

2025 年度実施方針

1. 件 名：

部素材からのレアアース分離精製技術開発事業

2. 根拠法

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号二及び第九号

3. 背景及び目的・目標

2020年に政府が宣言した「2050年カーボンニュートラル」の実現には、電動化の普及がカギとされている。例えば、エアコンや電気自動車などに使用される電動モータには、レアアース（軽希土類のネオジムや重希土類のディスプロシウム、テルビウムなど）を用いたネオジム磁石が部材として使用されており、今後も大幅にその需要が増加すると見込まれている。しかしながら、ネオジム磁石に含有するこれらのレアアース、特に、ディスプロシウムやテルビウムについては、それらの鉱石資源が特定国に偏在していることから、その供給リスクは以前から問題視されている。

これまでも日本ではレアアースの資源供給リスクに向け、多くの政策事業を実施し、様々な技術開発が行われ、またその一部は社会実装もされてきたが、現在もおレアアースの資源供給リスクが十分に解決できているとは言い難い状況が続いている。特に、レアアースの分離精製工程に関しては、作業コストの関係上、製造時の端材（工程くず）、スベックアウト品及びスクラップ品から回収された廃ネオジム磁石を海外（ベトナムや中国）へ輸出し、そこで加工された再生品を再び輸入しているという現状は大きな課題である。従って、この分離精製工程に関しては、日本国内で実施してもコスト優位性のあるプロセスを早期に構築し、国内で資源のリサイクルを推進してこのような重要資源の国外流出を抑えていく必要がある。

そこで、本事業では廃棄物等から目的とするディスプロシウムやテルビウムなどの重レアアースを回収するまでの一連の製造工程を日本国内で実施できるように、コスト競争力を有する重レアアースの高効率分離精製技術の開発、及び重レアアースの精錬技術の開発を目標とし、この目標を達成することで、特定国の製造技術や資源政策に依存しない「重レアアース資源循環及び資源確保」を国が主導する形で進めていき、日本の素材産業の安定化と将来の供給リスクを解消することが狙いである。

研究開発項目①「未利用資源からの重レアアース回収技術の開発」

本事業は、日本国内での社会実装化が目標であるため、研究開発項目①では事業開始前に現行の製造コスト（海外製造コスト）に対して競争力のあるコスト（目指すべきコスト水準）を目標として設定し、適宜コスト評価を行いながら、研究開発を進めていく。

研究開発項目①では、まず、未利用資源からディスプロシウム（Dy）やテルビウム（Tb）などのような重レアアース群を選択的に濃縮し回収可能な新規吸着剤の開発とこの吸着剤を用いた回収するプロセスの開発を行う。具体的には、鉄などの高濃度夾雑物から希薄な重レアアース群（Dy、Tb）を選択的かつ効率的に分離・回収が可能な新規吸着剤技術を開発し、吸着回収特性、選択性、耐久性等を評価する。その際、天然資源（鉱物）に含有することが多い放射性元素（ウラン、トリウム等）との分離も考慮し、放射性元素の吸着挙動も把握する。次に、未利用資源の実工程液を用いた試験により、回収コスト等のプロセス評価を行う。得られた結果を基に、スケールアップ試験を行い、社会実装に向けたプロセス確立及び設備構築を目指す。

重レアアースの選択的濃縮プロセスの開発

【中間目標（2025 年度）】

目的物である重レアアース群（ディスプロシウム、テルビウム）と想定される夾雑物（鉄等）、放射性元素（ウラン、トリウム等）との分離を可能にする技術を開発し、さらに当該技術を用いた重レアアースの選択的濃縮・回収プロセスを開発する。また、目指すべきコスト水準に対するコスト評価も行う。

【最終目標(2027 年度)】

中間目標で設定した目指すべきコスト水準に基づいて、当該技術の社会実装が可能かを確認するためのスケールアップ試験を実施し、再度コスト評価を行う。

研究開発項目②「ディスプロシウム/テルビウムの高精密相互分離技術及び精錬技術の開発」

本事業は、日本国内での社会実装化が目標であるため、研究開発項目②においても事業開始前に現行の製造コスト(海外製造コスト)に対して競争力のあるコスト(目指すべきコスト水準)を目標として設定し、適宜コスト評価を行いながら、下記(1)高精密相互分離技術の開発及び(2)新規電解還元法の研究開発を進めていく。

(1)高精密相互分離技術の開発

研究開発項目②では、ディスプロシウムとテルビウムとを高精密で相互に分離する技術の開発を行う。両者は原子番号が隣接し、化学的挙動が類似しているため、従来は溶媒抽出法を多段階で繰り返すことで分離されている。そこで両者の分離について分離係数(液—液、固—液など二相間の両金属の分配比の比)を指標とし、従来法(溶媒抽出法)の分離係数(条件により2~3)を基準として 2 倍以上の分離係数を持つ高精密相互分離技術を確立する。当該分離技術については、実用プロセスに向けた環境適合性、量産性、コスト適合性を備えることを前提とする。さらに、新規抽出剤当該技術の耐久性、使用溶媒の削減検討等、実用性向上のための性能評価を行う。

また、従来型の分離装置であるミキサーセトラの設置規模や溶媒使用量を低減する分離装置を開発する。これまでの NEDO プロジェクトで開発された分離装置(エマルションフロー装置等)の活用も考慮する。これらの開発内容をういた統合した高精密相互分離技術(抽出プロセス)を開発し、装置規模が従来比 1/5 となる分離精製プロセスを確立する。

(2)新規電解還元法の開発

分離精製プロセスの後工程となる金属回収工程についても、より低温下での実施を可能にする精錬技術として新規電解還元法を開発する。ここで、新たに開発する方法は、一般的な熔融電解法や金属熱還元法と比較して、200℃以上低い温度下でテルビウムを取得することを目標とする。これにより精錬プロセスの省エネルギー化及び環境負荷の低減を達成する。

(1) 高精密相互分離技術の開発

【中間目標(2025 年度)】

ディスプロシウムとテルビウムの分離について、従来法(溶媒抽出法)の分離係数(条件により2~3)を基準として 2 倍以上の分離係数を持つ高精密相互分離技術を確立する。また従来型装置(ミキサーセトラ)と比較して 1/2 以下の装置規模で、かつ同等の分離性能を示すような新規分離装置を開発する。また目指すべきコスト水準に対するコスト評価も行う。

【最終目標(2027 年度)】

中間目標で見いだされた新規手法のスケールアップ検討を行う。また新規分離装置による分離精製プロセスのスケールアップ試験を実施し、装置規模が従来比 1/5 で環境適合性、量産性、コスト適合性を備える分離精製プロセスを確立する。

(2) 新規電解還元法の開発

【中間目標(2025 年度)】

一般的な熔融塩電解法、金属熱還元法と比較して、200℃以上低い温度下でテルビウムを取得する新製法を開発する。熔融塩電解法の場合、電解をより低温下で実施でき、かつレアアース金属取得の際に蒸留除去精製が可能となるような熔融塩と液体合金系との有望な組み合わせを複数開発する。また、目指すべきコスト水準に対するコスト評価も行う。

【最終目標(2027 年度)】

中間目標までに調査した新製法を最適化し、環境適合性、量産性、コスト適合性を備えたプロセスを確立する。

4.実施内容及び進捗(達成)状況

プロジェクトマネージャー(以下「PMgr」という。)にNEDO バイオ・材料部 内山章二を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化するように努めた。国立研究開発法人産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター 資源循環技術研究チーム長 成田弘一をプロジェクトリーダー(以下「PL」という。)とし、株式会社三徳 開発部長 入江年雄をサブプロジェクトリーダー(以下「SPL」という。)とし、以下の研究開発を実施した。

4.1 2024 年度事業内容

本事業は、日本国内での社会実装が目標であるため、事業開始前に現行の製造コスト(海外製造コスト)に対して競争力のあるコスト(目指すべきコスト水準)を目標として設定し、研究開発を進めた。

研究開発項目①「未利用資源からの重レアアース回収技術の開発」

重レアアースの選択的濃縮プロセスの開発

(実施体制:産総研、(株)三徳、千葉大)

①-A 重レアアースに選択的吸着能を有する新規吸着剤の開発

官能基導入方法を検討し、新規吸着剤を作製した。また、作製した新規吸着剤及び細孔特性の制御した新規吸着剤の官能基導入量を確認した。

①-B 新規吸着剤の実用性評価およびコスト評価

①-Aで作製した新規吸着剤による模擬水溶液からの重レアアースの吸着特性評価(選択性、吸着容量、吸着速度)を行った。また、実試料を用いた既存の吸着剤によるレアアースおよび放射性元素の吸着挙動の把握を行った。

研究開発項目②「ディスプロシウム/テルビウムの高精密相互分離技術及び精錬技術の開発」

(1) 高精密相互分離技術の開発

(実施体制:産総研、(株)三徳、(株)エマルションフローテクノロジーズ、原子力研、大阪大、鹿児島大、神戸大、佐賀大)

②(1)-A 新規抽出剤の合成

- ・新規抽出剤と重レアアースからなる錯体をモデリングし、新規抽出剤をベースにして配位子骨格を改良し、量子化学計算に基づく安定度定数予測式を用いて分離効率を調査し、分配係数の予測値を算出した。
- ・計算科学的手法、抽出分離試験のフィードバックに基づいて2023年度に調査した合成経路について、小スケールの原材料から実際に新規抽出剤の誘導体を合成し、各候補経路の詳細について微修正を行いながら、合成経路の妥当性を評価した。

②(1)-B 新規抽出系開発及び抽出機構解明

- ・新規抽出剤による重レアアース抽出に関し、レアアース抽出評価装置を用い、pH、抽出剤濃度、共存アニオン濃度等の影響を調査した。
- ・新規抽出剤による錯体に関し、錯生成度定数の測定及び各種放射光XAFSによる測定を実施した。また、溶液状態との比較として、単結晶等の固体系錯体を作成した。
- ・有機ホスフィン酸系抽出剤を用い、SF(Dy/Tb)値の希釈剤効果を調査した。また、有機溶媒の物理的パラメーター(密度等)を求めた。有機リン系抽出剤における、Saponificationの割合とSF(Dy/Tb)値の関係を調査した。
- ・連続抽出試験のための装置(ミキサーセトラ)の導入し、通水試験等の実施を予定していたが、工事着工の遅れにより、装置の発注を完了するまでに留まった。(ミキサーセトラの詳細仕様の決定を行ったが、消防許可申請に日時を要したため、当該年度においては必要な装置類の契約手続を行うまでとなった。)

②(1)-C 抽出分離装置開発

- ・機械攪拌式単段型エマルションフロー装置による油水の滞留時間分布を調べ、高い装置性能を実現するための運転条件を調査した。さらに液流量などの条件を変化させて従来の抽出剤(PC88A等)によるレアアースの物質移動係数を求めるとともに、液滴径分布を測定した。スケールアップに向けて装置の多段化による流動特性の変化の有無を調べる目的で、各段が単段型装置と同じく従来型エマルションフロー装置構造を有する機械攪拌式の3段型のエマルションフロー装置を用いて油水の滞留時間分布を調査して単段装置と比較した。
- ・23 年度に設計したラボスケール機械攪拌式多段エマルションフロー装置を製作し、従来の抽出剤(PC88A等)を用いて、同多段装置の性能評価を実施した。抽出された問題点を把握するとともに、これらを解決するために容器構造等を改良し、スケールアップに向けて、ベンチスケール装置の設計・試作を開始した。

(2) 新規電解還元法の開発

(実施体制:産総研、㈱三徳、京都大、早稲田大、鈴鹿高専)

②(2)-A 蒸留除去に適した金属を直接用いた新規電解還元－蒸留法の開発

- ・選定した蒸留用金属Xと熔融塩の組み合わせについて、電気化学測定装置を用いた基礎的な電気化学測定および溶解度・蒸発量の評価を実施した。
- ・その場観察装置を用いて、熔融塩電解中の動的挙動を観察するとともに、種々の蒸留用金属Xを用いた真空蒸留試験を実施した。

②(2)-B 電解用に適した金属を利用した新規電解還元－蒸留法の開発

- ・前年度に有望と判断された電解用金属Zおよび熔融塩系の組み合わせについて、電気化学測定装置を用いて熔融塩中での基礎的な電気化学測定を行い、Tb-Z合金作製に適した条件を探った。
- ・得られたTb-Z合金について、蒸留操作前の適切な工程を検討した。また、蒸留工程における不純物としてのZの挙動を確認した。
- ・いくつかの電解用金属Zについて、商業規模生産の可能性を検証した。

②(2)-C 合金隔膜法を用いた廃磁石からのTb回収への適用検討

- ・中温塩化物系熔融塩にて、合金隔膜透過試験を実施し、TbとNdの分離性を評価した。

4. 2 実績推移

(2024 年 12 月 23 日現在)

	2023 年度	2024 年度
実績額推移 需給勘定(百万円)	260百万円	300百万円
特許出願件数(件)	1	1
論文発表数(報)	0	3
フォーラム等(件)	21	8

5. 事業内容

PMgrにNEDO バイオ・材料部 内山章二を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。国立研究開発法人産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター 資源循環技術研究チーム長 成田弘一をプロジェクトリーダー(以下「PL」という。)とし、株式会社三徳 開発部長 入江年雄をサブプロジェクトリーダー(以下「SPL」という。)とし、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 2025 年度事業内容

本事業は、日本国内での社会実装が目標であるため、事業開始前に現行の製造コスト(海外製造コスト)に対して競争力のあるコスト(目指すべきコスト水準)を目標として設定し、研究開発を進めていく。

研究開発項目①「未利用資源からの重レアアース回収技術の開発」 レアアースの選択的濃縮プロセスの開発

(実施体制:産総研、(株)三徳、千葉大)

①-A 重レアアースに選択的吸着能を有する新規吸着剤の開発

- ・吸着剤の高度化のため、超純水製造装置を用いて吸着剤の表面を清浄な状態に洗浄し、架橋剤の添加などによる細孔特性の制御、反応性基の粒子表面濃度の厳密な評価などを行う。作製した多孔質反応性高分子粒子および新規吸着剤の機械的強度を試料乾燥装置でフリーズドライし、試料強度測定装置などを用いて評価する。
- ・吸着剤の細孔特性などの物性や架橋剤、導入する官能基などの種類と重レアアース吸着特性との関係性を精査する。

① -B 新規吸着剤の実用性評価およびコスト評価

- ・①-Aで作製した新規吸着剤による未利用資源模擬水溶液からの重レアアースの吸着特性(選択性、吸着容量、吸着速度)、吸脱着試験性、耐久性などの性能の評価を、吸着剤評価装置などを用いて行う。また、実試料を用いて①-Aで作製した新規吸着剤によるレアアースと放射性元素の吸着挙動を検討する。
- ・実試料の処理液を用いて①-Aで作製した新規吸着剤によるレアアースの吸着挙動を検討する。新規吸着剤を用いた重レアアース回収プロセスのコスト評価および吸着剤の課題抽出を行う。

研究開発項目②「ディスプロシウム/テルビウムの高精密相互分離技術及び精鍊技術の開発」

(1) 高精密相互分離技術の開発

(実施体制:産総研、(株)三徳、(株)エマルションフローテクノロジーズ、原子力研、大阪大、鹿児島大、神戸大、佐賀大)

②(1)-A 新規抽出剤の合成

- ・2024年度に提示した新規抽出剤候補とDy及びTb錯体をモデル化し、重レアアース分離性能や酸解離定数等の熱力学定数の予測結果から、新規抽出剤候補を選定する。2(1)-Bからのフィードバックを受けて、新規抽出剤候補によるDy及びTb抽出分離反応をモデル化し、ADFソフトウェアを用いた量子化学計算による電子状態解析等よりDy/Tb分離メカニズムを調べる。
- ・新規抽出剤の誘導体のうち抽出試験により絞り込まれた候補化合物について、グラムスケールでの合成経路を検討し合成を行う。各反応ステップにおけるスケールアップ時の適性を評価する。物質精製試験用溶媒再生装置一式を利用することにより、スケールアップ時に必要となる反応溶媒の再利用を図り、合成プロセスの環境調和性についても考慮する。

② (1)-B 新規抽出系開発及び抽出機構解明

- ・新たに合成された新規抽出剤の誘導体に関して前年までと同様の検討を行う。また、2024年度に引き続き、恒温振盪機を用いて温度の影響について調べる。さらに、新規抽出剤の誘導体による重レアアース抽出反応を調べ、抽出平衡定数を求める。
- ・新規抽出剤と重レアアース間の化学結合性に関して、各種放射光光電子分光、吸収分光等により錯体の実験的状態密度関数を求めることにより調べる。

- ・有機リン酸系、有機ホスホン酸系、有機ホスフィン酸系抽出剤における、SFの抽出時間依存性や水相への有機配位子等の添加効果を調べる。
- ・上記で検討した有機リン抽出系における抽出条件にて連続抽出試験を行う場合について、同等の抽出結果が得られるかをプロセス評価等にて精査し、実証試験に使用する条件を決定する。また、連続抽出試験のための装置(ミキサーセトラ)導入を行い、通水試験等を行う。

②(1)-C 抽出分離装置開発

- ・スケールアップ指針として、2024年度までに各種条件で測定された物質移動係数をまとめた相関式を作成する。また、2024年度までに明らかにした滞留時間分布に基づき、装置性能の指標である理論段数を予測する式を作成する。従来の抽出剤(PC88A等)を用いたレアアースの抽出で得られたスケールアップ指針を多段のベンチプラント試作機での性能評価への適用可能性を評価する。必要に応じて修正と改良を行う。
- ・スケールアップに必要な因子を把握し、それに応じたスケールアップ方法論を確立する。まずは、2024年度に引き続き、ラボスケール(1L容器/段)から10倍サイズでの多段ベンチプラント試作機(10L容器/段)を複数仕様で設計・製作する。装置設計では、ベンチプラントとして機能させるためのプロセスフローダイアグラム(PFD)も検討する。多段ベンチプラント試作機(10L容器/段)を用いて、従来の抽出剤(PC88A等)によるレアアース溶媒抽出試験を行い、同ベンチプラント試作機の性能を評価する。その結果に応じて、さらなる改良を行い、装置の容器等の構造を最適化する。なお、容器等の構造最適化は、新規に製作、もしくは試作機の改造によって行う。また、従来の抽出剤(新規抽出剤の誘導体)を用いた際のPFDを提案するとともに、新規抽出剤の検討を開始する。

(2) 新規電解還元法の開発

(実施体制:産総研、(株)三徳、大阪大学、京都大、早稲田大、鈴鹿高専)

②(2)-A 蒸留除去に適した金属を直接用いた新規電解還元－蒸留法の開発

- ・最も有望な蒸留用金属Xと塩化物系溶融塩の組み合わせについて電解試験を行い、電流効率や電解電圧等のコスト評価に必要なデータを集中的に取得する。また、元素分析装置を導入して作製したTb合金の元素分析を行う。
- ・最も有望な蒸留用金属Xとフッ化物系溶融塩の組み合わせについて電解試験を行い、電流効率や電解電圧等のコスト評価に必要なデータを集中的に取得する。
- ・塩化物、フッ化物系溶融塩との組み合わせとして最も有望な蒸留用金属Xに対し、試料前処理装置等を用いて真空蒸留の条件を最適化するとともに、コスト評価に必要なデータを集中的に取得する。また、その場観察システムを用いて蒸留用金属Xの電極形状の影響について検討する。
- ・得られた値をもとに暫定的なコスト評価を行う。

③ (2)-B 電解用に適した金属を利用した新規電解還元－蒸留法の開発

- ・最も有望な蒸留用金属X、電解用金属Zおよび塩化物系溶融塩の組み合わせについて、真空ポンプ装置三式(試薬脱水用二式と作製試料保存用一式)を用いて電解試験を行い、電流効率や電解電圧等のコスト評価に必要なデータを集中的に取得する。また、元素分析装置を導入して作製したTb合金の元素分析を行う。
- ・フッ化物系溶融塩についても、最も有望な組み合わせに対して電解の最適条件を絞り込み、コスト評価に必要な知見を収集する。
- ・絞り込んだ組み合わせに対して抽出条件を集中的に行い、Tbの分配および蒸留用金属X中への電解用金属Zの混入の程度も明らかにする。引き続き合金中に懸濁した溶融塩粒子の除去方法を検討する。
- ・電解用金属Zの混入程度をもとに真空蒸留試験を行い、蒸留用金属中における許容濃度を把握する。また、その場観察システムを用いてTb合金形成過程のより詳細な知見を得る。

- ・有望な電解用金属Zについて、コスト評価に必要な知見を収集するとともに、ここまでに得られたデータをもとに暫定的なコスト評価を行う。

②(2)-C 合金隔膜法を用いた廃磁石からのTb回収への適用検討

- ・高温塩化物系熔融塩においてるつぼ状電極などを用いてTbの合金隔膜透過試験を実施する。また、元素分析装置を導入して、使用した合金隔膜の元素分析を行う。
- ・フッ化物系熔融塩中においてるつぼ状電極などを用い、Tbの合金隔膜透過試験を実施するとともに耐久性の向上が見込める合金隔膜に向けた検討を開始する。合金試料分析の前処理用にオスミウム蒸着装置を導入し、合金内部のより詳細な観察を行う。
- ・中温塩化物系熔融塩にて、耐久性の向上が見込める合金隔膜を保持する方法を検討する。

5. 2 2025 年度事業規模

委託事業 需給勘定 468 百万円

6. その他重要事項

(1) 知財マネジメントにかかる運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。

(2) データマネジメントにかかる運用

「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメントに係る基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。

(3) 標準化施策等との連携

必要に応じて実施する。

7. スケジュール

7. 1 本年度のスケジュール: 2025 年度上期: 中間評価

2025 年度下期: 第 3 回技術推進委員会

8. 実施方針の改定履歴

2025 年 2 月、制定

(別紙)実施体制図

