

インドネシア、パプア州、グラスベルグ鉱山、DMLZ鉱床における、銅-金鉱化作用に伴われる鉱物組み合わせに関する先行研究 Initial study on the mineral assemblages associated with Cu-Au mineralization, DMLZ deposit, Grasberg mine, Papua, Indonesia

*中尾 彰汰¹、米津 幸太郎¹、ティンデル トーマス¹、ロサナ メガ²、ベンサマン ベニー³

*Shota Nakao¹, Kotaro Yonezu¹, Thomas Tindell¹, Mega Fatimah Rosana², Benny Bensaman³

1. 九州大学、2. パジャジャラン大学、3. PTフリーポートインドネシア

1. Kyushu University, 2. Pagjajaran Universitas, 3. PT. Eksplorasi Nusa Jaya Freeport Indonesia

グラスベルグ鉱山は世界でも最大規模の銅-金鉱山の一つとして知られている (Cu: 341,099t, Au: 35t, 2015)。鉱山の歴史は1936年にオランダの地質学者により発見されたことに始まり、1972年からのPT Freeport Indonesiaによる大規模採掘へとつながった。現在操業中の鉱床は全部で3つあり、グラスベルグ露天掘り鉱床、Deep Ore Zone (DOZ)坑内掘り鉱床、そしてDeep Mill Level Zone(DMLZ)坑内掘り鉱床である。鉱床のタイプとして、グラスベルグ露天掘り鉱床は斑岩銅鉱床、残り二つの坑内掘り鉱床はスカルン鉱床となっている。グラスベルグ露天掘り鉱床は、現在のグラスベルグ鉱山全体の生産量の70%を占める鉱床であるが、高品位の坑内掘り鉱床を開発するという計画に沿って、1990年から始まった操業を2017年末期に終了し、グラスベルグ鉱山内すべての鉱床が坑内掘り鉱床へとなる予定である。一方、DMLZ鉱床は2015年に操業を開始した最も新しい鉱床であり、かつ2021年までに鉱石生産量を8万t/日を見込まれている鉱床であるが、DMLZ鉱床は操業を開始して間もないため学術的調査もあまり進んでいない。そこで、本研究ではDMLZ鉱床におけるスカルン鉱物組み合わせと鉱石鉱物の分布について理解し、金属鉱化作用とスカルン作用の関連について明らかとすることを目的とした。

DMLZ鉱床での金属の鉱化作用は、白亜紀から第三紀のKembelangan GroupやNew Guinea Limestone Groupの石灰岩や砂岩に、鮮新世に貫入した貫入岩である閃緑岩が、密接に関連している。貫入岩の閃緑岩から離れるにつれて、岩相がホルンフェルス帯、スカルン帯、そして結晶質石灰岩へと変わり、それらすべての岩相を貫くコア試料(TE-17-09)を中心に、鉱物組み合わせの分布を明らかにするために均一間隔でサンプルを採取した。なお、本研究では、特にエクソスカルン変質地帯（コア試料の坑口から約320m~480m地点）に着目し実験を行った。研究手法としては現地調査による肉眼観察に加え、研磨片・薄片の作製、SEM-EDXによる鉱物同定、XRFによる化学分析を行った。

スカルン鉱床には高温の前行過程と低温の後退過程という二つの異なる変質の過程が存在しており、前行過程においてザクロ石などの無水鉱物が形成され、後退過程において緑簾石などの含水鉱物や硫化鉱物が形成されることが分かっている。顕微鏡観察より、前行過程における主な鉱物としてザクロ石、後退過程における主な鉱物として緑簾石、黄銅鉱、黄鉄鉱が確認された。また、主な鉱石鉱物は黄銅鉱と黄鉄鉱、脈石鉱物は緑簾石であったことから、DMLZ鉱床のエクソスカルン変質地帯では後退過程において形成された鉱物が卓越していると言える。顕微鏡観察により観察された自然金はすべて黄銅鉱に付随していたことから、DMLZ鉱床における金の鉱化作用も後退過程において起こっていると考えられる。また、高温の前行過程に形成される主な鉱物であるザクロ石がコア試料の坑口から約360m地点の試料を境に観察できなくなったことと、母岩中の方解石が対照的にその地点付近より遠い地点において卓越してきたことから、貫入岩からもたらされた熱水はその地点までに前行過程の鉱物ができない温度にまで冷却されたと考えられる。

結論として、前行過程に形成されるザクロ石は貫入岩近傍（コア試料の坑口から約360m地点まで）の試料でのみ観察された一方で、後退過程に形成される緑簾石や、黄銅鉱と黄鉄鉱が広範囲にわたり発達していたことから、DMLZ鉱床のエクソスカルン変質地帯における主なスカルン鉱物と鉱石鉱物は後退過程において形成されており、自然金もすべて黄銅鉱に付随していたことから、金の鉱化作用も同様に、後退過程に発達していることが解明された。

キーワード：スカルン、鉱物組み合わせの分布、銅-金鉱化作用

Keywords: skarn, zonation of mineral assemblages, Cu-Au mineralization

Characteristics of Gold Mineralization in the Salu Bulu Prospect, South Sulawesi, Indonesia

*Muhammad Zain Tuakia¹, Ryohei Takahashi¹, Akira Imai¹

1. Akita University

The Salu Bulu prospect is one of the gold prospects in Awak Mas project which is located in Luwu District, South Sulawesi Province, Indonesia. The prospect is hosted in meta-sedimentary rocks of pre-Cenozoic Latimojong Formation which consists of dark (graphitic), green (chloritic) and red (hematitic) mudstone, siltstone, sandstone and intercalated meta-volcaniclastic rocks. The mineralized zones are approximately three meters thick and associated with stockwork veins and cataclastic breccias with an orientation sub-parallel and discordant to the foliation of the host rocks. Carbonatization (ankerite \pm calcite or dolomite), silicification, albitization and sulfidation (pyrite) are common in addition of minor sericitization.

Pyrite is the most abundant sulfide mineral which is commonly more abundant as disseminated in the altered host rocks than in veins. It shows different morphologies and textures: fine-grained, porous and deformed pyrites. Trace amounts of tennantite-tetrahedrite, chalcopyrite, bornite, galena, hematite and rutile are also present as inclusions in pyrite and rarely as discrete minerals. Covellite and chalcocite occur on the rim of some chalcopyrite, which are possibly of supergene origin. Bulk chemical compositions of strongly altered rocks and ore bodies indicate that Au content is correlated with Ag, Ni, Na₂O and Mo contents and show Au/Ag ratio ranges from 1.5 to 7 (average 4.4). Gold occurs as electrum and native gold as fracture filling and inclusion in pyrite with Au/(Au+Ag) ratio ranging from 66.2 to 78.5 atomic % and from 81.4 to 82.3 atomic %, respectively.

Fluid inclusions in mineralizing veins and matrix of cataclastic breccia are mainly liquid rich vapor-liquid H₂O inclusions and minor H₂O vapor inclusions. Laser Raman detected CO₂ and N₂ gases in these inclusions. Homogenization temperature (Th) of fluid inclusions in mineralizing veins ranges from 132 to 336 °C and that in the matrix of cataclastic breccia ranges from 148 to 368 °C, which homogenized into the liquid phase. Salinity of fluid ranges from 4.3 to 9.3 wt.% (average 7.4 wt.%) NaCl equivalent in mineralizing veins and from 5 to 9.5 wt.% (average 7.1 wt.%) NaCl equivalent in matrix of cataclastic breccia. Carbonate alteration was probably formed by CO₂ rich mineralizing fluid as it was confirmed by the presence of CO₂ in fluid inclusions, while albite alteration and the occurrence of albite in veins and matrix of cataclastic breccia indicates the presence of sodium-rich mineralizing fluid. Hydrothermal activity accompanied with deformation during formation of cataclastic breccia formed pyrite and gold. In the alteration halo of quartz-carbonate \pm albite vein and stocwork, gold precipitated as fracture filling and inclusion in pyrite.

Keywords: Meta-sedimentary rocks, pyrite, quartz-carbonate \pm albite vein, CO₂

Fe isotope and trace element variations in Shilu iron deposit, Hainan province, China: an early Neoproterozoic iron formation

*Jian Sun¹, Xiang-kun Zhu¹, Zhi-hong Li¹

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences

The Shilu Fe ore deposit in Hainan province, China is known as the richest Fe-ore deposit in Asia, with proven ore reserves exceed 460 Mt of Fe-ore at an average grade of 51% FeO. It is dominated by high-grade hematite-type Fe ores, which are hosted in dolomite marble of Shilu Group. The constrained age of the ores is early Neoproterozoic, between ca. 0.8Ga and ca. 1.0Ga. The genesis of the deposit is still under debate due to its complicated geological characteristics. The proposed models include: 1) skarn type deposit; 2) magmatic-volcanic origin (erupted volcano); 3) exhalative sedimentary origin.

Here Fe isotopes and trace elements for iron ores and jasper from the main orebody (Beiyi Orebody) of Shilu deposit were systematically investigated based on carefully petrographic studies. It is observed under the microscope that fine-grained jasper is widely distributed in the Fe ores. The Fe isotopes and PAAS-normalized REE patterns vary regularly for iron ores from different layers. There are three layers of iron ores in Beiyi Orebody. The iron ores from the bottom (lower) layer have highly positive $\delta^{56}\text{Fe}$ values of ca. 1‰ ~ 1.5‰. Their PAAS-normalized REE patterns show remarkably positive Eu anomalies and negligible Y anomalies, indicating partly sourced from high-temperature hydrothermal fluids. On the other hand, the iron ores from the middle layer have slightly positive $\delta^{56}\text{Fe}$ values of ca. 0.2‰ ~ 0.4‰, whereas those from the upper layer have $\delta^{56}\text{Fe}$ values of ca. -0.2‰ ~ 0.2‰. Their PAAS-normalized REE patterns imply a mixed source from seawater and low-temperature fluids, with LREE depleted and HREE enriched, no or negligible Eu positive anomalies, and slightly positive Y anomalies.

The positive and variable Fe isotope compositions, and characters of REE patterns, as well as the fact that jasper is widely distributed in the iron ores, convincingly demonstrate that the Shilu Fe deposit is of chemical-sedimentary origin, or in other word, banded iron formation (BIF).

Shilu iron formation is not the only one of the early Neoproterozoic iron formations. Another one, the Aok iron formation in NW Canada, has also been previously reported. They likely deposited in a same period according to stratigraphic correlation. It seems that the early Neoproterozoic iron formations are not of local occurrence, but may be widely in globe, although their scale is not as large as that of Cryogenian iron formations. The origin and significance of occurrence of the early Neoproterozoic iron formations are interesting issues worthy of further studies, but obviously they are not related to the "Snowball Earth".

The Fe isotope and REE variation trend in Shilu iron deposit provide insights into the temporal evolution of iron deposition. The variation of REE patterns among different layers of ore deposit indicates that the degree of mixing of high temperature hydrothermal fluids is not constant during Fe precipitation. The correlation between Fe isotopes and REE patterns indicate that the Fe isotope variation may be affected by changes of physico-chemical conditions (such as pH, Eh and T) during Fe-oxide precipitation.

Keywords: iron deposit, iron isotopes, rare earth element, iron formation, early Neoproterozoic

Petrographic study of geological units and veins of the Co-O epithermal gold deposit, Mindanao, Philippines

*Kristine Joy Taguibao¹, Akira Imai¹, Ryohei Takahashi¹, Ciceron, Jr. Angeles^{2,3}, Samuel Declaro², Jesse Umbal²

1. Akita University, Japan, 2. Philsaga Mining Corp., Philippines, 3. Medusa Mining Ltd., Australia

Located in the eastern Mindanao Island, Philippines, the Co-O mine of the Philsaga Mining Corp. (a Philippine subsidiary of the Medusa Mining Ltd. of Australia) hosts two mineralization types, namely: intermediate sulfidation epithermal gold (+ Ag ±Cu ±Pb ±Zn) quartz vein and porphyry copper-gold. Eastern Mindanao belongs to the Pliocene-Quaternary calc-alkaline magmatic zone of the Central Mindanao Volcanic Zone (Mines and Geosciences Bureau, 2004). Stratigraphic units in this region include andesitic and pyroclastic basement rocks of the Eocene Anoling Andesite, intrusive rocks of the Early Oligocene Diwata Diorite, and sedimentary sequences of the Late Oligocene to Early Miocene Bislig Formation. Younger limestone units are the Lower Middle Miocene Rosario Limestone and Pleistocene Hinatuan Limestone. This study is part of a research on the structural geology characterization of this deposit and vicinity. It is a review of the general geology and mineralogical characteristics of the study area through field surveys and petrography of the main geologic units and veins, integrated with XRD analyses of clay minerals.

In the Co-O mine, the main geologic units are Eocene to Oligocene basaltic-andesitic to andesitic volcanic flows and volcanoclastic basement deposits, Oligocene andesitic to dioritic stocks and dikes intruding the volcanic basement rocks, a diatreme-maar complex that cuts and overlies these volcanic and intrusive rocks, and overlying sedimentary sequences (e.g., Sonntag and Hagemann, 2010). The porphyry copper-gold mineralization and overprinting intermediate sulfidation epithermal gold mineralization are mainly hosted in an intrusive stock and surrounding volcanic rocks. The epithermal vein system is characterized by structurally-controlled early stage hydrothermal breccias and main stage epithermal quartz veins.

The volcanic basement rocks generally contain phenocrysts of plagioclase, clinopyroxene, and hornblende crystals set in a microcrystalline matrix. In most samples, sub-angular to sub-rounded plagioclase crystals (~1-5 mm) show alteration to clay minerals. As verified through XRD, the clay minerals are smectite (montmorillonite) and chlorite (± kaolinite). The andesite porphyry and dioritic intrusive rocks mainly contain large crystals (>1 mm) of plagioclase, hornblende, and minor quartz. Andesite porphyries contain plagioclase, clinopyroxene, and opaque minerals (pyrite ±chalcopyrite), and some with xenoliths of porphyritic andesites. Plagioclase crystals exhibit alteration to clay minerals (chlorite, interstratified illite-montmorillonite ±kaolinite). Veins/veinlets cutting across these units are generally quartz ±calcite, with opaque and clay minerals. The diatreme portion of the diatreme-maar complex consists of monomictic to polymictic breccias containing clasts of andesite porphyry to diorite and andesitic volcanics. The clasts are generally lithic fragments and partly detrital crystals set in patches of fine-grained quartzofeldspathic, calcitic and chloritic minerals. Plagioclase crystals appear to be bloated and altered to clay minerals (smectite/montmorillonite, chlorite, interstratified illite-montmorillonite ± kaolinite).

Petrographic study of the veins in Co-O is partly used for fluid inclusion microthermometry. The quartz ± calcite veins are generally white to smoky/gray and exhibit massive, banded, comb/crustiform, and

mosaic textures. Initial results indicate a dominance of small inclusions (<2 microns) with only a few measurable inclusions (>5 microns). These inclusions occur within quartz and calcite crystal grains as internal trails and clusters of two-phase inclusions, including dominant liquid-rich vapor-liquid inclusions with rare vapor-rich inclusions. Previous consultancy works (Hagemann and Grignola, 2012; Hagemann and Roudaut, 2014), which investigated similar crystal grains of quartz and calcite veins, interpreted the occurrence of these inclusions as pseudosecondary, from which microthermometric analyses were measured. The occurrence of such assemblages is consistent with fluid boiling during fluid inclusion entrapment and formation of the quartz \pm calcite veins (Hagemann and Grignola, 2012).

Keywords: petrography, geology, Philippines, Co-O mine

鹿児島湾若尊海底熱水系における輝安鉱の沈澱条件

Precipitation condition of stibnite at Wakamiko submarine Hydrothermal system in Kagoshima Bay, Japan

小林 真理²、*山中 寿朗¹、川角 彰吾²、柏村 朋紀²、千葉 仁²

Mari Kobayashi², *Toshiro Yamanaka¹, Shogo Kawasumi², Tomoki Kashimura², Hitoshi CHIBA²

1. 東京海洋大学、2. 岡山大学大学院自然科学研究科

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

鹿児島湾湾奥部の水深約 200m の海底に若尊熱水系と呼ばれる活発な熱水噴出活動が確認されている。過去の潜航調査から少なくとも3か所でチムニーを伴う熱水噴出活動が見つかっており、これらのチムニーは主に輝安鉱の塊状硫化物から成るマウンドの上に形成されている。先行研究より、この硫化物マウンドはかつて海底下で形成され、その後小規模な水蒸気爆発のような噴火活動が起こり、海底面上に噴出した可能性が示されており、海底下において鉱床規模での硫化物沈殿が生じていることが期待されている。

本研究では、若尊海底下において輝安鉱沈殿適した条件が存在するのかを明らかにすることを目的とし、鉱物の共生関係、EPMA分析による元素分析、硫黄同位体比測定を行い、その結果と先行研究で明らかとされている熱水の化学的、物理的条件に基づいて熱力学計算を行った結果を合わせて輝安鉱沈殿条件について検討した。

検鏡およびEPMA分析を行った結果、微量ではあるが黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、黄銅鉱、方鉛鉱の存在が認められた。硫黄同位体比測定の結果、輝安鉱の硫黄同位体比は試料ごとにあまり差が無いのに対し、黄鉄鉱の硫黄同位体比には比較的大きな差が認められた。産状と合わせて考えると、これらの硫化物が輝安鉱と共生関係にあるとは見せないと結論づけた。閃亜鉛鉱中のFeS含有量についてEPMA分析を行った結果、0.5~41.0mol%とおおきなばらつきを示し、このことから閃亜鉛鉱は様々な酸化還元条件で沈殿していると考えられた。よって、熱水の酸化還元条件は一様ではなく、輝安鉱も様々な酸化還元条件で沈殿していると考えられる。輝安鉱の硫黄同位体比と、本海域の噴気ガスや熱水試料から得られた硫化水素の同位体比を用いて硫黄同位体地化学温度計を用いて形成温度を見積もったところ110~220°Cと算出された。

アンチモンに関する熱力学データから、アンチモンは $H_2Sb_2S_4$ 、 $HSb_2S_4^-$ 、 $Sb_2S_4^{2-}$ 、 $Sb(OH)_3$ の錯体で熱水中に溶存していると推定された。酸化還元条件はアンチモンの溶解度と関係がなく、さらに硫化水素濃度の変化による溶解度への影響もほとんどないと考えられた。また、pH条件について、若尊では熱水中に火山ガス由来もしくは堆積有機物分解起源の CO_2 が多量に溶解していることによりpH=6でほとんど一定であるため、pH変化に伴う溶解度の変化は無視できる。このような条件下において熱水が200°C以上になると1ppm以上のアンチモンが熱水中に溶け込み、鉱液として有効な熱水になると考えられた。その一方で、温度が170°Cより低温になると溶解度は劇的に低下し、それによって輝安鉱の沈殿も生じると推測された。この温度条件は硫黄同位体比から推測された輝安鉱の沈殿温度と矛盾しない。熱水の温度低下は、上昇に伴う伝導的なものと、海水との混合によるものが考えられる。いずれの場合も、輝安鉱の沈殿に影響しないが、本海域からはマグネシウムを含む熱水性粘土鉱物が報告されており、その形成温度が約130°Cとされていることから、海水の混合が温度低下の主因だと考えられる。なお、本海域の硫化物には最大500ppmほどの金の濃縮が認められるが、金の濃縮は、酸化的な海水の混合に起因すると考えられる。

以上より、若尊熱水系における輝安鉱の沈殿は温度によるコントロールが主体であり、輝安鉱の沈殿には高温の熱水が噴出するチムニーよりも海底下におけるおだやかな温度低下が生じている環境のほうが適していると考えられる。

キーワード：輝安鉱、海底熱水系、鹿児島湾

Keywords: stibnite, submarine hydrothermal system, Kagoshima Bay

秋田県北鹿地域におけるR2流紋岩の地質学的研究：黒鉱鉱床分布との関係

Geological study on R2 rhyolite in the Hokuroku District, Akita: their alteration patterns and relationship to Kuroko ores

*野中 建太¹、山田 亮一¹、掛川 武¹

*Kenta Nonaka¹, Ryoichi Yamada¹, Takeshi Kakegawa¹

1. 東北大学理学研究科地学専攻

1. Graduate School of Science, Tohoku University

1500万年間に形成された黒鉱鉱床は、熱水変質を被った火成岩などの上盤岩石に覆われ保存されてきている。上盤岩石の熱水変質分布と黒鉱鉱床の空間分布に関する研究は皆無である。上盤岩石の変質と黒鉱の分布が明らかになれば、現在の海底下に埋没した黒鉱鉱床の探査指針を与えるものとなり重要である。そこで本研究では秋田県北鹿地域の黒鉱鉱床上盤のR2流紋岩を対象とし、火山岩層序とそれらが被った熱水変質の産状を明らかにすること、後黒鉱期の海底火山活動と熱水活動域の分布、黒鉱鉱床との空間的關係に関して地質学的・岩石学的研究を行うことを目的とする。

深沢鉱山および餌釣鉱山近傍地域の野外調査を行った結果、この地域に分布するR2流紋岩岩体の内部構造が明らかになった。岩体内部には成層した3種の岩石が見出された。最下層岩石は、数十cm大の礫～細礫からなり、珩長質溶岩ドームの自破碎した外殻部と解釈した。細礫内部には石英や同一方向に伸びる不定形～レンズ形岩片を伴う流離構造が認められたが、全体的に粘土化が著しい。特に礫間の基質には約500 μm幅の石英脈が発達しており、自形黄鉄鉱が点在し、熱水変質が著しいゾーンと考えられる。この上位には、火山礫凝灰岩が存在した。緑色粘土化変質を受けた基質に材木状軽石礫や流紋岩質溶岩礫、玄武岩質溶岩礫を含む。材木状軽石は最大数cmの垂角礫であるが、一方で流紋岩質および玄武岩質溶岩礫は数十cm大の巨礫から細礫の垂角礫として存在していた。水中火砕流起源、あるいは再堆積性の火山砕屑岩であると考えられ、堆積後、熱水変質を被ったと考えられる。この火山砕屑岩は、角礫岩により貫かれていた。調査地域最上位層として変質の度合いの低い流紋岩質溶岩流が見出された。

一方、大茂内沢地域では、R2流紋岩岩体は複数のflow unitで構成され、少なくとも厚さ100m分の厚さに達する。個々のflow unitは塊状相とその上部に発達する板状節理からなる。flow unit内部は数cm幅のシリカ脈を伴うことが多いが、著しく変質した板状節理部にはセドナイトなどの緑色鉱物が卓越する。以上の結果により、黒鉱鉱床近傍上盤では、硫化鉱物（黄鉄鉱）をとともう熱水変質を確認できた。これは、鉱床形成後の継続的な海底熱水活動の痕跡である可能性がある。その一方で黒鉱鉱床から離れた地域では、熱水変質は認められるが、溶岩噴出・流動時の海水との反応によるものであると考えられる。

キーワード：北鹿地域、黒鉱層準上盤、後黒鉱期活動、珩長質火山岩類、熱水変質

Keywords: Hokuroku district, Hanging-wall sequence of Kuroko ores, Post-Kuroko activity, Felsic volcanic rocks, Hydrothermal alteration

Petrochemistry of Plutonic Rocks along Loei Fold Belt, Northeastern Thailand

*Patchawee Nualkhao¹, Ryohei Takahashi¹, Akira Imai¹, Punya Charusiri²

1. Akita University, 2. Chulalongkorn University

Petrography and geochemistry of Permo-Triassic plutonic rocks from different provinces along the Loei Fold Belt, northeastern Thailand were studied. The Loei Fold Belt is an 800-km north-south trending fold belt that hosts an epithermal Au and several skarn Cu-Au deposits. Petrographic analysis of the granodiorites, diorites and granites in the area shows that the rocks consist mainly of quartz, plagioclase, hornblende and biotite. Orthoclase feldspars has been noted from samples in the Loei Province. Accessory minerals such as magnetite and ilmenite were also present. Magnetic susceptibilities of granitoids vary from 0.01 to 11.14×10^{-3} SI in the Loei Province, from 0.07 to 9.9×10^{-3} SI in the Petchabun Province and 0.02 to 2.81×10^{-3} in the Chantaburi Province. Concentrations of major elements suggest that these intermediate to acid igneous rocks have calc-alkaline affinities. Trace element geochemistry upon normalization to chondrite shows moderately elevated LREEs and relatively flat HREEs, with distinct depletion of Eu. Plotting concentrations of Rb versus Y/Nb and Nb/Y in tectonic discrimination diagrams for granitoids show that the rocks formed in volcanic-arc setting. New age data from radiometric K-Ar dating of orthoclase from granodiorite in the provinces of Loei and Nakhon Sawan yielded ages of 171 and 221 Ma, respectively. Age data of hornblende separated from diorite in Lopburi Province yielded ages of 219 Ma. Sulfur isotope data of pyrite separated from limestone and skarn deposit in Wang Saphung, Loei Province, show negative values of $\delta^{34}\text{S}$ (CDT) from -9 to +1‰. The sulfur isotope values suggest that the magma had been influenced by light biogenic sulfur from local country rocks.

Keywords: Loei Fold Belt, Geochemistry, Petrology, Calc-alkaline, Thailand

レーザーアブレーションICP-MSを用いたラテライト質ニッケル鉱石中のスカンジウムの定量分析

Quantitative analysis of scandium in lateritic nickel ores using LA-ICP-MS

*昆 慶明¹、横山 隆臣¹、江島 輝美¹、実松 健造¹、Maulana Adi²

*Yoshiaki Kon¹, Takaomi D Yokoyama¹, Terumi Ejima¹, Kenzo Sanematsu¹, Adi Maulana²

1. 産業技術総合研究所、地圏資源環境研究部門、2. ハサヌディン大学

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Hasanuddin University

スカンジウムは広義の希土類元素に含まれるが、マグマの分化や岩石の風化の過程での地球化学的挙動はイットリウムやランタノイドとは異なる。そのため、スカンジウムは希土類鉱床に限らず、様々な鉱床の副産物として生産されてきたが、主要なスカンジウム含有鉱物が何であるかは明らかになっていない。本研究では、ラテライト型ニッケル鉱床のスカンジウム含有鉱物を特定するため、インドネシアのSoroako鉱床のニッケル鉱石についてLA-ICP-MSを用いて局所元素分析を行った。LA-ICP-MSによる分析径はおよそ10 μm 程度であるため、ミクロン-サブミクロンオーダーの微細な鉱物単体の元素分析は困難である。そのため、鉱物単相に加えて複数の鉱物粒からなる部分の測定を行い、各元素組成の分布から各端成分の元素組成を推定した。

その結果、Soroako鉱床においては、針鉄鉱中のスカンジウム濃度が80–300 ppm程度であることが分かった。また、シリカやスピネル中のスカンジウム濃度は10 ppm以下であった。一方、針鉄鉱中のニッケル濃度は低いため、全岩元素組成において、スカンジウム濃度とニッケル濃度に負の相関が見られることと調和的である。本研究結果から、Soroako鉱床では針鉄鉱が主要なスカンジウム含有鉱物であることが分かった。

キーワード：スカンジウム、ニッケル、ラテライト、リモナイト鉱、鉱床、針鉄鉱

Keywords: scandium, nickel, laterite, limonite, ore deposit, goethite

Characteristics and genesis of ion adsorption type REE deposits and related granites in South China

*Yan Hei Li¹, Mei-fu Zhou¹

1. University of Hong Kong

Rare Earth Elements (REEs) are strategically important in high-technology industrials. Currently, China dominates the global production of REEs while the widespread “ion-adsorption type” deposits in South China are some of the major REE sources especially the more demanding heavy rare earth elements (HREEs). Therefore, it is critical to have an in-depth understanding on the characteristics and genesis of this type of deposit. This review will summarize the geochemical and mineralogical features of these deposits as well as their parent granite, and suggest the factors controlling the formation of these deposits.

Although prospects of ion adsorption type REE deposit have been discovered and explored in Vietnam, Myanmar, Thailand, Brazil, Malawi, and Madagascar recently, the majority of this type of deposit is located in South China, distributing over the Jiangxi, Guangdong, Fujian, Hunan and Yunnan provinces. In general, deposits can be categorized into the HREE-enriched, for example the famous Zudong deposit in southern Jiangxi province and the LREE-enriched type, such as the Heling and Dingnan deposit in southern Jiangxi province. Numerous geochemical analyses have indicated that the maximum REE enrichment, normally two- to three-fold enrichment compared to the parent granite, mostly occurs within the completely weathered zone (B horizon) with less concentration in the semi-weathered zone (C horizon). Accumulation of LREE at comparatively upper part while that for HREE at the lower part is also frequently observed in these deposits. Mostly, the REE pattern of the regolith is similar to the parent rock, except for Ce. Strong positive Ce anomaly is commonly observed in the upper part of the weathering profile while it shifts to a negative one at the lower part. It is likely due to the oxidation of Ce^{3+} to Ce^{4+} and the precipitation of cerite that removes Ce from fluids at shallow level. As for the mineralogy, clay minerals, particularly kaolinite and halloysite, are the key components on which the REEs are adsorbed. Nevertheless, organic substances and Fe-Mn oxyhydroxides likely play an important role. Furthermore, SEM observations show that a variety of secondary REE minerals exist in the regolith. Residual zircon, monazite, and xenotime may also contribute a certain amount of the resources. Traditionally, REEs are thought to be adsorbed onto clay minerals in ionic state, however, recent studies start to reveal that nano-REE particles and colloids are also adsorbed on clay minerals. These deposits are dominantly developed from the weathering of biotite and/ or muscovite-bearing alkali granite from Caledonian to Yanshanian period in the region. The nature of the parent granites is various, including S-type, A-type and highly-fractionated I-type. However, it is common that late stage metasomatism took place transferring part of the REEs into hydrothermal minerals, which are more susceptible to weathering, such as bastnäsite-(Ce), synchysite-(Y), fergusonite, and allanite.

Under a tropical to sub-tropical climate, REEs are released from the parent REE-enriched granites during weathering. Along with infiltration of meteoric water, REEs are leached from broken down of REE-bearing minerals, and transported to the lower part, at where they are adsorbed by clay minerals and precipitate as secondary minerals. After a long period of weathering, REE accumulates at the lower part of the profile to form the deposit. Therefore, climate and duration of weathering, that control the intensity and extent of weathering, are significant to the ore formation. Exhumation is also important in keeping weathering active. Low-lying relief and slow denudation rate in South China help reduce the erosion of the regolith

and preserve of the ore bodies. pH and redox environment of the regolith are other major factors and they control REE adsorption and secondary mineral precipitation in the regolith.