지질학회지 제62권 제3호, p. 571-594 (2026년 9월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 62, no. 3, p. 571-594 (September 2026)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2026.035

Check for updates

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

Review

핵심광물 성인 및 탐사 연구의 지질학적 접근법 및 동향

이범한‡, 조재국, 김남훈, 양석준, 박상준

한국지질자원연구원 광상지질연구센터

Geological approaches and research trends in the genesis and exploration of critical minerals

Bum Han Lee‡, Jaeguk Jo, Namhoon Kim, Seok-Jun Yang, Sang Joon Pak

Ore Geology Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: July 8, 2026 / **Revised:** August 18, 2026 / **Accepted:** August 18, 2026
‡**Corresponding author:** +82-42-868-3946 / **E-mail:** leebh@kigam.re.kr

요약: 전 지구적 탄소중립 정책 추진으로 리튬, 니켈, 코발트, 희토류, 구리 등 핵심광물의 수요가 급격히 증가하고 공급망 불안정이 심화됨에 따라 핵심광물 탐사를 위한 지질학적 연구도 활발히 이루어지고 있다. 본 논평은 핵심광물 탐사를 위한 지질학적 접근법과 최근 동향을 다룬다. 최근 주목받는 접근법으로는 광물 시스템을 적용한 해석과 인공지능 기반 탐사를 들 수 있다. 안정동위원소 지구화학은 모암과 광화유체의 기원, 원소 이동, 산화·환원 반응 및 유체-암석 상호작용을 추적하는 데 활용된다. 연대측정과 암석연대학은 광화 시기와 지질 사건의 시간적 관계를 규명하는 핵심 도구이며, 구조지질학적 해석은 단층, 전단대, 습곡, 균열계가 광화유체의 이동과 침전을 제어하는 과정을 밝히는 데 기여한다. 특히 IOCG (iron oxide-copper-gold) 관련 광상 연구에서는 MIAC (metasomatic iron and alkali-calcic) 광물 시스템 개념을 통해 철산화물 광화작용, 알칼리-칼슘 변질, 희토류·우라늄 광화를 광물시스템 관점에서 통합하려는 시도가 이루어지고 있다. 이러한 다학제적 접근은 핵심광물 광상의 성인 모델을 고도화하고 탐사 표적 설정의 신뢰도를 높이는 데 크게 기여할 것이다.

주요어: 핵심광물, 광상 성인, 탐사, 광물 시스템, 다학제적 접근

ABSTRACT: Driven by global carbon neutrality initiatives, the demand for critical minerals-such as lithium, nickel, cobalt, rare earth elements (REEs), and copper-has surged rapidly, intensifying supply chain instabilities. Consequently, geological research for critical mineral exploration is being actively conducted. This review covers recent trends and geological approaches in critical mineral exploration. Notable emerging approaches include mineral system-based interpretation and artificial intelligence (AI)-driven exploration. Stable isotope geochemistry is utilized to trace the origins of host rocks and mineralizing fluids, element mobility, redox reactions, and fluid-rock interactions. Geochronology and petrochronology serve as key tools for defining the temporal relationships between mineralization epochs and geological events, while structural geological interpretation contributes to elucidating how faults, shear zones, folds, and fracture systems control the transport and precipitation of mineralizing fluids. Particularly in studies of iron oxide-copper-gold (IOCG) and related deposits, attempts are being made to integrate iron oxide mineralization, alkali-calcic alteration, and REE-uranium mineralization from a mineral system perspective using the metasomatic iron and alkali-calcic (MIAC) mineral system concept. Such multidisciplinary approaches will significantly contribute to refining the genetic models of critical mineral deposits and enhancing the reliability of exploration targeting.

Key words: critical minerals, ore genesis, exploration, mineral systems, multidisciplinary approaches

Copyright © The Geological Society of Korea 2026

1. 핵심광물 성인 및 탐사 연구의 필요성과 동향

1.1. 핵심광물 성인 및 탐사 연구의 필요성

2015년, 전 세계 196개국이 참여하여 체결한 파리협정을 계기로 탄소 배출량과 흡수량을 동일하게 맞춰 지구 평균 온도 상승을 억제하자는 탄소중립 정책이 본격적으로 추진되었다. 이에 따라 전기 자동차, 이차전지, 풍력, 전력 네트워크 등 청정에너지 기술에 필요한 광물의 수요가 급격히 증가하였고, 원료 수급이 원활하지 않으면서 공급망 위기가 대두되었다. 이러한 위기에 대응하기 위해 호주, 미국, 캐나다 등 세계 각국은 자국의 광물 수급에 중요도가 높은 광물들을 핵심광물(critical minerals)로 지정하고, 안정적인 확보 전략을 마련하고 있다(Mudd e*t al.*, 2018; Hammond and Brady, 2022; Kerr, 2023). 대한민국 정부 또한 2023년, 공급망 위기 발생 가능성이 높고 국내 산업 및 경제에 미치는 영향이 큰 33종의 광물을 핵심광물로 선정하였다(Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea, 2023). 이중, 전기차, 이차전지, 반도체 분야 공급망 안정화에 우선적으로 필요한 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연과 희토류 5종(네오디뮴, 디스프로슘, 터븀, 세륨, 란탄)을 10대 전략 핵심광물로 선정하였다(Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea, 2023).

현재 각국은 자국의 산업 보호와 자원 확보를 위해 개별적으로 핵심광물을 지정하고 있지만, 주요 핵심광물의 공급망 위기는 국가를 막론하고 공통적으로 겪게 될 문제로 예상된다. 국제에너지기구(IEA)의 2024년 보고서(International Energy Agency, 2024)에 따르면, 핵심광물 수요량은 2023년 대비 2030년은 200-300%, 2050년은 250-400% 증가할 것으로 전망된다. 또한, 국제에너지기구는 이 보고서에서 수요 증가 속도, 단기 시장 균형, 장기 시장 균형, 실제 가격 변동성, 청정에너지 비용에 미치는 영향을 종합적으로 평가하여 2040년까지의 공급망 위험도를 분석하였다. 그 결과, 리튬, 구리, 코발트, 희토류, 흑연, 니켈 순으로 공급망 위험도가 높은 것으로 발표하였다. 이러한 공급망 위험도가 높은 핵심광물의 원료 확보 방안에 대한 연구가 우선적으로 수행되어야 하며, 공급망 위기에 영향을 미치는 다양한 변수를 고려하여 지속적인 모니터링과 대응 전략 마련이 필요하다.

핵심광물의 공급망 위기에 대비하기 위해 다양한 분야에서 연구가 필요하다. 핵심광물 공급망 확보에 기여할 수 있는 연구 분야는 크게 핵심광물 원료 확보를 위한 탐사와 원료의 가공 및 재활용을 위한 활용 분야로 나뉜다. 연구 방법에 따라 연구 분야가 구분되지만, 탐사 분야와 활용 분야의 융합 연구가 이루어지기도 한다(Lee e*t al.*, 2024a). 핵심광물 탐사 연구는 성인 연구, 지질학적 탐사 연구, 지구물리학적 탐사 연구로 구분된다. 특히, 핵심광물 성인 연구는 학문적인 중요성뿐만 아니라 탐사에 활용할 수 있는 지시자를 제공하는 역할을 한다. 따라서 핵심광물의 성인 및 탐사 연구는 원료 확보를 위한 중요한 과정이며, 이를 통해 안정적인 공급망을 구축하는 데 기여할 수 있다. 본 논평에서는 지질학적인 연구 방법을 이용한 핵심광물 성인 및 탐사 연구를 다루고자 한다.

1.2. 핵심광물 성인 및 탐사 연구의 지질학적 접근법

지질학적인 연구 방법을 이용한 핵심광물의 성인 및 탐사 연구는 연구 방법에 따라 광물의 미량원소를 이용한 연구 방법(Mao e*t al.*, 2016; Gregory e*t al.*, 2019; Wilkinson e*t al.*, 2020; Nie *et al.*, 2023), 광물의 동위원소를 이용한 연구 방법(Barker *et al.*, 2013; Hough *et al.*, 2019), 광물 내 유체포유물 지화학 분석 연구 방법(Wilkinson, 2001; Seo *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2019), 연대측정 및 암석연대학을 이용한 광상 형성 환경 연구 방법(Chiaradia *et al.*, 2013; Large *et al.*, 2020), 구조지질학적 광상 해석 및 탐사 방법(Cox, 2005), AI를 이용한 탐사 방법 등으로 구분할 수 있다(Xiong *et al.*, 2018; Zuo, 2020; Yang *et al.*, 2024). 특히, 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 미량원소, 안정동위원소를 이용한 지구화학적 연구 방법은 핵심광물이 농집된 광체의 특정 광물 또는 광체가 형성될 때 생성되는 변질대의 특정 광물에 함유된 미량원소나 안정동위원소를 분석하여 광상이 형성되는 환경과 과정을 알아내고 탐사 지시자를 도출하는 연구 결과들이 발표되고 있다(Barker *et al*., 2013; Mao *et al*., 2016; Beinlich *et al*., 2019; Gregory *et al*., 2019; Wilkinson *et al*., 2020; Nie *et al*., 2023). 다양한 지질학적 접근법들 중 동위원소를 이용한 연구 방법, 연대측정 및 암석연대학을 이용한 연구 방법, 구조지질학적 연구 방법은 각각 2, 3, 4장에서 자세히 다룬다.

광물 내 미량원소 분석을 통한 광상 형성 환경 및 탐사 지시자 관련 연구는 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석 등 황화광물 내 미량원소(Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Cr, In, Ge, Mn, Mo, Ni, Sb, Se, Sn, Ti, Tl, V 등)의 함량 변화로부터 열수, 속성, 변성 등 광상 형성 과정을 알아내고 탐사 지시자를 도출하는 연구(e.g., Gill *et al.*, 2016; Mukherjee and Large, 2017; Conn *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2022), 자철석, 적철석과 같은 산화광물 내 미량원소의 함량으로부터 산화광물 침전의 환경을 알아내고 탐사 지시자를 도출하는 연구(e.g., Dare *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2020), 많은 암석에서 부구성광물로 들어있고 결정 구조와 화학적 특성상 다양한 미량원소들을 포함할 수 있는 인회석 내 미량원소로부터 광상 형성 환경을 알아내고 탐사 지시자를 도출하는 연구(e.g., Bouzari *et al.*, 2016; Mao *et al.*, 2016), 변질

대에서 주로 산출되는 녹렴석 내 미량원소 함량 변화를 이용하여 탐사 지시자로 사용하고자 하는 연구들이 수행되었다(e.g., Baker *et al.*, 2020; Wilkinson *et al.*, 2020; Plouffe *et al.*, 2022).

최근 인공지능(artificial intelligence, AI)을 이용한 기술이 발달함에 따라 인공지능 기술을 이용하여 핵심광물 탐사에 적용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다(Yang *et al.*, 2024). 핵심광물 탐사에 직접적으로 적용될 수 있는 광물 잠재성도 작성(mineral prospectivity mapping, MPM)은 명시적(explicit) 자료와 내재적(implicit) 자료를 종합하여 광화작용의 잠재성이 높은 지역을 찾을 수 있도록 지도를 만드는 것으로, 1980년대부터 광물자원 탐사에 활용하기 위해 연구되어 왔으나(Agterberg, 1989), 사용 가능한 자료의 양이 증가함에 따라 AI를 활용하여 다양한 자료를 종합하고 광물 잠재성도를 작성하는 연구가 수행되고 있다(Xiong *et al.*, 2018). AI로 작성한 광물 잠재성도를 바탕으로 실제 캐나다 퀘벡주 북쪽에서 니켈황화물 광상을 찾는 탐사가 코볼드 메탈(KoBold Metals)에 의해 수행된 바 있다(Goldman and House, 2023). 국내에서도 하천 퇴적물 지구화학 자료를 바탕으로 AI를 이용하여 함리튬 페그마타이트의 부존 가능성이 높은 집수 유역 지점들을 도출하고, 현장 검증을 통해 기존에 보고되지 않은 리튬 함량이 높은 페그마타이트와 심부 리튬 부존 가능성이 높은 페그마타이트들을 발견한 연구가 수행되었고(Lee *et al.*, 2024b), 지질, 지구화학, 지구물리 등 래스터맵 자료로부터 지도학습기반 머신러닝 및 딥러닝 모델을 개발함으로써 잠재 부존지를 예측하고 지질조사를 통해 검증하기 위한 후속 연구가 착수되었다(Pak *et al.*, 2025).

핵심광물 광상의 성인 및 탐사 연구를 위해 최근에는 광물 시스템(mineral systems) 개념을 적용한 연구가 많이 이루어지고 있다. 광물 시스템 개념은 1990년대 중반 석유 시스템의 개념으로부터 전통적인 광상 모델이 갖는 한계를 극복하고 보다 포괄적인 지질학적 맥락에서 광물 부존을 설명하려는 시도에서 도입되었고(Wyborn *et al.*, 1994; McCuaig *et al.*, 2010), 광상 탐사 분야 선진국인 호주에서 광물 시스템 개념을 통한 광상 해석 기술을 발달시키면서 2010년대 중반부터 실제 탐사에 본격적으로 적용되었다(Hagemann *et al.*, 2016).

광물 시스템은 여러 가지 핵심 요소로 구성된다. 첫 번째 요소는 주요 금속의 생성, 이동, 침전을 야기하는 광화유체(i.e., hydrothermal fluids)를 생성하거나, 이동하는 역할을 하는 에너지원으로, 맨틀로부터의 열류, 마그마 활동, 지각 변형과 같은 과정이 포함된다(Hronsky and Groves, 2008). 두 번째 요소는 금속과 유체의 공급원으로, 금속이 기원하는 장소와 이를 운반하는 유체의 특성이 중요한 역할을 한다. 금속의 공급원은 마그마 분화 과정, 맨틀이나 지각 내 변질된 암석, 그리고 심부 지하수 등이 될 수 있다. 세 번째 요소는 유체의 이동 경로이다. 금속을 포함한 유체는 특정한 지질 구조를 따라 이동하며, 단층, 파쇄대, 층리면과 같은 구조적 요소들이 주요한 통로 역할을 한다(Oliver *et al.*, 2006). 네 번째 요소는 침전 환경으로, 금속이 침전하여 광상을 형성하는 과정에서 온도와 압력의 변화, 화학적 반응, 유체의 혼합 등이 중요한 요인으로 작용한다(Goldfarb *et al.*, 2001). 마지막 요소는 보존과 부화 과정이다. 형성된

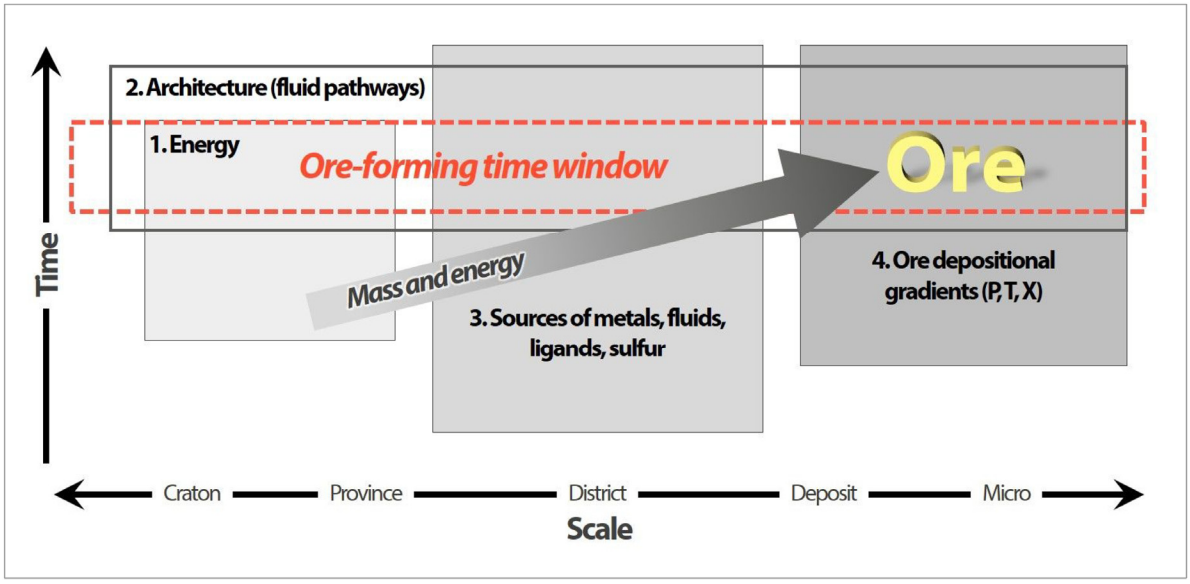

Fig. 1. Conceptual diagram of a mineral system (modified from Dulfer *et al.*, 2016).

광상이 오랜 지질학적 시간 동안 유지되고, 일부 광상은 이차적 부화 과정을 거쳐 경제적으로 더욱 가치 있는 형태로 변화할 수 있다(Frimmel *et al*., 2005). 광상이 보존되기 위해서는 침식과 변형 작용이 최소화되어야 하며, 특정 환경에서는 금속이 농축되는 부화 과정이 발생할 수 있다.

이러한 광물 시스템의 핵심 요소들은 지질학적 시간-공간 스케일(지구조-지질시대)에서 원자 단위 시간-공간 스케일(원자 단위 광물-유체 반응)까지 다양한 과정에서 일어나므로 다양한 시간-공간 스케일에서 광상 형성 환경 및 과정을 이해하기 위한 연구가 필요하다(그림 1). 구리, 희토류 등 핵심광물을 포함하고, 대규모 광상 형성이 가능한 IOCG (Iron Oxide Copper Gold) 광상을 광물 시스템 개념으로 접근하여 재해석한 Metasomatic Iron and Alkali-Calcic (MIAC) 시스템에 대한 연구도 최근 활발히 이루어지고 있다. MIAC 시스템에 대한 연구 동향은 5장에서 자세히 다룬다.

기존의 광상 연구는 특정 광상의 성인과 특정 지역의 광물 형성 과정에 초점을 맞추었지만, 보다 넓은 지질학적 배경을 고려하지 못하는 경우가 많았다. 광물 시스템 개념은 광물 형성을 개별적인 광상 모델이 아니라, 보다 광범위한 지질학적 과정의 결과로 해석하는 새로운 접근법을 제공하였다(Huston *et al*., 2016). 광상이 생성되는 과정은 매우 복잡한 지질과정이며, 다양한 지질학적 요인이 동시에 작용하기 때문에 단순한 광상 모델만으로는 충분한 설명이 어렵다. 따라서 광물 시스템 접근법을 통해 광물 형성과 관련된 모든 요인을 종합적으로 분석하고 이해하는 것이 필요하다(McCuaig and Hronsky, 2014). 전통적인 광상 모델과 비교할 때, 광물 시스템 접근법은 여러 가지 차이점을 가진다. 전통적인 광상 모델 연구의 특징은 특정 광상 유형(예: 반암형 구리-몰리브덴-금 광상, 조산대형 금 광상, 해저 열수 분출형 괴상 황화광상 등)에 관한 개별 연구에 집중하고, 광상의 형성 조건과 국지적인 지질학적 특성을 중심으로 분석하고, 광물자원의 형성을 지역적으로 한정하여 해석하며, 광물 부존 가능성을 예측할 때 기존의 알려진 광상 유형을 적용하는 방식을 사용해 왔다. 광물 시스템을 이용한 광상 성인 연구의 특징은 개별 광상 유형이 아닌, 광물 형성의 근본적인 지질학적 과정(e.g., 마그마 관입, 열수 이동, 퇴적 환경 변화 등)을 분석하고, 광물이 형성될 수 있는 전체적인 시스템(금속 원소 공급원, 유체 이동 경로, 침전 메커니즘 등)을 고려하여 탐사 가능성을 평가하며, 특정한 광상 유형에 국한되지 않고, 다양한 유형의 광상이 동일한 지질학적 환경에서 형성될 수 있음을 인식하여, 전 지구적 규모에서 지질학적 환경과 광물 부존 간의 관계를 연구하여 광물 탐사의 범위를 확장하는 데 있다. 이러한 차이로 인해 광물 시스템 접근법은 광상 형성을 보다 거시적인 관점에서 이해하는 데 유리하며, 새로운 광상 유형을 예측하는 데 강점을 가진다(Groves *et al*., 2022). 광물 시스템을 활용한 성인 연구는 다음과 같은 장점이 있다. 기존의 광상 모델은 이미 알려진 광상 유형을 기반으로 탐사를 수행하지만, 광물 시스템 접근법은 지질학적 과정과 구조적 요인을 분석하여 새로운 탐사 지역을 예측하는 데 도움을 준다(Huston *et al*., 2016). 동일한 판구조 환경에서 다양한 광상이 형성될 수 있음을 고려하여 탐사 전략을 최적화할 수 있다(McCuaig *et al*., 2010). 광물 시스템 접근법은 지구물리, 지구화학, 원격 탐사 등의 최신 기술과 결합하여 탐사 효율성을 높일 수 있으며(Hagemann *et al*., 2016), 기존 광상 모델이 적용되지 않는 지역에서도 새로운 광물을 찾을 가능성이 커진다(Groves *et al*., 2022). 반면, 광물 시스템을 활용한 연구는 다음과 같은 단점이 존재한다. 기존 광상 모델보다 더 많은 지질학적 데이터(지구화학, 지구물리, 구조 지질 등)가 필요하며, 이를 통합적으로 분석하는 데 높은 전문성이 요구된다(Muller *et al*., 2025). 넓은 범위에서 연구를 수행해야 하므로, 초기 탐사 비용이 증가할 수 있다. 기존의 잘 정립된 광상 모델과 달리, 광물 시스템 접근법은 특정 광상의 정확한 위치보다는 전체적인 형성 과정을 분석하는 것이므로, 탐사 과정에서 불확실성이 클 수 있다. 국내에서도 광물 시스템의 이러한 단점들을 보완하고 주요 핵심광물 광상들을 광물 시스템 요소별로 해석하여 탐사에 필요한 지침을 마련하기 위한 연구가 착수되었다(Lee *et al*., 2025).

2. 동위원소 지구화학을 이용한 핵심광물 연구

2.1. 안정동위원소 활용 분야

안정동위원소 지구화학의 기본 원리는 브리스코와 로빈슨에 의해 처음 인식되었으며, 이들은 자연 물질에서 붕소 동위원소 비율의 차이를 처음으로 식별했다(Briscoe and Robinson, 1925). 해당 연구에서 제시된 핵심 원리는 “다양한 상(phase)의 시스템에서는 동위원소가 선호에 따라 분별(fractionation)되는데, 하나의 상이 다른 공존상에 비해 무겁거나 가벼운 동위원소를 선택적으로 포함한다”는 것이다. 이러한 동위원소 분별은 동위원소를 포함한 하나 이상의 상의 질량 및 열역학적 특성의 미세한 차이로 인해 발생하며, 이는 평형(equilibrium) 상태 그리고/혹은 운동학적(kinetic) 과정 모두에서 발생한다(Hoefs, 2015; Werner and Cormier, 2022). 예를 들어, 물이 포화되지 않은 공기로 증발하는 과정과 광합성 중 이산화탄소가 포함되는 과정은 큰 동위원소 분별을 동반하는 비가역적인 운동학적 과정이다. 반면, 고온에서의 결정 성장과 광물의 재결정화

과정은 열역학적 평형에 가까운 조건에서 일어나므로 비교적 더 작은 동위원소 분별을 동반한다. 운동학적 분별과 달리, 상평형 조건에서의 동위원소 분별은 열역학적 규칙을 따른다(Young *et al.*, 2002). 전통적인 동위원소 분석 시스템은 일반적으로 동위원소 질량분석기(IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometry)를 활용한 연구가 알려져 있다. 이 방법은 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N), 황(S)와 같은 주요 원소들의 동위원소비를 측정하는 데 사용된다. IRMS는 각 원소의 동위원소 비율을 매우 정밀하게 분석할 수 있으므로 환경, 생물, 고고학 및 지질학 연구 등, 다양한 분야에서 활용된다(Brenna *et al.*, 1997; Krouse, 2006). 이러한 전통적인 동위원소 분석법은 물질의 기원, 이동 경로 및 변화를 추적하는 데 유용한 도구로 자리잡았다. 또한, 최근 분석 기술의 발전에 따라 비전통적인 동위원소 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 다중검출 유도결합 플라즈마 질량분석기(MC-ICP-MS, Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)의 등장으로 더욱 정교한 분석이 가능해졌다(Rehkämper *et al.*, 2001; Albarède and Beard, 2004). MC-ICP-MS는 고감도와 높은 분해능을 제공하여, 경원소(light elements)에서 금속원소를 포함하는 중원소(heavy elements)에 이르기까지 다양한 원소들의 동위원소 비율을 분석할 수 있는 장점이 있다(그림 2). 이 같은 배경하에, 최근 질량분석 기술의 발전에 힘입어 기존의 IRMS 시스템으로는 분석이 어려웠던 비전통 안정동위원소 연구 분야가 빠르게 확장되고 있다(Teng *et al.*, 2017; Rahaman, 2024).

2.2. 안정동위원소 지구화학과 핵심광물 연구

안정동위원소 지구화학은 핵심광물을 포함하는 모암체(host rock)의 형성 기원, 광물을 구성하는 주요 원소의 이동 경로 및 축적 기작을 연구하는 데 유용한 도구로 활용되고 있다. 전통적인 안정동위원소 지구화학에서는 주로 C, H, O, N, S로 대표되는 다섯 가지 원소의 안정동위원소 비율에서 발생하는 변이를 다룬다. 예를 들어, 광상의 모암체가 되는 퇴적암, 화강암, 변성암을 구성하는 1차 광물과, 일련의 열수변질 혹은 풍화작용을 통해 형성된 2차 광물 중에서 광화작용을 지시하는 광물, 또는 그 집합체를 대상으로 한 동위원소 분별 특성 연구는 핵심광물을 구성하는 특정 원소의 출처와 이동 경로를 추적하는 데 중요한 단서를 제공한다. 최근에는 비전통 안정동위원소 분석을 통해 핵심광물을 구성하는 주요 원소(e.g., Li, Ni, Fe, Cu, Mg, etc.)의 동위원소비를 도출함으로써, 핵심광물의 광화작용 규명을 위한 다양한 정보를 얻을 수 있게 되었다.

자연계에서 일어나는 동위원소 분별은 서로 다른 산화상태에 있는 원소들과의 화학 결합 성질 차이에서 발생한

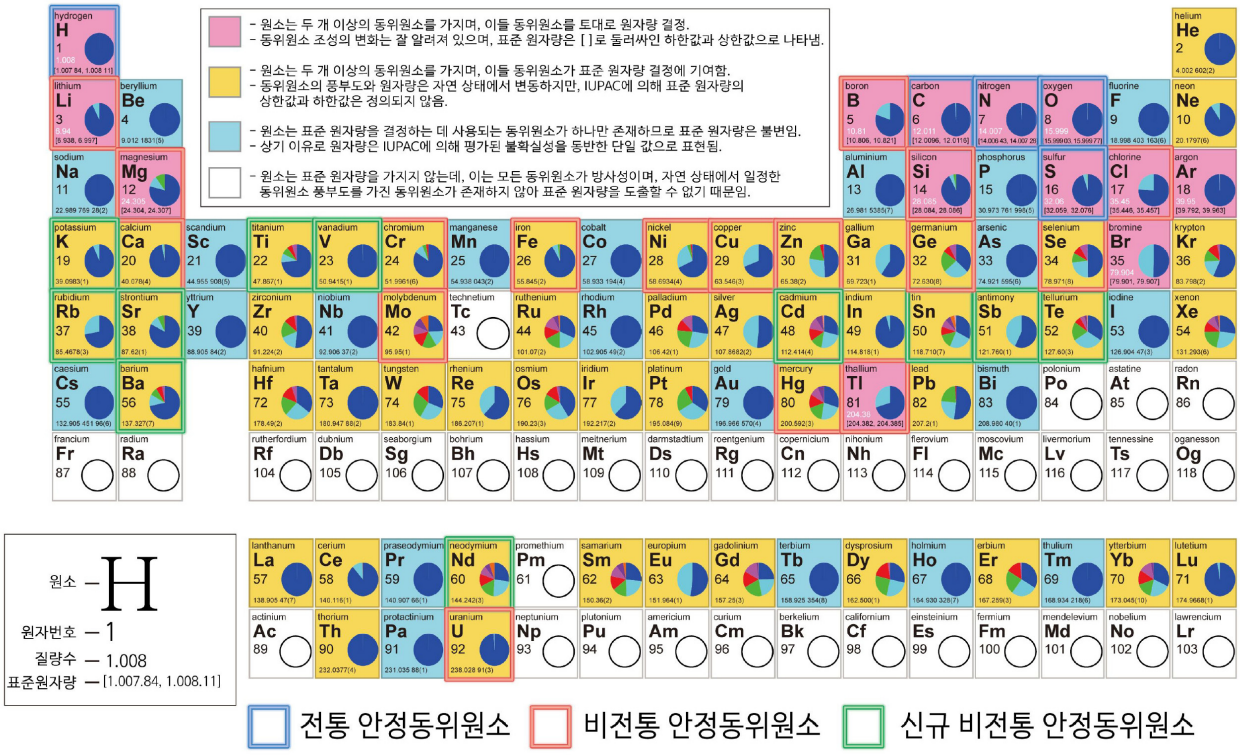

Fig. 2. Periodic table of elements and isotopes (modified from IUPAC, 2022).

다. 이산화탄소(CO_2)와 메탄(CH_4) 사이에서 나타나는 탄소동위원소 분별, 황화물(sulfide)과 황산염(sulfate) 간의 황동위원소 분별, 암모늄(NH_4^+)과 암모니아(NH_3) 사이에서의 질소동위원소 분별이 대표적이다(Li *et al.*, 2012; Sharp, 2017). 동위원소 분별은 동위원소 질량 차이에 기인한다. 가벼운 원자 질량을 가진 원소들은 무거운 원소들에 비해 동위원소 질량 차이가 크다. 예를 들어 ^{13}C-^{12}C와 ^{18}O-^{16}O 쌍의 동위원소 비율은 각각 8.3%, 12.5%인 반면, ^{87}Sr-^{86}Sr의 비율은 1.2%에 불과하다. 특히, 중수소(D)와 수소(H)의 상대 질량 차이는 거의 100%에 가깝다. 그 결과 수소 동위원소 분별 정도는 다른 원소들에 비해 약 10배 더 크다(Sharp, 2017). 이처럼 동위원소 비율의 차이를 분석함으로써, 특정 광물 내에서 동위원소의 분포를 추적하고, 그 광물이 형성된 환경이나 기원, 또는 화학적 변화를 파악할 수 있다.

2.3. 탄산염암 기반 핵심광물과 탄소-산소 동위원소비 특성

탄산염암(carbonate rocks)은 그 자체로 경제적 및 산업적 가치가 크며, 리튬, 희토류, 마그네슘과 같은 중요한 자원을 포함할 수 있다(Swart, 2015; Barker and Dipple, 2019). 따라서, 다양한 지질학적 환경에서 탄산염암을 구성하는 탄소와 산소 동위원소비 특성 파악은 핵심광물의 분포와 형성 과정을 이해하는 데 유용한 정보를 제공한다(Talbot, 1990; Kump and Arthur, 1999). 예를 들어, 바다 환경에서 석회암을 구성하는 탄소의 공급원은 용해된 중탄산(HCO_3^-)이며, 탄산염과 중탄산 이온 간의 동위원소비 분별($\Delta^{13}C_{탄산염-중탄산}$)은 약 1-2‰ 정도 발생한다(Rubinson and Clayton, 1969; Emrich *et al.*, 1970). 바다 환경에서 전체 용존 탄소(TDC; Total Dissolved Carbon)의 평균 $\delta^{13}C$ 값은 약 1‰을 보이는 반면(Kump and Arthur, 1999), 얕은 바다 환경에서는 생물학적 펌프(biological pump) 활동으로 인해 1-2‰ 높은 탄소 동위원소비를 나타낸다(Kump and Arthur, 1999; Prokoph *et al.*, 2008). 변질되지 않은 해양 탄산염암의 평균 $\delta^{13}C$ 및 $\delta^{18}O$ 값은 0‰에 가깝다(Keith and Weber, 1964; Hudson, 1977). 육지 환경에서 탄산염은 천수(meteoric water)와의 평형 상태에서 형성되므로 $\delta^{18}O$ 값이 낮다. 담수 탄산염암은 용존 무기탄소(DIC; dissolved inorganic carbon)와 대기 CO_2의 영향을 반영할 수 있다(Cerling and Quade, 1993). DIC가 해양 탄산염의 용해에서 유래했다면, $\delta^{13}C$ 값은 0에 가까울 것이다(Keith and Weber, 1964). 반면, 유기물의 산화과정에서 발생한 DIC는 침전된 탄산염의 $\delta^{13}C$ 값을 매우 낮게 만든다(Hudson, 1977). 그 결과, 담수 석회암의 $\delta^{13}C$ 값은 유기탄소의 기여 정도에 따라 음의 값을 나타낸다. 속성작용은 해양 탄산염암의 $\delta^{18}O$ 값을 낮춘다(Hudson, 1977; Allan and Matthews, 1982; Marshall, 1992). $\delta^{13}C$ 값도 속성작용 동안 낮아지는 경향이 있지만, 그 영향은 산소동위원소비 변화보다 뚜렷하지 않다(Marshall, 1992; Swart, 2015). 이는 속성작용에 관여하는 유체가 용존 탄소를 거의 포함하지 않고 기존의 탄산염 퇴적물로부터 탄소가 거의 대부분 공급되기 때문이다(Hudson, 1977; Swart, 2015). 드물게, 메탄 생성과정에서 가벼운 탄소가 제거됨에 따라 잔류 이산화탄소와 반응한 탄산염이 높은 $\delta^{13}C$ 값을 나타낸다(Mozley and Burns, 1993). 상기 동위원소 비율 특성에 근거한 탄산염암의 형성과정 이해는 핵심광물 탐사에서 광화대 구획과 같은 탐사 방향 계획 수립 시 중요한 정보를 제공할 수 있다(Barker and Dipple, 2019).

2.4. 이온흡착형 희토류 광상과 질소 동위원소비 특성

이온흡착형 광상(ion-adsorption type deposits, IADs)은 금속 이온이 점토나 다른 미세 입자 광물의 표면에 흡착되어 형성된 광물 집합체를 의미한다. 이러한 광상은 주로 중생대 화강암체의 풍화작용을 통해 형성되며, 대표적으로 중국 남부 지역에서 희토류를 포함하는 대규모 IADs (e.g., Zudong, Longnan, etc.)가 개발되고 있다(Li *et al.*, 2017).

암모늄염(e.g., $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4HCO_3)과 같은 질소화합물은 풍화된 화강암에서 형성된 점토광물의 음전하를 가진 표면층에 흡착된 희토류를 추출하는 데 널리 사용되어 왔다(Moldoveanu *et al.*, 2012). 고농도의 암모늄(NH_4^+) 이온은 점토광물의 표면층에 흡착된 교환 가능한 희토류 이온(REE^{3+})을 쉽게 대체할 수 있기 때문이다. 암모늄 형태의 질소 거동이 암석 진화와 원소순환 사이의 관계에서 중요한 역할을 한다는 사실은 여러 연구에서 보고되었다(Fischer *et al.*, 2005). 암모늄의 이온 반경(1.45 Å)은 포타슘(1.38 Å)과 유사하여 각섬석, 운모류, K-장석류 등과 같은 조암광물의 격자 내에서 치환될 수 있다(Mahler and Persson, 2012; Sidey, 2016). 이러한 1차 광물이 열수교대나 풍화 과정을 겪으면서 동위원소 분별이 일어난다(Hall, 1993). 모암체에서 희토류가 풍부한 경우, 일련의 열수 교대 및 풍화 과정을 통해 희토류 원소들이 모암체 내 희토류 광물로부터 침출되고, 2차 점토광물에 재농집된다. 이 과정에서 암모늄 형태의 질소 거동은 희토류 농집과 밀접한 관계가 있다(Jo *et al.*, 2023). 특히, pH 5-6의 약산성 환경에서는 질소가 주로 암모늄 형태로 거동하며 점토광물 내에 흡착된다. 그 결과, 희토류는 점토광물에서 암모늄과 높은 상관성을 보이며 공존한다. 동시에, 암모늄 형태의 질소가 희토류와 함께 점토 입자 내 축적되는 과정은 질소동위원소비 특성으로 기록된다. 예를 들어, 희토류가 풍부한 화강암이 열수교대 및 풍화과정을 겪는 동안 온도와 pH 변화로 인해 광물 내 암모늄과 암모니아 사이에서 질량 분배

가 일어나고, 이와 함께 질소동위원소 분별이 발생한다(Li *et al.*, 2012). 퇴적물에 남아 있는 암모늄의 질소동위원소 값은 풍화 과정 중 상대적으로 가벼운 ^{14}N이 풍부한 암모니아 가스의 우선적 방출로 인해, 잔여 퇴적물의 동위원소비는 ^{15}N이 부화된 무거운 경향을 보인다(Pitcairn *et al.*, 2005). 또한, 희토류가 풍부한 화강암체의 $\delta^{15}N$ 값은 모암체의 출처로 여겨지는 심부 마그마 기원과 유기물이 풍부한 퇴적 기원과 같은 서로 다른 출처에서 공급된 질소와의 상호작용에 기인하므로 암모늄-질소 농도 및 동위원소 조성의 체계적인 변화와 2차적으로 형성된 카올린 그룹 광물의 축적 기작 연구는 풍화 화강암과 관련된 IADs 광화작용 특성을 이해하는 데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

2.5. 비전통 안정동위원소와 핵심광물 연구

동위원소 질량분석 기술의 발전에 힘입어, 최근 많은 연구자들에 의해 보고되고 있는 비전통 안정동위원소 연구는 핵심광물(e.g., Li, REE, Cu, etc.)과 관련된 광상의 성인 해석에 필요한 지질학적 정보를 제공하며, 광상 탐사의 지시자로서 활용될 잠재력이 높은 연구 분야로 주목받고 있다. 예를 들어, 리튬 자원은 크게 염호형(brine type), 암석형(pegmatite type), 점토형(clay type)으로 분포하는데, 리튬 광상의 형성 기작 연구에서 리튬 동위원소비(δ^7Li)는 리튬의 기원과 광상 형성 과정을 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다. δ^7Li 특성은 마그마 및 열수 환경에서 발생하는 리튬의 이동과 분별뿐만 아니라 저온 환경에서의 유체-암석 상호작용을 추적하는 데에도 활용될 수 있다(Pogge von Strandmann *et al.*, 2019). 예를 들어, 광물 내 치환되어 있던 리튬이 침출되어 유체 내 용존되면서 리튬 함량이 증가하고 동시에 리튬 동위원소비 분별이 발생한다(Parkinson *et al.*, 2007). 이러한 리튬 분별 계수는 온도 변화에 지배되므로 리튬 동위원소비에 근거한 유체의 이동 경로 추적 및 화학반응을 예상해 볼 수 있다(Parkinson *et al.*, 2007). 신선한 맨틀 기원 현무암의 Li 동위원소 조성은 비교적 제한된 범위를 보이며, 전 세계 N-MORB의 평균 δ^7Li 값은 약 +3.4 ± 1.4‰로 보고되어 상부 맨틀의 대표적인 조성과 유사하다(Tomascak *et al.*, 2008). 반면, 현대 해수의 δ^7Li 값은 약 +31‰로 맨틀 및 신선한 현무암보다 현저히 높은 값을 나타낸다(Jeffcoate *et al.*, 2004). 해저에서 저온 변질을 받은 현무암은 해수-암석 반응 과정에서 동위원소적으로 무거운 해수 기원의 Li를 흡수함에 따라 신선한 현무암보다 높은 δ^7Li 값을 나타낼 수 있으며, 이러한 변화는 해수-해양지각 사이의 Li 교환 과정을 반영한다(Chan *et al.*, 1992; Chan *et al.*, 2002). 한편, 상부 대륙지각의 평균 δ^7Li 값은 약 0‰로 상부 맨틀(약 +4 ± 2‰)보다 낮으며, 이는 대륙지각이 장기간 경험한 화학적 풍화 과정에서 ^7Li가 상대적으로 유체로 이동하고 가벼운 Li가 풍화 잔류물에 선택적으로 보존된 결과로 해석된다(Teng *et al.*, 2004). 이러한 리튬 동위원소 분별 특성은 리튬을 함유한 암석과 광체가 마그마 분화, 열수작용, 유체-암석 반응 및 풍화와 같은 지질학적 과정을 거치는 동안 기록된 물질 이동의 이력을 추적할 수 있는 중요한 단서를 제공한다.

또한, $\delta^{26}Mg$, $\delta^{44}Ca$, $\delta^{56}Fe$ 특성은 주로 탄산염으로 이루어진 화성암인 함철-희토류 카보나타이트(carbonatite) 연구 분야에서 폭넓게 활용되어 왔다(Antonelli *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2023). $\delta^{26}Mg$와 $\delta^{44}Ca$는 희토류 광물과 함께 산출되는 탄산염광물(e.g., dolomite, calcite, etc.)의 형성 과정에서 관여한 유체의 기원과 주변 암체와 상호작용을 통한 원소의 거동 특성을 규명하는 중요한 단서를 제공한다(Amsellem *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2021). 특히, Fe는 +2가(e.g., ilmenite; $FeTiO_3$, pyrrhotite; $Fe_{1-x}S$)와 +3가(e.g., hematite; Fe_2O_3, goethite; FeO(OH))로 존재하며, 자철석(magnetite; $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$)에서는 Fe^{2+}와 Fe^{3+}가 공존한다. 따라서, 광물별 $\delta^{56}Fe$ 조성은 함철-희토류 카보나타이트 광체를 형성시킨 유체의 기원뿐만 아니라, 광화작용 중 발생한 산화-환원 반응과 유체-광물 간 화학적 진화 과정을 규명하는 데 활용될 수 있다(Sun *et al.*, 2013). 대표적으로, 중국 내몽골 자치구에 위치한 바얀보오(Bayan Obo)와 서호주에 위치한 마운트 웰드(Mount Weld) 광산을 대상으로 비전통 동위원소 연구가 알려져 있다(Sun *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2026). 최근에는 $\delta^{65}Cu$ 특성을 이용한 반암동 광상(porphyry copper deposits)의 성인 연구가 보고되었다(Zheng *et al.*, 2019; Sarjoughian *et al.*, 2024; Babazadeh *et al.*, 2025). Cu는 광물 격자에서 +1가 혹은 +2가로 존재하므로 광화작용 동안 수반되는 산화-환원 반응, 광화유체의 기원과 이동 경로를 추정하는 지시자로 활용될 수 있다. 예를 들어, $\delta^{65}Cu$는 광화작용이 일어날 당시의 물리·화학적 조건에 민감하게 반응하며 동위원소 분별을 일으키므로 동위원소비 특성에 근거하여 광체의 형성에 관여한 마그마 기원을 유추할 수 있다(Zhang *et al.*, 2024). 대표적으로 이란의 케르만(Kerman) 반암동광상을 대상으로 한 비전통 안정동위원소 연구가 알려져 있다(Sarjoughian *et al.*, 2024).

향후 동위원소 지구화학 연구에서는 단일 동위원소계의 해석에 머무르기보다, Li, Mg, Fe, Cu 등 비전통 안정동위원소와 C-O-H-S-N 동위원소 자료를 함께 활용하여 광화유체의 기원, 유체-암석 반응, 산화-환원 조건 변화를 복합적으로 해석할 필요가 있다. 또한 동일 광상 내에서도 광물별·변질대별 동위원소 조성이 다르게 기록될 수 있으므로, 광물학적 산상, 미량원소 조성, 연대자료와 결합한 다중 동위원소 연구가 강화되어야 한다. 이러한 접근은 핵심광물

광상의 형성 과정을 보다 정밀하게 규명하고, 탐사 단계에서 활용 가능한 동위원소 지시자를 체계화하는 데 기여할 것이다.

3. 연대측정 및 암석연대학 연구를 통한 핵심광물 성인 연구

3.1. 연대측정 기법의 원리와 적용 범위 확대

연대측정 연구는 방사성 동위원소 조성을 이용하여 광물의 절대 연대(absolute age)를 결정하고, 이후의 열적 변화(thermal history) 및 관련된 지질학적 사건(geological process)을 추적할 수 있으며, 이를 통해 광물의 생성 및 진화 과정을 밝히는 데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 최근 분석 기기의 발달로 인해 연대측정이 가능한 광물의 종류가 확대되었고, 광화작용 동안에 형성된 광석광물에 대한 직접적인 분석이 가능해짐에 따라 이들에 대한 연대측정 결과를 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다. 다양한 절대연령 측정 방법 중 U-Pb 동위원소 조성을 이용한 연대측정법은 주로 저어콘(zircon)과 모나자이트(monazite)를 대상으로 화성암, 변성암, 그리고 퇴적암의 형성, 변성 및 퇴적 시기를 규명하기 위해 많이 활용되어 왔다. 최근에는 분석 기기 및 기술의 발달과 다양한 표준 광물에 대한 연구가 폭넓게 수행됨에 따라 현재는 다양한 광물(갈렴석(allanite), 인회석(apatite), 방해석(calcite), 석석(cassiterite), 컬럼바이트-탄탈라이트(columbite-tantalite, coltan), 석류석(garnet), 금홍석(rutile), 철망간중석(wolframite)) 등에 대해 U-Pb 연대측정을 수행할 수 있으며, 이들 광물은 광화 시기 규명을 위해 광범위하게 활용되고 있다(Chelle-Michou and Schaltegger, 2023). 특히, 레이저 삭박 유도결합 플라즈마 질량분석법(LA-ICP-MS)의 발전으로 열수 광상에서 흔히 산출되는 방해석과 같은 탄산염광물에 대한 U-Pb 연대측정이 가능해지면서, 저온 열수계 및 광화작용의 시기를 직접 제약할 수 있는 길이 열렸다(Roberts *et al.*, 2020). 또한, U-Pb 연대측정법 외에도 휘수연석(molybdenite)의 Re-Os 연대측정법은 광석광물 자체의 정출 시기를 직접 결정할 수 있는 대표적인 방법으로, 마그마-열수 광상의 광화 시기 규명에 폭넓게 활용되고 있다(Stein *et al.*, 2001). 국내에서도 상동 텅스텐-몰리브데넘 광상을 대상으로 유체포유물 연구와 함께 ^{39}Ar-^{40}Ar 연대측정이 수행되어 마그마-열수 광화작용의 시기가 규명된 바 있다(Seo *et al.*, 2017). 이처럼 연대측정이 가능한 광물의 종류가 확대되고 광화작용 동안에 형성된 광석광물에 대한 직접적인 분석이 가능해짐에 따라, 핵심광물의 형성 과정을 이해하기 위한 절대연령 측정 결과를 적극적으로 활용하는 연구가 활발히 수행되고 있다.

3.2. 다중 광물 연대측정을 통한 핵심광물 광상 성인 해석 사례

Lu *et al.* (2011)은 중국 지린성(Jilin Province) Hongqiling magmatic Ni-Cu 광상으로부터 SHRIMP 저어콘 U-Pb 및 ID-TIMS pyrrhotite Re-Os 연대측정을 수행하였다. 연구자들은 연대측정 결과로부터 Hongqiling Ni-Cu 광상이 후기 페름기 Hulan Group 변성퇴적암의 퇴적(272.2 ± 4.3 Ma, zircon U-Pb), 후기 트라이아스기에 마그마-열수 작용(208 ± 21 Ma, pyrrhotite Re-Os)에 의한 Ni-Cu 광화작용의 순서로 진화하였음을 밝혔다. Xiong *et al.* (2020)은 남중국에서 가장 큰 희유금속 페그마타이트 광화대로 알려진 Renli 광상에서 모암과 함 희유금속 페그마타이트의 관계를 파악하기 위해 LA-ICP-MS 저어콘, 모나자이트, 그리고 coltan U-Pb 연대측정을 수행하였다. 이들은 연구 지역의 화성 및 광화작용의 시기를 흑운모 몬조화강암의 관입(154.1 ± 2.5 Ma, zircon U-Pb), 백운모 몬조화강암 관입(141.0 ± 2.4 Ma, zircon U-Pb; 140.7 ± 2.2 Ma, monazite U-Pb), 그리고 함 Nb-Ta 페그마타이트 관입(140.2 ± 2.3 Ma, coltan U-Pb)으로 보고하였다. 더 나아가 연대측정 결과와 지구화학적 특성을 함께 고려하여 Renli 광상의 광화작용이 백운모 몬조화강암과 밀접한 관련성이 있음을 주장하였으며, 남중국 지역에 분포하는 초기 백악기에 형성된 백운모 몬조화강암을 Nb-Ta 광상 탐사의 주요 목표 대상으로 고려해야 함을 주장하였다. Lentz *et al.* (2020)은 캐나다 뉴브런즈윅주 Lake George Sb-Au-W-Mo 광상의 성인을 규명하기 위해 U-Pb, Ar-Ar, Re-Os 연대측정을 수행하였다. 이들 동위원소를 이용한 연대측정 결과를 활용하여 Lake George 광상은 화강섬록암의 관입(419.6 ± 1.4 Ma, LA-ICP-MS zircon U-Pb), 황반암(lamprophyre)의 관입(419.4 ± 1.4 Ma, Ar-Ar 금운모 step leaching), W-Mo 광화작용(417.5 ± 1.7 Ma, 416.1 ± 1.7 Ma, 휘수연석 동위원소 희석 열이온화 질량분석(isotope dilution thermal ionization mass spectrometry)), 그리고 금(Au)-안티모니(Sb) 광화작용(414.1 ± 1.3 Ma, 금운모 Ar-Ar step heating)의 순으로 진화하였음을 밝혔다. McCauley and Bradley (2014)는 세계 각지에 분포하는 377개 지역의 페그마타이트에 대한 연대측정 결과를 종합하여 페그마타이트 형성 시기와 광화작용의 관련성을 밝힌 바 있다. 이들은 저어콘, 모나자이트, 인회석, 콜탄 등에 대한 U-Pb, Rb-Sr, ^{40}Ar/^{39}Ar, 그리고 Re-Os 연대측정 결과를 정리하였다. 이를 통해 Lithium-Cesium-Tantalum (LCT) 페그마타이트는 신원생대부터 삼첩기에 이르기까지 다양한 생성 시기(2,638, 1,800, 962, 529, 485, 371, 309, 및 274 Ma)에 형성되었지만, Niobium-Yttrium-Fluorine (NYF) 페그마타이트는 약 1,000 Ma에 집중적으로 형성되었음을 밝혔다. 더 나아가 함 희유금속

페그마타이트의 형성 시기는 초대륙 형성 및 이와 관련된 판구조 운동과 밀접한 관련이 있음을 주장한 바 있다. Partington *et al.* (1995)는 세계 최대 규모의 리튬 매장지 중 하나인 Greenbushes 페그마타이트에 대해 광상의 형성과 광화작용의 시기를 규명하기 위해 전암, 저어콘, 그리고 백운모에 대한 지질연대학적 연구를 수행한 바 있다. 이들은 분석 결과를 종합적으로 해석하여 Greenbushes 페그마타이트가 신시생대(2,527 Ma, SHRIMP 저어콘 U-Pb)에 관입, 고원생대(2,430 Ma, 전암 Pb-Pb)의 열수 변질과 2차 광화작용, 그리고 신원생대(약 1,100 Ma, 백운모 Rb-Sr)에 변형 및 광물 재이동을 거쳤음을 밝혔다. 이를 통해 Greenbushes 페그마타이트는 단순한 마그마 분화 산물이 아니며 장기간의 지질학적 과정을 거쳐 형성된 복합적인 광상임을 밝힌 바가 있으며, 페그마타이트 광상의 성인 연구에 중요한 기초 자료를 제공하였다.

3.3. 암석연대학(Petrochronology)의 개념과 적용 사례

최근에는 암석학, 지질연대학, 그리고 지구화학 연구를 종합적으로 활용하여 암석의 형성과 변형 과정에 대한 시간적 정보와 화학적 조건을 연계하여 연구하는 암석연대학(petrochronology)의 필요성이 대두되고 있다. 암석연대학은 연대측정 결과를 단순한 수치 연령이 아니라 특정 암석 형성 과정 및 그 물리·화학적 조건과 연계하여 해석하는 접근법으로 정의되며, 전자현미분석(Electron Probe Micro-Analysis, EPMA), Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS), Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) 등 다양한 분석 기법의 발전과 함께 빠르게 발전하고 있는 연구 분야이다(Engi *et al.*, 2017). 암석연대학의 방법론적 발전에서 특히 주목되는 것은 동일한 광물 미소영역에서 연령과 지화학 정보를 동시에 획득하는 기법의 등장이다. 레이저 삭박 분할 흐름(laser-ablation split-stream, LASS) 분석은 단일 레이저 삭박으로 발생한 시료를 두 대의 질량분석기로 나누어 U-Pb 연령과 미량원소 조성을 동시에 측정하는 기법으로, 복잡한 지질 이력을 경험한 암석에서 연령별 성장 누대(growth zone)와 지화학적 조건을 직접 연계하여 해석할 수 있게 하였다(Kylander-Clark *et al.*, 2013). 또한, 저어콘의 경우 Ti 함량을 이용한 결정화 온도 추정(Ti-in-zircon thermometry), 희토류 원소 패턴과 Ce 및 Eu 이상치를 통한 산화환원 상태 추정과 석류석과 모나자이트 등 공존 광물과의 원소 분배 관계를 이용한 성장 환경 해석이 가능하며, 연령 자료에 암석학적 맥락(petrologic context)을 부여하는 대표적인 암석연대학 도구로 자리 잡았다(Rubatto, 2017). 과거 지질연대학 분야의 연구는 암석의 단순한 절대 연대를 결정하는 데 주목적이 있었던 것과는 달리 암석연대학은 다양한 연대 자료 활용, 열적 및 지화학적 자료와 연대 데이터에 대한 종합적인 고찰을 통해 다양한 지질학적 과정의 속도 및 지속 시간을 연구함으로써 연구 대상 암체의 기원 물질, 형성 및 진화 과정 등 종합적인 지질 환경의 변천 과정을 밝히는 데 유용한 연구 방법이다. 이러한 특성은 광상 성인 및 진화 과정을 고찰하는데 폭넓게 활용되고 있으며, 핵심광물과 관련된 최근의 연구 결과를 간략히 살펴보면 다음과 같다. Chelle-Michou *et al.* (2014)은 페루의 Coroccohuayco 반암 동 광상을 대상으로 LA-ICP-MS와 ID-TIMS 저어콘 U-Pb 연대측정 결과, 저어콘 Hf 동위원소와 미량원소 조성 분석을 통해 반암 구리(Cu) 광상 형성과 심부 기원 마그마에 대한 시간적 관계를 규명하였다. 연구 결과, 반암 동 광상의 형성은 단일 사건이 아닌 최소 500만 년에 걸친 장기적인 마그마 진화 과정의 일부이며, 최대 열적 조건(thermal peak)에서 반암 관입 및 광화 작용이 발생함을 확인하였다. 또한, 마그마 재주입(rejuvenation)이 핵심적인 과정으로 작용하며, 새로운 마그마의 유입과 기존 마그마의 재용융(remelting)을 통해 금속 성분이 농집되고, 이후 마그마가 냉각되면서 유체 방출과 광화작용이 발생한 것으로 해석하였다. 저어콘의 Ce 이상치(Ce anomaly) 분석을 통해 마그마의 산화 상태는 상부 지각이 아닌 심부에서 결정됨을 확인하였으며, 이는 반암형 구리(Cu) 광상이 높은 산화 환경에서 형성된 것으로 판단하였다. 한편, Garber *et al.* (2017)은 변성작용을 경험한 광상 내 티타나이트(titanite)를 대상으로 U-Pb 연대측정과 미량원소 분석을 수행하여, 변성작용의 시간적 제약과 광물 형성 과정의 해석을 시도하였다. 연구 결과, 티타나이트의 미량원소 조성이 변성 온도와 유체 조성에 따라 달라질 수 있음을 보여주었으며, 이는 변성 광상의 성인 해석과 광물 탐사에 활용될 수 있는 중요한 정보로 작용한다. Poletti *et al.* (2016)은 미국 캘리포니아 Mountain Pass 지역의 초고포타슘질(ultra-high potassic) 및 탄산염암 관입암 복합체에서 저어콘, 티타나이트, 모나자이트를 대상으로 U-Pb 연대측정과 동위원소 분석을 수행하였고, 이를 통해, 이들 암석이 동일한 맨틀 근원을 가지지만 서로 다른 용융 및 분화 과정을 거쳤음을 밝혀내어, 희토류 광상의 성인 해석에 중요한 정보를 제공하였다. 이러한 연구들은 암석연대학을 이용하여 핵심광물의 형성 시기와 진화 과정에 대한 해석을 더욱 정밀하게 수행할 수 있음을 보여준다.

3.4. 연대측정 및 암석연대학 연구의 쟁점과 향후 과제

핵심광물 성인 연구에서 연대측정은 광물 형성과 변형 과정의 시간적 흐름을 규명하기 위해 필수적이며, 몇 가지 방법론적 쟁점이 상존한다. 첫째, 단일 광물 연대측정만으로는 특정 광물화 사건(crystallization event)의 시점만을 제공하는 한계가 있다. 서로 다른 광물과 동위원소계는 각기

다른 폐쇄온도(closure temperature)를 가지므로(Dodson, 1973), 동일한 광상에서도 분석 대상 광물에 따라 겉보기 연령(apparent age)이 달라질 수 있으며, 이는 U-Pb, Ar-Ar, Re-Os 연대 사이의 불일치로 나타나기도 한다. 특히 반암형 광상과 같이 광화작용이 수십만 년 이내의 짧은 시간 동안 반복적으로 발생하는 시스템에서는, 각 동위원소계의 분석 정밀도와 폐쇄온도 차이를 고려하지 않으면 광화작용의 지속시간을 과대 혹은 과소평가할 수 있다는 점이 지적된 바 있다(Chiaradia *et al.*, 2013). 따라서 저어콘, 모나자이트, 휘수연석, 황철석 등 다양한 광물을 활용한 연대측정을 병행하면, 동일한 광상 내에서도 여러 단계의 마그마 작용, 변성작용, 유체 이동이 언제 어떻게 진행되었는지를 보다 정밀하게 분석할 수 있다. 둘째, 연대측정 데이터만으로는 광물 형성 당시의 물리화학적 환경을 온전히 복원하기 어렵다는 점이다. 연대측정 데이터와 광물의 미량원소 및 동위원소 조성을 통합적으로 해석하면, 광물 형성 당시의 온도-압력 조건뿐만 아니라 유체의 기원, 광물화 환경, 산화 상태 등의 정보를 동시에 확보할 수 있어 성인 연구의 해석력을 크게 향상할 수 있다. 셋째, 국내 광상을 대상으로 한 정밀 연대측정 연구는 아직 상대적으로 제한적이며(e.g., Seo *et al.*, 2017), 국내 핵심광물 광상의 성인 규명과 탐사 지시자 도출을 위해서는 다중 동위원소 연대측정 및 암석연대학 사례 연구의 축적이 요구된다. 앞으로는 고정밀 연대측정 기법(U-Pb, Re-Os, Ar-Ar 등)의 발전과 함께, 광물의 지화학적 특징을 정량적으로 평가할 수 있는 기계학습 및 빅데이터 분석 기법이 도입됨으로써, 다양한 지질 환경에서 광물 성인의 복합적 메커니즘을 보다 정교하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 연대측정 및 암석연대학 자료를 광물 시스템(mineral system) 요소별 해석과 결합하여 광화작용의 시기, 지속시간, 물리·화학적 조건을 통합적으로 제약하는 연구는 핵심광물 탐사 지시자 도출에 직접적으로 기여할 수 있는 향후 중요한 연구 방향이 될 것이다. 이와 함께 다음과 같은 과제들이 해결되어야 할 것으로 판단한다. 첫째, 방해석, 석석, 철망간중석 등 새롭게 연대측정 대상이 된 광물들은 저어콘에 비해 U 함량이 낮고 비방사기원 납(common Pb)의 비율이 높아 얻어진 연령의 정밀도와 정확도가 제한되는 경우가 많다. 이를 극복하기 위해 광물별 균질한 표준물질(reference material)의 개발과 실험실 간 교차검증 체계의 구축이 선행되어야 한다(Roberts *et al.*, 2020; Chelle-Michou and Schaltegger, 2023). 둘째, LASS 분석과 같이 연령과 지화학 자료를 동시에 획득하는 기법을 광석광물 및 변질 광물에 확대 적용하여, 광화작용

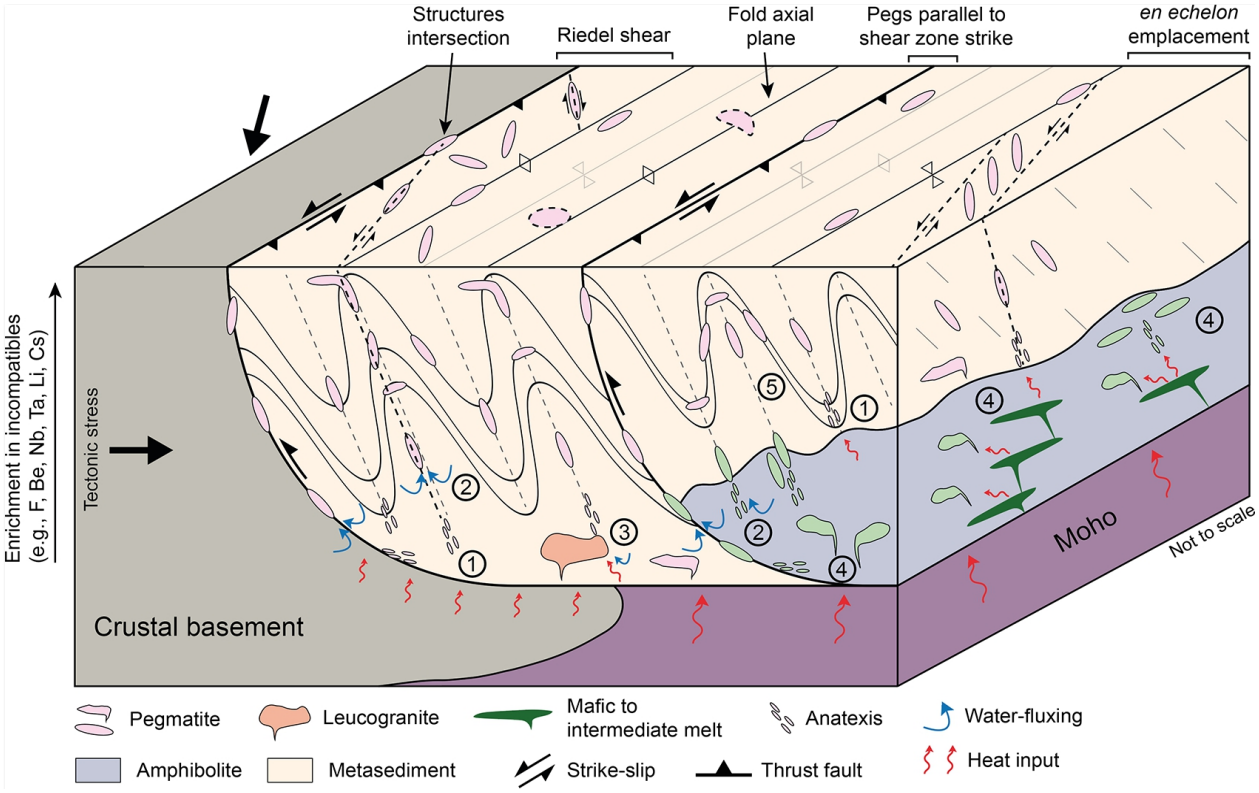

Fig. 3. Schematic model of anatectic pegmatites showing the generation, migration, and crystallization/stalling of pegmatitic melts, and the major structures controlling these processes (modified from Silva *et al.*, 2023).

의 각 단계를 시간-온도-유체 조성의 통합적 틀에서 복원하는 연구가 필요하다. 셋째, 국내외에서 축적되고 있는 방대한 연대측정 및 지화학 자료를 표준화된 데이터베이스로 구축하고, 이를 기계학습 기반으로 광상 예측 모델(e.g., Yang *et al.*, 2024)의 학습 자료로 활용한다면, 연대측정·암석연대학 연구는 개별 광상의 성인 규명을 넘어 광역적 핵심광물 탐사 전략 수립에도 직접 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 구조지질학적 해석을 통한 핵심광물 연구

4.1. 핵심광물 탐사를 위한 구조지질학적 연구

핵심광물 연구와 탐사는 단순한 자원의 발견을 넘어, 해당 광상이 형성된 지질학적 조건을 체계적으로 분석하고 해석하는 과정이다(e.g., McCuaig *et al.*, 2010). 특히 구조지질학은 지구의 다양한 지질구조와 그 변형 과정을 다루며, 지각 변형, 단층, 습곡, 균열 등의 구조적 요소들이 광상 형성에 미치는 영향을 이해하는 데 중요한 역할을 한다(e.g., Pirajno, 2009; Fossen, 2016). 이러한 연구는 자원의 분포를 예측하고, 광상의 위치와 특성을 설명하는 데 필수적인 도구를 제공한다(e.g., McKinstry, 1948; Robb, 2021).

구조지질학적 관점에서 광상의 형성과 분포는 화학적 작용뿐만 아니라, 암석의 변형 작용으로 형성된 단층 시스템과 이에 작용하는 응력의 상관관계 및 물리적 특성에 의해서도 결정된다(e.g., Cox *et al.*, 2001). 많은 광상 유형은 후생성(epigenetic)으로 분류되며, 광상의 형성 과정이 지질구조에 의해 제어된다고 알려져 있다(e.g., Vearncombe, 2023). 예를 들어, 맥상형 금(Au) 광상은 후생성 광상 유형으로 가장 잘 알려져 있으며, 이러한 후생성 지질구조에 의한 제어는 분지(basin)형 연-아연(Pb-Zn) 광상에서도 나타난다(Sangster, 1996).

동시성(syngenetic) 광상 역시 지질구조, 특히 천부지각의 단층계에 의해 제어되며, 이를 대표하는 유형으로 천열수형(epithermal) 광상과 해저화산성 괴상황화물형(VMS) 광상을 들 수 있다(Vearncombe, 2023). 시생대 니켈(Ni) 광상은 화성기원으로 형성되지만, 중요 지질구조의 제어를 받거나 이에 의해 이차 부화가 발생할 수 있다(Perring, 2015). 철(Fe) 광상 역시 주로 후생성 퇴적기원으로 형성되나, 주요 단층 및 균열대를 통한 유체 이동에 의해 이차 부화가 발생할 수 있다(Hagemann *et al.*, 2016). 반암형 구리-몰리브덴-금 광상은 마그마의 천부 관입에 의해 발달한 지질구조를 따라 형성된다(Skarmeta, 2021). 이처럼, 지질구조는 광상 형성의 주요 제어 요인 중 하나이며, 구조지질학은 광상의 발견·개발·평가에 필수적인 학문으로 자리매김하고 있다.

핵심광물 탐사를 위한 대표적인 구조지질학적 연구 방법으로는 다음 네 가지를 들 수 있다(e.g., McCuaig and Hronsky, 2014). 첫째는 지질도 및 지질구조 해석이다. 이는 탐사 지역의 주요 지질구조와 구조구의 변화, 암상을 식별하고 광물 부존 가능성이 높은 지역을 파악하는 데 필수적이다(Brimhall *et al.*, 2006). 둘째는 3D 구조 모델링이다. 이를 통해 지질구조와 광상의 형성 과정을 분석하고, 유체의 흐름 특성을 파악함으로써 광상의 깊이와 위치를 예측할 수 있다(Caumon *et al.*, 2009; Gloyn-Jones and Kisters, 2019). 셋째는 단층 및 단열 분석이다. 단층과 단열은 광화유체가 이동하고 집중될 수 있는 경로로, 이를 통해 광화대가 분포할 가능성이 높은 지역을 예측할 수 있다(Cox *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2022). 넷째는 응력 분석이다. 지각 내 응력 분포를 분석하여 광화작용이 발생할 가능성이 높은 지역을 예측하는 방법이다(Groves *et al.*, 1998; Sibson, 2001).

4.2. 구조지질학 연구 적용 사례 및 동향

지질구조의 기하학적·운동학적 특성은 광물 침전의 심도와 위치를 예측하는 데 중요한 단서를 제공하며, 습곡의 힌지 부분과 같은 구조는 대규모 광상이 형성될 가능성이 높은 공간을 지시하기도 한다(Cox *et al.*, 2001; Goldfarb and Groves, 2015). 이러한 구조적 제어는 실제 다양한 광상 유형과 탐사 현장에서 확인되어 왔으며, 이 절에서는 그 구체적 사례와 최근 연구 동향을 살펴본다.

리튬 페그마타이트의 탐사 및 채굴은 최근 몇 년간 에너지 저장 산업의 성장과 함께 리튬을 비롯한 에너지 저장 광물의 수요가 급증하면서 그 중요성이 더욱 커지고 있으며, 이에 따라 리튬 페그마타이트의 형성 및 분포에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(e.g., London, 2005). 현재 리튬 페그마타이트에 관한 연구는 대부분 화학적 분별 작용에 초점을 맞추고 있으며, 페그마타이트가 모화강암으로부터 진화했다고 가정하는 경우가 많다. 그러나 모화강암과 페그마타이트 사이의 연결 관계가 명확하지 않은 경우에는 이러한 가정이 한계에 부딪힌다. 이러한 이유로 최근 Silva *et al.* (2023)은 캐나다 마니토바(Manitoba)의 웨쿠스코 호수(Wekusko Lake) 페그마타이트 광상 연구를 통해 아나텍시스 모델(anatectic model)을 제안하였다(그림 3). 이 모델은 화학적 분별 작용 중심의 기존 해석과 달리, 기존 암석의 용융 과정과 용융체의 이동·축적을 제어한 지질구조에 주목함으로써 모화강암-페그마타이트 간 연결 관계가 불분명한 사례를 설명할 수 있는 대안적 관점을 제시한다.

구조를 활용한 탐사 성공 사례는 다른 금속 광상에서도 확인된다. 2012년의 노바-볼린저(Nova-Bollinger) Ni-Cu 광상이 발견된 이후, 프레이저 존(Fraser Zone)과 앨버니-

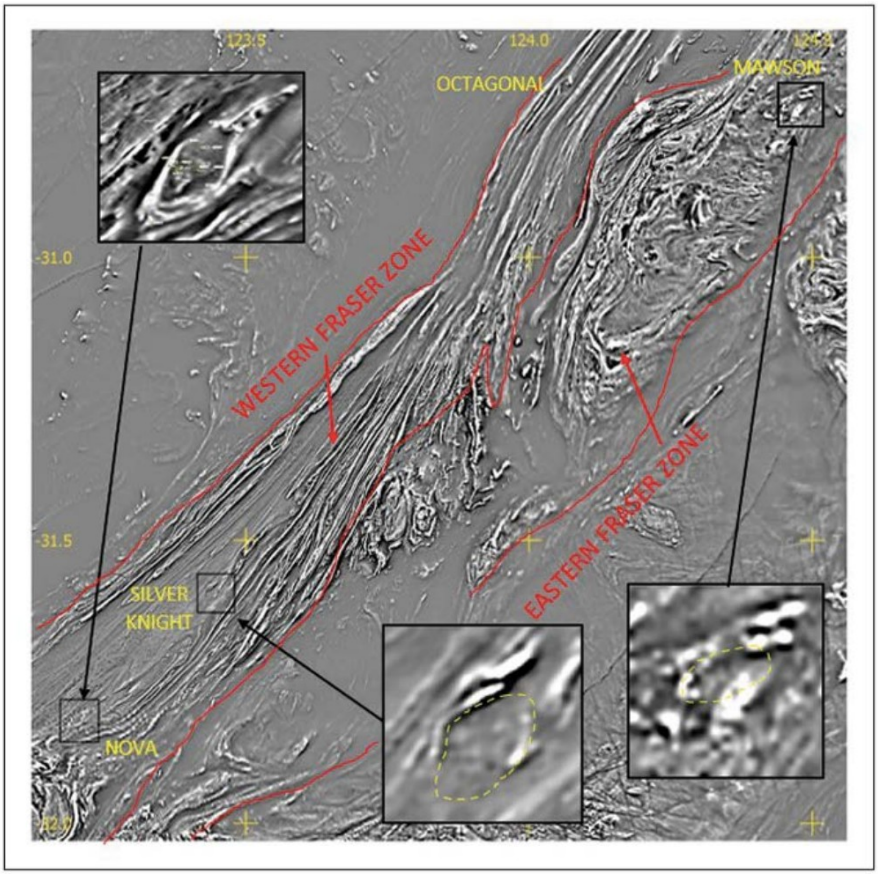

Fig. 4. Nova-Bollinger Eye structure in the central Fraser Zone (Standing and Munro, 2022).

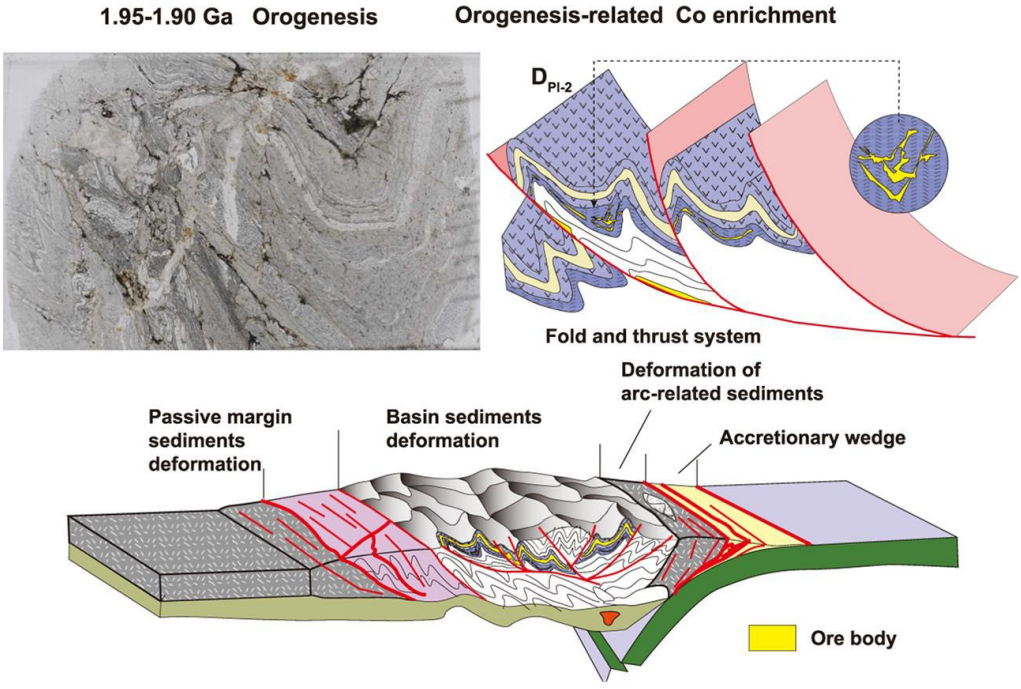

Fig. 5. Structural deformation history of the Dahenglu Cu-Co mineralized belt and mineralization controlled by thrust and fold structures (modified from Tian *et al.*, 2024).

프레이저 조산대(Albany-Fraser Orogen) 전역에서 다양한 마그마 관입체에 의해 형성된 Ni-Cu 광상들이 잇따라 발견되었다(그림 4; Standing and Munro, 2022). 이들 광상에서 초염기성 관입체는 공통적으로, 지역 항공 자기 영상에서 쉽게 식별되는 타원형 '아이(eye)' 형태의 지질구조 내에 분포한다. 이러한 '아이' 형태는 여러 번의 습곡 구조 및 부딘 작용(boudinage)이 중첩되어 형성된 것으로 해석되며, 대부분의 광상이 이 부분에 집중되어 있다. 실제로 이 구조적 특징을 탐사 지표로 활용함으로써 광상 발견에 성공하였다.

북중국 지괴의 고원생대 조산대에 발달한 금속·비금속 광화 시스템에서도 유사한 구조적 제어가 확인된다. Tian *et al.* (2024)은 다헝루(Dahenglu) Cu-Co 광화대에서 열수 유체의 구조적 제어와 집중 과정을 규명하기 위해 상세한 구조 분석, 시추 코어 현미경 관찰, TESCAN 사(社)의 통합광물분석기 분석을 수행하였다. 그 결과, 쓰러스트 단층(thrust fault)이 광석 형성 열수 유체의 이동을 위한 주요 통로 역할을 했으며, 쓰러스트 단층과 습곡의 중심부, 그리고 횡와 습곡 사이의 전단대가 함코발트 열수 유체의 침전에 이상적인 공간을 제공했다는 결론을 도출하였다(그림 5). 이는 유체의 이동 통로(쓰러스트 단층)와 침전 공간(습곡 중심부·전단대)이 서로 다른 구조 요소에 의해 각각 제어될 수 있음을 보여준다.

서호주 필바라(Pilbara) 지역에 위치한 우디 우디 광산(Woodie Woodie Mine)의 망간 광상은 초기 열수 기원의 피롤루사이트(pyrolusite), 브라우나이트(braunite), 크립토멜레인(cryptomelane) 등의 산화광물이 후기 침강 유체 기원의 산화물과 함께 중첩되는 특징을 보인다(Jones *et al.*, 2013). 광산 남쪽 끝에 있는 Jewel-Southwest 단층대가 함망간 열수 유체의 주요 통로 역할을 한 것으로 해석되며, 이 단층대의 양측에 상당량의 망간 광석이 집중되어 있다. 광화작용은 중생대 동안 북서-남동 방향으로 진행된 확장 및 분지 형성과 관련이 있으며, 주 망간 광화작용은 분지 형성과 관련 있는 성장 단층을 따라 지역화되어 있고, 주(main) 성장 단층에서 분기되는 고각의 2차·3차 구조를 따라 광화작용이 뚜렷하게 집중되는 양상을 보인다(그림 6).

1980년대 구조지질학적인 해석을 통해 광화 유체의 이동, 반응, 제어를 이해하는 데 중요한 돌파구가 마련되었으며(Fyfe, 1985), 이후 원격 탐사 기술의 발전과 함께 구조지질학적 탐사 방법 또한 진화해 왔다(e.g., Sabins, 1999). 위성 및 항공 촬영 기술을 활용한 탐사는 대규모 지역의 지질 구조를 신속하게 파악할 수 있게 해주었으며, GIS와 같은 데이터 분석 도구는 복잡한 지질 데이터를 효율적으로 처리하고 시각화하는 데 크게 기여하였다.

광상 탐사를 위한 최근의 구조지질학적 연구 동향은 다음과 같다: (1) 인공지능(AI)과 머신러닝 기술들이 접목되고 있다(Cracknell and Reading, 2014). (2) 고해상도 3D 구조 모델링 기법을 활용하여 복잡한 지질 구조를 시뮬레이션하고, 대규모 지하 3D 모델링을 통해 단층 시스템과 구조적 특성을 세밀하게 분석함으로써 경제성 있는 탐사 대상 지역을 선별하는 방법론이 적용되고 있다(Caumon *et al.*, 2009). (3) 단층 및 주변의 단열대 분석에 초점을 맞춘 연구가 확대되고 있으며, 핵심광물 광상에서 나타나는 상호작용을 모델링하기 위해 구조지질학적 데이터와 지화학 분석 데이터를 결합하여, 광상 형성에 중요한 구조적 특징을 파악하는 연구가 이루어지고 있다(Schirra *et al.*, 2024). (4) 드론(UAV) 기술을 활용한 지질 조사는 구조지질학적 데이터 수집에 혁신을 일으키고 있다(Bemis *et al.*, 2014). 앞으로도 구조지질학적 탐사 방법은 지속적으로 발전할 것으로 전망되며, 인공지능과 통합 탐사 접근법은 광상 탐사의 효율성 및 정확성을 크게 향상시킬 것으로 예상된다(Kreuzer and Etheridge, 2010).

향후 구조지질학적 핵심광물 연구에서는 지표 구조 해석과 시추 코어 관찰, 지구물리 자료, 지화학 이상대, 원격 탐사 자료를 3차원 공간에서 통합하는 연구가 더욱 중요해질 것이다. 특히 단층과 전단대가 단순한 유체 이동 통로인지, 실제 금속 침전을 유도한 구조적·화학적 반응 공간인지 구분하기 위해서는 구조 요소의 형성 시기와 광화 시기를 함께 제약하는 연구가 필요하다. 이를 위해 구조 해석, 연대 측정, 변질광물 지화학, 유체포유물 분석을 결합한 통합 연구가 강화되어야 하며, 이러한 접근은 심부 및 잠두 광상의 탐사 표적을 보다 정밀하게 설정하는 데 기여할 수 있다.

5. Metasomatic Iron and Alkali-Calcic (MIAC) 시스템 이해를 통한 핵심광물 연구

5.1. MIAC 시스템 개요

전 세계에 부존하는 철 광상 중 올림픽 댐(Olympic Dam) 광상은 자철석 또는 적철석이 주로 산출되는 초대형 다금속 광상 유형으로 많은 탐사와 광물 시스템 관점에서 연구가 수행되어 왔다(McPhie *et al.*, 2011). 올림픽 댐 광산은 세계에서 가장 대표적인 IOCG (Iron Oxide Copper Gold) 광상으로, 구리(Cu), 금(Au), 우라늄(U), 은(Ag)을 포함하는 다금속 광상이다(Hayward and Skirrow, 2010). 올림픽 댐 광상은 철산화물(Fe-oxide)과 함께 구리(Cu)와 금(Au)이 공존하는 새로운 유형의 광상으로 연구자들에게 큰 관심을 받았으며, 이 광상의 연구를 통해 IOCG 광상 모델이 확립되었고, 이후 전 세계적으로 유사한 광상(e.g., Iron Oxide Apatite; IOA)을 연구하는 주요 표식지가 되어 왔다(Hitzman *et al.*, 1992). 올림픽 댐 광상은 기존의 주요

구리 광상인 반암형 구리광상(porphyry Cu) 및 층준형 구리광상(stratiform Cu)과 비교하면 철산화물을 포함한 변질 작용을 통해 광화가 집중되는 특징을 보인다(Williams *et al.*, 2005).

특히, 자철석과 적철석이 주요 광물로 존재하며, 구리(Cu), 금(Au), 우라늄(U) 및 희토류(REE)가 함께 산출되는 점에서 반암형 구리광상 및 층준형 구리광상 등과 차이를 나타낸다(Reeve *et al.*, 1990). 또한, 광화가 진행되면서 철산화물이 중요한 역할을 하며, 지구조적 관점에서 대륙 지괴 경계부 및 열개 시스템과 밀접한 연관이 있는 점도 올림픽 댐 광상의 중요한 특징 중 하나이다. 이러한 차이점들은 올림픽 댐 광상의 연구를 통해 IOCG 광상 모델이 제시되는 계기가 되었다(Hitzman *et al.*, 1992). 그러나 IOCG 광상은 광물 시스템적 접근에서 보면 마그마 작용, 심부 지각 유체 등이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 보이지만, 정확한 금속 공급원에 대해 여러 연구가 혼재되어 있다. 일부 연구에서는 이러한 광상이 산성 화성암과 관련이 있다고 주장하지만(Williams *et al.*, 2005), 다른 연구에서는 염수를 포함한 열수 유체가 주요 역할을 한다고 보고되고 있다(Corriveau and Mumin, 2010). 또한 IOCG로 분류되는 광상들은 철산화물과 Cu-Au를 공통적으로 수반하면서도, U와 REE의 함량 및 주요 금속광물 조합에서 상당한 차이를

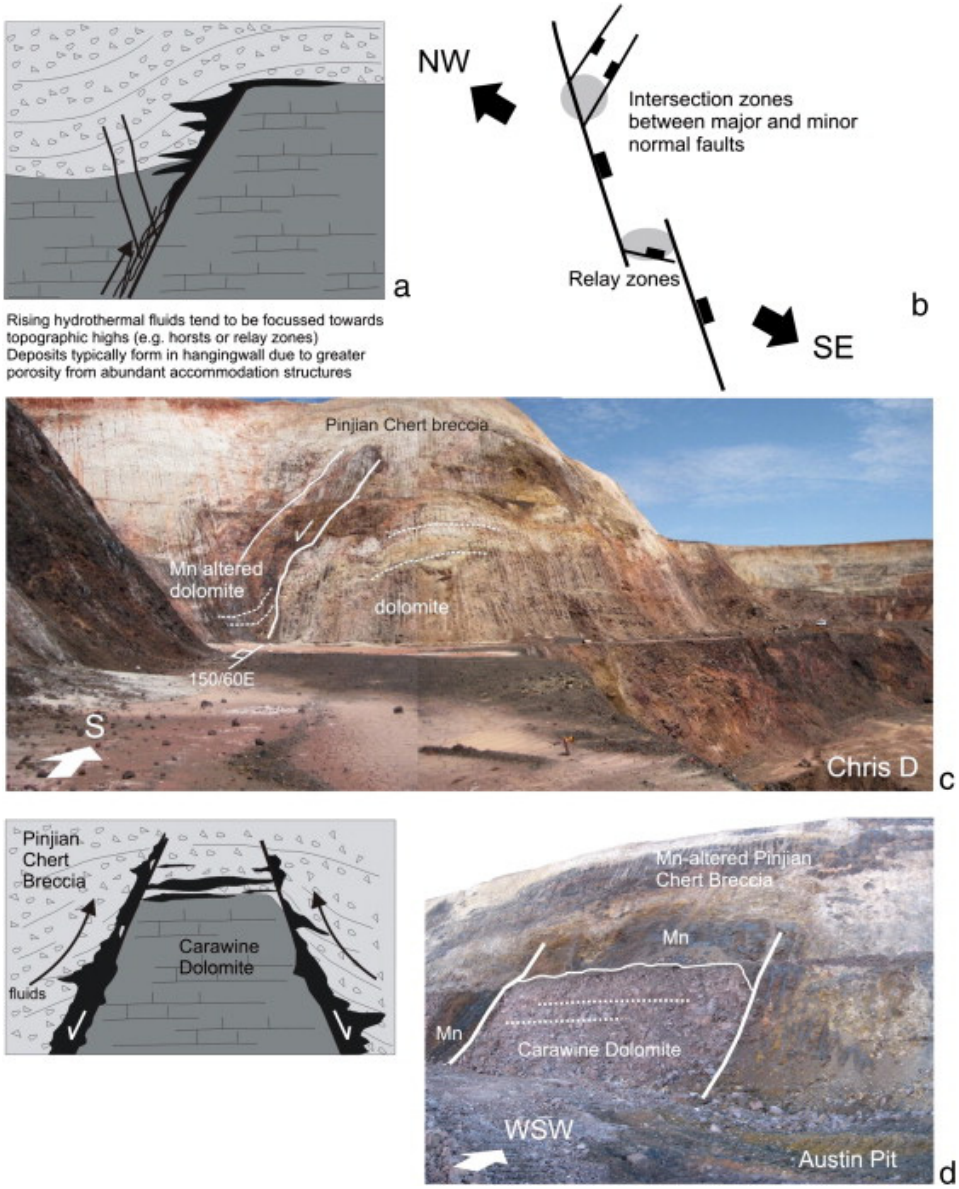

Fig. 6. Distribution of the main mineralized zones, schematic diagram of controlling faults, and field photographs of the Woodie Woodie manganese deposit (modified from Jones *et al.*, 2013).

보인다. 일부 광상에서는 금이 중요하게 산출되는 반면 다른 광상에서는 구리가 우세하고 금은 거의 산출되지 않는 등 광물 조성과 형성 환경이 다양하다(Groves *et al.*, 2010). 이러한 다양성은 IOCG 광상을 단일한 성인 모델만으로 설명하기 어렵다는 점을 보여주며, 광화와 변질을 보다 넓은 광물 시스템 관점에서 해석할 필요성을 제기하였다.

IOCG 광상은 공간적 및 시간적으로 매우 다양한 환경에서 형성된다. 이들 광상은 특정한 판구조 환경에 국한되지 않으며, 다양한 시대와 판구조 환경에서 형성된다(그림 7). 대표적인 IOCG 광상은 남미, 호주, 아프리카, 중국 등 여러 지역에서 발견되며, 각 지역의 형성 시기와 광화 작용이 다르게 나타난다. 예를 들어, 일부 IOCG 광상은 고기 조산운동과 관련하여 형성된 것으로 보이지만, 다른 광상은 상대적으로 젊은 대륙성 열수작용과 관련이 있다(Williams *et al.*, 2005). 따라서 특정 시대와 지역에 맞춘 광물 시스템 접근이 필요하지만, 현재까지 보편적으로 적용할 수 있는 단일 모델은 수립되지 않았다.

이러한 IOCG 모델의 한계를 보완하고, 철산화물 광화와 이에 수반되는 광역적인 변질 및 다양한 금속의 농집을 하나의 시스템에서 이해하기 위해 MIAC (Metasomatic Iron and Alkali-Calcic) 시스템 개념이 제안되었다(그림 8; Corriveau *et al.*, 2016). IOCG 모델에서는 철산화광물 이외에 구리(Cu)와 금(Au)의 기원에 대한 불확실성이 존재하며, 상기한 바와 같이 일부 연구는 마그마에서, 다른 연구는 순환하는 염수(brine) 유체에서 기원했다고 제안하였다(Williams *et al.*, 2005). 또한, IOCG 광상은 대규모 단층과 전단대(shear zone)와 관련이 있지만, 동일한 구조적 환경에서도 광물 조합이 달라서, 단순한 광상 형성 기작으로 설명하기 어렵다는 한계가 있었다(Corriveau and Mumin, 2010). MIAC 시스템은 이러한 다양성을 특정 광상 유형의 차이로만 설명하기보다는, 철 교대작용과 알칼리-칼슘 변질, 유체의 이동 및 금속 농집이 공간적·시간적으로 연계된 하나의 광물 시스템으로 해석한다. MIAC는 기존 IOCG 모델이 특정 광상 유형에 집중한 것과 달리, 보다 넓은 범위의 마그마-열수 광물 시스템을 설명하는 개념으로, 희토류(REE), 우라늄(U), 인산염(P), 몰리브덴(Mo), 코발트(Co) 등의 형성 과정까지 포함한다(Corriveau *et al.*, 2016). 또한, MIAC 모델은 철 산화물과 알칼리-칼슘 변질(alkali-calcic alteration)이 단순한 IOCG 계열 광상뿐만 아니라, 더 넓은 범위의 마그마-열수 시스템에서 공통적으로 발생한다고 가정한다(Corriveau *et al.*, 2007). 따라서 MIAC 개념은 IOCG를 대체하는 단일 광상 성인 모델이라기보다, 기존 IOCG 모델로 설명하기 어려웠던 변질과 광화의 다양성을 보다 통합적으로 해석하기 위한 광물 시스템적 접근으로 이해할 수 있다(Corriveau *et al.*, 2016).

5.2. MIAC 시스템 특징

앞서 언급한 바와 같이 MIAC 시스템의 핵심은 IOCG와

Fig. 7. Global distribution of IOCG and IOA deposits (Corriveau and Montreuil, 2025, Minerals, CC BY 4.0).

MIAC의 차이를 반복적으로 구분하는 데 있기보다, 마그마와 유체의 진화, 유체-암석 반응 및 열수변질이 철산화물 광화와 다양한 금속의 이동·침전을 어떻게 연결하는지를 해석하는 데 있다(Corriveau *et al.*, 2016). MIAC 모델은 다양한 광상의 형성 과정에서 마그마, 유체, 변질 작용이 어떻게 조직적으로 상호작용하는지를 체계적으로 설명하여, IOCG 모델보다 더 포괄적인 지질학적, 공간적, 시간적 관점을 제공하는 것이 특징이다. 특히 금속의 기원을 단일 마

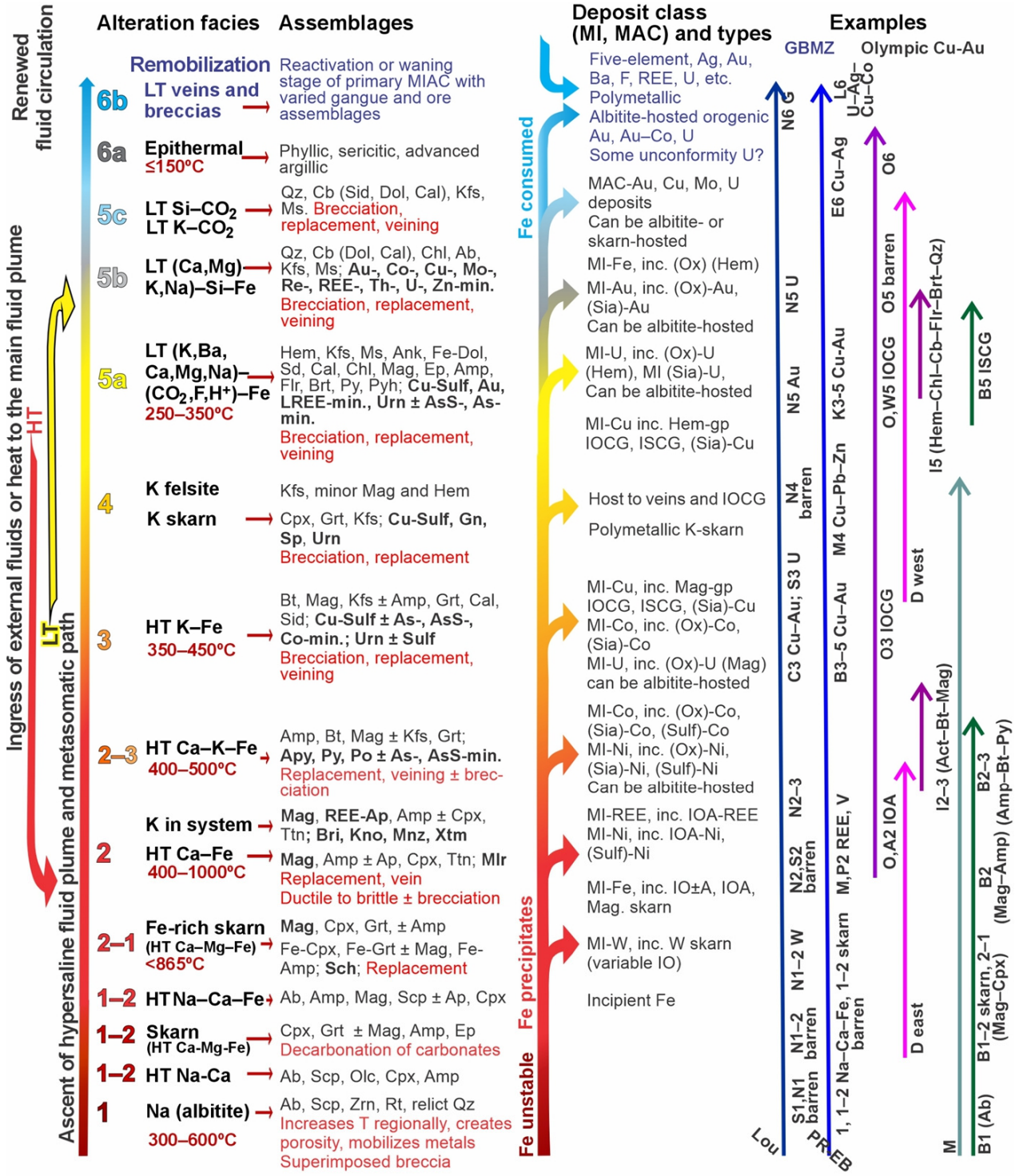

Fig. 8. Deposit types associated with MIAC systems related to alkali-calcic alteration (Corriveau and Montreuil, 2025, Minerals, CC BY 4.0).

그마에 한정하기보다는 마그마성 유체뿐만 아니라 퇴적층-기원 염수 및 지각 변성 유체 등 다양한 기원의 유체가 광화에 관여할 가능성을 함께 고려한다(Barton, 2009; Groves *et al.*, 2010).

이러한 유체는 H_2O, CO_2, F, Cl 등의 휘발성 물질을 포함하며, 유체의 온도, 압력, 조성 및 모암과의 반응 정도에 따라 서로 다른 금속광물과 변질광물 조합을 형성한다(Corriveau *et al.*, 2016). 따라서 MIAC 시스템에서 매우 복잡한 변질 양상을 서로 독립적인 사건으로 보기보다는 하나의 열수 시스템이 진화하는 과정에서 나타나는 연속적인 변질과 광화의 산물로 해석한다. 타 모델들과 마찬가지로 MIAC에서도 광상 형성에 기여하는 열수의 온도, 압력, 조성 등이 열수변질 작용에 반영되기 때문에 열수변질 특성을 이해하는 것이 중요하며, 이를 위해 열수변질의 특성과 강도를 정량화하는 연구도 진행되고 있다(Corriveau *et al.*, 2022).

열수변질은 주로 철산화물(Fe-oxide)과 연관되며, 철과 구리, 금, 희토류, 우라늄 등이 함께 침전된다(Hitzman *et al.*, 1992). 마그마에서 방출된 고온 유체는 주변 모암과 반응하여 산화철(자철석, 적철석)의 침전을 유도하며, 이때 시스템의 산소분압(산화-환원) 환경이 조절되면서 주요 금속 착이온들이 용해되거나 침전되는 기작이 발생한다(Williams *et al.*, 2005). 초기 고온 상태에서 철산화물이 결정화되며, 구리와 금은 염화(Cl)이온 복합체로 용해되어 이동한다. 이후 열수 유체의 온도와 화학적 환경이 변화하면서 구리, 금, 희토류 등의 금속이 침전되며, 이러한 과정에서 특정한 변질 패턴이 형성된다(그림 8). 따라서 철산화물의 형성과 금속광화는 개별적인 과정이라기보다 열수 유체의 냉각과 산화-환원 상태 및 화학조성 변화에 따라 연속적으로 진행되는 과정으로 볼 수 있다.

알칼리-칼슘 변질(alkali-calcic alteration)은 MIAC 시스템에서 중요한 특징으로 작용하는데, 이는 열수 유체에 포함된 소듐(Na), 포타슘(K), 칼슘(Ca) 등의 원소가 암석 내 광물과 반응하면서 발생한다(Corriveau *et al.*, 2007). 소듐 변질(sodic alteration)은 일반적으로 사장석(albite)과 같은 광물의 형성을 유도하며, 고온-고염분 환경에서 강하게 나타난다. 이 과정에서 황동석(chalcopyrite)과 같은 함구리광물이 형성될 수 있으며, 이는 IOCG 광상의 주요 특징 중 하나이다(Porter, 2010). 포타슘 변질(potassic alteration)은 K-장석, 흑운모, 견운모 등의 광물이 형성되는 과정으로, 금과 구리의 침전과 밀접한 관련이 있다. 이 변질 과정은 주로 높은 온도 범위에서 발생하며, 구리와 금이 농축되는 광물화 환경을 조성하는 데 중요한 역할을 한다. 이와 같이 소듐·칼슘 및 포타슘 변질은 서로 분리된 변질 유형이라기보다, 유체의 진화와 유체-암석 반응에 따라 공간적·시간적으로 중첩될 수 있으며, 이러한 변질대의 분포는 MIAC 시스템의 범위와 광화 중심부를 해석하는 중요한 지질학적 지표가 된다.

후기 열수 변질(late-stage hydrothermal alteration)은 MIAC 시스템에서 희토류, 우라늄, 인산염과 같은 원소들의 농축과 관련이 있다. 초기 마그마 활동이 끝난 후, 저온-중온의 열수 유체가 잔류하는 광화 환경을 따라 이동하면서 희토류와 우라늄이 이동하고, 특정한 화학적 변화가 일어나는 지역에서 침전된다(Corriveau and Mumin, 2010). 이러한 과정에서 모나자이트(monazite), 인회석(apatite), 우라나이트(uraninite) 등의 광물이 형성되며, 이는 IOCG 광상 형성 모델과 비교하여 MIAC 시스템에서 통합적으로 설명하는 특징이 된다(Williams *et al.*, 2005). 후기 열수 작용이 활발한 지역에서는 CO_2, F, Cl 등의 휘발성 성분이 중요한 역할을 하며, 이는 희토류와 우라늄이 용해되어 이동하는 과정에 기여한다(Hitzman *et al.*, 1992). 특히, 환원 환경에서 우라늄이 용해도 감소로 인해 침전되면서 경제적으로 중요한 우라늄 광상이 형성될 수 있다(Groves *et al.*, 2010). 이러한 후기 광화는 MIAC 시스템이 Fe-Cu-Au 중심의 광화뿐 아니라 REE, U 및 P와 같은 핵심광물의 이동과 농집까지 하나의 진화된 열수 시스템 안에서 해석할 수 있다는 점을 보여준다. 따라서 MIAC 시스템에서 열수변질은 단순한 광물학적 변화를 의미하는 것이 아니라, 유체의 이동 경로와 물리·화학적 진화, 그리고 금속 원소의 이동과 침전을 기록하는 핵심 요소로 볼 수 있다(Corriveau *et al.*, 2007). 마그마에서 방출된 유체는 초기 변질 과정을 통해 철산화물과 구리-금을 형성하고, 후기 열수 작용을 거치면서 희토류와 우라늄을 포함하는 복합적인 광상 환경을 조성한다(Williams *et al.*, 2005). 이러한 시·공간적 변화는 MIAC 시스템 내에서 서로 다른 금속 조합이 형성되는 원인을 이해하는 동시에 핵심광물의 농집 위치를 예측하는 데 중요한 근거가 된다. 열수변질은 특정한 온도, 압력, 화학적 조건의 변화에 따라 광물 형성 패턴을 다르게 나타내며, 광상의 규모와 경제적 가치를 결정하는 중요한 요소로 작용한다(Porter, 2010).

MIAC 모델은 공간적 관계까지 설명하는 시스템 모델로서, 기존 IOCG 모델의 공간적 문제를 보완한다. 기존 IOCG 모델에서는 대규모 단층(faults), 전단대(shear zones)와 같은 구조적 요소들이 중요하게 작용하지만, 동일한 구조 내에서도 광물 조성이 다르게 나타나는 경우가 많다(Corriveau *et al.*, 2016). MIAC 시스템은 이러한 차이를 변질과 광화의 공간적 분대로 해석하며, 광상 중심부에서 주변부로 이어지는 변질 및 금속 조합의 변화를 통해 전체 광물 시스템을 파악하고자 한다. 예를 들어, 중심부(core zone)에서는 Fe-oxide가 우세하며 초기 구리, 금 광상이 집중되고, 변질

대(alteration halo)에서는 알칼리(Na, K)와 칼슘(Ca) 변질이 강하게 나타난다(Barton, 2009). 주변부(distal zone)에서는 후기 열수 작용으로 인해 희토류(REE), 우라늄(U), 인(P) 등의 원소가 농축될 가능성이 크며, 이는 후기 광물화 작용이 진행되었음을 시사한다(Corriveau *et al.*, 2016). 따라서 이러한 중심부-변질대-주변부의 공간적 관계는 MIAC 시스템을 구성하는 변질 및 광화 과정의 연속성을 보여주는 동시에, 특정 지질 환경에서 Fe-Cu-Au 광화와 REE-U-P 등 핵심광물의 잠재적 분포를 예측하는 데 활용될 수 있다.

5.3. MIAC 시스템의 연구 동향

MIAC 시스템의 개념은 기존의 광상 모델로 부족한 변질 패턴과 광물 조합을 이해하기 위해 제안되었다. 특히 IOCG 광상과 키루나형 철광상 및 일부 희토류·우라늄 광상은 전통적으로 개별적인 광상으로 간주되었으나, 이들 광상에서 공통적으로 관찰되는 변질 작용이 동일한 기원을 가질 가능성이 제기되면서 MIAC 시스템이 주목받기 시작했다(Corriveau *et al.*, 2022). 기존의 광상 모델은 마그마 작용, 퇴적 작용 또는 변성 작용에 의해 개별적으로 형성된다고 설명되었지만, MIAC 시스템에서는 대규모 열수 변질과 금속 원소의 이동이 광물화 과정에서 중요한 역할을 한다는 점을 강조한다. 이 시스템은 특히 맨틀에서 유래한 산화된 유체가 지각 내부로 유입되면서, 철산화물, 소듐 및 칼슘이 풍부한 환경을 조성하고, 이 과정에서 다양한 광물과 금속 원소가 농축되는 방식으로 광상이 형성된다고 설명한다. 따라서 MIAC 시스템은 특정한 지질 환경에서 나타나는 변질 패턴을 통합적으로 설명하는 접근법으로 점차 발전하고 있다.

최근에 제안된 MIAC 시스템에 대하여 기존 IOCG 모델과 비교하여 연구가 진행되고 있으며, 다음과 같은 부분에서 주요 학문적 논의가 진행되고 있다. 첫째, MIAC 시스템이 하나의 독립적인 광상 분류 체계로 정립될 수 있는가 하는 점이다. 기존 광상 모델에서는 IOCG 광상, 키루나형 철광상, 희토류 및 우라늄 광상을 개별적으로 분류하였으나, MIAC 시스템이 이러한 광상을 통합적으로 설명할 수 있는지가 주요 논쟁의 대상이 되고 있다(Skirrow, 2022). MIAC 시스템은 특정한 변질 패턴을 공유하는 다양한 광상을 포함할 수 있다는 점에서 하나의 통합적 모델로서 제시되고 있지만, 기존의 광상 모델과 비교하여 얼마나 명확한 경계를 설정할 수 있는지에 대한 추가 연구가 필요하다(Corriveau *et al.*, 2022; Skirrow, 2022). 일부 연구자들은 MIAC 시스템이 광물화 과정에서 유사한 특징을 가진 광상들을 설명하는 유용한 도구라고 주장하는 반면, 다른 연구자들은 MIAC 시스템이 다양한 지질 환경에서 나타날 수 있는 보편적 변질 패턴의 일부일 뿐이며, 개별 광상 모델로서의 타당성이 부족할 수 있다고 지적하고 있다(Normandeau *et al.*, 2024).

둘째, MIAC 시스템과 다른 광상 유형(예: 반암형 구리 광상, 스카른 광상 등) 간의 변질 작용 차이에 대한 논의가 지속되고 있다. MIAC 시스템이 특정 변질 메커니즘을 강조하는 반면, 일부 연구에서는 이 변질이 광상 형성에 필수적인 요소가 아닐 수 있다. 반암형 구리 광상은 주로 마그마성 유체가 중요한 역할을 하며, 그 과정에서 포타슘(K)과 황(S)이 풍부한 환경이 조성된다. 반면, MIAC 시스템에서 강조하는 변질 패턴은 소듐(Na)과 칼슘(Ca)의 농축과 철산화물 형성이 특징적이다. 이러한 차이는 두 시스템이 공유하는 요소와 차별되는 요소를 명확히 구분하는 것이 필요함을 시사한다. 일부 연구에서는 MIAC 시스템과 기존 광상 모델 간의 변질 패턴을 정량적으로 비교하여, 어떤 변질 과정이 특정 광상 유형에 더 적합한지를 분석하고 있다(Skirrow, 2022).

셋째, MIAC 시스템의 적용 범위가 지질학적 환경에 따라 다를 수 있다는 점도 중요한 논쟁거리이다. MIAC 시스템이 특정한 지구조적 환경에서만 형성되는지, 혹은 더 광범위한 지질 환경에서 적용될 수 있는지가 명확하게 정립되지 않았다. 예를 들어, MIAC 시스템이 IOCG 광상 및 키루나형 철광상과 같은 철산화물 광상과 주로 연관된다는 점은 명확하지만, 일부 연구에서는 이 시스템이 보다 광범위한 지질환경에서도 적용될 수 있다고 주장한다(Normandeau *et al.*, 2024). MIAC 시스템이 반드시 특정한 지질 환경에서만 나타나는 것이 아니라, 다양한 열수 변질 환경에서도 나타날 수 있다. 이러한 연구들은 MIAC 시스템의 적용 가능성을 확장할 수 있는 근거를 제공하지만, 그에 대한 지질학적, 지구화학적 근거가 더욱 명확히 제시될 필요가 있다.

최근 연구들은 MIAC 시스템이 단순히 특정 광상 모델을 대체하는 개념이 아니라, 기존 모델과 상호 보완적으로 작용할 수 있는지를 연구하고 있다(Corriveau *et al.*, 2022; Skirrow, 2022). 특히 MIAC 시스템이 다양한 변질 환경에서 나타날 수 있다는 점이 점점 더 부각되면서, 이 시스템이 기존 광상 분류 체계에 어떻게 통합될 수 있는지가 향후 연구의 중요한 방향으로 제시되고 있다. MIAC 시스템의 독립적인 모델로서의 타당성과 한계를 평가하는 연구가 앞으로 더욱 필요할 것으로 보인다. 향후 MIAC 시스템 연구에서는 광상 유형의 명명이나 분류를 넘어, 철산화물 광화작용, 알칼리-칼슘 변질, REE-U-P 광화가 서로 어떤 시·공간적 관계를 갖는지 규명하는 것이 중요하다. 이를 위해 변질대의 광물조합과 전암 지화학, 자철석·인회석·모나자이트 등 지시광물의 미량원소 조성, 동위원소 및 연대자료를 함께 활용한 통합 해석이 필요하다. 또한 MIAC 시스템이 IOCG, IOA, 반암형 구리 광상, 스카른 광상 등 기존 광상

모델과 어떻게 구분되거나 연결되는지에 대한 비교 연구가 축적되어야 한다. 이러한 연구는 MIAC 개념의 적용 범위를 명확히 하고, 철산화물 관련 핵심광물 광상의 탐사 지시자를 구체화하는 데 기여할 것이다.

6. 맺는말

핵심광물의 수요가 급격히 증가하는 가운데, 탐사 대상은 점차 심부화·저품위화·복합화되고 있다. 이러한 조건에서는 더 이상 개별 광상 유형의 경험적 유사성만으로 탐사를 수행하기 어렵다. 광물 시스템 개념을 바탕으로 핵심광물의 형성 과정을 통합적으로 해석하고, 여기에 미량원소 및 안정동위원소 지구화학, 연대측정과 암석연대학, 구조지질학, 인공지능 기반 잠재성 평가 등 다학제적 연구 방법을 결합하면 광상 성인 모델을 정교화하고 탐사 표적의 신뢰도를 높일 수 있다.

최근 핵심광물 연구는 광상 성인 해석의 정밀화, 다중 분석 자료의 통합, 광물 시스템 기반 탐사, 인공지능을 활용한 잠재성 평가로 확장되고 있다. 동시에 각 방법론의 적용 범위와 한계도 중요한 쟁점으로 남아 있다. 향후 핵심광물 연구는 해석 방법의 고도화와 함께, 자료 간 불일치와 모델 적용의 한계를 검증하는 방향으로 지속되어야 한다. 특히 미량원소와 동위원소 자료, 연대측정 결과, 구조지질학적 해석, 지구물리·원격탐사 자료를 동일한 광물 시스템 틀 안에서 통합하고, 이를 현장 지질조사와 시추 검증으로 연결하는 연구가 중요하다. 또한 인공지능 기반 탐사 모델은 단순한 예측 결과의 제시에 그치지 않고, 지질학적으로 해석 가능한 변수와 탐사 지시자를 도출하는 방향으로 발전해야 한다. 이러한 연구는 핵심광물 광상의 형성 과정에 대한 이해를 심화하고, 탐사 전략의 신뢰도를 높이는 기반이 될 것이다.

감사의 글

이 논평은 과학기술정보통신부 정부출연사업인 한국지질자원연구원 기본사업(GP2025-003)의 지원을 받아 작성되었습니다. 논평의 작성을 제안해주신 장호완 교수님과 원고를 검토해주신 우경식 교수님, 임현수 교수님, 세심하게 심사해주신 서정훈 교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

Agterberg, F.P., 1989, Computer Programs for Mineral Exploration. Science, 245, 76-81.

Albarède, F. and Beard, B.L., 2004, Analytical methods for non-traditional isotopes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 55, 113-152.

Allan, J.R. and Matthews, R.K., 1982, Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. Sedimentology, 29, 797-817.

Amsellem, E., Moynier, F., Bertrand, H., Bouyon, A., Mata, J., Tappe, S. and Day, J.M., 2020, Calcium isotopic evidence for the mantle sources of carbonatites. Science Advances, 6, eaba3269.

Antonelli, M.A., Kendrick, J., Yakymchuk, C., Guitreau, M., Mittal, T. and Moynier, F., 2021, Calcium isotope evidence for early Archaean carbonates and subduction of oceanic crust. Nature Communications, 12, 2534.

Babazadeh, S., Raeisi, D., Santosh, M., Zhao, M. and D'Antonio, M., 2025, Recycled mantle source for porphyry mineralization: U-Pb and Re-Os geochronology, and S-Pb-Cu isotopic constraints from the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, central Iran. Journal of Geochemical Exploration, 268, 107630.

Baker, M.J., Wilkinson, J.J., Wilkinson, C.C., Cooke, D.R. and Ireland, T., 2020, Epidote Trace Element Chemistry as an Exploration Tool in the Collahuasi District, Northern Chile. Economic Geology, 115, 749-770.

Barker, S.L.L. and Dipple, G.M., 2019, Exploring for carbonate-hosted ore deposits using carbon and oxygen isotopes. Geophysical Monograph, 238, 185-207.

Barker, S.L.L., Dipple, G.M., Hickey, K.A., Lepore, W.A. and Vaughan, J.R., 2013, Applying stable isotopes to mineral exploration: Teaching an old dog new tricks. Economic Geology, 108, 1-9.

Barton, M.D., 2009, IOCG deposits: A Cordilleran perspective. In: Proceedings of the Tenth Biennial SGA Meeting, Townsville, 5-7.

Beinlich, A., Barker, S.L.L., Dipple, G.M., Hansen, L.D. and Megaw, P.K.M., 2019, Large-scale stable isotope alteration around the hydrothermal carbonate-replacement Cinco de Mayo Zn-Ag deposit, Mexico. Economic Geology, 114, 375-396.

Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T. and Bangash, H.A., 2014, Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. Journal of Structural Geology, 69, 163-178.

Bouzari, F., Hart, C.J.R., Bissig, T. and Barker, S., 2016, Hydrothermal Alteration Revealed by Apatite Luminescence and Chemistry: A Potential Indicator Mineral for Exploring Covered Porphyry Copper Deposits. Economic Geology, 111, 1397-1410.

Brenna, J.T., Corso, T.N. and Tobias, H.J., 1997, High-precision continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. Mass Spectrometry Reviews, 16, 227-258.

Brimhall, G.H., Dilles, J.H. and Proffett, J.M., 2006, The Role of Geologic Mapping in Mineral Exploration. Society of Economic Geologists Special Publication, 12, 221-241.

Briscoe, H.V.A. and Robinson, P.L., 1925, XCIX.-A redetermination of the atomic weight of boron. Journal of the Chemical Society, Transactions, 127, 696-720.

Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., Le Carlier de Veslud, C., Viseur, S. and Sausse, J., 2009, Surface-Based 3D Modeling of

Geological Structures. Mathematical Geosciences, 41, 927-945.
Cerling, T.E. and Quade, J., 1993, Stable carbon and oxygen isotopes in soil carbonates. Geophysical Monograph, 78, 217-232.
Chan, L.H., Alt, J.C. and Teagle, D.A.H., 2002, Lithium and lithium isotope profiles through the upper oceanic crust: a study of seawater-basalt exchange at ODP Sites 504B and 896A. Earth and Planetary Science Letters, 201, 187-201.
Chan, L.H., Edmond, J.M., Thompson, G. and Gillis, K., 1992, Lithium isotopic composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans. Earth and Planetary Science Letters, 108, 151-160.
Chelle-Michou, C., Chiaradia, M., Ovtcharova, M., Ulianov, A. and Wotzlaw, J.-F., 2014, Zircon petrochronology reveals the temporal link between porphyry systems and the magmatic evolution of their hidden plutonic roots (the Eocene Coroccohuayco deposit, Peru). Lithos, 198-199, 129-140.
Chelle-Michou, C. and Schaltegger, U., 2023, U-Pb Dating of Mineral Deposits: From Age Constraints to Ore-Forming Processes. In: Huston, D. and Gutzmer, J. (eds.), Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration. Mineral Resource Reviews. Springer, Cham, 37-87.
Chen, F., Deng, J., Wang, Q., Huizenga, J.M., Li, G. and Gu, Y., 2020, LA-ICP-MS trace element analysis of magnetite and pyrite from the Hetaoping Fe-Zn-Pb skarn deposit in Baoshan block, SW China: Implications for ore-forming processes. Ore Geology Reviews, 117, 103309.
Chiaradia, M., Schaltegger, U., Spikings, R., Wotzlaw, J.-F. and Ovtcharova, M., 2013, How Accurately Can We Date the Duration of Magmatic-Hydrothermal Events in Porphyry Systems?—An Invited Paper. Economic Geology, 108, 565-584.
Conn, C.D., Spry, P.G., Layton-Matthews, D., Voinot, A. and Koenig, A., 2019, The effects of amphibolite facies metamorphism on the trace element composition of pyrite and pyrrhotite in the Cambrian Nairne Pyrite Member, Kanmantoo Group, South Australia. Ore Geology Reviews, 114, 103128.
Corriveau, L. and Montreuil, J.-F., 2025, Metasomatic Mineral Systems with IOA, IOCG, and Affiliated Critical and Precious Metal Deposits: A Review from a Field Geology Perspective. Minerals, 15, 365.
Corriveau, L., Montreuil, J.F. and Potter, E.G., 2016, Alteration facies linkages among iron oxide copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. Economic Geology, 111, 2045-2072.
Corriveau, L. and Mumin, A.H., 2010, Exploring for iron oxide copper-gold (Ag-Bi-Co-U) deposits: Case examples, classification and exploration vectors. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 20, 1-12.
Corriveau, L., Mumin, A.H. and Potter, E.G., 2022, Iron oxide copper-gold (Ag-Bi-Co-U-REE) and affiliated deposits: introduction and overview. In: Corriveau, L., Potter, E.G. and Mumin, A.H. (eds.), Mineral systems with iron oxide copper-gold (IOCG) and affiliated deposits: Geological Association of Canada, Special Paper, 52, 1-25.
Corriveau, L., Ootes, L., Mumin, H., Jackson, V., Bennett, V., Cremer, J.F., Rivard, B., McMartin, I. and Beaudoin, G., 2007, Alteration vectoring to IOCG(U) deposits in frontier volcano-plutonic terrains, Canada. In: Milkereit, B. (eds.), Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Toronto, 1171-1177.
Cox, S.F., 2005, Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 100, 39-75.
Cox, S.F., Knackstedt, M.A. and Braun, J., 2001, Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. Reviews in Economic Geology, 14, 1-24.
Cracknell, M.J. and Reading, A.M., 2014, Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information. Computers & Geosciences, 63, 22-33.
Dare, S.A.S., Barnes, S.J., Beaudoin, G., Meric, J., Boutroy, E. and Potvin-Doucet, C., 2014, Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. Mineralium Deposita, 49, 785-796.
Dodson, M.H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 40, 259-274.
Dulfer, H., Skirrow, R.G., Champion, D.C., Highet, L.M., Czarnota, K., Coghlan, R. and Milligan, P.R., 2016, Potential for intrusion-hosted Ni-Cu-PGE sulfide deposits in Australia: A continental-scale analysis of mineral system prospectivity. Record 2016/01. Geoscience Australia, Canberra, 129 p.
Emrich, K., Ehhalt, D.H. and Vogel, J.C., 1970, Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. Earth and Planetary Science Letters, 8, 363-371.
Engi, M., Lanari, P. and Kohn, M.J., 2017, Significant ages—An Introduction to Petrochronology. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 83, 1-12.
Fischer, T.P., Takahata, N., Sano, Y., Sumino, H. and Hilton, D.R., 2005, Nitrogen isotopes of the mantle: Insights from mineral separates. Geophysical Research Letters, 32, 1-5.
Fossen, H., 2016, Structural Geology (2nd edition). Cambridge University Press, Cambridge, 524 p.
Frimmel, H.E., Groves, D.I., Kirk, J., Ruiz, J., Chesley, J. and Minter, W.E.L., 2005, The Formation and Preservation of the Witwatersrand Goldfields, the World's Largest Gold Province. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.), Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, 769-797.
Fyfe, W.S., 1985, Fluids, tectonics and crustal deformation. Tectonophysics, 119, 29-36.
Garber, J.M., Hacker, B.R., Kylander-Clark, A.R.C., Stearns, M. and Seward, G., 2017, Controls on Trace Element Uptake in Metamorphic Titanite: Implications for Petrochronology. Journal of Petrology, 58, 1031-1057.
Gill, S.B., Piercey, S.J. and Layton-Matthews, D., 2016, Mineralogy and metal zoning of the Cambrian Zn-Pb-Cu-Ag-Au Lemarchant volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Newfoundland. The Canadian Mineralogist, 54, 1307-1344.
Gloyn-Jones, J. and Kisters, A., 2019, Ore-shoot formation in the

Main Reef Complex of the Fairview Mine-multiphase gold mineralization during regional folding, Barberton Greenstone Belt, South Africa. Mineral Deposita, 54, 1157-1178.

Goldfarb, R.J. and Groves, D.I., 2015, Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos, 233, 2-26.

Goldfarb, R.J., Groves, D.I. and Gardoll, S.J., 2001, Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geology Reviews, 18, 1-75.

Goldman, J. and House, K., 2023, AI Hunts for Hidden Minerals: Machine Learning is Uncovering Hoards of Vital EV Battery Metals. IEEE Spectrum, 60, 22-27.

Gregory, D.D., Cracknell, M.J., Large, R.R., McGoldrick, P., Kuhn, S.D., Maslennikov, V.V., Baker, M.J., Fox, N., Belousov, I., Figueroa, M.C., Steadman, J.A., Fabris, A.J. and Lyons, T.W., 2019, Distinguishing ore deposit type and barren sedimentary pyrite using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry trace element data and statistical analysis of large data sets. Economic Geology, 114, 771-786.

Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. and Hitzman, M.W., 2010, Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. Economic Geology, 105, 641-654.

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F., 1998, Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews, 13, 7-27.

Groves, D.I., Santosh, M., Muller, D., Zhang, L., Deng, J., Yang, L.-Q. and Wang, Q.-F., 2022, Mineral systems: Their advantages in terms of developing holistic genetic models and for target generation in global mineral exploration. Geosystems and Geoenvironment, 1, 1.

Hagemann, S.G., Lisitsin, V.A. and Huston, D.L., 2016, Mineral system analysis: Quo vadis. Ore Geology Reviews, 76, 504-522.

Hall, A., 1993, The influence of secondary alteration on the ammonium content of granites, exemplified by the Rosses complex of Donegal. Mineralogical Magazine, 57, 591-598.

Hammond, D.R. and Brady, T.F., 2022, Critical minerals for green energy transition: A United States perspective. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 36, 624-641.

Hayward, N. and Skirrow, R.G., 2010, Geodynamic setting and controls on iron oxide Cu-Au (±U) ore in the Gawler Craton, South Australia. In: Porter, T.M. (eds.), Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective, v. 3 - Advances in the Understanding of IOCG Deposits, 9-31.

Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. Precambrian Research, 58, 241-287.

Hoefs, J., 2015, Stable Isotope Geochemistry (7th ed.). Springer, Berlin.

Hough, G., Swapp, S., Frost, C. and Fayek, M., 2019, Sulfur isotopes in biogenically and abiogenically derived uranium roll-front deposits. Economic Geology, 114, 353-373.

Hronsky, J.M. and Groves, D.I., 2008, Science of targeting: Definition, strategies, targeting methodology, and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences, 55, 3-12.

Hudson, J.D., 1977, Stable isotopes and limestone lithification. Journal of the Geological Society, London, 133, 637-660.

Huston, D.L., Mernagh, T.P., Hagemann, S.G., Doublier, M.P., Fiorentini, M., Champion, D.C., Jaques, A.L., Czarnota, K., Cayley, R., Skirrow, R. and Bastrakov, E., 2016, Tectono-metallogenic systems - The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. Ore Geology Reviews, 76, 168-210.

International Energy Agency, 2024, Global Critical Minerals Outlook 2024. IEA, 282 p.

IUPAC, 2022, Periodic Table of the Elements, version dated 4 May 2022.

Jeffcoate, A.B., Elliott, T., Thomas, A. and Bouman, C., 2004, Precise, small sample size determinations of lithium isotopic compositions of geological reference materials and modern seawater by MC-ICP-MS. Geostandards and Geoanalytical Research, 28, 161-172.

Jo, J., Yamanaka, T. and Shin, D., 2023, Nitrogen isotope geochemistry of ion adsorption-type REE mineralization: Insights from the weathered granitoid rocks in the Sancheong district, South Korea. Ore Geology Reviews, 157, 105429.

Jones, S., McNaughton, N.J. and Grguric, B.A., 2013, Structural controls and timing of fault-hosted manganese at Woodie Woodie, East Pilbara, Western Australia. Ore Geology Reviews, 50, 52-82.

Keith, M.L. and Weber, J.N., 1964, Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. Geochimica et Cosmochimica Acta, 28, 1787-1816.

Kerr, A., 2023, Critical Minerals in the Context of Canada: Concepts, Challenges and Contradictions. Geoscience Canada, 50, 85-103.

Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26, 503-517.

Kreuzer, O.P. and Etheridge, M.A., 2010, Risk and uncertainty in mineral exploration: implications for valuing mineral exploration properties. AIG News, 100, 20-28.

Krouse, H.R., 2006, Isotope ratio mass spectrometry. In: Encyclopedia of Analytical Chemistry, John Wiley & Sons.

Kump, L.R. and Arthur, M.A., 1999, Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. Chemical Geology, 161, 181-198.

Kylander-Clark, A.R.C., Hacker, B.R. and Cottle, J.M., 2013, Laser-ablation split-stream ICP petrochronology. Chemical Geology, 345, 99-112.

Large, S.J.E., Wotzlaw, J.-F., Guillong, M., von Quadt, A. and Heinrich, C.A., 2020, Resolving the timescales of magmatic and hydrothermal processes associated with porphyry deposit formation using zircon U-Pb petrochronology. Geochronology, 2, 209-230.

Lee, B.H., Kim, N., Kim, E.-J., Pak, S.J., Yang, S.J., Youm, S.-J., Oh, I.H., Yoo, B.C., Yoon, S.-J., Lee, G., Jo, J., Heo, C.-H., Kim, I.-J., Im, H., Davaasuren, O.-E., Park, G.S., Lee, J.-H., Lee, S.,

Shin, W. and Ahn, G.M., 2025, Development of target-oriented exploration protocols for critical minerals (Li, REE, Cu, etc.). KIGAM 2025-2030 Basic Research Planning Report, GP2025-003, 103 p (in Korean).

Lee, B.H., Kim, N., Kim, E.-J., Pak, S.J., Yang, S.J., Youm, S.-J., Oh, I.H., Yoo, B.C., Yoon, S.-J., Lee, G., Jo, J., Park, G., Kwon, J., Ahn, S., Oh, S., Yi, H., Heo, C.-H., Park, G.S., Lee, J.-H., Im, H., Davaasuren, O.-E., Bang, M., Lee, S., Lee, J.-H., Shin, W., Kim, H., Sung, Y. and Kim, I.-J., 2024b, Preliminary study on AI-based exploration and verification for critical minerals. KIGAM Report, JP2024-005-2025, 658 p (in Korean with English abstract).

Lee, B.H., Koh, S.-M., Kim, K.H., Kim, N., Kim, R., Kim, E.-J., Park, G.S., Bak, S.-G., Pak, S.J., Park, H., Bang, E.S., Seo, J.-B., Son, Y.-S., Yang, S.J., Youm, S.-J., Oh, I.H., Yoo, B.C., Yoon, S.-J., Lee, G., Yi, M.-J., Lee, S., Lee, J.-H., Chung, K.W., Jeong, S., Jo, J., Joo, S.-H., Joo, Y.-Y., Choi, J., Han, S., Heo, J. and Heo, C.-H., 2024a, Potential evaluation of K-battery mineral commodity (Ni, Co) and development of utilization technology. KIGAM Report, GP2024-004-2024, 326 p (in Korean with English abstract).

Lentz, C., Thorne, K., McFarlane, C.R.M. and Archibald, D.A., 2020, U-Pb, Ar-Ar, and Re-Os Geochronological Constraints on Multiple Magmatic-Hydrothermal Episodes at the Lake George Mine, Central New Brunswick. Minerals, 10, 566.

Li, L., Lollar, B.S., Li, H., Wortmann, U.G. and Lacrampe-Couloume, G., 2012, Ammonium stability and nitrogen isotope fractionations for NH_4^+-$NH_{3(aq)}$-$NH_{3(gas)}$ systems at 20-70°C and pH of 2-13: Applications to habitability and nitrogen cycling in low-temperature hydrothermal systems. Geochimica et Cosmochimica Acta, 84, 280-296.

Li, M.Y.H., Zhao, W.W. and Zhou, M.F., 2017, Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model. Journal of Asian Earth Sciences, 148, 65-95.

London, D., 2005, Granitic pegmatites: An assessment of current concepts and directions for the future. Lithos, 80, 281-303.

Lu, L., Mao, J., Li, H., Pirajno, F., Zhang, Z. and Zhou, Z., 2011, Pyrrhotite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of the Hongqiling Ni-Cu sulfide deposits in Northeast China. Ore Geology Reviews, 43, 106-119.

Mahler, J. and Persson, I., 2012, A study of the hydration of the alkali metal ions in aqueous solution. Inorganic Chemistry, 51, 425-438.

Mao, M., Rukhlov, A.S., Rowins, S.M., Spence, J. and Coogan, L.A., 2016, Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. Economic Geology, 111, 1187-1222.

Marshall, J.D., 1992, Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. Geological Magazine, 129, 143-160.

McCauley, A. and Bradley, D.C., 2014, The global age distribution of granitic pegmatites. The Canadian Mineralogist, 52, 183-190.

McCuaig, T.C., Beresford, S. and Hronsky, J., 2010, Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. Ore Geology Reviews, 38, 128-138.

McCuaig, T.C. and Hronsky, J.M., 2014, The mineral system concept: The key to exploration targeting. Society of Economic Geologists Special Publication, 18, 153-175.

McKinstry, H.E., 1948, Mining Geology. Prentice-Hall Inc., 680 p.

McPhie, J., Kamenetsky, V.S., Chambefort, I., Ehrig, K. and Green, N., 2011, Origin of the supergiant Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia: Was a sedimentary basin involved? Geology, 39, 795-798.

Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea, 2023, Strategy and Policy Directions for Securing Critical Minerals. MOTIE, Sejong, 13 p.

Moldoveanu, G.A. and Papangelakis, V.G., 2012, Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. Desorption mechanism. Hydrometallurgy, 117-118, 71-78.

Mozley, P.S. and Burns, S.J., 1993, Oxygen and carbon isotopic composition of marine carbonate concretions: an overview. Journal of Sedimentary Petrology, 63, 73-83.

Mudd, G.M., Werner, T.T., Weng, Z.-H., Yellishetty, M., Yuan, Y., McAlpine, S.R.B., Skirrow, R. and Czarnota, K., 2018, Critical Minerals in Australia: A Review of Opportunities and Research Needs. Record 2018/51. Geoscience Australia, Canberra.

Mukherjee, I. and Large, R.R., 2017, Application of pyrite trace element chemistry to exploration for SEDEX style Zn-Pb deposits: McArthur Basin, Northern Territory, Australia. Ore Geology Reviews, 81, 1249-1270.

Muller, D., Groves, D.I., Santosh, M. and Yang, C.-X., 2025, Critical metals: Their mineral systems and exploration. Geosystems and Geoenvironment, 4, 1.

Nie, L., Wang, F., White, N.C., Zhang, D., Yan, C. and Wang, X., 2023, Scheelite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration. Ore Geology Reviews, 155, 105338.

Normandeau, P.X., McMartin, I. and Corriveau, L., 2024, Till geochemistry as a vector to metasomatic iron and alkali-calcic systems and associated deposits in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. Minerals, 14, 547.

Oliver, N.H., McLellan, J.G., Hobbs, B.E., Cleverley, J.S., Ord, A. and Feltrin, L., 2006, 100th anniversary special paper: numerical models of extensional deformation, heat transfer, and fluid flow across basement-cover interfaces during basin-related mineralization. Economic Geology, 101, 1-31.

Pak, S.J., Lee, B.H., Kim, N., Kim, E.-J., Heo, C.-H., Yang, S.J., Oh, I.H., Yoo, B.C., Yoon, S.-J., Lee, G., Park, G.S., Shin, S., Jo, J., Kim, S.-Y., Kim, I.-J., Lee, J.-H., Davaasuren, Lee, J.-H. and Lee, S., 2025, AI-based predictive modeling for critical mineral exploration and validation of prospective resource areas. KIGAM 2025-2030 Basic Research Planning Report, GP2025-034, 90 p (in Korean).

Parkinson, I.J., Hammond, S.J., James, R.H. and Rogers, N.W., 2007, High-temperature lithium isotope fractionation: Insights from lithium isotope diffusion in magmatic systems. Earth and Planetary Science Letters, 257, 609-621.

Partington, G.A., McNaughton, N.J. and Williams, I.S., 1995, A Review of the Geology, Mineralization, and Geochronology of the Greenbushes Pegmatite, Western Australia. Economic Geology, 90, 616-635.

Perring, C.S., 2015, A 3D geological and structural synthesis of the Leinster area of the Agnew-Wiluna Belt, Yilgarn Craton with special reference to the volcanogenic setting of komatiite-associated nickel sulfide deposits. Economic Geology, 110, 469-503.

Pirajno, F., 2009, Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer Science & Business Media, 1291 p.

Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Kerrich, R., Craw, D. and Brewer, T.S., 2005, The behavior of nitrogen and nitrogen isotopes during metamorphism and mineralization: Evidence from the Otago and Alpine Schists, New Zealand. Earth and Planetary Science Letters, 233, 229-246.

Plouffe, A., Kjarsgaard, I.M., Ferbey, T., Wilton, D.H.C., Petts, D.C., Percival, J.B., Kobylinski, C.H. and McNeil, R., 2022, Detecting Buried Porphyry Cu Mineralization in a Glaciated Landscape: A Case Study from the Gibraltar Cu-Mo Deposit, British Columbia, Canada. Economic Geology, 117, 777-799.

Pogge von Strandmann, P.A.E., Fraser, W.T., Hammond, S.J., Tarbuck, G., Wood, I.G., Oelkers, E.H. and Murphy, M.J., 2019, Experimental determination of Li isotope behaviour during basalt weathering. Chemical Geology, 517, 34-43.

Poletti, J.E., Cottle, J.M., Hagen-Peter, G.A. and Lackey, J.S., 2016, Petrochronological Constraints on the Origin of the Mountain Pass Ultrapotassic and Carbonatite Intrusive Suite, California. Journal of Petrology, 57, 1555-1598.

Porter, T.M., 2010, Current Understanding of Iron Oxide Associated-Alkali Altered Mineralised Systems: Part I - An Overview. In: Porter, T.M. (eds.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective, v. 3 - Advances in the Understanding of IOCG Deposits. PGC Publishing, Adelaide, 5-32.

Prokoph, A., Shields, G. and Veizer, J., 2008, Compilation and time-series analysis of a marine carbonate $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, $^{87}Sr/^{86}Sr$ and $\delta^{34}S$ database through Earth history. Mathematical Geosciences, 40, 1-18.

Rahaman, W., 2024, Non-traditional stable metal and metalloid isotopes and their potential applications in earth, ocean, and environmental sciences. Geosystems and Geoenvironment, 3, 100307.

Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N. and Oreskes, N., 1990, Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit. In: Hughes, F.E. (eds.), Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 15-26.

Rehkämper, M., Schönbächler, M. and Stirling, C.H., 2001, Multiple collector ICP-MS: Introduction to instrumentation, measurement techniques and analytical capabilities. Geostandards and Geoanalytical Research, 25, 23-40.

Robb, L., 2021, Introduction to Ore-Forming Processes (2nd edition). John Wiley & Sons, 496 p.

Roberts, N.M.W., Drost, K., Horstwood, M.S.A., Condon, D.J., Chew, D., Drake, H., Milodowski, A.E., McLean, N.M., Smye, A.J., Walker, R.J., Haslam, R., Hodson, K., Imber, J., Beaudoin, N. and Lee, J.K., 2020, Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) U-Pb carbonate geochronology: strategies, progress, and limitations. Geochronology, 2, 33-61.

Rubatto, D., 2017, Zircon: The Metamorphic Mineral. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 83, 261-296.

Rubinson, M. and Clayton, R.N., 1969, Carbon-13 fractionation between aragonite and calcite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 33, 997-1002.

Sabins, F.F., 1999, Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews, 14, 157-183.

Sangster, D.F., 1996, Carbonate-hosted Lead-Zinc Deposits (75th Anniversary Volume). Society of Economic Geologists, Special Publication 4, 664 p.

Santos, A.M., Deditius, A.P., Oskierski, H., Vicentini, A.O., Roberts, M.P., Bhat, G. and Fougerouse, D., 2026, Dolocrete blanket over Mt Weld carbonatite (Western Australia)-A geochemical and mineralogical window to REE super-resource. Chemical Geology, 707, 123327.

Sarjoughian, F., Shubin, F., Asadi, S., Moore, F. and Haschke, M., 2024, Cu isotope patterns of whole rocks in the Kerman porphyry copper belt, southeastern Urumieh Dokhtar magmatic arc, Iran. Journal of Geochemical Exploration, 256, 107329.

Schirra, M., Zajacz, Z. and Muller, D., 2024, Magnetite geochemistry of giant alkalic-type epithermal gold deposits: insights into the magmatic evolution of mineralized alkaline systems. Geological Society, London, Special Publication, 551, 1-24.

Schmidt, M.A., Leybourne, M.I., Peter, J.M., Petts, D. and Layton-Matthews, D., 2019, Fluid inclusion LA-ICP-MS and whole rock geochemical investigation of possible magmatic contributions to the giant Windy Craggy Besshi-type VMS deposit. In: Rogers, N. (eds.), Targeted Geoscience Initiative: 2018 report of activities, Geological Survey of Canada, Open File 8549, 189-204.

Seo, J.H., Yoo, B.C., Villa, I.M., Lee, J.H., Lee, T., Kim, C. and Moon, K.J., 2017, Magmatic-hydrothermal processes in Sangdong W-Mo deposit, Korea: Study of fluid inclusions and ^{39}Ar-^{40}Ar geochronology. Ore Geology Reviews, 91, 316-334.

Sharp, Z., 2017, Principles of stable isotope geochemistry. 416 p.

Sibson, R.H.M., 2001, Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition. Reviews in Economic Geology, 14, 25-50.

Sidey, V., 2016, On the effective ionic radii for ammonium. Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials, 72, 626-633.

Silva, D., Groat, L., Martins, T. and Linnen, R., 2023, Structural controls on the origin and emplacement of lithium-bearing pegmatites. The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology, 61, 1-10.

Skarmeta, J., 2021, Structural controls on alteration stages at the Chuquicamata copper-molybdenum deposit, Northern Chile. Economic Geology, 116, 1-28.

Skirrow, R.G., 2022, Hematite-group IOCG ± U deposits: An update on their tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au-U mineralizing processes. In: Corriveau, L., Potter, E.G. and Mumin, A.H. (eds.), Mineral systems with iron oxide copper-gold (IOCG) and affiliated deposits. Geological Association of Canada, 27-51.

Standing, J.G. and Munro, M.A., 2022, Anatomy of mineralised

eye structures in the Fraser Zone, Albany-Fraser Orogen, W.A. Structural Geology and Resources, Kalgoorlie, Western Australia, 27-30.

Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., Hannah, J.L. and Scherstén, A., 2001, The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works. Terra Nova, 13, 479-486.

Sun, J., Zhu, X., Chen, Y. and Fang, N., 2013, Iron isotopic constraints on the genesis of Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China. Precambrian Research, 235, 88-106.

Sun, J., Zhu, X.K., Belshaw, N.S., Chen, W., Doroshkevich, A.G., Luo, W.J., Song, W.L., Chen, B.B., Cheng, Z.G., Li, Z.H., Wang, Y., Kynicky, J. and Henderson, G.M., 2021, Ca isotope systematics of carbonatites: Insights into carbonatite source and evolution. Geochemical Perspectives Letters, 17, 11-15.

Swart, P.K., 2015, The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future. Sedimentology, 62, 1403-1432.

Talbot, M.R., 1990, A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. Chemical Geology: Isotope Geoscience section, 80, 261-279.

Teng, F.-Z., Dauphas, N. and Watkins, J.M., 2017, Non-traditional stable isotopes: retrospective and prospective. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 82, 1-26.

Teng, F.Z., McDonough, W.F., Rudnick, R.L., Dalpé, C., Tomascak, P.B., Chappell, B.W. and Gao, S., 2004, Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, 4167-4178.

Tian, Z., Liu, F., Xiao, W., Wang, H., Zhu, Z. and Wang, D., 2024, Structure-controlled mineralization resulted from Paleoproterozoic orogenesis in the Dahenglu Cu-Co deposit, NE China. Ore Geology Reviews, 165, 1-17.

Tomascak, P.B., Langmuir, C.H., le Roux, P.J. and Shirey, S.B., 2008, Lithium isotopes in global mid-ocean ridge basalts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72, 1626-1637.

Vearncombe, J.R., 2023, Function and status of structural geology in the Resource industry. Australian Journal of Earth Sciences, 70, 908-931.

Werner, R.A. and Cormier, M.A., 2022, Isotopes-Terminology, definitions and properties. In: Tree Physiology, Springer, Cham.

Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55, 229-272.

Wilkinson, J.J., Baker, M.J., Cooke, D.R. and Wilkinson, C.C., 2020, Exploration targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry: A case study of the El Teniente deposit, Chile. Economic Geology, 115, 771-791.

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. and Marschik, R., 2005, Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin. In: Hedenquist, J.F.H., Thompson, R.J. and Goldfarb, J.P.R. (eds.), One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists.

Wyborn, L., Heinrich, C. and Jaques, A., 1994, Australian proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: The AusIMM Annual Conference. AusIMM Darwin, 109-115.

Xiong, Y., Zhou, T., Fan, Y., Chen, J., Wang, B., Liu, J. and Wang, F., 2022, Enrichment mechanisms and occurrence regularity of critical minerals resources in the Yaojialing Zn skarn polymetallic deposit, Tongling district, eastern China. Ore Geology Reviews, 144, 104822.

Xiong, Y., Zuo, R. and Carranza, E.J.M., 2018, Mapping mineral prospectivity through big data analytics and a deep learning algorithm. Ore Geology Reviews, 102, 811-817.

Xiong, Y.-Q., Jiang, S.-Y., Wen, C.-H. and Yu, H.-Y., 2020, Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: Constraints from U-Th-Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon. Lithos, 358-359, 105422.

Yang, F., Zuo, R. and Kreuzer, O.P., 2024, Artificial intelligence for mineral exploration: A review and perspectives on future directions from data science. Earth-Science Reviews, 258, 104941.

Yang, K.F., Fan, H.R., Pirajno, F. and Liu, X., 2023, Magnesium isotope fractionation in differentiation of mafic-alkaline-carbonatitic magma and Fe-P-REE-rich melt at Bayan Obo, China. Ore Geology Reviews, 157, 105466.

Yang, S.-J., Kim, T., Kim, E.-J., Duuring, P., Koh, S.-M., Nam, H.-T., Heo, C.-H., Cho, S.-J. and Kim, Y.-S., 2022, Geometry and scale property of a gold-silver-bearing vein system associated with an oblique-slip fault zone at Gasado Island, Korea. Ore Geology Reviews, 147, 1-17.

Young, E.D., Galy, A. and Nagahara, H., 2002, Kinetic and equilibrium mass-dependent isotope fractionation laws in nature and their geochemical and cosmochemical significance. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66, 1095-1104.

Zhang, Y., Li, W. and Brzozowski, M.J., 2024, Dynamics of Cu isotope fractionation during the reactions of pyrite with Cu(I)-bearing hydrothermal fluids. Geochimica et Cosmochimica Acta, 383, 43-56.

Zhang, Y., Liu, Y., Hou, Z. and Zheng, X., 2021, Iron and sulfur isotopic compositions of carbonatite-related REE deposits in the Mianning-Dechang REE belt, China: Implications for fluid evolution. Ore Geology Reviews, 138, 104373.

Zheng, Y.-C., Liu, S.-A., Wu, C.-D., Griffin, W.L., Li, Z.-Q., Xu, B., Yang, Z.-M., Hou, Z.-Q. and O'Reilly, S.Y., 2019, Cu isotopes reveal initial Cu enrichment in sources of giant porphyry deposits in a collisional setting. Geology, 47, 135-138.

Zuo, R., 2020, Geodata science-based mineral prospectivity mapping: A review. Natural Resources Research, 29, 3415-3424.