

# レアアース資源を供給する鉱床タイプ

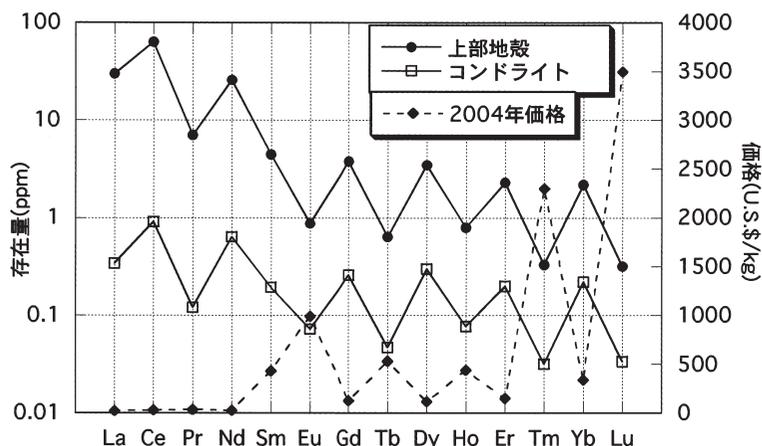
石原 舜三<sup>1)</sup>・村上 浩康<sup>2)</sup>

## 1. まえがき

レアアース元素(REE)は原子番号57(La)から71(Lu)に至る互いに化学的性質が似た15元素に対する呼び名であるが、YやScを含めて用いられることもある。岩石中のその存在量は奇数元素で少なく、偶数元素で多い特徴があり、そのため価格は基本的にはそれぞれの希少度と反比例している点は、当然とは言え興味深い(第1図)。最も重い原子番号71ルテチウムは純度99.99%1キログラムが、約40万円(\$1=115円換算)の最高値を示し、69ツリウム(99.90%)は26.5万円である。逆に安いものでは、57ランタン(99.99%)が2,650円、58セリウム(99.50%)が3,620円である。なお39イットリウム(99.99%)は10,120円である。第1図には、上部地殻とコンドライトの双方におけるレアアース元素存在量を示したが、両者で同様な傾向が認められる。したがって測定値をコンドライトで割ると凹凸が消滅し、右下がりの見やすい直線が得られる。そこで一般の学術論文では、両者の比に基づいて議論する習慣が定着している。

レアアースは最初花崗岩質ペグマタイトから小規模に生産された。19世紀後半から20世紀前半にかけては、主に砂鉱、特にアメリカ合衆国南東部の海岸から採取された。また1940年代までは量的に多いCe、La、Nbはそれぞれ単独に、その他の少量元素は分離の困難さもあって一括して取引されていた。1968-1985年には世界の生産量の多くはカリフォルニア州のマウンテンパス カーボナタイト鉱床および世界各地の砂鉱採取の副産物であった。漂砂鉱床の主体は西オーストラリア、一部東オーストラリア、インド半島南部、アメリカ東海岸などである。この情勢は1990年代初頭まで続いた。

1980年代は中国の生産量が増加し始め、オーストラリアとアメリカの比率が低下し、ロシアで初生鉱床からの生産が始まった。1998年以降は、中国の生産比率は世界の80%を超える。その主力はバイユンオボ鉱床である。全世界の生産量は1983年(31,439トン)から2004年(95,150トン)の12年間に約3倍に増加し、工業製品の高度化と共に消費が急速に拡大したことを示している。最近の国別生産推移を第1表に



第1図 レアアース元素の存在量と価格との関係。価格は2004 Mineral Yearbookによる。

1) 産総研 特別顧問  
 2) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: レアアース, カーボナタイト, 過アルカリ岩, マウンテンパス, パスタネサイト

第1表 最近の奇数年の希土類元素生産量 (REO/トン).

国名/年	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003
オーストラリア	8,328	10,304	7,047	7,150	3,850	1,650	110	0	0	0	0
ブラジル	2,891	2,174	2,383	1,377	719	270	103	0	0	0	0
中国	未公表	8,500	15,100	25,220	16,150	22,100	48,000	53,000	70,000	80,600	90,000
インド	2,200	2,200	2,200	2,365	2,200	2,500	2,750	2,750	2,700	2,700	2,700
キルギスタン	未公表	未公表	未公表	696	721	0	未公表	未公表	6,115	3,800	未公表
マレーシア	601	3,869	1,618	1,700	1,093	224	452	422	631	281	450
モザンビーク	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
南アフリカ	0	0	660	660	237	237	0	0	0	0	0
スリランカ	165	110	110	110	110	110	110	110	120	0	0
タイ	164	459	270	368	229	127	0	7	0	0	0
ロシア	未公表	未公表	未公表	7,626	6,138	4,468	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
アメリカ	17,083	13,428	11,100	20,787	16,465	17,754	22,200	10,000	5,000	5,000	0
ザイール	6	0	53	96	66	11	5	0	0	0	0
合計	31,440	41,046	40,541	68,155	47,978	49,451	75,730	68,289	86,566	94,381	95,150

\*推定値 Castor and Hedrick (2006).

示す. 今後は磁石, 特にFe-Nd-B系の普及もあって, 需要はさらに高まり生産は増加するものと予想される.

レアアースはその供給源が非常に高品位の花崗岩質ペグマタイト, カーボナタイト鉱床から, 非常に低品位の海浜砂鉱床, さらに風化殻鉱床や“ラテライト”に亘って稼行された実績があり, その供給源の多様性が特色である. 今後の需要増加に伴って, この傾向

は更に強まると考えられ, この際レアアースを含む各鉱床タイプを概観することは大変有意義である. ここでは“鉱床”から“岩石”の世界に亘って広く採取可能なレアアース資源の個々について解説し, 将来資源の進む方向について提案する.

なお中国固有のイオン吸着型鉱床については, 石原・村上(2005a)で解説し, バイユンオボ鉱床については金沢ほか(1999)に詳しい紹介があるので参照さ



第2図 世界の主要なレアアース鉱床の分布. 三角は漂砂鉱床, 円はその他鉱床 (Castor and Hedrick, 2006).

第2表 主要なレアアース含有鉱物 (Castor and Hedrick, 2006に追加)。

鉱物名	化学組成	REO wt%
Aeschnite	(Ln, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub>	36
Allanite (orthite)	(Ca, Ln) <sub>2</sub> (Al, Fe) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	30
Anatase	TiO <sub>2</sub>	3
Ancylite	SrLn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) · H <sub>2</sub> O	46
Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F, Cl, OH)	19
Bastnasite	LnCO <sub>3</sub> F	76
Brannerite	(U, Ca, Ln)(Ti, Fe) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	6
Britholite	(Ln, Ca) <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH, F)	62
Cerianite	(Ce, Th)O <sub>2</sub>	81
Cheralite	(Ln, Ca, Th)(PSi)O <sub>4</sub>	5
Chevkinitite	(Ce, Ca, Th) <sub>4</sub> (Fe, Mg)(Ti, Fe, Mg) <sub>4</sub>	n.a.
Churchite	YPO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	44
Dridite	(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	n.a.
Eudialyte	Na <sub>15</sub> Ca <sub>6</sub> (Fe, Mn) <sub>3</sub> Zr <sub>3</sub> (Si, Nb)Si <sub>25</sub> O <sub>73</sub> (OH, Cl, H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub>	10
Euxenite	(Ln, Ca, U, Th)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	<40*
Fergusonite	Ln(Nb, Ti)O <sub>4</sub>	47
Florencite	LnAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	32
Gadolinite	LnFeBe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	52
Gorceixite	BaAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> )(PO <sub>3</sub> OH)(OH) <sub>6</sub>	n.a.
Goyazite	SrAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> )(PO <sub>3</sub> OH)	n.a.
Huanghoite	BaLn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	38
Hydroxylbastnasite	LnCO <sub>3</sub> (OH, F)	75
Kainosite	Ca, V (Y, Ln) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> CO <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	38
Loparite	(Ln, Na, Ca)(Ti, Nb)O <sub>3</sub>	36
Monazite	(Ln, Th)PO <sub>4</sub>	71
Mosandrite	(Ca, Na, Ln) <sub>12</sub> (Ti, Zr) <sub>2</sub> Si <sub>7</sub> O <sub>31</sub> H <sub>5</sub> F <sub>4</sub>	<65*
Parisite	CaLn <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	64
Samaraskite	(Ln, U, Fe) <sub>3</sub> (Nb, Ta, Ti) <sub>5</sub> O <sub>16</sub>	12
Synchisite	CaLn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F	51
Thalenite	Y <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH)	63*
Xenotime	YPO <sub>4</sub>	61*
Yttrotantalite	(Y, U, Fe)(Ta, Nb)O <sub>4</sub>	<24*

\*理論値. n. a. : not available

りたい。世界の主要なレアアース鉱床を第2図に示す。レアアース鉱物は希産鉱物が多いので、一般に馴染みが少ない。第2表に主要鉱物および本文に出現する鉱物について、化学式、その希土類含有量について掲げる。

## 2. REE鉄鉱床

この鉱床タイプはバイユンオボ鉱床に尽きると言っても良い。バイユンオボ鉱床の成因はカーボナタイトで

あると考える人が多いが、Hitzman *et al.* (1992) のようにオリンピックダム、キルナバーラなどと共にIOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) に含める人もいる。カーボナタイトとは地学辞典によると、方解石やドロマイトを主成分とし、他にかんらん石、燐灰石、磁鉄鉱、パイロクロアを含む火成起源の炭酸塩岩とある(森清・諏訪, 1996)。このような広い定義に基づくと、バイユンオボ鉱床から熱水性炭酸塩鉱物脈まで、カーボナタイトは広がるであろう。カーボナタイト鉱床は一般にアルカリ火成岩類を伴い、アルカリ交代作用であるフェナ



写真1 バイユン オボ鉱床がある豊かな牧草地。モンゴル国境に近い(2005年8月)。



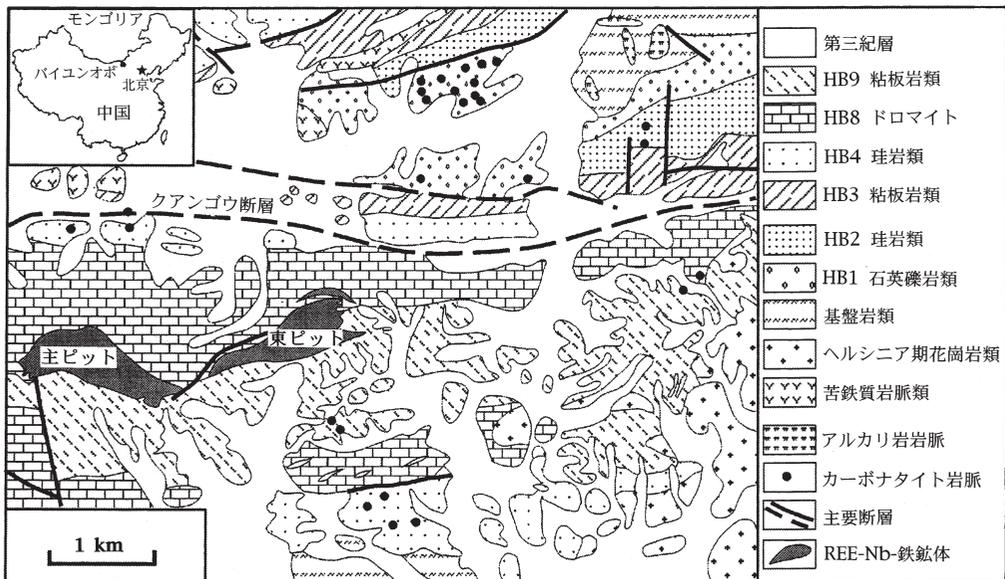
写真2 バイユン オボ鉱山ゲストハウスの掲げられた鄧小平の毛筆「中東に石油あり, 中国に希土あり」。

イトを伴うことが多く、希土類パターンは軽希土類に富む。バイユンオボ鉱床は以上の条件を満たすが、カーボナタイト説では巨大な鉄鉱床の説明が難しい。ここでは、一応、REE鉄鉱床として独立させて扱い、成因については後述する。

バイユンオボ鉱床の発見は1927年ロシア人地質家によると云われる。しかし当地は長らくモンゴル遊牧民の大地であり(写真1)、鉄鉱床はそれ以前から発見されていても不思議ではない。露頭が突出していたためにモンゴル語でバヤン(豊かな)オボ(丘)と呼ばれていた。しかし中国名の当て字「白雲鄂博」のため

か現在の中国では「バイユンオボ」と発音され、また英表記も一部でされている。1957年から開発され、20ヶ所で鉄-REE-Nb鉱床として採掘されたが、現在では2つの大規模ピット(写真2)で採掘・操業中である(石原・村上, 2005b)。共に走向延長1km以上、主ピットで5.4%、東ピットでは5.2%REO(酸化物としてのレアアース元素総量)の鉱石を採掘している。総鉱量は鉄鉱石15億トン(35%Fe)、レアアース鉱石5,740万トン(品位6%REO)、ニオブ鉱石220万トン(平均0.13%Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)である(Fan et al., 2006)。

この鉱床は北中国プレートの中期原生代のバイユ



第3図 バイユン オボ鉱床の地質略図 (Fan et al., 2006)。カーボナタイトとアルカリ岩は北東部に点在するに過ぎない点に注目。

ンオボ層群に胚胎する。この地層はHb1~9垂層に分類され、Hb8垂層のみ炭酸塩岩(ドロマイト)であり、その他は粘板岩、砂岩、珪岩、礫岩類から構成される。鉱床の下盤(北側)は砂岩を挟むドロマイト、上盤(南側)は粘板岩類である(第3図)。鉱体はレンズ状ないし層状、3つの主要鉱体と多数の衛星鉱体からなり、層準規制を受ける。明らかなカーボナタイト岩脈、アルカリ火成岩類はやや離れて分布する(第3図)。鉱床から数キロ以内に古生代中期と後期の花崗岩類があり、深部にも予想されている。希土類鉱物(モナズ石)のTh/Pb年代は555-398Ma、最終鉱化年代は古生代である。

主鉱化期(430-420Ma)の縞状鉱石はREE-鉄酸化物に変質鉱物のエジリン、ほたる石、少量のアルカリ角閃石を伴う(石原・村上, 2005b)。これはアパタイト、バスタネサイト、ほたる石、石英を含むエジリン脈、さらに後期のパライト-バスタネサイト-Ba-REEフッ化炭酸塩鉱物の鉱脈やポッドに切られる。最末期の鉱化作用はコロムバイト、イルメノルティル、エシキナイト、フェルグソナイトなどのNb鉱物を伴う(Chao *et al.*, 1997)。

これまでに提案されたこの鉱床の成因論は多様である。1) 母岩と同時の堆積性鉱床、2) (カーボナタイトマグマからの) 熱水鉱液の海底噴気鉱床あるいは深成交代鉱床、3) アルカリ花崗岩マグマによる熱水交代作用。近年では流体による熱水交代作用を考える人が多く、その流体の起源としては、i) カーボナタイト、ii) アルカリ岩、iii) 沈み込み帯などが提案されている。

バイユンオボ鉱床の他にも鉄鉱床に伴われるレアアース鉱床がある。まず、巨大な鉱量を持つ南オーストラリアのオリンピックダム鉱床はCu, U, Ag, Au鉱床として知られているが、この角礫化花崗岩中の鉱体は40-90%の赤鉄鉱を含み、実は鉄鉱床である(石原, 1999)。脈石鉱物は石英、絹雲母、ほたる石、重晶石、0.5%のREE量を含み、その主力は微細なモナズ石とバスタネサイトである。従って、LREE/HREE比は高く、その回収の計画は無いが、将来に回収するとすれば粉末尾鉱として貯鉱(?)されている利点がある。

スウェーデン北部のキルナ鉱床の磁鉄鉱石は平均0.7%、赤鉄鉱石は0.5%REOを含む。その原因はアパタイトとモナズ石であり、LREEに富む性格を持つ。スウェーデンには他にも同様な鉄鉱床がある。

ミズーリ州のピーリッジ(Pea Ridge)鉄鉱床は小規模、高品位のREE鉱体を含む。これは15億年の花崗岩・閃長岩中の角礫パイプ鉱床で平均品位は12%REEと高い。モナズ石とゼノタイムを含み、両鉱物の比率によってLREE/HREE比が変化する。ニューヨーク州、Minevilleの先カンブリア紀斑れい岩と閃長岩中の磁鉄鉱石の尾鉱にはアパタイトが含まれており、これは11%REO、2%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含む。

### 3. カーボナタイト鉱床

世界に点在するカーボナタイトには100ヶ所以上でREE鉱物が知られており、両者の親近性が窺える。稼行されているカーボナタイト鉱床はマウンテンパス1ヶ所と言ってよく、ここでも近年環境規制で採掘が中止され、2003年は貯鉱から売鉱されている。マウンテンパス鉱床はロスアンゼルスからラスベガスへ向かう国道91号線沿いの乾燥山岳地帯に位置し、州境より20kmカリフォルニア側に入っている(写真3-7)。

マウンテンパス鉱床は1954年初頭にMolybdenum Corp. Americaにより開坑された。現在この会社はMolycorp Inc. と改名され、Unocalの子会社化している。1987年の確定と予想鉱量はカットオフ5%として、8.9%REO、2,900万トンと発表された(Castor, 1991)。現在でも同様な品位で、鉱量2,000万トンであるが(Castor and Nason, 2003)、カットオフ品位を下げても鉱量の増加は少量であり(S. Castor, 談, 2006)、低品位鉱石は少ないようである。

鉱床付近には、原生代の花崗岩質片麻岩類、眼球片麻岩などが北北西-南南東方向に伸張して広く分布する。これらに同時代の過カリウムアルカリ岩がカーボナタイトと共に貫入する(Olson *et al.*, 1954)。過カリウムアルカリ岩はシオンキナイトと呼ばれるカリ長石(正長石とサニデイン)・かすみ石・輝石を含む斑れい岩、および閃長岩からなる。シオンキナイト-閃長岩複合体が最も一般的であり、最大長約2kmである。REE鉱物はカーボナタイトのほか、ペグマタイト、鉱脈にも含まれる(第4図)。

鉱床の記載は別報(村上・石原, 2006)に譲るが、鉱石は岩脈と同方向に伸長したレンズ状を示し(第5図)、バスタネサイト10-15%、方解石-ドロマイト65%、重晶石20-25%が主要鉱物で、他にストロンチアナイト、タルクが局在する。方鉛鉱が一部で多量に産出

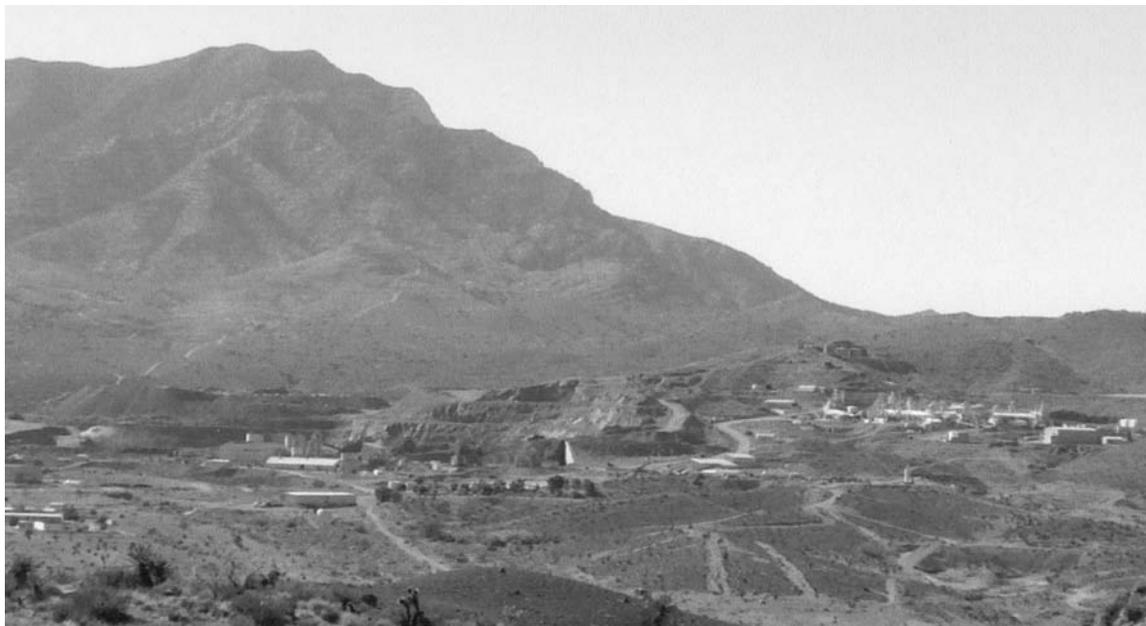


写真3 国道61号線沿いのマウンテンパス鉱山全景(2006年6月).



写真4 鉱山付近のサボテンが多い山地.



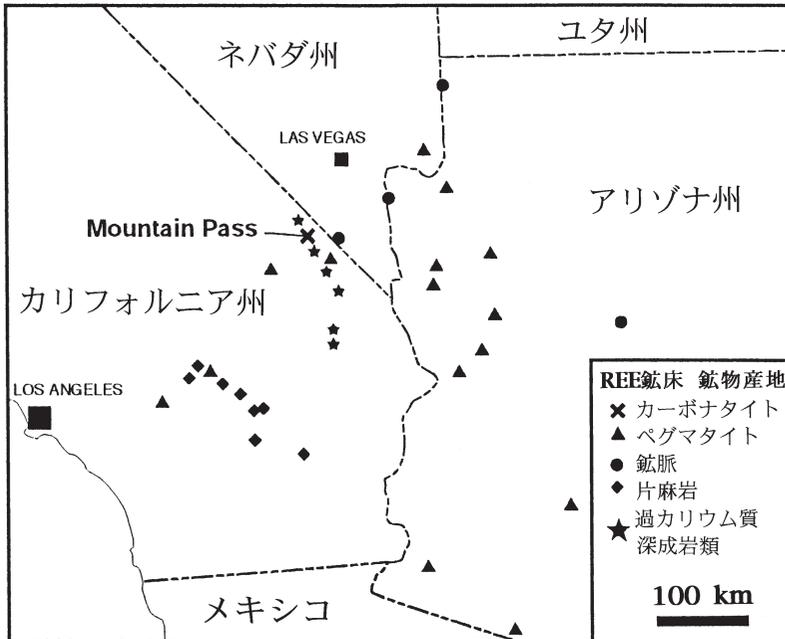
写真6 採掘を休止中のオープンピット.



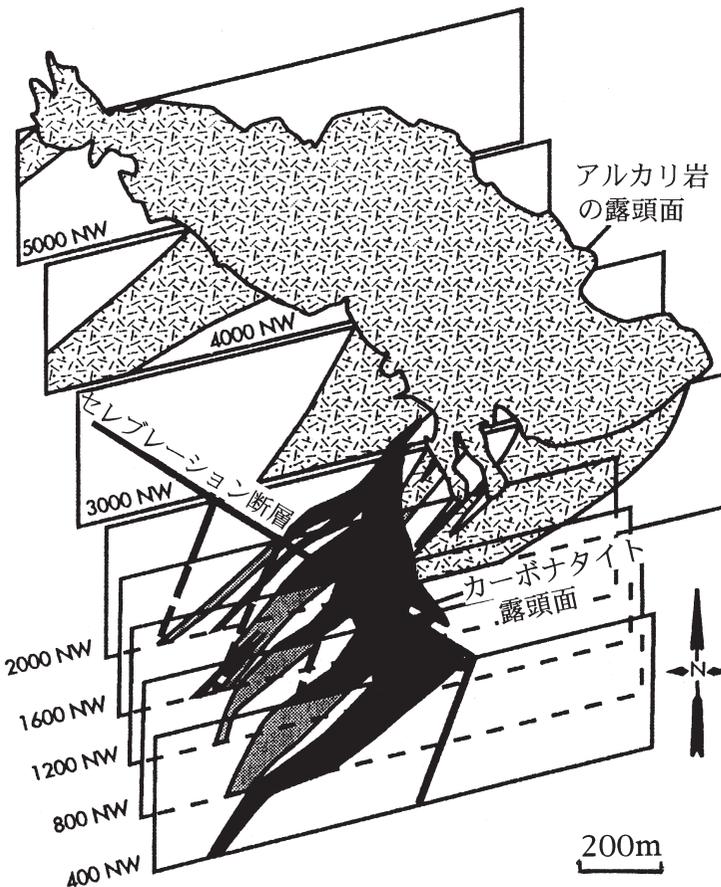
写真5 閃長岩中の急傾斜カーボナタイト岩脈. 人物スケール左の白色部.



写真7 過カリウムアルカリ岩体の一部, 閃長岩. 中央に黒雲母縁を伴うアルカリ長石脈.



第4図  
カリフォルニア州南部のマウンテンパス カーボナタイト、過カリウムアルカリ岩体、REE鉱床の分布 (Castor, 1991).



第5図  
マウンテンパス鉱床のアルカリ岩とカーボナタイト形態図 (Castor and Nason, 2003).

第3表 世界の主要なレアアース鉱床の開発状況 (Castor and Hedrick, 2006を一部変更)。

鉱床名	国名	鉱石量(万トン)	品位(%REO)	鉱床タイプ	現状
バイユンオボ	中国	5,740	6.0	REE鉄(カーボナタイト)	稼行中
マウンテンパス	アメリカ	2,900	8.9	カーボナタイト	休山中
マウントウェルド	オーストラリア	1,540	11.2	カーボナタイト ラテライト	開発中
アラシャ	ブラジル	80	13.5	カーボナタイト ラテライト	未開発
カタロン	ブラジル	200	12.0	カーボナタイト ラテライト	未開発
Dubbo	オーストラリア	70	0.86	トラカイト ラテライト	未開発
Mrima Hill	ケニア	30	5.0	カーボナタイト ラテライト	未開発
ストレンジレイク	カナダ	3,000	1.3	熱水鉱染鉱床	未開発
Nolan's Bore	オーストラリア	380	4.0	アパタイト鉱脈	未開発
牦牛坪	中国	150	2.7-3.9	炭酸塩鉱脈	稼行中
竜南・尋烏	中国	不明	0.05-0.2	花崗岩ラテライト	稼行中
Lovozero	ロシア	不明	0.01	超アルカリ閃長岩	稼行中
Aktyus	キルギスタン	不明	0.25	不明	稼行中
Eneabba	オーストラリア	不明	0.001	砂鉱	稼行中

するが、硫化物は一般に少ない。微量のREE鉱物として他に9種類がある。アメリカ合衆国南西部では一連の探査で発見された多数のカーボナタイトがあるが、REEを稼行出来たものはマウンテンパスのみであった。

マウンテンパス鉱床は次の諸点から間違いなくカーボナタイトである。(i) 構造と組織の面で炭酸塩岩は火成起源である。(ii) アルカリに富むtemitlic変質に関する。(iii)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初生値が低い。しかし、一般にカーボナタイトはナトリウム質であるのに対し、(a) 過カリウム質の火成活動に関係する、(b) 鉱床の形態が特異である、(c) 鉄、燐酸塩、Nbに著しく乏しいなどは他の鉱床とはやや異なる性格である。

コロラド州Powderhorn Hill地区のCambian Hillカ

ーボナタイトは岩脈状カーボナタイトで3%REOに達するが、平均品位は0.5%REOに過ぎず、鉱量は未確定である。同じ地域のWet Mountainは小規模で2.5%REO鉱化帯を含む。

アイダホーモンタナ州境のノースフォーク地域には顕生代カーボナタイト岩脈で21%REOに達する鉱化帯を含み、モナズ石、アラナイト、ancylite(第2表)が知られている。鉱化部分の岩脈は幅1m以下であるから、量的には期待できない。

カナダ東部のカーボナタイトにもREE鉱化が認められている。ケベック州のオカの中生代カーボナタイト岩脈は著名でbritholite(第2表)を含む。現在、採掘ピットは水没している(写真8)が、新たな試錐によりNb資源としての再開発が検討されている(写真9)。



写真8 カナダ、オカのカーボナタイト鉱床(2006年6月)。現在、採掘ピットは完全に水没。

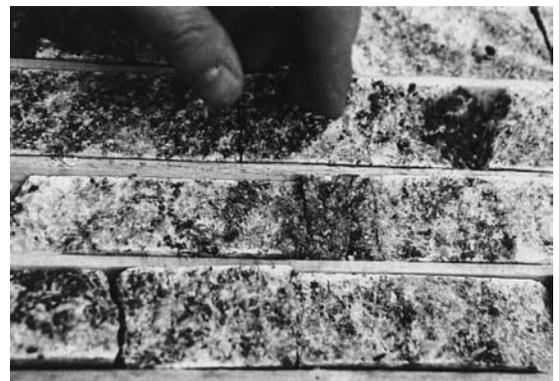


写真9 オカ鉱床の新たな開発へ向けたボーリングで得られたカーボナタイト。



写真10 南ア、パラボラ カーボナタイトにおけるアパタイトの採掘(1993年9月)。

ケベック州東部の後期原生代のSt. Honore岩体では試錐により幅80mの鉍化帯(>3%REO)が知られている。鉍物はバスタネサイトとモナズ石であり、LREEに富む。

ブラジルのカーボナタイトもREEに富むが、これまでの生産量は少ない。ミナス ジェイラス州、アラシャ(Araxá)のバレイロ岩体では品位2.5%Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、4.4%REOの酸化鉍石が4.5億トンも知られている。

アフリカのカーボナタイトもLREEを多く含むが、いずれも未開発である。マラウイのKangankunde Hillにはモナズ石を含むカーボナタイト岩脈がある。このモナズ石はThを含まず優れている。5%REO品位で50万トン程度の資源量が予想されている(Deans, 1966)。Mariano (1989)はこのモナズ石は元々マグマ性であったものが熱水変質によりThを含まないモナズ石と少量のバスタネサイト、florencite-goyazite(第2表)に変化したと解釈した。

タンザニアのウイグウ・ヒル(Wigu Hill)のカーボナタイト岩脈はモナズ石を含み、20%REOを含む(Deans, 1966)。南アのパラボラのカーボナタイトは早期原生代のカリウム質アルカリ岩複合体に産出し、露天掘りにより多量の銅とアパタイトを生産した(写真10)。日産4,250万トンのアパタイト浮選精鉍が生産され(写真11)、そのアパタイトのREO含有量は0.4-0.9%であり、低い。

四川省のマオニューピン(牦牛坪)鉍床は1992年に中国第二位の生産量を持ち、従来は鉍脈型とされていたが、最近では同位体・その他の性質に基づきカーボナタイトであると判断されている(Hou *et al.*, 2006)。これまでに判明している上部の鉍量は約150



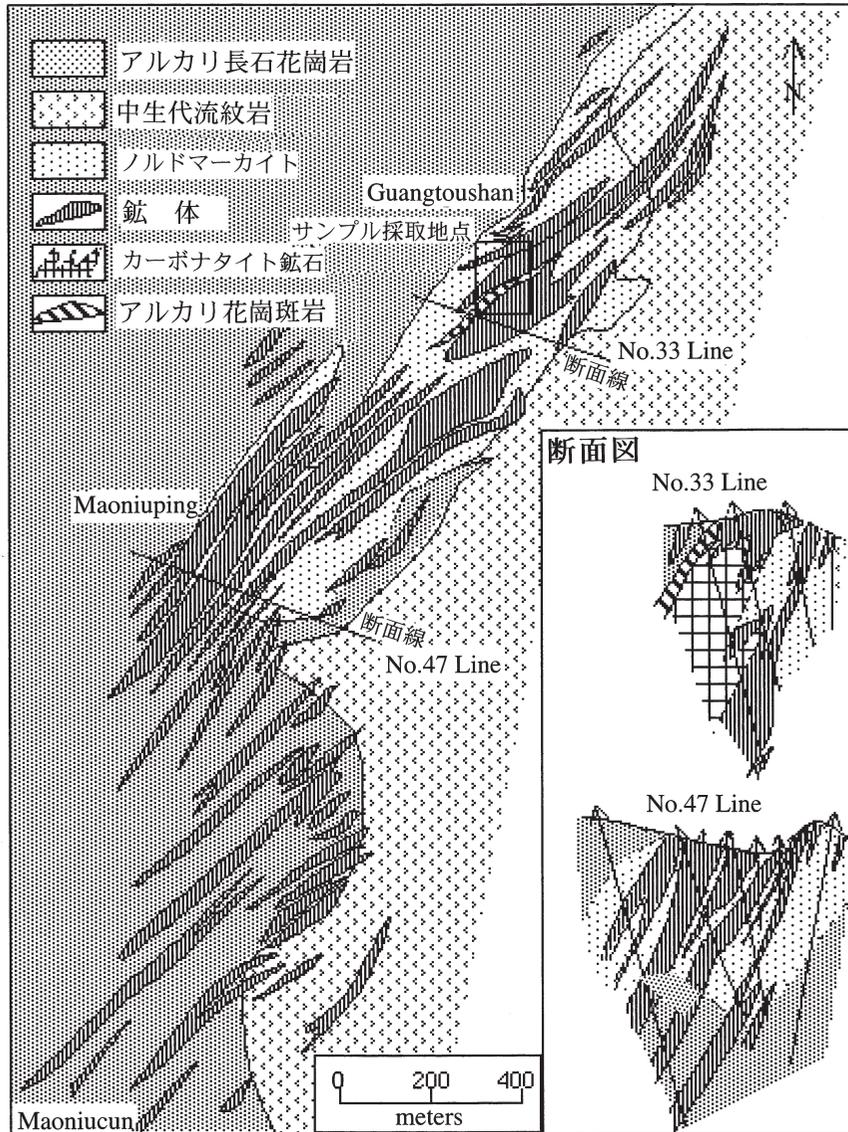
写真11 南ア、パラボラ鉍山におけるアパタイトの浮遊選鉍(1993年9月)。

万トン、平均品位2.7-3.9%REOである。最上部の酸化帯では10-13.6%REOが知られている。そのほか副産物として鉛33万トン、銀174トン、重晶石378万トン、ほたる石240万トンが期待されている有望鉍床である(Wang *et al.*, 2001)。

鉍床はインド-アジア衝突帯東部にあり、南北系の走行横づれ断層が恐らく開いた時期に貫入したカーボナタイト-アルカリ花崗岩類(~35Ma)に関連し、特にノルドマーカイト(石英閃長岩)岩脈に付随する(第6図)。鉍化帯は北北東に約10km、幅200-600mの規模を持ち、鉍化作用はバスタネサイト、ペグマタイト、ペグマタイト質方解石鉍脈~ネットワーク脈であり、REE鉍物は主にバスタネサイト、ほかにchevkinite, xenotime, britholite(第2表)、アラナイト、モナズ石、脈石鉍物は重晶石、方解石、石英、ほたる石、長石、エジリンと硫化物(主に黄鉄鉍)である。

鉍石は低いSiO<sub>2</sub>(<10.22%)、FeO(<1.20%)、MgO(0.73%)と幅広いCaO(40.7-55.4%)含有量を持つ点で初生のMgカーボナタイトと異なり、LREEに著しく富む点で一般のカーボナタイトの性格を持つ。HFS元素<sup>註1</sup>(Nb, Ta, P, Zr, Hf, Ti)に乏しい。Sr初生値は比較的高く(0.7060-0.7079)、Nd初生値は著しく低く(-3.2-18.7)、鉛同位体比が幅広い点で世界の他のカーボナタイトと異なる。これら同位体データから、マグマの起源は沈み込んだ大洋地殻と遠洋堆積物により変質した上部マントル起源と考えられ、閃長岩類とカーボナタイトとの関係はマグマ期における液相不混和により説明されている(Hou *et al.*, 2006)。

トルコのキジルガオレン(Kizilcaoren)ではバスタネサイト-ほたる石-重晶石カーボナタイトが幅30cmの岩



第6図 四川省のマオニューピン鉱床の地質図 (Wang et al., 2001).

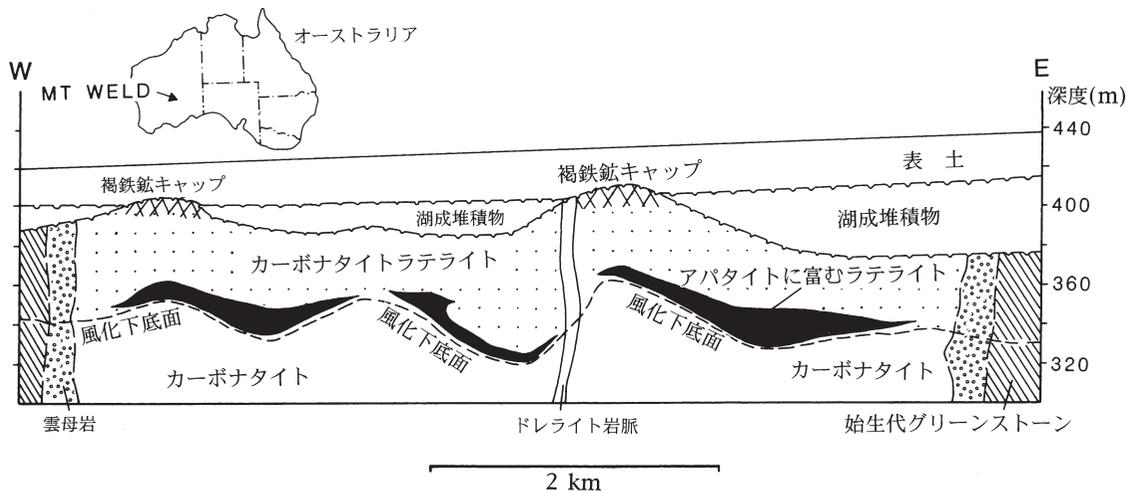
床状レンズに産出し、約5%REEを含むが、LREEに富むタイプである。このカーボナタイトは第三紀のフォノライト、トラカイト、同質火砕岩と関係して産出する。

#### 4. 風化殻鉱床

花崗岩そのものやカーボナタイトや閃長岩に関係する初生低品位鉱床が風化作用によって経済性を持つ可能性は1980年代から研究された。このタイプは大きな鉱量と一部では高品位鉱が得られているが、実

際に稼行されたものは花崗岩が風化した華南のイオン吸着型鉱床しか存在しない。カーボナタイトが風化した鉱床はラテライト鉱床と呼ばれており、その代表例であるオーストラリアのマウント ウェルド (Mount Weld) は現在開坑へ向けて準備中である。

華南の花崗岩地帯では風化殻が厚く発達しており、その中のレアアースに富む部分がイオン吸着型鉱床と呼ばれて、これまでに20~30ヶ所で採掘された。花崗岩の風化斜面を適宜採掘するために、鉱山名を特定することは非常に困難である。その生産量は



第7図 マウント ウェルド カーボナタイト 鉱床の断面図 (Lottermoser, 1990).

1992年には中国のレアアース生産量の14%に達した (Wu *et al.*, 1996). 華南の風化殻鉱床の代表的なものは江西省南部の竜南地区の竜南 (Longnan, HREE+Y型), 尋烏 (Xuwu, LREE型) であり, Wu *et al.* (1990, 1992) により詳細に研究され, 石原・村上 (2005a) によって本誌に紹介された.

竜南鉱の希土類パターンはゼノタイムのものに酷似しており, 尋烏型はLaに富む (第9図B). 共にCeが低く, セリウムが酸化してCe<sup>4+</sup>となるため地下水に移動し, 濃集しなかったと考えられる. 鉱床は一般に厚さ3-10m, ハロサイトとカオリナイトを主とし, 品位は0.05-0.2% (Wu *et al.*, 1996) と低いが, REEは酸で簡単に溶出できる利点がある.

REE カーボナタイトが風化したREEに富むラテライト土壌は, 熱帯地方を中心に世界で50ヶ所以上知られているが, 華南のように広範囲に採掘された所は無い. 西オーストラリア南部のマウント ウェルド鉱床は原生代 (20億年) の巨大なカーボナタイトの風化キャップである (第7図). 最上部にスパージーン帯 (厚さ0-9m) があり, 主にゲーサイト-赤鉄鉱および鉛とアルミナの含水硫酸塩であるプルンオグマイト (plumbogummite, PbAl<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>H<sub>2</sub>O) から構成され, 0.5-30% REEを含む. その下位の残留帯 (residual zone, 3-30m) は主鉱物はアパタイトとゲーサイトで, 0.1-1% REEを含む (Lottermoser, 1990). この鉱床は一般に高いLREE/HREEを持つが, 一部でHREEとYが高い鉱石がある. 公表された鉱量は

1,540万トン (11.2% REO + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mariano, 1989), または230万トン (18% REO) である.

ラテライトキャップ下部の未風化カーボナタイトは0.1-0.2% REOを含む. この初生鉱体がペルム紀の水河時代以降の長い風化時間の間に浸透する地下水によってLREEは上部に磷酸塩, Al-磷酸塩鉱物として濃集し, 下部ではYとHREEを含むチャーチアイト (churchite) に含まれて, 現在に至ったものと考えられる (Duncan and Willett, 1990).

西オーストラリア北部のヤングバナ (Yangibana) 探鉱地でも11% REOに達する酸化鉱焼けが発見されており, これは初期原生代のカーボナタイトの風化殻である.

ブラジルのアラシャ カーボナタイトでは80万トン (平均13.5% REO) の鉱量が得られており, その鉱物は磷酸塩である gorceixite と goyazite である (Kamitani and Hirano, 1990). ここではラテライト化によりREEのほか, Nb, Zrの著しい濃集が得られている (Morteani and Preinfalk, 1996). アラシャ南東方約300kmのカタロン (Catalao) Iカーボナタイト複合体は, 白亜紀 (83 Ma) のリング状かんらん岩, リン酸塩, 炭酸塩マグマの貫入岩体であり, 約200万トン (品位12% REO) のラテライト鉱石を持つ (Hirano *et al.*, 1990). REO 鉱物は主に gorceixite などの二次的な磷酸塩である. ブラジル北部, パラ州のMaicuruカーボナタイト複合体の風化殻では二次的磷酸塩鉱物として17% REEを含む (Costa *et al.*, 1991). ベネズエラのアマゾン河流域

のセロ インパクトには巨大な円形構造があり、これは環状カーボナタイトの風化部分と思われる。これは11% REEに達する含有量を持つ(O' Driscoll, 1988)。

ブラジルのカーボナタイトには深層風化によって生じたアナターゼがあり、チタン資源として活用されているが、これには軽希土類に富むREEが含まれる。パイロットプラントによる試験によればチタン精鉱中に3% REEが含まれており、チタンの製品化の為にはそれを除去する必要がある。チタン資源は大規模で、最大のミナス ジェイラス州のセラネグラでは、2億トン(27.7% TiO<sub>2</sub>)である。同様なものはアマゾン河流域でも発見されている。

REEに富むラテライトはアフリカでは17ヶ所で知られている。最もよく研究されたものはケニアのMrima Hillのカーボナタイトの風化土壤中、モナズ石を含む5% REO 鉱量が600万トン得られている。

ヨーロッパではモンテネグロで、石灰岩カルストの風化起源と思われる上部ジュラ紀のボーキサイト鉱床にhydroxyl-バストネサイトとしてREEが濃集している例がある。

REE 鉱物は一般に風化作用の影響を受けにくいとされるが、例外もある。風化で残存し易いモナズ石はラテライトに産出し易い。ブラジルのアラシャとカタロンでは、ラテライト中のREEは下位の原岩のそれを反映し、ラテライト化でREEは動いていないと考えられている。華南の竜南と尋烏のイオン吸着型鉱床の異なるREEパターン(第9図)も、その原岩の相違を反映したものである。

一方、ラテライト化で風化し易い鉱物の分解によって、ラテライト化過程でREEの“分化作用”が生じることも事実であって、マウント ウエルドの例は第7図に示した。また酸化環境下ではREE 鉱物の分解により、正または負のセリウム異常が現れる。したがってラテライト化では原岩の組成の他、風化期間の長さ、風化速度、地形などもラテライトの性質を規制する要素である。

## 5. 過アルカリ火成岩のHREE 鉱床

過アルカリ火成岩類に関連して数多くのREE異常は知られているが、一般には低品位である。しかし重希土類に富み大規模であるだけに将来的には非常に魅

力的な資源である。ロシア・コラ半島の古生代のロボゼロ層状岩体(Lovozero layered massif)には露石閃長岩に関連するREE含有ラポライト(laporite)があって、過去50年間採掘されている。この層状火成岩体は4層に分けられる。主体は最上部のeudialytic閃長岩で容量比で30%を占め、最下部層は厚さ1,000m以上、容量比65%のネフォリナイト、ほかにネフェリン閃長岩と同関連岩類からなる。また、ごく少量の後期閃長岩がある。これら岩石の主構成鉱物はネフェリン、マイククロクリン、エジリンであり、少量鉱物としてもarfvedsonite, hydrosodalite, natorolite, sodaliteである。

ラポライトは一般に細粒(0.2-0.6mm)、やや斑状、ネフェリンに富み、分化が進んだ層準で見られる。かすみ石と少量のエジリンからなる白色のアルカリ完晶質岩である urtite, エジリン, 正長石, かすみ石を主鉱物とする粗粒アルカリ岩のmaligniteなどにも富む。この岩体の最上部に厚さ数cm~数mの単位でラポライト濃集部分が見られる。ラポライトは38.5% TiO<sub>2</sub>, 30-36% REO, 10-12% Nb-Ta酸化物の組成を持ち、重希土類にもやや富んでいる(第9図B)。1990年代には3万トン/年のラポライトが2鉱山からエストニアとカザフスタンに出鉱され、精錬された。採掘は現在中止されているが、再開が考慮されている。

1980年代のイットリウム価格上昇はその探査を活発化させ、それは同様に過アルカリ花崗岩類に関連するHREEやZr 鉱床, Be, Nb, Ta資源の新たな発見に繋がった。これら新資源は大規模ではあるが、現在稼行中のLREEに富む鉱床に較べて低品位である性質を持つ。

ニューメキシコ州のDajarito MountainのHREE-Zr 鉱床は10km<sup>2</sup>の拡がりを持つドーム状閃長岩貫入岩体のeudialyte部に濃集する。平均品位0.18% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.2% ZrO<sub>2</sub>の鉱量240万トンである。

オンタリオ州、Kipawa湖に露出するグレンビル変動を受けた片状閃長岩は100×1,300mの範囲にY, Zrに富む部分があり、endialyte, mosandrite, britholiteを含んでいる。ケベック-ラブラドル州境のストレンジレイク(Strange Lake) Zr-HREE-Nb-Ce 鉱床は直径6kmのプラグ状アルカリ岩体に伴う鉱床であるが、主要鉱化は熱水期であり、これについては後述する。

ストレンジレイク南東250kmのShallow Lake, Letia Lakeにも高イットリウム岩が知られている。カナダ、北西準州のイエローナイフの南東約100kmのThor Lake

にもアルカリ岩に伴ってレアメタルに富む鉍床 (鉍量 176 万トン, 0.20-0.28%  $\text{Re}_2\text{O}_3$ , 0.17-0.20%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 0.46-0.58%  $\text{Nb}_2\text{O}_3$ , 0.62-1.11%  $\text{BeO}$ ) がある (Taylor and Pollard, 1996).

グリーンランド南部の Ilimaussag の後期原生代過アルカリ閃長岩には 27% の eudialyte を含む岩相が知られている。O' Driscoll (1988) は 0.12%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 1.2%  $\text{ZrO}_2$  層を発見し, Steenfelt (1991) は厚さ 3.5m (平均 100 万トン), 平均 4%  $\text{ZrO}_2$  を報告した。スウェーデンの Norra Kair の中期原生代の eudialyte 閃長岩は Zr や Y に富む。

サウジアラビアにも REE, Zr を伴うアルカリ岩が分布する。軽, 重希土類の双方に富み, その予想鉍量は ~4.4 億トン, 品位は 0.13-0.52% Y である (Drysdall et al., 1984)。エジプトには北東系のトランス大西洋系断裂帯の東方延長部沿いに閃長岩・過アルカリ花崗岩が後白亜紀に貫入し REE に富む。ガラエルハムラ (Gara El Hamra) 岩体は特に HREE が多く含まれており重要で, その変質部分では 3% REE に達する (H. Abdalla, 2005 私信)。

## 6. 熱水性鉍床

熱水性鉍床は貫入岩体頂部の鉍染鉍床, 鉍脈型などがある。前者が規模が大きく, カナダのラブラドル州中央部の ストレンジ レイク 鉍床は推定鉍量 3,000 万トン以上と大規模である。平均品位は 1.3% REE, 3.25%  $\text{ZrO}_2$ , 0.66%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 0.12% Be, 0.56% Nb であり (Williams-Jones, 2006, 講演), そのレアアース含有量は約 39 万トンである。

### 6.1 鉍染鉍床

ストレンジ レイク 鉍床は, 始生代の変成岩類中に貫入する中期原生代の非造山型アルカリ花崗岩類 (Rb/Sr 年代 1,189 Ma) に関連して産出する。この貫入岩体は直径 6km, 3 回の貫入時期を持ち, 周辺をほたる石と赤鉄鉍に富む角礫岩に取りまかれる。岩相は大きくは中心部の未変質ハイパーソルバス花崗岩, その周縁のサブソルバス花崗岩に二分される (第 8 図)。後者は多量の母岩のモンゾニ岩起源の円形~亜円礫状の優白質エンクレーヴを含み, これはハイパーソルバス花崗岩の周縁部を形成していたと考えられる。過アルカリ花崗岩ペグマタイト岩脈 (10-50cm)

が東西方向に貫入し, 更に岩体中心部には幅 6-20m のペグマタイト-アプライト岩床があって, REE に富む (Salvi and Williams-Jones, 1992)。

各岩相の構成鉍物はアルカリ長石 (アルバイト, 微斜長石, パーサイト), 石英を主成分とし, 苦鉄鉍物はエジリンと artredsonite, 次いで REE 鉍物, HFS 元素鉍物である。REE 鉍物, HFS 元素鉍物, ほたる石などは変質岩で卓越する。斑晶としては微斜長石, arfredsonite, 石英などが径 1cm 以下で存在する。REE-HFS 元素鉍物は一般に elpidite である。これら含有量は, ハイパーソルバス花崗岩から末期のペグマタイト-アプライト, 変質サブソルバス花崗岩へと上昇する。

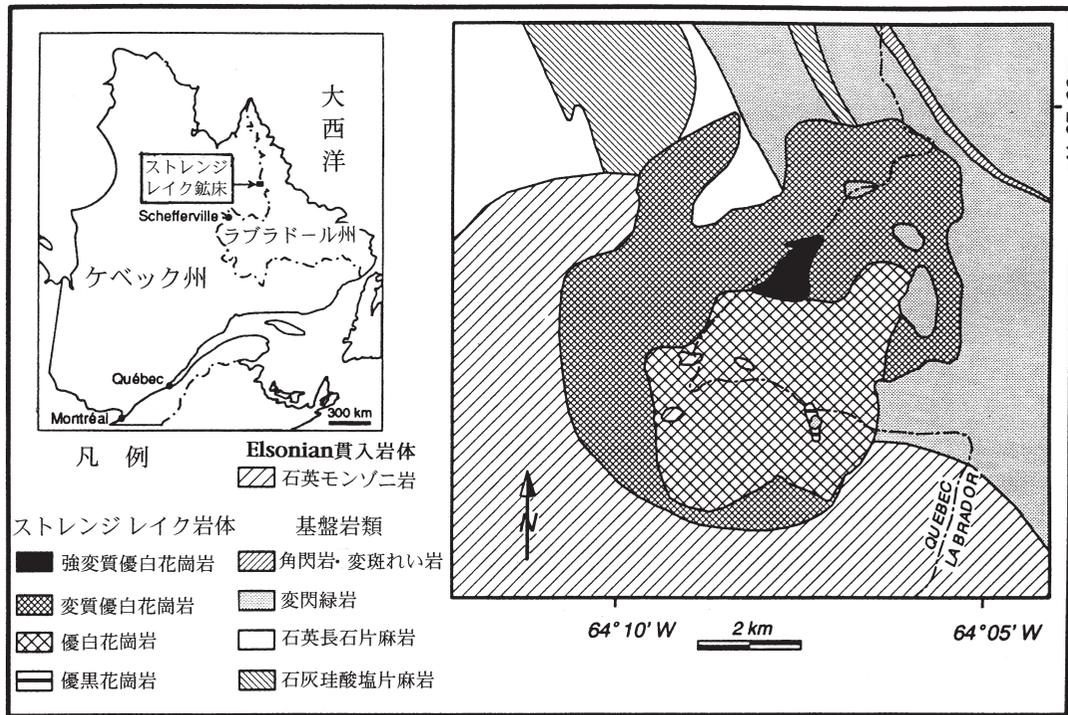
変質作用は (i) REE-HFS 元素鉍物と Ca 鉍物を含む赤鉄鉍パッチの出現, (ii) arfredsonite の赤鉄鉍土エジリン土石英化, (iii) Na 含有相と置換する鉍物+石英の存在, (iv) 二次的な青紫色ほたる石, として見られる。変質サブソルバス花崗岩では中規模の HREE の濃集が見られ, ペグマタイト-アプライトの変質鉍体では著しく HREE が濃集している (第 8 図)。

オーストラリア北部の Brockman 鉍床は下部原生代の変成流紋岩質凝灰岩中に胚胎し, 900 万トン (1.3% Zr, 0.15%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 0.12% HREE) の鉍量を持つ (O' Driscoll, 1988)。

ニューサウスウェールズ州, Dubbo のジュラ紀トラカイト中の鉍床も同様に熱水性と思われ, 8,300 万トン (1.9%  $\text{ZrO}$ , 14%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 0.12% REO) の鉍量を持つ。ブラジルの Pocos de Caldas には中生代又は古第三紀の閃長岩が直径 30km 規模で露出し, 一部に eudialyte を濃集する。

### 6.2 鉍脈鉍床

レアアース鉍物は小規模ではあるが熱水性鉍脈にも濃集し, アフリカではかつて 2 鉍山で稼行された。南アフリカでは Steenkampskraal で 1950-1960 年代に 5 万トンのモナズ石が, モナズ石-アパタイト石英脈から生産された。これは原生代花崗岩の破碎帯を満たす鉍脈であり, 幅 1m, 走向延長 300m である。モナズ石は非常に高品位で 75% にも達し, アパタイト, 磁鉄鉍, 硫化物を伴う。鉍石品位は 39% REO に達し LREE のみならず HREE にも富み, 明らかな Eu 負の異常を示す。同様なモナズ石-アパタイト脈はネバダ州 Crescent Peak (マウンテンパスの 30km 東方) でも先カンブリア紀花崗岩を切って胚胎する。



第8図 ストレンジレイク鉱床付近の地質図 (Salvi and Williams-Jones, 1990).

アフリカ東部、ブルンジのKarongeでは先カンブリア紀珪岩と片岩を切って網状-細脈状に石英-重晶石、バスタネサイト-モナズ石が産出し、採掘された。バスタネサイトとモナズ石はカーボナタイトに典型的なLREEに富むパターンを示す。南アではPilanesberg過アルカリ岩に伴う鉱脈にbritholiteを含有するものがある。

アイダホ-モンタナ州境のLemhi Passには250km<sup>2</sup>の地域にREE-Th含有石英脈が散在し、REO資源として37万トンが予想されている。鉱化はLREEに富み、平均品位は<1% REOであるが、一部では0.3% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、2% REEに達する。50km離れたDiamond Creekにも同様な鉱化がある。モンタナ州のShusblodでは白亜紀の石英-炭酸塩-ほたる石-parisite脈に0.1-0.2% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の異常が見られる。アイダホ州Hall Mountainのトル石-石英-炭酸塩鉱物-ほたる石脈では0.2% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が知られている。

オーストラリアのアムス スプリングに近いNolan's Boneには脈状アバタイトが産出し、REEに富み、資源量として380万トン(4.0% REO, 17% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)が報告されている。鉱脈型レアアース鉱床の多くはカーボナ

イト-アルカリ岩複合体と成因的に関係している可能性がある(例:ブルンジのKarongeなど)。しかしネバダ州のCrescent Peakはマウンテンパス鉱床から30km離れているに過ぎないが、その鉱脈は著しい負のユーロピウム異常を示し、恐らく成因を異にする。

## 7. 漂砂鉱床

REEを回収する砂鉱床の多くは花崗岩類や高変成岩類を後背地とする第三紀-第四紀層から得られるが、先カンブリア紀にも達する化石砂鉱から得られることもある。

Orris and Grauch (2002)は360ヶ所以上のREE砂鉱産地を報告している。稼行産地の多くは海成起源で現在の海岸線に沿っているチタン砂鉱で、副産物としてジルコン、モナズ石、一部でゼノタイムを含むものである。1980年代におけるオーストラリアの化石海岸から採集されたチタン-ジルコン化石砂鉱のモナズ石とジルコンは、世界で第3番目に重要な供給源であった。現在では含まれるThの為にこの砂鉱はほとんど稼行されていない。以下の記述は主にCastor and

Hedrick (2006)に基づく。

オーストラリア・パースの北方、Eneabbaのルティル、ジルコン-チタン鉄鉱砂鉱(第2図)は1970年後半から生産を開始し、2,500トン/年のモナズ石を生産してきており、現在でも生産可能である。重鉱物量は約6%、その中のモナズ石量は0.5-7.0%である。重鉱物層は現海岸線の上方30mかそれ以上の所に分布し、上部新第三紀か初期更新世の堆積物である(Lissiman and Oxenford, 1975)。この鉱床はまず内陸部の始生代変成岩類が風化、分解して中生代堆積岩類に堆積し、それが再度侵食されて形成されたものである。

Capelに近いGeographe Bay地区では、チタン-ジルコン砂鉱が1950年代中頃から50kmに亘って採掘された。これは更新世-現世の年代を持つ。この地区の砂鉱はEneabbaと同様な背景を有するが、この方が重鉱物が多い。その中のモナズ石量は0.04-1.1%と低い(Welch *et al.*, 1975)。

少量のモナズ石はオーストラリアの東海岸でもルティル、ジルコンと共に回収された。これは第四紀層と砂丘を採掘したものである。重鉱物量は0.5%以下、モナズ石はその内の1%以下である。ビクトリア州内陸盆地のWIM150鉱床は厚さ14mのチタン-ジルコン砂鉱であるが、REEに富み、REE鉱物資源量はモナズ石58万トン、ゼノタイム17万トンである(O' Driscoll, 1988)。

海浜砂鉱の副産物であるモナズ石はその他ブラジル、インド、マレーシア、タイ、中国、台湾、ニュージーランド、スリランカ、インドネシア、ザイール、韓国、アメリカで採集されたが、現在ではインド、マレーシア、スリランカ、タイ、ブラジルのみである。

インドでは主に西海岸に採掘地がある(第2図)。ここでは西風のために砂が豊富である(写真12-15)。インド政府はチタン-ジルコン砂鉱からのモナズ石回収を規制しており、REEの回収は国内でのみ行われている。

東南アジアではモナズ石とゼノタイムとがスズ石、ジルコン、チタン鉄鉱回収時の重要な副産物であった。中国がイットリウムの生産を増加した1988年以前は、マレーシアのゼノタイムが世界で最大の供給源であったが、その理由はスズ花崗岩がチタン鉄鉱系の分化相であるために、アクセサリ-鉱物が主にREEに富むゼノタイムであるためである。スズ石は現世の河

川底、海浜砂鉱から回収されたが、現在では終掘している。

1952-1994年間に500トン/年のモナズ石が、アメリカはフロリダ州のGreen Cave Springs(第2図)の更新世のチタン-ジルコン砂鉱から生産された。マウンテンパス鉱床発見前のREE供給源は非海成砂鉱であった。“カロライナ モナズ石帯”からは総量5,000トンのモナズ石が1885-1917年に生産されたが、この砂鉱は0.25kg/m<sup>3</sup>のモナズ石品位を持っていた。アイダホ州では砂鉱からREE鉱物が1950年代に生産されている。キャスケード・ドレツゲングでは重鉱物1kg/m<sup>3</sup>の砂礫層から7,000トンのモナズ石が回収され、残存モナズ石量は3.8万トンと推定されている。アイダホ州のBear Valleyではドレツジングにより約1万トンのREOとNb, Taをも含むモナズ石、そしてY-ユークセン石が採取された。アイダホ州北部ではゼノタイム、また一部は砂金採取と共にREE鉱物が回収された。

カナダ・オンタリオ州の初期原生代の変成礫岩に含まれるウラン鉱床は閃ウラン鉱、プランネライト、モナズ石にREEが含まれる。これから1950-70年代、そして1986-90年にREEが回収された。これらREEを含む鉱物は砂鉱起源で、後の変成作用と熱水活動で富化作用を受けたと信じられている。1973年時の推定で、この地域には2.3億トン(平均0.1%U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)の鉱石の存在が推定されており(Robertson, 1981)、1990年代前半時点でその半分が残存していた。ウラン採掘は1996年に中止された。

南カリフォルニアのMusic Valleyには先カンブリア紀片麻岩に16%REO(含6%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)のゼノタイムとモナズ石に富むゾーンがあり、これは砂鉱起源と考えられている。ワイオミング州のBald Mountainではカンブリア紀礫岩中にモナズ石の化石砂鉱がある。砂鉱起源のモナズ石とゼノタイムのREEパターンは著しいユーロピウム負異常を示し、斜長石を含む起源岩から変化したことを示す。更にモナズ石がバイユンオボやマウンテンパスの著しくLREEに富むものに較べて、比較的高いHREEを持つ特色がある。

## 8. その他の鉱床

カザフスタンの天山山脈中のAktusにはPb, Mo, Ag, Biと共に産出するREEがあると伝えられている。その平均REE含有量は0.25%であり、その44%は



写真12 南インド, Chavara砂鉱地に近い海岸風景. 砂浜が延々と続く.



写真14 一歩, 内陸沿岸部に入るとゴムの採取を行っている.



写真13 海岸では貝で作ったお土産を売っている.



写真15 また, 椰子の実は生活必需品である.

HREEである. 鉱床はストック状の2鉱体からなり, synchisite (Y), バスタネサイト, モナズ石, ゼノタイム, ジルコンを含む.

ほたる石にもREEがCaを置換する形, または微粒のREE鉱物として含まれる. 南アのNaboom Spruitのほたる石鉱床からは1980年代に少量のモナズ石が生産され, ニューメキシコ州のGallinas Mountainのほたる石鉱床からは1950年代に65トンのバスタネサイト精鉱が生産された.

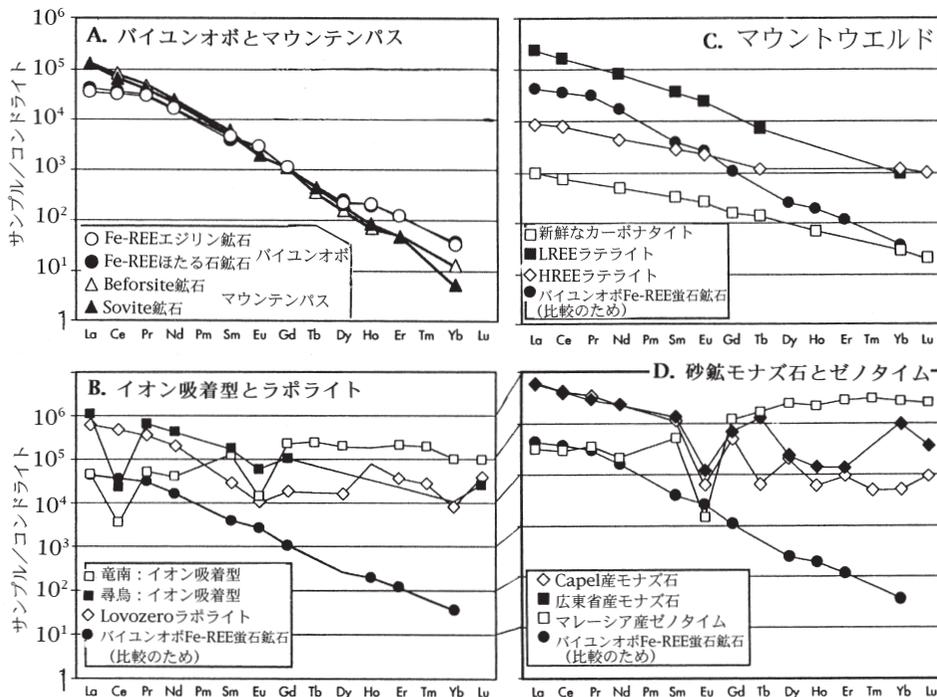
カナダ・アルバータに近い後期先カンブリア系の砂岩には含ウラン-HREEゼノタイムを産し, 同様なものは西オーストラリアにも見られる. ベトナムの古生代石灰岩中の破碎帯には1.4-5%REOの鉱石が数百万トン知られている.

海成磷酸塩鉱床にもREEが含まれることがある. モンタナーアイダホ州境のペルム紀磷酸塩岩層には多量のREEと0.1%Yが知られている.

## 9. 希土類元素パターン

火成岩類中の希土類元素パターンは通常コンドライト値との比較で示される. レアアースの存在量は, コンドライト, 地球物質ともに原子番号の偶数元素で大きく, 奇数元素で小さい特性があり, 比を求めることによりスムーズな右下がりのパターンが得られるため, 広く用いられている. しかし絶対量が重要な資源調査では, 生の値の方が便利ながある.

一般の火成岩類でレアアースを多く含む鉱物(鉱物/メルト比 $>1$ )は重鉱物である. 角閃石とざくろ石では元素によっては分配比が10に達しレアアースを多く含むが, 黒雲母, 磁鉄鉱などは1以下であり, レアアースを濃集しない. これに対してアクセサリ鉱物はその含有量は少ないものの分配係数は大きく, アラナイト, ジルコン, アパタイト, チタン石などでは10を超える.



第9図 主要鉱石のレアアースパターン (Castor and Hedrick, 2006).

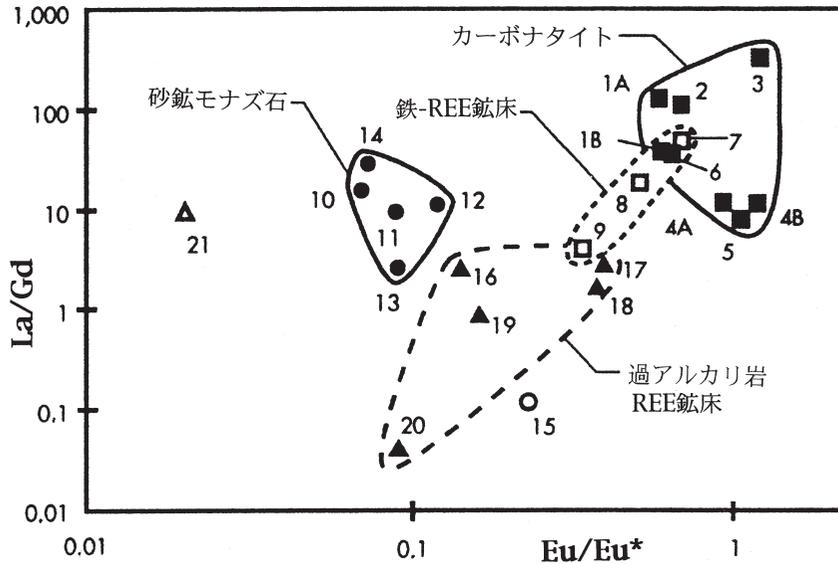
これらの鉱物はレアアース元素の種類によって異なる分配係数を持つ。軽希土類元素が選択的に分配される代表は、アラナイト(エピソード)、バスタネサイトなどである。一方重希土類を濃集するものはざくろ石、ジルコン、ゼノタウムである。軽希土類に富むパターンを持つ先カンブリア時代のトナル岩やアダカイトなどの火成岩類は、深部における高压によりざくろ石が生じた変成岩類が部分溶融して生じたものと解釈されている。火成岩類の大部分を占める長石類は低い分配係数を持つが、斜長石のEuの分配係数は2を超える。従ってEuの負異常は深部でマグマから斜長石が取り去られた結果と考えられる。この負異常の程度を示す指数としてEu/Eu\*がある。これはEu負異常を前後の元素の高さと比較したものである (Eu実測値/Sm+Gd ; Henderson, 1984)。

レアアース鉱石は一般の火成岩類と較べて3桁高い濃度を持ち、レアアース鉱物が多種類に亘るため特徴ある希土類パターンを示すことが多い。カーボナタイトのマウンテンパスではコンドライト比がランタンで10<sup>5</sup>に達し、重希土類へ低下する。バイユンオボの鉱石はこれに酷似するが、La, Ce, Prがやや低く、重希土類のHo, Er, Ybに富む(第9図A)。イオン吸着

型とラポライトはバイユンオボの鉱石より希土類元素に富み、かつフラットで重希土類に富むことが明瞭である(第9図B)。マウントウエルドの風化物では重希土類ラテライトがバイユンオボの鉱石より高品位であり、軽希土類ラテライトはやや低品位である(第9図C)。砂鉱においては鉱物種が明瞭なため、鉱物特性に従ったパターンが見られる(第9図D)。

軽希土類と重希土類の筆頭元素であるLa/Gd比は軽・重希土類元素比を表すものとして有効である。また、Eu/Eu\*比はカーボナタイトのようなマントル起源岩では1であり、地殻起源のチタン鉄鉱系花崗岩類では低い値を示す。第10図に代表的なレアアース鉱床の値を示す。カーボナタイト鉱床とその風化ラテライトは高いLa/GdとEu/Eu\*領域を占め、これらがマントル起源で地殻からの寄与を殆ど受けていないことを示す。

一方、オーストラリア、中国、フロリダなどの砂鉱床のモノズ石精鉱は高La/Gd域と低Eu/Eu\*域にまとまる。それは砂鉱の原岩が斜長石を含む地殻物質の部分溶融により生じたためである。過アルカリ岩中のHREEに富む鉱床は比較的低いLa/GdとEu/Eu\*領域に分散する。これは過アルカリ岩が斜長石を含む



第10図 主要鉱石のL/HREE比とEu異常との関係 (Castor and Hedrick, 2006).

1Aマウンテンパス バスタネサイト, 1Bマウンテンパス モナズ石, 2カンガンクンデREE カーボナタイト, 3キジルシャオーレンREE カーボナタイト, 4A, 4BサリトレIIペロヴァスカイト・アナターゼ, 5マウントウエルド カーボナタイト, 6マイクルREE カーボナタイト, 7バイユンオボ, 8ピーリッジ角礫, 9ミネヴィルアパタイト, 10, 11西, 東オーストラリア漂砂モナズ石, 12南中国漂砂モナズ石, 13フロリダ漂砂モナズ石, 14ブラジル漂砂モナズ石, 15マレーシア漂砂ゼノタイム, 16ストレンジレイク, 17キバワレイク ユーディアライト, 18ボカン マウンテン, 19,20 Jabal Sa'id & Jabal Tawlah, 21クレセントピーク鉱脈.

地殻起源を持つことによると思われる。マレーシアのゼノタイム砂鉱は同じ領域にプロットされる。いくつかの鉄REE鉱床はカーボナタイトと過アルカリ岩HREE鉱床を結ぶ領域を占め、マントルと地殻混合起源であることを示す。バイユンオボ鉱床はカーボナタイト領域を占め、この比から見る限りそれがマントル起源であることを示している。

### 10. レアアース鉱床のタイプ

レアアース鉱床は、以上のように非常に多岐にわたる性質を持つが、その生成条件に基づき高温高压生成の火成鉱床と常温常圧の風化鉱床に2大別できる。火成鉱床は更に、レアアース鉱物がマグマ期に濃集したマグマ性鉱床と、熱水期に濃集した熱水性鉱床とに分けられる。風化鉱床は現地性風化鉱床と、移動して堆積した漂砂鉱床に分けられる。これら鉱床タイプと実例とを第4表に示した。

世界のレアアース鉱床を分類する場合に、最大の問題点はバイユンオボ鉱床の位置づけにある。記述

のように、この鉱床の北側には大量の海成炭酸塩岩類が分布している。明らかに火成起源のカーボナタイト岩脈は鉱体から南北に離れて若干描かれているに過ぎず、また、炭酸塩岩よりも深所起源の証拠となるアルカリ岩脈も北東部に少数記録されているに過ぎない(第3図)。しかし鉱石の希土類元素パターンはカーボナタイトのそれと酷似する。したがって筆者らは最初に堆積性の赤鉄鉱層が沈殿し、隆起・褶曲後にマントル起源のアルカリカーボナタイト鉱液が裂隙に沿って上昇し、REE鉱物を晶出せしめたのではなからうかと考えている。生成の時代は各種の同位体年代測定から、原型は原生代中期に形成され、それが中期古生代のカレドニア変動でREE鉱化作用を受け、更に後期古生代のヘルシニア変動の構造運動・花崗岩活動によって鉱石成分の再移動などの修正を受け、現在に至ったものではなからうかと考えている。

### 11. 今後の進む方向

レアアース資源のこれまでの稼行品位は平均REO

第4表 レアアース鉱床タイプと代表的鉱床

鉱床タイプ	母岩	代表的鉱床
火成鉱床	マグマ性鉱床	ラポライト, 閃長岩
	カーボナタイト	各種炭酸塩物
	ベグマタイト鉱床	花崗岩など
	熱水性鉱床	アルカリ花崗岩関連の鉱染網状, 鉱脈鉱床
風化鉱床	イオン吸着型鉱床	花崗岩類
	ラテライト鉱床	カーボナタイト
	漂砂鉱床	主に変成岩類起源

数100ppmの漂砂鉱床からREO12%のカーボナタイト-ラテライト鉱床まで様々である。このように幅広く稼行されている資源は他に見当たらない。この事実はレアアース資源の開発と利用はまだ初期段階で未成熟であることを示している。たとえば北米大陸の銅鉱業は19世紀末のCu20%のスカルンボナンザ(アラスカのケニカット)にはじまり、現在のポーフィリー銅鉱石のCu0.4%に低下している。

一方、レアアース資源の背景には、ウランとともに戦略物質として扱われている特異性がある。コラ半島の過カリウム深成岩類が採掘されている事実や、中国におけるREE鉱区取得やバイユンオボなどの鉱山見学が外国人に解放されないのは、このためである。レアアース資源の安定供給のためには“脱バイユンオボ鉱石”を早急に進める必要がある。

本文で紹介したように、これまでの発見資源の中にまだ高品位の鉱床のものが未処理で残っている。オーストラリアのマウントウエルドにおけるカーボナタイトのラテライト鉱床では、品位を11.2%REO+Yまで落としても1,540万トンの鉱量が得られている。このような乾燥地域の風化鉱床は地質条件に加えて、気候条件の制約を受けるので今後の探査地域はせばまるが、ブラジル、オーストラリア、アフリカなどでは更に発見が期待される供給源の一つである。

更なる将来資源としては、過アルカリ岩とその熱水変質岩である。熱水活動では反応の促進によって風化作用よりも一桁高いレアアースの濃集が予想される。原岩の過アルカリ岩がレアアースに富んでいれば、熱水循環によってそれが抽出され、レアアースが変質岩に高品位で大規模に濃集されるかもしれない。この意味でストレンジレイクなどの“レアアースのポーフィリー型鉱床”の研究に期待したい。

註1 (High Field Strength Element) : 固相である造岩鉱物と液相であるマグマとの分配係数が1より小さく、マグマに濃集する不適合元素の中でイオン価が大きいために固相に入りにくい元素 (Zr, Nb, Hf, Taなど, 野津, 1996)。

文 献

Castor, S. B. (1991) : Rare earth deposits in the Southern Great Basin. *In* Geology and Ore Deposits of the Great Basin (Raines *et al.*, ed.), Geol. Soc. Nevada, 523-528.

Castor, S. B. and Nason, G.W. (2003) : Mountain Pass rare earth deposit, California. 39<sup>th</sup> Forum Industrial Minerals, Reno, Nevada, Nevada Bureau Mines & Geol. 68-81.

Castor, S.B. and Hedrick, J.B. (2006) : Rare earth elements. *In* Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., and Krukowski, S.T. (eds.), Industrial Minerals and Rocks, 7th edition: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, Colorado, p. 769-792.

Chao, E.C.T., Back, J.M., Minkin, J.A., Tatumoto, M., Wang, J., Conrad, J.E., MaKee, E.H., Hou, Z., Meng, Q. and Huang, S. (1997) : The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposits of Inner Mongolia, China: a cornerstone example for giant polymetallic ore deposits of hydrothermal origin. *U.S. Geol. Surv.*, Bull. 2143, 1-65.

Costa, M.L., Fanesca, L.R., Angelica, R.S., Lemos, V.P. and Lemos, R.L. (1991) : Geochemical exploration of the Maicuru alkaline-ultramaic-carbonatite complex, northern Brazil. *Jour. Geochem. Explor.* V. 40, 193-204.

Deans, T. (1966) : Economic geology of African carbonatites. *In* Carbonatites (O. F. Tuttle and J. Gittins eds.), 385-413, Wiley Interscience, N.Y.

Drew, L.J., Meng, Q. and Sun, W. (1990) : The Bayan Obo iron-rare earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Lithos.* v. 26, 43-65.

Drysdall, A. R., Jackson, N.J., Ramsay, C.R., Douch, C.J. and Hackett, D. (1984) : Rare element mineralization related to Precambrian alkali granites in the Arabian Shield. *Econ. Geol.*, v. 79, 1366-1377.

Duncan, R.I. and Willett, G.C. (1990) : Mount Weld carbonatite. *In* Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea. *Aust. Inst. Mining Metall.*, 591-597.

Fan, H-R., Hu, F-F., Yang, K-F. and Wang, K-Y. (2006) : Fluid unmix-

- ing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China: Evidence from fluid inclusions. *Jour. Geochem. Explor.*, v. 89, 104-107.
- Henderson, P. (1984) : General geochemical properties and abundances of the rare earth elements *In* Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson ed.). 1-32, Elsevier, N.Y.
- Hirano, H., Kamitani, M., Sato, T. and Sudo, S. (1990) : Niobium mineralization of Catalao I carbonatite complex, Goias, Brazil. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v. 41, 577-594.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T. (1992) : Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Res.* v. 58, 241-287.
- Hou, Z., Tian, S., Yuan, Z., Xie, Y., Yin, S., Yi, L., Fei, H. and Yang, Z. (2006) : The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth Planet. Sci. Let.*, (in press).
- 石原舜三 (1999) : オーストラリアのオリンピックダム鉱床-近代探査法の勝利-. *地質ニュース* no. 536, 7-18.
- 石原舜三・村上浩康 (2005a) : 今レアアースが面白い-イオン吸着型鉱床は将来の高度先端産業を支えられるか? *地質ニュース*, no.609, 4-18.
- 石原舜三・村上浩康 (2005b) : 世界最大のレアアース鉱床-内蒙古のバイユンオボ. *資源地質*, v.55, 口絵III-IV.
- Kamitani, M. and Hirano, H. (1990) : Araxa carbonatite deposit and its lateritization. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v.41, 595-604.
- 金沢康夫・中嶋輝允・高木哲一 (1999) : 世界最大のレアアース鉱床-中国バヤンオボ鉱床-の成因をめぐって. *資源地質*, v. 49, 203-216.
- Lissiman, J.C. and Oxenford, R.J. (1975) : Eneabba rutile-zirconilmenite sand deposit, W. A.. *In* Economic Geology of Australia and Papua New Guinea., I: Metals. *Aust. Inst. Mining Metall., Monogr.* 5, 1062-1070.
- Lottermoser, B. G. (1990) : Rare-earth element mineralization within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*, v. 24, 151-167.
- Mariano, A. N. (1989) : Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. *In* Carbonatites - Genesis and evolution, 149-165, Unwin Hyman, London.
- 森清寿郎・諏訪兼位 (1996) : カーボナタイト. *新版地学辞典*. 平凡社, 1443 p.
- Morteani, G. and Preinfalk, C. (1996) : REE distribution and REE carriers in laterites of Araxa and Catalao (Brazil). *In* Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. (Jones, A.P., Wall F. and Williams, C.T. eds.), Mineral. Soc. Series 7, 227-255, Chapman & Hall, London.
- 村上浩康・石原舜三 (2006) : 軽希土類元素に富むカーボナタイト鉱床: 米国, マウンテンパス鉱床. *資源地質*, v. 56, (投稿中).
- 野津憲治 (1996) : HFS元素新版地学辞典. 平凡社. 1443p.
- O'Driscoll, M. (1988) : Rare earth - enter the dragon. *Industrial Minerals*, v. 254, 21-54.
- Olson, J.C., Shawe, D.R., Pray, L.C. and Sharp, W.N. (1954) : Rare earth mineral deposits of the Mountain Pass district, San Bernardino county, California. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 261, 75 p.
- Orris, G.J. and Grauch, R. I. (2002) : Rare earth element mines, deposits, and occurrences. *USGS Open-file Report* 02-189, Reston VA.
- Robertson, J.A. (1981) : The Blind River uranium deposits: The ores and their setting. *In* Genesis of U- and Au- bearing Quartz-pebble Conglomerate. (Armstrong, F.C. ed.). Prof. Paper, 1161, U1-U23.
- Salvi, S. and Williams-Jones, A. E. (1990) : The role of hydrothermal processes in the granite-hosted Zr, Y, REE deposit at Strange Lake, Quebec/Labrador: Evidence from fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 54, 2403-2418.
- Salvi, S. and Williams-Jones, A. E. (1992) : Reduced orthomagmatic C-O-H-N-NaCl fluids in the Strange Lake rare-metal granitic complex, Quebec/Labrador, Canada. *Eur. J. Mineral.*, v. 4, 1155-1174.
- Steenfelt, A. (1991) : High-technology metals in alkaline and carbonatitic rocks in Greenland: Recognition and exploration. *Jour. Geochem. Explor.* v. 40, 263-279.
- Taylor, R.P. and Pollard, P.J. (1996) : Rare earth element mineralization in peralkaline systems: the T-zone REE-Y-Be deposit, Thor Lake, Northwest Territories, Canada. *In* Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. (Jones, A.P., Wall F. and Williams, C.T. eds.), Mineral. Soc. Series 7, 167-192, Chapman & Hall, London.
- Wang, D., Yang, J., Yan, S., Xu, J., Chen, Y., Pu, G. and Luo, Y. (2001) : A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and geochemistry. *Resource Geol.*, v. 51, 177-188.
- Welch, B. K., Sofoulis, J. and Fitzgerald, A.C.F. (1975) : mineral sand deposits of the Capel area, W. A. *In* Economic Geology of Australia and Papua New Guinea., I: Metals. *Aust. Inst. Mining Metall., Monogr.* 5, 1070-1088.
- Wu, C-Y., Huang, D-H. and Guo, Z-X. (1990) : REE geochemistry in the weathered crust of granites, Longnan area, Jiangxi Province. *Acta Geol. Sinica.*, v. 3, 193-210.
- Wu, C-Y., Bai, G. and Huang, D-H. (1992) : Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling Mountain area. *Bull. Chinese Academy Geol. Sci.*, v. 25, 43-58 (中文英要旨付).
- Wu, C., Yuan, A. and Bai, G. (1996) : Rare earth deposits in China. *In* Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. (Jones, A.P., Wall F. and Williams, C.T. eds.), Mineral. Soc. Series 7, 281-310, Chapman & Hall, London.

---

ISHIHARA Shunso and MURAKAMI Hiroyasu (2006) : Ore deposit types for rare earth element (REE) resources.

<受付: 2006年7月5日>