

관리번호			2026-정보-융합기술-7- 품목공모-05	RFP 유형코드	목적·내용	성과물 특성	지원유형
					R	0	1
					원천연구	이론·기술의 정립 및 검증 (TRL 2~4)	일반연구개발
국가전략연구 기획평가전문분야		PM분야	정보-융합기술	RB분야	전자정보 나노·소재 탄소중립 나노·소재	RB 세부분야	-
사업명		미래개척융합과학기술개발사업 - 미래유망융합기술파이오니어(도전형)					
RFP명		AI 생체분자 기반 자가농축형 희토류 분리 플랫폼 (TRL : [시작] 2단계 ~ [종료] 4단계)					
지원 정보	지원기간	2026.07 ~ 2031.12			정부지원금	3,800백만원	
	1단계	2026.07 ~ 2027.12			1단계	600백만원	
	(1차년도)	(2026.07 ~ 2026.12)			(1차년도)	(200백만원)	
	2단계	2028.01 ~ 2029.12			2단계	1,600백만원	
	3단계	2030.01 ~ 2031.12			3단계	1,600백만원	
	주관기관유형	■ 제한없음 □ 대학/출연(연)/국공립연/특정연 □ 기업 □ 기타 비영리법인(병원 등) □ 외국법인					
주관기관 외 필수참여기관	■ 제한없음 □ 기업 □ 기타 비영리법인(병원 등) □ 외국법인						
키워드	한글 영문	희토류, 생체분자, 자가농축, 흡착, 재생 Rare Earths, Biomolecules, Self-concentration, Adsorption, Regeneration					

1. 추진배경	
<p>○ 추진근거</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 과학기술기본법 제11조(국가연구개발사업의 추진)</li> <li>- 과학기술기본법 제17조(협동·융합연구개발의 촉진)</li> <li>- (국정과제 28) 세계를 선도할 넥스트(NEXT) 전략기술 육성</li> <li>- 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획('23.12)</li> <li>- 국가전략기술 육성에 관한 특별법 및 「국가전략기술 육성 기본계획(안)」, 「국가전략기술 체계고도화 방향(안)」</li> <li>- 혁신적·도전적 R&amp;D 육성 시스템 체계화 방안('24.03, 혁신도전형 R&amp;D)</li> </ul> <p>○ 세부 추진배경</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 과제의 대상은 희토류 이온에 선택적으로 결합하는 생체분자를 AI 기반으로 설계·고도화하고, 이를 능동형 자가농축·고정화 기술과 결합하여 폐자원 침출액 등으로부터 인접 난분리 희토류를 친환경적으로 분리·회수하는 생체분자 기반 그린 희토류 자원화 원천기술임.</li> <li>- 희토류(REE)는 전기차 구동모터·풍력발전·전자소자·국방 등 첨단산업의 핵심 영구자석(NdFeB) 원료(Nd-Pr-Dy-Tb 등)이며, 본 기술은 분자 수준 선택성과 무(저)약품 공정을 특징으로 하여 기존 용매추출 대비 환경부하·공정단계를 획기적으로 낮출 수 있음.</li> <li>- (시장) 글로벌 희토류 시장은 출처별 추정 편차가 크나, 2024년 약 40억 달러 규모에서 2030년경 확대(연 8% 중반대 성장)되거나 2025년 약 140억 달러에서 2034년 약 412억 달러(연 12.3%)로 성장할 것으로 전망됨. 응용 분야에서는 영구자석이 최대 비중(약 41%)을 차지하며, 희토류 재활용 시장은 2024년 약 5.5억 달러에서 2033년 약 10.1억 달러로 성장(연 7.0%) 전망임.</li> <li>- (공급망 안보) 중국이 희토류 채굴의 약 60%, 정제의 약 90%를 장악한 가운데, 2023년 12월</li> </ul>	

분리·추출 기술 수출 금지, 2025년 4월 7중 희토류 수출통제에 이어 2025년 10월 상무부 공고 제61호로 역대 최강 수준의 희토류·영구자석 수출통제가 발표되었고, 2차 통제는 2026년 11월까지 일시 유예되었으나 면허제는 상존함. 한국은 2024년 기준 희토류 금속 약 79.8%·화합물 약 61.1%를 중국에 의존하여 공급망 리스크가 매우 높음. 이에 따라, 독자적 분리·정제·재자원화 기술 확보가 시급.

- (기존 용매추출) 전 세계 희토류 분리의 90% 이상이 용매추출(SX)에 의존하며, 대표 추출제의 인접 희토류 분리계수가 1.2~1.5에 불과해 고순도 확보에 다단 공정과 대량의 유기용매·산·알칼리가 요구되고, 2차 폐수방사성/유독 폐기물 발생을 수반함.

- (생체분자 기반 기술) 란모돌린(LanM)은 높은 희토류 선택성을 보이며, 단일 단계 컬럼으로 인접 희토류간 유의미한 분리 계수를 보고하는 등 세계적으로 그 관심이 증대되고 있으며 세계적 학술지에 보고되고 있음 (Nature, 2023). 그러나 ①낮은 산업적 확장성(정제 단백질 수율 L당 ~ 1 g 이하, 고비용), ②인접쌍에 대한 제한된 선택성, ③단순 인식·센싱 수준(능동 농축 부재), ④실공정 고정화·재사용성, ⑤산성·복합 매트릭스 하 내구성, ⑥실환경 적용성에서 기술적 임계에 머물러 있음.

- (국외) 생체분자를 이용한 희토류 분리는 최근 수년간 가장 빠르게 발전한 분야로, 실험실 수준에서는 화학적으로 구별이 어려운 인접 희토류(예: Nd/Dy)를 단일 공정만으로 높은 선택도(분리계수:~12)로 분리할 수 있음이 이미 입증된 단계임. 최근에는 "우수한 소재 하나를 찾는" 방식에서 AI-계산설계로 수백 종의 후보를 대량 탐색·설계하는 방식으로 진화하고 있으며, 미국·유럽 등 주요국은 희토류 공급망 자립을 위해 관련 소재·공정에 대규모 투자를 확대하고 있음

- (국내) 국내도 생체·바이오 소재를 활용해 폐자원·산업부산물 침출액에서 희토류를 회수하고 반복 사용이 가능함을 보이는 등 원천 소재·공정의 기반은 상당 수준 축적되어 있으며, 이를 통해 희토류를 비희토류로부터 분리하는 연구가 보고된 바 있음. 다만 아직은 개별 소재나 단위 공정을 각각 검증하는 단계에 머물러 있어, 선택적 분리 + 능동 농축 + 친환경 공정을 하나로 묶은 통합 원천기술은 확보되지 못한 초기 단계이며, 실제 산업화는 여전히 전통적 분리·정제 기술에 의존하고 있음.

- (핵심 추진 근거) 중국 수출통제 현실화에 따른 공급망 안보, 글로벌 환경규제, 도시광산 경제성 측면에서 용매·강산 의존을 최소화한 독자적 친환경 희토류 분리·재자원화 원천기술 확보가 시급함. 생체분자는 세계적으로 가장 유망한 차세대 분리 소재이나, 산업적 확장성·능동 농축·실공정 고정화·실환경 적용의 임계를 넘지 못함. 따라서 ①AI 기반 산업 적용형 고선택성 생체분자 발굴·고도화, ②능동형 자가농축, ③안정적 고정화·통합 플랫폼, ④무(저)약품 탈착·재생, ⑤실환경 검증을 결합한 융합 원천기술 개발이 필요하며, 이는 본 과제의 핵심 추진 근거임.

#### ○ 기획의 주안점

- (해결하고자 하는 문제) 기존 용매추출(SX) 기반 희토류 분리는 인접 원소 간 분리계수가 낮아 수십~수백 단의 다단 공정과 대량의 유기용매·산·알칼리, 2차 폐수를 수반함. 한편 자연계 생체분자(란모돌린 등)는 정밀한 분자 인식 능력을 보였으나, ① 생체분자의 낮은 산업적 확장성 ② 인접 난분리쌍에 대한 산업적 선택성, ③ 단순 인식·센싱을 넘어선 능동적 포집·농축, ④ 실공정 고정화, ⑤ 친환경 탈착·재생, ⑥ 실환경 적용성 측면에서 기술적 임계에 머물러 있음. 본 과제는 이들 한계를 동시에 돌파하는 그린 자원화 분리 소재·시스템 확보를 핵심 난제로 정의함. (설명: 본 과제는 생체분자 기반의 그린 희토류 자원화 기술 개발을 목적으로 하며, 희토류 분리가 가능한 원천 생체소재의 발굴과 공정 적용을 위한 최적 성능 가이드라인 확립을 핵심 목표로 함. 이에 따라 기존의 물리·화학적 분리기술 또는 무기소재 기반 희토류 분리기술에 적용되는 성과 지표를 그대로 활용하기에는 한계가 있음. 따라서 생체소재의 특성과 산업적 활용 가능성을 반영할 수 있는 차별화된 성과 지표를 도입할 필요가 있음.)

- (기술개발 주안점) 본 과제는 다음을 핵심 주안점으로 제시함

\* (산업 적용형 생체분자 발굴) 기존 희토류 이온 특이적 생체분자의 적용 한계를 극복하기 위해,

대량생산 가능성과 구조적 안정성이 확보된 생체분자를 스크리닝하고, 정제 및 분리에 최적화된 특성을 가진 소재를 분석·발굴할 것 (설명: Lanmodulin과 같은 고선택성 히토류 결합 단백질이 보고되었음에도 불구하고, 바이오품질 기반 히토류 포집 기술은 아직 상용화 단계에 이르지 못함. 이러한 한계의 주요 원인으로는 높은 생산 단가와 선택성 및 결합 친화도 중심의 특성 평가가 지적됨. 산업적으로 실현 가능한 바이오품질 기반 히토류 분리·포집 기술을 개발하기 위해서는 공정 적용 가능성이 높은 바이오품질을 발굴하고, 이를 소재화하기 위한 안정성, 재사용성, 고정화 가능성 등 공정 적합 특성을 확보하는 과정이 선행되어야 함. 따라서 단순히 분리 효율이 우수한 바이오품질을 개발하는 것만으로는 실제 히토류 분리·회수 공정에 직접 활용되기 어려우며, 경제성과 공정 적용성을 동시에 고려한 소재 개발이 필요함.)

- \* **(정밀 분리·AI 소재 고도화)** 발굴된 생체분자를 기반으로 단순 흡착·인식이 아니라 분리계수(분리인자)를 지표로 인접 난분리쌍(예: Nd/Dy, Nd/Pr)을 정밀 변별하는 고선택성 소재를, AI 구조분석 기반 설계·탐색을 통해 고도화할 것 (설명: 효율적인 AI 기술 활용을 위해서는 단순한 생체분자 설계에만 집중할 것이 아니라, 히토류 분리 공정에 최적화된 소재 특성을 체계적으로 확보하고 이를 데이터베이스화할 필요가 있음. 이후 분리계수를 핵심 평가 지표로 활용한 AI 기반 설계·최적화를 수행함으로써, 발굴된 생체분자의 히토류 선택성과 공정 적용 가능성을 동시에 향상시키는 접근이 필요함.)
- \* **(자가 농축)** 이온을 단순 인식·센싱하는 데 그치지 않고, 소재 표면으로 이온을 능동적으로 유도·농축하는 자가농축 메커니즘을 구현하여 저농도 환경에서의 회수 효율을 확보하고, 가능한 외부 에너지 투입이 적은 방식을 우선 적용할 것 (예: 외부 자극에 의한 자발적 분극 최대화 등) (설명: 능동적인 이온 유도 메커니즘의 도입은 바이오품질 기반 히토류 포집·분리 효율을 향상시킬 수 있는 효과적인 전략으로 판단됨. 다만, 그린 히토류 자원화의 실현을 위해 추가적인 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방향으로 기술을 설계하는 것을 목표로 함.)
- \* **(통합 플랫폼 구현)** 용액상에서만 기능하는 한계를 극복하기 위해, 활성점·선택성을 유지한 체 지지체·필터에 안정적으로 고정화하여 통합형 히토류 회수 플랫폼을 구현할 것 (설명: 단순한 소재 고정화에 초점을 맞추기보다, 개발된 바이오품질 기반 히토류 분리 소재와 자가농축 메커니즘을 효과적으로 결합하여 고효율 히토류 회수·농축이 가능한 통합 플랫폼을 구현하는 것을 목표로 함.)
- \* **(친환경 탈착)** 유기용매·강산 의존을 최소화하는 무약품·저약품(chemical-free) 방식의 탈착·재생을 우선 적용할 것
- \* **(실환경 검증)** 모델 용액을 넘어 실제 또는 실제 침출액(폐연구자석·전자폐기물·산업폐수 등) 등 실환경에서 성능을 검증하여 실증가능성을 확보할 것

- **(목표 수준·기대효과)** 세계 최고 수준의 생체분자 기반 분리 선행연구 대비 차별화되는, 실환경 조건에서의 고선택 분리 성과와 친환경 공정성을 동시에 확보함으로써, 도시광산 기반 전략 히토류의 자립적·지속가능한 그린 자원화 기반을 마련함.

## 2. 과제목표

- **최종 목표** : AI 기반 분자 설계로 발굴한 히토류 이온 특이적 고선택성 생체분자와, 단순 인식·센싱을 넘어 이온을 능동적으로 포집·농축하는 자가농축 기능을 단일 소재·시스템으로 통합하여, 실제 침출액 환경에서 인접 난분리 히토류를 고선택·고효율로 분리·회수하는 친환경(그린) 자원화 분리 플랫폼 원천기술 개발 및 실증

### ○ 단계별 목표

1단계('26~'27)	(산업 적용형 생체분자 발굴) 대량생산 가능성·구조적 안정성·공정 적용성을
--------------	---

	<p>각종 히토류 결합 생체분자 발굴 확보</p> <p><b>(선택성 확보)</b> AI 기반 설계·탐색 및 서열·구조 분석으로 히토류군 또는 경·중히토류 수준의 산업적 선택성 확보 (AI 후보군 hit rate 무작위 후보군 대비 <math>\geq 1.5</math>배)</p> <p><b>(자가농축 요소기술)</b> 이온 능동 포집·농축(자가농축) 메커니즘 확보</p> <p><b>(고정화 기초)</b> 활성점·선택성을 유지하는 고정화 기재 설계·확보</p> <p><b>(분리성능)</b> 히토류군 또는 경·중히토류 분리계수 <math>\geq 2</math>, 탈착률 <math>\geq 50\%</math>, 회수율 <math>\geq 50\%</math></p> <p><b>(성과물)</b> 논문·특허 자율제시</p> <p>※ No-Go: 산업 적용형 고선택성 생체분자 미확보 또는 자가농축·고정화 요소기술 미검증 시 과제 중단/목표 보완</p>
2단계('28~'29)	<p><b>(선택성 고도화)</b> AI 기반 서열·구조 최적화로 인접 난분리쌍 변별 선택성 향상 (Top-K 후보 성공률 <math>\geq 15\%</math>)</p> <p><b>(소재화·모듈화)</b> 자가농축 소재의 고정화·모듈화 구현</p> <p><b>(통합·검증)</b> 고선택성 소재 + 자가농축 + 고정화를 결합한 단위 모듈/단일 공정 구현·검증</p> <p><b>(분리성능)</b> 분리계수 <math>\geq 5</math>, 탈착률 <math>\geq 70\%</math>(무약품·저약품 방식 우선), 회수율 <math>\geq 70\%</math>, 재사용 5회 시 초기 성능 90% 유지</p> <p><b>(성과물)</b> 논문·특허 자율제시</p> <p>※ No-Go: 단위 모듈 통합 성능 미달 시 목표 변경/보완</p>
3단계('30~'31)	<p><b>(정밀 분리 소재 고도화)</b> AI 재설계 사이클 구축으로 인접 난분리쌍(예: Nd/Dy, Nd/Pr)에 대한 고선택성 분리 구현 (Top-K 후보 성공률 <math>\geq 25\%</math>)</p> <p><b>(통합 플랫폼)</b> 생체분자-자가농축 융합 기반, 다종 히토류 단계 분리가 가능한 통합 분리·회수 플랫폼 구현</p> <p><b>(최종 성능)</b> 분리계수 <math>\geq 15</math>, 탈착률 <math>\geq 80\%</math> (무약품·저약품 방식 우선), 회수율 <math>\geq 80\%</math>, 재사용 10회 시 초기 성능 90% 유지</p> <p><b>(실환경 검증)</b> 실제 침출액(폐연구자석·전자폐기물·산업폐수 등) 환경에서 통합 플랫폼 성능 검증</p> <p><b>(성과물)</b> 논문·특허 자율제시</p>

## 3. 성과지표

### ○ 성과지표

항목		1단계	2단계	3단계 (최종목표)	비고
필수	인접 히토류(난분리쌍, 예: Nd/Dy·Nd/Pr) 분리계수	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 15$	-
	자가 농축	자가농축 메커니즘 확보	자가농축 소재 고정화·모듈화	생체분자-자가농축 융합 플랫폼 구현	-
	농축계수	단계별 자율제시			저농도 환경에서 비기능성 지지체·필터 대비 기능성 지지체·필터의 히토류 포집 양 비교
	탈착률(무약품/저약품 방식 우선)	$\geq 50\%$	$\geq 70\%$	$\geq 80\%$	흡착된 히토류 대비 탈착된 양, 탈착액 ICP 농도 기반 회수율, chemical-free 방식 우선
	회수율	$\geq 50\%$	$\geq 70\%$	$\geq 80\%$	침출액 내 초기 농도 및 회수 농도를 비교하여 회수율 산정
	재사용 안정성	-	$\geq 90\%$ (5회)	$\geq 90\%$ (10회)	5회 혹은 10회 반복 재사용 시 초기 성능 대비 유지율
	소재설계	AI 후보군 검증 성공률	무작위 후보군	Top-K 성공률	Top-K 성공률

지표	대비 ≥1.5배	≥15%	≥25%
논문(JCR 상위 10% 이내), 특허, 기술이전 등	단계별 자율제시		
선행연구 대비 차별화 소재 확보	단계별 자율제시		
고정화(Immobilization) 전략	단계별 자율제시		
실환경(침출액 등) 검증 전략	단계별 자율제시		

4. 특기사항			
기본 특성분류	주요 항목별 해당여부	국가전략기술	<input checked="" type="checkbox"/> Y (혁신·미래소재/미래소재 및 설계·평가 플랫폼) <input type="checkbox"/> N
		혁신도전형 R&D	<input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
		특허로 R&D(舊 IP-R&D)	<input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> N
		경쟁형 R&D	<input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
		보안과제	<input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> N
		기술료 징수	<input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
		3책5공 적용	<input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
		국제공동연구 의무	<input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> N
		지자체 예산매칭 의무	<input type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> N
	DMP 수립·이행 의무	<input checked="" type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N	
ESG		<input type="checkbox"/> E(환경) <input type="checkbox"/> S(사회) <input type="checkbox"/> G(지배구조) <input checked="" type="checkbox"/> 해당없음	
<p>○ (융합연구) 융합기술 분야의 연계성이 과제 연구목표 및 내용에 명확하게 적시 필수</p> <p>○ 실제 제출하는 과제명은 연구자의 아이디어가 포함될 수 있는 제목으로 연구계획서 제출</p> <p>○ 미래적 분야의 도전적 연구 주제에 대한 지속 가능성을 제시하고, 검증된 연구개발에 대한 활용성 스케일업 연구개발 지원을 위한 이중 이상 분야 융합 연구진 구성 권고</p> <p>○ (경쟁형) 단계평가를 통해 2단계 계속 지원 여부를 결정</p> <p>- 단계평가 시 과제책임자는 1단계 성과 및 2·3단계 계획을 바탕으로 과제 조정 제안 가능</p> <p>- 차 단계 계속지원 과제의 경우 경쟁형중단 과제(경쟁기관)의 연구내용 및 방법, 연구기관(연구자) 등 일부 흡수 가능</p> <p>- 평가위원회는 이를 고려하여 2단계 계속 지원 여부 결정 가능</p> <p>※ 경쟁형 과제로 1단계 평가 후 2단계 진입 (RFP별 1개 과제 내외 계속지원 예정)</p> <p>※ 평가 결과에 따른 과제중단 및 연구비 조정 가능</p> <p>○ 본 사업은 데이터 관리계획(DMP) 제출을 의무화하여, 구축 데이터의 범위·공개 수준·활용 방안을 명시해야 하며, 과제 선정 및 단계/최종 평가 시 DMP 이행 여부를 주요 평가 항목으로 반영</p> <p>○ 연차점검(필요 시) 및 단계평가를 통해 연차별 단계별 추진 현황 및 성과를 점검받고, 점검·평가·추진위원회 의견에 따라 연구개발과제의 목표 및 내용, 과제 구성, 연구비, 계속 지원 여부 등 조정 가능</p>			