

太白山鑛化帶 蓮花—巨道鑛山에 있어서의 스카른과 鑛石鑛物의 隨伴關係 및 相平衡

尹 碩 奎*

Skarn-Ore Associations and Phase Equilibria in the Yeonhwa-Keodo Mines, Korea

Suckew Yun

Abstract: The Yeonhwa (I, II) and Keodo mines, neighboring in the middle part of the Taebaegsan mineral belt, contain three distinct classes of skarn deposits: the zinc-lead skarn at Yeonhwa (I, II), the iron skarn at Keodo south (Jangsan orebodies), and the copper skarn at Keodo north (78 orebodies). The present study characterizes the three classes of skarn deposits mainly in terms of skarn/ore associations examined from chemical compositional point of view, and applies existing quantitative phase diagrams to some pertinent mineral assemblages in these mines.

At Yeonhwa I the Wolam I orebody shows a vertical variation in skarn minerals ranging from clinopyroxene/garnet zone on the lower levels through clinopyroxene (without garnet) zone on the intermediate levels, and finally to rhodochrosite veins on the upper levels and surface. Ore minerals, sphalerite and galena, associate most closely with the intermediate clinopyroxene zone. At Keodo, the Jangsan iron skarn hosted in quartz monzodiolite as a typical endoskarn, shows a skarn zoning, from center of orebody to outer side, magnetite zone, magnetite/garnet zone, garnet clinopyroxene zone, and clinopyroxene/epidote/plagioclase zone. The 78 copper skarn in the Hwajeol limestone indicates a zoning, from quartz porphyry side toward limestone side, orthoclase/epidote zone, epidote/clinopyroxene zone, and clinopyroxene/garnet zone; chalcopyrite and other copper sulfides tend to be in clinopyroxene/garnet zone.

Mioroprobe analyses of clinopyroxenes and garnets from the various skarn zones mentioned above revealed that the Yeonhwa zinc/lead skarns are characterized by johansenitic clinopyroxene (Hd 25-78, Jo 15-23) and manganoan andraditic garnet (Ad 13-97, Sp 1-24), whereas the Jangsan iron skarn at Keodo by Mn-poor diopsidic clinopyroxene (Di 78-93, Jo 0.2-1.0) and Mn-poor grossularitic grandite (Gr 65-77, Sp 0.5-1.0). The 78 copper skarn at Keodo is characterized by Mn-poor diopsidic-salite (Di 66-91, Jo 0.2-1.1) and Mn-poor andraditic grandite (Ad 40-74, Sp 0.5-1.1). The compositional characteristics of iron, copper, and zinc-lead skarns in the Yeonhwa-Keodo mines are in good correlations with those of the foreign counterparts.

Compiling a T-XCO₂ phase diagram for the Jangsan endoskarns, a potential upper limit of temperature of the main stage of skarn formation is estimated to be about 530°C, and a lower limit to be 400°C or below assuming XCO₂=0.05 at P total=lkb. Applying a published log fS₂ - log fo₂ diagram to the Keodo 78 and Yeonhwa exoskarns, it is revealed that copper sulfides and zinc-lead sulfides do not co-exist stably below log fS₂=-4 and log fo₂=-23 at T=400°C and XCO = 1 atm.

1. 序 論

過去에 接觸交代鑛床이라 불리워오던 鑛床類型을 오

*延世大學校 地質學科

날날에는 스카른鑛床이라고 널리 불리우고 있다. 스카른鑛床의 內容은 주로 石灰珪酸鹽類로 되는 所謂 스카른과 硫化物, 酸化物, 其他 鹽類로 되는 鑛石鑛物類로 構成되어 있는데 이들 鑛物은 一般的으로 帶狀分布를 이

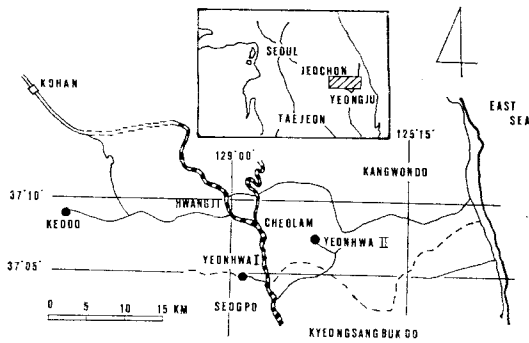


Fig. 1 Location map of the Keodo-Yeonhwa district

루는 경우가 많고 어떤 스카른帶에 어떤 鑛石鑛物이 잘 隨伴되는지에 對하여 最近 많은 研究가 進行되고 있다 (例: Zharikov, 1970; Burt, 1972a). 그런데 스카른鑛床의 生成過程을 時間的으로 考慮할때 많은 研究者들이 스카른鑛物이 先行되고 鑛石鑛物이 後行하는 것으로 해석하고 있으며 (例: Shimizu and Iiyama, 1982) 따라서 鑛物의 隨伴關係와 相平衡의 問題에 對하여 스카른과 鑛石鑛物을 別途로 다루는 경우가 많다. 例를 들어 Helgeson et al(1978)에 依한 造岩鑛物의 熱力學的性質에 關한 綜合이나 Liou(1974)에 依한 柘榴石/石英의 安定性에 關한 實驗的 研究는 前者의 경우이고 Holland(1965)에 依한 主要鑛石鑛物에 對한 熱化學的性質의 適用에 關한 研究는 後者의 경우일 것이다.

그러나 스카른의 生成過程은 前期의 前進的 脫炭酸化作用에서 後期의 後退的 水化作用에 이르기까지 連續되고 있으며 一部の 鑛石化作用은 別써 前期의 스카른化와 併行되기도 하며 (例: 磁鐵石), 後期의 水化作用에 密接히 隨伴되어 스카른을 交代하면서 一定한 스카른帶에 選好的으로 沈澱되는 것이다. 上記 스카른化의 前後期를 通하여 金屬元素의 酸化 또는 硫化가 進行됨으로서 이루어진 스카른/鑛石鑛物의 複合體가 果然 化學的인 平衡狀態下에 있었는지의 如否는 于先 顯微鏡的인 判定이 앞서야 하며 아울러 理論的인 可能性을 檢討하기 爲해서 相律的으로 다루게 되는데 이 問題에 對한 最近의 研究로서는 Burt(1972b), Gamble (1982), Burton et al(1982) 등을 들 수 있다.

本 研究에서는 스카른과 鑛石鑛物의 隨伴關係 및 相平衡에 關한 問題를 太白山鑛化帶內의 蓮花鑛山과 巨道鑛山을 選擇하여 다루어본 것이다 (Fig. 1). 이들 두 鑛山을 擇한 理由는 蓮花鑛山은 우리나라의 代表的인 鉛, 亞鉛스카른이고 巨道鑛山은 이와 地質的으로 隣接하고 있으며 同一鑛山內에 鐵스카른과 銅스카른을 併有하고 있어 이들 三種의 스카른을 比較할수 있기 때문이다. 蓮花鑛山에 對하여는 筆者의 近作 (例: Yun, 1979a; 1982)에서 一部 資料를 使用하였고 野外調査와 鑛物分析은 主로 巨道鑛山에 對해 集中的으로 實施하였다. 本 研究에서는 이들 資料를 토대로 하여 上記한 三種의 스카른鑛床에 있어서의 스카른과 鑛石鑛物의

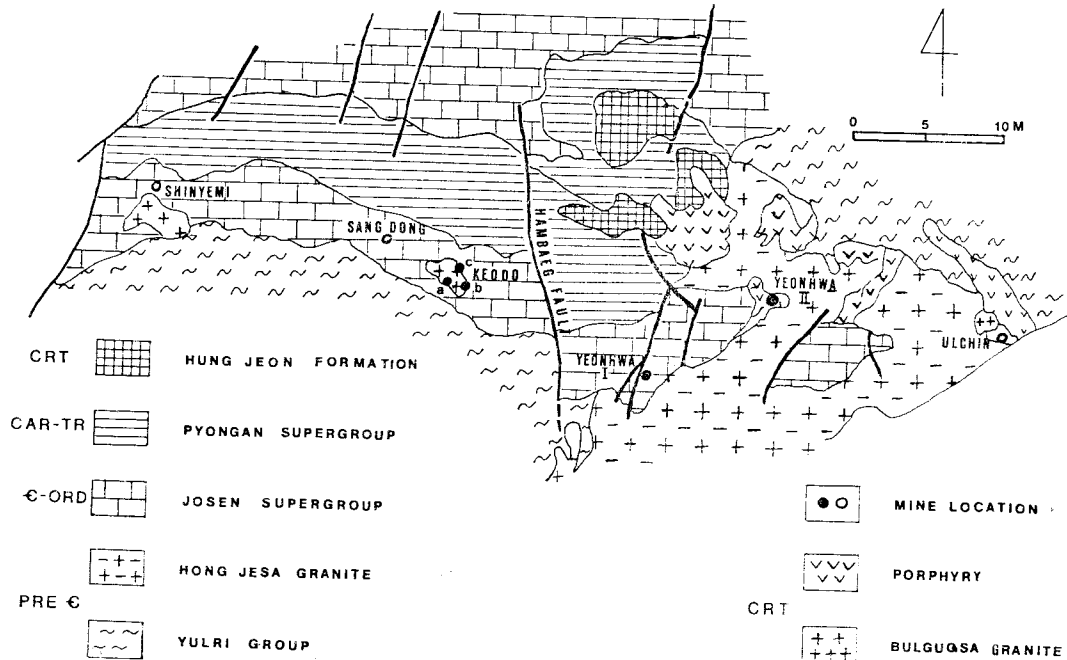


Fig. 2 Regional geology of the Taebaegsan metallogenic belt

隨伴關係를 化學的인 側面에서 檢討하였고 相平衡에 對한 簡單한 考察을 試圖한 것이다.

2. 地質構成

太白山堆積盆의 南緣에 따라 西側에서 부터 東側으로 向하여 新禮美, 上東, 巨道, 蓮花(第一 및 第二), 蔚珍等 우리나라 屈指의 鑛山들이 거의 一列로 點在하는 所謂 太白山鐵化帶(Fig. 2)는 咸白向斜의 南翼을 이루는 朝鮮系의 石灰質堆積層에 貫入한 白堊紀末 火成岩類와 成因의으로 關聯되어 있는 스카른鑛床群으로 特徵지어진다.

2-1 堆積岩類

蓮花—巨道地域에 있어서의 朝鮮系累層은 先캄브리아紀의 稟里統을 不整合으로 덮으며 東西로 길게 延長되나 咸白大斷層에 의해 蓮花地區가 南쪽으로 크게 移動(Fig. 2)되었다. 朝鮮系의 地層은 本域에서 約 1100m의 두께를 가지며 下部로부터 大陸性 基底礫岩 및 砂岩으로서의 壯山珪岩層, 淺海性 泥質堆積物인 描峯層, 大陸棚 炭酸鹽質堆積物인 豊村石灰岩 및 深海性泥灰質堆積物인 花析層(Yun, 1978)까지가 露出된다. 이들中 蓮花地域에서는 描峯層內의 石灰質狹層에서 豊村石灰岩을 지나 花析層까지가 스카른鑛床의 母岩이고 巨道鐵山에서는 一部 描峯層과 花析層이 스카른化를 받았다.

2-2. 火成岩類

巨道地區에 露出되는 所謂 於坪花崗閃綠岩體는 長經 3 km, 短經 2 km의 岩株로서(Fig 2) 나타나나 成分上 單一火成岩이 아니라 外郭部의 石英閃綠岩과 中心部에서 이를 貫入한 花崗閃綠岩으로 區分된다(張浩完·朴箕和, 1982). 花崗閃綠岩(?)試料의 黑雲母의 K-Ar 年代가 107m. y. (Kim, O. J. 1971), 또는 105m. y. (Farrar et al., 1978)로서 이 岩體의 貫入時期는 白堊紀中期임을 가르킨다. 巨道鐵山에서 磁鐵鑛石을 主로 하는 壯山鑛體와 太白鑛體(Fig. 2에서 a와 b)는 石英閃綠岩이 스카른化된 內成스카른이고 黃銅石을 主로 하는 78鑛體(Fig. 2에서 c)는 前述한 花崗閃綠岩으로 부터 分化된 石英斑岩脈을 關係火成岩으로 하여 花析層이 스카른化된 것이다. 蓮花地區의 煌斑岩은 上部로 퍼지는 2個의 不規則 岩體로서 直徑은 西部岩體가 400 m, 東部岩體가 300 m이다. 西部岩體로 부터의 黑雲母의 K-Ar 年代가 213 m. y.(Yun and Sib Silberman, 1979)로서 本岩의 貫入時期가 三疊紀前期임을 가르킨다.

蓮花地區에는 이밖에 小規模의 輝綠岩脈, 石英斑岩脈 및 流紋岩脈이 散發的으로 露出되는데 流紋岩脈을

除外하고는 모두 顯著한 熱水變質을 받고 있어 先鐵化岩脈들인것 같으나 石英斑岩이 菱狀간石化를 받은 點으로 보아 鐵化에 密接한 關係가 있었던것 같다(尹碩奎, 朴商範 1979).

3. 鑛 床

本 地域內의 鑛床은 모두 스카른鑛床에 屬하나 蓮花鐵山(第 1)은 두터운 石灰質 岩層內의 鑛筒型 鉛·亞鉛鑛床으로 代表되는데 比해 巨道鐵山은 南部의 石英閃綠岩이 스카른化된 內成스카른으로서의 鐵鑛床(壯山鑛體와 太白鑛體)과 北部의 花析層이 鐵化된 外成스카른으로서의 銅鑛床(78鑛體)으로 區分된다.

3-1. 蓮花鐵山

蓮花鐵山은 一群의 鑛筒型 塊狀鑛體로 特徵지어졌으며 이들은 鑛體外緣部에 스카른을 隨伴하며 鉛·亞鉛鑛化는 描峯層으로 부터 始作하여 두터운 豊村石灰岩과 花析層을 貫通하여 急傾斜로 賦存된다. 約 20個의 形態의으로는 서로 類似하나 크고 적게 規模를 달리하는 鑛體들이 東北方向과 西北方向으로 V字型을 이루어 配列됨으로서 그들이 하나의 共軛된 裂罅系를 따라 鐵化되었음을 잘 보여주고 있다. 最大의 規模를 갖는 月岩鑛體는 地表露頭에서 -360 Level까지만 해도 垂直高 480m에 達하며 鑛體는 그 以下로 繼續된다. 이 鑛體는 下部로부터 上部로 向하여 輝石/柘榴石帶, 輝石帶 및 菱狀간 石帶로 帶狀分布를 보이며 鑛石鑛物인 閃亞鉛石과 方鉛石은 輝石帶에 가장 잘 隨伴된다. 이 밖에 少量의 黃銅石이 隨伴되며 硫化脈系로서는 磁硫鐵石이 主이고 後期의 黃鐵石 및 白鐵石이 極少量 나타난다. 이 밖에 詳細한 內容에 對해서는 韓甲洙(1969) 및 Yun(1979b)에 이미 發表된바 있다.

3-2. 巨道鐵山

巨道鐵山은 本來 於坪閃綠岩體 南緣部의 壯山鑛體와

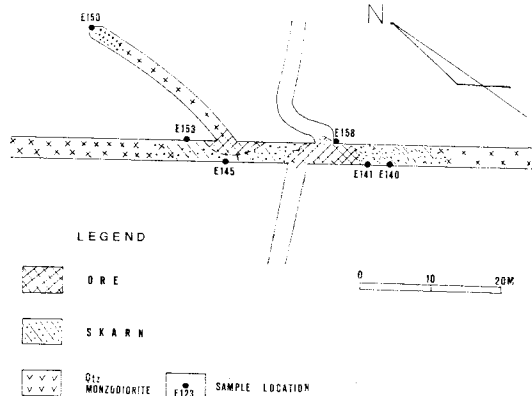


Fig. 3 Underground geologic map of the Keodo Jangsan orebodies

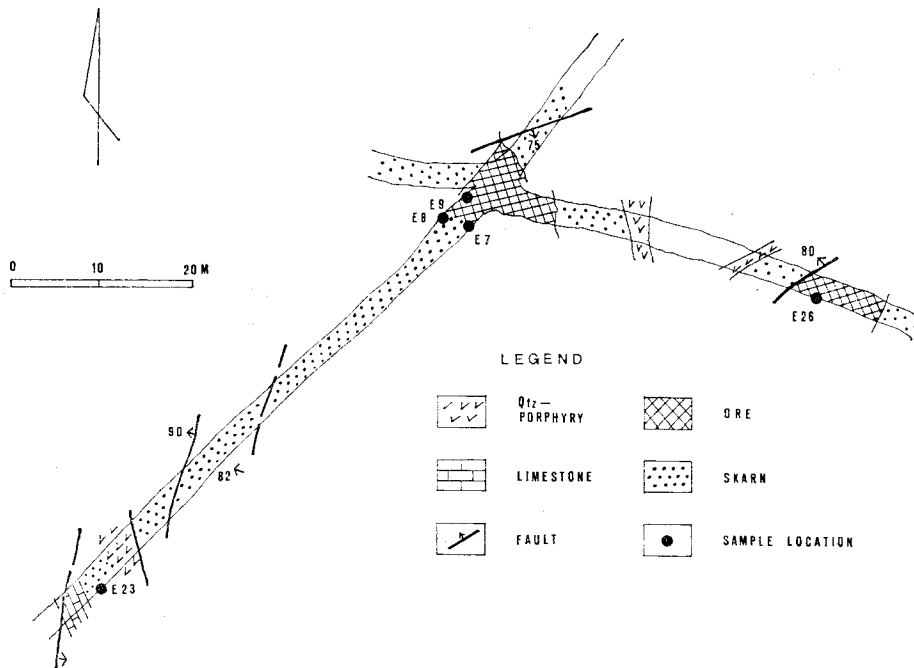


Fig. 4 Underground geologic map of the Keodo 78 orebodies

太白鑛體에서 鐵을 主對象으로 하고 銅을 副産物로 稼行하고 있었는데 1978年 鑛振試鑛에 依해 同岩體 北部 外側에서 銅을 主로 하는 新鑛體가 發見되어 이것이 78鑛體로 命名되었다. 石英-몬조다이오라이트內의 內成스카른(Fig. 3)인 壯山鑛體와 太白鑛體에서의 스카른鑛物은 柘榴石, 斜輝石 및 綠簾石을 主로 하며 斜長石의 輝石化를 볼수 있다. 鑛石鑛物은 磁鐵石이 主이고 少量의 黃銅石이 包含된다. 이에 反해 78鑛體는 石英斑岩脈의 貫入을 받은 花析層을 母岩으로 하는 外成스카른(Fig. 4)으로서 스카른鑛物로서는 亦是 柘榴石, 斜輝石이 主이며 後生스카른(張·朴, 1982)으로서의 柘榴石, 斜輝石, 綠簾石, 陽起石, 綠泥石, 方解石 및 石英을 包含한다. 鑛石鑛物로는 黃銅石이 主이고 곳에 따라 斑銅石과 輝銅石을 볼수 있다. 硫化脈石으로서 黃鐵石 및 磁硫鐵石이 나타난다.

4. 스카른鑛物과 鑛石鑛物의 隨伴關係

스카른鑛床을 鑛種에 따라서 鐵스카른, 銅스카른, 鉛亞鉛스카른, 텅스텐스카른, 모리브덴스카른, 錫스카른等으로 分類할 수 있는데 各國에서 알려진 스카른鑛床에 關한 綜合資料(Einaudi et al, 1981; Einaudi and Burt, 1982)에 依하면 Table 1 과 같다. 其中에서 特徵的인 早期스카른과 鑛石鑛物의 組合을 注目해 보면 Iron skarn 에서는 Ferrosalite, Grandite, Epidote,

Magnetite 이고 Copper skarn 에서는 Andradite, Diopside, Chalcopyrite 이고 Zinc-lead skarn 에서는 Manganian hedenbergite, Andraditic garnet, Sphalerite, Galena 이다. 本研究에서는 蓮花鑛山과 巨道鑛山에 있어서의 特徵的인 스카른/鑛石鑛物의 組合과 이들과를 比較하여 그 一致性和 相違性을 찾아보는 것이 그 目的의 一部이다.

4-1. 蓮花鑛山

이미 鑛床記載에서 言及한 바와 같이 蓮花鑛山에서는 月岩鑛體의 例에서와 같이 스카른은 鑛體下部로 부터 上向으로 柘榴石/輝石帶, 輝石帶, 菱鎂矽石帶의 順으로 帶狀分布를 하고 있으며 閃亞鉛石, 方鉛石은 特히 輝石帶에 잘 隨伴되며 때로는 스카른帶를 넘어서 石灰岩을 交代하기도 한다. 關係火成岩이 不明하고 Mn 含量이 높은 스카른(Mn-hedenbergite, Bustamite, Rhodonite, Rhodochrosite)으로 特徵지어지는 事實은 外國의 鉛·亞鉛스카른의 경우와 잘 一致하는 點이다.

4-2. 巨道鑛山

石英-몬조다이오라이트를 母岩으로 하는 內成스카른으로서의 太白 및 壯山鑛體는 柘榴石과 磁鐵石으로 特徵지어졌고 斜長石이 輝石化되었으며 綠簾石을 包含한다. 이들은 매우 不規則하게 隨伴되나 局部的으로 帶狀分布를 보이기도 하는데 磁鐵鑛體를 中心으로 하여 外側으로 柘榴石帶, 柘榴石/輝石帶, 輝石/斜長石/綠

Table 1. Major Characteristics of Iron, Copper, and Zinc-Lead Skarns¹

	Iron	Copper	Zinc-Lead
1. Typical size	5-200%	1-100%	0.2-3%
2. Typical grade	40% Fe	1-2% Cu	9% Zn, 6% Pb, 5 oz/ton Ag Zn, Pb, Ag (Cu, W)
3. Metals associated	Fe, (Cu, Co, Au)	Cu, (Mo, Zn, W)	Plutons commonly absent; granodiorite, granite
4. Associated igneous rocks	Gabbro to Syenite; mostly diorite	Granodiorite to quartz monzonite	Local, but intense: epidote-pyroxene-garnet
5. Endoskarn	Epidote-Pyroxene Na-silicates	Local: epidote-pyroxene-garnet	High in Fe, Mn, S, low in Al
6. Exoskarn (Composition)	High in Fe; low in S, Mn	High in Fe, S; low in Al, Mn	Manganoan hedenbergite (Hd 30-90, Jo 10-40) andraditic garnet (Ad20-100) bustamite, hodonite
7. Early minerals	Ferrosilite (Hd 20-80), grandite (Ad20-95) epidote, magnetite	Andradite (Ad 60-100), diopside (Hd 5-50), Wollastonite	Mn-actinolite, ilvaite, chlorite, dannemorite, rhodochrosite
8. Late minerals	Amphibole, chlorite, ilvaite	Actinolite (Chlorite, montmorillonoids)	Sphalerite, galena, pyrrhotite, pyrite, magnetite, (Chalcopyrite, arsenopyrite)
9. Ore minerals	Magnetite, (Chalcopyrite, Cobaltite, pyrrhotite)	Chalcopyrite, Pyrite, hematite, magnetite, (bornite, pyrrhotite molybdenite, tennantite)	
10. Pluton morphology	Large to small stocks, dikes	Small stocks, dikes, breccia pipes	If present, stocks and dikes
11. Tectonic setting	Oceanic island arc, Rifted continental margims	Continental margin, Syn-to late orogenic	Continental margin, Syn-to late orogenic

1. Abridged from Einaudi and Burt(1982).

鑛石帶의 順으로 配列된다.

78鑛體에 있어서의 스카른도 이미 鑛床記載에서 言及한 바와 같이 柘榴石과 輝石을 主로 하고 칼리長石 및 綠簾石이 나타난다. 火成岩側에서 石灰岩側을 向하여 正長石/綠簾石帶, 輝石/綠簾石帶, 柘榴石/輝石帶의 順으로 帶狀分布를 보이며 黃銅石을 主로 하는 銅鑛石은 輝石/柘榴石帶에 隨伴된다. 黃銅石은 흔히 黃鐵石을 交代하고 있으며 이들은 또한 斑銅石에 依해 交代되었고 斑銅石은 다시 輝銅石에 依해 交代되었다 (張·朴, 1982).

4-3 스카른 鑛物의 化學成分과 鑛石金屬의 隨伴關係

스카른과 鑛石鑛物의 隨伴關係를 알아보기 爲해서는 大部分이 珪酸鹽固溶體인 스카른鑛物의 化學成分에서 부터 出發해야 한다. 이를 爲해 本 研究에서는 蓮花鑛山에 對하여는 既存 分析資料(yun, 1979 b; 1979c)를 使用하였고 巨道鑛山에 對하여는 大部分 輝石과 柘榴石이 共存하는 試料中에서 各, 10餘個의 鑛物粒子를 Electron Microprobe 로 分析하였다. 分析은 日本 早稻

田大學에서 JXA-60을 使用하여 掘居正治氏의 도움으로 이루어졌다. 分析結果는 Table 2, 3, 4, 5에서 보는 바와같이 蓮花, 巨道壯山 및 巨道 78로 區別하여 提示했는데 서로 顯著한 相違點을 드러내고 있다. Fig. 5는 蓮花鑛山(第1 및 第2)의 分析結果를 表示한 것인데 輝石은 Mn 含量이 높아서 Johansenite 分子를 15-23% 까지 包含하며 柘榴石 또한 Mn 含量이 높아서 Spessartine 分子를 最高 24%까지 包含하며 全體적으로 Andradite 쪽으로 치우친 分布를 보인다. 巨道 壯山鑛體의 경우는(Fig. 6) Mg 含量이 매우높은 輝石(Diopside 分子 77~94%)으로 特徵지어지며 柘榴石은 Fe 分이 적고(Andradite 21-33%), CaAl 含量이 높은 Grossular 에 가까운(Grossular 65-77%)Garndite이다. 78鑛體의 경우도 亦是 輝石은 Diopside 에 가까와(Diopside 分子 66-91%) 壯山鑛體의 경우와 類似하나 柘榴石은 Andradite 쪽으로 치우치는 Grandite(Andradite 40-95%)이다. 巨道鑛山에서는 壯山, 78 어느 鑛體를 莫論하고 Mn 含量이 極히 적은 輝石(Johansenite 1% 以下)과

Table 2. Electron Microprobe Analyses of Clinopyroxenes from Jangsan Orebodies

	E145	E150	E153	E158	E140
SiO	53.42	55.34	54.80	54.86	53.95
Al ₂ O ₃	0.38	1.92	1.69	0.41	1.30
FeO(total Fe)	3.66	1.49	1.16	5.01	6.83
MnO	0.28	0.05	0.09	0.36	0.20
MgO	15.68	16.27	17.12	13.50	14.35
CaO	26.04	25.93	26.40	25.62	24.34
Total	99.46	100.98	101.31	99.75	100.97
Number of cations on basis of 6 Oxygens					
Si	1.978	1.99	1.957	2.025	1.979
Al	0.017	0.021	0.043		0.056
	(1.994)	(2.000)	(2.000)	(2.025)	(2.035)
Al		0.060	0.028	0.018	
Fe	0.113	0.044	0.035	0.155	0.210
Mn	0.009	0.001	0.003	0.011	0.006
Mg	0.865	0.867	0.911	0.743	0.785
Ca	1.033	0.994	1.013	1.013	0.957
	(2.020)	(1.960)	(1.980)	(1.939)	(1.957)
Mole percent end members					
Diopside	87.63	89.11	93.30	89.10	78.43
Hedenbergite	11.48	10.74	7.49	18.61	20.95
Johansenite	0.89	0.15	0.26	1.23	0.62

Table 3. Electron Microprobe Analyses of Garnets from Jangsan Orebodies

	E145	E150	E153	E158
SiO ₂	39.40	39.89	39.55	39.95
TiO ₂	0.42		0.47	0.04
Al ₂ O ₃	17.37	14.73	12.97	16.01
Fe ₂ O ₃ (total Fe)	6.80	7.34	9.79	7.75
MnO	0.22	0.44	0.2x	0.43
MgO	0.36	0.06	0.21	0.07
CaO	37.11	36.40	36.32	36.24
Total	101.68	98.94	99.53	100.49
Number of cations on basis of 24 oxygens				
Si	5.973	6.230	6.196	6.134
Al	0.027			
	(6.000)	(6.230)	(6.196)	(6.134)
Ti	0.048		0.056	0.005
Al	3.077	2.711	2.394	2.897
Fe+3	0.776	0.862	1.154	0.895
	(3.901)	(3.574)	(3.604)	(3.797)
Mn	0.028	0.058	0.028	0.056
Mg	0.081	0.012	0.050	0.016
Ca	6.028	6.109	6.097	5.962
	(6.138)	(6.179)	(6.175)	(6.034)

Mole percent end members

Pyrope	1.33	0.19	0.81	0.27
Almandine				
Spessartine	0.46	0.94	0.46	0.93
Grossular	77.09	74.74	65.17	75.09
Andradite	21.12	24.13	33.56	23.71

Table 4. Electron Microprobe Analyses of Clinopyroxenes from 78 Orebodies

	E7	E8	E23	E26	E57.7
SiO ₂	53.42	53.69	54.53	53.16	52.64
Al ₂ O ₃	0.38	0.48	1.03	0.81	0.46
FeO(total Fe)	3.66	2.68	6.57	9.02	10.76
MnO	0.28	0.19	0.35	0.24	0.35
MgO	15.68	16.70	13.57	12.19	12.20
CaO	26.04	25.20	25.38	25.28	24.87
Total	99.46	98.94	101.49	100.69	101.28
Number of cations on basis of 6 oxygens					
Si	1.978	1.982	1.993	1.984	1.971
Al	0.017	0.021	0.097	0.016	0.020
	(1.994)	(2.003)	(2.000)	(2.000)	(2.991)
Al			0.037	0.019	
Fe	0.113	0.083	0.201	0.281	0.337
Mn	0.009	0.006	0.011	0.007	0.011
Mg	0.865	0.919	0.739	0.678	0.681
Ca	1.033	0.997	0.994	1.011	0.998
	(2.020)	(2.005)	(1.979)	(1.996)	(2.027)

Mole percent end members

Diopside	87.63	91.20	74.86	68.77	66.17
Hedenbergite	11.48	8.21	24.05	30.47	32.75
Johansenite	0.89	0.59	1.09	0.76	1.08

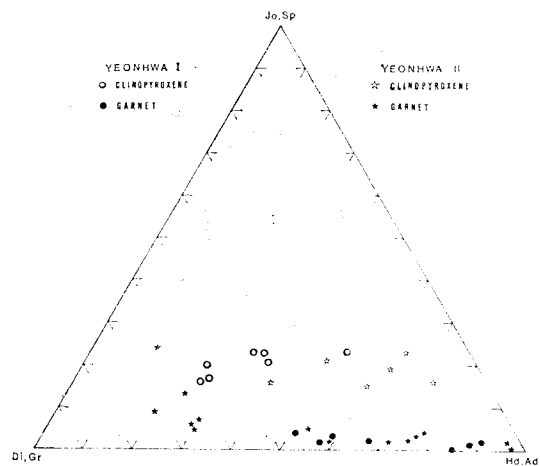
**Fig. 5** Compositional distribution of clinopyroxenes and garnets from Yeonhwa (I, II) mine

Table 5. Electron Microprobe Analyses of Garnets from 78 Orebodies

	E7	E8	E23	E26	E57.7
SiO ₂	37.78	36.48	38.16	38.26	36.70
TiO ₂	1.59	1.81	0.32	0.13	0.71
Al ₂ O ₃	11.69	5.86	11.24	8.54	9.90
Fe ₂ O ₃ (Total Fe)	13.25	22.39	15.52	19.58	18.81
MnO	0.25	0.21	0.35	0.50	0.42
MgO	0.33	0.12	0.15	0.08	0.04
CaO	35.42	33.84	35.10	34.48	34.49
Total	100.29	100.71	100.84	101.57	100.54
Number of cations on basis of 24 Oxygens					
Si	5.841	5.918	6.0131	6.065	5.886
Al	0.159	0.082			
	(6.000)	(6.000)	(6.013)	(6.065)	(6.000)
Ti	0.313	0.221	0.038	0.016	0.021
Al	2.730	1.039	2.087	1.455	1.575
Fe ₃₊	1.241	2.734	1.840	2.335	2.222
	(3.924)	(3.994)	(3.965)	(3.946)	(4.000)
Mn	0.050	0.029	0.046	0.067	0.057
Mg	0.099	0.029	0.036	0.019	0.010
Ca	5.888	5.882	5.926	5.856	5.926
	(6.037)	(5.940)	(6.000)	(5.942)	(5.990)
Mole percent end members					
Pyr	1.65	0.49	0.60	0.32	1.05
Sp	0.83	0.49	0.77	1.13	0.94
Gr	57.93	25.04	51.27	38.97	41.39
Ad	39.59	73.99	47.35	59.59	56.07

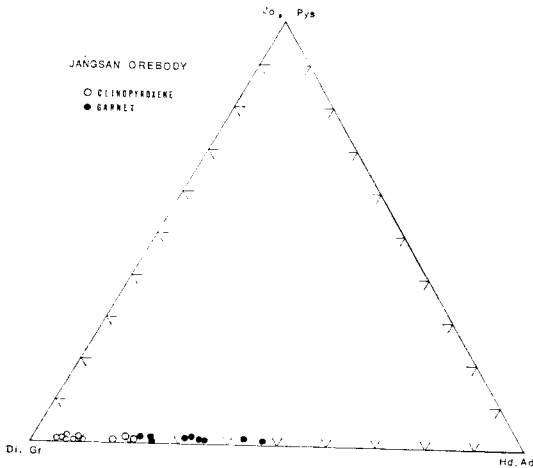


Fig. 6 Compositional distribution of clinopyroxenes and garnets from Keodo Jangsan orebodies

柘榴石(Spessartine 1% 以下)으로 代表되어 蓮花鎂山의 경우와는 큰 對照를 보여준다.

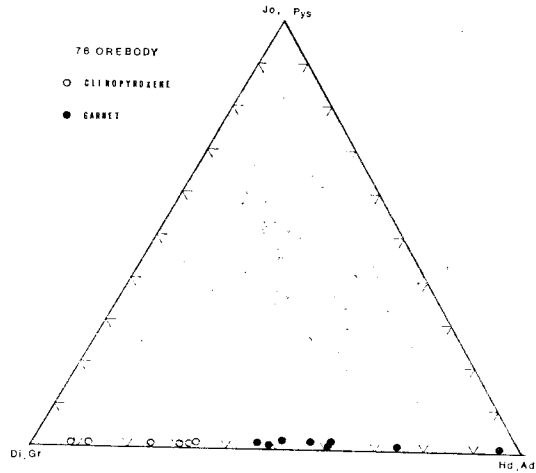


Fig. 7 Compositional distribution of clinopyroxenes and garnets from Keodo 78 orebodies

以上과 같은 蓮花, 巨道壯山, 및 巨道 78에서의 스킨鎂物組合과 그들의 化學成分上의 特徵을 몇몇 外國의 경우와 比較하면 蓮花는 日本의 Nakatatsu (Shimizu and Iiyama, 1982)나 美國 New Mexico의 Central mining district (Burton et al, 1982; Einaudi et al, 1982)의 鉛·亞鉛스카른과 對比가 되며 巨道壯山은 日本의 Kamaishi (Uchida and Iiyama, 1982)나 British Columbia Empire mine (Haug, 1796)의 磁鐵石(銅)스카른과 大體로 對比가 되나 Diopside 쪽으로 몹시 偏重되는 點이 다르다. 78鎂體의 斜輝石亦是 Diopside salite 이나 이는 日本의 Takiue (Kitamura, 1975)나 美國 Utah의 Bingham (Sweeney, 1980)에서의 銅스카른에서도 마찬가지이고 柘榴石이 Andraditic grandite 인 點도 모두 잘 一致되는 現象이다.

5. 스킨-鎂石鎂物의 相平衡

最近 Burt(1972)에 依해 珪酸鹽-硫化物의 平衡을 다루기 爲해 多成分系 Ca-Fe-Si-C-O-S, CaSiO-Fe-Cu-O-S, CaSiO-Fe-Zn-O-S 등의 相平衡에 關한 一聯의 定性的 $\mu_{O_2}-\mu_{S_2}$ diagram 이 提示됨에 따라 Burton et al(1982), Gamble(1982) 등이 그의 定量化를 爲한 實驗의 研究結果를 一部 發表하고 있으나 制限된 條件下에서의 結果에 不過함으로 實際로 適用하기에는 未洽한 點이 많다. Einaudi et al(1981)은 地質學的인 現實을 考慮하면서 既存相律資料中에 알맞는 것을 골라서 綜合相律圖를 작성하는 試圖를 하고 있다.

本 研究의 對象地域인 蓮花鉛·亞鉛스카른, 巨道壯山鐵스카른 및 巨道 78銅스카른에 對한 鎂物組合과 相

平衡을 다루는데 있어 각 鑛床의 生成溫度 및 深度에 關한 測定資料가 없는 만큼 各 鑛體에 있어서의 特徵的인 鑛物組合과 主要스카른의 化學成分을 토대로 하는 수 밖에 없다. 于先 鐵스카른으로서의 巨道壯山鑛體를 考慮할때 比較的 鹽基性인 火成岩을 母岩으로 한 內成스카른이 Grossularitic grandite, Diopsidic salite, Epidote, Plagioclase 등으로 特徵지어 있다는 點에 비추어 이들은 다음과 같은 Univariant curves (Gordon and Greenwood, 1971)에 의해 安定域이 區劃될 것이다.

이 경우 광물은 모두 일차적인 것에 한하며 이차적인 Garnet 나 Clinzoisite는 차환에 부채하다.

- (1) $An + Qz + 2Cc = Gr + 2CO_2$
- (2) $4Cz + Qz = 5An + Gr + 2H_2O$
- (3) $2Cz + 3Qz + 5Cc = 3Gr + H_2O + 5CO_2$

여기서 An=Anorthite, Qz=Quartz, Cc=Calcite, Gr=Grossular, Cz=Clinzoisite.

上記 Univariant reactions에 關與한 石英, 方解石은 主要스카른에 隨伴되어 있으며 反應 (1), (3)은 脫炭酸作用이고 反應 (2), (3)은 左側으로 進行될 때에 水化作用이다. 따라서 이들 鑛物組合의 安定性을 左右하는데 있어서 $X CO_2$ 가 重要한 要因이 됨을 알수 있다. 그리고 이들 鑛物相의 成分系는 Ca-Al-Si-C-O-H 또는 Ca-Mg-Si-C-O-H이고 萬一 壓力을 一定하다고 假定하면 2個의 變數即 T-XCO₂ 또는 log fo₂-T의 關係로 相의 平衡을 다룰수 있다. 먼저 壓力問題인데 太白山鑛化帶에 따라 貫入한 火成岩類들은 大部分 小規模의 岩株들로서 比較的 地表가까이에 貫入한 것으로 思料된다. 特히 壯山鑛體의 關係火成岩으로 볼수 있는 花崗閃綠岩은 大體로 斑岩質인 點으로 보아 貫入深度數 km 以下일 것이다. 이 程度의 深度라면 壓力은 1K bar 內外로 推算된다 (Lusk and Ford, 1978). 다음은 $X CO_2$ 인데 Taylor and O'Neil, (1977); Huang, (1976)에 依하면 石灰岩의 變質交代時 그 內部를 流通하는 流體의 $X CO_2$ 는 比較的 낮아서 0.1 以下인 만큼 石英은 조다이오라이트內에서의 $X CO_2$ 는 이보다 낮을 것으로 思料된다.

Fig. 8은 既述한 成分系中 Ca-Al-Si-C-O-H系의 全壓 1 K bar 下에서의 T-X CO₂圖로서 上記한 3個의 Univariant curves가 一點에서 만나는 C點의 $X CO_2$ 는 約 0.05 이고 溫度는 約 450°C이다. 壯山스카른에서 Wollastonite가 發見되지 않음으로 溫度의 上限 (point A)은 約 530°C이고, Tremolite가 發見되지 않으며 Clinopyroxene은 Diopsidic 하기는 하나 Hedenbergite分子를 7.5~21% 包含하므로 溫度의 下限은 400°C를 下廻할 것이며 스카른段階를 뒤따르는 硫化

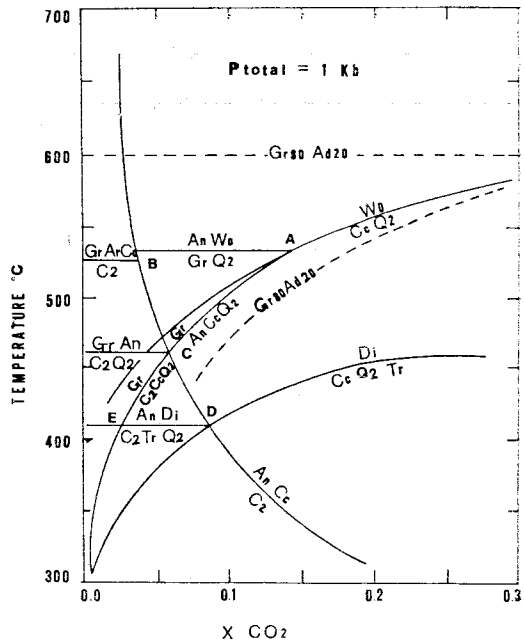


Fig. 8 Isobaric T-XCO₂ diagram for the system Ca-Al-Si-C-O-H at a total pressure of 1 Kb. Equilibria related to invariant point A, B, and C are from Gordon and Greenwood (1971); invariant point D is from Uchida and Iiyama (1982); Potential univariant curves for Gr 80 Ad 20 are from Taylor and Liou (1978). For abbreviation, see text.

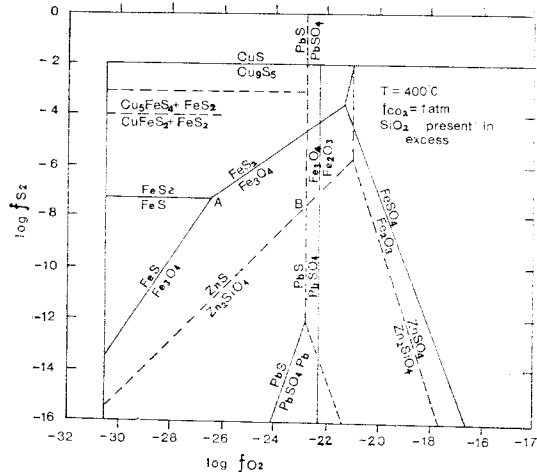


Fig. 9 Log fs₂-fO₂ diagram for the system Fe-Cu-Zn-Pb-Si-S-O at T=400°C and fCO₂=1 atm. Adopted from Holland (1965).

段階에서 溫度는 더욱 下降할 것이다.

巨道 78鑛體의 경우도 스카른鑛物의 化學成分에 있

어서 輝石은 壯山鎂體의 그것과 類似하고 單至 柘榴石이 좀더 Andraditic 한 點으로 보아 Fig. 8 內의 Univariant curve, $An+Q+2Cc=Gr+2CO_2$ 의 位置가 低溫쪽으로 下降($X CO_2$ 가 一定할때)하게 되며 同鎂體에서 柘榴石의 化學成分이 平均 Gr40 Ad60 程度임으로 Invariant point C의 溫度는 約 400°C 또는 그 以下로 떨어지게 되며 이때의 $X CO_2$ 는 0.1에 가까워진다.

따라서 黃銅石, 斑銅石, 輝銅石, 黃鐵石, 磁硫鐵石 등으로 構成되는 硫化鎂物의 平衡關係를 알아보기 爲해서는 Fig. 9와 같은 Holland (1965)의 $\log fS_2 - \log fO_2$ 圖를 適用할수가 있다. 이 圖面에는 $Fe S_2/F_3O_4$, FeS/Fe_3O_4 , ZnS/Zn_2SiO_4 , $PbS/PbSO_4$ 등의 關係가 包含되어 있어 蓮花鎂山의 鉛亞鉛硫化物에 對해서도 알아볼수가 있다. 卽 硫化銅鎂物은 黃鐵石·磁鐵石의 平衡線보다 높은 fS_2 領域에서 安定하며 磁硫鐵石과 密接히 隨伴되는 硫化鉛·亞鉛鎂物은 이들 平衡線보다 낮은 fS_2 에 位置하여 보다 넓은 fO_2 領域에서 安定하나 地質學的으로 現實的인 fO_2-fS 下에서 硫化銅鎂物과 硫化鉛·亞鉛鎂物이 安定하게 共存할수 없고 매우 높은 fS_2-fO_2 下에서만 共存이 可能함을 알수 있다.

6. 要約과 結論

太白山 鎂化帶의 中間部에 位置하고 있는 巨道鎂山과 蓮花鎂山은 서로 相違한 鎂種 卽 鐵스카른, 銅스카른 및 鉛·亞鉛스카른으로 鎂化되어 있어 다음과 같은 스킨/鎂石鎂物의 隨伴關係로 特徵지어진다.

1. 蓮花鎂山에서는 鎂體의 下部로 부터 上部를 向하여 柘榴石/輝石帶, 輝石帶 및 菱鎂간石帶로 帶狀分布를 이루며 閃亞鉛石, 方鉛石은 輝石帶에 보다 豊富히 隨伴된다.

2. 巨道壯山鎂體에서는 局部的으로 鎂體內에서 外側으로 向하여 磁鐵石帶, 磁鐵石/柘榴石帶, 柘榴石/輝石帶, 斜輝石/斜長石/綠簾石帶의 順으로 帶狀分布를 이루며 磁鐵石은 柘榴石帶에 隨伴된다.

3. 78鎂體에서는 石英斑岩側에서 石灰岩側으로 向하여 正長石/綠簾石帶, 斜輝石/綠簾石帶, 柘榴石/斜輝石帶의 順으로 帶狀分布를 보이며 硫化銅鎂物은 斜輝石/柘榴石帶에 隨伴된다.

4. 스킨鎂物의 化學成分은

a. 蓮花鉛·亞鉛스카른에서는 Mn 含量이 높은 Clinopyroxene(Hd 25-78%, Jo 15-23%)과 Grandite garnet (Ad 13-97%, Sp<24%)로 特徵지어지는데 비해

b. 巨道鎂山의 鐵스카른에서는 Mg 含量이 높은 Clinopyroxene(Di 78-93%), Ca, Al 含量이 높은 Grossular에 가까운(Gr 65-77%) Grandite로 代表되며

c. 巨道78의 銅스카른에서는 Clinopyroxene은 Diopside에 가까우나(Di 66-91%) Garnet는 Andradite에 치우치는 Grandite(Ad 40-95%)로 特徵지어진다.

이들 3種의 스킨 鎂床에서 나타나는 스킨鎂物의 組合과 化學成分上의 特徵을 外國의 類似 鎂床과 比較하면 많은 共通點이 發見된다.

이러한 鎂物組合과 化學成分을 토대로 上記 3種의 鎂床에 있어서의 鎂物相의 平衡關係를 定量的 相律圖의 適用으로 解析할수 있는바 巨道壯山鐵스카른의 安定域은 $X CO_2$ 를 0.05로 推定할때 生成溫度의 上限은 500°C이고 下限은 400°C를 若干下廻할 것이며 巨道78 銅스카른과 蓮花鉛·亞鉛스카른의 安定域은 $X CO_2$ 의 값이 높아지고 生成溫度의 上限이 400°C까지 떨어진 것으로 解析된다. 또한 硫化銅鎂物은 黃鐵石·磁鐵石平衡線보다 높은 fs_2 領域에서 安定하나 硫化鉛·亞鉛鎂物은 黃鐵石·磁鐵石平衡線보다 낮은 fs_2 領域에서 安定함으로 硫化銅鎂物과 硫化鉛·亞鉛鎂物은 普通 地質的으로 現實的인 fs_2-fO_2 下에서는 安定하게 共存할수 없음을 알수 있다.

謝 辭

本 研究는 1980年度 文教部 學術研究助成費에 依하여 이루어졌다. 野外調査를 爲해 便宜를 提供해 주신 咸太炭鎂 金正洙所長 巨道鎂山 李外奉所長, 金大中課長에게 感謝드리며 스킨鎂物의 電子線分析을 協助해 주신 日本早稻田大學 今井教授, 掘居氏, 木內氏에게 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

張浩完·朴箕和, 1982, 巨道鎂山 Fe-Cu 스킨 鎂床의 岩石鎂床學의 成因研究: 동력자원연구소 조사연구보고 14호, p.129-155.
 尹碩奎·朴商範, 1979, 太白山 鎂化帶 東西部 鉛亞鉛鎂床群의 一般特徵 및 探査에 關한 研究: 자원개발연구소 조사연구보고 7호, p.45-86.
 韓甲洙 1969, 蓮花鎂山의 地質과 鎂床: 鎂山地質 2卷, p.47-57.
 Burt, 1972a, Mineralogy and geochemistry of Ca-Fe-Si skarn deposits: unpub. Ph. D. thesis, Harvard Univ., 256 p.
 Burton, J. C., Taylor, L. A., and Chou, I. M., 1982, The fO_2 -T and fS_2 -T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite-Johanselite solid solutions: Econ. Geol., v. 77, p.764-783.
 Einaudi, M. T., and Burt, D. M., 1982. Introduction,

- terminology, classification, and composition of skarn deposits: *Econ. Geol.*, v. 77, p.745-754.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., and Newberry, R. J., 1981. Skarn deposits: *Econ Geol.*, 75th Ann. Vol., p.317-391.
- Farrar, E., Clark, A. H., and O. J. Kim, 1978. Age of the Sangdong tungsten deposits, Republic of Korea, and its bearing on the metallogeny of the southern Korean Peninsula: *Econ Geol.*, v. 73, p. 547-552.
- Gamble, R. P., 1982. An experimental study of sulfidation reactions involving andradite and hedenbergite: *Econ. Geol.*, v. 77, p.784-797.
- Gordon, T. M. and Greenwood, H. J., 1971. The stability of grossularite in H-O-CO mixture: *Am. Mineralogist*, v. 56, p.1674-1688.
- Haug, J. L. 1976. Geology of the Merry Widow and Kingfisher contact metasomatic skarn-magnetite deposits, northern Vancouver island, British Columbia: unpub. M. S. thesis, Univ. Calgary, 117 p.
- Helgeson, H. C., Delany, J. M., Nesbitt, H. W., and Bird, D. K., 1978. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals: *Am. Jour. Sci.*, v. 278A, p. 1-229.
- Holland, H. D., 1965. Some applications of thermochemical data to problems of ore deposits, II, Mineral assemblages and the compositions of ore-forming fluids: *Econ. Geol.*, v. 60, p. 1101-1166.
- Kim, O. J., 1971. Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenesis in South Korea: *Jour. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 4, p.1-9.
- Kitamura, K., 1975. Al-Fe partitioning between garnet and epidote from the contact metasomatic copper deposits of the Chichibu mine, Japan: *Econ. Geol.*, v. 70, p.725-738.
- Liou, J. G., 1974. Stability relations of andradite-quartz in the system Ca-Fe-Si-O-H: *Am. Mineralogist*, v. 59, p.1016-1025.
- Lusk, J., and Ford, C. E., 1978. Experimental extension of the sphalerite geobarometer to 10 Kbar: *Am. Mineralogist*, v. 63, p.516-519.
- Shimizu, M., and Iiyama, J. T., 1982. Zinc-lead skarn deposits of the Nakatatsu mine, Central Japan: *Econ. Geol.*, v. 77, p.1000-1012.
- Sweeney, M. J., 1980. Geochemistry of garnets from the north ore shoot, Bingham district, Utah: unpub. M. S. thesis, Univ. Utah, 154 p.
- Taylor, B. E., and Liou, J. G., 1978. The low-temperature stability of andradite in C-O-H fluids: *Am. Mineralogist*, v. 63, p.398-393.
- Uchida, E., and Iiyama, J. T., 1982. Physicochemical study of skarn formation in the Shinyama iron-copper ore deposits of the Kamaishi mine, northeastern Japan: *Econ. Geol.*, v. 79, p. 809-822.
- Yun, S., 1978. Petrography, chemical composition, and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I mine area, southeastern Taebaegsan region, Korea: *J. Geol. Soc. Korea*, v. 14, p.145-174.
- Yun, S., 1979a. Geology and skarn ore mineralization of the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea: unpub. Ph. D. thesis, Stanford Univ., California, 306 p.
- Yun, S., 1979b. Structural and compositional characteristics of skarn zinc-lead deposits in the Yeonhwa-Ulchin mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea, Part I, The Yeonhwa I Mine: *Jour. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 12, p. 51-73.
- Yun, S., 1979c. Structural and compositional characteristics of skarn zinc-lead deposits in the Yeonhwa-Ulchin mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea, Part II: The Yeonhwa II Mine: *Jour. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 12, p. 147-176.
- Yun, S., and M. T. Einandi, 1982. Zinc-lead skarns of the Yeonhwa-Ulchin district, South Korea: *Econ Geol.*, v. 77, p.1013-1032.
- Zharikov, V. A., 1970. Skarns: *Internat. Geology Rev.*, v. 12, p.541-559, 619-647, 760-775.