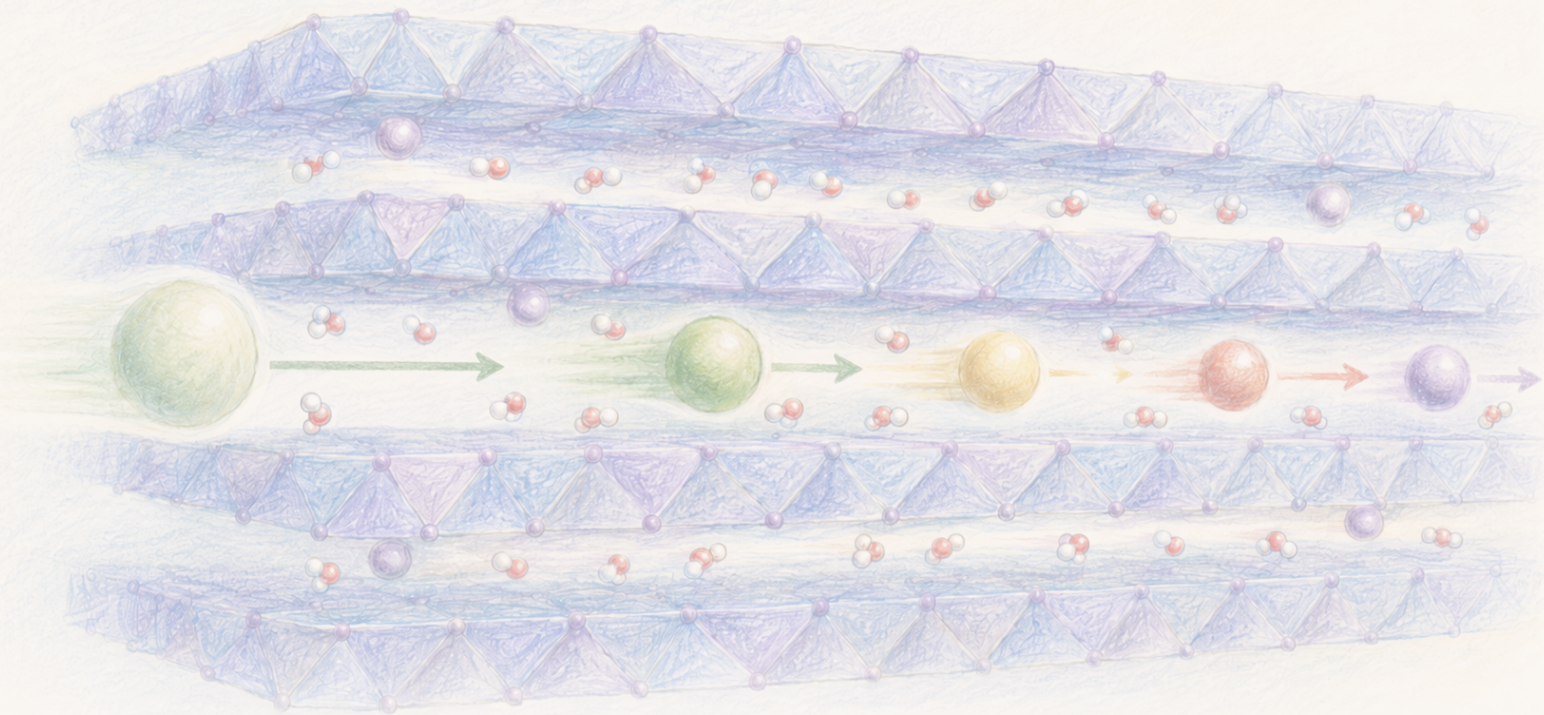




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

물이 찬 광물 채널을 고정하자 비슷한 희토류 이온 을 더 잘 분리할 수 있었다

마그네슘은 수화된 산화망간의 틈을 란타넘족 이온의 물 껍질 폭에 가깝게 유지했고, 실험실 시험에서 선택된 이온쌍의 농축을 개선했다. 실제로 입증된 작업은 밀리리터 규모 용액과 밀리그램 규모 재료에서 이루어졌다. 연속 흐름 운전, 긴 주기 수명, 상업 규모의 환경 성능은 아직 입증되지 않았다.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, *Nature Chemical Engineering* 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

물이 찬 광물 채널의 폭을 고정하자 비슷한 희토류 이온을 더 잘 분리할 수 있었다

희토류 이온은 멀리서 보면 닮은 형제자매를 구분하기 어려운 것과 비슷한 이유로 분리하기 어렵다. 차이는 실제로 존재하지만 아주 작다.

란타넘족 원소들은 주기율표에서 서로 나란히 있고 보통 같은 전하의 이온을 만든다. 계열을 따라 크기는 조금씩 변하지만 화학적 거동은 매우 비슷하다. 그래서 산업적 정제에는 반복적인 분리 단계가 많이 필요하다.

새로운 실험실 연구는 이 문제에 **구속 (confinement)** 을 이용해 접근했다. 연구진은 물이 찬 틈을 사이에 두고 겹쳐진 산화망간 시트를 사용했다. 희토류 이온은 물속에서 물 분자들에 둘러싸인 채 이 틈에 접근한다. 받침이 없으면 시트는 이온을 받아들이기 위해 더 벌어질 수 있다. 마그네슘 이온은 일종의 버팀대 역할을 했다. 시트 사이에 남아 있으면서 틈이 좁게 유지되도록 도왔다. 그러면 서로 다른 희토류 이온은 물 일부를 떼어 내고 채널 안으로 들어가 고체의 산소 원자와 결합하는 데 서로 다른 에너지 비용을 치르게 된다.

The separation trick was holding the wet gap narrow

Structure, electrochemistry and calculations support the mechanism from different angles.

UNPINNED CHANNEL

selected light lanthanides
expand the water-rich interlayer
more room changes dehydration,
coordination and binding
neighboring-pair preference
remains modest

MAGNESIUM-PINNED CHANNEL

retained Mg²⁺ helps keep
the buserite gap narrow
confinement changes dehydration,
coordination and binding
selected neighboring-pair
enrichment increases

EVIDENCE IS ASSEMBLED, NOT FILMED

- X-ray: solid structure
- electrochemistry: insertion and separation
- DFT: hydration and binding interpretation

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

고정되지 않은 채널과 마그네슘으로 고정된 채널은 구조 분석, 전기화학, 계산이 함께 지지하는 메커니즘 해석이다. 어느 하나의 실험도 전체 분자 이동 과정을 직접 촬영하지 않았다.

The Clean Paper CC BY 4.0

시험한 한 쌍인 란타넘과 네오디뮴에서는 이 **고정 (pinning)** 이 농축계수를 1.6 에서 **5.4** 로 높였다. 란타넘과 프라세오디뮴에서는 1.5 에서 **4.2** 로 올라갔다. 농축계수는 분리 후 두 이온의 비율을 분리 전 비율과 비교하는 값이다. 1 이면 어느 쪽도 선호하지 않는다는 뜻이고, 5.4 라면 포획된 물질에서 네오디뮴이 란타넘보다 선호되는 정도가 시작 혼합물보다 5.4 배 강해졌다는 뜻이다.

이는 특정 이온쌍에 대해 의미 있는 실험실 결과다. 모든 희토류를 이제 깔끔하게 분리할 수 있다는 증거도, 연속 흐름 공정이 입증됐다는 뜻도, 용매추출을 대체할 수 있다는 뜻도 아니다.

논문의 가장 강한 아이디어는 정유공장보다 훨씬 작다. 물에 젖은 광물의 틈이 벌어지지 않도록 붙잡아 두는 것이다.

물속의 이온은 맨 이온보다 크다

희토류 원소에는 란타넘족과 스칸듐, 이트륨이 포함된다. 이 연구는 란타넘에서 이터븀까지 양전하를 띤 란타넘족 이온 12 종을 시험했다. 세륨은 산화수가 쉽게 변하기 때문에 제외됐고, 방사성 프로메튬도 제외됐다.

물속에서 이온은 혼자 이동하지 않는다. 물 분자들이 전하 주변에 배열돼 **수화 껍질 (hydration shell)** 을 만든다. 좁은 채널 안으로 들어가 고체에 결합하려면 이온이 그 물층 일부를 재배열하거나 벗겨 내야 할 수 있다. 필요한 에너지는 이온 자체와 주변 환경 모두에 따라 달라진다.

크기는 **옹스트롬 (Å)** 으로 측정한다. 1 옹스트롬은 1 미터의 100 억분의 1 이다 ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$). 시험한 란타넘족 이온의 첫 번째 수화 껍질 직경은 대략 **6.6~7.1 Å** 로 보고됐다.

연구진은 buserite 라는 수화된 층상 산화망간을 사용했다. 반복되는 한 시트 위치에서 다음 시트 위치까지 측정한 층간 간격은 약 **9.6~9.7 Å** 였다. 그러나 시트 자체도 공간을 차지한다. 실제로 시트 사이에서 물이 차 있을 수 있는 자유 틈은 약 **6.8~6.9 Å** 뿐이었다.

이 차이는 중요하다. 9.7 Å 의 층간 간격이 9.7 Å 짜리 빈 채널이라는 뜻은 아니다.

일부 가벼운 란타넘족 이온은 구조를 더 많은 물을 포함하는 상으로 팽창시켰다. 그 경우 시트 간 간격은 약 **11.2 Å**, 추정 자유 틈은 약 **8.42 Å** 였다. 더 좁은 관련 구조인 birnessite 의 자유 틈은 약 **4.42 Å** 였다.

The ion enters with water around it

Approximate dimensions connect hydration and confinement without making a rigid sieve.

HYDRATED ION

first water-shell diameter
6.6-7.1 angstroms
water molecules must rearrange
or partly leave during binding

PINNED FREE GAP

space between solid sheets
6.8-6.9 angstroms
from 9.6-9.7 angstrom
sheet-to-sheet spacing

EXPANDED FREE GAP

water-rich phase
about 8.42 angstroms
from about 11.2 angstrom
sheet-to-sheet spacing

MECHANISTIC COMPARISON, NOT A SIZE-ONLY FILTER

- free gap and interlayer spacing are different measurements
- hydration, coordination and binding also affect selectivity

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

비교 대상은 맨 이온과 전체 시트 간 간격이 아니라, 대략적인 수화 껍질 직경과 물이 찬 자유 틈이다. 크기는 메커니즘의 일부이지 전부가 아니다.

The Clean Paper CC BY 4.0

광물 자체가 이온에 맞춰 변할 수 있다

마그네슘으로 고정하지 않으면 채널은 딱딱한체가 아니다. 겹친 시트가 움직일 수 있다. 실험에서는 가벼운 이온인 란타넘, 프라세오디뮴, 네오디뮴이 재료에 더 많은 물을 들어오게 하고 틈을 더 넓혔다. 유로퓸부터 이터븀까지 무거운 이온들은 더 좁은 채널을 유지하는 경향이 있었다. 사마륨은 두 반응 사이에 놓였다.

논문은 첫 번째 반응을 **Group I**, 두 번째를 **Group II** 라고 부른다. 이는 주기율표의 족 번호가 아니라 이 특정 재료가 각 이온에 반응하는 방식을 구분하는 이름이다. 다른 실험 조건에서는 경계가 달라질 수도 있다.

이 구조적 차이는 서로 다른 그룹의 이온쌍을 분리하는 데 도움이 됐다. 직접 이온교환에서는 란타넘 대 디스프로슘의 농축계수가 **7.8**, 프라세오디뮴 대 디스프로슘 **5.7**, 네오디뮴 대 디스프로슘 **4.5**, 네오디뮴 대 유로퓸 **2.6** 으로 보고됐다.

대부분의 이웃한 이온쌍은 훨씬 어려웠고 농축계수는 1.1 근처였다. 1에 가까운 값은 거의 선호가 없다는 뜻이다. 두 이온이 서로 다른 채널 구조를 선호할 때가 같은 반응 그룹 안에서 가까이 있을 때보다 재료가 더 쉽게 구별했다.

마그네슘이 채널을 고정한다

연구진은 이어 **전기화학적 삽입 (intercalation)** 을 사용했다. 전기화학 반응으로 고체 층 사이에 이온을 집어넣는 방식이다. 희토류 이온이 들어오는 동안 마그네슘 이온은 채널에 남았고, 남아 있는 마그네슘이 buserite 의 층간 간격이 팽창하지 않도록 도왔다.

더 좁고 젖은 틈 안에서는 수화된 이온이 들어올 공간이 적다. 제안된 메커니즘은 구속, 부분 탈수화, 배위, 결합을 함께 포함한다. **배위 (coordination)** 는 이온 바로 주변에서 직접 상호작용하는 원자, 흔히 산소 원자를 가리킨다.

증거는 여러 종류의 연구에서 온다. X 선 측정은 고체 구조를 추적했다. 전기화학 실험은 삽입과 분리를 측정했다. 양자역학적 계산인 **밀도범함수이론 (DFT)** 은 구조, 수화, 결합을 비교했다. 계산은 메커니즘 해석을 돕지만 이온 하나가 채널을 통과하는 모습을 직접 촬영한 영상은 아니다.

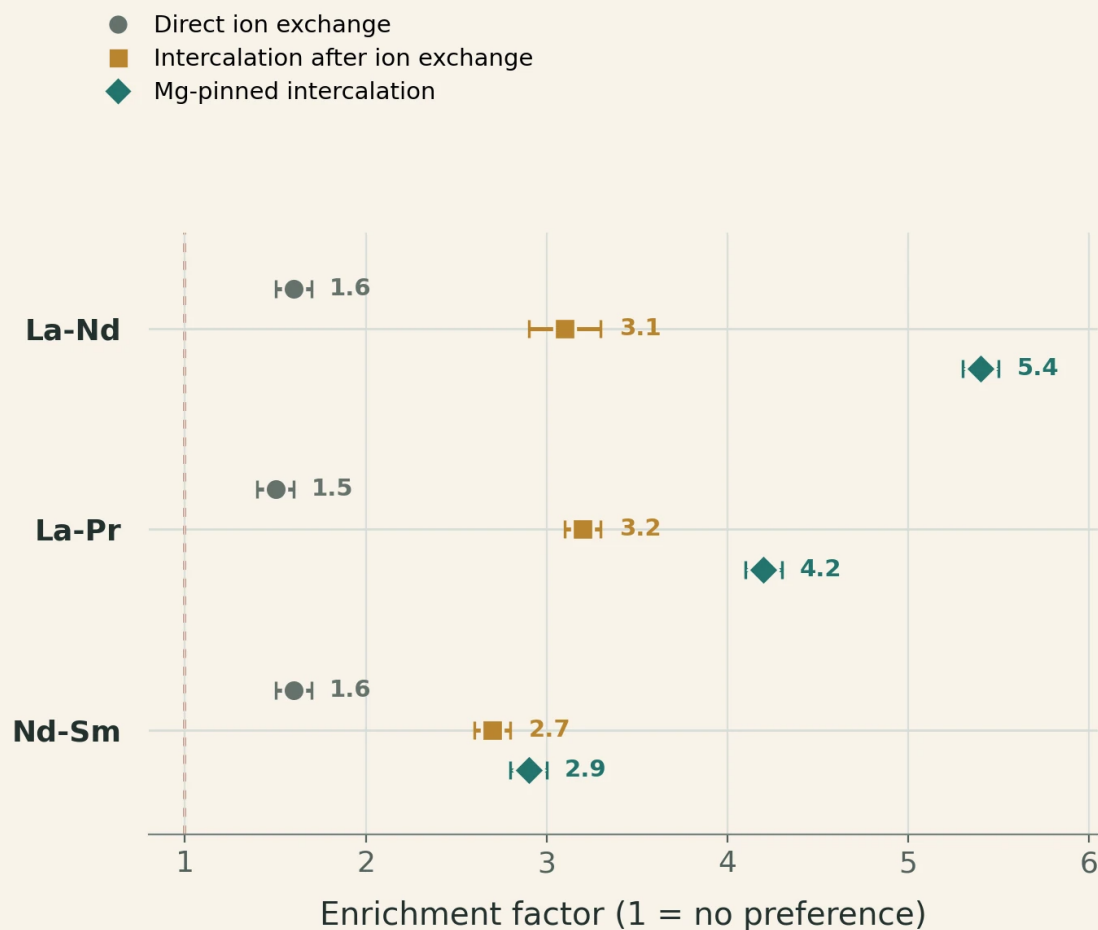
메커니즘을 단순히 “작은 이온은 통과하고 큰 이온은 막힌다” 라고 표현할 수도 없다. 물 껍질, 층이 어떻게 반응하는지, 탈수화에 드는 에너지, 이온이 고체와 어떻게 배위하는지가 모두 기여한다.

고정은 선택된 이웃 이온쌍의 분리를 개선했다

가장 크게 강조된 변화는 란타넘과 네오디뮴이었다. 고정하지 않았을 때 **1.6 +/- 0.1** 이던 농축계수가 마그네슘으로 고정하면 **5.4 +/- 0.1** 로 올라갔다. 란타넘 대 프라세오디뮴은 **1.5 +/- 0.1** 에서 **4.2 +/- 0.1** 로, 네오디뮴 대 사마륨은 **1.6 +/- 0.1** 에서 **2.9 +/- 0.1** 로 증가했다.

Pinning changes pair-specific enrichment

Three laboratory protocols compared for each 1:1 lanthanide mixture



Enrichment factor is not purity or recovery.

Points are means; whiskers show $\pm$ s.d. ($n = 3$). Conditions are comparisons, not sequential stages.

각 행은 하나의 공정이 순차적으로 진행된 세 단계가 아니라 서로 다른 세 가지 실험실 프로토콜을 비교한다. 계수 1은 선호가 없음을 뜻하고 값이 높을수록 특정 이온쌍에 대한 농축이 강하다. 점은 평균, 수염은 $\pm$ 표준편차 ($n = 3$)를 나타낸다.

The Clean Paper CC BY 4.0

pH 2에서 란타넘-네오디뮴 값은 5.6 ± 0.2 였다. 전기적 속도를 0.1C에서 0.5C로 다섯 배 올리면 값은 5.4 ± 0.1 에서 4.3 ± 0.4 로 낮아졌다. C-rate는 가한 전류를 재료 용량과 비교하는 척도다. 속도가 높으면 이온과 고체가 반응할 시간이 줄어든다.

어떤 하나의 숫자도 이 재료를 보편적으로 설명하지 않는다. 농축은 이온쌍, 고체 구조, 산도, 운전 속도에 따라 달라진다.

논문은 희토류가 아닌 흔한 이온이 매우 많은 조건에서도 재료를 시험했다. 시작 혼합물에는 희토류 이온 하나당 경쟁 이온 1,000 개가 들어 있었다. 보고된 선택도는 나트륨에 대해 약 **1,200**, 칼슘에 대해 **6,500**, 마그네슘에 대해 **1,700** 이었다.

이는 이런 실험실 조건에서 흔한 이온이 분리를 자동으로 압도하지 않는다는 유용한 증거다. 하지만 실제 광석에서 나온 완전한 용액, 즉 여러 금속과 산도, 오염물이 모두 들어 있는 흐름을 시험한 것은 아니다.

농축, 분리, 순도, 제거, 회수는 서로 다른 결과다

논문에는 여러 성능 지표가 나오며 서로 바뀌 쓸 수 없다.

농축계수 (enrichment factor) 는 분리 후 두 이온의 비율을 분리 전 비율과 비교한다. 5.4 라는 값은 포획된 물질에서 한 이온이 다른 이온보다 선호되는 정도가 시작 혼합물보다 5.4 배 강하다는 뜻이다.

분리계수 (separation factor) 는 액체에 남은 양까지 고려한다. 각 이온에서 포획된 양과 포획되지 않은 양의 균형을 비교한 뒤, 두 이온의 그 균형을 다시 비교한다. 그래서 더 많은 물질이 제거되면 농축계수와 다른 방식으로 움직이면서도 분리계수는 커질 수 있다.

순도 (purity) 는 회수된 분획에서 선택한 이온이 차지하는 비율이다. 2 단계 실험에서는 지정된 경로에서 약 **97.0% 네오디뮴 순도, 92.3% 디스프로슘 순도**에 도달했다.

제거율 (depletion) 은 시작 용액에서 제거된 비율이다. 10 밀리그램 분말을 연속 8 번 추가한 네오디뮴-디스프로슘 시험에서는 **디스프로슘의 72%** 가 제거됐고 누적 분리계수는 10.8 이었다.

회수율 (recovery) 은 포획한 이온 가운데 나중에 얼마나 다시 방출할 수 있는지를 묻는다. 역이온교환은 한 네오디뮴-디스프로슘 작업에서 **80%** 를 회수했다. 전기화학적 제거는 한 란타넘-네오디뮴 작업에서 **89%** 를 회수했다.

회수는 가역성을 보여 준다. 같은 성능을 유지하면서 전극을 몇 번 재사용할 수 있는지는 증명하지 않는다.

Four strong numbers, four different denominators

These evidence cards come from different experiments; they are not process steps.

ENRICHMENT

La-Nd
5.4 +/- 0.1
captured ratio divided
by starting ratio

PURITY

neodymium
about 97.0%
target share in a
recovered fraction

DEPLETION

dysprosium
72%
share removed from
the starting solution

RECOVERY

La-Nd operation
89%
share of captured
rare-earth ions released

A LARGE VALUE IN ONE CARD CANNOT REPLACE THE OTHERS

- high depletion can coexist with low purity
- one recovery operation does not establish cycle life

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

보고된 네 지표는 서로 다른 분모를 사용하고 서로 다른 실험에서 나왔다. 하나의 공정에서 순차적으로 이어지는 단계가 아니라 별도의 증거 카드다.

The Clean Paper CC BY 4.0

인상적인 두 퍼센트가 왜 서로 다른 뜻일 수 있을까?

어떤 공정이 시작 액체에서 한 이온의 90% 를 제거했다고 하자. 제거율은 높다. 하지만 원치 않는 다른 이온도 함께 많이 따라왔다면 회수 물질의 순도는 낮을 수 있다. 반대로 아주 순수한 소량의 분획을 얻더라도 목표 이온 대부분을 남겨 두었다면 회수율은 낮을 수 있다. 공정을 평가하려면 가장 큰 숫자 하나가 아니라 이 모든 물질수지가 필요하다.

입증된 장치는 아직 비커 실험이다

규모를 의식한 전기화학 실험은 각 이온을 리터당 25 밀리몰 포함한 **5 밀리리터** 용액에서 시작했다. 전극에는 대략 **25~40 밀리그램**의 활성 물질이 들어 있었다.

전극 하나는 네오디뮴의 약 40% 를 제거했다. 전극 세 개를 직렬로 사용하면 약 **90% 제거율**과 누적 분리 계수 **16.6 +/- 0.4** 에 도달했다. 운전 속도에 따라 반응 시간은 **200 분에서 13 시간**이었다.

이 크기와 시간은 무엇이 실제로 입증됐는지를 규정하므로 핵심 이야기 안에 들어가야 한다.

보충자료는 물질전달 한계도 지적한다. 더 높은 농도의 비커 조건에서 총 제거율 50% 에 도달하려면 **266 밀리그램 전극**, 즉 **제곱센티미터당 532 밀리그램의 활성 물질**이 필요하다고 추정했다. 작은 전극에 그렇게 많은 물질을 쌓으면 용해된 이온이 전체 물질에 도달하기 어려워진다. 그래서 실제 비커 실험에서는 더

물은 용액을 사용했다.

가상의 흐름 셀은 예측으로만 등장한다. 5 x 5 센티미터 전극을 넣은 1.25 밀리리터 셀을 가정하면, 보충자료는 약 90% 제거에 **1C** 에서 약 20 분, **0.5C** 에서 약 40 분이 걸릴 것으로 추정한다. 그런 흐름 셀 실험은 보고되지 않았다.



단계도는 경계에서 끝난다. 이원 혼합물과 단계적 실험실 증거는 존재하지만, 흐름 셀 시간과 환경 성능은 공장 규모에서 입증된 것이 아니라 예측 또는 시나리오 기반이다.

The Clean Paper CC BY 4.0

환경 비교는 시나리오이지 공장 결과가 아니다

보충자료의 생애주기평가 (LCA) 는 희토류 산화물로 끝나는 분리 단계를 비교하고, 산화네오디뮴 **1 킬로그램당** 투입량을 보고한다.

채굴, 광석 전처리, 완전한 상업 정제 사슬은 포함하지 않는다. 실험실 공정은 여러 출처에서 모은 가정을 사용해 모델링한다. 전극 수명 **10 회, 20 회, 100 회**는 이 연구에서 측정한 내구성이 아니라 시나리오 및 민감도 값이다. 모델은 마그네슘 회수 용액의 농도가 10% 변할 때까지 재사용할 수 있다고 가정하고, **95% 물 재활용**을 가정하며, 이 연구에서 실험적으로 입증하지 않은 450~600°C 에서 2 시간 소성 과정도 포함한다.

생애주기평가 (life-cycle assessment) 는 명시된 시스템 경계 안의 환경 부담을 계산한다. 답의 범위는 그 경계만큼 넓고, 신뢰도는 물질 목록과 규모 가정만큼만 좋다.

이 분석은 에너지, 재료, 재사용이 어디에서 중요한지 보여 줄 수 있다. 상업적 공정이 산업용 용매추출보다 환경 영향이 낮을 것이라고 증명할 수는 없다.

메커니즘과 플랫폼은 나왔지만, 공학적으로 갈 길은 길다

논문은 수화된 층상 고체의 간격과 화학 환경을 의도적으로 제어하면 선택된 란타넘족 분리를 개선할 수 있음을 보여 준다. 마그네슘 고정은 단순히 또 하나의 화학적 결합 자리를 추가한 것이 아니라, 물에 둘러싸인 이온이 통과해야 하는 구조 자체를 제한했다.

그 결과는 실용적인 질문을 연다. 실제 광석에서 나온 혼합물에서도 성능이 유지될까? 현실적인 활성물질 적재량을 가진 전극을 만들 수 있을까? 산화망간은 수많은 삽입·방출 주기를 얼마나 견딜까? 연속 셀이 선택도, 처리량, 물 수지를 유지할 수 있을까? 파일럿 규모에서 실제로 측정한 투입자료를 사용하면 환경 비교는 어떻게 달라질까?

이 실험은 그 질문들에 답하지 않는다. 대신 질문을 훨씬 구체적으로 만든다.

성과는 완성된 희토류 정유공장이 아니다. 몇 옴스트롬에 불과한 물이 찬 공간을 제어하는 것만으로 어려운 분리를 바꿀 수 있다는 증거다.

핵심 요약

연구진은 수화된 층상 산화망간을 사용해 물속에서 선택된 란타넘족 이온쌍을 분리했다. 재료의 자유 틈은 약 6.8~6.9 Å로, 보고된 이온 첫 수화 껍질 직경 6.6~7.1 Å에 가까웠다. 남아 있는 마그네슘이 채널을 고정해 이온쌍별 농축을 개선했다. 란타넘-네오디뮴은 1.6에서 5.4, 란타넘-프라세오디뮴은 1.5에서 4.2로 올랐다. 연구는 흔한 이온이 많은 조건, 단계적 순도, 연속 제거, 회수 작업도 보고했다. 실제 입증 규모는 활성물질 25~40 밀리그램을 사용한 5 밀리리터 비커 실험이고 반응 시간은 200 분에서 13 시간이었다. 흐름 셀 시간은 예측값이며, 많은 주기의 재사용은 시험하지 않았고, 생애주기 비교도 실험실 규모 가정에 의존했다. 논문은 구속 메커니즘과 실험실 플랫폼을 뒷받침하지만 산업용 용매추출의 대체 공정을 입증하지는 않는다.

과장 없이 보면

논문이 보여 주는 것: 남아 있는 마그네슘으로 수화된 산화망간 틈을 약 6.8~6.9 Å로 유지하면 선택된 란타넘족 이온쌍의 분리가 달라졌다. 구조 측정, 전기화학, 계산은 구속·탈수화·배위·결합을 포함하는 메커니즘을 지지한다.

가장 좋은 성능: 지정된 조건에서 란타넘-네오디뮴 농축은 5.4 +/- 0.1, 란타넘-프라세오디뮴은 4.2 +/- 0.1이었다. 다른 이온쌍은 다른 값을 보였다. 별도 실험에서 서로 다른 분모를 사용하는 순도, 제거율, 회수율

도 보고됐다.

보여 주지 않는 것: 모든 희토류에 쓸 수 있는 보편적 분리재, 실제 광석 전체 흐름에서의 작동, 입증된 연속 흐름 셀, 다회 사용 내구 전극, 용매추출 대체, 상업 규모에서 입증된 환경 우위.

주요 규모 한계: 입증된 실험은 5 밀리리터 용액, 활성물질 약 25~40 밀리그램, 반응 시간 200 분 ~13 시간을 사용했다. 더 높은 농도 목표에서는 제곱센티미터당 532 밀리그램 적재 문제를 시사했다. 흐름 시간은 외삽했고, 생애주기평가의 전극 수명과 주요 재활용 입력은 가정이었다.

일반 독자는 얼마나 신뢰해야 하는가? 이름이 제시된 이온쌍과 조건의 실험실 측정에는 높은 신뢰가 적절하다. 직접 구조·전기화학 데이터와 계산을 결합한 분자 메커니즘 해석에는 중간 정도의 신뢰가 적절하다. 현재 데이터가 산업 처리량, 수명, 환경 성능을 예측한다는 주장에는 낮은 신뢰가 맞다.

출처

Zou et al., Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026)
<https://doi.org/10.1038/s44286-026-00418-8>