

IRENA 2022, Technical Paper 2/2022

エネルギー変革のための重要原料 レアアース(希土類元素)

著者:ドルフ・ギーレン、マルティナ・ライオンズ

Dolf Gielen and Martina Lyons

翻訳: 朴勝俊(機械翻訳を訂正) Ver. 1 (2022/10/18)

Gielen, D. and M. Lyons (2022), Critical materials for the energy transition: Rare earth elements, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

<https://irena.org/Technical-Papers/Rare-Earth-Elements>

IRENA について

国際再生可能エネルギー機関(IRENA)は、国際協力の主要なプラットフォームとして、卓越したセンターとして、政策・技術・資源および金融知識のリポジトリとして、そして世界のエネルギーシステムの変革を推進するための現場での取り組み推進者として機能しています。2011 年に設立された政府間組織である IRENA は、持続可能な開発や、エネルギーアクセス、エネルギー安全保障、低炭素経済成長と繁栄を追求するため、バイオエネルギーや地熱、水力、海洋、太陽光、風力など、あらゆる形態の再生可能エネルギーの普及と持続的利用を推進しています(www.irena.org)。

謝辞

多くの専門家から貴重なコメントと提案をいただき、このテクニカルペーパーの質を高めることができました。Laurie Hayley, Camille Bouliane, Nathalie Ross, Michael Paunescu (Natural Resources Canada), Milan Grohol (European Commission), Samuel Carrara, Michalis Christou, Anca Itul (European Commission Joint Research Centre), Roland Gauss (European Raw Materials Alliance (ERMA)), Silvia Burgoz Rodriguez (ENEL Foundation), Hioki Keiko (Daido Steel), Keisuke Nansai (National Institute for Environmental Studies Japan), H. K. M. Y. (Japan Oil Gas Metals National Corporation), N. K. (Japan Oil Gas Metals National Corporation), N. K. (Japan Oil Gas Metals International), H. K. (Japan Oil Gas Metals International), H. K. (JOGMEC), H. K. (Japan Oil Gas Metals International) 笹井秀樹(独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)、Nabeel A Mancheri(レアアース産業協会)、Feng Zhao, Wanliang Liang, Anjali Lathigara and Joyce Lee (Global Wind Energy Council (GWEC)), Sofia Kalantzakos (NYU - New York University), Vincent Harris (Northeastern University), Anwen Zhang および Zhanheng Chen(敬称略)。Paul Komor(IRENA)が内部技術レビューを行い、Steven Kennedy が内容の編集を行いました。

このテクニカルペーパーは Dolf Gielen と Martina Lyons が執筆し、特許活動に関する貴重な情報は IRENA の同僚である Francisco Boshell と Francesco Pasimeni が提供したものです。

お問い合わせ・ご意見はこちら: publications@irena.org

免責事項

本書で示された見解は著者のものであり、必ずしも IRENA の見解や方針を反映するものではありません。本書は、いかなるトピックについても、IRENA の公式な立場や見解を示すものではありません。スタッフテクニカルペーパーは、技術的な議論に貢献し、関連するトピックに関する新しい知見を広めるために、IRENA の職員によって作成されます。このような出版物は、比較的限定的な査読を受けることがあります。これらは個々の著者によって書かれたものであり、それに適した形で引用・説明されるべきものです。本書で示された所見、解釈、結論は著者のものであり、必ずしも IRENA またはその全メンバーの意見を反映するものではありません。IRENA は、この著作物の内容に対する責任を負わず、ここに含まれるデータの正確性を保証するものでもありません。IRENA およびその職員、代理人、データ等の第三者コンテンツの提供者は、明示・黙示を問わず、いかなる種類の保証も行わず、本書または資料の使用による結果についていかなる責任または義務も負わないもの

とします。特定の企業や、プロジェクト、製品について言及することは、IRENA または著者がそれらを承認または推奨していることを意味するものではありません。本書で使用されている呼称および資料の提示は、地域や国、領土、都市、またはその当局の法的地位、あるいは境界線またはその画定に関する IRENA または著者の意見の表明を意味するものではありません。

略号

EV	電気自動車
GW	ギガワット(十億ワット、百万 kW)
HCl	塩酸(hydrochloric acid)
IRENA	国際再生可能エネルギー機関
kg	キログラム(千グラム)
kt	キロトン(千トン)
LED	発光ダイオード
Mt	メガトン(百万トン)
NaOH	水酸化ナトリウム(sodium hydroxide)
NdFeB	ネオジウム磁石(ネオジウム・鉄・ボロン, neodymium-iron-boron)
PVC	ポリ塩化ビニル(Polyvinylchloride)
REE	レアアース元素(rare earth element)
wt%	重量パーセント

※ 訳者追加

et al. たち(複数の論文著者を意味する)

要約

レアアースは 17 種類の化学元素からなるグループで、そのうちのいくつかはエネルギー変革に不可欠なものです。ネオジムや、プラセオジム、ジスプロシウム、テルビウムは、電気自動車(EV)や風力タービンに使用される永久磁石の製造に重要な役割を担っています。数量ベースではネオジムが最も重要です。イットリウムとスカンジウムはある種の水素電解装置に使われ、ユーロピウム、テルビウム、イットリウムはエネルギー効率の高い蛍光灯に使われています。従来のエネルギーも、自動車の排気ガス触媒の製造などにレアアース(REE)を使用していました。しかし、今後必要とされるエネルギー関連のレアアースの組み合わせは、これまでとは異なります。

需要および市場成長予測

レアアースの生産量は、2020 年には 240kt に達しました。特に今後大きく伸びると予想されるのは、永久磁石のニーズです。レアアース全体の約 29~35%が永久磁石に使用されてきており、そのうち EV に使用されるのは 15%未満でした。2020 年の EV 向けには約 6~9kt のネオジムが使用され、この年の永久磁石の使用量全体の 15~20%を占めました。また、永久磁石の約 10%(ネオジム 4kt)が風力発電機に使用されており、特に洋上風力発電機と中国の陸上風力発電機に多く使用されています。2020 年の永久磁石の使用量は、EV と風力タービンを合わせて約 3 分の 1 を占めました。風力発電機が生産量はこの 10 年で 2 倍になると予測されているのに対し、EV の生産量は 10 倍以上に成長すると見込まれます。

ジスプロシウムやテルビウムは、熱安定性を高めるために永久磁石に少量添加されます。ジスプロシウムの使用量はネオジムより少ないですが、ネオジムよりはるかに希少です。そのため、ジスプロシウムの供給はレアアース供給の観点からも重要な要素となっています。

永久磁石材料の供給は、成長する電気自動車産業の需要を満たすために、大幅に増加する必要があります。野心的なエネルギー変革のシナリオでは、電気自動車と風力発電の永久磁石と、それに含まれるレアアースに対する総需要は、現在から 2030 年の間に 2 倍以上になる可能性があります。中には 4 倍になるとの情報もあります。需要予測は、主要な需要カテゴリーにおける成長の不確実性により、大きく異なります。

供給見通し

天然のレアアース資源は、現在の消費量よりもはるかに多いです。エネルギー変革のすべてのニーズを満たすのに十分なレアアース資源が知られています。しかし主な課題は、需要の増加に合わせてバリューチェーン全体にわたって採掘と加工活動を拡大することです。

天然のレアアース鉱床は、通常、レアアースの混合物を含んでいます。ネオジムは、平均してこれらの鉱床の約 20%を占めています。しかし、各種レアアースの供給は個別に評価する必要があります。グループ全体のデータは限られた価値しかなく、実際の希少性のレベルを反映していません。多くの鉱床には放射性ウランやトリウムも含まれているため、鉱山尾鉱[廃棄物]の管理は複雑になっています。さまざまなレアアース(希土類元素)が結合生産される一方で、それらの市場は分かれているので、あるものは乏しく、あるものは過剰になっています。この乖離は今後数年で拡大するでしょう。鉱床の構成はさまざまなもので、一部の鉱床は他の鉱床よりも

価値が高くなります。レアアースをグループとして扱うのではなく、個々のレアアースを理解することが重要です。

レアアース(希土類)の鉱床は広く分布しています。多くの場所で採掘を拡大することは経済的に可能ですが、処理能力の方は、ノウハウが特定の国に集中していることなど、様々な要因のせいで容易に拡大することができません。採掘の拡大は、リサイクルや再利用などの循環型経済の概念や、需要の伸びを緩和するための技術革新とも組み合わせる必要があります。

中国南部やミャンマーでは、イオン性粘土鉱床に比較的高濃度のジスプロシウムが含まれています。ベトナムなど他の地域にも同種の資源がありますが、まだ開発されていません。

天然資源とは別に、(アルミニウム生産による)赤泥や、石炭燃焼によるフライアッシュ、(石炭火力発電からの)石膏などの残留物には、回収可能なレアアースが多量に含まれているものがあります。また、最近、新しい海底鉱床が発見されました。しかし、これらの選択肢はいまだ経済的に実行可能ではないため、必要な需要を満たせない可能性があります。

レアアース冶金は、分離から製錬、鑄造、磁石製造に至るまで、技術的に難しいものです。そのため、新規サプライヤーの参入には限界があります。

サプライチェーンのリスク回避

レアアースの大部分は中国に集中しています(2020年実績で、採掘の58%、精製の90%、永久磁石生産の90%)。この集中が供給面での懸念を生んでいます。中国以外では、処理コストと環境問題により、生産能力の開発が制限され、閉鎖に追い込まれることもあります。近年では、中国政府も環境上の理由からレアアース採掘の拡大を制限しようとしています。他の国々が過去30年間にわたり、このバリューチェーンに投資してこなかったのに対し、中国はレアアース鉱床が豊富で、政策の枠組みも整っており、関連する分離・加工技術の習得に長年取り組んできたため、成長が促進されました。電気自動車産業の出現により、供給の多様化の必要性が注目され、供給の多様化とサプライチェーンのリスク軽減のために、多くの取り組みが進行中です。近年では、採掘だけに焦点を当てるだけでは不十分であり、サプライチェーン全体を考慮する必要があるという認識が広まっています。

中国の市場優位性は、中国国内のサプライチェーンの激しい競争をもたらしました。例外は、自動車に使用されている焼結高機能永久磁石の市場分野です。重要なオリジナル技術特許の一部を日本企業が保有していましたが、近年、中国と米国がボンド磁石と焼結磁石の特許取得を強化し、この10年間で焼結磁石の特許を新たに500件以上申請しています。これは、この将来的な市場の重要性を示す指標です。

他方で、EVの普及を計画している国は、中国からの輸出にたいする依存度を下げたいと考えています。しかし、すぐにそれを実現するのは難しいです。現在、世界には主要な鉱山が11箇所と、主要な加工工場が7箇所しかなく、そのうち6箇所が中国に、1箇所がマレーシアにあり、さらにエストニアに小規模な工場があるだけです。オーストラリアやカナダ、ノルウェー、南アフリカ、アメリカ、アフリカ諸国では、新しい鉱山や加工施設の開発が進められています。しかし、これらのプロジェクトは、環境問題や開発期間の長さなどから、賛否両論があります。例えば、グリーンランド議会は最近、世界最大級の未開発レアアース鉱床の開発を禁止しました。

中国国外の生産能力を構築するためには戦略的な投資が必要であり、投資が実行可能になるまでには通常、

機器メーカーやエンドユーザーからの事前のコミットメントを確保する必要があります。政府もまた、必要な投資のリスクを軽減する役割を担っています。

サプライチェーン全体の供給リスクを低減するために、多段階の戦略が必要です。中国は当分の間、レアアース製品の主要供給国であり続けるでしょう。その一方で中国は、レアアース原料の輸入依存度を高めてもいません。供給の多様性は有益あり、国内で完全に自給するアプローチは経済的にも貿易的にも困難でしょう。したがって、レアアースの供給者と使用者の間で、国際的な対話を強化する必要があります。また、技術開発者や供給者、政策立案者の間の対話も、強化する必要があります。当事者がサプライチェーンに沿って、より緊密に協力するためには、戦略的な投資が必要です。

レアアース依存を減らすための革新的な技術

自動車メーカーは、自動車産業がレアアース(希土類)に依存していることを認識し、永久磁石を使わないモーター設計を開発しました。しかし、これらの設計は性能が低く、航続距離が短くなります。これは自動車にとって特に重要な要素です。重量がそれほど重要でない特定の用途で十分な性能を発揮する、新しい永久磁石材料の研究が続けられています。

また、レアアースへの依存度を下げる新しい永久磁石材料の研究も続けられています。これには、重量がそれほど重要でない特定の電子機器用途の代替材料も含まれます。また、風力タービンの設計においても、代替材料が存在します。

永久磁石に使用されるジスプロシウムの使用量を減らすか、全く無くしてしまうことが、現在の研究開発の大きな課題です。

焼結永久磁石への依存度を下げ、重要なレアアースを減らせる新たな磁石加工技術が開発中です。特定の形状を製造する能力によって、今日の加工方法の選択肢が制限され、その結果、材料組成も制限されることとなります。

政策的意味合い

今後数年間は、永久磁石の主要原料の供給を拡大することが重要です。必要とされる原料の量は比較的小さいため、このような取り組みによる環境への影響は限定的であり、いくつかの新たな採掘・処理方法の開発によって、世界の供給量を大幅に増加させることができます。効果的なレアアース戦略を立てるには、サプライチェーンの各段階とそれぞれの特徴を認識することが重要です。採掘の段階はよく知られていますが、加工と永久磁石生産についてはあまりよく理解されていません。世界市場の透明性を高めるために、公開データの利用可能性を高めることが推奨されます。

新しい供給能力の開発におけるボトルネックについて、よりよく理解する必要があります。また、供給量の拡大とサプライチェーンのリスク軽減という2つの目的は、それぞれ異なるアプローチを必要とするため、混同しないようにする必要があります。

主要原料への依存度を減らすためのイノベーションは、十分に考慮されるべきです。エネルギー技術設計には、重要なレアアース(希土類)の使用を減らすか、なくす可能性があります。この設計の可能性をもっと理解する必要があります。

欧州は欧州原材料連合(ERMA)を設立し、当初はレアアース(REE)に焦点を当てています。欧州には 30 の重要原材料リストが存在します。米国では、鉱物資源を含む重要なサプライチェーンの脆弱性を評価し、その回復力を強化するための、政府全体の取り組みが指示されており、最初の取り組みとしてレアアースに焦点が当てられています。また、中国や日本などの主要消費国も政策を打ち出しています。

一方、天然資源を保有する国々は、これを経済的なチャンスと捉えています。供給者に長期的な採掘への投資を納得させるためには、国際的な協力が必要であり、公正な長期価格と需要の確実性が必要となるでしょう。環境と社会への懸念は、並行して対処されなければなりません。また、採掘だけに焦点を当てるべきではなく、加工の方が、より優先順位が高いように思われます。

2022 年 1 月の第 12 回 IRENA 総会とその後の協議の結果、このテーマに関する関与を深めることが使命となりました。加盟国との協議を経て、IRENA は、主要原料に関する観測所を拡大し、欧州連合を含む 167 の加盟国間の対話を促進して、臨界材料とエネルギー変革との間のネクサスを促進するために、「エネルギー変革のための主要原料に関する共働フレームワーク」を立ち上げました(IRENA、2022 年)。

序章

気候変動を緩和するためのエネルギー変革を加速するには、主要原料の供給量を増やす必要があります (Gielen, 2021; Gielen and Lyons, 2022)。国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) の「世界エネルギー変革見通し」は、その変革にとって電気自動車 (EV) と風力発電が重要であることを強調しています (IRENA, 2021 年)。それを達成するためには、電気自動車が道路交通の主流となり、風力発電の設備容量が 2020 年から 2050 年の間に倍増し、洋上風力の設備容量が 35 ギガワット (GW) から 2000GW に増加しなければなりません。

これらの技術はレアアース (希土類元素) に依存しています。その供給を十分に拡大するために、鉱業と加工産業は、環境的にも社会的にも健全な方法で、加速度的に拡大する必要があります (IRENA, 2020)。採掘量の増加には、リサイクルや再利用といった循環型経済の概念や、需要の伸びを緩和するためのイノベーションを組み合わせる必要があります。

レアアース金属やレアアース酸化物とも呼ばれるレアアースは、地殻中に適度に存在し、触媒や光学材料、磁石、電池、照明などの用途で、特に価値のあるユニークな特性を持っています。

一般にレアアースと呼ばれる 17 種類の化学元素のうち、15 種類はランタノイド族 [57~71] に属しますが、化学的性質が類似している第 3 期のイットリウム [39] とスカンジウム [21] も含まれます。レアアースは原子番号によって軽希土類と重希土類に分類されることが多いです。軽元素はランタン [57] と、セリウム [58]、プラセオジウム [59]、ネオジウム [60]、プロメチウム [61]、サマリウム [62]、ユーロピウム [63]、ガドリニウム [64] です。重元素はテルビウム [65] と、ジスプロシウム [66]、ホルミウム [67]、エルビウム [68]、ツリウム [69]、イッテルビウム [70]、ルテチウム [71] です (USCRS, 2020) [括弧内の原子番号は翻訳者が追加]。

15 国で行われている 40 件の大規模な鉱石探査プロジェクトには、様々な等級の 3000 メガトン (Mt) 以上の推定資源が含まれており、2017 年には 11 の鉱山が操業中でした (USCRS, 2020 年)。レアアース生産量は 2019 年に減少しましたが、2020 年には再び増加傾向にあり、世界で 240 キロトン (kt) へと増加しました。今日の REE 生産物の主要な供給源は、硬質岩石堆積物と粘土です。これらの資源にはさまざまな種類のレアアース (希土類) が含まれており、それらは結合生産 (または結合採掘) されています。ネオジウムは、電気自動車や風力発電に不可欠なもので、一般的に、軽希土類鉱物のバストネサイトとモナザイトに含まれる希土類量の 10~18% を占めます。最大の鉱山は中国にありますが、その他、オーストラリアやブラジル、インド、スリランカ、アメリカなどでも採掘されています。

希土類元素はグループとして論じられることが多いですが、その特性や用途は著しく異なります。エネルギー変革の観点から見ると、ネオジウム [60] とプラセオジウム [59]、ジスプロシウム [66]、そしてわずかにテルビウム [65] は、特定のクリーンテクノロジーに必要な永久磁石に応用されているため、重要な元素です。ユーロピウム [63] とテルビウム [65]、イットリウム [39] は主に蛍光灯に使用されますが、近年は新しい蛍光体によってその必要性が減少しています。セリウム [58] とユーロピウム [63]、ガドリニウム [64]、ランタン [57]、テルビウム [65]、イットリウム [39] は、発光ダイオード (LED) に基づく半導体技術に使用される重要な鉱物です (Jaroni, Friedrich and Letmathe, 2019)。固体酸化物電解質は、酸化イットリウムを必要とします (Minke et al, 2021; SBH4, 2021)。しかし、これらの用途に使用されるレアアースの総量は比較的少ないので、以下の議論では主に磁石に焦点を当てます。

レアアース、特にネオジム〔60〕やジスプロシウム〔66〕などの希土類は、風力タービンの発電機や電気自動車のモーターに使用される永久磁石の重要な構成要素となっています。1メガワットの風力発電機には約500キログラムの永久磁石が必要で、その3分の1がレアアースです(特に洋上風力発電機用)¹。一般的な電気自動車では、タイプやデザインにもよりますが、1台あたり約2~5kgの磁石が必要です。これらの用途を合わせると、2030年までに年間約150ktの永久磁石の生産が必要となり、50ktのレアアース需要が発生する可能性があります²。

ネオジム磁石(NdFeB)は、その高エネルギー特性から、革新的用途と製造コスト低減をもたらす小型設計に適しています。市販の焼結ネオジム磁石では、ネオジム〔60〕の一部をプラセオジム〔59〕や、ジスプロシウム〔66〕、テルビウム〔65〕などの他のレアアースで置き換えるのが一般的です(Advanced Magnets, 2021)。ネオジムとプラセオジムは物理的・化学的性質が似ていて分離しにくいいため、通常は鉱石中に共存しています。そのため、純粋なネオジム金属ではなく、プラセオジム-ネオジム合金を製造し、磁石の原料として使用の方が経済的です。一般に、このような磁石のレアアース含有量は重量比で30%前後であり、総コストの少なくとも70%を占めます(Advanced Magnets, 2021)。ネオジム磁石は永久磁石全体の約3分の2を占め、残りはフェライトが主流です(Ma and Henderson, 2021)。

表 1: レアアース酸化物価格

	(純度%)	米ドル/kg		
		2017	2018	2021年12月24日
スカンジウム(Sc)〔21〕	99.990	4 600	4 600	836
イットリウム(Y)〔39〕	99.999	3	3	11.9
ランタン(La)〔57〕	99.500	2	2	2
セリウム(Ce)〔58〕	99.500	2	2	1.5
プラセオジム(Pr)〔59〕	99.500	65	63	140
ネオジム(Nd)〔60〕	99.500	50	50	143
サマリウム(Sm)〔62〕	99.500	2	2	4.5
ユーロピウム(Eu)〔63〕	99.990	77	53	32
ガドリニウム(Gd)〔64〕	99.999	37	44	76.2
テルビウム(Tb)〔65〕	99.990	501	455	1 720
ジスプロシウム(Dy)〔66〕	99.500	187	179	452

注: 製品は原子番号順に記載されています。価格は純度によって異なるため、異なる情報源からの類似の純度のデータを結合しています。スカンジウムのデータの出典は Stanford Metals Corporation です。その他の元素の出典は Argus Media Group - Argus Metals International です。2021年12月のデータの出所は ISE (2021)です。

世界のジスプロシウムの供給はネオジム以上に制約があり、エネルギー変革の際に問題となる可能性があります。ネオジム磁石の高温性能や耐熱性を高めるために、ジスプロシウムとテルビウムが大量に(最大12wt%)添加されています。さらに、ジスプロシウムをより最適化すると、磁石に熱安定性を与えることができます

¹ 高速風車では永久磁石発電機を使わないものもあり、中速風車ではダイレクトドライブ方式の10分の1程度の永久磁石で済みます。

² EVの台数を3500万台とし、永久磁石を用いた風力発電機100GW(市場シェア50%)と仮定。永久磁石はEV1台あたり3kg、風力発電機設備容量GWあたり0.5ktを用い、これには30%のレアアースが含まれるものとした(IRENA, 2021年)。

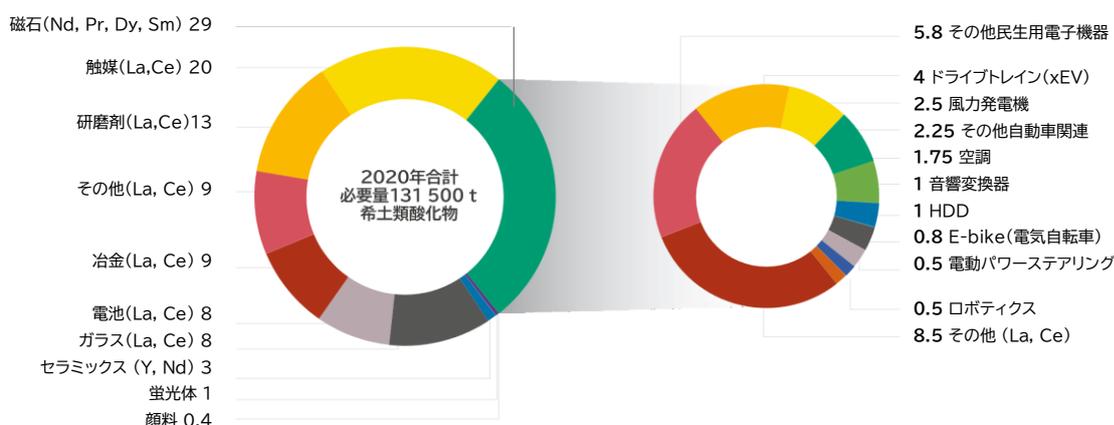
(Ormerod and Trout, 2021)。しかし、地殻中の相対的な存在量から見ると、ジスプロシウムは全希土類元素の1%未満です(Constantinides and De Leon, 2011)。そのため、電気自動車用高温ネオジム磁石の需要増に対応するためには、供給量の拡大が難しく、代替添加物や新たな供給源の確保が必要です。

レアアースの価格は、1kg あたり 2 ドル未満から 2000 ドル近くまでと、大きな開きがあります(表 1)。磁石に使われるものは近年大幅に価格が上昇していますが、セリウムやランタンは供給過剰であり、価格は横ばいか下落しています。

需要

突然の REE ブームは、これらの元素のユニークな光学的・磁気的特性を反映しています(Adler and Müller, 2014)。IHS Markit によると、2019 年のレアアース需要の 34%を磁石が占めています。Roskill(2021)は、最大の単一最終用途である希土類永久磁石が 2020 年の総需要の 29%を占めたと報告しています。2030 年には、磁石が総需要の約 40%を占めると予測されています。この予測が正確であることが証明されれば、主要な磁性レアアースの需要は、この 10 年の終わりまでに供給をはるかに上回る可能性があります(Alves Dias et al, 2020; Barrera, 2021)。

図 1: 最終用途分野別レアアース需要量と磁石の質量別内訳(2020 年、単位は%)



出典: Loskill 2021; BGR 2021

注)Ce=セリウム、Dy=ジスプロシウム、HDD=ハードディスクドライブ、La=ランタン、Nd=ネオジム、Pr=プラセオジム、Sm=サマリウム。

また、レアアースは従来型エネルギーやクリーンエネルギーの用途にも広く使用されています。2020 年のレアアース需要のうち、電池と触媒はそれぞれ 8%と 20%を占めています(図 1)。どちらの需要タイプも、エネルギーと関係があります。電池産業におけるレアアースの消費は、ニッケル水素電池(NiMH)へのレアアースの応用によるものです。NiMH には負極の化学組成に応じて 18~28 wt%のランタンが含まれます。このタイプの電池は今後大きく成長することはないと予測されます。セリウムは自動車の触媒コンバーターで、触媒として広く使われています。また、酸化セリウムは石油精製における石油分解触媒としても使用されています。酸化ランタンはポリ塩化ビニル(PVC)製造の触媒として使用されています。

エネルギー変革がレアアースの総使用量に及ぼす影響は、需要におけるプラスとマイナスの変化の合計となります。しかし特定の元素に対するその影響は、以下に述べるように大きく異なる可能性があります。

Roskill(2021)は、レアアースの総需要量と永久磁石の需要が引き続き増加することを示しています。この調査では、レアアース全体の需要は2030年までに41%増加すると予測されていますが、永久磁石のシェアは29%から36%に増加すると予測されており、上のパラグラフで引用した予測よりも若干低くなっています。電池と触媒の用途は、石油製品・精製の需要縮小に伴い、シェアが低下することが予測されます。ここでも、総需要量の予測には、個別の元素レベルで大きな違いが見られます。

米国地質調査所(USGS, 2021a)によれば、2020年のレアアース酸化物換算の生産量は240 ktに達します。そのうち50 ktは酸化ネオジムです。240ktのうち70ktが磁石に使用されており、ネオジムのほとんどがこの用途に使用されています³。輸送用途が磁石の約4分の1を占め、その半分はドライブトレイン(EV用モーター)です。これは車載モーター用の酸化ネオジムに対する6~9 ktの需要に相当し、レアアース総需要の2~4%にあたります。また、永久磁石全体の約1割が風力発電機用に使用されており(図1)、主に洋上風力発電機と中国の陸上風力発電機で使用されています。

また、ボトムアップで需要を推定することも可能です。2020年のEV販売台数は320万台で、これにはバッテリーEVとプラグインEVが含まれ、軽商用車も含まれます(EV volume, 2021)。しかし、2021年のEV販売台数の方が、市場規模が倍増した2020年の磁石需要を測る指標としては、より適切です。1台あたり3kgの磁石を使用するとすれば、需要は合計13ktとなります。磁石の30%をネオジムとすると、ネオジムは4.5kt、酸化ネオジムは5.5ktとなります。

2021年にエネルギー変革関連技術の主要用途に使用されたネオジムは、合計で20 kt未満です。これは、酸化ネオジムの総生産量の半分以下に相当します。風力タービンと電気自動車の合計では、レアアース総生産量の8%未満に相当します。

需要予測は情報源によって異なり、低位予測の2倍以上のものもあります。Adamas Intelligenceは、2028年までに、採掘されたネオジムおよびプラセオジム酸化物の世界需要は年間約7 ktに達すると予測しています(Barrera, 2021年)。これらの需要予測はBGR(2021)の2倍です。これはレアアースの磁石需要が、2020年から2030年の間に38 ktから68 ktに、年間3 ktの割合で成長すると見えています。他の鉱物商品や金属商品のメガトン級の生産と消費に比べれば、絶対量が比較的小さいことに留意すべきです。

2030年までに、永久磁石の需要は年間50 ktから225 ktに増加し、そのうち180 ktはEVのための、50 ktは風力発電機のための需要と考えられます(Ma and Henderson, 2021)。これが実現すれば、ネオジム磁石の供給不足は2030年までに135 ktに達する可能性があり、これは主にEVと風力発電産業の成長によるものとなります(Ma and Henderson, 2021年)。EVと風力発電の需要を合わせると、現在から2030年の間に永久磁石に使用されるレアアースの需要が2倍になる可能性があります。永久磁石に使用されるレアアースは、他の種類のレアアースと結合生産されるため(採掘された鉱石中に一緒に含まれるため)、レアアースの総生産量はそれに応じて増加します。風力タービンと電気自動車については、需要の伸びを抑えるための製品イノベーションの選択肢と合わせて、以下で詳しく説明します。この議論では、今後数年間で供給が大幅に拡大する必要がある

³本レポートでは、産業用モーター向け永久磁石の詳細については触れていませんが、この市場セグメントの進展は、永久磁石の需要や供給全体に影響を与える可能性があります。

ことを強調します。

風力発電

永久磁石は、風力発電機のギアボックスの小型・軽量・省スペース設計を可能にします。また、低電圧のライドスルー・キャパシティを向上させ、系統連系性を高めることができます。

世界的な風力発電の拡大により、ネオジムやプラセオジム、ジスプロシウムを中心とする一部のレアアースに対する需給バランスが崩れる見込みです。レアアース生産量が現在の 11～26 倍にならない限り、2050 年の世界風力発電目標による大幅な需要増に対応することは不可能です(Li et al.)。Ren et al. (2021)は、中国におけるレアアース需要が 2050 年までに 2020 年比で 18 倍に増加すると予測しています。その年までに、ネオジムの年間需要量は同国の埋蔵量の 1.6～3.3%に相当する可能性があります。ジスプロシウムのそれは 1.4-2.8%となります。2050 年以降、中国の風力発電所への供給において、リサイクル金属が果たす役割はますます大きくなっていくでしょう。

風力タービンに使用される原料、およびその代替原料は、複数の研究の焦点となっています(Lacal-Arántegui, 2015; Marx, 2018; Pavel et al, 2017 など)。

Carrara et al. (2020)は、陸上および洋上設備で使用される風力タービンにおいて、直接駆動式(ダイレクトドライブ)と、ギアボックス駆動式では材料含有量が違うことを指摘しています。発電機的设计や、ドライブトレインのシステム、グリッド接続の規定が大きく異なるため、二種類の設計方式は、速度や質量だけでなく、その原料含有量も大きく異なっています。

ギアボックス駆動式には、永久磁石でアシストするものと、電磁石発電機(多段ギアボックスの高速誘導発電機)を使用するものがあります。永久磁石発電機付き変速機には、中速タイプと高速タイプがあり、後者は永久磁石への依存度が低くなっています。近年、陸上・洋上ともに永久磁石式発電機付き中速ギアボックスの設計が主流となっています。しかし、一般的にギアボックス方式は、その重量と定期的なメンテナンスの必要性から、大型プラントやオフショア設備では競争力が劣ります。

一方、直接駆動式タービンの発電機は、永久磁石を用いたもの(ゴールドウインド社、シーメンス社、ゼネラルエレクトリック社など)と、電動発電機を用いたもの(エネルギーコン社など)の二種類があります。直接駆動式タービンは(ギアボックスをなくして)発電機を直接駆動させることで、さらなる小型・軽量化が可能となり、洋上での競争力が高まります。

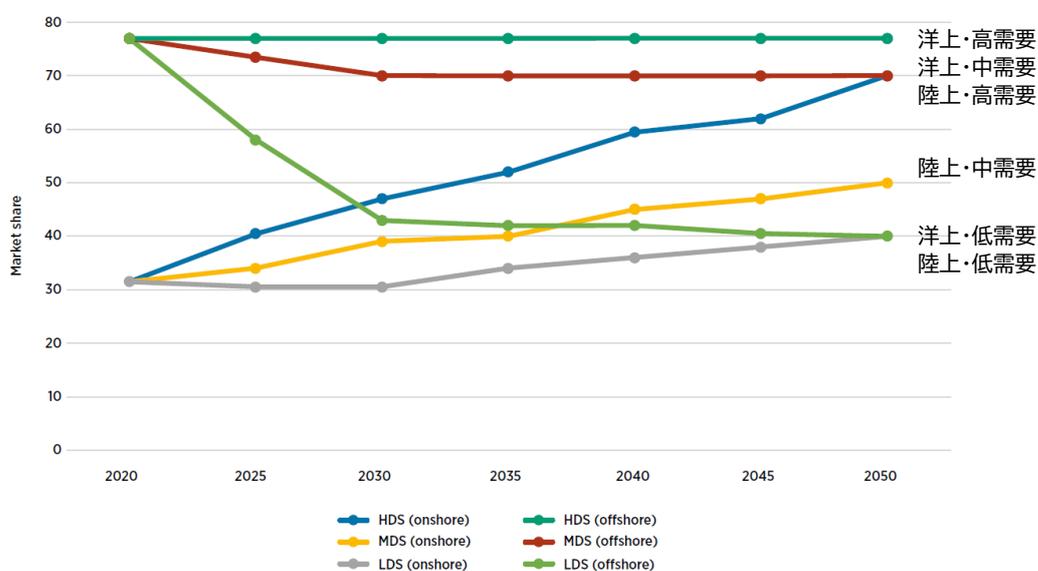
また、ハイブリッド駆動式のものも生産されています。同じ出力仕様の直接駆動式に比べ、永久磁石が小さいため、レアアースの使用量が少なく済みます。

将来、レアアースが不足するようになれば、高温超伝導体が直接駆動式タービンに使われるようになるかもしれません。これによりネオジムやジスプロシウムの消費量を削減できるほか、軽量化による性能向上も期待できます。しかし、この設計が実用化されるには、さらなるコスト削減と技術的進歩が必要でしょう(この方式が大きな利益をもたらすと考えられる海洋環境においても)。

永久磁石駆動のシェアが世界的に高まっています。2018 年には永久磁石式タービンが世界のオフショア設備の 4 分の 3 を駆動しました。オンショア市場ではギアボックス誘導発電機タービンが市場の 52%を占めています。残りの大部分を占めるのは、永久磁石駆動装置を使用したタービンです(GWEC 2019; Carrara et al. 2018)

風力発電機の永久磁石の使用は、Carrara et al. (2020)によれば3つのシナリオがあります。いずれのシナリオでも2050年までに陸上と洋上で収束することが見込まれますが(図2)、低需要シナリオと高需要シナリオの幅は広がっています。後者では、陸上における永久磁石駆動装置の市場シェアが2050年には70%に達する可能性があり、レアアース供給に大きな負担がかかります(Carrara et al., 2020)。この可能性は、将来のレアアース需要の形成における製品革新の重要性を示しており、意思決定と政策設計においてより注目されるに値するものです⁴。

図2 風力発電機における永久磁石使用のシナリオ(市場シェア%)



出典: Carrara et al. 2020 年より引用。

電気自動車

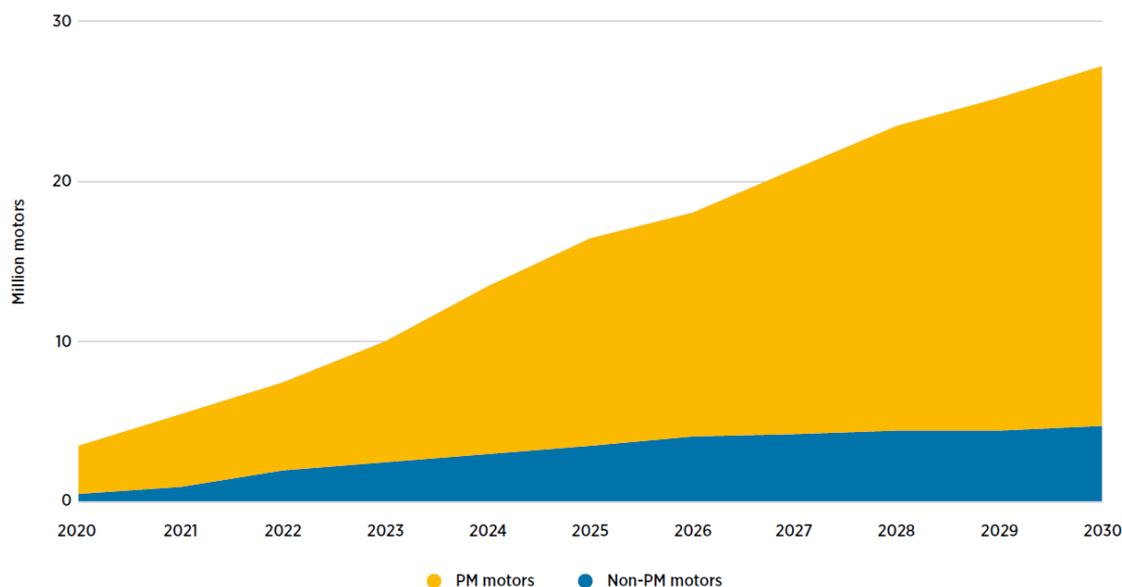
レアアース磁石は様々な自動車部品に使用されています(Fears 2021)。その使用の大部分はモーターが占めています。2020年に世界で生産された永久磁石の4個に1個は輸送用で、そのほとんどが電気モーター用ですが、マイクロモーターやセンサー、スピーカーにも使われています(Roskill 2021; Kane 2020)(図1参照)。そのシェアは、EVの利用が拡大するにつれて拡大すると予想されます(図4)。2030年にはEVだけでネオジム磁石の消費量の約25%を占めると予想されます(Adamas Intelligence 2021)。車両用トラクションモーター(電動自転車、スクーター、オートバイを含む)が市場の23%を占めることになります。

平均的なハイブリッド車やEVでは、その設計に応じて2kgから5kgの永久磁石が使用されます(Onstad 2021)⁵。モーターの永久磁石のコストは1台あたり300米ドル以上で、モーター全体のコストの半分以上を占めています(Onstad 2021)。

⁴ 下記「磁石用レアアース需要の伸び悩み」の項もご参照ください。

⁵ 欧州原材料連合(ERMA 2021)は、自動車1台あたりのレアアース磁石を1.5kgと想定していますが、このモーター技術を使用するEVの磁石質量は増加する可能性が高いとしています。

図 3: 電気自動車におけるレアアース永久磁石の使用予測、2020-2030 年(モーター百万個)



出典: Onstad 2021 より引用。

注)電池自動車や燃料電池自動車に搭載されるモーターを想定した。PM(Permanent Magnet、永久磁石)モーターとは、軸流磁束型永久磁石と表面実装型永久磁石のことである。Non-PM モーターは、通電巻線同期型と誘導型である。

2030 年の需要を満たすために、レアアースをベースにした永久磁石の生産量をどの程度増やさなければならぬかは、いくつかの要因によって決まります。その中で最も重要なのは EV の生産台数で、2000 万台から 4000 万台の間になると予想されます。その他の要因としては、永久磁石モーターを使用する EV の割合や、使用される磁石の重量、技術革新の影響などがあります。2030 年時点でも、ほとんどの EV が永久磁石を使用していると予想されます。EV の販売予測と永久磁石の継続使用に関する予測を合わせると、2030 年のネオジム磁石の潜在需要は最大 225 kt と予測されます (Ma and Henderson, 2021)。

これらを考慮すると、永久磁石を用いた発電機やトラクションモーターの需要増に対応するための、最も大きなボトルネックは、ジスプロシウム[66]の需要に影響する上限温度性能と、ジスプロシウムの入手可能性、および関連コストであると考えられます。技術的なブレークスルーが最も強く求められるのはここです (Onstad 2021)。

製品のイノベーションは、他の点でもレアアース需要に影響を与える可能性があります。たとえば、リラクタンズ・モーターの使用では、すでに低コストのフェライトベースの磁石をレアアースの代わりに使用することが可能になっています。こうした技術革新はいずれ、より高性能なトラクションモーターに応用されるかもしれません。エネルギー密度(kW/kg)の向上により、モーターのレアアース要求量が減少する可能性もあります。BMW の i3 EV モーターのエネルギー密度は 2.5kW/kg を達成し、一般的なハイブリッド車の 1~1.5kW/kg より大幅に高くなっています (Onstad, 2021 年)。

現在、モーターや発電機の出力重量比を最適化するためにネオジム磁石が不可欠となっていますが、自動車メーカーはレアアースへの依存度を下げる方法を模索しています。世界二大自動車メーカーのトヨタやフォルクスワーゲンなど、2020 年の小型自動車販売台数の 46%を占めるメーカーが、EV に使用するレアアース磁石

を縮小または廃止する考えを表明しています(Onstad 2021)。日産は新型車「アリヤ(Ariya)」からこうした磁石を撤去し、2021 年には BMW が電気 SUV「ix3」で同じ動きを見せています(Onstad 2021)。ルノーとテスラは、巻線ローターと誘導モーターの技術を応用して、一部のモデルからネオジム磁石を排除しています。テスラは永久磁石モーターと誘導モーターを組み合わせています。

希土類元素の利用の節約

レアアースへの依存は、その使用を最小限に抑えるか、あるいは全く使用しない永久磁石の開発によって軽減することができます(Northeastern 2018)。1982 年に日米のグループが独立で、非常に高い最大エネルギー積を持つネオジム磁石の製造方法を発見して以来、有望な進歩がありました。

ネオジム磁石の保磁力(減磁に対する抵抗力)を大きく低下させることなく、重希土類元素の消費量を削減することが重要です。保磁力を向上させるには、ジスプロシウムやテルビウムなどの重希土類元素を添加するのが一般的です⁶。重希土類元素は希少で産出地も限られていますが、永久磁石を使用する電気機器の成長シナリオが野心的であっても、ネオジムの生産は需要の増加に追いつくと予想されます。しかし、永久磁石を使用する発電機や電動機の上限温度性能を向上させるために使用されるジスプロシウムの代替品を見つけるには、技術的進歩が不可欠となります。この点では、規格や仕様が重要になります。設計で温度安定性を低めに設定すれば重要な材料を節約することができます。

現在、高性能な焼結ネオジム磁石が市場を席巻しています⁷。高い磁気特性と生産性から、風力発電機や EV 用モーターに使用されています。この磁石は「粒界拡散処理」を施すことにより、ジスプロシウムの含有量を大幅に低減することが可能です。現在の製造技術や用途では、ジスプロシウムの添加量を平均で半減させることが可能です。最良のシナリオでは、保磁力を低下させることなく 2%程度まで低減することも可能です。

焼結磁石が主流ですが、熱間変形磁石やボンド磁石も注目されています。これらの磁石は原料や製造技術、製品用途の点で大きく異なっています。焼結磁石と熱間異方性ネオジム磁石は、磁気特性は似ていますが、微細構造が異なります。熱間異方性ネオジム磁石は、焼結磁石に比べて結晶粒が 1 桁以上細かいため、最終的に高い保磁力を得ることができる可能性があります。これは重希土類を全く含まない高性能ネオジム磁石の製造方法として有望視されています。しかし、保磁力は異方性磁場のポテンシャルの 4 分の 1 程度にとどまっています(Hioki, 2021)。

Wang et al. (2021)は、単層グラフェンを 0.1 wt%添加することで、熱変形ネオジム磁石の保磁力を高めることができ、残留磁気(磁場が除去された後に材料に残る磁気)には大きな影響がないことを発見しました。これは、結晶粒成長制御を利用して、高保磁力・高残留磁気永久磁石や超強磁性材料を作製する道を開くものです。

Lambard et al. (2022)は、機械学習とベイズ最適化を用いて、プロセスパラメータから磁気特性を予測するプロセスを考案し、直接熱間押出で製造されるネオジム異方性磁石の高保磁力と残留磁場に対する最適条件を決定することを可能にしました。この方法は、重希土類を含まない高い保磁力と残留磁束を持つ磁石の製造プ

⁶ 磁化に対する抵抗よりも、減磁に対する抵抗の方が、材料の磁気特性をより深く理解できるため、保磁力と呼ばれることが多くなっている。保磁力は、材料の磁場をゼロにするために必要な印加磁場の強さとして測定される。単位はエルステツ(Oe)で、10e は 79.57747A/m に相当する。

<https://matmatch.com/learn/property/magnetic-coercivity>

⁷ 2019 年は、NdFeB 磁石全体の 94%が焼結磁石となった。

ロセスの基礎となるものです。この磁石は、最大エネルギー積(BHmax)で 380 キロジュール/立方メートル(kJ/m³)という優れた特性を有しています。

現在、熱間異方性磁石は円形にしか成形できません。そのため、主に電気自動車に使用されており、風力発電機にはまだ使用できません。また、生産規模の拡大が難しく、コストが高いという課題も残されています。そのため、熱間異方性磁石の市場シェアはまだ非常に小さいです。

ボンド磁石は、不規則で高度な形状を容易に形成することができますが、加工に必要な技術要件や精度が高いため、現在のところその普及は比較的少ないです。しかし、その技術は急速に進歩しており、長期的な展望が期待できます。ボンド磁石は、熱間異方性磁石と同様に風力発電機にはまだ使えませんが、電気自動車の小型マイクロモーター(1次モーターではない)や、電子機器への応用に適しています。近年、希少なディジミウム(プラセオジム元素とネオジム元素の混合物)の需要を減らすために、セリウム磁石が広く使われるようになってきました。その中で、セリウム磁石は特筆すべき存在です。高性能磁石には分類されませんが、高性能を必要としない製品に使用することができます。

レアアース系合金の代替材料はすでに存在しますが、ネオジム系磁石の代替に必要なエネルギー密度がありません。磁気の物理学では、代替磁石が希土類磁石の60%以上の性能を持つことはなく、サマリウム-鉄-窒化物(Sm-Fe-N)が最良の選択肢とされています(Harris, 2021)。代替候補の中には200°C以上の温度でネオジム系合金の性能を超えるものがあります。これらの化合物の多くは数十年前から知られていましたが、レアアースベースの化合物が発見された後、その最適化に対する真剣な関心は薄れてしまいました(Kramer et al., 2012)。

現在の研究の一つは、鉄やニッケルなどの一般的な金属の結晶構造を変えることで、より強力な磁石を作ることに注力しています(Northeastern, 2018)。しかし、そのような遷移金属系は、まだ手の届くところではありません。理論モデルが有望視されているとはいえ、それらが合成できるかどうか、合成できたとして、永久磁石を用いた電気機器に必要な熱力学的安定性を有するかどうかはまだ明らかではありません(Kramer et al. 2012)。

もう一つの磁石の代替戦略は、より弱い磁石で作動できるように製品を再設計することです。製品の再設計の選択肢と傾向については、上記の需要のセクションで説明したとおりです。

磁石に関する特許活動

2020年現在、日本はNdFeB特許の半分以上を支配しています。中国が焼結磁石技術で多くの特許を所有しているにもかかわらず、高性能磁石の製造においてその役割を拡大しない理由は、日本の優位性にあると考えられます(Box 1)。日立は、中国に200社ほどあるネオジム磁石メーカーのうち、わずか8社の大手中国メーカー(そのうちの数社は浙江省)に、高度な焼結磁石技術をライセンスしました(Ma and Henderson, 2021)。日立の決断は、中国に断片的な国内産業を生み出しました。200社のほとんどは、年間生産量が1500トン以下の小規模なプレイヤーです。さらに、中国が2018年に生産した約16万トンのNdFeB磁石のうち、高性能タイプは約15%(23000トン)に過ぎません。世界では、日立のライセンスの恩恵を受けた中国企業8社を含む約10社が、テスラやシーメンスなどのハイエンドユーザーに供給できる能力と品質を持っています。中国の生産者は、EVも風力発電機も、主に国内市場に供給しています。

日本とドイツは依然として高性能磁石の世界生産量の約半分を占めていますが、その生産水準は比較的一定しています。米国には大規模なNdFeBの製造拠点はありませぬ(Ma and Henderson, 2021)。

最後になりますが、電話やハードディスク用の永久磁石を節約することで、EV 市場向けに REEs を解放できるかもしれません(Ormerod and Trout, 2021)。そして、重要なレアアースに依存しない超伝導磁石は、近い将来に導入が予定されている超大型洋上風力発電機(14MW 超)に適しています。

Box 1: ボンド磁石と焼結磁石の特許活動

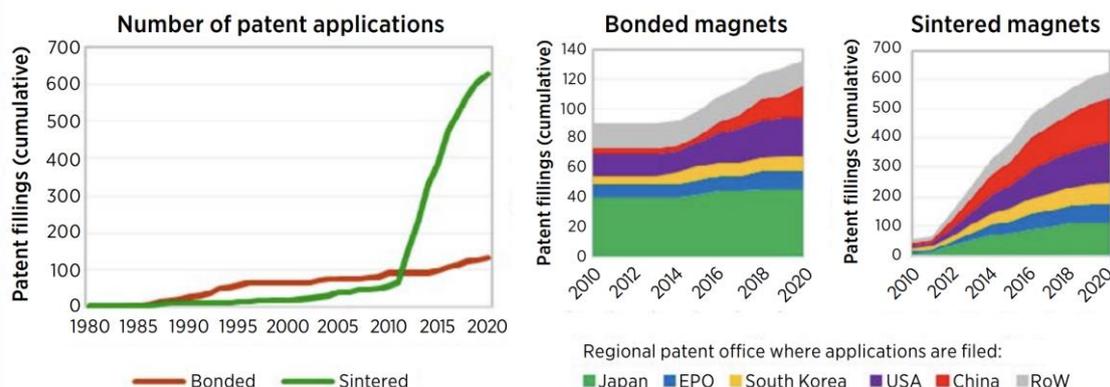
レアアースを含むボンド磁石と焼結磁石の特許は、それぞれ異なる傾向を示している[a]。ボンド磁石に関する特許活動は 1990 年代から始まり、2015 年に急増するまでの数十年間、ほぼ一定のレベルに達している(累積値では、2020 年の特許件数は 2015 年比で+36%となっている)。焼結磁石の出願は 2000 年代前半に始まったが、その製造技術に関する基本特許は 1983 年に成立している。2012 年には空前の伸びを記録し(2011 年比 123%増)、現在に至っている。2020 年まで、焼結磁石の特許登録件数は、ボンド磁石の約 5 倍である(図 4 左の折れ線グラフ参照)。

ボンド磁石と焼結磁石に関する特許は、出願先も異なる[b]。ボンド磁石の特許は日本に集中しているが、時間の経過とともに日本のシェアは縮小している。2010 年には、ボンド磁石特許の 44%が日本で保護されていたが、2020 年には 34%に減少している。これは、中国と米国の重要性が高まった結果であり、2010 年から 2020 年の間に、それぞれ 3%から 16%、17%から 20%へと増加している。

2012 年以降の焼結磁石関連の特許は、地域ごとにかなり均等に分布している。中国が 22%(2012 年から 2020 年の平均)、日本と米国が 20%、欧州(欧州特許庁)と韓国が 11%である(図 4 右の面グラフ)。

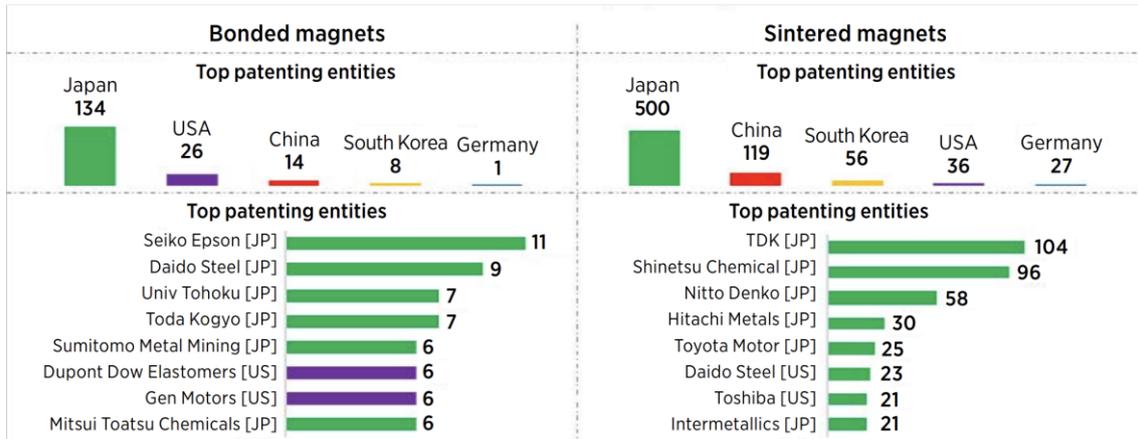
ボンドと焼結の両方の特許活動においては日本がリードしている。1980 年から 2020 年にかけて、ボンド磁石関連の特許出願の 73%の出願人の居住国は日本であり、次いで米国が 14%であった[c]。焼結磁石関連の特許出願は日本が 66%、中国が 16%である(図 5 下段の縦棒グラフ)。ボンド磁石に関する特許の上位 8 件のうち 6 件が日本企業で、そのうち 5 件が企業、1 件が大学である。残りの 2 件は米国企業である。焼結磁石の特許上位 8 社は全て日本企業である(図 5 下段横棒グラフ)。

図 4: 特許出願のトレンド



注) 左の折れ線グラフは、ボンド(bonded)と焼結磁石(sintered)に関する 1980 年から 2020 年までの特許出願件数の累計を示したものである。右側の 2 つの面グラフは、2010 年から 2020 年までの特許出願件数を地域の特許庁(特許出願が行われる場所)別に詳細に示したものである(EPO は欧州特許庁)。

図 5: 出願人の居住国別総数(1980~2020 年)



- 注) 特許出願数の合計は、特許出願人の居住国に基づいている。上段の縦棒グラフは、ボンド磁石(左)と焼結磁石(右)の特許取得国上位5カ国を示す。下段の横棒グラフはボンド磁石(左)と焼結磁石(右)の特許取得数上位8団体を表している。
- この分析には H01F1/0533(ボンド)と H01F1/0536(焼結)の2種類の共同特許分類コードが使用されている。これらのコードは、硬磁性材料(金属または合金)の飽和保磁力を特徴とする無機材料で、希土類金属を含む磁石を指す。
 - ある地域で(例えば、特定の国や地域の特許庁に)特許を出願することは、その地域で市場機会が予測されることを意味する。
 - 複数の出願人による異なる国への特許出願はダブルカウントされる。

供給

レアアース(希土類)の鉱床は 245 種類ほどが知られています。現在、経済的に意味のある生産が可能なのは 3 種類に限られ、バストネサイト(炭酸塩鉱物)と、モナザイトおよびゼノタイム(いずれもリン酸塩鉱物)です。レアアースはふつう放射性ウランやトリウムと関連しています。単一の鉱床にはレアアースの混合物が含まれ、結合生産されます(表 2)。鉱物性岩石鉱床とは別に、イオン吸着粘土の中には、かなりの量のレアアースを含むものがあります。このタイプの鉱床は現在、中国南部とミャンマーで開発されており、東南アジア全域に存在しています。過アルカリ鉱床にも大量のレアアースが含まれていますが、ロシアの鉱山からのものを除いては、現在は経済的に利用することはできません。

レアアースの需要はネオジウムやジスプロシウムなど一部の元素に集中しているため、セリウムやランタンなど他の元素は過剰生産されています。

2020 年には、240kt のレアアース酸化物が生産されました。生産の 6 割近くが中国で行われ、米国とミャンマー、オーストラリアがそれに続きます。2018 年の世界生産量の 90%以上をこの 4 カ国が占めています(表 2)。米国の採掘量は多いですが、それに対して資源埋蔵量(表 3)や加工能力が限られており、この国で採掘された鉱物は主に中国に出荷されて加工されています。したがって長期的には、中国以外の国々は採掘と加工の役割を担い、供給の多様性を確保する必要があります。USGS(2021b)は、レアアースの広範な分布の指標となる、世界中の 799 の鉱床について説明しています。

世界の生産量の約 70%は炭酸塩粘土に由来します。内モンゴルで採掘されるバヤンオボ炭酸塩粘土鉱床だけで、世界の生産量の 32%を占めています。ここでは、レアアースは鉄鉱石採掘の副産物として産出されます。バヤンオボには、40 Mt を超えるレアアースの埋蔵量があります。

バヤンオボ鉱山を中心とする China North Rare Earth Group は世界最大のレアアース生産者です。そのうえ China North は 7 万 3500 トンの処理能力を保有しています(Rockstone, 2016)。中国では江西省や福建省、四川省でもレアアースが採掘されています。

中国南部とミャンマーのイオン吸着粘土は、2020 年の世界の生産量の 17%(約 35kt)を占めています。これらの粘土にはジスプロシウムを含む重希土類が濃縮されているので重要です。ミャンマーでは、政治的に不安定なカチン州やシャン州に生産が集中しており、生産量報告も信頼性に欠けるものです。イオン吸着粘土は硫酸アンモニウムを用いた浸出法で処理されます。

世界のレアアースの確認埋蔵量は 116Mt であり、年間 240kt の生産が続くと仮定すると、現在の需要の 500 年分に相当します。中国を除けばベトナムやブラジル、ロシアなど大規模な資源を持つ国には目立った生産がありません。USGS(2021a)によると、グリーンランドは未開発のレアアース鉱床を、とりわけネオジウムの最大の埋蔵量を有しています。環境問題の懸念の中、多くのプロジェクトは承認を得るのに苦労しています。たとえば最近では、グリーンランドの議会によって大規模な採掘プロジェクトが打ち切られました。

しかし、エネルギー転換にとって重要なレアアースはごく一部です。ネオジウムがその一つです。この元素の世界の埋蔵量は 8 Mt と推定されており、セリウムに次いで 2 番目に豊富なレアアースです。埋蔵量は十分ですが、短・中期的に供給を増強することは難しいかもしれません。したがって、希少性の問題は埋蔵量ではなく、新規の採掘能力の開発によるものです。

表 2: 選択した原料鉱物のレアアース含有量(レアアース酸化物の%)

鉱物	国名	場所	ランタン(La)	セリウム(Se)	プラセオジウム(Pr)	ネオジウム(Nd)	サマリウム(Sm)	ユーロピウム(Eu)	ガドリニウム(Gd)	テルビウム(Tb)	ジスプロシウム(Dy)	ホルミウム(Ho)	エルビウム(Er)	ツリウム(Tm)	イットリウム(Yb)	ルテチウム(Lu)	イットリウム(Y)
バストネサイト	中国	内モンゴル自治区バヤンオボ市	23.00	50.00	6.20	18.50	0.80	0.20	0.70	0.10	0.10	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		四川省徳昌市(b)	35.60	43.80	4.73	13.10	1.22	0.23	0.52	0.06	0.09	0.05	0.04	0.01	0.06	NA	0.40
		四川省・茂尼坪(b)	29.50	47.60	4.42	15.20	1.24	0.23	0.65	0.12	0.21	0.05	0.06	0.04	0.05	0.01	0.70
		山東省渭山市(b)	35.50	47.80	3.95	10.90	0.79	0.13	0.53	0.14	NA	NA	NA	NA	0.03	NA	0.76
	米国	Mountain Pass, CA (c)	34.00	48.80	4.20	11.70	0.79	0.13	0.21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.12
ロバライト	ロシア	ムルマンスク州レフダ市(d)	25.00	50.50	5.00	15.00	0.70	0.09	0.60	NA	0.06	0.70	0.80	0.10	0.20	0.15	1.30
モナザイト	オーストラリア	Mount Weld Central Lanthanide, Western Australia(e)	23.90	47.60	5.16	18.10	2.44	0.53	1.09	0.09	0.25	0.03	0.06	0.01	0.03	NA	0.76
	中国	広東省南港市(b)	23.00	42.70	4.10	17.00	3.00	0.10	2.00	0.70	0.80	0.12	0.30	NA	2.40	0.14	2.40
	インド	Manavalakurichi, Tamil Naduf	22.00	46.00	5.50	20.00	2.50	0.02	1.20	0.06	0.18	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.45
希土ラテライト	中国	江西省宣武市(b)	38.00	3.50	7.41	30.20	5.32	0.51	4.21	0.46	1.77	0.27	0.88	0.13	0.62	0.13	10.10
		江西省新豊市(b)	27.30	3.23	5.62	17.60	4.54	0.93	5.96	0.68	3.71	0.74	2.48	0.27	1.13	0.21	24.30
		江西省隴南市(b)	2.18	<1.09	1.08	3.47	2.34	<0.37	5.96	1.13	7.48	1.60	4.26	0.06	3.34	0.47	64.90
ゼノタイム		広東省東南地区	1.20	3.00	0.60	3.50	2.20	0.20	5.00	1.20	9.10	2.60	5.60	1.30	6.00	1.80	59.30

出典 USGS、2021a。

a Zang, Zhang Bao, Lu, Ke Yi, King, Kue Chu, Wei, Wei Cheng, and Wang, Wen Cheng, 1982, Rare-earth industry in China: Hydrometallurgy, v. 9, no. 2, p.205-210.

b Yang, Xiaosheng and Zhi Li, Ling, 2014, China's rare earth ore deposits and beneficiation techniques: ERES 2014-1st European Rare Earth Resources Conference, Milos.Greece, April 4-7, 11 p.

c Molycorp, Inc., 2015, Form 10-K-2014: Greenwood Village, CO, Molycorp, Inc., 145 p. (Accessed June 30, 2016, at <http://www.molycorp.com/investors.>)。

d Hedrick, J.B., Sinha, S.P., and Kosynkin, V.D., 1997, Loparite, a rare-earth ore:

e Lynas Corp., Ltd., 2012, Increase in Mt Weld resource estimate for the Central Lanthanide deposit and Duncan deposit, January 18.

f Patra, R.N., 2014, Latest scenario in rare earth and atomic minerals in India: PDAC Convention 2014, Toronto, Ontario, Canada, March 2-4, 42 p.

g Nakamura, Shigeo, 1988, China and rare metals - Rare earth: Industrial Rare Metals, no. 94, May, p. 23-28.

表 3: 世界のレアアースの国別生産量

COUNTRY OR LOCALITY	2016		2017		2018		2019		2020
Australia ^{est}	15 000		19 000		21 000		20 000		17 000
Brazil	2 700	rev, est	1 700	est	1 200		710		1 000
Burundi ^{est}	-		40		620		200		500
China ^a	105 000		105 000		120 000		132 000		140 000
India ^{est, b}	1 500		1 800		2 900		2 900		3 000
Madagascar	-		-		2 000		4 000		8 000
Malaysia ^{est}	1 100		180		990		pm		pm
Myanmar ^{est}	3 500		15 000		23 000		pm		pm
Russia	2 700	rev	2 700	rev	2 700		2 700		2 700
Thailand ^{est, c}	1 600		1 300		1 000		1 900		2 000
United States ^{est}	-		-		14 000		28 000		38 000
Viet Nam ^{est, c}	240	rev	220	rev	920		1 300		1 000
Total	133 000	rev	147 000	rev	190 000		220 000		240 000

Source: USGS, 2021a.

Note: 数値はレアアース酸化物等価(トン)。表には 2021 年 1 月 26 日までに利用可能なデータを含む。記載の無いかぎり報告されたデータによる。有効数字 3 桁まで四捨五入(米国は有効数字 2 桁まで)。合計値と Total は必ずしも一致しない。

est = 推定値; rev = 修正値; - = ゼロ; pm = pro memoriam.

a) 公式の生産割当量。違法生産量は含まれていない。

b) インド原子力庁はモナザイト生産のデータを公開しなかった。

c) 輸出品のレアアース酸化物含有量

表 4: 国別のレアース生産量(production)と埋蔵量(reserves)および世界の埋蔵量比

COUNTRY	MINE PRODUCTION, 2020 [TONNES/YEAR]	RESERVES [TONNES]	% OF TOTAL WORLD RESERVES
China	140 000	44 000 000	38.0
Viet Nam	1 000	22 000 000	19.0
Brazil	1 000	21 000 000	18.1
Russia	2 700	12 000 000	10.4
India	3 000	6 900 000	6.0
Australia	17 000	4 100 000	3.5
United States	38 000	1 500 000	1.3
Greenland	-	1 500 000	1.3
Tanzania	-	890 000	0.8
Canada	-	830 000	0.7
South Africa	-	790 000	0.7
Other countries	100	310 000	0.3
Myanmar	30 000	NA	NA
Madagascar	8 000	NA	NA
Thailand	2 000	NA	NA
Burundi	500	NA	NA
World Total	243 300	115 820 000	100

出典: LePan, 2021

中国の支配的な立場は、レアースの生産よりも、レアースの加工と磁石製造に現れています。2020 年時点で、世界のレアース生産能力の 55%と精錬産出の 85%を占めている(Roskill, 2021 年)。しかし、中国のレアースに対する需要は非常に大きく、過去 5 年間一貫して国内供給を上回っており、輸入の急増につながっています。

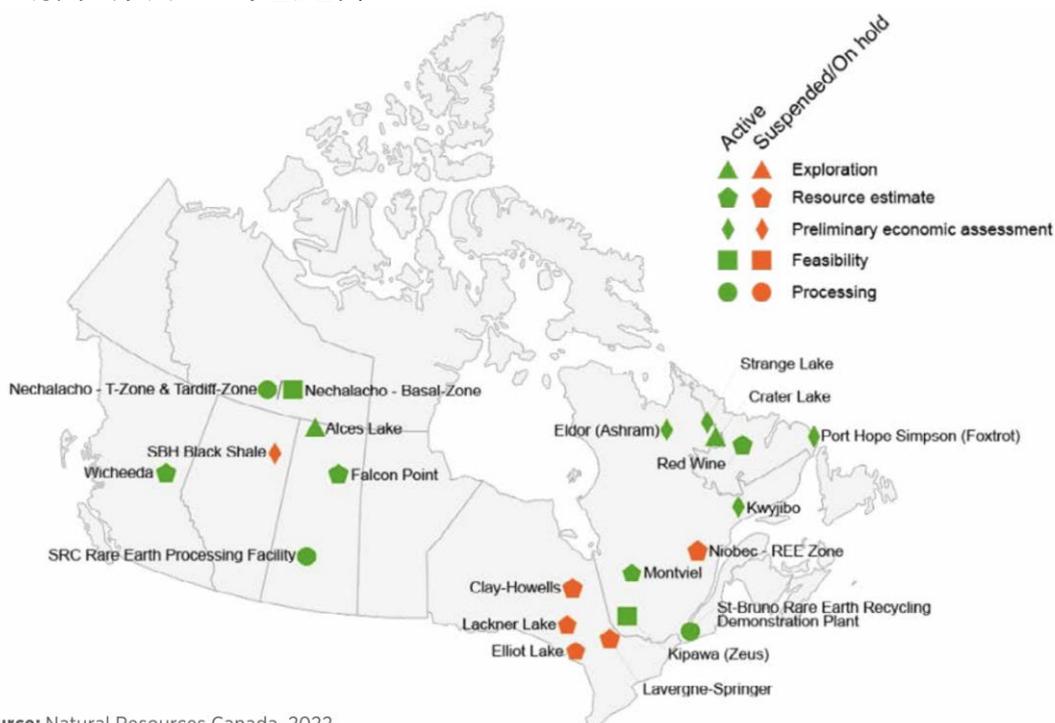
中国は従来、精錬工場を鉱山の近くに併設して、原料をすぐに還元し、生産にすぐに使える金属や金属酸化物に還元できるようにしてきました。そのため、生産効率が高く、輸送コストも低く、他国が世界市場で競争することが難しくなっています。

レアース鉱床のなかでもモナザイトの部分に関心が集まっている。モナザイトには通常、ネオジムやプラセオジムのほか、ジスプロシウムやテルビウムなどの重希土類が、バストネサイト鉱床よりも大きな重量比率で含まれています。モナザイトには天然放射能があるため、これまで取り扱いに高い費用がかかりましたが、レアース価格の上昇に伴って、コスト計算が変わってきました。さらに、モナザイトを豊富に含むチタン採掘残渣から放射性トリウムを分離する技術も進んでおり、この傾向はますます強まっています。

レアースの開発は衰えることなく続いています。最大の埋蔵量を誇るにもかかわらず、レアースの商業生産には至っていないカナダでも、いくつかの先進的な探査プロジェクトが進行中です。同国のレアース酸化物の資源量は 14 Mt を超えると考えられており、埋蔵量は現在 830 kt です(Natural Resources Canada, 2022)。カナダのノースウエスト準州のツール湖にある Nechalacho レアース鉱山プロジェクトは、有利な地質条件を享受しています。この鉱床はネオジムやプラセオジム(テゾーン、レイクゾーン)のほか、ジルコニウム、リチウムが地表近くで鉱化していることが特徴で、放射性物質の含有量も低いです。Avalon は 2005 年に同鉱区の権益を取

得しました。2019 年には、ネチャラチョの表層付近の鉱床はチーター・リソースズ(バイタル・メタルズの子会社)が購入しました。ネチャラチョ・レアアース鉱山は 2021 年 6 月に生産を開始し、3 年間の小規模実証採掘プロジェクトとして、カナダ初のレアアース鉱山となりました。原料は現地で破碎・選別され、サスカトゥーン・サスカチュワン州に輸送され、さらに処理される予定です。同社は、2025 年までに最低 5000 トンのレアアース酸化物を生産する予定です(Tester, 2011; Avalon, 2021)。

図 6: カナダのレアアース・プロジェクト



Source: Natural Resources Canada, 2022.

Active: 実施中、Suspended/On hold: 停止・保留中、Exploration: 資源探査、Resource estimate: 資源推定、Preliminary economic assessment: 予備的経済性評価、Feasibility: 実現可能性調査、Processing: 加工

免責事項: この地図は説明のためだけに提供される。本地図に示された境界線および名称は、地域や国、領土、都市、またはその当局の地位、あるいは境界線または境界線の画定に関する IRENA 側の意見の表明を意味するものではない。

グリーンランド議会は最近、ウランの試掘・探査・開発を禁止する法案を可決し(政府は、この制限をトリチウムなど他の放射性元素にも適用する規定を出す可能性があります)。この新法により、テルビウムとジスプロシウムを含む世界最大級の未開発レアアース鉱床であるクアンスイ鉱山の開発が阻止されます(Reuters, 2021b)。同法は、平均ウラン含有量が 100ppm 未満であれば、非ウラン資源の試掘・探査・開発には直接適用されません。しかし、グリーンランドにはウランに関連しないレアアースが豊富に存在します。もう一つの有望なレアアース・プロジェクトであるサルファルトーク・カーボナイト複合体は、カナダに拠点を置く採掘・探査会社によって開発中です(Mining, 2021)。

ケニアやマラウイ、ナミビア、マダガスカル、タンザニアには、今後数年のうちに稼働する可能性のあるカーボナイトと過アルカリのプロジェクトがあります。プラセオジウムを含むいくつかの重要なレアアースはタンザニアで発見されており、特に注目されています(Earth.org, 2020)。

日本も、極東の領海に相当量のレアアースを埋蔵しており、重要な供給源になる可能性があります。しかし、

海底採掘は困難であり、環境への懸念も大きいため、これらの鉱床は、今後数年間は手が付けられないかもしれません。南鳥島付近の鉱床には、1600万トンの貴重な金属が含まれていると報告されています(高谷ら、2018)。

鉱山テールや、使用済みスクラップ、その他の二次資源からのレアアースリサイクルは、まだ経済的に実行可能ではないものの、追加供給を確保する大きなチャンスとなります。一般に、廃棄物や副産物に含まれるレアアース濃度は採掘された鉱石よりもはるかに低いものの、二次資源に含まれるレアアースの量は、収率が低くても現在の世界需要を満たせる可能性があります。リン酸化石や、石炭灰、アルミニウム生産の赤泥は、貴重なレアアースの濃度が高く、量も十分にあるため、回収の有望な候補となります。さらに、二次的な供給源の中には、実際にスカンジウムなどの高価値の元素が鉱石よりも豊富に含まれているものもあります。二次資源からレアアースを抽出するプロセスのうち、どれが厳しい環境制約の下で、大規模化したときに、採算が取れるかはまだ分かっていません(Gaustad, Williams, Leader, 2021年)。

一次鉱石の抽出方法には2種類あります。1つ目は、表土を取り除き、鉱石を浸出池に運び、化学物質(硫酸アンモニウムや塩化アンモニウムなど)を加えて金属を分離する方法です。この分離工程で使用される化学薬品は、大気汚染や侵食の原因となり、地下水への浸出が懸念されます。2つ目の処理方法は、地面に穴を開け、PVCパイプとゴムホースを挿入し、化学物質をポンプで注入して土を洗い流すというものです。その後、得られたスラリーを浸出池に送り込み、レアアース金属を分離させるのです。

この方法では、露天掘り鉱山と同様の問題が発生し、さらに鉱山作業員が使用した塩ビ管やゴムホースなどの備品が鉱山に散乱したままになるという問題があります(Earth.org, 2020)。廃坑は、残留化学物質が地域の地下水に浸出し続けるなど、継続的な環境破壊の原因となっています。

環境的・社会的理由による鉱山の閉鎖は今後も増加し、供給が制約されることは間違いありません。特に重希土類は、中国南部の複数の鉱山が環境面や社会的な理由で操業停止しているため、供給が逼迫すると予想されます。

レアアースの加工：企業と方法

レアアースの加工は、レアアースの採掘よりもはるかに集中度が高いです。2020年には中国が、採掘では約58%を占めていたのに比べ、加工では85%を占めています。中国の事業以外には、2020年にはオーストラリアからの約24ktの鉱石がマレーシアで加工され(世界生産量の約10%)、残りはエストニアで加工されている。

10年前のレアアース価格高騰をきっかけに、何百ものレアアース採掘プロジェクトが立ち上がりました。しかしながら生産に至ったのはわずか5件です。鉱石の採掘から大規模な加工・分離に移行できたのは1つだけです(Argus, 2020)。オーストラリアのLynasは、軽希土類酸化物の唯一の大規模生産者です。そして、Lynasの事業は、日本政府の支援があっただけで商業規模に到達することができたのです。

中国は依然として、磁石に使用されるレアアースの供給に関しては、最も低コストです(Xie, 2021)。しかし中国国外でも、加工精製能力を開発するための新たな取り組みが進行中です。それらの取り組みについて、以下に簡単に説明します。

2020年8月、カナダのサスカチュワン州政府は、州が所有・運営するレアアース処理施設に3100万米ドルを出資すると発表しました(SRC, 2020)。年間3ktの処理能力を持つこの施設の商業処理プラントでは、軽希土類(特にセリウム、ランタン、プラセオジウム、ネオジウム)の優良な供給源であるモナザイトサンドを濃縮・分離・処理します。混合希土類炭酸塩の中間濃縮物は、市場の要求に応じて、分離希土類酸化物に加工されます(SRC, 2020年)。

カナダの開発会社Medallion Resourcesは、モナザイト砂からレアアースを抽出する施設のアセスメントを完了しました。提案された施設は、年間7ktの生産能力を持ち、セリウム減損混合希土類炭酸塩製品から870トンのネオジウムおよびプラセオジウム酸化物を生産する予定です。このプロジェクトの資本コストは3400万米ドルと推定され、モナザイト供給コストを除いた、セリウム減損混合希土類酸化物の運転コストは12米ドル/kgです(Embleton, 2021年)。

イルカ社(Iluka Resources)は、西オーストラリア州Eneabbaにある同社の既存のミネラルサンド施設に、新たなレアアース処理施設を計画しています。オーストラリア政府は2021年5月に、このプロジェクトに対する支持を表明しました(Fastmarkets, 2021)。イルカは、二酸化チタンから派生するジルコンとルチルの世界最大の生産者です。同社はEneabbaで大規模なモナザイトの備蓄を処理し、ビクトリア州Wimmeraで開発されるサイトから原料を採掘する予定です。ゴールドマン・サックスの予測では、イルカは12億米ドルを投じて分解・浸出プラントを建設し、年間2万トンの希土類酸化物を生産する精製所を作り、2025年に暫定的に生産を開始する予定のWimmera鉱山を開発しなければなりません(Cholteeva, 2021年)。

ウラン精錬のEnergy Fuelsは、米国のウラン施設で処理するためにモナザイトを購入し、レアアース分野に参入しました(Fastmarkets, 2021)。同社は、レアアースとウランを回収するために、モナザイトとその他の鉱石を年間15000トン以上処理することを想定しています(Cholteeva, 2021)。

オーストラリアのLynasは、軽希土類を分離する新工場をテキサス州に建設することで米国政府と合意しました。年間生産量は5000トンと推定されています(Cholteeva, 2021)。

オーストラリアン・ストラテジック・マテリアルズは、先端技術用の特殊金属と酸化物を生産しています。同社は、オーストラリア・ニューサウスウェールズ州の鉱床からジルコニウムやプラセオジウム、ネオジウム、ニオブ、ハフニウムを加工するダボ・プロジェクトを所有しています。韓国のZiron Techとの合弁パートナーシップを通じて、

同社はダボ・プロジェクトの産出物から材料を生産するために、酸化物分離と金属化技術を開発しています (Cholteeva, 2021)。

Mountain Pass の所有者である MP Materials は、米国で大規模なレアアース採掘・処理施設を運営し、シンガポールの Shenghe Resources にレアアース精鉱を供給しています (Stocklight, 2021)。同社のステージ II 最適化計画は、精鉱を生産するマウンテンパス施設を拡張し、個々のレアアース酸化物の分離を含むように企画されています (Stocklight, 2021)。

Energy Fuels と Neo Performance Materials は、米国ユタ州の Energy Fuels White Mesa 工場で混合レアアース炭酸塩を生産しています。Neo は、エストニアでこの炭酸塩を酸化物などのレアアース化合物に分離・加工しています。Energy Fuels/Neo の生産構想は、分離された重希土類酸化物を供給する中国以外の唯一のサプライチェーンとなります (Embleton, 2021 年)。2021 年 12 月、Energy Fuels は Nanoscale Powders LLC との提携により、環境にやさしいレアアース金属製造技術の開発を発表しました。この革新的な技術は、無水レアアース塩化物の熔融ナトリウム還元によって、酸化物からレアアース金属を作るプロセスを使用します。このプロセスは、生産コストとエネルギー消費、そして温室効果ガス排出の削減を約束するものです (Energy Fuels, 2021 年)。

テキサス州シエラブランカにある USA Rare Earth の Round Top サイトは、2023 年に稼働する予定です。Round Top の濃縮多金属鉱床には、17 種類のレアアースのうち 16 種類と、リチウム、ガリウム、その他の貴重な鉱物が含まれています。発表された生産量を 100 年以上続けるのに十分な資源が確認されています。予備経済評価では、20 年間の正味現在価値として 15 億 6000 万米ドルを見込んでいます。予備経済評価では、内部収益率 70%、ロイヤリティ 26 百万米ドルを支払った後でも、平均年間純収入 3 億 9500 万米ドルを見込んでいます。これらの予測や見積もりが正確であることが証明されれば、ラウンドトップは最も低コストのレアアース生産者の 1 つとなり、世界で最もコストの低いリチウム生産者の 1 つとなります。同社は 2020 年にコロラド州ウィートリッジにレアアースと重要鉱物の加工施設を開設し、2020 年 4 月には日立金属アメリカ社が所有していたノースカロライナ州の NdFeB 永久磁石製造システムを取得しました (US Rare Earth, 2021 年)。

Ucore Rare Metals は、アラスカ州ケチカンの南西に位置する Bokan Mountain Project を開発し、レアアース酸化物精鉱を生産しています。予備経済評価では、割引率 10%、操業期間 11 年、税引前内部収益率 43%に基づいて、税引前正味現在価値を 577 百万米ドルと推定しています。Ucore 社は、2 つのバルクサンプル地域を特定し、フィージビリティスタディのための活動を調整するために、フィールドマッピングを実施しました (Ucore, 2021b)。当社は、重希土類と軽希土類の分離精製施設 (Alaska Strategic Metals Complex) の建設を計画しています (Ucore, n.d.)。Ucore は Vital Metals との間に、2024 年から操業開始する Vital Metal の Nechalacho プロジェクトからの、混合レアアース濃縮物の長期供給に関する覚書を締結しました (Ucore, 2021a)。

処理センターが主に中国に集中している重要な理由のひとつは、レアアースはその化学的特性のために分離が困難なことです。そのため、特殊なノウハウが必要とされ、処理プラントは高価で、運転コストも高くなります。

レアアースは化学的性質が非常に似ているため、それぞれを分離することが困難です。濃縮物に含まれるレアアースを抽出するには、酸やアルカリを使用する湿式冶金や乾式冶金の技術を使って、レアアースを含む鉱物を分解し、鉱物から浸出貴液に浸出させなければなりません (しばしば相互作用的に)。濃縮物は硫酸とともに乾燥・焙焼され、その後再び硫酸で浸出されます。この浸出液を炭化水素アンモニウムで処理し、レアアース

を抽出します。これを塩化水素で処理し、再び抽出するのです。

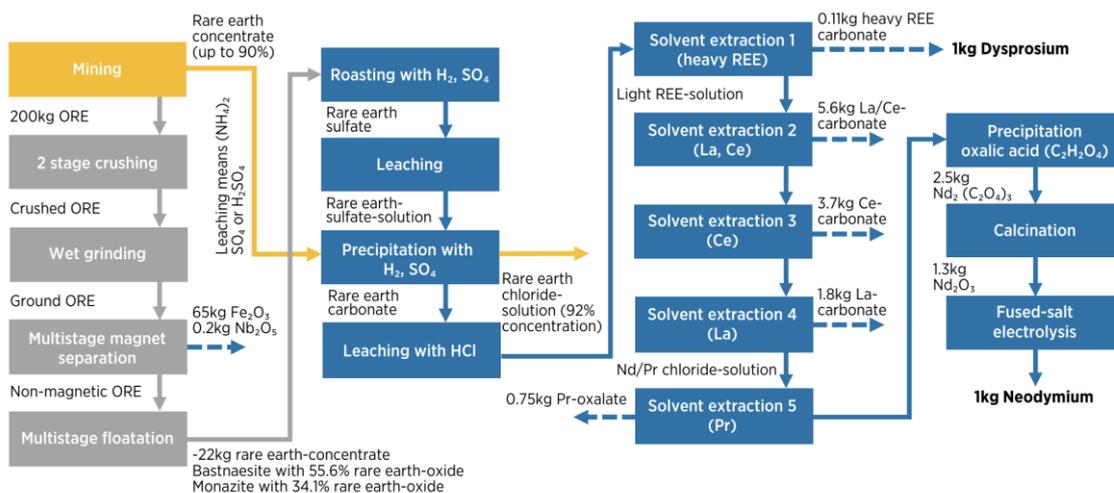
よく知られたアプローチとしては、以下のようなものがあります。

- 硫酸(H_2SO_4)によるアシッドベーキングに続いて、水浸出を行う方法。これらはバヤン・オボ(バストネサイトとモナザイト)や、マウント・ウェルド(モナザイト、アパタイト)で使用されています。
- 浮遊濃縮物を塩酸(HCl)で攪拌酸浸出し、浸出残留物を苛性ソーダ(NaOH)処理し、その後 HCl 浸出する方法。このプロセスは、マウンテン・パス(バストネサイト)で使用されています。

ふつう濃縮物は、純度 90%以上の炭酸塩と、シュウ酸塩、塩化物、水酸化物、酸化物の混合レアアースとなる。これは、出発鉱物の濃縮物のレアアース濃度が 20~40%であることと比較できます。化学濃縮物はその後、高純度(99%以上)の個々のレアアースに分離するための施設に送られます(Anderson and Hatch, 2017)。個々の元素の分離は複雑で、必要な純度を得るために何度も繰り返さなければならないステップもあります。この分離は、レアアースの供給において最も要求の厳しいステップです。異なる元素を分離するために、物理的特性が、とりわけ溶解度と磁気的特性が利用される(Adler and Müller, 2014)。これに続いて、個々のレアアースを得るためのステップで有機溶媒分離が行われます。ネオジムを得るために使用されるプロセスを図 7 に示します。

この分離工程は、原料を溶解し、液体を含む何百ものチャンパーを通じて溶解・集中させるために、高価で労働集約的なものとなっています。この精錬は、特別な技術的ノウハウを蓄積した中国に集中していますが、日本企業による活動も、日本国内と東南アジアの一部で行われています。金属の製造には、それぞれの酸化物が電気分解されます。この熔融塩電解の工程は、現在ではほとんど中国に集中しています。

図 7: ネオジム生産のための加工工程(訳出せず)



出典: BGR, 2021

Note: Ce = Cerium; Fe_2O_3 = ferric oxide; HCl = hydrochloric acid; H_2SO_4 = sulphuric acid; kg = kilogramme; La = lanthanum; Nd = neodymium; Nb_2O_5 = niobium pentoxide; $NdCl_3$ = neodymium(III) chloride; Nd_2O_3 = neodymium oxide; $Nd_2(C_2O_4)_3$ = neodymium oxalate; $(NH_4)_2SO_4$ = ammonium sulphate; Pr = praseodymium.

特に、放射性元素の分離が課題となっています。モナザイトの場合、トリウムを含む鉱山テールの廃棄が、バヤンオボ周辺などの放射能汚染につながっています。原子炉の燃料となりうるトリウムはアルファ放射能が $1 \cdot 10^{-3}$ キュリー/kg 以下であれば、廃棄物から抽出・濃縮し、ヒドロキシカーボネート沈殿法で処分することが可能

です。必要に応じて、トリウム・ヒドロキシカーボネートは二酸化トリウムに焼成することができます (Anufrieva et al., 2014)。中国は、2030 年までに世界初の商業用トリウム原子炉を完成させたいと考えています (Mallapaty, 2021)。

近年、レアアースの一次鉱物と二次資源を対象とした様々な浸出技術が開発されている (表 5)。いずれのプロセスも複数の工程を含み、酸やアルカリを相互作用的に使用するものもあります。

表 5: 一次レアアース生産における浸出技術の概要

鉱物	プロセス/ステップ	収率	特徴	状況
バストネサイト	I. 塩酸(HCl)浸出による非希土類炭酸塩の除去 II. エンデュウの焼成による希土類酸化物の生成	85-90%	• バストネサイトの精鉱を生産する最も古い方法。	時代遅れ
	I. 硝酸(HNO ₃)または硫酸(H ₂ SO ₄)で温浸	98%	• 酸の選択はその後の処理に依存する: 溶剤抽出→硝酸(HNO ₃)沈殿→硫酸(H ₂ SO ₄)	時代遅れ
	I. 620°Cでローストし、炭酸ガスを発生させる(CO ₂) II. 30%HCl 浸出	—	• Cerium+III は焼成中に Cerium+IV に酸化される→REE フッ化物を溶出させない • 残渣は市場性がある	時代遅れ
	I. アルキンコンバージョン希土類金属フッ化物 RE ₃ F ₃ を希土類水酸化物 RE(OH) ₃ に II. 30%HCl 浸出	—	• アルカリ転換の前に、塩酸浸出でレアアース炭酸塩を抽出することができる	使用中
	I. 硫酸焼成 II. 塩化ナトリウム水溶液浸出 III. 二硫化ナトリウムとして沈殿	—	• 沈殿物は塩化物に変換され、溶媒抽出によりさらに精製される	使用中
モナザイト	I. 熱硫酸(H ₂ SO ₄)で温浸する。	—	• プロセス条件により、軽希土類のみ、または軽希土類+重希土類+トリウムのいずれかが溶出される	時代遅れ
	I. 60-70%の熱水酸化ナトリウムで温浸 II. 洗浄残渣をお湯で洗い流す III. 選択した鉱酸で浸出する	98%	• マンガンが存在するとセリウムは溶出しない • トリウムはレアアースと一緒に溶出される • リン酸三ナトリウム(Na ₃ PO ₄)は副産物として市場に出回る	使用中
	I. 塩化カルシウム (CaCl ₂) と炭酸カルシウム (CaCO ₃) を用いて、還元性および硫化性雰囲気下で加熱 II. 3%HCl で浸出	89%	• 微粉碎の必要がない • トリウムは溶出せず、二酸化トリウム(ThO ₂)として残渣に残る。 • マンガン問題なし	使用中
アイアンクレー	I. 硫酸((NH ₄) ₂ SO ₄)による塩浸出	80-90%	• カチオン交換により物理吸着したレアアースをターゲットとする	使用中
	I. 塩水による浸出	40%	• 非効率だが安価なプロセス	研究開発中
	I. 強酸による酸浸出(pH<1)	100%	• 粘土を丸ごと溶かす • 大幅な追加コストが発生する	使用されていない

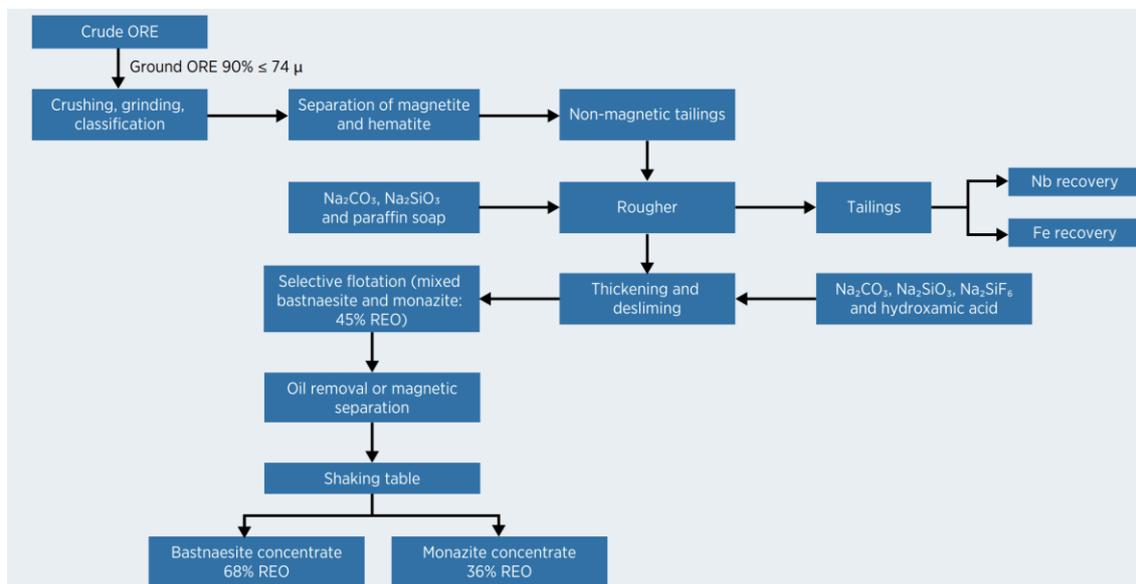
出典: Peelman et al., 2014.

バストネサイトとモナザイトの新しい処理方法については、Box 2 に記載しました。イオン吸着粘土の場合、レアアースイオンは粘土粒子の表面で弱く結合しています。そのため積極的な浸出システムは必要ありません (Box 3)。レアアースイオンの浸出には、食塩水または硫酸アンモニウムが使用されます。ヒープリーチングまたは原位置法が使用されています (Anderson and Hatch, 2017)。処理にはしばしば塩酸も使用されます。

Box 2: バストネサイトとモナザイトの新しい加工方法

バストネサイトは、世界の希土類元素(REE)の 7 割を産出する資源である。世界最大のレアアース生産地であるバヤンオボには、バストネサイトと耐火性希土類リン酸塩であるモナザイトが混在するユニークな鉱床がある。これらを分離するために、まず混合元素を濃縮し、図 8 に示すようなプロセスで分離する。

図 8: バヤンオボのレアアース加工フローシート(訳出ししない)



出典: Peelman et al., 2014.

注) Fe=鉄、Na₂CO₃=炭酸ナトリウム、Na₂SiF₆=六フッ化ケイ酸ナトリウム、Na₂SiO₃=ケイ酸ナトリウム、Nb=ニオブ、REO=希土類酸化物。

バヤンオボでは、混合精鉱を濃硫酸(98%)で 300℃以上に加熱し、レアアース鉱物を水溶性の硫酸塩に変換する。水浸出精製して得られたレアアース硫酸塩溶液は、混合炭酸塩の調製(重炭酸アンモニウムの添加)や溶媒抽出によるレアアース単体の製造に使用される。

従来のプロセスは、高温 HCl 浸出の後に苛性分解段階を含む 2 段階浸出システムを使用していた。Colligan, O'Kelley and Anderson (2021)は、低密度のスラリーを生成する 1 段の高温・高濃度 HCl 浸出プロセスを用いると、回収率を 2 段階浸出プロセスの 70%から 95%に引き上げることができることを見出した。一段階浸出プロセスでの高い回収率の理由をより深く理解するため、フッ素がシステムとどのように相互作用するかについて、さらに調査中である。この新しいプロセスを工業規模にするためには、酸の使用や、浸出後の固液分離、個々のレアアース浸出後の分離についてシステムを最適化する必要がある。

大量の貴液を処理できることから、溶媒抽出は現在、レアアース分離のための最も商業的に適した技術として広く認められている (Cen et al., 2021)。深部共晶溶媒は、希土類に適用される湿式冶金プロセスにおいて、従来の溶媒を置き換えることができる「グリーン」溶媒として、過去 10 年で注目が高まっている。低蒸気圧で生分解性かつ低毒性のこの溶媒は通常、室温で液体であり不揮発性である。その特性は、水素結合供与体に大きく依存する。ドナーの種類が豊富なため、この溶媒は特に適応性が高く、特定の用途に合わせてカスタマイズすることができる。(Cen et al., 2021)。

Box3: イオン吸着粘土の処理

イオン吸着型レアアースは、低放射能で中・重希土類元素(REE)に富む鉱石である。その含有量は 0.05~0.3 wt%で、全希土類元素の 80 wt%以上がイオン交換可能な状態となっている。イオン交換性希土類を化学的に活性化陽イオン(Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg_2^+ 、 Ca_2^+ 、 Al_3^+ など)と接触させると、希土類を交換・脱離することができる。硫酸アンモニウムや、硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウムなどの一連の浸出剤は、レアアースをその場で抽出するために開発された。

浸出液を回収した後、通常は、アルミニウムを除去して希土類含有希薄溶液を精製する必要がある。この作業には一般的に重碳酸アンモニウムが使用され、その後焙焼することで、純度 92 wt%以上、アルミニウム含有量 1.5 wt%未満(酸化アルミニウムの形)の混合希土類酸化物を得ることができる。

レアアース混合酸化物 1 トンを得るために、3~6 トンの重碳酸アンモニウムが消費される。その結果、鉱区の水系ではアンモニア性窒素の富栄養化が進み、深刻な環境問題となっている。

アルカリ性のカルシウム・マグネシウム化合物を代替沈殿剤として使用することで、簡便で低コスト、かつ幅広い適用が期待でき、アンモニア性窒素の問題も解決することができる。しかし、さらなるプロセス開発が必要である。その他の新しい抽出技術も研究する価値がある。これらには、改良された遠心抽出や、新しい抽出剤を用いた安価でグリーンな合成形態が含まれる(He et al, 2021)。

レアース供給コスト

ほとんどのレアース鉱床には、重希土類と軽希土類のどちらかが多く含まれており、セリウムやランタンなどが特に多く含まれているものもあります。豊富な鉱物は、供給不足の鉱物よりも安価に入手できます。

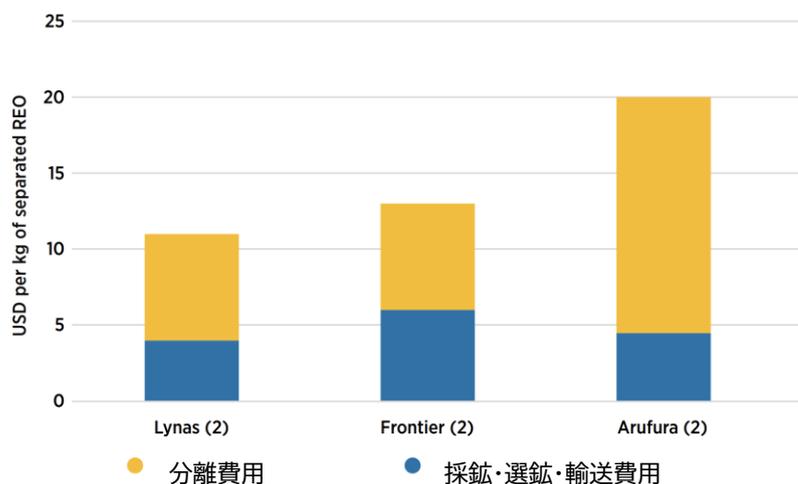
レアース価格は金や銀と異なり、世界の公的取引所で取引されている商品ではないため、リアルタイムで追跡することは困難です。しかし Argus などの民間企業が、レアースとその使用製品の動向を監視する市場参加者の調査に基づいて、定期的な価格評価を発表しています。Adamas Intelligence、ISE、Stormcrow Capital、Technology Metals Research、Asian Metal などのアナリスト企業や価格フォーラムも、そのレポートに価格予測を掲載しています(Pistilli, 2021)。

ネオジムやプラセオジム、テルビウム、ジスプロシウムの価格が、17 種類のレアースの中でとくに急速に上昇しています(表 1 参照)。いずれも磁石に使用されるものです。例えば、中国で生産される磁石の主なレアース成分であるネオジム・プラセオジム酸化物の平均価格は、2020 年第 2 四半期の 40.80 米ドル/kg から 2021 年の同期には 69.90 米ドル/kg に上昇しました(Lynas Rare Earths, 2021)。

経済分析によれば、ネオジム・プラセオジム酸化物の価格が 10 米ドル/kg 上昇(15%の上昇)し、酸化ジスプロシウムの価格が 100 米ドル/kg 上昇(3 分の 1 の上昇)すれば、レアース供給を増やす経済的インセンティブが十分に生まれるとされています。このような価格上昇は、磁石のコストを 7 米ドル/kg 程度とし、電気自動車 1 台当たり 2kg の磁石を想定すると、電気自動車のコストを 15 米ドル/kg 程度引き上げることになります(Makichuk, 2021)。しかし、供給を拡大できる速度は、収益性以外の要因によって制限されることが多いです。

それぞれのレアースの重量あたり価格は 3 桁以上異なり、鉱床の構成もかなり異なるので、混合製品の重量単位の平均値は鉱山によって大きく異なります(Sykes, 2013)。バヤンオボ鉱山とマウンテンパス鉱山は、その製品ミックスの価値が最低水準であり、ダボ鉱山とネチャラコ鉱山は最高水準です。

図 9: レアース分離酸化物製造プロジェクトの運転費用(レアース酸化物 kg 当たりドル)



出典: Sykes, 2013

MIT(2016)によれば、「レアース市場における需給の不公平が予測されるという問題が、大きな懸念材料となっている」。「レアースの総需要と総供給はほぼ等しいが(そしてしばらくはそうであると予想されるが)、

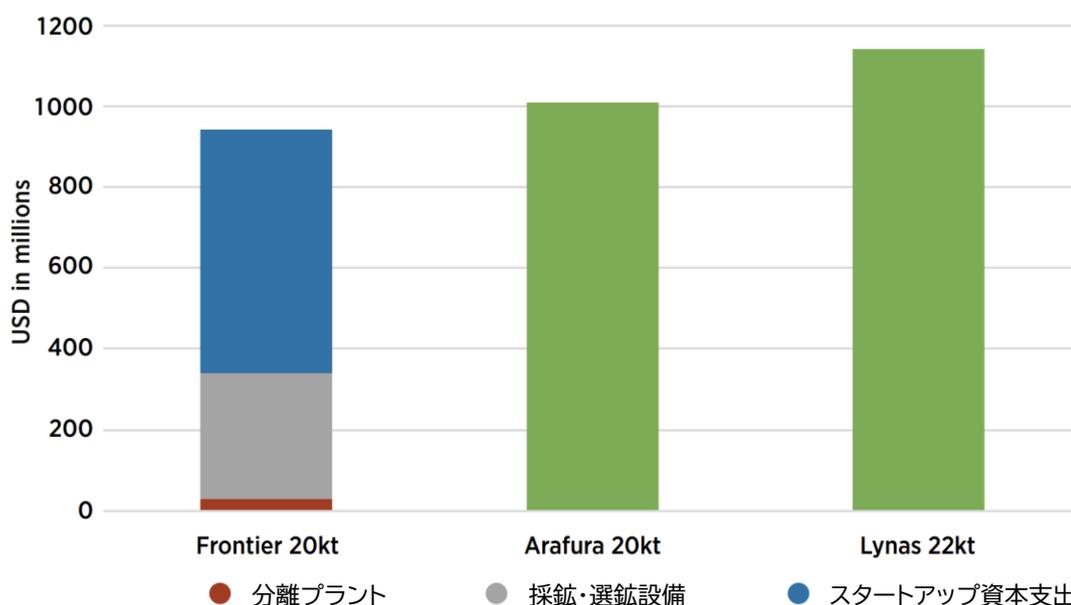
ネオジウムやジスプロシウムなどの個別元素の供給はまもなく、世界の需要に追いつかなくなるだろう。これは経済の多くの部門に大きな価格不安定性をもたらし、新技術の統合と開発に悪影響を及ぼすだろう。」

加工費は、営業費用と資本的支出に分けられます。コストの内訳については、最近のデータはありません。Sykes (2013) が提供したデータは 10 年近く前のものです。

図 9 は、操業経費を示したもので、通常 10~15 米ドル/kg であり、このうち分離コストが大半を占めています。

図 10 は、資本支出を示しています。これは、年間生産能力が分離レアアース酸化物で 20~40kt の場合、通常 10 億米ドルに達します。10%の annuity を仮定すると、これは 5 米ドル/kg に相当します(Sykes, 2013)。最近発表された英国での 12.5 kt/年の能力を持つレアアース分離プラントは、1 億 9000 万米ドルの費用がかかると予測されています(Mineralprices, 2021)。

図 10: レアアース分離生産プロジェクトの設備投資額実績と予測(単位:百万米ドル)



出典: Sykes, 2013

Zandkopsdrift プロジェクト(フロンティア社が南アフリカで開発中)の総資本支出は、世界の同規模のプロジェクトと同程度です。資本支出の 3 分の 2 は、南アフリカの Saldanha 分離プラントに関するものです。同業他社(Lynas や Arafura 分離プラント計画など)の公表データでは、同等の capital split requirements が示されています。

まとめると、平均的な生産コストの総額は 15 米ドル/kg(2010-2013 年の値)です。これは現在の製品価格と比較しても遜色なく、新たな採掘プロジェクトを始める経済的な動機付けとなるものです。

レアアースの安定供給を高めるには

本レポートで述べたように、デジタル経済や脱炭素経済にとって重要な鉱物は、地理的に非常に集中しており、世界貿易の不確実性が高まるにつれて、その確保が急がれるようになりました。

レアアースの採掘と加工が中国に非常に集中していることは、輸入国にとって懸念材料です。レアアースの鉱床はすべての大陸に存在しますが、中国国外における生産能力の開発努力は、経済性や環境問題、多くの鉱床に含まれる放射性ウランとトリウムとの副産物の存在によって妨げられています。

中国は 2020 年にレアアース全体の 58%を採掘し(表 5)、85%を精錬しています。前述のとおり、永久磁石の製造も中国に集中するようになりましたが、これは中国がレアアース加工技術の専門知識を身につけたためです(Hurst, 2010)。中国政府は、インフラ整備や資源配分、産業政策を通じて、大規模な資源開発と産業クラスターの形成を推進しています。さらに、中国は長年にわたって一帯一路構想の下でレアアース採掘のグローバル化に努めてきました。これは、多くの重要資源が存在する国の政府が、中国の一括融資制度やその他の形態の支援の見返りとして、独占取引を喜んで受け入れることが多いという認識からです(Kalantzakos, 2020a)。

現在、中国はバリューチェーンのさらなる上位を目指そうとしています(Chu and Serpell, 2021)。同国は、レアアースを使用した製品の戦略的価値を認識した後で、1990 年代初頭にこの産業を集中的に規制し始めました。2016 年から 2020 年の国家鉱物資源計画では、国際紛争やその他の重大な妨害が発生した場合に発動する監視・評価・助言システムの構築を通じて、「戦略的」なレアアース産業に細心の注意を払うよう呼びかけている。同時に、中国の鉱物資源計画は、国家安全保障に不可欠な戦略的地域を指定する意向を示しています。以下の 6 社は、国内のレアアース生産能力の 80%以上を占め、中国はこれらの企業に生産割当を課しています(Shen, Moomy and Eggert, 2020)。

- 中国金属レアアース
- チナルコ・レアアース&メタルズ
- 広東省ライジング非鉄
- 中国北部レアアースグループ
- 中国南方希土集団
- 廈門タングステン

中国政府は現在、複数の国有企業の資産を合併し、中国レアアースグループを創設しようとしています(Durden, 2021 年)。国有企業である China Minmetals は、Chinalco Rare Earth and Metals と Ganzhou Rare Earth Group という 2 つの大手企業との合併について国務院から承認を受けました⁸。新組織は中国のレアアース生産量の 70%を支配し、価格設定権を持つこととなります(Yu and Mitchell, 2021)。

中国の生産はかなりの汚染をもたらすため、政府はレアアース生産と加工に厳しい制限を設けています(Schüler-Zhou, 2018)。かつて、中国は合法的な生産に加えて、かなりの非正規の採掘を行っていました。しかし、その供給源は大幅に減少し、2011 年の 120 kt から 2020 年には 10 kt に減少しています(BGR, 2021 年)。世界貿

⁸ Ganzhou Rare Earth は環境規制に対応するため、6 年以上にわたって生産を停止してきました。

易機関は 2014 年に中国のレアアース輸出割当を否定する判決を下し、中国は産業上限を撤廃するに至りました。また、2015 年 5 月に輸出関税を撤廃し、価格の下落を促しました。

地政学的な状況が悪化する中、長年の研究と産業政策によって、経済的重要性がますます高まる金属の生産(ひいては世界的な利用可能性)を中国が支配するに至り、主要消費国の政府は代替供給を模索することになりました。他の国々での鉱山開発によって、世界生産に占める中国のシェアは 2010 年の 92%から 2020 年には 58%に低下しました。Jaroni, Friedrich and Letmathe (2019) は、中国以外の 14 のレアアース採掘プロジェクトを評価しました。肯定的な仮定(高い製品価格など)の下では、14 プロジェクトのうち 12 プロジェクトが経済的に実現可能です。しかし、あまり楽観的でない仮定では、経済的に実現可能なプロジェクトの数は 4 つに減少します。このように幅が広いことは、レアアース採掘プロジェクトに伴う経済的リスクを示しています。そしてこのリスクが、採掘プロジェクトの開発が困難なことを説明する一つの要因なのです。

しかし、精製されたレアアース(REE)の生産で引き続き優位に立っている中国(85%)は、そのリスクの大きさについて意見は異なるものの(Hsu, 2019; Kalantzakos, 2020a)、サプライチェーンに対する強い支配力を保持しています(LePan, 2021)⁹。

いずれにせよ、レアアースの経済的重要性と供給市場の偏りから、多様化は不可欠であり、避けられない目標といえます。現実的には、これは中国国外での供給能力を高めることを意味します。しかし、各国政府が中国以外のサプライチェーンの整備を繰り返し求めても、ほとんど成果は上がっていません(Kalantzakos, 2020a)。

したがって、政府や鉱山会社、レアアース使用製品のメーカー、および主要な戦略的資源が集中している国々は、新しいサプライチェーンを開発するための協力的な取り組みを強化する必要があります。開発途上国との新たな政府間協力の形態が、そのような努力の中でも特に重要な位置を占めるべきです。地元利益をもたらす、生産国を支援する持続可能な採掘が重要になります。将来の処理プラントの立地にも注意が必要です。中国以外のレアアース依存企業は、長期の契約とコミットメントによってのみ、代替供給の信頼性を確保することができます。そのコミットメントが採掘・加工企業へのサプライチェーンに及べば、プロジェクトのリスクを軽減する効果的な方法となります。さらに、レアアース加工企業が中国国外の鉱床に共同投資すれば、投資の安定性が高まります。現在、市場が不安定で、中国が供給(と価格)をコントロールできることを考えると、水平方向の協力と垂直方向のコミットメントなしに、新規鉱山に投資するのは愚の骨頂です。最後に、レアアースの冶金と採掘の能力は中国以外では不足しているため、他の国もプロセスのノウハウに、場合によっては中国と協力して投資すべきです(Jaroni, Friedrich and Letmathe, 2019 年)。

必要な協力の触媒として考えられるのが、欧州委員会の「グローバル・ゲートウェイ」です。2021 年 12 月に発表されたグローバル・ゲートウェイは、2027 年までに全世界で 3000 億ユーロ(3400 億米ドル)をインフラやデジタル、気候に関するプロジェクトに投資する計画です(EC, 2021)。このフレームワークは、特に重要物資の確保を目的としたものではありませんが、その目的に適応させることは可能でしょう。

一次ソースと二次ソースから持続可能な形で生産されるレアアース磁石へのアクセスを確保するために、欧

⁹ 特許活動は、レアアースの世界的な生産に対する中国の支配力のもう一つの側面です。2019 年 10 月時点で、中国は 1950 年以降のすべてのレアアースに関する 2 万 5911 件の特許を申請しており、日本の 1 万 3920 件、米国の 9810 件、欧州連合の 7280 件よりはるかに多いです(Ng, 2019)。

州原材料連合は2021年9月に産業界や政府組織、非政府組織、大学から約200人の関係者を集め、「レアアース磁石とモーター：欧州の行動の呼びかけ」と題する行動計画を策定しました。欧州におけるレアアース需要の現状と予測を推計し、サプライチェーンの確保に向けて欧州連合や加盟国、産業界、地域社会が実施すべき詳細なアクションを記述しています。推奨される行動は、この分野の成長を妨げている規制問題と、必要な投資とに焦点を当てた2つのアプローチに基づいています。同文書は、欧州の政策立案者に公平な競争の場を設けるよう求め、レアアースを使用する欧州の部品製造者に、供給品のかなりの割合を欧州の生産者から調達する約束をするよう、検討を要請しています。また、欧州の政策立案者と産業界に対し、使用済み製品や廃棄物の再処理とリサイクルを確保するよう求めています。最後に、新興の欧州レアアース・バリューチェーンへの投資を誘発するための革新的な金融手段に焦点を当てています(ERMA, 2021)。

米国では、レアアース磁石を国内生産する企業に対して税額控除を拡大する法案が、2021年に下院に提出されました。この法案は、米国で製造されたNdFeB磁石に対して20米ドル/kgの控除を設定し、米国の鉱山から供給されるレアアースを使用した磁石に対しては、30米ドル/kgまで控除を拡大するというものです(ロイツー、2021a)。

2022年1月、米国上院は中国への依存度を下げるために、2025年までにレアアースの戦略的備蓄を確立し、レアアースの国産化を促進する法案を発表しました(Edwards, 2022年)。各国は、何種類かの金属を含む、様々な種類の戦略的備蓄を保持しています(Siripurapu, 2020)。戦略的備蓄が有効な対応策となるかどうかは意見が分かれるところです。レアアースの備蓄は短期的な緊急事態には役立ちますが、石油備蓄の場合と比べれば、レアアース供給の集中度は今のところはるかに高く、新たな供給を開発するための対応時間はるかに長い。ため、供給ショックに対する代替策とはなりません。化石燃料とは異なり、問題は消費者競争であり、供給者の行動ではありません。同時に、世界最大のレアアース加工国である中国は、世界最大の消費国でもあります。しかし、日本はレアまたはクリティカルに分類される鉱物の備蓄を維持しており、米国では新たな備蓄が検討されています。

要約すると、各国政府はレアアースの供給セキュリティを強化するために、いくつかのオプションを有しています。

- 市場の透明性を高めること
 - 現在の供給状況をより詳細に追跡する
 - 将来の需要に対するシナリオを作成する
 - 鉱山開発と、予想される運転開始時点と供給貢献度を評価する
 - 主なレアアース製品の公開価格と将来価格を追跡する
 - 市場形成を促進するために、国際的な品質基準と認証を確保する
- 重要材料に関する国際的な対話を深める
 - 協調的関係を形成し、重要鉱物の確保戦略に対するバラバラのアプローチを終わらせる
 - 採掘活動と加工活動の地理的集中に対処する
 - 開発途上国との信頼と協力の新しい道を築く
 - 探査や、リサイクル、代替、サプライチェーンの多様化、法律対応、重要材料リストの作成、さらなる研究・革新への国家投資など、現実的な解決策を模索する(Kalantzakos, 2020b.)

- 鉱業や加工、インフラ、人的資本への投資
 - 国内外での操業に関わらず、環境・社会・透明性(腐敗防止)規制の分野における厳しいコンプライアンス対策を遵守しながら、新規鉱山や加工工場の許可プロセスを合理化する(Wood et al., 2021年)。
 - 供給を保証するための長期固定価格契約の促進、新技術への投資、人的資本への投資により、民間セクターがレアアース採掘・加工に対する投資家のリスク逓減を支援する(Wood et al., 2021)。
- 世界各地の鉱山開発を促進し、所有権を分散させることによって、供給を多様化させ、競争的な深い市場を形成するために行動する。
- 重要な資材の在庫を確保する。
- 民間企業にインセンティブを与え、レアアース関連ビジネスに取り組めるよう誘導する。

結論と 推奨事項

希土類元素は 17 の化学元素からなるグループです。しかし、レアアースをグループとして扱っても、得られる知見は限られます。特定のレアアースだけが、磁石に使われることによって世界的な政治的関心を集め、価格が上昇している重要な材料なのです。エネルギー変革において重要な役割を果たす、このような元素の供給に注目する必要があります。

電気自動車の台頭や、風力タービンの普及により、永久磁石の製造に使われるネオジムやプラセオジム、ジスプロシウム、テルビウムなどのレアアースに対する需要が、今後も増加すると予想されています。ネオジムやプラセオジム、ジスプロシウム、テルビウムといった永久磁石に使われる希土類は、現在から 2030 年の間に、2 倍から 4 倍の供給が必要です。特に、ジスプロシウムの供給量の増加が課題となっています。使用されている原料の量は、商品原料の量に比べれば少なく、採掘・加工業者も限られています。しかし、永久磁石の材料として急増する需要に対応するためには、2030 年にかけて産業を急成長させなければなりません。長期的には(2050 年までには)、新規鉱山の建設が予定されているので、需要に対する問題はそれほど深刻ではないと思われる。また、今後数十年の間に、廃棄物の一部を処理してレアアースを回収できるようになるので、リサイクルの役割が高まる可能性もあります。鉱床にはさまざまなレアアースの混合物が含まれているので、磁石材料を含む鉱床は、特別な経済的・戦略的関心を集めています。

磁石に使用されるジスプロシウムを減らし、希土類元素を必要としない高性能な磁石を開発する努力も続けられています。しかし、そのような革新的な製品設計は、一般的に言えば性能を低下させます。新たな解決策を見出すための科学的努力も続けられていますが、その成果は不透明であり、最も成功した解決策であっても、その大幅な普及には時間がかかると考えられます。電気自動車の高成長への期待と相まって、レアアース需要予測は不確かであり、この点についてさらなる分析が必要です。

供給量の増加という点では、資源は広く分布しているので、主な課題は採掘にあるわけではありません。個々のレアアースを分離し、高品質の永久磁石に変換するための、複雑で特別な知識を必要とする加工段階が障害となっているのです。中国はレアアースのサプライチェーン全体において重要な役割を担っています。しかし、中国は採掘と加工に起因する環境問題に直面しており、この産業の成長を規制し、抑制しようとしています。そのため、レアアース採掘における中国のシェアは近年低下していますが、レアアース加工と磁石生産は依然として中国に集中しています。ただしこのような一般論は注意深く解釈する必要があります。実は、EV 用のハイエンド焼結永久磁石に関しては、中国の地位はそれほど優位ではないのです。

供給リスクを軽減するため、数年前から供給多様化の努力が行われてきました。これまでのところ、その進展は限定的であり、レアアース供給の経済的重要性が急速に高まっているため、その取り組みが強化されています。中国・米国・日本・EU などの国々は、以前からレアアースへの依存度を把握し、レアアース供給戦略を策定しており、現在では多くの国がこれに追随しています。すべての国の関心が、供給増加の必要性に向かっているので、さらなる対話と協力が進められることは確実です。最近設立された IRENA 共同フレームワークの重要な資料は、そのような対話に使用できます。

政府と民間企業は、新しい持続可能なサプライチェーンを開発するために、協力する必要があります。鉱業部門は、統合によって、あるいは少なくとも実質的な協力関係を強化することによって、利益が得られるでし

よう。典型的な 10~40kt の分離プラントは 2 億~10 億米ドルのコストがかかるでしょう。資源を保有する企業の多くは新興企業であり、これらの資源を開発するために必要な資金力を持ち合わせていません。したがって、鉱山会社や消費者(特に自動車メーカーや風力発電機メーカー)、政府が協力して、プロジェクトのリスクを軽減する必要があります。また、その供給が持続可能であることを証明する環境ラベルも検討されるべきでしょう。

参考文献(REFERENCES)

- Adamas Intelligence (2021), Rare Earth Magnet Market Outlook to 2030, Adamas Intelligence, Toronto and Amsterdam, www.adamasintel.com/report/rare-earth-magnet-market-outlook-to-2030.
- Adler, B. and R. Müller (2014), Seltene Erdmetalle: Gewinnung, Verwendung und Recycling, www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00029682/ilm1-2014100070.pdf.
- Advanced Magnets (2021), "Introduction to basic composition and microstructure of sintered NdFeB magnet", www.advancedmagnets.com/sintered-ndfeb-magnets/?fbclid=IwAR2coi4p_cx8M1P0Er-L3BgqSSncggIC2TY5oKys-ddzQ8Jflwg1dv1Rlk.
- Alves Dias, P. et al. (2020), The Role of Rare Earth Elements in Wind Energy and Electric Mobility, EUR30488 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Anderson, C. and G. Hatch (2017), "Session 5: Rare-earth mining, mineral processing and extractive metallurgy", Presentation at NATO AVT-285 Lecture Series: Rare Earths: Securing Supply Chains, Materials and Technologies, www.researchgate.net/publication/305221097_Rare_Earth_Mining_Mineral_Processing_and_Extractive_Metallurgy.
- Anufrieva, A. et al. (2014), "Processing of REE-containing ores and concentrates", Procedia Chemistry, Vol. 11, pp. 119-125, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876619614001727.
- Argus (2020), "How to build a rare earth supply chain", https://view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/MET-White_paper-How_to_build_a_rare_earth_supply_chain.pdf.
- Avalon (2021), "Nechalacho REE", www.avalonadvancedmaterials.com/nechalacho/.
- Barrera, P. (2021), "Rare earths market update", Investing News Network, 15 July, <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earths-market-update>.
- BGR (2021), "Seltene Erden: Informationen zur Nachhaltigkeit", Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf;jsessionid=E9405F806F0790249E4643452BF47ECF.1_cid284?_blob=publicationFile&v=3.
- Carrara, S. et al. (2020), Raw Materials Demand for Wind and Solar PV Technologies in the Transition towards a Decarbonised Energy System, EUR 30095 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Cen, P. et al. (2021), "Extraction of rare earths from bastnaesite concentrates: A critical review and perspective for the future," Minerals Engineering, Vol. 171, 107081, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687521003101.
- Cholteeva, Y. (2021), "Mapping rare earths projects outside China", www.mining-technology.com/features/mapping-rare-earths-projects-outside-china/.
- Chu, A. and O. Serpell (2021), "Rare earth elements pose environmental, economic risks for clean energy", <https://kleinmanenergy.upenn.edu/podcast/rare-earth-elements-pose-environmental-economic-risks-for-clean-energy/>.
- Colligan, G., O'Kelley, B. and Anderson, C. (2021), "Novel methods for bastnaesite concentrate leaching", Mining, Metallurgy & Exploration, Vol. 39, pp. 31-38, www.researchgate.net/publication/355886312_Novel_Methods_for_Bastnaesite_Concentrate_Leaching?enrichId=rgreq-4db3cd51a49b72cb03f805b446c70dc-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM1NTg4NmMxMjBUzoxMDk2OTQwODU5MTk1MzkzQDE2Mzg1NDI0ODkwNTM%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf.
- Constantinides, S. and J. De Leon (2011), "Permanent magnet materials and current challenges", Arnold Magnetic Technologies, Rochester, www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Permanent-Magnet-Materials-and-Current-Challenges-Constantinides-and-DeLeon-PowderMet-2011-ppr.pdf.
- Croat J.J. et al. (1984), "Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets", Journal of Applied Physics, Vol. 55/6, pp. 2078-2082.
- Durden, T. (2021), "China creates China Rare Earth Group to tighten control over rare earth supplies", www.nxtmine.com/news/articles/energy-critical-metals/rare-earths/china-creates-new-state-owned-mining-giant-to-tighten-control-of-rare-earth-supplies/.
- Earth.org (2020), "How rare-earth mining has devastated China's environment", <https://earth.org/rare-earth-mining-has-devastated-chinas-environment/>.
- EC (2021), "Global Gateway: Up to €300 billion for the European Union's strategy to boost sustainable links around the world", European Commission, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6433.
- Edwards, J. (2022), "Senate bill seeks to encourage domestic rare earth elements production",

- <https://executivegov.com/2022/01/senate-bill-seeks-to-encourage-domestic-rare-earth-elements-production/>.
- Embleton, R. (2021), "Rare earths: Monazite supply chains gather momentum", <https://roskill.com/news/rare-earths-monazite-supply-chains-gather-momentum/>.
- Energy Fuels (2021), "Energy Fuels announces strategic venture with nanoscale powders to develop innovative rare earth metal-making technology", www.energyfuels.com/2021-12-15-Energy-Fuels-Announces-Strategic-Venture-with-Nanoscale-Powders-to-Develop-Innovative-Rare-Earth-Metal-Making-Technology.
- ERMA (2021), Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action, European Raw Materials Alliance, <https://erma.eu/app/uploads/2021/09/01227816.pdf>.
- EV volumes (2021), "Global EV sales for 2021 H1", www.ev-volumes.com/.
- Fastmarkets (2021), "Building sources of rare earths supply", www.fastmarkets.com/article/4014936/building-sources-of-rare-earths-supply.
- Fears, P. (2021), "Rare earth magnets in electric vehicle motors", Bunting, www.buntingeurope.com/rareearth-magnets-in-electric-vehicle-motors.
- Gaustad, G., E. Williams and A. Leader (2021), "Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 167, 105213, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920305309.
- Gielen, D. (2021), "Critical materials for the energy transition", IRENA technical paper 5/2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition.
- Gielen, D. and M. Lyons (2022), "Critical materials for the energy transition: Lithium", IRENA technical paper 1/2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <https://irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Lithium>.
- GWEC (2019), "Global Wind Market Development, Supply Side Data 2018", Brussels,
- Harris, V. (2021), "Rare earth element-based magnets: science, supply and sustainability in 2021 and beyond", https://sites.nationalacademies.org/PGA/Jefferson/PGA_365826.
- He, Q. et al. (2021), "Progress in green and efficient enrichment of rare earth from the leaching liquor of ion adsorption type rare earth ores", Journal of Rare Earths, <https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.09.011>.
- Hioki, K. (2021), "High performance hot-deformed Nd-Fe-B magnets (Review)", Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 22/1, pp. 72-84, www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7850326/.
- Hsu, J. (2019), "Don't panic about rare earth elements", www.scientificamerican.com/article/dont-panic-about-rare-earth-elements/.
- Hurst, C. (2010), China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Institute for the Analysis of Global Security, www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf.
- IHS Markit (2019), "Rare earth elements – the vitamins of modern industry", <https://ihsmarkit.com/research-analysis/rare-earth-elements--the-vitamins-of-modern-industry.html#:~>
- IRENA (2022), IRENA Members Pave Way for New Cooperation on Critical Materials, www.irena.org/newsroom/articles/2022/Mar/IRENA-Members-Pave-Way-for-New-Cooperation-on-Critical-Materials
- IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook.
- IRENA (2020), Reaching Zero with Renewables, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2020/Sep/Reaching-Zero-with-Renewables.
- ISE (2021), "Metal prices: Latest prices of metals, rare earths and materials", Institut für seltene Erden und strategische Metalle, <https://ise-metal-quotes.com/>.
- Jaroni, M., B. Friedrich and P. Letmathe (2019), "Economical feasibility of rare earth mining outside China", Minerals, Vol. 9/10, pp. 576, <https://doi:10.3390/min9100576>.
- Kalantzos, S. (2020a), "Critical minerals and the new geopolitics", www.project-syndicate.org/commentary/china-critical-minerals-new-geopolitics-by-sophia-kalantzos-2020-10.
- Kalantzos, S. (2020b), "The race for critical minerals in an era of geopolitical realignments", The International Spectator, Vol. 55/3, pp. 1-16, DOI: 10.1080/03932729.2020.1786926.
- Kane, M. (2020), "A quarter of NdFeB magnet production will be used in EVs by 2030", InsideEVs, <https://insideevs.com/news/439469/quarter-of-ndfeb-production-used-evs-2030>.
- Kramer, M. et al. (2012), "Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators", JOM, Vol. 64/7, pp. 752-763, DOI: 10.1007/s11837-012-0351-z.
- Lacal-Arántegui, R. (2015), "Materials use in electricity generators in wind turbines – state-of-the-art and future specifications", Journal of Cleaner Production, Vol. 87, pp. 275-283, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.047>.
- Lambard, G. et al. (2022), "Optimization of direct extrusion process for Nd-Fe-B magnets using active learning assisted by machine learning and Bayesian optimization", Scripta Materialia, Vol. 209, 114341, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646221006217?via%3Dihub.
- Lee, R. W. (1985), "Hot-pressed neodymium-iron-boron magnets", Applied Physics Letters, Vol. 46/8, pp. 790-791.
- LePan, N. (2021), "Rare earth elements: Where in the world are they?" <https://elements.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/>.
- Li, J. et al. (2020), "Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions", One Earth, Vol. 3/1, pp. 116-125, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220302980.
- Lynas Rare Earth (2021), 2021 Annual Report, https://lynasrareearths.com/wp-content/uploads/2021/10/LYC_AR21.pdf
- Ma, J. and J. Henderson (2021), "The impermanence of permanent magnets: A case study on industry, Chinese production, and supply constraints", <https://macropolo.org/analysis/permanent-magnets-case-study-industry-chinese-production-supply/>.
- Makichuk, D. (2021), "Prices soar as rare earth demand grows: report", <http://asiatimes.com/2021/09/prices-soar-as-rare-earth-demand-grows-report/>.

- Mallapaty, S. (2021), "China prepares to test thorium-fuelled nuclear reactor", *Nature*, Vol. 597, pp. 311-312 (2021) www.nature.com/articles/d41586-021-02459-w.
- Marx, A. (2018), "An in-depth comparative study of direct drive versus gearbox wind turbines", MSc thesis, KTH Stockholm, www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1293881/FULLTEXT01.pdf.
- Mineralprices (2021), "£10M investment for company behind rare earth processing plans", <https://mineralprices.com/10m-investment-for-company-behind-rare-earth-processing-plans/>.
- Mining (2021), "Hudson Resources says licence won't be affected by Greenland uranium ban", www.mining.com/hudson-resources-says-license-wont-be-affected-by-greenland-uranium-ban/.
- Minke, C. et al. (2021), "Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis?" *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46/46, pp. 23581-23590, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921016219.
- MIT (2016), "Rare earth elements supply and demand", Massachusetts Institute of Technology, <https://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/ree.html>.
- Ng, E. (2019), "China's war chest of rare earth patents give an insight into total domination of the industry", www.scmp.com/business/companies/article/3019290/chinas-war-chest-rare-earth-patents-give-insight-total.
- Northeastern (2018), "Developing alternatives to rare earth materials", <https://coe.northeastern.edu/news/developing-alternatives-to-rare-earth-materials/>.
- NRCan (2022), "Rare earth elements facts", Natural Resources Canada, www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/rare-earth-elements-facts/20522.
- Onstad, E. (2021), "China frictions steer electric automakers away from rare earth magnets", Reuters, www.reuters.com/business/autos-transportation/china-frictions-steer-electric-automakers-away-rare-earth-magnets-2021-07-19.
- Ormerod, J. and S. Trout (2021), "The global permanent magnet industry: 2020-2030 overview", presentation at the 2021 Rare Earth Magnet Workshop on June 9, 2021, www.youtube.com/watch?app=desktop&v=RN1usJZYSE&feature=youtu.be.
- Pavel, C. et al. (2017), "Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines", *Resources Policy*, Vol. 52, pp. 349-357, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>.
- Peelman, S. et al. (2014), "Leaching of rare earth elements: Past and present", ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference | Milos | 04-07/09/2014, www.eurare.org/docs/eres2014/seventhSession/SebastianPeelman.pdf.
- Pistilli, M. (2021), "Rare earth elements prices 101", <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earth-metals-prices/>.
- Ren, K. et al. (2021), "Bridging energy and metal sustainability: Insights from China's wind power development up to 2050", *Energy*, Vol. 227, 120524.
- Reuters (2021a), "US House Bill would give tax credit rare earth magnets", www.reuters.com/business/us-house-bill-would-give-tax-credit-rare-earth-magnets-2021-08-10/.
- Reuters (2021b), "Greenland bans uranium mining, halting rare earths project", www.reuters.com/world/americas/greenland-bans-uranium-mining-halting-rare-earths-project-2021-11-10/.
- Rockstone (2016), "Wie der sinkende Eisenerzpreis den Seltenen Erden auf die Sprünge helfen kann", www.rockstone-research.com/index.php/de/maerkte-rohstoffe/558-Wie-der-sinkende-Eisenerzpreis-den-Seltenen-Erden-auf-die-Spruenge-helfen-kann.
- Roskill (2021), *Rare Earths Market Outlook to 2030*, 20th edition.
- Sagawa, M. et al. (1984), "New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe", *Journal of Applied Physics*, Vol. 55/6, pp. 2083-2087.
- SBH4 (2021), "Electrolysers: AEC, AEM, PEM and SOE for hydrogen (and syngas) production", <https://sbh4.de/assets/electrolyser-aec-aem-pem-soe.pdf>.
- Schmidt, G. (2016), "Case study rare earths/neodymium", www.oeko.de/oekodoc/2528/2016-055-de.pdf.
- Schüler-Zhou, Y. (2018), "Chinas Rohstoffpolitik fuer Seltene Erden", www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Downloads/Top_News/Rohstoffwirtschaft/57_china_seltene_erden.pdf;jsessionid=E9405F806F0790249E4643452BF47ECF.1_cid284?_blob=publicationFile&v=2.
- Shen, Y., R. Moomy and R. Eggert (2020), "China's public policies toward rare earths, 1975–2018", *Mineral Economics*, Vol. 33, pp. 127-151, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13563-019-00214-2.pdf>.
- Siripurapu (2020), "The State of U.S. Strategic Stockpiles", Council on Foreign Relations, www.cfr.org/backgrounder/state-us-strategic-stockpiles.
- SRC (2020), "SRC Rare Earth Processing Facility", Saskatchewan Research Council, www.src.sk.ca/sites/default/files/files/resource/Rare%20Earth%20Processing%20Facility_Jan21.pdf.
- Stocklight (2021), MP Materials Corporation Annual Report 2021, <https://annualreport.stocklight.com/NYSE/MP/21760120.pdf>.
- Sykes, J. (2013), "Rare earth mine costs", Centre for Exploration Targeting, University of Western Australia, www.researchgate.net/publication/283117423_Rare_earth_mine_costs.
- Takaya, Y. et al. (2018), "The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements", *Nature Scientific Reports*, Vol. 8, 5763, www.nature.com/articles/s41598-018-23948-5.pdf?utm_medium=affiliate&utm_source=commission_junction&utm_campaign=3_nsn6445_deeplink_PID100024933&utm_content=deeplink.
- Tester, E. (2011), "Ein Spiel mit wenig Gewinnern Don Bubar Der Gründer und CEO von Avalon Rare Metals erklärt, weshalb es in seltenen Erden um das Besetzen des Marktanteils geht", www.fuw.ch/article/laquoein-spiel-mit-wenig-gewinnernraquodon/.
- Ucore (n.d.), "Alaska 2023", <https://ucore.com/alaska2023/>.
- Ucore (2021a), "Ucore and Vital Metals execute feedstock supply MoU for the Alaska SMC", <https://ucore.com/ucore-and-vital-metals-execute-feedstock-supply-mou-for-the-alaska-smc/>.
- Ucore (2021b), "USFS issues authorization for Ucore's Bokan-Dotson Ridge sampling program", <https://ucore.com/usfs-issues->

- [authorization-for-ucore-bokan-dotson-ridge-sampling-program/](#).
- USA Rare Earth (2021), "USA Rare Earth to produce nearly half of new U.S. government critical minerals list", www.globenewswire.com/news-release/2021/12/10/2350069/0/en/USA-Rare-Earth-to-Produce-Nearly-Half-of-New-U-S-Government-Critical-Minerals-List.html.
- USCRS (2020), "An overview of rare earth elements and related issues for Congress", United States Congressional Research Service, Washington, DC, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46618>.
- USGS (2021a), "Rare earths statistics and information", United States Geological Survey, www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information.
- USGS (2021b), "Rare earth element mines, deposits, and occurrences", United States Geological Survey, <https://mrdata.usgs.gov/ree/map-us.html>.
- Wang, R. et al. (2021), "Coercivity enhancement and microstructural characterization of hot-deformed Nd-Fe-B magnets with graphene addition", *Materials Characterization*, Vol. 178/12, 111210.
- Wood, D. et al. (2021), *The Mosaic Approach: A Multidimensional Strategy for Strengthening America's Critical Minerals Supply Chain*, Wilson Center, Washington, DC, www.wilsoncenter.org/publication/mosaic-approach-multidimensional-strategy-strengthening-americas-critical-minerals.
- Xie, J. (2021), "Replacing Chinese rare-earth magnets 'tough'", www.globaltimes.cn/page/202108/1232443.shtml.
- Yu, S. and T. Mitchell (2021), "China merges 3 rare earths miners to strengthen dominance of sector", www.ft.com/content/4dc538e8-c53e-41df-82e3-b70a1c5bae0c.