

中国金川鉬床産ニッケル-銅鉬石の構成鉬物とその組織

鹿野 新平* 孫 国 雄** 北村 強*

Constituent Minerals and Textures of Nickel-Copper Sulfide Ores from the Jinchuan Deposit, China. By Shimpei KANO, Kuoxiong SUN and Tsuyoshi KITAMURA.

Magmatic nickel-copper ores from the Jinchuan deposit, Gansu Province, China, were analyzed mineralogically with the aid of optical microscope, EPMA, X-ray diffractometer and AAS. The deposit occurs in the Jinchuan ultramafic intrusive body, one of mafic-ultramafic rock bodies which intruded into the pre-Cambrian metamorphic rocks in the Caledonian, along the second order fractures derived from a deep fracture. This developed in the north of the west edge of the Alashan uplifting within the North China Metaplatform.

Ores are classified, on megascopic textural characteristics, into three types, sideronitic, spotted and disseminated ores. They almost always contain pyrrhotite (Fe_{1-x}S), pentlandite ($(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$), chalcopyrite (CuFeS_2) and serpentine ($\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) as common major ore constituting minerals. Mackinawite (FeS) and cubanite (CuFe_2S_3) often appear as exsolution product from earlier sulfide minerals. Violarite (FeNi_2S_4) and smythite (Fe_9S_{11}) occur as alteration product from pentlandite. A small amount of bornite (Cu_5FeS_4) and pyrite (FeS_2) can be found in some of disseminated ores.

Sideronitic ore, composing the main parts of the rich ore bodies, shows textures typical for magmatic nickel-copper sulfide deposits. Sulfides are occupying and cementing grain boundaries of such gangue minerals as olivine, pyroxene, etc. or their altered minerals. Occasionally, gangue minerals maintain their primary crystal form completely. In sideronitic ore, sulfides usually contain many contraction cracks which are filled with serpentine, suggesting that the cooling of the sulfide melt proceeded very rapidly. Contraction cracks become more narrow in spotted ore than in sideronitic ore and they are rarely found in disseminated ore.

Pyrrhotite group minerals in sideronitic ores include troilite (FeS), hexagonal (Fe_{1-x}S) and monoclinic (Fe_7S_8) pyrrhotites, but those in spotted and disseminated ores are dominated overwhelmingly by monoclinic pyrrhotite. Troilite and hexagonal pyrrhotite rich in iron often contain "flame" pentlandite exsolved from high-temperature pyrrhotite phase with decrease in temperature. The "flame" pentlandite cannot be found in monoclinic pyrrhotite. In contrast to this, monoclinic pyrrhotite contains more nickel in its structure than troilite or hexagonal pyrrhotite. The nickel content in monoclinic pyrrhotite ranges from 0.05 to 0.20 weight percent, while usually, that in troilite or hexagonal pyrrhotite is less than 0.0 n weight percent and hardly exceeds 0.03 weight percent.

Ordinary pentlandite contains 25 to 27 atomic percent of nickel regardless of ore type, but nickel content in "flame" pentlandite is around 18 atomic percent. A kind of sideronitic ore unusually rich in chalcopyrite includes pentlandite containing 0.5 to 1.3 weight percent of cobalt, but coexisting pyrrhotite or chalcopyrite does not contain cobalt in amounts detectable with EPMA.

An earthy mineral found in spotted ore contains more than 10 weight percent copper and about 0. n weight percent nickel. It shows a very clear anisotropic property, suggesting it is a mineral belonging to the valleriite ($[(\text{Cu}, \text{Fe})\text{S}]_4[(\text{Mg}, \text{Al})(\text{OH})_2]_3$)-haapalaite ($[(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}]_4[(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{OH})_2]_3$) family. This mineral must be "bokudokou", ($[(\text{CuFeS}_2)[(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_2]]$), so called in China. Some disseminated ores contain garnierite ($(\text{Mg}, \text{Ni})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) whose nickel-content ranges from 0.5 to 1.0 weight percent, although usual nickel-content in serpentine does not exceed 0.0 n weight percent.

(Received June 11, 1988)

Keywords: ultramafic rock, magmatic deposit, magmatic ore, sulfide ore, nickel ore, copper ore, ore texture, pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite, mackinawite, cubanite, bokudokou, valleriite, haapalaite, garnierite.

1. 緒 論

1958年中国甘肅省 (Gansu Province) で発見された金川 (Jinchuan) 鉬床は、超マフィック岩に伴う、磁硫鉄鉬 (pyrrhotite)・ペントランド鉬 (pentlandite)・黄銅鉬 (chalcopyrite) を主と

選鉬製錬研究所報告 第1051号 日本鉬業会昭和63年度春季大会にて発表

*東北大学選鉬製錬研究所

**中国西北冶金研究院 (現東北大学選鉬製錬研究所客員研究員)

するニッケル-銅硫化物鉱床である。世界におけるこの種の鉱床の多くは、始生代の生成になるのに対し^{1)~4)}、中国のそれは、顕生代になってから生成したものがほとんどであり、かつニッケルを伴うマフィック-超マフィック岩体も小規模のものが多いといわれている⁵⁾。その中では、金川鉱床はぬきんでており、ニッケル埋蔵量は500万 ton を超えるとされ、まさにサドベリー(Sudbury) 鉱床⁶⁾ に次ぐ世界の大鉱床といわれるゆえんである⁷⁾。

採掘は、1963年露天掘りをもって開始され、1965年坑内採掘へ移行し、以来本格的に稼行されてきており、現在すでに年産2万 ton におよぶ電解ニッケルの生産をみるに至っている^{8),9)}。しかしながら現行の鉱石処理プロセスにはいくつかの問題があり、精鉱品位から判断して、(1) Ni-Cu 品位が低く、処理量が多いこと、(2) MgO 量が高く、溶錬が困難なこと。(3) Cu の回収率が低いこと、などが指摘されている⁸⁾。このような問題の解決には、扱う鉱石についての正確な鉱物学的情報の獲得が急務である。事実、現地では、浮選にかからない含ニッケル珪酸塩鉱物や含銅鉱物の存在が、かつまた磁硫鉄鉱中に含まれるニッケル量が問題視されている⁸⁾。

本報文では、X線回折測定装置、光学顕微鏡、X線マイクロアナライザー、原子吸光光度計、その他の測定・観測機器を用いて調べた結果¹⁰⁾ を記載し、鉱床学的にあるいは鉱物処理上重要と考えられる二・三の問題にも言及する。本来、鉱石は地殻の一部を構成するものであり、それを対象とする研究にとっては、現地における、産状の地質学的把握は不可欠である。しかしながら、本研究にはそれが欠落しており、不完全のそしりは免れない。不足のところは、入手できた数少ない文献^{5),7),9)} に頼った次第である。

2. 鉱床の概要

2.1 位置・交通

金川鉱床は、甘粛省永昌県金川鎮にあり、省都蘭州 (36°03' N, 103°57' E)¹¹⁾ の北西およそ400 km、ゴビ砂漠の南端に位置する (Fig. 1)。標高 1,500~1,700 m の高原北斜面にあり、南方へは竜首山脈の高原地帯、さらには 5,000 m 級の祁連山脈へと連なる⁹⁾。

北京-蘭州間 1,200 km は航空便で約2時間、蘭州-金川鉱山間は車で6時間前後を必要とする。北京から鉄道を利用する場合には、約44時間で最寄りの河西堡駅に達し、そこから車で30分程で金川鉱山に達する⁹⁾。

2.2 地質・鉱床

金川鉱床を胚胎している岩体は、金川超マフィック岩体と呼ばれ、阿拉善隆起区¹²⁾ (Alashan uplifting) 西縁に位置している。この地域の南側と北側には深部断裂が発達しており、北側の深

- 1) Ross, J.R.; Travis, G.A.: *Econ. Geol.*, **76** (1981), 1291.
- 2) Naldrett, A.J.: *Econ. Geol.*, **75th Anniv. Vol.** (1981), 628.
- 3) 島崎英彦: 岩波講座, 地球科学, **14**, (佐々木昭, 石原舜三, 関陽太郎編), 7.
- 4) Naldrett, A.J.: *Canadian Mining Metall. Bull.*, **66** (1973), 45.
- 5) She, Chuanjing: *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks*, ed. by Pasadena et al., (1986), Theophrastus Publication S.A., Athens, 325.
- 6) Hawley, J.E.: *Canadian Mineral.*, **7** (1962), 1.
- 7) 岸本文男: 地質ニュース, No. 344 (1983), 52.
- 8) 矢澤 彬, 呉 振 東, 臼井進之助: 日本鉱業会昭和63年度春季大会講演要旨集 (1988), 193.
- 9) 国際協力事業団: [鉱開技・JR・86-158] (1986), pp. 87.
- 10) 鹿野新平, 孫 国 雄, 北村 強: 日本鉱業会昭和63年度春季大会講演要旨集 (1988), 195.
- 11) 東京天文台編: 理科年表, No. 58 (1985), 丸善.
- 12) 任紀舜, 姜春発, 張正坤, 秦徳余 (藤田至則監訳): 中国の地質構造とその発達史, (1986), 築地書館, pp. 140.

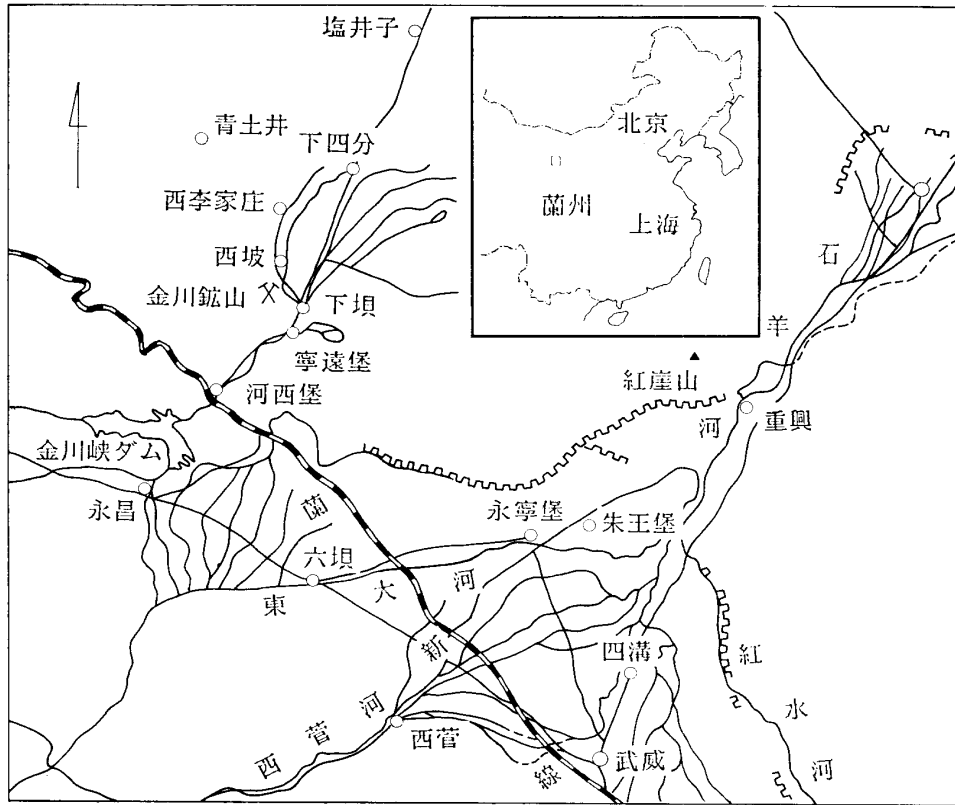


Fig.1 Location map of Jinchuan nickel-copper ore deposit, Gansu Province, China. It is about 400 kilometers northwest of Lanchou, the capital of Gansu Province.

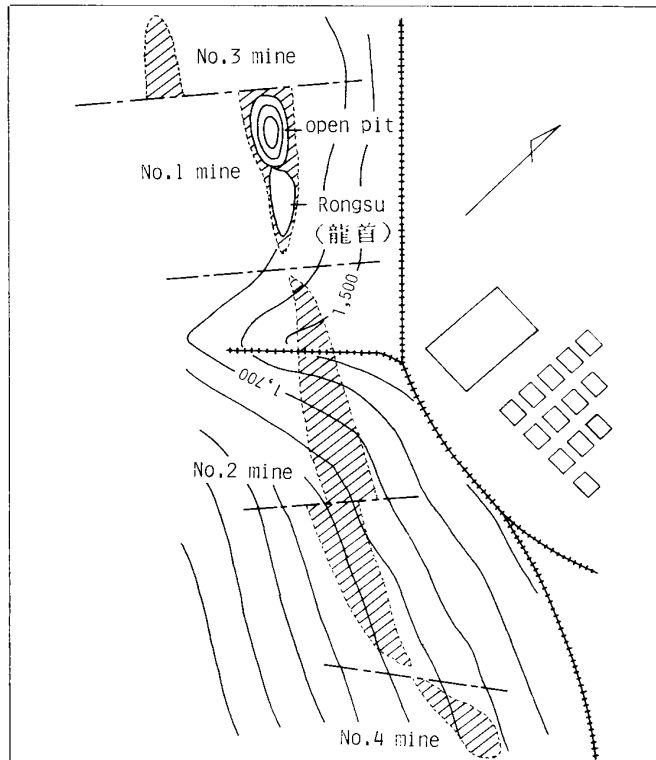


Fig.2 Plan of Jinchuan ultramafic intrusive rockbody. The body is cut and divided to four main blocks by parallel faults.

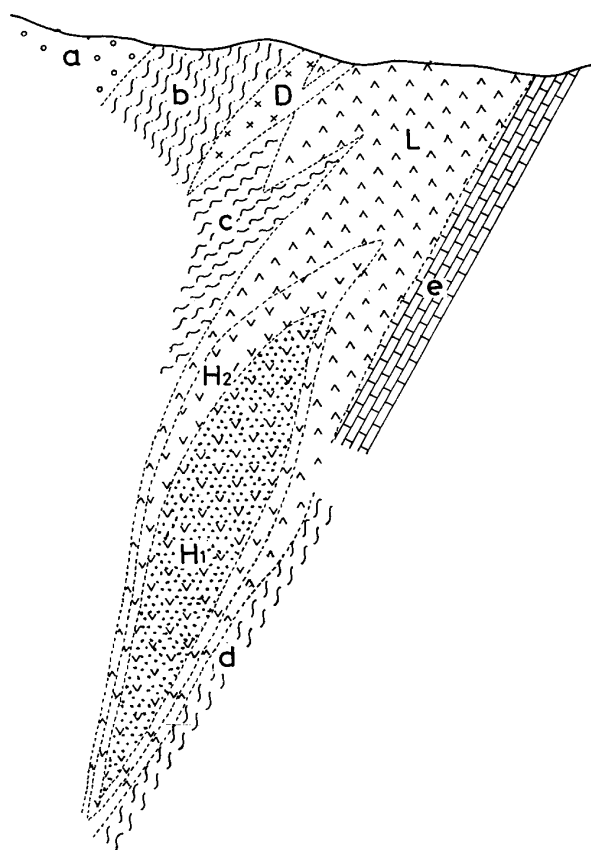


Fig. 3 Geological cross-section through Jinchuan ultramafic intrusion (after Song, Shuxia, 1983⁵⁾, partly modified). The ultramafic intrusive, which intruded into pre-Cambrian metamorphic rocks in the Caledonian, consists of two main zones different in basicity, lehrzomite in the upper part and harzburgite in the lower. Nickel-copper ores are concentrated within the harzburgite zone, especially in its lower part. a: homogenized migmatite. b: plagioclase-hornblende schist. c: biotite-chlorite schist. d: marble. L: lehrzomite. D: diabase. H₁: rich ores (harzburgite with sideronitic Cu-Fe sulfide). H₂: poor ores (harzburgite with disseminated sulfide).

3. 鉱石型および構成鉱物

3. 1 鉱石型

金川鉱床の初成鉱石 (primary ore) は, その組織・構造に基づいて, 鉱染鉱 (disseminated ore), 斑状鉱 (spotted ore), シデロニティック鉱 (sideronitic ore), および塊状鉱 (massive ore) の4型に大別されている。鉱体内では, これらがある程度の規則性をもって分布し, 鉱体周縁部から富鉱体中心部に向かって, 上記の順に配列する傾向を示す⁵⁾。

シデロニティック鉱は, マグマ性ニッケル-銅硫化物鉱床に典型的な型の鉱石で, 冷却しつつあるマグマが, すでに晶出していたカンラン石 (olivine) 結晶のすき間を通して追い出され, そこを硫化物メルト (sulfide melt) が満たしたことを暗示するような構造をもっている (Fig. 4-A, -B)。この型では, 硫化物の含有量は 25~80% の間で変化する。斑状鉱は, 硫化物, ないしその集合体, 斑状に脈石中に点在するもので (Fig. 4-C), 見掛け上は, シデロニティック型鉱石の, 硫化物含有量の低いもののようなものであるが, 必ずしもそうではなく, 顕微鏡下で観察され

部断裂からの第二オーダーの断裂に沿って, 120個あまりのマフィック-超マフィック貫入岩体が分布する⁵⁾。金川超マフィック岩体は, その中の一つであり, 先カンブリア代後期 (先長城系白家咀子累層⁷⁾) のミグマタイトと変成石灰岩 (大理石) の間を切って貫入した, カレドニア期のレールゾライト (lehrzomite) -ハルツバージャイト (harzburgite) の超マフィック岩類からなる。

この岩体は, 延び方向 NW-SE, 傾斜 SW 70°+ の岩脈状貫入岩体で, 水平延長およそ 6,500 m, 幅 20~530 m で, 垂直延長は 1,000 m を超える (Figs. 2, 3)⁹⁾。岩体内では岩相および鉱化が垂直・水平両方向に変化する帯状構造が認められる。塩基度の低いレールゾライトは岩体の上部を占め, 塩基度の高いハルツバージャイトはその下部を占める。主要な鉱化はレールゾライト中には認められずハルツバージャイトの基底部に硫化物富鉱帯が胚胎する。このような帯状構造は, マグマの分化作用に起因したものと考えられている⁵⁾。

金川貫入岩体は, 走向 NE-SW, 傾斜 NW の平行断層群によって分断されており, 分断ブロックは北西側から, それぞれ第3, 第1, 第2, および第4鉱区と呼ばれている (Fig. 2)。これらの中では, 第2鉱区の規模がもっとも大きく, 富鉱部も最大である⁹⁾。

る組織も同じではない。金川鉬床では、シデロニティック鉬と斑状鉬が富鉬帯を形成しているが、これら両者の出鉬量は、全体の80%を占めている。

鉬染鉬は、貫入岩体の上部に位置している鉬体を、あるいは岩体基底部にある富鉬帯の周辺部

Table 1 Types of Jinchuan ore.

Type	Mode of occurrence	Classification in this work	Remark
Massive	As veins in ore bodies		was not available
Sideronitic	In the lower part, or at the bottom of the intrusion	I	corse network structure
		II	medium network structure
		III	fine network structure
Spotted		VII	network rich in chalcopryrite
		IV	richer in sulfides
		VI	poorer in sulfides
Disseminated	In suspended ore bodies, or at the edge of rich ore body	VIII	finely disseminated

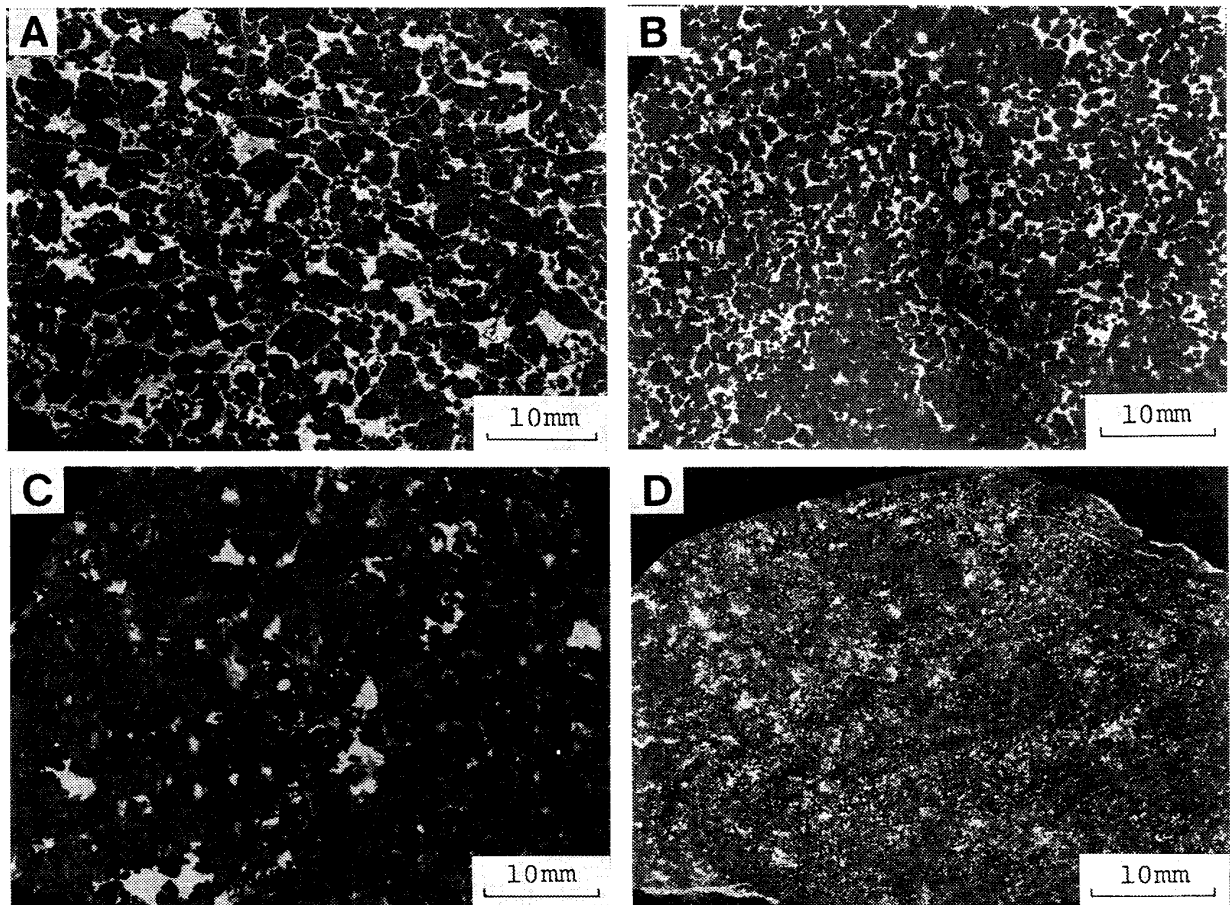


Fig. 4 Photographs showing macroscopic textural characteristics of sideronitic (A and B), spotted (C), and disseminated (D) ores from Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit. White parts are sulfides made up mostly of pyrrhotite, pentlandite, and chalcopryrite. Black parts are gangue silicates which almost always contain serpentine.

を構成しており, 硫化鉍物, ないしその集合体の微粒が脈石中に散在するものである (Fig. 4-D). これと対照的に, 塊状鉍は, ほぼ 100 パーセント硫化鉍物からなる鉍石であり, 脈状鉍体として胚胎される。

入手試料は, 金川鉍床内の, 異なるいくつかの採掘切羽からの鉍石の混合したものであり, したがって異なる型の鉍石の混合物であったので, これらは手作業により, 各型別に選別された。研究には, これをさらに, その特性に応じて細分し, シデロニティック鉍は, 脈石鉍物粒の大きい順に I, II, III と分け, とくに黄銅鉍に富むものを VII とした (Table. 1). 斑状鉍は硫化鉍物量の多寡によって, IV および VI に分けた。塊状鉍は入手試料中には含まれておらず, 本研究の対象にはならなかった。

3. 2 鉍石型別の化学組成

鉍石の Ni および Cu 品位の, 鉍石型への依存度合いを知るため, 主要元素含有量を原子吸光法によって測定した (Table. 2). その結果, (1) Ni および Cu の含有量は, シデロニティック鉍で最も高く, 鉍染鉍, 斑状鉍の順で低下する, (2) 黄銅鉍を異常に含む VII 型を除き, Ni/Cu の重量比は常に 1 より大きく, シデロニティック鉍では 2~3 の値となる, (3) 斑状鉍では, 硫化鉍物に富む IV 型よりも, それに乏しい VI 型の方が, Ni/Cu 比が高く, かつ Ni 含有量も多い, 等の事実が示された。

Table 2 Analytical data of Jinchuan ore. (with AAS)

Ore type	Fe wt. %	Ni wt. %	Cu wt. %	Co wt. %	Mg wt. %
I-1	17.8	3.01	1.09	0.065	13.1
I-2	18.0	3.14	1.54	0.064	13.7
II-3	14.8	1.82	2.65	0.047	14.2
III-2	16.9	2.46	0.74	0.051	13.9
IV-1	7.7	0.50	0.38	0.018	11.9
VI-0-B	9.1	0.71	0.15	0.022	17.0
VII-2	15.3	1.36	3.12	0.036	13.5
VIII-0	14.0	1.78	1.28	0.037	11.0

鉍石中のペントランド鉍と黄銅鉍の量比 pn/cp が常に一定で, ただ脈石に対する相対量だけが変化するものなら, 鉍石品位は可変であるが, Ni/Cu 比はほとんど一定と考えてよい。しかし, 上記の分析結果は, そうではないことを示している。したがって, 鉍石型によって pn/cp 比が変わっているか, まったく異種の鉍物が含まれるか, あるいはその両者が関与しているか, の何れかが正解である。本研究では, 鉍物量比の測定はおこなっていないので, まったくの正解を出すことは不可能である。しかしながら, 後述するように, VI 型の鉍石には, Cu を 12 atom. %, Ni を 0.3~0.4 atom. % 含む valleriite-haapalaite 類縁の鉍物が含まれ, また VIII 型には NiO 1 % を超える garnierite 類似の鉍物が含まれている。これらの鉍物の存在も, 上記分析結果に影響を与えているであろう。

3. 3 主要構成鉍物

粉末試料による X 線の回折図形上で読みとることのできる相を, その試料の主要構成鉍物 (main constituting mineral) とした (Fig. 5). Table 3 に明らかなように, 磁硫鉄鉍, ペントランド鉍, 黄銅鉍の外に, 磁鉄鉍 (magnetite), クロムスピネル (chromspinel), および蛇紋石 (serpentine) が, すべての型の主要構成鉍物として出現する。

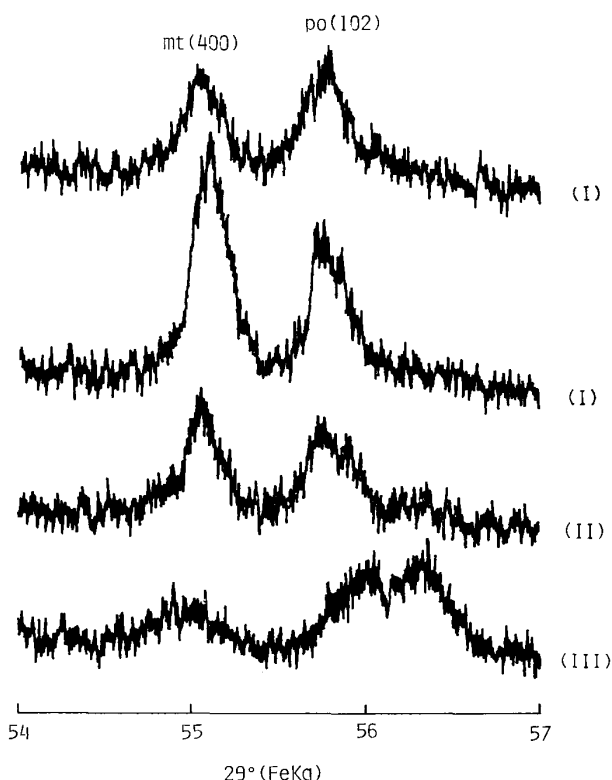


Fig. 6 X-ray (Fe-K alpha) diffraction patterns shown by 102-spacing of pyrrhotite. A diffraction angle of X-ray by 102-spacing becomes higher with the decrease in Fe/S atomic ratio.

蒙っているためである。顕微鏡下では、残存鉱物 (relict mineral) として見出される (Fig. 7).

3. 4 副成分鉱物

X線回折からは、その存在が判らないが、顕微鏡下の観察により、あるいはX線マイクロアナライザー (EPMA) を用いた測定から、存在の確認された鉱物を副成分鉱物 (minor constituent mineral) とした (Table 4)。これらのうち、マツキノー鉱 (mackinawite), トロイライト (troilite), およびキューバ鉱 (cubanite) は、いずれも初成鉱物であり、のこりは、二次的な変質鉱物である。

Table 4 Minor constituent minerals of Jinchuan nickel-copper sulfide ore, Gansu Province, China.

Mineral (abbr.)	Ideal chemical formula	Ore type
mackinawite (mk)	FeS	I, III, IV, VI
troilite (tr)	FeS	I, II, III, IV, VII
smythite (sm)	Fe ₉ S ₁₁	II, VII
pyrite (py)	FeS ₂	VIII
cubanite (cb)	CuFe ₂ S ₃	IV, VIII
bornite (bn)	Cu ₅ FeS ₄	IV
violarite (vl)	FeNi ₂ S ₄	VIII
valleriite (val)	[(Cu, Fe)S] ₄ •[(Mg, Al)(OH) ₂] ₃	VI

磁硫鉄鉱については、とくにその 102 面間隔の測定をおこない、六方・単斜晶系の区別、および六方晶系相における Fe 欠損量の算出をした (Fig. 6)。その結果、1 個の試料片中の磁硫鉄鉱は、単斜・六方晶系の何れか一方のみ、あるいはその両者を含むか、の何れかであり、六方晶系相の場合には、47.49~47.68 atom. % Fe の組成範囲にあることが示された。また、シデロニティック鉱には六方晶系磁硫鉄鉱が、斑状鉱・鉱染鉱には単斜晶系のものが卓越する傾向がうかがわれる。X線マイクロアナライザー (EPMA) を用いた分析からは、同一試料片内に異なった晶系、あるいは異なった組成の磁硫鉄鉱結晶粒の含まれることがしばしば見出されるので、粉末 X線回折図形から読みとられる晶系ないし組成は、含まれている磁硫鉄鉱の平均的情報とみなされる。

X線回折図形から、カンラン石の存在を明瞭に読みとることはできなかったが、これは、カンラン石のほとんどが蛇紋石化を

マッキノー鉍およびトロイライトは、富鉍帯を構成するシデロニティック鉍、斑状鉍中のみ見出され、鉍染鉍中には出現しない。このことは、Fe 欠損量の少ない磁硫鉄鉍がシデロニティック鉍に、その多い単斜型磁硫鉄鉍が、鉍体縁辺部を構成する鉍染鉍に集中すること、と関連した現象のようである。

4. 鉍石組織

4.1 一般的組織

金川鉍床産鉍石は、その巨視的な構造の性質から、4種類の型に分けられたが、顕微鏡下で観察される、微細な鉍石組織にも、それぞれの型の特徴が見出される。

シデロニティック鉍 マグマ分化によって生成されたことを示唆する、いくつかの組織上の特徴が、シデロニティック鉍に顕著に観察される。この型の鉍石では、硫化鉍物集合体と脈石との境界が、極めて明瞭であり、直線的である (Fig. 7-A, -B, -C)。これらの境界線は、カンラン石の結晶輪廓を示すものであり、カンラン石結晶粒間を埋めた硫化物メルトが、そこに固結したものである。硫化物集合体にみられる多くのわれめは、硫化物メルトの冷却収縮によるものであり、ひびわれの幅が広いのは冷却速度の大きかったことを暗示する。

斑状鉍・鉍染鉍 シデロニティック鉍にくらべると、斑状鉍中の硫化物集合体のわれ目は、幅が狭く、小規模なもので (Fig. 7-D) あり、しかも緑泥石 (chlorite)、斑銅鉍 (bornite) といった熱水性鉍物の伴う場合もみられるようになる。鉍染鉍にいたると、硫化鉍物中に、われめは、まったく観察されない (Fig. 7-E)。しかも、硫化鉍物は細粒として脈石中に散在するもので、シデロニティック鉍とは異なった生成を思わせる様相を呈してくる。これらのことは、マグマ性といわれるニッケル-銅硫化物鉍床といっても、熱水作用が皆無とはいえないことを示唆する¹³⁾。

4.2 離溶および変質組織

鉍石中の磁硫鉄鉍・ペントランド鉍・黄銅鉍の相互の結晶粒界は、なめらかな曲線状であり、何れの鉍物も明瞭な自形を示すことはない。ペントランド鉍は、磁硫鉄鉍の結晶粒界を走る脈状で、あるいは塊状で存在する。黄銅鉍は、磁硫鉄鉍中に塊状である場合が多い (Fig. 7-B, -F)。これらの組織は、何れの場合も、硫化物メルトが固結してできる最初の固相である単一固溶体 (monosulfide solid solution)^{14), 15)} からの、離溶相である。これらの鉍物は、それ自身からさらに離溶してできた鉍物、あるいは変質作用に基づく二次鉍物をしばしば含んでいる。

磁硫鉄鉍中には、いわゆる "flame" pentlandite¹⁵⁾ が観察される場合がある (Fig. 8-A, -B)。これは、トロイライトないし Fe に富む六方磁硫鉄鉍中に限って出現し、単斜晶系磁硫鉄鉍に伴われることはない。黄銅鉍には、マッキノー鉍が、磁鉄鉍と密接に関連して離溶しているが、このマッキノー鉍は、ペントランド鉍中にも見出されることがある (Fig. 8-C, -D)。

ペントランド鉍はそれ自身からの変質鉍物としてのビオラ鉍 (violarite) あるいはスマイサイト (smythite) を含むことがある。Fig. 8-E および -F にみられるように、変質は結晶粒界に沿って進行している。以上の外に、黄鉄鉍あるいは斑銅鉍 (bornite) が、鉍染鉍 (VIII型) の一部に観察されるが、両者はいずれも変質による二次鉍物である。後述する "墨銅鉍" も変質鉍物と考えられるが、これは硫化鉍物をあまり含んでいない斑状鉍 (VI型) 中に見出されている。

13) Fleet, M. E. : Econ. Geol., 72 (1977), 1449.

14) Naldrett, A. J. ; Craig, J. R. ; Kullerud, G. : Econ. Geol., 62 (1967), 826.

15) Craig, J. R. ; Vaughan, D. J. : *Ore Microscopy and Ore Petrography*, (1981), 123, John Wiley & Sons, New York.

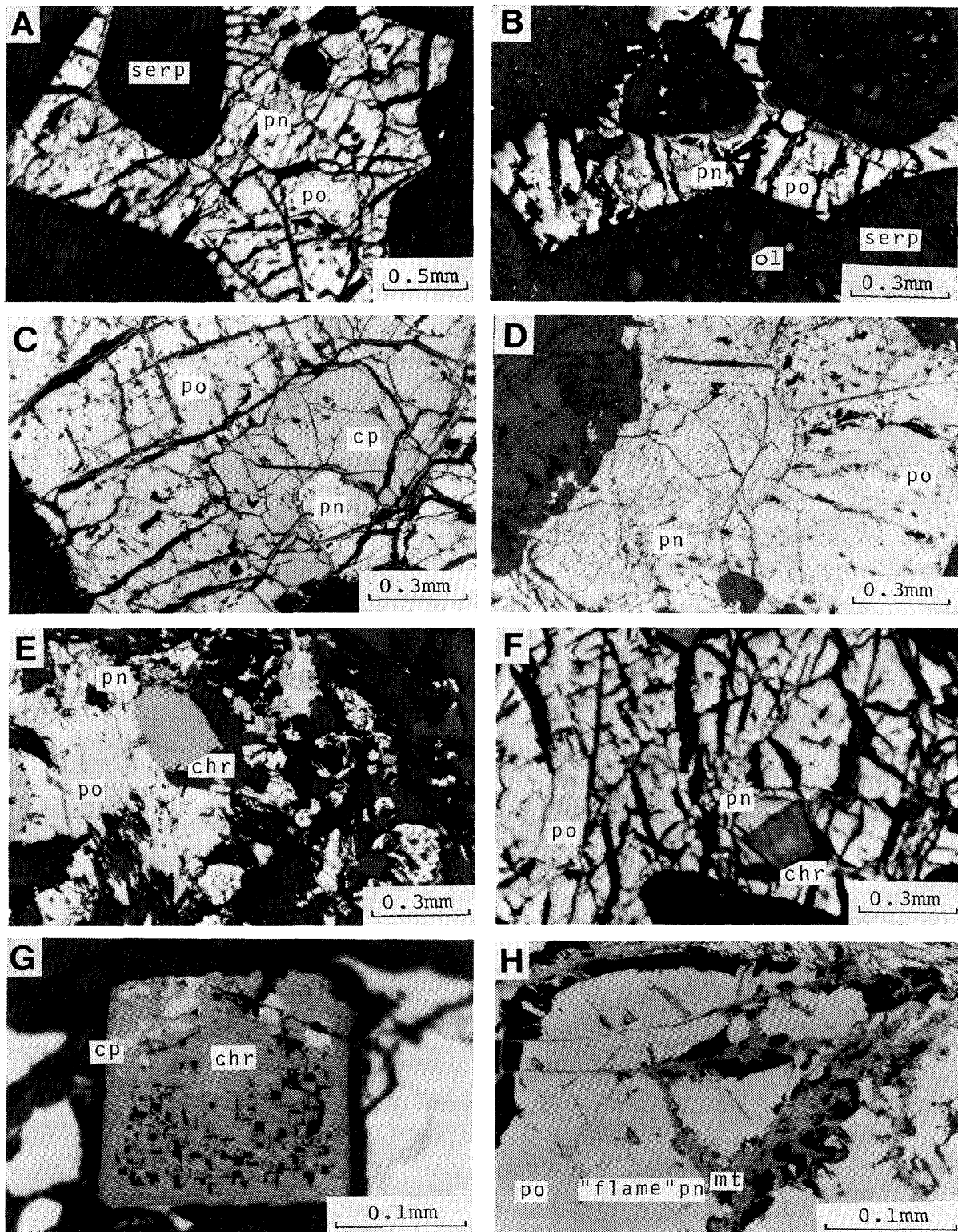


Fig.7 Microphotographs showing textures observed on polished sections of Ni-Cu sulfide ores. A (I-6-C), B (I-2-B), and C (VII-1-A): Sideronitic ore characterized by clear boundary between massive sulfide-assembly and serpentinized olivine and by many wide cracks within sulfide phase; olivine (ol) can be seen existing as relict mineral. D (VI-0-B): Spotted ore, in which cracks are narrower than in sideronitic ore. E (VIII-0-C): Disseminated ore, in which sulfide-mineral grains are finely scattered in gangue silicates. F (I-2-C) and G (I-3-A): Euhedral chromspinel in small octahedra, which might have crystallized in sulfide melt before its solidification. H (I-3-B): anhedra dendritic magnetite.

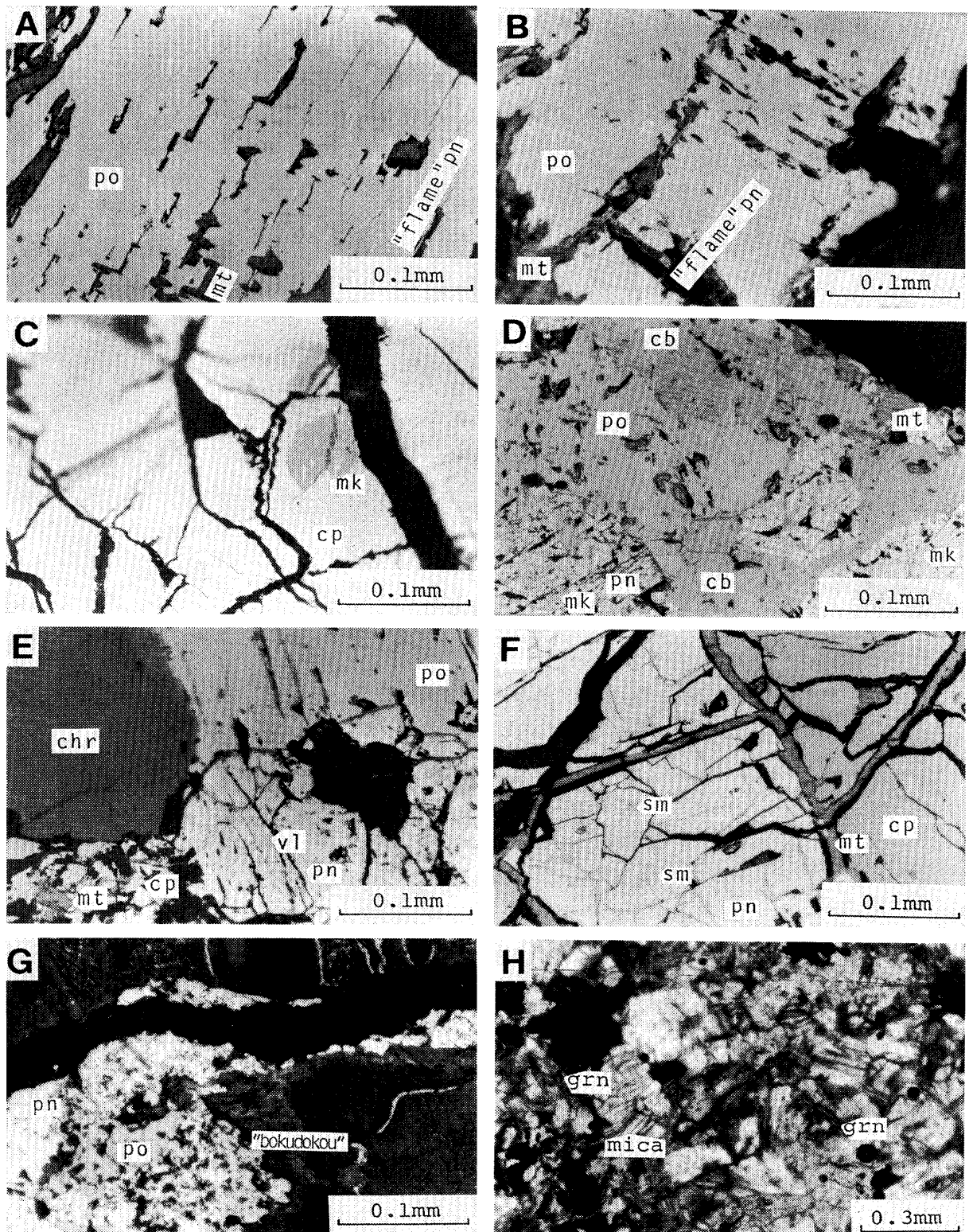


Fig.8 Microphotographs of textures observed on polished sections (A-G) and thin section (H) of Ni-Cu sulfide ores. A (I-1) and B (III-2): "flame" pentlandite appearing along a crystallographic direction in pyrrhotite. C (I-4-D): Mackinawite exsolved from chalcopyrite. D (IV-1-A): Paragenesis of pyrrhotite, cubanite, pentlandite and magnetite: pentlandite contains thin lamellae of mackinawite. E (VIII-0-C): Assemblage of chromspinel, magnetite, pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite; pentlandite is partly altered to violarite. F (VII-1-A): Smythite, as an alteration product of pentlandite. G (VI-0-A): "bokudokou" found in spotted ore, which must be a mineral belonging to valleriite-haapalaite family. H (VIII-0-P): Garnierite (grn), which contains 0.5 to 1.0 weight percent of Ni.

5. 主要鉱物の化学組成

黄銅鉱は, stoichiometric CuFeS_2 組成を, ほとんど常に示すが, 磁硫鉄鉱とペントランド鉱は, 変動する組成の領域をもっている^{16),17)}. この後二者は, 鉱石型に関連した, 興味ある組成変動を示す (Figs. 9, 10).

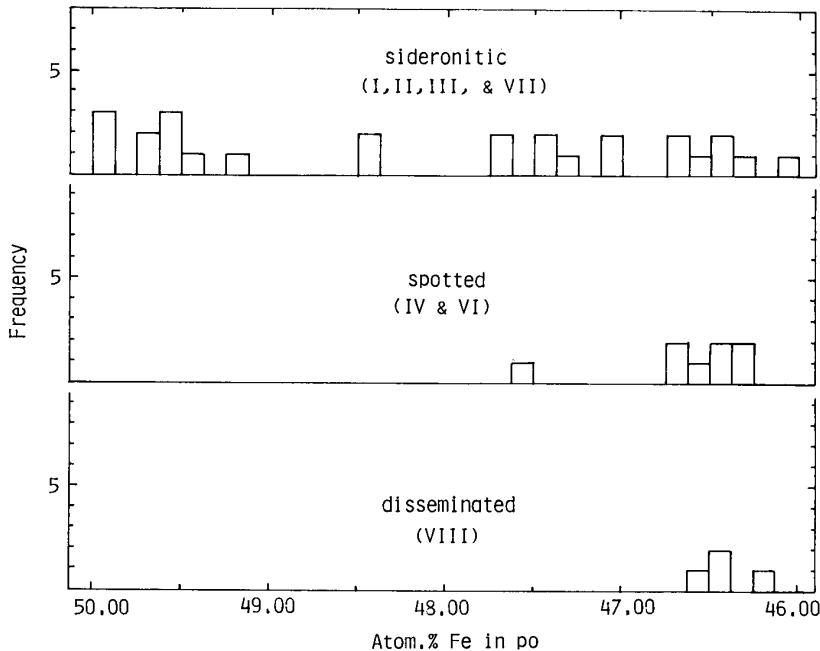


Fig. 9 Frequency distribution of pyrrhotite compositions in Jinchuan ores.

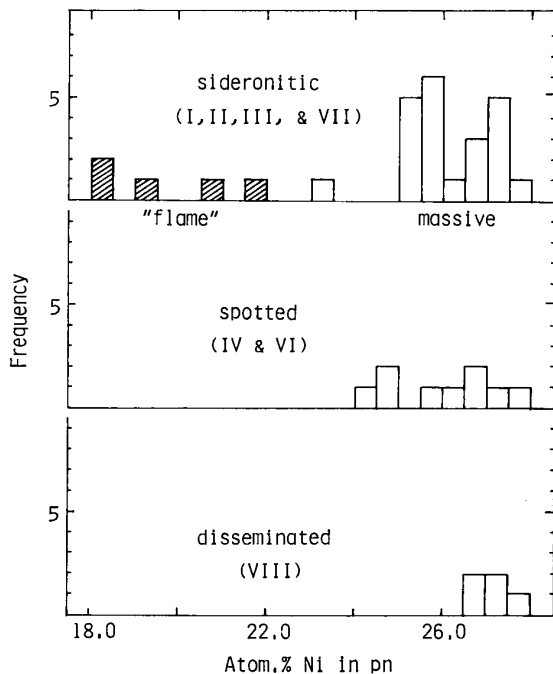


Fig. 10 Frequency distribution of Ni contents in pentlandite in Jinchuan ores.

動を示す (Figs. 9, 10).

シデロニティック鉱中の磁硫鉄鉱は, トロイライト (FeS) から単斜晶系磁硫鉄鉱 (Fe_7S_8) に至る組成領域の中に, 広い分布を示すが (Fig. 9), 斑状鉱・鉱染鉱に含まれる磁硫鉄鉱は, そのほとんどすべてが単斜晶系に属するものである. 通常のペントランド鉱の場合は, 鉱石型による組成の差異はないとみなしてよく, 25~27 atom. % の Ni を含んでおり, Ni/Fe 原子比は常に 1 より大きい. しかし, 磁硫鉄鉱中に含まれている "flame" ペントランド鉱は, 通常のペントランド鉱よりも Ni 含有量が低い (Table 5). この傾向は,

従来いわれてきたこと¹⁷⁾と一致している.

白金族グループの元素は, 通常超マフィック岩体に伴われるが¹⁸⁾, 金川鉱石中には, EPMA で検知できる程には含まれていないようである. コバルトも通常は検知できる程には含まれないが, シデロニティック鉱で, とくに黄銅鉱に富む型 (VII型) の鉱石中のペントランド鉱には, 0.5~0.7 wt. % の Co が含まれるものがあり, 最高値 1.36 wt. % の Co が記録された. しかし, この場合にも, 共生する磁硫鉄鉱や黄銅鉱からは検知されていない.

6. 二, 三の問題点について

6. 1 磁硫鉄鉱中のニッケル量

磁硫鉄鉱が "flame" ペントランド鉱を含んでいれば, 当然のことながら, 見掛けの上でその磁

16) Toulmin, P.; Barton, P. B., Jr.: *Geochim. Cosmochim. Acta.* **28** (1964), 641.

17) Mirsc, K. C.; Fleet, M. E.: *Econ. Geol.*, **68** (1973), 518.

18) Naldrett, A. J.; Cabri, L. J.: *Econ. Geol.*, **77** (1976), 1131.

Table 5 Some Examples of Chemical Composition of Ore Minerals. (in atom. %)

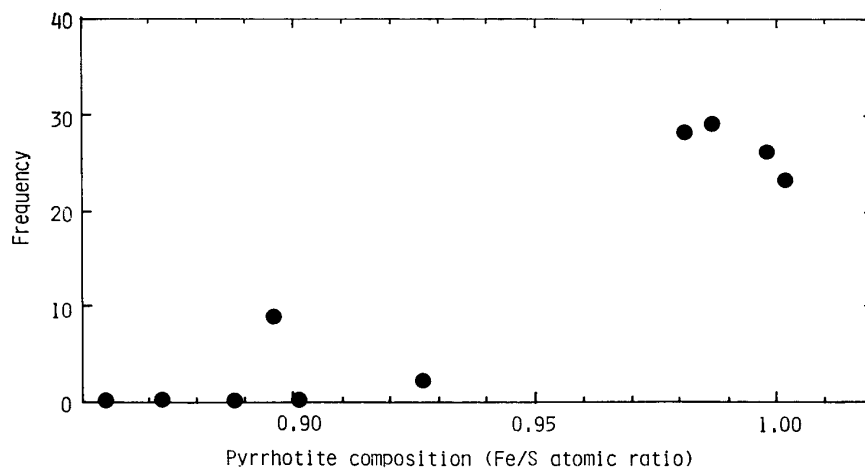
	S	Fe	Ni	Cu	Ore Type
po	50.43	49.57			I-1 (47.68*)
	50.45	49.55			
	50.56	49.44			
	53.28	46.72			II-1 (mpo, 46.67*)
	53.56	46.44			
pn	48.50	23.99	27.51		II-1
	48.42	24.30	27.28		
	48.26	26.56	25.18		II-2
	48.04	26.24	25.72		
	49.86	31.83	18.31**		
mk	48.52	38.98	9.53	1.16	IV-1
	50.16	40.87	6.81	2.17	
	49.88	30.49	10.70	8.92	
vl	58.83	22.58	18.59		VIII-1
	59.10	22.36	18.54		
	58.25	23.43	18.32		

*Fe-content calculated from d_{102} value.

**"flame" pentlandite in pyrrhotite.

硫鉄鉱のニッケル含有量を高めることになる。

Fig. 11 から明らかなように, "flame" ペントランド鉱と共生する磁硫鉄鉱は, stoichiometric FeS 組成のトロイライト, あるいはその近辺の組成のものに限られていて, 単斜晶系磁硫鉄鉱とは共生しないとみてさしつかえない。他方, 磁硫鉄鉱の結晶自体の中に, ニッケルの固溶する可能性は, 十分考えられる。測定の結果 (Fig. 12) によれば, "flame" ペントランド鉱の場合とは逆に, トロイライトないしその近辺組成のものには, ニッケルはほとんど含まれず ($<10^{-2}$ wt. %). 単斜晶系のものに, よく含まれている (max. 0.2 wt. %). したがって, 金川鉱床の磁硫鉄

**Fig. 11** Dependence of "flame" pentlandite appearance on pyrrhotite composition.

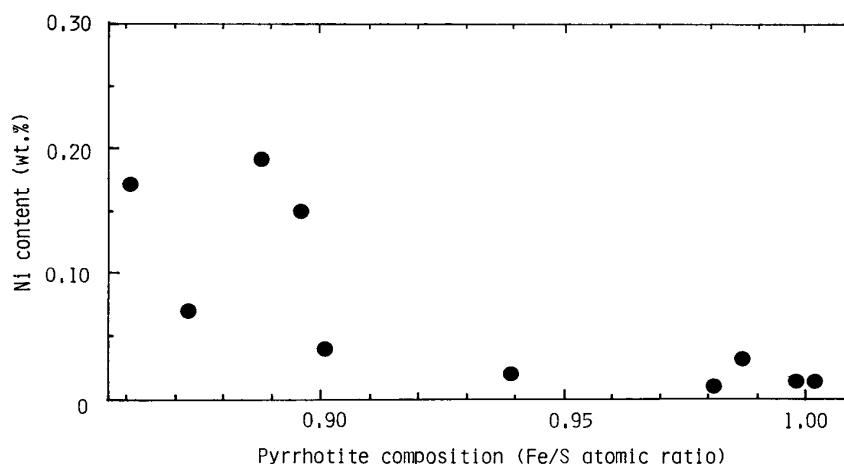


Fig. 12 Variation of Ni content with Fe/S atomic ratio of pyrrhotite.

鉱中には、巨視的にみるならば、その Fe/S 比にあまり関係なく、ニッケルが含まれていることになりそうである。

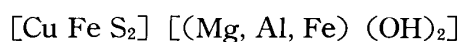
6. 2 "墨銅鉱"

斑状鉱試料の一部のものに、銅を 10 wt. % 余り、ニッケルを 10^{-1} wt. % ほど含む、土壤様鉱物が見出された (Fig. 8-G) (Table 6). この土壤様鉱物は、脈石中にわりあいと密集して、あるいは硫化鉱物を取りかこむような形で存在し、反射異方性が明瞭で、鏡下での同定は容易である。この鉱物が、鉱山現地で浮遊性の悪い含銅鉱物とされる "墨銅鉱"⁸⁾ であることはまちがいない。

Table 6 Chemical Composition of "valleriite". (VI-0) (in atom. %)

Mg	S	Fe	Ni	Cu	Si	X
23.10	36.36	27.93	0.30	12.31		4.0
18.99	37.38	29.15	0.40	13.14	0.94	4.6
22.49	38.43	26.99		12.06		5.0
21.33	37.39	28.27	0.25	12.16	0.60	4.6

"墨銅鉱" の化学式は、



で与えられているが⁸⁾、本研究での分析結果からは (Table 6)、むしろヴェレリー鉱 (valleriite)¹⁹⁾



ないし、ハーパライト (haapalaite)¹⁹⁾



に近い組成を示し、おそらくこの中間組成を有する類縁鉱物であろう。

本鉱物は、斑状鉱試料中にもみ見出されている。

19) Fleischer, M.: *Glossary of Mineral Species*, 5th ed. (1987), 192, The Mineralogical Record Inc., Tuscon.

6. 3 含ニッケル珪酸塩鉬物

金川鉬床産鉬石試料中のニッケル含有量は、通常高々 10^{-2} wt. % のオーダーであるが、鉬染鉬型 (VIII 型) 試料の脈石中に、0.5~0.9 wt. % Ni を含む鉬物が見出された (Table 7)。透過光による顕微鏡下の観察では (Fig. 8-H)、ニッケル含有量の高いのは、褐色の、暗色味を帯びた部分に相当し、蛇紋石の一種と同定される。この部分を仔細に観察すると、褐色の部分で、淡緑色の細かい帯状のラメラ様の箇所が認められる。この淡緑相は含ニッケル蛇紋石、すなわちガーニーライト (garnierite) に相当するものと考えられる。

Table 7 Chemical Compositions of Ni-bearing Silicates. (in wt. %, VIII-0)

MgO	SiO ₂	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	S	Ni+Mg+Fe Si
31.33	35.88			8.91	0.89	0.34	1.50
29.39	31.05	0.16	0.24	34.84	0.51	0.21	2.26
33.13	39.22		0.29	9.29	1.14	0.53	1.46
27.73	32.24		0.22	24.49	0.65	0.29	1.87

7. 結 論

金川鉬床産のニッケル-銅鉬石の鉬石組織、構成鉬物、化学組成、などを X 線回折測定装置、光学顕微鏡、X 線マイクロアナライザー、原子吸光光度計、その他の機器を用いて観察・測定をおこない、次の諸事実が知られた。

(1) 鉬石は、その巨視的構造に基づいて、シデロニティック鉬、斑状鉬、および鉬染鉬に大別される。これら 3 種の型の鉬石に共通して含まれる主要鉬物は、磁硫鉄鉬、ペントランド鉬、黄銅鉬および蛇紋石である。微量含まれる副成分鉬物は、マッキノー鉬、キューバ鉬が離溶鉬物として、ビオラ鉬、スマイサイトがペントランド鉬の変質鉬物として見出される。

(2) 金川鉬床の富鉬帯を形成するシデロニティック鉬は、カンラン石結晶粒間を硫化物メルトが充填、固結したものであることが、その組織から示唆され、また、この型の硫化鉬物には、多くのわれめが発達しており、冷却速度が大きかったことを暗示している。斑状鉬では、この冷却による収縮われ目は、小規模のものとなり、鉬染鉬に至ると、われ目はみられなくなる。これらのことは、金川鉬床の生成条件が、その位置によって、相当に異なっていたことを示唆している。

(3) シデロニティック鉬中の磁硫鉄鉬には、トロイライトから、単斜型磁硫鉄鉬に至る間の、種々の相が見られるのに対し、斑状鉬・鉬染鉬では、単斜型磁硫鉄鉬が圧倒的に卓越する。また、"flame" ペントランド鉬は、トロイライト、ないし、その近辺組成の六方型磁硫鉄鉬にのみ出現するが、磁硫鉄鉬の結晶自体に固溶するニッケル量は、単斜型ないしその近辺組成の磁硫鉄鉬に多く (max. 0.2 wt. % Ni)、トロイライト、あるいはそれに近い組成の磁硫鉄鉬には、たかだか 10^{-2} wt. % 程度しか含まれない。

(4) "墨銅鉬" は、斑状鉬中の試料に見出されたが、これは Cu を 12 atom. % 含む、valleriite ~ haapalaite の類縁鉬物と考えられる。本鉬物は Ni を 0.3~0.4 atom. % 程度含んでいる。

(5) 脈石中の NiO 含有量は、 10^{-2} wt. % 程度がふつうであるが、鉬染鉬試料の脈石部には、NiO が 1 wt. % を超える garnierite を含む場合がある。

本報文は、1987年以来、東北大学選鉱選錬研究所と、中国西北鉱冶研究院とが行ってきている、中国金川鉱床産鉱石についての、国際共同研究の成果の一部をまとめたものである。この共同研究が実現したのは、東北大学選鉱製錬研究所矢澤 彬教授の尽力による処が大きい。金川鉱床の地質学的文献については、日鉱探開(株)喜多正弘氏から、同鉱床産鉱石の実態については、中国西北鉱冶研究院呉振東高級工程師(前 東北大学選鉱製錬研究所、客員研究員)から、それぞれの情報を頂いた。EPMAによる分析は東北大学選鉱製錬研究所佐藤雄孝技官が、原子吸光法による分析は同所張礼強客員研究員(中国西北鉱冶研究院)が、それぞれ行った。参考試料として用いたカナダ・オンタリオ州サドベリー鉱床産鉱石の研磨試料片は、東北大学理学部岩石鉱物鉱床学教室北風 嵐博士および林謙一郎博士から借用した。本研究は、東北大学選鉱製錬研究所長大森康男教授、同所矢澤 彬教授、臼井進之助教授、徳田昌則教授、および岡田廣吉助教授の激励と援助によって支えられた。これらの方々に感謝の意を表す。