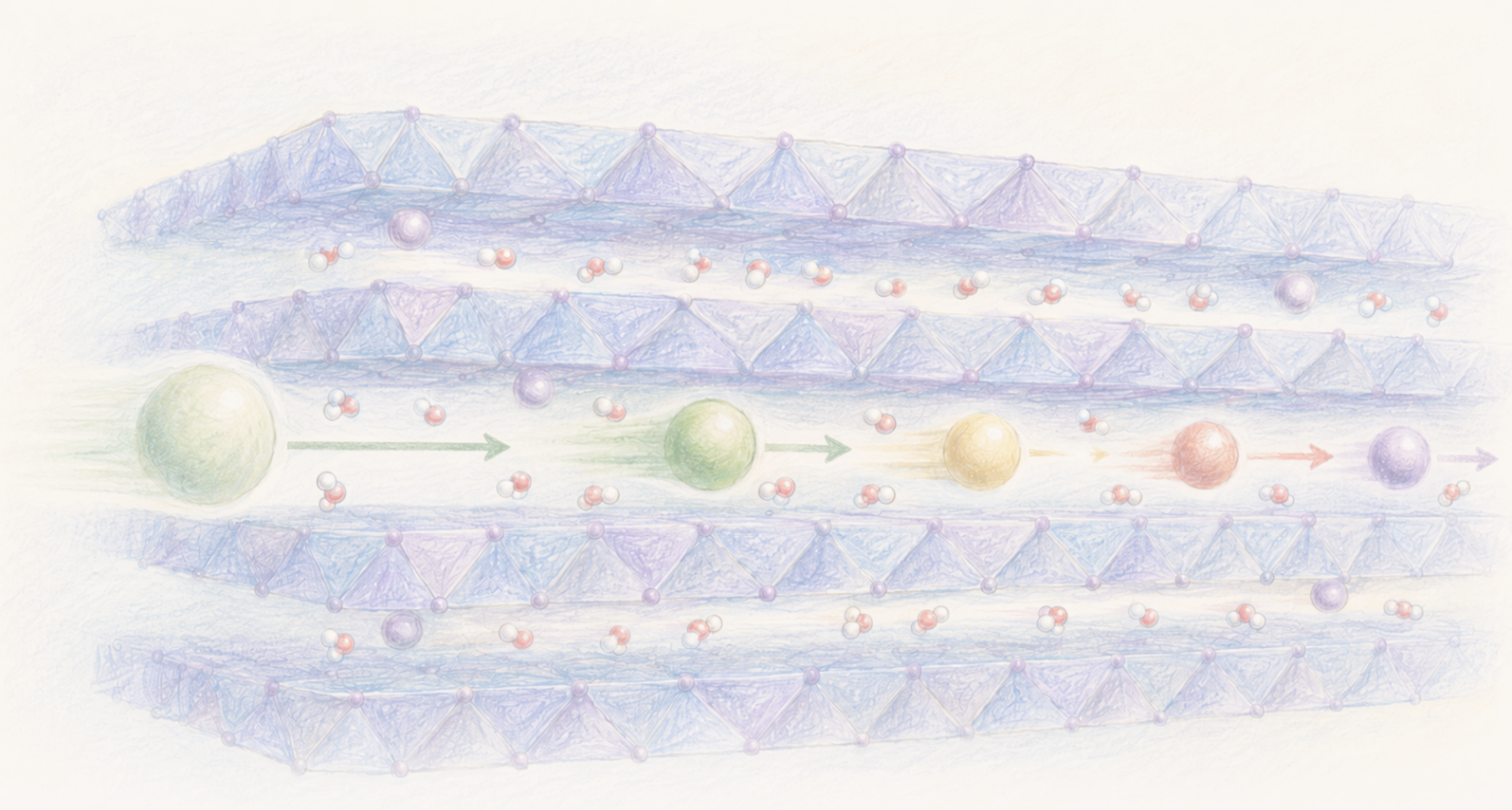


The Clean Paper

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

At stabilisere en vandfyldt mineralkanal hjalp med at adskille lignende sjældne jordartsioner

Magnesium holdt en hydratiseret spalte i manganoxid tæt på bredden af vandskallen omkring en lanthanoidion og forbedrede udvalgt parvis berigelse i laboratorieforsøg. Det demonstrerede arbejde brugte milliliter opløsning og milligram materiale; gennemstrømningsdrift, lang cykluslevetid og kommerciel miljøpræstation er stadig ikke dokumenteret.

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

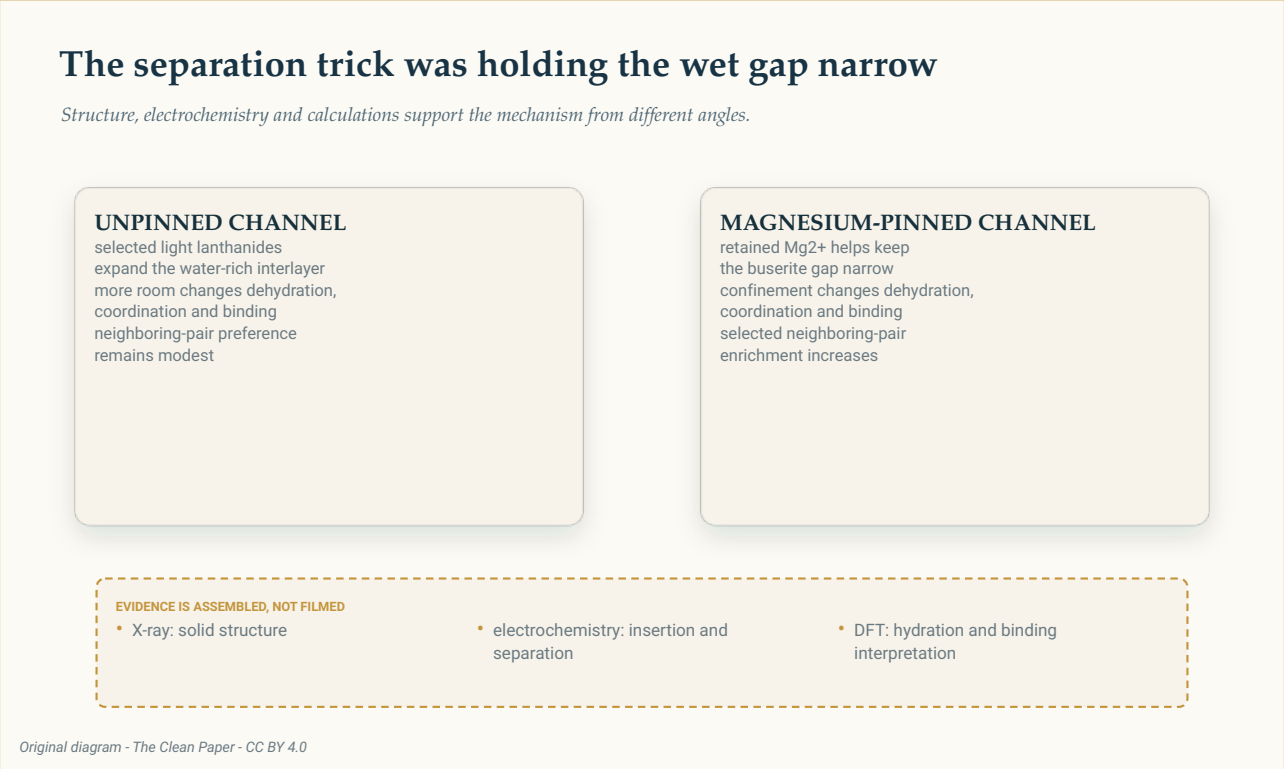
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

At holde en vandfyldt mineralkanal på plads hjalp med at adskille lignende sjældne jordartsioner

Sjældne jordartsioner er vanskelige at adskille af samme grund, som søskende kan være vanskelige at kende forskel på på afstand: Forskellene er reelle, men små.

Lanthanoiderne ligger ved siden af hinanden i det periodiske system og danner normalt ioner med samme ladning. Størrelsen ændrer sig gradvist gennem serien, mens den kemiske adfærd forbliver ens. Industriel raffinering kræver derfor mange gentagne separationstrin.

Et nyt laboratoriestudie angreb problemet gennem indeslutning. Forskerne brugte stablede lag af manganoxid med en vandfyldt spalte mellem dem. En sjælden jordartsion nærmer sig spalten omgivet af vandmolekyler. Uden afstivning kan lagene bevæge sig fra hinanden for at skabe plads. Magnesiumioner fungerede som en afstivning: Når de blev liggende mellem lagene, hjalp de med at holde spalten smal. Forskellige sjældne jordartsioner måtte da betale forskellige energiomkostninger for at afgive noget af vandet, komme ind i kanalen og binde sig til oxygenatomer i det faste stof.



De ustøttede og magnesiumfikserede kanaler er mekanistiske fortolkninger, der understøttes af strukturmålinger, elektrokemi og beregninger. Ingen enkelt måling observerede hele den molekylære sekvens.

The Clean Paper CC BY 4.0

For ét undersøgt par, lanthan og neodym, øgede denne **fiksering** berigelsesfaktoren fra 1,6 til **5,4**. For lanthan og praseodym steg den fra 1,5 til **4,2**. En berigelsesfaktor sammenligner forholdet mellem de to ioner efter separationen med forholdet før separationen. Værdien 1 betyder ingen præference; 5,4 betyder, at det indfangede materiale favoriserede neodym frem for lanthan 5,4 gange stærkere

end udgangsblandingen gjorde.

Det er meningsfulde, parspecifikke laboratorieresultater. De er ikke bevis for, at alle sjældne jordarter nu kan adskilles rent, at en gennemstrømningsproces er demonstreret, eller at solventekstraktion kan erstattes.

Artiklens stærkeste idé er mindre end et raffinaderi: Forhindr en våd mineralspalte i at åbne sig.

En ion i vand er større end det nøgne atom

Sjældne jordarter omfatter lanthanoiderne samt scandium og yttrium. Studiet testede tolv positivt ladede lanthanoidioner fra lanthan til ytterbium. Cerium blev udeladt, fordi det let skifter oxidationstrin, og radioaktivt promethium blev udeladt.

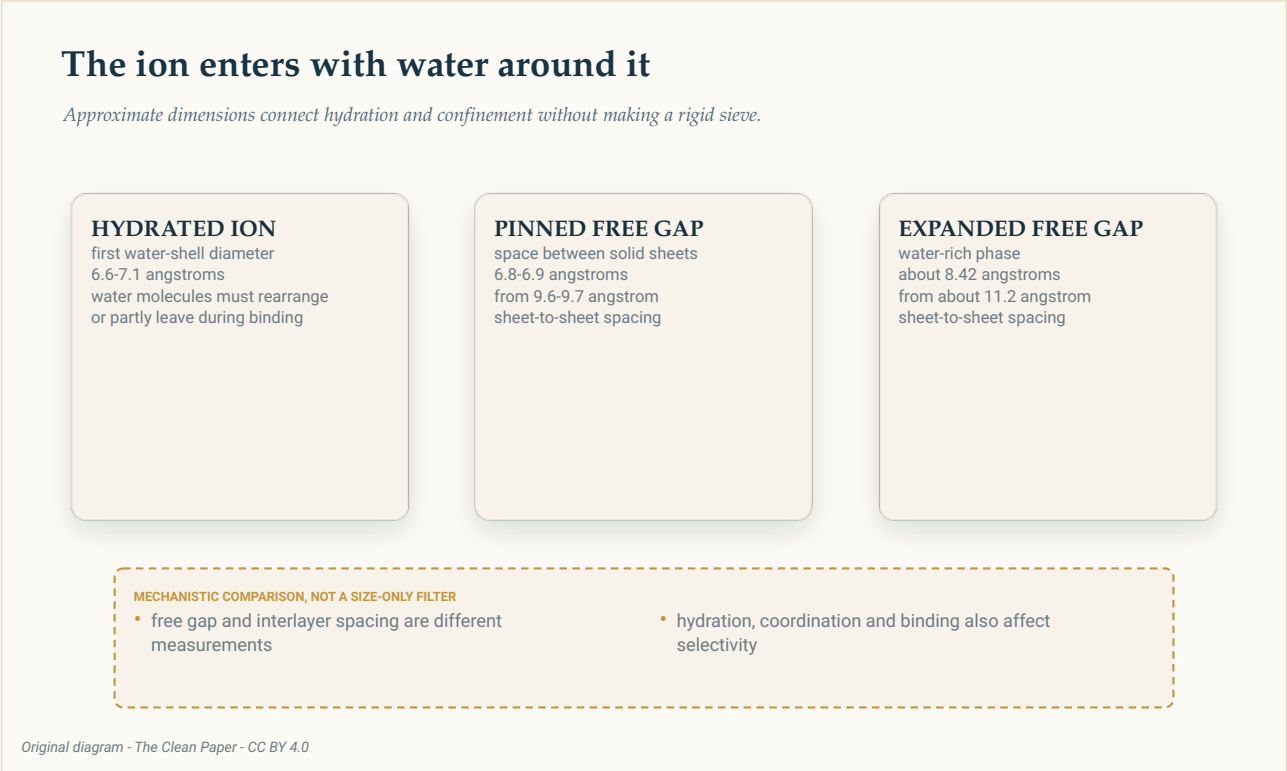
I vand bevæger en ion sig ikke alene. Vandmolekyler ordner sig omkring ladningen og danner en **hydratiseringsskal**. For at komme ind i en smal kanal og binde sig til et fast stof kan ionen være nødt til at omorganisere eller afgive en del af dette vandlag. Energiomkostningen afhænger både af ionen og omgivelserne.

Dimensionerne måles i **ångstrøm (Å)**. Én ångstrøm er en tiendedel milliardtedel meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). De første hydratiseringsskaller omkring de undersøgte lanthanoider blev rapporteret til at være omtrent **6,6 til 7,1 Å** i diameter.

Forskerne brugte et hydratiseret, lagdelt manganoxid kaldet buserit. De stablede lag lå omtrent **9,6 til 9,7 ångstrøm** fra hinanden, målt fra én gentagen lagposition til den næste. Men selve laget optager plads. Den frie, vandfyldte spalte mellem lagene var kun omtrent **6,8 til 6,9 ångstrøm**.

Denne sondring er vigtig. En afstand mellem lagene på 9,7 ångstrøm er ikke en åben kanal på 9,7 ångstrøm.

Nogle lettere lanthanoider fik strukturen til at udvide sig til en mere vandrig fase. Her var afstanden fra lag til lag omtrent **11,2 ångstrøm**, og den beregnede frie spalte omtrent **8,42 ångstrøm**. En smallere beslægtet struktur, birnessit, havde en fri spalte på omkring **4,42 ångstrøm**.



Sammenligningen gælder den omtrentlige diameter af hydratiseringsskallen og den frie vandfyldte spalte, ikke en nøgen ion sammenlignet med hele afstanden fra lag til lag. Størrelse er én del af mekanismen, ikke hele forklaringen.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineralet kan tilpasse sig ionen

Uden magnesiumfiksering er kanalen ikke en stiv si: De stablede lag kan bevæge sig. I forsøgene fik de lettere ioner lanthan, praseodym og neodym materialet til at optage mere vand og åbne sig yderligere. De tungere ioner fra europium til ytterbium havde tendens til at lade den smallere kanal forblive intakt. Samarium lå mellem disse to reaktioner.

Artiklen kalder den første reaktion **gruppe I** og den anden **gruppe II**. Det er betegnelser for, hvordan ionerne fik netop dette materiale til at reagere, ikke gruppenumre i det periodiske system. Grænsen kan også flytte sig under andre forsøgsbetingelser.

Denne strukturelle forskel hjalp for par på tværs af grupperne. Ved direkte ionbytning var den rapporterede berigelsesfaktor **7,8** for lanthan mod dysprosium, **5,7** for praseodym mod dysprosium, **4,5** for neodym mod dysprosium og **2,6** for neodym mod europium.

De fleste nabopar var langt vanskeligere med berigelsesfaktorer nær 1,1. En faktor nær 1 betyder ringe præference. Materialet kunne lettere adskille ioner, der favoriserede forskellige kanalstrukturer, end ioner, der lå tæt på hinanden i samme reaktionsgruppe.

Magnesium fikserer kanalen

Forskerne brugte derefter **elektrokemisk interkalation**: en elektrisk reaktion, der fører ioner ind mellem faste lag. Magnesiumioner blev liggende i kanalen, mens sjældne jordartsioner gik ind. Det tilbageholdte magnesium bidrog til at forhindre buseritafstanden i at udvide sig.

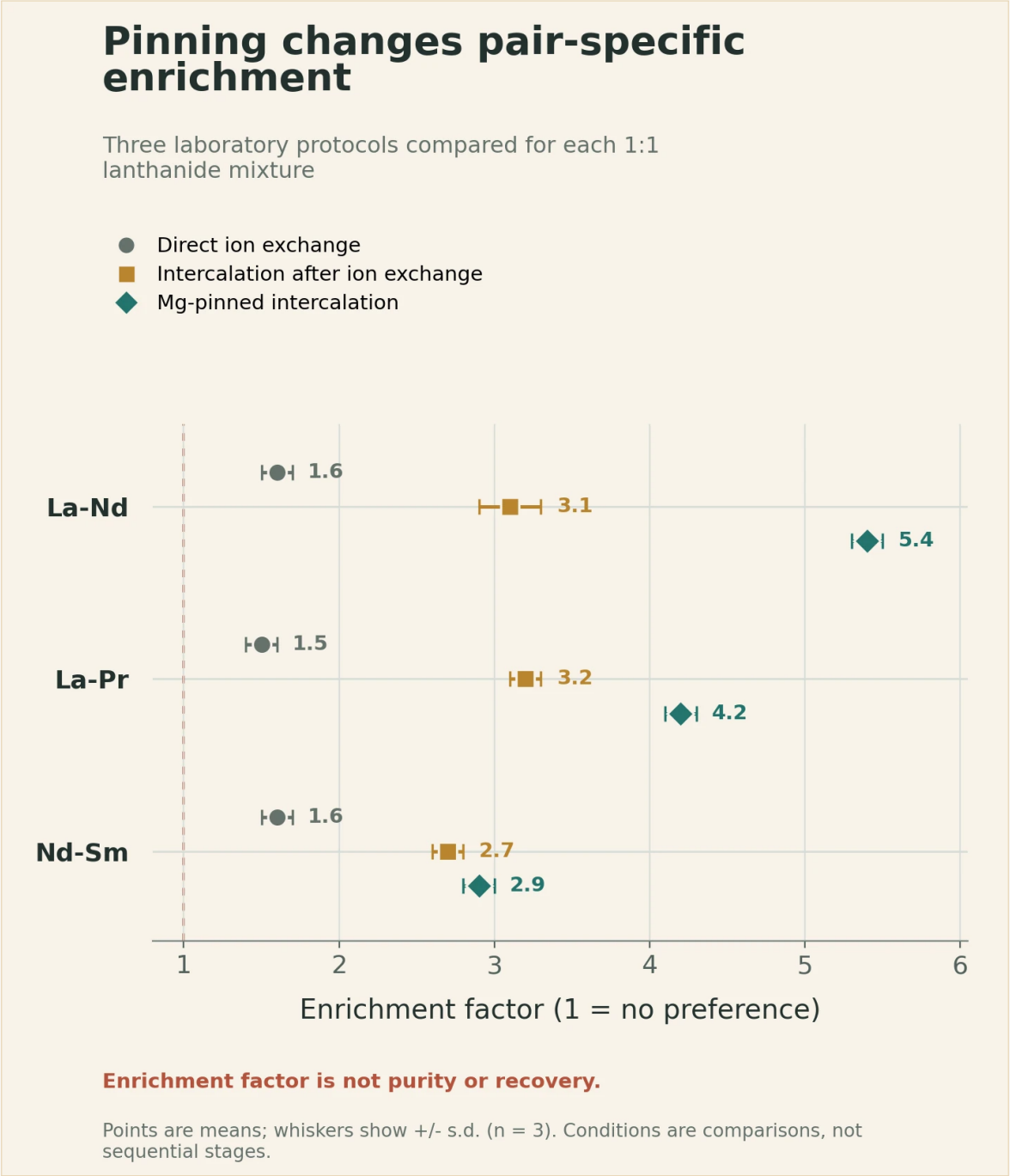
Inde i denne smallere, våde spalte har en indkommende hydratiseret ion mindre plads. Den foreslåede mekanisme kombinerer indeslutning, delvis dehydratisering, koordination og binding. **Koordination** betegner de nærliggende atomer — ofte oxygen — som direkte omgiver og vekselvirker med ionen.

Evidensen kommer fra flere typer arbejde. Røntgenmålinger fulgte strukturen i det faste stof. Elektrokemiske forsøg målte indsættelse og separation. **Tæthedsfunktionalteori**, en kvantemekanisk beregningsmetode, sammenlignede strukturer, hydratisering og binding. Beregningerne hjælper med at fortolke mekanismen; de er ikke en direkte film af én ion, der bevæger sig gennem kanalen.

Mekanismen er heller ikke blot »mindre ioner passerer, større stoppes«. Vandskallen, lagenes reaktion, energiomkostningen ved dehydratisering og ionens koordination med det faste stof bidrager alle.

Fiksering forbedrede udvalgte nabopar

Den største fremhævede ændring gjaldt lanthan og neodym: Berigelsen steg fra **1,6** ± **0,1** uden fiksering til **5,4** ± **0,1** med magnesiumfiksering. Lanthan mod praseodym steg fra **1,5** ± **0,1** til **4,2** ± **0,1**. Neodym mod samarium steg fra **1,6** ± **0,1** til **2,9** ± **0,1**.



Hver række sammenligner tre separate laboratorieprotokoller, ikke tre på hinanden følgende trin i én proces. En faktor på 1 betyder ingen præference; højere værdier betyder stærkere parspecifik berigelse. Punkterne viser gennemsnit, og stregerne viser ± standardafvigelse (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Ved pH 2 var værdien for lanthan–neodym **5,6 ± 0,2**. Da den elektriske C-rate blev femdoblet fra 0,1C til 0,5C, faldt den fra **5,4 ± 0,1** til **4,3 ± 0,4**. C-raten sammenligner den påførte elektriske strøm med materialets kapacitet. En højere rate giver ionerne og det faste stof mindre tid til at reagere.

Ingen enkelt værdi beskriver materialet universelt. Berigelsen afhænger af ionparret, faststofstrukturen, surhedsgraden og driftsraten.

Artiklen udfordrede også materialet med store mængder ioner, der ikke er sjældne jordarter. Udgangsblandingerne indeholdt én sjælden jordartsion for hver 1.000 konkurrerende ioner. De rapporterede selektivitetsværdier var omtrent **1.200** mod natrium, **6.500** mod calcium og **1.700** mod magnesium.

Det er nyttig evidens for, at almindelige ioner ikke automatisk overvælder separationen under disse laboratoriebetingelser. Det er ikke en test af en komplet malmvæske med alle dens metaller, surhed og urenheder.

Berigelse, separation, renhed, udtømning og genvinding er forskellige resultater

Artiklen bruger flere præstationsmål, og de kan ikke erstatte hinanden.

En **berigelsesfaktor** sammenligner forholdet mellem to ioner efter separationen med forholdet før separationen. Værdien 5,4 betyder, at det indfangede materiale favoriserede det ene medlem af parret 5,4 gange stærkere end udgangsblandingen gjorde.

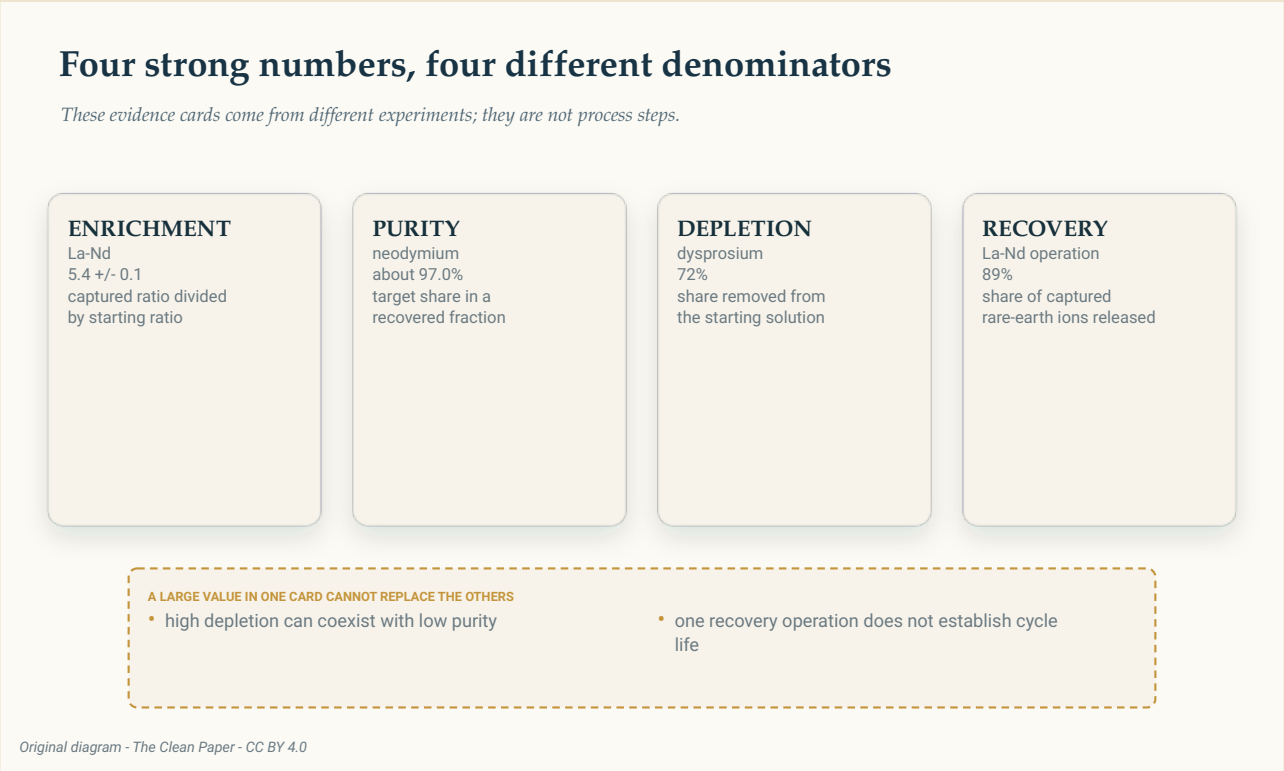
En **separationsfaktor** tager også hensyn til det, der er tilbage i væsken: Den sammenligner indfanget og ikke-indfanget mængde for hver ion og sammenligner derefter disse to balancer. Den kan derfor stige, når mere materiale fjernes, selv om berigelsesfaktoren følger et andet mønster.

Renhed er andelen af en udvalgt ion i en genvundet fraktion. Demonstrationer i to trin nåede omtrent **97,0 procent neodymrenhed** og **92,3 procent dysprosiumrenhed** i de angivne forløb.

Udtømning er den andel, der fjernes fra startopløsningen. Otte på hinanden følgende tilsætninger af 10 milligram pulver fjernede **72 procent af dysprosiumet** i en neodym–dysprosium-test og gav en akkumuleret separationsfaktor på 10,8.

Genvinding spørger, hvor meget af en indfanget ion der senere kan frigives. Omvendt ionbytning genvandt **80 procent** i én neodym–dysprosium-operation. Elektrokemisk fjernelse genvandt **89 procent** i én lanthan–neodym-operation.

Genvinding viser reversibilitet. Den fastslår ikke, hvor mange gange en elektrode kan genbruges uden at miste ydeevne.



Fire rapporterede mål bruger forskellige nævnere og kommer fra forskellige forsøg. De er separate evidenskort, ikke på hinanden følgende trin i én proces.

The Clean Paper CC BY 4.0

Hvorfor kan to imponerende procenttal betyde forskellige ting?

Antag, at en proces fjerner 90 procent af én ion fra startvæsken. Det er høj udtømning. Hvis mange uønskede ioner følger med, kan det genvundne materiale alligevel have lav renhed. Omvendt kan en meget ren, lille fraktion betyde dårlig genvinding, hvis det meste af målet blev tilbage. En procesvurdering behøver alle disse balancer, ikke kun det største tal.

Det demonstrerede apparat er stadig et bægerglasforsøg

De skalaorienterede elektrokemiske forsøg begyndte med **5 milliliter** opløsning, som indeholdt 25 millimol pr. liter af hver ion. Elektroderne bar omtrent **25 til 40 milligram** aktivt materiale.

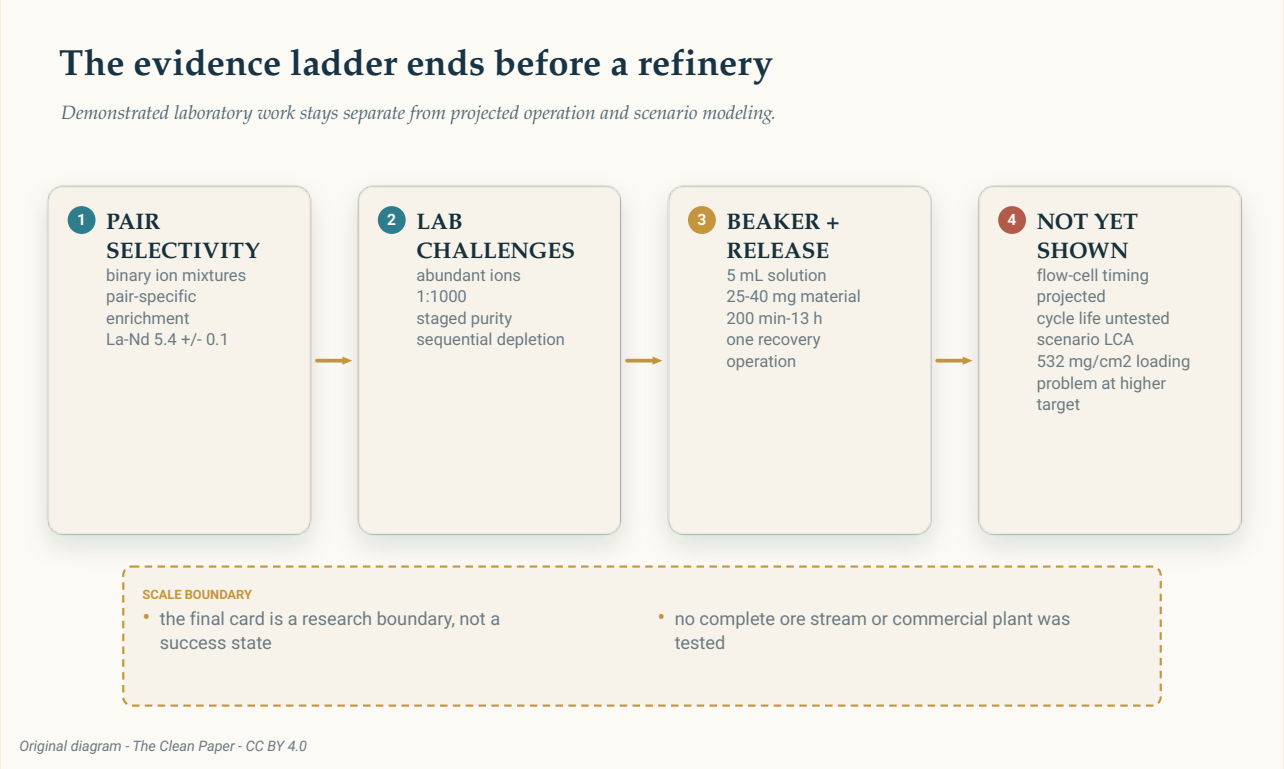
Én elektrode fjernede omtrent 40 procent af neodymet. Tre elektroder brugt i serie nåede omtrent **90 procent udtømning** og en akkumuleret separationsfaktor på **16,6 ± 0,4**. Afhængigt af driftsraten varede reaktionerne fra **200 minutter til 13 timer**.

Disse dimensioner og tider hører hjemme i hovedhistorien, fordi de definerer, hvad der faktisk blev demonstreret.

Tillægget identificerer også en masseoverførselsgrænse. For et bægerglasmål med højere koncen-

tration blev det anslået, at 50 procent samlet udtømning ville kræve en **266-milligrams elektrode**, eller **532 milligram aktivt materiale pr. kvadratcentimeter**. At pakke så meget materiale på den lille elektrode ville gøre det vanskeligt for opløste ioner at nå det hele. Forfatterne gik derfor over til en mere fortyndet opløsning i bægerglasforsøget.

En hypotetisk gennemstrømningscelle findes kun som en fremskrivning. For en antaget celle på 1,25 milliliter med en elektrode på 5 × 5 centimeter anslår tillægget omtrent **20 minutter ved 1C** eller **40 minutter ved 0,5C** for omkring 90 procent udtømning. Ingen sådan gennemstrømningscelle blev testet.



Stigen ender ved en grænse: Der findes binær og trinvis laboratorieevidens, mens tid i gennemstrømningscelle og miljøpræstation stadig er fremskrevet eller scenariebaseret, ikke demonstreret i anlægsskala.

The Clean Paper CC BY 4.0

Miljøsammenligningen er et scenarie, ikke et anlægsresultat

Den supplerende livscyklusanalyse sammenligner separationstrin, der ender i sjældne jordartsoxider, og rapporterer inputfaktorer pr. **1 kilogram neodymoxid**.

Den omfatter ikke minedrift, forbehandling af malm eller en komplet kommerciel raffineringskæde. Laboratorieprocessen repræsenteres med antagelser sammensat fra flere kilder. Elektrodeliv på **10, 20 og 100 cyklusser** er scenarie- og følsomhedsværdier, ikke holdbarhed målt i dette studie. Modellen antager, at magnesiumopløsningen til genvinding kan genbruges, indtil koncentrationen har ændret sig med 10 procent, antager **95 procent vandgenvinding** og inkluderer kalcinering ved 450–600 °C i

to timer, selv om kalcinering ikke blev demonstreret eksperimentelt her.

En **livscyklusanalyse** bogfører miljøbelastninger inden for en angivet systemgrænse. Svaret er kun så bredt som grænsen og så pålideligt som opgørelsen og skalaantagelserne.

Analysen kan identificere, hvor energi, materialer og genbrug betyder mest. Den kan ikke bevise, at en kommerciel version ville have lavere miljøpåvirkning end industriel solventekstraktion.

En mekanisme, en platform og en lang ingeniørvej

Artiklen fastslår, at afstanden og det kemiske miljø i et hydratiseret, lagdelt fast stof bevidst kan styres for at forbedre separationen af udvalgte lanthanoidpar. Magnesiumfiksering gjorde mere end at tilføje et nyt kemisk bindingssted: Den begrænsede den struktur, som vandindhyllede ioner måtte bevæge sig gennem.

Resultatet åbner praktiske spørgsmål. Overlever ydeevnen i virkelige blandinger fra malm? Kan elektroder fremstilles med en brugbar massebelastning? Hvor stabilt er manganoxidet gennem mange indsættelses- og frigivelsescyklusser? Kan en kontinuerlig celle opretholde selektivitet, gennemstrømning og vandbalance? Hvordan ser miljøsammenligningen ud med målte opgørelser fra pilotskala?

Forsøget besvarer ikke disse spørgsmål. Det gør dem mere konkrete.

Præstationen er ikke et færdigt raffinaderi for sjældne jordarter. Det er evidens for, at nogle få ångstrøm kontrolleret, vandfyldt rum kan ændre en vanskelig separation.

Kort fortalt

Forskere brugte hydratiseret, lagdelt manganoxid til at adskille udvalgte par af lanthanoidioner i vand. Materialets frie spalte var omtrent 6,8–6,9 ångstrøm, tæt på den rapporterede diameter på 6,6–7,1 ångstrøm for ionernes første hydratiseringsskal. Tilbageholdt magnesium hjalp med at fiksere kanalen og forbedrede parspecifik berigelse, blandt andet lanthan–neodym fra 1,6 til 5,4 og lanthan–praseodym fra 1,5 til 4,2. Studiet rapporterede også udfordringer med store mængder andre ioner, trinvis renhed, sekventiel udtømning og genvindingsoperationer. Den demonstrerede skala var stadig bægerglasforsøg med 5 milliliter, 25–40 milligram aktivt materiale og reaktionstider fra 200 minutter til 13 timer. Tid i gennemstrømningscelle blev fremskrevet, genbrug over mange cyklusser blev ikke testet, og livscyklussammenligningen byggede på laboratorieantagelser. Artiklen understøtter en indeslutningsmekanisme og en laboratorieplatform, ikke en industriel erstatning for solventekstraktion.

Nøgtern vurdering

Hvad artiklen viser: At holde en hydratiseret manganoxidspalte nær 6,8–6,9 ångstrøm med tilbageholdt magnesium ændrede separationen af udvalgte lanthanoidpar. Strukturmålinger, elektrokemi og beregninger understøtter en mekanisme med indeslutning, dehydratisering, koordination og binding.

Hvad der fungerede bedst: Under de angivne betingelser nåede berigelsen for lanthan–neodym 5,4 ± 0,1 og for lanthan–praseodym 4,2 ± 0,1. Andre par gav andre værdier. Separate forsøg rapporterede renhed, udtømning og genvinding med forskellige nævnere.

Hvad den ikke viser: En universel separator for alle sjældne jordarter; drift på en komplet malmstrøm; en demonstreret kontinuerlig gennemstrømningscelle; holdbare elektroder over mange cyklusser; erstatning af solventekstraktion; eller dokumenteret kommerciel miljømæssig overlegenhed.

Vigtigste skalabegrænsninger: Demonstrerede test brugte 5 milliliter opløsning, omtrent 25–40 milligram aktivt materiale og 200 minutter til 13 timer. Et mål med højere koncentration indebar et massebelastningsproblem på 532 milligram pr. kvadratcentimeter. Gennemstrømningstiderne blev ekstrapoleret. Elektrodeliv og vigtige genvindingsparametre i livscyklusanalysen var antagelser.

Hvor stor tillid bør en almindelig læser have? Høj tillid til de rapporterede laboratoriemålinger for de navngivne par og betingelser. Moderat tillid til den foreslåede molekylære fortolkning, fordi den kombinerer direkte struktur- og elektrokemiske målinger med beregninger. Lav tillid til, at de nuværende data forudsiger industriel gennemstrømning, levetid eller miljøpræstation.

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