

氏名（本籍）	Adi Sulaksono（インドネシア）
専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	国博甲第10号
学位授与の日付	令和3年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	国際資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	鉱物化学および硫黄同位体からみたインドネシア，グラスベルグ斑岩銅鉱床のマグマ-熱水過程 (Mineral chemistry and sulfur isotope insights into magmatic and hydrothermal processes leading to porphyry Cu mineralization at Grasberg, Indonesia)
論文審査委員	(主査) 教授 渡辺 寧 (副査) 教授 Andrea Agangi (副査) 教授 大場 司 (副査) 教授 Antonio Arribas

## 論文内容の要旨

本学位論文は、インドネシア東部ニューギニア島に位置するグラスベルグ斑岩銅金鉱床の成因を、地質学、岩石学、鉱物学、同位体地球化学の手法を用い解明したものである。この地域は北方からの海洋プレートの沈み込みに伴う新生代の火成活動が活発な地域で、グラスベルグ地域には鮮新世のマグマの貫入が深成岩-火山岩複合岩体を形成している。このグラスベルグ複合岩体には世界有数規模の斑岩銅金鉱化作用が認められる。この鉱化作用には、マグマの進化過程において、十分な量の塩素、硫黄、そして金属元素の濃集が必要である。本学位論文では、これらの元素がどのように濃集したのか、また硫化物として沈殿したのかを、火成岩の全岩化学組成や鉱物組み合わせ、鉱物化学、特に角閃石、ジルコン、アパタイト中の鉱物化学組成に基づき議論している。

グラスベルグ複合岩体に含まれる角閃石は、アルミニウムの含有量により高アルミニウム角閃石と低アルミニウム角閃石に分類される。低アルミニウム角閃石は約 730-700°C, 1.1-0.7kbar の温度圧力、FMQ+3.4 の酸化環境で Main Grasberg Intrusion (MGI) に含まれる。この火成活動は Early South Kali Dike (ESKD) と呼ばれる貫入岩に貫入されている。ESKD は低アルミニウム角閃石のリムを持つ高アルミニウム角閃石を含んでいる。この高アルミニウム角閃石は約 900-850°C, 4.3-3.3kbar の温度圧力、FMQ+1 の酸化環境で結晶しており、斑晶縁辺部を 790-720°C, 1.9-1.0kbar の圧力、FMQ+2.7 の酸化環境で形成された角閃石に包まれている。

一方、貫入岩類に含まれるジルコンは、ランタノイド元素の中でセリウムに富む特徴を示すが、MGIの方がESKDよりも、よりセリウムの高異常を示す。このことはMGIマグマの方がより酸

化的であったことを意味する。アパタイトの塩素、硫黄含有量から推定される脱ガス過程は、1) 低アルミニウム角閃石と斜長石の晶出後に MGI マグマから塩素の脱ガス、2) 低アルミニウム角閃石と斜長石の晶出の前の約 800°C, 2kbar での ESKD マグマから硫黄の脱ガス、3) 低アルミニウム角閃石と斜長石の晶出後の ESKD マグマからの塩素の脱ガス、の3フェーズに区分される。

初期の熱水イベントは、硫化物を含まない硬石膏に富むカリ長石—黒雲母変質を形成し、次の6フェーズの熱水鉱物の沈澱が引き続いて生じた：1) 磁鉄鉱、2) 黒雲母、3) 石英、4) 硬石膏—黄銅鉱、5) 黄銅鉱±絹雲母、6) 黄鉄鉱—黄銅鉱—石英+絹雲母。カリ変質帯中の熱水性黒雲母は斑晶の黒雲母と比較して高い Mg# と低い鉄含有量で特徴づけられる。

これらの初生鉱物の形成順序と化学組成は、酸化した MGI マグマからなるマグマだまりに、より還元的な高アルミニウム角閃石を含むマグマが貫入したことを示す。形成された混合マグマは ESKD 斑岩として固結した。MGI, ESKD マグマからの塩素の脱ガスは地殻上部での斑晶鉱物の結晶作用に関連しているが、ESKD マグマからの硫黄の流体への分配は、より高い圧力と温度での別のプロセスが関与したと推定される。2つのマグマ混合は硫酸塩の還元により SO<sub>2</sub> を形成する下記の反応をもたらしている。



グラスベルグ鉱床で生じた断続的な脱ガスは鉱化熱水として斑岩上部に濃集した。この熱水は初期には硫化水素に乏しかったが、SO<sub>2</sub> の自己酸化還元反応や母岩鉱物中の鉄の酸化により還元され、硫化鉱物として最終的に沈殿したと結論される。

## 論文審査結果の要旨

本学位論文のテーマは、世界でも最大規模のグラスベルグ斑岩銅金鉱床を題材に、斑岩銅鉱化作用が生じるメカニズムを詳細に示したもので、鉱床学のテーマとして重要である。さらに本研究は、様々な観点から1つの鉱床の成因をデータをもって議論している。これは論文提出者が十分な知識、多角的に課題を分析、解決方法を提示する能力を習得していることを示す。本学位論文は、これまで詳しく検討されてこなかったジルコンやアパタイト、角閃石の結晶順序と化学組成に基づきマグマ—熱水系の進化を議論したもので、新たな知見を含んだオリジナリティの高い論文である。

本論文の一部の内容は、Resource Geology (v. 68, no. 2, p. 195-207), Proceedings of MGEI "Southwest Pacific Resources 2018 に公表されており、さらに Mineralium Deposita 誌にも公表されている (<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00126-021-01040-9>)。本学位論文には 116 の引用文献が適切に引用され、論文提出者が十分に先行研究の知識を習得しており、さらに研究倫理上、細心の注意を払っていることを示す。また分析手法に関する付録もつけられており、研究のトレーサビリティも確保されている。

令和3年2月2日に実施した最終試験では、本学位論文提出者により、4名の審査委員の前で40分にわたり学位論文に関する発表が行われた。その後30分にわたり評価委員と発表内容に

関する質疑が行われた。主な質疑は以下の通りである。

1) アパタイト中の塩素や硫黄はマグマの塩素や硫黄量を反映しているのか？硫黄はマグマ中の溶解度を超えているのではないか？

回答：本研究で得られたアパタイトの塩素，硫黄の含有量は一般的に見積もられているマグマ中のもとと大きな違いはなく，マグマの塩素，硫黄含有量を反映したものである。

2) どのようにしてこのような超酸化的マグマが形成されたのか？

回答：最も一般的な説明は，沈み込む海洋地殻に酸化的な硫黄が含まれていたこと，マグマが生じたマントルウェッジでの酸化的な硫黄の供給が推定される。その他，地表付近の岩石の混合も可能性として考えられる。今後検討していきたい。

3) このような大規模な鉱床を形成するには，大規模な貫入岩のキューポラが必要なのではないか？

回答：平面的には必ずしも規模の大きなキューポラは必要なく，垂直方向に延長された鉱化帯があれば良いと考えている。

4) 金属元素はほとんどが流体に保持されたと考えられるが，硫黄がどうして飽和し硫黄が還元した鍵は何か？

回答：硫黄の飽和はマグマの混合が重要で，硫黄の還元は母岩との反応が最も大きな要因であると考えている。

以上のように様々な質問に対して本学位論文提出者によりの確に回答が行われた。本最終試験の結果，本学位審査委員会は，最終試験を合格とし，学位の授与を可と判定した。