

屯田 및 栢田鑛床에서 産出되는 에렉트럼의 産出狀態와 組成變化

Mode of Occurrence and Compositional Variation of Electrum from the Dunjeon and Baegjeon Gold Deposits

이찬희(Chan Hee Lee)* · 박희인(Hee-In Park)**

*한국자원연구소 심해지광물자원연구그룹
(Deep-Sea Mineral Resources Research Group, Korea Institute of Geology,
Mining and Materials, P. O. Box 14, Taedok Science Town, Taejeon 305-350, Korea)

**서울대학교 지질학과
(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

요약 : 둔전-백전지역의 금-은, 안티모니 광상에서 산출되는 에렉트럼의 전체 조성범위는 22.6~69.5 atom% Ag로서 각 광상마다 조성의 차이가 있을 뿐 아니라 동일광상에서도 광화시기 및 에렉트럼을 수반하는 광물군에 따라 Ag의 함량이 서로 다르다. 둔전 북광상에서 산출되는 에렉트럼의 조성은 22.6~29.5 atom% Ag의 좁은 범위를 보이며 I기의 것이 II의 것에 비하여 Au의 함량이 높다. 둔전 남광상에서 산출되는 에렉트럼의 조성범위는 33.6~69.5 atom% Ag이고, 백전광상의 것은 35.6~63.5 atom% Ag로서 에렉트럼의 수반광물에 따라 Ag/Au 비가 달라진다.

전반적으로 에렉트럼의 한 입자에서도 Au와 Ag는 조성비를 달리하며 입자의 중앙부에서 외각부로 갈수록 Ag의 함량이 증가하는 경향이 있다. 또한 에렉트럼 정출 당시의 생성온도, 염농도, fs_2 가 높을수록 에렉트럼의 Ag/Au 비가 낮고 base metal 유화광물과 공존하는 에렉트럼이 Ag 광물과 공존하는 것보다 Ag/Au 비가 낮다. 둔전광산 남, 북광상의 에렉트럼에는 Cu; 0.20~1.92, Bi; 0.35~0.67, As; 0.70~1.19 atom%가 포함되어 있으며 Cu는 Ag의 함량이 증가할수록 감소하며 Bi와 As는 Ag가 증가함에 따라 높아진다.

ABSTRACT : The compositional variation of electrums from gold-silver and antimony deposits in the Dunjeon Baegjeon mining area, range from 22.6 to 69.5 atom% of Ag. Ag contents in electrums vary with paragenetic sequences and associated minerals. Ag contents increase from core to margin in a single grain.

Compositional range of electrums from the North ore deposits of the Dunjeon gold mine are from 22.6 to 29.5 atom% of Ag. Electrums contain Cu(0.40 to 0.55 atom%) and Bi(0.35 to 0.67 atom%). Composition of electrums from the South ore deposits of the Dunjeon gold mine varies from 33.6 to 69.5 atom% of Ag. Cu and As contents in electrums range from 0.20 to 1.92 and from 0.70 to 1.90 atom%, respectively. As the content of Ag in electrums increase, the contents of Bi and As in electrums increase but that of Cu decreases. Electrums of the Baegjeon gold deposits contain 35.6 to 63.5 atom% Ag, suggesting that Au contents in electrums associated with base metal sulfides be higher than those associated with Ag-minerals. Ag/Au ratios in electrums increase with decreasing temperature, salinity and fs_2 of the mineralizing solution.

序 言

江原道 三陟郡 下長面 易屯里에는 소규모의 화강암질 복합암체가 분포한다. 이 花崗岩體의 북쪽 연변에는 금, 은을 생산한 바 있는 둔전광산 북광상(이하 北鑛床)과 금, 은, 안티모니를 채광한 바 있는 둔전광산 남광상(이하 南鑛床)이 부존하며, 화강암체의 남쪽에는 백전 금, 은 광산, 王帝 안티모니 광산이 있다. 위 광상들은 朝鮮累層群에 속하는 서로 다른 층준의 암석 내에 배태되어 있어, 광상의 유형도 스킨형, 散點-網狀細脈型, 鑛脈型, 交代型으로 다양하다. 또한 여러 종류의 Sb, Bi, Te계 광물이 산출되며 단일의 광맥에서 광물의 垂直的 帶狀分布를 보이기도 하고 역둔화강암체를 중심으로 광상의 水平的 帶狀分布를 보인다.

이 지역의 지질과 광상, 광화작용의 특징 등은 필자들에 의하여 상세히 보고되어 있다(박희인 등, 1987; 박희인, 이찬희, 1988; 1990; 1991; 1991; 1992; 이찬희, 1993; Lee et al., 1993). 또한 에렉트럼의 화학조성도 일부는 언급된 바 있으며 백전광상의 황철석에서 산출되는 invisible gold에 대하여도 보고된 바 있다(박희인, 이찬희, 1992).

이 연구는 둔전광산의 북광상, 남광상, 백전광상에서 산출되는 에렉트럼(electrum)의 산출상태를 상세히 밝히고 이들의 Ag/Au 비와 Cu, Bi, As의 함량을 검토하여 에렉트럼의 정출환경에 따른 화학조성의 변화양상에 대하여 고찰하여 본 것이다.

地質 및 鑛床

광산부근의 지질은 조선누층군에 속하는 지층과 이를 후기에 관입한 花崗岩類와 脈岩類로 구성되어 있다. 화강암체는 易屯里 부락의 서북쪽에 분포하며 동서로 800m, 남북으로 1,100m 규모이다(박희인 등, 1987). 이는 섬록암, 석영섬록암, 화강섬록암, 반상화강암의 순으로 관입한 복합암체로서 易屯花崗岩體로 명명된 바 있다(박희인, 이찬희, 1990). 이 암체와 접하는 花折層, 斗務洞層의 구성암석은 스킨 또는 호온펠스화되어 있다. 맥암류로는 염기성, 산성, 염기성-산성 중복암맥 등이 있으며 상술한 모든 암석을 관입하고 있다.

위 지역에 부존하는 광상은 銅古珪岩을 모암으로 하는 북광상과 斗務洞層에 배태한 남광상이 있고 豊村石灰岩의 층준을 고대한 백전광상과 왕제광상이 있다. 왕제광상은 금, 은 광물의 산출이 없는 안티모니를 생산한 광상으로서 1974년까지 手選精鑛의 생산량이 230톤(Sb 25%)이라 한다(한국의 광상, 제6호, 1974). 남광상에서도 한때 안티모니를 생산한 바 있다. 각 광상의 특징을 간략히 요약하면 Table 1과 같다.

北鑛床은 주로 동점규암층 중의 백색규암 내에 배태된 광염-망상세맥상 광상이다. 유화광물을 수반하는 석영세맥의 폭은 0.8cm 미만의 것이 대부분이나 15cm 정도되는 것도 있다. 광체의 주향은 모암의 그것과 같이 N15-20°E에 10-15°NW로 경사한다. 남개갱에서 보여지는 광화대의 연장은 약 150m이다. 광체 주변의 모암은 대부분 규화되어 있고 부광부는 견운모화, 녹니석화, 점토광물화 작용을 심하게 받았다.

Table 1. Characteristic features of ore bodies from the Dunjeon and Baegjeon gold deposits.

Ore deposits	Dunjeon North	Dunjeon South	Baegjeon
Host rock	Dongjeom Quartzite	Dumudong Formation	Pungchon Limestone
Ore body	Massive, Disseminated -Stockworks	Vein	Veinlets, Disseminated -Stockworks
Genesis	Skarn, Hypo-mesothermal	Xenothermal	Epithermal
Strike & Dip	N15 20E 15 20NW	N15-20E 80NW-90°	N30E 20-25NW
Ore minerals	Base-metals, Bi-Te-S, Au-Ag minerals	Base-metals, Pb-Sb-Bi-S, Cu-Sb-S, Sb-S minerals	Base-metals, Sb Ag-S, Ag S, Au Ag minerals
Wall rock alteration	Skarnization, Silicification, Chloritization, Sericitization, Argillization	Silicification, Chloritization, Sericitization, Argillization	Carbonitization, Chloritization, Silicification, Sericitization, Argillization

南鑛床은 두무동층과 이를 관입한 역둔화강암 체내에 발달한 열극을 충진한 단일의 맥상 광상이다. 광맥은 이들 스카른과 호온펠스 내에 발달한 열극을 충진하여 배태하고 있고 광체 주변의 모암은 규화, 건운모화, 점토광물화 등으로 변질되어 있다. 광맥의 주향과 경사는 N15-20°E, 80-90°NW이고 맥폭은 1-120cm로 膨縮이 심하다.

백전광상은 豊村石灰岩과 花折層의 경계를 따라 풍촌석회암의 최상위부인 魚卵狀石灰岩(oolitic limestone)의 층리를 따라 배태되어 있다. 광상의 모암인 어란상석회암의 주향과 경사는 N30°E, 20-35°NW이다. 또한 광석의 고품위부를 따라 개설되어 있는 斜坑의 모양으로 보아 부광부는 망토(manto)의 형태를 이루고 있을 것으로 추정된다. 광화대의 모암은 약 1.5m 폭으로 탈색 변질되어 규화, 돌로마이트화, 녹리석-건운모화, 점토광물화 작용을 심하게 받았다. 광석은 모암의 층리를 따라 발달한 불규칙한 모양의 거정질 방해석맥이나 방해석-석영세맥에 수반된다. 또한 방해석맥과 접하는 석회암 내의 우우리스(oolith)를 교대하여 산출되기도 한다. 특징적으로 광화대의 우우리스는 암갈색을 띠며 2mm 미만의 것이 대부분이다. 광석에는 시기를 달리하는 광화작용의 중첩이 있었던 구조적 증거가 없는 것으로 보아 광화작용은 1회 있었고, 초기에는 돌로마이트, 녹리석화 작용과 함께 미량의 산화광물, base metal 유화광물의 침전이 있었으며 말기에는 건운모화, 점토광물화 작용과 함께 Au-Ag 광물의 정출이 있었던 것으로 보인다.

에렉트럼의 產出狀態

둔전-백전지역의 금-은 광상에서 산출되는 에렉트럼은 그 產出狀態와 頻度, 입자의 크기, 공존 광물의 종류 및 화학조성에 있어서 각 광상마다 조금씩 차이가 있고 공통적으로 은광물의 산출이 상당히 드물다. 각 광상에서 산출되는 에렉트럼의 공존광물과 상대적인 빈도는 Table 2와 같다.

北鑛床: 광화작용은 3시기에 걸쳐 있었으며 소량의 산화광물과 base metal 유화광물 이외에 Bi, Te계의 테트라디마이트(tetradymite), 에이키나

Table 2. Associate mineral with electrum from the Dunjeon and Baegjeon gold deposits.

Ore deposits	Dunjeon North		Dunjeon South		Baegjeon
	I	II	I	II	
Pyrite	**	*	**	**	***
Chalcopyrite	*	*	*	*	*
Galena	**	*	**	***	
Quartz	*			**	
Tetradymite	*	**			
Sphalerite	***	**			*
Pyrrhotite			*	*	
Cosalite				*	
Boulangerite				*	
Arsenopyrite			**		**
Argentite					*
Pyrrargyrite					*
Calcite					**

*** = abundant, ** = common, * = rare

이트(aikinite), 비스무시나이트(bismuthinite) 등이 산출된다. 또한 에렉트럼을 수반하는 석영의 流體 包有物에는 암염, 카리암염 이외에도 방해석, 석영, 운모류, 불투명 광물 등 많은 종류의 固相包有物을 수반한다(박희인, 이찬희, 1991).

에렉트럼은 I기의 鑛染-網狀細脈狀 광석에서 산출빈도가 높다. 塊狀광석에서도 섬아연석, 방연석의 내부에 포유물상으로 극미량 산출되는 것이 있으며 크기는 10µm 미만이다. I기의 에렉트럼 중에는 황철석, 섬아연석, 방연석, 석영 내부에 포유물상으로 산출되는 것도 있으나 대부분은 황철석과 섬아연석, 섬아연석과 방연석, 방연석과 황동석의 입자의 경계나 파쇄된 틈을 충진 또는 교대하여 산출되는 경우로서 보통 장경이 30-40µm 정도가 된다. 한편 에렉트럼은 석영에 수반되는 테트라디마이트의 벽계면을 교대하여 산출되거나 테트라디마이트의 내부에 포유물상으로 산출되며 드물게는 약 100µm 정도가 되는 것도 있다.

II기의 에렉트럼은 방연석과 황동석, 방연석과 테트라디마이트의 입자경계를 충진하거나 교대하여 산출되는 것이 주류를 이루며 보통 20µm 정도이다. 그러나 I, II기를 통하여 섬아연석이나 방연석을 교대하여 산출되는 것이 제일 많으며 입자의 크기는 보통 30µm 내외로서 정출시기와

공존광물에 따라 큰 차이는 없어 보인다.

에렉트럼의 化學組成

南鑛床: 이 광상은 3시기에 걸친 광화작용이 있었으며 I기는 석영, 炭酸鹽鑛物과 함께 미량의 산화광물, base metal 유화광물, Au-Ag 광물의 침전이 있었다. II기는 base metal 유화광물과 함께 여러 종류의 Sb, Bi 유염광물, Au-Ag 광물의 정출이 있었으며 III기는 금속광물의 수반이 없는 탄산염광물만의 침전기이다.

I기의 에렉트럼은 황철석, 유비철석의 내부에 포유물상으로 산출되는 경우와 황철석과 황동석, 황동석과 방연석의 입자경계를 충전하거나 교대하여 산출된다. 입자의 크기는 장경이 보통 100 μm 정도이고 후자의 경우가 산출빈도도 높고 입자의 크기도 크다.

II기는 코사라이트, 방연석, 석영에 수반되는 것이 대부분이며 입자의 크기는 육안관찰이 가능한 것에서부터 수 μm 까지 다양하나 50~100 μm 정도가 가장 많다. 코사라이트에 수반되는 에렉트럼은 상호 intergrowth하여 myrmekitic한 조직을 보이는 것과 樹枝狀으로 산출되는 것이 많다. 또한 미립의 에렉트럼이 자류철석을 교대하여 산출되며 보우란저라이트(boulangerite)와 방연석의 입자경계나 파쇄된 틈을 따라 세맥상으로 산출되는 등 다양한 산출상태를 보인다. 에렉트럼의 산출빈도와 입자의 크기로 보아 이 시기가 금의 주요 정출기이다.

栢田鑛床: 이 광상의 광석은 서로 끊고 끊기는 관계가 없는 것으로 보아 광화작용은 한 시기에 한하여 있었던 것으로 보여진다. 에렉트럼은 주로 우우리스를 교대한 散點狀 황철석, 유비철석, 섬아연석이나 방해석맥과 접하는 모암의 주변부에서 산출되는 황철석에 수반된다. 에렉트럼 입자의 크기는 육안관찰이 가능한 것에서부터 수 μm 까지 다양하나 대부분 10 μm 미만이다. 에렉트럼의 산출상태는 황철석의 내부에 휘은석과 같이 포유물상으로 산출되는 경우가 제일 많다. 또한 섬아연석과 유비철석의 입자 내에서도 입자의 경계를 따라 교대하는 것도 있고, 황동석에 수반되어 농홍은석-휘은석과 공존하기도 한다. 드물게는 방해석이나 석영의 내부에 독립된 입자로 산출되는 경우도 있다.

일반적으로 天然에서 산출되는 금은 Au-Ag 고용체 광물, Te, Bi, Sb 등의 化合物로 산출되는 것과 기타 타광물의 원소를 치환하여 산출되는 것이 있다. Au와 Ag는 완전고용체를 이룰 수 있으며 Ag의 함량에 따라 自然金(native gold : 20 wt% Ag 미만) 또는, 에렉트럼(electrum : 20 wt% Ag 이상)이라 부른다(Shikazono and Shimizu, 1987). 둔전-백전의 금은 에렉트럼 상태로 산출되는 것이 주류를 이루나 북광상에서 산출되는 금은 Ag의 함량으로 보아 자연금이라고 할 수 있다.

主成分 元素

이 지역의 광상에서 산출되는 에렉트럼의 전체 組成範圍는 22.63~69.45 atom% Ag (43.56~86.13 wt% Au)로서 상당히 넓은 범위를 가진다(Fig. 1). 그러나 각 광상마다 조성의 차이를 보일 뿐 아니라 동일광상에서도 광화작용의 시기에 따라 조성범위를 달리하고 있으며 동일광상의 동일시기에는 共存鑛物의 종류에 따라 Au의 함량에 차이가 있다. 또한 한 입자에서도 입자의 중심부와 외각부에 따라

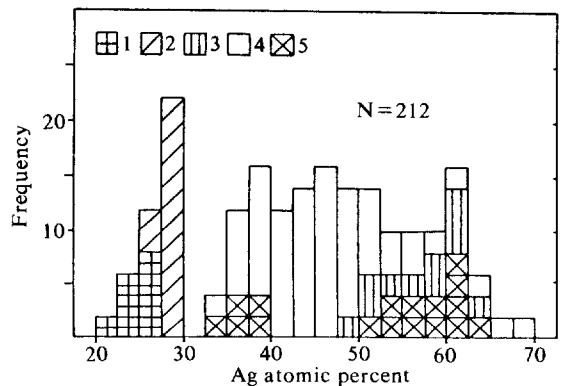


Fig. 1. Histogram showing Ag atomic percent of electrums from the Dunjeon and Baegjeon gold deposits. 1=stage I electrums of the North ore deposits, 2=stage II electrums of the North ore deposits, 3=stage I electrums of the South ore deposits, 4=stage II electrums of the South ore deposits, 5=electrums of the Baegjeon ore deposits.

조성의 차이를 보인다. 각 광상에서 산출되는 에렉트럼을 시기별로 공존광물에 따라 화학조성의 평균치를 표시하면 Table 3과 같다.

북광상에서 산출되는 에렉트럼 중에 I기의 황철석, 섬아연석과 공존하는 에렉트럼의 Ag 함량은 22.63~29.45 atom%이고, II기의 테트라디마이트와 공존하는 것에서는 26.54~29.94 atom%로서 I기의 것에서 Au의 함량이 높다(박희인, 이찬희, 1990 : Fig. 4). II기의 테트라디마이트와 공존하는 에렉트럼 중에 100 μm 정도의 크기를 갖는 입자를 확대하여 Au, Ag, Bi 원소의 상대적인 분포를 보면 同一粒子에서도 Au의 함량에 차이가 심한 것을 볼 수 있다(Fig. 2). 입자의 중심부에서 외각부로 갈수록 Ag가 증가하는 경향을 보이며 최외각부에서는 Ag의 累帶構造를 보여준다. 이런 부분을 정량분석한 결과 입자의 중심부(23.8 atom% Ag)와 외각부(27.5 atom% Ag)의 차이는 최고 3.7% 정도임을 보여준다.

남광상에서 산출되는 에렉트럼의 전체 조성범위는 33.56~69.45 atom% Ag로서 Ag/Au 비를 보면 I기의 것이(1.17~1.45), II기의 것에(0.74~0.98) 비하여 Ag의 함량이 높은 특징이 있다(Table 3). 또한 I기의 에렉트럼에서 황동석과 공존하는 것이 특히 Au의 함량이 높고, II기의 중기에서는 코사라이트와 공존하는 에렉트럼이 방

연석과 공존하는 것에 비하여 Au의 함량이 높으며 공존광물에 따라 조성의 차이가 있는 것을 알 수 있다(박희인 등, 1987 : Fig. 5).

백전광상의 에렉트럼은 35.58~63.48 atom% Ag로서 넓은 범위를 보일 뿐 아니라 Au의 조성도 공존광물에 따라 차이가 있다. 특히 황철석, 섬아연석과 공존하는 것에서 Au의 함량이 높으며 휘은석, 농홍은석 등의 은광물과 공존하는 것에 Ag의 함량이 높음을 보여준다(Table 3). 또한 하나의 에렉트럼 입자에서도 Au의 함량 차이가 심하다. 100 μm 정도의 에렉트럼 한 입자에서 Au, Ag, Sb 원소의 상대적인 분포를 보면 Fig. 2와 같이 Au와 Ag는 不均質하게 분포하며 서로 상반되는 함량의 차이를 보여준다. 주로 입자의 외각부에 Ag의 함량이 높아 최고 6.5 atom%의 차이를 보인다. 또한 에렉트럼은 입자의 경계를 따라 Sb와 Ag가 같이 분포함을 볼 수 있고 Fig. 2의 우측 하단부에는 에렉트럼을 교대한 농홍은석이 산출되는 것으로 보아 에렉트럼 입자의 외각부를 따라 농홍은석이 교대하고 있었을 것으로 보인다.

微量元素

현재까지 알려진 바에 의하면 韓國의 금-은 광상에서 산출되는 에렉트럼의 미량원소에 대한 연

Table 3. Representative average composition of electrum from the Dunjeon and Baejeon gold deposits.

Ore deposits	Stage	Associated Minerals	Weight percent					Total	Atomic Percent		
			Au	Ag	Cu	Bi	As		Au	Ag	Ag/Au
Dunjeon North	I	Py(12)	83.98	15.36	0.29	0.17	-	99.80	75.0	25.0	0.33
	II	Sl(11)	82.29	16.99	0.29	0.15	-	99.71	72.6	27.4	0.38
		Tdy(17)	81.26	16.94	0.06	0.95	-	99.21	72.4	27.6	0.38
Dunjeon South	I	Cp(14)	59.50	32.28	0.70	0.26	0.78	99.52	46.0	54.0	1.17
		Py-Asp(12)	54.60	43.40	0.44	0.09	1.13	99.66	40.8	59.2	1.45
	II	Cp-Po(15)	64.10	34.29	0.34	0.15	0.01	99.89	50.6	49.4	0.98
		Co(16)	70.52	28.56	0.01	0.61	0.00	99.70	57.5	42.5	0.74
		Gn(18)	64.72	34.25	0.00	0.19	0.12	99.28	50.8	49.2	0.97
Baegjeon		Py-Sl(6)	75.84	23.64	-	-	-	99.46	63.8	36.2	0.57
		Asp(8)	63.22	36.64	-	-	-	99.86	48.6	51.4	1.06
		At(6)	54.37	45.56	-	-	-	99.93	39.5	60.5	1.53

()=number of analytical points, Py=pyrite, Sl=sphalerite, Tdy=tetradymite, Cp=chalcopyrite, Asp=arsenopyrite, Co=cosalite, Po=pyrrhorite, Gn=galena, At=argentite

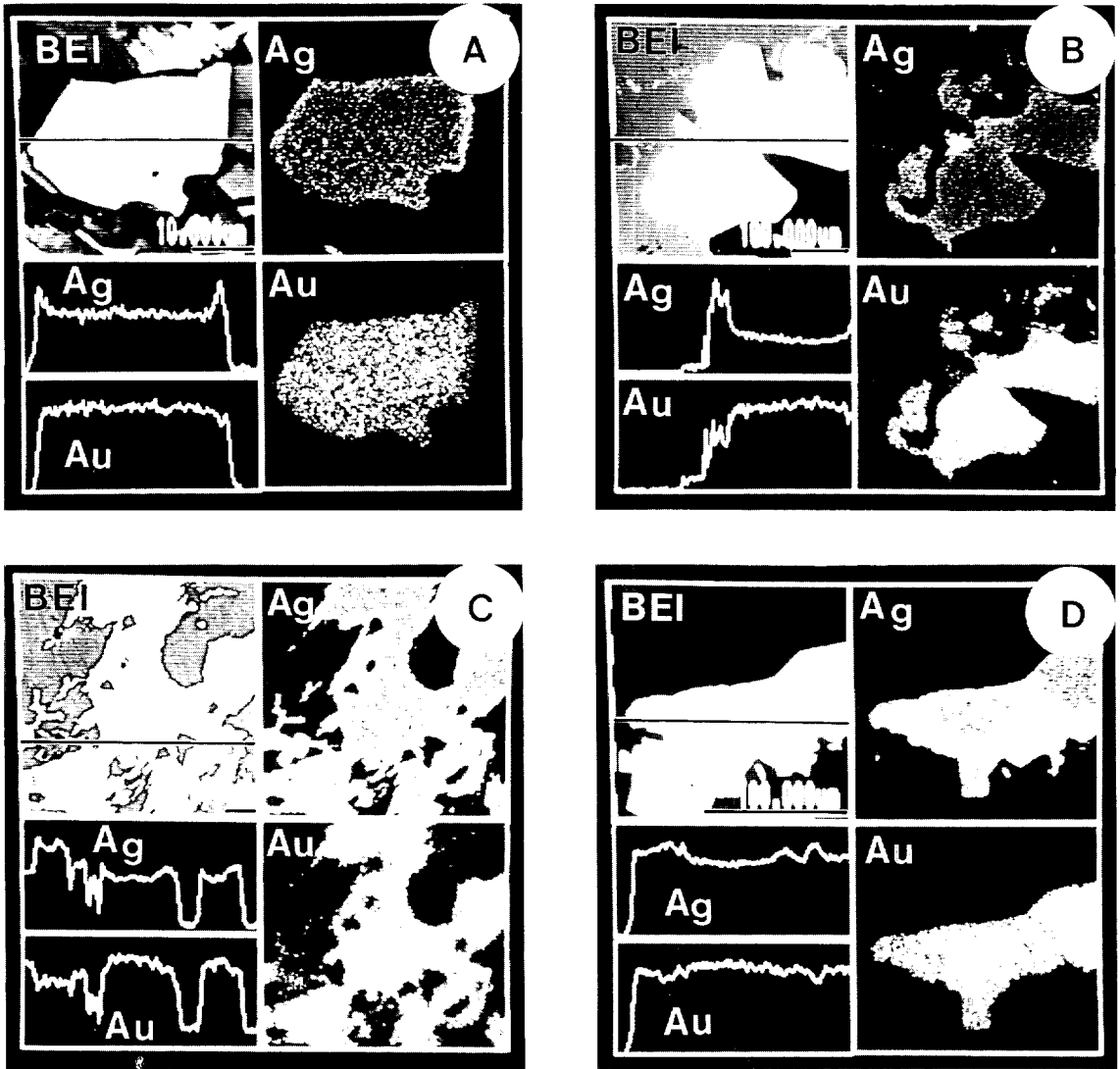


Fig. 2. Microphotographs of back scattered x-ray images and line profiles of electrum from the Dunjeon and Baegjeon gold deposits. A=Electrum of the North ore deposits, Dunjeon gold mine, B and C=Electrum of the South ore deposits, Dunjeon gold mine, D=Electrum of the Baegjeon gold deposits, BEI=Back scattered electron images, Ag=AgL α x-ray images and line profiles, Au=AuL α x-ray images and line profiles.

구는 전혀 없었다. 일본의 Yoshino(Kuroko type) 광장에서 산출되는 에렉트럼에는 Cu : 6.4 atom%, Fe : 5.2 atom% 정도 포함되어 있음을 보고하였다 (Imai et al., 1981). 또한 Shikoshi-Odomari 광장에서는 산출되는 에렉트럼에는 Sb가 1.67 wt% 정도 포함되어 있어 Ag가 감소할수록 Sb는 많아진다고 한다(Urashima et al., 1981).

북광상의 에렉트럼 내 미량원소의 함량을 보면 (Fig. 3) Bi는 0.35~0.67 atom%이고 Cu는 0.40~0.55 atom%로서 I기의 에렉트럼에는 Cu가 II기에는 Bi가 높은 특징이 있다(Table 3). II기의 에렉트럼 중 100 μ m 정도의 크기를 갖는 입자에서 중앙부와 외각부의 Bi 함량에는 큰 차이가 없는 것으로 보아(Fig. 2) Bi는 테트라디마이트(Bi₂Te₂S)

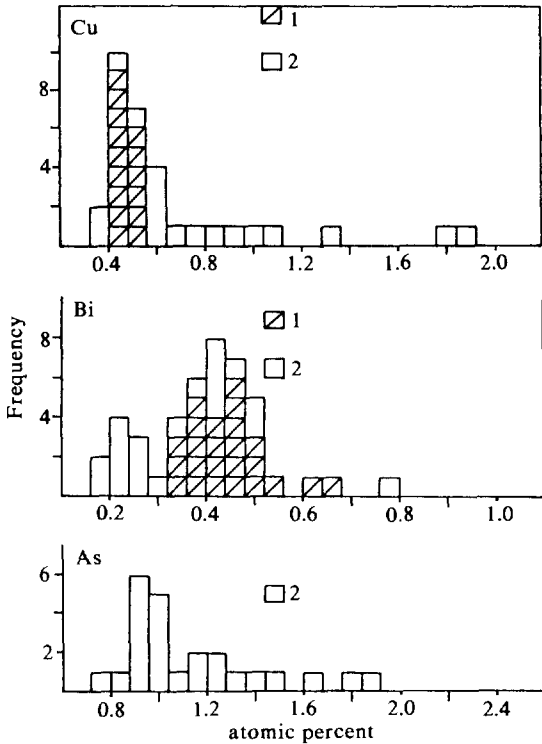


Fig. 3. Histogram showing atomic percent of the Cu, Bi and As in electrum from the North and South ore deposits, Dunjeon gold mine, 1=North ore deposits, 2=South ore deposits.

의 영향이라기 보다는 에렉트럼의 構成元素로 포함되어 있을 가능성이 많다.

둔전광산 남광상의 에렉트럼에도 Cu : 0.20~1.92, As : 0.70~1.90 atom% 정도 포함되어 있다 (Fig. 3). 이 중에 As는 I 기의 유비철석과 공존하는 것에서 특히 높아 0.86~2.14 wt% 정도를 보인다. 유비철석과 공존하는 에렉트럼의 큰 입자에서 중심부와 외각부에서 As의 함량에 차이가 없는 것으로 보아 As는 에렉트럼의 구성원소로 포함되어 있을 것으로 추정된다.

EPMA분석에서 미량원소의 함량은 그 원소의 原子量과 주성분 원소의 舉動에 따라 달라질 수 있기 때문에 분석의 檢出限界를 일괄적으로 정하기는 어렵다. 검출한계가 얼마든지 간에 0.2%와 2.0%는 상대적으로 많은 의미를 부여한다. 이 연구에서는 에렉트럼의 주성분 원소인 Ag와 빈부관계를 보이는 정도에 따라 Cu=0.35, Bi=0.18, As

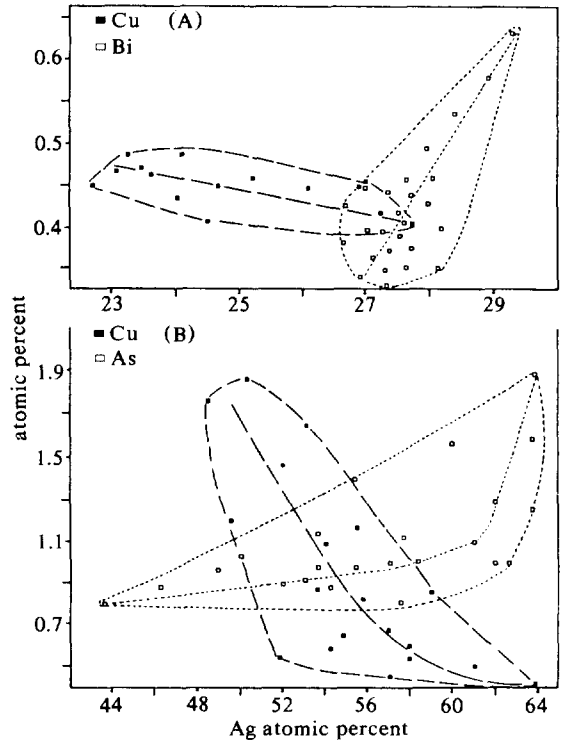


Fig. 4. Variation diagram of Cu, Bi and As versus Ag atomic percent in electrum from the North and South ore deposits, Dunjeon gold mine. (A)=North ore deposits, (B)=South ore deposits.

=0.70 atom%를 하한으로 표시하였다. 북광상의 에렉트럼에는 Cu와 Bi가 남광상에는 Cu와 As가 특히 많이 포함되어 있음을 알 수 있었다. 이들의 함량변화를 Ag의 함량변화와 연관시켜 볼 때 Cu는 Ag가 증가함에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하고 Bi와 As는 Ag가 증가함에 따라 높아지는 경향을 보인다(Fig. 4)

考 察

위 광상의 생성조건과 특징적인 광물의 화학조성을 요약하면 Table 4와 같다. 광석에서 Ag/Au의 비를 보면 둔전광산 북광상은 1.5~3.3인데 비하여 남광상과 백전광상은 각각 3.6~51.9, 5.4~22.2로서 Au 보다는 Ag의 품위가 높다(김문수 등, 1979; 대한광업진흥공사, 1981). 또한 에렉트럼의 조성에서도 북광상의 것이 남광상이나 백전광상

Table 4. Summary on characteristic features of mineralization from the Dunjeon and Baegjeon gold deposits.

Ore deposits		Dunjeon North		Dunjeon South		Baegjeon
Ore grade* (g/ton)	Ag	4-18		87-638		34-209
	Au	3-12		7-34		5-10
	Ag/Au	1.5-3.3		3.6-51.9		5.4-22.2
Stage		I	II	I	II	
Electrum(at %)	Ag	22.6-29.5	26.2-30.0	43.9-63.8	33.6-69.4	35.6-63.5
	Ag/Au	0.30-0.39	0.36-0.42	0.79-1.75	0.51-2.27	0.50-1.80
Trace elements in electrums(wt %)	Cu	0.25-0.31	0.04-0.08	0.05-1.20	0.00-0.24	-
	Bi	0.03-0.27	0.80-1.41	0.09-0.39	0.08-0.81	-
	As	-	-	0.51-2.14	0.00-0.18	-
Zoning of Au and Ag in electrums		Ag increases from core to margin		Heterogeneous		Ag increases from core to margin
Associate mineral with electrum		Py, Cp, Gn, Tdy, Sl, Qt	Py, Cp, Gn, Tdy, Sl	Py, Cp, Gn, Asp	Py, Cp, Qt, Gn, Po, Co.	Py, Cp, Sl, At, Asp, Pyr, Cal
Ag minerals		Rare	Rare	Rare	Rare	Rare
Sphalerite(FeS mole %)		19.2-21.3	0.5-1.3	21.7-23.3	16.3-17.6	1.3-2.1
Arsenopyrite(As at %)		30.3-31.2	-	33.0-33.6	30.7-31.0	29.1-31.2
Temperature(°C)		290-454	218-348	310-402	182-346	177-226
-Log fs ₂ (bar)		8-12	13-15	-	8-19	13-15
Salinity(wt % NaCl)		0.2-54.2	1.0-8.2	0.6-5.0	0.6-4.4	0.6-4.6

*Kim et al.,(1979), Korea Mining Promotion Corporation(1981), Py=pyrite, Cp=chalcopyrite, Gn=galena, Qt=quartz, Tdy=tetradymite, Sl=sphalerite, Po=pyrrhotite, Co=cosalite, Asp=arsenopyrite, Bl=boulangerite, At=argentite, Pyr=pyrargyrite, Cal=calcite

의 것보다 범위가 좁고 Au 함량이 높다.

에렉트럼의 조성범위는 각 광상마다 조금씩 다를 뿐 아니라 동일광상에서도 광화시기 및 공존 광물에 따라 많은 차이를 보인다. 동일 입자에서도 조성의 차이가 심하여 입자의 중앙부에서 외각부로 갈수록 Ag가 증가하는 경향을 보인다. 이런 경우는 이미 보고된 바도 있고, 반대로 입자의 중앙에서 외각으로 갈수록 Au가 증가하는 경우도 있으며, 일정한 경향이 없이 아주 불균질한 경우도 있다. 특히 입자가 클수록 심한 차이를 보인다고 한다(Yamaoka and Nedachi, 1978; Shikazono, 1985). 이런 단일입자에서의 Ag/Au 비는 에렉트럼의 정출기간 중에 발생하는 鑛化流體의 미세한 변화(Ag/Au의 activity)를 반영하는 것이라고 하나 이런 사실을 구체적으로 밝혀낸 단서나 연구는 없는 실정이다(Shikazono, 1985).

에렉트럼의 Ag/Au 비를 좌우하는 요인은 Au와 Ag를 운반하는 광화유체의 성질에 따라 다르며 그 광화유체는 광화작용의 物理化學的 조건의 支配를 받게 된다. 광화유체 내의 Au와 Ag의 용존상태 chloride complex ion(Cl_2^-), bisulfide complex ion($(HS)_2^-$)이 가장 중요한 것으로 알려져 있다(Barnes, 1979; Helgeson, 1969; Hanley, 1973; Hanley et al., 1984; Seward, 1973, 1976, 1981, 1984).

일반적으로 광화유체 내의 Au는 $AuCl_2^-$ 또는 $Au(HS)_2^-$ 의 complex ion 상태로 운반되며 상호관계식은 $AuCl_2^- + 2H_2S = Au(HS)_2^- + 2Cl^- + 2H^+$ 로 표현된다. 이들은 각각 $AuCl_2^- + 1/2H_2O = Au + 2Cl^- + 1/4O_2 + H^+$, $Au(HS)_2^- + 1/2H_2O + H^+ = Au + 2HS + 1/4O_2$ 로 分離되어 Au를 沈澱시킨다(Schenberger and Barnes, 1989). 또한 Au는 $AuCl_2^-$

에서 Ag는 $\text{Ag}(\text{HS})_2$ 에서 溶解度가 높다. 온도, 염농도, fs_2 가 높을수록 $\text{AuCl}_2^-/\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ 비는 감소하기 때문에 온도, 염농도, fs_2 가 높은 광상일수록 에렉트럼의 Au 함량이 높다고 한다(Seward, 1981; Shikazono and Shimizu, 1986 a, b; 1987).

둔전광산 북광상은 산점 망상세맥형의 광상으로 온도(454°C), 염농도(54 wt%), fs_2 가 높은 深熱水型 金鑛床으로서(박희인, 이찬희, 1990) 에렉트럼의 Au함량(Ag/Au=0.33~0.38)이 아주 높다. 또한 온도, 염농도 fs_2 가 더 높은 I기의 에렉트럼이 II기의 것보다 Au의 함량이 더 높은 특징이 있다(Table 4). 위의 사실로 보아 북광상의 Au는 AuCl_2 상태로 광화유체 내에 용존되어 있었을 것으로 추정된다. 따라서 북광상의 에렉트럼은 고온, 고염농도의 광화유체에서 安定한 AuCl_2^- complex ion에서 유래하였기 때문에 원래 Ag/Au비가 낮으며 광화작용의 후기로 갈수록 沸騰現象과 더불어 온도, 염농도, fs_2 가 감소하여 에렉트럼의 Ag/Au비가 증가한 것으로 해석할 수 있다.

남광상은 염농도는 낮으나(0.6~5.0 wt%), 濃度 勾配(402~182°C), 광물의 대상분포, telescoping 현상 등으로 보아 xenothermal형 금광상으로 보고한 바 있다(박희인 등, 1987). 이 광상이 에렉트럼은 Ag/Au비가 0.74~1.45로 아주 넓은 범위를 보이고 오히려 온도가 높은 I기의 에렉트럼에서 Au의 함량이 낮다. 또한 공존광물에 따라 Ag/Au의 비가 다르다(Table 3). 광화용액 내 Au의 용존상태는 290°C 이상의 온도, 4 wt% 이상의 염농도일 경우에 우세한 AuCl_2^- 일 것으로 보인다(Large et al., 1988). 광화작용의 제반조건(Table 4)으로 볼 때 남광상의 에렉트럼을 정출시킨 Au는 AuCl_2^- and $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 의 두 가지 complex ion이 동시에 작용하였을 가능성이 많다(Hanley et al. 1984; Hanley, 1985; Brown, 1986). 또한 I기의 에렉트럼(Ag/Au=1.71~1.45)에서 II기(Ag/Au=0.74~0.98)로 가며 Ag/Au 비가 작은 것으로 보아, AuCl_2^- and $\text{Au}(\text{HS})_2^-/\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ 비는 증가하면서 비등현상과 온도, fs_2 의 감소에 의한 에렉트럼의 정출이 있었을 것으로 추정된다. 그러나 두 가지 이상의 운반매질이 서로 다른 침전과정을 거쳤는 지도 알 수는 없다.

백전광상은 세맥상, 광염상 광상으로서 온도(177~226°C), 염농도(0.6~4.6 wt%), fs_2 로 보아 淺熱水型 금광상의 특징을 가진다(Table 4). 에렉트럼의 조성은 비교적 넓은 범위를 보이거나(Ag/Au=0.57~1.53) 말기의 Ag광물로 공존하는 것보다 조기의 base metal 유화광물과 공존하는 에렉트럼에서 Au의 함량이 높다. Au의 용존상태는 위와 같은 環境에서 우세한 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ complex ion의 상태로 이동하였으며 광화작용의 末期에서 末期로 가며 $\text{Au}(\text{HS})_2^-/\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ 가 증가한 것으로 해석할 수 있다.

에렉트럼에 포함되어 있는 미량원소의 최대치는 Cu=1.20, Bi=1.41, As=2.14 wt%로서 상당히 많은 양을 포함하고 있다. 이 미량원소는 각 광상이나 광화시기의 차이이기보다는 공존광물의 종류에 따라 함량의 유무가 결정될 것으로 보인다. 즉 황동석과 공존하는 것에서는 Cu가 코사라이트, 테트라디마이트와 공존하는 것에서는 Bi가 유비철석과 공존하는 것에서는 As 등의 원소들이 Au나 Ag를 미량 치환한 것으로 보인다. 이들은 에렉트럼의 정출당시 주변광물에서 유래된 원소가 에렉트럼의 침전에 영향을 끼친 것으로서 에렉트럼의 구성원소로 포함되어 있는 것이다. 둔전광산의 에렉트럼에는 Au의 함량이 많을수록 Cu는 감소하고 Bi, As는 증가하는 경향을 보인다.

이상에서와 같이 둔전-백전 광상에서 산출되는 Au의 용존상태와 에렉트럼의 정출과정을 정성적으로 고찰하여 보았으나 위에서 설명한 것 이외에 pH, aAu/aAg, aCl⁻, mCl⁻, mK⁺, aO₂, aCO₂, aH₂S, total S, S species들이 모암과의 반응, 동위원소 교환반응 등에 의하여 달라질 수 있다. 따라서 이들의 상호작용을 상세히 밝힌 후 금-은, 안티모니의 沈澱過程을 모델화하여 차후에 보고하고자 한다.

結 言

1. 둔전-백전지역의 광상에서 산출되는 에렉트럼의 Ag atom%는 각각 둔전 북광상: 22.6~29.5, 둔전 남광상: 33.6~69.5, 백전광상: 35.6~63.5의 범위이다.

2. 에렉트럼의 Ag 함량은 각 광상의 광화시기 및 공존광물에 따라 다를 뿐 아니라 동일입자에서도 차이가 있으며, 동일입자의 중심부에서 외각부로 갈수록 Ag의 함량이 증가한다.

3. 에렉트럼에 포함된 미량원소는 각각 Cu : 0.20~1.92, Bi : 0.35~0.67, As : 0.70~1.90atom %로서 Cu는 Ag가 증가함에 따라 감소하고 Bi, As는 Ag가 증가함에 따라 높아진다.

4. 둔전-백전지역의 광상에서 산출되는 에렉트럼은 온도와 염농도, f_{S_2} 가 높은 곳일수록 Au의 함량이 높고 base metal 유화광물과 공존하는 것이 Ag광물과 공존하는 것보다 Au의 함량이 더 높다.

參考文獻

김문수, 김수영, 박종남, 이기동, 이취영, 이진수, 김성재(1979) 태백산 UNDP항공전자 이상지역의 지상 탐사연구, KIGAM Bull., 8, 1-29.
 대한광업진흥공사(1981) 한국의 광상, 8, 290-291.
 대한광업진흥공사(1974) 한국의 광상, 6, 69-70.
 박희인, 우영균, 이찬희(1987) 둔전금광산 남광상의 광석과 유체포유물, 광산지질, 20, 107-118.
 박희인, 이찬희(1988) 둔전-백전지구의 금, 은, 안티모니 광화작용, 지질학회지, 24, 519(요약).
 박희인, 이찬희(1990) 둔전광산 북광상의 금-은 광화작용, 지질학회지, 26, 358-370.
 박희인, 이찬희(1991) 둔전금광산 북광상에서 산출되는 다상포유물내의 고상, 광산지질, 24, 1-8.
 박희인, 이찬희(1991) 천열수 충준교대형 백전광상의 금, 은, 안티모니 광화작용, 지질학회지, 27, 527(요약).
 박희인, 이찬희(1992) 둔전금광산 북광상에서 산출되는 Sb, Bi 유염광물의 산출상태와 생성환경, 광산지질, 25, 17-25.
 박희인, 이찬희(1992) 백전금광상에서 산출되는 누대조직을 갖는 황철석의 광물화학과 "Invisible Gold", 지질학회지, 28, 627-636.
 이찬희(1993) 태백산광화대 북부, 둔전-백전지역

의 금, 은, 안티모니 광상의 지질, 광물, 유체포유물, 안정동위원소 연구, 서울대학교 대학원, 이학박사학위논문, 422p.
 Barnes, H. L.(1979) Solubility of ore minerals, In Barnes, H. L.(Ed.), Geochemistry of hydrothermal ore deposits, New York, Wiley and Sons, 404-460.
 Brown, K. L.(1986) Gold deposition from geothermal discharge in New Zealand. Econ. Geol., 81, 976-986.
 Helgeson, H. C.(1969) Thermodynamic of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures, Am. J. Sci., 267, 729-804.
 Hanley, R. W.(1973) Solubility of gold in hydrothermal chloride solutions, Chem. Geol., 11, 73-87.
 Henley, R. W.(1985) The geothermal framework of epithermal deposits, In Reviews in Econ. Geol., 2, 1-24.
 Hanley, R. W.(Truesdell) A. H., Barton, P. B. Jr. (1984) Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. In Reviews in Econ. Geol., 1, 115-127.
 Imai, N., Sakai, E., Suzuki, S. and Hashimoto, K. (1981) Electrum in the Kuroko ore from the Yoshino mine, Yamagata Prefecture, Japan-A summary of its ore mineralogy. Mining Geol., Japan, Spe. Issue, No.10, 203-218.
 Large, R. R., Huston, D. L., McGoldrick, P. J., Ruxton, P. A., and McArthur, G.(1988) Gold distribution and genesis in Australian volcanogenic massive sulfide deposits and their significance for gold transport model. Econ. Geol., Mono., 6, 520-536.
 Lee, C. H., Park, H. I. and Chang, L. L. Y.(1993) Sb-cosalite from Dunjeon gold mine, Taebaeg city, Korea. Mineralogical Magazine, 57, 527-530.
 Schenberger, D. M., and Barnes, H. L.(1989) Solubility of gold in aqueous sulphide solutions from 150°C to 350°C. Geochim. Cosmochim. Acta, 53, 269-278.
 Seward, T. M.(1973) Thio complexes of gold and the

- transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 379-399.
- Seward, T. M.(1976) The solubility of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, 1329-1341.
- Seward, T. M.(1981) Metal complex formation in aqueous solution at elevated temperatures and pressures. In Rickard, D. T., Wickman, F. E. (Ed.), *Chemistry and geochemistry of solutions at high temperature and pressure. Phys. Chem. Earth* 13 and 14, 113-132.
- Seward, T. M.(1984) The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In Foster, R. P.(Ed.), *Gold '82, The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Geol. Soc. Zimbabwe Spec. Pub., Balkema, A. A., 1, 165-181.*
- Shikazono, N.(1985) A comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblages and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein-type deposits in Japan. *Econ. Geol.*, 80, 1415-1424.
- Shikazono, N. and Shimizu, M.(1986 a) Ag/Au total production ratio and Au-Ag minerals from vein-type and disseminated-type deposits in Japan. *Mining Geol., Japan*, 36, 411-424.
- Shikazono, N. and Shimizu, M.(1986 b) Compositional variations in Au-Ag series minerals from some gold deposits in the Korean Peninsula. *Mining Geol., Japan*, 36, 545-553.
- Shikazono, N. and Shimizu, M.(1987) The Ag/Au ratio of native gold and electrum and the geochemical environment of gold vein deposits in Japan. *Min. Dep.*, 22, 309-314.
- Urashima, Y., Soeda, A., Tsukahara, N., Matsugi, M. and Sano, T.(1981) The Sakashi-Odomari gold-silver deposits, Hyogo Prefecture, Japan. *Mining Geol., Japan, Spe. Issue, No.10*, 53-74(in Japanese).
- Yamaoka, K. and Nedachi, M.(1978) Gold and silver minerals from Chidose and Takatama epithermal deposits, In *gold and silver ore in Japan* : Tokyo, Japan, *Mining Metall. Inst.*, 75-100(in Japanese).