

氏名（本籍）	Muhammad Zain Tuakia（インドネシア）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博 第253号
学位授与の日付	平成31年3月21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	工学資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	インドネシア、スラウエシ島、Salu Bulu 鉱徴地における金 鉱化作用の特徴と成因 (Characteristics and Genesis of Gold Mineralization in the Salu Bulu Prospect, Sulawesi, Indonesia)
論文審査委員	(主査) 教授 大場 司 (副査) 教授 石山 大三 (副査) 教授 佐藤 時幸 (副査) 教授 柴山 敦 (副査) 教授 今井 亮

論文内容の要旨

Several significant gold deposits hosted in metamorphic rocks have been discovered in Sulawesi, Indonesia, namely Paboya, Awak Mas, Palopo and Bombana. The Salu Bulu prospect is one of the gold prospects in the Awak Mas project in the central part of the Western Metallogenic Province, Sulawesi, Indonesia. The four domains in the Salu Bulu prospect (Biwa, Lelating, Bandoli and Freddie) has been explored by Placer Dome Inc., in 1999 and One Asia Resource Ltd., in 2011 to 2013 through 132 drilled holes with an average length of 100 m. The resource was measured and indicated about 5.6 million tons at 2.2 g/t Au with a cut-off grade at 0.5 g/t Au as well as an additional 0.5 million tons at 1.1 g/t Au as an inferred resource, reported by Tetra Tech in 2013. The Salu Bulu prospect is hosted by the cover sequence of Latimojong Metamorphic Complex. Within the prospect, the Latimojong Metamorphic Complex consists of meta-dark (graphitic), green (chloritic) and red (hematitic) mudstone, siltstone, sandstone and intercalated meta-volcanic and volcanoclastic rocks along with phyllite. The ore bodies in the Salu Bulu prospect are north-south trending and dipping steeply eastward, approximately three meters thick which are associated with veins, stockwork and breccias with an orientation sub-parallel and discordant to the

foliation of the host rocks. The veins can be classified in three stages namely early, main and late stages and gold mineralization is related to the main stage. The veins formed during the main stage are composed of quartz, carbonate (mainly ankerite) and albite. The breccia formed mainly during the main stage of mineralization. The breccia is associated with quartz, carbonate (mainly ankerite), albite and pyrite.

Sulfide minerals, native gold and electrum are lesser abundant or absent in the veins and stockwork. High grade gold ores in the Salu Bulu prospect are accompanied with intense alteration along the main stage veins and breccia. Alteration mineral assemblage includes ankerite \pm calcite, quartz, albite and pyrite along with minor sericite. Pyrite is the most abundant sulfide mineral, which is spatially related to gold (<2-42 μm in size). It is more abundant as dissemination in the altered host rocks than those in veins, suggesting that water-rock interaction played a role to precipitate pyrite and gold in the Salu Bulu prospect. Pyrite shows several different morphologies and textures: fine-grained, porous, deformed and massive pyrites. Lesser amounts of tennantite-tetrahedrite, chalcopyrite, bornite, galena, hematite and rutile are also present as inclusions in pyrites, and as discrete disseminated minerals in altered host rocks, veinlets and matrix of breccia. Covellite and chalcocite occur on the rim of some chalcopyrite.

Correlation coefficients of whole-rock Ag, Ni, Mo and Na contents to whole-rock Au content are above 0.5 indicating that they are strongly correlated with gold. The Mo, Ni, Sb, Hg, Se, Sr and W contents are relatively elevated in altered host rocks and ores than in unaltered host rocks, whereas the Cs, Rb and V contents are relatively depleted. The K_2O content is depleted in hydrothermally altered host rocks and ores indicating absence of potassic alteration and decomposition of K-bearing mineral in host rocks during hydrothermal alteration. Various elevated and depleted of MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 and MnO contents in hydrothermally altered host rocks and ores are related to inherited host rocks composition (i.e. mineral composition). PAAS normalized REE plots of unaltered and altered host rocks and ores are relatively similar patterns which are depleted of LREE and sub-horizontal HREE with various Eu positive anomalous (Eu/Eu^* varying from 0.1 to 0.9). ΣREE of unaltered host rocks is relatively similar and higher than hydrothermally altered host rocks and ore indicating evidence for mobility and fractionation of REE during hydrothermal alteration. Gold was introduced as electrum and native gold with $\text{Au} / (\text{Au} + \text{Ag})$ ratio ranging from 66.2 to 78.5 atomic % and from 81.4 to 82.3 atomic %, respectively as fracture filling and inclusion in pyrites. The Ni and Co concentrations of pyrite are high, 10 - 7780 ppm and 390 - 2710 ppm, respectively, in edges, cores and rims of pyrite with Co/Ni ratio of

pyrite ranging from 0.09 to 63.

Fluid inclusions in quartz in the veins of the main stage and the matrix of breccia are mainly two-phase liquid-rich inclusions with minor two-phase vapor-rich and single-phase liquid or vapor inclusions. CO₂ and N₂ are detected in the fluid inclusions by Laser Raman microspectrometry. Raman spectrum of CO₂ clearly shows strong bands at ~ 1285 cm⁻¹ (ν_1) and ~ 1388 cm⁻¹ ($2\nu_2$) in mineralized vein and at ~ 1282 cm⁻¹ (ν_1) and ~ 1385 cm⁻¹ ($2\nu_2$) in the matrix of breccia, N₂ and graphite at ~ 2328 cm⁻¹ and ~ 1617 cm⁻¹ respectively in mineralized vein and at ~ 2327 cm⁻¹ and ~ 1606 cm⁻¹ respectively in matrix of breccia. Homogenization temperature (Th) of fluid inclusions in the veins ranges from 132 to 357 °C and that in the matrix of breccia ranges from 148 to 368 °C, which homogenized into a liquid phase. Salinity of fluid ranges from 3.5 to 8.0 wt% (average 6.3 wt%) NaCl equivalent in the veins and from 3.9 to 8.5 wt% (average 6.0 wt%) NaCl equivalent in the matrix of breccia. The wide range of homogenization temperature of fluid inclusions and the co-existence of two-phase liquid-rich and two-phase vapor-rich inclusions suggest boiling of fluid when they were trapped. The trapping temperature was 190 to 210 °C. Fluid boiling probably occurred when the fluid was trapped at approximately 120 to 190 meters below the paleo water table. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values of fluid, +5.8 ‰ and +7.6 ‰ calculated from $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ of quartz (+17.2 ‰ and +19 ‰) at 205°C from the main stage vein indicate oxygen isotopic exchange with wall rocks during deep circulation. $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ of pyrite narrowly ranges from -2.0 to +3.4 ‰ suggesting a single source of sulfur. Gold mineralization in the Salu Bulu prospect occurred in an epithermal condition, after the metamorphism of the Latimojong Metamorphic Complex and emplacement of Palopo Granite or Enrekang Volcanic Series in the Late Miocene to Pliocene. It was formed at relatively shallow depth from CO₂-bearing sodic mineralizing fluid with low to moderate salinity (3.0 - 8.5 wt% NaCl equiv.). Temperature and pressure of ore formation range from 190 to 210 °C and 1.2 to 1.9 MPa, respectively.

論文審査結果の要旨

提出された博士論文の草稿，博士論文要旨および論文目録について審査し，不備がないことを確認し，書類審査は合格とした。資源学専攻の教員および外部からの審査委員により構成される審査委員会において審査した。本学位論文では，インドネシア，スラウエシ島中央部において変成岩類の中に胚胎される石英脈に伴われる金鉱化作用について，母岩の変質鉱物の記載および全岩化学組成，鉱化作用を伴う角礫及び鉱脈の鉱石鉱物の記載，角礫及び鉱脈の石英に含まれる流体包有物のマイクロサーモメトリーおよびラマン赤外分

光分析、硫化物の硫黄同位体組成などに基づいて論じ、流体包有物に熱水の沸騰が認められることから、変成岩を母岩とするにもかかわらず浅熱水系において鉱床が生成したこと、金品位とニッケル含有量の間には正の相関が認められることから苦鉄質岩を循環した熱水に金属が抽出されたこと、石英脈中ではなく母岩中の黄鉄鉱に伴われて金が産することから母岩中の鉄の硫化反応が金の沈殿に重要な役割を果たしたことを示した。インドネシアの変成岩中に胚胎する金鉱床は、これまで変成作用に伴われる造山型金鉱床とされてきたが、本研究により新しい知見が得られたことは、資源学的に重要な業績である。

まず著者は、研究対象地域の概要と研究背景、探鉱の経緯、先行研究、成因研究の問題点を述べた後に本研究の目的を説明した。次に、スラウエシ島の地質セッティングと鉱床生成区、研究対象である **Salu Bulo** 金鉱徴地の近年の探鉱プロジェクトに基づく資源量を説明した。また、研究対象の周辺地質、地質調査で観察した露頭および試錐コアの産状記載と薄片の顕微鏡観察の結果から、胚胎母岩である **Latimojong** 変成岩複合体について説明した。その後、著者は鉱石の産状と熱水変質作用の特徴、全岩化学組成と鉱物化学組成、流体包有物研究と安定同位体の分析結果を説明した。**Salu Bulo** 金鉱徴地の鉱体は、南北走向、東急傾斜で厚さ約 3 m の鉱脈および網状鉱脈、角礫から構成され、鉱体は母岩の片理と斜交する。鉱脈は、初期、主要期、後期の 3 段階に区分され、石英、炭酸塩（主としてアンケル石）、曹長石からなる。角礫は主要期に形成された。硫化物と金の鉱化作用は、主要期の脈と角礫に沿う変質部に生じており、変質鉱物は、アンケル石、方解石、石英、曹長石、黄鉄鉱および少量の絹雲母からなる。鉱石の産状観察に基づき、水-岩石反応が金鉱化作用に大きな役割を果たしたことが明らかになった。黄鉄鉱中には、少量の自然金、エレクトラム、砒四面銅鉱・安四面銅鉱、黄銅鉱、斑銅鉱、方鉛鉱、赤鉄鉱、ルチルが含まれる。全岩化学分析によれば、Au は、Ag, Ni, Mo, Na の各元素と正の相関を示す、一方、Mo, Ni, Sb, Hg, Se, Sr, W は、未変質の岩石と比較して鉱石および変質岩に濃集する傾向を示す。自然金とエレクトラムは黄鉄鉱中の割れ目を充填または包有物として産出し、化学組成は 66.2-82.3 atomic % Au である。黄鉄鉱は高い Ni (10 - 7780 ppm) と Co (390 - 2710 ppm) の含有量を示す。流体包有物は、主に液相-気相の 2 相包有物からなり、気相に富む包有物と液相に富む包有物が共存することから熱水流体の一部は沸騰していた。レーザーラマン分析により流体包有物の気相に CO₂ と N₂ の含有が確認された。流体包有物のマイクロサーモメトリーにより、**Salu Bulo** 金鉱徴地を形成した熱水は 3.0 - 8.5 wt% NaCl 相当塩濃度であり、鉱床形成温度および深度、圧力は、190-210 °C、古地下水面下 120-190m, 1.2-1.9 MPa であることが明らかになった。脈中の石英の酸素同位体組成から熱水の同位体組成を求め、鉱化熱水は地下深部を循環し母岩との反応により酸素同位体交換が生じたこと、黄鉄鉱の硫黄同位体組成は -2.0 to +3.4 ‰ でありマグマ起源であることが明らかになった。

これまでに **Salu Bulo** 金鉱徴地の成因は、造山型金鉱床の可能性があると考えられてきたが、露頭および岩石・鉱石サンプルの詳細な観察と記載、各種室内実験を用いて、本鉱床は浅熱水金鉱床であることを明らかにし、鉱床の生成環境と成因を論じたことは、資源

学的に重要な業績であると認められることから、学位論文として十分な業績であると認め、
審査は合格と判定した。