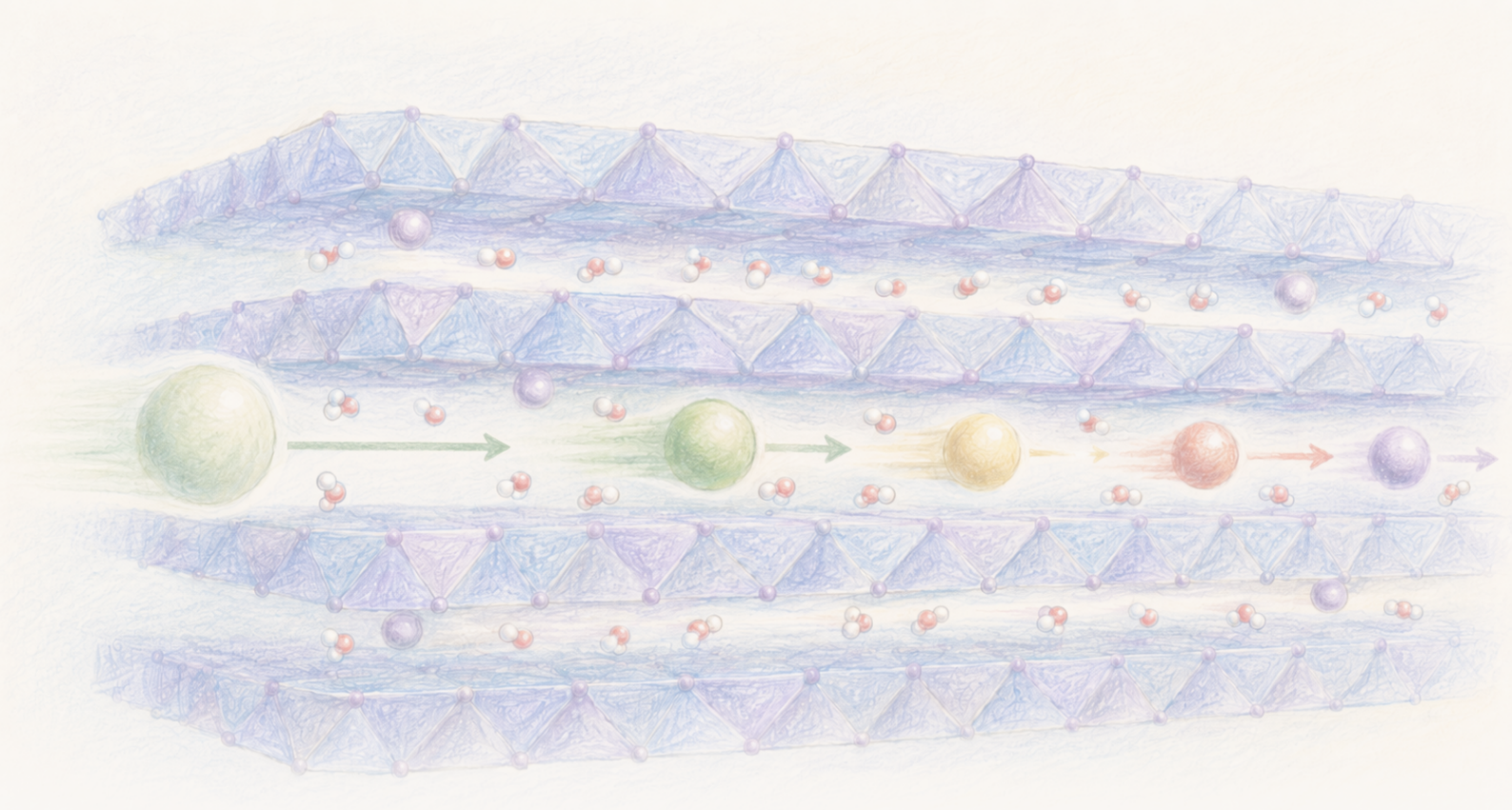


The Clean Paper

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

Kufungia upana wa njia ya madini iliyojaa maji kulisaidia kutenganisha ioni zinazofanana za elementi za ardhi adimu

Magnesiamu ilisaidia kuweka pengo la oksidi ya manganese yenye maji karibu na upana wa ganda la maji la ioni ya lantanoidi na kuboresha urutubishaji wa jozi fulani katika majaribio ya maabara. Kazi iliyoonyeshwa ilitumia mililita za suluhisho na miligramu za nyenzo; uendeshaji wa mtiririko, maisha marefu ya mizunguko na utendaji wa kimazingira katika kiwango cha kibiashara bado havijathibitishwa.

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

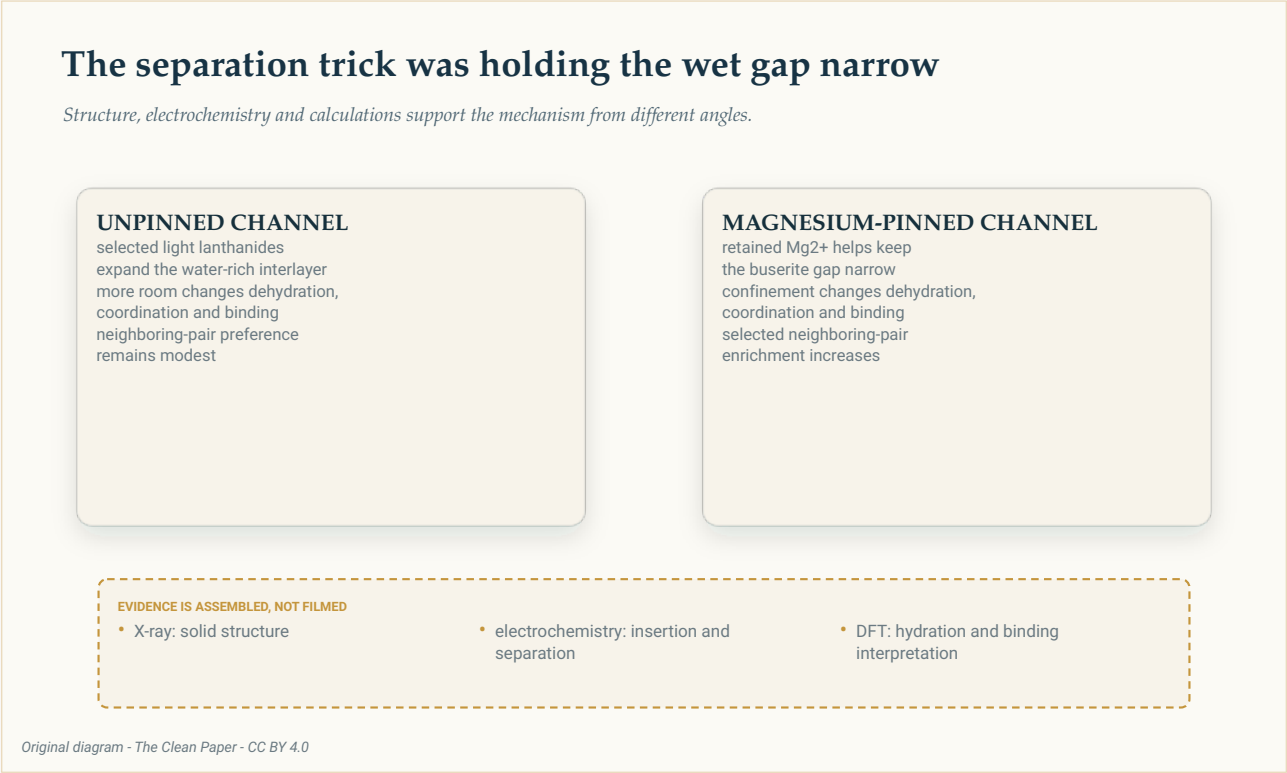
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Kufungia njia ya madini iliyojaa maji kulisaidia kutenganisha ioni zinazofanana za elementi za ardhi adimu

Ioni za elementi za ardhi adimu ni vigumu kutenganisha kwa sababu ileile ambayo ndugu wanaofanana wanaweza kuwa vigumu kutofautishwa ukiwa mbali: tofauti zipo kweli, lakini ni ndogo.

Lantanoidi hukaa karibu na karibu katika jedwali la elementi na kwa kawaida hutengeneza ioni zenye chaji ileile. Ukubwa wao hubadilika taratibu katika mfululizo, huku tabia zao za kikemia zikibaki kufanana. Kwa hiyo usafishaji wa viwandani hutegemea hatua nyingi za utenganishaji zinazorudiwa.

Utafiti mpya wa maabara ulikaribia tatizo hilo kwa kutumia nafasi finyu. Watafiti walitumia tabaka zilizopangwa za oksidi ya manganese zenye pengo lililojaa maji kati yake. Ioni ya elementi ya ardhi adimu inapokaribia pengo hili huwa imezungukwa na molekuli za maji. Bila kitu cha kulishikilia, tabaka zinaweza kuachana ili kuipa nafasi. Ioni za magnesiamu zilitenda kama tegemeo: zilipobaki kati ya tabaka, zilisaidia kuweka pengo kuwa jembamba. Ioni tofauti za elementi za ardhi adimu zililazimika kulipa gharama tofauti za nishati ili kuondoa sehemu ya maji, kuingia kwenye njia na kujifunga kwa atomi za oksijeni katika yabisi.



Njia isiyofungiwa na ile iliyofungiwa kwa magnesiamu ni tafsiri za utaratibu unaoungwa mkono na muundo, elektrokemia na hesabu. Hakuna jaribio moja lililotazama mfuatano mzima wa molekuli moja kwa moja.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kwa jozi moja iliyojaribiwa, lanthanum na neodymium, **kufungia (pinning)** huku kuliongeza kipengele cha urutubishaji kutoka 1.6 hadi **5.4**. Kwa lanthanum na praseodymium, kiliongezeka kutoka 1.5 hadi **4.2**. Kipengele cha urutubishaji hulinganisha uwiano wa ioni mbili baada ya utenganishaji na

uwiano wao kabla ya utenganishaji. Thamani ya 1 ingemaanisha hakuna upendeleo; 5.4 inamaanisha nyenzo iliyokamatwa ilipendelea neodymium kuliko lanthanum mara 5.4 zaidi ya mchanganyiko wa mwanzo.

Haya ni matokeo ya maabara yenye maana kwa jozi maalumu. Si ushahidi kwamba kila elementi ya ardhi adimu sasa inaweza kutenganishwa kwa usafi, kwamba mchakato wa mtiririko umeonyeshwa au kwamba uchimbaji kwa viyeyusho unaweza kubadilishwa.

Wazo lenye nguvu zaidi katika makala ni dogo kuliko kiwanda cha kusafisha madini: zuia pengo la madini lenye maji lisifunguke.

Ioni ndani ya maji ni kubwa kuliko atomi tupu

Elementi za ardhi adimu zinajumuisha lantanoidi pamoja na scandium na yttrium. Utafiti ulijaribu ioni kumi na mbili za lantanoidi zenye chaji chanya kutoka lanthanum hadi ytterbium. Cerium iliondolewa kwa sababu hubadilisha hali yake ya oksidishaji kwa urahisi, na promethium yenye mionzi pia haikutumiwa.

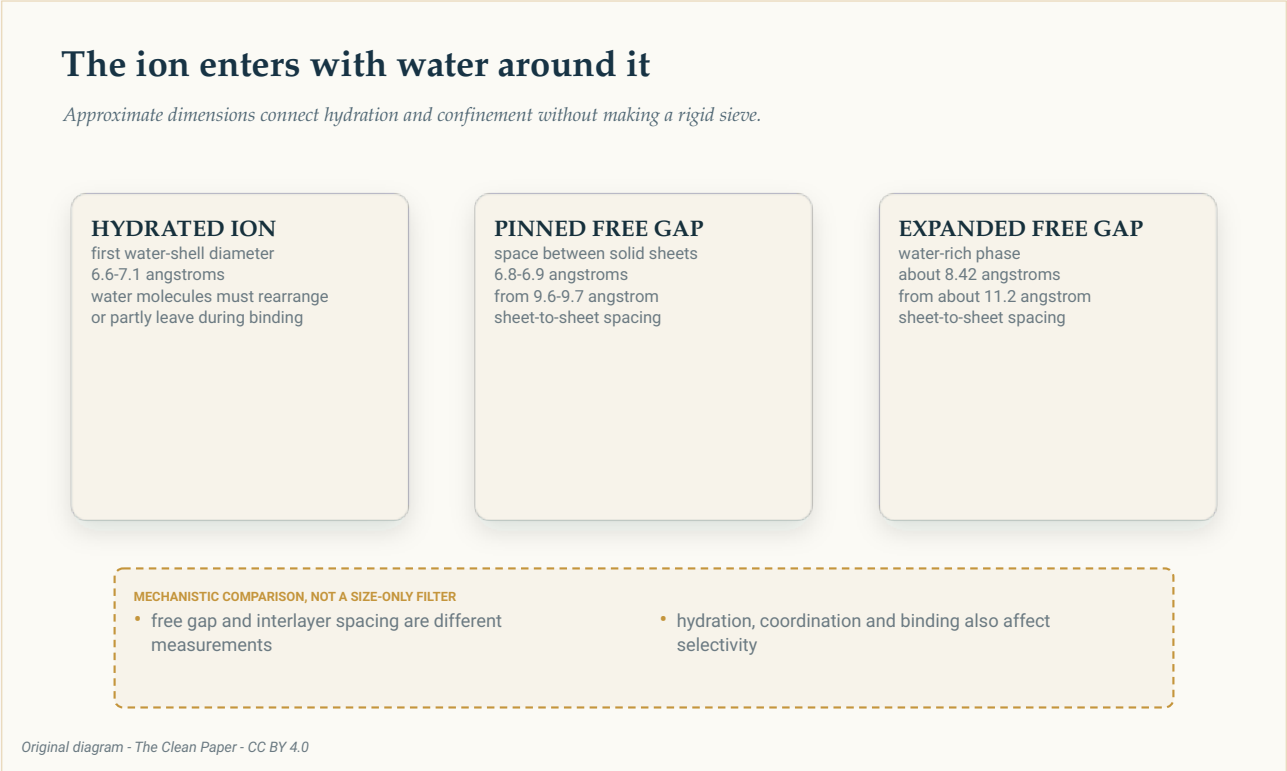
Ndani ya maji, ioni haisafiri peke yake. Molekuli za maji hujipanga kuzunguka chaji yake na kuunda **ganda la maji (hydration shell)**. Ili kuingia kwenye njia nyembamba na kujifunga kwa yabisi, ioni inaweza kuhitaji kupanga upya au kuondoa sehemu ya tabaka hilo la maji. Gharama ya nishati hutegemea ioni yenyewe na mazingira yake.

Vipimo vimetolewa kwa **angstrom (Å)**. Angstrom moja ni sehemu moja ya bilioni kumi ya mita (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Maganda ya kwanza ya maji ya lantanoidi zilizojaribiwa yaliripotiwa kuwa na upana wa takriban **6.6 hadi 7.1 Å**.

Watafiti walitumia oksidi ya manganese yenye tabaka na maji inayoitwa buserite. Tabaka zake zilizopangwa zilikuwa na umbali wa takriban **angstrom 9.6 hadi 9.7** kutoka nafasi moja ya tabaka inayojirudia hadi inayofuata. Lakini tabaka lenyewe linachukua nafasi. Pengo huru lililojaa maji kati ya tabaka lilikuwa takriban **angstrom 6.8 hadi 6.9** pekee.

Tofauti hiyo ni muhimu. Umbali wa angstrom 9.7 kati ya tabaka si njia wazi ya angstrom 9.7.

Baadhi ya lantanoidi nyepesi zilisababisha muundo kupanuka kuwa hali yenye maji mengi zaidi. Hapo umbali kutoka tabaka hadi tabaka ulikuwa takriban **angstrom 11.2** na pengo huru lilikadiriwa kuwa takriban **angstrom 8.42**. Muundo unaohusiana lakini mwembamba zaidi, birnessite, ulikuwa na pengo huru la karibu **angstrom 4.42**.



Ulinganisho ni kati ya kipenyo cha takriban cha ganda la maji na pengo huru lililojaa maji, si kati ya ioni tupu na umbali wote kutoka tabaka moja hadi jingine. Ukubwa ni sehemu ya utaratibu, si maelezo yote.

The Clean Paper CC BY 4.0

Madini yanaweza kujibadilisha kulingana na ioni

Bila kufungiwa na magnesiamu, njia si ungo mgumu: tabaka zake zilizopangwa zinaweza kusogea. Katika majaribio, ioni nyepesi za lanthanum, praseodymium na neodymium zilifanya nyenzo ichukue maji zaidi na kufunguka zaidi. Ioni nzito zaidi kutoka europium hadi ytterbium kwa ujumla ziliacha njia nyembamba ikiwa vilevile. Samarium ilikuwa katikati ya miitikio hiyo miwili.

Makala inaita mwitikio wa kwanza **Group I** na wa pili **Group II**. Hizi ni lebo za jinsi ioni zilivyofanya nyenzo hii maalumu iitikie, si nambari za vikundi katika jedwali la elementi. Mpaka kati yao unaweza pia kubadilika chini ya hali nyingine za majaribio.

Tofauti hiyo ya muundo ilisaidia kwa jozi zinazovuka makundi. Katika ubadilishanaji wa ioni wa moja kwa moja, kipengele cha urutubishaji kilichoripotiwa kilikuwa **7.8** kwa lanthanum dhidi ya dysprosium, **5.7** kwa praseodymium dhidi ya dysprosium, **4.5** kwa neodymium dhidi ya dysprosium na **2.6** kwa neodymium dhidi ya europium.

Jozi nyingi za jirani zilikuwa ngumu zaidi, zikiwa na vipengele vya urutubishaji karibu na 1.1. Kipengele karibu na 1 humaanisha upendeleo mdogo. Nyenzo iliweza kutofautisha kwa urahisi zaidi pale ioni mbili zilipopendelea miundo tofauti ya njia kuliko zilipokuwa karibu katika kundi lilelile la mwitikio.

Magnesiamu huifungia njia

Kisha watafiti walitumia **uingizaji wa ioni kati ya tabaka kwa njia ya elektrokemia (electrochemical intercalation)**: mwitikio wa umeme unaoingiza ioni kati ya tabaka za yabisi. Ioni za magnesiamu zilibaki ndani ya njia ioni za elementi za ardhi adimu zilipoingia. Magnesiamu iliyobaki ilisaidia kuzuia nafasi ya buserite isipanuike.

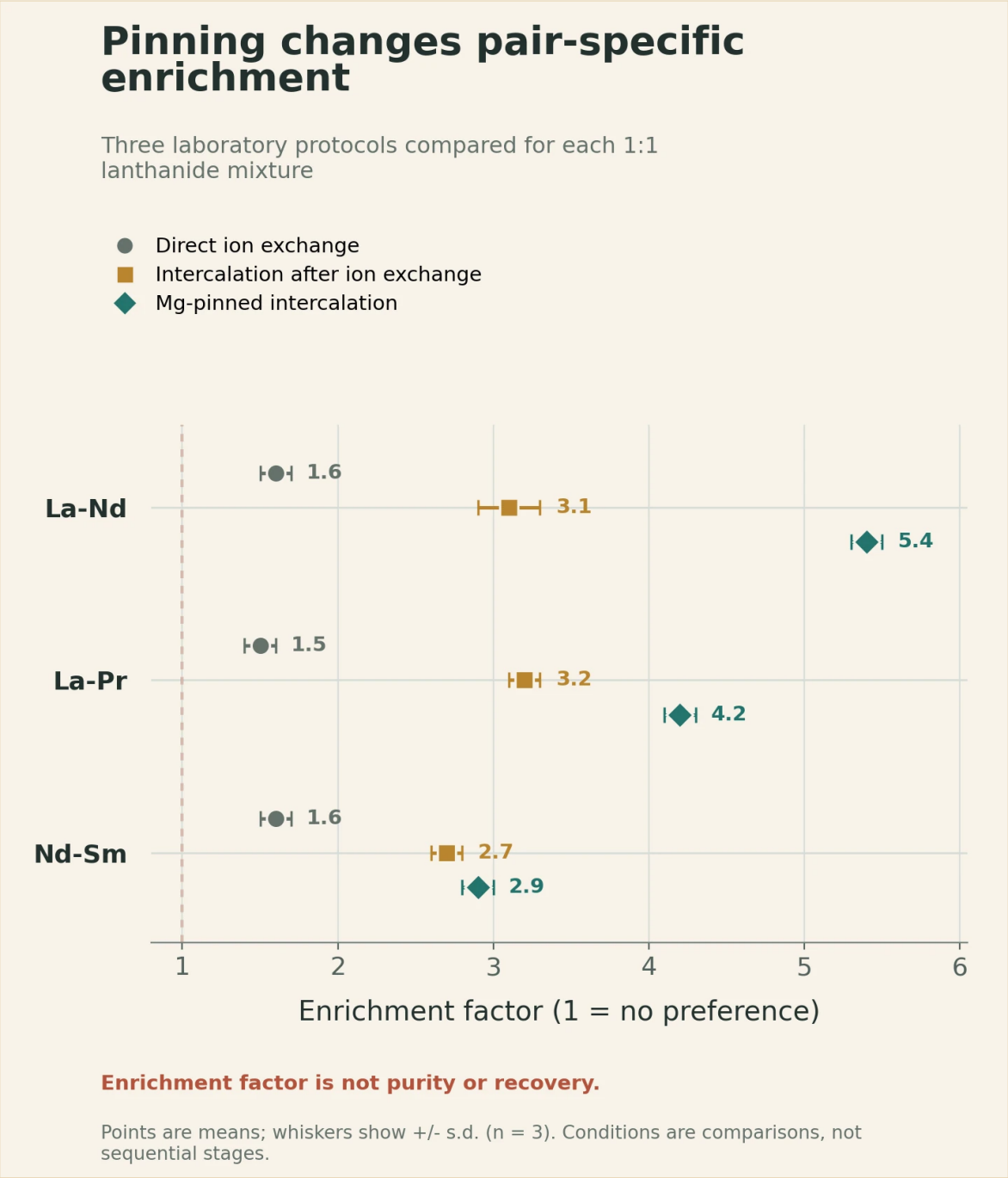
Ndani ya pengo hilo jembamba lenye maji, ioni iliyoingia ikiwa imezungukwa na maji ina nafasi ndogo zaidi. Utaratibu unaopendekezwa unachanganya kufungiwa katika nafasi finyu, kuondoa sehemu ya maji, coordination na kujifunga. **Coordination** hapa humaanisha atomi zilizo karibu, mara nyingi oksijeni, ambazo huzunguka ioni moja kwa moja na kuingiliana nayo.

Ushahidi unatoka katika aina kadhaa za kazi. Vipimo vya X-ray vilifuatilia muundo wa yabisi. Majaribio ya elektrokemia yalipima uingizaji na utenganishaji. **Nadharia ya utendakazi wa msongamano (density functional theory)**, hesabu ya kimekanika ya kwanta, ililinganisha miundo, uwekaji wa maji na kujifunga. Hesabu hizo husaidia kutafsiri utaratibu; si filamu ya moja kwa moja ya ioni moja ikisafiri kupitia njia.

Wala utaratibu si rahisi kama “ioni ndogo hupita, kubwa huzuiwa.” Ganda la maji, jinsi tabaka zinavyoitikia, gharama ya kuondoa maji na jinsi ioni inavyoratibiwa na yabisi vyote vinachangia.

Kufungia kuliboresha jozi fulani za jirani

Mabadiliko makubwa zaidi yaliyoangaziwa yalikuwa kwa lanthanum na neodymium: urutubishaji ulipanda kutoka **1.6 +/- 0.1** bila kufungia hadi **5.4 +/- 0.1** baada ya kufungia kwa magnesiamu. Lanthanum dhidi ya praseodymium ilipanda kutoka **1.5 +/- 0.1** hadi **4.2 +/- 0.1**. Neodymium dhidi ya samarium ilipanda kutoka **1.6 +/- 0.1** hadi **2.9 +/- 0.1**.



Kila mstari unalinganisha itifaki tatu tofauti za maabara, si hatua zinazofuatana za mchakato mmoja. Kipengele cha 1 humaanisha hakuna upendeleo; thamani kubwa zinaonyesha urutubishaji wenye nguvu zaidi kwa jozi maalumu. Nukta zinaonyesha wastani na mistari ya makosa inaonyesha +/- mkengeuko sanifu (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Katika pH 2, thamani ya lanthanum-neodymium ilikuwa **5.6 +/- 0.2**. Kuongeza kasi ya umeme mara tano, kutoka 0.1C hadi 0.5C, kuliishusha kutoka **5.4 +/- 0.1** hadi **4.3 +/- 0.4**. C-rate hulinganisha mkondo wa umeme uliotumika na uwezo wa nyenzo. Kasi kubwa huwapa ioni na yabisi muda mfupi zaidi wa kuitikia.

Hakuna thamani moja inayoeleza nyenzo katika hali zote. Urutubishaji hutegemea jozi, muundo wa yabisi, asidi na kasi ya uendeshaji.

Makala pia iliijaribu nyenzo mbele ya ioni nyingi ambazo si za elementi za ardhi adimu. Mchanganyiko wa mwanzo ulikuwa na ioni moja ya elementi ya ardhi adimu kwa kila ioni 1,000 zinazoshindana. Thamani za uteuzi zilizoripotiwa zilikuwa takriban **1,200** dhidi ya sodiamu, **6,500** dhidi ya kalsiamu na **1,700** dhidi ya magnesiamu.

Huo ni ushahidi wenye manufaa kwamba ioni za kawaida hazizidi moja kwa moja uwezo wa utenganishaji chini ya hali hizi za maabara. Si jaribio la kimiminika kamili kinachotokana na madini ghafi chenye metali, asidi na vichafuzi vyake vyote.

Urutubishaji, utenganishaji, usafi, upunguzaji na urejeshaji ni matokeo tofauti

Vipimo kadhaa vya utendaji vinaonekana katika makala, na haviwezi kubadilishwa kimoja kwa kingine.

Kipengele cha urutubishaji hulinganisha uwiano wa ioni mbili baada ya utenganishaji na uwiano wao kabla ya utenganishaji. Thamani ya 5.4 humaanisha nyenzo iliyokamatwa ilipendelea mmoja wa jozi hiyo mara 5.4 zaidi kuliko mchanganyiko wa mwanzo.

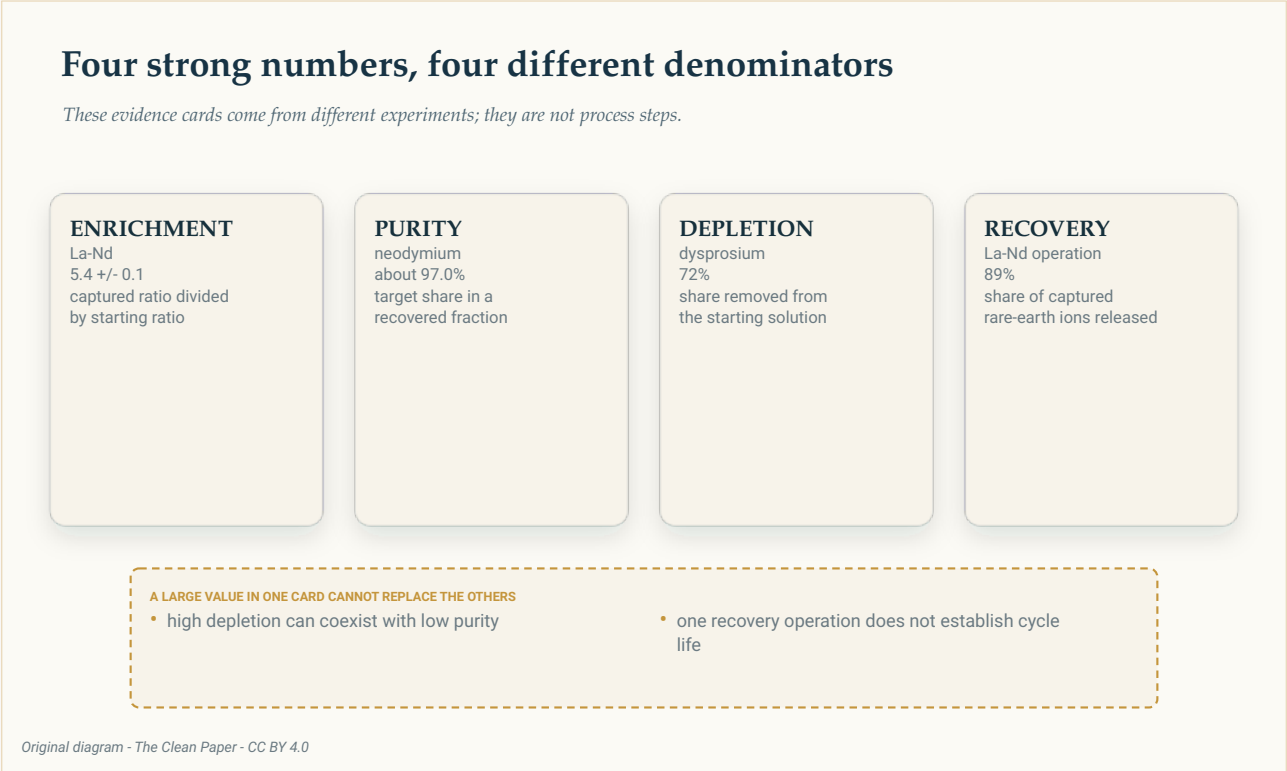
Kipengele cha utenganishaji pia huhesabu kile kinachobaki kwenye kioevu: hulinganisha kiasi kilichokamatwa cha kila ioni na kiasi chake kisichokamatwa, kisha hulinganisha mizani hiyo miwili. Kwa hiyo kinaweza kuongezeka kadiri nyenzo zaidi inavyoondolewa hata ikiwa kipengele cha urutubishaji kinafuata mwenendo tofauti.

Usafi ni sehemu ya ioni iliyochaguliwa katika sehemu iliyorejeshwa. Maonyesho ya hatua mbili yalifikia takriban **97.0% ya usafi wa neodymium** na **92.3% ya usafi wa dysprosium** katika njia zao maalumu.

Upunguzaji ni sehemu iliyoondolewa kutoka suluhisho la mwanzo. Ongezeko nane mfululizo za miligramu 10 za unga ziliondoa **72% ya dysprosium** katika jaribio la neodymium-dysprosium na kutoa kipengele cha utenganishaji kilichokusanywa cha 10.8.

Urejeshaji huuliza ni kiasi gani cha ioni iliyokamatwa kinaweza kutolewa baadaye. Ubadilishanaji wa ioni wa kinyume ulirejesha **80%** katika jaribio moja la neodymium-dysprosium. Uondoaji kwa elektrokemia ulirejesha **89%** katika jaribio la lanthanum-neodymium.

Urejeshaji unaonyesha kwamba mchakato unaweza kurudishwa nyuma. Hauonyeshi ni mara ngapi elektrodu inaweza kutumiwa tena huku ikihifadhi utendaji.



Vipimo vinne vilivyoripotiwa vina viashiria vya chini tofauti na vinatoka katika majaribio tofauti. Ni kadi za ushahidi, si hatua zinazofuatana za mchakato mmoja.

The Clean Paper CC BY 4.0

> **Kwa nini asilimia mbili zinazovutia zinaweza kumaanisha mambo tofauti?**
>
> Tuseme mchakato unaondoa 90% ya ioni moja kutoka kioevu cha mwanzo. Huo ni upunguzaji mkubwa. Ikiwa ioni nyingi zisizotakiwa zinaondoka pamoja nayo, nyenzo iliyorejeshwa bado inaweza kuwa na usafi mdogo. Kinyume chake, sehemu ndogo iliyo safi sana inaweza kuwakilisha urejeshaji hafifu ikiwa sehemu kubwa ya lengo iliachwa nyuma. Tathmini ya mchakato inahitaji mizani yote hii, si nambari kubwa zaidi.

Kifaa kilichoonyeshwa bado ni jaribio la beaker

Majaribio ya elektrokemia yanayolenga kiwango yalianza na **mililita 5** za suluhisho lenye millimole 25 kwa lita ya kila ioni. Elektrodu zilibeba takriban **miligramu 25 hadi 40** za nyenzo hai.

Elektrodu moja iliondoa takriban 40% ya neodymium. Elektrodu tatu zilizotumiwa mfululizo zilifikia takriban **90% ya upunguzaji** na kipengele cha utenganishaji kilichokusanywa cha **16.6 +/- 0.4**. Kutegemea kasi ya uendeshaji, miitikio ilidumu kutoka **dakika 200 hadi saa 13**.

Vipimo na muda huo vinafaa kuwa sehemu ya simulizi kuu kwa sababu vinafafanua kile kilichoonyeshwa kwa vitendo.

Kiambatisho pia kinatambua kikomo cha uhamishaji wa massa. Kwa lengo la beaker lenye mkusanyiko mkubwa zaidi, kufikia upunguzaji wa jumla wa 50% kulikadiriwa kuhitaji **elektrodu ya miligramu 266**, au **miligramu 532 za nyenzo hai kwa sentimita ya mraba**. Kupakia kiasi hicho cha nyenzo kwenye elektrodu ndogo kungefanya iwe vigumu kwa ioni zilizoyeyushwa kufika kwenye nyenzo zote. Kwa hiyo waandishi walihamia kwenye suluhisho lililochanganywa zaidi na maji kwa jaribio la beaker.

Seli ya mtiririko ya kinadharia inaonekana tu kama makadirio. Kwa seli inayodhaniwa kuwa na mililita 1.25 na elektrodu ya sentimita 5 kwa 5, kiambatisho kinakadiria takriban **dakika 20 katika 1C** au **dakika 40 katika 0.5C** kwa karibu 90% ya upunguzaji. Hakuna jaribio kama hilo la seli ya mtiririko linaloripotiwa.

Ngazi inaishia kwenye mpaka: kuna ushahidi wa maabara kwa jozi na hatua kadhaa, huku muda wa seli ya mtiririko na utendaji wa kimazingira ukiwa bado makadirio au matokeo ya hali za mfano badala ya maonyesho katika kiwango cha kiwanda.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ulinganisho wa mazingira ni hali ya mfano, si tokeo la kiwanda

Tathmini ya ziada ya mzunguko wa maisha inalinganisha hatua za utenganishaji zinazoishia kwenye oksidi za elementi za ardhi adimu na kuripoti pembejeo kwa kila **kilo 1 ya oksidi ya neodymium**.

Haijumuishi uchimbaji wa madini, matayarisho ya awali ya ore wala mnyororo kamili wa kibiashara wa usafishaji. Mchakato wa maabara unawakilishwa kwa kutumia dhana zilizokusanywa kutoka vyanzo mbalimbali. Maisha ya elektrodu ya **mizunguko 10, 20 na 100** ni thamani za hali ya mfano na uchanganuzi wa unyeti, si uimara uliopimwa katika utafiti huu. Mfano hudhani kwamba suluhisho la kurejesha magnesiamu linaweza kutumiwa tena hadi mkusanyiko wake ubadilike kwa 10%, hudhani **95% ya maji yanarejelewa**, na unajumuisha kuchomwa kwa joto la nyuzi 450-600 Celsius kwa saa mbili ingawa hatua hiyo haikuonyeshwa kwa majaribio hapa.

Tathmini ya mzunguko wa maisha huhesabu mizigo ya mazingira ndani ya mpaka maalumu wa mfumo. Jibu lake ni pana kadiri mpaka huo ulivyo na linaaminika kadiri orodha yake ya pembejeo na dhana za kiwango zinavyoaminika.

Uchanganuzi unaweza kutambua ni wapi nishati, nyenzo na matumizi tena vina umuhimu. Hauwezi kuthibitisha kwamba toleo la kibiashara lingekuwa na athari ndogo ya mazingira kuliko uchimbaji wa viyeyusho wa viwandani.

Utaratibu, jukwaa na safari ndefu ya uhandisi

Makala inaonyesha kwamba nafasi na mazingira ya kikemia ya yabisi yenye tabaka na maji yanaweza kudhibitiwa kimakusudi ili kuboresha utenganishaji wa jozi fulani za lantanoidi. Kufungia kwa magnesiamu hakukuongeza tu eneo lingine la kujifunga kikemia: kulizuia kimuundo pengo ambalo ioni zilizozungukwa na maji zililazimika kupitia.

Tokeo hilo linafungua maswali ya vitendo. Je, utendaji unaweza kustahimili mchanganyiko halisi unaotokana na ore? Je, elektrodu zinaweza kutengenezwa kwa mzigo wa massa unaofanya kazi? Oksidi ya manganese ni thabiti kiasi gani baada ya mizunguko mingi ya kuingiza na kutoa? Je, seli endelevu inaweza kudumisha uteuzi, kiwango cha kupitia nyenzo na mizani ya maji? Ulinganisho wa mazingira unaonekanaje ukiwa na orodha za pembejeo zilizopimwa katika kiwango cha majaribio ya kiwandani?

Jaribio halijibu maswali hayo. Linafanya yawe mahususi zaidi.

Mafanikio si kiwanda kilichokamilika cha kusafisha elementi za ardhi adimu. Ni ushahidi kwamba angstrom chache za nafasi iliyojaa maji na kudhibitiwa zinaweza kubadilisha utenganishaji mgumu.

Muhtasari safi

Watafiti walitumia oksidi ya manganese yenye tabaka na maji kutenganisha jozi fulani za ioni za lantanoidi katika maji. Pengo huru la nyenzo lilikuwa takriban angstrom 6.8-6.9, karibu na kipenyo kilichoripotiwa cha angstrom 6.6-7.1 cha ganda la kwanza la maji la ioni. Magnesiamu iliyobaki ilisaidia kufungia njia na kuboresha urutubishaji wa jozi maalumu, ikiwemo lanthanum-neodymium kutoka 1.6 hadi 5.4 na lanthanum-praseodymium kutoka 1.5 hadi 4.2. Utafiti pia uliripoti majaribio dhidi ya ioni nyingi za kawaida, usafi wa hatua kadhaa, upunguzaji wa mfululizo na urejeshaji. Kiwango kili-

choonyeshwa kilibaki majaribio ya beaker ya mililita 5 yenye miligramu 25-40 za nyenzo hai na muda wa mwitikio kutoka dakika 200 hadi saa 13. Muda wa seli ya mtiririko ulikadiriwa, matumizi tena kwa mizunguko mingi hayakujaribiwa, na ulinganisho wa mzunguko wa maisha ulitegemea dhana za kiwango cha maabara. Makala inaunga mkono utaratibu wa nafasi finyu na jukwaa la maabara, si mbadala wa viwandani wa uchimbaji kwa viyeyusho.

Ukaguzi bila chumvi

Makala inaonyesha nini: Kuweka pengo la oksidi ya manganese yenye maji karibu na angstrom 6.8-6.9 kwa kutumia magnesiamu iliyobaki kulibadilisha utenganishaji wa jozi fulani za lantanoidi. Vipimo vya muundo, elektrokemia na hesabu vinaunga mkono utaratibu unaohusisha nafasi finyu, kuondoa sehemu ya maji, coordination na kujifunga.

Ni nini kilifanya vizuri zaidi: Chini ya hali maalumu, urutubishaji wa lanthanum-neodymium ulifikia 5.4 +/- 0.1 na lanthanum-praseodymium 4.2 +/- 0.1. Jozi nyingine zilikuwa na thamani tofauti. Majaribio tofauti yaliripoti usafi, upunguzaji na urejeshaji, ambazo hutumia viashiria vya chini tofauti.

Haionyeshi nini: Kitenganishi cha jumla kwa elementi zote za ardhi adimu; uendeshaji kwenye mkondo kamili kutoka ore; seli endelevu ya mtiririko iliyojaribiwa; elektrodu zenye uimara wa mizunguko mingi; kubadilisha uchimbaji kwa viyeyusho; au ubora wa kimazingira wa kibiashara uliothibitishwa.

Mipaka mikuu ya kiwango: Majaribio yaliyoonyeshwa yalitumia mililita 5 za suluhisho, takriban miligramu 25-40 za nyenzo hai na dakika 200 hadi saa 13. Lengo lenye mkusanyiko mkubwa zaidi lilionyesha tatizo la mzigo wa miligramu 532 kwa sentimita ya mraba. Muda wa mtiririko ulikokotolewa kwa makadirio. Maisha ya elektrodu na pembejeo kuu za urejelezaji katika tathmini ya mzunguko wa maisha zilikuwa dhana.

Msomaji wa kawaida anapaswa kuwa na imani kiasi gani? Imani kubwa katika vipimo vya maabara vilivyoripotiwa kwa jozi na hali zilizotajwa. Imani ya wastani katika tafsiri ya molekuli iliyopendekezwa, kwa sababu inaunganisha muundo wa moja kwa moja na elektrokemia pamoja na hesabu. Imani ndogo kwamba data za sasa zinatabiri kiwango cha kupitia nyenzo, maisha ya kifaa au utendaji wa mazingira wa viwandani.

Vyanzo

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