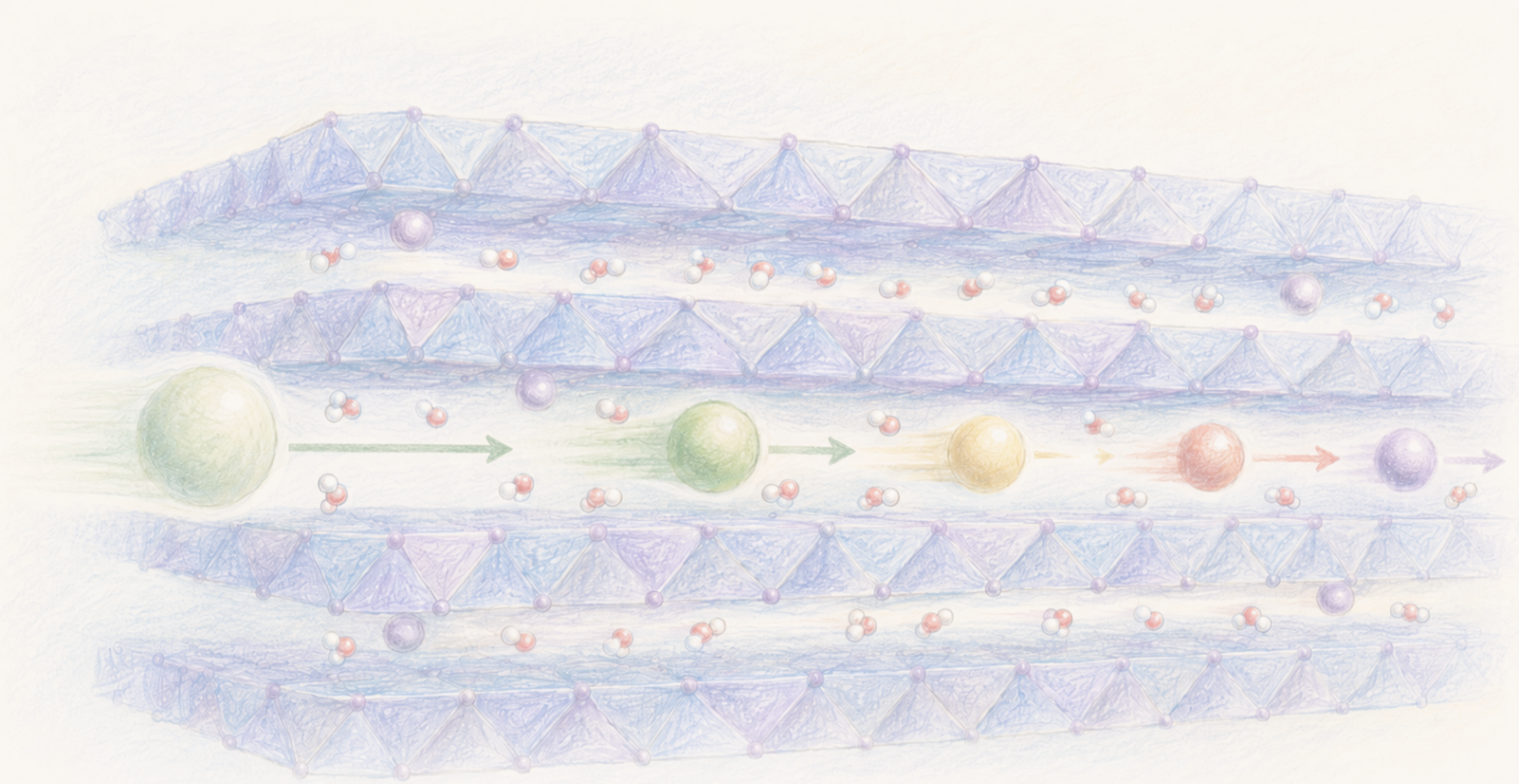


The Clean Paper

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

წყლით სავსე მინერალური არხის დაფიქსირებამ ერთმანეთის მსგავსი იშვიათმიწა იონების განცალკევება გააუმჯობესა

მაგნიუმმა ჰიდრატირებული მანგანუმის ოქსიდის ნაპრალი ლანთანოიდის იონის წყლის გარსის სიგანესთან ახლოს შეინარჩუნა და ლაბორატორიულ ტესტებში ზოგიერთი წყვილის გამდიდრება გააუმჯობესა. ნაჩვენები სამუშაო მილილიტრობით ხსნარსა და მილიგრამობით მასალას იყენებდა; ნაკადური მუშაობა, ხანგრძლივი ციკლური გამძლეობა და კომერციული გარემოსდაცვითი შესრულება ჯერ დამტკიცებული არ არის.

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

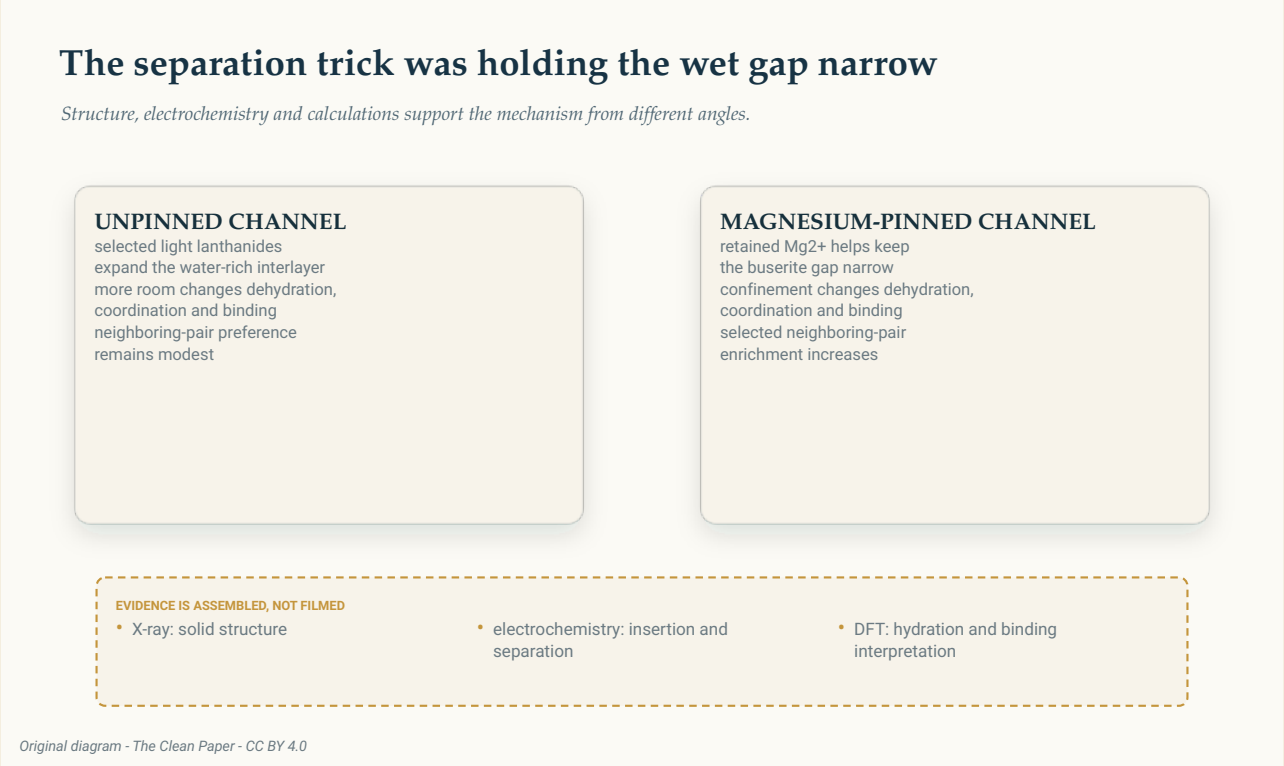
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

წყლით სავსე მინერალური არხის დაფიქსირებამ ერთმანეთის მსგავსი იშვიათმიწა იონების განცალკევება გააუმჯობესა

იშვიათმიწა იონების განცალკევება იმავე მიზეზითაა რთული, რის გამოც შორიდან ერთმანეთის მსგავსი და-ძმების გარჩევა შეიძლება გაგვიჭირდეს: განსხვავებები რეალურია, მაგრამ მცირე.

ლანთანოიდები პერიოდულ სისტემაში ერთმანეთის გვერდით არიან განლაგებული და ჩვეულებრივ ერთნაირი მუხტის მქონე იონებს ქმნიან. სერიის გასწვრივ მათი ზომა თანდათან იცვლება, ქიმიური ქცევა კი ძალიან მსგავსად რჩება. ამიტომ სამრეწველო გაწმენდა მრავალჯერ გამეორებულ განცალკევების ეტაპებს ეყრდნობა.

ახალ ლაბორატორიულ კვლევაში ამ პრობლემას შეზღუდული სივრცის — confinement-ის — გამოყენებით მიუდგნენ. მკვლევრებმა გამოიყენეს ერთმანეთზე დალაგებული მანგანუმის ოქსიდის ფენები, რომელთა შორის წყლით სავსე ნაპრალი იყო. იშვიათმიწა იონი ამ სივრცეს წყლის მოლეკულებით გარშემორტყმული უახლოვდება. დამჭერის გარეშე ფენებს შეუძლიათ ერთმანეთს დაშორდნენ და იონს ადგილი გაუთავისუფლონ. მაგნიუმის იონები ერთგვარი დამჭერის როლს ასრულებდნენ: როდესაც ისინი ფენებს შორის რჩებოდნენ, ნაპრალს ვიწროდ ინარჩუნებდნენ. ამის შემდეგ სხვადასხვა იშვიათმიწა იონს განსხვავებული ენერგეტიკული „ფასი“ ჰქონდა გადასახდელი, რათა წყლის ნაწილი მოეშორებინა, არხში შესულიყო და მყარ სხეულში ჟანგბადის ატომებს შეკავშირებოდა.



დაუფიქსირებელი და მაგნიუმით დაფიქსირებული არხები მექანიზმის ინტერპრეტაციებია, რომლებსაც სტრუქტურული გაზომვები, ელექტროქიმია და გამოთვლები უჭერს მხარს. არც ერთ ცალკეულ ექსპერიმენტში მთლიანი მოლეკულური თანმიმდევრობა პირდაპირ არ დაუკვირვებიათ.

The Clean Paper CC BY 4.0

ერთ გამოცდილი წყვილისთვის — ლანთანუმისა და ნეოდიმისთვის — ამ **დაფიქსირებამ** გამდიდრების ფაქტორი 1.6-დან **5.4-მდე** გაზარდა. ლანთანუმისა და პრაზეოდიმისთვის ის 1.5-დან **4.2-მდე** გაიზარდა. გამდიდრების ფაქტორი ადარებს ორი იონის თანაფარდობას განცალკევების შემდეგ მათ თანაფარდობას განცალკევებამდე. მნიშვნელობა 1 ნიშნავს უპირატესობის არარსებობას; 5.4 ნიშნავს, რომ დაჭერილ მასალაში ნეოდიმის უპირატესობა ლანთანუმთან შედარებით 5.4-ჯერ უფრო ძლიერი იყო, ვიდრე საწყის ნარევში.

ეს კონკრეტული წყვილებისთვის მიღებული მნიშვნელოვანი ლაბორატორიული შედეგებია. ისინი არ ამტკიცებს, რომ ახლა ყველა იშვიათმიწა ელემენტის სუფთად განცალკევებაა შესაძლებელი, რომ ნაკადური პროცესი უკვე აჩვენეს ან რომ გამხსნელით ექსტრაქციის ჩანაცვლება შეიძლება.

ნაშრომის ყველაზე ძლიერი იდეა მთლიან გადამამუშავებელ ქარხანაზე ბევრად მცირეა: არ მისცე სველ მინერალურ ნაპრალს გახსნის საშუალება.

წყალში იონი შიშველ ატომზე დიდია

იშვიათმიწა ელემენტებში შედის ლანთანოიდები, ასევე სკანდიუმი და იტრიუმი. კვლევაში ლანთანუმიდან იტერბიუმამდე თორმეტი დადებითად დამუხტული ლანთანოიდის იონი გამოცადეს. ცერიუმი გამორიცხეს, რადგან ის დაჟანგვის ხარისხს ადვილად იცვლის, ხოლო რადიოაქტიური პრომეთიუმი საერთოდ არ გამოიყენეს.

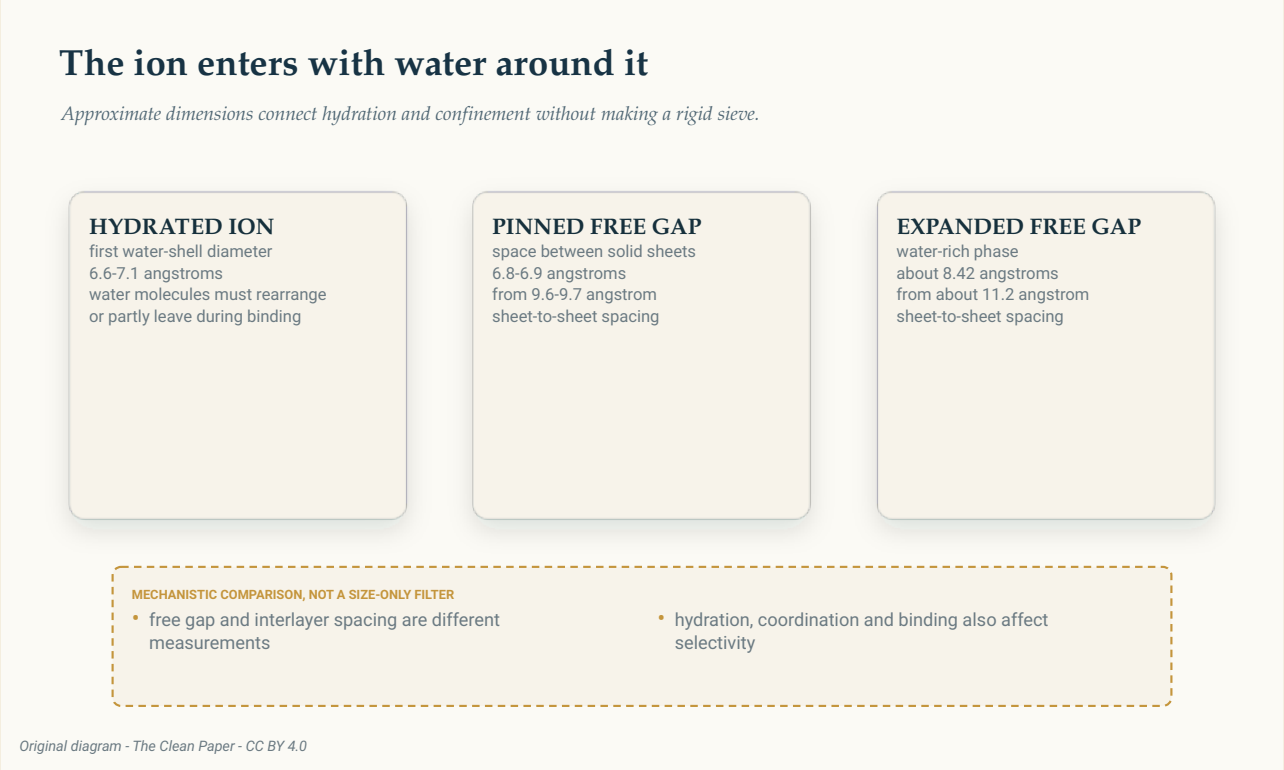
წყალში იონი მარტო არ გადაადგილდება. წყლის მოლეკულები მის მუხტს გარშემო ეწყობა და **ჰიდრატაციულ გარსს** ქმნის. ვიწრო არხში შესვლისა და მყარ ზედაპირთან დასაკავშირებლად იონს შეიძლება ამ წყლის ფენის ნაწილის გადაწყობა ან მოცილება დასჭირდეს. ამის ენერგეტიკული ფასი დამოკიდებულია როგორც თვით იონზე, ისე მის გარემოზე.

ზომები მოცემულია **ანგსტრემებში (Å)**. ერთი ანგსტრემი მეტრის ერთი მეათმილიარდედია (**1 Å =** 10^{-10} **m**). გამოცდილი ლანთანოიდების პირველი ჰიდრატაციული გარსების დიამეტრი დაახლოებით **6.6-დან 7.1 Å-მდე** იყო.

მკვლევრებმა გამოიყენეს ჰიდრატირებული ფენოვანი მანგანუმის ოქსიდი — ბუზერიტი. მისი ერთმანეთზე დაწყობილი ფენების განმეორებადი პოზიციებიდან გაზომილი დაშორება დაახლოებით **9.6-9.7 ანგსტრემი** იყო. მაგრამ თავად ფენაც იკავებს სივრცეს. ფენებს შორის რეალურად თავისუფალი, წყლით სავსე ნაპრალი მხოლოდ დაახლოებით **6.8-6.9 ანგსტრემი** იყო.

ეს განსხვავება მნიშვნელოვანია. 9.7-ანგსტრემიანი შრეთაშორისი მანძილი არ ნიშნავს 9.7-ანგსტრემიან თავისუფალ არხს.

ზოგიერთმა მსუბუქმა ლანთანოიდმა სტრუქტურა უფრო წყალმდიდარ ფაზად გააფართოვა. იქ ფენიდან ფენამდე მანძილი დაახლოებით **11.2 ანგსტრემი**, ხოლო თავისუფალი ნაპრალი დაახლოებით **8.42 ანგსტრემი** იყო. მონათესავე, უფრო ვიწრო სტრუქტურას — ბირნესიტს — დაახლოებით **4.42 ანგსტრემიანი** თავისუფალი ნაპრალი ჰქონდა.



შედარება კეთდება ჰიდრატაციული გარსის სავარაუდო დიამეტრსა და წყლით სავსე თავისუფალ ნაპრალს შორის და არა შიშველ იონსა და მთლიან ფენა-ფენა მანძილს შორის. ზომა მექანიზმის ნაწილია, მაგრამ არა მთელი ახსნა.

The Clean Paper CC BY 4.0

მინერალს შეუძლია იონს მოერგოს

მაგნიუმით დაფიქსირების გარეშე არხი ხისტი საცერი არ არის: მის ფენებს გადაადგილება შეუძლია. ექსპერიმენტებში მსუბუქმა იონებმა — ლანთანუმმა, პრაზეოდიმმა და ნეოდიმმა — მასალას მეტი წყალი შეათვისებინა და უფრო ფართოდ გახსნა. უფრო მძიმე იონები, ევროპიუმიდან იტერბიუმამდე, როგორც წესი, ვიწრო არხს უცვლელად ტოვებდნენ. სამარიუმი ამ ორ ქცევას შორის აღმოჩნდა.

ნაშრომში პირველ პასუხს **ჯგუფი I**, მეორეს კი **ჯგუფი II** ეწოდება. ეს სახელები აღწერს, როგორ რეაგირებდა კონკრეტული მასალა ამ იონებზე; ისინი პერიოდული სისტემის ჯგუფების ნომრები არ არის. სხვა ექსპერიმენტულ პირობებში საზღვარიც

შეიძლება შეიცვალოს.

ამ სტრუქტურულმა განსხვავებამ სხვადასხვა ჯგუფის იონთა წყვილების განცალკევებას ხელი შეუწყო. პირდაპირი იონგაცვლისას გამდიდრების ფაქტორი იყო **7.8** ლანთანუმი/დისპროზი **5.7** პრაზეოდიმი/დისპროზიუმისთვის, **4.5** ნეოდიმი/დისპროზიუმისთვის და **2.6** ნეოდიმი/ევროპიუმისთვის.

მეზობელი იონების წყვილების უმეტესობა ბევრად რთული აღმოჩნდა, გამდიდრების ფაქტორით დაახლოებით 1.1. ერთთან ახლო ფაქტორი ნიშნავს მცირე უპირატესობას. მასალა უფრო ადვილად არჩევდა ერთმანეთისგან იონებს, რომლებიც არხის განსხვავებულ სტრუქტურებს ანიჭებდნენ უპირატესობას, ვიდრე იონებს, რომლებიც ერთსა და იმავე პასუხის ჯგუფში ერთმანეთთან ახლოს იყვნენ.

მაგნიუმი არხს აფიქსირებს

შემდეგ მკვლევრებმა გამოიყენეს **ელექტროქიმიური ინტერკალაცია** — ელექტრული რეაქცია, რომელიც იონებს მყარი ფენების შორის შეჰყავს. როდესაც იშვიათმიწა იონები შედიოდნენ, მაგნიუმის იონები არხში რჩებოდა. დარჩენილი მაგნიუმი ბუზერიტის გაფართოებას ზღუდავდა.

ამ უფრო ვიწრო სველ სივრცეში შემომავალ ჰიდრატირებულ იონს ნაკლები ადგილი აქვს. შემოთავაზებული მექანიზმი აერთიანებს სივრცით შეზღუდვას, ნაწილობრივ დეჰიდრატაციას, კოორდინაციას და შეკავშირებას. **კოორდინაცია** ნიშნავს იონის უშუალო გარემოში მყოფ ატომებს — ხშირად ჟანგბადს — რომლებიც მასთან პირდაპირ ურთიერთქმედებს.

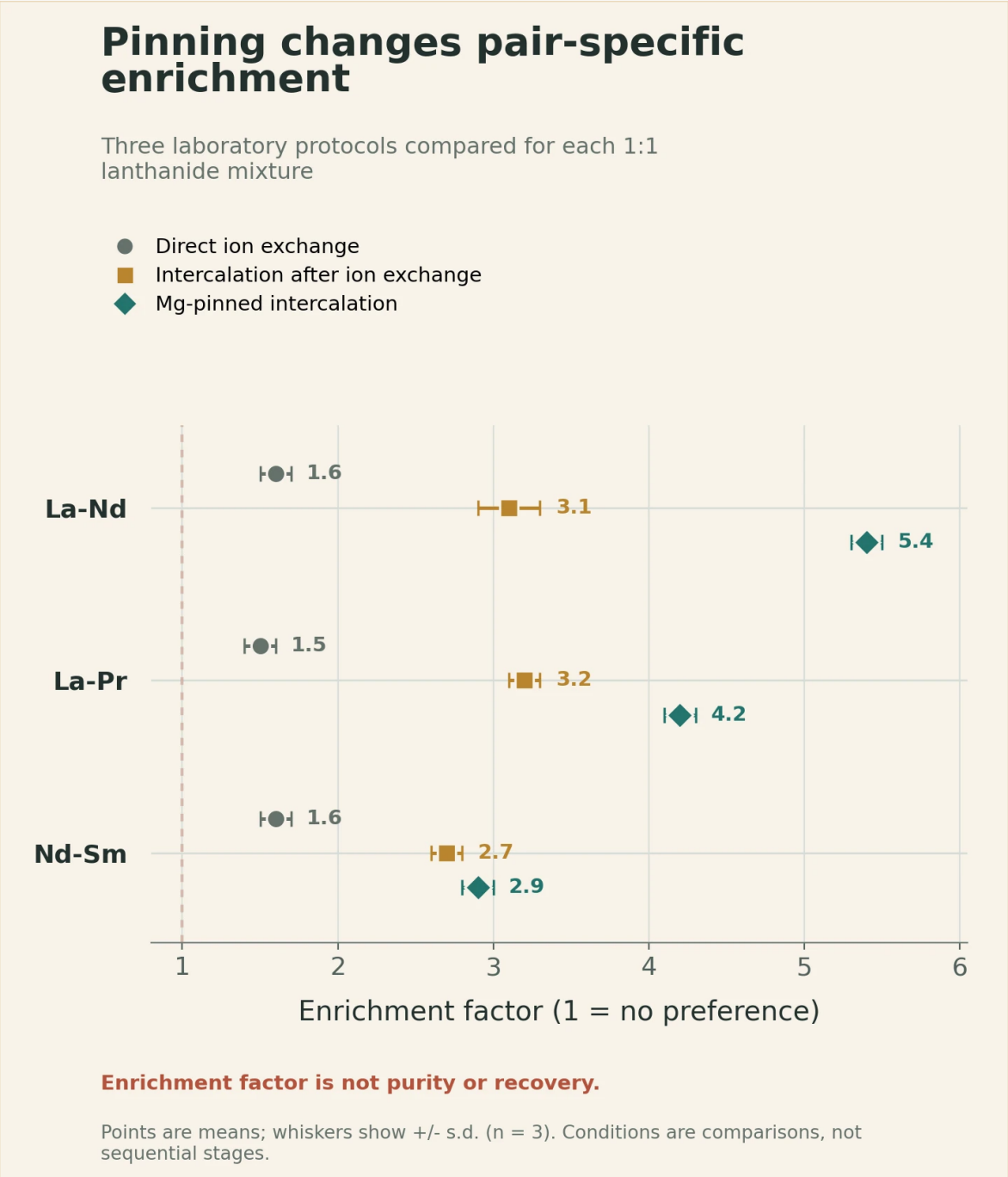
მტკიცებულება რამდენიმე ტიპის სამუშაოდან მოდის. რენტგენული გაზომვებით აკვირდებოდნენ მყარი სხეულის სტრუქტურას. ელექტროქიმიური ექსპერიმენტებით გაზომეს იონების შეტანა და განცალკევება. **სიმკვრივის ფუნქციონალის თეორიის** კვანტურ-მექანიკური გამოთვლებით შეადარეს სტრუქტურები, ჰიდრატაცია და შეკავშირება. ეს გამოთვლები მექანიზმის ინტერპრეტაციაში გვეხმარება; ისინი ერთი იონის არხში მოძრაობის პირდაპირი ვიდეო არ არის.

მექანიზმი არც ისეთი მარტივია, როგორც „პატარა იონები გაივლიან, დიდი იონები შეჩერდებიან“. შედეგში მონაწილეობს წყლის გარსი, ფენების რეაქცია, დეჰიდრატაციის ენერგეტიკული ფასი და ისიც, როგორ კოორდინირდება იონი მყარ სხეულთან.

დაფიქსირებამ ზოგიერთი მეზობელი წყვილის განცალკევება გააუმჯობესა

ყველაზე გამოკვეთილი ცვლილება ლანთანუმი-ნეოდიმის წყვილში იყო: გამდიდრება დაფიქსირების გარეშე **1.6 +/- 0.1**-დან მაგნიუმით დაფიქსირებისას **5.4 +/- 0.1**-

მდე გაიზარდა. ლანთანუმი-პრაზეოდიმი **1.5 +/- 0.1**-დან **4.2 +/- 0.1**-მდე გაიზარდა. ნეოდიმი-სამარიუმი — **1.6 +/- 0.1**-დან **2.9 +/- 0.1**-მდე.



თითოეული რიგი სამი ცალკეული ლაბორატორიული პროტოკოლის შედარებაა და არა ერთი პროცესის თანმიმდევრული ეტაპები. ფაქტორი 1 ნიშნავს უპირატესობის არარსებობას; უფრო მაღალი მნიშვნელობა კონკრეტული წყვილის უფრო ძლიერ გამდიდრებას ნიშნავს. წერტილები საშუალო მნიშვნელობებს, ხოლო ულვაშები +/- სტანდარტულ გადახრას აჩვენებს (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

pH 2-ზე ლანთანუმი-ნეოდიმის მნიშვნელობა **5.6 +/- 0.2** იყო. ელექტრული სიჩქარის

ხუთჯერ გაზრდამ, 0.1C-დან 0.5C-მდე, მნიშვნელობა **5.4 +/- 0.1**-დან **4.3 +/- 0.4**-მდე შეამცირა. C-სიჩქარე გამოყენებულ დენს მასალის ტევადობას ადარებს. უფრო მაღალი სიჩქარე იონებსა და მყარ სხეულს რეაგირებისთვის ნაკლებ დროს აძლევს.

არც ერთი რიცხვი არ აღწერს მასალას უნივერსალურად. გამდიდრება დამოკიდებულია კონკრეტულ წყვილზე, მყარი სხეულის სტრუქტურაზე, მჟავიანობასა და მუშაობის სიჩქარეზე.

ნაშრომში მასალა ასევე გამოცადეს დიდი რაოდენობით არაიშვიათმიწა იონების ფონზე. საწყის ნარევებში ყოველ ერთ იშვიათმიწა იონზე 1,000 კონკურენტი იონი მოდიოდა. დაფიქსირებული სელექტიურობა იყო დაახლოებით **1,200** ნატრიუმის, **6,500** კალციუმის და **1,700** მაგნიუმის მიმართ.

ეს სასარგებლო მტკიცებულებაა, რომ ამ ლაბორატორიულ პირობებში გავრცელებული იონები განცალკევებას ავტომატურად არ ახშობს. მაგრამ ეს არ არის რეალური მადნიდან მიღებული სრული ხსნარის გამოცდა ყველა მისი მეტალით, მჟავიანობითა და დამაბინძურებლებით.

გამდიდრება, განცალკევება, სისუფთავე, ამოღება და აღდგენა სხვადასხვა შედეგია

ნაშრომში რამდენიმე შესრულების მაჩვენებელია და მათი ერთმანეთის ჩანაცვლება არ შეიძლება.

გამდიდრების ფაქტორი ორ იონს შორის თანაფარდობას განცალკევების შემდეგ ადარებს მათ თანაფარდობას განცალკევებამდე. მნიშვნელობა 5.4 ნიშნავს, რომ დაჭერილ მასალაში მოცემული წყვილის ერთი წევრის უპირატესობა 5.4-ჯერ უფრო ძლიერი იყო, ვიდრე საწყის ნარევში.

განცალკევების ფაქტორი ითვალისწინებს იმასაც, რაც სითხეში რჩება: თითოეული იონის დაჭერილ რაოდენობას მის დაუჭერელ რაოდენობას ადარებს, შემდეგ კი ამ ორ ბალანსს ერთმანეთს. ამიტომ ის შეიძლება გაიზარდოს მასალის მეტი ნაწილის მოცილებასთან ერთად მაშინაც კი, თუ გამდიდრების ფაქტორი სხვა კანონზომიერებას მიჰყვება.

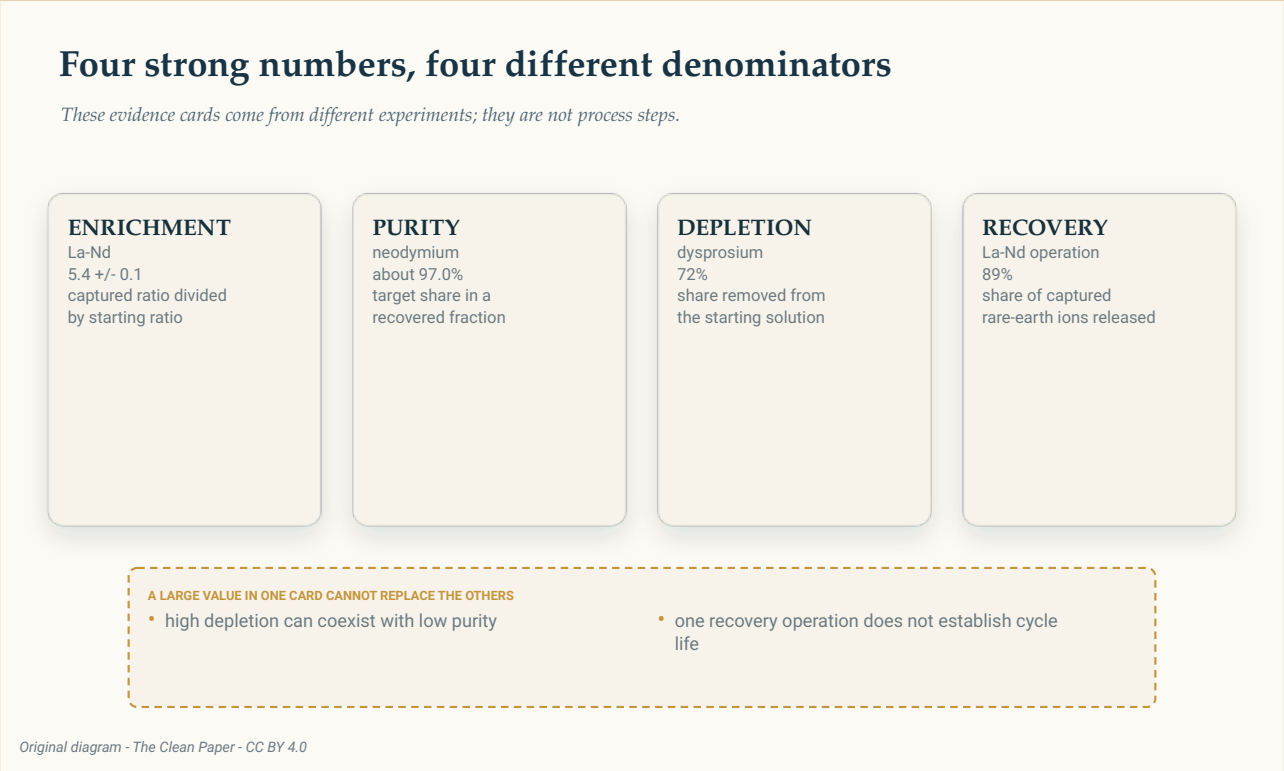
სისუფთავე არის აღდგენილ ფრაქციაში არჩეული იონის წილი. ორეტაპიანმა დემონსტრაციებმა მათთვის განსაზღვრულ გზებში დაახლოებით **97.0% ნეოდიმის სისუფთავეს** და **92.3% დისპროზიუმის სისუფთავეს** მიაღწია.

ამოღების ხარისხი (depletion) არის საწყისი ხსნარიდან მოცილებული წილი. 10 მილიგრამი ფხვნილის რვა თანმიმდევრულმა დამატებამ ნეოდიმი-დისპროზიუმის ტესტში **დისპროზიუმის 72%** მოაშორა და დაგროვილი განცალკევების ფაქტორი 10.8 მიიღო.

აღდგენა (recovery) კითხულობს, დაჭერილი იონის რამდენი ნაწილის ხელახლა

გამოშვებაა შესაძლებელი. უკუ იონგაცვლით ერთ ნეოდიმი-დისპროზიუმის ოპერაციაში **80%** აღადგინეს. ელექტროქიმიური მოცილებით ლანთანუმი-ნეოდიმის ოპერაციაში **89%** აღდგა.

აღდგენა შექცევადობას აჩვენებს. ის არ ადგენს, რამდენჯერ შეიძლება ელექტროდის ხელახლა გამოყენება შესრულების შენარჩუნებით.



ოთხი გამოქვეყნებული მაჩვენებელი განსხვავებულ მნიშვნელს იყენებს და სხვადასხვა ექსპერიმენტიდან მოდის. ეს მტკიცებულების ცალკეული ბარათებია და არა ერთი პროცესის თანმიმდევრული ეტაპები.

The Clean Paper CC BY 4.0

რატომ შეიძლება ორი შთამბეჭდავი პროცენტი სრულიად განსხვავებულ რამეს ნიშნავდეს?

დავუშვათ, პროცესი საწყისი სითხიდან ერთი იონის 90%-ს აშორებს. ეს მაღალი depletion-ია. თუ მასთან ერთად ბევრი არასასურველი იონიც ამოდის, აღდგენილი მასალა მაინც დაბალი სისუფთავის შეიძლება იყოს. საპირისპიროდ, ძალიან სუფთა პატარა ფრაქცია შეიძლება ცუდ recovery-ს ნიშნავდეს, თუ სამიზნის უმეტესობა უკან დარჩა. პროცესის შეფასებას ყველა ეს ბალანსი სჭირდება და არა მხოლოდ ყველაზე დიდი რიცხვი.

ნაჩვენები აპარატურა ჯერ კიდევ ბექერის ექსპერიმენტია

მასშტაბზე ორიენტირებული ელექტროქიმიური ტესტები იწყებოდა **5 მილილიტრი** ხსნარით, რომელიც თითოეული იონის 25 მილიმოლს ლიტრზე შეიცავდა. ელექტროდებზე დაახლოებით **25-40 მილიგრამი** აქტიური მასალა იყო.

ერთმა ელექტროდმა ნეოდიმის დაახლოებით 40% ამოიღო. სერიაში გამოყენებულმა სამმა ელექტროდმა დაახლოებით **90% depletion** და **16.6 +/- 0.4** დაგროვილი განცალკევების ფაქტორი მიაღწია. მუშაობის სიჩქარის მიხედვით რეაქციები **200 წუთიდან 13 საათამდე** გრძელდებოდა.

ეს ზომები და დროები მთავარ სიუჟეტში უნდა იყოს, რადგან სწორედ ისინი განსაზღვრავს, რა იქნა რეალურად ნაჩვენები.

დამატებითი მასალები მასის გადაცემის შეზღუდვასაც ასახელებს. უფრო მაღალი კონცენტრაციის ბექერის სამიზნეზე საერთო 50%-იანი depletion-ის მისაღწევად საჭირო ელექტროდის მასა შეფასდა **266 მილიგრამად**, ანუ **532 მილიგრამ აქტიურ მასალად კვადრატულ სანტიმეტრზე**. პატარა ელექტროდზე ამდენი მასალის მოთავსება ხსნარში მყოფ იონებს მის ყველა ნაწილამდე მისვლას გაურთულებდა. ამიტომ ავტორებმა ბექერის ექსპერიმენტისთვის უფრო განზავებული ხსნარი გამოიყენეს.

ჰიპოთეტური ნაკადური უჯრედი მხოლოდ პროგნოზის სახითაა წარმოდგენილი. 1.25-მილილიტრიანი უჯრედისა და 5 × 5 სანტიმეტრიანი ელექტროდის დაშვებით დამატებითი მასალები დაახლოებით **20 წუთს 1C-ზე** ან **40 წუთს 0.5C-ზე** აფასებს დაახლოებით 90%-იანი depletion-ის მისაღწევად. ასეთი ნაკადური უჯრედის ექსპერიმენტი ნაშრომში არ არის ჩატარებული.

კიბე საზღვართან მთავრდება: არსებობს ბინარული და ეტაპობრივი ლაბორატორიული მტკიცებულება, ხოლო ნაკადური უჯრედის დრო და გარემოსდაცვითი შესრულება მხოლოდ პროგნოზებსა და სცენარებზეა დაფუძნებული და არა ქარხნული მასშტაბის დემონსტრაციაზე.

The Clean Paper CC BY 4.0

გარემოზე ზემოქმედების შედარება სცენარია და არა ქარხნის შედეგი

დამატებით მასალებში მოცემული სასიცოცხლო ციკლის შეფასება ადარებს განცალკევების ეტაპებს, რომლებიც იშვიათმიწა ოქსიდებით მთავრდება, და შეყვანებს ანგარიშობს **1 კილოგრამ ნეოდიმის ოქსიდზე**.

მასში არ შედის მოპოვება, მადნის წინასწარი დამუშავება ან სრული კომერციული გამწმენდი ჯაჭვი. ლაბორატორიული პროცესი წარმოდგენილია რამდენიმე წყაროდან შეკრებილი დაშვებებით. ელექტროდის **10, 20 და 100 ციკლის** სიცოცხლის ხანგრძლივობა სცენარული და მგრძნობელობის მნიშვნელობებია და არა ამ კვლევაში გაზომილი გამძლეობა. მოდელი ვარაუდობს, რომ მაგნიუმის აღდგენის ხსნარის ხელახალი გამოყენება შეიძლება მანამდე, სანამ მისი კონცენტრაცია 10%-ით არ შეიცვლება; ასევე ვარაუდობს **95% წყლის გადამუშავებას** და ითვალისწინებს 450-600°C-ზე ორი საათის კალცინაციას, მიუხედავად იმისა, რომ კალცინაცია აქ ექსპერიმენტულად არ უჩვენებიათ.

სასიცოცხლო ციკლის შეფასება გარემოსდაცვით დატვირთვებს ითვლის წინასწარ განსაზღვრულ სისტემურ საზღვრებში. მისი პასუხი იმდენად ფართოა, რამდენად ფართოც ეს საზღვარია, და იმდენად საიმედო, რამდენადაც მისი ინვენტარი და მასშტაბის დაშვებები.

ანალიზს შეუძლია აჩვენოს, სად არის მნიშვნელოვანი ენერგია, მასალები და ხელახალი გამოყენება. მას არ შეუძლია დაამტკიცოს, რომ კომერციულ ვერსიას სამრეწველო გამხსნელით ექსტრაქციაზე ნაკლები გარემოსდაცვითი ზემოქმედება ექნება.

მექანიზმი, პლატფორმა და გრძელი საინჟინრო გზა

ნაშრომი აჩვენებს, რომ ჰიდრატირებული ფენოვანი მყარი სხეულის მანძილისა და ქიმიური გარემოს განზრახ კონტროლი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ზოგიერთი ლანთანოიდის განცალკევების გასაუმჯობესებლად. მაგნიუმით დაფიქსირება უბრალოდ კიდევ ერთ ქიმიურ შემაკავშირებელ ადგილს არ ამატებდა: ის ზღუდავდა თვით სტრუქტურას, რომლის გავლაც წყლით გარშემორტყმულ იონებს უწევდათ.

ეს შედეგი პრაქტიკულ კითხვებს ხსნის. გაუძლებს თუ არა მუშაობა რეალურ, მადნიდან მიღებულ ნარევებს? შესაძლებელია თუ არა ელექტროდების წარმოება რეალისტური მასობრივი დატვირთვით? რამდენად სტაბილურია მანგანუმის ოქსიდი მრავალჯერადი შეტანისა და გამოშვების ციკლების განმავლობაში? შეძლებს თუ არა უწყვეტი უჯრედი სელექტიურობის, გამტარუნარიანობისა და წყლის ბალანსის შენარჩუნებას? როგორი იქნება გარემოსდაცვითი შედარება პილოტური მასშტაბის რეალურად გაზომილი ინვენტარით?

ეს ექსპერიმენტი ამ კითხვებს არ პასუხობს. უბრალოდ მათ უფრო კონკრეტულს ხდის.

მიღწევა დასრულებული იშვიათმიწა გადამამუშავებელი ქარხანა არ არის. ეს არის მტკიცებულება, რომ კონტროლირებულ, წყლით სავსე რამდენიმე ანგსტრემიან სივრცეს რთული განცალკევების შეცვლა შეუძლია.

სუფთა შეჯამება

მკვლევრებმა წყალში ზოგიერთი ლანთანოიდის იონური წყვილის განცალკევებისთვის ჰიდრატირებული ფენოვანი მანგანუმის ოქსიდი გამოიყენეს. მასალის თავისუფალი ნაპრალი დაახლოებით 6.8-6.9 ანგსტრემი იყო, რაც ახლოსაა იონების პირველი ჰიდრატაციული გარსების დაფიქსირებულ 6.6-7.1-ანგსტრემიან დიამეტრთან. დარჩენილი მაგნიუმი არხს აფიქსირებდა და კონკრეტული წყვილების გამდიდრებას აუმჯობესებდა, მათ შორის ლანთანუმი-ნეოდიმს 1.6-დან 5.4-მდე და ლანთანუმი-პრაზეოდიმს 1.5-დან 4.2-მდე. კვლევაში ასევე გამოიცადა გავრცელებული კონკურენტი იონები,

ეტაპობრივი სისუფთავე, თანმიმდევრული depletion და recovery ოპერაციები. ნაჩვენები მასშტაბი დარჩა 5-მილილიტრიან ბექერის ტესტებზე, 25-40 მილიგრამი აქტიური მასალით და 200 წუთიდან 13 საათამდე რეაქციის დროებით. ნაკადური უჯრედის დრო მხოლოდ პროგნოზირებული იყო, მრავალციკლიანი ხელახალი გამოყენება არ გამოცდილია და სასიცოცხლო ციკლის შედარება ლაბორატორიული მასშტაბის დაშვებებზე იყო დამოკიდებული. ნაშრომი უჭერს მხარს სივრცითი შეზღუდვის მექანიზმს და ლაბორატორიულ პლატფორმას და არა გამხსნელით ექსტრაქციის სამრეწველო ჩანაცვლებას.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: ჰიდრატირებული მანგანუმის ოქსიდის დაახლოებით 6.8-6.9-ანგსტრემიანი ნაპრალის დარჩენილი მაგნიუმით შენარჩუნებამ ზოგიერთი ლანთანოიდის წყვილის განცალკევება შეცვალა. სტრუქტურული გაზომვები, ელექტროქიმია და გამოთვლები უჭერს მხარს მექანიზმს, რომელიც მოიცავს სივრცით შეზღუდვას, დეჰიდრატაციას, კოორდინაციასა და შეკავშირებას.

რა მუშაობდა საუკეთესოდ: განსაზღვრულ პირობებში ლანთანუმი-ნეოდიმის გამდიდრებამ **5.4 +/- 0.1**, ხოლო ლანთანუმი-პრაზეოდიმმა **4.2 +/- 0.1** მიაღწია. სხვა წყვილებს განსხვავებული მნიშვნელობები ჰქონდა. ცალკეულ ექსპერიმენტებში გამოქვეყნდა სისუფთავის, depletion-ისა და recovery-ის შედეგები, რომლებიც განსხვავებულ მნიშვნელს იყენებს.

რას არ აჩვენებს: უნივერსალურ გამყოფს ყველა იშვიათმიწა ელემენტისთვის; მუშაობას სრული მადნის ნაკადზე; რეალურად ნაჩვენებ უწყვეტ ნაკადურ უჯრედს; მრავალ ციკლზე გამძლე ელექტროდებს; გამხსნელით ექსტრაქციის ჩანაცვლებას; ან კომერციულ მასშტაბზე დადასტურებულ გარემოსდაცვით უპირატესობას.

მასშტაბის მთავარი შეზღუდვები: ნაჩვენები ტესტები იყენებდა 5 მილილიტრ ხსნარს, დაახლოებით 25-40 მილიგრამ აქტიურ მასალას და 200 წუთიდან 13 საათამდე დროს. უფრო მაღალი კონცენტრაციის სამიზნემ აჩვენა 532 მილიგრამ/სმ^2 მასობრივი დატვირთვის პრობლემა. ნაკადური დროები ექსტრაპოლირებული იყო. ელექტროდის სიცოცხლის ხანგრძლივობა და სასიცოცხლო ციკლის შეფასებაში მნიშვნელოვანი გადამუშავების პარამეტრები დაშვებები იყო.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა დასახელებული წყვილებისა და პირობებისთვის მიღებულ ლაბორატორიულ გაზომვებში. ზომიერი ნდობა შემოთავაზებულ მოლეკულურ ინტერპრეტაციაში, რადგან ის აერთიანებს პირდაპირ სტრუქტურულ და ელექტროქიმიურ მონაცემებს გამოთვლებთან. დაბალი ნდობა იმაში, რომ არსებული მონაცემები სამრეწველო გამტარუნარიანობას, ხანგრძლივობას ან გარემოსდაცვით შედეგებს პროგნოზირებს.

წყაროები

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