

氏名（本籍）	Avriel Venis Literal Cirineo（フィリピン）
専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	国博甲第 5 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 24 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）	Evolution of the hydrothermal system and ore mineralization at the Southwest prospect, in the vicinity of the Santo Tomas II deposit, Baguio district, Philippines (フィリピン, Baguio 地域, Santo Tomas II 鉱床近傍, Southwest 鉱徴地における熱水系の進化と鉱化作用)
論文審査委員	(主査) 教授 大場 司 (副査) 教授 佐藤時幸 (副査) 教授 石山大三 (副査) 教授 Andrea Agangi (副査) 教授 今井 亮

## 論文内容の要旨

The Baguio district is a premiere gold and copper district in the Philippines known to host numerous porphyry copper, epithermal gold and skarn deposits, including the Santo (Sto.) Tomas II deposit, a 60-year old block-caving mine being operated by Philex Mining Corporation. Recent exploration activities uncovered the occurrence of porphyry-type veinlets that overprinted the complex of porphyry intrusions and breccia facies in the Southwest prospect. A yet to be established genetic connections of this porphyry-type veinlets to the Sto. Tomas II deposit may postulate the occurrence of supposedly blind porphyry copper deposits, thus it is significant to establish a genetic model of the Southwest prospect in the understanding of the porphyry copper deposits in the southern Baguio district. The prospect is located at the southwestern periphery of the Sto. Tomas II orebody, which hosts a copper-gold mineralization related to a complex of porphyry intrusions, breccia facies and overlapping porphyry-type veinlets emplaced within the basement metavolcanics rocks of the Pugo Formation and conglomerates of the Zigzag Formation.

The complex is composed of at least four broadly petrographically similar dioritic intrusive rocks that vary in texture and alteration type and intensity. Arranged in

chronological order, they are the: (1) coarse-grained biotite quartz diorite (ODP – Old Diorite Porphyry), (2) fine-grained quartz diorite porphyry (EMD - Early Mineralization Diorite), (3) medium-grained porphyritic hornblende quartz diorite (LD – Late Diorite) and (4) hornblende andesite porphyry (DP – Diorite Porphyry). These intrusions were accompanied with at least five breccia facies, namely, (1) PMBx1 - Phreatomagmatic Breccia Facies 1, (2) PMBx2a - Phreatomagmatic Facies 2a, (3) PMBx2b - Phreatomagmatic Breccia Facies 2b, (4) EMDBx - Early Mineralization Diorite Breccia and (5) DPBx - Diorite Porphyry Breccia. The breccia facies overlapped the intrusions and recorded several brecciation episodes that involved explosive brecciation induced by phreatomagmatic activities that reflected the varying pressure-temperature conditions in magmatic-hydrothermal system during the emplacement of the various intrusions. Various quartz-bearing veinlet assemblages overprinted the pre-, syn- and late-mineralization porphyry intrusions and breccia facies but are also present as quartz vein fragments in the breccia facies.

Hydrothermal alteration assemblages consisting of potassic, chlorite-magnetite, propylitic and sericite-chlorite alteration, and contemporaneous veinlet types were developed on the host rocks. Potassic alteration is characterized by secondary biotite-quartz-magnetite-anhydrite-chalcopyrite-bornite. Secondary biotite is the dominant alteration mineral present as fine disseminations in the groundmass and as polygrain aggregates completely altering former ferromagnesian minerals, such as hornblende. It is often accompanied with quartz, anhydrite, magnetite and copper iron sulfides. Chlorite-magnetite alteration overprinted the potassic alteration. It is defined by the assemblage of sericite-chlorite-carbonate-magnetite±K-feldspar and abundant chalcopyrite-magnetite-chlorite-actinolite±sericite veinlets. Propylitic alteration is exhibited by LD. It is characterized by chlorite-epidote-calcite±illite. The shallower portions dominated by the PMBx2a and PMBx2b were altered by chlorite-illite-pyrite±chalcopyrite with associated quartz-gypsum cement. Elevated copper and gold grades are present in the (1) chalcopyrite-bornite assemblage in the potassic alteration in the syn-mineralization EMD and contemporaneous veinlets including the sheeted quartz veinlets and (2) chalcopyrite-rich mineralization associated with the chalcopyrite-magnetite-chlorite-actinolite±sericite veinlets contemporaneous with the chlorite-magnetite alteration. Erratic remarkable concentrations of gold were also present in the late-mineralization LD.

High  $X_{Mg}$  of calcic amphiboles (>0.60) in the intrusive rocks indicates that the magmas have been in oxidizing conditions since the early stages of crystallization, while a gap in the of Al content between the rims and the cores of the calcic amphiboles in the EMD and LD indicates decompression during the crystallization of these intrusive rocks from the magmas. Meanwhile,  $X_{Mg}$  of secondary biotites and chlorites are also high (>0.70)

with low to undetectable Cl and F contents.

Fluid inclusion microthermometry suggests the trapping of fluids that formed the potassic alteration, associated ore mineralization and sheeted quartz veinlets within the subcritical immiscible region at pressures between 50 and 30 MPa and temperatures between 554 and 436 °C, at depths between 1.9 km and 1.1 km. Temperature data from the biotite and chlorite geothermometers indicate that the chalcopyrite-rich mineralization associated with the chlorite-magnetite alteration was formed at a much lower temperature (ca. 290°C) than the potassic alteration dominated by secondary biotite (ca. 470°C).

Evidences from the vein off-setting matrix suggest multiple intrusions within the EMD, despite the K-Ar ages of the potassic alteration in EMD and hornblende in the LD to be of about the same age at  $3.5 \pm 0.3$  Ma. The K-Ar age of the potassic alteration was likely to be thermally reset, as a result of the overprinting hydrothermal activities. Alternatively, these may also indicate that the two events occurred within short time interval. The constrained K-Ar ages also indicate an earlier, if not co-eval intrusive rocks in the Southwest prospect with that of the earliest “dark diorite” intrusion in the Sto. Tomas II. In addition, the range of  $\delta^{34}\text{S}$  of sulfide minerals from +1.8 ‰ to +5.1 ‰ in Southwest closely overlaps with those of the Sto. Tomas II, Clifton and Bumolo porphyry copper deposits and epithermal vein prospects within the vicinity, indicating a homogeneous source of sulfur.

## 論文審査結果の要旨

提出された博士論文、博士論文要旨及び論文目録について、所属する資源学専攻の教員および外部審査委員により構成される審査委員会において審査し、不備がないことを確認した。記載内容は適正であり、また、査読のある学術誌に投稿された論文が受理されていることを確認し、書類審査は合格とした。申請者は、フィリピン、ルソン島北部バギオ地域の Santo Tomas II 斑岩銅鉱床の近傍において探査活動が行われている Southwest 鉱徴地について、貫入岩類および角礫岩類の岩石記載、石英細脈および伴われる変質鉱物について鉱物学および地球化学的特徴を明らかにし、流体包有物の記載、均質化温度および塩濃度を求め、さらに K-Ar 法による年代測定を行ない、熱水系の発達史と貫入岩類および角礫岩類の時間的關係を明らかにするとともに、近接する斑岩型銅-金鉱床との時間的關係を明らかにした。

まず著者は、Southwest 鉱徴地において、記載岩石学的に類似する 4 つの貫入岩、5 つの角礫岩を識別した。貫入岩類は早期のものから順に、(1) 粗粒黒雲母石英閃緑岩 (ODP - Old Diorite Porphyry), (2) 細粒石英閃緑斑岩 (EMD - Early Mineralization Diorite), (3) 中粒斑状ホルンブレンド石英閃緑岩 (LD - Late Diorite), (4) ホルンブレンド安山斑岩 (DP - Diorite Porphyry) で

ある。角礫岩は、(1) PMBx1-マグマ水蒸気角礫岩 1, (2) PMBx2a-マグマ水蒸気角礫岩 2a, (3) PMBx2b-マグマ水蒸気角礫岩 2b, (4) EMDbx-早期鉍化閃緑岩角礫岩, (5) DPBx-閃緑斑岩角礫岩である。これらの貫入岩類と角礫岩類の形成時期は重複しており、マグマの貫入によって生じたマグマ-熱水系において、マグマ水蒸気噴火が複数回起こったことが示唆された。また、石英細脈がこれらの貫入岩類および角礫岩類を切っており、角礫岩中に石英脈の破片が含まれることから、貫入岩類および角礫岩類は鉍化作用前、鉍化作用中、および鉍化作用後に形成されたことが示された。

次に著者は、熱水変質作用のタイプはカリウム質、緑泥石-磁鉄鉍、プロピライト質、絹雲母-緑泥石に分類され、それぞれの時期に石英細脈が生成していることを示した。特に高い銅および金品位は、(1) カリウム質変質した鉍化作用中の貫入岩である EMD 中および同時期の平行石英細脈群を含む石英細脈に伴われる黄銅鉍-斑銅鉍鉍化作用、(2) 緑泥石-磁鉄鉍変質作用と同時期の黄銅鉍-磁鉄鉍-緑泥石-アクチノ閃石±絹雲母細脈に伴われる黄銅鉍に富む鉍化作用により生成した。鉍化作用後期に貫入した LD 中にも局所的に高い金品位が認められる。

続いて著者は、貫入岩の Ca 角閃石が高い  $X_{Mg}$  値(>0.60)を持つことから、マグマは結晶化の初期から酸化的であったこと、EMD および LD の Ca 角閃石のコアとリムの Al 含有量のギャップがあることから、これらのマグマは結晶化の途中で圧力低下が生じたことを示した。

さらに著者は、流体包有物マイクロサーモメトリーより、鉍化作用、平行石英細脈群に伴われるカリウム質変質を生じた流体は深度 1.1 ないし 1.9km、温度 436 ないし 554°C で流体不混和の領域で捕獲されたことを示した。黒雲母温度計および緑泥石温度計は、緑泥石-磁鉄鉍変質に伴われる黄銅鉍に富む鉍化作用は約 290°C で生じ、二次的黒雲母が卓越するカリウム質変質作用(約 470°C) よりも低温であったことを示した。

最後に著者は、脈の交差関係の解析により EMD が複数回の貫入によるものであることを示唆した。また、EMD のカリウム質変質作用の K-Ar 年代と LD のホルンブレンドの K-Ar 年代はいずれも  $3.5 \pm 0.3$  Ma であり、カリウム質変質作用の K-Ar 年代は熱的にリセットされたか熱水変質作用が重複した可能性もあるが、これらの活動が短い時間範囲で生じた可能性があるとして述べた。この年代値は、Santo Tomas II 鉍床の最も初期の貫入岩“dark diorite”の年代値と同じである。さらに Southwest 鉍徴地の硫化物の  $\delta^{34}S$  は +1.8 ~ +5.1 ‰ を示し、Santo Tomas II, Clifton および Bumolo 鉍床および周辺の他の鉍徴地と同じ範囲の値であることから、同一の起源に由来することを明らかにした。

本学位論文はバギオ地域において探査が行われている鉍徴地の斑岩型鉍化作用の熱水系と貫入岩類および角礫岩類の形成史、記載岩石学的特徴と熱水の化学的特徴、世界的にも著名な近接する斑岩型銅-金鉍床との時間的關係を明らかにし、探査ポテンシャルにおける意義を示した。博士の学位に値する業績であると認め、本審査は合格と判定した。