

## 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	理解醸成の進捗・評価	参加人数等	次年度への課題
中間貯蔵施設事業等に対する理解醸成	1	公益財団法人 原子力安全研究 協会	次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解醸成	除去土壌等の再生利用や処理等に対して、これまでの議論は技術的な側面が中心であり、次世代を担う若手(学生)や地域住民の方に説明する自治体担当者などの人材育成及び理解醸成を含めたコミュニケーションとその方法論は不足している状況にある。 そこで、3年計画で次世代を担う学生、若手技術者等の人材育成のため、 (1)コミュニケーションツール作成 (2)人材育成プログラム を実施した。	・コミュニケーションツールの作成: 実務者向けのPhase3資料の改訂、自治体職員向けのPhase2資料の作成、一般向けのPhase1資料を作成した。 ・大学等での講義:Phase3資料を用いて7大学の学生を対象とした講義を実施した。また、若手技術者が参加する学会シンポジウム等で講義を実施した。 ・現地見学、ワークショップ:特定復興拠点整備事業、仮設焼却事業、中間貯蔵施設等を見学し、2回のワークショップを実施した。ワークショップでは、学生、若手技術者、自治体職員を含めた参加者がグループで、除去土壌の処理に関する課題に取り組んだ。企画運営側にも大学院生が参画し、現地住民との対話を実施した。 ・フォローアップ:知識を定着させるためのフォローアップとして、大学での学生による参加報告会を実施し、今後に向けた発展的な議論を行った。	・技術的内容の理解度の確認:講義参加学生に対して、全てのテーマに対する理解度を確認するためのアンケートを実施した結果、正解率は77%であった。個別テーマで見ると、「6.安心と安全」以外は理解度80%を達成しており、「6.安心と安全」については次年度に向けて改善したい。 ・理解・認知レベルの変化:大学での講義に参加した学生の知識・認知レベルの変化を確認するため、神戸大学の授業参加者に対して、事前及び事後アンケートを実施した結果、知識レベルの向上が見られた。また、現地見学およびワークショップ参加後アンケートでは「とても役立った」「役立った」という回答が多く、満足度が高かった。	・大学等での講義:7大学、若手技術者が参加する学会シンポジウム、福島県内の研究所で計約280人 ・現地見学、ワークショップ:学生24名、学生ファシリテータ2名、若手技術者・自治体職員数名 ・フォローアップ:6大学の学生に対して実施	最終年となる令和2年度は、 (1)コミュニケーションツールの作成: Phase1~3の公開用資料の改訂 (2)人材育成プログラム:8大学以上の学生を対象として講義等を継続、より多様な参加者によるワークショップを実施する。
	2	福島工業高等専門学校	除去土壌の再生利用等に関わる理解醸成のための課題解決型アプローチの実践II	福島高専の学生を対象として、学修プログラム、フィールド・ワークを踏まえ、除去土壌の中間貯蔵、減容・再生利用、最終処分に貢献できる人材の育成を図る。その上で、地域的な問題、課題を意識した除去土壌の再生利用等に関する理解醸成のための実践を試行し、その効果を検証する。また、低学年生を対象としたセミナー等を行い、再生利用等の関心を維持する。	・学修プログラム(集中講義):除染による除去土壌の発生、再生利用技術や安全評価など6講義を実施した。 ・フィールド・ワーク:再生利用実証事業施設、中間貯蔵施設など4施設で実施した。 ・課題解決型アプローチの実践:共同教育は5ヶ所、学生研究は4テーマ、学会は5学会、国際交流は米国2大学で実施した。また、地域住民等との対話は勉強会形式で大熊町で実施した。	・学修プログラム:特に、グループ討論は除去土壌の再生利用等の現状や問題点を理解する上で効果的であった。低学年セミナー等も関心の維持に効果があった。 フィールド・ワーク:除去土壌の再生利用等の疑問点の解消等に効果的であった。 本アプローチの実践、即ち、「知る」、「見る」、「伝える」の活動を通して、学生は除去土壌の再生利用に関して、多くを学び、地域の若者として課題を認識し、どうすべきかまで提案しており、人材育成も含め、その効果は十分あった。	・低学年セミナー:延べ50名(2日間) ・学習プログラム:延べ50名(2日間) ・フィールドワーク:延べ37名 ・関係機関との共同教育:延べ30名 ・学生研究:延べ11名 ・国際交流:2名 ・地域住民との対話(勉強会):福島高専学生30名、福島大学学生4名、大熊町住民17名 など	(1)若年層の拡大や若年層の関心の維持:福島県以外の原発立地県や環境公害問題の歴史を持つ県などの高専への拡大を模索 (2)地域住民の拡大と共同作業の試行:花植えなど地域住民との共同作業や地域イベントへの参加などを通じた信頼関係の向上 (3)関連する広報施設との連携:学生自らが展示物等を活用して地域住民との直接的対話を深化させる活動の検討

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	減容等の評価	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	3	日立造船株式会社	ばいじん等からのCs分離回収とその安定化技術の実証	除去土壌等の減容・再生利用を推進するためには減容化に伴って生じるばいじん等のさらなる減容化や最終処分のための安定化が必要である。本実証はばいじんから放射性Csを分離除去し水へ移行したCsを回収分離して最終処分を容易なものとする安定化と洗浄ばいじんを減容・再生利用化熱処理の反応促進剤に再利用する場合の影響を検討した。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ばいじんに含まれるCl、Cs等の可溶性分は、液固比6L/kg-dryとして、洗浄することが適していると判断、フィルタープレスにより固液分離可能であった。</li> <li>・ばいじん洗浄水からのCs回収分離率は99.5%で特措法施行規則の基準値を達成した。</li> <li>・Cs回収したPB+Fe(OH)3はアルカリ解体時、Cs移行率90.1～100.9%、ゼオライトによるCs回収率99.4%、Cs回収後のゼオライトの平均放射性Cs濃度14万Bq/kg、ばいじん洗浄水270Bq/Lの約519倍であった。</li> <li>・ゼオライトの焼成時にCsがほぼ揮発しないことを確認した。安定化体からの放射性Cs溶出濃度は特措法施行規則の基準を達成した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗浄ばいじん全量を反応促進剤として再利用しても除去土壌等とCaO、MgO、およびSiO2の各成分が所定の配合割合を満たせる範囲にあるため、反応促進剤として再利用することは可能と判断した。</li> <li>・ばいじん洗浄、Cs回収分離、Csの安定化技術によって、減容化率が1/405、減量化率が1/68、放射性Cs濃縮率が67倍となり、今回実証した技術が減容化に有効であることを確認した。</li> </ul>	施設外部の空間線量当量率は2.5μSv/h以下(管理区域設定基準)に抑えることが可能であると試算された。法令により定められた被ばく線量限度(5年間で100mSvかつ1年間で20mSv)を超える恐れが無いことが試算された。	処理コストは、ばいじん1tあたり、施設・建設費380千円、運転・維持管理費299千円と試算された。	ばいじん洗浄～安定化施設を30t/dとする。施設の稼働は、ばいじん1.25t/hで8h/d、250d/yと設定した。運転期間は10年、Cs回収処理水は環境放流とした。	所長1名、運転管理者4名、運転員9名(運転は日勤体制)	処理施設の空間線量当量率、作業員被ばく線量評価をシミュレーションした結果、施設外部の空間線量当量率は2.5μSv/h以下に抑制可能であり、被ばく線量限度(5年間で100mSvかつ1年間で20mSv)以下と試算された。
	4	国立大学法人 東京工業大学	汚染土壌分級物から回収されたCsの高減容・安定固定化	亜臨界水高速イオン交換法で、福島土壌からCsを取り出し、Al、Srを骨格とした安価なセラミックス(アパタイト)構造体に多量のCsを化学的結合させ、長期貯蔵に耐えられる高減容固化体を合成する。また、Csとホウケイ酸ガラスフリットを混合、熔融させることにより、ガラス固化体の合成を行う。さらに固化プロセスとして、放射性物質を全てドラム内で処理でき、ドラムをそのまま最終処分できるインドラム式Cs固化法を、セラミックス固化体及びガラス固化体において実証した。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬福島汚染土壌について得られたCs混合物を使って、インドラム方式でアパタイト固化体及びガラス固化体を製造し、固化体中にCsを固定化することに成功したが、アパタイト固化体の耐水性が低いという問題点が明らかになった。</li> <li>・Cs含有率10wt%となるようにCs混合物を高Na含有ガラスフリットと混合し、ドラムを用いて900℃でガラス固化体を作製した結果、Csはポルサイトとしてガラス中に分散保持された。処理時間を調整することでポルサイト微粒子はガラス中に均質に保持できた。50℃、24時間の水浸出試験においてもCsはガラス中に安定に保持された(浸出率0.6%)。インドラム方式のガラス固化法は、実用的なCs固定化技術と結論できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インドラム式ガラス固化体プロセスにおいて、汚染土壌C・Dに対して約3万分の1以下に高減容化できる見通しを得た。インドラム方式ガラス固化プロセス導入により廃棄物の安全かつクローズドな高減容化が可能である。</li> </ul>	対象汚染土壌が10万Bq/kg超の場合は、装置周辺の空間線量が極めて高くなるので、遠隔操作が前提となる。	インドラム式ガラス固化体プロセスについて、土壌処理量当りコスト:21千円/t、ドラム当りコスト:43百万円/本(償却費:46%、ユーティリティ費:11%、消耗品費:25%、人件費:18%)と試算された。	インドラム式ガラス固化体プロセスについて、処理対象物は、土壌C(分級後)約110wt、土壌D約18wt(上記の土壌処理量当りコストにはCs脱離コストは含まれていない)、土壌中のCs含有量:9.5t、処理期間:15年、インドラム内蔵ガラス量:150kg/本、ガラス固定化Cs量:15kg/本(10wt%)とした。	20人日/Cs-kgを想定	対象汚染土壌が10万Bq/kg超の場合は、装置周辺の空間線量が極めて高くなるので、遠隔操作が前提となる。
	5	鹿島建設株式会社	除去土壌中の放射性Cs含有粘土の分離性向上を目指した物理的解泥技術の実証	土壌Cの約8割は農地由来である。土壌中の放射性Csの多くは2:1粘土に吸着しており、これが土壌中の腐植により他の粘土や砂礫と団粒化していることが、分級洗浄による減容再生利用の妨げの原因となっている可能性がある。対策手法としては、表面粉碎型解泥の導入と20μm程度での分級・分離が効果的と考えられる。本実証では、4つの解泥手法(超音波分散機、ボールミル、高圧エジェクター、シエマキサー)を実証比較した結果、超音波分散機とボールミルの解泥効果が高く、それに伴い除染率や再生利用率を向上できることを明らかにした。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各解泥手法毎の最適運転状況は以下となった。 超音波分散機:15pass=22.5秒 ボールミル:5pass=18分55秒 高圧エジェクター:2pass、12MPa シエマキサー:3pass、60Hz</li> <li>・75μm未満の泥水の解泥装置としてボールミルと超音波分散機が有効であること、解泥効果は処理する土壌の性状に依存するため、適材適所の使い方が必要であることが分かった。</li> <li>・解泥前の平均値と比較して解泥後の20～75μmは放射能濃度が低下し、解泥後の20μm以下の濃度に変化はなかった。これは解泥により放射能濃度の高い細粒分が粗粒の表面から、同程度の濃度の細粒側へ移行したためである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1.5～2.66万Bq/kg(2018年時点)の粘性土除去土壌の20～75μmの土粒子11.4万m3が再生されると試算された。(20～75μmの土粒子の割合を73%とした場合)</li> </ul>	実証試験において作業場所空間線量率0.41～0.57μSv/h、作業員最大被ばく量87μSv(実働36日間)	推算値4.9万円/m3	10年稼働(280日/年、12h/日)、20μm分級サイクロン270台、ボールミル(φ2m)14台、薬剤、後処理設備、建屋並びに運転・維持管理費について試算した。	想定実機歩掛り:運転員約15名、処理能力:前処理に必要な75μm分級洗浄ペースで13m3/h	粉じん防護マスク、保護メガネ、ゴム手袋、前掛けを使用する。

各技術のまとめ(3/3)

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	減容等の評価	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	6	国立大学法人九州大学	最終処分に向けた高圧脱水ブロックによる焼却灰の減容化と放射性セシウムの安定化	最終処分場へ貯蔵する飛灰の減容化が求められている。従来技術は、飛灰に打設時の流動性に必要な水、固化後の強度に必要なセメントを混合した後、型枠に打込みブロック(型枠ブロック)を製作する技術である。提案技術は、水とセメントを混合した飛灰を排水機能を有する鋼製型枠に4.0MPaの高圧で打込み、余剰水を脱水しながらブロック(高圧脱水ブロック)を製作する技術である。本試験では、高圧脱水ブロックにおいて、①同重量の飛灰が減容化して処理できること、②放射性Cs溶出量が基準値以下であること、③固化体強度を保つことを検証した。	・高圧脱水ブロックは、同容量の型枠ブロックと比較して、1.4倍の飛灰を処理することができ、飛灰を1t処理するために必要な容量を約30%減容できた(体積比:0.70)。 ・型枠ブロックにおいて特措法施行規則の溶出量150Bq/L以下を満たす飛灰の放射能濃度の最大値は3.2万Bq/kgと試算された。一方、高圧脱水ブロックでは、6倍量の飛灰リンスをおこなうことにより同条件を満たす飛灰の放射能濃度の最大値は15万Bq/kgと試算され、飛灰の放射能濃度が10万Bq/kgを超えても対応可能と考える。 ・型枠ブロックでは、固化体強度5.0MN/m <sup>2</sup> を満足するのに必要なセメント添加率(飛灰に対する単位乾燥重量)は111.3%となる。同条件を満たす高圧脱水ブロックに必要なセメント添加率は44.1%となり、型枠ブロックと比較して約1/2のセメント量に抑えられる。	・高圧脱水ブロックは、型枠ブロックと比較して飛灰1t処理するために必要な容量を30%減容できるものと試算された。	前提条件として、飛灰の放射能濃度は10万Bq/kg、高圧脱水ブロックの濃度は15,700Bq/kgとする。提案技術の実用化に向けた7.0m <sup>3</sup> 型高圧脱水ブロック製作機に関する被ばく線量は、2.1mSv/年と想定される。	飛灰1t当たりの処理コストは、高圧脱水ブロック(提案技術):118,670円/t、型枠ブロック(従来技術):134,530円/tであり、提案技術は1.0m <sup>3</sup> 当たり処理可能な飛灰の重量が従来技術の1.4倍となるため、従来技術と比較してトータルコストを11.8%縮減できる。	高圧脱水ブロック製作機(7.0m <sup>3</sup> 型)3基、24時間/日、飛灰の放射性Cs濃度は10万Bq/kg、作業期間は5年間、10ヵ月/年、25日/月、合計1,250日とした。	作業員7名(1班当たり)3組3交代で120m <sup>3</sup> /日(含水率42.1%の脱水ブロック)	フィルタープレス機の水槽は、放射能濃度が高くなるため、高濃度区域として区画分けをおこなう。
	7	株式会社奥村組	膨潤抑制剤添加処理により除去土壌の再利用を効率化する技術	除去土壌の減容・再生利用技術の一つとして湿式分級処理が検討されている。一方、中間貯蔵施設の受入分別における除去土壌からの異物除去には改質材が用いられ改質材には高吸水性樹脂(Super Absorbent Polymer、以下、SAP)を含むものがある。SAPは数百倍に及ぶ吸水膨潤性があり、湿式分級処理により回収される土壌の品質に影響を及ぼす懸念がある。このSAPの吸水膨潤性は多価陽イオン(以下、抑制剤)を添加することで抑制可能である知見を得ている。そこで、SAPを含む除去土壌の湿式分級処理を行い、SAPが分配された場合の影響および抑制剤の添加効果等について評価した。	・3種類の改質材を添加したすべての土壌試料でSAPの膨潤が確認された。また、すべての改質材に対して3種類の抑制剤の抑制効果を確認した。 ・現地TR試験では、分別後土壌に対する膨潤性を確認できなかったため改質材を同土壌に3wt%追添加した模擬土壌を作製し、硫酸第一鉄を0.25wt%以上添加すれば膨潤抑制効果が得られることを確認した。 ・回収粗粒土壌(75μm以上)の含水率は、改質材追添加(分別後土壌に同材3wt%)のケースで増大(21.7→28.4%)、抑制剤を添加(0.5wt%)すれば低減する(28.4→22.4%)こと等を確認した。 回収粗粒土壌について単位体積重量の逆数として求めた比容積で比較すると、改質材追添加なしで0.47m <sup>3</sup> /t、同材追添加したケースで0.53m <sup>3</sup> /tと13%増大し、これに抑制剤を添加すると0.48m <sup>3</sup> /tまで下がる結果を得た。 ・回収粗粒土壌を用いて高さ約1mの実証盛土を構築した。今後引き続きモニタリングを引き続き実施する。	改質材Cを追添加した分別後土壌を湿式分級処理した場合、再生利用対象となる粗粒分(75μm以上)はSAPの影響で、含水率の増加、比容積の増大(単位体積重量の低減)、コーン指数の低減等の品質の低下が生じる。これに、硫酸第一鉄等の抑制剤を加える本技術は、品質の低下を抑制するための一つ的手段となる。	一連の試験に従事した作業員の最大日被ばく量は1.88μSv/日(仮に、ある個人が1年間(276日稼働)同様の条件下で同様の作業に従事したとしても被ばく量は0.52mSv/年となり、被ばくリスクは小さいことを確認した。	湿式分級処理費用に、抑制剤添加費用として分級前土壌1t当り887円追加される。	湿式分級処理プラント処理能力は30m <sup>3</sup> /時間、稼働時間は6時間/日、抑制剤添加量は分別土壌1m <sup>3</sup> に対し5kg(粉体)を2倍の水で希釈して添加、抑制剤添加設備は700L/時間の調整・送液可能な設備(自動で稼働)2年間で償却とした。	自動添加設備の維持手間は微小	抑制剤の添加は自動化が可能である。また、薬剤補充も離れた場所や遮蔽版で隔離した場所に調整槽を設置することが可能であるため、被ばくリスクに対する安全は十分に確保することができる。