

インジウムと火山堆積性塊状硫化物鉱床, 特にポルトガルのネベシュコルボ鉱床について

石原舜三¹⁾

1. まえがき

世界的な生活様式の高度化に伴うインジウムの品不足, すなわち価格の高騰を取り上げて約1年となるが(石原, 2005), 依然として\$1,000/kgの高値(国内10月建値11~11.5万円, レアメタルニュース 2,234号)が続いており(第1図), 今やインジウムは銀(約3万円/kg)を遥かに凌ぐ“貴金属”に昇格した。それほどこの元素は存在量が少なく特殊な地質条件環境下のみで存在し, 増産をするには限界があることを示している。

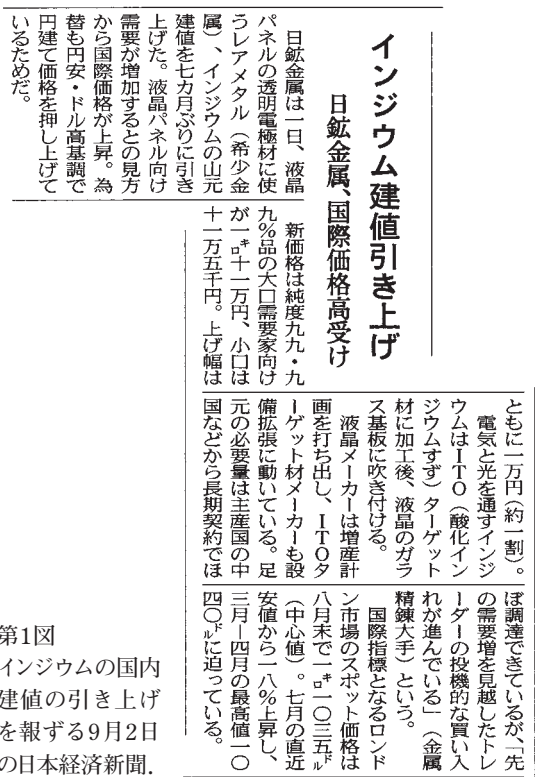
Murao *et al.* (1991)は日本の最も重要なインジウム資源はスズ多金属鉱床であるとし, 世界的な総括において, インジウムが濃集する広域のおよび局部的地質条件として, 次の7点を提案した。

- (1) 珪長質火成活動の存在,
- (2) チタン鉄鉱系花崗岩区,
- (3) チタン鉄鉱系花崗岩区中の幾つかのセグメント,
- (4) 熱水性スズ多金属鉱床と黒鉱などの火山堆積性鉱床,
- (5) スズ多金属鉱床胚胎の場としてカルデラ構造を有する所,
- (6) スズ多金属鉱床の場合, 火山底性~深成の環境,
- (7) スズ多金属鉱床内でスズ石-硫化物(特に斑銅鉱)組合せの存在。

現在ではグリーンタフ帯の余市, 寿都, 湯の沢, 尾去沢, 西沢などの新産地が発見されており, この提案には若干の修正が必要である。これについては別に報告する。

一方, 国際的には, 黒鉱型の火山性塊状硫化物鉱床に伴うものが大規模である。鉱床中のインジウムの産状は, (イ)独立鉱物, あるいは(ロ)他鉱物(銅・亜鉛硫化物, スズ石など)の陽イオンを置換するものまで様々である。独立鉱物は非常に稀にしか産出しないから, 資源的には後者, 特に閃亜鉛鉱などの硫化物に含まれるものが大変に重要となる。インジウムは親銅元素であり, In^{3+} のイオン半径は0.88Å(6配位), 同族の Cu^{2+} (0.81Å)や Zn^{2+} (0.83Å)を置換して硫化物に入りやすい。現在, 鉱業的に回収されているインジウムの多くは閃亜鉛鉱や銅硫化物から得られている。

そのような資源的観点から, ここでは世界のインジウム資源, 特にその規模が大きい火山性塊状硫化物鉱床に伴うものの概要を報告し, その成因的背景,



第1図
インジウムの国内建値の引き上げを報ずる9月2日の日本経済新聞。

1) 産総研 特別顧問

キーワード: インジウム, 始生代, 古生代, 火山堆積性, 塊状硫化物, 鉱床, ネベシュコルボ, 亜鉛精鉱

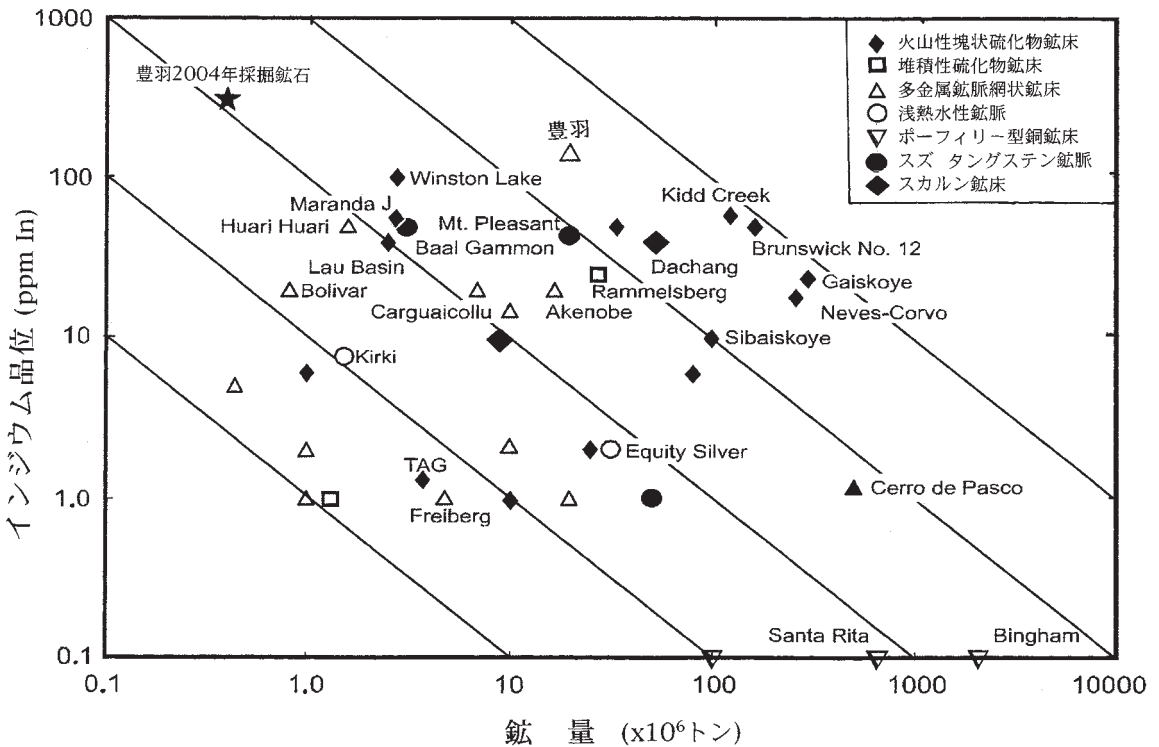
今後の資源問題などについて考察してみたい。火山性塊状硫化物鉱床のうち流紋岩ドームを伴うような珪長質火山岩類と密接なもの(狭義の黒鉱型)がインジウムの濃集には重要であるが、より堆積性の要素が強い噴気堆積性鉱床(SEDEX, ブロークンヒル, サリバンなど)にもインジウム異常が認められている。日本の火山性塊状硫化物鉱床は、黒鉱型、別子型ともに1ppm In以下であり(通産省, 1993), インジウムに非常に乏しい性格を持つ。

2. インジウムの品位・鉱量と鉱床のタイプ, そして生成時代

資源量を表す最適の方法として、品位-鉱量図がある。Schwarz-S. and Herzig (2002)はインジウムに関して世界的にデータを集め、第2図を作成した。彼らの集計から品位20ppm以上、鉱量100万トン以上

の主要鉱床を抜粋すると、第1表のように纏められる。これらインジウム高含有量鉱床は恐らくチタン鉄鉱系花崗岩質マグマに関する鉱脈~鉱染型スズ鉱床、および珪長質マグマの海底火山活動に関係して生成した黒鉱型塊状硫化物鉱床に2分される。一方、逆にインジウム低含有量鉱床の代表はポーフリー銅鉱床であり、世界4大鉱床の一つビンガムは20億トン以上の鉱量を誇るが、そのインジウム含有量は0.1ppm程度と非常に低い(第1図)。この事実は、インジウムは磁鉄鉱系マグマ活動とは基本的には無縁であることを示している。

我が国では豊羽, 明延, 生野の3鉱山が大きく、いづれもスズ多金属鉱脈型である。同様な高品位鉱床はボリビア, 華南のスズ多金属鉱化域に期待できる。豊羽鉱床の値は1992年の訪日時の統計調査(Kooiman and Ruitenber, 1992)に基づくことされ、図からは品位140ppm, 鉱量1,980万トンと読み取れる。



第2図 世界の主要なインジウム含有鉱床の品位と鉱量。Schwarz-S. and Herzig (2002)によるが、マランダJ 鉱床は品位50ppm, 鉱量270万トンに、豊羽はエピサーマルから多金属に訂正し、昨年度の生産量を石原 (2005) から追記した。豊羽の品位と鉱量はKooiman and Ruitenber (1992)に基づくことされているが、この文献には見つからなかった。

第1表 世界の主要なインジウム含有鉱床 (Schwarz-S. and Herzig, 2002に加筆).

鉱床名	時代とタイプ	鉱量 ($\times 10^6$ トン)	品位 (ppm)	In含有量 (トン)
顕生代の鉱脈～鉱染型鉱床				
1 日本, 豊羽	新生代, 鉱脈	19.8	140	2,772
2 ボリビア, ワリワリ	新生代, 鉱脈	1.6	50	80
3 日本, 生野	新生代, 鉱脈	6.9	20	138
4 日本, 明延	新生代, 鉱脈	17.0	20	340
5 中国, ターチヤン	中生代, スカルン	53	40	2,120
6 カナダ, プレザント山	380Ma, 鉱染網状	19.84	45.2	897
火山性塊状硫化物鉱床				
7 ポルトガル, ネベシュコルボ	後期デボン紀	>262	>18	7,000
8 ロシア, ザイスコイ	デボン紀	300	24	7,200
9 ドイツ, ラムメルスベルグ	デボン紀	27.2	25	680
10 カナダ, ブルンスヴィック	オルドビス紀	161	50	8,050
11 カナダ, ヒーススティーレ	オルドビス紀	33.8	50	1,690
12 カナダ, サリバン	原生代, 14.7億年	<160	50	>8,000
13 豪州, ブロークンヒル	同上, 16.9-17.0億年	<300	>10	>3,000
14 カナダ, キッドクリーク	始生代, 27.1億年	<135	<50	3,400
15 南ア, マランダJ	始生, 30.2億年	2.7	50	135

ここでは既述のように(石原, 2005), 北西部, 早期の酸化的雰囲気で熱水鉱液から晶出したインジウムを含まないAg-Pb-Zn脈, 南東部で後期の還元的雰囲気で晶出した含インジウム錫多金属鉱脈が産出するから, インジウム含有量は鉱体内で著しく変化する. 後期脈から出鉱した2004年の採掘鉱石(309ppm, 38.9万トン)は世界最高の品位を持つ. 一方, カナダ東部の古生代のカレドニア造山帯のプレザント山(Mt. Pleasant)では, 花崗岩に関係するスズ・タングステン多金属鉱染網状鉱床にインジウムが濃集し(平均45ppm), その含有量は約900トンである. 以上の諸鉱床は鉱石のタイプこそ違うものの, 成因的には還元的な含スズ(=タングステン)花崗岩質マグマ活動に関連したものと思われる.

その他の巨大鉱床はいづれも黒鉱型の火山堆積性塊状硫化物鉱床であるが, 我が国の黒鉱鉱床にはインジウムは含まれないと言ってよい. 主要な火山堆積性塊状硫化物鉱床は先カンブリア紀～古生代末期の時代を持ち, 世界最大はカナダの始生代の鉱床であり, 総鉱量(生産量+残存鉱量)16.6億トン, 含まれる銅量2,750万トン, 亜鉛量5,030万トン, イベリア半島はこれに匹敵し, 総鉱量17.7億トン, 含まれる銅量1,460万トン, 亜鉛量3,490万トンである(Leistel *et al.*, 1998). インジウム含有塊状硫化物鉱床は, これら先カンブリア時代(始生代と原生代)と古生代のカレド

ニア期の巨大な鉱床帯に限られる点は興味深い.

2.1 始生代の鉱床

最古のインジウム含有鉱床は南アフリカ共和国にあり, マランダJ鉱床と呼ばれる. これは大きくはないが(インジウム含有量135トン), 超苦鉄質ないし流紋岩質の火山岩類から構成されるグリーンストーン帯に産出する点で興味深い. 鉱床はアンチモン-金鉱化帯として知られる始生代地塊の一つ, マーチソングリーンストーン帯(30.7-29.7億年)に位置している. マランダJ鉱床は, 厳密にはこれらに斜交する銅-亜鉛鉱化帯の一部を占める, 珪長質火山岩類に付随する火山性塊状硫化物鉱床である. 母岩は石英-絹雲母片岩, 石英-緑泥石片岩, 石英-斑岩片岩, 流紋岩, 珪長質集塊岩類である(Pearlon and Viljoen, 1986).

マランダJ鉱床の構成鉱物は主に黄鉄鉱, 閃亜鉛鉱, より少ない黄銅鉱, 磁硫鉄鉱, 磁鉄鉱からなる. 方鉛鉱は先カンブリア時代の鉱化帯の常として非常に少ない. スズ鉱物は報告されていない. 鉱体中のインジウム含有量は3~640ppm, 平均323ppmであり, その含有量は銅品位との相関性がある. また鉱体は帯状分布を示し, 閃亜鉛鉱化帯が銅による交代作用を受けた所でインジウムが多い傾向があるので, 両者との関連性が示唆される. 母岩のインジウム含有量は, 流紋岩210ppb, 石英斑岩140ppbの非常に

高い値を示す。

キッド クリーク(Kidd Creak) 鉱床は、カナダのオンタリオ州のティミンズの近くにおいて、総鉱量1.39億トン(2.4% Cu, 6.5% Zn, 0.23% Pb, Ag 90g/t, Sn ~ 0.15%)を有する巨大鉱床である。鉱床は超苦鉄質火山岩であるコマチアイトを基盤とし、珪長質火山岩類中に胚胎する。最下部の下盤流紋岩は2716 ± 0.6 Ma, 上盤流紋岩は2711.5 ± 1.2 Maの年代を有し、鉱化作用は少なくとも400万年は継続した。上盤側には枕状組織を持つ玄武岩溶岩や角礫岩が存在するため、鉱床は海底噴気熱水性と考えられているが、鉱体は複雑に褶曲し、層状の原形を保有せず、南部鉱体、中央鉱体、北部鉱体に分けられている。

鉱床のインジウム含有量は1 ~ 870 ppmと変化し、In 含有鉱物としてはロケサイト、他に閃亜鉛鉱(15 ~ 2,059 ppm In), 黄銅鉱(5 ~ 1,085 ppm In), 黄錫鉱, スズ石, テンナンタイトなどに少量含まれる。

2.2 原生代の鉱床

原生代には二つのSEDEX (sedimentary-exhalative) 型の巨大鉱床がある。いずれも大陸内リフトの沿った火山性噴気活動で堆積岩と同生的に生成したものである。

一つはオーストラリア南東部のブローケンヒルであり、これは珪長質片麻岩(1701 Ma)を母岩とするZn-Pb-Ag 鉱床であり、構成鉱物は閃亜鉛鉱・方鉛鉱・含銀鉱物のほか、黄銅鉱、微量のスズ石を伴う(Parr *et al.*, 2004)。磁硫鉄鉱が多いが、母岩の変成度が高く初生の酸化還元状態は詳らかでない。インジウム含有量は閃亜鉛鉱について10.0 ppmと74.7 ppmの報告があり(Yi *et al.*, 1995)、その鉱量が3億トンに達するために、最小値の10 ppmを採用しても、総インジウム量は3,000トンである。

カナダ西部、アメリカ合衆国との国境に近いサリバンの噴気堆積性鉱床(総鉱量 160×10^6トン)にはスズ石が回収されるほど多産し(石原・寺島, 1983)、インジウム含有量は閃亜鉛鉱について、94.4 ppm, 93.0 ppm, 19.2 ppmの3個の値が報告されている(Yi *et al.*, 1995)。Schwarz-S. and Herzig (2002)はこれに基づき鉱床平均値を50 ppm Inと推定しており、鉱床のインジウム含有量は8,000トンにも達する巨大な鉱床となるが、当鉱山は既に閉山されている。鉱床は泥質岩に胚胎し、噴気口と思われる電気石化部分に塊状

鉱体が、周辺に層状鉱体が分布する。主要な鉱石物は磁硫鉄鉱・閃亜鉛鉱・方鉛鉱・含銀鉱物、そして黄鉄鉱である。

2.3 古生代の鉱床

第1表に示したように、古生代には最も大規模な鉱床がある。カナダのアパラチア造山帯にはオルドビス紀の重要な鉱床がある。特にブルンスヴィック No.12 鉱床は約8,000トンのインジウム含有量を持ち、これは世界最大級である。この鉱床はオルドビス紀の火山碎屑性グレイワッケおよび炭質物粘板岩を母岩とする塊状硫化物鉱床である。インジウムは一般の硫化物中に含まれ、その含有量は主に閃亜鉛鉱-方鉛鉱から構成される主鉱体が3 ~ 300 ppm, 平均52 ppm, 閃亜鉛鉱-方鉛鉱の西鉱体は5 ~ 230 ppm, 平均69 ppm, 黄鉄鉱-磁硫鉄鉱-黄銅鉱からなる湧口鉱体は1 ~ 230 ppm, 平均25 ppm, 黄鉄鉱-閃亜鉛鉱-方鉛鉱の層状鉱体は4 ~ 180 ppm, 平均49 ppmである。選鉱産物の含有量は亜鉛精鉱220 ppm, 銅精鉱76 ppm, 鉛精鉱57 ppmであり、亜鉛精鉱が最も高い。

カナダのヒーススチール鉱床も同様なオルドビス紀火山碎屑岩と泥岩中に胚胎する火山堆積性塊状硫化物鉱床で、その生成構造場は大陸性背弧と考えられている。主要構成鉱物は閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱、磁硫鉄鉱であるが、他に四面銅鉱/砒四面銅鉱とプーランジェライト($Pb_5Sb_4S_{11}$)などを伴う。ここでは選鉱過程におけるインジウム含有量が次のように分析されており(Chen and Petruk, 1980)、ここでは亜鉛精鉱に次いで、銅精鉱も高品位である。

選鉱元鉱	50 ppm In
銅精鉱	200 ppm In
鉛精鉱	40 ppm In
亜鉛精鉱	400 ppm In
尾鉱	20 ppm In

ドイツのサクソニー地方、ハルツ山地のランメルスベルグ鉱床はデボン紀の炭質粘板岩を母岩とし、大陸性リフト沿いの熱水噴気活動で生成したものであるが、母岩には珪長質火山岩類は存在しない。閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄鉄鉱、磁硫鉄鉱、黄銅鉱から銅・鉛・亜鉛・銀が回収された。少量のスズ石、重晶石を伴う。インジウムは閃亜鉛鉱、黄銅鉱に含まれており、鉱体平均50 ppmと推定された。

ロシアのザイスコイはウラル山地南部に位置するオ

第2表 ロシア、ウラル産地南部の主要な火山性塊状硫化物鉱床の鉱量と品位 (Prokin and Buslaev, 1999).

鉱床名	鉱量 (億トン)	Cu	Zn	Pb	S	Co	Mo	As	Cd	Te	Tl	In
		%							ppm			
シバイスコイ	1.0	1.0	1.56	0.04	42.8	0.13	0.001	0.1	30	18	3	10
ザイスコイ	3.0	1.57	0.74	0.06	31.0	0.02	0.004	0.01	50	30	49	24
デツヤルスコイ	1.3	1.0	1.50	0.1	45.0	0.004	0.001	0.07	70	10	3	—

ルドビス紀の火山堆積性塊状硫化物鉱床で、鉱量3億トン以上と言われている (Prokin and Buslaev, 1999)。母岩は中部デボン系の島弧活動に関係した安山岩、デイサイト、流紋岩からなり、海底における噴気熱水性鉱床と考えられている。

母岩は珪長質火山岩と思われるが現在では絹雲母-緑泥石-石英岩である。鉱体は南北走向、東60°傾斜のレンズ状、鉱質は(イ)塊状銅鉱、(ロ)塊状銅-亜鉛鉱、(ハ)塊状黄鉄鉱、(ニ)鉱染状銅または銅-亜鉛鉱に分けられる。黄銅鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱の他、斑銅鉱がやや多い。微量のテンナンタイト、

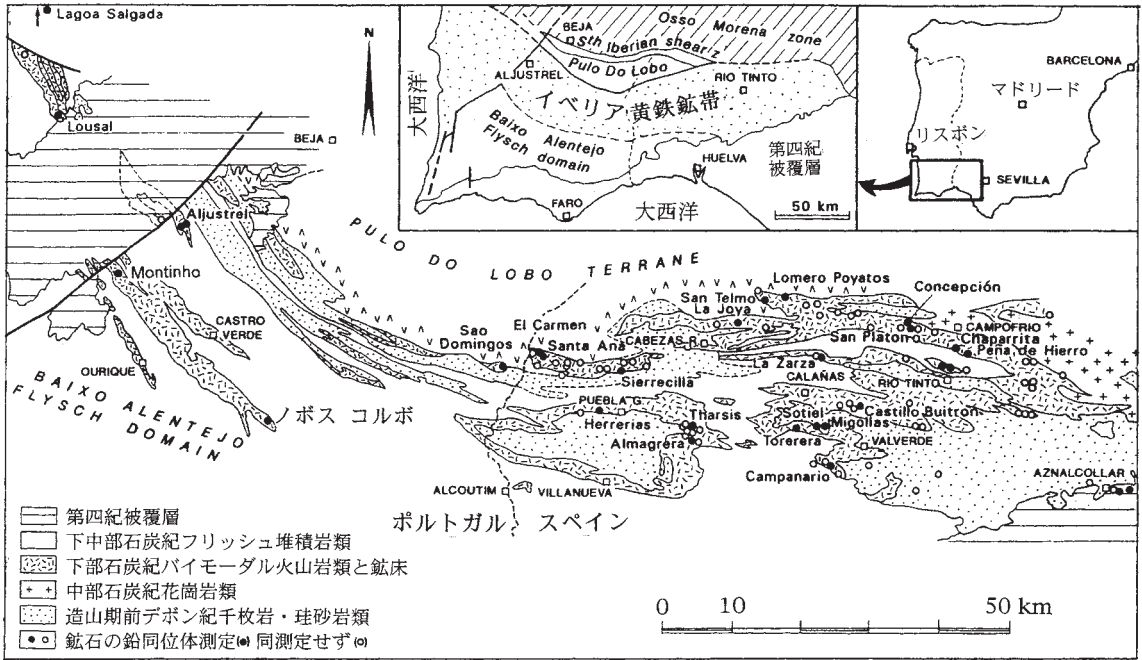
含スズ硫化物のスタノイダイト ($Cu_8(Fe, Zn)_3Sn_2S_{12}$) が産出する。

ウラル山地には多数の黒鉱型、キプロス型の塊状硫化物鉱床が知られているが、鉱量1億トン以上のものは第2表の3鉱山で、インジウムはザイスコイのみに多く含まれる (Prokin and Buslaev, 1999)。

ウラル山地と同様な古生代の火山性塊状硫化物鉱床はスペイン-ポルトガルのイベリア黄鉄鉱帯にも分布し、5億トン級のリオティント、3億トン級のネベシュコルボがある。ネベシュコルボ鉱床はスズ・インジウムに著しく富み特異である。次にこれについて解説



写真1 ネベシュコルボ鉱山の俯瞰図 (SOMINCOR社資料による)。



第3図 イベリア黄鉄鉱帯の地質概要と鉱床の分布 (Marcoux, 1998).

第3表 イベリア黄鉄鉱帯の主要鉱床 (Relvas, 2000).

鉱床名	鉱量(×10 ⁶ t)	Cu(%)	Zn(%)	Pb(%)	Sn(%)
リオティント	全体 >500	0.30	0.54	0.16	なし
	最初 335	0.39	0.34	0.12	なし
ネベシュコルボ	全体 >300	1.60	1.40	0.28	0.10
	最初 100	3.46	3.54	0.80	0.25
Aljustrel	240	0.77	3.40	1.16	なし
Tharsis	110	0.50	2.70	0.60	なし
La Zarza	100	0.70	1.50	0.60	なし

しょう。

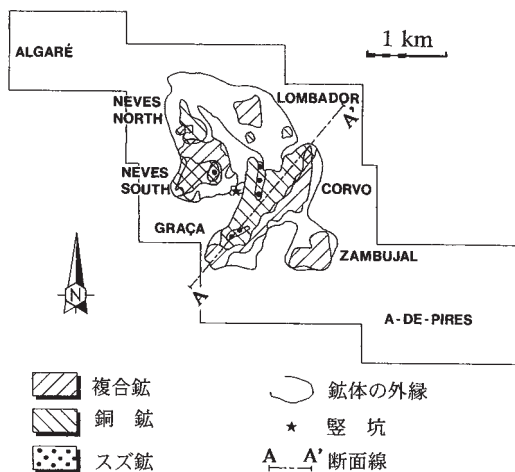
3. ネベシュコルボ鉱床

イベリア黄鉄鉱帯は、東西に約230km、南北に幅35-50kmの東西に伸長する中期古生代造山帯であり、ネベシュコルボ鉱床はその西部に位置する(第3図)。この鉱化帯には85鉱床が知られており、その総鉱量は17.65億トン、その含有金属量は銅1,460万トン、亜鉛3,490万トン、鉛1,300万トン、銀46,188トン、金887トンである(Leistel *et al.*, 1998)。鉱量1億トン以上の主要鉱床を第3表に示す。リオティント鉱床が最大規模であるが休止して久しく、現在稼行中の主

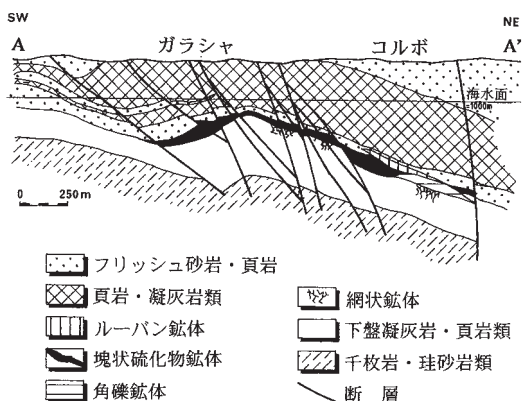
要鉱床はネベシュコルボのみである。

ネベシュコルボ鉱床は1977年に潜頭鉱床として発見された。なだらかな丘が続くポルトガル南部では、1970年当時幾つかの物理探査異常が知られており、ネベシュコルボ地区のそれは常に注目的であった。物探異常では重力異常が顕著で、磁気と電気探査にも異常が知られていた。緊急地質調査結果と合わせて1973年1-3月に最初のボーリングが掘られたが、深度244mに達する間に、若干の硫化鉄鉱化片岩を発見したのみで、富鉄体には遭遇しなかった。

その後、既存データの再解析と新たな物探および岩石解析が加えられ、再度のボーリングによって1977年5月、現在のネベシュコルボに属する厚さ50mの塊状



第4図 ネベシュコルボ鉱床の平面図と鉱体名 (Gaspar and Pinto, 1993).



第5図 ネベシュコルボ鉱床の南西-北東断面 (Gaspar and Pinto, 1993).

硫化物鉱体に貫通した。ガラシャ、コルボ、ザムプハル鉱体は、1977-1978年の引き続きボーリングによって発見された (Leca, 1990)。

この地域の基盤は造山期前のデボン紀千枚岩-珪砂岩類が広く分布し、これに下部石炭紀の火山堆積岩類が不整合に覆う。火山堆積岩類はカルクアルカリ岩系珪長質岩類が3層準 (デイサイト・流紋岩質火砕岩類, 溶岩, 再移動凝灰岩類) として発達し、これにソレアイト~アルカリ質苦鉄質岩が溶岩, 岩脈, 岩床として, また紫~黒色頁岩, 砂岩層, チャートとジャスパー, マンガン堆積物が夾在する。これらの火山性堆積物を厚いタービダイト層が不整合に覆う。

鉱床は全て火山堆積岩類に胚胎するが, 高品位部

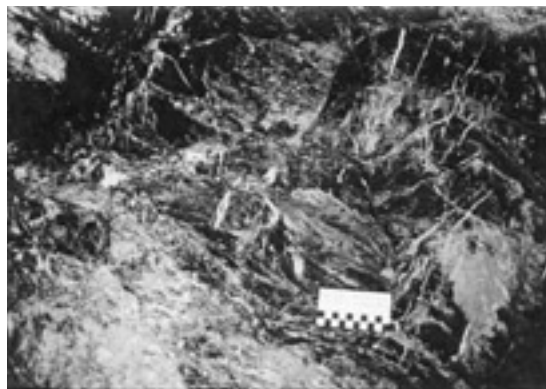


写真2 ネベシュコルボ坑内, コルボ鉱体母岩の粘板岩。

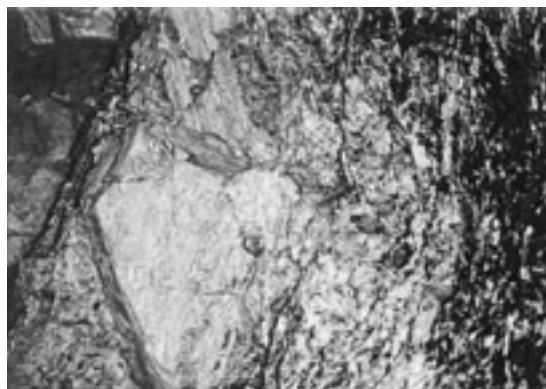


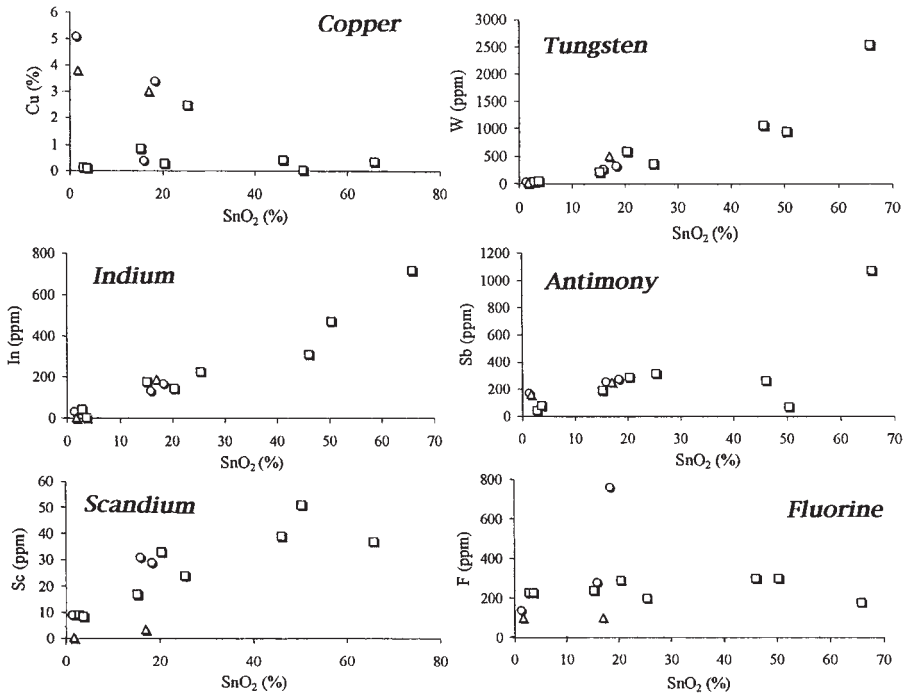
写真3 ネベシュコルボ坑内, コルボ鉱体の珪長質凝灰岩 (右) と硫化物鉱体 (左)。

はネベシュ北, ネベシュ南, コルボ, グラシアなどの6鉱体に分けられる (第4図)。鉱化作用は著しい層準規制を受け, 厚い珪長質火砕岩類最上部に見られる (第5図)。各鉱体共に下盤側母岩に網状~脈状鉱体を伴う。水平及び垂直方向のゾーニングが顕著で, 基本的に銅硫化物が最下位で, 次いで閃亜鉛鉱, 更に上位に黄鉄鉱となる。熱水の噴気活動を示唆する珪質のJCユニット (ジャスパーとカーボネイト) があり, これにはCu, Sn, In, Co, Sb, Seが濃集している。

ネベシュコルボ鉱床はその名の通り銅に富むが, また塊状硫化物鉱床としては異常にスズに富み (口絵参照), 鉱量的にはスズ鉱床である (第3表)。またイベリア黄鉄鉱帯の常として黄鉄鉱に富み, その黄鉄鉱量1.38億トンは全鉱量2.62億トンの53%を占める。黄鉄鉱を含む全鉱石の金属量は, スズ758万トン, 亜鉛374万トン, 銅345万トン, 鉛60万トン, 銀2,977トンであり (第4表), インジウムは7,000トンと推

第4表 ネベシュコルボ鉱床の鉱種別の品位 (SOMINCOR資料による)。

鉱種	鉱量(×10 ⁶ トン)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag (g/t)	Sn (%)
塊状銅鉱	20.1	7.59	なし	1.38	なし	0.39
縞状銅鉱	3.4	7.14	なし	0.35	なし	0.25
網状銅鉱	4.8	3.54	なし	0.9	なし	0.21
塊状Sn-Cu鉱	2.23	14.41	なし	2.15	なし	1.61
塊状スズ鉱	0.123	6.99	なし	1.03	なし	12.31
網状スズ鉱	0.016	3.34	なし	0.18	なし	10.99
縞状スズ鉱	0.515	1.23	なし	0.06	なし	6.01
塊状鉛亜鉛鉱	49.63	0.5	1.21	5.93	60	なし
合計	80.81	3.12	0.74	4.11	37	0.22
黄鉄鉱鉱体	138.0	0.51	なし	0.23	なし	なし
その他を含む総鉱量	261.5	1.32	0.23	1.43	11.38	2.9
総金属量		345.2万トン	60.2万トン	374.0万トン	2,976トン	758.4万トン

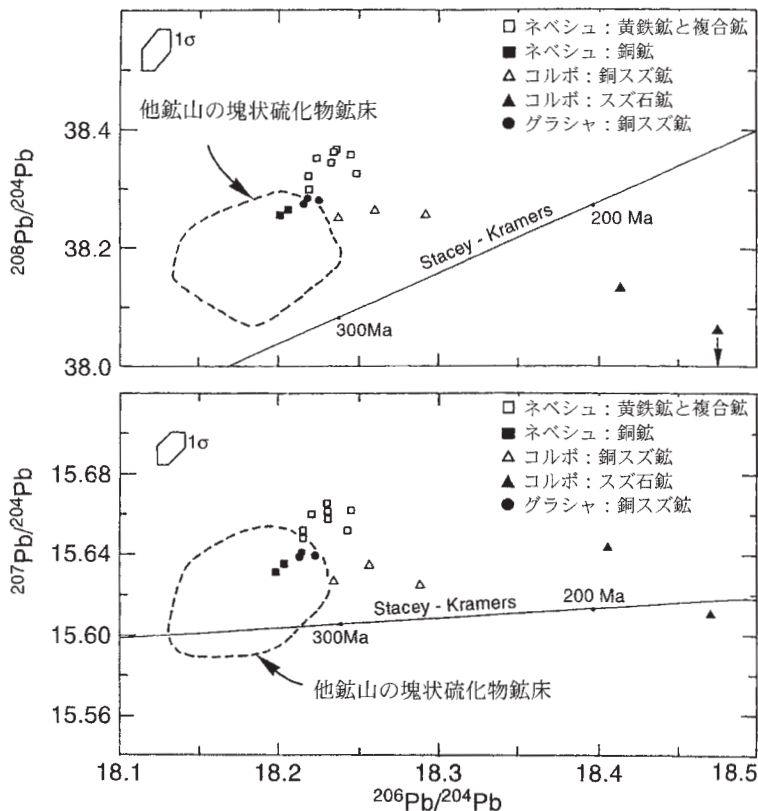


第6図 ネベシュコルボ鉱床、鉱床中のスズと鉱石成分との関係。○黒色粘板岩鉱石、□火砕岩鉱石、△黄鉄鉱チャート (Relvas, 2000)。

定されている。鉱石中のインジウム含有量は3.8ppmから720.3ppmに変化し (Relvas, 2000), Sn, W, Scと正の相関性を示し (第6図), これら元素間には成因的な関係が予想される。

イベリア黄鉄鉱帯の鉱石と母岩の鉛同位体比の測定は広く28鉱床について行われている (第2図)。鉱

床は広範囲に分布するのに係わらず、ネベシュコルボ鉱床を除き、鉛同位体比は均質で、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.183, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.622, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.191付近に集中し (第7図), それが大陸地殻起源であることを示している。この広範囲の均質性に対して, Marcoux (1998) は、“鉱液”が造山運動による広域的な割れ目



第7図 イベリア黄鉄鉱帯の鉛同位体比 (Marcoux, 1998).

の発達と熱水循環によって均質化された結果とみなしており, その過程をフロアヒーティングと呼んでいる (第8図).

一方, ネベシュコルボの鉱石は各鉱体間で不均一な値を示し, 放射性鉛に富むものが多く, 含スズ鉱体で顕著である. 特にスズ石の $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ は18.40を越え, 異常に大きい. その同位体比を説明するモデルとして, 3つの異なる起源物質, すなわち(イ)デボン紀-下部石炭紀の大陸地殻, (ロ)古いスズ鉱床からのスズと鉛がネベシュコルボ鉱液中に取り込まれた, (ハ)先カンブリア地塊が古生層の下にあって, そこからの元素の供給, が考えられる. Marcoux (1998)はこれら3者の混合が可能な上部地殻の熱水の流れを第8図のように示した.

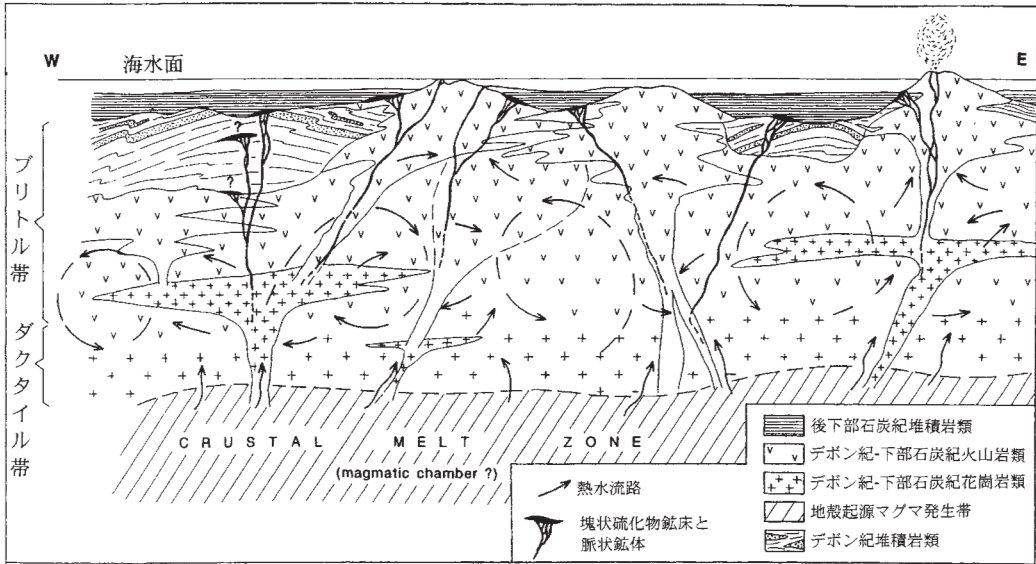
4. インジウムの起源

花崗岩類に伴うスズ鉱床は大陸地殻起源の還元的

マグマから生成したことには多くの実例がある. スズを伴う黒鉱型の塊状硫化物鉱床について, 石原・寺島 (1983)は関係する火山岩類の $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ が低く, かつ微量元素としてのSnが高いことから, キッドクリークなどのカナダの始生代含スズ塊状硫化物鉱床について, 花崗岩類の場合と同様な成因を考えた.

日本の鉱脈型鉱床, あるいはネベシュコルボ鉱床で見られるように, インジウムはスズと正の相関性を示し, 両者は同源である可能性が高い. 共に珪長質マグマの発生と分化作用で濃集する. スズ鉱床を伴う花崗岩類が微量元素としてのスズに富んでいる. インジウムの場合の実例は少ないが, 南アのマランダJ鉱床における流紋岩は210ppb, 石英斑岩140ppbの高い含有量は, 鉱床の形成と関係するものと考えられている (Pearlson and Viljoen, 1986).

我が国の岩石中のインジウム含有量については標準試料に関して高精度の分析値がある (Terashima, 2001). 一般の新鮮な第四紀火山岩類については次



第8図 イベリア黄鉄鉱帯，デボン紀マグマ-鉱化活動の概念図 (Marcoux, 1998)。



写真4 ネベシュコルボ坑内，コルボ鉱体の褶曲低品位部。



写真5 ネベシュコルボ坑内，コルボ鉱体，粘板岩中のスズ石網状鉱脈。

の値が得られており，その含有量は苦鉄鉱物の減少とともに減少する。

第四紀流紋岩 (JR-1, 2) : $25 \pm 2 \sim 33 \pm 2$ ppb

第四紀安山岩 (JA1~3) : $37 \pm 2 \sim 45 \pm 2$ ppb

第四紀玄武岩 (JB-1~1b) : $53 \pm 2 \sim 56 \pm 3$ ppb

足摺岬のAタイプ花崗岩類に貫入するパーアルカリ流紋岩岩脈 (JR-3) は 113 ± 4 ppb と，カルクアルカリ岩の流紋岩溶岩よりも高い値を示す。

花崗岩類は島根県三刀屋の磁鉄鉱系角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (JG-3) が 23 ± 2 ppb であるのに対し，チタン鉄鉱系に属する栃木県沢入の黒雲母花崗閃緑

岩-花崗岩 (JG-1, 1a) が $32 \pm 2 \sim 39 \pm 3$ ppb で，磁鉄鉱系よりもやや高い。苗木花崗岩 (JG-2) はチタン鉄鉱系であるが，その含有量は 13 ± 1 ppb で，低い。その原因は苦鉄鉱物含有量があまりに低いからかもしれない。

以上の火成岩類に対して，堆積岩類は一般に高い値を示す。南太平洋ペリリン海盆の遠洋性粘土 (JMS-2) は 165 ± 7 ppb，東京湾の泥 (JMS-1) は 96 ± 4 ppb である。北上山地，登米の粘板岩 (JSL1, 2) は $66 \sim 68 \pm 3$ ppb である。従ってインジウムやスズに富む火山性塊状硫化物鉱床の場合，インジウムに富む珪

第5表 インジウムの国別生産量, 埋蔵鉱量, そして資源量 (George, 2005). 単位: トン

国	製錬所生産額		埋蔵鉱量	資源量
	2003年	2004年		
中国	100	110	280	1,300
日本	70	70	100	150
カナダ	50	50	700	2,000
ベルギー	40	40	*	*
フランス	65	10	*	*
ドイツ	10	10	*	*
ロシア	15	15	200	300
アメリカ合衆国	—	—	300	600
ペルー	5	5	100	150
その他	15	15	800	1,500
合計	370	325	2,500	6,000

*その他に含まれている。

長質火山岩あるいは堆積岩類と成因的に関係している可能性は十分に考えられる。

5. 探査指針と将来資源量

インジウムを主成分とする鉱物は非常に稀であるから、平均含有量が300ppmをこえる豊羽鉱山の例は例外的であるが、インジウム鉱物を含む鉱床を発見出来れば鉱業的に大変魅力的である。既述のようにインジウムは大局的にはチタン鉄鉱系マグマに濃集するが、還元的マグマは硫黄を流体相に濃縮しないから、両性質を合わせ持つ含インジウム鉱床を得ることは極めて稀と言える。ゼノーサーマル型が最大の候補であるが、チタン鉄鉱系花崗岩地帯で何らかの原因で硫化物が多く生成した鉱床、磁鉄鉱系地帯で還元作用を受けた鉱床(例、豊羽鉱床)を探ることが新インジウム資源発見の近道と言える。具体的な地域としては、ペルー・ボリビアのスズ鉱化地帯、華南のスズ-タングステン鉱化地帯などが興味深く、インジウム鉱物を含む高品位鉱体を探査目標とすることである。

スズ鉱化地帯と言えば、マレー半島、イギリス南部、エルツゲビルゲなどの古典的フィールドでインジウム鉱物の話を聞かない。これら地域はインジウムの用途が開ける前に採掘されたこともあろうが、鉱床の生成がインジウム鉱物の沈澱には“plutonic”であり過ぎる可能性も否定できない。これに対してボリビアや

華南では“subvolcanic”環境が予想でき、同様なロシアの沿海州や周辺域にもインジウム鉱床産出の可能性がある。

一方、火山性塊状硫化物鉱床の場合、インジウムは閃亜鉛鉱、斑銅鉱などの主成分を置換する不純物として含まれる。硫化物量が多いため含有量は少ないが、鉱量的に大きい魅力がある。このタイプの鉱床探査においては、ベースメタルと同時にスズとインジウム含有量を分析・確認する必要がある。

インジウムは余りに極在するために今後の供給量の予測が大変困難であり、現在の資源量予測は亜鉛精鉱産出量に基づいて行われている。したがって原鉱石産出国よりも製錬所生産量に基づく予想が発表されており、アメリカ地質調査所 (George, 2005) の統計によると(第5表)、亜鉛精鉱に基づくインジウム埋蔵鉱量は2,500トン、これは2004-5年の生産量の平均値348トン、僅か7.2年分であるに過ぎない。また資源量としては6,000トンを予想している。

6. むすび

インジウムは天然における少量メタルであり、これまでは先端産業に“味の素”的に使われていたが、現在のように液晶として汎用製品に使うには既存資源では少量すぎる。既知の資源量評価は亜鉛精鉱に基づいており、亜鉛市況に規制される弱点がある。今後はインジウムの産状をよく理解し、インジウムを対象

とした鉱床探査を行うことが不可欠である。既知のスズ絡みの地質体を探査すると共に、“金におけるカーリン型”発見のような、全く新しい“ブレーク スルー”的な鉱床の発見が必要である。また同時に、汎用品には亜鉛酸化物のような代替品の開発研究を積極的に行うべきであろう。

謝辞：ネベシュコルボ鉱床の見学はリスボン大学のF. Barriga教授が用意され、J. M. R. S. Relvas博士の案内で可能であった。坑内見学を心良く許可されたSOMINCOR社ともども、関係各位に心からお礼申し上げる。

文 献

- Chen, T.T. and Petruk, W. (1980) : Mineralogy and characteristics that affect recoveries of metals and trace elements from the ore at Heath Steele mines, New Brunswick. *CIM Bull.* v. 73/823, 167-179.
- Gaspar, O. C. and Pinto, A. (1993) : Neves-Corvo, A kuroko type deposit in the Iberian Pyrite Belt. *Resource Geol. Spec. Issue*, no. 17, 249-262.
- George, M. W. (2005) : Indium. U. S. G. S. Mineral commodity summaries, Jan. 2005. USGS home page.
- 石原舜三 (2005) : いまインジウムが面白い—札幌市の豊羽鉱山。地質ニュース No. 605, 46-54.
- 石原舜三・寺島 滋 (1983) : 黒鉱地帯におけるスズ鉱化作用の成因：日本とカナダ。堀越 叡編：黒鉱・島弧・縁海。鉱山地質特別号, no. 11, 103-110.
- Jiang, S-Y., Slack, J. and Palmer, M. R. (2000) : Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. *Geology*, v. 28, 751-754.
- Kooiman, G. J. A. and Ruitenber, A. A. (1992) : Indium deposits and their economic potential: report on a mission to Japan. New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Mineral Resources, Geoscience Rept. 92-3, 62 p.
- Leca, X. (1990) : Discovery of concealed massive-sulphide bodies at Neves-Corvo, southern Portugal - a case study. *Trans. Inst. Mining Metal.* v. 99, Sect B, B139-B152.
- Leistel, J. M., Marcoux, E., Thieblemont, D., Quesada, C., Sanchez, A., Alomodovar, G. R., Pascual E. and Saez, R. (1998) : The volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita*, v. 33, 2-30.
- Marcoux, E. (1998) : Lead isotope systematics of the giant massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita*, v. 33, 45-58.
- Murao, S., Furuno, M. and Uchida, A. C. (1991) : Geology of indium deposits - a review. *Mining Geol.*, 41, 1-13.
- Parr, J. M., Stevens, B. P. J., Carr, G. R. and Page, R. W. (2004) : Sub-seafloor origin for Broken Hill Pb-Zn-Ag mineralization, New South Wales, Australia. *Geology*, v. 32, 589-592.
- Pearlon, T. N. and Viljoen, M. J. (1986) : Antimony mineralization in the Murchison Greenstone Belt- An overview. *In* Anheusser C. R. & Maske, S. ed. *Mineral Deposits in Southern Africa*. Vol. I, Geol. Soc. Africa, Johannesburg, 293-320.
- Prokin, V.A. and Buslaev, F. P. (1999) : Massive copper-zinc sulphide deposits in the Urals. *Ore Geol. Review*, 14, 1-69.
- Relvas, J. M. R. S. (2000) : Geology and metallogenesis at the Neves Corvo deposit, Portugal. Ph. D. dissertation, Univ. Lisboa, 319 p.
- Schwarz-S., U. and Herzig, P.M. (2002) : Indium - geology, mineralogy and economics. Springer, 257 p.
- Terashima, S. (2001) : Determination of indium and tellurium in fifty-nine geological reference materials by solvent extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Geostandard Newsletter*, 25, 127-132.
- 通産省 (1993) : 平成4年度希少金属鉱物資源の賦存状況調査報告書：ポテンシャル評価調査。平成5年3月，資源エネルギー庁，192 p.
- Yi, W., Halliday, A. N., Lee, D.C. and Christensen, J.N. (1995) : Indium and tin in basalts, sulfides and the mantle. *Cochim. Cosmochim. Acta*, 59, 5,081-5,090.

ISHIHARA Shunso (2005) : Indium in volcanogenic massive sulfide deposits: Particularly of the Neves Corvo deposits in Portugal.

＜受付：2005年6月17日＞