【小特集　宇宙への挑戦】

月面実証用水電解装置の開発※

津村柊吾・加藤敦史・馬場大輔・内田浩基
武田健太郎・岡堯志[*1]・森田健[*2]

Development of Water Electrolyzer for Technological Demonstration on the Moon

Shugo Tsumura・Atsushi Kato・Daisuke Baba・Hiroki Uchida
Kentaro Takeda・Takayuki Oka・Ken Morita

我々は月面での技術実証を目的とした水の電気分解装置を開発した。この装置は我々が地上向けに保有する固体高分子形の水電解技術を活用し、月面環境や宇宙機の制約に適用させたものである。月面環境での水電解技術を確立することができれば、月での存在が示唆されている水資源 [2]を利用した推薬生成の主要な要素技術として、今後の持続的な月惑星探査へ大きく貢献すると考えられる。月面実証用水電解装置は、株式会社 ispace による民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」Mission 2 の月着陸機に搭載され [3]、2025 年の月面運用を計画している。

1. はじめに

近年、月に水資源の存在可能性が示された [2] ことから月面探査・開発が世界的に注目を集めており、我が国においても、持続的な月面探査の実現に向けて、月面のレゴリスから抽出した水から推薬（水素および酸素）を製造する月面推薬生成プラントが構想されている [4]。国際宇宙探査の戦略を各国の宇宙機関間で調整するグループ (International Space Exploration Coordination Group: ISECG) が作るシナリオの中でも月探査の主要な目標として推薬を年間 50 t 現地製造することを掲げており [5]、今後ますます月面推薬生成に関する技術開発が活発になると考えられる。

図 1 に月面の推薬生成における水利用プロセスを示す。ステップ 4 に示されている水の電気分解（以下「水電解」）は、月面の推薬生成において主要なプロセスの 1 つであり、また有人活動における酸素供給や還元剤 (水素) 生成のプロセスとしても重要である。

そこで我々は、保有する地上用の水電解技術を活用し、月面での技術実証を目的とした水電解装置を開発した。装置は、株式会社 ispace　(以下「ispace」) による民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」Mission 2 に貨物 (以下、「ペイロード」) として搭載され [2]、2025 年の月面運用を計画している。本開発は、フロンティアビジネス創出活動の一環として取り組む宇宙事業開発の一つであり、2019 年 12 月に ispace との HAKUTO-R のコーポレートパートナー契約を締結したことを端に発して 2020 年より開発プロジェクトを発足、初期検討を経て 2021 年 6 月より基本設計を開始した。

本稿では、開発した水電解装置の概要と開発状況, 運用計画について述べる。

※ 本論文は、第 68 回宇宙科学技術連合講演会の講演論文 [1]を加筆修正したものである。

*1 エンジニアリング事業部、*2 本社 経営企画部

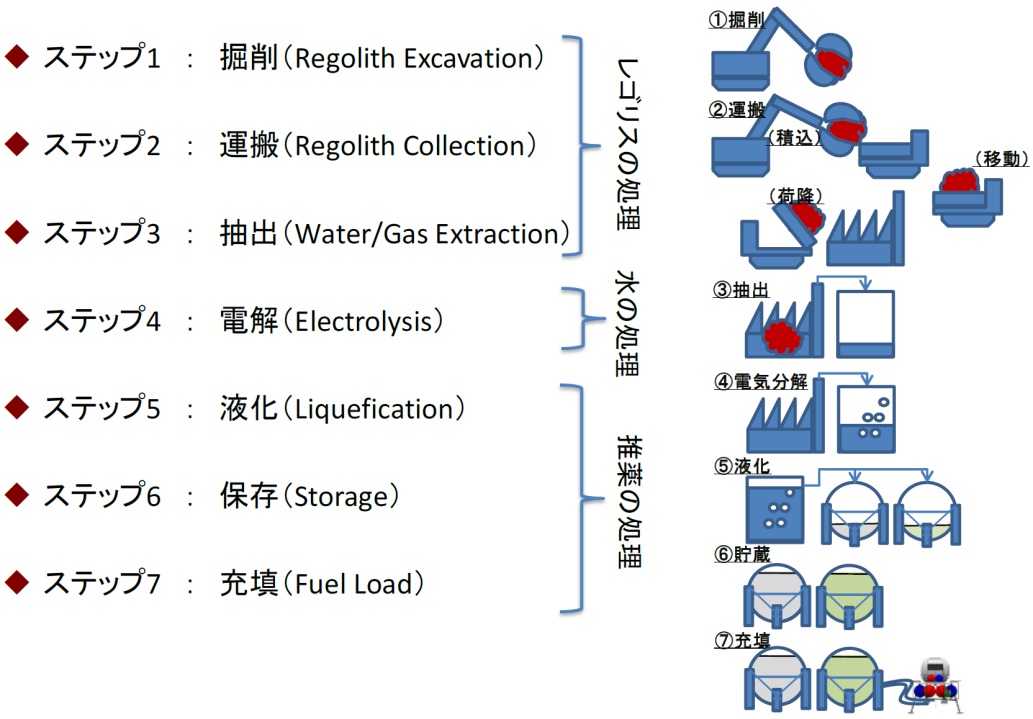

図 1 月面の水利用プロセス [4)]

2. ミッション概要

月面実証用水電解装置 (Hydro Oxy Creator: HOC) は、民間月面探査プログラム Mission 2 （以下「着陸機」）のペイロードであり、月面において水素と酸素を生成する水電解の技術実証ミッション（以下「本ミッション」）を担う。電気分解技術の他の実証事例として、軌道上では国際宇宙ステーションの酸素生成装置 (Elektron、Oxygen Generation System: OGS) が水電解を実施しており [6)]、地球以外の重力天体では火星探査車 (Perseverance) に搭載された火星酸素資源利用実験装置 (Mars Oxygen ISRU Experiment: MOXIE) が火星で二酸化炭素の電気分解を実施しているが [7)]、地球以外の重力天体での水電解は世界初の試みである。水電解は、月の水資源を活用するための重要な要素技術であり、本ミッションの実施により得られた成果は将来的な月面推薬プラント等の実現に寄与すると考えられる。

写真 1 に HOC フライトモデル (FM) の外観を、**表 1** に HOC の主要諸元を示す。

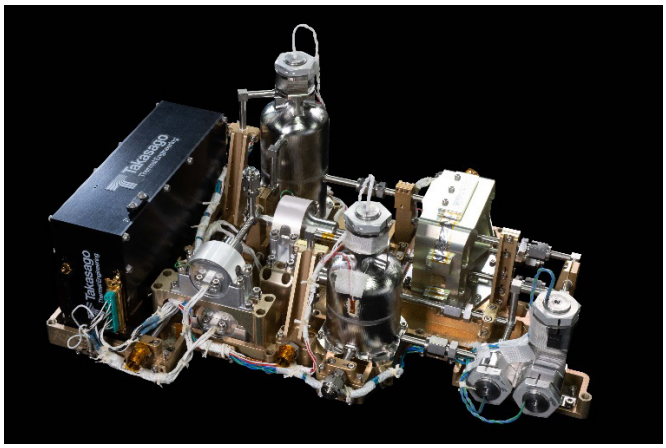

写真 1 HOC フライトモデル

表1 HOC 主要諸元

月着陸機	民間月面探査プログラム Mission 2
HOC 外形寸法	約 L: 300 mm×W: 440 mm ×H: 200 mm
HOC 質量	約 8 kg
ミッション期間	月着陸後～月の日の入り前（最大 14 日）

2.1 ミッション目標

本ミッションの技術実証目標を**表 2** に示す。目標のうち、①は本ミッションの根源的な要求に基づくミニマム目標であり、②および③は、将来的な貯蔵や信頼性等の観点から達成すべき機能および性能の要求に基づき定めた目標である。

表 2 技術実証目標

①	月面で水素と酸素を生成する
②	生成した水素および酸素を圧縮する
③	複数回の運転において上記を実証する

3. 水電解装置概要

図 2 に HOC の構成図を、**図 3** に HOC の運転データのイメージ示す。HOC は、通信系、制御・データ処理系、電源系、構造系、反応系、水素貯蔵系および酸素貯蔵系から構成されており、反応系の水電解セルに電圧を印加することで、装置内の水を電気分解し水素と酸素を生成する。反応系、水素貯蔵系および酸素貯蔵系で構成される密閉された系での水素、酸素ガスの発生により各系内の圧力を上昇させ、目標の生成圧力に到達させる。目標圧力に到達したら、間欠的に排気を行うことで各系内の圧力を一定の範囲に保った状態で運転することが可能である。加圧された水素および酸素ガスは、最終的に系外に排出して 1 サイクルの運転を終了する。以上の運転サイクルを繰り返すことにより、HOC は月面での技術実証目標の実現を目指す。

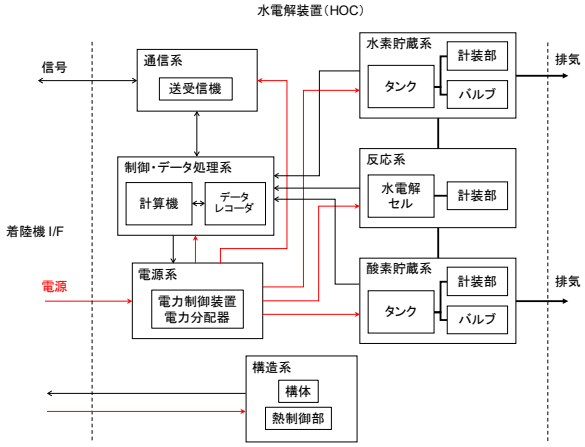

図 2 HOC 構成図

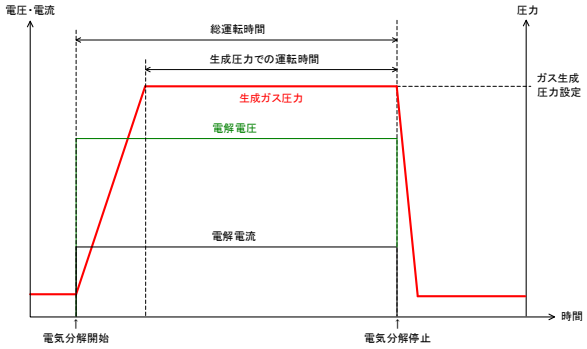

図 3 HOC の代表的な運転データのイメージ

3.1 水電解の方式・構成

HOC の水電解方式には固体高分子 (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) 形を採用した。PEM 形水電解は、水素イオン（プロトン、H^+）伝導性の高い高分子膜を用いた方式で、他の方式と比較して耐久性が高く、動作温度が 100℃以下と低温で動作する特徴がある [8]。この動作温度範囲の特徴により、HOC ではコンポーネント間の断熱やヒータの削減を可能とし、熱制御系や構造系を簡素化することで、質量や電力等の制約に対して適合するシステムを実現している。

図 4 に水電解セルの構造と反応の原理を模式的に示す。反応を担う PEM と電極触媒の接合体（膜電極接合体）の両側に、電子の授受と流体拡散を担う集電体、反応流体（H_2，O_2，H_2O）の流路形成を担うセパレータを配置して水電解セルを構成している。水電解反応では、反応流体流路の陽極側に純水を供給し、水電解セルに電力を供給すると、陽極の電極上で純水が電気分解され、陰極側に水素が、陽極側に酸素が発生する。

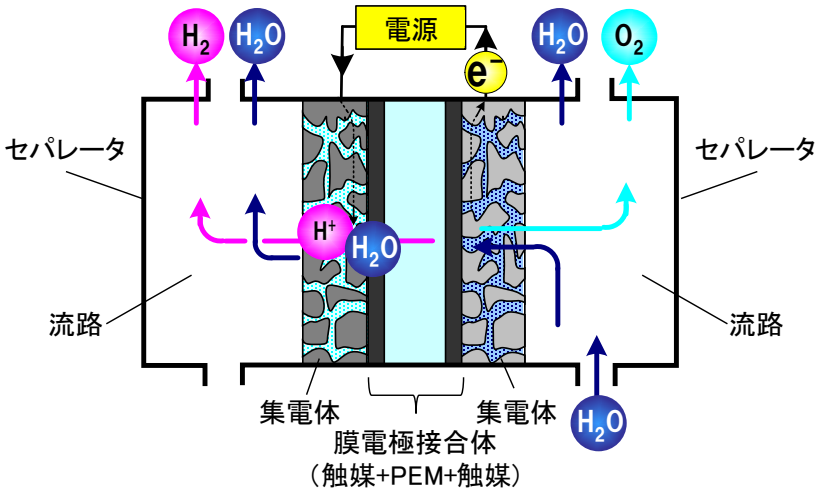

図 4 PEM 形水電解セルの構造と反応の原理

4. PEM 形水電解装置の宇宙適用における課題

HOC の開発では、地上向けに開発された PEM 形水電解装置をベースに宇宙適用における課題抽出を行った。以下に識別された代表的な課題を示す。

- 装置の小型軽量化
- 固体高分子膜の耐環境性
- 水電解セルの振動耐性
- 特殊重力環境（1/6G、微小重力）での気液分離
- 水素および酸素生成の検知
- その他着陸機搭載 I/F 条件、宇宙特殊環境条件への適合

本稿では、これら開発課題への対策や取り組みとして、以下 2 点について紹介する。

4.1 固体高分子膜（PEM）の耐環境性

HOC では、PEM にナフィオン膜を採用している。ナフィオンは、放射線への耐久性が低いことで知られるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) [9]を骨格に持つため、将来的な長期的な運用を想定した場合、放射線による機械強度の劣化が課題となる可能性がある。また電気分解の性能に直結するイオン交換能についてもその影響を考慮する必要がある。

この対策として HOC では、ナフィオンの放射線照射よる機械強度の劣化は酸素の存在下で促進されることに着目し、放射線への暴露時間が最も長い航行中の劣化を抑制するために、水電解セルの両極を脱酸処理した超純水で一様に浸漬した状態で維持することにした。ナフィオンは、無酸素の浸漬状態であれば 1600 kGy 超の耐久性を見込めるとされており (**図 5**) [10]、HOC の PEM はそのばく露環境に対して 10 年間で 80%以上の強度を維持することができると見込んでいる。

イオン交換能については、線量による劣化は緩やかであり、1600kGy において 2 割程度のイオン交換能の低下とされているため (**図 6**) [10]、長期間の運用においても十分に性能を維持できると考えられる。

一方で、本ミッションは前例のない試みであるため、放射線等の要因に関わらず、想定以上に PEM の劣化が生じる可能性がある。そのような場合においてもミッションを継続するための対策として、HOC では負荷である電解電流値を任意の値に低減できる制御モードを電源系に実装した。

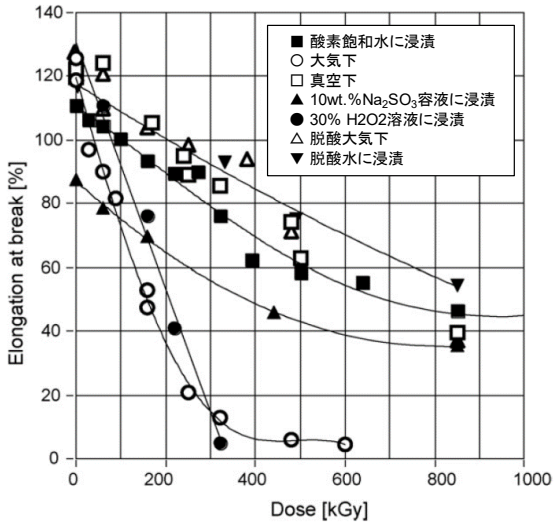

図 5 室温でのナフィオン™の放射線照射量に対する破断伸び [10)]

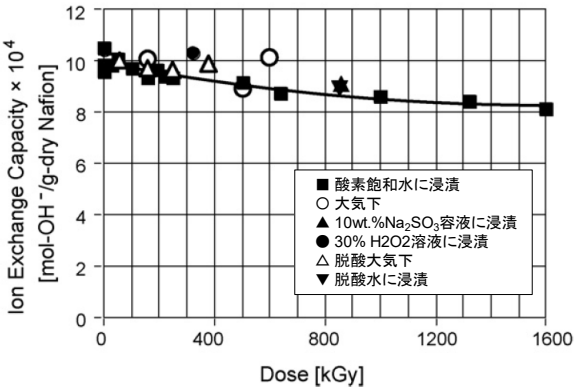

図 6 室温でのナフィオン™の放射線照射量に対するイオン交換容量 [10)]

4.2 水電解セルの振動耐性

水電解セルの開発課題の 1 つとして、打上げ時の振動環境に対する耐性が挙げられる。そこで水電解セルの試作モデルを用いて振動試験を実施し、振動負荷が電解性能に及ぼす影響を調査した。**図 7** に水電解セル初期試作モデル (BBM-1) の振動試験前後の電解効率を示す。BBM-1 の定格電流での電解効率は、生成ガス圧力 P_{we} = 0.1MPa で加振前 87.7%に対して加振後 84.6%、P_{we} = 0.9MPa で加振前 86.3%に対して加振後 81.6%と低下した。なお、ここでの電解効率は、作動電圧と熱的平衡電圧の比である。水電解セルは 3.1 項で述べたとおり複数の膜や部材から成る積層構造であり、面圧の均一性等、部品の積層状態が電解性能に大きく影響する。そのため振動負荷が水電解セルの積層状態を変位させ、電解性能の低下を引き起こしたと考えられる。

改良試作モデル (BBM-2) では、構造および内部部品に積層状態の変位を抑制するための改良を施し、改めて振動試験を実施した。試験の結果、BBM-2 の定格電流での電解効率は、常圧運転時 (P_{we} = 0.1MPa) で加振前 85.1%に対して加振後 84.9%、加圧運転時 (P_{we} = 0.9MPa) で加振前 83.9%に対して加振後 83.6%であり、効率の低下はみられなかった (**図 8**)。また複数回の振動試験を連続で実施し、累積的な負荷を与えた場合も同様に性能低下の傾向はみられなかった。

詳細設計では BBM-2 での改良に基づいてエンジニアリングモデル (EM) を設計、製造し、最大予測環境を上回る負荷にて振動試験を実施した。試験の結果、水電解セルの電解性能は加振の前後で変化がなく、かつ他の機能性能についても要求を満たすことを確認した。また FM についてもコンポーネント受入試験を実施しており、全ての要求を満たすことを確認した。**写真 2** に FM の試験実施の様子を示す。

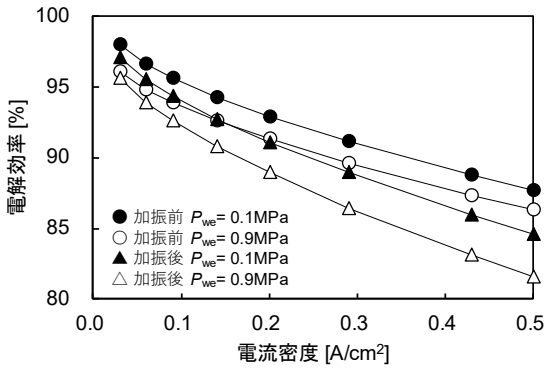

図 7 水電解セル（BBM-1）加振前後の電解効率

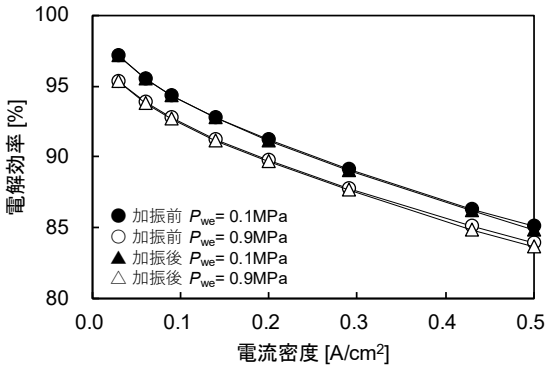

図 8 水電解セル（BBM-2）加振前後の電解効率

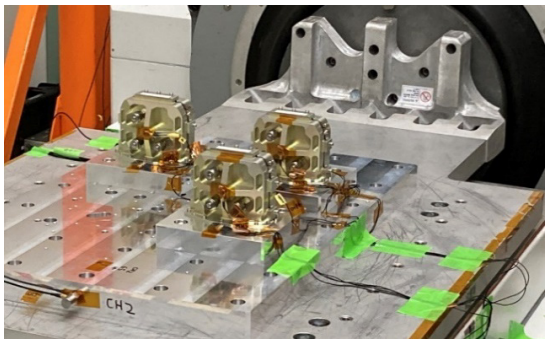

写真 2 水電解セル（FM）振動試験

5. 開発状況

HOC は 2022 年 6 月に基本設計審査[*3]、2023 年 3 月に詳細設計審査[*4] を通過、FM の製造および試験を経て 2024 年 1 月に出荷前審査[*5] を通過した。2024 年 3 月には着陸機へ搭載され、2024 年 8 月に着陸機の統合試験も完了している。着陸機は 2025 年 1 月 15 日に米国ケネディ宇宙センターより打ち上げられ、2025 年 2 月現在月～地球間の軌道を航行中である。

本項では 2023 年 5 月～同年 11 月に実施した HOC の FM の受入試験の代表的な実施内容について、その結果概要を述べる。

5.1 機能性能試験

HOC は、地上向けに開発された水電解装置を元に設計、製作されている。これまでの設計段階において、BBM や EM を用いて小型化や宇宙適用の改修、新規に製作された電子回路部との組み合わせ後も地上向けの既開発品と同等の性能を得られること、また環境試験の前後で機能性能の劣化がないことを試験検証した。

5.2 環境試験

HOC の環境試験として、熱真空試験、振動試験を実施した。**写真 3** に熱真空試験、**写真 4** に振動試験の実施の様子を示す。

HOC の水電解方式である PEM 形水電解は、液体の水を電気分解する性質上、水を液相に保てる温度環境条件を維持する必要がある。また固体高分子膜のイオン交換能は温度依存性が大きく、高温／低温ケースそれぞれの電解性能が仕様を満たすことを確認する必要がある。熱真空試験では、熱制御性能と電解性能、

---

*3 契約および技術仕様の各項目を満足する製品の実現性などを検討し、詳細設計に移行できることを確認する設計審査。
*4 製品の詳細な設計内容が契約・技術仕様の要求事項を満足し、フライトモデル製造に移行できることを確認する設計審査。
*5 製品の詳細な設計および製造内容が、契約・技術仕様の要求事項を満足し、引き渡しに問題がないことを確認する審査。

その他機能性能の評価を実施し、その全てで仕様を満たすことを確認した。また振動試験では、各加振の前後で構造や機能性能に劣化または不具合が無いことを確認した。

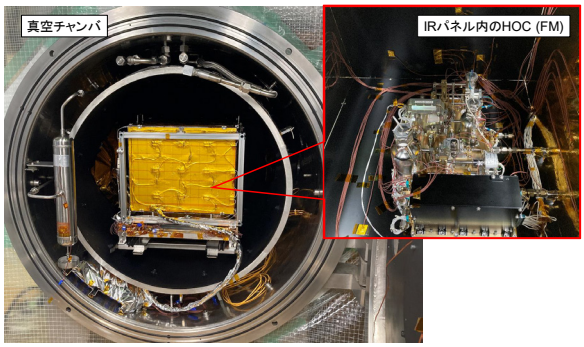

写真 3 HOC (FM) 熱真空試験

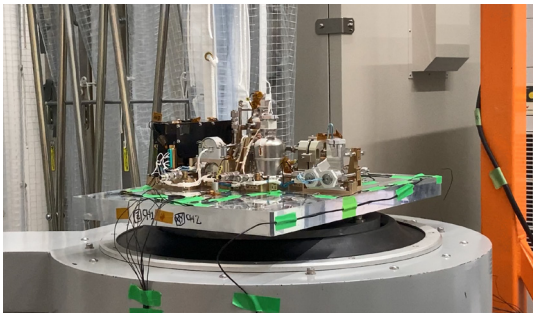

写真 4 HOC (FM) 振動試験

5.3 噛み合わせ試験

HOC は、着陸機との電気 I/F を介して電力の供給を受け、地上との通信も着陸機との通信 I/F を介してコマンドの送信、テレメトリの受信を行うため、各 I/F の噛み合わせ試験を実施した。噛み合わせ試験は、BBM、EM で実施した後、FM でも同様の試験を行い各 I/F の適合に問題ないことを確認した。

6. 運用計画

HOC 運用は、航行フェーズ、初期運用フェーズ、実証運用フェーズの 3 つに大別されている。本項では各フェーズの実施事項について概要を述べる。

6.1 航行フェーズ

打上機から分離した着陸機が通信を確立した後、航行フェーズに入る。航行フェーズでは、HOC のヘルスチェック、環境モニタ等を行う。**図 9** に Mission 1 着陸機の軌道を示す。着陸機は、小さい増速量で軌道投入できる遷移軌道を用いることから、打ち上げから月着陸まで 4〜5 か月の期間を要する [11]。そのためヘルスチェック等は着陸機が月軌道へ到着し、着陸シーケンスが開始されるまで定期的に実施する。

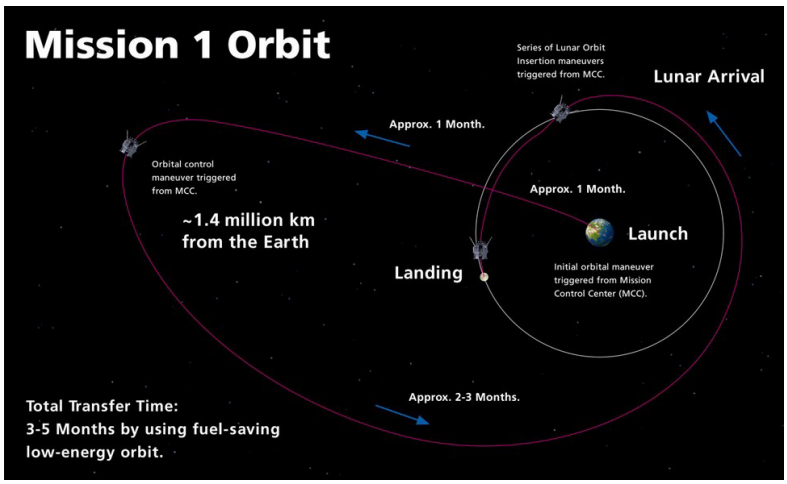

図 9 Mission 1 着陸機の軌道 [10]

6.2 初期運用フェーズ

着陸機の月面着陸後、初期運用フェーズに入る。初期運用フェーズでは、まず HOC の初期状態の確認を行い、次いでアクチュエータ (バルブ等) の操作により保管状態の解除を行う。その後、定格よりも低い電解電流条件にて水電解運転を短時間実施し、初期性能データを取得、確認する。このフェーズで技術実証目標①（**表 2** 参照）の達成を目指す。

6.3 定常運用フェーズ

初期運用フェーズ完了後、定常運用フェーズに入る。定常運用フェーズでは、着陸機側と取り決めた運用スケジュールに基づき、複数の運用スロットを設けており、各運用スロットでそれぞれ電解電流や水素、酸素の生成圧力、電解時間等の運転条件を変更して水電解の実証を試みる。本フェーズで技術実証目標②、③（**表 2** 参照）の達成を目指す。なお、HOC の水電解運転は原則として、リアルタイムモニタリング可能な地上局からの可視時間帯にのみ実施する。非可視時間帯のデータはデータレコーダに保存し、次の可視時間にまとめてダウンリンクする。

7. おわりに

本稿では、月面実証用水電解装置 (HOC) の開発状況、運用計画について紹介した。持続的な月面活動には現地資源利用が不可欠であり、水の電気分解は月面水資源を利用した水素および酸素製造の要素技術として重要である。また今後、非宇宙分野の民間企業の参入と地上技術の応用がますます重要になると考えており、高砂熱学工業も本ミッションを端緒として月面探査・開発の推進に貢献していく所存である。引き続き実証成功に向けて取り組んでいく。

謝 辞

本成果は、経済産業省が実施する「令和 3 年度宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（水電解技術開発））」の結果、得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

文　献

1) 津村ら: 月面実証用水電解装置の開発, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, (2024).
2) S. Li et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS, 115 (36) 8907-8912, (2018).
3) 加藤敦史, 森田健: フロンティアビジネス創出への挑戦-宇宙事業に関する取り組み-, 高砂熱学工業イノベーションセンター報, No.34 (2020).
4) 宇宙航空研究開発機構: 日本の国際宇宙探査シナリオ (案) 2021, 279-307, (2021).
5) The International Space Exploration Coordination Group (ISECG): The Global Exploration Roadmap Supplement, Oct. 2022. Table 3 (2022).
6) R. N. Schaezler and A. J. Cook: Report on ISS O2 Production, Gas Supply & Partial Pressure Management, ICES, 146 (2015).
7) M. Hecht et al.: Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE), Space Sci Rev., 217 (9) (2021).
8) S. Mekhilef, R. Saidurb, A. Safari.: Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 981– 989, (2012).
9) M. Dole: “The Radiation Chemistry of Macromolecules Vol. II”, Chap. 9, Academic Press, New York, (1973).
10) Y. Iwai et al.: Radiation deterioration in mechanical properties and ion exchange capacity of Nafion N117 swelling in water. Journal of Membrane Science 322, 249–255 (2008).
11) J. H. Ayuso et al.: “Flight Dynamics Operations for the First ispace Lunar Lander Mission M1”, 29th ISSFD (2024).

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering has developed a water electrolyzer for technological demonstrations, with the aim of producing hydrogen and oxygen on the moon. This technology could potentially contribute to a lunar propellant production in the future. This electrolyzer is installed on the payload of the commercial lunar exploration program Mission 2 by ispace Inc., and the operation is planned in 2025. This paper describes the overview, the development status and the operation plan of the electrolyzer.