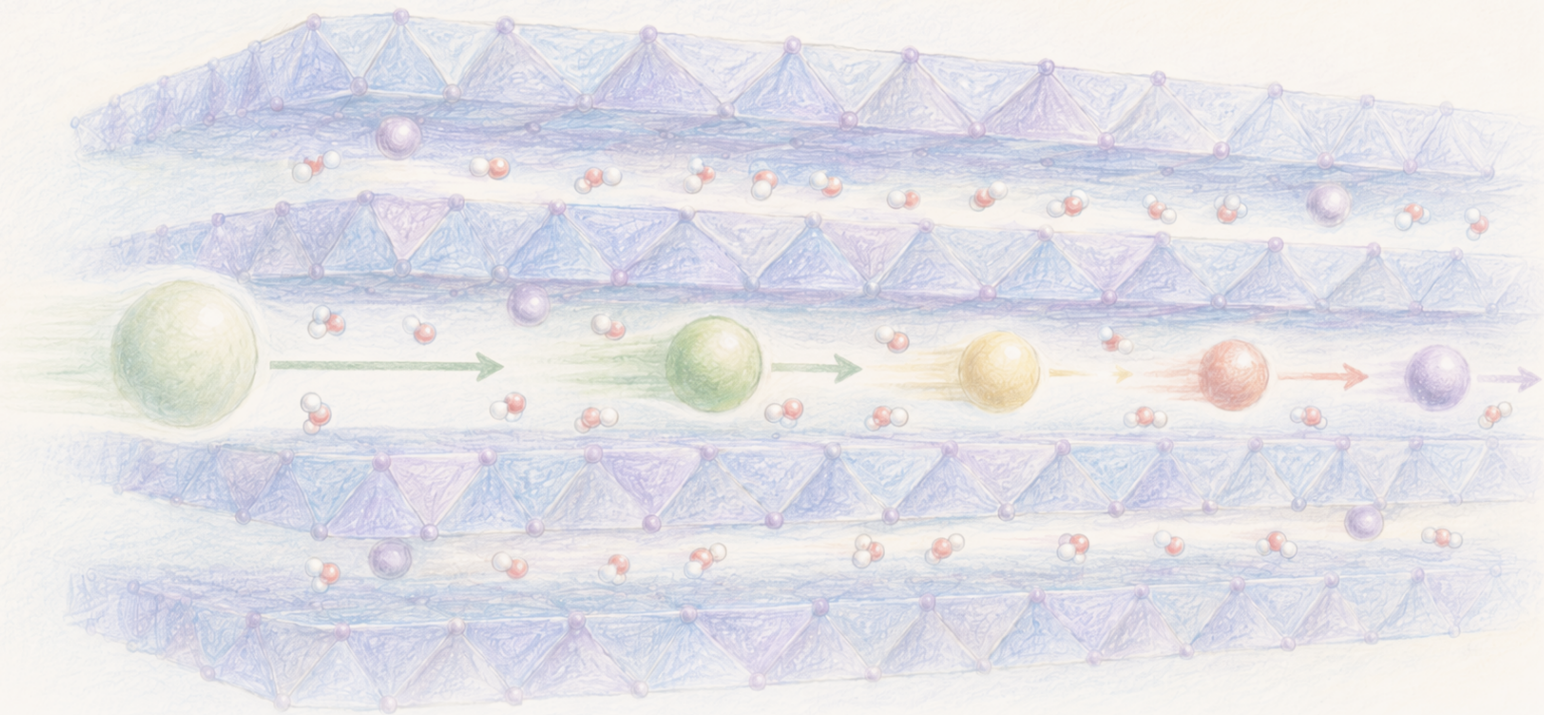




The CLEAN PAPER

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

በውሃ የተሞላ የማዕድን ቻናልን በቦታው ማቆየት ተመሳሳይ የብርቅዬ ምድር አየኖችን ለመለየት ረድቷል

ማግኒዥየም በውሃ የተያዘውን የማንጋኒዝ አካላዊድ ክፍተት ከላንታናይድ አየን የውሃ ሼል ስፋት አጠገብ እንዲቆይ አድርጎ፣ በላቦራቶሪ ሙከራዎች የተወሰኑ ጥንድ-ተኮር ማበልጸጎችን አሻሽሏል። የታየው ሥራ ሚሊሊትሮች ፈሳሽ እና ሚሊግራሞች ቁስ ተጠቅሟል፤ የፍሰት አሠራር፣ ረጅም የዑደት ዕድሜ እና የንግድ የአካባቢ አፈጻጸም አሁንም አልተረጋገጡም።

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

በውሃ የተሞላ የማዕድን ቻናልን በቦታው ማቆየት ተመሳሳይ የብርቅዬ ምድር አየኖችን ለመለየት ረድቷል

የብርቅዬ ምድር አየኖችን መለየት አስቸጋሪ የሆነው፣ ከርቀት ወንድማማቾችን ለይቶ ማወቅ አስቸጋሪ ሊሆን በሚችልበት ተመሳሳይ ምክንያት ነው፤ ልዩነቶቹ እውነተኛ ናቸው፣ ግን ትንሽ ናቸው።

ላንታናይዶች በወቅታዊ ሰንጠረዥ ላይ አንዱ ከሌላው ጎን ለጎን ይገኛሉ፤ እና ብዙውን ጊዜ ተመሳሳይ ክፍያ ያላቸው አየኖችን ይፈጥራሉ። መጠናቸው በተከታታይ ቀስ በቀስ ይለዋወጣል፤ የኬሚካላዊ ባህሪያቸው ግን ተመሳሳይ ይቆያል። ስለዚህ የኢንዱስትሪ ማጣራት ብዙ ተደጋጋሚ የመለያየት ደረጃዎችን ይጠቀማል።

አዲስ የላቦራቶሪ ጥናት ችግሩን በመገደብ አቀራረብ ተመልክቶታል። ተመራማሪዎቹ በመካከላቸው በውሃ የተሞላ ክፍተት ያላቸው ተደራራቢ የማንጋኒዝ አካላዊ ሉሆችን ተጠቅመዋል። የብርቅዬ ምድር አየን ወደዚህ ክፍተት ሲቀርብ በውሃ ሞለኪውሎች የተከበበ ነው። የሚያስደግፈው ነገር ከሌለ፣ ሉሆቹ አየኑን ለማስተናገድ ሊራራቁ ይችላሉ። የማግኒዥየም አየኖች እንደ ድጋፍ ሠሩ፤ በሉሆቹ መካከል ሲቆዩ ክፍተቱን ጠባብ እንዲሆን ረድተዋል። የተለያዩ የብርቅዬ ምድር አየኖችም የተወሰነ ውሃ ለማጣት፣ ወደ ቻናሉ ለመግባት እና በጠጣሩ ውስጥ ካሉ የአክሲጅን አቶሞች ጋር ለመያያዝ የተለያዩ የጋራ ዋጋ ከፍለዋል።

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

ያልተገደበው እና በማግኒዥየም የተገደበው ቻናል በመዋቅር፣ በኤሌክትሮኬሚስትሪ እና በስሌቶች የተደገፉ የስልተ-አሠራር ትርጓሜዎች ናቸው። አንድም ሙከራ ሙሉውን የሞለኪውላዊ ቅደም ተከተል በቀጥታ አልተመለከተም።

The Clean Paper CC BY 4.0

ከተፈተኑት ጥንዶች አንዱ ላንታኒየም እና ኒዮዲሚየም ሲሆን፣ ይህ በቦታው ማቆየት የማበልጸጊያ ፋክተሩን ከ1.6 ወደ 5.4 ከፍ አድርጎታል። ላንታኒየም እና ፕራሴዮዲሚየም ከ1.5 ወደ 4.2 ከፍ ብሏል። የማበልጸጊያ ፋክተር ከመለያየቱ በኋላ ያለውን የሁለቱ አየኖች ሬሾ ከመለያየቱ በፊት ከነበረው ሬሾ ጋር ያነጻጽራል። 1 ማለት ምንም ምርጫ የለም ማለት ነው፤ 5.4 ማለት የተያዘው ንጥረ ነገር ኒዮዲሚየምን ከላንታኒየም ይልቅ ከመነሻ ድብልቁ 5.4 እጥፍ በበለጠ ሁኔታ መርጧል።

ማለት ነው።

እነዚህ ለተወሰኑ ጥንዶች ጠቃሚ የላቦራቶሪ ውጤቶች ናቸው። አሁን ሁሉም የብርቅዬ ምድር ንጥረ ነገሮች በንጽህና ሊለዩ እንደሚችሉ፣ በፍሰት የሚሠራ ሂደት እንደታየ ወይም የሶልቨንት ኤክስትራክሽንን መተካት እንደሚቻል ማስረጃ አይደሉም።

በወረቀቱ ውስጥ ያለው ኃይለኛው ሐሳብ ከማጣሪያ ፋብሪካ ያነሰ ነው፤ በውሃ የተሞላ የማዕድን ክፍተት እንዳይከፈት ማድረግ።

በውሃ ውስጥ ያለ አየን ከባድው አቶም ይበልጣል

የብርቅዬ ምድር ንጥረ ነገሮች ላንታናይዶችን፣ ከስካንዲየም እና ይትሪየም ጋር ያካትታሉ። ጥናቱ ከላንታኒየም እስከ ይትሪየም ያሉ 12 አዎንታዊ ክፍያ ያላቸው የላንታናይድ አየኖችን ፈትኗል። ሴሪየም የኦክሲዴሽን ሁኔታውን በቀላሉ ስለሚቀይር አልተካተተም፤ ሬዲዮአክቲቭ ፕሮሜቲየምም አልተካተተም።

በውሃ ውስጥ አየን ብቻውን አይጓዝም። የውሃ ሞለኪውሎች በክፍያው ዙሪያ ተደራጅተው የሃይድሬሽን ሼል ይፈጥራሉ። ወደ ጠባብ ቻናል ገብቶ ከጠጣር ጋር ለመያያዝ፣ አየኑ የውሃ ሽፋኑን አንድ ክፍል እንደገና ማደራጀት ወይም ማጣት ሊኖርበት ይችላል። የኃይል ዋጋው በአየኑም ሆነ በአካባቢው ሁኔታ ይወሰናል።

መጠኖቹ በአንግስትሮም (Å) ይለካሉ። አንድ አንግስትሮም የአንድ ሜትር አስር ቢሊዮንኛ ክፍል ነው ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$)። የተፈተኑት ላንታናይዶች የመጀመሪያ ሃይድሬሽን ሼሎች ዲያሜትር በግምት 6.6 እስከ 7.1 Å እንደሆነ ተዘግቧል።

ተመራማሪዎቹ buserite የተባለ በውሃ የተያዘ ንብርብ ያለው የማንጋኒዝ ኦክሳይድ ተጠቅመዋል። ተደራራቢ ሉሆቹ ከአንድ ተደጋጋሚ የሉህ አቀማመጥ እስከ ቀጣዩ ሲሊካ በግምት 9.6 እስከ 9.7 አንግስትሮም ተራርቀው ነበር። ግን ሉሁ ራሱም ቦታ ይይዛል። በሉሆቹ መካከል ያለው ነፃ በውሃ የተሞላ ክፍተት በግምት 6.8 እስከ 6.9 አንግስትሮም ብቻ ነበር።

ይህ ልዩነት አስፈላጊ ነው። 9.7 አንግስትሮም የንብርብ-መካከል ርቀት ማለት 9.7 አንግስትሮም ክፍት ቻናል ማለት አይደለም።

አንዳንድ ቀላል ላንታናይዶች መዋቅሩ ወደ ብዙ ውሃ ወዳለው ፊዝ እንዲሰፋ አድርገዋል። በዚያ ሁኔታ ከሉህ ወደ ሉህ ያለው ርቀት በግምት 11.2 አንግስትሮም፣ የተገመተው ነፃ ክፍተት ደግሞ በግምት 8.42 አንግስትሮም ነበር። birnessite የተባለ ከዚህ ጋር የተዛመደ ጠባብ መዋቅር በግምት 4.42 አንግስትሮም ነፃ ክፍተት ነበረው።

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

ንጽጽሩ በባዶ አየን እና በሙሉ ከሉህ ወደ ሉህ ርቀት መካከል ሳይሆን፤ በግምታዊ የሃይድሬሽን ሼል ዲያሜትር እና በነፃው በውሃ የተሞላ ክፍተት መካከል ነው። መጠን የስልተ-አሠራሩ አንድ ክፍል ነው፤ ግን ሙሉ ማብራሪያው አይደለም።

The Clean Paper CC BY 4.0

ማዕድኑ ከአየኑ ጋር ሊላመድ ይችላል

በማግኒዥየም ካልተገደበ ቻናሉ የማይንቀሳቀስ ወንፌት አይደለም፤ ተደራራቢ ሉሆቹ ሊንቀሳቀሱ ይችላሉ። በሙከራዎቹ ውስጥ ቀላል የሆኑት ላንታኒም፣ ፕራሴዮዲሚየም እና ኒዮዲሚየም አየኖች ቁሱ ብዙ ውሃ እንዲይዝ እና ክፍተቱ እንዲሰፋ አድርገዋል። ከዩሮፒየም እስከ ይተርቢየም ያሉት ከባድ አየኖች ጠባብ ቻናል እንዳለ የመተው ዝንባሌ አሳይተዋል። ሳማሪየም በሁለቱ ምላሾች መካከል ነበር።

ወረቀቱ የመጀመሪያውን ምላሽ Group I፣ ሁለተኛውን Group II ይለዋል። እነዚህ አየኖቹ ይህን የተወሰነ ቁስ እንዴት እንዳስመለሱት የሚገልጹ መለያዎች ናቸው፤ የወቅታዊ ስንጠረዥ የቡድን ቁጥሮች አይደሉም። ድንበሩም በሌሎች የሙከራ ሁኔታዎች ሊለዋወጥ ይችላል።

ይህ የመዋቅር ልዩነት ከአንድ ቡድን ወደ ሌላ ለሚገኙ ጥንዶች ረድቷል። በቀጥታ የአየን ልውውጥ ውስጥ የተዘገበው የማበልጸጊያ ፋክተር ላላንታኒም ከዲስፕሮሲየም ጋር 7.8፣ ለፕራሴዮዲሚየም ከዲስፕሮሲየም ጋር 5.7፣ ለኒዮዲሚየም ከዲስፕሮሲየም ጋር 4.5 እና ለኒዮዲሚየም ከዩሮፒየም ጋር 2.6 ነበር።

አብዛኞቹ ጎረቤት ጥንዶች በጣም አስቸጋሪ ነበሩ፤ የማበልጸጊያ ፋክተራቸውም ወደ 1.1 የሚጠጋ ነበር። ወደ 1 የሚጠጋ ፋክተር ትንሽ ምርጫ ብቻ እንዳለ ያሳያል። ሁለቱ አየኖች የተለያዩ የቻናል መዋቅሮችን ሲመርጡ፣ በተመሳሳይ የምላሽ ቡድን ውስጥ ቅርብ ሲሆኑ ከነበረው ይልቅ ቁሱ በቀላሉ ሊለያቸው ችሏል።

ማግኒዥየም ቻናሉን በቦታው ያቆያል

ተመራማሪዎቹ ከዚያ electrochemical intercalation ተጠቅመዋል፤ ይህ አየኖችን በጠጣር ንብርብሮች መካከል የሚያስገባ ኤሌክትሪካዊ ምላሽ ነው። የብርቅዬ ምድር አየኖች ሲገቡ የማግኒዥየም አየኖች በቻናሉ ውስጥ ቀርተዋል። የቀረው ማግኒዥየም የbuserite ርቀት እንዳይሰፋ ረድቷል።

በዚያ ጠባብ እርጥብ ክፍተት ውስጥ ወደ ውስጥ የሚመጣ በውሃ የተከበበ አየን ያለው ቦታ ያነሰ ነው። የቀረበው ስልተ-አሠራር መገደብን፣ ከፊል ውሃ ማጣትን፣ coordination እና መያያዝን ያጣምራል። Coordination ማለት አየኑን በቀጥታ የሚከቡ እና ከእሱ ጋር የሚገናኙ ቅርብ አቶሞችን፣ ብዙውን ጊዜ ኦክሲጅንን፣ ያመለክታል።

ማስረጃው ከተለያዩ የሥራ ዓይነቶች ይመጣል። የX-ray መለኪያዎች የጠጣሩን መዋቅር ተከታትለዋል። የኤሌክትሮኬሚካል ሙከራዎች ማስገባትን እና መለያየትን ለከተዋል። ጥግግት functional ንድፈ ሐሳብ፣ የኳንተም ሜካኒክስ ስሌት፣ መዋቅሮችን፣ ሃይድሬሽንን እና መያያዝን አነጻጽሯል። ስሌቶቹ ስልተ-አሠራሩን ለመተርጎም ይረዳሉ፤ አንድ አየን በቻናሉ ውስጥ ሲንቀሳቀስ የተቀረጸ ቀጥተኛ ፊልም አይደለም።

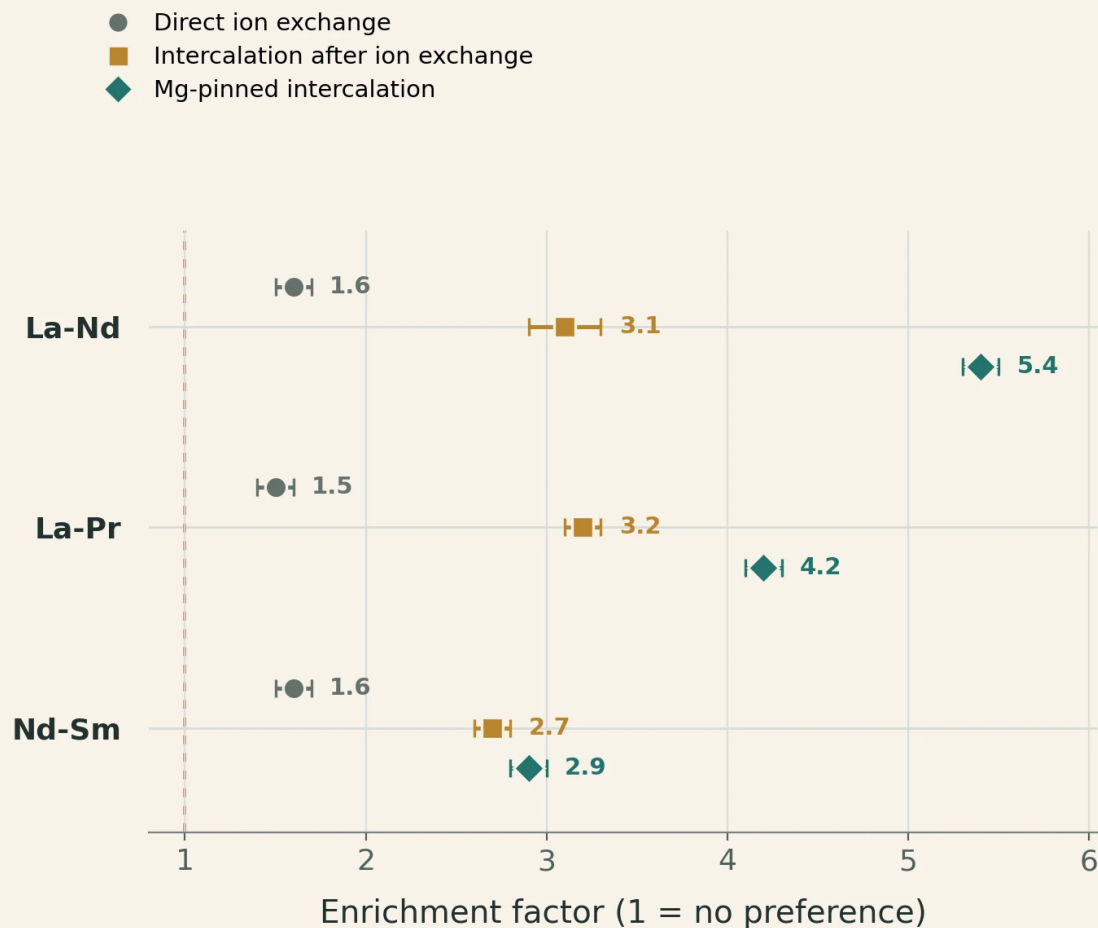
ስልተ-አሠራሩም በቀላሉ “ትንንሽ አየኖች ያልፋሉ፣ ትልልቅ አየኖች ይቆማሉ” የሚል አይደለም። የውሃ ሼሉ፣ ንብርብሮቹ እንዴት ምላሽ እንደሚሰጡ፣ ውሃን ማጣት ምን ያህል ኃይል እንደሚጠይቅ እና አየኑ ከጠጣሩ ጋር እንዴት coordination እንደሚፈጥር ሁሉም ይሳተፋሉ።

በቦታው ማቆየት የተወሰኑ ጎረቤት ጥንዶችን አሻሽሏል

በጣም የታየው ለውጥ ለላንታኑም እና ኒዮዲሚየም ነበር፤ ማበልጸግ ያለ መገደብ ከ1.6 +/- 0.1 በማግኒዥየም ሲገደብ ወደ 5.4 +/- 0.1 ከፍ ብሏል። ላንታኑም ከፕራሴዮዲሚየም ከ1.5 +/- 0.1 ወደ 4.2 +/- 0.1 ከፍ ብሏል። ኒዮዲሚየም ከሳማሪየም ከ1.6 +/- 0.1 ወደ 2.9 +/- 0.1 ከፍ ብሏል።

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 $\pm$ s.d. ($n = 3$). Conditions are comparisons, not sequential stages.

እያንዳንዱ ረድፍ የአንድ ሂደት ተከታታይ ደረጃዎችን ሳይሆን ሦስት የተለያዩ የላቦራቶሪ ፕሮቶኮሎችን ያነጻጽራል። ፋክተር 1 ማለት ምርጫ የለም ማለት ነው፤ ከፍ ያሉ እሴቶች ለተወሰነው ጥንድ የበለጠ ጠንካራ ማበልጸግን ያሳያሉ። ነጥቦቹ አማካኞችን፣ ጢሞቹ $\pm$ መደበኛ ልዩነትን ያሳያሉ ($n = 3$)።

The Clean Paper CC BY 4.0

በpH 2 ላንታኒየም-ኒዮሂሚየም እሴቱ 5.6 ± 0.2 ነበር። የኤሌክትሪክ ፍጥነቱን አምስት እጥፍ፣ ከ0.1C ወደ 0.5C ከፍ ማድረግ፣ እሴቱን ከ5.4 ± 0.1 ወደ 4.3 ± 0.4 አሳንሶታል። C-መጠን የተተገበረውን የኤሌክትሪክ ፍሰት ከቁሱ አቅም ጋር ያነጻጽራል። ከፍ ያለ ፍጥነት ለአየኖቹ እና ለጠጣሩ ምላሽ ለመስጠት ያነሰ ጊዜ ይሰጣል።

አንድም እሴት ቁሱን በሁሉም ሁኔታ አይገልጽም። ማበልጸግ በጥንዱ፣ በጠጣሩ መዋቅር፣ በአሲዳማነት እና በአሠራር ፍጥነት ይወሰናል።

ወረቀቱ ቁሱን በብዛት ባሉ የብርቅዬ ምድር ያልሆኑ አየኖችም ፈትኖታል። የመነሻ ድብልቆች ለእያንዳንዱ 1,000 ተወዳዳሪ አየኖች አንድ የብርቅዬ ምድር አየን ነበራቸው። የተዘገቡት የመምረጥ እሴቶች ከሶዲየም ጋር በግምት 1,200፣ ከካልሲየም ጋር 6,500 እና ከማግኒዥየም ጋር 1,700 ነበሩ።

ይህ በእነዚህ የላቦራቶሪ ሁኔታዎች የተለመዱ አየኖች መለያየቱን በራሳቸው እንደማያጥለቀቁት ጠቃሚ ማስረጃ ነው። ግን ሁሉንም ብረቶች፣ አሲዳማኝነት እና ብክለቶች የያዘ ሙሉ ከማዕድን የተገኘ ፈሳሽ ሙከራ አይደለም።

ማበልጸግ፣ መለያየት፣ ንጽህና፣ ማሟጠጥ እና መመለስ የተለያዩ ውጤቶች ናቸው

በወረቀቱ ውስጥ በርካታ የአፈጻጸም መለኪያዎች አሉ፣ እና አንዱን በሌላው መተካት አይቻልም።

የማበልጸጊያ ፋክተር ከመለያየቱ በኋላ ያለውን የሁለት አየኖች ሬሾ ከመለያየቱ በፊት ከነበረው ጋር ያነጻጽራል። 5.4 ማለት የተያዘው ቁስ የጥንዱን አንድ አባል ከመነሻ ድብልቁ 5.4 እጥፍ በበለጠ ሁኔታ መርጧል ማለት ነው።

የመለያየት ፋክተር በፈሳሹ ውስጥ የቀረውንም ያካትታል፤ ለእያንዳንዱ አየን የተያዘውን መጠን ካልተያዘው ጋር ያነጻጽራል፤ ከዚያም እነዚህን ሁለት ሚዛኖች እርስ በርሳቸው ያነጻጽራል። ስለዚህ የማበልጸጊያ ፋክተሩ በሌላ አቅጣጫ ቢሄድም፣ ብዙ ቁስ ሲወገድ የመለያየት ፋክተሩ ሊጨምር ይችላል።

ንጽህና በተመለሰ ክፍል ውስጥ የተመረጠው አየን ድርሻ ነው። ባለሁለት ደረጃ ሙከራዎች በተወሰኑ መንገዶቻቸው ወደ 97.0% የኒዮዲሚየም ንጽህና እና 92.3% የዲስፕሮሲየም ንጽህና ደርሰዋል።

ማሟጠጥ ከመነሻ ፈሳሽ የተወገደው ክፍል ነው። ስምንት ተከታታይ የ10 ሚሊግራም ዱቄት ጭማሪዎች በኒዮዲሚየም-ዲስፕሮሲየም ሙከራ ውስጥ 72% ዲስፕሮሲየምን አስወግደው 10.8 የተጠራቀመ የመለያየት ፋክተር አስገኝተዋል።

መመለስ ከተያዘ በኋላ ምን ያህል አየን እንደገና ሊለቀቅ እንደሚችል ይጠይቃል። ተቃራኒ የአየን ልውውጥ በአንድ የኒዮዲሚየም-ዲስፕሮሲየም አሠራር 80% መልሷል። ኤሌክትሮኬሚካል ማስወገድ በላንታኖም-ኒዮዲሚየም አሠራር 89% መልሷል።

መመለስ ሂደቱ ወደኋላ ሊመለስ እንደሚችል ያሳያል። አፈጻጸሙን ጠብቆ አንድ ኤሌክትሮድ ስንት ጊዜ እንደገና ሊጠቀም እንደሚችል ግን አያረጋግጥም።

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

አራቱ የተዘገቡ መለኪያዎች የተለያዩ መከፋፈያዎችን ይጠቀማሉ እና ከተለያዩ መከራዎች የመጡ ናቸው። የአንድ ሂደት ተከታታይ ደረጃዎች ሳይሆኑ የማስረጃ ካርዶች ናቸው።

The Clean Paper CC BY 4.0

ሁለት አስደናቂ መቶኛዎች እንዴት የተለያዩ ነገሮችን ሊያመለክቱ ይችላሉ?

አንድ ሂደት ከመነሻ ፈሳሽ 90% የአንድን አየን እንደሚያስወግድ እንበል። ይህ ከፍተኛ ማሟጠጥ ነው። ብዙ ያልተፈለጉ አየኖችም ከእሱ ጋር ከመጡ፣ የተመለሰው ቁስ አሁንም ዝቅተኛ ንጽህና ሊኖረው ይችላል። በተቃራኒው፣ በጣም ንጹህ የሆነ ትንሽ ክፍል የታለመው አብዛኛው ቁስ ቢቀር ደካማ መመለስን ሊወክል ይችላል። የሂደት ግምገማ ትልቁን ቁጥር ብቻ ሳይሆን እነዚህን ሁሉ ሚዛኖች ይፈልጋል።

የታየው መሣሪያ አሁንም የቤከር መከራ ነው

በስኬል ላይ ያተኮሩት የኤሌክትሮኬሚካል መከራዎች በአንድ ሊትር 25 ሚሊሞል የእያንዳንዱ አየን ያለበት 5 ሚሊሊትር ፈሳሽ ጀምረዋል። ኤሌክትሮዶቹ በግምት 25 እስከ 40 ሚሊግራም ንቁ ቁስ ይዘው ነበር።

አንድ ኤሌክትሮድ በግምት 40% ኒዮዲሚየምን አስወግዷል። ሦስት ኤሌክትሮዶችን በተከታታይ መጠቀም ወደ 90% ማሟጠጥ እና 16.6 +/- 0.4 የተጠራቀመ የመለያየት ፋክተር አድርጏል። በአሠራር ፍጥነቱ መሠረት ምላሾቹ ከ200 ደቂቃ እስከ 13 ሰዓት ወስደዋል።

እነዚህ መጠኖች እና ጊዜዎች የታየውን መከራ ድንበር ስለሚወስኑ ዋናው ታሪክ ውስጥ መካተት አለባቸው።

ተጨማሪ መረጃው የጅምላ ዝውውር ገደብንም ይጠቁማል። ከፍ ያለ ኮንሰንትሬሽን ላለው የቤከር ግብ 50% ጠቅላላ ማሟጠጥ ለማግኘት 266 ሚሊግራም ኤሌክትሮድ፣ ወይም በካሬ ሴንቲሜትር 532 ሚሊግራም ንቁ ቁስ እንደሚያስፈልግ

ተገምቷል። ይህን ያህል ቁስ በትንሹ ኤሌክትሮድ ላይ መጠቅለል በፈሳሽ ውስጥ የሚገኙ አየኖች ሁሉንም ቁስ እንዲደርሱ ያስቸግራል። ስለዚህ ደራሲዎቹ ለቤከር ሙከራው ወደ የበለጠ ቀጭን ፈሳሽ ተዛውረዋል።

ምናባዊ የፍሰት ሴል የሚታየው እንደ ግምታዊ ፕሮጀክሽን ብቻ ነው። 1.25 ሚሊሊትር ሴል እና 5 በ5 ሴንቲሜትር ኤሌክትሮድ እንዳለ በመገመት፣ ተጨማሪ መረጃው ወደ 90% ማሟጠጥ ለመድረስ በ1C በግምት 20 ደቂቃ ወይም በ0.5C 40 ደቂቃ ይገምታል። እንዲህ ያለ የፍሰት-ሴል ሙከራ አልተዘገበም።

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

ደረጃው በድንበር ላይ ያበቃል፤ ለሁለት አየኖች እና ለተደራረቢ የላቦራቶሪ ሙከራዎች ማስረጃ አለ፤ የፍሰት ጊዜ እና የአካባቢ አፈጻጸም ግን በፋብሪካ ስኬል ከታየ ይልቅ እንደ ግምት ወይም ሁኔታ-ተኮር ስሌት ይቀራሉ።

The Clean Paper CC BY 4.0

የአካባቢ ንጽጽሩ የሁኔታ ስሌት ነው፤ የፋብሪካ ውጤት አይደለም

ተጨማሪው የሕይወት-ዑደት ግምገማ በብርቅዬ ምድር አካላዊዶች የሚያበቁ የመለያየት ደረጃዎችን ያነጻጽራል እና ግብዓቶቹን ለ1 ኪሎግራም ኒዮዲሚየም አካላዊድ ይዘግባል።

ማዕድን ማውጣትን፣ የማዕድን ቅድመ-ሕክምናን ወይም ሙሉ የንግድ ማጣሪያ ሰንሰለትን አያካትትም። የላቦራቶሪ ሂደቱ ከበርካታ ምንጮች በተሰበሰቡ ግምቶች ተወክሏል። የኤሌክትሮድ ዕድሜ 10፣ 20 እና 100 ዑደቶች የሁኔታ እና የስሜታዊነት ስሌት እሴቶች ናቸው፤ በዚህ ጥናት የተለካ ዘላቂነት አይደለም። ሞዴሉ የማግኒዥየም መመለሻ ፈሳሽ ኮንሰንትሬሽን በ10% እስኪለወጥ ድረስ እንደገና ሊጠቀም እንደሚችል ይገምታል፤ 95% የውሃ እንደገና መጠቀምን ይገምታል፤ እና ካልሲኒየን እዚህ በሙከራ ባይታይም በ450-600 ዲግሪ ሴልሺየስ ለሁለት ሰዓት ካልሲኒየንን ያካትታል።

የሕይወት-ዑደት ግምገማ በተገለጸ የሥርዓት ድንበር ውስጥ የአካባቢ ጫናዎችን ይቆጥራል። መልሱ ድንበሩ እንደሚያካትተው ነገር ብቻ ሰፊ ነው፤ እና የሚታመነው የግብዓት ዝርዝሩ እና የስኬል ግምቶች እንደሚታመኑት መጠን ነው።

ትንታኔው ኃይል፣ ቁሳቁሶች እና እንደገና መጠቀም የት እንደሚያስፈልጉ ሊጠቁም ይችላል። የንግድ ስሪት ከኢንዱስትሪ ሶልሽንት ኤክስትራክሽን ያነሰ የአካባቢ ተፅዕኖ እንደሚኖረው ግን ሊያረጋግጥ አይችልም።

አንድ ስልተ-አሠራር፣ አንድ መድረክ እና ረጅም የምህንድስና መንገድ

ወረቀቱ በውሃ የተያዘ ንብርብ ያለው ጠጣር ርቀትና ኬሚካላዊ አካባቢ ሆኖ ተብሎ በመቆጣጠር የተወሰኑ የላንታናይድ መለያዮችን ማሻሻል እንደሚቻል ያሳያል። በማግኒዥየም መገደብ ሌላ የኬሚካል መያዣ ቦታ ከመጨመር በላይ ነበር፤ በውሃ የተከበቡ አየኖች ሊያልፉበት የሚገባውን መዋቅር ገድቧል።

ይህ ውጤት ተግባራዊ ጥያቄዎችን ይከፍታል። አፈጻጸሙ ከእውነተኛ ማዕድን የተገኙ ድብልቆችን ሊቋቋም ይችላል? ኤሌክትሮዶች በሚሠራ የጅምላ ጭነት ሊመረቱ ይችላሉ? የማንጋኒዝ አክሳይዱ በብዙ የማስገባት እና የመልቀቅ ዑደቶች ምን ያህል የተረጋጋ ነው? ቀጣይነት ያለው ሴል መምረጥን፣ የሂደት መጠንን እና የውሃ ሚዛንን ሊጠብቅ ይችላል? በፓይለት ስኬል በተለኩ ግብዓቶች የአካባቢ ንጽጽሩ ምን ይመስላል?

ሙከራው እነዚህን ጥያቄዎች አይመልስም። ይበልጥ ግልጽና ተጨባጭ ያደርጋቸዋል።

ስኬቱ የተጠናቀቀ የብርቅዬ ምድር ማጣሪያ ፋብሪካ አይደለም። ጥቂት አንግስትሮሞች ብቻ ያላቸው በቁጥጥር ስር የዋሉ በውሃ የተሞሉ ቦታዎች አስቸጋሪ መለያየትን ሊቀይሩ እንደሚችሉ የሚያሳይ ማስረጃ ነው።

ንጹህ ማጠቃለያ

ተመራማሪዎች በውሃ የተያዘ ንብርብ ያለው የማንጋኒዝ አክሳይድ ተጠቅመው በውሃ ውስጥ የተወሰኑ የላንታናይድ አየን ጥንዶችን ለይተዋል። የቁሱ ነፃ ክፍተት በግምት 6.8-6.9 አንግስትሮም ነበር፤ ይህም የአየኖች የመጀመሪያ ሃይድሬሽን ሼል 6.6-7.1 አንግስትሮም ዲያሜትር ከተዘገበው ጋር ቅርብ ነው። የቀረው ማግኒዥየም ቻናሉን በቦታው እንዲቆይ ረድቶ ለተወሰኑ ጥንዶች ማበልጸግን አሻሽሏል፤ ላንታኒየም-ኒዮዲሚየም ከ1.6 ወደ 5.4፣ ላንታኒየም-ፕራሴዮዲሚየም ከ1.5 ወደ 4.2 ጨምሮ። ጥናቱ በብዛት ካሉ አየኖች ጋር የተደረጉ ፈተናዎችን፣ በደረጃ የተገኘ ንጽህናን፣ ተከታታይ ማሟጠጥን እና የመመለስ ሙከራዎችንም ዘግቧል። የታየው ስኬል 5 ሚሊሊትር የቤከር ሙከራዎች፣ 25-40 ሚሊግራም ንቁ ቁስ እና ከ200 ደቂቃ እስከ 13 ሰዓት የምላሽ ጊዜ ላይ ቀርቷል። የፍሰት-ሴል ጊዜ በግምት ነበር፤ በብዙ ዑደቶች እንደገና መጠቀም አልተፈተነም፤ እና የሕይወት-ዑደት ንጽጽሩ በላቦራቶሪ-ስኬል ግምቶች ላይ ተመርክሟል። ወረቀቱ የመገደብ ስልተ-አሠራርን እና የላቦራቶሪ መድረክን ይደግፋል፤ የኢንዱስትሪ ሶልሽንት ኤክስትራክሽን መተኪያን አይደግፍም።

ያለ ማጋነን ፍተሻ

ወረቀቱ የሚያሳየው፡ በውሃ የተያዘ የማንጋኒዝ አክሳይድ ክፍተትን በቀረ ማግኒዥየም ወደ 6.8-6.9 አንግስትሮም ቅርብ ማቆየት የተወሰኑ የላንታናይድ ጥንዶች መለያየትን ቀይሯል። የመዋቅር መለኪያዎች፣ ኤሌክትሮኬሚስትሪ እና ስሌቶች መገደብን፣ ውሃ ማጣትን፣ coordination እና መያያዝን ያካተተ ስልተ-አሠራር ይደግፋሉ።

በተሻለ ሁኔታ የሠራው፡ በተገለጹ ሁኔታዎች የላንታኒየም-ኒዮዲሚየም ማበልጸግ 5.4 +/- 0.1፣ የላንታኒየም-ፕራሴዮዲሚየም 4.2 +/- 0.1 ደርሷል። ሌሎች ጥንዶች የተለያዩ እሴቶች ነበሯቸው። የተለዩ ሙከራዎች የተለያዩ መከፋፈያዎችን የሚጠቀሙ የንጽህና፣ የማሟጠጥ እና የመመለስ ውጤቶችን ዘግበዋል።

የማያሳየው፡ ለሁሉም የብርቅዬ ምድር ንጥረ ነገሮች የሚሠራ ሁለንተናዊ መለያያ፣ በሙሉ የማዕድን ፍሰት ላይ አሠራር፣ በሙከራ የታየ ቀጣይነት ያለው የፍሰት ሴል፣ ብዙ ዑደቶችን የሚቋቋሙ ኤሌክትሮዶች፣ የሶልሽንት ኤክስትራክሽን መተካት፣ ወይም በንግድ ስኬል የተረጋገጠ የአካባቢ ብልጫ።

ዋና የስኬል ገደቦች፡ የታዩት ሙከራዎች 5 ሚሊሊትር ፈሳሽ፣ በግምት 25-40 ሚሊግራም ንቁ ቁስ እና ከ200 ደቂቃ እስከ 13 ሰዓት ተጠቅመዋል። ከፍተኛ የኮንሰንትሬሽን ያለው ግብ በካሬ ሴንቲሜትር 532 ሚሊግራም የመጫን ችግር አሳይቷል። የፍሰት ጊዜዎች በስሌት ተገምተዋል። በሕይወት-ዑደት ግምገማው የኤሌክትሮድ ዕድሜ እና ዋና የእንደገና መጠቀም ግብዓቶች ግምቶች ነበሩ።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? ለተሰየሙት ጥንዶች እና ሁኔታዎች በተዘገቡ የላቦራቶሪ መለኪያዎች ላይ ከፍተኛ እምነት። የቀረበው ሞለኪውላዊ ትርጓሜ ቀጥተኛ መዋቅራዊ እና ኤሌክትሮኬሚካል መረጃን ከስሌቶች ጋር ስለሚያጣምር መካከለኛ እምነት። የአሁኑ መረጃ የኢንዱስትሪ ፍሰትን፣ ዕድሜን ወይም የአካባቢ አፈጻጸምን በትክክል እንደሚተነብይ ዝቅተኛ እምነት።

ምንጮች

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>