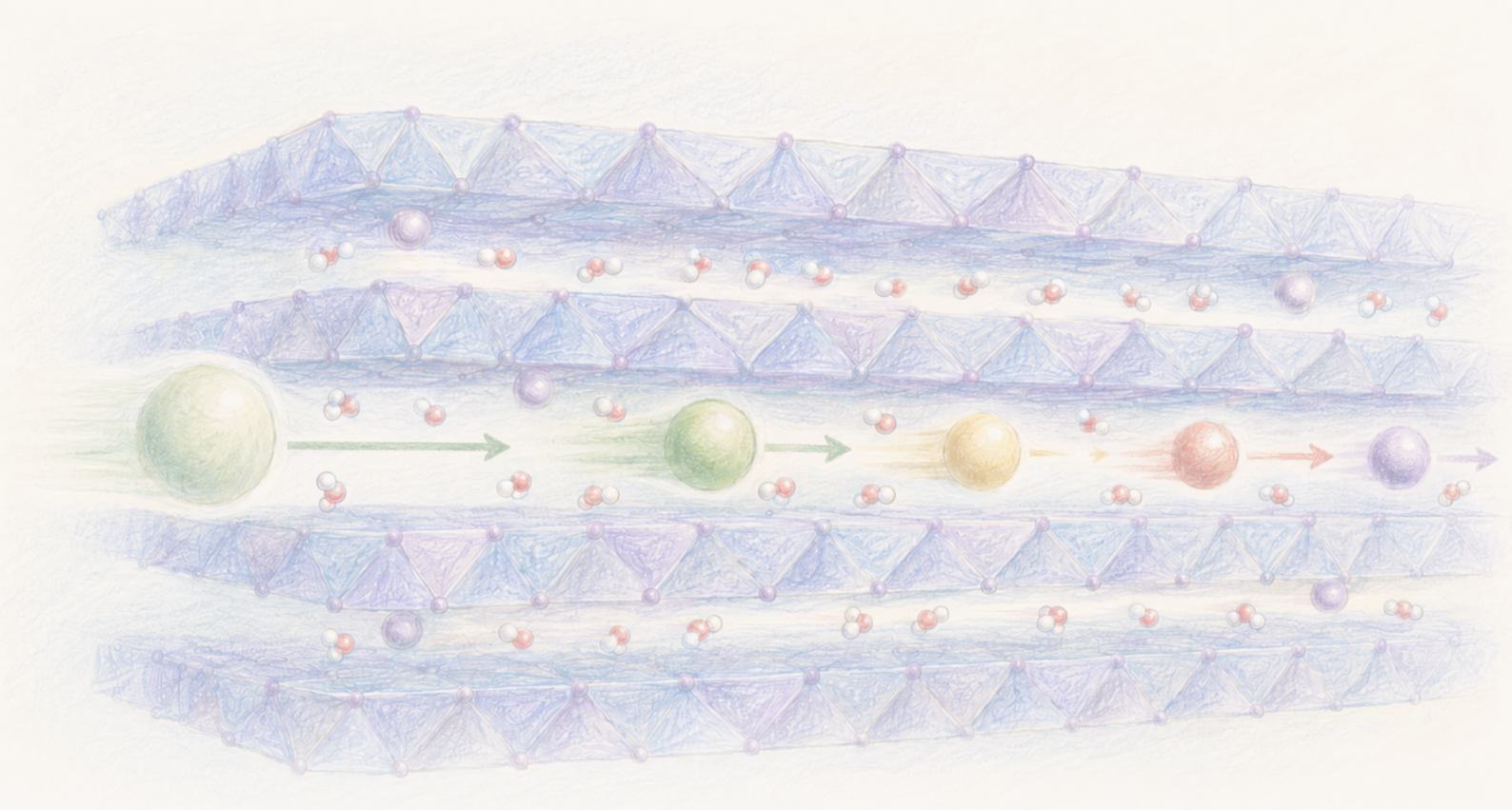


The Clean Paper

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

Suyla dolu bir mineral kanalını sabitlemek, birbirine benzeyen nadir toprak iyonlarını ayırmaya yardımcı oldu

Magnezyum, hidratlı manganez oksit boşluğunu bir lantanit iyonunun su kabuğuna yakın genişlikte tuttu ve laboratuvar testlerinde seçilmiş çiftlerin zenginleştirilmesini iyileştirdi. Gösterilen çalışma mililitrelerce çözelti ve miligramlarca malzeme kullandı; akışlı çalışma, uzun çevrim ömrü ve ticari çevresel performans henüz kanıtlanmış değil.

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

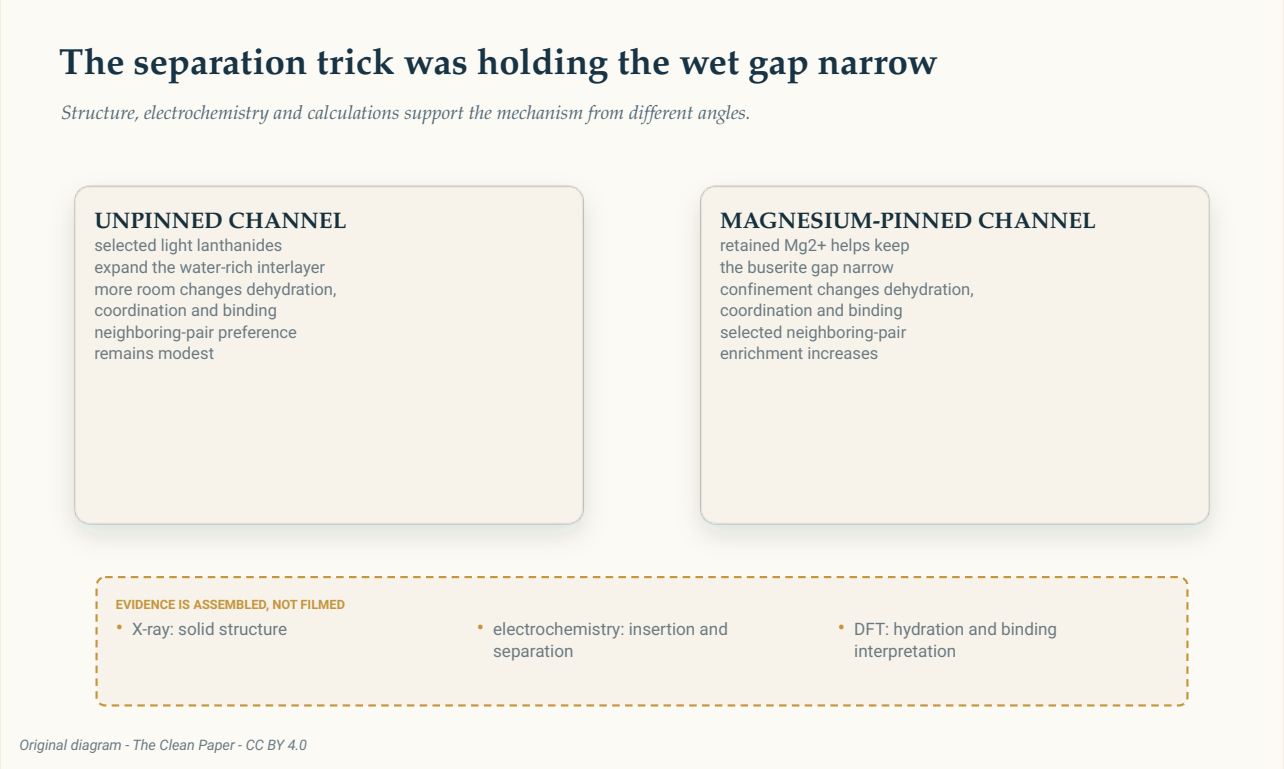
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Suyla dolu bir mineral kanalını sabitlemek, birbirine benzeyen nadir toprak iyonlarını ayırmaya yardımcı oldu

Nadir toprak iyonlarını ayırmak, uzaktan birbirine benzeyen kardeşleri ayırt etmenin zor olmasına benzer bir nedenle güçtür: farklar gerçektir, ama küçüktür.

Lantanitler periyodik tabloda yan yana bulunur ve genellikle aynı yüke sahip iyonlar oluşturur. Seri boyunca boyutları kademeli olarak değişirken kimyasal davranışları birbirine benzer kalır. Bu nedenle endüstriyel rafinasyon çok sayıda tekrarlanan ayırma basamağına dayanır.

Yeni bir laboratuvar çalışması bu soruna sınırlama yoluyla yaklaştı. Araştırmacılar, aralarında suyla dolu bir boşluk bulunan üst üste dizilmiş manganez oksit tabakaları kullandı. Bir nadir toprak iyonu bu boşluğa, su molekülleriyle çevrili halde yaklaşır. Bir destek olmadığında tabakalar onu barındırmak için birbirinden uzaklaşabilir. Magnezyum iyonları bir destek gibi davrandı: tabakalar arasında kaldıklarında boşluğun dar tutulmasına yardımcı oldular. Böylece farklı nadir toprak iyonları, su moleküllerinin bir kısmını bırakmak, kanala girmek ve katıdaki oksijen atomlarına bağlanmak için farklı enerji bedelleri ödedi.



Sabitlenmemiş ve magnezyumla sabitlenmiş kanallar; yapı, elektrokimya ve hesaplamalarla desteklenen mekanistik yorumlardır. Hiçbir tek deney moleküler dizinin tamamını doğrudan izlemedi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Test edilen bir çiftte, lantan ve neodimyum için bu **sabitleme**, zenginleştirme faktörünü 1,6'dan **5,4**'e çıkardı. Lantan ve praseodimyum için değer 1,5'ten **4,2**'ye yükseldi. Zenginleştirme faktörü, ayrımdan sonra iki iyonun oranını ayrımdan önceki oranlarıyla karşılaştırır. 1 değeri hiçbir tercih

olmadığı anlamına gelir; 5,4 ise yakalanan malzemenin, başlangıç karışımına kıyasla neodimyumu lantana karşı 5,4 kat daha güçlü biçimde tercih ettiğini gösterir.

Bunlar, belirli çiftler için anlamlı laboratuvar sonuçlarıdır. Her nadir toprağın artık temiz biçimde ayrılabildiğine, akışlı bir sürecin gösterildiğine ya da çözücü ekstraksiyonunun yerini alabileceğine kanıt değildir.

Makaledeki en güçlü fikir bir rafineriden çok daha küçüktür: ıslak bir mineral aralığının açılmasını engellemek.

Sudaki bir iyon, çıplak atomdan daha büyüktür

Nadir toprak elementleri lantanitlerin yanı sıra skandiyum ve itriyumdan oluşur. Çalışmada lantandan iterbiyuma kadar on iki pozitif yüklü lantanit iyonu test edildi. Seryum, oksidasyon durumunu kolayca değiştirdiği için; radyoaktif prometyum ise radyoaktif olduğu için dışarıda bırakıldı.

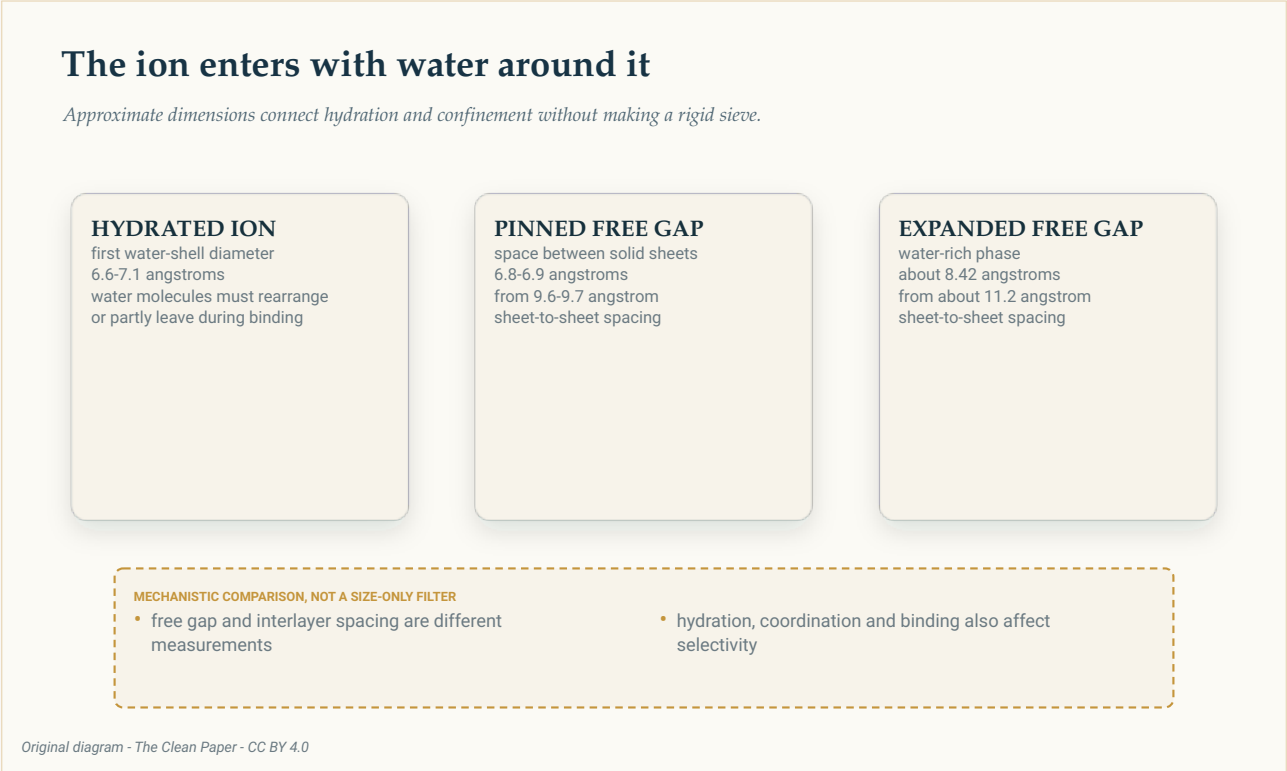
Suda bir iyon tek başına hareket etmez. Su molekülleri, iyonun yükünün çevresinde düzenlenerek bir **hidrasyon kabuğu** oluşturur. Dar bir kanala girip katıya bağlanmak için iyonun bu su tabakasının bir bölümünü yeniden düzenlemesi ya da bırakması gerekebilir. Bunun enerji maliyeti hem iyona hem de çevresine bağlıdır.

Boyutlar **ångström (Å)** cinsinden ölçülür. Bir ångström, metrenin on milyarda biridir (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Test edilen lantanitlerin ilk hidrasyon kabuklarının çapı yaklaşık **6,6 ila 7,1 Å** olarak bildirildi.

Araştırmacılar, buserit adı verilen hidratlı, tabakalı bir manganez oksit kullandı. Üst üste duran tabakalar, bir tekrar eden tabaka konumundan diğerine ölçüldüğünde yaklaşık **9,6 ila 9,7 ångström** aralıklıydı. Ancak tabakanın kendisi de yer kaplar. Tabakalar arasında suya açık serbest boşluk yalnızca yaklaşık **6,8 ila 6,9 ångström** idi.

Bu ayrım önemlidir. 9,7 ångströmlük tabakalar arası mesafe, 9,7 ångströmlük açık bir kanal değildir.

Daha hafif bazı lantanitler yapının daha fazla su içeren bir faza genişlemesine neden oldu. Burada tabakadan tabakaya mesafe yaklaşık **11,2 ångström**, tahmini serbest boşluk ise yaklaşık **8,42 ångström** idi. Birnazit adlı daha dar ilişkili yapıda serbest boşluk yaklaşık **4,42 ångström** idi.



Karşılaştırma, çıplak iyon ile tam tabaka-tabaka mesafesi arasında değil; yaklaşık hidrasyon kabuğu çapı ile suyla dolu serbest boşluk arasındadır. Boyut mekanizmanın bir parçasıdır, tamamı değildir.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineral iyona uyum sağlayabilir

Magnezyumla sabitleme olmadığında kanal katı bir elek değildir: üst üste duran tabakaları hareket edebilir. Deneylerde daha hafif iyonlar olan lantan, praseodimyum ve neodimyum, malzemenin daha fazla su almasına ve daha geniş açılmasına yol açtı. Evropiyumdan iterbiyuma kadar daha ağır iyonlar ise daha dar kanalın korunmasına eğilim gösterdi. Samaryum bu iki yanıtın arasında kaldı.

Makale ilk yanıtı **Grup I**, ikincisini **Grup II** olarak adlandırıyor. Bunlar, iyonların bu belirli malzemeyi nasıl etkilediğini tanımlayan etiketlerdir; periyodik tablodaki grup numaraları değildir. Sınır, başka deney koşullarında da değişebilir.

Bu yapısal fark, farklı gruplara ait çiftlerde yardımcı oldu. Doğrudan iyon değişiminde bildirilen zenginleştirme faktörü lantan-disporsiyum için **7,8**, praseodimyum-disporsiyum için **5,7**, neodimyum-disporsiyum için **4,5** ve neodimyum-evropiyum için **2,6** idi.

Komşu çiftlerin çoğu çok daha zordu ve zenginleştirme faktörleri yaklaşık 1,1 civarındaydı. 1'e yakın faktör, çok az tercih olduğu anlamına gelir. Malzeme, iki iyon farklı kanal yapılarını tercih ettiğinde, aynı yanıt grubunda birbirine yakın oldukları duruma göre onları daha kolay ayırt edebildi.

Magnezyum kanalı sabitler

Araştırmacılar daha sonra **elektrokimyasal interkalasyon** kullandı: iyonları katı tabakaların arasına yerleştiren elektriksel bir reaksiyon. Nadir toprak iyonları içeri girerken magnezyum iyonları kanalda kaldı. Tutulan magnezyum, buserit aralığının genişlemesini önlemeye yardımcı oldu.

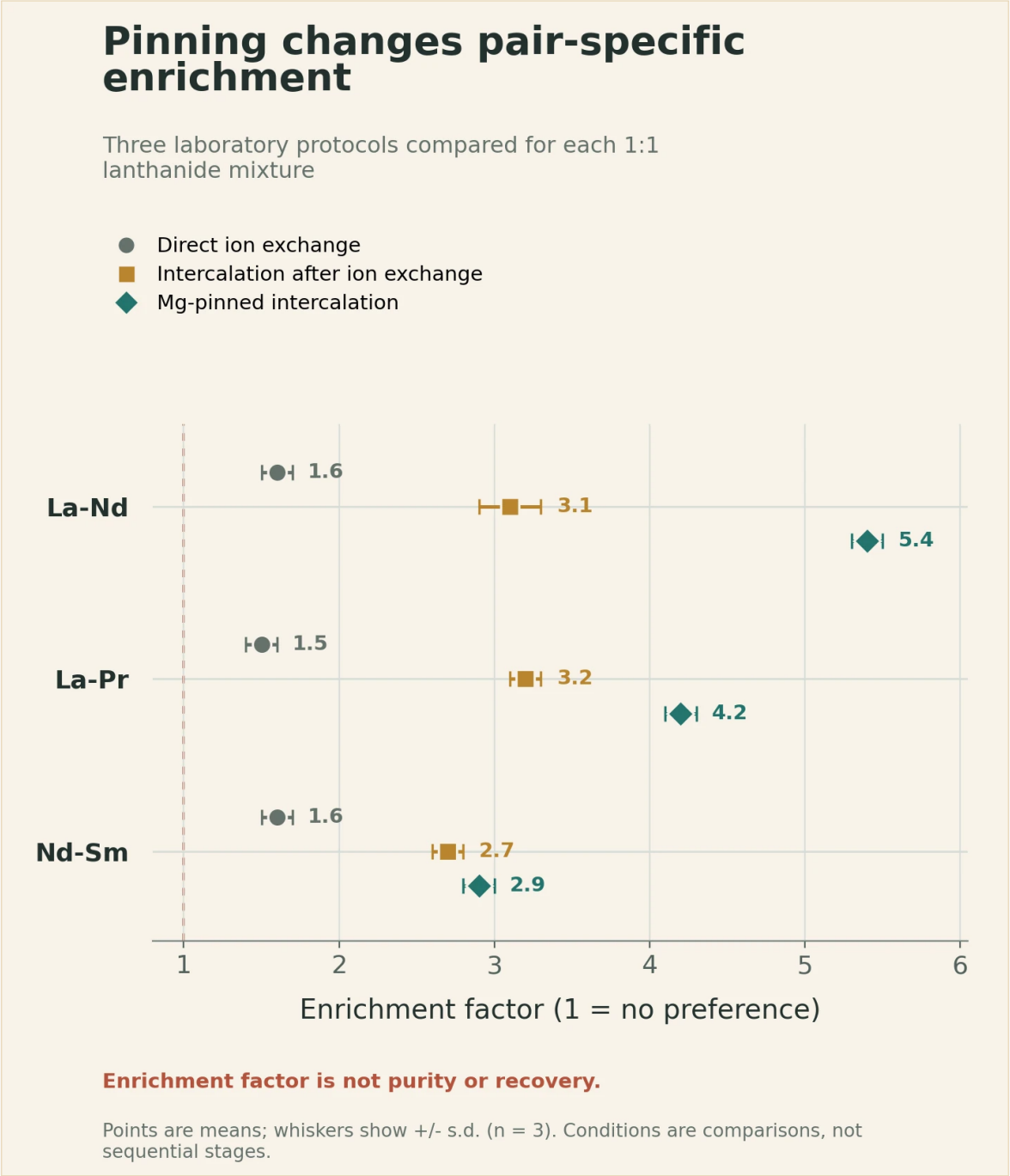
Bu daha dar, ıslak boşlukta gelen hidratlı iyonun hareket alanı daha azdır. Önerilen mekanizma sınırlama, kısmi dehidrasyon, koordinasyon ve bağlanmayı birlikte içerir. **Koordinasyon**, iyonu doğrudan çevreleyen ve onunla etkileşen, çoğunlukla oksijen gibi yakın atomları ifade eder.

Kanıt birkaç farklı çalışmadan gelir. X-ışını ölçümleri katı yapıyı izledi. Elektrokimyasal deneyler iyon eklenmesini ve ayrımı ölçtü. Kuantum mekaniksel bir hesaplama olan **yoğunluk fonksiyoneli teorisi**, yapıları, hidrasyonu ve bağlanmayı karşılaştırdı. Hesaplamalar mekanizmayı yorumlamaya yardımcı olur; bir iyonun kanaldan geçişinin doğrudan filmi değildir.

Mekanizma ayrıca basitçe "küçük iyonlar geçer, büyük iyonlar durur" şeklinde de değildir. Su kabuğu, tabakaların nasıl tepki verdiği, dehidrasyonun enerji bedeli ve iyonun katıyla nasıl koordine olduğu hep birlikte katkıda bulunur.

Sabitleme, seçilmiş komşu çiftlerde ayrımı iyileştirdi

Vurgulanan en büyük değişim lantan ve neodimyum içindi: zenginleştirme, sabitleme olmadan **1,6 +/- 0,1** iken magnezyumla sabitleme sonrası **5,4 +/- 0,1**'e çıktı. Lantan-praseodimyum **1,5 +/- 0,1**'den **4,2 +/- 0,1**'e, neodimyum-samaryum ise **1,6 +/- 0,1**'den **2,9 +/- 0,1**'e yükseldi.



Her satır tek bir sürecin ardışık aşamalarını değil, üç ayrı laboratuvar protokolünü karşılaştırır. 1 faktörü tercih olmadığını; daha yüksek değerler ise çifte özgü daha güçlü zenginleştirmeyi gösterir. Noktalar ortalamaları, çizgiler ise +/- standart sapmayı gösterir (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

pH 2'de lantan-neodimyum değeri **5,6 +/- 0,2** idi. Elektriksel hızın 0,1C'den 0,5C'ye beş kat artırılması değeri **5,4 +/- 0,1**'den **4,3 +/- 0,4**'e düşürdü. C-hızı, uygulanan elektrik akımını malzemenin kapasitesiyle karşılaştırır. Daha yüksek hız, iyonlara ve katıya yanıt vermek için daha az zaman bırakır.

Tek bir değer malzemeyi evrensel olarak tanımlamaz. Zenginleştirme, iyon çiftine, katı yapıya, asitliğe ve çalışma hızına bağlıdır.

Makale ayrıca malzemeyi bol bulunan, nadir toprak olmayan iyonlarla sınadı. Başlangıç karışımlarında her bir nadir toprak iyonuna karşı 1.000 rakip iyon vardı. Bildirilen seçicilik değerleri sodyuma karşı yaklaşık **1.200**, kalsiyuma karşı **6.500** ve magnezyuma karşı **1.700** idi.

Bu, bu laboratuvar koşullarında yaygın iyonların ayrımı otomatik olarak bastırmadığına dair yararlı bir kanıttır. Tüm metalleri, asitliği ve kirleticileriyle gerçek bir cevher türevi sıvının testi değildir.

Zenginleştirme, ayırma, saflık, uzaklaştırma ve geri kazanım farklı sonuçlardır

Makalede birkaç performans ölçütü yer alır ve bunlar birbirinin yerine kullanılamaz.

Bir **zenginleştirme faktörü**, ayrımdan sonra iki iyonun oranını ayrımdan önceki oranlarıyla karşılaştırır. 5,4 değeri, yakalanan malzemenin çiftin bir üyesini başlangıç karışımına göre 5,4 kat daha güçlü tercih ettiği anlamına gelir.

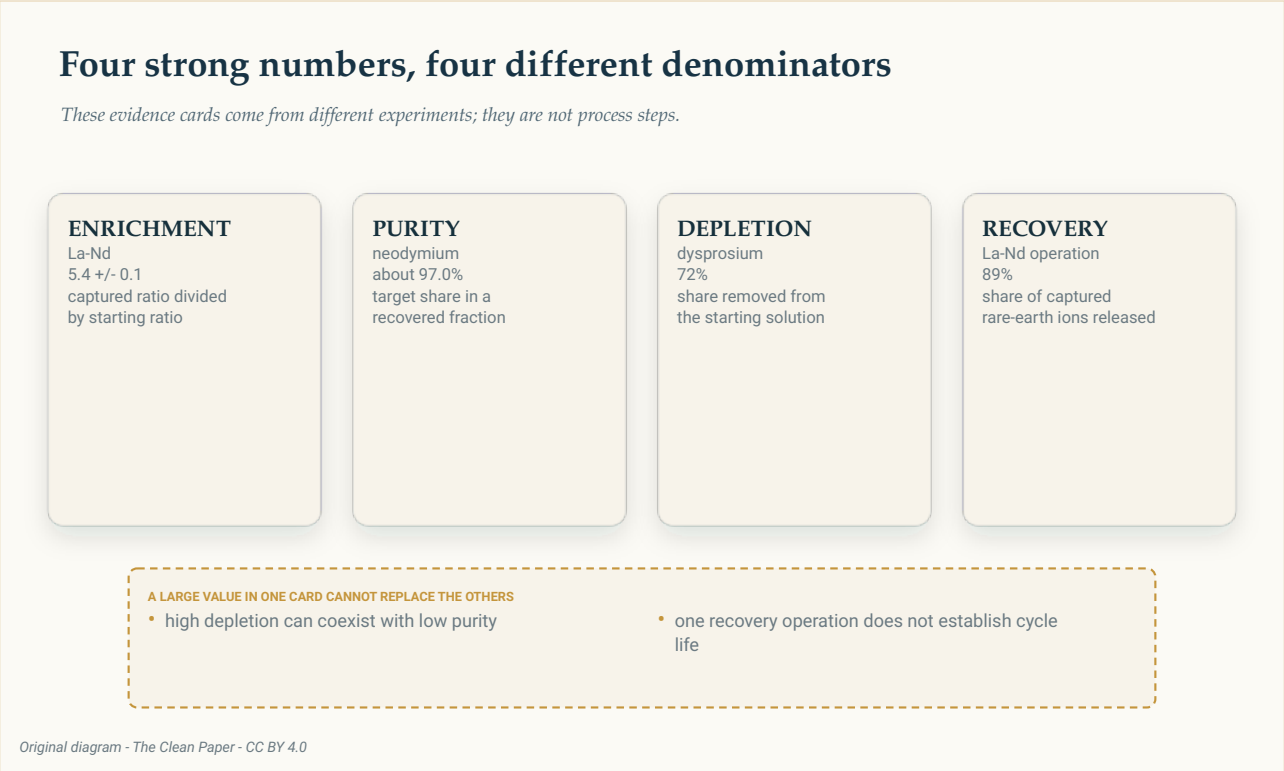
Bir **ayırma faktörü** sıvıda ne kaldığını da hesaba katar: her iyonun yakalanan miktarını yakalanmayan miktarıyla karşılaştırır, ardından bu iki dengeyi birbirine oranlar. Bu nedenle, zenginleştirme faktörü farklı bir desen izlese bile daha fazla malzeme uzaklaştırıldıkça ayırma faktörü yükselebilir.

Saflık, geri kazanılmış bir fraksiyon içinde seçilen iyonun payıdır. İki aşamalı gösterimler, belirtilen yollarda yaklaşık **%97,0 neodimyum saflığı** ve **%92,3 disprosyum saflığı** elde etti.

Uzaklaştırma (depletion), başlangıç çözeltisinden çıkarılan fraksiyondur. Her biri 10 miligram toz içeren sekiz ardışık ekleme, neodimyum-disprosyum testinde **disprosyumun %72'sini** uzaklaştırdı ve birikimli 10,8 ayırma faktörü üretti.

Geri kazanım, yakalanmış bir iyonun daha sonra ne kadarının serbest bırakılabildiğini sorar. Ters iyon değişimi bir neodimyum-disprosyum işleminde **%80** geri kazanım sağladı. Elektrokimyasal çıkarma ise bir lantan-neodimyum işleminde **%89** geri kazanım sağladı.

Geri kazanım tersinirliği gösterir. Bir elektrodun performansını koruyarak kaç kez yeniden kullanılabileceğini göstermez.



Bildirilen dört ölçüt farklı paydalar kullanır ve farklı deneylerden gelir. Bunlar tek bir sürecin ardışık aşamaları değil, ayrı kanıt kartlarıdır.

The Clean Paper CC BY 4.0

İki etkileyici yüzde neden farklı şeyler anlatabilir?

Bir sürecin başlangıç sıvısındaki bir iyonun %90'ını uzaklaştırdığını varsayın. Bu yüksek uzaklaştırmadır. Ancak onunla birlikte çok sayıda istenmeyen iyon da gelirse, geri kazanılan malzemenin saflığı yine düşük olabilir. Tersine, çok saf ama küçük bir fraksiyon, hedefin çoğu geride bırakılmışsa zayıf geri kazanım anlamına gelebilir. Bir süreç değerlendirmesi yalnızca en büyük sayıya değil, bu dengelerin tümüne ihtiyaç duyar.

Gösterilen düzenek hâlâ bir beher deneyidir

Ölçeğe dönük elektrokimyasal testler, her iyondan litre başına 25 milimol içeren **5 mililitre** çözeltiyle başladı. Elektrotlarda yaklaşık **25 ila 40 miligram** aktif malzeme vardı.

Bir elektrot neodimyumun yaklaşık %40'ını uzaklaştırdı. Seri kullanılan üç elektrot yaklaşık **%90 uzaklaştırmaya** ve **16,6 +/- 0,4** birikimli ayırma faktörüne ulaştı. Çalışma hızına bağlı olarak reaksiyonlar **200 dakikadan 13 saate** kadar sürdü.

Bu boyutlar ve süreler ana hikâyeye dahildir, çünkü gerçekte neyin gösterildiğini tanımlarlar.

Ek materyal ayrıca bir kütle aktarımı sınırı belirliyor. Daha yüksek derişimli bir beher hedefinde

toplam %50 uzaklaştırmaya ulaşmak için **266 miligramlık bir elektrot**, yani **santimetrekare başına 532 miligram aktif malzeme** gerektiği tahmin edildi. Bu kadar malzemeyi küçük elektrota doldurmak, çözünmüş iyonların tamamına ulaşmasını zorlaştıracaktı. Bu nedenle yazarlar beher deneyinde daha seyreltilmiş bir çözeltiye geçti.

Varsayımsal bir akış hücresi yalnızca bir projeksiyon olarak yer alıyor. 5 x 5 santimetrelik elektrotlu, varsayılan 1,25 mililitrelik bir hücre için ek materyal, yaklaşık %90 uzaklaştırma için **1C'de yaklaşık 20 dakika** veya **0,5C'de yaklaşık 40 dakika** tahmin ediyor. Böyle bir akış hücresi deneyi raporlanmıyor.

Merdiven bir sınırda biter: ikili ve aşamalı laboratuvar kanıtı vardır; akış süresi ve çevresel performans ise tesis ölçeğinde gösterilmiş değil, projeksiyon ya da senaryo temellidir.

The Clean Paper CC BY 4.0

Çevresel karşılaştırma bir senaryodur, tesis sonucu değildir

Ek yaşam döngüsü değerlendirmesi, nadir toprak oksitleriyle biten ayırma basamaklarını karşılaştırır ve girdileri **1 kilogram neodimyum oksit** başına raporlar.

Madencilik, cevher ön işlemesi veya eksiksiz bir ticari rafinasyon zinciri buna dahil değildir. Laboratuvar süreci, birden fazla kaynaktan derlenen varsayımlarla temsil edilir. **10, 20 ve 100 çevrimlik** elektrot ömürleri bu çalışmada ölçülen dayanıklılık değil, senaryo ve duyarlılık değerleridir. Model, magnezyum geri kazanım çözeltisinin derişimi %10 değişene kadar yeniden kullanılabildiğini, **suyun %95'inin geri dönüştürüldüğünü** varsayar ve burada deneysel olarak gösterilmemiş olmasına

rağmen 450-600 santigrat derecede iki saatlik kalsinasyonu hesaba katar.

Bir **yaşam döngüsü değerlendirmesi**, tanımlanmış bir sistem sınırı içindeki çevresel yükleri hesaba katar. Sonucu ancak bu sınır kadar kapsamlı ve envanter ile ölçek varsayımları kadar güvenilirdir.

Analiz, enerji, malzeme ve yeniden kullanımın nerede önemli olduğunu gösterebilir. Ticari bir sürümün endüstriyel çözücü ekstraksiyonundan daha düşük çevresel etkiye sahip olacağını kanıtlayamaz.

Bir mekanizma, bir platform ve uzun bir mühendislik yolu

Makale, hidratlı tabakalı bir katının aralığının ve kimyasal ortamının, seçilmiş lantanit ayrımlarını iyileştirmek üzere bilinçli olarak kontrol edilebileceğini gösteriyor. Magnezyumla sabitleme yalnızca başka bir kimyasal bağlanma noktası eklemedi; suyla sarılı iyonların geçmek zorunda olduğu yapıyı sınırladı.

Bu sonuç pratik sorular doğuruyor. Performans gerçek cevher türevi karışımlarda korunabilir mi? Elektrotlar uygulanabilir kütle yükleriyle üretilebilir mi? Manganez oksit, çok sayıda ekleme ve serbest bırakma çevriminde ne kadar kararlı? Sürekli bir hücre seçiciliği, verimi ve su dengesini koruyabilir mi? Ölçülmüş pilot ölçekli envanterlerle çevresel karşılaştırma nasıl görünür?

Deney bu soruları yanıtlamıyor. Onları daha somut hale getiriyor.

Başarı, tamamlanmış bir nadir toprak rafinerisi değildir. Birkaç ångströmlük kontrollü, suyla dolu alanın zor bir ayrımı değiştirebileceğine dair kanıttır.

Kısa özet

Araştırmacılar, suda seçilmiş lantanit iyon çiftlerini ayırmak için hidratlı, tabakalı manganez oksit kullandı. Malzemenin serbest boşluğu yaklaşık 6,8-6,9 ångström idi; bu, iyonların bildirilen 6,6-7,1 ångströmlük ilk hidrasyon kabuğu çapına yakındı. Tutulan magnezyum kanalı sabitlemeye yardımcı oldu ve çifte özgü zenginleştirmeyi iyileştirdi; lantan-neodimyum 1,6'dan 5,4'e, lantan-praseodimyum 1,5'ten 4,2'ye çıktı. Çalışma ayrıca bol bulunan iyonlarla zorlama deneyleri, aşamalı saflık, ardışık uzaklaştırma ve geri kazanım işlemleri raporladı. Gösterilen ölçek 5 mililitrelik beher deneyleri, 25-40 miligram aktif malzeme ve 200 dakikadan 13 saate uzanan reaksiyon süreleriyle sınırlı kaldı. Akış hücresi süresi projekte edildi, çok sayıda çevrimde yeniden kullanım test edilmedi ve yaşam döngüsü karşılaştırması laboratuvar ölçeği varsayımlarına dayanıyordu. Makale bir sınırlama mekanizmasını ve laboratuvar platformunu destekliyor; çözücü ekstraksiyonunun endüstriyel ikamesini değil.

Abartısız değerlendirme

Makale neyi gösteriyor: Tutulan magnezyumla hidratlı manganez oksit aralığını yaklaşık 6,8-6,9 ångströmde tutmak, seçilmiş lantanit çiftlerinin ayrımını değiştirdi. Yapısal ölçümler, elektrokimya ve hesaplamalar; sınırlama, dehidrasyon, koordinasyon ve bağlanmayı içeren bir mekanizmayı destekliyor.

En iyi performans neydi: Belirtilen koşullarda lantan-neodimyum zenginleştirmesi 5,4 +/- 0,1'e, lantan-praseodimyum ise 4,2 +/- 0,1'e ulaştı. Diğer çiftlerin değerleri farklıydı. Ayrı deneylerde saflık, uzaklaştırma ve geri kazanım sonuçları raporlandı; bunların paydaları farklıdır.

Ne göstermiyor: Tüm nadir topraklar için evrensel bir ayırıcı; eksiksiz bir cevher akışında çalışma; gösterilmiş sürekli akış hücresi; çok çevrimli dayanıklı elektrotlar; çözücü ekstraksiyonunun yerini alma; ya da ticari ölçekte kanıtlanmış çevresel üstünlük.

Başlıca ölçek sınırları: Gösterilen testlerde 5 mililitre çözelti, yaklaşık 25-40 miligram aktif malzeme ve 200 dakikadan 13 saate kadar süreler kullanıldı. Daha yüksek derişimli hedef, santimetrekare başına 532 miligramlık bir yükleme sorunu ortaya koydu. Akış süreleri ekstrapole edildi. Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki elektrot ömrü ve önemli geri dönüşüm girdileri varsayımdı.

Genel bir okuyucu ne kadar güvenmeli: Adlandırılmış çiftler ve koşullar için bildirilen laboratuvar ölçümlerine yüksek güven. Önerilen moleküler yoruma orta düzeyde güven; çünkü doğrudan yapı ve elektrokimya verilerini hesaplamalarla birleştiriyor. Mevcut verilerin endüstriyel verim, ömür veya çevresel performansı öngördüğüne düşük güven.

Kaynaklar

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