

岩手県釜石鉱山天狗森鉱床産の磁鉄鉱の化学組成

宮下 敦*¹

Chemical compositions of magnetite from the Tengumori ore deposit, the Kamaishi Mine, Iwate Prefecture, Japan

Atsushi MIYASHITA *¹

ABSTRACT : The microstructure and chemical composition of magnetite from the Tengumori ore deposit in Kamaishi Mine were investigated. The magnetite from the Tengumori ore deposit is silician and has a structure that partially has an exsolution texture. The estimated temperature of crystallization of magnetite is in the range of 660-400°C using the magnetite geothermometer. This temperature range is 200-100°C higher than that obtained from thermochemical analysis about skarn mineral assemblage. In the Kamaishi Mine, the crystallization temperature of magnetite from the Tengumori ore deposit is similar to that of the Sahinai ore deposit and higher than that of the Shinyama ore deposit. This trend is different from the conventional one of the formation temperatures of the skarn minerals in the Kamaishi Mine.

Keywords : Kamaishi Mine, Tengumori ore deposit, Skarn, Silician magnetite

(Received November 24, 2023)

1. はじめに

スカルン(Skarn)型鉱床は、珪長質マグマが関与する熱水と、石灰岩をはじめとするCaやMgに富んだ岩石が反応する交代作用によって形成される金属鉱床であり(鞠子, 2008)¹⁾, 昭和時代までは日本国内の主要な金属鉱山の稼行対象であった(図1)。金属地下資源に関しては、採鉱方法がよりコストが低い露天採掘に移行し、鉱体の性状から坑内採掘が主体になるスカルン型鉱床を稼行対象とする国内鉱山は全て終掘している。しかし、スカルン型鉱床は、世界的に見れば重要な地下資源であり、また近年は酸化鉄型鉱床(IOA型 およびIOCG型)や斑岩銅鉱床と成因的な関連があることも分かっている。

釜石鉱山は、岩手県釜石市西方の大峰山(1147m)を中心に、釜石市甲子町陸中大橋附近から遠野市東方の気仙郡土倉附近まで分布する鉄および銅を主要鉱種とするスカルン型鉱床である。甲子町を流れる甲子川流域では、古来、「餅鉄」と呼ばれる塊状磁鉄鉱が採取されていたが、江戸前期には上流で磁鉄鉱鉱体露頭が発見された。大島

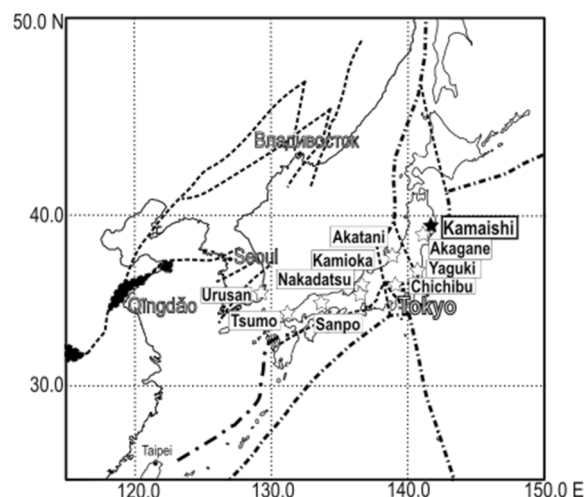


図1. 釜石鉱山の位置と、日本列島の代表的なスカルン鉱床の分布。

たかとう
高任の指導により、この磁鉄鉱鉱体を原料として南部藩の橋野高炉で製鉄が行われ、現在は重要な産業遺跡として世界遺産に指定されている。また、明治期以降は、釜石市海岸部に官製製鉄所が置かれ、これが発展して日本製鉄東日本製鉄所釜石地区(釜石製鉄所)となった。

*¹ : 理工学科教授 (miya@st.seikei.ac.jp)

釜石鉱山 1993 年に鉄・銅鉱石の採掘は終了し、現在は、坑内湧水を原料とするミネラルウォーターや、坑道を利用した地下発電所などを行いながら、終掘後の後処理を行っている。主生産品となっているミネラルウォーターは飲用のほかに化粧品原料としても活用されている。また、花こう岩中を貫通している坑道を利用した高レベルたこともある(日鉄鉱業株, 1988)²⁾。釜石鉱山スカルン鉱床は終掘してしまっているが、その鉱床学的研究は、産業遺産としての釜石鉱山の価値を高めるものと考えられる。

筆者は、1982 年から釜石鉱山のスカルン鉱床の調査研究を行い、天狗森銅鉱体を中心として試料採取し、その構成鉱物の特徴について検討してきた。本稿では、釜石鉱山天狗森^{てんぐもり}鉱床磁鉄鉱の化学組成を報告し、それに基づいた鉱床生成温度推定を行う。

2. 釜石鉱山天狗森鉱床

釜石鉱山の鉱床は、関係火成岩と考えられている磁鉄鉱型花崗閃緑岩を主体とする蟹岳複合岩体の周縁に、南部北上帯に属する石炭紀-ペルム紀の石灰岩、頁岩、および火砕岩中に形成されたスカルンに胚胎している。鉱体は蟹岳複合岩体の東側と西側に配列しており、東側を東列鉱床群、西側を西列鉱床群と呼んでいる。東列鉱床群は、北から六黒見、高前、外ヒザゴ、内ヒザゴ、細越、前山、鬼ヶ沢の各鉱床からなる。西列鉱床群は、北から、青木、大峰、日峰、佐比内、新山(主要鉱体)、天狗森、滝野沢、杓掛、大仙の各鉱床からなる。(図 2)

これらの鉱床のうち、西列に属する天狗森鉱床は、釜石鉱山としては最後に開発された銅鉱体であり、諸鉱床の中では最も標高が高い海拔 900m以上の部分に位置している(堀ほか, 1982)³⁾。スカルンと銅鉱体は、ペルム紀甲子層中の石灰岩と、これを不整合に覆う白亜紀馬木の内層の碎屑岩層との不整合面近くに、水平方向ののびを

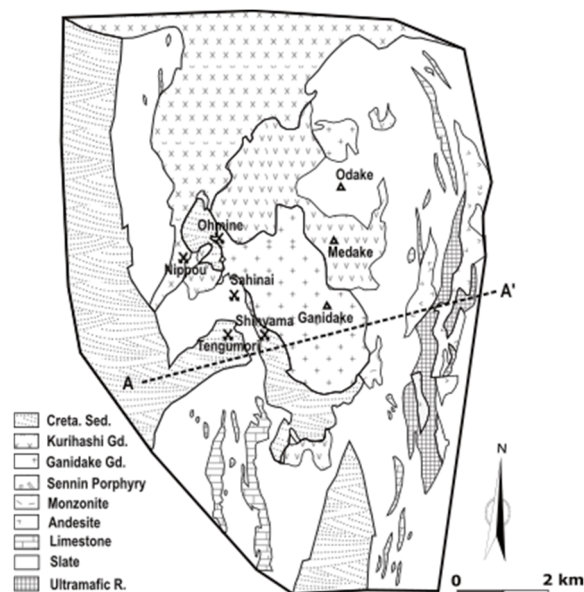


図 2. 釜石鉱山周辺の地質。掘ほか, (1982)に加筆。

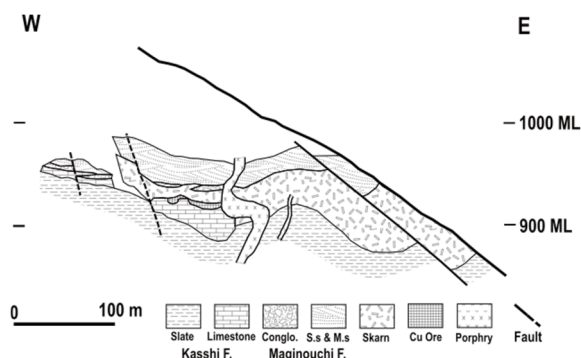


図 3. 釜石鉱山天狗森鉱床の東西断面図 堀ほか(1982)に加筆。

もって胚胎されている(図 3)。このため、銅鉱体はRoom and Pillar方式で採掘された。鉱体は、その中央部を切る東北東-西南西方向の断層によって、北側が高くなるように変位しており、断層を境に北側をN鉱体、南側をS鉱体と呼んでいる。また、N鉱体中には、スカルンや鉱体を切

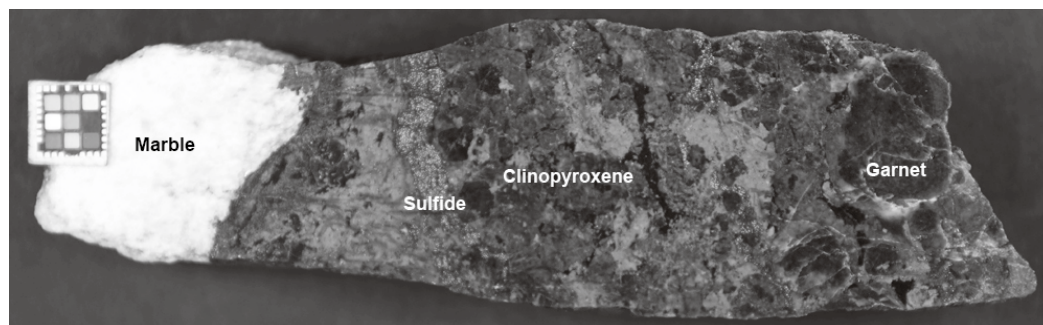
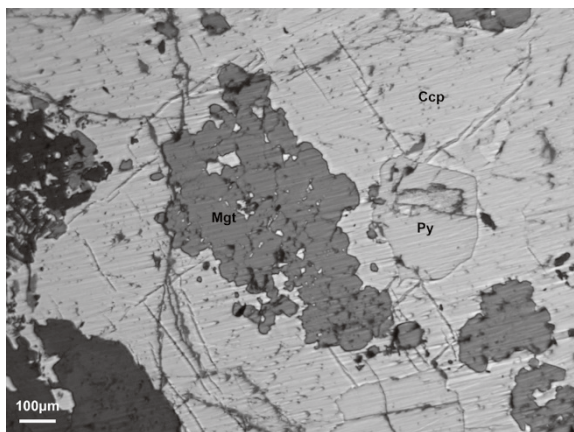


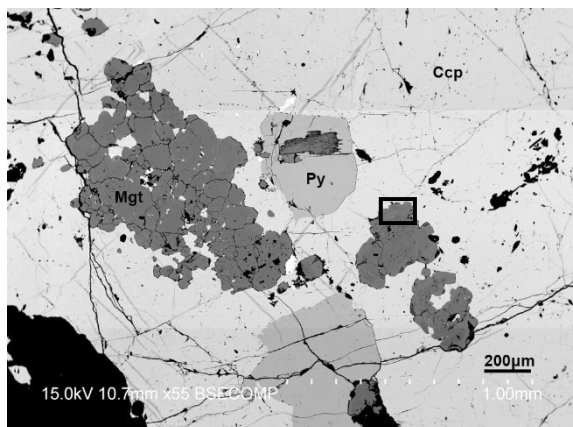
図 4. 釜石鉱山天狗森鉱床の石灰岩起源スカルン標本。左側から、石灰岩(Marble)-硫化物(Sulfide)-単斜輝石(Clinopyroxene)-ピソリテックざくろ石(Garnet)が見られる。磁鉄鉱は硫化物の部分に伴う。四角いカラースケールは一辺が 1cm。

って併入する幅 3~12mの閃緑玢岩岩脈によって貫かれている。

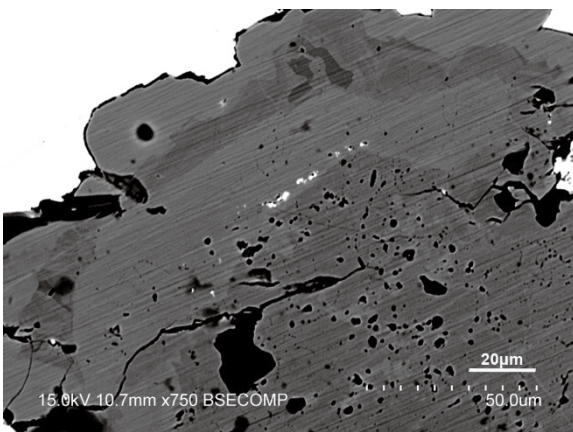
スカルンは、ペルム紀石灰岩と白亜紀火砕岩の境界部分に発達し、スカルン化および銅鉱化作用をもたらした鉱液は、不整合面に沿って流動したことが分かる。スカルンは 累帯構造を持ち、石灰岩-ピソリティックざく



(A)



(B)



(C)

図5. 釜石鉱山天狗森鉱床の磁鉄鉱の産状 (A)反射頭微鏡画像; (B) 後方散乱電子像(BEI); (C) (B)の黒枠部分の拡大画像。Siに富む部分は暗色に見える。凡例; Mgt: 磁鉄鉱; Py: 黄鉄鉱; Ccp: 黄銅鉱。

ろ石帯-単斜輝石帯-緑れん石帯-頁岩の順に配列する。ピソリティックざくろ石帯と単斜輝石帯が石灰岩起源のスカルン、緑れん石帯が碎屑岩起源のスカルンと考えられる。図4に、石灰岩-ピソリティックざくろ石帯境界のスラブ標本画像を示す。

銅鉱化作用は、スカルン帯形成の少し後のステージと考えられ、スカルン帯の構造に調和的な縞状組織を持っている。磁鉄鉱物は、黄銅鉱、磁鉄鉱を主体とし、少量の磁鉄鉱と黄鉄鉱、および微量のキューバ鉱、閃亜鉛鉱、ベントランド鉱、ウルマン鉱、輝コバルト鉱などを伴っている(堀ほか, 1982)。磁鉄鉱はShiga (1988, 1989)^{4),5)}によってケイ素を数 wt.%含む含ケイ素磁鉄鉱であることが報告されている。

銅鉱化作用の後、原岩がスカルン化することによる体積変化のため、スカルン帯は破碎され、生じたクラックに後生のざくろ石、石英、炭酸塩鉱物からなる網状脈が発達する。網状脈の発達は、単斜輝石スカルン帯の上部から緑れん石スカルン帯にかけて著しくなっている。

3. 天狗森鉱床産磁鉄鉱の化学組成

1) 産状

天狗森鉱床は、銅を主要鉱種としており、新山鉱床や佐比内鉱床と違って、スカルン中に含まれる磁鉄鉱の量は少ない。

磁鉄鉱は、ピソリティックざくろ石帯を中心に石灰岩起源スカルン中に硫化物に伴って、半自形もしくは他形結晶の集合体として産する(図5A)。硫化物はざくろ石よりも後の晶出であるので、磁鉄鉱もざくろ石よりも後から晶出したと考えられる。

2) 微細組織

SEMの組成像(後方散乱電子像, BEI)で観察する(図5B)と、結晶成長時のものと考えられる化学組成の差を持つ微細なオシレーターナ組成累帯が見られ(図5C)。BEIで暗い部分は、含Si磁鉄鉱である。この組織は、他のスカルン型鉱床の含Si磁鉄鉱(Shimazaki, 1998)と共通である⁶⁾。ただ、この部分を高倍率で観察すると、断面が楕円形の微細な包有物を多数含む(図5C)。宮下(1993)は、この組織について、磁鉄鉱に著量のSiが固溶したのち、低温で磁鉄鉱とケイ酸塩鉱物とが、離溶した組織と考えた⁷⁾。

3) 化学組成

天狗森鉱床産磁鉄鉱および釜石鉱山の他の磁鉄鉱鉱体中の磁鉄鉱の代表的な分析値を表1に示す。後述の磁鉄鉱地質温度計を適用した代表的な分析値についても併せ

て示す。分析には、国立科学博物館のエネルギー分散型 X線分析装置(日本電子 5400 + Link 社 QX2000), および早稲田大学教育学部のエネルギー分散型 X線分析装置(日立 S3400 + Oxford X-Act)を用いた。後者については、半定量的な分析精度になる。Shiga(1988, 1989) が示したように、SiO₂ を 3 wt.%以上含む含 Si 磁鉄鉱(Silician magnetite)の部分がある。Si を含むこと以外は、その他の成分は微量である。

表 1. 釜石鉱山天狗森鉱床の磁鉄鉱の化学組成

Mineral	Mgt Tengumori	Mgt Tengumori	Mgt Sahinai	Mgt Shinyama
Mine	T5	T5	550ML-SL1	8D-200
Sample	T5	T5	550ML-SL1	8D-200
SiO ₂	3.12	0.28	1.13	1.06
TiO ₂	0.08	0.02	0.05	0.02
Al ₂ O ₃	0.85	0.23	0.67	0.72
V ₂ O ₃	0.07	0.11	0.09	0.12
Fe ₂ O ₃	66.00	69.20	68.50	68.23
FeO	28.81	30.32	29.72	30.39
MnO	0.04	0.12	0.25	0.00
MgO	0.35	0.05	0.19	0.08
CaO	0.55	0.10	0.37	0.26
Total	99.87	100.43	100.97	100.88
Si	0.149	0.014	0.055	0.052
Ti	0.003	0.001	0.002	0.001
Al	0.048	0.014	0.039	0.042
V	0.003	0.004	0.004	0.005
Fe ³⁺	2.377	2.619	2.519	2.536
Fe ²⁺	1.153	1.275	1.215	1.255
Mn	0.002	0.005	0.010	0.000
Mg	0.025	0.004	0.014	0.006
Ca	0.028	0.005	0.019	0.014
Total	3.787	3.942	3.877	3.911
Nos. of O	4.000	4.000	4.000	4.000

4. 考察

近年, Canil and Lacourse (2020)は, 合成実験データに基づく経験式として, 磁鉄鉱中の微量元素を用いた地質温度計を提案した⁸⁾。磁鉄鉱中のX_{Mg}=(Mg/(Mg+Fe^{tot}))から,

$$T_{Mg-mag} (^{\circ}C) = -8344(\pm 320)/[\ln X_{Mg} - 4.1(\pm 0.28)] - 273$$

$$R^2 = 0.83$$

で推定温度が得られる。釜石鉱山産の磁鉄鉱組成について, この温度計を適用した。経験式のR² 値は計算される温度の誤差が大きいことを示しており, 推定温度の比較は多数の測定をして分布を見る必要がある。

この磁鉄鉱地質温度計を釜石鉱山の天狗森鉱床, および磁鉄鉱が主要な鉱種であった佐比内鉱床 550MLと新山鉱床 7D鉱体+EN鉱体に適用した頻度分布図を図 6 に示す。計算された磁鉄鉱の晶出温度は, 天狗森鉱床と佐比内鉱床が 660–400°Cでほぼ同じであるが, 新山鉱床では 520-380°Cで明らかに低温である。鉱床の配列(図 2)では, 西側の佐比内鉱床-天狗森鉱床から, 東側の新山鉱床に向かって磁鉄鉱の生成温度が低下していることになる。

釜石鉱山の各鉱床の生成温度推定は, スカルンの累帯配列などを根拠に, 関係火成岩である蟹岳花崗閃緑岩体に近い北側のものほど高く, 関係火成岩から離れるのに従って低くなると考えられてきた(Uchida, 1986)⁹⁾。Uchida (1986)は, 1 気圧, XCO₂=0.02 の条件下で比較した場合, スカルンの生成温度は, 新山鉱床 4D-7D鉱体で 440-400°C, 天狗森鉱床で 400-360°Cであることを示した。今回の磁鉄鉱地質温度計による推定は, スカルン累帯配列の解析結果から比して, 200-100°C以上高い温度を示し, また,

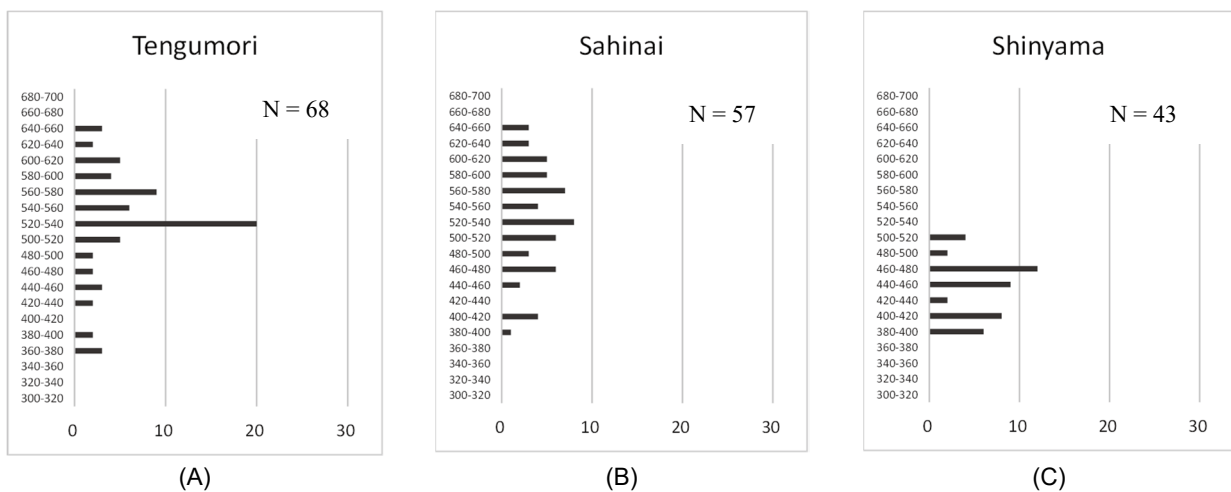


図 6. 釜石鉱山産の磁鉄鉱温度計(Canil and Lacourse, 2020)で求めた温度の頻度分布図: (A) 天狗森鉱床; (B) 佐比内鉱床; (C) 新山鉱床。

各鉱床間の温度変化も違う傾向を示している。この差については、釜石鉱山の別の鉱床から得られた試料や、磁鉄鉱組成分析値をさらに増やして検討する必要があると考えられる。

一方、含Si磁鉄鉱は、酸化鉄-銅-金(Iron-Oxide-Copper-Gold, IOCG)型鉱床で塩濃度の高い熱水から晶出した磁鉄鉱にも特徴的である(González et al., 2018)¹⁰⁾。釜石鉱山の関係火成岩はIOCG型と同じ磁鉄鉱型花こう岩類であり、磁鉄鉱にはIOCG型に特徴的な自形の燐灰石包有物を持つものがある。また、スカルンを伴うIOCG型も存在する(小島, 2019)ため¹¹⁾、釜石鉱山の磁鉄鉱鉱床の一部に、成因的にIOCG型と関連があるものが含まれている可能性を指摘しておきたい。

謝辞

釜石鉱山の磁鉄鉱試料の一部は、新釜石鉱山(株)の山澤茂行・元社長から頂いた。磁鉄鉱の分析にあたっては、国立科学博物館の横山一己博士(現・茨城県立自然博物館)と重岡昌子氏(現・国立極地研究所)、および早稲田大学教育学部の米持賢治氏のお世話になった。また、本論執筆にあたっては、早稲田大学教育学部の村上浩康博士との議論が有益であった。

本研究にあたって、成蹊大学理工学部特別研究費および成蹊大学研究助成を使用した。

記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鞠子 正, 鉱床地質学—金属資源の地球科学. 古今書院, 580 頁, 2008.
- 2) 日鉄鉱業(株), 結晶質岩中の既存空洞における岩盤物性及び地下水状況調査(I), 動力炉・核燃料事業団委託研究成果報告書, 366 頁, 1988.
- 3) 堀 昌雄, 市毛芳克, 堀越孝昌, 吉田 廣, 釜石鉱山天狗森鉱床の探鉱について, *鉱山地質*, **32**, 189-202, 1982.
- 4) Shiga, Y. Silician magnetite from the Kamaishi mine, Japan. *Min. Geol.* **38**, 437-440, 1988.
- 5) Shiga, Y. Further study of silician magnetite. *Min. Geol.* **39**, 305-309, 1989.
- 6) Shimazaki, H. On the occurrence of silician magnetites. *Resour. Geol.* **48**, 23-29, 1998.
- 7) 宮下 敦, 釜石鉱山産 Silician-magnetite の微細組織, 三鉱学会講演要旨集, 18,99, 1993.
- 8) Canil D. and Lacourse T., Geothermometry using minor and trace elements in igneous and hydrothermal magnetite, *Chemical Geology*, **541**, 119576.,2020, DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119576.
- 9) E. Uchida, Relation between zonal arrangement of skarns and temperature of formation at the Kamaishi Mine, Northeastern Japan, *Mining Geol.*, **36**, 195-208, 1986.
- 10) E. González, S. Kojima, Y. Ichii, T. Tanaka, Y. Fujimoto and T. Ogata, Silician Magnetite from the Copiapó Nordeste Prospect of Northern Chile and Its Implication for Ore-Forming Conditions of Iron Oxide-Copper-Gold Deposits, *Minerals*, **8**, 529, 2018; doi:10.3390/min8110529.
- 11) 小島晶二, 酸化鉄型銅金 (IOCG) 鉱床成因論に関する最近の進展, 特にチリに分布する鉱床について, *資源地質*, **69**, 97-109., 2019