

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

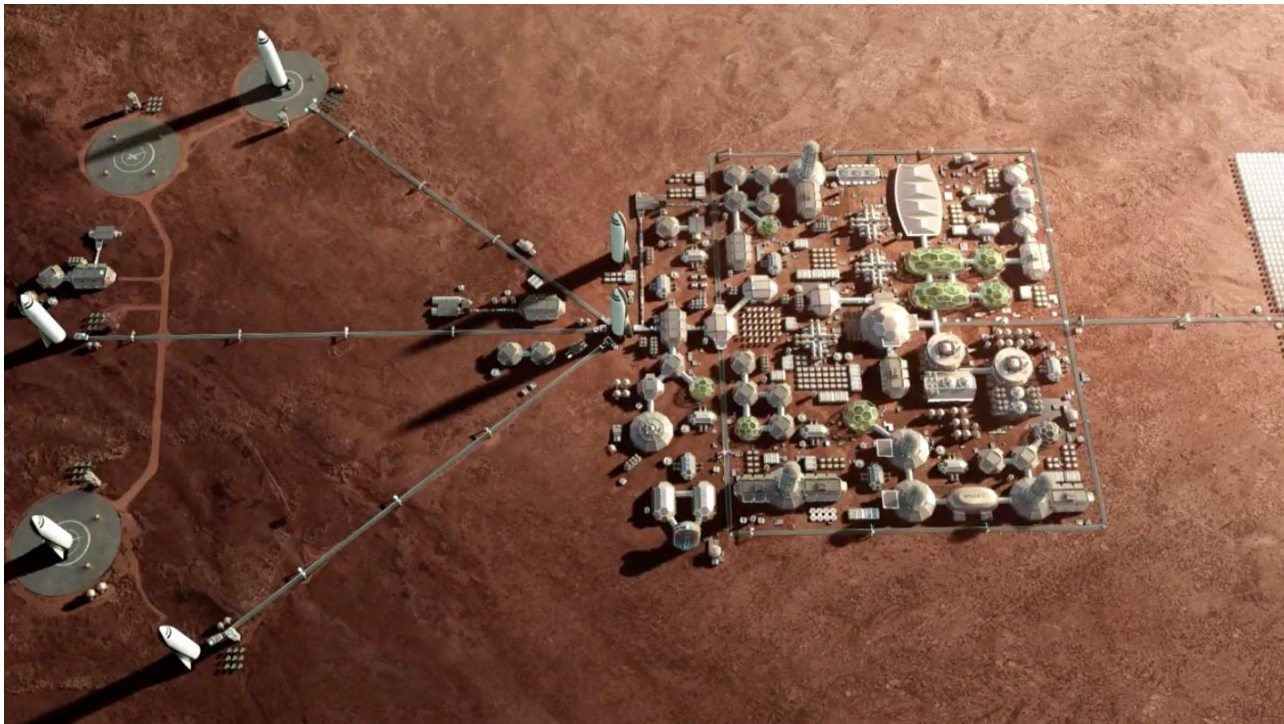
***Relazione per la prova finale
«Utilizzo delle risorse in situ:
principali tecnologie per la creazione
di un habitat marziano »***

Tutor universitario: Prof.ssa Bertani

Laureando: *Siria Finizio*

Padova, 26/09/2023

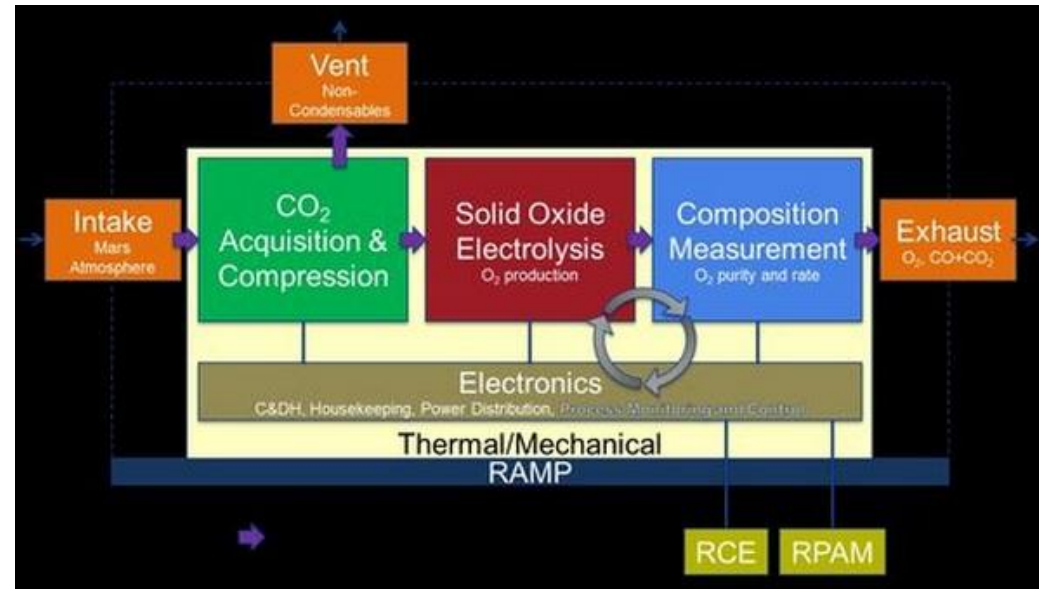
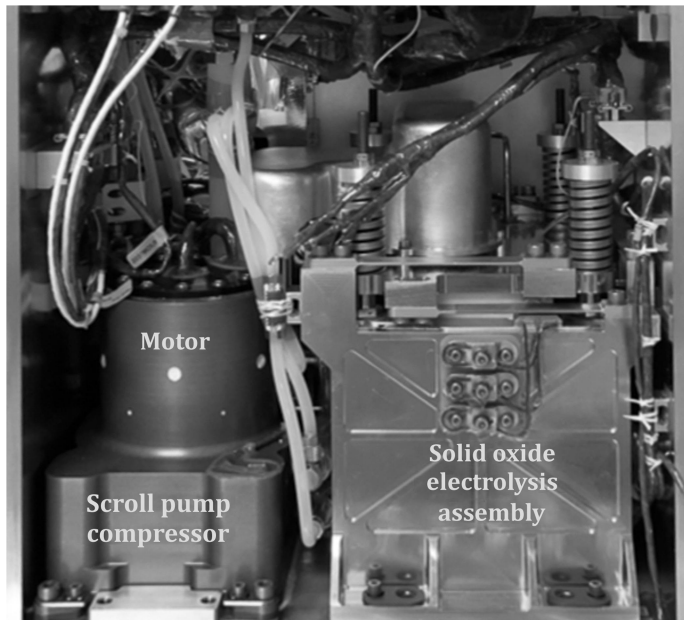
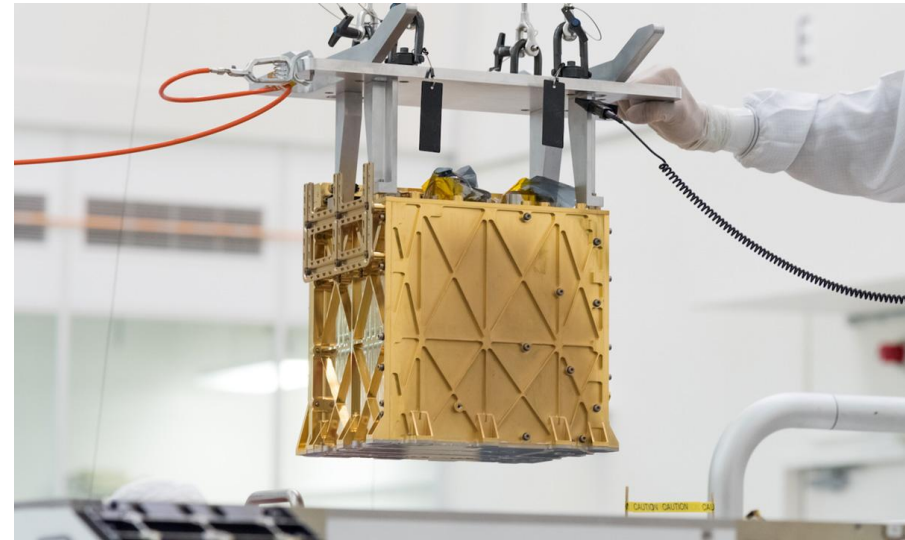
Innanzitutto, definiamo **ISRU**: è la raccolta, elaborazione, conservazione e utilizzo di materiali trovati o fabbricati su altri oggetti astronomici. Questo comporta un ingente risparmio di risorse e carburante rispetto al trasporto dalla Terra. ISRU ha il potenziale di fornire materiali per supporto alla vita sul pianeta, propellente, materiali da costruzione ecc.



Obiettivi:

- risparmio sul propellente
- condurre operazioni a lungo termine in ambienti ostili
- autonomia
- scalabilità: si inizia a testare su una scala ridotta ma bisogna essere in grado di ottenere risultati su una scala maggiore
- water mining
- produzione di ossigeno
- produzione di propellente
- estrazione di metalli e altri materiali costruenti

Con le dimensioni di un tostapane, MOXIE rappresenta la prima dimostrazione di tecnologia ISRU su un altro pianeta. Realizzato dentro il rover della NASA Perseverance 2020, è riuscito a produrre ossigeno dal diossido di carbonio che forma il 95% dell'atmosfera marziana. Bisogna considerare che l'atmosfera sulla Terra esercita 1000 mbar di pressione sul suolo, mentre quella marziana è così rarefatta che ne esercita solo 7 mbar circa. Di questa atmosfera, l'ossigeno costituisce solo lo 0,13%. MOXIE ha una potenza di soli 300 Watt, ma il suo successo promette bene per un futuro impianto su larga scala.



Sottosistema di acquisizione e compressione dell'anidride carbonica (CAC)

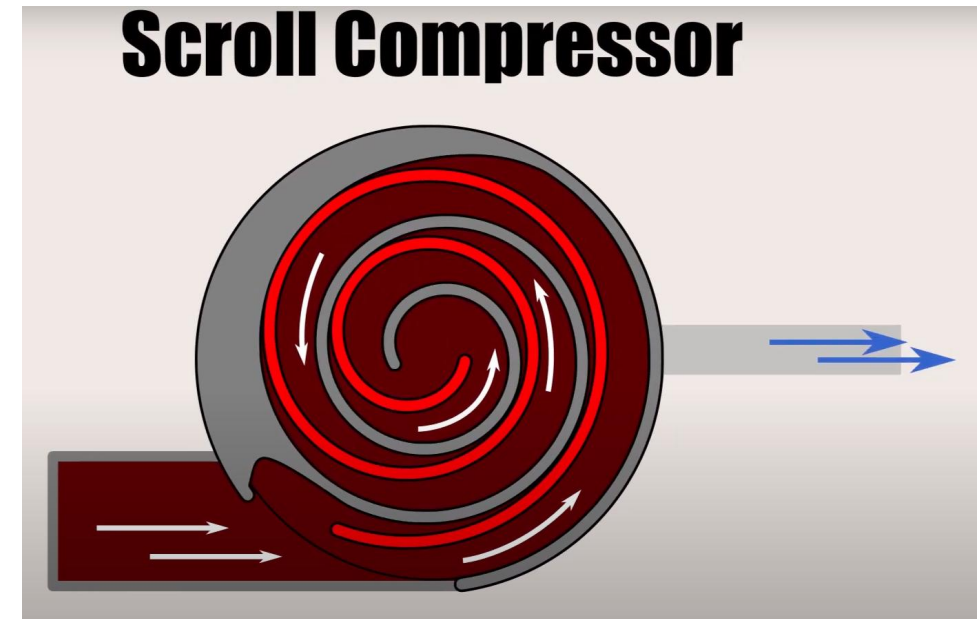
Filtro HEPA

Prima dell'ingresso nel compressore l'aria marziana viene filtrata per eliminare le polveri.

Compressore a scorrimento

Aumenta la pressione dell'aria marziana di 100 volte arrivando al 70% della pressione sulla Terra a livello del mare. Questo tipo di compressore ha molte meno parti in movimento rispetto al sistema classico a pistone ed è dunque più silenzioso e compatto.

La pompa è capace di raggiungere 3500 rpm. A valle viene utilizzata una valvola di non ritorno per smorzare le oscillazioni di pressione, una coppia di sensori di pressione su entrambi i lati dell'orifizio di uscita viene utilizzata per misurare la portata e un raffreddatore di gas di riflusso viene utilizzato per impedire ai gas caldi di danneggiare la valvola di non ritorno e rifluire nel compressore durante lo spegnimento.



Sottosistema SOXE (Elettrolizzatore ad ossido solido)

Questo tipo di strumento è fondamentalmente una cella a combustibile all'inverso. Si basa sul principio che a temperature elevate certi ossidi ceramici diventano ottimi conduttori per ioni ossigeno (O^{2-}).

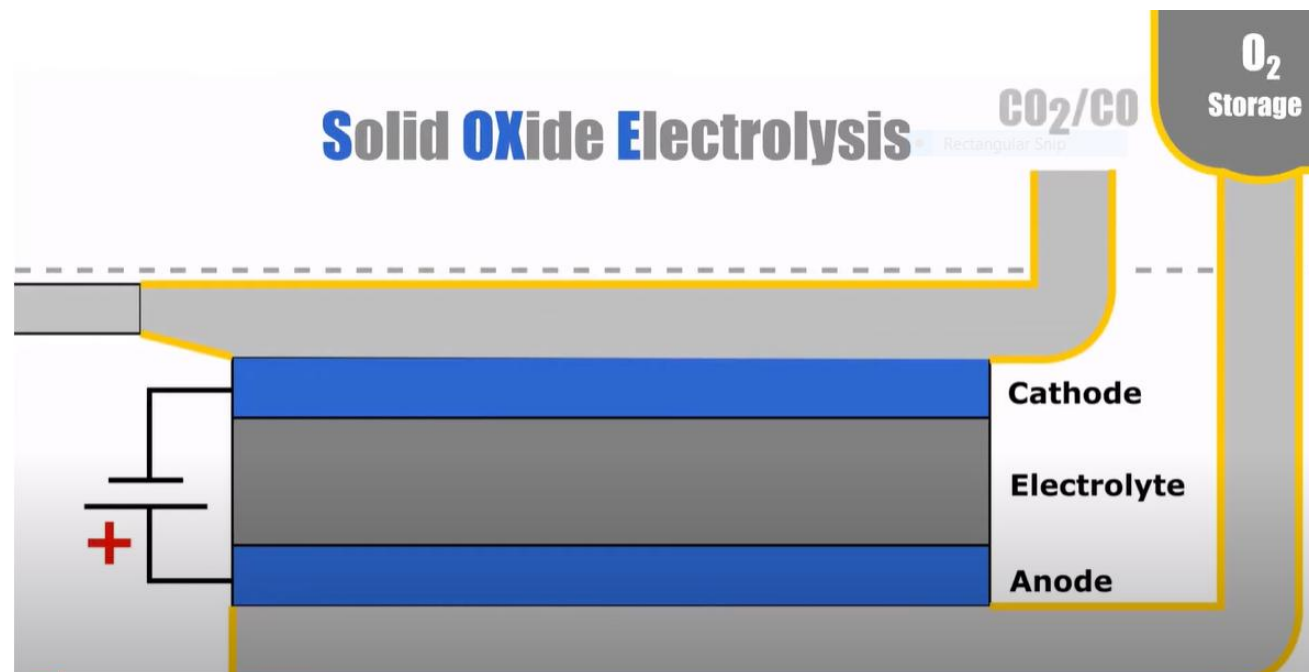
Un sottile disco non poroso di elettrolita solido è schiacciato tra due elettrodi porosi. La CO_2 riscaldata a $800^\circ C$ si diffonde nell'elettrodo poroso (catodo) e arriva all'interfaccia con l'elettrolita. Attraverso una combinazione di dissociazione termica ed elettrocatalisi un atomo di ossigeno si libera dalla molecola di anidride carbonica e acquisisce due elettroni dal catodo completando il suo orbitale esterno e diventando uno ione di ossigeno. Grazie alle vacanze presenti nel reticolo cristallino dell'elettrolita gli ioni sono trasportati all'interfaccia tra elettrolita e anodo.

Qui cedono i due elettroni all'elettrodo e si combinano con altri atomi di ossigeno con legame covalente puro per formare O_2 , che viene rilasciato in atmosfera allo scarico dell'anodo.

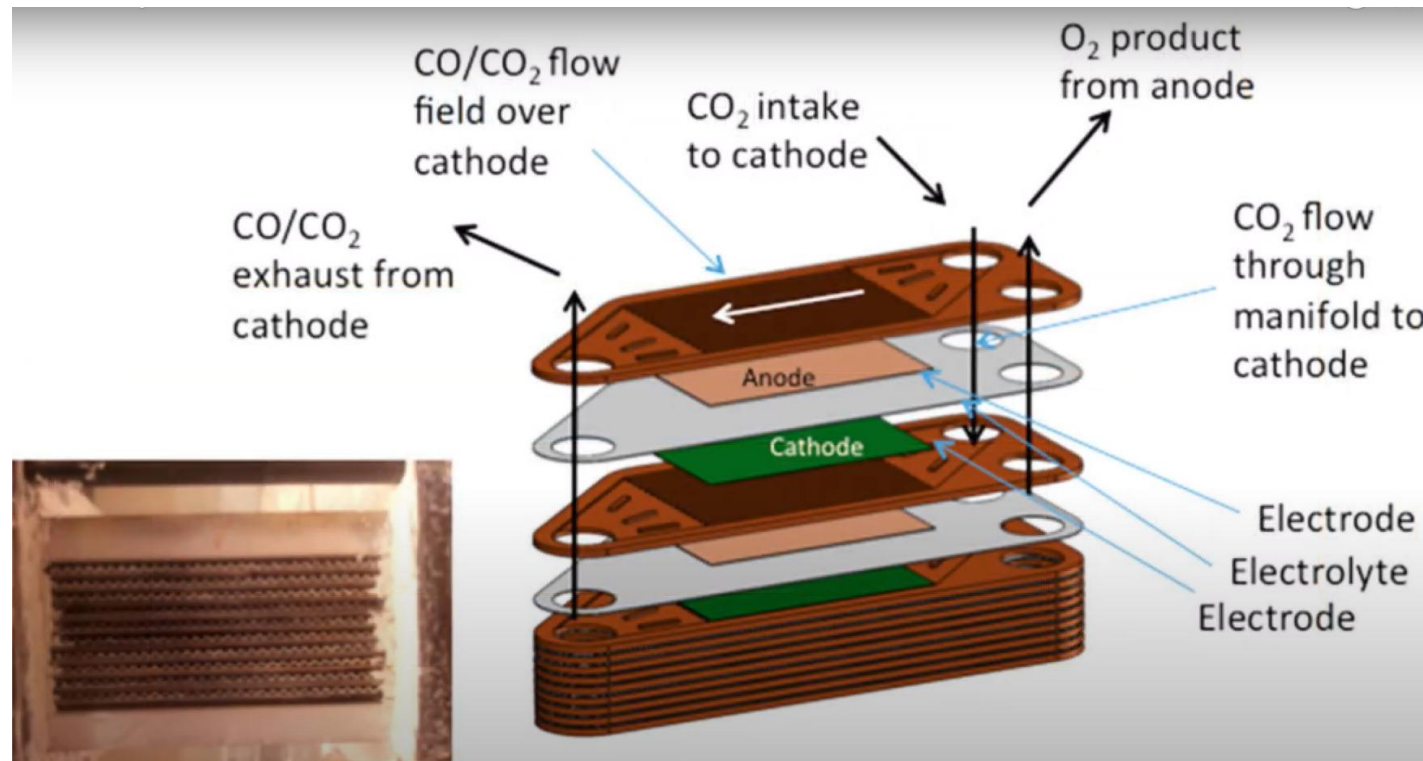
I gas inerti presenti nell'atmosfera non reagiscono ma ritornano in atmosfera nello scarico del catodo insieme al CO e alla CO_2 inutilizzata.

Nel complesso la reazione è : $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$

Le SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cells) sono in forte crescita grazie alla loro elevata efficienza.



Nel caso di MOXIE, il catodo è rivestito con nickel per dare inizio alla reazione elettrochimica fornendo una via di conduzione per gli elettroni e l'elettrolita è a base di ossido di zirconio (ZrO_2) stabilizzato con scandio. Questo perché la ScSZ (scandia-stabilized zirconia) presenta una conduttività ionica maggiore rispetto al più comune ed economico YSZ (yttria-stabilized zirconia) e un'ottima stabilità a lungo termine. Lo svantaggio è una resistenza meccanica minore che comporta uno spessore maggiore dell'elettrolita nella cella. Vi sono 10 celle separate da interconnettori e disposte in due stack sovrapposti da 5 celle ciascuno.



Un lato di ciascuna interconnessione trasporta il gas in ingresso attraverso ciascun catodo, trasportando CO, CO₂ non reagita e gas atmosferici residui allo scarico del catodo.

L'altro lato di ciascuna interconnessione trasporta l'ossigeno puro prodotto verso lo scarico dell'anodo.

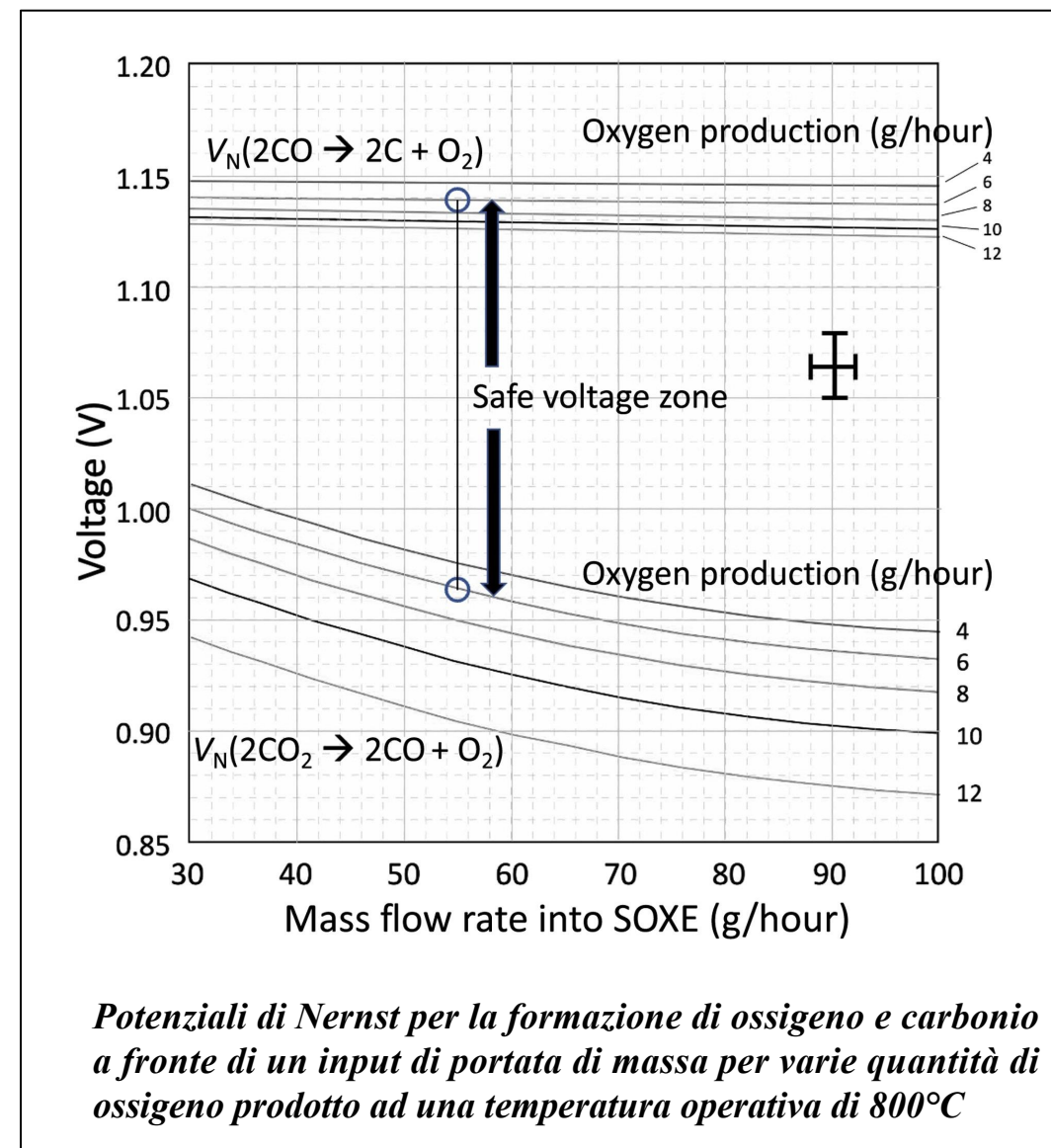
Gli scambiatori di calore recuperano il calore dai gas in uscita.

Il **potenziale di Nernst (V_N)** per una reazione di elettrolisi è il potenziale al di sopra del quale la reazione può avvenire. Per operare in sicurezza MOXIE deve stare al di sopra della soglia per la produzione di ossigeno ($2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$) ma al di sotto della soglia che porta alla formazione di carbonio sul catodo ($2CO \rightarrow 2C + O_2$). Queste soglie dipendono dalle pressioni parziali e dalla temperatura dei reagenti.

E' necessario evitare il deposito di carbonio al catodo perchè esso aumenta la resistenza della cella riducendone l'area attiva e può portare a frattura.

Il potenziale di Nernst è molto sensibile alla temperatura e test in laboratorio hanno individuato la temperatura di $800^\circ C$ come il miglior compromesso tra un'operazione efficiente, cioè con un buon distacco tra le due soglie e il rischio di danneggiare componenti termosensibili.

All'interno del rover **Perseverance** tuttavia, limiti su volume e potenza hanno escluso l'utilizzo di un forno e invece vi sono due piastre riscaldanti sulla prima e ultima cella delle due colonne con un'isolamento parziale sui lati. Ciò comporta gradienti interni fino a $10^\circ C$ tra le celle centrali più fredde e quelle esterne. Dovendo adeguare il potenziale a quello sicuro per le celle più fredde (che presentano un distacco tra le due soglie minore) non si sfrutta appieno il potenziale delle celle più calde.



Attualmente solamente il 10% dell'energia è impiegata per generare ossigeno.

Il 90% è invece impiegato per il compressore, l'elettronica e il riscaldamento. Facendo funzionare il compressore a pressione più bassa o con una maggiore efficienza complessiva del sistema si potranno ottenere risultati più incoraggianti.

MOXIE ha un totale di 10 celle ed è in grado di produrre circa 10g/h di O₂, ossia lo 0,5% di quello necessario per produrre propellente durante 14 mesi per una missione di 3-4 persone su Marte.

E' dunque scontata la necessità di realizzare uno strumento basato su MOXIE ma a scala molto più grande, che avrà il compito di:

- sostituire le aperture fisse con regolatori di pressione
- migliorare il sottosistema di controllo termico, puntando a eliminare gradienti di temperatura
- migliorare il sistema di monitoraggio e controllo che dovrà essere in grado di autocalibrarsi, rilevando continuamente cambiamenti dell'atmosfera esterna per adeguare la velocità del compressore.
- funzionare senza interruzioni. Infatti attualmente vi è la necessità di effettuare cicli riscaldamento/raffreddamento intermittenti perchè quando MOXIE è in funzionamento il rover non può svolgere altre operazioni. Questi cicli comportano uno stress termico importante sulle componenti e richiedono tempo.

La Terra e Marte si avvicinano una volta ogni 26 mesi.

Attualmente l'idea per la prima missione con esseri umani su Marte è di mandare tutto il necessario, incluso un MOXIE su grande scala, e successivamente dopo 26 mesi mandare gli astronauti. In questo modo, tenendo conto dei 6 mesi di viaggio necessari per arrivare su Marte, la base sarebbe in funzione da già 20 mesi quando gli astronauti lasciano la Terra. Per soddisfare il bisogno di ossigeno si punta a una produzione continua di 2-3kg/h. Si stima siano necessari almeno 25 kW per la missione, che saranno utilizzati dal MOXIE 2.0 prima dell'arrivo degli astronauti. La struttura avrà quindi le dimensioni di un freezer e peserà una tonnellata.

La risorsa più importante presente su Marte sono i vasti depositi di acqua sotto forma di ghiaccio.

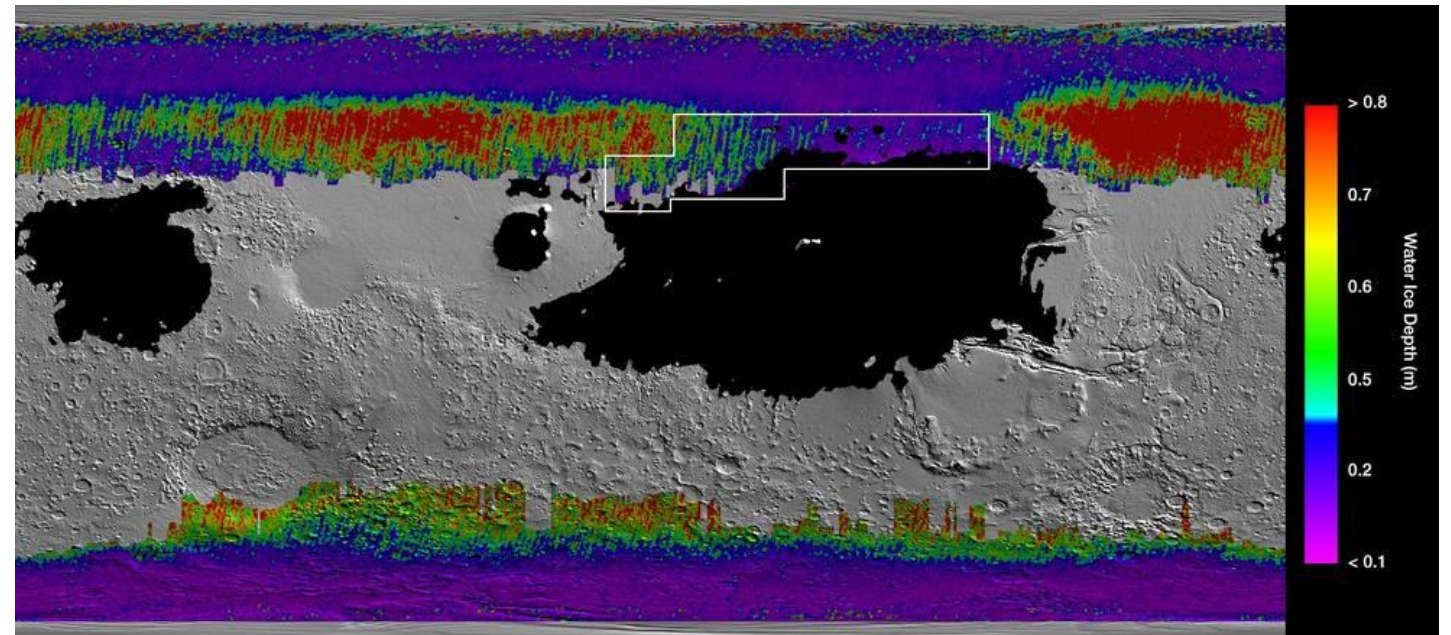
L'acqua è necessaria per usi quali supporto alla vita, agricoltura, costruzione come anche elettrolisi per ottenere idrogeno e ossigeno da usare in celle a combustibile e motori dei razzi. **Ogni chilogrammo di materiale di consumo trasportato dalla Terra richiede circa 200 kg di propellente per arrivare su Marte, a seconda del veicolo.** Questa problematica verrebbe meno se si riuscisse a utilizzare l'acqua già presente su Marte, facilitando il processo di colonizzazione umana.

La posizione e la facilità di estrazione dell'acqua è uno dei driver più importanti nella selezione del luogo dove costruire la prima base marziana. Il ghiaccio più superficiale è più facile da estrarre, ma potrebbe anche essere meno puro di ghiaccio più in profondità.

Su Marte, il ghiaccio è visibile al polo nord ed è presente in abbondanti quantità sotto CO₂ ghiacciata al polo sud.

Vi sono due tipi di siti candidati per l'atterraggio su Marte potenzialmente ricchi di ghiaccio:

- **pianure dell'emisfero settentrionale**
- **LDA (Lobate Debris Aprons), ghiacciai rocciosi dove il ghiaccio è seppellito sotto uno strato superficiale di roccia, più difficili da attraversare con un rover**



VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover)

Future operazioni su grande scala richiedono un'ottima conoscenza della geologia del sito, per la quale sono necessarie analisi del sottosuolo per stabilire la presenza di ghiaccio, la sua composizione, distribuzione e forma. Altrettanto importante è la conoscenza dei materiali interposti tra il suolo e il ghiaccio sotterraneo.

A tal fine è stato proposto **VIPER**, uno strumento già selezionato per operare sulla Luna nel 2024.

Oltre a ricercare acqua VIPER mapperà la distribuzione di risorse utili nell'area di intervento.

Il payload comprende vari strumenti integrati con una piattaforma per la mobilità laterale e un trapano che scaverà nel sottosuolo.



NSS (Neutron Spectrometer System)

Fornisce una stima della quantità di idrogeno. Quando i raggi cosmici galattici colpiscono la regolite (insieme eterogeneo di sedimenti, polvere e frammenti di materiali, lo strato più superficiale del pianeta) rompono i nuclei dei materiali grazie alla loro elevata energia. I neutroni rilasciati cedono una grande quantità di energia quando colpiscono particelle con simile massa, come gli atomi di idrogeno, e si termalizzano (diventano lenti). Monitorando il flusso locale di neutroni NSS è in grado di stabilire se sono presenti o meno atomi di idrogeno.

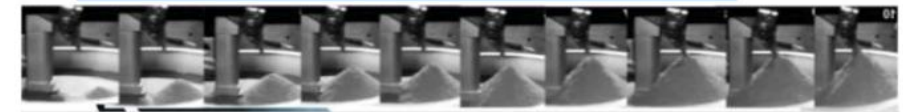
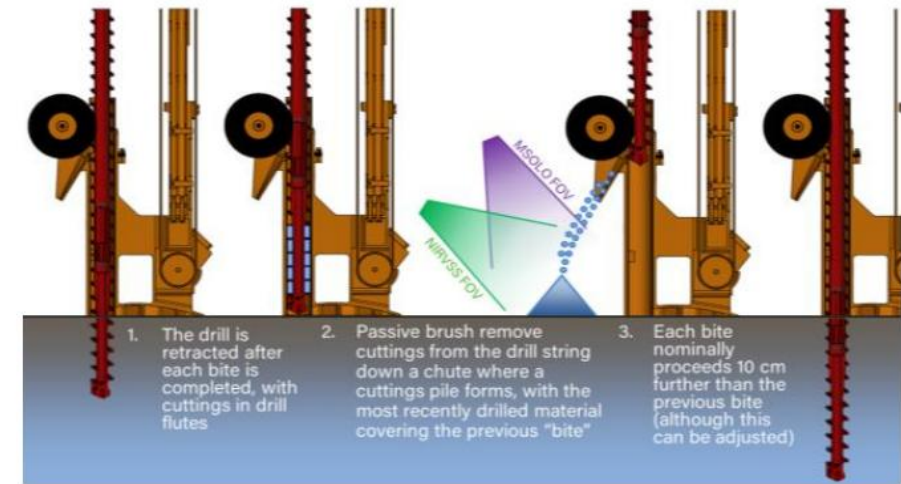
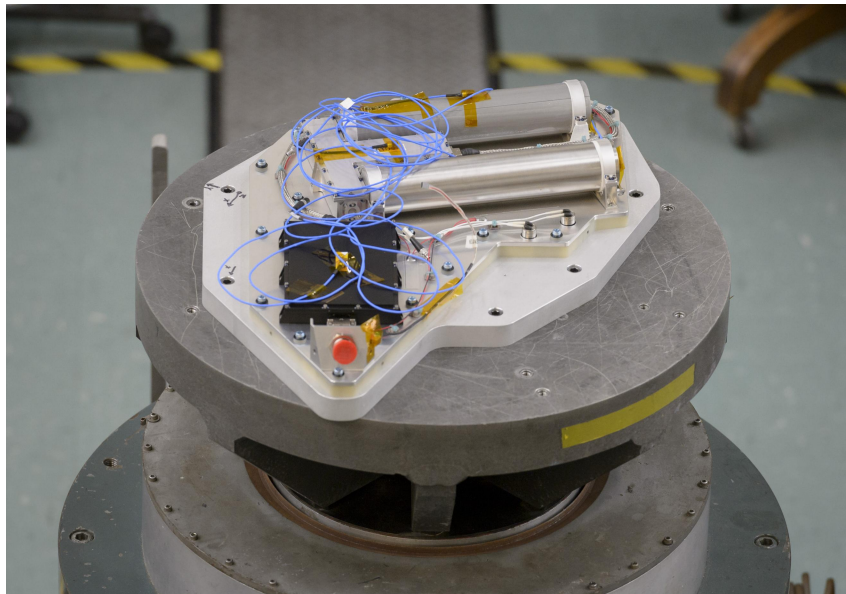


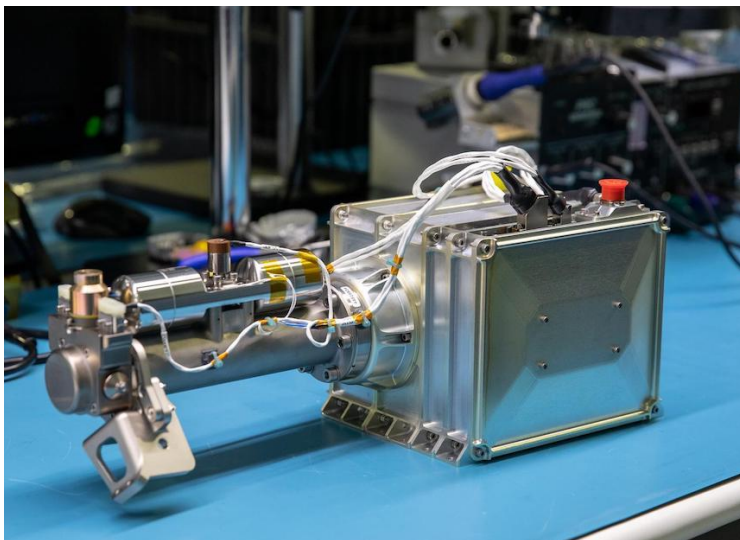
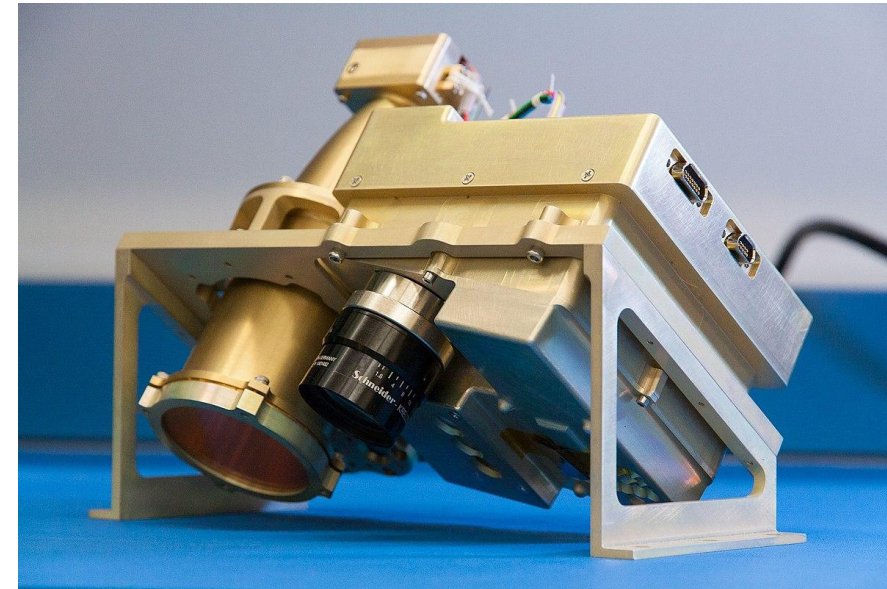
Figure 4. Bite sampling approach. Shown below are cuttings cones every 10 cm bite.

TRIDENT (The Regolith and Ice Drill for Exploring New Frontiers)

Una volta che NSS ha individuato una concentrazione di idrogeno sufficiente per inferire la presenza di acqua sotto forma di ghiaccio, il rover azionerà un trapano rotante a percussione lungo 1m realizzato dalla Honeybee Robotics in California, che porterà i campioni di materiali in superficie per l'analisi

NIRVSS (Near-Infrared Volatiles Spectrometer System)

Analizza i campioni di sottosuolo. E' in grado di determinare a che molecola appartiene l'idrogeno precedentemente identificato da NSS (acqua, semplice atomo di idrogeno oppure molecola del gruppo idrossile). Lo spettrometro individuerà anche i diversi tipi di minerali e sostanze presenti, fornendo in seguito una mappa ad alta risoluzione della composizione del sottosuolo.



MSolo (Mass Spectrometer observing lunar operations)

E' uno strumento adattato da un modello commerciale.

Non appena VIPER atterra sulla Luna analizzerà le sostanze volatili (H_2 , He, CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S , SO_2 , etc.) rilasciati dalla regolite. Lavorerà insieme a NIRVSS per analizzare i campioni di sottosuolo.

MSolo è in grado di rilevare e identificare sostanze volatili a basso peso molecolare, tra 1 e 100 unità di massa atomica.

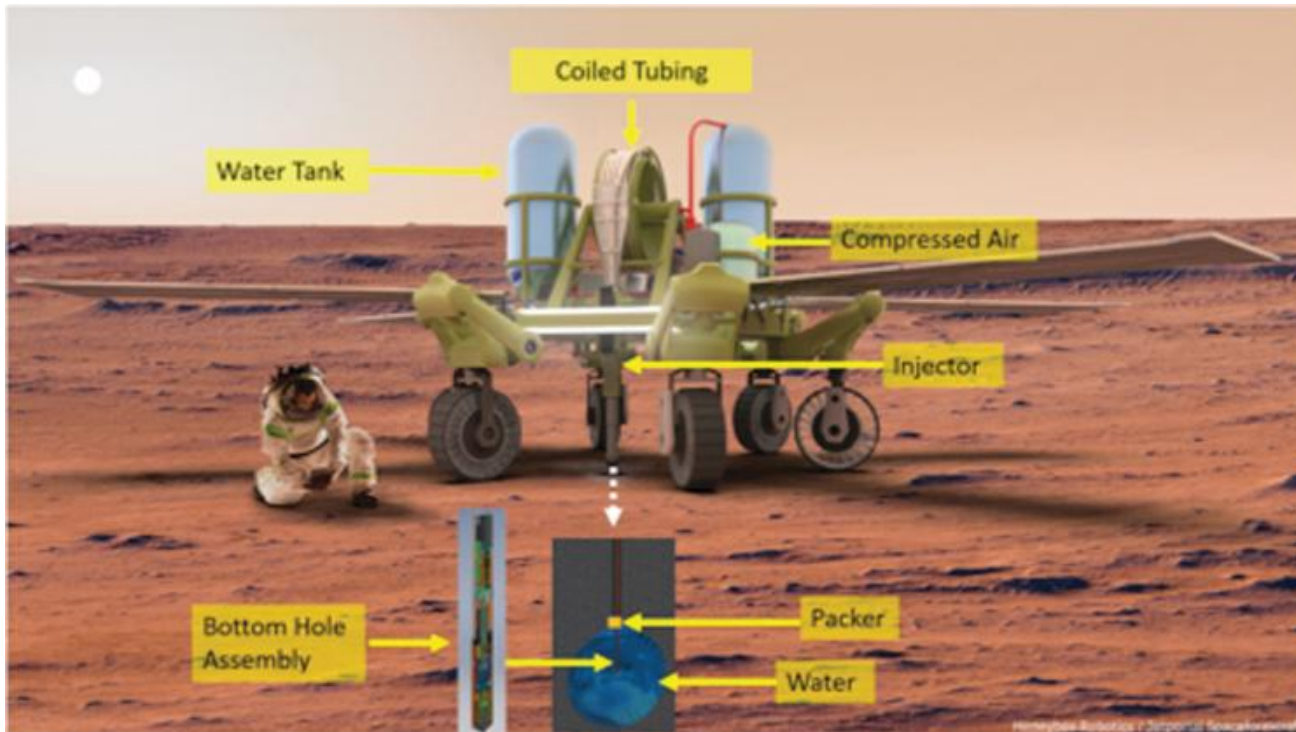
Un sistema chiamato “RedWater” è attualmente in via di sviluppo. Si basa su due tecnologie, **Coiled Tubing** per creare il buco e **Rodwell** per sciogliere il ghiaccio e pompare l’acqua. Il sistema sarebbe capace di ricavare acqua fino a 25m di profondità con al limite 20m di materiale interposto.

Alla fine del tubo CT c’è la BHA (Bottom Hole Assembly) con un motore e un trapano rotante a percussione per arrivare al sottosuolo.

Per mantenere pulito il tubo, viene pompata aria compressa dall’atmosfera marziana. Creato il buco, il tubo rimane e sarà usato come condotto per l’acqua.

Una volta che viene raggiunto il deposito di ghiaccio, il trapano non avanza più in profondità ma si ferma continuando a ruotare. Si tappa il buco in superficie per evitare la sublimazione, si azionano i riscaldatori e il ghiaccio inizia a sciogliersi. Una frazione dell’acqua viene portata in superficie attraverso lo stesso tubo in cui scorreva l’aria grazie ad una pompa peristaltica e immagazzinata in un serbatoio di stoccaggio. L’altra parte di acqua viene riscaldata e utilizzata per facilitare lo scioglimento del ghiaccio.

In base ai test si stima che si possano produrre 1000 kg di acqua in 10 giorni.



La **reazione di Sabatier** utilizza metalli di transizione come catalizzatori (rutenio o nickel) ed è una reazione esotermica ($\Delta H = -165,4 \text{ kJ/mol}$) che avviene a $300 - 400^\circ\text{C}$ e 30 bar.

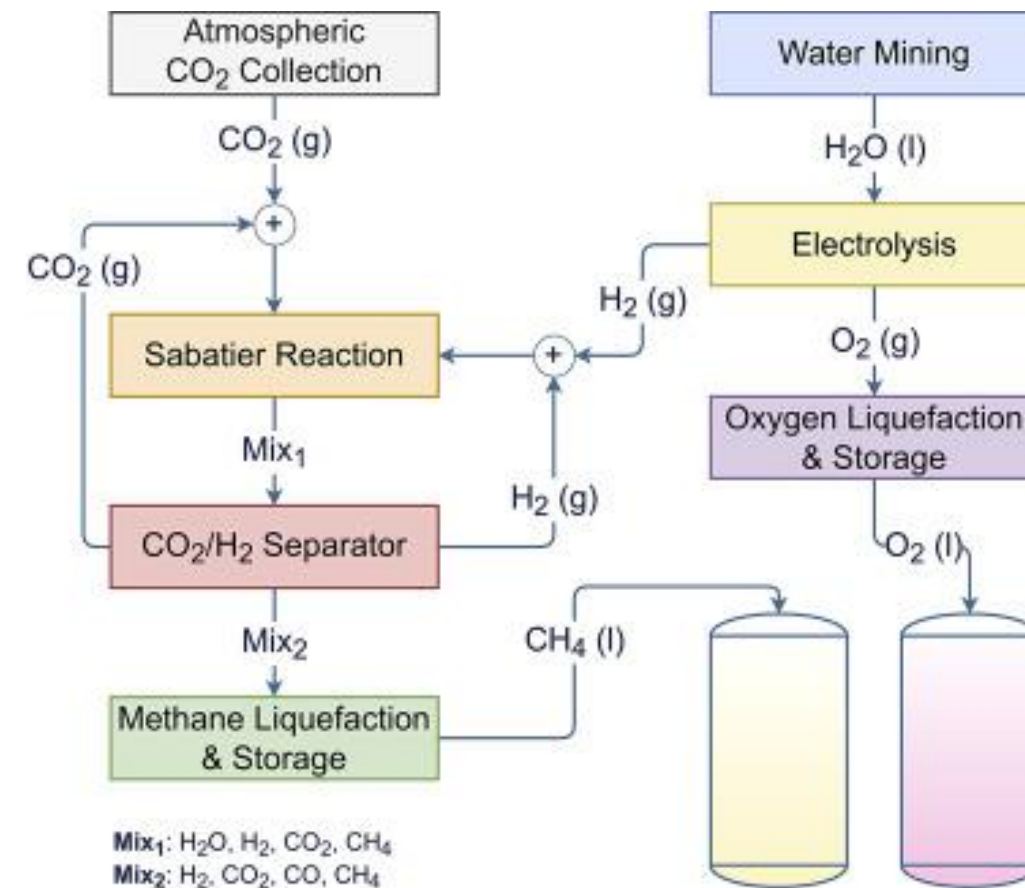
Dall'acqua ottenuta si può ricavare ossigeno e idrogeno attraverso l'elettrolisi dell'acqua ($4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{O}_2$) riciclare poi l'idrogeno facendolo reagire assieme all'anidride carbonica presente in abbondanti quantità nell'atmosfera marziana nella reazione di Sabatier ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$).

La reazione netta è dunque **$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$** .

Così facendo si ottiene il metano da utilizzare come propellente.

SpaceX in particolare si sta impegnando su questo fronte per alimentare Starship. Il propellente utilizzato da Starship è Methalox, una coppia criogenica di ossigeno liquido e metano liquido (LOX).

Starship ha un rapporto stechiometrico tra comburente e combustibile O/F di 3,5 circa, mentre il processo nel complesso (elettrolisi + metanazione) ha un rapporto ossigeno:metano di 4:1. L'ossigeno in eccesso può essere utilizzato per altri processi come la respirazione.

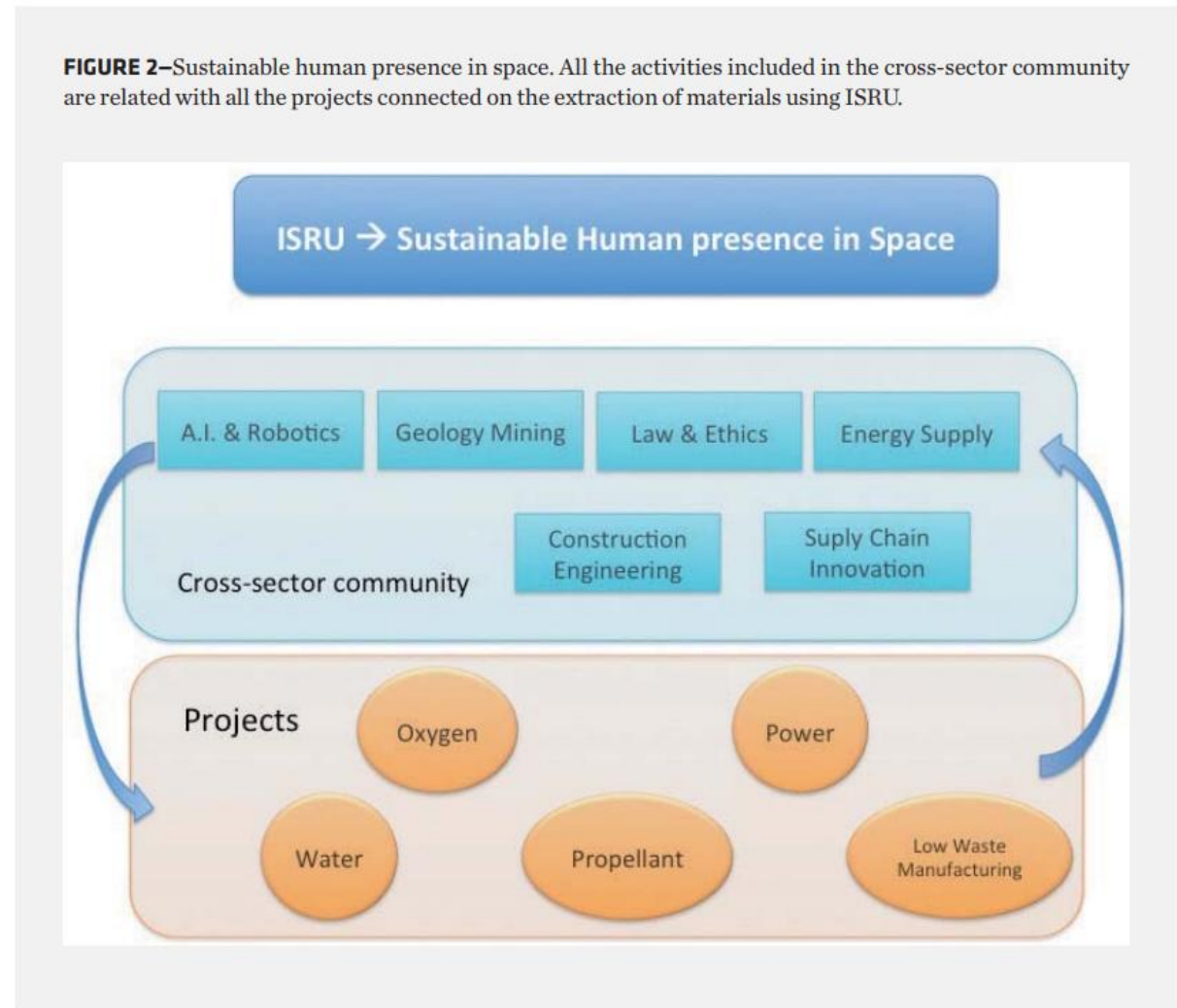


Le tecnologie per ISRU sono in costante evoluzione e aumento. Al momento mancano ancora le tecnologie per implementarle tutte, ma gli studi sono abbondanti e in continua crescita, alimentandosi gli uni con gli altri.

E' innanzitutto necessario sviluppare tecnologie affidabili e su larga scala per la produzione di ossigeno, acqua e propellente. Una volta che queste basi sono solide, si svilupperà meglio l'aspetto riguardante la creazione di materiali da costruzione, fertilizzante per coltivare il terreno ecc. E' necessaria una collaborazione tra attori di diversi settori e su diverse scale, dalle start up alle grandi multinazionali; dalle università private a quelle pubbliche, dall'industria terrestre all'industria spaziale.

Una presenza umana sostenibile su Marte richiede indipendenza dalle risorse terrestri.

Nel complesso Marte possiede già tutte le risorse necessarie per una sua futura colonizzazione, limitate solo dalla capacità umana di accedervi e saperle sfruttare.



BIBLIOGRAFIA:

- Jennifer L. Heldmann, Margarita M. Marinova, Darlene S.S. Lim, David Wilson, Peter Carrato, Keith Kennedy, Ann Esbeck, Tony Anthony Colaprete, Richard C. Elphic, Janine Captain, Kris Zacny, Leo Stolov, Boleslaw Mellerowicz, Joseph Palmowski, Ali M. Bramson, Nathaniel Putzig, Gareth Morgan, Hanna Sizemore, and Josh Coyan. Mission Architecture Using the SpaceX Starship Vehicle to Enable a Sustained Human Presence on Mars. New Space.Sep 2022.259-273.
- Jeffrey A. Hoffman et al., Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE)—Preparing for human Mars exploration. Sci.Adv.8,eaeabp8636(2022).DOI:10.1126/sciadv.abp8636
- Asif Mahmood, Saira Bano, Ji Haeng Yu, Kew-Ho Lee, High-performance solid oxide electrolysis cell based on ScSZ/GDC (scandia-stabilized zirconia/gadolinium-doped ceria) bi-layered electrolyte and LSCF (lanthanum strontium cobalt ferrite) oxygen electrode, Energy, Volume 90, Part 1, 2015, Pages 344-350, ISSN 0360-5442
- Aziz Nechache, Stéphane Hody, Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 149, 2021, 111322, ISSN 1364-0321
- Haseeb A.S.M.A. (Ed.-in-Chief). (2023). Encyclopedia of Materials: Electronics. Vol. I: Organic Electronics, Electroceramics and Complex Oxides, and Magnetic Materials. Elsevier
- MOXIE (Mars Oxygen ISRU Experiment), Washington University in St. Louis, <https://an.rsl.wustl.edu>
- K. Zacny, P. Chu, V. Vendiola, K. Bywaters, S. Goldman, P. Creekmore, P. Ng, E. P. Seto, J. Quinn, A. Eichenbaum, J. Captain, J. Kleinhenz, A. Colaprete, R. Elphic and TRIDENT team, TRIDENT Drill for VIPER and PRIME1 Missions to the Moon. Honeybee Robotics, Altadena, CA, KAZacny@HoneybeeRobotics.com, NASA Kennedy Space Center, FL, NASA Johnson Space Center, TX, NASA Ames Research Center, CA

- K. Zacny, Z. Mank, M. Buchbinder, D. Sabahi, M. Hecht, N. E. Putzig, P. van Susante, Honeybee Robotics (zacny@honeybeerobotics.com), RedWater: Approach for Mining Water from Mars' Ice Deposits Buried 10s of meters Deep. Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Planetary Science Institute, Michigan Technological University

- Shah Saud Alam, Christopher Depcik, Sindhu Preetham Burugupally, Jared Hobeck, Ethan McDaniel, Thermodynamic modeling of in-situ rocket propellant fabrication on Mars, iScience, Volume 25, Issue 5, 2022, 104323, ISSN 2589-0042,

- Luisa M^a Lara López (coord.), White Book of the CSIC, Vol. 12 "Our future? Space colonization and exploration" ISBN 978-84-00-10760-4. 2021

SITOGRAFIA:

- Perseverance - Preparing the Future, YouTube, uploaded by Reflective Layer, 28/07/2020,
- <https://www.youtube.com/watch?v=wMBr8OGzYxg>
- <https://scienzapertutti.infn.it/php/glossario.php?Testo=conducibilit>
- <https://mars.nasa.gov>
- https://marspedia.org/Sabatier/Water_Electrolysis_Process
- SpaceX, <https://www.space.com/how-feed-one-million-mars-colonists.html>