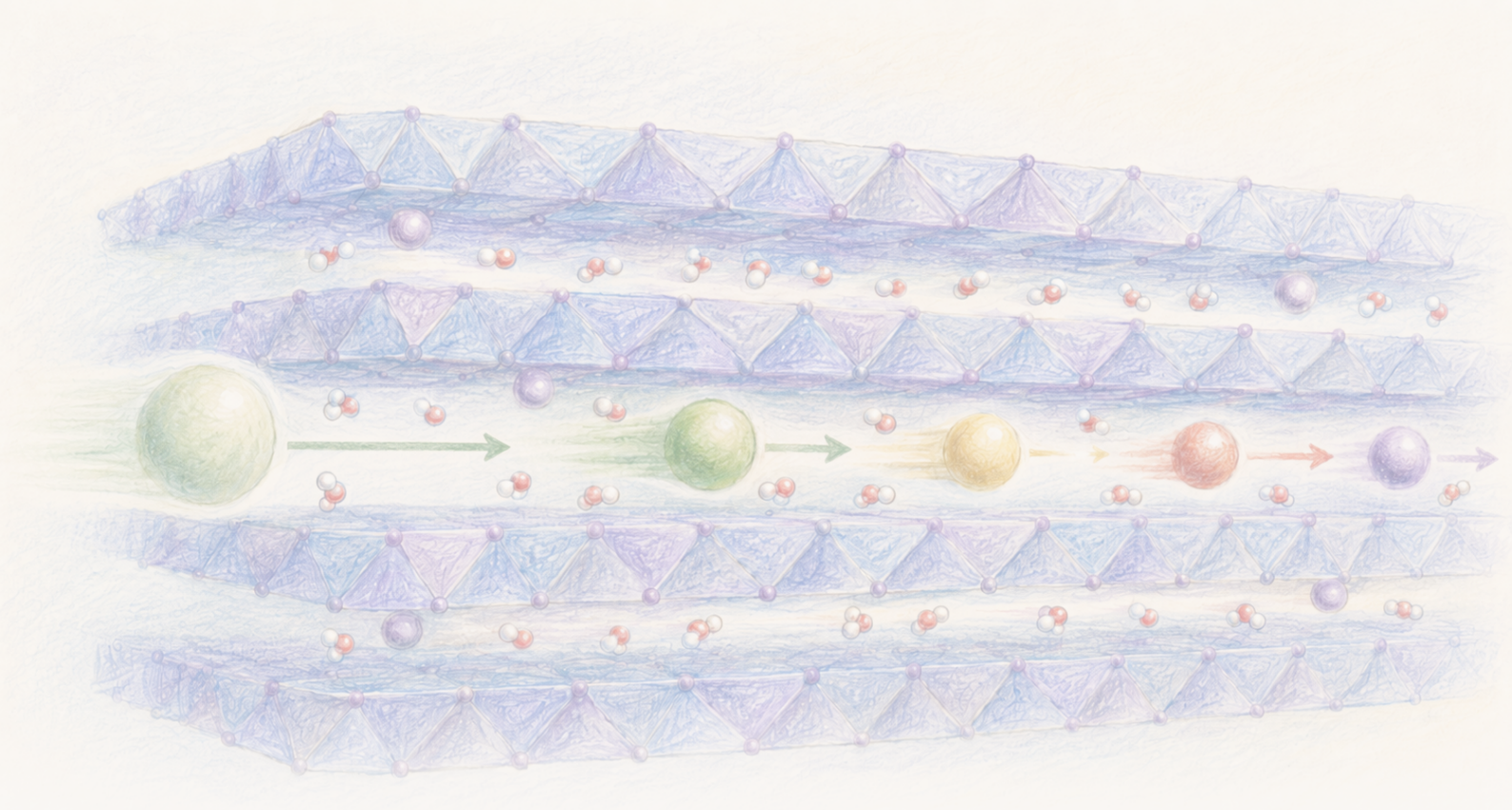


The Clean Paper

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

Å stabilisere en vannfylt mineralkanal bidro til å skille lignende ioner av sjeldne jordarter

Magnesium holdt en hydrert spalte i manganoksid nær bredden på vannskallet rundt et lantanoid-ion og forbedret utvalgt parvis anrikning i laboratorietester. Det demonstrerte arbeidet brukte milliliter med løsning og milligram med materiale; drift med gjennomstrømning, lang sykluslevetid og kommersiell miljøytelse er fortsatt ikke dokumentert.

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

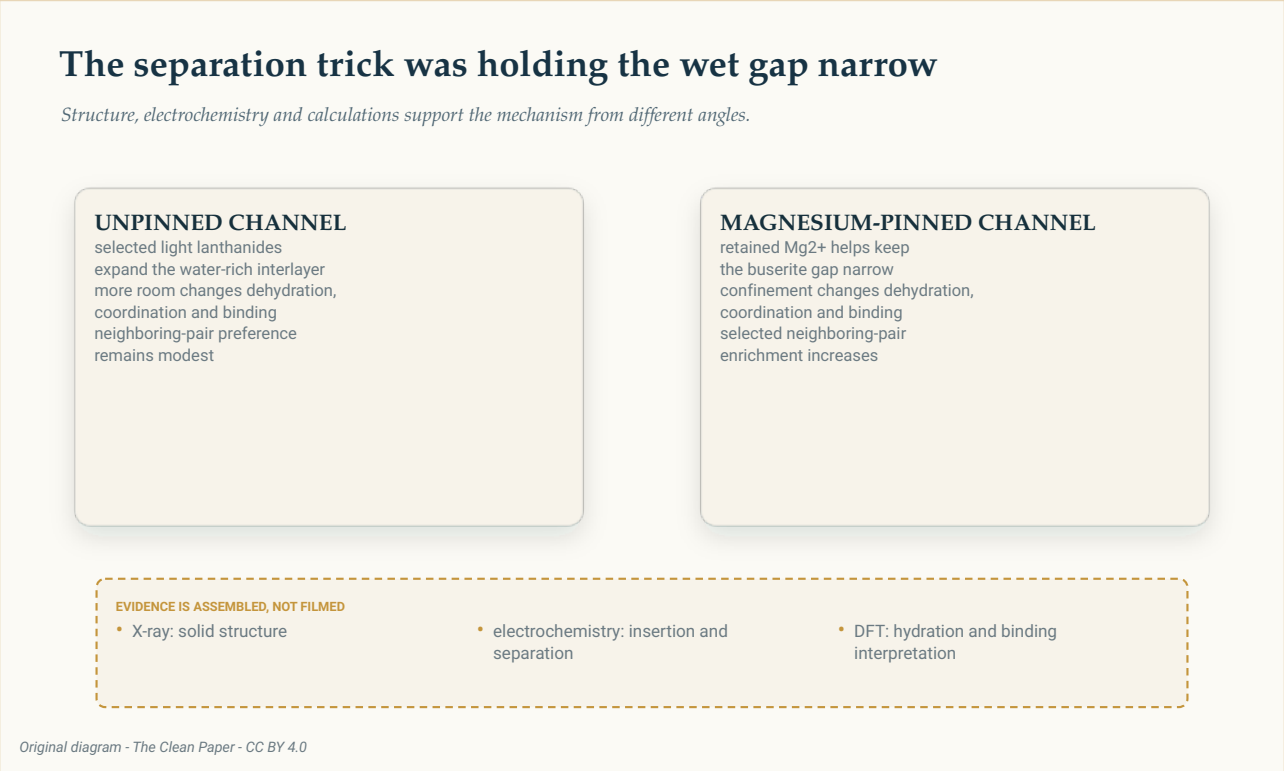
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Å holde en vannfylt mineralkanal på plass hjalp med å skille lignende sjeldne jordartsioner

Sjeldne jordartsioner er vanskelige å skille av samme grunn som søsken kan være vanskelige å skjelne på avstand: Forskjellene er reelle, men små.

Lantanidene ligger ved siden av hverandre i periodesystemet og danner vanligvis ioner med samme ladning. Størrelsen endrer seg gradvis gjennom serien, mens den kjemiske oppførselen forblir lik. Industriell raffinering krever derfor mange gjentatte separasjonstrinn.

En ny laboratoriestudie angrep problemet gjennom inneslutning. Forskerne brukte stablede sjikt av manganoksid med en vannfylt spalte mellom dem. Et sjeldent jordartsion nærmer seg spalten innpakket i vannmolekyler. Uten avstivning kan sjiktene bevege seg fra hverandre for å gi plass. Magnesiumioner fungerte som en avstivning: Når de ble værende mellom sjiktene, bidro de til å holde spalten smal. Ulike sjeldne jordartsioner måtte da betale ulike energikostnader for å gi slipp på noe av vannet, gå inn i kanalen og binde seg til oksygenatomer i det faste stoffet.



De ustøttede og magnesiumfikserte kanalene er mekanistiske tolkninger støttet av strukturmålinger, elektrokjemi og beregninger. Ingen enkeltmåling observerte hele molekylsekvensen.

The Clean Paper CC BY 4.0

For ett testet par, lantan og neodym, økte denne **fikseringen** anrikningsfaktoren fra 1,6 til **5,4**. For lantan og praseodym steg den fra 1,5 til **4,2**. En anrikningsfaktor sammenligner forholdet mellom de to ionene etter separasjon med forholdet før separasjon. Verdien 1 betyr ingen preferanse; 5,4 betyr at det fangede materialet favoriserte neodym fremfor lantan 5,4 ganger sterkere enn startblandingen

gjorde.

Dette er meningsfulle, parspesifikke laboratorieresultater. De er ikke bevis på at alle sjeldne jordarter nå kan skilles rent, at en strømningsprosess er demonstrert, eller at løsemiddelekstraksjon kan erstattes.

Den sterkeste ideen i artikkelen er mindre enn et raffineri: Hindre at en våt mineralspalte åpner seg.

Et ion i vann er større enn det nakne atomet

Sjeldne jordarter omfatter lantanidene samt skandium og yttrium. Studien testet tolv positivt ladde lantanidioner fra lantan til ytterbium. Cerium ble utelatt fordi det lett skifter oksidasjonstilstand, og radioaktivt prometium ble utelatt.

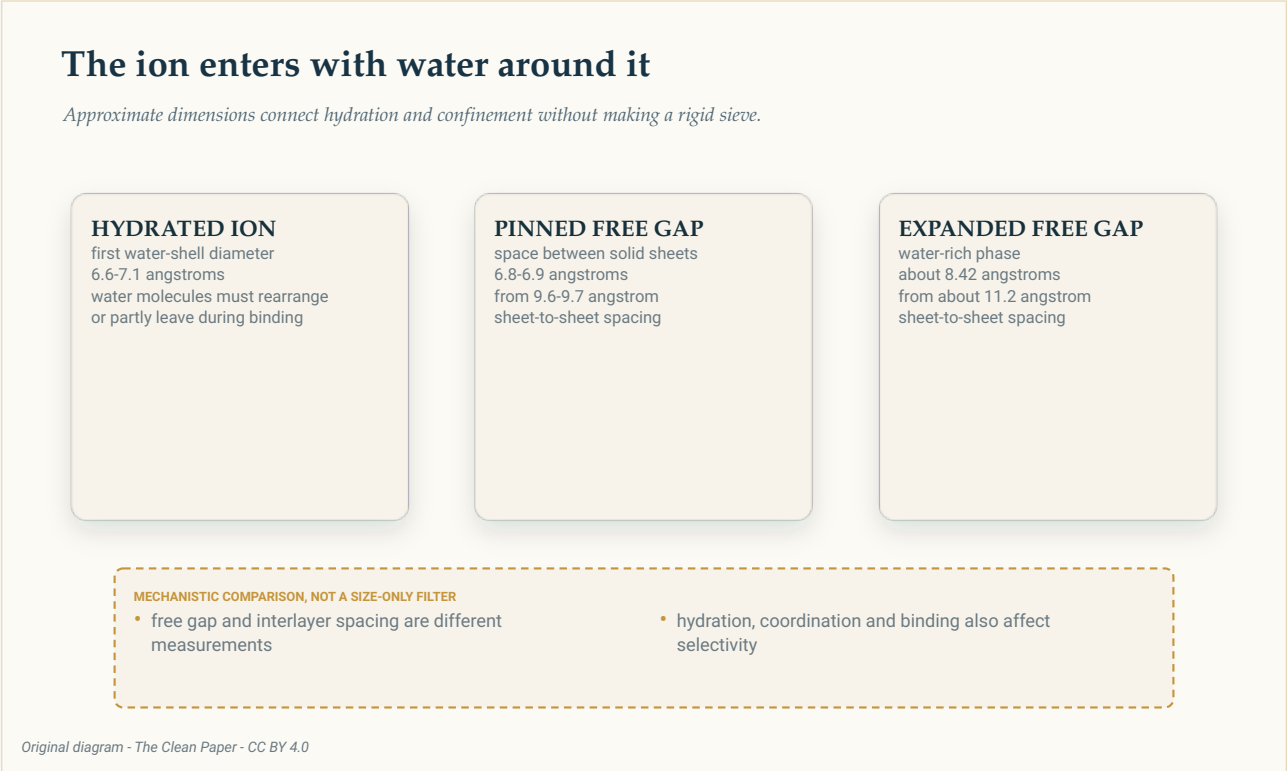
I vann beveger et ion seg ikke alene. Vannmolekyler ordner seg rundt ladningen og danner et **hydratiseringsskall**. For å gå inn i en smal kanal og binde seg til et fast stoff kan ionet måtte omorganisere eller gi slipp på en del av dette vannlaget. Energikostnaden avhenger både av ionet og omgivelsene.

Dimensjonene måles i **ångstrøm (Å)**. Én ångstrøm er en tidels milliarddels meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). De første hydratiseringsskallene til de testede lantanidene ble rapportert å være omtrent **6,6 til 7,1 Å** i diameter.

Forskerne brukte et hydratisert, lagdelt manganoksid kalt buseritt. De stablede sjiktene lå omtrent **9,6 til 9,7 ångstrøm** fra hverandre, målt fra én repeterende sjiktposisjon til den neste. Men selve sjiktet tar plass. Den frie vannfylte spalten mellom sjiktene var bare omtrent **6,8 til 6,9 ångstrøm**.

Dette skillet er viktig. En avstand mellom lagene på 9,7 ångstrøm er ikke en åpen kanal på 9,7 ångstrøm.

Noen lettere lantanider fikk strukturen til å ekspandere til en mer vannrik fase. Der var avstanden fra sjikt til sjikt omtrent **11,2 ångstrøm**, og den beregnede frie spalten omtrent **8,42 ångstrøm**. En smalere beslektet struktur, birnessitt, hadde en fri spalte på rundt **4,42 ångstrøm**.



Sammenligningen gjelder den omtrentlige diameteren på hydratiseringsskallet og den frie vannfylte spalten, ikke et nakent ion mot hele avstanden fra sjikt til sjikt. Størrelse er én del av mekanismen, ikke hele forklaringen.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineralet kan tilpasse seg ionet

Uten magnesiumfiksering er kanalen ikke en stiv sil: De stablede sjiktene kan bevege seg. I forsøkene fikk de lettere ionene lantan, praseodym og neodym materialet til å ta opp mer vann og åpne seg videre. De tyngre ionene fra europium til ytterbium hadde en tendens til å la den smalere kanalen forbli intakt. Samarium lå mellom disse to responsene.

Artikkelen kaller den første responsen **gruppe I** og den andre **gruppe II**. Dette er betegnelser på hvordan ionene fikk akkurat dette materialet til å reagere, ikke gruppenumre i periodesystemet. Grensen kan også endre seg under andre forsøksbetingelser.

Denne strukturelle forskjellen hjalp for par på tvers av gruppene. Ved direkte ionebytte var den rapporterte anrikningsfaktoren **7,8** for lantan mot dysprosium, **5,7** for praseodym mot dysprosium, **4,5** for neodym mot dysprosium og **2,6** for neodym mot europium.

De fleste nabopar var langt vanskeligere, med anrikningsfaktorer nær 1,1. En faktor nær 1 betyr liten preferanse. Materialet kunne lettere skille ioner som favoriserte ulike kanalstrukturer, enn ioner som lå nær hverandre i samme responsgruppe.

Magnesium fikserer kanalen

Forskerne brukte deretter **elektrokjemisk interkalering**: en elektrisk reaksjon som fører ioner inn mellom faste sjikt. Magnesiumioner ble værende i kanalen mens sjeldne jordartsioner gikk inn. Det beholdte magnesiumet bidro til å hindre buserittavstanden i å utvide seg.

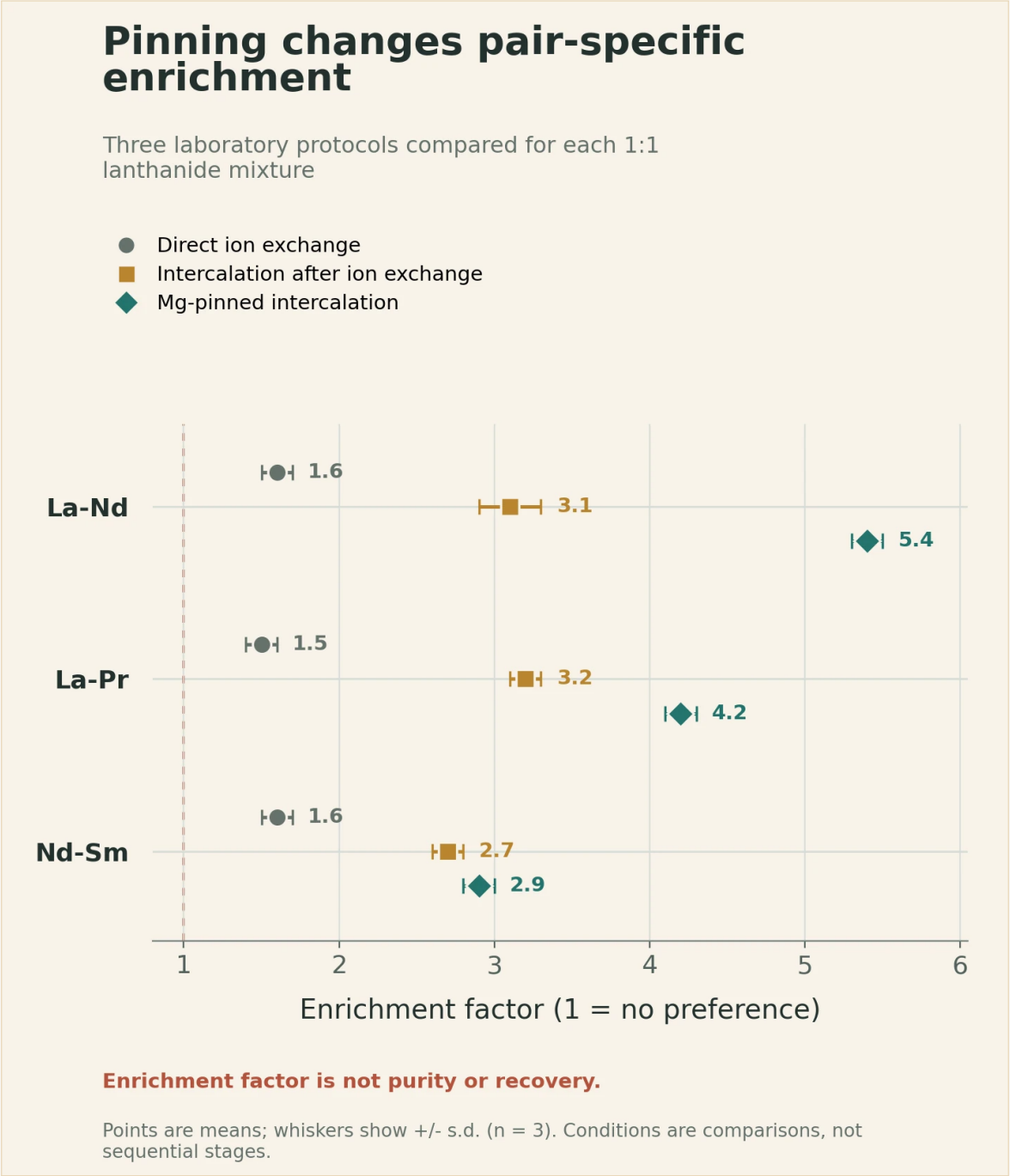
Inne i denne smalere, våte spalten har et innkommende hydratisert ion mindre plass. Den foreslåtte mekanismen kombinerer inneslutning, delvis dehydratisering, koordinasjon og binding. **Koordinasjon** betegner atomene i nærheten — ofte oksygen — som direkte omgir og samhandler med ionet.

Bevisene kommer fra flere typer arbeid. Røntgenmålinger fulgte strukturen i det faste stoffet. Elektrokjemiske forsøk målte innsetting og separasjon. **Tetthetsfunksjonalteori**, en kvantemekanisk beregningsmetode, sammenlignet strukturer, hydratisering og binding. Beregningene hjelper med å tolke mekanismen; de er ikke en direkte film av ett ion som beveger seg gjennom kanalen.

Mekanismen er heller ikke bare «mindre ioner passerer, større stoppes». Vannskallet, hvordan lagene reagerer, energikostnaden ved dehydratisering og hvordan ionet koordineres med det faste stoffet, bidrar alle.

Fiksering forbedret utvalgte nabopar

Den største fremhevede endringen gjaldt lantan og neodym: Anrikningen steg fra **1,6** ± **0,1** uten fiksering til **5,4** ± **0,1** med magnesiumfiksering. Lantan mot praseodym steg fra **1,5** ± **0,1** til **4,2** ± **0,1**. Neodym mot samarium steg fra **1,6** ± **0,1** til **2,9** ± **0,1**.



Hver rad sammenligner tre separate laboratorieprotokoller, ikke tre påfølgende trinn i én prosess. En faktor på 1 betyr ingen preferanse; høyere verdier betyr sterkere parspesifikk anrikning. Punktene viser gjennomsnitt, og strekene viser ± standardavvik (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Ved pH 2 var verdien for lantan–neodym **5,6 ± 0,2**. Da den elektriske raten ble femdoblet fra 0,1C til 0,5C, falt den fra **5,4 ± 0,1** til **4,3 ± 0,4**. C-raten sammenligner den påførte elektriske strømmen med materialets kapasitet. En høyere rate gir ionene og det faste stoffet mindre tid til å reagere.

Ingen enkeltverdi beskriver materialet universelt. Anrikningen avhenger av ioneparet, faststoffstrukturen, surhetsgraden og driftsraten.

Artikkelen utfordret også materialet med store mengder ioner som ikke er sjeldne jordarter. Startblandingene inneholdt ett sjeldent jordartsion for hver 1 000 konkurrerende ioner. Rapporterte selektivitetsverdier var omtrent **1 200** mot natrium, **6 500** mot kalsium og **1 700** mot magnesium.

Dette er nyttig bevis på at vanlige ioner ikke automatisk overvelder separasjonen under disse laboratorieforholdene. Det er ikke en test av en komplett væske fra malm med alle dens metaller, surhet og forurensninger.

Anrikning, separasjon, renhet, uttømming og gjenvinning er ulike resultater

Artikkelen bruker flere ytelsesmål, og de kan ikke erstatte hverandre.

En **anrikningsfaktor** sammenligner forholdet mellom to ioner etter separasjon med forholdet før separasjon. Verdien 5,4 betyr at det fangede materialet favoriserte det ene medlemmet av paret 5,4 ganger sterkere enn startblandingen gjorde.

En **separasjonsfaktor** tar også hensyn til det som er igjen i væsken: Den sammenligner fanget og ikke-fanget mengde for hvert ion og sammenligner deretter disse to balansene. Den kan derfor øke når mer materiale fjernes, selv om anrikningsfaktoren følger et annet mønster.

Renhet er andelen av et valgt ion i en gjenvunnet fraksjon. Demonstrasjoner i to trinn nådde omtrent **97,0 prosent neodymrenhet** og **92,3 prosent dysprosiumrenhet** i de angitte forløpene.

Uttømming er andelen som fjernes fra startløsningen. Åtte påfølgende tilsetninger av 10 milligram pulver fjernet **72 prosent av dysprosiumet** i en neodym–dysprosium-test og ga en akkumulert separasjonsfaktor på 10,8.

Gjenvinning spør hvor mye av et fanget ion som senere kan frigjøres. Omvendt ionebytte gjenvant **80 prosent** i én neodym–dysprosium-operasjon. Elektrokjemisk fjerning gjenvant **89 prosent** i én lantan–neodym-operasjon.

Gjenvinning viser reversibilitet. Det fastslår ikke hvor mange ganger en elektrode kan gjenbrukes uten å miste ytelse.

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

Fire rapporterte mål bruker ulike nevnere og kommer fra ulike forsøk. De er separate beviskort, ikke påfølgende trinn i én prosess.

The Clean Paper CC BY 4.0

Hvorfor kan to imponerende prosenter bety forskjellige ting?

Anta at en prosess fjerner 90 prosent av ett ion fra startvæsken. Det er høy uttømming. Hvis mange uønskede ioner følger med, kan det gjenvunne materialet likevel ha lav renhet. Omvendt kan en svært ren, liten fraksjon bety dårlig gjenvinning hvis det meste av målet ble liggende igjen. En prosessvurdering trenger alle disse balansene, ikke bare det største tallet.

Det demonstrerte apparatet er fortsatt et begerglassforsøk

De skalaorienterte elektrokjemiske forsøkene startet med **5 milliliter** løsning som inneholdt 25 millimol per liter av hvert ion. Elektrodene bar omtrent **25 til 40 milligram** aktivt materiale.

Én elektrode fjernet omtrent 40 prosent av neodymet. Tre elektroder brukt i serie nådde omtrent **90 prosent uttømming** og en akkumulert separasjonsfaktor på **16,6 ± 0,4**. Avhengig av driftsraten varte reaksjonene fra **200 minutter til 13 timer**.

Disse dimensjonene og tidene hører hjemme i hovedhistorien fordi de definerer hva som faktisk ble demonstrert.

Tillegget identifiserer også en masseoverføringsgrense. For et begerglassmål med høyere konsen-

trasjon ble det anslått at 50 prosent total uttømming ville kreve en **266-milligrams elektrode**, eller **532 milligram aktivt materiale per kvadratcentimeter**. Å pakke så mye materiale på den lille elektroden ville gjøre det vanskelig for oppløste ioner å nå alt sammen. Forfatterne gikk derfor over til en mer fortynnet løsning i begerglassforsøket.

En hypotetisk strømningscelle finnes bare som en fremskrivning. For en antatt celle på 1,25 milliliter med en elektrode på 5 × 5 centimeter anslår tillegget omtrent **20 minutter ved 1C** eller **40 minutter ved 0,5C** for rundt 90 prosent uttømming. Ingen slik strømningscelle ble testet.

Stigen ender ved en grense: Det finnes binære og trinnvise laboratoriebevis, mens tid i strømningscelle og miljøytelse fortsatt er fremskrevet eller scenariobasert, ikke demonstrert i anleggsskala.

The Clean Paper CC BY 4.0

Miljøsammenligningen er et scenario, ikke et anleggsresultat

Den supplerende livsløpsanalysen sammenligner separasjonstrinn som ender i sjeldne jordartsoksider, og rapporterer innsatsfaktorer per **1 kilogram neodymoksid**.

Den omfatter ikke gruvedrift, forbehandling av malm eller en komplett kommersiell raffineringskjede. Laboratorieprosessen representeres med antakelser satt sammen fra flere kilder. Elektrodeliv på **10, 20 og 100 sykluser** er scenario- og sensitivitetsverdier, ikke holdbarhet målt i denne studien. Modellen antar at magnesiumløsningen for gjenvinning kan brukes om igjen til

konsentrasjonen har endret seg med 10 prosent, antar **95 prosent vanngjenvinning** og inkluderer kalsinering ved 450–600 °C i to timer, selv om kalsinering ikke ble demonstrert eksperimentelt her.

En **livsløpsanalyse** bokfører miljøbelastninger innenfor en oppgitt systemgrense. Svaret er bare så bredt som grensen og så pålitelig som inventaret og skalaantakelsene.

Analysen kan identifisere hvor energi, materialer og gjenbruk betyr mest. Den kan ikke bevise at en kommersiell versjon ville ha lavere miljøpåvirkning enn industriell løsemiddelekstraksjon.

En mekanisme, en plattform og en lang ingeniørvei

Artikkelen fastslår at avstanden og det kjemiske miljøet i et hydratisert, lagdelt fast stoff kan kontrolleres bevisst for å forbedre separasjonen av utvalgte lantanidpar. Magnesiumfiksering gjorde mer enn å tilføre et nytt kjemisk bindingssted: Den begrenset strukturen som vanninnpakkede ioner måtte bevege seg gjennom.

Resultatet åpner praktiske spørsmål. Overlever ytelsen i virkelige blandinger fra malm? Kan elektroder produseres med en brukbar massebelastning? Hvor stabilt er manganoksidet gjennom mange innsettings- og frigjøringssykluser? Kan en kontinuerlig celle opprettholde selektivitet, gjennomstrømning og vannbalanse? Hvordan ser miljøsammenligningen ut med målte inventarer fra pilotskala?

Forsøket besvarer ikke disse spørsmålene. Det gjør dem mer konkrete.

Prestasjonen er ikke et ferdig raffineri for sjeldne jordarter. Det er bevis på at noen få ångstrøm kontrollert, vannfylt rom kan endre en vanskelig separasjon.

Kort oppsummert

Forskere brukte hydratisert, lagdelt manganoksid til å skille utvalgte par av lantanidioner i vann. Materialets frie spalte var omtrent 6,8–6,9 ångstrøm, nær den rapporterte diameteren på 6,6–7,1 ångstrøm for ionenes første hydratiseringsskall. Beholdt magnesium bidro til å fiksere kanalen og forbedret parspesifikk anrikning, blant annet lantan–neodym fra 1,6 til 5,4 og lantan–praseodym fra 1,5 til 4,2. Studien rapporterte også utfordringer med store mengder andre ioner, trinnvis renhet, sekvensiell uttømming og gjenvinningsoperasjoner. Den demonstrerte skalaen var fortsatt begerglassforsøk med 5 milliliter, 25–40 milligram aktivt materiale og reaksjonstider fra 200 minutter til 13 timer. Tid i strømningscelle ble fremskrevet, gjenbruk over mange sykluser ble ikke testet, og livsløpssammenligningen bygde på laboratorieantakelser. Artikkelen støtter en inneslutningsmekanisme og en laboratorieplattform, ikke en industriell erstatning for løsemiddelekstraksjon.

Nøktern vurdering

Hva artikkelen viser: Å holde en hydratisert manganoksidspalte nær 6,8–6,9 ångstrøm med beholdt magnesium endret separasjonen av utvalgte lantanidpar. Strukturmålinger, elektrokjemi og beregninger støtter en mekanisme med inneslutning, dehydratisering, koordinasjon og binding.

Hva som fungerte best: Under angitte betingelser nådde anrikningen for lantan–neodym 5,4 ± 0,1 og for lantan–praseodym 4,2 ± 0,1. Andre par ga andre verdier. Separate forsøk rapporterte renhet, uttømming og gjenvinning med ulike nevnere.

Hva den ikke viser: En universell separator for alle sjeldne jordarter; drift på en komplett malmstrøm; en demonstrert kontinuerlig strømningscelle; holdbare elektroder over mange sykluser; erstatning av løsemiddelekstraksjon; eller bevist kommersiell miljøoverlegenhet.

Viktigste skalabegrensninger: Demonstrerte tester brukte 5 milliliter løsning, omtrent 25–40 milligram aktivt materiale og 200 minutter til 13 timer. Et mål med høyere konsentrasjon innebar et massebelastningsproblem på 532 milligram per kvadratcentimeter. Strømningstidene ble ekstrapolert. Elektrodeliv og viktige gjenvinningsparametere i livsløpsanalysen var antakelser.

Hvor stor tillit bør en vanlig leser ha? Høy tillit til de rapporterte laboratoriemålingene for de navngitte parene og betingelsene. Moderat tillit til den foreslåtte molekylære tolkningen, fordi den kombinerer direkte struktur- og elektrokjemimålinger med beregninger. Lav tillit til at dagens data forutsier industriell gjennomstrømning, levetid eller miljøytelse.

Kilder

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