

# オーストラリア マウントウェルド レアース鉱床の特徴と鉱化作用

西川 有司<sup>1)</sup>・藤井 昇<sup>1)</sup>

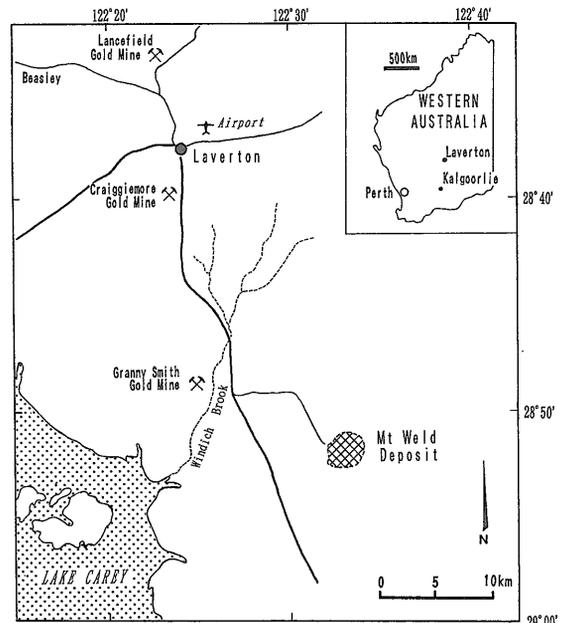
## 1. はじめに

マウントウェルド(Mt. Weld)鉱床は、西オーストラリアの南部のイルガンブロック(Yilgarn Block)中の緑色岩帯(greenstone belt)に発見された世界でも有数のレアースを主鉱種とする潜頭のカーボナタイト鉱床である(口絵1).

レアースが濃集したカーボナタイト鉱床としては、アメリカ・カリフォルニア州のマウンテンパス(Mountain Pass)鉱床、中国の白雲鄂博(Bayan Obo)鉱床、微山(Weishan)鉱床、アフリカ・マラウィーのカンガンクンデ(Kangankunde)鉱床が知られている。これらはいずれもバストネサイトかモナザイトを主要レアース鉱物とするランタン(La)、セリウム(Ce)などの軽希土に富んだ鉱床である。一方、マウントウェルド鉱床は、カーボナタイトの風化にともなう二次富化作用により二次モナザイト、ケラライト [Cheralite, (Ca, Ce, Th) (P, Si)O<sub>4</sub>], チャーチャイト [Churchite, (Y, Er) (PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O, =ワインシェンカイト] 等のレアース鉱物が濃集し、軽希土ばかりでなく、サマリウム(Sm)、イットリウム(Y)等の中重希土にも富む資源として、その特異な形成過程とともに注目されている。

マウントウェルド・カーボナタイトの発見は、1966年、連邦政府鉱物資源局(Australia Bureau of Mineral Resources)が実施した空中磁気探査により顕著な磁気アノマリーが捕捉され、地表下に円筒状貫入岩体が潜在する可能性が見い出されたことに始まる。以来、Utah Development Company, Union Oil Development Corporation, Carr Boyd Minerals Limited 等によりカーボナタイトの存在が確認され

るとともに、それにとりもなう資源を目指した探鉱が行われ、1970年代はニオブ鉱床を、80年代はリンおよびレアース鉱床を対象として調査がなされてきた(Duncan, 1988, 1990)。とくに80年代後半は、超電導の素材として脚光をあびたイットリウムを契機としたレアース資源への関心の高まりもあり、レアース鉱床に対する探鉱が精力的に実施された(口絵2, 3)。これまでにマウントウェルド鉱床に対して行われたボーリングは、リバースサーキュレーションドリル30,000 m, ダイヤモンドボーリング2,000 m であり、レアース鉱床の鉱量・品位が確認され、カーボナタイト鉱床の特徴が明らかにされてきている(例えば Duncan, 1992)。



第1図 マウントウェルド鉱床位置

1) 三井金属鉱業株式会社 資源開発部：  
〒103 東京都中央区日本橋室町2-1-1

キーワード：オーストラリア，カーボナタイト，レアース，ニオブ，タンタル，リン，レゴリス，残留帯，洗成帯

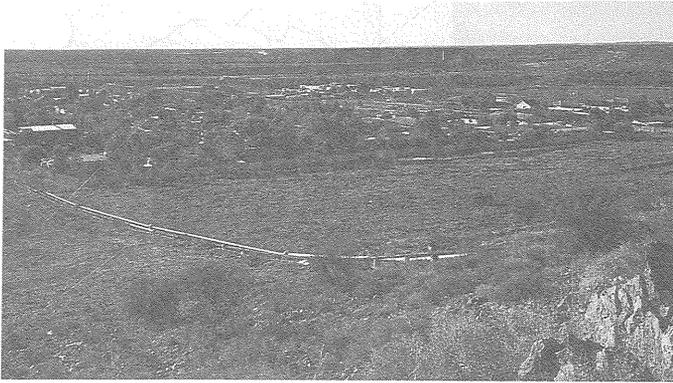


写真1  
ラバートンの町並み。遠方に金の露天掘り採掘跡が見える。

現在 Ashton Mining Ltd. によってレアアース鉱床の起業化調査(フィジビリティースタディー)が実施されている。筆者らは Ashton との共同での起業化調査を通し幾度か現地視察を行っている。この、世界でも希な、カーボナタイトの風化にともなうマウントウェルド鉱床の地質・鉱床の特徴と鉱化作用について、ここに紹介する。

## 2. 位置・交通・気候

マウントウェルド鉱床は、西オーストラリア州パースから北東方向に直距離800 km, 1890年代にゴールドラッシュでにぎわったカルグーリーから300 kmにあるラバートン(Laverton)の南方34 kmに位置し、カーボナタイト岩体の中心は東経122°32', 南緯28°52'にある(第1図)。

ラバートンからマウントウェルド鉱床地域へは車で40分の道のりであり、交通の便は悪くない。ラ

バートンは鉱山町として知られており、付近には Western Mining Corporation Holdings Ltd. のランスフィールド(Lancefield)鉱山, Placer Pacific Ltd. のグラニュー・スミス(Granny Smith)鉱山など先カンブリア紀緑色岩に胚胎した金鉱床の露天掘鉱山が存在する(写真1, 2)。

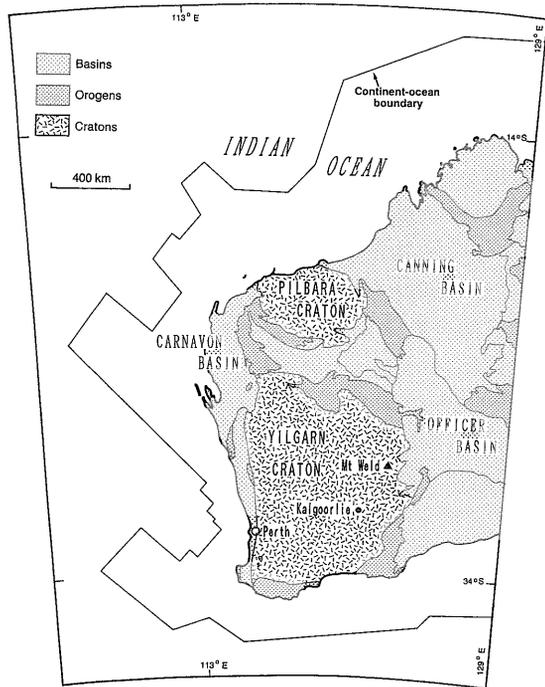
マウントウェルド鉱床地域は標高約450 mで、西方25 kmにあるカレイ(Carey)湖(塩湖)へ向かってゆるやかに傾斜する平坦地にある。ユーカリやアカシアなどの灌木がまばらに生えているだけの、乾燥した半砂漠地帯であり、年間降水量は200 mm前後で、蒸発量(3000 mm)がこれを大きく上回る。年に数度のスコールがあり川ができるが、スコール時以外は涸れた状態となっている(写真3)。気温は、1月には日中40°C近くまで上昇するが、冬7-8月には5°C前後まで冷え込む。付近の人口密度は極めて小さく、所々羊が放牧されている他は目立った産業は無い。



写真2 Granny Smith 金鉱山。右手前よりマウントウェルド鉱床からの給水パイプラインが伸びる。



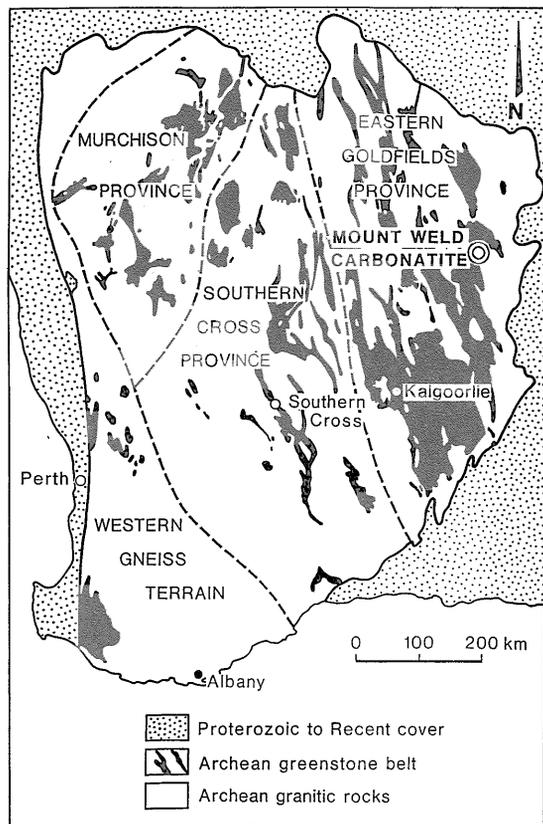
写真3 ラバートンとマウントウェルドの間を流れる Windich Brook. ふだんは涸れているが年に数度のスコール時には濁流となる。



第2図 西オーストラリアの地質構造区分 (Geological Survey of Western Australia, 1990)

### 3. マウントウェルド鉱床周辺の地質

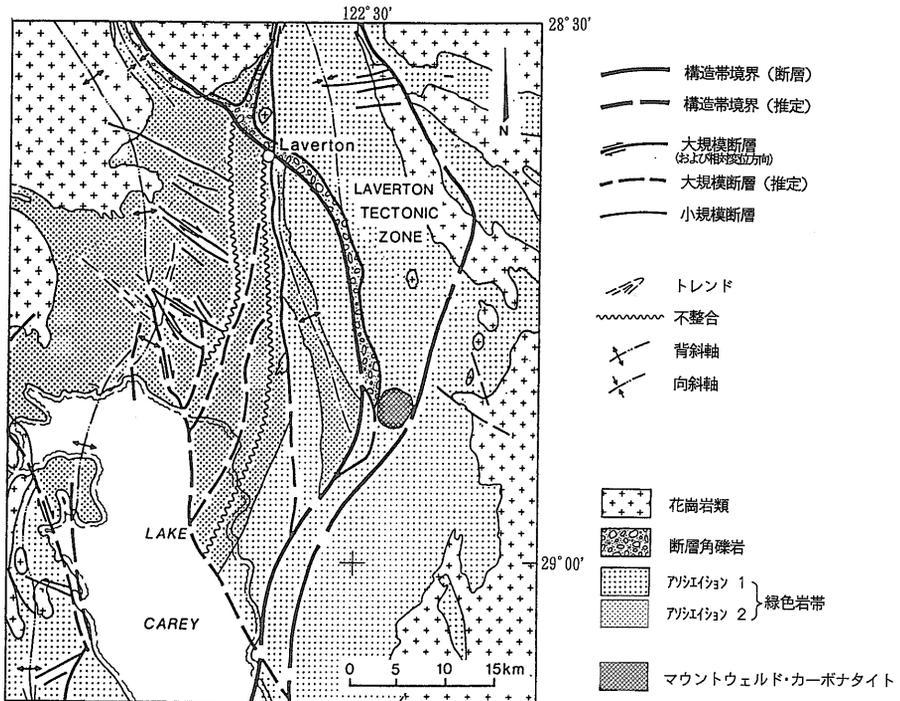
西オーストラリアの地質は、クラトンとそれらの周囲に発達するベースンからなる(第2図)。ピルバラ(Pilbara)およびイルガン(Yilgarn)クラトンには、先カンブリア紀の苦鉄質岩類からなるいわゆる緑色岩(greenstone)および花崗岩類が分布する。オフィサー(Officer), カニング(Canning), カーナボ



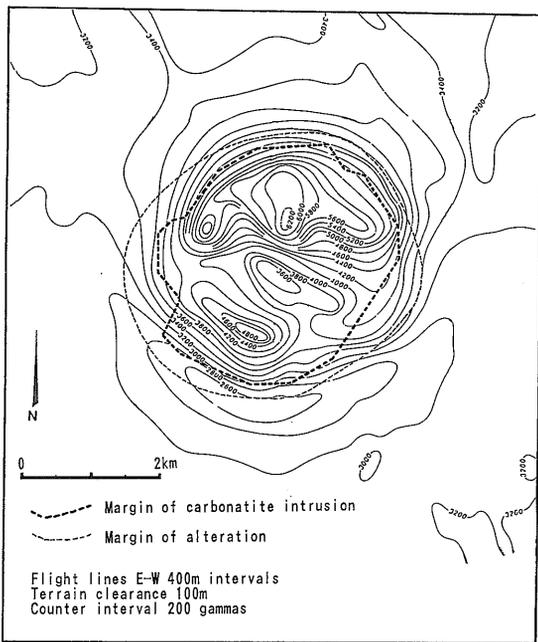
第3図 イルガンクラトンの岩相分布 (Willet et al., 1989)

ン(Carnarvon)などのベースンは主として海成～陸成の堆積岩類からなり、その堆積年代は先カンブリア紀から新生代におよんでいる。

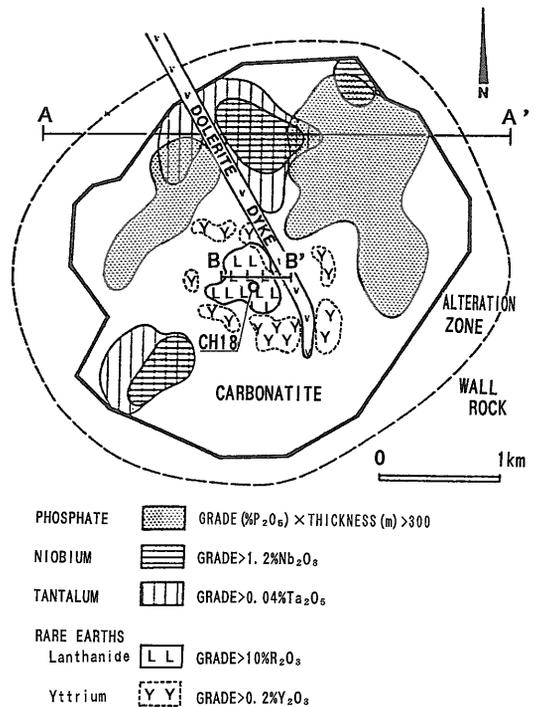
マウントウェルド・カーボナタイトは、イルガンクラトン東部の東西400 km, 南北900 kmの範囲を占める東部ゴールドフィールド帯(Eastern Goldfields Province)の中央部付近に位置する(第3図)。この東部ゴールドフィールド帯は2800～2600 Maの間に形成されたとされ(McCulloch et al, 1983), 緑色岩が花崗岩類の貫入によって一部分断されるものの、全体的に南北方向のトレンドを示し、最大幅150 kmで帯状に分布する。また南北走行の断層がよく発達し同方向の軸をもつ褶曲構造を形成している。マウントウェルド・カーボナタイトは、東部ゴールドフィールド帯の中央部を南北方向に伸びる幅5 kmから15 kmのラバートン構造帯(Laverton tectonic zone)中に貫入しており(第4図), その放射年代は $2064 \pm 4$  Ma(K-Ar)またはは



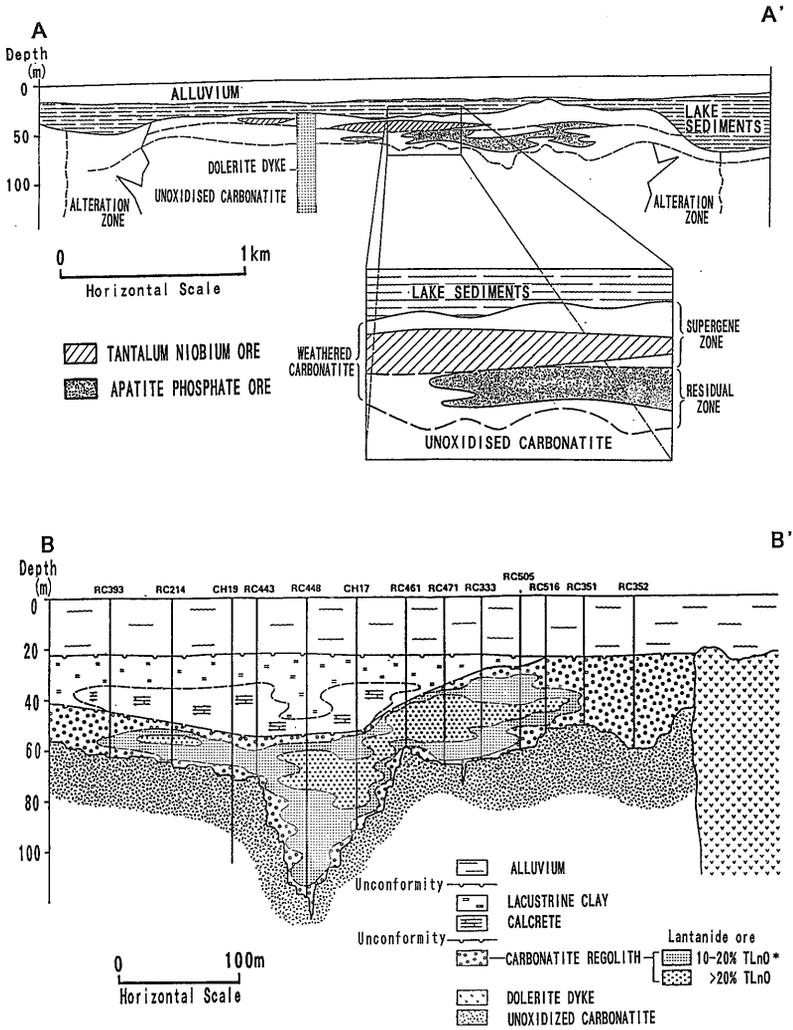
第4図 マウントウェルド鉱床周辺の地質 (Hallberg, 1985)



第5図 中磁気探査によるマウントウェルド・カーボナタイトの磁気アノマリー図 (Willett et al., 1989).



第6図 マウントウェルド鉱床分布平面図 (Duncan, 1991 に一部加筆)  
A-A', B-B' 断面: 第7図参照. CH-18ボーリング柱状図: 第8図参照.



第7図 マウントウェルド地質鉱床断面図

上(A-A'断面)：リンおよびニオブ鉱床(Duncan, 1991), 下(B-B'断面)：レアアース鉱床(Duncan, 1992)

\*TLnO：ランタニド酸化物合計(Total Lanthanide Oxide;  $La_2O_3 + CeO_2 + \dots + Lu_2O_3$ )

第1表 マウントウェルド・カーボナタイトの鉱物組成 (Willett et al. 1989より抜粋)

岩相	構造	組成
Sovite	cumulate	calcite(95%), biotite(4%), apatite(1%), pyrite(trace), chalcopyrite(tr.)
Sovite	flow layered	calcite(75%), dolomite(10%), apatite(10%), magnetite+hematite+barite+pyrite+chalcopyrite+biotite+monazite+zircon(5%)
Dolomitic sovite	flow layered	calcite(35%), dolomite(25%), biotite(15%), apatite(15%). Opaques(10%) include pyrrhotite(9%), pyrochlore(1%) and trace chalcopyrite and magnetite.
Beforsite	cumulate	dolomite(85%), apatite(10%), barite(5%), tremolite(tr), chlorite(tr), monazite(tr), zircon(tr), maghemite(tr)
Calcitic beforosite	cumulate	dolomite(55%), calcite(30%), apatite(10%), maghemite(5%), ilmenite(tr)
Apatite beforcite	flow layered	dolomite(60%), apatite(25%), phlogopite(10%), ilmenite+maghemite(15%)

2020±17 Ma (Rb-Sr)を示す(Webb, 1973; Collerson, 1982). ラバートン構造帯はダクタイル変形, 過アルカリ火成活動, グラーベン構造などを特徴とし, 一般に露頭に乏しく深部まで(100 m 以上)風化が及んでいる. マウントウェルド・カーボナタイト岩体付近では風化した非顕晶質の塩基性火山岩, 蛇紋岩, 酸性~中性火山岩および多源礫岩が分布する(第4図).

#### 4. マウント・ウェルド鉱床

##### (1) 地質的特徴と鉱床の分布

磁気アノマリーの発見(第5図)に端を発し, ボーリング探鉱から鮮明にされたマウントウェルド・カーボナタイトは, 始生代の苦鉄質火山性堆積岩中に垂直に貫入する直径約3 kmの円柱状の岩体である. 角礫化とフェナイト化作用を受けた壁岩が, カーボナタイトパイプの周囲を幅500 mのリムとして取りまいており, これらをNW-SE方向に横切って未変質の原生代ドレライト岩脈(幅約100 m)が岩体中に貫入する(第6図). 岩体最上部にはカーボナタイトの風化残留鉱物などからなるレゴリス(古土壌)が形成され, ここにレアース鉱床やリン, タンタル・ニオブ鉱床が胚胎している(第6, 7図). カーボナタイト岩体とそれを取りまく母岩の上位には第三紀のモンモリロナイト質湖成層が最大70mの厚さで堆積し, さらに河川堆積物である

沖積層が層厚20~25 mで被覆する.

カーボナタイトは, 方解石とドロマイトを主要造岩鉱物とするソーバイトおよびペフォースイトからなり, アパタイト, 黒雲母, 金雲母, 磁鉄鉱, パイロクロア, 重晶石, ジルコン, モナザイトをともなる(第1表). これらの岩相中にはしばしば有色鉱物が濃集し縞状構造(グリメライト相)を示す他, 多くのゼノリスが認められる(口絵4).

鉱床を胚胎するレゴリスはカーボナタイト岩体古地表部に形成された風化殻部であり, 下部の残留帯(residual zone)と上部の浅成帯(supergene zone)とに区分される. 残留帯と浅成帯は漸移関係にあり, 両者を併せたレゴリスの厚さは20~60 mで最大90 mに達する.

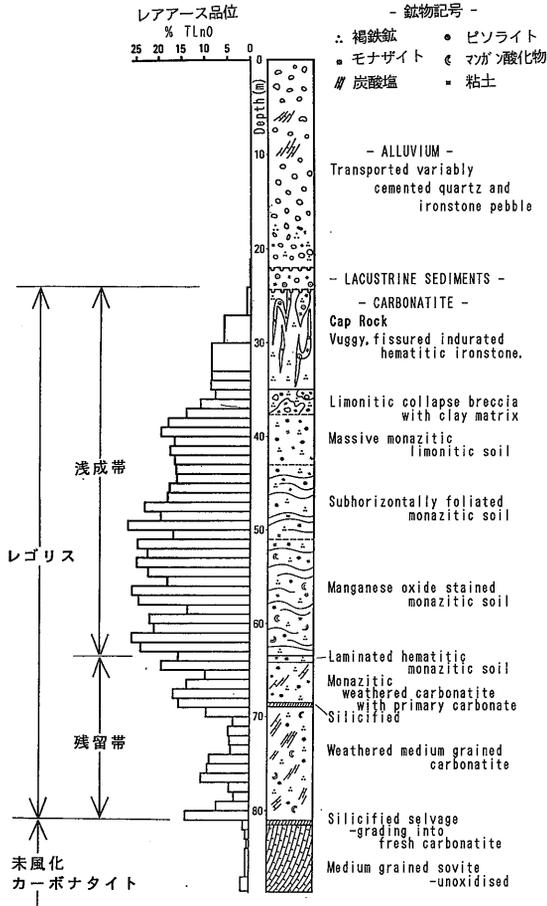
残留帯は, 部分的にカーボナタイトの組織を残存する脆弱で黄褐色を呈すカーボナタイトの風化部であり, Caの溶脱・移動によってカーボナタイトから遊離したアパタイト, 磁鉄鉱, イルメナイト, パイロクロアなどの初生鉱物ならびに二次鉱物であるモナザイト, 褐鉄鉱などが含有される. 特にアパタイトは局部的に濃集し, リン鉱床を形成している(第6, 7図).

浅成帯は現地性の土壌と, 堆積作用による再移動物質とからなっており, 黄褐色で固結度の低い柔らかいシルト質岩であり(口絵4), 著しいバイオターベーション(底棲生物による堆積物の擾乱作用)を受けている. カーボナタイトの初生構造は残存した

第2表 レアース鉱石の化学組成

		レアース成分 (上段: 分析値、中段: 各成分構成比、下段: 軽・中・重レアース構成比)															計		トリウム 957	
		軽 レアース				中 レアース					重 レアース						TR203	ThO2	U3O8	
		La2O3	CeO2	Pr6O11	Nd2O3	Sm2O3	Eu2O3	Gd2O3	Tb4O7	Dy2O3	Ho2O3	Er2O3	Tm2O3	Yb2O3	Lu2O3	Y2O3				Sc2O3
マウント ウェルド	ランタニド鉱 (高品位部)	9.02	18.60	1.50	6.07	0.79	0.20	0.37	0.05	0.11	0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.10	0.07	86.92	0.20	<0.01
		24.4%	50.4%	4.1%	16.4%	2.1%	0.5%	1.0%	0.1%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%		100%		
		← 95.3% →				← 4.1% →					← 0.6% →									
マウント ウェルド	ランタニド鉱 (中品位部)	3.64	7.58	0.81	2.66	0.33	0.09	0.14	0.01	0.06	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.13	0.03	15.51	0.10	<0.01
		23.5%	48.9%	5.2%	17.2%	2.1%	0.6%	0.9%	0.1%	0.4%	0.1%	0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	0.9%	0.2%	100%		
		← 94.8% →				← 4.0% →					← 1.2% →									
	イトリウム鉱	0.72	1.41	0.24	0.95	0.24	0.11	0.24	0.05	0.20	0.03	0.05	<0.01	0.03	<0.01	0.75	0.02	5.01	0.09	<0.01
		14.4%	28.1%	4.8%	18.9%	4.8%	2.1%	4.8%	0.9%	3.9%	0.6%	0.9%	<0.3%	0.6%	<0.3%	15.0%	0.3%	100%		
		← 66.2% →				← 18.5% →					← 17.4% →									
モザイト (ブライズワース州)		15.35	28.60	2.91	10.45	1.73	0.02	1.01	0.18	0.62	0.08	0.11	0.01	0.04	0.01	2.08	0.01	63.17	6.44	0.36
		24.30%	45.28%	4.60%	16.54%	2.73%	0.03%	1.59%	0.28%	0.97%	0.12%	0.17%	0.02%	0.06%	0.02%	3.29%	<0.02%	100%		
		← 90.72% →				← 5.60% →					← 3.67% →									
ゼノライト (ブライズワース州)		0.12	0.23	0.04	0.37	0.46	0.01	1.11	0.41	3.95	0.97	2.46	0.49	3.40	0.43	41.50	<0.01	55.92	0.68	1.05
		0.21%	0.40%	0.07%	0.65%	0.82%	0.02%	1.98%	0.72%	7.05%	1.73%	4.39%	0.88%	6.08%	0.77%	74.21%	<0.02%	100%		
		← 1.34% →				← 10.60% →					← 88.06% →									

(三井金属による分析結果)



第8図 ランタニド鉱中央部のボーリング(CH-18孔)柱状図(Duncan, 1992)

い。レアアース、ニオブ、タンタル、クロム；チタン、バナジウムなどを吸着する不溶性の鉄酸化鉱物、二次的モナザイト、アルミニウム鉱物、クランダライト<sup>註1)</sup>族鉱物などを含むほか植物片や外来生石英粒なども認められる。この浅成帯がレアアースおよびタンタル・ニオブ鉱床の主要胚胎場となっている(第6図)。

レゴリス中に胚胎するこれらの鉱床のうち、レアアース鉱床がレゴリスの中心部に、タンタル鉱床、ニオブ鉱床、リン鉱床がレアアース鉱床の周辺部に分布する(第6図)。リン鉱床は残留帯中にシート状に6~30mの厚さで賦存し、原岩中に8%程度含まれるアパタイト(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>量3.5%)が50%(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>量22%)に濃縮されている。タンタルおよびニオブ鉱床は、リンとともに残留帯中に濃集したパイロクロアが、風化により分解し、鉱物中に含まれていた元素が細粒のクランダライト族鉱物によって置換され、浅成帯中に厚さ数m~30mの規模のタンタル・ニオブ高品位部となり、鉱床を形成している(Duncan and Willett, 1990; Duncan, 1991)。

(2) レアアース鉱床

レアアース鉱床はレアアース成分の量比から、軽希土に富むランタニド鉱(lanthanide ore; (La+Ce) ÷ Y = 30~100)と、中・重希土に富むイットリウム鉱(yttrium ore; (La+Ce) ÷ Y = 2~5)に分類される(Willett et al, 1989)。ランタニド鉱はカーボナタイト

第3表 マウントウエルドレアアース鉱石の鉱物組成例

区分	組成鉱物		鉱物組成(体積比)	
	鉱物名	化学式	ランタニド鉱	イットリウム鉱
鉱石 鉱物	Monazite	(Ce, La, Th)PO <sub>4</sub>	13.6%	0.5%
	Cherarite	(Ca, Ce, Th)(P, Si)O <sub>4</sub>	13.4%	4.3%
	Florencite	CeAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	5.0%	0.7%
	Cerianite	(Ce, Th)O <sub>2</sub>	0.9%	trace
	Churchite	(Y, Er)PO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	absent	0.2%
	Xenotime	YPO <sub>4</sub>	absent	0.1%
	Pyrchlore	(Ca, Na, LRE) <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O, OH, F)	absent	0.1%
	sub-total		32.9%	5.9%
脈石 鉱物	Goethite	α-FeO(OH) <sub>2</sub>	50.2%	35.1%
	Ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	3.3%	4.4%
	Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH, F, Cl)	2.9%	24.2%
	Crandallite	CaAl <sub>3</sub> H(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	2.0%	8.7%
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	1.3%	4.1%
	Criptomelane	K[(Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>2+</sup> ) <sub>8</sub> O <sub>16</sub> [MnO(OH)]]	1.2%	3.6%
	Jacobsite	(Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Mg)(Fe <sup>3+</sup> , Mn <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.2%	1.6%
	Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	trace	11.1%
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.2%	0.1%	
sub-total		65.2%	92.9%	
total		98.1%	98.8%	

(三井金属による鉱物試験結果)

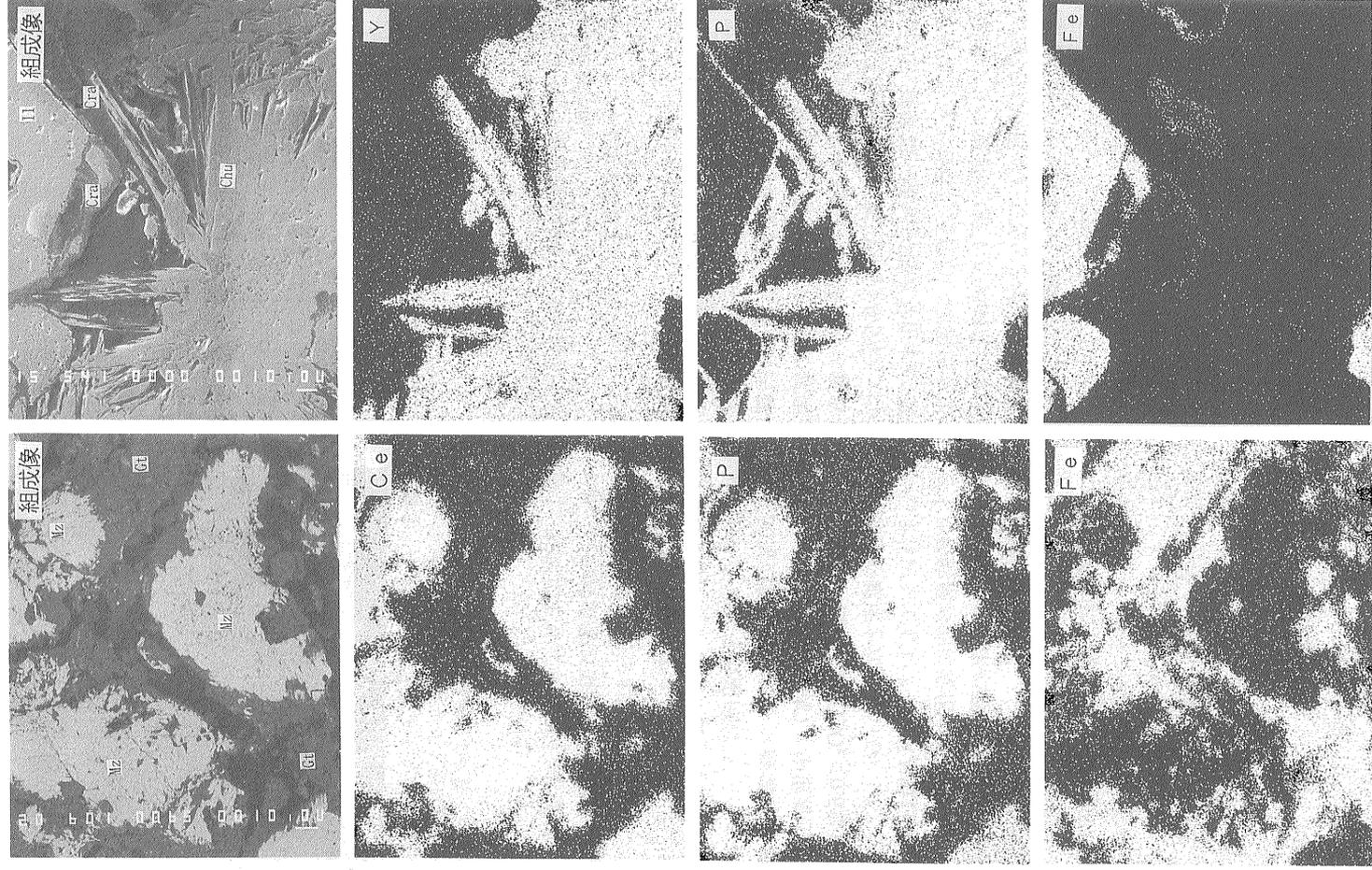
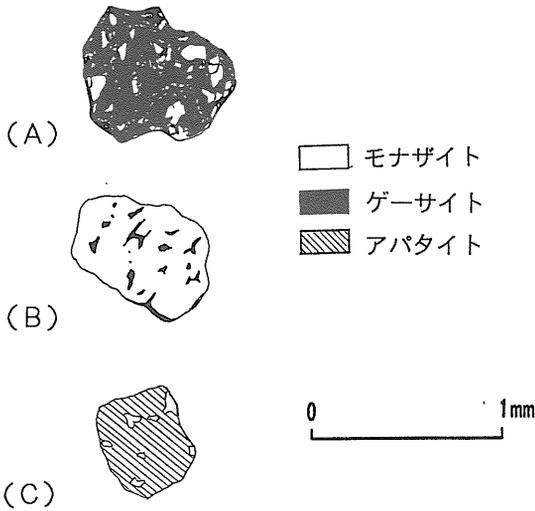


写真4 鉱石のEPMA 特性X線像 (左右0.19 mm, 範囲は口絵写真5 参照)



第9図 モナザイトの産状スケッチ。

- A：モナザイトを包有するゲーサイトの集合体。
- B：ゲーサイトを包有またはリム状に伴うモナザイトの集合体。
- C：モナザイトを包有するアパタイト粒。

ト岩体中央部のドレライト岩脈の西側に隣接して存在し、これを環状に取り囲むようにイットリウム鉱が分布している(第6図)。いずれもレゴリス内部の、主に浅成帯中に胚胎し、水平なレンズ状の鉱床を形成している。ランタニド鉱、イットリウム鉱とも、高品位部( $TR_2O_3$ <sup>注2)</sup>>16%、 $Y_2O_3$ >0.5%)は、厚さ5~50mで、深度25~80mの間に存在する(第7図(B-B'断面))。なお両鉱とも黄色~黄褐色を呈す固結度の低いシルト質岩(口絵4)で肉眼では区別できない。ランタニド鉱のレアアース元素構成比はブラジルの重砂鉱床のモナザイトと比較して $Eu_2O_3$ 、 $Y_2O_3$ の割合が高く、イットリウム鉱はゼノタイムと比較して軽希土の含有が高いという特徴がみられる(第2表)。

ランタニド鉱の中心部を垂直に貫くダイヤモンドコアボーリングの柱状図(第8図)に示されるように、岩相と品位との関係に特徴がみられる。レゴリスの下位に存在するカーボナタイト原岩中にレアアースの一次鉱物はほとんど認められず、レアアース品位はふつう $TR_2O_3$ 1~2%未満である。残留帯でのレアアース品位は $TR_2O_3$ 数%~15%を示す。浅成帯のランタニド鉱の典型的な化学組成は、鉄酸化物30~50%、 $TR_2O_3$ 15~40%、リン酸塩5~10%、アルミナ1~5%、シリカ2~16%、マンガン酸化

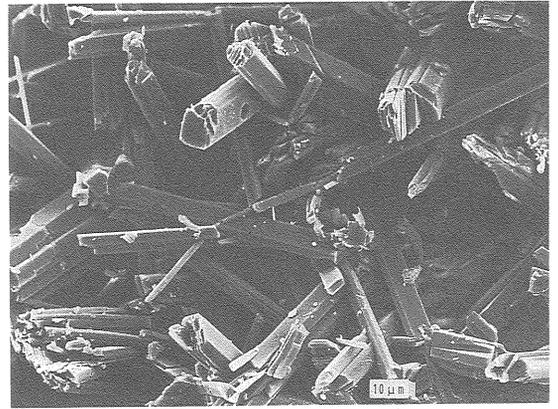


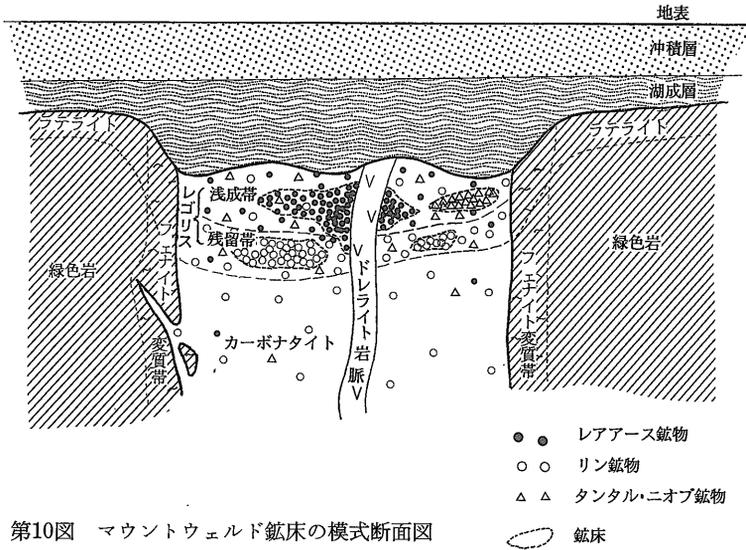
写真5 マウントウェルド・イットリウム鉱の晶洞中に成長したチャーチャイトの自形結晶 (Univ. of Newcastle, Dr. B. Lottermoser 撮影)

物1~10%であり、レアアースの高濃集帯となっている。この浅成帯の頂部は、赤鉄鉱や褐鉄鉱により膠結され、厚さ数~十数mのキャップロックとなっている。このキャップロック中にも $TR_2O_3$ は数%含有する。ランタニド鉱を取りまくイットリウム鉱においても、その組成はランタニド鉱と同様に30~50%の鉄酸化物やリン酸塩等を含むが、 $TR_2O_3$ がやや低い(数~10%)。中重希土、特にイットリウム品位が高いため( $Y_2O_3$ >0.5%)相対的に中重希土に富む鉱床となっている。

いずれにしてもレアアース品位は上下、水平方向とも比較的漸移的に変化する特徴があり、カットオフ品位によって鉱床の形状と規模は大きく変わる。

### (3) 鉱物組織

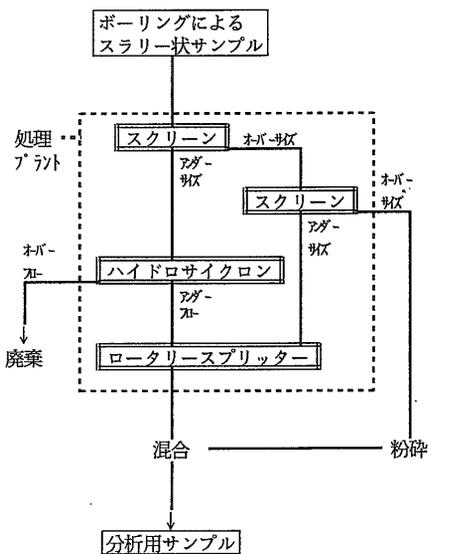
マウントウェルドのレアアース鉱物は、風化などにより二次的に形成された多種のリン酸塩鉱物である(第3表)。ランタニド鉱のレアアース鉱物は主としてモナザイト、ケラライトでありイットリウム鉱はケラライト、モナザイト、フローレンサイト、チャーチャイト等からなる(口絵5、写真4)。両鉱ともレアアース鉱物が鉱石中の10~50%を占め、また脈石鉱物のゲーサイトは30~50%ほど含有される。レアアース鉱物の多くはいずれもミクロンサイズと細粒で、ゲーサイトによりコーティング、セメンティングされ径10ミクロン以下の鉱物の集合体(アグリゲート)を構成して産することが多い。モナザイトはこのアグリゲートのほか、微細ゲーサイトの包有物を含む粗粒の単体粒子として産する場



第10図 マウントウェルド鉱床の模式断面図

第4表 マウントウェルド鉱床の鉱量・品位 (Duncan, 1992)

鉱床	鉱量	品位 (カット品位)
リン	250 百万t	18.1% $P_2O_5$ (10.0% $P_2O_5$ )
ニオブ	273	0.9% $Nb_2O_5$ (0.5% $Nb_2O_5$ )
タンタル	145	0.034 $Ta_2O_5$ (0.02% $Ta_2O_5$ )
レアアース		
ランタニド鉱	15.4	11.2% $R_2O_3$ (5.0% $R_2O_3$ )
イットリウム鉱	7.43	15.7% $R_2O_3$ (10.0% $R_2O_3$ )
	1.31	23.6% $R_2O_3$ (20.0% $R_2O_3$ )
	4.0	0.36% $Y_2O_3$ (0.2% $Y_2O_3$ )
	0.48	0.87% $Y_2O_3$ (0.5% $Y_2O_3$ )



第11図 ハイドロサイクロン・サンプリングリムサンプル処理フロー

合、あるいはアパタイト中にモナザイトが包有物として含まれるなど多様な産状を呈している(第9図)。また、一般的な重砂鉱床やペグマタイト中のモナザイトの  $ThO_2$  含有量(約6%)に比較してこの二次モナザイトは  $ThO_2$  0.2%と低い。ケラライト、チャーチャイト等もモナザイトと同様な産状を示し、 $ThO_2$  含有量も低い。また、まれにレゴリス中の空隙や裂隙を充填する自形結晶の集合体としてチャーチャイトが産することもある(写真5)。

### 5. 鉱化作用

マウントウェルド・レアアース鉱床の鉱化作用の具体的説明はまだなされていないが、カーボナタイト地表部の風化→残留帯形成→残留アパタイトの分解→二次的リン酸塩鉱物の晶出と浅成帯の形成、というプロセスを経て鉱床が形成されたものと考えられている(Willett et al, 1989; Duncan,1992)。

まず、今から約20億年前にレアアース、タンタル、ニオブを含む炭酸塩マグマが貫入しカーボナタイトが形成された。カーボナタイト中にはアパタイトが約8%含まれ、レアアース元素はこのアパタイトの結晶格子の一部を占めていた。その後原生代末期までの間にカーボナタイトおよびその周辺は隆起、浸食され、垂直方向に4,000 mの削剝を受けた。削剝された物質は東方のオフィサーベースンに運搬され堆積した。古生代ペルム紀初期の広域氷河作用による浸食を受けた後は、新生代始めに湖成層に覆われるまでの長い間、地塊は安定し準平原となった。この間に、高温多湿の熱帯性気候の影響によりカーボナタイト表面に厚いレゴリスが形成されたものと考えられる。

天水による炭酸塩の溶脱にとまらぬ下方への浸食により、カーボナタイト岩体の表面は周辺に比べ凹地状となり、カーボナタイトの直上には比較的溶解しにくいアパタイトなどが残留鉱物として濃集し、残留帯が形成された。残留帯上層部はさらにラテライト化を受けアパタイトやパイロクロアなどの残留鉱物は分解し、鉱物中に含まれるレアアース成分(アパタイト中に  $\text{TR}_2\text{O}_3$  0.5~1%含有)が地下水中に溶出した。浅成帯形成過程においては河川による堆積もあった。そして、湖ができ、周辺の緑色岩類の風化生成物であるモンモリロナイトを主成分とする湖成堆積物によってレゴリスは被覆されていった。このような環境下において浅成帯では、地下水によるレアアース成分の水平的移動・濃集により二次的に様々なリン酸塩鉱物が析出していったと考えられる。カーボナタイト中央部のドレライト岩脈は地下水の流れを遮断するいわゆる帽岩の役割を果たしたため、この岩脈に隣接する地点でレアアース鉱物が大量に析出し、富鉱部を形成したと考えられる(第10図)。また、ランタニド鉱とイットリウム鉱の分布の相違は、地下水の挙動、化学条件の違いに起因すると考えられるが、これまでのところ具体的追求にいたっていない。

なお、近隣のGranny Smith金鉱山への選鉱用水供給のため1990年頃よりマウントウェルド鉱床地帯からの取水を開始し(写真2)、それまで地表下15 mにあった地下水は徐々に下がってきている。しかし、まだ鉱床は地下水にひたっており鉱化作用が今も続いている可能性がある。

## 6. 鉱量および開発計画

マウントウェルド・レアアース鉱床に対するボーリングは、鉱化帯中心部については20 m間隔、その周辺部については40 m間隔で合計280孔が掘削された。鉱石は固結度の低いシルト岩であり、リバーサーキューションボーリングによる採取サンプルは、スラリー状である。そのため現場でのレアアース鉱物の濃縮に hidroサイクロン・サンプル・リグを開発し(口絵3, 第11図)、探鉱作業をスピード化した。探鉱の結果ランタニド鉱は、カットオフ品位10%  $\text{TR}_2\text{O}_3$  の場合、埋蔵鉱量7.43百万t品位15.7%  $\text{TR}_2\text{O}_3$  が確認された。またイットリウム鉱は、カットオフ品位0.2%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  の場合、鉱量4百万t品位0.36%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  が確認された。さらにカットオフ品位を上げれば、高品位鉱石部がしばり込まれる(第4表)。ランタニド鉱のレアアース成分比は軽希土95%、中重希土5%の比率であり、イットリウム鉱は軽希土80%、中重希土20%の比率をもっている(第2表)。また鉱石の固結度は0.94から2.5、比重は平均1.5である。

アメリカのマウンテンパス鉱床はカーボナタイト・レアアース鉱床の稼行鉱山として有名であり、鉱量3千百万t( $\text{TR}_2\text{O}_3$  8.9%)を有する(Roskill, 1991)。マウントウェルド・レアアース鉱床のランタニド鉱の品位はマウンテンパス鉱床よりはるかに高く、世界でも希な高品位レアアース資源である。またイットリウム鉱が隣接して賦存しており、軽希土に片寄らず中重希土にも富む資源であるため、レアアース各成分の需要が用途開発によって大きく変化するレアアース事業にとって、このマウントウェルドのレアアース資源は、需要の変化に対応した生産への可能性をもっていると考えられる。

1991年から選鉱およびレアアース成分の抽出技術開発、マーケティング、環境調査などを含む起業化調査が実施されている。オープンピットによる鉱石の採掘、浮遊選鉱による  $\text{TR}_2\text{O}_3$  50%のレアアース鉱物精鉱の生産、パース付近でのレアアース(鉱物)精鉱のアルカリ分解と溶媒抽出による各レアアース成分の生産、そして世界のマーケットへの製品販売という開発計画のアウトラインが描かれているが、まだ開発の時期については具体化されていない。現在、起業化調査は最終段階にあり、1990年

代後半には生産が始まる可能性がある。

1990年の世界のレアアース需要は酸化物ベースで35,500 tとされ(大町, 1992), マウントウェルド鉱床からのレアアースの生産量は5,000 t(酸化物ベース)が計画されている(Duncan, 1992). このマウントウェルドからの生産物がマーケットへ進出すれば, 原料の大部分を中国に依存する現在のレアアースの供給構造に少なからずインパクトを与えるものと考えられる。

なお, リン鉱床は1985~87年にかけて西豪州の肥料会社が探鉱と予察的起業化調査を実施したが, コスト上の問題があり現在まで開発には至っていない。またタンタル・ニオブ鉱床は, クランダライト族鉱物からのタンタル・ニオブの経済性のある抽出技術がまだ研究段階であり, 今のところ開発の計画はない。

## 7. おわりに

カーボナタイトの風化, ラテライト化にともなって形成されたマウントウェルド・レアアース鉱床を紹介した。磁力アノマリーに端を発しカーボナタイト鉱床への探鉱が開始された1960年代後半は, カーボナタイトマグマの存在が世界中で認識されるようになってきた時期である。以後25年間にわたる探鉱により, この潜頭のレゴリス内に胚胎するレアアース鉱床およびリン, タンタル・ニオブ鉱床, そしてカーボナタイトの特徴が明らかになり鉱化作用の解明がなされてきた。各鉱床の埋蔵鉱量が確認され, 特にレアアース鉱床は世界でも希な高品位鉱床であり事業化への検討に至っている。

マウントウェルド・レアアース鉱床の鉱化作用について, 例えば地下水の挙動や二次的レアアース鉱物形成時の化学的条件, あるいはレアアース鉱物濃集の具体的メカニズムなどはまだ十分に解明されていない。また, カーボナタイト自体にいかんしてレアアース, タンタル・ニオブ, リンなどの元素が濃集したのか, あるいはカーボナタイト特有のアルカリ岩複合岩体が存在しているのかどうか, 日本ではなじみがない地質・鉱床だけに興味深い。

将来マウントウェルド鉱床が開発され, 鉱床を被覆する堆積物がとり除かれて鉱床自体を直接観察できるようにになれば, 始生代での炭酸塩マグマ活動か

らレアアース鉱床形成に至るメカニズムをより鮮明にさせていくことができるだろう。

- 注1) クランダライト:  $\text{CaAl}_3\text{H}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ . 明ペンシと同構造, 三方柱状結晶, 繊維状集合体または微細結晶の緻密な集合体(地学辞典, 平凡社, 1983)
- 注2)  $\text{TR}_2\text{O}_3$ : レアアース酸化物合計(Total Rare Earth Oxides;  $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2 \cdots + \text{Lu}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Sc}_2\text{O}_3$ )

## 参考文献

- Collerson, K. D. (1982): Age and strontium isotope systematics of the Mt. Weld carbonatite, Western Australia. Commissioned report to Union Oil Dev. Corp.
- Duncan, R. K. (1988): Discovery of the Mt Weld carbonatite. R & D For The Minerals Industry. Western Australian School of Mines, Conference 1988, 86-93.
- Duncan, R. K. and Willett, G. C. (1990): Mt Weld carbonatite. Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea (Ed. F. E. Hughes), 591-597 (the Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne)
- Duncan, R. K. (1991): Tantalum, Niobium and Rare Earth Resources of the Mt Weld Carbonatite, Western Australia. Bull No 65 Tantalum-Niobium International Study, March 1991 6-8.
- Duncan, R. K. (1992): Geology and Mineralization of the Mt Weld Rare Earth Deposit, Laverton, Western Australia. TMS Annual Meeting in San Diego, March 1-5, 1992.
- Geological Survey of Western Australia (1990): Geology and Mineral Resources of Western Australia, Memoir 3, 10, 290.
- Hallberg, J. A. (1985): Geology and Mineral Deposits of the Leonora-Laverton area, Northeastern Yilgarn Block, Western Australia. Hesperian Press: Perth.
- McCulloch, M. T., Compston, W. and Froude, D. (1983): Sm-Nd and Rb-Sr dating of Archaean gneisses, eastern Yilgarn Block, Western Australia. Geological Society of Australia Journal, 30, 149-153.
- 大町良治(1992):「レアアース」, 工業レアメタル, no. 105, 39-48.
- Roskill Information Services Ltd. (1991): The Economics of Rare Earths and Yttrium., Eighth Edition, 128-129.
- Webb, A. W. (1973): Amdel Laboratory Report No. AN 3799/73
- Willett, G. C., Duncan, R. K. and Rankin, R. A. (1989): Geology and Economic Evaluation of the Mt Weld carbonatite, Laverton, Western Australia, Kimberlites and Related Rocks, Vol. 2: Their Mantle/crust Setting, Diamonds and Diamond Exploration. Geol. Soc. Aust. Spec. Publ. 14., 1215-1238.

NISHIKAWA Yuji and FUJII Noboru (1993): Characteristics and mineralogy of the Mt. Weld rare earths deposit.

<受付: 1993年6月10日>