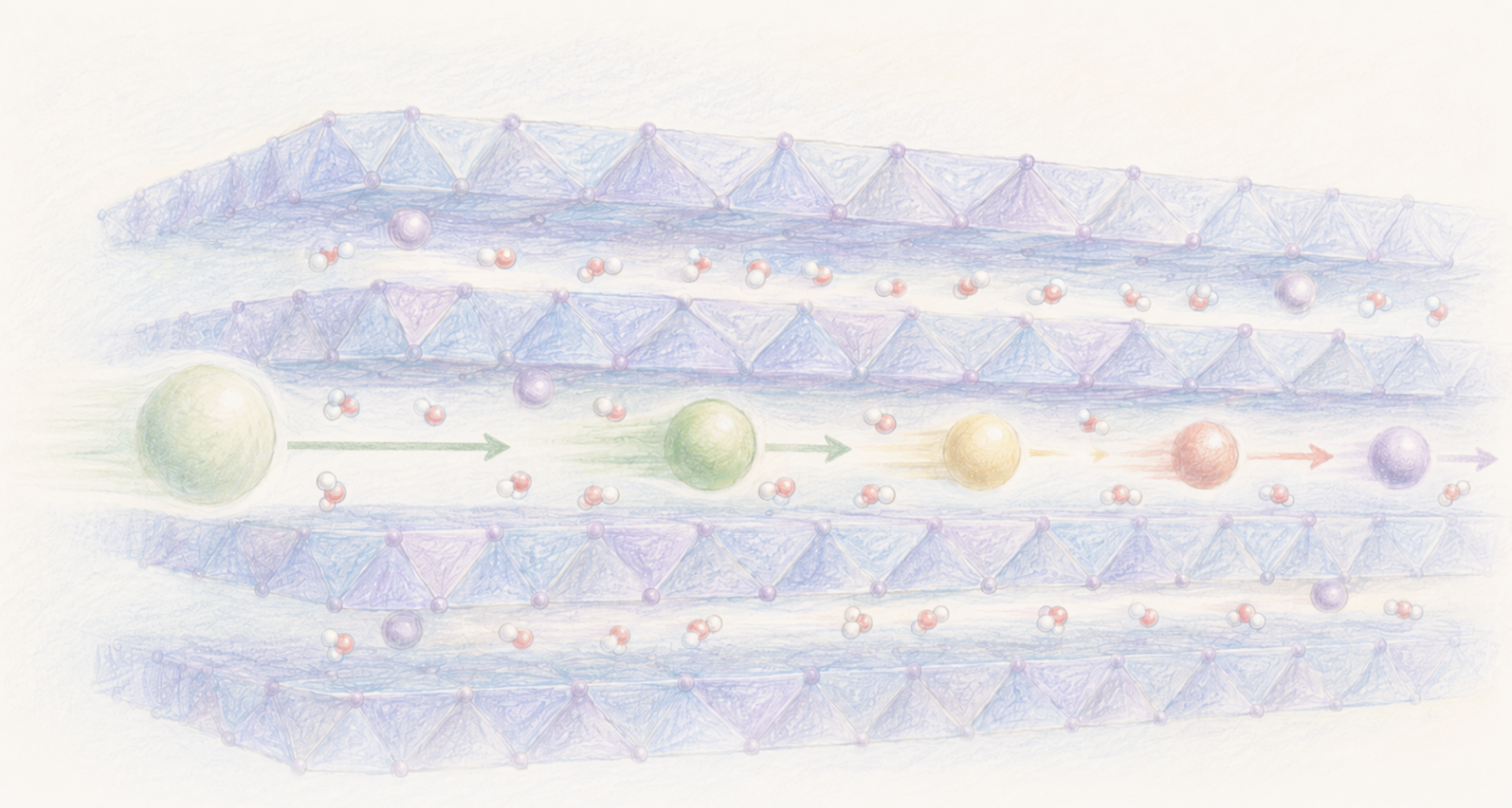


The Clean Paper

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

Զրով լցված հանքային ալիքը ամրացնելը օգնեց տարանջատել իրար նման հազվագյուտ հողային իոնները

Մագնեզիումը հիդրատացված մանգանի օքսիդի բացվածքը պահեց մոտավորապես լանթանիդային իոնի ջրային թաղանթի լայնության չափով և լաբորատոր փորձերում բարելավեց որոշ զույգերի հարստացումը: Ցուցադրված աշխատանքը կատարվել է լուծույթի միլիլիտրերով և նյութի միլիգրամներով. հոսքային աշխատանքը, երկար ցիկլային կյանքը և առևտրային մասշտաբի բնապահպանական արդյունավետությունը դեռ ապացուցված չեն:

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

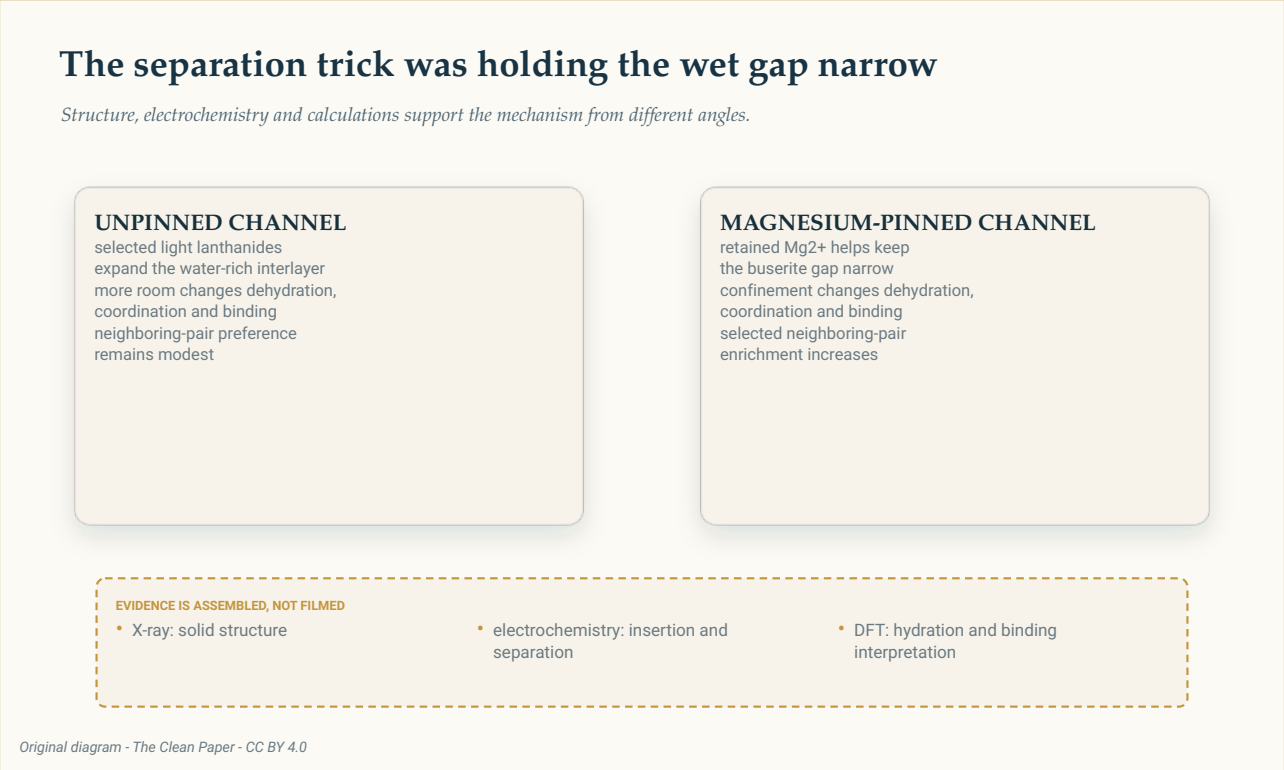
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Ջրով լցված հանքային ալիքը ամրացնելը օգնեց տարանջատել իրար նման հազվագյուտ հողային իոնները

Հազվագյուտ հողային իոնները դժվար է տարանջատել նույն պատճառով, որով հեռվից դժվար է տարբերել իրար նման քույրերին ու եղբայրներին. տարբերությունները իրական են, բայց փոքր։

Լանթանիդները պարբերական աղյուսակում կողք կողքի են գտնվում և սովորաբար նույն լիցքով իոններ են ձևավորում։ Շարքի երկայնքով նրանց չափերը աստիճանաբար փոխվում են, մինչդեռ քիմիական վարքը մնում է նման։ Այդ պատճառով արդյունաբերական մաքրումը հիմնվում է տարանջատման բազմաթիվ կրկնվող քայլերի վրա։

Նոր լաբորատոր ուսումնասիրությունը խնդրին մոտեցել է տարածական սահմանափակման միջոցով։ Հետազոտողները օգտագործել են մանգանի օքսիդի իրար վրա դասավորված շերտեր, որոնց միջև ջրով լցված բացվածք կար։ Հազվագյուտ հողային իոնը այդ բացվածքին մոտենում է ջրի մոլեկուլներով շրջապատված։ Առանց հենակի շերտերը կարող են իրարից հեռանալ՝ տեղ բացելով դրա համար։ Մագնեզիումի իոնները գործել են որպես հենակ. երբ դրանք մնացել են շերտերի միջև, օգնել են բացվածքը նեղ պահել։ Այդ պայմաններում տարբեր հազվագյուտ հողային իոններ տարբեր էներգետիկ գին են վճարել՝ ջրի մի մասը կորցնելու, ալիք մտնելու և պինդ նյութի թթվածնի ատոմներին կապվելու համար։



Չամրացված և մագնեզիումով ամրացված ալիքները մեխանիստական

մեկնաբանություններ են, որոնց աջակցում են կառուցվածքային չափումները, էլեկտրաքիմիան և հաշվարկները։ Ոչ մի առանձին փորձ չի դիտել ամբողջ մոլեկուլային հաջորդականությունը։

The Clean Paper CC BY 4.0

Փորձարկված զույգերից մեկի՝ լանթանի և նեոդիմի դեպքում այս **ամրացումը** հարստացման գործակիցը 1.6-ից բարձրացրել է մինչև **5.4**։ Լանթանի և պրազեոդիմի դեպքում այն 1.5-ից աճել է մինչև **4.2**։ Հարստացման գործակիցը համեմատում է երկու իոնների հարաբերությունը տարանջատումից հետո և առաջ։ 1 արժեքը կնշանակեր, որ որևէ նախընտրություն չկա, իսկ 5.4-ը՝ որ բոնված նյութում նեոդիմը լանթանի նկատմամբ 5.4 անգամ ավելի ուժեղ էր գերադասված, քան սկզբնական խառնուրդում։

Սրանք զույգին հատուկ, նշանակալի լաբորատոր արդյունքներ են։ Դրանք չեն նշանակում, որ այժմ կարելի է մաքուր տարանջատել բոլոր հազվագյուտ հողային տարրերը, որ հոսքային գործընթաց է ցուցադրվել կամ որ լուծիչային էքստրակցիան կարելի է փոխարինել։

Հոդվածի ամենաուժեղ գաղափարը զտարանից շատ ավելի փոքր մասշտաբ ունի՝ թույլ չտալ, որ խոնավ հանքային բացվածքը լայնանա։

Ջրի մեջ իոնը մերկ ատոմից մեծ է

Հազվագյուտ հողային տարրերը ներառում են լանթանիդները, ինչպես նաև սկանդիումը և իտրիումը։ Ուսումնասիրությունը փորձարկել է տասներկու դրական լիցքով լանթանիդային իոն՝ լանթանից մինչև իտերբիում։ Ցերիումը բացառվել է, որովհետև հեշտությամբ փոխում է օքսիդացման աստիճանը, իսկ ռադիոակտիվ պրոմեթիումը՝ իր ռադիոակտիվության պատճառով։

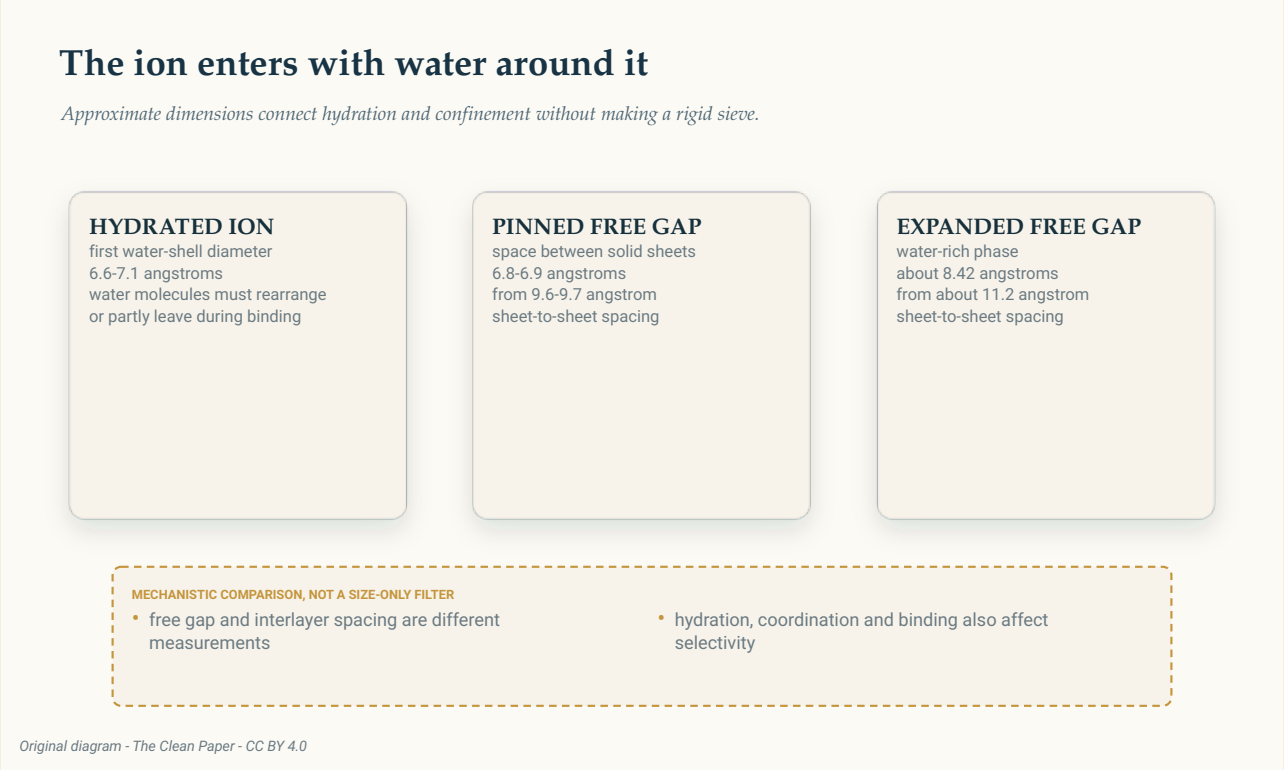
Ջրում իոնը միայնակ չի շարժվում։ Ջրի մոլեկուլները դասավորվում են նրա լիցքի շուրջ՝ ձևավորելով **հիդրատացման թաղանթ**։ Նեղ ալիք մտնելու և պինդ նյութին կապվելու համար իոնը կարող է ստիպված լինել վերադասավորել կամ մասամբ կորցնել այդ ջրային շերտը։ Դրա էներգետիկ գինը կախված է և՛ իոնից, և՛ շրջապատող միջավայրից։

Չափերը տրված են **անգստրեմներով (Å)**։ Մեկ անգստրեմը մետրի տասը միլիարդերորդ մասն է (**1 Å =** 10^{-10} **m**)։ Փորձարկված լանթանիդների առաջին հիդրատացման թաղանթների տրամագծերը հաղորդվել են մոտ **6.6–7.1 Å**։

Հետազոտողները օգտագործել են բուզերիտ կոչվող հիդրատացված, շերտավոր մանգանի օքսիդ։ Նրա իրար վրա դասավորված շերտերի դիրքերի միջև հեռավորությունը մոտ **9.6–9.7 անգստրեմ** էր՝ մի կրկնվող շերտի դիրքից մինչև հաջորդը։ Բայց հենց շերտը նույնպես տարածք է զբաղեցնում։ Շերտերի միջև ջրով լցված իրական ազատ բացվածքը ընդամենը մոտ **6.8–6.9 անգստրեմ** էր։

Այս տարբերությունը կարևոր է: 9.7 անգստրեմ միջշերտային հեռավորությունը չի նշանակում 9.7 անգստրեմ բաց ալիք:

Որոշ թեթև լանթանիդներ կառուցվածքը ստիպել են ընդարձակվել դեպի ավելի ջրառատ փուլ: Այդ դեպքում շերտից շերտ հեռավորությունը մոտ **11.2 անգստրեմ** էր, իսկ գնահատված ազատ բացվածքը՝ մոտ **8.42 անգստրեմ**: Ավելի նեղ հարակից կառուցվածքը՝ բիրնեսիտը, ուներ մոտ **4.42 անգստրեմ** ազատ բացվածք:



Համեմատությունը կատարվում է հիդրատացման թաղանթի մոտավոր տրամագծի և ջրով լցված ազատ բացվածքի միջև, ոչ մերկ իոնի և ամբողջ շերտից շերտ հեռավորության միջև: Չափը մեխանիզմի մաս է, ոչ ամբողջ բացատրությունը:

The Clean Paper CC BY 4.0

Հանքանյութը կարող է հարմարվել իոնին

Առանց մագնեզիումով ամրացման ալիքը կոշտ մաղ չէ. նրա շերտերը կարող են շարժվել: Փորձերում ավելի թեթև իոնները՝ լանթանը, պրազեոդիմը և նեոդիմը, նյութին ստիպել են ավելի շատ ջուր ընդունել և ավելի լայն բացվել: Եվրոպիումից մինչև իտերբիում ավելի ծանր իոնները հակված էին նեղ ալիքը պահպանել: Սամարիումը գտնվում էր այս երկու արձագանքների միջև:

Հոդվածը առաջին արձագանքը կոչում է **Group I**, իսկ երկրորդը՝ **Group II**: Դրանք այս կոնկրետ նյութի՝ իոններին արձագանքելու ձևի պիտակներ են, ոչ պարբերական աղյուսակի խմբերի համարներ: Սահմանը կարող է փոխվել նաև այլ

փորձարարական պայմաններում։

Կառուցվածքային այս տարբերությունը օգնեց տարբեր խմբերի միջև զույգերի դեպքում։ Ուղիղ իոնափոխանակման ժամանակ հաղորդված հարստացման գործակիցը լանթան–դիսպրոզիում զույգի համար **7.8** էր, պրազեոդիմ–դիսպրոզիումի համար՝ **5.7**, նեոդիմ–դիսպրոզիումի համար՝ **4.5**, իսկ նեոդիմ–եվրոպիումի համար՝ **2.6**։

Հարևան զույգերի մեծ մասը շատ ավելի դժվար էր՝ մոտ 1.1 հարստացման գործակիցներով։ 1-ին մոտ գործակիցը նշանակում է թույլ նախընտրություն։ Նյութը ավելի հեշտ էր տարբերակում երկու իոն, երբ դրանք նախընտրում էին ալիքի տարբեր կառուցվածքներ, քան երբ մոտ էին իրար նույն արձագանքային խմբում։

Մագնեզիումը ամրացնում է ալիքը

Հետազոտողները հետո կիրառել են **Էլեկտրաքիմիական ինտերկալացիա**՝ էլեկտրական ռեակցիա, որը իոններ է մտցնում պինդ շերտերի միջև։ Մագնեզիումի իոնները մնացել են ալիքում, երբ հազվագյուտ հողային իոնները ներս են մտել։ Պահպանված մագնեզիումը օգնել է թույլ չտալ, որ բուզերիտի միջշերտային հեռավորությունը մեծանա։

Այդ ավելի նեղ խոնավ բացվածքում ներս մտնող հիդրատացված իոնը քիչ տեղ ունի։ Առաջարկվող մեխանիզմը միավորում է տարածական սահմանափակումը, մասնակի ջրազրկումը, կոորդինացիան և կապումը։ **Կոորդինացիա** նշանակում է մոտակա ատոմների՝ հաճախ թթվածնի, դասավորությունը, որոնք անմիջապես շրջապատում և փոխազդում են իոնի հետ։

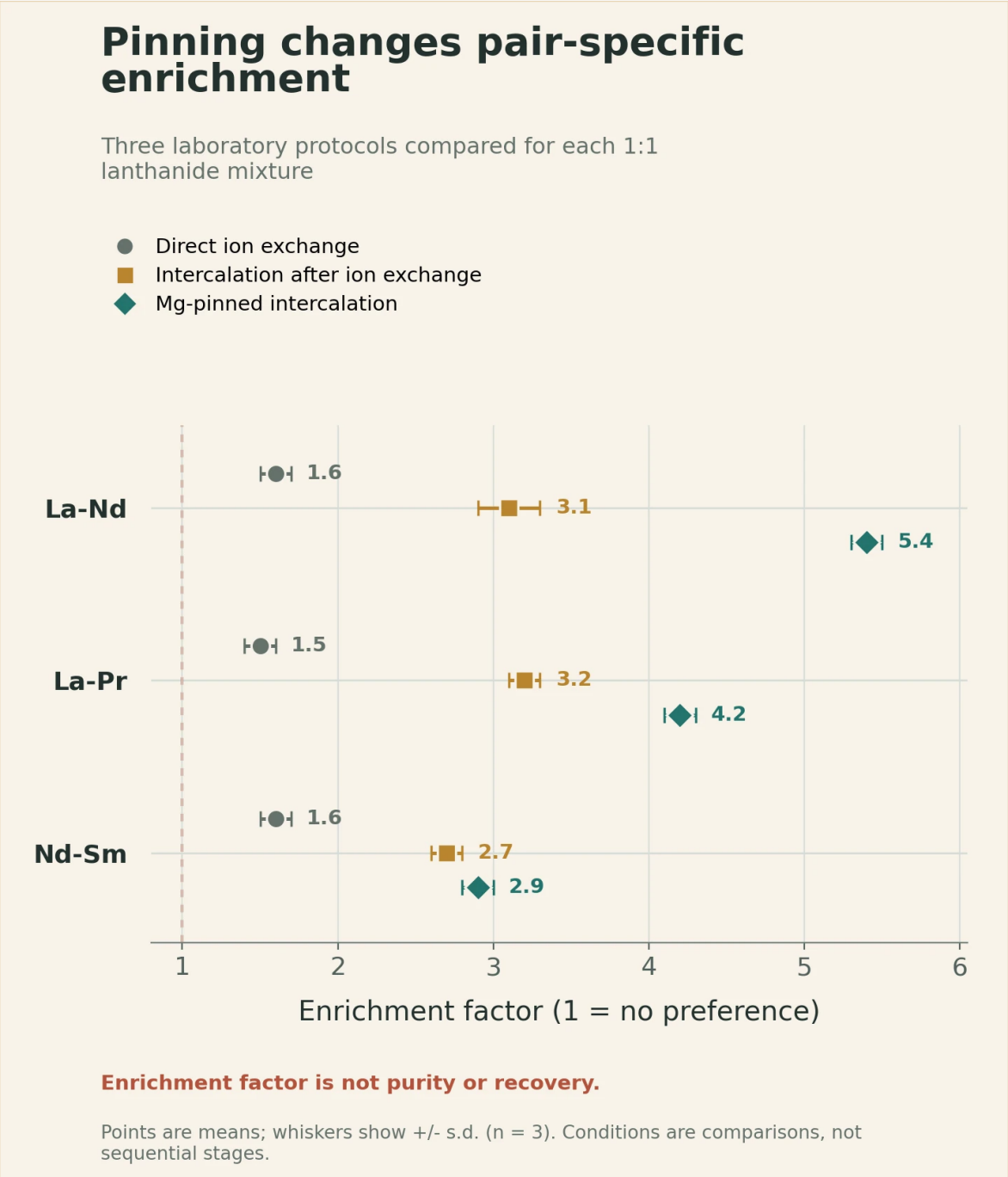
Ապացույցները գալիս են աշխատանքի մի քանի տեսակներից։ Ռենտգենյան չափումները հետևել են պինդ նյութի կառուցվածքին։ Էլեկտրաքիմիական փորձերը չափել են ներդրումն ու տարանջատումը։ **Խտության ֆունկցիոնալի տեսությունը**՝ քվանտամեխանիկական հաշվարկ, համեմատել է կառուցվածքները, հիդրատացումը և կապումը։ Հաշվարկներն օգնում են մեկնաբանել մեխանիզմը. դրանք ալիքով շարժվող մեկ իոնի ուղղակի ֆիլմ չեն։

Մեխանիզմը նաև պարզապես «փոքր իոններն անցնում են, մեծերը կանգնում» չէ։ Ջրային թաղանթը, շերտերի արձագանքը, ջրազրկման էներգետիկ գինը և պինդ նյութի հետ իոնի կոորդինացիան՝ բոլորը դեր ունեն։

Ամրացումը բարելավեց որոշ հարևան զույգերի տարանջատումը

Ամենամեծ ընդգծված փոփոխությունը լանթանի և նեոդիմի համար էր. հարստացումը առանց ամրացման **1.6 +/- 0.1**-ից մագնեզիումով ամրացման դեպքում բարձրացավ

մինչև **5.4 +/- 0.1**: Լանթան–պրազեոդիմ զույգի համար այն **1.5 +/- 0.1**-ից բարձրացավ մինչև **4.2 +/- 0.1**: Նեոդիմ–սամարիումի համար՝ **1.6 +/- 0.1**-ից մինչև **2.9 +/- 0.1**:



Յուրաքանչյուր տող համեմատում է երեք առանձին լաբորատոր ընթացակարգ, ոչ մեկ գործընթացի հաջորդական փուլեր: 1 գործակիցը նշանակում է նախընտրության բացակայություն, իսկ ավելի բարձր արժեքները՝ զույգին հատուկ ավելի ուժեղ հարստացում: Կետերը ցույց են տալիս միջինները, իսկ բեղիկները՝ +/- ստանդարտ շեղումը (n = 3):

The Clean Paper CC BY 4.0

pH 2-ի դեպքում լանթան–նեոդիմ արժեքը եղել է **5.6 +/- 0.2**: Էլեկտրական արագությունը հինգ անգամ՝ 0.1C-ից մինչև 0.5C բարձրացնելը այն նվազեցրել է **5.4 +/- 0.1**-ից

մինչև **4.3 +/- 0.4**: C-հաճախականությունը կիրառված էլեկտրական հոսանքը համեմատում է նյութի տարողության հետ: Ավելի բարձր արագությունը իոններին և պինդ նյութին արձագանքելու ավելի քիչ ժամանակ է տալիս:

Ոչ մի առանձին թիվ նյութը համընդհանուր չի նկարագրում: Հարստացումը կախված է զույգից, պինդ կառուցվածքից, թթվայնությունից և աշխատանքային արագությունից:

Հոդվածը նյութը փորձարկել է նաև մեծ քանակով առկա՝ ոչ հազվագյուտ հողային իոնների պայմաններում: Սկզբնական խառնուրդներում յուրաքանչյուր 1 հազվագյուտ հողային իոնի դիմաց եղել է 1,000 մրցակցող իոն: Նատրիումի նկատմամբ հաղորդված ընտրողականությունը մոտ **1,200** էր, կալցիումի նկատմամբ՝ **6,500**, մագնեզիումի նկատմամբ՝ **1,700**:

Սա օգտակար ապացույց է, որ սովորական իոնները այս լաբորատոր պայմաններում ավտոմատ չեն գերակշռում տարանջատմանը: Բայց սա լիարժեք հանքաքարից ստացված հեղուկի փորձ չէ՝ իր բոլոր մետաղներով, թթվայնությամբ և աղտոտիչներով:

Հարստացումը, տարանջատումը, մաքրությունը, նվազեցումը և վերականգնումը տարբեր արդյունքներ են

Հոդվածում օգտագործվում են արդյունավետության մի քանի չափանիշներ, և դրանք փոխարինելի չեն:

Հարստացման գործակիցը համեմատում է երկու իոնների հարաբերությունը տարանջատումից հետո և առաջ: 5.4 արժեքը նշանակում է, որ բռնված նյութը զույգի մի անդամին 5.4 անգամ ավելի ուժեղ էր գերադասում, քան սկզբնական խառնուրդը:

Տարանջատման գործակիցը հաշվի է առնում նաև այն, ինչ մնում է հեղուկում. այն յուրաքանչյուր իոնի բռնված քանակը համեմատում է չբռնված քանակի հետ, ապա համեմատում է այդ երկու հավասարակշռությունները: Այդ պատճառով այն կարող է աճել, երբ ավելի շատ նյութ է հեռացվում, նույնիսկ եթե հարստացման գործակիցը այլ կերպ է փոխվում:

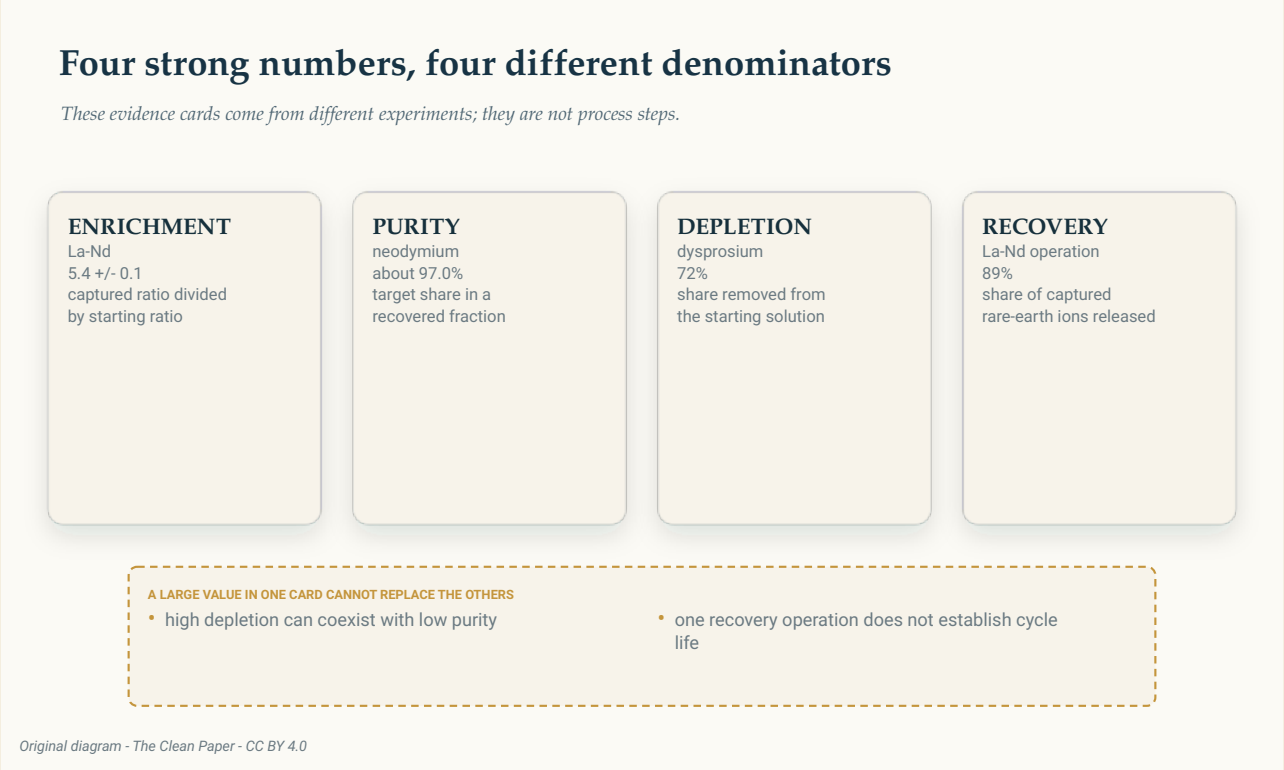
Մաքրությունը ընտրված իոնի բաժինն է վերականգնված ֆրակցիայում: Երկփուլ ցուցադրումներում համապատասխան ուղիներով ստացվել է մոտ **97.0% նեոդիմի մաքրություն** և **92.3% դիսպրոզիումի մաքրություն**:

Նվազեցումը սկզբնական լուծույթից հեռացված բաժինն է: Փոշու 10 միլիգրամանոց ութ հաջորդական ավելացումները նեոդիմ–դիսպրոզիում փորձի ժամանակ հեռացրել են **դիսպրոզիումի 72%-ը** և տվել 10.8 կուտակային տարանջատման գործակից:

Վերականգնումը հարցնում է, թե բռնված իոնի որքան մասը կարելի է հետո

ազատել: Հակադարձ իոնափոխանակումը նեոդիմ–դիսպրոզիում գործողություններից մեկում վերականգնել է **80%**: Էլեկտրաքիմիական հեռացումը լանթան–նեոդիմ գործողությունում վերականգնել է **89%**:

Վերականգնումը ցույց է տալիս հետադարձելիություն: Այն չի հաստատում, թե քանի անգամ կարելի է էլեկտրոդը կրկին օգտագործել՝ առանց արդյունավետությունը կորցնելու:



Հաղորդված չորս չափանիշները տարբեր հայտարարներ են օգտագործում և գալիս են տարբեր փորձերից: Դրանք ապացույցային քարտեր են, ոչ մեկ գործընթացի հաջորդական փուլեր:

The Clean Paper CC BY 4.0

Ինչպե՞ս կարող են երկու տպավորիչ տոկոսներ տարբեր բան նշանակել

Ենթադրենք՝ գործընթացը սկզբնական հեղուկից հեռացնում է մեկ իոնի 90%-ը: Դա բարձր նվազեցում է: Բայց եթե դրա հետ դուրս են գալիս նաև շատ անցանկալի իոններ, վերականգնված նյութի մաքրությունը դեռ կարող է ցածր լինել: Հակառակը՝ շատ մաքուր փոքր ֆրակցիան կարող է ունենալ վատ վերականգնում, եթե թիրախային նյութի մեծ մասը մնացել է ներսում: Գործընթացը գնահատելու համար պետք են այս բոլոր հավասարակշռությունները, ոչ ամենամեծ թիվը:

Ցուցադրված սարքը դեռ բաժակային փորձ է

Մասշտաբին ուղղված էլեկտրաքիմիական փորձերը սկսվել են **5 միլիլիտր** լուծույթով, որտեղ յուրաքանչյուր իոնի կոնցենտրացիան եղել է 25 միլիմոլ/լիտր։ Էլեկտրոդները կրել են մոտ **25–40 միլիգրամ** ակտիվ նյութ։

Մեկ էլեկտրոդ հեռացրել է նեոդիմի մոտ 40%-ը։ Հաջորդաբար օգտագործված երեք էլեկտրոդ հասել են մոտ **90% նվազեցման** և **16.6 +/- 0.4** կուտակային տարանջատման գործակցի։ Կախված աշխատանքային արագությունից՝ ռեակցիաները տևել են **200 րոպեից մինչև 13 ժամ**։

Այս չափերն ու ժամանակները պետք է մնան պատմության հիմնական մասում, որովհետև հենց դրանք են սահմանում, թե իրականում ինչ է ցուցադրվել։

Լրացուցիչ նյութը նաև նշում է զանգվածափոխանցման սահմանափակում։ Ավելի բարձր կոնցենտրացիայով բաժակային թիրախի համար ընդհանուր 50% նվազեցման հասնելը գնահատվել է որպես **266 միլիգրամանոց էլեկտրոդ**, կամ **532 միլիգրամ ակտիվ նյութ մեկ քառակուսի սանտիմետրի վրա**։ Այդքան նյութը փոքր էլեկտրոդի վրա խիտ տեղավորելը կդժվարացներ լուծված իոնների հասանելիությունը դրա ամբողջ ծավալին։ Այդ պատճառով հեղինակները բաժակային փորձի համար անցել են ավելի նոսր լուծույթի։

Հիպոթետիկ հոսքային բջիջը հայտնվում է միայն որպես կանխատեսում։ Ենթադրված 1.25 միլիլիտրանոց բջջի և 5×5 սանտիմետր էլեկտրոդի համար լրացուցիչ նյութը մոտ 90% նվազեցման համար գնահատում է մոտ **20 րոպե 1C-ի դեպքում** կամ **40 րոպե 0.5C-ի դեպքում**։ Նման հոսքային բջջի փորձ չի հաղորդվում։

Սանդուղքն ավարտվում է սահմանով. կան երկբաղադրիչ և փուլային լաբորատոր ապացույցներ, մինչդեռ հոսքային աշխատանքի ժամանակը և բնապահպանական արդյունավետությունը մնում են կանխատեսված կամ սցենարային, ոչ գործարանային մասշտաբով ցուցադրված:

The Clean Paper CC BY 4.0

Բնապահպանական համեմատությունը սցենար է, ոչ գործարանի արդյունք

Լրացուցիչ կյանքի ցիկլի գնահատումը համեմատում է տարանջատման քայլերը, որոնք ավարտվում են հազվագյուտ հողային օքսիդներով, և մուտքերը հաշվարկում է **1 կիլոգրամ նեոդիմի օքսիդի** հաշվով:

Այն չի ներառում հանքարդյունահանումը, հանքաքարի նախնական մշակումը կամ ամբողջական առևտրային մաքրման շղթան: Լաբորատոր գործընթացը ներկայացված է բազմաթիվ աղբյուրներից հավաքված ենթադրություններով: Էլեկտրոդների **10, 20 և 100 ցիկլ** կյանքը սցենարային և զգայունության արժեքներ են, ոչ այս ուսումնասիրության մեջ չափված դիմացկունություն: Մոդելը ենթադրում է, որ մագնեզիումի վերականգնման լուծույթը կարելի է կրկին օգտագործել մինչև դրա կոնցենտրացիան 10%-ով փոխվի, ենթադրում է **95% ջրի վերամշակում** և ներառում է 450–600 °C-ում երկու ժամ կալցինացում, թեև կալցինացումն այստեղ փորձարարորեն չի ցուցադրվել:

Կյանքի ցիկլի գնահատումը հաշվարկում է բնապահպանական ծանրաբեռնվածությունը սահմանված համակարգային սահմանի ներսում: Դրա պատասխանը նույնքան լայն է, որքան այդ սահմանը, և նույնքան հուսալի, որքան մուտքային տվյալներն ու մասշտաբային ենթադրությունները:

Վերլուծությունը կարող է ցույց տալ, թե որտեղ են կարևոր էներգիան, նյութերը և կրկնակի օգտագործումը: Այն չի կարող ապացուցել, որ առևտրային տարբերակը արդյունաբերական լուծիչային էքստրակցիայից ավելի քիչ բնապահպանական ազդեցություն կունենա:

Մեխանիզմ, հարթակ և երկար ինժեներական ճանապարհ

Հոդվածը ցույց է տալիս, որ հիդրատացված շերտավոր պինդ նյութի բացվածքն ու քիմիական միջավայրը կարելի է դիտավորյալ վերահսկել՝ որոշ լանթանիդների տարանջատումը բարելավելու համար: Մագնեզիումով ամրացումը պարզապես մեկ այլ քիմիական կապման տեղ չի ավելացրել. այն սահմանափակել է այն կառուցվածքը, որի միջով պետք է շարժվեին ջրով շրջապատված իոնները:

Այս արդյունքը գործնական հարցեր է բացում: Արդյունավետությունը կպահպանվի՞ իրական հանքաքարից ստացված խառնուրդներում: Կարելի՞ է պատրաստել աշխատունակ զանգվածային բեռնվածությամբ էլեկտրոդներ: Որքան կայուն է մանգանի օքսիդը բազմաթիվ ներդրման և ազատման ցիկլերում: Կարո՞ղ է շարունակական բջիջը պահպանել ընտրողականությունը, արտադրողականությունը և ջրի հավասարակշռությ Ինչպիսի՞ տեսք կունենա բնապահպանական համեմատությունը՝ չափված պիլոտային մասշտաբի տվյալներով:

Փորձը այս հարցերին չի պատասխանում: Այն պարզապես դրանք ավելի կոնկրետ է դարձնում:

Ձեռքբերումը պատրաստի հազվագյուտ հողային տարրերի զտարան չէ: Այն ապացույց է, որ ջրով լցված մի քանի անգստրեմ վերահսկվող տարածքը կարող է փոխել դժվար տարանջատումը:

Կարճ ամփոփում

Հետազոտողները ջրում որոշ լանթանիդային իոնների զույգեր տարանջատելու համար օգտագործել են հիդրատացված շերտավոր մանգանի օքսիդ: Նյութի ազատ բացվածքը մոտ 6.8–6.9 անգստրեմ էր՝ մոտ այն 6.6–7.1 անգստրեմ տրամագծին, որը հաղորդվել է իոնների առաջին հիդրատացման թաղանթների համար: Պահպանված մագնեզիումը օգնել է ամրացնել ալիքը և բարելավել զույգին հատուկ հարստացումը,

այդ թվում՝ լանթան–նեոդիմը 1.6-ից մինչև 5.4 և լանթան–պրազեոդիմը 1.5-ից մինչև 4.2։ Ուսումնասիրությունը նաև հաղորդել է մեծ քանակով սովորական իոնների պայմաններում փորձեր, փուլային մաքրություն, հաջորդական նվազեցում և վերականգնում։ Ցուցադրված մասշտաբը մնացել է 5 միլիլիտրանոց բաժակային փորձեր՝ 25–40 միլիգրամ ակտիվ նյութով և 200 րոպեից մինչև 13 ժամ ռեակցիայի ժամանակով։ Հոսքային բջջի ժամանակը միայն կանխատեսվել է, բազմակի ցիկլերում կրկնակի օգտագործումը չի փորձարկվել, իսկ կյանքի ցիկլի համեմատությունը կախված է լաբորատոր մասշտաբի ենթադրություններից։ Հոդվածը աջակցում է սահմանափակման մեխանիզմին և լաբորատոր հարթակին, ոչ լուծիչային էքստրակցիայի արդյունաբերական փոխարինմանը։

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. Հիդրատացված մանգանի օքսիդի մոտ 6.8–6.9 անգստրեմ բացվածքը պահպանված մագնեզիումով այդ չափի մոտ պահելը փոխել է որոշ լանթանիդային զույգերի տարանջատումը։ Կառուցվածքային չափումները, էլեկտրաքիմիան և հաշվարկները աջակցում են սահմանափակումը, ջրազրկումը, կոորդինացիան և կապումը ներառող մեխանիզմին։

Ինչն է աշխատել լավագույնը. Նշված պայմաններում լանթան–նեոդիմ հարստացումը հասել է 5.4 +/- 0.1-ի, իսկ լանթան–պրազեոդիմը՝ 4.2 +/- 0.1-ի։ Այլ զույգերի արժեքները տարբեր են եղել։ Առանձին փորձերում հաղորդված մաքրության, նվազեցման և վերականգնման արդյունքները տարբեր հայտարարներ են օգտագործում։

Ինչ չի ցույց տալիս. Համընդհանուր տարանջատիչ բոլոր հազվագյուտ հողային տարրերի համար, աշխատանք լիարժեք հանքաքարային հոսքի վրա, ցուցադրված շարունակական հոսքային բջիջ, բազմակի ցիկլերում դիմացկուն էլեկտրոդներ, լուծիչային էքստրակցիայի փոխարինում կամ ապացուցված առևտրային բնապահպանական գերազանցություն։

Մասշտաբի հիմնական սահմանափակումները. Ցուցադրված փորձերը օգտագործել են 5 միլիլիտր լուծույթ, մոտ 25–40 միլիգրամ ակտիվ նյութ և 200 րոպեից մինչև 13 ժամ։ Ավելի բարձր կոնցենտրացիայի թիրախը ենթադրել է 532 մգ/սմ^2 բեռնվածության խնդիր։ Հոսքային ժամանակները էքստրապոլացվել են։ Կյանքի ցիկլի գնահատման մեջ էլեկտրոդների կյանքն ու հիմնական վերամշակման մուտքերը ենթադրություններ էին։

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն անվանված զույգերի և պայմանների համար հաղորդված լաբորատոր չափումների նկատմամբ։ Միջին վստահություն առաջարկվող մոլեկուլային մեկնաբանության նկատմամբ, քանի որ այն միավորում է ուղիղ կառուցվածքային և էլեկտրաքիմիական ապացույցները հաշվարկների հետ։ Ցածր վստահություն այն հարցում, թե ներկայիս տվյալները կանխատեսում են արդյոք արդյունաբերական արտադրողականություն, ծառայության ժամկետ կամ բնապահպանական արդյունավետություն։

Աղբյուրներ

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