

深部地下資源に関する未来技術

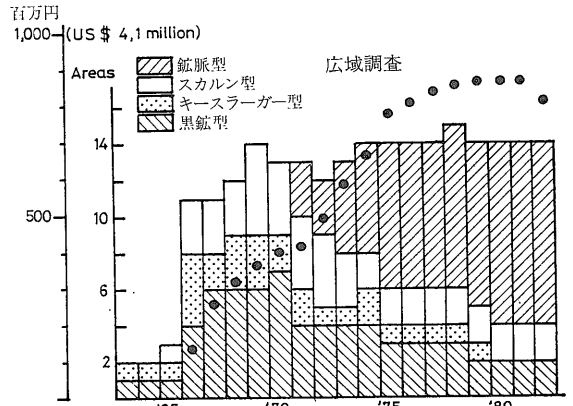
武内 寿久 氏 (東京大学工学部)
Sukune TAKENOUI

本日は深部地下資源 特に金属資源を主体に それを開発するためには今後どのような技術を考えてらよいか私見を述べ御批判をいただきたいと思ひます。

過去20年間に日本国内で行われました金属資源の探査は三段階法と称し 金属鉱業事業団が主体となり費用の全額を国の補助金でまかなう広域調査 費用の一部を企業が負担する精密調査および企業が行う探鉱の3種が主要な部分を占めております。 広域調査の年間経費は最近は大抵10億円位になっています。 調査対象の鉱床型は黒鉱床 スカルン鉱床 キースラーガー型鉱床などもありましたが 最近では 鉱脈型鉱床の比率が高くなっております (第1図)。 広域調査で有望地域が選出されますと精密調査が実施され 必要によっては地質構造調査のための坑道や立坑も掘削されます。 精密調査で有望な鉱床が補捉されますと その後は企業が鉱量確認の探鉱を進めます。 企業探鉱には政府からの融資もありますが 金属鉱業界の活動の低迷を反映してここ10年程の融資額は伸び悩んでおります。

わが国には これまで鉱山として稼行された深さよりも深い所に鉱床はないのでしょうか? あるとすればどのような鉱床が存在するのでしょうか? 斑岩銅鉱床を例にとって考えてみます。 斑岩銅鉱床は現在の世界の銅資源の数十%を供給しており ペルー チリ 米国西部 カナダ等に多数分布しております。 また フィリピンからパプア・ニューギニア ソロモン諸島にかけさらにパキスタン・イランからブルガリア・ユーゴスラビア・ルーマニアにかけても分布しております。 これらの鉱床はおもに中生代末から新第三紀にかけて生成したものです。 南西太平洋地域の鉱床のなかには約100万年前に生成した極めて若い年代のものもあります。 しかし 日本列島にはこれまでのところ大規模な斑岩銅鉱床は一つも発見されていません。 これは 何らかの地質学的理由により日本には本当にこの型の鉱床がないのかあるいは我々金属資源探査関係者が怠慢で鉱床は存在するがまだ発見されていないのか のどちらかなのでしょうか? 結論は得られておりません。

SILLITOE (1973) の提唱した斑岩銅鉱床モデルは 南米アンデス山脈に沿って分布する鉱床の調査結果からまとめあげられたものですが それによりますと 成層火



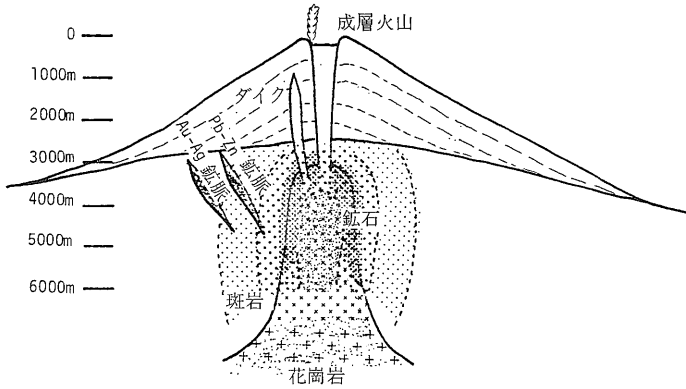
第1図 広域調査地域の鉱床型と年間調査補助金額の推移 (金属鉱業事業団, 1982)

山を形成したマグマ溜りの頭の部分に斑岩銅鉱床が形成されているということです (第2図)。 日本には多くの成層火山がありますが それらの深部に鉱床があるかどうか検討してみる価値があるのではないのでしょうか。

しかし 阿蘇山のような大きなカルデラを形成した火山では鉱化流体となる水を含んだマグマが大量に放出されてしまうため鉱床は形成されていないとの考えもあります (SILLITOE, 1980)。 米国においては斑岩銅鉱床の上部に発達する大規模な熱水変質帯の研究が行われており 下部にあるべき未発見鉱床との関連が議論されております。

斑岩モリブデン鉱床ですが 既知鉱体の下部に新鉱体が発見された例があります。 米国のロッキー山脈中のユラッド斑岩型モリブデン鉱床はかつて鉱量1200万トンくらいのもっと大きくない鉱体でしたが 斑岩型鉱床のモデルに基づき作業仮説をたて詳細な地質調査を行って1000m以上の深い試錐により既知鉱体の下900~1000mの所にヘンダーソンと呼ぶ鉱量約3億トンの新鉱体を発見しております (第3図)。 既知鉱床の断層によって転位した部分を深部に発見した例は斑岩銅鉱床にも若干ありますが ヘンダーソンのように全く新しい鉱体を深部に発見した例は 参考になる点が多いと思ひます。

斑岩銅鉱床には 第4図に示すように鉱体中心から外側に向かってカリ帯 (熱水から生成したカリ長石や黒雲母を



第2図 斑岩銅鉱床の生成環境モデル (SILLITOE, 1973).

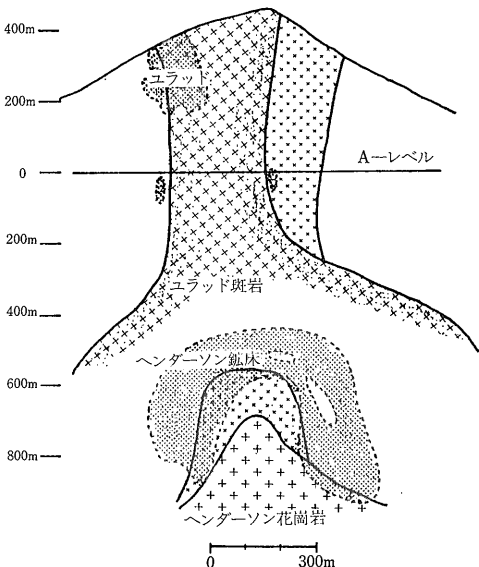
伴う) フィリック帯(絹雲母・石英を伴う) 粘土化帯(カオリンを伴う) およびプロピリティック帯(緑泥石・緑れん石を伴う)の母岩の変質帯が形成されています。これは模式的帯状分布であり またカリ帯—プロピリティック帯とフィリック帯—粘土化帯のペアが重複しているとの見解もあります。しかし いずれにしても母岩の変質帯の分布が鉱床探査の重要な指針であることには変わりありません。

変質帯中の透明鉱物を顕微鏡で観察しますと 結晶中に径1~30 μ m程度の微小空洞があり その中に流体がとりこまれた流体包有物が認められます。流体包有物は結晶が晶出している時の周囲の流体をとりこんだもの

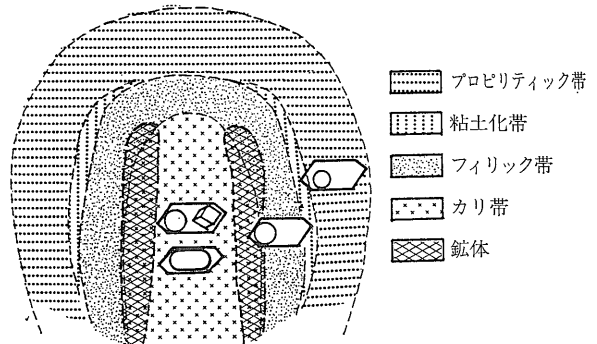
や 結晶の晶出後に作用した流体をとりこんだものがありますので これを調べることでより地殻中の流体の諸条件を推定することができます。流体包有物を加熱しながら顕微鏡で観察し 液相が膨張して包有物が液相で占められる均質化温度を測定することにより 鉱物の生成温度が推定できます。流体包有物を一度凍結させた後液相中の氷の溶解温度を測定することにより 氷点降下の値から液相の塩濃度を推定することができます。沸とうしている熱水が包有されると 一群の包有物のなかに包有物の容積に対し気相容積比の大きい包有物(気相包有物)と小さい包有物(液相包有物)が共存しているのが観察され

ますが この種の包有物については均質化温度を測定しますと結晶生成時の圧力も一義的に決定できます。また 流体包有物の内容を抽出して 水の安定同位体組成 塩類組成やガス組成の分析を行うこともできます(第5図)。斑岩銅鉱床では流体包有物の性質についても帯状分布が認められております。

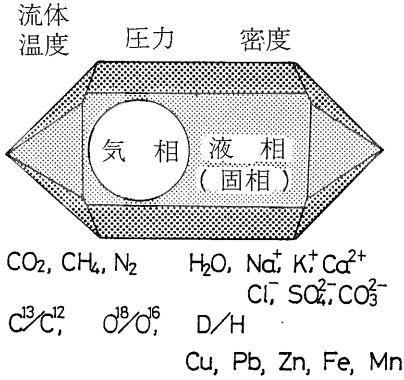
斑岩銅鉱床の鉱体中央の流体包有物には熱水の沸騰を示す産状が認められ 均質化温度は400~500 $^{\circ}$ Cと高く塩濃度が40~50%と高いものがしばしば観察されます。鉱体の外側の包有物では温度 塩濃度も低くなります(第4図)。包有物中の水の安定同位体組成をみますと 鉱体中央ではマグマから放出された水の割合が高いことを示す重い水であり 鉱体の外側では循環地下水の関与が大きいことを示す軽い水が測定されておりますが 斑岩銅鉱床の高品位部は 温度・塩濃度が高く重い水の帯と温度・塩濃度が低く軽い水の帯の間に発達していると報告されています。第6図には比較のため斑岩銅鉱床以外の鉱床型の包有物のデータも示してありますが 深熱水成脈銅鉱床では温度250~350 $^{\circ}$ C 塩濃度5~15%の



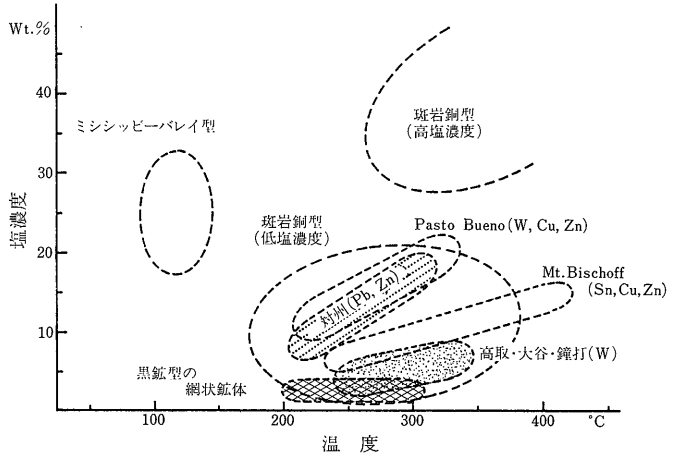
第3図 米国コロラド州の Urad-Henderson 斑岩モリブデン鉱床 (HOLLISTER, 1978).



第4図 斑岩銅鉱床の母岩変質の帯状分布と各帯の流体包有物の産状。



第5図 流体包有物から得られる地殻中の流体に関する各種の情報.



第6図 各種鉱床の流体包有物の均質化温度と塩濃度.

範囲に 重要な鉛・亜鉛資源であるミシシッピーバレイ型鉱床では温度は150°C以下で塩濃度が20~30%の範囲に分布し 鉱床型による鉱化流体の特徴が良く表わされています。

高塩濃度の流体包有物を室温で観察しますと包有物の液相中に NaCl 結晶 時にはKCl 結晶も認められます。このような包有物をゆっくり加熱してそれぞれの結晶が溶解する温度を測定しますと H₂O-NaCl-KCl 三成分系図を用いて水溶液の NaCl, KCl濃度を推定することができます 鉱化流体のK/Na 比の変化を追求することができます (第7図)。

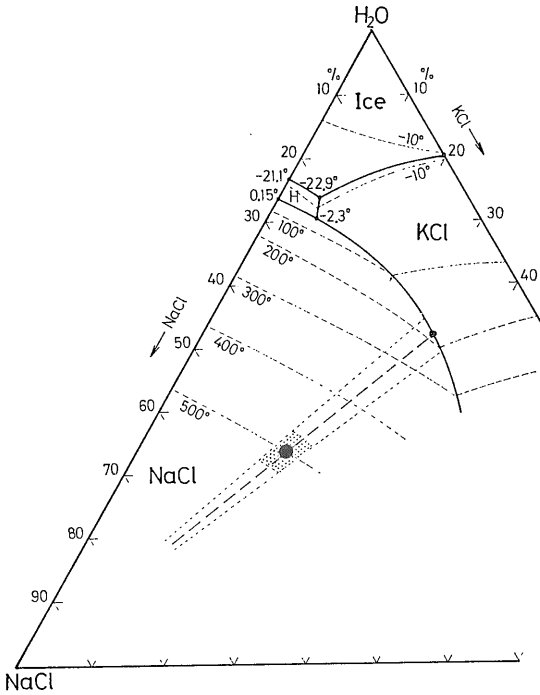
演者は フィリピンの斑岩銅鉱床中の流体包有物を観察した結果 (TAKENOCHI, 1981) から 鉱化流体の活動は鉱体の形態と流体包有物の産状より 2群に大別できると考えております。 1群は鉱体の上下に比較的連続するパイプ状形態を示し 流体包有物には均質化温度 塩濃度ともに著しく高いものが多い鉱床で フィレックス鉱山のサント・トーマスⅡ 鉱体がよい例です。これに対し マー・カッパー鉱山のタピアン鉱体のように 不規則な形の傘をもった「きのこ」形で 流体包有物には均質化温度 塩濃度ともに変化に富み かつ比較的低いものが多い他の1群があります。 水の安定同位体組成のデータがありませんので詳しい検討はできませんが 前の例では鉱化流体の主体はマグマ水で地下水の混入量が比較的少なかったが 後の例では鉱化作用の期間に地下水の寄与がかなりあったものであろうと考えられます。 流体包有物の同位体組成 ガス組成 塩類の組成などが分かればさらに興味ある結果が得られるものと思います。

黒鉱鉱床には深沢鉱床のように層状鉱体が主体のもの と 小坂内の岱・上向鉱床のように層状鉱体の下部にパ

イプ状網状鉱体を伴うものがあります。 この網状鉱体は下部珪鉱体ともよばれ 鉱化流体の通路であったと考えられております。 この下部珪鉱体の流体包有物の均質化温度には300°C前後ものが多く これまでに開発された範囲の深さでは上下方向の著しい温度勾配が認められておりません。 鉱体の外に向かったの温度勾配に関するデータはありませんが おそらく水平方向の勾配は急で鉱化流体の通路に沿って上下に伸びる円筒状の高温帯ができていたのではないかと考えられます。 ではその下部 すなわち鉱化流体の根源はどうなっていたのでしょうか。 これについては現在のところ確実なデータはまだありません。

黒鉱鉱床の付近では しばしば不規則な形の貫入角礫岩脈が鉱体を切っているのが認められます。 この角礫岩脈の角礫には基盤の古生層 である千枚岩や花崗岩質岩・石英斑岩の礫もあります。 これらの礫は角礫岩脈の貫入時に下部から持ってこられたものと思われませんが 火成岩中の石英粒には よく調べますとしばしば微小な高塩濃度流体包有物が含まれております。 これは黒鉱鉱床の下部にかけて高塩濃度の流体が活動していたことを示すものであり 下部珪鉱体中の流体包有物の諸性質の下方への変化 ならびに下部の高塩濃度流体包有物との関連を追求することは興味ある課題であると考えております。

以上のように流体包有物は容積は微小ですが 地殻中の流体に関する貴重な情報源となっております。 しかし 問題は包有物の容積が僅少であり 産状が複雑であるため信頼できる分析値を得ることが難しい点にあります。 最近は機器分析装置の発達が著しく 分析精度ならびに感度が向上しておりますので この点が改善され

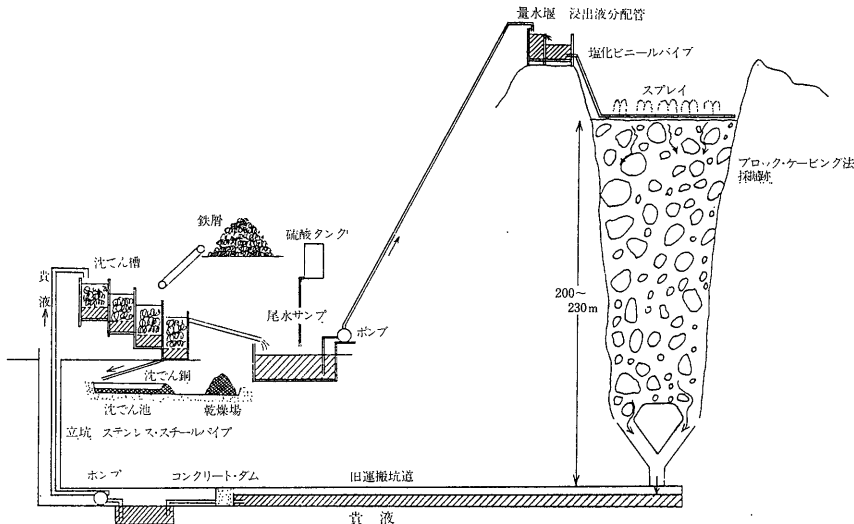


第7図 H₂O-NaCl-KCl 3成分系図。加熱に際し多相流体包有物中の KCl 結晶が 180°C で NaCl 結晶が 500°C で溶解したとすると 水溶液の組成は黒丸印で示される。

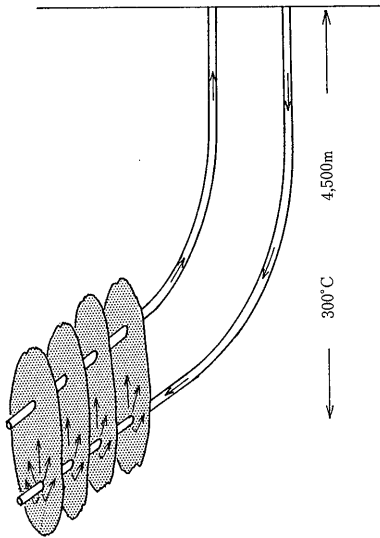
例えば 八幡平(岩手県)には大規模な松尾硫黄鉱床がありますが SILLITOE (1973) の斑岩銅鉱床のモデルからみれば松尾鉱床の下 2000m から 4000m 位の深さに銅鉱床が存在する可能性が考えられます。物理探査試錐などによりこのような条件の所に鉱床が発見されても現在の探鉱技術では回収不能のため資源量であって我々が資源として利用できる鉱石埋蔵量の形では計上できません。松尾のような火山体の深部で坑内採掘を行うことなどともできませんので人間が坑内に入らなくてもすむ新しい探鉱技術が必要となります。新技術の一として インプレース・リーチング法が考えられます。

インプレース・リーチング法は ブロック・ケービング法で採掘した後の残鉱中の銅の回収に利用されています。米国アリゾナ州のマイアミ鉱山や岩手県土鉱山などで採用されていた方法です。ブロック・ケービング法により鉱石を採掘しますと一般に鉱石の崩落が地表に達して大きな陥没を生じます。ここへ地表から水をかけてやりますと 残鉱中の硫化物の酸化により破碎岩石中に滲透した水は硫酸酸性水となり岩石中の銅鉱物を溶解して流下します。こうして下部の坑道に湧出する含銅酸性水(2000-600ppm Cu)を集めて 鉄スクラップを投入しますとイオン化傾向の相違により鉄の表面に沈澱銅が付着しますのでこれを回収すれば Cu 75% 位の沈澱銅が得られ 選鉱を経ることなく銅製錬所に送られます(第8図)。このように インプレース・リーチング法は当初は採掘を中止した鉱山の残鉱の回収に用いられましたが その後低品位で坑内採掘では採算に乗らない斑岩銅鉱床の採掘法として検討されております。

れば流体包有物の利用価値はさらに高くなるでしょう。わが国における今後の金属資源探査においては地下深部の探査が重要な課題となるでしょう。探査の深さがどれ位になるかは対象とする鉱床型にもよるでしょう。



第8図 米国アリゾナ州 Miami 鉱山におけるインプレース・リーチングの概要図(武内1975)。



第9図 水圧破碎の概念図。(MURPHY, 1982)

従って概念的には3,000mも深い所にある新しい鉱体に対しても2本のボーリングを下し酸化剤と酸性水を鉱体に流してやればインプレース・リーチング法を行うことはできるはずですが。この方法によれば人間は坑内採掘場に入る必要がなく銅は水溶液で運搬されますので取り扱いはずっと簡単になります。ただ鉱体の中に万べんなく水を通して銅資源を無駄なく回収するためどのようにして水の通路を作ってやるかが問題となります。これまでの研究で銅 亜鉛 ウランにはインプレース・リーチング法が適用できそうですが鉛や銀 その他の有用金属の回収にどのような溶液を使えばよいかという問題もあります。

米国ロスアラモス研究所では地殻中の高温岩体の熱エネルギー回収を目標に岩石の水圧破碎の研究が行われており日本の地熱地帯においても研究が行われております。第9図のように2本の試錐孔をうがちこの間に高圧水により圧力をかけて割目を作ろうという技術ですからこういう技術が発達して地殻中のある部分に計画した規模密度の割目を作ることができるになれば地殻深部の金属資源の回収にインプレース・リーチング法が利用できるでしょう。現在の水圧破碎技術では第9図に示すように2本の試錐孔の間に何枚かの円板状割目を作る程度ですから網目状の割目を作り溶出の効率を上げるためには多くの技術的問題が解決されねばなりません。

金属資源開発の歴史をふりかえってみますと 明治初

期にダイナマイトの利用技術が導入され それまでの手掘りによる低い採掘能率が大幅に改善され ついで大正末期から昭和初期にかけて浮遊選鉱法が導入されて出鉱品位を一挙に下げることができました。このようないくつかの鉱業技術の革新はありましたが 岩石に孔をうがち火薬で発破するという採掘の基本構想はここ百年の間まったく変わっておらず 今後の鉱業の発展のためには これまでの構想とは異なった画期的技術の確立が望まれるわけです。

近年の鉱床探査には大規模採掘を前提とした新しい観念が導入されています。かつての鉱脈鉱床の考えでは開発に値しなかった細脈の網状鉱床が 斑岩銅鉱床の概念に基づいた探査の結果 大規模開発の対象となる程に発展したりあるいは珪化岩中の低品位鉱染状金鉱化作用がいわゆる温泉型金鉱床として注目されるなど 従来の観念にとらわれない新しい構想が探査に盛りこまれております。わが国のように地表付近はすでにかなり開発された地域では 今後はいきおい地殻深部に資源を求めてゆくようになるでしょう。それにはこれまでに蓄積したデータに基く斬新な地下資源賦存モデルの設定とそれを検証する深部探査技術 および深部地下資源を採取する技術のバランスのとれた開発研究が必要です。しかしこれらの仕事は企業単位の活動では難しく 国のプロジェクト研究や共同研究による強力な推進が必要だと思います。

引用文献

- 金属鉱業事業団 (1981) : 金属鉱業事業団——20年のあゆみ——
 HOLLISTER, V. F. (1978) : Geology of the porphyry copper deposits of the western hemisphere. SME/AIME, 219.
 MURPHY, H. (1982) ; Hot dry rock reservoir development and testing in the USA. 1st Japan-US Joint Seminar on Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy. Tech. Rept., 343-368.
 SILLITOE, R. H. (1973) : The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Econ. Geol., 68, 799-815.
 SILLITOE, R. H. (1980) : Cauldron subsidence as a possible inhibitor of porphyry copper formation. Mining Geol. Special Issue No. 8, 85-93.
 TAKENOUCHI, S. (1981) : Fluid inclusion studies of several Philippine porphyry copper deposits. Metallogeny of Asia, 1980. Geol. Surv. Japan Rept. No. 261, 149-167.
 武内寿久 氏 (1975) : インプレース・リーチング。セラミック・データブック, 75, 119-123