

銅の国, チリ

松久 幸敬 (鉱床部)
Yukihiro MATSUHISA

1. はじめに

地質調査所では 工業技術院による国際研究協力 (IT IT) 特別研究のプロジェクトのひとつとして 南米のチリを対象に「乾燥地域における銅 鉛 亜鉛鉱床探査法の研究」を行なっている (地質ニュース 323号 地質調査所の国際的活動の概要 (昭和55年度) 参照). 初年度は火成岩の岩石学的 地球化学的特徴と鉱床の広域的な分布の関連についての調査を行ない その様子は石原舜三によって地質ニュース326号に紹介された. 第2年度 (昭和55年度) はチリにおいて最も重要な鉱床であるポーフィリ型銅鉱床を調査の対象とし 同位体地質学の手法によって鉱床の成因を解明し 探査の指針を得ることを目標とした. 筆者は このテーマのもとに エル・テニエンテ (El Teniente) 鉱山とアンディーナ (Andina) 鉱山に1ヶ月滞在し 現地調査と試料の採集を行なった. そこでこの機会に現地の様子を紹介し あわせてポーフィリ型銅鉱床の同位体的研究についてもとりあげてみたい.

2. ポーフィリ型銅鉱床

銅はさまざまな種類の鉱床から得られ わが国では足尾のような鉄脈鉱床 あるいは 黒鉄鉱床や別子式含銅硫化鉄床 スカルンといった産状が知られている. しかし世界的にみれば 銅の過半はポーフィリ型銅鉱床から得られており 黒鉄鉱床のような塊状硫化物鉱床の産銅に占める割合は10%に満たない (表1). またポーフィリ型銅鉱床は銅ばかりでなくモリブデンの重要な供給源である. そこで わが国が必要とする鉱物資源の海外の供給源を理解するうえでも ポーフィリ型銅鉱床についての知識は不可欠である.

ひと口にポーフィリ型銅鉱床といっても その地質学的状況はさまざまである. しかし共通して言えることは 中-酸性の斑状貫入岩に関係して これらの貫入岩及び周辺の岩石に鉱染状あるいは細脈状に銅の初生鉱化作用が認められることである. また一般に鉱床は低品位 (~1% Cu) 大規模であり しばしば二次富化帯を伴っている.

表1 世界の銅生産量に占める4種の主要鉱床タイプの割合 (S.E.キスラー著. 石原舜三訳 「限りある資源」より算出)

鉱床のタイプ	金属銅量 (%)
ポーフィリ型銅鉱床	61
堆積型銅鉱床	26.5
塊状硫化物鉱床	8
銅・ニッケル型鉱床	4.5

一般に斑状貫入岩を中心として熱水変質帯と鉱化帯の同心円状の配列が見られる. 年代測定の結果によれば斑状岩の貫入と熱水変質 鉱化作用は ほぼ同時期に一連の出来ごととしておこっている. ローウエルとギルバート (Lowell and Guilbert, 1970) は ポーフィリ型銅鉱床について次のようにまとめた. すなわち変質帯はカリウム帯 (黒雲母-カリ長石) を中心に 外側に向かって フィリック帯 (石英-セリサイト-黄鉄鉱) 粘土化帯 (石英-カオリン-モンモリロナイト) プロピライト帯 (緑泥石-方解石-緑泥石) の順に同心円状に配列し これに対応して硫化鉄物組合せも 黄銅鉱 黄鉄鉱 輝水鉛鉄帯から黄鉄鉱 黄銅鉱帯を経て黄鉄鉱-一方鉛鉄-閃亜鉛鉄帯へと変化する.

シェパードら (Sheppard, 1977 など) は熱水変質鉱物の酸素及び水素同位体組成から 中心部のカリウム帯の変質は斑状貫入岩マグマの結晶作用の過程でマグマから放出されたマグマ水によって引き起され その外側のフィリック帯以降の変質は周囲の天水起源の地下水が加熱されて循環することによって生じた結論した. その様子は後述するチリのエル・サルパドル鉱床の例で詳しくみたいと思う.

マグマの結晶作用が進むと流体相が形成され その増加が急激で著しい場合に所謂二次沸騰がおこる. この流体相が初期の鉱化作用をもたらすと考えられる. 遊離した流体相が天井を吹き飛ばして爆発するか 周囲に割れ目を作ってエネルギーを消費するか あるいはマグマの容積を増すだけでじっとしているかは周囲の圧力による (Burnham and Ohmoto, 1980-図1). ポーフィリ型銅鉱床では しばしば網目状の不規則な割れ目の

発達が見られ また角礫パイプと呼ばれる破碎岩をしばしば伴う。つまりそのような割れ目や破碎岩が形成されるのに適当な圧力条件がこの型の鉱床を作るのに必要で 上へ広く突き抜けるような条件—たとえばカルデラの形成—では ポーフイリイ型銅鉱床 (その原料が散逸してしまうので) 形成されないという主張もある。

シリトウ (Sillitoe, 1972) は世界のポーフイリイ型銅鉱床の分布とプレート・テクトニクスを結びつけて この型の鉱床が大洋地殻の沈み込むプレート周辺でカルクアルカリ質の火成作用に伴って形成されると主張した。南北アメリカの西縁に沿って分布するポーフイリイ型銅鉱床群の存在はこの主張をなるほどと思わせるが (図2) 同じく大洋プレートの沈み込み帯で カルクアルカリ岩が広く分布する日本列島でこの型の鉱床が見つからないのは何故であろうか。地層の削剝レベルの問題であろうか。もともとマグマに含まれる金属イオン量が少ないのだろうか。あるいは流体相の化学的性質 (塩濃度や硫化物イオンの酸化度) が異なるためだろうか。上田と西脇 (Uyeda and Nishiwaki, 1980) は2つのプレートの相対的な動きから プレートの境界の応力状態が圧縮であるか引張りであるかが形成される鉱床の型—ポーフイリイ型銅鉱床か塊状硫化物鉱床か—を決めていると主張した。今回の我々のプロジェクトでは 太平洋の両側での鉱床生成条件の違いを明らかにすることも重要なテーマのひとつである。

3. チリのポーフイリイ型銅鉱床

3.1 チリの銅生産とチリ銅公社

チリは銅の国である。現在稼行中の鉱山に鉱化作用のみられる地点を加えると チリのポーフイリイ型銅鉱床の数は40を超える (図3)。そのうち4つの大鉱山 チュキカマタ (Chuquicamata) エル・サルバドール (El Salvador) アンディーナ (Andina) エル・テニエンテ (El Teniente) は1971年以来 国営のチリ銅公社 (Corporación Nacional del Cobre de Chile 略してCODELCO Codelco) によって運営されている。なかでもチュキカマタは世界最大の銅産出量をほこる露天掘鉱山として またエル・テニエンテは世界最大の坑内掘鉱山としてつとに有名である。

CODELCOの4大鉱山の銅生産量は 1979年現在年産90

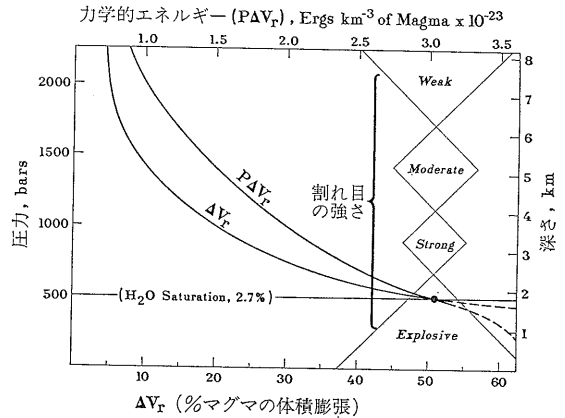


図1 含水マグマの二次沸騰における容積変化と放出される力学的エネルギー (Burnham and Ohmoto, 1980). ΔV_r と $P/\Delta V_r$ の曲線は初期の含水量が2.7重量%の花崗閃緑岩質マグマが結晶した場合を示す。

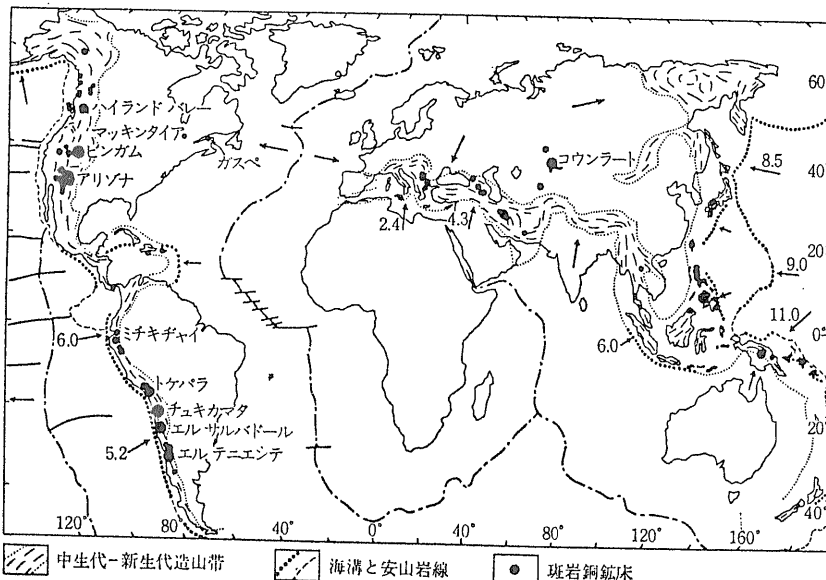


図2 世界の主要なポーフイリイ型銅鉱床の分布 (石原, 1972). 矢印と数字はプレートの沈み込み速度 (cm/年)。

万トンに達し 自由世界の総生産量の15%を占める。このうち4鉱山の内訳は チュキカマタ56% エル・テニエンテ30% エル・サルバドール9% アンディーナ5%である。また副産物のモリブデンの年生産量は1.3万トンで その68%をチュキカマタが産出している。銅の99%は輸出され 輸出先のベスト・スリーは ①西ドイツ ②ブラジル ③アメリカ合衆国 である。アンディーナ鉱山の鉱石は 特に日本に向けて輸出されている。

チリは銅の埋蔵量においても世界有数で その量は1.4億トンといわれ世界の28%を占め 更にその80%は上記4大鉱山にあるといわれている。そこでモデルコのチリにおける経済的 社会的影響力は大きく サンチャゴの中心街にメイン・オフィスを構えながら独立王国の観がある。

3.2 ポーフイリ型銅鉱床の地質学的背景

チリのポーフイリ型銅鉱床は そのほとんどがアンデス山脈の西斜面に南北に細長くのびる帯(総延長2400km 幅20—45km)に沿って分布している(図3)。主要な鉱床のほとんどは標高2500—4200mの高所にある。

アンデスはアメリカ・プレートの西縁に位置し 中生代—新生代の造山帯が 先カンブリア紀—古生代の基盤の上のっている。中生代—新生代の火成活動はカルクアルカリ質の火山岩と深成岩(卓越した量の安山岩とトータル岩へアダメロ岩の貫入岩)からなり 活動の舞台は全体として時間とともに東進する(石原, 地質ニュース326号参照)。ジュラ紀から白亜紀前期には 海岸地帯に安山岩の海底火山活動とその東側に浅海堆積物がみられるが 白亜紀中期以降は火山作用と砕屑物の堆積は陸上のものになる。

大部分のポーフイリ型銅鉱床が成因的に関係する貫入岩は 上記の中生代—新生代の典型的なカルクアルカリ岩質の中性の火成岩で トータル岩(デイサイト) 花崗閃緑岩(流紋岩質デイサイト) アダメロ岩(流紋岩または石英レイトイト)である。東のアルゼンチン側では 関係火成岩として石英に欠けるアルカリ質の岩石もみられる。これはサブダクションに関係した島弧の火成作用の一般的傾向と一致している。

多くの鉱床では 火成岩の貫入が繰り返してみられ 鉱化作用はそのうち後期のひとつ又はいくつかの貫入岩に関係して起きている。過半の鉱床では鉱化作用の中心は孤立した岩株か岩株の集合で 岩株の平面における断面積は0.5km²以下といった小さなものが多い。しかし35km²以上の大きい岩株に関係した鉱化作用もあり

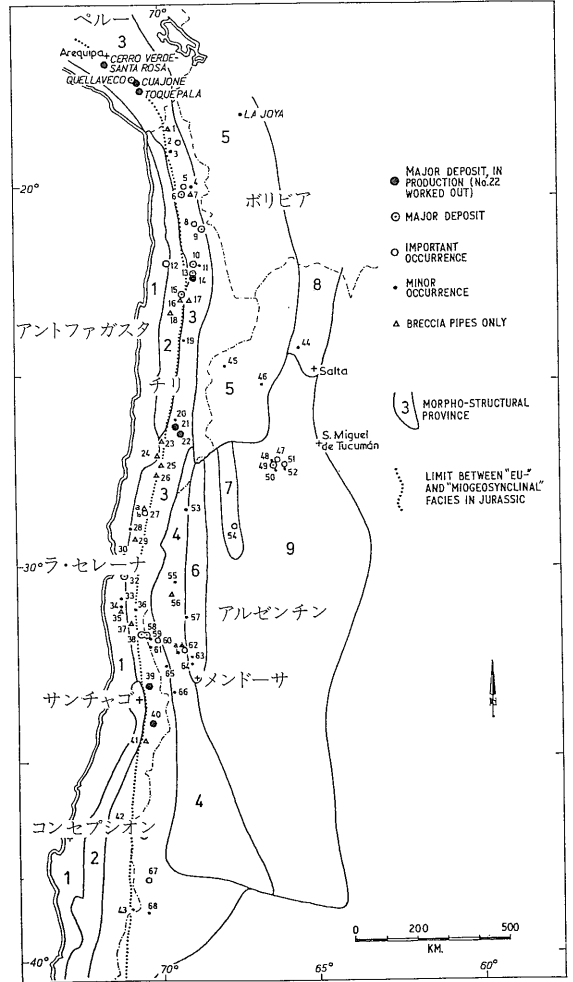


図3 チリとアルゼンチンにおけるポーフイリ型銅鉱床の分布 (Sillitoe, 1981)。大黒丸は現在稼行中の主要な鉱山(No. 22を除く): 14. チュキカマタ 21. エル・サルバドール 39. アンディーナ(ディスタターダ) 40. エル・テニエンテ。

このような大きなものはポーフイリ型銅鉱床をもたらす岩株の先駆と考えられ 一連の貫入の初期の段階に対応している。

鉱化作用の時代はすでに述べた火成作用の時代に対応して西から東へ 白亜紀後期から中新世へと若くなる。鉱化作用は一定の時間間隔をおいていくつかのピークがあり 特に65—54m. y. 41—29m. y. 16—5m. y. の3つの時期が顕著であり 主要な鉱床はこの時期のいずれかに入る(図4)。

被貫入岩は 鉱床のおよそ70%では白亜紀—第三紀前期の主として陸成の安山岩質火山岩である。それらと貫入岩とが 広い意味で同源であると推論される例もあ

表2 チリの4大ポーフィリイ型銅鉱床

鉱床	鉱量 (100万トン)	品位 Cu(%)	品位 Mo(%)	出鉱 (千トン/日)	関係火成岩	K-Ar 火成岩 年令 (100万年) 熱水変質	被貫入岩
チュキカマタ	1400	1.2 (1.7)*	0.04 (0.05)*	90	花崗閃緑斑岩	35-37	花崗閃緑岩
エル・サルバドール	260	1.35 (1.5)	0.04 (0.04)	30	花崗閃緑斑岩	39	第三紀火山岩
エル・テニエンテ	4000	1.05 (1.54)	0.03 (0.03)	60	デイサイト斑岩	—	第三紀火山岩
アンディーナ	3000	1.24 (1.2)	0.03 (0.02)	15	石英モンゾニ斑岩	4.6-5.2	第三紀火山岩

*現在のミル・ヘッド品位

るが 多くの場合膨大な安山岩の噴出物は詳細な対応関係の解析を困難にしている。一方 ジュラ紀の海成層や古生代の貫入岩が被貫入岩となっている例もある。これらの母岩の違いは ポーフィリイ型銅鉱床の性質には反映されていない。

構造規制については アンデスの南北性の構造に伴って鉱床が形成されるものもあるが 鉱床の半分は主要な構造(断層)に関係しない均質な応力場で形成されている。チュキカマタ パンパ・ノルテ エル・アブラの鉱床群は 主要な断層によって規制されている例である。

表2にチリの4大ポーフィリイ型銅鉱床について 鉱量 品位 関係火成岩 K-Ar 年令等をまとめて示した。

4. チュキカマタ鉱床

チュキカマタ鉱床は 南緯22度付近の砂漠の高地に位置し 世界最大の露天掘鉱山である。鉱床はチュキカマタ・ピット(図5)とその南のミーナ・スル(エクゾティカ鉱体)からなり 更に北方延長にパンパ・ノルテ鉱床



図5 チュキカマタ鉱床のピット。ピットの大きさは長さ4000m 幅1800m 深さ450mである。

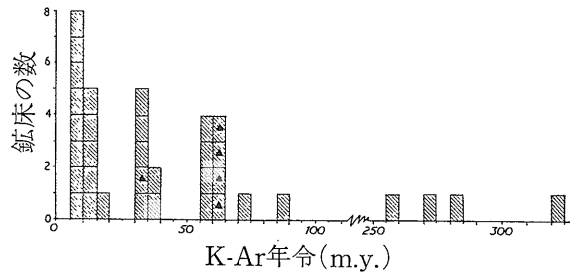


図4 チリ アルゼンチン 南部ペルーにおけるポーフィリイ型銅鉱床の鉱化作用の時期(Sillitoe, 1981)。三角は電気石英管パイプを示す。

が将来の開発を待っている。

1915年に露天掘が始まって以来 1977年までに1200万トンの銅を生産している。表2に示された鉱量はピット地域の二次富化帯のみを対象としたもので 深所や鉱床の北方延長を含めると その総鉱量は88億トン(0.46%Cu)に達するといわれる。

図6にチュキカマタ鉱床周辺の地質の概要を示す。初生鉱化作用は長さ12 km 幅0.8 kmの花崗閃緑質の斑状複合貫入岩体(チュキ斑岩類)の中にある。この斑岩類は漸新世初期に ジュラ紀の花崗閃緑岩(エレナ花崗閃緑岩)と古生層の変成岩類に貫入した。鉱床の西側にはウエスト・フィッシャーと呼ばれる南北に何 kmも続く断層があり チュキ斑岩類の貫入とその後の網目状割れ目の発達に重要な役割をはたした。

チュキカマタの初生鉱化作用(斑銅鉱-黄銅鉱-輝銅鉱組合せ)は チュキ斑岩類の後マグマ期に始まり 母岩のカリウム変質を伴っている。それにひき続き3段階の熱水変質作用・鉱化作用がみられる。熱水の活動は網目状割れ目の発達に密接に関係しており 熱水溶液は網目状割れ目に沿って拡がったと思われる。最初の熱水期の活動に関係してモリブデン鉱化作用がみられる。

主要な熱水期には 石英・セリサイト変質に伴って黄鉄鉱が晶出している。なお同時に少量の斑銅鉱 黄銅鉱 閃亜鉛鉱 硫砒銅鉱も晶出している。最後の鉱化期はウエスト・フィッシャーの近くの脈に粘土化変質帯を伴って現われ 黄鉄鉱・硫砒銅鉱組合わせが少量のルゾナイト 閃亜鉛鉱 方鉛鉱 テンナンタイトとともに晶出する。

その後 おそらく中新世後期にすでに熱水変質を受けた岩石のうち ウエスト・フィッシャーから西の部分が断層に沿って数 km 南へずれて 断層の西には現在見られるフォルトナ花崗閃緑岩が接するようになった。

更に中新世以降 鉱床の南の部分-現在のチュキ・ピット地域-は浸蝕を受け 溶出と二次富化作用が繰り返しておこった。その結果 上部の輝銅鉱帯から下部のコペリン帯に至る厚い二次富化帯 (南北3.5km 幅500m 厚さ400m) が形成された。又この過程で 多量の銅を含む地下水が南方に流れ 銅が再沈澱してエキゾテカ鉱体を形成した。

チュキカマタ鉱山の様子は本号の口絵写真を参照されたい。

5. エル・テニエンテ鉱床

5.1 エル・テニエンテ鉱山へ

エル・テニエンテ鉱山はサンチャゴ (Santiago, 後の a にアクセントがある) (図7) の南100km アンデスの西斜面 標高2,500m に位置している。サンチャゴから中央低地ぞいに パン・アメリカナ ハイウェイを高速バスで1時間半程南下したところにランカグア (Rancagua) の町があり ここにコデルコ・エル・テニエンテ部門の本部と職員の宿舎がある。鉱山へはこの町から更に鉱山専用道路で1時間程アンデスに向かって登る。途中ゲートがあって入山者のチェックは厳重を極めている。職員の宿舎の一部は山の上のコヤ (Coya) という村にもあり ゲスト・ハウスもその近くにあつて プールやゴルフコースの付いた快適な施設である。

エル・テニエンテ鉱山は 昔ひとりの脱走兵 (大尉) がアンデスに逃げて その途中で鉱床を発見したといわれ 鉱山の名前 (スペイン語で大尉) もそれに由来している。ブロック・ケービング法による本格的な採鉱は1906年にウィリアム・ブラーデン (William Braden—地層名に残る (後述)) によって始められ のちケネカット鉱山会社に引き継がれ アジェンデ政権下での国有化を経て1971年から現在のコデルコによって運営されるようになった。

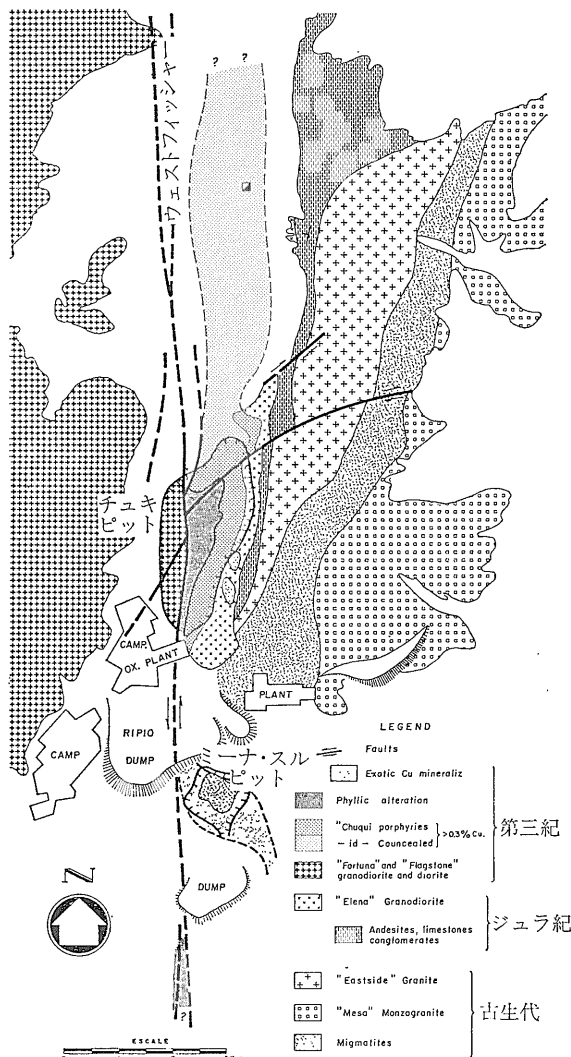


図6 チュキカマタ鉱床付近の地質図 (Ambrus, 1978)。

ケネカット時代にはT-5レベルのシーウエル (Sewell) が鉱山の中心であったが 現在では300m下位のT-8レベルのアルト・コロン (Alto colon) が鉱山の中心でここに事務所 選鉱所などの中心施設がある。鉱石はT-5とT-8の両レベルから出しており シーウエルにも選鉱所が残っている。精練所はアルト・コロンとシーウエルの中間のカレートネス (Caletones) にあり 盛んに煙を出すのが遠くコヤのゲスト・ハウスからも望まれる (図8)。

作業は3交代で 麓のランカグアの町から労働者を運んできたバスがアルト・コロンの駐車場に並んでいる様子は壮観である (図9)。坑内へは アルト・コロンから



図7 サンチャゴのオイギンス大通り。中央の教会はサンチャゴ最古の建物サン・フランシスコ教会。

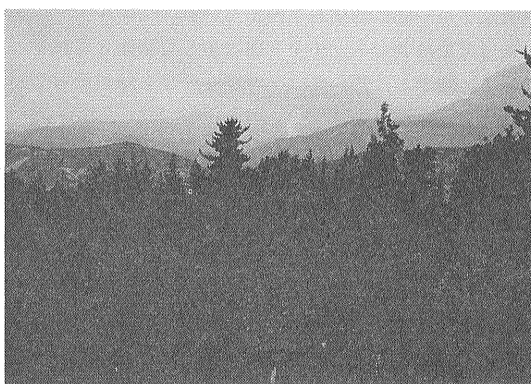


図8 コヤのゲスト・ハウスからエル・テニエンテ鉱山を遠望。カレートネス精練所の煙がアンデスの谷に広がる。

発車した電車がそのままT-8レベルに入る(図10)。メイン・シャフトはT-1~T-5レベルとT-5~T-8レベルの2段に分かれて(比高600m)2階建350人乗りの大エレベーターが人と資材を運んでいる。ブロック・ケーシングで採られた鉱石はプロダクション・レベルのグリッドを通過して坑内のクラッシャー室へ運ばれ更に貨車で坑外の選鉱所へ送られる。

現在はT-1とT-4がプロダクション・レベルで主として二次富化帯を掘っているが近い将来採掘の対象は初生鉱化帯が中心となる。そこで鉱山では初生鉱化作用の解析とその採掘法の検討が現在重要な課題となっている。二次富化帯の銅品位は1.6%であるが初生鉱化帯では1%ぐらいになる。コデルコではカット・オフ品位を0.5%においており世界の他の鉱山では考えられない贅沢なことである。

5.2 地質のあらまし

エル・テニエンテ鉱床はアンデスの西側にそって南

北に長く分布する第三紀の厚い火山岩類の中に位置する(図11)。この火山岩類は全体として南北方向の軸を持った褶曲帯を形成している。図11をみるとこの帯の中に中性-酸性の小規模な第三紀貫入岩類が分布しているがその中のあるものが鉱化作用をもたらしている。

表3にエル・テニエンテ鉱床付近の地質層序を示す。上述の第三紀火山岩類はファレジョーネス(Farellones)層と呼ばれ主として安山岩の熔岩と碎屑岩からなる厚い地層で全層厚2700mに及ぶ。地層は上・中・下部に分けられているが鉱化作用の母岩になるのは下部ファレジョーネス層である。ファレジョーネス層の年代は表3にあるように暁新世-始新世といわれていたが最近のK-Ar年代測定によれば8m.y.(上部中新世)で鉱化作用の時期(5m.y.)との差は小さい。

下部ファレジョーネス層の下に不整合を隔ててコヤ・マチャリ(Coya-Machali)層が来る。コヤ・マチャリ層は上部白亜紀といわれ大部分安山岩質の熔岩 碎屑岩



図9 鉱山の労働者は一日三交代で麓のランカグアから専用バスで登ってくる。



図10 坑内へ入る電車。普通の通勤電車と変らない。

からなるが一部に堆積岩を挟んでいる。 エル・テニエンテ付近ではコヤ・マチャリ層は著しく褶曲しておりその上に緩やかに傾いたファレジョーネス層がのっている (図12, 13)。

鉱床地域ではファレジョーネス層を貫いて 石英閃緑岩(トータル岩)とデイサイト斑岩が分布する。 石英閃緑岩は鉱床南部に分布するバソリス状岩体で 枝分れして不規則な形状を呈する (図14)。 岩体の上部では斑状であるが 下部へ行くにしたがって等粒状になる。 石英閃緑岩は多かれ少なかれ変質しており 後に述べるように周囲の安山岩と同じような変質作用と鉱化作用を受けている。

デイサイト斑岩は鉱床北部に分布する 岩株状貫入岩体である (図14)。 岩体は NNW に細長くのびており 地表で幅 50m 下部へ行くに従って大きくなって T-8 レベルでは幅 300m になる。 デイサイト斑岩はすべて変質を受けており 白い塊状の岩石である。 組織は石英閃緑岩と似ているが カリ長石が多いことで区別される。

斑晶は石英の“rounded eyes” 黒雲母の“books” を特徴的に含み 灰曹長石～中性長石組成の斜長石とカリ長石を含む。 パーサイトの離溶と交代が 岩体中心部で特徴的にみられる。 デイサイト斑岩は 鉱化作用と変質作用の主要な時期に直接関与している貫入岩であ

表3 エル・テニエンテ鉱床付近の層序 (Camus, 1975)

時代	地層名 (岩石名)	記載
第 三 紀	ランプロファイア岩脈	角閃石ランプロファイア
	レイタイト斑岩	ブラーデン・パイプ中に出現
	ブラーデン層	角礫パイプ
	主要 鉱 化 作 用	
	デイサイト斑岩	
	石英閃緑岩	
紀	上部ファレジョーネス層 (750m)	岩滓集塊岩・火砕岩及び安山岩 玄武岩溶岩
	中部ファレジョーネス層 (750m)	安山岩溶岩及び湖成層
晩新世	下部ファレジョーネス層 (1200m)	塊状安山岩 主要な鉱床母岩
主 要 不 整 合		
上部白亜紀	コヤ・マチャリ層	安山岩溶岩・火砕岩 及び湖成層

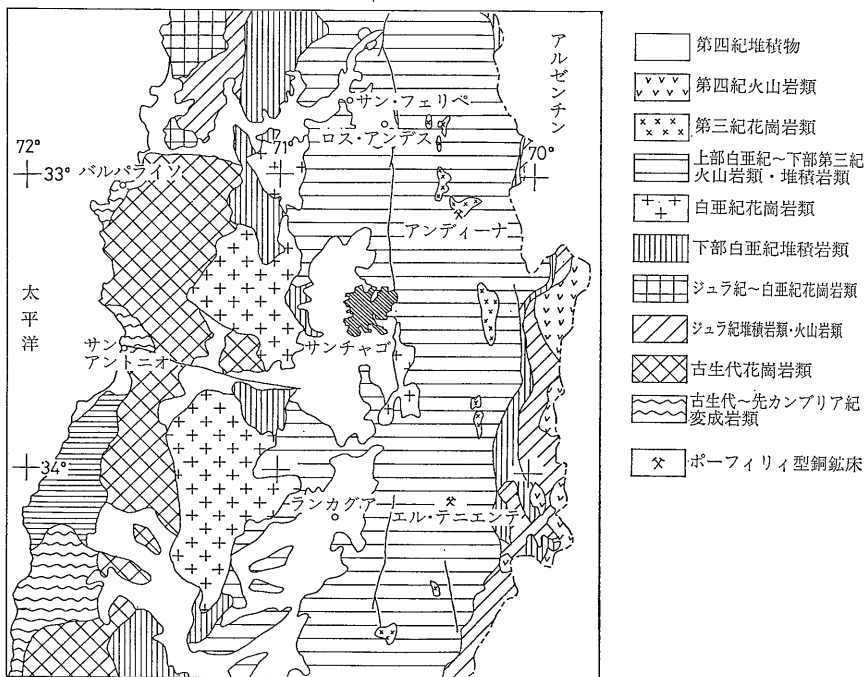


図11 チリ中部の地質図 (チリ地質調査所 IIG, 1964 を簡略化)。

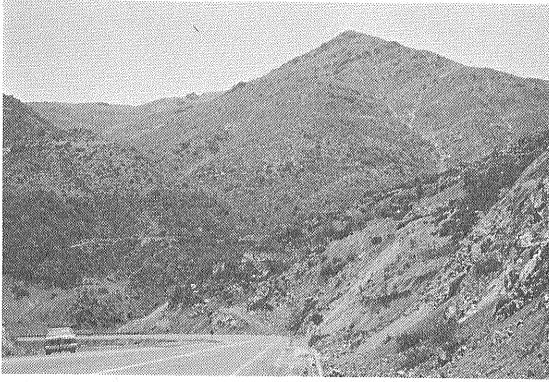


図12 エル・テニエンテ鉱山への道。 褶曲したコヤ・マチャリ層(手前の崖)の上にゆるく傾いた下部ファレジョーネス層(遠方の山)がのる。

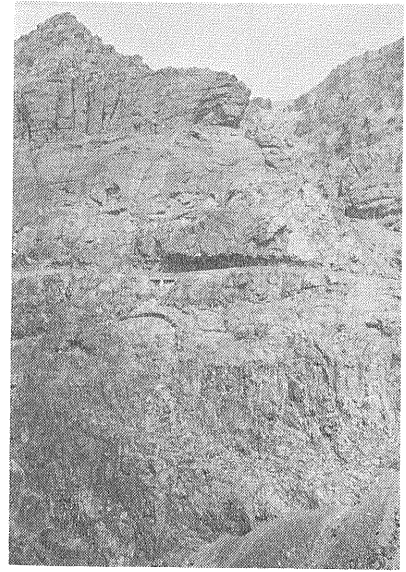


図13 アルト・コロソからシーウエルへ行く峡谷でみられる下部ファレジョーネス層。 崖の中腹にみえるのはかつてシーウエルからコヤへ鉱石を運んだ軌道。

る。

エル・テニエンテ鉱床を最も特徴づけるのは プラーデン (Braden) 層と呼ばれる角礫パイプの存在である(図14)。 プラーデン層は鉱床地域の中心に位置し “層” と呼ばれているが逆円錐形で 平面はほぼ円形のパイプ状断面をしている。 円錐の東側はほぼ垂直で 西側はやや緩く傾斜している。 直径は地表で1300mあるが T-8 レベルでは 650m まで減少する。 現在知られている垂直方向の伸びは1600mを超え 既述のすべての岩石を貫いている。

ブラーデン層は周囲の岩石—安山岩 石英閃緑岩 デイサイト斑岩—の円礫〜亜角礫を含み マトリックスは礫と同質の岩石の粉末である。 礫の大きさは数 cm から2〜3mまで変り分級が悪いが 固化の程度は強く灰色のコンクリート状を呈する (図15)。

礫は周囲の母岩と同じように変質して鉱化作用を受けているので プラーデン角礫パイプの形成は主要な鉱化作用のあとであると考えられる。 鉱山では このブラーデン層の中に坑内の諸施設をつくって プラーデン層そのものは今まであまり詳しく調べられていない。しかし最近 鉱化作用の各ステージとの関係で見直されようとしている。

ブラーデン層の外周を取り巻くように 幅20〜40mの

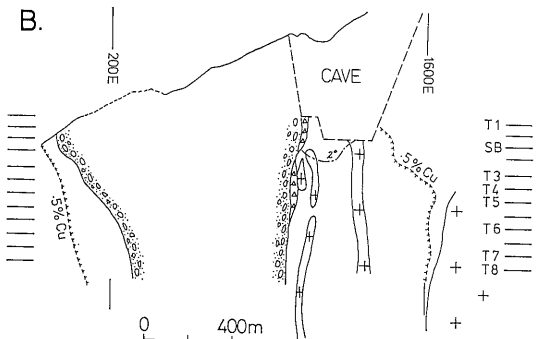
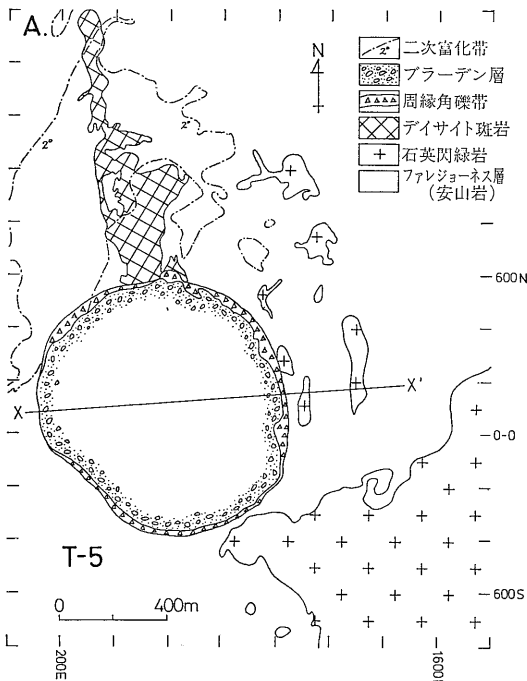


図14 A. エル・テニエンテ鉱床 T-5 レベル地質平面図 B. 同 X-X' 断面図。



図15 坑内でみられるブラーデン層 (T-4 レベル)。マトリックスは礫と同じ岩石の細粉である。一見コンクリートの様にみえる。

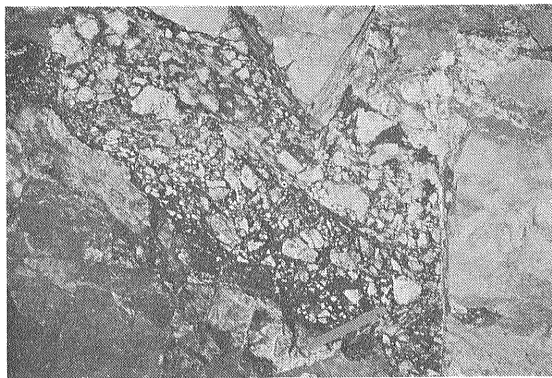


図16 周縁角礫帯 (T-1 レベル)。マトリックスは電気石で黒色を呈する。この部分は二次富化を受けている。

周縁角礫帯が発達する (図14)。周縁角礫帯は安山岩 デイサイト 石英閃緑岩の角礫を含み マトリックスは電気石 石英 硬石膏と硫化鉱物 (黄銅鉱 斑銅鉱 テンナンタイト等) からなる (図16)。ブラーデン層とは 角礫とマトリックスの色 (黒色) で容易に識別出来る。ブラーデン層へは漸移的であるが ブラーデン層から周縁角礫帯への注入がしばしばみられる。周縁角礫帯はいわゆる電気石角礫パイプに該当するものでブラーデン層形成前に形成されたものと考えられる。レイトイト斑岩の不規則な小岩体 (数m~300m) がいくつかブラーデン層中に存在する。この岩石は石英の“rounded eyes”を残してそれ自身強く変質しているが 周囲に変質ハローがみられない。又黄鉄鉱を除いて他の硫化鉱物を含まない。表-3 ではこの岩石の貫入をブラーデン層の上位に置いているが 最近鉱山の地質家の間ではレイトイト斑岩の貫入がブラーデン角礫パイプそのものの形成と それに関係した鉱化作用をもたらしたのではないかという考えが提出されている (後出)。

このほかに 明らかに鉱化作用後の貫入であるランブروفファイア脈 (幅1~2m) が坑内外でみられるが ここでは省略する。

5.3 熱水変質と鉱化作用

すでに述べたように ローウエルとギルバートによればボーフィリク型銅鉱床の変質帯は 内から外に向かってカリウム帯からフィリク帯をへてプロピライト帯へと同心円状に広がっている。エル・テニエンテ鉱床でもデイサイト斑岩に強いカリウム変質帯があって ここが変質作用ならびに鉱化作用の中心のようである。カマス (Camus, 1975) はローウエルとギルバートのモデルに従って エル・テニエンテ鉱山の変質作用をまとめた。

しかし現在 鉱山の地質家は少し違う考えを持っているようである。以下にそれを紹介したい。

最も重要な点は 変質作用が同心円状に分帯されるのではなく 重複しているということであろう。すなわち初期のカリウム変質はかなり広い範囲に及んでおり (このことはカマスの論文でも認められる) それに重複する形で フィリク変質が細脈の形で現われる。

鉱山の地質家は変質作用を次の3つの重要な時期に分ける。

- 第1期 (後マグマ期) : カリウム変質帯
- 第2期 (主熱水期) : フィリク変質帯
- 第3期 (後熱水期) : 含電気石変質帯

第1期のカリウム変質帯はすでに述べたようにデイサイト斑岩を中心に広い範囲に及んでいる。デイサイト斑岩の中心ではパーサイトの離溶 カリ長石化 黒雲母“book”がみられ 斑岩の周囲の安山岩では斑岩から遠ざかるにつれて変質が弱まってカリウム帯 (カリ長石の形成) 高度黒雲母化帯 低度黒雲母化帯 プロピライト帯の分帯がみられる (図17)。この分帯はブラーデン層によって切られるが ブラーデン層の外側ではこの分帯が保たれていて かつてデイサイト斑岩が南へ延びていたことが推定される。

第1期の変質作用を受けた安山岩は一樣に黒雲母化しており 肉眼では源岩がわからない。この時期の変質作用に伴う脈は ハローを持たない石英脈で母岩との境は明瞭である (図18)。この時期の鉱化作用は母岩に鉱染状にあるものと 上述の石英脈中に伴うものがある。全体として変質作用の程度に対応して 内から外へ斑銅鉱> 黄銅鉱帯 黄銅鉱> 斑銅鉱帯 黄銅鉱> 黄鉄鉱帯 黄鉄鉱> 黄銅鉱帯の分帯がみられる。

第2期の変質は 石英・セリサイトのハローを持つ石英・硬石膏脈で特徴づけられる (図19)．ハロー中には緑泥石もみられる．

第2期の脈は第1期の黒雲母化帯の中に重複して現われ 第1期の石英脈を明瞭に切っている．両期の脈は石英・セリサイトのハローを持つか否かで 坑内でも容易に識別出来る．

第2期の脈は網目状に分布し方向性はないが 脈の分布密度を測ると 特に第2期の熱水変質作用の強かった場所がわかる (図20)．それはデイサイト斑岩の両翼で深部に向かって分布密度が低下する．第2期の熱水変質 (フィリック変質) は斑岩が冷却する過程で 熱水が斑岩を取り巻くように上から下へ拡がっていく事によって形

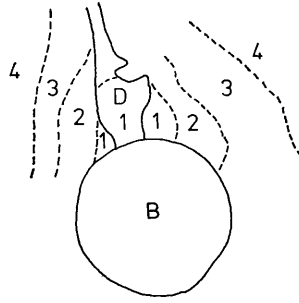


図17 デイサイト斑岩(D)を中心とする第1期 (後マグマ期) 変質の分帯. 1. カリウム帯 2. 高度黒雲母化帯 3. 低度黒雲母化帯 4. プロピライト帯. B. ブラーデン層

成されたと推定される．

第2期の鉱化作用は黄銅鉱を主とし 脈の中及びハローの部分にみられる．

第3期の変質は硬石膏を主とし 少量の石英を含む不規則な形の脈として現われる (図21)．この時期の脈は斑銅鉱 緑レン石がハローを伴って現われることが特徴で 緑レン石は第2期には出現しない．テンナンタイトがみられる．

不規則な形状をした脈は時として角礫状を呈し 電気石を伴う．脈の分布はブラーデン層の周辺に限られ 脈の傾きはブラーデン層の縁の傾きと調和的である．

第3期の脈は ブラーデン層及び周縁角礫帯の形成に伴って出来た放射状割れ目を満たして形成されたものであろう．鉱床にとって重要なことは 第3期の脈の分布に沿って斑銅鉱の二次富化がみられることである．

坑内では各時期の脈が入り乱れて見られるが 上述の規則性によって概ね判定できる (図22)．図23に ブラーデン層西側断面における3つの時期の分布状態を模式的に示す．

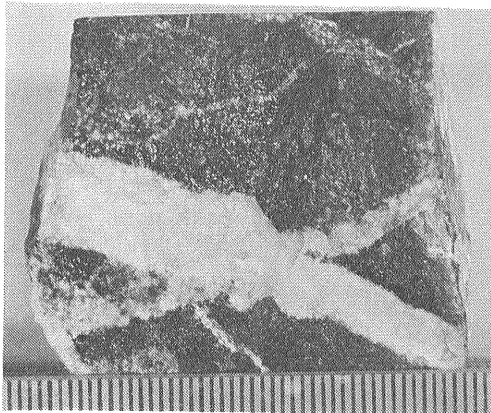


図18 第1期変質に伴う石英脈．母岩との境は明瞭でハローを伴わない．写真の母岩は安山岩であるが 強度の黒雲母化を受けて源岩の組織はわからない．スケールの目盛は1mm (図19, 21も同じ)．

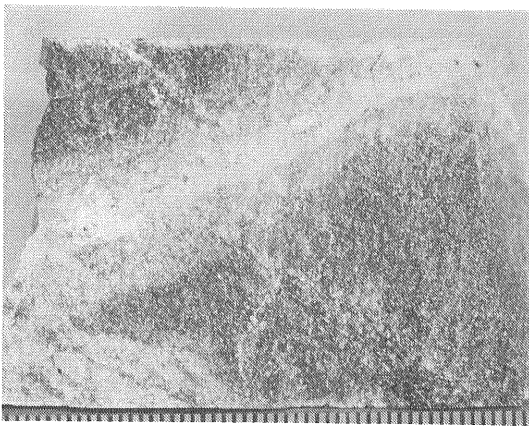


図19 第2期変質に伴う石英・硬石コウ脈 (脈の中心約4mmの白い部分)．石英・セリサイトハロー (脈の周縁約5mm) を伴う．マトリックスの暗色部は黒雲母化安山岩．

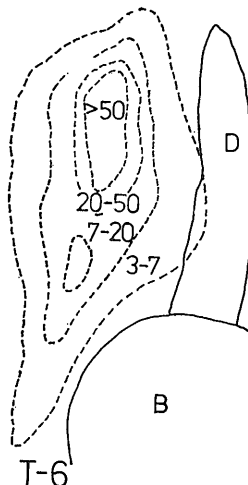


図20 第2期変質脈の密度分布．数字はパーセント．デイサイト斑岩(D)の翼部に第1期のカリウム変質に重複して発達する．

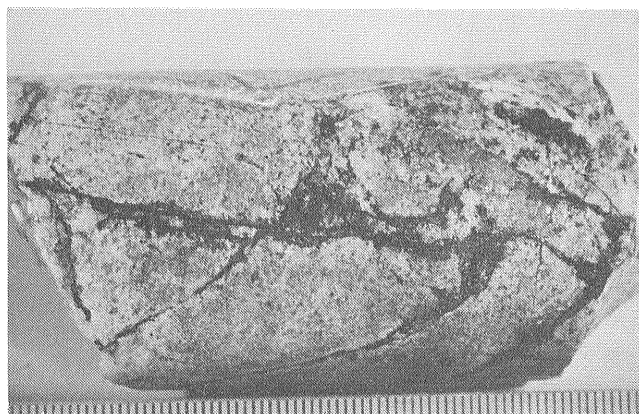


図21 第3期変質脈、不規則な形状を示し、しばしば角礫化し電気石を伴う。

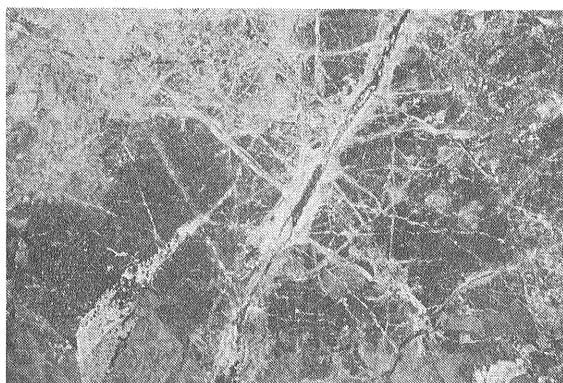
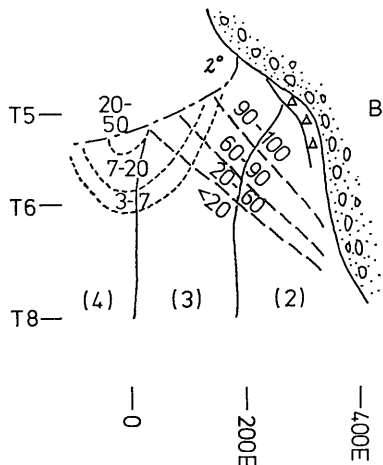


図22 坑内での異なる時期の脈の重複の様子。母岩は黒雲母化安山岩。

以上に加えて、第4期というべき変質脈がブラーデン層形成の末期にみられる。すなわちブラーデン層の空隙に菱鉄鉱、石膏を伴う硬石膏脈が発達し、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、テンナンタイトの鉱化作用がみられるのである。

エル・テニエンテでは硬石膏がすべての時期にみられるが、硬石膏が多いことはチリのポーフィリイ型銅鉱床の特徴で、あとでエル・サルバドル銅床の項で再び触れることになる。輝水鉛鉱もすべての時期に出るが、最も著しい鉱化作用は第3期（後熱水期）にみられる。

以上が所謂初生鉱化作用であるが、この上に現在の地下水によって銅が溶出、二次富化された二次富化帯がかぶさっている。地下水の流れは鉱床の南東部からブラーデン層の東をまいて北側に出ていて、それに沿って二次富化帯が形成されている（図14）。地下水脈の底部がすなわち二次富化帯の底部で、二次富化帯はT-6レベ






-  第3期(後熱水期)変質
-  第2期(主熱水期)変質
-  第1期(後マグマ期)変質

図23 ブラーデン層(B)西縁断面での各時期の変質の重複の様子を示す模式図。第1期の(2)(3)(4)は図17の分帯に対応。第2期、第3期の数字は脈の密度(パーセント)を示す。第2期の変質は上方からの熱水のたれさがりを、第3期の変質はブラーデン・パイプ形成に伴って形成された放射状割れ目にそった脈の生成を示唆する。

ルより深部へは及んでいない。坑内では表面に緑色の水酸化銅鉱物やコペリンが生じていて、二次富化帯に入ったことがすぐわかる（図24）。

5.4 変質作用・鉱化作用と貫入岩との関係

第1期（後マグマ期）の変質作用・鉱化作用がデイサイト斑岩の貫入によって生じたことは明瞭である。カリウム帯の分帯は石英閃緑岩によっては規制されていないので、石英閃緑岩の貫入はデイサイト斑岩の貫入より早く、且つ目立った鉱化作用をもたらさなかったと思われる。しかし、鉱床の南東で得られる一見新鮮な石英閃緑岩も鉱染状の黄銅鉱（～0.5%）を含んでおり、鉱化作用の南方への延長を考える場合、石英閃緑岩による鉱化作用を再検討する必要があるといわれている。

第2期（主熱水期）の変質作用は、すでに述べたように、デイサイト斑岩の冷却過程で、上部から導入された地下水起源の熱水によってもたらされたと考えられている。それを実証し、この期の熱水活動のひろがりをも明らかにするには、変質鉱物の同位体的研究が最も有効と考えられる（後出）。

前にブラーデン角礫パイプの形成にはレイタイト斑岩

の貫入が関係しているという 鉱山の地質家の最近の考えを紹介したが もしそうであれば第3期(後熱水期)の鉱化作用もレイタイト・マグマに關係しているのであろう。すでに述べたように レイタイト斑岩そのものは黄鉄鉱を除いて硫化鉱物に不毛なので 第3期の鉱化作用はそれ以前の段階の鉱化作用の再分配や二次富化であると考えられる。ただ電気石やサルフォソールトはこの段階に特徴的なので レイタイト・マグマはホウ素やヒ素 アンチモンに富んでいたと考えられるが その点は今後の研究を待たねばならない。

ところでエル・テニエンテの周縁角礫帯や他の鉱床の電気石角礫パイプでは 礫はその場で割れた破片のままのような形状を示し ほとんど移動していない。これに対し プラーデン層では礫は円礫化しており明らかに流れている(坑内で流理構造がみられる)。従って 周縁角礫帯とプラーデン層とははっきり区別するべきであり第3期の鉱化作用 変質作用に關係したのは前者を形成した熱水であろう。これらの一連の角礫または円礫パイプの形成機構がどのようなものであったかは 今後の解明を必要とする問題である。

6. アンディーナ鉱床

さて 長らく滞在し親しんだエル・テニエンテ鉱山をあとにして アンディーナ鉱山に向うことにしよう。アンディーナ鉱山は サンチャゴの北東80km 標高4,000mのアンデスの高所にあり 以前リオ・ブランコ(Rio Blanco)と呼ばれた鉱床である(図11)。鉱床はリオ・ブランコの源流の稜線を中心に点々とあるが 稜線の南西側(サンチャゴ側)はディスプターダ(Disputada)鉱床といい エクソン(Exxon)が掘っている。

鉱山へ行くには ディスプターダ側からは入らず サンチャゴから北へロス・アンデス(Los Andes)を廻っ

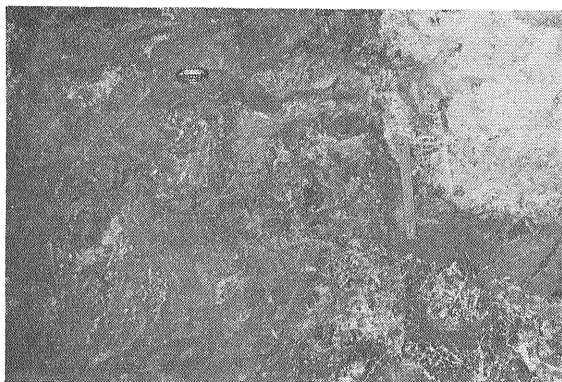


図24 坑内における二次富化帯への移行(T-4レベル)。
図の左側は表面に水酸化銅鉱物が沈澱して緑色を呈す。

てリオ・アコンカグアの谷をアンデスに向って溯る。峠の手前には有名なスキー場ポルティージョ(Portillo)があり 峠を越えればもうそこはアルゼンチンである。

リオ・アコンカグアの支流リオ・ブランコを南へ入ったところに静かなサラディージョ(Saladillo)の町があり ここがアンディーナ鉱山の中心で 事務所や宿舎がある(図25)。鉱山へはここから更に30分程リオ・ブランコの谷を溯る(図26)。冬期の積雪を避けるため クラッシュャー室 鉱石輸送路(パイプ) 選鉱所等の施設はすべて地下にある。アンディーナ鉱山もエル・テニエンテ鉱山同様 ブロック・ケービング法で採鉱しているが 開発が始まって日が浅いため(1970年以降)採鉱レベルは最上位のひとつだけである。坑内へは水平坑道でいきなりこのレベルに入るようになっている(図27)。

アンディーナ鉱床地域の地質は 概ねエル・テニエンテ鉱床地域と同じである。すなわち 第三紀の安山岩(ファレジョーネス層)中にいくつかの斑岩が貫入している。図28に鉱床地域の地質概念図を 表4に地質層序を示す。

石英モンゾニ斑岩が後マグマ期のカリウム変質作用と鉱化作用をもたらしたと考えられるが この斑岩の地表付近の露出は幅1~2mの岩脈にすぎず N-19レベル(地表から600m下位)ではじめて直径200m位の岩体になる。地表で鉱床の東方に分布するディスプターダ花崗閃緑岩が地下では広くひろがっており 石英モンゾニ斑岩の貫入を受けてカリウム変質作用 鉱化作用の主要な母岩になっている。

アンディーナ鉱床及びディスプターダ鉱床に特徴的なのは電気石角礫パイプの発達である。地表では酸化した電気石角礫パイプの露頭が点々とみられる(図29)。しかし地下では電気石角礫パイプはすぐに消えて 角礫

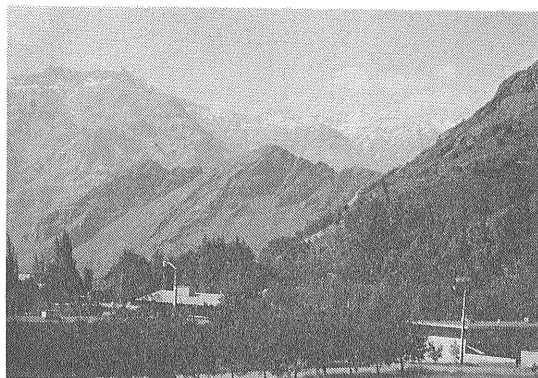


図25 アンディーナ鉱山の本地地のある町 サラディージョ。

化した花崗閃緑岩や石英モンゾニ斑岩に移行する(図30)。従って ここでは電気石角礫パイプの底部を見ているわけであり この角礫パイプがエル・テニエンテのブラーデン層周縁角礫に対応するものとすれば エル・テニエンテのより深部をみていることになる。

鉱床中央部に分布するデイサイト斑岩は著しいセリサイト化を受けているが 熱水性の石英を伴わない。石英の“rounded eyes”が特徴で エル・テニエンテのレイタイト斑岩に似る。このセリサイト変質には硬石膏 菱鉄鉱 黄鉄鉱 閃亜鉛鉱 方鉛鉱が伴われるが黄銅鉱の量は少ない。

鉱床北方の流紋岩チムニーはデイサイト斑岩と同様のセリサイト変質を受けているが 黄鉄鉱以外の硫化物には不毛である。岩体周辺は角礫化を受けている。

変質帯は ①カリウム帯 ②石英・セリサイト変質を伴うカリウム帯 ③弱い石英・セリサイト変質を伴うブ

ロピライト帯 ④デイサイト斑岩に関係したセリサイト帯 に分けられる。これらは④を除いて 石英モンゾニ斑岩を中心に分帯されるが カリウム帯は西方にややひろく拡がっている。カリウム帯では明瞭なカリ長石脈の発達が見られる。②③の石英・セリサイト変質はエル・テニエンテ同様 脈で現われる。

アンディーナの鉱化作用は黄銅鉱が圧倒的に多い(～96%) ことと 二次富化作用が弱いことが特徴である。黄銅鉱の量は上述の変質分帯の順にほぼ対応している。南方(図28では見えない)の石英モンゾニ斑岩の周囲では斑銅鉱の鉱化作用が認められる。

以上のことから アンディーナ鉱床の鉱化作用・変質作用は模式的にはエル・テニエンテ鉱床のそれと同様のものと考えられる。すでに述べたように アンディーナのコデルコの銅生産量に占める割合は5%と小さいが鉱量では エル・テニエンテに匹敵するといわれ 将来が期待されている(表2)。

表4 アンディーナ鉱床付近の層序

地 層 名 (岩石名)	記 載
流紋岩チムニー	～4m. y. (K-Ar)
デイサイト斑岩	セリサイト化
電気石角礫パイプ	
主 要 鉱 化 作 用	
石英モンゾニ斑岩	～5.2m. y. (K-Ar)
ディスプターダ花崗閃緑岩	～10m. y. (K-Ar)
ファレジョーネス層 (700m)	安山岩



図26 アンディーナ鉱山は リオ・ブランコの源流 標高4000mのアンデスの高地にある。12月(夏)の残雪

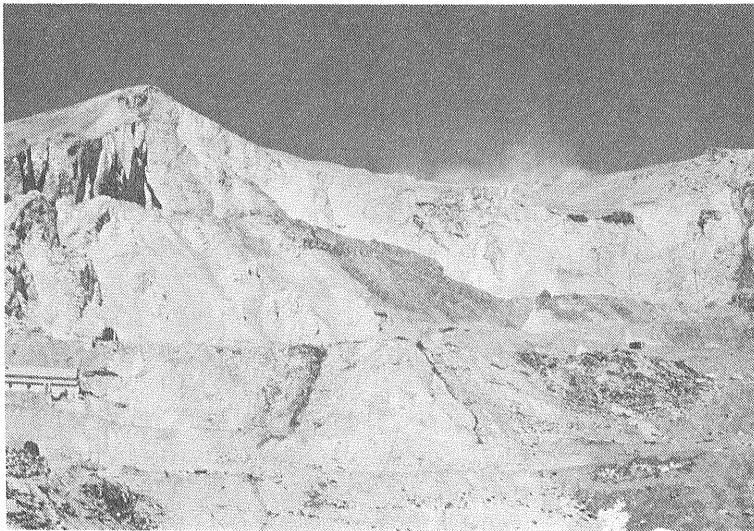


図27 アンディーナ鉱山の坑道入口とブロック・ケービングで出来た凹地 (Cave)。

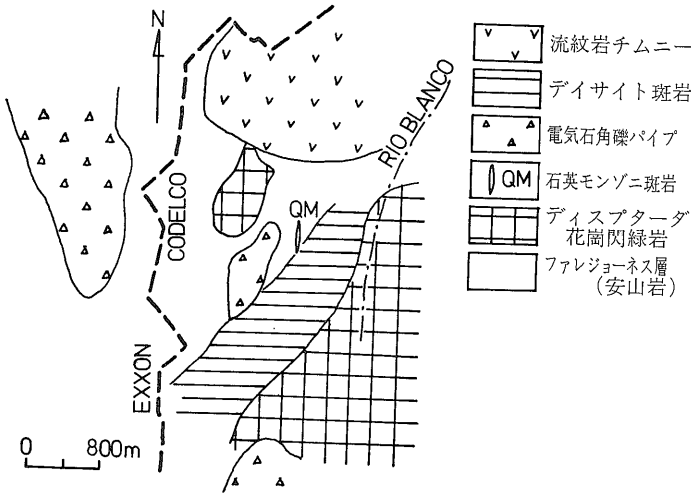
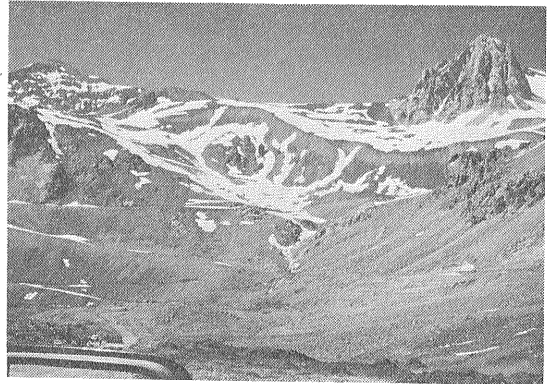


図28 アンディーナ鉱山付近の地質概念図。

図29 アンディーナ鉱山付近の電気石角礫パイプの露頭(中景)。右端のピークは流紋岩プラグ。



7. エル・サルバドール鉱床

7.1 地質のあらまし

エル・サルバドール鉱床については グスタフソンとハント (Gustafson and Hunt, 1975) の詳細な研究がある。この鉱床は 現在南アメリカのポーフィリイ型銅鉱床の中で最も詳しい同位体的研究が行なわれている鉱床なので最後にその紹介をしてみたいと思う。

エル・サルバドール鉱床の鉱化作用は エル・テニエンテやアンディーナ鉱床と異なって 上部白亜紀の安山岩及び堆積岩中に貫入した斑岩類によって生じている。46~50m. y. 前に一連の流紋岩ドーム 石英斑岩の貫入があるが これに伴う鉱化作用は弱い。その後41m. y 前に一連の花崗閃緑岩類の貫入があり これに伴って主要な鉱化作用と変質作用がおきた。更にその後浅性の酸化作用と二次富化作用が重なり 輝銅鉱を中心とする現在の富鉱部が形成された。

花崗閃緑岩類は貫入順に “X” “K” “L” 斑岩と呼ばれ “L” 斑岩が最も大きく 且つ唯一の新鮮な岩石である。初期の主要な鉱化作用は “L” 斑岩の貫入前に終っており 鉱床の全銅量500万トンの3/4がこの時期におちたと言われる。

初期の変質作用はカリウム変質作用で 広範な母岩がカリ長石化 黒雲母化を受けている。この時期の脈を “A” 脈と呼び 石英 パーサイト長石 硬石膏 黄銅鉱 斑銅鉱からなる。鉱化作用は母岩にも鉱染状に及んでいる。

後期の鉱化作用・変質作用は 大量の黄鉄鉱の存在とカリ長石・黒雲母を分解する変質作用で特徴づけられる。この時期の脈を “D” 脈と呼び 硫化鉱物 硬石膏 少量の石英からなり セリサイト (+緑泥石) ハローを持つ。硫化鉱物は主として黄鉄鉱であるが 少量の黄銅鉱 斑銅鉱 硫砒銅鉱 テンナンタイト 閃亜鉛鉱 方鉛鉱を含む。 “D” 脈は初期の鉱化作用のすべての脈と レイタイト (鉱化期後の貫入岩) を除くすべての岩石を切っ



図30 アンディーナ鉱山坑内の電気石角礫パイプ。

いる。

“A”脈と“D”脈の間に漸移期があって この時期の脈を“B”脈と呼び 石英と硬石膏 硫化鉱物からなる。カリ長石は存在せず 輝水鉛鉱と黄銅鉱が特徴的である。“B”脈はレイタイトを除くすべての貫入岩を切っている。

現在の溶脱帯に相当する部分は粘土化帯で パイロフィライトを中心にダイアスポア 明パン石 紅柱石 セリサイトを含む。粘土化帯はすべての変質 鉱化作用のあとに ペブル岩脈を中心に形成されたと思われる。

硬石膏はエル・サルバドール鉱床のすべての鉱化作用の時期に出現する。硬石膏を含む岩石（硫酸塩帯）は透水率がほとんどゼロで 地下水脈の効果的な障壁となる。しかし硫酸塩帯は地下水と徐々に反応してまず石膏となり やがて水に溶解する。従って地下水による二次富化帯の下限は硫酸塩帯の上限に一致する。

7.2 酸素及び水素同位体による研究

熱水と反応した岩石 あるいは熱水から沈澱した鉱物の酸素及び水素同位体組成は 熱水の同位体組成 反応（生成）温度 水／岩石比などによって規制される。そこで熱水変質帯の岩石・鉱物のこれらの同位体組成を測定することによって 熱水の起源や 熱水変質作用のおきた条件などを推定する手懸かりが得られる（地質ニュース 282・285・289号参照）。

シェパードとグスタフソン（Sheppard and Gustafson, 1976）はエル・サルバドール鉱床の初期のカリウム変質 後期の黄鉄鉱—セリサイト変質 末期の粘土化変質を代表する変質鉱物と脈鉱物 更に最後の浅性変質のカオリナイトについて酸素及び水素同位体組成を分析した。その結果を図31に示す。石英の酸素同位体組成は 深成岩の石英のそれとほぼ等しく カリウム変質帯・A脈からD脈に向って次第に重酸素（¹⁸O）に富んでくる。同位体平衡は鉱化作用を受けていない“L”斑岩とカリウム変質を受けた“X”斑岩のみに成りたっていて それぞれの平衡温度は650°Cと525°Cである。後者はカリウム変質における石英—カリ長石—黒雲母の平衡温度を示している。後期の黄鉄鉱—セリサイト変質における石英—セリサイト組合わせは同位体平衡にない。

彼等は同位体平衡温度と他の地質学的証拠（流体包有物充填温度や鉱物組合せ）から推定した温度に基づいて 各変質時期の鉱物と平衡にあった熱水の同位体組成を見積もった。熱水は初期の変質（高温）から後期の変質（低温）へ向って重酸素（¹⁸O）に乏しく 重水素（D）に富むようになる明瞭な経路を示す（図32）。

初期のカリウム変質をもたらした熱水の酸素同位体組

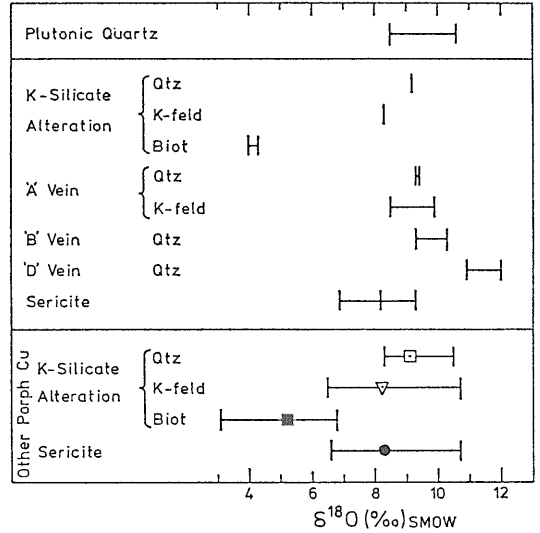


図31 エル・サルバドール鉱床の変質鉱物 脈鉱物の酸素同位体組成 (δ¹⁸O 値)。図の上段は一般の深成岩の石英 下段は他のポーフイリ型銅鉱床の変質鉱物の値を比較のために示す (Sheppard and Gustafson, 1976)。

成は マグマ水のそれとほぼ同じである。しかし水素に関しては鉱化作用を受けていない“L”斑岩の熱水より重水素に富んでいる。このことはマグマ水からカリウム変質の熱水に至る間に 同位体組成が多少変化したかかもしれない事を示唆している。熱水が重水素に富むようになるひとつの可能性としては 系から水素が逃散する際の同位体効果がある。水素の逃散の可能性は 初期の鉱化作用における多量の硫酸塩の存在とも関連づけられる。つまりこの段階では まだ多量の地下水は入ってきていないので 硫黄の酸化は何か他の要因でコントロールされなければならない。それを水素の逃散に求める考え方である。一方 カリウム変質の熱水が相対的に重水素に富むようになるもうひとつの可能性は マグマと遊離流体相の間の同位体分別である。すなわち遊離流体相の水はマグマに比べて重水素に富み マグマから末期に晶出する含水鉱物は重水素に乏しくなる。また他の起源の水との混合の可能性もある。

後期の黄鉄鉱—セリサイト変質 (“D”脈で代表される) をもたらした熱水は 岩石との反応で重酸素に富んだ天水起源の水であろうと彼らは考えている。

粘土化帯は地表近くでの蒸発で動的同位体効果を受けた (図32のslope3) 天水起源の酸性の温泉水から生じたものである。それは ペブル岩脈周辺の粘土化帯の産状とも一致する。

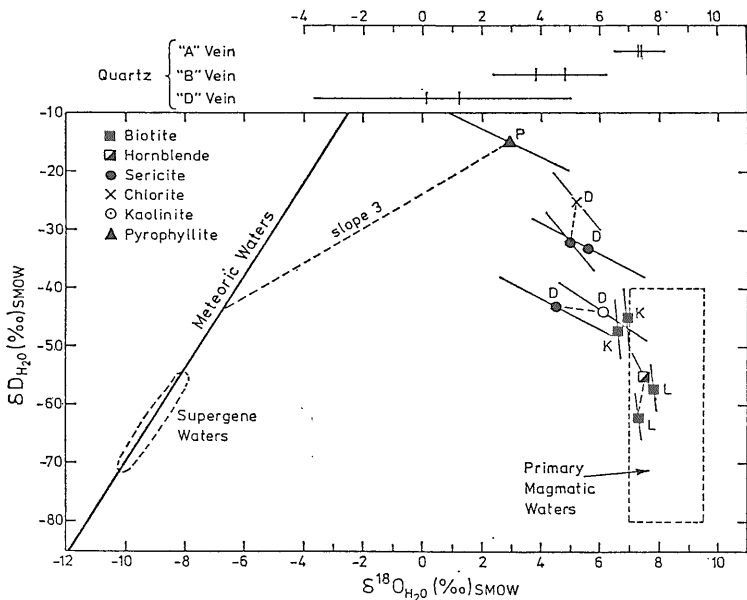


図32 エル・サルバドル鉱床の各変質期の熱水の酸素 ($\delta^{18}\text{O}$) 及び水素 ($\delta^3\text{D}$) 同位体組成 (Sheppard and Gustafson, 1976). L. “L”斑岩 (非変質 マグマ水を示す) K. “K”斑岩 (カリウム変質) D. “D”脈 (セリサイト変質) P. 粘土化帯のピロフィライト. “slope 3”は酸性の熱水の蒸発による動的同位体効果を示す. “Supergene waters” は浅性のカオリナイトを沈澱させた水の同位体組成. 図上部の横線は “A”脈 “B”脈 “D”脈の石英と平衡にあった熱水の酸素同位体組成.

それぞれの時期の熱水の間には多かれ少なかれ混合があって 図32でみられるような重酸素濃度と重水素濃度の連続的変化が生じたのであろう.

上述の後期の変質作用に関与した天水は その後の浅性変質のカオリナイトを沈澱させた天水 (図32の “Supergene Waters”) よりも重水素に富んでいる. これはその後のアンデスの隆起によって 浅性変質の期降水の重水素濃度が低下したためかも知れない.

7.3 硫黄同位体による研究

すでに述べたように チリのポーフィリ型銅鉱床は 鉱化作用のあらゆる時期に硬石膏を多量に生じているのが特徴である. フィールドとグスタフソン (Field and Gustafson, 1976) はエル・サルバドル鉱床の硫化物硫酸塩について 硫黄同位体組成を測定した. その結果 深熱水性硫酸性 (+7.3~+17.3%) は 浅性硫酸塩 (-4.6~+3.6%) や深熱水性硫化物 (-10.1~-0.3%) より ^{34}S に富んでいる. ここでいう深熱水性変質は 初期のカリウム変質と後期のセリサイト変質をさしている. 浅性硫酸塩は 主として深熱水性硫化物の酸化によって生じたものであることがわかる.

深熱水性硫酸塩—硫化物の 同位体平衡温度は $400^\circ\sim 570^\circ\text{C}$ の範囲である. 今一定の同位体組成を持った無限大の硫黄リザーバーから硫酸塩と硫化物が平衡状態で晶出したとすると それらの同位体組成は 溶液中の SO_4^{2-} と H_2S の量比と温度の関数となる. その場合横軸に同位体分別の大きさ (又は温度) をとった時の硫酸塩と硫化

物の同位体組成の外挿上の交点が リザーバーの同位体組成を与えるであろう. 図33は エル・サルバドル鉱床のカリウム帯 (1) とセリサイト変質 (2) における硫酸塩—硫化物硫黄同位体分別 (横軸) と硫黄同位体組成 (縦軸) の相関を示している. この図はエル・サルバドル鉱床において 上述の仮定が成り立っていることを示している. 直線の傾き (上部の硫酸塩と下部の硫化物が補償関係にある) が溶液中の SO_4^{2-} と H_2S の量比を与える. 横軸で $\Delta=0$ となった時直線は交わり この時の縦軸の値がリザーバーの同位体組成である.

図33によれば 初期の硬石膏—黄銅鉱—斑銅鉱組合せは +1.6% の硫黄リザーバーから形成され 後期の硬石膏—黄鉄鉱—黄銅鉱組合せは +6.8% の硫黄リザーバーから形成されたことになる. また初期の硫酸塩/硫化物比は70:30 後期のそれは40:60である.

ところが フィールドとグスタフソンがこの図を描いた後で 黄鉄鉱の分析に問題があることがわかり それを補正すると 初期と後期の硫酸塩—硫化物組合せはほぼ同一の線にのり 硫黄リザーバーの値は +2% になる. この値はマグマの硫黄同位体比に近い. 従ってすべての鉱化作用を通じて深部のマグマが硫黄の供給源でありつづけたことになる.

初期の熱水変質ではカリ長石が斜長石を 又黒雲母が角閃石を置換し はき出されたカルシウムは硬石膏として固定される. この時の f_{O_2} と pH は SO_4^{2-} と H_2S の共存域にある. 後期の熱水変質では pH (と温度) の低

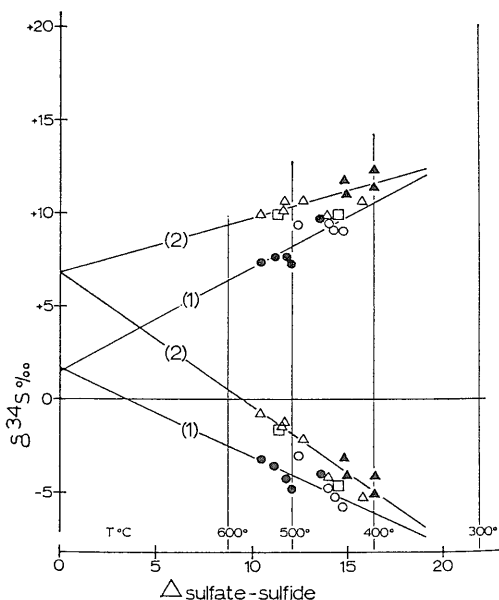


図33 エル・サルパドール鉱床のカリウム帯(1) (丸と四角)とセリサイト変質(2) (三角)における硫酸塩—硫化物硫黄同位体分別(横軸)と硫黄同位体組成(たて軸) (Field and Gustafson, 1976). 上側の(1)(2)が硫酸塩 下側の(1)(2)がそれに対応する硫化物である。硫酸塩と硫化物は一定の硫黄同位体組成を持ったリザバーから温度の低下にしたがって平衡に晶出したことを示している。d=0のときのたて軸がリザバーの組成を与える。

下によりカリ長石が分解してセリサイトが形成されるが SO_4^{2-} と H_2S はやはり共存している。鉱物の酸素及び水素同位体組成によれば セリサイト変質の段階で地下水起源の水が入ってくるが 硫黄の供給源は変化しておらず 溶液の f_{O_2} と pH の変化は バッファーにより内部的に制御されている。しかしこのモデルは多分に同位体組成の結果に依存しており フィールドとグスタフソンの修正前の結果によれば 地下水起源の水の導入とともに 硫黄リザバーの同位体組成も変化するわけで今後のより一層の同位体研究が望まれる。

8. おわりに

チリの四大ポーフィリ型銅鉱床を概観したが この膨大な銅 (およびモリブデン) がどこから来たかは 大きな問題である。すでにみたように ポーフィリ型銅鉱床での銅の濃集は大きく二段階に分けられる。すなわち 初生鉱化作用と二次富化作用である。二次富化作用が 地下水による硫化鉱物の溶脱・再沈澱で銅が濃集する過程であることは 産状からもまた同位体的研究

からも明らかである。二次富化作用が鉱床となるためには 地下水の動きとその後の気候条件が重要な因子となる (口絵写真参照)。しかし 二次富化作用はあくまでその場での銅の再移動であって 初生鉱化作用の銅の濃集がその後の二次富化作用も著しく規制する。

初生鉱化作用の過程のおおまかな図はすでに描かれているが その定量的な解析はまだほとんど行なわれていない。初生鉱化作用のうち かなりの量は後マグマ期の熱水によってもたらされたと思われるが 数千万トンという銅が小さな斑岩株のマグマのみからもたらされたとすると そのマグマは 銅の濃度において大へん異常なものである。なぜ特定の貫入岩が銅に富むのか マグマの初期の銅濃度はどの程度であったか それが流体相に濃集するメカニズムはどのようなものか 天水起源の水が入ってくる熱水期に熱水の循環によって母岩から抽出されてくる銅の量はどのくらいか 今後の解析を待つ問題は多い。

シリトウ (Sillitoe, 1972) は 異常に銅に富む海洋地殻 (塩基性岩と鉱床の両方を含む) の沈み込みが その溶融によってポーフィリ型銅鉱床のマグマを生ぜしめたという可能性を指摘しているが もしそうであれば 海嶺の反対側にも銅に富む海洋地殻が存在する筈である。そのことはまだ検証されていない。しかしながら チリを歩いていると この地域全体の銅のバックグラウンドが異常に高いという実感を持つ。マグマそのものもともと銅に富むのではないかという考えは チリをあとにするすべての地質家の脳裏をかすめるであろう。

主な参考文献

Camus, F. (1975) Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Econ. Geol.*, 70, 1341—1372.

Field, C. W. and Gustafson, L. B. (1976) Sulfur isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.*, 71, 1533—1548.

Gustafson, L. B. and Hunt, J. P. (1975) The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.*, 70, 857—912.

Lowell, J. D. and Guilbert, J. M. (1970) Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, 65, 373—408.

Sheppard, S. M. F. and Gustafson, L. B. (1976) Oxygen and hydrogen isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.*, 71, 1549—1559.

Sillitoe, R. H. (1981) Regional aspects of the Andean porphyry copper belt in Chile and Argentina. *Trans. Inst. Mining metall. (Sec. B)*, 90, B15—B36.