

菱刈鉱山の開発および現況

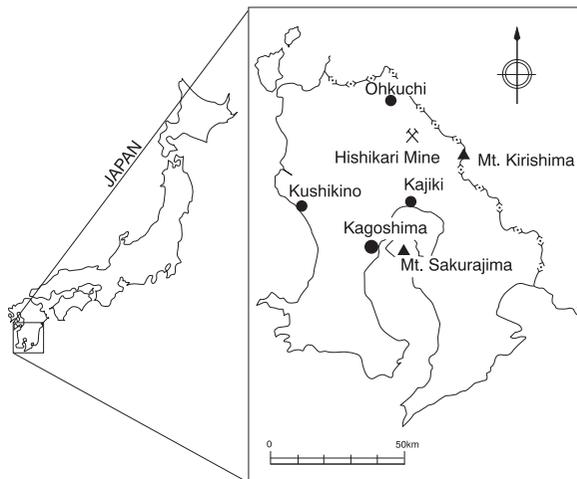
岡田 和也¹⁾

1. 高品位金鉱脈の発見

1.1 探鉱の経緯

菱刈鉱山は、鹿児島市の北東部に位置する(第1図)。「菱刈」の名が文献に登場するのは、平安時代のはじめで、当時の「菱刈」は伊佐地方の総称であった。鎌倉時代に、藤原氏の苗裔に当る菱刈氏が、相良氏と連衡して先着の牛屎氏を駆逐し伊佐郡全体に号令した。戦国時代には菱刈氏と島津氏の間で戦闘が続くが、菱刈氏が島津氏の軍門に下って以降は島津氏の直轄地となった。1871年(明治4年)廃藩置県により鹿児島県に属し、1889年(明治22年)市町村の実施により菱刈村と太良村(後の本城村)が発足した。菱刈村は、1940年の町制の実施と1954年の本城村との合併を経て今日の菱刈町に至っている。「菱刈」の地名の由来は、和名類聚抄に「比志加里」と訓じ「比地菱多ク産セシ故其名ヲ得たり」とある。菱は、水底から茎をのばして夏に葉を水面に放射状にひろげる一年生水草であり、今も貯水池等に自生しているが、明治時代までは川内川流域の低湿地に繁茂しており、その実を食したと伝えられる。

菱刈地域の探鉱の歴史は、1750年代の馬越郷山田金山の試掘まで遡るとされており、その後断続的に小規模な試掘が実施された。1903年頃から山田鉱山の採掘が行われたが、金山整備令(1943年)により中止された。鉱脈は東西走向の3脈からなり、一番坑「盃宗火」は粘土質石英脈で細脈ながらも高品位であった(近藤, 1986)。生産された金量は定かではない。1952年、日ノ出興業(株)が大切坑の取明け、錘押約40mを実施したが、鉱況が悪化し中止した。1969年に布計鉱山(株)が鉱業権を買収したが、その後経営が悪化し、1973年の



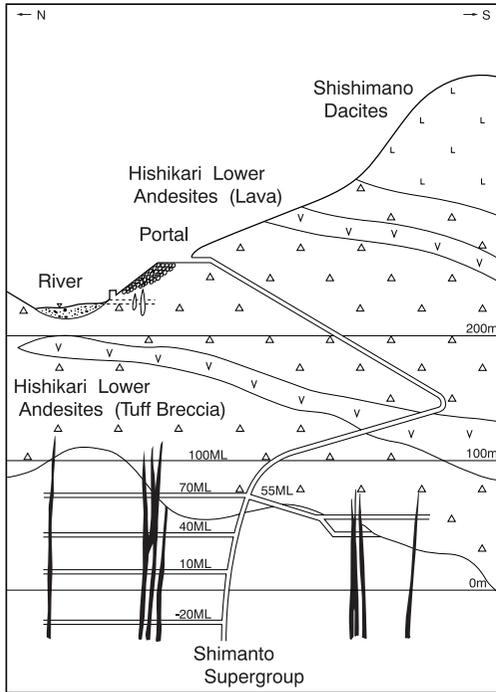
第1図 菱刈鉱山位置図。

同社解散を機に当社の子会社である鯛生鉱業(株)が鉱業権を取得した。1981年に当社が鉱業権を買収し今日に至っている。以上のように、菱刈地域の探鉱には長い歴史があるが、現在開発されている主要な鉱床は、上述の山田鉱山の採掘対象鉱脈より更に地中深くに胚胎する潜頭性のものである。山田鉱山旧坑は、現在採掘中の菱泉脈の上部延長に相当するが、鉱脈として連続してはいない。1981年の鉱床発見は、以下に述べるように、近代的な探査技術を駆使した科学的探鉱の成果である。

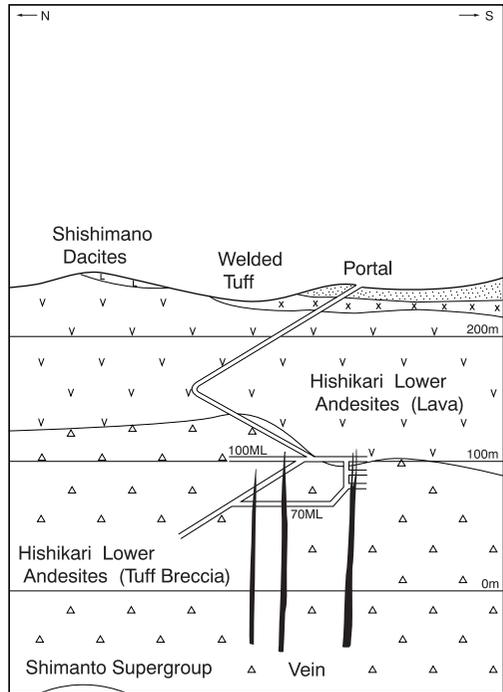
1968年に設立された金鉱業振興協会は、金鉱業緊急合理化5ヶ年計画の一環として金鉱山の基礎的地質鉱床調査を計画した。1975年からは金属鉱業事業団が実施母体となり「北薩地域」の調査を3年間実施した。この背景には、貿易自由化以降の我が国の鉱業の衰退ぶりに対する官民の強い

1) 住友金属鉱山株式会社 資源事業部 技術部

キーワード: 菱刈鉱山, 鹿児島県, 浅熱水性金銀鉱床, 探鉱, 開発



(a) 本鉱床



(b) 山田鉱床

第2図 本鉱床および山田鉱床の地質断面図(模式図)。

危機意識があった。1978年からは調査地域を拡大し、広域調査「北薩・串木野地域」を展開した。対象地域で実施された調査の内容は、地質調査、資源衛星画像の解析、重力探査、電気探査、ヘリコプターによる空中電磁探査、地化学探査等である。北薩地域の主な金鉱床(串木野、山ヶ野、大口など)は、母岩である北薩古期安山岩類の隆起-背斜構造の頂部および翼部に胚胎しており、このような地質構造は、深部の高比重岩層の隆起による高重力異常を示すことが知られていた。また、鉱脈を形成した熱水と岩石との反応により生じた粘土化帯は、電気探査においては低比抵抗異常を示し、近隣の大口鉱山の既知鉱床は低比抵抗異常帯中に存在することが知られていた。上述の調査の結果、菱刈地区に高重力異常帯と低比抵抗異常帯をはじめとする各調査の異常が重なる有望な探鉱対象地域が捕捉された。当該地域において金属鉱業事業団が1980～81年度に実施した3孔の地質構造試錐は、その全てが高品位の含金銀石英脈に着脈した。

金属鉱業事業団の成果を受けて、当社は同事業

団の了解のもとに企業試錐探鉱を実施した。試錐計画は同事業団の試錐結果および旧山田金山旧坑の状況から、走向N70～80° E、垂直～北急傾斜の雁行状含金銀石英脈が賦存するとの推定に基づき立案した。金属鉱業事業団が実施した2孔(間隔400m)を含む走向延長700m間に100m間隔の8断面を設定して、1断面2～3本の傾斜試錐(計18本、6,870.8m)を実施した。その結果、全試錐において高品位の金鉱脈に着脈するという探査史上稀に見る大成果を挙げた。

1.2 地質・鉱床

菱刈地域の地質(阿部ほか, 1986, 茨城・鈴木, 1990, Izawa *et al.*, 1990, 茨城ほか, 1991)は、先新第三系の四万十累層群を基盤とし、これを不整合に覆う第四系の火山岩・火山砕屑岩類および沖積層から成る。第2図に本鉱床および山田鉱床の地質断面図(模式図)を示す。

四万十累層群は、南九州の基盤をなしており、対象地域では頁岩と砂岩およびそれらの互層を主体とする。四万十累層群の露頭は鉱山付近では見

られないが、試錐と坑道探鉱により、海拔0mから130m(地表下の100mから200m)に確認されている。第四紀火山岩は、下位より上位へ菱刈下部安山岩類、黒園山石英安山岩類、菱刈中部安山岩類、獅子間野石英安山岩類および菱刈上部安山岩類である。菱刈下部安山岩類は、火砕岩、凝灰岩、安山岩溶岩を主体とし、四万十累層群を不整合に覆う。探鉱の初期段階では、これらの岩石は、新第三系の北薩古期安山岩類と考えられた。今日の菱刈鉱山発見の端緒となった1980年度の金属鉱業事業団の試錐(55MAHT-5)には、因縁めいたエピソードが残っている。菱刈鉱山発見以前は、北薩地方の四万十累層群は、鉱床形成の観点からは深すぎて鉱床の胚胎母岩とはなり得ないと考えられていた。そのため、55MAHT-5試錐が、四万十累層群に入る手前で孔内事故を起こしたとき、担当した業者は、試錐作業を継続して高品位鉱脈の発達の可能性が低い四万十累層群へ掘り進むのは得策ではないと作業の中止を要請した。しかし、契約深度に達していなかったため続行を命じられ、何とか掘進したところ高品位の金鉱脈に着脈したのである。菱刈鉱床の発見は、上に述べた従来の経験則を覆した。

菱刈鉱床は、浅熱水性の含金銀石英氷長石脈であり、砂岩、頁岩および安山岩類中の割れ目を充填して分布する。推定埋蔵鉱量は、金量250t(本鉱床150t(平均品位60g/t)、山田鉱床50(平均品位25g/t)、山神鉱床50t(平均品位70g/t))である(植野, 1993)。菱刈地域では現在も精力的に探鉱活動を継続しており、埋蔵鉱量については今後さらに増加する可能性がある。

菱刈鉱床の特徴は、以下のように要約されるが、その高い金の濃集が最大の特徴であると言えよう。上記の埋蔵鉱量が、1km×2.3km×150m(深度)というごく狭い地域の中で見つけられたことは、世界的にも注目し値する。

1. 金含有率(金品位)が非常に高い。
2. 鉱脈の生成は約100万年前と新しい。
3. 鉱脈中に温泉を伴っている。
4. 火山岩の他に四万十累層群中にも鉱脈が発達している。
5. 銀含有率よりも金含有率の方が高い(銀の約2倍)。

熱水鉱床の生成には、その名の通り「熱水」が必要である。熱水は温泉水と似ているが、地下深部は高圧であるため温度は100℃以上である点で異なる。このような高温の熱水は周囲の岩石と反応し様々な物質を溶かし込む。金はそのままでは水に溶けないが、熱水中の硫黄と結合して錯体として溶け込み運搬される。熱水が岩石の割れ目を上昇して地表に近づくと、酸化環境、減圧、温度の低下等により、熱水中に溶けていた物質が溶け切れなくなって割れ目の中に沈殿する。こうした沈殿が繰り返され、割れ目が沈殿物により充填されて鉱脈が形成されたと考えられている。

1.3 菱刈鉱床発見の影響

菱刈鉱床の発見およびその鉱業権の帰趨が、社会・経済に与えた影響としては、当時の当社の株価の乱高下が筆頭に挙げられる。本誌に相応しい話題ではないかもしれないが、探査技術者の社会的責任を考える意味でも新鉱床の発見がもたらす社会・経済的影響は興味深い内容であるので、近藤(1993)等を基に、当時の当社をめぐる状況をまとめる。

当社の株(以下、住鉱株)は、1981年9月までは株価200円台で推移していたが、同年9月17日の金属鉱業事業団による菱刈山田地区における高品位金鉱床発見の発表により売買高が急速に膨らみ、10月には500円を突破、1982年1月には600円台、2月末には772円の高値をつけた。日本最後の相場師といわれる是川銀蔵氏の「買い」に対して「在日華僑・香港筋・北浜の有名相場師などの売り」の大仕手戦のピークである。3月15日の株式相場全体の暴落時に408円まで急落したが、3月17日の日本経済新聞朝刊のスクープ記事「平均品位100g/t、鉱量百数十万tが埋蔵され、開発に踏み切る」により住鉱株の買いが殺到、市場は大混乱した。東京証券取引所は、同日後場の住鉱株売買を停止し、当社に事情説明を要請した。同日夕刻、当社は「14本の試錐を終了、結果発表、4本掘進中、坑道探鉱に進むに十分な鉱床規模と評価する」旨の中間発表を行った。以降、住鉱株は、4月9日の1,230円までストップ高を連続した。このような株価暴騰の下、外部の要請もあり、4月23日、当社は探鉱成果として「極めて大胆に推定すれば、金量



第3図 菱刈鉱山(本山坑)全景。

120t, 平均品位80g/t」と発表した。

既述のように、菱刈鉱床は、岩石の割れ目を充填した含金銀石英氷長石脈であるが、この種の鉱床の脈幅や品位は非常に不安定であり、僅か数m離れただけでも大きく変化する。前述の18本の試錐は、100m間隔の8断面を設定して1断面当り2～3本の割合で穿孔した傾斜試錐である。垂直に近い急傾斜の鉱脈を地表から非効果的な傾斜試錐で探鉱するのであるから、この段階では局所的な鉱脈の状態と鉱脈群が賦存する領域の輪郭程度が把握されたに過ぎず、埋蔵鉱量や平均品位の推定には情報量があまりに少なすぎた。しかし、上述のような社会情勢の下、不十分な情報に基づく「極めて大胆」な推定であっても鉱量・品位の推定値を公表すべきと判断したのである。カナダや豪州では「ジュニアカンパニー」と呼ばれる探鉱会社が、株式市場から広く資金を調達しており、それらの探鉱の成否によって当該の株価が乱高下するのは常識であり市場にも理解があるが、我が国ではあまり類例が無く、上述のような大混乱を招いたのであろう。ただ、これほどの社会的なインパクトのある鉱量計算であったが、担当した地質技術者は、推定した莫大な金量の妥当性については、鴻之舞・佐渡との比較から自信をもっており、むしろ平均品位80g/tという常識外れの高品位鉱床を説明する鉱床学的な考察に頭を悩ませたと述懐して

いる。その後の探鉱・開発によって、上記の推定の対象となった鉱脈群の鉱量・品位が明らかになるにつれ、当初の推定値の妥当性が確認された。

2. 鉱山の開発

2.1 基本方針

菱刈鉱山の開発に当っては、下記の基本方針を策定した。

1. 保安衛生は技術である。技術を練磨し保安の質的向上を図りゼロ災害ゼロ疾病の鉱山をつくる。
2. 環境の改善を図り坑内外の環境の違いをなくし、きれいで清潔な鉱山をつくる。
3. 地域の発展に貢献し、鉱害のない鉱山をつくる。

2.2 用地の確保・許認可手続

用地の確保は、鉱山開発の第一段階であるが、鉱山の位置によって立地条件や場所が自ずから決まるので殆ど自由度が無く、特に日本の場合には規制条件が多いので、開発における難題の一つである。菱刈鉱山の周辺は、水田や小高い山が並び民家が点在する典型的な農村地帯であった(第3図)。坑口付近は国有地であり、開発のためには官庁関係の許認可が必要であった。特に土地に関する手続きは複雑であった。貸付申請と保安林解除申請

について大口営林署、熊本営林局、林野庁、菱刈町、県農林事務所、県林務部などと度重なる交渉の末、1981年6月末によく林野庁長官決裁が下りた。その他、鉱山開発に必要な予定敷地として民有地6氏9筆の田畑・山林を買収した。

2.3 環境アセスメント

鉱山開発操業に当たり、第一の命題は「いかに周辺の環境と調和・共存して天与の資源を採掘するか」であった。菱刈鉱山の環境上の特徴から次の2点が大きな課題となった。

1. 金鉱脈中に温泉水が存在するので、採掘のために、この温泉水を安全かつ効率的に取り除き、周辺に影響を与えることなく処理・排水する。
2. 鉱山は農村地帯に隣接するので、鉱山活動が周辺の生活環境に影響を及ぼさないようにする。

これらの課題を達成するため、1981年、環境アセスメントを実施することとした。調査範囲は鉱山周辺の約25km²とし、調査項目は気象、大気、騒音・振動、悪臭、地形・地質、地盤沈下、河川水、河川の水質、温泉、地下水、植物、動物、農業・漁業、景観、人口、産業、文化財、交通の18項目とした。調査には客観的な評価が必要なため、調査を第三者機関に依託した。結果は下記の通りであった。

1. 温泉水は、クリーンで重金属を含まないので、計画通り処理を行えば、環境への影響は殆ど無い。
2. 鉱山周辺の騒音・粉塵・交通対策等も適切な防止対策を取れば問題は無い。
3. 坑内開発による地下水への影響は、地質構造および地下水の賦存状況からして問題無い。

米国で生まれた環境アセスメントの概念を我が国に導入したのは、1976年の川崎市が最初であり、国のレベルでは1984年の閣議決定を受けて実施要綱が定められた。この点でも菱刈鉱山の開発における環境アセスメントの実施は、先進的なものであったと言える。鹿児島大学名誉教授 浦島幸世博士は、講演の中で、菱刈鉱山について「菱刈の金

鉱床の発見は、多くの関係者の理論と技術の成果で、日本の鉱床探査史・金山史における大事件である。いままで金山は鉱脈の見つかった部分から掘り進むのが常であった。鉱床の全体の様子があらかたわかり、環境アセスメントを経て開発に着手する例は、日本の金山としては初めてであろう。」と述べておられる。

2.4 坑外設備

鉱山用地が確保されると、直ちに坑内開発に必要な設備の建設工事が急ピッチで進められた。先ず坑口予定位置周辺の砂防ダムおよび構内道路の建設、用地の造成、坑内開発で排出される研の捨て場所となる第一捨石たい積場の建設に着手した。その後、坑内開発で必要となる電力、圧気設備などが並行して建設された。その他、温泉水揚水設備、温泉水処理施設、坑内に新鮮な空気を供給するための扇風機、作業現場に冷水を供給するための冷却設備およびそのパイプライン等が必要であった。このため、通常の鉱山開発と比較すると、その動力となる電力をはじめ設備投資額が多くなった。施業案等許認可の申請は、1985年末までに150件以上にのぼった。

2.5 斜坑掘進

1.1に述べた試錐探鉱によって、高品位の金鉱脈の存在と同時に鉱脈中に大量の温泉水が存在することが確認された。これに対応するため、鉱山開発は、従来の軌道を敷設する開発運搬方式ではなく、ロード・ホウル・ダンプ(LHD)等の重機類を使用したトラックレス斜坑方式を採用することに決定した。

1982年12月坑口予定位置の法面整形と山腹水路工事を行い、3本の坑道の坑口取付工事を開始した。3本の坑道の内2本は主要運搬斜坑、残りの1本は扇風機取付坑道とした。3坑道ともに坑口より50m間を上り勾配1%でコンクリート巻き立てを施工しながら掘削していった。真冬の雪の降る中、昼夜連続の工事が進められた。斜坑は、通気量の確保と、積載能力13.5tの鉱山用低床式ダンプが通行できるように、高さ3.5m・幅4.4mのアーチ形状で傾斜17%の下り勾配とした(第4図)。

第一・第二斜坑は同時掘進され、100m～200m間隔で目貫(接近した2本の坑道間を結ぶ小坑道)



(a) 斜坑入口



(b) 坑道内

第4図 斜坑入口と坑道内の様子。

によって連絡し、風洞に据えた容量320kw、風量5,000m³/分の扇風機により第一斜坑入気・第二斜坑排気の坑道通気を確保した。また扇風機は坑内火災対策として風向を逆転できる仕様とした。支保は、当初125×125H形鋼のアーチ枠を建て込み矢木・矢板で囲う鋼枠支保を基本としたが、後にNATM工法を取り入れた。NATMとは、ロックボルト(鉄筋等)と吹付コンクリートによって岩盤を補強する工法である。路盤が穿孔水や湧水により泥状になり重機の運行や安全上に問題が生じた箇所については、コンクリート製の床版を敷設することで対応した。

斜坑掘進は、坑口より450m～570mの間は強粘土化帯で粘土の膨張により施枠・路盤が変形するなど難航したが、強粘土化帯を切り抜けて以降はほぼ順調に進み、1984年12月末には第一斜坑1,071.8m、第二斜坑1,028.6mに達した。

2.6 温泉水の制御

菱刈鉱山開発の最大の技術的課題は、鉱脈中に存在する高温の温泉水を安全に抜湯し、周辺的环境に影響を与えることなく処理することであった。温泉水の賦存状況および性質については、探鉱試錐での調査の結果、次の点が明らかにされた。

1. 鉱脈に伴われる温泉水の温度は60℃から65℃で、その水頭は200ML(鉱脈の上限は100～120ML付近)と推測された。
2. 湧湯量は予測困難であり、多量である。
3. 泉質は重炭酸食塩泉であり、炭酸ガスによる配

管の腐蝕とスケール付着の可能性があるものの重金属類を含まずクリーンである。

温泉水は、鉱脈中に存在しているので、鉱脈に到達し採掘をするためには、温泉水位を低下させる必要があった。坑道掘進と温泉水の処理手順は次のように決め実施した。

1. 斜坑掘進に先立ち試錐を行い、湧湯の有無を確認する。
2. 湧湯を確認した場合、グラウト(坑道周辺の岩盤の亀裂にセメント等を注入し出水を止める技術)を実施し坑道内への湧出を防止する。
3. 温泉水位以下に坑道掘削を進め、鉱脈下盤に抜湯基地を設けて鉱脈に向け扇状に抜湯試錐を穿孔し、自然の水位差を利用して試錐孔から温泉水を湧出させる。
4. 抜湯した温泉水はポンプで坑外に揚水する。
5. 排水は冷却後排水基準以下に処理し、専用のパイプラインで河川へ放流する。

他鉱山の例を参考に、6m³/分の処理設備を設けて抜湯を開始したが、温泉水圧は水頭差にして100mと極めて高く、湧湯量は予想を遥かに上回るものであった。このため、処理能力を12m³/分に増加する等の対策を取ったが、後述するように、増大した電力負荷を賄うためには配電線路を含む膨大な設備の拡充が必要であり、初期の探鉱開発は、まさに温泉水との闘いであった。

2.7 湯之尾地区の地盤沈下

1984年8月、菱刈鉱山の開発と同時期に湯之尾地区温泉街で温泉水位の低下および地盤沈下が発生した。同年11月菱刈町は原因究明を目指し、湯之尾地区地盤沈下調査検討委員会を発足させた。委員会は、久保町長(当時)の他、大学の学識経験者、建設省、当社で構成され、原因に関する精細な調査が進められた。翌年5月に「湯之尾地区の極めて特異な複合災害であり、この地区の地質構造の特異性、変質シラス、局所的な地下空洞、大量の降雨、地元の温泉汲み上げと共に菱刈鉱山の抜湯も影響を与えている可能性がある」という調査結果が出された。

当社は、長期にわたり鉱山事業を営むためには地域社会との友好と信頼関係の確保が極めて重要な前提条件であるという基本方針から、被災者の方々が困窮されている現実を前にして、速やかな復旧救済に積極的に協力すべきであると考え、地盤沈下の原因の究明を待たずに、県や町の指導の下、救済基金を町に寄付することとした。また、温泉水の枯渇に対しては給湯を目的として1984年12月、町と当社が共同出資し第3セクター方式の菱刈泉熱開発株式会社(現在の菱刈泉熱開発有限会社)を設立した。坑内から汲み上げた温泉水の3m³/分を湯之尾温泉街まで給湯するため、約6kmのパイプラインを敷設し、途中の山田地区等に中継タンクを設けた。工事は順調に進み、1985年7月に給湯を開始した。これら一切の設備は当社が設置し菱刈町に寄付した。

復旧救済事業が行われる一方で、事態発生から継続して動態観察が実施されたが、地盤沈下も沈静化し、復旧救済事業もほぼ終了してきた。菱刈町は、2001年度に設置した湯之尾地区地盤沈下現況検討委員会の「変質シラスが分布する範囲以外については、地盤沈下は収束していると判断する」旨の最終報告を受け、事態の収束を宣言した(菱刈町議会、2003)。

3. 安定操業の確立

初期開発が一段落し、安定操業へ向けての基盤固めが進められた。基本方針は、①保安の確保、②効率的操業、③技術の向上、④地元との融和で

ある。

3.1 保安管理体制の強化

保安衛生活動については、1983年2月に保安衛生委員会を発足させ、労使および協力会社が一体となった保安衛生管理体制を確立した。1983年11月には坑内での緊急時に対応すべく救護隊を編成した。保安活動は1985年に開始した危険予知活動を基本としている。現在の課題は、採鉱切羽の増加や機械化が進んだために、坑内における作業員の単独作業が増加していることである。その対策として、単独作業現場における危険予知の徹底、PHSを利用した坑内無線を導入して相互連絡体制の強化を進めている。また、ロックボルトや足場専用車等を導入して機械化を図ることで作業の安全確保に努めている。

3.2 主要設備の増強

鉱床の規模と鉱量の把握が進み将来の操業体制が明確になるのに伴い、安定操業に必要な主要設備の増強工事が進められた。

電力については、開発当初、使用電力1,500kwの計画で山元に変電設備を設け地域の電源系統から電圧6.6kvで受電した。その後、予想を上回る坑内湧水量の増加等により使用電力量が増加し、周辺地域に電圧降下の影響が発生し始めたため、九州電力(株)大口変電所から線路長約13kmの専用配電線路を設置し、応急の対応策とした。しかし、開発が進むにつれて負荷設備容量の増大が続く、これらの問題を抜本的に解決するために九州電力(株)と度重なる協議の上、特別高圧変電所(電圧66kv×2回線)を設置することになった。工事には送電線経過地の調査、用地交渉および1,200m²の国有保安林解除の手続等を含め約3年の期間を必要とした。その間坑内開発の動力源に支障をきたすわけにはいかないので、電圧変動対策としてサイリスター型無効電力補償装置(TQC)を導入した。特高変電設備の工事は順調に進み、1986年10月に受電を開始した。

坑内環境については、開発期間中から高温湧水や高い岩盤温度による坑内温度の上昇が作業の妨げとなっており、保安の確保や生産性向上のためには抜本的な対策として大量通気と切羽冷却が必

要であった。開発当初は、第一斜坑を入気として第二斜坑に容量5,000m³/分の排気用扇風機を設置する中央式通気系統を採用し、排気系統に熱発生源である抜湯基地、揚湯配管を配置した。しかし、開発の進捗に伴う坑内作業範囲の拡大や予想以上の湧湯量によって坑内発生熱量が増加し、坑内環境が悪化してきたため、本鉱床西端に直径4mの排気専用立坑を開削し、容量10,000m³/分の主要扇風機を設置する対偶式通気系統に変更して通気量を倍増した。同時に、揚湯配管専用立坑を設け、抜湯基地および揚湯配管系統からの発生熱が作業場へ流入しないような坑内構造とした。さらに、坑内冷却のための冷水供給能力を強化するとともに、閉回路方式による給水・返水システムを構築し、夏期取水量が制限される場合にも坑内環境を維持できるようにした。これら一連の坑内環境改善の結果、ほぼ全ての切羽でエンタルピー21kcal/kg(乾・湿球温度28℃に相当)以下を維持できるようになった。

揚排水設備については、1984年4月から本格的な抜湯を開始して約半年後に発生した揚湯パイプやポンプの腐食現象およびスケールの付着が問題となった。総延長9,000mの揚水パイプに関わる問題だけに早急な対策が必要であった。調査の結果、加圧下にある温泉水がポンプ室等で逐次開放されるにつれ放出するCO₂が炭酸ガス腐食およびスケールの原因であると考えられた。腐食対策として、ポンプのケーシングおよび仕切板には13Cr鋼を、新設するパイプには2Cr-N6鋼パイプを使用した。また、温泉水を流送中に大気に接触しないようポンプの流出口を水面下にしたり、パイプのスケール除去として定期的にピグ流送を行うことで解決した。温泉水位を低下させるため抜湯基地を逐次100ML、70ML、40ML、10MLに設けてきたが、最終の抜湯用基地となる-50MLポンプ室を1990年4月に完成させ、排水および第3セクター菱刈泉熱開発(有)への給湯を安定して実施できるようになった。この設備は、スケール対策の他に安全策として温泉水ラインの出口に緊急遮断装置を設置し、さらにポンプ室下部に容量700m³の非常用バックを設置するというものであった。

4. 山田鉱床の開発

本鉱床の西南1.2km付近の菱刈町山田地区において、1987年～1988年に地表からの試錐探鉱を実施した結果、含金銀石英脈群が発見され、菱刈鉱山山田鉱床と命名された。鉱床の規模は、鉱量約200万t、平均品位Au20～25g/t、金量40～50tと推定された。山田鉱床は、本鉱床に比べて、品位が低く、広範囲に多数の石英脈が存在する大規模鉱床であり、岩盤温度が高いという特徴がある。

山田鉱床の鉱脈群(現在の稼行対象部)の母岩は、菱刈下部安山岩類のみであり、四万十累層群を主要な母岩とする本鉱床・山神鉱床とは異なる。菱刈下部安山岩類は、全体に熱水変質作用を受け、粘土化している。また菱刈下部安山岩類上部の堆積岩中には珪質シンターが認められ、その上位の加久藤溶結凝灰岩下部の境界付近にも変質作用がおよんでいる。

山田鉱床は本鉱床に比べて低品位なので、単独の開発よりも本鉱床と合わせて開発することが菱刈鉱山全体の資源の有効活用に結びつく判断して開発を決定した。本鉱床より岩盤温度が高いと予想されたので、予め主要通気を確保するルートを開内につくり、その後、立入・下盤坑道を掘進した。また、掘進にあたっては、油圧ジャンボ・20tトラック等を導入して機械化を推進した。山田斜坑の掘進は、同斜坑の坑口と本山坑の40MLからとの双方から行い、1990年12月に貫通した。引き続き70、100MLの開発を進め、1991年2月に着脈、5月に出鉱開始となった。

5. 山神鉱床の開発

山神鉱床は、本鉱床の南東約300～500mに位置し、山神社の直下に存在することから山神鉱床と命名された。本鉱床の開発と並行して実施した坑内試錐探鉱によって鉱脈の概要を把握した後、1991年度上期から錘押坑道探鉱を55MLで開始した。山神鉱床の地質は、本鉱床と同様に四万十累層群とその上位の菱刈下部安山岩類からなり、これら両層中に胚胎されている。四万十累層群と菱刈下部安山岩類との南西側境界面(不整合面)付近には、層厚10～20mの粘土化帯が分布し、鉱脈

の発達規制されている。本鉱床同様、高品位を特徴としており、北東部では水平長7～8mにわたるストックワーク帯（網状脈）の形成も認められる。エレクトラムの粒径は、本鉱床・山田鉱床より大きく（平均25～35 μm ）、最大70 μm に達するものもある。1991年2月に掘進を開始し同年5月末には着脈した。これと並行して南東部に向け立入の掘進を行い、東部通気立坑を開削し山神鉱床開発時の通気を確保した。鉱況は、概して予想以上に良く、富鉱帯は隣接する網状脈も含めると15mをこえる幅広脈になっており、今後の採掘方法が検討課題となっている。

6. 菱刈鉱山の現況

初出鉱から18年経過し、菱刈鉱山の累計産金量は2003年7月には130tを超えた。この間、1996年1月には鴻之舞鉱山の56年間の産金量73tを超え、1997年5月には佐渡金山が約380年間で産出した産金量83tを僅か11年10ヶ月という短期間で超え、名実ともに日本一の金鉱山となり、今もその記録を更新中である。2002年12月には開山20周年記念を迎え、菱刈鉱山もすでに幼年期から青年期に入ったと言える。年間出鉱量は、当初5万tで計画されたが、①探鉱の結果、隣接する山田・山神鉱床で多くの鉱量を獲得したこと、②これらの開発は既存設備を利用することで投資額を抑制できること、③東予製錬所の銅精鉱増熔に伴う必要珪酸鉱量と合致すること等の理由により、1992年10月までに年産15万tの増産体制へ移行した。現在は、安定操業に向け、生産産金量を年間7.5tとして出鉱量増・出鉱品位減をはかっており、2002年度末で出鉱量18万tの増産体制を達成した。今後は、山田鉱床からの出鉱量比率を高め、本山坑からの出鉱を減らし、極力本鉱床高品位鉱画の温存をはかり、長期安定操業の継続を目指している。

鉱山の長期安定操業には、安全で鉱害の無い鉱山経営が不可欠であり、菱刈鉱山においては、労働安全衛生と環境の両面を継続的に管理・改善していくシステムの構築に取り組んでいる。1999年から環境マネジメント・システムの構築に着手し、2000年に国際規格であるISO14001の認証を取得した。2001年には、菱刈鉱山の操業に直接的に係

わる関係会社にまで認証範囲を拡張して現在に至っている。労働安全衛生については、2002年に労働安全マネジメントシステムOHSAS18001の認証を取得した。

7. 菱刈鉱山の開発を契機にした技術開発

住友金属鉱山株式会社の歴史は、1691年の別子銅山の稼行に始まり、長期にわたって我が国の資源供給に貢献してきた。海外への進出も早く、1961年のベスレヘム銅山（加）開発への投融資を始めとして、リオ・ブランコ銅山（チリ）、グラナイル銅山（加）、ニューインペリアル銅山（加）への融資、投融資を実施した他、ウェスタン・マイニング社（豪）とニッケル・マットの長期買鉱契約を締結した。しかし、1973年に別子、鴻之舞の両鉱山を、1979年に佐々連鉱山を閉山した時点で、創業以来初めて国内の直轄操業鉱山が皆無という時期を経験することになった。当社の資源事業に大きな空洞が生じたことは言うまでもない。資源部門の体制は大幅に縮小せざるを得ず、1972年4月当時1,360名の人員は、1975年4月560名、1980年4月には260名へと縮減された。

上述のような資源事業における危機的な状況の下、多年営々として蓄積してきた鉱山技術と技能を次の転機に備えて蓄積するために様々な方策が講じられた。採石事業や土木建設事業への進出、海外派遣者の増員や社内外各部門への出向派遣先の開拓などに積極的に努力した。探査技術者については、海外における自主探鉱や共同探鉱に参加することによって技術力のある程度維持することができたものの、菱刈鉱山の発見・開発が無ければ、脈々と受け継がれてきた鉱山技術は断絶してしまった可能性が高い。本節では、菱刈鉱山の探査・採鉱において開発、導入した各種技術について述べる。

7.1 採鉱技術

採鉱法の開発にあたっては、重機類を利用して鉱石を完全に採掘することと、採掘跡の空洞を充填して岩盤を保持することを原則として、当鉱山に適する採鉱法を開発してきた。本山坑において最初に採用した採鉱法は下向充填採鉱法であった。

下向充填採鉱法には、鉱石を全量回収可能で、分岐脈に柔軟に対応できる等の長所があるものの、生産性が低いという欠点があった。このため、上向充填採鉱法であるSS (Slice Slitting) 法、BS (Bench Stopping) 法、DS (Double Slicing) 法等の採鉱試験を実施し、最適な採鉱法を確立してきた。

SS法はサブレベル採鉱法を小規模化した採鉱法であり、下向充填採鉱法に比べて、低コストで能率が高く研混入率が低いという長所がある。レベル間隔15mの上下鍾押坑道（すげおしこうだ）の中間に新たに坑道を開削し、その上下3.75mの鉱石をスリット状に抜き取ることから名付けられた。鉱石の回収には、遠隔操作が可能なLHDを導入し、危険な作業領域に作業員が立ち入ることを不要にして安全性と生産性を向上させた。さらにその後、幅広脈を対象に走行方向に数回に分割するDS法、比較的膨縮が少ない細脈を対象に、上下鍾押坑道間(11.25m～16.25m)の鉱画を一度に起砕するBS法を確立した。現在は、採掘する幅および高さをさらに拡張したSublevel Open Stopping法の試験を実施し、生産性の向上を図っている。

採鉱法の大型化を進める過程では、穿孔パターン、爆薬、装薬・発破法、充填材料・方法等の技術改善、ならびに海外製の高性能長孔穿孔機、大容量バケット搭載LHDの導入等、様々な側面から地道な取組みにより作業の効率化を図ってきた(第5図)。最近においては初期発破自由面の開削にレイズボラーを使用しさらに効率化を進めている。また作業効率の向上とともに高性能重機の整備技術も向上させてきた。

採鉱の大型化に際しては、採掘後の空洞の安定性が懸念されるが、これについては、岩盤応力測定、数値解析による採掘領域の適正化、および支保材、充填材の評価等を行ない、保安の確保を大前提として進めている。正確な鉱量、品位の推定、採掘計画、採掘量の計算には、世界の多くの鉱山で使用されている鉱床評価ソフトウェア、空洞計測装置等を活用し、効率的な生産管理を実行している。一方、採鉱技術の向上と並んで重要な事項である良好な作業環境の確保についても、重機排ガス、熱環境、粉塵等の対策に多大な力を注ぎ技術を向上させてきた。

以上のように菱刈鉱山で培ってきた採鉱技術は



(a) 1ブーム・ドリル・ジャンボ。鍾押坑道の掘進発破のために穿孔している様子。



(b) 15t ダンプ・トラック。



(c) ロード・ホウル・ダンプ。

第5図 菱刈鉱山で使用している重機類。

世界に誇れるものであり、マイニングエンジニアの育成を含め、今後海外で鉱山開発を展開していく上での貴重な財産となっている。

7.2 探査技術

菱刈地域の採鉱において導入し培った新たな探査技術としては、各種の物理探査法が筆頭に挙

げられる。物理探査は、目に見えず手の届かない地中を様々な物理現象を利用して探索する技術であり、鉱床の発見および以降の開発において重要な役割を果たした。さらに、周辺地域の探鉱および同種の鉱床に対する適用性の評価を行うために、各種の新しい物理探査法を導入し、ケース・スタディとして菱刈地域で実施した。試験的に実施した手法には、金属資源探査を目的とした物理探査法としては我が国で初めて実施したものも含まれる。ケース・スタディの結果は、以下のように要約できる(川崎ほか, 1986, 汐川ほか, 1992, 岡田, 1999)。

1. 高重力異常は、標高130mまで盛り上がった基盤(密度差 $0.2\sim 0.25\text{g/cm}^3$)と解釈された。この地下構造は、火山活動に関連した基盤の局所的なドーム形成であると解釈された。重力調査は、探鉱の初期段階において、金鉱化の可能性の高い地域を抽出する際の強力なツールとなりうる。基盤のドーム形成が裂隙を引き起こす可能性があるので、局所的な高重力異常は、探鉱上注目すべき指標である。
2. 対象地域の比抵抗断面は、以下の三層構造によって特徴づけられる。
 - (a) 未変質の火山岩類に対応する高比抵抗(100～1,000 Ωm)の最上層
 - (b) 変質した火山岩類に対応する低比抵抗(3～8 Ωm)の中間層
 - (c) 基盤岩または岩相の異なる火山岩類に対応する高比抵抗(80～200 Ωm)の最下層
 比抵抗マッピングと直流法および電磁法を含む比抵抗垂直探査は、岩相および地質構造を把握する上で非常に重要である。
3. 低比抵抗帯中のIP異常(高チャージャビリティ異常)は、鉱化帯を探査する上で最も重要な指標である。IP異常の原因については、なお議論の余地があるが、対象地域のIP異常は、地中に存在する導電率の高い熱水が関係して引き起こされた現象であると考えるのが最も合理的である。

金属資源探査の対象が潜頭鉱床を中心とする中で、新規の探鉱における物理探査の重要性は益々高くなってきており、菱刈地域の探鉱で得られた知

見は、その後の国内外の探鉱に活かされている。後述するポゴ金鉱床の探鉱においても、空中電磁、空中磁気、CSAMT、IP等の各種物理探査法を駆使している。

8. おわりに - 「菱刈」以降 -

自社鉱山を有することは、自社製錬所への原料の長期安定供給源を確保できるのと同時に、金属価格の上昇による利益を直接享受できるという大きな利点がある。当社は、菱刈鉱山の操業を開始して以降、米国最大の産銅会社であるフェルプス・ドッジ社のモレンシ銅山(米)へ資本参加した。この資金調達の一部には、菱刈鉱山の金の先売りを利用した。これは、ゴールド・ローンと呼ばれる資金調達法であり、貴金属ディーラーから比較的低价で金を借り、これをスポット市場で売り資金を得、決済には鉱山から産出した金の現物を充てるという鉱山会社など金を実際に扱う業者にのみ可能な方法である。モレンシ銅山への参入は成功し、その後、同じくフェルプス・ドッジ社のラ・カンデラリア銅山(チリ)開発、PT INCO社(インドネシア, Ni)への資本参加、バランド社(ニューカレドニア, Ni)への資本参加、ノースパークス銅山(豪)、パツ・ヒジャウ銅山(インドネシア)への資本参加など、大型プロジェクトを次々に成功させることができた。これらのプロジェクトへの参入と成功は、菱刈鉱山の成功を契機に生まれた種が、新たな成功に繋がりを、さらに新たな種が生まれるという連鎖として捉えることができる。この点でも菱刈鉱山の成功がもたらした影響は計り知れないほど大きい。

現在、当社は、米国アラスカ州においてポゴ金鉱床を開発中である。同鉱床は、1991年に開始したグラスルーツ探鉱(初期段階の基礎調査から始める探鉱)で発見した大規模潜頭鉱床である(高岡ほか, 1999)。当社にとっては、マジョリティ権益を有する海外鉱山の開発は初めての経験であり、国内の菱刈鉱山、新居浜研究所で培った技術(探鉱、採鉱、選鉱他)を活かしながら、アラスカの自然環境に調和した鉱山開発を目指し、2005年末の生産開始を計画している。厳寒の下、移手段はヘリコプターのみの過酷な探鉱作業、合弁事業のパートナーの撤退、水平に近い緩い傾斜をもつ特

異な形状の金鉱床の発見など、語るべき話題に尽きない探鉱プロジェクトであったが、これも菱刈に続くモレンシでの成功があったからこそ実施できたプロジェクトである。同プロジェクトは、探鉱段階から開発段階へ進み、開発のために必要な環境許可の取得に向けて努力しているが、それらを担う若手技術者は菱刈鉱山で学び巣立った者たちである。教育の場として自社鉱山をもつことの重要性が改めて認識される。我が国では、昨今、大学教育においても資源系の講座・研究室が減少しており、実地に現場における業務を学習できる鉱山も数少なくなっている。一方、海外に目を向ければ、非鉄業界の動向は、各社の生産ラインの合理化・統合あるいは縮小による企業体質の強化と、非鉄メジャー各社を中心とした「食うか食われるか」と形容すべき企業買収・合併による熾烈な再編、寡占化で特徴付けられる。我が国最大の金山である菱刈鉱山も、いずれは終掘、閉山の日が来るであろう。しかし、当社が、上述のような環境下で国際競争を戦い、資源供給という社会的な責任を果たしていくためにも、菱刈鉱山がもつ鉱山技術開発・人材育成の場としての意義を十分に活かし、世界に通用する技術者を育成していかなければならないと考える。

参 考 文 献

- 阿部一郎・鈴木英雄・磯上篤生・後藤寿幸(1986)：菱刈鉱山の地質と探鉱開発，*鉱山地質*, 36, 2, 117-130.
- 菱刈町議会(2003)：ひしかり議会だより, 第60号, 6.
- 茨城謙三・鈴木良一(1990)：菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について，*鉱山地質*, 40, 2, 97-106.
- 茨城謙三・鈴木良一・福田英一(1991)：菱刈鉱山本鉱床と山田鉱床の微量成分，*鉱山地質*, 41, 2, 63-75.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaraki, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, K., Koga, A. and Taguchi, S. (1990) : The Hishikari Gold Deposit: High-grade Epithermal Veins in Quaternary Volcanics of Southern Kyushu, Japan, *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 1-56.
- 川崎 潔・岡田和也・窪田 亮(1986)：菱刈鉱山における物理探査，*鉱山地質*, 36, 2, 137-147.
- 近藤皓二(1986)：菱刈鉱山の探鉱開発について，*鉱山地質*, 36, 1, 1-9.
- 近藤皓二(1993)：菱刈鉱山開発余録，住友金属鉱山株式会社 社内報「いぶき」, No.311-319.
- 岡田和也(1999)：金属資源の探査-菱刈鉱山，物理探査ハンドブック 第6巻, 1018-1024, 物理探査学会.
- 汐川雄一・岡田和也・窪田 亮・川崎 潔(1992)：MT法による菱刈鉱山本鉱床地域の深部構造調査，*資源地質*, 42, 2, 73-84.
- 高岡秀俊・阿部一郎・村上尚義(1999)：アラスカ州ストーンボーイ地域ポゴ地区における金鉱床の発見について，*資源地質*, 49, 2, 125-145.
- 植野泰治(1993)：菱刈鉱山の効率的開発・操業，*資源と素材*, 109, 575-580.
-
- OKADA Kazuya (2004) : Exploration and development of Hishikari mine.

<受付：2004年7月12日>