

■ 論 説 ■

希土類資源について

Future of Rare Earth Mineral Resources in the World

藤 田 勇 雄*

Isao Fujita



表1 希土類元素含有鉱物の一例

Cerianite	$(\text{Ce,Th})\text{O}_2 \cdots \text{Nb,La,Y}$ 等を含有
Fluocerite	$(\text{Ce,La,Y})\text{F}_3$
Bastnaesite	$(\text{Ce,La})(\text{CO}_3)\text{F}$
Parisite	$(\text{Ce,La})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$
Allanite	$(\text{Ca,Ce,Th})_2(\text{Al,Fe,Mg})_3\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot (\text{OH})$ ……Yを含有
Gadlinite	$\text{Be}_2\text{FeY}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Thorite	ThSiO_4
Thortveitite	$(\text{Sc}_2,\text{Y})_2\text{Si}_2\text{O}_7$
Zircon	$\text{ZrSiO}_4 \cdots \text{Ye,Y,U,Th,Pb,Hf,P}$ 等を含む
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F} \cdots$ 希土類元素を含むものあり
Brockite	$(\text{Ca,Th,Ce})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdots \text{Ca,Th}$ の一部 が希土類元素で置換される。
Monazite	$(\text{Ce,La,Th,Y})\text{PO}_4 \cdots$ 通常4~9%の ThO_2 を含む
Xenotime	$\text{YPO}_4 \cdots$ YをU,Thがしばしば置換する。
Brannerite	$(\text{U,Ca,Fe,Th,Y})_3\text{Ti}_5\text{O}_{16}$
Euxenite	$(\text{Y,Ca,Ce,U,Th})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6 \cdots$ Nb>Ta
Fergusonite	$(\text{Y,Er,U,Th})(\text{Nb,Ta,Ti})\text{O}_4$

1 緒 言

希土類元素は1964年米国において、カラーブラウン管の赤色蛍光体として採用され、以後この分野でYttrium, Europiumの地位が安定するとともに希土類は注目を集め、いまや材料関係者にとって一般的なものになりつつある。今後は多方面での利用が開発され、ますます脚光を浴びるものと予想されることから希土類鉱物資源の将来性についてまとめた。なお紙面の関係で各希土類元素、酸化物の諸性質や用途、価格動向等には言及できないので、他の文献を参照されたい。

2 希土類元素および希土類鉱物

希土類元素は周期律表第3族aに属する57番Lanthanum (La)から71番Lutetium (Lu)に至る15元素の呼称である。一般的には化学的性質が類似しているので39番Yttrium (Y), 21番Scandium (Sc)を加えて総称する。LaからGadolinium (Gd)までを軽希土類(セリウム族), Terbium (Tb)からLuとYを加えて重希土類(イットリウム族)に分類する。またEuropium (Eu)からDysprosium (Dy)までをテルビウム族とも分類する。

希土類はその呼称と相違して希少な元素ではなく、地殻中には一般に使用している金属元素と同程度の存在量を示すものも多い。したがって希土類を含有する鉱物も多く100種類以上の存在が知られていて、その代表的な鉱物を表1に示した。

3 希土類鉱石と資源

希土類鉱物の種類は多いが、希土類原料としてはMonazite, Bastnaesite, Xenotimeが代表的鉱石

である。Y鉱石としてはXenotimeの他Gadlinite, Fergusoniteが、Sc鉱石としてはThortveititeが主要鉱石となる。その他タングステン鉱石(ソ連, チェコ), ウラン鉱石(カナダ), 燐鉱石(米国, ソ連)から副産物としてScが回収されている。また粘土, 錫石, 堆積型鉄鉱石, ボーキサイト, 含ニッケルラテライト等には20~100 g/t, 石炭の灰分には20~390 g/t, アルミ製錬赤泥にも24 g/tのScが含まれている。したがってこれらからの回収も今後研究されなければならない。

3.1 希土類資源の埋蔵量

希土類資源の埋蔵量を表2に示す。

希土類資源の埋蔵量は中国を除けば北米525万t, 印度100万t, ソ連50万t, 豪州40万t, ブラジル

* 神鋼商事(株)(株神戸製鋼所出向社員)鉄鋼原料本部
参与・資源調査担当部長

表2 希土類鉱物資源の埋蔵量 (1978年) (REO)

国 別	レア・アース資源埋蔵量 (1,000 st)			イットリウム資源埋蔵量 (st)			スカンジウム資源埋蔵量 (t)			レアアース鉱石産出能力 (st)		
	埋蔵量	他の 資源*	合 計	埋蔵量	他 資 源*	合 計	埋蔵量	他の 資源*	合計	1978年	1979年	1985年
米 国	5,000	26,000	31,000	3,500	41,500	45,000	228	124	352	31,500	31,500	46,500
カ ナ ダ	250	1,100	1,350	2,400	25,600	28,000	163	107	270			
北 米 小 計	5,250	27,100	32,350	5,900	67,100	73,000	391	231	622	2,300	2,300	2,500
ブ ラ ジ ル	350	180	530	2,500	8,500	11,000						
南 米 小 計	350	180	530	2,500	8,500	11,000	—	13	13			
ソ 連	500	9,500	10,000	1,600	13,400	15,000				3,000	3,000	3,000
フィンランド, ノル ウェー, スウェーデン	60	120	180	200	800	1,000				500	500	500
ヨーロッパ小計	560	9,620	10,180	1,800	14,200	16,000	48	216	264			
マラガシー	20	40	60									
南ア共和国	5	15	20									
エジプト	10	100	110									
マラウイ	15	50	65									
その他	20	35	55									
アフリカ小計	70	240	310				235	71	306	1,100	1,100	1,600
オーストラリア	400	250	650	6,000	20,000	26,000				10,500	15,500	20,500
オセアニア小計	400	250	650	6,000	20,000	26,000	96	56	152			
中 国	(推定) 60,000		(推定) 60,000									
マレーシア	30	50	80	600	1,900	2,500				1,500	1,500	1,500
インド	1,000	2,000	3,000	20,000	40,000	60,000				3,500	3,500	5,000
韓国	50	100	150	1,000	3,000	4,000						
スリランカ	10	10	20	200	300	500						
その他	10	20	30	200	800	1,000				1,000	1,000	1,500
アジア小計	61,100	2,180	63,280	22,000	46,000	68,000	—	30	30			
世界合計	67,730	39,570	107,300	38,200	155,800	194,000	770	617	1,387	54,900	59,900	82,600

*レアアース鉱物ではなく燐灰石、ウラン鉱石からの副産物によるもの。

(資料：文献 5, 1)

REO: Rare Earth Oxides

35万tの順で全世界合計770万t程度である。しかし燐鉱石やウラン鉱石からの副産物としての資源がかなりあり全体で4,700万t位と推定されている。最近では中国の資源も段々と明らかになり包頭にLa, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Yの存在が確認され、Bastnaesite - Monaziteで約6,000万tが推定される。

3.2 希土類鉱床

世界の希土類鉱床の代表例を表3に示す。以下主要鉱床に関して成因別に略述する。

(1) 火成岩

火成岩の希土類含有量は、大略、塩基性岩→中性岩→酸性岩の順に増加する。火成岩中の希土類含有量は燐灰石、Sphane, Zircon, 鉄苦土鉱物の存在に依存する。

超塩基性岩ではソ連のPyroxenite中にPerovs-

kiteが含まれている例がある。

酸性岩では花崗岩類に希土類含有量が多く、岩漿分化作用の初期の産物として含希土類鉱物が生成しているが採掘価値はない。

アルカリ岩では米国のRocky BoyのVolcanic NeckのPorphyritic Cancrinite, Syeniteに含希土類鉱物の存在が知られている。またアルカリ岩体はカーボナタイトと複合岩体をなし、カーボナタイト中に希土類鉱物、ニオブ・タンタル鉱物を含む鉱床を形成することがある。代表例はMountain Pass 鉱床であるが熱水鉱床の項で述べる。

ベグマタイト鉱床にはマダガスカルやカナダ、米国、ブラジル等に含希土類鉱物を含有する例がある。これら初生鉱床が採掘されることはなく、通常風化残留物が小規模に採掘されるのみである。

(2) 岩漿分化鈳床

スウェーデンの Lappland 地方に多い含磷灰石磁鉄鈳中の磷灰石には Monazite が含まれている。磷灰石は選鈳によって鉄鈳石から分離され、その量も多いことから将来の価格動向によっては希土類資源となりうる。

(3) 高熱交代鈳床

代表的鈳床として中国の白雲額博鈳床がある。鈳床南側の花崗岩体に起因する鈳化溶液により前震旦紀のドロマイト質石灰岩中に生成した含希土類鉄鈳床である。主要鈳体は3鈳体あり、平均30% Feを示し螢石と希土類鈳物を含有するのが特徴である。鉄鈳石の埋蔵量は約8億tといわれ、主に Bastnaesite を含み希土類品位5~6%に達する。Bastnaesite + Monazite 量は約6,000万tの超世界的規模といわれている。現在、鉄精鈳を分離・濃縮した後、6,000 t/dの含希土類尾鈳が発生し、その10%程度が希土類原鈳として処理され、60% REO精鈳をえている。さらに硫酸法により塩化希土を製造するとともに一部を溶媒抽出により単体化合物に分離している。したがって発生尾鈳の90%は未処理のまま池水中に堆積しており、近い将来、選鈳法の改善により一挙に世界市場への進出も可能となる。

(4) 熱水鈳床

代表的鈳床として現在世界最大の希土類を生産している米国の Mountain Pass 鈳床がある。この鈳床はカーボナタイトの岩漿分化作用に際し直接 Bastnaesite が生成したとする説もあるがここでは熱水鈳床説を採用した。Las Vegas 南西 60 mile の Sierra Nevada 山脈中にある鈳床は Bastnaesite-Carbonates Vein でカンブリア紀の変成岩類を貫く Shonkinite-Syenite 岩株中に約200本の鍾が認められる。鈳石の平均希土類品位は7~8%で、鈳物構成は方解石40%、重晶石25%、Bastnaesite 12%、Strontianite 10%、石英8%から成り少量の磷灰石、方鉛鈳、赤鉄鈳、Monazite を随伴する。埋蔵量は1978年現在、確定 REO 36.5万t、推定 REO 300万t以上であると公表されている。

(5) 放射性鈳床

トリウム鈳床やウラン鈳床に伴って希土類鈳物を産出するものがあり副産物として回収されている。

米国の Lemhi Pass (Idaho) には先カンブリア紀の珪岩や千枚岩中の破砕帯に沿って発達する鈳脈型トリウム鈳床がある。Cago No.12 鈳脈では ThO₂

+REO 13.5%、REO 5.97%の品位で、希土類鈳物として Thorite、褐簾石 (Allanite)、Monazite、Xenotime、Euxenite、Brockite が知られている。

カナダの Elliot Lake には始生代岩石の表面の凹部を埋める最下部の原生代礫岩と珪岩中にウラン鈳床が胚胎する。主要ウラン鈳物は Brannerite と Uraninite である。Uraninite は Y を多く含むとともに Monazite を随伴している。鈳石の希土類品位は REO 0.057%、ThO₂ 0.28% である。ウラン抽出時の副産物として Y を生産していたが、現在は生産を中止している。

豪州の Mary Kathleen 鈳床は接触交代鈳床に属するウラン鈳床であるが、褐簾石、含希土類緑簾石等を含んでいる。平均品位 REO 5%を示し、1978年50tの希土類精鈳を得たのち生産を中止している。

(6) 磷鈳床

米国の Pliocene の Bone Valley Formation 中の磷灰石には重鈳物が含まれている。磷灰石分離後の廃石中に重鈳物は3~8% (Monazite 2~3%) 含まれる。現在重鈳物は未回収であるが、将来の資源として注目される。

(7) 砂鈳床

含希土類鈳物を含む変成岩、花崗岩やペグマタイトが風化すると Monazite、Xenotime、Ilmenite 等の抗風化作用を持つ重鈳物は現地に残留濃縮または流水作用により濃集し砂鈳床を形成する。

スリランカ北東部の Plumodai 海岸には海岸沿いに海浜砂鈳床が発達している。鈳量は陸上のみで重鈳物換算326万t、海底まで含めると2,500万tが推定されている。この鈳床では Ilmenite 回収尾鈳から Rutile, zircon, Monazite を回収している。

印度の Chavara 鈳床 (Kerala 州 Quilon 市海岸)、MK 鈳床 (Trivandrum 市南方) は海浜砂鈳床である。この2鈳床の Monazite 含有量は数100万tに達するといわれ、Monazite の生産が行われている。

ブラジルにも海浜砂鈳床が発達しており、Monazite 260万tを埋蔵している。Cumuruxitaba 鈳床 (Bahia 州, Psado)、Ponta de Fruta 鈳床および Guarapari (Espírito, Santo 州) の3鈳床から約3,000t/年の Monazite が生産されている。

豪州東海岸では New South Wales 州 New Castle から北方に Queensland 州 Fraser Island まで約800kmの範囲に重鈳床が点在している。ま

た西海岸の Bunbury には海浜砂鉱床と内陸の段丘型砂鉱床が存在する。現在では海浜砂鉱床は終掘し、段丘型砂鉱床が採掘されている。

Western Titanium Ltd. では Ilmenite 25~30万 t/年, Zircon 2.5万 t/年, Monazite +Rutile+Leucoxene 6,000 t/年を生産している。

エジプトのナイル川河口には三角洲型砂鉱床があり、Monazite が約 26 万 t 埋蔵されている。

タイの Puket 周辺には海底砂錫鉱床があり、Aokan Tin Berhad 社と Billton Thailand 社によって採掘されている。錫を回収した後のアマン（重鉱物の濃集した尾鉱）から Ilmenite, Monazite, Zircon を回収しているが、まだ 100 万 t のアマンが放置されている。

マレー半島からビルマにかけて河川成砂鉱床が発達しており、錫を主目的に採掘されている。錫の生産量はマレーシア 6.6 万 t/年、タイ 3 万 t/年であり、副産物の Monazite を回収すれば、マレーシア 1,500 t/年、タイ 720~1,080 t/年、Xenotime では両国計 300 t/年になろう。

ナイジェリアの JOS 高原にも河川成砂鉱床があり、錫生産の副産物として Th 鉱物, Xenotime Fergusonite, Monazite の回収が行われている。

アフリカ、マラウイの Malawi 湖と Nyasa 湖に湖成砂鉱床の存在が知られている。米国の白亜紀の Idaho 底盤上に 50 鉱体以上の現地残留鉱床の存在が知られている。しかしいずれも未稼行である。

4 希土類鉱石の選鉱

4.1 Monazit の選鉱

Monazite は主に Ilmenite の副産物として回収されている。一例として西豪州の Westralian Sands Ltd. では粗鉱を磁選によって処理して Ilmenite を分離する。続いて非磁着物を Spiral によって比重分離し、その conc. を静電選鉱にかける。この Non-conc. (不良導体) をさらに磁選機にかけて最終的に Monazite 精鉱をえている。

以上のような方法は比較的粗い鉱石の処理には適するが微細粉鉱には浮選が適用可能である。

4.2 Bastnaesite の選鉱

表 4 1981 年レアアース輸入通関実績

▶硝酸ランタン (kg)		▶フッ化セリウム (kg)		アメリカ	2,218,665
フランス	69,941	西ドイツ	100	ブラジル	15,000
▶酸化イットリウム (kg)		▶希土類金属, イットリウム		合計	3,143,137
中国	14,612	およびスカンジウム (kg)		▶粗製の塩化希土 (希土類金属化合物の製造原料用のもの) (kg)	
マラヤ	8,000	中国	1,500	中国	1,063,500
ノルウェー	8,720	イギリス	21	インド	50,000
イギリス	2,270	フランス	3,375	イギリス	17,488
フランス	30,250	西ドイツ	800	アメリカ	838,251
西ドイツ	716	ソ連	99	ブラジル	130,000
ソ連	37,124	アメリカ	2,242	合計	2,099,239
アメリカ	29	合計	8,037	▶フェロセリウムまたは発火性合金 (kg)	
合計	101,721	▶その他のレアアース (酸化ユーロピウム, 水酸化希土を含む) (kg)		台湾	104
▶酸化セリウム (kg)		韓国	284	ホンコン	3
中国	200	中国	56,848	イギリス	1,421
フランス	52,708	台湾	990	フランス	707
オーストリア	100	シンガポール	3,146	西ドイツ	100
アメリカ	9,451	インド	123,000	スイス	498
合計	62,459	イギリス	126,132	アメリカ	7,190
▶酸化ランタン (kg)		フランス	254,140	合計	10,023
中国	1,000	西ドイツ	67,546		
フランス	254,020	フィンランド	589		
オーストリア	24,900	ソ連	276,789		
合計	279,920	カナダ	8		

(資料：文献 6)

表5 レアアースの56年消費実績と57年の見通し(t) (推定)

	54年	55年	56年	56/55	57年
				(%)	(予測)
酸化イットリウム	65 (44)	100 (72)	120 (80)	+20	100
酸化ユーロピウム	2.5 (1.5)	3.0 (1.0)	3.0 (1.0)	—	2.5
酸化サマリウム	25	45	75	+67	90
酸化ランタン	347 (199)	361 (173)	507 (280)	+40	400
酸化セリウム	1,550 (69)	2,300 (52)	2,700 (62)	+17	2,700
ミッシュメタル	480 (101)	550 (49)	550 (25)	—	550
フッ化希土	70 (0.9)	70 (0.5)	70 (0.1)	—	70
合計	2,540 (416)	3,519 (362)	4,025 (448)	+14	3,912
新金属協会資料	1,742	2,320	2,722	—	3,022

(注) 合計数量が新金属協会資料より1,000t前後多くなっているのはバストネサイト系研摩材を酸化セリウム(おもに研摩材)に加えていることによる。カッコ内は輸入で内数(資料:文献6)

Bastnaesiteを産出するMountain Pass 鉱山の選鉱について述べる。ここでは高温浮選法を採用し、160 t/dの工場を稼働している。すなわち-100 mesh, 96%に粉碎された原鉱石に捕収剤 Emulsol 300 および抑制剤リグニン硫酸アンモニウムと珪酸とを添加して、条件槽でパルプ温度93℃で条件付けを行った後、粗選、精選5段を実施して最終的に63% REO 精鉱を得ている。なお浮選時のパルプはpH 9.5, 温度54℃である。

5 希土類の分離精製

従来から希土類の分離精製には酸分解法、アルカリ分解法、溶媒抽出法、イオン交換法などが用いられている。最近では新しい希土類精鉱処理法⁴⁾が開発され注目を集めている。その概要はNaOH水溶液に希土類精鉱を体積比1/3位混合して放電する。放電によるイオンエネルギーによって水酸化希土が生成する。水酸化希土をろ過回収しHCl処理によって塩化希土を分離するというものである。

6 希土類の動向と需給

世界の希土類鉱石の産出状況は表2中に示すように1979年実績で米国3.15万t, 豪州1.55万t, が圧倒

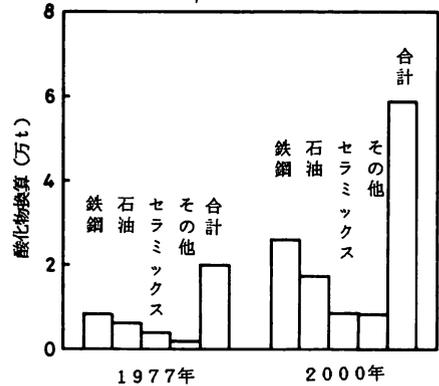


図-1 希土類需要将来予測(アメリカ)
(資料:文献7)

的に多く、希土類鉱石の偏在を示唆している。

日本における輸入実績は表4に示すように量的には水酸化希土を含むレアアースが多く、米国、ソ連、フランスの順で輸入されている。フランスからの輸入は硝酸La, 酸化La, 酸化Ce, 希土類金属で第1位, 酸化Yで第2位を占めている。希土類の輸入量も中国, 米国, フランス, ソ連, 印度, ドイツ等に片寄りが大きい。

日本における希土類の消費を表5に示す。1981には希土類全体で約4,000 t/年を消費している。内訳では酸化Ceの消費が圧倒的に大きい。このようにCeへの消費に片寄りがあっても、主要鉱石であるMonazite Bastnaesiteに略50%のCeが含まれているが、米国、中国に偏在する他にはとくに不安はない。

一方希土類資源の耐用年数(鉱量÷年間生産量)は小村¹⁾によると248~1508年としており、最近の中国の鉱量に加わると数字上何ら心配はない。

西暦2,000年の需要予測⁷⁾では全世界で14万t/年で米国が約6万tとみられている。残りの大半は日本とECとされ、両者の需要は略等量と見込まれている。米国の用途別需要は図-1に示すように、1977年に対して、鉄鋼、石油、セラミック関係の消費が伸びると考えられている。

7 むすび

希土類の資源産出国としては米国、豪州、印度、マレーシア、ブラジル(以上合計量は全世界生産量の95%)であるがソ連、中国も次第に生産を伸ばしつつある。一方希土類の大消費国は米国、日本、EC諸国である。以上のように米国のみが産出国であり消費国であるが、米国もYの産出(60t/年)は消費(120t/年)の1/2にすぎず、Yでは輸入国である。日本、ECは他国資

源に依存する純然たる消費国である。そして2,000年には日本とECの消費は米国並の6万t/年に達すると予測される点が問題である。

米国のYはかつてカナダのウラン製造残渣を輸入使用していたが、カナダの輸出禁止に伴いマレーシアのXenotimeに依存している。資源国の印度とブラジルはMonazite自身での輸出を禁止しており、Thの国内重要資源としてこれらを回収した後の粗製塩化希土を輸出している。最大の希土類生産国である米国では希土類は重要資源として、長期国家計画に基づいて備蓄されている。消費国のフランス、西ドイツも国家備蓄が計られている。

このような政策が他の希土類生産国に拡大波及することも当然考えなければならないので、希土類の需給バランスには不安材料も多く、日本は希土類の長期安定確保に関して何等かの施策が必要となろう。

参考文献

- 1 小村幸二郎他；新金属工業、(1982) P35, P81
- 2 鈴木敏明；未公表資料
- 3 今西信之他；未公表資料
- 4 井上 潔；公開特許公報(A), 昭57-7890
- 5 米国鉱山局；Mineral Facts and Problems (1980)
- 6 アルム出版社；レアメタルニュース、No.1152 (1982) P 9およびNo.1160 (1982) P 3
- 7 金子秀夫；鉄と鋼 68 (1982) No. 2, P 193

シンポジウムのお知らせ

環境科学シンポジウム

(環境科学特別研究総合班主催)

昭和58年2月9日(水)

会場：日本生命中之島研修所 大阪市北区中之島4-3-43

10日(木)

会場 (定員)		A 講 堂 300	B 第2教室 180	C C 教室 120	D 第1教室 100
2月9日 (水)	9:00 }	環境動態領域 気圏部門 R 11	環境改善技術領域 生物部門 R 31	環境理念領域 R 40	人体影響領域 環境毒性部門 R 21
	13:00 }	特別講演(講堂) 「ドバトを指標とした環境疫学」 近藤 恭司(名大・農)			
	14:00 }	環境動態領域 陸域部門 R 12	環境改善技術領域 工学部門 R 34	環境情報領域 遠隔計測部門 R 52 化学計測部門 R 51	人体影響領域 環境疫学部門 R 22
懇 親 会 : 2月9日(水)のシンポジウム終了後に予定されております。					
2月10日 (木)	9:00 }	環境動態領域 海域部門 R 14	環境改善技術領域 化学部門 R 32	環境情報領域 化学計測部門 R 51	特別プロジェクト R 01
	13:00 }	特別講演(講堂)前半:高井康雄(東大・農)後半:沖野外輝夫(信大・理) 「陸域部門の研究のあゆみ—一例として諏訪湖の地域研究について—」			
	14:00 }	環境動態領域 物質循環部門 R 16 陸域部門 R 12	環境動態領域 都市域部門 R 15	化学計測部門 R 51 環境情報領域 R 53 情報システム部門	予 備

連絡先：〒106 港区六本木7-22-1 東京大学生産技術研究所

環境科学特別研究総合班事務局 電 03 (402) 6231 内線 2448, 2413