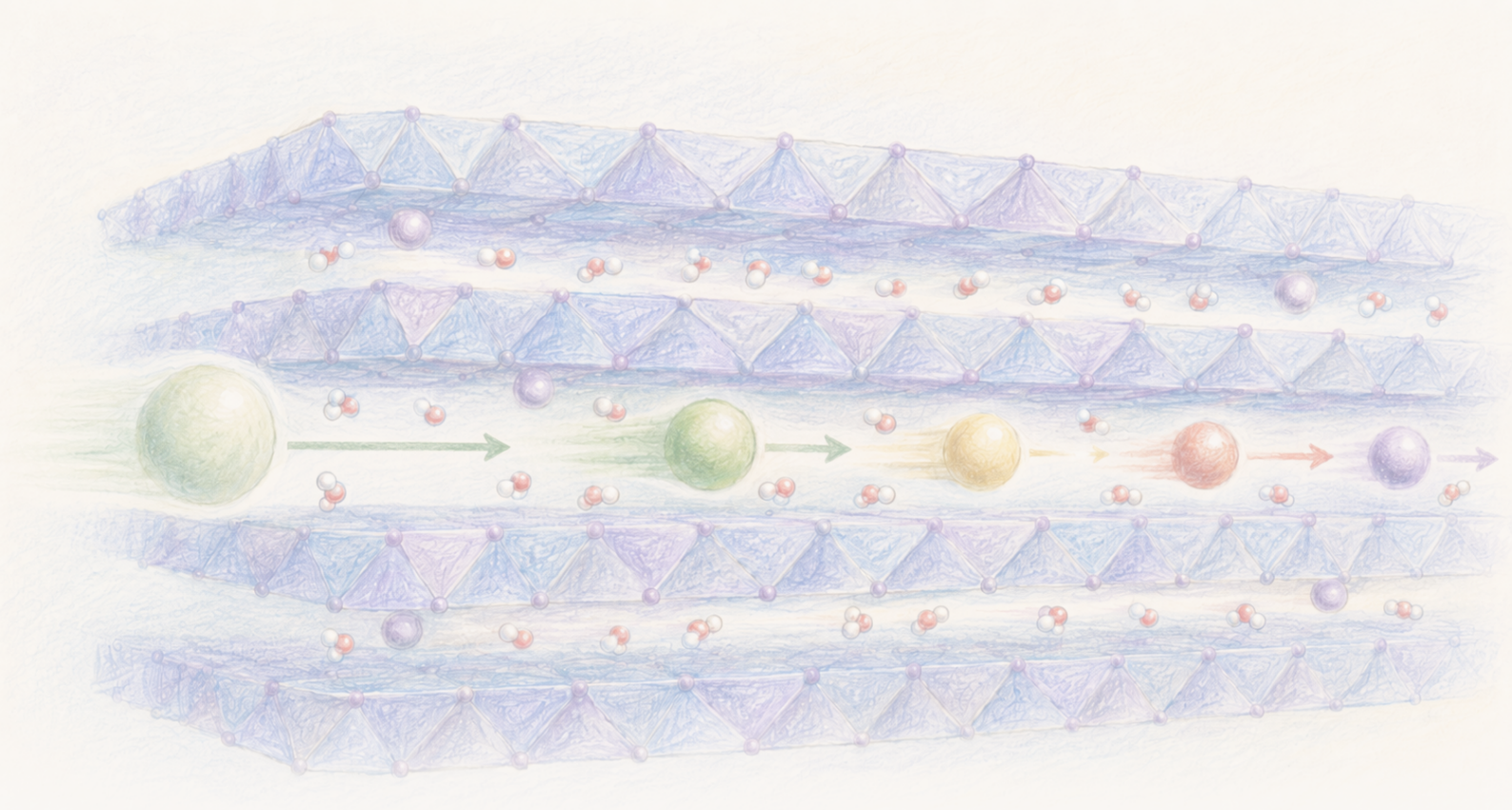


The Clean Paper

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

Deur 'n watergevulde mineraalkanaal vas te pen, kon soortgelyke seldsameaardione beter geskei word

Magnesium het 'n gehidreerde mangaanoksiedgaping naby die breedte van 'n lantaniedioon se waterskil gehou en geselekteerde paargewyse verryking in laboratoriumtoetse verbeter. Die gedemonstreerde werk het milliliters oplossing en milligramme materiaal gebruik; vloeibedryf, lang sikluslewe en kommersiële omgewingsprestasie bly onbewys.

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

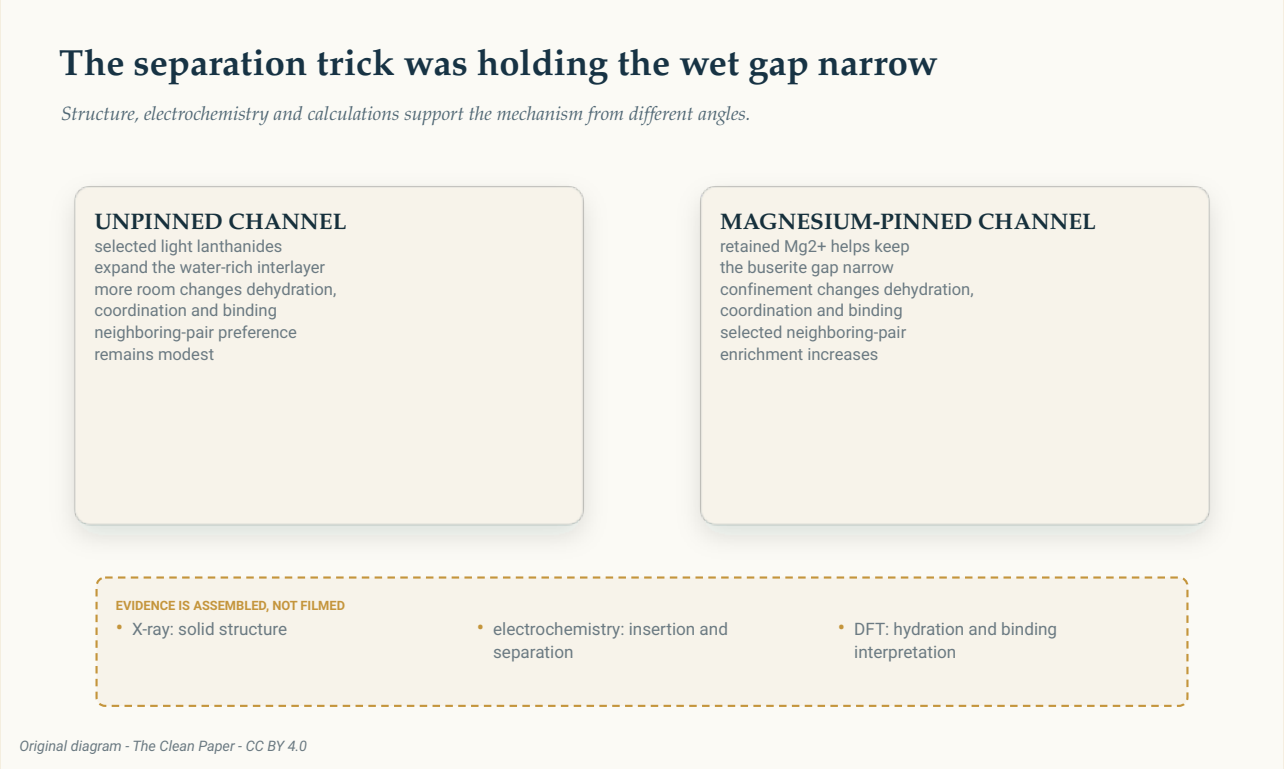
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Deur ’n watergevulde mineraalkanaal vas te pen, kon soortgelyke seldsameaardione beter geskei word

Seldsameaardione is moeilik om te skei om dieselfde rede waarom dit op ’n afstand moeilik kan wees om broers en susters van mekaar te onderskei: die verskille is werklik, maar klein.

Die lantaniede lê langs mekaar in die periodieke tabel en vorm gewoonlik ione met dieselfde lading. Hul groottes verander geleidelik deur die reeks, terwyl hul chemiese gedrag soortgelyk bly. Industriële raffinering berus daarom op baie herhaalde skeidingstappe.

’n Nuwe laboratoriumstudie het die probleem deur middel van inperking benader. Die navorsers het gestapelde mangaanoksiedvelle met ’n watergevulde gaping tussenin gebruik. ’n Seldsameaardioon nader hierdie gaping omring deur watermolekules. Sonder ’n stut kan die velle uitmekaar beweeg om daarvoor plek te maak. Magnesiumione het soos ’n stut opgetree: wanneer hulle tussen die velle gebly het, het hulle gehelp om die gaping smal te hou. Verskillende seldsameaardione moes toe verskillende energiepryse betaal om van hul water af te staan, die kanaal binne te gaan en aan suurstofatome in die vaste stof te bind.



Die ongepende en magnesiumgepenne kanale is meganistiese interpretasies wat deur struktuurdata, elektrochemie en berekeninge ondersteun word. Geen enkele eksperiment het die volledige molekulêre volgorde waargeneem nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Vir een getoetste paar, lantaan en neodimium, het hierdie **vaspenning** die verrykingsfaktor van 1,6 tot **5,4** verhoog. Vir lantaan en praseodimium het dit van 1,5 tot **4,2** gestyg. ’n Verrykingsfaktor

vergelyk die verhouding van die twee ione ná skeiding met hul verhouding vóór skeiding. ’n Waarde van 1 sou geen voorkeur beteken nie; 5,4 beteken dat die vasgevange materiaal neodimium bo lantaan 5,4 keer sterker bevoordeel het as wat die beginmengsel gedoen het.

Dit is betekenisvolle, paarspesifieke laboratoriumresultate. Dit is nie bewys dat elke seldsame aarde nou skoon geskei kan word, dat ’n vloeiproses gedemonstreer is of dat oplosmiddelekstraksie vervang kan word nie.

Die sterkste idee in die artikel is kleiner as ’n raffinadery: keer dat ’n nat mineraalgaping oopgaan.

’n Ioon in water is groter as die kaal atoom

Seldsameaardelemente sluit die lantaniede plus skandium en yttrium in. Die studie het twaalf positief gelaaide lantaniedione van lantaan tot ytterbium getoets. Serium is uitgesluit omdat dit maklik van oksidasietoestand verander, en radioaktiewe prometium is uitgesluit.

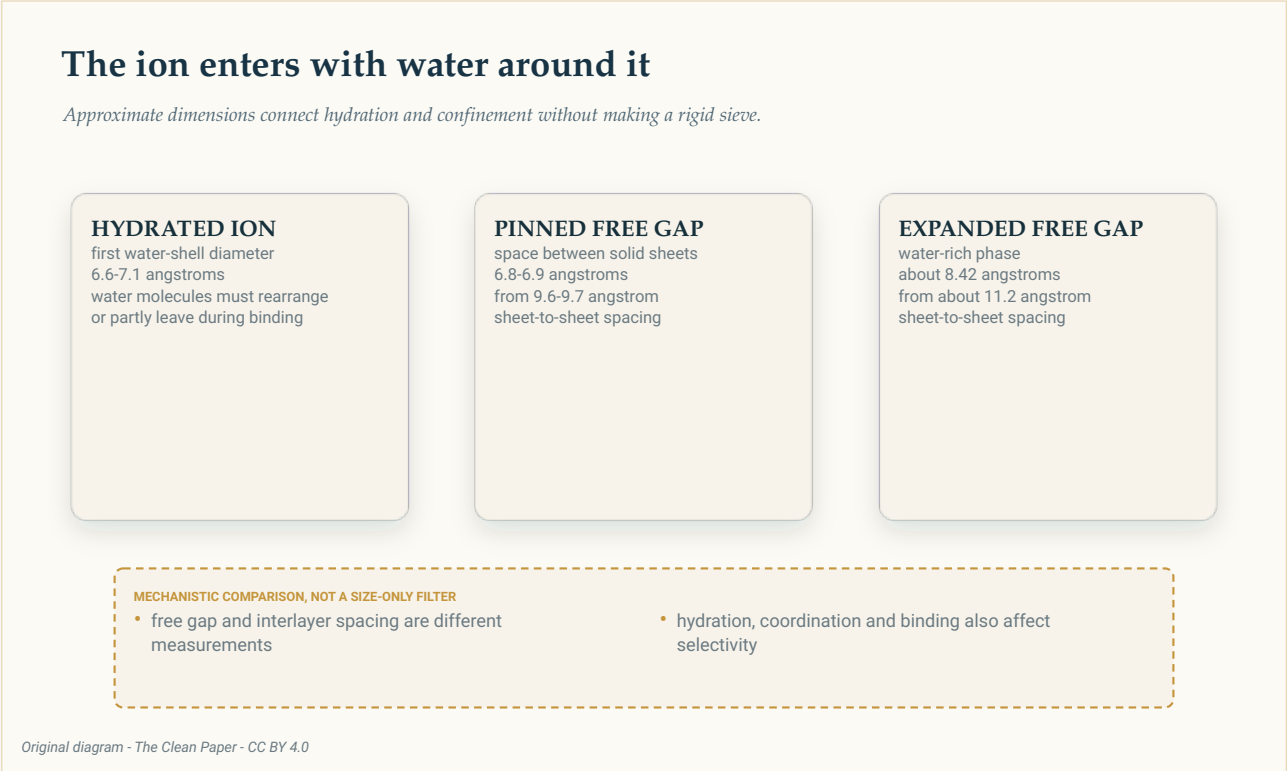
In water beweeg ’n ioon nie alleen nie. Watermolekules rangskik hulself rondom sy lading en vorm ’n **hidrasieskil**. Om ’n smal kanaal binne te gaan en aan ’n vaste stof te bind, moet die ioon moontlik ’n deel van daardie waterlaag herrangskik of afwerp. Die energiekoste hang van sowel die ioon as sy omgewing af.

Die afmetings word in **ångström (Å)** gemeet. Een ångström is een tienmiljardste van ’n meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Die eerste hidrasieskille van die getoetste lantaniede is as ongeveer **6,6 tot 7,1 Å** in deursnee gerapporteer.

Die navorsers het ’n gehidreerde, gelaagde mangaanoksied genaamd buseriet gebruik. Die gestapelde velle daarvan was ongeveer **9,6 tot 9,7 ångström** uitmekaar, gemeet van een herhalende velposisie tot die volgende. Maar die vel self neem ruimte in. Die vrye watergevulde gaping tussen die velle was slegs ongeveer **6,8 tot 6,9 ångström**.

Daardie onderskeid maak saak. ’n Tussenlaagafstand van 9,7 ångström is nie ’n oop kanaal van 9,7 ångström nie.

Sommige ligter lantaniede het die struktuur laat uitsit tot ’n fase met meer water. Daar was die afstand van vel tot vel ongeveer **11,2 ångström** en die beraamde vrye gaping ongeveer **8,42 ångström**. ’n Nouer verwante struktuur, birnessiet, het ’n vrye gaping van ongeveer **4,42 ångström** gehad.



Die vergelyking is tussen die benaderde deursnee van die hidrasieskil en die vrye watergevulde gaping, nie tussen ’n kaal ioon en die volle afstand van vel tot vel nie. Grootte is deel van die meganisme, nie die hele verduideliking nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Die mineraal kan by die ioon aanpas

Sonder magnesiumvaspenning is die kanaal nie ’n stywe sif nie: sy gestapelde velle kan beweeg. In die eksperimente het die ligter ione lantaan, praseodimium en neodimium die materiaal meer water laat opneem en wyer laat oopgaan. Die swaarder ione van europium tot ytterbium het geneig om die nouer kanaal onveranderd te laat. Samarium het tussen hierdie twee reaksies gelê.

Die artikel noem die eerste reaksie **Groep I** en die tweede **Groep II**. Dit is etikette vir hoe die ione hierdie spesifieke materiaal laat reageer het, nie groepnommers uit die periodieke tabel nie. Die grens kan ook onder ander eksperimentele toestande verskuif.

Daardie strukturele verskil het met pare oor die groepsgrens gehelp. In direkte ioonuitruiling was die gerapporteerde verrykingsfaktor **7,8** vir lantaan teenoor disprosium, **5,7** vir praseodimium teenoor disprosium, **4,5** vir neodimium teenoor disprosium en **2,6** vir neodimium teenoor europium.

Die meeste naburige pare was baie moeiliker, met verrykingsfaktore naby 1,1. ’n Faktor naby 1 beteken min voorkeur. Die materiaal kon makliker onderskei wanneer die twee ione verskillende kanaalstrukture bevoordeel het as wanneer hulle naby mekaar in dieselfde reaksiegroep gelê het.

Magnesium pen die kanaal vas

Die navorsers het daarna **elektrochemiese interkalasie** gebruik: ’n elektriese reaksie wat ione tussen vaste lae invoeg. Magnesiumione het in die kanaal gebly terwyl seldsameaardione binnegekom het. Die behoue magnesium het gehelp om te voorkom dat die buserietafstand uitsit.

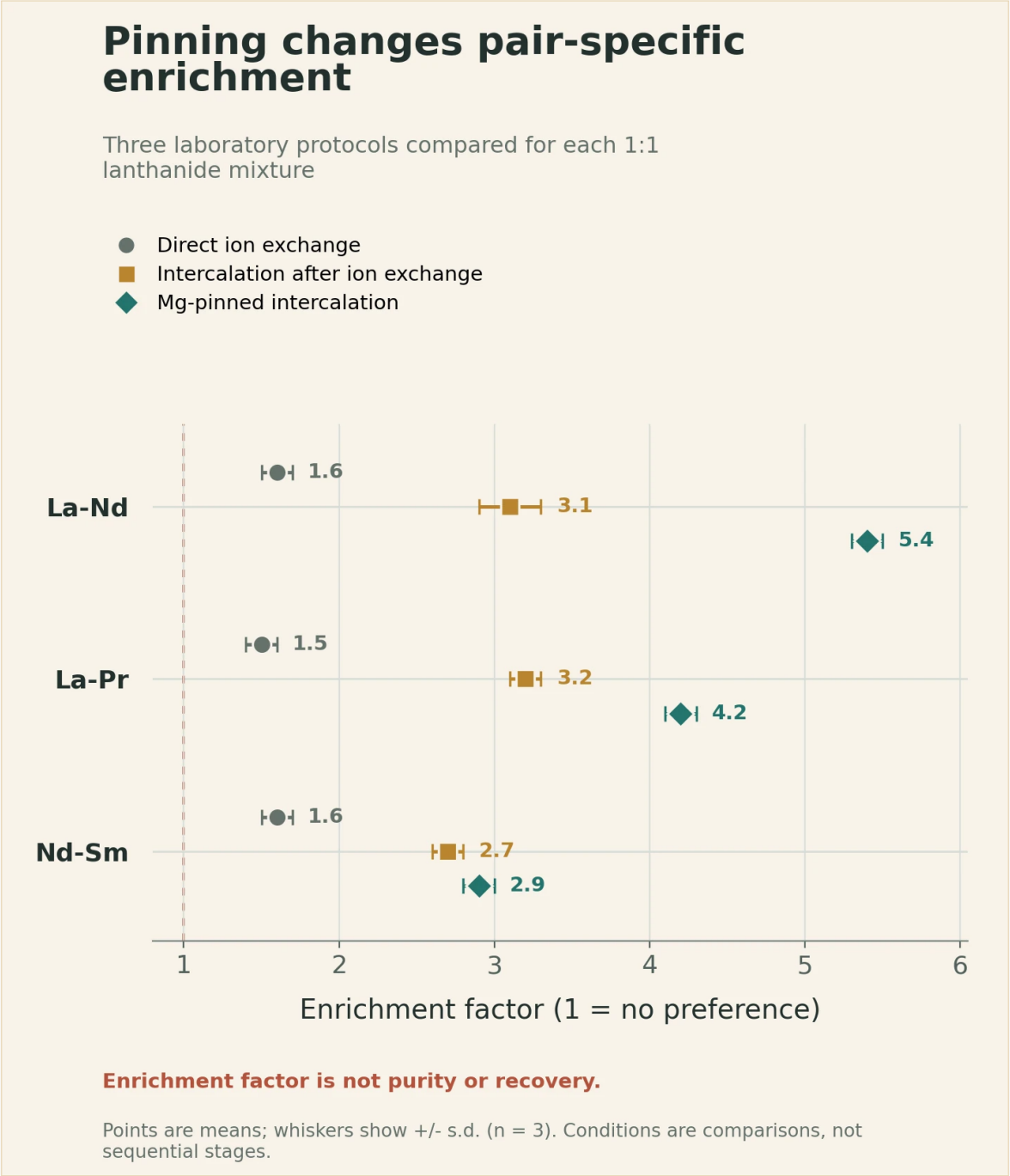
Binne daardie nouer nat gaping het ’n inkomende gehidreerde ioon minder ruimte. Die voorgestelde meganisme kombineer inperking, gedeeltelike dehidrasie, koördinasie en binding. **Koördinasie** verwys na die nabygeleë atome, dikwels suurstof, wat die ioon direk omring en daarmee wisselwerk.

Die bewyse kom uit verskeie soorte werk. X-straalmetings het die vaste struktuur gevolg. Elektrochemiese eksperimente het invoeging en skeiding gemeet. **Digtheidsfunksionaalteorie**, ’n kwantummeganiese berekening, het strukture, hidrasie en binding vergelyk. Die berekeninge help om die meganisme te interpreteer; hulle is nie ’n direkte film van een ioon wat deur die kanaal beweeg nie.

Die meganisme is ook nie bloot “kleiner ione gaan deur, groter ione word gestuit” nie. Die waterskil, hoe die lae reageer, hoeveel dehidrasie kos en hoe die ioon met die vaste stof koördineer, dra almal by.

Vaspenning het geselekteerde naburige pare verbeter

Die grootste uitgeligte verandering was vir lantaan en neodimium: verryking het van **1,6 +/- 0,1** sonder vaspenning tot **5,4 +/- 0,1** met magnesiumvaspenning gestyg. Lantaan teenoor praseodimium het van **1,5 +/- 0,1** tot **4,2 +/- 0,1** gestyg. Neodimium teenoor samarium het van **1,6 +/- 0,1** tot **2,9 +/- 0,1** gestyg.



Elke ry vergelyk drie afsonderlike laboratoriumprotokolle, nie opeenvolgende fases van een proses nie. ’n Faktor van 1 beteken geen voorkeur nie; hoër waardes dui op sterker paarspesifieke verryking. Punte toon gemiddeldes en snorbaarde toon +/- standaardafwyking (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

By pH 2 was die lantaan-neodimiumwaarde **5,6 +/- 0,2**. Toe die elektriese tempo vyfvoudig van 0,1C tot 0,5C verhoog is, het dit van **5,4 +/- 0,1** tot **4,3 +/- 0,4** gedaal. Die C-tempo vergelyk die toegepaste elektriese stroom met die materiaal se kapasiteit. ’n Hoër tempo gee die ione en vaste stof minder tyd om te reageer.

Geen enkele waarde beskryf die materiaal universeel nie. Verryking hang af van die paar, vaste struktuur, suurheid en bedryfstempo.

Die artikel het die materiaal ook met volop nie-seldsameaardione uitgedaag. Beginmengsels het een seldsameaardioon vir elke 1 000 mededingende ione bevat. Gerapporteerde selektiwiteitswaardes was ongeveer **1 200** teenoor natrium, **6 500** teenoor kalsium en **1 700** teenoor magnesium.

Dit is nuttige bewys dat algemene ione nie onder hierdie laboratoriumtoestande noodwendig die skeiding oorweldig nie. Dit is nie ’n toets van ’n volledige vloeistof uit erts met al sy metale, suurheid en besoedeling nie.

Verryking, skeiding, suiwerheid, uitputting en herwinning is verskillende resultate

Verskeie prestasiemaatstawwe verskyn in die artikel, en hulle kan nie vir mekaar ingeruil word nie.

’n **Verrykingsfaktor** vergelyk die verhouding van twee ione ná skeiding met hul verhouding vóór skeiding. ’n Waarde van 5,4 beteken die vasgevange materiaal het een lid van daardie paar 5,4 keer sterker bevoordeel as wat die beginmengsel gedoen het.

’n **Skeidingsfaktor** neem ook in ag wat in die vloeistof agterbly: dit vergelyk elke ioon se vasgevange hoeveelheid met sy hoeveelheid wat nie vasgevang is nie, en vergelyk dan daardie twee balanse. Dit kan dus styg namate meer materiaal verwyder word, selfs wanneer die verrykingsfaktor ’n ander patroon volg.

Suiwerheid is die aandeel van ’n gekose ioon in ’n herwonne fraksie. Tweefase-demonstrasies het ongeveer **97,0% neodimiumsuiwerheid** en **92,3% disprosiumsuiwerheid** in hul gespesifiseerde roetes bereik.

Uitputting is die fraksie wat uit die beginoplossing verwyder word. Agt opeenvolgende toevoegings van 10 milligram poeier het **72% van die disprosium** in ’n neodimium-disprosiumtoets verwyder en ’n opgehoopte skeidingsfaktor van 10,8 opgelewer.

Herwinning vra hoeveel van ’n vasgevange ioon later vrygestel kan word. Omgekeerde ioonuitruiling het **80%** in een neodimium-disprosiumbewerking herwin. Elektrochemiese verwydering het **89%** in ’n lantaan-neodimiumbewerking herwin.

Herwinning toon omkeerbaarheid. Dit bepaal nie hoeveel keer ’n elektrode hergebruik kan word terwyl prestasie behoue bly nie.

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 maatstawwe gebruik verskillende noemers en kom uit verskillende eksperimente. Dit is bewyskaarte, nie opeenvolgende fases van een proses nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Waarom kan twee indrukwekkende persentasies verskillende dinge beteken?

Gestel ’n proses verwyder 90% van een ioon uit die beginvloeistof. Dit is hoë uitputting. As baie ongewenste ione saamkom, kan die herwonne materiaal steeds lae suiwerheid hê. Omgekeerd kan ’n baie suiwer klein fraksie swak herwinning verteenwoordig as die meeste van die teiken agtergebly het. ’n Prosesevaluering het al hierdie balanse nodig, nie net die grootste getal nie.

Die gedemonstreerde apparaat is steeds ’n bekereksperiment

Die skaalgerigte elektrochemiese toetse het met **5 milliliter** oplossing begin wat 25 millimol per liter van elke ioon bevat het. Die elektrodes het ongeveer **25 tot 40 milligram** aktiewe materiaal gedra.

Een elektrode het ongeveer 40% van die neodimium verwyder. Drie elektrodes wat in serie gebruik is, het ongeveer **90% uitputting** en ’n opgehoopte skeidingsfaktor van **16,6 +/- 0,4** bereik. Afhangend van die bedryfstempo het reaksies van **200 minute tot 13 uur** geduur.

Daardie afmetings en tye hoort in die hoofverhaal omdat hulle bepaal wat gedemonstreer is.

Die bylaag identifiseer ook ’n massa-oordragbeperking. Vir ’n bekerteiken met hoër konsentrasie is beraam dat **’n elektrode van 266 milligram**, of **532 milligram aktiewe materiaal per vierkante sentimeter**, nodig sou wees om 50% totale uitputting te bereik. Om soveel materiaal op die klein elektrode te pak, sou dit vir opgeloste ione moeilik maak om alles te bereik. Die outeurs het daarom na ’n meer verdunde oplossing vir die bekereksperiment oorgeskakel.

’n Hipotetiese vloeisel verskyn slegs as ’n projeksie. Vir ’n veronderstelde sel van 1,25 milliliter met ’n elektrode van 5 by 5 sentimeter, beraam die bylaag ongeveer **20 minute by 1C** of **40 minute by 0,5C** vir ongeveer 90% uitputting. Geen sodanige vloeisel-eksperiment word gerapporteer nie.

Die leer eindig by ’n grens: binêre en gefaseerde laboratoriumbewyse bestaan, terwyl tydsberekeninge vir ’n vloeisel en omgewingsprestasie geprojekteer of scenariogebaseer bly eerder as op aanlegskaal gedemonstreer.

The Clean Paper CC BY 4.0

Die omgewingsvergelyking is ’n scenario, nie ’n aanlegresultaat nie

Die aanvullende lewensiklusbeoordeling vergelyk skeidingstappe wat by seldsameaardeoksiede eindig en rapporteer insette per **1 kilogram neodimiumoksied**.

Dit sluit nie mynbou, ertsvoorbehandeling of ’n volledige kommersiële raffineringsketting in nie. Die laboratoriumproses word voorgestel deur aannames uit verskeie bronne saam te stel. Elektrodeleeftye van **10, 20 en 100 siklusse** is scenario- en sensitiwiteitswaardes, nie duursaamheid

wat in hierdie studie gemeet is nie. Die model neem aan dat magnesiumherwinningsoplossing hergebruik kan word totdat die konsentrasie daarvan met 10% verander, neem **95% waterherwinning** aan, en sluit kalsinering by 450-600 grade Celsius vir twee uur in, al is kalsinering nie hier eksperimenteel gedemonstreer nie.

'n **Lewensiklusbeoordeling** tel omgewingslaste binne 'n verklaarde stelselgrens. Die antwoord is net so breed soos daardie grens en net so betroubaar soos die inventaris- en skaalaannames.

Die ontleding kan aandui waar energie, materiale en hergebruik saak maak. Dit kan nie bewys dat 'n kommersiële weergawe 'n laer omgewingsimpak as industriële oplosmiddelekstraksie sou hê nie.

'n Meganisme, 'n platform en 'n lang ingenieurspad

Die artikel toon dat die afstand en chemiese omgewing van 'n gehidreerde gelaagde vaste stof doelbewus beheer kan word om geselekteerde lantaniedskeidings te verbeter. Magnesiumvaspenning het meer gedoen as om nog 'n chemiese bindingsplek by te voeg: dit het die struktuur beperk waardeur wateromhulde ione moes beweeg.

Daardie resultaat open praktiese vrae. Kan prestasie in werklike mengsels uit erts standhou? Kan elektrodes met werkbare massalading vervaardig word? Hoe stabiel is die mangaanoksied oor baie invoeg- en vrystellingsiklusse? Kan 'n deurlopende sel selektiwiteit, deurset en waterbalans handhaaf? Hoe lyk die omgewingsvergelyking met gemete inventarisse op loodsskaal?

Die eksperiment beantwoord nie daardie vrae nie. Dit maak hulle meer konkreet.

Die prestasie is nie 'n voltooide seldsameaardraffinadery nie. Dit is bewys dat 'n paar ångström se beheerde, watergevulde ruimte 'n moeilike skeiding kan verander.

Kortliks

Navorsers het gehidreerde, gelaagde mangaanoksied gebruik om geselekteerde pare lantaniedione in water te skei. Die materiaal se vrye gaping was ongeveer 6,8-6,9 ångström, naby die gerapporteerde 6,6-7,1-ångström-deursnee van die ione se eerste hidrasieskille. Behoue magnesium het gehelp om die kanaal vas te pen en paarspesifieke verryking verbeter, waaronder lantaan-neodimium van 1,6 tot 5,4 en lantaan-praseodimium van 1,5 tot 4,2. Die studie het ook uitdagings met volop ione, gefaseerde suiwerheid, opeenvolgende uitputting en herwinningsbewerkings gerapporteer. Die gedemonstreerde skaal het by bekertoetse van 5 milliliter met 25-40 milligram aktiewe materiaal en reaksietye van 200 minute tot 13 uur gebly. Tydsberekening vir 'n vloeisel is geprojekteer, hergebruik oor baie siklusse is nie getoets nie, en die lewensiklusvergelyking het van laboratoriumskaalaannames afgehang. Die artikel ondersteun 'n inperkingsmeganisme en 'n laboratoriumplatform, nie 'n industriële plaasvervanger vir oplosmiddelekstraksie nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel toon: Deur ’n gehidreerde mangaanoksiedgaping met behoue magnesium naby 6,8-6,9 ångström te hou, is die skeiding van geselekteerde lantaniedpare verander. Struktuurmetings, elektrochemie en berekeninge ondersteun ’n meganisme wat inperking, dehidrasie, koördinasie en binding behels.

Wat die beste gevaar het: Onder gespesifiseerde toestande het lantaan-neodimiumverryking 5,4 +/- 0,1 en lantaan-praseodimium 4,2 +/- 0,1 bereik. Ander paarwaardes het verskil. Afsonderlike eksperimente het suiwerheids-, uitputtings- en herwinningsresultate gerapporteer wat verskillende noemers gebruik.

Wat dit nie toon nie: ’n Universele skeier vir alle seldsame aardes; werking op ’n volledige ertsstroom; ’n gedemonstreerde deurlopende vloeisel; duursame elektrodes oor baie siklusse; vervanging van oplosmiddelekstraksie; of bewese kommersiële omgewingsmeerderwaardigheid.

Belangrikste skaalbeperkings: Die gedemonstreerde toetse het 5 milliliter oplossing, ongeveer 25-40 milligram aktiewe materiaal en 200 minute tot 13 uur gebruik. ’n Teiken met hoër konsentrasie het ’n probleem van 532 milligram per vierkante sentimeter se massalading geïmpliseer. Vloeitye is geëkstrapoleer. Elektrodeleeftyd en belangrike herwinningsinsette in die lewensiklusbeoordeling was aannames.

Hoeveel vertroue behoort ’n algemene leser te hê? Hoë vertroue in die gerapporteerde laboratoriummetings vir die genoemde pare en toestande. Matige vertroue in die voorgestelde molekulêre interpretasie, omdat dit direkte struktuur- en elektrochemiese data met berekeninge kombineer. Lae vertroue dat die huidige data industriële deurset, leeftyd of omgewingsprestasie voorspel.

Bronne

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