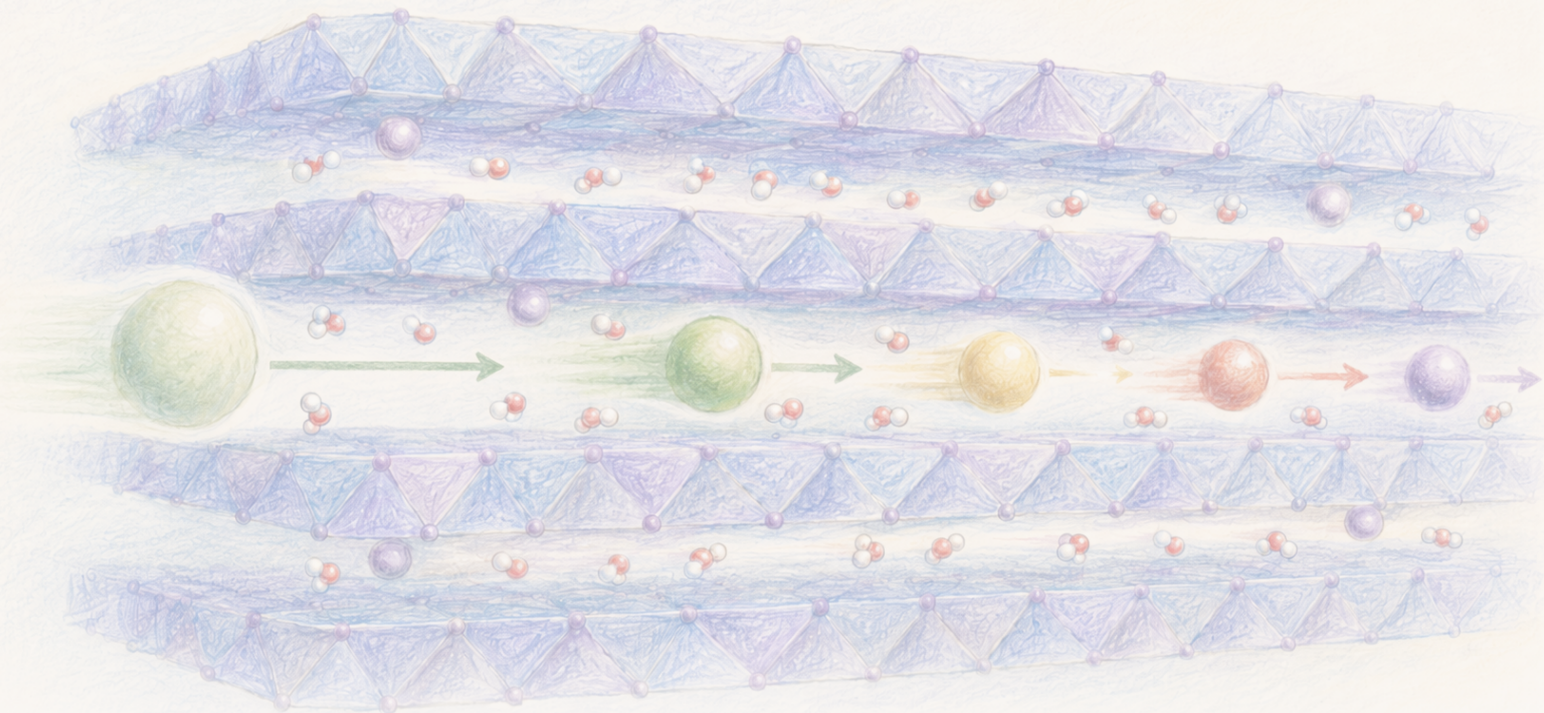




The CLEAN PAPER

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

ثابت نگه داشتن یک کانال معدنی پر از آب به جداسازی یون‌های مشابه عناصر خاکی کمیاب کمک کرد

منیزیم شکاف آب‌دار اکسید منگنز را نزدیک به پهنای پوستهٔ آب‌پوشی یون لانتانید نگه داشت و در آزمون‌های آزمایشگاهی غنی‌سازی برخی جفت‌ها را بهتر کرد. کار نشان داده شده از میلی‌لیترها محلول و میلی گرم‌ها ماده استفاده کرد؛ کارکرد جریانی، عمر چرخه‌ای طولانی و عملکرد زیست‌محیطی تجاری هنوز اثبات نشده‌اند.

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, 413-402 (2026) · DOI: 8-00418-026-s44286/1038.10

ثابت‌نگه‌داشتن یک کانال معدنی پر از آب به جداسازی یون‌های مشابه عناصر خاکی کمیاب کمک کرد

جداسازی یون‌های عناصر خاکی کمیاب به همان دلیلی دشوار است که تشخیص دو خواهر یا برادر از فاصله دور: تفاوت‌ها واقعی‌اند، اما کوچک.

لانتانیدها در جدول تناوبی کنار یکدیگر قرار دارند و معمولاً یون‌هایی با باریکسان تشکیل می‌دهند. اندازه آن‌ها در طول این سری به تدریج تغییر می‌کند، در حالی که رفتار شیمیایی‌شان شبیه می‌ماند. بنابراین پالایش صنعتی به مراحل جداسازی تکرارشونده فراوان متکی است.

یک مطالعه آزمایشگاهی تازه از مسیر محصورسازی به این مشکل نزدیک شد. پژوهشگران از ورقه‌های لایه‌لایه اکسید منگنز استفاده کردند که میانشان شکافی پر از آب وجود داشت. یک یون خاکی کمیاب در حالی به این شکاف نزدیک می‌شود که مولکول‌های آب دور آن را گرفته‌اند. اگر چیزی ورقه‌ها را مهار نکند، آن‌ها می‌توانند برای جا دادن یون از هم دور شوند. یون‌های منیزیم مانند یک مهار عمل کردند: وقتی میان ورقه‌ها باقی ماندند، به باریک ماندن شکاف کمک کردند. در نتیجه یون‌های مختلف خاکی کمیاب برای کنارگذاشتن بخشی از آب، ورود به کانال و اتصال به اتم‌های اکسیژن جامد، هزینه‌های انرژی متفاوتی پرداختند.

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 Mg^{2+} 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

کانال‌های بدون مهار و مهارشده با منیزیم، تفسیرهای سازوکاری‌ای هستند که ساختار، الکتروشیمی و محاسبات از آن‌ها پشتیبانی می‌کنند. هیچ آزمایش منفردی کل توالی مولکولی را مستقیماً مشاهده نکرد.

The Clean Paper CC BY 0.4

برای یکی از جفت‌های آزموده‌شده، لانتانیم و نئودیمیم، این مهارکردن ضریب غنی‌سازی را از 6.1 به 4.5 رساند. برای لانتانیم و پرازئودیمیم، از 5.1 به 2.4 رسید. ضریب غنی‌سازی نسبت دو یون پس از جداسازی را با نسبت آن‌ها پیش از جداسازی مقایسه می‌کند. مقدار 1 یعنی هیچ ترجیحی وجود ندارد؛ 4.5 یعنی ماده جذب‌شده، نئودیمیم را نسبت به لانتانیم 4.5 برابر بیشتر از مخلوط آغازین ترجیح داده است.

این‌ها نتایج آزمایشگاهی معنادار و مختص جفت‌های مشخص‌اند. شاهدهی نیستند که اکنون همه عناصر خاکی کمیاب را می‌توان تمیز جدا کرد، یک فرایند جریان پیوسته نشان داده شده یا استخراج با حلال را می‌توان جایگزین کرد.

قوی‌ترین ایده مقاله بسیار کوچک‌تر از یک پالایشگاه است: نگذارید یک شکاف معدنی خیس بازتر شود.

یون در آب از اتم برهنه بزرگ‌تر است

عناصر خاکی کمیاب شامل لانتانیدها به‌اضافه اسکاندیم و ایتیم‌اند. این مطالعه دوازده یون لانتانید مثبت از لانتانیم تا ایتربیوم را آزمود. سریم کنار گذاشته شد چون به‌راحتی حالت اکسایش را تغییر می‌دهد و پروتمی رادیواکتیو نیز حذف شد.

در آب، یون تنها حرکت نمی‌کند. مولکول‌های آب پیرامون بار آن آرایش می‌یابند و یک پوسته آب‌پوشی تشکیل می‌دهند. برای ورود به کانالی باریک و اتصال به جامد، یون ممکن است مجبور شود بخشی از این لایه آب را بازآرایی یا جدا کند. هزینه انرژی به خود یون و محیط اطرافش بستگی دارد.

ابعاد با آنگستروم (Å) اندازه‌گیری می‌شوند. یک آنگستروم یک ده‌میلیارد متر است ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$). قطر نخستین پوسته آب‌پوشی لانتانیدهای آزموده‌شده حدود 6.6 تا 1.7 Å گزارش شد.

پژوهشگران از اکسید منگنز لایه‌ای و آب‌دار به نام بوسریت استفاده کردند. فاصله ورقه‌های روی هم‌چیده آن از یک موقعیت تکرارشونده ورقه تا موقعیت بعدی حدود 6.9 تا 7.9 آنگستروم بود. اما خود ورقه فضا اشغال می‌کند. شکاف آزاد پر از آب بین ورقه‌ها فقط حدود 8.6 تا 9.6 آنگستروم بود.

این تمایز مهم است. فاصله بین لایه‌ای 7.9 آنگستروم به معنای کانال باز 7.9 آنگسترومی نیست.

برخی لانتانیدهای سبک‌تر باعث شدند ساختار به فازی با آب بیشتر منبسط شود. آن‌جا فاصله ورقه تا ورقه حدود 2.11 آنگستروم و شکاف آزاد برآوردی حدود 42.8 آنگستروم بود. ساختار مرتبط و باریک‌تری به نام پیرنسیت شکاف آزادی در حدود 42.4 آنگستروم داشت.

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

مقایسه میان قطر تقریبی پوسته آب پوشی و شکاف آزاد پر از آب است، نه میان یون برهنه و کل فاصله ورقه تا ورقه. اندازه بخشی از سازوکار است، نه تمام توضیح.

The Clean Paper CC BY 0.4

ماده معدنی می تواند خود را با یون تطبیق دهد

بدون مهار منیزی، کانال یک غربال سخت نیست: ورقه های روی هم چیده آن می توانند حرکت کنند. در آزمایش ها، یون های سبک تر لانتانیم، پرازئودیم و نتودیم باعث شدند ماده آب بیشتری جذب کند و بازتر شود. یون های سنگین تر از اروپیم تا ایتربیوم تمایل داشتند کانال باریک تر را دست نخورده نگه دارند. ساماریم میان این دو پاسخ قرار گرفت.

مقاله پاسخ نخست را گروه I و پاسخ دوم را گروه II می نامد. این ها برچسب هایی برای نحوه پاسخ همین ماده به یون ها هستند، نه شماره گروه های جدول تناوبی. مرز میان آن ها نیز ممکن است در شرایط آزمایشی دیگر تغییر کند.

این تفاوت ساختاری به جفت هایی که دو طرف مرز بودند کمک کرد. در تبادل یونی مستقیم، ضریب غنی سازی گزارش شده برای لانتانیم در برابر دیسپروزیوم 8.7، پرازئودیم در برابر دیسپروزیوم 7.5، نتودیم در برابر دیسپروزیوم 5.4 و نتودیم در برابر اروپیم 6.2 بود.

بیشتر جفت های همسایه بسیار دشوارتر بودند و ضریب غنی سازی نزدیک 1.1 داشتند. ضریب نزدیک 1 یعنی ترجیح کمی وجود دارد. ماده هنگامی آسان تر تمایز می داد که دو یون ساختارهای متفاوت کانال را ترجیح می دادند، نه وقتی در یک گروه پاسخ نزدیک به هم بودند.

منیزیم کانال را مهار می کند

پژوهشگران سپس از درون نشانی الکتروشیمیایی استفاده کردند: واکنشی الکتریکی که یون‌ها را میان لایه‌های جامد وارد می‌کند. یون‌های منیزیم هنگام ورود یون‌های خاکی کرباب در کانال باقی ماندند. منیزیم باقی‌مانده به جلوگیری از انبساط فاصله بوسریت کمک کرد.

درون آن شکاف خیس و باریک‌تر، یون آب‌پوشیده ورودی فضای کمتری دارد. سازوکار پیشنهادی ترکیبی از محصورسازی، آب‌زدایی جزئی، هماهنگی و اتصال است. هماهنگی به اتم‌های نزدیک – اغلب اکسیژن – گفته می‌شود که مستقیماً یون را احاطه می‌کنند و با آن برهم‌کنش دارند.

شواهد از چند نوع کار می‌آیند. اندازه‌گیری‌های پرتو X ساختار جامد را دنبال کردند. آزمایش‌های الکتروشیمیایی ورود و جداسازی را اندازه گرفتند. نظریه تابعی چگالی، یک محاسبه مکانیک کوانتومی، ساختارها، آب‌پوشی و اتصال را مقایسه کرد. این محاسبات به تفسیر سازوکار کمک می‌کنند؛ فیلم مستقیمی از حرکت یک یون در کانال نیستند.

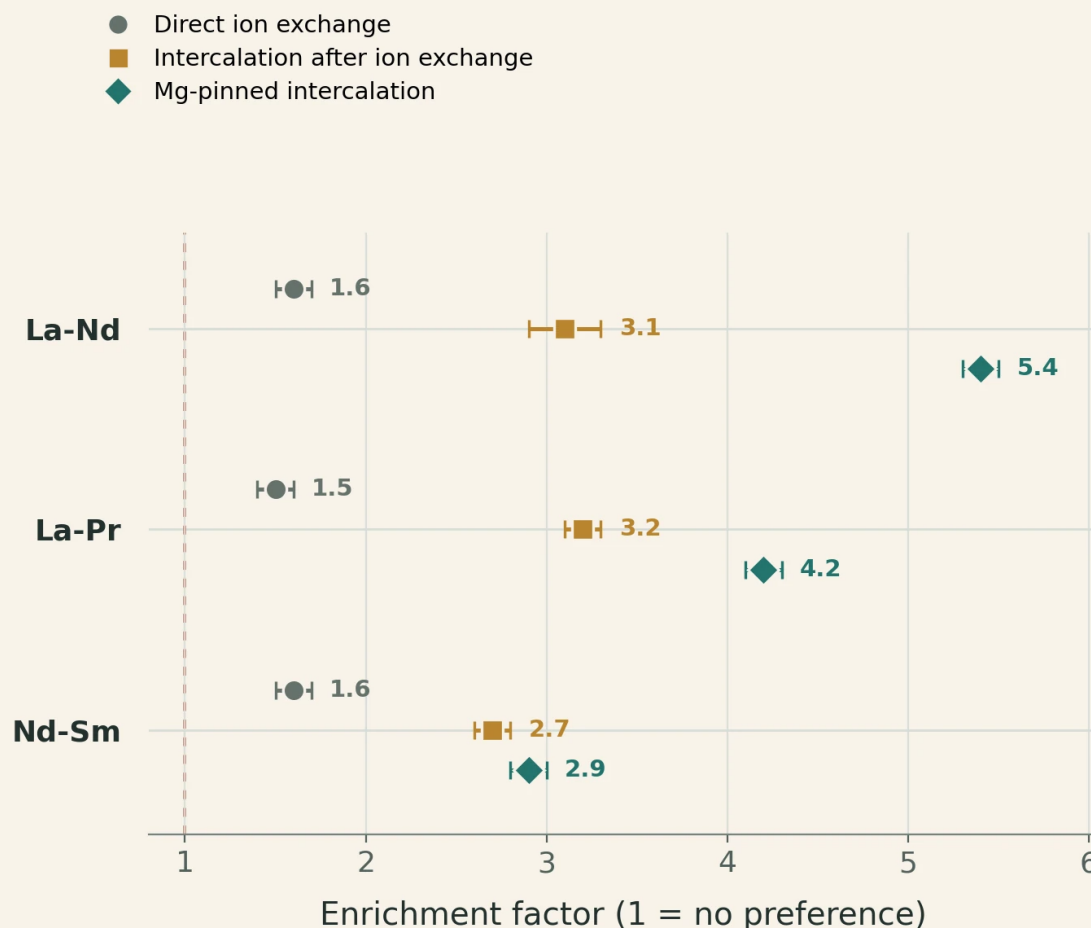
سازوکار نیز صرفاً این نیست که «یون‌های کوچک‌تر عبور می‌کنند و بزرگ‌ترها متوقف می‌شوند». پوسته آب، واکنش لایه‌ها، هزینه آب‌زدایی و نحوه هماهنگی یون با جامد همگی نقش دارند.

مهارکردن، برخی جفت‌های همسایه را بهتر جدا کرد

بزرگ‌ترین تغییر برجسته برای لانتانیم و نئودیم بود: غنی‌سازی از 6.1 ± 1.0 بدون مهار به 4.5 ± 1.0 با مهار منیزیمی رسید. لانتانیم در برابر پرازنئودیم از 5.1 ± 1.0 به 2.4 ± 1.0 افزایش یافت. نئودیم در برابر ساماریم از 6.1 ± 1.0 به 9.2 ± 1.0 رسید.

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.

هر ردیف سه پروتکل آزمایشگاهی جدا را مقایسه می کند، نه مراحل پیاپی یک فرایند. ضریب 1 یعنی هیچ ترجیحی وجود ندارد؛ مقادیر بالاتر نشان دهنده غنی سازی قوی تر و مختص همان جفت اند. نقطه ها میانگین ها و خط های خطا +/- انحراف معیار را نشان می دهند (n = 3).

The Clean Paper CC BY 0.4

در pH برابر 2، مقدار لانتانیم-تئودیمیم 6.5 +/- 2.0 بود. افزایش پنج برابری نرخ الکتریکی از 1C.0 به 5C.0 آن را از 4.5 +/- 1.0 به 3.4 +/- 4.0 کاهش داد. نرخ C جریان الکتریکی اعمال شده را با ظرفیت ماده مقایسه می کند. نرخ بالاتر به یونها و جامد زمان کمتری برای پاسخ می دهد.

هیچ عدد منفردی عملکرد ماده را در همه شرایط توصیف نمی کند. غنی سازی به جفت یونها، ساختار جامد، اسیدیته و نرخ کارکرد بستگی دارد.

مقاله همچنین ماده را با یونهای فراوان و غیرخاکی کمیاب به چالش کشید. مخلوط های آغازین برای هر یک یون خاکی کمیاب، 1,000

یون رقیب داشتند. گزینش پذیری گزارش شده حدود 1,200 در برابر سدیم، 6,500 در برابر کلسیم و 1,700 در برابر منیزیم بود. این شاهد مفیدی است که یون‌های رایج در این شرایط آزمایشگاهی خودبه‌خود جداسازی را از کار نمی‌اندازند. اما آزمون یک مایع کامل مشتق از سنگ معدن با همه فلزها، اسیدیته و آلاینده‌هایش نیست.

غنی‌سازی، جداسازی، خلوص، تخلیه و بازیابی نتایج متفاوت‌اند

چند سنجۀ عملکردی در مقاله دیده می‌شوند و نمی‌توان آن‌ها را جای یکدیگر گذاشت.

ضریب غنی‌سازی نسبت دو یون پس از جداسازی را با نسبت آن‌ها پیش از جداسازی مقایسه می‌کند. مقدار 4.5 یعنی ماده جذب شده یک عضو آن جفت را 4.5 برابر بیشتر از مخلوط آغازین ترجیح داده است.

ضریب جداسازی آنچه در مایع باقی می‌ماند را نیز حساب می‌کند: مقدار جذب‌شده هر یون را با مقدار جذب‌نشده آن مقایسه می‌کند و سپس آن دو تراز را با هم می‌سنجد. بنابراین با حذف ماده بیشتر می‌تواند افزایش یابد، حتی اگر ضریب غنی‌سازی الگوی دیگری داشته باشد.

خلوص سهم یون انتخاب‌شده در بخش بازیابی شده است. نمایش‌های دو مرحله‌ای در مسیرهای مشخص خود به حدود 0.97% خلوص نئودیم و 3.92% خلوص دیسپروزم رسیدند.

تخلیه کسری است که از محلول آغازین حذف شده است. هشت افزودن پیاپی 10 میلی گرم پودر در آزمون نئودیم-دیسپروزم 72% دیسپروزم را حذف کرد و ضریب جداسازی تجعی 8.10 داد.

بازیابی می‌پرسد چه مقدار از یون جذب‌شده بعداً آزاد می‌شود. تبادل یونی معکوس در یک عملیات نئودیم-دیسپروزم 80% را بازیابی کرد. حذف الکتروشیمیایی در یک عملیات لانتانیم-نئودیم 89% را بازیابی کرد.

بازیابی برگشت‌پذیری را نشان می‌دهد. ثابت نمی‌کند یک الکتروود را چند بار می‌توان با حفظ عملکرد دوباره استفاده کرد.

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

چهار سنجۀ گزارش شده مخرج های متفاوت دارند و از آزمایش های متفاوت می آیند. این ها کارت های شواهدند، نه مراحل پیاپی یک فرایند.

The Clean Paper CC BY 0.4

چرا دو درصد چشمگیر می توانند معنای متفاوتی داشته باشند؟

ناخواسته یون های از بسیاری اگر بالاست. تخلیه این کند. حذف آغازین مایع از را یون یک 90% فرایند یک کنید فرض خالص بسیار کوچک بخش یک برعکس، باشد. داشته پایینی خلوص هنوز است ممکن بازیابی شده ماده بیابند، همراهش نیز نه دارد، نیاز ترازها این همه به فرایند یک ارزیابی باشد. مانده جا هدف ماده بیشتر اگر باشد داشته ضعیفی بازیابی است ممکن عدد. بزرگ ترین

دستگاه نشان داده شده هنوز یک آزمایش بشر است

آزمون های الکتروشیمیایی مقیاس محور با 5 میلی لیتر محلول شروع شدند که 25 میلی مول بر لیتر از هر یون داشت. الکترودها تقریباً 25 تا 40 میلی گرم ماده فعال حمل می کردند.

یک الکتروود حدود 40% نئودیم را حذف کرد. سه الکتروود در سری به حدود 90% تخلیه و ضریب جداسازی تجربی 6.16 +/- 4.0 رسیدند. بسته به نرخ کارکرد، واکنش ها از 200 دقیقه تا 13 ساعت طول کشیدند.

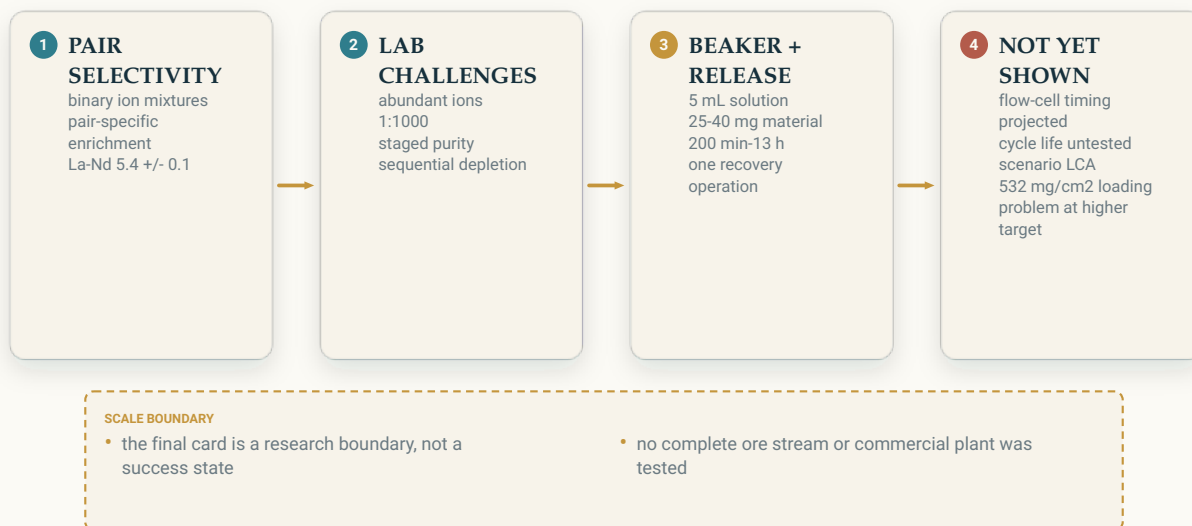
این ابعاد و زمان ها باید در داستان اصلی باشند، چون تعریف می کنند واقعاً چه چیزی نشان داده شد.

ضمیمه همچنین یک محدودیت انتقال جرم را شناسایی می کند. برای هدف بشر با غلظت بالاتر، برآورد شد رسیدن به 50% تخلیه کل به یک الکتروود 266 میلی گرمی، یا 532 میلی گرم ماده فعال بر سانتی متر مربع نیاز دارد. فشردن این مقدار ماده روی الکتروود کوچک، رسیدن یون های حل شده به همه آن را دشوار می کند. نویسندگان بنابراین برای آزمایش بشر به محلولی رقیق تر رفتند.

یک سلول جریان فرضی فقط در حد برآورد مطرح می‌شود. برای یک سلول فرضی 25.1 میلی‌لیتری با الکتروود 5 در 5 سانتی‌متر، ضمیمه حدود 20 دقیقه در 1C یا 40 دقیقه در 5C.0 را برای حدود 90% تخلیه برآورد می‌کند. هیچ آزمایش چنین سلول جریانی گزارش نشده است.

The evidence ladder ends before a refinery

Demonstrated laboratory work stays separate from projected operation and scenario modeling.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

نردبان در یک مرز پایان می‌یابد: شواهد آزمایشگاهی دوتایی و مرحله‌ای وجود دارند، اما زمان‌بندی جریان و عملکرد زیست‌محیطی هنوز برآوردی یا سناریو محورند، نه در مقیاس کارخانه نشان داده شده.

The Clean Paper CC BY 0.4

مقایسه زیست‌محیطی یک سناریو است، نه نتیجه کارخانه

ارزیابی چرخه عمر ضمیمه مراحل جداسازی را تا رسیدن به اکسیدهای خاکی کمیاب مقایسه می‌کند و ورودی‌ها را به ازای 1 کیلوگرم اکسید نئودیم گزارش می‌دهد.

استخراج معدن، پیش‌تیار سنگ معدن یا زنجیره کامل پالایش تجاری را شامل نمی‌شود. فرایند آزمایشگاهی با فرض‌هایی که از چند منبع گردآوری شده‌اند مدل می‌شود. عمر الکتروود 10، 20 و 100 چرخه مقدارهای سناریو و تحلیل حساسیت‌اند، نه دوام اندازه‌گیری شده در این مطالعه. مدل فرض می‌کند محلول بازیابی منیزیم را می‌توان تا زمانی که غلظتش 10% تغییر کند دوباره استفاده کرد، 95% بازیافت آب را فرض می‌کند و کلسیناسیون در 450 تا 600 درجه سلسیوس به مدت دو ساعت را در نظر می‌گیرد، هرچند کلسیناسیون در این‌جا به‌طور آزمایشی نشان داده نشد.

ارزیابی چرخه عمر بارهای زیست‌محیطی را درون یک مرز سامانه مشخص حساب می‌کند. پاسخ آن فقط به اندازه آن مرز گسترده و به اندازه موجودی و فرض‌های مقیاس قابل اعتماد است.

تحلیل می‌تواند نشان دهد انرژی، مواد و استفاده مجدد در کجا اهمیت دارند. نمی‌تواند ثابت کند نسخه تجاری اثر زیست‌محیطی کمتری از

استخراج صنعتی با حلال خواهد داشت.

یک سازوکار، یک پلتفرم و راه مهندسی طولانی

مقاله نشان می‌دهد فاصله و محیط شیمیایی یک جامد لایه‌ای آب‌دار را می‌توان عمداً کنترل کرد تا جداسازی برخی لاتنانیدها بهتر شود. مهار منیزی فقط یک جایگاه اتصال شیمیایی دیگر اضافه نکرد؛ ساختاری را محدود کرد که یون‌های پوشیده از آب باید از آن عبور می‌کردند.

این نتیجه پرسش‌های عملی باز می‌کند. آیا عملکرد در مخلوط‌های واقعی مشتق از سنگ معدن دوام می‌آورد؟ آیا می‌توان الکترودهایی با بارگذاری جرمی قابل کار ساخت؟ اکسید منگنز در چرخه‌های متعدد ورود و آزادسازی چقدر پایدار است؟ آیا یک سلول پیوسته می‌تواند گزینش‌پذیری، دبی و تراز آب را حفظ کند؟ مقایسه زیست‌محیطی با موجودی‌های اندازه‌گیری شده مقیاس پیلوت چگونه خواهد بود؟ آزمایش به این پرسش‌ها پاسخ نمی‌دهد. آن‌ها را مشخص‌تر می‌کند.

دست‌آورد، یک پالایشگاه کامل عناصر خاکی کمیاب نیست. شاهدهی است که چند آنگستروم فضای پر از آب کنترل شده می‌تواند یک جداسازی دشوار را تغییر دهد.

خلاصه روشن

پژوهشگران از اکسید منگنز لایه‌ای آب‌دار برای جداسازی برخی جفت‌های یون لاتنانید در آب استفاده کردند. شکاف آزاد ماده حدود 8.6 تا 9.6 آنگستروم بود، نزدیک به قطر گزارش شده 6.6 تا 1.7 آنگسترومی نخستین پوسته آب‌پوشی یون‌ها. منیزیم باقی‌مانده به مهار کانال کمک کرد و غنی‌سازی مختص جفت را بهبود داد؛ از جمله لاتنانیم-تئودیمیم از 6.1 به 4.5 و لاتنانیم-پرازتودیمیم از 5.1 به 2.4. مطالعه همچنین چالش با یون‌های فراوان، خلوص مرحله‌ای، تخلیه پیاپی و عملیات بازیابی را گزارش کرد. مقیاس نشان‌داده شده همچنان آزمایش‌های 5 میلی‌لیتری بشر با 25 تا 40 میلی‌گرم ماده فعال و زمان واکنش 200 دقیقه تا 13 ساعت بود. زمان‌بندی سلول جریان برآورد شد، استفاده مجدد طی چرخه‌های زیاد آزموده نشد و مقایسه چرخه عمر به فرض‌های مقیاس آزمایشگاهی متکی بود. مقاله از یک سازوکار محصورسازی و یک پلتفرم آزمایشگاهی پشتیبانی می‌کند، نه جایگزینی صنعتی برای استخراج با حلال.

بررسی بدون اغراق

مقاله چه چیزی نشان می‌دهد: نگه داشتن شکاف اکسید منگنز آب‌دار نزدیک 8.6 تا 9.6 آنگستروم با منیزیم باقی‌مانده، جداسازی برخی جفت‌های لاتنانید را تغییر داد. اندازه‌گیری‌های ساختاری، الکتروشمی و محاسبات از سازوکاری شامل محصورسازی، آب‌زدایی، هماهنگی و اتصال پشتیبانی می‌کنند.

بهترین عملکرد چه بود: در شرایط مشخص، غنی‌سازی لاتنانیم-تئودیمیم به 4.5 +/- 1.0 و لاتنانیم-پرازتودیمیم به 2.4 +/- 1.0 رسید. مقادیر جفت‌های دیگر متفاوت بودند. آزمایش‌های جداگانه نتایج خلوص، تخلیه و بازیابی را گزارش کردند که مخرج‌های متفاوت دارند.

چه چیزی نشان نمی‌دهد: جداکننده‌ای عمومی برای همه عناصر خاکی کمیاب؛ کارکرد روی جریان کامل سنگ معدن؛ سلول جریان پیوسته نشان‌داده شده؛ الکترودهای بادوام در چرخه‌های فراوان؛ جایگزینی استخراج با حلال؛ یا برتری زیست‌محیطی تجاری اثبات شده.

محدودیت‌های اصلی مقیاس: آزمون‌های نشان‌داده شده از 5 میلی‌لیتر محلول، تقریباً 25 تا 40 میلی‌گرم ماده فعال و 200 دقیقه تا 13

ساعت استفاده کردند. هدف غلظت بالاتر به مشکل بارگذاری 532 میلی گرم بر سانتی متر مربع اشاره کرد. زمان‌های جریان برون‌یابی شدند. عمر الکترود و ورودی‌های عمده بازیافت در ارزیابی چرخه عمر فرض بودند.

یک خواننده عمومی تا چه حد باید اطمینان داشته باشد؟ اطمینان بالا به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی گزارش شده برای جفت‌ها و شرایط نام‌برده. اطمینان متوسط به تفسیر مولکولی پیشنهادی، چون ساختار و الکتروشمی مستقیم را با محاسبات ترکیب می‌کند. اطمینان پایین که داده‌های فعلی بتوانند دبی صنعتی، عمر یا عملکرد زیست‌محیطی را پیش‌بینی کنند.

منابع

Engineering Chemical Nature separation, element rare-earth for channels ionic solid angstrom-size Pinning al., et Zou
(2026) 413-402, 3
<https://doi.org/10.1038/s44286-026-00418-8>