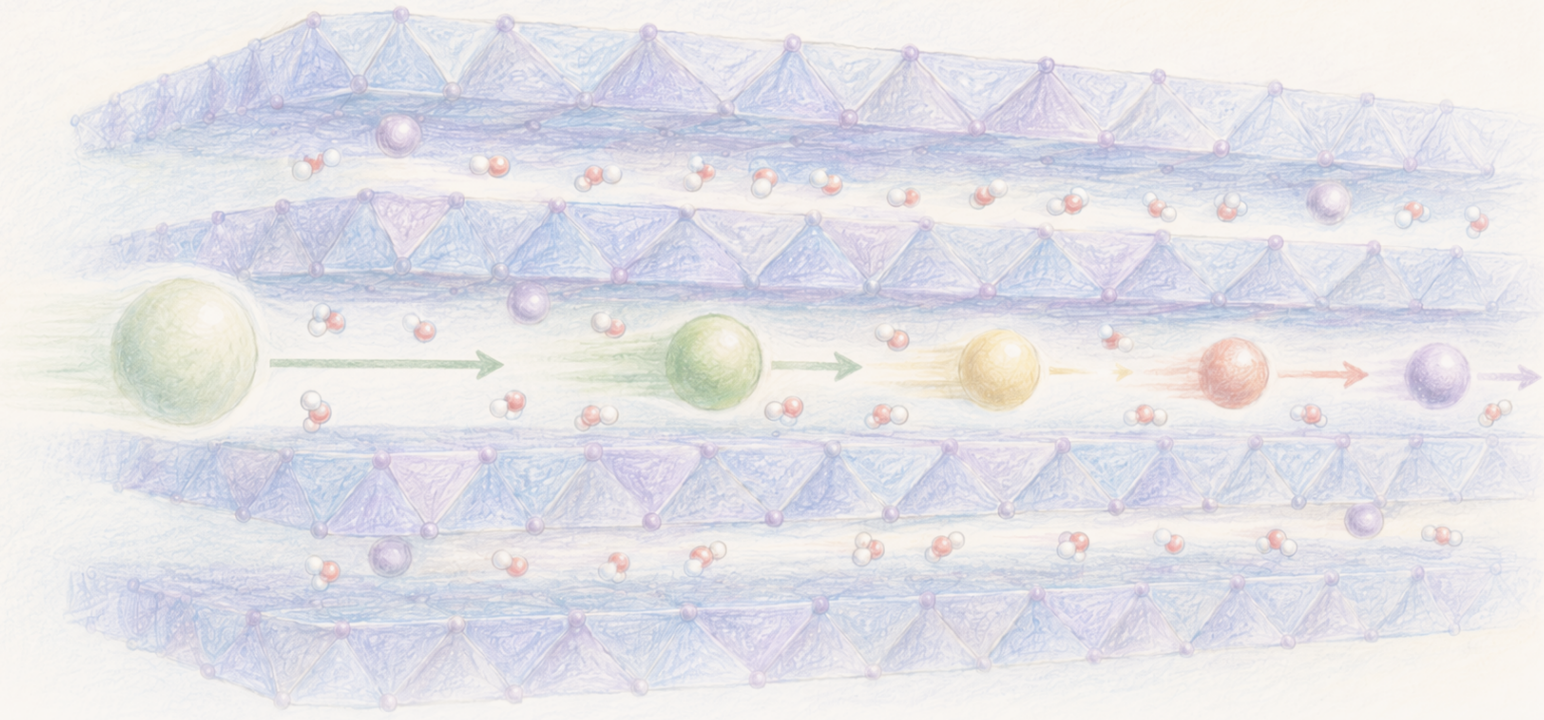




The CLEAN PAPER

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

পানভিরা খনজি চ্যানেলকে সবু অবস্থায় আটকে রেখে কাছাকাছি
ধরনের বরিল-মৃত্তিকা আয়ন আলাদা করা সহজ হয়েছে

ম্যাগনেসিয়াম জলযোজিত manganese-oxide স্তরগুলোর মাঝে ফাঁককে lanthanide আয়নের পানির আবরণের কাছাকাছি
প্রস্থে ধরে রেখেছে এবং পরীক্ষাগারে নির্বাচনী আয়ন-জোড়ার enrichment বাড়িয়েছে। দেখানো কাজটি millilitre পরিমাণ
দ্রবণ ও milligram পরিমাণ পদার্থে; অবচ্ছিন্ন প্রবাহ, দীর্ঘ cycle life এবং বাণিজ্যিক পরিশোধন কর্মক্ষমতা এখনো
প্রমাণিত নয়।

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

পানভিরা খনজি চ্যানেলকে সরু অবস্থায় আটকে রাখলে কাছাকাছি বরিল-মৃত্তিকা আয়ন আলাদা করা সহজ হয়েছে

বরিল-মৃত্তিকা আয়ন আলাদা করা কঠিন, অনেকটা দূর থেকে দেখতে একই রকম ভাইবোঁনকে আলাদা করার মতো। পার্থক্য সত্যি, কিন্তু ছোট।

Periodic সারণিতে ল্যান্থানাইডগুলো পাশাপাশি থাকে এবং সাধারণত একই charge-এর আয়ন তৈরি করে। ধারা জুড়ে তাদের আকার ধীরে বদলায়, অথচ রাসায়নিক আচরণ অনেকটা একই থাকে। তাই শিল্পে পরিশোধনের জন্য বারবার পৃথকীকরণ ধাপ চালাতে হয়।

নতুন একটি পরীক্ষাগার গবেষণায় সমস্যাটিকে সীমাবদ্ধতা দিয়ে মোকাবিলা করা হয়েছে। গবেষকরা স্তর স্তর সাজানো ম্যাগনেজি অক্সাইড স্তর ব্যবহার করছেন, যাদের মাঝখানে পানভিরা ফাঁক ছিল। বরিল-মৃত্তিকা আয়ন এই ফাঁককে কাছে আসে পানি অণুর আবরণ নিয়ে। কোনো brace না থাকলে স্তরগুলো আয়নকে জায়গা দিতে দূরে সরে যেতে পারে। ম্যাগনেসিয়াম আয়ন brace-এর মতো কাজ করেছে: স্তর স্তর মাঝ থেকে ফাঁকটিকে সরু রাখতে সাহায্য করেছে। ফলে ভিন্ন বরিল-মৃত্তিকা আয়নের জন্য কিছু পানি ঝরিয়ে চ্যানেলে ঢোকা এবং কঠিন পদার্থের অক্সিজেনে পরমাণুর সঙ্কে বাঁধে করার শক্তি ব্যয় ভিন্ন হয়েছে।

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

ম্যাগনেসিয়াম ছাড়া এবং ম্যাগনেসিয়াম দিয়ে আটকে রাখা চ্যানেলে—দুটই গঠন, তড়িৎরাসায়ন ও হিসাব থেকে সমর্থিত প্রক্রিয়াগত ব্যাখ্যা। কোনো একক পরীক্ষা সম্পূর্ণ আণবিক ক্রম সরাসরি দেখেনি।

The Clean Paper CC BY 4.0

পরীক্ষিত একটি জোড়া—ল্যান্থানাম ও নিওডিমিয়াম—এর ক্ষেত্রে এই আটকে রাখা সমৃদ্ধকরণ গুণক 1.6 থেকে 5.4 করেছে। ল্যান্থানাম ও প্রাসডিমিয়ামের ক্ষেত্রে 1.5 থেকে 4.2। সমৃদ্ধকরণ গুণক পৃথকীকরণের পর দুই আয়নের অনুপাতকে পৃথকীকরণের আগের অনুপাতের সঙ্কে তুলনা করে। মান 1 হলে কোনো অগ্রাধিকার নেই; 5.4 মানের ধরা পদার্থে নিওডিমিয়ামের প্রতি ল্যান্থানামের তুলনায় অগ্রাধিকার প্রাথমিক মিশ্রণের চেয়ে 5.4 গুণ বেশি।

এগুলো নিরীক্ষিত জোড়ার জন্য অর্থপূর্ণ পরীক্ষাগার ফল। এতে প্রমাণ হয় না যে এখন সব বরিল-মৃত্তিকা পরিশোধনভাবে আলাদা করা যাবে, প্রবাহ প্রক্রিয়া দেখানো হয়েছে, বা দ্রাবক নিক্ষেপন বদলে দেওয়া যাবে।

গবেষণাপত্রে সবচেয়ে শক্তিশালী ধারণাটি পরিশোধনাগারে চেষ্টা করে অনেক ছোট: একটি ভিজো খনজি ফাঁককে খুলে যেতে না দেওয়া।

পানিতে আয়ন খালি পরমাণুর চেষ্টা বড়

বরিল-মৃত্তিকা মৌল বলতে lanthanide-এর সঙ্গে scandium ও yttrium-ও বোঝায়। গবেষণায় lanthanum থেকে ytterbium পর্যন্ত 12টি ত্রিধাত্মক lanthanide ion পরীক্ষা করা হয়েছে। Cerium সহজে oxidation state বদলায় এবং promethium তজ্জেক্রিয়—তাই দুটিকে বাদ দেওয়া হয়।

পানিতে আয়ন একা চলে না। পানি অণু তার charge-এর চারপাশে সাজিয়ে **জলযোজিত খোলস** তৈরি করে। সবুজ চ্যানলে ঢুকলে কঠিন পদার্থের সঙ্গে বাঁধে করতে আয়নকে এই পানি স্তরেরে কিছু অংশ পুনর্বিন্যস্ত বা ঝরতে হতে পারে। শক্তি ব্যয় আয়ন ও আশপাশের পরবিশেষ—দুটোই ওপরই নরিভর করে।

মাত্রাগুলো **অ্যাংস্ট্রম (Å)**-এ দেওয়া। 1 অ্যাংস্ট্রম হলো মিটারের দশ-বিলিয়ন ভাগের এক ভাগ ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$)। পরীক্ষিত ল্যান্থানাইডগুলোর প্রথম জলযোজিত খোলসের ব্যাস আনুমানিক **6.6 থেকে 7.1 Å**।

গবেষকেরা busenite নামে জলযোজিত স্তরযুক্ত ম্যাঙ্গানিজ অক্সাইড ব্যবহার করেন। পুনরাবৃত্ত স্তর অবস্থান থেকে পরেরটির দূরত্ব ছিল প্রায় **9.6 থেকে 9.7 অ্যাংস্ট্রম**। কিন্তু স্তর নজিও জায়গা নেই। তাই স্তরের মাঝখানের আসল মুক্ত পানিভরা ফাঁক ছিল মাত্র **6.8 থেকে 6.9 অ্যাংস্ট্রম**।

এই পার্থক্য গুরুত্বপূর্ণ। 9.7-অ্যাংস্ট্রম interlayer ব্যবধান মানই 9.7-অ্যাংস্ট্রম খোলা চ্যানলে নয়।

কিছু হালকা ল্যান্থানাইড গঠনকে বেশি পানি-সমৃদ্ধ পর্যায়ে প্রসারিত করায়। সেখানে স্তর-to-স্তর ব্যবধান ছিল প্রায় **11.2 অ্যাংস্ট্রম** এবং মুক্ত ফাঁকের অনুমান প্রায় **8.42 অ্যাংস্ট্রম**। Birnessite নামে কাছাকাছি একটি আরও সবুজ গঠনে মুক্ত ফাঁক ছিল প্রায় **4.42 অ্যাংস্ট্রম**।

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

তুলনাটি জলযোজিত আয়নের আনুমানিক ব্যাস ও মুক্ত পানিভরা ফাঁকের মধ্যে; খালি আয়ন ও পুরো স্তর-to-স্তর ব্যবধানের মধ্যে নয়। আকার প্রক্রিয়ার

একটি অংশ, পুরো ব্যাখ্যা নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

খনজি গঠন আয়নের সঙ্গে মানিয়ে নতি পারে

ম্যাগনেসিয়াম আটকে রাখা ছাড়া চ্যানলে কঠোর sieve নয়; stacked স্তর নড়তে পারে। পরীক্ষায় হালকা আয়ন ল্যান্থানাম, প্রাসডিউমিয়াম ও নডিউমিয়াম পদার্থকে বেশি পানি নতি এবং বেশি খুলতে বাধ্য করেছে। Europium থেকে ইটারবিয়াম পর্যন্ত ভারী আয়ন সাধারণত আরও সংকীর্ণ চ্যানলে বজায় রয়েছে। Samarium দুই ধরনের প্রতিক্রিয়ার মাঝামাঝি ছিল।

গবেষণাপত্র প্রথম প্রতিক্রিয়াকে **দল I** এবং দ্বিতীয়টিকে **দল II** বলছে। এগুলো এই পদার্থে আয়নের আচরণের চহিন, periodic সারণির দল সংখ্যা নয়। অন্য পরীক্ষামূলক অবস্থায় সীমা বদলাতেও পারে।

এই কাঠামোগত পার্থক্য ভিন-গোষ্ঠীর জোড়া আলাদা করতে সাহায্য করেছে। সরাসরি আয়ন বিনিময়ে নথিভুক্ত সমৃদ্ধকরণ গুণক ছিল ল্যান্থানাম বনাম ডিসপ্রোসিয়াম **7.8**, প্রাসডিউমিয়াম বনাম ডিসপ্রোসিয়াম **5.7**, নডিউমিয়াম বনাম ডিসপ্রোসিয়াম **4.5**, এবং নডিউমিয়াম বনাম europium **2.6**।

বেশির ভাগ পাশাপাশি জোড়া অনেক কঠিন ছিল; সমৃদ্ধকরণ গুণক ছিল প্রায় 1.1। 1-এর কাছাকাছি মান খুব সামান্য অগ্রাধিকার বোঝায়। একই প্রতিক্রিয়া দলের কাছাকাছি আয়নের তুলনায় ভিন চ্যানলে গঠন পছন্দ করা আয়ন জোড়া আলাদা করা সহজ হয়েছে।

ম্যাগনেসিয়াম চ্যানলে-টিকে pin করে

এরপর গবেষকরা **electrochemical intercalation** ব্যবহার করেন—বৈদ্যুতিক বিক্রিয়ার সাহায্যে কঠিন পদার্থের স্তরের মাঝখানে ion ঢোকানো। Rare-earth ion ঢোকানোর সময় magnesium ion channel-এর মধ্য থেকে যায়। এই অবশিষ্ট magnesium buserite-র স্তরবিন্যাসকে অতিরিক্ত প্রসারিত হওয়া থেকে আটকাতো সাহায্য করে।

এই সব, ভজো ফাঁকে জলযোজিত আয়নের জায়গা কম। প্রস্তুতি প্রক্রিয়ায় সীমাবদ্ধতা, আংশিক জলমোচন, সমন্বয় এবং বন্ধন—সবই আছে। **সমন্বয়** বলতে আয়নকে সরাসরি ঘিরে তার সঙ্গে মখিস্ক্রিয়া করা কাছের পরমাণু, প্রায়ই অক্সিজেন, বোঝায়।

প্রমাণ এসছে কয়েক ধরনের কাজ থেকে। X-রশ্মি পরিমাপ কঠিন পদার্থ গঠন অনুসরণ করেছে। তড়িৎসায়নিক পরীক্ষা সন্নিবেশে ও পৃথকীকরণ মপেছে। **ঘনত্ব কার্যগত তত্ত্ব**, একটি ক্রিয়ান্টাম-যান্ত্রিক হিসাব, গঠন, জলযোজন ও বন্ধন তুলনা করেছে। হিসাব প্রক্রিয়া ব্যাখ্যা করতে সাহায্য করে; একটি আয়ন চ্যানলের ভেতর দিয়ে যাওয়ার সরাসরি চলচ্চিত্র নয়।

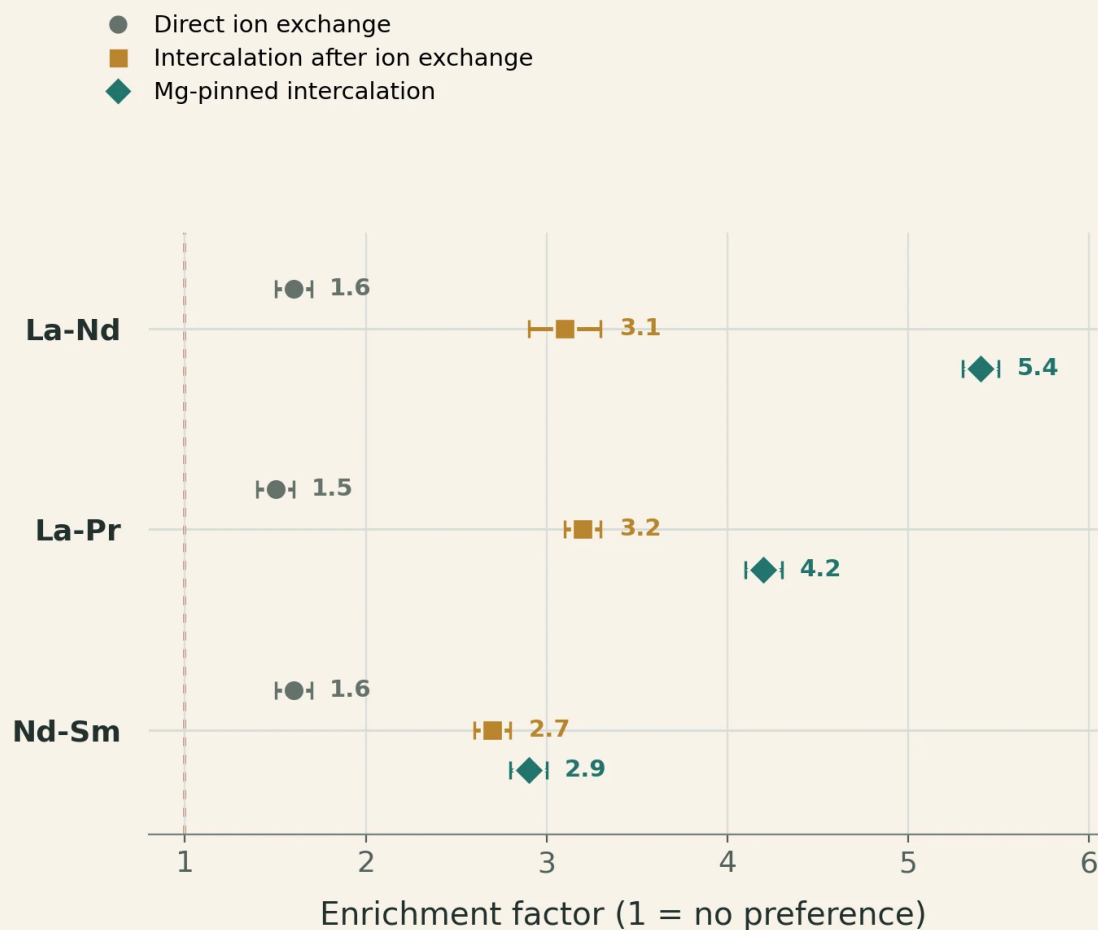
প্রক্রিয়া-টিশু “ছেটি আয়ন যায়, বড় আয়ন আটকে যায়”ও নয়। পানি খোঁলস, স্তর কীভাবে প্রতিক্রিয়া দেয়, dehydration-এর শক্তিব্যয় এবং আয়ন কঠিন পদার্থের সঙ্গে কীভাবে লক্ক্যবন্ধি করে—সবই ভূমিকা রাখে।

আটকে রাখা কছু পাশাপাশি জোড়ার পৃথকীকরণ বাড়িয়েছে

সবচেয়ে বেশি আলোচিত পরিবর্তন ল্যান্থানাম ও নডিউমিয়ামে: আটকে রাখা ছাড়া সমৃদ্ধকরণ **1.6 +/- 0.1**, ম্যাগনেসিয়াম আটকে রাখায় **5.4 +/- 0.1**। ল্যান্থানাম বনাম প্রাসডিউমিয়াম **1.5 +/- 0.1** থেকে **4.2 +/- 0.1**। নডিউমিয়াম বনাম samarium **1.6 +/- 0.1** থেকে **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.

প্রতিটি সারি একই প্রক্রিয়ার ধারাবাহিক পরীক্ষা নয়; তিনটি আলাদা পরীক্ষার পরে টেবিলের তুলনা। গুণক 1 মান অগ্রাধিকার নই; বেশি মান নির্দেশিত জেডার বেশি সমৃদ্ধকরণ বোঝায়। বিন্দু গড় দেখায় এবং whisker +/- মানক বিচ্যুতি (n = 3)।

The Clean Paper CC BY 4.0

pH 2-এ ল্যান্থানাম-নডিডমিয়াম মান হল 5.6 ± 0.2 । বদ্যুতকি হার পাঁচগুণ, 0.1C থেকে 0.5C, বাড়ালে মান 5.4 ± 0.1 থেকে 4.3 ± 0.4 -এ নেমে যায়। C-হার প্রয়োগে পতি বদ্যুতকি বদ্যুৎপ্রবাহকে পদার্থ ধারণক্ষমতার সঙ্গে তুলনা করে। বেশি হারে আয়ন ও কঠনি পদার্থের প্রতিক্রিয়া দেওয়ার সময় কম।

কোনো একটি মান পদার্থ-টিকে সব অবস্থায় বর্ণনা করে না। সমৃদ্ধকরণ নির্ভর করে জেডা, কঠনি পদার্থ গঠন, অম্লতা ও operating হারের ওপর।

গবেষণায় প্রচুর অ-বরিল-মৃত্তিকা আয়নের মাঝে পদার্থ-টি পরীক্ষা করা হয়েছে। প্রারম্ভিক মিশ্রণে প্রতিটি বরিল-মৃত্তিকা আয়নের জন্য

1,000টি competing আয়ন ছিল। প্রতিবেদিত বাছাইক্ষমতা ছিল সে ডিয়ামরে বর্নিত প্রায় 1,200, ক্যালসিয়ামরে বর্নিত 6,500 এবং ম্যাগনেসিয়ামরে বর্নিত 1,700।

এতে বোঝা যায়, এই পরীক্ষাগার অবস্থায় সাধারণ আয়ন স্বয়ংক্রিয়ভাবে পৃথকীকরণকে ডুবিয়ে দেয়নি। কিন্তু এটি সব ধাতু, অম্লতা ও দূষক-সহ সম্পূর্ণ আকরিক-উৎপন্ন তরলরে পরীক্ষা নয়।

সমৃদ্ধকরণ, পৃথকীকরণ, বিশুদ্ধতা, অপসারণ ও পুনরুদ্ধার আলাদা ফল

গবেষণাপত্রে কয়েকটি কার্যক্ষমতা মাপকাঠি আছে; একটিকে জায়গায় আরেকটি ব্যবহার করা যাবে না।

সমৃদ্ধকরণ গুণক পৃথকীকরণের পর দুই আয়নের অনুপাতকে পৃথকীকরণের আগের অনুপাতের সঙ্গে তুলনা করে। 5.4 মানের ধরা পদার্থ ওই জোড়ার একটি সদস্যকে প্রাথমিক মিশ্রণের তুলনায় 5.4 গুণ বেশি সমর্থন করেছে।

পৃথকীকরণ গুণক তরলে যা বাকি থাকে সেটিকে বিবেচনা করে: প্রতিটি আয়নের ধরা ও uncaptured পরিমাণের ভারসাম্য তুলনা করে, তারপর দুই আয়নের ভারসাম্য তুলনা করে। তাই আরও পদার্থ সরালে পৃথকীকরণ গুণক বাড়তে পারে, যদিও সমৃদ্ধকরণ গুণক অন্যভাবে বদলায়।

বিশুদ্ধতা হলো পুনরুদ্ধার করা অংশে নির্দিষ্ট আয়নের অংশ। দুই-পর্যায় প্রদর্শনে নির্ধারণিত পথে প্রায় 97.0% নডিডমিয়াম বিশুদ্ধতা এবং 92.3% ডসিপ্রেসিয়াম বিশুদ্ধতা পাওয়া গেছে।

অপসারণ হলো প্রাথমিক দ্রবণ থেকে কত অংশ সরানো হয়েছে। 10 মিলিগ্রাম গুঁড়োর আটটি পরপর addition নডিডমিয়াম-ডসিপ্রেসিয়াম পরীক্ষায় 72% ডসিপ্রেসিয়াম সরায় এবং জমা পৃথকীকরণ গুণক 10.8 দেয়।

পুনরুদ্ধার জিজ্ঞাসে করে ধরা আয়নের কতটা পরে আবার ছাড়া যায়। Reverse আয়ন বনিময় একটি নডিডমিয়াম-ডসিপ্রেসিয়াম প্রক্রিয়ায় 80% পুনরুদ্ধার করেছে। তড়িৎরাসায়নিক অপসারণ একটি ল্যান্থানাম-নডিডমিয়াম প্রক্রিয়ায় 89% পুনরুদ্ধার করেছে।

পুনরুদ্ধার পুনরাবর্তনক্ষমতা দেখায়। একই কার্যক্ষমতা রেখে ইলেক্ট্রোড কতবার পুনর্ব্যবহার করা যাবে, তা প্রতিষ্ঠা করে না।

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

চারটি নিখড়িক্ত মাপকাঠি হর আলাদা এবং এগুলো ভিন্ন পরীক্ষা থেকে এসেছে। এগুলো প্রমাণ কার্ড, একই প্রক্রিয়ার ধারাবাহিক পর্যায়ে নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

দুটি চমকপ্রদ শতাংশ কীভাবে আলাদা অর্থ বহন করতে পারে?

ধরুন একটি প্রক্রিয়া প্রাথমিক তরল থেকে একটি আয়নরে 90% সরাল। এটি উচ্চ অপসারণ। কিন্তু তার সঙ্গে অনেকে unwanted আয়ন-ও এলে পুনরুদ্ধার করা পদার্থের বিশুদ্ধতা কম হতে পারে। আবার খুব বিশুদ্ধ একটি ছোট অংশ poor পুনরুদ্ধার বোঝাতে পারে, যদি লক্ষ্যের বেশির ভাগই পছন্দে থেকে যায়। প্রক্রিয়া মূল্যায়নে শুধু সবচেয়ে বড় সংখ্যা নয়, সব ভারসাম্য দরকার।

দেখোনে যন্ত্রপাতি এখনও বাকি পরীক্ষা

Scale-up-এর দকিনেওয়ে electrochemical experiment শুরু হয়েছে 5 millilitre solution দিয়ে, যেখান থেকে প্রতিটি ion-এর concentration ছিল 25 millimole per litre। Electrode-এ সক্রিয় পদার্থ ছিল আনুমানিক 25 থেকে 40 milligram।

একটি ইলেক্ট্রোড প্রায় 40% নিওডিমিয়াম সরায়। ধারায় তিনটি ইলেক্ট্রোড ব্যবহার করলে প্রায় 90% অপসারণ এবং জমা পৃথকীকরণ গুণক 16.6 +/- 0.4 হয়। Operating হার অনুযায়ী বাকি 200 মিনিট থেকে 13 ঘণ্টা চলছে।

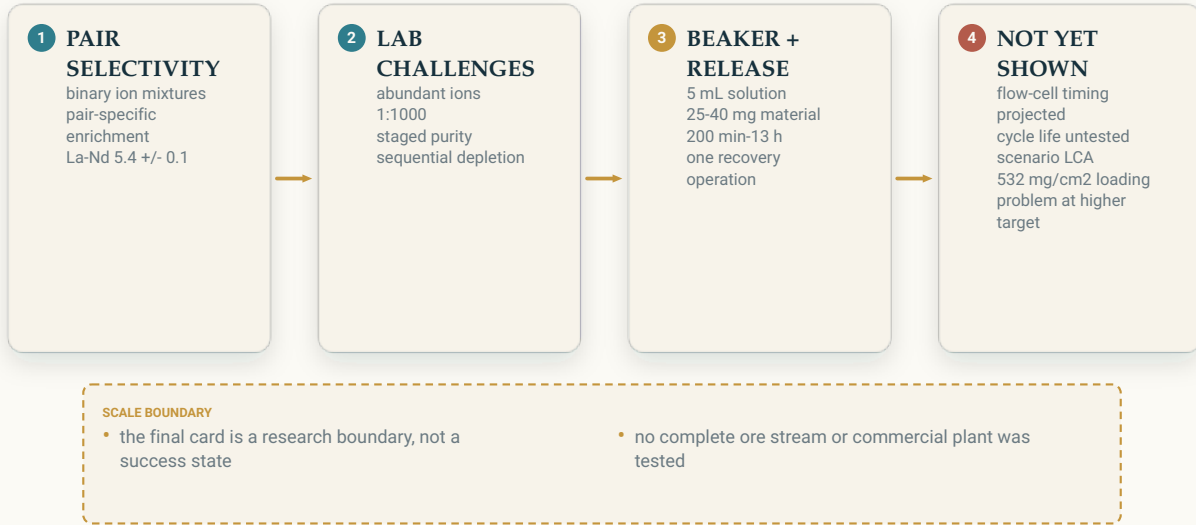
এই মাত্রা ও সময় মূল কাহিনির অংশ, কারণ কী বাস্তবে দেখোনে হচ্ছে তা এগুলো নির্ধারণ করে।

পর্যাপ্ত উপকরণে ভর-স্থানান্তরে সীমা-ও আছে। উচ্চতর-ঘনত্ব বাকি লক্ষ্যে 50% মনে অপসারণ পতে আনুমানিক 266-মিলিগ্রাম ইলেক্ট্রোড, বা প্রতি বর্গ সেন্টিমিটারে 532 মিলিগ্রাম সক্রিয় পদার্থ লাগত। ছোট ইলেক্ট্রোডে এত পদার্থ গুঁজে দিলে dissolved আয়নরে সব অংশে পট্টা ছানো কঠিন হতো। তাই লেখকরা বাকি পরীক্ষার জন্য আরও পাতলা দ্রবণ ব্যবহার করেন।

একটি কাল্পনিক flow cell-এর হিসাব শুধু অনুমান। 1.25-millilitre cell ও 5 × 5 centimetre electrode ধরে supplementary material-এ আনুমানিক 1C-তে 20 মিনিট অথবা 0.5C-তে 40 মিনিটে প্রায় 90% ion অপসারণের হিসাব দেওয়া হয়েছে। এমন কোনো flow-cell experiment বাস্তবে প্রতিবেদন করা হয়নি।

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

ধাপক্রম একটি সীমা-তে শেষে হয়: দ্বিমিক ও ধাপে ধাপে পরীক্ষাগার প্রমাণ আছে, কিন্তু প্রবাহ সময়বন্টিয়াস ও পরবিশেষত কার্যক্ষমতা অনুমানভিত্তিক বা পরিস্থিতি-ভিত্তিক; উদ্ভাদি স্কেলে প্রদর্শিত নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

পরবিশেষত তুলনা একটি পরিস্থিতি, উদ্ভাদি ফল নয়

পর্যাপ্ত জীবন-চক্র মূল্যায়ন বরিল-মৃত্তিকা অক্সাইডে শেষে হওয়া পৃথকীকরণ ধাপ তুলনা করে এবং প্রতি **1 kilogram নিওডিমিয়াম অক্সাইড**-এর ইনপুট প্রতিনিবেশ করে।

এতে খনন, আকরক pretreatment বা পূর্ণ বাণিজ্যিক refining শৃঙ্খল নাই। পরীক্ষাগার প্রক্রিয়া-টিনানা উৎসরে অনুমান জুড়ে উপস্থাপন করা হয়েছে। Electrode আয়ুষ্কালরে **10, 20 ও 100 চক্র** পরিস্থিতি ও সংবদনশীলতা মান; এই গবেষণায় স্থায়িত্ব হিসেবে পরিমাপিত নয়। মডলে ধরে ম্যাগনেসিয়াম পুনরুদ্ধার দ্রবণ ঘনত্ব 10% বদলানো পর্যন্ত পুনর্ব্যবহার করা যাবে, **95% পানি পুনর্ব্যবহার** হবে, এবং 450-600 ডিগ্রি সেলসিয়াসে দুই ঘণ্টা ক্যালসিনেশন অন্তর্ভুক্ত—যদিও এখানে ক্যালসিনেশন পরীক্ষামূলকভাবে প্রদর্শিত নয়।

জীবন-চক্র মূল্যায়ন নির্ধারণিত ব্যবস্থা সীমার ভেতরে পরবিশেষত বোঝা হিসাব করে। উত্তরটি সীমা যত বসিত এবং তালিকা ও স্কেলে অনুমান যত নির্ভরযোগ্য, ততটাই শক্তিশালী।

বিশ্লেষণে কীভাবে শক্তি, পদার্থ ও পুনর্ব্যবহার গুরুত্বপূর্ণ তা শনাক্ত করতে পারে। বাণিজ্যিক সংস্করণ শিল্পভিত্তিক দ্রাবক নিক্ষেপনে চেষ্টা কম পরবিশেষত প্রভাব দেবে, তা প্রমাণ করতে পারে না।

একটি প্রক্রিয়া, একটি প্ল্যাটফর্ম এবং দীর্ঘ প্রকটীশল পথ

গবেষণাপত্রটি প্রতিষ্ঠা করে যে জলযোজিত স্তরযুক্ত কঠিন পদার্থের ব্যবধান ও রাসায়নিক পরিবেশে ইচ্ছাকৃতভাবে নয়ন্ত্রণ করে নরিবাচতি ল্যান্থানাইড পৃথকীকরণ উন্নত করা যায়। ম্যাগনেসিয়াম আটকে রাখা শুধু আরকেটরাসায়নিক বন্ধন স্থান যোগ করলে; পানি-wrapped আয়ন যোগে গঠনের মধ্যে দিয়ে চলছে সেটিকেই সীমাবদ্ধ করেছে।

এই ফল ব্যবহারিক প্রশ্ন খুলে দেয়। বাস্তব আকরিক-উৎপন্ন মিশ্রণে কার্যকরমতা টিকে থাকবে? Workable ভর loading-সহ ইলেক্ট্রেড বানানো যাবে? বহু সন্নিবেশ/প্রকাশ চক্রে ম্যাগনেসিয়াম অক্সাইড কত স্থিতিশীল? Continuous কৌশল বাছাইক্যমতা, প্রক্রিয়াকরণ হার ও পানিভারসাম্য ধরে রাখতে পারবে? পরিমাপিত pilot-স্কেলে তালিকা দিয়ে পরিবেশগত তুলনা কমন হবে?

পরীক্ষা এই প্রশ্নগুলোর উত্তর দেয় না। বরং এগুলোকে আরও নরিদৃষ্টি করে।

সাফল্যটি সম্পূর্ণ বরিল-মৃত্তিকা পরিশোধনাগার নয়। কয়কে অ্যাংস্ট্রম নয়ন্ত্রণ, পানিভরা মহাকাশ একটি কঠিন পৃথকীকরণ বদলে দিতে পারে—তার প্রমাণ।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

গবেষকেরা পানিতে নরিবাচতি ল্যান্থানাইড-আয়ন জোড়া আলাদা করতে জলযোজিত স্তরযুক্ত ম্যাগনেসিয়াম অক্সাইড ব্যবহার করেছেন। পদার্থের মুক্ত ফাঁক ছিল প্রায় 6.8–6.9 অ্যাংস্ট্রম, যা আয়নের প্রথম জলযোজন খোলসের নথিভুক্ত 6.6–7.1-অ্যাংস্ট্রম ব্যাসের কাছাকাছি। Retained ম্যাগনেসিয়াম চ্যানেলে pin করে এবং জোড়া-নরিদৃষ্টি সমৃদ্ধকরণ বাড়ায়: ল্যান্থানাম-নডিডমিয়াম 1.6 থেকে 5.4, ল্যান্থানাম-প্রাসডিডমিয়াম 1.5 থেকে 4.2। গবেষণায় প্রচুর-আয়ন চ্যালেঞ্জ, ধাপে ধাপে বশিদ্ধতা, পরপর অপসারণ ও পুনরুদ্ধার প্রক্রিয়া-ও প্রতিবেদন করা হয়েছে। দেখানো হয়েছে স্কেলে ছিল 5-মিলিগ্রামের বাকির পরীক্ষা, 25–40 মিলিগ্রাম সক্রিয় পদার্থ এবং 200 মিনিট থেকে 13 ঘণ্টা বক্রিয়া সময়। প্রবাহ-কৌশল সময়বিন্যাস অনুমানভিত্তিক, বহু চক্র পুনরব্যবহার পরীক্ষিত নয়, এবং জীবন-চক্র তুলনা পরীক্ষাগার-স্কেলে অনুমানের ওপর নরিভরশীল। গবেষণাপত্রটি সীমাবদ্ধতা প্রক্রিয়া ও পরীক্ষাগার প্ল্যাটফর্মকে সমর্থন করে, দ্রাবক নিক্ষেপনের শলিপিভিত্তিক প্রতিস্থাপনকে নয়।

সরাসরি যাচাই

গবেষণাপত্রটিকে দেখো: Retained ম্যাগনেসিয়াম দিয়ে জলযোজিত ম্যাগনেসিয়াম-অক্সাইড ফাঁক প্রায় 6.8–6.9 অ্যাংস্ট্রমে ধরে রাখলে নরিবাচতি ল্যান্থানাইড জোড়ার পৃথকীকরণ বদলায়। কাঠামোগত পরিমাপ, তড়িৎরাসায়ন ও হিসাব সীমাবদ্ধতা, dehydration, সমন্বয় ও বন্ধন-সহ প্রক্রিয়াকে সমর্থন করে।

কোন ফল সবচেয়ে ভালো ছিল: নরিদৃষ্টি অবস্থায় ল্যান্থানাম-নডিডমিয়াম সমৃদ্ধকরণ 5.4 ± 0.1 , ল্যান্থানাম-প্রাসডিডমিয়াম 4.2 ± 0.1 । অন্য জোড়ার মান আলাদা। পৃথক পরীক্ষায় বশিদ্ধতা, অপসারণ ও পুনরুদ্ধার প্রতিবেদন করা হয়েছে, এবং তাদের হার আলাদা।

কী দেখায় না: সব বরিল-মৃত্তিকার সর্বজনীন separator; সম্পূর্ণ আকরিক ধারায় প্রক্রিয়া; প্রদর্শিত অবচ্ছিন্ন প্রবাহ কৌশল; বহু-চক্র স্থায়ী ইলেক্ট্রেড; দ্রাবক নিক্ষেপনের প্রতিস্থাপন; বা প্রমাণিত বাণিজ্যিক পরিবেশগত শ্রেষ্ঠত্ব।

প্রধান স্কেলে সীমা: দেখানো হয়েছে পরীক্ষায় 5 মিলিগ্রামের দ্রবণ, প্রায় 25–40 মিলিগ্রাম সক্রিয় পদার্থ এবং 200 মিনিট থেকে 13 ঘণ্টা লগেছে। উচ্চতর-ঘনত্ব লক্ষ্য প্রতিবরণ সেন্টেমিটারে 532-মিলিগ্রাম loading সমস্যা তৈরি করেছে। প্রবাহ সময় extrapolated। জীবন-চক্র মূল্যায়নে ইলেক্ট্রেড আয়ুষ্কাল ও বড় পুনরব্যবহার ইনপুট অনুমান ছিল।

সাধারণ পাঠকের কতটা আস্থা রাখা উচিত? নামকরা জোড়া ও অবস্থার নথিভুক্ত পরীক্ষাগার পরিমাপে উচ্চ আস্থা। প্রস্তাবিত আগবকি

ব্যাখ্যায় মাঝারি আস্থা, কারণ সরাসরি গঠন ও তড়িৎরাসায়নের সঙ্গে হিসাব মলিচ্ছে। বর্তমান তথ্য শলি্পভিত্তিক প্রক্রিয়াকরণ হার, আয়ুষ্কাল বা পরবিশেষত কার্যক্ষমতা পূর্বাভাস দিয়ে—এ দাবিতে কম আস্থা।

উৎস

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>