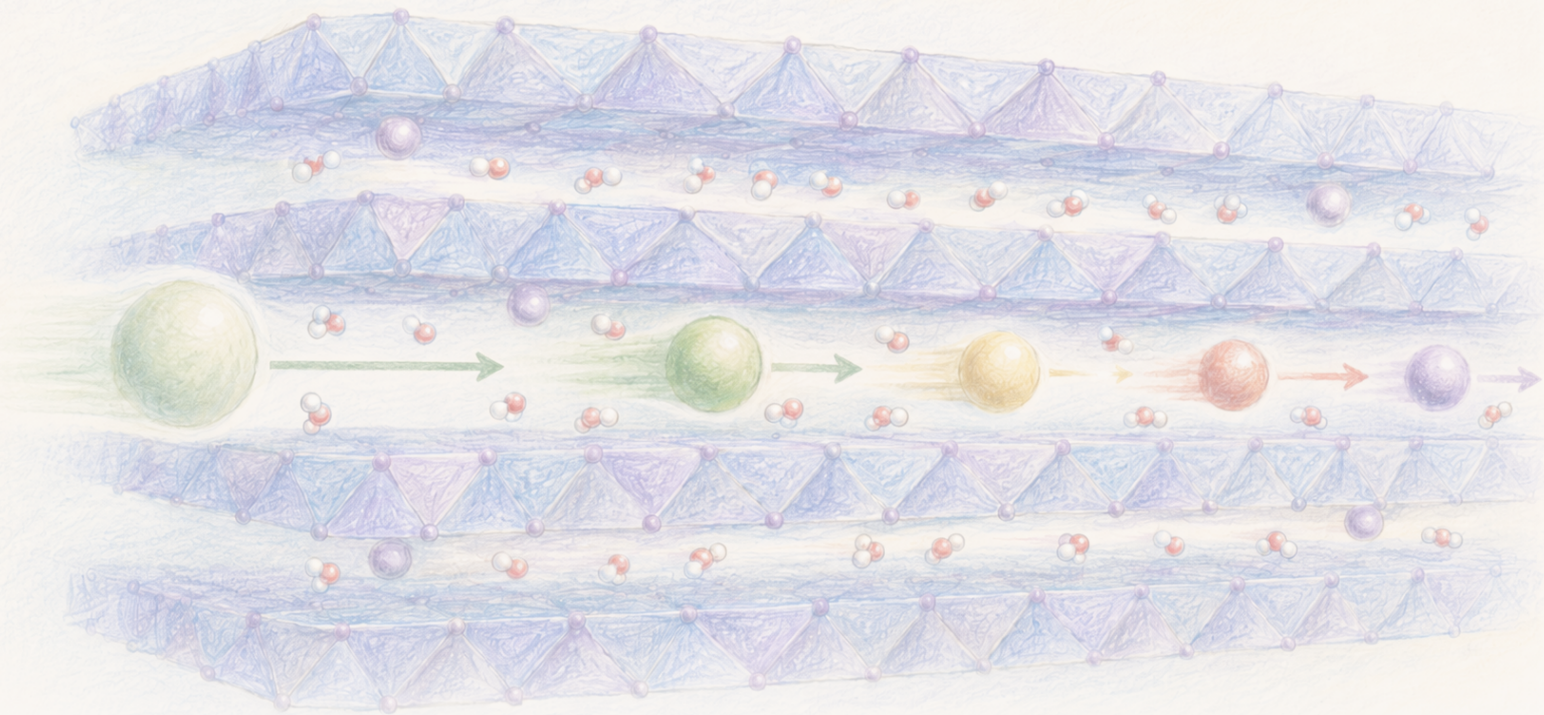




The CLEAN PAPER

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

Dídì ikanni mineral tí omi kún mọ iwọn kan ràn lówó láti ya àwọn ion rare-earth tó jọra sọtò

Magnesium dī ààyè hydrated manganese-oxide mọ iwọn tó sun mọ water shell ion lanthanide, ó sì mú enrichment àwọn bata kan dára sí i nínú test yàrá. Iṣẹ tí a fi hàn lo millilitre solution àti milligram material; flow operation, cycle life gígùn àti environmental performance commercial kò tū jẹ mímu dájú.

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

Dídì ikanni mineral tí omi kún mọ iwọn kan ràn lówọ láti ya àwọn ion rare-earth tó jọra sọtò

Àwọn ion rare-earth sòro láti ya sọtò fún ìdì kan náà tí ó fi lẹ̀ sòro láti mọ àwọn ará ìdílẹ̀ méjì tó jọra láti ọ̀nà jìjìn: ìyàtò náà wà ní tòótọ́, sùgbọ́n ó kéré.

Àwọn lanthanide jókódó lẹgbẹ̀ẹ̀ ara wọn nínú periodic table, wọn sì sáà maa ní dá ion tí charge rẹ̀ dọ́gba sílẹ̀. Iwọn wọn ní yí díẹ̀díẹ̀ kojá jara náà, nígbà tí iwà kemistri wọn sì jọra. Nítorí náà, refining ilé-iṣẹ̀ gbẹ̀kẹ̀ lẹ̀ ọ̀pọ̀ ìgbésẹ̀ iyapa tí a ní tún ẹ̀ lẹ̀ẹ̀kan sí i.

Ìwádìí yàrá tuntun kan dojú kọ̀ ìṣòro náà pèlú **confinement** — fífi àyè tí ion lẹ̀ gbé dín kù. Àwọn olùṣèwádìí lo àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ̀ manganese oxide tí wọn kó sọ́rì ara wọn, pèlú àyè tí omi kún láàárín wọn. Ion rare-earth kan maa ní sún mọ̀ àyè yìi pèlú àwọn molíkúlù omi tó yí i ká. Bí kò bá sí ohun tí ó dì àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ̀ náà mọ̀, wọn lẹ̀ yà síra kí ion náà lẹ̀ wólẹ̀. Àwọn ion magnesium sìṣẹ̀ bí ohun ìdènà: nígbà tí wọn dúró láàárín àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ̀, wọn ràn lówọ̀ láti jẹ́ kí àyè náà dín. Nígbà náà, àwọn ion rare-earth tó yàtò ní iye agbára tó yàtò láti san kí wọn lẹ̀ yọ̀ apá kan ti omi tó yí wọn ká, wọ̀ ikanni náà, kí wọn sì so mọ̀ àwọn atomu oxygen nínú solid.

The separation trick was holding the wet gap narrow

Structure, electrochemistry and calculations support the mechanism from different angles.

UNPINNED CHANNEL

selected light lanthanides
expand the water-rich interlayer
more room changes dehydration,
coordination and binding
neighboring-pair preference
remains modest

MAGNESIUM-PINNED CHANNEL

retained Mg²⁺ helps keep
the buserite gap narrow
confinement changes dehydration,
coordination and binding
selected neighboring-pair
enrichment increases

EVIDENCE IS ASSEMBLED, NOT FILMED

- X-ray: solid structure
- electrochemistry: insertion and separation
- DFT: hydration and binding interpretation

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Ikanni tí a kò dì mọ̀ àti ikanni tí magnesium dì mọ̀ jẹ́ ìtumọ̀ ọ̀nà ìṣẹ̀ tí ìṣètò, electrochemistry àti calculation ní ẹ̀ ìtílẹ̀yìn fún. Kò sí idánwò kan soṣo tó wo gbogbo itẹ̀sí molíkúlù náà láti ìbèrẹ̀ dé ọ̀pín.

The Clean Paper CC BY 4.0

Fún bata kan tí wọn dán wò, lanthanum àti neodymium, **pinning** yìi mú enrichment factor pọ̀ láti 1.6 sí **5.4**. Fún lanthanum àti praseodymium, ó gòkè láti 1.5 sí **4.2**. Enrichment factor ní fi ìpín àwọn ion méjèèjì lẹ̀yìn iyapa wé ìpín wọn ǵáájú iyapa. Iye 1 tùmọ̀ sí pé kò sí ààyò; 5.4 tùmọ̀ sí pé ohun tí a mú yàn neodymium ju lanthanum lọ ní ìlọ́pọ̀ 5.4 ju bí adalu ìbèrẹ̀ ẹ̀ rí lọ.

Àwọn wònyí jẹ abajade yàrá tó ní ìtumò fún àwọn bata pàtó. Wọn kì í ẹ̀rí pé gbogbo rare earth lè jẹ mímọ ní iyapa báyyí, pé a ti fi ilànà flow kan hàn, tàbí pé solvent extraction lè jẹ rirópò.

Èrò tó lágbára jù nínú ìwé ìwádíí nàà kéré ju refinery kan lọ: má jẹ kí ààyè mineral tí omi wà nínú rẹ sí sí i.

Ion nínú omi tóbi ju atomu tí kò ní omi yí ká lọ

Àwọn eroja rare-earth ní àwọn lanthanide pèlú scandium àti yttrium. Ìwádíí nàà dán àwọn ion lanthanide tó ní charge rere mejìlá wò, láti lanthanum dé ytterbium. Wọn yọ cerium kúrò nítorí pé ó rọ̀rùn fún un láti yí oxidation ipò padà, wọn sì yọ promethium radioactive kúrò.

Nínú omi, ion kì í rìn nikan. Àwọn molíkúlù omi máa ní ẹ̀tò ara wọn yí charge rẹ ká láti dá **hydration shell** sílẹ̀. Kí ion lè wọ ikanni kékeré kí ó sì so mó solid kan, ó lè ní láti tún fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ omi yẹn ẹ̀tò tàbí yọ apá kan kúrò. Iye agbára tó ní ná dá lórí ion nàà àti ayika rẹ.

Wọn ní díwọn àwọn ìwọn yí ní **angstrom (Å)**. Angstrom kan jẹ ìdà ọkan nínú bílìọ̀nù mẹwàá ti mita ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$). Iwọn ìwọn kojá àárín hydration shell àkókó ti àwọn lanthanide tí wọn dán wò jẹ nńkan bí **6.6 sí 7.1 Å**.

Àwọn olùṣẹ̀wádíí lo manganese oxide fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ tí omi kún tí a ní pè ní buserite. Àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ tí a kó jọ yà síra ní nńkan bí **9.6 sí 9.7 angstrom**, tí a díwọn láti ibi fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ kan tí ó ní tún ara rẹ ẹ̀ ẹ̀kejì. Ẹ̀gbọ̀n fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ fúnra rẹ gba àyè. Ààyè ọ̀fẹ́ tí omi kún tó wà láàárín àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ jẹ nńkan bí **6.8 sí 6.9 angstrom** nikan.

Ìyàtò yẹn ẹ̀ pàtàkì. Interlayer spacing 9.7 angstrom kì í ẹ̀ ikanni sí 9.7 angstrom.

Diẹ lára àwọn lanthanide fẹ́rẹ́ mú kí ẹ̀tò nàà gbooro sí phase tí omi rẹ pọ sí i. Ní bẹ̀, àyè láti fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ kan sí ẹ̀kejì jẹ nńkan bí **11.2 angstrom**, ààyè ọ̀fẹ́ tí wọn ẹ̀ ẹ̀sírò rẹ sì jẹ nńkan bí **8.42 angstrom**. Structure tó dín sí i tí ó jọra, birnessite, ní ààyè ọ̀fẹ́ tó fẹ́rẹ́ jẹ **4.42 angstrom**.

The ion enters with water around it

Approximate dimensions connect hydration and confinement without making a rigid sieve.

HYDRATED ION

first water-shell diameter
6.6-7.1 angstroms
water molecules must rearrange
or partly leave during binding

PINNED FREE GAP

space between solid sheets
6.8-6.9 angstroms
from 9.6-9.7 angstrom
sheet-to-sheet spacing

EXPANDED FREE GAP

water-rich phase
about 8.42 angstroms
from about 11.2 angstrom
sheet-to-sheet spacing

MECHANISTIC COMPARISON, NOT A SIZE-ONLY FILTER

- free gap and interlayer spacing are different measurements
- hydration, coordination and binding also affect selectivity

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Àfiwé nàà jẹ láàárín iwọn hydration shell tó fẹrẹ tó àti ààyè ọfẹ tí omi kún, kì í ẹ láàárín ion tí kò ní omi yí ká àti gbogbo àyè láti fẹlẹfẹlẹ kan sí èkejì. Iwọn jẹ apá kan ti ọ̀nà iṣẹ, kì í ẹ gbogbo itàn nàà.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineral nàà lè yí ara rẹ sí ion nàà

Làìsí pinning magnesium, ikanni nàà kì í ẹ sieve líle tí kò yí padà: àwọn fẹlẹfẹlẹ tí a kó jọ lè rìn. Nínú idánwò, àwọn ion fẹrẹ lanthanum, praseodymium àti neodymium mú kí ohun èlò nàà gba omi sí i kí ó sì sí gbooro. Àwọn ion tó wuwo láti europium dé ytterbium sáà jẹ kí ikanni dín nàà dúró bó ẹ rí. Samarium wà láàárín ihùwàsí méjèèjì.

ìwé iwádíí nàà pe ihùwàsí àkókó ní **Group I**, èkejì ní **Group II**. Àwọn orúkọ wònyí jẹ label fún bí àwọn ion ẹ mú kí ohun èlò pátó yíi dáhùn, kì í ẹ nǫ̀nbà ẹgbẹ nínú periodic table. Ààlà nàà lè tún yí padà lábẹ condition idánwò mǫ̀ràn.

Ìyàtò iṣètò yẹn ràn lówọ fún àwọn bata tó kojá ẹgbẹ. Nínú taara ion exchange, enrichment factor tí wọn ròyìn jẹ **7.8** fún lanthanum sí dysprosium, **5.7** fún praseodymium sí dysprosium, **4.5** fún neodymium sí dysprosium àti **2.6** fún neodymium sí europium.

Ọ̀pọ̀ àwọn bata aláduúgbò nira púpọ̀ sí i, pèlú enrichment factor tó sun mó 1.1. Factor tó sun mó 1 tùmọ̀ sí ààyò díẹ. Material nàà lè yà wọn mọra rọ̀rùn sí i nígbà tí àwọn ion méjèèjì fẹ iṣètò ikanni tó yàtò ju nígbà tí wọn wà sunmọ ara wọn nínú idáhùn ẹgbẹ kan nàà.

Magnesium ní dì ikanni nàà mó

Léyìn nàà àwọn olùṣèwádíí lo **electrochemical intercalation**: reaction itanna kan tí ní fi ion sínú àárín fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ solid. Àwọn ion magnesium dúró nínú ikanni bí àwọn ion rare-earth ẹ̀ ní wọ́lé. Magnesium tó kù nínú rẹ̀ ràn lówọ́ láti má jẹ́ kí spacing buserite nàà gbooro.

Nínú ààyè omi tó dín yẹn, ion hydrated tó ní wọ́lé ní àyè kékeré. Mechanism tí wọn dabaa kó confinement, partial dehydration, coordination àti binding jọ. **Coordination** tùmọ̀ sí àwọn atomu tó wà nítòsí, nígbà púpọ̀ oxygen, tí ó yí ion ká tààrà tí wọn sì ní bá a ẹ̀ interaction.

Èrí nàà wá láti ọ̀pọ̀ irú ọ̀ṣẹ̀. Ìwọ̀n X-ray topinpin ọ̀ṣẹ̀tò solid. Experiment electrochemical díwọ̀n insertion àti separation. **Density functional àbá-ẹ̀kọ̀**, calculation quantum-mechanical kan, fi ọ̀ṣẹ̀tò, hydration àti binding wé ara wọn. Àwọn calculation nàà ní ràn lówọ́ láti tùmọ̀ ọ̀nà ọ̀ṣẹ̀; wọn kì í ẹ̀ fídíò tààrà tí ion kan tí ní rìn nínú ikanni.

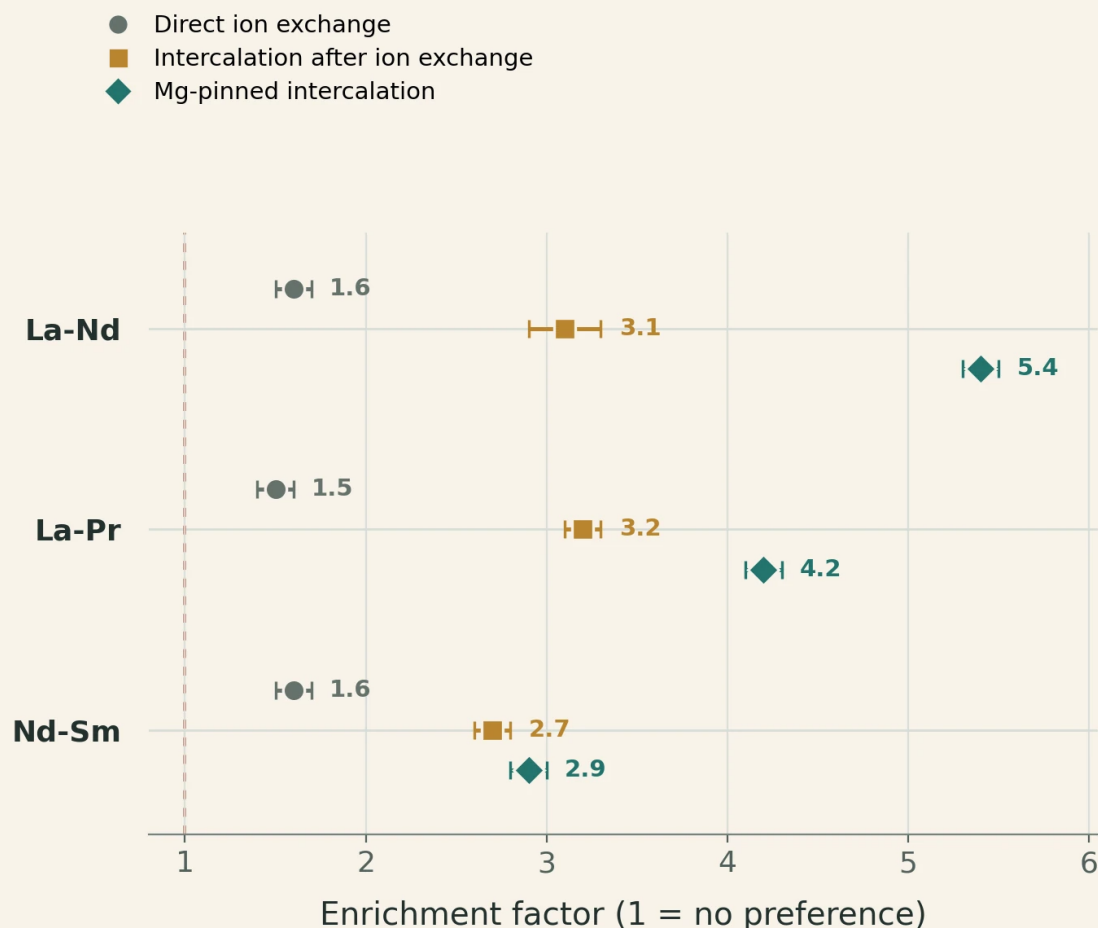
Mechanism nàà kì í ẹ̀ “ion kékeré ní kojá, ion rí lá ní dúró” nikan. Water shell, bí àwọn layer ẹ̀ ní dahun, iye agbára tí dehydration ní ná, àti bí ion ẹ̀ coordinate pèlú solid gbogbo wọn ní ipa.

Pinning mú iyapa diẹ́ lára àwọn bata aládùúgbò dára sí i

Ìyípadà tó ga jù tí iwé iwádíí nàà tẹ̀numọ̀ ni lanthanum àti neodymium: enrichment gòkè láti **1.6 +/- 0.1** láisí pinning sí **5.4 +/- 0.1** pèlú magnesium pinning. Lanthanum sí praseodymium gòkè láti **1.5 +/- 0.1** sí **4.2 +/- 0.1**. Neodymium sí samarium gòkè láti **1.6 +/- 0.1** sí **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 $\pm$ s.d. ($n = 3$). Conditions are comparisons, not sequential stages.

Ìlà kòòkan nì fí yàrá ìdánwò protocol mètà tó yàtò wé ara wọn, kì í ẹ̀ ipele tó n tẹ̀lé ara wọn nínú ìlànà kan. Factor 1 túmọ̀ sí ààyò kankan kò sí; iye tó ga sí i nì fí pair-specific enrichment tó lágbára sí i hàn. Àwọn kókó fí mean hàn, whisker sì fí $\pm$ standard deviation hàn ($n = 3$).

The Clean Paper CC BY 4.0

Ní pH 2, iye lanthanum-neodymium jẹ **5.6 $\pm$ 0.2**. Nígba tí wọn mú rate itanna pọ̀ ní ìlọ̀po márùn-ún, láti 0.1C sí 0.5C, iye náà sòkalẹ̀ láti **5.4 $\pm$ 0.1** sí **4.3 $\pm$ 0.4**. C-rate nì fí current itanna tí a lò wé capacity ohun èlò. Rate tó ga nì fún ion àti solid ní àkókò diẹ̀ láti dahun.

Kò sí iye kan soṣo tó Ẹ̀pẹ̀júwe ohun èlò náà ní gbogbo condition. Enrichment dá lórí bata ion, ìṣètò solid, acidity àti rate iṣẹ́.

ìwé ìwádíí nàà tún dán ohun èlò nàà wò pèlú ọpọ ion tí kì í ẹ rare-earth. Adalu ìbèrẹ ní ion rare-earth kan fún gbogbo ion olùdíje 1,000. Àwọn iye selectivity tí wọn rọ̀yìn jẹ nńkan bí **1,200** lòdì sí sodium, **6,500** lòdì sí calcium àti **1,700** lòdì sí magnesium.

Èyí jẹ ẹrí tó wúlò pé àwọn ion tí ó wọpọ kì í ẹ pé wọn máa bori separation nàà laifowoyi lábẹ condition yàrá wọnyí. Kì í ẹ ìdánwò lórí omi gidí tí a yọ látí ore pèlú gbogbo metal, acidity àti contaminant rẹ.

Enrichment, separation, purity, depletion àti recovery jẹ abajade tó yàtò

Ọpọ metric isẹ hàn nínú ìwé ìwádíí nàà, a kò sì lè fi ọkan rọ̀pọ omí.

Enrichment factor ní fi ìpín ion méjì lẹyìn separation wé ìpín wọn sáájú separation. Iye 5.4 tùmọ sí pé ohun èlò tí a mú fẹ ọkan nínú bata yẹn ju ẹlẹkejì lọ ní ilọpo 5.4 ju adalu ìbèrẹ lọ.

Separation factor tún ka ohun tí ó kù nínú liquid sí: ó ní fi iye ion kọ̀ọkan tí a mú wé iye tí a kò mú, lẹyìn nàà ó fi balance méjèjè wé ara wọn. Nítorí nàà ó lè gòkè bí a ẹ ní yọ ohun èlò sí i, bí enrichment factor tilẹ ní tẹlẹ àpẹrẹ mǐràn.

Purity ni ipin ti ion tí a yan nínú fraction tí a gba padà. Àwọn demonstration ipele méjì dé nńkan bí **97.0% neodymium purity** àti **92.3% dysprosium purity** nínú pathway tí wọn sàlàyé.

Depletion ni ipin tí a yọ kúrò nínú solution ìbèrẹ. Ifikún powder 10 milligram lẹ̀ẹkan lẹ̀ẹkan ní ìgbà méjọ yọ **72% dysprosium** nínú ìdánwò neodymium-dysprosium, ó sì dá accumulated separation factor 10.8 sílẹ.

Recovery bèèrẹ iye ion tí a ti mú tí a lè tú sílẹ lẹyìn nàà. Reverse ion exchange gba **80%** padà nínú operation neodymium-dysprosium kan. Electrochemical removal gba **89%** padà nínú operation lanthanum-neodymium kan.

Recovery ní fi reversibility hàn. Kò fi hàn iye ìgbà tí electrode lè tún lò láipẹyà performance.

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

Metric mērin tí wọn ròyìn lo denominator tó yàtò, wọn sì wá látí idánwò tó yàtò. Wọn jẹ kaadi ẹrí, kì í ẹ ipele tó n tẹlẹ ara wọn nínú ilàna kan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kí ló dé tí percentage méjì tó dára lè túmọ sí ohun tó yàtò?

Ká sọ pé ilàna kan yọ 90% ion kan kúrò nínú liquid ibèrè. Ìyẹn jẹ depletion tó ga. Bí ọpọ ion tí a kò fẹ bá tún wá pẹlú rẹ, ohun èlò tí a gba padà lè ẹ̀ sí ní purity kéré. Ní ọ̀nà kejì, fraction kékeré tó mọ gan-an lè ní recovery búburú bí ọpọ target bá kù sẹyìn. Ìsìrò ilàna nílò gbogbo balance wònyí, kì í ẹ nọ́nbà tó tóbi jù nìkan.

Ohun èlò tí wọn fi hàn ẹ̀ jẹ̀ idánwò inú beaker

Àwọn idánwò electrochemical tí ó dojú kọ scale bèrè pẹ̀lú **5 millilitre** solution tí ó ní 25 millimole fún litre tí ion kòòkan. Àwọn electrode ní nìkan bí **25 sí 40 milligram** active ohun èlò.

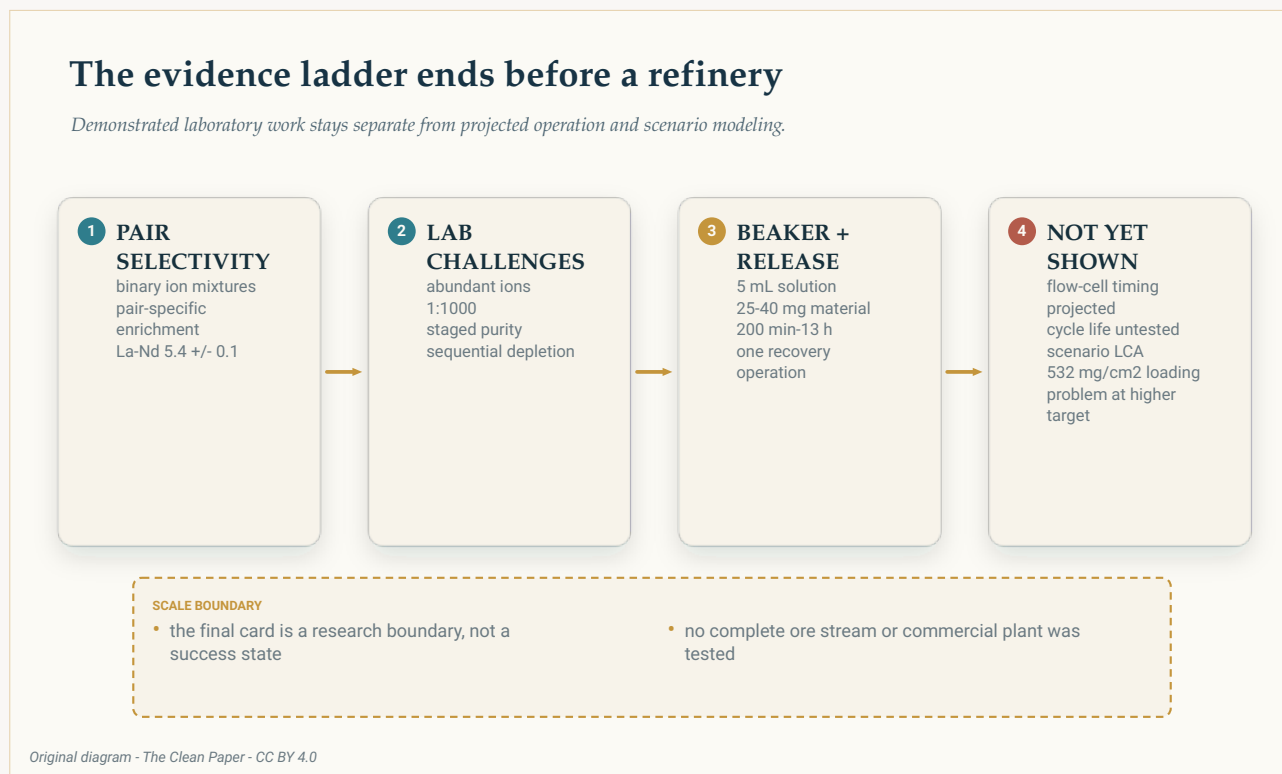
Electrode kan yọ nìkan bí 40% neodymium. Electrode mọ́ta tí a lò lèsèsè dé nìkan bí **90% depletion** àti accumulated separation factor **16.6 +/- 0.4**. Gégẹ̀ bí operating rate ẹ̀ rí, reaction gba látí **200 minute sí 13 hour**.

Àwọn iwọn àti àkókò wònyí yẹ kí wọn wà nínú itàn pàtàkì nítorí pé wọn ní sọ ohun tí a fi hàn gangan.

Supplement nàà tún tọ́ka mass-transfer ààlà kan. Fún target beaker tí concentration rẹ̀ ga sí i, wọn ẹ̀ ìsìrò pé látí dé 50% total depletion yòò nílò **electrode 266 milligram**, tàbí **532 milligram active ohun èlò fún square centimetre**. Fífún electrode kékeré nàà ní ohun èlò tó pọ̀ bẹ̀ẹ̀ yòò jẹ́ kí ó ẹ̀rọ fún ion tí ó tú nínú omi látí dé

gbogbo rẹ. Nítorí nàà àwọn onkòwẹ yí padà sí solution tó dilute sí i fún ìdánwò beaker.

Flow seçìlì àròsọ hàn gégé bí projection nìkan. Fún seçìlì 1.25-millilitre tí a ro pẹ̀lú electrode 5 x 5 centimetre, supplement ẹ̀ ẹ̀sírò ǹhkan bí **20 minute ní 1C** tàbí **40 minute ní 0.5C** fún ǹhkan bí 90% depletion. Kò sí flow-cell ìdánwò bẹ̀ẹ̀ tí ìwé ìwádíí nàà ròyìn.



Àtẹ̀gùn ẹ̀rì nàà parí ní ààlà kan: ẹ̀rì yàrá fún binary mixture àti staged operation wà, nígbà tí timing flow àti environmental performance ẹ̀ jẹ́ projection tàbí scenario, kì í ẹ̀ ohun tí a tí fí hàn ní scale ilé-ìşẹ́.

The Clean Paper CC BY 4.0

Àfiwé ayika jẹ́ scenario, kì í ẹ̀ abajade ilé-ìşẹ́

Supplementary life-cycle assessment fí àwọn ìgbésẹ́ separation tó parí ní rare-earth oxide wé ara wọn, ó sì ròyìn input fún **1 kilogram neodymium oxide**.

Kò ka mining, ore pretreatment tàbí gbogbo commercial refining chain sí. Wọn ẹ̀ aṣojú ilànà yàrá pẹ̀lú assumption tí a kó jọ láti ọ̀pọ̀ oríṣun. Electrode lifetime tí **10, 20 àti 100 cycle** jẹ́ iye scenario àti sensitivity, kì í ẹ̀ durability tí a díwọn nínú ìwádíí yí. àwòşẹ́ nàà ro pé a lè tún magnesium recovery solution lò tí tí concentration rẹ́ yóò fí yí ní 10%, ó ro **95% water recycling**, ó sì ka calcination ní 450-600 degree Celsius fún wákàtí méjì sí, bí calcination kò tilẹ́ jẹ́ ohun tí a fí hàn ní ìdánwò yí.

Life-cycle assessment ní ẹ̀ àkòşìlẹ́ ẹ̀rù ayika nínú ètò ààlà tí a şàlàyẹ́. Ìdáhùn rẹ́ gbooro tó ààlà nàà, ó sì gbẹ̀kẹ́ lẹ́ bí inventory àti assumption scale ẹ̀ dára tó.

Ìtupalẹ nàà lè tọka ibi tí agbára, ohun èlò àti reuse ẹ pàtàkì. Kò lè fídí múlẹ pé commercial ẹdà yóò ní environmental impact kéré ju industrial solvent extraction lọ.

Mechanism kan, platform kan àti ọ̀nà engineering gígùn

Ìwé ìwádíí nàà fídí múlẹ pé spacing àti ayika kemistri ti hydrated layered solid lè jẹ ọ̀ṣakoso pẹ̀lú ètẹ látí mú separation àwọn bata lanthanide kan dára sí i. Magnesium pinning ẹ ju fífí binding site kemistri mǐràn kun lọ: ọ̀ dì ọ̀ṣètò tí àwọn ion tí omi yí ká ní látí gba kojá.

Abajade yẹn sí àwọn ibeèrè practical sílẹ̀. Ẹ́ performance lè dúró nínú adalu gidi látí ore? Ẹ́ a lè ẹ́ electrode pẹ̀lú mass loading tó ọ̀ṣẹ́? Báwo ni manganese oxide ẹ́ dúró pẹ́ tó kojá ọ̀pọ̀ insertion àti release cycle? Ẹ́ continuous ẹ́ẹ̀lì lè pa selectivity, throughput àti water balance mó? Báwo ni àfiwé ayika ẹ́ rí tí a bá ní inventory pilot-scale tí a díwọ̀n gangan?

Experiment nàà kò dáhùn àwọn ibeèrè wọ̀nyí. Ó kan mú wọ̀n di ohun tó ẹ́ẹ̀ beèrè ní kedere sí i.

Àṣeyọ́rí nàà kì í ẹ́ refinery rare-earth tí ọ́ tì ẹ́tán. Ó jẹ́ ẹ̀rì pé àyè omi díẹ̀ tó jẹ́ angstrom mélòò kan, tí a ẹ́kóso, lè yí separation tó nira padà.

Àkótán mímọ̀

Àwọn olùṣewádíí lo hydrated layered manganese oxide látí ya àwọn bata lanthanide-ion kan sọ̀tò nínú omi. Ààyè ọ̀fẹ́ ohun èlò nàà jẹ́ nńkan bí 6.8-6.9 angstrom, tó sun mó iwọn 6.6-7.1 angstrom ti hydration shell àkókọ̀ àwọn ion. Magnesium tó dúró nínú rẹ̀ ràn lówọ̀ látí dì ikanni, ọ́ sì mú pair-specific enrichment dára sí i, pẹ̀lú lanthanum-neodymium látí 1.6 sí 5.4 àti lanthanum-praseodymium látí 1.5 sí 4.2. Ìwádíí nàà tún rọ̀yìn ọ̀dánwò pẹ̀lú ion tó pọ̀, staged purity, sequential depletion àti recovery operation. Scale tí wọ̀n fí hàn ẹ́ jẹ́ ọ̀dánwò beaker 5-millilitre pẹ̀lú active ohun èlò 25-40 milligram àti reaction àkókò látí 200 minute sí 13 hour. Wọ̀n ẹ́ projection flow-cell timing nńkan, a kò dǎn reuse ọ̀pọ̀ cycle wò, àfiwé life-cycle sì gbẹ̀kẹ̀ lé assumption scale yàrá. Ìwé ìwádíí nàà ẹ́ ọ̀tílẹ̀yìn fún confinement ọ̀nà ọ̀ṣẹ́ àti yàrá ọ̀dánwò platform, kì í ẹ́ rirọ̀pọ̀ industrial fún solvent extraction.

àyẹ̀wò láìsí àṣọ̀dùn

Ohun tí ìwé ìwádíí nàà fí hàn: Dídí ààyè hydrated manganese-oxide mó nńkan bí 6.8-6.9 angstrom pẹ̀lú magnesium tó dúró nínú rẹ̀ yí separation àwọn bata lanthanide kan padà. Ìwọ̀n ọ̀ṣètò, electrochemistry àti calculation ẹ́ ọ̀tílẹ̀yìn fún ọ̀nà ọ̀ṣẹ́ tí confinement, dehydration, coordination àti binding wà nínú rẹ̀.

Ohun tí ọ́ ọ̀ṣẹ́ dára jù: Lábẹ́ condition pátó, lanthanum-neodymium enrichment dé 5.4 $\pm$ 0.1, lanthanum-praseodymium sì dé 4.2 $\pm$ 0.1. Àwọn iye bata mǐràn yàtò. Experiment tó yàtò rọ̀yìn purity, depletion àti recovery tí denominator wọ̀n yàtò.

Ohun tí kò fi hàn: Separator tó ẹ́ṣẹ́ fún gbogbo rare earth; operation lórí gbogbo ore stream; continuous flow ẹ́ṣẹ́lì tí a ti fi hàn; electrode tó dúró fún ọ̀pọ̀ cycle; rirọ̀pọ̀ solvent extraction; tàbí environmental superiority commercial tí a ti fidí múlẹ̀.

Àwọn ààlà scale pàtàkì: ìdánwò tí a fi hàn lo 5 millilitre solution, nìkan bí 25-40 milligram active ohun èlò àti 200 minute sí 13 hour. Target concentration tó ga sí i fi ẹ̀sòro loading 532 milligram fún square centimetre hàn. Flow àkókò jẹ extrapolation. Electrode lifetime àti àwọn input recycling pàtàkì nínú life-cycle assessment jẹ assumption.

Ìgboyà mélóó ni olùkà gbogbogbòò yẹ kí ó ní? Ìgboyà gíga nínú àwọn ìwọ̀n yàrá tí a ròyìn fún àwọn bata àti condition tí a darúkọ. Ìgboyà àárín nínú ìtumọ̀ molecular tí wọ̀n dabaa, nítorí pé ó kó ẹ̀sètò àti electrochemistry tààrà jọ pẹ̀lú calculation. Ìgboyà kéré pé dàtá lẹ́wọ̀lẹ́wọ̀ lẹ́ sọ industrial throughput, lifetime tàbí environmental performance tẹ̀lẹ̀.

Àwọn orísun

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>