

特別賞

異分野技術の融合による 焼却飛灰スラリーから放射性セシウムを 磁力で迅速回収できるコンパクトな除染システムの開発 － ライフサイエンス発の画期的なグリーンイノベーション技術の創製－

¹ DOWA エレクトロニクス株式会社、² 大成建設株式会社、
³ 東京慈恵会医科大学 臨床医学研究所

上山 俊彦¹ 根岸 昌範² 吉田 貴行¹
前川 弘樹¹ 今村 聡² 並木 禎尚³

原発事故で拡散した放射性セシウムは可燃物の焼却を経て飛灰に濃縮し、しかも大半が水溶性のため環境中への拡散リスクも高いまま暫定的に保管されている。大量の放射性セシウムを含んだ飛灰の処理・処分は進んでいない。飛灰中セシウム低減・除染済飛灰からのセシウム拡散防止はこの問題を解決する鍵になる。

「飛灰スラリー中でセシウムを直接吸着後、磁気分離できる除染剤」は有望であるが、そのような除染剤やそれを活用する処理技術はこれまで存在しなかった。

本研究では分野横断的研究を推進し、飛灰に対応した「磁性除染剤」を開発、実証試験プラントを設置してその実用性を評価した。

1. はじめに

原発事故に由来する放射性セシウムによる環境汚染問題は、平成24年度から本格除染のフェーズに移行し、国や自治体直轄の除染事業が行われている。

表1は除染廃棄物の発生量を推計した一例であるが、大量発生が見込まれる除染廃棄物は、回収後は仮置き場で保管されており、可燃物だけでも数百万から1000万 m³(cf. 東京ドーム：124万 m³)を超える。中間貯蔵に向け、焼却による減容化が必要であるが、放射性セシウムが濃縮した焼却残渣が相当量発生することになる。2013年12月末時点での指定廃棄物の保管量は14万トンに達し、焼却灰は約10万トンを占め、大部分が飛灰である¹⁾。

	少発生量シナリオ	多発生量シナリオ
福島県内	1,500万m ³	3,100万m ³
県外	140万m ³	1,300万m ³
条件	・高線量地域も生活圏のみ除染(森林は10m内部まで枝打ちや落葉除去) ・比較的低線量地域(年間5mSv以下)はホットスポット対応、子供の生活環境に限定	・20mSv/年以上の地域のみ非生活圏の森林に枝打ちや落葉除去 ・比較的低線量地域(年間5mSv以下)でも表土を剥く

表1 除染廃棄物発生量の推計

放射性セシウムを含む可燃物の焼却により、焼却残渣中の放射性セシウムの濃縮、水溶性セシウムの割合増加という問題が生じる。図1は、都市ごみ焼却施設で可燃物を処理した際のマスバランスを示したものである。可燃物投入量に対し10%程度の焼却残渣が発生しその5分の1が飛灰となる。主灰と比べ飛灰の発生量は少ないものの放射能濃度は10倍以上高く、可燃性がれきの焼却過程では、飛灰への放射性セシウムの濃縮率として最大33倍が想定されている²⁾。

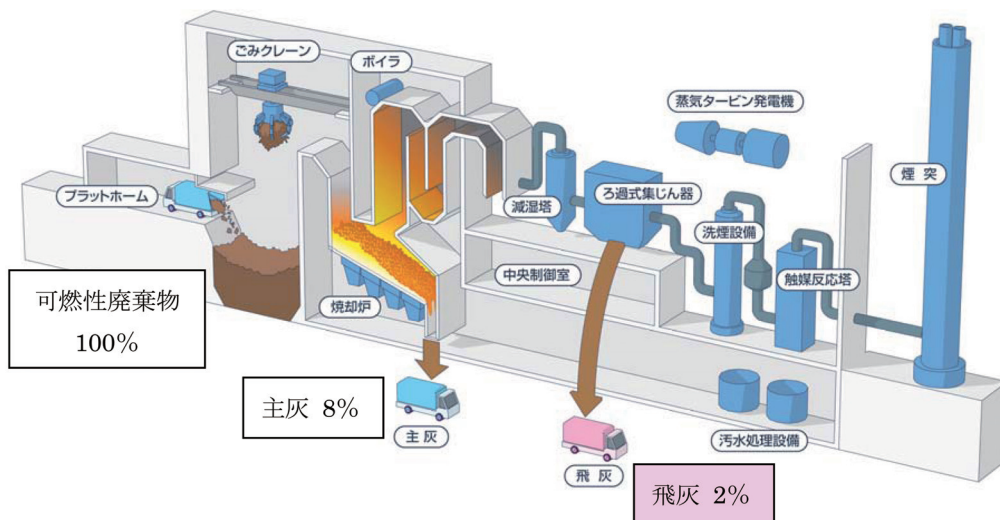


図1 可燃物焼却処理のマスバランス

焼却時にガス化したセシウムは、排ガスの冷却過程で他の塩類とともに飛灰中で再結晶化するため、セシウムの大部分が水溶性になる。図2は飛灰外観と電子顕微鏡写真の例であるが、カリウムやナトリウムと同様、セシウムも塩化物として存在する³⁾。

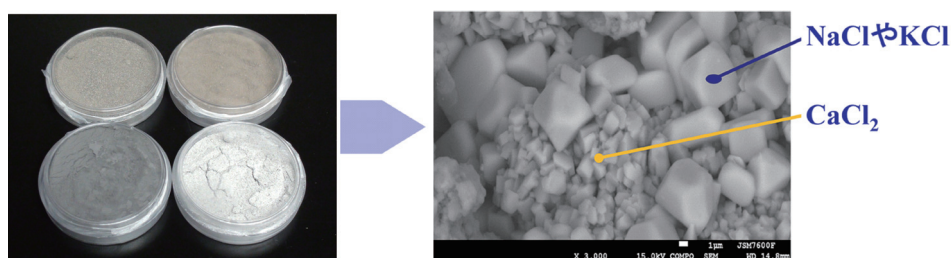


図2 焼却飛灰の外観と電子顕微鏡写真

放射性セシウムが濃縮する飛灰は発生量も多く、高濃度の水溶性セシウムを含むため、周辺環境への拡散も懸念される。そのため、飛灰洗浄により溶出させたセシウムを吸着材に濃縮・固定して安全に保管し、処理済飛灰の放射能濃度を法定基準8,000Bq/kg以下に減らすスキームを仮定した(図3)。

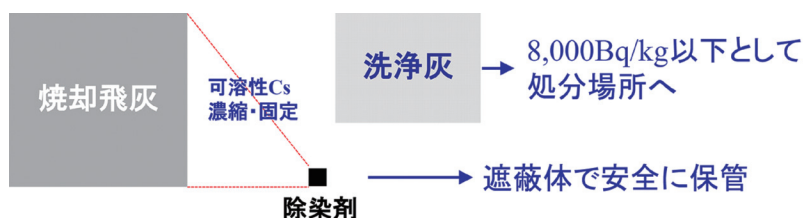


図3 飛灰洗浄処理のスキーム

2. 磁性除染剤の開発の経緯

2.1 汚染飛灰の洗浄における問題点とその克服を目指した新技術の開発

従来の飛灰洗浄では、水を加えたスラリーにセシウムを溶出後、フィルタープレスなどの固液分離で得られる液体成分に除染剤を混ぜて水溶性セシウムを取り除いていた(図4)。ところが、分離された固形分(脱水ケーキ)には30~50%以上の水分が含まれる。そのため、脱水ケーキを埋め立てると水分に溶けているセシウムが二次的に拡散し、土壌・地下水などの放射能汚染を引き起こす。一方、少量の除染剤を用いて大きな効果を発揮させるには、粉末化により除染剤の表面積を拡大し、セシウムの吸着サイトを増やす必要があるが、細かな除染剤ほど回収が難しく、沈殿など追加工程を要する。

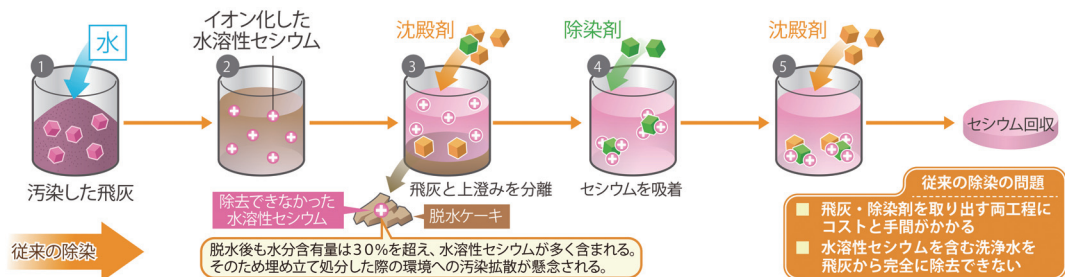


図4 従来の飛灰浄化法

そこで、「スラリー中でセシウムを吸着させた粉末化除染剤を磁石で強制回収する方法」をみつければ、①スラリー段階で取り除けるため、処理済飛灰に水溶性セシウムは残らず、埋め立て後の拡散を回避できる、②表面積が大きく磁気分離可能なため、セシウム吸着能と除染剤回収能を高い次元で両立できる、と考え、本技術を開発した。

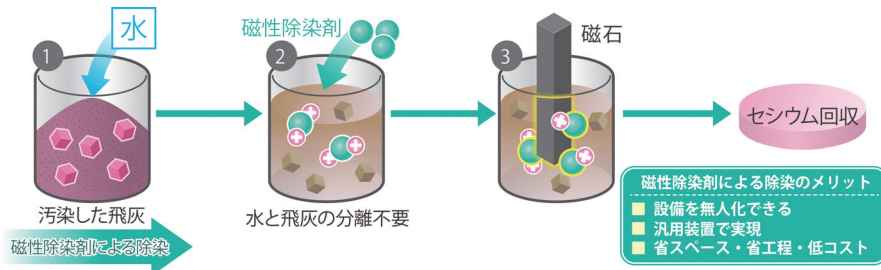


図5 磁性除染剤を用いる飛灰浄化法【本技術】

2.2 磁性除染剤の基盤技術

共著者の並木らは治療効果増強と副作用軽減を目指したライフサイエンス研究において、産業技術研究助成事業(NEDO)、最先端・次世代研究開発支援プログラム(内閣府)の研究代表者として、抗がん剤や治療遺伝子を担持させた磁性微粒子を、磁力で癌部に強制送達できるドラッグデリバリーシステム(DDS)を独自に開発してきた(図6)⁴⁻¹²⁾。

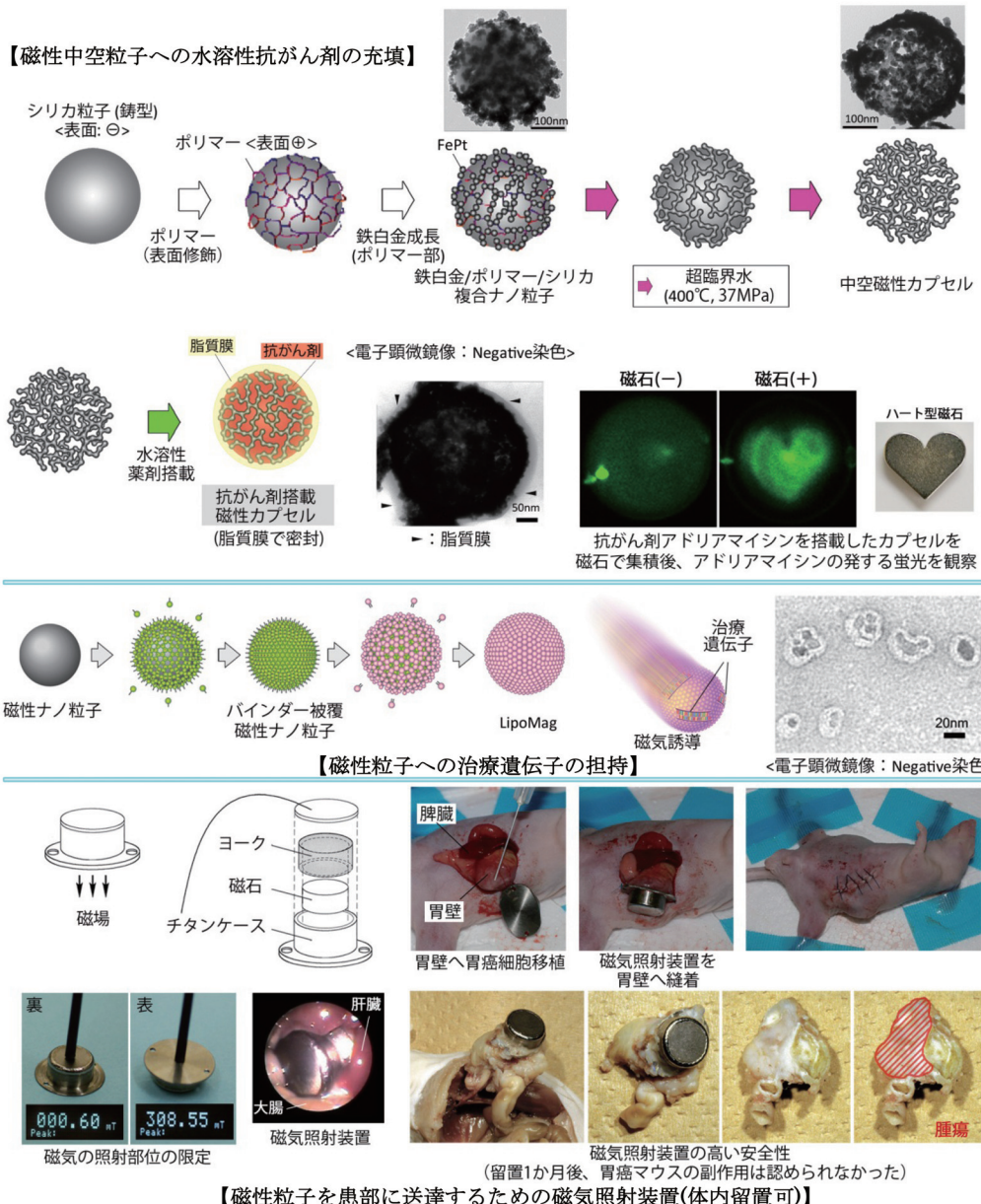
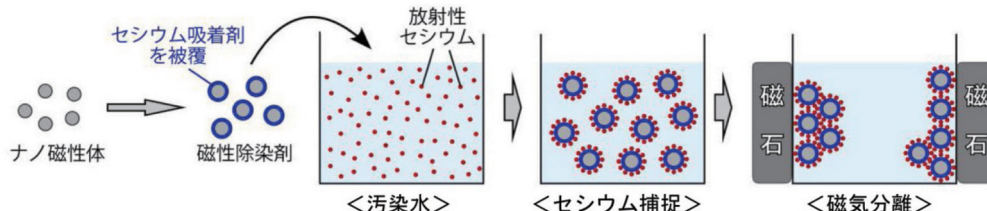


図6 磁性ナノ粒子への薬剤担持を基盤とする磁気誘導型 DDS

2.3 原発汚染水を標的とした磁性除染剤の開発

DDS 開発過程で、原発事故による大規模な放射能汚染が発生した。この喫緊の課題に対し、並木らは「磁性微粒子への薬剤担持技術」を応用、セシウム吸着材であるフェロシアン化鉄(プルシアンブルー)をマグネタイト微粒子表面に結合させた「磁気回収できる除染剤」を発明し(特許4932054号)、汚染水から99%以上の放射性セシウムを15秒以内に磁石で取り除けることを確認している(図7)¹³⁻²⁰⁾。

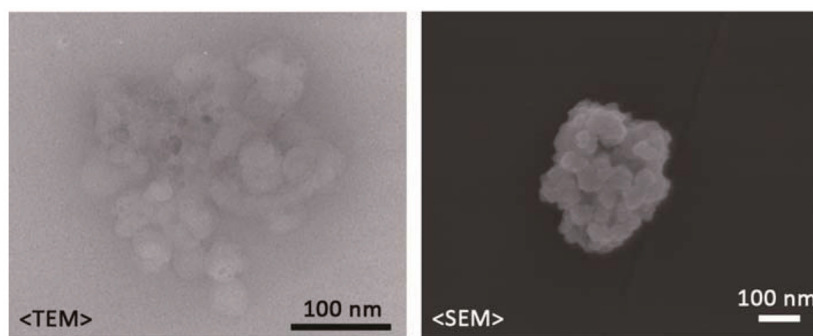


【汚染水用除染剤のセシウム吸着・磁気回収イメージ】



磁石(一) 磁石装着 → 7秒後

【汚染水用除染剤の磁気回収】



【汚染水用除染剤の電子顕微鏡写真】

図7 磁性除染剤(汚染水用)

3. 汚染飛灰を標的とした新たな磁性除染剤の開発

汚染水用に開発した磁性除染剤の飛灰への適用可能性を探るため、最初に飛灰スラリーを遠心分離した上澄みに対する除染効果を調べた。フェロシアン化鉄のアルカリ分解を防ぐため中和を要したが、除染剤を混合・磁気回収したところ十分な効果が得られた。次に、中和した飛灰スラリーに除染剤を混ぜ磁気分離を試みたが、放射能濃度は低減しなかった。スラリーに対応させるには、磁性除染剤に以下の改良を施す必要が考えられた²¹⁾。

3.1 新型磁性除染剤に求められる特性

(1) 耐塩類性

飛灰には様々な塩類が大量に含まれている。ゼオライトやフェロシアン化物は、代表的なセシウム吸着材であるが、ゼオライトの場合、塩濃度の高い溶液中では吸着能が著しく妨害されるため、飛灰スラリーには適用できない。

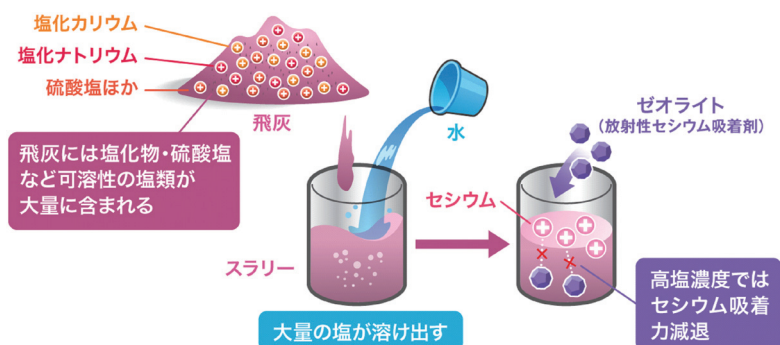


図8-1
磁性除染剤
に求められる
耐塩類性

(2) 耐アルカリ性

焼却施設では、焼却時に発生する塩化水素、硫黄酸化物などの酸性物質を中和するため消石灰を吹き込んでおり、飛灰スラリーは強いアルカリ性を示す。フェロシアン化物は耐塩類性に優れるが、フェロシアン化鉄の場合、pH7以上で分解してセシウム吸着能を失うとともに、シアン排水としての水処理が必要になる ($\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 + 12\text{OH}^- \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3[\text{Fe}$

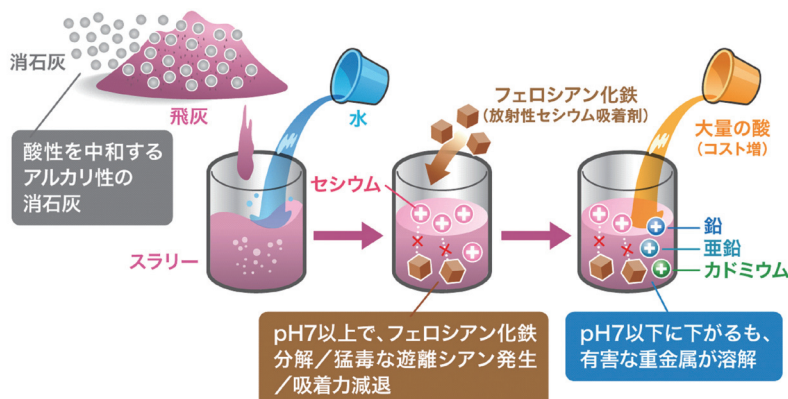


図8-2
磁性除染剤
に求められる
耐アルカリ性

(CN)₆]⁴⁻)。スラリーの pH を7以下に調整する方法もあるが、大量の酸が必要でコスト増大を招き、その pH 領域では鉛やカドミウムなど有害な重金属も水に溶け出す問題がある。

(3) 飛灰と磁性除染剤の固 - 固分離性

セシウムを効率良く低減させるには、なるべく多くの除染剤をスラリーから迅速に回収する必要がある。磁気分離の観点からは、磁性除染剤の性状として粒径が大きく、磁気特性が高く、飛灰粒子との親和性が小さい方が有利である。セシウム吸着の観点からは、粒径が小さく、表面積が大きく、分散性が高い方が有利である。そのため、これらの性質をバランス良く除染剤に付与することが重要である。汚染水用除染剤のサイズは小さく飛灰微粒子と凝集体を形成しやすいため、また、その母材には飽和磁化の小さな酸化鉄微粒子を用いていたため、磁力によるスラリー固形分と除染剤の固 - 固分離は困難であった。即ち、永久磁石程度の磁力では回収できず、高勾配磁力選別機では飛灰ごと回収された。

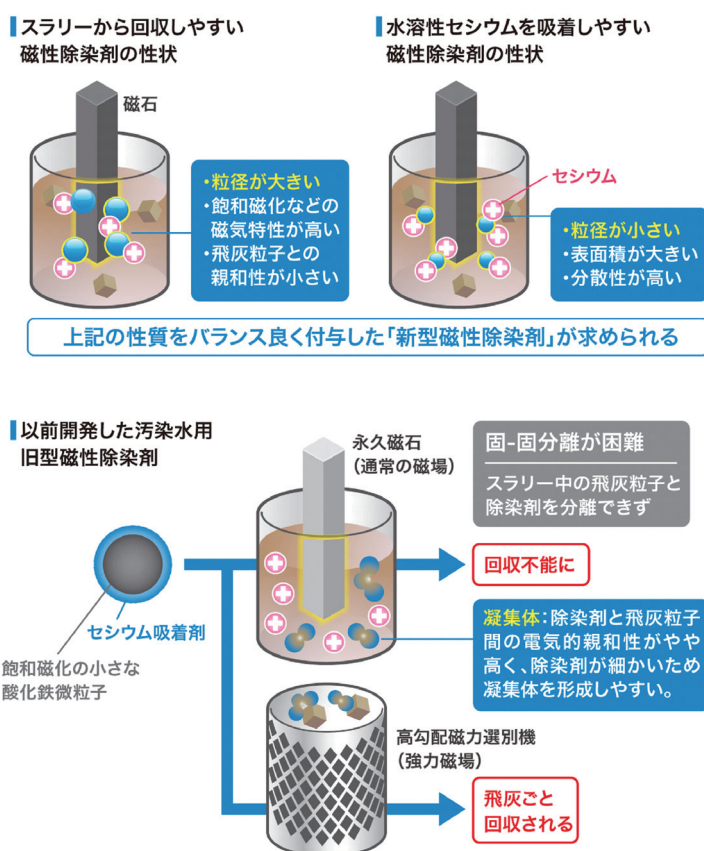


図8-3 磁性除染剤に求められる固 - 固分離性

(4) 物理的強度

本技術は、セシウムをスラリーから直接除去できることを特長とする。スラリーの攪拌を強めれば処理時間を短縮できるが、除染剤に作用するせん断応力も高まる。応力によりセシウム吸着材が磁性粉から剥離すると除染能は低下するため、攪拌に耐える除染剤の強度が要求される。

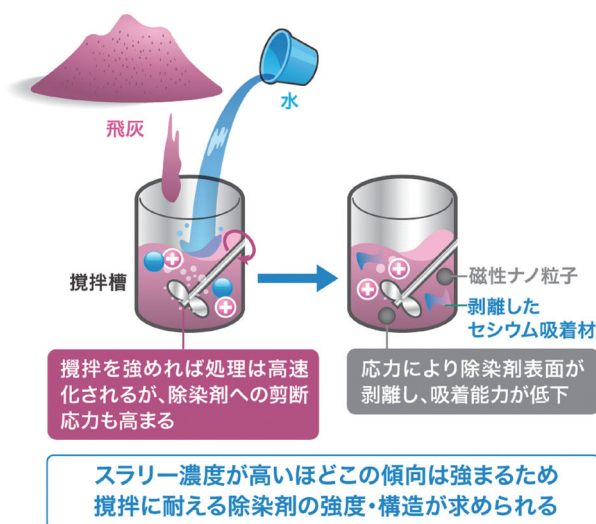


図 8-4 磁性除染剤に求められる物理的強度

3.2 異分野融合による新型磁性除染剤の開発・性能評価

磁性除染剤に求められる特性、高度汚染飛灰を大量に用いる実証試験の必要性を鑑みて、異分野技術の融合により目標を達成できる研究体制を構築した(図9)。

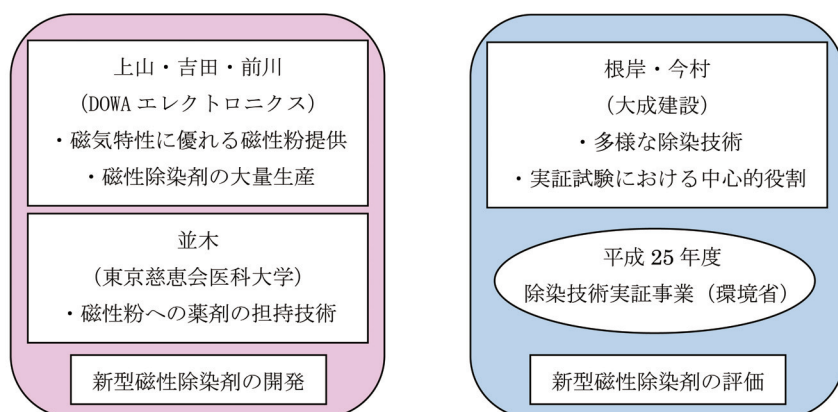


図9 研究体制の組織図

並木らによる磁性微粒子への薬剤担持技術、DOWA エレクトロニクスによる高性能磁性粒子の量産技術を融合し、飛灰に対応できる磁性除染剤を新たに開発した。さらに大成建設が提案した、本磁性除染剤を活用できる飛灰処理システムが、環境省 除染技術実証事業（テーマ名：「磁性ナノ粒子を利用した焼却飛灰からの放射性セシウム回収技術」）に採択された。栃木県内の一般廃棄物処理施設に保管されている高濃度セシウムを含む飛灰を検討対象として、実証スケールの設備を用いて本磁性除染剤の性能について評価した。

DOWA エレクトロニクスは、磁気記録媒体の記録ビットの高密度化に伴う磁性ナノ粒子の体積減少による性能低下を補うため、小さな粒子サイズでも磁気特性の高い、安価な磁性材料を提供してきた^{22, 23)} (図10)。



図10 DOWA エレクトロニクスが開発した磁性ナノ粒子を材料とする磁気記録媒体

大成建設は、建設事業を通して環境の保全・創造に努め、先駆的な環境事業を推進している。2011年11月より、飯舘村、川俣町、郡山市、南相馬市、常磐自動車道で本格的除染業務に携わっている(図11)。



図11 大成建設による除染事業

3.3 新型磁性除染剤の特徴

飛灰用磁性除染剤は以下の構造をもつ。耐食処理を施した鉄粉にフェロシアン化ニッケルを担持させた。この一次粒子同士をバインダーで結合し、特殊処理により空隙に富む多孔性二次粒子(径 $4.4\sim 10.3\mu\text{m}$)を得た(図12～14)。フェロシアン化鉄に比べ耐アルカリ性に優れるフェロシアン化ニッケルをセシウム吸着材として用いることで、適応 pH は11まで広がり、耐塩類性と耐アルカリ性の両立が可能になった。



図12 各種フェロシアン化物

① フェロシアン化鉄、②フェロシアン化亜鉛、③フェロシアン化ニッケル、④フェロシアン化銅、⑤フェロシアン化コバルト。③がアルカリ環境で最も高いセシウム吸着能を示した。

新型除染剤では内部の空隙にもフェロシアン化ニッケルを搭載したため(図13・14)、内部を中心としたセシウム吸着サイトの割合が増えた。この構造は、吸着能の増大だけでなく、攪拌時の飛灰粒子との衝突による吸着サイトの剥離を防止するのにも有効である(図15)。磁気分離については、飽和磁化の大きな耐食鉄粉、およびフェロシアン化鉄よりも飛灰との電気的親和性の低いフェロシアン化ニッケルを原料として用い、二次粒子径を平均 $6.5\mu\text{m}$ 以上に制御することで除染剤の回収効率は大幅に向上した(図16・17)。その結果、小さな磁力でも、新型除染剤はスラリーから迅速に回収できるようになった。

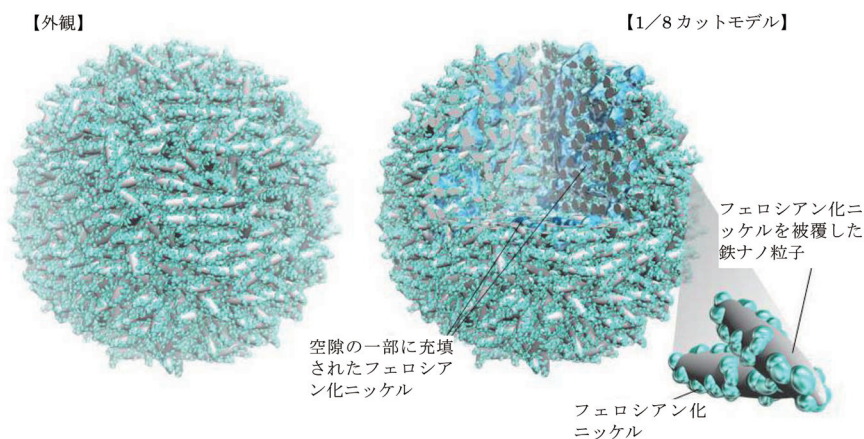


図13 新型磁性除染剤の模式図

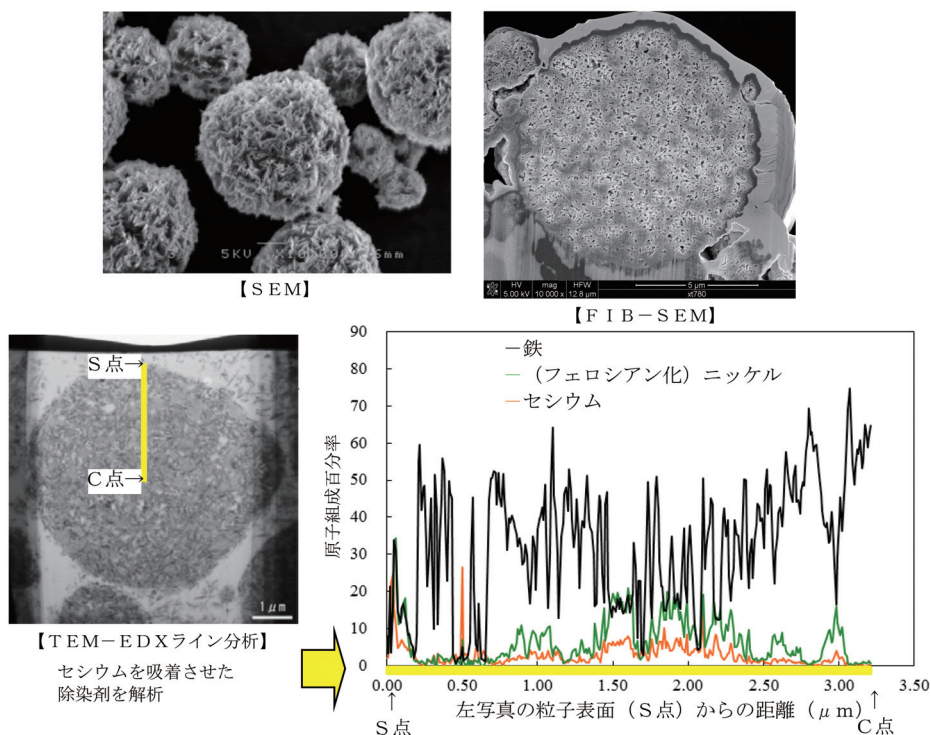


図14 新型磁性除染剤の構造

粒子内部の空隙の一部にフェロシアン化ニッケルを搭載した。EDX-ライン分析により、粒子内部のフェロシアン化ニッケルの分布割合が大きいことを確認した。

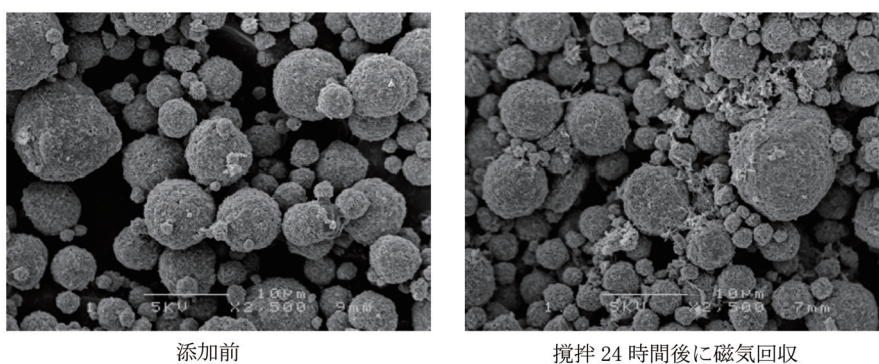


図15 新型磁性除染剤の耐久試験(飛灰スラリー中での攪拌)

飛灰40gに水400mLを加え、磁性除染剤40mg(飛灰重量の0.1%)を混ぜた。24時間200rpm(ストローク:1インチ)にて攪拌後、磁気分離装置(図16)で回収した粒子を電子顕微鏡(SEM)で観察した。攪拌後も除染剤の形態は保たれていた(飛灰の不溶性固形分(繊維状)の付着を認める)。

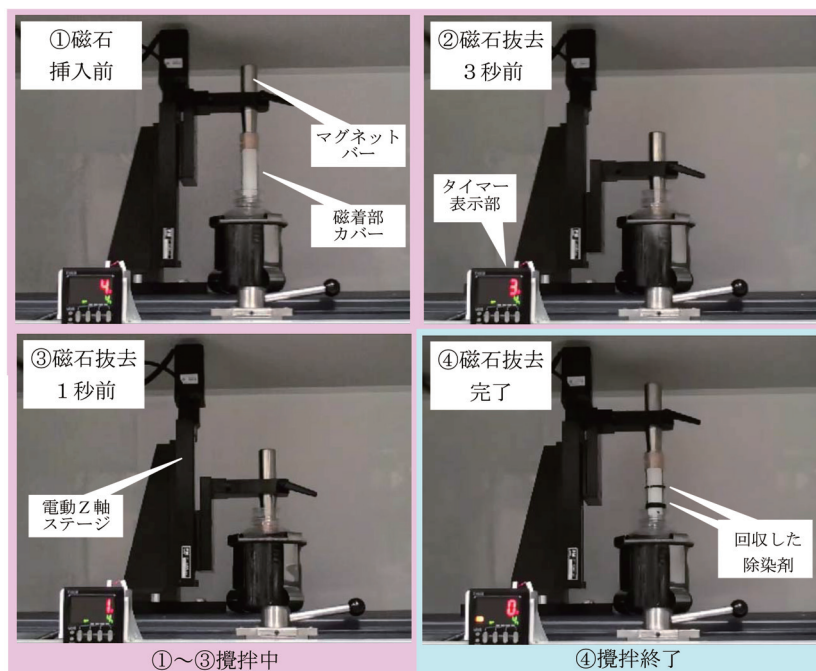


図16 磁性除染剤を加えた飛灰スラリーの攪拌・磁気分離装置(テーブル試験用)

磁性除染剤を飛灰スラリーに混合後、除染剤を磁気分離するための装置。攪拌・磁気回収のタイミングをコンピューター制御することにより、精度の高い試験が可能になった(特許出願済)。

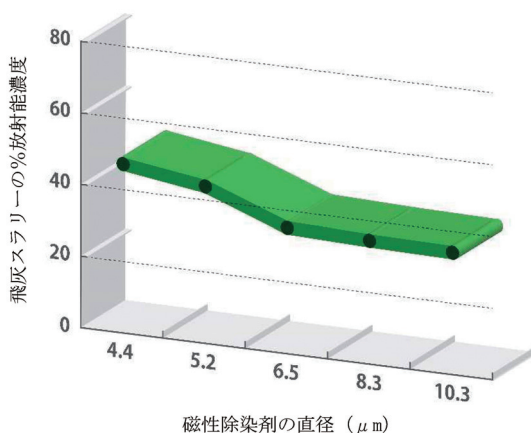


図17 除染剤のサイズと処理済飛灰スラリーの放射能濃度の関係(テーブル試験)

除染剤の直径を $6.5\mu\text{m}$ 以上に制御することで除染効果は最大となった。図15と同じ条件で、除染剤を混合し、磁気分離後に飛灰スラリーの放射能濃度を調べた(処理前の放射能濃度を100%として比較した)。

4. 新型磁性除染剤を用いた実証試験

4.1 実証試験プラントの概略

磁性除染剤と飛灰洗浄を組み合わせ、その実用性を検討するため実証試験を行った。図18のように、少量（乾燥飛灰重量の0.5%以下）の磁性除染剤を飛灰スラリーに直接混合後、小型のマグネットセパレーターを用いて磁気分離するだけで、スラリー状態のまま除染が完了する。その後、除染済スラリーの固液分離にも高压フィルタープレスに代替するコンパクトな真空脱水装置を使用した。

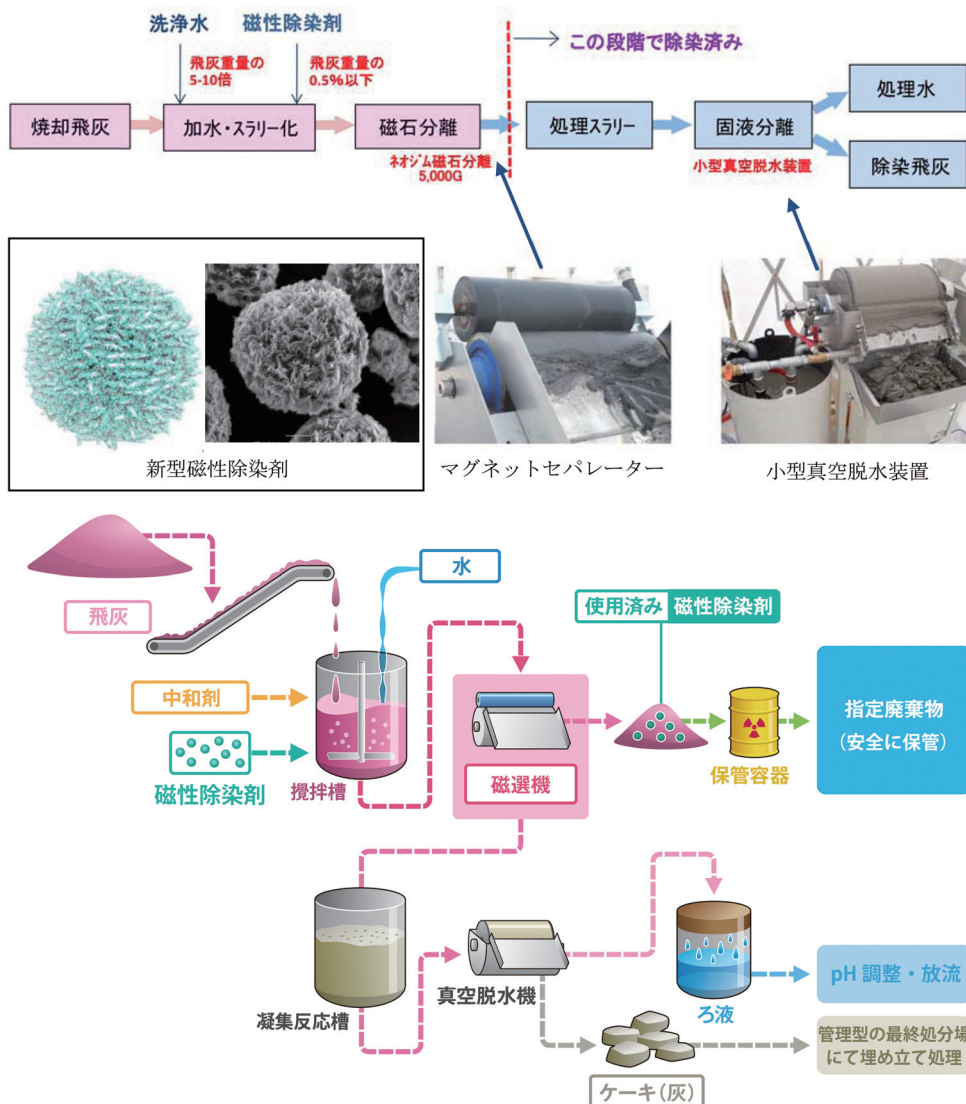


図18 飛灰処理システム概略フロー図

4.2 汚染飛灰の供給先および実証試験の実施場所

栃木県内の一般廃棄物焼却施設より、平成23年8月に排出された保管飛灰2種類(24,000、33,000Bq/kg 前後)の提供を受けた。実証試験は那須環境技術センター(栃木県那須塩原市)にプラントを設置して実施した。

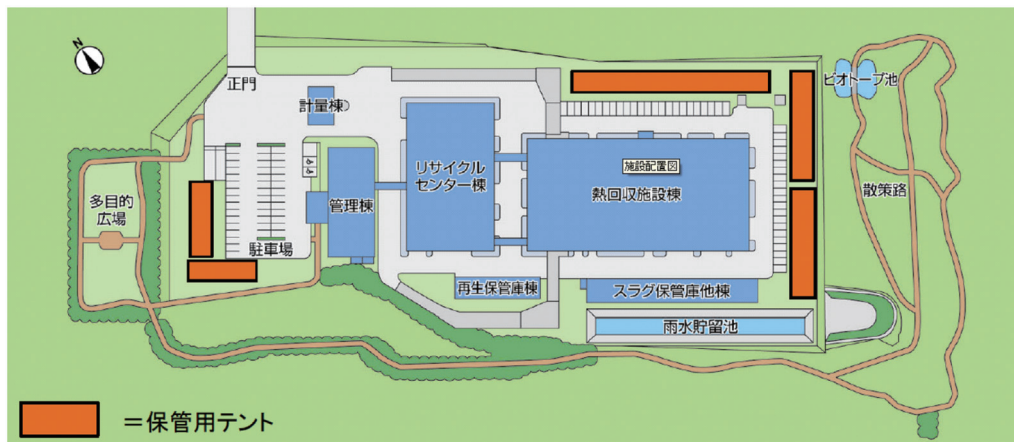


図19 高濃度汚染飛灰の保管用テント(焼却施設内)

4.3 実証試験プラントの設置

実証試験プラントのレイアウトを上図に示す。赤枠内は処理前の飛灰や回収した除染剤など放射線量が高いサンプルを扱う区域である。攪拌・解砕槽とマグネットセパレーターは鋼板に溶接、一体化することで転倒防止措置を講じた。

試験プラントのフローを下図に示す。セパレーターを通過した飛灰スラリーは、スラリー受け槽からバルブの切り替えで、攪拌・解砕槽間を循環できる構造とした。

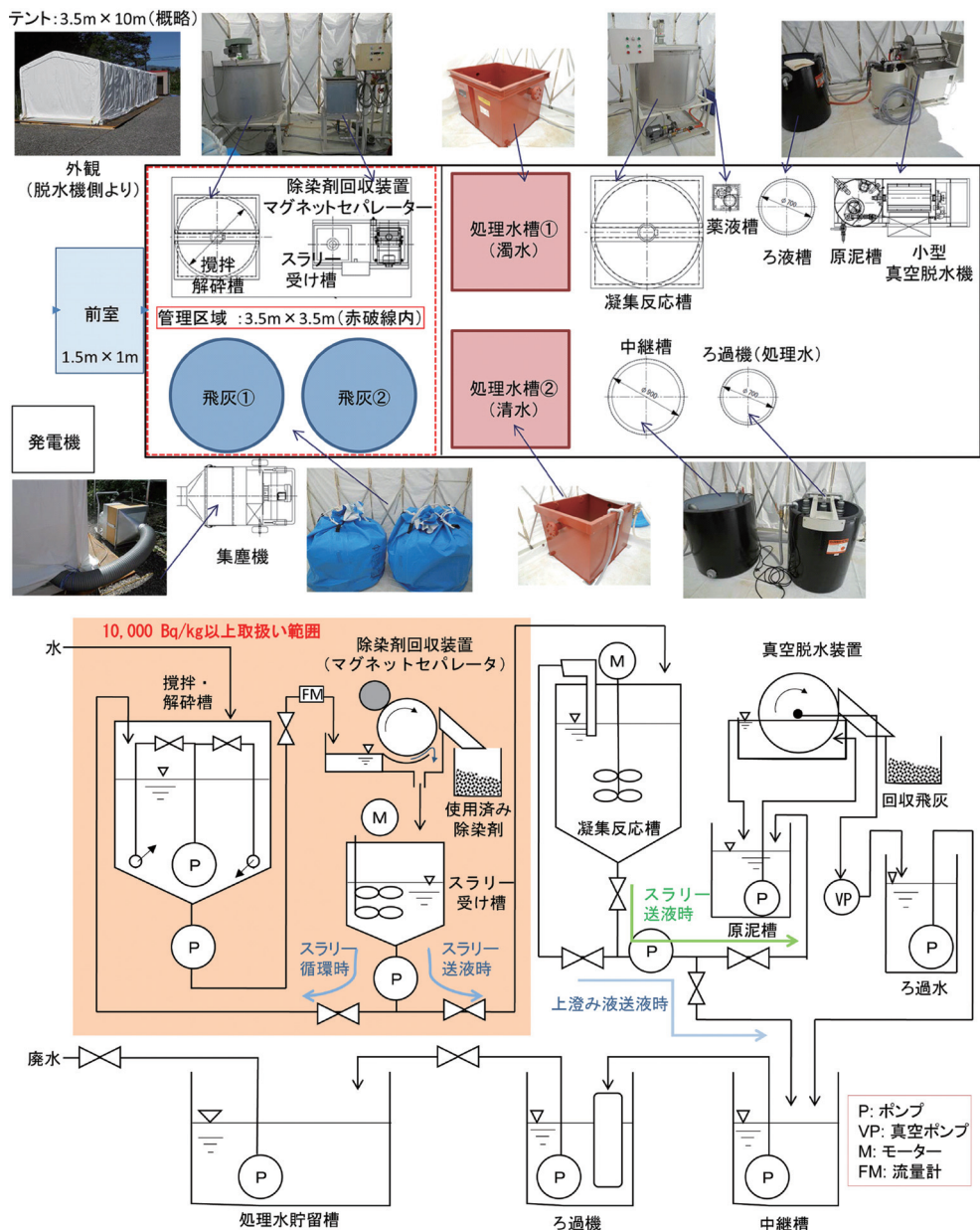


図20 実証試験プラントのレイアウト図(上)・フロー図(下)

試験プラントの設置工事状況を以下に示す。水平を確認しながら鉄板を敷設、テント・防水シートを設置後、資材や機材を配置した。



図21 試験プラントの設置工事

木枠部分に HEPA フィルターを内蔵する小型集塵機 (⑦：吸引風量 $20\text{m}^3/\text{min}$) の吸引ダクトを $10,000\text{Bq/kg}$ 以上の高濃度放射性セシウムの取扱い区域に設置した。飛灰を扱う際に稼働させ、作業員の安全確保・大気中への放射性粉じんの拡散防止に配慮した。

テント内設備の配置を以下に示す。



図22 高線量飛灰の取扱い範囲(上)・除染済スラリーの取扱い範囲(下)

4.4 磁性除染剤の磁気分離と除染済飛灰スラリーの脱水

○マグネットセパレーター

固定されたマグネットコア周囲を非磁性ステンレスの外筒が回転する(図23)。回収部のスクレーパーには磁力がかからず、磁着物を掻き落とせる仕組みである。駆動には外筒を回転させる省電力・小型モーターのみを要し、非常にコンパクトな装置である。

最大容量80L/minの装置を使用し、20L/minでスラリーを通過させて磁性除染剤を回収した(8時間で9.6m³のスラリーを処理可能)。マグネットコア部の隙間をスラリーが通過する構造で(図23)、20L/minの際に回収効率は最大となった。

また、攪拌槽とセパレーター間を、スラリー体積の4～8倍の累積通過量となるまで循環させることで、除染剤の回収量が増え、テーブル試験同等の除染効果が得られた。実処理では、複数の装置を直列に配置することで、ワンパスでの磁気分離が完了する。

スケールアップについては、ネオジム磁石を内蔵するマグネットコア部の長さを伸ばすことで対応でき、最大容量2,000L/minの装置が市販されている。

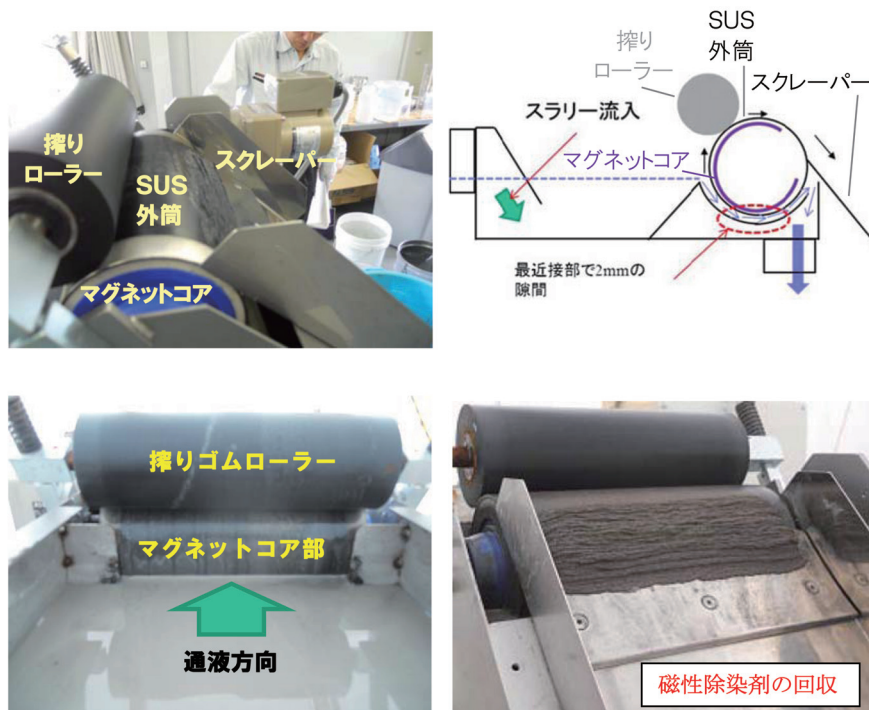


図23 マグネットセパレーター

○小型真空脱水装置

多孔加工を施したステンレスドラム表面にフィルタプレス用のろ布を装着し、内部を真空にして外周から汚泥を脱水する装置である(図24)。汚泥は原泥槽からドラム周囲を循環させた。

この装置では、60秒(脱水／吸引)⇒10秒反転で処理しており、1サイクル140秒あたりの飛灰回収量は平均1.14kgであり、24時間で700kgの脱水済飛灰が得られる。脱水済飛灰の含水率は平均55.9%であり、飛灰の非水溶性成分量に換算すると310kgとなり、飛灰の非水溶性成分の比率は48%であるから、飛灰元試料として646kgに相当する。

実処理においては、ドラム径を30から50cmに、長さを41から70cmにすることで、4.7倍(3.1トン／日)まで処理速度を上げられるため、スケールアップした装置2台により、1日4トンの飛灰を処理できる。

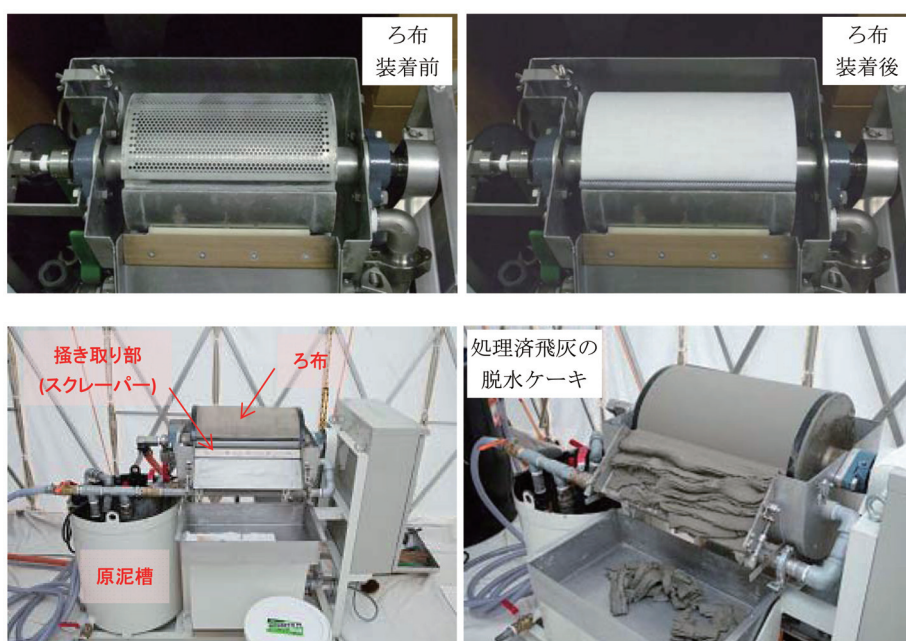
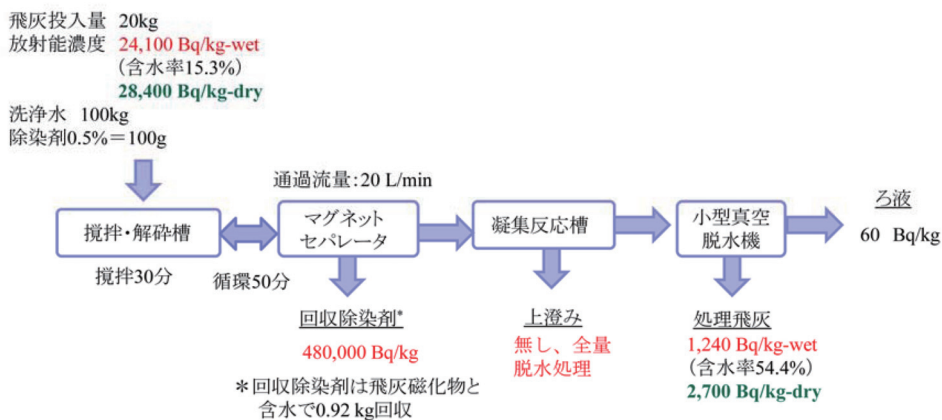


図24 真空脱水装置

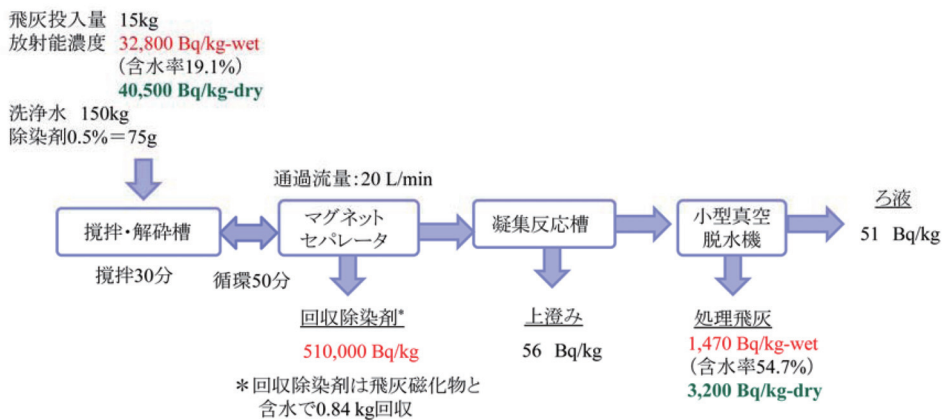
4.5 除染システムによる飛灰浄化と試験廃棄物の処理

実証試験の代表的な結果を以下に示す。

【ケース 1（飛灰サンプル①を使用）】



【ケース 2（飛灰サンプル②を使用）】



【ケース 3（飛灰サンプル②を使用）】

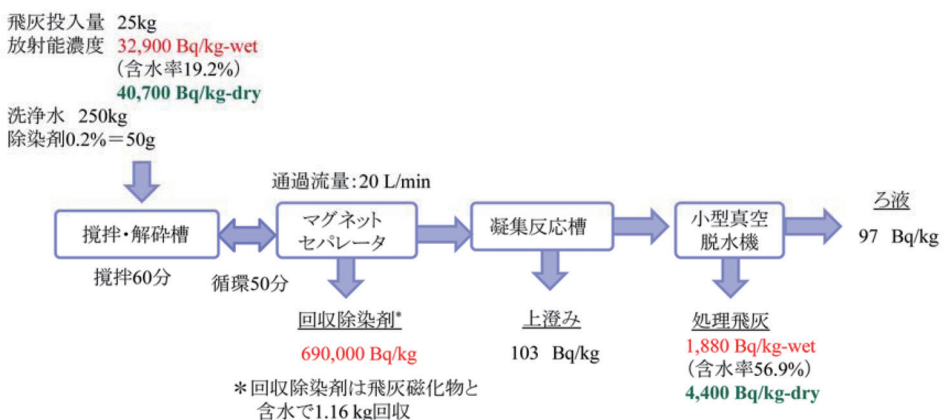


図25 処理前後の飛灰・洗浄液の放射能濃度

	【ケース 1】	【ケース 2】	【ケース 3】
除染前放射能濃度 (Bq/kg)	28,400	40,500	40,700
除染後放射能濃度 (Bq/kg)	2,700	3,200	4,400
除染率(%)	90.5	92.1	89.2
全シアン濃度(mg/L)	0.2 以下	0.2 以下	0.1 以下

表2 処理前後の飛灰の放射能濃度(乾燥重量当たり)および排水中の全シアン濃度

処理前後の飛灰の放射能濃度から算定した除染率は平均90.6%であり、除染剤由来の全シアン濃度は定量下限値(0.1mg/L)未満～0.2mg/L以下と排水基準値を下回った(表2)。また、除染済飛灰から溶出する重金属は全て定量下限値(0.01mg/L)未満であった。尚、除染剤のセシウム吸着量が乾燥重量当たり 10^7 Bq/kg以下であれば、洗浄水の放射能濃度は数十Bq/kg程度に制御できることを確認している。

コストについては、既に提案されている高圧フィルタープレスとプルシアンブルーを併用する方法と比べ、除染剤などの費用は若干増えるものの、簡便な処理設備、省スペースな装置に代替できるため、大幅に削減可能である。



図26 試験に関連する環境汚染の防止措置

試験終了時には、除染済飛灰と磁選機による回収物を良く混合後、フレキシブルコンテナに戻したうえで飛灰提供元の焼却施設に返却した(左)。洗浄水は放射能濃度が飲料水基準10Bq/kg以下に合致することを確認した後、試験を実施した那須環境技術センターの排水処理設備に放流した(右)。

5. まとめ

本研究では、ライフサイエンス領域の先端技術と、磁性材料・環境・プラント設計など異分野技術を融合、「飛灰スラリーから放射性セシウムを直接取り除けるコンパクトな除染システム」を開発し(世界初)、その高い効率性・有用性を実証試験にて明らかにした。

本技術の実用化は保管飛灰を迅速に減容化できるだけでなく、「磁気回収できる除染剤」の特長を活かし、被曝の危険が大きな使用済除染剤の回収工程の無人化にも役立ち、スラリーのまま水溶性セシウムを除染できることから、処理済飛灰からのセシウムの溶出・拡散防止にも貢献する。

6. 謝 辞

磁性除染剤の実用化開発は DOWA テクノファンド (DOWA ホールディングス (株)) により実施した。基盤となる磁性ナノ粒子への薬剤担持技術は、最先端・次世代開発支援プログラム (内閣府)、産業技術研究助成事業 (NEDO) により開発した。

飛灰を用いた実証試験は、平成 25 年度除染技術実証事業 (環境省) において実施した。

本技術開発の東京慈恵会医科大学、DOWA エレクトロニクス (株)、DOWA エコシステム (株)、大成建設 (株)、成和リニューアルワークス (株) の関係各位のご協力に深謝致します。

7. 用語解説

放射性セシウム

^{134}Cs 、 ^{137}Cs の半減期は、それぞれ、2.1 年、30 年である。

飛灰

燃焼排ガスに含まれる粒子状物質で、集塵灰、ボイラ・ガス冷却室・再燃焼室で捕捉した煤塵 (ばいじん) の総称。飛灰は、主灰に比べ融点が高く (1250～1350℃)、セシウムの他、ダイオキシン、重金属の含有率が高い。

主灰

焼却炉の底に落下した灰。

スラリー

水を加え泥状にした混合物で、固体粒子が液体中に懸濁している流動体。

フィルタープレス (圧濾機)

ろ布 (布製フィルター) とろ板 (ろ布を張る穴の開いた板) を重ね、スラリーを圧入濾過し固形分・液体成分を分離する装置。

脱水ケーキ

汚泥などスラリーの脱水により得られる固形分。脱水後も固形分当たり 30～50 重量% 以上の水分が残る。

固液分離

沈殿・濾過などにより、濁質成分と水分を分離する操作。

ドラッグデリバリーシステム (DDS : Drug Delivery System)

薬物の体内分布を時間的・空間的・量的に制御し、目的部位に適切な量の薬剤を、適切な

タイミングで送達するシステム。

中空磁性カプセル

シリカ鑄型粒子の表面に被覆したポリマー部に磁性微粒子を成長させる。続いて、超臨界水処理 (400℃・37MPa) により、磁性微粒子同士が部分的に熱融合した後、鑄型が徐々に分解されるため、最終的に多孔中空状の磁性カプセルが得られる。

アドリアマイシン(ドキシソルピシン)

抗癌剤の一種。心筋障害など重篤な副作用が知られ、その回避のため、癌部のみに薬剤を送達できる DDS は有効である。

バインダー

ナノ粒子などに薬剤を結合させるための物質。

治療遺伝子

例えば、癌の増殖に必要な血管新生や癌細胞分裂を抑制する遺伝子。この遺伝子をナノ粒子に担持させることにより癌病巣への送達効率が向上する。

ネガティブ染色

脂質ナノ粒子などを電子顕微鏡で観察するときに用いる方法で、リンタングステン酸など電子を散乱させやすい重金属塩の溶液で染色すると、粒子周辺が黒く染まったように見え、コントラストが向上する。

磁気照射装置

治療薬を担持させた磁性微粒子を患部に運ぶため、患部に留置し、患部に限局した磁場を発生させる装置。磁気回路(ヨーク)により必要な方向以外の磁場漏洩を防ぎ、生体適合性の高いチタンでカプセル化する工夫を施した。

フェロシアン化鉄(プルシアンブルー)

鉄のシアノ錯体に過剰量の鉄イオンを加えて得られる紺色顔料でセシウムを吸着する。

マグネタイト(四酸化三鉄： Fe_3O_4)

砂鉄の成分で、磁石で回収できる。

ゼオライト

アルミノケイ酸塩の一種で、結晶構造中に比較的大きな空隙をもち、吸着・イオン交換材料として利用される。セシウム除去にも使えるが、他のイオンが混在すると効率は著減する。

飽和磁化

磁気特性を示す指標で、この値が大きいほど磁石に集まりやすい。今回用いた特殊鉄粉の場合、一般的な磁性体であるマグネタイトの2.5倍近くの飽和磁化を示す。

磁気記録媒体

磁気記録ヘッドにより磁化され、残留磁化のパターンが記録される媒体。磁気テープ、フロッピーディスク、ハードディスクなど。

記録ビット

情報の単位。一定サイズの媒体に多くの情報を記録するには、記録ビットサイズを小さくする必要がある。

浚渫(しゅんせつ)

港湾・河川などの底面を浚(さら)って土砂などを取り去る土木工事。グラブ式は、グラブバケットにより水底土砂をつかみあげる方式。

覆砂(ふくさ)

海底・湖底など底質改善を目的とする技術。ヘドロで底質が悪化した部位を砂などにより覆う。

TISD (Taisei Interoperable System for Decontamination)

タブレット端末を利用した調査・計画や電子承認(住民の同意)、廃棄物の追跡管理などに活用できる除染サポートシステム。

スピンジェット

超高压水を舗装の隙間に噴射し、区画線の塗料などを剥離する方法。

ショットブラスト

金属球やドライアイスなどの研削材を高速噴射し、舗装表面などを削り取る方法。

SEM(走査型電子顕微鏡)

細い電子線で試料を走査(scan)し、電子線を当てた座標情報から像を構築し表示する。

FIB-SEM

FIB(集束イオンビーム加工観察装置)とSEMを組み合わせたもの。FIBは、数nm～数百nm径に集束したイオンビームで、試料表面の特定領域の切削や、特定領域への炭素・タングステン・プラチナなどの成膜が可能。

TEM-EDX

TEM(透過型電子顕微鏡)とEDX(エネルギー分散型X線分光法)を組み合わせたもの。EDXは分析対象領域への電子線の照射により発生する特性X線のエネルギーと発生回数を計測し、元素・組成分析を行う手法。ライン分析は線状領域を対象とする。

HEPA フィルター

High Efficiency Particulate Air Filter の略称で0.3 μ mの粒子を99.97%捕集できる。

8. 参考文献

- 1) <http://shiteihaiki.env.go.jp/02/02.html#amount>
指定廃棄物の数量(平成25年12月31日現在：環境省 指定廃棄物処理 情報サイト)
- 2) 環境省資料「災害廃棄物の広域処理の推進について」
- 3) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 技術資料「放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分」
- 4) Namiki Y, Namiki T, Yoshida H, Ishii Y, Koido S, Nariai K, Mitsunaga M, Yanagisawa S, Kashiwagi H, Mabashi Y, Yumoto Y, Hoshina S, Fujiise K, Tada N. A novel magnetic crystal-lipid nanostructure for magnetically guided in vivo gene delivery. Nat Nanotechnol. 2009; 4, 598-606.【Nature Asia Materials: Research Highlight に選出】(<http://www.nature.com/am/journal/v2/n1/full/am20109a.html>)
- 5) 並木 慎尚. 磁性ナノ粒子を用いた癌治療を目指して. 医学のあゆみ 2010; 232, 819-21.
- 6) 瀧上輝顕, 河村 亮, 山崎陽太郎, 北本仁孝, 中川 勝, 並木 慎尚. FePt/SiO₂ 複合型磁性ナノ粒子の作製. J Jpn Soc Powder Metallurgy 2010; 57, 636-41.
【粉体粉末冶金協会論文賞受賞】
- 7) Namiki Y, Fuchigami T, Tada N, Kawamura R, Matsunuma S, Kitamoto Y, Nakagawa M. Nanomedicine for cancer: lipid-based nanostructures for drug delivery and moni-

- toring. Acc Chem Res 2011; 44, 1080-93.
- 8) Fuchigami T, Kawamura R, Kitamoto Y, Nakagawa M, Namiki Y. A magnetically guided anti-cancer drug delivery system using porous FePt capsules. Biomaterials 2011; 33, 1682-7.
 - 9) Fuchigami T, Kawamura R, Kitamoto Y, Nakagawa M, Namiki Y. Ferromagnetic FePt-Nanoparticles/Polycation Hybrid Capsules Designed for a Magnetically Guided Drug Delivery System. Langmuir 2011; 27, 2923-8.
 - 10) Namiki Y, et.al. Magnetic nanostructures for biomedical application. In: Masuda, Y., Editor. Nanocrystal. Rijeka, Croatia: INTECH pp349-72; 2011.
 - 11) 並木禎尚. 核酸医薬などのドラッグデリバリーを目指した磁性ナノコンポジットの創成. 遺伝子医学 2012; 23, 819-21.
 - 12) Namiki Y. Synthesis of lipidic magnetic nanoparticles for nucleic acid delivery. Methods in Mol Biol 2013; 948, 243-50.
 - 13) Namiki Y, Namiki T, Ishii Y, Koido S, Nagase Y, Tada N, Kitamoto Y. Inorganic-Organic Magnetic Nanocomposites for use in Preventive Medicine: A Rapid and Reliable Elimination System for Cesium. Pharm Res 2012; 29, 1404-18.
 - 14) 並木禎尚. ナノサイズの磁性微粒子で放射性物質除去—高効率・短時間で除去・回収が可能—. 工業材料 2012; 60, 58-9.【工業材料キーワード40に選出】
 - 15) 並木禎尚, 前川弘樹, 吉田貴行, 上山俊彦, 後藤昌大, 正田憲司ら. 放射性セシウムを磁石で迅速回収できる除染剤の実用化(前篇)-グリーンイノベーションに貢献するライフイノベーション発の新技術-. Material Stage 2012; 12(8), 62-71.
 - 16) 並木禎尚, 前川弘樹, 吉田貴行, 上山俊彦, 後藤昌大, 正田憲司ら. 放射性セシウムを磁石で迅速回収できる除染剤の実用化(後篇)-グリーンイノベーションに貢献するライフイノベーション発の新技術-. Material Stage 2012; 12(9), 61-8.
 - 17) 「汚染地で進む実証実験 従来技術の限界に挑戦」日経エコロジー pp32-3; 2011.12.
 - 18) 「セシウム除去 最短15秒; 磁性もった微粒子使用」日本経済新聞朝刊 新聞記事 2011.9.21.
 - 19) 「ナノ磁性体でセシウム除去 慈恵医大開発 オンサイトで手軽に」環境新聞 新聞記事 2011.9.21.
 - 20) 「磁力でセシウムの迅速除去を実現!! など見どころ満載 イノベーション・ジャパン2011—大学見本市」MSN photo ニュース 2011.9.21.
<http://photo.sankei.jp.msn.com/kodawari/data/2011/09/0921innovation/>
 - 21) 渡邊亮栄, 並木禎尚. 磁性除染剤による焼却飛灰からの放射性セシウム除去技術開発. 環境浄化技術 2014; 13, 74-8.
 - 22) 佐藤仁俊, 飯島志行, 冷永華, 李継光, 倉嶋敬次, 吉田貴行, 神谷秀博, 石垣隆正. 針状鉄コバルトナノ粒子の耐酸化シリカ被覆. J Jpn Soc Powder Metallurgy 2009; 56, 232-5.
 - 23) Namai A, Yoshikiyo M, Yamada K, Sakurai S, Goto T, Yoshida T, Miyazaki T, Nakajima M, Suemoto T, Tokoro H, Ohkoshi S. Hard magnetic ferrite with a gigantic coercivity and high frequency millimeter wave rotation. Nat Commun 2012; 3, 1035.