

「部素材からのレアアース分離精製技術開発事業」 (中間評価)

2023年度～2027年度 5年間

プロジェクトの詳細説明 (公開版)

2025年6月18日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

バイオ・材料部

報告内容



1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標及び達成見込み
(2)アウトプット目標及び達成状況

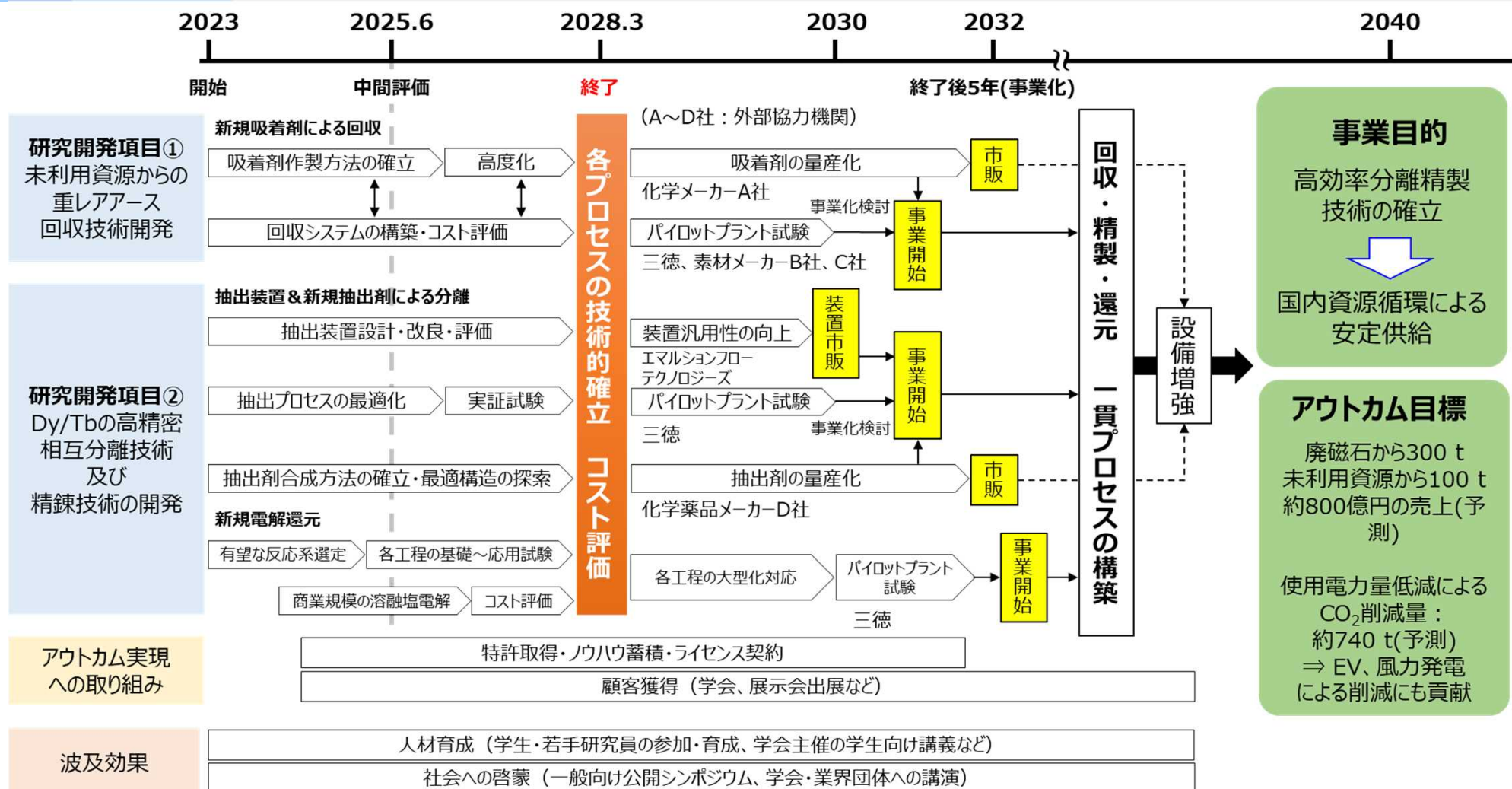


3. マネジメント

ページ構成

- アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組
- アウトカム目標達成の見込み
- 個別事業の位置づけ
- 個別事業ごとのアウトプット目標と根拠
- 個別事業ごとのアウトプット目標達成状況
- 研究開発成果
- 副次的成果・波及効果等
- 特許出願および論文発表状況

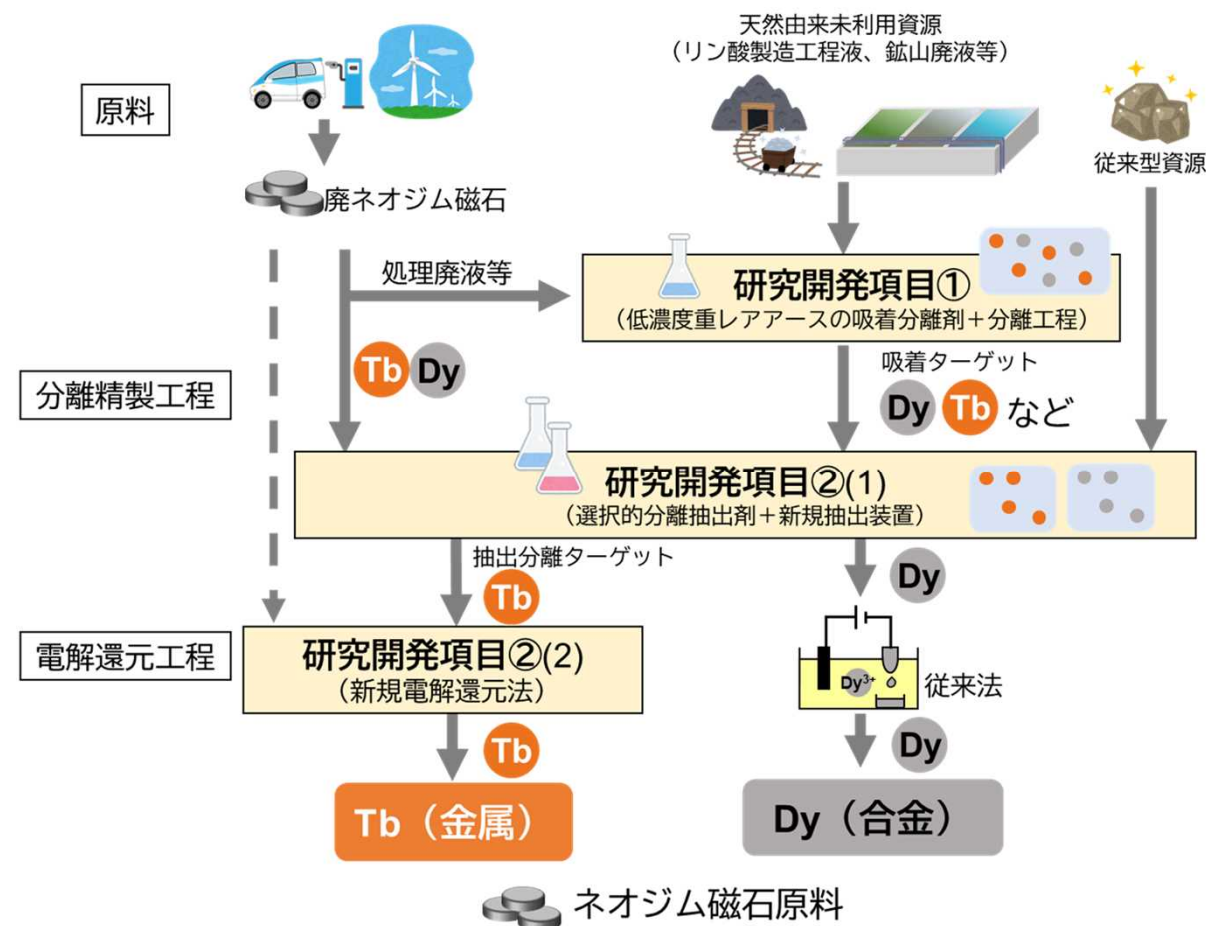
アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組



アウトカム目標の達成見込み

アウトカム目標（2040年予測）		達成見込み	達成見込みの根拠 （競合優位性、外部環境動向等）	早期社会実装に向けた課題と対策
1. 高効率分離精製技術の確立・使用電力量低減によるCO ₂ 削減量	740 トン/年	○	・新規抽出分離装置（エマルションフロー装置）の導入により設置床面積および電力使用量の削減が、また新規電解還元法の導入により電力使用量の削減が、それぞれ見込まれる。さらに処理量が増大しても従来型よりも極めて高効率のプロセスを組むことが可能である。	【課題】 直近のレアアース需給動向の悪化（輸出規制等）を受けた事業化の早期実現。
2. 回収品の売上げ	800 億円/年	○	・事業開始前における磁石業者への市場情報についてのヒヤリング結果に基づき目標を設定。  【中間評価時における外部環境情報】 ・現時点で2040年度における重レアアースの国内需要ならびに価格予測に大きな変更なし。 ・EUの重要原材料法にてリサイクル材利用に関する数値目標が設定されるなど、2040年にかけてレアアース回収品の需要は増加すると予想。	【対策】 アウトカム達成までの道筋（ロードマップ）を見直し、研究開発項目それぞれの進捗度に応じて適時事業化を検討する。

個別事業（研究開発項目）の位置付け



研究開発項目①

入手は容易であるが忌避元素濃度が高く重レアアース濃度が低いため、重レアアース濃縮が困難である資源から、低コストで重レアアースのみを濃縮するための吸着分離システムの構築を行う。

研究開発項目②(1)

従来法では多量の有機溶剤の使用や広大な分離装置設置面積が必要なため国内操業が困難である、Tb/Dy相互分離の高効率化を新規分離剤及び分離装置開発により進め、国内での分離精製を可能にする分離プロセスを開発する。

研究開発項目②(2)

従来法ではエネルギー多消費で高コストなため国内操業できない、Tbの還元処理（製錬）について新規な電解還元法を開発し、②(1)の技術と合わせて、Tb及びDyの国内精錬を可能にする基盤技術を確立する。

個別事業のアウトプット目標と根拠

個別事業 (研究開発項目)	中間目標	最終目標	根拠
① 未利用資源から の重レアアース 回収技術の開発	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、アルミニウム等）、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。	中間目標で設定した目指すべきコスト水準に基づいた方法で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。	回収される資源価値と同等のコストで重レアアースを回収できれば、コスト競争力のあるプロセスとなり、本事業後、速やかに事業化が可能となる。
② ディスプロシウム/ テルビウムの 高精度相互分 離技術及び 精錬技術の開発	②(1)高精度相互分離技術の開発 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度相互分離技術を確立する。また従来型装置（ミキサーセトラー）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。	中間目標で見いだされた新規分離技術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。	従来法の 2 倍以上の分離係数を持つ分離系へ置き換えることで、パイロット試験開始の目安となる抽出装置のイニシャルコストをおおよそ半減することが可能となる見込み。また国内工場での実施を考慮すると装置規模1/5へのダウンサイズが必要である。
	②(2)新規電解還元法の開発 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、かつレアアースメタル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。	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。	現行プロセスで一般的な電解条件（1400℃超）では材質などの面で利用可能な容器や装置類が限られコスト増の要因である。新製法により電解条件の低温化が達成されると、材質等の制約が大幅に緩和され、低コスト化、省エネルギー化が見込まれる。

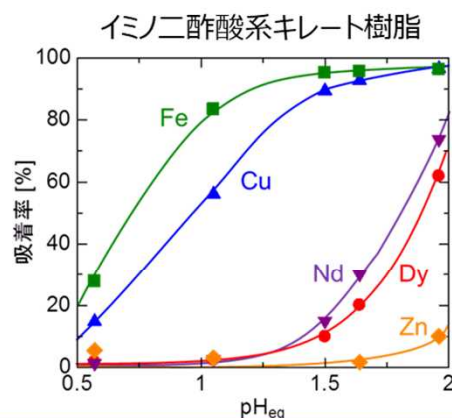
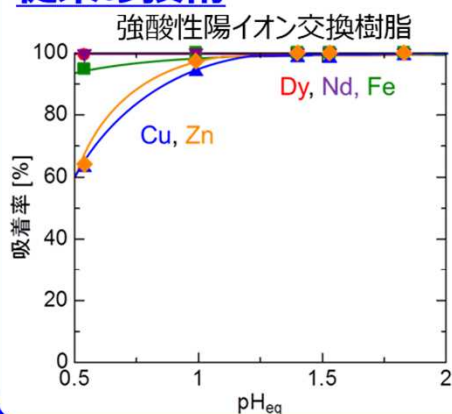
個別事業のアウトプット目標達成状況

個別事業 (研究開発項目)	中間目標 (2026年3月)	成果 (2025年4月)	達成度 (見込み)	達成の根拠/ 解決方針
① 未利用資源からの 重レアアース回収 技術の開発	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、アルミニウム等）、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。	担体作製法および吸着反応部位導入法を確立し、作製した新規吸着剤が重レアアースに高い選択性を有することを確認した。また、実試料からも重レアアースを選択的に回収可能であることを示した。選択性、吸着量、耐久性、吸着速度についてデータを取得し、コスト評価を行った。	○ 2026年3月に 達成見込み	重レアアースに選択性を有する新規吸着剤の作製方法を確立し、コスト評価も問題なく進んでいるため、達成見込みと評価
② ディスプロシウム/テルビウムの高精度 相互分離技術及び 精錬技術の開発	②(1)高精度相互分離技術の開発 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度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。	・新規分離系については、計算から推定された化合物を合成し、抽出条件の最適化を進め、ディスプロシウム/テルビウム分離係数約4を達成した。 ・新規分離装置については、機械攪拌式エマルションフロー装置が従来型ミキサーセトラ装置と比較して4倍の処理速度を示すことが分かった。これは装置規模がおおよそ1/3～1/4になることを示唆しており、目標値を大きく上回って達成している。	[新規抽出系開発] ○ 2026年3月に 達成見込み [新規装置開発] ◎ 達成済み	[新規抽出系開発] 分離条件を向上させる条件が確定しつつあることから、達成見込みと評価 [新規装置開発] 中間目標を達成済み
	②(2)新規電解還元法の開発 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、かつレアアースメタル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。	400～1000℃の温度域での熔融塩電解と1000℃以下での真空蒸留が可能な熔融塩系および液体合金系の有望な組み合わせを複数挙げるとともに、電解試験や各種基礎測定により、その実現可能性を検証した。さらに、これまでに得られた実験値等を暫定的に採用してコスト評価を行い、従来法を国内で実施する場合に比較して30%のコスト削減を実現するための条件を明確化した。	○ 2026年3月に 達成見込み	本法に適した有望な組み合わせを複数挙げるとともに、コスト計算も順調に進捗していることから、達成見込みと評価

研究開発成果 ①新規吸着剤の開発

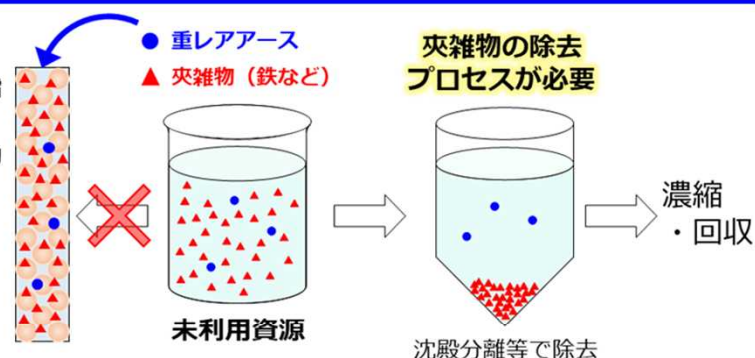
【背景・目標】

従来の技術



市販のイオン交換樹脂
キレート樹脂
重レアアースと夾雑物を
両方とも吸着

分離できない

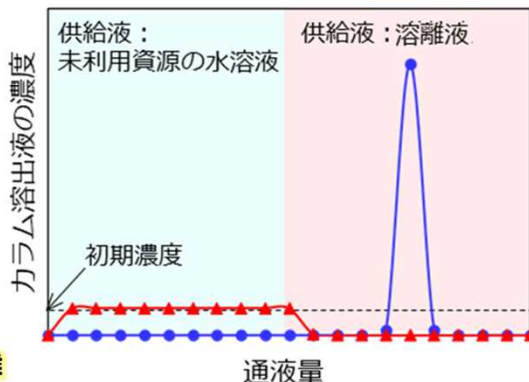
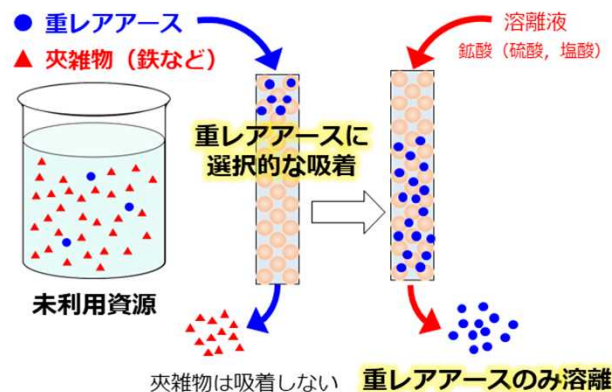


- 市販の吸着剤では分離できない
- 夾雑物除去プロセスが必要

コスト競争力がない

重レアアースに選択的な吸着剤を用いた回収技術

重レアアースのみ
濃縮・回収



- 希薄溶液に最適な吸着法 (簡便で、操作性がよい)
- 薬品等の使用量低減
- 新規に工場をつくることなく、導入できる (副産物として生産)

コスト競争力のあるプロセスに

目標

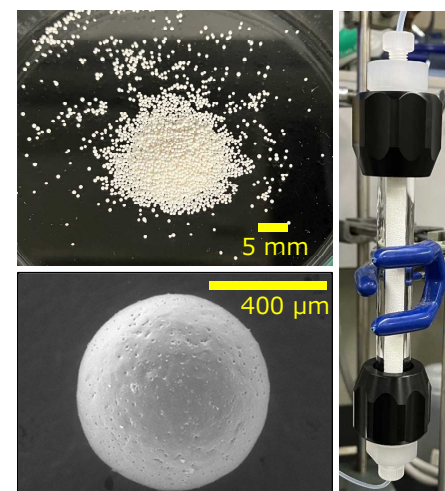
重レアアースに選択的な吸着剤の開発

研究開発成果 ①新規吸着剤の開発

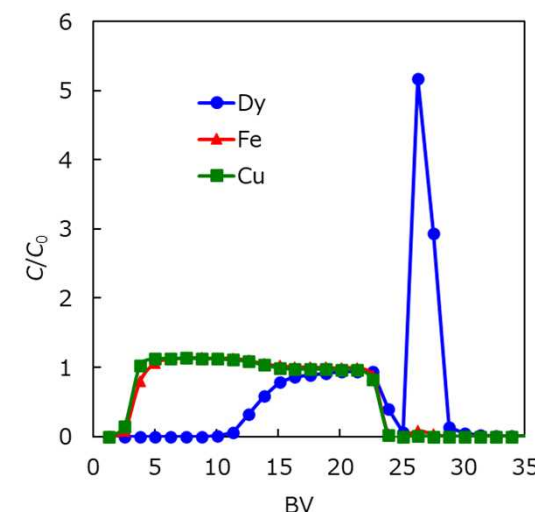
研究開発項目① 未利用資源からの重レアアース回収技術の開発	達成状況	○
達成状況の根拠	新規吸着剤の作製方法を確立し、特許を出願した。新規吸着剤が重レアアースに高い選択性を有していることを確認した。コスト評価で重要な指標となる選択性、吸着量、耐久性、吸着速度についてデータを取得し、コスト評価を実施した。	

【アウトプット】

- 工業的に量産化が容易な合成方法で、耐久性の高い高分子粒子担体を実用的な粒子径・粒子形状等に制御し、作製する方法を確立した。さらに、その担体に吸着反応部位を導入する方法を検討し、**新規吸着剤の作製方法を確立**した。 **特許の出願**
- 従来吸着剤では競合し吸着分離が困難である鉄イオンなどの存在下においても、作製した吸着剤は**重レアアースに高い選択性**を有することを確認した。さらに、実試料からも重レアアースを選択的に回収可能であることを示す結果を得た。
高い選択性を有する吸着剤は他にはないので、本事業で検討している未利用資源以外にも水平展開が可能である。
- 新規吸着剤に対してコスト評価で重要な指標となりえる選択性、吸着量、耐久性、吸着速度についてデータを取得し、**コスト評価を実施**した。



作製した新規吸着剤

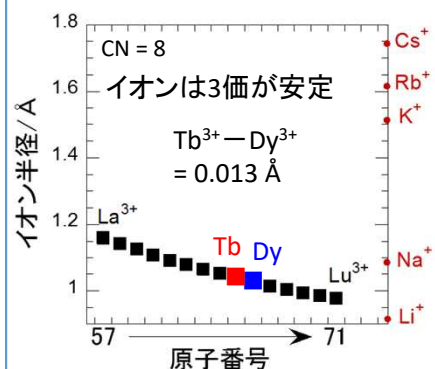


新規吸着剤によるカラム試験結果

研究開発成果 ②(1)抽出系および抽出装置の開発

【背景・目標の根拠】

レアアースのイオンサイズ



分離係数 (Separation Factor, SF)

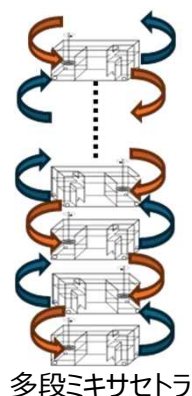
二相間(有機相-水相等)における
元素の二相間の濃度比(分配比 D)
の二元素間の比

$$D_A = \text{有機相A濃度/水相A濃度}$$

$$D_B = \text{有機相B濃度/水相B濃度}$$

$$SF = D_A/D_B$$

従来型分離精製プロセス



広大な敷地面積
多量の有機溶剤

国内操業が困難

▶ 添加剤としてTb及びDyを含有したネオジム磁石がそれぞれ存在するため、TbとDyの相互分離技術が廃磁石リサイクルにおいても必要である。また、高性能ネオジム磁石として、今後Tb含有のものがより重要となると予想されている。それには高純度Tbが必須である。

▶ 重レアアースは特にイオンサイズが類似しており、金属イオンの中でも相互分離が極めて困難である。

▶ 従来型抽出剤による分離係数(2~3)では、多段の分離操作を要し、多量の有機溶剤を使用。

▶ 従来型抽出装置(ミキサセトラ)は特にセトラ部の設置面積が大きい。

▶ よって現行技術では大規模の分離施設等が必要になり、国内における操業は厳しい。

解決策

- 高分離係数を有する抽出系開発
(有機溶剤使用量
& 装置規模低減可能)
- 高分離効率可能かつコンパクトな
抽出装置開発
(装置規模低減可能)

最終目標

中間目標で見いだされた新規分離技術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。

最終目標の根拠

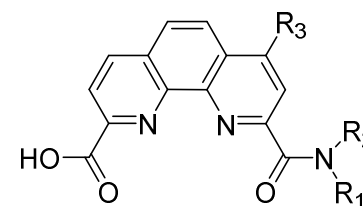
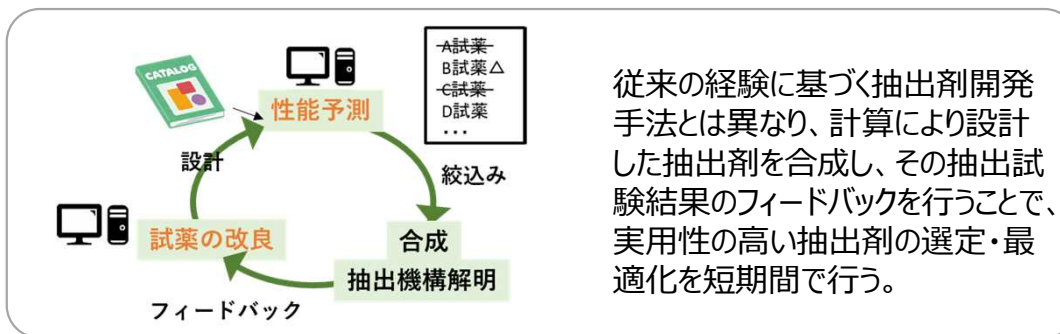
従来法の2倍以上の分離係数を持つ分離系へ置き換えることで、パイロット試験開始の目安となる抽出装置のインシャルコストをおおよそ半減することが可能となる見込み。また国内工場での実施を考慮すると装置規模1/5へのダウンサイズが必要である。

研究開発成果 ②(1)抽出系の開発

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 研究開発項目②(1) 高精密相互分離技術の開発 A抽出剤の設計及び合成効率化 B新規抽出系開発及び抽出機構解明	達成状況	○
達成状況の根拠	計算から推定された化合物を合成し、抽出条件の最適化を進め、Dy/Tb分離係数約 4 を達成した。分離条件を向上させる条件が確定しつつあることから達成見込みと評価	

【アウトプット】

- 計算科学的手法により高性能の抽出剤構造を推定し、それに基づき新規抽出剤の合成に関して合成ルートの探索及び合成最適化を行い、タイプA及びタイプBで合計 7 種の誘導体を合成した。
- 合成した誘導体を用いて錯体化学的アプローチにより構造特性を調べたところタイプAが高分離を示した。また有機溶剤への溶解性についても、タイプAが優れていることが分かった。
- タイプA及びタイプBの抽出剤を用いてレアアースの溶媒抽出試験を行い、Dy/Tbの分離係数を調べたところ、タイプAがより高い値を示した。現時点でタイプAの抽出剤の使用により約 4 の分離係数が得られている。
- 上記の結果は、計算・合成・錯体解析・抽出試験のサイクルが、本開発項目におけるDy/Tbの分離係数向上のために有用であることを示す。



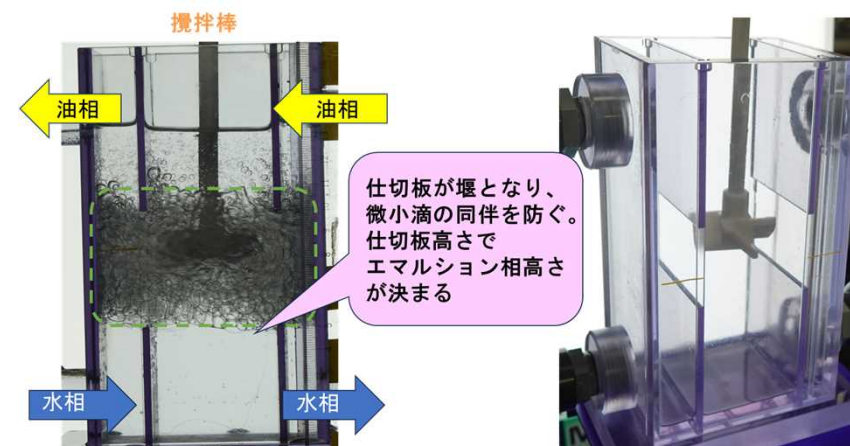
抽出剤基本構造

研究開発成果 ②(1)抽出装置の開発

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 研究開発項目②(1) 高精密相互分離技術の開発 Cエマルションフローによる高効率分離	達成状況	◎
達成状況の根拠	機械攪拌式エマルションフロー装置が従来型ミキサセトラ装置と比較して4倍の処理速度を示すことが分かった。これは装置規模がおよそ1/3～1/4になることを示唆しており、目標値を大きく上回って達成している。	

【アウトプット】

- 工業的な重レアアースの相互分離に適した抽出装置として機械攪拌式エマルションフロー装置の特性を調べた。
- 物質移動係数と液滴径分布を測定では、機械攪拌式エマルションフロー塔では油相流速による変化が小さく、低油相流速でも抽出性能が高いこと、またノズル型よりも物質移動容量係数が大きく水相流速に依存することが明らかになった。
- 機械攪拌式エマルションフロー塔は、4段ミキサセトラの4倍以上の処理量を実現できることが示された。これは装置規模がおよそ1/2～1/3になることを示唆している。
- 機械攪拌式エマルションフロー装置の改良において、送液方法等の工夫により、重レアアース相互分離に必要な多段化に対しても対応可能なが分かった。



試験に用いた機械式エマルションフロー装置

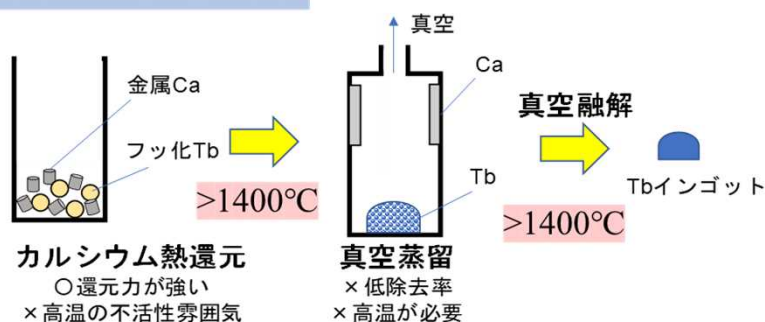
研究開発成果 ②(2)新規電解還元法の開発

【背景・目標】

- ・重希土類に富む資源は一部地域(中国、ベトナムなど)に偏在(産出量ベースでは比較的多様)
- ・重希土類関連の技術(特に製造技術)も一部地域に偏在

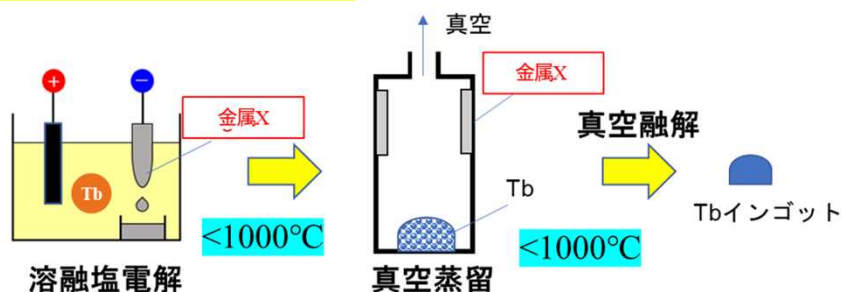
テルビウムの還元は国内実施できない
⇒国内資源循環は実現不可

従来法：Ca熱還元法



従来のテルビウム還元方法
「カルシウム熱還元法」
高コスト・高エネルギー消費
⇒国内実施不可

新規電解還元－蒸留法



「新規電解還元法」
低コスト・少エネルギー消費
⇒国内実施可能に

研究開発成果 ②(2)新規電解還元法の開発

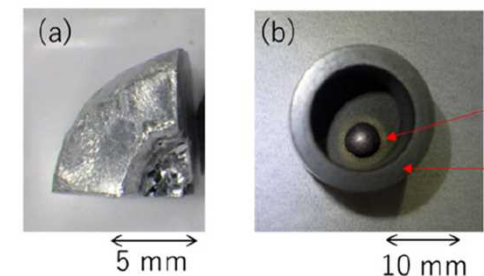
研究開発項目② ディスプロシウム/テルビウムの高精密相互分離技術及び精錬技術の開発 研究開発項目②(2) 新規電解還元法の開発		達成状況	○
達成状況の根拠	従来法の1400℃以上に比較して大幅な低温化、具体的には600℃～910℃での熔融塩電解、700℃程度での分離操作により、金属Tbを回収できる複数の反応系を見出した。また、これらのデータをもとに暫定的なコスト評価を実施した。		

【アウトプット】

- 初年度に熱力学計算や蒸気圧曲線などから有望な合金系を絞り込むことで**研究を効率化**
- 熔融塩電解をはじめとした各工程における基礎測定により、その実用性を評価⇒**大幅な低温化の可能性を確認**
- 一部の系については**商業規模の熔融塩電解を先行して試験**し、実用可能性が高いことを示した
- いくつかの系では本法による金属Tbの回収まで確認
⇒**有望な反応系の選定**
- コスト計算を暫定的に実施し、**大幅な低コスト化の可能性**を示すとともに、それを実現するための技術課題を明確化した
- 研究の過程で明らかになった新たな課題についても有効な対策を考案・実証⇒**特許出願**
- 研究成果を論文誌や学会で積極的に発表⇒**学術面でも貢献**



熔融塩電解の様子



(a)回収したTb合金と
(b)金属Tbの外観

*T. Oishiら, JOM, in press
(<https://doi.org/10.1007/s11837-025-07142-3>) より

特許出願および論文発表状況

表. 特許、論文、その他外部発表の状況(2023－2025) ※2025年5月1日現在. カッコ内は見込み.

年度	特許出願			論文		その他外部発表			受賞実績
	国内	外国	PCT	査読付	その他	学会発表・講演	プレス発表	展示会出展	
2023	1					27			1
2024	1			4	1	23		2*1,2	3
2025	1(1)		(1)	2		(5)			

*1) Renewable Energy 2025 (2025/1/29-31):レアアース資源循環のための製錬技術開発
 *2) Nanotech 2025 (2025/1/29-31):エマルションフロー法によるレアアース／レアメタルの分離・抽出技術