



## 전 세계 Ni 광상의 유형별 지질환경

유 봉 철

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

니켈은 철보다 단단한 은백색이고 주기율표 10족에 속하는 강자성 금속원소로서 산화와 부식에 강한 것으로 잘 알려져 있다. 니켈은 전략 비축광물에 해당되며 스테인리스강, 특수 합금강, 도금, 가전제품, 공구, 열교환기, 화폐, 비행기 터빈의 날개, 엔진 피스톤 등에 주로 사용되어 왔지만 최근에는 니켈카드뮴전지 및 니켈 수소건전지 등에도 많이 사용되는 필요한 산업 소재로 최근 3년간 국제 가격이 세 배나 올랐다. 우리나라는 중국, 일본, 미국에 이어 세계 네 번째 니켈 수요 국가이다. 또한 최근 포스코는 니켈 제련공장을 준공하여 한해 우리나라에서 소비되는 니켈 수요의 절반 정도를 자급할 수 있게 되었다.

한국광물자원공사(구 대한광업진흥공사)는 2006년 국내의 4개 기업과 컨소시엄을 구성해 세계 3대 니켈 광산의 하나인 아프리카 마다가스카르의 암바토비 광산 개발에 참여하고 있다. 지식경제부(구산업자원부)에 의하면 이 광산은 매장량 1억 2500만톤 정도이며 2010년 개발이 끝나면 연간 최대 6만톤의 니켈을 생산할 예정이다. 이 생산량은 뉴칼레도니아의 SLN(연산 7만 8000톤), 인도네시아의 소로아코(6만 2000톤)에 이어 세계 3위에 해당된다. 세계 니켈 수요는 연평균 5.4% 증가할 것으로 전망이며 이에 따라 중국, 일본 등 주요 국가들이 니켈 광산을

확보하기 위해 치열한 경쟁을 벌이고 있다고 지식경제부(구 산업자원부)는 설명했다. 지식경제부(구 산업자원부)에 의하면 해외자원개발이라 함은 국외에서 대통령령이 정하는 광물, 농·축산물, 수산물 및 임산물을 의미하며 해외자원개발을 해외자원개발사업법 제3조의 규정에 의한 방법에 따라 개발하는 것을 말한다. 현재 신고된 사업 진행현황은 192건이며 니켈을 통한 사업 진행 현황은 1)호주 화이트클리프 니켈 탐사 사업, 2)통가리티모르, 3)암바토비 및 4)뉴칼레도니아 등이 있다. 우리나라의 니켈광상은 강원도 고성지역(수동, 동양), 경기도 포천(가포), 가평지역(가평), 경북 김천-성주지역(삼광, 금성), 충남 홍성-연기지역(환선, 청람), 충북 음성(금왕) 및 전북 남원-장수지역(죽산, 산내) 등에서 니켈을 채굴하였으나 지금은 전무한 실정이다.

따라서 여기에서는 일부 환경지질정보에 발표된 것과 최근을 자료를 종합하여 니켈 광상의 유형별 지질환경에 대해 기술하고자 한다.

### 니켈광상의 유형 및 지질환경

니켈의 전세계 매장량은  $130 \times 10^6$  톤이며 주로 니켈은 laterite형 광상과 sulfide형 광상에

주로 산출되며 상당량의 니켈이 해저(태평양, 인도해양)에 망간단괴(매장량  $290 \times 10^6$  톤)와 함께 존재한다(그림 1). laterite형 광상은 니켈 매장량의 60%에 해당되고 주로 남미, 북중미, 동남아시아 및 오세아니아에서 주로 산출되고 sulfide형 광상은 니켈 매장량의 40%에 해당되며 북미, 아프리카, 오세아니아 및 북유럽에서 주로 산출된다.

laterite형 광상은 적도 양쪽 위도  $22^\circ$ 까지 주로 분포하며 인도네시아, 뉴칼레도니아, 브라질 및 필리핀 등이다. 이 지역은 습윤열대기후이며 지체구조적으로 활동성 판충돌대에 해당된다(Elia, 2002). 이런 지구조 환경에서 대규모 상승 오피올라이트 판들(obducted ophiolite sheets)이 지표에 노출되어 강한 화학적 풍화를 받아 니켈 laterite형 광상이 형성된다. 이때 laterite형 광상의 형성에 규제되는 요소는 모암의 암석학, 지구조환경, 풍화시간, 고기후역사 및 지형 등이다(Freyssinet et al., 2005).

sulfide형 광상은 다양한 지체구조환경과 시

생대로부터 페름기 및 트라이아스기까지 폭넓은 지질시대를 갖는다. 이 sulfide형 광상은 지체구조환경상 코마티아이트(komatiites)형 광상, tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상, 범람현무암(flood basalts)과 관련된 관입암체형 광상, 운석흔(astrobleme)형 광상 및 열수재이동(hydrothermal-remobilized)형 광상으로 분류된다(Hoatson et al., 2006). 또한 Naldrett(1997)에 의하면 마그마성 니켈 sulfide 광상은 1)열개된 대륙주변부(rifted continental margins), 2)지괴-내륙(cratonic-intracontinental) 환경, 3)활동성 조산대(active orogenic belts) 및 4)동시성화산 그린스톤대(synvolcanic greenstone belts)로 분류하였다. sulfide형 광상에서 산출되는 황화광물은 주로 자류철석, 펜틀란드이트(pentlandite) 및 황동석이다. 이들 광상에서 산출되는 주 광종은 니켈, 코발트 및 백금속원소인 반면, 금, 은, 크롬 및 연 등은 소량 함유된다.

니켈의 매장량(laterite형 광상 + sulfide형 광상)은 호주(36%), 뉴칼레도니아(11%), 러시아

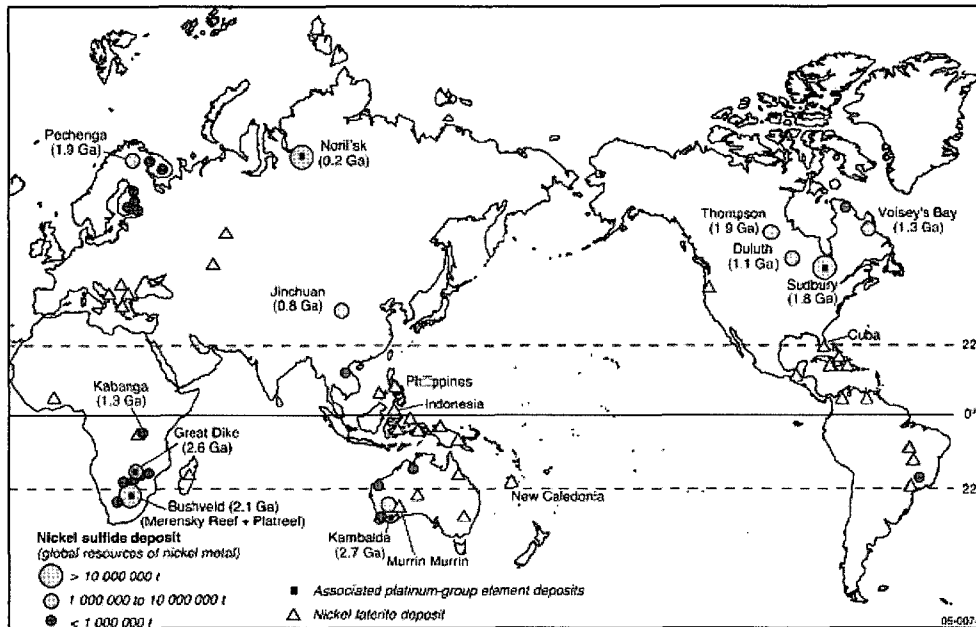


그림 1. World distribution of significant sulfide and laterite nickel deposits(Hoatson et al., 2006).

기술동향 (유병철)

(10%), 쿠바(8%), 캐나다(7%), 브라질(7%), 남아프리카공화국(6%), 인도네시아(5%), 중국(2%), 도미니카 공화국(1%), 콜롬비아(1%), 그리스(1%), 보츠와나 공화국(1%), 필리핀(1%), 베네수엘라(1%) 및 기타국가(3%) 등으로 호주, 뉴칼레도니아 및 러시아 등이 대부분을 차지한다(그림 2). 또한 니켈광산 생산량을 살펴보면, 러시아(19%), 캐나다(16%), 호주(11%), 인도네시아(9%), 뉴칼레도니아(7%), 콜롬비아(6%), 필리핀(5%), 중국(5%), 쿠바(5%), 브라질(5%), 남아프리카공화국(3%), 도미니카 공화국(3%), 보츠와나 공화국(2%), 그리스(1%), 짐바브웨(1%), 베네수엘라(1%) 및 기타국가(2%) 등으로 러시아, 캐나다 및 호주 등이 대부분을 차지한다(그림 2).

특히, sulfide형 광상의 매장량은 캐나다( $28.4 \times 10^6$  톤), 러시아( $27.5 \times 10^6$  톤), 호주( $12.9 \times 10^6$  톤), 남아프리카공화국( $12.9 \times 10^6$  톤), 미국( $8 \times 10^6$  톤), 짐바브웨( $5.9 \times 10^6$  톤), 중국( $5.5 \times 10^6$  톤) 및 핀란드( $0.23 \times 10^6$  톤)이다. 여기에 laterite형 광상의 매장량까지 포함할 경우, 호주는 전세계 니켈 매장량의 37%를 차지하며 다음으로 러시아(10%), 쿠바(9%) 및 캐나다(7%) 순이다(Hoatson et al., 2006). 광상 성인과 관련하여 전세계 및 호주에서의 sulfide형 광상

라(1%) 및 기타국가(2%) 등으로 러시아, 캐나다 및 호주 등이 대부분을 차지한다(그림 2). 특히, sulfide형 광상의 매장량은 캐나다( $28.4 \times 10^6$  톤), 러시아( $27.5 \times 10^6$  톤), 호주( $12.9 \times 10^6$  톤), 남아프리카공화국( $12.9 \times 10^6$  톤), 미국( $8 \times 10^6$  톤), 짐바브웨( $5.9 \times 10^6$  톤), 중국( $5.5 \times 10^6$  톤) 및 핀란드( $0.23 \times 10^6$  톤)이다. 여기에 laterite형 광상의 매장량까지 포함할 경우, 호주는 전세계 니켈 매장량의 37%를 차지하며 다음으로 러시아(10%), 쿠바(9%) 및 캐나다(7%) 순이다(Hoatson et al., 2006). 광상 성인과 관련하여 전세계 및 호주에서의 sulfide형 광상

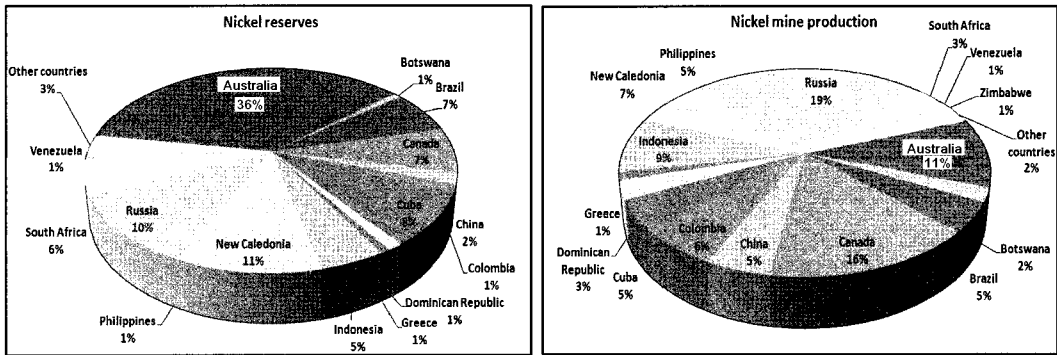


그림 2. Metal reserves and mine production diagrams of the World(USGS, 2008).

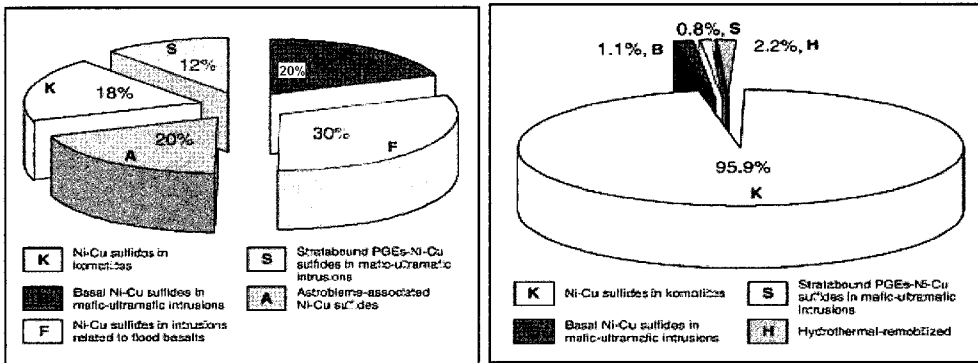


그림 3. Resources of nickel metal by types of nickel sulfide deposits in the World and Australia (Hoatson et al., 2006).

에 대한 비율은 그림 3과 같다.

이 그림에서 보는 것과 같이 전세계의 니켈 sulfide형 광상에서 성인적으로 니켈금속의 매장량은 tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암 체형 광상(32%; basal Ni-Cu sulfides(20%), stratabound PGEs-Ni-Cu sulfides(12%)), 범람현무암과 관련된 관입암체형 광상(30%), 운석흔형 광상(20%) 및 코마티아이트형 광상(18%)이고 호주의 경우는 코마티아이트형 광상(95.9%), 열수재이동형 광상(2.2%) 및 tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상(1.9%; basal Ni-Cu sulfides(1.1%), stratabound PGEs-Ni-Cu sulfides(0.8%)이다. 또한 전세계에서 코마티아이트형 광상과 관련된 대표적인 광화대는 서호주의 Eastern Goldfields 광화대(63%), 캐나다의 Thompson 광화대(22%), 캐나다의 Abitibi 광화대(6%), 캐나다의 Cape Smith 광화대(4%), 짐바브웨의 짐바브웨 광화대(3%) 및 서호주의 Southern Cross 광화대(2%) 등이 있다.

sulfide형 광상 중에 전세계 및 호주의 대표적인 니켈금속의 매장량은 그림 4와 같다.

이 그림에서 보는 것과 같이 각 광상의 니켈금속의 매장량은 Noril'sk 광상( $23.1 \times 10^6$  톤), Sudbury 광상( $19.8 \times 10^6$  톤), Duluth 광상( $8.0 \times 10^6$  톤), Platreef 광상( $6.5 \times 10^6$  톤), Merensky Reef 광상( $6.3 \times 10^6$  톤), Jinchuan 광상( $5.5 \times 10^6$  톤), Great Dike 광상( $5.4 \times 10^6$  톤), Pechenga 광상( $4.0 \times 10^6$  톤), Thompson 광상( $3.5 \times 10^6$  톤), Mt Keith 광상( $3.4 \times 10^6$  톤), Perseverance 광상( $2.5 \times 10^6$  톤), Voisey's Bay 광상( $2.2 \times 10^6$  톤), Yakabindie 광상( $1.7 \times 10^6$  톤), Kambalda 광상( $1.4 \times 10^6$  톤), Honeymoon Well 광상( $1.0 \times 10^6$  톤) 등이다. 광상 성인과 관련하여 Noril'sk 광상과 Duluth 광상은 범람현무암(flood basalts)과 관련된 관입암체형 광상에 해당되며 Sudbury 광상은 운석흔(astrobleme)형 광상에 해당된다. Platreef 광상, Jinchuan 광상, Pechenga 광상, Voisey's Bay 광상,

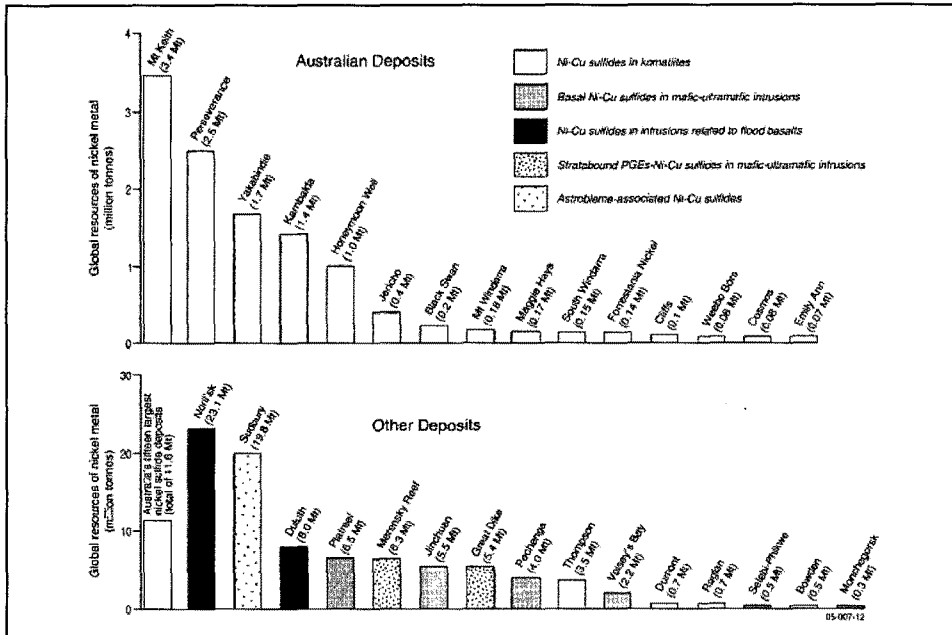


그림 4. Histogram comparing the global resources of nickel metal for World's and Australia's deposits(Hoatson et al., 2006).

Merensky Reef 광상 및 Great Dike 광상은 tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상에 해당되며 Thompson 광상, Mt Keith 광상, Perseverance 광상, Yakabindie 광상, Kambalda 광상 및 Honeymoon Well 광상은 코마티아이트(komatiites)형 광상에 해당된다. 이들 광상에 대한 니켈 품위는 0.1~10% 정도이다. 일부 코마티아이트(komatiites)형 광상(Cosmos, Prospero, Long, Victor, Black Swan 광상)들은 높은 품위(5~9% Ni)를 갖는다.

sulfide형 광상의 생성시기를 살펴보면, 코마티아이트(komatiites)형 광상(3000~1877 Ma), tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상(2927~140 Ma), 범람현무암(flood basalts)과 관련된 관입암체형 광상(1120~251 Ma) 및 운석흔(astrobleme)형 광상(1850 Ma)이나 대부분 3000~2700 Ma와 2060~1844 Ma 시기에 집중되어 산출된다. 일반적으로 코마티아이트(komatiites)형 광상과 tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상과 관련된 마그마의

가장 중요한 성인 규제 요소는 1)마그마내 다량의 광석 금속들 함유, 2)마그마의 황화광물 포화상태, 3)다른암석들과 반응하는 마그마의 수용력(예, 온도, 점성도, 휘발성분 함유도, 마그마 정치심도의 역학, 모암의 성질)이다(Arndt et al., 2005). 한 예로, 고온이며 점성도가 낮은 코마티아트와 tholeiitic picrite는 상대적으로 온도가 낮고 휘발성물질이 다량 함유된 알칼리 picrite나 현무암보다 Ni-Cu±PGE sulfide형 광상을 형성할 수 있는 잠재성이 높은 근원 암체이다.

니켈에 대해 새로이 2010년부터 2020년 이전까지 sulfide형 광상과 laterite형 광상에 대한 프로젝트를 소개하면 표 1 및 2와 같다.

이들 도표에서 보는 것과 같이, sulfide형 광상의 프로젝트는 주로 호주, 캐나다 및 미국이며 laterite형 광상의 프로젝트는 호주, 인도네시아, 필리핀, 파푸아뉴기니아 등이다.

표 1. New sulfide projects scheduled for completion, by year, before 2020

Projected year of first production	Country and state/province	Project and company	Resource grade (% nickel)	Estimated resources (thousands) <sup>1)</sup>	Annual production capacity(of contained nickel)	Nickel product
2010	Australia (Western Australia)	Yakabindie BHP Billiton Plc	0.58	290,000	40,000	-
2010	United States (Minnesota)	Mesaba Teck Cominco American, Inc.	0.12	300,000	20,000	Byproduct concentrate of Ni-Co sulfide or hydroxide.
2011	Australia (Western Australia)	Waterloo and Amorac LionOre Australia Ltd.	2)	2)	NA	Concentrates.
2011	Canada (Manitoba)	Maskwa Mustang Minerals Corp.	0.74 0.75	6,000 550	3,800	-

NA = Not available, Mt=Million ton, <sup>1</sup>Gross weight, dry. "Estimated resources" are rounded to no more than two significant digits. When two or more data sets are listed, the first resource data represent measured resources; the second, indicated resources; and the third, inferred resources. <sup>2</sup>Resource estimate in progress.  
(Source: Kuck, 2004; 2006).

전 세계 Ni 광상의 유형별 지질환경

표 2. New laterite projects scheduled for completion, by year, before 2020

Projected year of first production	Country and state/province	Project and company	Resource grade(% nickel)	Estimated resources (thousands) <sup>1)</sup>	Annual production capacity(of contained nickel)	Nickel product
2010	-	Nakety-Bogota Argosy Minrals, Inc. and Soc. des Mines de la Tontouta	1.47 1.50	88,000 140,000	52,000	Ni-Co intermediate.
2011	Australia (Western Australia)	Mount Margaret Minara Resources Ltd. (formerly Anaconda Nickel Ltd.)	0.78	170,000	45,000	Ni-Co hydroxide.
2011	Cuba (Camaguey)	San Felipe Government of Guba	1.30	250,000	45,000	Metal or oxide.
2011	Indonesia (Halmahera Island)	Weda Bay Weda Bay Minerals, Inc. and PT Aneka Tambang	1.37 1.35	159,000 23,000	48,000	Ni-Co sulfide.
2012	Australia (Queensland)	Marlborough/Gladstone Gladstone Pacific Nickel Ltd.	1.02	210,000 <sup>2)</sup>	30,000	Metal.
2012	Guatemala	Sechol Jaguar Nickel Inc.	1.40 1.50	37,000 <sup>2)</sup> 100,000	NA	Ni-Co intermediate.
2013	Papua New Guinea (Madang)	Ramu China Metallurgical Construction (Group) Corp., Highlands Pacific Ltd., and Mineral Resources Development Co.	0.91 1.01	76,000 67,000	33,000	Metal.
2013	Philippines (Mindoro Island)	Sablayan Crew Development Corp.	0.94	72,000	40,000	Do.
2014	Australia (New South Wales)	Syerston Ivanhoe Nickel and Platinum Ltd.	0.69	96,000	18,000	Ni-Co sulfide concentrate.
2014	Australia (Western Australia)	Kalgoorlie and North Kalgoorlie-Ghost Rocks, Goongarrie, and Kalpini Heron Resources Ltd. and Inco Limited	1.20 0.83	100,000 225,000	50,000	Ni-Co hydroxide.
2015	Indonesia (Maluku)	Gag Island BHP Billiton Plc and PT Aneka Tambang	1.35	240,000	30,000	Intermediate, metal, or ferronickel.
2015	New Caledonia (Southern)	Prony Inco Limited, Bureau de Recherches Geologiques et Minières, and Sumitomo consortium	1.50	NA <sup>2)</sup>	NA <sup>2)</sup>	Ni oxide.
2015	Papua New Guinea (Oro)	WoWo Gap Resource Mining Corp. Ltd.	1.09 1.44 1.02	31,000 18,000 18,000	45,000	Metal.
2018	Cote d'Ivoire	Biankouma, Touba, and Sipilou Falconbridge Ltd. and Soc. d'Etat pour le Developpement Minier	1.57 1.40	120,000 140,000	45,000	Ni-Co intermediate or ferronickel.
2019	Indonesia (Sulawesi)	La Sampala Rio Tinto pic	1.50 1.30	195,000 185,000	NA	NA

\* 주석은 표1과 동일.

## 결 언

니켈의 전세계 매장량은  $130 \times 10^6$  톤이며 laterite형 광상(60%), sulfide형 광상(40%) 및 해저의 망간단괴에서 산출된다. laterite형 광상은 적도 양쪽 위도 22°까지 위치하는 인도네시아, 뉴칼레도니아, 브라질 및 필리핀 등에서 주로 산출된다. laterite형 광상은 습윤열대기 후이며 지체구조적으로 활동성 판충돌대에 해당된다. 이런 지구조 환경에서 대규모 상승 오피올라이트 판들(obducted ophiolite sheets)이 지표에 노출되어 강한 화학적 풍화를 받아 대규모 laterite형 광상이 형성된다. sulfide형 광상은 다양한 지체구조환경과 시생대로부터 페름기 및 트라이아스기까지 폭넓은 지질시대에서 산출된다. 이 sulfide형 광상은 지체구조환경상 코마티아이트(komatiites)형 광상, tholeiitic 염기성내지 초염기성 관입암체형 광상, 범람현무암(flood basalts)과 관련된 관입암체형 광상, 운석흔(astrobleme)형 광상 및 열수재이동(hydrothermal-remobilized)형 광상으로 세분된다. sulfide형 광상에서 산출되는 황화광물은 주로 자류철석, 펜틀란다이트 및 황동석이다. 이들 광상에서 산출되는 주 광종은 니켈, 코발트 및 백금속원소인 반면, 금, 은, 크롬 및 연 등은 소량 함유된다.

## 참고문헌

- Arndt, N.T., Leshner, C.M., and Czamanske, G.K. (2005) Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 5-23.
- Elias, M. (2002) Nickel laterite deposits—geological overview, resources and exploitation. In: Cooke, D.R., Pongratz, J. (Eds.), *Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis, and Exploration*. Centre for Ore Deposit Research Special Publication, 4. University of Tasmania, Hobart, 205-220.
- Freyssinet, Ph., Butt, C.R.M., Morris, R.C., and Piantone, P. (2005) Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 681-722.
- Hoatson, D.M., Jaireth, S., and Jaques, A.L. (2006) Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. *Ore Geology Review*, 29, 177-241.
- Kuck, P.H. (2004) Nickel. United States Geological Survey, Mineral Yearbook, January 2004. United States Geological Survey, 27p.
- Kuck, P.H. (2006) Nickel. United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2006. United States Geological Survey, 116-117.
- Naldrett, A.J. (1997) Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44, 283-315.
- U.S. Geological Survey (2008) Mineral commodity summaries 2007.