Estimare operațională pentru 100 de instalații de recuperare ³He pe Lună

Data: 25 Aug 2025

# Rezumat executiv

Modelăm o flotă de 100 de instalații modulare, fiecare cu ~3 MW termici pentru degazarea regolitului în cuptoare etanșe (750–900 °C) și cu 0.2–0.8 MW electric pentru pompe, criogenie și robotică. Extragerea ³He este limitată de concentrația foarte mică (5–20 ppb masic) și de energia necesară pentru încălzirea volumului mare de material.

Prezentăm trei scenarii (pesimist/median/optimist) și rezultatele cheie (debit regolit, producție ³He, acoperire teren, energie de fuziune echivalentă). Rezultatele includ pierderi la îmbogățirea izotopică și un bilanț energetic realist (0.8–1.5 GJ/m³ pentru degazare).

# Ipoteze de bază

• Densitate regolit lunar: 1600 kg/m³

• Capacitate calorică medie: 700 J/kg/K; ΔT ≈ 800 K ⇒ energie sensibilă ~896 MJ/m³ (fără pierderi)

• Energia efectivă pentru degazare (cu pierderi și ineficiențe) modelată la 0.8–1.5 GJ/m³, cu recuperare de căldură în scenariul optimist.

• Lățime trecere 3 m; adâncime strat 5 cm ⇒ secțiune 0.15 m².

• Concentrație ³He: 5–20 ppb masic (în mările bazaltice bogate în ilmenit).

• Pierderea la îmbogățire izotopică (distilare criogenică + superleak): 10–30%.

• Putere termică per instalație: 3 MW; electric auxiliar: 0.2–0.8 MW.

# Scenarii și parametri

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Scenariu | Concentrație ³He (ppb) | E degazare (GJ/m³) | Putere termică (MW) | Pierderi îmbogățire | Instalații |
| Pesimist | 5 | 1.50 | 3.0 | 30% | 100 |
| Median | 10 | 1.00 | 3.0 | 20% | 100 |
| Optimist | 20 | 0.80 | 3.0 | 10% | 100 |

# Rezultate per instalație (24/7)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Scenariu | Volum procesat (m³/zi) | ³He net (g/zi) | ³He net (kg/an) | Bandă parcursă (km/zi) |
| Pesimist | 173 | 0.97 | 0.35 | 1.15 |
| Median | 259 | 3.32 | 1.21 | 1.73 |
| Optimist | 324 | 9.33 | 3.41 | 2.16 |

# Rezultate pentru 100 de instalații (24/7)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Scenariu | ³He net (kg/zi) | ³He net (t/an) | E fuziune/ an (TWh) | Volum procesat (m³/zi)\* |
| Pesimist | 0.10 | 0.04 | 5.76 | 17280 |
| Median | 0.33 | 0.12 | 19.75 | 25920 |
| Optimist | 0.93 | 0.34 | 55.54 | 32400 |

\*Volum total flotă/zi; banda totală ~ volum / 0.15 m².

# Energie și putere instalată

Putere termică totală estimată (100 instalații): ~300 MW\_th. Consum electric auxiliar total: 20–80 MW\_e (medie ~50 MW\_e).

Nota: în scenariile reale, energia termică provine cel mai robust din micro‑reactoare nucleare sigilate (2–5 MW\_th per modul), iar electricul se asigură din același nucleu sau din solar + stocare. Recuperarea de căldură (gaze de evacuare → preîncălzire regolit) poate scădea energia specifică spre 0.8 GJ/m³ în condiții bune.

# Flux procedural – din teren în rezervoare

1. Recoltare: excavator cu bandă (3 m lățime, 5 cm adâncime) în treceri paralele; control praf: cicloni + filtre electrostatice în cort local.

2. Transport etanș: conveior închis către modulul de proces; by-pass pentru material supra‑dimensional.

3. Preîncălzire regenerativă: regolitul rece trece printr-un schimbător ceramic și recuperează căldura gazelor evacuate din cuptor.

4. Degazare în cuptor etanș (tub rotativ sau pat fluidizat în vid): 750–900 °C, 15–30 min timp de ședere; gaze colectate imediat într-un volum etanș.

5. Răcire gaze + capcane reci criogenice: reținere secvențială H₂O/CO₂/CO/H₂; rămâne amestec He/Ne.

6. Separare heliu (He/Ne) → He brut; compresie în butelii sau stocare lichidă.

7. Îmbogățire izotopică (bază fixă): distilare criogenică + superleak pentru ⁴He; obții ³He > 90–99%.

8. Reziduul (regolit copt) → briquetting/sintering pentru dale rutiere; reutilizare la infrastructură (drumuri, platforme, ecranare radiații).

# Performanțe și note de proiectare

• Debitul termic controlează producția: la 3 MW\_th și 1.0 GJ/m³ → ~260 m³/zi/instalație.

• Producția ³He depinde liniar de ppb: 5 ppb ≈ 8 mg/m³; 20 ppb ≈ 32 mg/m³ (înainte de pierderi la îmbogățire).

• Distanța parcursă/zi este modestă: 1.1–2.2 km/zi/instalație (la lățime 3 m, adâncime 5 cm).

• Consum electric auxiliar (pompe vid, compresoare He, criogenie): ~0.2–0.8 MW\_e/instalație.

• Co‑produse valoroase: H₂O (procesabilă), H₂/CO (pentru sinteză), O₂ (prin reducerea ilmenitului), metale (Fe/Ti) – cresc utilitatea ISRU.

• Controlul prafului este critic pentru fiabilitate; folosirea reziduului sinterizat ca pavaj reduce abraziunea și consumul energetic la transport.

• Întreținere: rulmenți și etanșări rezistente la abraziune; design modular pentru schimb rapid al cămășilor ceramice în cuptor.

# Echivalență energetică a ³He colectat

Reacția D + ³He → ⁴He + p eliberează ~18.35 MeV/reacție. Asta corespunde la ~5.87×10¹⁴ J/kg ³He (~1.63×10¹⁴ Wh/kg). Valoarea exactă depinde de schema de ardere, de raportul de amestec și de conversia termică–electrică.

# Sinopsis numeric (100 instalații)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Scenariu | ³He net (t/an) | E fuziune echiv. (TWh/an) | Banda totală (km/zi)\* |
| Pesimist | 0.04 | 5.76 | 115 |
| Median | 0.12 | 19.75 | 173 |
| Optimist | 0.34 | 55.54 | 216 |

\*Banda totală ≈ volum total / 0.15 m²; indică lungimea zilnică de teren procesat la 3 m lățime, 5 cm adâncime.

# Concluzii operative

O flotă de 100 de instalații (~300 MW\_th total, plus 20–80 MW\_e) poate produce, în funcție de ppb și eficiență, ~0.2–1.3 tone ³He/an, cu echivalențe de fuziune de ordinul 0.1–0.8 TWh/an. Deși aceste cifre pot părea modeste, instalația oferă beneficii ISRU majore (apă, oxigen, metale, drumuri), iar producția ³He poate crește odată cu cartografierea zonelor mai bogate (ilmenit). Scalarea se face aproape liniar cu numărul de module și/sau cu puterea termică per modul.

Recomandare: începe cu 2–3 module pilot cu monitorizare geochimică in situ, validează ppb reale, ajustează energia specifică prin recuperare termică, și dimensionează fabrica de îmbogățire izotopică la bază pentru fluxul zilnic de heliu brut.

# Anexă A – Calcule detaliate

# Anexă B – Aprovizionare Li: ISRU și transmutare din ³He

ANEXĂ DE CALCULE – Recuperare ³He din regolit lunar (100 instalații)

Data: 25 Aug 2025

# 1. Notare și ipoteze

• ρᵣ = densitatea regolitului lunar ≈ 1600 kg/m³.

• cₚ = capacitate calorică medie ≈ 700 J/kg/K.

• ΔT = salt termic pentru degazare ≈ 800 K (până la ~750–900 °C).

• Aₛ = secțiune de procesare per trecere = lățime × adâncime = 3.0 m × 0.05 m = 0.15 m².

• Eₘ³ = energie efectivă pentru degazare pe m³ de regolit (include pierderi): 0.8–1.5 GJ/m³.

• C₍He3₎ = concentrația ³He în regolit: 5–20 ppb masic (1 ppb = 10⁻⁹).

• ηₑₙᵣ = factor de pierderi la îmbogățirea izotopică (distilare criogenică + superleak): 10–30%.

• Pₜₕ = putere termică per instalație: 3 MW (bază).

• N = numărul de instalații: 100.

# 2. Formule de bază

2.1 Energie sensibilă ideală pe m³ (fără pierderi): Eₛ = ρᵣ · cₚ · ΔT [J/m³].

2.2 Volum procesat pe zi per instalație: V\_zi = (Pₜₕ · 86400) / Eₘ³ [m³/zi].

2.3 Masă de ³He per m³ înainte de îmbogățire: m₍He3₎/m³ = ρᵣ · C₍He3₎ [kg/m³].

2.4 Producție zilnică netă ³He per instalație: M₍He3,zi₎ = V\_zi · ρᵣ · C₍He3₎ · (1 − ηₑₙᵣ) [kg/zi].

2.5 Producție anuală netă per instalație: M₍He3,an₎ = 365 · M₍He3,zi₎ [kg/an].

2.6 Lungime bandă parcursă pe zi: L\_zi = V\_zi / Aₛ [m/zi].

2.7 Pentru o flotă de N instalații: M₍He3,zi₎(flotă) = N · M₍He3,zi₎; similar pentru anual.

# 3. Verificări numerice ale ipotezelor

• Eₛ = ρᵣ·cₚ·ΔT ≈ 1600 × 700 × 800 ≈ 896 MJ/m³ (ideal). Modelele operaționale folosesc 0.8–1.5 GJ/m³ pentru a include pierderi și ineficiențe.

# 4. Calcul per scenariu (per instalație și flotă de 100)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Scenariu | ppb | E (GJ/m³) | Pₜₕ (MW) | ³He (g/zi/inst) | ³He (kg/an/inst) | ³He (t/an/100) | L (km/zi/inst) |
| Pesimist | 5 | 1.50 | 3.0 | 0.97 | 0.35 | 0.04 | 1.15 |
| Median | 10 | 1.00 | 3.0 | 3.32 | 1.21 | 0.12 | 1.73 |
| Optimist | 20 | 0.80 | 3.0 | 9.33 | 3.41 | 0.34 | 2.16 |

# 5. Echivalență energetică a ³He colectat

Reacția D + ³He → ⁴He + p eliberează ~18.35 MeV/reacție.  
• Energie pe mol: Eₘₒₗ = 1.77e+12 J/mol.  
• Energie pe kg ³He: Eₖg ≈ 5.87e+14 J/kg ≈ 163.1 GWh/kg ≈ 0.163 TWh/kg.

# 6. Sensibilitate parametrică (per instalație)

Tabelul de mai jos variază trei parametri principali: concentrația C₍He3₎ (ppb), energia specifică Eₘ³ (GJ/m³) și puterea termică Pₜₕ (MW). Pierderea la îmbogățire ηₑₙᵣ este fixată la 20% pentru comparație.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ppb | E (GJ/m³) | Pₜₕ (MW) | V (m³/zi) | ³He (g/zi) | ³He (kg/an) | L (km/zi) |
| 5 | 0.8 | 2.0 | 216 | 1.38 | 0.50 | 1.44 |
| 5 | 0.8 | 3.0 | 324 | 2.07 | 0.76 | 2.16 |
| 5 | 0.8 | 5.0 | 540 | 3.46 | 1.26 | 3.60 |
| 5 | 1.0 | 2.0 | 173 | 1.11 | 0.40 | 1.15 |
| 5 | 1.0 | 3.0 | 259 | 1.66 | 0.61 | 1.73 |
| 5 | 1.0 | 5.0 | 432 | 2.76 | 1.01 | 2.88 |
| 5 | 1.5 | 2.0 | 115 | 0.74 | 0.27 | 0.77 |
| 5 | 1.5 | 3.0 | 173 | 1.11 | 0.40 | 1.15 |
| 5 | 1.5 | 5.0 | 288 | 1.84 | 0.67 | 1.92 |
| 10 | 0.8 | 2.0 | 216 | 2.76 | 1.01 | 1.44 |
| 10 | 0.8 | 3.0 | 324 | 4.15 | 1.51 | 2.16 |
| 10 | 0.8 | 5.0 | 540 | 6.91 | 2.52 | 3.60 |
| 10 | 1.0 | 2.0 | 173 | 2.21 | 0.81 | 1.15 |
| 10 | 1.0 | 3.0 | 259 | 3.32 | 1.21 | 1.73 |
| 10 | 1.0 | 5.0 | 432 | 5.53 | 2.02 | 2.88 |
| 10 | 1.5 | 2.0 | 115 | 1.47 | 0.54 | 0.77 |
| 10 | 1.5 | 3.0 | 173 | 2.21 | 0.81 | 1.15 |
| 10 | 1.5 | 5.0 | 288 | 3.69 | 1.35 | 1.92 |
| 20 | 0.8 | 2.0 | 216 | 5.53 | 2.02 | 1.44 |
| 20 | 0.8 | 3.0 | 324 | 8.29 | 3.03 | 2.16 |
| 20 | 0.8 | 5.0 | 540 | 13.82 | 5.05 | 3.60 |
| 20 | 1.0 | 2.0 | 173 | 4.42 | 1.61 | 1.15 |
| 20 | 1.0 | 3.0 | 259 | 6.64 | 2.42 | 1.73 |
| 20 | 1.0 | 5.0 | 432 | 11.06 | 4.04 | 2.88 |
| 20 | 1.5 | 2.0 | 115 | 2.95 | 1.08 | 0.77 |
| 20 | 1.5 | 3.0 | 173 | 4.42 | 1.61 | 1.15 |
| 20 | 1.5 | 5.0 | 288 | 7.37 | 2.69 | 1.92 |
| 30 | 0.8 | 2.0 | 216 | 8.29 | 3.03 | 1.44 |
| 30 | 0.8 | 3.0 | 324 | 12.44 | 4.54 | 2.16 |
| 30 | 0.8 | 5.0 | 540 | 20.74 | 7.57 | 3.60 |
| 30 | 1.0 | 2.0 | 173 | 6.64 | 2.42 | 1.15 |
| 30 | 1.0 | 3.0 | 259 | 9.95 | 3.63 | 1.73 |
| 30 | 1.0 | 5.0 | 432 | 16.59 | 6.05 | 2.88 |
| 30 | 1.5 | 2.0 | 115 | 4.42 | 1.61 | 0.77 |
| 30 | 1.5 | 3.0 | 173 | 6.64 | 2.42 | 1.15 |
| 30 | 1.5 | 5.0 | 288 | 11.06 | 4.04 | 1.92 |

# 7. Pierderi la îmbogățire – impact

Producția netă M₍He3₎ scade liniar cu (1 − ηₑₙᵣ). Exemplu (Median: ppb=10, E=1.0 GJ/m³, Pₜₕ=3 MW):

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ηₑₙᵣ | ³He (g/zi/inst) | ³He (kg/an/inst) | ³He (t/an/100) |
| 10% | 3.73 | 1.36 | 0.14 |
| 20% | 3.32 | 1.21 | 0.12 |
| 30% | 2.90 | 1.06 | 0.11 |

# 8. Exemplu de calcul (scenariul Median)

Date: C₍He3₎=10 ppb, Eₘ³=1.0 GJ/m³, Pₜₕ=3 MW, ηₑₙᵣ=20%.  
Pas 1: V\_zi = (3×10⁶ W × 86400 s)/ (1.0×10⁹ J/m³) ≈ 259 m³/zi.  
Pas 2: m₍He3₎/m³ = ρᵣ·C ≈ 1600 kg/m³ × 10×10⁻⁹ ≈ 0.000016 kg/m³ = 16 mg/m³.  
Pas 3: M₍He3,zi₎ = V\_zi × 16 mg/m³ × (1 − 0.2) ≈ 3.32 g/zi/inst.  
Pas 4: M₍He3,an₎ ≈ 1.21 kg/an/inst; pentru 100 inst: 0.12 t/an.

# 9. Observații operaționale

• • Recuperarea de căldură (gaze la 600–900 °C → preîncălzire regolit rece) poate coborî Eₘ³ spre 0.8 GJ/m³.

• • Încălzirea cu microunde (2.45 GHz) poate crește uniformitatea; eficiența depinde de pierderile dielectrice locale.

• • Captarea gazelor imediat la ieșirea din cuptor este esențială; pierderile de He în vid sunt ireversibile.

• • Controlul prafului: cicloni inerțiali + filtre electrostatice; reziduu sinterizat folosit ca pavaj reduce abraziunea.

• • Co-produse (H₂O, H₂, CO, O₂) îmbunătățesc balanța ISRU și justifică economic instalațiile chiar la producții mici de ³He.

ADDENDUM – Aprovizionare locală cu litiu (Li) pe Lună

Data: 25 Aug 2025

Obiectiv: asigurarea Li pentru baterii, aliaje și, pe termen lung, pentru circuite și aplicații nucleare (breeding). Propunem un mix: (A) extracție chimică directă din regolit (ISRU) și (B) transmutare din ³He via ³He(α,γ)⁷Be→⁷Li.

# A) ISRU – Extracție directă de Li din regolit

Abordare: după degazarea pentru ³He, regolitul poate fi procesat în leșiere (hidrotermală/ionică) sau electrochimie în săruri topite (ex. cloruri/fluoruri) pentru recuperarea Li. Conținutul de Li variază mult pe Lună; folosim o plajă orientativă 5–30 ppm masic, cu randamente de recuperare 40–70%.

Debit flotă (scenariu Median din raport): ~25920 m³/zi regolit procesat (100 instalații, 3 MW\_th/inst, 1.0 GJ/m³).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Li (ppm) | Recuperare | Li (kg/zi) | Li (t/an) | Observație |
| 5 | 40% | 83 | 30.3 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 5 | 50% | 104 | 37.8 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 5 | 70% | 145 | 53.0 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 10 | 40% | 166 | 60.5 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 10 | 50% | 207 | 75.7 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 10 | 70% | 290 | 106.0 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 20 | 40% | 332 | 121.1 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 20 | 50% | 415 | 151.4 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 20 | 70% | 581 | 211.9 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 30 | 40% | 498 | 181.6 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 30 | 50% | 622 | 227.1 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |
| 30 | 70% | 871 | 317.9 | Post-degazare; potențial folosire săruri topite |

Note: valorile sunt orientative; cartografierea chimică locală va fixa ppm-urile reale. Procesarea post-degazare poate fi integrată cu metalurgia Fe/Ti (ilmenit) pentru sinergii termice.

# B) Transmutarea ³He → ⁷Li

Calea propusă: ³He + ⁴He → ⁷Be + γ (Q~1.6 MeV), urmată de ⁷Be (t₁/₂≈53 zile, EC) → ⁷Li + νₑ + γ (477 keV). Într-un plasmatron/nebunie termică cu heliu-4 (co-produs), ³He poate fi convertit selectiv la ⁷Be, apoi stocat în ecranare pentru decădere controlată la ⁷Li.

Stoichiometrie: 1 mol ³He → 1 mol ⁷Li. Factor masic: 7 / 3.016 ≈ 2.32 kg Li per 1 kg ³He transmutat.

Producția anuală curentă de ³He (scenariu Median, 100 instalații): ~121 kg/an ⇒ ⁷Li transmutat maxim ~281 kg/an (dacă ³He este dedicat integral acestei rute).

# Comparativ: fluxuri Li (ISRU vs. transmutare)

• ISRU (10–20 ppm la 50% recuperare): sute de kg Li/zi pentru flota de 100 instalații.  
• Transmutare din ³He (scenariu Median): ~0.8 kg/zi echivalent, dar cu Li aproape izotopic ⁷Li pur.

# Inginerie pentru transmutare

• Reactor ³He–⁴He de volum mic (RF/microunde) cu captură de ⁷Be pe ținte metalice (ex. Cu) ușor de extras.

• Manipulare ⁷Be: radioizotop (t₁/₂≈53 zile; γ 477 keV) – ecranare locală, manipulare robotică, cămări de decădere 2–3 perioade pentru siguranță.

• Conversie accelerată: ⁷Be(n,p)⁷Li folosind un flux moderat de neutroni (generator D–D/D–T sau spalație), reducând timpul până la Li.

• Sortare izotopică: dacă se dorește ⁶Li pentru breeding, se poate folosi schimb izotopic/laser; alternativ ⁷Li(n,n'α)T la energii înalte.

# Integrare cu lanțul existent

1) Degazare pentru ³He → 2) ISRU Li (chimic/electrolitic) din același regolit → 3) Linie mică de transmutare ³He→⁷Li pentru flux ⁷Li de înaltă puritate folosit la aplicații speciale. Astfel, Li de masă vine din ISRU, iar Li-7 pur din transmutare.

# Concluzie

Nu ne bazăm pe ³He pentru volum de Li; îl folosim pentru a obține ⁷Li de puritate ridicată. Volumul principal de Li provine din ISRU pe același flux de regolit. Mixul asigură atât cantitate, cât și calitate izotopică.