

# レアメタル資源

## 2. レア・アース…(1)

坂 卷 幸 雄 (地質部)・神 谷 雅 晴 (鉱床部)  
 Yukio SAKAMAKI Masaharu KAMITANI

### レア・アースは「めずらしい」ものか？

レア・アース (rare earth) とレアメタル (rare metal) —両方ともレアという言葉がついていささかまぎらわしい。しかし 専門用語としては レア・アースのほうが大先輩である。

レア・アースは 直訳して希土類 (稀土類) と呼ぶ。「稀」という文字からは めったにお目にかかれない・めずらしい—という印象を強く受ける。しかし 事實は意外にもそうではない。

第1表に示したように 希土類元素の二番目・58番

第1表 元素の存在度

	A	B	B/A	b	c
57 La	0.485	22	45	30	0.378
58 Ce	1.23	43	35	60	0.976
59 Pr	0.20	5.9	30	8.2	0.136
60 Nd	0.878	20	23	28	0.716
61 Pm	—	—	—	—	—
62 Sm	0.273	4.0	15	6.0	0.230
63 Eu	0.086	0.8	9.3	1.2	0.0866
64 Gd	0.345	3.5	10	5.4	0.311
65 Tb	0.060	0.5	8.3	0.8	0.0589
66 Dy	0.413	3.0	7.3	4.8	0.390
67 Ho	0.098	0.7	7.1	1.2	0.0888
68 Er	0.272	1.7	6.2	2.8	0.255
69 Tm	0.041	0.3	7.3	0.5	0.0385
70 Yb	0.259	1.8	6.9	3.0	0.249
71 Y	0.041	0.3	7.3	0.5	0.0387
39 Yu	4.8	38	7.9	33	
21 Sc	30	50	1.7	22	

注：A. 宇宙存在度 (Si=1,000,000原子当たりの該当元素原子数で表示)  
 B. 地殻存在度 同 上  
 b. 同 (重量 ppm)  
 c. Leedy コンドライト (1943年に米オクラホマ州に落下した隕石) 中の存在度 (重量 ppm)  
 松井・坂野 (編) (1979) による。B/Aの計算は筆者  
 元素記号 呼び方については第2表を参照

セリウムは 地殻存在度が60ppmで 銅の55ppmよりも多い。天然には存在しない61番プロメチウムは別として 地殻存在度がもっともひくい希土類元素・69番ツリウム 71番ルテチウムでも0.5ppmは含まれている。これに対して 金は0.004 水銀は0.08 身近にある銀でもこの値は0.07ppmでしかない。これらの値を原子量で割って原子数の比に直すと 一部では順位が入れ変わるが 大勢が左右されるわけではない。つまり レア・アースは 元素としてはわりにありふれた存在なのである。

それにもかかわらず レア・希 という言葉がつかのななぜか。一言でいえば 目立たなかったからである。後にくわしくのべるが レア・アースは普通の鉱物のなかの副成分—微量成分として含まれ なかなか表にその姿をあらわさない。たまに レア・アースを主成分とする鉱物があっても 小さくて見逃される。比重は大きいものが多いから いわゆる「重砂」として河原や浜辺に集まることがあるが キラキラ光っている金属鉱物のように 世間一般の人がひと目で見てわかるというものでもない。これらの事情が複雑にからみあった結果が 「希」という一字に煮つまっている。

さらにもう一つの複雑な事情があるにはあった。それは 希土類元素のそれぞれが 化学的には非常によく似た性質を持っていて 分離がなかなかうまくゆかなかったことによる。分離どころか 発見史をたどってみると—ある一つの希土類元素をくわしく調べてゆくと どうもおかしな点が出てくる。それをつきつめてゆくと また新しく一つの元素が発見される—そういうことの繰り返しだった。かなりの数の希土類元素の発見が 年表の上では最近のことに属しているのも このようなわけによる(第1図・第2表)。

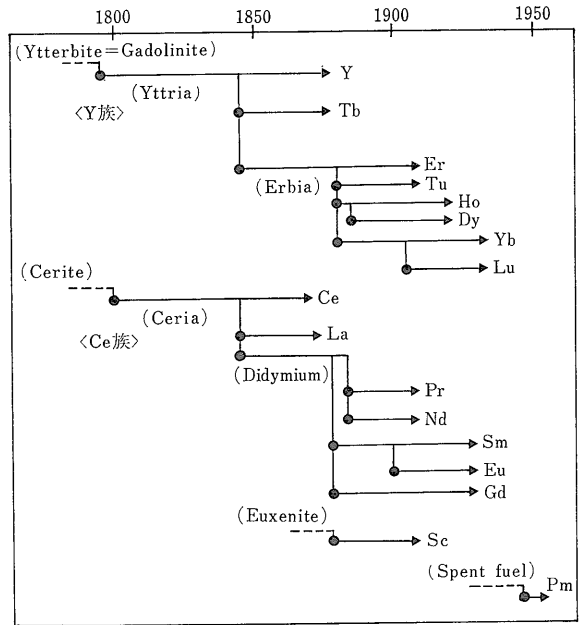
### レア・アースの定義と性質

元素の周期律表を思いだしてみよう。1番元素の水素から始めて56番元素のバリウムまではきれいな周期性を持ってた。その次の57番元素・ランタンもそうだ。しかし58番セリウムから71番ルテチウムまではどうしてもそれまでの枠には納まらない。この57番以降の15元素をどう始末するか。その曲折はそのまま化学史のなかの一大ドラマだったが、最後には15把ひとからげにして3a族の第6周期に納まった。余談になるが歴史は繰り返して次の第7周期でも89番アクチニウムから103番ローレンシウムまでが一つの枠に入れられていてそのなかには90番トリウム・92番ウラン・94番プルトニウムなどの文歴史的にも大きな意味を持つ元素がふくまれている。

おなじ3a族のなかの21番スカンジウムと39番イットリウムはレア・アースと化学的性質がよく似ていてしばしば挙動を共にする。そのために資源論などでは広義のレア・アースとしてこの2つも合めてしまう場合が多い。ここでも特に断わらない限りそのような扱いにする。

レア・アースはどれも金属元素である。その単体としての性質は第3表に示した。原子価は普通+3価。化合物の色も第4表に見られるように多彩である。

この+3価をとるときのイオン半径を第3表によって



第1図 希土類元素の発見の経過。

眺めてみると57番ランタンがいちばん大きく以下71番ルテチウムまでだんだん小さくなっていくのがわかる。これが「ランタニド縮合」として知られている現象である。この現象と言い一様に+3価の原子価をとることと言いレア・アースには化学的な特異性がつきまとうがこれらは一番外側の6sという電子軌道

第1表 希土類元素の呼び方・発見年・発見者

元素	呼び方(和)	呼び方(英)	発見年	発見者	
57 La	ランタン	Lanthanum	1839	Mosander	Ce 族 (軽希土)
58 Ce	セリウム	Cerium	1803	Berzelius ほか	
59 Pr	プラセオジウム	Praseodymium	1839	Welsbach	
60 Nd	ネオジウム	Neodymium	1839	Welsbach	
61 Pm	プロメチウム	Promethium	1947	Marinsky ほか	
62 Sm	サマリウム	Samarium	1839	Boisbaudran	
63 Eu	ユーロピウム <sup>1)</sup>	Europium	1839	Demarcay	
64 Gd	ガドリニウム	Gadolinium	1839	Marignac	
65 Tb	テルビウム	Terbium	1843	Mosander	Y 族 (重希土)
66 Dy	ジスプロシウム	Dysprosium	1866	Boisbaudran	
67 Ho	ホルミウム	Holmium	1879	Cleve	
68 Er	エルビウム	Erbium	1843	Mosander	
69 Tm	ツリウム	Thulium	1879	Cleve	
70 Yb	イッテルビウム	Ytterbium	1878	Marignac	
71 Lu	ルテチウム	Lutetium	1905	Urbain ほか	
39 Y	イットリウム	Yttrium	1794	Gadolin	
21 Sc	スカンジウム	Scandium	1879	Nilson	

1) Euの呼び方は 学術用語集ではユーロピウムであるが ここでは一般の慣用に従った。

第3表 物 性

元 素	融 点	沸 点	比 重	外 観 (色 光沢)	結晶系	格 子 定 数 (Å)		
						a <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	(b <sub>0</sub> )
57 La	920	3,469	6.174	錫白色金属	Hex.	3.770	12.131	8.239
58 Ce	795	3,468	6.771	銅白色金属	Cub.	5.1604		
59 Pr	935	3,127	6.782	銀白色金属	Hex.	3.6702	11.828	
60 Nd	1,024	3,027	7.004	銀白色金属	Hex.	3.6582	11.802	
61 Pm	—	—	—	—	—	—	—	
62 Sm	1,072	1,900	7.536	灰色金属	Orth.	8.050	14.072	
63 Eu	826	1,439	5.269	—	Cub.	4.578		
64 Gd	1,312	3,000	7.895	—	Hex.	3.6315	5.777	
65 Tb	1,356	2,800	8.277	—	Hex.	3.5900	5.696	
66 Dy	1,407	2,600	8.536	—	Hex.	3.5923	5.6543	
67 Ho	1,461	2,600	8.803	—	Hex.	3.5761	5.6174	
68 Er	1,497	2,900	9.051	—	Hex.	3.5590	5.592	
69 Tm	1,545	1,727	9.332	—	Hex.	3.5372	5.5619	
70 Yb	824	1,427	6.977	—	Cub.	5.481		
71 Lu	1,652	3,327	9.842	—	Hex.	3.5050	5.5486	
39 Y	1,509	2,927	4.478	灰色金属	Hex.	3.3080	5.2653	
21 Sc	1,539	2,727	2.992	淡灰白色金属	Hex.	3.302	5.245	

金属単体. 融・沸点以外は常温での値

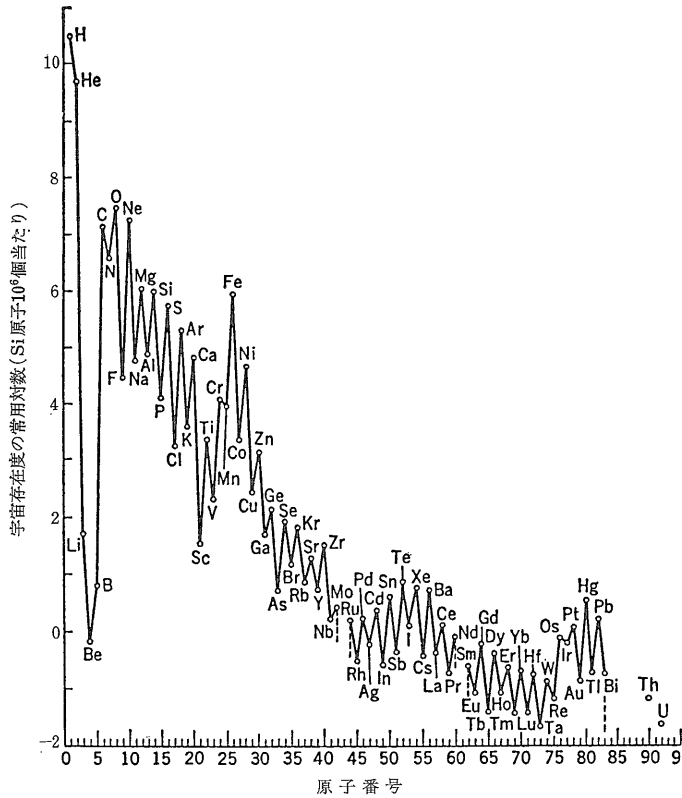
結晶系: Cub. 等軸晶系 Hex. 六方晶系 Orth. 斜方晶系

第4表 原子の構造・イオン

元 素	電 子 配 列 <sup>1)</sup>			原 子 価			イオン半径 (Å) <sup>2)</sup>			化 合 物 の 色			原子半径 (Å)	
	N	O	P	〈●: 存在〉			+2	+3	+4	+2	+3	+4		
	4f	5d	6s	+2	+3	+4	+2	+3	+4	+2	+3	+4		
57 La		1	2		●			1.045						1.877
58 Ce	1	1	2		●	●		1.010	0.80				(酸化物)	1.825
59 Pr	3		2		●	(●)		0.997	—				黒	1.828
60 Nd	4		2		●	(●)		0.983	—				—	1.821
61 Pm	5		2		●			0.970					—	—
62 Sm	6		2	●	●			0.958		—			桃	1.802
63 Eu	7		2	●	●			0.947		無			黄	2.042
64 Gd	7	1	2		●	(●)	—	0.938	—				無—淡紅	1.802
65 Tb	9		2		●	(●)	1.17	0.923	—				無	1.782
66 Dy	10		2		●			0.912					無	1.773
67 Ho	11		2		●			0.901					黄—黄緑	1.766
68 Er	12		2		●			0.890					褐緑	1.757
69 Tm	13		2	●	●			0.880		—			赤	1.746
70 Yb	14		2	(●)	●		—	0.868		黄—黄緑			淡緑	1.940
71 Lu	14	1	2		●		1.02	0.861					無	1.734
39 Y	—	—	—		●			0.900					—	1.801
21 Sc	—	—	—		●			0.745					無	1.641

1): 共通部分 (1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>10</sup> 4s<sup>2</sup> 4p<sup>6</sup> 4d<sup>10</sup> 5s<sup>2</sup> 5p<sup>6</sup>) を省略

2): SHANNON と PREWITT による. Ca<sup>+2</sup> は 1.00Å



第2図 元素の宇宙存在度と Oddo-Harkins の規則.

が2個の電子ですでに埋まっているのに 内側の4f・5dという軌道にまだ空きがあることと関連している。原子番号が大きくなってゆくと この余席も第4表に示したように 4f軌道を主体として次第に埋まってゆき 電荷のバランスが保たれる。

さて ここでふたたび第1表に戻って レア・アース各元素の存在度を眺めてみよう。そうすると 原子数の比の値で 奇数番号の元素の存在度が 両隣りの偶数番号元素のそれよりも 必ず低い値をとっていることに気がつく。横軸に原子番号 縦軸に存在度を採って折れ線をつなぐと 鋸の歯のようなグラフ(第2図)ができる。これは 原子核の安定性の差として説明され 発見者の名をとって 「Oddo-Harkinsの規則」と呼ぶ。

レア・アースの分析値を整理する必要は 研究室では日常的によく起こる。しかし その時にこのギザギザがあるままだと 傾向が非常につかみにくい。これを解決するのがノーマリゼーション(規格化)という操作である。

この操作は 得られた分析値を 各元素ごとに 標準物質である隕石——Leedy コンドライト——の値で割ることをさしている。Leedy コンドライトは 太陽系の始原物質に最も近い組成を持つと考えられているからで

ある。

規格化した値をプロットし直した図形 いわゆるレア・アース パターンは Masuda-Coryell plotとも呼ばれ ずっとなめらかな形になる。ただし 普通の希土類元素の分析によく用いられている同位体希釈法という手法が原理的に使えない 59番プラセオジウム 65番テルビウム 67番ホルミウム 69番ツリウムと 天然には存在しない61番プロメチウムは 普通このプロットからは除かれている。

第1表から読み取れることがもうひとつある。それは レア・アースの地殻存在度は宇宙存在度にくらべてほぼ一桁前後高くなっていることである。このことはレア・アースの主原子価が+3価であるために マグマから初期に晶出してくる造岩鉱物のなかにうまくはいりこめず 結果として残液のなかにどンドン取り残されていってしまうからである。この残液がついに固まったものがペグマタイトと呼ばれる岩石で そこにはレア・アース ウラン トリウム ニオブ タンタルなどのいわばマグマのなかの「はぐれもの」たちが寄り集まっている。アルカリ岩体のなかの特殊な塊状火成岩体であるカーボナタイトも同様にレア・アースの濃集の場をかたちづくっている。

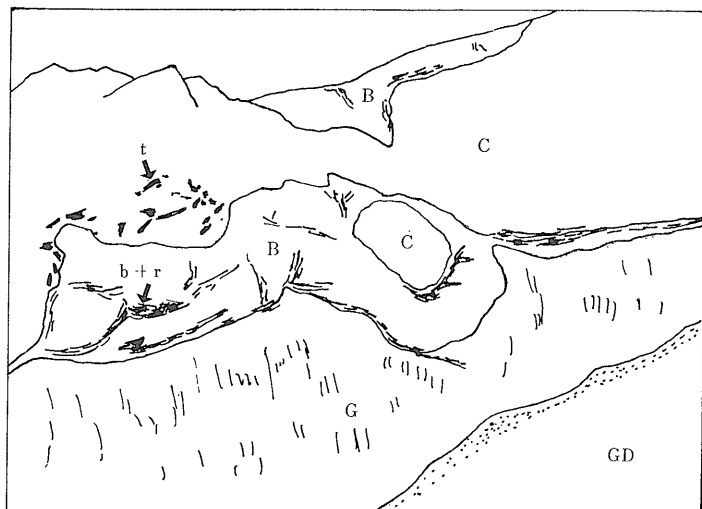


写真1 採掘中のペグマタイト (福島県石川郡石川町塩ノ平. 1988年3月).

C: 中核部 (長石+石英) B: 黒雲母帯 (長石+黒雲母) G: 文象帯 (石英+長石+黒雲母) GD: 母岩 (花崗閃緑岩)

t: 電気石 b: 黒雲母 r: レア・アース鉱物 (モナズ石 ゼノタイム ジルコンなど. 黒雲母と共生)

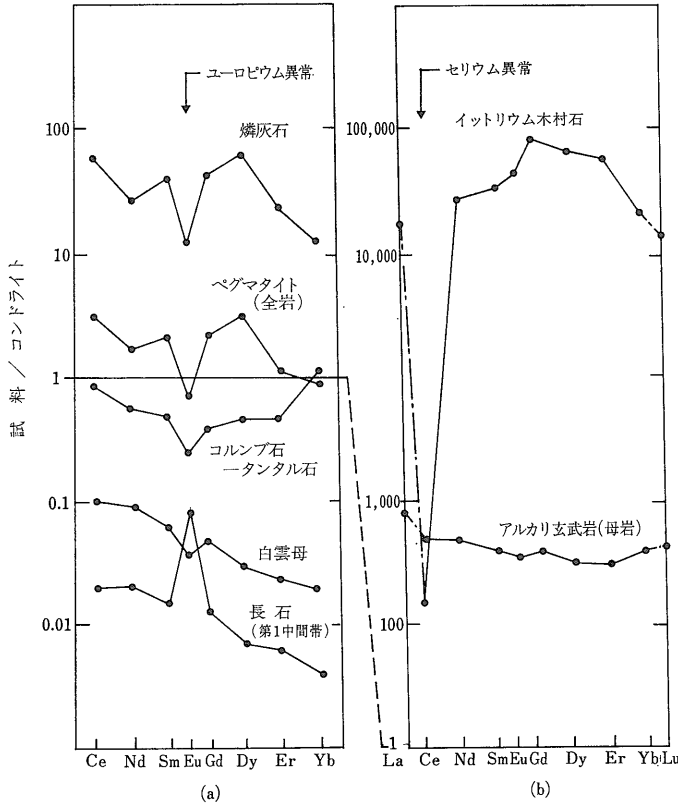
全体の平均厚さ: 約2m.

だから レア・アースをふくむ鉱物は 産出する場所も その地質環境も極めて限られてしまっていて あちらでもこちらでも採れるというわけにはゆかない。その意味では レア・アースは 地質条件のととのっていない地域にとっては 額面通りレアなのである。次号以下で触れるように 資源としてレア・アースをみた場合に このことはとりもなおさず産出が国により地域によっていちじるしく偏っていることを意味する。こうしてみると 地球化学的な元素固有の性質は まわり回って資源戦略にまで影を落していることがわかる。

このようにレア・アースの主原子価は+3価であるが それ以外の異常原子価をとる元素がいくつかある。なかでも 岩石地球化学的に意味の大きいものはセリウムの+4価とユーロピウムの+2価である。セリウムの

+4価は 系が酸化環境にあることの一つの指標であって このとき セリウムの水酸化物は溶解度が低いため 容易に沈澱して液相中から取り除かれる。また ユーロピウムの+2価は 同じ+2価のカルシウムと共にマグマ分化の初期に結晶する長石類に取りこまれ 結晶構造の上で本来カルシウムがはいるべき位置に組み込まれる。どちらの場合でも 取りこまれた側にはプラスの 取り除かれた側にはマイナスの異常値がそれぞれ現れ 先に説明した Masuda-Coryell plot の上では鋭いピークや谷として描き出される (第3図)。

第3図(a)は アメリカ South Dakota 州 Black Hills 地域の Tin Mountain ペグマタイト産の鉱物について レア・アース パターンを描いた例である。長石に正の 他の鉱物とペグマタイト全岩に負のユーロピウム異常がでていることがよくわかる。また コルンブ石一



第3図 Masuda-Coryell plot による レア・アース パターンと ユーロビウム・セリウム異常の例。

(a) : WALKER, R. J. et al (1986).  
 (b) : 赤木ほか (1986) から作図。

第4図 レア・アース鉱物の結晶外形の例。  
 (長島・長島 1960による)。

- (a) フェルグソン石 (岐阜県苗木産)。
- (b) ユークセン石 (福島県石川産)。
- (c) サマルスキー石 (福島県石川産)。
- (d) ゼノタイム (福島県石川産)。
- (e) モナズ石 (福岡県小峰産)。

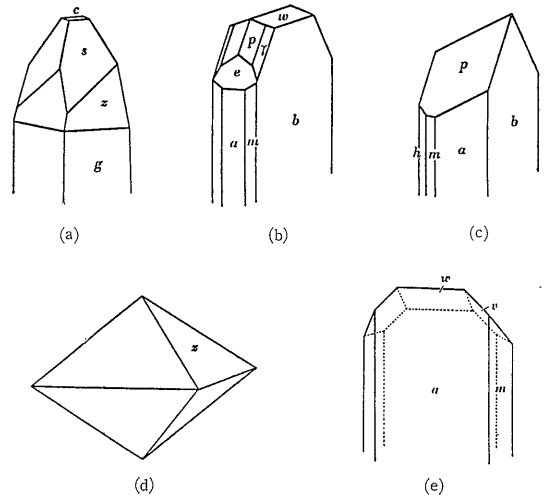
タンタル石  $[Y, U, Fe^{+2}(Nb, Ta)_2O_6]$  には 重希土側でイットリビウムの相対的な濃集がある。

第3図(b)は わが国の佐賀県東松浦半島で 近年新鉱物として発見されたイットリウム木村石  $[CaY_2(CO_3)_4 \cdot 6H_2O]$  と その母岩であるアルカリ玄武岩のレア・アース パターンである。ここでは 母岩からはやや軽希土側に高い 緩やかな傾斜の図形が得られているのに対し イットリウム木村石では他のレア・アース元素にくらべて3-4桁も低いセリウムの負異常が検出されている。

これらは 岩石や鉱物の履歴や形成環境を知る上で 有力な手掛りを与えてくれる 基礎的なデータである。

### レア・アース鉱物

レア・アースが普通+3価の原子価をとること +2価のカルシウムとイオン半径が似ていること ベグマタイトやカーボナタイト さらにそれらを起源とする砂鉱床から産出することなどはすでに述べた。これらのことは レア・アースを主成分とする鉱物のでき方にも



大きく影響している。

+3価をとるということは その相手方として-3価の  $(PO_4)^{-3}$  が選ばれやすいということにつながる。  $Ca^{+2}$  のかわりに  $R^{+3}$  (以下 レア・アースのなかで元素を特定しない場合には 元素記号に準じて R をもちいる。) が入

った場合には 当然 陰イオン側でもそれに対応する置換が起こって 電荷のバランスが保たれる。

レア・アース鉱物の場合 和名の決まっていなもので多いので その場合は英名のままで記すことにする。また 昨1987年に決まった国際鉱物学連合の新命名規約では レア・アース鉱物の場合 主体になっている元素の記号を最後にカッコをつけて表示することとなった。新しい表示法による鉱物名のリストは第5表にまとめたが 普及にはまだ時間がかかる見込なので 本文中ではとりあえずこれまでの表記法を採用しておく。(たとえば前出のレア・アースを含むコルンブ石—タルタン石は、新命名法ではイットロコルンブ石—イットロタルタン石: Yttracolumbite-(Y)—Ytrotantalite-(Y) と呼ぶことになった。

鉱物の外形をよく知っておくことは 同定に際して役に立つ。ペグマタイトに産出するものは比較的はっきりした外形をとっていて それぞれの鉱物種に特有の結晶面が現れているものが時々ある。第4図にそれらの例を示す。

砂鉱中に産するものは砕けたりこすれたりして結晶面が損なわれている場合がほとんどであるが それでも注意すると もとの外形の痕跡が読み取れることがある。例えば 岐阜県苗木地方の砂鉱中にてでくるフェルグソン石は 見掛けが鼠の糞そっくりである。表面には黄灰色の皮膜ができていて 割れば 強い樹脂状光沢を呈する褐黒色の破面が現れて 容易に判別ができる。

### 1) ハロゲン化鉱物

Fluocerite (Tysonite):  $(\text{Ce}, \text{La})\text{F}_3$  が代表種である。蛍石: Fluorite:  $\text{CaF}_2$  の Ca の位置の一部に  $\text{Ce}^{+3}$ ,  $\text{Y}^{+3}$  が入る変種があって Cerfluorite, Yttrifluorite と呼ばれる。見掛けの上では通常の蛍石との区別はつけにくい。陰イオンのバランスは  $\text{F}^-$  が  $\text{F}_2$  から  $\text{F}_{2.17}$  まで増えることで保たれる。

### 2) 酸化鉱物

酸化鉱物はいくつかの形にわけて考えると理解しやすい。

\*  $\text{MO}_2$  型 (Nb, Ta を含まない)

Cerianite:  $(\text{Ce}, \text{Th})\text{O}_2$ . Ce は +4 価. 閃ウラン鉱: Uraninite:  $\text{UO}_2$  方トリウム石: Thorianite:  $\text{ThO}_2$  と同構造の等軸晶系. 逆に閃ウラン鉱や方トリウム石のなかに  $\text{Ce}^{+4}$  がとりこまれていることもある。

\*  $\text{MO}_2$  型 (Nb, Ta を含む)

いわゆるニオブ・タンタル酸塩鉱物. ニオブ タン

タルは +5 価をとり 普通は互いに置きかわることができ.

それらのオルト酸 すなわち  $0.5[(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}] = \text{H}_3 \cdot (\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_4$  や メタ酸:  $0.5[(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}] = \text{H}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3$  の塩 つまり  $\text{M}_3^{+1}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_4 = \langle a \rangle$  や  $\text{M}^{+1}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3 = \langle b \rangle$  はきわめて安定で これらをベースにした鉱物が多い. 2—ニオブ・タンタル酸塩  $\text{M}_4^{+1}(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_7 = \langle c \rangle$  がベースのものも存在する. Mは金属元素の入る位置である.

$\langle a \rangle$  の  $\text{M}_3^{+1}$  の場所には  $\text{Y}^{+3}$  が入りやすく その代表種がフェルグソン石: Fergusonite:  $\text{YNbO}_4$  である. ここには  $\text{U}^{+4}$ ,  $\text{Ce}^{+4}$  も入ることがあり その補償は  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  などによってなされる.

$\langle b \rangle$  は 現実にはこれを2倍した  $\text{M}_2^{+1}(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$  の形をとる.  $\text{M}_2^{+1}$  には  $\text{Ca}^{+2}$  が入ることがまず考えられるが 現実には 前に述べた「落ちこぼれ」の  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Y}^{+3}$ ,  $\text{Ce}^{+4}$ ,  $\text{U}^{+4}$ ,  $\text{Th}^{+4}$  がこの位置に入ってくる. この場合の電荷バランスは  $\text{Nb}^{+5}$ ,  $\text{Ta}^{+5}$  の位置に  $\text{Ti}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  が入ったり  $\text{O}^{-2}$  の位置に  $\text{F}^-$ ,  $\text{OH}^-$  が入ることで保たれる. この代表種が ユークセン石—ポリクレーヌ: Euxenite-Polycrase:  $(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$  系列である.

$\langle c \rangle$  の場合も 事情はほぼ同様であって 代表種はイットロベタフォ石: Yttrobetafite:  $(\text{Y}, \text{U}, \text{Ce})_2(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})$  イットロパイロクロア: Yttrropyrochlore:  $(\text{Y}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{U})_{1-2}(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2(\text{O}, \text{OH})_7$  である.

これまで見てきたように Mの位置にいろいろな元素が入り それらとの対応で陰イオンの組成も変わり さらに Nb, Ta は相互に置換が可能——ということは 基本的なワク組みのなかでも 鉱物種の数がどんどん多くなるということを暗示する. 事実 その通りで このグループほど 同定に手をやく鉱物群もあまりない.

鉱物種の決定は 結晶構造と化学組成によっておこなう. 結晶構造は  $\langle a \rangle$  が正方晶系と斜方晶系 および それらと同質異像(化学組成が同じなのに結晶構造を異にするため 別種の鉱物となる組合せ. たとえば ダイヤモンドと石墨)の関係にある単斜晶系.  $\langle b \rangle$  は斜方晶系  $\langle c \rangle$  は等軸晶系をとる.

しかし これらの鉱物はしばしばウラン・トリウムをとりこんでいる. すると そこからの放射線で結晶構造は乱され X線解析による同定が困難になる. また 化学的には極めて安定なので 分解しにくく 湿式化学分析には格別の技術を要する. 肉眼的には強い樹脂状光沢と貝殻のような割れ口を持ち 黒—褐 灰緑等の色を示し 比重が高く しかも たがいによく見掛けが似ている.

こうなってくると「このグループだ」ということまではどうにか判るが それから先が一筋縄で行かないことが理解できよう。これまでの命名は 一種の名人芸でなされていた場合が多く 近代的な分析手法が発達して来た現在 それらの再検討がせまられている。地質調査所でも あらたな研究テーマがかかげられている。

化学的安定性が高いことによって これらの鉱物は母岩が風化 分解してもそのまま川砂の中に入り 濃集して砂鉱床を作ることもあるが このことは産業的に見た場合 鉱物の分解と 目標元素の抽出が難関となることを意味する。現に 終戦直前 日本の軍部は「わが国の資源で原子爆弾を作る」ことを夢みて 福島県石川地方や同・水晶山地区で希元素鉱物を採掘させたが 肝心のウランの抽出に手を焼いているうちに終戦を迎えたという秘話も伝えられているほどである。

### 3) 燐酸塩(砒酸塩・バナジン酸塩) 鉱物

基本構造  $R^{+3}(PO_4)$ 。この  $R^{+3}$  には セノタイム: Xenotime:  $YPO_4$  を例外として普通は軽希土がはいる。砒酸塩・バナジン酸塩はこの P を As, V でおきかえたものであるが 数は少ない。

セノタイムは正方晶系をとり しばしば共生するジルコン: Zircon:  $ZrSiO_4$  とは同じ結晶構造である。これも普通に共生するモナズ石(=モナザイト): Monazite:  $(Ce, La, Nd, Th)PO_4$  の場合は  $Ce^{+3}$  のイオン半径が  $Y^{+3}$  のそれよりも大きいために セノタイムの構造を少し押しゆがめて入りこむ形となり これにともなって結晶系は単斜晶系に変わる。この  $Ce^{+3}$  の位置にはしばしば  $Th^{+4}$  が入る。ラドフエン: Rhabdophane:  $(Ce, La)PO_4 \cdot H_2O$ : 六方晶系 に近縁の 人形石: Ningyoite:  $(U, Ca, Ce)_2(PO_4)_2 \cdot 1-2H_2O$  は 岡山-鳥取県境の人形峠ウラン鉱床の主要鉱石鉱物で 斜方晶系をとり  $U^{+4}$  を含む。

Florencite:  $(La, Ce)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$  とその近縁種は  $Al^{+3}$  と  $(OH)^-$  がつけ加わり 三方晶系をとる。

Britholite:  $(Ce, Ca)_5(SiO_4, PO_4)_8(OH, F)$  は 燐灰石: Apatite:  $Ca_5(PO_4)_3F$ : 六方晶系 と同じ構造で この  $Ce^{+3}$  を  $Y^{+3}$  でおきかえた変種は 阿武隈石: Abukumalite の変種名を持つ。

これらのうちで 資源的に重要なのはモナズ石とセノタイムである。これらは 粒状で樹脂光沢が強い。緻密で比重が大きいため ベグマタイトだけでなく しばしば砂鉱床にも濃集する。モナズ石は軽希土の原料として一時期重視されていたが なかに含まれているトリウムが放射性であるために環境対策上とかく問題視されやすい。そのため 近年 軽希土原料鉱物として

は 次にのべるバストネス石に首座が移っている。

### 4) 炭酸塩鉱物

一般式  $R^{+3}(CO_3)F$  で表現されるバストネス石: Bastnäsite:  $(Ce, La, Y)(CO_3)F$ : 六方晶系 と  $R_2^{+3}(CO_3)_3 \cdot nH_2O$  のランタン石: Lanthanite:  $(La, Ce)_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$ : 斜方晶系 の2つの系列が主流である。

$R^{+3}$  はふつう軽希土が主体であるが  $Ca^{+2}$ ,  $Sr^{+2}$ ,  $Ba^{+2}$ ,  $Na^{+2}$  で置きかえられていることもあり また陰イオン側に  $(OH)^-$  がはいることもある。

資源的には バストネス石(=バストネサイト)が最も重要な位置を占める。

このグループのなかでの近年の話題は 佐賀県東松浦半島のアルカリ玄武岩質溶岩のから 広い範囲にわたって 新鉱物 イットリウム木村石: Kimuraite-(Y):  $CaY_2(CO_3)_4 \cdot 6H_2O$ : 斜方晶系 が発見されたことである(前出 第3図参照)。この鉱物は近縁の ネオジウムランタン石: Lanthanite-(Nd):  $(Nd, La)_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$ : 斜方晶系 および ロッカ石: Lokkaite-(Y):  $CaY_4(CO_3)_7 \cdot 9H_2O$ : 斜方晶系 と共に晶洞のなかに含まれており 世界的にみてもレア・アース鉱物としては非常にめずらしい産状である。

これらの発見とその後の研究には 地質調査所も深くかかわっている。くわしい内容については近く別の機会に紹介することとしたい。

### 5) 珪酸塩鉱物

レア・アースを含む珪酸塩鉱物は ネソ珪酸塩: Nesosilicate: 基本基  $(SiO_4)^{-4}$  ソロ珪酸塩: Sorosilicate: 基本基  $(Si_2O_7)^{-6}$  など シクロ珪酸塩: Cyclosilicate: 基本基  $(Si_6O_{18})^{-12}$  など 等のグループについて知られている。これまでも述べてきた陽イオン側の置きかえがひんぱんに見られるのに加えて 陰イオン基側でも  $(OH)^-$ ,  $F^-$  による  $O^{-2}$  の置きかえや Si の位置での B, Al, P などによる置きかえがしばしば起こり 一部の種では ベグマタイト形成の最末期に濃集する Be も加わって 全体の姿は複雑きわまるものになる。

比較的よく知られている種は ガドリリン石: Gadolinite:  $(Ce, La, Nd, Y)_2Fe^{+2}Be_2Si_2O_{10}$ : 単斜晶系 や 褐簾石(かつれん石): Allanite:  $(Ce, Ca, Y)_2(Al, Fe^{+3})_3(SiO_4)_3(OH)$ : 単斜晶系 などであって 特に 褐簾石は一般の深成岩の副成分鉱物としても含まれていることがある。

しかし 珪酸塩鉱物も化学的に安定なものも多く 複酸化鉱物の場合と同じように レア・アースの抽出は容



易ではない、このため 資源的な価値としては多くを期待できない。

レア・アースを主成分とする鉱物二の数は 今回の国際鉱物学連合の新命名規約の制定によって かなり増すことになった。変種の扱い方などによって多少の変動は生じるものの 目安としては ハロゲン化鉱物: 4 (1) 酸化鉱物: 34(8) 炭酸塩鉱物: 35(7) 硼酸塩鉱物: 1 (0) 硫酸塩鉱物: 2(0) 磷酸塩・砒酸塩・バナジウム酸塩鉱物: 27(8) タングステン酸塩鉱物: 2(0) 珪酸塩鉱物: 49(7) 計: 153(31) 種 ——括弧内はそれらのうちわが国に産出するもの——とみておけば大きく変わることはないであろう。

### わが国のレア・アース鉱物の探査・研究略史

19世紀末から20世紀初頭にかけて わが国の各地で鉱物資源の探査・開発が行なわれるなかで 岐阜県苗木地方の砂錫の選鉱滓から フェルグソン石が発見されたのをはじめとして 滋賀県田ノ上山 現在の筑波研究学園都市に隣接する茨城県山ノ尾 福島県石川地方など 各地からレア・アース鉱物が見出され 1904年に刊行された日本鉱物誌(初版)に記載された。これらはいずれも花崗岩質ベグマタイトや それらに由来する砂鉱中からの産出である。大正期を経て昭和期にはいると アマチュア鉱物収集家と 東大・化学教室の木村健次郎教授を中心とする研究者グループとの緊密な連繋のもとに 多くの産地が新たに追加され 同定された鉱物種も増えた。第二次世界大戦末期に 軍関係者と当時の理研グループが結んで 国産ウランで原子爆弾を作ること計画し 福島県下でレア・アース鉱物を集めさせたことは前に触れた。

戦後の混乱期には公的機関の活動は停滞したが 熱心なアマチュアの採集活動は続いた。1947年には 伊藤貞一・桜井欽一編で 「日本鉱物誌・第3版上」が刊行されて それまでのレア・アース鉱物に関するデータも整理の上集録された。

1954年からは 地質調査所と 大学等の諸研究機関で国内ウラン資源の系統的な探査研究が開始された。研究の主要なターゲットは 1955年の人形峠鉱床の発見と1956年の原子燃料公社(現 動力炉・核燃料開発事業団)の発足に伴って 次第に堆積型ウラン鉱床へと移ったが 1950年代後半までは ベグマタイト・砂鉱床や鉱脈型鉱床の探査も精力的に行なわれて その副産物としてレア・アース鉱物についても新産地や新知見などの情報が追加された。

最近の新素材ブームのなかで またあらためてレア・アース鉱物に関心が向けられるようになり たとえば

1988年4月号

飛騨山地のくさび石: Sphene (Titanite):  $(Ca, Y)TiSiO_6$ —YはCaを置換して少量含まれる—のような以前から産出が知られていた鉱物についても再検討が始まり また イットリウム木村石のような新発見ももたらされた。特に 最近の分析手法の急速な発達によって これまででは考えられなかったようなレア・アースの濃集帯があらたに解明される可能性もあながち夢物語とは言いい切れない。いまだにまとまった国内レア・アース資源を手にしていないわれわれではあるが その意味でここしばらくは 知的好奇心に支えられたところよい緊張の時期を過ごすことができそうである。

### 〈おもな参考文献〉

#### ◎産状記載など

- 長島乙吉・長島弘三(1960): 日本希元素鉱物 長島乙吉先生祝賀記念事業会  
伊藤貞一・桜井欽一(改編)(1947): 日本鉱物誌第3版上 中文館書店  
地質調査所(編)(1961): 日本におけるウランの産状(その1) 地調報告 no. 190  
ウラン・トリウム鉱物研究委員会(編)(1961): ウラン・その資源と鉱物 朝倉書店

#### ◎鉱物リスト 命名法など

- FLEISCHER, M. (1986): Glossary of Mineral Species. 5th ed., Mineralogical Record, Tucson, U. S. A.  
NICHEL, E. H. and MANDARINO, J. A. (1987): Procedures involving the IMA Commission on New Minerals and Mineral Names and guidelines on mineral nomenclature. American Mineralogist, 72, 1031-1042  
松原 聡(1987): 日本産鉱物種 鉱物情報

#### ◎希元素地球化学

- 松井義人・坂野昇平(編)(1979): 岩波講座 地球科学4—地球の物質科学Ⅲ—岩石・鉱物の地球化学 岩波書店

#### ◎レア・アースの利用

- 新金属協会(編)(1980): レア・アース(増補改訂版) 新金属協会

#### ◎学術論文等

- WALKER, R. J. et al.(1986): Internal evolution of the Tin Mountain pegmatite, Black Hills, South Dakota. American Mineralogist, 71, 440-459  
NAGASHIMA, K. et al. (1986): Kimuraite,  $CaY_2(CO_3)_4 \cdot 6H_2O$ , a new mineral from fissures in an alkali olivine basalt from Saga Prefecture, Japan, and new data on lokkaite. American Mineralogist, 71, 1022-1027  
赤木 右 増田彰正 清水 洋 中井俊一(1986): 木村石を含む火成岩中の希土類元素の測定(演旨) 日本地球化学会年會講演要旨集 29

第5表 レア・アース鉱物

ハロゲン化鉱物

(#) Fluocerite-(Ce) (=Tysonite)	hex.	(Ce, La)F <sub>3</sub>
Fluocerite-(La)	hex.	(La, Ce)F <sub>3</sub>
Gagarinite-(Y)	hex.	NaCaY(F, Cl) <sub>6</sub>
Tveitite-(Y)	mon. ps. cub.	Ca <sub>1-x</sub> Y <sub>x</sub> F <sub>2+x</sub>

酸化鉱物

Cerianite-(Ce)	cub.	(Ce <sup>4+</sup> , Th)O <sub>2</sub>
Loveringite	trig.	(Ca, Ce) (Ti, Fe <sup>3+</sup> , Cr, Mg) <sub>21</sub> O <sub>38</sub>
* Davidite-(Ce)	trig.	(Ce, La) (Y, U, Fe <sup>2+</sup> ) (Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O, OH) <sub>38</sub>
* Davidite-(Y)	trig.	(La, Ce) (Y, U, Fe <sup>2+</sup> ) (Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O, OH) <sub>38</sub>
* Davidite-(La)	trig.	(La, Ce) (Y, U, Fe <sup>2+</sup> ) (Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O, OH) <sub>38</sub>
** Fergusonite-(Y)		
(フェルグソン石)	tet.	YNbO <sub>4</sub>
Formanite-(Y)	tet.	YTaO <sub>4</sub>
(#)*Fergusonite-beta-(Y)		
(ベータ・フェルグソン石)	mon.	YNbO <sub>4</sub>
Fergusonite-beta-(Nd)	mon.	(Nd, Ce)NbO <sub>4</sub>
Fergusonite-beta-(Ce)	mon.	(Ce, La, Nd)NbO <sub>4</sub>
Yttrocolumbite-(Y)	orth.	(Y, U, Fe <sup>2+</sup> ) (Nb, Ta)O <sub>4</sub>
# Yttrotantalite-(Y)	orth.	(Y, U, Fe <sup>2+</sup> ) (Ta, Nb)O <sub>4</sub>
# Ishikawaite (石川石)	orth.	(U, Fe, Y, Ca) (Nb, Ta)O <sub>4</sub>
Polymignite	orth.	(Ca, Fe, Y, Th) (Nb, Ti, Ta, Zr)O <sub>4</sub>
** Euxenite-(Y) (ユークセン石)	orth.	(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
** Polycrase-(Y)	orth.	(Y, Ca, Ce, U, Th) (Ti, Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Tanteuxenite-(Y)	orth.	(Y, Ce, Ca) (Ta, Nb, Ti) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Lucasite-(Ce)	orth.	CeTi <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Fersmite	orth.	(Ca, Ce, Na) (Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> (O, OH, F) <sub>6</sub>
Yttrocrasite-(Y)	orth.	(Y, Th, Ca, U) (Ti, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
# Kobeite-(Y) (河辺石)	amor.-orth. (?)	(Y, U) (Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub> (?)
Aeschynite-(Ce)	orth.	(Ce, Ca, Fe, Th) (Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Aeschynite-(Nd)	orth.	(Nd, Ca, Fe, Th) (Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Aeschynite-(Y)	orth.	(Y, Ca, Fe, Th) (Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Nioboaeschynite-(Ce)	orth.	(Ce, Ca, Th) (Nb, Ti) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Nioboaeschynite-(Nd)	orth.	(Nd, Ce) (Nb, Ti) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>
Tantaloeschynite-(Y)	orth.	(Y, Ce, Ca) (Ta, Ti, Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Vigezzite	orth.	(Ca, Ce) (Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
** Samarskite-(Y)		
(サマルスキー石)	mon.	(Y, Ce, U, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> (Nb, Ta, Ti) <sub>5</sub> O <sub>16</sub>
Loranskite-(Y)	-	(Y, Ce, Ca)ZrTaO <sub>6</sub> (?)
Loparite-(Ce)	orth.	(Ce, Na, Ca) <sub>2</sub> (Ti, Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Yttrobetafite-(Y)	cub.	(Y, U, Ce) <sub>2</sub> (Ti, Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH)
Yttropyrochlore-(Y)	cub.	(Y, Yb, Ca, U) <sub>1-2</sub> (Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>7</sub>
Ceripyrochlore-(Ce)	cub.	(Ce, Ca, Y) <sub>2</sub> (Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH, F)

## 炭酸塩鉱物

(#)*Bastnaesite-(Ce)			
(バストネス石)	hex.	(Ce, La) (CO <sub>3</sub> )F	
* Bastnaesite-(La)	hex.	(La, Ce) (CO <sub>3</sub> )F	
* Bastnaesite-(Y)	hex.	(Y, Ce) (CO <sub>3</sub> )F	
Hydroxylbastnaesite-(Ce)	hex.	(Ce, La) (CO <sub>3</sub> ) (OH, F)	
Hydroxylbastnaesite-(Nd)	hex.	(Nd, Ce, La) (CO <sub>3</sub> ) (OH, F)	
(#) Synchysite-(Ce)	hex.	Ca (Ce, La) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	
Synchysite-(Nd)	hex.	Ca (Nd, La) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	
Synchysite-(Y) (=Doverite)	hex.	Ca (Y, Ce) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	
Parisite-(Ce)	trig.	Ca (Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	
Parisite-(Nd)	trig.	Ca (Nd, Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	
Cordylite-(Ce)	hex.	Ba (Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	
Roentgenite-(Ce)	trig.	Ca <sub>2</sub> (Ce, La) <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub> F <sub>3</sub>	
Huanghoite-(Ce)	trig.	BaCe (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	
Zhonghuacerite-(Ce)	trig.	Ba <sub>2</sub> Ce (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F	
Cebaite-(Ce)	mon.	Ba <sub>3</sub> Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub> F <sub>2</sub>	
Cebaite-(Nd)	mon.	Ba <sub>3</sub> (Nd, Ce) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub> F <sub>2</sub>	
Lanthanite-(Ce)	orth.	(Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	
Lanthanite-(La)	orth.	(La, Ce) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	
# Lanthanite-(Nd)	orth.	(Nd, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	
# Calkinsite-(Ce)	orth.	(Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O	
Ancylite-(Ce)	orth.	SrCe (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) · H <sub>2</sub> O	
Calcioancylite-(Ce)	orth.	(Ca, Sr)Ce (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) · H <sub>2</sub> O	
Carbocernaite	orth.	(Ca, Na) (Sr, Ce, Ba) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	
Bijvoetite-(Y)	orth.	(Y, Dy) <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> · 11H <sub>2</sub> O	
Gysinite-(Nd)	orth.	Pb (Nd, La) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) · H <sub>2</sub> O	
Schuilingite-(Nd)	orth.	PbCu (Nd, Gd, Sm, Y) (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) · 1.5H <sub>2</sub> O	
# Kimuraitite-(Y) (木村石)	orth.	CaY <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	
# Lokkaiite-(Y)	orth.	CaY <sub>4</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>7</sub> · 9H <sub>2</sub> O	
Mckelveyite-(Y)	tric. ps. trig.	Ba <sub>3</sub> Na (Ca, U)Y (CO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> · 3H <sub>2</sub> O	
Burbankite	hex.	(Na, Ca) <sub>3</sub> (Sr, Ba, Ce) <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub>	
Khanneshite	hex.	(Na, Ca) <sub>3</sub> (Ba, Sr, Ce, Ca) <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub>	
Ewaldite-(Y)	hex.	Ba (Ca, Y, Na, K) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	
Daqingshanite-(Ce)	hex.	(Sr, Ca, Ba) <sub>3</sub> (Ce, La) (PO <sub>4</sub> ) (CO <sub>3</sub> ) <sub>3-x</sub> (OH, F) <sub>x</sub>	
Sahamalite-(Ce)	mon.	(Mg, Fe <sup>+2</sup> )Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	
# Tengerite-(Y)	tet. (?)	CaY <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	

## 硼酸塩鉱物

Braitschite-(Ce)	hex.	(Ca, Na) <sub>27</sub> (Ce, La) <sub>2</sub> B <sub>22</sub> O <sub>43</sub> · 7H <sub>2</sub> O
------------------	------	--

## 硫酸塩鉱物

Chukhurovite-(Y)	cub.	Ca <sub>3</sub> (Y, Ce)Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )F <sub>13</sub> · 10H <sub>2</sub> O
Chukhurovite-(Ce)	cub.	Ca <sub>3</sub> (Ce, Y)Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )F <sub>13</sub> · 10H <sub>2</sub> O

## 磷酸塩鉱物

** Xenotime-(Y) (ゼノタイム)	tet.	$YPO_4$
** Monazite-(Ce) (モナズ石)	mon.	$(Ce, La, Nd, Th)PO_4$
# Monazite-(La)	mon.	$(La, Ce, Nd)PO_4$
Monazite-(Nd)	mon.	$(Nd, La, Ce)PO_4$
Cheralite	mon.	$(Ca, Ce, Th)(P, Si)O_4$
Vitusite-(Ce)	orth.	$Na_3(Ce, La, Nd)(PO_4)_2$
# Churchite-(Y)		
(=Weinschenkite)	mon.	$YPO_4 \cdot 2H_2O$
Churchite-(Nd)	mon.	$YPO_4 \cdot 2H_2O$
Kolbeckite	mon.	$ScPO_4 \cdot 2H_2O$
Rhabdophane-(Ce)	hex.	$(Ce, La)PO_4 \cdot H_2O$
# Rhabdophane-(La)	hex.	$(La, Ce)PO_4 \cdot H_2O$
# Rhabdophane-(Nd)	hex.	$(Nd, Ce, La)_2(PO_4)_2 \cdot H_2O$
Belovite	hex.	$(Sr, Ce, Na, Ca)_5(PO_4)_3(OH)$
Florencite-(Ce)	trig.	$CeAl_3(PO_4)_2(OH)_6$
Florencite-(La)	trig.	$(La, Ce)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$
Florencite-(Nd)	trig.	$(Nd, Ce)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$
Britholite-(Ce)	hex.	$(Ce, Ca)_5(SiO_4, PO_4)_3(OH, F)$
# Britholite-(Y)		
(=Abukumalite, 阿武隈石)	hex.	$(Y, Ca)_5(SiO_4, PO_4)_3(OH, F)$
Petersite-(Y)	hex.	$(Y, Ce, Nd, Ca)Cu_6(PO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$
Chernovite-(Y)	tet.	$YAsO_4$
Retzian-(Ce)	orth.	$Mn_2Ce(AsO_4)(OH)_4$
Retzian-(La)	orth.	$(Mn, Mg)_2(La, Ce, Nd)(AsO_4)(OH)_4$
Retzian-(Nd)	orth.	$Mn_2(Nd, Ce, La)(AsO_4)(OH)_4$
# Agardite-(La)	hex.	$(La, Ca)Cu_6(AsO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$
Agardite-(Y)	hex.	$(Y, Ca)Cu_6(AsO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$
Wakefieldite-(Ce)	tet.	$(Ce^{+3}, Pb^{+2}, Pb^{+3})VO_4$
Wakefieldite-(Y)	tet.	$YVO_4$

## タングステン酸塩鉱物

Yttrotungstite-(Y)	mon.	$YW_2O_6(OH)_3$
Cerotungstite-(Ce)	mon.	$CeW_2O_6(OH)_3$

## 珪酸塩鉱物

# Iimoriite-(Y) (飯盛石)	tric.	$Y_2(SiO_4)(CO_3)$
Steenstrupine-(Ce)	hex.	$(Ce, La, Na, Mn)_6(Si, P)_6O_{18}(OH)$
Cerite-(Ce)	trig.	$(Ce, Ca)_9(Mg, Fe^{+2})Si_7(O, OH, F)_{28}$
Toernebohmit-(Ce)	mon.	$(Ce, La)_2Al(SiO_4)_2(OH)$
Toernebohmit-(La)	mon.	$(La, Ce)_2Al(SiO_4)_2(OH)$
Tritomite-(Ce)	trig.	$(Ce, La, Y, Th)_5(Si, B)_3(O, OH, F)_{13}(?)$
Tritomite-(Y) (=Spencite)	trig. (?)	$(Y, Ca, La, Fe^{+2})_5(Si, B, Al)_3(O, OH, F)_{13}(?)$
Rowlandite-(Y)	amor.	$Y_4Fe^{+2}Si_4O_{14}F_2(?)$
Cappelenite-(Y)	trig.	$Ba_3(Y, Ce)_6Si_3B_6O_{24}F_2$
# Stillwellite-(Ce)	trig.	$(Ce, La, Ca)BSiO_5$
Gadolinite-(Ce)	mon.	$(Ce, La, Nd, Y)_2Fe^{+2}Be_2Si_2O_{10}$

# Gadolinite-(Y)	mon.	$Y_2Fe^{+2}Be_2Si_2O_{10}$
Minasgeraisite-(Y)	mon.	$CaY_2Be_2Si_2O_{10}$
# Calciogadolinite	mon.	$(Ca, Ce, Y)_2(Fe^{+2}, Fe^{+3})Be_2Si_2(O, OH)_{10}$
# Hingganite-(Y)	mon.	$(Y, Yb, Er)BeSiO_4(OH)$
Hingganite-(Yb)	mon.	$(Yb, Y)BeSiO_4(OH)$
Melanocerite-(Ce)	hex.	$(Ce, Ca)_5(Si, B)_3O_{12}(OH, F) \cdot nH_2O(?)$
# Yttrialite-(Y)	hex. (?)	$(Y, Th)_2Si_2O_7$
# Thortveitite	mon.	$(Sc, Y)_2Si_2O_7$
Keivyite-(Y)	mon.	$(Y, Yb)_2Si_2O_7$
Keivyite-(Yb)	mon.	$(Yb, Y)_2Si_2O_7$
# Thalenite-(Y)	mon.	$Y_3Si_3O_{10}(OH)(?)$
# Hellandite-(Y)	mon.	$(Ca, Y)_6(Al, Fe^{+3})Si_4B_4O_{20}(OH)_4$
Tadzhikite-(Ce)	mon.	$Ca_3(Ce, Y)_2(Ti, Al, Fe^{+3})B_4Si_4O_{22}$
Mosandrite	mon.	$(Na, Ca, Ce)_3Ti(SiO_4)_2F$
# Allanite-(Ce)		
(=Orthite, 褐簾石)	mon.	$(Ce, Ca, Y)_2(Al, Fe^{+3})_3(SiO_4)_3(OH)$
Allanite-(La)	mon.	$(La, Ca, Y)_2(Al, Fe^{+3})_3(SiO_4)_3(OH)$
Allanite-(Y) (=Yttrorhithite)	mon.	$(Y, Ce, Ca)_2(Al, Fe^{+3})_3(SiO_4)_3(OH)$
Chevkinite-(Ce)	mon.	$(Ca, Ce, Th)_4(Fe^{+2}, Mg)_2(Ti, Fe^{+3})_3Si_4O_{22}$
# Perrierite-(Ce)	mon.	$(Ca, Ce, Th)_4(Mg, Fe^{+2})_2(Ti, Fe^{+3})_3Si_4O_{22}$
Tombarthite-(Y)	mon.	$Y_4(Si, H_4)_4O_{12-x}(OH)_{4+2x}$
# Kainosite-(Y)	orth.	$Ca_2(Y, Ce)_2Si_4O_{12}(CO_3) \cdot H_2O$
Caysichite-(Y)	orth.	$Y_2(Ca, Gd)_2Si_4O_{10}(CO_3)_3 \cdot 4H_2O$
Bazzite	hex.	$Be_3(Sc, Al)_2Si_6O_{18}$
Ashcroftite-(Y)	tet.	$KNaCaY_2Si_6O_{12}(OH)_{10} \cdot 4H_2O$
Ilimaussite-(Ce)	hex.	$Ba_2Na_4CeFe^{+3}Nb_2Si_8O_{28} \cdot 5H_2O$
Joaquinite-(Ce)	mon.	$Ba_2NaCe_2Fe^{+2}(Ti, Nb)_2Si_8O_{26}(OH, F) \cdot H_2O$
Orthojoaquinite-(Ce)	orth.	$Ba_2NaCe_2Fe^{+2}Ti_2Si_8O_{26}(O, OH) \cdot H_2O$
Laplandite-(Ce)	orth.	$Na_4CeTiPSi_7O_{22} \cdot 5H_2O$
Lepersonnite-(Gd)	orth.	$CaO \cdot (Gd, Dy)_2O_3 \cdot 24UO_3 \cdot 8CO_2 \cdot 4SiO_2 \cdot 60H_2O$
Monteregianite-(Y)	orth.	$(Na, K)_6(Y, Ca)_2Si_6O_{38} \cdot 10H_2O$
Nordite-(Ce)	orth.	$(Ce, La)(Sr, Ca)Na_2(Na, Mn)(Zn, Mg)Si_6O_{17}$
Nordite-(La)	orth.	$(La, Ce)(Sr, Ca)Na_2(Na, Mn)(Zn, Mg)Si_6O_{17}$
Okanoganite-(Y)	trig.	$(Na, Ca)_3(Y, Ce)_{12}Si_6B_2O_{27}F_{14}$
Tundrite-(Ce)	tric.	$Na_3(Ce, La)_4(Ti, Nb)_2(SiO_4)_2(CO_3)_3O_4(OH) \cdot 2H_2O$
Tundrite-(Nd)	tric.	$Na_3(Nd, La)_4(Ti, Nb)_2(SiO_4)_2(CO_3)_3O_4(OH) \cdot 2H_2O$
Saryarkite-(Y)	hex.	$Ca(Y, Th)Al_5(SiO_4)_2(PO_4, SO_4)_2(OH)_7 \cdot 6H_2O$
Sazhinite-(Ce)	orth.	$Na_2CeSi_6O_{14}(OH) \cdot nH_2O$
Vyuntspakhkrite-(Y)	mon.	$Y_4Al_2AlSi_5O_{18}(OH)_5$

結晶系: cub.: 等軸 tet.: 正方 hex.: 六方 trig.: 三方  
 orth.: 斜方 mon.: 単斜 tric.: 三斜 amor.: 非晶質  
 ps.cub.: 擬等軸 etc.

\* : 主要鉱物 # : 本邦産出鉱物 ( ) : 同・細分類未確認