

レアメタル資源の安定供給を目指して

— レアアース資源確保のための取り組みと課題 —

高木 哲一

新興工業国の経済発展により、21世紀に入り金属資源価格が高騰し、さらに2009-2012年には中国のレアアース輸出制限によるレアアース危機が勃発した。これらを受けて、2010年より産総研では、レアメタル資源研究拠点の整備、海外地質調査機関との協力関係の構築を進めた。さらに、南ア、米国、ブラジル、モンゴル等でのレアアース資源調査を積極的に進めた。特に南アでは、有望な重レアアース鉱床を発見した。2011年秋以降、レアアース価格の暴落により、世界中のレアアース資源開発計画が頓挫し、レアメタル資源開発のリスクの高さを露呈した。民間にそのリスクに耐えて次のレアアース危機へ備えを求めるのは困難であり、産総研による調査研究体制の継続が求められている。

キーワード: レアメタル、鉱物資源、レアアース、安定供給、新興工業国

Securing a stable supply of critical raw metals

– Efforts and issues for the securement of rare-earth resources –

Tetsuichi TAKAGI

In the early 21st century, metal prices soared due to the economic development of newly industrialized countries. Moreover, a rare-earth resource crisis occurred between 2009 and 2012 due to export restrictions imposed by China. Against this background, AIST set up a research base for critical metal resources, and established collaborative relationships with some foreign geological survey agencies (GS) from 2010. Furthermore, joint surveys were conducted with GS of South Africa, United States, Brazil, Mongolia, and others. While undertaking these surveys, we found a promising prospect for heavy rare-earth in South Africa. After the autumn of 2011, however, the prices of rare-earths collapsed, and the majority of rare-earth exploration/mining programs worldwide were put on hold. This sequence of events revealed the risks that accompany the development of critical metal resources. To mitigate the impact of future crises, AIST should continue research and development of rare-earth resources.

Keywords: Rare metal, mineral resource, rare-earths, stable supply, BRICS

1 はじめに

1.1 レアメタルとは

金属資源は、鉄やアルミニウム等大量に生産・消費されるコモンメタル（汎用金属）、産業の基礎材料となるベースメタル、金・銀等の貴金属、産出量・使用量共に少ないが産業に重要なレアメタル等に分類される（図1）。日本では、レアメタルとして31種類の金属が経済産業省により指定され、他の金属資源とは区別して安定供給対策が講じられている^[1]。レアアース（希土類元素）はレアメタル中の1金属として扱われるが、実際にはランタノイド元素15種にスカンジウム（Sc）、イットリウム（Y）を加えた17種の金属の総称である。ランタノイド元素の内、原子量がユーロピウム（Eu）より軽い元素を軽レアアース、重い元素を重レアアースと呼び区別する。軽レアアースは蛍光材、ガラス研磨剤、

鉄鋼用脱酸素剤、Ni-H電池、石油精製用触媒等に、重レアアースは高性能磁石に主に用いられる。

1.2 レアメタルショック

日本の金属鉱業は、第二次世界大戦後、鉱量の減少・枯渇等により徐々に縮小していたが、1980年代以降の円高、賃金の上昇、公害問題等により急速に衰退した。主力の大規模・高品位鉱山も相次いで採掘を終了し（秋田県北鹿地区黒鉱、1993年；岐阜県神岡鉱山、2001年；北海道豊羽鉱山、2006年）、現在は数ヶ所の金鉱山（鹿児島県菱刈鉱山等）が稼行するのみとなっている。今日、金属資源のほぼ全量を輸入に頼る日本の産業にとって、その安定供給は死活問題である。さいわい1980～2000年代初頭まで、金属資源の価格は比較的安定しており、経済力により自由に輸入できる時代が続いた。この時期、鉱物資源確保

産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7

Institute for Geo-Resources and Environment, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: takagi-t@aist.go.jp

Original manuscript received January 9, 2015, Revisions received September 7, 2015, Accepted September 10, 2015

に対する危機感は、官民共に十分に高かったとは言えない。

ところが、安定していた非鉄金属資源の価格が、2004年頃から急激に上昇を始めた。「レアメタルショック」の始まりである(図2、3)。これは、主にBRICS等の新興工業国における金属資源消費量が、市場のバッファー能力を超えて増加したことに起因する。この価格高騰はリーマンショックで一時収束するが、その後また価格が上昇し現在に至っている。レアメタル、ベースメタル等の非鉄金属資源は世界的な争奪戦の様相を呈しており、民間企業の対応範囲を超えて、国対国の構図となっている。鉱物資源の確保には、経済力のみならず、政治・外交や科学技術等の総合力が必要な時代に入ったと言える。経済産業省は、2009

年7月に「レアメタル確保戦略」^[2]を策定し、国が前面に出て資源確保戦略を積極的に推進する政策を打ち出した。

2 レアメタル資源研究の目的

2.1 レアメタル資源研究

レアメタルの研究は、材料科学と地球科学に大きく二分することができる。前者は、レアメタルを利用した高性能材料、レアメタルの使用量削減・代替材料、リサイクル等のための研究開発が目的である。一方、後者はレアメタル資源の探査、資源評価が目的である(選鉱・製錬技術の開発は、一部両者にまたがっている)。産総研ではこれらレアメタル関連研究を総合的に実施していることから、2006年

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	*2	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn			Fl			Lv

*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
*2	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Ti	レアメタル	Cu	ベースメタル	*1	ランタノイド
Dy	レアアース (レアメタルの一部)	Au	貴金属	*2	アクチノイド
Fe	コモンメタル (汎用金属)				

図1 金属資源の一般的な分類

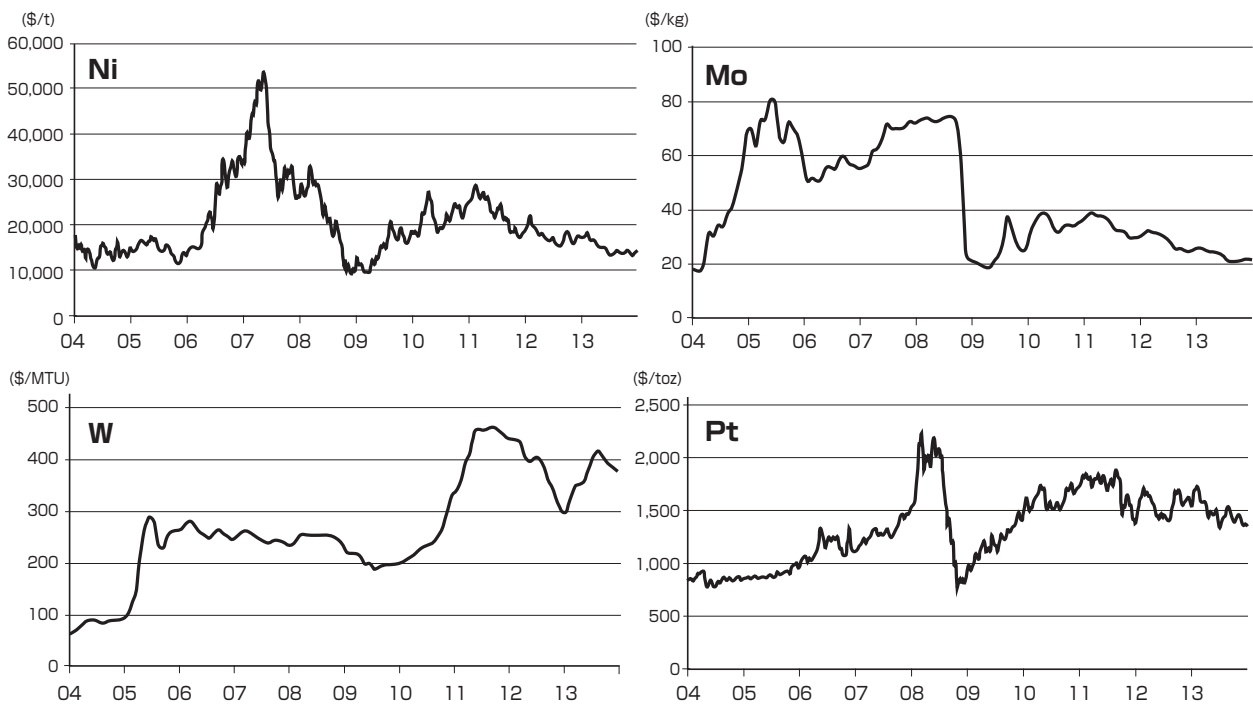


図2 主要レアメタル価格の推移 (ロンドン金属取引所価格を基に経済産業省が作成)

から産総研内にレアメタル・タスクフォースを設置し、材料科学と地球科学を車の両輪として研究の促進を図ってきた^[3]。この論文では、レアメタルの地球科学的研究を「レアメタル資源研究」として取り上げることとする。

2.2 レアメタル資源の特徴

鉱物資源開発は、探査から開発まで一般に10～15年の時間がかかる。その間の各種調査や試験に多額の費用がかかるため、開発後の利益を確実に見込むことができなければ事業を推進することができない。動き出した開発計画が、可採鉱量・品位の不足や採掘・選鉱・製錬コストの問題等から途中で中止になる場合も数多い。ベースメタル、貴金属等の非鉄金属は、国際市場が形成されており、安定した価格で利益を上げることができる。また、銅・亜鉛は日本国内で製錬所が稼働しており、鉱石を炉に継続的に供給する必要があるため、販売量が安定している。したがって、大手鉱山会社・総合商社がこれらの開発リスクを負担し、積極的な投資・開発を推進している。一方レアメタルは、先端産業に必須であるにもかかわらず、採掘量・使用量共に少量であり、売買による利益が少ない。また、技術の進化により必要とされるレアメタルの種類が短期間に変化することがしばしばある。ほとんどのレアメタルは国際市場が形成されておらず、投機、戦争、鉱山ストライキ、保護主義等の政治・経済的理由により価格が大きく変動する。このような高いリスクから、レアメタル資源開発は、ベンチャー企業やジュニア鉱山会社（鉱山等の大規模な資本を持たない探鉱専門の企業）がリスクを取って推進する傾向がある。また、レアメタル鉱床は、ベースメタル鉱床等と産状が大きく異なる「非在来型」であることが多く、開発にあたっては高度な地質学的・選鉱学的知見を要するこ

とがある。レアメタル資源を確実に確保するためには、開発初期段階における資源ポテンシャル評価を公的機関（各国地質調査所、大学）が企業に代わって実施し、有望な案件を見極めることにより、投資リスクを少しでも軽減することが求められる。レアメタル資源研究を、産総研内の他の工学分野と比較すると、研究開発のサイクルタイムが非常に長く、かつリスク要因が技術開発以外の多岐にわたっている特徴がある。したがって、息の長い研究開発の継続が求められる。

3 レアメタル資源確保の戦略

前述のようにレアアースはレアメタルの一部であるが、最近の数年間に限ると我が国においてレアアース資源の確保戦略が、レアメタル資源確保戦略と同義語に近かった。そこで、本章ではレアアースを中心とした産総研の対応を述べることにする。

3.1 レアアース危機

1980年代までレアアースは主にインドの漂砂鉱床で生産されていたが、1990年代に入り需要が拡大すると、それに替わって米国マウンテンパス鉱山からの生産が中心になった。ところが、1990年代末から2000年代初頭にかけて中国の生産量が急激に伸び、安値攻勢により世界市場の90%以上のシェアを獲得するに至った。マウンテンパス鉱山はコスト面で中国品に対抗できなかったのみならず、鉱山廃水による環境汚染問題も影響し、2002年に休山に追い込まれた。中国は、その後2007年頃からレアアースの輸出枠を設けて徐々に出荷を規制するようになり、供給のリスクが認識され始めていたが、リーマンショックが一段落した2009年頃から輸出枠の絞り込みにより需給バラ

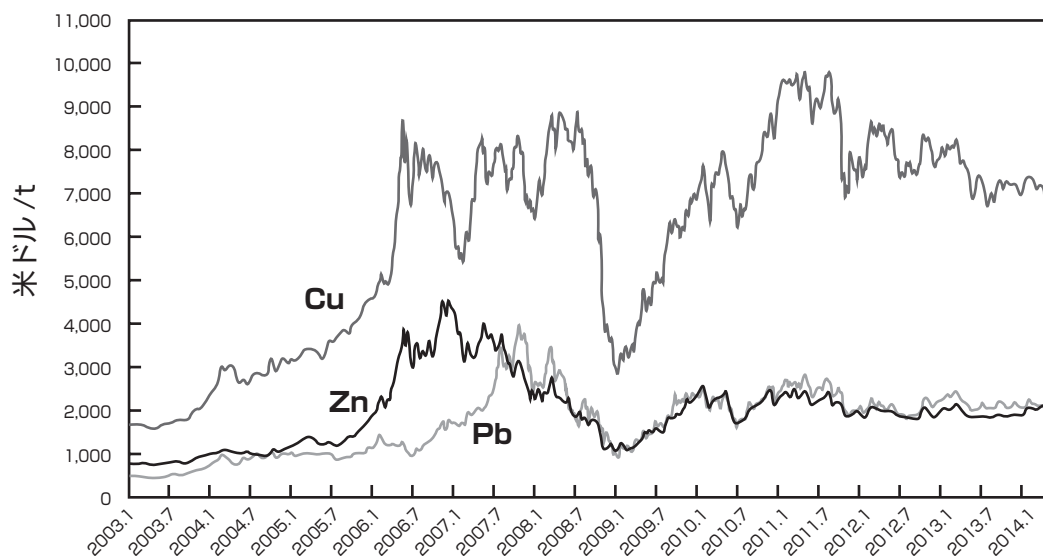


図3 ベースメタル（銅、鉛、亜鉛）価格の推移（ロンドン金属取引所）

スが崩れ、2010年後半から価格が急上昇した。2010年9月の尖閣諸島漁船衝突事件以後、対日レアアース輸出が事実上ストップしたため、日本の産業が深刻なレアアース供給不足に陥る「レアアース危機」が勃発した。2011年8月にレアアースは史上最高値を記録した(図4)。

3.2 レアアース資源開発のシナリオ

レアアース資源開発は、ベースメタルや貴金属資源と同様、鉱徴地(地表で鉱石の濃集が認められる露頭)の発見から始まる。鉱徴地は、専門家による地表調査で産状や広がりを明らかにし、それが鉱床(一定の規模で鉱石が濃集する場所)であることを確認する。次に来る概査では、熱水鉱床であれば、熱水変質帯の広がりや熱水の起源を、漂砂鉱床であれば重鉱物が濃集する層準の分布や厚さ等を把握することにより、鉱床のおおよその規模や埋蔵鉱量を評価する。レアアース資源の場合は、この段階で初期的な選鉱試験が行われることが多い。なぜならば、レアアースを含む鉱物が分離・抽出できなければ、鉱石中のレアアース含有量(品位)が高くても開発は難しいからである。ここまでの段階は、企業単独または公的地質調査機関が実施することが多い。

鉱床が有望と判断されると、精査段階に移り、ボーリング調査や物理探査が行われ埋蔵鉱量を確定する。さらに、密度の高いボーリング調査(数十~数千本)や試掘により可採鉱量を見積もる。ボーリング調査や物理探査は、多額の費用がかかるため、日本企業の権益が関係する案件では、まず(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が単独あるいは民間企業と共同で実施し、適切な段階で民間企業に全面的に引き継ぐのが通例である。開発の主体となる企業等が決まり、鉱山の具体的な開発計画を策定する段階になると、鉱山開発に伴う周囲の環境影響評価やインフラ整備等を行い、これらをクリヤしてようやく開山となる。レアアースを含むレアメタル資源の場合、他の非鉄

金属よりも開発リスクが大きいので、開山後もJOGMECや(株)国際協力銀行(JBIC)の支援を必要とする場合がある。

3.3 レアアース資源開発の要件

現在、レアアース資源の供給源を中国がほぼ独占しているため、新たな原料の供給源を確保するには中国外のレアアース鉱床を開発・再開発するしかない。そのための要件としては以下の項目が挙げられる。

品位: 中国のレアアース鉱石に価格的に対抗するために、軽レアアースに富む鉱石の場合、全レアアース量(酸化物換算)が4%以上、重レアアースに富む鉱石の場合でも1%以上。

レアアース含有鉱物: 炭酸塩(バストネサイト等)やリン酸塩(モナザイト、ゼノタイム等)等の易溶性鉱物が望ましい。難溶性鉱物(アルミニウムを含むリン酸塩、ニオブ鉱物、ジルコン等)は分解にコストがかかる。また、平均粒径が100 μm 以上はないと選鉱が難しい。

埋蔵鉱量: 全レアアース量で数万トン以上

採掘方法: 原則として露天採掘

放射性物質: モナザイトにしばしば高濃度なトリウムが含まれる。トリウム含有廃棄物の発生量が多い場合は、国際原子力機関(IAEA)の基準^[4]に従って保管または埋設処分する必要がある。明確な閾値は決められていないが、未処理の鉱石(原鉱)で1,000 ppm未満が望ましい。

社会的環境: 道路、鉄道等のインフラが整備され、治安維持および鉱業法が確立していること。

産総研がレアアース鉱床の探査を行う場合は、対象とする鉱徴地が上記の要件を満たすかどうかを各種調査・分析で確認することになる。そのために、事前に当該国の地質調査所等に情報提供を依頼し、調査戦略を十分に練っておくことが重要である。

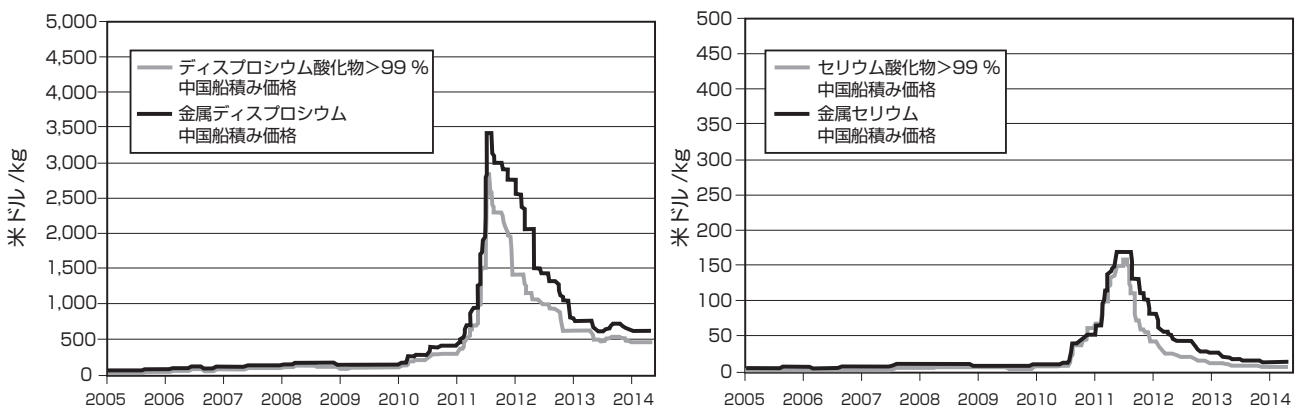


図4 ディスプロシウム(重レアアース) およびセリウム(軽レアアース) 価格の推移 (Metal Pages Web Site 資料より作図)

4 レアース資源研究への取り組み

本章では、国のレアメタル資源確保戦略に産総研が具体的に寄与した例として、前述のレアース危機への対応を説明する。

4.1 レアメタル・レアース資源研究拠点の設置

レアース危機を受けて、日本政府は、2010年度および2011年度補正予算にレアース資源確保対策のための予算を盛り込み、産総研にも資源エネルギー庁委託事業として大型の予算措置を行った（実際の予算執行は、2011年度および2012年度）。それに先立ち、2010年秋に資源エネルギー庁は産総研に対しレアメタル・レアース資源研究拠点の設置を要請した。しかし、産総研の鉱物資源研究体制は旧工業技術院時代から縮小の一途を辿っており、特に選鉱・製錬技術の開発を担当していた環境管理研究部門（旧資源環境技術総合研究所の一部）はリサイクル技術研究にすっかり衣替えをしていた。鉱床の成因研究や探査技術開発を担当している地圏資源環境研究部門でも、旧地質調査所の4課体制からわずか1研究グループ（1課相当）体制に縮小されており、研究拠点形成にはあまりにも弱体であった。そこで、レアース鉱床探査と初期的選鉱試験を地圏資源環境研究部門で、本格的選鉱と製錬技術開発を東北大学で対応することとし、上記の補正予算を活用して新たに拠点形成を開始することにした。なお、環境管理研究部門には、2014年に戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）が設置され、レアメタル等に関するリサイクル研究開発の中核となっている^[5]。

地圏資源環境研究部門では、まず研究拠点を整備するために、2011-2012年の2年間で鉱物・鉱石分析設備および選鉱試験設備の導入を行った^[6]。鉱物や岩石を分析する設備は、従来から所内に整備されていたが、金属鉱

石は通常の岩石と比べて特定の元素が極端に濃集しており、また特にレアース鉱石はトリウム等放射性元素の濃度が高い傾向がある。そのため、本格的なレアメタル・レアース資源研究を実施するには、コンタミネーションの回避や実験作業に伴う排水・粉塵処理のために、旧来の施設とは別に実験施設を構築する必要があった。導入された設備の中で特に注目すべき新鋭機器は、まずLA-ICPMS

（Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer）である^[7]。LA-ICPMSは、レーザー光を分析対象の固体に集束して照射し、蒸発した表面物質を高純度アルゴンガスと共にエアロゾルとしてICPMSに導入し、化学分析を行う機器である（図5）。試料の前処理がほとんど不要で、局所高精度分析が可能である。同機器によるレアース鉱石の分析では、従来の酸溶解法では不可避であった試料の溶け残りの問題がなく、1試料あたり2分という迅速分析が可能となった^[8]。地圏資源環境研究部門の同機器は、鉱石分析用として独自の改良や新機能が加えられており、これまでに十カ国以上の数百個以上に上る鉱石を分析し、レアメタル資源研究に大きく貢献した。次に注目される機器は、MLA（Mineral Liberation Analyzer）である（図6）。MLAは、通常の走査型電子顕微鏡と強力な画像解析ソフトを組み合わせた機器で、鉱石中や鉱物粉末の鉱物量比、粒径、コンポジット率等の統計的データを1試料数時間で計算・表示する機能を持つ。同機器も、これまでに数十のレアメタル鉱石試料を解析し、鉱石の評価や選鉱方法の策定に大きく貢献した。その他、高感度高分解能年代測定装置SHRIMP[®]（図7）や高電圧パルス選択性粉碎装置SELFRAG[®]等も導入し、成果を挙げつつある。前述のように、選鉱実験室は排水・粉塵処理設備を完備しており、特に排水は真空蒸留減容



図5 LA-ICPMS（レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計）、レーザー光源：サイバーレーザー社製、ICPMS：アジレント・テクノロジー社製、その他の部分はインハウスで組み立て。



図6 MLA (Mineral Liberation Analyzer)、FEI社製

装置を用いて処理することにより、重金属や放射性物質の懸濁水が室外に流出することを防止している。

4.2 海外地質調査機関との研究協力体制の構築

レアアース危機への対応において、海外地質調査機関との研究協力体制の構築は、研究推進環境の整備という点で必須である。その理由としては、主に以下の3つが挙げられる。

- 1) 資源国の信頼性の高い資源情報の収集：海外資源調査を実施する場合、必ず事前に当該国の公的地質調査機関から情報を得て、有望地域を絞り込む必要がある。
- 2) 海外調査時の安全性の確保：現地自然环境や治安状況に応じた安全な調査を実施するには、公的地質調査機関の協力が不可欠である。
- 3) 資源外交への貢献：資源国と研究協力を実施していることを対外的に示すことにより、日本が周到に資源確保対策を講じていることをアピールできる。これにより、他の資源国に対し、日本へのレアアース禁輸等極端な資源政策を抑制する効果が期待される。

国際研究協力の対象国は、有望レアアース鉱床のポテンシャルが高い国が前提となるが、経済産業省の政策、現地政府機関の要請、過去の協力実績、治安・政治状況等を総合的に検討して選択される。以下に、これまでの主な国際研究協力の経緯を示す。

米国：レアアース危機の勃発以降、日本政府では日米協力を軸にして問題の解決を図る動きが活発化した。2010年11月に米国ローレンスリバモア国立研究所にて日米レアアースラウンドテーブルが開催され、日米のレアアース関連研究者が一堂に会して意見交換を行った。産総研（省資源、リサイクル、資源探査各担当者）も、経済産業省、JOGMEC、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、主要大学の専門家と共にこの会議に参加した。2011年1月に

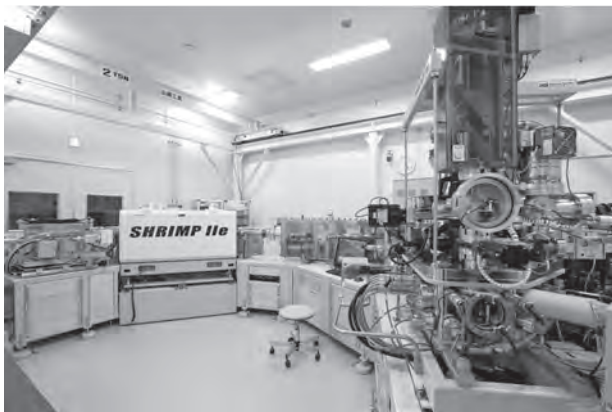


図7 高感度高分解能年代測定装置 SHRIMP[®] (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe)、Australian Scientific Instruments 社製

米国エネルギー省本部にて日米レアアース会議が開催された。この会議には、各省庁、JOGMECの担当者が参加し、産総研からは、資源探査分野の協力を先行させるという政策的判断から著者のみが参加し、その後の日米研究協力を討議した。この席上で、産総研と米国地質調査所 (USGS: United States Geological Survey) のレアメタル資源に関する研究協力が合意された。その後、非公式会合を経て、2011年12月にサンフランシスコにて産総研とUSGSとの研究協力覚え書きを正式に取り交わした。2011年8月にはアラスカ州南部、2012年11月にミズーリ州東部、2014年10月にはカリフォルニア州南部およびジョージア州中部のレアアース鉱徴地を現地調査し、2015年度も現地調査を計画中である。南アフリカ共和国（南ア）：南アは、白金族元素やクロム等のレアメタルを豊富に産する鉱業大国であり、レアアース危機以前の2007年に南アフリカ地球科学審議会 (CGS: Council for Geoscience)、JOGMEC、産総研の三者で研究協力覚え書きを取り交わした。それ以来、調査研究（後述）を活発に実施している。2013年に行われた日-南ア鉱業担当大臣会議での合意文書には、この研究協力の推進が明記された。2014年3月から産総研とCGSの二者による研究協力覚え書きに更新され、現在も継続している。

モンゴル国：旧工業技術院時代より、モンゴル国とは、国際産業技術協力 (ITIT) 事業やJICA事業等を通じた鉱物資源分野の長い研究協力の実績があり、産総研発足後も研究者レベルでの交流を継続してきた。レアアース危機を受けて、2010年10月に産総研、JOGMEC、モンゴル鉱物資源管理庁 (MRAM: Mineral Resources Authority of Mongolia) 三者間で研究協力覚え書きを正式に取り交わした。同年に南ゴビ地域、2011-2012年には、同国民間企業の協力も得て、モンゴル西部地域にてレアアース鉱徴地の現地調査を実施した。現在、モンゴル国では鉱業法の改正による既存鉱区の見直しが進んでいるため、同国のレアメタル資源政策が落ち着くまで、一時調査研究を見合わせている。

ブラジル連邦共和国：2009年11月にブラジル地質調査所 (リオデジャネイロ) で開かれた産総研、ブラジル地質調査所 (CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)、ブラジル鉱産局 (DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral) 合同セミナーにて、レアアース資源研究を含む複数の地球科学分野での研究協力が合意された。その後、2010年12月の日伯科学技術協力合同委員会や複数の非公式会合を経て、2012年12月に産総研とDNPMとの間で研究協力覚え書きが正式に取り交わされた。2013年6月にはブラジル議会上院公聴会にて、著者が日本のレアアース資源政策の講演を実施、同年ゴイアス州南

部、ミナスジェライス州中南部、2014年2月にはゴイアス州北部のレアース鉍徴地の現地調査を実施した。

その他の国々：レアメタル・レアース資源に関する研究協力覚え書きを取り交わした組織としては、ミャンマー地質調査所（DGSE）、韓国地質資源研究院（KIGAM）、タイ鉍物資源局（DMR）があり、定期的な人材交流等を実施している。また、研究協力覚え書きの取り交わしは行っていないが、フィンランド地質調査所（GTK）、トルコ地質調査所（MTA）、豪州地質調査所（GA）等とも研究交流を行っている。

4.3 レアース鉍床・鉍徴地の調査研究－南アフリカ共和国の例－

本節では、最も調査研究が進んでいる南アフリカ共和国の例について、これまでの経緯や見通しを述べる。

鉍徴地発見：南アフリカ共和国の首都プレトリアを含む北東部には、東西460 km、南北250 kmに及ぶ巨大なブッシュフェルト深成岩体が露出している。この岩体は、マグマが約20億年前に地下深くで冷え固まってできた岩石で構成され、同国の主要レアメタル資源である白金族元素、クロムもブッシュフェルト深成岩体に付随する鉍床から産する。同岩体分布域には多数の螢石（CaF₂）鉍床が分布しており、一部はフッ素の原料として盛んに採掘されている。螢石鉍床には、しばしば高濃度のレアースが伴われることが世界各地で知られており、同地域で稼行する螢石鉍山に関する2008年以前の予察的調査でもレアースの鉍徴が確認されていた。しかし、既存の稼行鉍山は外資系で白人経営のものが多く、南ア政府のBEE（Black Economic Empowerment）政策の元での調査研究は容易ではなかった。2009年9月に産総研－CGS共同で行われた現地調査で、ブッシュフェルト深成岩体中央部近くの螢石旧鉍近傍にレアースの鉍徴地を見いだした。本鉍徴地は未開発地区であるが、螢石鉍床の探鉍に伴いCGSの研究者によって地表部の変質帯が検出されていた。産総研での分析の結果、同鉍徴地は重レアースに富む有望鉍床である可能性が確認された。

探査鉍区の申請：2009-2010年当時はレアースが高騰を続けている最中であり、まず本レアース鉍床を他の探査企業からプロテクトする必要があった。そこで、CGSから南ア国営鉍業公社（AEMFC: African Exploration, Mining and Finance Corporation）に探査鉍区申請を依頼した。鉍床地区一帯は国有地であり、また土地の管理者はすべて先住民であったため、現地調査は障害なく進めることが可能であった。

探鉍ボーリングの実施：CGSによる放射能探査の結果から同鉍床の広がりやを絞り込み、2012年度に5本、2013年度に

3本の浅層探鉍ボーリングを実施した（図8）。その結果、地表から数十mのラテライト質風化帯はレアース品位が比較的高く、伏在する未風化の深成岩もペグマタイト質部は風化帯と同様な品位を持つことが明らかになった。平均レアース品位は、酸化物換算で1 %前後であるが、イットリウムと重レアースに富む特徴を持つ。また、レアース含有鉍物は比較的分解が容易なリン酸塩鉍物であり、トリウムも100 ppm未満と通常の岩石よりやや高い程度である。したがって、採掘が容易な風化帯から開発が可能であると判断された。

選鉍試験：本鉍床の開発には、地表部の風化帯に含まれるレアース含有鉍物を選鉍し、精鉍を作る技術を確認することが必須条件である。なぜならば、風化帯岩石をそのまま酸・アルカリ分解したのでは多量の薬品が必要となりコストが合わないからである。2013-2014年度は、現場から数十kgの試料を産総研に搬入し、ラボスケールの選鉍試験に軸足を移して作業を進めていた。2015年度は、早稲田大学、南ア鉍物処理研究所（MINTEK）の協力も仰ぎ、精鉍のレアース品位の向上を目指して選鉍試験を加速する予定である。

今後の見通し：2013年12月に、都内で行った公聴会で本レアース鉍床の調査結果の一部を開示したが、その時点で興味を示す日本企業はなかった。今後、選鉍試験で一定の成果を得ることができた段階で、これまでの成果全体を取りまとめ、再度、企業・JOGMEC等に情報を開示

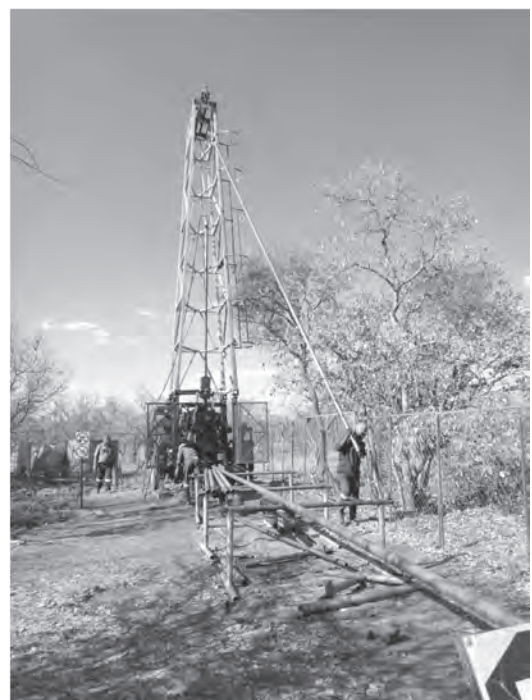


図8 南アフリカ共和国で実施した浅層探鉍ボーリング（2013年）

する予定である。また、判断材料を増やすために必要な調査研究をさらに追加する可能性も高い。いずれにしても、産総研およびCGSが自前の研究費で調査研究を継続するには限界があり、本鉱床の開発計画を前進させるには外部（JOGMEC、民間等）の資金が必要である。本鉱床から重レアアースを生産することができれば、中国外に新たな供給元が出現することになる。このことは、たとえ生産量が少量でも、中国というカントリーリスクを取らなくても重レアアースが入手できる、という安心感を市場にもたらし、価格の安定化に寄与すると期待される。

4.4 レアアース資源データベースの構築

政府や民間企業がレアアース資源確保のための戦略を立てるには、まず世界のレアアース資源の分布、規模、性質等を把握する必要がある。また、レアアース資源の埋蔵量が特定の国に偏在していることが明らかになれば、その国に対し、国際社会への責任として適正な価格で輸出するように促すこともできる。そのため、USGSは、Mineral Commodity Summaries等の各種鉱物資源情報を毎年Web Site上に公開している^[9]。レアアース資源の場合、2002年に報告されたOrris and Grauch^[10]による世界的データベースが基本となり、世界中で探査・開発が行われた経緯がある。しかし、それから12年が経ち、レアアース危機が勃発した現在、レアアース資源のデータベースを全面的に見直し、再度資源確保の戦略を立て直す時期が来ている。そこで、産総研ではUSGSと共同でレアアース資源データベースの整備を実施しており、2016年中には最初の成果が出版される見通しである。

また、レアアースのマテリアルフロー解析や需給予測の研究も同時に実施しており、成果を挙げている^{[11][12]}。この研究は、レアアースが輸入され、国内産業で製品化され、輸出または廃棄・リサイクルされるまでの流れを解析すること、および将来の価格・技術動向に基づく需給の変化を予測することにより、資源探査、省資源、リサイクルの戦略立案に資することを目的としたものである。

5 レアアース危機後の課題

5.1 レアアース価格の暴落

レアアースの価格は、2011年8月に最高値を記録して以降、2013年にはセリウムで30分の1、ディスプレイウムでも4分の1程度にまで暴落した（図4）。これは、中国が輸出規制によって溜まっていた在庫を放出したこと、レアアースを使用する日本企業が代替品への切り替えや、レアアース使用量の削減を積極的に進めたこと等に起因する。しかし、レアアース価格暴落の結果、世界中で進められていた100を下らないレアアース資源開発プログラムが、既

開発の米国マウンテンパス鉱山と豪州マウントウェルド鉱山を除き、ほぼすべて遅延・中断または廃止に追い込まれた。前述のように、鉱物資源開発には10～15年の時間が必要であり、レアアース危機が顕在化してから価格暴落までのわずか4年程度の時間では、新規の鉱山開発は困難であった。また、レアアース危機後もしばらく操業を継続してきた、米国マウンテンパス鉱山を経営するモリコープミネラルズ社が、2015年6月に民事再生法を申請し、経営破綻した。これらの経緯は、レアメタル資源開発のリスクがいかに高いかを鉱業関係者に思い知らせた。

5.2 本格研究としての産総研の役割

レアアース危機はとりあえず収束したが、レアアース供給源の多角化は進まず、レアアース危機以前と同じ中国の独占構造が現在も継続している。レアアースと同様に80%以上の供給源を中国が占めるレアメタルは、タングステンやアンチモン等他にも存在する（図9）。今後の国際情勢次第では、中国がいつそれら資源カードを切らないとも限らず、潜在的な危機性は低下していない。レアアース危機は決して一過性の出来事ではないのである。また、次のレアアース危機が生じてから対応を始めたのでは間に合わない。しかし、2章で詳述したように、レアメタル・レアアース資源開発は民間企業にとってリスクが大きく、事前の準備や投資には限界がある。現在の日本では、唯一産総研が、他機関（資源エネルギー庁、JOGMEC、海外の地質調査機関、大学等）と連携しつつ、レアメタル・レアアース資源に関する継続的・体系的な情報収集、調査研究、人材育成等を実施可能な研究機関である。将来必ず来るであろう第二、第三のレアアース危機に備えた、資源情勢に左右されない中・長期的視野に立った研究開発の実施こそが、本格研究として産総研が果たすべき役割である（図10）。2015年現在、主に中国の景気減速に起因する資源安により、鉱物資源供給に対する注目度・危機感は低下している。しかし、資源安は、鉱山において採算を取りやすい高品位部の選択的採掘につながり、結果として鉱山の寿命短縮、鉱量の枯渇を招く。近い将来に必ず来るであろう資源安の反動に備えて、産総研は確実に本格研究を遂行する責務を負っていると言える。

謝辞

この研究に携わっている地圏資源環境研究部門鉱物資源研究グループの皆様、渡辺 寧氏（秋田大学、元鉱物資源研究グループ長）に謝意を表します。また、この研究を終始ご指導いただいた資源エネルギー庁鉱物資源課の皆様および（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属資源開発本部の皆様にご心より御礼申し上げます。

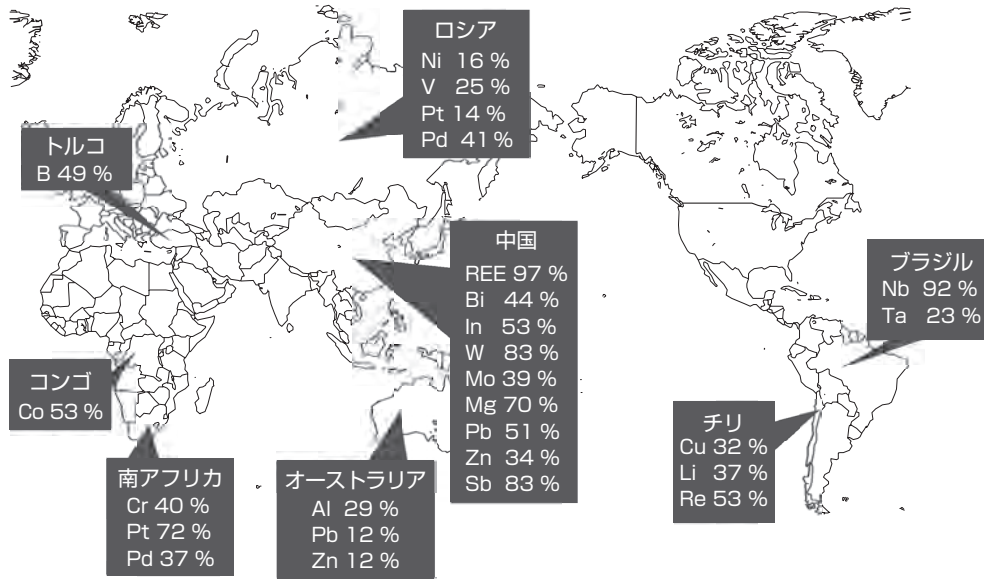


図9 各国レアメタル生産量の世界生産量に対する割合。偏在性の強いベースメタル等も含む。資源エネルギー年鑑^[13]に基づいて作図。

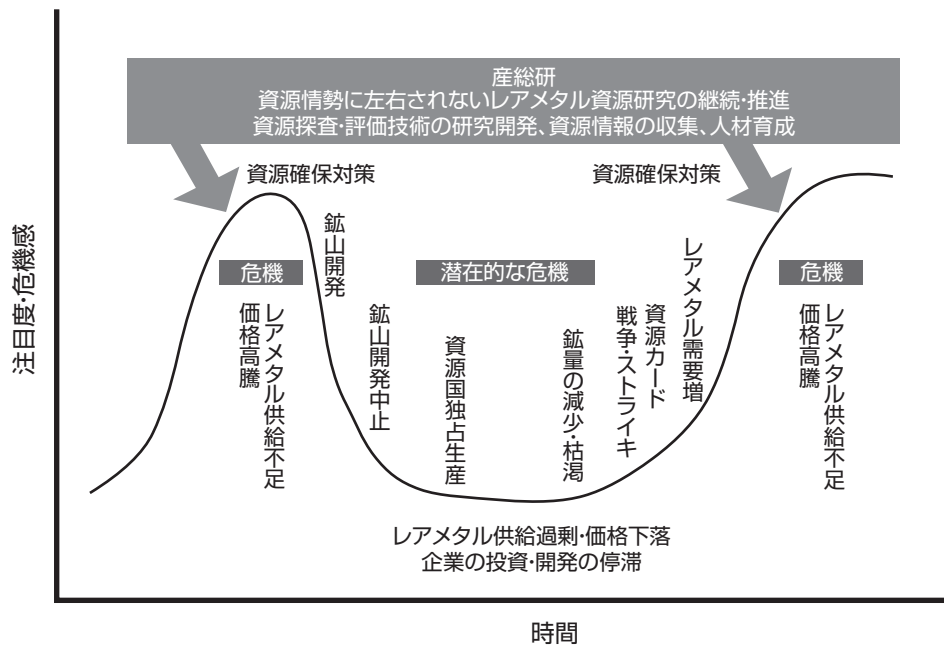


図10 レアメタル資源研究における本格研究の概念図

参考文献

[1] 経済産業省: レアアース対策, http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/rareearth/index.html, 閲覧日2015-01-05.

[2] 経済産業省: レアメタル確保戦略, (2009).

[3] 中村守: レアメタル, *産総研TODAY*, 8 (5), 10-11 (2008).

[4] International Atomic Energy Agency (IAEA): *Management of NORM Residues*, IAEA-TECDOC-1712, (2013).

[5] SUREコンソーシアム: <https://unit.aist.go.jp/emtech-ri/sure/cons.html>, 閲覧日2015-08-20.

[6] 高木哲一: レアメタル資源分析・選鉱試験施設の整備, *産総研TODAY*, 13 (5), 22 (2013).

[7] 昆慶明, 高木哲一: レーザー光を利用したレアアース鉱石の化学分析, *産総研TODAY*, 11 (1), 23 (2011).

[8] Y. Kon, H. Murakami, T. Takagi and Y. Watanabe: The development of whole rock analysis of major and trace elements in XRF glass beads by fsLA-ICPMS in GSJ geochemical reference samples, *Geochemical Journal*, 45 (5), 387-416 (2011).

[9] U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>, Accessed 2015-01-05.

[10] G. J. Orris and R. I. Grauch: Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-189, (2002).

[11] 森本慎一郎, 徐維那: 我が国のレアアース対策による需要削減量予測手法の提案, *エネルギー・資源*, 34 (6), 10-17 (2013).

- [12] Y. Seo and S. Morimoto: Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010-2030, *Resources Policy*, 39 (C), 15-20 (2014).
- [13] 資源エネルギー年鑑編集委員会編: 資源エネルギー年鑑 2014, 通産資料出版会, 783 (2014).

執筆者略歴

高木 哲一（たかぎ てついち）

1986年鳥根大学理学部地質学科卒。1992年岡山大学大学院自然科学研究科修士（理学）。科学技術特別研究員PDを経て1994年に工業技術院地質調査所に入所、非金属鉱物資源の研究に従事。2001-2006年産総研深部地質環境研究センターにて高レベル放射性廃棄物地質層処分研究に従事。2007年から地圏資源環境研究部門にてレアメタル資源の研究に従事。2009年より鉱物資源研究グループ長。レアメタル資源研究全般の調整、取りまとめを担当。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（矢野 雄策：産業技術総合研究所地質調査総合センター研究戦略部、小林 慶三：産業技術総合研究所材料・化学領域構造材料研究部門）

レアメタル資源の安定供給を国として推進するための地質情報整備について、著者を含む鉱物資源研究グループには経済産業省から大きな期待がかけられ、その期待に応えてきた。それは有望鉱床の確認であり、選鉱試験の拠点の整備であり、データベースの構築であった。そのために、多くの海外地質調査機関との研究協力をを行い、南アフリカなど遠隔かつさまざまな困難な要素を持つ地域にもチャレンジしてきた。著者は、鉱物資源研究グループを育成指導し、調査と交渉の最前線に立ってきた。調査、分析、情報整備を行い、その経験に基づいてレアメタル資源、その中で特にレアアース資源研究の体系を俯瞰する論文をシンセシオロジーに掲載することはたいへん価値が高い。資源開発へつなげるための産総研の研究開発、資源国との連携、関係機関との共同研究体制等が実例を交えて記載されている。特に最近話題となったレアアース危機に対応するための事例を取り上げ、今後の我が国産業界の持続的発展に向けたリスクの高い資源確保に対して貴重な提言を行っている。資源開発は高いリスクを有し、長い時間を要する一方で産業需要や国際情勢の中で危機感は一足ではない。危機が顕在化している時のみでなく、危機が潜在化している間も長期的に資源研究を継続することの意義を明確に示した論文である。

議論2 レアメタルとレアアース

コメント（矢野 雄策、小林 慶三）

一般の読者にはレアメタル、レアアースの区別が難しい。シンセシオロジーは鉱物資源の専門誌ではないので、レアメタル、レアアースそれぞれの定義や使い分けの考え方を示してほしい。

回答（高木 哲一）

レアアース、レアメタルの解説をこの論文の冒頭に付けました。日本では、レアメタルとして31種類の金属が経済産業省により指定され、他の金属資源とは区別して安定供給対策が講じられています。レアアース（希土類元素）はレアメタル中の1金属として扱われますが、実際にはランタノイド元素15種にスカンジウム（Sc）、イットリウム（Y）を加えた17種の金属の総称です。

議論3 レアメタル・レアアースへの産総研の取り組み全体の中の資源研究

質問・コメント（小林 慶三）

産総研としては、レアメタルやレアアースの対策として、資源開発だけではなく、リサイクルや代替材料開発、省使用化技術開発等にも総合的に取り組んでいると思います。また、希少資源に対する需給バランスを考えながら、産総研らしい取り組み（総合的・戦略的取り組み）を行っていると思います。本格研究という考えに立てば、各希少資源に対して産業シナリオを考えた最適な対策技術があると思いますが、資源開発が最も有効と考えられる希少資源はレアアースでしょうか。できれば、産総研の総合的な取り組みを紹介しつつ、レアアースは資源開発が最も有効な対策技術（緊急性や代替実現性等を考慮して）であることを記載いただく方がわかりやすいように思います。

回答（高木 哲一）

2.1節に産総研のレアメタル研究を紹介しました。レアメタルの研究は、材料科学と地球科学に大きく二分することができます。前者は、レアメタルを利用した高性能材料、レアメタルの使用量削減・代替材料、リサイクル等のための研究開発が目的です。一方、後者はレアメタル資源の探査、資源評価が目的です（選鉱・製錬技術の開発は、一部両者にまたがっています）。産総研ではこれらレアメタル関連研究を総合的に実施していることから、2006年から所内にレアメタル・タスクフォースを設置し、材料科学と地球科学を車の両輪として研究の促進を図ってきました。

レアアースは、資源開発が最も有効な対策である元素の一つです。その理由は、消費量の少なさにあります。例えば、高性能磁石の耐熱性向上に必須なディスプロシウム（レアアースの1種）は、国内の年間消費量がわずか数百トンです。しかし、レアアース危機の際には、ディスプロシウムはほぼ全て中国南部で生産されていたため、価格が高騰し入手困難な元素でした。もし、ディスプロシウムを産する鉱山が中国外に開発されていれば、たとえ消費量の一部しか生産できなくても、市場原理が働くことにより価格を抑制できたはずで、また、鉱山設備が小規模で済むため、生産が早く開始できます。同じレアメタルでも、消費量が比較的大きい元素（ニッケルやタングステン等）は、資源開発の効果が短期的には出にくく、代替材料やリサイクル技術の開発を総合的に推進する必要があります。

議論4 レアメタル資源研究における産総研の役割と本格研究

質問・コメント（小林 慶三）

資源開発における産総研の立ち位置、JOGMECとの関係、資源国（地質調査機関）との関係等を記載いただいておりますが、資源国の資源開発における関係機関のそれぞれの役割が少しわかりにくいように思います。資源開発を行う国ごとに対応が違うとは思いますが、それぞれのプレイヤーの役割を少し紹介いただくと本格研究としてより理解できるものと思います。

回答（高木 哲一）

各プレイヤーの役割については3.2節に記述しました。鉱徴地の発見、鉱床の確認、概査までの段階は企業単独または公的地質調査機関（産総研）が実施することが多いと考えられます。精査段階、すなわちボーリング調査や物理探査になるとJOGMECが単独あるいは民間企業と共同で実施し、適切な段階で民間企業へ全面的に引き継ぐのが通例です。その後開発の主体となる企業等によって、鉱山開発計画の策定、環境影響評価、インフラ整備を経た上で開山に至ります。開発リスクの大きいレアメタル資源の場合は、開山後もJOGMECやJBICの支援を必要とする場合があります。

質問・コメント（矢野 雄策）

レアメタル資源研究における本格研究とはどういうものか、産総研は死の谷を越えることにどのように貢献しているのか、はこの論文の核になる部分ですので、しっかりと論説をいただきたい。

回答（高木 哲一）

レアメタル資源開発（鉱山開発）という観点から見ると、現実には産総研の役割は限定的です。経済産業省傘下にはJOGMECという大きな組織があり、各鉱山会社も研究開発体制を持っています。したがって、レアメタル資源開発における「死の谷」を産総研が主体となって越えるというシナリオを描くことは、組織の過大評価になってしまいます。そこでこの論文では、レアメタル需給状況の波を、産総研の一貫した研究開発体制で越えていく概念を示しました。現在の日本では、唯一産総研が、レアメタル・レアアース資源に関する継続的・体系的な情報収集、調査研究、人材育成等が実施可能な研究機関です。資源情勢に左右されない中・長期的視野に立った研究開発の実施こそが、本格研究として産総研が果たすべき役割であると考えます。（図10）。近い将来に必ず来るであろう資源安の反動に備えて、

産総研は確実に本格研究を遂行する責務を負っていると考えています。

産総研と資源国の研究機関との連携も、本格研究を遂行する上での重要な柱です。レアメタル資源は、国際市場が十分に形成されていないものが多く、しばしば投機の対象にもなることから、公開情報では資源量や品位が誇張されている場合が少なくありません。正確な資源情報を得るには、資源国の公的地質調査機関（地質調査所）を通じた情報収集および共同調査が必要です。産総研は、国際地質調査所会議（ICOGS）の一員であり、主要国地質調査所との協力関係を長年にわたって構築してきました。レアアース危機の際、南ア、モンゴル、米国等で迅速に資源評価を実施できたのも、この協力関係によるものです。今後も、資源国地質調査所との連携を一層推進していく所存です。