

氏名（本籍）	レナルディ スヘンドラ（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18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、南スラウエシの Awak Mas 変成岩胚胎金鉱床の特徴と成因 - 中央ジャワ、Luk Ulo 複合岩体の金鉱化作用との比較 (Characteristics and Genesis of the Awak Mas Metamorphic Rock-Hosted Gold Deposit, South Sulawesi, in Comparison to the Gold Mineralization in the Luk Ulo Complex, Central Java, 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 Awak Mas gold deposit situated in the South Sulawesi, Indonesia holds 54 Mt mineral resource and 35.6 Mt reserves with 0.5 g/t Au cut-off grade in the Awak Mas, Salo Bulu, and Tarra prospects. The gold deposits are hosted by low-grade metamorphic rocks, such as metapelites, carbonaceous metapelites, metavolcanic rocks, and Metahematitic mudstone, metamorphosed up to lower greenschist facies. The genesis of the Awak Mas gold deposit has remained unclear due to some overlapping characteristics with several types of gold mineralization, including epithermal, orogenic, and intrusion-related gold deposits. Thus, this study aimed at recharacterizing this deposit on the basis of petrography, geochemistry, mineral chemistry, stable isotopes and fluid inclusion analyses to better understand the genesis of the Awak Mas gold deposit. As part of this study, we also investigated the characteristics and ages of intrusive rocks in the surrounding of the Awak Mas deposit, which are potentially related to the mineralization.

The three gold prospects share similar alteration and mineralization characteristics, which consist of three stages of hydrothermal veins; (1) milky quartz early-stage veins with local kaolinite-dickite alteration and pyrite-hematite-energite-luzonite-bornite-covellite-native gold/electrum ore assemblage, (2) carbonates, albite, quartz main-stage veins with prominent albitization and carbonatization and pyrite, hematite, chalcopyrite, energite, luzonite, tennantite, tetrahedrite, native gold/electrum ore assemblage, and (3) transparent quartz and albite late-stage veins with pyrite, chalcopyrite, tennantite, tetrahedrite, sphalerite, and native gold/electrum ore assemblage. The fluid inclusion study indicates similar characteristics for all mineralization stages, including (1) modes of homogenization temperature within 190–240 °C in the early-

stage to 150–200 °C and 160–210 °C in the main- and late-stage veins, respectively and (2) moderate salinity of fluid inclusions with averages within 4.3–6.9 wt.% NaCl eq. in the early-stage to 4.5–7.5 wt.% NaCl eq. in the main-, and 7.2–7.9 wt.% NaCl eq. late-stage veins.

Micro-XRF analysis shows that the hydrothermal alteration occurs as local (cm to m scales) alteration halos surrounding the veins, consisting of dominant albite in the proximal and dominant carbonates in the distal zones. Gold mineralization is mostly found in the alteration halo, particularly in reactive host-rocks, such as Metahematitic mudstone and metavolcanic rocks. Sulfidation of the Fe-rich host-rocks is the main mechanism for gold precipitation, resulting in strong association of gold and pyrite, whereas boiling, cooling, and mixing of hydrothermal fluids are responsible to the precipitation of gold within the veins or at the contact between veins and host-rocks.

Mineral chemistry of hydrothermal quartz, rutile, and phosphate minerals suggest both magmatic- and orogenic gold-type mineralization. EPMA detected elevated amounts of Ti in quartz (up to 42 ppm) and significant amounts of SO₃ in goyazite (4.13 wt.% avr.) and apatite (0.16 wt.%), similar to those found in the porphyry deposits. On the other hand, LA-ICP-MS analysis of TiO₂ phases shows relatively high content of Sb (>10 ppm) similar to those found in orogenic gold mineralization.

However, several lines of evidence suggest that the Awak Mas deposit is more genetically related to the magmatic intrusions. This includes the local acid alteration with vuggy texture and high sulfidation stage of ores in the early-stage mineralization, oxidized hydrothermal fluids in the early and main-stage mineralization, sulfur isotope composition of pyrite ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ = early-stage: +0.7‰, main-stage: +2.1‰, and late-stage: -1.4‰ avr.) and phosphates ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ = early-stage: +17.5‰ and main-stage: +22.4‰), carbon isotopes of carbonates with mantle signature ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$: -5.8‰ avr.), moderate salinity of fluid inclusions in all stages (6–8.8 wt.% NaCl eq.), and relatively high calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ of fluids in equilibrium with quartz from +3.5 to +8.8‰ for both early- and late-stage veins.

The intrusive rocks consist of gabbro to granite with tholeiitic to calc-alkaline affinity and volcanic arc tectonic signature. The granitoid consists of quartz, plagioclase, microcline, K-Feldspar with hornblende, biotite, pyroxene, titanite, epidote, tourmaline, apatite, and zircon as accessory minerals, suggesting I-type granitoid. The presence of ilmenite-dominated oxide in the biotite-rich granitoid and magnetite-dominated oxide in the hornblende-rich granitoid indicates two oxidation state of magma, reduced and oxidized I-type, respectively. The hornblende-rich granitoid is locally altered to chlorite-illite-epidote-pyrite-ilmenite-magnetite alteration assemblage. The sulfur isotope composition of pyrite disseminated in the altered intrusive rocks yielded $\delta^{34}\text{S}$ of +5.8 to +8.0‰, contrasting with the that of pyrrhotite from unaltered intrusive rocks with $\delta^{34}\text{S}$ at -8.0‰. This clearly suggests the intrusive rocks have been altered by the same hydrothermal fluids as those found in ores of the Awak Mas deposit. U-Pb ages of magmatic zircon from biotite-rich granitoid yielded magmatic age of 6.245–4.717 ± 0.025–0.023 Ma, whereas hornblende-rich granitoid yielded 34.308–30.073 ± 0.092–0.086 Ma. The timing of mineralization is constrained based on the occurrence of hydrothermal alteration in the intrusive rocks. The maximum mineralization age constrained by altered intrusive rocks is 30.073 Ma, which is considerably younger than metamorphic ages of Lantimojong metamorphic rocks (Cretaceous), providing evidence of non-orogenic-related mineralization, and suggests intrusion-related mineralization.

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出版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、中央ジャワの Luk Ulo 変成岩複合岩体および南スラウエシの Awak Mas 鉱床の金鉱化作用は、白亜紀の変成岩に胚胎し、前者は 1) 石英-イライト-黒鉛変質作用、2) 黄鉄鉱-磁硫鉄鉱の鉱物組み合わせ、3) 414-423 °C の形成温度、4) 堆積岩起源の硫黄の存在、等の点から造山型金鉱化作用であると述べた。一方、後者は、鉱床タイプが不明である点を問題提起した。

次に著者は、Awak Mas 鉱床は、3つの鉱化段階からなる熱水鉱脈/網状鉱脈からなることを説明した。1) 初期ステージは、黄鉄鉱、赤鉄鉱、硫砒銅鉱、ルソン銅鉱、斑銅鉱、自然金を含む乳白色石英脈と局所的なカオリナイト-ディッカイト変質作用、2) 主要鉱化ステージは、黄鉄鉱、赤鉄鉱、黄銅鉱、硫砒銅鉱、ルソン銅鉱、砒四面銅鉱-安四面銅鉱固溶体、自然金を含む炭酸塩鉱物-曹長石-石英脈、3) 後期ステージは、黄鉄鉱、黄銅鉱、砒四面銅鉱-安四面銅鉱固溶体、閃亜鉛鉱、自然金を含む透明石英-曹長石脈からなる。母岩には鉱脈に沿って数 cm から数 m の幅で熱水変質作用のハローが存在し、主に曹長石と炭酸塩鉱物からなる。脈石鉱物中の流体包有物は、均質化温度（最頻値）150–230 °C、塩濃度 6.0–8.8 wt.% NaCl eq. と全ての鉱化段階において同様の傾向を示す。著者は、金鉱化作用が主に変赤鉄鉱泥岩、変火山岩の変質ハロー中に認められことから、鉄に富む母岩の硫化が金沈殿の主なメカニズムであり、金は黄鉄鉱と同時に沈殿したこと、また、熱水の沸騰が鉱脈中の金沈殿を生じたことを説明した。

さらに著者は、EPMA 分析により、Awak Mas 鉱床のゴヤス石と燐灰石には、Luk Ulo 複合岩体と比較して、多量の SO₃ が含まれていること、Awak Mas 鉱床のルチルの Fe³⁺含有量は、Luk Ulo 複合岩体のルチルの Fe³⁺含有量よりも高いことを説明した。LA-ICP-MS 分析により、Awak Mas 鉱床および Luk Ulo 複合岩体のルチルは、他の造山型金鉱床と同様に比較的高い Sb (>10 ppm) 含有量を持つことが明らかになった。

著者は、Awak Mas 鉱床の成因について、1) 初期鉱化ステージが局所的に酸性変質と高硫化型の鉱化作用を伴う、2) 初期および主要鉱化ステージにおける酸化的な熱水流体、3) 黄鉄鉱とリン酸塩鉱物の δ³⁴S_{CDT} 値、4) 黄鉄鉱の高い Se 含有量、5) マントル起源の特徴を示す δ¹³C_{PDB} 値 (av. -5.8 ‰)、6) 中程度の熱水の塩濃度 (6.0–8.8 wt.% NaCl eq.)、7) 熱水の δ¹⁸O_{SMOW} 値、などの点から花崗岩の貫入に関わるものであると説明した。

また著者は、Awak Mas 鉱床周辺の深成岩類の特徴を説明し、熱水変質として含まれる黄鉄鉱の硫黄同位体組成とジルコンの U-Pb 年代から、Awak Mas 金鉱床は、白亜紀の Lantimojong 変成岩の年代よりも若いと推定されることから造山型ではなく、貫入岩関連型鉱床である

と説明した。

本学位論文は、インドネシア、中央ジャワの Luk Ulo 変成岩複合岩体および南スラウエシの Awak Mas 鉱床の金鉱化作用の地球化学的特徴と鉱床タイプを明らかにした研究内容である。本研究は、インドネシアにおいて変成岩に胚胎される金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。