

Aspects of Potential Resource, Process Mineralogy and Metallurgical Recovery of Gold at the Sar Cheshmeh Porphyry Copper Mine

(Sar Cheshmeh 斑岩銅鉱山における金資源とそのプロセス鉱物学、
選鉱・冶金法による回収に関する研究)

学位論文内容の要旨

斑岩銅鉱床は銅、モリブデンの主要な供給源であり、現在世界において銅の 50%以上が斑岩銅鉱床から採鉱、選鉱、製錬のプロセスを経て生産されている。また、斑岩銅鉱床は平均 0.05g/t の金を含んでおり、近年金の供給源として重要性を増している。イランの Sar Cheshmeh 鉱山は世界有数の銅、モリブデン鉱山の一つであり、斑岩銅鉱床より採鉱された平均 0.9-1.0% Cu の鉱石が同鉱山選鉱工場で一日当たり 43,000 t 処理されており、浮選法により銅精鉱(30% Cu)とモリブデン精鉱(55% Mo)が得られ、各製錬所に送られている。同鉱石中に微量存在する金のうち銅精鉱に伴われたものは銅製錬の電解精製工程で陽極泥として回収される。その金回収率は約 40%程度であり、大半が尾鉱として廃棄されているため、有効な金回収法の開発が望まれている。しかし、同鉱石中の金の存在形態や選鉱プロセスにおける挙動については不明な点が多く、新たな金回収法の開発研究に着手できないのが現状である。

このような背景から本研究では、Sar Cheshmeh 鉱床中の金の存在状態、同鉱山選鉱工場における金の選別挙動について地球化学、プロセス鉱物学的手法を導入して詳しく調べ、さらに得られた知見に基づき金回収法について検討し、浮選法、微生物処理、化学処理を組み合わせたハイブリッド金回収プロセスを見出した。本論文はこれらの研究結果をまとめたものであり、以下のように7章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、初めに斑岩銅鉱床と同鉱床中での金鉱化作用について既往の研究を紹介し、次に Sar Cheshmeh 鉱山の地質、鉱床、鉱石に関して述べた。また、Sar Cheshmeh 鉱床の各変質帯から採取した多数のサンプルに対して微量元素を含めた 37 元素について中性子放射化分析(INAA)、ICP-MS 分析を行い、金と各元素との相関を調べ、同鉱床における金の分布の特徴を明らかにした。

第3章では、Sar Cheshmeh 鉱山選鉱工場の概要を紹介し、次に元鉱、精鉱、尾鉱から

長期にわたり採取した多数のサンプルに対する 37 元素の INAA および ICP-MS 分析結果を述べた。各元素に関して 1 月間の経日変化および 1 年間の経月変化を調べた結果、イ) 元鉱中の平均金品位は 0.1ppm 以下であり、浮選における金の挙動は必ずしも銅の挙動と対応しないこと、ロ) 平均して金の約 44%が銅・モリブデン精鉱に回収され、残りは尾鉱になっていること、ハ) 元鉱および精鉱中の銅と金は、鉄、モリブデン、銀、ヒ素、亜鉛、鉛などと正の相関を有すること、などが明らかになった。

第 4 章では、Sar Cheshmeh 鉱山選鉱工場における浮選フィード、精鉱、尾鉱について粒度別、比重別に区分けした試料を調製し、光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察、電子線マイクロアナライザー (EPMA) による分析をした結果を述べた。試料中の金の量が 1ppm 以下であるため、どの方法を用いてもいずれの試料からも金を検出することができなかった。光学顕微鏡下で各鉱物の単体分離度を測定した結果、イ) 浮選フィードでは銅鉱物の 70-87%が単体分離していること、ロ) 尾鉱中の銅鉱物は主として片刃粒子として存在すること、などを明らかにした。

第 5 章では、選鉱・冶金学の立場から Sar Cheshmeh 鉱石中の金の存在形態を明らかにするため、種々の試料調製法、分析法を工夫・検討し、鉱石中に金が visible、invisible、encapsulated の三形態で存在することを見出した。また、各形態の金存在量を測定する方法を考案した。まず、EPMA 分析時に反射電子像を測定して金の存在する領域を特定し、この領域で二次電子像、X 線像、波長分散スペクトル (WDS) を測定することにより 2 μ m 以上の visible な金粒子を確認できることを確かめ、銅・モリブデン浮選精鉱および尾鉱中に visible な金粒子が含まれていることを示した。次に、二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いて、黄鉄鉱、黄銅鉱粒子の中に invisible な金を不均一に含むものがあることを実証した。さらに、2 種類の Diagnostic Leaching を行うことにより、visible、invisible、encapsulated の三形態で存在する金の量をそれぞれ測定する方法を提案し、この方法を用いて各鉱石中の金の存在形態を明らかにした。また、尾鉱中には約 80%の金が visible な形態で含まれており、その多くは黄鉄鉱に含まれていることを指摘した。

第 6 章では、尾鉱中に含まれている金を回収するため、浮選法、微生物浸出法、酸浸出法、青化法について検討した結果と、その結果に基づき新しく開発した金回収法について述べた。本法では、初めに尾鉱について硫化浮選することで金を含む硫化鉱（主に黄鉄鉱）を浮選精鉱として回収し、次にこの精鉱を鉄酸化細菌で浸出処理した後、青化法により金を回収する。この浮選法、微生物処理、青化処理を組み合わせたハイブリッド金回収プロセスを浮選尾鉱に適用し、高い金回収率が得られることを示した。

第 7 章は結論であり、本研究で得られた主な知見と成果をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 恒 川 昌 美
副 査 教 授 中 島 巖
副 査 教 授 金 子 勝比古
副 査 助 教 授 平 島 剛

学 位 論 文 題 名

Aspects of Potential Resource, Process Mineralogy and Metallurgical Recovery of Gold at the Sar Cheshmeh Porphyry Copper Mine

(Sar Cheshmeh 斑岩銅鉱山における金資源とそのプロセス鉱物学、
選鉱・冶金法による回収に関する研究)

斑岩銅鉱床は銅、モリブデンの主要な供給源であり、現在世界において銅の 50%以上が斑岩銅鉱床から採鉱、選鉱、製錬のプロセスを経て生産されている。また、斑岩銅鉱床は平均 0.05g/t の金を含んでおり、近年金の供給源として重要性を増している。イランの Sar Cheshmeh 鉱山は世界有数の銅、モリブデン鉱山の一つであり、斑岩銅鉱床より採掘された平均 0.9-1.0% Cu の鉱石が同鉱山選鉱工場で一日当たり 43,000 t 処理され、浮選法により銅精鉱 (30% Cu) とモリブデン精鉱 (55% Mo) が得られ、各製錬所に送られている。同鉱石中に微量存在する金のうち銅精鉱に伴われたものは銅製錬の電解精製工程で陽極泥として回収される。その金回収率は約 40%程度であり、大半が尾鉱として廃棄されているため、有効な金回収法の開発が望まれている。しかし、同鉱石中の金の存在形態や選鉱プロセスにおける挙動について不明な点が多く、新たな金回収法の開発研究に着手できないのが現状である。

このような背景から本研究では、Sar Cheshmeh 鉱床中の金の存在状態、同鉱山選鉱工場における金の選別挙動について地球化学、プロセス鉱物学的手法を導入して詳しく調べ、さらに得られた知見に基づき金回収法について検討し、浮選法、微生物処理、化学処理を組み合わせたハイブリッド金回収プロセスを見出している。本論文はこれらの研究結果をまとめたものであり、以下のように 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および本論文の構成について述べている。

第 2 章では、初めに斑岩銅鉱床と同鉱床中での金鉱化作用について既往の研究を紹介し、次に Sar Cheshmeh 鉱山の地質、鉱床、鉱石に関して述べている。また、Sar Cheshmeh 鉱床の各変質帯から採取した多数のサンプルに対して微量元素を含めた 37 元素について中性子放射化分析 (INAA)、ICP-MS 分析を行い、金と各元素との相関を調べている。その結果、(Ca+K)/Ca 比あるいは Rb/Sr 比と金、銅品位との間、および両者の比と変質との間に強い相関があることなど、同鉱床における金の存在と分布の特徴を明らかにしている。

第 3 章では、Sar Cheshmeh 鉱山選鉱工場の概要を紹介し、次に元鉱、精鉱、尾鉱から長期にわたり採取した多数のサンプルに対する 37 元素の INAA および ICP-MS 分析結果を

述べている。各元素に関して1月間の経日変化および1年間の経月変化を調べた結果、イ) 元鉱中の平均金品位は 0.1ppm 以下であり、浮選における金の挙動は必ずしも銅の挙動と対応しないこと、ロ) 平均して金の約 44%が銅・モリブデン精鉱に回収され、残りは尾鉱になっていること、ハ) 元鉱および精鉱中の銅と金は、鉄、モリブデン、銀、ヒ素、亜鉛、鉛などと正の相関を有すること、などを明らかにしている。

第4章では、Sar Cheshmeh 鉱山選鉱工場における浮選フィード、精鉱、尾鉱について粒度別、比重別に区分けした試料を調製し、光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)による観察および電子線マイクロアナライザー(EPMA)による分析を行っている。その結果、尾鉱中の銅および金の多くは 75 μm 以上の粗粒子および 38 μm 以下の微粒子に含まれていることを指摘し、これが同選鉱工場の閉回路粉砕工程にある分級機の性能に起因することを明らかにしている。すなわち、分級性能が劣るため、単体分離の不十分な 75 μm 以上の粗粒子が浮選工程にフィードされることになるが浮遊できず尾鉱となること、また過粉砕により生じた酸化銅鉱微粒子(38 μm 以下)が同様に尾鉱になることを示している。これらの知見に基づき、銅と金の回収率を向上させるためには、上記分級機の設備更新と尾鉱の再処理が必要であることを述べている。

第5章では、選鉱・冶金学の立場から Sar Cheshmeh 鉱石中の金の存在形態を明らかにするため、種々の試料調製法、分析法を工夫・検討し、これらの方法を用いて鉱石中に金が後述するように visible、invisible、encapsulated の三形態で存在することを見出している。また、各形態の金存在量を測定する方法を考案している。まず、EPMA 分析時に反射電子像を測定して金の存在する領域を特定し、この領域で二次電子像、X 線像、波長分散スペクトル(WDS)を測定することにより 2 μm 以上の visible な金粒子を確認できることを確かめ、銅・モリブデン浮選精鉱および尾鉱中に visible な金粒子が含まれていることを実証している。次に、二次イオン質量分析法(SIMS)を用いて、黄鉄鉱、黄銅鉱粒子の中に invisible な金を不均一に含むものがあることを示している。さらに、石英中にも微量取り込まれている金がある(encapsulated)ことを指摘し、2種類の diagnostic leaching を行うことにより、visible、invisible、encapsulated の三形態で存在する金の量をそれぞれ測定する方法を提案し、この方法を用いて各鉱石中の金の存在形態を明らかにしている。また、尾鉱中には約 80%の金が visible な形態で含まれており、その多くは黄鉄鉱に含まれていることを見出している。

第6章では、尾鉱中に含まれている金を回収するため、浮選法、微生物浸出法、酸浸出法、青化法について検討した結果と、その結果に基づき新しく開発した金回収法について述べている。本法では、初めに尾鉱について硫化鉱浮選することで金を含む硫化鉱(主に黄鉄鉱)を浮選精鉱として回収し、次にこの精鉱を鉄酸化細菌で浸出処理した後、青化法により金を回収する。この浮選法、微生物処理、青化処理を組み合わせたハイブリッド金回収プロセスを浮選尾鉱に適用し、高い金回収率が得られることを実証している。

第7章は結論であり、本研究で得られた主な知見と成果をまとめている。

これを要するに、著者は斑岩銅鉱床中の微量な金の存在状態、選鉱プロセスにおけるその挙動をプロセス鉱物学的手法により明らかにし、廃石中の金を回収するためのハイブリッド資源処理プロセスを開発しており、鉱物処理工学および資源再生工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。