

レアメタル資源

2. レア・アース…(2)

神谷 雅晴 (鉱床部)
Masaharu KAMITANI

I 生産量, 埋蔵鉱量 資源量

1. 生産量

レアアースの生産が本格化したのは1948年以降であり それまでは主に ガスマントル 発火合金 アークカーボン用として利用されていたにすぎない。1960年頃からガラス レンズなどの研磨剤 石油触媒 鉄鋼 窯業用などに用途が開けるとともに 生産が拡大した。

近年ではエレクトロニクス関連の素材として 中～重希土の需要が拡大しつつあるが とくに1980年代の後半

から ニオブ (Nb) に代わる超電導材料としてのイットリウム (Y) に注目が集まり Y-Ba-Cu系セラミックの超電導メカニズムの研究とともに素材工業化への加工技術の開発が行なわれつつある。したがって その技術開発の動向如何では イットリウムに対する需要の急増も考えられる状況にある。

この10数年間におけるレアアース生産量の推移 (第1表) はモナザイトの堅調な伸びに比べ バストネサイトの劇的な変化に象徴される。すなわち マウンテンパス鉱山 (Mountain Pass, 米国) は10数年前に生産をはじめ

第1表 レアアース世界生産量の推移 (単位, 精鉱量トン, REO を60%程度含む) (USBM 1985, 87による)

	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
モナザイト											
オーストラリア	4,507	5,310	9,379	14,992	16,206	14,079	13,282	9,562	15,141	16,702	13,750
ブラジル	1,452	1,610	2,441	2,541	1,988	2,010	2,054	1,768	5,256	3,622	5,500
インド	3,000	2,994	2,734	3,303	3,254	3,395	3,704	4,000	4,000	4,000	3,660
マレーシア	3,285	1,879	1,977	1,254	542	347	320	546	1,051	4,451	5,500
モザンビーク	—	—	—	—	—	—	4	3	4	4	4
ナイジェリア	18	18	18	18	—	—	—	—	—	—	—
スリランカ	5	1	5	213	213	63	60	304	300	147	200
タイ	367	—	—	—	32	152	107	162	277	298	250
米 国	—	—	—	2,080	2,000	1,170	1,420	1,670	1,670	2,500	2,500
ザイール	298	240	97	77	90	51	35	32	15	2	—
計	12,932	12,052	16,651	24,478	24,325	21,267	20,986	18,047	27,714	31,726	31,364
バストネサイト											
ブルンジ	380	250	230	70	50	50	50	—	—	—	—
米 国	24,870	21,700	25,630	23,590	27,520	26,640	28,470	29,170	28,470	42,190	13,428
計	25,250	21,950	25,860	23,660	27,570	26,690	28,520	29,170	28,470	42,190	13,428
ゼノタイム											
オーストラリア	—	—	—	—	—	27	52	46	24	—	275
マレーシア	120	139	75	—	—	—	24	76	10	384	110
ブラジル	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	110
タイ	—	—	50	—	6	52	45	46	38	28	3
インド	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	73
中 国	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	333
計	120	139	125	—	6	79	121	168	72	412	904
合 計	38,302	34,141	42,636	48,138	51,901	48,036	49,627	47,385	56,256	74,328	45,696

第2表 世界のレアアース埋蔵鉱量

国	埋蔵量(トン)*	主要な鉱床タイプ
オーストラリア	380,000 (400,000)	漂砂鉱床
ブラジル	73,000 (350,000)	漂砂鉱床
カナダ	200,000 (250,000)	カーボナタイト
中国	36,000,000 (一)	カーボナタイト, 風化残留 漂砂鉱床
インド	1,900,000 (1,000,000)	漂砂鉱床
マレーシア	35,000 (30,000)	漂砂鉱床
タイ	1,100 (一)	漂砂鉱床
米国	6,500,000 (5,000,000)	カーボナタイト鉱床
その他	2,200,000 (700,000)	
計	47,289,000 (7,730,000)	

* USBM 1977による。() は1980 USBM による。

め 比較的順調な操業を続けてきたものの 1985年には対前年比45%の激減をみた。これは米国におけるレアアースの主要な用途であった石油触媒としての軽希土(La, Ce)がほとんど不要となったためである。このような需要構造上の大きな変化は単に世界のレアアース業界に衝撃を与えたというだけでなく本質的にバランス産業であるこの業界の順調な発展に著しいブレーキとなることは否めない。

一方レアアースの供給構造上の大きな変化は数年前から中国に起った。中国だけでなく社会主義国の通例として資源量や生産量は世界の統計には登場して来ない。しかし世界一の埋蔵鉱量を持ちマウンテンパスに次ぐ生産を続けている白雲鄂博鉱山(内蒙古自治区)の出現さらに全く新しい鉱床タイプといわれる竜南 尋烏(華南)のイオン吸着型鉱床の発見と開発は最近の注目すべきニュースの一つである。

モナザイトは主に砂鉱床からイルメナイト ルチルジルコンなどと共に産出している。その主要な生産国はオーストラリア ブラジル マレーシアであり米国も10年前から生産している。オーストラリアでは Eneabba をはじめとする西オーストラリアが主でその生産量は増大の一途を示す。他方 1970年代の前半まで主産地の一つであったオーストラリア東海岸地域からの生産量は激減している。インドの生産は非常に安定しており 3,000~4,000トンを示すが ブラジル マレーシアの生産はこの2~3年間インドを凌駕する勢いを見せている。

1988年5月号

バストネサイトは前述のようにカーボナタイト鉱床から産出しマウンテンパス鉱山及び白雲鄂博鉱山からの生産が世界のほとんど全部を占めていると言ってよい。しかし中国ではほかに徽山鉱山(山東省)があってバストネサイトを年間1500トン程度生産している(Roskill's Information Service, 1985)。

上に述べた両鉱床タイプ以外に中国華南のイオン吸着型鉱床から中~重希土に富むレアアースが生産されわが国でも輸入している。

またソ連(コラ半島)ではアルカリ岩に伴う燐灰石中にレアアースが含まれこれを回収しているが生産量の詳細は不明である。

2. 埋蔵鉱量 資源量

レアアースは一般にランタノイドのランタン(La)からルテチウム(Lu)までの15元素及びイットリウム(Y)とスカンジウム(Sc)を含めた17元素を一括したものを指しているがこのうち天然に産しないプロメチウム(Pm)は除外される。埋蔵鉱量や資源量を表わす場合にはこれらの元素はおおむね一括されレアアース酸化物(REO)として示されている。その理由はこれらの元素含有率が各鉱床ごとに異なっているだけでなく数種以上のレアアース含有鉱物から構成されるので同じ鉱床の内部でもその含有率の変化が著しいためである。しかし近年のようにレアアースを一括して利用するだけでなくおのおの元素あるいは金属の特性を生かさなければならない現状では埋蔵鉱量や資源量の表示には各元素の含有量または軽希土(LRE) 中希土(MRE) 重希土(HRE) 程度に区分して示すのが好ましい。

レアアースの世界の埋蔵鉱量及び資源量は1980年代に入り飛躍的に増大した。すなわち中国がカーボナタイト鉱床(白雲鄂博鉱山)をはじめその他のタイプの鉱床の埋蔵鉱量を公表した(Sun Hong-ru, 1983)のをはじめ世界各地でレアアース鉱床の探査が進んだためと考えられる。

世界の埋蔵鉱量(経済的に採掘又は回収可能なもの)は第2表に示した通りである。その中で参考のために1980年に公表された数量を括弧で示した。ここで極めて明らかな変化は中国の登場とそれにより世界の埋蔵鉱量が約6倍に達する増加を見せていることである。中国の鉱量は3,500万トン(REO)が白雲鄂博鉱山であり(Sun Hong-ru, 1983) 残りの鉱量は徽山カーボナタイト鉱床 新しく見出されたイオン吸着型鉱床及び主として広東省に分布する海浜重砂鉱床の合計であろう。

中国を除けばマウンテンパス鉱山の埋蔵量が依然として重要な地位を占めている。このほか重砂鉱床か

らモナザイトを回収しているインドも埋蔵鉱量を倍増している国である。

埋蔵鉱量と資源量を世界生産量(第1表)に比較してみると レアアースは1,000年以上も供給可能な鉱量を保有しているように見える。しかしながら レアアースは16元素から成り 各々の元素は鉱床のタイプあるいは各鉱床ごとに著しい違いがあることに留意する必要がある。一般的には カーボナタイトに伴うレアアースは主要な鉱物がバストネサイトであるため 軽希土に富む。砂鉱床ではモナザイトが主要鉱物であることによって 中希土が バストネサイトに比べてやや多いものの 基本的には軽希土の比重が高い。したがって 4,700万トンの埋蔵鉱量のほとんどを La Ce 及び Nd が占めることになる。これに比べ イオン吸着型¹⁾と称されるタイプの鉱床は その粗鉱品位こそ低いものの中希土やYに富んでいることから超電導 エレクトロニクス関連素材として先端技術に不可欠であることによって 注目を集めており 今後 類似の鉱床タイプについての調査研究 開発に大きな期待がかけられている。

第3表は USBM によって1980 87年に公表された世界のイットリウム埋蔵量であり 1980年には僅か19万トンと推定されていたが 87年には 中国の埋蔵量 72万トンが計上され 世界の埋蔵量は一挙に96.7万トンになった。中国の埋蔵量は主として白雲鄂博と竜南及び尋烏地区の風化残留型鉱床によると考えられる。このほか米国の鉱量増も著しい。

イットリウムは超電導素材として一躍脚光を浴びてきただけに 若し 素材加工技術開発が進展したとすれば より多くの需要が予想されるので 早急に探査と開発の促進をはからなければならなくなるだろう。

II 鉱 床

レアアースは他のレアメタル元素に比べて その地殻存在度が高いにもかかわらず レアアースを鉱床の主体鉱種とするものは比較的少ない。その理由としては以下のように考えられる

- ① レアアースはマグマの分化過程でいろいろな鉱物に分配される。
- ② マグマ過程の末期に比較的濃集するが 濃集比は概して低い。
- ③ 他の鉱物資源に比べて その開発利用の歴史が浅いため 鉱床探査が充分に行なわれたとは言い難い。

1) 楊岳清ほか2 (1981) などによるがその地質及び鉱床の産状から風化残留型に属すると考えられるので 以後風化残留鉱床に分類する。

第3表 イットリウム埋蔵量 (Y₂O₃, トン)

地 域 ・ 国	埋蔵量・資源量 (1980)	埋蔵量 (1987)
北アメリカ		
米 国	45,000	130,000
カナダ	28,000	4,000
南アメリカ		
ブラジル	11,000	1,500
ヨーロッパ		
ソ 連	15,000	—
北 欧 三 国	1,000	—
ア ジ ア		
中 国	—	720,000
イ ン ド	60,000	38,000
韓 国	4,000	—
マレーシア	2,500	21,000
タ イ	—	660
オーストラリア		
オーストラリア	26,000	7,600
そ の 他	1,000	44,000
計	190,000	967,000

(USBM, 1980, 1987による)

近年 レアアースは 主要な用途であった発火合金 鉄鋼 石油触媒 窯業などに加えてエレクトロニクス関連の需要が伸びてくるにつれて サマリウム (Sm) ユーロピウム (Eu) ガドリミウム (Gd) イットリウム (Y) など 中～重希土資源の安定供給の確保が問題となってきた。とくに レアアースが超電導の素材としての可能性がクローズアップされるようになり さらに 中～重希土の需要が拡大するに伴って レアアース鉱床の産状 資源の賦存ポテンシャルの評価などが緊急の課題となって来た。

1. 鉱床のタイプ

レアアースは鉱床の主体鉱種としても あるいは随伴鉱種としても存在するが 一般に後者に属するものが圧倒的に多い。ここでは これまでに確認された鉱床を分類する(第4表)とともに それぞれの代表的ないくつかの鉱床について紹介する。

1) レアアースを主とする鉱床

(1) カーボナタイト鉱床

カーボナタイトは上部マントルの部分溶融によって生じたマグマが結晶分化作用により 各種のアルカリ岩を生み その過程で分離した炭酸塩に富む分化岩である。すなわち カーボナタイトは方解石やドロマイトなどを主成分鉱物とするもので 一部は地表に噴出あるいは地下浅所に貫入固結した火成岩であると定義することができる。

第4表 レアアース鉱床の分類

レアアースを主とする鉱床	
1) カーボナタイト／アルカリ岩複合体	(ex) Mountain Pass, USA Baiyun Obo, China Kangankunde, Malawi
2) 鉱脈鉱床	(ex) Steenkampskaal, South Africa
3) 風化残留鉱床 (イオン吸着型鉱床)	(ex) Long-nan, China Xun-wu, China
レアアースを随伴する鉱床	
1) カーボナタイト／アルカリ岩複合体	(ex) Khibiny, USSR Oka, Canada Araxa, Brazil Catalao, Brazil
2) アルカリ花崗岩	(ex) Strange Lake, Canada
3) ベグマタイト鉱床	(ex) Salinas, Minas Gerais, Brazil Green Bushes, S. Australia
4) スカルン鉱床	(ex) Mary Cathleen, Australia
5) 鉱脈鉱床	(ex) Buffalo fluospar mine, Soute Africa Korsnas mine, Finland
6) 堆積鉱床	(ex) Malay Peninsular West Australia South and East India South China Florida, USA Blind River, Canada
(1) 砂鉱床	
(2) 礫岩鉱床	
7) その他	
(1) 層準規制硫化物鉱床	(ex) Olympic Dam, Australia
(2) ボーキサイト鉱床	(ex) Arkansas, USA Sedimentary baxites, China
(3) マンガンノジュール	
(4) 燐灰土 (石) 鉱床	

このような火成岩はわが国のような島弧には産出しないが、その産状や伴う鉱物資源については1960年代ごろから一部の研究者や技術者によって注目されるようになった。わが国では、鉱物資源とくにレアメタル資源を伴う重要な鉱床という見地から立見(1965)、武内(1873 a.b. 1981)をはじめ神谷・平野(1984, 85)、坂巻・神谷(1986)らにより、また地球化学的及び岩石学的立場から田中(1981)や諏訪(1981)らによって紹介されてきている。

カーボナタイトは通常、超塩基性岩、アルカリ岩などと伴い、それらと複合体を構成する。主として世界の大륙地域あるいはそれらの縁辺部の深部断裂に沿って貫入・噴出することが知られており(第1図)、大小を合わせると約600岩体が報告されている(Kamitani and Hirano, 1987)。その地質時代はプレカンブリアから現世までにわたるが、北半球では古生代及び白亜紀のものが多く、一方南半球では Gondwana 大陸分裂後から現在に至る間に貫入・噴出したカーボナタイトーアルカリ

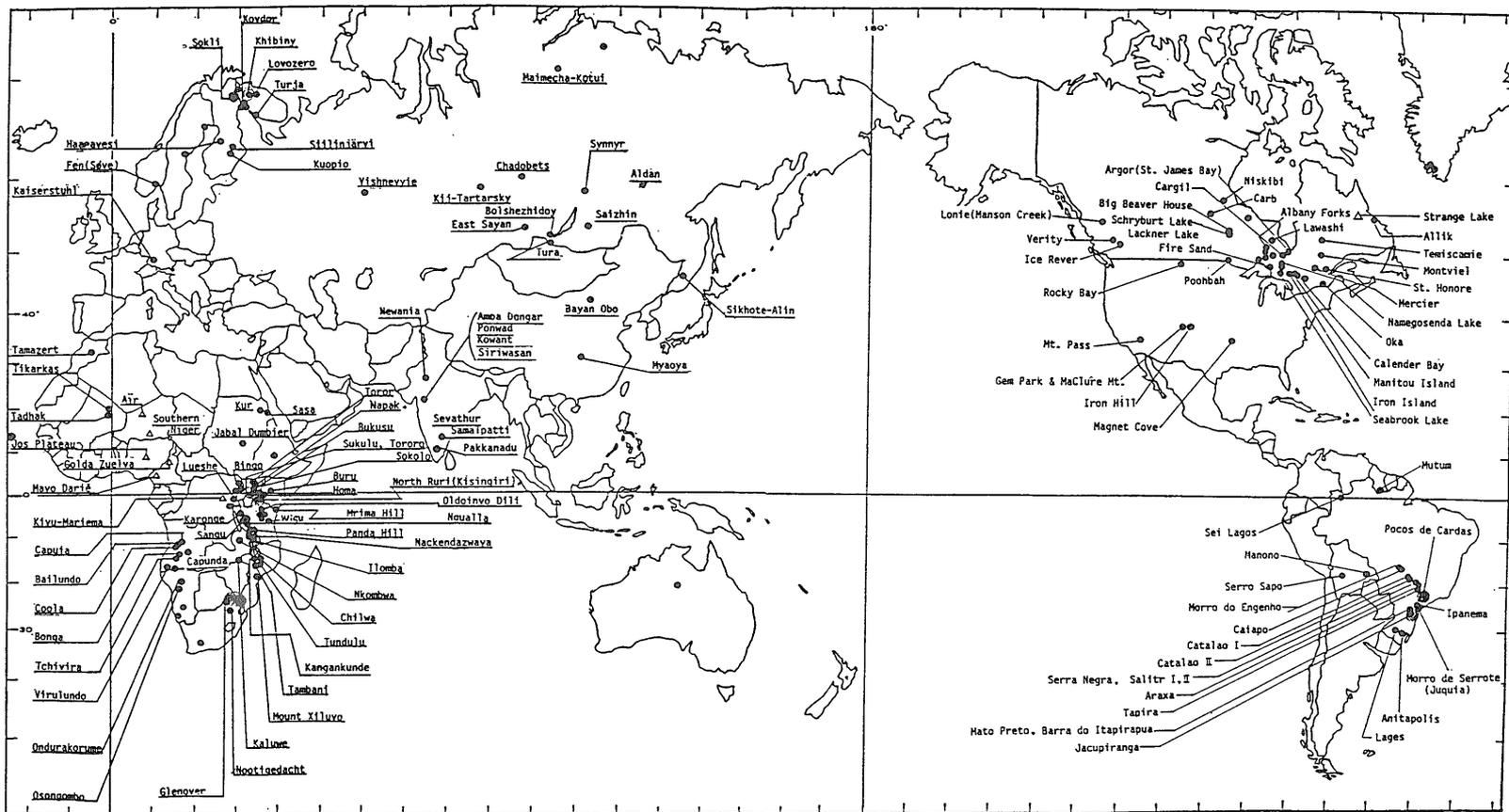
岩複合体が卓越している。主な分布地域は東アフリカ地溝帯、西アフリカ、ブラジル南部、カナダ東部などである(第1図)。

白雲鄂博(Baiyun Obo) 鉱床

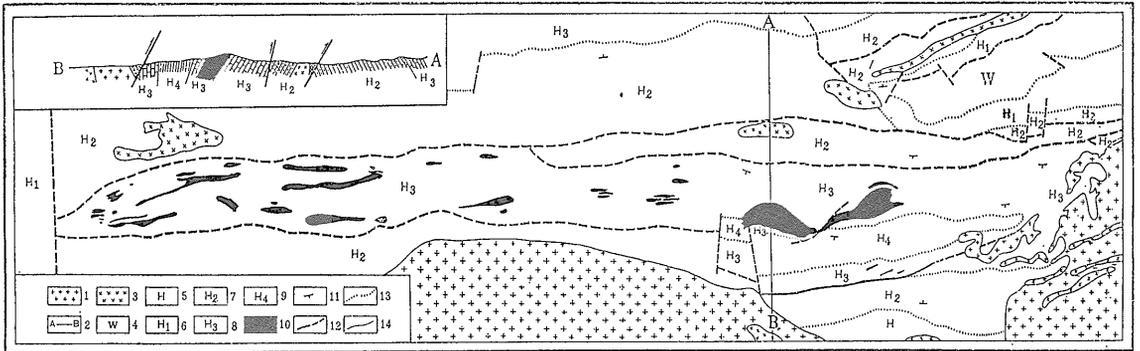
中国内蒙古自治区の首都呼和浩特(フフホト)の北西方約200kmに位置し、北京からは呼和浩特經由包頭(パオトウ)まで鉄道が通じている。

鉱床についての最初の報告は岸本(1985)に基けば、丁道衡(1933)による高温熱水性の鉄鉱床であり、レアアースに関する記載は何作霖(1935)が最初であった。他方、1940年前後には日本による資源調査の一環としてこの鉄鉱床が対象となり、門倉(1940)、藺部(1952)等による鉱量・品位に関する報告がなされている。

1950年代以降は地質鉱床および成因に関する研究が活潑となって来はじめ、いろいろな成因説が提出されていることは岸本(1985)による詳しい解説がある。成因に関する論争は現在でもなお続いており、その定着に



第1図 世界の主要なカーボナタイトアルカリ岩複合岩体分布図 (Kamitani and Hirano, 1987).



第2図 白雲鄂博錳山地質図(王中剛ほか, 1973).

1. 黒雲母花崗岩 2. 断面線 3. 斑礫岩 閃緑斑岩 4. 始生界 5. ミグマタイト 6. 石英砂岩 礫岩 7. 石英砂岩 粘板岩 8. ドロマイト 石灰岩 9. 粘板岩 10. 錳体 11. 走向傾斜 12. 断層 13. 地層境界

はまだ長い時間が必要であろう。

ここでは 最近提出された白鶴・袁忠信 (1983, 85) 及び周振玲ほか (1980) のカーボナタイト説に基いて その産状を説明する。成因論とは別に 白雲鄂博錳床がレアアースに関して 世界最大の埋蔵量を擁していることは Sun Hong-ru (1983) および李東英 (1984) などによって公表された数量からも明らかである。

地質及び錳床

白雲鄂博錳山付近は地質構造上 中朝地塊と蒙古ヘルシニア褶曲帯との中間に位置し 片麻岩類を主とする始生界二道注層群と 砂岩 珪岩 粘板岩 石灰岩 ドロマイトから成る白雲鄂博層群が分布する。これらを買いてカーボナタイト 閃長岩及び黒雲母花崗岩があり このうち 貫入カーボナタイトは433 Ma (Rb-Sr) 花崗岩は264 Ma (K-Ar; 肖仲洋 1979) を示すが 白雲鄂博層群の粘板岩の Rb-Sr 年代は700~760 Ma (白鶴 袁忠信 1985)あるいはドロマイトとモナザイトの $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代では1400—1500 Ma (王中剛ほか1973) など不一致の点が多く 母岩 錳床の生成年代に関する議論もなお続けられるものと思われる。

カーボナタイトはプレカンブリア系のもつ東西性の構造に調和して多数のレンズ状~塊状岩体が認められる(第2図)。カーボナタイトや被貫入岩類については数多くの同位体組成に関する研究が行なわれている。そのうち カーボナタイトの $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ δS^{34} δO^{18} 及び C^{13} などの値の多くは 世界のカーボナタイトと海成堆積物との中間の値をもっている (白鶴 袁忠信 1985)。錳床を胚胎するドロマイト層は向斜構造をもち 東西方向の延長は約20km幅は2—4 kmを示す。カーボナタイト錳床群は 主錳体 東錳体及び西錳体(群)に大別されて

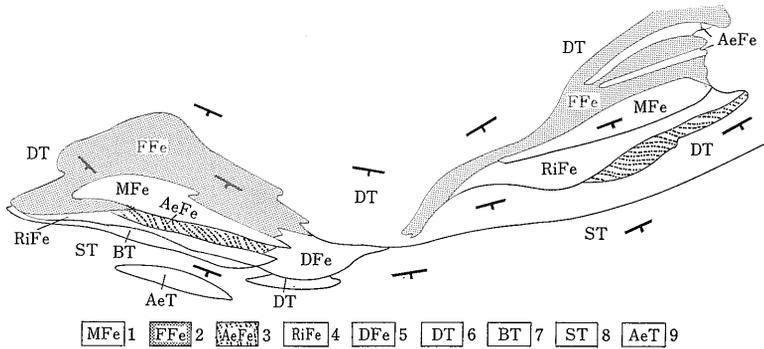
いるが 主要なものは主錳体と東錳体であり(第3図) レアアース (REO) の埋蔵錳量は3,500万トン 鉄錳石 (45%TFe) は11.5億トンでさらにニオブ (Nb_2O_5) を78万トン伴っていることが公表された (Sun Hong-ru 1983)。

錳床の産状は第3図に示したように 主錳体・東錳体では中心に塊状希土鉄錳石帯があり 周囲をレアアース品位の最も高い蛍石型希土錳石帯とリーベカイト型希土錳石帯が包む。因みに 帯状蛍石型希土鉄錳石の品位は13.5% (REO) である (第5表)。

錳石は主成分錳物の組合せによって ドロマイト希土錳 希土鉄錳 珪酸塩希土錳及び貫入カーボナタイト錳に4分類され それらはさらに19に細分されている (白鶴・袁忠信 1985)。

ドロマイト型希土錳 (第3図 DT及びBTに相当する); ドロマイト層中に賦存し 錳体の形は層状 レンズ状 塊状で 縞状組織が明瞭である。主要な錳物はドロマイト アンケライト 菱鉄錳 方解石など岩酸塩錳物のほか 磁鉄錳 ソーダ透角閃石 螢石 金雲母などである。このほか 少量の燐灰石 重晶石 エジリン輝石 リーベック角閃石 黄鉄錳 長石 石英を伴う。レアアース錳物としてはモナザイト パストネサイト 褐簾石などがあり そのほかニオブを含む錳物のパイロクロア エシナイト イルメノルチル フェルスマナイト フェルグソナイトが認められる。レアアース品位は希土鉄錳石に次いで高い。

希土鉄錳石 (第3図 MFe FFe AeFe RiFe DFe); 主としてドロマイト層の上部に位置し 時にドロマイトと粘板岩との境界付近に胚胎する。錳体は層状~レンズ状で母岩の産状と調和的である。主錳体と東部錳体におけるこの希土鉄錳石の産状は第3図に示したように



第3図 白雲鄂博鉍床主東鉍体の鉍石分帯 (白鶴 袁忠信 1985)
 MFe 塊状希土鉄鉍石 FFe 蛭石型希土鉄鉍石
 AeFe エジリン型希土鉄鉍石
 RiFe リーベカイト型希土鉄鉍石
 DFe ドロマイト型希土鉄鉍石
 DT ドロマイト型希土鉍石 BT 黒雲母型希土鉍石 ST 長石岩型希土鉍石 AeT エジリン型希土鉍石

その周囲をドロマイト希土鉍及び珪酸塩希土鉍に包まれてレンズ状を呈する。縞状蛭石一鉄一希土鉍は蛭石 赤鉄鉍 バストネサイト イルメノルチル 鉄コロンバイトに富み 塊状鉄一希土鉍は磁鉄鉍 赤鉄鉍 鉄コロンバイト エンナイト モナザイト及びバストネサイトから成る。 エジリン輝石一ソーダ角閃石一鉄一希土鉍は磁鉄鉍 エジリン輝石 ソーダ角閃石 蛭石 エンナイト パイロクロア 黄河石 バストネサイト及びモノザイトが主である。 一般に レアアースは縞状蛭石一希土一鉄鉍石中で最も高品位である。 いずれの鉍石にもドロマイト 方解石 重晶石 燐灰石 褐鉄鉍 黒雲母 長石 石英は普遍的に存在する。

珪酸塩岩希土鉍 (第3図 ST AeT BT); 金雲母透輝石型希土鉍 黒雲母型希土鉍 エジリン輝石希土鉍及び長石粘板岩型希土鉍に分けられる。 金雲母透輝石型鉍は東部鉍体の南の花崗岩とドロマイトとの接触部にあって 透輝石と金雲母を主とし 曹長石 方解石 燐灰石 ソーダ角閃石 スフェーンを伴い 局部的にパイロクロア 褐簾石 Ce 燐灰石を認める。 黒雲母型希土鉍は主鉍体の南部のみに産出し 鉄鉍体と粘板岩及びドロマイトと粘板岩との接触部付近に見られる。 黒雲母が多く ソーダ角閃石 磁鉄鉍 蛭石 方解石 バファータイト スフェーンのほか微量のモノザイト 鉄コロン

バイト エンナイトを伴う。 エジリン型希土鉍は主及び東部鉍体において僅かに認められ エジリン輝石のほかソーダ角閃石 蛭石 曹長石 重晶石 燐灰石 黒雲母 方解石 磁鉄鉍から成り バストネサイトを伴い少量のジルコンを含んでいる。 長石粘板岩型鉍は主鉍体の上盤側で厚く K_2O は15%にも達する。 微斜長石あるいは曹長石が主で 少量の石英 ソーダ角閃石 エジリン輝石 黒雲母。 磁鉄鉍 蛭石及び方解石を伴う。 また ごく微量のルチル エンナイト 鉄コロンバイト モナザイト バストネサイトも認められる。

貫入式炭酸塩岩鉍石; 長石型 ドロマイト型及び磁鉄鉍型に分けられる。 長石型は珪酸塩岩希土鉍石に ドロマイト型は希土鉄鉍石に また 磁鉄鉍型はドロマイト希土鉍にそれぞれ類似している (第4図)。

以上述べた各タイプの鉍石中において酸化希土(REO)は0.2~9.45%含まれる。 その中で $\Sigma Ce / \Sigma Y$ は27~81と言われ 全般に重希土に乏しい。 したがって 精鉍中のY含有量は2,000—1,400 ppmと推定される。

鉍石中のレアアース含有鉱物はモノザイトとバストネサイトのほか22種類が明らかにされている。 一般にモノザイトはドロマイト型希土鉍に多く バストネサイトは蛭石型希土鉄鉍石中で多い。 また YやNbに比較的富むエンナイトはソーダ角閃石型 エジリン輝石型及びスカン型鉍石中に フェルグソナイト族鉱物はドロマイト型鉍石中にそれぞれ含まれている。

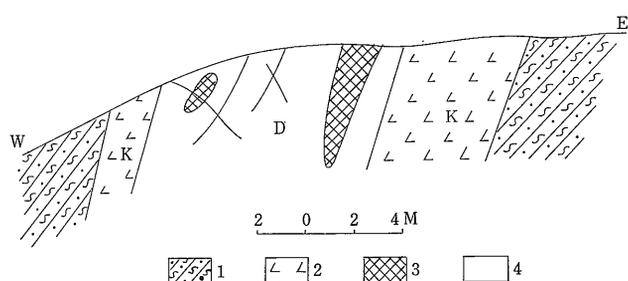
第5表 白雲鄂博鉍床の分帯及び平均品位 (TREE %)

分帯	主鉍体	東鉍体	西鉍体
带状蛭石型希土鉄鉍石帯	13.5(9)	—	—
塊状希土鉄鉍石帯	2.9(7)	—	—
エジリン型希土鉄鉍石帯	8.6(12)	—	—
リーベカイト型希土鉄鉍石帯	1.9(3)	4.7(1)	1.2(1)
ドロマイト型希土鉄鉍石帯	4.2(6)	3.9(5)	1.5(6)
黒雲母型希土鉄鉍石帯	—	—	—

() は分析個数 (王凱怡, 1981による)

鉍床の成因

鉍床の成因に関する議論については 岸本 (1985) によって詳しく紹介されたように 堆積変成説 花崗岩説 カーボナタイト説など多彩であるが 最近 白鶴・袁忠信 (1983, 85) によって提出された海底火山堆積成カーボナタイト説は 鉍床の産状 鉱物組合せ及び各種同位体組成データなどを合理的に説明し得る考え方と思われる。 また 劉鉄庚・邱聚田 (岸本文男訳 1986) によっ



第4図 白雲鄂博鉄床 尖山東坡カーボナタイト岩脈の産状 (白鶴 袁忠信 1985)
 1. ミグマタイト 2. アルカリ長石帯
 3. 鉄鉄鉄床 4. カーボナタイト

て明らかにされたカーボナタイトの産状や化学組成の特徴も 前述の説を裏付けるものといえる。同様に明瞭な貫入カーボナタイトの産状を第4図に示す。

すなわち 白雲鄂博カーボナタイト鉄床地域は 中期～後期原生代の間 満蒙トラフと内蒙古陸との中間の大陸斜面に位置しており ドロマイト 石灰岩 砂岩 泥岩 粘土岩などから成る厚い海成堆積物によっておおわれていた。この地域に ほぼ東西方向の深部断裂が発達し 上部マントルの部分熔融によって生じたマグマは液体不混和によってカーボナタイトマグマを分離し この断裂に沿って上昇し 海底へ噴出した。したがってすでに堆積しつつあったドロマイト層などと 大半のカーボナタイトはほぼ整合的に累重した (第5図)。

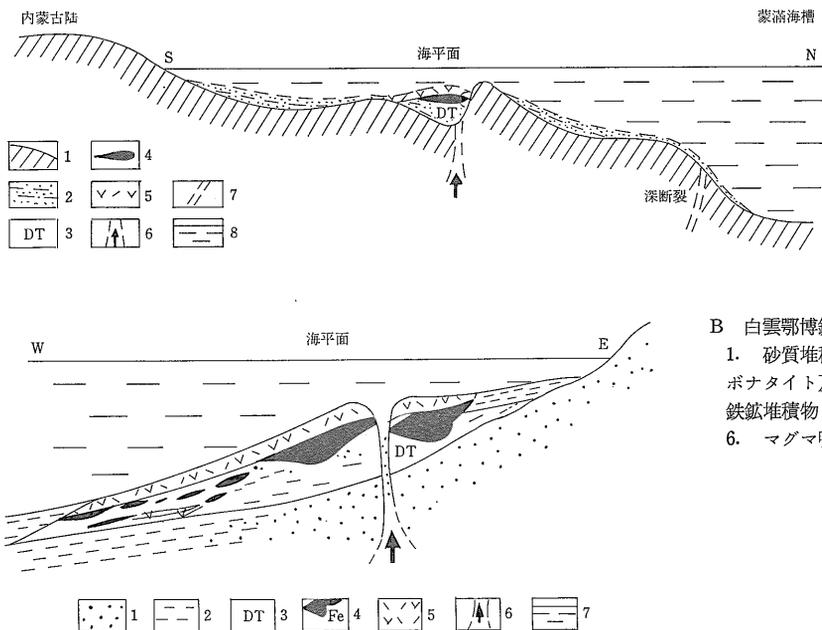
このような生成モデルを提出した白鶴・袁忠信 (1985) は このタイプのカーボナタイトに対して「海相火山堆積炭酸岩 (Marine facies volcano-sedimentary carbona-

tite)」と定義するとともに 同様な産状を示すタイプのカーボナタイトが 中国に数多く存在することを示した。なお 高品位のレアアース鉱石を伴うようなカーボナタイトはこれまでのところそれほど多く見出されていないが 湖北省北西に位置する廟壩 (Miaoya) カーボナタイト鉄床はヘルシニア期に貫入した複合岩体であって アンケライト・カーボナタイトは3% (REO) 以上のレアアースを伴っている (第6図)。

マウンテンパス (Mountain Pass) 鉄床

1949年にこの鉄床が発見されてから1980年代に至るまで 常に世界最大かつ高品位のレアアース鉄床として評価されて来た。また その生産量は1985年まで最も安定した軽希土の供給源となっていた。

マウンテンパス鉄床カリフォルニア州はラスベガス市の南西約100km 海拔標高1500m 前後の高地に位置し



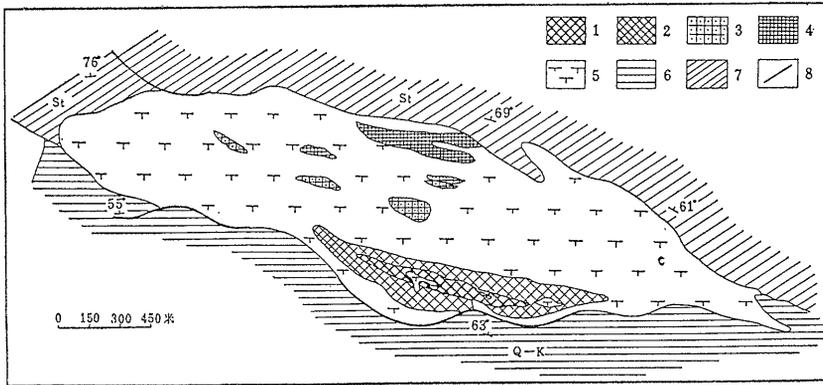
第5図 白雲鄂博鉄床の生成モデル (白鶴 袁忠信 1985)

A 白雲鄂博鉄床の地質構造位置図。

- 1. 古陸基盤岩 2. 砂泥質堆積物 3. ドロマイト質堆積物 4. 鉄質堆積物 5. アルカリ岩 (粗面岩) 6. マグマ噴出口 7. 深部断裂 8. 海水海面

B 白雲鄂博鉄床生成模式図

- 1. 砂質堆積物 2. 粘土質堆積物 3. カーボナタイト及び堆積性炭酸塩岩 4. 菱鉄鉄鉄鉄堆積物 5. アルカリ岩 (粗面岩) 6. マグマ噴出口 7. 海水海面



第6図 廟塚カーボナタイト複合岩体地質図(李石1980)

1. 黒雲母カーボナタイト
2. 方解石カーボナタイト
3. 含炭質物方解石カーボナタイト
4. アンケライトカーボナタイト
5. 閃長岩
6. メタ石英クラトファイヤー
7. 網雲母片岩
8. 断層

ている。

周辺の地質は NNW—SSE の伸びをもつプレカンブリア界と クラークマウンテン断層とイバンパー断層で境される中〜古生代の堆積岩類及び第四系から成っている (Olson et al., 1954)。プレカンブリア界は片麻岩片岩及び花崗岩類から成り その片理の走向は N—S ~ NNW—SSE を示す。

カーボナタイトはプレカンブリア界中に貫入し 各種のアルカリ岩類と密接に伴って産出している(第7図A)。数多くのカーボナタイトのうち Sulphide Queen Carbonatite はこの地域で最大の岩体であり 長径720m 短径210mの規模を有し 鉱体の品位は5—10% (REO) その埋蔵粗鉱量は1億トンを超える。USBM (1985) によるレアアース含有量 (REO) は約500万トンである。レアアースを伴うカーボナタイトは Sulphide Queen 以外に200を超えるが いずれもアルカリ岩(またはアルカリ交代岩)を伴っている。Sulphide Queen は NNE 及び NW 系断層によって変位している(第7図C)が その復元図(第7図B)からマグマの貫入様式がよく理解できる。

カーボナタイトを構成する鉱物は 方解石 ドロマイト アンケライトが主であり 菱鉄鉱 スترونチアナイト アラレ石 白鉛鉱を伴うほか 重晶石 天青石 バストネサイト パリサイトも普遍的に認められる。このほか 石英 赤鉄鉱 磁鉄鉱 褐鉄鉱 緑泥石 金雲母 黒雲母 白雲母 スフェーン エジリン輝石 褐簾石なども伴う。また、方鉛鉱 黄鉄鉱 黄銅鉱などの硫化鉱物も散在する。レアアースを含む鉱物はバストネサイトが圧倒的に多いが モナザイト 燐灰石もしばしば見られる。

カーボナタイトの生成時代は ションキナイト中のジルコンによって800—900Ma の測定値があり また 野外の産状からも このカーボナタイト/アルカリ岩複合

岩体の貫入は後期原生代と考えられている(Olson et al., 1954)。

その他のカーボナタイト鉱床

アフリカとくに東アフリカリフトバレー及びその周辺には中生代以降に貫入噴出したカーボナタイト—アルカリ岩複合岩体が集中的に生じている。カーボナタイトには しばしばレアアースが濃集するが なかでも Kangankunde 鉱床(マラウイ)はストロンチアナイト 重晶石とともに モナザイト(5~10%)があり 埋蔵鉱量350,000トン(モナザイト平均含有率; 5.6%)が確認されている(Holt 1965)。この岩体は美事な環状構造を示しレアアース スترونチウムを伴うカーボナタイトは最末期に貫入したもので 主に岩体の中心部とその西に産出する(第8図)。

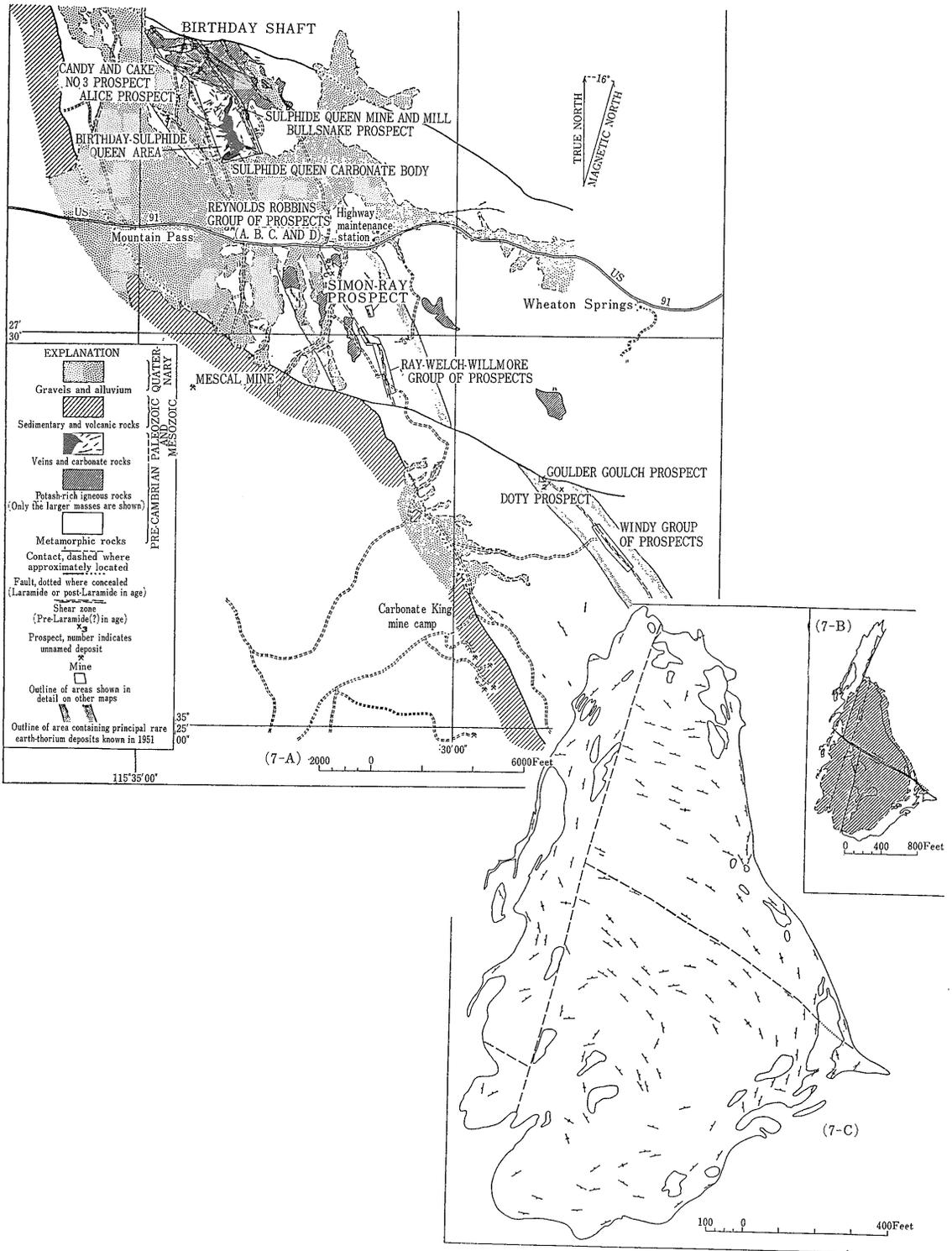
Karongé カーボナタイト(ブルンジ)にはバストネサイトとモナザイトから成る脈状鉱体が確認されており (Van Wanbeke 1977) 小規模ながら1970年代に稼行された実績がある。このほか Mrima Hill(ケニア) Wigu Hill(タンザニア) Nkombwa Hill(ザンビア)などに小規模なレアアース鉱床が知られている。

ブラジルにはニオブ(Nb)の大規模鉱床として著名なアラシャ(Araxa)鉱山があり 小規模ながら高品位(10~11% REO)のレアアース鉱体を伴っている。また同様にカタロン(Catalao)ニオブ鉱山にも中程度の品位(2%REO)の鉱体が推定されている(Berbert 1984)。

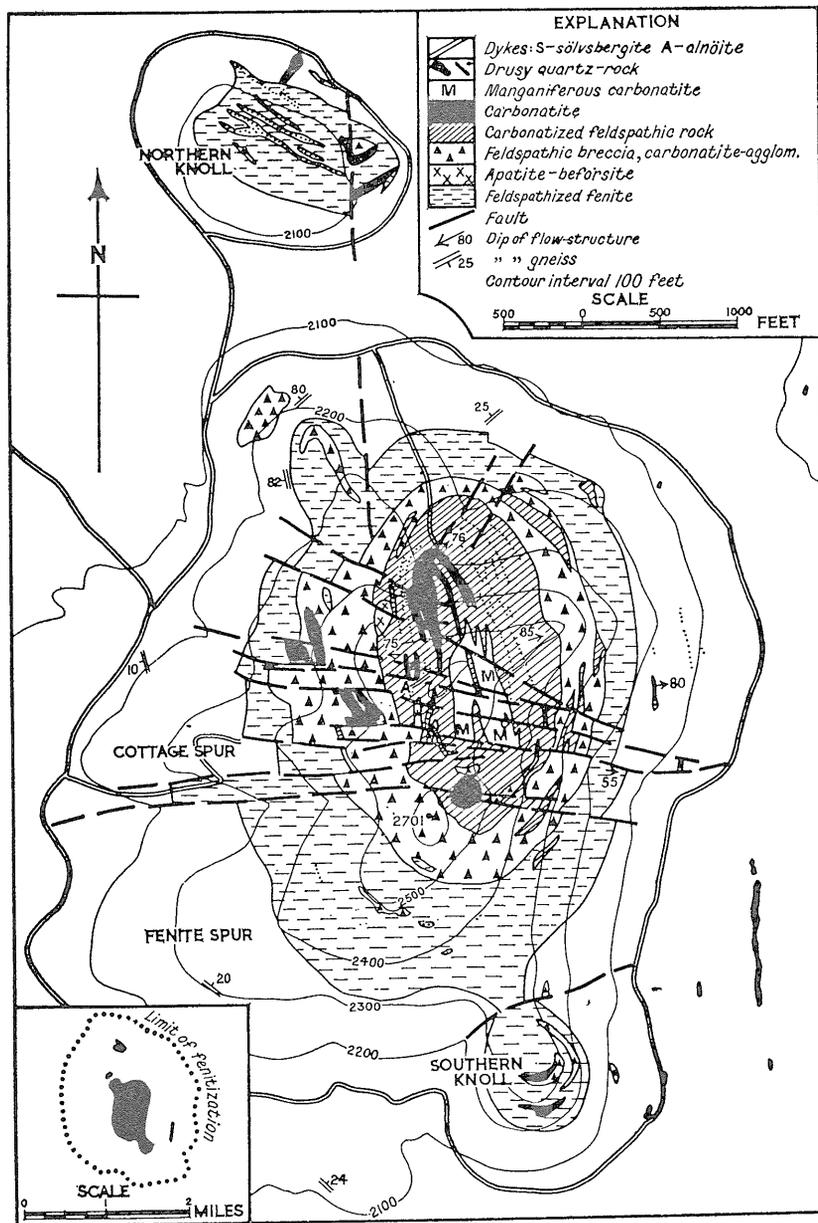
インド カナダなどにも多数のカーボナタイトが分布し 若干のバストネサイト モナザイトなどのレアアース鉱物を随伴しているものの レアアースを開発の主要対象とするほどのポテンシャルには乏しいようである。

2. 鉱脈鉱床

レアアース鉱物は一般にペグマタイト期やグライゼン



第7図 マウンテンパス カーボナタイト鉱床の産状
(Olson et al., 1954)



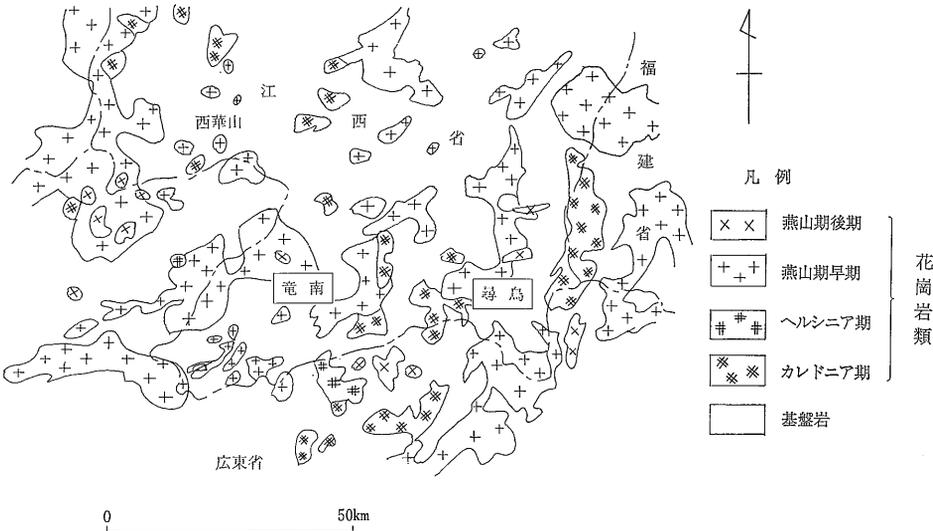
第8図 カンガンクンデ
カーボナタイト
鉱床図
(Holt 1965)

期に晶出することが多く 低温熱水期には カーボナタイトを除いて レアアースを濃集することは少ない。特異な例として南アフリカの Steenkampskraal, Buffalo fluospar 及び Bou Naga (モーリタニア) では レアアースが濃集し 過去に開発が行われた。

Steenkampskraal 鉱床はケープタウンの北東約 450 km に位置しており その周辺には Uilklip 及び Roo-dewal 鉱床も存在する。鉱床は始生代の花崗岩 花崗片麻岩類の割れ目を充填した熱水性の平行脈 網状脈で

あり 鉱脈の最大走向延長は 300m 脈幅平均 1m 開発深度約 150m である。鉱石鉱物は 磷灰石 ジルコン モナザイト 及び各種の鉄及び銅鉱物から成る。鉱脈中では概して 磷灰石が多く モナザイトとの合計含有率は 80%にも達する。

開発初期におけるこの鉱床の埋蔵鉱量は 225,000 トン モナザイト精鉱 (45% REO) を 1965年に閉山するまでの間 57,000 トン生産した。現在の残存鉱量は 35,000~50,000 トンが見込まれ そのうち モナザイトは精鉱量で約 20,000 トンと推定されている (Von Backstrom,



第9図 竜南及び尋烏鉱床位置図

1976).

Roodewal 及び Uilklip 両鉱床も その産状は Steenkampskraal 鉱床と同様であるが 鉱床規模 品位とも劣っており 稼行実績はない。

Buffalo fluospar 鉱床はプレトリアの北北東約150kmに位置し 螢石を主としモナザイト及びバストネサイトを伴う鉱脈鉱床である。レアアース鉱物は螢石の選鉱尾鉱から回収された (Neary and Highley, 1984)。

3. 風化残留鉱床 (イオン吸着型鉱床)

このタイプの鉱床は中国江西省南部において発見され 1980年代から竜南 (Lo nnan) と尋烏 (Xunwu) 両地区において生産されるようになった。その地質及び鉱床ならびに産状の特徴については 楊岳清ほか(1981)及び楊主明(1987)により また 含有レアアースと生産概況については Sun Hong-ru(1983)によって報告されている。

鉱床は竜南と尋烏両県にあり (第9図) いずれも早期燕山期 (中生代ジュラ紀) の花崗岩類を原岩とした風化残留層が稼行の対象となっている。付近には 各種の花崗岩類が分布するが 最も優勢なものは白雲母花崗岩と黒雲母花崗岩であり かつ 両者に含有されるレアアース鉱物に著しい相異がみられる。白雲母花崗岩にはゼノタイムのほかYに富む鉱物が多いが 黒雲母花崗岩では褐簾石が圧倒的に多いため Yに乏しく かつ軽希土に富む傾向がみられる。(楊岳清ほか 1981)。

竜南と尋烏鉱床のレアアース組成の相違は第6表に示したように 前者が中～重希土及びイットリウムに富み 後者は軽希土及び中希土に富むことである。

この地域は亜熱帯性気候であるため風化分解作用が著るしく 厚い風化殻が発達している。レアアースは基盤岩 (堆積岩 変成岩) にも含まれるが 花崗岩類とくに早期燕山期のものに比較的多く濃集している。一般的には分化の進んだ花崗岩類中では より軽希土に富むとともに Eu の負の異常が顕著である。

風化殻は数m～20数mの厚さをもち その垂直断面は風化の程度に応じた粘土鉱物の組み合わせによって分帯することが可能である (第10図)。それらは地表から原岩に向かって ①カオリナイトーギプサイトーパーミキュライトー雲母/パーミキュライト混合層帯 ②カオリナイトーギプサイトーパーミキュライト帯 ③カオリナイトーメタハロイサイト帯及び④モンモリロナイトーカオリナイトーメタハロイサイト帯に分帯できる。このうち ②帯が最も厚く 10～20mに達する。

化学的風化作用に対して抵抗力の強いモナザイト ゼノタイムなどの鉱物は風化殻中においても鉱物として残留するが その他のレアアースを含む鉱物は比較的容易に分解する。このため レアアースはイオン化し 粘土鉱物とくにメタハロイサイトによって吸着される。したがって 風化殻中のレアアース含有量はメタハロイサイトの多い帯 すなわち カオリナイトーメタハロイサイト帯において最大の値をとる。このような風化帯中ではレアアース酸化物の合計 (TREO) は 1,500ppm (楊主明 1987) ないし3,000～4,000ppm (楊岳清 1981) に達する。このことは化学的風化作用によって レアアース量は原岩の含有量に比較して3倍以上に濃集したことを意味している。オーストラリアにおけるデボン

第6表 中国産レアアース鉱石の化学組成 (李, 1984)

	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
1	2.18	<1.09	1.08	3.47	2.34	<0.1	5.69	1.13	7.48	1.60	4.26	0.6	3.34	0.47	64.10
2	29.84	7.18	7.14	30.18	6.32	0.51	4.21	0.46	1.77	0.27	0.80	0.13	0.62	0.13	10.07
3	23.0	42.7	4.1	17.0	3.0	<0.1	2.0	0.7	0.8	0.12	<0.8	Trace	2.4	<0.14	2.4
4	1.2	8.0	0.6	3.5	2.15	<0.2	5.0	1.2	9.1	2.6	5.6	1.3	6.0	1.8	59.3

1. 江西省竜南鉱 (風化残留鉱床)
2. 江西省尋烏鉱 (風化残留鉱床)
3. 広東省南部砂鉄床モナザイト
4. 広東省南部砂鉄床ゼノタイム

紀花崗閃緑岩は風化作用によりレアアースを原岩含有率の2-3倍程度濃集することが確認されている (Nesbitt 1979).

風化殻中におけるレアアースは第9図の①及び②帯でCeの増加 ③と④帯で相対的な減少が認められる。これはCeが水酸化物として①②帯に固定されるためであり それより下方の風化帯へはほとんど移動しなかったことを示している。またYが③及び④帯でやや多いのはYがゼノタイム以外の鉱物—たとえば含Yバストネサイト—として含まれており それらの分解と移動によって濃集したものと推測される。

2. レアアースを随伴する鉄床

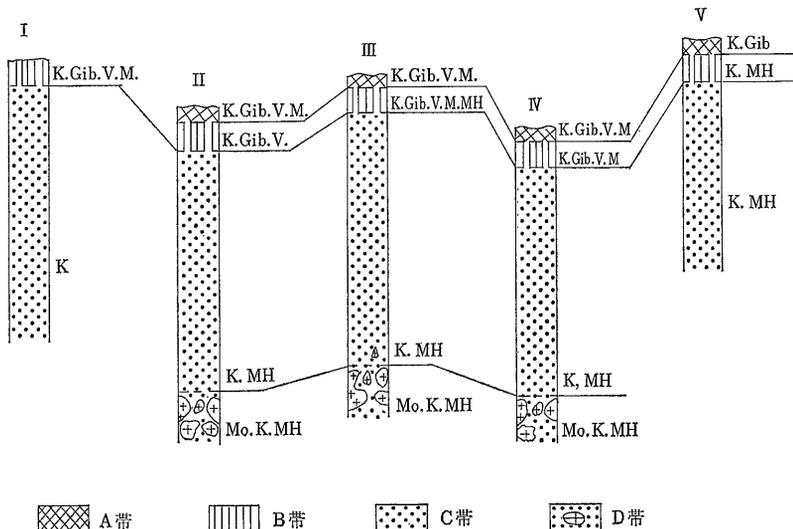
レアアースの地殻存在度は比較的大きく どのような岩石中にも100 ppm 以上は含まれている (Correns et al 1970) にもかかわらず それらが濃集して単独の鉄床を構成することは比較的少ない。前述したように カーボナタイト及びごく一部の鉄脈鉄床を除けば レアアース

(REO) 品位が1%を超えることはほとんど無いといっている。この意味から 今後も副成分として回収されるレアアースに対する資源依存性は大きく とくに中〜重希土への需要増が進みつつある現在 あるいは将来レアアースの分離回収技術の開発と向上を含めて レアアース資源全体を評価すべき時期に来ているものと考えられる。

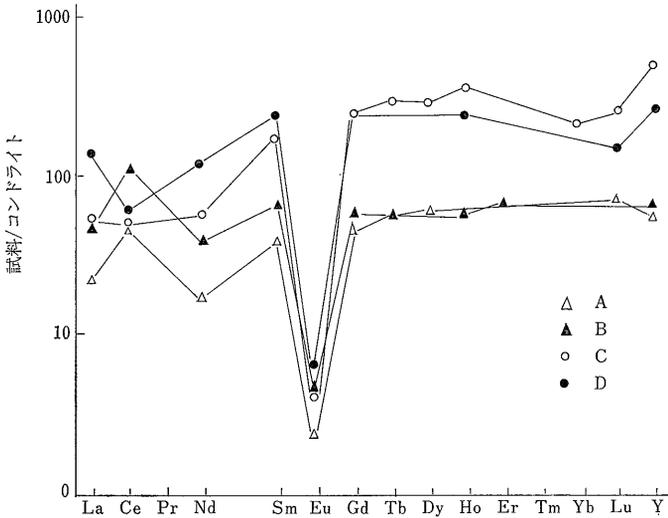
1. アルカリ岩に伴うレアアース

アルカリ岩は主として大陸地域に分布し しばしばカーボナタイトを伴って産出することでも知られている。この岩石は一般の火成岩類と同様に 噴出岩も深成岩もあるが それらに比べて石英に乏しく アルカリ長石 準長石 Na-角閃石 Na-輝石などから成るもので 上部マントルで発生したマグマに由来すると考えられている。

キビニ (Khibiny) アルカリ岩複合岩体; コラ半島 (ソ連) のつけ根付近に位置し 複合岩体中の燐灰石—霞石岩体から燐灰石を採掘し 燐酸質肥料原料に供して



第10図 竜南鉄床の風化殻断面及び鉱物組成 (楊主明 1987)
 K: カオリナイト MH: ハロイサイト Mo: モンモロロナイト V: パーミキュライト M: 不規則混合層鉱物 (雲母・パーミキュライト) Gib: ギブサイト



第11図 風化殻断面分帯試料のレアアースパターン(楊主明 1987)
A. B. C. D. は第10図の風化断面に対応。

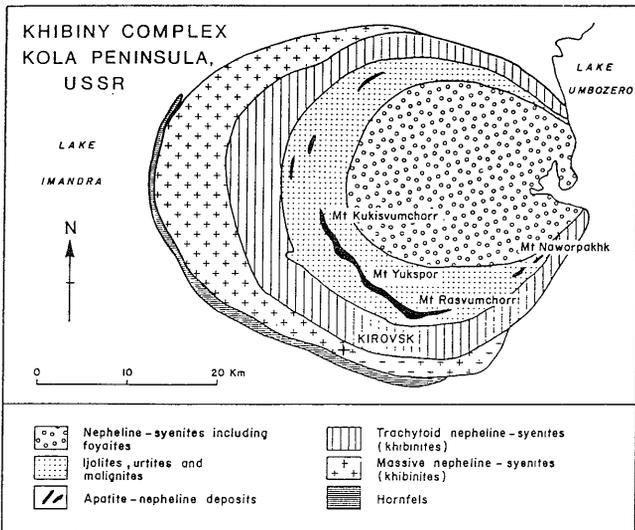
いる。その製造過程で燐灰石に含まれるレアアースを分離回収しているもので 同国の主要なレアアース供給源である (Roskill Information Service, 1985)。

アルカリ岩体は直径約 40km の規模をもち 霞石閃長岩を中心として 7 期の貫入岩から成る環状岩体で (第12 図) 石炭紀後期～二畳紀前期の貫入と考えられている (Gerashimovsky, et al., 1974)。燐灰石-閃長岩 (鉍床) はアイヨライト ウルタイト及びマリグナイトから構成される。鉍床は数個の岩体から成り それらは15～75%の燐灰石 10～80%の霞石 1～25%エジリン輝石を主成分鉍物とし 普通輝石 くさび石 長石及び含チタン磁鉄鉍を伴う。燐灰石はフッ素燐灰石で 或る分析

試料ではストロンチウム (SrO_2 11.4%) とレアアース (REO 4.9%) を含んでいる (Notholt 1979) が 平均したレアアース (REO) 含有量は 1% 土と考えられる。

この岩体に伴う燐灰石の埋蔵量から推定すると 回収され得るレアアース資源量は 500 万トン (REO 換算) 以上である。

ブラジル南部 Posos de Cardas アルカリ岩体はブラジル最大のアルカリ岩複合岩体であり その中の閃長岩とフォノライトのラテライト化風化殻中にはトリウム (ThO_2 1%) とレアアース (REO 4%) を含む鉍体が見出されており その鉍量は約100万トンといわれる (Wedow, 1967)。



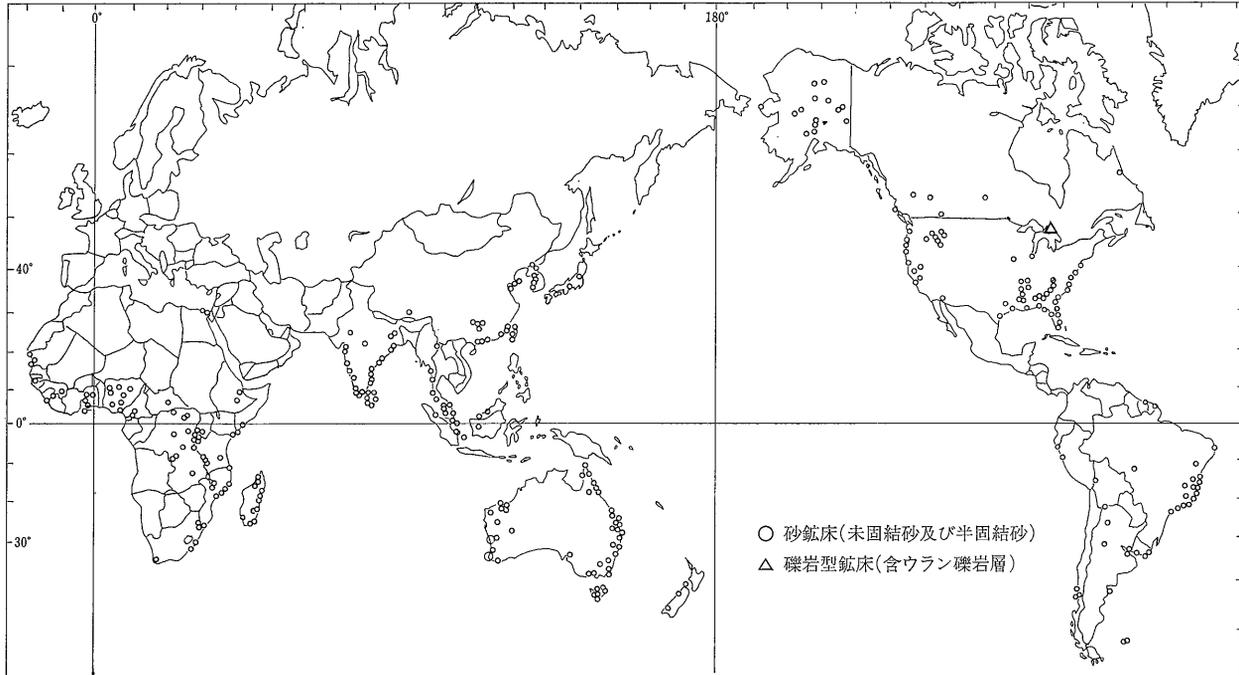
第12図 キビニアルカリ岩体地質図 (Notholt, 1979)。

数年前に話題を提供した北東カナダ Strange Lake 鉍床 (New Foundland, Labrador) は Schefferville の北東約240kmに位置し 先カンブリアのアルカリ花崗岩複合岩体 (USBM 1985) で 岩体中には多量のパイロクロア ($(\text{Na}, \text{Ca})_2 \text{Nb}_2\text{O}_6 (\text{O}_2\text{OH}_3\text{F})$) ガドリナイト ($\text{Be}_2\text{FeY}_2\text{O}_2 (\text{SiO}_4)_2$) などを含み その開発が検討されている。

このほか アルカリ岩あるいはアルカリ岩-カーボナタイトは世界各地に分布しており (第1 図) いくつかの岩体でレアアースを伴うことはすでに知られている (例えば Kamitani and Hirano, 1987)。今後も同様なタイプの鉍床が見出される可能性は大きく レアアースの重要な供給源となるかもしれない。

2. 堆積鉍床

このタイプの鉍床としては 砂岩 礫岩及び



第13図 世界の砂鋳床分布図

未固結の砂鋳床(漂砂鋳床)がある。このうち レアアースの最大の供給源としての砂鋳床は世界各地 とくに中～低緯度地域に集中的に分布する(第13図)。なかでも 西オーストラリア インド南部 ブラジル南部 米国フロリダ 中国南部 マレー半島地域などは レアアースの主産地である。いずれも 錫 イルメナイト ジルコンなどがそれらの主要な資源であり モナザイトは随伴鋳物としてその選鋳過程で回収されている。

礫岩型鋳床としてはカナダ東部(エリオットレイク)が著名で レアアースとくに Y の供給源として 最近になって 再び脚光を浴びるようになってきた。

1. 砂鋳床

砂鋳床は未固結砂に含まれる資源の濃集体を指すが その大半は海浜および 河川流域に生成している。

オーストラリア; 主産地は西オーストラリア州南西海岸 クィーンズランド州南東海岸及びニューサウスウェールズ州東海岸地域である。海浜重砂の生産の比重は1960年代から西オーストラリアに移り 1984年にはオーストラリアのモナザイト全生産量の95%以上を占めるに至っている(Towner, 1987)。

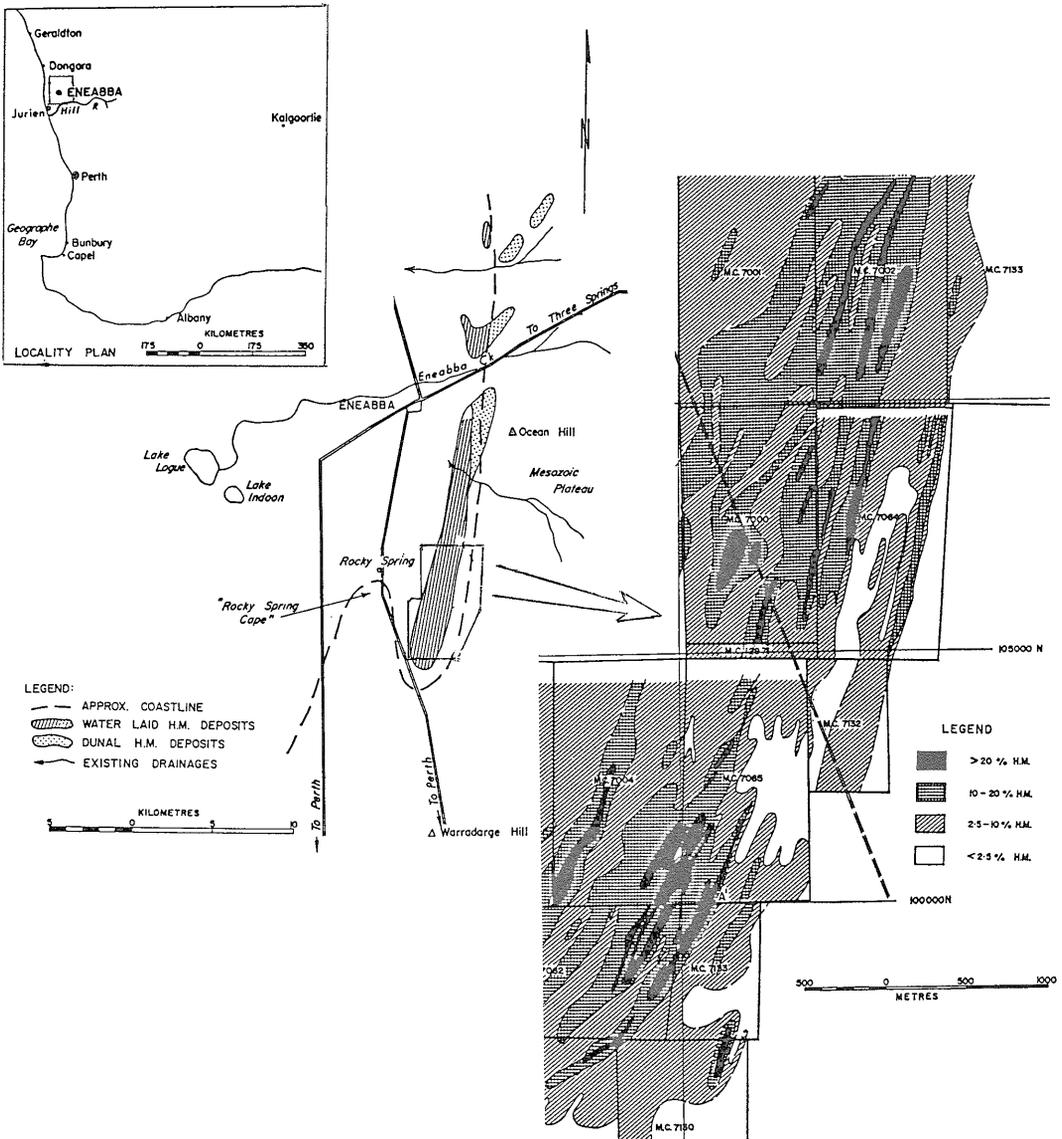
Eneabba 地区の砂鋳床は州都パースの北約300km に位置する。鋳床は現在の海外線の約 30km 内陸部にあり 南北方向の延長約 30km 幅約 3 km の範囲に分布する(第14図)。鋳床の生成時期は新第三紀鮮新世後期

～更新世前期間の海進期(海面上昇)であり 現在の海水準面上 82～128m に位置している。砂鋳床は中生代ジュラ紀 Yarragadee 層及び白亜紀 South Perth 層を覆って発達している。したがって 重砂の直接の供給源はこれら中生層の堆積岩であるものの 本質的にはさらに東に広く分布する始生代の花崗岩類 片麻岩類であると考えられている(Lissiman and Oxenford, 1975)。

最大の鋳体はこの地区の南部に位置し 重鋳物含有率10%以上の部分の重鋳物埋蔵鋳量は2,500～3,000万トンといわれる。このうち モナザイト含有率はオーストラリアの砂鋳床中で最も高い(第7表)。

Capel 地区の砂鋳床は Bunbury 市の南～南西に位置し Geographe 湾の海岸線にほぼ平行して分布する(第15図)。鋳床生成時期は Eneabba 地区より新しく 第四紀更新世～完新世で 重鋳物の濃集はリヌールム間水期(7～100万年前)と考えられている(Welch et al., 1975)。

鋳床は 約10km の間隔をもつほぼ平行した数個の鋳体(South Capel, North Capel, Tutunup, Yoganup, Boyanup など)から成っている。このうち Yoganup Extended 鋳体が最大で 重鋳物品位10%以上の部分は NE-SW 延長約 5 km 最大の厚さ 200m (平均100m) であり 重鋳物の埋蔵鋳量は約 3,800 万トンと推定されている。この鋳体の重鋳物組成は第7表のとおりであるが モナザイトの平均含有率は 0.8% で 前述の Eneabba 南部鋳体に比べやや低い。しかし ごく少量のゼノタイムはこの地区から回収されている(Towner, 1987)。



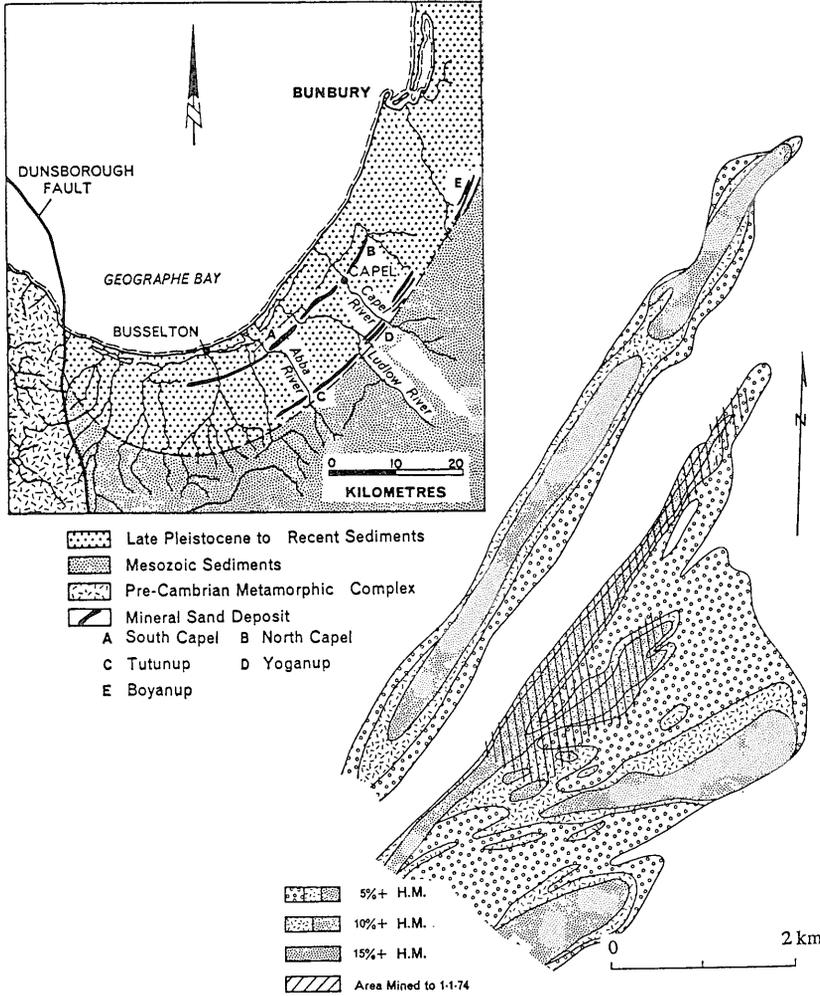
第14図 Eneabba 鉱床の位置及び品位分布 (Lissiman and Oxenford, 1975)

オーストラリア東海岸地域 (Brisbane~Sydney) には 1,000km以上にわたって ルチル ジルコンを比較的多く含む砂鉱床が海浜及びラグーンに沿って発達している。 主要な産地はブリスベン北方の North Stradbroke 島及びシドニー北方の Hawks Nest と Tomage Sandbeds (Newcastle 北方) である。 重鉱物の供給源は中生代及び新生代の堆積岩であり 重鉱物含有率は西オーストラリアの鉱床に比べて低く (第8表) またモナザイトの含有率もかなり低い (McKellar, 1975)。 鉱床は後期更新世~完新世のラグーン砂及び風成砂が主であるが 地域の北 (Moreton basin) ではイルメナイトが多

く南ではルチルとジルコンに富む傾向が顕著である。 また ルチルとジルコンの粒度組成にも大きな差異がありこれらは鉱床の源岩の特徴をよく表わしているものと考えられている。

インド; インド大陸南部海岸地域には高品位の重砂鉱床の分布が知られており (Overstreet, 1967) なかでもケララ州 Quilon 付近からタミルナドゥ州沿岸部にかけて豊富な埋蔵量が推定されている。

ケララ州 Chavara 地方の Needendakara から Kayamkulam にかけての海浜には25kmにわたって 重鉱



第15図 Yoganup 鉱床の位置及び品位分布 (Welch et al, 1975による)

第7表 Eneabba 重砂の鉱物組成 (重量%)

鉱物	含有率	備考
イルメナイト	27.9~62.8	
ジルコン	6.8~61.1	*その他鉱物
ルチル	4.9~14.1	十字石 角閃石
白チタン石	~4.8	珪線石 輝石
モナザイト	~2.4	ザクロ石 板チタン石
監晶石	~11.8	スピネル 電気石
その他*	2.2~34.0	

(Llssiman and Oxenford, 1975 による)

物が 3/4 以上を占める黒色重砂が賦存し イルナメイトの埋蔵量 (FeTiO₂) 約1,700万トン ルチル埋蔵量 (TiO₂) 125万トンが計上されている (Indian Bureau of Mines, 1984 86)。モナザイトも比較的豊富であることから (第9表) インド最大のレアアース賦存地区といえる。鉱床は直接的には沿岸部に発達する第三紀以降の

堆積物 (Warkallis 及び Teris) がモンスーン海流によって運搬 淘汰された結果であり したがって より石英に富む“軽い砂”は主に北方の Allepey—Shertallai 地方に集中的に産出する (Poulose, 1972)。Chavara 地方に次ぐ重砂鉱床はキロン南方の Kovalam 及び Anjango—Varkallai 海岸 Trichur 及び Cannanore 地方にも分布している。

タミルナドゥ州南部 とくに Kanyakumari 地方の海岸にもキロン付近と同様な重砂が分布し 活潑な採掘が行われている。

比較的新らしく発見された砂鉄床はオリッサ州 Chatterpur 海岸にあるが ケララ及びタミルナドゥの鉄床に比べて重鉄物品位及びモナザイト品位も低いものの埋蔵量は2億3,000万トンである (Indian Bureau of Mines 1984)。

アンドラプラデシュ州北東部の Godavari 川の河口か

ら海岸線及び Vishakhapatnam 付近にも砂鉱床が分布する。 Vishakhapatnam 付近の基盤岩はチャルノカイトやベグマタイトを伴う含ザクロ石珪線石片麻岩と珪岩から成り これらが重鉱物の供給源と考えられている。 このブラックサンド中のモナザイト品位は高く南では1~2%程度であるもの 北部では4%以上に達するようである (Overstreet, 1917)。 モナザイト中のトリウムも概して多く ThO_2 5~11%である。

ブラジル；ブラジルはモナザイトの調査開発が最も早くから行われた国の一つである。 レアアース鉱物は海浜砂 河川砂及び第三紀層中にも含まれるが 採掘の対象は主に リオデジャネイロからビトリアにかけての海岸地域である。 主要な鉱床は第三紀層中とくに砂岩に由来する海岸段丘 砂洲などの堆積物である (Neary and Highley, 1984)。 しかし 砂層の構成鉱物からみると その供給源は後背地にある始生界の低圧/高温型の変成相中のミグマタイト 眼鏡片麻岩などであり これらには平均すると0.2%のモナザイトが含まれている (Leonaldos, Jr., 1974)。 なお ブラジル南部一帯の砂鉱床には モナザイト量として 180,000トンの埋蔵鉱量が報告されている (DNPM, 1973)。

スリランカ；砂鉱床はスリランカ島のほぼ全域にわたって分布するが 主要なものは北東部 (Mullaitivu~Tricomalee) と南西部 (コロombo南方) である。 Pulmoddai 地区の鉱床は現世の重砂であり その分布延長は7.2kmで 幅は最大220mといわれ (Clark, 1983) 埋蔵量は400万トン 重鉱物組成はイルメナイト70~72% ジルコン8~10% ルチル8% 珪線石1%でモナザイト含有率は0.3%である。 コロンボ南方の Kaikawara 及び Polkotuwa 海浜重砂は極めてモナザイトに富むことが知られ とくにモンスーンの後では15%以上のモナザイト含有率となる。 しかし ThO_2 もやや多く平均10%に達する (Herath, 1975)。

アメリカ；モナザイトについて世界で最もよく調査され 多くの産地が知られている (Overstreet, 1967)。 その
1988年5月号

第8表 オーストラリア東部砂鉱床の重鉱物組成

	R	Z	(R+Z)	IL	(R+Z) (IL)	Cr_2O_3	Mon
	%	%	%	%		%	%
Yeppoon	4.5	9.9	14.4	62.8	.23	.35	.1
Moreton Is. N.S.I—	21.5	15.4	36.9	47.1	.78	2.11	.5
High dunes	15.8	12.5	28.3	50.1	.56	1.29	.2
Below S.L.	18.8	15.6	34.4	39.7	.87	1.90	.3
Beach	31.1	22.9	54.0	27.0	2.00	3.31	.3
Evans Head	29.0	32.0	61.0	22.9	2.66	4.45	.6
Jerusalem Creek	31.3	36.5	67.8	16.6	4.08	5.99	.8
Bonny Hills	38.6	40.3	78.9	15.7	5.03	8.46	.3
Dunbogan	35.2	38.2	73.4	17.5	4.19	5.0	.3
Diamond Head	38.6	28.4	67.0	13.2	5.08	3.4	.5
Swan Bay	29.4	35.3	64.7	12.4	5.22	2.5	.2
Tuggerah—							
High dunes	46.2	22.7	68.9	14.0	4.92	1.0	.8
Low dues	50.4	30.0	80.4	10.0	8.04	1.5	.4

R：ルチル， Z：ジルコン， IL：イルメナイト

Mon：モナザイト

(Mckeller, 1975による)

第9表 インドの主要砂鉱床の重鉱物組成 (重量%)

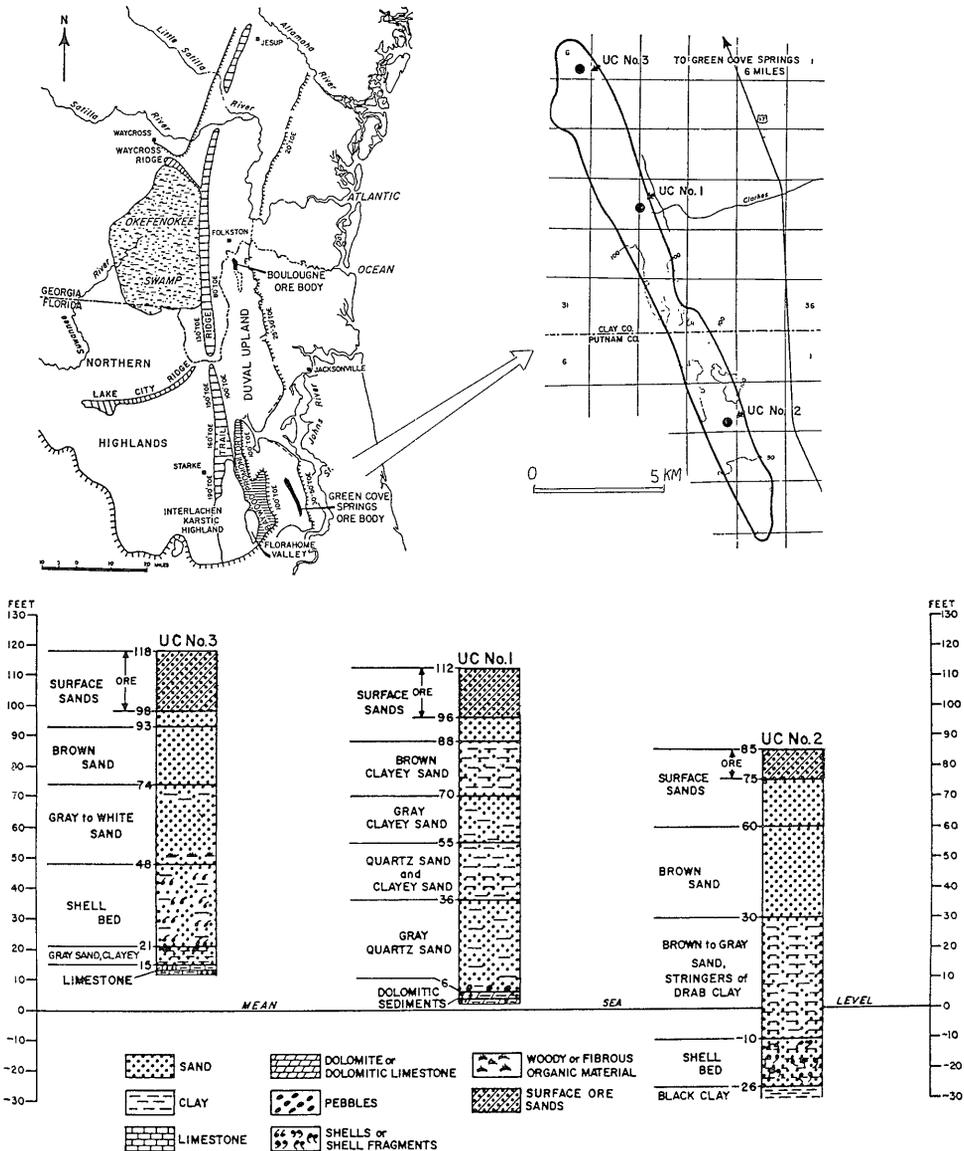
鉱物	Chavara 地域 (Needendakara- kayamkulam)	Manavalakurichi 地域
イルメナイト	60~70	45~55
ルチル	4~7	2~3
ジルコン	5~8	4~6
モナザイト	0.1~1.0	3~4
珪線石	4~8	2~3
白チタン石	1~1.5	0.5~1.0
ザクロ石	—	7~14
その他	4~25	10~25

(Indian Bureau of Mines, 1983 による)

のうち 現在生産を行っているのは主にフロリダ半島北部の大西洋岸である。 この地域には Green Cove Springs と Boulougne 鉱床があり 砂層中には3~4%の重鉱物を含んでいる。

現在 稼動中の Green Cove Springs 鉱床は他の地区に比べ モナザイトにやや富んでいる。 鉱床規模は NW—SE 延長約19km 幅1.2km 平均の厚さは約6m である (第16図)。

Boulougne 鉱床は Green Cove Springs のすぐ南に位置し その鉱床規模は N-S 延長4.5km 幅1km



第16図 Green Cove Springs (USA) の砂鉱床の産状 (Pirkle et al., 1974による)

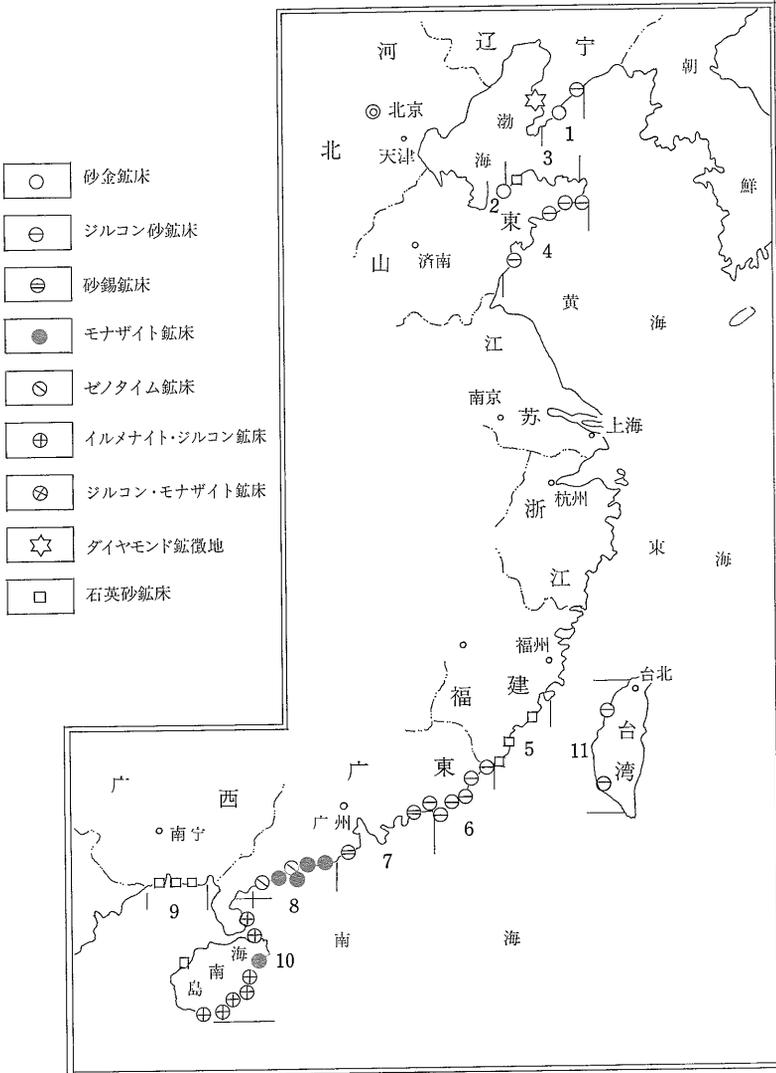
厚さ1~7mであり いずれの鉱床も古期海岸線に賦存するもので 現在の海水準の上位90~100mに位置している。

これらの砂鉱の供給源はフロリダ半島北部の花崗岩類片麻岩類などであって その組成は石英 長石のほかイルメナイト 白チタン石 ルチル 藍晶石 珪線石 ジルコン 電気石 緑簾石 ザクロ石などである (Pirkle et al., 1974)。

中国; 主要な砂鉱床は華北及び華南地方の海岸線に沿って広く分布している (譚起新ほか 1985) が レアア

ス鉱物を比較的多く伴う砂鉱床は福建省南部から広東省南部にかけて海浜砂として賦存する (第17図)。とくにモナザイトは広東省陽江付近から海南島にかけて濃集しゼノタイムも伴っている (劉洪浜 1984)。

広州から陽江 呉川にかけての砂鉱床の規模は大きく 主な重鉱物はイルメナイト ジルコン モナザイトであり ルチル 磁鉄鉱などを随伴する。この地域の後背地にはカレドニア期のミグマタイトが多く 燕山期の花崗岩類とともに主要な供給源である。一方 雷州半島の北部ではイルメナイトとモナザイトが主要な重鉱物となっているもの 中部から南部にかけてはイルメナイ



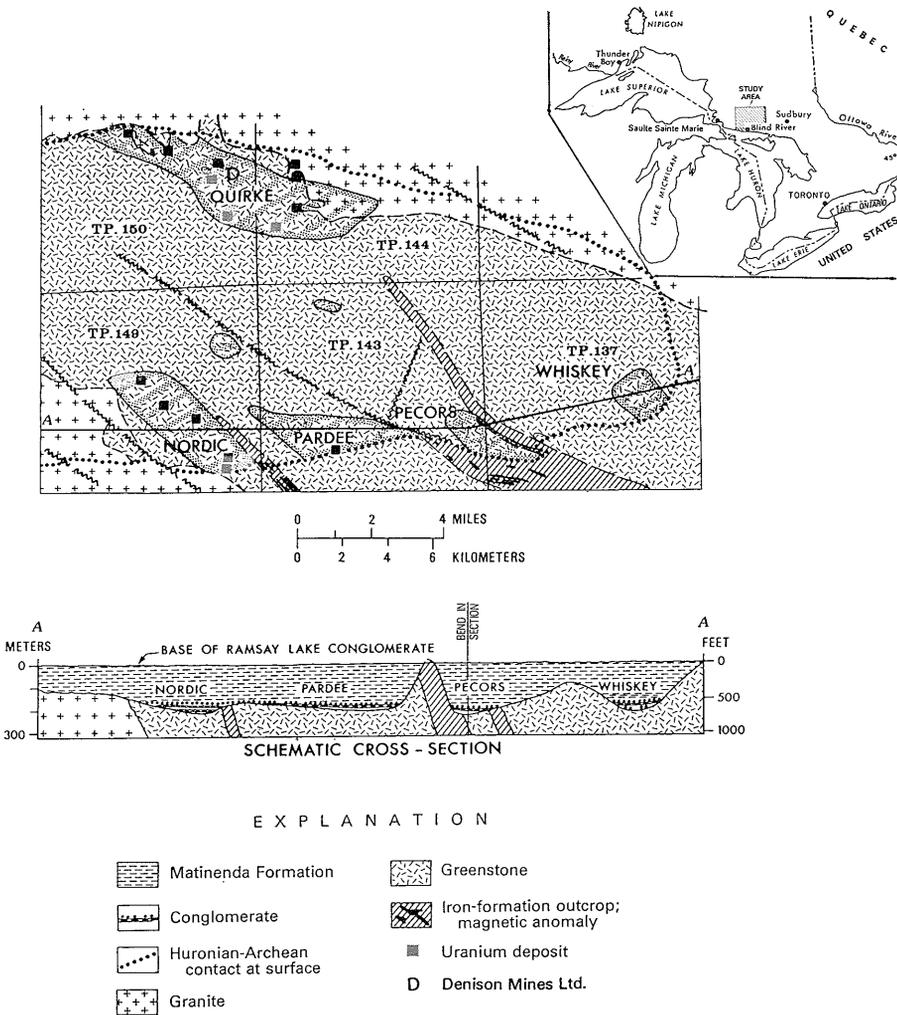
第17図 中国海浜砂鉱床分布図 (譚起新ほか, 1985)

トルチル ジルコンが非常に多く モナザイト ゼノタイムに乏しい。これは後背地に広く噴出した玄武岩により 主としてイルメナイトが供給されたため モナザイトやジルコンは沿岸流による運搬と更新世の堆積物によるものと考えられている (譚起新ほか 1985)。このような広東省南部沿岸の砂鉱床の形成時期は ¹⁴C 測定によって 全て第四紀に属し かつ重砂が大規模に生成したのは完新世である (阮汀 趙希寿 1984)。

タイ・マレーシア・インドネシア；マレー半島からインドネシア・ビリトン島に至る古生代～中生代の花崗岩帯は錫ベルトとしてよく知られている。錫を伴う花崗岩は主として三畳紀 (230～200万年) に貫入固結したもので (Bignell and Snelling 1977) イルメナイト系の花崗

岩類で特徴づけられ マグネタイト系花崗岩類に比べ Sn, K, F などに著しく富んでいる (Ishihara et al., 1979)。花崗岩帯は Eastern belt, Main Range 及び Western belt の3帯に分けられている (Hatchison and Taylor, 1978)。タイ南部では Western belt と Main Range の花崗岩類が マレーシアからインドネシア (パンカ ビリトン島) に至る広い範囲は Main Range に属する花崗岩類が発達し その磁化率 放射能や岩石化学的な性質はほぼ共通した性格をもっている (佐野ほか 1986)。また スマトラ島にも三畳紀と白亜紀の花崗岩類があって 小規模ではあるが 錫鉱化作用が見られる (佐藤 1984)。

レアアース鉱物 (モノザイト ゼノタイム) は錫に富む花崗岩類及びそのペグマタイト グライゼンあるいはスカ



第18図 Elliot-Blind River 地域の含ウラン鉱床 (Robertson 1975 による)

ルン中に 錫石 イルメナイト ジルコンなどと共に伴われる。これらの花崗岩類は熱帯性の強烈な風化作用によって分解され、氷期海退時には削剝が一段と進み、それらが河川によって運搬、堆積し、大規模な砂鉱床を形成した。

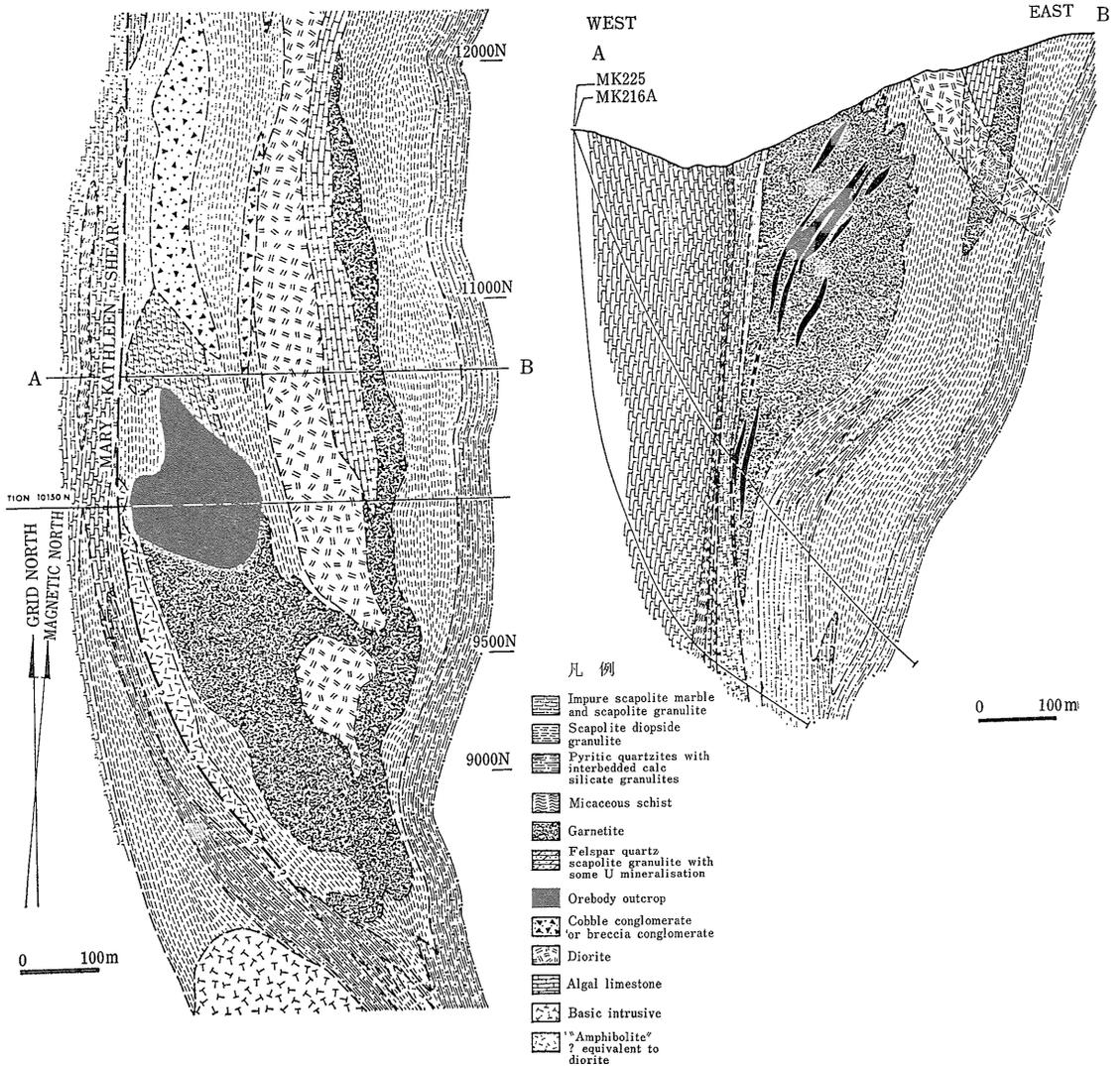
レアアース鉱物の砂鉱中の品位や鉱物種に関する広域的な研究はあまり行われていないため、マレー半島からインドネシアに至る広域の資源ポテンシャル評価は現在のところかなりむづかしい。しかし、一部の鉱床地区における砂錫の選鉱尾鉱(アマン)中に含まれるモナザイト及びゼノタイムの含有率は明らかにされている(新金属協会 1978及び79)。たとえばマレーシア Kinta Valley 及び Kuala Lumpur 付近の鉱床からのアマンでは比較的高品位で、モナザイトは2~3%、ゼノタイムは0.5~1%である。タイ南部及びインドネシアのアマンはマレーシアに比べてやや低いといわれる。アマ

ン産出量は錫生産の好不調に左右されることから、アマンから回収され得るレアアースも当然、大きな影響を受けることになる。

2. 礫岩型ウラン鉱床

Elliot Lake-Blind River 地域の含ウラン礫岩層
カナダ ヒューロン湖北部地域には基盤をなす始生界の緑色岩類、アルゴマ花崗岩類、堆積岩類などとそれらを不整合におおう原生界ヒューロン累層群が発達する。含ウラン礫岩層は原生界最下部のヒューロン累層群下部層の礫岩層(Matinenda層)に相当する。礫岩層は起伏のはげしい基盤岩の構造に支配されており、ENEWSW方向に伸びたチャンネルに沿って、幅3~4 km、延長8 km以上、厚さ最大300mの規模で堆積している。

礫は主として石英から成り、マトリックスは石英、長石、黄鉄鉱などがその大半を占めるが、そのほかにジル



第19図 Mary Kathleen 鉱床 (U) の産状 (Hawkins, 1975 による)

コン モナザイト ルチル 閃ウラン鉱 ブランネル鉱 やごく微量の金を伴っている。

この地域の鉱床の鉱石平均品位は0.10%U₃O₈ 0.05% ThO₂ 0.09g/t Au であり 埋蔵鉱量(粗鉱量)の合計は約3億トンに達し その中にレアアース (Y₂O₃を主とする)が0.25% (REO) 含まれる (Boyle; 1979, Robertson, 1981)。

ウラン鉱床は第18図に示したように 2地区に分かれて分布し それらに10以上の鉱山が集中する。 イットリウムを回収している Denison 社は北部地区に位置し 年間2,400—2,500トン (U₃O₈) のウラン鉱を生産するとともに 1986年末頃から 150t/年のプラントによって酸化イットリウム (Y₂O₃) を回収している。

なお 回収溶液中のレアアース含有率は次の通りである (USBM, 1985)。

La₂O₃ 0.8% CeO₂ 3.7% Pr₆O₁₁ 1.0% Nd₂O₃
 4.1% Sm₂O₃ 4.5% Eu₂O₃ 0.2% Gd₂O₃ 8.5%
 Tb₄O₇ 1.2% Dy₂O₃ 11.2% Ho₂O₃ 2.6% Er₂O₃
 5.5% Tm₂O₃ 0.9% Yb₂O₃ 4.0% Lu₂O₃ 0.4%
 Y₂O₃ 51.4%

この品位を中国の竜南鉱やゼノタイム (第6表) に比べると Y₂O₃ がやや少ないものの 全体としては中〜重希土に富むことを特徴としている。

カナダには Elliot Lake-Blind River 地域のほかに

Sudbury 西方56kmに Agnew Lake 鉱床があり ウランのほかモナザイトを伴うことが知られている。さらに北西準州の Montgomery Lake-Pedlin 地域 ケベック州北部の Sakami Lake, Mistassini Lake などいくつかの含ウラン礫岩型鉱床も確認されている。

3. その他の鉱床に伴うレアアース

レアアースがいろいろな種類の岩石や鉱床に伴っていることはよく知られている(例えば Herrman; 1970 Henderson; 1984)。したがって レアアースがある種の岩石や鉱床から経済的に分離・回収が可能となれば新しい資源として登場することが考えられる。例えばオーストラリアのオリンピックダム (Olympic Dam) 層準規制型 銅—ウラン—金鉱床 メリーカスリーン (Marry Kathleen) ウラン鉱床などのほか マンガン団塊や燐灰土なども将来のレアアース供給源として注目する必要がある。

オリンピックダム鉱床 (Cu-U-Au-RE)

南オーストラリア Roxby Dawns に位置し 1975年に発見された層準規制型の大規模な銅鉱床である。鉱床は原生代の鉱化作用によると考えられており これまで確認された埋蔵量は約 20 億トン (Cu 品位 1.6%) で 鉱床中にはウラン (U_3O_8 品位 500ppm) 金 (Au 品位 0.6g/t) のほかにレアアース (REO 品位 0.5~0.6%) を伴っている。レアアース鉱物はバストネサイトとフローレンサイトが主であることから (Roberts and Hudson, 1983) 概して軽希土に富んでいるようである。

メリーカスリーン鉱床 (U)

オーストラリア クインズランド州の西に位置する。このウラン鉱床は1954年に発見されたもので 鉱床は主にザクロ石帯及び一部はスカポライト化グラニュライト岩の接触部に生成しており 10ヶ以上のレンズ状鉱体から成っている (第19図)。ウランの埋蔵量は643万トン (U_3O_8 品位 0.12%) といわれる (Hawkins, 1975)。1963年までウラン鉱の採掘が行われ 現在休止している。レアアース鉱物はアラナイト (褐礫石) が主で Stillwellite (Ca, La, Ce) $BSiO_3$ を伴うほか 広範囲に生じたザクロ石帯中には Y がやや多く含まれる。平均品位 0.1% U_3O_8 以上のウラン鉱石中のレアアース含有率は 2.6% (REO) といわれ ウラン鉱の採掘が再開されれば レアアースの回収も検討されよう。

マンガン団塊中のレアアース

マンガン団塊は 1 世紀以上も前にチャレンジャー号

によって発見されて以来 今日まで世界各国による探査開発研究が行われ 現在では資源量 5,000 億トン 開発可能資源量は 230 億トンが試算されている (Archer, 1979)。マンガン団塊中には Mn, Cu, Ni, Co が多く含まれていることはよく知られているが さらにレアアースも数 100ppm (REO) 以上を含有している。マンガン団塊の分布はいずれの海洋底でも確認されているものの 最も有望な地域は東太平洋北部低緯度域であり ほかに中部北太平洋 南太平洋及びインド洋の一部でも高濃集域が知られている。McKelvey et al. (1983) によれば 全レアアース含有率は 1,000ppm を超え なかでも Y は 510ppm にも達している。この品位は Y に対する将来需要が激増したとしても 若しマンガン団塊の採掘が経済性を持つようになるとすれば 充分に対応することが可能となる。

燐鉱床

燐鉱床とくに海成の燐鉱床は世界中に広く分布し 主に燐酸質肥料原料として用いられ 世界の総生産量は 13,500 万トン (P_2O_5) に達している (USBM, 1985)。この中には例えばソ連のアルカリ岩 ブラジルのカーボナタイトから産出する燐灰石も含まれるが 大部分が海成の燐鉱床からのものである。

このような燐鉱石中にもレアアースが含まれることはよく知られ 平均的に数 100ppm 以上の REO が存在する (例えば Cook, 1976)。また アメリカとオーストラリア産の燐鉱石中のレアアース平均含有量は Y (275ppm) と Sc (2ppm) を合計すると 736ppm に達する。なかでも 相対的に重希土が多くとくに Y に富むことが注目される (Alschuler, 1980)。

世界の燐鉱の埋蔵量は 140 億トン 資源量 520 億トン (USBM, 1985) であることと重希土及び Y の豊富さを考慮すれば 燐鉱石からのレアアースの回収も検討すべきものと思われる。

III 問題点

レアアースはその工業的な利用から Y Sc を含め 17 元素を一括して呼称することが一般的であり ここでもそれにならって取扱ってきた。レアアース各元素の地殻存在度及びそれらが濃集する鉱床中における含有量にも変化が著しいという特徴は レアアース資源を評価する場合に 絶えず念頭においていなければならない。例えば カーボナタイト中における主要なレアアース鉱物がバストネサイトであることは 全体として軽希土に富み 中～重希土に極めて乏しいということを意

味する。砂鉱床中のモナザイトはバストネサイトと比べてやや中希土が多いというものの概して軽希土に富むことに変わりはない。しかしながら砂鉱床中には少量ではあるがゼノタイムが伴われる。ゼノタイムは Y_2O_3 を60%程度含むことで近年になり脚光を浴びている鉱物の一つである。

世界の主要なレアアース鉱床の主成分鉱物の大半がバストネサイトとモナザイトであることは当然のことながら Y 及び中～重希土に乏しいということの意味する。このことは第2表に示した USBM (1985) による世界のレアアース資源量と Y_2O_3 資源量を比較してみれば一目瞭然である。

1986年からニオブ (Nb) に代って超電導の素材として急激に注目されるようになった Y は軽希土 とくにランタン (La) やセリウム (Ce) などに比べ これまでに確認された資源量はごく僅かである。若し Y が今後も超電導の素材として最も適当として利用されるとすれば近い将来における需給の逼迫は当然の帰結であろう。

一方 これまでレアアース需要の大部分を占めていた Ce La などが米国における石油触媒としての役割を失ってしまったために レアアース全体の需給バランスは崩れ 今や混乱状態にあると言っても言いすぎではない。したがって 今後におけるレアアースの素材としての需給予測は新技術の開発研究の動向に大きく影響を受けることもあって 極めてむづかしいと言えよう。

中～重希土のうち Sm, Eu, Gd についてはこれまで強磁性体 蛍光材 バブルメモリーなどの新技術の素材として一定の地位を確保しているもの これらはレアアース鉱床あるいは鉱石中の含有率が低い。とくに Eu はレアアースが最も濃集し易い結晶分化の進んだ深成岩において低く 他の元素と逆の傾向をもっている。また Gd はもともと地殻存在度が低く レアアース鉱石中でも含有量が少ない。このような産状は中～重希土の新素材としての利用が進めば進むほど需給はタイトとなり レアアース全体の需給バランスが悪化することも予見される。上述のようなレアアースの置かれている環境を改善し 今後の新技術開発に伴う需要に応えるためには 以下のような対応が緊急に要請されよう。

1. レアアース鉱床中の各元素の含有率を正確に検討したうえで 世界の資源量を明らかにすること
2. 中～重希土の含有量の多い 新しいタイプの鉱床の調査研究及び探査を推進すること。
3. 中～重希土が副産物として伴われる鉱床における各元素の存在量を明らかにすること。
4. 大量に利用されている鉱物資源からのレアアース

回収技術の開発を行うこと。

5. 各々のレアアース元素資源量に対応して バランスのとれた需要の開拓を行うこと。

IV おわりに

わが国における近年のレアアース消費比率は 他の鉱物資源に比べて高く 世界需要の20%に達する勢いを示している とくに 中～重希土については ますますその傾向が加速されつつあると言える。したがってこのような鉱物資源の確保は単にわが国の産業の発展のためだけでなく むしろ世界の資源需給バランスの安定化に不可欠である。とくに レアアースをはじめとする先端技術産業関連素材の世界に対する安定供給のための鉱床探査開発及び回収技術の開発はわが国を含めて工業先進各国の当然の義務といっても過言ではないだろう。

参考文献

- Altschuler, Z. S. (1980) The geochemistry of trace elements in marine phosphorites, Part I, Characteristic abundances and enrichment, in Marine phosphorites-geochemistry, occurrence, genesis. Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists, Spec. publ., No. 29, p. 19-30.
- Archer, A. A. (1979) Reserves and resources in manganese nodules. Proc. 3rd Intern. Ocean Symp. 1978, Tokyo, p. 54-61.
- 白 鶴, 袁 忠信 (1983) 白雲鄂博鉱床成因分析, 中国地質科学院鉱床地質研究所, No. 4, p. 1-17.
- , —— (1985) 炭酸岩地質及其鉱産, 中国地質科学院鉱床地質研究所, 第13号, 1, p. 100-192.
- Batchelor, B. C. (1979) Geological characteristics of certain coastal and offshore placers as essential guides for tin exploration in Sundaland, Southeast Asia. Geol. Soc. Malaysia Bull., Vol. 11, Dec., p. 283-313.
- Berbert, C. O. (1984) Carbonatites and associated mineral deposits in Proc. Intern. Centennial Symp. 1982. Report No. 263, Geol. Surv. Japan, p. 269-290.
- Bignell, J. D. and Snelling, N. J. (1977) Geochronology of Malayan granites. Overseas Geology and Mineral Resources, Inst. Geol. Sci., U.K., No. 47, 72p.
- Boyle, R. W. (1970) The geochemistry of gold and its deposits. Geol. Surv. Canada, Bull. No. 280, p. 310-333.
- Cook, P. J. (1980) Sedimentary phosphate deposits. in K. H. Wolf edition, Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. II, Regional studies and specific deposits. Elsevier, Vol. 7, p. 519-535.
- Correns, C. W. et al. (1970) Yttrium and lanthanides, in Handbook of Geochemistry, Springer-Verlag N. Y.,

- p. 57-71-B-1~57-71-0-1.
- DeKun, N. (1965) The mineral resources of Africa. Elsevier. publ., Comp., N. Y., 740p.
- Department National Producao Mineral (1973) Perfil analitico do trio e terras raras, Boletim No. 28, Ministerio das Minas e Energia, Brazil, 72p.
- Gerasimorsky, U. I. et al., (1974) The alkaline province of Kola peninsula. In the Alkaline rocks, Sorensen edition, p. 206-221.
- Glasby, G. P. et al., (1987) The distribution of rare-earth and minor elements in manganese nodules and sediments from the equatorial and S. W. Pacific, Lithos, Vol. 20, p. 97-113.
- Griffiths, J. (1984) Rare-earths—attracting increase attention, Industrial minerals, April, p. 19-37.
- Hatchison, C. S. and Taylor, D. (1978) Metallogenesis in SE Asia. Jour. Geol. Soc. London, Vol. 27, p. 295-305.
- Hawkins, B. W. (1975) Marry Kathleen uranium deposits, In. Econ. Geol. Australia and Papua New Guinea. C. L. Knight edition, AIMM, p. 398-402.
- Henderson, P. (1984) Rare Earth Element Geochemistry, Developments in Geochemistry 2, Elsevier, 510p.
- Herath, J. W. (1975) Mineral Resources of Sri-Lanka, Econ. Bull., No. 2, Geol. Surv. Sri Lanka.
- Herrmann, A. G. (1970) Yttrium and Lanthanides, Handbook of Geochemistry, K. H. Wedepohl edition, Springer-Verlag, p. 39, B-1~0-1.
- Holt, D. N. (1965) The Kangankunde Hill rare earth prospect, Bull. Geol. Surv., Dept. Malawi, No. 20, 130p.
- Imeokparia E. G. (1984) Geochemistry of the granitic rocks from the Kwandonkaya Complex, Northern Nigeria, Lithos, Vol. 17, p. 103-115.
- Indian Bureau of Mines (1984) Indian Minerals Yearbook, 1981, Ilmenite and Rutile, p. 560-565.
- (1986) Indian Minerals Yearbook 1981, Ilmenite and Rutile, p. 525-536.
- Ishihara, S. (1979) The magnetite series and ilmenite series granitoids and their bearings on tin mineralization, particularly of the Malay peninsula region. Geol. Soc. Malaysia Bull., No. 11, p. 103-110.
- 姜 傳武ほか4 (1982) 白雲鄂博鉄鉍床同位体地質研究, 地質科学院成果選集, 中国科学院地質研究所, 第1集, p. 270-278.
- 神谷雅晴 (1984) ブラジルの地質とカーボナタイト鉍床, 地質ニュース, No. 362, p. 24-33.
- , 平野英雄 (1985) ブラジルのカーボナタイト鉍床, 地質ニュース, No. 372, p. 6-16.
- Kamitani, M. and Hirano, H. (1987) Important carbonate-alkaline complexes and related mineral resources in the World, In rept. of Intern. Research and Development Cooperation. ITIT proj., No. 8316, p. 116-129.
- 金属鉍事業団資源情報センター (1983) 昭和58年度地質解析委員会報告書 (Be, Bi, Li, RE, Sb, Sr, V), 140p.
- 岸本文男 (1985) 中国のバヤンオボ希土類—ニオブ—鉄鉍床. 地学雑誌, Vol. 94, No. 4, p. 30-47.
- Kurien, T. K. (1980) Geology and mineral resources of Andhra Pradesh, Bull. Geol. Surv. India, No. 44.
- Leonardos, O. H. Jr. (1974) Origin and provenance of fossil and recent monazite deposits in Brazil, Econ. Geol., Vol. 69, p. 1126-1128.
- 李 石 (1981) 湖北省崩壘カーボナタイトの地球科学的特徴とその成因の研究, 地調月報, Vol. 32, No. 11, p. 683-691 (岸本文男訳)
- 李 東英 (1984) 中国の希土類完全利用と日中希土業界の技術協力の推進について, 金属時評, 7, p. 600-604.
- Lissiman, J. C. and Oxenford, R. J. (1975) Eneabba rutile-zircon-ilmenite sand deposit, W. A., In Econ. Geol. of Australia and Papua New Guinea, edited by Night, monogr. Ser. No. 5, 1062-1070.
- 劉 洪浜 (1984) 中国浜海砂鉍調査研究, 海洋地質と第四紀地質, Vol. 4, No. 2, p. 40-49.
- 劉 鉄度, 邱 聚田 (1986) 再論白雲鄂博白雲炭酸の成因, 地質と勘探, Vol. 22, No. 8, p. 35-40 (岸本文男訳)
- McKellar, J. B. (1975) The eastern Australian rutile province, In. Econ. Geol. of Australian and Papua New Guinea, edited by Night, C. L., AIMM. Monogr. Ser. No. 5, p. 1055-1062.
- Mackelvey et al. (1983) Analysis of the World distribution of manganese-rich subsea manganese nodules. U.S. Geol. Survey, Circ. 886, 55p.
- 孟 慶潤 (1982) 論白雲鄂博鉄鉍床含鉍圍岩—白雲岩の堆積成因及其堆積環境分析, 地質論評, Vol. 28, No. 5, p. 481-489.
- Neary, C. R. and Highley, D. E. (1984) The economic importance of the Rare-earth element geochemistry, edited by Henderson, Elsevier, N. Y., p. 423-466.
- Nesbitt, H. W. (1979) Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. Nature, Vol. 279, p. 206-210.
- Notholt, A. J. G. (1979) The economic geology and development of igneous phosphate deposits in Europe and the USSR, Econ. Geol., Vol. 74, p. 339-350.
- Olson, J. C. et al. (1954) Rare-earth mineral deposits of the Mountain Pass district, San Bernardino County, California, Geol. Surv. prof. paper, No. 261, 75p.
- 大町良治 (1987) レアアース, 工業レアメタル, 92, p. 72-80.
- Overstreet, W. C. (1967) The geologic occurrence of monazite, USGS prof. paper, 530p.
- Pirkle, E. C. et al. (1974) Green Cove Springs and Boulougne heavy-mineral Sand deposits of Florida, Econ. Geol., Vol. 69, p. 1129-1137.
- Poulose, K. V. (1972) Heavy mineral and glass sand deposits of Kerala coast. Indian Minerals, vol. 26, no. 1, p. 118-124
- Roberts, D. E. and Hudson, G. R. (1983) The Olympic Dam Cu-U-Au deposit, Roxby Downs, S. Australia. Econ. Geol., vol. 78, p. 799-822

- Robertson, J.A. (1981) The Blind River uranium deposits: in Genesis of U and Au-bearing Precambrian quartz-pebble conglomerates, edited by Armstrong, F.C. U.S. Geol. Surv. Prof-paper 1161-A-BB, p. U 1-23
- Roskill's Information Service (1985) The Economics of Rare earth. 4th edition, p. 1-89
- 阮 汀・趙 希寿 (1984) 広東浜海砂鉄成鉱時代の初步研究 海洋地質と第四紀地質 vol. 4, p. 27-36
- 坂巻幸雄 神谷雅晴 (1986) レアアース 稀産資源の評価に関する研究 特研促進費報告書 地調 p. 124-154
- 佐野俊一ほか2 (1986) 東南アジアの錫花崗岩—エスカップ地域鉱物資源開発センター特別プロジェクトについて— 地質ニュース no. 281 p. 16-29
- 佐藤興平 (1984) 東南アジアの花崗岩と錫鉄床を訪ねて 地質ニュース no. 353 p. 20-36
- Semenov, E.I. (1974) Economic mineralogy of alkaline rocks. in the alkaline rocks, Sorensen edition, John Wiley & Sons, p. 543-553
- 新金属協会 (1978) タイ・マレーシアの新金属資源の開発輸入促進調査団報告書 129 p.
- , (1979) インドネシアの新金属資源 (Ta, RE) の開発輸入促進調査団報告書 89 p.
- 菌部竜一 (1952) 内蒙古烏蘭察布盟バイン・ボクト鉄鉄床調査報告書 東亜地質鉱産誌 華北 火鉱 II-1 p. 1-6
- Sun Hong-ru (1983) A brief introduction of the mineral resources and production of less common metals in China. 稀有金属 2巻 1期 p. 4-9
- 諏訪兼位 (1981) カーボナタイトの岩石学 鉱山地質 vol. 31 no. 61 p. 457-465
- 武内寿久称 (1973a) カーボナタイト鉄床 (I) 鉱山地質 vol. 23 p. 367-382
- , (1973b) カーボナタイト鉄床 (II) 鉱山地質 vol. 23 p. 437-451
- , (1981) カーボナタイト鉄床について 鉱山地質 vol. 31 p. 415-420
- 譚 起新ほか5 (1985) 对我国滨海砂鉄的一些基本論説 海洋地質と第四紀地質 vol. 5 no. 4 p. 41-47
- 田中 剛 (1981) 火成岩にみられる希土類元素の挙動とカーボナタイト 鉱山地質 vol. 31 p. 467-476
- 立見辰雄 (1965) カーボナタイト及びアルカリ岩複合岩体に伴う鉄床 地学雑誌 vol. 74 p. 13-33
- Towner, R.R. (1987) Australian mineral industry, Annual review for 1984 Aust. Gov. Publishing Service, Canberra, 1987 p. 241-243 p. 277-287
- Tu Guangzhi (1981) On the mineral deposits of Bayan Obo and Shilu, Scientia Sinica, vol. 24 no. 2 p. 228-236
- U.S. Bureau of Mines (1980) Rare Earth Elements and Yttrium, A Chapter from Mineral Facts and Problems, 1980 Ed- 18 p.
- (1985) Rare Earth Elements and Yttrium. A Chapter from Mineral Facts and Problems, 1985 Ed. 18 p.
- (1985) Minerals Yearbook, vol. 1, Rare-Earth Minerals and Metals, p. 791-803
- (1987) Mineral Commodity Summaries, Rare-Earth Metals, p. 124-127
- 王 中剛ほか2 (1973) 堆積変質—熱液交代型稀土鉄鉄床の成因特征 地球化学 第1期 p. 5-11
- 王 凱怡 (1981) 白雲鄂博鉄稀土鉄床中稀土元素の分配特点 地質科学 no. 4, p. 360-360
- Van Wambeke, L. (1977) The Karonge rare earth deposits, Republic Burundi new mineralogical-geochemical-data and origin of the mineralization, Miner. Deposita, vol. 12, p. 373-380
- Von Backstrom, J.W. (1976) Thorium, C.B. Coetzee (editor), Mineral Resources of Republic of S. Africa, Dept. of Mines, Geol. Surv. Pretoria, 5th edition, p. 209-212
- Wedow, H. (1967) The Morro do Ferro thorium and rare-earth ore deposit, Pocos de Cardas district, Brazil, Bull. U.S. Geol. Surv., 1185-D, p. 34
- Welch, B.K. et al., (1975) Mineral Sand deposits of the Capel area, W. A., in Econ. Geol. Australia and Papua New Guinea, edited by Night, C.L., AIMM, Monogr. Ser. no. 5, p. 1070-1088
- 肖 仲洋 (1979) 白雲鄂博鉄区同位素年令データの討論 全国同位素地質會議論文集 第II集 p. 22-28
- 楊 主明 (1987) 江西竜南花崗岩希土風化殻中粘土鉄物の研究 地質科学 no. 1, p. 70-80
- 楊 岳清ほか2 (1981) 離子吸附希土鉄床成鉄地質特征及找鉄方向 中国科学院報 鉄床地質研究所 vol. 2, no. 1, p. 102-118
- 周 振玲ほか3 (1980) 内蒙古白雲鄂博白雲炭酸岩の地質特征及其成因探討 地質論評 vol. 26, no. 1, p. 35-41