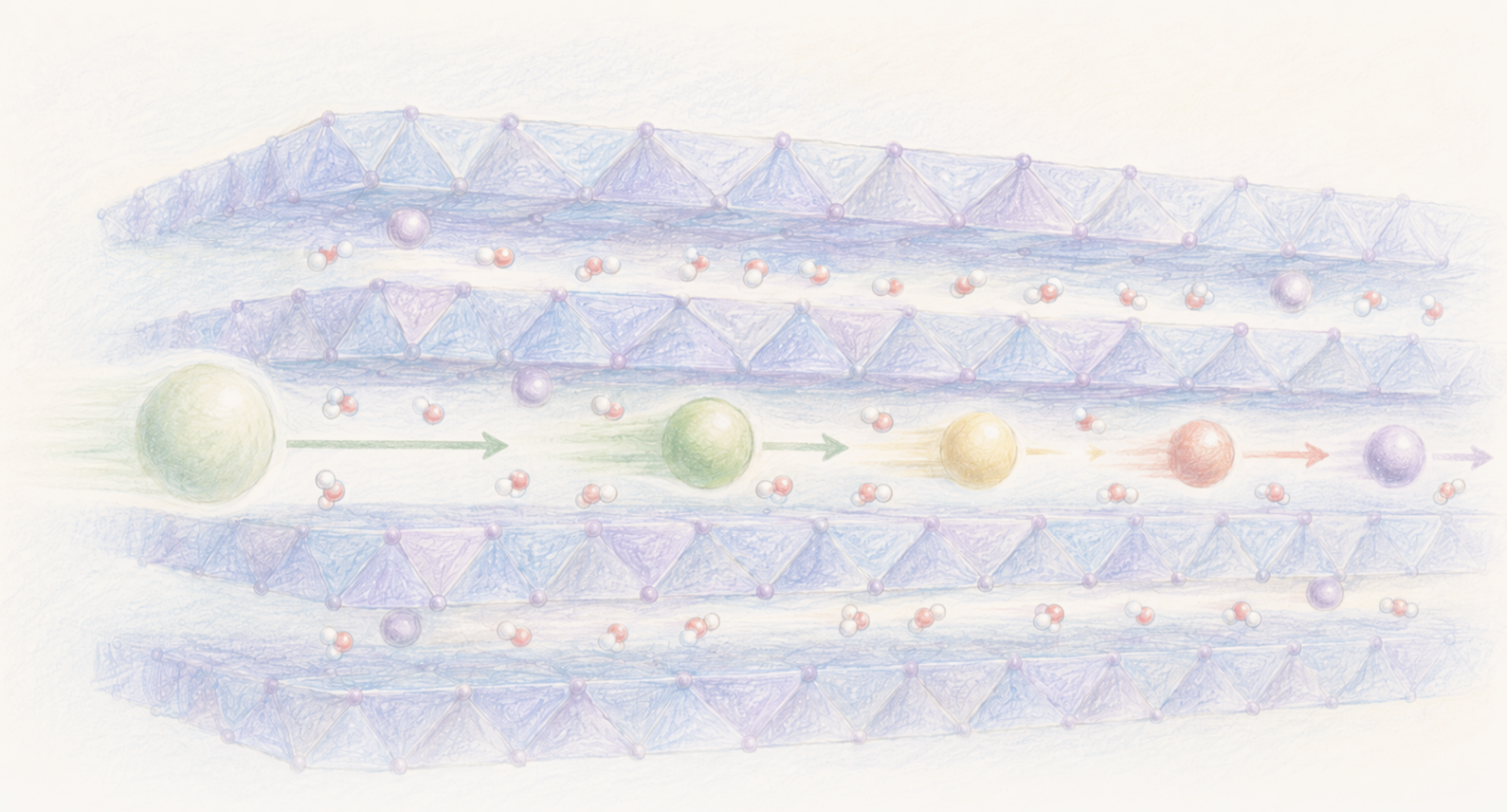


The Clean Paper

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

Att spänna fast en vattenfylld mineralkanal hjälpte till att skilja likartade sällsynta jordartsjoner

Magnesium höll en hydratiserad manganoxidspringa nära bredden hos en lantanoidjons vattenskal och förbättrade utvald parvis anrikning i laboratorietester. Det demonstrerade arbetet använde milliliter lösning och milligram material; flödesdrift, lång cykellivslängd och kommersiell miljöprestanda är fortfarande obevisade.

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

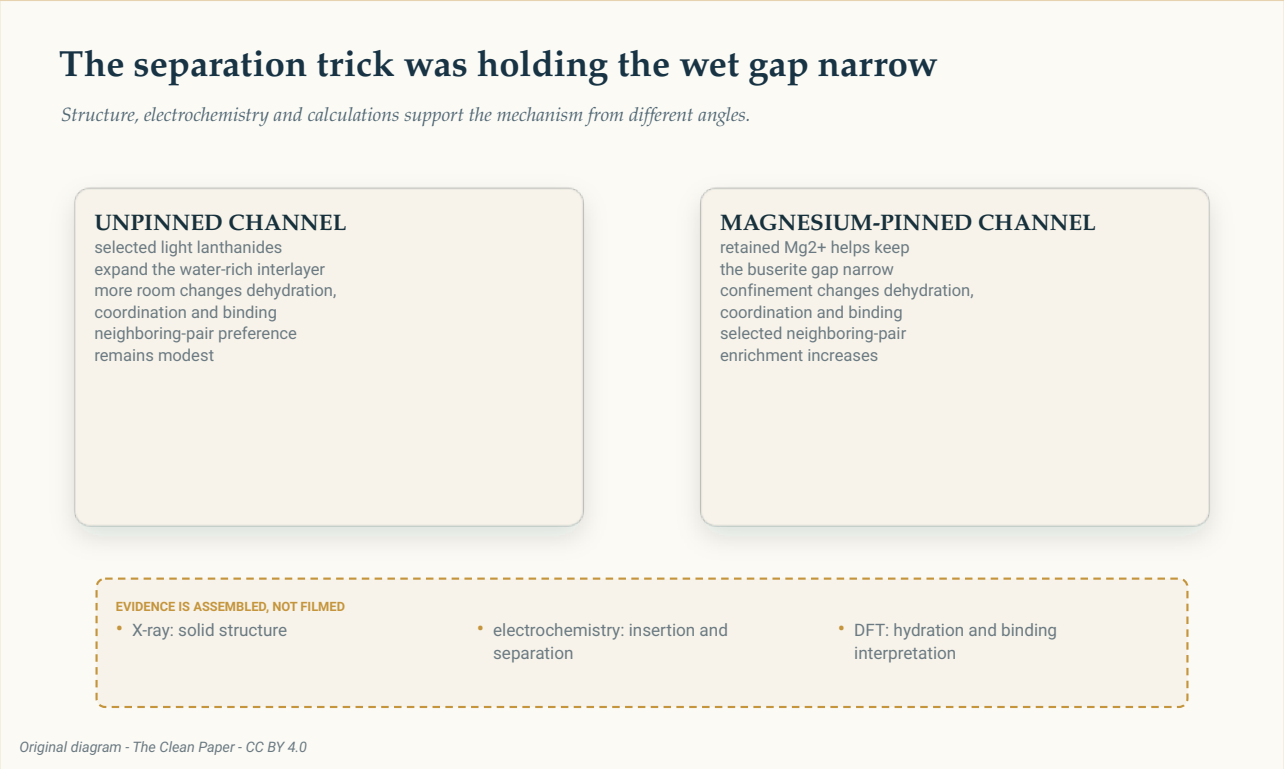
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Att spänna fast en vattenfylld mineralkanal hjälpte till att skilja likartade sällsynta jordartsjoner

Sällsynta jordartsjoner är svåra att separera av samma anledning som syskon kan vara svåra att skilja åt på avstånd: skillnaderna är verkliga, men små.

Lantanoiderna står bredvid varandra i periodiska systemet och bildar vanligen joner med samma laddning. Deras storlek förändras gradvis genom serien, medan det kemiska beteendet förblir likartat. Industriell raffinering kräver därför många upprepade separationssteg.

En ny laboratoriestudie angrep problemet genom instängning. Forskarna använde staplade skikt av manganoxid med ett vattenfyllt mellanrum. En sällsynt jordartsjon närmar sig mellanrummet omsluten av vattenmolekyler. Utan en stagning kan skikten glida isär och ge plats. Magnesiumjoner fungerade som ett stag: när de låg kvar mellan skikten hjälpte de till att hålla springan smal. Olika sällsynta jordartsjoner fick då betala olika energikostnader för att avlägsna en del av vattnet, gå in i kanalen och binda till syreatomer i det fasta materialet.



De ostagade och magnesiumstagade kanalerna är mekanistiska tolkningar som stöds av strukturmätningar, elektrokemi och beräkningar. Inget enskilt experiment filmade hela den molekylära sekvensen.

The Clean Paper CC BY 4.0

För ett testat par, lantan och neodym, ökade denna **stagning** anrikningsfaktorn från 1,6 till **5,4**. För lantan och praseodym steg den från 1,5 till **4,2**. En anrikningsfaktor jämför förhållandet mellan de två jonerna efter separationen med deras förhållande före den. Ett värde på 1 skulle innebära ingen preferens; 5,4 betyder att det infångade materialet gynnade neodym framför lantan 5,4 gånger

starkare än startblandningen gjorde.

Detta är meningsfulla parspecificerade laboratorieresultat. De visar inte att alla sällsynta jordartsmetaller nu kan separeras rent, att en flödesprocess har demonstrerats eller att lösningsmedelsextraktion kan ersättas.

Artikelns starkaste idé är mindre än ett raffinaderi: hindra en våt mineralspringa från att öppna sig.

En jon i vatten är större än den nakna atomen

Sällsynta jordartsmetaller omfattar lantanoiderna samt skandium och yttrium. Studien testade tolv positivt laddade lantanoidjoner från lantan till ytterbium. Cerium uteslöts eftersom det lätt byter oxidationstillstånd, och radioaktivt prometium uteslöts.

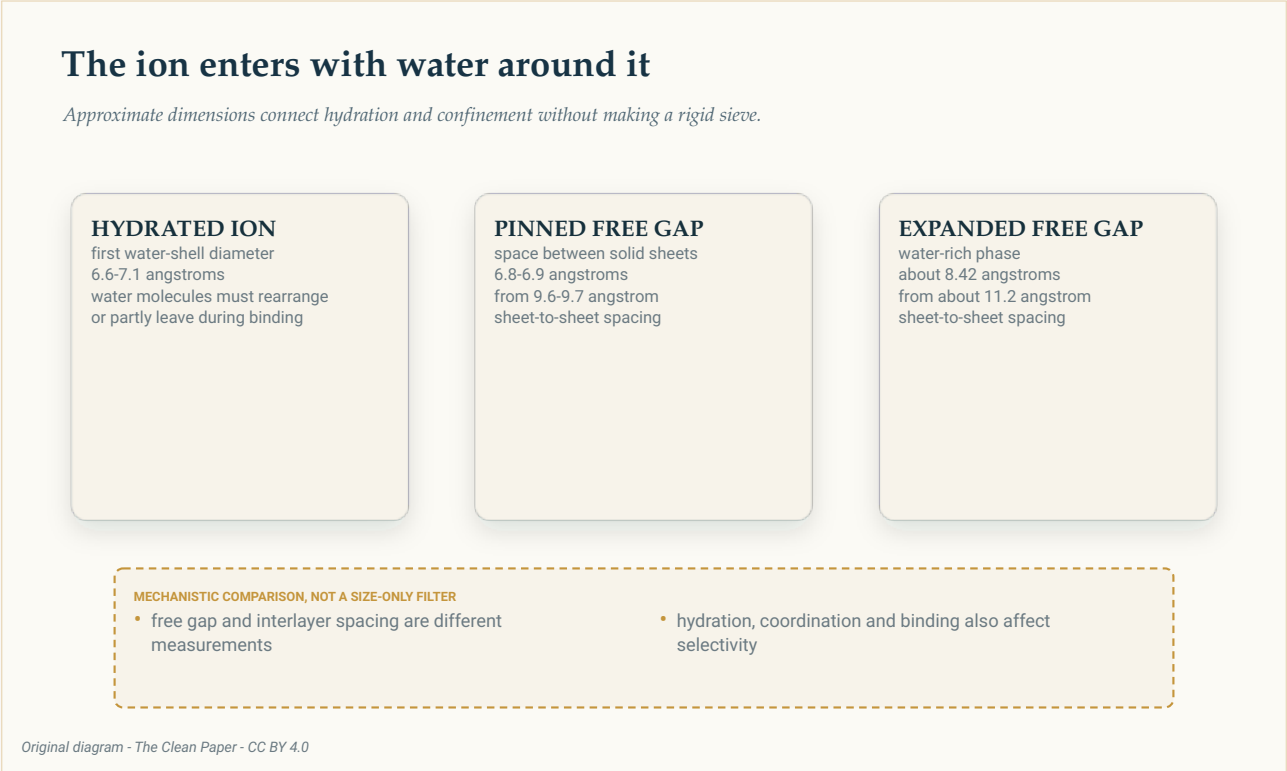
I vatten färdas en jon inte ensam. Vattenmolekyler ordnar sig kring laddningen och bildar ett **hydratiseringsskal**. För att gå in i en smal kanal och binda till ett fast ämne kan jonen behöva ordna om eller kasta av en del av vattenlagret. Energikostnaden beror på både jonen och omgivningen.

Måtten anges i **ångström (Å)**. En ångström är en tiomiljarddels meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). De första hydratiseringsskalen för de testade lantanoiderna rapporterades vara ungefär **6,6 till 7,1 Å** i diameter.

Forskarna använde en hydratiserad skiktad manganoxid som kallas buserit. De staplade skikten låg omkring **9,6 till 9,7 ångström** från varandra, mätt från en återkommande skiktposition till nästa. Men själva skiktet upptar plats. Den fria vattenfyllda springan mellan skikten var bara omkring **6,8 till 6,9 ångström**.

Skillnaden är viktig. Ett mellanlagersavstånd på 9,7 ångström är inte en öppen kanal på 9,7 ångström.

Några av de lättare lantanoiderna fick strukturen att expandera till en vattenrikare fas. Där var avståndet mellan skikten omkring **11,2 ångström** och den uppskattade fria springan omkring **8,42 ångström**. En smalare besläktad struktur, birnessit, hade en fri springa på omkring **4,42 ångström**.



Jämförelsen gäller den ungefärliga diametern på hydratiseringsskalet och den fria vattenfyllda springan, inte en naken jon och hela avståndet mellan skikten. Storlek är en del av mekanismen, inte hela förklaringen.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineralet kan anpassa sig till jonen

Utan magnesiumstagning är kanalen inte en stel sil: de staplade skikten kan röra sig. I experimenten fick de lättare jonerna lantan, praseodym och neodym materialet att ta upp mer vatten och öppna sig. De tyngre jonerna från europium till ytterbium tenderade att lämna den smalare kanalen intakt. Samarium låg mellan de två svaren.

Artikeln kallar det första svaret **grupp I** och det andra **grupp II**. Det är etiketter för hur jonerna fick just detta material att reagera, inte gruppnummer i periodiska systemet. Gränsen kan dessutom förändras under andra experimentförhållanden.

Strukturskillnaden hjälpte för par som korsade grupperna. Vid direkt jonbyte var den rapporterade anrikningsfaktorn **7,8** för lantan mot dysprosium, **5,7** för praseodym mot dysprosium, **4,5** för neodym mot dysprosium och **2,6** för neodym mot europium.

De flesta grannpar var betydligt svårare, med anrikningsfaktorer nära 1,1. En faktor nära 1 betyder liten preferens. Materialet kunde lättare skilja mellan två joner när de gynnade olika kanalstrukturer än när de låg nära varandra i samma responsgrupp.

Magnesium spänner fast kanalen

Forskarna använde sedan **elektrokemisk interkalation**: en elektrisk reaktion som för in joner mellan fasta skikt. Magnesiumjoner låg kvar i kanalen medan de sällsynta jordartsjonerna gick in. Det kvarhållna magnesiumet hjälpte till att hindra buseritavståndet från att expandera.

I den smalare våta springan har en inkommande hydratiserad jon mindre utrymme. Den föreslagna mekanismen kombinerar instängning, partiell dehydratisering, koordinering och bindning. **Koordinering** betecknar de närliggande atomer — ofta syre — som direkt omger och växelverkar med jonen.

Beläggen kommer från flera typer av arbete. Röntgenmätningar följde den fasta strukturen. Elektrokemiska experiment mätte införande och separation. **Täthetsfunktionalteori**, en kvantmekanisk beräkningsmetod, jämförde strukturer, hydratisering och bindning. Beräkningarna hjälper till att tolka mekanismen; de är ingen direkt film av en jon som rör sig genom kanalen.

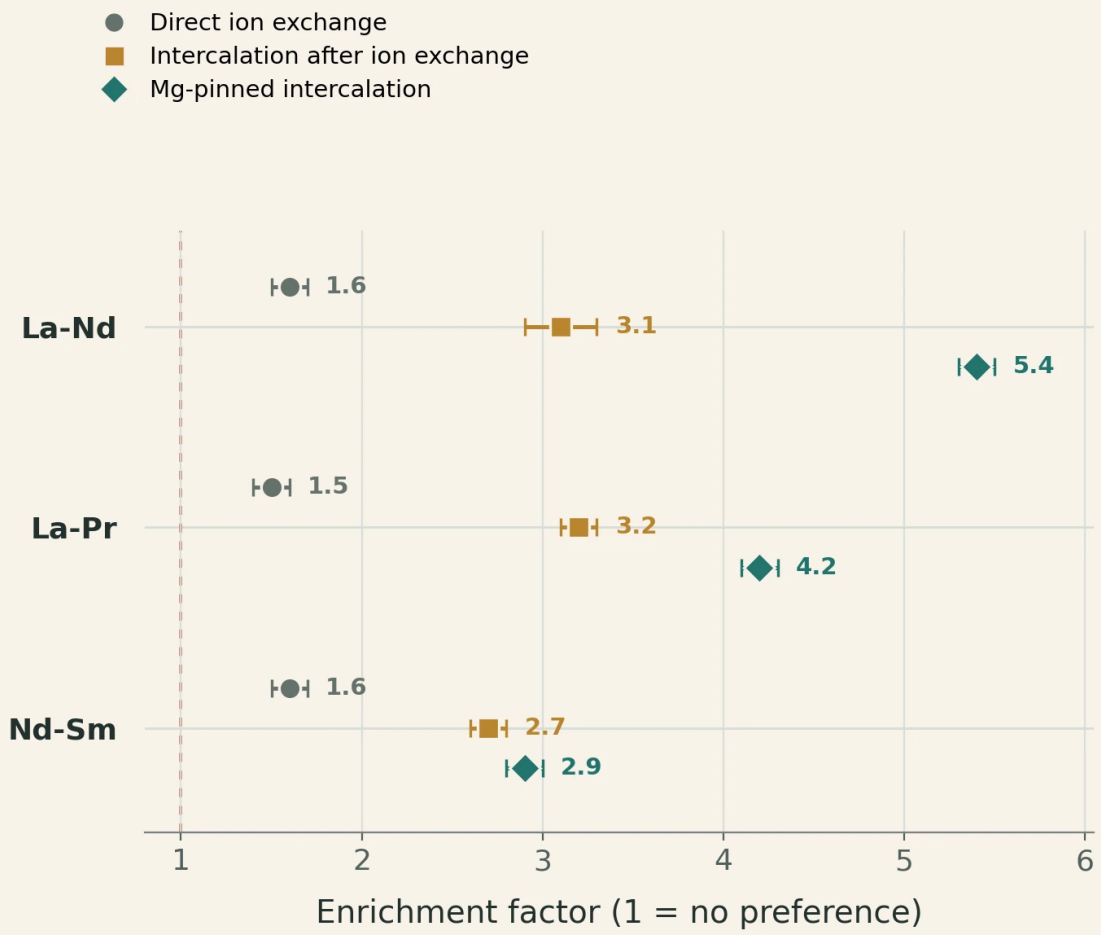
Mekanismen är inte heller bara ”små joner passerar, stora joner stoppas”. Vattenskalet, hur skikten reagerar, energikostnaden för dehydratisering och jonens koordinering med det fasta materialet bidrar alla.

Stagning förbättrade utvalda grannpar

Den största framhävda förändringen gällde lantan och neodym: anrikningen steg från **1,6 +/- 0,1** utan stagning till **5,4 +/- 0,1** med magnesiumstagning. Lantan mot praseodym steg från **1,5 +/- 0,1** till **4,2 +/- 0,1**. Neodym mot samarium steg från **1,6 +/- 0,1** till **2,9 +/- 0,1**.

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 +/- s.d. (n = 3). Conditions are comparisons, not sequential stages.

Varje rad jämför tre separata laboratorieprotokoll, inte efterföljande steg i en process. En faktor på 1 betyder ingen preferens; högre värden visar starkare parspecificerad anrikning. Punkterna visar medelvärden och spröten visar +/- standardavvikelse (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Vid pH 2 var värdet för lantan–neodym **5,6 +/- 0,2**. När den elektriska hastigheten femdubblades, från 0,1C till 0,5C, sjönk värdet från **5,4 +/- 0,1** till **4,3 +/- 0,4**. C-hastigheten jämför den applicerade elektriska strömmen med materialets kapacitet. En högre hastighet ger jonerna och det fasta materialet mindre tid att reagera.

Inget enskilt värde beskriver materialet universellt. Anrikningen beror på jonparet, den fasta strukturen, surheten och driftshastigheten.

Artikeln utmanade också materialet med stora mängder joner som inte var sällsynta jordartsjoner. Startblandningarna innehöll en sällsynt jordartsjon per 1 000 konkurrerande joner. Rapporterad selektivitet var omkring **1 200** mot natrium, **6 500** mot kalcium och **1 700** mot magnesium.

Det är användbara belägg för att vanliga joner inte automatiskt överväldigar separationen under dessa laboratorieförhållanden. Det är inte ett test av en fullständig malmbaserad vätska med alla dess metaller, surhet och föroreningar.

Anrikning, separation, renhet, utarmning och återvinning är olika resultat

Artikeln använder flera prestandamått, och de kan inte ersätta varandra.

En **anrikningsfaktor** jämför förhållandet mellan två joner efter separationen med förhållandet före den. Ett värde på 5,4 betyder att det infångade materialet gynnade den ena medlemmen i paret 5,4 gånger starkare än startblandningen gjorde.

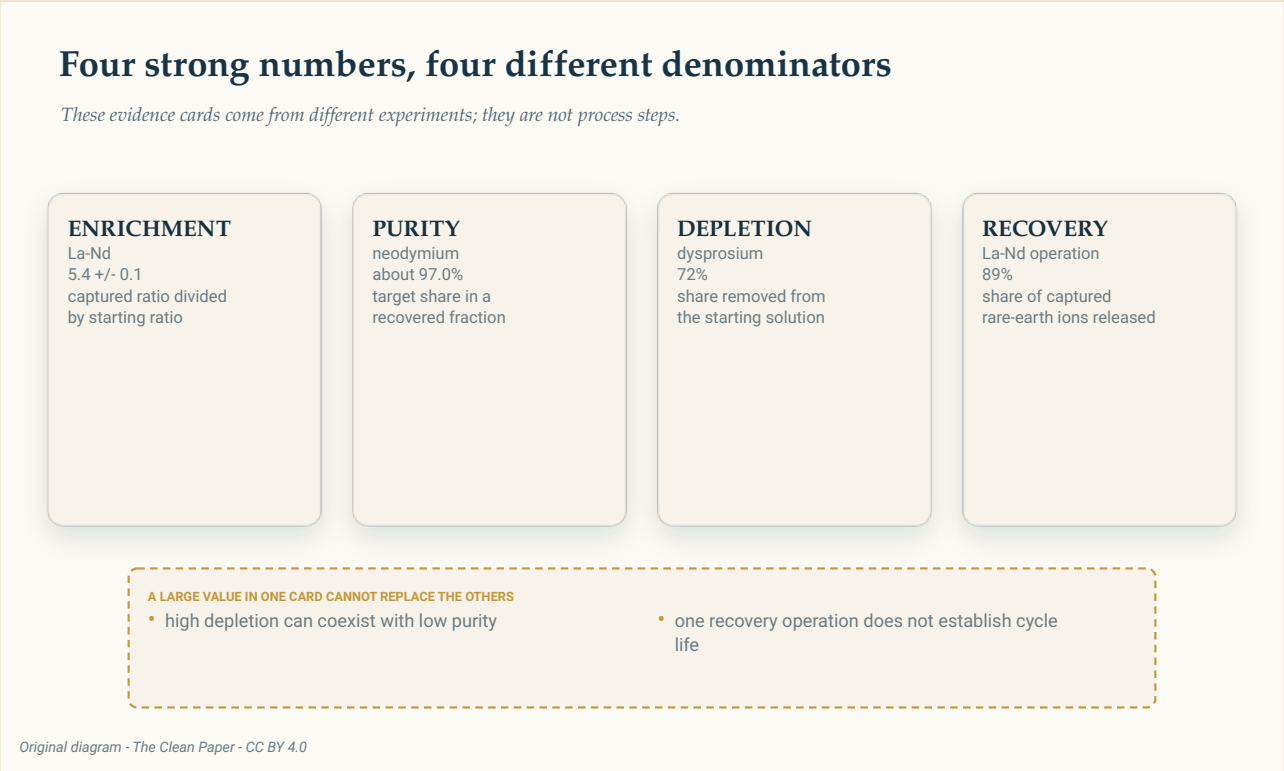
En **separationsfaktor** tar också hänsyn till det som finns kvar i vätskan: den jämför den infångade mängden av varje jon med dess icke-infångade mängd och jämför sedan dessa två balanser. Den kan därför stiga när mer material avlägsnas även om anrikningsfaktorn följer ett annat mönster.

Renhet är andelen av en vald jon i en återvunnen fraktion. Demonstrationer i två steg nådde omkring **97,0 procent neodymrenhet** och **92,3 procent dysprosiumrenhet** längs sina angivna vägar.

Utarmning är den andel som avlägsnas från startlösningen. Åtta successiva tillsatser av 10 milligram pulver avlägsnade **72 procent av dysprosiumet** i ett neodym–dysprosiumprov och gav en ackumulerad separationsfaktor på 10,8.

Återvinning frågar hur mycket av en infångad jon som senare kan frisättas. Omvänt jonbyte återvann **80 procent** i en neodym–dysprosiumoperation. Elektrokemisk borttagning återvann **89 procent** i en lantan–neodymoperation.

Återvinning visar reversibilitet. Den fastställer inte hur många gånger en elektrod kan återanvändas med bibehållen prestanda.



Fyra rapporterade mått använder olika nämnare och kommer från olika experiment. De är separata beläggkort, inte efterföljande steg i en process.

The Clean Paper CC BY 4.0

Varför kan två imponerande procentsatser betyda olika saker?

Anta att en process avlägsnar 90 procent av en jon från startvätskan. Det är hög utarmning. Om många oönskade joner följer med kan det återvunna materialet ändå ha låg renhet. Omvänt kan en mycket ren liten fraktion innebära dålig återvinning om det mesta av måljonen lämnades kvar. En processbedömning behöver alla dessa balanser, inte det största talet.

Den demonstrerade apparaten är fortfarande ett bägarexperiment

De skalinriktade elektrokemiska testen började med **5 milliliter** lösning innehållande 25 millimol per liter av varje jon. Elektroderna bar ungefär **25 till 40 milligram** aktivt material.

En elektrod avlägsnade omkring 40 procent av neodymet. Tre elektroder i serie nådde omkring **90 procents utarmning** och en ackumulerad separationsfaktor på **16,6 +/- 0,4**. Beroende på driftshastigheten varade reaktionerna från **200 minuter till 13 timmar**.

Dimensionerna och tiderna hör hemma i huvudberättelsen eftersom de definierar vad som faktiskt demonstrerades.

Supplementet identifierar också en begränsning i massöverföringen. För ett mål med högre koncentration i bägare uppskattades 50 procents total utarmning kräva en **elektrod på 266 milligram**, eller **532 milligram aktivt material per kvadratcentimeter**. Om så mycket material packades på den lilla elektroden skulle lösta joner få svårt att nå allt. Författarna gick därför över till en mer utspädd lösning i bägarexperimentet.

En hypotetisk flödescell förekommer bara som en projektion. För en antagen cell på 1,25 milliliter med en elektrod på 5 gånger 5 centimeter uppskattar supplementet omkring **20 minuter vid 1C** eller **40 minuter vid 0,5C** för cirka 90 procents utarmning. Något sådant flödescellsförsök rapporteras inte.

Stegen slutar vid en gräns: det finns binära och stegvisa laboratoriebelägg, medan tider i flödescell och miljöprestanda fortfarande är projektioner eller scenarier och inte har demonstrerats i anläggningsskala.

The Clean Paper CC BY 4.0

Miljöjämförelsen är ett scenario, inte ett anläggningsresultat

Den kompletterande livscykelanalysen jämför separationssteg som slutar i sällsynta jordartsoxider och rapporterar insatser per **1 kilogram neodymoxid**.

Den omfattar inte gruvdrift, förbehandling av malm eller en fullständig kommersiell raffineringskedja. Laboratorieprocessen representeras med antaganden sammanställda från flera källor. Elektrodlivslängder på **10, 20 och 100 cykler** är scenario- och känslighetsvärden, inte hållbarhet

uppmätt i studien. Modellen antar att magnesiumåtervinningslösningen kan återanvändas tills dess koncentration förändrats med 10 procent, antar **95 procents vattenåtervinning** och inkluderar kalcinering vid 450–600 grader Celsius i två timmar trots att kalcinering inte demonstrerades experimentellt här.

En **livscykelanalys** redovisar miljöbelastningar inom en angiven systemgräns. Svaret är bara så brett som gränsen och så tillförlitligt som inventeringen och skalantagandena.

Analysen kan identifiera var energi, material och återanvändning spelar roll. Den kan inte visa att en kommersiell version skulle ha mindre miljöpåverkan än industriell lösningsmedelsextraktion.

En mekanism, en plattform och en lång teknisk väg

Artikeln visar att avståndet och den kemiska miljön i ett hydratiserat skiktat fast ämne medvetet kan styras för att förbättra utvalda lantanoidseparationer. Magnesiumstagningen gjorde mer än att lägga till ännu ett kemiskt bindningsställe: den begränsade strukturen som de vattenomslutna jonerna måste röra sig genom.

Resultatet öppnar praktiska frågor. Överlever prestandan i verkliga malmbaserade blandningar? Kan elektroder tillverkas med en fungerande massbelastning? Hur stabil är manganoxiden genom många cykler av införande och frisättning? Kan en kontinuerlig cell upprätthålla selektivitet, genomströmning och vattenbalans? Hur ser miljöjämförelsen ut med uppmätta inventeringar från pilotskala?

Experimentet besvarar inte frågorna. Det gör dem mer konkreta.

Prestationen är inte ett färdigt raffinaderi för sällsynta jordartsmetaller. Den är belägg för att några ångström av kontrollerat, vattenfyllt utrymme kan förändra en svår separation.

Kort sammanfattning

Forskarna använde hydratiserad skiktad manganoxid för att separera utvalda par av lantanoidjoner i vatten. Materialets fria springa var omkring 6,8–6,9 ångström, nära den rapporterade diametern på 6,6–7,1 ångström för jonernas första hydratiseringsskal. Kvarhållet magnesium hjälpte till att spänna fast kanalen och förbättrade parspecificerad anrikning, bland annat lantan–neodym från 1,6 till 5,4 och lantan–praseodym från 1,5 till 4,2. Studien rapporterade också tester med rikligt förekommande joner, stegvis renhet, successiv utarmning och återvinningsoperationer. Den demonstrerade skalan förblev bägartester med 5 milliliter, 25–40 milligram aktivt material och reaktionstider från 200 minuter till 13 timmar. Tider i flödescell var projektioner, återanvändning under många cykler testades inte och livscykeljämförelsen byggde på antaganden från laboratorieskala. Artikeln stöder en instängningsmekanism och en laboratorieplattform, inte en industriell ersättning för lösningsmedelsextraktion.

Rakt på sak

Vad artikeln visar: Att hålla en hydratiserad manganoxidspringa nära 6,8–6,9 ångström med kvarhållet magnesium förändrade separationen av utvalda lantanoidpar. Strukturmätningar, elektrokemi och beräkningar stöder en mekanism med instängning, dehydratisering, koordinering och bindning.

Vad som presterade bäst: Under angivna förhållanden nådde anrikningen lantan–neodym 5,4 +/- 0,1 och lantan–praseodym 4,2 +/- 0,1. Andra par gav andra värden. Separata experiment rapporterade renhet, utarmning och återvinning med olika nämnare.

Vad den inte visar: En universell separator för alla sällsynta jordartsmetaller; drift på en fullständig malmström; en demonstrerad kontinuerlig flödescell; hållbara elektroder över många cykler; ersättning av lösningsmedelsextraktion; eller bevisad kommersiell miljööverlägsenhet.

Viktigaste skalbegränsningarna: De demonstrerade testen använde 5 milliliter lösning, omkring 25–40 milligram aktivt material och 200 minuter till 13 timmar. Ett mål med högre koncentration innebar ett massöverföringsproblem på 532 milligram per kvadratcentimeter. Flödestider extrapolerades. Elektrodlivslängd och viktiga återvinningsinsatser i livscykelanalysen var antaganden.

Hur stor tillit bör en allmän läsare ha? Hög tillit till de rapporterade laboratoriemätningarna för de namngivna paren och förhållandena. Måttlig tillit till den föreslagna molekylära tolkningen, eftersom den kombinerar direkt struktur och elektrokemi med beräkningar. Låg tillit till att nuvarande data förutsäger industriell genomströmning, livslängd eller miljöprestanda.

Källor

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