

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術
の基盤研究事業
(低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討)

評価用資料

令和元年 11月25日

経済産業省事業推進課名

資源エネルギー庁 電力・ガス事業部

原子力立地・核燃料サイクル産業課

研究開発実施機関名

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子燃料工業株式会社

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業
(低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討)
技術評価結果報告書 (終了時評価)

プロジェクト名	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業 (低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討)
行政事業レビューとの関係	平成 31 年度行政事業レビューシート 0330
上位施策名	エネルギー基本計画
担当課室	資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力立地・核燃料サイクル産業課

プロジェクトの目的・概要

低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染に伴い発生する廃液等のガラス固化への課題を整理し、ガラス固化の前処理としてのウラン等の除染技術及び除染結果を精密に測定する技術の開発を目的とする。

具体的には、ウラン等と共にはぎ取られた母材がガラス固化に与える影響について検討し、ガラス固化の課題を整理する。また、ガラス固化の前処理として、除染時の母材の混入量を極力抑え、かつ除染のための薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウラン除染技術を開発するとともに、除染の効果を確認するため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。

＜上位施策の中での本プロジェクトの位置付け＞

本技術開発は、「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」としたエネルギー基本計画に基づくものである。なお、再利用可能な金属のクリアランスを進めることで、循環型社会構築を図ることに繋がる。

予算額等 (委託) (単位：百万円)

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 26 年度	平成 29 年度	平成 28 年度	令和元年度	・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 ・ 原子燃料工業株式会社
H26FY 執行額	H27FY 執行額	H28FY 執行額	H29FY 執行額	総執行額
60	103	154	59	(H26 年～29 年) 377

* 端数処理のため合計が一致しない場合がある。

1. 事業アウトカム（【終了時評価項目 1】）

事業アウトカム指標	
1. 除染技術開発 ○低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等 【金属からのウラン等の除染技術】／【除染廃液からの不純物分離技術】 ガラス固化の前処理として、母材の混入量を極力抑え、薬品等の二次廃棄物の発生を最小化する低レベル放射性廃棄物からのウランの除染・分離技術を開発する。 2. 測定技術開発 ○クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 確実にクリアランスするため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。 除染技術開発及び測定技術開発により、2050 年までに発生するウラン廃棄物のうち、約半数を占める金属のクリアランスが可能であり、以下の効果が見込まれる。 ・クリアランスの促進 ・ウラン廃棄物の物量低減 ・放射性廃棄物処分場の必要面積の縮減 ・最終処分場の逼迫時期の延命 ・新たな評価手法による検認技術の運用 ※事業の実施にあたっては、将来にも亘る実効性のある研究成果を得るために、国内のウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を十分に踏まえる。	
指標目標値	
計画： 【金属からのウラン等の除染技術】 金属の低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染技術として、金属表面に残留しているウラン等を選択的に除去し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法及び表面に残留するウラン等を効率的に切削することが可能なブラスト法の技術的実証。 【除染廃液からの不純物分離技術】 除染廃液からの母材及びウランの分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術の実証。	実績：事業終了時 【金属からのウラン等の除染技術】 ・最適な除染方法として選定したブラスト除染及び酸浸漬除染について、除染条件を最適化した除染試験を実施し有効性を確認。特に、ブラスト除染は金属形状に対する柔軟性が高く90%以上の金属廃棄物に適用可能。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・酸除染では、中和・沈殿反応により容易に酸を除去可能。 ・ブラスト除染では、除染・分離統合システムを開発。研磨材と水の再利用により二次廃棄物

【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、α線による測定(日本原子力研究開発機構の例では約 30 分)と同程度の実用的な時間で測定することができるγ線による測定評価手法の確立。	の発生を抑制できることを実証。 ・二次廃棄物からのウラン回収は工程スラッジの処理プロセスの中で実施することが合理的。 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・クリアランス測定装置を製作した。模擬ドラム缶を用いた測定データを取得し、かさ密度 1.0g/cm³ 程度の測定対象について、放射能濃度 0.1Bq/g (NU) の測定を 60 分以内で実現可能であることを確認した。 ・事業終了後も継続して、国内のウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を踏まえて電力共通研究を実施。また、標準化(原子力学会)に向けた作業を実施中。 ※新たな評価手法を運用するとき、実際の放射性廃棄物(金属鋼材)をドラム缶上下で大きな偏りが無く、且つかさ密度が大きくなり過ぎないように収納することが課題。
--	---

2. 研究開発内容及び事業アウトプット (【終了時評価項目 2】)

(1) 研究開発内容

1. 除染技術開発

○低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等

【金属からのウラン等の除染技術】／【除染廃液からの不純物分離技術】

国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。

2. 測定技術開発

○クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等

【除染済み母材の残留ウラン測定技術】

国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度な γ 線測定手法を開発する。

(2) 事業アウトプット

事業アウトプット指標		
1. 除染技術開発 ○低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等 【金属からのウラン等の除染技術】／【除染廃液からの不純物分離技術】 国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。		
2. 測定技術開発 ○クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度なγ線測定手法を開発する。		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時（26 年度）	計画： 【金属からのウラン等の除染技術】 文献等により、最適な除染方法の選定及び除染で発生する二次廃棄物の特徴を調査する。 選定した除染方法による予備的な除染試験を行い、基礎データを得る。 【除染廃液からの不純物分離技術】 文献等により、除染廃液からの母材及びウランの分離、除染材の再利用に適用可能な不純物分離技術を調査する。	実績：目標達成度 100% 【金属からのウラン等の除染技術】 文献調査により、酸浸漬法及びウェットブラスト法を有効な除染候補として絞り込むとともに、予備的な除染試験を行い、二次廃棄物の特徴を含めた基礎データが得られた。 【除染廃液からの不純物分離技術】 文献調査により、酸浸漬の廃液は化学的分離、ウェットブラスト法の廃液は物理分離が有力な候補となりうることを確認した。

	【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、γ線によるウランの定量法の成立性を検証する。 クリアランス対象物の形状やウラン等の付着状態の違いによる遮蔽効果等を考慮したモデルを検討する。	【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 試験及びシミュレーションにより、γ線測定手法に影響する酸浸漬法による除染後の母材表面のU-238とPa-234mの残留状況に関わるデータを取得し、γ線によるウランの定量法の成立性を確認した。 シミュレーションにより、線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響についてモデル化してデータを取得した。
中間評価時（27年度）	計画： 【金属からのウラン等の除染技術】 酸浸漬法及びウェットブラスト法による除染試験を行い、最適条件を見出す。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ウェットブラスト法の模擬廃液を用いた小規模なサイクロン分離機による分離試験を行い、基礎データを得る。 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、解析結果をデータベース化する検討を行	実績：目標達成度 100% 【金属からのウラン等の除染技術】 除染試験により、酸浸漬法の最適条件及びウェットブラスト法の最適条件に関するデータを取得した。この条件を実用化における除染条件とすることとした。 【除染廃液からの不純物分離技術】 ブラスト研磨材と金属表面の研削屑の分離に係る基礎データを取得し、不純物分離に係る技術的見通しを得た。 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 酸浸漬法によるウラン化合物、トリウム化合物の溶解度のシミュレーションによる放射平

	う。 線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が、測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響について、シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験を実施し、散乱γ線等価モデル法の適用の妥当性を検証する。 ウラン燃料加工施設等におけるクリアランス測定装置設置場所の調査、複数位置測定を模擬した装置によるγ線の効率的な測定を実現するための検出器配置を調査する試験等を実施し、クリアランス測定装置の仕様を決定する。	衡状態に関するデータを取得し、データベース化を検討した。 シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験により、各種データを取得した。これにより、散乱γ線等価モデル法適用の妥当性を確認した。 各施設でのバックグラウンド測定データを解析し遮へい体の厚さを設定した。また、既存のドラム缶測定装置の測定データから検出器の台数を設定した。これらの結果をもとに、クリアランス測定装置の仕様を決定し、概念設計を終了した。
終了時評価時（29 年度）	計画： 【金属からのウラン等の除染技術】 平成 27 年度までの技術開発により、枢要技術としての除染技術に関する開発目標は達成されたことから、平成 29 年度に計画している統合システムにおいて、実廃棄物サイズの試料に対する除染効率等を確認し、実規模での技術的成立性を評価する。 【除染廃液からの不純物分離技術】 平成 27 年度に技術的見通しが得られたサイクロン分離機による分離について、実用的な廃液量を処理可能な実規模スケールでの試験を実施し、実規模での技術的成立性を評価する。	実績：目標達成度 100% 【金属からのウラン等の除染技術】 【除染廃液からの不純物分離技術】 ・実廃棄物を想定した模擬廃棄物を用いて、除染から分離までを行う実規模の統合システムを設計・製作。 ・模擬廃棄物を用いて実運用を想定した試験を実施。 ・試験結果から除染性能及び二次廃棄物の分離性能を評価し本装置の技術的成立性を実証。 ・なお、二次廃棄物はガラス固化可能であることを確認(金属 100 トン当たりガラス固化体 12 本程度)。

	【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ドラム缶型容器を対象としたクリアランス測定装置を製作し、定量性能を評価する。実用的な測定時間（60 分以内）で、クリアランスレベル（1Bq/g 以下）の残留ウランの測定が可能であることを実証する。	【除染済み母材の残留ウラン測定技術】 ・クリアランス測定装置を製作し、模擬ドラム缶を用いた測定試験により、各種データを取得した。これにより、かさ密度 1.0g/cm³ 程度の測定対象について、放射能濃度 0.1Bq/g (NU) の測定を 60 分以内で実現可能であることを確認した。
--	--	--

<共通指標実績>（該当のない項目は、セル↓は削除して構わない。）

論文数	論文の被引用度数	特許等件数 （出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス 供与数	国際標準への寄与	プロトタイプの作成
2	1	1	0	0	クリアランスの除染方法及び測定方法について、成果の標準化（学会標準）に向けた取り組みを実施中	・除染及び分離に係る統合システムの製作（H29 年度製作） ・クリアランス測定装置の製作（H28 年度製作）

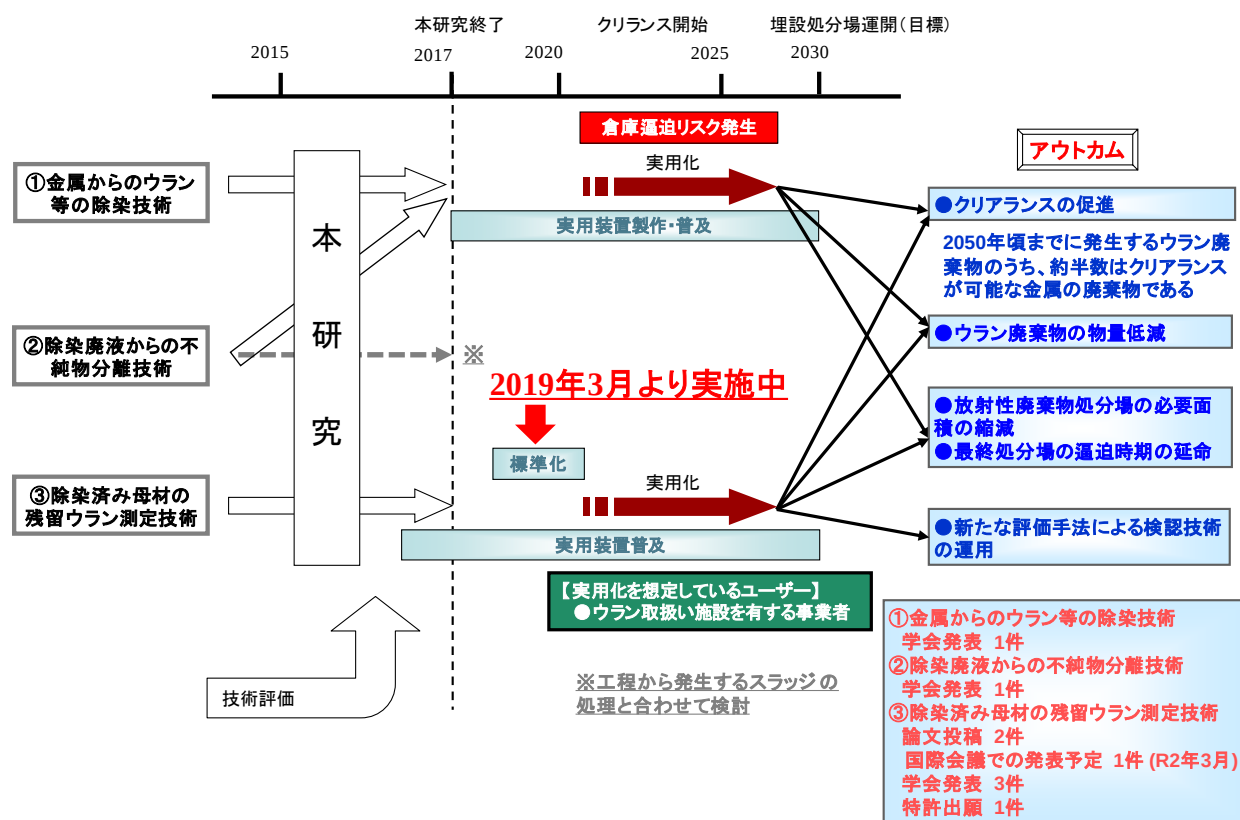
3. 当省(国)が実施することの必要性（【終了時評価項目3】）

- ① 放射性廃棄物の排出者である核燃料サイクル事業者は、廃棄物の安全、安心な処理処分を行うための技術的及び社会的な共通の課題を有している。これらの課題解決には技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要するため民間事業者にとって開発リスクが高いといえることから国が主導で行う必要がある。
- ② 国内の主要事業者が一体となって取り組むことで、クリアランスの除染方法及び測定方法について、成果の標準化（例：複雑金属のクリアランス測定方法について学会標準を作成する）が促進され、さらに国内の事業者は本事業の成果を導入しやすくなる。
- ③ 国の関与によって産学官連携が強まり、開発過程の知見を共有できるため、上記の標準化が進めやすくなるとともに、規制側も多様な手法への対応の負担を軽減できる。
- ④ 平成 30 年 7 月閣議決定された「エネルギー基本計画」においても、放射性廃棄物の処分については、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現

に向け、国として必要な研究開発を推進することが明記されている。

4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ（【終了時項目4】）

- 平成 29 年度までに、金属からのウラン等の除染技術開発では、金属表面に残留しているウラン等を選択的に除去し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法、及び表面に残留するウラン等を効率的に切削することが可能なブラスト法の技術的実証を行った。除染廃液からの不純物分離技術では、除染廃液からの母材及びウランの分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術を実証した。除染済み母材の残留ウラン測定技術では、測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、 α 線による測定（日本原子力研究開発機構の例では約 30 分）と同程度の実用的な時間で測定することができる γ 線による測定評価手法を確立した。
- 本事業終了後の平成 31 年 3 月より、クリアランス測定方法について、成果の標準化（複雑金属のクリアランス測定方法について学会標準を作成する）に向けた取り組みを実施している。

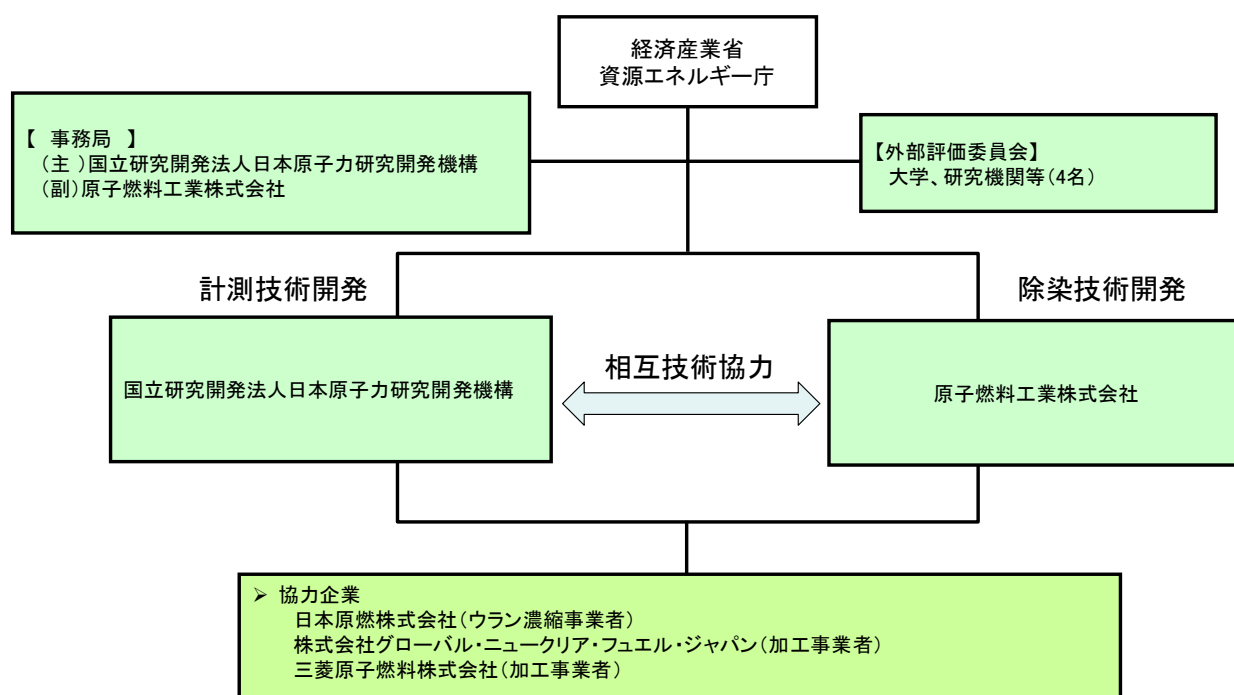


5. 研究開発の実施・マネジメント体制等（【終了時評価項目5】）

- 事業の実施に当たっては、着実かつ有意義な研究成果を得るため、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と原子燃料工業株式会社の 2 社体制で除染技術開発と測定技術開発を行うとともに、国内のウラン取扱い事業者の協力を得ながら、ウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を十分に踏まえ事業を進めた。

また、外部から評価、助言を得るため有識者による外部評価委員会を開催（2回／年）し、当該委員会等での議論を事業に反映できる柔軟な実施体制を構築した。

なお、事業の着実な推進のため、受託2社での調整会議を定期で開催（6回／年）し、各研究の課題、フォローアップ等を行った。



6. 費用対効果（【終了時評価項目6】）

- 投入した国費総額は約4億円（4年間）である。
- 本事業により以下のアウトプットが得られた。
 - ・ 除染・分離及び測定に係る装置設計に関する技術情報
 - ・ 装置の有効性や評価手法の妥当性に関する技術情報
- 国内のウラン取り扱い事業者は、本技術情報を共有する。その結果、国内事業者はクリアランスの実施（アウトカム）に向けて、開発や標準化に必要な費用の重複を回避することができ、規制側も多様な手法への対応を軽減できるため十分な費用対効果が得られる。
- 2050年頃までに加工メーカ及び原子力機構等から発生すると見込まれる低レベル放射性廃棄物のうち、約64,000トンの金属がクリアランスの対象となり得るとされている。本事業で開発した技術の対費用効果を見積もるにあたり、上記の金属のうちの約半数（3万トン＝15万本／200Lドラム缶）のみに本技術を適用するとした相当に保守的な仮定を置いたとしても、少なくとも300億円程度の埋設処分費用の削減が見込める。

現行、ウラン廃棄物の処分制度が確立していないため、コストの算出にあたっては、第二種廃棄物埋設事業における処分単価＊1を参考にした。

*1：文部科学省 原子力科学技術委員会 研究施設等廃棄物作業部会（第9回）

資料1「埋設処分業務の実施に関する計画」に基づく業務の実施状況について

【トレンチ処分単価：186 千円／本】

トレンチ処分する費用単価を 20 万円/本と仮定すると、約 300 億円の処分費用の削減が見込める。

7. 外部有識者（評価検討階）の所見及び同所見を踏まえた改善点等

外部有識者の所見【前回中間評価時】

- (1) 当事業はガラス固化の前処理という位置付けでウラン廃棄物の除染技術等を開発するものであり、酸浸漬による化学除染で発生する除染廃液の方がガラス固化に向いている。また、ブラスト法では研磨材とウラン化合物が完全に分離できなければ、ガラス固化処理への影響を検討する必要がある。このように除染処理技術について、ガラス固化を考慮した比較検討をすることにより事業の到達点がより明確になる。
- (2) 成功の評価の主張が、本研究開発プロジェクトの結果が生み出すプロフィットに終始せず、原子力関連の事業、国の施策に対してどのような貢献が成されたのか、国民に対してどのようなベネフィットを提供することに繋がる成果を示せたのかといったようなことを適切に示せるように事業を進めるべき。

所見を踏まえた改善点（対処結果）等【前回中間評価時】

- (1) 化学除染技術（酸除染）、物理除染技術（ブラスト除染）のそれぞれについて、ガラス固化への影響を検討した。酸除染は、ブラスト除染のように研磨材及びその摩耗粉の発生がなく、金属固形物の廃棄物が少ないためガラス固化に向いている。金属固形物の廃棄物が比較的多いブラスト除染に対しては、ガラス固化体として鉄リン酸ガラスを用いることで、容易に固化可能との結論を得た。
- (2) 本成果は放射性廃棄物そのものの抑制のみならず、放射性廃棄物処分場の減縮にも寄与することから、国民や社会のニーズに的確に応える公益性が高い技術の開発を行うものであることを事業報告書に盛り込んだ。

8. 産構審評価ワーキンググループの所見及び同所見を踏まえた改善点等

評価ワーキンググループの所見【前回中間評価】

<研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性>

- ・減容化とともに安全性を確保する技術の着実な進展を図ること。

<事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性>

- ・多くの大学・機関が関係しているので、実証に向けた体制・仕組みづくりを早めに検討すること。

<研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性>

- ・ノウハウや特許等の知財を確保し、将来の国際的なビジネス展開を視野に入れて、国際的な優位性を図ること。
- ・福島への適用の可能性を検討すること。

所見を踏まえた改善点（対処結果）等【前回中間評価時】

＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞

・ 本事業においては、計画当初より安全性を確保するための試験・評価についても実施することとしており、本事業が国民の安全・安心に繋がるよう、着実な技術の進展を図った。

＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞

・ 事業終了後の実証段階に向けた体制・仕組みづくりとして、学会等での認知・標準化や実証に向けて、継続的な取り組みを行ってきた。現在、本技術成果は学会標準化に向けて原子力学会により議論が進められている。

＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞

・ 本事業は海外の技術・動向を注視しながら実施し、投稿論文 2 件、特許出願 1 件の成果につなげるとともに、上記のとおり本事業の成果の学会標準化に向けた取り組みを継続して行っている。

・ 福島事故により発生した廃棄物へのガラス固化技術の適用の検討については、本事業の範囲外であるが、本事業終了後も、本事業開発で利用した散乱ガンマ線等価モデルについて、放射性セシウムを含む除染廃棄物等の高精度で迅速な測定技術としての適用検討を進めているところである。