

マレーシアにおける希土類元素資源について

森 山 徐 一 郎

A study on the mineral resources of rare earth elements in Malaysia

by

Joichiro MORIYAMA

ま え が き

1966年10月2日より、わたくしはマレーシアに出張しわずかな日数ではあったが、Kuala Lumpur を基点として、Selangor, Pahang, Negri Sembilan, Perak などの各州のスズ選鉱所からのアマン萍の収集を行なった。収集した試料は、22種類のものであるが、帰学後これらの試料をさらに磁選により分類し、蛍光X線分析、およびX線解析によりいくぶん検討を加えた。この小稿ではスズ鉱石に随伴する希有元素鉱物、とくに希土類元素資源を中心に報告したい。

I 序

東南アジア地域、とくにタイ、マレーシア、インドネシアの鉱業について考える場合、これらの国々のスズ鉱業は現在の世界においても非常に重要な位置を占めているものであるし、また東南アジア地方の古代からの歴史の記録の中においても、ゴム資源、香料資源などと並んで特記された資源であったことはいうまでもないことである。古くは紀元前6世紀以降の記録にも残されており、さらにその後現代にいたる幾多の変転の多い歴史的な事件の中でその経済的背景に散見されるものである。

東南アジアのスズ鉱石は花崗岩質の鉱脈に随伴するものであって、雲南地方、北ビルマからタイ国、マレーシアを通り、Bangka, Billiton 両島、すなわちいわゆる“Tin Island”と称されるインドネシアの一部をかすめボルネオ東岸に達する広い範囲に賦存している。

タイ国においてはスズ鉱業は全生産の70%まで小鉱業主の手中にあり、ごく最近にいたるまで外国技術の参加は禁止されており、また11°付近の地方は保存地域として政府当局の管理の下におかれていたが、最近にいたりこの地方に対する制限も解除されつつあり、深査が行なわれている現状である。さらにスズ製錬所の建設も米国 U. C. C. 社との合弁事業として Phuket 島において進められ、近くスズインゴット年産 30,000 トンにいたる計画である。タイ国スズ

鉱業の原鉱石は Renong, Phuket, Songkhla 地方やマレーシア国境に近い Pin Yok 等に産出される。

一方マレーシアにおいてはスズ鉱業の事情は異なっている。主として Kinta Valley の堆積層中に存在しており, Ipoh, Kuala Lumpur 地方および Pahang 地方に鉱床が存在している。マレーシアのスズ鉱業ならびに製錬業には, 英国資本, 技術が古くから加わっており, 採掘様式も外国資本による大型のドレッジャーによるものと, 華僑資本による小型の選鉱方式によるものに大別され, 製錬所も英国系の 2 社とわが国と現地人の合弁によるもの 1 社が存在しており, 東南アジア地域における最大のスズ生産国である。

インドネシアにおいては現在まではスズ鉱業は国営であって, Central Board of the State Tin Mining Enterprises により統括されている。これらは三つの分局, すなわち Bangka, Billiton および Singkep の各局に分かれ, その中で Bangka が最大で60%の生産をにぎり, これにつづくものが Billiton の35%で, 残る 5%が Singkep に属している。インドネシアのスズ鉱業は海底スズ鉱石を大型機械化により採取することにより将来の発展が望まれているものである。

表 1 には世界スズ精鉱生産量と東南アジア各地の生産量を対比して示した。世界生産に対してはほぼ60%以上の数字が示されている点が注目される。

東南アジア地域に存在するスズ鉱石はスズ石 (Cassiterite) が主である。南方産スズ石は世界の他の地方, たとえばわが国, ボリビア等の山スズ鉱石に比して品位はきわめて高く, 随伴不純物も少なく, したがって選鉱および製錬が容易であるといわれているが, これらの鉱石も顕微鏡的な dimension においては決して単純な均一相から形成されるものでなく, 多くの鉱石が含まれている。すなわち コロンブ石 (タンタル石), イルメナイト, 磁鉄鉱, γ -ヘマタイト等はほとんど常に存在しており, この他長石, 石英, 鉄マンガン重石, 含銅硫化鉄鉱, 輝蒼鉛鉱もしばしば見出され, この他硫錫鉱, malayaite (CaSnSiO_5), tin sphene, varlamoffite ($\text{SnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 等も存在すると報告されている。さらに熱帯風化により堆積した場合にはその組成は

表 1 スズ精鉱の生産(トン)

	インドネシア	マレーシア	タイ国	世界生産	東南アジアの比率 (%)
1940-1944*	26100	42700	10000	161700	49
1945-1949*	16600	27700	3300	116900	41
1950-1954*	33600	57900	9800	165900	61
1955-1959*	27200	51800	10900	146500	61
1960-1964*	16700	57300	14200	147400	60
(1965)	14700	63000	18100	152300	63

* 平均値

Source : W. Robertson, *Report on the world tin position with projections for 1965 and 1970*, London : International Tin Council, 1965.

さらに複雑になり、Kinta Valley で採取される粗鉍品位は 0.003~0.01% 付近のものであり、その母岩からの鉍物が混入してくるため粘土物質の他に石英、電気石、黄玉、イルメナイト、ジルコン、モナズ石、ユークセナイト、黄鉄鉍、硫ヒ鉄鉍、イルメノルチルなども含有してくる。以上スズ鉍石の東南アジアにおける位置とその賦存の状態についてのべてきたが、その随伴鉍物の中でイルメナイトは重要なチタニウム工業の資源としてわが国でもこの地方への依存度も高いものであり、さらにこの他この小文の標題である希土類元素鉍物の資源であるモナズ石、ゼノタイム等も現代科学工業の進歩とともに脚光をあびてきている。粗スズ鉍石からスズ石の濃縮方法は、大型のドレヅジャー方式によるものと比較的簡単な選鉍方式によることはすでに述べたが、筆者が今回収集した精鉍は後者に属するものであり、スズ鉍石とイルメナイトあるいはアマン滓との関係を示すために、図1に含スズ石粗鉍からのスズ石の濃縮方法を模式的に示しておく。この方法は Palong washing といわれるものでマレーシアの小企業において多く採用されている方式である。スズ含有量 0.01~0.05% のものが Palong washing を行なうことにより 0.5%から次第に 50%にまで濃縮され、さらに Lanchut washing により 70%にいたり、最後に磁選その他で75%付近の精鉍をうるにいたる。

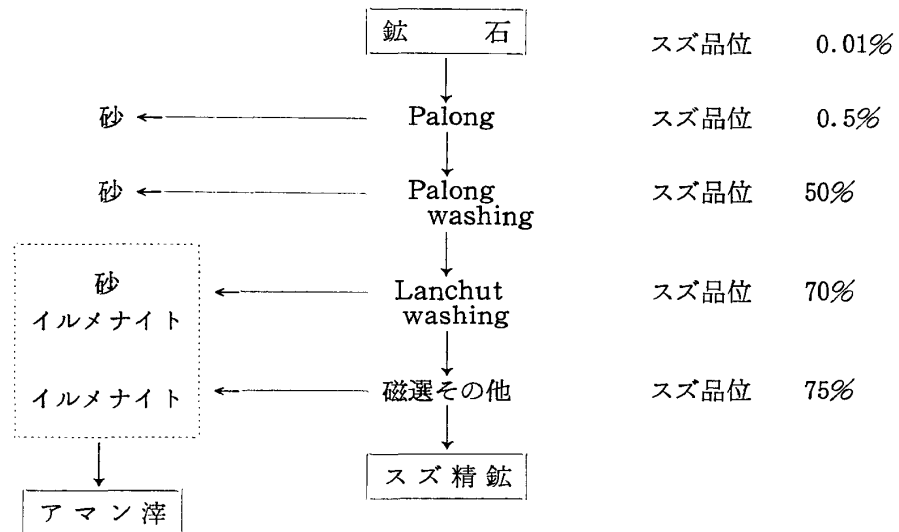


図1 パロン様式選鉍の模式図

Lanchut washing によりえられた砂中にはイルメナイトが含まれ、これをさらに分離していわゆるアマン滓が採取される。このアマン滓中には次章以下で記するごとくきわめて多くの鉍物が含まれるが筆者の課題である希土類元素の大部分はこの中に濃縮されてくる。希土類元素の鉍物として最もよく知られているものはモナズ石、あるいはゼノタイム等である。モナズ石もゼノタイムもわれわれ化学技術にたずさわるものには、大きな変化を認めえないものであ

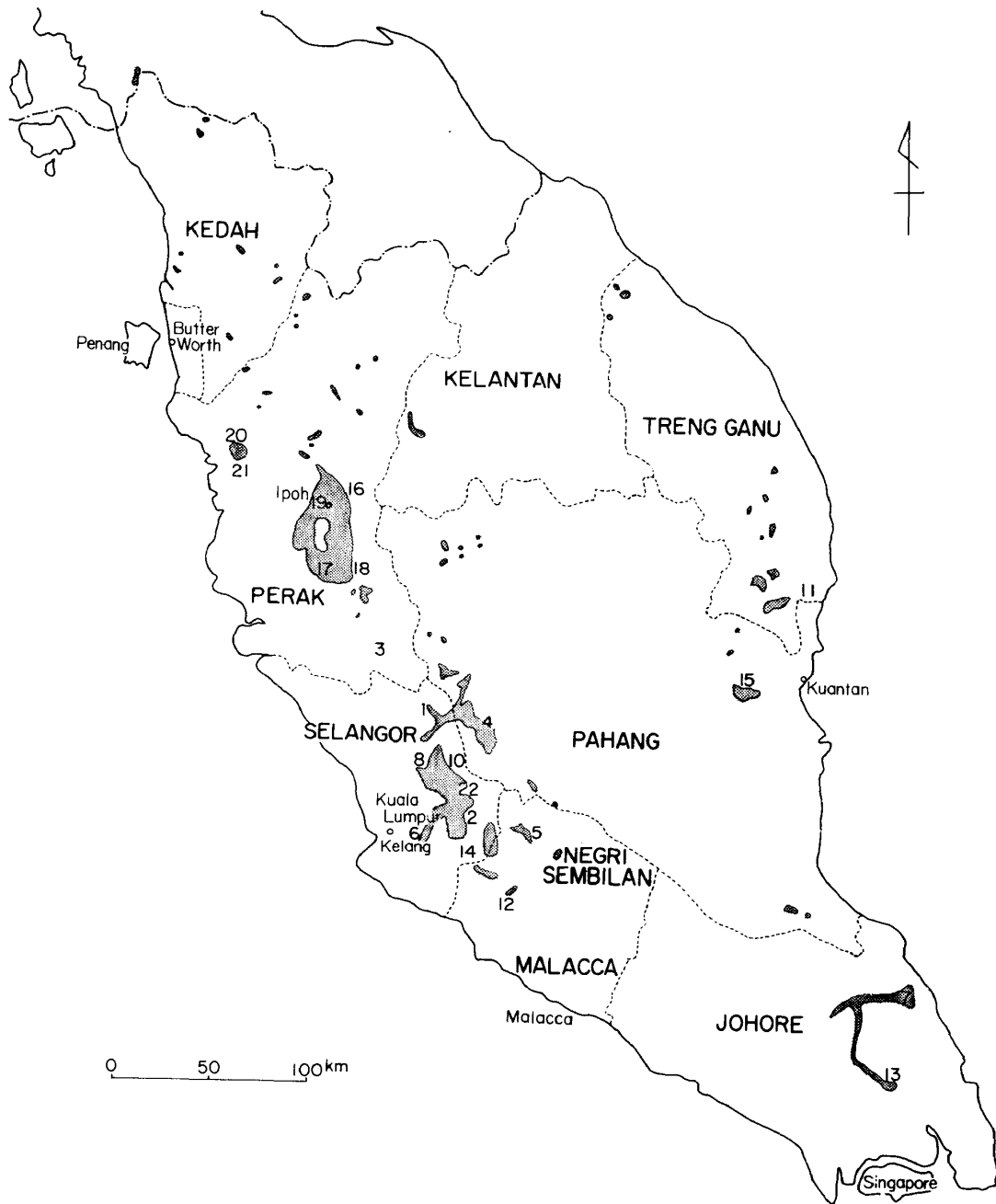


図 2 試料採取地点

るが、ただ大きな特徴としてはモナズ石には比較的に軽希土類元素が多く、ゼノタイムには重希土類元素が多く、現在問題の多いイットリウム等もゼノタイムに多く含まれている。スズ鉱石に随伴する鉱物の中でイルメナイト以外では、モナズ石等は、興味ある資源鉱物である。この稿は昭和41年秋東南アジア資源研究の一翼として、マレーシアに出張し、スズ鉱業から産出されるアマン滓について、検討した結果の一部をまとめたものである。

表 2 鉍物の採取場所

試料番号	採取場所	試料番号	採取場所
1	Kuala Kubu, Selangor	12	Rantan, Negri Sembilan
2	Cheras, Selangor	13	Jemuluang, Johore
3	Slim River, Perak	14	Kajang, Selangor
4	Kerak, Pahang	15	Gambang, Pahang
5	Titi, Negri Sembilan	16	Ipoh East, Perak
6	Puchong, Selangor	17	Batu Gaja, Perak
7	Jemuluang, Johore	18	Batu Gaja, Perak
8	Kepong, Selangor	19	Ipoh West, Perak
9	Old Kuchai, Selangor	20	Taiping, Perak
10	Batu Cave, Selangor	21	Taiping, Perak
11	Kemaman, Trengganu	22	Ulu Kelang, Selangor

表 3 磁選の結果

	重量 (Gr.)				重量百分率 (%)		
	C	M	T	計	C	M	T
1	3.9	2.0	88.4	94.3	4.14	2.12	93.74
2	0.7	5.8	93.2	99.7	0.70	5.82	93.48
3	1.6	7.4	89.8	98.8	1.62	7.49	90.89
4	3.6	5.9	85.4	94.7	3.80	6.02	90.18
5	2.4	0.4	93.2	96.0	2.50	0.42	97.08
6	1.2	12.8	84.9	98.9	1.21	12.94	85.85
7	19.0	19.8	59.7	98.5	19.29	20.10	60.61
8	0.2	4.9	93.6	98.7	0.21	4.96	94.83
9	0.2	5.0	93.6	98.8	0.20	5.06	94.74
10	tr	1.5	97.0	98.5	tr	1.52	98.48
11	1.6	3.8	90.2	95.6	1.67	3.98	94.35
12	0.2	0.6	97.6	98.4	0.20	0.61	99.19
13	1.8	4.1	91.0	96.9	1.86	4.25	93.91
14	1.4	4.4	90.8	96.6	1.45	4.55	94.00
15	5.4	8.6	86.6	100	5.37	8.55	86.08
16	55.4	9.9	31.5	96.8	57.23	10.23	32.54
17	67.2	3.8	22.4	93.4	71.95	4.07	23.98
18	14.6	9.6	94.4	99.6	14.81	9.74	75.45
19	28.4	4.6	63.2	96.2	29.52	4.78	65.80
20	34.0	23.2	41.8	99.0	34.34	23.44	42.22
21	76.6	8.8	11.3	96.7	99.21	9.10	11.69
22	39.7	49.6	9.8	99.1	40.06	50.05	9.89

II 鉱石の採取場所および磁選による試料の作製

この研究では表 2 に示すような 22 種類のアマン滓を用いた。図 2 に示すように Perak, Selangor, Pahang, Negri Sembilan, Johore の各州のものである。これらの試料は主として華僑資本の鉱業所から集められたものであるためその選鉱方法もそれぞれ異なっており、また当然の結果として組成の変化も多いものである。そこでこれらの試料は小型磁選機により 12,000 ガウス, 20,000 ガウスにて分離を行ない、これらを試料として検討を加えることにした。

図 3 には選別の方法とそれぞれの試料の記号を示し、表 3 には分類された試料の重量とその比率を示している。常識的に大別すると“C”には磁鉄鉱, イルメナイトが含まれるはずであり, “M”にはコロンブ石, 変種イルメナイト, モナズ石, ゼノタイム等が属し, “T”にはスズ石, 石英, 方解石, 金紅石, ジルコン等が予想される。

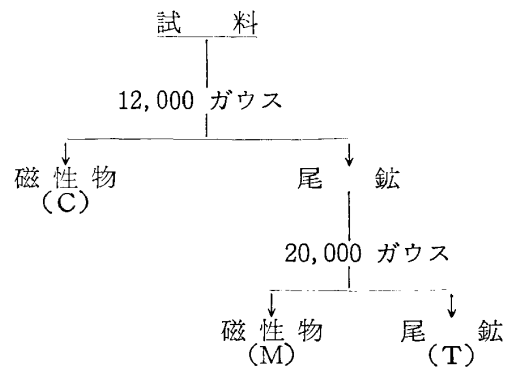


図 3 磁選の方式

III 蛍光 X 線分析による検討

マレーシアにおけるアマン滓と称するものもその鉱床の状況により、また現地特有の経済的事情、すなわちそれぞれの選鉱場の技術および設備によりその組成が極めて複雑である。とくに筆者の収集した試料は中小スズ鉱業主の選鉱場からえたものであり、その選鉱設備および選鉱能力を異にするため、蛍光 X 線分析で検討を行なってみるとその組成は極めて変化が多く認められ、前章の磁選による分類の際に予想したものよりかなり変わった結果がえられている。図 4 には蛍光 X 線による結果を示している。この図を概括してみるとスズ石はそれぞれの試料に明らかに存在しているが、産地により、あるいはまた選鉱場によりかなりよく分離されているものもあり、またあるものでは分離度の悪いものもあることが認められる。これは選鉱場の技術、能力によることも考えられるが、スズ鉱石自体の特性にも依存し、特にさらに微細な鉱物学的検討が必要であり、また興味をもたれる。タンタル, ニオブについてはほぼすべての鉱石試料中に検出される。これはスズ石中にはタンタル石, あるいはコロンブ石が微細な混合状態であるとする説を裏がきするようである。筆者の収集した試料中でははっきりと認めえなかった鉱石試料は Trengganu 州, Kemaman 産のもので一般に Kemaman 付近のものは含タンタル, ニオブ量が多いといわれているが筆者の実験では逆の結果がえられている。事実 Kemaman 産のスズ精鉱の分析例として、酸化タンタルニオブ含量 0.15% が認められる。特に顕著に

	Sn	Fe	Ti	Ta	Nb	Ce	La	Y	Zr	W	U	Th	Mn	Cu	Pb
1 C	●	○		○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
1 M	●			○	○	○	○			●		○			○
1 T	●								○	●					○
2 M	●	○		○	○	○		○		○	○	○			
2 T	●	○							●	○					○
3 C	●	○		○	●			○		○		○			
3 M	●	○			●			○	○	○			○		○
3 T	●			○				○	○	○					○
4 C	●	○			○			○		○				○	
4 M	●	○				○	○	○		○	○	○			
4 T	●	○		○					○	○					
5 C	○	○			○			○	○	●			○	○	
5 T	●		○	○						●				○	
6 M	○				○	○	○	○	○	○	○				
6 T	●	○		○				○	○	○					
7 C	●	○						○		○				○	
7 M	●	○			○			○		○					
7 T	●	○		○					○	○					
8 M	●	○			○	○		○	○	○		○			
8 T	●	○							○	○				○	○
9 M	●	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○		
9 T	●	○		○				○	○	○					○
10M	●	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○		
10T	●	○		○				○	○	○				○	
11C	●	○				○	○	○	○	○	○	○			○
11M	●	○				○	○	○	○		○				
11T	●	○					○	○	○						
12T	●	○		○				○	○	○				○	

	Sn	Fe	Ti	Ta	Nb	Ce	La	Y	Zr	W	U	Th	Mn	Cu	Pb
13C	●	●		○	○	○					●		○	●	
13M	●	○			○	○	○	○		●		○			
13T	●	○							○	○		○			○
14C	●	●		○	○	○	○	●	○	●	○	○			○
14M	●	○		○	○	○	○	○	○	●	○	○			
14T	●	○		○					●	○					○
15C	●	●						●	○	○	○	○			
15M	●	○				○	○	●		○	○	○			○
15T	●	○		○				○	○	○					
16C	○	●			○	○		○	○	●				○	
16M	●	●			●	○	○	●	○	○	○	○			
16T	●	○						○	●	○	○				○
17C	○	●		○	○	○	○	●		●		○	○		○
17M	○	●			○	○	○	●	●	○	○	○			
17T	●	●		○				○	○	○	●		○		
18C	●	●			○	○		●	○	●	○	○		●	
18M	●	●			○	○	○	●	○	○				○	
18T	●	●			○	○			○	○	○				
19C	●	●			○			●	○	○	●		○		○
19M	●	●			○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○
19T	●	●			○	○	○	○	○	○	●		○		○
20C	●	●		○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○
20M	●	●		○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○
20T	●	●			○	○		○	○	○	○	○		○	
21C	●	●			○	○		○	○	●			●	○	○
21M	●	●		○	○	○	○	●	○	○	●	○	○		○
21T	●	●		○	○	○		○	○	○	●	○	○		○
22C	●	●		○	○	○		○		●				○	○
22M	●	●		○	○	○	○	●	○	○	○	○	○		
22T	●	●			○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	

図 4 螢光 X 線分析結果

見出されたものとしては、Slim River, Ipoh 東部のものがあり、Perak 州南部のスズ精鉱中にはタンタル石、コロンブ石が比較的多く含まれる。Taiping 付近のものはわれわれの入手した試料においてはコロンブ石は多く見出されていない。つぎにジルコニウムは、Kuala Lumpur 東南方の Cheras 付近のもの、同じく Kajang 付近の試料、および Perak 州 Batu Gaja 付近の試料、Gambang 付近のものに多いようであるが、一般的にアマン滓中にはジルコン砂

として含まれている。

セリウム、ランタン、イットリウム、ウラン、トリウム等はアマン滓中にモナズ石あるいはゼノタイムが存在していることを示すものであるが、蛍光X線分析ではイットリウムが見やすいのでイットリウムについて検討を加えてみた。Selangor 州 Kajang, Pahang 州の Gambang, Perak州の Ipoh 付近, Batu Gaja, Taiping 付近, Selangor 州 Ulu Kelang のものには特に顕著に見出されており、その他全アマン滓の試料中にモナズ石、あるいはゼノタイムが存在していることが示される。

この他興味深いのはタングステンが全試料にわたり、また各試料の磁選別分について見出されることであって、南方産のような高品位スズ精鉱においてもタングステンの混入は避けられないことが示され、またアマン滓中にも必ず随伴するので南方産アマン滓の冶金学的な処理においては留意が必要であることがわかる。特にタングステンの多い試料は、Selangor 州では Ulu Kelang, Kajang, Kuala Kubu 産のもの、Perak 州では Taipin, Ipoh, Batu Gaja 付近のもの、その他 Johore 州の Jemuluang, Pahang の Kerak 産のものである。以上アマン滓について蛍光X線分析による定性分析結果を概括的にのべてみたのであるが、これらの分析例からみてもマレーシアにおけるアマン滓は非常に多様性があり、地質鉱物学的見地からまた選鉱学、冶金学的立場からさらに検討を加えることが必要である。

IV X線回折による組成鉱物の同定

前章においては蛍光X線分析により各試料についてアマン滓中に存在する各種元素の検討を試み、その含有鉱物について推定を行なった。さらに確認するためX線回折による同定を行なった結果について記する。X線回折による同定の場合は前章の蛍光X線分析からの予想とは必ずしも一致しないが、これら不一致は鉱物の組成に関する一つの考察の資料と考えられる。

(1 C) イルメナイト, ゼノタイム, スズ石, (1 M) スズ石, 金紅石, モナズ石, (1 T) スズ石; (2 C) スズ石, ヘマタイト, イルメナイト, (2 M) スズ石, (2 T) スズ石; (3 C) スズ石, 金紅石, コロンブ石, (3 M) スズ石, 金紅石, (3 T) スズ石; (4 C) イルメナイト, スズ石, (4 M) スズ石, モナズ石, (4 T) スズ石; (5 C) イルメナイト, スズ石, (5 M) スズ石, ゼノタイム, コロンブ石, (5 T) スズ石; (6 C) スズ石, モナズ石, (6 M) スズ石, モナズ石, (6 T) スズ石; (7 C) スズ石, イルメナイト, ゼノタイム, (7 M) スズ石, (7 T) スズ石; (8 C) スズ石, (8 M) スズ石, モナズ石, イルメナイト; (9 M) スズ石, モナズ石, (9 T) スズ石; (10 M) スズ石, モナズ石, (10 T) スズ石, ジルコン; (11 C) スズ石, イルメナイト, ゼノタイム, (11 M) スズ石, モナズ石, (11 T) スズ石; (12 M) スズ石, 金紅石, モナズ石, ゼノタイム, (12 T) スズ石; (13 C) スズ石, 鉄マンガン重石, (13 M) スズ石, (13 T) スズ石; (14 C) スズ石, イルメナイト, ゼノタイム, (14 M) スズ

石, モナズ石, ゼノタイム, (14T) スズ石, ジルコン; (15C) スズ石, マグネタイト, ゼノタイム, (15M) スズ石, ゼノタイム, (15T) スズ石; (16C) イルメナイト, (16M) スズ石, イルメナイト, ゼノタイム, (16T) ジルコン, スズ石; (17C) イルメナイト, 鉄マンガン重石, (17M) スズ石, モナズ石, (17T) スズ石, 石英, ジルコン; (18C) マグネタイト, イルメナイト, コロンブ石, (18M) スズ石, (18T) スズ石, 石英, ジルコン; (19C) イルメナイト, コロンブ石, スズ石, (19M) スズ石, (19T) スズ石, 石英, ジルコン; (20C) イルメナイト, ゼノタイム, スズ石, (20M) コロンブ石, ゼノタイム, スズ石, (20T) スズ石, ゼノタイム, ジルコン; (21C) イルメナイト, ザクロ石, (21M) 金紅石, コロンブ石, スズ石, (21T) コロンブ石, 金紅石, スズ石; (22C) 鉄マンガン重石, イルメナイト, (22M) 鉄マンガン重石, コロンブ石, モナズ石, (22T) スズ石, 鉄マンガン重石, モナズ石, ゼノタイム:

X線解析においてはモナズ石とゼノタイムがあまり判然としていないが, Kajang の鉍石, あるいは Gambang, Ipoh, Taiping の鉍石などはゼノタイムに近い結晶鉍物が存在するように思われる。タングステン等はほとんどすべての鉍石中に含まれるが, Kuala Kubu の鉍石のようにX線解析では認め難いものもあり, 一方, Jemuluang, Batu Gaja, Ulu Kelang の鉍石はX線解析結果とよく一致するものも認められる。

これらの事実はスズ石そのものもその組成が複雑であり, またアマン漳のほうも鉍石の混在度など非常に不均一であることを示すものと考えられる。

V お わ り に

この稿では, マレーシアのスズ石, イルメナイトに随伴するアマン漳について, 希土類元素を中心に検討をこころみた。先にも記したように原鉍石が非常に不均一であり, また選鉍所の技術, 設備がそれぞれ異なっているのでこの結果からマレーシアのアマン漳を論ずるにはもちろん充分ではない。ただ筆者は今まであまり検討されていなかったアマン漳について, その冶金学的な処理方法への一つの手がかりとしてこの調査, 収集, 検討をこころみた。

今後このような複雑なアマン漳の工業的価値を評価するためにいかなる方法によるべきなのか, またいかなる実験の進め方が錯綜した因子をときほぐすのに必要であるかが考えられねばならない。

この小稿を終えるにあたり当実験の遂行に御指導を賜りました工学部滝本教授, 港助教授に厚く御礼申し上げます。また現地での収集に多大の御援助をいただいた O. T. S. の各位, さらに選鉍その他に御便宜を与えて下さった石原産業(株)中央研究所に衷心より御礼申し上げます。