

기술동향

희토류 회수 및 재활용 기술

KISTEP 투자기획조정센터 박정원 · 문윤실 · 이현경



KISTEP





Contents

제1장 개요	1
제2장 기술동향	7
제3장 산업동향	13
제4장 정책동향	20
제5장 R&D 투자동향	26
제6장 결론 및 제언	31



제1장 개요

1.1. 작성 배경

 희토류(Rare Earth Elements, REE)란 자연계에 드물게 존재하는 원소라는 의미로 독특한 성질로 인해 첨단산업에 필수적으로 사용되는 물질

- 희토류는 원자번호 57번(La)부터 71번(Lu)까지 란타넘족 15종과 21번(Sc), 39번 (Y)를 포함한 17종의 원소를 총칭하는 것으로 무게에 따라 경(輕)희토류와 중(重)희토류로 구분
※ 우리나라는 희토류를 1종으로 취급하지만, 유럽은 중희토류·경희토류를 구분하여 2종으로 취급
- 희토류는 소량 첨가만으로도 물질을 화학적·전기적·자성적·발광적 특성을 갖게 만드는 특징을 갖고 있어, 제품의 고기능·고성능 발현을 위해 필수적으로 사용

〈표 1〉 희토류의 사용처 및 사용 원소

분류	원소명	기호	번호	응용 분야
란탄	경희토류	란타늄	La	57 촉매제, 전극, 수소저장, 광학유리, 레이저
		세륨	Ce	화학 산화제, 유리 및 세라믹 착색제
		프라세오디뮴	Pr	자석, 레이저, 유리 및 세라믹 착색제
		네오디뮴	Nd	자석, 레이저, 세라믹콘덴서
		프로메튬	Pm	항로조명, 원자력 전지, 발광도료
		사마륨	Sm	자석, 레이저, 중성자 제어봉
		유로퓸	Eu	형광체, 레이저, 수은램프, 핵자기 공명 완화제
	중희토류	가돌리늄	Gd	중성자 흡수제, 자기공명영상 조영물질, 철·크리뮴 합금
		터븀	Tb	녹색 형광체, 레이저, 초음파탐지시스템
		디스프로슘	Dy	자석, 레이저, 조명 광원
		홀뮴	Ho	자석, 광섬유 레이저 등 광통신기기
		어븀	Er	군용, 적외선 레이저, 바나듐강, 광섬유
		톨륨	Tm	휴대용 X-ray 장비, 레이저, 금속할로겐램프
		이터븀	Yb	적외선 레이저, 광통신 광섬유 증폭제, 핵의학
	비란탄	루테늄	Lu	배터리, 발광다이오드(LED) 전구, 방사선 장비
		스칸듐	Sc	항공우주용 경량 알루미늄·스칸듐 합금
		이트륨	Y	형광체, 마이크로파 필터, 고온초전도체, 암 치료

※ 출처 : 산업연구원(2021)



희토류를 채굴·생산하는 광업이 경제 규모에서 차지하는 비중은 크지 않지만, 후방산업 및 가치사슬의 최종 단계에서 상당한 규모의 경제적 가치를 창출

- 2016년 미국에서 사용된 희토류의 가격은 6.1억 달러에 불과했으나, 석유화학, 반도체 등 주요 산업에 활용되며 총 4,900억 달러의 가치를 창출¹⁾

〈표 2〉 미국 희토류 이용에 따른 부가가치

산업구분	사용처	부가가치	희토류 비용	주 원소
플라스틱소재 및 수지	기타	30,379	1.4	La, Ce
철강 및 합금철	야금	29,077	9.5	La, Ce, Pr, Nd
반도체 및 관련기기	세라믹, 연마	26,923	1.9	La, Ce, Pr, Nd
탐색, 탐지, 항법	자석 및 기타	32,066	24.8	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb, Y
⋮				
총계		496,782	613.4	

주 : 부가가치 및 희토류 비용은 모두 2016년 기준

※ 한국무역협회 자료(2022) 재인용 (원본 : White House(2021))



희토류는 친환경 자동차 및 신재생에너지 산업 분야의 핵심 소재로 최근 그 사용량이 크게 증가하고 있으며 가격 또한 급등 중

- 희토류 생산량은 2017년 17만 톤에서 2021년 29만 톤으로 연평균 12% 증가했으며, 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)는 2050 탄소중립 달성을 위한 전기 자동차(EV)와 풍력발전의 보급 확대에 따른 희토류의 글로벌 수요가 2040년까지 3~7배 증가할 것으로 전망²⁾(‘21년 대비)
- 특히 전기차와 풍력발전의 영구자석에 사용되는 네오디뮴과 디스프로슘은 최근 공급 한계에 도달하고 있어 가격이 급격한 상승 추세

〈표 3〉 희토류 산화물의 연도별 가격(USD/톤)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
산화디스프로슘(Dy)	186,800	178,650	239,060	261,650	410,040	382,850
산화네오디뮴(Nd)	50,149	49,774	44,563	48,938	98,140	134,353
산화란탄(La)	2,267	2,230	1,892	1,613	1,509	1,397
산화이트륨(Y)	3,409	3,200	2,816	2,823	6,427	11,746

※ 한국자원정보서비스(KOMIS), 광물가격지표

1) 박가현 외, 주요국의 핵심광물 확보전략과 시사점, 한국무역협회, 2022

2) IEA(2021), ‘The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions’



전 세계 희토류 광물의 가공과 제조는 중국이 독점하고 있으며, 특히 중희토류는 중국과 인접 지역에 매장이 편중되어 공급 위험도가 높은 상황

- 전 세계 희토류 매장량은 1억 3,000만 톤으로 지각 내 함량이 다른 원소에 비해 적지 않지만, 광물의 품질이 낮고 희토류 원소의 농도가 매우 낮아 경제성을 갖춘 광산은 일부에 불과
- 낮은 채산성뿐만 아니라 광물의 가공과정에서 발생하는 방사성 물질의 방출 및 환경오염의 부담으로 인해 희토류를 직접 채굴·가공하는 국가는 제한적
 - 희토류 1톤 생산에 방사성 폐기물(1~1.4톤), 산성 가스(6.3만 m³), 산성 폐수(20만 L)와 다량의 유기 폐액이 발생하며, 이산화탄소(CO₂) 또한 다량 배출
 - * 주요 금속 생산 시 배출되는 이산화탄소의 양 : 네오디뮴 75.8톤(채굴 13.2/ 가공 62.6톤) 코발트 16.7톤(채굴 2.1/가공 14.6톤), 니켈 10톤(채굴 5.3/가공 4.7톤), 리튬 4.85톤(채굴 1.47/가공 3.39톤)³⁾
- 중국은 풍부한 희토류 광물을 보유하고 있으며 선진국 대비 환경규제가 강하지 않아 전세계 희토류 생산량의 70%를 차지하고 중희토류의 생산은 독점하는 등 희토류 공급에 압도적 영향력을 행사하는 전략적 지위 확보⁴⁾
 - 경희토류의 생산은 중국뿐만 아니라 미국, 호주, 브라질 등에서도 이루어지고 있으나 수급 불균형이 심한 중희토류의 생산은 중국 남부 장시·광동 지역에 집중⁵⁾
 - * 영구자석의 원료인 테르븀(Tb), 디스프로슘(Dy) 등은 중희토류에 해당하며 수요 대비 공급이 매우 부족
 - 채광, 분리, 추출 및 고순도 완제품 제조 등 희토류 공정 전 단계에 걸쳐 생산능력을 보유하고 17종의 희토류 원소를 모두 생산할 수 있는 나라는 중국이 유일

〈표 4〉 국가별 희토류 매장량 및 생산량('22)

구분	중국	미국	호주	베트남	러시아	기타*	합계
매장량	44,000,000	2,300,000	4,200,000	22,000,000	21,000,000	36,500,000	130,000,000
	33.8%	1.7%	3.2%	16.9%	16.1%	28.1%	100%
생산량	210,000	43,000	18,000	4,300	2,600	22,100	300,000
	70.0%	14.3%	6.0%	1.4%	0.9%	7.4%	100%

* 브라질, 인도, 미얀마, 태국, 그린란드, 캐나다 등

※ 출처 : U.S. Geological Survey(2023)

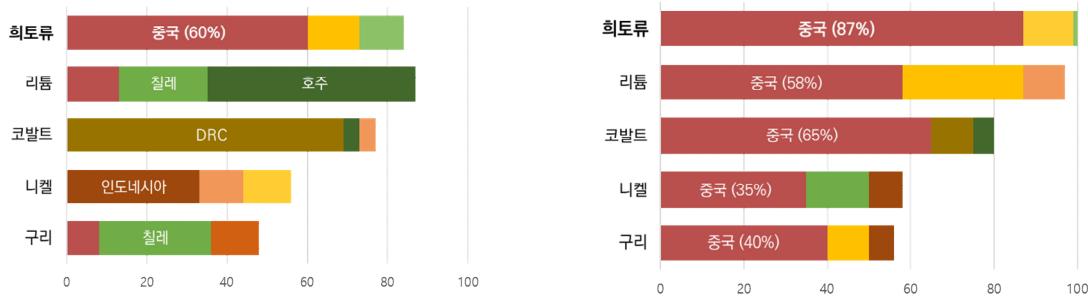
3) IEA(2021), The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions

4) 김경훈 외, 우리나라와 주요국 희토류 공급망 현황 및 시사점, 한국무역협회(2021)

5) 임영목 외, 희토류 친환경 재활용 기술 및 자원 확보 방안, 한국산업기술평가원(2018)

 최근 전략물자로서의 희토류에 대한 관심이 급증, 중국 의존도 감소와 공급망 다변화를 위한 희토류 회수 및 재활용 기술개발의 중요성 대두

- 주요국의 중국 의존도 감소 정책으로 인해 중국의 희토류 생산 점유율은 92%('10)에서 60%('19)로 대폭 감소하였지만, 가공 점유율은 87%('19)로 여전히 독점적 지위⁶⁾



[그림 1] 중국의 주요 금속별 채굴(좌) 및 가공(우) 점유율

※ IEA(2021)

- 주요국은 희토류 공급망 다변화 방안으로 희토류 대체 및 저감형 신소재 기술개발, 희토류 회수 및 재활용 기술개발 등을 한 축으로 인식
- 희토류 회수 및 재활용 기술을 통해 채굴 시 발생하는 환경오염의 완화, 첨단제품 가공의 탄소 발생량 감소, 공급과 수요의 불균형 문제의 완화가 가능할 것으로 기대
 - 장기적으로는 도시광산으로부터 폐자원을 회수·재활용함으로써 자원 순환에 기여



[그림 2] 1차 자원과 재활용을 통해 영구자석(NdFeB) 1kg을 만드는데 생성되는 이산화탄소 규모 비교

※ ERMA (2021), Rare Earth Magnets and Motors : A European Call for Action

 본 브리프는 희토류 회수 및 재활용 기술의 국내외 현황을 소개하고, 정책 동향 및 정부R&D 투자현황을 분석하여 정책적 시사점을 도출하고자 함

6) IEA(2021), The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions

1.2. 기술의 정의 및 범위

 희토류 회수 및 재활용 기술은 희토류 공정 폐기물 등에서 원소를 회수하거나, 사용 후 제품의 재활용을 통해 희토류 산화물 또는 금속을 생산하는 기술

- 희토류 회수 및 재활용 기술은 금속 폐기물을 가치있는 원재료로 다시 활용하는 것으로, 폐기물의 형태에 따라 크게 세 가지로 구분 가능
 - ① 희토류 가공과 영구자석 등 제품의 제조 공정에서 발생하는 ‘스크랩’ 등으로부터 희토류를 회수하는 기술
 - ② 사용 후 폐기되는 ‘희토류 제품(영구자석 등)’을 회수하여 재활용하는 기술
 - ③ 기타 대체 ‘공급원료(석탄재, 폐수 등)’에서 희토류 원소를 선택적으로 추출하는 기술
- 가공 및 제조 공정에서 발생하는 폐기물의 재활용 기술(①)은 희토류 광물 가공 및 제품 제조 공정을 보유한 경우에만 활용 가능하다는 한계점이 존재

※ 자성체 제조 과정에 투입된 희토류 금속의 약 20-30%가 스크랩의 형태로 제조 공정에서 회수되어 공정에 재투입됨⁷⁾. 희토류 회수 및 재활용하기에 가장 용이한 형태라고 볼 수 있음
- 풍력발전, 전기자동차에서 발생하는 폐영구자석 등에 함유된 희토류의 회수수요가 증가하고 있음을 고려할 때, 최근 주목받는 희토류 회수 및 재활용 기술은 사용 후 제품·기타 폐기물로부터 희토류를 얻는 기술(②,③)에 해당

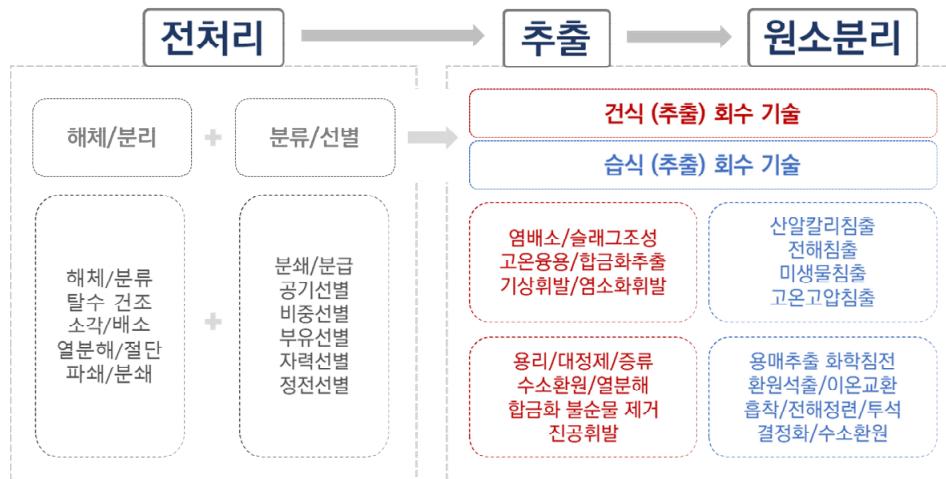
 폐제품으로부터 순도 높은 희토류를 얻는 재활용 기술의 목적을 감안할 때, 공정을 거친 뒤 나오는 산출물에 따라 전처리-추출-원소 분리 기술로 구분 가능

- 금속의 재활용은 일반적으로 해체-분류·분리-선별·농축-금속추출-분리정제의 프로세스로 구성되며, 파쇄, 용융, 침출 등 물리·화학적 분리 방법을 모두 활용
- 본 고에서는 공정별 산출물에 따라 희토류가 함유된 폐제품 조각을 수집·선별하는 전처리(Pre-treatment), 희토류 화합물을 얻는 추출(Leaching), 희토류 원소를 분리하는 원소 분리(Elements separation)로 구분하고자 함
 - (전처리) 개별 회수된 제품을 해체하고 희토류가 함유되지 않은 부분을 제거하는 등 폐제품 조각의 희토류의 농도(함량)을 높이는 단계

※ 물리적 분리(제품 해체, 선별, 채질, 파·분쇄, 자성 분리 등)와 화학적 분리(도금 박리 등)기술이 해당

7) 흥현선, 폐희토류금속의 리사이클링 기술 및 산업 동향, 고등기술연구원(2012)

- (추출⁸⁾) 화학적 처리를 통해 비희토류 물질을 제거하고 농축된 희토류 복합체를 얻는 단계
 - ※ 습식(산 및 알칼리 추출, 침출), 건식(용광로, 전기 슬랙스 경제, 용융 플럭스 반응, 전기분해 등) 기술이 해당
- (원소 분리) 희토류 복합체로부터 희토류 산화물(사용 가능한 형태)을 분리·생산하는 기술
 - ※ 용매 추출(Solvent Extraction)이 주로 사용되며 이온교환법, 흡착법, 침전법, 전기 투석 등이 해당



[그림 3] 희토류 회수 및 재활용 단계 및 단계별 기술 분류

※ 지식경제부, 도시광산 활성화 포럼('11.09.), 자료 재구성

※ 추출 기술과 원소분리 기술은 구분되지 않으며, 제품과 공정 목적에 따라 기술을 혼합하여 공정을 구성하여 사용



[그림 4] (좌측부터) 전처리, 추출, 원소 분리 공정의 산출물

 본 브리프는 ‘영구자석 및 기타 폐기물로부터의 희토류를 회수하는 기술’의 동향을 살펴보고 시사점을 도출하고자 함

- 도시광산 개발에 해당하는 희토류 회수 및 재활용 기술로서 사용후 제품 및 대체 공급원료를 대상으로 하는 기술(②,③)에 초점을 맞추어 동향을 정리하였음
 - 희토류 광산으로부터의 채굴, 스크랩 재활용, 희토류 대체재 활용 등은 필요한 경우에만 언급

8) 본 고에서는 사전적 의미인 침출(고체-액체, Extraction), 추출(액체-액체, Leaching)의 구분 없이 독자의 이해를 높이기 위해 ‘추출’로 통일하여 사용하였음

제2장 기술동향

 희토류 재활용 기술은 전략물자의 공급망 다변화 및 자원순환 측면에서 주목 받는 분야로 정부 지원을 중심으로 기술개발 중

- 현재 희토류 재활용 시장은 초기 형성 단계로 민간기업보다는 정부의 지원에 따른 대학·연구소의 연구개발이 중심

 1장에서 서술한 희토류 회수 및 재활용 공정(전처리-추출-원소 분리) 개념에 기반하여, 공정별 기술개발 이슈는 다음과 같음

- (전처리) 비희토류를 제거하고 제품 내 희토류 농도를 높이기 위한 제품의 선별 및 분류를 위한 자동화 공정의 개발 필요
- (추출·원소 분리) 희토류 추출 및 분리 과정에서 발생하는 다량의 폐산·폐액으로 인한 환경 오염 방지를 위해 바이오리칭*, 유기물, 유기산, 약산 습식 공정과 고효율 건식 공정 등 친환경 기술개발 필요

※ 희토류 원소들의 유사한 화학적 성질로 인해 원소 분리를 위한 상용 공정의 대부분은 강산을 사용하는 용매 추출(Solvent Extraction)법을 사용 중

* 바이오리칭(생물 침출) : 박테리아나 균류(Fungi)를 이용하여 금속을 추출하는 기술로 금과 구리의 상업적인 회수에는 오래전부터 이용

 전반적인 공정은 일반적인 금속 정·제련과 유사하지만, 불순물이 섞여 있는 폐제품으로부터 희토류를 선별하고 고순도의 희토류를 고효율·친환경적으로 얻기 위한 맞춤형 설계가 기술개발 방향의 핵심

2.1 해외 주요국 기술동향

 (미국) 국립연구소와 대학을 중심으로 친환경 파일럿 플랜트와 저비용·고효율 기술 개발을 추진 중이며, 대체 공급 원료(석탄재, 광산 폐기물 등)에서 희토류를 추출하는 기술에 초점

- (추출) 미국 에너지부(DOE) 산하 CMI*의 주도로 희토류 회수 및 추출 연구가 이루어지고 있으며, 특히 석탄재와 광산 폐기물로부터 희토류 추출 연구에 초점

* CMI(Critical Materials Institute)는 4개의 국립연구소와 15개 대학, 30개 이상의 민간기업이 참여하는 공공/민간 파트너십 연구 허브로, 핵심 물질에 대한 ① 공급망 다양화, ② 대체제 개발, ③ 재사용 및 재활용, ④교차 연구(Crosscutting Research) 수행

- (에너지기술연구소) 2026년까지 석탄재로부터 고순도 희토류를 1-3톤/일(day) 회수하는 것을 목표로 제시하고 3개의 소규모(100g/day) 파일럿 공정을 운영⁹⁾
- (AMES 연구소) 수용성 용액에서 구리를 포집 금속(Collecting Metal)으로 사용하는 선택적 희토류 추출 기술을 개발('19). 산을 사용하지 않아 환경 오염의 부담이 적은 이 기술은 2020년 TdVib 사에 기술 이전되었으며, 연간 희토류 산화물 3~5톤을 생산하는 시범 공장 설립 중('22)
- (웨스트버지니아대) 석탄 광산의 산성 폐기물로부터 순도 90% 이상(중희토류 45% 포함)하는 용매 추출법 및 자동화 추출 공정을 연구('21)
- (휴斯顿대) 'Flash Joule Heating' 반응을 이용, 석탄재로부터 희토류를 분리하는 초고속 (~3,000°C, ~1s), 저비용(\$12/ton)의 추출 기술을 발표('22)

- (원소 분리) 저비용·고효율 공정 및 친환경 원소 분리 기술개발 진행

- (리버모어 연구소) 희토류 회수 시 발생하는 산의 사용을 줄이기 위해 란모듈린 단백질을 이용한 습식-바이오리칭 복합 Nd-Dy 분리 기술개발('21)¹⁰⁾
- (방위고등연구계획국(DARPA)) RPOD('22~)와 EMBER('21~) 프로그램을 통해 전기화학적 환원을 이용한 고순도 회수기술 개발 및 미생물을 이용한 희토류 기술개발 등을 추진

〈표 5〉 DARPA가 추진중인 희토류 재활용 기술개발 내용

프로그램명	세부내용
Recycling at the Point of Disposal (RPOD)	(참여기관) 애리조나 주립대, 아이오와 주립대, 매사추세츠 공과대, TG社 (태양전지 재활용 스타트업) (추진내용) 선택적 침출·전해 공정 기반 습식제련 공정 개발, 전기 화학적 환원을 이용한 고순도 회수방법 개발(화학 폐기물 저감 목표)
Environmental Microbes as a BioEngineering Resource (EMBER)	(참여기관) 리버모어 국립연구소, 바텔 기념 연구소, 샌디에이고 주립대 (추진내용) 미생물을 이용한 희토류 분리 기술개발 및 파일럿 실증 추진

9) <https://netl.doe.gov/resource-sustainability/minerals-and-materials/program-overview/background>

10) Ziye dong et al., "Bridging Hydrometallurgy and Biochemistry: A Protein-Based Process for Recovery and Separation of Rare Earth Elements", ACS Cent. Sci., 7, 2021

 (EU) 유럽의 순환경경제 강조 및 폐기물 재활용 정책에 따라 영구자석에서의 희토류 회수 및 재활용 기술개발 확대

- (전처리) 영구자석으로부터 희토류 추출 효율을 높이기 위한 화학적 도금 박리 기술과 이를 기반으로 하는 전처리 자동화 공정의 실증 연구 진행 중
 - (버밍엄대) 영구자석 스크랩의 화학적 수소 처리(Hydrogen processing of magnet scrap, HPMS)를 통해 전처리(도금 박리) 시 자기 특성 회복률 90% 이상의 회수 기술을 개발하고('15) 이를 기반으로 100kg/일 규모의 자석 분리가 가능한 자동화 공정 시범 운영 ('22)
- (추출) 환경오염이 심각한 용매 추출법을 대체하기 위한 건식 공정, 바이오리칭 등 저비용·친환경 기술을 개발 중
 - (REE4EU 프로젝트) EU는 5년간 7,500만 유로를 투입하여 영구자석 및 이차전지 폐기물을 대상으로 하는 친환경 희토류 회수 기술개발에 투자. 이온성 액체 추출을 이용한 희토류 산화물 확보 및 고온 전기분해를 이용한 희토류 금속 제조 기술개발 수행
※ Horizon2020의 일환으로 REE4ER 프로젝트를 런칭 / (연구기간) 2015년~2019년, 7,500만 유로
 - (REEGain 프로젝트) 전자 폐기물 및 폐수에 함유된 희토류를 박테리아, 단세포 녹조류 및 극한 미생물 내에 축적시켜 희토류를 회수하는 기술 개발 추진. 친환경적임과 동시에 높은 회수율을 달성할 수 있을 것으로 기대(실험실 규모에서 회수율 75~80% 달성)
※ (연구기간) 2018년~2022년, (연구비 규모) 100만 유로

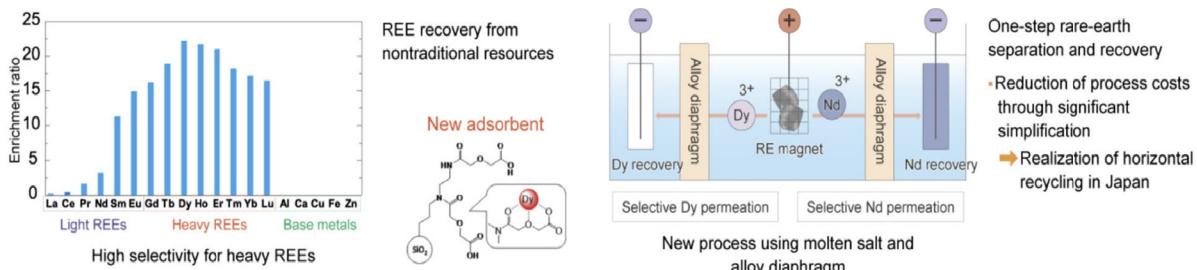


[그림 5] EU의 영구자석 전처리 시범 시설(좌), 희토류 추출(ILE 및 HTE) 파일럿 시설(우)
※ SUSMAGPRO 및 REE4EU 홈페이지

 (일본) 희토류 재활용 관련 최고 기술국으로, 2010년 이후* 정부의 적극적인 지원으로 상용화 가능한 수준의 기술개발 완료 및 공정 개선 지속 추진

* 2010년 중국의 센카쿠열도 분쟁으로 인한 희토류 수출 제한 조치 이후, 희토류 공급망 안정화를 위한 대체/저감/재활용 기술개발 중

- 일본 정부가 적극 추진한 희토류 관련 리사이클 기술개발 정책에 힘입어, 일본은 전처리-추출-분리 기술 모두 상용화 가능한 수준의 실증 기술을 확보한 것으로 판단
 - 낫산은 와세다 대학과 공동으로 전기자동차 등의 폐모터부품을 용해하여 희토류를 효율적으로 회수(회수 시간 8시간 → 4시간으로 단축)하는 방법을 세계 최초로 개발¹¹⁾
 - 이 외에도 도요타, 히타치, 미쓰비시, 파나소닉, 아사히, 도시바 등의 대기업에서 영구자석 분해, 추출, 원소 분리를 위한 기술들을 보유 중이며 실증화 단계 연구 완료
- 낫산, 도요타, 혼다 등 자동차 제조업체는 산-학 연계를 통해 공정 개선과 친환경 기술개발 중
 - (도쿄대/히타치) 포집금속을 이용한 희토류 추출 및 진공증류를 통한 희토류 금속 제조 기술 실증 연구 실시('17), 염화마그네슘을 이용한 건식 영구자석 추출 및 원소분리 방법 개발('18), 선택염화법을 이용한 희토류 선택적 회수 기술을 개발 중
 - (와세다대/낫산) 전기차 모터의 분해 없이 희토류 회수가 가능하도록 폐영구자석 내 희토류를 슬래그로 농축시켜 복합 희토류 산화물을 추출하는 건식제련법 개발('21) 및 100kg 규모의 용해로를 이용한 순도 99.3%의 희토류 회수 기술 실증('22)
- 산업기술총합연구소(AIST)는 자원순환기술 연구조직을 별도로 운영하고, 3대 연구 주제^{*} 중 2개를 희토류 관련 연구로 진행하며 희토류 회수 기술개발에 집중
 - * ① 간단한 희토류 자석 재활용 공정 개발, ② 비전통적 자원에서 희토류 회수 및 백금족 회수 기술 개발, ③ 이차전지에서 새로운 주요 금속의 회수 방법 공정 개발



[그림 6] AIST에서 개발한 희토류 추출을 위한 흡착제(좌), 영구자석 원소 분리 기술(우)

※ AIST 홈페이지

(중국) 세계 희토류 생산량의 대부분을 차지하는 중국은 재활용보다는 광산으로부터의 공급 및 생산 효율성 향상에 주력

- 희토류 광물이 풍부한 중국은 폐제품의 재활용보다는 주로 광산 채굴 시 생산 효율성 향상에 초점을 맞추어 기술개발 추진하고 있음

11) 사공목, 글로벌 희토류산업 환경변화와 일본의 대응 전략, 산업연(2021)

- 다만, 자국 내에 희토류 제조 공정을 보유하고 있는 만큼 양질의 스크랩 접근이 쉽고 사용 후 폐기물에 비해 공급 또한 용이하기 때문에, 제조공정 스크랩 내 희토류의 재활용률 향상을 위한 연구가 기업 중심으로 수행되고 있음
 - 광석 선광(추출) 및 제련(분리) 과정에서 나오는 폐기물에서 80~96%의 회수율로 희토류를 회수하고 있으며, 20만톤 이상의 희토류 산화물을 회수하는 것으로 추정¹²⁾
 - 최근 국제 표준화 기구인 ISO TC298 Rare Earths의 Working Group(WG) 2 Recycling에 보고·제안된 표준안^{*}에서, 사용 후 폐 스크랩의 재활용 관련 정책 추진을 중국 내에 이미 확보된 국내 표준의 글로벌화 방향으로 시도하고 있음을 확인

* ISO/DIS 24544 Recyclable Neodymium iron boron (NdFeB) resources - Classification, general requirements and acceptance conditions(2022.8월 기준 논의 중)
- 네오디뮴 영구자석 경우, 향후 시장의 수요가 폭발적으로 증가하고 단일합금으로서 희토류가 가장 많이 포함되어있음을 고려하여 최근 영구자석의 재활용에도 관심을 보이고 있음
 - 사용 후 폐제품 재활용 기술은 북경기술대학 등 대학을 중심으로 수행

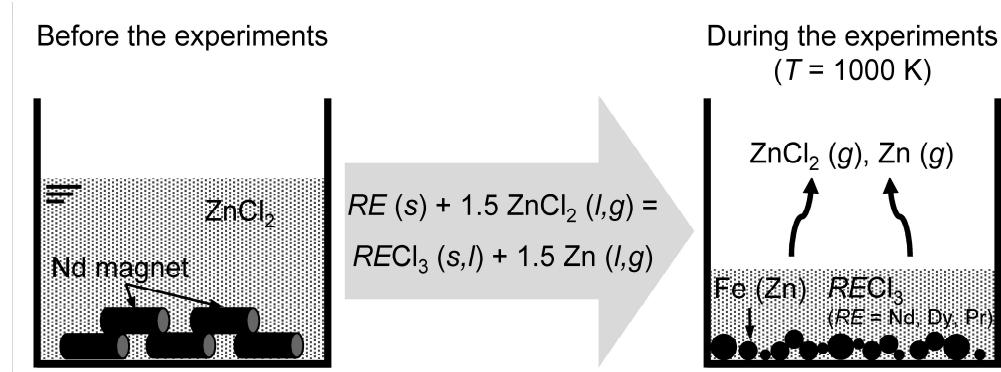
2.2 국내 기술동향

-  정부 R&D 투자를 통해 출연연과 대학을 중심으로 희토류 회수 및 재활용 연구 (영구자석 위주)가 수행 중이며 선도국(일본) 대비 기술 수준은 73.4% 수준¹³⁾
- 정부의 R&D 투자를 통해 한국지질자원연구원, 한국생산기술연구원, 고등기술연구원과 대학을 중심으로 형광체와 영구자석의 재활용을 위한 기술개발 중
 - 폐영구자석 재활용 기술을 포함한 희토류 제련을 위한 기술은 정부 R&D 투자를 통해 출연연 및 대학 중심으로 수행중이며 일부 기술에 대해 파일럿 규모 실증화 연구가 이루어짐
 - (전처리) 전처리 기술의 경우 일반적 파·분쇄가 주를 이루고 있으며 영구자석에서 희토류의 회수율 향상을 위해 불활성 가스 조건 하에서 파·분쇄 기술개발 중
 - 고등기술연구원은 희토류 자석의 자력 제거, 열처리, 분쇄를 통한 ‘희토류 자석의 재활용 방법’ 개발('19)
 - 한국생산기술연구원은 영구자석에서 희토류 추출 효율 향상을 위한 수소 처리 방법인 ‘영구자석 내 희토류 원소 추출을 위한 액상금속추출 방법’ 개발('20)

12) N. A. Mancheri et al. (2019), Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience, Resources, Conservation and Recycling, 142, 2019, 101–112

13) 중소기업 기술 로드맵, 최신 로드맵 자료보고서(2023~2025), 「희소금속 회수 시스템」.

- (추출·원소 분리) 한국지질자원연구원과 한국생산기술연구원에서 영구자석 재활용을 위한 희토류 회수 기술을 개발 중이며 용매 추출 분리법 기반의 파일럿 및 재제조 실증 단계
 - 한국지질자원연구원은 영구자석으로부터 희토류를 추출하는 황산복염침전법('18), 선택 염화법과 전해정련을 이용한 고순도 네오디뮴 회수 기술개발('20), 성립희토금속과 협업하여 희토류 회수 파일럿 공정 실증 완료('19)
 - 한국생산기술연구원은 불화물 용융염의 할로겐 치환반응에 의한 Nd와 Nd, Dy의 선택적 희토류 추출 기술개발('20)



[그림 7] 고효율·저에너지의 고속 선택염화법(한국지질자원연구원)

제3장 산업동향

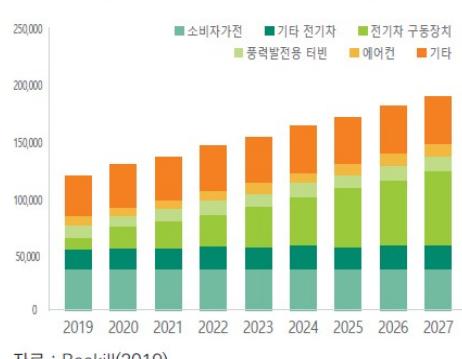
3.1 글로벌 산업동향

 (시장 규모) 희토류 재활용 시장은 2022년 2.62억 달러에서 2030년 6.23억 달러 규모로 연평균 11.4% 성장 예상¹⁴⁾

※ 전체 희토류 시장 규모는 '22년 63억 달러에서 '30년 174억 달러 규모로 연평균 13.5% 성장 예상¹⁵⁾

- 전기차와 풍력발전의 보급에 따라 구동모터에 사용되는 영구자석 수요의 급격한 증가가 예상되며, 폐기가 시작되는 2030년 이후 영구자석의 재활용 산업이 형성될 것으로 예상
 - EV 1대당 희토류 사용량은 Nd(0.25~0.5kg), 기타 희토류(0.06~0.35kg)이며 '40년까지 희토류 수요는 EV에만 6~15배의 증가 예상
 - 풍력발전의 희토류 사용량은 ('20) Nd(3.14천 톤), Pr(0.51천 톤), Dy(0.34천 톤), Tb(0.12천 톤)에서 ('30) Nd(8.5천 톤), Pr(1.5천 톤), Dy(0.95천 톤), Tb(0.35천 톤)으로 2~3배 증가 예상

■ 네오디뮴 영구자석 용도별 수요 전망(톤)



자료 : Roskill(2019)

■ 전세계 풍력발전 신규설비규모 전망(GW)



자료 : GWEC Global Wind Report 2021

[그림 8] 희토류의 주사용처인 영구자석 및 풍력발전 설비의 수요 전망

※ 출처 : 한국무역협회(2021)

14) Research and market(2023), <https://www.researchandmarkets.com/reports/5724168/rare-earth-metal-recycling-market#tag-pos-3>

15) Research and market(2023), <https://www.researchandmarkets.com/reports/5322966/rare-earth-metals-market-research-report-by-type#tag-pos-8>

- 희토류 재활용 산업은 아직 크게 형성되어있지는 않으나 자원 안보 측면에서 크게 확장될 것으로 기대되며, 많은 기업들이 각국 정부의 지원 하에 재활용 가치가 높은 제품·원소의 탐색 및 관련 기술개발을 추진하고 있음
 - 대표적인 희토류 재활용 솔루션 제공업체는 Sovay SA(벨기에), Hitachi Metals, Ltd. (일본), Umicore(벨기에), Osram Licht AG(독일), Energy Fuels, Inc.(미국), Global Tungsten & Powders Corps.(미국) 등이 존재



(미국) 연방정부는 국방부 중심으로 미국 내 영구자석 공급망을 갖추기 위한 기술 개발 및 사업화를 지원하고 있으며, Apple 등 첨단기업들 또한 희토류 확보를 위한 재활용 기술 투자 확대 중

- 미국은 1973년에 국방 분야에 사용되는 희귀 광물 및 철강 등에 자국산 원자재 사용을 의무화하는 규정을 마련한 바 있음. 1980년대 중반 이후로 희토류 생산이 감소함에 따라 유명무실한 법안이 되었으나, 향후 자국산 비중을 높이기 위해 전략 광물의 채굴, 가공, 재활용 비중을 높일 것으로 보임. 이에 따라 국방부를 중심으로 희토류 공급망 다변화를 위한 기술개발 및 사업화 집중 추진 중¹⁶⁾

※ '22년 9월 미 국방부는 최신 전투기 F-35 엔진에 사용된 희토류 합금이 중국산이라는 사유로 당초 주문한 126대의 인수를 중단했다가 중국산 의존의 불가피성을 인정하고 재개한 바 있음

- 미 국방부는 SBIR/STTR*을 통해 기술사업화 및 기술이전을 지원하고, 특히 미국 내 중 희토류의 채굴·재활용 공정 구축을 위한 공정 테스트 및 공장 설립 지원 강화

* Small Business Innovation Research(SBIR) / Small Business Technology Transfer(STTR)

- 미 국방부가 SBIR을 통해 영구자석 재활용에 투자한 금액은 '16년부터 '21년 6월까지 3,070만 달러에 이르며, DPA(Depense Production Act) Title III 프로그램으로 확대하여 스케일업 투자 중¹⁷⁾

- 국방부는 영구자석 스크랩으로 영구자석을 재제조하는 기술의 개발을 위해 Urban Mining에 2,880만 달러를 지원하였고('20), Noveon Magnetics 사에 3,500만 달러 규모의 지원으로 EV와 풍력발전기 모터의 영구자석 재활용 공장 건설('22)

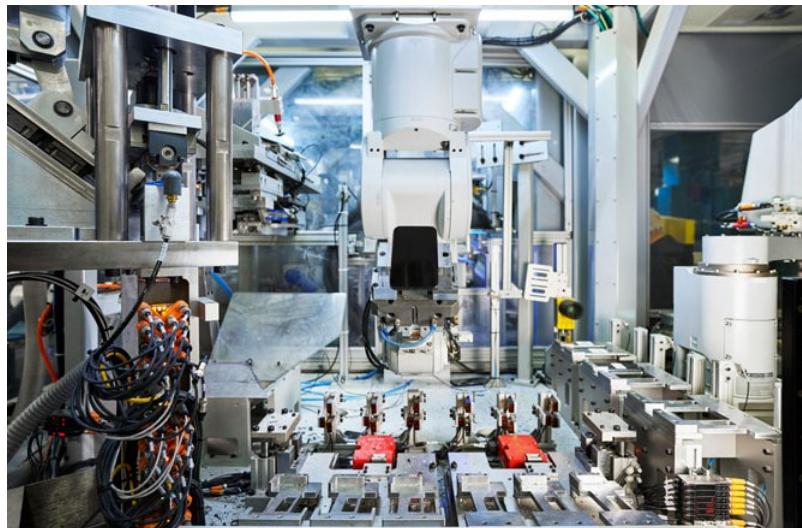
- 미국 유일의 희토류 광산을 운영 중인 MP Materials 사는 중희토류 분리를 위한 정제 공장 설립을 위해 국방부로부터 3,500만 달러 지원('22)을 받았는데, 여기에는 희토류의 재활용 계획이 포함

- 호주 Lynas 사는 첨단산업 폐수로부터 희토류 회수 기술이 포함된 중희토류 분리 및 처리 공장 구축을 위해 국방부와 1억 2천만 달러 계약 체결('22)

16) 한국무역협회, 미국의 '희토류 독립'과 한국의 역할, 2022.10.26.

17) The White House (2021), 'Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, And Fostering Broad-Based Growth(100-Day Reviews under Executive Order 14017)'

- (Apple) 애플의 재활용 연구소인 Material Recovery Lab(MRL)를 운영하여 유용자원 회수 및 재활용 추진 중
 - 애플은 자체 개발한 자석 선별(수집) 로봇 ‘타즈(Taz)’를 통해 오디오 모듈에서 자석을 분리하여 희토류를 회수
 - 분해 및 해체 로봇 ‘데이지(Daisy)’를 통해 연간 120만 개의 아이폰을 분해하고, 유용자원 회수 로봇인 ‘데이브(Dave)’ 등을 통해 제품에 사용되는 희토류의 45% 이상을 재활용 원료로 사용¹⁸⁾



[그림 9] 애플의 분해 및 해체 로봇 ‘데이지(Daisy)’의 모습

※ 출처 : Apple(2022)

 (EU) EC는 영구자석 재활용 프로젝트를 통해 상용화 목적의 영구자석 재활용 공정에 대한 산학연 공동 연구를 지원 중이며, 화학 소재 기업과 재활용 전문업체들은 형광체 재활용 공장을 운영 중

- 영국의 버밍엄대는 영구자석 재활용을 위한 자성 스크랩의 수소 처리 기법 개발로 UKRI의 지원을 받아 영구자석 재제조 업체인 HyProMag을 설립('19)
 - UKRI(3,300만 파운드)와 Horizon 2020의 지원으로 40여 개 산학연 그룹과 함께 100kg/day 규모의 영구자석 재활용 산업화 센터 구축 중('22)
- 벨기에 Solvay 사는 희토류 분리, 정제, 가공의 허브를 설립하기 위해 프랑스 La Rochelle에 1,500만 유로 규모의 영구자석 희토류 재활용 공장을 운영 중이며, 영구자석 재활용 사업 확장 계획 발표('22)

18) Apple(2022), ‘Environmental_Progress_Report’

- 영국 LCM(Less Common Metals)사는 REE4EU 프로젝트를 통해 개발된 이온성 액체를 이용한 추출 및 고온 전기분해 기술을 활용해 상용화급 재활용 기술개발 중
- 이탈리아 Relight 사는 자동화 분류 공정으로 다양한 전자 제품의 형광체에서 희토류(Y, Er, Gd, Te, Ce, La)를 추출하는 공정을 가동 중이며 연간 4만 톤 규모의 재활용이 가능하고 2015년 21,000톤의 전자 폐기물을 재활용
 - 그 밖에도 프랑스 Rhodia 사, 독일 Osram 사는 형광램프 재활용으로 희토류를 회수하는 상용 희토류 형광램프 재활용 공정 운영 중

 (일본) 2010년 초반부터 NEDO의 지원으로 재활용 기술개발이 추진되었으며, 금속 및 제조 기업과 재활용 업체를 중심으로 소규모 재활용 공정 운영 중

- NEDO의 지원 하에 개발된 기술들은 기업으로 이전 및 사업화되어 자동차, 형광체, 에어컨 컴프레셔, HDD, 영구자석 등의 분야에서 회수 및 재활용 사업이 추진되고 있음¹⁹⁾
 - 기업의 전문 분야에 맞게 전처리(분해 및 해체, 탈자, 자석 회수), 원소 추출 및 회수 분야에서 각각의 사업을 추진 중
- 닛산, 도요타, 혼다 등 자동차 제조업체는 전통적 방식을 이용한 영구자석 재활용 기술을 보유하고 있으며 대학과 연계하여 공정 개선 및 친환경 기술개발 중
 - 닛산은 와세다대와 건식 공정인 고온 용융 슬래그를 이용한 영구자석 재활용 기술의 실증 테스트를 진행 중이며, 20년대 중반까지 상업화 수준 개발 목표 발표²⁰⁾

〈표 6〉 일본 내 영구자석(Nd, Dy) 재활용 기업 리스트

구분	사업 영역	회수 및 재활용 기술 및 사업 현황
아사히 프리텍	귀금속 및 희귀금속 재활용	모터 분해 기술개발 완료 및 사업화에 대한 채산성 재검토 단계
오와키 상점	금속 폐기물 재활용 기업	옥살산염을 이용한 Nd, Dy 고순도 회수 시스템 개발 및 실증 완료
마크 코퍼레이션	사용 후 자동차 재사용·재활용 전문 기업	HEV의 구동 모터 분해 및 영구자석 소자 회수 기술 보유
그린 사이클즈 시스템	사용 후 제품의 재활용, 재소재화	에어컨 컴프레셔로부터 자동 해체 및 영구자석 탈자 후 회수 기술 보유
싸움씨 기술 개발	희토류 회수 장치 제조, 희토류 분리 회수 처리, 분석 위탁	에멀전플로우를 이용한 저비용(20%), 고수율(10배), 고순도 희토류 원소 분리 기술 보유
타구치 금속	철·비철금속의 재활용	에어컨 컴프레서를 해체하여 로터에 포함된 네오디뮴 자석을 탈자 회수

19) <https://www.cjc.or.jp/raremetal/company-list>

20) <https://www.just-auto.com/news/nissan-testing-new-rare-earth-recycling-process/>

구분	사업 영역	회수 및 재활용 기술 및 사업 현황
도시바	종합 전자기기	건식 용융염 전해 방법을 이용한 산업용 영구자석 모터의 재처리 기술로 Nd 및 Dy의 선택적 회수 및 재제조
히타치 금속	제조업	자석 제조 공정 내 슬러지에서 탄소 열 환원법에 의한 희토류 회수 및 재활용 보유 및 재활용 사업 수행 중 HDD와 에어컨 컴프레셔의 영구자석 회수 전처리 공정 기술(분해 및 탈자, 자석 분리) 보유, 회수 후 자석 제조회사에 매각
도요타	자동차 제조업	제품 회수부터 모터 분해-원소 회수까지 모든 공정의 기술을 갖고 있으며, 실증 플랜트 완료 후 도요타 메탈을 통해 영구자석 회수 중
혼다	자동차 제조업	일본중화학공업과 협력하여 2012년 자동차 사용후 부품(Ni-MH 배터리 등)에서 희토를 추출 양산 공정 확립 및 2013년부터 재생 희토류 전지 공급
파나소닉 (에코 테크놀로지)	가전 리사이클링	에어컨 컴프레셔의 전처리 단계인 분해 및 탈자 기술 보유, 실증 시험 완료
미쓰비시	전기 및 소재 제조업	에어컨 컴프레셔, 자동차 구동모터의 공진 감쇠형 탈자법을 사용한 자동 해체 장치 개발 및 실증 완료, 실증화 추진 중

※ 출처 : 일본 산업 환경 관리 협회(cjc.or.jp)

- 한편, 일본의 주요 자동차 제조사는 전기차 구동용 모터에서 필요로 하는 희토류 사용량을 감축하며 중희토류 의존도를 낮추는 방향으로 기술개발 추진 중²¹⁾
 - 닛산자동차는 EV ‘아리아’에 영구자석을 사용하지 않는 권선계자형 모터(WRSM, Wound Rotor Synchronous Motor)를 사용함으로써 ’25년에는 중희토류 사용량을 1% 미만으로 낮추는 목표를 제시, 이스즈자동차는 EV ‘엘프’에 영구자석을 포함하지 않는 유도 모터를 사용

(중국) 세계 선두 수준의 희토류 분리·추출 기술을 보유하고 있으며 공정 폐기물 및 희토류 회수를 위한 상용 공정을 운영 중

- 중국은 희토류 생산 및 수출을 엄격히 통제·관리하는 한편, 희토류 산업의 질적 성장을 유도하기 위한 업계 재편을 2011년부터 대대적으로 추진
 - 중국 공업정보화부의 희토류 산업개발 계획(2016~2020)에 의해 중국 희토류 시장은 6대 희토류 그룹^{*}이 주도하는 구도로 재편
 - * 중국희유희토, 중국오광희토, 중국북방희토, 샤먼텅스텐희토, 중국남방희토, 광동성희토산업
 - 중국 산업기술정보부는 희토류 생산량 통제 강화와 희토류 산업의 질적 고도화 추진('16)

21) 글로벌 공급망 분석센터, 中 희토기술 수출 규제 강화에 따른 日 시장 동향 및 업계 대응, 글로벌 공급망 인사이트 Weekly 제56호, 2023.5.4.

- 2021년 중국희토그룹(China Rare Earth group)^{*}의 설립으로 중국의 희토류 산업은 신설 중국희토그룹과 기존의 북방희토그룹 투톱 체제가 되었으며(2개 그룹이 생산량의 90% 장악), 희토류 산업에 대한 정부의 통제력 강화
 - * 중국 국유기업(중국알루미늄그룹, 중국우광 그룹, 간저우 희토그룹)과 연구개발형 기업2곳(톄옌과학 기술유한회사, 유연과학기술유한공사)을 통·폐합해 만든 세계 최대의 국유 희토류 기업
- 중국희토그룹은 중국의 3대 이동통신업체 중 하나인 차이나모바일과 전략적 협정을 체결하며 희토류 산업의 디지털 전환 계획을 발표
 - ※ 전문가들은 중국 희토류 산업이 정밀화, 지능화, 기술력 측면에서 더욱 성장할 것으로 기대
- 현재 중국 내 희토류 폐기물 처리능력은 약 20만 톤으로 희토류 분리·추출 생산능력으로 환산하면 약 8만 톤 이상으로 추정²²⁾
- 중국희토그룹은 지역 연구기관, 대학과 협력하여 연 5만톤 규모의 희토류 채광–제련–가공 중 발생하는 폐기물의 희토류 회수 연구 추진('21)
- 중국 희토류 재활용 업체인 Ji'an Xintai Technology 사는 1년간 600톤 규모의 재활용 된 프라세오디뮴 산화물과 네오디뮴 산화물을 애플에 공급 계약 체결 발표('22)²³⁾
- 영구자석 제조업체인 JL MAG Rare-Earth 사는 멕시코에 연간 5,000톤 규모의 스크랩 합금 처리가 가능한 영구자석 재활용 공장 건설을 위해 1억 달러 투자 발표('22)²⁴⁾

3.2 국내 산업동향

-  (국내) 현재까지 상용 공정을 운영 중인 희토류 재활용 기업은 부재하며, 영구 자석 재활용의 상용화를 위한 기술개발 및 파일럿 규모 테스트 진행 중
- 글로벌환경기술개발사업을 통해 국내 유일 영구자석 제조업체인 성림첨단산업(자본출자)과 한국지질자원연구원(기술출자)이 희토류 재활용을 위한 연구소기업인 성림희토금속을 설립 ('15)하고 영구자석으로부터 침출과 원소 분리, 소재화를 위한 파일럿 공정 실증 완료('19)²⁵⁾
 - 전통적 방식의 습식 기반 폐영구자석 재활용 공정 실증 완료

22) KIET(2021), '중국 희토류산업 동향과 정책적 시사점'

23) <https://www.yicaiglobal.com/news/china-huahong-surges-after-unit-inks-deal-to-supply-apple-with-recycled-rare-earth-oxides>'

24) <https://www.yicaiglobal.com/news/china-jl-mag-to-build-usd100-million-rare-earth-magnet-recycling-facility-in-mexico>

25) 환경부 글로벌환경기술개발사업 Phase II, '폐 영구자석으로부터 희토류 금속회수 상용설비 개발 및 기술실증' 최종보고서, 2019. 7.



[그림 10] 폐 영구자석 재활용 Pilot-Plant 공정도

※ '폐 영구자석으로부터 희토류 금속회수 상용설비 개발 및 기술실증' 최종보고서(2019)

- 성립첨단산업은 '22년 중국으로부터 리쇼어링하여 대구에 영구자석 제조 공장을 건설하였고 '24년에는 베트남에 영구자석 재활용 공장 건설 계획
- 한편, 현대자동차, 포스코, 삼성SDI 등의 대기업이 습식법을 활용한 영구자석 재활용 기술을 개발하였으나, 상용화된 공정은 운영되고 있지 않음
- (표준화 동향) 부족한 희토류 산업기반을 극복하기 위해 한국생산기술연구원과 한국기계전기전자기술연구원의 주도의 적극적인 국제 표준화 수행으로 희토류 재활용과 관련된 3건의 ISO 표준 채택 및 추가적인 표준화 제안 수행 중²⁶⁾

〈표 7〉 한국이 제안한 ISO TC 298(희토류) 관련 표준

구분	제목	설명
ISO 22450	희토류 원소 재활용 - 산업 폐기물 및 폐기 제품에 대한 정보제공 요구사항	• 희토류 관련 폐기물 분류와 각 분류 코드 제안
ISO/TS 22451	희토류 원소 재활용 - 산업 폐기물 및 폐기 제품의 희토류 원소 측정 방법	• 제품 내 희토류 함량을 정량적으로 분석하는 XRD, ICP-OES, ICP-MS의 측정법 설명
ISO 22453	산업 폐기물 및 폐기 제품의 희토류 원소 정보 교환법	• QR 코드를 통한 정보교환 관련 정보의 생성법과 QR 코드를 통해 제공해야 할 표준화된 정보 목록

※ 출처 : 「ISO TC 298에서의 희토류 재활용 관련 국제 표준화 현황」, 저자 재구성

26) 이미혜 et al. (2022), 「ISO TC 298에서의 희토류 재활용 관련 국제 표준화 현황」

제4장 정책동향

 중-일 갈등의 여파로 발생한 희토류 가격 폭등('10) 및 팬데믹 이후 나타난 공급망 재편 현상은 주요국의 희토류 공급망 안정화 정책을 강화

- 중국 정부가 지속적으로 희토류 공급망 점유율 확대 및 희토류 자원 무기화 정책을 추진함에 따라 각국은 **對중국 수입의존**에 대한 위기의식이 확대
 - 중국 정부는 희토류 수출쿼터 부과('98), 수출허가총량제도 도입('04), 수출세 과세('06), 세율 인상('08) 및 **對 일본 희토류 금수조치('10)** 등의 정책으로 영향력 행사
※ WTO의 판결로 수출 쿼터와 수출세는 2015년 폐지되었으나, 중국 정부는 생산 총량을 통제 중
- 주요국은 전략적 안보 물자에 희토류를 포함하고, 역내 희토류 생산 확대, 우방국을 중심으로 하는 공급망 재편 및 희토류 재활용을 포함하는 공급망 안정화 정책 수립

〈표 8〉 주요국의 핵심광물(희토류 포함) 지정현황 및 선정기준

	국가별 핵심광물 명칭 및 지정현황	선정기준
미국	핵심광물 50가지	• ① 경제안보에 필수적으로 필요한 비연료광물, ② 공급망 취약, ③ 제조업 필수원료
	희토류 17종 중 14종을 개별 지정	
EU	핵심원자재 30가지	• EU 내 경제적 중요도 및 공급위험 등을 평가
	경희토류·중희토류 2종 지정	
일본	희소금속 34가지	• 공급·가격·수요 리스크, 재활용 제한성, 수요측면 잠재 위험도 등 평가
	희토류 17종을 1종으로 지정(한국과 동일)	

※ 출처 : 산업부, 핵심광물 확보전략

4.1. 해외 주요국 정책동향

 (미국) 희토류를 핵심 물자로 지정하고 중국 의존도를 낮추기 위해 에너지부와 국방부를 중심으로 다양한 희토류 공급망 확보 정책 추진

- 미-중 패권 경쟁 이후, 중국 의존도 감소를 위해 동맹국 협력을 강조하며 자국 내 광산 개발, 대체재 개발, 재활용 확대 등 공급망 다변화 정책 추진 중

- 에너지부는 「Critical Minerals and Materials」('21)의 4대 원칙의 첫 번째로 핵심 광물 및 소재 공급망 다원화-대체재 개발-재활용 개선의 3대 축을 설정²⁷⁾
- 「EO14017(America's Supply Chains)」('21)에서 4대 핵심 품목(반도체, 배터리, 의약품, 희토류) 공급망의 취약점을 검토하고 동맹국들과의 공급망 협력과 희토류를 포함한 중요 광물에 대한 재활용 확대를 권고²⁸⁾
 - ※ 최종 제품에 대한 회수 및 수거 계획의 수립, 최종 제품의 재활용을 고려한 설계, 재활용에 대한 소비자 인식 제고, 회수 및 수거에 대한 주(지역별) 규정의 차이 등 정책적 선결 과제를 제시
 - ※ 중국을 배제한 희토류(영구자석) 밸류체인 구축을 위해 우방국의 생산 가능 현황 제시
- 「인프라 투자 및 일자리법(Infrastructure Investment and Jobs Act, IIJA)」('21)을 통해 희토류를 포함한 핵심광물의 재활용에 대한 연구와 희토류 실증 및 수급 안정화 지원 방안 발표
- 「국방물자생산법(Defense Production Act, DPA)」('22)을 통해 희토류를 포함한 핵심 광물 및 원자재의 공급망 안정화를 위한 채굴, 생산, 가공 프로젝트와 재활용 프로젝트에 보조금 지원 방안을 마련하고 미국 최초의 역내 자석 공급망 출범 촉발²⁹⁾

| 네오디뮴 영구자석 공급망의 각 단계별 생산가능 국가 현황

국가명	채굴	혼합물	분리		환원 후 금속화	자석합금	소결 및 자석생산
			LREE	HREE			
호주	●	시험중					
미얀마	●	●					
부룬디	●						
중국	●	●	●	●	●	●	●
에스토니아			●				
독일							●
프랑스			●	●			
말레이시아		●	●				
러시아	●	●	●				
인도	●	●	●				
일본				●	●	●	●
카자흐스탄			미가동				
미국	●	**	**	**	미가동	미가동	**
영국					●	●	
베트남					●	●	●
기타	●	●	●		●	●	●

주 : **으로 표시된 부분은 미국이 국내에서 구축 진행중인 단계를 의미

자료 : 100-Day Reviews under Executive Order 14017

[그림 11] 영구자석(NdFeB) 공급망의 단계별(채굴-제조) 생산가능 국가 현황

※ 출처 : 한국무역협회(2022)주요국의 핵심광물 확보전략과 시사점(원 자료: White House(2021))

※ 채굴부터 자석의 제조까지의 6단계 공급망에 모두 참여하는 국가는 중국 외 전무

27) U.S. DOE(2021), 'Critical Minerals and Materials: US Department of Energy's Strategy to Support Domestic Critical Mineral and Material Supply Chains'

28) The White House (2021), 'Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, And Fostering Broad-Based Growth(100-Day Reviews under Executive Order 14017)'

29) <https://www.barnesrichardson.com/defense-production-act-invoked-for-critical-minerals>'



(EU) 범유럽 공공기금을 활용한 유럽 내 핵심 광물 생산역량 강화 및 자원순환 관점에서의 희토류 재활용 정책 수립 및 권고

- 「핵심원자재 복원 계획(Critical Raw Materials Resilience)」('20)의 주요 정책으로 역내 생산 및 재활용 투자 확대를 발표하고, 재활용을 통한 리튬과 희토류 확보가 담긴 「핵심 원자재 법(Critical Raw Materials Act)*」 초안 발표(23.03.16)

* ① 핵심 원자재 연간 소비량의 10% 이상을 역내 추출, 40% 이상을 역내 가공, 연간 소비량의 15% 이상을 재활용, 전략원자재별 단일 수입원 비중은 연간 소비량의 65% 이하 달성을 목표

② 핵심 원자재 관련 연구, 혁신, 기술에 대한 투자.

③ 광산 폐기물 회수 및 영구자석의 재활용을 위한 순환성 요구사항 총족 및 재활용 관련 정보제공

- 유럽 전역에서 핵심 광물에 대한 탐사 및 채굴이 활발히 진행되고 있으며, 유럽 원자재 기금은 EU내 희토류·영구자석 생산을 위해 약 20억 유로에 달하는 투자를 발표('23)³⁰⁾

- 유럽연합 내 다양한 협회 및 정책 제안 기구를 운영하고, 전략 광물의 확보를 위한 금속 회수 및 재활용 촉진과 주민 수용성 제고, 인식 확산을 위한 정책 마련

- 2020년 9월 유럽원자재연합(ERMA: European Raw Materials Alliance)을 결성하여 희토류 및 전략광물의 친환경적이고 안정적인 확보를 추진

- 유럽 희토류 역량 네트워크(European Rare Earth Competency Network, ERECON, 2013~)을 운영하며 핵심 과제 및 권장 사항을 개발

※ ERECON의 주요 논의사항 : 유럽에서 희토류의 1차 공급을 위한 기회와 장애물, 유럽 희토류 자원 효율성 및 재활용, 유럽의 최종 사용자 산업과 희토류 공급 트렌드와 과제

- EU는 2020년 신순환 경제 실행계획을 통해 순환경제 활성화 방안을 제시, 핵심 산업의 가치사슬에서 폐기물 발생의 억제 및 지속 가능한 비즈니스 모델 강화를 제안

※ 원소별 희토류 재활용 현황: 재활용이 용이한 형광체의 Y(31%), Eu(38%)은 재활용률이 높지만, 영구자석에 포함된 Nd(1% 미만), Dy(0%)의 재활용은 미미, 희토류 전체에 대한 재활용률은 1% 미만



[그림 12] 유럽연합(EU)의 원소별 재활용률

※ 한국무역협회(2022), 주요국의 핵심광물 확보전략과 시사점(원 자료: EC)

30) <https://www.reuters.com/markets/europe/european-fund-critical-minerals-projects-launch-next-year-2022-06-17/>

 (일본) 경제산업성 주도 3R(Reduce, Replace, Recycling) 정책을 통해 희토류 재활용을 추진 중이며 적극적인 제3국 광산개발 등 중국 의존도를 낮추기 위한 공급망 다변화 정책 추진

- 중국의 희토류 수출금지 이후('10), 제3국 희토류 개발 프로젝트 투자를 통해 중국 의존도를 58%('20)까지 낮췄으며 '25년까지 중국 의존도를 50% 이하로 낮추는 목표를 발표
- 일본 에너지·금속광물 자원 기구(JOGMEC)를 중심으로 희토류를 포함한 희소금속 공급망 안정화 정책을 추진 중이며, 제3국(호주, 카자흐스탄, 인도, 베트남 등) 희토류 광산과 희토류 정제 공장(미얀마, 베트남)에 투자하는 등 희토류 기술을 바탕으로 희토류 밸류체인을 구축
- 「2050년 carbon neutral 사회 실현을 향한 광물자원정책」('21)을 추진하며 에너지 전환·변혁에 따라 필요한 희소금속의 비축뿐 아니라 효과적인 재활용 시책 제시
 - 희소금속 수급을 위해 재활용을 강조한 「Rare Metal 확보전략」('09), 「Rare Earth 종합 대책」('10), 「신·국제자원전략」('20)을 순차적 발표³¹⁾

 (중국) 압도적인 희토류 생산·가공 점유율을 바탕으로 회수 및 재활용을 포함하는 희토류 산업의 고도화 정책 추진

- 희토류 수출 쿼터 축소 발표('12) 등 자원 무기화 정책과 국유기업 중심으로 매년 생산 총량을 기업별로 할당하는 생산 총량 지표 도입으로 희토류 생산 통제^{*32)}
- * 희토류 채굴 총량(천 톤) : 105('17)→ 120('18)→ 132('19)→ 140('20)→ 168('21)→ 210('22)
- 공업신식화부와 자연자원부는 희토산업 관리 규범화라는 명분으로 「희토류 관리조례」 ('21)를 발표하며 생산·수출을 관리하고 외국인의 중국 내 광산투자 및 원광 수출을 통제
- 상무부는 「수출금지 및 수출제한 기술 목록 공개 의견 수렴안」('22.12.)에 희토류의 정제·가공·이용 기술을 추가하며 미-중 패권 경쟁의 대응 방안으로 희토류를 사용
- 「14차 5개년 계획」의 원자재 산업 발전 계획('21)에서 희토류 산업 클러스터를 조성하고 희토류 신기술 R&D, 기술 엔지니어링 및 산업 응용을 위한 기술 혁신 강조
 - 희토류 2차 자원의 전면적 회수를 위한 과학적 메커니즘 구축과 녹색 및 저탄소 기술 수준 고도화, 재생 가능 자원 재활용 프로젝트 구축 제시

31) 김윤경(2021), 일본의 광물자원 확보전략, 한국자원공학회 58(6)

32) 산업자원통상부(2022), 「글로벌 공급망 인사이트(2022년 제9호)」

- 2035년 장기 목표에 자원순환체계 구축 및 개선을 위한 폐기물 재활용 시설 건설 및 분류 시스템 개선 생산자 책임 시스템 적용 범위 확장, 재활용 촉진 목표

〈표 9〉 중국의 희토류 재활용 촉진을 위한 국가 정책³³⁾

	주관부처	내용
희토류 관리에 관한 규정 ('21.1.)	공업정보화부(MIIT)	<ul style="list-style-type: none"> • 희토류를 포함하는 2차 자원 재활용을 위한 환경친화적인 기술 및 공정의 사용 장려 및 지원, 자원순환형 산업체제 구축
“14차 5개년” 순환경제발전계획 ('21.12.)	국가발전개혁위원회	<ul style="list-style-type: none"> • 자원 재활용 효율 향상과 자원의 활용 수준 향상 • 폐비철금속, 폐자동차 등 도시폐기물의 분류 및 처리 촉진과 재활용 및 활용에 대한 산업 표준 관리 구현
자원종합이용을 위한 부가가치세 정책 개선에 관한 공고 ('21.12.)	재정부 및 국가세무총국	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용 업체의 재활용 자원 판매에 대하여 3% 과세율로 간이세액 계산 방식 적용 또는 일반세액계산 적용으로 재활용 산업 활성화를 위한 인센티브 제공

4.2. 국내 정책동향

 재활용 정책은 산업부(재활용 산업 육성)와 환경부(순환경체 시스템구축)를 중심으로 희소금속 공급망 강화 및 자원순환 목적의 재활용 확대 정책 추진

- 희소금속 35종(56개 원소)의 하나로 희토류를 지정해 자원 안보, 공급망 관리 강화 정책을 추진하고 있으며, 희소금속 전체의 확보-비축-순환을 위한 정책 추진 중
 - 산업부는 재활용을 포함한 전반적인 희소금속 산업 육성을 위한 인프라 지원과 공급망 확보 목적의 비축 확보전략 추진 중
 - 희소금속 공급망 안정화를 위한 재활용 활성화가 포함된 전략인 「희소금속 산업 발전대책 2.0」('21) 발표
 - 「산업혁신기반구축 로드맵('23~'25)」의 52개 과제 중 하나로 희소금속 회수 및 공통 활용 기술을 선정, GVC 대응 목적의 핵심 희소금속의 시생산 및 기반구축 지원 발표('22.4.)
 - 최근 「핵심광물 확보전략」('23.2.)을 발표하며 10대 전략 핵심광물*의 특정국 의존도를 80%에서 50%로 완화하고, 2%대인 재자원화를 20%대로 확대 목표를 발표
- * 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 흑연, 희토류 5종(Nd, Dy, Tb, Ce, La)

33) https://www.sohu.com/a/605585386_120113054

〈표 10〉 산업부 희토류 관련 정책 동향

안건명	희소금속 소재산업 발전 종합대책('21)	산업혁신기반구축 로드맵('22)	핵심광물 확보전략('23)
비전	산업 공급망의 안전성·복원력을 높이는 희소금속 안심국가 실현	-	안정적 핵심광물 공급망 확보를 통해 첨단산업 강국 도약
목표	100일분 비축 확보(現) 평균 56.8일분), 100대 핵심기업 육성, 튼튼한 희소금속 생태계	희소금속 산업용 원료 시생산설비, 품질인증 기반 구축	10대 전략 핵심광물 특정국 의존도 50%대로 완화, 재자원화 20%대로 확대
세부 내용	확보-비축-순환 3중 안전망 강화, 기업 성장패키지 지원, 강력한 희소금속 추진체계 구축	핵심 희소금속 원료 시생산 및 품질인증 기반 구축('24~'26), 실증지원·운영 서비스('27~'28)	위기대응능력 강화, 핵심광물 확보 다각화, 체계적인 핵심광물 인프라 구축

- 환경부는 순환경제사회를 만들기 위한 법 제정, 기준 마련, 인식 개선 등 사회적 시스템 구축과 폐기물 저감, 순환이용 및 처분(재활용 포함) 정책 추진
 - 자원의 생산-소비-관리-재생 4단계*에 걸친 전 과정의 순환이용 체계 구축을 위한 「제1차 자원순환기본계획('18~'27)」은 단계별 추진과제를 제시
 - * 4단계 중 미래 폐자원 재활용기반 구축단계인 재생 단계에서 4대 전략 희소금속(리튬, 탄탈륨, 타이타늄, 희토류)의 회수 및 소재화 기술개발 추진내용을 포함
 - 2016년 제정한 「자원순환기본법」('18년 시행)을 22년 12월, 「순환경제사회 전환 촉진법」으로 전면 개정('24.1.1 시행 예정)하며 순환경제 전환(생산-소비-재활용)을 본격 추진
- 과기정통부는 「자원기술 R&D 투자 혁신전략」('20.4.)과 후속 안건인 「자원기술 R&D 투자 로드맵」('21.4.)을 발표하며 자원기술(개발·순환) 공통기반 고도화 방안과 폐자원 효율적 처리·재활용을 위한 R&D 방향 제시

제5장 R&D 투자동향

5.1 주요국 R&D 투자동향

 (미국) 에너지부 통해 국립연구소 및 대학 주도 희토류 재활용 기술을 개발하고 국방부를 통해 산업체에 보조금 형태의 지원 중, 석탄재와 광산 폐기물로부터 희토류를 회수하기 위한 프로젝트 중심의 R&D 투자³⁴⁾

- 에너지부는 미국 내 핵심 소재의 공급망 확보를 위해 13개 국립연구소 및 대학 주도 희토류 및 백금족 재사용 및 재활용 개선 연구프로젝트에 3,000만 달러 투자('21.2)
- 에너지부 산하 국립연구소 NETL은 석탄재에서 희토류 회수 기술개발을 위해 5년 동안 ('14~'18) 연간 1,500달러 규모의 자금 지원을 받았으며 2019년 1,800만 달러, 2021년 2,300만 달러 자금 지원
- 국방부는 상용 원소 분리 방법인 용매 추출(SX) 공정 개선을 위한 RapidSX 기술개발을 위해 Ucore사에 180만 달러 지원('20)³⁵⁾, DARPA의 상용화 목적의 희토류 회수 및 재활용 연구 프로그램 ‘EMBER 프로그램’과 ‘PROD 프로그램’의 대상 연구기관으로 주립대학과 국립연구소에 지원하여 재활용 R&D에 투자
-  (EU) 영구자석 가격의 급격한 상승과 탄소중립 달성을 위한 수요 증가로 다양한 희토류 회수 및 재활용 프로젝트를 진행 중이며, 영구자석의 회수 및 재활용에 집중하여 공정 및 기술개발에 지속적으로 투자
- ERMA(European Raw Materials Alliance)의 보고서에 따르면, 유럽연합 내에서 희토류 관련 전체 프로젝트에 17억 유로가 투자되고 있으며 재활용에만 3억 유로 투자('21)³⁶⁾

34) [https://www.iea.org/policies?country\[0\]=United%20States&type\[0\]=Finance&type\[1\]=Loans%20%2F%20debt%20finance&type\[2\]=Loan%20guarantee&type\[3\]=Grants&topic\[0\]=Critical%20Minerals](https://www.iea.org/policies?country[0]=United%20States&type[0]=Finance&type[1]=Loans%20%2F%20debt%20finance&type[2]=Loan%20guarantee&type[3]=Grants&topic[0]=Critical%20Minerals)

35) <https://www.newsfilecorp.com/release/52447/Ucore-Announces-Technical-Services-Agreement-with-Innovation-Metals-Corp.-for-RapidSXTM-Rare-Earth-Element-Separation-Technology-Testing>

36) ERMA. (2021), ‘Rare Earth Magnets and Motors : A European Call for Action’

- EC는 최근 10년간 희토류 재활용 전용 R&D 프로젝트에 6,400만 유로 이상 투자하였으며, 산-학 공동 연구로 영구자석 재활용 파일럿 공정 개발 위주의 연구 수행 중

〈표 11〉 EU 희토류 재활용 전용 사업

프로젝트명	총 예산 (만 유로)	사업기간	목적
SUSMAGPRO	1,300	'19~'23	• 영구자석 재활용 기술개발
SecREEtS	1,288	'18~'22	• 인회석으로부터 희토류 원소 회수
REEPRODUCE	1,005	'22~'26	• 영구자석 회수 공정 개발
REE4EU	752	'15~'19	• 영구자석 및 폐기물 재활용 공정 개발
REECOVER	600	'13~'16	• 전자폐기물로부터 건식 전해환원을 이용한 희토류 회수 기술 개발
NEOHIRE	444	'17~'20	• 영구자석 저감 및 재활용 기술개발
EREAN	390	'13~'17	• 희토류 재활용
REMANENCE	372	'13~'16	• 희토류 영구자석 재활용 기술개발
REMAGHIC	325	'15~'18	• 희토류 회수 및 마그네슘 재활용 기술개발

※ 출처 : EC, Research and Innovation, Project databases 검색

(중국) 국립자연과학재단을 통한 기초연구 투자와 국영 희토류 기업의 R&D 투자 권고를 통해 공정 회수 기술과 영구자석 재활용을 위한 기술혁신 강조

- 국립자연과학재단(NNSF, National Natural Science Foundation of China)을 통해 기초 연구와 랩스케일 단위의 친환경 기술개발을 지원
- 희토류 산업 개발 계획('16~'20)에서 기술혁신을 위한 희토류 기업의 영업이익 대비 연구 개발비 비율을 '15년 3%에서 '20년까지 5% 이상 투자 목표 제시³⁷⁾

(일본) NEDO를 통해 희토류를 포함한 금속의 3R* R&D에 투자 중이며, JOGMEC을 통해 정부 및 민간 자금 지원을 통해 희토류 공급망 다변화 추진 중

* 3R(Reduce, Reuse, Recycle)

- NEDO는 다양한 금속의 재활용 기반 기술 개발을 위해 ‘고효율 자원순환시스템 구축을 위한 재활용기술 연구개발 사업’의 22년도 예산으로 3억 2천만엔 투자
 - 폐전자제품의 탐색·해체·선별 공정을 자동화하는 자동선별시스템 개발 및 고효율의 새로운 제련 기술개발 목적
- JOGMEC을 통해 적극적인 제3국 광산개발, 대체·저감 및 정·제련·제조 기술개발과 해저 희토류 탐사 및 채굴 기술개발 등 기술 중심의 공급망 안정화를 위한 기술에 투자

37) 중국 산업정보기술부(MIIT) (2016), ‘희토류 산업 개발 계획(2016-2020)’

5.2 국내 R&D 투자동향

 5년간('17~'21) 희토류 관련 정부 R&D 투자 규모는 총 2,060억 원으로, 전체 정부R&D 투자액 중 0.18%에 해당³⁸⁾

- 희토류의 중요성에 대한 인식에도 불구하고 우리나라 정부R&D 사업 중 관련 연구가 차지하는 비중은 매우 작은 편
- 희토류 R&D 중 회수 및 재활용에 특화된 기술을 대상으로 하는 연구를 집계할 경우*, 5년간 423억 원 투자된 것으로 조사

* 회수 및 재활용이 아닌 대체/저감/재사용 기술과 회수 및 재활용이 키워드에 포함되지 않은 광물·정·제련 기술 제외 시

- 희토류 회수 및 재활용 관련 R&D는 '17년(77억 원)에서 '19년(65억 원)까지 감소 추세였으나 '20년에 소폭 증가, 산업부의 신규사업* 착수로 '21년 크게 증가(전년대비 55억, 64%↑)

* 순환자원이용희소금속회수공통활용기술개발(R&D)(산업부)

〈표 12〉 정부R&D 투자액 중 희토류 R&D 투자 비중(2017 ~ 2021)

(단위 : 억 원, 개)

구분	2017	2018	2019	2020	2021	5년간 R&D 투자액	
						합계	정부R&D 중 비중(%)
정부 R&D 투자액(A)	195,018	197,483	205,306	242,000	274,005	1,113,812	-
희토류 R&D 투자액(B)	357	343	338	506	516	2,060	0.18%
회수 및 재활용 R&D 투자액(C)	77	54	65	86	141	423	0.038%
(회수 및 재활용 과제 수)	(19개)	(20개)	(20개)	(27개)	(23개)	(109개)	-

 희토류의 회수 및 재활용 기술개발은 '환경부: 자원순환을 위한 폐자원 회수', '산업부: 산업 원료·소재 확보'의 역할 분담 하에 추진되고 있음

- (환경부) 순환 경제, 도시광산 개발을 위한 재활용 연구는 환경부 글로벌환경기술개발사업의 유용자원재활용기술개발사업단('11~'20, 6,976억 원)을 기점으로 시작

38) 국가연구개발 조사·분석 데이터 중 희토류 관련 R&D 과제 집행액을 조사하였으며 모델링, 메커니즘 규명, 원소 함유량 분석과 같은 기초연구 등을 포함하여 광범위하게 집계

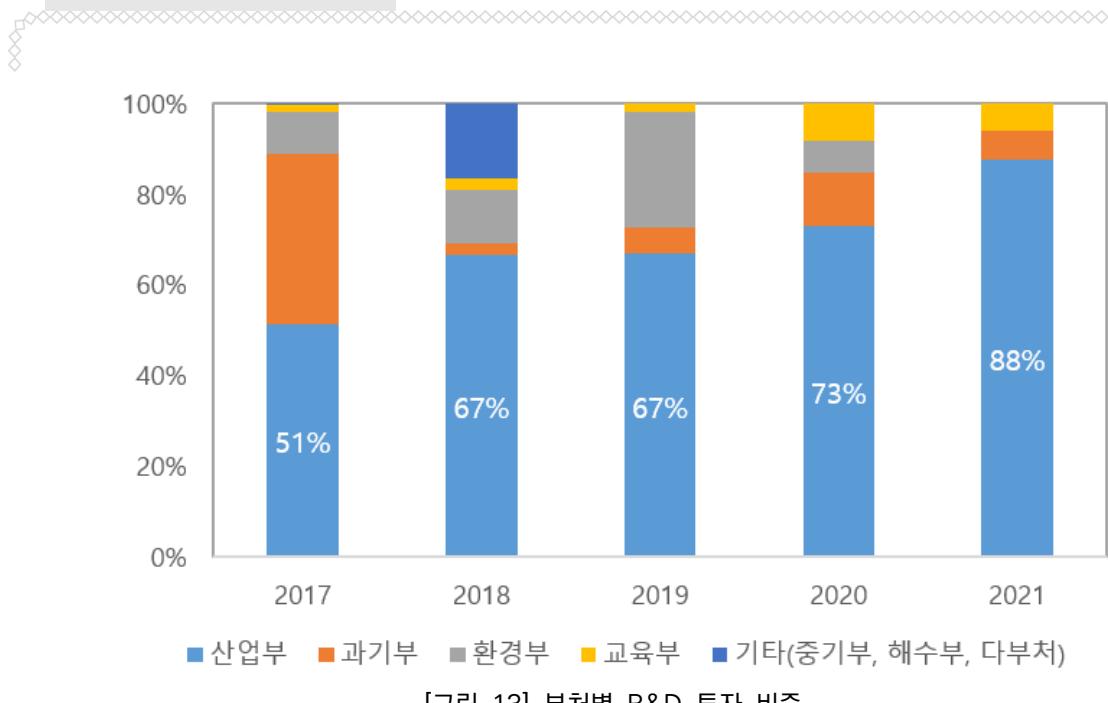
- 글로벌 태양광 기술 개발 사업은 환경 산업 성장과 수출 사업화를 위한 실용화 목적인 사업으로 유기금속(폐촉매 재활용), 타이어, 폐수 등의 자원 및 온실가스의 저감/대체 등 사업화 기술 개발에 초점, 폐 영구자석 재활용을 위한 기술 실증 과제 2개에 투자
- (산업부) 2020년 이후, 산업부 산업 혁신 기반 구축 사업과 순환자원 이용 희소금속 회수 공동 활용 기술 개발 사업을 통해 희토류 재활용 상용화를 위한 인프라 지원 및 공동 활용 기술 개발이 포함된 희소금속 재활용 사업을 본격 시작
- 순환자원 이용 희소금속 회수 공동 활용 기술 개발('21~'25)은 세부 사업 단위에서 금속의 회수 및 재활용 기술 확보·확산을 목적으로 하는 유일한 사업

〈표 13〉 희토류 재활용 연구가 포함된 주요 사업 목록

사업명(세부)	희토류 관련 사업비 (백만원)	사업기간	목적 및 희토류 재활용 연관 과제
글로벌 태양광 기술 개발 사업 (환경부)	3,480	'11~'21	(목적) 6대 환경 기술 분야 기술 수준 세계 최고 기술 보유국 대비 90% 이상 달성을 통한 환경 산업의 신성장 동력화 및 수출 사업화 (과제) 폐 영구자석으로부터 희토류 금속 회수 상용화 기술 개발 및 기술 실증 ('16~'18, 2,000백만원, 폐 HDD로부터 유용 자원 선별/회수 상용화 기술 실증 ('19~'20, 1,480백만원)
산업 혁신 기반 구축 (R&D) (산업부)	9,178	'14~	(목적) 산업 기술 개발에 필수적인 공동 활용 인프라 구축 지원을 통해 중소 기업의 산업 기술 혁신 역량을 제고 (과제) 희소금속 고순도화 실증 기반 조성 사업 ('20년, 997백만원, '21년, 2,523백만원, '22년, 2,158백만원), 희토류 추출 미니 파일럿 실증 ('21년, 3,500백만원)
순환자원 이용 희소 금속 회수 공동 활용 기술 개발 (R&D) (산업부)	3,535	'21~'25	(목적) 경제성 문제로 저가 해외 유출, 매립, 폐기되는 3개의 상태별 순환자원(고품위 고상, 저품위 고상, 저품위 액상)으로부터 금속 회수 공정의 공동 활용 기술을 개발 (과제) 국내 미 활용 고품위 고상 스크랩의 해외 유출 방지를 위한 오픈 플랫폼 형 소재화(상용 소재품 위 > 99%) 기반 자원 회수 기술 개발 ('21년, 1,300백만원, '22년 2,235백만원)
산업 소재 핵심 기술 개발 (R&D) (산업부)	4,449	'14~	(과제) 고순도 중 희토류 추출을 위한 친환경 pyrometallurgy process 개발 및 소재화 기술 개발 ('18~'22, 4,449백만원)
자원 개발 기술 개발 (산업부)	4,500	'13~'22	(목적) 자원의 자주 개발률 제고와 자원 개발 분야의 투자 대비 성과 극대화를 위한 기술력 향상 추진 (과제) 희토류 분리 정제의 친환경 공정 개발 및 비용 절감을 위한 관리 기술 개발 ('15~'17, 4,500백만원)

 (수행 부처) 희토류 회수 및 재활용 기술에 대한 지원은 산업통상자원부 중심 (88%, '21년 기준)으로 이루어지고 있음

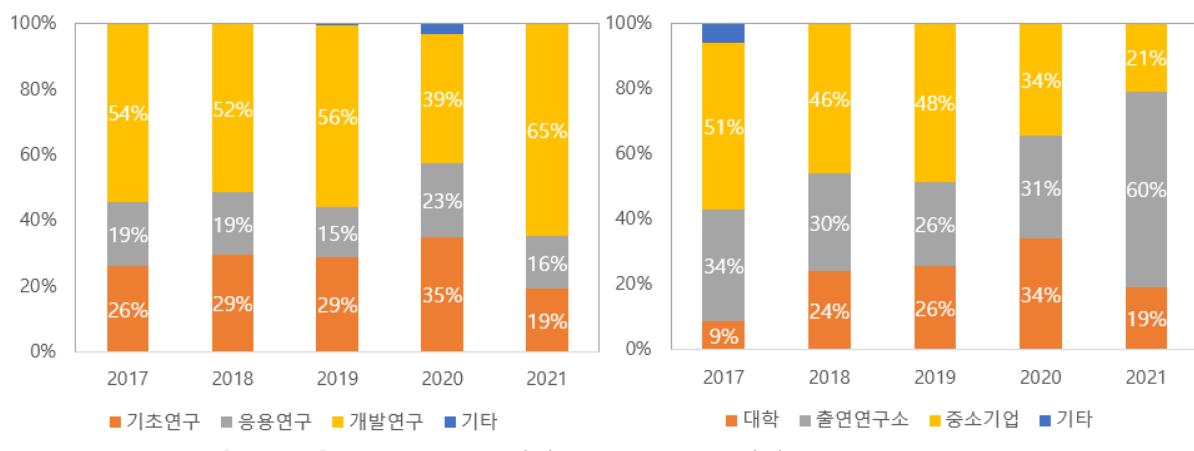
- 산업통상자원부의 R&D 수행 비중은 '17년 51% → '21년 88%로 증가하였으며, 상용화 목적의 희소금속 재활용 인프라 구축, 공동 기술 개발 등 기반 구축 사업의 신규 과제를 확대하고 있음



[그림 13] 부처별 R&D 투자 비중

(연구개발단계 및 수행주체) 개발연구 위주(50% 이상)로 수행되고 있으며, 정부 출연연구소의 수행 비중은 증가, 중소기업의 수행 비중은 감소 추세

- (연구개발단계) 최근 5년간 개발연구 55%, 기초연구 26%, 응용연구 18%, 기타 1% 투자
- (연구개발주체) 최근 5년간 출연연 40%, 중소기업 37%, 대학 22%, 기타 1% 투자되었으며, '17~'20년 출연연의 평균 수행 비중 30% 대비 '21년 60%로 급격히 증가
 - '21년 산업부 산업혁신기반구축(R&D) 사업의 과제 2건(한국생산기술연구원 25억 원, 한국지질자원연구원 35억 원)과 순환자원이용 희소금속 회수 공통활용기술개발(R&D) 사업의 신규 과제 1건(한국생산기술연구원 13억 원) 등으로 인해 출연연의 수행 비중 증가



[그림 14] 연구개발 단계별(좌) 연구개발 주체별(우) R&D 수행 비중

제6장 결론 및 제언

6.1 요약 및 정리

 첨단산업의 필수 소재인 희토류의 공급망 다변화와 탄소중립 달성을 위한 기여를 위해 희토류 회수 및 재활용 기술의 중요성 확대

- 전기차 풍력발전기 등에 쓰이는 영구자석의 수요 증가에 따라 희토류의 가격이 폭발적으로 증가하고 희토류에 대한 높은 중국 의존도가 경제 안보의 리스크로 작용함에 따라, 폐제품으로부터의 회수 및 재활용이 희토류 공급망 다변화의 한 축으로 인식되기 시작
- 또한 희토류 채굴 과정에서 발생하는 방사성 물질 방출, 다량의 이산화탄소 발생 등 환경 오염 문제는 희토류 회수 및 재활용 기술의 필요성을 증대

 희토류 재활용 시장은 아직 초기 형성 단계로, 2차 자원으로부터 친환경·저비용·고효율로 자원을 추출하기 위한 기술의 탐색 및 상용화 연구가 진행 중

- 사용 후 제품뿐만 아니라 석탄재, 산업폐기물 등 다양한 공급처에서 희토류 회수 기술을 개발 중이며, 미국은 석탄재와 폐기물 위주, 유럽은 영구자석 재활용 위주의 연구 수행
- 미국, 유럽, 일본은 다량의 산성 폐액이 발생하는 기존 습식 공정의 개선 및 건식법의 실증 연구를 수행하고, 장기적으로 바이오리칭, 유기물 등의 친환경 기술을 연구 중

 희토류 재활용 산업은 영구자석의 폐기가 확대되는 2030년 무렵 본격 형성될 것으로 보이며, 주요국은 이에 대비하기 위한 상용화 연구개발 투자 및 기업 직접지원 등을 수행 중

- IEA 및 주요국은 영구자석의 폐기가 급격히 증가하는 2030년 전후를 산업 형성 시점으로 보고, 영구자석 및 기타 공급원에서 희토류 회수를 위한 친환경 기술개발과 공정 실증 연구 수행 중
- 미국은 국방부의 희토류 관련 기업 지원과 SBIR/STTR/IBAS를 통한 중소기업 육성을 지원하고 있으며, 국립연구소와 대학을 통해 기존 공정의 개선과 친환경 공법의 개발 등 상용화 목적의 R&D 투자와 기업 직접지원을 통해 산업 형성을 위한 실증 단계의 연구 중

- 유럽은 EU 차원의 영구자석 재활용 위주의 R&D 프로젝트와 실증 공정 운영 프로젝트를 지원하고, 대학을 통한 기술사업화 및 산업 발전을 위한 공동 연구, 인프라 지원 중
- 일본은 희토류 공급망 안정화를 위해 3R(재활용/대체/저감) 기술을 적극적으로 개발한 희토류 관련 기술 선도국으로, 다양한 분야에서 기업별 최적화된 회수 및 재활용 기술을 확보

 주요국은 희토류를 전략물자로 선정하고 공급망 안정화를 위한 확보전략을 발표하며 국제 협력, 자원 탐사 및 개발, 재활용 R&D 확대 추진

- 미국은 희토류를 핵심품목 및 중요물자로 지정하며 공급망 안정화를 위한 동맹국 협력 확대와 자원 탐사 및 개발, 재활용 R&D 확대 추진 중
- 유럽은 희토류를 핵심 원자재로 선정하고 재활용을 통한 희토류 확보 목적의 법 제정과 주요 정책을 발표하고 2010년부터 지속적인 재활용 R&D 투자와 영구자석 재활용 중심의 공정 기술의 개발에 투자 중
- 일본은 희토류 대체, 저감, 재활용을 위한 R&D 투자를 확대함과 동시에 제3국 광산개발, 해저 희토류 탐사 및 채굴 기술개발 등 적극적인 희토류 공급망 다변화 추진

 우리나라는 희토류를 포함한 희소금속 전체에 대한 확보전략을 추진하고 있으나, 주요국 대비 희토류 관련 기술, 인프라, R&D 투자는 부족한 편

- 산업부를 통해 희소금속 전체의 공급망 강화와 환경부를 통해 자원 순환 정책을 추진하고 있으며, 35종의 희소금속 중 하나로 희토류를 지정하여 확보-비축-순환 관리 중
- 최근 자원순환기본법을 「순환경제사회 전환 촉진법」으로 전면 개정하고 희소금속 공통 활용 기술개발 지원, 인프라 지원 등 자원기술 R&D에 대한 정책과 투자를 확대하는 추세
- 우리나라의 희토류 관련 기술은 선도국(일본) 대비 73.4% 수준이고, 상용화된 희토류 회수 및 재활용 공정은 없는 실정

6.2 시사점 및 제언

 희토류와 관련된 전후방 산업의 성장이 예상됨에 따라, 정부 주도의 희토류 산업 발전을 위한 지원 방안 마련 필요

- 희토류의 중요성에도 불구하고 경제성 부족, 초기 투자 비용 등의 문제로 인해 산업계의 투자가 부족한 상황을 해결하기 위해 유망 기술에 대한 기술-경제적 평가(TEA)와 경제성 층족 방안 마련, 기술 집적 및 사업화 선도 기관 운영 필요
- 희토류 재활용 세부 공정별 희토류 재활용 기업 육성을 위한 기존 금속 재활용 업체의 활성화와 정·제련 및 제조 기업의 인프라와 연계한 산업 육성 고려 필요

 재활용 활성화를 위한 제품설계 기술과 기존 인프라를 활용한 기술개발 필요

- 제품 설계시 재활용을 고려한 재활용 친화적인 디자인(조성 설계)에 대한 고려와 재활용 만으로는 수요에 대한 전량 확보가 불가능하므로, 재활용 기술의 개발과 함께 대체 및 저감 기술을 포함한 희토류 공급망 안정화를 위한 종합적인 기술개발 필요
- 자원생산 기술(광물의 가공 및 정·제련)과 재활용 기술은 크게 상이하지 않으므로, 재활용 기술개발에 정·제련 기업과 연계한 인프라 지원 방안과 기술개발 필요

 희토류 시장 확대 및 재활용 시장 활성화를 위한 연속성 있는 R&D 투자와 산업 형성을 위한 인프라 지원의 확대 필요

- 국내 희토류 회수 및 재활용 관련 R&D는 자원순환과 희소금속 단위 세부사업의 1~2개의 과제로 산발적으로 진행되거나 개인기초연구, 출연연을 통해 소액으로 수행되는 실정으로 연구의 연속성과 목적성이 있는 연구의 수행과 사업화 실현을 위한 전용 사업 고려 필요
- 영구자석 폐기 확대 시점인 2030년을 대비한 대규모의 처리가 가능한 친환경 기술에 대한 연구가 필요하며 기초·원천 연구를 사업화하기 위한 시범시설과 실증을 위한 테스트베드 같은 공동 연구 인프라 지원의 확대 필요

※ (EU) SUSMAGPRO 프로젝트의 영구자석 전처리 시범공정 운영, (미국) BIL 희토류 실증 시범 설비 구축 검토 및 투자 발표



중장기적인 재활용 인식과 제도 개선과 동시에 국가 역량 확보를 위한 인재·기업 육성 방안 필요

- 기존 정책의 자원 확보전략에서 중장기적인 자원 안보 대응력을 키우기 위한 산-학-연 연계 기업형 전략인재육성 등 인재 육성방안 마련과 재자원화 기업 육성을 위한 정책적 방안 마련 필요
- 탄소중립에 대한 기여도 평가 필요(LCA 등)를 통한 희토류 재활용 필요성 제고와 함께 재활용에 대한 인식 개선, 희토류 리소스 확보를 위한 제품 회수를 위한 정책적 지원 필요
 - 희토류는 제품 내 낮은 함량으로 인해 채산성이 낮으므로 회수 제품 확대를 위한 사용자의 제품 재활용 참여 방안, 공급자 제품 수거 방안, 재활용 인센티브, 제품 회수 시스템구축 등 제도적인 지원 필요

참고문헌

문헌자료

- 산업통상자원부(2023), 「핵심광물 확보전략」
- 한국무역협회(2023), Trade Focus 2023-1호 「미국의 공급망 핵심품목 리스트 현황 및 시사점」
- 한국무역협회(2022), Trade Focus 2022-32호 「주요국의 핵심광물 확보전략과 시사점」
- 산업자원통상부(2022), 「글로벌 공급망 인사이트(2022년 제9호)」
- 한국환경연구원(2022), 해외환경정책동향 2022-01호 「탄소중립시대 핵심 광물」
- 중소기업 기술 로드맵, 최신 로드맵 자료보고서(2023~2025), 「희소금속 회수 시스템」.
- 한국지질자원연구원(2021), 「대한민국 2050 탄소중립 에너지 전환시대_한 눈에 보는 6대 핵심광물 이슈 분석」
- 한국무역협회(2021), Trade Focus 2021-18호 「우리나라와 주요국의 희토류 공급망 현황 및 시사점」
- 에너지경제연구원(2021), 「주요국 핵심광물 확보 전략 분석」
- 산업연구원(2021). 「중국 희토류산업 동향과 정책적 시사점」
- 산업연구원(2021), 「글로벌 희토류산업 환경변화와 일본의 대응전략」
- 환경부 한국환경산업기술원(2019), 글로벌 태환경기술개발사업 Phase II 「폐 영구자석으로부터 희토류 금속 회수 상용설비 개발 및 기술실증」 최종보고서
- 임영목 외(2018), 「희토류 친환경 재활용 기술 및 자원 확보 방안」
- 이미혜 외(2022). ISO TC 298에서의 희토류 재활용 관련 국제 표준화 현황. *J. Powder Mater.*, 29(2), 159–165
- 김윤경(2021), 일본의 광물자원 확보전략, 한국자원공학회, 58(6), 614–619
- 흥현선(2013), 폐 희토류금속자원의 리사이클링 기술 및 산업 동향, 대한금속재료학회, 26(2), 33–49
- USGS(2023), 「Mineral Commodity Summaries 2023」
- The White House(2021), 「Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth」
- U.S. DOE(2021), 「Critical Minerals and Materials: US Department of Energy's Strategy to Support Domestic Critical Mineral and Material Supply Chains」

- IEA(2021), 「The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions」
- ERMA(2021), 「Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action」
- Apple(2021), 「Environmental Progress Report」
- U.S. DOC(2019), 「A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals」
- Y. Fujita et al(2022), Recycling rare earths: Perspectives and recent advances, *MRS Bulletin*, 47, 283–288
- N. A. Mancheri et al(2019), Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience, *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 2019, 101–112
- NEDO(2022), 「NEDO's Environmental Technology Activities in 2022」
- JOGMEC(2020), 「北米におけるレアアースのサプライチェーン状況分析業務」
- 国家发改委(2021), 「十四五”循 环经济发展规划」
- 财政部、国 家税务总局(2021)「关于完善资源 综合利用增值税 政策的公告」
- 工信部(2021), 「稀土管理条例 (征求意见稿)」
- 中华人民共和国工业和信息化部(2017), 「稀土行业发展规划 (2016 – 2020)」

보도자료

- 중국전문가포럼(CSF)(2023.2.23.), “中 희토류 산업 재편 지속 추진... 전략적 자원 중요성 강조”
- 지식경제부 보도자료(2011.9.23.), “도시광산 활성화를 위해서는 이것이 필요!”
- 매일경제(2009.11.27.), “10대 희소금속 발전대책... 해외자원 개발땐 금융 우대”
- Sohu(2022.11.14.), “一天研究一个行业：中国稀土回收行业市场深度分析”
- Yicaiglobal(2022.9.13.), “China’s JL Mag to Build USD100 Million Rare-Earth Magnet Recycling Facility in Mexico”
- Barnes/Richardson(2022.4.5.), “Defense Production Act Invoked for Critical Minerals”
- Yicaiglobal(2022.1.12.), “China’s Huahong Surges After Unit Inks Deal to Supply Apple With Recycled Rare Earth Oxides”
- JustAuto(2021.12.6.), “Nissan testing new rare earth recycling process”
- Newfile(2020.2.14.). “Ucore Announces Technical Services Agreement with Innovation Metals Corp. for RapidSX(TM) Rare Earth Element Separation Technology Testing”

 사이트

- NTIS 홈페이지, <https://m.ntis.go.kr/ThMain.do>
- 한국자원정보서비스(KOMIS) 홈페이지, <https://www.kores.net/komis/main/userMain/main.do>
- IEA 홈페이지, <https://www.iea.org>
- CMI 홈페이지, <https://www.ameslab.gov/cmi>
- NETL 홈페이지, <https://netl.doe.gov>
- Ucore 홈페이지, <https://ucore.com>
- eurostat 홈페이지, <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- JST 홈페이지, <https://www.jst.go.jp/EN/>
- NEDO 홈페이지, <https://www.nedo.go.jp/english/>
- AIST 홈페이지, https://www.aist.go.jp/index_en.html
- 일본 산업 환경 관리 협회 홈페이지, cjc.or.jp
- Research and market, <https://www.researchandmarkets.com/reports/5724168/rare-earth-metal-recycling-market#tag-pos-3>



| 저자 소개 |

박 정 원

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 연구원

Tel: 043-750-2483 E-mail: jwpark@kistep.re.kr

문 윤 실

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 연구원

Tel: 043-750-2760 E-mail: mys0654@kistep.re.kr

이 현 경

한국과학기술기획평가원 투자기획조정센터 부연구위원

Tel: 043-750-2589 E-mail: hklee19@kistep.re.kr

| 편집위원 소개 |

전 승 수 연구위원

한 민 규 연구위원

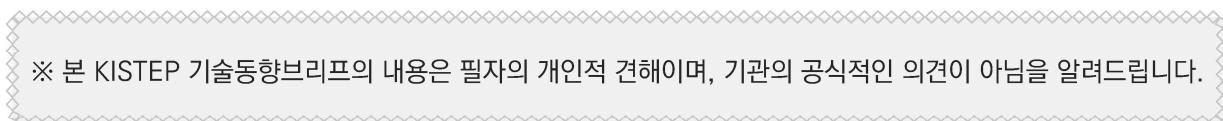
여 준 석 연구위원

이 승 필 부연구위원

정 두 엽 부연구위원

한국과학기술기획평가원 사업조정본부

Tel: 043-750-2728 E-mail: dooyupjung@kistep.re.kr



※ 본 KISTEP 기술동향브리프의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.

[KISTEP 브리프 발간 현황]

발간호 (발행일)	제목	저자 및 소속	비고
57 (23.01.06.)	MZ세대를 위한 미래 기술	지수영·안지현 (KISTEP)	미래예측
- (23.01.20.)	KISTEP Think 2023, 10대 과학기술혁신정책 아젠다	강현규·최대승 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제341호)
58 (23.02.02.)	세계경제포럼(WEF) Global Risks 2023 주요내용 및 시사점	김다은·김유신 (KISTEP)	혁신정책
59 (23.02.07.)	미국의 「오픈사이언스의 해」 선포와 정책적 시사점	이민정 (KISTEP)	혁신정책
- (23.02.21.)	‘데이터 보안’ 시대의 10대 미래유망기술	박창현·임현 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제342호)
60 (23.03.06.)	연구자산 보호 관련 주요국 정책 동향 및 시사점	유지은·김보경 (KISTEP)	혁신정책
61 (23.03.20.)	美, 「과학적 진실성 정책 및 실행을 위한 프레임워크」의 주요 내용 및 시사점	정동덕 (KISTEP)	혁신정책
- (23.03.29.)	우리나라 바이오헬스 산업의 주력산업화를 위한 정부 역할 및 지원방안	홍미영·김주원 안지현·김종란 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제343호)
62 (23.03.30.)	2021년 한국의 과학기술논문 발표 및 피인용 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
63 (23.03.30.)	2021년 신약개발 정부 R&D 투자 포트폴리오 분석	강유진·김종란 (KISTEP)	통계분석
- (23.04.03.)	국방연구개발 예산 체계 진단과 제언	임승혁·안광수 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제344호)
64 (23.04.06.)	2023년 중국 양회의 주요 내용 및 과학기술외교 시사점	강진원·장지원 (KISTEP)	혁신정책
65 (23.04.10.)	2023 인공지능 반도체	채명식·이호윤 (KISTEP)	기술동향
66 (23.04.13.)	생성형 AI 관련 주요 이슈 및 정책적 시사점	고윤미·심정민 (KISTEP)	혁신정책

발간호 (발행일)	제목	저자 및 소속	비고
- (23.04.17.)	STI 인텔리전스 기능 강화 방안 -12대 과학기술혁신 정책 이슈를 중심으로-	변순천 외 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제345호)
67 (23.04.17.)	『OECD Science, Technology, Innovation Outlook 2023』의 주요 내용 및 시사점	홍세호·심정민 (KISTEP)	혁신정책
- (23.04.19.)	임무지향형 사회문제해결 R&D 프로세스 설계 및 제언	박노언·기지훈·김현오 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제346호)
68 (23.05.02.)	전기차 배터리 핵심공급망	이승필·여준석·조유진 (KISTEP)	기술동향
- (23.05.03.)	기업 혁신활동 제고를 위한 R&D 조세 지원 정책 연구 : 국가전략기술 연구개발 기업을 중심으로	구본진 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제347호)
69 (23.05.04.)	하위 조직정보 대응을 위한 OECD 원칙 및 과학기술 시사점	배용국·정미나 (KISTEP)	혁신정책
70 (23.06.08.)	OECD MSTI 2023-March의 주요 결과	정유진 (KISTEP)	통계분석
71 (23.06.09.)	2022년 지역 과학기술혁신 역량평가	한혁·안지혜 (KISTEP)	통계분석
72 (23.06.23.)	일본, 『사이언스 맵 2020』의 주요내용 및 정책적 시사점	이미화·심정민 (KISTEP)	혁신정책
- (23.06.27.)	국가연구개발 성과정보 관리체계 개선 제언	김행미 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제348호)
- (23.06.28.)	신입과학기술인 직무역량에 대한 직장상사-신입간 인식 비교 분석	박수빈 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제349호)
73 (23.06.30.)	2021년도 국가연구개발사업 내 여성과학기술인력 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
74 (23.07.03.)	2022년 국가 과학기술혁신역량 분석	김선경·한혁 (KISTEP)	통계분석
- (23.07.05.)	기술파권경쟁시대 한국 과학기술외교 대응 방향	강진원·김진하 (KISTEP), 이정태(KIST)	이슈페이퍼 (제350호)
- (23.07.06.)	학문분야별 기초연구 지원체계에 대한 중장기 정책제언 (국내외 지원현황의 심층분석을 기반으로)	안지현·윤성용·함선영 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제351호)
75 (23.07.14.)	美 2023 국방과학기술전략서(NDSTS)의 주요 내용 및 시사점	유나리·최충현·임승혁· 한민규(KISTEP)	혁신정책

발간호 (발행일)	제목	저자 및 소속	비고
76 (23.07.27.)	2023년 IMD 세계경쟁력 분석	한혁 (KISTEP)	통계분석
77 (23.07.27.)	2021년 미국 박사학위 취득자 현황 분석	한혁 (KISTEP)	통계분석
78 (23.07.26.)	제 5차 과학기술기본계획과 과학기술분야 중장기계획 간 연계현황 및 시사점	홍정석·심정민 (KISTEP)	혁신정책
79 (23.08.01.)	일본『통합혁신전략 2023』의 주요 내용 및 시사점	양은진·심정민 (KISTEP)	혁신정책
80 (23.08.21.)	일본『2023 우주기본계획』의 주요 내용 및 시사점	최충현·문태석·이재민· 강현규(KISTEP)	혁신정책
81 (23.08.29.)	미국의 R&D와 혁신 현황	한혁 (KISTEP)	통계분석
82 (23.08.30.)	2023년 유럽혁신지수 분석과 시사점	한웅용 (KISTEP)	통계분석
83 (23.09.01.)	회로류 화수 및 재활용 기술	박정원·문윤실·이현경 (KISTEP)	기술동향