

## マリアナトラフ18°Nにおける硫化物—硫酸塩 チムニーの鉱物組成と鉱石組織

加瀬 克雄\*<sup>1</sup> 柴田 次夫\*<sup>1</sup> 蒲生 俊敬\*<sup>2</sup>

マリアナトラフ18°N付近の水深3,600mの海底において、「しんかい6500」のdive 152で、活動的なチムニーとチムニーの崩壊物と考えられる鉱石礫が発見、採取された。試料はすべて重晶石を主とし、さまざまな量の硫化鉱物を含む。熱水の通路に接する部分では、黄銅鉱と方鉛鉱を樹枝状に包有する閃亜鉛鉱とそれを交代する黄銅鉱が観察される。熱水の通路から離れると、黄銅鉱の量が減少し、方鉛鉱が増加するとともに微粒の黄鉄鉱が認められるようになる。熱水はバリウム、銅、亜鉛、鉛に富み、FeS<sub>2</sub>に不飽和であったと考えられる。マリアナトラフの鉱床は、鉱物組成と鉱石組織において、沖縄トラフ伊是名海穴の熱水性硫化物鉱床に類似し、鉛硫化物の少ない中央海嶺の熱水性硫化物鉱床とは異なる。

キーワード: マリアナトラフ, チムニー, 海底熱水性鉱床, 黒鉱鉱床, 重晶石, 方鉛鉱

## Mineralogy and Ore Texture of the Hydrothermal Sulfide-Sulfate Chimney near 18°N, Mariana Trough

Katsuo KASE\*<sup>3</sup> Tsugio SHIBATA\*<sup>3</sup> Toshitaka GAMO\*<sup>4</sup>

A white smoker chimney and several fragments of chimney were sampled near 18°N, Mariana Trough by the submersible "Shinkai 6500" during the dive 152. The ore samples mainly consist of barite followed by sphalerite, chalcopyrite, galena, tetrahedrite, pyrite and bornite. Traces of conduits through which hydrothermal solutions vented are present in the chimney and some ore fragments. Along the conduit wall, chalcopyrite may be a major constituent and occurs replacing dendritic sphalerite. Chalcopyrite decreases in amount outwards from the areas close to conduits, and galena increases instead. Fine-grained pyrite appears in such galena-rich domains. It is likely that the hydrothermal solutions responsible for the Mariana chimney are rich in Ba, Cu, Zn and Pb and undersaturated in FeS<sub>2</sub>. The ore mineralogy and texture of the Mariana deposit are very similar to those of the sulfide deposit from the Izena Hole, Okinawa back-arc trough, but are different from the Pb-deficient mid-oceanic ridge sulfide deposits hitherto known.

\* 1 岡山大学理学部

\* 2 東京大学海洋研究所

\* 3 Department of Earth Science, Faculty of Science, Okayama University

\* 4 Ocean Research Institute, University of Tokyo

## 1. はじめに

マリアナトラフ18°N付近の水深3,600m地点(アリス・スプリングス)において枕状溶岩の上に高さ約12cm, 基底部の径約8cmの円錐形を呈し(写真1), 頂部から白煙を噴いている活動的なチムニーが発見され, 付近に散在していた拳(こぶし)大までの黒褐色, 褐色及び灰白色鉱石礫とともに採取された。チムニーは黒褐色を呈し, 多孔質で脆く, その内部には底部から頂部に向かって, 及び中央部から側方部に向かって熱水の通路と考えられる連続した空隙が認められる。チムニーは一面に黄色の粉状結晶で被覆されている(写真1)。チムニーの周辺に散在していた鉱石礫のいくつかにはチムニーに認められると同様の組織・構造が認められ, また後述のようにこれらの試料がチムニーと同様に重晶石を主成分とすることから, これらの鉱石礫はチムニーの崩壊物と考えられる。ただし, 黄色粉状結晶が認められず, かわりに1mm程度の厚さで黒色粉状物質が鉱石礫を被覆しているものもある。これらの鉱石試料を樹脂に埋め込んで研磨片, 研磨薄片を作成し, 光学顕微鏡, EPMAを用いて鉱石組織, 鉱物組み合わせを調べた。特にチムニー試料は輪切りにして樹脂に埋め込み, 鉱物種と鉱物組み合わせの側方変化を調べた。

重晶石, 閃亜鉛鉱, 黄銅鉱及び方鉛鉱が鉱石試料の主要構成鉱物である。黄鉄鉱, 白鉄鉱, 四面銅鉱, 方解石, 非晶質物質がこれらに次ぎ, 少量の斑銅鉱, PbO, PbCl<sub>2</sub>, 銅藍も認められた。チムニーを被覆している黄色物質は自然硫黄であり, 鉱石礫に付着している黒色物質は, 少量の鉄と鉛を含むマンガン酸化物である。以下にチムニーと鉱石礫の鉱物組織と鉱物組成を記述する。

## 2. 鉱石の組織・構造・鉱物組成

### 2.1 チムニー

全体として, 伸長方向に0.5mm程度までの長柱状一針状重晶石が放射状及び束状に集合し, それらの間に主に重晶石の外形に規制されて, 時に重晶石を交代して, 様々な組織を呈する径約0.2mmまでの硫化鉱物粒が産出する。硫化鉱物の量は比較的少なく, 鉱石としては鉱染鉱に分類される。硫化鉱物としては閃亜鉛鉱が主体で, 著量の黄銅鉱, 方鉛鉱を伴う。黄鉄鉱, 白鉄鉱, 四面銅鉱がこれらに次ぎ, 斑銅鉱も極く少量産する。閃亜鉛鉱は,

① 黄銅鉱や方鉛鉱を樹枝状に多数包有する半自形から粒状一楕円体状のもの(樹枝状閃亜鉛鉱; 写真3)

② 黄銅鉱や方鉛鉱が閃亜鉛鉱の結晶成長面に沿って配列した自形一自形のもの

③ 中心部に斑銅鉱を含む細粒不定形のもの(写真5), 及び

④ 径0.05mm以下の小球状コロフォラム閃亜鉛鉱などがある。樹枝状閃亜鉛鉱粒の中心部には黄銅鉱の病変(disease)が認められることがある(写真4)。黄銅鉱, 方鉛鉱及び四面銅鉱は閃亜鉛鉱粒に伴い複合粒を形成している場合が多い。熱水の通路と考えられる空隙に接する部分は, 離れた部分に比較して銅に富み, 閃亜鉛鉱の粒度が大きく, また閃亜鉛鉱を交代したと考えられる, 少量の閃亜鉛鉱を含む黄銅鉱粒がときどき認められる(写真7参照)。方鉛鉱は熱水の通路から離れた部分では単独粒として, しばしば自形で, かつ閃亜鉛鉱を交代した組織を呈して産出する(写真6)。斑銅鉱は常に微細な粒子として閃亜鉛鉱粒の中心部に包有されており, 単独粒子として産することはない。黄鉄鉱はチムニーの外縁部に産し, 方鉛鉱, コロフォラム閃亜鉛鉱に伴って, 径0.005mm以下から0.03mmまでの粒度の同心球状コロフォラムあるいはフラムボイダル組織を呈する。また, 伸長方向に最大0.2mmの菱形を呈する少数のPbCl<sub>2</sub>が独立粒として産出する。チムニーの外面は自然硫黄で薄く被覆されている。鉄やマンガンの酸化物は認められない。

### 2.2 鉱石礫

チムニーと同様に多孔質で脆い。肉眼的に3つのタイプに分類される。以下各々についていくつかの興味ある鉱物の産状を記述する。

#### (1) Aタイプ

いくつかの黒褐色の試料の表面には熱水の通路であったと考えられる連続した窪(くぼ)みがあり, その構造に平行に硫化鉱物が濃集した縞状構造が認められる(写真2)。窪み(熱水の通路)に接して, ほとんど黄銅鉱からなる部分がある。黄銅鉱の形態は閃亜鉛鉱のそれと類似しているため, 閃亜鉛鉱を交代したものと考えられる(写真7)。熱水の通路から離れた硫化鉱物の濃集部は, 放射状一樹枝状に黄銅鉱を包有する径0.1—0.3mmの半自形から粒状一楕円体状の閃亜鉛鉱を主体とし, その部分の鉱物組成は, チムニーの鉱物組成と似ている

が、やや黄銅鉱に富み、方鉛鉱に乏しい。また、硫化鉱物の粒度がやや大きい。重晶石は長柱状を示すものが多く、針状のものは少ない。1つの試料では伸長方向に約1mm程度までの粒度の方鉛石が重晶石に共存して産出している。

### (2) Bタイプ

熱水の通路と思われる構造を欠く灰褐色の鉱染鉱で、重晶石を主とし、閃亜鉛鉱、黄銅鉱、方鉛鉱及び微量の四面銅鉱を含む。Bタイプの鉱石は黄鉄鉱あるいは白鉄鉱を含むものとこれらの鉄硫化鉱物をほとんど含まないものに区分される。黄鉄鉱は径0.1mm以下で自形あるいは半自形を示す。白鉄鉱は自形で産し、比較的粗粒で径0.3mmに達する。他の鉱物の変質によって形成された組織を示さない。鉄硫化鉱物の存在を除けば、鉱石組織はAタイプの試料で熱水の通路から1cm程離れた部分の組織に類似している。

### (3) Cタイプ

灰白色で肉眼的に不均質であり、角礫状の構造が認められる。長柱状の重晶石を主体とする。硫化鉱物は微量で、微細(径0.001—0.01mm)な閃亜鉛鉱、方鉛鉱、四面銅鉱、黄銅鉱及びそれらの複合粒が認められる。その他に、同じ程度の粒度のフラムボイダル黄鉄鉱が散点している。Cタイプに分類される3つの試料の1つに、重晶石を覆って、径0.2—0.3mmのやや伸長した板状あるいは粒状を呈するPbOが認められる。また、このタイプの試料の表面はいずれも、黒色の少量の鉄と鉛を固溶するマンガン酸化物に被覆されている。

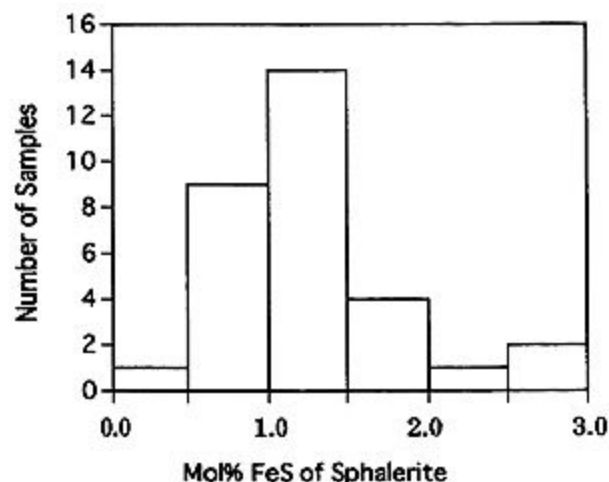


図1 閃亜鉛鉱のFeS含有量(mol%)  
Fig. 1 Mol% FeS of sphalerite.

### 3. 硫化鉱物の組成

硫化鉱物の組成をX線マイクロアナライザーを用いて分析した。補正はYui(1992)に従った。閃亜鉛鉱の分析結果を図1に示す。すべての産状の閃亜鉛鉱について、そのFeS含有量は3mol%以下であり、産状によるFeS含有量の違いは少ない。熱水の通路に接し、黄銅鉱に富む部分の閃亜鉛鉱がわずかに鉄に富むようである。CuSに相当するFeSを差し引いたFeSは1mol%以下のものが多い。

白鉄鉱はX線マイクロアナライザーの反射電子線像で明瞭な明暗が認められ、明るい部分には著量のAsとCuが検出される。陸上の白鉄鉱とは異なり、暗い部分にも一般に0.1%以上のAsが含まれる(表1)。黄鉄鉱、黄銅鉱および方鉛鉱には特別の元素は検出されない。

### 4. マリアナトラフの硫化物試料の特徴

マリアナトラフの熱水性硫化物鉱床の特徴は以下のようによまとめられる。

① 活動的なチムニー、チムニーの崩壊物とも、重晶石を主とし硫化鉱物の含有量は比較的少ない。その鉱石は鉱染鉱であり、いわゆる“塊状硫化物鉱床”の鉱石には相当しない。

② 活動的なチムニーはホワイトスモーカーであり、その温度は測定されていないが、他地域における測定結果からの類推(e.g., Haymon and Kastner, 1981)から300°C以下と推測される。比較的低温の熱水であるが、

表1 白鉄鉱の化学組成。No. 1と2は反射電子線像の明るい部分、3と4は暗い部分の分析値である。

Table 1 Electron microprobe analysis of marcasite. Nos. 1—2, and 3—4 are analyses of bright and dark domains of marcasite in the back-scattered electron images, respectively.

	1	2	3	4
weight percent				
Fe	46.95	46.78	47.65	47.98
Cu	0.72	0.89	0.15	0.17
Zn	0.09	0.05	0.07	0.05
As	1.82	0.95	0.42	0.27
S	51.67	52.46	52.81	53.28
Total	101.25	101.13	101.10	101.75
atomic percent				
Fe	33.78	33.50	34.01	33.99
Cu	0.46	0.56	0.09	0.11
Zn	0.06	0.03	0.04	0.03
As	0.97	0.50	0.22	0.14
S	64.74	65.41	65.64	65.73

閃亜鉛鉱、方鉛鉱とともに著量の黄銅鉱を晶出させている。他方鉄硫化物 ( $\text{FeS}_2$ ) の産出は熱水の通路からやや離れた部分に限られ、その量も上記3鉱物に比較して少ない。初生熱水はバリウム、亜鉛、鉛とともに銅に富み、鉄硫化物に関して不飽和であると考えられる。銅に富み鉄の乏しい熱水の性質は、初生鉱物として、斑銅鉱が晶出していることと調和的である。なお、現世の海底熱水性鉱床では斑銅鉱の産出はまれである。

③ すべての硫化鉱物は、閃亜鉛鉱中の  $\text{FeS}$  がおそらく 1 mol% 以下で示される高い硫酸分圧の条件で沈殿した。

④ 放射状及び樹枝状に配列した黄銅鉱と方鉛鉱を包有する閃亜鉛鉱の存在は、これらの鉱物が熱水から急速にかつ同時に晶出したことを示唆する。崩壊したチムニーの試料に認められた樹枝状閃亜鉛鉱を交代する黄銅鉱は、かつてより高温の熱水が湧出したことがあることを示すのであろう。熱水の通路から離れたチムニーの外縁部に産出するフラムボイダル黄鉄鉱は、海水中に湧出した熱水から晶出・降下しチムニーに付着したものと考えられる。

⑤  $\text{PbO}$ 、 $\text{PbCl}_2$  及び  $\text{As}$ 、 $\text{Cu}$  を含む白鉄鉱は陸上の塊状硫化物鉱床には知られていない。これらの産出は統成変化を受けていない硫化物鉱床の特徴を示すものと考えられる。

#### 5. 他地域の現世熱水性硫化物鉱床及び黒鉱鉱床との比較

東太平洋海膨や大西洋中央海嶺に知られる熱水性硫化物鉱床は、銅、亜鉛あるいは銅-亜鉛硫化物鉱物を主とし、方鉛鉱などの鉛を含む鉱物の産出は少ない。EPR 21°N, Guaymas basin, 及び Juan de Fuca Ridge の Axial Seamount における硫化物鉱床は比較的鉛に富み、それぞれ 0.61% (Bischoff et al., 1983), 0.52%, 及び 0.35% (Hannington et al., 1986) の鉛を含む分析値が報告されている。これらの鉱床を含む中央海嶺型の熱水性鉱床の生成環境は、少なくとも部分的には、低い硫酸分圧で安定な磁硫鉄鉱やアイソキューバナイトの晶出で示される。今回採取されたマリアナトラフの硫化物試料は極めて限られているが、その鉱物の化学組成と鉱物の生成環境は多くの中央海嶺型熱水性鉱床とは異なっているように思われる。これに対して、沖縄トラフ背弧海盆伊是名海穴の熱水性鉱床は鉱物の鉱物組成・化学組成と鉱石組織、及び閃亜鉛鉱の  $\text{FeS}$  含有量で示される生成環境などにおいて、マリアナトラフの熱水性鉱床に類似

している点が多い (Halbach et al., 1989; 浦辺, 1989)。沖縄トラフ背弧海盆の岩石は島弧型カルクアルカリ岩系の玄武岩、安山岩、石英安山岩、流紋岩のバイモーダルな組み合わせであり (Halbach et al., 1989), 中央海嶺の海洋地殻の岩石とは異なる。Halbach et al. (1989) は沖縄トラフの熱水性鉱床が黒鉱鉱床に類似していることを指摘し、浦辺 (1989) は両鉱床の類似点と相違点を議論した。

Solomon (1976) によれば、陸上に知られる塊状硫化物鉱床のうち、わが国の黒鉱鉱床のように銅・鉛・亜鉛を主要鉱石金属とする鉱床の母岩には必ず酸性火山岩が伴われる。海洋地殻上では鉛を主要鉱石金属とする塊状硫化物鉱床は生成されないと言いつけることができるであろう。現在までに知られているかぎり、Solomon (1976) の指摘は現世の海底熱水性硫化物鉱床にも当てはまるように思われる。今回採取された限定された鉱石試料から判断するかぎり、マリアナトラフの鉱床の主要鉱石金属は銅・鉛・亜鉛であるように思われる。マリアナトラフの鉱床サイト周辺は背弧海盆玄武岩で覆われているが、地殻深部はどのような岩石で構成されているのであろうか。

#### 謝 辞

試料の採取にあたり、ご助力いただいた「しんかい 6500」司令、乗員、「よこすか」船長、乗組員の皆様に深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- Bischoff, J.L., R.J. Rosenbauer, P.J. Aruscavage, P.H. Baedeker and J.G. Crock (1983): Sea-floor massive sulfide deposits from 21°N, East Pacific Rise; Juan de Fuca Ridge; and Galapagos Rift: Bulk chemical composition and economic implications. *Econ. Geol.*, 78 (8), 1711-1720.
- Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, L. Käselitz, R.D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Märten, J. Ishibashi, S. Czerwinski and N. Blum (1989): Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338 (6215), 496-499.
- Hannington, M.D., J.M. Peter and S.D. Scott (1986): Gold in sea-floor polymetallic sulfide deposits.

- Econ. Geol., 81 (8), 1867-1883.
- Haymon, R.M. and M. Kastner (1981) : Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N : preliminary description of mineralogy and genesis. Earth Planet. Sci. Lett., 53 (3), 363-381.
- Solomon, M. (1976) : "Volcanic" massive sulphide deposits and their hostrocks—a review and an explanation." p 21-50. In : Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits, II, Regional Studies and Specific Deposits, 6. Edited by K.H. Wolf, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 585 pp.
- 浦辺徹郎 (1989) : 伊是名海穴 (鉱床サイト1) の鉱床の鉱物学的特徴—黒鉱との比較において—。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 5, 191-196.
- Yui, S. (1992) : A system of EPMA data reduction programs using BASIC for personal computers in 1992. Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. IV, 23, 147-158.

(原稿受理 : 1994年6月30日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載



写真 1 白煙を吹き上げていたチムニーの試料 (No. 152-4)。表面は自然硫黄の結晶で覆われている。

Photo 1 Sampled white smoker chimney. The surface is thinly coated with native sulfur. No. 152-4.

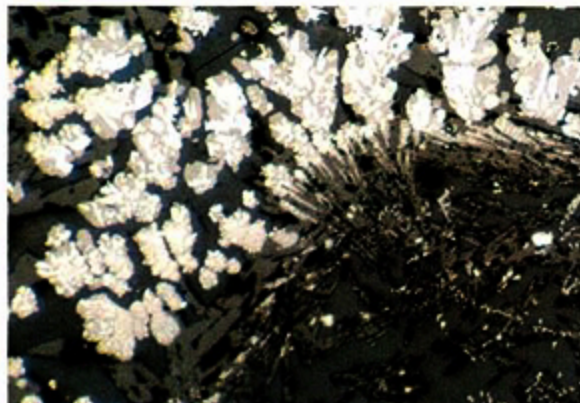


写真 3 多数の方鉛鉱 (白色) と黄銅鉱 (黄色) を樹枝状に含む閃亜鉛鉱。針状の重晶石の成長方向と同じ方向で空隙に向かって伸長している。反射顕微鏡写真。写真の横幅は 0.6 mm。No. 152-4

Photo 3 Photomicrograph of sphalerite containing dendritic grains of galena and chalcopyrite, and growing toward inside of tubular vesicle. Reflected light. Width of field of view is 0.6 mm. No. 152-4.



写真 2 熱水の通路と考えられる連続した空隙に平行に硫化鉱物の濃集した縞状構造を持つ鉱石礫 (No. 152-1a)

Photo 2 Fragment of chimney with sulfide-concentrated bands along the conduit of hydrothermal solution. No. 152-1a.

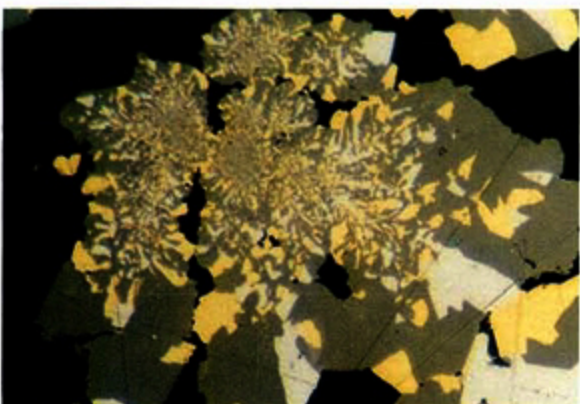


写真 4 写真 3 の部分の拡大反射顕微鏡写真。閃亜鉛鉱粒の中心部に黄銅鉱病変 (chalcopyrite disease) に似た組織が見える。横幅は 0.15 mm

Photo 4 Close up of the sphalerite grain of photo 3, showing chalcopyrite disease of sphalerite. Reflected light. Width of field of view is 0.15 mm.

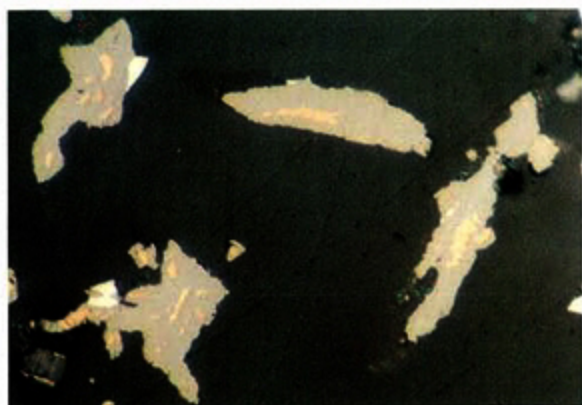


写真 5 コアに斑銅鉱を含む閃亜鉛鉱。反射顕微鏡写真。写真の横幅は 0.15 mm。No. 152-4

Photo 5 Photomicrograph of sphalerite with bornite in the core. Reflected light. Width of field of view is 0.15 mm. No. 152-4.



写真 7 熱水の通路と思われる空隙に接した部分の閃亜鉛鉱を交代したと考えられる黄銅鉱。チムニーの崩壊物と思われる鉱石塊 (No. 152-3a)

Photo 7 Photomicrograph of chalcopyrite replacing sphalerite along the conduit wall of copper-rich ore fragment. Reflected light. Width of field of view is 0.6 mm. No. 152-3a.

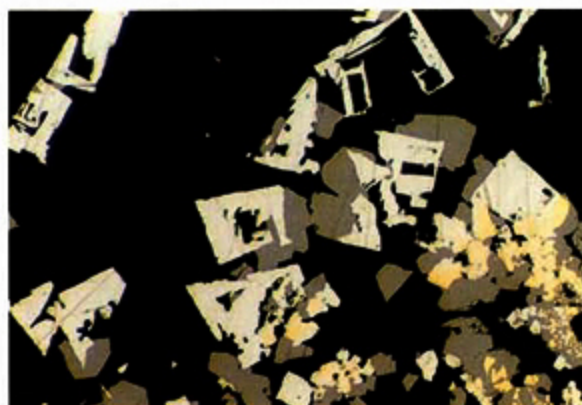


写真 6 閃亜鉛鉱 (灰色) を交代する組織を示す自形-骸晶状方鉛鉱 (白色)。反射顕微鏡写真。写真の横幅は 0.6 mm。No. 152-4

Photo 6 Photomicrograph of euhedral-skeletal galena showing replacement for sphalerite. Width of field of view is 0.6 mm. Reflected light. No. 152-4.

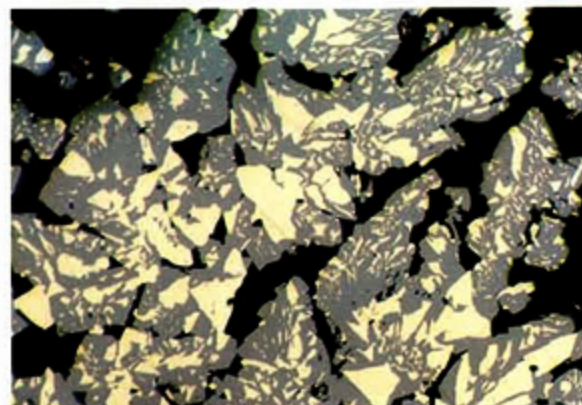


写真 8 多数の黄銅鉱を樹枝状に含む粒状-楕円体状閃亜鉛鉱の反射顕微鏡写真。写真 7 から 5 mm 離れた部分。横幅は 0.6 mm。No. 152-3a

Photo 8 Photomicrograph of granular-ellipsoidal sphalerite containing dendritic chalcopyrite grains. 5 mm apart from the area of photo 7. Width of field of view is 0.6 mm. Reflected light. No. 152-3a.