해설

광산폐기물 재처리를 통한 핵심위기광물의 확보 전략

이수정^{1,2} · 김리나^{3,4*}¹한국지질자원연구원 글로벌협력본부 책임연구원, ²과학기술연합대학원대학교 자원순환공학전공 교수,³한국지질자원연구원 광물자원연구본부 선임연구원, ⁴과학기술연합대학원대학교 자원순환공학전공 부교수

Strategies to Secure Critical Minerals by Reprocessing Mine Wastes

Sujeong Lee^{1,2} and Rina Kim^{3,4*}¹Principal Researcher, Global Cooperation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea²Professor, Resources Recycling Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Korea³Senior Researcher, Mineral Resources Division, KIGAM, Daejeon, Korea⁴Associate Professor, Resources Recycling Engineering, UST, Daejeon, Korea*Corresponding Author. Rina Kim, rkim@kigam.re.kr, Mineral Resources Division, KIGAM, Daejeon, Korea

Received

15 June 2021

Final version Received

6 August 2021

Accepted

26 August 2021

Abstract

Securing critical minerals in high demand for clean energy, electric vehicles, and aerospace has emerged as a major concern for countries worldwide due to their scarcity, supply risk, and lack of substitutes. The United States, the EU, Australia, Canada, and Japan have been cooperating to secure these minerals. Critical minerals are most often treated as by-products of metallurgical processes because of their low concentration in the crust of minable depth and high companionability to the major minerals. Feasibility studies for recovering critical minerals from mine wastes have been conducted in the EU and the United States, and some have resulted in commercial production. In Korea, tailings have been investigated to identify their environmental impact, mostly focusing on the behavior of heavy metals in them. In this review, we examine the trends of reprocessing tailings for recovering critical minerals and present the necessary information evaluating tailings as resources. To successfully assess the potential of tailings as resources, it is essential to build a database including the physical, chemical, and mineralogical properties of tailings as well as basic information such as geographic location and accessibility.

Key words : Critical minerals, Mine wastes, Reprocessing, Recover, Database

요약

청정에너지와 전기차, 항공우주 등에서 수요가 급증하는 핵심위기광물의 확보는 희소성과 공급의 불안정성, 대체재의 부재로 인해 세계 각국의 초미의 관심사로 대두되었다. 미국과 유럽연합, 호주, 캐나다 및 일본은 핵심위기광물을 확보하기 위한 국제적 공조에 힘을 쏟고 있다. 핵심위기광물은 채굴 가능한 깊이의 지각에서 함량이 낮고 주광물에 동반되기 때문에 대부분 주요 금속 생산의 부산물에 함유되어 있다. 광산폐기물로부터 핵심위기광물을 회수하기 위한 타당성 연구가 유럽연합과 미국 등에서 이루어져 왔으며, 상업적으로 생산된 경우도 보고되고 있다. 국내에서는 광산폐기물을 유해 중금속의 거동 파악이나 제거, 환경에 미치는 영향을 연구하는 대상으로 보는 것이 일반적이다. 본 해설에서는 광산폐기물의 재처리를 통한 핵심위기광물의 회수 가능성을 검토하기 위해 이와 관련된 전반적인 동향과 자원으로서의 광산폐기물을 평가하기 위해 필요한 정보를 제시하였다. 무엇보다도 지형적 위치, 접근 가능성 등의 기본 정보부터 광산폐기물의 물리적·화학적·광물학적 분석 결과를 포함하는 데이터베이스 구축이 선행되어야 할 것이다.

주요어 : 핵심위기광물, 광산폐기물, 재처리, 회수, 데이터베이스

서론

2차 세계대전 후 금속의 수요는 세계적으로 급증하기 시작하여 2000년대 이후는 그야말로 폭발적이었다고 할 수 있다. 2000~2015년 사이 세계 철광석 소비량은 연간 6억1천만 톤에서 23억 톤으로 약 4배 증가하였는데(Fortier *et al.*, 2018), 중국의 경제성장에 따른 중산층의 급격한 팽창과 철강 산업의 확대에 따른 것이다(Fortier *et al.*, 2018). 또한, 1995~2015년의 20년간 생산된 구리는 1700년부터 2015년 사이 전체 생산량의 절반에 가까운 45% 이상이다(Meinert *et al.*, 2016). 100년 전과 비교하여 세계 인구는 4배 증가한 반면, 구리의 생산량은 22배가 늘었다(Meinert *et al.*, 2016). 희유금속의 수요는 구리, 철과 비교할 수 없을 정도로 생산량이 급증했는데, 1973년에서 2015년 사이 주석의 생산은 21% 증가한 반면 갈륨의 생산은 무려 2,800%나 증가하였다(Schulz *et al.*, 2017).

금속의 소비량뿐만 아니라 사용하는 금속의 종류도 다양해졌다. 한 예로 속도가 빨라지고 용량이 커진 컴퓨터 칩 제조에 1980년대에는 12개의 원소가 사용되었다. 반면 2000년대 이후 컴퓨터 칩에 들어가는 원소의 종류는 45개 이상으로 2배 이상 증가하였다(Fig. 1). 1998년부터 2013년까지 제조된 휴대폰 85개를 분석한 연구에서는 8개의 희토류 원소를 포함한 38개 원소가 거의 모든 휴대폰에서 공통적

으로 사용된 것으로 나타났다(Christian *et al.*, 2014).

이와 같이 금속의 소비량이 증가하고 활용되는 금속이 다양화됨에 따라 수요·공급의 불일치, 자원의 편재, 정치적·경제적 상황에 따른 공급의 불안정성이 커지는 현상이 대두되었다. 이에 전 세계 산업국가들은 이러한 광물 또는 암석을 포함한 일군의 물질을 핵심위기광물(critical minerals) 또는 핵심위기금속(critical metals) 이라고 명명하고 국가마다 이들 물질을 규정하고 있다. 유럽연합의 경우 천연고무와 점결탄(coking coal) 등 금속 또는 광물이 아닌 물질까지 포함시켜 핵심위기원자재(critical raw materials, CRM)로 칭하고 있다.

이들 물질을 정의하는 가장 큰 두 가지 요소는 산업의 수요와 공급의 불안정성이다. 즉, 산업 전반에 걸쳐 필수 불가결한 원자재이고 대체재도 없는데 공급이 안정적이지 않아 당장 확보하기가 어려울 뿐만 아니라 장기적인 수요와 공급을 예측하기 어렵다는 특징을 가지고 있다. 이에 따라 미국과 유럽연합, 일본 등은 미래 기술 및 산업구조의 변화 전망을 바탕으로 금속을 중심으로 한 원자재의 위기성 분석(criticality analysis)을 수행하고 있다(Kim, 2013). 위기성이 높은 것으로 평가된 핵심위기광물 또는 핵심위기원자재는 특히 청정에너지 산업에서 수요가 높는데, 태양광패널, 풍력터빈, 전기자동차, 2차 전지 그리고 고효율 조명과 같은 품목의 원료로 사용된다.

Fig. 1. Increases in the use of elements over two decades of computer chip technology development. The number of minerals used to make high-speed and high-capacity integrated circuits have increased from 12 in the 1980s to 16 in the 1990s and more than 60 by the 2000s (Schulz *et al.*, 2017).

핵심위기광물의 공급대책 수립을 어렵게 하는 더 큰 문제는 시장에서의 거래가 투명하지 않기 때문에 이들 광물 및 금속의 이동을 추적하기 어렵다는 점이다(DOE 2020; Nassar *et al.*, 2015). 핵심위기광물의 거래가 사적인 계약을 통해 이루어지다보니 현재 알려진 대부분의 통계는 시장의 통계에 기반한 정확한 값이라기보다는 추정치로 보는 것이 정확하다. 상황이 이렇다보니 자국의 산업에 필요한 대부분의 핵심위기광물의 단기적, 장기적 공급전망을 세우는 일은 매우 어렵다.

미국은 이러한 상황에서 더 이상 자국의 생산이나 인접한 교역국으로부터의 수입으로 자원의 국내 수요를 충족시킬 수 없고 중국, 러시아, 콩고 등 정치적으로 불안정한 관계의 국가들에 의존하게 되는 상황을 심각한 위기로 평가하고 국가 차원의 대책 수립과 국제연대 강화를 가속화하고 있다. 미국은 캐나다, 호주와 CMMI(critical minerals mapping initiative)를 발족시키고 핵심위기광물이 주요 광물에 동반(companion) 되도록 작용하는 지질학적 현상을 밝혀 핵심위기광물의 공급원을 찾기 위해 노력하고 있다(DOE, 2020). 광상 형성에 대해 폭 넓은 지식이 누적되어 있음에도 불구하고 광물 간 원소의 치환은 복잡한 지질학적 작용과 환경에서 일어나기 때문에 아직 완벽하게 이

해되지 못한 부분이 존재하기 때문이다. 유럽은 유럽연합 차원에서 CRM 목록을 발표하고 폐광 자원, 전자폐기물 등에 대한 재활용 기술을 개발하여 핵심위기광물을 확보하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

본 해설에서는 주요 국가들의 핵심위기광물 목록을 분석하고 일부 핵심위기광물에 대한 2차 공급원, 즉 폐자원으로 부터의 핵심위기광물 회수 연구 동향을 점검하였다. 특히 2차 공급원 중 광산폐기물에서의 핵심위기광물 회수 연구에 대한 문헌을 중심으로 조사하였으며, 우리나라와 상황이 유사한 유럽연합에서 진행되었던 사례를 검토하고 핵심위기광물을 회수하기 위해 필요한 전략을 확립하고자 하였다.

주요국의 핵심위기광물 목록

미국 등 주요국에서는 핵심위기광물 또는 원자재를 지정함으로써 미개발 광산에서의 새로운 채광은 물론 재활용으로부터 금속을 확보하기 위해 노력하고 있다. 미국(US)과 유럽연합(EU), 호주(AU), 캐나다(CA)가 선정한 핵심위기광물 또는 원자재는 국가별 상황과 자원의 확보역량에 따라 각각의 기준에 따라 선정되었으며 일부 금속은 공통적으로 포함되어 있다(Fig. 2, Table 1). 3개 국가 및 유럽연

Fig. 2. Metals or materials classified as critical in the US, the EU, Australia, and Canada. The 37 elements or materials in yellow are commonly considered critical in the 3 countries and the EU (DOE, 2020; COM, 2011, 2014, 2017, 2020; Australian Government, 2020; Government of Canada, 2021).

합의 핵심위기광물 선정 기준을 살펴보면, 미국, 유럽연합, 캐나다의 경우 주목적이 자국의 산업에 필요한 원료를 확보하여 공급하기 위함이다. 반면에 호주는 세계 최대의 광업 국가 중 하나로, 호주의 중요한 교역국인 영국, 유럽연합, 미국, 일본, 한국 등의 산업에서 주요하게 여겨지는 광물 및 금속을 우선순위로 하여 핵심위기광물을 선정하였다.

위의 3개 국가 및 유럽연합에서 공통적으로 핵심위기광물로 선정한 광물 및 금속은 희토류를 포함한 37개의 원소 또는 물질(노란색) 이다(Fig. 2). 국내의 핵심위기광물 또는 핵심위기원자재 목록을 작성한다면 이들 원소 및 물질이 포함될 확률이 높을 것이다. 이 37개의 원소 및 물질에는 희토류 원소 17개를 비롯해 리튬, 마그네슘, 백금족, 코발트, 갈륨, 저마늄, 인듐 등 전기차와 청정에너지 등의 첨단 산업에서 수요가 높은 금속들이 포함된다(Fig. 2). 특히 희토류 원소는 향후 10년 내 급증할 것으로 예상되는 친환경 자동차(전기자동차, 수소자동차, 하이브리드자동차 등) 모터의 핵심 부품인 영구 자석에 대량 사용될 것으로 예측되고 있어 그 중요도가 특히 높다고 할 수 있다(Yang *et al.*, 2017). 또한, 희토류 원소는 핵심위기광물로서의 위기성이 가장 큰 금속 중의 하나라고 할 수 있는데, 전 세계 매장량의 약 40%가 중국에 분포하고 있고 2021년 기준 60% 가량의 희토류가 중국에서 생산되고 있어 편재성이 크다고 할 수 있다(USGS, 2021). 더불어 최근 중국이 환경오염을 표면적인 이유로 하여 희토류 생산을 중단하면서 희토류 가격이

상승한 바 있어 공급의 불안정성이 큰 원소이다.

그 외에 갈륨, 세슘, 알루미늄, 주석과 텔루륨, 우라늄, 형석은 미국과 캐나다에서 핵심위기광물로 지정한 원자재들이다(Fig. 2). 스트론튬은 미국과 유럽연합이 동시에 핵심위기광물(원자재)로 지정한 유일한 금속이다(Fig. 2). 유럽연합은 미국과 달리 중정석, 인산염 암석, 점결탄, 보크사이트, 금속 실리콘, 천연고무, 봉산염을 핵심위기원자재의 범위에 포함시키고 있다(Fig. 2). 형석은 미국, 유럽연합, 캐나다에서 공통적으로 핵심위기광물로 지정하고 있다(Fig. 2). 이렇듯 각 국가별로 광물의 부존 현황, 공급의 수월성 여부, 국가별 주요 산업 분야에 따른 핵심위기광물 수요 등에 따라 목록에 차이가 있다.

금속의 동반성(Metal companionability)

핵심위기광물로 지정된 대부분의 원소들은 지각에서의 함량이 매우 낮은 편이다. 금속원소를 주성분으로 하는 광물이 한 곳에 농집되어 있는 것을 광상이라고 정의하기 때문에 지각 내 함량이 희유한 금속은 함량이 낮아 광상을 생성하지 못한다. 이들 희유금속은 광물의 주성분인 다른 금속원소를 미량 치환하여 ppm 단위의 함량으로 포함되어 있다. 이때 치환당하는 주원소 금속을 주금속(host metal), 치환해 들어가는 희유금속을 동반금속(companion metal)이라고 한다. 희토류 원소 등 일부를 제외한 핵심위기광물

Table 1. Criteria for critical mineral selection in the US, the EU, Australia, and Canada

Country	Name	Criteria	References
United States	Critical mineral resources	1. A non-fuel mineral or mineral material essential to the economic and national security of the US; 2. The supply chain of which is vulnerable to disruption; and 3. That serves an essential function in the manufacturing of a product, the absence of which would have significant consequences for our economy or our national security	EO 13817, 2017
EU	Critical raw materials	1. Link to industry(linked to all industries across all supply chain stages) 2. Modern technology(dependency of technological progress & quality of life on access to a growing number of raw materials) 3. Environment(indispensable role of CRMs in clean technologies)	https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
Australia	Critical minerals	1. The level of criticality assigned by the United Kingdom, European Union, United States of America, Japan and Republic of Korea 2. Australia's known resources as well as potential for discovery of new resources 3. Demand in terms of global market size; and 4. growth outlook	Skirrow <i>et al.</i> , 2013
Canada	Critical minerals	1. Essential to Canada's economic security 2. Required for Canada's transition to a low-carbon economy 3. A sustainable source of critical minerals for our partners	https://nrcan.gc.ca/criticalminerals

원소들은 대체로 동반금속으로 존재한다. 현재 산업에서 가장 흔히 사용되는 62개의 금속 또는 준금속의 61%도 동반금속이다(Fig. 3). 붉은 색으로 표시된 원소는 동반금속의 형태로만 존재할 확률이 높은 금속이다(Fig. 3). Fig. 4에 표시된 희유금속의 동반성향 다이어그램에서 푸른색으로 표시된 주금속 가까이에 위치한 희유금속은 동반되는 경향이 매우 강한 것으로 발견된다. 이러한 특성 때문에 주금속을 유인금속(attractors), 동반금속을 편승금속(hitch-hikers) 이라고 부르기도 한다(Ayres and Talens Peiró, 2013).

어떤 금속이 한 개 혹은 한 개 이상의 주금속의 부산물에 대부분 또는 전량 함유되는 정도를 동반성(companionability) 이라고 한다. 동반금속의 생산은 주금속의 생산에 의존할 수밖에 없기 때문에 특정 시기의 주금속의 생산량에 따라 동반금속의 공급 불안정이 더욱 클 수밖에 없다.

광물의 주성분인 주금속과 동반금속으로 존재하는 핵심 위기광물의 종류에 대해 현재까지 알려진 내용을 종합하면 금속광상에서 어떤 핵심위기광물의 존재를 기대할 수 있는지 예상하는 것이 가능하다(Fig. 4). 예를 들어 알루미늄 광석인 보크사이트에는 평균 50 ppm의 갈륨이 포함되어 있다(Table 2). 2010년 중국에서 생산된 희토류의 50%는 바얀오보(Bayan Obo) 광산에서 생산되는 철광석의 부산물에서 생산되었다(Table 2). 철광석에 수반되는 대표적인 희

Fig. 4. Metal companionability. The principal host metals form the inner circle. Companion elements appear in the outer circle at distances proportional to the percentage of their primary production that originates with the indicated host metal. The companion elements in the white region of the outer circle are elements for which the production percentage that originates with the indicated host metal has not been determined (Nassar *et al.*, 2015).

Fig. 3. Periodic table of companionability on a global basis in 2008. Metals that are mainly produced as hosts are in blue, and those produced as companions are in red (Nassar *et al.*, 2015).

토류 원소는 경희토류로 분류되는 란타넘, 세륨, 프라세오디뮴, 네오디뮴 등이다(Fig. 4). 코발트는 구리와 니켈 광석의 부산물에 존재하는데(Fig. 4, Table 2), 콩고와 잠비아의 구리광상과 함니켈 라테라이트 광상은 코발트의 주요 공급원이다(Ayres and Talens Peiró, 2013). 2010년 전 세계 코발트 생산량 88,000톤의 35%는 구리광석 부산물에서, 50%는 니켈광석 부산물에서, 나머지 15%는 코발트 비소화합물에서 생산되었다(USGS, 2009). 이 밖에 니켈광석의 부산물에는 팔라듐을 비롯한 백금족 원소들이 흔히 발견된다(Fig. 4). 구리를 함유한 황화광물의 로스팅 부산물에는 레늄과 몰리브덴이 존재한다. 또한, 다양한 구리광석의 정련 부산물에는 텔루륨과 셀레늄이 존재하는 것으로 알려져 있는데 제련된 구리 1톤에는 65 g의 텔루륨이 함유되어 있다(USGS, 1973). 셀레늄은 흔히 광물에서 황을 치환하여 존재하기 때문에 구리의 제련부산물로부터 전량 생산된다(Ayres and Talens Peiró, 2013). 섬아연석에는 갈륨, 게르마늄과 인듐이 평균 0.005%씩 존재한다(Habashi, 1997).

자원재활용과 핵심위기광물

광산에서 생산되는 광석은 핵심위기광물의 1차 공급원(conventional primary source)이다. 즉, 핵심위기광물이 주금속 광석광물에 함유된 동반금속으로 존재하는 경우이다. 핵심위기광물의 수요가 급증하면서 전통적인 금속회수 경로인 광산 채굴을 제외한 비전통적 금속자원 확보가 핵심위기광물의 회수방안으로 관심을 끌고 있다. 비전통적 금속 회수 방안에는 광업 또는 산업 활동의 부산물로부터 금속을 회수하는 자원재활용, 금속원소가 광상을 이루고 있지만 채굴이 어려운 극한 환경인 심해저광상 등이 포함된다(Table 3).

이러한 비전통적 금속자원 회수방안 중에서 핵심위기광물의 확보가능성이 높은 것으로 자원재활용 중 광산폐기물의 재처리를 들 수 있다. 과거 자원처리 공정을 거쳐 폐석이나 제련공정의 부산물로 버려진 광산폐기물을 현재의 발전된 선광·제련 기술로 재처리하여 핵심위기광물의 경제적

Table 2. Major metals and their companion metals present in the by-products

Host	Companion	Content of hitch-hiker in the ore and current mine production	Reference
Al	Ga	50 ppm in bauxite	Gray and Kramer, 2005
Fe	REE	171 kg RE oxides/1 tonne Fe, 3.7 kg Nb/1 tonne Fe in Bayan Obo mines	Drew <i>et al.</i> , 1991
Cu	Co, Re, Mo, Te, Se	0.4% Co in Zambia and Zaire 0.03% Mo & $\geq 0.001\%$ Re 65 ppm Te in copper refined 260 ppm (US), 640 ppm (Canada) Se in copper	Kesler, 1994; Habashi, 1997; United States Bureau of Mines, 1985; USGS, 1973
Zn	Ge, In	0.005% Ge, 0.005% In, 0.005% Ga in sphalerite	Habashi, 1997
Ni	Co, PGM	0.01% Co in laterite 27 ppm Pt (South Africa), 15 ppm PGM in Ni sulfide ore (Russia)	Berger <i>et al.</i> , 2011; Renner, 1997
Sn	Nb, Ta	0.2% Ta in cassiterite ore	Habashi, 1997

Table 3. Unconventional sources of critical metals

	Source	Potential	Conflict
Primary	Deep seabed mineral deposits	- High grade (in some cases) - No requirement for crushing - Low concentrations of Th & U	- Much higher energy intensity (high costs) - Environmental risks - Social rejection - Contests for mining rights
Secondary	Urban ores	- Increasing interest, particularly in Japan & EU countries	- Unsatisfied level of current recycling techniques
	Mining wastes & landfills	- Energy & greenhouse gas benefits (low cost) - No requirement for crushing - Benefit of reducing ultimate waste disposal requirements	- Low grade - Required infrastructural, institutional and behavioral adjustments
	Coal-fired ash		- Significant ecological and economic costs

회수 가능성을 타진해 볼 수 있다. 일반적인 폐기물의 재활용과 구분되는 점은 광산폐기물의 경우 선광 공정을 이미 거쳐 분쇄가 불필요하여 에너지 소모가 적고 최종 폐기물의 양을 줄일 수 있는 장점이 있다는 것이다. 따라서 광산폐기물 재처리하는 향후 보다 중요한 핵심위기광물 확보방안이 될 것으로 예상된다(Ayres and Peiró, 2013; McLellan *et al.*, 2016). 물론 목적 광물의 품위가 낮고 현재의 재처리 공정을 통해 경제성을 확보하기 어려운 점은 걸림돌이라 할 수 있다(Table 3). 그러나 현재 많은 국가가 금속 가격의 급등으로 핵심위기광물을 확보하는데 어려움을 겪고 있기 때문에, 향후 예상되는 지속적인 금속 가격 상승이 광산폐기물의 재처리 또는 재자원화 기술 개발에 주요한 요인이 될 것으로 보인다(Lottermoser, 2011).

광산폐기물 외에 위기금속의 2차 공급원(secondary source)으로 도시광산과 석탄재를 고려해볼 수 있다. 폐가전 등으로 이루어진 도시광산은 우리나라와 같은 자원빈국의 입장에서 유용한 핵심위기광물의 공급원이 될 수 있다. 문제는 재활용을 통해 경제적으로 금속을 회수할 수 있으려면 대상 폐기물에 포함된 금속의 가치가 높아야하고 재활용 공정이 간단하며, 폐기물의 수집과 해체가 효율적으로 이루어져야 한다는 점이다(McLellan *et al.*, 2016). 금속은 폐가전 등 최종제품에 사용되는 형태에 따라 재활용률이 달라진다. 알루미늄, 금, 납은 비교적 재활용이 쉽지만 구리와 아연은 다른 금속과 섞여 사용되기 때문에 회수하기 어렵다(McLellan *et al.*, 2016). 희토류 원소 역시 선택적 회수가 어렵다는 문제를 안고 있다. 석탄재의 경우 석탄연소 과정에서 석탄재에 함유된 금속이 농집될 수 있으나 석탄에 함유된 광물의 양이 워낙 적어 여전히 금속의 농도가 낮는데다 금속의 함량이 석탄재마다 다른 문제가 있다.

이외에 비전통적인 금속광으로 심해저광상을 들 수 있다. 심해저광상은 비전통적인 1차 공급원(unconventional primary source)이라고 할 수 있다. 심해저광상은 일반적으로 200미터 이하의 깊은 바닷속에 형성된 광상을 의미한다(Table 3). 희토류, 코발트, 구리, 아연, 금, 니켈 등의 금속이 다중금속단괴(polymetallic nodule), 페로망간, 심해퇴적물 등에 함유된 심해저광상은 경우에 따라 금속의 농도가 높고 분쇄 등 선광 공정을 생략할 수 있는 장점이 있다(Lusty *et al.*, 2018; Pak *et al.*, 2019). 그러나 심해저광상이 상업적으로 개발될 예는 아직 없다. 심해저광상 개발의 문제는 해상의 선박 위에서 최소한의 선광공정을 진행하면서 폐수와 고형의 폐기물을 바다에 버리게 될 것으로 예상된다는 점이다(Levin *et al.*, 2020). 무엇보다 각각의 심해저광상은 독특한 환경에 위치하고 다양한 규모, 경제성의 차이 등을 포함하고 있는데다 광상이 개발될 경우 과연 어느 나라의 소유인가에 대해 논란의 소지가 많다(Pak *et al.*,

2019; Levin *et al.*, 2020). 더욱이 상업적인 대규모 채광과 선광이 심해 생태계에 어떤 영향을 줄지 알 수 없기 때문에 이에 대한 규정 절차를 세우는 것도 현재로서는 가능하지 않다(Levin *et al.*, 2020).

광산폐기물로부터 핵심위기금속의 회수

광산폐기물로부터 핵심위기광물 등 희유금속을 회수하기 위한 연구는 유럽에서 많이 수행된 바 있다. 유럽연합 차원에서는 스마트 그라운드(SMART GROUND) 프로젝트로 이탈리아, 스페인, 핀란드, 헝가리, 영국 등 유럽 5개국에서 2차 공급원(secondary raw materials)으로써 광산폐기물을 포함한 추출공정폐기물(extractive waste, EW)의 파일럿 규모 재처리 공정에 관한 정보구축을 수행하였다(Blengini, *et al.*, 2019; Dino *et al.*, 2016, 2018). 스마트 그라운드 프로젝트는 정보수집, 관련 규정 검토 및 실험실과 현장에서의 연구방법, 가장 유력한 잠재 수요(시장) 분석, 그리고 수집된 정보의 균형 잡힌 통합을 통해 정보수요자가 스마트 그라운드 플랫폼에 쉽게 접근할 수 있도록 하였다(Dino *et al.*, 2018). 스마트 그라운드 플랫폼에서 제공하는 정보는 지질학적 정보, 채광되었던 광석광물 정보, 채광 및 선광 기록, 추출공정 시설의 특징으로 구성되어 있다(Blengini *et al.*, 2019). 또한, 광산폐기물의 광물학적, 지화학적 특성은 물론 전성분 데이터는 광산폐기물로부터 금속 회수가 가능한지를 판단하기 위해 반드시 필요한 정보이다(Geise *et al.*, 2011; Dino *et al.*, 2016). 예를 들어, Fe-Ni-Cu-(Co) 황화광상인 캄펠로 몬티(Campello Monti) 광산 지역은(Table 4) 1850~1945년에 채굴이 이루어져 광산폐기물에 대해 남아있는 자료가 없었기 때문에 광산 활동 기록, 광산폐기물의 유형, 지질학적 정보 등을 스마트 그라운드 플랫폼에서 제공할 목적으로 예비조사가 수행되었다(Blengini *et al.*, 2019). 캄펠로 몬티 광산을 비롯하여 유럽 연합의 정책에 따라 폐광 지역에서 희유금속을 회수하기 위한 파일럿 규모의 연구가 여러 지역에서 이루어졌다(Table 4).

이 밖에도 광산폐기물에서 주석, 탄탈륨, 니오븀을 회수한 스페인의 피누타(Penouta) 광산, 희토류 원소를 회수한 스웨덴의 뉴크랭버그(New Krankberg) 광산, 포르투갈의 코바스(Covas) 광산에서 광산폐기물로부터 핵심위기광물 회수의 잠재적 가능성이 입증되었다(Blengini *et al.*, 2019; Tunsu *et al.*, 2019). 이 중 피누타 광산은 1985년에 폐쇄되었으나 희유금속 회수 공정개발과 경제적 타당성 분석을 거쳐 2018년에 재가동되었다(Blengini *et al.*, 2019). 피누타 광산은 스페인에서 가장 중요한 광산 중의 하나였으며 광산폐기물에는 상당량의 탄탈륨과 니오븀이 함유되어 있

Table 4. The EU's pilot sites for the recovery of critical minerals from mine wastes (Dino *et al.*, 2018)

Name & location	Pilot description	Status
Monotorfano mining area, Italy	Feldspar production from granite waste facilities exploitation	Active site
Gorno mining area, Italy	EW facility characterized by a high content of metals such as Zn, Pb and possible CRMs such as Ge, Te, In, Cd etc.	Closed site
Campello Monti mining area, Italy	EW facility characterized by high Ni, Cu, Co content and possible CRMs such as PGM	Closed site
Aijala mining area, Finland	EW facilities in Southwest Finland. Tailings from mining containing Cu, Zn, S, Ag, and Au	Closed site
Rudabánya, Hungary	EW facilities containing tailings from sulphide exploitation	Closed site
Pátka, Hungary	EW facilities containing tailings of fluorite dressing plant	Closed site

었다(Blengini *et al.*, 2019). 우간다 카세세(Kasese)에서는 바이오 제련(biometalurgy) 공정으로 코발트 회수 공정의 경제성이 입증되었다(Blengini *et al.*, 2019). 카세세 광산에서 배출된 폐기물은 황화광물을 함유하고 있어 황산화-철산화 박테리아를 활용한 바이오 제련에 적합하였고 결과적으로 적은 환경부담으로 코발트를 회수할 수 있었다. 실험실 규모에서 출발하여 대규모 상업적 운전까지 10여년이 소요되었지만 기술적으로는 물론 경제적으로도 성공한 사례라 할 수 있다.

유럽연합 이외에 대표적인 광업 국가인 칠레에서는 국립 지질광업연구소(Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN)에서 광산폐기물에 대한 데이터베이스를 구축하여 제공하고 있다. 해당 데이터베이스에는 광산명, 광산의 위치(좌표 정보), 광산소유자, 가행여부, 광산폐기물 규모 등의 정보가 구축되어 있으며, 57개 금속의 농도 정보 또한 포함되어 있다. 57개 금속 중 22개의 금속이 유럽연합의 CRM 목록에 포함된 금속(V, Co, Y, Nb, Sc, Hf, Ta, Sb, Bi, W, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) 과 일치한다(SERNAGEOMIN, 2021). 칠레의 광산폐기물 데이터베이스를 활용하여 희토류, 바나듐과 같은 핵심위광물의 회수 가능성에 대한 경제성 분석 연구가 수행되었으며, 일부 금속의 회수 공정이 경제성이 있을 것으로 분석되었다(Araya *et al.*, 2020). 또한, 광산폐기물로부터 금속을 회수하는 공정이 경제성을 갖기 위해서는 고려된 요소들 중 자본적 지출(capital expenditure, CAPEX)의 영향이 가장 큰 것으로 나타나 이를 낮추는 것이 핵심인 것으로 분석되었다(Araya *et al.*, 2021).

국내에서는 1990년대부터 광산폐기물에 대한 연구가 수행되어왔는데, 광산폐기물 내 유해 중금속의 거동이나 제거, 환경에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 광산폐기물을 순환자원으로 보는 연구의 경우에는 폐기물 중 잔여 유가 금속의 회수보다는 최종 폐기물에 대한 건설

재료, 폐광산채움재 등의 활용에 대한 연구가 대부분 이루어진 것으로 파악되었다. 국내 광산폐기물로부터 유가금속을 회수하는 연구는 극히 드물게 수행되었다. 1979년 상동광산의 광산폐기물(0.074% WO₃)에 대한 부유선별 연구가 수행되었는데, 품위 20% WO₃, 회수율 50%를 달성한 것으로 나타났다(Whang *et al.*, 1979). 또한, 2000년 일부 연구자들에 의하여 광산폐기물을 포함한 저품위 광석에 대하여 유가 금속을 회수하기 위한 바이오 제련 연구가 수행되었으며, 해당 연구에서 전주제일광산 및 무극광산의 광산폐기물로부터 바이오 제련법으로 아연, 구리 등의 금속을 회수할 수 있는 것으로 파악되었다(Ministry of Science and Technology, 2000). 이와 같이 국내에서 일부 연구는 이루어졌으나 실제 현장에서 광산폐기물로부터 유가 금속 회수가 이루어진 경우는 현재까지 전무하다. 또한, 국내의 경우 유럽연합 또는 칠레와 같은 광산폐기물에 대한 체계적인 데이터베이스가 마련되어 있지 않아 이에 대한 개선이 필요하다.

광산폐기물을 재처리하여 핵심위광물 등 희유금속의 회수 여부를 판단하기 위해 필요한 정보를 Table 5에 요약하여 정리하였다. 광산폐기물의 재처리가 가능한지 판단하기 위해서는 우선적으로 광산폐기물의 지형적 위치, 접근 가능성, 소유권 현황, 현장조사를 통한 재처리 대상 물질의 양 평가 등이 필요하다(Table 5). 특히 광산폐기물이 배출된 광산의 채굴 및 생산(공정) 이력, 광상학적 특징, 재처리 대상 물질의 화학적·물리적·광물학적 특성 분석과 단체 분리도 평가, 그리고 금속의 동반성 정보가 수집되어야 한다. 오래 전 생산 이력이 있는 금속광산에서 배출된 광산폐기물의 경우 광물학적 정보는 전혀 남아있지 않을 가능성이 크다. 이 경우 과거 낮은 수준의 선광·제련 기술로 광석이 처리되었기 때문에 핵심위광물뿐만 아니라 주금속의 품위 또한 현재의 기준에서는 높을 수 있으므로 광상학적 정보와 함께 광물학적 특성 분석이 이루어져야 한다. 무엇보다

Table 5. Data information needed to assess the potential of mine tailings as new reserves in geopolitical, environmental, economic, and social contexts

a. Investigation of mine tailings characteristics and of the exploitable materials <ul style="list-style-type: none"> • Location • Geographic accessibility • Ownership • Dump volume(site survey) • Tailings characteristics <ul style="list-style-type: none"> - Companionability (host and companion metals) - Chemical, physical and mineralogical characterization - Mineral liberation • Regional geologic setting and metallogeny • Mining history
b. Study of any particular restriction in accessing and exploiting the investigated area <ul style="list-style-type: none"> • Local policy • Legislation for mine tailings exploitation and waste management • Environmental restriction • Public perception • Collaboration with key stakeholders

보다도 핵심위광물을 포함한 유용금속이 어떤 광물 혹은 화합물에 어떤 방식으로 존재하는지 규명되어야 하며 이는 입도 분포와 연관되어 밝혀져야 한다. 또한, 광산폐기물의 재처리가 가능하기 위해서는 지자체의 정책과 법규, 환경 규제, 지역의 여론, 이해당사자 간의 협력관계 등 제약이 될 만한 외부 요소들을 면밀하게 검토할 필요가 있다(Table 5).

결론

청정에너지와 전기차, 항공우주 등 4차 산업혁명으로 수요가 급증하는 핵심위광물의 확보는 희소성과 공급의 불안정성, 대체재의 부재로 인해 세계 각국의 초미의 관심사로 대두되었다. 자원의 대부분을 수입에 의존하는 국내 상황과 유사한 유럽에서는 광산폐기물을 2차 자원으로 보고 그 잠재성을 파악할 규모에서 상업적 생산 규모까지 검토하고 있다. 이와 유사한 조사는 미국에서도 이루어졌으며 경우에 따라서는 핵심위광물을 경제적으로 회수한 사례도 있다. 광산폐기물을 재활용하여 핵심위광금속을 회수하기 위해 광산지역의 지질학적 정보, 채광되었던 광석광물 정보, 채광 및 선광 기록 등이 체계적으로 수집되어야 한다. 특히 과거 효율이 낮은 선광·제련공정으로 금속생산이 이루어진 폐광지역을 중점적으로 검토할 필요가 있다. 광산폐기물 대표시료에 대한 물리적, 화학적, 광물학적 분석이 체계적으로 이루어지고 예비실험을 거친 공정 설계가 필요할 것이며 동시에 재처리 사업의 경제적 타당성과 환경부담을 정밀하게 파악해야 한다. 유럽연합 및 칠레에서

선행된 바와 같이 광산폐기물의 특성을 종합한 데이터베이스 구축이 그 첫 단계가 되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 글로벌 공동연구 촉진 사업 ‘4차 산업혁명 기술 핵심원료 확보와 지속가능한 자원활용을 위한 광미의 재발견(글로벌 20-002, NP2021-001)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Araya, N., Kraslawski, A., and Cisternas, L.A., 2020. Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings, *Journal of Cleaner Production*, 263, 121555p.
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., and Cisternas, L.A., 2021. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis, *Journal of Environmental Management*, 284, 112060p.
- Australian Government, 2020. *Australian critical minerals prospectus 2020*, 172p.
- Ayres, R.U. and Talens Peiró, L., 2013. Material efficiency: rare and critical metals, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 371, 20110563p.
- Berger, V.I., Donald, A.S., Bliss, J.D., and Moring, B.C., 2011. *Ni-Co laterite deposits of the world—database and grade*

- and tonnage models, Report of the United States Geological Survey, Washington, DC, USA.
- Blengini, G.A., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., and Viegas, H.M., 2019. *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills - State of play on existing practices*, JRC Science for Policy Report, EUR 29744 EN, Publication office of the European Union, Luxembourg, 130p.
- Chistian, B., Romanov, A., Romanova, I., and Turbini, L.J., 2014. Elemental compositions of over 80 cell phones, *Journal of Electronic Materials*, 43, p.4199-4213.
- COM, 2011. *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions-Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials*, European Commission, Brussels, 22p.
- COM, 2014. *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions-On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative*, European Commission, Brussels, 7p.
- COM, 2017. *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions-On the 2017 list of critical raw materials for the EU*, European Commission, Brussels, 8p.
- COM, 2020. *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions-Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability*, European Commission, Brussels, 23p.
- Dino, G.A., Rossetti, P., Biglia, G., Coulon, F., Gomes, D., Wagland, S., Luste, S., Särkkä, H., Ver, C., Delafeld, M., and Pizza, A., 2016. SMART GROUND Project: SMART data collection and inteGRation platform to enhance availability and accessibility of data and infOration in the EU territory on SecoNDary Raw Materials, *Energy Procedia*, 97, p.15-22.
- Dino, G.A., Rossetti, P., Perotti, P., Alberto, W., Sarkka, H., Coulon, F., Wagland, S., Griffiths, Z., and Rodeghiero, F., 2018. Landfill mining from extractive waste facilities: The importance of a correct site characterisation and evaluation of the potentialities, A case study from Italy, *Resources Policy*, 59, p.50-61.
- DOE, 2020. *Critical materials rare earths supply chain: A situational white paper*, DOE/EE-2056, USA.
- Drew, L.J., Qingrun, M., and Weijun, S., 1991. The geology of the Bayan Obo iron-rare Earth niobium deposits, Inner Mongolia, *Materials Science Forum*, 13, p.13-32.
- EO 13817, 2017. *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, Executive Office of the President, USA.
- EU critical raw materials, 2021.05.14., https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- Fortier, S.M., Thomas, C.L., McCullough, E.A., and Tolcin, A.C., 2018. Global trends in mineral commodities for advanced technologies, *Natural Resources Research*, 27(2), p.191-200.
- Geise, G., LeGalley, E., and Krekeler, M.P.S., 2011. Mineralogical and geochemical investigations of silicate-rich mine waste from a kyanite mine in central Virginia: implications for mine waste recycling, *Environmental Earth Sciences*, 62, p.185-196.
- Government of Canada, 2021. Canada's Critical Minerals List, <https://nrcan.gc.ca/criticalminerals>
- Gray, F. and Kramer, D.A., 2005. *Gallium and gallium compounds. In Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology (ed. K Othmer)*, John-Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Habashi, F. (ed), 1997. *Handbook of extractive metallurgy*, Wiley-VCH, New York, NY, USA.
- Kesler, S.E., 1994. *Mineral resources, economics and the environment*, Macmillan Co., New York, NY, USA.
- Kim, Y.J., 2013 Strategy of critical materials management in the world, *Resources Recycling*, 22, p.3-12.
- Levin, L.A., Amon, D.J., and Lily, H., 2020. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining, *Nature Sustainability*, 3, p.784-794.
- Lottermoser, B.G., 2011, Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes, *Elements*, 7, p.405-410.
- Lusty, P.A., Hein, J.R.J., and Josso, P., 2018. Formation and occurrence of ferromanganese crusts: Earth's storehouse for critical metals, *Elements*, 14, p.313-318.
- McLellan, B., Yamasue, E., Tezuka, T., Corder, G., Golev, A., and Giurco, D., 2016. Critical minerals and energy-Impacts and liminations of moving to unconventional resources, *Resources*, 5, 19p.
- Meinert, L., Robinson Jr, G.P., and Nassar, N., 2016. Mineral resources: reserves, peak production and the future, *Resources*, 5(1), 14p.
- Ministry of Science and Technology, 2000. *Development of Recovery Technology of Precious Metals using Microorganisms*, Research report, Korea.
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., and Harper, E.M., 2015. By-product metals are technologically essential but have problematic supply, *Science Advances*, 1(3), e1400180.
- Pak, S-J., Seo, I., Lee, K-Y., and Hyeong, K., 2019. Rare earth elements and other critical metals in deep seabed mineral

- deposits: composition and implications for resource potential, *Minerals*, 9(1), 3p.
- Renner, H., 1997. *Platinum group metals*. In Handbook of extractive metallurgy (ed. F Habashi), Wiley-VCH, New York, NY, USA.
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003. Chapter 3.01. Composition of the Continental Crust. In Holland, H.D. and Turekian, K.K. Ed., p.1-64. *Treatise on Geochemistry*, Pergamon.
- Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., 2017. *Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, USA, 797p.
- SERNAGEOMIN, 2021.06.14., <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Dulfer, H., and Senior, A.B., 2013. *Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand*, Geoscience Australia, Canberra.
- Tunsu, C., Menard, Y., Eriksen, D.Ø., Ekber, C., and Petranikova, M., 2019. Recovery of critical materials from mine tailings: A comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems, *Journal of Cleaner Production*, 218, p.425-437.
- United States Bureau of Mines, 1985. *Mineral facts and problems*, United States Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- USGS, 1973. *United States mineral resources*, United States Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- USGS, 2009. *Minerals yearbook 2009*, Vol. I. Metals and minerals, Washington, DC, USA. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/>
- USGS, 2021. *Mineral Commodity Summaries 2021*: U.S. Geological Survey, USA, 200p. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>.
- Whang, K., Oh, J., and Lee, D., 1979. Selective flotation of scheelite from the Sangdong slimy tailings, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 16, p.255-262.
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P.T., and Binnemans, K., 2017. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: A critical review, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3, p.122-149.

이 수 정

현재 한국지질자원연구원 글로벌협력본부 책임연구원
과학기술연합대학원대학교 자원순환공학전공 교수
(本學會誌 第56卷 第5号 参照)

김 리 나

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 선임연구원
과학기술연합대학원대학교 자원순환공학전공 부교수
(本學會誌 第58卷 第1号 参照)