

2025-06
정책연구

강원특별자치도 희소금속 재자원화 산업 육성 방안

연구책임자 : 박승환 선임연구원

목 차

제1장 연구개요

제1절 연구배경 및 필요성	3
제2절 연구 범위 및 제안 목적	9
제3절 비전 및 추진전략	12

제2장 희소금속 수요 예측 및 공급 리스크 분석

제1절 희소금속 수요 증가 추세 및 공급 리스크 분석	15
1. 국내·외 탄소중립 기술 확산에 따른 희소금속 수요 예측	18
2. 기술별 주요 희소금속 수요 분석	21
3. 글로벌 공급망 구조 분석 및 리스크 요인 분석	28
제2절 전방산업(배터리, 전기차 등)에서의 희소금속 사용 실태 조사	52
1. 주요 산업별 희소금속 사용량 및 적용 기술 확인	52
2. 전략광종별 강원특별자치도 대응 필요성	57

제3장 희소금속 활용분야 내재량 산정

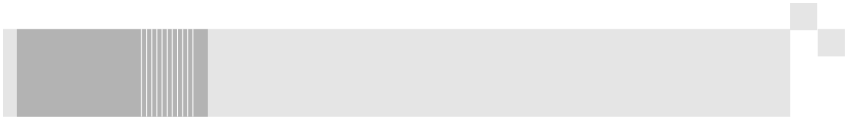
제1절 산업별 소재-부품 구조 및 희소금속 내재량 추정	65
1. 내재량 산정의 개념과 목적	65
제2절 내재량 데이터의 불확실성과 해석 주의점	78
1. 기술 조성 및 설계변수의 다양성	78
2. 데이터 출처 및 표준화의 불일치	79
3. 시간적 요인 및 기술혁신 속도의 영향	80
4. 회수효율 및 공정 손실율의 변동성	80
5. 해석 및 정책적 활용 시 주의사항	81
제3절 내재량 기반 회수잠재량 산정	85
1. 회수잠재량 분석의 정책적 활용	87
2. 재활용 기술, 회수율, 폐자원 관리체계 분석	91
3. 재활용 기술 탄소저감효과 분석	108

제4장 희소금속 함유 폐기물 관리체계 및 법제도 검토

제1절 희소금속 함유 폐기물 법제도 분석	113
1. 국내 법·제도 현황	114
2. 해외 제도 및 정책 비교	121
3. 국내 제도적 한계 및 개선 필요사항	126

제5장 결론 및 정책제언

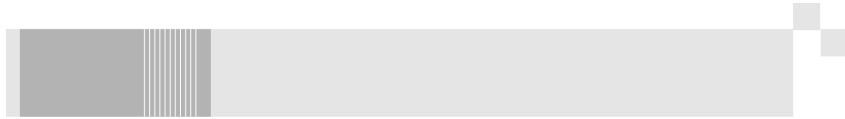
제1절 순환경제 정책 및 제도적 기반 마련을 위한 전략 제언	135
제2절 희소금속 재자원화 산업 활성화를 위한 희소금속 순환경제 정책 추진방향	140
제3절 탄소중립 기술과 연계한 희소금속 순환경제 추진 세부 전략	143
1. LCA(수명주기평가) 기반 금속별 탄소절감계수 도입 및 제도화	143
2. CCUS·수전해·배터리 재활용 등 탄소중립 핵심기술과 희소금속 회수산업의 연계	149
3. 강원특별자치도 풍력·ESS·배터리 산업과 영월 첨단산업 핵심소재단지를 중심으로 한 ‘탄소중립형 희소금속 순환경제 실증지구’ 지정	155
제4절 맺음말	160
1. 정책적 시사점 요약	161
2. 결론	162
 [Appendix] Reference	 163



표목차

[표 1-1] 희소금속의 종류(국가희소금속센터)	4
[표 2-1] 희소금속 공급망 집중 구조 (Up-Mid-Down Stream 매트릭스)	16
[표 2-2] 희소금속 35종 채굴(Upstream) 집중 현황	33
[표 2-3] 희소금속 35종 정련·가공(Midstream) 집중 현황	40
[표 2-4] 희소금속 35종 부품·완제품(Downstream) 집중 현황	47
[표 2-5] 전략광종별 주요 리스크 및 대응 방향	58
[표 2-6] 전략광종별 강원특별자치도의 대응 방안	61
[표 3-1] 72 kWh NCM811 배터리 팩 내재량 계산 방법	70
[표 3-2] 희소금속 별 내재량 분석	72
[표 3-3] 제품군 별 주요 금속 내재량 분석 결과	74
[표 3-4] 회수잠재량 계산을 위한 단계별 내용 및 자료원	86
[표 3-5] 주요 산업군 별 희소금속 회수잠재량 특징	86
[표 3-6] 희소금속 재자원화 산업육성 발전방향 요약	91
[표 3-7] 반도체 금속군 별 회수원 특징 및 비교	106
[표 3-8] 반도체 금속군 별 회수율	107
[표 3-9] 재련기술 별 탄소감축 효과 분석	108
[표 3-10] 금속군 별 탄소감축률	110

[표 4-1] 산업군 별 폐기물 배출 형태 및 문제점	121
[표 4-2] 국내외 폐기물 재활용 법제도 분석 결과 요약	126
[표 4-3] EPR 제도의 시사점	130
[표 4-4] 정책개선 종합 시사점 분석 결과	131
[표 5-1] 국내 제도 한계 요약	136
[표 5-2] 법제도 개선방향 요약	139
[표 5-3] 희소금속 순환경제 정책 추진방향	142
[표 5-4] 금속별 절감효과 예시값	144
[표 5-5] 기술분야 별 회수산업 주요 금속	149



그림목차

[그림 2-1] 청정에너지 전환에 따른 주요 희소금속 수요 전망	19
[그림 2-2] 내연기관차 대비 전기차 필요 광물량(비교)	22
[그림 2-3] 가스발전 대비 해상풍력 설비 필요 광물량(비교)	23
[그림 2-4] 희소금속 별 청정에너지 수요 비중 확대	24
[그림 2-5] 수소·연료전지 및 수전해 기술별 CAPEX 효율 비교	25
[그림 2-6] 리튬·코발트·희토류 정제 집중도	26
[그림 2-7] 2040년 넷제로 달성 시 광물 수요 예상량	28

제 1 장

연구개요

제 1 장

연구개요



제1절 연구배경 및 필요성

- 희소금속이란 우리나라는 현재 수요가 있는 것과 향후 기술혁신에 수반에 새로운 공업용 수요가 예측되는 것으로 35종, 56개의 금속 원소로 정의하고 있으며, 리튬, 마그네슘, 세슘, 베릴륨, 스트론튬, 바륨, 희토류, 티타늄, 지르코늄, 하프늄, 바나듐, 니오븀, 탄탈륨, 크롬, 몰리브덴, 텅스텐, 망간, 레늄, 코발트, 니켈, 백금족, 카드뮴, 갈륨, 인듐, 탈륨, 붕소, 게르마늄, 인, 비소, 안티몬, 비스무스, 실리콘, 셀레늄, 텔루륨, 주석(단 희토류는 Rare Earth Element 17종, 백금족(PGM)은 백금족 원소 6종을 의미)이 이에 속한다.

[표 1-1] 희소금속의 종류(국가희소금속센터)

구분	종류	원소	종류수
희소금속	알칼리/알칼리토 금속	Li, Mg, Cs, Be, Sr, Ba	6
	반금속 원소	Ge, P, As, Sb, Bi Se, Te Sn, Si	9
	철족원소	Co, Ni	2
	보론그룹 원소	B, Ga, In, Tl, Cd	5
	고융점 금속	Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Re	11
	희토류 금속	REE(희토류원소) 17종 ¹⁾	1
	백금족 원소 ²⁾	Ru, Rh, Os, Pd, Ir, Pt	1
합계			35

- 희소금속 35종은 모두 전략적 중요성을 가지지만, 국제 통계의 가시성에는 차이가 존재한다. 리튬, 코발트, 니켈, 크롬, 망간, 몰리브덴, 텅스텐, 티타늄, 바나듐, 니오븀, 탄탈륨, 레늄, 희토류(17종), 백금족금속(PGM) 등은 국제거래소(LME, SHFE) 또는 미국지질조사국(USGS), 국제에너지기구(IEA) 등의 보고서에서 수급·가격이 정기적으로 관리되는 금속으로, 글로벌 공급망 분석이 용이하다. 이들 금속은 배터리, 전기차, 철강, 항공우주 등 탄소중립 기술 확산에 직결된 핵심 소재이기 때문에 가격 변동성과 공급 리스크에 대한 국제적 모니터링이 활발하다.

1) 희토류금속 17종은 1군(REE, Rare Earth Element)으로 분류

2) 귀금속중 백금족(6종)은 PGM 1군으로 분류

- 반면, 갈륨, 인듐, 게르마늄, 안티모니, 실리콘, 보론, 인, 셀레늄, 텔루륨, 비스무트 등은 특정 산업(반도체, 디스플레이, 태양광 등)에 국한된 사용 비중이 크고, 거래소보다는 산업별·국가별 보고서에 의존하는 경우가 많다. 따라서 이들 금속은 수급 데이터의 신뢰성이 상대적으로 낮아, 전방산업 중심으로 한정적으로 분석이 가능하다.
- 한편, 베릴륨, 스트론튬, 바륨, 카드뮴, 탈륨, 비소와 같은 금속은 산업 내 사용 규모가 작거나, 독성 및 환경규제 문제로 인해 국제적 거래 통계가 거의 집계되지 않는다. 이러한 금속들은 군수·특수 용도로 사용되는 경우가 많아 공급망의 투명성이 낮으며, 오히려 “데이터 부족” 자체가 잠재적 리스크 요인으로 작용한다.
- 따라서 희소금속의 수요·공급 리스크를 분석할 때는, 통계 기반 분석이 가능한 금속과 정책적 모니터링이 필요한 금속을 구분하는 것이 중요하다. 이는 향후 강원특별자치도의 희소금속 재자원화 산업 정책 수립에 있어, 어떤 금속은 실증적 자료를 토대로 대응전략을 마련하고, 어떤 금속은 정보 인프라 구축과 모니터링 체계 강화를 우선해야 하는지를 구분하는 기준으로 활용될 수 있다.
- 일본은 우리나라 대비 4종(마그네슘, 카드뮴, 인, 실리콘), 희토류(스칸듐), 백금족(팔라듐, 백금)을 제외한 나머지 31종에 대해 희소금속으로 정의하고 있으며, 미국은 우리나라와 6종의 금속(마그네슘, 니켈, 인, 비소, 안티몬, 주석)을 제외하였으나, 5종(칼슘, 루비듐, 토륨, 우라늄, 플루토늄)을 추가한 총 33종을 희소금속으로 분류하였다.
- 전 세계적으로 탄소중립 전환이 가속화되면서 전기차, 2차전지, 풍력·

태양광 등 재생에너지, 전력망 확충, 수소·암모니아 에너지 등 저탄소 기술의 보급이 급속히 확대되고 있다. 이러한 기술들은 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연, 희토류, 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄 등 다양한 희소금속에 대한 수요를 수반하며, 이에 따라 희소금속의 전략적 중요성이 전례 없이 높아지고 있다(IEA, 2021; USGS, 2024). 그러나 글로벌 공급망은 특정 국가와 기업에 심각하게 편중되어 있고, 가격 변동성이 확대됨에 따라 희소금속은 이제 단순한 소재가 아닌 산업·에너지 안보 차원의 핵심 이슈로 부상하고 있다.

- 과거 산업용·특수용 중심의 수요가, 최근에는 배터리·전동화·신재생 설비 중심으로 재편되었다. 이에 따라 일부 금속은 “전지 재료(양극·음극·전해질·집전체)”로, 일부는 “모터·터빈용 영구자석 및 고강도 합금”으로 핵심화되며 수요의 동조화·급증이 나타나고 있다. 기술 로드맵(고니켈 양극, LFP/LFMP 확산, Si계 음극, 고체전해질, 고온 초합금 등)의 변화는 금속 바스켓 구성과 등급 사양(순도, 입도, 불순물 허용치)까지 바꾸며, 단순 톤(ton) 기준이 아닌 품질·전처리 경쟁을 촉발한다.
- 첫째, 수요 구조의 질적 변화가 뚜렷하다. 과거에는 군수나 특수 합금 등 일부 산업에 국한되던 금속 수요가 최근에는 배터리, 전동화, 재생 에너지 설비 등으로 확산되며 새로운 수요 구조를 형성하고 있다. 특히 일부 금속은 양극재·음극재·전해질·집전체 등 배터리 핵심소재로, 또 다른 금속은 전동기 및 풍력터빈용 영구자석, 항공·에너지 설비용 고강도 합금으로 전환되며 수요 급증이 나타나고 있다(World Bank, 2020). 이 과정에서 기술 로드맵(고니켈 양극재, LFP·LFMP 확산, Si계 음극, 고체전해질, 초합금 등)의 변화가 금속 바스켓 구성과 등급 사양까지 바꾸며, 단순한 생산량 경쟁을 넘어 품질·전처리 기술 경쟁으로 이어지고 있다.

- 둘째, 공급망의 편중과 지정학적 리스크가 고조되고 있다. 코발트의 경우 전 세계 생산량의 70% 이상이 콩고민주공화국에 집중되어 있으며, 리튬은 호주와 남미 염호 지역에 편재되어 있다. 희토류와 갈륨·게르마늄 등은 중국이 정련·분리 공정을 사실상 독점하고 있으며, 2023년에는 중국이 갈륨·게르마늄에 대한 수출통제를 단행하여 첨단산업 공급망 불안을 심화시켰다(European Commission, 2023). 니켈 역시 인도네시아가 자국 내 가공 의무화를 통해 글로벌 공급망에서 지배력을 강화하고 있다. 이러한 공급 편중은 국제적인 수출 규제, 내수 우선 정책, 환경 및 노동 규제, 광산 투자 지연, 물류 병목 현상과 결합하여 물리적·제도적 리스크를 상시화하고 있으며, 이는 가격 상승뿐 아니라 납기 변동과 품질 불일치 문제로 이어져 국내 전방산업의 안정적 조달을 위협한다(IRENA, 2023; KIGAM, 2022).
- 셋째, 가격 변동성 확대와 금융·정책 요인이 복잡하게 작용한다. 전기차 보급 확대, 각국의 보조금 정책, 탄소국경조정제도(CBAM), 전략비축, 투자 심리 변화 등이 맞물리며 가격의 급등락 주기가 짧아지고 있다. 거래소에 상장된 니켈·코발트·몰리브덴 등은 실시간 가격 변동성이 크고, 갈륨·인듐·게르마늄·일부 희토류처럼 비상장 금속은 정보 비대칭으로 인해 시장 가격 파악이 어렵다. 이에 따라 기업은 장기 공급계약과 현물 거래를 혼합한 복합적 조달전략을 요구받고 있다(MOTIE, 2023).
- 넷째, ‘도시광산’과 재자원화의 부상은 공급망 전략의 중요한 축으로 떠오르고 있다. 전기차와 ESS, 전자제품의 폐기 및 리퍼브·리사이클 물량이 2030년 전후로 본격 증가할 전망이다. 생산 공정에서 발생하는 스크랩과 사용 종료(EoL) 자원의 동시 증가는 재자원화를 ‘제3의 공급원’으로 자리잡게 하고 있다. 재활용은 단순 자원 대체를 넘어, 공정

단계에서의 탄소배출 저감, 지역 일자리 창출, 기술 내재화, 품질 표준화라는 파급 효과를 가진다. 특히 신규원료와 재생원료의 혼합 비율은 소재 품질과 탄소발자국(LCA)에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 재자원화는 기술적·환경적·경제적 차원에서 모두 중요하다(IRENA, 2023).

- 다섯째, 대한민국이 직면한 구조적 과제도 명확하다. 우리나라는 전방 산업 경쟁력은 세계적 수준이지만, 핵심 금속 대부분을 해외에 의존하고 있으며 중간재 가공·정제 공정이 해외에 집중되어 있다. 재활용 인프라는 빠르게 확충되고 있으나, 광종별 회수율과 경제성, 규제 정합성이 상이하다. 또한 데이터 표준화, 추적성(Traceability), 재생소재 인정제도(저탄소 인증, 원산지·함량 검증 등)는 아직 정비 단계에 머물고 있다(KIGAM, 2022).
- 여섯째, 강원특별자치도의 기회와 당위성이 크다. 강원은 석회석·마그네사이트 등 광물자원을 보유하고 있으며, 시멘트·세라믹·금속·화학 소재 산업과 동해안 항만·물류 인프라, 산업단지를 기반으로 한다. 이는 자원재활용 공정을 집적화하고 클러스터를 조성하기에 적합한 조건이다. 또한 지역 산업에서 발생하는 부산물·스크랩과 인접 권역에서 유입 가능한 배터리·전자·자석 스크랩을 결합하면, 텅스텐·몰리브덴·티타늄·희토류·리튬·니켈·코발트 등 광종별 특화 재자원화 체인을 구축할 수 있다. 더 나아가 동해안 항만을 활용한 원료 수입-재자원화-재수출 모델, 산업단지 공동 인프라 활용, LCA 기반 저탄소 인증 연계는 지역 산업의 고부가가치화를 촉진할 것이다(MOTIE, 2023).
- 마지막으로, 왜 지금 강원에서 재자원화 산업을 육성해야 하는가에 대한 분명한 답이 존재한다. 2030년 전후로 전기차 배터리의 사용 종료 물량과 제조 스크랩이 동시에 증가하면서 재활용 원료가 본격 확대될 것이다. 이 초기 시장 설계 단계에서 입지, 공정, 표준, 인력, 데이터

체계를 선점하는 지역이 지속 가능한 경쟁우위를 확보한다. 강원은 이러한 요건을 충족하고 있으며, 주요 광종의 특화 라인을 조합해 도시 광산-순환경제 거점으로 도약할 수 있다. 이는 지역 차원의 탄소중립 산업 전환, 부가가치 창출과 양질의 일자리 확충, 국가 공급망 회복탄력성 강화에 기여할 것이다.

- 요약하면, 본 연구는 탄소중립 확산에 따른 희소금속 수요 급증과 공급망 리스크, 재자원화의 부상이라는 구조적 전환 속에서, 강원특별자치도의 지리·산업·인프라 강점을 활용한 ‘희소금속 재자원화 산업’ 육성 전략을 마련하기 위해 추진된다. 목표는 ① 광종별 가치사슬 재설계(회수-정제-전구체/소재화), ② 지역 순환경제 인프라·표준·인력 체계 구축, ③ 전방산업 연계 비즈니스 모델 창출이며, 이를 통해 강원이 국가 차원의 순환경제·탄소중립 달성에 실질 기여하는 핵심 거점으로 자리매김하는 데 있다.



제2절 연구 범위 및 제안 목적

- 본 연구의 범위는 희소금속 재자원화 산업을 둘러싼 수요·공급 구조, 전방산업 활용, 재활용 기술 및 관리체계, 정책·제도적 기반을 종합적으로 분석하는 데 있다. 이를 위해 첫째, 글로벌 차원의 탄소중립 기술 확산에 따른 희소금속 수요 전망과 공급망 리스크를 검토한다. 특히 리튬, 코발트, 니켈, 망간, 희토류, 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄 등 탄소중립 핵심 광종을 중심으로 국제에너지기구(IEA), 미국지질조사국(USGS), 세계은행(World Bank) 등에서 제

시한 수요 전망을 분석하고, 공급망 집중도와 지정학적 불안정 요인을 평가한다(IEA, 2021; USGS, 2024; World Bank, 2020).

- 둘째, 국내외 전방산업(배터리, 전기차, 전자, 철강, 항공우주 등)에서의 희소금속 사용 실태를 조사한다. 이를 통해 주요 산업별 소재 사용량; 부품 구조를 파악하고, 희소금속 내재량을 추정하며, 주요 기업·산업단지 사례와 전문가 면담 결과를 반영하여 현장의 수요 구조를 입체적으로 제시한다(IRENA, 2023).
- 셋째, 재활용 기술, 회수율, 폐자원 관리체계를 분석한다. 여기에는 국내외 선진국에서 상용화된 회수·정제·재제조 기술, 산업별 회수율 및 경제성, 법·제도적 관리체계 검토가 포함된다. 특히 도시광산 및 EoL(end-of-life) 배터리 재활용, 영구자석 회수, 합금 스크랩 재활용 등 기술별 진전 상황과 개선 잠재력을 검토함으로써, 강원특별자치도에 적용 가능한 기술·산업적 시사점을 도출한다(KIGAM, 2022; MOTIE, 2023).
- 넷째, 이러한 분석을 토대로 순환경제 정책 및 제도적 기반 마련을 위한 전략 제언을 도출한다. 구체적으로는 국내 자원순환 관련 정책과 지침의 체계성을 검토하고, EU 핵심원자재법(CRMA), 미국 IRA(인플레이션감축법) 등 해외 정책과 비교 분석을 수행한다. 이를 통해 강원특별자치도가 지역 차원의 희소금속 재자원화 거점으로 발전하기 위한 로드맵을 제시하고, 국가적 차원에서 순환경제 및 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있는 정책 대안을 마련한다(European Commission, 2023).

- 따라서 본 연구의 목적을 다음 세 가지로 요약할 수 있다.
 - ① 희소금속 수요와 공급망 리스크를 분석하여 전략 광종별 대응 필요성을 제시한다.
 - ② 국내외 산업 현황과 재활용 기술 수준을 비교·검토하여 강원특별자치도 적용 가능성을 도출한다.
 - ③ 정책·제도적 대안을 제언함으로써 강원특별자치도가 국가 순환경제 및 탄소중립 달성의 핵심 거점으로 자리매김할 수 있는 실행 전략을 제시한다.



제3절 비전 및 추진전략

비 전

희소금속 재자원화 산업 육성을 통한 순환경제 실현과 탄소중립 기여

추진목표

희소금속 순환경제 기반 산업생태계 조성 및 강원특별자치도 자원산업 고도화

① 수요·공급 예측 및 리스크 관리 글로벌 수요 전망 예측을 통해 공급 리스크를 분석하고, 강원 산업 구조 연계 가능한 방안 마련	② 전방산업 수요 구조 분석 산업별 활용 현황을 조사하여 부품·소재 별 구조를 파악해 기업별 수요 패턴 분석
③ 재활용 산업 생태계 활성화 희소금속 재활용 기술 동향 분석을 통해 순환경제 산업 생태계 활성화 전략 제시	④ 국내외 정책·제도 비교를 통한 실행전략 도출 국내외 법제도 분석을 통해 제도적 시사점을 분석해 이를 활용할 수 있는 지역특화형 실행방안 도출

추진전략

추진전략 ①	글로벌 분석 기반 강원형 전략 마련
추진전략 ②	재활용 기술 고도화 및 지역 산업단지 연계
추진전략 ③	정책·제도 기반 강화와 실행체계 확립
추진전략 ④	산·학·연·관 협력 거버넌스를 통한 지속가능한 운영

제2장

회소금속 수요 예측 및 공급
리스크 분석

제2장

희소금속 수요 예측 및 공급 리스크 분석



제1절 희소금속 수요 증가 추세 및 공급 리스크 분석

- 희소금속 35종은 국제적 거래 구조와 산업 활용도에 따라 통계 가시성이 크게 구분된다. 우선 리튬, 코발트, 니켈, 크롬, 망간, 몰리브덴, 텅스텐, 티타늄, 바나듐, 니오븀, 탄탈륨, 레늄, 희토류(17종), 백금족금속(PGM) 등은 국제거래소(LME, SHFE)나 미국지질조사국(USGS), 국제에너지기구(IEA) 등에서 가격과 수급 현황이 정기적으로 집계되는 금속이다. 이들 금속은 전기차 배터리, 철강, 항공우주, 풍력터빈 등 탄소중립 기술의 핵심소재로서 글로벌 수요가 크기 때문에 비교적 신뢰도 높은 데이터가 확보된다.
- 반면 갈륨, 인듐, 게르마늄, 안티모니, 실리콘, 보론, 인, 셀레늄, 텔루륨, 비스무트와 같은 금속은 반도체, 태양광, 디스플레이 등 특정 산업에 한정적으로 활용되며, 거래소보다는 국가별·산업별 보고서에서 단편

적으로만 통계가 제시된다. 따라서 이들 금속은 글로벌 공급망 차원의 종합적 통계는 부족하지만, 개별 산업 동향 분석에는 활용할 수 있다.

- 또한 베릴륨, 스트론튬, 바륨, 카드뮴, 탈륨, 비소와 같은 금속은 군수·특수용도나 소규모 산업에 국한되어 사용되며, 독성 및 환경규제 문제로 인해 국제적 거래 데이터가 거의 집계되지 않는다. 이 경우에는 “데이터 부재” 자체가 공급망 불확실성으로 이어질 수 있어, 정책적으로는 오히려 모니터링과 정보 인프라 구축이 중요하다.

[표 2-1] 희소금속 공급망 집중 구조(Up-Mid-Down Stream 매트릭스)

광종	Upstream (채굴)	Midstream (정련·가공)	Downstream (부품·완제품)
리튬 (Li)	호주, 칠레, 아르헨티나	중국(>60%), 칠레 일부	양극재(LFP, NCM) - 중국 70% 이상
니켈 (Ni)	인도네시아, 필리핀, 러시아	인도네시아 HPAL, 중국, 러시아	전구체·양극재 - 중국·한국·일본 집중
코발트 (Co)	DRC 70%+	중국(>70%), 핀란드 일부	양극재 - 중국 화합물 독점, 한국·일본 보완
망간 (Mn)	남아공, 가봉, 호주	중국 전해망간 90%+	배터리용 황산망간 - 중국 집중
흑연 (C)	중국, 모잠비크	중국(80%+)정제	음극재 - 중국 지배, 한국·일본 소량
희토류 (REE)	중국, 미얀마, 호주	중국(80~90%), Lynas(말레이시아)	네오디뮴 자석 - 중국 90%+
텅스텐 (W)	중국(80%+), 베트남	중국 APT지배	초경합금·공구 - 중국·독일·오스트리아
몰리브덴 (Mo)	칠레, 중국, 미국	중국·칠레·미국 정련	합금강·촉매 - 미국·EU·중국
티타늄 (Ti)	호주, 남아공, 인도	러시아·일본·중국 스폰지	항공합금 - 러시아·일본, 방산용 미국
바나듐 (V)	중국, 러시아, 남아공	중국 60%+	합금강·VRFB - 중국 철강사
니오븀 (Nb)	브라질(90%+)	브라질(CBMM) 수직계열화	페로니오븀 - 브라질 독점

광종	Upstream (채굴)	Midstream (정련·가공)	Downstream (부품·완제품)
탄탈륨 (Ta)	호주, 브라질, DRC	중국·에스토니아·태국	커패시터·합금 - 중국 우위
레늄 (Re)	칠레, 폴란드	부산물 회수 - 제한적	항공·가스터빈 합금 - 미국·EU
갈륨 (Ga)	중국	중국(>90%)	화합물 반도체 GaAs/GaN - 중국 주도
게르마늄 (Ge)	중국, 러시아	중국 60~70%	광섬유·IR 광학 - 중국 우위
인듐 (In)	중국, 한국, 캐나다	중국, 한국·일본 보완	ITO 타깃 - 중국 지배
셀레늄 (Se)	칠레, 페루, 중국	중국·일본·독일	CdSe·유리 탈색제 - 중국 중심
텔루륨 (Te)	중국, 미국, 캐나다	중국·일본	CdTe 태양전지 - 중국·미국(First Solar)
마그네슘 (Mg)	중국(절대다수)	중국 85~90%	경량합금 - 중국 내 가공 집중
크롬 (Cr)	남아공, 카자흐스탄	중국·남아공 제련	스테인리스강 - 중국·EU 철강사
규소 (Si)	중국, 브라질, 노르웨이	중국 70%+	폴리실리콘 - 중국 75%+
인 (P)	모로코, 중국	중국(70%±)	비료·LFP 전구체 - 중국 주도
보론 (B)	터키, 미국	터키(Eti Maden)	특수유리·세라믹 - 터키 독점
베릴륨 (Be)	미국, 중국	미국·중국 양분	BeCu 합금 - 방산·항공 집중
스트론튬 (Sr)	멕시코, 스페인, 중국	중국·스페인	전자부품·자석 - 중국 비중 큼
바륨 (Ba)	중국, 인도, 모로코	중국·인도	바륨염 → 전자·유리 - 중국
카드뮴 (Cd)	중국, 한국	중국·한국·일본	CdTe 태양전지·Ni-Cd - 제한적
탈륨 (Tl)	중국	중국 편중	특수광학 - 소규모 시장
비소 (As)	중국, 칠레	중국 편중	GaAs 반도체용 - 중국·미국

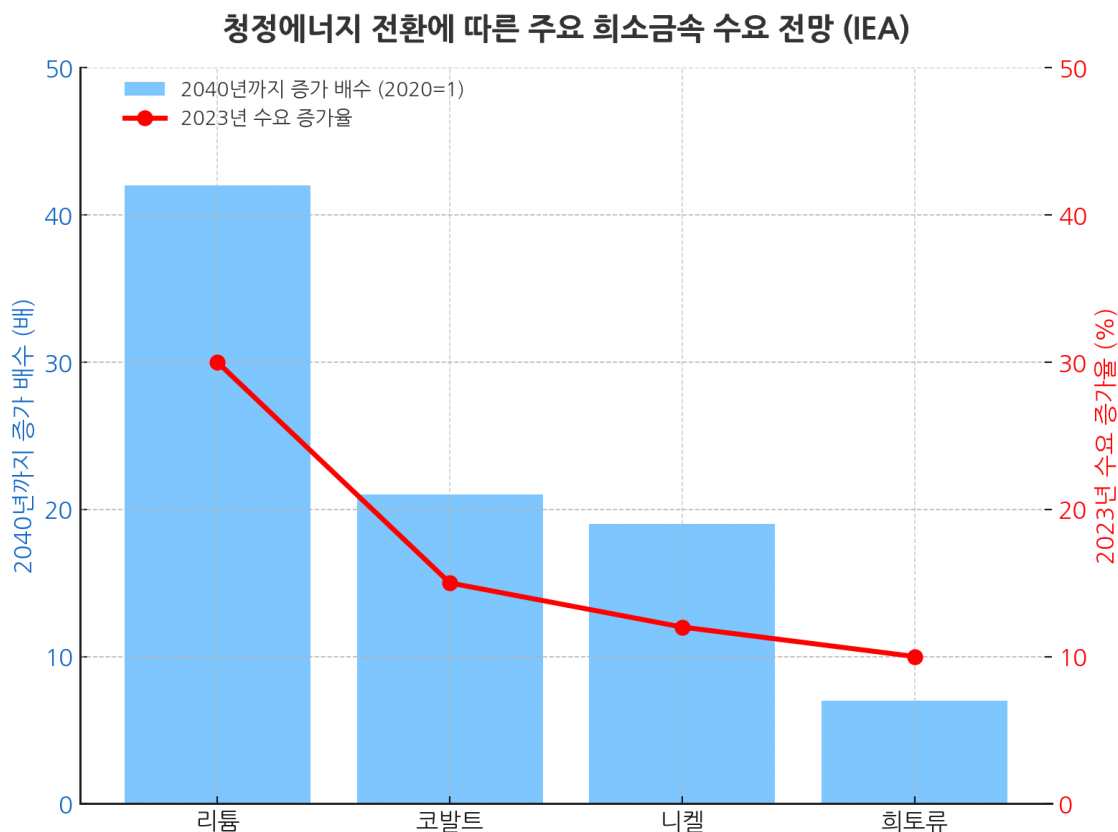
광종	Upstream (채굴)	Midstream (정련·가공)	Downstream (부품·완제품)
비스무트 (Bi)	중국, 멕시코	중국·멕시코	합금·의약품 - 중국 우위
백금 (Pt)	남아공, 러시아	남아공 정련	자동차 촉매·연료전지 - EU·일본·한국
팔라듐 (Pd)	러시아, 남아공	러시아 Norilsk, 남아공	자동차 촉매·전자부품 - EU·중국
로듐·이리듐·루테튬·오스뮴·스미튬	남아공, 러시아	남아공 편중	촉매·전자 특수용도 - 남아공 리스크

- 따라서 희소금속 공급망 리스크를 평가할 때는, 통계 기반으로 심층 분석이 가능한 금속군과, 통계가 제한적이어서 별도의 정보 관리 체계가 필요한 금속군을 명확히 구분할 필요가 있다. 이러한 구분은 강원특별자치도의 희소금속 재자원화 전략 수립 과정에서, 어떤 금속에 대해 실증적 자료를 토대로 대응전략을 마련하고, 어떤 금속에 대해서는 조기경보 및 모니터링 체계를 우선 구축할 것인지를 판단하는 기초 자료로 활용될 수 있다.

1. 국내·외 탄소중립 기술 확산에 따른 희소금속 수요 예측

- 탄소중립 기술의 확산은 희소금속 수요를 구조적으로 증가시키고 있다. 국제에너지기구(IEA)는 청정에너지 전환에 필요한 주요 광물의 수요가 2040년까지 크게 확대될 것이라 전망한다. 특히 리튬 수요는 2020년 대비 최대 42배, 코발트는 21배, 니켈은 19배, 희토류는 7배 증가할 것으로 예상되며, 이들 광물의 대부분이 배터리, 전기차, 재생에너지 설비에 사용될 것으로 분석된다(IEA, 2021). 또한 IEA의 최신 보고서에 따르면 2023년 한 해 동안만 리튬 수요가 전년 대비 약 30% 증가

했으며, 니켈·코발트·흑연·희토류 등도 급격한 수요 확대세를 보였다(IEA, 2024).



[그림 2-1] 청정에너지 전환에 따른 주요 희소금속 수요 전망(IEA, 2024)

- 유럽연합(EU)은 자국 내 전략광물 확보를 위한 정책적 대응을 강화하고 있으며, 이에 따르면 희토류 수요는 2030년까지 약 6배, 2050년까지 7배 증가할 것으로 전망된다(European Commission, 2023). 그러나 현재 희토류의 채굴 및 정련이 대부분 중국에 편중

되어 있어, 수요 급증에 따른 공급망 리스크는 더욱 심화될 가능성이 높다.

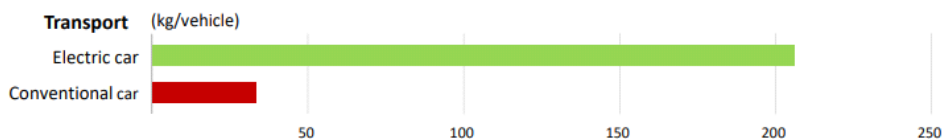
- 세계은행(World Bank) 또한 2050년까지의 청정에너지 전환 시나리오에서, 배터리·태양광·풍력 등 저탄소 기술 보급 확대가 특정 희소금속의 수요를 대규모로 견인할 것이라 전망하였다. 특히 전기차와 에너지 저장장치(ESS)의 급성장으로 리튬, 코발트, 니켈이 대표적인 수요 증가 광종으로 꼽히며, 풍력 및 전동기 산업에서는 희토류(네오디뮴, 디스프로슘 등)의 중요성이 더욱 커질 것으로 분석된다(World Bank, 2020).
- 한편, 기술 변화도 수요 전망에 중대한 영향을 미친다. 최근 배터리 산업은 고니켈 양극재 확대, LFP·LFMP 배터리의 상용화, Si계 음극 및 고체전해질 기술 개발 등으로 광종별 수요 구조가 다변화되고 있다. 이에 따라 특정 광물의 단순 수량뿐 아니라, 순도, 전구체 형태, 불순물 허용치 등 품질적 사양까지 세분화된 수요가 증가하고 있으며, 이는 향후 공급망 경쟁의 핵심 요소가 될 전망이다(IRENA, 2023).
- 종합하면, 탄소중립 기술 확산은 향후 수십 년간 희소금속 수요를 기하급수적으로 확대시킬 것이며, 특히 리튬·코발트·니켈·망간·흑연 및 희토류가 수요 증가의 중심에 자리할 것이다. 이러한 예측은 강원특별자치도가 희소금속 재자원화 산업을 전략적으로 육성해야 하는 근거를 제공하며, 향후 지역 차원의 자원회수·재활용 체계 구축 필요성을 뒷받침한다.

2. 기술별 주요 희소금속 수요 분석

- 탄소중립 전환을 뒷받침하는 핵심 기술들은 공통적으로 다량의 희소금속을 필요로 하며, 기술별로 요구되는 광종과 수요 구조가 다르게 나타난다. 따라서 수요 분석은 단순 금속별 통계를 넘어, 어떤 기술이 어떤 금속을 ‘병목자원(bottleneck mineral)’으로 만드는가를 규명하는 것이 중요하다(IEA, 2021; IRENA, 2023; USGS, 2024).

가. 전기차(EV) 및 2차전지

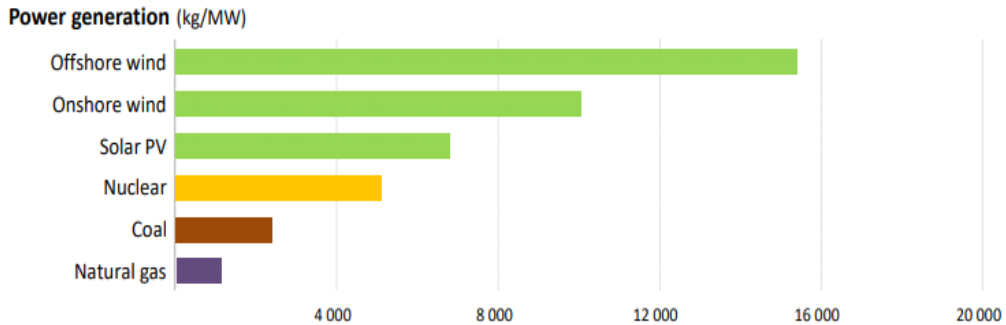
- 양극재: 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn), 인(P) → NCM, NCA, LFP, LFMP 계열에 따라 투입 금속 비율 상이
- 음극재: 흑연(C, 천연/인조), 규소(Si, SiO_x) → 흑연은 현재 90% 이상, 규소는 차세대 대체재로 수요 급증 예상
- 전해질/도전재: 리튬염(LiPF₆ 등), 붕소(B, 전해질 첨가제), 알루미늄(Al, 집전체), 구리(Cu, 집전체) → 소재 산업에서 광종별 소비 비중 점차 확대
- 전기차 1대는 내연기관차 대비 6배 더 많은 광물이 필요함(그림 2-2)
- 구체적 리스크: EV 급증(2030년 2억 대 전망)에 따라 리튬 수요는 2020년 대비 42배, 코발트 21배, 니켈 19배 증가 가능(IEA, 2021)



[그림 2-2] 내연기관차 대비 전기차 필요 광물량(비교) (IEA, 2021)

나. 재생에너지(풍력·태양광)

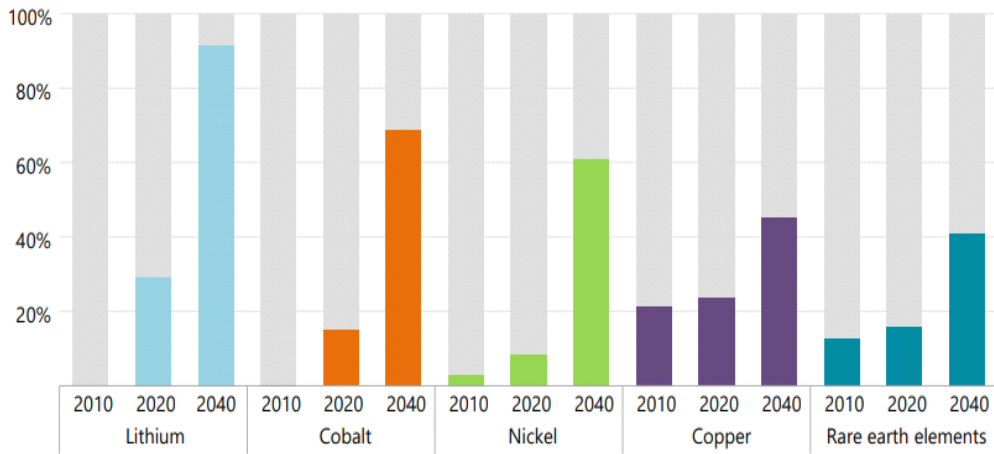
- 풍력터빈: 희토류(네오디뮴 Nd, 프라세오디뮴 Pr, 디스프로슘 Dy, 테르븀 Tb) → 영구자석 기반 발전기 핵심
- 태양광: 실리콘계: 규소(Si, 폴리실리콘) → 글로벌 공급 75% 이상 중국 편중
- 박막계: 인듐(In), 갈륨(Ga), 셀레늄(Se), 텔루륨(Te), 카드뮴(Cd) → CIGS, CdTe 계열에서 사용
- 해상풍력 1MW 설비는 동등 규모 가스발전 대비하여 13배 더 많은 광물이 필요함(그림 2-3)
- 구체적 리스크: EU는 2050년까지 태양광·풍력 발전 확대에 따라 희토류, 인듐, 실리콘 수요가 각각 3~7배 이상 늘어날 것으로 전망 (European Commission, 2023)



[그림 2-3] 가스발전 대비 해상풍력 설비 필요 광물량(비교) (IEA, 2021)

다. 전력망 및 송배전 인프라

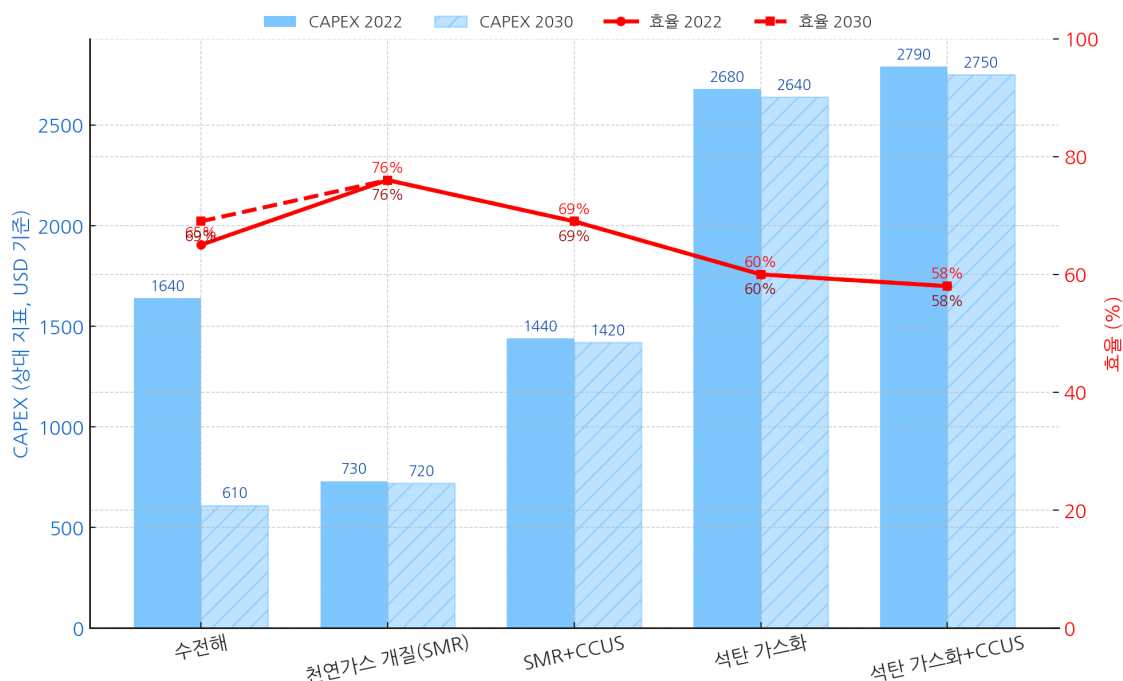
- 초전도체/고효율 변압기: 니오븀(Nb), 바나듐(V) 합금, 고온 초전도체 재료
- 케이블 및 전력 장치: 알루미늄(Al), 구리(Cu) 기반이지만, 안정적인 전도 특성을 위해 희소 합금 원소(베릴륨 Be, 비스무트 Bi) 사용
- 배전기기: 희토류 자석, 특수강(크롬 Cr, 몰리브덴 Mo, 텅스텐 W)
- 리스크 요인: 전력망 확장은 배터리·풍력에 비해 덜 주목받지만, 베릴륨·니오븀 같은 소량 금속이 병목이 될 수 있음



[그림 2-4] 희소금속 별 청정에너지 수요 비중 확대(IEA, 2021)

라. 수소·연료전지 및 수전해

- 연료전지 촉매: 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 로듐(Rh) → PGM(백금족금속)이 핵심
- 수전해 촉매: 이리듐(Ir), 루테튬(Ru) → PEM 수전해 시스템에서 사용
- 암모니아 합성: 철계 촉매 기반이지만, 고효율·내구성 촉매에 몰리브덴(Mo), 루테튬(Ru) 사용
- 리스크 요인: PGM은 남아공·러시아 편중이 심각, 수소경제 확산 속에서 공급 불안정 심화 예상(IRENA, 2023)

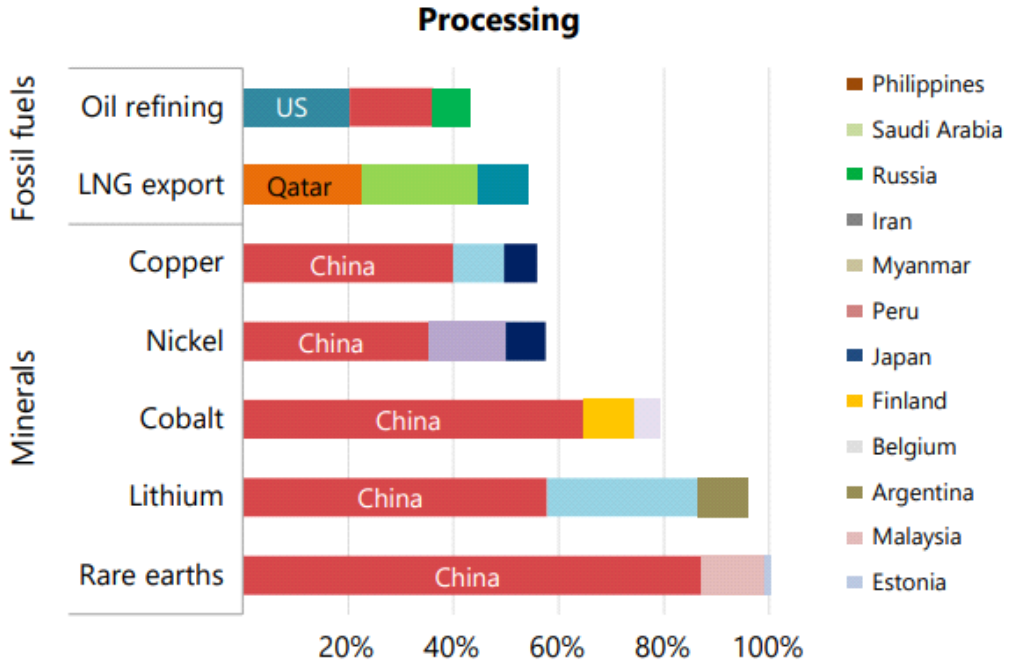


[그림 2-5] 수소·연료전지 및 수전해 기술별 CAPEX 효율 비교(IEA, 2023)

마. 반도체·디지털·첨단산업

- 반도체 소재: 갈륨(Ga), 게르마늄(Ge), 인듐(In), 비소(As), 안티몬(Sb) → 화합물 반도체·광통신용
- 디스플레이·LED: 인듐(In, ITO), 갈륨(Ga, GaN), 희토류(유로퓸 Eu, 테르븀 Tb - 형광체)
- 방산·우주·첨단 합금: 베릴륨(Be), 티타늄(Ti), 레늄(Re) → 항공엔진·위성·방산 부품 핵심
- 리스크 요인: 2023년 중국의 Ga·Ge 수출통제는 글로벌 반도체·통

신망에 직접 충격을 주며, 미드스트림-다운스트림 병목을 드러냄
(European Commission, 2023)

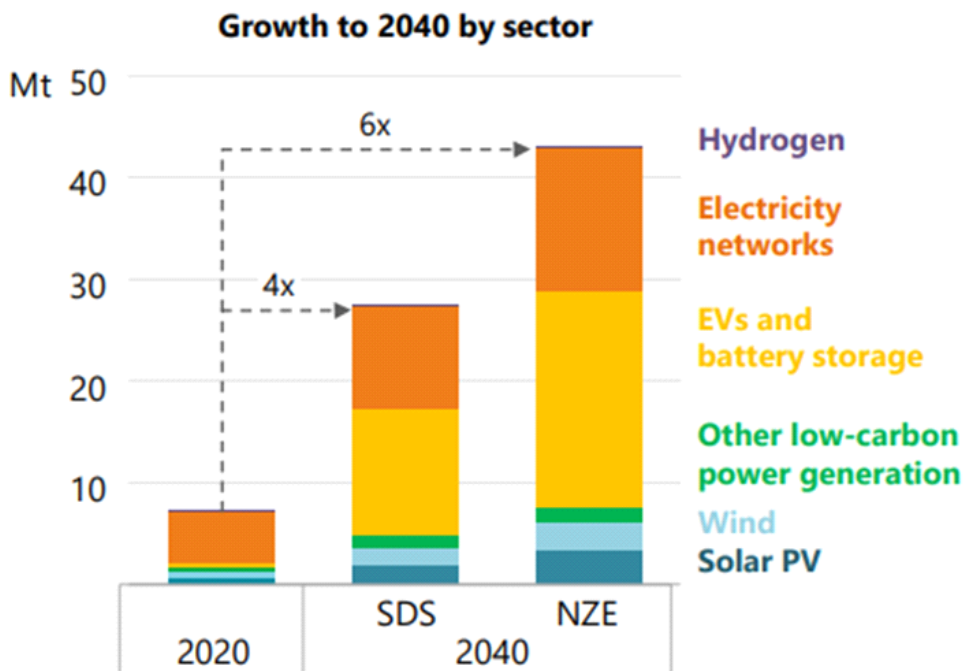


[그림 2-6] 리튬·코발트·희토류 정제 집중도(IEA, 2021)

- 국제에너지기구(IEA)는 넷제로(Net Zero) 시나리오 달성을 가정할 경우, 2040년까지 청정에너지 전환에 필요한 광물 수요가 현재 대비 최대 6배까지 증가할 것이라 전망한다. 특히 전기차·배터리·재생에너지 설비 등에서 핵심적으로 사용되는 특정 광물은 그 수요 증가 폭이 매우 가파르다.
- 가장 대표적인 사례는 리튬(Li)으로, 2020년 대비 약 42배 확대될 것으로 분석된다. 이는 전기차 및 에너지저장장치(ESS) 보급이 폭발적으로 증가하고, 고니켈·고용량 양극재를 중심으로 배터리 수요가 확대되

기 때문이다. 흑연(Graphite) 역시 배터리 음극재의 사실상 독점적 소재로, 2040년까지 25배의 수요 증가가 예상된다. 코발트(Co)는 NCM·NCA 계열 배터리에서 여전히 안정성과 고출력 특성을 보완하는 역할을 수행하면서, 21배의 수요 확대가 전망된다. 니켈(Ni)은 고에너지밀도 양극재로의 전환이 가속화되면서 19배 증가할 것으로 보인다. 또한 희토류(REEs)는 전기차 모터와 풍력터빈에 사용되는 네오디뮴 영구자석 수요 확대로, 2040년까지 약 7배 증가가 예상된다(IEA, 2021).

- 이러한 수치는 단순히 특정 광물의 시장 확대를 의미하는 것이 아니라, 청정에너지 기술 발전과 공급망 안정성이 긴밀하게 연결되어 있음을 보여준다. 즉, 탄소중립 달성을 위한 기술 보급이 본격화될수록 희소금속의 수급 불균형 가능성이 심화되며, 이는 가격 변동성·지정학적 리스크·공급 병목으로 이어질 수 있다. 따라서 광물 수요 전망은 단순한 통계가 아니라, 향후 자원외교·재활용 인프라·대체소재 개발 등 전략적 대응의 필요성을 입증하는 근거로 활용될 수 있다.



[그림 2-7] 2040년 넷제로 달성 시 광물 수요 예상량(IEA, 2021)

3. 글로벌 공급망 구조 분석 및 리스크 요인 분석

- 희소금속 공급망은 채굴(Upstream)-정련·가공(Midstream)-소재·부품(Downstream) 전 단계에서 특정 국가와 기업에 집중되어 있으며, 이로 인해 구조적 리스크가 내재되어 있다. 이러한 편중 현상은 지정학적 불안, 정책 변수, 환경·사회 규제와 결합하여 글로벌 공급망 안정성을 위협한다(IEA, 2021; USGS, 2024).

가. 채굴(Upstream) 집중

- 우선 채굴 단계에서의 편중은 매우 뚜렷하다. 코발트는 전 세계 생산량의 약 70% 이상이 콩고민주공화국(DRC)에 집중되어 있으며, 정치적 불안정, 아동노동, 열악한 인프라 등으로 인해 공급 불안정성이 상존한다. 리튬은 호주(경암 리튬)와 남미 리튬 삼각지대(칠레·아르헨티나·볼리비아)의 염호에 매장과 생산이 집중되어 있는데, 이 과정에서 수자원 이용 갈등과 환경 규제가 주요 리스크로 작용한다.
- 희토류의 경우 중국이 채굴과 정련을 모두 장악하고 있으며, 약 60~70%의 글로벌 시장 점유율을 차지한다. 미얀마 및 일부 아프리카 국가가 대체 공급원으로 부상하고 있으나, 이들 지역 역시 정세 불안과 제도적 미비로 인해 안정적인 공급처로 기능하기 어렵다(USGS, 2024).
- 우리나라에서 지정된 희소금속 별로 채굴 집중 현황은 아래와 같다.

1) 배터리, 전동화 핵심 광물(리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연)

- 리튬(Li) : 채굴은 호주(경암, 스포듀민)와 남미 염호(칠레·아르헨티나·볼리비아) 중심으로 편중. 최근 중국·짐바브웨·캐나다도 확대 중이나, 호주·남미 양측 구조가 여전히 주류. 가격 조정기에도 아르헨티나·칠레·중국에서 광산 증설과 단계적 증산이 지속됐다.
- 코발트(Co) : 콩고민주공화국(DRC)에서 광산 생산의 약 74%가 산출. 인도네시아의 니켈 프로젝트 부수 생산이 늘지만, 단기 편중

완화 효과는 제한적. 정련은 중국 비중이 매우 높아 채굴·정련 이중 편중 구조

- 니켈(Ni) : 인도네시아(라테라이트) 대규모 증설이 글로벌 증산을 견인. 현지 원광 수출금지 및 내국가 가공 의무화 정책으로 채굴·정련 단계가 현지에 고착되는 경향.(정책은 미드스트림 이슈이나 업스트림 입지에도 직접 영향)
- 망간(Mn) : 채굴은 남아공·가봉·호주가 3대 축으로, 배터리용 황산망간 수요가 늘지만, 철강용 벌크 수요가 여전히 지배해 광산 투자도 이축을 따름(세부 수치는 USGS 연감 참조)
- 천연흑연(C 그래파이트) : 중국 내 광산과 아프리카(모잠비크·마다가스카라 등) 신증설이 주류임, 음극재용 구상화 전처리 수요가 커 플레이크 흑연 자원지의 전략성이 상승함

2) 자석, 고강도 합금, 내열 합금 핵심 광물(희토류, 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄 등)

- 희토류(REE, Nd·Pr·Dy 등) : 채굴·정련 전 단계에서 중국 주도. 미얀마·미국·호주 공급이 보완하나, 정세·공정제약으로 구조적 편중은 지속(정련 편중은 미드스트림이지만 업스트림도 중국/미얀마 비중 큼)
- 텅스텐(W) : 중국이 세계 공급의 ‘절대 다수’를 차지함, 2024/2025 USGS에 따르면 중국 외 생산은 약 20% 내외에 불과. 서방은 캐나다 Mactung, 한국 상동, 호주 신규 프로젝트로 다변화 시도 중
- 몰리브덴(Mo) : 칠레·중국·미국·페루가 핵심 산출국(구리와 동시 산출

되는 경우 다수)으로, 구리 사이클과 연동되어 공급 변동성이 나타남

- 티타늄(Ti, 주로 일메나이트·루틸) : 호주·남아공·모잠비크·인도·중국의 광산이 주요 원천임, 일메나이트 중심의 대량 채굴이 지속되며, 고급 분말·스폰지 등은 하류에서 품질이 나뉨
- 바나듐(V) : 중국·러시아·남아공이 주 산출지로(강종용 첨가제로 별크 수요), 페로바나듐 제조체계와 연계된 지역 편중이 지속됨
- 니오븀(Nb) : 브라질 단일국 의존이 매우 높아 2024 USGS 기준 약 90%를 브라질이 생산(주로 CBMM, 아락사 광산)하고 있으며, 캐나다 가 소수 보완함
- 탄탈륨(Ta) : 호주·브라질·캐나다 및 중부아프리카 일부에서 산출(주요는 리튬/주석 광산과 동반) 중이며, 분쟁광물 관리 체계가 공급 안정의 관건임
- 레늄(Re) : 구리·몰리브덴 제련 부산물로 회수(칠레·폴란드 등), 원광 단독 채굴이 아닌 부산물 의존형이라 기초금속 사이클에 민감함

3) 반도체, 광전자, 디스플레이 소재(갈륨, 게르마늄, 인듐, 셀레늄, 텔루륨)

- 갈륨(Ga) : 보크사이트(알루미나) 제련 부산물로 중국 비중이 압도적 이어서 2023년 수출통제로 공급 불안 심화됨
- 게르마늄(Ge) : 아연 제련 부산물. 중국·러시아·캐나다 등에서 회수되며, 갈륨과 함께 2023년 중국 통제가 공급망 쇼크 요인
- 인듐(In) : 아연 제련 부산물. 중국·한국·캐나다 등에서 회수, ITO(산

화인듐주석) 수요가 좌우하며, 부산물 구조 탓에 주금속(아연) 사이클에 연동됨

- 셀레늄(Se)·텔루륨(Te) : 구리 제련 부산물(아노드슬라임) 회수로, 칠레·페루·중국 등 구리 대국의 제련 레벨과 연동되는 부산물 편중형

4) 경량, 내식 금속 및 벌크 전략 광물(마그네슘, 마그네사이트, 크롬계 등)

- 마그네슘(Mg) : 1차 금속은 중국의 비중이 절대적(피존법 대량설비). 원가·에너지·환경규제에 민감해 '중국 단일 리스크'가 상존함
- 크롬(Cr, 크롬철석) : 남아공·카자흐스탄 중심의 편중된 매장·채굴. 스테인리스 수요 사이클에 연동되며 전력·물류 리스크가 상존함

5) 기타 전략 및 특수금속(베릴륨, 스트론튬, 바륨, 카드뮴, 탈륨, 비소, 비스무트 등)

- 베릴륨(Be) : 미국(유일 대규모 광산/정련 체계)과 중국이 핵심 공급지. 방산·항공 특수수요 중심임
- 스트론튬(Sr) : 멕시코·스페인·중국에서 셀레스틴 광산 중심 산출. 수요 축소로 신규 광산은 제한적임
- 바륨(Ba, 중정석/Barite) : 중국·인도·모로코 등에서 채굴(시추용 드릴머드 벌크 수요). 지역 편중이 크고 물류비 민감함
- 카드뮴(Cd) : 아연 제련 부산물. 환경규제 민감(니켈-카드뮴 축전지 축소), 부산물 구조로 주금속 사이클에 연동됨

- 탈륨(Tl) : 아연·구리 제련 부산물로 소량 회수되며, 극소수 국가에서만 상업적 회수 체계를 보유함
- 비소(As) : 구리·금 제련 부산물로 환경·독성 규제 강화 교역·회수 체계가 폐쇄적임
- 비스무트(Bi) : 주석·납 제련 부산물로 중국 비중 높으며 제련 레벨에 연동됨
- 규소(Si, 금속실리콘) : 석영과 전력집약형 제련에 의존(중국·브라질·노르웨이 등)하며, 전력·환경규제에 민감함
- 인(P) : 인광석은 모로코·중동·중국 편중되어 있으며, 황린(적린) 전환 체계는 하류 공정 이슈이나, 원광 편중이 근본
- 보론(B, 붕사/켈사이트) : 터키·미국이 핵심 산출지(보락스·커널라이트)로, 특수유리·세라믹 수요에 좌우함
- 백금족금속(PGM: Pt·Pd·Rh·Ir·Ru·Os) : 남아프리카·러시아 편중이 뚜렷하며, 심층 채굴·전력 리스크·노사 이슈가 공급 변동성 요인임

[표 2-2] 희소금속 35종 채굴(Upstream) 집중 현황

광종	주요 산출국	편중 포인트
리튬 (Li)	호주, 칠레, 아르헨티나, 볼리비아	호주(경암), 남미(염호) 양대 축. 물자원 갈등·환경규제 리스크.
코발트 (Co)	DRC, 러시아, 호주, 캐나다	DRC 70%+ 절대 편중. 인권·정치 리스크.
니켈 (Ni)	인도네시아, 필리핀, 러시아, 호주	인도네시아 급부상. 원광 수출금지·내수가공 의무화.
망간 (Mn)	남아공, 가봉, 호주	철강용 벌크 수요 위주. 아프리카 의존.

광종	주요 산출국	편중 포인트
흑연 (C, 천연)	중국, 모잠비크, 마다가스카르	중국 절대 다수. 아프리카 신증설. 음극재 수요 급증.
희토류 (REE, 17종)	중국, 미얀마, 호주, 미국	중국 채굴·정련 60~70%. 대체 공급 미약.
텅스텐 (W)	중국, 베트남, 러시아, 볼리비아	중국이 80%+. 서방은 캐나다·한국·호주 신규 프로젝트 시도.
몰리브덴 (Mo)	칠레, 중국, 미국, 페루	구리 동반 산출. 구리 사이클 영향.
티타늄 (Ti, 일메나이트/루틸)	호주, 남아공, 모잠비크, 인도, 중국	일메나이트 중심 대량 채굴. 하류 가공 차별화.
바나듐 (V)	중국, 러시아, 남아공	3국 집중. 강종 첨가제로 벌크 수요.
니오븀 (Nb)	브라질(>90%), 캐나다	브라질 절대 독점(CBMM).
탄탈륨 (Ta)	호주, 브라질, 캐나다, DRC	리튬·주석 광산 부산물. 분쟁광물 관리 필요.
레늄 (Re)	칠레, 폴란드, 미국	구리·Mo 제련 부산물 의존. 공급 불안정.
갈륨 (Ga)	중국, 러시아	알루미나 부산물. 중국 압도적. 2023년 수출통제.
게르마늄 (Ge)	중국, 러시아, 캐나다	아연 부산물. 중국 주도, 수출통제 사례.
인듐 (In)	중국, 한국, 캐나다	아연 부산물. 주금속 사이클 연동.
셀레늄 (Se)	칠레, 페루, 중국	구리 제련 부산물.
텔루륨 (Te)	중국, 미국, 캐나다, 칠레	구리 제련 부산물.
마그네슘 (Mg)	중국 절대 다수, 러시아	피존법 대규모 설비. 중국 단일 리스크.
크롬 (Cr)	남아공, 카자흐스탄, 인도	크롬철석 채굴 3국 편중. 스테인리스 수요 의존.
베릴륨 (Be)	미국, 중국	미국·중국 양분. 항공·방산 특수용도.

광종	주요 산출국	편중 포인트
스트론튬 (Sr)	멕시코, 스페인, 중국	셀레스틴 광산 편중. 시장 축소로 신규광산 제한.
바륨 (Ba, 중정석)	중국, 인도, 모로코	시추용 드릴머드 벌크 수요. 중국 비중 큼.
카드뮴 (Cd)	중국, 한국, 러시아	아연 제련 부산물. 환경규제 민감.
탈륨 (Tl)	중국, 카자흐스탄	아연·구리 부산물. 소규모 회수.
비소 (As)	중국, 칠레	구리·금 제련 부산물. 독성 규제.
비스무트 (Bi)	중국, 멕시코, 볼리비아	주석·납 부산물. 중국 비중 높음.
규소 (Si, 금속실리콘)	중국, 브라질, 노르웨이	석영+전력집약 제련. 전력 규제 민감.
인 (P, 인광석)	모로코, 중국, 사우디	모로코가 최대 매장. 비료·화학 수요 지배.
보론 (B, 붕사)	터키, 미국	터키 최대 매장. 특수유리·세라믹.
백금 (Pt, PGM)	남아공, 러시아	남아공 압도적. 채굴 심층·전력리스크.
팔라듐 (Pd, PGM)	러시아, 남아공	러시아·남아공 양대 축. 제재 리스크.
로듐·이리듐·루테튬·오스뮴 (PGM 기타)	남아공, 러시아	동일하게 PGM 편중. 공급 변동성 큼.

나. 정련·가공(Midstream) 집중

- 정련 및 가공 단계는 기술집약도가 높고 진입장벽이 크다는 특징이 있으며, 특정 국가의 독점적 지위가 뚜렷하다. 니켈은 인도네시아가 세계 최대 매장국으로, 최근 고압산침출(HPAL) 설비에 대한 대규모 투자를 통해 전구체용 니켈 생산을 확대하고 있다. 또한 자국 내 가공 의무화 정책을 시행하여 해외 기업의 접근성을 낮추고 있으며, 이는 글로벌 공급망 구조에 중대한 영향을 미친다.

- 희토류·갈륨·게르마늄 역시 중국이 정련·분리 공정을 사실상 독점하고 있으며, 이는 단순 채굴보다 높은 기술 장벽으로 인해 대체 공급이 어렵다. 더 나아가 2023년 중국 정부가 갈륨·게르마늄에 대해 수출통제 조치를 시행함으로써 첨단산업 공급망의 불안을 가중시켰다(European Commission, 2023).

1) 배터리·전동화 핵심(리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연)

- 리튬(Li) : 탄산리튬·수산화리튬 정제는 중국 비중이 절대적이다. 원광과 중간재(SC6, 염수)가 호주·남미에서 나와도 최종 정제·제품화(배터리급)는 중국에서 대규모로 이뤄진다. 칠레·아르헨티나에도 정제능력이 있으나 글로벌 시장지배력은 중국이 보유한다. IEA와 USGS는 리튬 정련·가공 단계의 중국 집중을 공급망 리스크로 명시한다.
- 니켈(Ni) : 인도네시아는 원광 수출 금지와 현지 가공 의무화로 HPAL(고압산침출)·NPI/페로니켈·MHP 등 배터리 전구체용 니켈의 현지 정련을 급증시켰다. 중국은 전구체·황산니켈 공정에서 핵심 파트너로 얽혀 있으며, 러시아·중국의 정련능력도 여전히 존재한다. 이 구조는 미드스트림에서 인도네시아-중국 축의 편중을 강화한다.
- 코발트(C) : DRC에서 나온 정광·중간재의 절대다수가 중국으로 이동해 황산코발트 등 화합물로 정제된다. 유럽(핀란드)·북미 일부 정제시설이 있으나 규모·원료 접근성에서 중국을 대체하기 어렵다. 업스트림(DRC)-미드스트림(중국) 이중 편중 구조가 대표적 리스크다.
- 망간(Mn) : 배터리용 전해망간(Electrolytic Mn)과 황산망간은 중국 정제 비중이 압도적(대다수)이며, 남아공·말레이시아 등이 일부를 보완한다. 철강용 대량수요와 다른 배터리급 품질 스펙이 미드스트림 편중

을 더한다.

- 흑연(Graphite, 천연·인조) : 천연흑연의 구상화·정제와 인조흑연의 코크스→침탄→소결 등 음극재용 가공은 중국에 극도로 집중되어 있다. 따라서 원광 다변화만으로는 리스크 완화가 제한적이며, 구상화/정제 설비의 지역 분산이 핵심 과제로 지목된다.

2) 자석·고강도 합금·내열 합금(희토류, 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄, 바나듐, 니오븀, 탄탈륨, 레늄)

- 희토류(REE) : 분리·정련(Separation/Refining) 단계의 80~90%가 중국에 있다. 호주의 Lynas는 말레이시아에서 분리·정련 플랜트를 운영하며 비중국 대안으로 기능하지만, 글로벌 총량 대비 비중은 제한적이다. EU와 IEA는 분리공정의 중국 편중을 구조적 리스크로 명시한다.
- 텅스텐(W) : APT(암모늄 파라텅스테이트)와 초경합금용 탄화텅스텐 분말 생산은 중국 비중이 압도적이다. 오스트리아·베트남 등 일부 가공 허브가 있으나, 고순도화·분말화 기술과 규모에서 중국 우위가 유지된다.
- 몰리브덴(Mo) : 산화몰리브덴→페로몰리브덴 전환 및 화합물 가공은 중국·칠레·미국 중심이다. 구리 제련 부산물 의존도가 커 기초금속(구리) 사이클에 연동·제약된다.
- 티타늄(Ti) : 고순도 Ti 스폰지는 러시아·일본·중국이 주도하며, 항공급 품질은 러시아·일본이 강세다. 하류의 합금·분말(AM용) 등급은 국가별로 품질 분화가 심하다.
- 바나듐(V) : 산화바나듐·페로바나듐 정제는 중국이 과반을 차지하고 러

시아·남아공이 보조한다. 철강용 첨가제 수요 구조가 미드스트림 설비 입지와 직결된다.

- 니오븀(Nb) : 브라질(CBMM)이 채굴-정련-제품화까지 수직계열화하여 세계 공급을 사실상 좌우한다. 캐나다가 일부 보완하나, 미드스트림 지배력은 브라질 단독 우위를 벗어나지 않는다.
- 탄탈륨(Ta) : 분쟁광물 규제에 추적성이 요구되는 가운데, 중국·에스토니아·태국 등에서 재정련·분말화 역량이 강하다. 리튬·주석 광산 부산물 원료의 정제 안정성이 상시 이슈다.
- 레늄(Re) : 구리 제련의 아노드슬라임 등에서 희소 회수되며, 칠레·미국·폴란드에 제한된 회수·정련 허브가 존재한다. 부산물 의존형이라 공급탄력성이 낮다.

3) 반도체·광전자·디스플레이 소재(갈륨, 게르마늄, 인듐, 셀레늄, 텔루륨)

- 갈륨(Ga) : 알루미늄 정제 부산물로부터 중국이 90%+를 정련·정제한다. 2023년 중국의 수출통제는 글로벌 반도체·통신·태양광 공급망의 미드스트림 리스크를 각인시킨 사례였다.
- 게르마늄(Ge) : 아연 제련 부산물 기반 정련에서 중국 점유율이 우위이며, 러시아·캐나다가 일부 보완한다. 중국의 2023년 통제 강화로 미드스트림 불확실성이 확대됐다.
- 인듐(In) : 아연 제련 부산물에서 중국의 고순도 인듐 정련이 우위이고, 한국·일본은 2차 정제·ITO 체인에서 강점이 있다. 주금속(아연) 사이클과 동조되는 특징이 있다.

- 셀레늄(Se) / 텔루륨(Te) : 모두 구리 제련 아노드슬라임에서 회수·정련되는 전형적 부산물계 금속이다. 중국의 비중이 크고, 일본·독일·캐나다 등이 일부 정련 허브를 형성한다. 구리 제련 가동률이 미드스트림 공급의 병목 요인이다.

4) 경량·내식 금속 및 벌크 전략광물(마그네슘, 크롬, 규소, 인, 보론)

- 마그네슘(Mg) : 1차 금속 제련은 중국 피존법 설비가 85~90%를 차지한다. 에너지·환경 규제 변동이 곧 공급변동으로 이어지는 단일국가 리스크가 크다.
- 크롬(Cr) : 페로크롬 제련과 스테인리스 소재 체인은 중국·남아공·카자흐스탄 축에 집중되어 있다. 전력·물류 리스크와 가격 변동이 동반된다.
- 규소(Si, 금속실리콘) : 석영+전력집약 제련 특성상 중국 점유율이 70%+이며, 노르웨이·브라질 등이 보조한다. 전력·환경 규제가 생산에 직접 영향을 미친다.
- 인(P, 황린) : 황린 생산은 중국 집중(70%±)으로 평가되며, 미국·카자흐스탄이 보완한다. 화학·반도체·배터리 전구체 사슬에서 중간재 병목으로 작동할 수 있다.
- 보론(B) : 원광은 터키·미국이 주도하고, 정련·보락스 가공은 터키 국가기관(Eti Maden)이 지배적 역할을 한다. 국영·독점적 체계 특성이 크다.

5) 기타 전략·특수금속 및 PGM(베릴륨, 스트론튬, 바륨, 카드뮴, 탈륨, 비소, 비스무트, PGM)

- 베릴륨(Be) : 정련·합금화는 미국(유타)과 중국 중심의 양극(兩極) 체계다. 방산·항공 특수 수요로 기술·규제 장벽이 높다.
- 스트론튬(Sr) : 탄산스트론튬 정제는 중국 비중이 크고, 스페인·멕시코가 일부 보완한다. 수요 축소로 신규 정련능력 투자는 제한적이다.
- 바륨(Ba, 중정석→바륨염) : 바륨염 전환은 중국·인도 비중이 높다. 시추용 드릴머드 대량수요와 연계되어 미드스트림 가격 변동성이 크다.
- 카드뮴(Cd) : 아연 제련의 부산물 정제로 중국·한국·일본에 역량이 집중된다. 환경규제 민감도가 높다.
- 탈륨(Tl) / 비소(As) : 각각 아연·구리 제련 부산물로 중국 편중 회수·정제가 일반적이다. 독성·환경 규제로 교역이 제한되고 폐쇄적 공급망 특성을 보인다.
- 비스무트(Bi) : 주석·납 제련 부산물 정제가 중국·멕시코 중심이다. 주금속 사이클 영향이 크다.
- PGM(백금·팔라듐·로듐·이리듐·루테튬·오스뮴) : 남아공·러시아에 정련시설과 기술이 집중되어 있다. 특히 팔라듐은 러시아 Norilsk Nickel의 영향력이 크고, 백금·로듐 등은 남아공 의존이 높다. 정련 허브 편중+제재·전력 리스크가 결합한다.

[표 2-3] 희소금속 35종 정련·가공(Midstream) 집중 현황

광종	주요 정련·가공국	편중 포인트
리튬 (Li)	중국(>60%), 칠레, 아르헨티나	중국이 탄산리튬·수산화리튬 정제 절대 지배. 광산은 호주·남미에 있어도 최종 정제는 중국 중심

광종	주요 정련·가공국	편중 포인트
코발트 (Co)	중국(>70%), 핀란드, 캐나다	DRC 원광의 대부분이 중국으로 이동 후 정제. 유럽·북미 일부 시설 있으나 규모 제한
니켈 (Ni)	인도네시아, 중국, 러시아	인도네시아는 HPAL 공정 투자 확대, 현지 가공 의무화로 글로벌 전구체용 니켈 공급 지배
망간 (Mn)	중국, 남아공, 말레이시아	중국이 전해망간(Electrolytic Mn) 정제의 90% 이상 담당
흑연 (C)	중국 압도적(>80%)	천연·인조 모두 중국 내 구상화·구체화 처리 시설 집중
희토류 (REE)	중국(80~90%), 말레이시아, 에스토니아	중국이 분리·정련 기술 독점. Lynas(호주→말레이시아) 일부 보완
텅스텐 (W)	중국(80%+), 오스트리아, 베트남	고순도 APT(중간재)·탄화텅스텐 생산 대부분 중국에서 생산
몰리브덴 (Mo)	중국, 칠레, 미국	구리 제련 부산물로 정련. 중국이 전환·산화몰리브덴 생산 다수 차지
티타늄 (Ti)	중국, 일본, 러시아, 미국	고순도 Ti 스폰지 생산은 러시아·일본·중국 중심. 항공급 품질은 러시아·일본 강세
바나듐 (V)	중국, 러시아, 남아공	중국이 산화바나듐 정제 점유율 60% 이상
니오븀 (Nb)	브라질(CBMM), 캐나다	브라질이 채굴부터 정련까지 수직계열화
탄탈륨 (Ta)	중국, 에스토니아, 태국	분쟁광물 규제 영향, 중국이 재정련·분말 생산 강세
레늄 (Re)	칠레, 미국, 폴란드	구리 제련 부산물 회수. 회수·정련 시설 제한적
갈륨 (Ga)	중국(>90%), 독일, 일본	알루미나 부산물. 2023년 중국 수출통제로 글로벌 불안 확대
게르마늄 (Ge)	중국(60~70%), 러시아, 캐나다	아연 제련 부산물. 중국이 정련·정제 점유율 우위
인듐 (In)	중국, 한국, 일본, 캐나다	ITO용 고순도 인듐 정련 중국이 우위. 한국·일본은 2차 정제 중심
셀레늄 (Se)	중국, 일본, 독일	구리 아노드슬라임 정련. 중국 비중 큼

광종	주요 정련·가공국	편중 포인트
텔루륨 (Te)	중국, 일본, 캐나다	구리 제련 부산물 정제. 중국 점유율 60% 이상
마그네슘 (Mg)	중국(85~90%), 이스라엘, 러시아	중국의 피존법 제련 지배. 유럽·이스라엘 일부 보완
크롬 (Cr)	중국, 남아공, 카자흐스탄	페로크롬 제련 중국이 소비와 정련 모두 지배
베릴륨 (Be)	미국, 중국, 카자흐스탄	미국(UTAH) + 중국 2국 체계
스트론튬 (Sr)	중국, 스페인, 멕시코	탄산스트론튬 정제 중국이 주도
바륨 (Ba)	중국, 인도, 모로코	중정석→바륨염 전환 중국 비중 높음
카드뮴 (Cd)	중국, 한국, 일본	아연 제련 부산물. 중국 점유율 우위
탈륨 (Tl)	중국	아연 부산물 회수 중국 집중
비소 (As)	중국	구리 제련 부산물 처리 중국 독점적
비스무트 (Bi)	중국, 멕시코	주석·납 제련 부산물. 중국 절대 우위
규소 (Si)	중국, 노르웨이, 브라질	금속실리콘 정련 중국이 70% 이상 차지
인 (P, 황린)	중국, 미국, 카자흐스탄	황린(Phosphorus) 생산 중국 70% 이상
보론 (B)	터키, 미국, 아르헨티나	정련·보락스 가공은 터키 국가기관(Eti Maden) 독점
백금 (Pt, PGM)	남아공, 러시아, 영국	정련시설 남아공 집중
팔라듐 (Pd, PGM)	러시아, 남아공, 캐나다	러시아 Norilsk Nickel이 공급 지배
로듐·이리듐·루테튬·오스뮴 (PGM 기타)	남아공, 러시아	정련시설·기술 남아공 편중

다. 부품·완제품(Downstream) 집중

- 소재·부품 단계에서도 특정 국가의 집중 현상이 명확하다. 배터리 산업에서 중국은 전 세계 전지용 양극재·음극재 생산의 70% 이상을 차지하고 있으며, 이에 대응하여 EU와 미국은 각각 CRMA(핵심원자재법), IRA(인플레이션감축법)를 통해 중국 의존도 완화 정책을 추진하고 있다. 자석 및 합금 분야에서도 네오디뮴 영구자석, 초경합금용 텅스텐·몰리브덴 소재 등이 중국 및 일부 일본·EU 기업에 집중되어 있다. 따라서 공급 제한이 발생할 경우 글로벌 제조업 전반에 연쇄 충격이 불가피하다(IRENA, 2023).

1) 배터리·전동화 핵심(리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연)

- 리튬 (Li) : 전지용 탄산리튬·수산화리튬이 양극재로 투입. 중국이 전 세계 양극재(특히 LFP) 생산의 70% 이상을 차지하며, 한국·일본도 일부 하이니켈계 양극재에서 강세
- 니켈 (Ni) : 전구체→양극재로 이어지는 밸류체인에서 중국과 한국, 일본의 소재 기업이 집중. CATL, GEM, 에코프로, 포스코퓨처엠 등이 대표적
- 코발트 (Co) : 양극재 및 전구체에 필수. 중국이 화합물·양극재 전환을 독점적으로 주도. 한국·일본이 고니켈계 양극재에 코발트 투입을 점진 축소하나, 고성능·고안정성 영역 수요는 지속
- 망간 (Mn) : 배터리용 황산망간 및 LMO/LFMP 구조에 적용. 중국의 전해망간 기술 우위로 인해 전구체 생산도 중국 집중
- 흑연 (C) : 천연·인조흑연 모두 음극재로 가공 시 중국 집중도가 80% 이상. 한국·일본도 일부 가공·코팅 설비 보유하나 규모는 제한적

2) 자석·고강도 합금·내열 합금(희토류, 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄, 바나듐, 니오븀, 탄탈륨, 레늄)

- 희토류 (Nd, Pr, Dy 등) : 전기차 모터·풍력터빈용 네오디뮴 영구자석 (NdFeB) 생산의 90% 이상이 중국에서 이뤄짐. 일본·EU 일부 기업(히타치, Vacuumschmelze 등)만 제한적으로 참여
- 텅스텐 (W) : 초경합금·공구·드릴·절삭도구 완제품 생산은 중국, 독일, 오스트리아 기업이 주도. 공급 제한 시 전 세계 제조업 연쇄 충격 가능
- 몰리브덴 (Mo) : 고강도·내열 합금강, 석유화학 촉매 등 하류 수요에서 미국·중국·EU 기업이 강세. 공급 불안 시 철강·화학산업 직접 타격
- 티타늄 (Ti) : 항공기용 합금재·생체재료에서 러시아 VSMPO-AVISMA와 일본 기업(Toho, Osaka Titanium)이 글로벌 하이엔드 공급 주도. 미국도 방산용 공급망 유지
- 바나듐 (V) : 고강도강(Vanadium Microalloyed Steel)과 바나듐 레독스 흐름전지(VRFB) 적용. 중국 철강사와 유럽계 합금사가 생산 지배
- 니오븀 (Nb) : 브라질 CBMM이 페로니오븀 제품을 사실상 독점 공급. 고강도강·초전도체·특수합금에 투입
- 탄탈륨 (Ta) : 커패시터(전자부품), 의료·항공 합금으로 가공. 중국이 파우더·커패시터 생산 우위. 일본·미국은 고신뢰 전자기기용 특수 제품군에 집중
- 레늄 (Re) : 초합금 터빈블레이드(항공엔진·가스터빈)에 투입. 미국·EU 항공엔진사(PW, GE, Rolls-Royce) 공급망에 절대적으로 의존

3) 반도체·광전자·디스플레이 소재(갈륨, 게르마늄, 인듐, 셀레늄, 텔루륨)

- 갈륨 (Ga) : 화합물 반도체(LED, RF칩)로 가공. 중국이 고순도 GaAs, GaN 웨이퍼 공급망을 장악. 일본·미국 일부 고성능 제품군 유지
- 게르마늄 (Ge) : 광섬유, 적외선 광학·태양전지용으로 가공. 중국의 정제·웨이퍼 제품 우위. 캐나다·독일 일부 광학 전문 기업 존재
- 인듐 (In) : 주로 ITO(Indium Tin Oxide) 타깃으로 가공. 중국이 타깃 제조와 패널 재료 지배, 한국·일본은 고성능 ITO 분야 참여
- 셀레늄 (Se) : 태양광(CdSe, CIGS) 및 유리 탈색제로 가공. 중국 비중 높음
- 텔루륨 (Te) : CdTe 태양전지, 반도체 소재로 가공. 중국·미국이 주요 공급자

4) 경량·내식 금속 및 벌크 전락광물(마그네슘, 크롬, 규소, 인, 보론)

- 마그네슘 (Mg) : 자동차·항공용 경량합금으로 가공. 중국 내 합금·부품화 절대적. EU·미국은 원자재는 수입, 가공 단계 일부만 보유
- 크롬 (Cr) : 스테인리스강 생산(페로크롬 투입)이 절대적 다운스트림 수요. 중국·EU 철강사 집중
- 규소 (Si) : 금속실리콘→폴리실리콘→태양광·반도체 소재. 중국이 폴리실리콘 생산의 75% 이상 차지. 한국·미국은 일부 고순도 분야 유지
- 인 (P) : 화학비료·식품첨가제 등 대량 수요 외에도, 황린→리튬인산철

(LFP) 배터리 등 신형 수요가 중국 중심으로 형성

- 보론 (B) : 보락스·붕사→특수유리·세라믹·섬유로 가공. 터키·미국이 원료 주도, 정제·가공은 터키 국영 Eti Maden 우위

5) 기타 전략·특수금속 및 PGM(베릴륨, 스트론튬, 바륨, 카드뮴, 탈륨, 비소, 비스무트, PGM)

- 베릴륨 (Be) : 베릴륨합금(BeCu)·방사선 투과 소재로 가공. 미국 국방산업, 중국 항공산업에서 전략적으로 관리
- 스트론튬 (Sr) : 탄산스트론튬→전자부품·자석 소재로 가공. 중국·스페인 기업 일부
- 바륨 (Ba) : 바륨염→시추, 유리, 전자제품용으로 가공. 중국이 완제품 공급 우위
- 카드뮴 (Cd) : CdTe 태양전지, Ni-Cd 배터리 등으로 가공. 환경규제 강화로 수요 제한적
- 탈륨 (Tl) : 특수광학·전자재료용으로만 제한적 가공. 소량, 중국 중심
- 비소 (As) : 반도체용 GaAs 제조에 투입. 중국·미국 일부
- 비스무트 (Bi) : 비스무트합금, 약품, 특수소재로 가공. 중국 비중 절대적
- 백금(Pt) : 자동차 촉매, 수소 연료전지 전극. 남아공·러시아 공급 후 EU·일본·한국 완제품 가공
- 팔라듐(Pd) : 자동차 촉매·전자부품. 러시아 Norilsk Nickel 생산→중국·EU 촉매제 기업

- 로듐·이리듐·루테튬·오스뮴 (PGM 기타) : 촉매·화학·전자 특수용도로 가공. 남아공 편중

[표 2-4] 희소금속 35종 부품·완제품(Downstream) 집중 현황

광종	주요 정련·가공국	편중 포인트
리튬 (Li)	중국(CATL, BYD), 한국(에코프로, 포스코퓨처엠)	중국 양극재 생산 70% 이상
니켈 (Ni)	중국(GEM), 한국(에코프로), 일본(Sumitomo)	인도네시아산 니켈→중국 전구체 집중
코발트 (Co)	중국 화합물 업체, 한국·일본 고니켈 양극재 기업	원광 DRC, 정제·양극재 중국 집중
망간 (Mn)	중국 업체 중심	전해망간→전구체 중국 압도적
흑연 (C)	중국(80%+), 한국·일본 일부	구상화·코팅 중국 독점
희토류 (REE)	중국(90%+), 일본(히타치), 독일(Vacuumschmelze)	전기차·풍력 모터용 자석 중국 지배
텅스텐 (W)	중국, 독일 오스트리아	절삭도구 공급망 중국 집중
몰리브덴 (Mo)	미국, 중국, EU	구리 사이클과 연동, 공급 불안
티타늄 (Ti)	러시아(VSMPO), 일본(Toho), 미국	항공급 품질 러시아·일본 편중
바나듐 (V)	중국 철강사, 유럽 합금사	철강·배터리용 중국 집중
니오븀 (Nb)	브라질(CBMM)	단일기업 지배 구조
탄탈륨 (Ta)	중국, 일본, 미국	분말·커패시터 중국 우위
레늄 (Re)	미국(GE, PW), EU(RR)	항공엔진 제조사 공급망 절대 의존

광종	주요 정련·가공국	편중 포인트
갈륨 (Ga)	중국, 일본, 미국	중국 고순도 화합물 반도체 우위
게르마늄 (Ge)	중국, 독일, 캐나다	정제·웨이퍼 중국 집중
인듐 (In)	중국, 한국, 일본	중국 타깃 제조 우위
셀레늄 (Se)	중국, 일본	구리 제련 부산물 기반
텔루륨 (Te)	중국, 미국(First Solar)	중국 제련+미국 패널기업 양분
마그네슘 (Mg)	중국, EU 일부	중국 합금·부품화 집중
크롬 (Cr)	중국, EU	페로크롬 투입, 3국 집중
규소 (Si)	중국, 한국, 미국	중국 폴리실리콘 75%+
인 (P)	중국, 모로코	비료 대량·배터리 신흥 수요 중국 주도
보론 (B)	터키(Eti Maden), 미국	국영 독점 가공
베릴륨 (Be)	미국, 중국	방산·항공 특수 수요 편중
스트론튬 (Sr)	중국, 스페인	전자부품용 탄산스트론튬 중국 비중
바륨 (Ba)	중국, 인도	바륨염 전환 중국 집중
카드뮴 (Cd)	중국, 한국, 일본	환경규제 민감, 생산 제한적
탈륨 (Tl)	중국	소량, 특수시장 한정
비소 (As)	중국, 미국	반도체 제조 투입, 독성 규제 민감
비스무트 (Bi)	중국, 멕시코	중국 절대적 공급 우위
백금 (Pt)	남아공, 러시아→EU·일본·한국 촉매 기업	자동차 촉매 글로벌 집중
팔라듐 (Pd)	러시아, 남아공→EU·중국	러시아 Norilsk Nickel 지배력
로듐·이리듐·루테튬·오스뮴	남아공, 러시아	특수금속, 남아공 전력리스크 심각

라. 지정학·정책적 리스크

- 이와 함께 공급망에는 다양한 지정학적 리스크가 내재하며, 다음과 같이 수출통제 및 자원 무기화, 환경·사회(ESG) 리스크 및 정책·제도 변수로 구분하여 소개한다.

1) 수출통제 및 자원 무기화

- 중국의 희토류 통제: 2010년 센카쿠 열도(다오위다오) 분쟁 당시 중국은 일본에 대한 희토류 수출을 제한하여, 일본 전자·자동차 산업에 큰 충격을 주었다. 이 사건은 특정 자원이 외교 갈등 시 압박 수단으로 활용될 수 있음을 전 세계에 각인시켰다(IEA, 2021).
- 중국의 갈륨·게르마늄 수출통제(2023): 반도체·통신·태양광 핵심소재인 갈륨(Ga), 게르마늄(Ge)에 대해 중국 정부는 ‘안보심사’를 이유로 수출허가제를 도입했다. 이 조치로 미국·EU 반도체 산업은 공급 불안에 직면했고, “중국의 자원무기화가 현실화되었다”는 평가를 받았다(European Commission, 2023).
- 러시아의 PGM·니켈 공급 리스크: 러시아는 세계 팔라듐(Pd) 생산의 약 40%를 차지하고 있으며, 우크라이나 전쟁 이후 제재·수출 제한이 글로벌 자동차 촉매 시장을 뒤흔들었다. 동시에 러시아는 니켈(특히 고순도 Class 1 Ni) 공급에서도 일정 비중을 차지해, 전기차·배터리 산업의 불안정 요인으로 작용한다(USGS, 2024).

2) 환경·사회(ESG) 리스크

- 아동노동과 인권 문제: 콩고민주공화국(DRC)의 코발트 광산은 세계 생산의 70% 이상을 차지하지만, 수만 명의 아동노동과 열악한 안전환경 문제가 국제적으로 비판을 받고 있다. 이에 따라 OECD는 ‘분쟁광물 가이드라인’, EU는 기업지속가능성실사지침(CSDDD)을 통해 기업에 광물 출처 확인 및 인권검증 의무를 부과하였다(World Bank, 2020).
- 환경 파괴와 지역사회 반발: 남미 리튬 삼각지대(칠레·아르헨티나·볼리비아)의 염호 개발은 지하수 고갈과 생태계 파괴 논란을 일으켰다. 현지 공동체와 환경단체는 대규모 증산 프로젝트에 반대하며, 각국 정부는 채굴 허가 조건을 강화하고 있다(USGS, 2024).
- ESG 규제 심화: 국제 투자자와 완성차 OEM들은 ESG 요건을 충족하지 못하는 원료를 점차 배제하고 있다. 예컨대, EU는 배터리 규제(2023)를 통해 원산지·탄소발자국·재활용 함량 공개를 의무화하였다. 이는 원자재 자체보다 “ESG 인증 여부”가 거래 성사와 가격 형성에 큰 영향을 미치게 될 것임을 의미한다(European Commission, 2023).

3) 정책·제도적 변수

- 미국 IRA(2022): 인플레이션감축법은 전기차 세액공제 조건으로 ‘우호국(origin) 채굴·정련 광물 사용’을 의무화했다. 중국산 광물은 단계적으로 제외되며, 이는 한국·호주·캐나다 등 동맹국을 배터리 공급망에 끌어들이는 동시에, 기업에 원산지 추적·검증 부담을 가중시킨다.
- EU CRMA(2023): 유럽연합은 2030년까지 핵심광물 수요의 10%는

역내 채굴, 40%는 가공, 15%는 재활용으로 충당하겠다는 목표를 설정했다. 이는 중국 의존도를 줄이는 제도적 장치이지만, 역내 프로젝트 지연·환경규제와 충돌하는 모순도 존재한다.

- 한국·일본: 한국은 『핵심광물 공급망 안정화 전략(2023)』을 발표해 전략비축 확대, 민간투자 촉진, 해외자원개발·재활용 기술 투자에 집중하고 있다. 일본도 JOGMEC을 통해 자원외교 및 우방국 합작투자를 강화한다(MOTIE, 2023).
- 수출통제·ESG 규제·정책 변수는 단순히 “자원 확보 비용”만을 높이는 것이 아니라, 산업 구조 전환을 강제하는 요인으로 작용한다. 즉, 기업은 이제 단기적 원자재 조달뿐 아니라, 장기적 ESG 대응·재활용 기술 투자·우방국 협력 체계까지 고려해야 한다.
- 특히 한국과 같이 자원 의존도가 높은 국가는, 이러한 리스크가 누적될 경우 가격 급등(Price Spike) + 납기 변동(Delivery Risk) + 품질 미스매치(Quality Mismatch)라는 삼중 충격을 겪을 수 있다. 따라서 국가 차원에서는 비축·공급망 다변화·재자원화 인프라를, 지역 차원에서는 산업단지 기반 재활용·전처리·정제 클러스터를 구축하는 것이 시급하다.



제2절 전방산업(배터리, 전기차 등)에서의 희소금속 사용 실태 조사

1. 주요 산업별 희소금속 사용량 및 적용 기술 확인

- 전방산업(배터리, 전기차, 전자, 철강, 재생에너지, 수소·연료전지 등)은 희소금속의 수요를 실질적으로 견인하는 핵심 분야이다. 국제에너지기구(IEA, 2021)는 청정에너지 기술 확산으로 인해 리튬·니켈·코발트·망간·희토류 등 전략금속의 수요가 2040년까지 수십 배 증가할 것으로 전망하며, 이들 산업의 생산공정·부품구조·소재사양이 희소금속의 사용량과 등급 규격을 직접적으로 결정한다고 분석하였다.

가. 전기차(EV) 및 2차전지 산업

- 전기차와 2차전지 산업은 전 세계 희소금속 수요 증가를 주도하는 대표적인 산업군이다. 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn), 흑연(C), 인(P), 알루미늄(Al), 구리(Cu), 붕소(B) 등이 주요 투입 금속이며, 특히 양극재와 음극재의 조성 변화가 금속 수요 구조를 결정짓는다.
 - 양극재: NCM/NCA(고니켈계) 및 LFP/LFMP(철계) 계열로 구분된다. 최근 배터리 에너지밀도 향상을 위해 니켈 비중이 크게 증가하고(Co 저감 추세), LFP/LFMP 계열은 원가경쟁력과 안전성으로 급

부상 중임

- 음극재: 흑연(천연·인조)이 여전히 90% 이상을 점유하나, 실리콘(Si, SiO_x)을 혼합하여 용량을 높이는 방향으로 기술이 진화 중
- 전해질 및 집전체: LiPF₆·LiFSI 등 리튬염, Al·Cu 금속박, 붕소계 첨가제가 주로 사용됨
- 정량적 기준: 60~80 kWh급 EV 배터리팩 1대당 약 8~12kg의 리튬, 35~45kg의 니켈, 5~7kg의 코발트, 60~70kg의 흑연, 50~80kg의 구리·알루미늄이 투입되는 것으로 추정됨(USGS, 2024)
- 기술 트렌드: 고니켈 양극·Si계 음극·고체전해질로의 전환, LFP/LFMP 보급 확대, 전고체 배터리 대비 준비 단계
- 리스크 요인: 리튬·니켈·코발트의 가격 및 규격 변동성, 흑연 구상화·코팅 공정의 중국 편중, 전구체 품질·입도(PSD) 관리 문제
- 이 산업은 전기차 보급과 에너지저장장치(ESS) 확산으로 인해 향후 10~20년간 리튬, 니켈, 흑연의 세계 시장 수요를 주도할 것으로 예상된다(IEA, 2024).

나. 전자·반도체·디스플레이 산업

- 전자 및 반도체 산업은 초고순도 희소금속이 소량으로 사용되지만, 단가와 기술의존도가 매우 높은 산업군이다. 핵심 금속은 갈륨(Ga), 게르마늄(Ge), 인듐(In), 비소(As), 안티몬(Sb), 희토류 형광체(Eu, Tb, Y), 은(Ag), 구리(Cu) 등이다.
- 화합물 반도체: GaAs, GaN, InP 계열은 통신기기·레이더·전력반도

체에 적용되며, SiC와 함께 차세대 반도체 핵심 소재로 평가됨

- 디스플레이: ITO(인듐주석산화물) 타깃, 형광체(희토류), 은(Ag) 배선이 주요 수요처임
- 광학·포토닉스: 게르마늄(Ge) 렌즈, 레이저 다이오드(III-V계), 태양 전지용 박막
- 정량적 기준: 반도체 웨이퍼나 ITO 타깃 단위로 수 g-수 kg 규모의 초고순도(6N+) 금속이 사용됨
- 기술 트렌드: 고주파·고전압용 GaN/SiC 소자 확대, 고해상도 패널용 ITO 증가, Mini/Micro LED로 전환 중
- 리스크 요인: 중국의 Ga·Ge 수출통제(2023), 초고순도 공급 병목, 타깃 재활용률 저조(출처: European Commission, 2023; USGS, 2024)

다. 철강·기계·공구(합금·초경·방산 포함)

- 철강 및 기계 산업은 대량소재형 희소금속 수요가 발생하는 전통 산업군으로, 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 바나듐(V), 니오븀(Nb), 티타늄(Ti), 크롬(Cr), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등이 주요 금속이다.
 - 초경합금·공구강: WC-Co, Mo·V계 합금강(절삭·금형·굴착용)
 - 고강도 합금강: Cr-Ni-Mo 조합으로 내열·내식성 확보
 - 티타늄 합금: 항공·의료용 경량 고강도 부품
 - 정량적 기준: 공구 1kg당 텅스텐 약 70%, 코발트 10~15% 구성, 특수강 내 합금원소는 수% 첨가로 기계적 성질 결정

- 기술 트렌드: 금속분말 적층제조(AM)용 미분말화 수요, 초내열 니켈계 초합금(터빈·원전용) 확대
- 리스크 요인: W·Nb의 특정국 편중(중국·브라질), 분말 입도·산소함량 관리, 코발트 결합제 대체 기술 부족(출처: USGS, 2024; MOTIE, 2023)

라. 재생에너지(풍력·태양광) 및 전력망

- 재생에너지 설비는 청정에너지 전환의 핵심이며, 희토류(RE), 규소(Si), 인듐(In), 갈륨(Ga), 셀레늄(Se), 텔루륨(Te), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 알루미늄(Al) 등이 주요 금속이다.
 - 풍력발전기: 영구자석(PMSG) 기반 발전기에 Nd, Pr, Dy 등 희토류가 투입되며, 1MW급 풍력터빈당 약 200kg 수준의 자석 금속이 필요함
 - 태양광: 폴리실리콘(PV 모듈 주류), 박막형(CdTe, CIGS)에서는 In, Ga, Se, Te가 사용됨
 - 전력망: 초고압 케이블·변압기에 Cu, Al, Be, Nb 등 투입
 - 기술 트렌드: 해상풍력 대형화(14~20MW급) → 희토류 자석 수요 증가, PV 효율 개선 → 은(Ag) 절감·Cu 치환
 - 리스크 요인: REE 생산의 90% 이상이 중국 편중, 폴리실리콘·웨이퍼 생산의 지역 집중, 구리·알루미늄 가격 변동(출처: IEA, 2021; European Commission, 2023)

마. 수소·연료전지 및 수전해

- 수소경제 핵심 기술군으로, 백금족금속(Pt, Pd, Ir, Ru), 니켈(Ni), 티타늄(Ti) 등이 필수 원소이다.
 - 연료전지(PEMFC): 백금(Pt) 촉매가 전극반응의 핵심. 고내구형 셀에는 Ir, Ru 소량 첨가
 - 수전해(PEM): Ir·Ru 촉매, Ti 분리판, 알칼라인 수전해는 Ni계 전극
 - 정량적 기준: PEM 스택 1MW급 기준, Pt·Ir 총합 약 300~400g, Ti 수백 kg 수준(IEA, 2023)
 - 기술 트렌드: 귀금속 사용량 절감(저함량 촉매·비귀금속 대체), 대면적 스택 표준화
 - 리스크 요인: 남아공·러시아 중심의 PGM 생산 편중, Ir 매장량 제한, 회수·재활용률 20% 미만(출처: IRENA, 2023; IEA, 2023)

바. 항공우주·방산·의료 등 특수산업

- 특수산업은 상대적으로 수요량은 적지만, 고부가가치·고기술금속 중심의 전략소비 구조를 가진다. 레늄(Re), 베릴륨(Be), 티타늄(Ti), 텅스텐(W), 희토류 등이 주로 사용된다.
 - 항공우주: Re 함유 니켈계 초합금(터빈 블레이드), Ti 합금 구조재
 - 방산·정밀기기: BeCu 합금 스프링, Nd·Sm계 자석 기반 자이로센서
 - 정량적 기준: 초합금의 Re 비율 3~6%, Ti 합금 80~90%가 항공용
 - 리스크 요인: ITAR 등 군수규제에 따른 수입 제약, 소재 국산화율

저조, 고정밀 스크랩 품질관리(출처: USGS, 2024; KIGAM, 2022)

사. 종합 분석 및 시사점

- 산업별 희소금속 수요 비중을 보면, 배터리·EV 산업이 리튬·니켈·흑연·인 등을 중심으로 가장 높은 성장 탄력을 보이며, 그다음은 재생에너지·전력망(희토류·구리·알루미늄), 반도체·디스플레이(Ga·Ge·In) 순이다. 공통적으로 나타나는 구조적 리스크는 다음과 같다.
 - ① 특정국(중국·DRC·브라질 등) 생산 편중
 - ② 고순도·미세입도 등 정제품 품질 스펙의 병목
 - ③ 재활용 회수율 미성숙 및 EoL 자원 회수체계 부재
- 정책적으로는
 - (i) 광종별 표준 스펙 정립 및 대체·블렌딩 허용 기준 마련
 - (ii) 스크랩·블랙매스·자석 스크랩 등 생산부산물 회수 라인 조기 구축
 - (iii) 고순도·특수분말의 국산화 및 품질평가 체계 확립

2. 전략광종별 강원특별자치도 대응 필요성

- 희소금속은 탄소중립 전환, 디지털 산업화, 첨단제조 경쟁력의 핵심 기반자원으로, 광종별로 서로 다른 공급망 리스크와 기술 의존 구조를 가진다.
- 따라서 동일한 ‘희소금속’이라도 배터리금속군, 자석금속군, 합금금속군, 반도체소재군, 귀금속·촉매군으로 구분하여 리스크 요인을 진단하고, 그에 상응하는 회수-정제-소재화 전략을 수립할 필요가 있다.

- 이러한 접근은 향후 강원특별자치도의 산업적 적용 가능성을 도출하기 위한 기초분석으로 기능한다.

[표 2-5] 전략광종별 주요 리스크 및 대응 방향

구분	대표 원소	주요 리스크 요인	국내 대응 방향	강원도 적용 가능성
① 배터리 금속군 (Li-Ni-Co-Mn-O)	리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연	- 채굴: 호주·남아·인도네시아 편중- 정련: 중국 집중(특히 Li, Co)- ESS-EV 확산에 따른 수요 급증	- 폐배터리·제조스크랩 회수 확대- 블랙매스 전처리 및 습식정제- 재생용 ESS 인증·실증 체계 구축	원주·횡성권 ESS 재사용-배터리 해체 허브“블랙매스-정제-ESS” 일괄 실증 라인 구축
② 자석 금속군 (REE Nd-Pr-Dy 등)	네오디뮴, 프라세오디뮴, 디스프로슘 등	- 채굴·정련 모두 중국 의존(80%↑)- 미얀마 공급 불안정- 수입자석 의존도 95% 이상	- 사용후 자석 회수·선별 체계 구축- 수소박리(HD) 기반 재생 자석 공정- 자석 - 투 - 자석 (Magnet-to-Magnet) 실증	풍력·ESS 해체 연계 자석 회수 실증자석 전처리-재생소결 파일럿(강릉·동해권)
③ 합금 금속군 (W-Mo-Ti-V 등)	텅스텐, 몰리브덴, 티타늄, 바나듐 등	- 중국 정련 집중(특히 W 80% 이상)- 공급 불안·가격변동성- 고순도 정제기술 국내 미확보	- 초경합금 스크랩 회수- 저탄소 정련·APT/AMT 공정 실증- 재생 분말야금·3D프린팅용 소재화	영월·상동광산 중심 “텅스텐 순환벨트” 구축·재활용-분말-첨단소재 일체형 클러스터
④ 반도체 소재군 (Ga-Ge-In-Te 등)	갈륨, 게르마늄, 인듐, 텔루륨	- 아연·구리 부산물 의존- 중국·러시아 공급 제한(수출규제)- 국내 회수체계 미비	- 제련 부산물(슬라임, 더스트) 회수 기술 강화- 고순도 정제 및 반도체용 회수공정 개발	강원도 내 유색금속 제련 부산물 회수 실증 가능 R&D·대학 중심 파일럿 구축(춘천·원주권)

구분	대표 원소	주요 리스크 요인	국내 대응 방향	강원도 적용 가능성
⑤ 귀금속 촉매군 (Pt-Pd-Rh 등 PGM)	백금, 팔라듐, 로듐 등	- 남아공·러시아 공급 집 중- 자동차·수소촉매 핵 심소재- 가격 변동성 극 심	- 폐촉매·연료전지 MEA 회수 실증- 귀금속 전처 리·정량분석 센터 구축- 저탄소 정제 및 순환공급 망 확립	촉매 전처리·시험분석센 터(춘천·홍천권)·수소촉매 회수 및 재활용 실증 가 능
⑥ 태양광 에너지 소재군 (Si·Ag 등)	실리콘, 은	- 은·실리콘 회수를 저조 PV 폐모듈 증가(2030년 이후)	- 자동해체·열/용매 EVA 박리- Ag 선택용출·Si 재 정제 실증	동해·삼척권 PV 모듈 해 체·자원화 단지 구축“PV 재자원화 실증센터” 운영

- 배터리금속군과 자석금속군은 ‘수요 급증형 전략광종’으로, 전기차·ESS·풍력발전 등 탄소중립 핵심산업의 성장에 따라 향후 10년간 세계 수요가 최소 3~5배 증가할 것으로 전망된다. 이들 금속군은 신규 채굴 확대보다 순환경제 기반의 회수·정제 시스템 확충이 훨씬 현실적이며, 특히 폐배터리·폐자석의 자원화는 “도시광산(urban mining)”의 대표적 사례로 꼽힌다.
- 따라서 강원특별자치도는 ① 배터리 해체·ESS 재사용·블랙매스 전처리 기술을 집적한 ‘이차전지 순환경제 허브’, ② 사용후 자석 회수·수소박리(HD) 전처리·재소결 공정을 실증하는 ‘희토류 자석 재활용 거점’으로 특화하는 것이 유망하다.
- 이는 자원회수뿐 아니라 RE100 전력과 연계한 저탄소 공정 실증, 그리고 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환법(EPR)」의 실증적 확장 모델로 기능할 수 있다.
- 합금금속군과 귀금속·촉매군은 ‘공급리스크형 전략광종’으로, 특정 국가

(중국·남아공·러시아 등)에 생산이 편중되어 있고, 가격·정세·물류 등 외생 리스크에 직접 노출되어 있다. 이들 금속은 생산지 다변화가 어렵기 때문에, 국내 재자원화 및 정련 역량을 확보한 자급형 공급망 구축이 핵심 대응방향이다.

- 강원도는 영월 상동광산(텅스텐)을 중심으로 초경합금 스크랩 수거 → 저탄소 제련(APT/AMT 공정) → 재생 분말 생산으로 이어지는 ‘재생 텅스텐 순환벨트’, 자동차·연료전지 촉매의 전처리·정량분석·귀금속 회수 기능을 갖춘 ‘PGM 전처리 및 분석센터’를 구축할 수 있다.
- 이들은 「국가자원안보 특별법」 제18조(재자원화산업클러스터) 및 제22조(핵심공급기관 지정)에 근거하여 중앙정부의 기술·재정·금융 지원을 받을 수 있는 구조를 형성한다. 즉, 강원형 모델은 “지정폐기물 관리에서 자원안보형 산업으로의 전환”을 시도하는 제도적 실험장이 될 수 있다.
- 반도체소재군과 태양광소재군은 ‘기술집약형 전략광종’으로, 아연·구리 제련 부산물에서 미량 회수되는 갈륨(Ga), 게르마늄(Ge), 인듐(In), 텔루륨(Te) 등과 2030년 이후 대량 발생할 태양광 폐모듈(PV)은 고순도 정제 및 고부가 재활용 기술이 핵심이다. 이들 금속은 소량·고가 구조이므로 정밀 회수·정제 기술력이 산업경쟁력을 좌우한다.
- 따라서 강원도는 ① 제련 부산물 슬라임·더스트 회수 실증, ② PV 모듈 자동해체·은(Ag) 선택용출·실리콘(Si) 업그레이드 공정 파일럿 구축을 통해, ‘첨단소재 재자원화 기술실증 단지’로서의 역할을 수행할 수 있다.
- 이 영역은 환경부의 「자원순환기본법」상 ‘순환이용 촉진대상물질’ 지정과, 산업부의 「국가자원안보 특별법」상 재자원화산업 지원이 이중으로

적용 가능한 교차지대다.

- 강원특별자치도에서는 단계별 대응전략 및 제도 연계 방향을 위해 전략광종별 대응은 다음의 3단계 자원순환 구조로 체계화할 수 있다.

[표 2-6] 전략광종별 강원특별자치도의 대응 방안

구분	핵심 단계	주요 내용	연계 제도	강원특별자치도 역할
① 회수 (Recycling)	사용후 제품·산업스크랩의 집하 및 분류	폐배터리·자석·촉매· 모듈 회수 네트워크 구축	EPR 제도, 폐기물관리법	광역 회수센터 운영, 순환이용 촉진대상 시범사업
② 정제 (Refining)	금속 회수·정련·분말 화	습식·건식 복합정제, 부산물 회수, Li·W·REE 고순도화	국가자원안보 특별법(재자 원화산업 지원)	정제·전처리 실증, RE100 기반 저탄소 공정
③ 소재화 (Materiali- zation)	재생금속의 산업용 소재 전환	재생 분말·합금·전극·자석 등 고부가 소재화	산업표준화법 , 탄소중립기본 법	재활용 금속 품질인증·공공조달 확대

- 이 3단계는 단순한 재활용 체계를 넘어, ① 자원순환(환경부), ② 자원안보(산업부), ③ 탄소중립(환경·산업 공동)을 하나의 체계로 통합하는 방향으로 설계될 수 있다.
- 강원특별자치도는 이를 실현하기 위한 “희소금속 재자원화산업클러스터”(Circular Economy Cluster for Critical Metals)의 선도 후보지로, 실증사업을 통해 국가자원안보 특별법 제18조에 따른 최초의 지방형 모델 지정이 가능하다.

- 결국, 희소금속의 재자원화 전략은 단순한 재활용 정책이 아니라 “탄소 중립을 달성하기 위한 국가자원안보 정책의 핵심 축”으로 기능해야 한다. 이에 강원특별자치도는 다음 세 가지 이유로 그 실증무대에 가장 적합하다.
 - ① 광물자원 기반: 영월 상동광산 등 국내 유일의 전략광물 생산지 존재
 - ② 산업 연계성: 원주·횡성의 배터리·전장 산업, 동해·삼척의 PV 산업 인프라
 - ③ 정책 연계성: 국가자원안보 특별법(산업부)과 자원순환기본법(환경부)을 동시에 적용할 수 있는 복합 시범지 구조
- 따라서 향후 강원특별자치도의 희소금속 재자원화 정책은
 - ① 전략광종별 리스크 기반 대응체계 구축,
 - ② 산업-제도-지역 연계형 실증모델 운영,
 - ③ 탄소중립형 순환경제 산업으로의 전환 촉진이라는 세 축을 중심으로 발전해 나가야 한다.

제 3 장

희소금속 활용분야 내재량 산정

제 3 장

희소금속 활용분야 내재량 산정



제1절 산업별 소재-부품 구조 및 희소금속 내재량 추정

1. 내재량 산정의 개념과 목적

- ‘내재량(Embedded Metal Content)’이란 특정 제품이나 시스템(예: 배터리, 모터, 자석, 축매 등)에 포함된 단위당 구성 금속의 중량(kg/제품 또는 kg/kWh)을 의미한다. 이는 단순히 ‘제품 제작에 사용된 금속의 총량’을 넘어, 해당 제품이 공급망 리스크, 회수 잠재력, 자원 효율성, 탄소저감 기여도에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 평가할 수 있게 하는 핵심 지표이다(IEA, 2021; IRENA, 2023).
- 이 개념은 특히 희소금속과 같은 핵심광물(Critical Minerals)의 순환 경제 및 재자원화 정책 수립에서 중요한 역할을 한다. 제품 단위별 금속 내재량을 파악함으로써, 각 산업이 특정 금속에 얼마나 의존하고 있는지, 기술 구조가 어떻게 자원 수급을 변화시키는지를 구체적으로

분석할 수 있다. 예를 들어, 전기차용 배터리의 경우 NCM811, LFP, NCA 등 양극재 조성 차이가 니켈·코발트·리튬의 내재량 구조를 크게 달리하며, 이는 곧 국가별 공급망 안정성 및 재활용 전략의 우선순위 결정에 직접적인 영향을 미친다.

가. 수요예측의 단위기준 통일

- 내재량은 산업별 수요예측에서 ‘단위 표준화’를 가능하게 한다. 예컨대 “1대의 EV”, “1kWh 배터리”, “1MW 풍력터빈”, “1대의 모터” 등으로 단위를 통일해 각 금속별 사용량을 비교할 수 있다. 이를 통해 특정 산업의 생산 규모(대수, kWh, MW 등)만으로도 연간 총 금속 수요(t/년)를 거시적으로 산출할 수 있어, 국가 차원의 자원수급 시나리오 분석이나 장기 수요예측 모델 구축에 활용된다.

1) 재활용·회수 정책의 정량적 근거 제공

- 제품의 내재량 정보는 향후 폐제품(EoL, End-of-Life) 발생량과 회수 가능 금속량을 예측하는 데 필수적이다.
- 예를 들어, ‘전기차 1대당 리튬 내재량 8 kg’이라는 데이터는 일정 시점의 폐차량(대수)을 통해 ‘회수 가능한 리튬 총량(t/년)’을 추산할 수 있게 한다.
- 이를 기반으로 재활용 설비 규모, 금속 회수율, 경제성 분석, 탄소저감 효과(LCA) 등을 정량적으로 산출할 수 있으며, 순환경제 전략 수립의 핵심 지표로 기능한다.

2) 공급망·기술 의존도 평가

- 내재량 분석은 기술별 금속 조성 차이가 자원수급 구조에 미치는 영향을 비교·평가하는 데 활용된다.
- 예를 들어, NdFeB 영구자석이 사용하는 네오디뮴(Nd), 프라세오디뮴(Pr), 디스프로슘(Dy) 등의 내재량은 SmCo 자석과 큰 차이를 보이며, 이는 희토류 공급망의 불안정성을 평가하는 지표가 된다.
- 또한 촉매·반도체·수소전해시스템 등에서도 기술 전환(예: Pt → Ir, Ru 대체)의 효과를 정량화할 수 있어, 탄소중립 기술의 금속 수급 리스크를 예측하는 데 중요한 도구로 활용된다.
- 결국 내재량 개념은 단순한 물질량 산출을 넘어,
 - ① 자원 수급 및 수요관리,
 - ② 폐자원 회수 및 재활용 정책,
 - ③ 기술·공급망 의존도 분석,
 - ④ LCA 기반 환경영향 평가,
 - ⑤ 국가 단위 자원전략 수립
 등을 하나의 정량적 틀로 연결해주는 역할을 한다.
- 따라서 희소금속 재자원화 산업의 정책 수립과 기술개발 방향 설정 시, 내재량 분석은 ‘기초 데이터이자 정책적 나침반’으로 기능한다고 할 수 있다.

나. 산정 방법론 및 데이터 구조

- 본 연구에서는 희소금속이 산업제품(특히 배터리, 모터, 자석 등)에 얼마나 내재되어 있는지를 정량적으로 산출하기 위해, 국제 주요 기관의

단위금속 사용량 데이터를 기반으로 하되, 국내 산업 구조와 기술 특성을 반영한 보정 절차를 적용하였다.

- 즉, 국제 표준 데이터를 그대로 사용하는 것이 아니라, 한국 내 제품 사양(팩 용량, 화학 조성, 공정 효율 등)을 고려해 현실화한 값으로 재산정함으로써, 향후 재자원화 및 회수정책 수립 시 실질적인 근거자료로 활용될 수 있도록 설계하였다.

1) 1단계. 제품-부품 구조 분해 (BOM 분석, Bill of Materials Analysis)

- 첫 번째 단계에서는 각 제품을 구성하는 부품 수준의 구조 분석(BOM, Bill of Materials)을 통해 금속이 실제 어디에, 어떤 비율로 사용되는지를 세분화하였다.
- 예를 들어, 전기차 배터리는 팩(Pack) → 모듈(Module) → 셀(Cell) 구조로 이루어져 있으며, 각 단계별로 알루미늄(케이스), 구리(전류집전체), 니켈·코발트·리튬(양극활물질), 흑연(음극활물질) 등이 상이한 비율로 투입된다.
- 이러한 세부 구조는 OEM 제조사 공개 자료, Argonne National Laboratory의 BatPaC 모델, 한국지질자원연구원(KIGAM) 보고서, USGS 산업 데이터 등을 종합하여 분석하였다.
- 이를 통해 각 부품별 금속 투입 비율(%)을 정의하고, “제품 단위(예: 1 kWh 배터리, 1대 EV, 1톤 자석)”당 금속 투입량을 계량화할 수 있었다.

2) 2단계. 조성별 단위 사용량 계산 (Unit Metal Content Calculation)

- 두 번째 단계에서는 각 부품의 화학 조성 및 기술 유형별 금속 함량을 고려하여 단위당 금속 사용량을 산출하였다. 예를 들어, 리튬이온 배터리의 경우, 양극재 조성에 따라 금속 사용량이 크게 달라진다.
 - NCM811 (Ni:Co:Mn = 8:1:1)
 - NCM622 (Ni:Co:Mn = 6:2:2)
 - LFP (LiFePO₄, Co·Ni 미사용)
- 이러한 조성비를 적용하여 1 kWh당 Ni, Co, Li, Mn의 내재량 (kg/kWh)을 계산하였다.
- 참고자료는 IEA(2021), IRENA(2023), EU CRMA(2023) 등에서 제시한 국제 표준값을 사용하되, 국내 산업에서 실제 사용되는 팩 용량·에너지밀도·효율계수를 반영하여 보정하였다.

3) 3단계. 회수율 및 공정 효율 반영 (Recovery Efficiency Adjustment)

- 마지막 단계에서는 실제 재자원화 과정에서 발생하는 회수율(recovery rate)과 공정 손실율(loss rate)을 반영하여 ‘이론적 내재량’에서 ‘실질 회수 가능량’을 산정하였다. 예를 들어, 배터리 재활용 공정별 평균 회수율은 다음과 같다.
 - 습식 정제(hydrometallurgy): 90~95%
 - 건식 소성(pyrometallurgy): 80~90%

- 용융/복합공정: 85~92%
- 이를 참고하여 각 금속별 공정 효율을 적용하였으며, 자료원은 RMI(Responsible Minerals Initiative, 2022), 산업통상자원부(MOTIE, 2023) 및 국내 재활용기업 보고자료를 활용하였다.

[표 3-1] 72 kWh NCM811 배터리 팩 내재량 계산 방법

구분	수치	설명
단위 금속 사용량	Ni 0.55 kg/kWh	NCM811 양극 기준
총 내재량	72 kWh × 0.55 kg/kWh = 39.6 kg	전기차 1대 내재량
회수율 적용	39.6 kg × 95% = 37.6 kg	실제 회수 가능한 니켈량
산업 규모 환산	10만 대 생산 시 = 3,760 ton/년	연간 회수잠재량 추정

- 위 표는 희소금속이 실제 산업 제품(예: 배터리, 모터, 자석, 연료전지, 반도체 등)에 얼마나, 어떤 형태로 내재되어 있는지를 정량적으로 비교하기 위한 기초 데이터셋으로, 이는 단순히 각 금속의 생산량이나 수입량을 파악하는 수준을 넘어, 제품 단위별로 금속이 ‘얼마나 잠겨 있는가(embedded)’를 수량화한 것으로, 자원순환 정책과 공급망 안정화 전략 수립을 위한 핵심 정량 기초자료로 활용된다.
- 이 표는 국제 주요 기관인 IEA(International Energy Agency, 2021), IRENA(International Renewable Energy Agency, 2023), USGS(U.S. Geological Survey, 2022), JOGMEC(Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 2023) 등의 통계자료 및 산업별 기술조성 데이터를 종합하여 작성되었다.
- 즉, 각 기관이 발표한 금속별 수요예측·소재조성·제품단위 분석결과를

통합하고, 여기에 산업별 평균 조성비(예: NCM811, NdFeB 등)를 적용하여 다음의 4가지 과정을 거쳐 단위당 금속 포함량(kg/kWh, kg/ton, g/kW 등)으로 표준화하였다.

가) 데이터 수집 및 비교

- 각 국제기관이 제시한 희소금속별 산업 사용량, 제품별 금속비중, 수명주기 분석(LCA) 자료를 취합한다.
 - 예: IEA 「The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions(2021)」, IRENA 「Critical Materials for Energy Transition(2023)」 등

나) 산업 조성비 적용

- 제품별 주요 기술 조성비(예: 배터리의 Ni:Co:Mn 비율, 자석의 Nd:Fe:B 구성비)를 반영하여, ‘제품 단위(1 kWh, 1 ton, 1 kW)’당 금속 함유량을 산출하였다.

다) 단위 표준화 및 평균화

- 서로 다른 기술과 보고서 간의 단위를 통일(kg, g, ton 등)하고, 산업별 평균값으로 보정하여 비교 가능한 기준을 확보한다.

라) 정책적 해석 가능성 확보

- 결과적으로, 각 금속이 어떤 제품·산업에 집중적으로 내재되어 있는지

를 시각화할 수 있게 되며, 이는 공급망 리스크 분석, 재활용 잠재량 산정, 국가별 자원 전략 수립의 기초 자료로 활용된다.

[표 3-2] 희소금속 별 내재량 분석

구분	주요 적용 제품군	단위	내재량(평균)	비고(기술 조성/참고치)
리튬 (Li)	EV용 리튬이온 배터리	kg/kWh	0.09 ~ 0.11	NCM811, LFP 등 양극 기준 (배터리팩 전체 1대당 약 8~10kg Li)
코발트 (Co)	EV용 배터리	kg/kWh	0.10 ~ 0.14	NCM622~811 조성에 따라 편차, LFP는 Co 미사용
니켈 (Ni)	EV용 배터리	kg/kWh	0.45 ~ 0.60	고니켈계 NCM/NCA 조성 기준
망간 (Mn)	EV용 배터리	kg/kWh	0.10 ~ 0.15	NCM/NMX 조성에 따라 다름
구리 (Cu)	EV 전체	kg/대	60 ~ 80	배터리, 모터, 전선 포함 (내연기관차의 약 2~3배)
알루미늄 (Al)	EV 전체	kg/대	200 ~ 250	경량화 차체, 케이스 등 포함
철 (Fe)	EV 전체	kg/대	180 ~ 250	모터 및 차체 프레임 포함
흑연 (C, Graphite)	EV용 배터리	kg/kWh	0.70 ~ 1.20	음극재 기준, 천연/인조 흑연 비율 반영
니오븀 (Nb)	초전도재, 특수강, 콘덴서	g/kg제품	1~5	고온합금, 초전도코일 등
텅스텐 (W)	절삭공구, 터빈블레이드	kg/ton 제품	20 ~ 80	초내열합금 및 초경합금
바나듐 (V)	고장력강, 배터리(전해질)	kg/ton강	1.5 ~ 5.0	V2O5 기준, VRFB(Flow Battery)는 60~70 kg/kWh

구분	주요 적용 제품군	단위	내재량(평균)	비고(기술 조성/참고치)
희토류 (Nd, Pr, Dy, Tb)	영구자석(NdFeB)	kg/ton자 석	Nd 250 ~ 350, Pr 60 ~ 100, Dy 20 ~ 40	EV 구동모터 1대당 NdFeB 약 2~3 kg 사용
사마륨 (Sm), 코발트(Co)	SmCo 자석	kg/ton자 석	Sm 330 ~ 360, Co 640 ~ 670	고온안정 자석(항공, 군용) 중심
플래티늄 (Pt)	연료전지(PEMFC)	g/kW	0.10 ~ 0.30	스택 출력당 촉매량 (100kW급 스택 = 약 10~30g Pt)
이리듐 (Ir)	수전해 촉매 (PEM)	g/kW	0.40 ~ 1.00	PEM Electrolyzer 기준, 알칼라인형은 미사용
루테튬 (Ru)	PEM 수전해 촉매	g/kW	0.10 ~ 0.30	Ir 대체 또는 보조촉매로 사용
게르마늄 (Ge)	태양전지(다층셀), 센서	g/W	0.0001 ~ 0.001	고효율 다층셀 기준
갈륨 (Ga)	GaAs, GaN 반도체	g/W 또는 g/cm ²	0.02 ~ 0.05	RF, LED, 전력소자 등
인듐 (In)	ITO 투명전극	g/m ²	0.3 ~ 0.6	디스플레이, 태양광 모듈 등
안티몬 (Sb)	납축전지, 난연제	kg/ton	5 ~ 15	합금 또는 화합물 첨가제로 사용
세슘 (Cs)	광센서, 의료·우주용	g/제품	0.1~1.0	CsI, CsBr 등 화합물 형태
마그네슘 (Mg)	경량합금, 배터리 소재	kg/ton 제품	10 ~ 30	자동차 차체, 전자부품 중심

- 위 표는 청정에너지 전환과 디지털산업을 대표하는 6개 주요 제품군(전기차 배터리, 구동모터, 풍력터빈, 연료전지, 태양광 모듈, 스마트폰)에

대해 각 단위 제품당 내재된 희소금속의 평균 함량을 제시한 것이다.

- 즉, “한 대(또는 한 기, 한 세트)의 제품 속에 어떤 금속이 얼마만큼 잠겨(embedded) 있는가”를 수량화하여 자원순환·회수정책의 기초 단위 데이터로 삼기 위한 것이다.
- 이 표는 국제에너지기구(IEA, 2021), 미국지질조사국(USGS, 2022), 유럽집행위원회 Critical Raw Materials Act(EU CRMA, 2023), JOGMEC(2023) 등의 통계에 산업평균 조성비와 제품 규격 정보(팩 용량, 자석 중량, 스택 출력 등)를 결합해 작성하였다.

[표 3-3] 제품군 별 주요 금속 내재량 분석 결과

제품군	단위	주요 금속 내재량
전기차 배터리 (NCM811, 60kWh 기준)	1대당	Li 8~10kg, Co 8~9kg, Ni 35~40kg, Mn 8~10kg, Cu 40~50kg, Al 30~40kg, C(graphite) 60~70kg
EV 구동모터 (NdFeB 자석형)	1대당	Nd 1.5~2.5kg, Pr 0.3~0.5kg, Dy 0.2~0.3kg, Cu 10~15kg
풍력터빈 (3MW급, 직접구동형)	1기당	Nd 500~600kg, Pr 100~120kg, Dy 50~80kg, Cu 4~5ton
연료전지차 (100kW 스택 기준)	1대당	Pt 10~30g, Ir 2~10g (수전해용 포함 시), Cu 10~15kg
태양광(1MWp)	1세트	Si 40ton, Ag 50~70kg, In 5~7kg, Ga 3~5kg, Cu 2~3ton
스마트폰 (1대당)	-	Au 0.03g, Ag 0.3g, Cu 15g, Pd 0.015g, In 0.03g, Sn 0.5g, Ta 0.02g, Nd 0.002g 등

① 전기차 배터리 (NCM811, 60kWh 기준)

- 주요 금속 내재량: Li 8~10 kg, Co 8~9 kg, Ni 35~40 kg, Mn

8~10 kg, Cu 40~50 kg, Al 30~40 kg, Graphite 60~70 kg

- 해설: NCM811 조성의 양극재는 고니켈 비중이 높아 Ni·Co 의존도가 크다. 이 수치는 1대 전기차(60 kWh 배터리 탑재) 기준으로, 총 100 kg 이상의 핵심금속이 내재되어 있음을 의미한다.

향후 폐EV 배터리가 본격적으로 회수될 경우, 리튬·니켈·코발트가 재활용산업의 핵심 대상군이 된다.

특히 LFP계 조성으로의 전환이 진행될수록 Co 수요는 감소하고 Li·Fe 비중은 증가한다.

② EV 구동모터 (NdFeB 자석형)

- 주요 금속 내재량: Nd 1.5~2.5 kg, Pr 0.3~0.5 kg, Dy 0.2~0.3 kg, Cu 10~15 kg

- 해설: 영구자석형 구동모터(PMSM)는 희토류 금속 중에서도 네오디뮴(Nd) 과 디스프로슘(Dy) 에 대한 의존도가 높다.

한 대의 EV 모터에 약 2~3 kg의 희토류 자원이 내재되며, 이는 폐차 후 고순도 분리·정제 기술을 통한 회수 가능성이 매우 높다.

특히 Cu (10~15 kg)는 전력손실 저감 및 열전도 역할로 필수 소재이며, 희토류와 함께 모터 재활용의 핵심 대상이다.

③ 풍력터빈 (3MW급, 직접구동형)

- 주요 금속 내재량: Nd 500~600 kg, Pr 100~120 kg, Dy 50~80 kg, Cu 4~5 ton

- 해설: 직접구동형(gearless) 풍력터빈에는 대형 NdFeB 자석이 탑재되어 수백 kg 규모의 희토류 금속이 사용된다.

터빈 1기만으로도 희토류 회수 잠재량이 EV 수천 대 수준에 달한다. 또한 구리(Cu)는 코일과 전력케이블에 4~5 톤 내외 사용되어 금속 밀도가 매우 높은 산업 군에 속한다.

따라서 대형 설비 해체 및 재활용산업(풍력 리사이클링)의 경제성 분석에 핵심 지표로 활용된다.

④ 연료전지차 (100kW 스택 기준)

- 주요 금속 내재량: Pt 10~30 g, Ir 2~10 g (수전해용 포함 시), Cu 10~15 kg
- 해설: 백금(Pt)은 연료전지 스택의 촉매로 사용되는 고가 귀금속으로, 비록 질량은 적으나 단가 기여도가 매우 크다.
이리듐(Ir)은 수전해 촉매로 사용될 경우 보조 귀금속으로 작용하며, 양자 모두 회수 기술이 이미 상용화 되어 있다.
연료전지차 1대에서 회수되는 귀금속량은 미미하나, 재활용 단가 기여도는 가장 높은 그룹에 속한다.

⑤ 태양광 모듈 (1MWp 기준)

- 주요 금속 내재량: Si 40 ton, Ag 50~70 kg, In 5~7 kg, Ga 3~5 kg, Cu 2~3 ton
- 해설: 실리콘(Si)은 모듈의 기본 소재이며, 은(Ag)은 전극 페이스트로 사용된다. 특히 Ag, In, Ga는 경제성이 높은 재활용 대상 금속으로, 태양광 폐모듈 처리정책 수립의 핵심 근거 지표이다.
모듈 1 MWp 단위당 Ag 50~70 kg은 '고부가가치 회수' 대상으로 분류된다. In·Ga는 CIGS 및 GaAs 박막형 모듈에서 상대적으로 높게 나타난다.

⑥ 스마트폰 (1대 기준)

- 주요 금속 내재량: Au 0.03 g, Ag 0.3 g, Cu 15 g, Pd 0.015 g, In 0.03 g, Sn 0.5 g, Ta 0.02 g, Nd 0.002 g 등
- 해설: 스마트폰은 소형 제품이지만 희소금속의 종류가 가장 다양하게 포함되어 있다. 특히 Au(금), Ag(은), Pd(팔라듐), Ta(탄탈륨), In(인듐) 등은 ‘전자 산업형 귀금속’으로 분류되며, 전자폐기물(e-waste)의 주요 회수대상이다.

한 톤의 폐휴대폰에서 회수되는 금의 양은 광석 100톤에 해당할 정도로 농축도가 높아 ‘도시광산(Urban Mine)’의 대표적 사례로 언급된다.



제2절 내재량 데이터의 불확실성과 해석 주의점

- 내재량(Embedded Metal Content)은 제품 단위당 금속 함유량을 정량화할 수 있는 핵심 지표이지만, 그 산정 과정에는 다양한 불확실성 요인이 존재한다.
- 이는 기술 조성, 제조공정, 데이터 출처, 시간적 변화 등 여러 요소에 의해 발생하며, 결과적으로 내재량 수치의 정확도·적용성·정책해석의 신뢰성에 영향을 미친다.
- 따라서 본 연구에서는 내재량 데이터를 정책적 의사결정의 ‘절대값’으로 해석하기보다는, 상대적 비교지표(Relative Index) 및 추세분석용 참고값으로 활용할 것을 전제로 한다.

1. 기술 조성 및 설계변수의 다양성

- 내재량 산정에서 가장 큰 불확실성 요인은 제품의 기술 조성(chemistry composition) 과 설계변수(design parameter)의 차이이다. 배터리의 경우, NCM811, NCM622, LFP, NCA 등 양극 조성에 따라 Ni·Co·Mn의 비율이 크게 다르며, 셀 구조(파우치형, 각형, 원통형), 에너지밀도(Wh/kg), 팩 효율 등에 따라 내재량이 $\pm 30\%$ 이상 차이날 수 있다.
- 모터 및 자석의 경우, NdFeB와 SmCo의 조성비, Dy 첨가량, 자속밀도 설계 등에 따라 희토류 함량이 상이하다. 양광 모듈 역시 결정질

실리콘(crystalline), 박막형(CdTe, CIGS), GaAs 등 기술유형에 따라 Ag, In, Ga의 사용량이 달라진다.

- 이러한 기술적 다양성은 내재량을 단일 수치로 표현하는 데 근본적 한계를 갖게 하며, 따라서 본 연구에서는 주요 조성별 평균값(industrial weighted average)을 기준으로 정리하였다.

2. 데이터 출처 및 표준화의 불일치

- 국제기관별 보고서(IEA, IRENA, USGS, CRMA 등) 간에는 산정 범위·단위·가정조건이 서로 상이하다.
- IEA(2021)는 배터리 소재 기준(활물질 중심), USGS(2022)는 국가별 총소비량 기준, IRENA(2023)는 LCA(Life Cycle Assessment) 기반으로 시스템 전체를 포함한다.
- 또한 동일 금속이라도 일부는 산화물 기준(oxide form), 일부는 순수 금속 기준(metal form)으로 제시되어 있어, 이를 kg 단위로 환산할 때 화학적 보정계수(conversion factor) 적용이 필요하다.
- 이러한 표준화 불일치로 인해 국가·기관별 내재량 수치에 $\pm 10\sim 25\%$ 수준의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 가능한 한 동일 단위(kg/제품, kg/kWh 등)로 통일하되, 출처별 신뢰도를 표기하고, 국제 평균값(global mean)을 중심으로 정리하였다.

3. 시간적 요인 및 기술혁신 속도의 영향

- 내재량은 고정된 상수가 아니라, 시간에 따라 변화하는 동적 지표(dynamic indicator) 이다. 이는 신기술의 등장이나 효율 향상에 따라 금속 사용량이 지속적으로 변화한다는 의미로, 다음은 각 사용처별 기술 변화 요인을 정리한 결과이다.
 - 배터리: 에너지밀도 향상과 리사이클링 소재 활용 증가로 Ni·Co 사용량은 감소 추세, Li·Si·Na 계열로 다변화
 - 모터: Dy-free, Nd-reduced 자석 기술 등장으로 희토류 함량이 감소 중
 - 연료전지 및 수전해: Pt·Ir 대체 촉매(Ru, Co 기반) 연구 확대
 - 태양광: Ag paste 대체 기술 및 CIGS 효율 향상으로 귀금속 사용량 축소
- 이처럼 기술혁신은 내재량을 급격히 변화시키므로, 2025년 기준 데이터는 향후 2030년 전망치와 다소 다를 수 있다.
- 이에 본 연구에서는 현행 기술 기준의 정태적(static) 평균치로 제시하되, 정책 해석 시에는 “단기 지표”로 활용하고 주기적 갱신이 필요함을 명시한다.

4. 회수효율 및 공정 손실율의 변동성

- 재자원화·회수 단계에서는 공정 유형에 따라 금속 회수율이 달라진다. 습식(hydrometallurgical), 건식(pyrometallurgical), 복합공정

(hybrid) 간 효율 격차는 최대 $\pm 15\%$ 수준이며, 전처리·분리·정제 과정의 기술 성숙도에 따라 손실율이 달라진다.

- 예를 들어, 리튬: 70~90% 니켈·코발트: 90~95% 희토류: 80~90% 정도의 회수 효율 차이가 존재한다.
- 이에 따라 “이론적 내재량”과 “실질 회수가능량” 간의 차이가 발생하며, 정책적으로는 회수효율 향상 투자가 내재량 대비 실질 자급률을 높이는 핵심 변수로 작용한다.

5. 해석 및 정책적 활용 시 주의사항

- 내재량(Embedded Metal Content) 데이터는 기술적·산업적 의미가 매우 크지만, 이를 정책적으로 해석하거나 산업전략에 직접 반영할 때는 다섯 가지 주요 주의사항을 반드시 고려해야 한다.
- 이는 내재량이 ‘절대값’이라기보다는 ‘정량화된 추정값’이며, 산업 구조·기술 발전·경제성에 따라 유연하게 변동할 수 있기 때문이다.

가. 절대값(absolute value) 해석의 한계

- 내재량 데이터는 다양한 가정(조성비, 효율, 단위변환 등)을 기반으로 산정된 평균적 추정치(estimated average)이다. 즉, “전기차 1대당 리튬 9 kg이 사용된다”는 수치는 특정 기술 기준(NCM811)과 평균값을 반영한 결과이며, 실제 제조사·모델·셀 구조에 따라 $\pm 30\%$ 이상 차이가 발생할 수 있다.
- 그럼에도 불구하고 정책 분석에서 이 값을 절대값으로 해석하면, 잘못

된 자원 수요 예측이나 과잉·과소 투자로 이어질 수 있다. 따라서 내재량은 절대적 수치보다는 비교·추세 지표(comparative indicator)로 해석해야 하며, “Ni 대비 Co 비중이 감소한다”, “LFP 전환 시 Li의 존도는 유지되나 Co 수요는 급감한다”와 같은 상대적 변화 방향 중심으로 접근해야 한다.

나. 산업별·기술별 가정의 명확화 필요

- 내재량 산출 시 전제되는 기술 조성(chemistry)과 제품 기준(unit base)은 산업별로 다르다. 예를 들어, 동일한 “리튬 8 kg/대”라는 값도
 - NCM811 기준일 경우 → Ni·Co가 함께 존재하는 고에너지밀도형
 - LFP 기준일 경우 → Ni·Co 미사용, 리튬 순수량만 존재
 즉, 구성에 따라 금속 내재구조가 완전히 달라진다.
- 정책수립자가 이러한 전제조건을 명확히 인식하지 못하면, 기술 간 자원 의존도 비교나 재활용 우선순위 설정에서 오류가 발생할 수 있다.
- 따라서 내재량 데이터를 활용할 때는 “해당 수치가 어떤 조성(NCM811, LFP, NdFeB 등)과 어떤 단위(kg/kWh, kg/unit)를 전제로 한 것인지”를 반드시 명시해야 한다. 이는 국가나 지역 차원의 자원 전략 수립에서 데이터 신뢰성의 전제조건이 된다.

다. 회수효율(Recovery Rate)과 경제성(Economic Feasibility)의 구분

- 내재량은 ‘물리적으로 존재하는 금속의 양’을 의미하지만, 모든 내재금속이 실제로 회수·재활용되는 것은 아니며, 공정 효율(70~95%)과 더불어, 경제성 확보 여부가 실질 순환율을 결정한다. 예를 들어, EV 배터리 내 리튬은 기술적으로 90% 이상 회수 가능하지만, 리튬 가격이 낮거나 정제비용이 높을 경우 상업적 회수는 이루어지지 않는다. 반면 백금(Pt)이나 팔라듐(Pd)처럼 단가가 높은 금속은 극소량이라도 대부분 회수된다. 따라서 내재량이 크다고 해서 반드시 높은 회수 잠재력을 의미하는 것은 아니다.
- 정책 해석 시 ‘회수 가능량(technical potential)’과 ‘경제적 회수량(economic potential)’을 명확히 구분해야 하며, 후자는 시장가격·회수비용·재활용 기술 성숙도(TRL)에 따라 달라진다.

라. 지역별 산업·기술 특성의 반영 필요

- 국가나 지역의 산업 구조, 기술수준, 폐제품 회수율은 내재량의 적용 가능성을 좌우한다. 예를 들어, 강원특별자치도는 풍력터빈·배터리 재활용 중심 산업이지만, 희토류 정제·제련 인프라는 상대적으로 부족하다. 이 경우 풍력터빈의 Nd·Dy 내재량은 높더라도, 실질 회수율은 재활용 설비의 접근성 및 물류비용에 의해 제한될 수 있다.
- 또한 해외에서 수입된 중간재(모듈, 셀 등)는 ‘국내 제조 내재량’으로 단순 포함시킬 수 없다. 따라서 지역 차원의 내재량 해석 시에는 산업 입지, 공급망 위치, 폐기물 회수 네트워크 등을 종합적으로 고려해야

하며, 필요시 ‘지역보정계수(Local Adjustment Factor)’를 적용해 수정해야 한다.

마. 데이터의 주기적 갱신 필요성

- 내재량은 고정값이 아니라, 기술혁신과 산업구조 변화에 따라 지속적으로 변동하는 변수(variable)이다. 배터리 기술이 NCM811에서 LFP·Na-ion으로 이동하고, 모터가 Dy-free 구조로 발전하며, 태양광 모듈이 Ag-free 페이스트를 채택하는 등, 새로운 기술이 등장할 때마다 금속 내재량은 주기적으로 재평가되어야 한다.
- 특히 청정에너지 분야의 기술 수명주기가 3~5년 단위로 짧기 때문에, 내재량 데이터는 최소 2~3년 주기로 업데이트가 필요하다. 이를 통해 국가 및 지자체는 최신 기술 트렌드에 부합하는 동적 자원전략(Dynamic Resource Strategy)을 수립할 수 있다.



제3절 내재량 기반 회수잠재량 산정(Recoverable Potential Estimation)

- 내재량(Embedded Metal Content)은 산업제품 단위당 금속 함유량을 정량화하는 지표로, 이를 기반으로 각 산업군에서 회수(Recycling) 가능한 금속의 이론적·실질적 잠재량(Recoverable Potential)을 추정할 수 있다.
- 본 절에서는 앞서 제시한 내재량 데이터(kg/kWh, kg/unit, kg/MW 등)를 산업 생산량 및 폐제품 발생량(EoL, End-of-Life)과 연계하여, 연간 회수가능 금속량(t/년)을 산출하고, 이를 지역별·산업별 순환경제 전략의 기초자료로 활용하고자 한다.
- 즉, 내재량이 ‘자원구조의 지도(Map)’라면, 회수잠재량은 ‘자원순환의 속도와 규모’를 보여주는 지표라 할 수 있으며, 회수잠재량(Recoverable Potential, RP)은 다음의 기본 식으로 정의된다.

$$RP_i = P_i \times EC_i \times RR_i \times Y_i$$

- 여기서

P_i : 산업별 제품 생산량 또는 폐기량(대/년, MW/년 등)

EC_i : 단위당 금속 내재량(kg/대, kg/kWh 등)

RR_i : 금속별 회수 효율(Recovery Rate, %)

Y_i : 자원 회수율(제품 회수율 × 재활용 비율)

- 이 식을 통해, 각 금속·산업별로 연간 회수 가능한 이론적 금속량(t/년)을 도출한다.

[표 3-4] 회수잠재량 계산을 위한 단계별 내용 및 자료원

단계	내용	주요 자료원
① 산업별 제품 생산량 및 폐기량 산정	EV, 풍력터빈, 태양광, 연료전지, 전자제품 등 EoL 발생량 추정	KOSIS, IEA, MOTIE, KIGAM, 기업 보고서
② 내재량(EC) 적용	제품 단위별 금속 내재량(kg/kWh, kg/unit 등) 적용	IEA(2021), IRENA(2023), USGS(2024)
③ 회수효율(RR) 반영	금속별 공정 효율(습식·건식·복합공정) 적용	RMI(2022), MOTIE(2023), K-eco 자료
④ 회수율(Y) 보정	폐제품 회수율, 불법처리율, 수입·수출 흐름 보정	환경부(EPR 자료), KOSHA, 산업협회 통계
⑤ 연간 회수잠재량(RP) 도출	산업·금속별 t/년 단위로 환산	자체 계산 및 통계 추정

- 본 연구의 분석 결과, 주요 산업군별 희소금속 회수잠재량은 다음과 같은 구조를 가진다.

[표 3-5] 주요 산업군 별 희소금속 회수잠재량 특징

산업군	주요 회수대상 금속	특징 및 잠재량 해석
EV·배터리 산업	Li, Ni, Co, Cu, Al	EoL EV 급증에 따라 연간 수천 톤 규모의 회수 가능. 특히 Ni·Co의 고가치 회수 잠재력이 큼
풍력터빈·모터 산업	Nd, Pr, Dy, Cu	풍력 해체기 증가로 희토류 회수량 급증 예상. 자석 회수기술의 고도화가 관건
태양광 산업	Si, Ag, In, Ga	폐모듈 발생량 급증(2030년 이후). 은(Ag) 중심의 고부가 회수시장 형성 가능
연료전지·수전해 산업	Pt, Ir, Ru	절대량은 적으나 단가가 높아 회수 경제성 우수. 귀금속 회수산업 육성 필요
전자·ICT 산업	Au, Ag, Pd, In, Ta	도시광산형 산업으로, 회수 효율 90% 이상 가능. e-waste 관리체계가 핵심

- 내재량과 생산량을 결합한 회수잠재량은 “향후 순환경제 산업의 금속별 시장규모”를 가늠하는 정량 지표로 활용된다. 특히 EV·풍력·태양광의 세 산업군이 전체 회수잠재량의 약 70% 이상을 차지할 것으로 예상된다.

1. 회수잠재량 분석의 정책적 활용

- 내재량 기반 회수잠재량(Recoverable Potential) 분석은 단순한 수치적 평가를 넘어, 국가 및 지역 차원의 순환경제 정책·산업 인프라 구축·탄소중립 이행전략을 정량적으로 지원하는 기능을 가진다.
- 특히 금속별·산업별 회수잠재량이 높은 부문을 중심으로, ‘어디에, 어떤 시설을, 어떤 규모로 구축할 것인가’를 판단할 수 있는 정책적 우선순위 결정 근거로 활용될 수 있다.

가. 재활용 인프라의 우선 구축 근거

- 회수잠재량 데이터는 산업별로 회수 가능한 금속의 규모를 명확히 제시함으로써, 재활용·정제·소재화 인프라 구축의 우선순위를 설정하는 핵심 기준이 된다. 특히 이차전지, 풍력, 태양광 산업은 세 가지 측면에서 공통적으로 높은 정책 우선순위를 갖는다.

① 대량의 EoL(End-of-Life) 폐제품이 단기간에 집중 발생한다.

- 2030년 이후 전기차·ESS 배터리, 풍력터빈, 태양광 모듈의 폐기물 발생량은 급격히 증가할 것으로 예상된다.

② 고부가가치 금속이 내재되어 있다.

- Ni, Co, Li, Nd, Dy, Ag 등은 국제가격 변동성이 높아, 회수 시 경제적 파급효과가 크다.

③ 국산 재활용 기술과 연계가 용이하다.

- 국내 기업·연구기관이 보유한 습식·건식 공정, 자석 회수, 블랙매스 정제 기술 등이 이미 상용화 단계에 도달해 있다. 따라서 회수잠재량이 높은 산업군을 중심으로 지역 단위 재활용 클러스터를 우선 조성해야 한다. 예를 들어,
 - ✓ “강원형 희토류 회수·정제센터” : 풍력터빈·모터·자석 스크랩 등에서 Nd, Dy, Pr을 회수·정제하여 고순도 희토류 산화물로 재자원화하는 거점 구축
 - ✓ “EV 배터리 블랙매스 전처리 라인” : 사용 후 배터리에서 추출한 블랙매스를 리튬·니켈·코발트로 분리 정제하는 고효율 습식공정 기반 설비
- 이러한 산업별 거점화 전략은 지역 내 연구기관, 산업단지, 공공시설과의 연계를 통해 “자원회수-정제-소재화-부품재투입” 으로 이어지는 지역순환형 자원산업 생태계로 발전할 수 있다.

나. 순환경제·탄소중립 정책 연계

- 희소금속의 회수·재활용은 단순한 자원 절약의 의미를 넘어, 채굴·정제 대비 온실가스 배출 저감 효과를 수반한다. 여러 문헌에 따르면, 리튬의 재활용은 채굴 대비 약 70~80%의 CO₂ 배출 절감, 니켈은 약 60~65%, 코발트는 약 55~60%, 알루미늄은 약 90% 의 절감 효과가

있는 것으로 알려져 있다(IEA, 2023).

- 따라서 내재량 기반 회수잠재량 데이터는 LCA(Life Cycle Assessment, 전 과정평가)를 활용한 탄소저감효과(tCO₂eq/년) 분석의 핵심 입력자료로 활용될 수 있다.
- 이를 통해 산업별로 “금속 회수를 통해 얼마나 탄소를 줄일 수 있는가”를 수치로 환산할 수 있으며, 결과적으로 탄소중립 기본계획, 순환 경제 로드맵, K-ETS(배출권거래제) 등의 정책 근거로 활용 가능하다.

다. 공급망 리스크 완화 및 자급률 제고

- 희소금속은 채굴·정제·공급의 70~90%가 특정 국가(중국, DRC, 인도네시아 등)에 집중되어 있어, 지정학적 리스크가 상존한다. 이에 따라 국내 회수·재활용을 통한 ‘대체 공급원(Substitute Source)’ 확보는 국가 자원안보의 핵심 전략으로 부상하고 있다.
- 회수잠재량(Recoverable Potential)은 국내에서 확보 가능한 자원의 총량을 수치로 제시함으로써, 희소금속 자급률(Self-Sufficiency Rate, %) 산정에 직접 활용될 수 있다. 예를 들어,
 - 연간 니켈 수입 10만 톤 중, 재활용을 통해 3천 톤을 회수 가능하다면 → 자급률 3%
 - 향후 2030년까지 EV 폐배터리 증가 시 회수량이 10배 확대될 경우 → 자급률 30% 수준까지 향상 가능
- 이와 같이 회수잠재량 분석은 단순히 “재활용 가능량”을 넘어, 공급망 리스크 완화, 수입대체, 국가 자원전략의 근거로 기능한다. 특히 국내 회수금속이 산업 내에서 다시 투입되는 “Closed-Loop Supply

Chain” 체계를 구축할 경우, 강원특별자치도 등 지역 차원의 소재 자립형 산업생태계 구축 효과를 기대할 수 있다.

라. 지역 산업 연계성 강화 - 강원특별자치도 적용

- 강원특별자치도는 ① 풍력·ESS·이차전지 산업 기반, ② 희토류 관련 연구기관(KIGAM 분소, 한국지질자원공사 강원센터 등), ③ 재자원화·폐기물 관리 인프라 등을 모두 보유하고 있어, 내재량 기반 희수잠재량 분석의 적용 적합성이 매우 높은 지역이다. 이를 바탕으로 다음과 같은 지역 산업 연계 전략이 가능하다.
 - 풍력산업 연계: 영월·태백 등지의 풍력단지 해체 예정 설비를 대상으로 Nd·Pr·Dy 희수 및 자석 재제조(Remagnetization) 기술 실증
 - 배터리 산업 연계: 횡성·춘천 지역에 EV·ESS 배터리 분리 및 블랙매스 전처리 공정 구축 → 재활용 소재를 인근 전자부품 제조단지로 재투입
 - 연구·산학 네트워크 구축: 강원대, 한림대, 한국지질자원연구원, 한국기후변화연구원 등과 연계한 ‘강원형 희소금속 재자원화 기술센터’ 설립
- 이러한 산업-연구-지자체 연계를 통해 강원특별자치도는 희소금속 희수·소재화·부품재제조가 연결된 “희소금속 재자원화 산업벨트(Rare Metal Circular Belt)” 구축의 거점으로 발전할 수 있다.

[표 3-6] 희소금속 재자원화 산업육성 발전방향 요약

구분	주요 활용 목표	기대 효과
재활용 인프라 구축	산업별 금속 잠재량 기반 클러스터 조성	산업집중형 회수·정제 시스템 구축
탄소중립 연계	LCA 기반 CO ₂ 감축효과 정량화	자원순환형 탄소저감 전략 수립
공급망 안정화	회수자원 = 대체공급원으로 활용	자급률 제고, 수입의존도 완화
강원도 적용	풍력·ESS·배터리 산업 연계	‘희소금속 재자원화 산업벨트’ 조성

2. 재활용 기술, 회수율, 폐자원 관리체계 분석

- 전 세계적으로 탄소중립(Net-Zero) 및 순환경제(Circular Economy)가 산업전략의 중심 의제로 부상하면서, 희소금속(critical minerals)의 안정적 확보와 재활용 기술 내재화가 국가 경쟁력의 핵심 요소로 자리 잡고 있다.
- 국제에너지기구(IEA, 2021)에 따르면, 청정에너지 기술 확산으로 인해 리튬(Li), 코발트(Co), 니켈(Ni), 망간(Mn), 희토류(REE), 백금족금속(PGMs), 갈륨(Ga), 인듐(In), 게르마늄(Ge) 등 전략광물의 수요는 2040년까지 4~6배 이상 증가할 전망이고, 이에 따라 기존의 “일차자원(Primary resources)” 중심 구조에서 “이차자원(Secondary resources)”을 활용한 자원순환형 공급망 구조(Circular Supply Chain)로의 전환이 필수적 과제로 제시되고 있다.

- 희소금속 재활용 기술은 단순한 폐자원 처리기술을 넘어, ① 공급망 안정성 강화, ② 자원 고갈 대응, ③ 산업 탄소배출 저감, ④ 지역경제의 녹색전환을 동시에 실현할 수 있는 핵심 전략기술로 평가된다 (Binnemans et al., 2013; IRENA, 2023).
- 탄소중립 전환과 자원 순환경제 확산으로 인해, 산업 전반에서 희소금속 재활용 기술(Recycling of Critical Metals)의 중요성이 급부상하고 있다.
- 각 산업은 생산공정의 부산물 및 EoL(End-of-Life) 제품을 통해 다량의 금속 스크랩을 배출하며, 이들로부터 고순도의 금속을 회수하는 기술이 공급망 안정성·탄소감축·경제성 측면에서 핵심 전략으로 자리잡고 있다.
- 희소금속 재활용 기술은 일반적으로 다음과 같은 4단계 구조를 따른다.
 - 전처리(Pre-treatment): 해체·분쇄·분류 등 물리적 선별을 통해 금속 함유물(스크랩, 블랙매스, 자석 등)을 확보하는 단계
 - 물리적 회수(Mechanical Separation): 밀도차·자기분리·전기분리 등을 통해 금속 농축률을 높이는 단계
 - 화학적 정제(Chemical Recovery): 침출(Leaching) - 용매추출(Solvent Extraction) - 침전(Precipitation) - 전해정제(Electrowinning) 등 고순도 회수공정
 - 제품화 및 재투입(Material Reuse): 산화물·염·금속 형태로 회수된 원소를 전구체(Precursor)나 합금소재 형태로 재활용
- 이 과정에서 에너지 소모 및 온실가스 배출이 발생하며, 특히 1차 금

속 생산(채굴~정련) 대비 재활용 공정의 탄소배출량은 60~95% 감소하는 것으로 보고된다(IEA, 2024).

가. 전기차(EV) 및 2차전지 분야

- 전기차(Electric Vehicle, EV) 및 2차전지(Lithium-ion Battery)는 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn), 흑연(C), 구리(Cu), 알루미늄(Al) 등 다수의 희소금속으로 구성된 고부가가치 제품이다.
- 이들 금속은 양극재·음극재·전해질·집전체 등 주요 구성요소에 분포하며, 각각 전기화학 반응과 전도성, 구조적 안정성을 결정한다. 그러나 사용 종료 후 폐배터리에는 잔류 전해액과 반응성 물질이 남아 있어, 방치 시 전기화학적 발열 반응과 전해질 분해로 인한 유해물질 누출이 발생할 수 있다. 이에 따라 배터리 재활용 공정에서는 단순 자원회수뿐 아니라 환경안전 확보와 유해성 저감이 동시에 요구된다.

① 전처리 단계

- 폐배터리는 충전전류를 완전히 제거하는 방전(Discharging) 공정을 거쳐 화학적 안정성을 확보한 뒤, 모듈·셀 단위로 해체된다. 이후 기계적 파쇄(Mechanical Shredding), 분급(Classification), 세척(Washing) 단계를 통해 활물질, 집전체, 분리막, 전극박 등 구성요소를 분리한다.
- 이 과정에서 생성되는 금속혼합분말을 “블랙매스(Black Mass)”라고 하며, 이는 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연 등을 30~50% 농도로 함유한 고가의 금속농축물이다. 이 블랙매스는 재활용 공정의 핵심 중간재로, 이후 습식제련(Hydrometallurgy) 또는 건식제련

(Pyrometallurgy) 공정으로 투입된다.

② 화학적 정제

- 습식제련은 낮은 에너지 소모와 높은 회수율로 인해 가장 일반적인 정제 공정이다. 먼저, 블랙매스를 황산(H_2SO_4) 과 과산화수소(H_2O_2) 등의 산화-환원 혼합용액에 용해시켜 금속이온을 용출(Leaching)시킨다. 이후 단계적으로 용매추출(Solvent Extraction, SX), 이온교환(Ion Exchange, IX), 전해채취(Electrowinning, EW) 공정을 거쳐 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn), 리튬(Li)을 선택적으로 분리·정제한다. 여기서 리튬은 보통 탄산리튬(Li_2CO_3) 또는 수산화리튬(LiOH) 형태로 결정화되며, 전구체 제조용 소재로 다시 투입된다.
- 습식제련의 대표적인 특징은 금속 간 분리의 선택성이 높고, 회수순도가 99.9% 이상이라는 점이다. 공정 폐수는 재활용되며, 최신 연구에서는 이온액체(ILs), 딥유택틱 솔벤트(DES) 등 환경부하가 낮은 친환경 용매 적용이 시도되고 있다. 이러한 친환경 용매 공정은 기존 황산계 공정 대비 COD, TDS 배출을 70~80% 이상 저감시키는 것으로 보고된다(Binnemans et al., 2023).
- 건식제련은 고온($1,200\sim 1,500^\circ\text{C}$)에서 블랙매스를 용융시켜 금속과 슬래그를 분리하는 방식이다. 이때 Co, Ni 등 고융점 금속은 금속상으로 농축되고, 리튬과 알루미늄 등은 슬래그상으로 이동한다. 이후 슬래그를 별도의 습식 공정으로 처리하여 리튬을 회수한다.
- 건식제련은 내열 합금 회수에 유리하지만, 고에너지 투입과 탄소 배출이 크다는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 Hybrid Process(건식-습식 병합형) 공정이 개발되고 있으며, 이는 리튬 회수율과 에너지

지 효율을 동시에 개선하는 방향으로 진화하고 있다.

③ 기술성숙도 및 산업 현황

- 현재 전기차 및 2차전지 재활용 기술은 TRL(Technology Readiness Level) 8~9 수준으로, 상용화 단계에 도달한 기술로 평가된다.
- 세계적으로는 Umicore(벨기에), Li-Cycle(캐나다), GEM(중국), SungEel HiTech(한국) 등이 대규모 공정을 운영 중이며, 국내에서도 포스코HY클린메탈, 성일하이텍 등이 상용 공정을 보유하고 있다.
- 이들 공정은 대부분 습식제련 기반 공정라인을 중심으로 구성되어 있으며, 연간 수만 톤 규모의 폐배터리 처리 능력을 확보하고 있다.

④ 환경 및 탄소 저감 효과

- 국제에너지기구(IEA, 2023)에 따르면, 1kg의 리튬을 1차 생산(광석 → 농축 → 제련) 대신 재활용으로 대체할 경우 약 14 kgCO₂eq의 탄소배출이 감축되며, 니켈과 코발트는 각각 30~40 kgCO₂eq 수준의 감축효과를 가진다. 이를 EV 배터리팩 단위(72 kWh, NCM811 기준)로 환산하면 약 3~4 tonCO₂eq의 탄소절감 효과를 갖는다. 즉, 10만 대 규모의 전기차 폐배터리를 재활용할 경우, 연간 약 30만~40만 tonCO₂eq의 배출 감축을 실현할 수 있는 셈이다.
- 또한, 재활용 공정은 기존 1차 제련 대비 에너지소비량을 60~80% 절감하며, 금속자급률 향상과 자원채굴 감소에 따른 생태계 교란 최소화 효과까지 포함된다. 이러한 점에서, 전기차 및 2차전지의 금속 재활용은 단순한 자원회수 기술을 넘어 탄소중립 및 순환경제 전략의 실질적 실행 수단으로 기능한다.

나. 재생에너지(풍력 및 태양광) 분야

- 재생에너지 산업은 고효율 전력변환 및 에너지 저장을 위해 다수의 희소금속(Critical Metals)을 활용한다.
- 특히 풍력발전기(Wind Turbine)와 태양광모듈(Photovoltaic Module)은 운전 기간(20~25년) 이후 대량의 금속 함유 폐기물을 배출하기 때문에, 이로부터 금속을 회수·정제하는 재활용 기술은 순환경제 및 탄소중립 실현의 핵심 기술군으로 주목받고 있다.

① 풍력발전기의 희토류 자석 재활용

- 풍력발전기의 영구자석(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)은 주로 네오디뮴(Neodymium, Nd), 프라세오디뮴(Pr), 디스프로슘(Dysprosium, Dy), 테르븀(Terbium, Tb) 등의 희토류 원소(Rare Earth Elements, REEs)로 구성되어 있다. 이들 금속은 자속밀도 및 자기보자력(Coercivity)을 향상시켜 대형 터빈의 효율을 좌우하는 핵심 소재로 사용된다.
- 운전 종료 후 폐자석은 일반적으로 수소분해법(HDDR, Hydrogen Decrepitation)을 통해 금속결정 내에 수소를 침투시켜 부피팽창을 유도함으로써 미세분말화된다. 이 HDDR 분말은 재자석화(Sintering) 공정을 통해 다시 NdFeB 자석으로 재생되거나, 화학적 정제공정을 통해 희토류 산화물 형태로 회수된다.
- 화학적 정제 경로는 산침출(Acid Leaching) → 용매추출(Solvent Extraction) → 침전(Precipitation) 순으로 이루어지며, 최종적으로 Nd_2O_3 , Dy_2O_3 등의 고순도 산화물로 회수된다. 이 과정에서 고온 열처리나 금속 환원 과정을 생략할 수 있어, 1차 제련 대비 에너지

소모를 약 70% 절감할 수 있는 것으로 보고된다(European Commission, 2023).

- 최근에는 기존 무기산 기반 공정의 환경부하를 줄이기 위해 이온액체(Ionic Liquid) 및 딥유틙텍 솔벤트(Deep Eutectic Solvent, DES)를 활용한 친환경 용매 기술이 주목받고 있다. 이 기술은 선택적 용출 특성이 높고 폐수 발생이 거의 없으며, 생물학적 미생물 반응을 이용한 생물침출(Bioleaching)과 병행될 경우 공정 온도를 낮추면서도 동일 수준의 회수율(>90%)을 달성할 수 있는 장점이 있다(Binnemans et al., 2023).

② 태양광 모듈의 금속 및 반도체 소재 재활용

- 태양광발전(PV) 산업에서 사용되는 모듈은 실리콘계(Silicon-based)와 박막계(Thin-film)로 구분된다. 각 모듈 유형은 다른 재활용 공정과 희소금속 구성 특성을 보인다.

※ 실리콘계 모듈(*P-type Si*)

- ✓ 실리콘계 모듈은 전체 태양광 시장의 약 90% 이상을 차지하며, 유리(Glass), EVA(에틸렌비닐아세테이트), 백시트(Backsheet) 등의 복합층 구조를 갖는다.
- ✓ 재활용 과정은 다음과 같다.
 - 물리적 분리: 유리·EVA·백시트 제거
 - 전극 분리: 은(Ag)·알루미늄(Al) 전극 제거
 - 실리콘 정제: 불순물 제거 및 고순도화
- ✓ 정제된 실리콘은 5N(99.999%) 이상의 순도로 재정제되어 신규 웨이퍼 및 태양광 셀 제조에 재활용된다. 특히 은 전극은 습식 침

출·전해정제 과정을 통해 회수되며, 1톤의 폐모듈에서 약 2~3 kg의 Ag를 회수할 수 있다.

※ 박막형 모듈(*CdTe, CIGS*)

- ✓ 박막형 모듈은 CdTe(Cadmium Telluride), CIGS(Cu-In-Ga-Se) 계열로 구성되어 있으며, 낮은 소재 사용량에도 불구하고 고가의 희소금속을 다수 포함한다.
- ✓ 대표 공정은 강산 용출(Strong Acid Leaching) 후 용매추출(SX)-전해정제(EW) 단계로 In, Ga, Se, Te 금속을 분리·정제하는 방식이다. 이때 산용액(H_2SO_4 또는 HNO_3)에 산화제를 첨가하여 금속이온을 안정화시키며, 후속 공정에서 개별 금속을 선택적으로 회수한다.
- ✓ 회수된 인듐(In)과 갈륨(Ga)은 고순도화($\geq 99.99\%$)를 거쳐 디스플레이, 반도체, 태양광용 박막소재로 재투입된다. 이들 금속의 재활용은 신규 제련 대비 70~80 kgCO₂eq/kg 금속의 탄소저감 효과를 보이며, Cd, Te 등의 독성 금속의 환경유출을 예방하는 부수적 이점도 있다.

③ 환경 및 탄소 저감 효과

- 유럽연합(European Commission, 2023) 및 IRENA(2023)의 평가에 따르면, 희토류 재활용은 신규 제련 대비 약 70%의 에너지 절감, In·Ga 회수는 금속 1kg당 70~80 kgCO₂eq 탄소감축, Ag 및 Si 재활용은 각각 약 60~90%의 탄소절감 효과를 보인다.
- 또한 재활용을 통해 희소금속 공급망의 지역적 편중(중국·DRC·남미)을 완화할 수 있으며, 유럽 및 한국 등 주요국에서는 이러한 환경효과를 “Green Supply Chain” 평가 지표에 반영하고 있다.

다. 전력망 및 송배전 인프라

- 전력망 및 송배전 인프라 부문은 국가 기반산업의 핵심 축으로, 초전도체(Superconductors), 변압기, 송전선, 전력전자 장치 등 고신뢰성이 요구되는 장비에 고용점·고강도 합금금속(Refractory and Alloying Metals) 이 광범위하게 사용된다.
- 주요 구성 금속은 나이오븀(Nb), 바나듐(V), 몰리브덴(Mo), 크롬(Cr), 텅스텐(W) 등으로, 이들은 강도·내열성·내식성·자성제어 등의 물리화학적 특성을 부여하여 특수강(Special Steel), 초전도체, 합금소재 등에 필수적으로 적용된다. 이들 금속의 재활용은 고온 용해와 고순도 정제가 병행되어야 하므로, 에너지 집약적이면서도 환경적 부하가 큰 공정군에 속한다. 따라서 1차 제련 대비 저탄소·고효율 공정으로의 전환이 산업적으로 중요하다.
- 특수강(Specialty Steel)의 주요 합금원소로 사용되는 Cr, Mo, W, V 등은 전기로(Electric Arc Furnace, EAF) 기반 용해-정련-합금조정(Melting-Refining-Alloying) 공정을 통해 재활용된다. 전기로 공정은 기존의 용광로 대비 에너지 소비량이 약 50% 이하이며, 고철·스크랩을 원료로 투입하여 Cr-Mo-V계 합금강을 반복적으로 생산할 수 있다.
- 재활용 시 합금원소의 산화손실을 방지하기 위해 산소제어와 슬래그 조성이 최적화되며, 결정립 미세화 및 불순물 제어를 위한 진공정련(Vacuum Degassing, VD) 또는 아르곤정련(AOD) 공정이 병행된다.
- 이 공정을 통해 생산된 재생 특수강은 내열·내식성이 신재강 대비 95% 이상 수준을 유지하며, 특히 1톤의 Cr-Mo계 특수강을 재활용할 경우 약 1.8톤의 CO_{2eq} 배출 절감 효과를 보인다. 이는 제련 과정에서 발생하는 석탄 기반 환원 반응의 제거와, 전기로 전력공급의 재생

에너지 전환 효과가 복합적으로 작용한 결과이다(USGS, 2024; UNEP IRP, 2020).

- 초전도체(Superconducting wire, tape) 재료로 사용되는 Nb, V 합금계 금속은 높은 전기전도성과 자기장 안정성이 요구되어, 불순물 농도가 수 ppm 이하로 관리된다. 이러한 재료의 재활용은 정밀한 화학적 정제가 필수적이며, 일반적으로 산침출(Acid Leaching)-용매추출(Solvent Extraction, SX)-전해정제(Electrorefining)의 3단계 습식 공정을 통해 이루어진다.
- 산침출 단계에서는 HCl-HNO₃ 혼합산이 주로 사용되어 Nb, V 산화물을 용해시키고, 이후 선택적 용매추출을 통해 NbCl₅, V₂O₅ 형태로 분리·농축된다. 최종 단계인 전해정제에서는 99.9% 이상의 고순도 Nb, V 금속이 회수되며, 이 금속은 다시 초전도선 제조공정의 합금소재로 재투입된다.
- 해당 공정은 신규 제련(탄탈라이트, 파이로클로어 광석 정련)에 비해 에너지 소비량을 약 85% 절감하며, 온실가스 배출량 또한 1kg당 약 30~35 kgCO₂eq에서 4~5 kgCO₂eq 수준으로 감소한다. 이러한 절감 효과는 고용점금속 중에서도 Nb이 특히 높게 나타나며, 이는 전해정제의 전력사용 효율 향상과 고농도 용액 재활용기술의 도입에 기인한다.
- 송전망용 합금과 특수 전자부품에 사용되는 베릴륨(Be) 과 비스무트(Bi) 는 독성 및 휘발성 특성 때문에 재활용 과정에서 환경·안전관리 기술이 필수적이다. Be은 진공증류(Vacuum Distillation)와 전해정제(Electrorefining)를 병행하여 회수하며, Bi는 저융점 특성을 이용한 진공증류 및 전해채취(Electrowinning) 공정으로 정제된다. 이들 금속은 공정 중 비산 및 손실률이 높지만, 회수된 금속은 순도 99.99% 이

상으로 회복 가능하다.

- 이와 같은 전력망용 합금금속의 재활용 체계는 ① 에너지 절감, ② 원료 자립도 향상, ③ 산업용 스크랩의 순환자원화라는 세 가지 효과를 동반한다. 특히 고용점 금속군(W, Mo, Nb, V)은 자원 매장지가 제한되어 있어 국내 순환자원 기반 공급망 구축이 전략적으로 중요하다.

라. 수소연료전지 및 수전해

- 수소경제 핵심설비인 연료전지(Fuel Cell) 및 수전해 시스템(Electrolyzer)은 백금족금속(PGMs: Pt, Pd, Rh, Ir, Ru)과 티타늄(Ti) 등의 고가·희소금속을 주요 구성원소로 포함한다. 이들 금속은 촉매활성, 전기화학적 내구성, 내열·내식성 등의 특성을 지녀, 수소 생산·이용 전 과정에서 핵심적인 역할을 담당한다.
- 그러나 PGM의 원광 매장량은 지구상에 극히 제한적이며, 남아프리카 공화국과 러시아 등 소수 국가에 편중되어 있어 공급망 리스크가 높다. 이에 따라 폐연료전지 및 수전해 촉매로부터의 고효율 재활용 기술 확보는 수소산업의 지속가능성을 좌우하는 핵심 과제로 대두되고 있다.
- 재활용 대상 금속은 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 로듐(Rh), 이리듐(Ir), 루테튬(Ru), 티타늄(Ti) 등으로 구분되며, 각각의 회수공정은 소재 형태와 결합 상태에 따라 차별화된다.
- 우선 전처리 단계에서는 사용이 종료된 막전극조립체(MEA, Membrane Electrode Assembly)를 분리하고, 고분자 전해질막(PEM) 및 바인더에 포함된 유기물을 열분해(Thermal decomposition) 방식으로 제거한다. 이 과정은 유기 잔사를 제거하여 금속 촉매층을 노출시키며, 이후 침출 효율을 극대화하기 위한 필수 단계로 작용한다.

- 화학처리 단계에서는 고귀한 백금족금속을 용출하기 위해 왕수(Aqua regia) 또는 $\text{HCl-H}_2\text{O}_2$ 혼합산계 용액을 사용한다. 이를 통해 Pt, Pd, Rh 금속이 금속염 이온 상태로 전환되며, 이어지는 용매추출(Solvent Extraction, SX) 과 침전(Precipitation) 단계를 거쳐 선택적으로 분리·농축된다. 회수된 금속은 99.95% 이상의 고순도로 정제되며, 회수율은 평균 95~98% 수준에 달한다. 이러한 고효율 습식제련공정은 Johnson Matthey(영국), Heraeus(독일), Tanaka Precious Metals(일본) 등 세계 주요 귀금속 기업에서 상용화되어 있다.
- 한편, 이리듐(Ir) 과 루테튬(Ru) 은 수전해 촉매층에서 산화형태로 존재하므로 별도의 공정이 필요하다. 해당 금속은 용융-산용해-재침전-정제(Melting-Acid dissolution-Repurification-Purification) 단계를 거쳐 고순도 산화물 또는 금속 형태로 회수된다. 특히 Ir은 귀금속 중에서도 매장량이 극히 적고, PEM 수전해(PEM Electrolysis) 시스템에서 핵심 촉매로 사용되기 때문에, 회수율 향상 및 재생촉매 활용에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 최근에는 대면적 수전해 스택에 적용 가능한 촉매재생(Refurbishment) 및 재도포(Re-deposition) 기술이 개발되어, 폐MEA로부터 직접 Ir, Ru를 재활용하는 공정이 실증 단계(TRL 7~8)에 진입하였다.
- 환경적 측면에서, 귀금속 재활용은 신규 제련 대비 압도적인 탄소감축 효과를 보인다. 국제에너지기구(IEA, 2023)와 Johnson Matthey(2022)의 분석에 따르면, 백금(Pt) 1kg을 광석으로부터 정련할 경우 약 25~30 tonCO₂eq의 온실가스가 배출되지만, 재활용공정을 통해 동일량의 Pt을 회수할 때의 배출량은 약 1.5 tonCO₂eq 이하로 감소한다. 이는 약 95% 이상의 탄소감축 효과에 해당하며, 이리듐(Ir) 또한 신규 제련 대비 90~95% 수준의 GHG 감축 잠재력을 지닌다. 이

러한 수치는 단일 금속 기준으로도 매우 높은 저감효과를 의미하며, 수소산업 전주기에서의 탄소발자국(LCA) 저감을 실질적으로 견인할 수 있음을 시사한다.

마. 반도체·디지털·첨단산업

- 반도체, 디지털 디스플레이, 항공·방산 등 첨단산업은 고성능·고신뢰성·경량화를 위해 다양한 희소금속(Critical and Strategic Metals)을 사용한다.
- 특히 갈륨(Ga), 인듐(In), 게르마늄(Ge), 안티몬(Sb), 비소(As), 레늄(Re), 티타늄(Ti), 유로퓸(Eu), 테르븀(Tb) 등은 반도체 회로, 화합물 반도체, 디스플레이, 발광체, 항공엔진 등 각기 다른 물성(전기전도성·발광특성·고온내열성)을 부여하는 핵심 금속으로 분류된다.
- 이들 금속은 제품단위 사용량이 적더라도 단가가 높고 정제 난이도가 커서, “소량고가형 희소금속”으로 불리며 재활용 경제성이 매우 높다. 또한 광석 대비 금속함량이 낮은 1차 제련공정에 비해, 산업부산물·폐제품으로부터의 회수는 에너지 효율성과 환경효과가 탁월하다(IEA, 2024).

① 금속 구성

※ 갈륨(*Ga*), 인듐(*In*), 비소(*As*), 안티몬(*Sb*)

- ✓ 이들 4개 금속은 화합물 반도체(Compound Semiconductor) 제조의 기본 원소이다. 대표적인 조합은 갈륨비소(GaAs), 인듐인화(InP), 인듐안티모니드(InSb) 등으로, 기존 실리콘 기반 반도체(Si)에 비해 고주파 특성, 고온 안정성, 전력 효율이 우수하다. 따라서

RF 칩, 광통신 모듈, 전력반도체, 5G 통신 부품, 위성용 송수신 소자 등에 필수적으로 사용된다.

- ✓ 이들 금속은 미량이지만 고순도(6N 이상)가 요구되며, 재활용 측면에서도 화합물 파편·증착 타깃 스크랩이 중요한 회수원으로 평가된다.

※ 제르마늄(Ge)

- ✓ 제르마늄은 광통신, 적외선 센서, 고효율 태양전지(다층 셀)에 적용되는 핵심 광소재이다. 특히 Si-Ge 기반 혼성 반도체, CIGS 박막 태양전지, IR 검출기에 필수적이며, 투명도와 전도성을 동시에 요구하는 광학용 정밀소재로도 사용된다.
- ✓ Ge는 광통신망·우주용 센서의 확산과 함께 수요가 빠르게 증가하고 있으며, 중국·러시아 편중도가 높아 대체소재 및 재활용 전략 수립이 시급한 금속이다.

※ 유로퓸(Eu), 테르븀(Tb)

- ✓ 유로퓸과 테르븀은 형광체(Phosphor) 및 LED 백라이트 발광 원소로, 적색(Eu_2O_3)과 녹색(Tb_4O_7) 형광체를 구성한다. 디스플레이·조명·레이저·의료용 장비 등 다양한 광학부품에 사용되며, 재활용 측면에서는 폐 LCD·LED 모듈에서 형광체 분리 및 회수 공정이 핵심이다.
- ✓ 최근 희토류 공급망 불안정으로 인해 폐형광체의 습식 정제 및 회수기술이 유럽·일본에서 상용화 단계(TRL 8~9)에 도달했다.

※ 레늄(Re), 티타늄(Ti)

- ✓ 레늄과 티타늄은 항공·방산·에너지 산업의 고내열·경량 합금 소재

로 분류된다. 레늄은 니켈계 초합금(Ni-Re Alloy)의 주요 강화원소로, 항공기·가스터빈 블레이드, 로켓엔진 등에 사용된다. 티타늄은 경량 고강도 구조재로서 항공기, 군수장비, 의료용 임플란트 등에 적용된다.

- ✓ 이들은 모두 재활용 가치가 매우 높으며, Ti는 진공아크재용해(VAR), Re는 암모늄퍼렌네이트(APR) 침전법을 통해 고순도 회수가 가능하다.

② 회수 기술

[표 3-7] 반도체 금속군 별 회수원 특징 및 비교

구분	금속	주요 회수원(Source)	대표 재활용-정제 공정	회수율(%) / 순도(%)	TRL	주요 특징 및 비교
① 화합물 반도체군						
	갈륨 (Ga)	반도체 타깃, GaAs 웨이퍼 스크랩, 박막 잔재	산/알칼리 용해 → 용매 추출(D2EHPA) → 전해 정제(EW)	90~95 / 99.999 (5N)	8~9	습식공정 중심, 화합물 해리 후 금속형태 회수. ITO-GaN 페타깃도 적용 가능
	인듐 (In)	ITO 타깃, 페 디스플레이, CIGS 셀, 납땜스크랩	질산침출-옥살산침전-전해정제	95~98 / 4N~6N	9	고순도 산화물→금속 In 회수, 친환경 용매(DES) 연구 활발
	비소 (As)	GaAs, InAs 스크랩	열분해-산화환원-침전-건식회수	70~80 / ≥99.9	7	독성물질로 처리 주의 필요, 폐가스 정제 필수
	안티몬 (Sb)	InSb, Pb-Sb 합금, 납축전지 잔재	건식제련(용융-정제) 또는 염화-환원-전해공정	85~95 / ≥99.9	8	재활용 기술 성숙, 주로 배터리 산업 중심. 반도체용은 초고순도 정제가 필요
② 광학·태양광 소재군						
	게르마늄 (Ge)	광섬유, 렌즈, IR 센서, 태양전지 웨이퍼	산화-염화-증류-환원 정제 (GeO ₂ →GeCl ₄ →Ge)	95~98 / 6N	8~9	고온 진공증류 통한 고순도화, 페렌즈·웨이퍼 재활용 활발
③ 형광체·발광소재군						
	유로퓸 (Eu)	페형광체, LED 칩, CRT 백라이트	질산침출-용매추출-옥살산침전-열분해	85~95 / ≥99.9	8~9	희토류 습식회수의 대표사례, 유럽·일본 상용화 단계
	테르븀 (Tb)	페형광체, 형광램프	질산침출-용매추출-탄산침전	85~90 / ≥99.9	8~9	형광체 분리 난이도 높음, REE 분리·정제 기술과 연계됨
④ 항공·방산 합금군						
	레늄 (Re)	초합금 스크랩, 터빈 블레이드, 촉매 잔재	용해-암모니아 용출 → AP R (Ammonium Perrhenate) 침전-환원	90~95 / ≥99.99	9	APR 공정으로 금속 Re 재생, 1차 제련 대비 CO ₂ 95% 감축
	티타늄 (Ti)	Ti-Ti-6Al-4V 스크랩, 항공부품, 분말재	진공아크재용해(VAR) 또는 전자빔용해(EBCHM)	95~98 / ≥99.9	9	고순도 정제, 불순물(O,N,H) 제거 우수, 항공급 재료로 재사용 가능

- ✓ 갈륨·인듐(Ga·In): 페타깃 및 박막소재로부터 회수되는 고부가 금속으로, 산성 침출 + 용매추출 공정이 주류이며, 친환경 용매(DES, IL) 적용 시 폐수감소 80%임, 회수금속은 4N~6N급으로 재증착 타깃에 재투입 가능
- ✓ 비소·안티몬(As·Sb): 독성·揮발성으로 인해 건식 공정과 폐가스 정제 동시 필요, Sb는 배터리 및 반도체용으로 회수 가치 높음
- ✓ 게르마늄(Ge): $\text{GeO}_2 \rightarrow \text{GeCl}_4 \rightarrow \text{Ge}$ 순으로 정제하는 고순도 회수체계 구축, 진공증류 기반 회수율 98%, 광학용 재활용 활성화 중
- ✓ 유로퓸·테르븀(Eu·Tb): 희토류 습식회수 대표군. 폐형광체에서 침출-침전-열분해로 산화물 회수, EU·일본에서 TRL 8~9 상용화, 국내는 실증단계
- ✓ 레늄(Re): 초합금 스크랩을 암모니아 용액에 용해 → APR 침전 후 수소환원, 회수금속은 99.99% 이상 순도, 신규 제련 대비 CO_2 95% 절감
- ✓ 티타늄(Ti): VAR 또는 EBCHM을 통한 불순물 제거형 재용해 공정, 항공기·의료용 소재로 재활용 가능, 고순도 금속으로 복귀 가능

[표 3-8] 반도체 금속군 별 회수율

금속군	평균 회수율	평균 순도	에너지 절감효과	TRL 수준
반도체·광통신 (Ga, In, Ge, As, Sb)	90~96%	4N~6N	70~80%	8~9
형광체·LED (Eu, Tb)	85~95%	≥99.9%	60~75%	8~9
항공·방산 (Re, Ti)	90~98%	≥99.99%	80~90%	9

3. 재활용 기술 탄소저감효과 분석

- 인듐(In) 재활용: 1kg 재활용 시 신규 제련 대비 약 75 kgCO₂eq의 탄소감축 효과가 발생하며, 이는 1차 제련 시 고온 증류 및 정제에 소요되는 전력·화학약품 사용량이 크게 감소하기 때문이다.
- 레늄(Re) 재활용: 신규 제련(몰리브덴 광석 부산물 정제)은 1kg당 20~25 tonCO₂eq의 온실가스를 배출하지만, 재활용 시에는 약 1~2 tonCO₂eq에 불과하여 90~95%의 감축 효과를 보인다(EU JRC, 2023).
- 티타늄(Ti) 재용해: VAR/EBCHM 재활용 공정은 1차 제련 대비 에너지소비 70% 감소, 온실가스 배출 80% 절감 효과를 보이며, 강원권과 같은 저탄소 전력망 지역에서는 탄소발자국이 추가로 낮아질 수 있다.

[표 3-9] 재련기술 별 탄소감축 효과 분석

구분	대표 기술	금속군	TRL	회수효율 (%)	CO ₂ 감축효과	기술특성
습식제련	H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ 침출-용매추출-전해 정제	Li, Ni, Co, Mn	8-9	90-98	70-90%	고순도·대규모
건식제련	고온 용융-슬래그분리	Co, Ni, Cu	8	80-90	60-70%	에너지다, Co합금
수소분쇄법	HDDR, 자석분말 재활용	Nd, Dy, Pr	7-9	85-95	60-70%	REE특화
이온액체 공정	IL, DES, 친환경 침출	Li, Co, REE	5-7	80-90	80-90%	저탄소 공정
귀금속 회수	용매추출-이온교환	Pt, Ir, Ru, Pd	8-9	90-98	90-95%	고부가 산업
전해정제	전해채취-재용해	Cu, Al, In	8-9	95-99	85-95%	범용성 높음

- 희소금속 재활용 공정은 원광 채굴-정련 과정을 생략함으로써, 평균적

으로 60~95%의 에너지 절감 효과를 달성한다. 예를 들어, 니켈(Ni) 및 코발트(Co)의 1차 생산 에너지 소비량은 약 200~250 MJ/kg 수준이나, 습식제련 기반 재활용 공정에서는 15~30 MJ/kg 수준으로 감소한다(IEA, 2023; USGS, 2024). 백금족금속(PGMs)의 경우, 채굴 단계의 광석 품위가 3~5 g/t에 불과해, 1 kg Pt 생산 시 평균 30 tonCO₂eq 이상의 배출이 발생한다. 반면, 폐연료전지 촉매에서 회수한 Pt는 동일 단위당 1.5~2.0 tonCO₂eq 수준으로, 약 95%의 감축 효과를 나타낸다.

- 습식제련(Hydrometallurgy) 은 희소금속 회수 공정 중 가장 높은 순도와 선택성을 보유하고 있으며, 특히 이온교환(IX), 용매추출(SX), 전해정제(EW) 단계를 연속화함으로써 99.9~99.99% 수준의 고순도 금속을 회수할 수 있다.
- 최근에는 친환경 용매계(이온액체, Deep Eutectic Solvent, 유기산계 침출액)가 전통적 산용매(H₂SO₄, HCl 등)를 대체하면서, 공정 중 발생하는 폐수 및 슬러지의 COD·TDS를 80% 이상 저감하고 있다(Lee et al., 2022; Binnemans et al., 2023).
- 특히 리튬이온배터리 및 연료전지 촉매의 경우, 친환경 습식제련을 적용할 때 공정별 온실가스 배출량은 기존 대비 70~90% 감소, 에너지 집약도(Energy Intensity) 또한 40~60% 절감되는 것으로 보고된다.

- 대표 금속별 1차 생산 대비 재활용 시 탄소감축률(%)은 다음과 같다.

[표 3-10] 금속군 별 탄소감축률

금속군	주요 금속	감축률(%)	주요 근거
배터리금속	Li, Ni, Co, Mn	70~90	IEA (2024)
귀금속	Pt, Pd, Ir, Rh	90~95	Johnson Matthey (2023)
희토류	Nd, Dy, Tb	60~70	EU JRC (2023)
반도체금속	In, Ga, Ge	70~80	Fraunhofer ISI (2022)
합금금속	W, Mo, Ti, Nb	75~85	UNEP IRP (2020)

- 이를 감축량(tCO_2eq 기준)으로 환산하면, 1톤의 Li-Ni-Co-Mn계 블랙 매스 재활용 시 약 4.8~6.0 tonCO_2eq , 1kg의 Pt 재활용 시 약 28~30 tonCO_2eq 의 탄소저감 효과가 발생한다.

제4장

희소금속 함유 폐기물 관리체계
및 법제도 검토

제4장

희소금속 함유 폐기물 관리체계 및 법제도 검토



제1절 희소금속 함유 폐기물 법제도 분석

- 희소금속은 산업 전반에 걸쳐 미량이지만 필수적으로 사용되며, 특히 배터리, 자석, 반도체, 촉매, 태양광 모듈 등에서 다량의 폐기물 형태로 배출된다.
- 이러한 희소금속 함유 폐기물(End-of-Life Products, EoL Waste)은 재활용을 통해 고부가가치를 창출할 수 있는 잠재 자원이지만, 현행 법·제도 체계에서는 대부분이 일반 금속스크랩 또는 지정폐기물로 분류되어, 희소금속의 회수 및 순환이 체계적으로 관리되지 못하고 있다.
- 따라서, 본 장에서는 국내외 폐기물 관리체계의 현황을 검토하고, 희소금속 회수·재활용 확대를 위한 법적 기반과 제도적 보완 방향을 제시한다.

1. 국내 법·제도 현황

가. 법적 분류 및 적용 체계

- 희소금속 함유 폐기물은 현행 법체계에서 별도의 독립된 관리대상으로 규정되어 있지 않으며, 다음과 같이 일반폐기물·지정폐기물·자원순환 대상물질의 일부로 간접 관리되고 있다.

1) 「폐기물관리법」 및 시행령

- 법적 성격:
「폐기물관리법」은 환경오염 방지와 공중보건 보호를 주목적으로 하는 사후적 관리 중심의 환경기본법으로, 폐기물의 적정 처리·운반·보관·처리시설 설치 및 사후관리에 중점을 두고 있으며 즉, 본래의 입법 취지는 ‘유해물질로부터의 환경·인체 보호’이지, ‘자원 회수’나 ‘재활용 산업 육성’은 부차적 기능에 머물러 있는 실정이다.
- 관련 조항 및 적용 대상:
동법 시행령 제8조(지정폐기물의 범위) 및 별표 1에서는 중금속(Ni, Co, Pb, Cd, Hg, Cr 등)이 함유된 산업폐기물을 지정폐기물로 분류하고, 이들은 운반·보관·처리 전 과정에서 엄격한 허가와 전산관리(K-eco 올바로시스템 등)를 요구받음에 따라 폐배터리, 폐자석, 폐축매, 전자부품 스크랩 등 희소금속 함유 폐기물도 대부분 ‘지정폐기물’로 취급되고 있다.

◦ 특징 및 한계:

「폐기물관리법」은 폐기물의 ‘유해성’을 기준으로 규제체계를 설계하므로, 희소금속이 고부가가치 자원임에도 불구하고 ‘오염원’으로 간주되는 구조이며, 따라서 리튬·코발트·니켈·희토류·백금족 등은 자원적 가치보다 독성물질 관리체계 안에서 규제되어 회수·재활용 공정 진입 시 다음과 같은 구조적 제약이 발생한다.

- 운반 및 보관 단계에서 ‘폐기물 운반업 허가’ 및 ‘이동경로 추적의무’ 부과 → 소규모 회수기업 진입 어려움
- 정련·재활용 시설은 ‘지정폐기물 처리시설’로 분류되어 환경영향평가·시설기준·폐수기준 등 과도한 규제 적용
- 희소금속이 주성분임에도 ‘재활용 자원’이 아닌 ‘위해물질’로 분류되어 세제·금융 인센티브 미적용

◦ 문제점 및 개선 필요성: 이러한 규제구조는 희소금속 재자원화 산업의 진입장벽으로 작용하며, 결과적으로 국내 자원회수율을 낮추는 요인이 되며, 특히 희토류, 귀금속(PGM), 텅스텐, 코발트, 니켈 등은 국제적으로 Critical Minerals로 분류되어 있음에도, 한국에서는 여전히 ‘지정폐기물’ 관리 체계 내에 묶여 있음, 이는 자원회수와 환경보호 간의 균형이 미비한 전형적 사례로, 향후 「폐기물관리법」의 자원순환형 전환이 필요한 실정이다.

2) 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률(EPR 제도)」

◦ 법적 성격:

이 법은 생산자책임재활용제도(EPR: Extended Producer Responsibility)에 근거하여, 제품의 제조·수입자가 제품의 사용 후 회수 및 재활용 의무를 부담하도록 한 순환경제형 제도이며 즉, ‘제품의 생산~소비~폐기 전 과정’을 생산자 책임 범위로 확장하여, 폐제품의 회수·재활용 체계를 시장 내부에서 작동시키는 대표적인 자원순환법이다.

◦ 주요 조항: 제9조~제12조는 EPR의 핵심으로,

- 제9조: 회수 및 재활용 의무 부과
- 제10조: 회수·재활용 실적보고 및 평가
- 제11조: 위탁재활용·공동이행제도
- 제12조: 이행의무 미이행 시 부담금 부과

등을 규정하고 있으며, 시행령 별표2에서는 구체적인 EPR 대상 품목(폐가전, 폐자동차, 폐전자, 폐휴대폰 등)을 명시하고 있다.

◦ 적용 품목 및 범위:

현재 제도의 적용대상은 폐가전·폐자동차·사용후 배터리·전기전자부품 등으로, 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등 일부 희소금속이 간접적으로 포함되어 있다. 그러나 실질적으로는 플라스틱·철·알루미늄 등 ‘주재료 재활용률’ 중심으로 관리되고 있어, 제품 내 희소금속의 회수·정제는 제도상 고려되지 않는다.

◦ 특징 및 한계: EPR 제도는 제품 단위의 회수·재활용 의무율을 규정하

지만, ‘금속 회수율(Metal Recovery Rate)’, ‘희소금속 함유제품의 분류 및 분리해체 기준’ 등은 부재함에 따라, 제품이 회수·분쇄되어 ‘재활용 실적’으로 보고되더라도, 희소금속(예: 희토류, 게르마늄, 인듐, 텅스텐, 백금족 등)이 실제로 회수되지 않아 “양적 재활용 중심의 형식적 순환”에 그치는 문제가 있다.

◦ 문제점 및 개선 필요성:

① EPR 대상 품목의 제한성

- 희토류 자석, 반도체 웨이퍼·타겟, 태양광 모듈, 풍력터빈, 산업용 배터리 등은 현재 EPR 적용 제외
- 유럽(EU)은 2024년부터 PV 모듈과 산업용 배터리도 EPR 의무화(EU Battery Regulation, WEEE Directive 개정), 한국은 후속 입법 필요

② 실적기준의 한계

- 현행 제도는 “재활용량(kg 단위)” 중심이므로, 고순도 금속 회수율·정제율을 평가하지 않음, 따라서 고부가금속이 폐자원으로 유출되거나 해외 재활용시장으로 이동

③ 제도 개선 방향

- 환경부-산업부 협력으로 ‘EPR+금속회수율’ 복합지표 도입 필요(예: EU형 Metal Recovery KPI)
- ‘희소금속 함유제품 분류표’ 신설 및 희토류 자석·배터리·태양광 모듈 등 고위험 품목의 단계적 EPR 포함 추진
- 회수·재활용 이행업체의 금속 정량분석·공인시험 지원체계 마련(예: 공인시험센터)

3) 「자원순환기본법」

- 법적 성격:
「자원순환기본법」은 폐기물 감량, 재활용 확대, 그리고 순환경제(circular economy) 전환을 위한 국가 기본법으로, 모든 산업 부문에서 ‘자원의 발생 억제-재사용-재활용-에너지 회수-최종처분 최소화’를 체계적으로 추진하기 위한 근거를 제공함
- 주요 조항:
 - 제22조(순환이용 촉진대상물질 지정)에 따라, 재활용 가치가 높거나 환경적 이익이 큰 폐기물을 ‘순환이용 촉진대상물질’로 지정할 수 있으며, 이에 대해 정부(환경부)는 생산자·수입자에게 재활용·회수·분리보관 등 의무조치를 부과할 수 있음
 - 또한, 제27조(자원순환 성과관리)에서는 산업별 자원순환 성과를 측정·평가하고, 재활용 실적 우수 사업자에 대한 인센티브 제공 근거를 마련하고 있음
- 내용 및 적용 가능성:
 - 현재 ‘순환이용 촉진대상물질’에는 철·비철금속, 폐플라스틱, 폐유 등이 포함되어 있으나, 리튬·니켈·코발트·망간·희토류·텅스텐 등 희소금속 함유 폐기물은 별도 지정 사례가 없는 실정임
 - 그럼에도 불구하고, 이 조항은 향후 희소금속 함유 폐기물(폐배터리, 폐자석, 폐촉매, 폐모듈 등)을 법정 ‘순환이용 촉진대상물질’로 지정할 수 있는 명확한 법적 근거를 제공함
 - 또한, 「국가자원안보 특별법」과 연계할 경우, 희소금속 재활용 사업이 ‘자원순환-자원안보 이중 체계’에서 동시 지원될 수 있음

- 예를 들어, 폐배터리의 블랙매스나 초경합금 스크랩은 「자원순환기본법」상 촉진대상물질로 지정되어 환경부 인허가·재활용 인증 지원을 받고, 동시에 「국가자원안보 특별법」상 재자원화산업클러스터 지정으로 산업부 재정·기술 지원을 받을 수 있음
- 문제점 및 개선방향:
 - 현재는 금속별 세부 지정 기준과 회수율 목표가 부재하고, 시행령 수준에서의 구체적 절차도 미비하여 실효성이 낮음
 - 따라서 향후 강원특별자치도는 폐배터리·폐자석·폐촉매·폐모듈 등 희소금속 함유 폐기물의 순환이용 촉진대상물질 지정 건의를 중앙정부에 제안하고, 도 차원의 ‘희소금속 순환이용 촉진 시범사업’을 운영함으로써 실질적 제도 개선의 모델로 삼을 수 있음
 - 이를 통해 「국가자원안보 특별법」과 연계한 ‘희소금속 자원순환-자원안보 통합체계’의 실증 거점으로 발전할 수 있을 것임

4) 「광물자원법」 및 「국가자원안보 특별법」

- 법적 성격:

「광물자원법」이 광물의 탐사·개발·관리 등 전통적 자원개발 중심의 법체계라면, 2025년 10월 1일 제정·시행된 「국가자원안보 특별법」은 국가 차원의 전략광물 확보 및 공급망 안정화를 목표로 하는 상위 개념의 특별법임, 이 법은 광물뿐 아니라 핵심소재·부품, 그리고 재자원화된 광물까지 포함하여 ‘자원안보’의 범위를 확장하고 있음
- 내용:
 - 「국가자원안보 특별법」은 산업통상자원부를 중심으로 ① 핵심자원의

안정적 수급 및 비축체계, ② 비상시 동원체계(비상동원광산·시설), ③ 재자원화산업 클러스터 지정 및 지원, ④ 핵심공급기관·핵심수요기관 지정제도, ⑤ 통합정보시스템 운영(가격·재고·비축량 관리) 등을 주요 골자로 함

- 특히 제18조에서는 ***“핵심자원의 회수·재활용 산업 육성”***을 국가의 책무로 명시하며, 재활용·정련·소재화 기술개발과 인프라 구축에 대한 재정·기술·금융 지원 근거를 포함하고 있음
- 또한, 시·도지사에게 지역자원안보 시책 수립과 조례 제정 권한을 부여하여 지방정부 차원의 재자원화 정책 추진도 가능하게 함
- 적용 가능성:
 - 이 법은 기존 「광물자원법」이 미비했던 ‘재활용 광물’의 법적 지위를 보완하고, 희소금속을 포함한 폐배터리·자석·태양광 등에서 발생하는 희소금속 함유 폐기물을 “2차 광원(secondary resource)”으로 간주할 수 있는 법적 근거를 마련함
 - 이에 따라, 강원특별자치도는 텅스텐(영월 상동), 희토류 자석(풍력·EV 모터), 배터리(ESS·EV), PGM(축매·연료전지), PV(태양광 모듈) 등 5대 전략 광종에 대해 「국가자원안보 특별법」상의 ‘재자원화 산업클러스터 지정’, ‘핵심공급기관 지정’, ‘비상동원광산 지정’ 등의 제도적 지원을 직접 연계할 수 있음
 - 또한, 국가 자원안보 기본계획(5년 단위)에 도 차원의 재자원화 사업을 반영시킬 수 있어, 향후 순환경제·탄소중립 정책과 통합된 ‘희소금속 재자원화 거버넌스’ 구축이 가능할 전망이다

나. 산업별 배출 및 회수 구조

[표 4-1] 산업군 별 폐기물 배출 형태 및 문제점

산업군	주요 폐기물 형태	관리 주체	문제점
이차전자·EV 산업	사용후 배터리, 블랙매스	EPR 대상이나 폐기물관리법상 지정폐기물로도 중복 관리	폐기물-자원 경계 불명확, 이송·보관 절차 복잡
풍력·자석 산업	영구자석 스크랩, 터빈 해체 부품	비유해 금속스크랩으로 분류	희토류 포함 불구, 일반 재활용업체 처리
반도체·전자 산업	ITO 타깃, 웨이퍼 폐기물	산업폐기물로 신고·보관	귀금속 회수 허가 절차 복잡, 회수율 낮음
태양광 산업	폐모듈	환경부 EPR 대상(2023~)	Ag-In-Ga 등 회수기준 미비, 표준화 부족

- 국내 희소금속 주요 산업별 관리주체·법적 분류·회수경로가 상이하여 희소금속 회수율은 실질적으로 10~30% 수준에 머물고 있으며(환경부, 2024), 특히, 폐배터리와 폐모듈은 EPR 대상이지만, 회수금속의 품질·등급 관리기준이 부재하여 국내에서 정제·소재화까지 이어지지 못하고 있는 실정이다.

2. 해외 제도 및 정책 비교

가. 유럽연합(EU)

- 주요 제도: EU Circular Economy Action Plan (2020), Critical Raw Materials Act (CRMA, 2023)
- 핵심 내용: CRMA에서 ‘핵심광물(Critical Raw Materials)’을 지정하고, 각 회원국에 대해 최소 회수율(Minimum Recovery Target)을 법

적으로 의무화 하였다.

- 리튬 50%, 코발트 90%, 니켈 90%, 희토류 60% 이상(2030 목표)
- 폐배터리, 자석, 전자폐기물 등 희소금속 함유 제품을 별도 관리대상(EoL Products) 으로 분류
- 재활용 공정 전 단계(수거-분리-정제)를 “자원공급망 단계(Supply Chain Stage)”로 인정
- 폐기물에서 재활용 가능한 금속을 “2차 원료(Secondary Raw Material)”로 재분류하여, 환경규제 대상이 아닌 산업자원으로 관리
- 시사점: EU는 “폐기물 → 자원”의 법적 지위를 명확히 구분함으로써, 희소금속 회수산업을 환경규제 영역이 아닌 산업정책의 일부로 통합하였다.

나. 일본

- 주요 제도: 「소재순환자원촉진법」, 「자동차재활용법」, 「도시광산(urban mining) 전략」 및 JOGMEC 정책
- 핵심 내용: 폐가전·폐자동차·폐배터리 등에서 희소금속을 회수하는 인증 재활용업체 제도(End-of-Life Certification) 운영, 재활용업체가 정부의 인허가를 통해 희소금속 회수·정제를 수행할 수 있도록 제도화
 - JOGMEC(일본석유천연가스금속광물기구)은 희소금속 스크랩을 “국가비축대상 자원”으로 인정하여 관리
 - “도시광산(urban mine)”을 국가 전략의 일환으로 규정하고, 재활용

금속을 “준-국가자원(Semi-Strategic Stockpile)”으로 관리

- 시사점: 일본은 희소금속을 단순 폐기물이 아닌 국가전략자원으로 제도적 지위 부여에 성공했다. 또한 회수업체 인증제와 재활용소재 품질기준을 마련하여, “산업용 소재로의 재투입”이 가능한 법적 경로를 확보했다.

다. 미국

- 주요 제도: 「국방생산법(Defense Production Act, DPA)」, 「국가핵심광물전략(National Strategy for Critical and Strategic Minerals)」, 「에너지부(Department of Energy, DOE) Critical Materials Program」, 「USGS Critical Minerals List」
- 핵심 내용:
 - ① 국가자원안보 기반의 ‘전략광물 관리체계’ 구축
 - 미국은 희소금속을 ‘환경·폐기물’의 문제가 아닌 국가 안보자원(National Security Resource)으로 규정한다.
 - 「국방생산법(DPA)」 제III편(Title III)은 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co), 희토류(REE), 그래파이트(C) 등을 ‘국가 방위산업 핵심물질(Critical Defense Materials)’로 지정하고, 생산시설 확충, 공급망 투자, 재활용 기술개발에 연방자금을 직접 투입할 수 있도록 명시하고 있다.
 - ② ‘국가핵심광물전략’(National Strategy for Critical and

Strategic Minerals, 2021)

- 백악관·내무부·에너지부 공동 수립
- 목표: (1) 핵심광물 채굴·정련 공급망의 리스크 완화, (2) 재활용 및 재사용(Recycling & Reuse) 역량 강화, (3) 동맹국과의 공급망 협력
- 이를 위해 DOE 산하 Critical Materials Institute (CMI) 및 NREL(국립재생에너지연구소)을 중심으로 폐배터리, 전자폐기물, 모터·자석 등으로부터 희소금속을 회수하는 공정기술(Direct Recycling, Hydrometallurgy, Electrorefining) 을 상용화 단계로 발전시키고 있음

③ DOE 및 USGS 재활용 프로그램

- DOE: Battery Recycling Prize, Lithium-Ion Battery Recycling R&D Center (ReCell Center) 운영 → 폐배터리 리튬·코발트 회수 실증
- USGS: Critical Minerals List(2024년 기준 50종)을 매년 갱신하고, 각 광종별 ‘Recycling and Substitution Potential’(재활용 및 대체 가능성)을 병기함으로써 재자원화 기술개발을 국가 자원보안 전략의 일환으로 공식화

④ 국가비축(National Defense Stockpile, NDS)

- 희토류, 텅스텐, 티타늄, 바나듐, 백금족(PGM) 등을 전략비축대상(Strategic and Critical Materials) 으로 지정하여 신규 채굴·재활용산업에서 확보된 금속을 비축재로 편입할 수 있는 제도 운용을 하

여 민간 재활용업체가 정부의 ‘공급망 계약(Supply Chain Agreement)’을 통해 재생금속을 비축재로 공급할 수 있는 법적 근거가 마련되어 있음

- 시사점:
미국은 희소금속을 단순한 산업소재가 아니라 국가안보·산업경쟁력 확보를 위한 전략자원으로 명확히 규정하고, ① 「국방생산법(DPA)」을 통한 재활용산업 직접 지원, ② DOE·USGS를 중심으로 한 공정기술·데이터 기반 관리체계, ③ 민간 재활용업체의 국가비축 연계 참여 제도화 등을 구축했다.
- 즉, 일본이 “도시광산(urban mine)”을 국가 내부의 자원으로 제도화했다면, 미국은 이를 “전략비축체계의 일부(Strategic Stockpile Loop)”로 편입하여 재활용금속이 곧 국가비축자원의 신규 공급원(Secondary Strategic Source)으로 기능하도록 제도화하였다.
- 이러한 접근은 강원특별자치도형 희소금속 재자원화 산업이 「국가자원안보 특별법」 체계 안에서 ‘지역단위 재자원화 → 국가자원비축 연계’ 모델로 발전할 수 있는 정책적 근거를 제공한다.

3. 국내 제도적 한계 및 개선 필요사항

[표 4-2] 국내외 폐기물 재활용 법제도 분석 결과 요약

구분	한국	유럽연합(EU)	일본	미국
법적 관리 범주	유해폐기물 중심, 희소금속 별도 정의 부재	핵심광물로 지정, 회수율 법제화	순환자원으로 분류, 인증 재활용업체 제도	전략물자로 분류, 공공-민간 공동회수
회수율 기준	없음	법정 최소 회수율(리튬 50%, Co/Ni 90%)	정부 목표 설정, 인증업체 성과관리	DOE 목표치 설정(금속별 상이)
품질·등급 기준	부재	정제금속 등급 표준(EU Taxonomy)	재활용소재 품질인증제	기술표준 + 세제지원 결합
자원정책 연계성	낮음 (환경규제 중심)	높음 (CRMA 통합)	매우 높음 (국가비축 포함)	매우 높음 (공급망·안보 연계)

가. 희소금속 함유 폐기물의 독립적 정의 부재

- 문제 인식
 - 현행 「폐기물관리법」 체계에서는 희소금속이 함유된 제품이 ‘일반 금속스크랩’ 혹은 ‘지정폐기물(유해폐기물)’로만 분류되어 있음, 이에 따라 리튬·니켈·코발트·희토류·텅스텐 등은 고부가가치 자원임에도 불구하고, 폐기물로 취급되어 운반·보관·처리 전 과정에서 과도한 인허가 절차가 요구되는 실정임

- 정책 한계
 - 이러한 이중적 지위(자원이면서 폐기물)는 회수기업의 진입 장벽(운반업·보관업 허가 등), 재활용 공정의 불필요한 지정폐기물 절차 적용, 산업계의 “비공식적 회수시장” 확산 등의 부작용을 초래함
- 개선 방향
 - 「폐기물관리법」 또는 「자원순환기본법」 내에 ‘희소금속 함유 폐기물 (Critical-Metal-Containing Waste)’을 독립 정의로 신설
 - 희소금속을 포함한 폐제품을 단순한 오염원이 아닌 ‘2차 광원 (Secondary Resource)’으로 명시하고, 환경유해성보다 자원가치를 우선 고려하는 별도 관리체계로 분류
 - “자원화 인정 제도(End-of-Waste)”를 도입하여, 일정 품질 이상의 희소금속은 폐기물 지위를 종료(EoW)시키는 법적 전환 장치 마련

나. 자원화 중심의 분류체계 전환 필요

- 현 구조의 한계
 - 현재 폐기물 관리체계는 “유해성 기준(hazard-based)”에 따라 설계되어 있어, 금속의 가치와 희소성은 고려되지 않음, 예컨대 희토류·백금족 등은 환경독성 기준으로 지정폐기물로 묶이지만, 이는 글로벌 자원안보 관점에서는 ‘전략물자’에 해당함
- 정책 전환 논리
 - 향후 자원안보·순환경제 정책은 “자원가치 기반(value-based)” 분류로의 전환이 필요함

- 이는 「국가자원안보 특별법」 제18조(재자원화산업 육성)과 직접 연계되어, 폐기물 관리법 체계의 하위법령 개정을 통해 ‘유해성 관리 체계’와 ‘자원회수 체계’를 병행 운영할 수 있음
- 구체적 실행방안
 - 「폐기물관리법 시행령」 별표 1에 “희소금속 함유 폐자원” 항목을 신설하고, “재활용 우선 관리대상”으로 지정
 - 지정폐기물 중에서도 자원가치가 높은 폐자원군(예: 폐배터리, 초경합금 스크랩, 폐자석, 폐촉매)은 별도의 “재자원화 우선 처리 절차” 적용
 - 강원특별자치도의 ‘희소금속 재자원화 실증지구’ 내에서는 이러한 품목을 대상으로 규제특례(샌드박스)를 우선 적용해, 전국 확대 전 단계의 정책 실증 거점으로 운영

다. 회수·정제 단계별 표준화 및 인증체계 미비

- 현황 및 문제점
 - 현재 국내에는 회수금속의 순도·등급·함유량 등에 대한 국가표준(KS)이나 공인인증체계가 부재함, 따라서 회수된 금속이 산업용 소재(배터리·자석·촉매 등)로 재투입하려면 해외 제련·정제 기업의 사전 품질검증 절차를 거쳐야 하는 비효율이 발생함
- 정책 제안
 - 「산업표준화법」 및 「자원순환기본법」을 근거로 “재활용금속 품질등급제(Recycled Metal Quality Certification)”를 도입

- 품질 항목: 함유율(%)·순도(ppm)·불순물 한계·LCA 기반 탄소배출량 등
- 인증기관: 한국산업기술시험원(KTL), 한국광해광업공단(KOMIR), 강원TP 내 “희소금속 품질시험센터” 지정 추진
- 이 인증체계를 국가조달·민간 조달에 반영하여 재활용금속 제품의 시장진입 인센티브 제공(공공조달 시 가산점 등)
- EU의 “Secondary Raw Material Certification” 모델을 벤치마킹해 강원형 “Re-Critical Metal 인증제”로 확장 가능

라. EPR 제도의 확대 및 통합 관리 강화

- 현행 한계
 - EPR(생산자책임재활용제도)은 폐가전·폐차·전지 등 일부 품목만을 대상으로 하며, 희소금속이 집중적으로 포함된 제품(희토류 자석, 풍력터빈, 반도체 타겟, 태양광 모듈 등)은 제도권 밖에 있음, 또한 재활용 의무율은 존재하지만, 금속회수율(Metal Recovery Rate, MRR) 항목은 설정되어 있지 않아 희소금속 회수 성과가 실질적으로 반영되지 않음
- 정책 개선 방향
 - EPR 제도 대상의 단계적 확대: 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」 시행령 별표2를 개정하여 희소금속 함유제품군(자석·PV 모듈·반도체·ESS·풍력 부품 등)을 EPR 관리대상에 포함
 - 금속회수율 기반 생산자책임제 도입: 재활용 실적을 단순 ‘중량(kg)’

이 아닌 금속 단위 회수율(%)로 전환하고, 생산자에게 제품 내 희소 금속 회수 성과를 직접 의무화

예: EU Battery Regulation(2024)은 Li·Ni·Co·Cu별 최소 회수율을 법정화(Li 50%, Co/Ni 90% 등)

- EPR-자원안보 통합모델 구축: EPR 제도에서 회수된 폐제품을 「국가 자원안보 특별법」상의 재자원화산업클러스터(강원형 실증지구)로 연계, 회수→전처리→정제→비축까지의 “One-Loop 순환체계”를 구축
- 제도통합 로드맵: 환경부(회수·EPR 관리) ↔ 산업부(정제·자원안보) 간 공동통합지표(회수율·품질·비축량) 설정 및 정보공유 체계 구축 (통합정보시스템 연계)

[표 4-3] EPR 제도의 시사점

구분	현행 제도	한계	개선/활용 방향
관리체계	생산자책임(EPR) 중심	제품단위 실적 위주	금속회수율(MRR) 포함한 정량평가로 전환
적용품목	폐가전·폐차·폐전지	희토류, PV, 반도체 등 미포함	‘희소금속 함유제품’ 단계적 확대
산업연계	환경부 중심, 자원적 관점 미흡	자원안보·순환경제 이중 분절	「국가자원안보 특별법」 연계한 통합 거버넌스 구축
강원도 역할	회수·재활용 실적지정지 부재		EPR 시범지역 + 재자원화산업클러스터 연계

- 한국의 현행 제도는 “유해폐기물 관리 중심”에 머물러 있으며, EU·일본·미국처럼 “희소금속을 자원·전략물자·순환자원으로 인정하는 통합 프

레임”이 부재하다. 따라서 향후 법적 체계 개편의 방향은 ① 희소금속 함유 폐기물의 독립 정의, ② 자원화 중심 분류체계 전환, ③ 회수율·품질 표준화 및 EPR 확대, ④ 산업·환경 법령의 통합적 거버넌스 구축으로 정리된다.

[표 4-4] 정책개선 종합 시사점 분석 결과

구분	현행 문제	개선 방향	기대 효과
법적 지위	희소금속 폐기물의 독립 정의 부재	“희소금속 함유 폐자원” 신설, 자원적 지위 부여	폐기물→자원 지위 전환(EoW)
분류체계	유해성 중심 지정폐기물 체계	자원가치 중심 “재자원화 우선 분류”	회수산업 진입장벽 완화
품질관리	회수금속 표준·인증 부재	재활용금속 품질등급제 도입	재활용 원료의 산업 재투입 촉진
EPR 관리	일부 제품만 대상, 금속회수율 미반영	희소금속 함유제품 포함, MRR 지표 도입	실질적 금속회수 확대 및 ESG 평가 강화
제도 연계	환경부·산업부 이원구조	EPR-자원안보 통합모델 구축	순환경제·자원안보 동시 달성

제 5 장

결론 및 정책제언

제 5 장

결론 및 정책제언



제1절 순환경제 정책 및 제도적 기반 마련을 위한 전략 제언

- 희소금속 함유 폐기물은 배터리, 풍력터빈, 자석, 반도체, 태양광 등 청정에너지 산업 전반에서 다량 발생하고 있으며, 이를 재활용할 경우 자원자립도 제고 및 탄소중립 실현에 크게 기여할 수 있다. 그러나 현행 국내 법체제는 여전히 “유해폐기물 관리 중심”에 머물러 있고, 희소금속이 “전략적 자원”으로서 관리되는 체계는 부재하다. 그 결과, 고부가 금속의 회수율은 낮고, 재활용 산업 진입장벽은 높은 상태다.

[표 5-1] 국내 제도 한계 요약

구분	주요 내용
① 법적 정의 부재	희소금속 함유 폐기물이 독립된 법적 항목으로 존재하지 않음. 대부분 일반금속스크랩 또는 지정폐기물로 분류
② 자원화 중심 법체계 미비	‘유해성 관리’ 중심의 분류로 인해 재활용 산업 활성화 저해
③ 회수율·품질 기준 부재	금속별 회수율, 정제품 품질, 등급에 관한 국가 표준이 없음
④ EPR 제도 한계	배터리·가전 중심에 국한, 풍력·자석·반도체·태양광 미포함
⑤ 법령 간 연계 미흡	폐기물관리법·자원순환기본법·광물자원법 간 역할 분리로 통합적 관리 부재

1. 자원안보 강화 - 희소금속 자급률 제고 및 수입의존도 완화

- 법·제도 개선을 통해 희소금속 함유 폐기물을 자원으로 인식하고 재활용 체계를 구축할 경우, 국내에서 확보 가능한 ‘2차 자원(secondary resource)’의 규모가 크게 확대된다. 이는 기존 해외 의존형 공급망을 보완하고, 전략금속의 자급률(Self-sufficiency)을 높이는 직접적인 효과를 가진다. 특히 리튬, 니켈, 코발트, 네오디뮴 등은 수입 의존도가 90% 이상이며, 국제 공급망 리스크(중국·콩고·인도네시아 집중)에 취약한 구조이다.
- 재활용을 통해 국내에서 일정 비율의 금속을 회수·재사용할 수 있다면, 국가 차원의 자원 비축 및 공급망 안정성이 크게 강화된다. 이는 곧 “희소금속의 국산화”로 이어지며, 중장기적으로는 국가 자원안보의 기반이 된다.

2. 산업경쟁력 확보 - 회수·정제·소재화 산업의 성장 기반

- 법제도 정비를 통해 희소금속 회수·정제·소재화 산업의 법적 근거와 기술표준이 마련되면, 재활용 산업은 단순한 환경 분야를 넘어 신성장 산업군으로 발전할 수 있다. 회수 단계에서는 자동분리, 파쇄, 용융, 습식 정제 기술의 고도화, 정제 단계에서는 고순도 금속 생산 및 불순물 저감 기술, 소재화 단계에서는 리사이클 소재 기반의 2차전자·자석·촉매 제조 기술이 연계되어 국내 기술력 향상과 산업 경쟁력 강화로 이어진다.
- 특히 강원특별자치도와 같은 지역에서는 풍력·ESS·배터리 산업과 연계한 소재 순환형 클러스터를 육성함으로써 지역경제 활성화와 일자리 창출 효과를 동시에 달성할 수 있다.

3. 탄소중립 기여 - 채굴 대비 50~90% 수준의 CO₂ 절감

- 희소금속을 채굴·정제하는 과정은 막대한 에너지와 온실가스를 배출한다. 예를 들어, 리튬 1톤 생산 시 약 15톤의 CO₂가 발생하고, 니켈·코발트의 제련 과정은 화석연료 사용량이 많아 탄소집약도가 높다. 반면 재활용 공정(습식·건식)은 채굴 대비 50~90% 수준의 탄소배출 절감 효과를 보인다. 이로써 희소금속 재활용은 단순한 자원순환정책을 넘어, 국가 탄소중립 전략의 실질적 감축수단으로 기능할 수 있다.
- 또한 회수잠재량 데이터를 기반으로 LCA(Life Cycle Assessment) 분석을 수행하면, 각 금속별·산업별 탄소저감량(tCO₂eq/년)을 정량화할 수 있으며, 이는 K-ETS(온실가스 배출권거래제) 및 탄소중립 실적 보고체계(NIR)에 반영 가능하다.

4. 지역순환경제 촉진 - 산업 밀집 지역 중심의 순환산업벨트 구축

- 법·제도 개선은 중앙정부 차원의 자원정책뿐 아니라, 지자체 중심의 지역 순환경제(Local Circular Economy) 구축을 가능하게 한다. 특히 강원특별자치도는 풍력단지, ESS, 배터리 재활용, 희토류 관련 연구기관이 집적되어 있어 희소금속 재자원화 산업벨트(Rare Metal Recycling Belt) 조성에 최적화된 지역이다.
- 제도 개선을 통해 지자체가 희소금속 회수·정제 인허가 권한, 지역 클러스터 관리체계, 공공-산업-연구기관 협력모델을 독자적으로 운영할 수 있게 되면, “생산-사용-폐기-회수-소재화”가 모두 지역 내에서 선순환되는 지역형 자원순환 모델이 구축된다.

5. 국제 정합성 강화 - 글로벌 공급망·정책 연계 기반 마련

- EU, 일본, 미국 등 주요국은 이미 희소금속 재활용을 국가전략과 법제도에 통합하였다.
 - EU CRMA(2023): 핵심광물 회수율 법정의무화 (Li 50%, Co/Ni 90%, REE 60%)
 - 일본 Urban Mining: 재활용업체 인증제 및 국가비축 연계
 - 미국 Critical Minerals Act(2023): 회수사업자 세제지원 및 전략물자 지정
- 국내 제도 역시 이러한 국제 기준과 정합성을 확보해야, 글로벌 공급

망(GVC) 내에서 ‘재활용 금속의 등가 인정(equal status)’을 받을 수 있다. 즉, 재활용 금속(Recycled Metal) 이 국제 표준시장(LME, EU Taxonomy 등)에서 ‘2차 원료(Secondary Raw Material)’로 인정받아야 국내 산업 경쟁력도 유지될 수 있다.

- 또한 국제 탄소감축 협약(ICA, CBAM) 대응 측면에서도, 재활용 기반 소재 사용은 탄소 국경조정(CBAM) 감면요소로 작용할 수 있다.

[표 5-2] 법제도 개선방향 요약

개선 영역	개선 방향	구체적 내용
① 법적 정의 신설	“희소금속 함유 폐기물(Critical Metal-Containing Waste)” 항목 신설	자원적 가치가 있는 폐기물을 독립 관리대상으로 지정
② 자원화 중심 분류체계 전환	유해성 중심 → 순환자원 중심으로 전환	희소금속 함유 폐기물을 “2차 광원(Secondary Resource)”으로 분류
③ 회수율·품질 표준화	금속별 회수율 및 정제품 품질기준 설정	국가 표준(KS) 또는 산업기술표준(KATS) 형태로 제정
④ EPR 제도 확대	대상 품목 확대 및 회수율 지표 도입	자석·풍력터빈·태양광·반도체 소재 포함, 금속 회수율 목표 설정
⑤ 통합 거버넌스 구축	환경·자원·산업 분야의 통합 관리체계 마련	폐기물관리법·자원순환기본법·광물자원법 간 연계 관리 프레임 구축



제2절 희소금속 재자원화 산업 활성화를 위한 희소금속 순환경제 정책 추진방향

- 법·제도 개선은 희소금속 재활용의 기술적 문제를 넘어, 자원안보-산업 경쟁력-탄소중립-지역경제-국제협력의 5대 축을 동시에 실현하는 전략적 전환점이다. 즉, “희소금속 폐기물 관리”는 더 이상 환경규제의 대상이 아니라, 국가 자원전략과 순환경제의 중심축으로 재정의되어야 한다.
- 우리나라의 희소금속 재자원화 체계는 여전히 ‘폐기물 관리 중심’에서 벗어나지 못하고 있으며, 국가 차원의 자원안보·산업경쟁력·탄소중립 관점이 유기적으로 통합된 순환경제 정책이 미흡한 실정이다. 이에 따라 본 연구는 다음의 세 가지 방향으로 제도적·정책적 전략을 제안한다.

1. 자원순환 정책체계의 정비 및 법제 통합

- 「폐기물관리법」, 「자원순환기본법」, 「광물자원법」의 이원적 체계를 통합하여 희소금속 함유 폐기물을 ‘2차 자원(Secondary Resource)’으로 관리하는 법적 근거를 마련한다.
- EU CRMA(2023), 일본 Urban Mining, 미국 Critical Minerals Act와 정합성 있는 국가 핵심광물 관리 프레임 구축이 필요하다.
- 산업·환경·자원정책의 연계를 통해 ‘규제 중심’에서 ‘자원전략 중심’으로의 전환을 추진한다.

2. 회수·정제·소재화 산업의 인프라 구축

- 내재량·회수잠재량 분석을 기반으로, 산업별 금속 흐름에 맞춘 재활용·정제·소재화 클러스터를 단계적으로 구축해야 한다. 특히 강원특별자치도는 풍력·ESS·이차전지 산업이 밀집해 있어, 희토류 및 배터리 금속 회수 산업벨트 조성의 최적지로 평가된다.
- 영월 첨단산업 핵심소재단지는 텅스텐(W) 제련 및 첨단소재 산업의 핵심 거점으로서, 향후 희소금속 순환경제의 실증형 거점 역할을 수행할 수 있다.
- 이 단지를 중심으로 폐광자원 재활용, 희소금속 정제·분석, 소재화 기술 실증 등이 연계되면 강원도는 전국 최초의 “희소금속 순환산업 허브(Closed-loop Industrial Hub)”로 발전이 가능하다.

3. 통합 거버넌스 및 데이터 기반 관리체계 구축

- 산업·환경·지자체·연구기관이 참여하는 순환경제 거버넌스 플랫폼을 설계해야 한다.
- 내재량(Embedded Content)-회수잠재량(Recoverable Potential)-회수실적 데이터가 연계되는 희소금속 통합 관리 DB 시스템 구축을 통해 자원흐름을 실시간으로 모니터링하고 정책결정에 반영할 수 있다. 이를 통해 국가 단위에서는 희소금속 자급률 목표를, 지역 단위에서는 재활용 실적 및 탄소저감 성과를 동시에 관리할 수 있는 체계가 마련된다.
- 희소금속의 회수·재활용은 단순한 자원절약이 아니라, 채굴 대비 50~90% 수준의 온실가스 배출 절감을 실현할 수 있는 탄소중립 기술

로 기능한다. 이에 따라 향후 희소금속 순환경제 정책은 탄소저감 목표와 병행되어 추진되어야 한다.

[표 5-3] 희소금속 순환경제 정책 추진방향

구분	주요 내용	기간
① 기반 구축기 (2025~2027)	- 희소금속 함유 폐기물의 법적 정의 신설- 회수율·품질 표준 제정 (KS, KATS) - 영월 첨단산업 핵심소재단지 내 “희소금속 분석·정제센터” 설립	단기
② 산업 확장기 (2028~2032)	- 강원형 희토류·배터리 회수 클러스터 구축- 풍력터빈·ESS 중심 재활용 실증사업 추진 - 탄소감축 실적 기반 재활용 인센티브 제도 도입	중기
③ 통합 운영기 (2033~이후)	- 전국 희소금속 순환산업 네트워크 구축 - LCA 기반 탄소감축량 데이터 통합 관리 - 국제공급망 연계(IEA-OECD 등 협력체계)	장기



제3절 탄소중립 기술과 연계한 희소금속 순환경제 추진 세부 전략

1. LCA(수명주기평가) 기반 금속별 탄소절감계수 도입 및 제도화

가. 개념 및 목적

- 희소금속 재활용은 원광 채굴·정제 대비 에너지 소비와 온실가스 배출이 현저히 적지만, 그 탄소저감 효과가 공식적으로 계량·인정되지 않아 제도적 사각지대에 놓여 있다.
- 이에 본 전략은 LCA(Life Cycle Assessment, 수명주기평가) 체계를 기반으로 금속별 탄소절감계수(Carbon Reduction Coefficient)를 산정·표준화하고, 이를 통해 재활용 실적이 곧바로 탄소감축 실적(tCO_2eq)으로 인정받도록 제도화하는 것을 목표로 한다.
- 즉, 단순한 자원순환을 넘어 “재활용 1톤 = CO_2 감축 n톤”으로 명시화하여 국가 온실가스 감축목표(NDC), 배출권거래제(K-ETS), ESG 공시 등에서 희소금속 재활용을 탄소중립 기술로 등재·인정하는 체계를 구축하는 것이다.

나. 세부 추진 내용

1) 기초 데이터 구축

① 국제 표준 기반 LCA 데이터 확보

- IEA(2021), IRENA(2023), USGS(2024), ISO 14040/44, IPCC GHG Protocol 등을 근거로 주요 금속(리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄, 구리, 희토류 등)의 전 과정 배출량(LCA: cradle-to-gate)을 산정한다.
- 채굴·정제·운송·제련 단계별 탄소배출량(kgCO₂eq/kg metal)을 비교하여 재활용 공정의 상대 절감률을 추출한다.

② 금속별 대표 절감효과(예시값)

[표 5-4] 금속별 절감효과 예시값

금속	신규 채굴·정제 배출량(kgCO ₂ eq/kg)	재활용 공정 배출량(kgCO ₂ eq/kg)	절감률(%)
리튬 (Li)	15~18	3~4	70~80
니켈 (Ni)	10~12	4~5	55~60
코발트 (Co)	12~14	5~6	55~65
알루미늄 (Al)	13~15	1~2	85~90
구리 (Cu)	7~9	3~4	50~60
희토류 (Nd, Dy)	25~28	9~10	60~70

국제 LCA 데이터베이스(IEA, GABI, Ecoinvent 등)와 국내 산업실증 데이터를 결합하여 정기 갱신

③ “LCA 프로파일” 구축 절차

- 1단계: 원광채굴-정제-가공-재활용 경로별 배출원(Activity) 식별

- 2단계: 에너지 투입, 공정 효율, 수율, 운송거리 등 변수를 반영
- 3단계: 탄소집약도 계산 및 감축계수 산출
- 4단계: 환경부 K-LCI DB 및 국가 LCA 플랫폼과 통합

④ 전문기관 참여 체계

- 주관기관: 환경부, 산업통상자원부
- 기술기관: 한국환경공단(K-eco), 한국지질자원연구원(KIGAM), 한국 기후변화연구원(KRIC) 등
- 검증기관: LCA 전문가그룹, 한국산업기술시험원(KTL), 한국표준협회(KSA)

2) 국가 LCA DB 연계 및 자동산출 시스템 구축

① K-LCI DB 연동 구조

- 환경부가 운영하는 Korean Life Cycle Inventory (K-LCI) 데이터 베이스에 금속별 재활용 LCA 값을 공식 등록
- 동일 금속에 대해 ‘신규생산 대비 감축계수’를 표준화하여 국가 공 공데이터로 제공
- 기업이 재활용 실적을 보고하면, 시스템이 자동으로 감축량(tCO_2eq)을 산출
예시: “리튬 1톤 재활용” → “15톤 CO_2 감축 자동 환산”

② 연계 플랫폼 구축

- 환경부 온실가스종합정보센터(GIR) 와 산업부 탄소중립산업정보플랫폼 간 연계
- K-ETS, K-Taxonomy, ESG Disclosure 플랫폼과 통합 API 제공
- 기업별·산업별 탄소저감 기여도 실시간 조회 가능

③ 국가 표준(KS) 제정 추진

- 한국표준협회(KSA) 주관으로 “KS X XXXX : 금속재활용 탄소감축 계수 산정방법” 신설
- 금속별 공정경로(습식·건식·복합)에 따른 표준 절감계수 제정

3) 인증 및 제도화

① 제도 신설: “재활용 기반 탄소감축 인정제”

- 「탄소중립·녹색성장기본법 시행령」에 신규 조항으로 추가
- 재활용기업 또는 지자체가 LCA 기반 감축성과를 제출 시 정부가 공식 감축실적으로 인증(C-Label)

② 연계 인센티브 체계

- K-ETS 배출권거래제: 감축실적을 상쇄크레딧(Offset)으로 인정 → 배출권 거래 가능
- 국가 감축사업(NDC) 통합관리시스템: 산업·비ETS 부문 감축실적으로 집계

- 저탄소인증제(C-Label): 인증 금속을 “Low-carbon Certified Metal” 로 표시하여 RE100, CBAM, ESG 보고 등에서 활용 가능

③ 검증 절차

- 기업이 금속별 재활용량, 공정별 LCA 데이터 제출 → 전문 검증기관(환경공단, KTL 등)이 심사 → 감축량(tCO₂eq) 승인 및 인증서 발급

4) 정책적 활용

① 국가 탄소감축 정책과 연계

- 재활용 기반 감축량을 정부의 2035 NDC 감축계획에 포함
- 산업부문의 비ETS(비거래) 감축사업 중 “자원순환 감축부문”으로 신규 편성

② 기업 ESG 및 세제 활용

- ESG 공시기준(ISSB, K-Taxonomy, IFRS S2) 내 “Scope 3 감축 실적”으로 반영
- 재활용 금속을 사용한 기업은 세제 감면(탄소저감투자공제), 저탄소 제품인증 가점 적용

③ 탄소국경조정(CBAM) 대응

- EU CBAM에서 인정받을 수 있는 LCA 기반 저탄소 원소 인증체계 구축 → 한국산 재활용 금속이 ‘저탄소 소재’로 수출 가능하도록 제도 정합성 확보

다. 기대 효과

① 정량적 평가 체계 확립

- 금속 재활용을 통해 감축되는 탄소량을 tCO₂eq 단위로 계량화 → 재활용 산업의 탄소 기여도를 국가 감축 통계에 반영 가능

② 정책 인센티브 근거 마련

- 감축실적이 배출권·세제혜택·ESG 지표로 연결됨으로써 재활용 기업의 투자유인 강화 및 시장경쟁력 향상

③ 국제 경쟁력 제고

- EU CRMA·CBAM, 일본 저탄소소재 인증제 등과의 상호인정 체계 구축
- 한국산 “Low-carbon Certified Metal”의 글로벌 수요 확대

④ 산업·지역 파급효과

- 재활용이 단순 환경행위가 아니라 탄소중립 산업으로 인정되어 지역 (예: 강원특별자치도) 내 재활용산업 투자 촉진
- 향후 강원·영월 실증지구에서 “금속 1톤 회수 = CO₂ 10톤 절감” 구조 실증 가능
- 본 전략은 “희소금속 재활용의 탄소저감 효과를 수치화하여 정책과 시장에 연결하는 제도적 혁신”이다. 이를 통해 재활용 산업이 탄소중립 달성의 주체로 인정받고, 강원특별자치도는 국가 최초의 LCA 기반 탄소감축형 희소금속 순환경제 실증지구로 발전할 수 있다.

2. CCUS·수전해·배터리 재활용 등 탄소중립 핵심기술과 희소금속 회수산업의 연계

가. 개념 및 필요성

- 탄소중립 달성을 위한 핵심 기술군(CCUS, 수전해, 연료전지, 배터리 재활용 등)은 모두 고성능·고내식 금속소재를 필요로 한다.
- 이는 희소금속의 안정적 공급 없이는 구현이 불가능한 구조로, 희소금속 회수산업은 이러한 탄소감축 기술과 상호보완적·순환적 관계를 형성한다.

[표 5-5] 기술분야 별 회수산업 주요 금속

기술 분야	주요 활용 금속	역할
CCUS (탄소포집·저장·활용)	Ni, Co, Mo, Pd	촉매·흡착제·전기분해 전극 소재
수전해 (Green Hydrogen)	Ir, Pt, Ru, Ti	전극 촉매·내식성 금속판
배터리 재활용 (Recycling)	Li, Co, Ni, Mn, Cu, Al	전극·집전체 회수 및 재정제
연료전지 (Fuel Cell)	Pt, Pd, Ir	산화·환원 촉매 핵심소재

- 이처럼 희소금속은 “탄소감축 기술을 구성하는 소재” 이자, “회수 자체가 탄소감축을 유발하는 자원”으로서 ‘Carbon-Neutral Technology ↔ Rare Metal Recycling’ 간 이중 탄소절감 효과를 창출할 수 있다.
 - ※ 탄소감축 기술을 위한 금속(Upstream) + 금속 회수로 인한 탄소 감축(Downstream) → 이중 순환 구조(Dual Carbon Benefit Cycle) 형성

나. 세부 추진 내용

1) 산업 간 순환 연계체계 구축

① 산업 간 금속 순환 루프 형성

- CCUS 및 수전해 실증플랜트에서 발생하는 폐촉매·흡착제·전극 스크랩을 희소금속 회수기업으로 회수·정제하여 재사용하는 “산업 간 금속 순환망” 구축
- 예:
CCUS 실증플랜트 → 폐흡착제(Ni, Mo) 회수 → 정제기업 재활용
→ 신촉매로 재공급
수전해 시설 → 폐전극(Ir, Pt, Ti) 회수 → 채도금·재활용 후 신규 전극 재생산

② 협력기관 및 기업 연계 모델

- 공공·연구기관: 한국에너지기술연구원(KIER), 한국전력연구원, 한국기후변화연구원(KRIC)
- 산업계: 한화임팩트(수전해), 두산퓨얼셀(연료전지), 현대ENG(CCUS), 성일하이텍(배터리)
- 협력 방식:
공정 부산물 발생지와 희소금속 회수업체 간 폐촉매 공동회수 협약(MOU)
실증플랜트 단위의 공정 부산물 트래킹 시스템(Traceability)

Platform) 구축

③ 지역 거점 연계

- 강원 영월·태백 지역을 중심으로 배터리-CCUS-수전해 공정폐기물 공동회수 네트워크 실증
- 영월 첨단산업 핵심소재단지 내에 “희소금속 공정폐기물 통합전처리 라인” 구축 추진

2) 기술적 융합 연구(R&D) 지원

① Hybrid Recycling Process 개발

- 기존 재활용 공정에 CCUS·수전해 부산물을 통합하여 처리하는 하이브리드형 회수기술 개발
- 예시:
CCUS 흡수액 내 Ni·Co 회수 → 금속이온 선택적 흡착·전해 정제
수전해 폐전극 내 Ir·Pt 회수 → 박리·용해·재도금을 통한 전극 재제조
연료전지 촉매 폐촉매 Pt·Pd 회수 → 습식용출 및 입자 재성형

② 공정 탈탄소화 기술 개발

- 회수공정을 기존 화학용매 기반에서 전기분해형·수소환원형으로 전환하여 “회수 과정에서 탄소 배출을 줄이는 공정(Carbon-free Recycling Process)” 개발
- 예: 저탄소 전해정제(Electro-refining), 폐촉매 재활용 시 수소환원

(H₂ reduction) 기술 적용

③ 국가 R&D 프로그램 연계

- 산업통상자원부 탄소중립핵심기술개발사업(2024~) 과 연계하여 “희소금속 기반 저탄소 공정소재 개발” 과제 신설
- 참여기관: KIGAM, KIER, KRICT, POSTECH, 고려대, 성일하이텍 등 산학연 공동컨소시엄 운영

3) 탄소저감 효과 검증체계 마련

① 공정별 탄소집약도(LCA) 평가체계 구축

- 회수공정의 단계별 배출량(전력, 열, 운송)을 LCA 기반으로 산정하고, 금속별 절감량을 합산하여 “공정 탄소집약도 개선률(%)” 지표로 관리
- 예시:
CCUS 폐축매 회수 → 1톤당 4.2tCO₂eq 감축
수전해 폐전극 회수 → 1톤당 8.5tCO₂eq 감축

② 실증시설 내 직접 계량 모듈 설치

- CCUS·수전해 실증플랜트 내에 희소금속 회수공정 통합형 모듈 설치 → 폐축매 입고량, 회수금속량, 에너지 사용량, 배출량을 실시간 측정
- 데이터는 환경부 LCA DB 및 산업부 탄소저감관리시스템과 연동하여 자동보고

③ 탄소감축 인증 절차 연계

- 검증된 공정별 감축량은 “재활용 기반 탄소감축 인정제”에 따라 C-Label 부여
- 회수기업은 감축실적을 K-ETS 상쇄크레딧으로 활용하거나, 제품단위 저탄소 인증마크를 부착하여 시장·수출 경쟁력 확보

다. 기대 효과

① 탄소중립 산업과 희소금속 산업의 동시 성장

- CCUS·수전해 등 탄소감축 기술산업이 금속소재 수급 측면에서 안정화되고, 희소금속 회수산업은 새로운 공정 부산물 공급원을 확보함으로써 기술·경제적 시너지 창출

② 공정 부산물 재활용을 통한 폐기물·원료비 절감

- 고가 금속이 함유된 폐촉매·전극·슬러지를 회수함으로써 폐기물 처리비용 절감과 함께 신규원료 구매비용 20~40% 절감 기대
- 산업 간 부산물 순환을 통해 폐기물 발생량 감소 + 자원순환율 제고 동시 달성

③ “탄소감축형 소재산업(Carbon-smart Materials Industry)” 생태계 확립

- 회수공정·탄소저감기술·순환경제가 결합된 신산업 영역 창출
- 향후 이 분야는 RE100·CBAM 대응, ESG 평가, 탄소배출권 시장과 연계되어 국가 단위의 저탄소 소재산업 전략(Core Low-carbon

Materials Strategy) 으로 발전 가능

④ 지역 실증 및 확산

- 강원특별자치도 내 풍력·ESS·배터리 산업과 영월 첨단산업 핵심소재 단지를 연계한 “탄소중립형 희소금속 회수-소재 실증 플랫폼” 구축을 통해 지역산업 육성 + 국가 탄소감축 목표 기여 동시 달성
- 본 전략은 “탄소중립 핵심기술”과 “희소금속 회수산업”을 하나의 순환 체계로 통합해, 탄소감축·자원순환·산업경쟁력 강화를 동시에 실현하는 ‘이중탄소효과(Dual Carbon Effect)’ 기반 산업모델을 제시한다.
- 이를 통해 강원특별자치도는 CCUS·수전해·배터리 산업이 공존하는 대한민국 최초의 “탄소중립 희소금속 순환산업 실증 클러스터”로 도약할 수 있다.

3. 강원특별자치도 풍력·ESS·배터리 산업과 영월 첨단산업 핵심소재단지를 중심으로 한 ‘탄소중립형 희소금속 순환 경제 실증지구’ 지정

가. 개념 및 추진 배경

- 강원특별자치도는 국내에서 보기 드물게 희소금속-에너지-광물-재활용 산업이 공존하는 지역으로, ‘탄소중립형 순환경제’를 실증할 수 있는 최적의 복합 산업생태계 기반을 보유하고 있다.
- 특히 영월 첨단산업 핵심소재단지는 텅스텐(W) 제련 및 고순도 정제, 초내열 합금소재 제조, 폐광자원 재활용 및 정련 기술 등을 포괄하는 국내 유일의 첨단 금속 정제 산업단지로, 강원권 순환형 자원산업 허브 구축의 핵심 축(Core Axis) 으로 평가된다.
- 이 단지와 주변 산업(풍력·ESS·배터리·광물)을 유기적으로 연계하여 “탄소중립형 희소금속 순환경제 실증지구 (Circular Economy Testbed for Carbon-neutral Rare Metals)”를 지정·운영함으로써, 희소금속 재자원화-탄소저감-산업육성의 통합 실증 플랫폼을 구축하는 것이 본 전략의 핵심이다.

※ “강원형 실증지구” = *광물(자원) + 소재(산업) + 에너지(탄소)*를 통합한 ‘Green Metal Cluster’, 즉 탄소중립 자원순환 모델의 국가 시범지구

나. 세부 추진 내용

1) 공간적 구성 및 인프라

- ① ‘강원형 순환자원 벨트(Gangwon Circular Resource Belt)’ 조성
 - 영월 첨단산업 핵심소재단지를 중심거점으로,
(서부권) 원주·횡성 → 이차전지 및 ESS 배터리 재활용,
(남부권) 태백·삼척 → 풍력터빈 해체 및 희토류 자석 회수,
(동부권) 동해항·묵호항 → 원료 수입·물류·수출 거점으로 연계
 - 세 권역을 산업도로·철도·항만 물류망으로 연결해 폐자원 수집-회수-정제-소재화-수출의 전 주기 물류체계를 구축함
- ② 핵심 인프라 및 시설 배치
 - 희소금속 분석·정제센터 : 회수금속의 성분·순도 분석, 불순물 제거, 정제기술 실증
 - LCA·데이터센터 : 금속별 재활용 공정의 배출량·감축량을 실시간 수집, 탄소계수 자동산출·보고
 - 저탄소 인증소재 실증라인 : 회수금속을 이용한 저탄소 합금·소재 생산 및 ESG 인증 실험
 - 폐촉매·전극 통합전처리 공정 : CCUS·수전해·연료전지 공정 부산물 (폐촉매, 폐전극)을 통합 처리·재활용
- ③ 스마트 산업단지 운영체계
 - IoT·AI 기반 “금속자원 흐름추적 시스템(Rare Metal Flow

Tracking System)” 구축

- 생산·회수·정제 데이터를 클라우드 기반으로 통합 관리 → 투명한 순환자원 거래 플랫폼 실현

2) 산업·연구·지자체 연계체계

① 산·학·연·관 통합 실증 플랫폼 구축

- 연구기관: 한국지질자원연구원(KIGAM), 한국기후변화연구원(KRIC), 한국재료연구원(KIMS), 강원대학교 등
- 산업체: 알몬티코리아(텅스텐), 현대자동차그룹(배터리 회수), 포스코 퓨처엠(양극재), 두산퓨얼셀(연료전지), 성일하이텍(재활용), 한화임팩트(수전해) 등
- 운영방식:
‘광물-소재-탄소-데이터(LCA)’가 연계된 통합기술 실증 플랫폼 구성
각 기관의 파일럿 설비를 영월 단지 내 “공동 실증라인”으로 집적

② 지자체 주도 제도화

- 강원도청·영월군이 공동으로 「순환경제 특별지구 조례」 제정 추진
- 입주기업 대상 지방세 감면, 전력요금 인센티브, ESG 인증금속 구매 우대제 도입
- 산업부·환경부와 연계한 지자체-국가 공동인증제(Local Green Metal Certification) 운영

③ 교육·인력양성 연계

- 강원대·한림대·폴리텍대학을 중심으로 “희소금속 순환기술 전문인력 양성과정” 개설
- 단지 내 실증라인을 활용한 현장실습·기업맞춤형 트레이닝 병행

3) 정책적 연계 및 확산 전략

① 국가 시범지구 지정

- 산업통상자원부, 환경부, 탄소중립위원회가 공동으로 “탄소중립형 희소금속 순환경제 실증지구(Ministry Joint Pilot Zone)” 지정
- 「국가자원안보특별법」 내 ‘핵심광물 재활용 시범단지’ 항목에 반영 추진

② 전국 확산 모델 구축

- 영월을 시작으로 → 울산(비철금속·수전해), 군산(배터리·ESS), 포항(소재·제련) 등 산업단지로 확장 가능한 모듈형 모델(Modular Expansion Model) 설계
- 국가 순환경제 기본계획(제2차, 2026~2035)에 반영해 “희소금속 순환산업 벨트화” 추진

③ 저탄소 인증 금속 공급 네트워크 구축

- 실증지구 내 회수금속·소재를 RE100·Net-zero 기업(삼성전자, 현대차, LGES 등)에 공급
- “Low-carbon Certified Metal Network”를 통해 CBAM 대응·탄소공시·RE100 평가에 활용 가능한 저탄소 인증소재 공급망 조성

다. 기대 효과

- ① 국내 최초의 저탄소 희소금속 순환산업 생태계 실증
 - “재자원화 → 정제 → 저탄소 인증 → 산업투입”의 전 주기를 한 지역 내에서 실증
 - 금속 재활용을 통한 탄소절감효과(tCO₂eq) 실측 데이터 확보 → 정책·산업 모두 활용 가능
- ② 탄소중립 기술 클러스터 모델 정립
 - CCUS·수전해·배터리 산업이 융합된 탄소감축-자원순환-소재산업 통합 플랫폼 구축
 - 실증 결과를 기반으로 국가형 “탄소중립 기술산업 클러스터 모델” 제시
- ③ 지역 균형발전 및 산업 생태계 고도화
 - 영월-태백-동해-원주를 연결하는 “Green Metal Corridor” 형성
 - 폐광산 지역(영월·태백)의 산업전환 촉진, 동해항 중심의 원료·소재 물류망 활성화, 원주권 대학·연구소 중심의 기술혁신 허브 형성 → 지속가능한 지역순환경제 생태계 조성
- ④ 국가 정책 연계 및 국제 경쟁력 제고
 - 탄소중립 기본계획, 국가핵심광물전략, K-ETS, ESG 공시 등 국가 정책과 직결
 - EU CRMA, 일본 Urban Mining, 미국 Critical Minerals Act와

정합성 확보 → 국제 공급망 내 한국형 저탄소 희소금속 브랜드화
(K-Rare Metal Label) 가능

- 영월 첨단산업 핵심소재단지를 중심으로 한 “탄소중립형 희소금속 순환경제 실증지구”는 강원특별자치도의 풍력·ESS·배터리 산업, 광물자원, 항만 인프라를 통합한 대한민국 최초의 Green Metal 실증 클러스터로서, 재자원화-탄소저감-산업육성의 3대 축을 실현하는 국가형 탄소중립 실증모델이다.



제4절 맺음말

- 본 연구는 글로벌 공급망 불안정, 탄소중립 이행, 순환경제 전환이라는 세 가지 환경 속에서 희소금속 재자원화 산업의 전략적 중요성을 재조명하고, 특히 강원특별자치도가 이를 선도할 수 있는 정책·산업적 기반을 탐색하기 위해 수행되었다.
- 그 결과, 희소금속은 단순한 산업소재를 넘어 국가자원안보(National Resource Security)와 탄소중립형 순환경제(Circular Economy for Carbon Neutrality)를 동시에 실현할 수 있는 핵심 인프라로 평가되었다.

1. 정책적 시사점 요약

① 전략광종별 대응체계 확립

- 광종별 리스크(수요 급증형, 공급리스크형, 기술집약형)에 따른 차별적 대응이 필요하며, 회수(Recycling)-정제(Refining)-소재화(Materialization) 단계별 연계 전략을 추진해야 한다.

② 제도적 기반 강화

- 「국가자원안보 특별법」 제18조에 따른 재자원화산업클러스터 지정을 통해 강원형 산업벨트를 구축하고, 「자원순환기본법」 및 EPR 제도와 연동하여 ‘자원안보-순환경제-탄소중립’의 삼중정책 구조를 완성해야 한다.

③ 산업·기술 인프라 구축

- 강원도 내 광물·금속·에너지 인프라를 통합하여 텅스텐(영월)-REE(강릉·동해)-배터리(원주·횡성)-PGM(춘천·홍천)-PV(삼척) 등 “5대 전략광종 실증거점 체제”를 형성할 필요가 있다.

④ 품질·인증체계 정립

- 회수금속의 순도·함유율·탄소배출량을 평가하는 “재활용금속 품질인증제(Recycled Metal Quality Certification)”를 도입하여, 재활용 소재가 산업소재로 재투입될 수 있는 제도적 사슬(legal loop)을 완성해야 한다.

⑤ 해외정책 벤치마킹

- 일본의 도시광산 전략(Urban Mining), 미국의 국방생산법(DPA) 기반 국가비축체계, EU의 CRMA(Critical Raw Materials Act,

2023) 와 같이, 희소금속을 단순 폐기물이 아닌 전략자원(Strategic Resource) 으로 제도화하는 접근을 적극 수용해야 한다.

2. 결론

- 결국, 희소금속 재자원화는 단순히 자원의 재활용을 넘어 국가안보, 에너지전환, 탄소중립 실현의 3대 축을 동시에 지탱하는 전략산업으로 자리매김해야 한다.
- 강원특별자치도는 광물·에너지·산업 인프라가 결합된 유일한 지역으로서, “희소금속 순환경제형 탄소중립 실증도시(Gangwon Circular Economy for Critical Metals)” 로 발전할 수 있는 정책적·산업적 잠재력을 충분히 보유하고 있다.
- 향후 강원형 모델이 국가 차원의 「자원안보 기본계획」과 연동될 때, 우리나라의 희소금속 재자원화 산업은 환경규제산업에서 ‘자원안보산업’으로의 전환점을 맞게 될 것이다.

[Appendix] Reference

OECD. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas. Paris: OECD, 2016 (3rd ed.).

World Bank. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington, DC: World Bank, 2020.

U.S. Department of Energy (DOE). National Blueprint for Lithium Batteries 2021–2030. Washington, D.C.: DOE, 2021.

International Energy Agency (IEA). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2021.

Government of Japan / JOGMEC. Urban Mine and Critical Metal Recycling Strategy. Tokyo: JOGMEC, 2022.

Responsible Minerals Initiative (RMI). Responsible Minerals Assurance Process (RMAP) and Due Diligence Practices: Annual Report 2022. Washington, D.C.: Responsible Business Alliance, 2022.

European Commission. Regulation (EU) 2023/1542 on Batteries and Waste Batteries. Brussels: European Commission, 2023.

European Commission. Critical Raw Materials Act (CRMA). Brussels: European Commission, 2023.

U.S. Department of Energy (DOE). Critical Materials Assessment 2023. Washington, D.C.: DOE, 2023.

International Energy Agency (IEA). Global Critical Minerals Outlook 2024. Paris: IEA, 2024.

International Renewable Energy Agency (IRENA). Critical Materials for the Energy Transition. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

U.S. Geological Survey (USGS). Critical Minerals of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply (updated list basis). Reston, VA: USGS, latest ed.

U.S. Geological Survey (USGS). Mineral Commodity Summaries 2024. Reston, VA: USGS, 2024.

European Commission. Communication on the Implementation of the Critical Raw Materials Act (CRMA): Targets and Measures. Brussels: European Commission, 2024.

ISO. ISO 14040/14044 Environmental management—Life cycle assessment. Geneva: ISO, latest ed.

ISO. ISO 14067 Greenhouse gases—Carbon footprint of products. Geneva: ISO, latest ed.

ISO. ISO 59010/59014 Circular economy—Guidelines/Indicators. Geneva: ISO, latest ed.

환경부. 『전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률』(EPR) 및 시행령·시행규칙. 세종: 환경부, 최신.

환경부. 『자원순환기본법』 및 시행령·시행규칙. 세종: 환경부, 최신.

환경부. 『폐기물관리법』 및 시행령·시행규칙. 세종: 환경부, 최신.

한국지질자원연구원(KIGAM). 『에너지전환 시대의 전략광물 확보 전략』. 대전: KIGAM, 2022.

한국지질자원연구원(KIGAM). 『국가핵심광물 관리체계 연구』. 대전: KIGAM, 2022.

산업통상자원부(MOTIE). 『핵심광물 공급망 안정화 전략』. 세종: 산업통상자원부, 2023.

대한민국. 『국가자원안보 특별법(법률 제21065호)』. 서울: 법제처, 2025.

연구책임 | 박승환 한국기후변화연구원 선임연구원

KRIC

정책연구 2025-06

강원특별자치도 희소금속 재자원화 산업
육성 방안

*인 쇄 _ 2025년 11월

*발 행 _ 2025년 11월

*발 행 인 _ 한국기후변화연구원장

*발 행 처 _ 한국기후변화연구원

*주 소 _ (24239) 강원자치도 춘천시 수변공원길 11

*홈페이지 _ www.kric.re.kr