

ハイテク産業に必要なレアメタル資源の地質的背景

石 原 舜 三*

Geologic Background of Rare Metal Resources Required by High-technology Industries

Shunso ISHIHARA *

Abstract

Worldwide, HREEs are not abundant, but LREEs are. HREEs are limited to certain weathered crust deposits in China where the original granites are rich in HREEs and surface weathering is intense. Because of environmental limitations on mining, it is necessary to discover the primary sources of REEs in alkaline igneous rock provinces. Indium can be recycled easily, and primary sources can be found in Sn-Zn-sulfides deposits of both volcanic and subvolcanic settings. Tungsten and bismuth are also limited mineral resources, but can be found in carbonate rocks with fractionated ilmenite-series granite intrusions. Molybdenum can be supplied sufficiently from porphyry-type deposits.

Key words : REE, Thor Lake, indium, Dachang, tungsten, molybdenum, bismuth

キーワード : 希土類元素, トアレイク, インジウム, ダーチャン, タングステン, モリブデン, ビスマス

I. はじめに

近年の中国, インドに代表される巨大人口保有国の経済的発展に伴う工業製品の需要の増大は投機資金の流入を含めて天然資源の価格高騰を招き, 改めて資源, 特に鉱物・燃料資源の有限性を如実に示すとともに, これまでの「少々高くても原料は買えばよい」とするわが国の昨今の資源政策に修正が必要となってきた。鉄鉱石の65% -up 決着は自主開発政策を採らない日本の弱点が浮き彫りにされた最も良い例である。筆者は『限りある資源』(1978 年刊, サイエンス社)の翻訳出版

以来この問題に大きな関心を持っており, 産出が希なレアメタルの産状や地質特性を的確に把握し, 高品位鉱石から低品位鉱石, さらに新資源に至る流れを的確に把握することが鉱床地質家の役目であろうかと考えている。

レアメタルとは理学的センスで言えば大陸地殻(=花崗岩)中の存在度が0.1-2 ppmのもので(モリブデン(Mo), タングステン(W), スズ(Sn), タンタル(Ta), セレン(Se), ヒ素(As), ビスマス(Bi), セシウム(Cs), テルル(Te)), 産業界に活用されるものであろう。しかしスズはその価格が経済新聞でベースメタルと同じ欄に扱わ

* 産業技術総合研究所

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

本稿は2008年3月19日に行われた地学クラブ講演会の講演報告である。

れているように、レアメタルには含まれない。希土類元素は、軽希土類は多いが（ランタン（La）30 ppm, セリウム（Ce）60 ppm）、レアメタルに含められている。磁石材料として話題のジスプロシウム（Dy）の存在度は少なく（3 ppm）、ネオジム（Nd）は多い（28 ppm）。金（Au 0.004 ppm）は遥かに希少であるが、レアメタルとしては扱われない。備蓄品目も一つの目安であるが、クラーク数が大きいマンガンも含まれるなど、独特の背景に由来して用いられている。

世界的に見て日本が大きく消費しているレアメタルは、磁性材料に不可欠の希土類、コバルト、排ガス触媒用のプラチナ、液晶に不可欠のインジウム、ステンレス用のニッケルなどで世界の消費量の1～2位を占めている（渡辺, 2008）。これらレアメタル資源の地質的背景と探査・資源政策上の問題点を、レアアースとインジウムを中心に指摘した。

II. レアアース、特に重希土類

希土類元素はLa～Euに至る軽希土類とGd～Luの重希土類からなり、現時点での残存鉱量の寿命は715年と大量である。その理由はバヤンオボ、マウンティンパス、マウントウェルドなどのカーボナタイト型鉱床が大規模かつ高品位であるからであるが、これらは軽希土類に富んでいるにすぎない。

1) 風化殻鉱床

高温磁石に必要なジスプロシウムは華南の重希土類に富む一部の花崗岩風化殻から生産されている（石原・村上, 2006）。この鉱石は低品位（～0.2% REE）であるが、希土類は風化土壌のハロイサイトに吸着されているためにその抽出が容易で、かつトリウムなどの有害元素が少ないなど採掘上の利点があり、これまで広く用いられた。しかし重希土類に富むものは華南の定南（Dingnan）地域の竜南の白雲母花崗岩（足洞花崗岩）の風化殻に限られていると言って良いくらいに少ない。またこの種の鉱床は国際的に情報が公開されていないために、その産状や重希土類に富む原因が十分にはわかっておらず、中国以外の国でも発見し成

因を研究する必要がある。

重要なポイントとしては、重希土類に富む分化した花崗岩と風化殻の厚い所を発見することである。また表土を採掘し、酸抽出するので、環境への配慮が重要である。中国以外では探査・採掘されていないが、他にもあるはずである。

2) 初生鉱床

初生鉱床では、真のアルカリ岩よりも固結末期で石英を含み、フッ素に富む亜アルカリ岩系に重希土類が多く含まれている。カナダのトアレイク（石原・渡辺, 2007）、中国のパルジョ鉱床（石原・村上, 2007a）などである。これらの鉱床の探査と研究とは現在進行中である。トアレイクでは原生代（2.1 Ga）のGrace Lake花崗岩中にトアレイク閃長岩類が貫入し、これを母岩としてとしてレイクゾーン、Rゾーン、Sゾーン、Beに富むTゾーン鉱体など、多くの小鉱体がある。大規模で重希土類に富むレイクゾーン鉱体の研究が今後の鍵を握っている。

この重要なポイントは、アルカリ岩の中から固結末期に石英過飽和の岩系を探し、熱水変質岩の希土類分析を行い重希土類に富むものを発見することであろう。

III. インジウム

日本是世界最大のインジウム消費国である。その理由はメタルでありながら透明性を保ち、かつ電極機能を有する特性がテレビその他に広く利用され始めた点にあり、かつ日本の産業界に電子工業が占める割合は大きいからである。最近のインジウム消費の増加は著しく、細井・上木（2007）によれば、その消費量は1996年が158トン、2006年が888トン、実に5.6倍の急成長である。2006年には透明電極89.0%、ボンディング6.8%、実に全体の95.8%が透明電極関連の消費であって、欧米・中国などの消費形態と著しく異なっている。

一方、世界の一次地金生産量は1996年220トン、2006年は606トンであり、2006年の場合にはわが国の消費量すら賅いきれていない。この不足分はリサイクルインジウムで補われており、

わが国において電気部品のリサイクル回収源から回収される二次供給量は 2006 年に 667 トンに達し、初めて二次供給量が一次供給量を上回った。今後はリサイクル技術の向上とともに、二次供給量がますます増加するものと思われる。

インジウムは希少鉱物資源であり過去に注目されなかったために、その地質学的な濃集機構は十分にわかっているとは言えない。その資源量は黒鉱型の塊状硫化物鉱床（石原・村上, 2007b）と亜火山性の鉱脈鉱床で多く発見されている。インジウムは主に閃亜鉛鉱で鉄（Fe）、亜鉛（Zn）を置換して含まれるから亜鉛に富む硫化物鉱床が必要不可欠であり、それらは経験的にスズ酸化物・硫化物を伴っている。塊状硫化物鉱床は時代的には始生代から現世の海底熱水鉱床に至るまで発見されているが、世界的に大きい鉱床はカナダ東部、ポルトガル・スペインのイベリア黄鉄鉱帯、ウラル褶曲帯などの古生代初期の造山帯に限られ、還元的な流紋岩活動に関係している。

インジウムは、浅所に濃集する傾向があり、スカルン型鉱床では少量産出するに過ぎない。多くはやや浅成の鉱脈型鉱床で、日本（資源量 9,000 トン）とボリビア（同 > 7,000 トン）、さらには、ブリモアリエ地方（石原・ゴネフチュク, 2007）では、主として火山活動に関係するゼノサーマル型の錫多金属鉱脈として産出し、錫を含む結晶分化が著しい珪長質マグマが火山底などの環境に貫入することが必要である（Ishihara *et al.*, 2006; 石原・村上, 2008）。中国にも北東部（石原ほか, 2006; Ishihara *et al.*, 2008）と最南部に重要鉱床が分布し、特に後者の大鉱床が鉱体数も多く大規模である。中国の国土資源省は最南部に 8,400 トン、Zhang *et al.* (1998) は 12,000 トンの資源量を推定している。ここでは最大の大鉱床（6,000 トン）を含め多数の鉱床が石灰質な堆積岩類に胚胎している。一部に珪長質貫入岩類は存在するものの鉱石硫黄の硫黄同位体比は、母岩である不純な石灰岩類の影響を著しく受けており、堆積岩類中の硫黄とインジウムが貫入岩頂部でリサイクルした可能性が考えられる。

ここでの問題点は、亜鉛資源探査では、ベース

メタルの他にインジウムとスズの分析が不可欠であることであり、閃亜鉛鉱の黒色度も記載する。鉱床のどの部分、どのステージの閃亜鉛鉱にインジウムが濃集するかは不明で、今後の研究課題であろう。

IV. タングステンとモリブデン

この両元素は、かつて“戦争元素”と言われ、大砲などの特殊鋼として用いられるために、戦争とともに価格が急騰したものであるが、昨今の価格高騰はタングステンが超硬度工具の需要が増し、またモリブデンは電子機器に新需要が発生したためである。タングstenは結晶分化が進んだ還元的マグマに伴われ、比較的深所に生成されるのでスカルン鉱床中に濃集することが多い（韓国の上東、中国の柿竹園（Shizhuyuan）、ベトナムの Nui Phao、カナダの Cantung、オーストラリアの Kings Island など）。副産物としてビスマスが期待できる。

一方、モリブデンは結晶分化が進んだ酸化的マグマに伴われ、鉱脈型よりもポーフィリー型として大規模で、クライマックス型として知られる。北アメリカ大陸には 1 km 以上の深所で何カ所も発見されているが、開発に至っていない。輝水鉛鉱はポーフィリー銅鉱床の副産物としても産出する。近年の銅鉱石の増産と価格差に起因して副産物の重要性が増し、特にチリにおける生産量が際立っている（中山, 2007）。輝水鉛鉱にはモリブデンを置換してレニウム（Re）が含まれており、その量はポーフィリー銅鉱床産の輝水鉛鉱に多い傾向がある。中国のモリブデン鉱床ではポーフィリー型とスカルン型の双方が重要である。

V. ビスマス

ビスマスは年間 1,300 トン程度消費される金属鉱物資源であるが、金属材料への添加材から医薬用まで幅広い分野で近代産業界に不可欠のメタルである。その価格は 2004 年から上昇基調に転じ、かつての \$3-4 / ポンドであったものが、昨秋には \$18 / ポンドに達している（石原, 2008）。需要増の原因は主として環境への配慮にあるが、資源

が特定の国に偏在することもその一因であろう。わが国では今世紀の初めから塗料に使われる鉛の代替としてビスマスを用い先進性を示している。また、北米・欧州では工業用ハンダに鉛でなくビスマスを用いる協定がなされ、ビスマスの需要増をもたらした。

わが国で現在ビスマスの使用量が最も多いものは、可鍛鉄、アルミ・銅合金などに混合される冶金添加剤である。金属材料への添加は、快削性付与のため（銅合金・アルミ合金など）、低融点化のため（鉛フリーハンダ・自動消火器・ヒューズ用）などである。次いで自動車・家庭用のバリウムフェライト磁石・触媒用などである。特殊なものとして医薬品化合物（整腸剤）にも用いられる。近い将来にブレークの可能性がある用途として、高温超電導線として期待されているビスマス系酸化物高温超電導体の主成分、Bi-Te 熱電変換材料などが考えられている。また、現在検討中の用途として、誘電材料、鉛重金属冷却高速炉などがある。

ビスマスは輝蒼鉛鉱・自然蒼鉛としてタングステン鉱床に含まれるのでタングステン鉱床の探索と同様に考えることができる。中国の柿竹園鉱床の総金属量は WO_3 75 万トン・スズ 49 万トンに対してビスマス 30 万トンであり、ベトナムの Nui Phao 鉱床は WO_3 16 万トンに対してビスマス 7.9 万トンを含む（石原ほか, 2008）。なおここでは螢石が多産する（ CaF_2 699 万トン）。日本の神岡鉱床では精錬過程でビスマスが 1913-1953 年間に 72 トン回収されたが、これは空地スカルンに含まれる AgBiS_2 (matildite) に由来するもので、鉱液中のビスマス、銀濃度がともに高かった特殊なケースと考えられる。

文 献

- 細井 明・上木隆司 (2007): ハイテク産業を支える亜鉛精錬副産物：インジウム. (社) 日本メタル経済研究所, 180 p.
- 石原舜三 (2008): 日本のビスマス資源と世界の重要な供給源について. 資源地質, **58**, 131-138.
- 石原舜三・ゴネフチュク, G.I. (2007): ロシア, プリモリーエ地域におけるインジウム資源量の予測. 資源地質, **57**, 25-28.
- 石原舜三・村上浩康 (2006): レアアース資源を供給する鉱床タイプ. 地質ニュース, **624**, 10-29.
- 石原舜三・村上浩康 (2007a): 中国, 大興安嶺, パルジョ花崗岩に見る重希土類元素の濃集. 資源地質, **57**, 137-142.
- 石原舜三・村上浩康 (2007b): ブルンスウィク 12 号鉱床の現状. 資源地質, **57**, 51-58.
- 石原舜三・村上浩康 (2008): ボリビアの主要な亜鉛・錫鉱床とインジウム資源量の評価. 資源地質, **58**, 1-10.
- 石原舜三・渡辺 寧 (2007): 熱水性レアアース鉱床：カナダ, トアレイクの例. 資源地質, **57**, 65-70.
- 石原舜三・石山大三・秦 克章 (2006): 大興安嶺山脈南部のスズ多金属鉱床におけるインジウム資源の評価. 資源地質, **56**, 212-215.
- Ishihara, S., Hoshino, K., Murakami, H. and Endo, Y. (2006): Resource evaluation and some genetic aspects of indium in the Japanese ore deposits. *Resource Geology*, **56**, 347-364.
- 石原舜三・浦辺徹郎・渡辺 寧 (2008): ベトナムの非鉄金属鉱物資源の概要. 資源地質, **58**, 27-36.
- Ishihara, S., Qin, K.Z. and Wang, Y. (2008): Resource evaluation of indium in the Dajing tin-polymetallic deposits, Inner Mongolia, China. *Resource Geology*, **58**, 72-79.
- 中山 健 (2007): モリブデン鉱業界の現状：チリ鉱業における「モリブデン」インパクトについて. 地質ニュース, **633**, 51-61.
- 渡辺 寧 (2008): レアメタル資源の確保に向けて. 「重希土類元素およびインジウムの濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究」平成 19 年度基盤研究 (A): 研究成果報告書, 12-16.
- Zhang, Q., Zhan, X., Pan, J. and Shao, S. (1998): Geochemical enrichment and mineralization of indium. *Chinese Journal of Geochemistry*, **17**, 221-225.