

スターダストプログラム 月面エネルギーシステム全体に関する 技術課題整理 成果報告

衛星開発小委員会

2026年7月14日

背景・目的

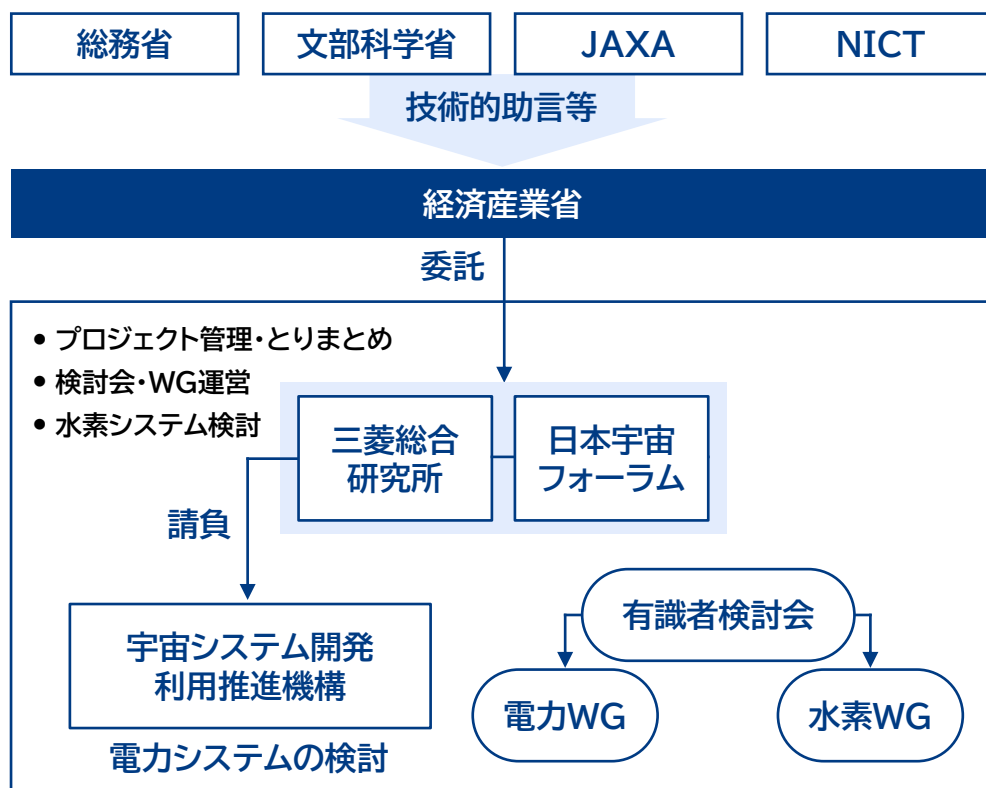
月面における宇宙飛行士の常時滞在やそれに先立つ短期間の有人月面探査、居住施設の設置・建設といったあらゆる活動において、月面での電力確保と安定供給が必要である。

また、月の極域や永久影等のレゴリス土壌には一定量の水氷が存在すると考えられており、地球の資源に依存しない持続的な月面活動を行うには、これらから水を抽出し、月面離着陸機等の燃料(水素・酸素)等として利用することが不可欠と考えられている。

このような状況を踏まえ、将来の月面活動に必要なエネルギー関連技術の開発・高度化においては、①月面エネルギーシステム全体に関する技術課題整理、②月面利用を見据えた水電解技術開発が重要であり、本事業においては①月面エネルギーシステム全体に関する技術課題整理を行った。

実施体制

- 三菱総合研究所と日本宇宙フォーラムのコンソーシアム体制にて実施した。
 - 電力システムの検討は宇宙システム開発利用推進機構に支援業務を請負外注した。
- 有識者検討会の下に関連企業が参加する電力・水素のWGを設置し、多くの企業や大学が参画して具体的検討を行った。



水素WGメンバ

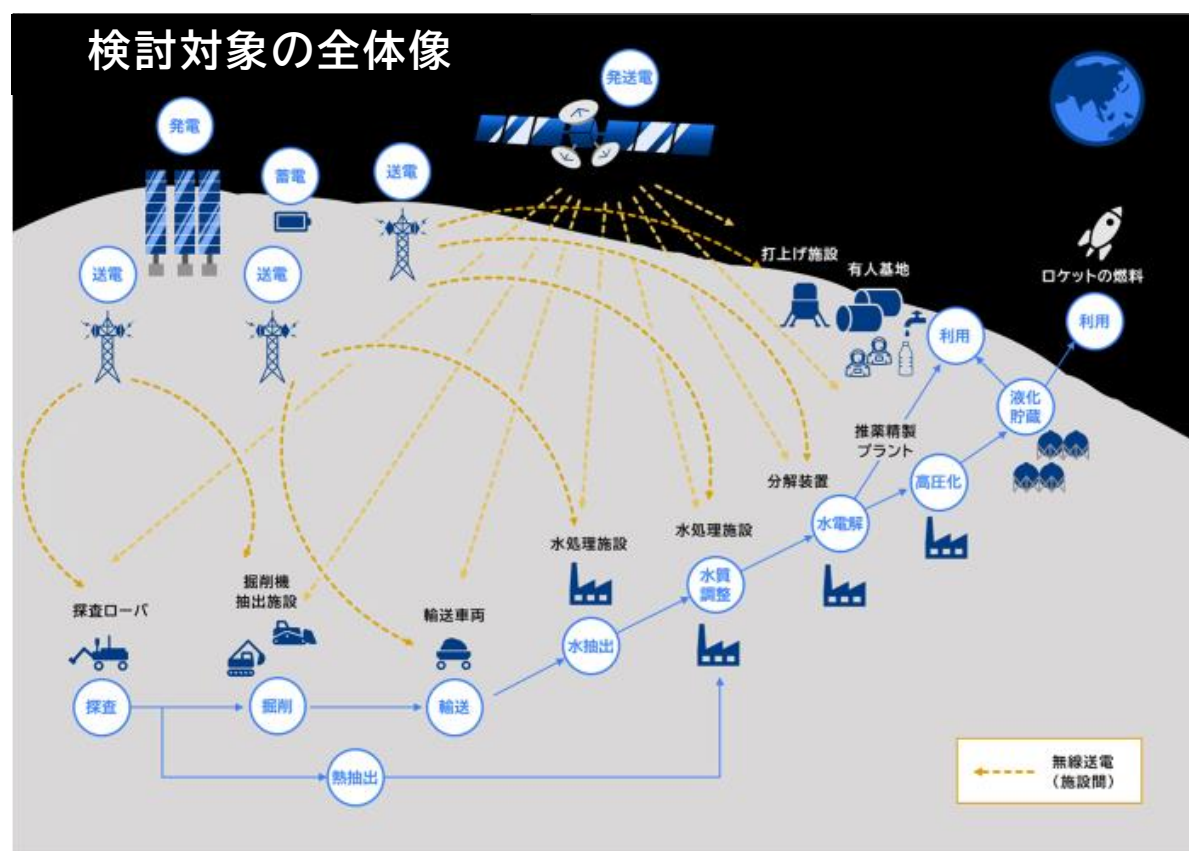
株式会社ispace
株式会社大林組
栗田工業株式会社
高砂熱学工業株式会社
千代田化工建設株式会社
日揮グローバル株式会社
三菱重工業株式会社
横河電機株式会社
東京科学大学

電力WGメンバ(主要メンバのみ)

宇宙システム開発利用推進機構
宇宙航空研究開発機構
株式会社IHIエアロスペース
出光興産株式会社
株式会社大林組
シャープエネルギーソリューションズ株式会社
金沢工業大学
京都大学
電気通信大学
東洋大学
光産業創成大学院大学
早稲田大学

実施項目

- 月面活動におけるエネルギーの確保・供給に必要となる技術の開発・高度化のため、「①月面での発電、蓄電、送電(無線電力送電等)を含む電力供給システム」および「②エネルギーとしての水素の確保・利用のためのシステム」を検討し、実現のために必要となる技術課題を特定・整理した。
- 加えて、「③必要なエネルギーシステムの全体アーキテクチャ」について、「④国内外動向調査」を踏まえた実現可能性を検討し、将来的に開発が必要とされる要素技術等について整理した。また、「⑤成果を用いた国民の理解促進」を行った。



実施結果(サマリ)

水素	エネルギーとしての水素の確保・利用のためのシステム • 探査、掘削、水抽出、水電解、液化、貯蔵といった水素の確保に必要な各プロセスについて、必要となる技術の検討・整理を行うとともに、各プロセスの関係性を具体化した。
電力	月面での発電、蓄電、送電(無線電力送電等)を含む電力供給システム • 発電、蓄電、送電の3つのプロセスで必要となる技術とシステム構成を具体化した。 - 発電: 月面上での発電、軌道上からの発電、太陽光以外の発電の3つの発電方式 - 蓄電: リチウムイオン電池と再生型燃料電池の2種類 - 送電: 無線送電(マイクロ波、レーザー)と有線送電の3つの方式
総合	月面上でのエネルギーシステムの全体アーキテクチャ • 水素の確保・利用のためのシステムおよびその他の月面施設を仮定し、月面での必要電力量(電力需要)を設定するとともに、需給のバランス等を踏まえたエネルギーシステムの全体アーキテクチャについて検討・具体化を行った。 • 加えて、アーキテクチャ実現に必要な実証活動を実証候補項目としてとりまとめた。
その他	国内外動向調査・成果を用いた国民の理解促進 • 公開情報や国際会議参加等を通じて情報収集および成果の発信をするとともに、得られた情報を基に日本の技術レベルについての分析を実施し、日本の強みとなり得る技術分野や研究開発で重視すべき技術課題を明確化した。

実施結果詳細

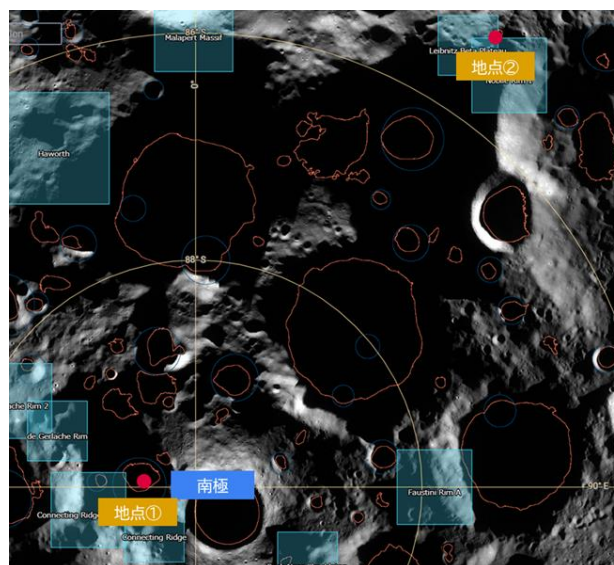
水素 水素に関わる技術課題整理

検討課題	検討状況
① 個別プロセスの 技術検討(R3-R6)	- 各プロセスで必要となる技術の月面での適用可能性について、候補技術の比較検討を実施し、必要となる要素技術開発を明確化 - 各プロセス内もしくは各プロセス間をつなぐために必要となる機能(ミッシングピース)についても検討を実施し、とりまとめ
② 全体アーキテクチャ の検討(R4-R6)	- 月面での人類活動の変遷に係るシナリオ案を検討・具体化 - 水素関連施設配置についてのアーキテクチャを15種類検討し、各アーキテクチャについて、施設建設や物資輸送、電力供給などの観点に基づいて評価 - 理学／工学の両面の条件から開発候補として有力と想定されるクレータを設定し、アーキテクチャ検討を具体化・詳細化
③ 必要電力値の算出 (R4-R6)	- 各施設の必要電力量を各プロセスごとに導出 - 電力WGにインプットすることで各施設への最適な電力アーキテクチャを検討
④ 課題整理(R3-R6)	各年度ごとに将来的に検討すべき課題等の明確化
⑤ 実証候補項目(R6)	将来的に開発が必要と思われる要素技術について、4つのフェーズに分けて各フェーズの月面への必要輸送量、施設配置、必要電力、技術課題等について検討し、実証候補項目としてとりまとめ

水素 関連施設配置のアーキテクチャ検討(1/2)

- 「理学的条件」と「工学的条件」の2種の観点から水抽出を行う候補のクレーター（PSR:永久影）を2か所選定し、具体的なクレーターを想定した施設配置のアーキテクチャを検討・明確化した。

- **理学的条件**: 月表面下の水量、PSRのサイズ、露出している水量、クレーター周辺温度
- **工学的条件**: 着陸(候補)地点、傾斜、日照量



理学的条件



月表面下の水量



露出している水量



PSRサイズ



クレータ周辺の温度

工学的条件



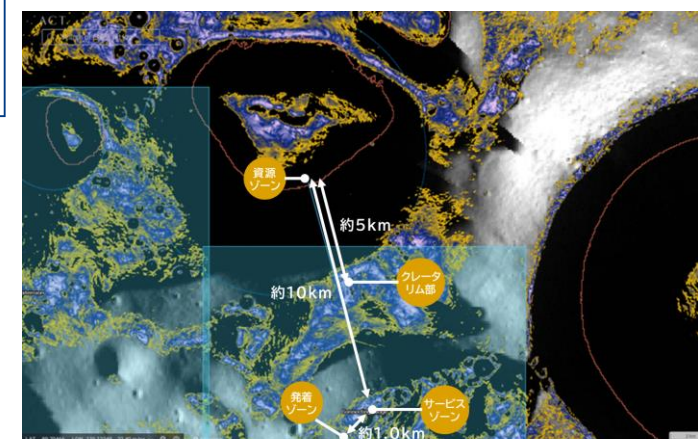
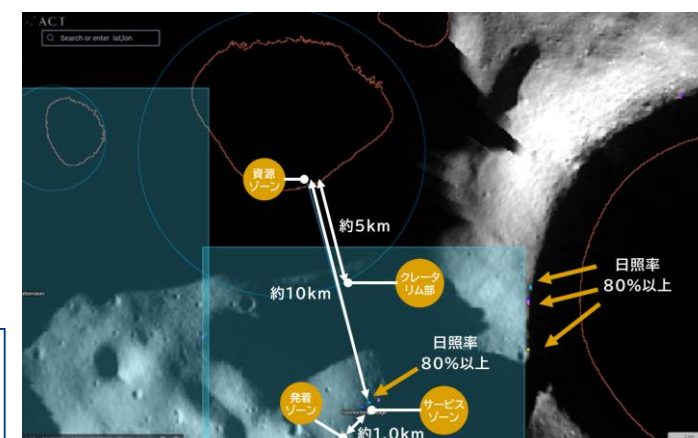
着陸地点



傾斜度



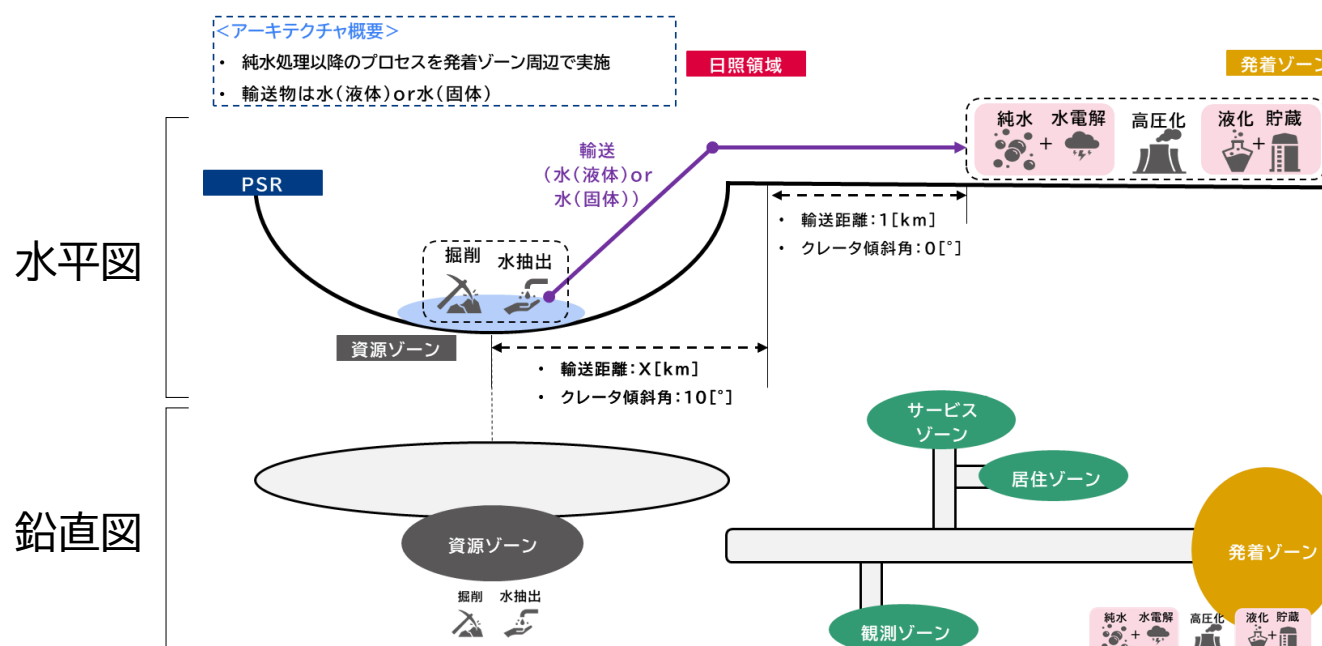
日照量



0[deg] 10[deg]

水素 関連施設配置のアーキテクチャ検討(2/2)

- 選定したクレーターを対象に水素利用のための各施設配置についてのアーキテクチャを検討・具体化した。
- 検討は、以下の条件に基づき実施した。
 - JAXAの国際宇宙探査シナリオ(案)2021に基づき、各ゾーンを設定
 - 各プロセスに必要な施設について、資源ゾーン(PSR内)、リム部、発着ゾーンのいずれかに配置
 - 全て資源ゾーンに配置するパターンから掘削以外は発着ゾーンに配置するパターンまで計15パターンを検討し、それぞれの場合のメリット、デメリット等を整理



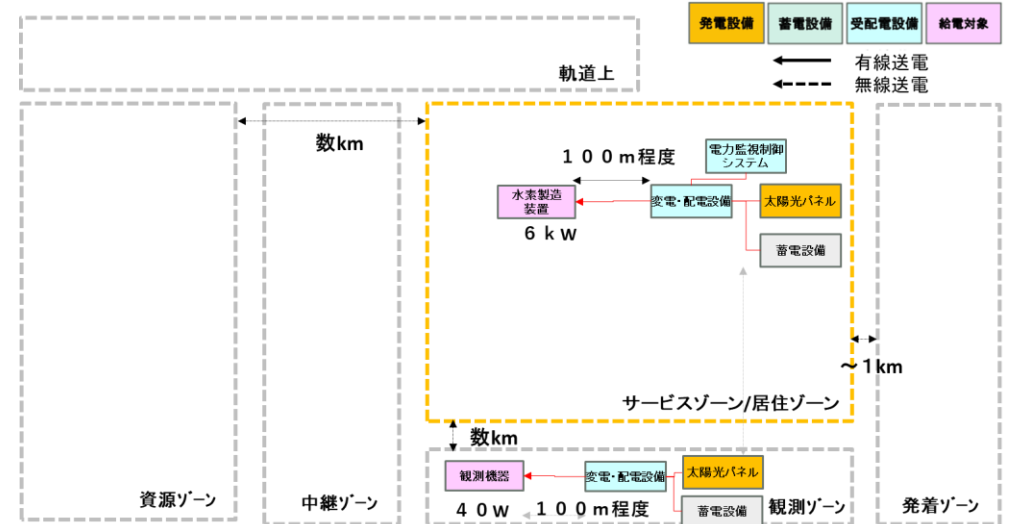
電力 電力に関わる技術課題整理

検討課題	検討状況
① 各システムの 技術検討(R3-R6)	● 月面上発電: 設置場所の設定による発電パターンの検討・具体化、1基当たりの発電タワーの仕様の設定 ● 月軌道上発電: 軌道とコンステレーションの検討、月面受電のレクテナの設置場所、特に消費地との距離等を含むシステム構成・規模の検討・具体化 ● 蓄電: 必要となる蓄電量と蓄電池重量の試算 ● 送電: 規模に応じた最適な送電方式の検討(距離、電力レベル等によるパラメトリックスタディ)、マイクロ波、レーザ、光ファイバ、電線による送電の課題明確化
② 全体アーキ テクチャの検討 (R4-R6)	● 電力関連施設に関する全体アーキテクチャの検討・具体化 ● 発電地点候補となった地点と送電システムを組み合わせた給電方法の検討・評価 ● 発電時に生じる「熱」の水素関連施設での活用可能性の評価
③ 必要電力の供給 方法検討(R4-R6)	● アーキテクチャおよび水素WGからの各地点・施設への電力要求量に応じた電力供給方法の検討・具体化
④ 課題整理(R3-R6)	● 各年度ごとに将来的に検討すべき課題の整理・明確化
⑤ 実証候補項目(R6)	● 将来的に開発が必要と思われる要素技術について、4つのフェーズに分けて各フェーズの月面への必要輸送量、施設配置、必要電力、技術課題等について検討し、実証候補項目としてとりまとめ

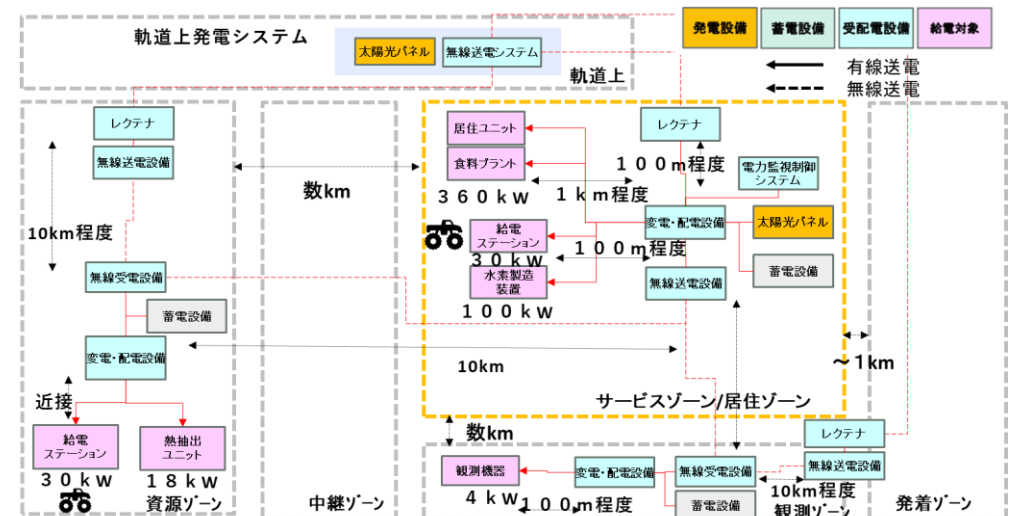
電力 関連施設配置のアーキテクチャ検討

- 電力供給システムの施設配置についてのアーキテクチャを検討・具体化した。
- 水素と同様にJAXAの国際宇宙探査シナリオ(案)2021に基づき各ゾーンを設定
- 水素WGで検討した各ゾーンでの必要電力量(電力需要)を設定
 - 水素の確保・利用のためのシステムおよびその他の月面施設を仮定し、それぞれのゾーンでの必要電力量を試算
- 4つのフェーズを設定し、各ゾーンでの電力需要を基に、各フェーズでの需要を満たす電力供給システムのアーキテクチャを検討・具体化した。

単体実証フェーズ(2030年頃を想定)

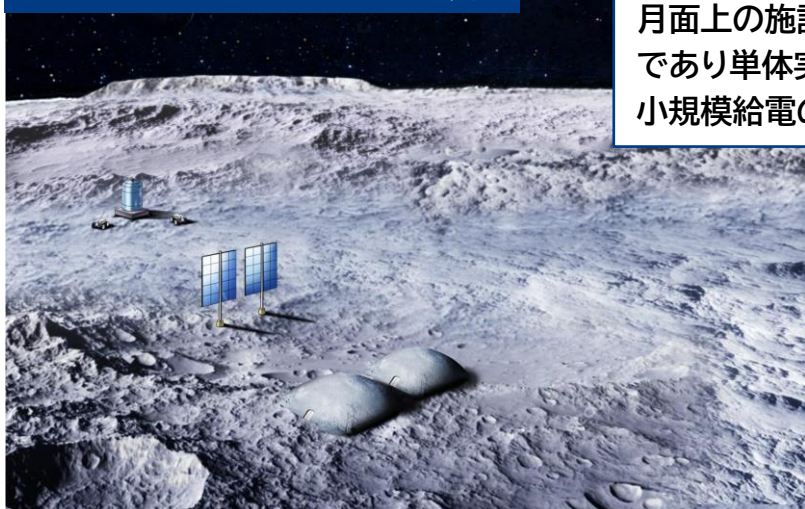


本格稼働フェーズ(2040年頃を想定)



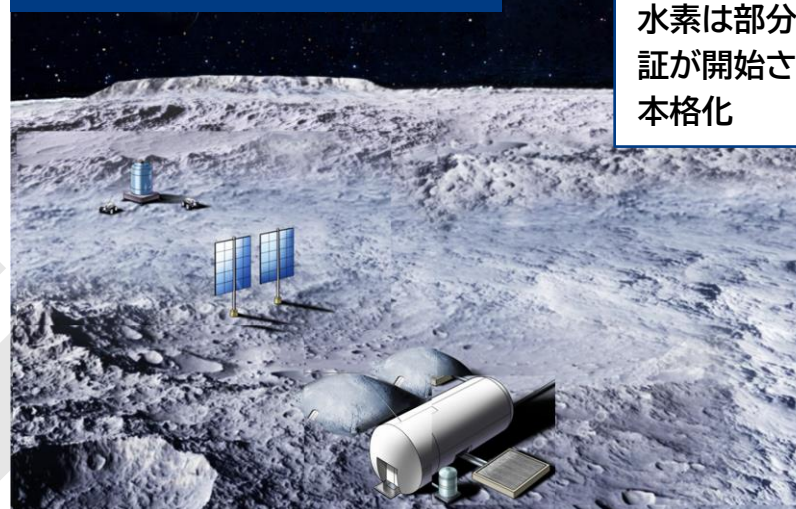
総合 水素・電力に関わる月面開発の進捗イメージ

Phase0(2030年頃)



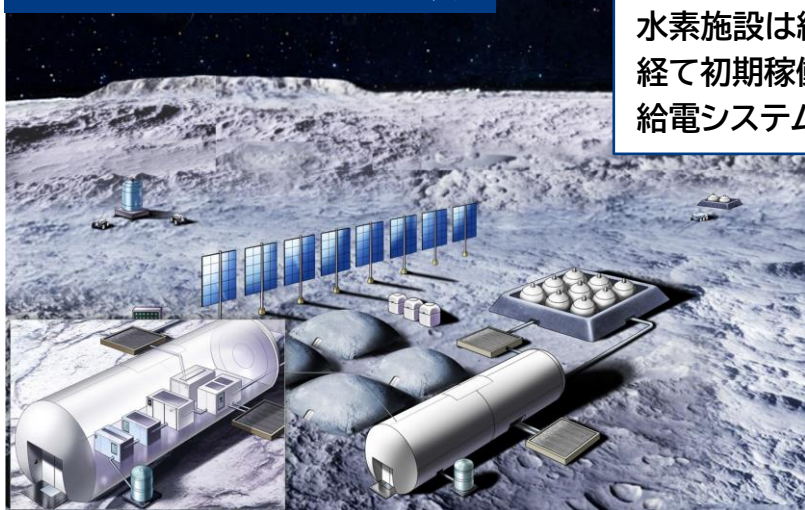
月面上の施設は限定的であり単体実証および小規模給電のみ実施

Phase1(-2035年頃)



水素は部分的な統合実証が開始され、給電も本格化

Phase2(-2040年頃)



水素施設は統合実証を経て初期稼働を開始し、給電システム大規模化

Phase3(-2045年頃)



PSR内での掘削も本格稼働し、移動体への給電も開始

総合 実証候補項目のとりまとめ

- 水素・電力のそれぞれのアーキテクチャ検討結果を踏まえ、アーキテクチャ実現のために将来的に開発が必要と思われる要素技術等について整理した。
- 加えて、各フェーズの月面への必要輸送量、施設配置、必要電力、技術課題等について検討し、実証候補項目としてとりまとめた。

水素関連の実証の推移

	フェーズ0:単体実証	フェーズ1:部分統合実証	フェーズ2:統合実証/初期稼働	フェーズ3:本格稼働
	2030年頃	2030年～2035年頃	2035年～2040年頃	2040年頃～
水探索	サービスゾーンでの実証に必要な項目(水の状態・量・分布)の確認 【2030年以前に2STEPで実施】	資源ゾーンでの実証に必要な項目(水の状態・量・分布など)の確認 【探索実証(0)】		
水抽出	サービスゾーンで地表近傍のレゴリスから現地で水を調達(熱抽出)し、タンクへの貯蔵を確認 【実証(0-①)】	サービスゾーンで地下レゴリスから現地で水を調達(熱抽出)し、タンクへの貯蔵を確認 【実証(1-①)】	資源ゾーンで動作及び保管確認 サービスゾーンでレゴリスから現地で水を調達(フェーズ1よりも多量処理) 【実証(2-①a)】	資源ゾーンでレゴリスから現地で水を調達及び保管確認 【実証(3)】
輸送(資源ゾーン⇔サービスゾーン)		AGVIに係る実証:サービスゾーン⇔資源ゾーン間の往復走破 長距離輸送インフラに係る施行FS 【輸送実証(1)】	水貯蔵タンク搭載のローバ(複数台)を用いて調達した水をPSR外へ輸送 長距離輸送インフラの部分導入 【輸送実証(2)】	水貯蔵タンク搭載のローバによるサービスゾーンまでの輸送の確認 長距離輸送インフラ構築本格着手 【輸送実証(2)】
純水処理		現地で調達した水を用いて純水処理→水素液化処理の確認(水抽出仮定でタンクに補充したレゴリス水を利用) 【実証(1-②)】	与圧区内で確保した現地で調達した水を用いて純水処理→水素液化処理の確認 上記と連結して曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(処理量の増加) 【実証(2-①b)】	与圧区内で確保した現地で調達した水を用いて純水処理→水素液化の確認(処理量の増加) 上記と連結して曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(処理量の増加) 【実証(2-②)】
電気分解				
高圧化				
水素/酸素液化				
水素/酸素貯蔵				
輸送(サービスゾーン⇔発着ゾーン)		液体水素/酸素貯蔵タンク搭載のローバによる物質輸送の確認 【実証(2-②)】	液体水素/酸素貯蔵タンク搭載のローバによる輸送の確認(輸送量増加による対応性確認) 【実証(2-②)】	液体水素/酸素貯蔵タンク搭載のローバによる輸送の確認(輸送量増加による対応性確認) 【実証(2-②)】
水素/酸素貯蔵		発着ゾーンの曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(貯蔵量増加の対応性確認) 【実証(2-②)】	発着ゾーンの曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(貯蔵量増加の対応性確認) 【実証(2-②)】	発着ゾーンの曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(貯蔵量増加の対応性確認) 【実証(2-②)】
充填				
統合システム	運転制御	情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立 【実証共通】	推業プラント設備関連の運転制御(制御範囲拡大) 【実証共通】	推業プラント設備関連の運転制御(制御範囲拡大) 【実証共通】
付帯設備		水保管のためのバッファタンク ・ 水及び液体水素/酸素保管のためのバッファタンク ・ 与圧区画の熱管理設備(範囲拡大)	水及び液体水素/酸素保管のためのバッファタンク ・ 与圧区画の熱管理設備(範囲拡大)	水及び液体水素/酸素保管のためのバッファタンク ・ 与圧区画の熱管理設備(範囲拡大)

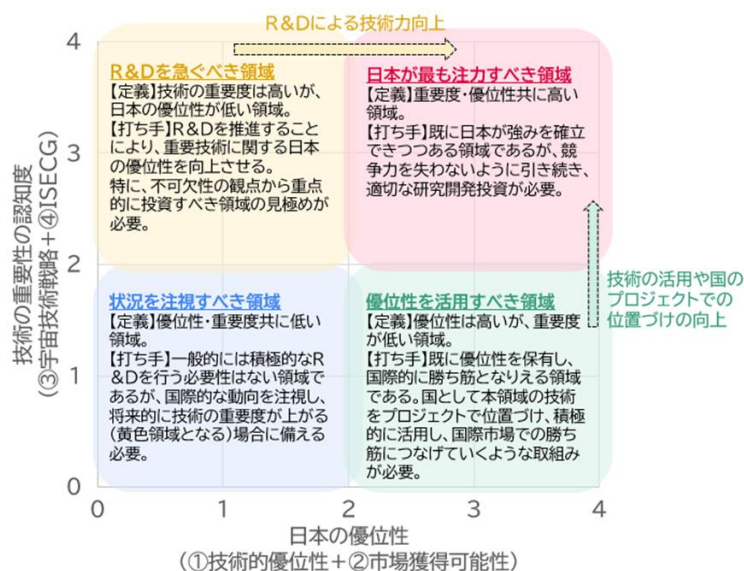
水素関連の実証候補項目例

項目	実証詳細
実証目的・必要性	- 目的: ①レゴリス抽出水を使用した純水処理設備と水電解設備の利用可能性及び両設備間のI/F確認 ②推業プラント関連設備に係る運転制御の確認 - 月面実証の必要性: 実際のレゴリス抽出水を純水化する実証であり、月面で実証する必要性は高い。また、与圧区画に設置する各月面設備の操作監視を行うため、設置場所による実証が必要。
実証期間	・ 1年間(～2035年頃)
実証候補項目(実証目標値)	【プラント設備】 ※表層近辺の水を簡易的に抽出する器具を別途検討の必要あり - 純水処理: ①フィルター洗浄機構や閉塞フィルターの自動切替機能を含むレゴリス粒子除去システムの動作確認 ②揮発性物質の除去処理機能の動作確認(処理量 4.8 L/h、純水製造量 3.8 L/h、電気分解装置に 0.8 L/hで供給、装置立上げに使用する模擬レゴリス抽出水量 3～5 L) - 水電解: ①曝露環境を含む月面環境でも信頼性がある「純水循環用ポンプ」「純水貯蔵タンク(バッファタンク)」「除湿器」等をスペックインした月面水電解装置の動作確認(処理量として1Nm³/h製造)
各ゾーンへの電力	【サービスゾーンへの電力量】 ⇒ 計 43[kW] - 推業プラントへの供給電力: 1(純水処理) + 32(水電解) [kW] - 運転制御: 0.5 [kW]
月面への必要輸送量	【プラント設備】 - 約1,100 [kg] (100[kg](純水処理) + 1,000[kg](水電解))

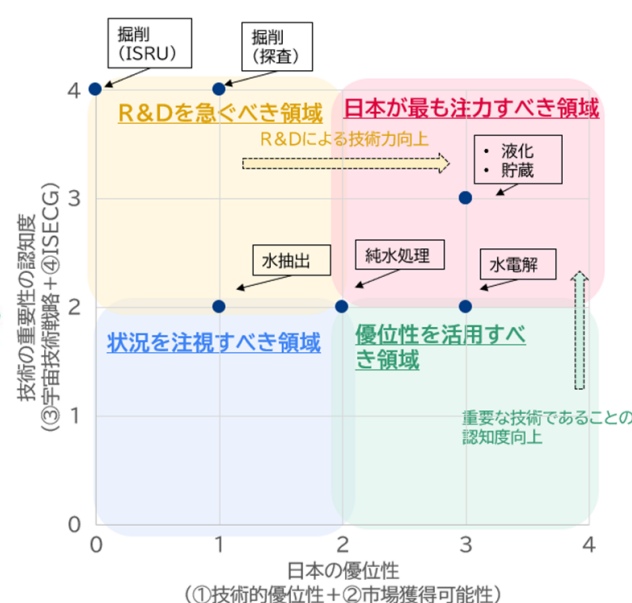
その他 日本の技術レベルについての分析

- 日米欧の水素・電力に関わる研究開発状況について各プロセスごとに比較・整理・分析を実施した。
- 加えて「日本の優位性(①技術的優位性+②市場獲得可能性)」と「技術の重要性の認知度(③宇宙技術戦略+④ISECG国際宇宙探査ロードマップ)」の2軸のマトリックス表で技術評価結果を4領域に整理・分析し、日本の強みとなり得る技術分野や研究開発で重視すべき技術課題を明確化した。

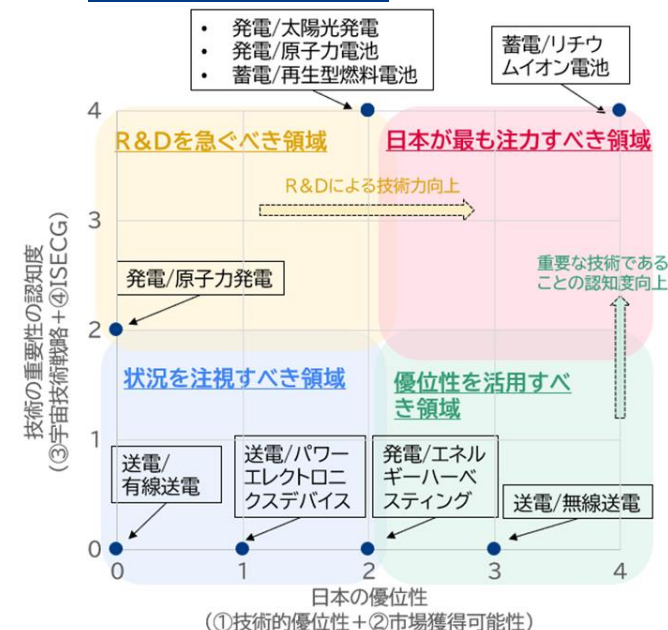
技術評価の定義



水素関連技術



電力関連技術



まとめ

本事業は令和3年度にスタートし、4年度をかけて月面でのエネルギー関連技術として、「水素」と「電力」についての技術課題の整理を実施した。

「水素」、「電力」とも月面での活用に向けて必要となる要素技術についての技術課題の整理を行うとともに、それぞれのシステムを実現するための施設配置についてのアーキテクチャの検討・具体化を実施した。

加えて、月面での実証が本格化すると想定される2030年以降を4つのフェーズに分け、各フェーズでの実施事項と必要輸送量、施設配置、必要電力、技術課題を整理・具体化し、実証候補項目としてとりまとめた。

その他、日本の技術レベルについての分析を行い、日本の強みとなり得る技術分野や研究開発で重視すべき技術課題を明確化した。

本事業による将来の月面開発に必要なエネルギー関連技術の課題整理結果は、月面での実証、そして実装を検討していくベースラインとなりえるものである。既に政府での各種検討にインプットとして活用されたが、エネルギーは月面開発に不可欠な要素であり、今後も様々な場面で活用されることを期待したい。

未来を問い続け、変革を先駆ける

MRI 三菱総合研究所