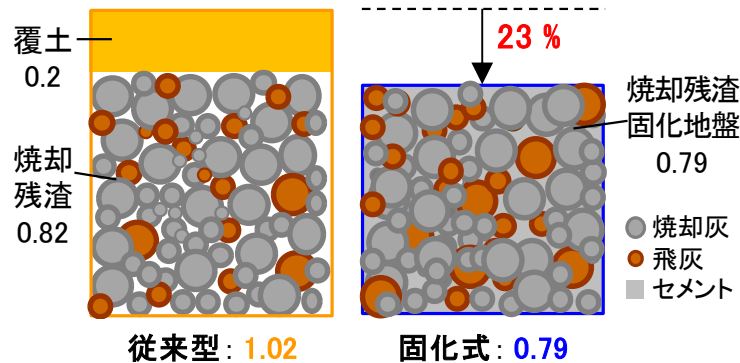


図 4.2.1 固化式処分による埋立地盤の減容効果

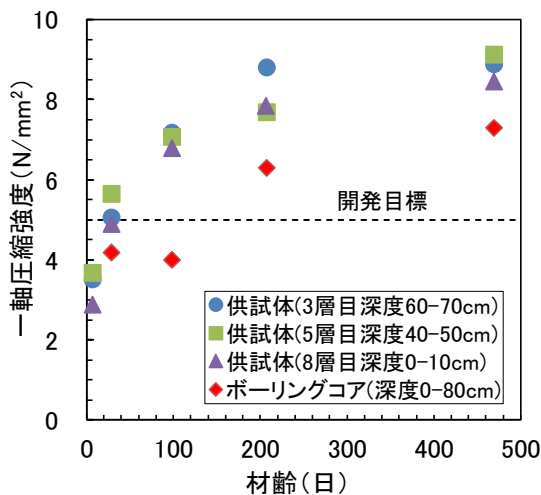


図 4.2.2 固化体の一軸圧縮強度と材齢の関係

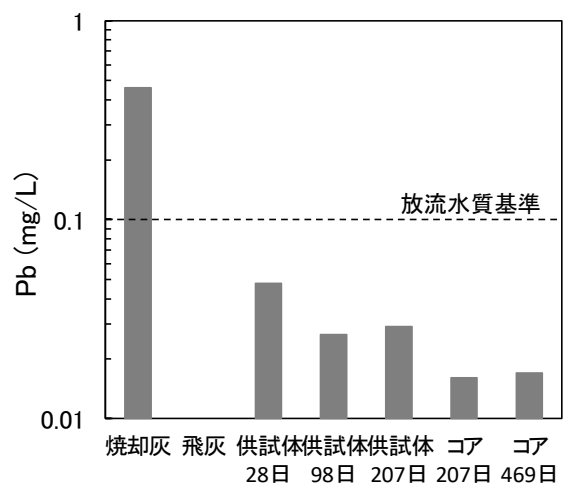


図 4.2.3 固化体の鉛溶出濃度

鉛、セレン、ふっ素の溶出が確認されたが、いずれの溶出濃度も放流水質基準以下であった。固化体の有害物質溶出濃度は開発目標（放流水質基準以下）を達成することが確認された。

#### (4) 固化式処分埋立地盤の孔隙構造

ボーリングコアサンプルを対象にマイクロ X 線 CT 法により深さ方向のマクロ孔隙率分布を求めた結果、深度 40 cm 付近でマクロ孔隙率が 8～25%と高い値を示した。これは、混練物を速やかに振動締固めしなかったために、混練物が乾燥し、含水比が低下し、密実に締固まらなかったためであった。混練物の含水率管理の重要性が示された。締固め不良部である深度 40 cm 付近を除くと、マクロ孔隙率は 2～8%であった。

ボーリングコアサンプルを対象に水銀圧入法でマイクロ孔隙径分布を求めた結果、最頻孔隙径は 30～60 nm であること、マイクロ孔隙率は 13～14%であることが示された。

### 4. 3 耐久性及び環境影響評価

#### (1) 固化式処分が遮水シートに及ぼす影響

埋立模型槽を用いた固化式処分の施工試験において、振動締固めによって遮水シートに発生したひずみは最大 2000  $\mu$  程度であった。このひずみは遮水シートの仕様（LLDPE、伸び率 400%以上＝ひずみ 4,000,000  $\mu$  相当以上）から考えて全く問題のない大きさであった。また、底面と法面の境界部やシート固定部付近でも特に大きなひずみは発生せず、固化式処分の施工が遮水シートの耐久性に悪影響を及ぼすことはないということが確認された。

#### (2) 固化式処分埋立地盤における未燃分腐敗の可能性及び内部ガス圧による破壊の可能性

一般細菌数を測定した結果、2000～3000 CFU/g という結果が得られ、固化式処分埋立地盤に一定数の菌が棲息していることが示唆された。また間隙水の TOC 濃度は 530 mg/L であり、一定の TOC 成分が確認されたことから、固化式処分埋立地盤は微生物が生育できる環境であることが示唆された。さらに、内部ガス圧による固化体破壊の可能性について、数値シミュレーションによる検討を行った結果、未燃分の分解に伴うガス発生によって固化体にひび割れ等の破壊が生じることはないことが示された。

#### (3) 長期屋外曝露の影響

長期間屋外曝露された固化式処分埋立地盤の表層にはポップアウトが多数発生した。ポップアウト部を取り出すと、その中心部に白色物質の生成が確認された。白色部と白色化していない箇所について、X 線回折分析を行い、同定された鉱物を比較した結果、ポップアウトの原因物質は Montmorillonite または Gypsum である可能性が示唆された。固化式埋立地盤が長期間屋外曝露を受ける際には表面を保護する必要性が示された。

#### (4) 水収支

表 4.3.1 に固化式及び従来型埋立模型槽における 650 日間の水収支を示す。数値は積算降水量に対する各積算水量の百分率である。蒸発量は、降水量から表流量及び浸出水量を引いて求めたものである。従来型では表流水の発生はほとんどなく、降水は覆土層に浸透し、その浸透水の約半数は非雨天時に蒸発し、残りの約半数は焼却残渣層へと浸透したものと考えられる。従来型の浸出係数（降水量に対する水処理量（＝表流水＋浸出水）の割合）は 49%であり、この浸出係数は従来型の処分場における一般的な浸出係数と同程度である。一方、固化式における浸出係数は 72%であり、従来型よりも高い値を示した。これは固化式埋立地盤が実質上不透水層であるため、降水が埋立地盤内に浸透せず、その多くは埋立地盤の表面を勾配に沿って流下し、その後表流水集水管または浸出水集水管へと流出するためである。固化式の埋立地盤が実質上不透水層であれば、浸出係数が 100%近くになっても良いと考えられるが、実際には埋立地盤の表面には細かい凹凸があり、またポップアウトが発生した場合には亀裂があり、降水量が少ない場合には、降水がそれらの凹凸や亀裂に浸入して保水され、非雨天時に蒸発しているものと考えられる。

表 4.3.1 650 日間の水収支 (単位: %)

	表流水	浸出水	蒸発量
固化式	26.8	45.2	28.0
従来型	0.004	49.1	50.9

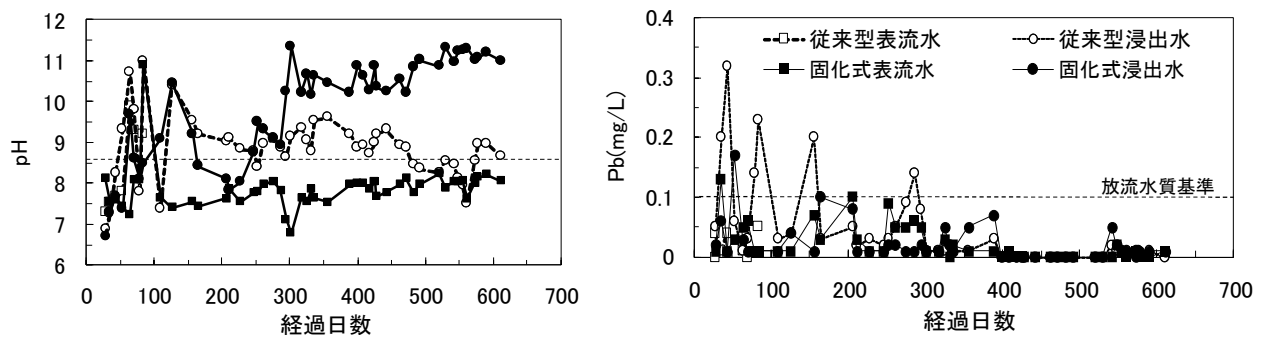


図 4.3.1 表流水及び浸出水の pH 及び鉛濃度

#### (5) 表流水及び浸出水の水質

図 4.3.1 に固化式及び従来型埋立模型槽の表流水及び浸出水の水質のうち、放流水質基準の超過が見られた pH 及び Pb 濃度を示す。pH 及び Pb 濃度以外は、放流水質基準を満足した。

固化式の表流水の水質をみると、実験開始から 90 日目付近までの実験初期において pH 及び鉛濃度の基準超過が見られたが、それ以降、pH、鉛濃度ともに放流水質基準を満足した。

次に固化式の浸出水の水質を見る。まず鉛濃度は、実験開始から 50 日目付近までの実験初期を除けば、放流水質基準を満足した。

pH は、時間の経過とともに上昇する傾向を示し、特に 300 日目付近で急激な上昇を示し、それ以降も上昇傾向を示し続けた。ここで、固化式の浸出水については、「浸出水」と称しているが、実際には碎石層に入り、碎石層及び保護土層を通過して、浸出水集水管から流出した「表流水」である。そのため、固化式の浸出水の水質は表流水集水管から流出する表流水と同様の傾向を示すと当初予想されが、100 日目付近以降、表流水と浸出水の pH には大きな差が生じた。関連する現象として、浸出水の流出応答は、300 日目付近から大幅に遅くなった。その後、固化式埋立模型槽の側面の一部を外し、内部を観察したところ、保護土層が硬化していたことが確認された。以上を踏まえると、固化式の浸出水の pH が上昇傾向を示した原因として、硬化した保護土層の中を水が通過したことが考えられる。具体的には、以下の①～③の現象が起きたものと考えられた：①長期間曝露によって固化式埋立地盤の表層にポップアウトが発生したために、表流水に固化式埋立地盤の細粒分やセメント成分が混入した。②その表流水が保護土層に流入して細粒分やセメント成分が保護土層で捕捉・集積され、保護土層の硬化及び空隙の目詰まり（スケーリング）が生じた。③保護土層の透水性の低下により、保護土層における浸透水の滞留時間が長くなり、硬化した保護土層のアルカリ成分が浸透水に移行し、その水が浸出水として流出したために pH が高くなった。

このように、固化式埋立地盤の表流水が保護土層のような多孔質体に浸透すると、多孔質体の目詰まりが生じ、さらには浸透水の pH の上昇などの問題を生じることが示された。その一方、固化式埋立地盤の表面上から直接表流水集水管に流入した表流水の水質は、上述のように実験初期を除き、放流水質基準を満たした。上記 2 点を踏まえると、固化式処分場における表流水の管理において、表流水が孔隙の比較的小さな多孔質体内を浸透することのないように管理することの重要性が示唆された。

## (6) 間隙水の水質

ボーリングコアサンプルから圧搾抽出された間隙水の水質は、pH、鉛、セレン、水銀、フッ素について、放流水質基準値の超過が見られた。固化式処分埋立地盤は実質上不透水層であるため、間隙水が外部へ流出することは考えられないものの、間隙水は放流水質基準を満足するものではないことが確認された。

## (7) ガス組成

密閉したボーリング孔内のガス組成は、 $N_2$ が82%程度、 $O_2$ が17%程度、 $H_2$ が1%程度を示し、 $CO_2$ 及び $CH_4$ は0%であった。この組成は大気組成に近いものであり、埋立ガスが活発に発生している様子は見られなかった。一方、大気組成に比べて $O_2$ がやや低いこと、 $H_2$ が検出されていることが特徴として挙げられる。埋立地盤内では少量ながら $O_2$ が消費されていること、微量ながら水素ガスが発生していることが推察された。

## 4. 4 経済性評価

埋立容量が異なる2ケース（10万 $m^3$ 、100万 $m^3$ ）について、従来型処分と固化式処分の埋立廃棄物1t当たりのライフサイクルコスト（LCC）を算出した。表4.4.1に評価ケースの概要、図4.4.1に算出結果を示す。

埋立容量が10万 $m^3$ の場合、従来型処分のLCCは27.1千円/t、固化式処分のLCCは25.0千円/tであり、従来型処分のLCCに対する固化式処分のLCCの低減率は7.7%であった。埋立容量が100万 $m^3$ の場合、従来型処分のLCCは10.8千円/t、固化式処分のLCCは10.3千円/tであり、従来型処分のLCCに対する固化式処

表 4.4.1 評価ケースの概要

項目	従来型 (小)	固化式 (小)	従来型 (大)	固化式 (大)
埋立容量 (千 $m^3$ )	100	100	1,000	1,000
埋立ごみ量 (千t)	141	183	1,410	1,830
供用期間(年)	20			
埋立終了後の 維持管理 期間(年)	15	3	15	3

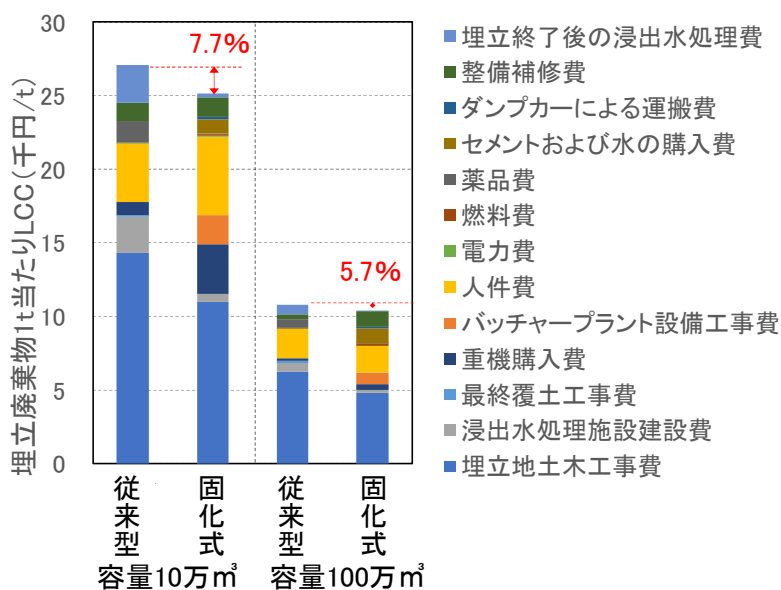


図 4.4.1 ライフサイクルコストの比較

分のLCCの低減率は5.1%であった。埋立容量が10万 $m^3$ 、100万 $m^3$ の両ケースとも、固化式処分の方がLCCは低く、固化式処分は従来型処分に対して、経済的にも有利であることが示された。

LCCの内訳をみると、固化式処分の方がコストが高い項目として、重機に関するコスト（重機購入費、燃料費、整備補修費）が挙げられた。これは、固化式処分場の方が必要な重機の量が多いためである。また、固化式処分ではバッチャープラントやセメント、水などが必要なこともコストを高くする一因となっている。一方、固化式処分の方がコストが低い項目として、浸出水処理に関するコスト（浸出水処理施設建設費、薬品費、埋立終了後の浸出水処理費）が挙げられた。これは、固化式処分の方が浸出水量が少ないためである。項目によってコストの高低があるが、正味のコストは固化式処分の方が低いという結果であった。

#### 4. 5 まとめ：研究目標達成度

表4.5.1に本研究の目標とそれに対する達成度の自己評価を示す。達成度欄に示すように、目標(1)、(2)、(3)、(4)ともに目標を達成したと評価される。

今後の課題として、実際の処分場において固化式処分を行うにあたっての課題がいくつか挙げられる。一つ目は示方配合の決定速度、二つ目はバッチャープラントの設計、三つ目は埋立作業計画、四つ目は表流水の集水方法と水処理施設の検討である。これらの課題の詳細については「Ⅱ. 成果の詳細 4. 5 まとめ：研究目標達成度」を参照されたい。

上記四点を含む今後の課題については、環境研究総合推進費補助金（次世代事業）「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」（令和2年度～令和4年度）による継続研究において、解決を図り、固化式処分システムの社会実装を目指す。

表 4.5.1 研究目標に対する達成度

研究目標	達成度
(1) 柔軟な埋立用材の調整システムの構築(埋立対象となる焼却残渣の性状変化に対応できる前処理及び配合システムの構築)	<ul style="list-style-type: none"> <li>前処理システム（混練不適物の除去）の確立とともに、性状が変動する焼却残渣に対して最適示方配合を決定する手法の確立を行った。</li> <li>以上のことから、目標(1)を達成したと評価される。</li> </ul>
(2) 高い施工性(日々搬入される大量かつ性状が変動する焼却残渣を効率的に固化処分できる施工性)、強固な埋立地盤構築（ $\geq 5 \text{ N/mm}^2$ 、地盤改良なしで重機が走行できるトラフィカビリティを有し、また災害廃棄物の選別、仮設処理施設等の構造物を設置できる支持力を有する地盤）、埋立地の延命化のための減容効果（ $\geq 20\%$ ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用的な施工手順を確立するとともに、一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工が問題なく可能であることを実証した。</li> <li>埋立地盤の強度（<math>7.2 \text{ N/mm}^2</math>）及び減容化率（23%）は開発目標を達成した。</li> <li>以上のことから、目標(2)を達成したと評価される。</li> </ul>
(3) 耐久性(長期耐久性を有する埋立地盤)と環境影響評価(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。)	<ul style="list-style-type: none"> <li>表層数 cm 以深の大部分の埋立地盤については、劣化は認められず、強度は時間とともに増加し、長期耐久性が確認された。</li> <li>固化式処分場における水処理の対象は表流水であり、表流水の水質は埋立後 90 日程度で放流水質基準を満足することを実証した。</li> <li>以上のことから、目標(3)を達成したと評価される。</li> </ul>
(4) 経済性(従来型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)	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来型処分場と固化式処分場のライフサイクルコストを算定し、固化式処分は従来型処分よりも経済的に有利であることを示した。</li> <li>以上のことから、目標(4)を達成したと評価される。</li> </ul>

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本研究により得られた成果の科学的意義を以下に示す。

#### 課題 1：埋立用材の調整

- ・焼却残渣から混練不適物を除去する固化式処分の前処理における焼却残渣の選別率及び選別速度を実証試験により明らかにしたこと
- ・一般廃棄物焼却残渣の固化式処分における最適な配合の含水比は振動締固め試験の最適含水比（乾燥密度が最大となる含水比）+1～4%であることを明らかにし、変動する一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合の決定手法を確立したこと
- ・産業廃棄物焼却残渣であってもセメント添加率を 20%にすることで固化式処分が可能であることや、石炭灰の添加によってセメント添加率の削減や有害物質溶出量の大幅な低減を図れることを明らかにしたこと

#### 課題 2：施工性と埋立地盤特性

- ・一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工は問題なく可能であることを実証したこと
- ・固化式処分場の埋立地盤は開発目標（減容効果、一軸圧縮強度、透水係数、有害物質溶出量）を達成することを実証したこと

#### 課題 3：耐久性と環境影響評価

- ・埋立地盤は長期間屋外曝露されると表層にポップアウトが発生することを明らかにしたこと
- ・固化式処分場における水処理量は降水量の約 7 割であること、表流水は埋立初期を除いて放流水質基準を満足すること、埋立ガスの発生はないことを明らかにしたこと

#### 課題 4：経済性評価

- ・最終処分場のライフサイクルコストの観点から固化式処分システムは従来型処分に比べて経済的に有利であることを明らかにしたこと

### (2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

固化式処分システムを適用した固化式処分場は、(1)強固な埋立地盤による高い耐震性を有し、(2)埋立地盤の減容化により埋立容量の消費を低減し、(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を短縮し、(4)維持管理費を低減でき、(5)跡地を早期かつ高度に利用することができる。特に、(1)から(5)により、震災発生時には地盤改良等を行うことなく直ちに固化式処分場を災害廃棄物の中間処理施設（二次仮置場、仮設処理施設）の用地として活用でき、迅速な復旧復興に資するレジリエントな廃棄物処理システムの構築が可能であり、行政ニーズは極めて高い。

また、社会的受容性の高い固化式処分システムの実現により、最終処分場は過疎地につくる迷惑施設から、都市型処分場へと移行する。廃棄物の発生地点と終着地点の距離が短くなり、受益と受苦の乖離の解消にも寄与する。立地条件が良い都市型の固化式処分場において創出された環境安全かつ強固な土地の価値は高く、高度な跡地利用により経済的便益を生み出すことができる。固化式処分場の跡地には、中間処理施設を建設することもできる。固化式処分場は地域循環圏の拠点として効率的な廃棄物処理にも貢献する。固化式処分システムの社会実装により、廃棄物処分事業は、環境安全かつ強靱な地盤を創造する革新的な事業となる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付論文>

- 1) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分における振動締固めに関する基礎的研究, 第13回環境地盤工学シンポジウム, pp. 275-280, 2019.

### (2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 秋田宏行, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの開発 (その2) ~焼却残渣固化体の耐久性および施工性~, 第39回全国都市清掃研究・事例発表会, 2018.
- 2) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 梶野友貴, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性及び強度に関する実証研究, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- 3) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行: 一般廃棄物焼却残渣固化体の内部ガス圧による破壊に関する検討, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- 4) Teppei Komiya, Takeru Saruwatari, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Isamu Sandambata, Takahiro Aoki, Tatsufumi Nishio, Hiroyuki Akita, Fuminori Hirose: Demonstrational Experiment on Environmental Safety of Cement-solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues, 2018 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management, 2018.
- 5) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 梶野友貴, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性と埋立地盤強度に関する実証研究, 平成30年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2018.
- 6) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤内部の孔隙構造に関する基礎的研究, 平成30年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2018.
- 7) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験 (その1: 施工性), 第53回地盤工学会研究発表会, 2018.
- 8) 青木貴均, 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 猿渡武, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験 (その2: 固化体の性状), 第53回地盤工学会研究発表会, 2018.
- 9) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験 (その3: 環境安全性), 第53回地盤工学会研究発表会, 2018.
- 10) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行: 廃棄物焼却残渣固化体の耐久性に及ぼす細孔隙における微生物活動の影響, 第53回地盤工学会研究発表会, 2018.
- 11) Yousuke Hakata, Teppei Komiya, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka: Influence of microbial activity in micro pores on durability of cement-solidified solid waste incineration residues, The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, 2018.



- 12) Takeru SARUWATARI, Teppei KOMIYA, Hirofumi NAKAYAMA, Takayuki SHIMAOKA, Isamu SANDAMBATA, Takahiro AOKI, Tatsufumi NISHIO, Hiroyuki AKITA, Fuminori HIROSUE: Demonstrational Experiment on Cement-Solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues, The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, 2018.
- 13) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣固化式処分の遮水シートに及ぼす振動締固めの影響, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.
- 14) 青木貴均, 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 産業廃棄物焼却灰の固化式処分に関する基礎的研究, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.
- 15) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の環境安全性及び埋立地盤強度に関する実証研究, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.
- 16) 博田庸介, 小宮哲平, 島岡隆行, 中山裕文, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤の孔隙構造に関する基礎的研究, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.
- 17) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の埋立特性に関する実証的研究, 第29回廃棄物循環学会研究発表会, 2018.
- 18) 秋田宏行, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究～一般廃棄物焼却残渣固化体の振動締固め特性～, 第40回全国都市清掃研究・事例発表会, 2019.
- 19) 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, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究～産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究～, 第40回全国都市清掃研究・事例発表会, 2019.
- 20) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤におけるマクロ孔隙の存在形態及び孔隙径分布に関する研究, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 21) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性及び強度に関する実証実験, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 22) 有村愛咲美, 中山裕文, 島岡隆行: 廃棄物固化式処分システムの費用と便益の評価に関する研究, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 23) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤内部の孔隙構造に関する基礎的研究, 平成31年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2019.
- 24) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の環境安全性及び水収支に関する実証研究, 平成31年度廃棄物循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2019.

- 25) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣の固化式処分における振動締固めと示方配合に関する研究, 第54回地盤工学会研究発表会, 2019.
- 26) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤の孔隙構造に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会, 2019.
- 27) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の水収支及び環境安全性に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会, 2019.
- 28) 青木貴均, 三反畑勇, 西尾竜文, 秋田宏行, 弘末文紀, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 産業廃棄物焼却残渣の固化式処分における示方配合に関する基礎的研究, 第54回地盤工学会研究発表会, 2019.
- 29) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣固化式処分における振動締固めと配合に関する研究, 令和元年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2019.
- 30) 青木貴均, 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究 ~産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究~, 令和元年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2019.
- 31) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分における振動締固めに関する基礎的研究, 第13回環境地盤工学シンポジウム, 2019.
- 32) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣の固化式処分システムの振動締固め特性に関する研究, 第41回全国都市清掃研究・事例発表会, 2020.
- 33) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性評価のための長期実証実験, 令和元年度土木学会西部支部研究発表会, 2020.
- 34) 青木貴均, 弘末文紀, 秋田宏行, 三反畑勇, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 産業廃棄物焼却残渣の固化式処分における示方配合に関する基礎的研究(その2), 第55回地盤工学発表会, 2020.
- 35) 青木貴均, 弘末文紀, 秋田宏行, 三反畑勇, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究~産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究(その2)~, 令和2年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2020.

## 7. 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

5) 小松 和史

武蔵工業大学工学部機械工学科卒業、工学学士、  
現在、三友プラントサービス株式会社代表取締役社長

## II. 成果の詳細

### [要旨]

本研究では、『固化式処分システム』を社会実装することを目的に、「埋立用材の調整」、「施工性と埋立地盤特性」、「耐久性と環境影響評価」、「経済性評価」の4課題について研究を行った。

「埋立用材の調整」では、固化式処分の前処理としての焼却残渣の混練に不適な鉄分や大寸法固形物の除去の実証試験を行い、焼却残渣の選別率や選別速度を明らかにした。また、変動する一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合について検討を行い、振動締固め試験で求まる乾燥密度が最大となる含水比を指標として最適示方配合を決めることができることを示した。さらに、固化式処分システムが産業廃棄物焼却残渣にも適用可能であるかを検討し、適用可能となる配合条件を示した。

「施工性と埋立地盤特性」では、埋立模型槽を用いた固化式処分の施工試験を実施し、一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工は問題なく可能であることや、埋立地盤は開発目標を達成するもの（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 $\geq 20\%$ ）であることを示した。

「耐久性と環境影響評価」では、施工試験で作製した埋立模型槽のモニタリングにより、長期間屋外曝露されると表層にポップアウトが生じるため、表面の保護が必要であることを示した。また、固化式処分場における水処理量は降水量の約7割であること、表流水は初期を除いて放流水質基準を満足するものであること、固化式処分場では埋立ガスが発生しないことを示した。

「経済性評価」では、固化式処分と従来型処分のライフサイクルコストを求め、固化式処分は従来型に比べて経済的にも有利であることを示した。

### 1. はじめに

一般廃棄物の排出量の減少、資源化率と焼却率の増加が相まって、最終処分される廃棄物に占める焼却残渣の割合は実に90%に達している。最終処分場の確保は依然として困難であり、埋立地の延命化に向けて、焼却残渣の有効利用が進められているが、セメント工場等が立地されていない地域においては埋立処分を継続せざるを得ない状態にある。また、震災が多発する中において、被災時にも機能を損ねない強靱な廃棄物処理施設の整備が急務となっている。被災後は、迅速な復旧復興対応が求められており、最終処分場においては、被災直後の片付けごみの受入先として、また災害廃棄物の仮置場、資源化のための仮設施設の設置の場所としての利用が望まれる。従来の廃棄物最終処分場（以下、処分場）における埋立処分技術では、処分場が廃止されるまでの長期に亘って浸出水、埋立ガス等の管理が求められ、さらに地盤の支持力不足、不同沈下等のため高度な跡地利用が難しいという問題がある。これらを改善するとともに、環境安全かつ強靱で、さらにはプラスの価値を生み出す強固な地盤を創出する新たな最終処分技術の開発が望まれる。

### 2. 研究目的

本研究では、平成26～28年度環境研究総合推進費により実施した「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」の研究成果である『固化式処分システム』を社会実装することを目的に、「埋立用材の調整」、「施工性と埋立地盤特性」、「耐久性と環境影響評価」、「経済性評価」の4課題について研究を行った。

固化式処分システムとは、石炭灰固化技術「超流体工法」<sup>1)</sup>を廃棄物焼却残渣に応用したものである。具体的には、焼却残渣にセメントと水を添加して混練し、混練物を埋立地に敷均し、高周波振動を与えて締固め、固化地盤として埋立処分するものである。固化式処分システムの適用により、(1)強固な埋立地盤の強固化に

よる耐震性の向上、(2)埋立廃棄物の減容化ならびに廃棄物の飛散防止に伴い覆土が不要になることによる廃棄物埋立容量の増加または埋立地の延命化、(3)雨水浸透の排除と有害物質の溶出低減による処分場の早期廃止、(4)維持管理期間の短縮による維持管理費の低減、(5)跡地の高度利用が期待される。特に、(1)及び(5)により、震災発生時には固化式処分場をただちに災害廃棄物の中間処理施設として活用でき、固化式処分場は迅速な復旧に資するレジリエントな廃棄物処理システムの構築に大きく貢献するものと期待される。

表 2.1 に本研究における開発目標を示す。固化式処分の適用による埋立層の減容化率は 20%以上（従来型処分場における覆土の体積率以上）、固化式処分埋立地盤の一軸圧縮強度は 5 N/mm<sup>2</sup>以上（高度な跡地利用に十分な強度）、透水係数は  $1 \times 10^{-7}$  cm/s 以下（実質上不透水層）、有害物質溶出濃度は放流水質基準以下（水処理なしで放流可能）、固化式処分システムのライフサイクルコストは従来型処分以下（従来型処分よりも経済的に有利）と設定した。

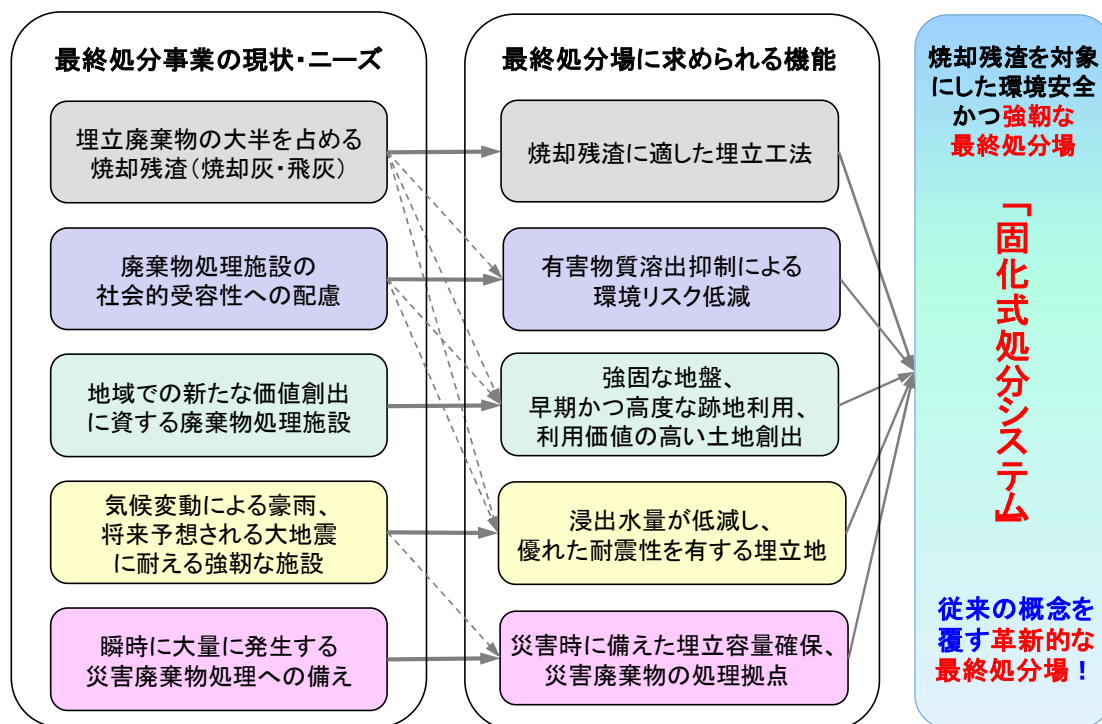


図 2.1 研究の背景及び目的

表 2.1 開発目標

項目	開発目標
減容化率	20%以上
一軸圧縮強度	5 N/mm <sup>2</sup> 以上
透水係数	$1 \times 10^{-7}$ cm/s以下
有害物質溶出量	放流水質基準以下
ライフサイクルコスト	従来型処分以下

### 3. 研究方法

#### 3. 1 埋立用材の調整

##### (1) 磁力選別及び篩選別による鉄分及び大寸法固形物（混練不適物）の除去

平成 29 年 7 月 5 日に、F 市 F 最終処分場の埋立作業が行われていない場所で、F 市 R 清掃工場から搬入された一般廃棄物焼却残渣 1 日分（焼却灰：運搬車 6 台＝約 8.5 t×6＝約 51 t、飛灰：運搬車 2 台＝約 8.5 t×2＝約 17 t）の提供を受け、磁力選別及び篩選別（40 mm メッシュ）によって鉄分及び大寸法固形物を除去する施工試験を実施した。使用した主な機材を表 3. 1. 1 及び図 3. 1. 1 に示す。なお、前処理を終えた焼却残渣（焼却灰約 15 t、飛灰約 5 t）は防水仕様のフレコンバッグ（容量約 1 t）に入れて、埋立模型槽を用いた施工試験を行う場所（九州大学伊都キャンパス内の屋外実験場）へ運搬し、残った焼却残渣はそのまま現地で埋立処分した。

表 3. 1. 1 焼却残渣の前処理に使用した主な機材

名称	仕様など	数量
バックホウ	0.7 m <sup>3</sup>	2 台
ミニバックホウ	0.2 m <sup>3</sup>	1 台
磁力選別機	軽量・薄型マグネット、アイオンハイマグ HM-81T（バックホウ装着、1960 kg） 長さ 1700×高さ 1240 mm、マグネット外径 1200 mm	1 台
篩選別機	自走式スクリーン・コマツ BM545S-1（10.3 t）、40 mm メッシュを使用 幅 2480×長さ 8030×高さ 4050 mm（作業時）	1 台
ユニック車	4 t 車	1 台



(a) 磁力選別機（バックホウアタッチメント電磁石）

(b) 篩選別機（小型自走式スクリーン）

図 3. 1. 1 焼却残渣の前処理に使用した選別機

##### (2) 一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

変動する焼却残渣の性状に対応した最適な示方配合を得るための方法を検討するために、種々の条件で室内配合試験等を実施した。なお、石炭灰の固化技術として開発された超流体工法（少量の水で混練したセメント混合粉体を外部振動によって締固めて硬化させる工法）では、テーブルフロー値によって固化体製造に適した配合を求めることができる。しかし、粗雑物を含む焼却残渣の流体化ではテーブルフロー試験の適用が困難であったため、テーブルパイブレータを用いた振動締固め試験によって最適な示方配合を得ることとした。実施した一連の室内配合試験の条件等を表 3. 1. 2 に示す。また、試験に使用した混練ミキサー及び振動締固め装置を図 3. 1. 2 に示す。

H30 年度の小型テーブルパイブレータを使用した試験ケースでは、モールド試料上面に目盛付きの円筒容器（重さ約 0.2 kg）を載せて、締固め中の沈下量を目視で測定した。

R1 年度前半の振動板アタッチメント（振動数 50～120 Hz）をテーブルバイブレータとして利用したケースでは、振動数や締固め時間の違いによる影響を確認するために、加振 1 分後、3 分後、6 分後、9 分後の 4 回、モールド内に試料表面の沈下量をスケールで測定して各加振時間における締固め曲線を求めた。

H30 年度のプレートコンパクタを使用したケースは、実際の施工機械に近いレベルでの振動締固め性状等を確認するため、鋼製型枠内（w30 cm×d60 cm×h30 cm）に、締固め層厚が概ね 10 cm または 20 cm となるように試料の投入質量を計量して軽く敷均し、その上に厚さ 12 mm のベニア板（29.5 cm×59.5 cm）を置き、その上にプレートコンパクタを載せて加振した（図 3.1.2(g)）。加振時間はプレートコンパクタの前後の向きを入れ替えて各 15 秒間、合計 30 秒間とした。締固め密度は、型枠内の試料上面の高さをメジャーで 8 箇所測定し体積を求めて算出した。

焼却残渣（焼却灰及び飛灰）は F 市 R 清掃工場で採取した 10 mm ふるい通過試料（図 3.1.3）または 40 mm ふるい通過試料を使用した。図 3.1.4 に焼却灰の粒度試験結果、表 3.1.3 に焼却残渣の物理試験結果の一例を示す。なお、実施工では焼却残渣は焼却灰と飛灰を乾燥質量比 3：1 で混合しセメント添加率を外割で 10% とすること（乾燥重量混合比で焼却灰：飛灰：セメント＝68.2：22.7：9.1 の配合）を想定しているが、一連の試験ではそれらの混合比を変えたケースも実施し、振動締固めに適した含水比等について検討した。セメントには高炉セメント B 種を使用し、所定の期間養生した供試体（焼却残渣固化体）の一軸圧縮強度試験、透水試験、重金属類の溶出試験を適宜実施して、締固め直後の状態（乾燥密度等）との相関性を分析し、最適な配合を適切に決定できる指標について検討した。

表 3.1.2 室内配合試験（振動締固め）の一覧

実施年度	混練ミキサー	混練時間		締固め装置 振動板の寸法	締固め仕様			焼却灰 の粒径	供試体寸法 (cm)	配合			
		空練り (分)	本練り (分)		振動数 (Hz)	締固め 時間	上載荷重 (kg)			混合比(乾燥質量%)			含水比 範囲(%)
										焼却灰	飛灰	セメント	
H30	縦型一軸ミキサー 15L 練り 愛工舎製作所:MS-15	0.5	2.5	小型テーブル バイブレータ 寸法500×500mm エクセン:TV500×500	60	3分	2.5	<10mm	φ5×H10	100	—	—	23～33
							—			100	—	32～42	
							75.0			25.0	—	24～34	
							2.5, 5.0	68.2	22.7	9.1	24～34		
	無し	<40mm	φ10×H約13	68.2	22.7	9.1	24.7～30						
	縦型二軸ミキサー 50L 練り 大平洋機工:HFN-50	0.5	2.5	プレートコンパクタ 寸法420×290mm (鋼性型枠内で使用) 三笠産業:MVC-40GB	103	30秒	46 (機械質量)	<40mm	□30×60×H10	68.2	22.7	9.1	24.5～30
無し							<40mm	□30×60×H20	68.2	22.7	9.1	27, 28	
R1 前半	縦型一軸ミキサー 30L 練り 愛工舎製作所:MS-30/50	0.5	2.5	振動板アタッチメント 寸法750×750mm (テーブルバイブレータ に改造して使用) エクセン:HKM75LFS	50	1分	無し	<40mm	φ10×H約13	100	—	—	27～31
					85	3分		<40mm	φ10×H約13	100	—	—	27～31
					120	6分 9分		<40mm	φ10×H約13	100	—	—	25～29
R1 後半	縦型一軸ミキサー 30L 練り 愛工舎製作所:MS-30/50	0.5	4.5	小型テーブル バイブレータ 寸法500×500mm エクセン:TV500×500	75	3分	無し	<40mm	φ10×H約10	100	—	—	24～29
										68.2	22.7	9.1	23～33
										60.6	33.3	9.1	27～31
										45.45	45.45	9.1	29～33
										33.3	60.6	9.1	31～35
—	100	—	30～43										



(a) 15 L ミキサー



(b) 30 L ミキサー



(c) 50 L 縦型二軸ミキサー

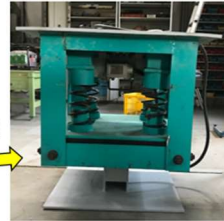


(d) 小型テーブルバイブレータ

模型槽での施工試験



テーブルバイブレータ利用



上下反転

(e) 振動板アタッチメント



(f) プレートコンパクタ

図 3.1.2 混練ミキサー及び振動締め装置



(a) 焼却灰 (10mm 下)

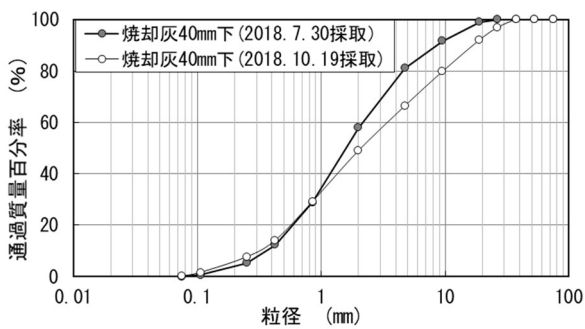


(b) 飛灰 (10mm 下)

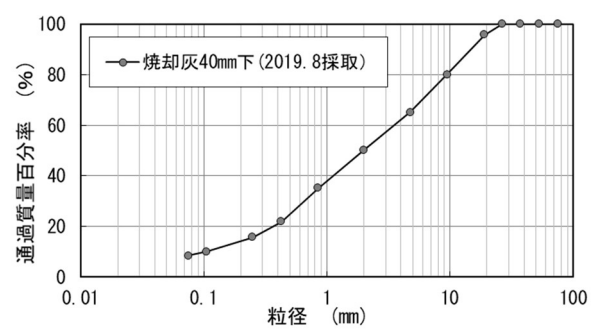


(c) 固化体の混練状況

図 3.1.3 焼却残渣 (10mm ふるい通過試料) 及び固化体の練混ぜ状況 (15L ミキサー)



(a) H30 年度～R1 年度前半の試験に使用した焼却灰



(b) R1 年度後半の試験に使用した焼却灰

図 3.1.4 配合試験に使用した焼却灰の粒度

表 3.1.3 焼却残渣の物性の一例 (2019 年 8 月採取)

	焼却灰	飛灰
粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.50	2.32
自然含水比 (%)	26	20



### (3) 産業廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

平成30年度の一般廃棄物処理事業実態調査の結果<sup>2)</sup>によると、一般廃棄物の焼却残渣は総排出量4,272万トンの内の約384万トンであるのに対して、産業廃棄物では総排出量3億7,577万トンの内の約931万トンと2倍以上の発生量がある。本研究の固化式処分システムを産業廃棄物焼却残渣（以下、産廃灰）に適用できれば、最終処分場の残余容量確保にも寄与する。そこで、3種類の産業廃棄物の焼却灰（10mmふるい下の試料、以下、産廃灰と呼ぶ）を採取し、以下に示す調査、試験等を実施した。

#### a) 産廃灰の材料評価

3種類の産廃灰の粒径分布（JIS A 1204（土のふるい分析）に準拠、N=1）、重金属溶出量（環告46号に準拠、N=3）を測定すると共に、蛍光X線分析（N=1）により元素構成割合を調べた。なお、今回採取した産廃灰の焼却施設の概要等を表3.1.4に示す。

表 3.1.4 産廃灰の焼却施設の概要

施設名称	焼却対象の廃棄物等	施設の種類と規模	備考
産業廃棄物焼却施設S工場「主灰」 (以下、産廃灰S)	廃油・廃プラ・廃酸・ 廃アルカリ・汚泥・廃 製品など産業廃棄物 全般	ロータリーキルン焼 却炉 120t/日	
産業廃棄物焼却施設C工場「主灰」 (以下、産廃灰C)	廃油・廃プラ・廃酸・ 廃アルカリ・汚泥・廃 製品など産業廃棄物 全般	ロータリーキルン焼 却炉 120t/日	
木質バイオマス発電 施設「飛灰」 (以下、産廃灰B)	未利用残材のみ	流動層ボイラー 年間約6万t	

#### b) 産廃灰固化体の示方配合の検討

産廃灰固化体の室内配合試験を行って振動締めに適した配合条件等を検討した。セメント添加率10%（外割）を基本配合として、配合試験ケース1（表3.1.5）では産廃灰のみの振動締固め試験結果との比較を行った。配合試験ケース2（表3.1.6）では石炭灰を添加した配合との比較も実施した。室内配合試験で作製したモールド供試体を用いて、産廃灰固化体の乾燥密度（JIS A 1225に準拠、N=3、材齢28・91日）、一軸圧縮強度（JIS A 1216に準拠、N=3、材齢28・91日）、重金属溶出量（環告46号に準拠、N=3、材齢28・91日）、透水係数（JIS A 1218に準拠、N=3、材齢91日）を適宜確認した。なお、セメント添加率10%では一般廃棄物焼却残渣の場合と同等の品質目標を達成するのが困難であったので、配合試験ケース3（表3.1.7）・ケース4（表3.1.8）を追加で実施して、セメント添加率を変えた配合やキレート剤を添加した配合についても検討した。

表 3.1.5 産廃灰固化体の配合試験ケース1

配合条件	配合条件						混練方法				振動締固め方法					
	粉体配合割合(%)			水粉体比(%)			バッチ量 (kg)	ミキサー (砕袋工舎製作所)	空練り		本練り(水添加後)		加振方向	テーブル バイブレータ	振動数 (Hz)	振動時間 (sec)
	産廃灰	石炭灰	セメント	産廃灰S	産廃灰C	産廃灰B			回転数 (rpm)	練り時間 (sec)	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)				
産廃灰のみ	100	0	0	30~50	50~56	40~46	3	MS-	110	30	179	120	下面から	FREQROL-Z200 (三菱電機製)	75	180
セメント10%添加	90	0	10	37~43	41~45	37~41										

表 3.1.6 産廃灰固化体の配合試験ケース 2

配合条件	配合条件						混練方法				振動締め方法					
	粉体配合割合(%)			水粉体比(%)			バッチ量 (kg)	ミキサー (株式会社製作所)	空練り		本練り(水添加後)		加振方向	テーブル バイブレータ	振動数 (Hz)	振動時間 (sec)
	産廃灰	石炭灰	セメント	産廃灰S	産廃灰C	産廃灰B			回転数 (rpm)	練り時間 (sec)	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)				
セメント10%添加	100	0	10	37~43	41~45	37~41	3	MS-30/50S(30L)	110	30	179	120	下面から	FREQROL-Z200 (三菱電機製)	75	180
石炭灰10%添加	90	10		32~37	35~39	30~40					120	270				

表 3.1.7 産廃灰固化体の配合試験ケース 3

配合条件						混練方法				振動締め方法	
粉体配合割合(%)			水粉体比(%)			空練り		本練り(水添加後)		載荷条件 (kg)	振動時間 (sec)
産廃灰	セメント	石炭灰	産廃灰S	産廃灰C	産廃灰B	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)		
80, 85, 90	10, 15, 20	0	32	34	32	390	30	390	150	5	30

※混練時のバッチ量は3kgで、ミキサーはMT-15G(容量15L)を用いた。【(株)愛工舎製作所製】

※テーブルバイブレータはFREQROL-Z200【三菱電機製】、振動数は75Hzで、加振は下面から。

表 3.1.8 産廃灰固化体の配合試験ケース 4

配合条件						混練方法				振動締め方法		
粉体配合割合(%)			水粉体比(%)			キレート剤添加率(%)	空練り		本練り(水添加後)		載荷条件 (kg)	振動時間 (sec)
産廃灰	セメント	石炭灰	産廃灰S	産廃灰C	産廃灰B	ピペラジン系、ジエチルアミン系、無機系	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)	回転数 (rpm)	練り時間 (sec)		
80	10	10	35	38	37	0, 0.5, 1.0	110	30	179	270	0	180

※混練時のバッチ量は3kgで、ミキサーはMS-30/50S(容量30L)を用いた。【(株)愛工舎製作所製】

※テーブルバイブレータはFREQROL-Z200【三菱電機製】、振動数は75Hzで、加振は下面から。

※キレート剤添加率は、産廃灰の乾燥質量割合に対する比率(%)。

#### (4) バッチャープラントの検討

固化式処分システムの実用化には、焼却残渣とセメントと水を効率よく混練するためにバッチャープラントが必要となる。そこで、埋立模型槽を用いた施工試験等で得られた施工性のデータを基に実規模のバッチャープラントについて検討した。

### 3. 2 施工性及び埋立地盤特性

#### (1) 固化式処分の施工性

九州大学伊都キャンパス内の実験エリアで、内寸4 m×1.7 m×高さ1.7 mの大型土槽(鋼製タンク)を用いて、二重遮水シート方式の管理型最終処分場における埋立を模擬して、従来型処分システム(ケース1)と固化式処分システム(ケース2)の2タイプを施工し、固化式埋立処分の施工性を確認した。

焼却残渣は前述の前処理システム施工試験で選別採取した焼却灰と飛灰を乾燥重量比3:1で混合して使用した。焼却灰と飛灰の混合は、埋立層の施工直前にバックホウを用いてベッセル内で行った。

ケース1(従来型、図3.2.1)の埋立層は、焼却残渣をプレートコンパクターで層厚約10 cm毎に締め固めて造成し、表層5 cmは碎石で覆土した。ケース2(固化式、図3.2.2)の埋立層は、焼却残渣にセメント(高炉B種)と適量の水を加えて強制二軸ミキサー(公称容量100 L)を用いて混合攪拌して、埋立模型槽内に敷均し、振動締め機を用いて層厚約10 cm毎に締め固めた。施工試験で使用した主な機材を表3.2.1に示す。

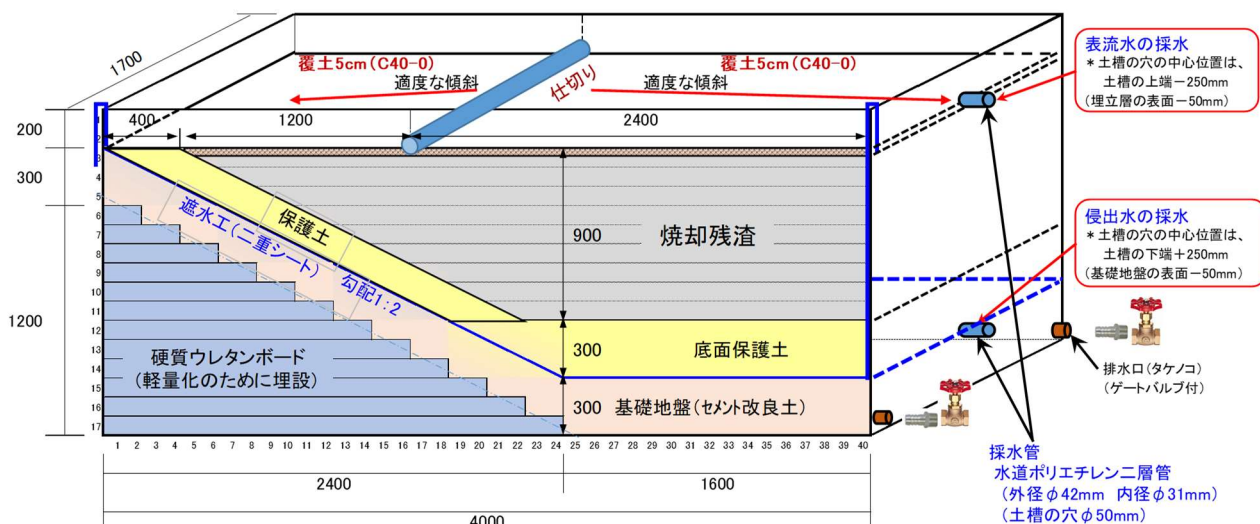


図 3.2.1 埋立模型槽を用いた施工試験の概要 (ケース 1 : 従来型)

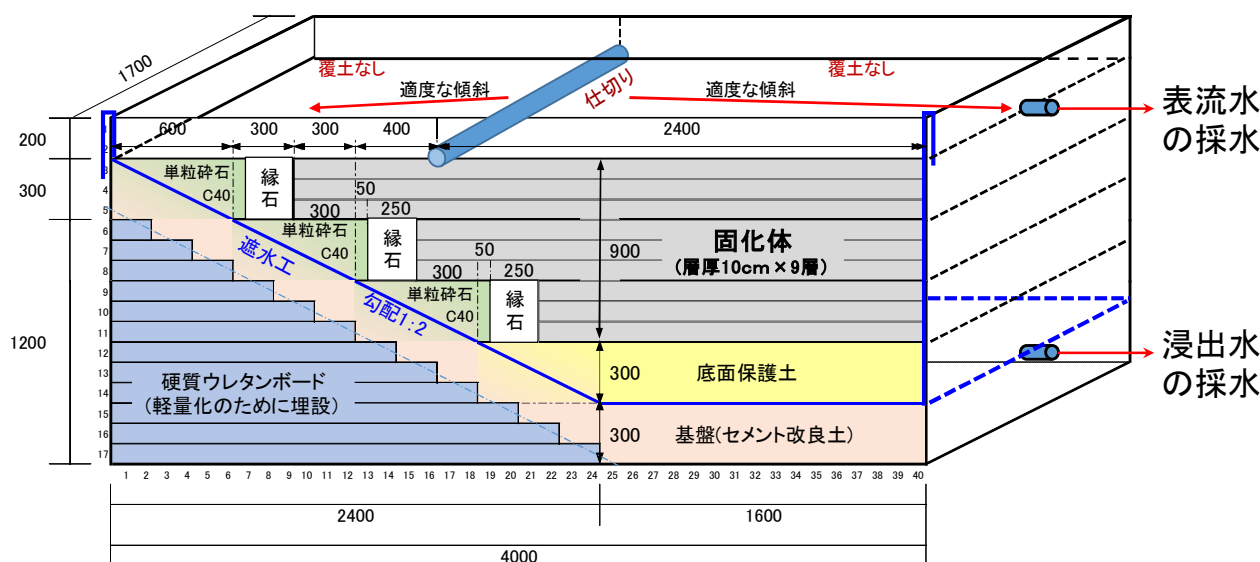


図 3.2.2 埋立模型槽を用いた施工試験の概要 (ケース 2 : 固化式)

表 3.2.1 埋立模型槽を用いた施工試験に使用した主な機材

名称	仕様など	数量
強制二軸ミキサー	太平洋機工(株) SUPER DOUBLE MIXER SD100, 100L 練	1
振動締め機	ミニバックホウ 0.2 m <sup>3</sup> アタッチメント (特注品) 振動プレート : 750 mm×750 mm×t19 mm (面積 0.56 m <sup>2</sup> ) 振動数 : 50~120 Hz、起振力 : 11.8 kN	1
プレートコンパクタ	タイキョク バイプロプレート TPD60E 重量 60 kg, 振動数 97 Hz (5800 rpm), 起振力 10.8 kN	1
バックホウ	0.7 m <sup>3</sup>	1
デジタルはかり	台秤 2 台、クレーンスケール 1 台	3
発電機	25 kVA	1

## (2) 固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果

単位質量の焼却残渣の埋立処分により消費される埋立地の容量を埋立容量消費量と称し、固化式処分と従来型処分の埋立容量消費量の比較により、固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果を評価した。固化式処分の埋立容量消費量  $C_S$  [ $\text{m}^3/\text{t}$ ] は、固化式埋立模型槽における焼却残渣固化体層の体積  $V_S$  [ $\text{m}^3$ ]、使用した焼却残渣の乾燥質量  $m_S$  [ $\text{t}$ ] を用い、式 3.2.1 により求めた。従来型処分の埋立容量消費量  $C_C$  [ $\text{m}^3/\text{t}$ ] は、従来型埋立模型槽における焼却残渣層の体積  $V_C$  [ $\text{m}^3$ ]、使用した焼却残渣の乾燥質量  $m_C$  [ $\text{t}$ ] を用い、式 3.2.2 により求めた。従来型処分については、実際の処分場においては埋立容量の約 20% が覆土で消費されることを考慮し、1.25 を乗じた。

$$C_S = \frac{V_S}{m_S} \quad \dots (3.2.1), \quad C_C = \frac{V_C}{m_C} \times 1.25 \quad \dots (3.2.2)$$

## (3) 固化式処分埋立地盤の強度、透水性、有害物質溶出濃度

固化式埋立模型槽の作製中に、埋立層の高さが底面保護土表面から①20～30cm、②40～50cm、③70～80cm になった時に、固化式埋立模型槽に充填する混練物の一部を採取し、モールドに充填し、振動板の上にモールドを乗せることで高周波振動を与えて締め固め、その後 20°C 一定で封緘養生し、所定の材齢となった固化体供試体を対象に、一軸圧縮強度試験 (JIS A 1216)、有害物質溶出試験 (JIS K 0102)、透水試験 (JIS A 1218) を実施した。対象とした材齢は、7、28、98、207、469 日とした。

また、固化式埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプル (送水式、 $\phi$  50 mm) (材齢 28、98、207、469 日) についても同様に一軸圧縮強度及び有害物質溶出濃度を測定した。

## (4) 固化式処分埋立地盤の孔隙構造

固化式処分埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプルを対象に孔隙構造の把握を行った。マイクロ X 線 CT 法で把握できる直径 47  $\mu\text{m}$  以上の孔隙をマクロ孔隙、マクロ孔隙よりも小さな孔隙をミクロ孔隙と称した。ミクロ孔隙は水銀圧入法によって測定した。

### a) マクロ孔隙構造の把握

マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ (TOSCANER 32300 FPD、TOSHIBA) を用いて X 線 CT 画像を取得した。管電圧を 140 kV、管電流を 150  $\mu\text{A}$ 、X 線照射厚 0.047 mm、撮影領域を 38.7 mm、画素数を 1024 $\times$ 1024 と設定した。偽像除去処理を行った画像を用いた。

図 3.2.3 のように得られた X 線 CT 画像の CT 値のヒストグラムにおける極小値を閾値とする二値化処理を行い、孔隙の抽出を行った。抽出可能な孔隙は画素 (ボクセル) サイズ (47  $\mu\text{m}$ ) より大きなものとなる。Brewer による孔隙の分類<sup>3)</sup>を参考にして、X 線 CT 法で抽出された孔隙 (47  $\mu\text{m}$  以上) を「マクロ孔隙」と称した。

図 3.2.4 にマクロ孔隙の立体画像を示す。これは二値化断面画像を積み重ねて立体化したものである。立体画像中の孔隙数と孔隙個々の体積を算出した。本研究では孔隙の体積と同体積の球体の直径をマクロ孔隙径と称し、207 日目に採取されたボーリングコアサンプルを対象にマクロ孔隙径分布を求めた。なお、画像解析においては画像解析ソフト ImageJ を使用し、マクロ孔隙の数と体積の算出では ImageJ の 3D object counter を用いた。

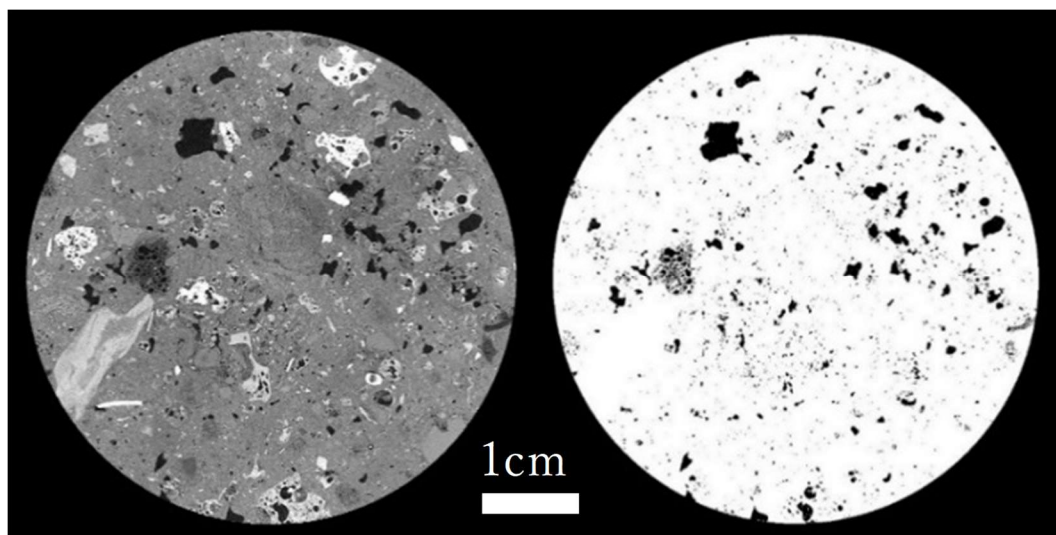


図 3.2.3 マイクロ X 線 CT 画像（左）及びその二値化処理画像（右）

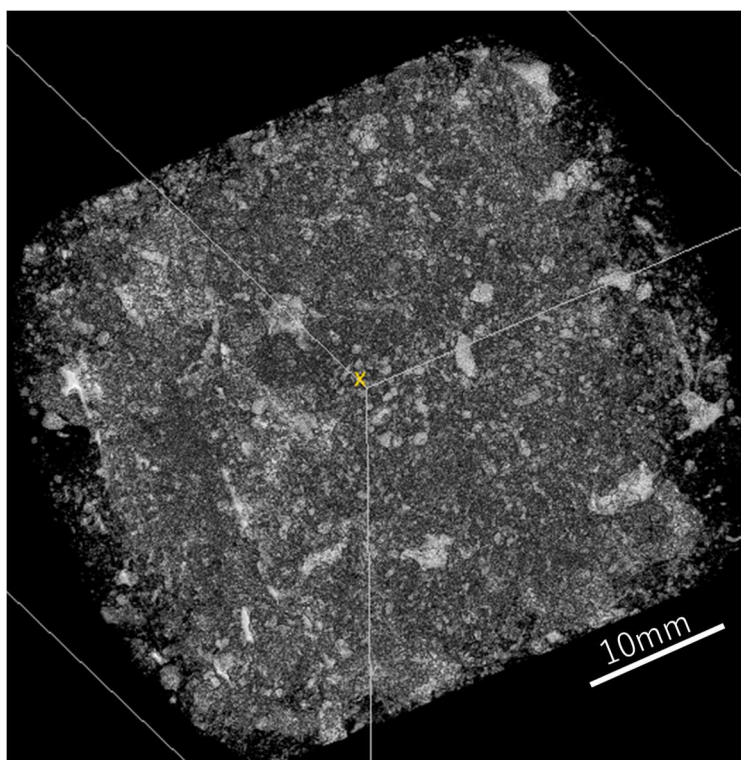


図 3.2.4 マクロ孔隙の立体画像

#### b) ミクロ孔隙構造の把握

28 日目、96 日、207 日目及び 461 日目のボーリングコアサンプルを水銀圧入法による分析に供した。表層からの悪影響を受けていない深度の試料を分析対象とする為、28 日目のボーリングコアサンプルは深度 50cm 付近、96 日目は 55cm 付近、207 日目に関しては 62cm 付近を分析対象とした。

コンクリートカッターを用いて各ボーリングコアを 5mm 程度の厚さとなるよう切断し、さらにペンチを用いて円盤状となった試料を 5mm 角となるよう切断したものを直ちにアセトン浸漬及び凍結乾燥機を用いた乾燥によって試料内の水分を取り除いた後、水銀圧入式ポロシメーター（AutoPore III、SHIMADZU）を用いて細孔分布の測定を行った。

また、水銀圧入試験から得られるデータは単位質量あたりの孔隙体積 (ml/g) であった。これに水銀圧入試験に供した試料の密度 (g/cm<sup>3</sup>) を掛け合わせることで単位体積当たりの孔隙体積 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) を算出し、これを基にして孔隙率を算出した。

### 3. 3 耐久性及び環境影響評価

#### (1) 固化式処分が遮水シートに及ぼす影響

前述の埋立模型槽を用いた施工試験において、固化式埋立地盤（ケース 2）の振動締固めによって遮水シート（低密度ポリエチレンシート LLDPE、厚さ 1.5 mm、引張強さ 140 N/cm 以上、伸び率 400%以上）に有害なひずみ等が発生しないかを検証した。ひずみ測定は、図 3. 3. 1 に示すように上側の遮水シートにひずみゲージ（KFGS-5-120-C1-11L10M3R、共和電業製）を貼り付け、振動締固め時のひずみを用いてサンプリング周波数 20 Hz（データロガー TDS-15）で実施した。また、施工完了後にも遮水シートのひずみを測定して有害なひずみ等が発生していないかを確認した。なお、下側の遮水シートは浸出水の測定を行うために底面と斜面と側面を袋状に一体化して模型槽内に設置したが、ひずみゲージを貼り付けた上側の遮水シートは、側面拘束による影響を避けるために、底面と斜面のみの長方形シートを基礎地盤上に敷設し、シート上端部のみを鋼製タンクに大型万力とボルト締めを併用して固定した。

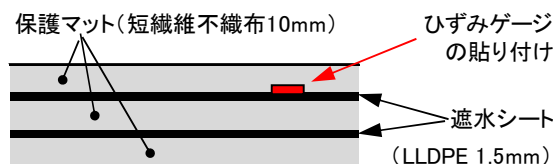


図 3. 3. 1 二重シート遮水工の断面とひずみゲージ

#### (2) 固化式処分埋立地盤における未燃分腐敗の可能性及び内部ガス圧による破壊の可能性

固化式処分埋立地盤には焼却残渣由来の未燃分（有機物）が含まれており、固化体内の微生物の活動による未燃分の腐敗に伴うガス発生により、固化体内部のガス圧力が上昇し、固化体に亀裂（破壊）が生じることで、固化体の強度及び環境安全性に悪影響を及ぼすことが懸念された。そこで、以下の a) 及び b) の検討を行った。

##### a) 未燃分腐敗の可能性に関する検討

微生物の存在の有無、及び栄養源の存在の有無に着目した検討を行った。微生物の存在の有無に関しては、固化式処分埋立地盤完成後 28 日目及び 96 日目に採取されたコアサンプルを用いて希釈平板法による微生物数の測定を行った。希釈平板法の測定方法については「土壌微生物実験法 第三版 第 8 章 希釈平板法」に則って測定を行った。栄養源の存在の有無に関しては 96 日目に採取されたコアサンプルについて圧搾抽出試験機を用いて間隙水を抽出し、それに含まれる TOC 成分量を栄養分と仮定し、その量を計測した。

##### b) 内部ガス圧による固化体破壊の可能性に関する検討

図 3. 3. 2 に示すように固化式処分埋立地における鉛直一次元のガス移動を検討した。地表面を原点に鉛直下向きを正とした座標を設けた。固化式埋立地では廃棄物の飛散は生じないため、覆土は施されず、地表において固化体は大気に曝されるものとした。底面においては遮水工と固化地盤の間に遮水工の保護層の設置を想定した。保護層の透気性は固化体に比べて極めて高く、固化体から保護層に抜けたガスは速やかに大気に抜けるものと考え、保護層のガス圧力は大気圧に等しいと仮定した。ガス発生速度は固化地盤のどこでも一様でかつ定常であると仮定した。腐敗に伴う熱の発生はなく、温度はどこも一様で恒温であると仮定した。

ゆえに、発生ガスは地表と保護層の双方から外気に抜け、ガス移動は  $z = d/2$  を対称面として上下対称になるため、 $z = 0 \sim d/2$  におけるガス移動の数値シミュレーションを行った。

式 3.3.1～3.3.3 の連立方程式を差分法で解き、ガス濃度分布の経時変化  $C(z, t)$  を求め、ガス濃度をガス圧力  $P(z, t)$  に換算した。式 3.3.1 はガスの質量収支式であり、右辺第一項は移流項、同第二項は拡散項、同第三項は発生項である。式(2)はガスの断面平均流速式、式(3)は理想気体の状態方程式である。差分法における時間分割幅 ( $\Delta t$ ) は 0.5 h、座標分割幅 ( $\Delta z$ ) は 1 m と設定した。初期のガス濃度は大気に等しく、地表のガス濃度は常に大気に等しい ( $C(z, 0) = C(0, t) = 1.176 \text{ kg/m}^3$ ) と設定した。対称面である  $z = d/2$  ではガス移動は生じない、すなわちガス濃度の勾配はゼロ ( $\partial C / \partial z (d/2, t) = 0$ ) と設定した。発生項  $Y$  については、固化体の圧搾抽出液 TOC 濃度から固化体中の TOC 成分量を求め、TOC 成分が単位時間当たり to 一定量分解されるものとして設定した。分解に要する時間は 1、3、10 年の 3 パターンとした。分解時間が終わったら、ガス発生速度を 0 に変更した。透気係数  $K$  については、固化体の飽和透水係数の実測値 ( $1 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ ) から水及びガスの粘性係数を用いて換算した透気係数  $K^*$  ( $4.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{h})$ ) の 0.1、1、10 倍の 3 パターンとした。埋立地の深さ  $d$  については、10、20、40 m の 3 パターンとした。

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\partial(vC)}{\partial z} + \varepsilon \frac{D}{\xi} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Y \quad \dots (3.3.1)$$

$$v = -K \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad \dots (3.3.2)$$

$$P = \frac{RTC}{w} \quad \dots (3.3.3)$$

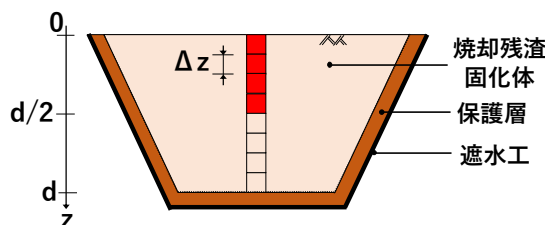


図 3.3.2 対象とした系

### (3) 長期耐久性及び環境影響評価

固化式処分場の長期耐久性及び環境影響を明らかにすることを目的に、固化式処分の施工試験によって作製した固化式埋立模型槽を対象に長期モニタリングを行った。

耐久性に関しては、埋立地盤の表層の観察、定期的に採取されたボーリングコアサンプルを用いた埋立地盤の深度方向の鉱物組成 (X 線回折分析) の把握を行った。

環境影響に関しては、固化式処分場の維持管理期間 (発生水の水処理が必要な期間) や浸出水処理施設及び調整池の設計に資する情報を取得することを目的に、固化式埋立模型槽において水収支及び発生水の水質の把握を行った。

図 3.2.2 に示すように固化式埋立模型槽の地表には仕切りを設け、仕切りより左側の表流水は碎石層へ流入し、仕切りより右側の表流水は表層の側面に設置された表流水集水管へ流入するように地表に適度な緩勾配を与えた。碎石層へ流入した水は遮水シート上を流下し、埋立模型槽底部の浸出水集水管へ流入するようにした。図 3.2.1 に示すように従来型埋立模型槽についても、同様に地表に仕切りと緩勾配を設け、表流水集水管及び浸出水集水管を設置した。表流水集水管及び浸出水集水管から流出した水を、それぞれ表流水及び浸出水と称することとした。

固化式及び従来型埋立模型槽の横にはそれぞれ表流水貯水タンク及び浸出水貯水タンクが設置されており、それらタンクへ流入する表流水及び浸出水を定期的に採水し、水質を分析した。また、各貯水タンクに水位計 (u20-001-01、Onset 社) を設置し、水位から表流水及び浸出水の発生量を計測するとともに、雨量計 (ECRN-100、METER 社) により降水量を計測し、両埋立模型槽における水収支を把握した。

固化式処分場における埋立地盤の間隙水の水質を明らかにすることを目的に、固化式埋立模型槽から採取したボーリングコアサンプルを圧搾し、抽出された細孔溶液の水質を把握した。また、固化式処分場における埋立ガスの発生状況を明らかにすることを目的に、ボーリング孔を利用し、ガス採取管（先端深度：40 cm）を取り付けたシリコン栓でボーリング孔を密閉して一定期間放置した後に、ボーリング孔内のガスを採取し、ガス組成を分析した。

### 3. 4 経済性評価

#### 3. 4. 1 研究の目的

固化式処分システムの経済性評価を行うため、固化式処分システムを導入した最終処分場（以下、固化式処分場と呼ぶ。）のライフサイクルコスト（以下、LCC と呼ぶ。）を推定し、従来型の最終処分場（以下、従来型処分場と呼ぶ。）と比較評価した。

#### 3. 4. 2 最終処分場の設定

従来型処分場及び固化式処分場の LCC の算出のために、前処理工程、最終処分場の規模、浸出水処理施設の規模、必要な重機などの設定を行った。最終処分場の LCC の計算に際しては、田中（2000）<sup>4)</sup>、松藤ら（2010）<sup>5)</sup>等を参考にした。

##### (1) 前処理工程

従来型処分場と固化式処分場について、必要な前処理が異なる。そこでそれぞれ別々の前処理工程を想定することとした。本研究では清掃工場から運搬される焼却残渣を最終処分場に搬入してからをシステム境界としたため、搬入及びそれ以前に関するコストは考慮しないものとした。本研究で想定した前処理工程を図 3.4.1 に示す。従来型処分場は清掃工場からダンプカーで運搬された焼却残渣をブルドーザで転圧するのみとした。一方、固化式処分場では清掃工場から運搬された焼却残渣を以下の流れに従って前処理するものとした。

- ①油圧ショベルで吊下げ磁選機のついたベルトコンベアに転入する。
- ②ベルトコンベアで運搬されながら磁選機で鉄くずを取り除く。
- ③ベルトコンベアで運搬後、自走式スクリーンに投入し、粒径の大きい廃棄物を取り除く。
- ④ベルトコンベアでバッチャープラントに運搬する
- ⑤バッチャープラントで焼却残渣とセメントと水を混練し、ダンプカーに排出する。
- ⑥ダンプカーで埋立地に運搬し投入する。
- ⑦振動板で締固めを行う。

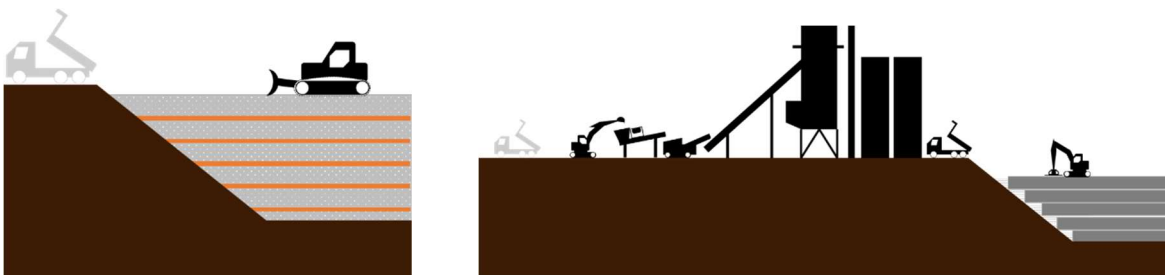


図 3.4.1 前処理工程（左：従来型、右：固化式）



## (2) 最終処分場の規模

最終処分場の規模を設定するために、埋立容量、供用期間、維持管理期間などをあらかじめ設定し、それを満たすように計算を行うこととした。収集人口に関しては、埋立容量が 10 万 m<sup>3</sup> になるように設定した。

### a) 従来型処分場の埋立容量

従来型処分場について埋立容量は埋立容積と覆土容積の和とした。

$$V = V_1 + V_C$$

ここで、 $V$  は埋立容量 [m<sup>3</sup>]、 $V_1$  は埋立容積 [m<sup>3</sup>]、 $V_C$  は覆土容積 [m<sup>3</sup>] である。

埋立容積は埋立ごみ量をもとに埋立重機による圧縮を考慮して次式を用いて算出した。

$$V_1 = \sum \frac{x_k}{\rho^k C_N^k} \times T$$

従来型処分場について埋立容積を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : V_1 = 83,333 [\text{m}^3]$$

覆土容積は埋立ごみに対する比率で求めることとし、次式を用いて算出した。

$$\text{従来型処分場} : V_C = b_1 \times V_1$$

ここで、 $b_1$  はごみに対する覆土割合 [-] である。本研究では、 $b_1 = 0.2$  として計算した。

従来型処分場について覆土容積を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : V_C = 16,667 [\text{m}^3]$$

### b) 固化式処分場の埋立容量

固化式処分場の埋立容量は次式を用いて算出した。

$$V = \text{従来型処分場に換算した場合の埋立容量} [\text{m}^3] \times \text{減容効果} [-]$$

ここで、減容効果とは従来型処分と固化式処分を焼却残渣単位質量あたりの埋立容量消費量で比較したときの固化式処分の埋立容量消費量の割合のことである。本研究では土槽を用いた施工性実証試験<sup>6)</sup>の施工結果を参考に焼却灰、飛灰、セメント、含水率の質量パーセントを表 3.4.1 のように設定した。

表 3.4.1 焼却灰、飛灰、セメント、含水率の質量パーセント

焼却灰	飛灰	セメント	含水率
76.7	23.2	8.97	21.9

また、減容効果を 0.23 [-] と設定した。固化式処分場の埋立ごみ量は先に求めたように  $Q = 5132$  [t/年] であるが、これを従来型の処分方法で埋め立てると仮定して計算すると埋立容量は 129,870 [m<sup>3</sup>] となる。

上記より、固化式処分場の埋立容量を次のように設定した。

$$\text{固化式処分場} : V = 100,000 [\text{m}^3]$$

また、固化式処分場は覆土が必要ないため、覆土容積を 0 と設定した。

$$\text{固化式処分場} : V_C = 0 [\text{m}^3]$$

### c) 埋立地面積

埋立地面積は次式を用いて算出した。

$$A_L = \frac{V}{b_2}$$

ここで、 $A_L$ は埋立地面積[m<sup>2</sup>]、 $b_2$ は平均埋立深さ[m]である。

$V$ は従来型処分場及び固化式処分場ともに 10 万 m<sup>3</sup>であるので、埋立地面積を次のように設定した。

$$A_L = 5,000 \text{ [m}^2\text{]}$$

#### d) 最終処分場の面積

最終処分場の面積は次式を用いて算出した。

$$A = \frac{A_L}{b_3} + A_W + A_I$$

ここで、 $A$ は最終処分場の面積[m<sup>2</sup>]、 $b_3$ は最終処分場の埋立地としての利用率[-]、 $A_W$ は浸出水調整池面積[m<sup>2</sup>]、 $A_I$ は防災調整池面積[m<sup>2</sup>]である。 $b_3$ について、本研究では最終処分場の立地を山間と設定したので $b_3 = 0.4$ と設定した。なお、 $A_W$ 及び $A_I$ の計算については後述する。

上記より、最終処分場の面積を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場 : } A = 13,029 \text{ [m}^2\text{]} \quad (A_W = 180 \text{ [m}^2\text{]}, A_I = 349 \text{ [m}^2\text{)})$$

$$\text{固化式処分場 : } A = 12,921 \text{ [m}^2\text{]} \quad (A_W = 25 \text{ [m}^2\text{]}, A_I = 395 \text{ [m}^2\text{)})$$

#### e) 埋立地区画数

埋立地区画数は埋立地面積に応じて決定するとし、次式を用いて算出した。

$$A_L < 50000 \text{ m}^2 \text{ の場合、} N_B = \text{CINT} \left( \frac{A_L}{10000} \right)$$

$$A_L \geq 50000 \text{ m}^2 \text{ の場合、} N_B = 5$$

ここで、 $N_B$ は埋立地区画数[-]である。また $\text{CINT}(x)$ は $x$ を四捨五入して1以上に整数化することを意味する。

埋立地区画数は従来型処分場及び固化式処分場ともに次のように設定した。

$$N_B = 1 \text{ [-]}$$

### (3) 浸出水処理

浸出水処理システムのプロセスに関する設定を表 3. 4. 2 に示す。

表 3. 4. 2 浸出水処理プロセスに関する設定

項目	単位	従来型処分場	固化式処分場
Ca 前処理	-	あり	なし
活性炭素吸着	-	あり	なし
生物処理	-	標準	
砂ろ過	-	なし	
脱窒素処理	-		
凝集沈殿	-	中性	

#### a) 浸出水量

供用期間における浸出水量は文献 4), 7) を参考に次式を用いて算出した。

$$S = \{g_A + g_C(N_B - 1)\} \frac{A_L}{N_B}$$

ここで、 $S$  は浸出水量[m<sup>3</sup>/日]、 $g_A$ は埋立中区画の単位面積当たりの浸出水量[m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/日]、 $g_C$ は埋立終了区画の単位面積当たり浸出水量[m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/日]である。

#### b) 埋立中区画の単位面積当たりの浸出水量

埋立中区画の単位面積当たりの浸出水量は文献 7) を参考に次式を用いて算出した。

$$g_A = \left( \frac{I - E}{1000} \right) \times (1 - r_{R1}) \times C_1$$

ここで、 $I$  は年降水量の 100 年降水確率の日換算値[mm/日]、 $E$ は年間日平均蒸発散量[mm/日]、 $r_{R1}$ は埋立中区画の侵入水排除率、 $C_1$ は埋立中区画の浸出係数[-] = 0.5 である。 $I$ 及び $E$ は日本の中程度の値として従来型処分場では $I = 7$ 、 $E = 2$ と設定した。一方、固化式処分場では降雨による水分は埋立地内に浸透せず、速やかに排水されるため、 $E = 0$ と設定した。 $r_{R1}$ について、従来型処分場では $r_{R1} = 0$ とした。固化式処分場では最終覆土加工を行わなくとも侵入水排除できる(そもそも最終覆土を必要としない)。固化体は水をほぼ通さない不透水であると考えられるが、ここでは安全性を考慮し $r_R = 0.9$ と設定した。

上記より、 $g_A$ を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場： } g_A = 0.00250 [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}]、\text{ 固化式処分場： } g_A = 0.00035 [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}]$$

#### c) 埋立終了区画の単位面積当たりの浸出水量

埋立終了区画の単位面積当たりの浸出水量は次式を用いて算出した。

$$g_C = \frac{\{I(1 - r_{R2}) - E\}}{1000} C_2$$

ここで、 $r_{R2}$ は埋立終了区画の侵入水排除率である。従来型処分場では最終覆土を侵入水排除加工することとし $r_{R2} = 0.5$ と設定した。固化式処分場では埋立終了後アスファルト等で覆うため侵入水は 0 になると考えられるが、ここでは安全性を考慮し $r_{R2} = 0.9$ と設定した。

$$\text{従来型処分場： } g_C = 0.00075 [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}]、\text{ 固化式処分場： } g_C = 0.00035 [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}]$$

浸出水量を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場： } S = 12.5 [\text{m}^3/\text{日}]、\text{ 固化式処分場： } S = 1.8 [\text{m}^3/\text{日}]$$

浸出水量は固化式処分場の方が従来型処分場の 10 分の 1 ほどになったが、埋立地区画数を 1 としているためであり、埋立容量及び埋立地区画数を大きくすると差は 3 分の 1 程度になる。

#### d) 維持管理期間における浸出水量

維持管理期間における浸出水量は次式を用いて算出した。

$$S' = g_C \times A_L$$

ここで、 $S'$  は維持管理期間における浸出水量[m<sup>3</sup>/日]である。

$S'$  は次のように設定した。

$$\text{従来型処分場： } S' = 3.75 [\text{m}^3/\text{日}]、\text{ 固化式処分場： } S' = 1.75 [\text{m}^3/\text{日}]$$

#### e) 浸出水調整池容量

浸出水調整池容量は文献 4) を参考に次式を用いて算出した。

$$V_A = b_4 \times S$$

ここで、 $V_A$ は浸出水調整池容量[m<sup>3</sup>]、 $b_4$ は浸出水調整池容量の算定日数[日]である。 $b_4$ は一日当たりの浸出水量を二か月間貯留できるものとし、 $b_4 = 60$ と設定した。

上記より $V_A$ を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : V_A = 750[\text{m}^3], \quad \text{固化式処分場} : V_A = 105[\text{m}^3]$$

#### f) 浸出水調整池面積

浸出水調整池面積は調整池の有効深さを5m、調整池の周辺の余裕を見て1.2を乗算することとして次式を用いて算出した。

$$A_W = \frac{V_A}{5} \times 1.2 \quad \dots (12)$$

ここで、 $A_W$ は浸出水調整池面積[m<sup>2</sup>]である。

浸出水調整池面積を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : A_W = 180[\text{m}^2], \quad \text{固化式処分場} : A_W = 25[\text{m}^2]$$

#### g) 防災調整池容量

防災調整池は周辺河川への許容放流量及び集水面積を用いて計算できる。ここでは糸島市の雨水排水施設に関する基準<sup>8)</sup>を参考に次式を用いて算出した。

$$V_i = \left( r_i - \frac{r_c}{2} \right) t_i \times f \times A_1 \times \frac{60}{360}$$

$$r_i = \frac{8228}{t_i + 47}$$

$$r_c = \frac{360 \times Q_C}{f \times A_2}$$

ここで、 $V_i$ は防災調整池容量[m<sup>3</sup>]、 $r_i$ は任意の降雨継続時間に対する降雨強度[mm/時]、 $r_c$ は放流量 $Q_C$ に相当する降雨強度[mm/時]、 $f$ は流出係数[-] = 0.9、 $A_1$ は集水面積[ha]、 $t_i$ は降雨継続時間[分]、 $Q_C$ は許容放流量[m<sup>3</sup>/s]である。降雨継続時間はここでは簡易的に10時間とし、 $t_i = 600$ と設定した。糸島市の基準<sup>8)</sup>によると開発後の土地の流出係数は $f = 0.9$ であるので、本研究でも最終処分場の流出係数を同値に設定した。

$Q_C$ はさらに次式を用いて算出した。

$$Q_C = \frac{1}{360} f \times I \times A_2$$

ここで、 $A_2$ は流域面積[m<sup>2</sup>]である。ここでは $A_2 = 5260$ (瑞梅寺川を参考に設定)とした。また本研究では最終処分場の建設場所を山間に設定していることから、建設が始まる前は山地であったとして $f = 0.5$ とした。

上記より、 $Q_C$ は従来型処分場及び固化式処分場ともに次のように設定した。

$$Q_C = 51.1[\text{m}^3/\text{s}]$$

集水面積に関して、最終処分場への降雨のうち雨水として排除されるのは、最終覆土の表面で排除されたもの、埋立地外に降ったもの、の二種類であり、 $A_1$ はその二種類の面積から浸出水調整池面積を引いたものの合計と考え、次式で算出した。

$$A_1 = A_L \times r_{R2} + \frac{A_L}{b_3}$$

以上より集水面積を次のように設定した。

従来型処分場： $A_1 = 1.5$ [ha]、固化式処分場： $A_1 = 1.7$ [ha]

上記より、 $V_i$ 、 $r_i$ 、 $r_c$ を次のように設定した。

$$r_i = 12.7[\text{mm/時}]、r_c = 3.89[\text{mm/時}]$$

従来型処分場： $V_i = 1,454$ [m<sup>3</sup>]、固化式処分場： $V_i = 1,648$ [m<sup>3</sup>]

#### h) 防災調整池面積

防災調整池面積は浸出水調整池と同様に、有効深さを 5 m、調整池の周辺の余裕を見て 1.2 を乗算すると考え、次式を用いて算出した。

$$A_i = \frac{V_i}{5} \times 1.2$$

ここで、 $A_i$ は防災調整池面積[m<sup>2</sup>]である。

防災調整池面積を次のように設定した。

従来型処分場： $A_i = 348$ [m<sup>2</sup>]、固化式処分場： $A_i = 395$ [m<sup>2</sup>]

#### i) 必要人員

必要人員は文献 4)を参考に以下の式を用いて算出した。

$$N_p = CINT \left\{ b_5 \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^{0.7} \right\}、(\text{固化式処分場: } N_p \geq 7)$$

ここで、 $N_p$ は必要人員[人]、 $b_5$ は最終処分場の基準人員[人]=5、 $Q_0$ は基準とする埋立ごみ量[t/年]=10,000、 $CINT(x)$ は $x$ を四捨五入して1以上に整数化することを意味する。本研究で想定している固化式処分場の前処理工程に従うと、必要人員が従来型処分場と比較して少なくなる可能性も考えられるが、ここでは公平性を得るため従来型処分場と同様の方法で算出した。また、ヒアリング結果によるとバッチャープラントに最低4人なため、油圧ショベルの操縦に必要な人員3人を含め、固化式処分場では7人以上という条件を追加した。

$N_p$ を次のように設定した。

従来型処分場： $N_p = 4$ [人]、固化式処分場： $N_p = 7$ [人]

### (4) 重機、設備

#### a) 必要となる重機、設備

本研究において設定した最終処分場において必要となる重機、設備を表 3.4.3 に示す。

表 3.4.3 必要な重機

処分場	重機	用途
従来型処分場	ブルドーザ	埋立廃棄物の破碎とてん圧
固化式処分場	油圧ショベル	(1)搬入された焼却残渣をベルトコンベアに投入 (2)固化体の振動締固め
	振動板	油圧ショベルに取り付けて振動締固め
	ベルトコンベア	焼却残渣をスクリーン及びプラントに運搬
	吊下げ磁選機	ベルトコンベアに取り付け鉄くず等を取り除く
	自走式スクリーン	混練に適さない大きな焼却残渣を分級
	ダンプカー	バッチャープラントからの固化体を埋立地に運搬

## b) 重機、設備の台数

従来型処分場で必要な重機はブルドーザ、固化式処分場で必要な重機は油圧ショベル（アタッチメントとして振動板）、自走式スクリーン、ベルトコンベア、磁選機である。それを踏まえ、重機の台数を計算した。ブルドーザ台数は文献 4) を参考に次式を用いて算出した。

$$\text{ブルドーザ台数[台]} = \text{CINT} \left( \frac{Q}{b_7} \right)$$

ここで、 $b_7$  はブルドーザの作業効率[t/年/台] = 36,000 である。固化式処分場ではブルドーザを必要としないので 0 台である。

上記より、ブルドーザ台数を次のように設定した。

従来型処分場：ブルドーザ台数 = 1[台]、固化式処分場：ブルドーザ台数 = 0[台]

油圧ショベルは搬入された焼却残渣やセメントをベルトコンベアに投入する工程と固化体の振動締固めの工程で必要となる。油圧ショベル台数は次式で算出した。

$$\text{油圧ショベル台数[台]} = \text{CINT} \left( \frac{V}{T \times V_R} \right) + 2$$

ここで、 $V_R$  は油圧ショベルの一年当たりの土工量[m<sup>3</sup>/年]である。 $V_R$  は林野庁の基準より次式で算出した。

$$V_R = \frac{3600}{C_m} q \times E \times 8 \times 365$$

$$q = 0.98 \times q_0$$

ここで、 $C_m$  は 1 サイクルの所要時間[s]、 $q$  は 1 サイクル当たり掘削積み込み量[m<sup>3</sup>]、 $E$  は作業効率[-]、 $q_0$  はバケット容量[m<sup>3</sup>] = 1.4 である。 $V_R$  は本来一時間当たりの効率を示すパラメータであるため、一日の作業時間を 8 時間、一年あたり 365 日作業すると仮定し、一年あたりの効率に変換して計算した。 $C_m$  は表 3.4.4 の通りである。

表 3.4.4 1 サイクル当たりの所要時間

旋回角度[°]	1 サイクル当たりの所要時間[s]
45	28
90	30
135	32
180	35

ここでは作業環境に余裕を持たせることとし、 $C_m = 35$ [s]と設定した。 $E$  は作業対象の土質及び作業条件により決定される係数である。係数の決定については詳細は省くが、砂質土を良好な現場で作業すると設定し、 $E = 0.80$ [-]とした。また $q$ に関して、本研究ではバケット容量が 1.4 m<sup>3</sup>のものを使用するとし、 $q = 1.37$ とした。

上記より $V_R$ を次のように設定した。

$$V_R = 113 \times 8 \times 365 = 329,176 \text{ [m}^3\text{/年]}$$

振動板の面積は 0.75[m]×0.75[m]であり、一度の締固めに 15 秒要するので、一分間に 2 か所締固めができるかと仮定すると年当たりの締固め面積は $0.75 \times 0.75 \times 2 \times 60 \times 8 \times 365 = 197,100$ [m<sup>2</sup>/年]となる。ただし固化体は埋立地内では薄く敷いて締固めを行う必要があり、作業効率も考慮すると単純な面積計算では必要台数を算出するのが難しいため、本研究では 2 台必要と設定した。同時に、振動板個数も 2 個必要と設定した。3 台以上必要なほど大規模の最終処分場に関しては、1 区画の分割数を調整し作業効率を高めて調節することとした。

以上より油圧ショベルの台数を次のように設定した。

従来型処分場：油圧ショベル台数 = 0[台]、固化式処分場：油圧ショベル台数 = 3[台]

従来型処分場：振動板個数 = 0[個]、固化式処分場：振動板個数 = 2[個]

次に、自走式スクリーンの台数は作業効率を考慮して次式で算出した。

$$\text{自走式スクリーン台数[台]} = CINT \left( \frac{Q}{b_{25}} \right)$$

ここで、 $b_{25}$ は自走式スクリーンの作業効率[t/年]である。 $b_{25}$ について、ヒアリングにより網目のサイズが40mmのとき作業効率が35[t/h]という結果を得られた。 $V_R$ と同様に一日の作業時間を8時間、一年あたり365日作業すると仮定し、一年あたりの効率に変換して計算した。

上記より $b_{25}$ を次のように設定した。

$$b_{25} = 102,200 \text{ [t/年]}$$

以上より自走式スクリーン台数を次のように設定した。

従来型処分場：自走式スクリーン台数 = 0[台]、固化式処分場：自走式スクリーン台数 = 1[台]

次に、ベルトコンベアは、幅600mmのものを長さ50m使用することとした。政村ら<sup>9)</sup>によるとベルトコンベアの能力は表3.4.5のように決定される。

表 3.4.5 プラント能力とベルトコンベア能力

プラント能力 [m <sup>3</sup> /h]	プラント送りコンベヤ能力 [t/h]	受入コンベア能力 [t/h]	ベルト幅 [mm]
45	120	120	500
60	180	180	600
90	250	200	
105			
135	350		700

ベルト幅600mmの内、最も作業能力の低い180t/hの数値を用いて一日の作業時間を8時間、一年あたり365日作業すると仮定し処理量を計算すると、525千t/年処理できることになる。これをベルトコンベアの基準処理能力( $b_{26} = 525,000$ [t/年])と考えることとした。年間埋立ごみ量がこの処理能力を超える場合、1セット50mのベルトコンベアが複数必要になるが、本研究では2セット必要な場合は100m、3セット必要な場合は150m・・・というように長さに換算して計算することとした。

以上を踏まえ、ベルトコンベア長さを次式で算出した。

$$\text{ベルトコンベア長さ[m]} = TRUN \left( \frac{Q}{b_{26}} \right) \times 50$$

ここで、 $TRUN(x)$ は $x$ を切り捨てして整数化することを意味する。吊下げ磁選機はベルトコンベアに取り付ける都合上、ベルトコンベアのセット数に依存する。よって次式で算出した。

$$\text{吊下げ磁選機個数[個]} = \frac{\text{ベルトコンベア長さ}}{50}$$

上記より、ベルトコンベア長さ及び吊下げ磁選機個数を次のように設定した。

従来型処分場：ベルトコンベア長さ = 0[m]、固化式処分場：ベルトコンベア長さ = 50[m]

従来型処分場：吊下げ磁選機個数 = 0[個]、固化式処分場：吊下げ磁選機個数 = 1[個]

次に、ベルトコンベア及びバッチャープラントは電力で動くため、コスト計算のために稼働時間を算出する必要がある。以下でそれぞれ別々に計算した。

ベルトコンベアの稼働時間[h/年]は運搬能力 180[t/h]をもとに次式で算出した。

$$\text{ベルトコンベアの稼働時間[h/年]} = \frac{Q}{180 \times 365}$$

上記よりベルトコンベアの稼働時間を次のように設定した。

従来型処分場：ベルトコンベアの稼働時間 = 0[h/年]

固化式処分場：ベルトコンベアの稼働時間 = 50.9[h/年]

## (5) バッチャープラント

バッチャープラントの稼働時間の計算をする上で重要なバッチャープラントの規模をプラント能力を用いて表すこととした。プラント能力は次式で算出した。

$$\text{プラント能力[m}^3\text{/h]} = \frac{V}{T \times 365 \times 8}、\text{ただし最低 } 30\text{[m}^3\text{/h]以上}$$

一日の作業時間を 8 時間、一年あたり 365 日作業すると仮定し、埋立容量を除することとした。ただし、プラントのサイズを考慮し、最低 30[m<sup>3</sup>/h]とすることとした。

上記よりプラント能力を次のように設定した。

$$\text{プラント能力} = 30\text{[m}^3\text{/h]}$$

バッチャープラントの稼働時間は上記のプラント能力の式を応用し、次式で算出することとした。

$$\text{バッチャープラントの稼働時間[h/年]} = \frac{V}{T \times \text{プラント能力}}$$

なお、従来型処分場ではバッチャープラントは必要ないため、0 [h/年]と設定した。

上記よりバッチャープラントの稼働時間を次のように設定した。

従来型処分場：バッチャープラントの稼働時間[h/年] = 0[h/年]

固化式処分場：バッチャープラントの稼働時間[h/年] = 167[h/年]

## (6) 電力使用量

年あたりの電力使用量は文献 4)を参考に次式で算出した。

$$U_E = U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}$$

ここで、 $U_E$ は電力使用量[kWh/年]、 $U_{E1}$ は浸出水処理による電力使用量[kWh/年]、 $U_{E2}$ はバッチャープラントの電力使用量[kWh/年]、 $U_{E3}$ はベルトコンベアの電力使用量[kWh/年]である。

### a) 浸出水処理プロセスによる電力使用量

浸出水処理プロセスによる電力使用量[kWh/年]は次式で算出される。

$$U_{E1} = \left(1 + \sum a_1^m\right) b_8 \times S \times 365$$

ここで、 $a_1^m$ は浸出水処理プロセスによる電力使用量の付加係数[-]、 $b_8$ は生物処理と凝集沈殿処理を行う場合の単位容積浸出水処理に要する電力[kWh/m<sup>3</sup>] = 2.6 である。 $a_1^m$ は表 3.4.6 の合計で決定される。



表 3.4.6 浸出水処理プロセスによる電力使用量の付加係数

m	浸出水処理項目	付加係数	
1	Ca 前処理	あり 0.1	なし 0.0
2	生物処理	標準 0.0	脱窒素 0.2
3	砂ろ過	あり 0.05	なし 0.0
4	脱塩素処理	あり 0.7	なし 0.0

$a_1^m$ を次のように設定した。

従来型処分場： $a_1^m = 0.1[-]$ 、固化式処分場： $a_1^m = 0[-]$

上記より、浸出水処理プロセスによる電力使用量を次のように設定した。

従来型処分場： $U_{E1} = 13,049$ [kWh/年]、固化式処分場： $U_{E1} = 1,661$ [kWh/年]

#### b) バッチャープラントの電力使用量

バッチャープラントの電力使用量[kWh/年]はバッチャープラントの年あたりの稼働時間に消費電力を積算することとし、次式で算出した。

$$U_{E2} = \text{バッチャープラントの稼働時間} \times b_{23}$$

ここで、 $b_{23}$ はバッチャープラントの消費電力[kW]である。政村ら<sup>9)</sup>はプラント能力と電力の関係を表 3.4.7 のように示した。

表 3.4.7 プラント能力と電力

プラント能力[m <sup>3</sup> /h]	消費電力量[kW]
30	60
45	70
60	90
90	130
105	155
150	180
180	220

この内、プラント能力はすでに決定した。本研究ではプラント能力と消費電力量に比例関係があると仮定し、表 3.4.7 をもとに Excel で近似式を決定し、 $b_{23}$ を算出することとした。次式が $b_{23}$ の算出式である。

$$b_{23} = 1.07 \times \text{プラント能力} + 28.4$$

プラント能力は先に示した通りであるので、ここでは $b_{23} = 60.5$ である。

上記より、バッチャープラントの電力消費量[kWh/年]を次のように設定した。

従来型処分場： $U_{E2} = 0$ [kWh/年]、固化式処分場： $U_{E2} = 10,083$ [kWh/年]

#### c) ベルトコンベアの電力使用量

ベルトコンベアの電力使用量[kWh/年]はベルトコンベアの年あたりの稼働時間に消費電力を積算することとし、次式で算出した。

$$U_{E3} = \text{ベルトコンベアの稼働時間} \times b_{24}$$

ここで、 $b_{24}$ はベルトコンベアの消費電力[kW]である。文献 10)によるとベルト幅 600 mm、長さ 15 m のベルトコンベアでは消費電力は約 5.5 kW である。本研究ではベルトコンベアを長さ 50 m 使用するので 3.33 倍して $b_{23} = 18.3$ と設定した。

上記よりバッチャープラントの電力使用量を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : U_{E3} = 0[\text{kWh/年}]、\text{固化式処分場} : U_{E3} = 933.7[\text{kWh/年}]$$

### (7) 燃料使用量

燃料使用量は文献 4) を参考に次式で算出した。

$$U_o = U_{oL} + U_{oH}$$

ここで、 $U_o$  は燃料使用量[L/年]、 $U_{oL}$  は軽油使用量[L/年]、 $U_{oH}$  は重油使用量[L/年]である。

#### a) 軽油使用量

従来型処分場では軽油は埋立重機（ブルドーザ）でのみ必要とされる。軽油使用量は次式で算出される。

$$\text{従来型処分場} : U_{oL} = b_9 \times Q$$

ここで、 $b_9$  は埋立ごみ 1t 当たりの軽油使用量[L/t] = 0.62 である。一方、固化式処分場ではブルドーザではなく油圧ショベルと自走式スクリーンを用いるが、油圧ショベル及び自走式スクリーンの燃料消費量は作業内容や効率に左右され、決定するのが難しいため、従来型処分場のブルドーザと燃料使用量を同じと仮定して計算することとした。ただし固化式処分場ではごみを埋め立てるまでに油圧ショベルが搬入された廃棄物をベルトコンベアに投入、振動板で締固めの二つの工程で合計二台必要、自走式スクリーンが一台必要であるため、次式を設定した。

$$\text{固化式処分場} : U_{oL} = b_9 \times 3 \times Q$$

上記より、軽油使用量を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : U_{oL} = 4,377[\text{L/年}]、\text{固化式処分場} : U_{oL} = 22,735[\text{L/年}]$$

#### b) 重油使用量

浸出水処理プロセスで重油が必要となる。重油使用量は次式で算出した。

$$U_{oH} = 365 \times (1 + a_2) b_{10} \times S$$

ここで、 $b_{10}$  は単位容積の浸出水処理に必要な重油量[L/m<sup>3</sup>] = 0.23、 $a_2$  は脱窒素型生物処理時の付加係数[-]である。 $a_2$  は表 3.4.8 により設定した。

表 3.4.8 脱窒素型生物処理時の付加係数

脱窒素のための加温あり	低温地域	中温地域	高温地域	脱窒素なし
	0.5	0.1	0.0	0.0

本研究では従来型処分場及び固化式処分場ともに脱窒素処理を行わないため、 $a_2 = 0$  である。

上記より  $U_{oH}$  及び  $U_o$  を次のように設定した。

$$\text{従来型処分場} : U_{oH} = 1,049[\text{L/年}]、\text{固化式処分場} : U_{oH} = 147[\text{L/年}]$$

$$\text{従来型処分場} : U_o = 5,426[\text{L/年}]、\text{固化式処分場} : U_o = 22,882[\text{L/年}]$$

### 3. 4. 3 ライフサイクルコスト (LCC)

ライフサイクルコストはイニシャルコストとランニングコストの和とし、次式で求めた。

$$\text{ライフサイクルコスト}[\text{円}/\text{t}] = \text{イニシャルコスト}[\text{円}/\text{t}] + \text{ランニングコスト}[\text{円}/\text{t}]$$

#### (1) イニシャルコストの算出方法

イニシャルコストの内訳は文献 4) を参考に設定した。表 3. 4. 9 にその内訳を示す。

表 3. 4. 9 イニシャルコスト

項目	説明
1) 埋立地土木工事費	埋立地及び調整池の建設費
2) 浸出水処理施設建設費	浸出水処理施設の建設費
3) 最終覆土工事費	最終覆土の侵入水排除加工にかかる費用
4) 重機購入費	重機の購入にかかる費用
5) バッチャープラント設備工事費	バッチャープラント本体建設費、関連の設備工事費

#### a) 埋立地土木工事費

埋立地土木工事費は文献 5) をもとに次式で算出した。

$$CC = \left\{ CC_0 \times \left( \frac{V + V_i + V_A}{V_0} \right)^{(1-\alpha)} \times (1 + \delta)^{(T_1 - T_0)} \right\} \times \frac{1000}{Q} \quad \dots (40)$$

ここで  $CC$  は埋立地土木工事費 [千円/t]、 $T_0$  及び  $V_0$  はそれぞれ基準とする年度 [年]=1990、埋立容量 [ $\text{m}^3$ ]=200,000 であり、 $CC_0$  はその時の埋立地土木工事費 [百万円]=800 である。また  $\alpha$  及び  $\beta$  はそれぞれ規模の効果、建設単価の上昇を表す定数である。文献 5) を参考に  $\alpha = 0.36$ 、 $\beta = 0.083$  として計算した。

#### b) 浸出水処理施設建設費

浸出水処理施設建設費は文献 5) をもとに以下の式で計算を行った。

$$CW = \left\{ CW_0 \times \frac{S}{S_0} \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^{-\alpha} \times (1 + \delta)^{(T_1 - T_0)} \right\} \times \frac{1000}{Q}$$

ここで、 $CW$  は浸出水処理施設建設費 [百万円/t] である。 $T_0$ 、 $V_0$  は上述の埋立地土木工事費の計算と同じ値であり、 $CW_0$  及び  $S_0$  は  $T_0$ 、 $V_0$  のときの浸出水処理施設建設費 [百万円]=450、浸出水 (処理) 量 [ $\text{m}^3/\text{日}$ ]=100 である。文献 5) を参考に  $\alpha = 0.38$ 、 $\beta = 0.062$  として計算した。

#### c) 最終覆土工事費

最終覆土工事費は文献 4) をもとに以下の式を用いて算出した。

$$C_F = \frac{b_{13} \times A_L}{Q}$$

$C_F$  は最終覆土工事費 [円/t]、 $b_{13}$  は最終覆土工事方法別単価 [円/ $\text{m}^3$ ] である。本研究では従来型処分場の最終覆土は侵入水排除加工をするものとし、 $b_{13}$  を 4000 [円/ $\text{m}^3$ ]、固化式処分場は覆土工事そのものを行わないため、 $b_{13}$  を 0 [円/ $\text{m}^3$ ] と設定した。

## d) 重機購入費

重機購入費は次式を用いて算出した。またここでは油圧ショベルのアタッチメントである振動板も重機とみなして重機購入費に含むこととした。基本的に計算方法は重機ごとに共通であるが、ベルトコンベアのみ長さで購入費を決定している。なお、バッチャープラントから排出された固化体を埋立地まで運搬するのに必要なダンプカーは本研究では積算標準単価を用いてコスト計算することにしたため、ランニングコストに含むこととし、ここでは計算しないものとした。

$$CB = \left\{ \frac{\psi^{17} \times \text{ブルドーザ台数}}{b_{14}} + \frac{\psi^{19} \times \text{油圧ショベル台数}}{b_{31}} + \frac{\psi^{20} \times \text{自走式スクリーン台数}}{b_{32}} + \frac{\psi^{21} \times \text{ベルトコンベア長さ}}{b_{33}} + \frac{\psi^{22} \times \text{吊下げ磁選機の台数}}{b_{34}} + \frac{\psi^{23} \times \text{振動板の個数}}{b_{35}} \right\} \times \frac{T}{Q}$$

ここで、 $CB$ は重機購入費[千円/t]、 $b_{14}$ はブルドーザの耐用年数[年]、 $b_{31}$ は油圧ショベルの耐用年数[年]、 $b_{32}$ は自走式スクリーンの耐用年数[年]、 $b_{33}$ はベルトコンベアの耐用年数[年]、 $b_{34}$ は吊下げ磁選機の耐用年数[年]、 $b_{35}$ は振動板の耐用年数[年]、 $\psi^{17}$ はブルドーザの価格、 $\psi^{19}$ は油圧ショベルの価格、 $\psi^{20}$ は自走式スクリーンの価格、 $\psi^{21}$ はベルトコンベアの価格、 $\psi^{22}$ は吊下げ磁選機の価格、 $\psi^{23}$ は振動板の価格である。各重機の耐用年数<sup>11)</sup>は、表 3.4.10 のように設定した。

表 3.4.10 重機の対応年数

	重機	耐用年数
$b_{14}$	ブルドーザ	5
$b_{31}$	油圧ショベル	5
$b_{32}$	自走式スクリーン	5
$b_{33}$	ベルトコンベア	3
$b_{34}$	吊下げ磁選機	5
$b_{35}$	振動板	5

また、各重機の価格はメーカ等へのヒアリング調査をもとに表 3.4.11 のように設定した。

表 3.4.11 重機の設定価格

	重機	単位	価格
$\psi^{17}$	ブルドーザ	千円/台	32,000
$\psi^{19}$	油圧ショベル	千円/台	35,000
$\psi^{20}$	自走式スクリーン	千円/台	20,000
$\psi^{21}$	ベルトコンベア	千円/m	250
$\psi^{22}$	吊下げ磁選機	千円/台	5,300
$\psi^{23}$	振動板	千円/台	1,500

## e) バッチャープラント設備工事費

バッチャープラント設備工事費は関連企業へのヒアリング調査及び文献 9)を参考に算出した。表 3.4.12 は、埋立容量 10 万 m<sup>3</sup>でのバッチャープラント関連のコストを算出したものである。また埋立容量 10 万 m<sup>3</sup>でのバッチャープラント本体の建設費はヒアリング調査により得られた基準建設費に耐用年数と供用期間を考慮して計算した。

表 3.4.12 埋立容量 10 万 m<sup>3</sup>でのバッチャープラント関連の費用

項目	価格 (千円)
バッチャープラント本体建設	233,000
セメントサイロ建設	16,000
機内電気設備及び配線	17,000
機外電気設備	12,000
排水処理設備	24,000
土木基礎工事	35,000
建築工事	26,000
合計	363,000

$$\text{バッチャープラント本体建設費} = \text{バッチャープラント本体基準建設費} \times \frac{T}{b_{36}}$$

ここで、バッチャープラント本体基準建設費は 70,000[千円]、 $b_{36}$ はバッチャープラントの耐用年数[年]である。 $b_{36}$ は文献 11)を参考に、 $b_{36} = 6$ と設定した。本研究では埋立容量 10 万 m<sup>3</sup>以外の規模の最終処分場については 0.6 乗則を用いて次式で計算することとした。

$$\text{バッチャープラント設備工事費} = \left(70000 \times \frac{T}{b_{36}} + 130000\right) \times \left(\frac{V}{100000}\right)^{0.6} \times \frac{1}{Q}$$

## (2) ランニングコストの算出方法

ランニングコストの内訳は文献 4)を参考に設定した。表 3.4.13 にその内訳を示す。

表 3.4.13 ランニングコスト

項目	説明
1) 人件費	最終処分場で労働する人員に対する費用
2) 電力費	浸出水処理施設や重機で消費される電気の費用
3) 燃料費	浸出水処理施設や重機で消費される燃料の費用
4) 薬品費	浸出水処理で必要となる薬品の購入費
5) セメント水及び購入費	固化体の製造に必要となるセメントと水の購入費
6) ダンプカーによる運搬費	バッチャープラントからの固化体を埋立地に運搬
7) 埋立地及び浸出水処理施設の整備補修費	重機や浸出水処理施設の整備補修費
8) 埋立終了後の浸出水処理費	薬品、電力、燃料、整備補修

### a) 人件費

人件費は文献 4)を参考に次式を用いて算出した。

$$C_p = \frac{\beta_3 \times N_p \times T}{Q}$$

ここで、 $C_p$ は人件費[千円/t]、 $\beta_3$ は一人当たり年間の人件費[千円/年/人]である。本研究では $\beta_3 = 7000$ [千円/年/人]と設定した。

### b) 電力費

電力費は次式を用いて算出した。

$$C_E = \frac{\psi^1 \times U_E \times T}{Q}$$

ここで、 $C_E$ は電力費[千円/t]、 $\psi^1$ は電力の価格[円/kWh]である。本研究では $\psi^1 = 20$ [円/kWh]と設定した。

#### c) 燃料費

燃料費は次式を用いて算出した。

$$C_o = \frac{(\psi^2 \times U_{OH} + \psi^3 \times U_{OL}) \times T}{Q}$$

ここで、 $C_o$ は燃料費[千円/t]、 $\psi^2$ は重油の価格[千円/L]、 $\psi^3$ は軽油の価格[千円/L]である。本研究では $\psi^2 = 0.034$ [千円/L]、 $\psi^3 = 0.057$ [千円/L]と設定した。

#### d) 薬品費

薬品費は次式を用いて算出した。

$$C_H = \left\{ \left( 1 + \sum a_5^m \right) \times \psi^{13} \times S \times 365 \right\} \times \frac{T}{Q}$$

ここで、 $C_H$ は薬品費[千円/t]、 $a_5^m$ は浸出水処理プロセスによる薬品費の付加係数、 $\psi^{13}$ は浸出水処理薬品総合価格である。 $a_5^m$ は表 3.4.14 の合計により決定される。本研究では従来型処分場が $a_5^m = 6.8$ 、固化式処分場が $a_5^m = 0$ とした。

表 3.4.14 浸出水処理プロセスによる薬品費の付加係数

m	浸出水処理項目	付加係数	
1	Ca 前処理	あり 3.8	なし 0.0
2	生物処理	標準 0.0	脱窒素型 0.9
3	活性炭吸着	あり 2.6	なし 0.0

また、 $\psi^{13} = 0.3$ [千円/m<sup>3</sup>]と設定した。

#### e) セメント及び水の購入費

セメント及び水の購入費は次式を用いて算出した。

$$\text{セメント及び水の購入費} = \text{セメントの購入費} + \text{水の購入費}$$

$$\text{セメントの購入費[千円/t]} = \text{セメントの単価[千円/t]} \times \text{ごみ 1t あたり必要なセメント量[t/t]}$$

$$\text{水の購入費[千円/t]} = \text{水の単価[千円/t]} \times \text{ごみ 1t あたり必要な水量[t/t]}$$

ごみ 1t あたり必要なセメント量[t/t]及びごみ 1t あたり必要な水量[t/t]は土槽を用いた施工性実証試験の結果報告書より、それぞれ 0.0896[t/t]、0.0621[t/t]と設定した。セメントの単価は土木工事積算標準単価<sup>12)</sup>より 10,300[円/t]、水の単価は糸島市の水道代のデータを参考に 1,032[円/t]とした。また従来型処分場では混練の工程が無く、セメント及び水は不要なため、ともに 0[t/t]と設定した。

## f) ダンプカーによる運搬費

ダンプカーによる運搬費は積算標準単価をもとに次式で算出した。

$$\text{ダンプカーによる運搬費[千円/t]} = \text{運搬距離に対する標準単価[円/m}^3] \times \frac{V}{Q}$$

標準単価は1 m<sup>3</sup>単位で与えられるため、1t 当たりのコストに変換した。また、運搬距離に対する標準単価は表 3.4.15 に示す通りである。本研究では運搬距離を 0.3km 以内に設定し、運搬距離に対する標準単価 = 244.92 とした。

表 3.4.15 運搬距離に対する標準単価

運搬距離[km]	標準単価[円/m <sup>3</sup> ]	運搬距離[km]	標準単価[円/m <sup>3</sup> ]
～0.3	244.92	～6.0	881.7
～0.5	293.90	～7.0	1028.7
～1.0	342.88	～8.5	1175.6
～1.5	391.87	～10.0	1322.6
～2.0	440.85	～12.5	1518.5
～2.5	489.83	～16.5	1861.4
～3.0	587.80	～23.5	2302.2
～3.5	636.78	～51.5	3086.0
～4.5	734.75	～60.0	4604.4

## g) 埋立地及び浸出水処理施設の整備補修費

埋立地及び浸出水処理施設の整備補修費は次式を用いて算出した。

$$C_M = C_{M1} + C_{M2} + C_{M3} + C_{M4}$$

ここで、 $C_M$ は埋立地及び浸出水処理施設の整備補修費[千円/t]、 $C_{M1}$ は浸出水処理施設の整備補修費[千円/t]、 $C_{M2}$ はバッチャープラントの整備補修費[千円/t]、 $C_{M3}$ はベルトコンベアの整備補修費[千円/t]、 $C_{M4}$ はその他重機の整備補修費[千円/t]である。

## h) 浸出水処理施設の整備補修費

浸出水処理施設の整備補修費は文献 4) を参考に次式で算出した。

$$C_{M1} = (b_{15} \times C_W) \times \frac{T}{Q}$$

ここで、 $b_{15}$ は浸出水処理施設のイニシャルコストに対する整備補修費の割合[1/年] = 0.02 である。

## i) バッチャープラントの整備補修費

バッチャープラントの整備補修費は損料率を用いて次式で算出した<sup>10)</sup>。

$$C_{M2} = \text{バッチャープラント本体標準建設費[千円/t]} \times \text{運転一時間当たりの損料率[-]} \\ \times \text{バッチャープラントの稼働時間[h/年]} \times T$$

運転一時間当たりの損料率は  $164 \times 10^{-6}$  である。バッチャープラント本体標準建設費とは、耐用年数を考慮しない埋立容量のみで決定される建設費のことで、次式で算出することとした。

$$\text{バッチャープラント本体標準建設費} = 70000 \times \left( \frac{V}{100000} \right)^{0.6} \times \frac{1}{Q}$$

## j) ベルトコンベアの整備補修費

ベルトコンベアの整備補修費は次式で算出した。

$$C_{M3} = \text{ベルトコンベア標準購入費[千円/t]} \times \text{運転一時間当たりの損料率[1/m]} \times \text{ベルトコンベア長さ[m]} \\ \times \text{ベルトコンベアの稼働時間[h/年]} \times T$$

運転一時間当たりの損料率は  $6.67 \times 10^{-6}$  [1/m] であるので、ベルトコンベア長さを積算した。

## k) その他重機の整備補修費

その他の重機の整備補修費は文献 4) を参考に次式を用いて算出した。

$$C_{M3} = b_{18} \times (\text{ブルドーザ台数} + \text{油圧ショベル台数} + \text{自走式スクリーン台数}) \times \frac{T}{Q}$$

ここで、 $b_{18}$  は重機の整備補修費 [千円/年/台] = 2000 である。

## 1) 埋立終了後の浸出水処理費

最終処分場では埋立終了後も廃止基準を満たすまでは浸出水処理をする必要があり、供用期間と同様、薬品や浸出水処理施設の整備補修にコストがかかる。ただし、最終覆土加工によって浸出水量を少なくすることができるため、コストは供用期間より抑えることができる。ここでは文献 4) を参考に埋立終了後の浸出水量を用いて次式で算出した。

$$C_{RA} = C_{RA1} + C_{RA2} + C_{RA3} + C_{RA4} + C_{RA5}$$

$$C_{RA1} = (\beta_3 \times N'_P) \times \frac{b_{12}}{Q}$$

$$C_{RA2} = (\psi^1 \times U'_E) \times \frac{b_{12}}{Q}$$

$$C_{RA3} = (\psi^2 \times U'_{OH}) \times \frac{b_{12}}{Q}$$

$$C_{RA4} = C'_H \times \frac{b_{12}}{Q}$$

$$C_{RA5} = (b_{15} \times C_W) \times \frac{b_{12}}{Q}$$

ここで、 $C_{RA1}$  は埋立終了後の浸出水処理費 [千円/t]、 $C_{RA2}$  は埋立終了後の人件費 [千円/t]、 $C_{RA3}$  は埋立終了後の電力費 [千円/t]、 $C_{RA4}$  は埋立終了後の重油の燃料費 [千円/t]、 $C_{RA5}$  は埋立終了後の薬品費 [千円/t]、 $C_{RA}$  は埋立終了後の浸出水処理施設の整備補修費 [千円/t]、 $N'_P$ 、 $U'_E$ 、 $U'_{OH}$ 、 $C'_H$  はそれぞれ埋立終了後の必要人員、電力費、重油使用量、薬品費である。 $U'_E$ 、 $U'_{OH}$ 、 $C'_H$  はそれぞれ浸出水処理施設の規模を  $S'$  として計算したときの値である。 $N'_P$  は次式を用いて算出した。

$$N'_P = CINT(0.03 \times S') \quad \text{ただし、} N'_P \geq 2$$



## 4. 結果及び考察

### 4. 1 埋立用材の調整

#### (1) 磁力選別及び篩選別による鉄分及び大寸法固形物（混練不適物）の除去

F市F最終処分場に搬入された焼却残渣（焼却灰：約51 t、飛灰：約17 t）から磁力選別（焼却灰のみ）及び篩選別（40 mm メッシュ）により鉄分及び大寸法固形物を選別除去した。選別処理の状況を図4.1.1、図4.1.2に、選別結果を表4.1.1に示す。焼却灰から選別除去された鉄分は約6%であり、40 mm以上の大寸法固形物は約2%（乾燥重量比）であった。なお、飛灰から選別除去された大寸法固形物は1%程度であったため、飛灰は選別処理の必要性がないと判断された。また選別速度は、磁力選別で0.64 t/分、篩選別で0.56 t/分であり、最終処分場に搬入された焼却残渣の即日選別が十分に可能な速度であることが確認された。



図 4.1.1 焼却残渣の前処理システムの施工試験状況



図 4.1.2 焼却残渣の選別処理状況

表 4.1.1 焼却残渣の選別処理結果

項目	単位	選別前	磁力選別	篩選別	選別後
焼却灰	t	51.0 (100.0%)	3.3 (6.4%)	1.0 (2.0%)	46.7 (91.6%)
飛灰	t	17.0 (100.0%)	-	0.2 (1.2%)	16.8 (98.8%)
選別速度	t/分	-	0.64	0.53	-

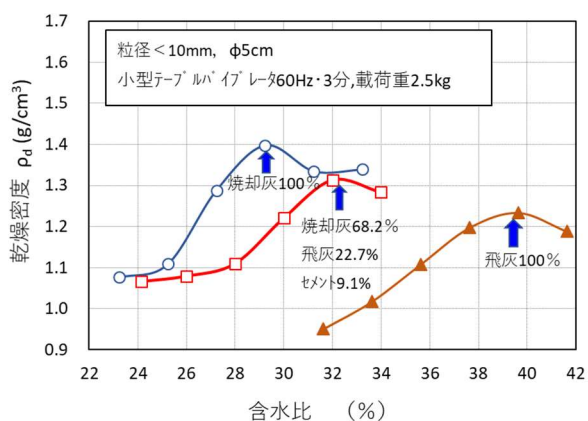
(2) 一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

表 3.1.2 で示した配合試験（振動締固め）によって得られた主な結果は以下の通りである。

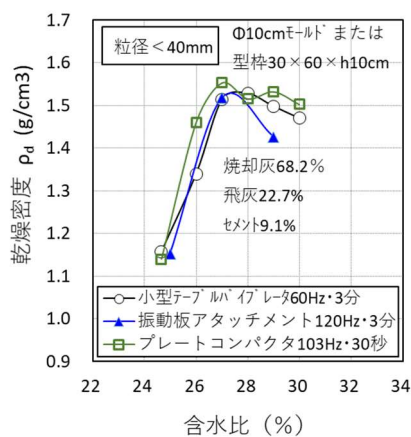
固化式処分の示方配合を決めるにあたっては、含水比が重要なファクターとなる。図 4.1.3 は小型テーブルバイブレータによる代表的な振動締固め曲線と締固め時のモールド試料表面沈下の時間経過である。図 4.1.3(a) の焼却残渣固化体（焼却灰 68.2%、飛灰 22.7%、セメント 9.1%の配合）の締固め曲線は、焼却灰 100%の締固め曲線と飛灰 100%の締固め曲線の間であって、乾燥密度が最大となる含水比は両者の混合比から概ね推定できると考えられる。図 4.1.3(b) は焼却残渣固化体のモールド供試体の試料表面の沈下量の測定例である。沈下の進行は 30 秒程度ではほぼ収束したが、その後も少しずつ間隙空気が抜けて沈下が継続したため、振動締固め時間は 3 分程度が適当であると判断された。

図 4.1.4 は異なる締固め試験装置による振動締固めの結果である。小型テーブルバイブレータ（3 分間）の締固め曲線は実施工を模擬したプレートコンパクタ（30 秒間）の締固め曲線とほぼ一致した（図 4.1.4(a)）。また、固化体の一軸圧縮強度と含水比の関係（図 4.1.4(b)）は、締固め曲線（乾燥密度と含水比の関係）（図 4.1.4(a)）の形状と類似しており、一軸圧縮強度と乾燥密度には相関があることが示唆された（図 4.1.8(b) 参照）。これらの結果より、小型テーブルバイブレータを用いた室内振動締固め試験によって実施工に適した含水比が推定できると判断された。

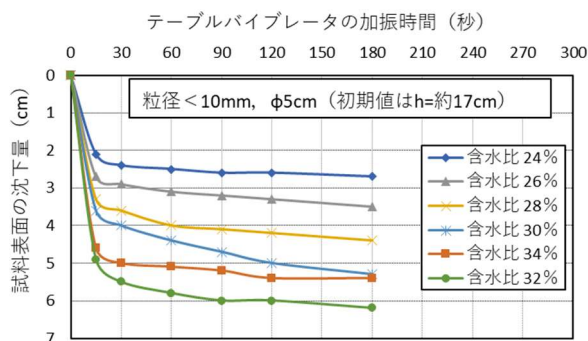
図 4.1.5 は標準的な配合（焼却灰と飛灰を乾燥質量比 3 : 1 で混合しセメントを外割で 10% 添加）での焼却残渣固化体の試験結果をまとめたグラフである。図 4.1.5(a) より、締固め曲線の乾燥密度が最大になる含



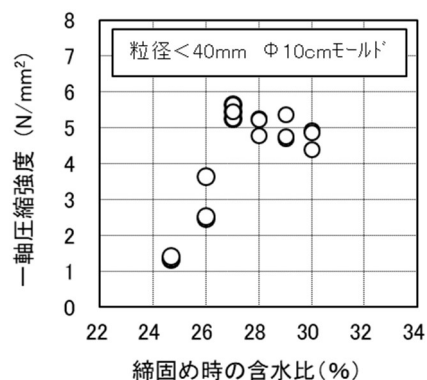
(a) 小型テーブルバイブレータによる締固め曲線



(a) 異なる装置による振動締固め曲線



(b) モールド試料表面の締固め時間-沈下曲線



(b) 一軸圧縮強度(材齢 28 日)と含水比の関係

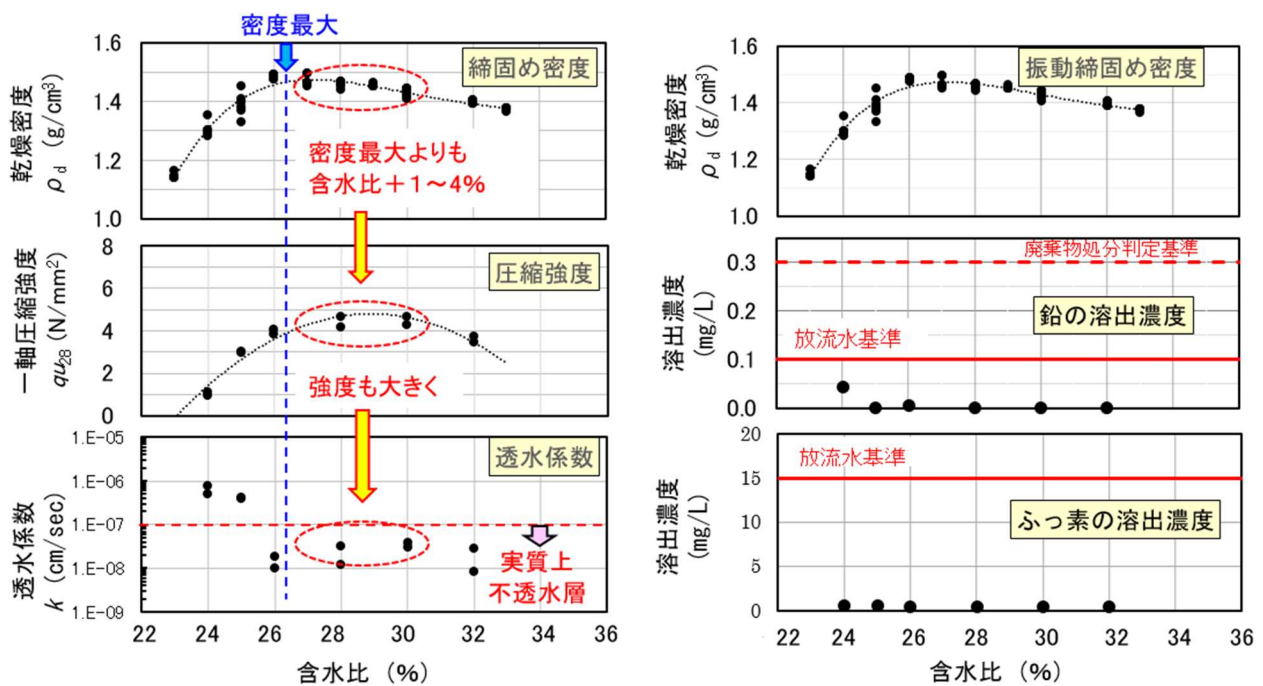
図 4.1.3 代表的な振動締固め曲線と試料表面沈下

図 4.1.4 異なる振動締固め装置による試験結果

水比よりも 1~4%含水比を大きくした方が一軸圧縮強度も大きく出て、透水係数も  $10^{-7}$  cm/s より小さく実質上の不透水層となり得るとということが確認できた。また、図 4.1.5(b)は一軸圧縮強度試験後の試料を用いて実施した溶出試験 (2 mm 粉碎、環告 46 号\_N=1 に準拠) の結果であるが、いずれも放流水質基準以下であった。同時に実施した六価クロムとセレンの溶出試験結果は全て微量もしくは検出限界未満であった。

図 4.1.6 及び図 4.1.7 は、図 4.1.3 及び図 4.1.5 の締固め試験で作製したモールド試料の写真であるが、いずれも密度が最大となる含水比 ( $\phi 5$  cm 試料では 32%、 $\phi 10$  cm 試料では 27%) よりも 2%程度水量が多い方が、表面が滑らかで空隙も少ないことが確認できる。

以上の試験結果から、小型テーブルバイブレータによる振動締固め試験によって、固化式処分に最適な示方配合を選定できることが明らかとなった。さらに、目標品質を満足する標準的な示方配合の例として、乾燥密度比で焼却灰：飛灰=3:1、セメント添加率 10% (外割) で、含水比については締固め曲線の乾燥密度が最大となる含水比よりも 1~4%大きい範囲を選定すればよいことが明らかとなった。



(a) 乾燥密度と一軸圧縮強度と透水係数の関係

(d) 締固め密度と溶出試験結果の関係

図 4.1.5 小型テーブルバイブレータで締固めた  $\phi 10$  cm モールド供試体の試験結果

(焼却灰 68.2%、飛灰 22.7%、セメント 9.1%の配合、材齢 28 日)



(a) 含水比 30%

(b) 含水比 32%

(c) 含水比 34%

図 4.1.6 小型テーブルバイブレータで締固めた  $\phi 5$  cm モールド供試体 (材齢 28 日後)

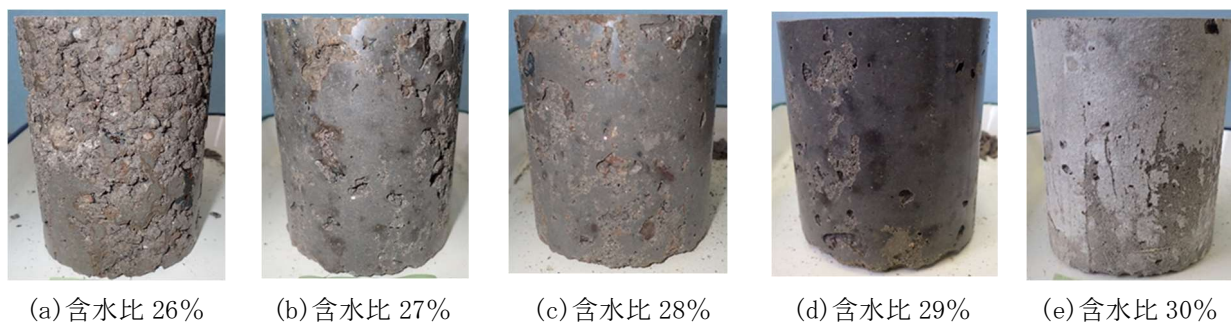
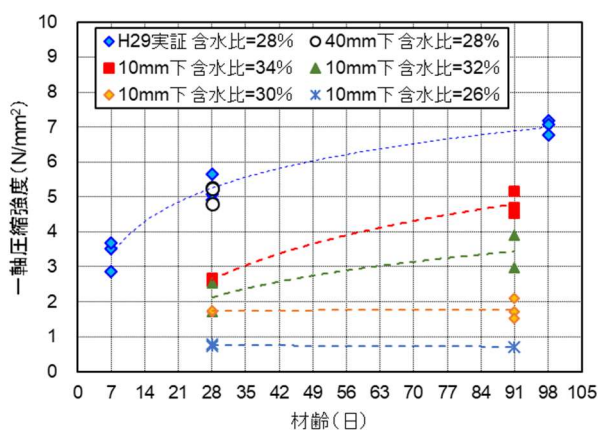
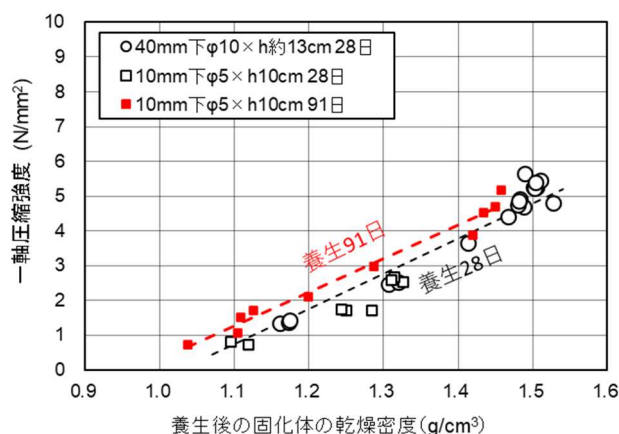


図 4.1.7 小型テーブルバイブレータで締固めたφ10cm モールド供試体 (材齢 28 日後)

次に、図 4.1.8 は焼却残渣固化体の材齢及び乾燥密度と一軸圧縮強度の関係を示すグラフである。図 4.1.8(a) に示すように、適切な配合を選定すれば材齢 28 日後も一軸圧縮強度は増加傾向にあるので、材齢 28 日強度を基準に固化式処分場の設計を行えば安全側であると考えられる。また、図 4.1.8(b) に示すように、一軸圧縮強度は供試体の乾燥密度と相関性があるので、固化体の乾燥密度は品質管理の指標として用いることができると考えられる。なお、図 4.1.9 に示すように、焼却灰と飛灰の混合割合を変えると締固め曲線も変化するが、両者の混合割合と一軸圧縮強度の間には図 4.1.9 のような相関性が認められるので、配合設計ではこの点にも注意が必要であることが分かった。

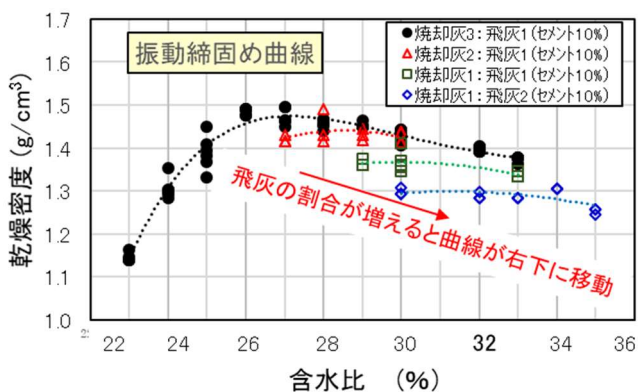


(a) 固化体の一軸圧縮強度と材齢の関係

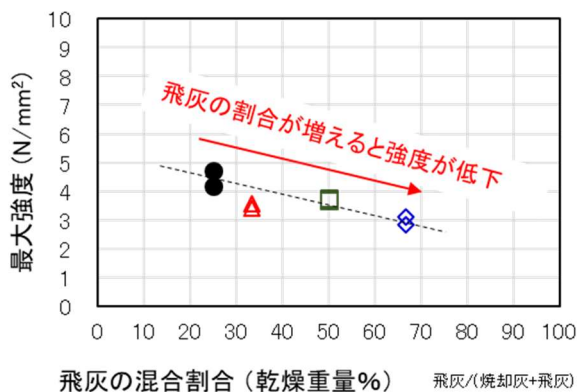


(b) 固化体の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

図 4.1.8 焼却残渣固化体の材齢及び乾燥密度と一軸圧縮強度の関係



(a) 焼却灰と飛灰の混合割合を変えた時の締固め曲線



(b) 飛灰の混合割合と一軸圧縮強度の関係

図 4.1.9 小型テーブルバイブレータで締固めたφ10cm モールド供試体 (材齢 28 日後)

(3) 産業廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合

a) 産廃灰の材料評価

異なる焼却施設から採取した3種類の産廃灰の粒径加積曲線を図4.1.10に示す。細粒分割合(75μm以下)は産廃灰Sと産廃灰Cはそれぞれ2.9%と2.3%と比較的小さな数値であったが、産廃灰Bは38.3%であった。産廃灰Bは木質系の灰であるために微細な灰が多く含まれていると考えられる。

各産廃灰の蛍光X線分析による元素構成割合を表4.1.2に示す。カルシウム(CaO)は産廃灰Sで29.4%と他の灰に比べ数値が大きい。また、二酸化ケイ素は産廃灰Bで40.3%と大きな数値を示すなど、各産廃灰で元素構成割合にかなり大きな違いが見られた。これらのばらつきは、各焼却施設で受け入れている産業廃棄物の種類やプラントの燃焼条件に起因するものと考えられる。なお、溶出試験で環境基準を超過した重金属等の試験結果を図4.1.11に示したが、フッ素は全ての産廃灰で環境基準を超過し、六価クロム、セレン、ホウ素でも環境基準を超えているものがあつた。

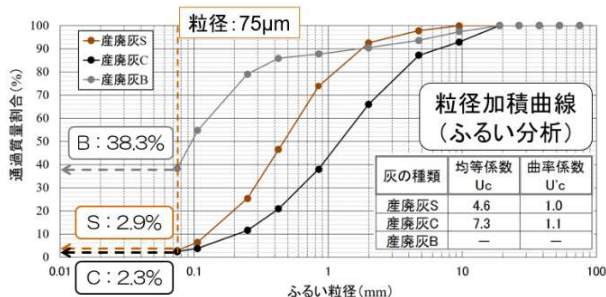


図 4.1.10 産廃灰3種類の粒径加積曲線

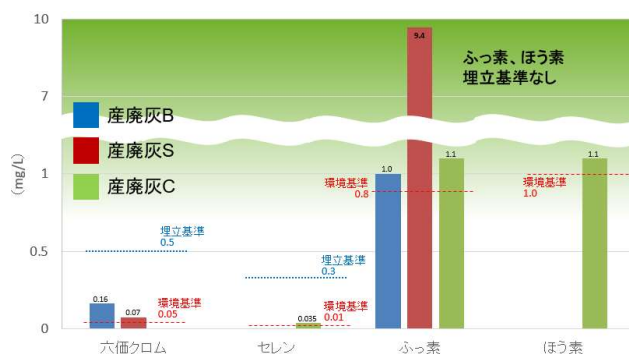


図 4.1.11 産廃灰3種類の重金属溶出量試験結果

表 4.1.2 産廃灰3種類の元素構成割合 (蛍光X線分析結果)

測定項目	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO
産廃灰S	3.7	2.2	10.8	14.0	4.3	2.2	0.6	29.4	6.6	15.7	1.6
産廃灰C	1.4	0.6	14.1	21.8	0.9	3.0	0.4	9.7	11.5	8.7	0.2
産廃灰B	1.1	3.1	13.9	40.3	1.0	1.9	4.7	18.1	0.6	5.3	<0.1

b) 産廃灰固化体の示方配合の検討

室内配合試験ケース1及びケース2における小型テーブルバイブレータによる振動締固め試験結果(締固め曲線)を図4.1.12及び図4.1.13に示す。乾燥密度が最も大きくなる含水比は、振動締固めの方法(载荷の有無、加振条件)や石炭灰の有無により異なり、産廃灰Sで35~47%、産廃灰Cで38~53%、産廃灰Bで37~42%であった。

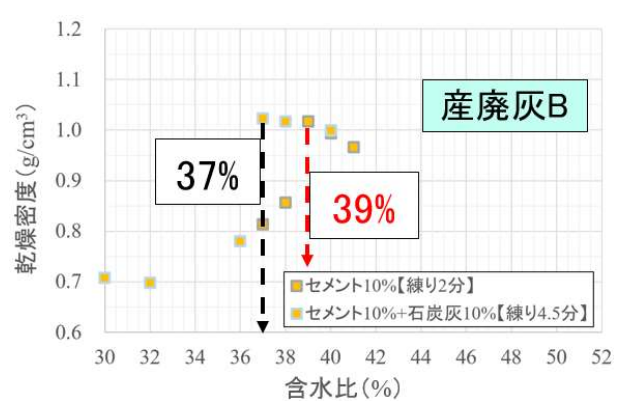
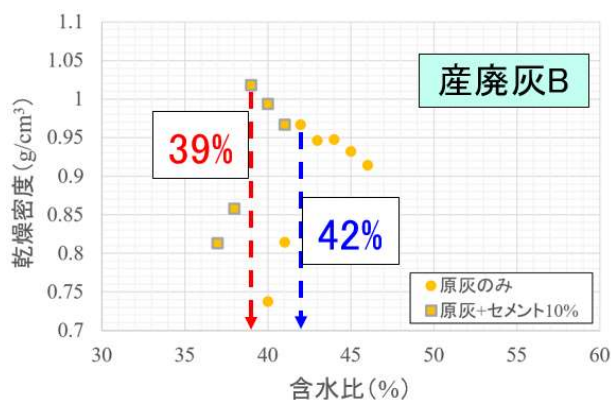
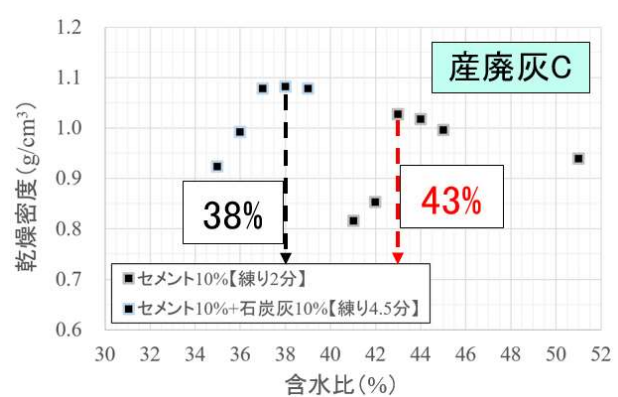
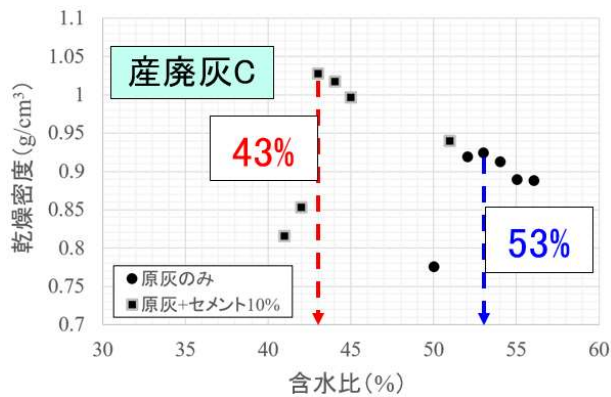
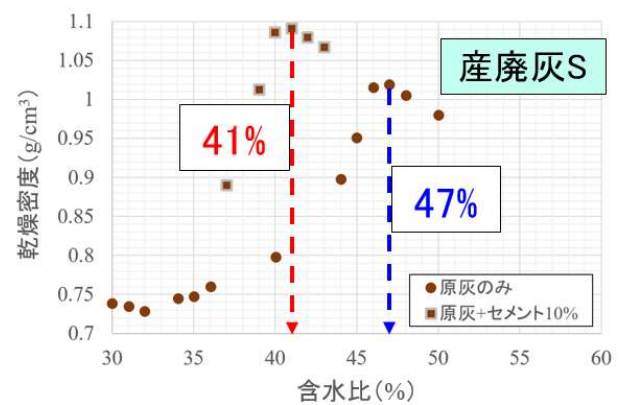
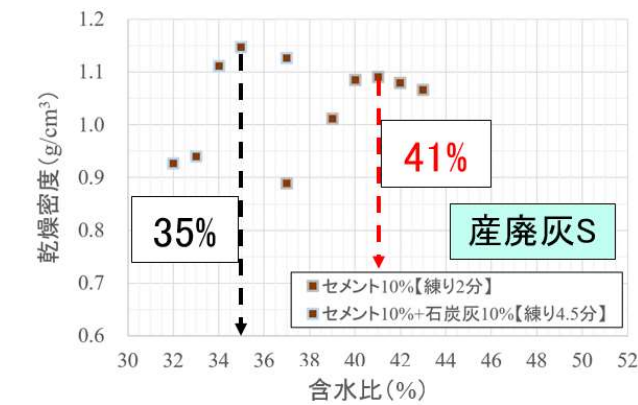


図 4.1.12 振動締固め結果 (配合試験ケース 1)

図 4.1.13 振動締固め結果 (配合試験ケース 2)

室内配合試験ケース 3 における産廃灰固化体の乾燥密度と一軸圧縮強度を図 4.1.14 に、重金属溶出量の代表例を図 4.1.15 に、透水係数の試験結果を図 4.1.16 に示す (いずれも横軸%はセメント添加率)。溶出試験は一軸圧縮強度試験後の試料を用いて実施した。

産廃灰固化体の乾燥密度及び一軸圧縮強度は、セメント添加率が 10~20% の範囲では、セメント添加率にほぼ比例して増加する。ただし、材齢 28 日 (気中封緘養生) では、いずれも本研究の目標値 5 N/mm<sup>2</sup> を下回った (図 4.1.14)。また、重金属溶出量も環境基準を超えるケースが多い (図 4.1.15)。

透水係数が  $1 \times 10^{-7}$  cm/s より小さく実質不透水とみなせるのは、セメント添加率が 20% の配合と、セメント添加率が 15% の産廃灰 S だけであった (図 4.1.16)。なお、産廃灰 S はセメント材料の 1 つである酸化カルシウムの含有割合が他の産廃灰よりも大きいために、強度も若干大きくなったと考えられる。

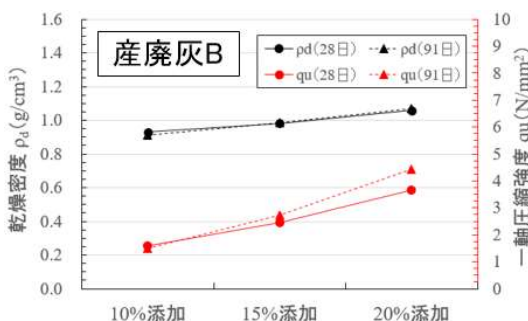
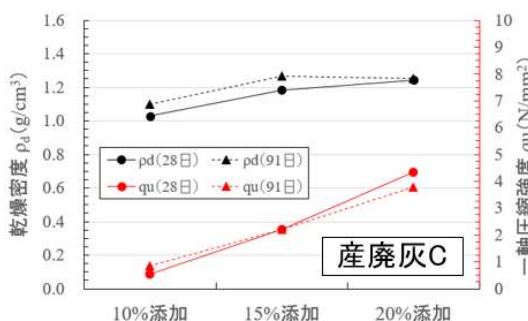
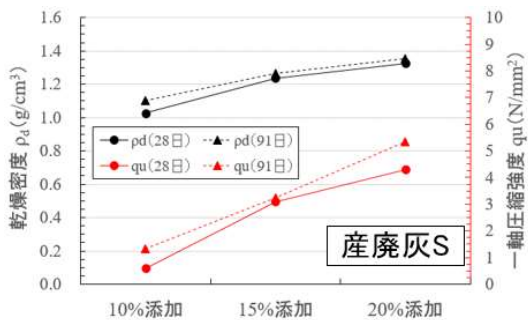


図 4.1.14 産廃灰固化体の乾燥密度と強度

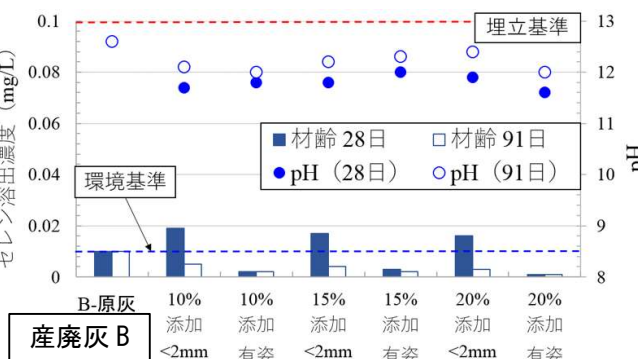
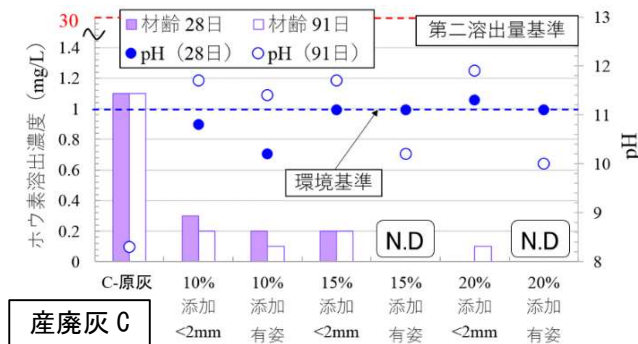
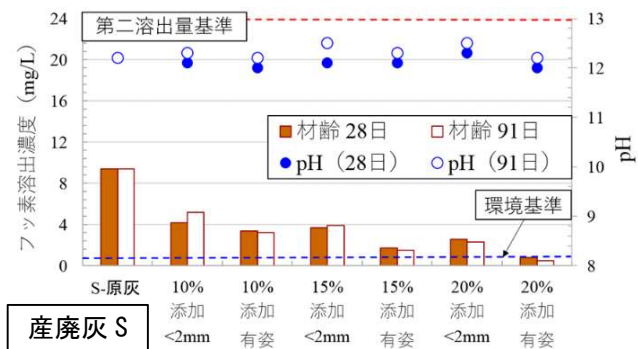


図 4.1.15 産廃灰固化体の溶出試験結果の代表例

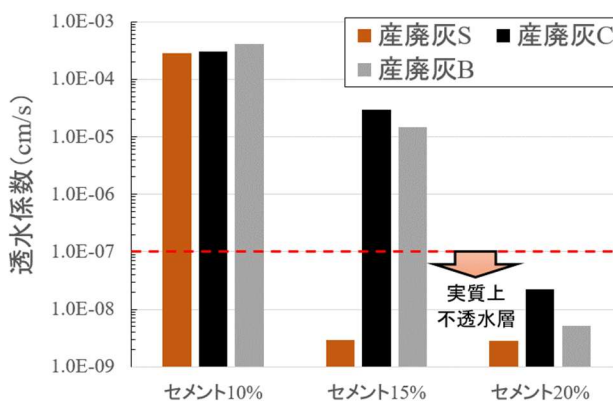


図 4.1.16 産廃灰固化体の透水試験結果

図 4.1.17 は、各産廃灰固化体のセメント添加率 10%の配合に石炭灰を 10%添加したときの試験結果であるが、石炭灰を加えていない配合 (図 4.1.14) と比べて乾燥密度と一軸圧縮強度が増加した。また、フッ素の溶出量も図 4.1.18 に示すようにかなり抑えることができている、透水ケースも概ね  $1 \times 10^{-7}$   $cm/s$  以下とな

った。これは、石炭灰が産廃灰中に含まれる酸化カルシウムとポゾラン反応を引き起こすことと、細粒で球形の石炭灰が加わることで攪拌性等が向上して固化体の品質が向上したのではないかと考えられる。

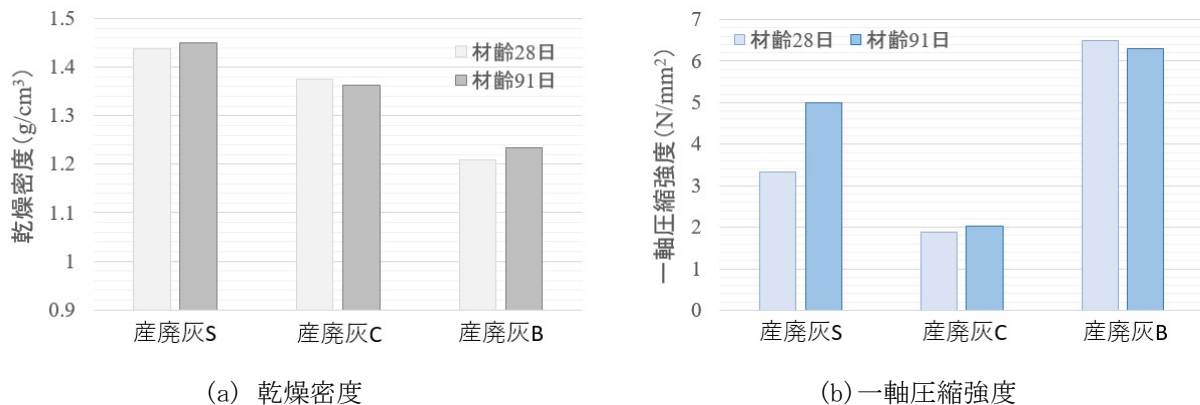


図 4.1.17 産廃灰固化体の乾燥密度と一軸圧縮強度（セメント添加率 10%、石炭灰を 10%添加）

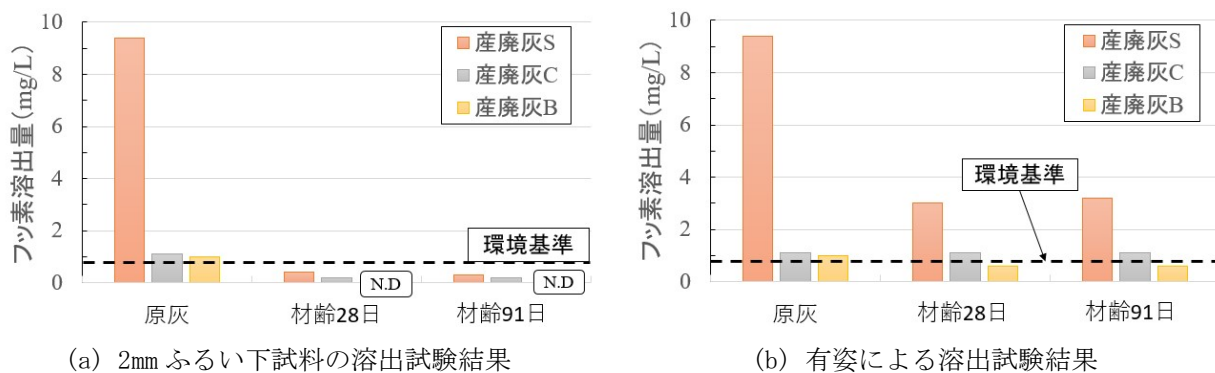


図 4.1.18 産廃灰固化体のフッ素溶出試験結果（セメント添加率 10%、石炭灰を 10%添加）

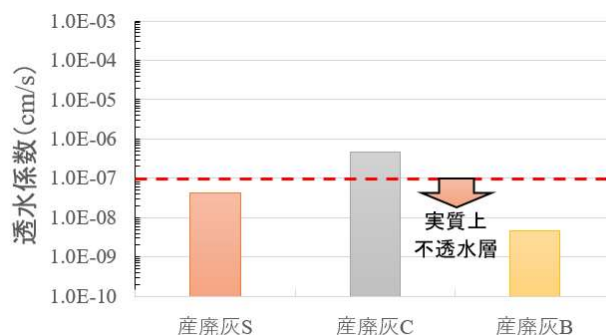


図 4.1.19 産廃灰固化体の透水試験結果（セメント添加率 10%、石炭灰を 10%添加、材齢 91 日）

図 4.1.20 は、キレート剤（ピペラジン系、ジエチルアミン系、無機系）を添加したときの固化体の溶出試験結果（材齢 28 日）を、原灰及びキレート剤無し（キレート 0%）の結果と比較したグラフであるが、キレート剤添加による溶出抑制効果は確認できなかった。図中のケース名は産廃灰の種類（S, C, B）とキレート剤の種類（P: ピペラジン系, J: ジエチルアミン系, M: 無機系）を表している。なお、今回の併合試験では、産廃灰固化体のミキサー混練時にキレート剤を添加したため、重金属とキレート剤の反応が十分に進行しなかった可能性もあり、施工手順等についても検討の余地があると考えられる。



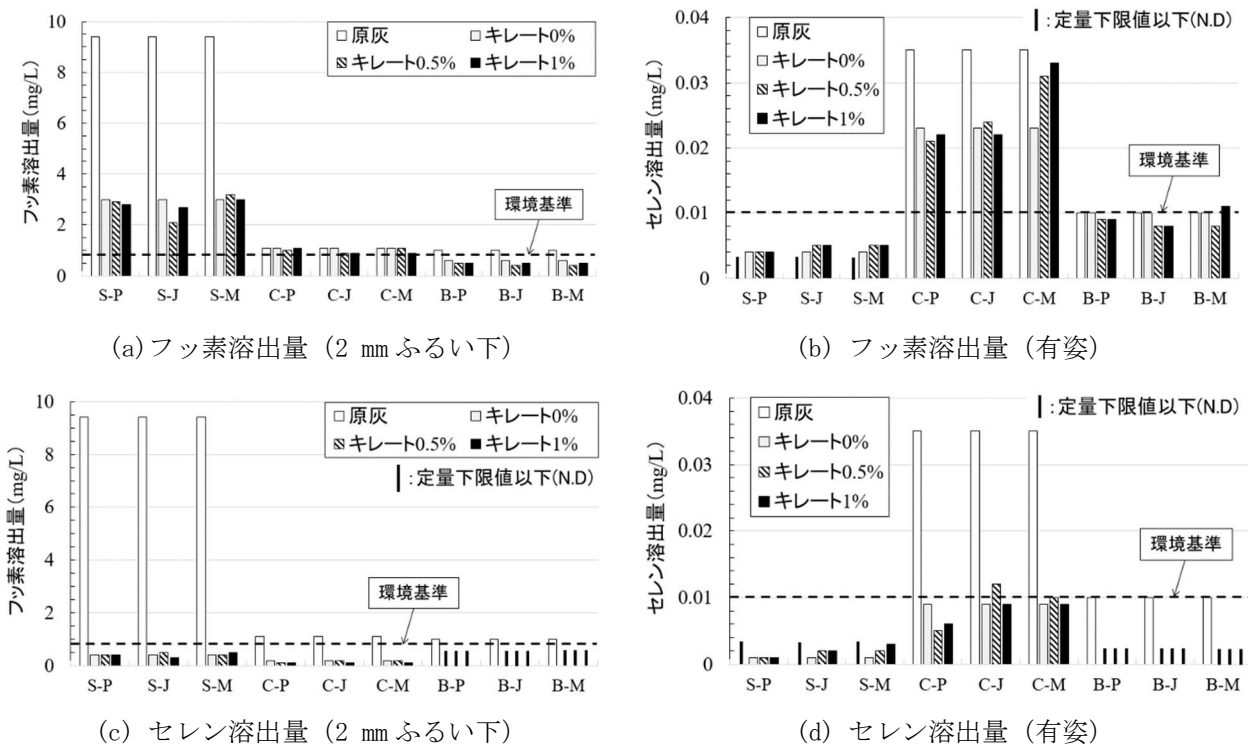


図 4. 1. 20 キレート剤を添加した産廃灰固化体の試験結果 (セメント添加率 10%、石炭灰 10%、材齢 28 日)

(4) バッチャープラントの検討

図 4. 1. 21 は固化式処分システムのイメージ図であるが、この中のバッチャープラントについて、埋立模型槽を用いた施工試験等で得られた施工性のデータを基に検討した。なお、検討に当たっては流体化工法による石炭灰固化技術のアッシュクリート Type II のバッチャープラント (図 4. 1. 22) 等も参考にした。

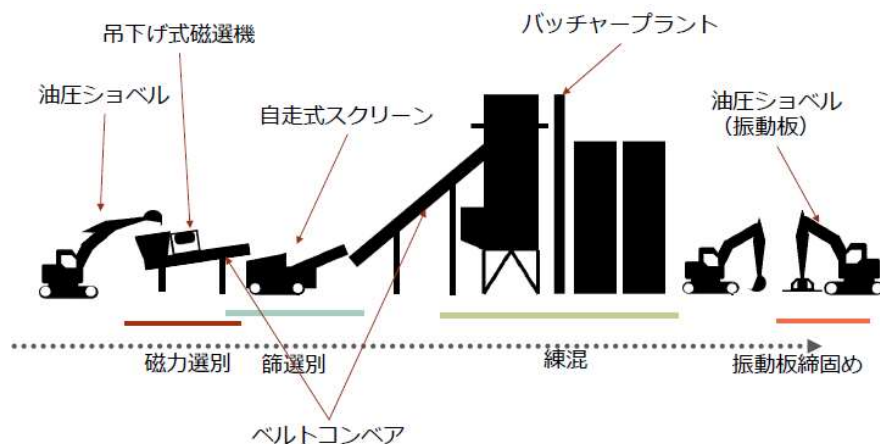


図 4. 1. 21 固化式処分システムのイメージ図



### (株)エコアッシュのプラント

九州電力(株)苓北発電所から処理委託を受けた石炭灰を利用して、リサイクル製品(盛土、ブロック等の建設資材)を製造販売  
<https://www.ecoash.jp/company/summary.html>

敷地面積：8,500平方メートル

ミキサー形式：2.5立方メートル二軸ミキサー

製造能力：50立方メートル/h

フライアッシュサイロ：300トンサイロ3基

セメントサイロ：50トンサイロ1基、石膏ヤード(約25t)

水槽：攪拌水槽、工業用水槽、海水槽

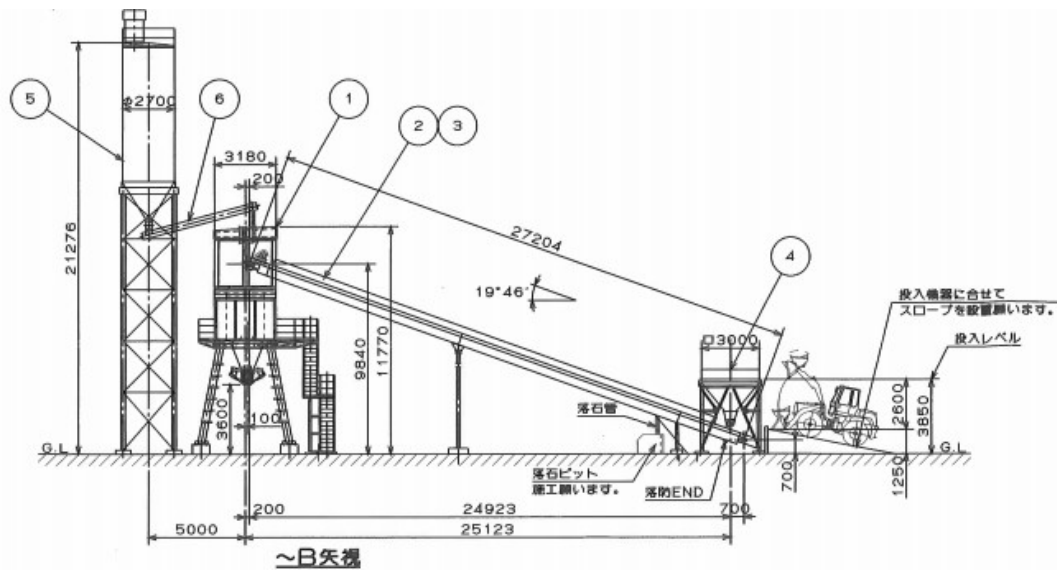
盛土施工能力：32立方メートル/h

図 4.1.22 バッチャープラントの参考例

今回の検討では、埋立用材調整方法の実証試験及び埋立模型槽を用いた施工試験のデータから表 4.1.3 のようにプラント能力を試算し、その数値に適したプラント本体の主な仕様を表 4.1.3 のように設定して、実規模バッチャープラントを試設計した。プラントの断面図と主要諸元を図 4.1.23 に、平面図を図 4.1.24 に示す。なお、今回は焼却灰と飛灰を 2 系統のベルトコンベアで供給する形式としたが、両者のプレミックスによるベルコンラインの 1 系統化や、ICT 活用による運転管理の効率化等についても検討の余地があると考えている。今後は実処分場での実証試験等を経て固化式処分システムによる埋立処分の施工方法を確立し、要求される施工能力に適合した、よりコンパクトなプラントの実用化を目指す予定である。

表 4.1.3 施工試験のデータに基づくプラント能力の設定

項	目	数量	単位	備考
能	力	15	m <sup>3</sup> /h	: 要求能力
サイクル	タイム	30	SEC	: 計量完了後材料放出タイム
		30	SEC	: ドライミキシングタイム
		120	SEC	: ウェットミキシングタイム
		20	SEC	: 製品排出タイム
		<b>200</b>	<b>SEC</b>	<b>: 1Batch当りのサイクルタイム</b>
				※各材料の計量はミキシング中に完了する。
時間	当り Batch 数	18	Batch/h	=3600SEC÷200SEC
ミキサ	容量の選定	0.83	m <sup>3</sup> /Batch	=15m <sup>3</sup> /h÷18Batch/h
		↓		ミキサは0.5m <sup>3</sup> 刻みのため
		<b>1.0</b>	<b>m<sup>3</sup>/Batch</b>	<b>日工型式：SF-1000を選定する</b>



主要諸元表

No.	名 称	数量	動力	仕 様
①	バッチャープラント本体	1		STB-100P-4T
②	計量ベルトコンベヤ (砂利用)	1	7.5kW ×2	450W×90t/h 脚、フード、片歩廊、側板、落防板、付 (ピーコントラス)
③	計量ベルトコンベヤ (砂 用)	1	7.5kW	450W×80t/h 脚、フード、片歩廊、側板、落防板、付 (ピーコントラス)
④	受材ホッパー	1	0.25×9 ×3	6m <sup>3</sup> ハイフレタ、流量調整カットオフゲート、付
⑤	セメントタンク	2		50t (高脚式)
⑥	計量スクリー	2	3.7kW×2 0.75kW×2	50t/h ロータリーバルブ×2 付

図 4.1.23 試設計によるバッチャープラントの断面図と主要諸元

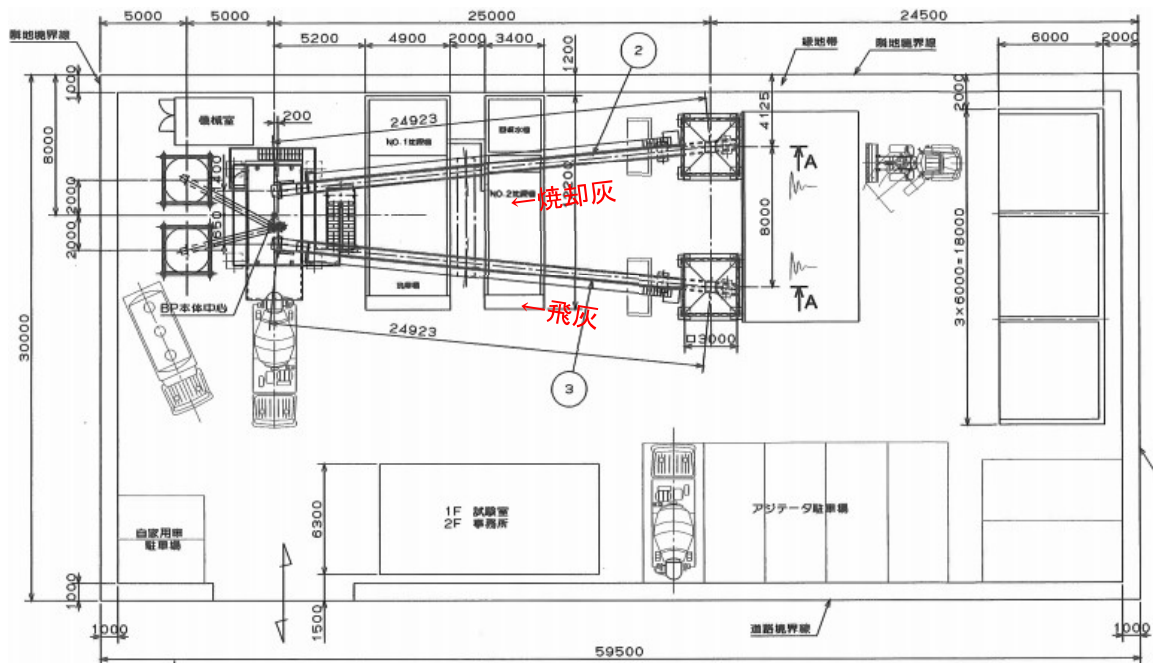


図 4.1.24 試設計によるバッチャープラントの平面図

## 4. 2 施工性及び埋立地盤特性

### (1) 固化式処分の施工性

ケース1（従来型）の埋立槽は平成29年7月26日と27日に施工し、ケース2（固化式）の埋立槽は7月31日と8月1日の2日間で施工した。施工状況を図4.2.1に示す。なお、施工後の埋立模型槽は表流水や浸出水のモニタリング等にも利用するため、図4.2.2のように採水タンク等を設置した。



図 4.2.1 埋立模型槽を用いた施工試験の施工状況

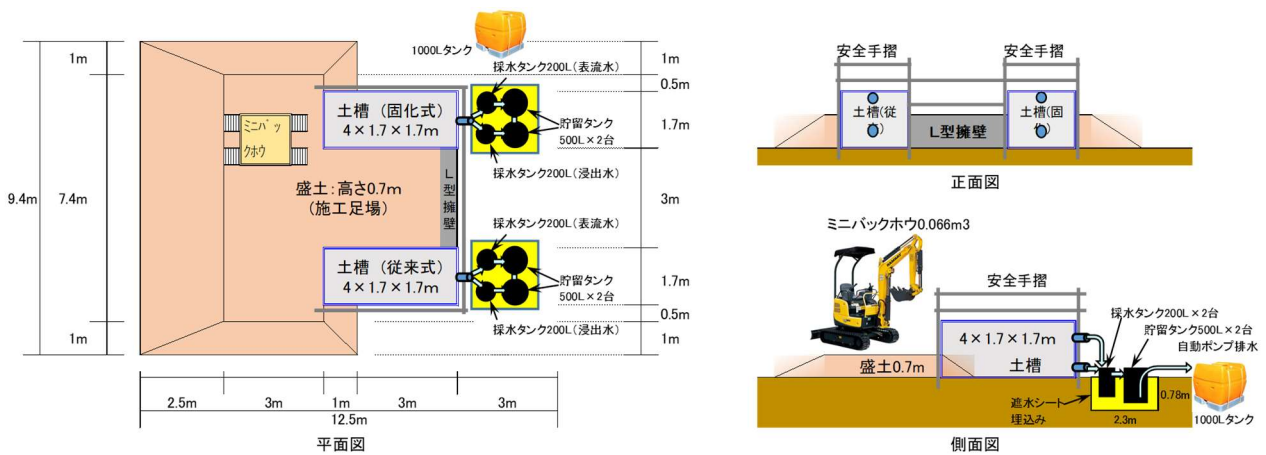
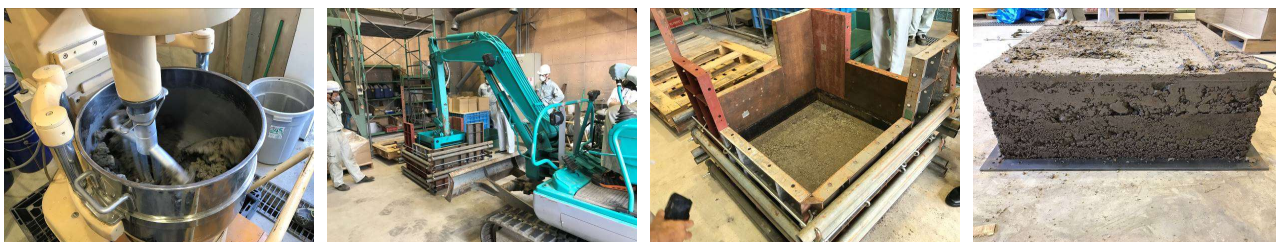


図 4.2.2 埋立模型槽を用いた施工試験の全体図

ケース2（固化式）の固化体の配合は、事前に実施した鋼製型枠内での振動締固め試験（図4.2.3）及び現地での試験練りの結果から、表4.2.1のように設定した。

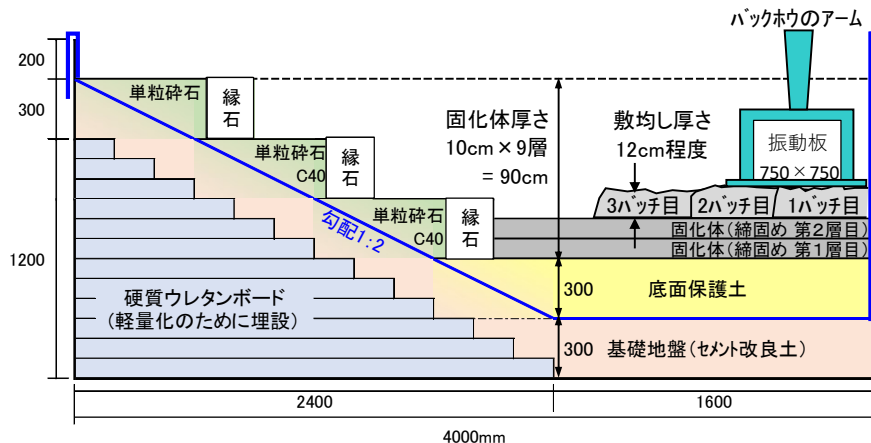


(a) 120L ミキサーで混練 (b) 振動締め機で締め (c) 1層 10cm 締め完了 (d) 2層 20cm の脱型後  
 図 4.2.3 鋼製型枠 (900 mm×900 mm×h600 mm) 内での振動締め試験の状況

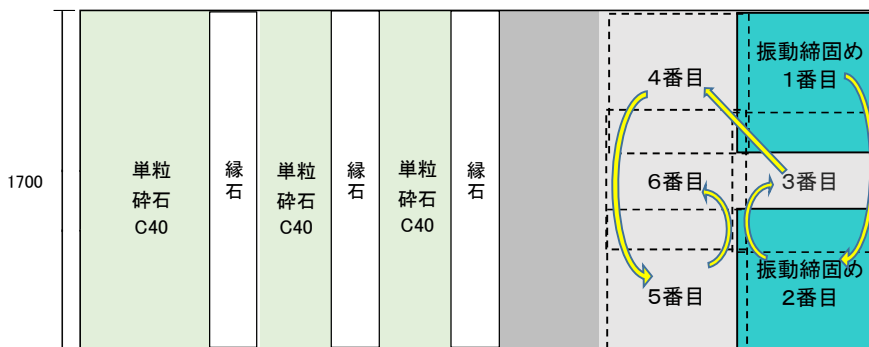
表 4.2.1 焼却残渣固化体の配合

固化体の配合条件			焼却残渣の混合条件				現場配合(100L当たり)				固化体(100L当たり)				
			混合比		焼却灰		飛灰		焼却灰						飛灰
含水比 (%)	セメント量 (%)	混練体積 (L)	主灰:飛灰 (乾燥重量比)	含水率 平均値 (%)	乾燥 重量 (kg)	含水率 平均値 (%)	乾燥 重量 (kg)	湿潤 重量 (kg)	湿潤 重量 (kg)	重量 (kg)	重量 (kg)	湿潤 重量 (kg)	水分 (kg)	含水率 (%)	乾燥 重量 (kg)
28.0	10.0	100	3:1	20.8	85.4	13.0	28.4	107.8	32.7	12.6	8.7	161.8	35.4	21.9	126.4

埋立模型槽を用いた施工試験での強制二軸ミキサーでの練混ぜは、まず焼却残渣とセメントをミキサーで30秒攪拌(空練り)してから水を加えてさらに2分間攪拌した。埋立層の施工は、標準的な1サイクル当たりの混練量を100L×3バッチとし、順次、厚さ12cm程度に敷き均し、ミニバックホウに搭載した振動締め板(振動数120Hz、面積=0.75m×0.75m=0.56m<sup>2</sup>)を用いて締めた。振動締め時間は15~30秒/カ所で、1サイクル(300L)当たりの標準的な振動締め回数は図4.2.4に示すように6回とした。固化体は



(1) 断面図



(2) 平面図

図 4.2.4 ケース 2 (固化式) の標準的な振動締め手順 (1サイクル当り 300 L)

合計 4,033 L (40 バッチ+表面仕上げ 1/3 バッチ) 混練して施工したが、標準的な 1 サイクル (300 L) 当たりの平均施工時間 (混練～締固め) は約 30 分であった。

以上のように埋立模型槽を用いた施工試験によって固化式埋立処分の施工性 (実用的な施工手順及び施工能力等) を確認することができた。

## (2) 固化式処分の適用による埋立地盤の減容効果

埋立模型槽を用いた施工試験での埋立重量と埋立体積から算出した埋立層の乾燥密度は、表 4.2.2 に示すようにケース 1 (従来型) では  $1.23 \text{ g/cm}^3$ 、ケース 2 (固化式) では  $1.41 \text{ g/cm}^3$  であった。ケース 1 の乾燥密度は既往研究の値 (埋立場での現地密度試験結果: 乾燥密度  $1.28 \text{ g/cm}^3$ ) よりは若干小さめであった。

図 4.2.5 に従来型処分及び固化式処分の埋立容量消費量を示す。従来型の埋立容量消費量は  $1.02 \text{ m}^3/\text{t-ash}$  であったのに対し、固化式の同量は  $0.79 \text{ m}^3/\text{t-ash}$  であった。このことから、固化式処分を適用することにより、埋立容量消費量を 23% 程度削減できることが示され、固化式処分の減容効果が確認された。また、この減容化率 23% は開発目標 (20% 以上) を達成するものであった。

表 4.2.2 埋立模型槽を用いた施工試験における埋立量及び埋立容量消費量の計算結果

施工試験 ケース	埋立 体積 ( $\text{m}^3$ )	含水比 (%)		計算 条件	使用した埋立用材の質量 (t)					密度 ( $\text{t/m}^3$ )	焼却残渣 の密度 ( $\text{t/m}^3$ )	焼却残渣 1t 当りの 埋立容量 消費量 ( $\text{m}^3/\text{t-ash}$ )
		焼却灰	飛灰		焼却灰 B	飛灰 F	セメント	水	合計 W			
1 従来型	3.735	26.1	14.0	湿潤 ⇒	4.236	1.412	0	0	5.648	1.51	1.51	0.661
				乾燥 ⇒	3.359	1.238	0	—	4.597	1.23	1.23	0.812
2 固化式	3.580	26.3	14.9	湿潤 ⇒	4.294	1.303	0.508	0.351	6.456	1.80	1.56	0.640
				乾燥 ⇒	3.401	1.134	0.508	—	5.042	1.41	1.27	0.790

\* 埋立体積には底面保護土や表面覆土等は含まれていない。

\* 焼却残渣の含水比は、湿潤重量約 1t 毎に測定した値の平均値である。

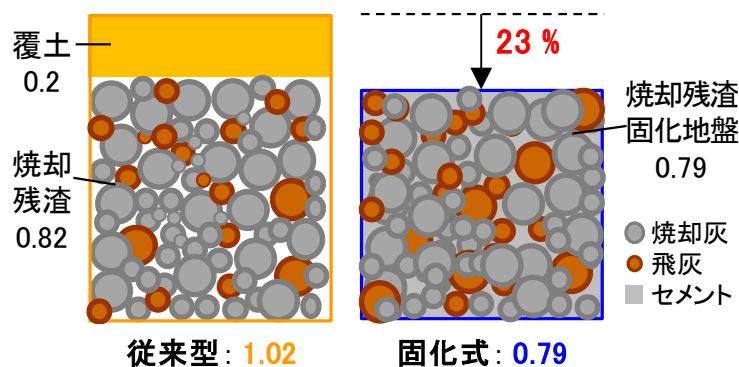


図 4.2.5 固化式処分による減容効果

## (3) 固化式処分埋立地盤の強度、透水性、有害物質溶出濃度

図 4.2.6 に固化体の一軸圧縮強度と材齢の関係を示す。固化体の一軸圧縮強度は、材齢とともに増加し、469 日目における強度は、供試体で  $8.5 \sim 9.1 \text{ N/mm}^2$ 、ボーリングコアサンプルで  $7.2 \text{ N/mm}^2$  に到達した。これらは開発目標 ( $5 \text{ N/mm}^2$  以上) を達成するものであった。

図 4.2.7 に固化体の透水試験結果を示す。なお、過去に実施した固化体の透水試験結果も含まれており、今回の透水試験結果は四角で囲まれた 3 点である。固化体供試体の飽和透水係数は  $1.9 \times 10^{-9} \sim 3.5 \times 10^{-9}$  cm/s を示し、開発目標 ( $1 \times 10^{-7}$  cm/s 以下) を達成した。固化式処分埋立地盤は実質上不透水層であることが確認された。

表 4.2.3 に固化体の有害物質溶出試験結果を示す。また、図 4.2.8 に鉛の溶出濃度を示す。固化体の溶出試験の結果、鉛、セレン、ふっ素の溶出が確認されたが、いずれの溶出濃度も放流水質基準以下であった。固化体の有害物質溶出濃度は開発目標（放流水質基準以下）を達成することが確認された。

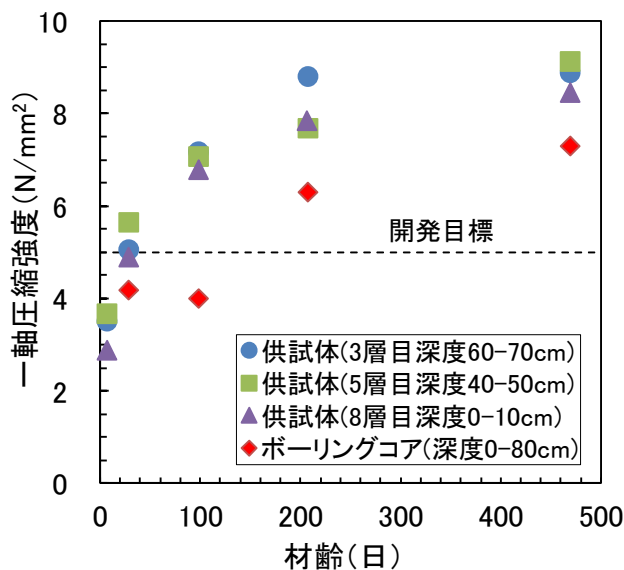


図 4.2.6 固化体の一軸圧縮強度と材齢の関係

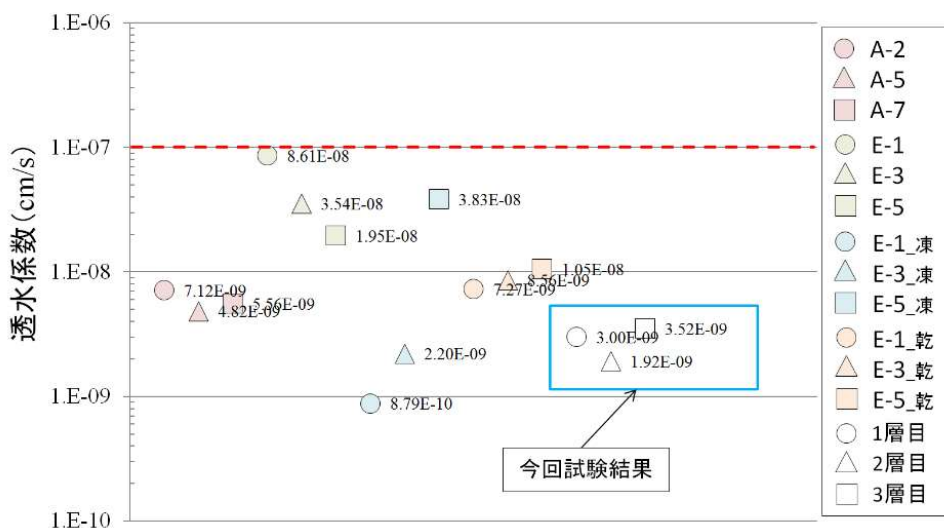


図 4.2.7 透水試験結果

表 4.2.3 有害物質の溶出試験結果

試験ケース (固化体2mm>>)	鉛およびその化合物	カドミウムおよびその化合物	水銀及びその化合物	砒素およびその化合物	セレンおよびその化合物	六価クロムおよびその化合物	ふっ素およびその化合物	ほう素およびその化合物	全シアン
	Pb	Cd	Hg	As	Se	Cr <sup>6+</sup>	F	B	CN
土槽試験(28日)	0.048	N.D	N.D	N.D	0.004	N.D	0.7	N.D	N.D
土槽試験(91日)	0.027	N.D	N.D	N.D	0.001	N.D	0.5	N.D	N.D
土槽試験(207日)	0.029	N.D	N.D	N.D	0.002	N.D	0.6	N.D	N.D
コアサンプル(207日)	0.016	N.D	N.D	N.D	0.002	N.D	0.5	N.D	N.D
土槽試験(469日)	0.075	N.D	N.D	N.D	0.005	N.D	0.6	0.1	N.D
コアサンプル(469日)	0.017	N.D	N.D	N.D	0.003	N.D	0.5	N.D	N.D
基準1: 埋立処分場判定基準(mg/L)〈環告第13号〉【廃棄物処分法】	0.3	0.3	0.005	0.3	0.3	1.5	—	—	1
基準2: 一般廃棄物の最終処分場放流水排水基準(mg/L以下)〈省令〉	0.1	0.03	0.005	0.1	0.1	0.5	15	50	1
基準3: F市地下水排水基準(mg/L以下)	0.1	0.03	0.005	0.1	0.1	0.5	8	10	1

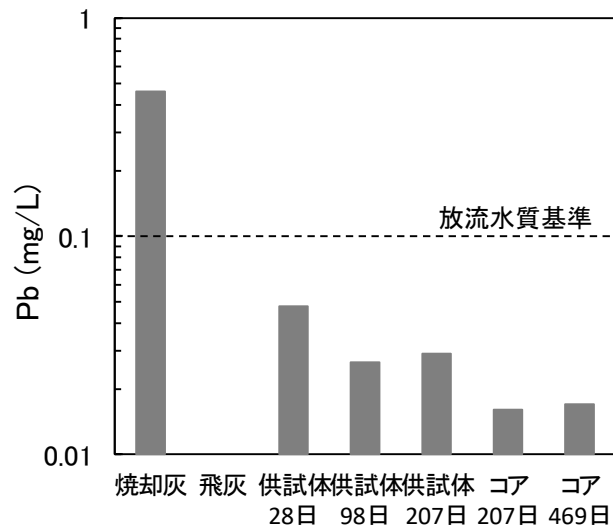


図 4.2.8 固化体の鉛溶出濃度

#### (4) 固化式処分埋立地盤の孔隙構造

##### a) 深度方向のマクロ孔隙率分布

図 4.2.9 に材齢 207 日のボーリングコアサンプル（以下、コアサンプルと呼ぶ。）のマイクロ X 線 CT 画像の代表例として深さ 5 cm 及び深さ 40 cm の画像を示す。また図 4.2.10 に同コアサンプルにおける地表からの深さとマクロ孔隙率の関係を示す。深さ 40 cm 付近の結果を除くとマクロ孔隙率は 2~8% を示し、深さとの間に相関は見られず、固化式処分の施工試験における振動締固めは深さによらず均質に行われていたことが示唆された。深さ 40 cm 付近のマクロ孔隙率は 8~25% と大きかったが、このような結果となったのは、施工の際、時期が夏季であり添加した水分が短時間に多量に蒸発しうる環境にあったのに加え、混練から締固めまでの時間が他の層に比べて長くなってしまったことが原因で、乾燥に伴う水粉体比の低下により密実に締固まらなかったためと考えられた。固化式処分の施工時においては混練後に速やかに振動締固めによる固化式処分を行う必要性が示された。



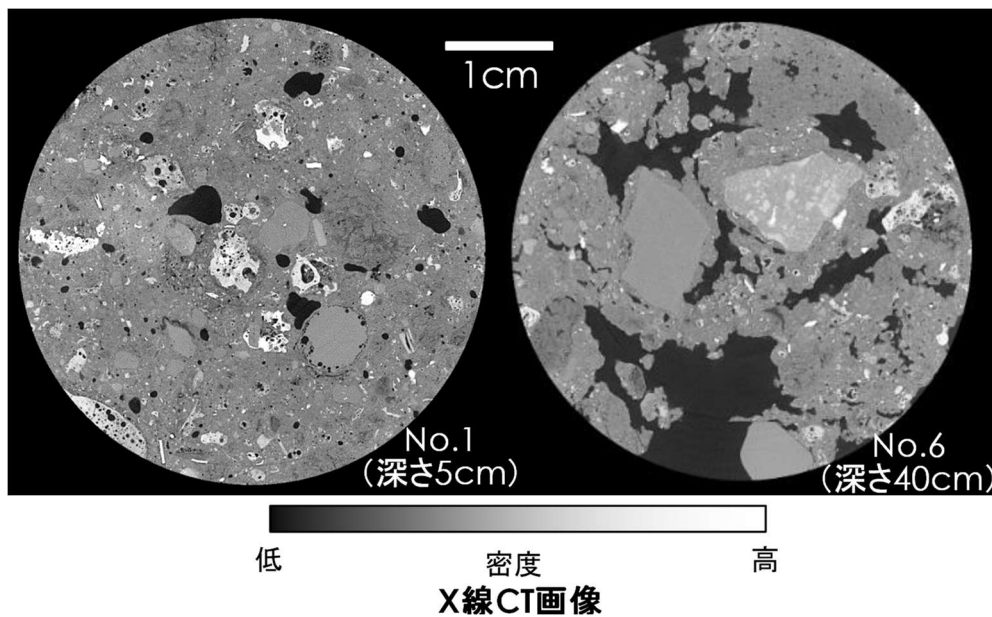


図 4.2.9 マイクロ X 線 CT 画像

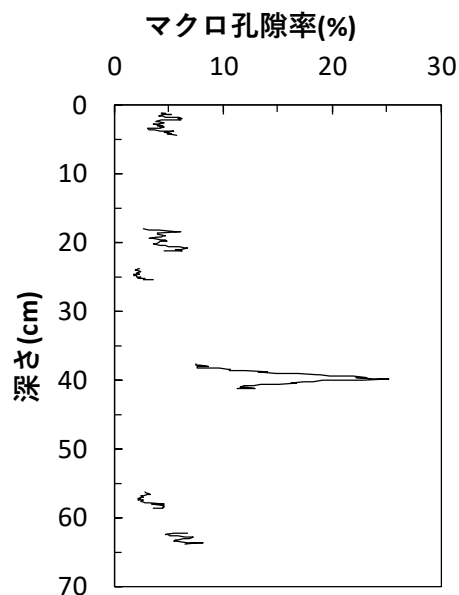


図 4.2.10 地表からの深さとマクロ孔隙率の関係

## b) マクロ孔隙の存在部位

焼却残渣粒子には清掃工場における焼却過程で形成された溶融体が保有するマクロ孔隙が存在する。また、セメントによる固化部には混練時に取り込まれたエントラップトエアや焼却残渣と水とセメントの反応により発生したガスが振動締固め時に抜けきれずに残留した孔隙が存在する。固化式処分の施工管理で減少を図ることができる後者の孔隙量（①固化部（焼却残渣粒子外）マクロ孔隙率）を把握するために、断面内のマクロ孔隙量（②マクロ孔隙率）を求めるとともに、同断面内で焼却残渣粒子を目視で抽出し、それ以外の部分を削除した画像においてマクロ孔隙量（③焼却残渣内マクロ孔隙率）を求め、②から③を引くことで①を求めた。

図 4.2.11 に深度別のマクロ孔隙率及びその内訳を示す。マクロ孔隙率は、混練後すぐに振動締固めを行わず、含水率が低下したために締固め不良となった深度 40 cm では 12% と高い値を示したが、それ以外の深度（締固め良好部）では 3~6% を示した。固化部のマクロ孔隙率は深度により 2~11% とばらつきを示したが、

焼却残渣粒子内のマクロ孔隙率は、マクロ孔隙率の大小、深度、及び締固めの良好/不良に依らず1%前後であることが示された。

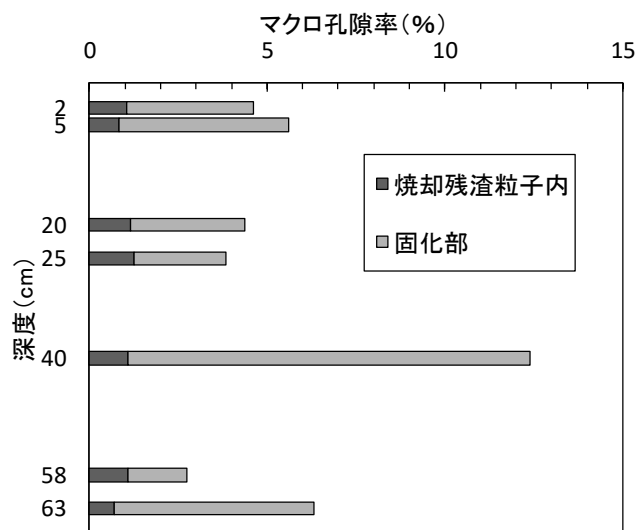


図 4.2.11 マクロ孔隙の存在部位別内訳

#### c) マクロ孔隙径分布

図 4.2.12 に材齢 207 日のコアサンプルの深度 20 cm 付近におけるマクロ孔隙の個数と孔隙径の関係、図 4.2.13 にマクロ孔隙の体積と孔隙径の関係を示す。同図内には、比較対象として一般的なセメント硬化体であるモルタルのデータ<sup>13)</sup>も示す。モルタルの配合は表 4.2.4 の通りである。コアサンプルにおいては、マクロ孔隙の数が最も多い孔隙径区分は 40~80  $\mu\text{m}$  であり、体積が最も多い孔隙径区分は 120~160  $\mu\text{m}$  であることが示された。モルタルと比較すると、コアサンプルの方が孔隙数、孔隙体積ともに多く、コアサンプルのマクロ孔隙数及びマクロ孔隙体積はそれぞれモルタルの 2.9 倍及び 24 倍であることが示された。

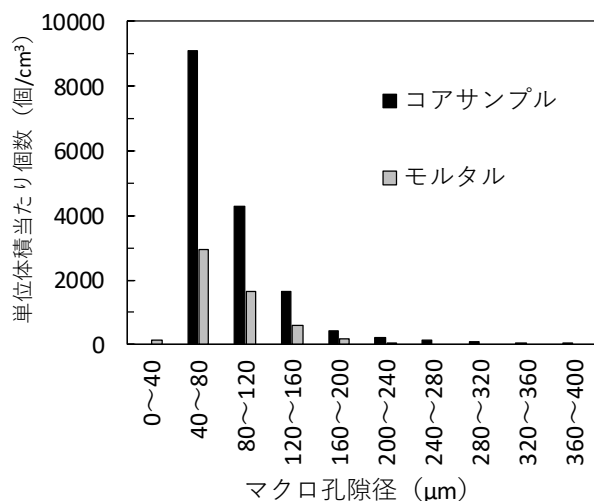


図 4.2.12 マクロ孔隙の個数と孔隙径の関係

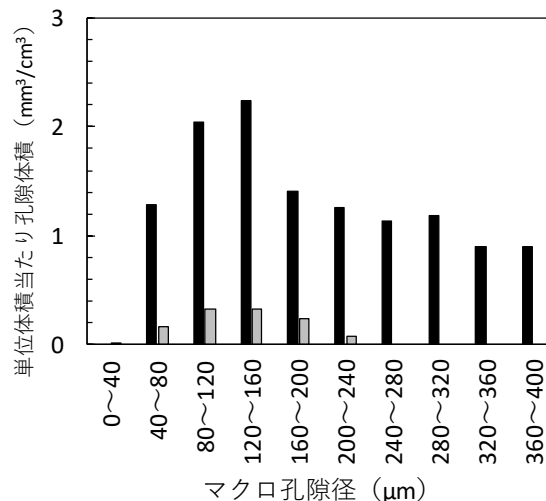


図 4.2.13 マクロ孔隙の体積と孔隙径の関係

表 4.2.4 杉山ら<sup>5)</sup>のモルタルの配合

粉体配合率 (質量%)		水粉体比 (%)	水結合剤比 (%)
細骨材	セメント		
71	29	14	50

※微量の消泡剤を添加

## d) ミクロ孔隙径分布

図 4.2.14 に 461 日目に採取されたボーリングコアサンプルの水銀圧入試験結果を示す。どの深度の試料もミクロ孔隙容積は  $0.125 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  程度であった。ミクロ孔隙の最頻径は  $30\sim 60 \text{ nm}$  程度であることが示された。図 4.2.15 に深度別のミクロ孔隙率を示す。ここで、ミクロ孔隙率はミクロ孔隙径区分ごとに示している。どの深度においてもミクロ孔隙率は 13-14% 前後であることが示された。

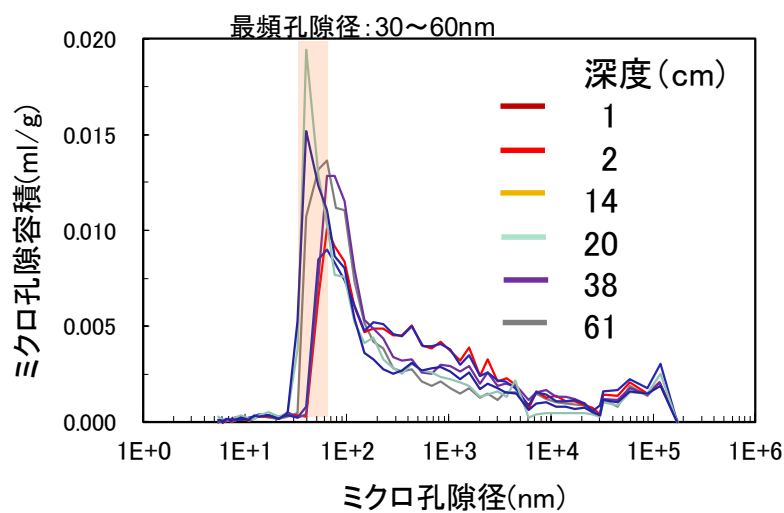


図 4.2.14 ミクロ孔隙径分布

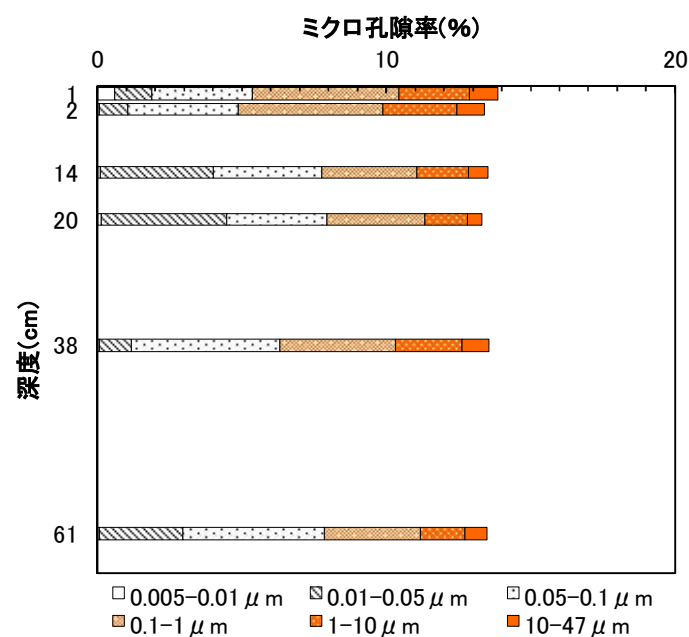


図 4.2.15 深度とミクロ孔隙率の関係

### 4. 3 耐久性及び環境影響評価

#### (1) 固化式処分が遮水シートに及ぼす影響

埋立模型槽を用いた施工試験ケース 2 (固化式) の埋立地盤の振動締め固め時に遮水シートに発生したひずみの測定例を図 4.3.1 に示す。振動締め固め時間は 1 か所当たり 15~30 秒で、ひずみは底面保護土の下 (S1~S4) で大きい、最大でも 2,000  $\mu$  程度であった。ひずみの測定値は、振動板と遮水シートの距離が最も短かった埋立層厚が最小の 10 cm の時であっても、埋立層厚が厚い時と同程度であった。ひずみの最大値 (2,000  $\mu$  程度) は遮水シートの引張性能 (伸び率 400% = ひずみ 4,000,000  $\mu$ ) の 0.05% 程度であり、発生したひずみは特に問題はないことが確認された。また、底面と法面の境界部やシート固定部付近においても特に大きなひずみは発生しなかった。

図 4.3.2 に施工後 16 か月間の遮水シートのひずみの測定結果を示す。施工後のひずみは初期値と同程度の値を示し、ひずみは施工後の長期間においても特に問題となる値を示さないことが確認された。

以上のように、固化式処分の施工が遮水シートの耐久性に悪影響を及ぼすことはないことが確認された。

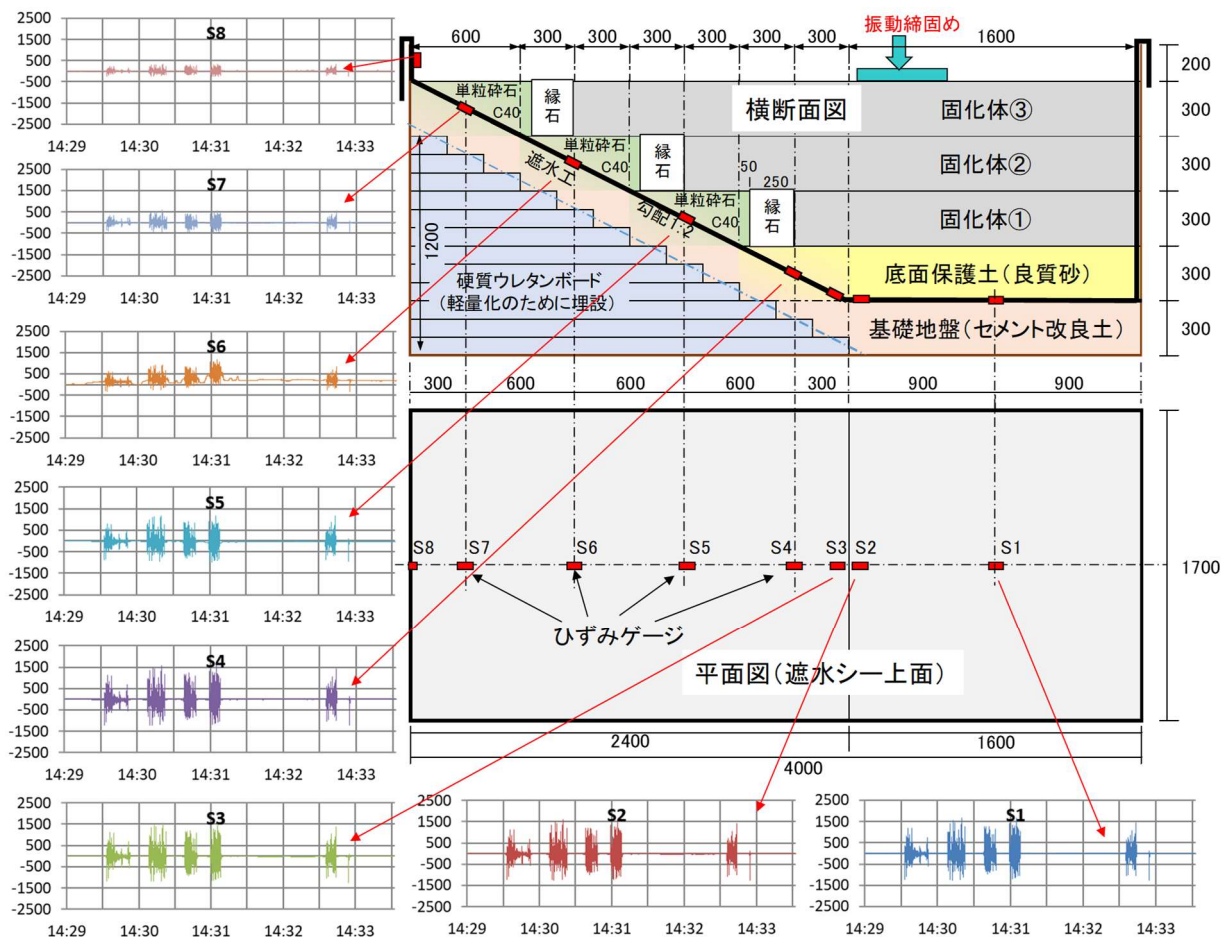


図 4.3.1 固化式処分の施工時 (振動締め固め時) の遮水シートのひずみ測定結果の一例  
(ひずみ時刻歴波形グラフの横軸は時刻 (時:分), 縦軸はひずみ ( $\mu$ ))

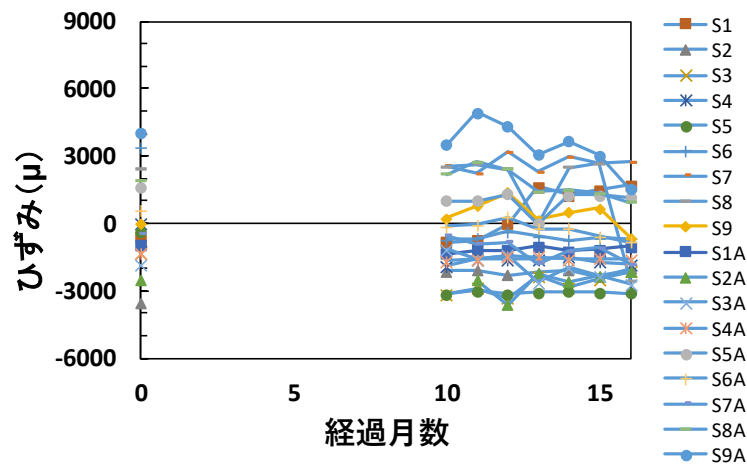


図 4.3.2 施工後の遮水シートのひずみ

## (2) 固化式処分埋立地盤における未燃分腐敗の可能性及び内部ガス圧による破壊の可能性

### a) 未燃分腐敗の可能性に関する検討

一般細菌数を測定した結果、2,000～3,000 CFU/g という結果が得られた。固化式処分埋立地盤にも一定数の細菌が棲息していることが示唆された。ただし、細菌数測定においては一般にコロニー数が 20～200 の物を用いて細菌数を計算するのに対し、本測定におけるコロニー数は 2～3 であった。そのため、本測定で求めた細菌数の計数精度は高くないものと考えられた。

間隙水の TOC 成分測定結果は 530 mg/L であった。TOC 成分量に関しては一定の量が確認されたため、固化式処分埋立地盤において微生物が活動できる可能性が示唆された。

### b) 内部ガス圧による固化体破壊の可能性に関する検討

図 4.3.3 に  $z = d/2$  におけるガス圧力の経時変化を示す。これは分解時間を 3 年、埋立地深さを 20 m に固定し、透気係数 3 パターンについての計算結果である。最も圧力が上昇した透気係数が 0.1K\* の場合では、ガス圧力の最大値は 1264 hPa となった。透気係数が 10 K\* の場合ではガス圧力の上昇はほとんど見られなかった。

図 4.3.4 に  $z = d/2$  における最大ガス圧力(分解完了時)と埋立地の深さの関係を示す。ここでは分解時間を 3 年に固定した。埋立地が深いほど、大気との界面からの距離が長いので、埋立地内にガスが溜まるという結果になった。最大の圧力を示した深さ 40 m、透気係数 0.1K\* のケースにおける最大の圧力は 1629 hPa となった。

図 4.3.5 に  $z=d/2$  における最大ガス圧力(分解完了時)と TOC 成分の分解速度の関係を示す。ここでは埋立地の深さを 20 m に固定した。分解速度が速い、すなわち分解時間が短いほど圧力が高くなった。最大の圧力を示した分解時間 1 年、透気係数 0.1K\* のケースにおける最大の圧力は 1609 hPa となった。

固化体破壊の可能性については、ともに圧力の次元を持つ固化体の強度とガス圧力の大小関係で議論ができると考えられる。ガス圧によるコンクリートの破壊の検討で用いる強度としては引張強度が妥当である<sup>14)</sup>。本研究における固化体作製の目標圧縮強度は 5.0 N/mm<sup>2</sup> であるが、これを圧縮強度と引張強度の関係式<sup>15)</sup>を用いて引張強度に換算すると 0.67 N/mm<sup>2</sup> (6700 hPa) となった。本研究における固化体内部のガス圧力の最大値は 1629 hPa であり、固化体作製における目標引張強度 0.67 N/mm<sup>2</sup> (=6700 hPa) の約 24% であった。このことから、未燃分の分解に伴うガス発生によって固化体にひび割れ等の破壊が生じることはないと考えられた。

本研究では焼却残渣固化体の破壊の可能性の検討を目的とした。焼却残渣固化体中の有機物の分解速度については、一定期間で有機物の全量が分解されるという速度設定を行ったが、実際の分解速度は本研究の想定よりもかなり遅いものと考えられる。しかしながら、より短期間に多くのガスが発生するという条件で行われたシミュレーションにおいても、破壊に至らないと結論付けられたため、実際の固化式処分場では破壊に至ることは限りなく低いという事が考えられた。

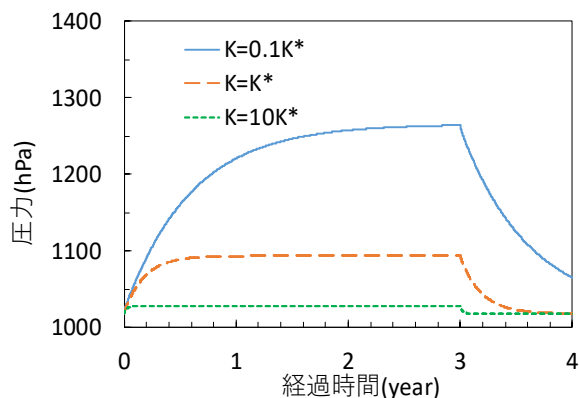


図 4.3.3 最大ガス圧力の経時変化  
(分解時間 3 年、埋立地深さ 20m に固定)

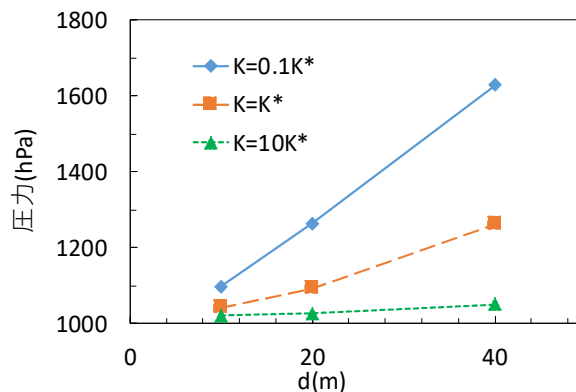


図 4.3.4 最大ガス圧力と埋立地深さの関係  
(分解時間 3 年に固定)

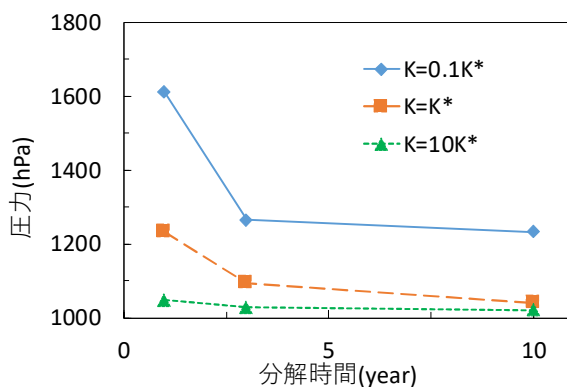


図 4.3.5 最大ガス圧力と TOC 成分の分解速度の関係  
(埋立地深さ 20m に固定)

### (3) 長期屋外曝露の影響

#### a) ポップアウトの発生

固化式埋立模型槽の施工から 133 日経過時点において、埋立地盤の表層にポップアウトが多数発生していた。図 4.3.6 にポップアウトの写真を示す。ポップアウト部を取り出すと、その中心部に白色物質の生成が観察された。白色部と白色化していない箇所について、X 線回折分析を行った。

同定された鉱物を表 4.3.1 に示す。非白色部では Calcite、Quartz、Gehlenite が同定された。これらの鉱物は一般廃棄物焼却残渣に一般的に存在するものである。ポップアウト現象の要因と考えられている白色部で同定された特徴的な鉱物としては Zincite、Montmorillonite、Gypsum が挙げられた。

白色部の X 線回折強度をみると、Zincite が高強度であった。しかし、この鉱物は紅色をしており白色鉱物とは関連がないと考えられた。白色鉱物の周りに紅色に近い色の鉱物が確認され、この鉱物が Zincite であると示唆された。また、Zincite がポップアウトの原因物質になりうるという報告は見られなかった。

Montmorillonite は特定の層状の結晶構造を有する粘土鉱物であり、乾湿の繰り返しの伴って膨張・収縮が起こりポップアウトを生じさせることが知られている。またこの鉱物は白色であるため、固化式処分埋立地盤のポップアウトの原因物質である可能性が示唆された。

Gypsum が主に生成され、問題となるのは下水処理施設や温泉地等の硫酸イオンの存在する環境におけるコンクリート構造物である。硫酸劣化のメカニズムはコンクリート構造物のセメント水和物と硫酸イオンとの反応によって膨張性を呈する Gypsum が析出し、やがて膨張破壊が起こるというものである。この鉱物は粉体の状態であれば白色を呈することから、固化式処分埋立地盤のポップアウトの原因物質である可能性が示唆された。

以上のように、ポップアウトの原因物質として Montmorillonite または Gypsum が示唆された。固化式処分埋立地盤が長期間屋外曝露を受ける際には表面を保護する必要性が示された。

#### b) 深度による鉱物組成の相違

固化式処分埋立地盤の X 線回折分析によって同定された鉱物として、Calcite、Quartz、Hydrocalumite、Halite、Gehlenite が挙げられた。図 4.3.7 に Calcite を除く鉱物の X 線回折強度と深度の関係を示す。

Calcite は、表層のみ強度が非常に高くなっており、それ以深では強度は 700 前後と一定となっている。この現象の要因として、固化式埋立地盤の炭酸化が考えられる。炭酸化とはカルシウム成分が大気中の二酸化炭素と反応し炭酸カルシウム (Calcite) に変化する現象であり、固化式埋立地盤の表層が大気中の二酸化炭素と反応したものと考えられる。表層以深では表層と比べて強度が高くなっていないことから、固化式埋立地盤の低透気性が示唆された。なお、コンクリート分野においては、炭酸化による鉄筋の腐食が問題とされる。しかし、固化式処分システムでは鉄筋を用いることはないため、炭酸化は問題にならないと考えられた。



図 4.3.6 固化式処分埋立地盤の表層のポップアウト

表 4.3.1 非白色部 (A) と白色部 (B) に同定された鉱物

Frequency	Mineral	Chemical formula	Existence	
			A	B
Major	Calcite (1)	$\text{CaCO}_3$	*	*
	Zincite (2)	$\text{ZnO}$		*
Minor	Hydrocalumite (3)	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Cl}_{1-x}(\text{OH})_x] \cdot 3(\text{H}_2\text{O})$		*
	Quartz (4)	$\text{SiO}_2$	*	*
	Gehlenite (5)	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$	*	*
	Halite (6)	$\text{NaCl}$		
	Montmorillonite (7)	$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		*
	Gypsum (8)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		*

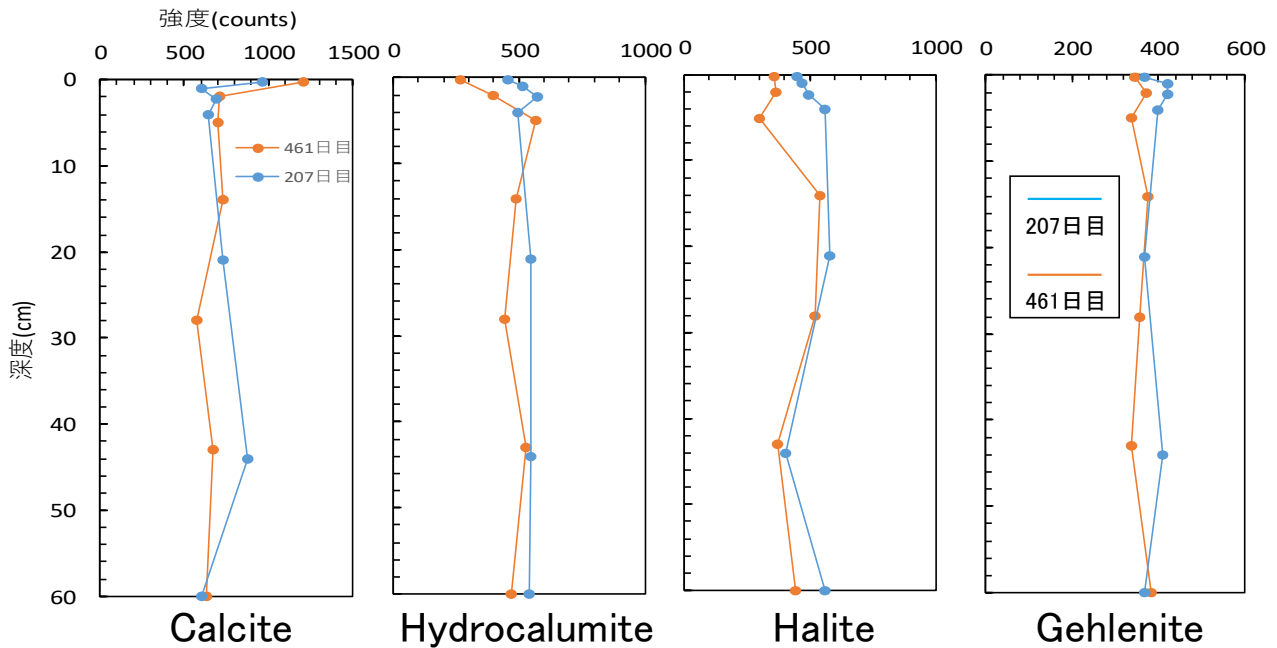


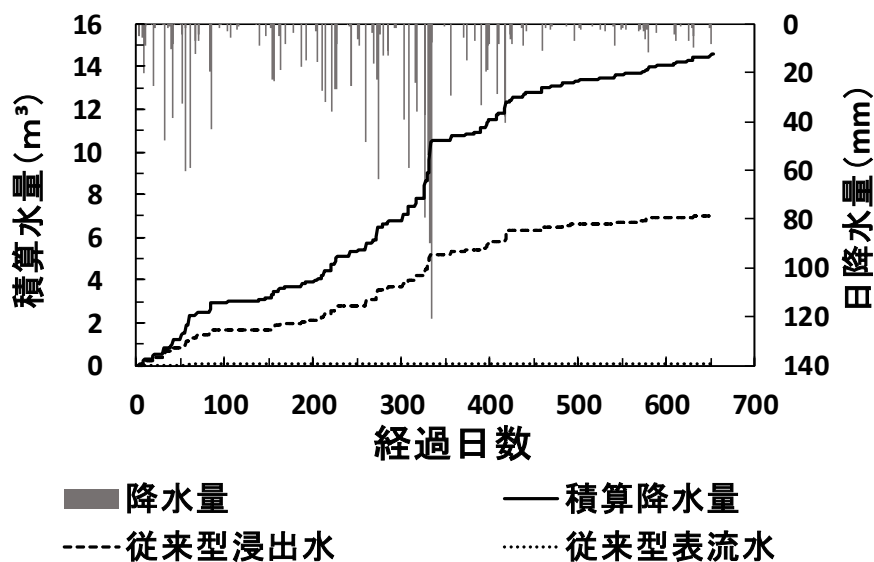
図 4.3.7 各鉱物の X 線回折強度と深度の関係

#### (4) 水収支

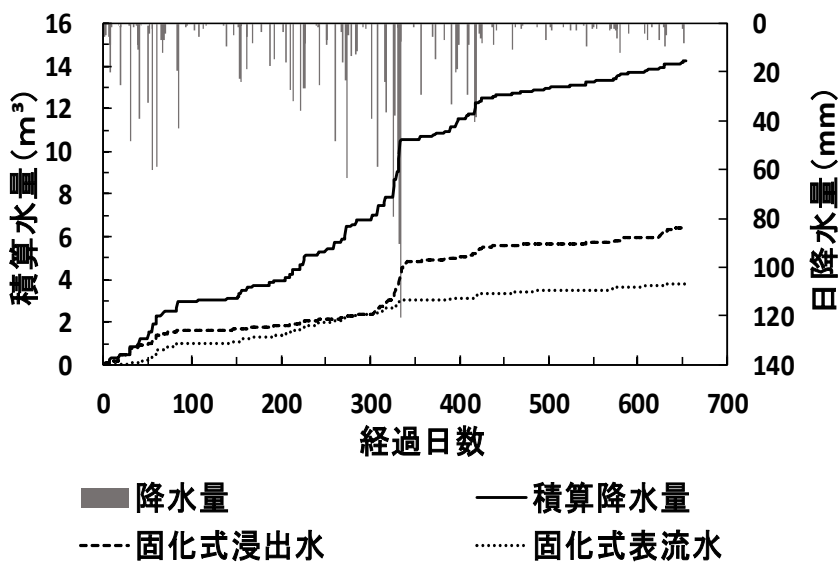
図 4.3.8 に従来型及び固化式埋立模型槽における降水量及び発生水量の経時変化を示す。また、表 4.3.2 に 650 日間の水収支（積算降水量に対する積算表流量または積算浸出水量の百分率）を示す。蒸発量は、降水量から表流量及び浸出水量を引いて求めたものである。

従来型では表流水の発生はほとんどなく、降水は覆土層内へと浸透し、その浸透水の約半数は蒸発し、残りの約半数は焼却残渣層へと浸透したものと考えられる。従来型の浸出係数（降水量に対する水処理量（＝表流水＋浸出水）の割合）は 49% であり、この浸出係数は従来型の処分場における一般的な浸出係数と同程度である。一方、固化式における浸出係数は 72% であり、従来型よりも高い値を示した。これは固化式埋立地盤が実質上不透水層であるため、降水が埋立地盤内に浸透せず、その多くは埋立地盤の表面上を勾配に沿って流下し、その後表流水集水管または浸出水集水管へと流出するためである。固化式の埋立地盤が実質上不透水層であれば、浸出係数が 100% 近くになっても良いと考えられるが、実際には埋立地盤の表面には細かい凹凸があり、またポップアウトが発生した場合には亀裂があり、降水量が少ない場合には、降水がそれらの凹凸や亀裂に降水に浸込んで保水され、非雨天時に蒸発しているものと考えられる。





a) 従来型



b) 固化式

図 4.3.8 降水量及び発生水量の経時変化

表 4.3.2 650 日間の水収支 (単位: %)

	表流水	浸出水	蒸発量
固化式	26.8	45.2	28.0
従来型	0.004	49.1	50.9

#### (5) 表流水及び浸出水の水質

図 4.3.9 に固化式及び従来型埋立模型槽の表流水及び浸出水の水質のうち、放流水質基準の超過が見られた pH 及び Pb 濃度を示す。pH 及び Pb 濃度以外は、放流水質基準を満足した。

固化式の表流水の水質をみると、実験開始から 90 日目付近までの実験初期において pH 及び鉛濃度の基準超過が見られたが、それ以降、pH、鉛濃度ともに放流水質基準を満足した。

次に固化式の浸出水の水質を見る。まず鉛濃度は、実験開始から 50 日目付近までの実験初期を除けば、放流水質基準を満足した。

pHは、時間の経過とともに上昇する傾向を示し、特に300日目付近で急激な上昇を示し、それ以降も上昇傾向を示し続けた。ここで、固化式の浸出水については、「浸出水」と称しているが、実際には碎石層に入り、碎石層及び保護土層を通過して、浸出水集水管から流出した「表流水」である。そのため、固化式の浸出水の水質は表流水集水管から流出する表流水と同様の傾向を示すと当初予想されが、100日目付近以降、表流水と浸出水のpHには大きな差が生じた。関連する現象として、浸出水の流出応答は、300日目付近から大幅に遅くなった。その後、固化式埋立模型槽の側面の一部を外し、内部を観察したところ、保護土層が硬化していたことが確認された。以上を踏まえると、固化式の浸出水のpHが上昇傾向を示した原因として、硬化した保護土層の中を水が通過したことが考えられる。具体的には、以下の①～③の現象が起きたものと考えられた：①長期間曝露によって固化式埋立地盤の表層にポップアウトが発生したために、表流水に固化式埋立地盤の細粒分やセメント成分が混入した。②その表流水が保護土層に流入して細粒分やセメント成分が保護土層で捕捉・集積され、保護土層の硬化及び空隙の目詰まり（スケーリング）が生じた。③保護土層の透水性の低下により、保護土層における浸透水の滞留時間が長くなり、硬化した保護土層のアルカリ分が浸透水に移行し、その水が浸出水として流出したためにpHが高くなった。

このように、固化式埋立地盤の表流水が保護土層のような多孔質体に浸透すると、多孔質体の目詰まりが生じ、さらには浸透水のpHの上昇などの問題を生じることが示された。その一方、固化式埋立地盤の表面上から直接表流水集水管に流入した表流水の水質は、上述のように実験初期を除き、放流水質基準を満たした。上記2点を踏まえると、固化式処分場における表流水の管理において、表流水が孔隙の比較的小さな多孔質体内を浸透することのないように管理することの重要性が示唆された。

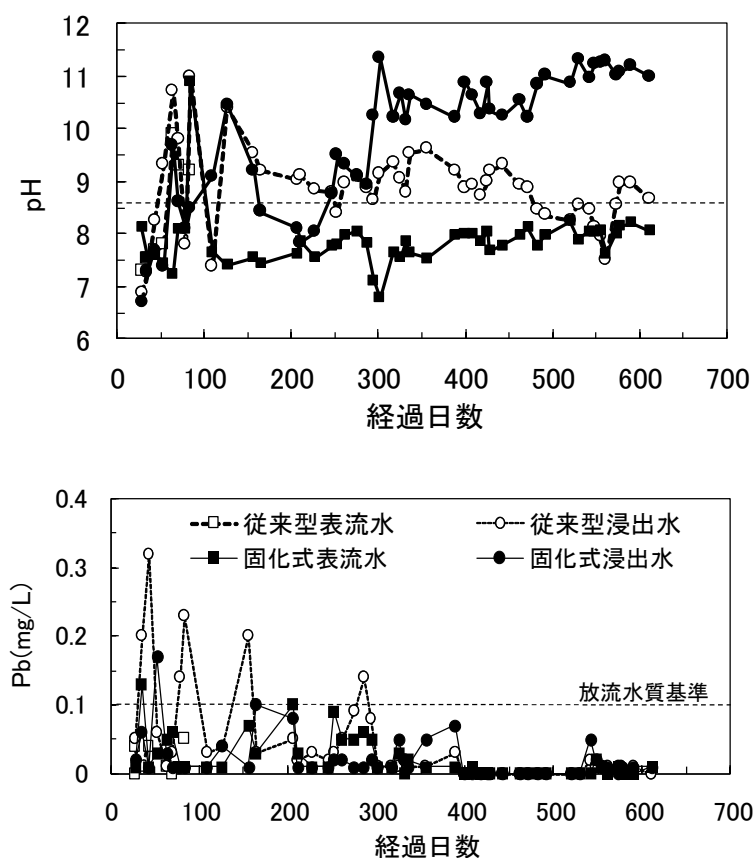


図 4.3.9 表流水及び浸出水の pH 及び鉛濃度

## (6) 間隙水の水質

表 4.3.3 にボーリングコアサンプルから圧搾抽出された間隙水（細孔溶液）の水質を示す。放流水質基準と比較すると、pH、鉛、セレン、水銀、フッ素について、放流水質基準値の超過が見られた。固化式処分埋立地盤は実質上不透水層であるため、間隙水が外部へ流出することは考えられないものの、間隙水は放流水質基準を満足するものではないことが確認された。

表 4.3.3 間隙水の水質

項目	単位	98日目	207日目	461日目	放流水質基準
pH	-	11.3	11.1	11.3	5.0~9.0
鉛	mg/L	0.23	0.82	0.46	0.1
セレン		1	2.5	0.05	0.1
全水銀		0.0018	0.019	0.0039	0.005
ふっ素化合物		< 0.08	24	-	8
カドミウム		0.048	0.037	0.014	0.1
ひ素		0.064	0.069	0.007	0.1
全シアン		< 0.1	< 0.1	< 0.1	1
全有機炭素		530	530	580	-
全窒素		190	88	-	-

## (7) ガス組成

表 4.3.4 に密閉して一定期間経過後のボーリング孔内のガス組成を示す。N<sub>2</sub>は82%程度、O<sub>2</sub>は17%程度、H<sub>2</sub>が1%程度を示し、CO<sub>2</sub>及びCH<sub>4</sub>は0%であった。この組成は大気組成に近いものであり、埋立ガスが活発に発生している様子は見られなかった。一方、大気組成に比べてO<sub>2</sub>がやや低いこと、H<sub>2</sub>が検出されていることが特徴として挙げられる。埋立地盤内では少量ながらO<sub>2</sub>が消費されていること、微量ながら水素ガスが発生していることが推察された。

表 4.3.4 ガス組成

項目	単位	119日目		147日目		186日目		304日目			482日目
		#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#3	#2
N <sub>2</sub>	%	82.4	82.9	81.2	79.9	82.7	82.2	81.9	83.5	82.7	80.0
O <sub>2</sub>		16.8	16.2	18.5	19.8	16.5	17.3	18.0	16.5	17.3	18.5
H <sub>2</sub>		0.7	0.9	0.3	0.4	0.8	0.6	0.1	0.0	0.0	1.5
CO <sub>2</sub>		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CH <sub>4</sub>		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
合計		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

#1、#2、#3はボーリング孔の番号であり、それぞれ28日、96日、207日強度測定用のボーリング孔

#### 4. 4 経済性評価

表 4.4.1 及び図 4.4.1 にライフサイクルコスト (LCC) の算出結果を示す。ここでは、埋立容量 10 万 m<sup>3</sup> のケースに加え、埋立容量 100 万 m<sup>3</sup> のケースについてもライフサイクルコストを算出したので、その結果も示す。ケース名の「従来型 1」及び「固化式 1」はそれぞれ埋立容量 10 万 m<sup>3</sup> の従来型処分場及び固化式処分場、「従来型 2」及び「固化式 2」はそれぞれ埋立容量 100 万 m<sup>3</sup> の従来型処分場及び固化式処分場を指す。

従来型処分場は固化式処分場より浸出水に関するコスト（浸出水処理施設建設費、薬品費、埋立終了後の浸出水処理費）が主に大きくなった。これは、従来型処分場の方が浸出水量が多いためである。一方、固化式処分場では重機に関するコスト（重機購入費、燃料費、整備補修費）が主に大きくなった。これは、固化式処分場の方が必要な重機の量が多いためである。また、バッチャープラントやセメント、水などが必要なこともトータルのコストを大きくする一因となっている。ただし本研究ではバッチャープラントの整備工事費に 0.6 乗則を用いているためスケールメリットが働きにくい、固化式処分場での必要人員や重機の台数、浸出水量、維持管理期間を過剰に設定している可能性がある。埋立容量 10 万 m<sup>3</sup> のケースで 7.68%、埋立容量 100 万 m<sup>3</sup> のケースで 5.09% 小さくなった。

表 4.4.1 LCC 算出結果

項目	埋立容量10万m <sup>3</sup>				埋立容量100万m <sup>3</sup>					
	従来型1		固化式1		従来型2		固化式2			
	千円/t	%	千円/t	%	千円/t	%	千円/t	%		
イニシャルコスト	埋立地土木工事費	14.30	52.8	10.98	43.9	6.23	57.7	4.79	46.8	
	浸出水処理施設建設費	2.44	9.0	0.56	2.2	0.61	5.7	0.23	2.3	
	最終覆土工事費	0.14	0.5	0	0	0.14	1.3	0	0	
	重機購入費	0.91	3.3	3.36	13.4	0.18	1.7	0.34	3.3	
	バッチャープラント設備工事費	0	0	1.98	7.9	0	0	0.79	7.7	
	合計	17.79	65.7	16.88	67.5	7.16	66.3	6.15	60.0	
ランニングコスト	人件費	3.97	14.6	5.34	21.4	1.98	18.4	1.83	17.9	
	電力費	浸出水処理	0.04	0.1	0.00	0.0	0.02	0.2	0.00	0.0
		バッチャープラント	0	0	0.02	0.1	0	0	0.02	0.2
		ベルトコンベア	0	0	0.00	0.0	0	0	0.00	0.0
		合計	0.04	0.1	0.03	0.1	0.02	0.2	0.03	0.3
	燃料費	重機(軽油)	0.04	0.1	0.14	0.6	0.04	0.3	0.14	1.4
		浸出水処理(重油)	0.01	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
		合計	0.04	0.1	0.14	0.6	0.04	0.3	0.14	1.4
	薬品費	1.43	5.3	0.02	0.1	0.63	5.8	0.02	0.2	
	セメントおよび水の購入費	セメント	0	0	0.92	3.7	0	0	0.92	9.0
		水	0	0	0.06	0.3	0	0	0.06	0.6
		合計	0	0	0.99	3.9	0	0	0.99	9.6
	ダンパーによる運搬費	0	0	0.13	0.5	0	0	0.13	1.3	
	整備補修費	浸出水処理施設	0.98	3.6	0.22	0.9	0.24	2.3	0.09	0.9
		バッチャープラント	0	0	0.21	0.8	0	0	0.83	8.1
		ベルトコンベア	0	0	0.03	0.1	0	0	0.03	0.3
		(その他)重機	0.28	1.0	0.87	3.5	0.06	0.5	0.09	0.9
		合計	1.26	4.7	1.34	5.4	0.30	2.8	1.05	10.2
	埋立終了後の浸出水処理費	人件費	1.49	5.5	0.23	0.9	0.15	1.4	0.02	0.2
		電力費	0.01	0.0	0.00	0.0	0.01	0.1	0.00	0.0
燃料費		0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	
薬品費		0.32	1.2	0.00	0.0	0.32	3.0	0.00	0.0	
整備補修費		0.73	2.7	0.03	0.1	0.18	1.7	0.01	0.1	
合計		2.55	9.4	0.27	1.1	0.67	6.2	0.04	0.4	
合計	9.29	34.3	8.13	32.5	3.63	33.7	4.10	40.0		
合計	27.09	100.0	25.01	100.0	10.80	100.0	10.25	100.0		

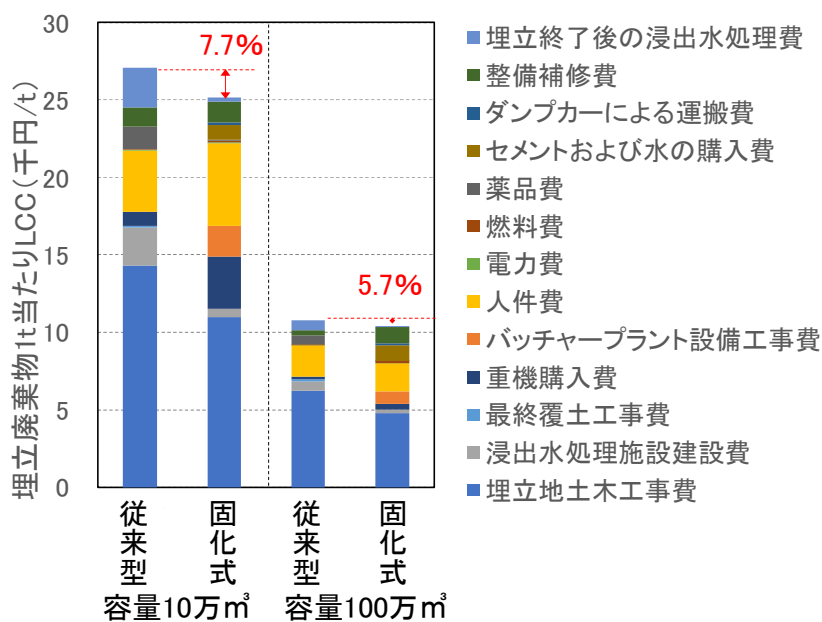


図 4.4.1 LCC の比較

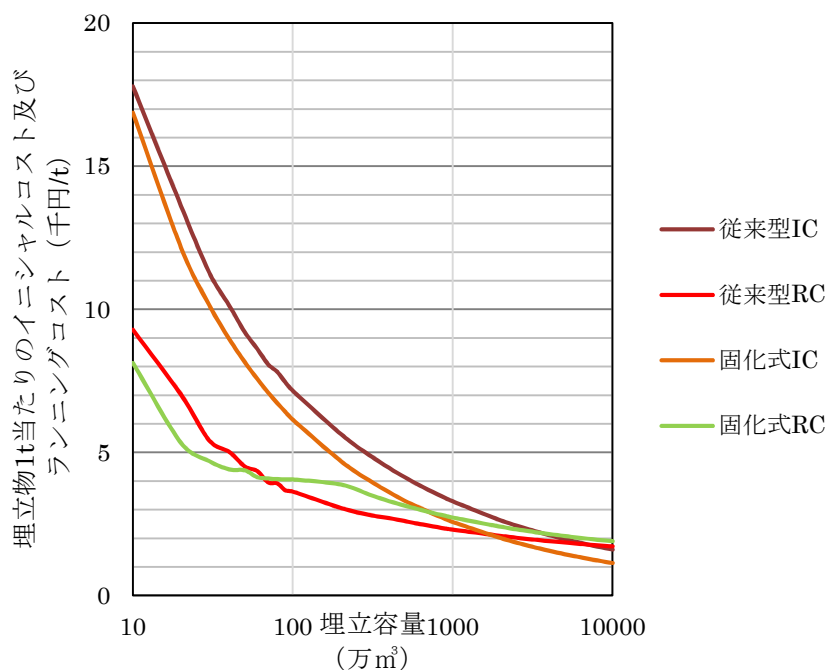


図 4.4.2 LCC と埋立容量の関係

図 4.4.2 に LCC と埋立容量の関係のグラフを示す。図中の「IC」及び「RC」はそれぞれイニシャルコスト及びランニングコストのことである。固化式処分場のランニングコストが埋立容量 100 万 m<sup>3</sup> のあたりで横ばいになった。これはバッチャープラントの処理能力を最低 30 m<sup>3</sup>/時とし、一日の作業時間が 8 時間を超える場合に 8 時間に収まるように処理能力を上昇させるように計算式を設定しており、埋立容量 100 万 m<sup>3</sup> 前後で処理能力が 30 m<sup>3</sup>/時のまま作業時間が増加しているため、電力費や整備補修費がかかるためである。埋立容量 300 万 m<sup>3</sup> あたりから作業時間が 8 時間で固定され処理能力が上昇するため、スケールメリットが再び働いている。

#### 4. 5 まとめ：研究目標達成度

表 4.5.1 に本研究の目標とそれに対する達成度の自己評価を示す。

表 4.5.1 研究目標に対する達成度

研究目標	達成度
(1) 柔軟な埋立用材の調整システムの構築(埋立対象となる焼却残渣の性状変化に対応できる前処理及び配合システムの構築)	<ul style="list-style-type: none"> <li>前処理システム(混練不適物の除去)の確立とともに、性状が変動する焼却残渣に対して最適示方配合を決定する手法の確立を行った。</li> <li>以上のことから、目標(1)を達成したと評価される。</li> </ul>
(2) 高い施工性(日々搬入される大量かつ性状が変動する焼却残渣を効率的に固化処分できる施工性)、強固な埋立地盤構築(≧5 N/mm <sup>2</sup> 、地盤改良なしで重機が走行できるトラフィカビリティを有し、また災害廃棄物の選別、仮設処理施設等の構造物を設置できる支持力を有する地盤)、埋立地の延命化のための減容効果(≧20%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用的な施工手順を確立するとともに、一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工が問題なく可能であることを実証した。</li> <li>埋立地盤の強度(7.2 N/mm<sup>2</sup>)及び減容化率(23%)は開発目標を達成した。</li> <li>以上のことから、目標(2)を達成したと評価される。</li> </ul>
(3) 耐久性(長期耐久性を有する埋立地盤)と環境影響評価(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。)	<ul style="list-style-type: none"> <li>長期間屋外曝露された表層(厚さ数 cm)においてはポップアウトの発生などの劣化が認められ、埋立地盤の表面が長期間屋外曝露される場合には表面保護の必要があることが確認された。</li> <li>一方、表層数 cm 以深の大部分の埋立地盤については、劣化は認められず、強度は時間とともに増加し、長期耐久性が確認された。</li> <li>埋立地盤が実質上不透水層である固化式処分場における水処理の対象は表流水であり、その表流水の水質は埋立後 90 日程度で放流水質基準を満足することを実証した。</li> <li>以上のことから、目標(3)を達成したと評価される。</li> </ul>
(4) 経済性(従来型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)	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来型処分場と固化式処分場のライフサイクルコストを算定し、固化式処分は従来型処分よりも経済的に有利であることを示した。</li> <li>以上のことから、目標(4)を達成したと評価される。</li> </ul>

目標(1)「柔軟な埋立用材の調整システムの構築」については、前処理システムの確立とともに、性状が変動する焼却残渣に対して最適示方配合を決定する手法の確立を行ったことから、目標(1)を達成したと評価される。

目標(2)「高い施工性、強固な埋立地盤構築(≧5 N/mm<sup>2</sup>)、埋立地の延命化のための減容効果(≧20%)」については、実用的な施工手順を確立するとともに、一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工が問題なく可能であることを実証した。さらに埋立地盤の強度(7.2 N/mm<sup>2</sup>)及び減容化率(23%)は開発目標を達成した。以上のことから、目標(2)を達成したと評価される。

目標(3)「耐久性(長期耐久性を有する埋立地盤)と環境影響評価(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)」については、長期間屋外曝露された表層(厚さ数 cm)においてはポップアウトの発生などの劣化が認められ、埋立地盤の表面が長期間屋外曝露される場合には表面保護の必要があることが確認された。一方、表層数 cm 以深の大部分の埋立地盤については、劣化は認められず、強度は時間とともに増加し、長期耐久性が確認された。さらに、埋立地盤が実質上不透水層である固化式処分場における水処理の対象は表流水であり、その表流水の水質は埋立後 90 日程度で放流水質基準を満足することを実証した。以上のことから、目標(3)を達成したと評価される。

目標(4)「経済性(従来型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)」については、従来型処分場と固化式処分場のライフサイクルコストを算定し、固化式処分は従来型処分よりも経済的に有利であることを示した。以上のことから、目標(4)を達成したと評価される。

今後の課題として、実際の処分場において固化式処分を行うにあたっての課題がいくつか挙げられる。

一つ目は、示方配合の決定速度である。性状が変動する焼却残渣に対して最適示方配合を決定する手法は確立されたが、実現場において求められる速度で示方配合を決定することができるのかはまだ実証できていない。今後、実際の処分場での固化式処分の実証試験等を行い、開発目標を達成しつつ、効率よく示方配合を決定できるシステムを確立することが求められる。

二つ目は、バッチャープラントの設計である。固化式処分システムにおいては、焼却残渣とセメントと水を効率よく混練するためのバッチャープラントが必要となる。本研究において実規模のバッチャープラントの試設計を行った。今後、実際の処分場での固化式処分の実証試験等を行い、固化式処分の施工方法を確立した上で、要求される施工能力に適合したコンパクトなプラントの設計が求められる。

三つ目は、埋立作業計画である。埋立地盤が長期間屋外曝露を受けると表層劣化が生じることが確認された。埋立地盤の表面が長期間風雨や日射に曝されることのない埋立作業計画や、表面が長期間曝露される場合には表面の保護を行うことが求められる。今後、実際の処分場においてこれらの点を考慮した固化式処分の実証試験等を行い、固化式処分の埋立作業計画立案マニュアルの作成が求められる。

四つ目は、表流水の集水方法と水処理施設の検討である。従来型の処分場では降水の多くが埋立地盤に浸透するのに対し、固化式処分場では、埋立地盤が実質上不透水層であることから、降水量の多く(約7割)が表流水となる。従来型処分場とは水収支が異なる固化式処分場における表流水の集水方法を検討する必要がある。また、固化式処分場の表流水の水量及び水質に応じた水処理施設の検討も求められる。

上記の四点を含む今後の課題については、環境研究総合推進費補助金(次世代事業)「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」(令和2年度～令和4年度)による継続研究において、解決を図り、固化式処分システムの社会実装を目指す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究により得られた成果の科学的意義を以下に示す。

#### 課題 1：埋立用材の調整

- ・焼却残渣から混練不適物を除去する固化式処分の前処理における焼却残渣の選別率及び選別速度を実証試験により明らかにしたこと
- ・一般廃棄物焼却残渣の固化式処分における最適な配合の含水比は振動締固め試験の最適含水比（乾燥密度が最大となる含水比）+1～4%であることを明らかにし、変動する一般廃棄物焼却残渣の性状に応じた最適示方配合の決定手法を確立したこと
- ・産業廃棄物焼却残渣であってもセメント添加率を 20%にすることで固化式処分が可能であることや、石炭灰の添加によってセメント添加率の削減や有害物質溶出量の大幅な低減を図れることを明らかにしたこと

#### 課題 2：施工性と埋立地盤特性

- ・一般廃棄物焼却残渣の固化式処分の施工は問題なく可能であることを実証したこと
- ・固化式処分場の埋立地盤は開発目標（減容効果、一軸圧縮強度、透水係数、有害物質溶出量）を達成することを実証したこと

#### 課題 3：耐久性と環境影響評価

- ・埋立地盤は長期間屋外曝露されると表層にポップアウトが発生することを明らかにしたこと
- ・固化式処分場における水処理量は降水量の約 7 割であること、表流水は埋立初期を除いて放流水質基準を満足すること、埋立ガスの発生はないことを明らかにしたこと

#### 課題 4：経済性評価

- ・最終処分場のライフサイクルコストの観点から固化式処分システムは従来型処分に比べて経済的に有利であることを明らかにしたこと

### (2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

固化式処分システムを適用した固化式処分場は、(1)強固な埋立地盤による高い耐震性を有し、(2)埋立地盤の減容化により埋立容量の消費を低減し、(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を短縮し、(4)維持管理費を低減でき、(5)跡地を早期かつ高度に利用することができる。特に、(1)から(5)により、震災発生時には地盤改良等を行うことなく直ちに固化式処分場を災害廃棄物の中間処理施設（二次仮置場、仮設処理施設）の用地として活用でき、迅速な復旧復興に資するレジリエントな廃棄物処理システムの構築が可能であり、行政ニーズは極めて高い。

また、社会的受容性の高い固化式処分システムの実現により、最終処分場は過疎地につくる迷惑施設から、都市型処分場へと移行する。廃棄物の発生地点と終着地点の距離が短くなり、受益と受苦の乖離の解消にも寄与する。立地条件が良い都市型の固化式処分場において創出された環境安全かつ強固な土地の価値は高く、高度な跡地利用により経済的便益を生み出すことができる。固化式処分場の跡地には、中間処理施設を建設することもできる。固化式処分場は地域循環圏の拠点として効率的な廃棄物処理にも貢献する。固化式処分システムの社会実装により、廃棄物処分事業は、環境安全かつ強靱な地盤を創造する革新的な事業となる。



## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分における振動締固めに関する基礎的研究, 第13回環境地盤工学シンポジウム, pp.275-280, 2019.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Yousuke Hakata, Teppei Komiya, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka: Influence of microbial activity in micro pores on durability of cement-solidified solid waste incineration residues, Proceedings of The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, pp.158-160, 2018.
- 2) Takeru SARUWATARI, Teppei KOMIYA, Hirofumi NAKAYAMA, Takayuki SHIMAOKA, Isamu SANDAMBATA, Takahiro AOKI, Tatsufumi NISHIO, Hiroyuki AKITA, Fuminori HIROSUE: Demonstrational Experiment on Cement-Solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues, Proceedings of The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, pp.155-157, 2018.
- 3) T. KOMIYA, T. SARUWATARI, Y. HAKATA, A. SAFFARZADEH, H. NAKAYAMA, T. SHIMAOKA, I. SANDAMBATA, T. AOKI, T. NISHIO, H. AKITA, F. HIROSUE: SIMULATING THE PERFORMANCE OF “CEMENT-SOLIDIFIED LANDFILL” OF MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION RESIDUES BY DEMONSTRATION EXPERIMENT, Proceedings of the 17th International Waste Management and Landfill Symposium, 2019.

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 秋田宏行, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの開発（その2）～焼却残渣固化体の耐久性および施工性～, 第39回全国都市清掃研究・事例発表会, 2018.
- 2) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 梶野友貴, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性及び強度に関する実証研究, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- 3) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行: 一般廃棄物焼却残渣固化体の内部ガス圧による破壊に関する検討, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- 4) Teppei Komiya, Takeru Saruwatari, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Isamu Sandambata, Takahiro Aoki, Tatsufumi Nishio, Hiroyuki Akita, Fuminori Hirose: Demonstrational Experiment on Environmental Safety of Cement-solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues, 2018 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management, 2018.
- 5) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 梶野友貴, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西

- 尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性と埋立地盤強度に関する実証研究，平成30年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会，2018.
- 6) 博田庸介，小宮哲平，中山裕文，島岡隆行，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤内部の孔隙構造に関する基礎的研究，平成30年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会，2018.
  - 7) 三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文，島岡隆行，小宮哲平，中山裕文，金松雅俊：一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験（その1：施工性），第53回地盤工学会研究発表会，2018.
  - 8) 青木貴均，三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，西尾竜文，島岡隆行，小宮哲平，中山裕文，猿渡武，荒井進，金松雅俊：一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験（その2：固化体の性状），第53回地盤工学会研究発表会，2018.
  - 9) 猿渡武，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分の実証実験（その3：環境安全性），第53回地盤工学会研究発表会，2018.
  - 10) 博田庸介，小宮哲平，中山裕文，島岡隆行：廃棄物焼却残渣固化体の耐久性に及ぼす細孔隙における微生物活動の影響，第53回地盤工学会研究発表会，2018.
  - 11) Yousuke Hakata, Teppei Komiya, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka: Influence of microbial activity in micro pores on durability of cement-solidified solid waste incineration residues, The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, 2018.
  - 12) Takeru SARUWATARI, Teppei KOMIYA, Hirofumi NAKAYAMA, Takayuki SHIMAOKA, Isamu SANDAMBATA, Takahiro AOKI, Tatsufumi NISHIO, Hiroyuki AKITA, Fuminori HIROSUE: Demonstrational Experiment on Cement-Solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues, The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, 2018.
  - 13) 三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文，島岡隆行，小宮哲平，中山裕文，荒井進，金松雅俊：焼却残渣固化式処分の遮水シートに及ぼす振動締固めの影響，平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会，2018.
  - 14) 青木貴均，三反畑勇，弘末文紀，秋田宏行，西尾竜文，島岡隆行，小宮哲平，中山裕文，荒井進，金松雅俊：産業廃棄物焼却灰の固化式処分に関する基礎的研究、平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会，2018.
  - 15) 猿渡武，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分の環境安全性及び埋立地盤強度に関する実証研究，平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会，2018.
  - 16) 博田庸介，小宮哲平，島岡隆行，中山裕文，弘末文紀，三反畑勇，秋田宏行，青木貴均，西尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤の孔隙構造に関する基礎的研究，平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会，2018.
  - 17) 猿渡武，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平，弘末文紀，三反畑勇，青木貴均，秋田宏行，西尾竜文：一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の埋立特性に関する実証的研究，第29回廃棄物循環学会研究発表会，2018.
  - 18) 秋田宏行，弘末文紀，三反畑勇，青木貴均，西尾竜文，島岡隆行，中山裕文，小宮哲平：焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究～一般廃棄物焼却残渣固化体の振動締固め特性～，第40回全国都市清掃研究・事例発表会，2019.

- 19) 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, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究～産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究～, 第40回全国都市清掃研究・事例発表会, 2019.
- 20) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤におけるマクロ孔隙の存在形態及び孔隙径分布に関する研究, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 21) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性及び強度に関する実証実験, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 22) 有村愛咲美, 中山裕文, 島岡隆行: 廃棄物固化式処分システムの費用と便益の評価に関する研究, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- 23) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤内部の孔隙構造に関する基礎的研究, 平成31年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2019.
- 24) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分の環境安全性及び水収支に関する実証研究, 平成31年度廃棄物循環学会九州支部研究ポスター発表会, 2019.
- 25) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣の固化式処分における振動締固めと示方配合に関する研究, 第54回地盤工学会研究発表会, 2019.
- 26) 博田庸介, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 弘末文紀, 三反畑勇, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤の孔隙構造に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会, 2019.
- 27) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の水収支及び環境安全性に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会, 2019.
- 28) 青木貴均, 三反畑勇, 西尾竜文, 秋田宏行, 弘末文紀, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 産業廃棄物焼却残渣の固化式処分における示方配合に関する基礎的研究, 第54回地盤工学会研究発表会, 2019.
- 29) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣固化式処分における振動締固めと配合に関する研究, 令和元年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2019.
- 30) 青木貴均, 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究～産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究～, 令和元年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2019.
- 31) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 小宮哲平, 中山裕文, 荒井進, 金松雅俊: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分における振動締固めに関する基礎的研究, 第13回環境地盤工学シンポジウム, 2019.
- 32) 三反畑勇, 弘末文紀, 秋田宏行, 青木貴均, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣の固化式処分システムの振動締固め特性に関する研究, 第41回全国都市清掃研究・事例発表会, 2020.

- 33) 猿渡武, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 弘末文紀, 三反畑勇, 青木貴均, 秋田宏行, 西尾竜文: 一般廃棄物焼却残渣固化式処分場の環境安全性評価のための長期実証実験, 令和元年度土木学会西部支部研究発表会, 2020.
- 34) 青木貴均, 弘末文紀, 秋田宏行, 三反畑勇, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 産業廃棄物焼却残渣の固化式処分における示方配合に関する基礎的研究(その2), 第55回地盤工学発表会, 2020.
- 35) 青木貴均, 弘末文紀, 秋田宏行, 三反畑勇, 西尾竜文, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 荒井進, 金松雅俊: 焼却残渣を埋立処分する固化式処分システムの示方配合に関する研究~産業廃棄物焼却残渣の固化式処分に関する基礎的研究(その2)~, 令和2年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2020.

### (3) 知的財産権

- 1) 斉藤栄一, 弘末文紀, 島岡隆行: 焼却残渣処分方法, 特許第6261277号, 平成29年12月22日.

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 廃棄物固化式処分システム情報サイト, <http://env.doc.kyushu-u.ac.jp/solidificationlandfill/>
- 2) 平成30年度循環型社会形成推進研究発表会, 招待講演(2019年1月17日, 「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」(島岡隆行))
- 3) NPO法人廃棄物地盤工学研究会 第42回勉強会, 招待講演(2019年10月19日, 「廃棄物固化式処分システムについて」(中山裕文))

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 環境新聞(2019年2月13日, 株式会社環境新聞社, 「第1回 日本オープンイノベーション大賞」(選考委員会選定優良事例に九州大学ほかによる「柔軟なコンソーシアムの構築による多種多様な焼却残渣を対象とした固化式処分システムの開発」が選定されたこととその開発内容の紹介))
- 2) 九州大学プレスリリース(2019年2月22日, 九州大学, 「本学工学研究院島岡隆行教授研究グループが、日本オープンイノベーション大賞選考委員会選定優良事例を受賞」)

### (6) その他

- 1) Student and Young Engineer Presentation Award (2018年8月26日, The 9th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Waste Management, “Influence of microbial activity in micro pores on durability of cement-solidified solid waste incineration residues”)
- 2) Award for Excellent Poster Presentation at the 22nd Korea-Japan Joint International Session (2018年9月13日, Korea Society of Waste Management, “Demonstrational Experiment on Environmental Safety of Cement-solidification Style Final Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Residues”)
- 3) 優秀講演者表彰(2018年11月12日, 平成30年度土木学会全国大会年次学術講演会, 「一般廃棄物焼却残渣固化式処分埋立地盤の孔隙構造に関する基礎的研究」)
- 4) 第1回日本オープンイノベーション大賞選考委員会選定優良事例(2019年3月5日, 内閣府, 「柔軟なコンソーシアムの構築による多種多様な焼却残渣を対象とした固化式処分システムの開発」)

## 8. 引用文献

- 1) (株)安藤・間：超流体工法，<http://www.ad-hzm.co.jp/service/ashcrete/tech/>.  
(最終閲覧日：2020年5月31日)
- 2) 環境省：一般廃棄物の排出および処理状況等（平成30年度）について，2020.
- 3) 土壌物理性測定法委員会：土壌物理性測定法，p. 94，1972.
- 4) 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.
- 5) 松藤敏彦，大原佳祐：一般廃棄物最終処分コストの分析および標準費用モデルの作成，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 21，No. 1，pp. 30-43，2010.
- 6) 島岡隆行：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，2017.
- 7) 樋口壯太郎：最終処分場の計画と建設 -構想から許可取得まで-，日報，1995.
- 8) 糸島市：糸島市開発行為等に関する指導規定 技術基準，pp. 15-16，  
<https://www.city.itoshima.lg.jp/s021/020/010/020/080/180401giutukijun.pdf>.  
(最終閲覧日：2020年5月31日)
- 9) 政村兼一郎，青山嘉博，東榎俊雄，成田英一，濱田芳巳，村田敦盛，吉兼亨：コンクリート工学ブックス・2 生コンプラント -装置と保守-，日本コンクリート工学協会，1980.
- 10) 鹿島出版会：全訂新版 建設機械ハンドブック，建設機械研究会，1992.
- 11) たつの市：機械及び装置の耐用年数（新旧対応表），  
[http://www.city.tatsuno.lg.jp/zeimu/documents/0026\\_taiyounensuhyou.pdf](http://www.city.tatsuno.lg.jp/zeimu/documents/0026_taiyounensuhyou.pdf).  
(最終閲覧日：2020年5月31日)
- 12) 建設物価調査会：平成29年度版 土木工事積算標準単価，2017.
- 13) 杉山隆文，志村和紀，畠田大規：高解像度X線CTによるAEモルタル中の空隙構造の透視，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol. 67，No. 3，pp. 351-360，2011.
- 14) 宇野隆浩ら：コンクリートの窒素ガス引張試験における供試体の破壊メカニズム，コンクリート工学年次学術論文集，Vol. 27，No. 1，pp. 379-384，2005.
- 15) 桜田道博ら：石炭灰を主原料とする高性能人工軽量骨材を用いたPCはり部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，No. 774，pp. 27-37，2004.

### III. 英文 Abstract

Practical Development of Resilient Landfill for Prompt Recovery Restoration from Earthquake

Principal Investigator: Takayuki SHIMAOKA

Institution: Faculty of Engineering, Kyushu University  
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, JAPAN  
Tel: +81-92-802-3433 / Fax: +81-92-802-3432  
E-mail: shimaoka@doc.kyushu-u.ac.jp

Cooperated by: Hazama Ando Corporation, Sanyu Plant Service Co., Ltd.

#### [Abstract]

Key Words: Solid waste incineration residues, Cement-solidification style final disposal, Super-fluidized method, Pretreatment, Mix proportion, Workability, Landfill ground characteristics, Durability, Environmental impact, Economical efficiency

In this study, for the purpose of practically implementing the "cement-solidification type final disposal system", studies on "Adjustment of landfill materials", "Workability and landfill ground characteristics", "Durability and environmental impact assessment", and "Economical evaluation" were conducted.

In "Adjustment of landfill materials", the verification test of the removal of iron and large-sized coarse particles that are unsuitable for kneading incineration residues as a pretreatment for cement-solidification type final disposal was carried out, and the sorting rate and sorting speed of incineration residues were clarified. In addition, it was examined that the optimum mix proportion depending on the characteristics of fluctuating municipal solid waste incineration residues, and it was shown that the optimum mix proportion could be determined by using the water content ratio that maximizes the dry density obtained by the vibration compaction test as an index. Furthermore, whether the cement-solidification type disposal system could be applied to the incineration residues of industrial waste was examined, and the mix proportion conditions with which the disposal system can be applied to the incineration residues of industrial waste was shown.

In "Workability and landfill ground characteristics", a pilot test of working of cement-solidification type final disposal was conducted, and it was demonstrated that the working of cement-solidification type final disposal of municipal solid waste incineration residues could be done without problems, and

also the landfill ground constructed by the pilot test achieved the development target such as “Uniaxial compressive strength  $> 5 \text{ N/mm}^2$ ”, “toxic substance elution concentration  $<$  water quality standard for discharge water”, “volume reduction effect  $> 20\%$ ” ).

In “Durability and Environmental Impact Assessment”, the monitoring of the landfill model tank constructed in the pilot working test showed that surface protection is required to prevent from pop-out occurred on the surface layer in long-term outdoor exposure. In addition, the amount of water treated at the cement-solidification type final disposal site is about 70% of the precipitation, the surface water was satisfied with the discharge water quality standard except for the initial period, and it was observed that landfill gas didn't generate at cement-soliification type landfill site.

In “Economic evaluation”, the life cycle costs of cement-solidification type final disposal and conventional final disposal were calculated, and it was shown that cement-solidificaton type final disposal was economically advantageous compared to conventional final disposal.