

重点課題

- ⑫社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発
- ⑤災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発

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

研究代表者

九州大学大学院工学研究院

教授 島岡 隆行

研究実施期間：令和2年度～令和4年度

研究体制：九州大学、安藤ハザマ

発表内容

1. 研究背景
2. 研究開発目的
3. 研究目標
4. 研究開発内容
5. 研究成果
 - 5-1. 研究成果の概要
 - 5-2. 環境政策等への貢献
 - 5-3. 研究目標の達成状況
6. 研究成果の発表状況

1. 研究背景

最終処分事業の現状・ニーズ

埋立廃棄物の大半を占める
焼却残渣(焼却灰・飛灰)

廃棄物処理施設の
社会的受容性への配慮

地域での新たな価値創出
に資する廃棄物処理施設

気候変動による豪雨、
将来予想される大地震
に耐える強靱な施設

瞬時に大量に発生する
災害廃棄物処理への備え

最終処分場に求められる機能

焼却残渣に適した埋立工法

有害物質溶出抑制による
環境リスク低減

強固な地盤、
早期かつ高度な跡地利用、
利用価値の高い土地創出

浸出水量が低減し、
優れた耐震性を有する埋立地

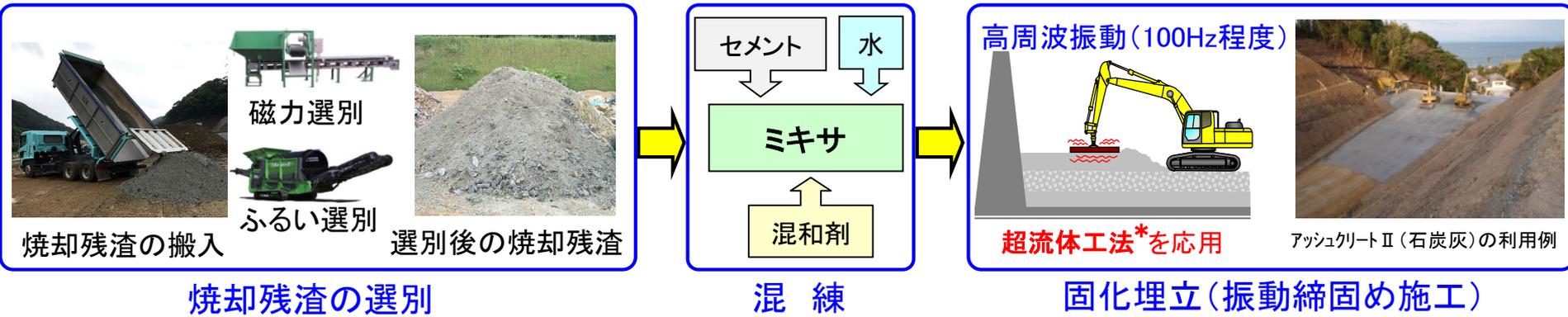
災害時に備えた埋立容量確保、
災害廃棄物の処理拠点

焼却残渣を対象
にした環境安全
かつ強靱な
最終処分場

「**固化式処分システム**」

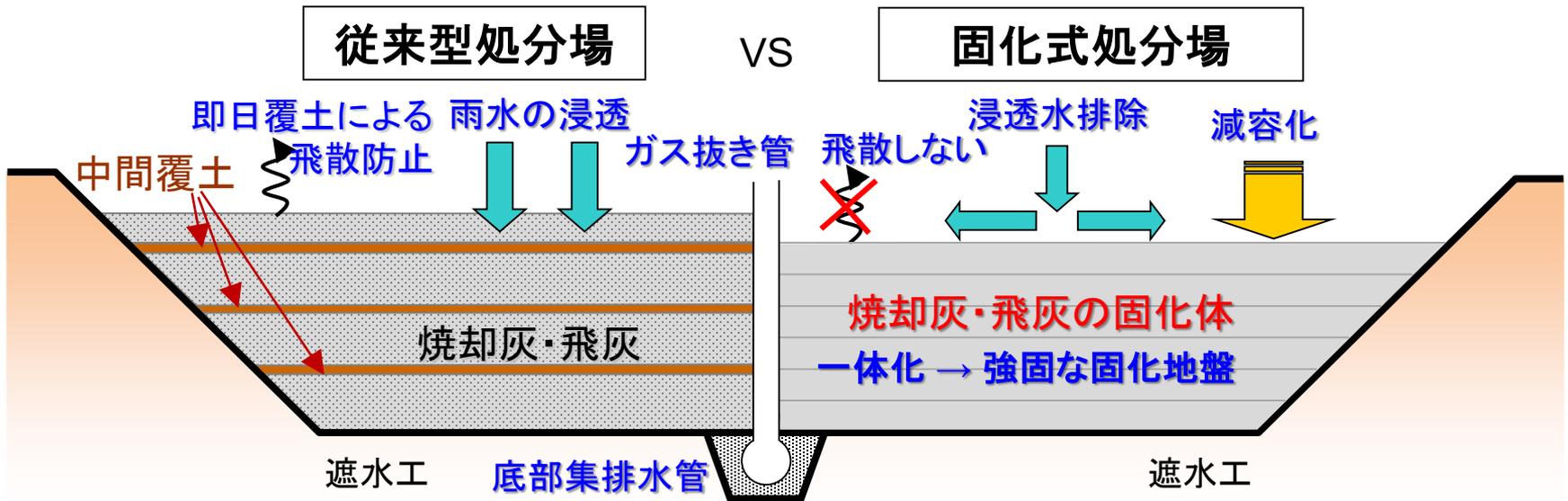
従来の概念を
覆す革新的な
最終処分場！

固化式処分システムとは？



* 超流体工法：少量で練混して振動で締め固めて硬化させる

固化式処分システムの施工手順



従来式処分場との相違

2. 研究開発目的

室内試験

H26～H28年度
環境研究総合推進費



- 供試体を用いた最適配合の検討
- 耐久性、耐震性評価

パイロット試験

H29～R1年度
環境研究総合推進費

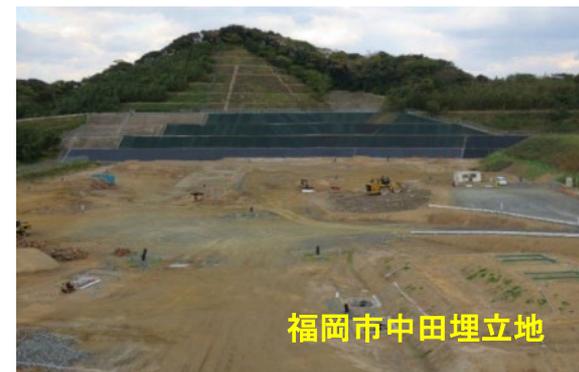


- 埋立模型槽での試験施工とモニタリング
- 配合設計手法の確立
- 経済性評価
- 産業廃棄物焼却灰への適用

実証試験と 社会実装

R2～R4年度

本課題



- 実処分場での実証施工とモニタリング
- 搬入毎に変動する焼却残渣の性状に対応可能な配合設計手法と施工方法の確立

3. 研究目標

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

4. 研究開発内容

最終処分、焼却残渣の研究実績が豊富で各種分析装置を保有する『九州大学』と、石炭灰固化研究、施工実績が豊富な『安藤ハザマ』の共同研究体制

研究テーマ		年度	研究内容	開発目標
1. 基本設計と運用試験	基本設計	1年度～2年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 固化式処分場の構造の検討 • 福岡市中田埋立地を想定した処理量の算定 • 実証施工のための詳細設計 	設計施工指針案
	運用試験	1年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 固化式処分場の前処理プロセス(混練不適物の除去、粒度調整、混練等)の確立のための機材選定と運用試験 • 固化式処分場の局部を模擬した施工試験 • 打設厚さ、打設接合面の密着性の検討 	
2. 実証施工	固化式処分場の建設	2年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 福岡市中田埋立場での配置計画 • IoT連携センサの設置とセンサネットワークの構築 • 日々変動する焼却残渣の性状に対応できる柔軟な前処理、配合システムの構築 • 固化式処分場の実証施工 	処理能力 ≥約 5 t/日 (実埋立地の1/10)
	固化式処分の評価	2年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 前処理プロセスのマテリアルフロー・バランスの評価 • 施工速度、選別組成、選別精度の評価 • 打設厚さ、打設接合面の密着性の評価 • 減容効果の評価 	減容化率 ≥ 20 % 設計施工指針案
3. 耐久性と環境安全性モニタリング	耐久性	2年度～3年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 載荷試験による地盤支持力測定 • ボーリングコアサンプルによる固化地盤の性状調査 • 固化式処分場解体時の処分場内部の状態確認 	埋立地盤強度 ≥ 5 N/mm ²
	環境安全性	2年度～3年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 水収支の評価 • 浸出水、表流水の水質モニタリング • IoT連携センサによる各種モニタリング 	水質 ≤ 放流基準
4. 経済性評価	LCC	1年度～3年度目	<ul style="list-style-type: none"> • 基本設計に準じたライフサイクルコスト評価 • 実証施工結果を踏まえたライフサイクルコスト評価 	LCC ≤ 従来型

5-1. 研究成果の概要

5-1-1 実証施工

- (1) 基本設計
- (2) 配合設計
- (3) 実証施工
- (4) 実証施工の評価

5-1-2 耐久性と環境安全性のモニタリング

- (1) 固化式処分場の水収支、水質、発生ガス
- (2) 低周波無線通信を用いたIoTモニタリングシステム
- (3) 固化地盤の長期耐久性

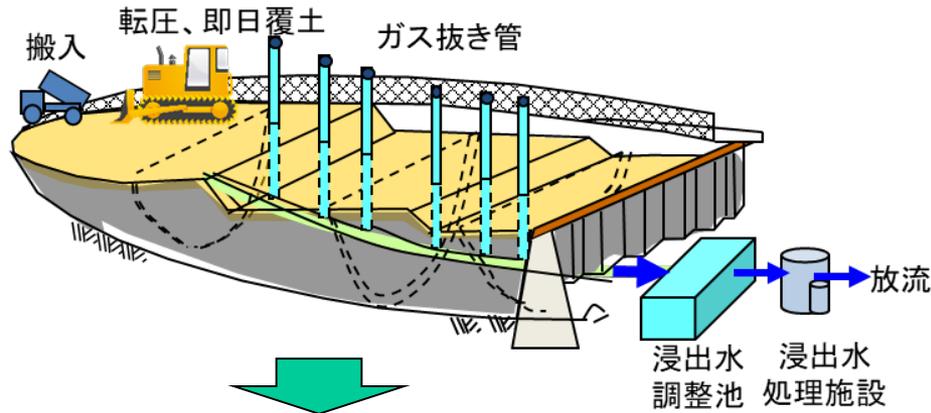
5-1-3 経済性評価

5-1-4 設計施工指針案

5-1-1 実証施工

(1) 基本設計

従来型処分場の構造



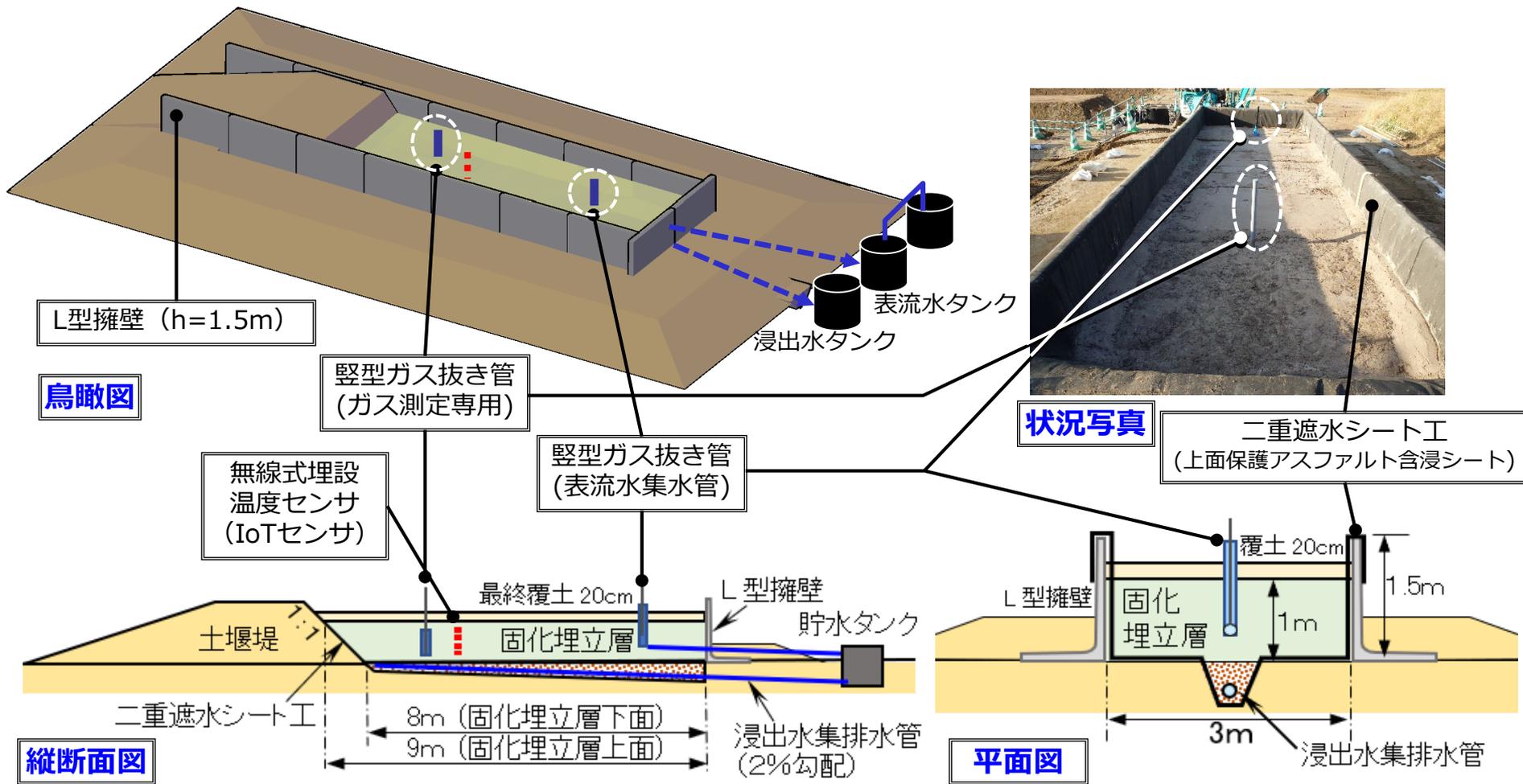
固化式処分場の構造

- 従来型の構造基準に準拠。ただし、固化式処分場の特徴を踏まえ、以下の構造とした。

項目	固化式処分場の特徴と採用構造
集排水設備	<ul style="list-style-type: none"> 浸出水が発生しないことを確認 → 浸出水と表流水を分けて集水 固化地盤は実質不透水 → 雨水の全量が表流水になると想定した設計
ガス抜き管	<ul style="list-style-type: none"> 有機物分解は起こらない。→ 埋立地内に空気を供給する機能は不要 CO₂、CH₄は発生しない。→ 最小限 (ガスモニタリング管を1本設置) 保護材(栗石)は不要 → 構造簡素化 (施工性向上、埋立容量増加に寄与)
遮水工保護材	<ul style="list-style-type: none"> 遮水工と固化地盤の境界への水の浸入防止 → 不透水性保護マット
IoTモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> 固化地盤内に低周波無線通信型センサを埋設

実証施工する固化式処分場の設計図

• 埋立容量: 約 25 m³ (=処理能力 5 t/日 × 10日間 × (1 - 前処理除去率) × 埋立容量消費量)



(2) 配合設計

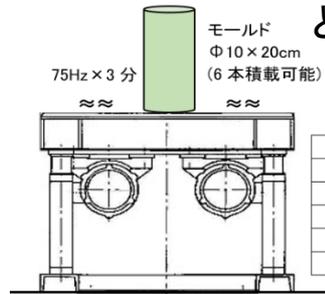
- ・焼却残渣の事前採取(含水比、粒度、成分等の確認)
- ・固化式処分の**室内配合試験** ⇒ 目標品質に適合する「**含水比範囲**」の確認

室内ミキサによる混練



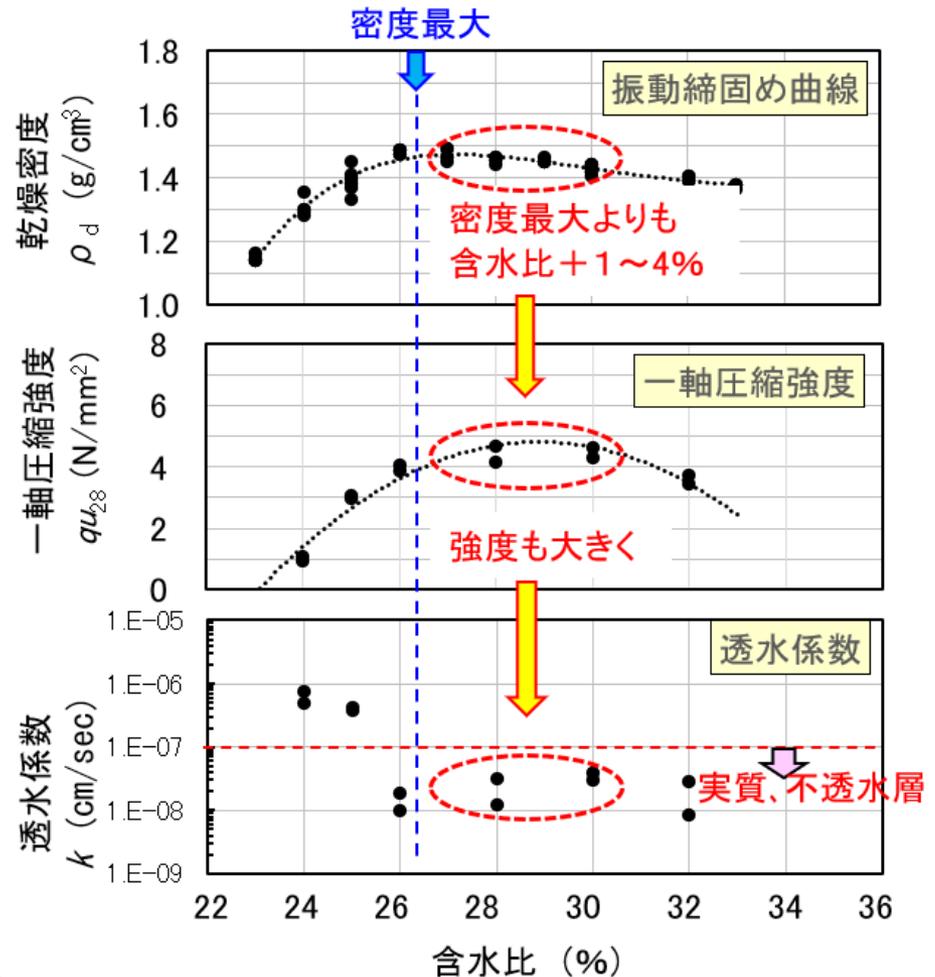
名称	縦型ミキサ
型式	MS-30/50
メーカー	愛工舎製作所
容量	30L / 50L ポウル
寸法	580×900×h1340 mm
モータ	2.2 kW
回転数	110~380 r.p.m.

振動締め試験で締め曲線と供試体作製



名称	テーブルバイブレータ
型式	TV500×500
メーカー	エクセン
寸法	500×500×h400 mm
振動数	30~75 Hz
振幅	0.21~0.54 mm

- 一軸圧縮試験 (強度、密度)
- 透水試験 (実質、不透水層)
- 溶出試験 (環境安全性)



- ・日々変動する焼却残渣にも柔軟に対応可能な配合設計

(3) 実証施工

固化式埋立期間: 令和3年11月1日～16日

①埋立処分場の構築



②焼却灰の選別処理



③現場室内配合試験



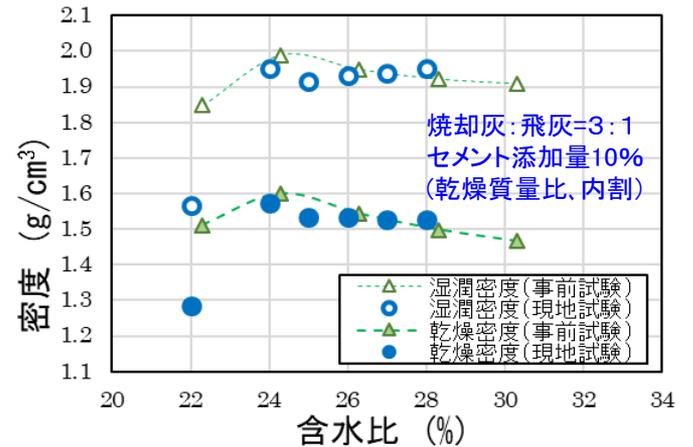
焼却灰の選別処理結果

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

処理能力、マテリアルバランスなども検証
分級後の焼却灰は、ほぼ均一で、含水比は約24%

【備考】

飛灰は受入れた2車分を選別処理せずに使用
(含水比測定値は車毎に変動: 19.4%と21.6%)



振動締固め曲線に基づく
現場配合の選定

(3) 実証施工

④ 混練 (バックホウ運搬→捲出し)



0.5m³強制二軸ミキサ

⑤ 固化式埋立



敷均し後、振動締め(層厚20cm)

⑥ ガス抜き管などの設置

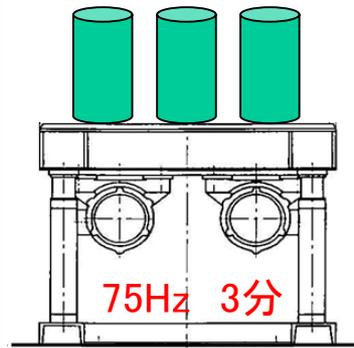


モニタリング用センサも設置

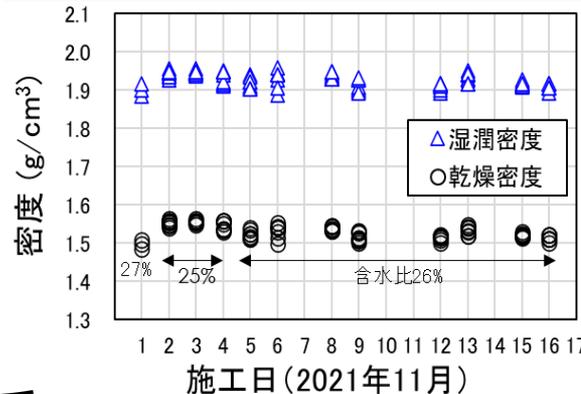
施工中の品質管理 (日常管理)

焼却灰・飛灰の
含水比測定
↓
現場配合の
加水量を決定

乾燥質量比(%)			加水量
焼却灰	飛灰	セメント	
67.5	22.5	10.0	●



テーブルバイブレータで
Φ10cm供試体を作製



締め密度を確認

品質確認

現場作製した
供試体の養生

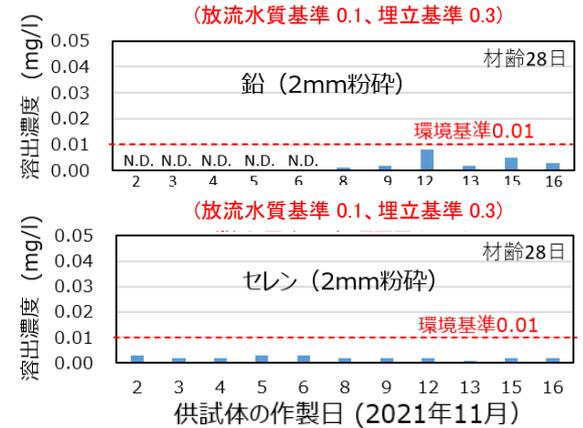
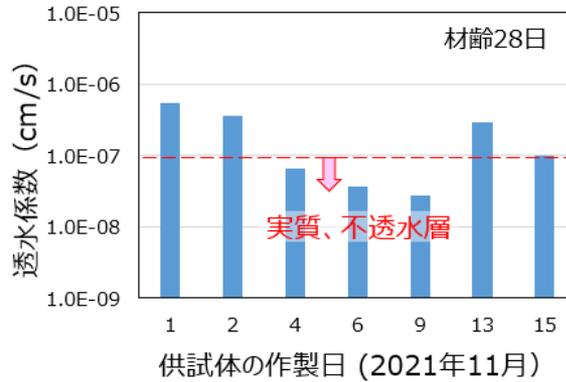
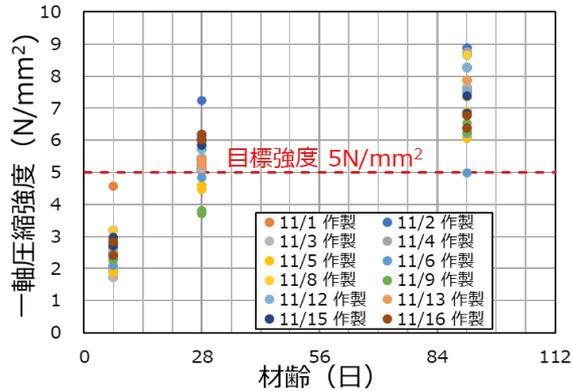
目標品質の確認

- ・圧縮強度
- ・透水係数
- ・溶出試験

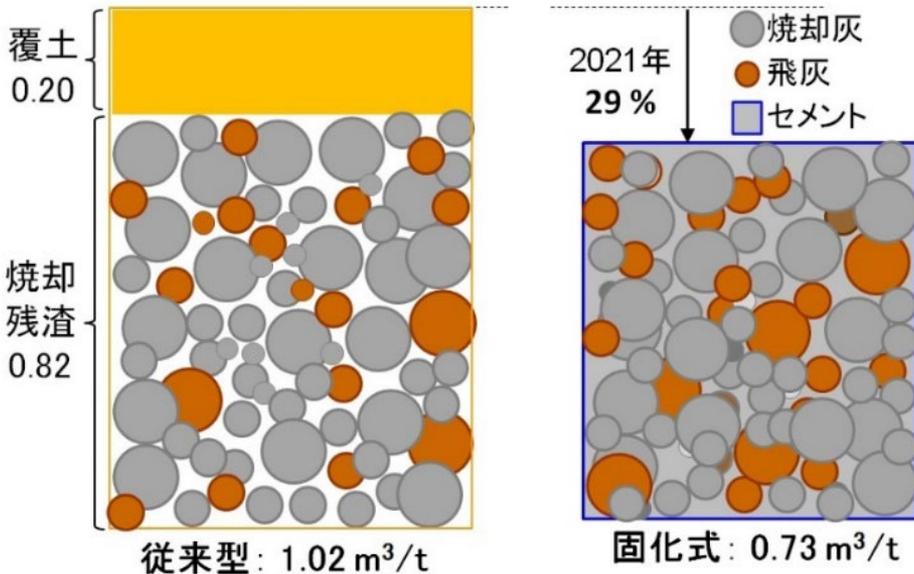
・ 焼却残渣の水分量の変動、固化式埋立の施工状況にも応じて柔軟に配合を修正

(4) 実証施工の評価

施工後の品質確認



作製した供試体で一軸圧縮試験、透水試験、溶出試験を実施し品質、環境安全性を確認



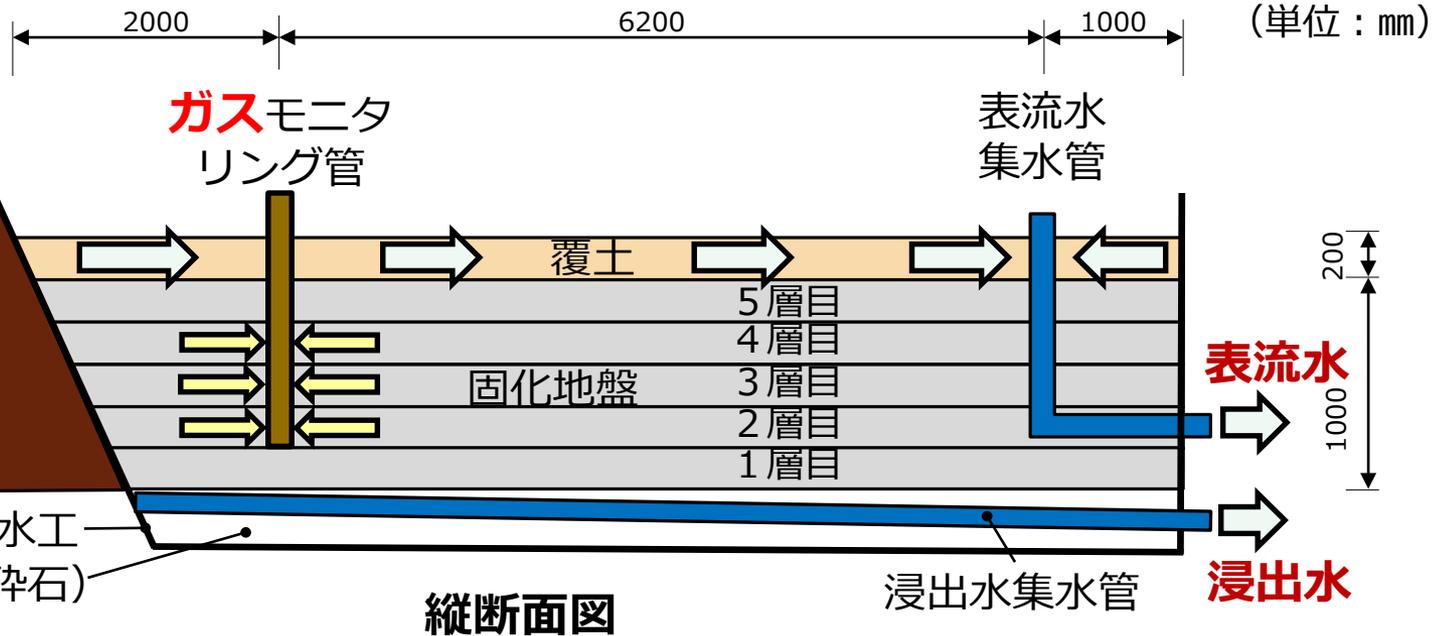
埋立容量消費量の比較

減容化の評価

- 埋立容量消費量は、0.73m³/t
- 従来型よりも29%減容化 (目標の減容化率 $\geq 20\%$ を達成)

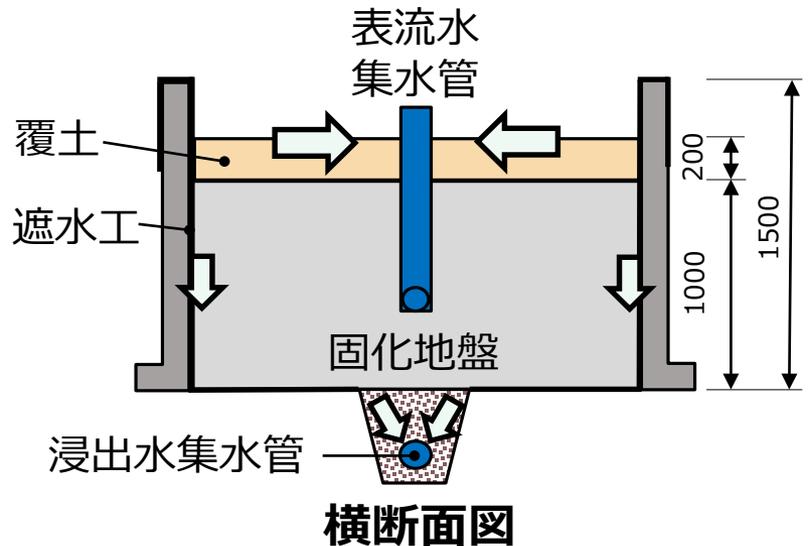
- 固化式の乾燥密度は平均1.52t/m³ (セメント10%添加分を除くと、 $1.52 \times 0.9 \div 1.37\text{t/m}^3$)
- 従来型の乾燥密度は1.22 t/m³ (既往研究で水置換法の現場密度試験を実施)

5-1-2 耐久性と環境安全性のモニタリング (1) 水収支、水質、ガス

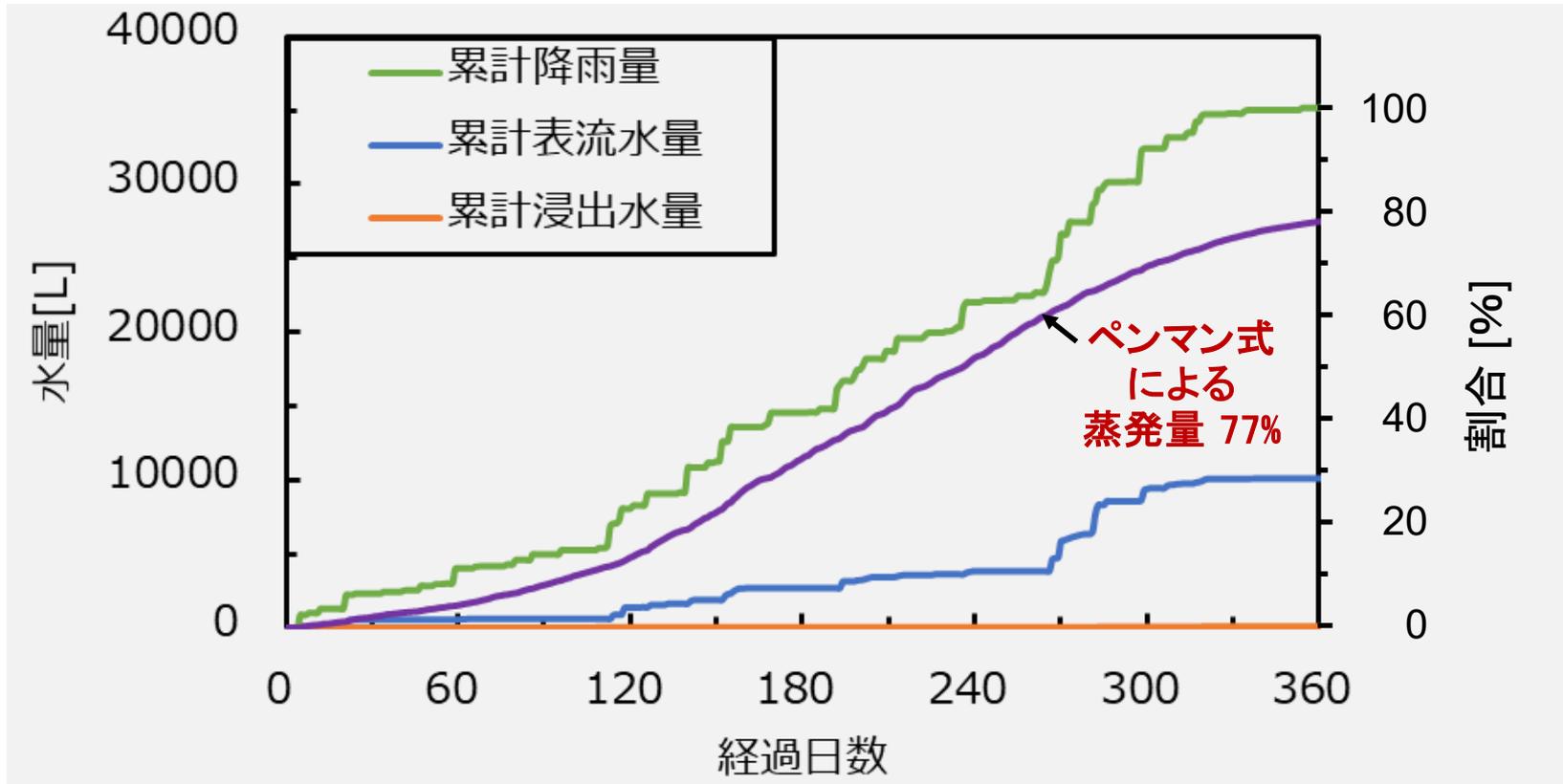


施工、モニタリング、解体の工程

項目	工程
固化埋立	R3年11月1日～16日
覆土施工	R3年11月17日
モニタリング	R3年11月～R4年11月
解体撤去	R4年12月5日～12日



水収支



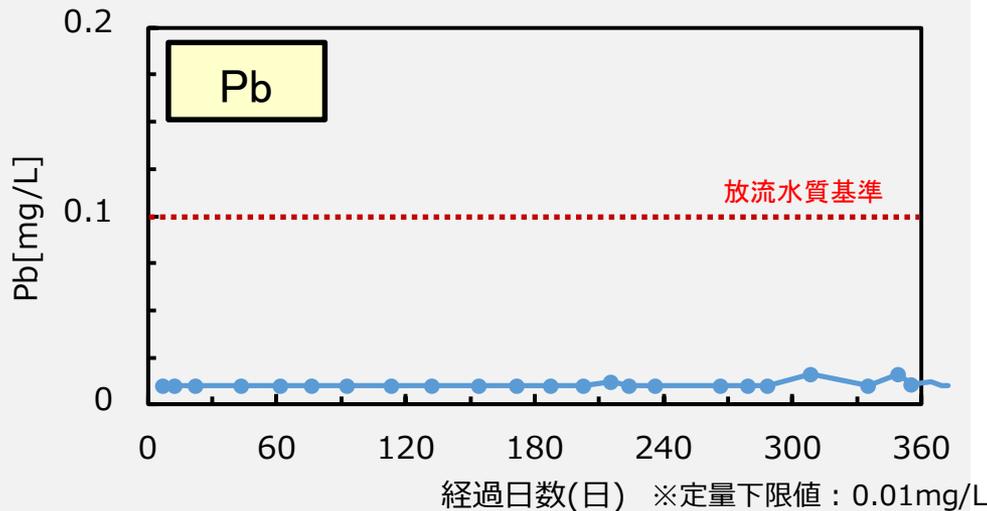
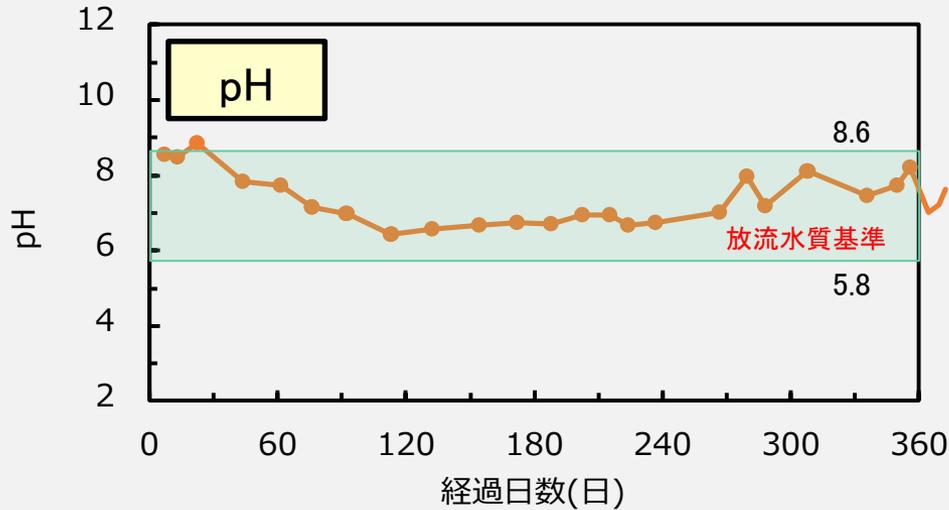
水収支(360日間) (単位: %)

降水	表流水	浸出水	蒸発 [※]
100.0	27.5	0.10	72.4

※ 蒸発量 = 降水量 - 表流水量 - 浸出水量

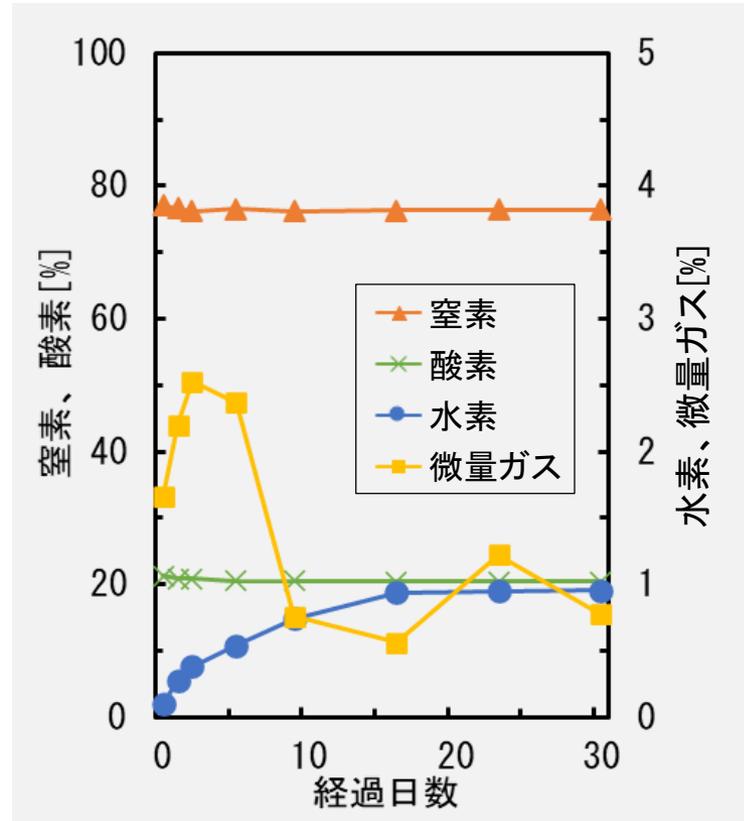
- 浸出水はほとんど発生しなかった。
- 降水量の28%が表流水として発生し、72%は蒸発した。
- 覆土の保水性と蒸発により、表流水の発生が抑制された。

表流水の水質、ガス



表流水のpH、Pb濃度の経時変化

- pHは22～43日目以降、有害重金属濃度は常時、**放流水質基準を満足した。**

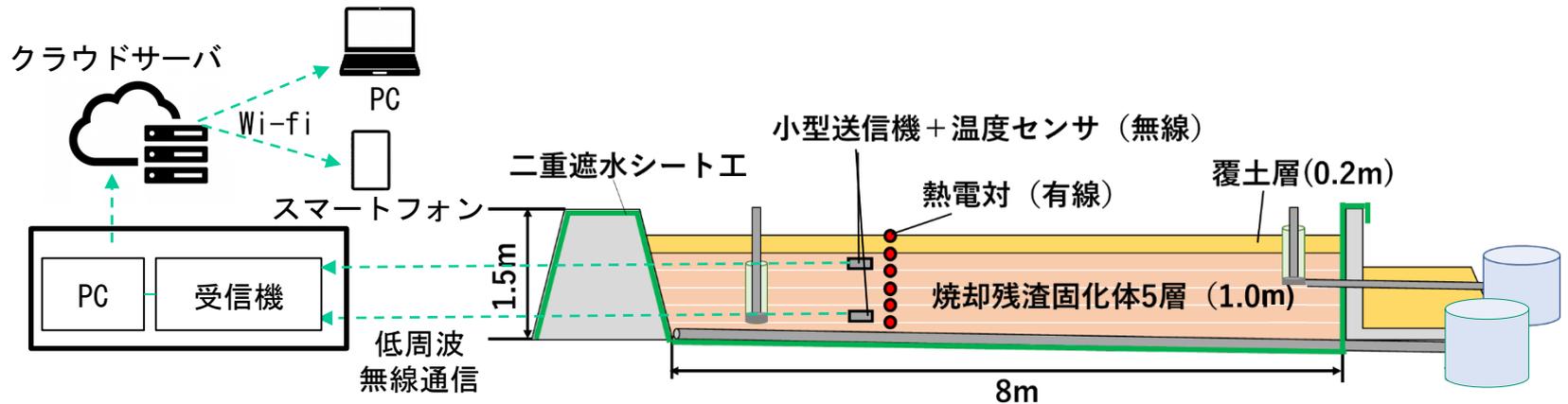


施工完了後のガス組成の経時変化

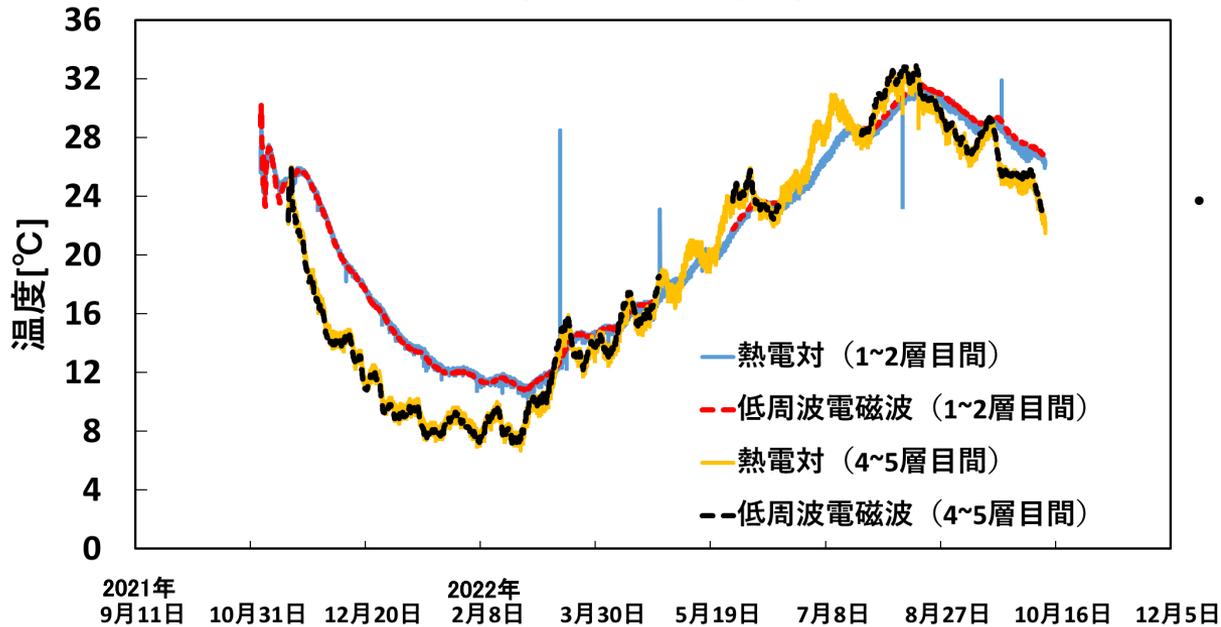
(施工完了後335～365日、
ガスモニタリング管の上端を密閉)

- CO₂、CH₄の発生は認められず、H₂は爆発下限界(4%)を大きく下回った。

(2) 低周波無線通信を用いた IoT モニタリングシステム



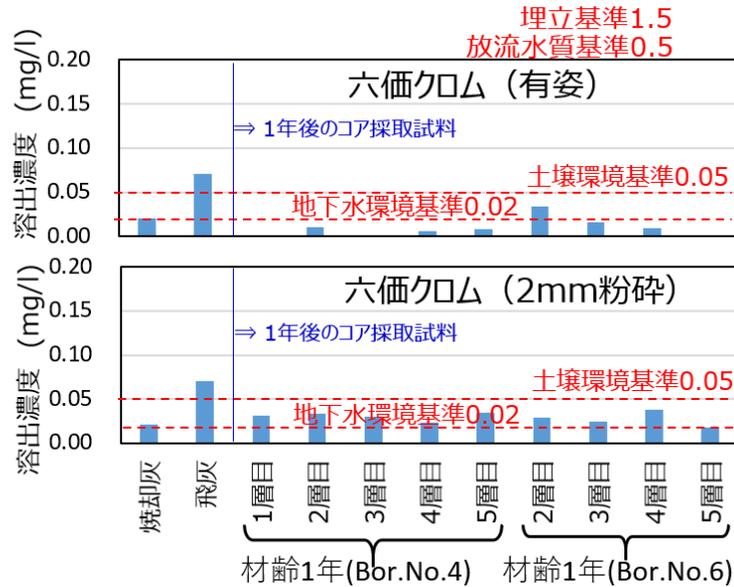
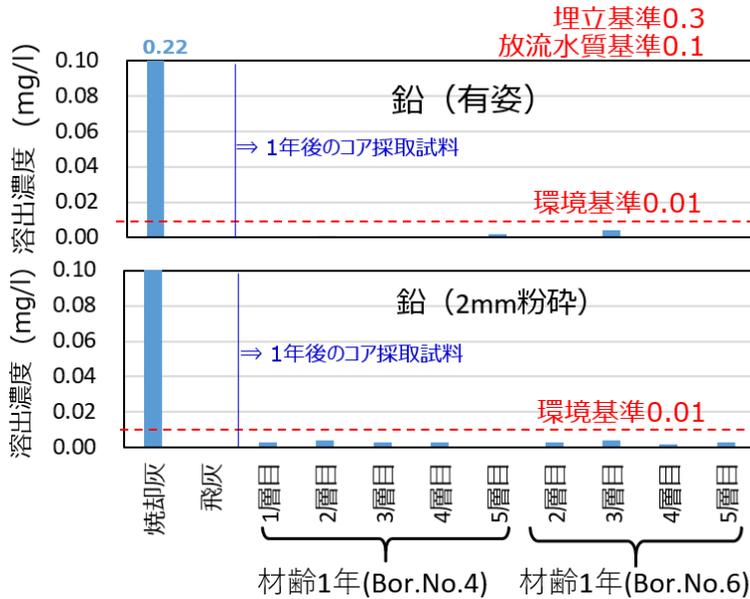
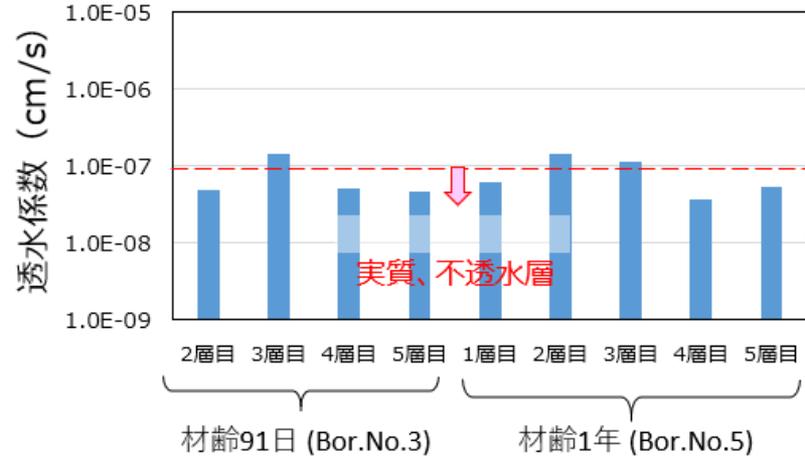
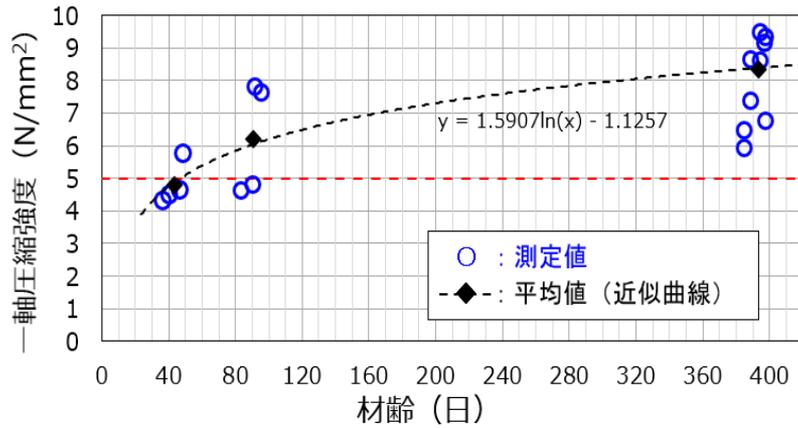
固化式処分場のIoTモニタリングシステム



- 固化式埋立地に埋設した小型低周波無線送信機から1年以上に亘り、埋立地内部の温度データを受信できた。

IoTモニタリングで得られた内部温度データ

(3) 固化地盤の長期耐久性(強度、透水性、環境安全性)



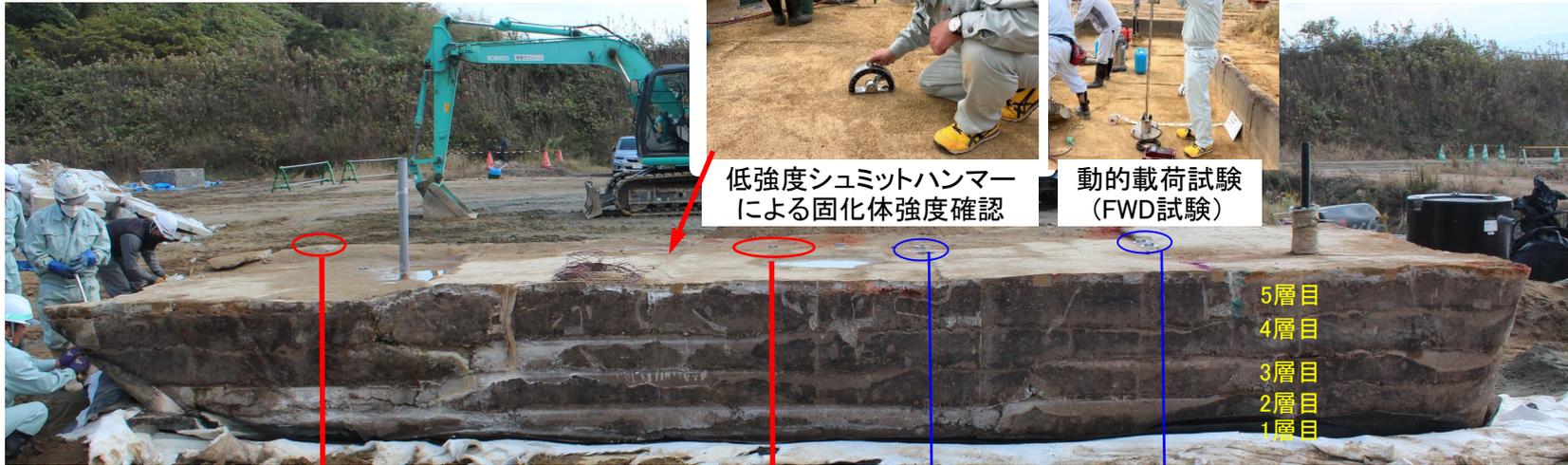
【備考】
 ぶつ素 < 環境基準
 セレン < 環境基準

オールコア採取した固化体で強度、透水性、環境安全性を確認

固化式処分場の解体撤去時の調査(2022年12月5~12日)

表面は亀裂もなく健全

堅固で支持力も大きい



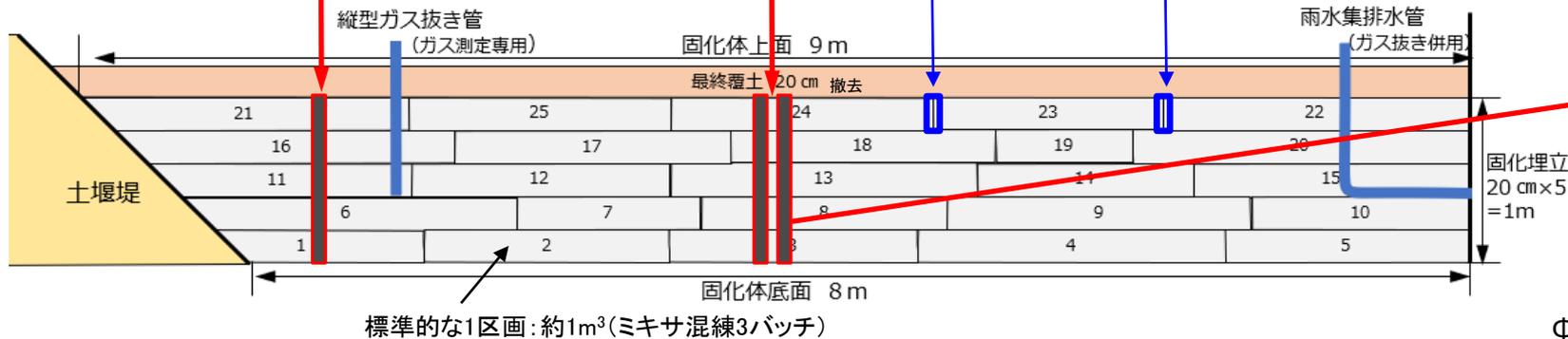
低強度シュミットハンマーによる固化体強度確認

動的载荷試験 (FWD試験)

5層目
4層目
3層目
2層目
1層目

Φ10cm オールコアボーリング

鉛直打継目のコア採取

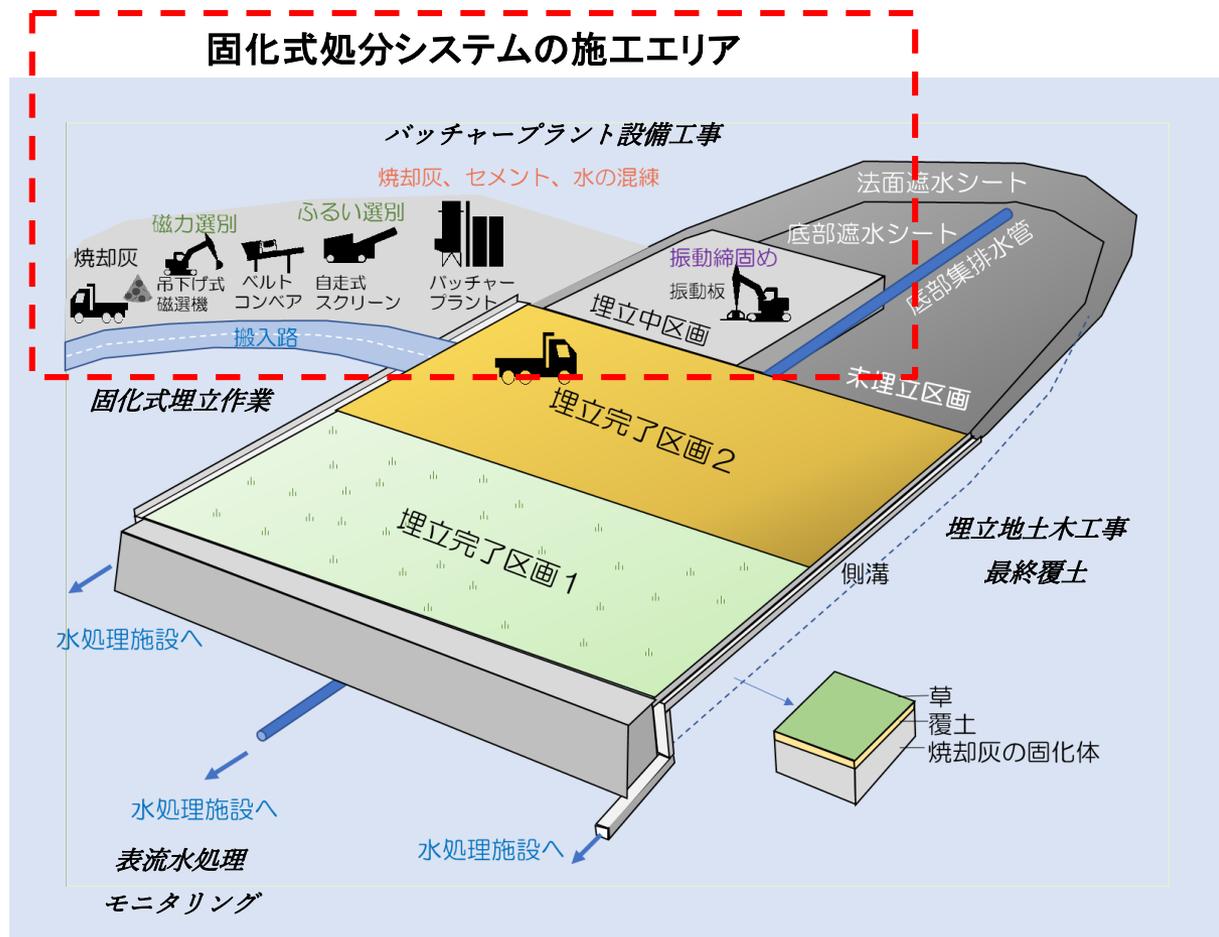


Φ10cm オールコア

- 目視では側面に水平打継目が確認できるが、**固化体内部は ほぼ一体化**
- 鉛直打継目は密着し、採取コア(打継ぎ間隔2日以内)の**透水係数は実質、不透水層**

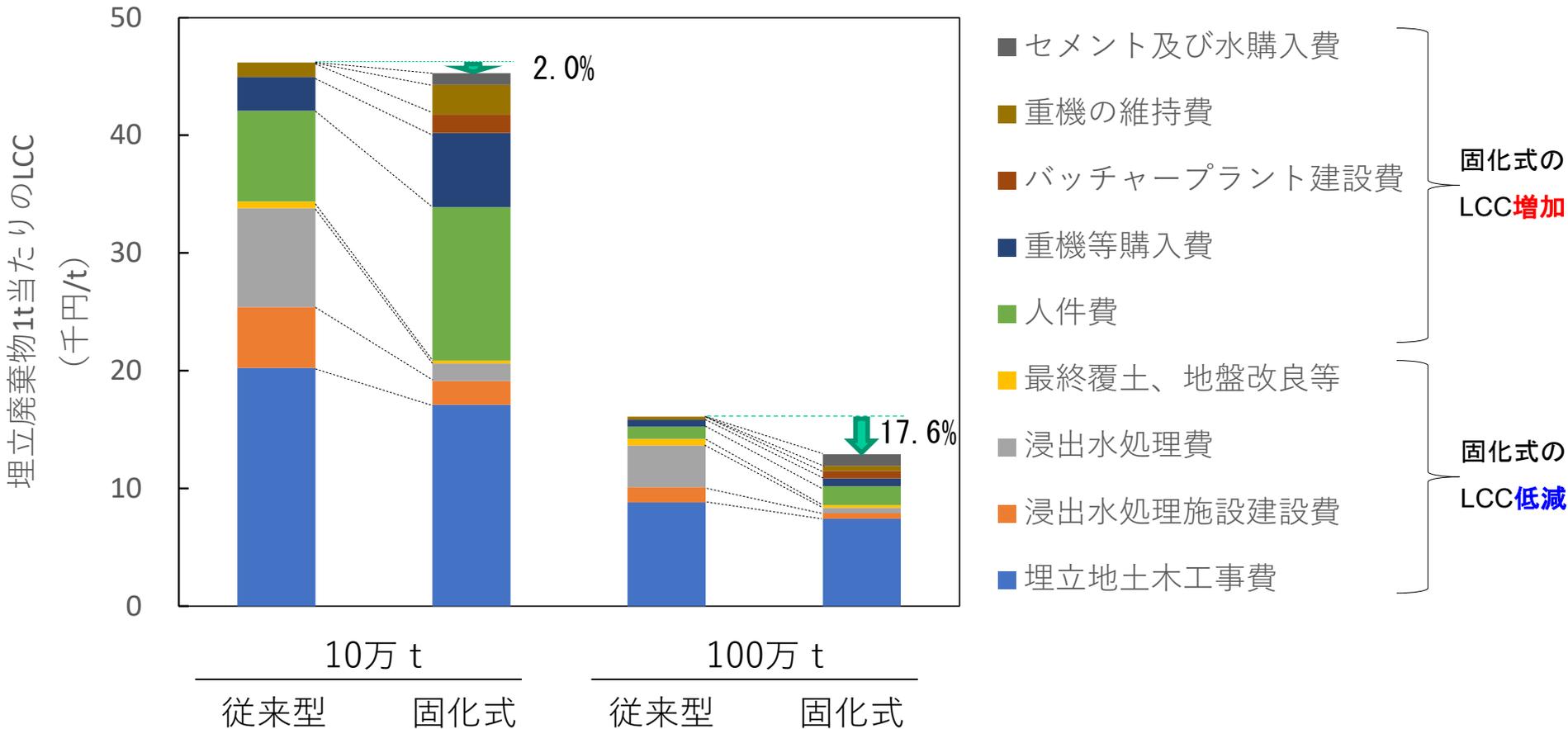
5-1-3 経済性評価

本研究で実施した基本設計、実証施工、各種モニタリングの結果を踏まえ、固化式処分場のLCCを計算し、従来型処分場との比較評価を行った。



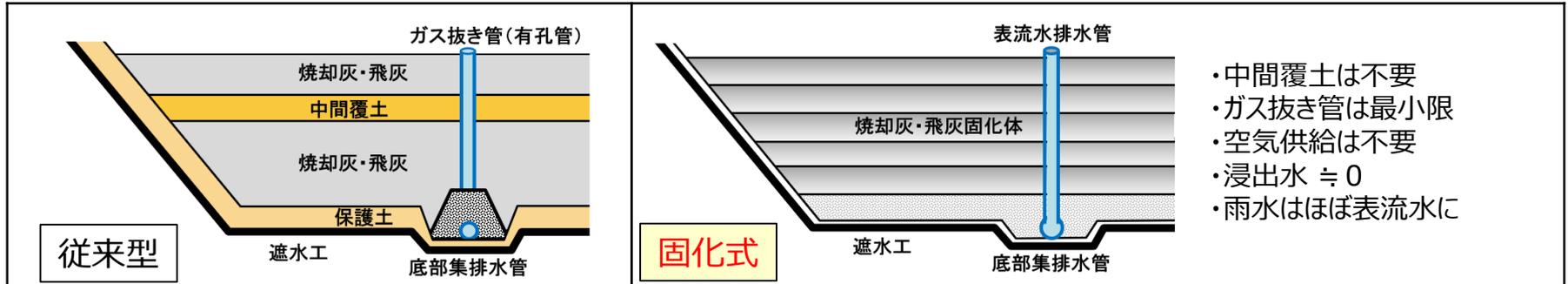
固化式処分場のイメージ図

LCC計算の結果



- LCC低減の方が大きく、固化式処分場のLCCは従来型よりも安くなる。
- LCC低減の要因は、埋立地土木工事費(埋立時減容化、覆土不要)、浸出水処理施設建設費(規模縮小、簡素化)、浸出水処理費(維持管理期間の大幅な短縮)など
- LCC増加の要因は、人件費、重機購入費、バッチャープラント設備工事費、セメント及び水の購入費

5-1-4 設計施工指針(案)



＜目次＞

設計要領

1. 最終処分場の構造と形態
2. 固化式処分場内施設配置と造成
3. 貯留構造物
4. 地下水集排水施設
5. 遮水工
6. 雨水集排水施設
7. 浸出水集排水施設
8. 浸出水処理施設
9. 埋立ガス処理施設
10. 被覆施設
11. 管理施設
12. 関係施設

管理要領

1. 最終処分場における管理
2. 廃棄物の搬入管理
3. 施設管理
4. 埋立作業管理
5. 環境管理
6. 埋立終了後または跡地の管理
7. 再生工法

＜目次(案)＞

設計編

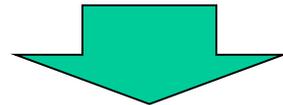
1. 最終処分場の構造と形態 (埋立層の不透水性を考慮)
2. 固化式処分場内施設配置と造成
3. 貯留構造物
4. 地下水集排水施設
5. 遮水工 (上面保護材に不透水性材を検討)
6. 雨水集排水施設 (雨水のほぼ全量が表流水)
7. 浸出水集排水施設 (浸出水≒0を考慮)
8. 表流水・浸出水処理施設 (水処理は簡素化)
9. 埋立ガス処理施設 (簡素化)
10. 被覆施設 (基本的には不要)
11. 管理施設 (選別処理・混練施設を設置)
12. 関係施設

施工編

1. 最終処分場における管理
2. 廃棄物の搬入管理
3. 施設管理
4. 埋立作業管理 (固化式埋立の手順を記載)
5. 環境管理
6. 埋立終了後または跡地の管理 (固化式は早期廃止が可能)

5-2. 環境政策等への貢献

1. 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、**コンパクト化**に寄与する。
2. 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。
3. 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。
4. 巨大地震にも耐える強固な地盤を活かし、地盤改良なしに大型選別装置や仮設焼却炉を設置でき、**災害廃棄物二次仮置場**として機能する。**迅速な復旧・復興**に貢献する。



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。

5-3. 研究目標の達成状況

目標(1) 柔軟な前処理及び配合システムの構築

- 焼却残渣の日単位の性状変化に対応可能な**前処理**(磁力選別および篩選別)並びに**配合決定**(振動締固め試験)のシステムを構築した。

目標(2) 高い施工性、強固な埋立地盤特性、減容効果の実証

- 開発目標の処理能力(5 t/日)で**施工**できることを実証した。
- **埋立地盤**は開発目標を達成した(一軸圧縮**強度** ≥ 5 N/mm²、有害物質溶出濃度 \leq 放流水質基準、**減容効果** ≥ 20 %)。

目標(3) 埋立地盤の長期的な耐久性、浸出水水質の環境安全性の実証

- **浸出水**はほとんど発生しない(=0.10%)こと、**表流水の水質**は開発目標を達成すること(放流水質基準を満足)を実証した。
- 1年後のコア採取、解体調査により埋立地盤の長期的な耐久性を実証した(**強度は材齢と共に増加、表層劣化もなく堅固な支持力**)。

目標(4) 従来の最終処分場と同等またはそれ以下のライフサイクルコスト

- 固化式処分は従来型に比べて高い**経済性**を有することが確認された。



自己評価: 目標どおりの成果をあげた。

6. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表: 2編

- ・INDUST(インダスト) 2022年9月
- ・環境浄化技術 2023年1月
- ・ジャーナル論文査読中 2023年3月

Journal of Material Cycles and Waste Management

"Wireless communication for environmental monitoring at waste landfills using low frequency electromagnetic waves"

(2) 口頭発表(学会等): 21編

(3) 知的財産権: 特許出願 1件 「焼却残渣処分場、焼却残渣処分方法」(特願2023-046551)

- ・その他に出願手続き中2件: 「焼却残渣処分場」、「焼却残渣処分方法」

(4) 国民との科学・技術対話: 1件

- ・福岡市西区環境フェスタ 2023年3月12日

(5) マスコミ等への公表・報道等: 2件

- ・週刊循環経済新聞 2022年1月31日
- ・環境新聞 2022年2月9日



ブース来訪者の感想・質問

- ・多くのメリットがあり、よく考えられている技術だと感じた。
- ・長い目で見ると固化式処分には多くのメリットがあることが良く分かった。
- ・液状化は起こらないとの理解でよいか?
- ・汚染物質の流出を抑制できるのは、安心できる。など

ご清聴、ありがとうございました。