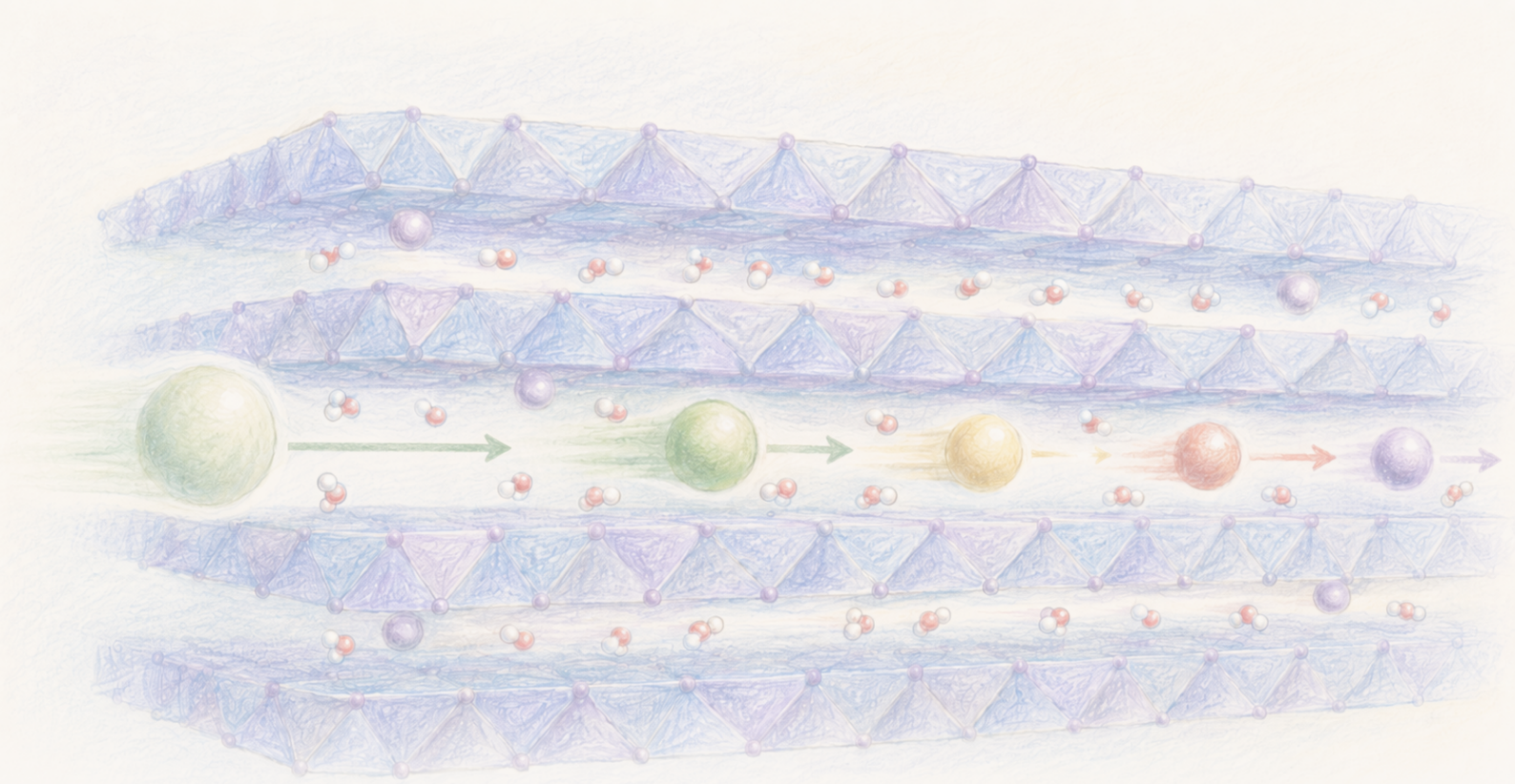


The Clean Paper

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

Dídì ikanni mineral tí omi kún mọ́ iwọn kan ràn lọ́wọ́ láti ya àwọn ion rare-earth tó jọra sọ́tọ̀

Magnesium dì àáyè hydrated manganese-oxide mọ́ iwọn tó sun mọ́ water shell ion lanthanide, ó sì mú enrichment àwọn bata kan dára sí i nínú test yàrá. Iṣẹ́ tí a fi hàn lo millilitre solution àti milligram material; flow operation, cycle life gígùn àti environmental performance commercial kò tíì jẹ́ mímú 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

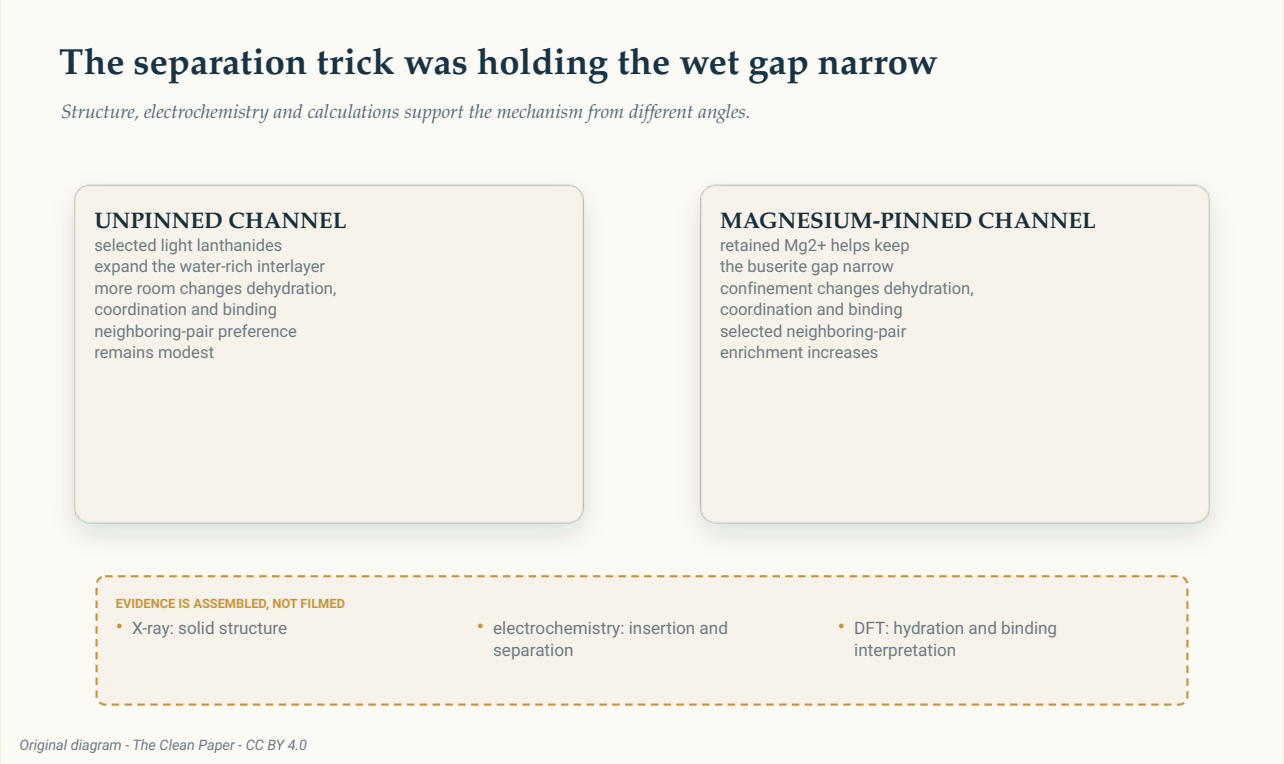
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Dídì ikanni mineral tí omi kún mọ́ iwọn kan ràn lọ́wọ́ láti ya àwọn ion rare-earth tó jọra sótò

Àwọn ion rare-earth ṣòro láti ya sótò fún ìdí kan náà tí ó fi lè ṣòro láti mọ àwọn ará ìdílé méjì tó jọra láti ọ̀nà jíjìn: ìyàtọ̀ náà wà ní tòótọ́, ṣùgbọ́n ó kéré.

Àwọn lanthanide jókòó légbèé ara wọn nínú periodic table, wọ́n sì sábà máa ń dá ion tí charge rẹ̀ dógba sílẹ̀. Iwọn wọn ń yí díẹ̀díẹ̀ kọjá jara náà, nígbà tí ìwà kemistri wọn ṣì jọra. Nítorí náà, refining ilé-iṣé gbékè lé òpò ìgbésè ìyapa tí a ń tún ṣe lékèkan sí i.

Ìwádìí yàrá tuntun kan dojú kọ ìṣòro náà pèlú **confinement** — fífi àyè tí ion lè gbé dín kù. Àwọn olùṣèwádìí lo àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ manganese oxide tí wọ́n kó sórí ara wọn, pèlú ààyè tí omi kún láàárín wọn. Ion rare-earth kan máa ń sún mọ́ ààyè yìí pèlú àwọn molíkúlù omi tó yí i ká. Bí kò bá sí ohun tí ó dì àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ náà mọ́, wọ́n lè yà síra kí ion náà lè wọlé. Àwọn ion magnesium ṣiṣé bí ohun ìdènà: nígbà tí wọ́n dúró láàárín àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́, wọ́n ràn lọ́wọ́ láti jé kí ààyè náà dín. Nígbà náà, àwọn ion rare-earth tó yàtò ní iye agbára tó yàtò láti san kí wọ́n lè yọ apá kan ti omi tó yí wọn ká, wọ ikanni náà, kí wọ́n sì so mọ́ àwọn atomu oxygen nínú solid.



Ikanni tí a kò dì mọ́ àti ikanni tí magnesium dì mọ́ jé ìtumò ọ̀nà iṣé tí ìsètò, electrochemistry àti calculation ń ṣe ìtìléyìn fún. Kò sí ìdánwò kan ṣoṣo tó wo gbogbo ìtèsí molíkúlù náà láti ìbèrè dé òpin.

The Clean Paper CC BY 4.0

Fún bata kan tí wọ́n dán wò, lanthanum àti neodymium, **pinning** yìí mú enrichment factor pò láti 1.6 sí **5.4**. Fún lanthanum àti praseodymium, ó gòkè láti 1.5 sí **4.2**. Enrichment factor ń fi ìpín àwọn ion méjèèjì léyìn ìyapa wé ìpín wọn ṣáájú ìyapa. Iye 1 túmò sí pé kò sí ààyò; 5.4 túmò sí pé ohun tí a mú yàn neodymium ju lanthanum lọ ní ìlópo 5.4 ju bí adalu ìbèrè ṣe rí lọ.

Àwọn wọ̀nyí jẹ́ abajade yàrá tó ní ìtumọ̀ fún àwọn bata pàtó. Wọn kì í ṣe ẹ̀rí pé gbogbo rare earth lè jẹ́ mímọ́ ní ìyapa báyìí, pé a ti fi ìlànà flow kan hàn, tàbí pé solvent extraction lè jẹ́ rírọ́pò.

Èrò tó lágbára jù nínú ìwé ìwádìí náà kéré ju refinery kan lọ: má jẹ́ kí ààyè mineral tí omi wà nínú rẹ̀ ṣí sí i.

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

Àwọn eroja rare-earth ní àwọn lanthanide pẹ̀lú scandium àti yttrium. Ìwádìí náà dán àwọn ion lanthanide tó ní charge rere mejìlá wò, láti lanthanum dé ytterbium. Wọ́n yọ cerium kúrò nítorí pé ó rọrùn fún un láti yí oxidation ipò padà, wọ́n sì yọ promethium radioactive kúrò.

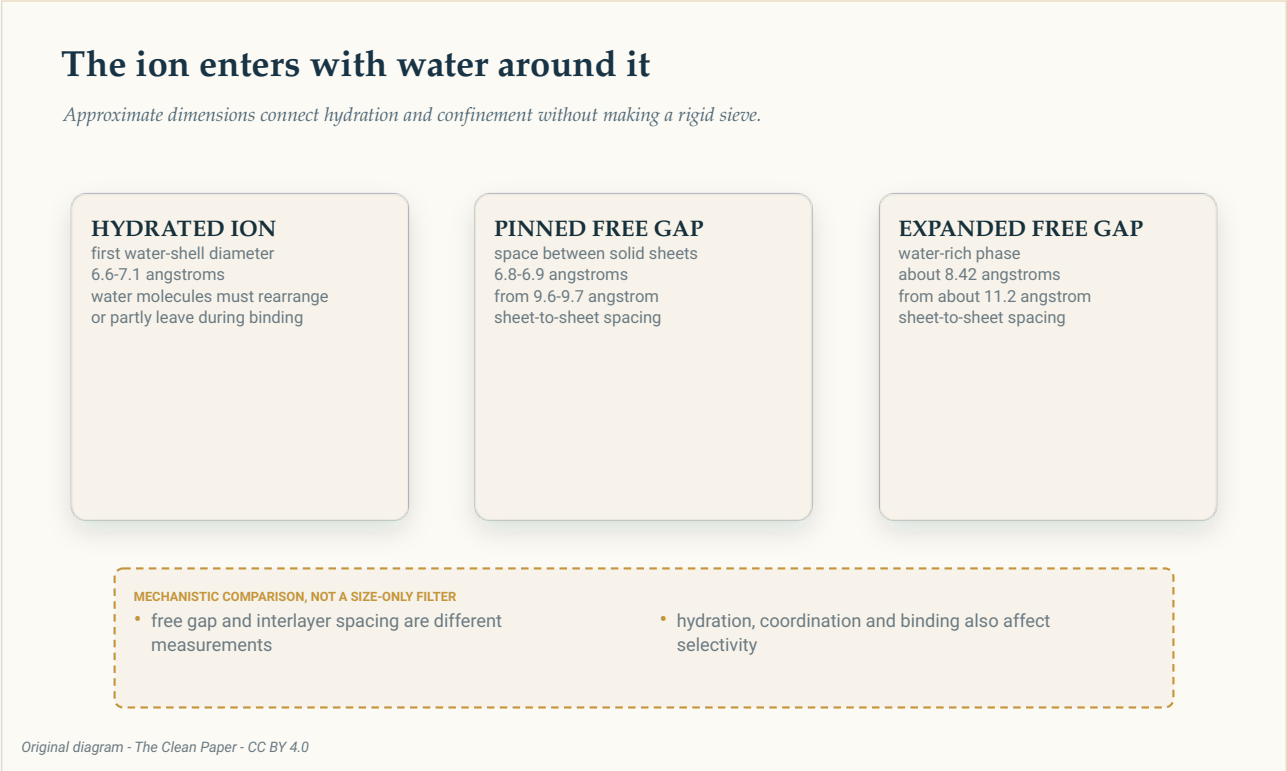
Nínú omi, ion kì í rìn nikan. Àwọn molíkúlù omi máa ń ṣètò ara wọn yí charge rẹ̀ ká láti dá **hydration shell** sílẹ̀. Kí ion lè wọ ikanni kékeré kí ó sì so mọ́ solid kan, ó lè ní láti tún fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ omi yẹn ṣètò tàbí yọ apá kan kúrò. Iye agbára tó ń ná dá lórí ion náà àti ayika rẹ̀.

Wọ́n ń díwọ̀n àwọn ìwọ̀n yìí ní **angstrom (Å)**. Angstrom kan jẹ́ ìdá ọ̀kan nínú bílíọ̀nù mẹ́wàá ti mita (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Iwọn ìwọ̀n kọ̀já àárín hydration shell àkọ́kọ́ ti àwọn lanthanide tí wọ́n dán wò jẹ́ nǹkan bí **6.6 sí 7.1 Å**.

Àwọn olùṣèwádìí lo manganese oxide fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ tí omi kún tí a ń pè ní buserite. Àwọn fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ tí a kó jọ yà síra ní nǹkan bí **9.6 sí 9.7 angstrom**, tí a díwọ̀n láti ibi fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ kan tí ó ń tún ara rẹ̀ ṣe sí èkejì. Ṣùgbọ́n fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ fúnra rẹ̀ gba àyè. Ààyè ọ̀fẹ́ tí omi kún tó wà láàárín àwọn fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ jẹ́ nǹkan bí **6.8 sí 6.9 angstrom** nìkan.

Ìyàtọ̀ yẹn ṣe pàtàkì. Interlayer spacing 9.7 angstrom kì í ṣe ikanni ṣíṣí 9.7 angstrom.

Diẹ̀ lára àwọn lanthanide fẹ́ẹ̀rẹ̀ mú kí ìṣètò náà gbooro sí phase tí omi rẹ̀ pọ̀ sí i. Ní bẹ̀, àyè láti fẹ́ẹ́fẹ́ẹ́ kan sí èkejì jẹ́ nǹkan bí **11.2 angstrom**, ààyè ọ̀fẹ́ tí wọ́n ṣe ìṣírò rẹ̀ sì jẹ́ nǹkan bí **8.42 angstrom**. Structure tó dín sí i tí ó jọra, birnessite, ní ààyè ọ̀fẹ́ tó fẹ̀rẹ̀ jẹ́ **4.42 angstrom**.



Àfiwé náà jẹ́ láàárín iwọn hydration shell tó fẹrẹ̀ tó àti ààyè ọ̀fẹ́ tí omi kún, kì í ṣe láàárín ion tí kò ní omi yí ká àti gbogbo àyè láti fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ kan sí èkejì. Iwọn jẹ́ apá kan ti ọ̀nà iṣẹ́, kì í ṣe gbogbo ìtàn náà.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineral náà lè yí ara rẹ̀ sí ion náà

Láìsí pinning magnesium, ikanni náà kì í ṣe sieve líle tí kò yí padà: àwọn fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ tí a kó jọ lè rìn. Nínú ìdánwò, àwọn ion fẹẹrẹ̀ lanthanum, praseodymium àti neodymium mú kí ohun èlò náà gba omi sí i kí ó sì ṣí gbooro. Àwọn ion tó wuwo láti europium dé ytterbium sábà jẹ́ kí ikanni dín náà dúró bó ṣe rí. Samarium wà láàárín ìhùwàsí méjèèjì.

ìwé ìwádìí náà pe ìhùwàsí àkọ́kọ́ ní **Group I**, èkejì ní **Group II**. Àwọn orúkọ wọ̀nyí jẹ́ label fún bí àwọn ion ṣe mú kí ohun èlò pàtó yìí dáhùn, kì í ṣe nọ́ńbà ẹgbẹ́ nínú periodic table. Ààlà náà lè tún yí padà lábẹ́ condition ìdánwò mìíràn.

Ìyàtọ̀ ìṣètò yẹn ràn lọ́wọ́ fún àwọn bata tó kọjá ẹgbẹ́. Nínú taara ion exchange, enrichment factor tí wọ́n ròyìn jẹ́ **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 aládùúgbò nira púpọ̀ sí i, pẹ̀lú enrichment factor tó sun mọ́ 1.1. Factor tó sun mọ́ 1 túmọ̀ sí ààyò díẹ̀. Material náà lè yà wọ́n mọ́ra rọrùn sí i nígbà tí àwọn ion méjèèjì fẹ́ ìṣètò ikanni tó yàtọ̀ ju nígbà tí wọ́n wà sunmọ́ ara wọn nínú ìdáhùn ẹgbẹ́ kan náà.

Magnesium ń dì ikanni náà mọ́

Lẹ́yìn náà àwọn olùṣèwádìí lo **electrochemical intercalation**: reaction itanna kan tí ń fi ion sínú àárín fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ solid. Àwọn ion magnesium dúró nínú ikanni bí àwọn ion rare-earth ṣe ń wọlé. Magnesium tó kù nínú rẹ̀ ràn lọ́wọ́ láti má jẹ́ kí spacing buserite náà gbooro.

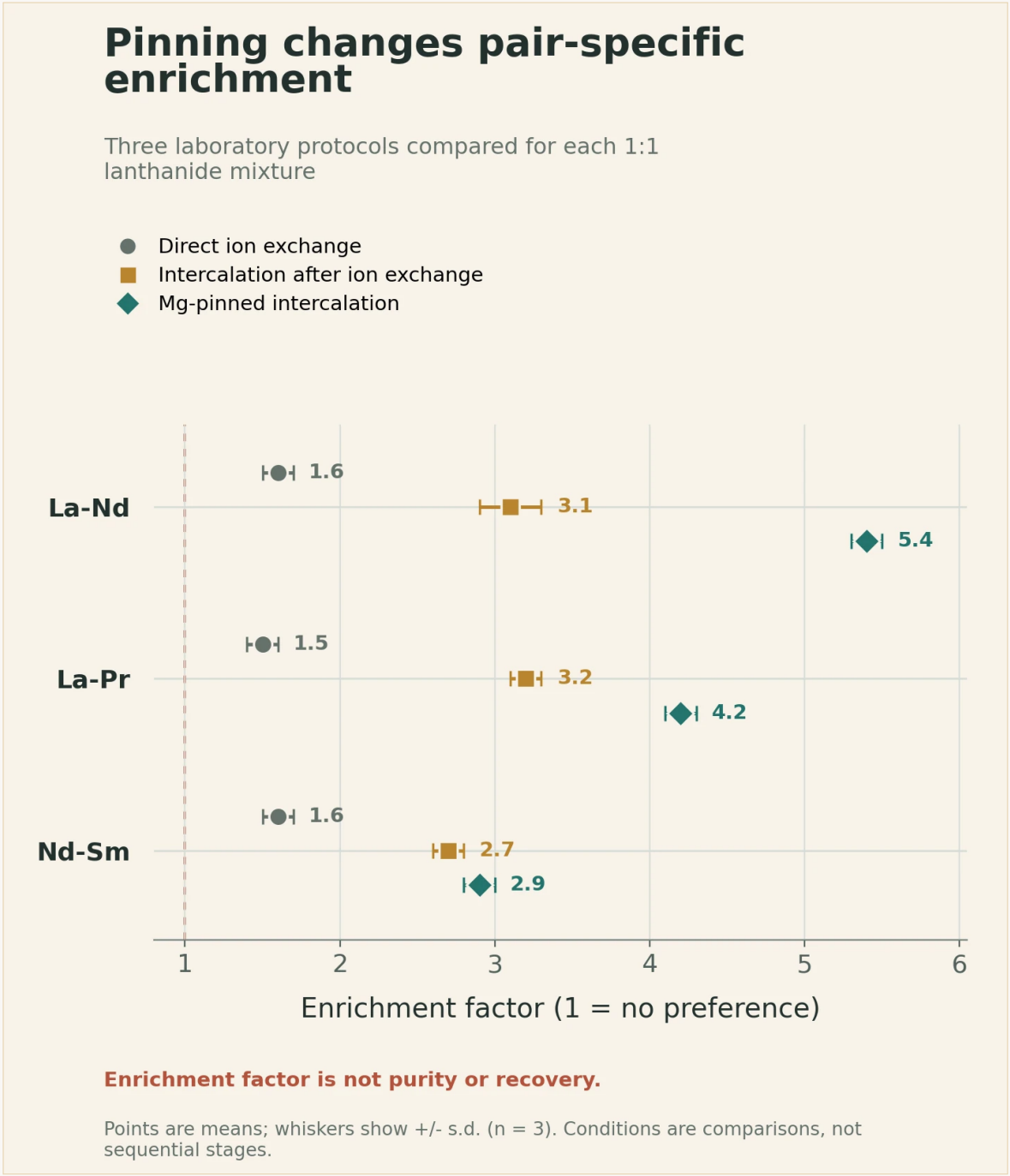
Nínú ààyè omi tó dín yẹn, ion hydrated tó ń wọlé ní àyè kékeré. Mechanism tí wọ́n dabaa kó confinement, partial dehydration, coordination àti binding jọ. **Coordination** túmọ̀ sí àwọn atomu tó wà nítòsí, nígbà púpọ̀ oxygen, tí ó yí ion ká tààrà tí wọ́n sì ń bá a ṣe interaction.

Ẹ̀rí náà wá láti ọ̀pọ̀ irú iṣẹ́. Ìwọn X-ray tọpinpin ìṣètò solid. Experiment electrochemical díwọ̀n insertion àti separation. **Density functional àbá-ẹ̀kọ́**, calculation quantum-mechanical kan, fi ìṣètò, hydration àti binding wé ara wọn. Àwọn calculation náà ń ràn lọ́wọ́ láti túmọ̀ ọ̀nà iṣẹ́; wọn kì í ṣe fídíò tààrà ti ion kan tí ń rìn nínú ikanni.

Mechanism náà kì í ṣe “ion kékeré ń kọjá, ion ńlá ń dúró” nìkan. Water shell, bí àwọn layer ṣe ń dahun, iye agbára tí dehydration ń ná, àti bí ion ṣe coordinate pẹ̀lú solid gbogbo wọn ní ipa.

Pinning mú ìyapa diẹ̀ lára àwọn bata aládùúgbò dára sí i

Ìyípadà tó ga jù tí ìwé ìwádìí náà tẹnumọ́ ni lanthanum àti neodymium: enrichment gòkè láti **1.6 +/- 0.1** láìsí pinning sí **5.4 +/- 0.1** pẹ̀lú 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**.



Ìlà kọ̀ọkan ń fi yàrá ìdánwò protocol méta tó yàtọ̀ wé ara wọn, kì í ṣe ìpele tó ń tẹ̀lé ara wọn nínú ìlànà kan. Factor 1 túmọ̀ sí ààyò kankan kò sí; iye tó ga sí i ń fi pair-specific enrichment tó lágbára sí i hàn. Àwọn kókó fi mean hàn, whisker sì fi +/- standard deviation hàn (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Ní pH 2, iye lanthanum-neodymium jẹ́ **5.6 +/- 0.2**. Nígbà tí wọ́n mú rate itanna pọ̀ ní ìlọ́po márùn-ún, láti 0.1C sí 0.5C, iye náà sọ̀kalẹ̀ láti **5.4 +/- 0.1** sí **4.3 +/- 0.4**. C-rate ń fi current itanna tí a lò wé capacity ohun èlò. Rate tó ga ń fún ion àti solid ní àkókò díẹ̀ láti dahun.

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

ìwé ìwádìí náà tún dán ohun èlò náà wò pẹ̀lú ọ̀pọ̀ ion tí kì í ṣe rare-earth. Adalu ìbẹ̀rẹ̀ ní ion rare-earth kan fún gbogbo ion olùdíje 1,000. Àwọn iye selectivity tí wọ́n ròyìn jẹ́ nǹkan bí **1,200** lòdì sí sodium, **6,500** lòdì sí calcium àti **1,700** lòdì sí magnesium.

Èyí jẹ́ ẹ̀rí tó wúlò pé àwọn ion tí ó wọ́pọ̀ kì í ṣe pé wọ́n máa bori separation náà laifọwọyi lábẹ́ condition yàrá wọ̀nyí. Kì í ṣe ìdánwò lórí omi gidi tí a yọ láti ore pẹ̀lú gbogbo metal, acidity àti contaminant rẹ̀.

Enrichment, separation, purity, depletion àti recovery jẹ́ abajade tó yàtọ̀

Ọ̀pọ̀ metric iṣẹ́ hàn nínú ìwé ìwádìí náà, a kò sì lè fi ọ̀kan rọ́pò omíì.

Enrichment factor ń fi ìpín ion méjì lẹ́yìn separation wé ìpín wọn ṣáájú separation. Iye 5.4 túmọ̀ sí pé ohun èlò tí a mú fẹ́ ọ̀kan nínú bata yẹn ju ẹlẹ́kejì lọ ní ìlọ́po 5.4 ju adalu ìbẹ̀rẹ̀ lọ.

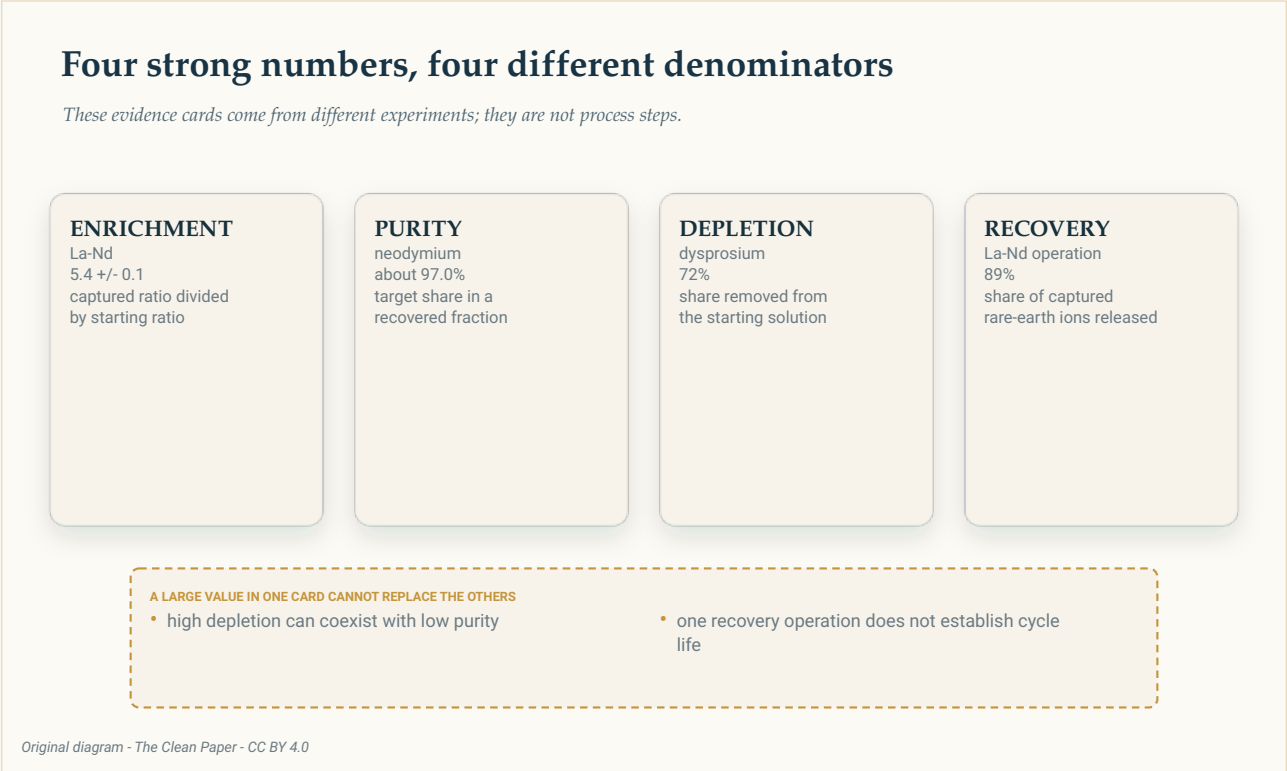
Separation factor tún ka ohun tí ó kù nínú liquid sí: ó ń fi iye ion kọ̀ọ̀kan tí a mú wé iye tí a kò mú, lẹ́yìn náà ó fi balance méjèèjì wé ara wọn. Nítorí náà ó lè gòkè bí a ṣe ń yọ ohun èlò sí i, bí enrichment factor tilẹ̀ ń tẹ̀lé àpẹẹrẹ mìíràn.

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

Depletion ni ipin tí a yọ kúrò nínú solution ìbẹ̀rẹ̀. Ìfikún powder 10 milligram lẹ́ẹ̀kan lẹ́ẹ̀kan ní ìgbà méjọ yọ **72% dysprosium** nínú ìdánwò neodymium-dysprosium, ó sì dá accumulated separation factor 10.8 sílẹ̀.

Recovery béèrè iye ion tí a ti mú tí a lè tú sílẹ̀ lẹ́yìn náà. Reverse ion exchange gba **80%** padà nínú operation neodymium-dysprosium kan. Electrochemical removal gba **89%** padà nínú operation lanthanum-neodymium kan.

Recovery ń fi reversibility hàn. Kò fi hàn iye ìgbà tí electrode lè tún lò láìpẹ̀yà performance.



Metric mẹ́rin tí wọ́n ròyìn lo denominator tó yàtọ̀, wọ́n sì wá láti ìdánwò tó yàtọ̀. Wọn jẹ́ kaadi ẹ̀rí, kì í ṣe ìpele tó ń tẹ̀lé ara wọn nínú ìlànà kan.

The Clean Paper CC BY 4.0

> **Kí ló dé tí percentage méjì tó dára lè túmọ̀ sí ohun tó yàtọ̀?**
>
> Ká sọ pé ìlànà kan yọ 90% ion kan kúrò nínú liquid ìbẹ̀rẹ̀. Ìyẹn jẹ́ depletion tó ga. Bí ọ̀pọ̀ ion tí a kò fẹ́ bá tún wá pẹ̀lú rẹ̀, ohun èlò tí a gba padà lè ṣì ní purity kéré. Ní ọ̀nà kejì, fraction kékeré tó mọ́ gan-an lè ní recovery búburú bí ọ̀pọ̀ target bá kù sẹ́yìn. Ìṣírò ìlànà nílò gbogbo balance wọ̀nyí, kì í ṣe nọ́ńbà tó tóbi jù nìkan.

Ohun èlò tí wọ́n fi hàn ṣi jẹ́ ìdánwò inú beaker

Àwọn ìdánwò electrochemical tí ó dojú kọ scale bẹ̀rẹ̀ pẹ̀lú **5 millilitre** solution tí ó ní 25 millimole fún litre ti ion kọ̀ọ̀kan. Àwọn electrode ní nǹkan bí **25 sí 40 milligram** active ohun èlò.

Electrode kan yọ nǹkan bí 40% neodymium. Electrode mẹ́ta tí a lò lẹ́ṣẹ̀ṣẹ̀ dé nǹkan bí **90% depletion** àti accumulated separation factor **16.6 +/- 0.4**. Gẹ́gẹ́ bí operating rate ṣe rí, reaction gba láti **200 minute sí 13 hour**.

Àwọn iwọn àti àkókò wọ̀nyí yẹ kí wọ́n wà nínú ìtàn pàtàkì nítorí pé wọ́n ń sọ ohun tí a fi hàn gangan.

Supplement náà tún tọ́ka mass-transfer ààlà kan. Fún target beaker tí concentration rẹ̀ ga sí i, wọ́n ṣe ìṣírò pé láti dé 50% total depletion yóò nílò **electrode 266 milligram**, tàbí **532 milligram active ohun èlò fún square centimetre**. Fífún electrode kékeré náà ní ohun èlò tó pọ̀ bẹ́ẹ̀ yóò jẹ́ kí ó ṣòro fún ion tí ó tú nínú omi láti dé

gbogbo rẹ̀. Nítorí náà àwọn onkọ̀we yí padà sí solution tó dilute sí i fún ìdánwò beaker.

Flow sẹẹli àròsọ hàn gégé bí projection nìkan. Fún sẹẹli 1.25-millilitre tí a ro pẹ̀lú electrode 5 x 5 centimetre, supplement ṣe ìṣírò nǹkan bí **20 minute ní 1C** tàbí **40 minute ní 0.5C** fún nǹkan bí 90% depletion. Kò sí flow-cell ìdánwò bẹ́ẹ̀ tí ìwé ìwádìí náà ròyìn.

Àtẹ̀gùn ẹ̀rí náà parí ní ààlà kan: ẹ̀rí yàrá fún binary mixture àti staged operation wà, nígbà tí timing flow àti environmental performance ṣì jẹ́ projection tàbí scenario, kì í ṣe ohun tí a ti fi hàn ní scale ilé-iṣẹ́.

The Clean Paper CC BY 4.0

Àfiwé ayika jẹ́ scenario, kì í ṣe abajade ilé-iṣẹ́

Supplementary life-cycle assessment fi àwọn ìgbésẹ̀ 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. Wọ́n ṣe aṣoju ìlànà yàrá pẹ̀lú assumption tí a kó jọ láti òpọ̀ orísun. Electrode lifetime ti **10, 20 àti 100 cycle** jẹ́ iye scenario àti sensitivity, kì í ṣe durability tí a díwọ̀n nínú ìwádìí yìí. àwòṣe náà ro pé a lè tún magnesium recovery solution lò títí concentration rẹ̀ yóò fi yí ní 10%, ó ro **95% water recycling**, ó sì ka calcination ní 450-600 degree Celsius fún wákàtí méjì sí, bí calcination kò tilẹ̀ jẹ́ ohun tí a fi hàn ní ìdánwò yìí.

Life-cycle assessment ń ṣe àkọsílẹ̀ ẹrù ayika nínú ètò ààlà tí a ṣàlàyé. Ìdáhùn rẹ̀ gbooro tó ààlà náà, ó sì gbẹ́kẹ̀ lé bí inventory àti assumption scale ṣe dára tó.

Ìtúpalẹ́ náà lè tọ́ka ibi tí agbára, ohun èlò àti reuse ṣe pàtàkì. Kò lè fìdí múlẹ́ pé commercial ẹ̀dà yóò ní environmental impact kéré ju industrial solvent extraction lọ.

Mechanism kan, platform kan àti ọ̀nà engineering gígùn

ìwé ìwádìí náà fìdí múlẹ́ pé spacing àti ayika kemistri ti hydrated layered solid lè jẹ́ iṣakoso pẹ̀lú ètè láti mú separation àwọn bata lanthanide kan dára sí i. Magnesium pinning ṣe ju fífi binding site kemistri mìíràn kun lọ: ó dì ìṣètò tí àwọn ion tí omi yí ká ní láti gba kọjá.

Abajade yẹn ṣí àwọn ìbéèrè practical sílẹ̀. Ṣé performance lè dúró nínú adalu gidi láti ore? Ṣé a lè ṣe electrode pẹ̀lú mass loading tó ṣiṣẹ́? Báwo ni manganese oxide ṣe dúró pẹ́ tó kọjá ọ̀pọ̀ insertion àti release cycle? Ṣé continuous sẹẹli lè pa selectivity, throughput àti water balance mọ́? Báwo ni àfiwé ayika ṣe rí tí a bá ní inventory pilot-scale tí a díwọ̀n gangan?

Experiment náà kò dáhùn àwọn ìbéèrè wọ̀nyí. Ó kan mú wọn di ohun tó ṣeé béèrè ní kedere sí i.

Àṣeyọrí náà kì í ṣe refinery rare-earth tí ó ti ṣetán. Ó jẹ́ ẹ̀rí pé àyè omi díẹ̀ tó jẹ́ angstrom mélòó kan, tí a ṣàkóso, lè yí separation tó nira padà.

Àkótán mímọ́

Àwọn olùṣèwádìí lo hydrated layered manganese oxide láti ya àwọn bata lanthanide-ion kan sọ́tọ̀ nínú omi. Ààyè ọ̀fẹ́ ohun èlò náà jẹ́ nǹkan bí 6.8-6.9 angstrom, tó sun mọ́ iwọn 6.6-7.1 angstrom ti hydration shell àkọ́kọ́ àwọn ion. Magnesium tó dúró nínú rẹ̀ ràn lọ́wọ́ láti dì ikanni, ó sì mú pair-specific enrichment dára sí i, pẹ̀lú lanthanum-neodymium láti 1.6 sí 5.4 àti lanthanum-praseodymium láti 1.5 sí 4.2. Ìwádìí náà tún ròyìn ìdánwò pẹ̀lú ion tó pọ̀, staged purity, sequential depletion àti recovery operation. Scale tí wọ́n fi hàn ṣì jẹ́ ìdánwò beaker 5-millilitre pẹ̀lú active ohun èlò 25-40 milligram àti reaction àkókò láti 200 minute sí 13 hour. Wọ́n ṣe projection flow-cell timing nìkan, a kò dán reuse ọ̀pọ̀ cycle wò, àfiwé life-cycle sì gbẹ́kẹ̀ lé assumption scale yàrá. ìwé ìwádìí náà ṣe ìtúlẹ́yìn fún confinement ọ̀nà iṣẹ́ àti yàrá ìdánwò platform, kì í ṣe rírọ́pò industrial fún solvent extraction.

àyẹ̀wò láìsí àsọdùn

Ohun tí ìwé ìwádìí náà fi hàn: Dídì ààyè hydrated manganese-oxide mọ́ nǹkan bí 6.8-6.9 angstrom pẹ̀lú magnesium tó dúró nínú rẹ̀ yí separation àwọn bata lanthanide kan padà. Ìwọn ìṣètò, electrochemistry àti calculation ṣe ìtúlẹ́yìn fún ọ̀nà iṣẹ́ tí confinement, dehydration, coordination àti binding wà nínú rẹ̀.

Ohun tí ó ṣiṣẹ́ dára jù: Lábẹ́ condition pàtó, lanthanum-neodymium enrichment dé 5.4 +/- 0.1, lanthanum-praseodymium sì dé 4.2 +/- 0.1. Àwọn iye bata mìíràn yàtọ̀. Experiment tó yàtọ̀ ròyìn purity, depletion àti recovery tí denominator wọn yàtọ̀.

Ohun tí kò fi hàn: Separator tó ṣiṣẹ́ fún gbogbo rare earth; operation lórí gbogbo ore stream; continuous flow sẹẹli tí a ti fi hàn; electrode tó dúró fún ọpọ̀ cycle; rirọ́pò solvent extraction; tàbí environmental superiority commercial tí a ti fìdí múlẹ̀.

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

Ìgboyà mélòó 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 wọ́n dabaa, nítorí pé ó kó ìṣètò àti electrochemistry tàárà jọ pẹ̀lú calculation. Ìgboyà kéré pé dátà lọwọ́lọwọ́ lè sọ industrial throughput, lifetime tàbí environmental performance tẹ́lẹ̀.

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