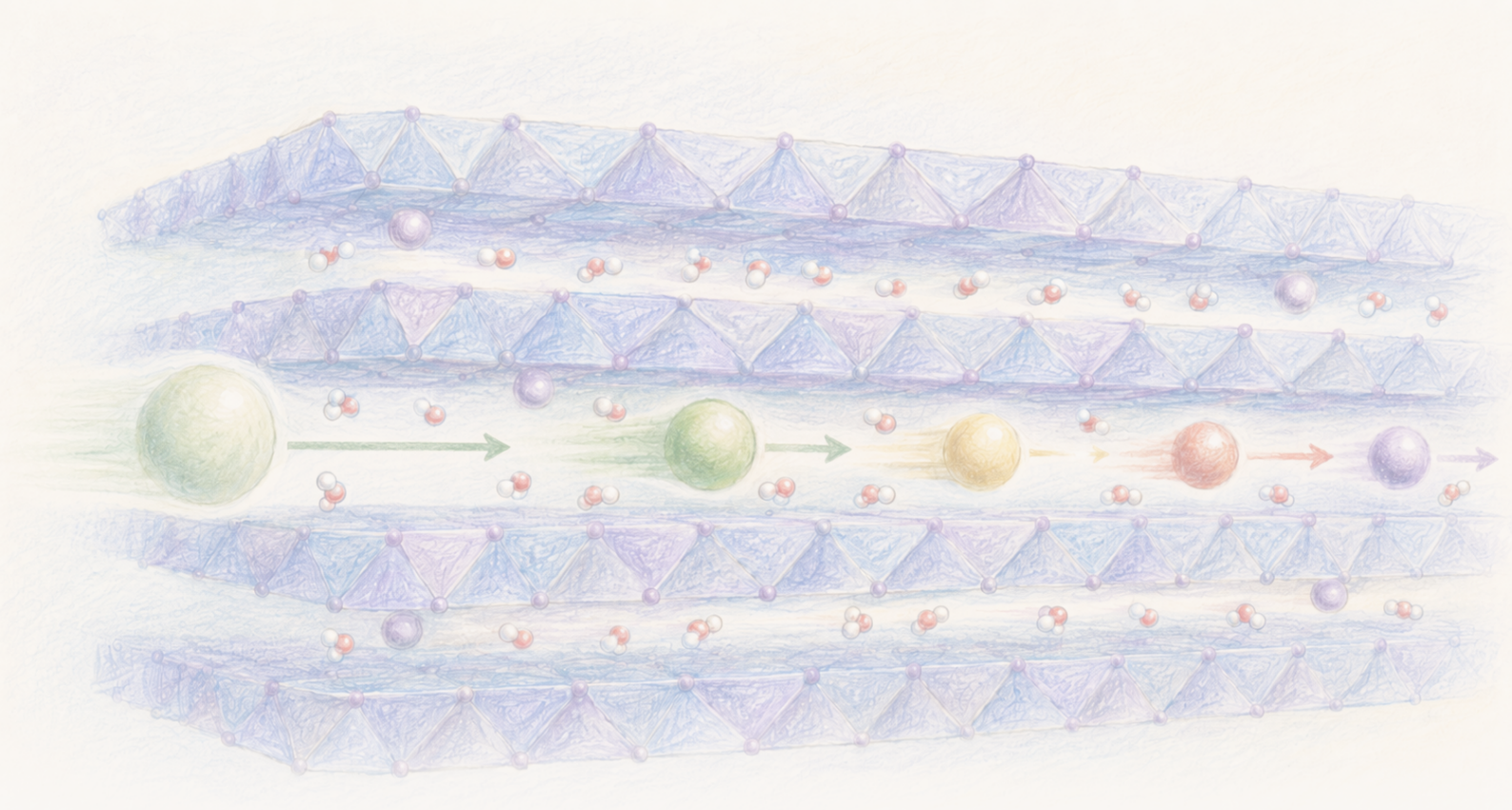


The Clean Paper

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

Het vastzetten van een met water gevuld mineraalkanaal hielp vergelijkbare zeldzame-aarde-ionen scheiden

Magnesium hield een gehydrateerde mangaanoxidespleet ongeveer even breed als de waterlaag rond een lanthanide-ion en verbeterde geselecteerde paarsgewijze verrijkingen in laboratoriumproeven. Het aangetoonde werk gebruikte milliliters oplossing en milligrammen materiaal; doorstroomwerking, lange cyclische levensduur en commerciële milieuprestaties zijn nog niet bewezen.

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

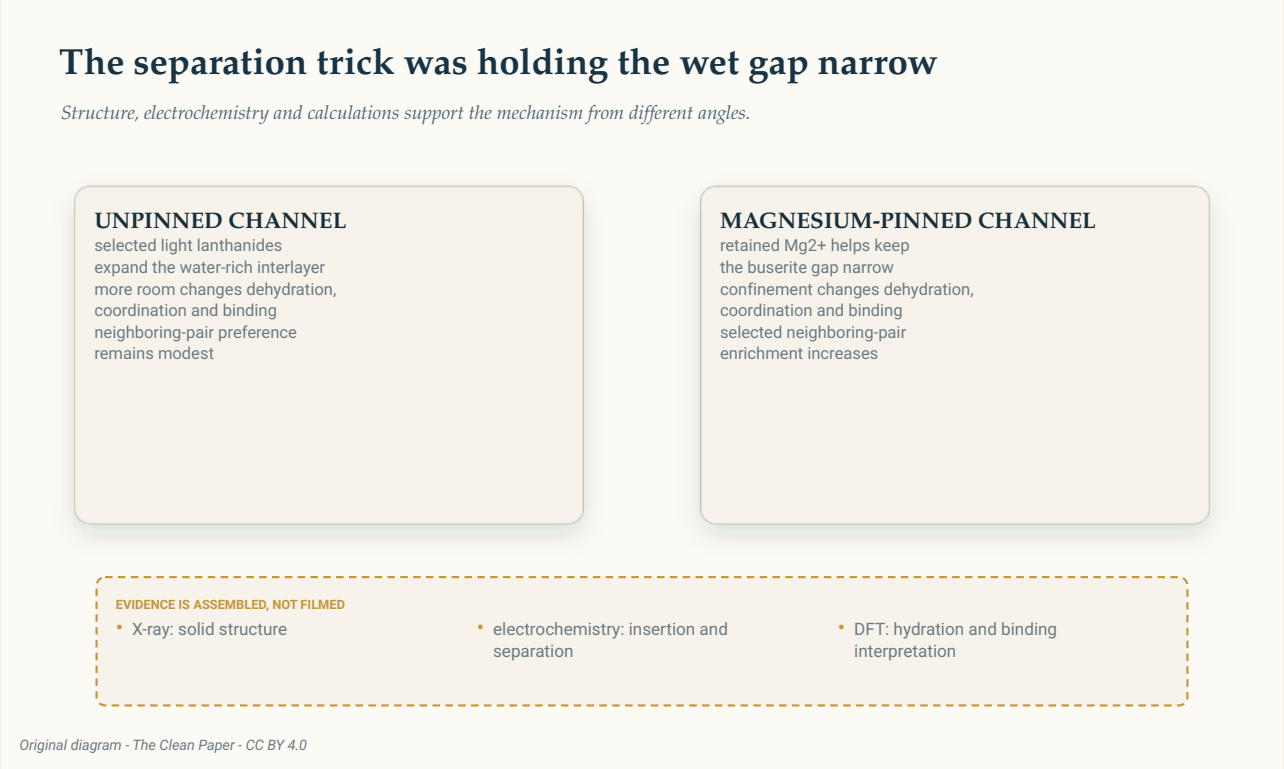
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Het vastzetten van een met water gevuld mineraalkanaal hielp vergelijkbare zeldzame-aarde-ionen scheiden

Zeldzame-aarde-ionen zijn moeilijk te scheiden om dezelfde reden waarom broers en zussen van een afstand soms moeilijk uit elkaar te houden zijn: de verschillen zijn echt, maar klein.

De lanthaniden staan naast elkaar in het periodiek systeem en vormen doorgaans ionen met dezelfde lading. Hun afmetingen veranderen geleidelijk over de reeks, terwijl hun chemische gedrag vergelijkbaar blijft. Industriële raffinage steunt daarom op veel herhaalde scheidingsstappen.

Een nieuwe laboratoriumstudie benaderde dat probleem via opsluiting. De onderzoekers gebruikten gestapelde lagen mangaanoxide met daartussen een met water gevulde spleet. Een zeldzame-aarde-ion nadert die spleet omgeven door watermoleculen. Zonder versteviging kunnen de lagen uit elkaar wijken om het ion ruimte te geven. Magnesiumionen werkten als een versteviging: wanneer ze tussen de lagen bleven, hielpen ze de spleet smal te houden. Verschillende zeldzame-aarde-ionen betaalden vervolgens verschillende energiekosten om een deel van hun waterlaag af te werpen, het kanaal binnen te gaan en zich aan zuurstofatomen in de vaste stof te binden.



De niet-vastgezette en met magnesium vastgezette kanalen zijn mechanistische interpretaties die worden ondersteund door structuurmetingen, elektrochemie en berekeningen. Geen enkel experiment volgde de volledige moleculaire reeks rechtstreeks.

The Clean Paper CC BY 4.0

Voor één getest paar, lanthaan en neodymium, verhoogde dit **vastzetten** de verrijkingsfactor van 1,6 naar **5,4**. Voor lanthaan en praseodymium steeg die van 1,5 naar **4,2**. Een verrijkingsfactor vergelijkt

de verhouding van de twee ionen na de scheiding met hun verhouding ervoor. Een waarde van 1 zou geen voorkeur betekenen; 5,4 betekent dat het opgevangen materiaal neodymium ten opzichte van lanthaan 5,4 keer sterker bevoordeelde dan het uitgangsmengsel.

Dat zijn betekenisvolle, paarspecifieke laboratoriumresultaten. Ze bewijzen niet dat nu elke zeldzame aarde zuiver kan worden gescheiden, dat een doorstroomproces is aangetoond of dat solventextractie kan worden vervangen.

Het sterkste idee in het artikel is kleiner dan een raffinaderij: voorkom dat een natte mineraalspleet open gaat staan.

Een ion in water is groter dan het kale atoom

Tot de zeldzame aardmetalen behoren de lanthaniden plus scandium en yttrium. De studie testte twaalf positief geladen lanthanide-ionen, van lanthaan tot ytterbium. Cerium werd uitgesloten omdat het gemakkelijk van oxidatietoestand verandert, en radioactief promethium werd eveneens uitgesloten.

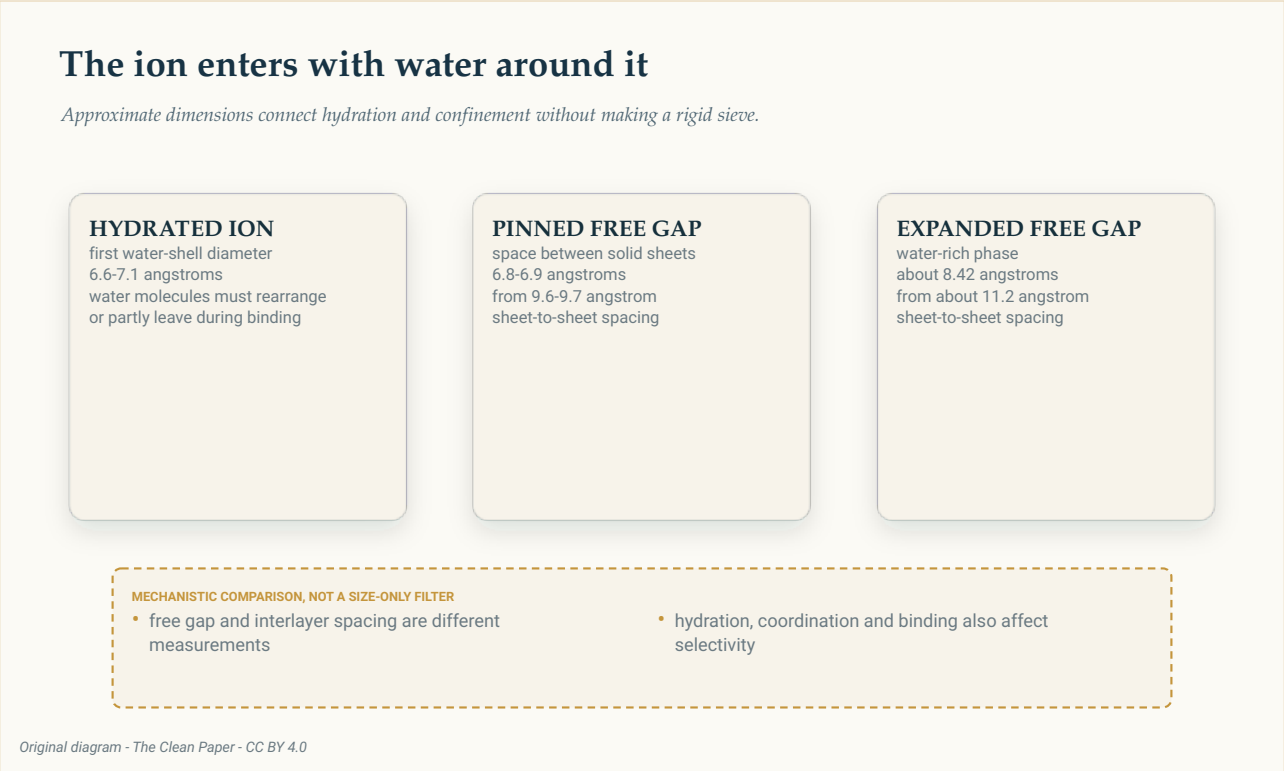
In water reist een ion niet alleen. Watermoleculen rangschikken zich rond zijn lading en vormen een **hydratatieschil**. Om een smal kanaal binnen te gaan en aan een vaste stof te binden, moet het ion die waterlaag mogelijk herschikken of gedeeltelijk afwerpen. De energiekosten hangen zowel van het ion als van zijn omgeving af.

De afmetingen worden gemeten in **ångström (Å)**. Eén ångström is één tienmiljardste meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). De eerste hydratatieschillen van de geteste lanthaniden waren volgens het artikel ongeveer **6,6 tot 7,1 Å** breed.

De onderzoekers gebruikten een gehydrateerd, gelaagd mangaanoxide dat buseriet heet. De gestapelde lagen lagen ongeveer **9,6 tot 9,7 ångström** uit elkaar, gemeten van de positie van één herhalende laag tot de volgende. Maar de laag zelf neemt ruimte in. De vrije, met water gevulde spleet tussen de lagen was slechts ongeveer **6,8 tot 6,9 ångström** breed.

Dat onderscheid is belangrijk. Een tussenlaagafstand van 9,7 ångström is geen open kanaal van 9,7 ångström.

Sommige lichtere lanthaniden lieten de structuur uitzetten tot een waterrijkere fase. Daar bedroeg de laag-tot-laagafstand ongeveer **11,2 ångström** en de geschatte vrije spleet ongeveer **8,42 ångström**. Een smallere verwante structuur, birnessiet, had een vrije spleet van ongeveer **4,42 ångström**.



De vergelijking gaat tussen de geschatte diameter van de hydratatieschil en de vrije met water gevulde spleet, niet tussen een kaal ion en de volledige laag-tot-laagafstand. Grootte maakt deel uit van het mechanisme, maar verklaart niet alles.

The Clean Paper CC BY 4.0

Het mineraal kan zich aan het ion aanpassen

Zonder vastzetting door magnesium is het kanaal geen starre zeef: de gestapelde lagen kunnen bewegen. In de experimenten lieten de lichtere ionen lanthaan, praseodymium en neodymium het materiaal meer water opnemen en verder opengaan. De zwaardere ionen van europium tot ytterbium lieten het smallere kanaal meestal intact. Samarium zat tussen die twee reacties in.

Het artikel noemt de eerste reactie **Groep I** en de tweede **Groep II**. Dit zijn labels voor de reactie die de ionen in dit specifieke materiaal veroorzaakten, geen groepsnummers uit het periodiek systeem. De grens kan onder andere experimentele omstandigheden ook verschuiven.

Dat structurele verschil hielp bij paren uit verschillende groepen. Bij directe ionenwisseling bedroeg de gerapporteerde verrijkingsfactor **7,8** voor lanthaan tegenover dysprosium, **5,7** voor praseodymium tegenover dysprosium, **4,5** voor neodymium tegenover dysprosium en **2,6** voor neodymium tegenover europium.

De meeste naburige paren waren veel moeilijker, met verrijkingsfactoren rond 1,1. Een factor nabij 1 betekent weinig voorkeur. Het materiaal kon gemakkelijker onderscheid maken wanneer de twee ionen verschillende kanaalstructuren bevoordeelden dan wanneer ze dicht bij elkaar in dezelfde

reactiegroep lagen.

Magnesium zet het kanaal vast

Vervolgens gebruikten de onderzoekers **elektrochemische intercalatie**: een elektrische reactie die ionen tussen vaste lagen invoegt. Magnesiumionen bleven in het kanaal terwijl zeldzame-aarde-ionen binnendrongen. Het achtergebleven magnesium hielp voorkomen dat de buserietafstand uitzet.

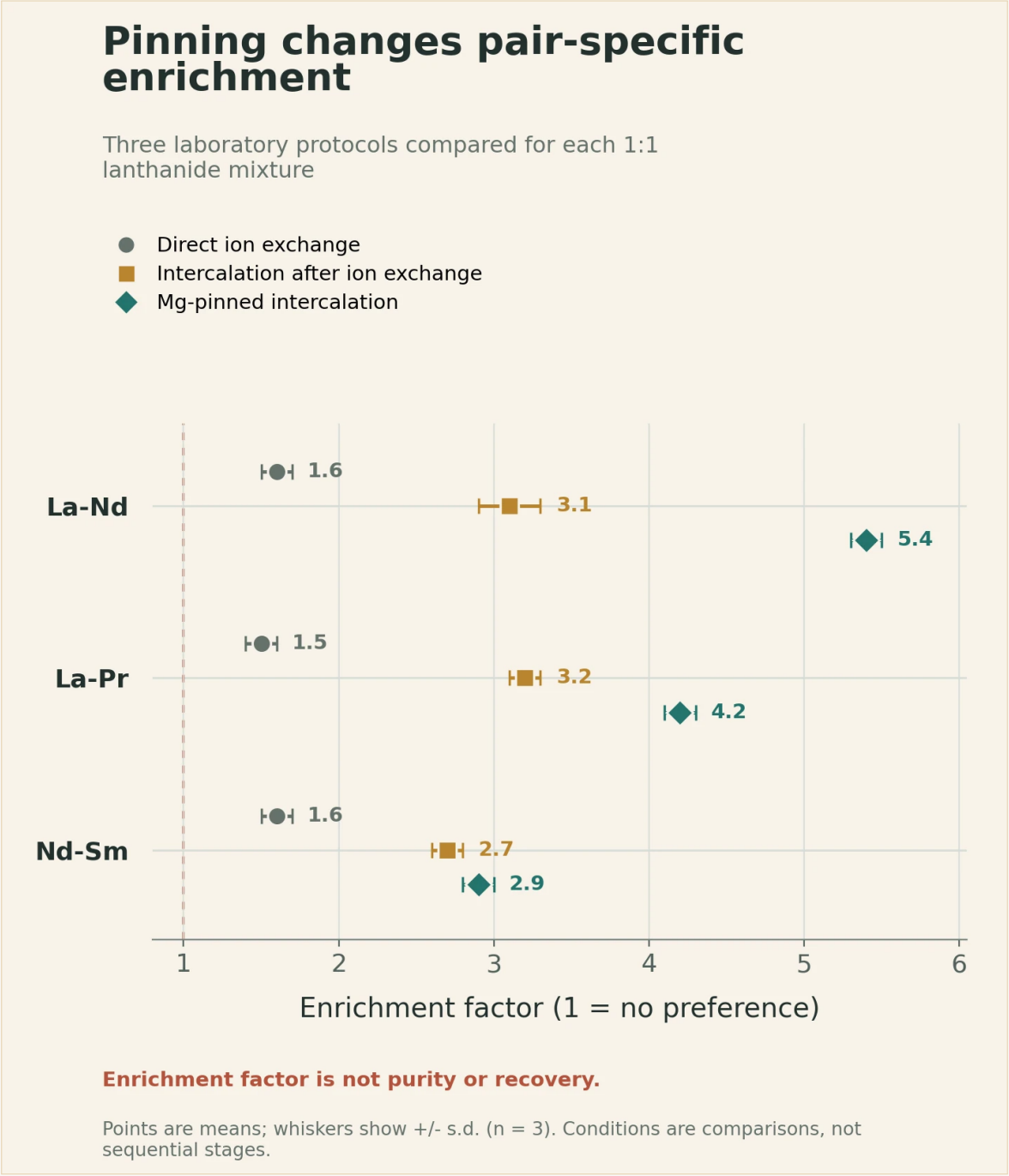
Binnen die smallere, natte spleet heeft een inkomend gehydrateerd ion minder ruimte. Het voorgestelde mechanisme combineert opsluiting, gedeeltelijke dehydratie, coördinatie en binding. **Coördinatie** verwijst naar de nabije atomen, vaak zuurstof, die het ion rechtstreeks omringen en ermee interageren.

Het bewijs komt uit verschillende soorten onderzoek. Röntgenmetingen volgden de vaste structuur. Elektrochemische experimenten maten invoeging en scheiding. **Dichtheidsfunctionaaltheorie**, een kwantummechanische berekening, vergeleek structuren, hydratatie en binding. De berekeningen helpen het mechanisme te interpreteren; ze vormen geen directe film van één ion dat door het kanaal beweegt.

Het mechanisme is evenmin simpelweg „kleinere ionen gaan door, grotere worden tegengehouden". De waterlaag, de reactie van de lagen, de kosten van dehydratie en de manier waarop het ion met de vaste stof coördineert, dragen allemaal bij.

Vastzetten verbeterde geselecteerde naburige paren

De grootste uitgelichte verandering gold voor lanthaan en neodymium: de verrijking steeg van **1,6 +/- 0,1** zonder vastzetting naar **5,4 +/- 0,1** met magnesiumvastzetting. Lanthaan tegenover praseodymium steeg van **1,5 +/- 0,1** naar **4,2 +/- 0,1**. Neodymium tegenover samarium steeg van **1,6 +/- 0,1** naar **2,9 +/- 0,1**.



Elke rij vergelijkt drie afzonderlijke laboratoriumprotocollen, geen opeenvolgende stappen van één proces. Een factor van 1 betekent geen voorkeur; hogere waarden duiden op sterkere paarspecifieke verrijking. Punten tonen gemiddelden en snorren tonen +/- standaardafwijking (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Bij pH 2 bedroeg de waarde voor lanthaan-neodymium **5,6 +/- 0,2**. Een vijfvoudige verhoging van de elektrische snelheid, van 0,1C naar 0,5C, verlaagde deze van **5,4 +/- 0,1** naar **4,3 +/- 0,4**. De C-snelheid vergelijkt de aangelegde elektrische stroom met de capaciteit van het materiaal. Bij een hogere snelheid krijgen ionen en vaste stof minder tijd om te reageren.

Geen enkele waarde beschrijft het materiaal universeel. Verrijking hangt af van het paar, de vaste structuur, de zuurgraad en de bedrijfssnelheid.

Het artikel stelde het materiaal ook bloot aan veel voorkomende niet-zeldzame-aarde-ionen. De uitgangsmengsels bevatten één zeldzame-aarde-ion per 1.000 concurrerende ionen. De gerapporteerde selectiviteitswaarden waren ongeveer **1.200** tegenover natrium, **6.500** tegenover calcium en **1.700** tegenover magnesium.

Dat is nuttig bewijs dat gewone ionen de scheiding onder deze laboratoriumomstandigheden niet automatisch overspoelen. Het is geen test van een volledige, uit erts afkomstige vloeistof met al haar metalen, zuurgraad en verontreinigingen.

Verrijking, scheiding, zuiverheid, verwijdering en terugwinning zijn verschillende resultaten

Het artikel gebruikt verschillende prestatiematen, die niet onderling verwisselbaar zijn.

Een **verrijkingsfactor** vergelijkt de verhouding van twee ionen na de scheiding met hun verhouding ervoor. Een waarde van 5,4 betekent dat het opgevangen materiaal één lid van dat paar 5,4 keer sterker bevoordeelde dan het uitgangsmengsel.

Een **scheidingsfactor** houdt ook rekening met wat in de vloeistof achterblijft: hij vergelijkt voor elk ion de opgevangen hoeveelheid met de niet-opgevangen hoeveelheid en vergelijkt daarna die twee verhoudingen. Daardoor kan de factor stijgen naarmate meer materiaal wordt verwijderd, ook wanneer de verrijkingsfactor een ander patroon volgt.

Zuiverheid is het aandeel van een gekozen ion in een teruggewonnen fractie. Tweestapsdemonstraties bereikten in de opgegeven routes ongeveer **97,0% neodymiumzuiverheid** en **92,3% dysprosiumzuiverheid**.

Verwijdering is het aandeel dat uit de uitgangsoplossing wordt gehaald. Acht opeenvolgende toevoegingen van 10 milligram poeder verwijderden in een neodymium-dysprosiumproef **72% van het dysprosium** en leverden een opgetelde scheidingsfactor van 10,8 op.

Terugwinning vraagt hoeveel van een opgevangen ion later weer kan worden vrijgemaakt. Omgekeerde ionenwisseling won **80%** terug in één neodymium-dysprosiumbewerking. Elektrochemische verwijdering won **89%** terug in een lanthaan-neodymiumbewerking.

Terugwinning toont omkeerbaarheid. Ze stelt niet vast hoeveel keer een elektrode kan worden hergebruikt zonder prestatieverlies.

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

Vier gerapporteerde maten gebruiken verschillende noemers en komen uit verschillende experimenten. Het zijn afzonderlijke bewijskaarten, geen opeenvolgende stappen van één proces.

The Clean Paper CC BY 4.0

Waarom kunnen twee indrukwekkende percentages iets anders betekenen?

Stel dat een proces 90% van één ion uit de uitgangsvloeistof verwijdert. Dat is een hoge verwijdering. Als veel ongewenste ionen meekomen, kan het teruggewonnen materiaal toch een lage zuiverheid hebben. Omgekeerd kan een zeer zuivere kleine fractie een slechte terugwinning betekenen wanneer het grootste deel van het doelion achterblijft. Voor een procesbeoordeling zijn al deze balansen nodig, niet alleen het grootste getal.

De gedemonstreerde opstelling is nog steeds een beker-glasproef

De op schaal gerichte elektrochemische proeven begonnen met **5 milliliter** oplossing met 25 millimol per liter van elk ion. De elektroden droegen ongeveer **25 tot 40 milligram** actief materiaal.

Eén elektrode verwijderde ongeveer 40% van het neodymium. Drie elektroden in serie bereikten ongeveer **90% verwijdering** en een opgetelde scheidingsfactor van **16,6 +/- 0,4**. Afhankelijk van de bedrijfssnelheid duurden de reacties van **200 minuten tot 13 uur**.

Die afmetingen en tijden horen in het hoofdverhaal, omdat ze bepalen wat werkelijk is aangetoond.

De bijlage identificeert ook een beperking door massatransport. Voor een doel met hogere concentratie in een bekerglas werd geschat dat **een elektrode van 266 milligram**, oftewel **532 milligram actief materiaal per vierkante centimeter**, nodig zou zijn om 50% totale verwijdering te bereiken. Zo veel materiaal op de kleine elektrode pakken zou het moeilijk maken voor opgeloste ionen om alles te bereiken. Daarom stapten de auteurs voor de bekerglasproef over op een verdundere oplossing.

Een hypothetische doorstroomcel verschijnt alleen als projectie. Voor een veronderstelde cel van 1,25 milliliter met een elektrode van 5 bij 5 centimeter schat de bijlage ongeveer **20 minuten bij 1C** of **40 minuten bij 0,5C** voor circa 90% verwijdering. Er wordt geen dergelijke doorstroomcelproef gerapporteerd.

De ladder eindigt bij een grens: er bestaat bewijs uit binaire en gefaseerde laboratoriumproeven, terwijl doorstroomtijden en milieuprestaties geprojecteerd of scenariogebaseerd blijven en niet op installatieschaal zijn aangetoond.

The Clean Paper CC BY 4.0

De milieuvergelijking is een scenario, geen fabrieksresultaat

De aanvullende levenscyclusanalyse vergelijkt scheidingsstappen die eindigen in zeldzame-aardeoxiden en rapporteert invoer per **1 kilogram neodymiumoxide**.

Ze omvat geen mijnbouw, ertsvoorbehandeling of volledige commerciële raffinageketen. Het laboratoriumproces wordt voorgesteld met aannamen die uit meerdere bronnen zijn samengesteld. Elektrodelevensduren van **10, 20 en 100 cycli** zijn scenario- en gevoeligheidswaarden, geen

duurzaamheid die in deze studie is gemeten. Het model neemt aan dat de magnesiumterugwinningsoplossing kan worden hergebruikt totdat haar concentratie 10% verandert, veronderstelt **95% waterrecycling** en omvat calcinatie bij 450–600 graden Celsius gedurende twee uur, hoewel calcinatie hier niet experimenteel is aangetoond.

Een **levenscyclusanalyse** brengt milieubelastingen binnen een opgegeven systeemgrens in rekening. Het antwoord is slechts zo breed als die grens en zo betrouwbaar als de inventaris- en schaalaannamen.

De analyse kan aangeven waar energie, materialen en hergebruik ertoe doen. Ze kan niet bewijzen dat een commerciële versie een lagere milieu-impact zou hebben dan industriële solventextractie.

Een mechanisme, een platform en een lange technische weg

Het artikel stelt vast dat de afstand en chemische omgeving van een gehydrateerde gelaagde vaste stof doelgericht kunnen worden geregeld om geselecteerde lanthanidenscheidingen te verbeteren. Magnesiumvastzetting voegde meer toe dan nog een chemische bindingsplaats: ze beperkte de structuur waar wateromhulde ionen doorheen moesten bewegen.

Dat resultaat opent praktische vragen. Blijft de prestatie behouden in echte mengsels uit erts? Kunnen elektroden met een werkbare massabelading worden vervaardigd? Hoe stabiel is het mangaanoxide gedurende veel invoeg- en vrijgavecycli? Kan een continue cel selectiviteit, doorvoer en waterbalans behouden? Hoe ziet de milieuvergelijking eruit met gemeten inventarissen op pilotschaal?

Het experiment beantwoordt die vragen niet. Het maakt ze concreter.

De prestatie is geen afgewerkte zeldzame-aarderaffinaderij. Ze is bewijs dat enkele ångström gecontroleerde, met water gevulde ruimte een moeilijke scheiding kan veranderen.

Heldere samenvatting

Onderzoekers gebruikten gehydrateerd gelaagd mangaanoxide om geselecteerde paren lanthanideionen in water te scheiden. De vrije spleet van het materiaal bedroeg ongeveer 6,8–6,9 ångström, dicht bij de gerapporteerde diameter van 6,6–7,1 ångström van de eerste hydratatieschillen van de ionen. Achtergebleven magnesium hielp het kanaal vast te zetten en verbeterde paarspecifieke verrijking, waaronder lanthaan-neodymium van 1,6 naar 5,4 en lanthaan-praseodymium van 1,5 naar 4,2. De studie rapporteerde ook proeven met veel voorkomende concurrerende ionen, gefaseerde zuiverheid, opeenvolgende verwijdering en terugwinning. De aangetoonde schaal bleef beperkt tot bekerglasproeven met 5 milliliter, 25–40 milligram actief materiaal en reactietijden van 200 minuten tot 13 uur. Doorstroomtijden werden geprojecteerd, hergebruik over veel cycli werd niet getest en de levenscyclusvergelijking hing af van aannamen op laboratoriumschaal. Het artikel ondersteunt een opsluitingsmechanisme en een laboratoriumplatform, geen industriële vervanging voor solventextractie.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: Het op ongeveer 6,8–6,9 ångström houden van een gehydrateerde mangaanoxidespleet met achtergebleven magnesium veranderde de scheiding van geselecteerde lanthanideparen. Structuurmetingen, elektrochemie en berekeningen ondersteunen een mechanisme met opsluiting, dehydratie, coördinatie en binding.

Wat het beste presteerde: Onder de opgegeven omstandigheden bereikte lanthaan-neodymium een verrijking van 5,4 +/- 0,1 en lanthaan-praseodymium 4,2 +/- 0,1. Andere paarwaarden verschilden. Afzonderlijke experimenten rapporteerden zuiverheid, verwijdering en terugwinning met verschillende noemers.

Wat het niet laat zien: Een universele scheider voor alle zeldzame aardmetalen; werking op een volledige ertsoplossing; een gedemonstreerde continue doorstroomcel; duurzame elektroden over veel cycli; vervanging van solventextractie; of bewezen commerciële milieuvoordelen.

Belangrijkste schaalbeperkingen: Aangetoonde proeven gebruikten 5 milliliter oplossing, ongeveer 25–40 milligram actief materiaal en 200 minuten tot 13 uur. Een doel met hogere concentratie impliceerde een massatransportprobleem bij 532 milligram per vierkante centimeter. Doorstroomtijden werden geëxtrapoleerd. Elektrodelevensduur en belangrijke recyclinginvoer in de levenscyclusanalyse waren aannamen.

Hoeveel vertrouwen moet een algemene lezer hebben? Veel vertrouwen in de gerapporteerde laboratoriummetingen voor de genoemde paren en omstandigheden. Redelijk vertrouwen in de voorgestelde moleculaire interpretatie, omdat die directe structuurmetingen en elektrochemie combineert met berekeningen. Weinig vertrouwen dat de huidige gegevens industriële doorvoer, levensduur of milieuprestaties voorspellen.

Bronnen

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