

| | |
|------------|--|
| 氏名（本籍） | ファドリン（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17号 |
| 学位授与の日付 | 令和5年3月23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） | インドネシア、スンバワ島、Hu'u 地域、Humpa Leu East 斑岩銅-金鉱徴地の地質、地質年代、地球化学 (Geology, Geochronology and Geochemistry of the Humpa Leu East Porphyry Copper-gold Prospect in Hu'u District, Sumbawa Island, Indonesia) |
| 論文審査委員 | (主査) 准教授 高橋 亮平 (副査) 教授 Andrea Agangi (副査) 教授 渡辺 寧 (副査) 教授 大場 司 |

論文内容の要旨

The Humpa Leu East (HLE) porphyry Cu-Au prospect is located in Sumbawa Island, within the eastern margin of the Sunda metallogenic belt, Indonesia. There are several world-class porphyry Cu-Au deposits with Miocene-Holocene ages in the belt, such as the Tujuh Bukit, Batu Hijau, Elang, and Onto-Hu'u deposits.

The HLE prospect formed in an active continental margin with a calc-alkaline magma affinity. The prospect is characterized by typical multiphase porphyry intrusions associated with hypogene mineralization. On the basis of the petrographic observation, the porphyry intrusions can be classified into early, intermediate, and late phases, which consists of two types of rocks, *i.e.*, diorite porphyry, and quartz diorite porphyry. The diorite porphyry intrusions are dark grey in color, consisting mainly of plagioclase and alteration minerals of carbonate, quartz, chlorite, anhydrite, albite, and K-feldspar. The quartz diorite porphyry intrusions are grey in color and consist of plagioclase, minor quartz, and alteration minerals of carbonate, quartz, chlorite, anhydrite, albite, and K-feldspar. Hydrothermal alteration associated with the main mineralization in the drill cores can be classified into potassic, chlorite-sericite, and sericite alteration. The potassic alteration includes quartz, magnetite, K-feldspar, calcite, albite, anhydrite, and chlorite. Secondary biotite has not been identified in this alteration, and it might have been replaced by chlorite. The chlorite-sericite alteration includes quartz, chlorite, sericite, calcite, and anhydrite. The sericite alteration includes abundant quartz, sericite, and calcite, and minor

chlorite, anhydrite, and gypsum. The mineralization stages of the HLE prospect can be divided into early, intermediate, and late. The early stage is associated with M (magnetite – bornite ± chalcopyrite), A (quartz + magnetite), and AB (quartz + magnetite + chalcopyrite ± pyrite) veins. These veins mainly formed in the potassic alteration zone. The intermediate stage is characterized by B veins (quartz + chalcopyrite + pyrite) and C veins (chalcopyrite ± pyrite), which mostly occur in the chlorite-sericite and sericite alteration zones. The late stage is mostly associated with D veins (calcite + gypsum + quartz + pyrite ± chalcopyrite ± sphalerite ± galena) that accompany sericite and chlorite alteration halo. Two styles of mineralization have been identified in the HLE prospect, *i.e.*, quartz-sulfide veins, and sulfide dissemination, where the former related with chlorite-sericite alteration are the most dominant copper and gold mineralization. Gold (Au) is mostly contained in chalcopyrite within intermediate stage.

Microscopic observation and laser Raman spectroscopy of fluid inclusions in quartz of the A, AB, B and D veins were conducted. There are three types of fluid inclusions, *i.e.*, liquid-rich two-phase V+L, monophasic vapor (or vapor rich V-L), and multi-phase vapor rich V+L+S inclusions. The laser Raman spectroscopic analysis revealed the presence of CO₂ in the vapor, two-phase (V+L) and multi-phase (V+L+S) fluid inclusions, which was identified by two main peaks at 1,388 and 1,285 cm⁻¹. Calcite in the potassic alteration zone would have been formed by a reaction of Ca-rich plagioclase and CO₂-rich fluids. The CO₂ in the hydrothermal fluids was likely derived from the magma. The microthermometry analysis data shows the trapping temperature of fluid inclusions in early stage (A; AB), intermediate (B), and late stages (D) of quartz veins are 470, 305, and 285 °C. The salinity of early stage (A; AB), intermediate (B), and late stages (D) of quartz veins was average 22, 12.4, and 7.6 wt.% NaCl eq. On the basis of the sulfur isotope analysis data, the δ³⁴S sulfides and sulfates values are from -3.8 to +3.4 ‰, and +9.9 to +12.4 ‰ which indicate that the sulfur was derived from igneous sources or magmatic fluids.

This study examined trace element compositions of zircon in the porphyry intrusions of the HLE prospect to apply them as a tool to assess magma fertility of copper and gold mineralization. The zircon in the porphyry intrusions is mainly magmatic origin with oscillatory zoning and characterized by a steeply upward REE patterns from La to Lu as well and strongly positive Ce/Ce* and moderately negative Eu/Eu* anomalies. Geochemistry of zircon indicates that the porphyry intrusions of the HLE prospect were a product of magmatism with crystallization temperature at average 780 °C. U-Pb zircon dating on the porphyry intrusions yielded 1.2-1.0 Ma (middle Pleistocene). The presence of magnetite and ilmenite inclusions in zircon indicates that the zircon formed in an oxidized magma. Trace element analysis of zircon indicated Eu/Eu* > 0.4, and Ce/Ce* > 50, and ΔFMQ +2.9±1.9. Ratios of the trace elements, Yb/Dy > 0.4 and Lu/Ho > 2.0 of zircon indicate fractional crystallization of amphibole in early stage. The presence of amphibole in the porphyry intrusions implies that the magma had high water content, more than ca. 4 wt.%. The Eu/Eu*, Ce/Ce*, Yb/Dy, and Lu/Ho ratios of zircon are applicable fertility assessment of porphyry Cu and Au mineralization for magmas.

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。

まず著者は、インドネシア、スンバワ島東部の Humpa Leu East (HLE) 斑岩 Cu-Au 鉱徴地は、Sunda 鉱床生成区の活動的な大陸縁辺に位置し、カルクアルカリマグマ系列の斑岩からなることを説明した。斑岩貫入岩体は、初期、中期、後期フェーズに区分され、閃緑岩斑岩と石英閃緑岩斑岩からなる。閃緑岩斑岩は、暗灰色で主に斜長石からなり、方解石、石英、緑泥石、硬石膏、曹長石、カリ長石の変質鉱物を伴う。石英閃緑岩は、灰色で主に斜長石と少量の石英からなり、方解石、石英、緑泥石、硬石膏、曹長石、カリ長石の変質鉱物を伴う。観察した試錐コアの熱水変質は、カリウム変質、緑泥石-セリサイト変質、セリサイト変質に区分される。カリウム変質は、石英、磁鉄鉱、カリ長石、方解石、曹長石、硬石膏、緑泥石を含む。緑泥石-セリサイト変質は、石英、緑泥石、セリサイト、方解石を含む。セリサイト変質は、多量の石英、セリサイト、方解石、少量の緑泥石、硬石膏、石膏を含む。

次に著者は、HLE 鉱徴地の鉱化段階は、初期、中期、後期ステージに分けられることを説明した。初期ステージは、M vein (磁鉄鉱、斑銅鉱±黄銅鉱)、A vein (石英、磁鉄鉱)、AB vein (石英、磁鉄鉱、黄銅鉱±黄鉄鉱) からなり、カリウム変質帯に含まれる。中期ステージは、B vein (石英、黄銅鉱、黄鉄鉱)、C vein (黄銅鉱±黄鉄鉱) からなり、緑泥石-セリサイト変質帯、セリサイト変質帯に含まれる。後期ステージは、主に D vein (方解石、石膏、石英、黄鉄鉱±黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱) からなり、緑泥石-セリサイト変質ハローを伴う。著者は、鉱化作用は、石英-硫化物と硫化物鉱染からなり、緑泥石-セリサイト変質を伴う前者が主要な銅-金鉱化作用であり、また、金は主に黄銅鉱に伴い産出することを説明した。

著者は、顕微鏡観察とレーザーラマン分光分析により、A, AB, B, D vein の流体包有物は、液相に富む気相-液相包有物、気相包有物 (または気相に富む気相-液相包有物)、気相-液相-固相包有物からなり、気相に CO₂ が含まれること、また、カリウム変質帯の方解石は、斜長石と CO₂ に富む流体の反応によって形成したと説明した。また、2 相包有物の流体包有物の均質化温度と塩濃度の最頻値を説明した (A vein : 470 °C, 22 wt.% NaCl eq.; B vein : 270 °C, 12.4 wt.% NaCl eq.; D vein : 250 °C, 7.6 wt.% NaCl eq.)。A vein 中の流体包有物は沸騰流体の捕獲であり、B, D 脈の流体包有物は非沸騰流体の捕獲である。

最後に著者は、斑岩中のジルコンの LA-ICP-MS 分析に基づく、微量成分組成と U-Pb 年代を説明した。ジルコンの希土類元素は、La から Lu にかけて急な右上がりパターン、強い正の Ce 異常、中程度の負の Eu 異常を示す。ジルコンは 780 °C の結晶化温度、1.2-1.0 Ma の形成年代を示す。著者は、ジルコンの化学組成の Eu/Eu*, Ce/Ce*, Yb/Dy, Lu/Ho の値を検証することにより、マグマが持つ斑岩型 Cu-Au 鉱化作用のポテンシャルを判定するツールとして応用が可能であると説明した。

本学位論文は、インドネシア、スンバワ島の Humpa Leu East 斑岩 Cu-Au 鉱徴地の鉱化作用に関わる地質記載を行い、方解石を含む熱水変質作用の成因、鉱床形成温度-圧力-深度、ジルコンの微量成分と U-Pb 年代を明らかにした研究内容である。本研究は、HLE 鉱徴地の探鉱および Sunda 鉱床生成区の斑岩型鉱床を対象とする資源探査の指針として大きな貢献となる。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。