

付録 3

各技術のまとめ

各技術のまとめ(1/3)

事業分野	No.	実施代表者	実証テーマ名	全体概要	結果・まとめ	結果の自己評価・意見	作業員被ばく量評価	コスト評価	コスト評価条件	歩掛り (作業人工、 作業速度等)	作業における 安全上の注意
除去土壌等の減容・再生利用等技術	1	株式会社大林組	溶融スラグの再生利用等技術の実証	双葉町仮設焼却第一施設および双葉町仮設灰処理第一施設(以下、「双葉町仮設処理第一施設」と記す)では、シャフト炉および表面溶融炉により除染廃棄物等やその焼却灰等が溶融処理され、安定した高品質の溶融スラグが生成されている。 本実証は、当該施設で生成される溶融スラグの再生利用を円滑に進めるため、利用用途(盛土材、路盤材、アスファルト舗装骨材、コンクリート骨材)に応じた再生利用品の安全性、安定性を確認することを目的として実施した。 今年度(3年計画の最終年度)は、室内試験、昨年度構築した盛土およびアスファルト舗装道路の供用時、解体時のモニタリング等を実施した。	実証試験の結果: 1. 構築物(盛土、舗装道路)供用時・解体時のモニタリング結果 ・盛土、舗装道路とも、モニタリング期間を通して空間線量率の変動は小さかった。盛土は、構築時の値よりも低い値が継続的に測定され、覆土(厚さ50cm)の遮へい効果が確認された。 ・舗装道路に対する促進載荷走行および機能確認試験の結果、舗装道路の品質は、溶融スラグ配合の有無や溶融スラグの種類によらず、全5工区とも同程度であることが確認された。溶融スラグを配合する場合でも、従来用いられている舗装道路の設計手法を適用できるものと考えられる。 ・モニタリング期間を通じて、盛土浸出水、舗装道路雨水表流水・浸透水(舗装直下の路盤・砕石層より採水)の水質は、放射性物質濃度は定量下限値未満であり、重金属等濃度も地下水環境基準に適合しており、人の健康保護および生活環境保全上の問題は認められなかった。 ・粉じん濃度、大気中放射性物質濃度、作業員被ばく量の測定結果から、周辺環境や作業員への影響は低レベルであることが確認された。 2. 室内試験の結果 ・国道等で多く採用されている排水性舗装用骨材として適用可能であることを確認できた。 ・1年間屋外暴露したコンクリート供試体について、圧縮強度の低下等、品質の低下や劣化は認められなかった。 3. 今後の展開 ・今後の再生利用に向けて、これからも環境安全性に関するデータを蓄積し、評価していくとともに、3年間の実証事業等で得られた成果を積極的に公表していく予定である。	溶融スラグを配合した盛土材、路盤材、アスファルト舗装、コンクリートが、土木資材として適用可能なことを確認できた。溶融スラグ再生利用先の拡大が期待できる。	放射性物質濃度が3,000Bq/kg程度の除去土壌、1,000Bq/kg程度の溶融スラグが混合された盛土の解体等を担当した作業員の一日当たり平均被ばく線量の最大値は、上限値として設定した75 μ Sv/dを大きく下回る2.4 μ Sv/dであり、被ばく線量は低かった。	盛土材製造645 円/t	稼働日数240 d/y×1y、処理数量211,200t(除去土壌118,080t、溶融スラグ93,120t)	880t/日	溶融スラグには放射性物質が含まれるため保護具を着用
	2	大成建設株式会社	除去土壌と溶融飛灰と脱水ケーキ等をジオポリマーの固化化材料として利用する技術	本技術実証は、放射性セシウム(Cs)が高濃度に濃縮された除去土壌、溶融飛灰、脱水ケーキについて、長期的な安定保管、Cs浸出抑制の観点から、ジオポリマー固化化処理の試験を通じ、Cs保持性の高い再生利用資材化技術の検討を行うことを目的とし、将来的に安定な保管と最終処分量の減量化および安全な処分を実現することを目標とする。	(1)コールド試験／ホット試験 【物性測定試験】 ・本試験に使用した溶融飛灰や一般／除去土壌には、ジオポリマーの固化化に寄与「Al」や「Si」が含まれていることを確認した(一部片方の元素のみ)。 【ジオポリマー配合検討試験】 ・ジオポリマー固化化用溶液配合とバインダー量(溶融飛灰、メタカオリン、脱水ケーキ(分級処理後の細粒分)、土壌(分級処理後の細粒分))を変化させジオポリマー固化化体を作製し、強度評価を実施した。 【ジオポリマー性能試験】 ＜一軸圧縮強度試験＞ ・ジオポリマー配合検討試験時に「堅固」と評価された配合とメタカオリンの代替材として脱水ケーキ(分級処理後の細粒分に処理を加えたもの)を使用した配合に対し、一軸圧縮強度試験を実施した。一部の配合にて、目標強度(一軸圧縮強度1,470kPa)以上になった。 ＜浸出試験＞ ・一軸圧縮強度試験にて目標強度以上かつ溶融飛灰の充填量が高いかつジオポリマー固化化体の作製コストが安価な配合とメタカオリンの代替材として脱水ケーキを使用した配合に対し、浸出試験を実施した。全ての配合にて、セメント固化体の浸出率(約80%)未満になった。 (2)最終処分の安全評価 ・浸出試験にて取得した浸出率を用いて、経過時刻に対する年間被ばく線量を算出し、めやす線量である10 μ Sv/yを下回った。	溶融飛灰、脱水ケーキ、土壌を材料(再生利用)としたジオポリマー固化化体が目標強度以上であり、Csの浸出率がセメント固化体より低い値になることを確認した。また、安全評価等を通じて、本技術が安定・安全に最終処分が可能なことを示せた。	放射性の溶融飛灰を扱う試験より得られた情報を基に試算した結果、作業員の年間の外部被ばくは8.960mSv/y程度であった。よって、線量限度(20mSv/y)を超えないため被ばくの観点における安全性は確保できる。	溶融飛灰(99,000t)を対象 4.8万円/200Lのドラム缶	実機プラントの仕様は、溶融飛灰を材料としたジオポリマー固化化体(200Lドラム缶)を228本/d(24時間操業)、10年間製造とし、作業員は57人(19人×3班)で行うこととした。	作業人工:57人工(19人×3班) 作業速度:10本(200Lのドラム缶)/h	実機製造プラントでは溶融飛灰や除去土壌、水酸化カリウム等を大量に取り扱うため、粉塵飛散防止策の強化、防護具着用の徹底等が必要となる。
	3	除去土壌等減容化・再生利用技術研究組合(VOREWS)	除去土壌を分級処理した砂をコンクリート用細骨材に利用するための技術実証	除去土壌を分級処理して得た分級砂の細骨材としての適合性を確認するため、①～④に示す分級砂の細骨材品質試験を行った。 「①既往実証試験の通常分級砂」 「②既往実証試験の高度分級砂」 「③稼働中の受入・分別施設3か所から新規に採取した分別後土壌を湿式分級した通常分級砂」 「④上記③を高度処理した高度分級砂」	1. 練り混ぜ水適合性試験 全てのケースでJIS規格に適合する結果となり、受入・分別施設に併設した井戸の水は、コンクリート練り混ぜ水として利用可能であることを実証した。 2. 細骨材品質試験 ・各種分級砂の細骨材品質試験を行い、コンクリート細骨材としてのJIS適合性を確認した結果、若干の課題があるものの、分級砂がコンクリート細骨材として利用可能なことが示された。 ・粒度調整した山砂を添加することで、細骨材適正粒度範囲に調整が可能である。 ・高度分級処理により、粘土境量は基準適合することが分かった。 ・有機不純物が基準不適合となる場合が多いが、高度分級処理・ジグ選別処理で有機物を除去することで、呈色状況が改善されることから、購入者の承認により、再生骨材として利用できる場合がある。 ・湿式分級処理する際には、洗浄水の塩化物量管理が必要であることが分かった。 3. 主な今後の課題 ・配合・強度試験、耐久性試験による分級砂の再生細骨材への詳細な適用性の確認 ・分級砂を用いたコンクリート製品からの追加被ばく線量測定による安全性評価	分級砂は山砂混合による粒度調整により、再生細骨材に利用可能であることが示された。今後、配合・強度試験等による分級砂の再生骨材への適用性の検証を進める予定。	作業時の被ばく量の平均値1.3 μ Sv、最大値3.0 μ Svと低かった。	湿式分級処費26,200 円/t＋粒度調整費4,650円/t(山砂混合率50%の場合)	通常分級処理プラント(40t/h級)5系列、高度分級処理プラント(20t/h級)1系列を建設し、土壌C(132万m ³)を5年間で処理することを条件とした。	40t/h、「中間貯蔵施設内における除去土壌の分級処理システム実証試験」の検討結果より引用	湿式分級処理により8,000Bq/kg以下に除染した分級砂をコンクリート用細骨材に再生利用する技術であるので、粉じん対策が必要である。令和5年度にコンクリート製品の追加被ばく量について検討し、評価する予定。
	4	鹿島建設株式会社	高吸水性樹脂含有改質材を含む低放射能濃度除去土壌を大量に再生資材化するための品質調整技術の実証	土壌Aおよび土壌Bは再生資材としての利用が検討されており、その合計は除去土壌全体の86%を占めていることから効率的な品質調整技術が求められる。本実証試験の目的は土壌Aおよび土壌Bの土木資材としての有効利用するための改良技術の立証である。除去土壌を用いて改良材の配合試験を行い、強度や環境安全性の観点から改良材を選定した。また混練機プラント実機での改良試験運転、盛土試験およびカラム試験による改良土の物理・化学的安定性の評価を行った。	実証試験の結果:主な検討項目の結果を以下に示す。 A. 改良材の選定 6種類の改良材から、強度面・環境安全面・コスト等を比較し、改良材の選定を行った(下表は代表3種類)。本試験では酸化マグネシウムとセメントの2種類を選定し、B.改良試験とC.盛土試験に適用した。 B.実機を用いた改良土製造 本実証事業では時間当たり処理量が多い回転筒式混合方式を使用して、混練機プラントでの改良試験を行った。Aで選定した2種類の改良材を用いて改良土を製造し、いずれの場合も所定のコーン指数が得られたことを確認した。 C. 改良材を添加した土壌の物理的・化学的な安定性評価 改良土2種類と原土の3種類の土壌で盛土を構築し、施工においては締固度90%以上、改良土のコーン指数 qc=800kN/m ² 以上となることを確認した。3か月間の盛土試験の結果、原土は3か月間で9mm沈下した一方で、改良土では約30日目までの2～3mm沈下したのにとどまり、その後は安定していることが確認された。いずれの盛土内でも硫化水素やメタンといった有害ガスの発生は認められず、盛土材として安定して使用できることを確認した。カラム試験では改良土の方がヒ素やフッ素、BODの濃度が高くなる傾向があった。本試験では土壌環境基準相当よりは低い濃度であったものの実際に使用するときには事前試験するなど検討が必要であることが分かった。当初懸念されていた六価クロムはほとんど溶出していないことを確認した。	酸化マグネシウムおよびセメントを選定して実機で改良試験を行い、除去土壌の改良が適用可能であることを示すことができた。また盛土試験やカラム試験で強度面・環境安全性の面での安定性を評価するためのデータが取得できた。	盛土作業ヤード内空間線量率 最大0.42 μ Sv/h 作業員被ばく量の最大72.5 μ Sv(実働26日間)	土壌1m3あたり 材料費:800～1,600 円 改良工:約2,000円	材料費 高炉セメントB種(添加量40kg/t)～酸化マグネシウム(添加量10kg/t) 自走式土質改良機改良機(1)、0.8級BH(投入1積込1)、10tDT(場内運搬6)	処理速度:80m ³ /h(自走式土質改良機)～250m ³ /h(回転筒式ミキサー)	改良材を使用する作業では粉じん対策(保護マスク等)を実施する。プラントは土木工事で実績がある機械であるが、挟まれ事故等の対策を実施する。

各技術のまとめ(2/3)

事業分野	No.	実施代表者	実証テーマ名	全体概要	結果・まとめ	結果の自己評価・意見	作業員被ばく量評価	コスト評価	コスト評価条件	歩掛り (作業人工、 作業速度等)	作業における 安全上の注意
除去土壌等 の減容・再生利用等技術	5	法政大学	除去土壌中の放射性セシウムの溶融塩・酸処理法による脱離とゼオライトを用いた回収・安定化による減容・再生利用技術の開発	除去土壌の多くは中間貯蔵施設に持ち込まれ、今後はこの土壌の再生利用を推進すると共に放射性 セシウムCs)を除去・濃縮し、最終処分量を減らすことが求められる。本事業では、高効率かつ低コストな除去土壌の減容・再生利用を推進することを目的に、放射性 C s濃度1.5万Bq/kg以上の除去土壌（環境省技術戦略における 土 壌C、Dを想定し、福島 県内における土壌中の放射性C sの溶融塩・酸処理による脱離、ゼオライトによる回収・安定化および浄化物の再生利用に関する実証試験を実施する。	・性状の異なる11試料を所定条件で溶融塩・酸処理 した結果、いずれの土壌も95%以上の放射性Cs除染率、8千Bq/kg以下の放射性Cs濃度、98 以上の減容率を達成した。また、2万q/kg程度の土壌であれば、溶融塩量と酸濃度を減少させても、高い除染率を示すことが分かった。 ・モルデナイトカラムにより、酸廃液中の放射性Csを85%以上回収できることが明らかになった。 ・モルデナイトのアルカリ水熱処理により、Csを固定可能なポルサイトに転換でき、平均9 0の高い放射性Cs移行率を示した。 ・マスパランスの計算結果から、いずれの工程も0.8以上の高いCs分配比を示すことが明らかになった。 ・浄化物は、小松菜やビオラ 等の植物栽培培地に利用でき、また、アルカリ水熱処理により、Cs吸着材等として利用できるモルデナイトへ転換できることも明らかになった。 ・酸廃液を酸処理工程において、5 回繰り返し利用しても高い除染率を保持した。	本年度の目標を達成でき、いずれの処理工程においても高いCs分配比を示すことを明らかにした。放射性Cs濃度によっては大幅な薬品コストの削減ができ、処理装置の簡素化も期待できる。浄化物や酸廃液の再生利用も可能 なことから、有用な減容・再生利用技術として 期待できる。	2万 Bq/kg 程度の放射能濃度の 除去土壌では、一人当たり年間 1 mSv 以下の被ばく量になる、それ以上の放射能濃度の除去土壌に対しても対応できるように年間作業時間を管理する。	13 万円 /t 土壌（設備費、薬剤費、人件費、光熱費から算出	設備費は 20 年で減価償却、薬剤費は土壌に対して10%塩化カルシウム添加、0.0 1M塩酸を土壌の10 倍量 20 g/200 mL) 添加、人件費は4名各工程1名8h/dとして算出した。なお、水道料金や廃棄物処分費は考慮していない。従来の化学処理より低環境負荷かつ低コストな処理が実現可能である。	作業速度等管理者1名、作業員3名 主な4作業工程を1日で実施。	土壌微粉末を扱うときは、防護マスクをしてドラフト内で作業する必要がある。特に濃縮物を取り扱うときは注意する必要がある。
	6	株式会社不動産テトラ	除去土壌Cに対して20μmを分級点とする分級と脱水処理システム	中間貯蔵受入分別施設では各工区で保管された除去土壌を高分子系土質改質材で改質した上で濃度選別や異物除去を行っている。除去土壌のうち土壌Cは、農地由来の粘土土が多くを占める。したがって、75 μ m以下の土壌と有機物を多く含み、この有機物が原因となって団粒化していることが多い。そこで、有機物を分解すると、細砂とシルト・粘土の分級処理精度を向上することが期待できる。また、放射性セシウムは主に20 μ m以下の粘土鉱物に強く吸着していることから、分級点を75 μ m未満とした新たな減容化技術が開発できれば、処理コストの低減と共に除染率の向上も見込むことができ、再生利用可能な分級土壌の対象を広げることができる。提案技術は、分級処理の前処理としてオゾンと過酸化水素を添加することで、促進酸化処理により有機物を分解する。これにより、団粒化している有機物・粘土鉱物を除去した後、分級点を20 μ mとする高性能固液分離機を用いた分級処理で減容化率と除染率を向上させる。	1. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた有機物分解試験 ①酸化分解による有機物の分解率は、目標80%以上を達成するための必要オゾン量(TOCで1mg分解するために必要なオゾン量)を確認した。また、オゾンと過酸化水素の添加量の最適比が15～20mol%であることが確認できた。 ②溶存有機態炭素分離測定(LC-OCD):酸化分解により、高分子有機化合物から分解が進行し、フミン酸類からフミン酸崩壊物質を経て低分子有機化合物・低分子有機酸へと分解し、二酸化炭素と水に分解していた。 2. 低濃度放射性セシウム含有土壌を用いた分級処理試験 ①減容率と除染率:減容率は、目標の68.5%を達成できたが、除染率は35%～70%で目標の88%に未達で、減容率と除染率の目標値を同時に達成できなかった。除染率が目標を達成できなかった原因は、土壌の初期濃度が低濃度の土壌であること、土壌に存在する黒雲母が選択的にCsを吸着し分級物の放射性Cs濃度下限値があることが原因であることが判明した。したがって、土壌が高濃度であれば、除染率も目標の88%を容易に達成できると考えられる。 ②SEM-EDX試験:有機物の指標である炭素濃度(質量濃度)の比較から、酸化分解により炭素濃度は減少し、砂粒子への有機物の付着が減少していることが確認できた。	促進酸化法による有機物の分解率は、目標80%を達成するために必要なオゾン量とオゾン/過酸化水素の添加量の最適比が求まった。固液分離機による分級処理は、減容率は目標68.5%を達成した。除染率は最大70%程度で目標88%の達成には至らなかったが、その原因は特定でき、実用化では除染率も達成可能なが判明した。脱水処理の含水率からフィルタープレスを必要としないことが確認でき、連続運転が可能である。	実証試験場所は居住制限区域外であった。ポケット線量計で日常管理の結果した結果、全作業員・全日で線量等量は0.3～1.7 μ Svであった。	実用化時の概算処理費は、1t当たり概算で32,000円となる。	含泥率8%、稼働率0.9、24h連続運転。反応槽による有機物分解処理(80m3×4台)/6h×4回/日)、固液分離器による分級処理(40m3×1台×泥水投入700L/分)、脱水処理(40m3×2台×泥水投入50L/分)6セプト15年で65万m3(124t)処理。	連続運転とすることで作業人工を削減できる	有機物分解、分級処理、脱水処理まで24h連続運転が可能で、遠隔操作で放射能に対する被ばくりスクは小さく、作業環境の安全性も確保することができる。
	7	早稲田大学	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	中間貯蔵施設内では、多くの除去土壌に高吸水性ポリマーなど有機成分を含む改質材が添加されている。このため湿式分級後の回収粗粒土にはポリマー成分が残留し、放射性物質濃度が高く、軟弱化する傾向が認められる。下記の2つの技術を用いて、回収粗粒土の放射性物質濃度低減、締固め強度の改善を図り、再生土の品質向上を目指した。 ①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減 ②吸水性固化材による再生資材の強度向上	① 湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減 現地試験における加圧浮上処理沈殿物の放射性物質濃度は処理前の土壌から概ね30%以上の低減率を示し、設定目標を達成した。処理により土壌中の有機物質、微細土粒子が分離し、放射性物質濃度は浮上物・懸濁物に濃縮する効果を確認した。 ② 吸水性固化材による再生資材の強度向上 養生日数3～7日の強度試験結果において、全サンプル土壌について高炉セメントB種より吸水固化材の改良効果が高い結果となった。懸濁液pH測定、有害物質の溶出試験結果から、環境調和性に優れており、経済性についても当初目標である固化材コスト3,000円/m3以下を達成した。	①湿式比重選別による再生資材の放射性物質濃度低減 加圧浮上処理沈殿物の放射性物質濃度は処理前の回収粗粒土から概ね30%以上低下し、設定目標を達成した。沈殿物から20 μ m未満の土粒子が除去されており、微細土の分離技術としても有効な結果を示した。 ② 吸水性固化材による再生資材の強度向上 養生日数3～7日が高炉セメントB種より強度改良効果が高く、経済性に優れた結果となった。また、有害物溶出など環境調和性についても良好な評価結果となった。	回収粗粒土の処理を行う本技術では、扱う土壌の放射性物質濃度は1万Bq/kg程度と予想される。加圧浮上処理、吸水性固化材による固化処理とも最大年間被ばく量は0.74 mSvと推定され、安全性に問題ないと判断される	加圧浮上処理コストは回収粗粒土処理費(有姿)21,000円/トン。吸水性固化材料コスト:養生7日800 kN/m2、1,260～1,640 円/m3	1日当たり7時間作業、月22日、5ヶ月間で1万トン进行处理。主要構成機器は、土壌供給装置、加圧浮上装置、凝集沈殿水処理設備、脱水装置等である。ランニングコストとして、燃料費、凝集剤、用水費等を計上した。	プラント運用8名、管理者2名、処理量105トン/日とした	湿式処理であるため、放射性物質を含む粉塵が飛散せず、適切な保護具着用して作業をすれば、被ばくに対する安全性を確保することができる
	8	J&T環境株式会社	保管大型土のう袋再資源化の技術実証検討	除去土壌搬入に伴い、中間貯蔵施設には使用済み大型土のう袋が大量に保管されている。一部は焼却処理されているが、処理量に限界がある。大型土のう袋はほとんどがプラスチック材(ポリエチレン・ポリプロピレンなど)で出来ており、有益な資源として素材でのリサイクル、熱源でのリサイクルが望ましい。	中間貯蔵施設に持ち込まれた大型土のう袋は、受入分別施設にて、おおよそ2つの方式(カッター式または破碎機式)で、土壌と分離され、袋詰めの上、一時保管されている。本実証事業においては、それぞれの方式で発生した低線量大型土のう袋を利用して、試験を実施した。大型土のう袋に着する土壌を「乾燥・乾式分離・洗浄」操作で分離することにより、再生プラスチック原料として利用可能性があることが判った。また土壌分離を確実に行うことで、放射能濃度が100(Bq/kg)以下となる可能性も見いだせた。今後の課題としては、大量処理に向けての装置選定、スケールアップ試験による処理性能把握、水洗浄の必要性、高線量大型土のう袋の場合での挙動確認などが挙げられる	保管大型土のう袋の実態調査、単位操作における土壌・放射能濃度評価	試験期間(約3カ月)中被ばく量0 (mSv)	設備 約10億円 運用 約5億円/年	6,000t/年(稼働300日)、乾式処理のみ(据付工事まで、建築・土木・受電設備除く)	全体工程を見極めた上で評価予定	設備構成および線量影響を精査の上、評価予定