

## 뉴칼레도니아 니켈 라테라이트 광석 내 가니어라이트의 광물학적 특징

### Mineralogy of Garnierite from New Caledonian Ni Lateritic Ore

조 현 구(Hyen Goo Cho)<sup>1</sup> · 김 순 오(Soon-Oh Kim)<sup>1</sup> · 김 상 배(Sang Bae Kim)<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소

(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science,  
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부

(Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 뉴칼레도니아 Nakety, Kouaoua, Ouaco 니켈 라테라이트 광상에서 수입하는 가니어라이트 광석의 광물학적 특성을 광학현미경 관찰, X-선 회절 분석과 전자현미분석에 의하여 연구하였다. 녹색 가니어라이트 광석은 고질상, 세포상, boxwork 조직 등 지표 부근의 저온에서 침전에 의한 조직을 잘 나타낸다. 이 광석의 니켈 광석광물은 대부분 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물이며, 일부 리자다이트가 포함되어 있다. 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물 내 NiO의 함량은 Ouaco (평균 40.63%), Nakety (평균 28.58%), Kouaoua (평균 24.90%) 순이며, Mg를 치환하는 Ni 백분율은 43.5~85.0%이다. 암갈색 가니어라이트 광석은 세포상이나 boxwork 조직을 가지며, 주 니켈 광석광물은 리자다이트~니켈 리자다이트 계열 광물에 일부 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물로 구성된다. 리자다이트~니켈 리자다이트 계열 광물 내 NiO의 함량은 1.14~4.06 wt. %이며, Ni/(Mg+Ni) 백분율은 1.7~6.8%인데, 니켈의 함량이 낮은 이유는 팔면체 자리에서 Mg를 치환하는 Fe의 함량이 많은 것에 기인한다.

주요어 : 뉴칼레도니아, 니켈 라테라이트 광상, 가니어라이트, 활석-윌렘사이트 계열, 리자다이트

**ABSTRACT** : Mineralogical characteristics of garnierite ores from the Nakety, Kouaoua, and Ouaco Ni laterite deposits in New Caledonia are investigated using optical microscopy, powder X-ray diffractometer, and electron probe microanalyzer. Green garnierite ores have colloform, cellular, and boxwork texture, which are formed by precipitation under low temperature surface environment. They are mainly composed of Ni-bearing talc~willemseite series mineral and partly of lizardite. In Ni-bearing talc~willemseite series mineral, NiO contents are Ouaco (average 40.63%), Nakety (average 28.58%), and Kouaoua (average 24.90%), in descending order. Ni atomic percentage replacing Mg in octahedral site are 43.5~85.0%. Dark brown garnierite ores show cellular or boxwork texture, and consist of lizardite~Ni lizardite with some Ni-bearing talc~willemseite series mineral. Ni contents in lizardite~Ni lizardite are 1.14~4.06 wt. % and Ni atomic percentage replacing Mg in octahedral site 1.7~6.8%. Low NiO content in dark brown garnierite attributes to high Fe content replacing Mg in octahedral site.

**Key words** : New Caledonia, Ni laterite deposits, garnierite, talc-willemseite series, lizardite

\*교신저자: sbkim@kigam.re.kr

## 서 론

온도가 높고 습윤한 열대 지방에서 형성되는 토양인 라테라이트(laterite)는 알루미늄과 철이 풍부하므로 대체로 적색 계통을 띤다. 이 중 니켈을 많이 함유하는 것을 니켈 라테라이트 광상이라고 하는데, 이런 종류의 광상은 정마그마광상의 일종인 액체불혼합액광상과 더불어 니켈의 중요한 광상이다(Guilbert and Park, 1986).

니켈 라테라이트 광상은 감람석을 많이 함유한 초염기성암(dunite, peridotite, komatite)이나 사문석화된 감람암이 지표에서 풍화되고 니켈함유 용액이 지표 하부로 분리·침출되어 형성된 것으로서, 원 모암 내에는 0.3% 정도의 Ni이 포함되어 있지만 라테라이트 광석 내에는 1.5~2.5% 정도로 부화된다. 라테라이트 니켈 광상은 화학적 풍화작용이 왕성하게 일어나는 뉴칼레도니아, 쿠바, 인도네시아, 필리핀, 호주 등의 열대 및 아열대 지역에 주로 부존한다(Evans, 1987).

니켈 라테라이트 광상에서 산출되는 니켈 광석은 산화광석(oxidic ore)과 규산염광석(silicate ore) 등 2종류로 구분된다. 산화광석 또는 갈철광형 라테라이트 광석(limonite type laterites)은 모암 내에 존재하던 마그네슘과 규소 성분이 심하게 용탈된 결과 철(Fe) 성분이 매우 심하게 부화되어 있다. 주구성광물은 침철석(goethite)이며, 니켈의 평균 품위는 1~2%이다. 산화광석대는 지표 부근에 위치하고 있으므로, 침식에 의하여 제거되어 없는 광상도 있다. 규산염광석 또는 사프로라이트형 광석(saprolite type)은 갈철광형 광석 하부에 형성되며, 니켈의 평균 품위는 1.5~2.5%이다. 주구성광물은 녹색의 가니어라이트(garnierite)이다(Guilbert and Park, 1986; Evans, 1987).

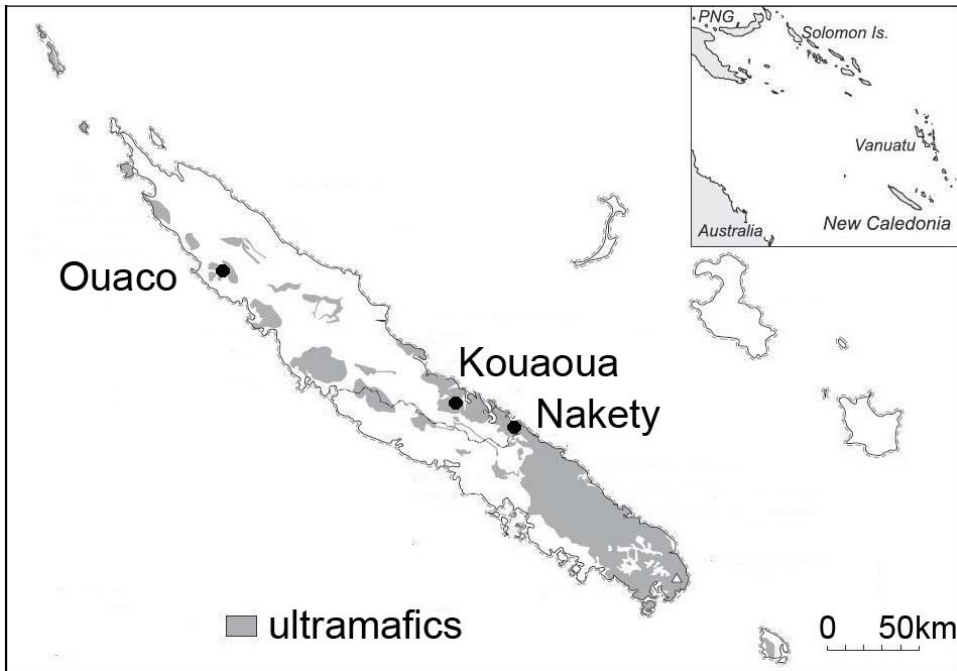
가니어라이트는 초염기성암이 풍화되고 사문석화된 곳에서 발견되는 녹색의 니켈 광석을 지시하는 용어로서, 대체로 맥상(vein)이나 pockets 형태로 존재한다. 이것은 하나의 광물종이 아니라, 사문석광물(serpentine), 활석(talc), 해포석(sepiolite), 녹니석(chlorite) 및 스멕타이트(smectite) 등 니켈-마그네슘 함유 규산염광물(Ni-Mg-hydrosilicates)의 혼합물이다(Brindley and Hang, 1973; Tauler et al., 2009; Wells et al., 2009). 가니어라이트는 Ni 사문석-네포우아이트(nepouite), 니켈을 함유하는 활석-윌렘사이트(willemseite), 해포석(sepiolite)-펠콘도아이트(falcondoite) 등 3가지 고용체 계열에

속하는 광물로 구분할 수 있으며, Ni 사문석-네포우아이트 계열은 삼팔면체형 1:1층 층상규산염광물로서, 7 Å 가니어라이트라고도 하며, 니켈을 함유하는 활석-윌렘사이트 계열은 삼팔면체형 2:1층 층상규산염광물로서, 10 Å 가니어라이트라고도 한다. 해포석-펠콘도아이트 계열은 삼팔면체형 2:1 역전 리본형(inverted ribbon) 층상규산염광물로서, 12 Å 가니어라이트라고도 한다. 이들은 대부분 결정도가 낮고, 독립적으로 존재하기도 하지만, 2 또는 3 계열이 매우 세립질로 치밀하게 공생하기도 한다(Brindley and Hang, 1973; Proenza et al., 2008, 2009).

뉴칼레도니아는 세계에서 가장 큰 가니어라이트 광상이 분포하는데, 라테라이트 니켈 광상이 19,000 km<sup>2</sup>인 섬의 1/3을 차지하며, 평균 심도는 약 20 m이다(그림 1). 뉴칼레도니아에 이처럼 거대한 니켈 가니어라이트 광상이 존재하는 이유는 습한 열대 기후, 모암의 사문석화, 풍화를 촉진하는 지질 구조(단층/절리) 및 이상적인 배수환경을 제공하는 지형 등 라테라이트 광상 생성한 유리한 많은 조건을 갖추고 있기 때문이다(Troly et al., 1979; Llorca and Monchoux, 1991). 이런 좋은 조건 때문에 일반적인 라테라이트 니켈 광상에서 니켈의 품위가 약 1.6%인데 반하여, 뉴칼레도니아의 니켈 광상은 Ni 2.5% 정도로 매우 높다(Evans, 1987). 뉴칼레도니아 니켈 광상의 생성 원인과 조건에 관해서는 많은 연구가 수행되었지만(Kühnel et al., 1978; Golightly, 1979, 1981; Schellman, 1983; Alcock, 1988; Brand et al., 1998; Elias, 2002; Gleeson et al., 2003; Dalvi et al., 2004; Freyssinet et al., 2005), 광물학적인 연구도 고로(Goro) 지역에 대한 연구(Wells et al., 2009) 이외에는 별로 없다.

우리나라의 니켈 광상은 강원 고성 지역, 경기도 포천-가평 지역, 경북 김천-성주 지역, 충남 홍성-연기 지역, 충북 음성 및 전북 남원-장수 지역 등에 분포하지만, 생산실적이 있었던 광산은 경북 성주의 금성 광산과 충남 홍성의 환선 광산 뿐이고, 현재 채광 중인 광산은 없다(서울대학교, 1998; 이현구 등, 2007). 니켈은 은백색의 금속광택을 지닌 금속으로써, 구조화폐, 스테인레스강, 생활도구, 항공기, 선박, 자동차, 우주선 등 여러 산업분야에 활용되며, 특히 우리나라의 6대 전략광종에 해당되므로 매우 중요한 자원에 속한다고 할 수 있다.

우리나라의 경우 니켈의 수요가 증가함에 따라 수입량이 증가하는 추세에 있으며, 그 대부분을 뉴



**Fig. 1.** Occurrences of ultramafic rocks in New Caledonia (after Llorca and Monchoux, 1991) and location of Nakety, Kouaoua, and Ouaco lateritic nickel deposits used in this study.

칼레도니아로부터 수입하고 있다(지식경제부, 2010). 그러나 이들 광석들에 관한 광물학적 연구는 광석의 경제성 여부를 평가하는 중요한 요인임에도 불구하고, 국내외 연구자들에 의하여 아직 이루어진 바가 없다. 이 연구의 목적은 현재 광양제철에서 수입하고 있는 뉴칼레도니아 가니어라이트 내 니켈을 포함하는 광석광물과 맥석광물의 종류를 감정하고, 니켈 함유광물의 광물학적 특성을 파악함으로써, 효율적인 선광과 제련을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

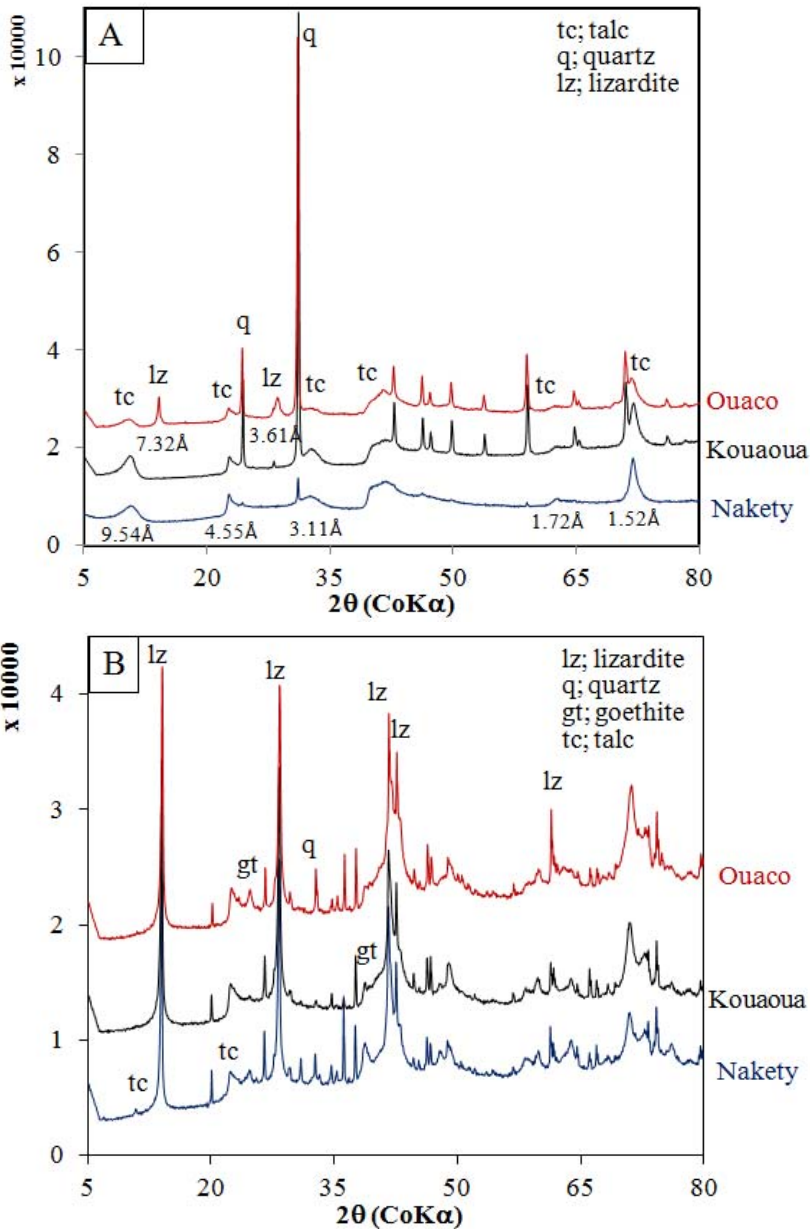
### 연구 재료 및 방법

이번 연구는 뉴칼레도니아 니켈 라테라이트 광상 중, Nakety, Kouaoua 및 Ouaco에서 수입된 가니어라이트 광석에 대하여(그림 1), 실제현미경 관찰을 통해 색에 따라 녹색과 암갈색 광석으로 구분하여 hand picking에 의하여 순수한 광석만을 선별한 후 추후 실험에 이용하였다.

분리된 광석 입자는 Petropoxy (Palouse Petro Products)를 이용하여 수지(resin)와 경화제(curing agent)를 10 : 1의 비율로 섞어 슬라이드 글라스

(slide glass) 위에 바른 후 분리된 시료를 얹고 굳힌 다음 연마박편(polished thin section)을 제작하였다. 제작된 연마박편을 이용하여 편광현미경, 광석현미경 관찰을 실시하여 그 광학적 특징을 조사한 후, 카본 코팅한 후 전자현미분석(Electron probe microanalysis)을 실시하여 원소의 이차원적인 분포와 정량화학분석을 실시하였다. 전자현미분석은 경상대학교 공동실험실습관이 보유하고 있는 JEOL JXA-8100 전자현미분석기를 이용하였으며, 직경 5  $\mu\text{m}$  전자빔을 이용하여 Ni, Mg, Mn, Fe, Co 등의 함량을 정량분석하였다.

검정색과 녹색 광석에 대하여 X-선 회절 분석(X-ray diffraction analysis)을 실시하여 광석을 이루는 광석광물과 맥석광물의 종류를 감정하였다. X-선 회절분석은 미국 퍼듀대학교 농학과에서 보유하고 있는 PanAnalytic 고분해능 X-선 회절분석기( $\text{CoK}\alpha = 1.7902 \text{ \AA}$ )를 이용하였으며, 분석조건은 40 kv/45 mA, 5~80° 2-theta 구간에서 주사간격 0.05°, 주사 시간 1초로 설정하여 연속 방식으로 회절값을 기록하였으며, 슬릿은 1.0-1.0-0.1°를 이용하였다.



**Fig. 2.** X-ray diffraction pattern of (A) green garnierite ore and (B) dark brown garnierite ore from New Caledonian Ni laterite deposits.

### 연구 결과 및 토론

#### 녹색 가니어라이트 광석

녹색 가니어라이트 광석은 실체현미경 하에서 연한 녹색에서 진한 녹색까지 색 변화가 있으며,

반사현미경 하에 어두운 노란색에서 밝은 노란색을 나타낸다. Nakety 산에서는 교질상(colloform) 조직, Kouaoua 시료에서는 세포상(cellular) 조직, 그리고 Ouaco 녹색 가니어라이트는 boxwork 조직을 관찰할 수 있는데, 이런 조직들은 모두, 낮은 온도에서 침전에 의하여 잘 형성된다(Guilber and

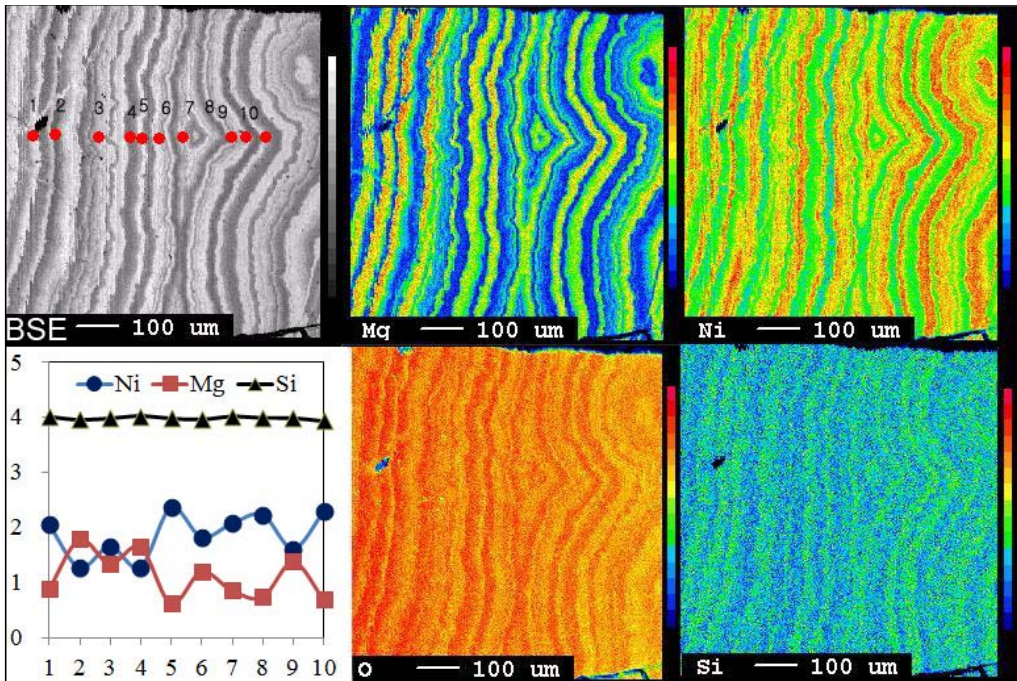


Fig. 3. Back-scattered electron image and X-ray maps showing the distribution of some elements in green garnierite ore from Nakety, showing colloform banding.

Park, 1986; Moon *et al.*, 2006).

녹색 가니어라이트 광석에 대한 X-선 회절분석 결과 Ni를 포함하는 광석광물은 활석(~월렘사이트)이 주를 이루며 리자다이트가 부분적으로 포함되어 있으며, 맥석광물로 석영과 녹니석 등이 포함되어 있음을 확인할 수 있다(그림 2). 대부분 시료에서 활석에 리자다이트가 매우 밀접하게 공생하여 산출되고 있다.

녹색 가니어라이트 광석을 전자현미분석기의 BSE (Back-scattered electron) 상(image)으로 관찰하면 밝은색과 어두운색이 매우 미세하게 교호하는 교질상 조직을 매우 잘 관찰할 수 있다(그림 3). 그림 3은 Nakety산 녹색 가니어라이트 주구성광물인 활석에 대하여 관찰한 것인데, 이 부분에 대하여 원소 분포 양상을 조사하면 밝은 부분에는 Ni가 많고, 대신 Mg가 적게 존재함을 알 수 있다. 어두운 부분은 이와 반대로 니켈이 적고 마그네슘이 많은 것을 알 수 있다. 이를 통하여 녹색 가니어라이트 광석의 주구성광물인 활석 내에서 Ni은 Mg와 같은 자리를 치환하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 변화 양상을 보다 확실하게 알아보기 위하여 정량

분석을 실시한 후, NiO의 함량과 사면체 자리 Si, 팔면체 자리 Mg 및 Ni 원자비를 그래프로 작성하였다. 그 결과 BSE상의 밝은 부분에서 NiO 함량은 34.34~37.99%, 어두운 부분에서는 21.23~30.11%로 현저하게 차이가 남을 알 수 있다. 산소수 11로 하여 원자비를 계산한 결과, 사면체 자리 Si 원자비는 거의 변화가 없지만 팔면체 자리의 Ni와 Mg는 서로 반비례로 변화함을 확인할 수 있다. Mg를 치환하는 Ni의 백분율은 밝은 부분에서 69.9~76.4%로 Mg의 2/3~3/4이 Ni로 치환되어 있는 반면에 어두운 부분에서는 41.5~55.0%로 Mg의 1/3~1/2만이 Ni로 치환되어 있다.

녹색 가니어라이트 광석의 주구성광물인 활석에 대하여 전자현미분석기를 이용하여 정량분석한 결과와 산소를 11개로 정하여 계산한 각 양이온들의 수치가 표 1에 제시되어 있다. 활석 내 NiO 함량은, Nakety에서는 22.34~36.66% (평균 28.58%), Kouaoua에서는 24.45~25.32% (평균 24.90%), Ouaco에서는 37.78~41.64% (평균 40.63%)이다. 이와 같은 분석치는 뉴칼레도니아 다른 광상에서 산출되는 10 Å 가니어라이트에 비하여 다소 높은

**Table 1.** Representative EPMA analysis of green garnierite ore

	Nakety								Kouaoua				Ouaco						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	54.34	54.18	54.93	55.12	53.85	52.54	52.35	53.46	52.60	50.01	50.18	49.75	53.18	46.86	48.18	46.32	48.98	48.77	47.71
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.00		0.02				0.02	0.03		0.03	0.02						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.65	0.60	0.02	0.04	0.02	2.18	1.91	0.03	2.87	2.07	2.59	1.58	0.21	0.55	0.48	0.38	0.71	0.42
FeO	0.20	0.35	0.36	0.02		0.04	0.39	0.37	0.02	0.03		0.03	0.05	0.60	0.37	0.34	0.33	0.47	0.83
MgO	15.69	14.68	14.51	12.84	12.26	10.74	9.54	8.52	6.63	13.04	13.83	13.14	13.13	4.37	4.21	4.78	4.74	4.04	3.98
MnO		0.08		0.05		0.05	0.02	0.04	0.04				0.03	0.03	0.10	0.02	0.02	0.08	0.04
NiO	22.34	24.69	25.79	27.74	27.78	30.11	30.27	31.86	36.66	24.45	24.87	24.97	25.32	37.78	40.80	41.01	41.25	41.30	41.64
CoO	0.02			0.05	0.06	0.04	0.07		0.01	0.01			0.04	0.04	0.01			0.01	0.03
CaO	0.18	0.16	0.19	0.01	0.10	0.07	0.18	0.14	0.09	0.30	0.20	0.28	0.40	0.03	0.32	0.28	0.22	0.22	0.37
Na <sub>2</sub> O	0.36	0.19	0.20	0.12	0.01	0.08	0.18	0.03	0.05	0.50	0.79	0.67	0.33	0.04		0.05	0.02	0.04	0.03
K <sub>2</sub> O	0.57	0.26	0.23	0.04	0.04	0.05	0.10	0.05	0.04	0.05	0.12	0.05	0.05	0.01			0.01		0.04
Total	94.44	95.28	96.81	96.01	94.15	93.72	95.25	96.37	96.20	91.29	92.06	91.54	94.12	90.04	94.46	93.27	96.01	95.60	95.04
	Numbers of cations on the basis of 11 oxygens																		
Si	3.92	3.92	3.92	3.99	3.99	3.97	3.89	3.94	3.99	3.79	3.79	3.78	3.90	3.91	3.87	3.80	3.86	3.87	3.84
Al <sup>IV</sup>	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	0.06	0.00	0.13	0.09	0.12	0.07	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
STet	3.95	3.95	3.95	3.99	3.99	3.97	3.99	4.00	4.00	3.92	3.88	3.90	3.97	3.92	3.89	3.82	3.88	3.90	3.86
Al <sup>VI</sup>								0.02											
Fe	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06
Mg	1.69	1.58	1.54	1.39	1.35	1.21	1.06	0.94	0.75	1.47	1.56	1.49	1.44	0.54	0.50	0.58	0.56	0.48	0.48
Mn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	1.30	1.44	1.48	1.61	1.65	1.83	1.81	1.89	2.24	1.49	1.51	1.53	1.49	2.54	2.63	2.70	2.62	2.63	2.69
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
Na	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.06	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOct	3.06	3.08	3.08	3.02	3.02	3.06	2.93	2.89	3.01	3.03	3.15	3.09	2.99	3.14	3.19	3.34	3.22	3.17	3.26
Ni/(Mg+Ni)	43.5	47.6	49.0	53.8	55.0	60.2	63.1	66.9	74.9	50.3	49.3	50.6	51.0	82.3	83.9	82.2	82.4	84.7	85.0
Ni/(Mg+Fe+Ni)	43.3	47.3	48.6	53.8	55.0	60.2	62.6	66.3	74.9	50.3	49.3	50.6	50.9	81.2	83.3	81.7	81.9	83.8	83.5

함량을 가지지만(Brindley and Hang, 1973; Manceau *et al.*, 1985; Llorca and Monchoux, 1991; Wells *et al.*, 2009), 남아프리카 바버튼(Barberton)에서 산출되는 월렘사이트와 잘 일치한다(De Waal, 1970). 철의 함량은 거의 대부분 시료에서 0.5% 이하인데, 이와 같은 함량은 뉴칼레도니아 다른 광상에서 산출되는 10 Å 가니어라이트의 분석값과 일치한다(Brindley and Hang, 1973; Manceau *et al.*, 1985; Wells *et al.*, 2009). 뉴칼레도니아 라테라이트 광상에서 산출되는 다른 중요 금속인 Co의 함량은 모두 0.01% 이하인데, 이를 통하여 분석된 시료는 Co가 많이 존재하는 심도보다는 깊은 곳에

서 채취된 것임을 알 수 있다(Llorca and Monchoux, 1991; Wells *et al.*, 2009).

활석의 결정구조 내 팔면체 자리 양이온인 Mg를 치환하는 Ni의 백분율은 Nakety에서는 43.5~74.9% (평균 54.1%), Kouaoua에서는 49.3~51.0% (평균 50.3%), Ouaco에서는 82.2~85.0% (평균 83.4%)이다. 일부 시료에서 스토이키오메트리(stoichiometry)에 맞지 않게 팔면체 양이온의 합이 3을 초과하는 것도 존재하는데, 이것은 가니어라이트를 구성하는 광물이 매우 세립질이고, 활석 가니어라이트 이외에 리자다이트 가니어라이트가 매우 치밀하게 공생하고 있기 때문인 것으로 판단된다



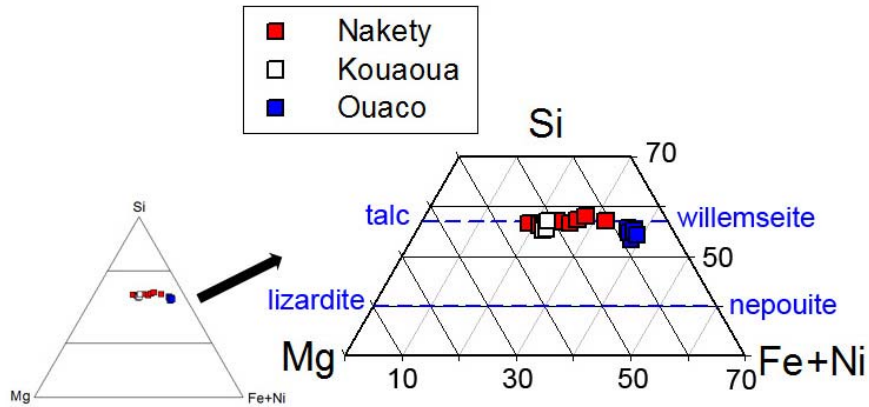


Fig. 4. The Si-Mg-(Fe+Ni) ternary diagram for green garnierite from New Caledonian Ni laterite deposits.

(Proenza *et al.*, 2008, 2009; Wells *et al.*, 2009). 정량분석된 결과를 이용하여 Si-Mg-(Fe+Ni) 삼각다이어그램에 도시하면 이들은 모두 Ni-bearing 활석 또는 윌렘사이트에 속하며(그림 4), 니켈의 함량은 Ouaco, Nakety, Kouaoua 순으로 높다.

#### 암갈색 가니어라이트 광석

암갈색 가니어라이트 광석은 대부분 진한 갈색을 나타내며, 녹색 가니어라이트 광석에 비하여 색의 변화가 적고 균질한 편이다. 반사현미경 하에서 밝은 회색을 가지며, 세포상~boxwork 조직을 보이는데, 이런 조직은 용탈에 의하여 재침전될 경우 특징적으로 형성되는 것이다.

분말 시료에 대한 X-선 회절분석 결과 광석광물은 사문석에 속하는 리자다이트이며, 맥석광물로 침침석(goethite)와 석영이 포함되어 있음을 알 수 있다(그림 2). 녹색 가니어라이트 광석의 주구성광물인 활석이 암갈색 가니어라이트에도 포함되어 있는 경우가 많다.

암갈색 가니어라이트 내 주광석광물인 리자다이트를 전자현미분석기의 BSE상으로 관찰하면 어두운색 바탕 안에 밝은색 부분이 섬처럼 분포하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 세포상 조직이나 boxwork 조직의 일종에 속한다(그림 5). Kouaoua산 암갈색 가니어라이트의 주구성광물인 리자다이트에 대하여 원소 분포 양상을 조사하면 녹색 가니어라이트 광석의 주구성광물인 활석에서와 같이 밝은 부분에는 Ni가 많고, 대신 Mg가 적게 존재하고, 어두운 부분은 이와 반대로 니켈이 적고 마그네슘이 많

은 것을 알 수 있다. Fe 성분은 Mg 성분과 반대로 거동함을 알 수 있다. 이를 통하여 이 광물 내에서 Ni은 Fe와 더불어 Mg와 같은 자리를 치환하고 있음을 알 수 있다.

암갈색 가니어라이트 광석의 주구성광물인 리자다이트에 대하여 전자현미분석기를 이용하여 정량 분석한 결과와 산소를 7개로 정하여 계산한 각 양이온들의 수치가 표 2에 제시되어 있다. 리자다이트 내 NiO의 함량은 Nakety에서는 1.14~1.56% (평균 1.37%), Kouaoua에서는 2.02~4.27% (평균 3.00%), Ouaco에서는 2.44~4.06% (평균 2.83%)이다. 거의 모든 시료에서 SiO<sub>2</sub>, FeO, MgO, NiO 이외의 함량은 1% 이하로 소량 존재한다. 이와 같은 분석치는 뉴칼레도니아 다른 광상에서 산출되는 7 Å 가니어라이트에 비하여 다소 낮은 함량을 지시하는데(Brindley and Hang, 1973; Brindley and Wan, 1975; Manceau *et al.*, 1985; Llorca and Monchoux, 1991; Wells *et al.*, 2009), 그 이유는 다른 광상에 비하여 철의 함량이 높거나 원모암 내 모광물 성분의 차이에 기인한 것으로 여겨진다.

일부 시료에서 화학양론(stoichiometry)에 맞지 않게 사면체 양이온의 합이 2를 초과하는 것도 있는데, 이것은 석영과 같은 불순물이 매우 세립질로 포함되어 있기 때문인 것으로 여겨진다(Proenza *et al.*, 2008, 2009). 또한 팔면체 양이온의 합이 3을 초과하는 것도 존재하는데, 가니어라이트를 구성하는 광물이 매우 세립질이므로, 리자다이트 가니어라이트 이외에 활석 가니어라이트가 매우 치밀하게 공생하고 있기 때문인 것으로 판단된다(Proenza

**Table 2.** Representative EPMA analysis of dark brown garnierite ore

	Nakety					Kouaoua							Ouaco						
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	41.66	41.26	42.18	42.60	42.69	40.01	41.44	40.18	39.52	39.34	39.32	40.24	40.57	39.90	40.58	41.97	40.79	42.41	40.96
TiO <sub>2</sub>						0.01	0.01				0.01								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.28	0.22	0.22	0.16	0.07	0.57	0.06	0.15	0.19	0.16	0.44	0.59	0.60	0.47	0.53	0.61	0.12	0.44
FeO	6.59	6.72	6.82	7.29	6.99	6.02	3.08	4.95	7.55	7.61	8.57	3.98	8.74	8.19	8.15	8.74	8.46	6.15	5.25
MgO	35.50	34.93	33.80	34.47	34.50	37.14	38.22	36.57	33.50	32.63	31.69	35.82	33.29	34.68	33.89	33.99	33.24	34.04	32.73
MnO	0.01	0.02	0.02	0.07	0.07	0.03	0.07	0.00	0.89	0.05	0.08	0.03	0.08	0.06	0.05	0.04	0.09	0.98	0.09
NiO	1.14	1.20	1.45	1.47	1.56	2.02	2.17	2.34	2.63	4.26	4.27	3.31	2.44	2.44	2.50	2.59	2.82	2.96	4.06
CoO	0.03		0.02	0.05	0.02	0.05	0.02	0.04	0.07	0.02	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06	0.03	0.04	0.10	0.03
CaO	0.15	0.10	0.15	0.14	0.13	0.04	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.02	0.02	0.01	0.05	0.03	0.05	0.07
Na <sub>2</sub> O				0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.03		0.03			0.04	0.02			0.01	
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02	0.02			0.02			0.01	0.00				0.01	0.00
Total	85.23	84.54	84.68	86.35	86.12	85.42	85.67	84.22	84.38	84.18	84.29	83.94	85.79	85.98	85.72	87.93	86.08	86.84	83.64
	Numbers of cations on the basis of 7 oxygens																		
Si	3.92	3.92	3.92	3.99	3.99	3.97	3.89	3.94	3.99	3.79	3.79	3.78	3.90	3.91	3.87	3.80	3.86	3.87	3.84
Al <sup>IV</sup>	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	0.06	0.00	0.13	0.09	0.12	0.07	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
STet	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3.95	3.95	3.95	3.99	3.99	3.97	3.99	4.00	4.00	3.92	3.88	3.90	3.97	3.92	3.89	3.82	3.88	3.90	3.86
Al <sup>VI</sup>								0.02											
Fe	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06
Mg	1.69	1.58	1.54	1.39	1.35	1.21	1.06	0.94	0.75	1.47	1.56	1.49	1.44	0.54	0.50	0.58	0.56	0.48	0.48
Mn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	1.30	1.44	1.48	1.61	1.65	1.83	1.81	1.89	2.24	1.49	1.51	1.53	1.49	2.54	2.63	2.70	2.62	2.63	2.69
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
Na	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.06	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOct	3.06	3.08	3.08	3.02	3.02	3.06	2.93	2.89	3.01	3.03	3.15	3.09	2.99	3.14	3.19	3.34	3.22	3.17	3.26
Ni/(Mg+Ni)	43.5	47.6	49.0	53.8	55.0	60.2	63.1	66.9	74.9	50.3	49.3	50.6	51.0	82.3	83.9	82.2	82.4	84.7	85.0
Ni/(Mg+Fe+Ni)	43.3	47.3	48.6	53.8	55.0	60.2	62.6	66.3	74.9	50.3	49.3	50.6	50.9	81.2	83.3	81.7	81.9	83.8	83.5

*et al.*, 2008, 2009; Wells *et al.*, 2009).

리자다이트의 결정구조 내 팔면체 자리 양이온인 Mg를 치환하는 Ni의 백분율은 Nakety에서는 1.7~2.4% (평균 2.1%), Kouaoua에서는 2.8~6.8% (평균 4.5%), Ouaco에서는 3.7~6.3% (평균 4.4%)이다. 정량분석된 결과를 이용하여 Si-Mg-(Fe+Ni) 삼각다이아그램에 도시하면 이들은 모두 순수한 리자다이트 또는 Ni-bearing 리자다이트에 속한다 (그림 6). 암갈색 가니어라이트 내 Ni의 함량이 예상보다 훨씬 적게 포함된 이유는 Ni과 함께 팔면체 자리 Mg를 치환하는 또 다른 금속인 Fe에 기인한 것으로 생각된다. 녹색 가니어라이트의 경우

Fe의 함량이 광상에 관계없이 모두 1.0% 이하인데 반하여, 암갈색 가니어라이트에서는 Fe 함량이 3% 이상 9%까지 존재한다. 즉 녹색 가니어라이트에서는 Ni이 Mg를 치환하지만, 암갈색 가니어라이트에서는 Ni 대신 Fe가 Mg를 치환한 것으로 판단되기 때문에 녹색 가니어라이트에서 Ni 함량이 높고, 암갈색 가니어라이트에서는 Ni 함량이 매우 낮은 결과가 초래된 것으로 여겨진다.

도미니카공화국에서 산출되는 가니어라이트의 안정도를 연구한 결과에 의하면, 3종류의 가니어라이트 형성을 규제하는 요인 중의 하나로 Si 활동도를 제시하고 있다(Gali *et al.*, 2009). 이에 따르면 뉴



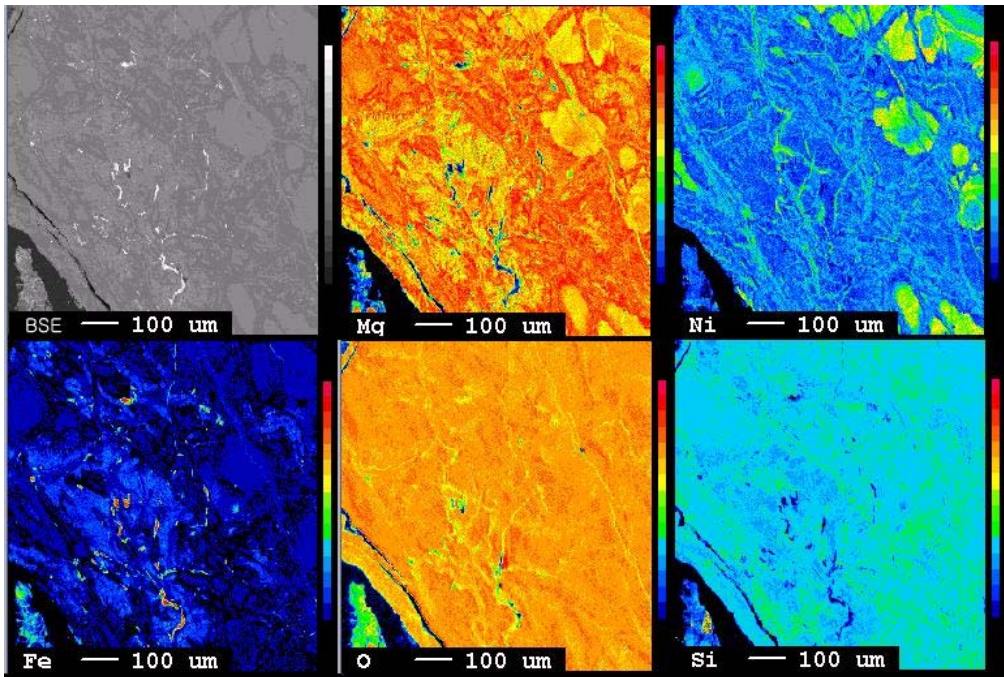


Fig. 5. Back-scattered electron image (BSE) and X-ray maps showing the distribution of some elements in dark brown garnierite ore from Kouaoua, showing boxwork texture.

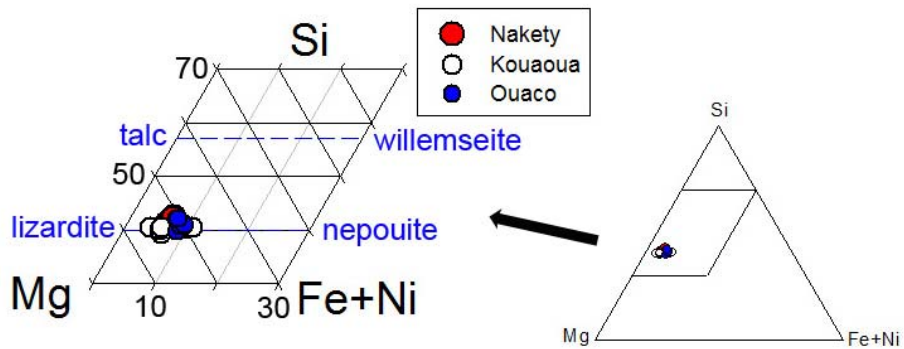


Fig. 6. The Si-Mg-(Fe+Ni) ternary diagram for dark brown garnierite from New Caledonian Ni laterite deposits.

칼레도니아 니켈 라테라이트 광상에서 산출되는 녹색 가니어라이트는 암갈색 가니어라이트에 비하여 높은 Si 활동도 조건에서 형성된 것으로 여겨진다.

### 결론

이번 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 뉴칼레도니아 니켈 라테라이트 광상인 Nakety,

Kouaoua, Ouaco에서 산출되는 가니어라이트 광석은 녹색 광석과 암갈색 광석으로 구분된다.

2) 녹색 가니어라이트 광석은 대부분 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물로 구성되며, 일부 리자다이트가 포함되어 있다. 전자현미분석을 통하여 연구한 결과 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물 내 NiO의 함량은 Ouaco (평균 40.63%), Nakety (평균 28.58%), Kouaoua (평균 24.90%) 순이며,

Ni/(Mg+Ni) 백분율은 43.5~85.0%이다.

3) 암갈색 가니어라이트 광석은 순수한 리자다이트~니켈 리자다이트 계열에 속하며, 일부 니켈 함유 활석~윌렘사이트 계열 광물이 포함되어 있다. 리자다이트~니켈 리자다이트 계열 광물 내 NiO의 함량은 1.14~4.06 wt. %이며, Ni/(Mg+Ni) 백분율은 1.7~6.8%이다. 니켈의 함량이 낮은 이유는 많은 양의 Fe가 Mg를 치환한 것에 기인한다.

4) 가니어라이트 광석 내 교질상, 세포상, box-work 조직 등은 이들이 지표 부근 저온에서 용탈 후 재침된 것임을 지시한다.

## 사 사

이번 연구는 한국지질자원연구원의 ‘해외 금속광물 개발을 위한 활용기술’의 위탁과제(뉴칼레도니아 산 니켈 광의 광물학적/광상학적 특성 평가)로서 수행되었다. 연구비를 지원하여 준 한국지질자원연구원에 대하여 감사드립니다. X선회절분석기 사용을 허가해준 퍼듀대학교 Cliff Johnston 교수와 Darrell Schultz 교수, 그리고 전자현미분석 시 적극적으로 도와준 경상대학교 공동실험실습관 정종욱 박사에게 감사드립니다. 빈약한 원고를 열심히 읽고 좋은 지적을 하여 보다 나은 원고를 만들어주신 김건영 박사님과 익명의 심사자에게도 감사를 드립니다.

## 참고문헌

서울대학교 (1998) 니켈-코발트 광상. 서울대학교 대학원 지질학과 광상학 연구실(편), 한국의 광상. 박희인 교수 정년퇴임기념논문집. 143-145.

이현구, 문희수, 오민수 (2007) 한국의 광상. 니켈 광상. 아카넷, 398-401.

지식경제부 (2010) 2009년 광산물 수급현황.

Alcock, R.A. (1988) The character and occurrence of primary resources available to the nickel industry. In: Tyroler, G.P. and Landolt, C.A. (eds.), *Extractive metallurgy of copper, nickel and cobalt*, Metallurgical Society, 117th TMS Annual Meeting Proceedings, Phoenix, Arizona, 67-89.

Brand, N.W., Butt, C.R.M., and Elias, M. (1998) Nickel laterites: classification and features. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.*, 17, 81-88.

Brindley, G.W. and Hang, P.T. (1973) The nature of garnierites - I structures, chemical compositions and color characteristics. *Clays Clay Minerals*, 21, 27-40.

Brindley, G.W. and Wan, H.M. (1975) Compositions, structures, and thermal behaviour of nickel-containing minerals in the lizardite-nepouite series. *Am.*

*Mineral.*, 60, 863-871.

Dalvi, A.D., Bacon, W.G., and Osborne, R.C. (2004) The past and the future of nickel laterites. In: PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange, March 7-10, 1-27.

De Waal, S.A. (1970) Nickel minerals from Barnerton, South Africa: III. Willemsite, A nickel-rich talc. *Amer. Mineral.*, 55, 31-42.

Elias, M. (2002) Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: Cooke, D.R. and Pongratz, J. (eds.), *Giant ore deposits: characteristics, genesis and exploration*, CODES Special Publication 4, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, 205-220.

Evans, A.M. (1987) *Introduction to Ore Geology* (2nd Ed.). Blackwell Publishing, 358p.

Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C., and Pianzone, P. (2005) Ore-forming processes related to laterite weathering. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 681-722.

Gali, S., Soler, J.M., Proenza, J.A., Lewis, F., Tauler, E., and Labrador, M. (2009) Stability of “garnierites” in the Falcondo nickel lateritic deposit, Dominican Republic. *Macla*, 11, 89-90.

Gleeson, S.A., Butt, C.R.M., and Elias, M. (2003) Nickel laterites: a review. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 54, 9-16.

Golightly, J.P. (1979) Nickeliferous laterites: a general description. In: Evans D.J.I. et al. (eds.), *International Laterite Symposium*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., 3-23.

Golightly, J.P. (1981) Nickeliferous laterite deposits. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, 710-735.

Guilbert, J.M. and Park, Jr., C.F. (1986) *The geology of Ore Deposits*. W.H. Freeman & Company, New York, 985p.

Kühnel, R.A., Roorda, H.J., and Steensma, J.J.S. (1978) Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. In: *Colloquium on the mineralogy, geochemistry and geology of lateritic nickel-bearing minerals and ores*, Orleans. *Bull. BRGM* (2), 3, 191-206.

Llorca, S. and Monchoux, P. (1991) Supergene cobalt minerals from New Caledonia. *Can. Mineral.*, 29, 149-161.

Manceau, A. and Calas, G. (1985) Heterogeneous distribution of nickel in hydrous silicates from New Caledonian ore deposits. *Am. Mineral.*, 70, 549-558.

Moon, C.J., Whateley, M.K.G., and Evans, A.M. (2006) *Introduction to Mineral Exploration* (2nd

- Ed.). Blackwell Publishing, 481p.
- Proenza, J.A., Lewis, J.F., Gali, S., Tauler, E., Labrador, M., Melgarejo, J.C., Longo, F., and Bloise, G. (2008) Garnierite mineralization from Falcondo Ni-laterite deposit (Dominican Republic). *Macla*, 9, 197-198.
- Proenza, J.A., Garcia-Casco, A., Lewis, J.F., Gali, S., Tauler, E., Labrador, M., Melgarejo, J.C., Longo, F., and Bloise, G. (2009) Textural relations and mineral compositions of garnierite ores using X-ray images. *Macla*, 11, 155-156.
- Schellman, W. (1983) Geochemical principles of lateritic nickel ore formation. In: Melfi, A.J. and Carvalho, A. (eds.), *Proceedings of the II International Seminar on Lateritisation Processes*, Sao Paulo, Brazil, 1982, 119-135.
- Tauler, E., Proenza, J.A., Gali, S., Lewis, J.F., Labrador, M., Garcia-Romero, E., Suarez, M., Longo, F., and Bloise, D.G. (2009) Ni-sepiolite-falcondoite in garnierite mineralization from the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Clay Minerals*, 44, 435-454.
- Troly, G., Esterle, M., Pelletier, B., and Reibell, W. (1979) Nickel deposits in New Caledonia, some factors influencing their formation. In: Evans, D.J.I. *et al.* (eds.), *International Laterite Symposium*, New Orleans, Louisiana, 19-21 February, New York, Society of Mining Engineers, 85-119.
- Wells, M.A., Ramanaidou, E.R., Verrall, M., and Tessarolo, C. (2009) Mineralogy and crystal chemistry of “garnierites” in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia. *Eur. J. Mineral.*, 21, 467-483.
- 
- 접수일(2011년 11월 9일), 수정일(1차 : 2011년 11월 20일),  
게재확정일(2011년 11월 24일)