

# 月面用水電解装置の開発結果と将来展望<sup>※</sup>

津村 柊吾・加藤 敦史・馬場 大輔・内田 浩基  
武田 健太郎・岡 堯志<sup>\*1</sup>・森田 健<sup>\*2</sup>

## Development Results and Future Prospects of Lunar Water Electrolyzer

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水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。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<sup>2,3)</sup>、2025 年 1 月 16 日に打ち上げられたが、同年 6 月 6 日の着陸失敗により月面での実証試験開始には至らなかった。しかしながら、およそ 5 か月にわたる軌道上運用では健全性が維持されていることを確認できており、一定の運用成果を得られた。将来開発においてはガス生成量の高出力化とプロセス間の連携が重要になると考えられる。

### 1. はじめに

近年、月に水資源の存在可能性が示された<sup>4)</sup> 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<sup>5)</sup>。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<sup>6)</sup>、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<sup>2,3)</sup>、2025 年 1 月 15 日に打上げられた。しかしながら同年 6 月 6 日に月面への軟着陸に失敗し、月面での実証試験開始に至らなかった。

本稿では、開発した水電解装置のミッション概要と開発成果、軌道上運用成果及び次期開発における課題と展望について述べる。

※ 本論文は、第 69 回宇宙科学技術連合講演会の講演論文<sup>1)</sup>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

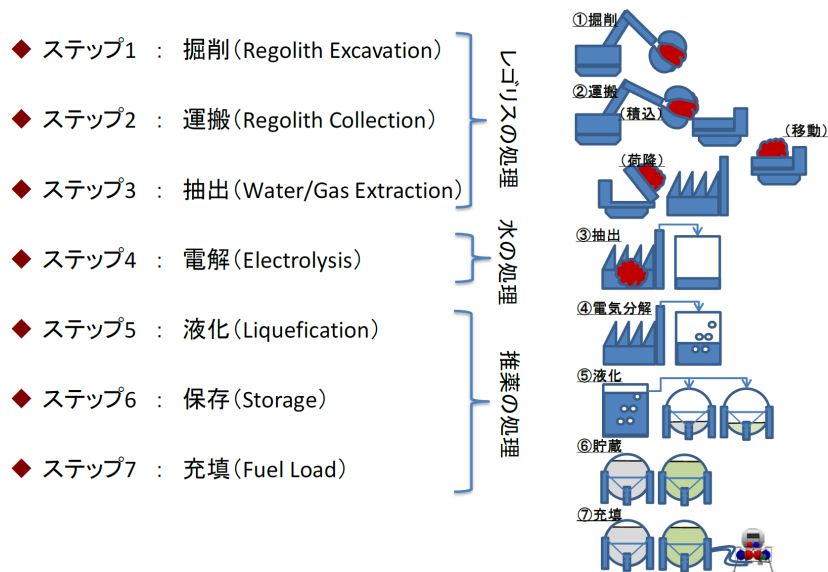


図1 月面の水利用プロセス<sup>4)</sup>

## 2. ミッション概要

### 2.1 水電解装置概要

月面用水電解装置 (Hydro Oxy Creator: HOC) は、民間月面探査プログラム Mission 2 (以下、着陸機) のペイロードとして開発された水電解装置である。写真1に着陸機に搭載されたHOCの写真、表1に主要諸元を示す。HOCは、高砂熱学工業が地上向けに開発した水電解装置をベースに設計・製作された。

図2にHOCの構成図、図3にHOCの運転データのイメージを示す。HOCは、通信系、制御・データ処理系、電源系、構造系、反応系、水素貯蔵系及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、水素貯蔵系及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連続運転することが可能である。加圧された水素及び酸素ガスは、最終的に系外に排出して1サイクルの運転を終了する。



写真1 着陸機に搭載されたHOCフライトモデル

表1 HOC 主要諸元

ミッション期間	最大 14 日
HOC 質量	約 8 kg
HOC 外形寸法	約 L: 300 mm×W: 440 mm ×H: 200 mm
ガス生成量 (定格)	水素: 2 NL/h 酸素: 1 NL/h
ガス生成圧力	MAX 1 MPa
許容温度範囲	+5~+60°C

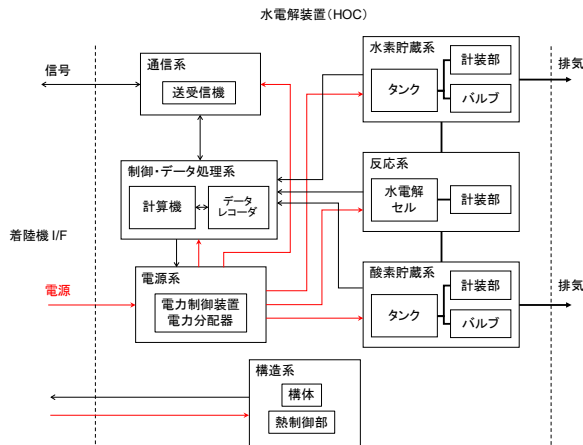


図 2 HOC 構成図

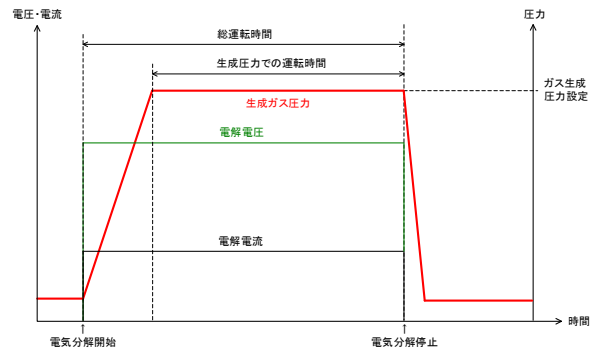


図 3 HOC の代表的な運転データのイメージ

## 2.2 水電解の方式・セルの構成

HOC の水電解方式には固体高分子 (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) 形を採用した<sup>7)</sup>。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。

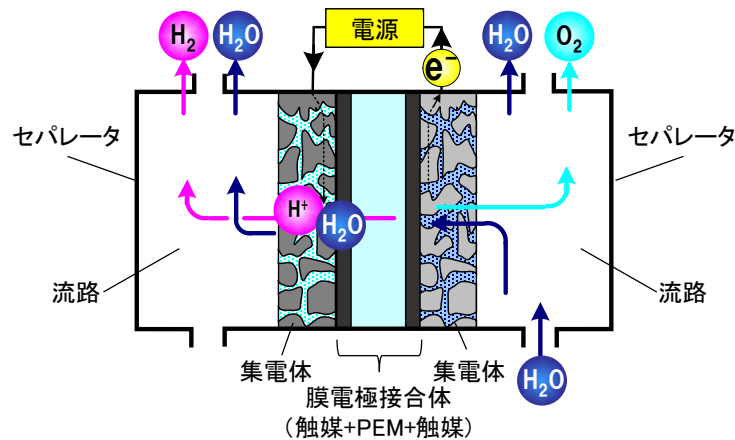


図 4 PEM 形水電解セルの構造と反応の原理

## 2.3 地上機との特徴的な違い(1/6G 環境下での水供給)

月面特有の環境として約 1/6 G の低重力環境がある。HOC においては、流体 ( $H_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ ) の挙動がその影響を受ける可能性があるが、地上での検証が困難であるためシステムの重力依存性が小さいプロセスが望まれる。また衛星の軌道上故障のおよそ 20%は流体系で発生しているとの報告<sup>6)</sup>もあり、流体の制御方法について信頼性の確保が課題である。

そこで HOC では、通常、水電解セルへの純水供給に用いられる電動ポンプを排し、電力が不要で機械可動部が無く、動作の重力依存性が小さい毛細管力を用いた純水供給方法を開発した。図 5 にその概念図を示す。前項で述べた水電解セル内の集電体は多孔質材料で構成されている。この多孔質材料の形状を工夫

することで流体の駆動源となる毛細管力を発生させ、純水を水電解セルへ供給する。水電解セルに電力を加えられると、陽極側で酸素ガスが生成され、集電体のガス孔からガス排出管へ流動する。本方式は、集電体の多孔質材料で生じる毛細管力のみを駆動源とすることから、電力を用いることなく、水電解セルへ純水の供給が可能である。

本方式の副次的な効果として、気液分離の安定性が挙げられる。HOCの気液分離器は月の重力を利用した重力式を採用している。電動ポンプを用いた強制循環方式の場合、通常電気分解される量よりも多くの水が送り込まれるため、ガス排出管は酸素ガスと水の混相流となり、気液分離の安定性に影響を及ぼす懸念があった。本方式では始動時を除きガス排出管内はほぼ酸素ガスのみとなるため、気液分離器を兼ねる水タンク内上部に一定以上の気層を確保しておけば、想定運用環境において気液分離に影響が生じるリスクが低いことを数値解析等で確認している。他方、強制循環方式を排することで、電解における発熱がセル内に留まりやすくなり、セルの温度安定性が低下するという欠点もあり、今後高電流密度化やセルスタック化に向けては熱制御設計が主要な課題になると考えられる。

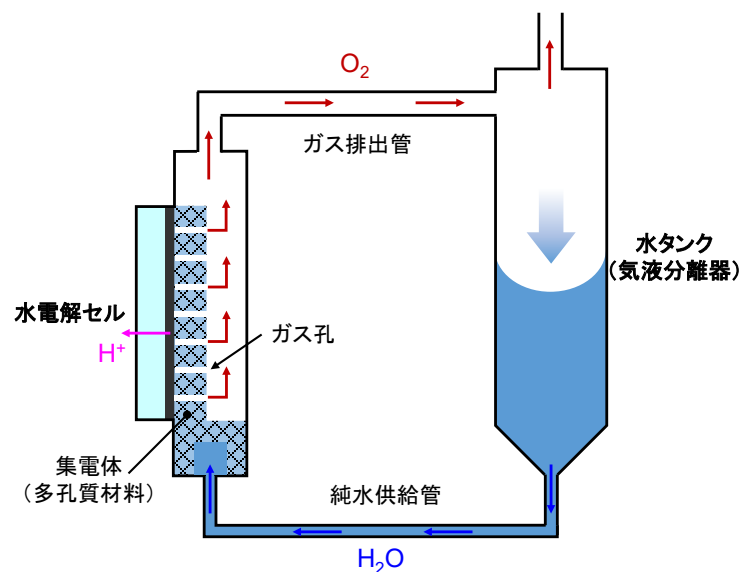


図 5 HOC のキャピラリーポンプ方式

### 3. 運用結果

#### 3.1 軌道上運用

月への軌道航行中は、HOCのヘルスチェック、環境モニタ等を行った。なお、軌道上運用においては着陸機の電力、通信制約から水電解運転の実証は計画されていなかった。

##### (1) インターフェース (I/F) 温度

図 6 に着陸機-HOC間のI/F温度のトレンドを示す。Lander I/F-1 及び 2 は、I/F面の着陸機側代表点 2か所の温度を示し、Payload (FM) I/F-1 及び 2 は、I/F面のHOC側代表点 2か所の温度をそれぞれ示している。HOCは、各I/F温度を参照して着陸機側に設置されたヒータをON/OFFすることで温度制御が行われた。

5月11日に着陸機側の運用の関係により許容温度範囲内で一時的に温度低下が発生したが、打上げから月の円軌道投入(5月29日)までの期間に亘って20~28°Cの範囲で安定したI/F温度制御がなされていたことが確認できる。円軌道投入以降は、周期的に着陸機が蝕に入るため温度が低下したが、許容温度下限+5°Cに対して十分な温度マージンを有している。

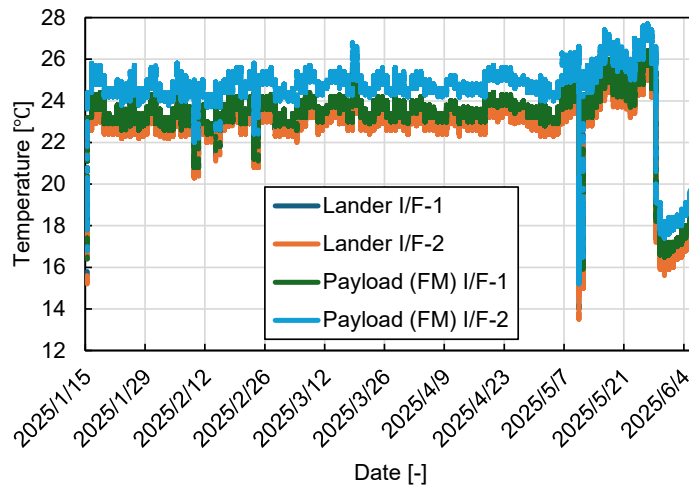


図6 軌道航行中のI/F温度トレンド

(2) HOC 温度

図7にHOCの温度のトレンドを示す。T-H1、H2は水素貯蔵系、T-O1、O2は酸素貯蔵系、T-O3は水電解セル、T-E1は電源系の代表点温度をそれぞれ示している。HOCの各温度はI/F温度に追従しており、各点の温度差は熱平衡試験で検証した結果と傾向が一致していたことから、HOCの受動熱制御設計及び検証の妥当性を確認できた。

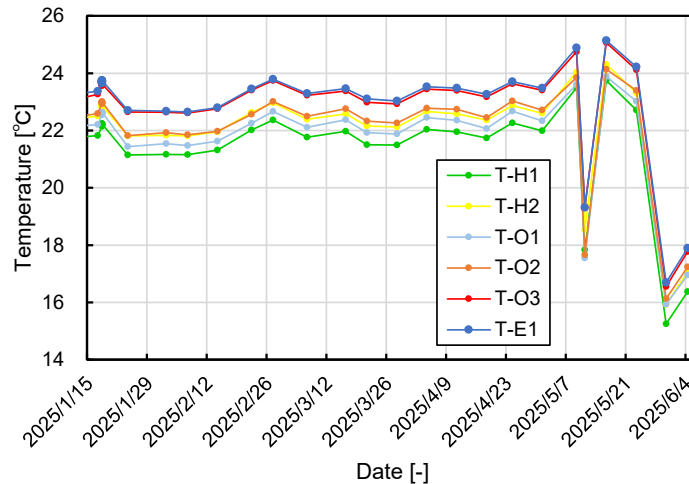


図7 軌道航行中のHOC温度トレンド

(2) HOC 圧力

図8にHOCの圧力トレンドを示す。P-H1、H2は水素貯蔵系、P-O1、O2は酸素貯蔵系の圧力をそれぞれ示している。P-H1、P-O1及びP-O2で圧力が低下傾向にあることが読み取れ、これはHOCの水電解セルに採用したゴム製のガスケットを介したガス透過によるリークと考えられる。P-H2は水電解セルに直接接続されていないシステムの圧力であるため、圧力低下の傾向は見られない。HOCのガス透過によるリーク影響は設計時に織り込み済みであり、今回の低軌道運用での圧力低下は、地上検証による Worst Case 予測よりも十分に小さいことから月面運用には問題はないと考えている。一方、長期運用やプラント化を見据えた次期開発においては、製造ガスや水の経日的な漏洩は資源の損失に直結するため十分な対策が必要である。なお、5月11日及び5月29日以降の圧力の低下は、前述の温度低下による影響である。

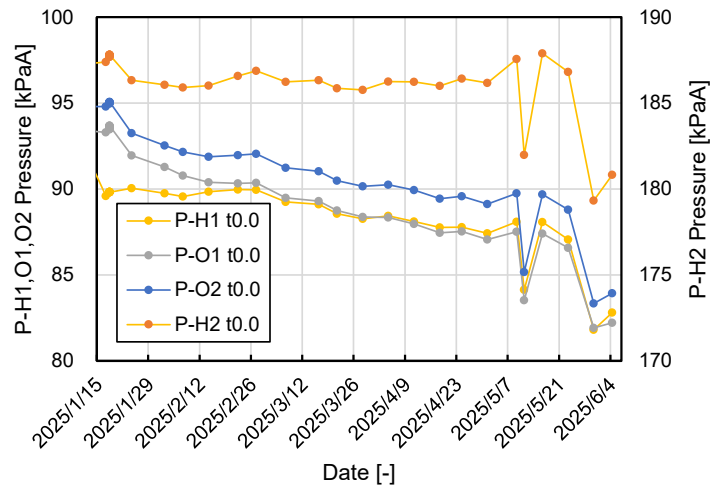


図 8 軌道航行中の HOC 圧カトレンド

### 3.2 月面運用

本項では月面着陸後に計画していた運用条件等について記述する。

#### (1) 初期運用

月面着陸後、着陸機のクリティカル運用を終えた後に HOC は初期運用に入る。初期運用では、まず HOC のヘルスチェックを行い軌道上で取得した最新データから異常等の有無を確認する。次いでソレノイドバルブ等のアクチュエータ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し、定常運用での運転に支障がないか確認する。

#### (2) 定常運用

初期運用フェーズ完了後、実証運用フェーズに入る。実証運用フェーズでは、着陸機側と予め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。HOC の実証予定だった運転プロファイルを表 2 に示す。なお、HOC の各運用スロットは原則として、リアルタイムモニタリングが可能な地上局からの可視時間帯にのみ実施する。非可視時間帯は保管状態とし、保管中のヘルスデータや環境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。

表 2 HOC 月面運用の運転プロフィール

運転条件	水素生成圧力 [MPa]	酸素生成圧力 [MPa]	運転時間 [min]
1	0.20	0.18	> 7
2	0.20	0.18	> 30
3	0.45	0.18	> 30
4	0.75	0.18	> 30
5	1.00	0.18	> 30
6	1.00	0.35	> 30
7	1.00	0.65	> 30
8	1.00	0.90	> 30
9	1.00	1.00	> 60

#### 4. 将来開発における課題と展望

今回開発した HOC は、様々な制約条件から水素・酸素の生成量が小さい設計となり、基本的な水電解機能の宇宙適用検証を予定するに留まった。そのため HOC で月面での年間推薬生成量のベースライン要求<sup>6)</sup>を満足することは困難である。次期開発では、まずはガス生成の高出力化を目標とした要求を定め、それに伴う技術課題の検討を行う必要があると考えている。

またプラント化に向けては、水電解の上流及び下流プロセスとのインターフェース開発も必須である。水電解は、月面推薬生成の中間プロセスであり、上流には氷含有レゴリスの採取、水抽出や精製等の一連のプロセスを得た純水供給の I/F が、下流には生成したガス精製、圧縮及び液化を行う推薬貯蔵の I/F それぞれ存在する<sup>5)</sup>。本ミッションでの HOC は、純水を充填した状態で打ち上げられ、生成した水素及び酸素ガスは月面へ放出予定であったが、今後はこれら I/F の仕様検討や検証、協調開発が重要になると考えられる。

さらに商業化に向けては、月離着陸機等、推薬のユーザの存在も欠かせず、資源探査及び実証機会の確保の観点でも継続した月面輸送の機会が望まれる。

#### 5. おわりに

本稿では、月面用水電解装置 (HOC) の開発結果と将来の展望について紹介した。HOC は着陸機の軟着陸失敗により水電解の実証には至らなかったが、開発した各技術は今後の月面推薬生成に資する要素技術として活用できるものと考えている。また非宇宙分野の民間企業として先駆的な挑戦であった本ミッションでは、宇宙分野における開発過程から運用計画、そして今回の失敗を経験し様々な知見が得られた。高砂熱学工業は本ミッションを端緒として引き続き宇宙分野での技術開発の推進に貢献していく所存である。

## 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: “月面用水電解装置の開発結果と将来展望”、第69回宇宙科学技術連合講演会、(2025).
- 2) 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).
- 3) 津村ら: 月面実証用水電解装置の開発、高砂熱学工業イノベーションセンター報、No.38 (2024).
- 4) S. Li et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions、PNAS、115 (36) 8907-8912、(2018).
- 5) 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).
- 6) The International Space Exploration Coordination Group (ISECG): The Global Exploration Roadmap Supplement、Oct. 2022. Table 3 (2022).
- 7) S. Mekhilef、R. Saidurb、A. Safari.: Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16、981–989、(2012).
- 8) 齋藤宏文: 人工衛星の軌道上故障に関する二次分析、日本航空宇宙学会論文集 Vol. 59、No. 690 190-196、(2011).

## ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering has developed a water electrolyzer for technological demonstrations, with the aim of producing hydrogen and oxygen on the moon. The electrolyzer was integrated into the payload of the commercial lunar exploration program Mission 2 by ispace Inc., which was launched on January 15, 2025. However, due to the unsuccessful lunar landing on June 6, 2025, our mission was terminated. This paper describes the summary of the mission, development, in-orbit operational results and future prospects.

---