

Tehnično poročilo za
inženirje in tehnologe

Načrt za energijo naslednje generacije

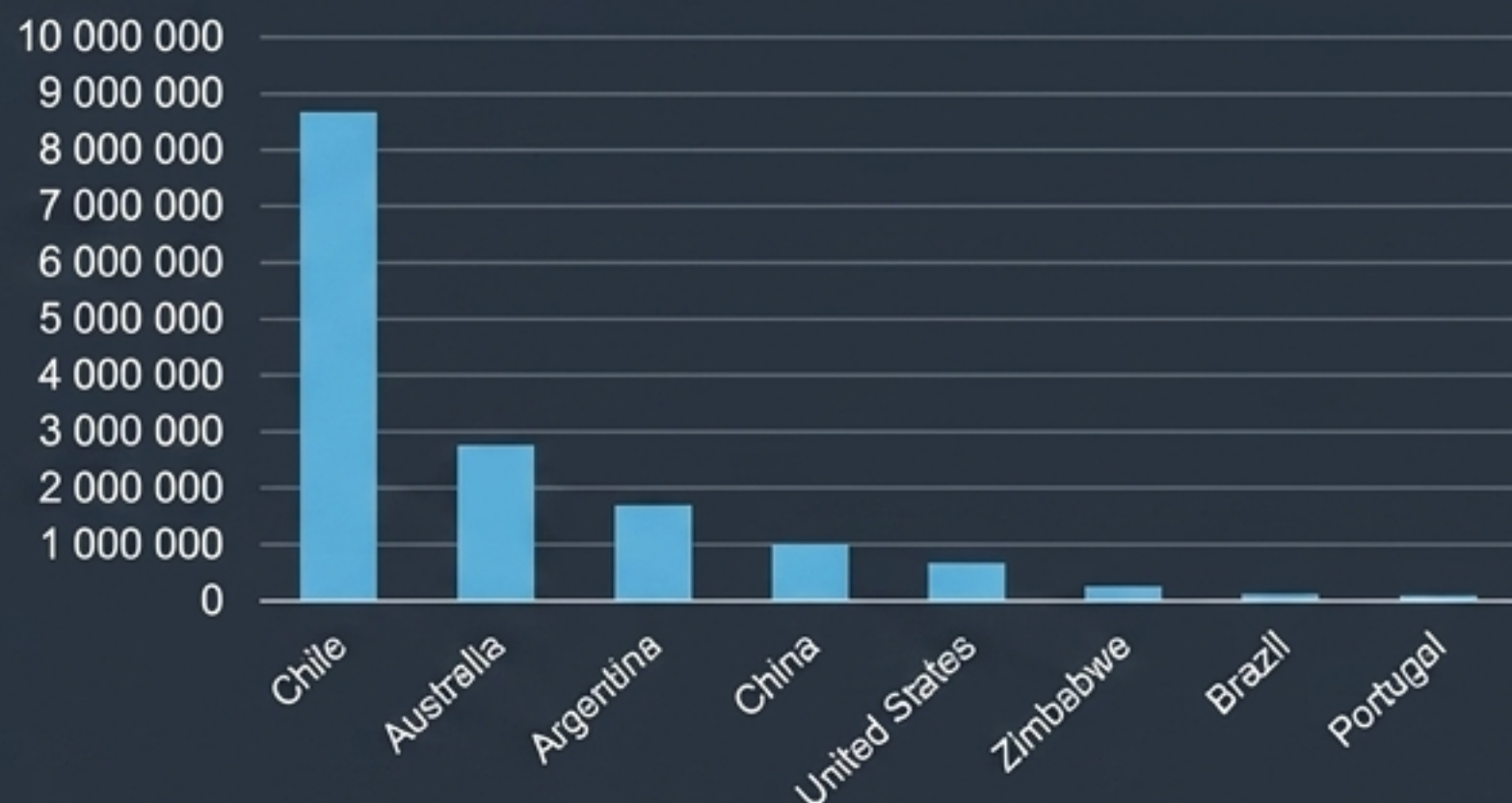
Sistemski inženiring in komercializacija natrij-
ionskih baterij (SIB)



Makro ozko grlo: Omejitve litija v pametnem omrežju

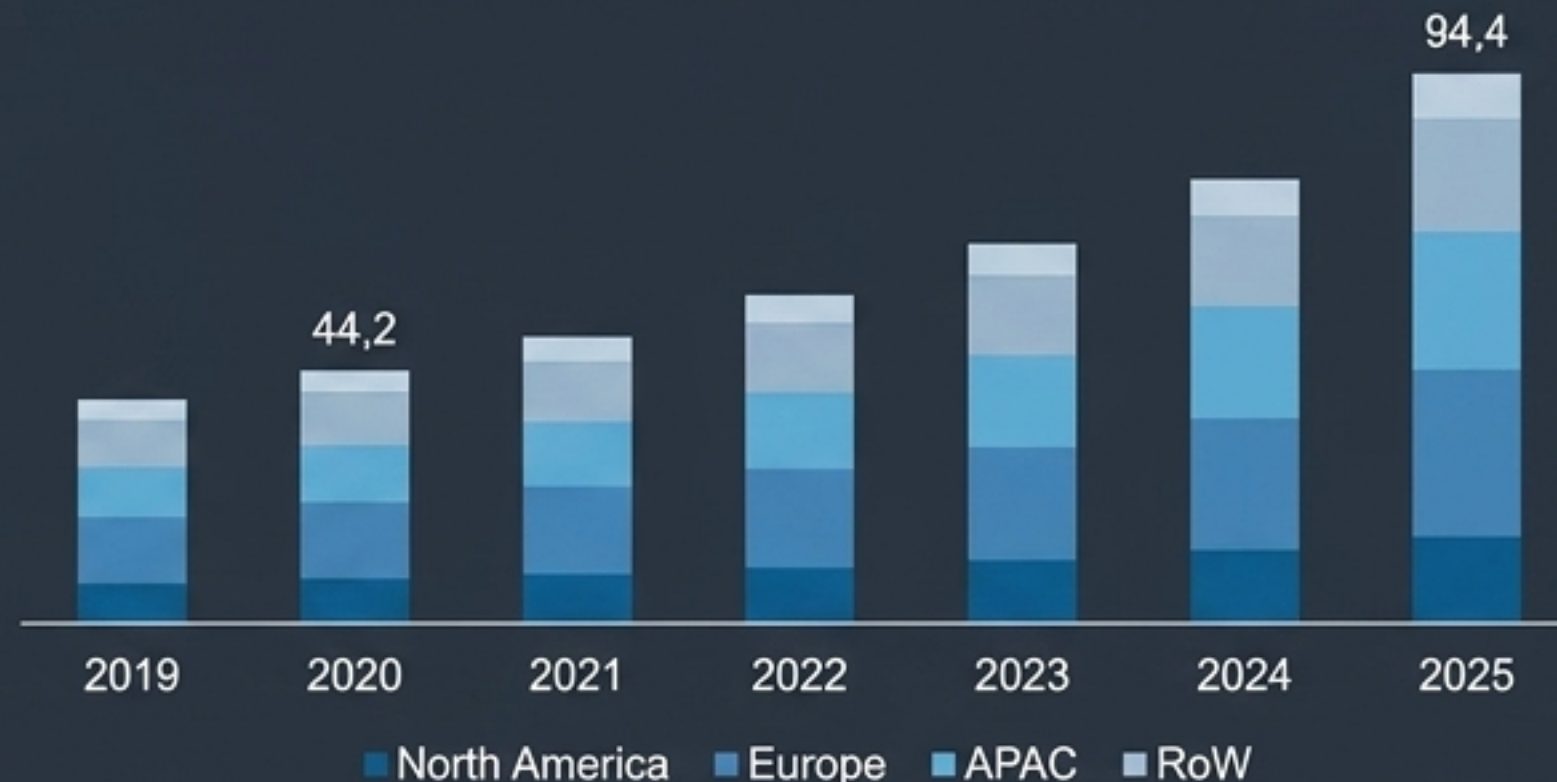
GLOBALNE REZERVE LITIJA PO DRŽAVAH (V TONAH)

(Data from IMAE 0)



PROJEKCIJA RASTI TRGA LIB (V MILIJARD USD)

(Data on <IMAGE 1)



Globalna poraba: 64 % električne energije še vedno izvira iz fosilnih goriv. Prehod zahteva masovno shranjevanje električne energije (EES).



Omejene rezerve: Litij predstavlja le 0,0017 ut. % zemeljske skorje. Skupne rezerve (2020) so ocenjene na zgolj 17 milijonov ton.

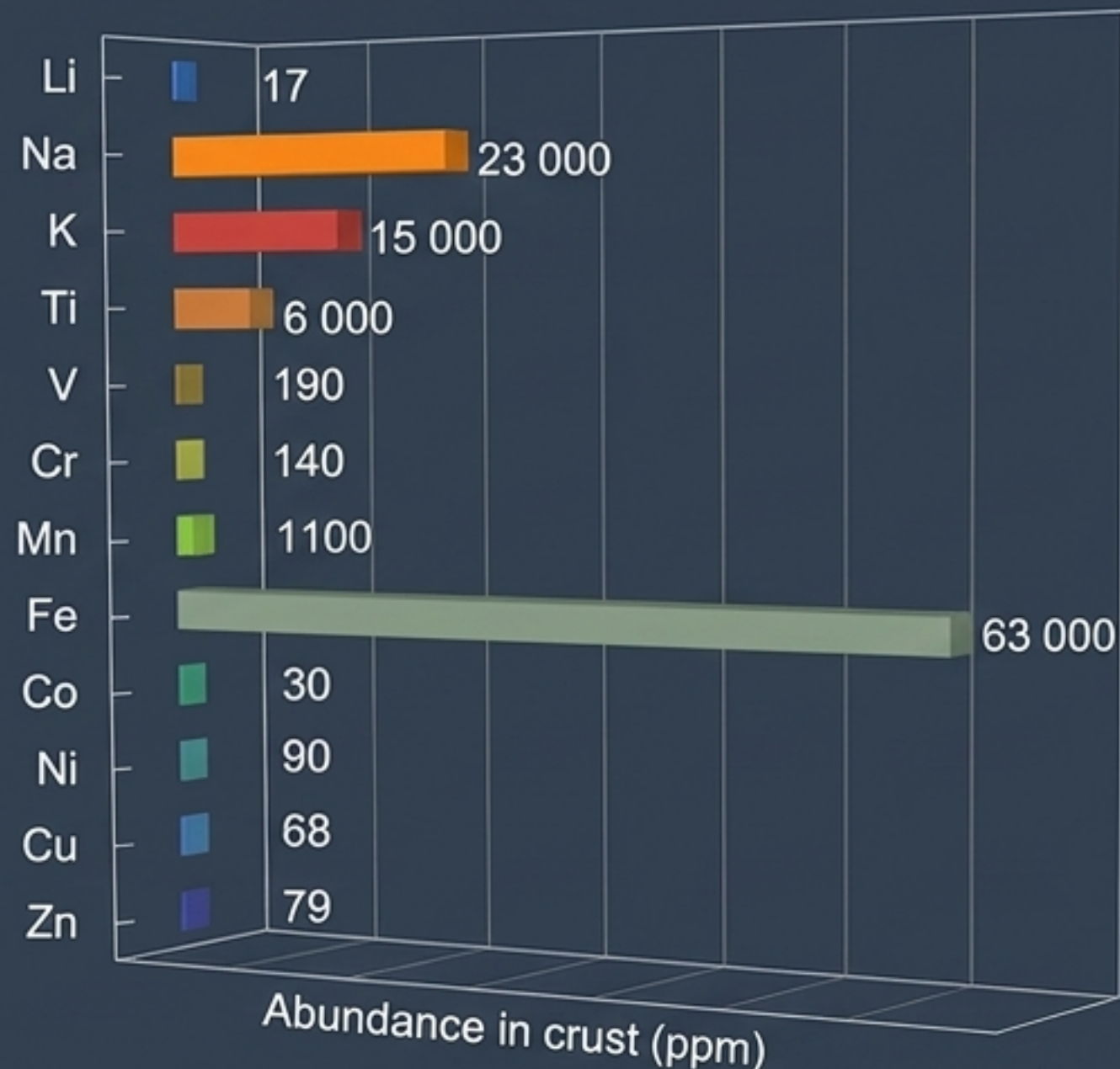


Kritična meja: Brez obsežnega recikliranja svetovne zaloge litija zadoščajo le še za 28 let ekonomsko upravičene proizvodnje.



Tržni pritisk: Trg litij-ionskih baterij (LIB) naj bi do leta 2025 presegel 90 milijard USD.

Kemična alternativa: Zlata doba natrija



Zaloge v zemeljski skorji

Natrij (2,27 %) je sedmi najbolj razširjen element, medtem ko je litij redek.

Oceanski viri

Koncentracija natrija v oceanih je $1,08 \times 10^4$ mg/L – v praksi neomejen vir.

Cena surovine (Primerjava)

Trona (prekurzor za natrijev karbonat) stane 135–165 USD/tono. Litijev karbonat stane približno 5000 USD/tono.

Surovina za SLB ne zahteva geopolitičnih kompromisov in je imuna na ozka grla v dobavni verigi.

Fizikalno-kemijska matrika: Li^+ proti Na^+

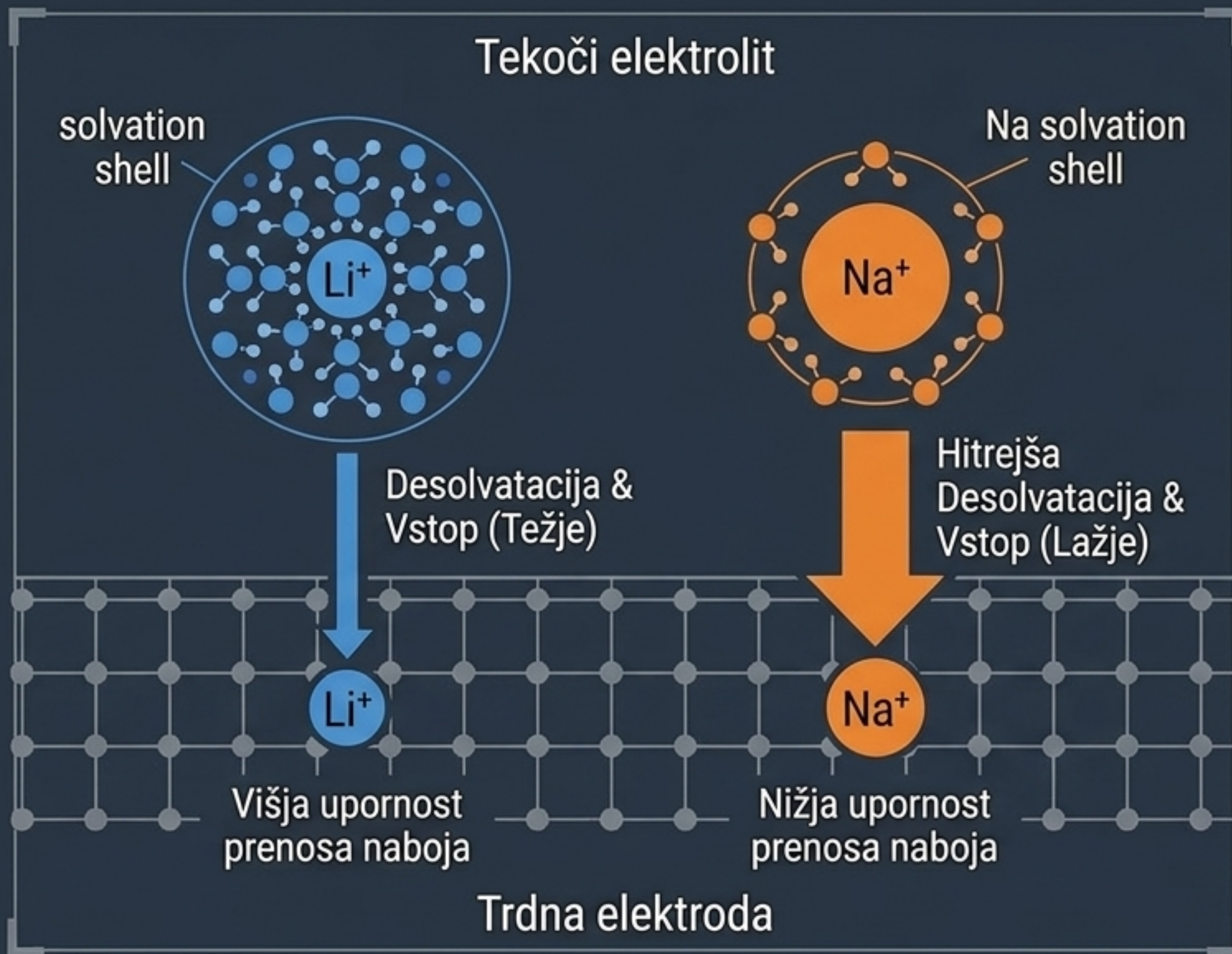
	Li^+ (Lithium)	Na^+ (Sodium)
Ionski polmer	Li^+ (0,76 Å)	Na^+ (1,02 Å)
Atomska masa	Li^+ (6,94 g/mol)	Na^+ (23,00 g/mol)
Standardni potencial	Li^+ (-3,04 V)	Na^+ (-2,71 V)
Energija desolvatacije (v PC)	Li^+ (218,0 kJ/mol)	Na^+ (157,3 kJ/mol)

Engineering Insight Callout



Večja masa in višji potencial pomenita nižjo osnovno energijsko gostoto. Vendar SIB to kompenzira s strukturno fleksibilnostjo in boljšo kinetiko.

Paradoks ionskega polmera: Kinetična prednost natrija



Mehanizem desolvatacije

Zaradi manjšega polmera ima Li^+ višjo površinsko gostoto naboja. Deluje kot Lewisova kislina in močno privlači molekule polarne topila.

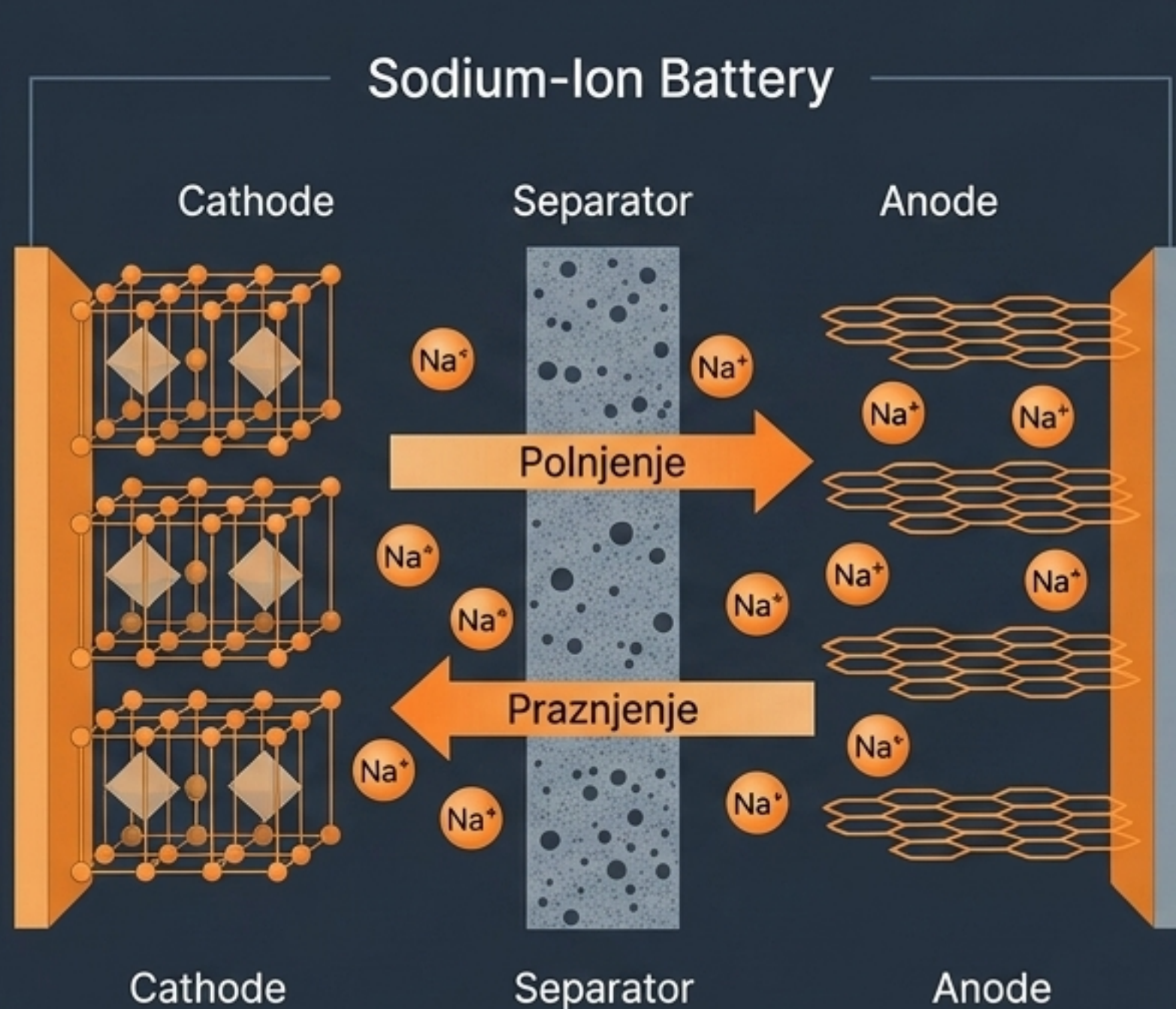
Inženirski rezultat

Večji Na^+ ion ima šibkejšo energijo desolvatacije.

Učinek na moč

Lažji prehod iz tekočega (elektrolit) v trdno stanje (elektroda) zmanjšuje upornost prenosa naboja, kar je ključna prednost pri zasnovi SIB baterij visoke moči (hitro polnjenje).

Sistemski inženiring: Arhitektura 'gugalnega stola'



Princip delovanja:

Identičen LIB. Med polnjenjem se Na⁺ ioni ekstrahirajo iz katode in vstavijo v anodo. Med praznjenjem se proces obrne.

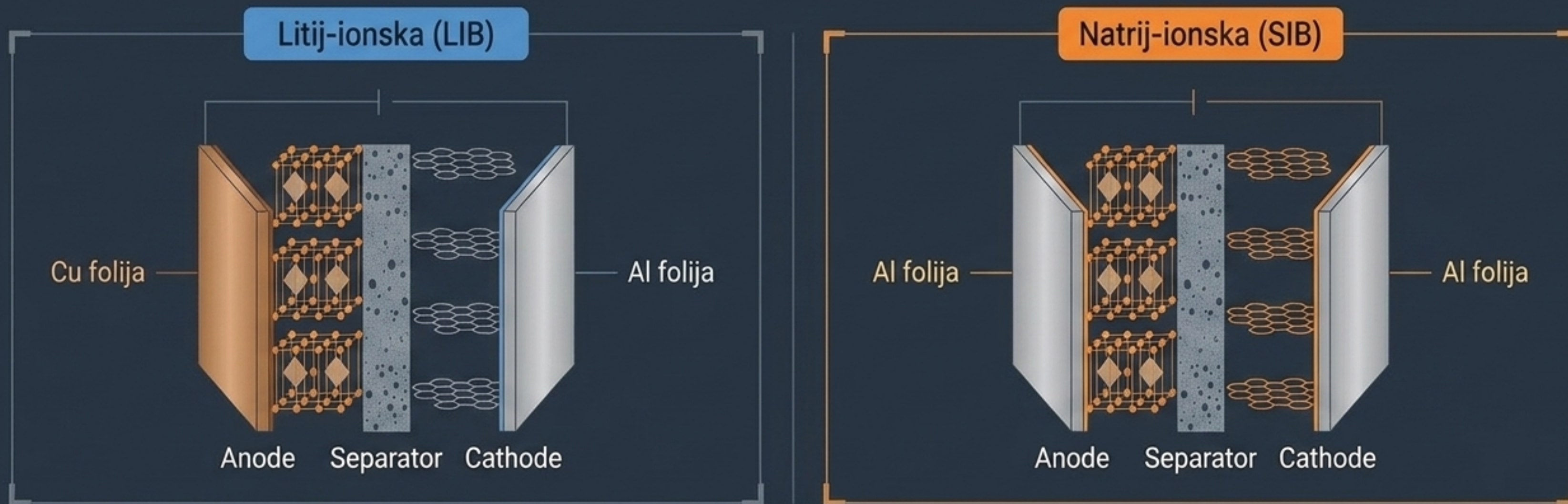
Proizvodna integracija:

Metode sinteze in strojna oprema za proizvodnjo (cilindrične celice, 'pouch' celice) se lahko neposredno prenesejo iz obstoječih tovarn LIB.

Brez dodatnih kapitalskih stroškov:

Tehnološki prehod iz LIB na SIB ne zahteva novih industrijskih infrastruktur.

Ekonomska prednost: Arhitektura aluminijastih zbiralnikov



Kemično dejstvo:

Aluminij pri nizkih potencialih tvori zlitino z litijem, zato morajo LIB na anodni strani uporabljati težji in dražji baker.

Natrijeva prednost:

Natrij pri nizkih potencialih ne reagira z aluminijem.

Stroškovni vpliv:

Bakrena folija stane približno 210 USD/m. Aluminijasta folija stane približno 70 USD/m.

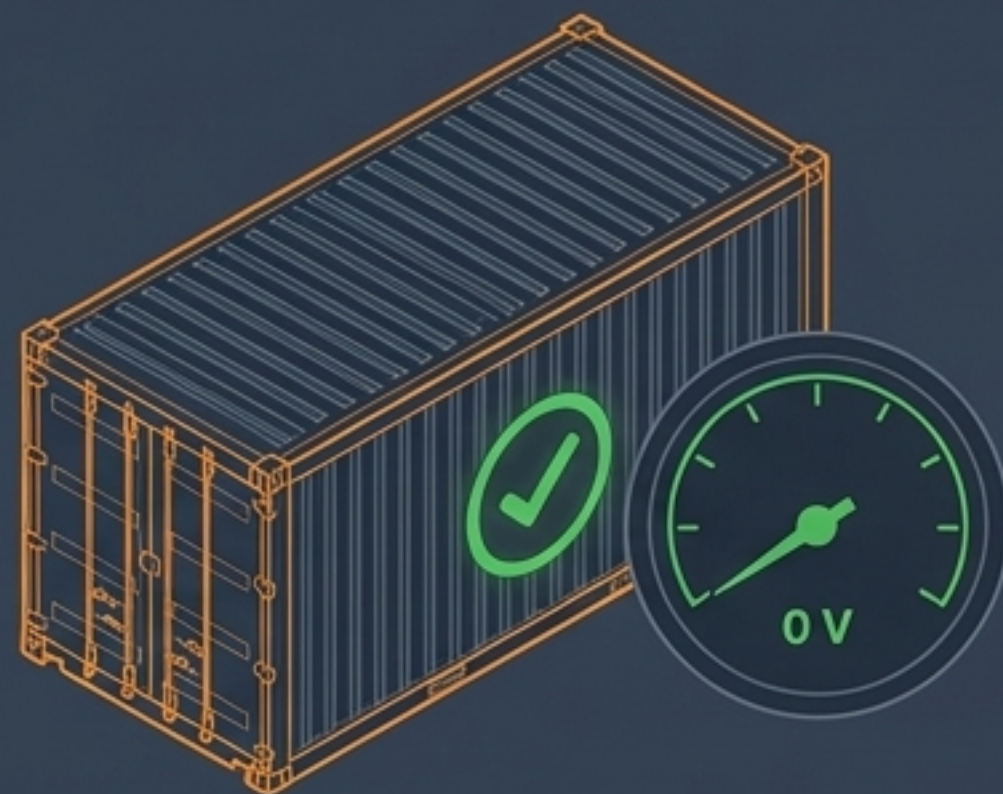
Končni izkupiček:

Uporaba aluminija za anodo in katodo **drastično zmanjša stroške in težo celice** ter s tem poveča **specifično energijsko gostoto SIB**.

Logistični inženiring: Prednost 'nič voltov'



Omejitve LIB: LIB se morajo transportirati pri približno 30 % stanju napolnjenosti (SOC). Padec napetosti na 0 V bi povzročil raztapljanje bakrene folije in uničenje baterije. To predstavlja veliko varnostno tveganje med transportom.



SIB Ultimativna varnost: Zaradi aluminijaste folije se lahko SIB izpraznijo na absolutno ničlo (0 V) brez poslabšanja zmogljivosti.

Shranjevanje na 0 V: Omogoča transport brez kakršnegakoli tveganja toplotnega pobega (thermal runaway), kar zmanjšuje zavarovalne in logistične stroške.

Kompromisna ovojnica: Pozicioniranje tehnologije



SIB zaseda idealno sredino med stroškovno učinkovitostjo svinčevo-kislinskih baterij (LAB) in visoko energijsko zmogljivostjo litij-ionskih baterij (LIB).

Komercialna sinteza: Pokrajina katodnih arhitektur



Slojasti oksidi

- **Značilnost:** Visoka gostota energije (140–160 Wh/kg).
- **Mehanizem:** Uporaba prehodnih kovin (Ni, Cu, Fe, Mn).
- **Ključni akterji:** Faradion (UK), HiNa (Kitajska).



Vodni sistemi

- **Značilnost:** Ekstremna varnost, vnetljivost ni mogoča.
- **Mehanizem:** Elektrolit na bazi slane vode, anoda iz Ti-fosfata.
- **Ključni akterji:** Aquion Energy (ZDA).

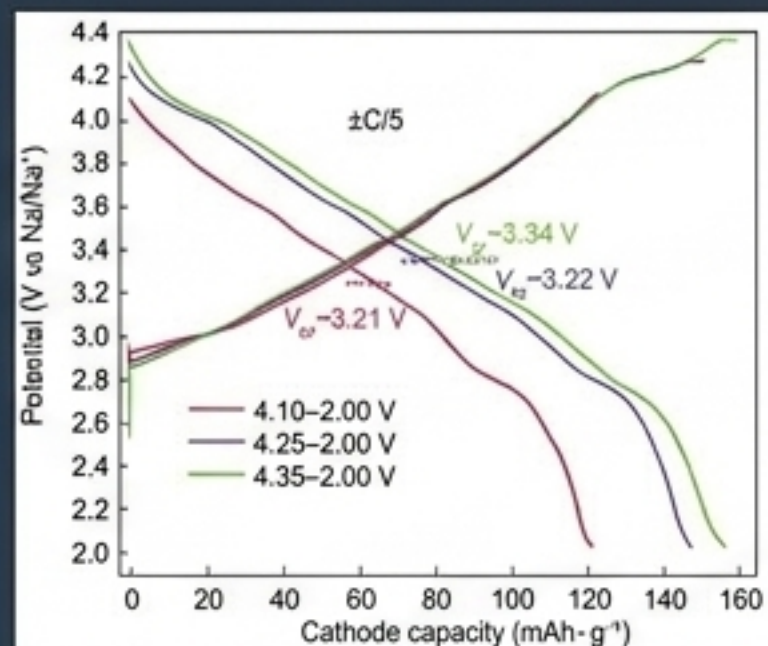


Analogi pruskega modrega (PBA)

- **Značilnost:** Izjemna življenjska doba in hitrost polnjenja.
- **Mehanizem:** Enofazna reakcija v robustni kristalni mreži.
- **Ključni akterji:** Novasis, Natron Energy (ZDA).

Arhitektura slojastih oksidov: Premikanje meja zmogljivosti

Faradion (UK)



➤ Faradion (UK)

- Mešana O3-P2 faza katode + anoda iz trdega ogljika (Hard Carbon).
- **Rezultati:** 140–160 Wh/kg, izjemna hitrost polnjenja (4C – 15 minut do polnosti brez padca kapacitete).

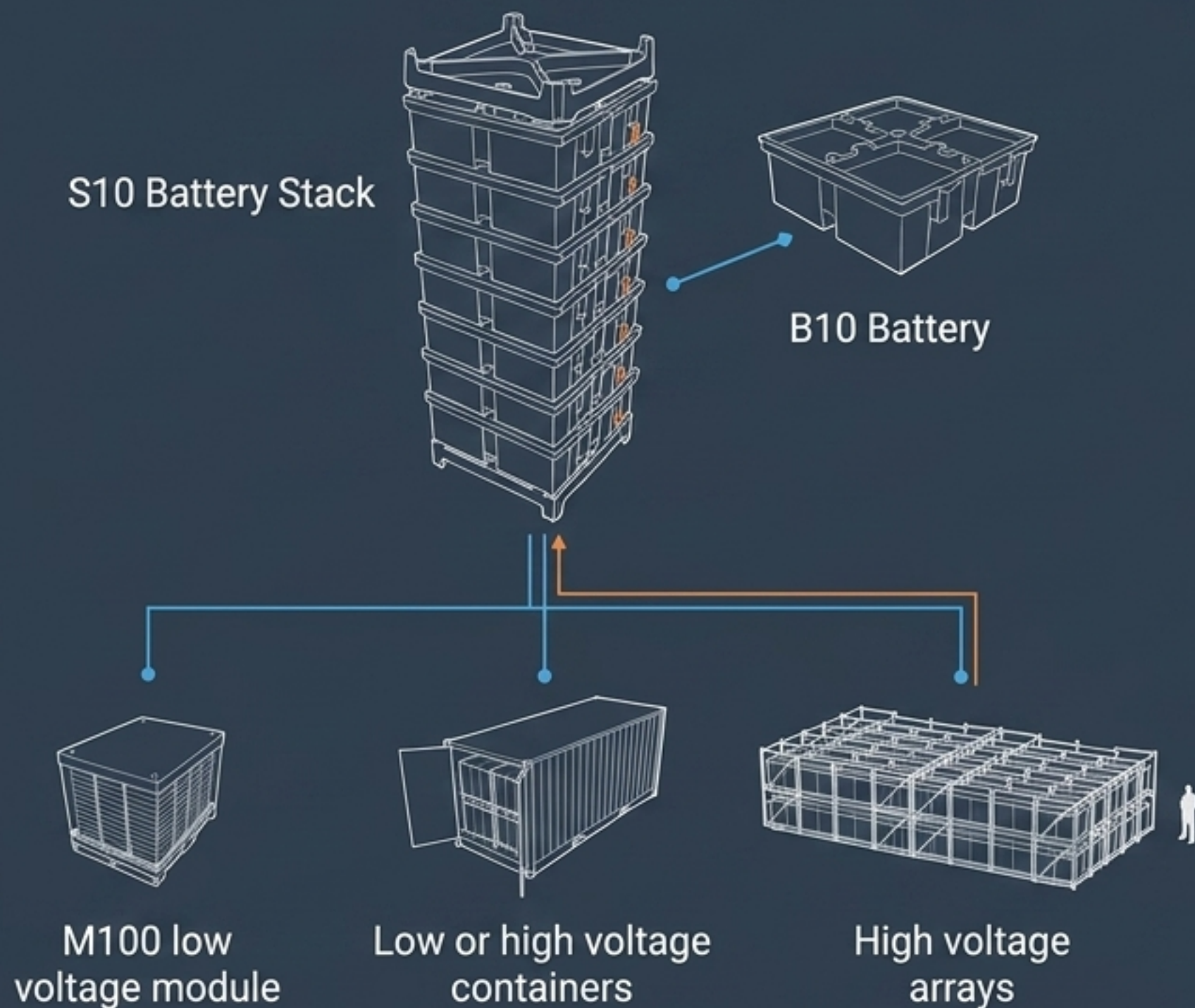
HiNa (Kitajska)



➤ HiNa (Kitajska)

- Revolucionarna uporaba bakrovih oksidov ($\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ redoks) in anode iz mehkega ogljika (antracit/smola).
- **Rezultati:** Prvi 30 kW/100 kWh SIB hranilnik na svetu (2019). Preko 4500 ciklov.

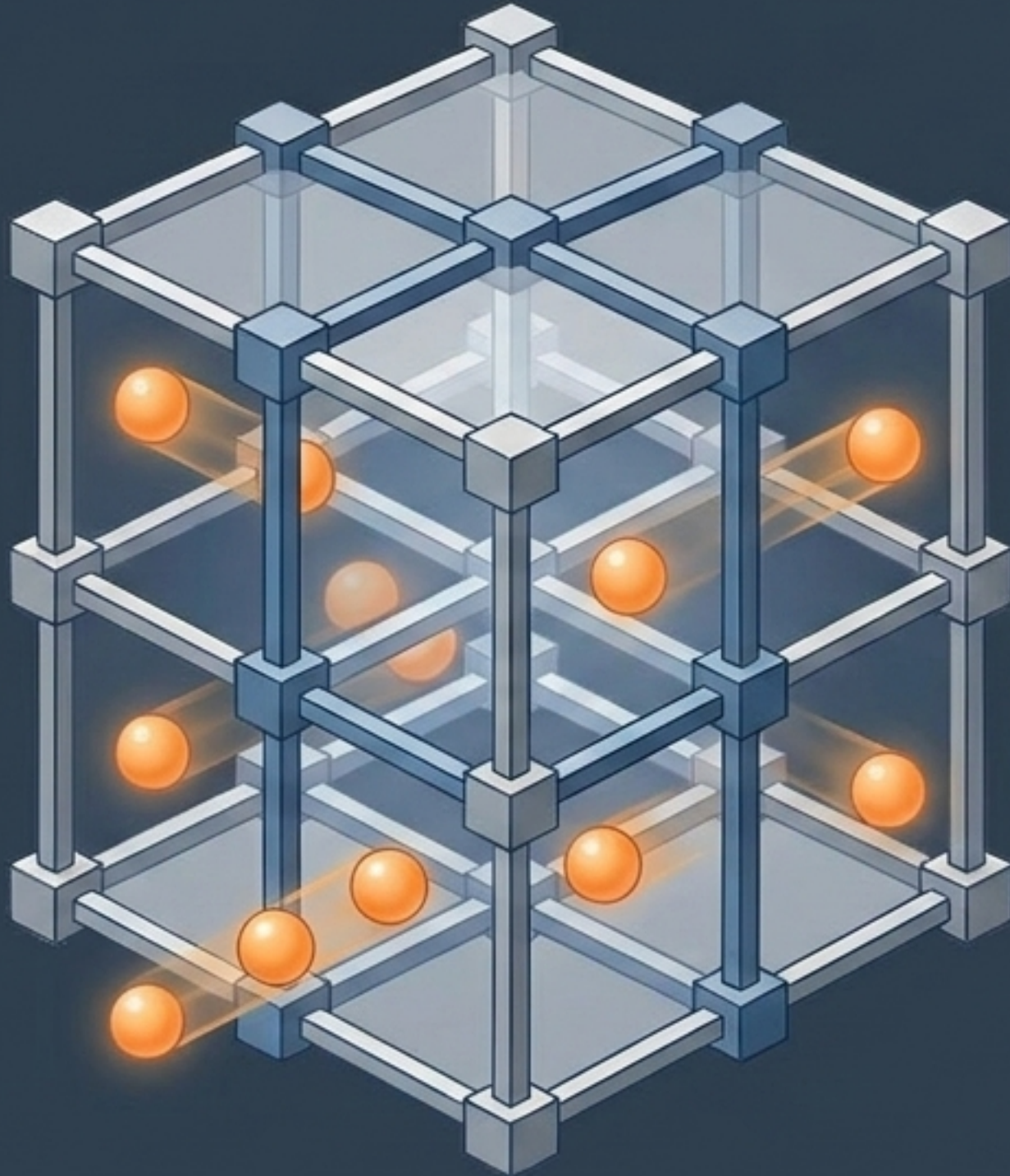
Vodni sistemi: Ultimativna varnost za omrežja



Študija primera: Aquion Energy (ZDA)

-  • **Inženirski pristop:** Namesto vnetljivih organskih topil uporabljajo vodni elektrolit ($< 5 \text{ mol/L Na}_2\text{SO}_4$) in sintetični bombažni separator.
-  • **Materiali:** Katoda na bazi mangana (Mn), anoda iz titanovega (Ti) fosfata.
-  • **Trajnostni dosežek:** Prve SIB baterije s certifikatom 'Cradle to Cradle'.
-  • **Namembnost:** Rešitve za bivalno in industrijsko shranjevanje energije, kjer teža ni omejitveni faktor, absolutna varnost pa je primarna.

Analogi pruskega modrega (PBA): Življenjska doba in hitrost



Prednost PBA

Splošna formula AMFe(CN)_6 . Robustna odprta struktura omogoča hitro interkalacijo Na^+ ionov brez mehanske degradacije materiala (enofazna reakcija).

Komercialna merila

- **Novasis:** Dosežena kapaciteta $\sim 160 \text{ mAh/g}$ s preprosto sintetično metodo koprecipitacije (brez visokotemperaturne kalcinacije, kar niža stroške).
- **Natron Energy:** Fokus na visoko moč in trajnost. Sistemska zmogljivost: Praznjenje v 2 minutah, polnjenje v 8 minutah. Izjemna življenjska doba: **35.000 ciklov** brez izgube kapacitete.

Inženirski kažipot: Odprti problemi naslednje generacije

Ozko grlo



Anode (Ogljikovi materiali)

Nizka začetna Coulombova učinkovitost (ICE) zaradi tvorbe SEI (Mejna faza trdnega elektrolita), ki nepovratno porabi Na^+ .

Katode (Oksidi in Polianioni)

Občutljivost slojastih oksidov na vlago in strukturna degradacija. Pri PBA prisotnost koordinirane vode.

Elektroliti

Degradacija elektrolita in neprestana rast SEI povečujeta upornost pri ekstremnih temperaturah.

Intervencija



Anode (Ogljikovi materiali)

Dodajanje 'žrtvenih' soli (sacrificial salts) za nadzorovano modifikacijo faz vmesnika.

Katode (Oksidi in Polianioni)

Nanos zaščitnih slojev, dopiranje kristalne mreže in postopki pranja z etanolom.

Elektroliti

Razvoj trdnih (solid-state) elektrolitov in ionskih tekočin za stabilen vmesnik.

Končni cilj: Nova paradigma shranjevanja

220 Wh/kg

Specifična energijska
gostota celice

3.3 V

Povprečna izhodna
napetost

500 mAh/g

Kapaciteta na anodi na
bazi trdega ogljika

Tehnološki prehod v zeleno gospodarstvo ne bo mogoč zgolj z litijem. Razvoj tehnologije 'cell-to-pack' (CTP) in reševanje vmesniških uporov na nivoju SIB sta inženirska izziva vašega desetletja.