



WASEDA University

第13回環境放射能除染研究発表会
減容化・再生利用と復興を考える 知のネットワーク会合

湿式比重選別法および 吸水性固化材を用いた再生土品質の向上

2024年9月

松方正彦¹・山崎淳司¹・正田武則¹
・相川光明¹・松原岩夫²・渡邊勝利²

早稲田大学¹・松蔵技建株式会社²

政策ニーズ、課題

- 政策的ニーズ（環境省）：除去土壌の再生利用の方針と要求品質
- 再生土の品質向上：**放射能濃度低減、締め固め強度向上**

●除去土壌の再生利用の方針

表1 再生土利用方針および要求品質

項目	記載
再生利用方針 (環境省)	・高度分級技術等により処理し砂質土として再生利用する方針 ・管理主体や責任体制が明確となっている公共事業の盛土等で利用
再生土の 要求品質	・ 放射能濃度8,000 Bq/kg以下 ：「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について」 2016年6月、環境省 ・ 通常の土木構造物に求められる要求品質を満足 ：「建設発生土利用技術マニュアル(土木研究所編著)」など

再生土の品質向上 → 放射能濃度低減、締め固め強度向上

●課題：再生土の放射性物質濃度の低減、再生土の締め固め強度向上

- ・ 中間貯蔵施設内の除去土壌は、分級による異物除去を行うため改質材（高吸水ポリマーを含有）を添加
- ・ **湿式分級のふるい通過が困難**
ポリマー成分、放射性セシウム残留、締め固め強度不足の恐れ
- ・ **改質材の残留した除去土壌の品質向上に対応できる改質技術を提案**

開発技術について(1) 加圧浮上処理

- 加圧浮上による処理：マクロ気泡により土壌中の残留ポリマー成分・付着土粒子を分離。土壌有機物の分離
- 細粒土除去：上方流より粒径75 μ m未満の細粒土粒子を浮上分離。放射性セシウムの除去

加圧浮上処理による除去土壌の改質

- 土壌に含まれるポリマーの分離のためには湿式比重選別法が好適。適用粒径から加圧浮上法を選定(図1参照)
- マクロ気泡により土壌から残留ポリマー、付着土粒子、土壌有機物を除去(図2参照)
- 加圧浮上槽内の上方流により土壌中の細粒分(粒径<75 μ m)を浮上分離
- 細粒分分離により放射性セシウムを除去、ポリマー・土壌有機物除去により締固め強度の改質を図る

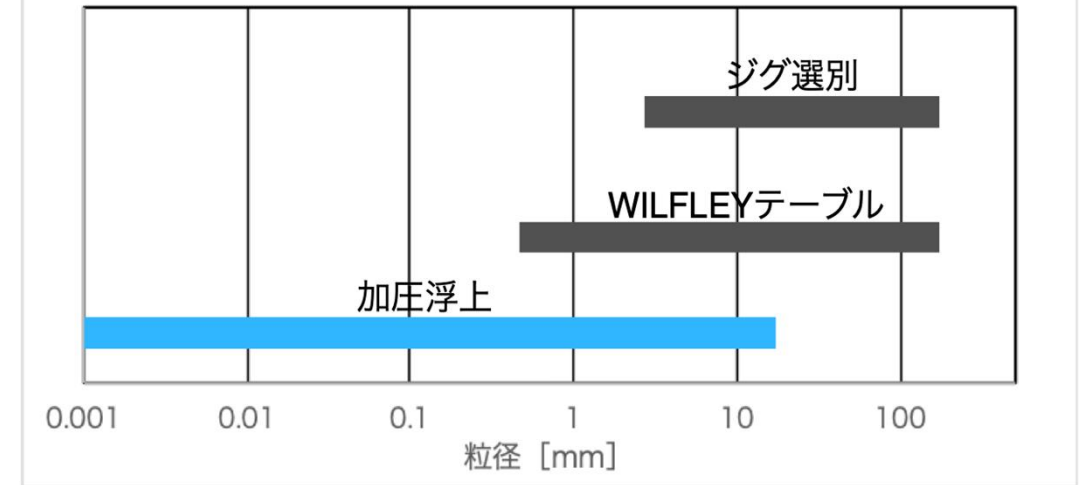


図1 湿式比重選別法と一般的な適用粒径範囲

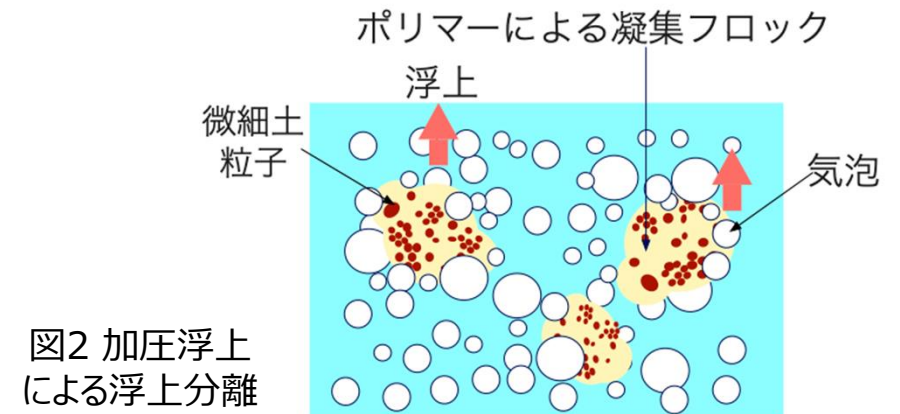


図2 加圧浮上による浮上分離

気泡付着による見かけ比重減少

【研究目標①】

加圧浮上処理により、湿式分級後の土壌から放射能濃度 **30 %以上低減**

開発技術について(2) 吸水性固化材の利用

- 吸水性固化材による処理：固化剤の吸水効果による、ポリマーを含む土の固化処理。環境影響評価も含めた総合評価
- 研究目標 吸水性固化材による改良土のコーン指数800 kN/m²以上、固化材コスト3,000 円/m³（土壌）以下

吸水性固化材による再生資材の強度向上

- ペーパースラッジ（PS）灰を基材とする固化材の適用（図3参照）
- 吸水改質が固化原理であるためポリマー、有機物を含む土の強度改良に有効だと考えられる
- 処理効果、経済性、環境影響を含めた総合評価

【研究目標 ②】

吸水性固化材による改良土のコーン指数800 kN/m²以上、固化材コスト 3,000 円/m³ 以下

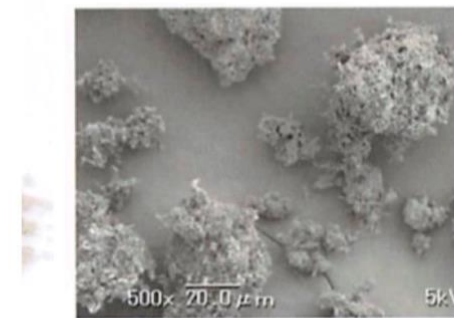


図3 吸水性固化材の写真および拡大写真

主たる試験実施場所

- ラボ試験：早稲田大学リサーチイノベーションセンター
- 現地試験：福島県双葉郡富岡町
- 試験土壌採取：同上（未除染区域）

[ラボ試験]

東京都新宿区早稲田鶴巻町 513
早稲田大学リサーチイノベーションセンター

[現地試験]

福島県双葉郡富岡町内

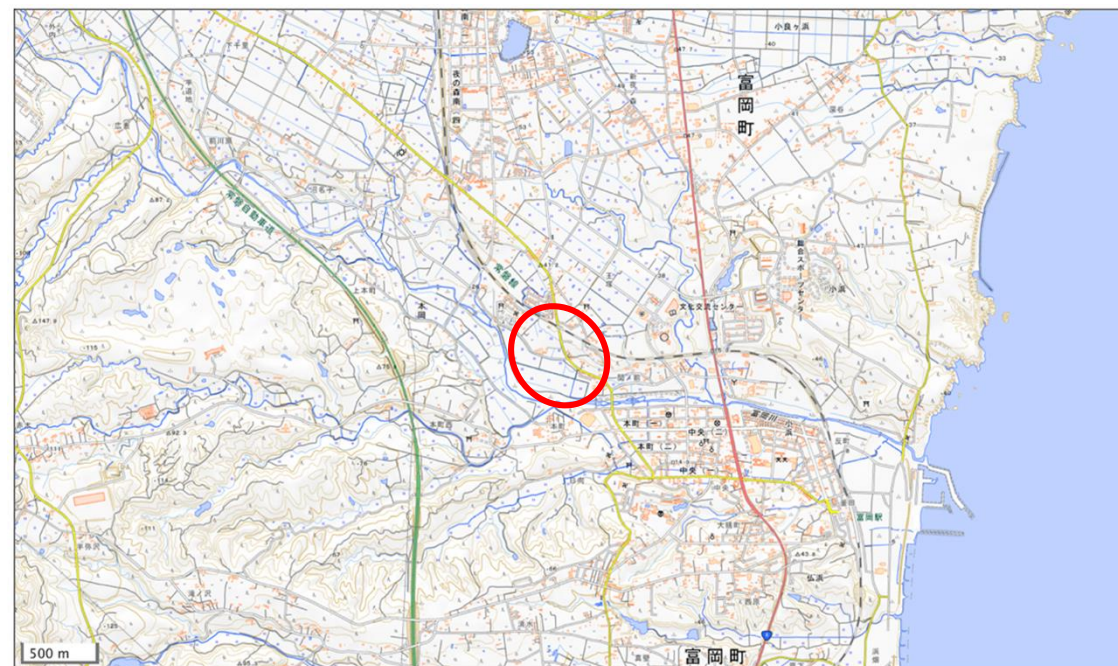


図4 現地試験実施場所地図

【加圧浮上処理】ラボ試験概要

- ラボ試験：容量5Lの加圧浮上試験装置を使用。固形分濃度、圧力などを変化させて試験実施
- 加圧浮上処理後の回収物の評価：強熱減量、示差熱分析、粒度分布

- ・ 容量 5 Lの加圧浮上試験装置
(図5参照)
- ・ 2 種の土壌（粘性土、砂質土）に
改質材を2wt%添加後、湿式分級
を実施（網目75 μ m, 2.0mm）

※回収粗粒土：湿式分級により回収
した土（粒径75 μ m-2.0mm）

- ・ **凝集処理は行わない**
- ・ 固形分濃度、圧力、加圧水注入量
を変化させて試験実施
- ・ 加圧浮上処理効果を強熱減量、
示差熱分析で評価



図5 ラボ試験用加圧浮上装置（浮上槽
5L、圧力0.6Mpa max）

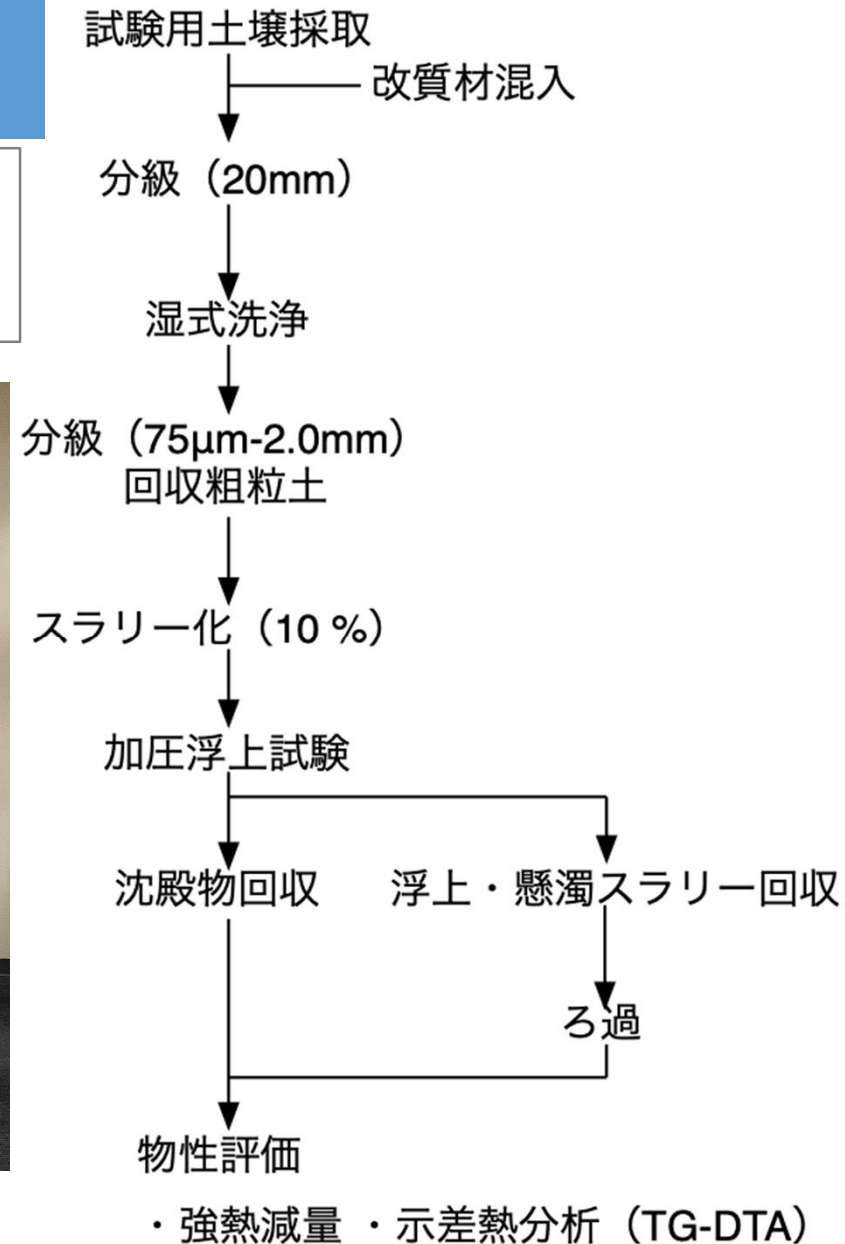


図6 加圧浮上試験の手順

【加圧浮上処理】ラベ試験結果 土壌分析結果

- 砂質土、粘性土に改質材を加え、湿式分級し、回収粗粒土（粒径75μm-2.0mm）を作製
- ラベ試験結果：加圧浮上処理により浮上物の強熱減量増加(200～370 %)。沈殿物は減少(50～70 %)

- 試験土壌：砂質土、粘性土の2種。細粒分：34%・58%、強熱減量：9%・17%
- 固形分濃度(1～7%)、加圧力(0.3～0.6MPa)、加圧水注入量（40-60%）を変化させて試験実施
- 加圧浮上処理により浮上物の強熱減量増加、沈殿物は低下。有機物質は浮上物に濃縮（表3）
- 処理効果は砂質土の方が大。細粒分の含有量に影響される

表2 試験土等の特性

区 分	含水率 [%]	強熱減量 [%]
粘性土（細粒分58 %）	26.8	16.6
回収粗粒土(粘性土、改質材添加)	41.7	16.8
砂質土（細粒分34 %）	14.8	9.0
回収粗粒土(砂質土、改質材添加)	32.6	7.3
T社製改質材	-	15.1

表3 加圧浮上処理回収物の強熱減量測定結果

区分	区分	強熱減量 [%]	対比
粘性土	回収粗粒土①	16.8	—
	浮上物②	34.3	2.04(②/①)
	沈殿物③	12.3	0.71(③/①)
砂質土	回収粗粒土①	7.3	—
	浮上物②	27.2	3.73(②/①)
	沈殿物③	3.8	0.52(③/①)

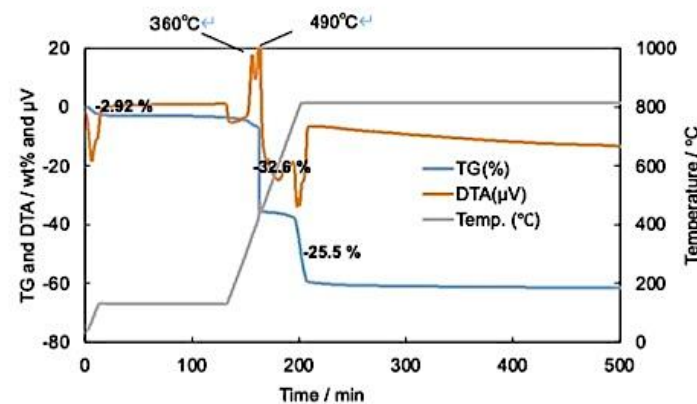
【加圧浮上処理】ラボ試験結果 示差熱分析

➤ 加圧浮上による有機物の分離：示差熱分析、目視観察より改質材に含有するポリマーの浮上分離を確認

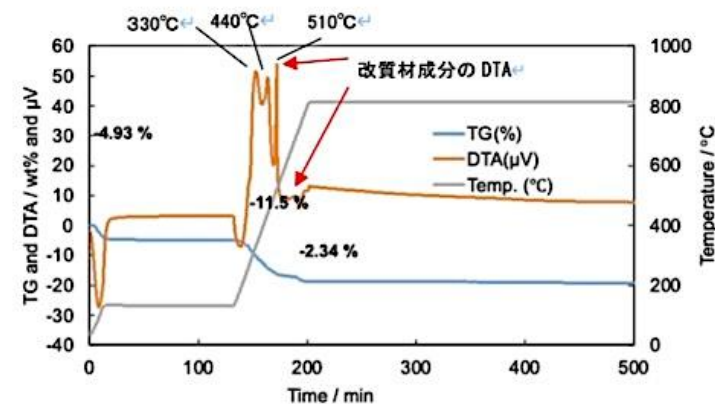
- 加圧浮上処理後の水面に白濁物、コイル状のポリマーを目視確認（図7）
- 回収粗粒土、改質材、加圧浮上処理回収物について熱重量分析、示差熱分析を実施（図8参照）
- 示差熱分析（TG-DTA）結果：浮上物に改質材成分が含まれる



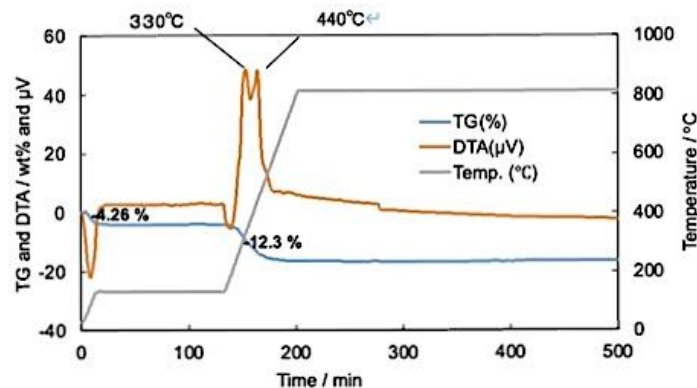
図7 加圧浮上試験後の水面写真



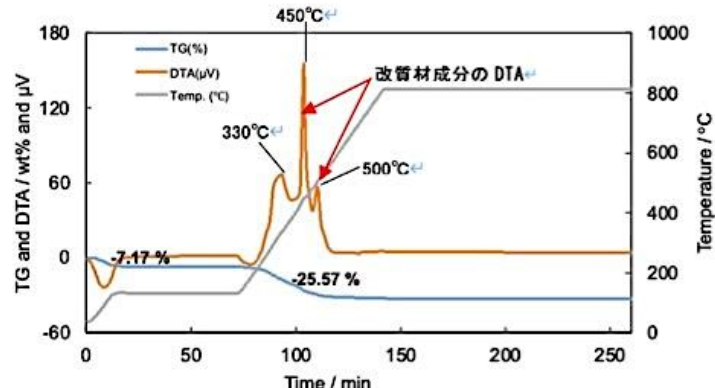
(A) T社製改質材



(C) 回収粗粒土（改質材添加）



(B) 回収粗粒土（改質材添加なし）



(D) 加圧浮上浮上物

図8 改質材、回収粗粒土、加圧浮上処理浮上物の TG-DTA分析結果

【加圧浮上処理】ラボ試験結果 まとめ

- 細粒分の分離：加圧浮上処理により細粒土粒子浮上 粒径サイズ：沈殿物＞懸濁物＞浮上物
- 加圧浮上の効果：浮上物の強熱減量増加(200～370 %)。沈殿物は減少(50～70 %)
- 適用可能性：ポリマー・土壌有機物の分離、細粒土の分離状況より除去土壌処理への適用可能性確認

- 浮上物の強熱減量増加(200～370 %)。沈殿物は減少(50～70 %)
- 加圧浮上処理後の分離土壌の粒径
沈殿物＞懸濁物＞浮上物
加圧浮上により微細粒子が浮上、沈殿物は細粒分含有が少ない（図9）
- ラボ試験結果より、固形分濃度3～5 %、圧力0.45 MPa以上と、現地試験加圧浮上処理の制御条件を決定
- 除去土壌処理への適用可能性を再確認

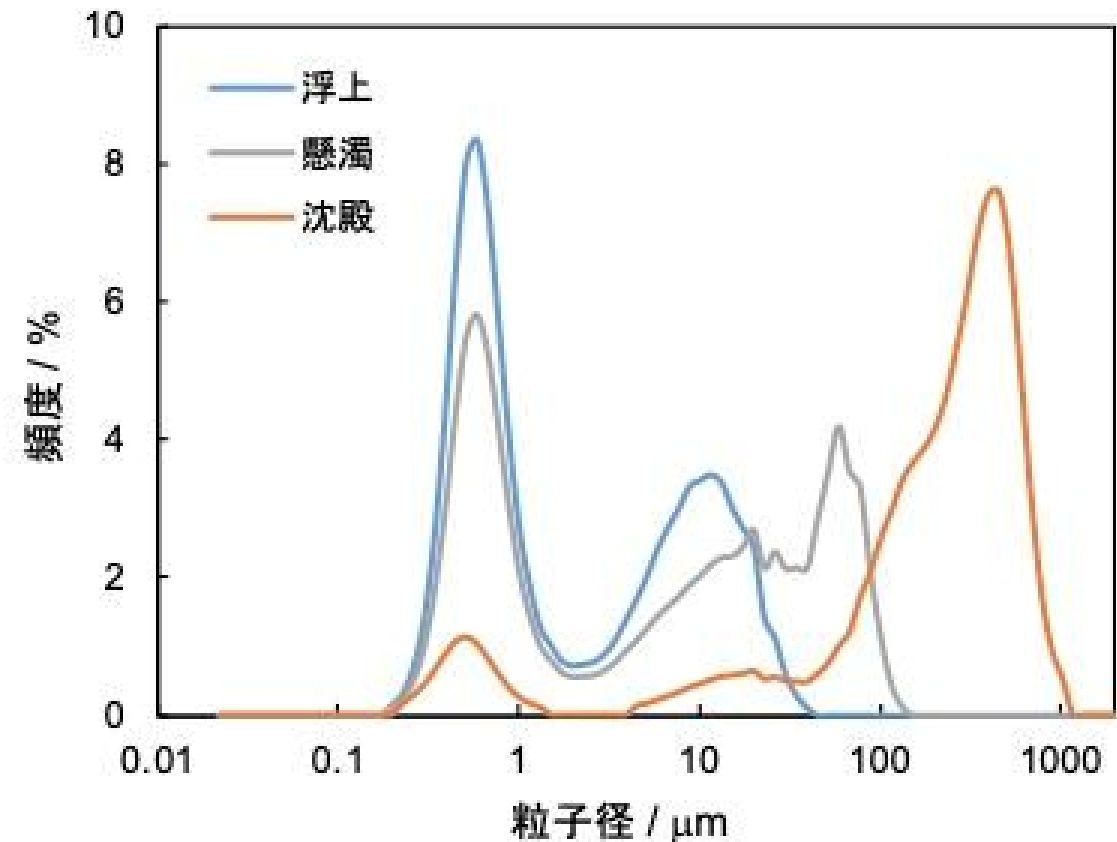


図9 加圧浮上処土壌の粒径分布（粘性土）

【加圧浮上処理】 現地試験手順

- 試験手順：土壌採取→改質材混合→湿式分級→加圧浮上試験
- 加圧浮上回収物の評価：強熱減量、放射能濃度

- 中間貯蔵施設と同じ手順で改質材混合後、湿式分級を実施(図11)
- 福島県内の未除染地域より、試験用土壌 3 種を採取
- 改質材は代表的な製品 2 種を使用
- 加圧浮上試験前後の回収物の強熱減量、放射能濃度を評価



図10 現地試験装置

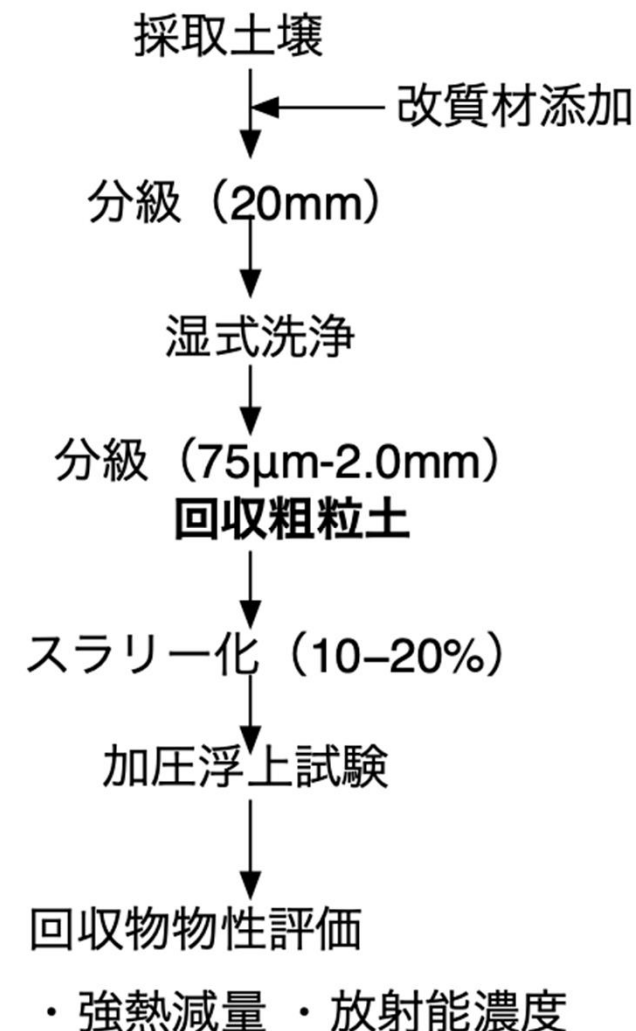


図11 現地試験手順

【加圧浮上処理】現地試験 (1)試験に使用した土壌

- 採取土：粘性土、砂質土の3試料、放射能濃度：4,300～5,700 Bq/kg-dry（平均値）
- 回収粗粒土：放射能濃度：2,200～5,400 Bq/kg-dry（平均値）

- 粘性土2種、砂質土1種を採取。放射能濃度4,300～5,700 Bq/kg-dry（表4参照）
- 改質材を添加、湿式分級を行って回収粗粒土（粒径0.075-2.0 mm）を採取
- 回収粗粒土の放射能濃度（平均値）2,200～5,400 Bq/kg-dry。

表4 現地試験用採取土の特性

採取土	土質分類名	細粒分 [%]	放射能濃度 [Bq/kg-dry]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
c	礫まじり砂質細粒土	64.2	5,000-6,200 平均 5,700	34.9	19.3
d	礫まじり細粒分質砂	25.1	3,900-4,900 平均 4,300	32.2	6.7
e	礫まじり砂質細粒土	54.8	4,900-6,300 平均 5,500	34.3	13.1

表5 回収粗粒土の特性（湿式分級後）

採取土	区分	放射能濃度 [Bq/kg dry]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
c	改質材含有 (T社製)	3,400-4,600 平均 4,000	33.3～44.7	17.6
d		1,900-2,400 平均 2,200	23.5～32.2	5.8
e		4,500-6,100 平均 5,400	37.2～46.6	13.1

【加圧浮上処理】現地試験(2) 加圧浮上装置

- 現地試験装置：加圧浮上槽容量 アクリル製62 L、加圧水供給装置（圧力0.6 MPa、流量max25 L/min）
- 処理条件：加圧力0.6 Mpa、固形分濃度3～5%、滞留時間3～5分、加圧水混入割合：50～65%

- 加圧浮上槽:アクリル製 容量 62 L (図12,13)
- 加圧水供給装置：ファインバブルポンプ（圧力0.6 MPa、流量max25 L/min）
- 処理条件：一般的な加圧浮上処理と比べ、固形分濃度が大きく、滞留時間が短い
- 凝集剤を使用しない
- 浮上物、懸濁物は採取したスラリーから凝集沈殿により回収
- 沈殿物は装置下部から回収

図12 現地試験加圧浮上槽構造（容量62 L）

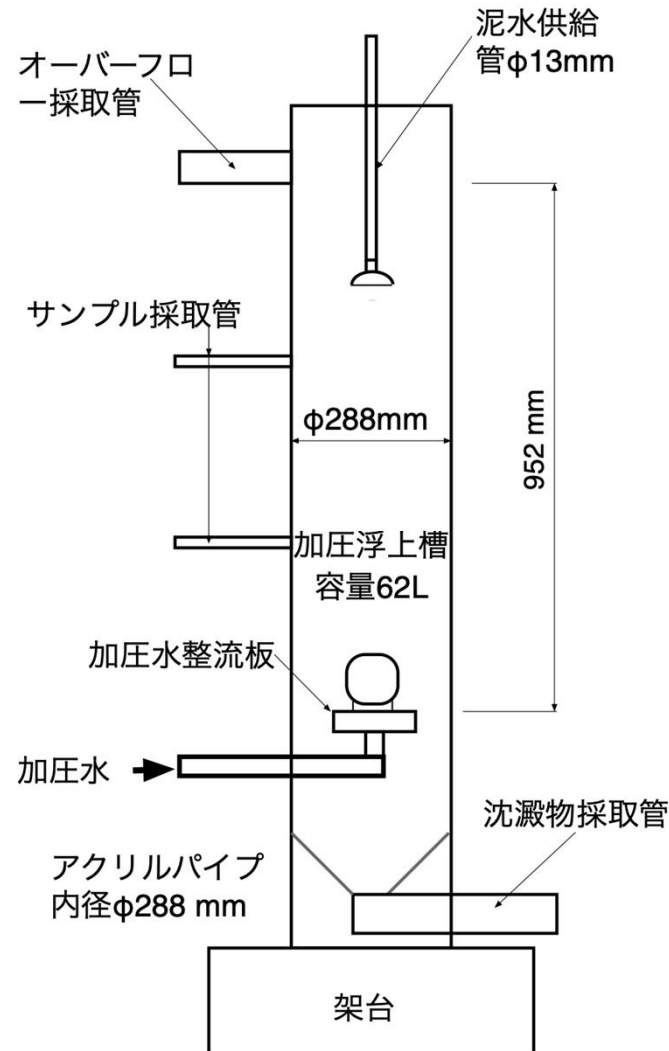


図13 現地試験加圧浮上システム写真

【加圧浮上処理】現地試験（3）試験結果

- 放射能濃度の変化：処理前土壌（回収粗粒土）からの低減率27～44 %
- 強熱減量の変化：浮上物：180～350 %、懸濁物：140～330 %、沈殿物：45～56 %

- 制御条件：加圧力0.6 Mpa、固形分濃度3～5%、滞留時間約4分、加圧水混入割合：50～65%
- 処理前（回収粗粒土）からの強熱減量の変化：浮上物：180～350 %、懸濁物：140～330 %、沈殿物：45～56 %（図14）
- 処理前（回収粗粒土）からの放射能濃度低減率27～44 %、研究目標の30 %以上達成（図15）
- 物質収支／重量収支誤差：7%以下、放射性物質収支誤差：±10%以下

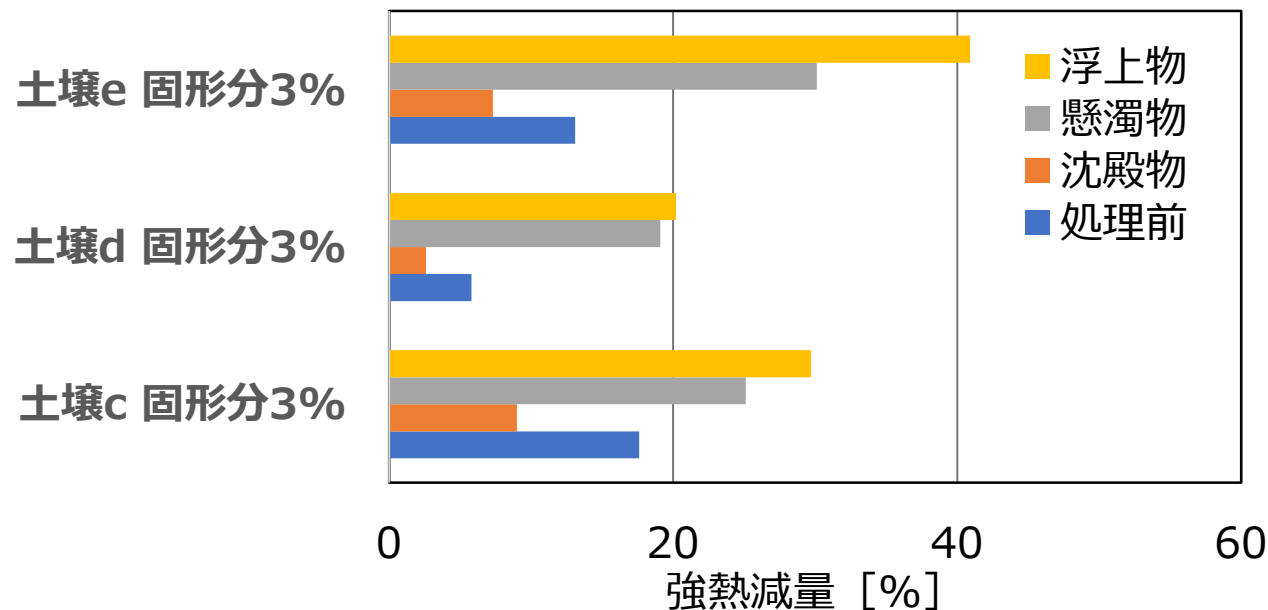


図14 処理後の沈殿物、懸濁物、浮上物の強熱減量

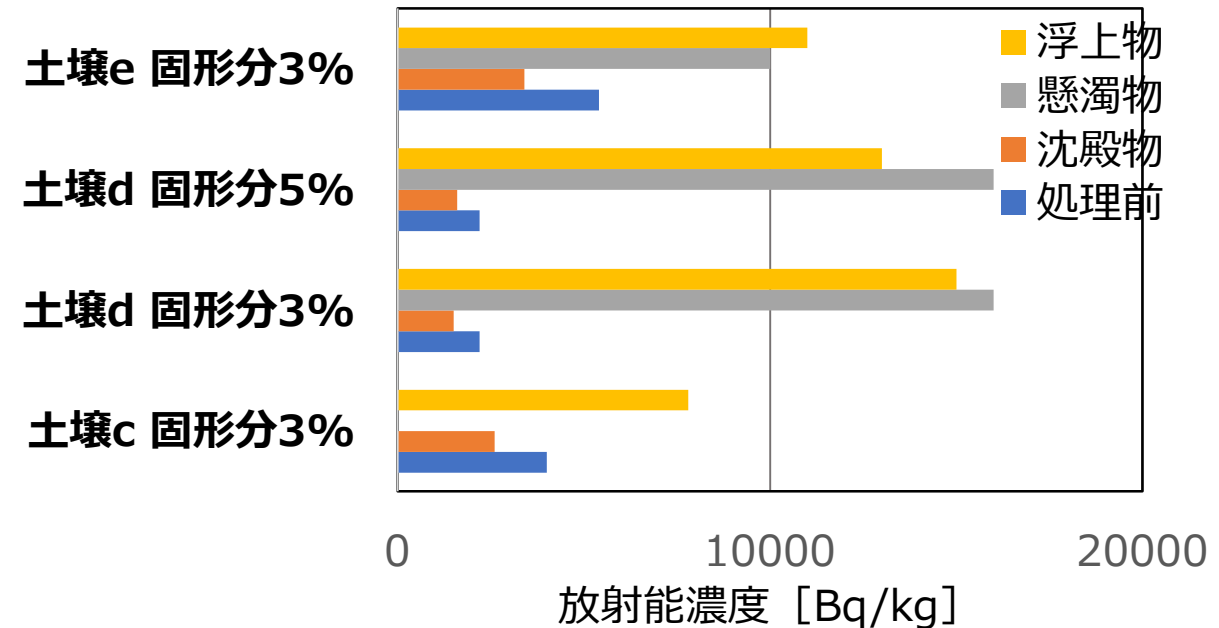


図15 処理後の沈殿物、懸濁物、浮上物の放射能濃度

【加圧浮上処理】現地試験 (4)加圧浮上処理沈殿物の粒度

- 加圧浮上分離物：沈殿物＞懸濁物＞浮上物
- 細粒土粒子の分離：細粒土粒子の浮上分離が可能。沈殿物の20 μm以下土粒子は4%以下

- 分離物の粒径 沈殿物＞懸濁物＞浮上物
- 20μm以下の土粒子の含有率4%以下（表6）
→細粒土分離：放射性物質濃度を低下

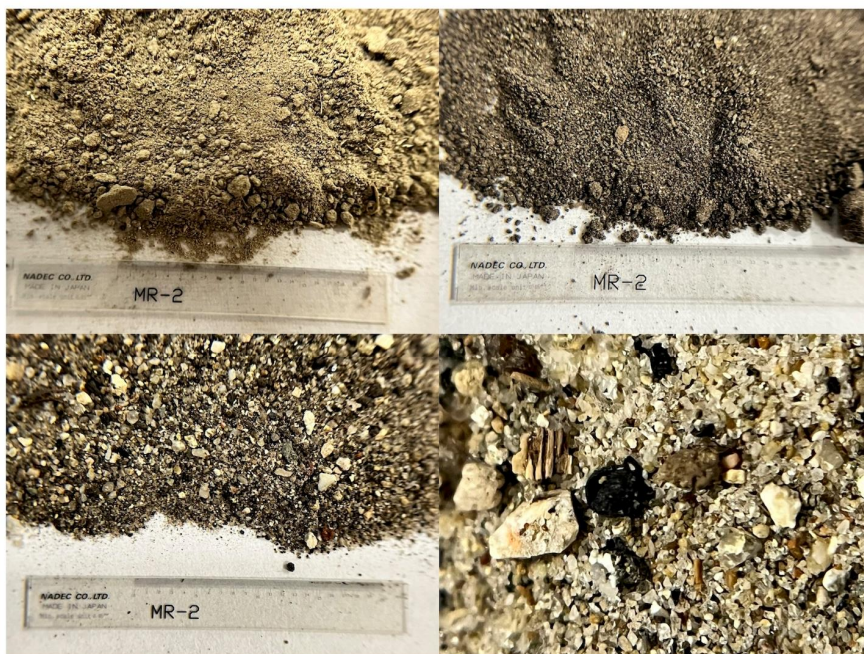


図16 加圧浮上分離物の写真（土壌d）

左上：浮上物、右上：懸濁物、左下：沈殿物、右下：沈殿物（拡大）

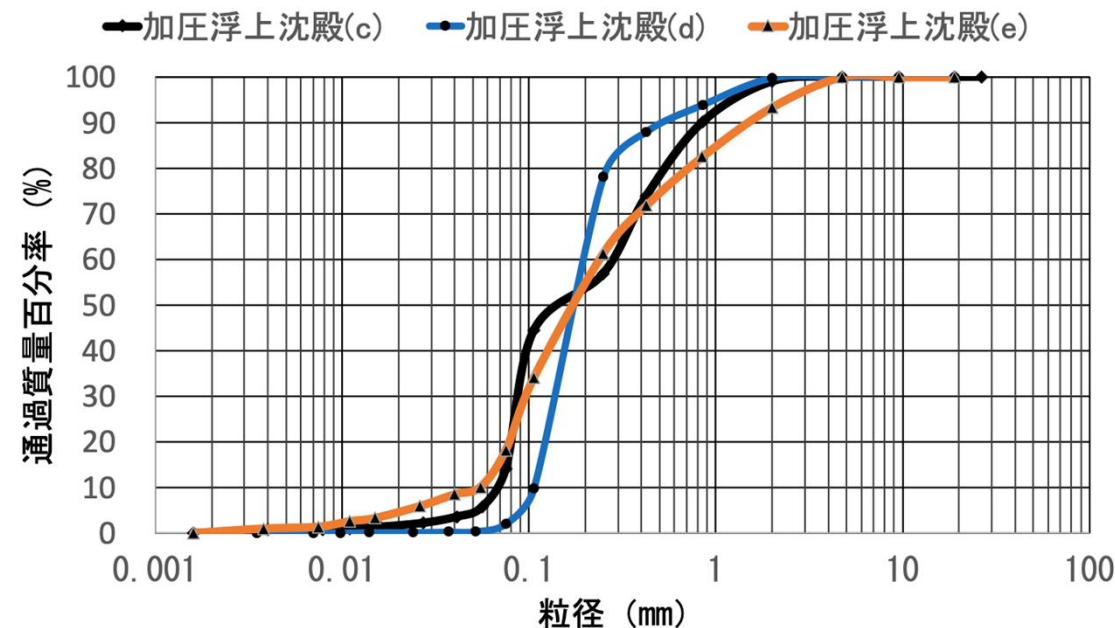


図17 加圧浮上沈殿物の粒径加積曲線図

表6 加圧浮上処理沈殿物の細粒分含有割合

採取土	細粒分含有 [vol %]	
	<75 μm	<20 μm
c	14	2
d	2	0.2
e	18	4

【吸水性固化材】 試験概要

➤ 固化試験：試験土 6 種を用いて、吸水性固化材、高炉セメントB種による改良試験実施

- 採取土を湿式分級した回収粗粒土、加圧浮上処理沈殿物6種の土壌を試験対象（表7参照）
- 吸水性固化材、高炉セメントB種 を使用した固化試験実施（添加量、50,100,150 kg/m³）

表7 試験用対象土の特性

#	土壌	コーン指数 [kN/m ²]	含水率 [%]	強熱減量 [%]
1	土壌 c 回収粗粒土	99.2	44.3	17.6
2	土壌 d 回収粗粒土	118.1	27.8	5.8
3	土壌 e 回収粗粒土	28.3	43.9	13.1
4	土壌 c 加圧浮上沈殿土	94.4	35.3	9.0
5	土壌 e 加圧浮上沈殿土	151.1	38.0	7.3
6	土壌 d 未洗浄土	80.3	36.2	7.1



図18 固化試験状況

【吸水性固化材】固化試験結果

➤ 固化試験結果：吸水性固化材は強度発現が早く、ほとんどのケースで高炉セメントB種より固化材必要量が少ない

- 養生3日、7日で目標コーン指数400、800 kN/m²を得るための改良試験を実施
- 固化試験のほとんどのケースで吸水性固化材の必要添加量が高炉セメントB種を下回る結果（図19、図20参照）

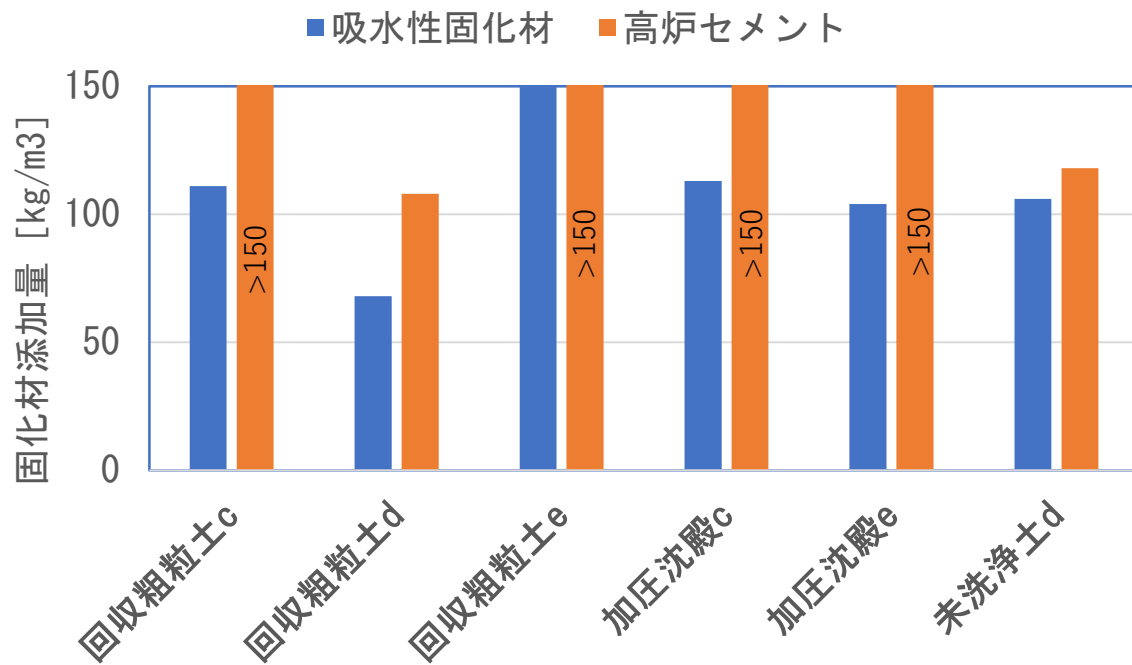


図19 必要添加量の比較
(養生7日、目標コーン指数800 kN/m²)

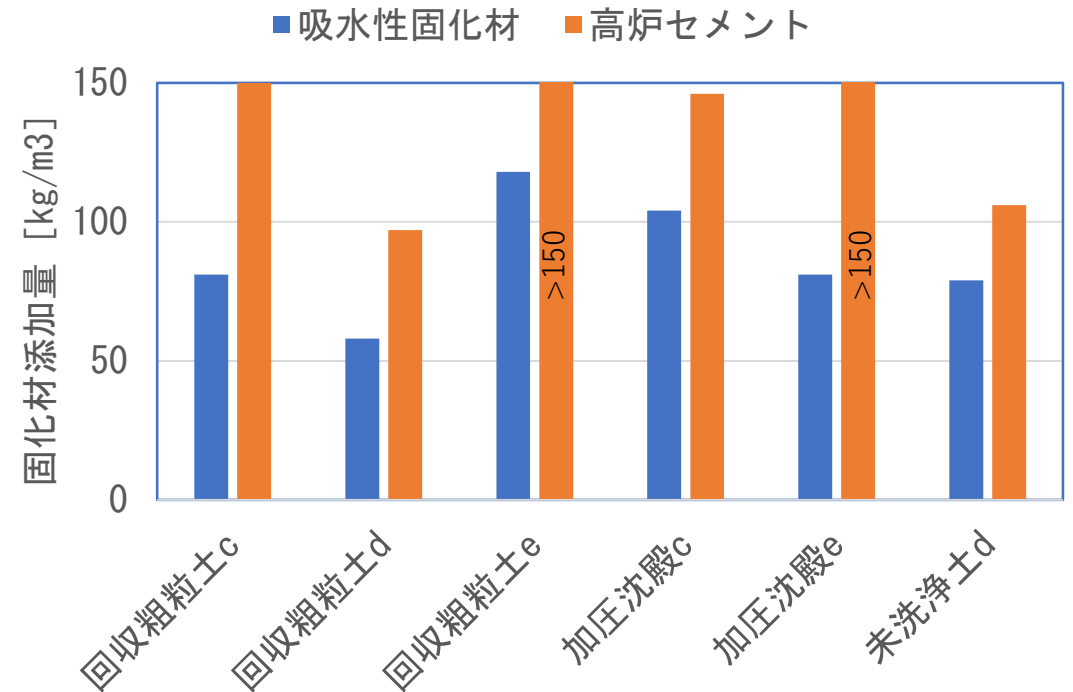


図20 必要添加量の比較
(養生3日、目標コーン指数400 kN/m²)

【吸水性固化材】固化メカニズム

➤ 固化メカニズム：吸水性固化材が高吸水ポリマーと接すると水が移動。固化機能に関与

- 20倍（重量）を吸水させた高吸水ポリマーと吸水性固化材を重量比1:1で混合すると、数分後に水が浸出
- 固化材からの多価イオン溶出に伴うポリマーからの水分移動が固化機能に関わると考えられる（図21、表8参照）

表8 吸水性固化材主成分

成分	含有量 [mg/kg]
Na ₂ O	<200
MgO	13,700
Al₂O₃	107,700
SiO ₂	119,000
CaO	529,800



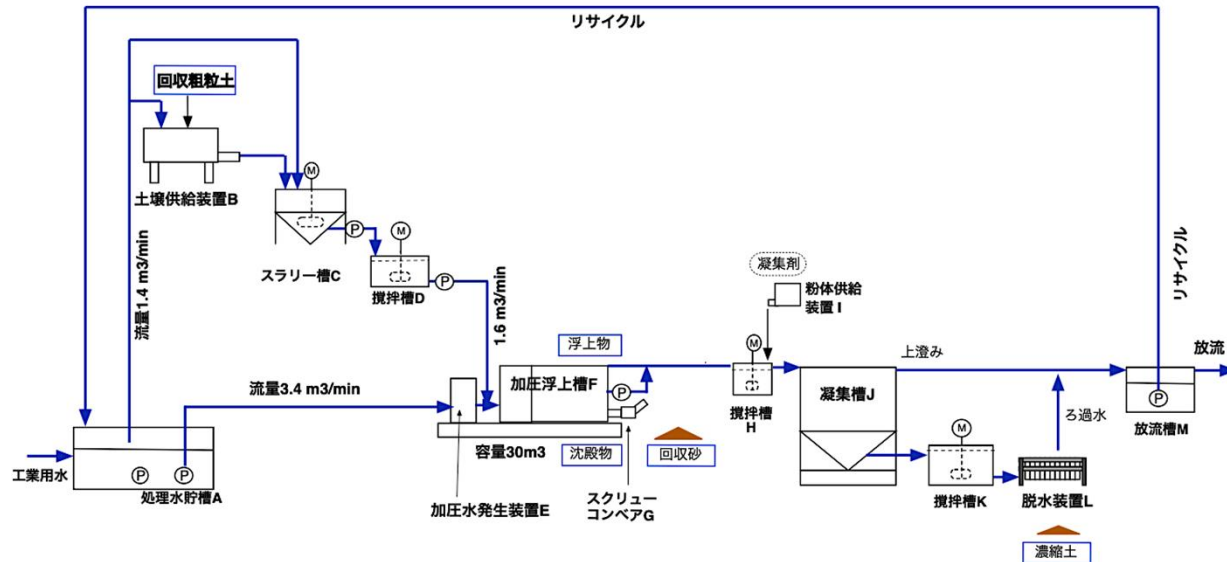
図21 20倍吸水ポリマーと吸水性固化材との混合後の写真

処理コスト

- 加圧浮上処理コスト：21千円／トン（処理土壌有姿重量あたり）
- 吸水性固化材材料コスト：養生7日800 kN/m²：1,260～1,640 円/m³、
養生3日400 kN/m²：1,080～2,190 円/m³

加圧浮上処理コスト

- 処理コスト：21千円／トン（処理土壌有姿重量あたり）
- 試算条件：1日当たり7時間作業処理量100トン、月22日、5ヶ月間で1万トン进行处理。水の7割を循環利用



吸水性固化材の材料コスト

- ①養生7日800 kN/m²：
固化材必要添加量 68～113 kg/m³
コスト1,260～1,640 円/m³
- ②養生3日400 kN/m²：
固化材必要添加量 58～118 kg/m³
コスト1,080～2,190 円/m³
・処理コストはセメントとほぼ同等

図22 加圧浮上システム図

【加圧浮上処理】実証試験結果まとめ

➤ 加圧浮上処理：除去土壌処理への適用の有効性を確認。再生土品質向上に役立つ

試験結果まとめ

- **除去土壌処理への適用の有効性を確認**
- 除去土壌からポリマー成分、有機物質を除去、放射性物質を低減可能。再生土の品質向上に有効
- 加圧浮上処理により、処理前土壌からポリマー・有機物除去（強熱減量44～55 % 減少）、放射能濃度を 27～44 % 低減。

今後の課題

- 処理効果の向上
- スケールアップと連続操作の実現
- 設備改良 ①連続供給装置の実用化 ②加圧浮上装置構造の最適化
実用化を目指して引き続き研究を継続中

【吸水性固化材】実証試験結果まとめ

➤ 吸水性固化材による処理：処理効果が高く、経済性・環境調和性についても優れている

試験結果まとめ

- 高含水の土、有機分を含む土の締固め強度改良に有効
- 短期間に強度発現が得られ、高い実用性
- 経済性に優れている
- セメントと比較し、pH、有害物質溶出などの面で環境影響が小さい

今後の課題

種々の除去土壌を用いた評価データの蓄積

本研究は、中間貯蔵・環境安全事業株式会社が環境省より受託した令和4年度中間貯蔵施設の管理等に関する業務の成果の一部である