

月面での夜間電力供給を目的とした 循環型再生エネルギーシステム

Lunar Night Power Supply:
Circulative Renewable Energy System Capable of Continuous Power Generation

稲 西 諒 亮¹
Ryosuke INANISHI
河 野 匠²
Takumi KAWANO

大 門 鋭 刀¹
Hayato DAIMON
本 多 徹¹
Toru HONDA

福 間 一 教¹
Kazunori FUKUMA

要 旨

月面での夜間電力供給を目的とした循環型再生エネルギーシステムの開発を進めている。循環型再生エネルギーシステムの原理証明を目的として、打ち上げ想定機の約1/10の出力を持つシステムを構築し、月面3年相当の利用回数である39回のサイクル試験をおこなった。

燃料電池スタックでは純酸素供給による電解質膜の特性変化を考慮したMembrane electrode assembly設計をおこなった。水電解スタックでは高圧酸素下の難燃性や耐酸化性に優れる部品材料を選定した。電気化学式水素昇圧スタックでは流路構造を最適化することで反応面の滞留水の排出性を向上させた。また、安定的な水循環を成立させるための制御やシステムの構築をおこなった。

以上の取り組みによりサイクル試験を達成し、循環型再生エネルギーシステムのコンセプトである水循環による継続的な発電が可能であることが実証され、原理証明を完了した。

ABSTRACT

Development is proceeding on a circulative renewable energy system for lunar night power supply. For proof of principle of the circulative renewable energy system, a system with approximately 1/10 the power of the expected launch unit was constructed, and a cycle test with 39 cycles was conducted, which is equivalent to three years of lunar use.

In the fuel cell stack, the membrane electrode assembly was designed in consideration of changes in the electrolyte membrane properties due to pure oxygen supply. In the electrolysis cell stack, component materials were selected that have reliable flame-retardant properties and oxidation resistance under high-pressure oxygen. In the electrochemical hydrogen compressor stack, discharge of stagnant water on the reaction surface was enhanced by optimizing the flow path structure. In addition, controls and systems were constructed to establish stable water circulation.

Through these initiatives, a cycle test was achieved and demonstrated the feasibility of continuous power generation through water circulation, which is the concept of the circulative renewable energy system and completed the proof of principle.

1. ま え が き

近年アルテミス計画をはじめとした月面開発の動きが活発になっている⁽¹⁾。アルテミス計画では宇宙飛行士が月面に長期滞在し、持続的な探査活動を実施することを目指している。その中で、重量と比例して高額になる月面への輸送コストを抑えつつ、安定的な電力供給を実現する手法が

求められている。我々は水素技術の新たな活用先として宇宙を見据えており、燃料電池システム⁽²⁾と高圧水電解システム⁽³⁾を組み合わせることで、月面での安定的な電力供給を可能にする循環型再生エネルギーシステム(Circulative Renewable Energy System: CREシステム)の開発を進めている。CREシステムは重量エネルギー密度が高く、輸送コスト及び大容量電力確保の観点でメリットを持つことから

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: ryosuke_inanishi@jp.honda

² 先進技術研究所

今後のさらなる発展が期待されている。本稿では、我々が開発を進めている CRE システムの構成を紹介するとともに、コンセプトである、“水の循環による継続的な発電”の原理証明に向けて実施した取り組みについて紹介する。

2. CRE システム

2.1. CRE システムの意義

月面での長期滞在における重要な課題の一つが、夜間の安定的な電力供給である。月の自転周期は約 27 日であり、月面地域により異なるが、夜が 8 から 14 日間ほど連続する。ある一つのミッションでは無人探査ビークル等の調査機器の稼働のため約 2 kW の電力が必要となり、14 日夜が連続する場合、最大で 672 kWh の電力量が必要であると想定している。この電力量を日中の太陽光発電により生み出し、夜間に利用できるよう保持する必要がある。一般的に考えられている手法として、夜間に使用する分の電力をバッテリーに蓄電する手法が挙げられる。しかし、質量の大きいバッテリーは、1 kg あたり 1 億円以上⁽⁴⁾とも言われる月面への輸送コストが高額になる。また、月面の低温環境下におけるバッテリー性能低下を防止するため、バッテリー自体を温める電力も蓄電する必要があり、重量の増加につながる。

開発中の CRE システムは、太陽光発電によって得られた電気で水を電気分解し、得られた水素と酸素を夜間に燃料電池スタック (Fuel cell stack: FC スタック) に供給して発電する。さらに発電時に生成される水を再び電気分解することにより、継続的に発電することをコンセプトとしている。Table 1 に電力量 672 kWh の発電を想定した、将来的な CRE システムの各コンポーネントの想定質量を示す。システム全体のトータル質量は 1911 kg、重量エネルギー密度は 352 Wh/kg となる。また、Fig. 1 に示すように、Li イオンバッテリーと比較しても重量エネルギー密度が大きく^{(5), (6)}、輸送コスト低減と大容量電力確保の観点で優位性を持つと考えている。

2.2. CRE システムの概要

CRE システムの概要図を Fig. 2 に示す。まず水電解スタック (Electrolysis cell stack: EC スタック) に水が供給される。EC スタックでは水を電気分解し水素と酸素を生成する。EC スタックは、高圧水素製造を目的として開発したスマート水素ステーションを構成する高圧水電解スタック⁽⁷⁾と類似した構造を有し、高圧酸素を生成する。一方、生成された水素は水とともに移動し、水と分離した後、電気化学式水素昇圧スタック (Electrochemical hydrogen compressor stack: EHC スタック) に供給される。EHC スタック内で、電気化学反応により昇圧することで高圧水素を生成する。生成した高圧水素と高圧酸素はタンクに貯蔵

Table 1 Expected mass of each component of CRE system

Items	Mass (kg)
CRE system	727
Storage system	814
Fuel water	370
Total mass	1911

しておき、電力が必要なタイミングで FC スタックに供給し、発電をおこなう。また、FC スタックでは反応時に水が生成されるため、これを再度 EC スタックに供給し循環させることで、継続的な発電が可能となる。

2.3. CRE システムの開発課題

CRE システムを月面で使用する際の課題が二つある。

一つ目は宇宙空間での安定的な利用に向けた課題である。宇宙での安定的な利用のためには地上とは異なる様々な外的要因について対応する必要がある。例えば太陽など

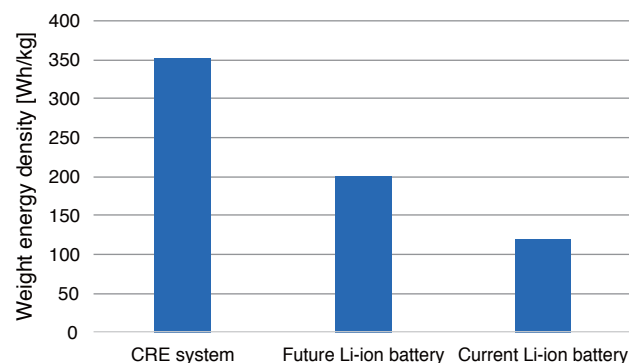


Fig. 1 Comparison of energy density between CRE system and Li-ion battery

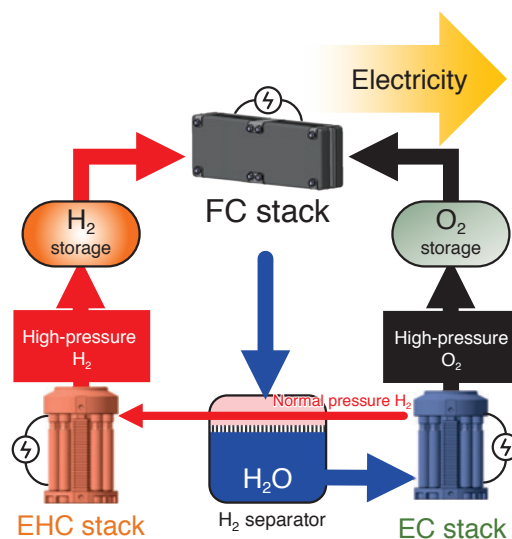


Fig. 2 Schematic diagram of CRE system

に排出すると、生成した水素、酸素が無駄となる。本 CRE システムでは、余剰ガスを直接 FC スタックへと供給し、反応させることで減圧をおこなう。FC スタックでは、水素と酸素は 2:1 のモル比率で反応するが、各スタック内で残存するガスの量は状況によって異なる。そのため、EC、EHC スタックの両方が減圧完了する前にどちらか片方のスタックの減圧が完了するケースが想定される。

これに対応できるよう、Fig. 3 に示す減圧弁の設定圧力を決定した。EC、EHC スタックと FC スタックの間にある減圧弁 A、C の設定圧力は減圧完了圧力とした。また各タンクと FC スタックの間にある減圧弁 B、D の設定圧力は減圧完了圧力から数十 kPa 程度高い圧力に設定した。これにより EC、EHC スタック側に残存するガスが優先的に消費される。EC あるいは EHC スタックが減圧完了圧力に到達した場合、減圧圧力に到達した方のタンク内のガスの消費が開始される。そのため FC スタック内での反応を継続することができ、発電による EC、EHC 両スタックの減圧が可能となる。

3.3. FC スタック

FC スタックは電解質膜での下記に示す水素と酸素の電気化学反応により化学エネルギーを電気エネルギーに変換する装置であり、反応部を有するセルを複数積層した構造となっている。



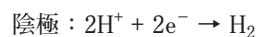
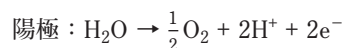
実証試験で用いた FC スタックを Fig. 4 に示す。地上での使用を目的とした FC スタックでは、空気中に含まれる酸素を使用し発電をおこなうが、CRE システムにおいては、EC スタックにより製造された純酸素が供給される。純酸素による影響として、電解質膜の経時的な特性変化が空気に比べ顕著となる。純酸素による単体耐久試験を実施し、耐久後の膜分子量低下を定量化することで構築した電解質膜の劣化モデル⁽⁸⁾を活用し、実証試験における性能低下を見込んだ Membrane electrode assembly (MEA) 設計をおこなった。



Fig. 4 FC stack

3.4. EC スタック

EC スタックは、水電解をおこない、高圧酸素と低圧水素を生成することを目的とした装置である。実証試験で用いた EC スタックでは 14.7 MPa の高圧酸素生成を目標とした。実証試験で用いた EC スタックを Fig. 5、EC スタックの概要図を Fig. 6 に示す。EC スタックは、FC スタックと同様に複数のセルを積層した構造となっている。セル内部の電解質膜に水を供給し、スタックに電圧を印加することにより酸素と水素イオン (H^+) を発生させる。酸素出口は封止されているため、時間の経過とともに圧力が上昇し、高圧酸素を得ることができる。電解質膜の両端に電圧を加えており、酸素とともに電気分解で発生した水素イオンは電解質膜内を通過して陰極側へと移動し、分離される。その後水素となり、EC の水素出口から排出され、EHC スタックへと供給される。



高圧酸素下に存在する部品は酸化が促進され、また発火温度の低下や燃焼速度の上昇により、大気中では不燃物である材料であっても可燃物となる場合がある。そのため陽極側の電解質膜周辺部品では酸化と燃焼防止の観点で材料選定をおこない、EC スタック部品に採用した。



Fig. 5 EC stack

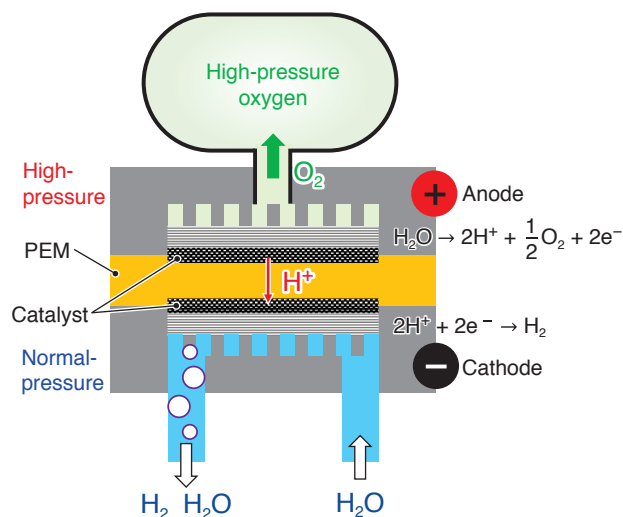
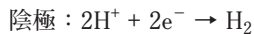


Fig. 6 Schematic diagram of EC

3.5. EHC スタック

EHC スタックは供給された水素を電気化学的に昇圧する装置である。実証試験で用いた EHC スタックでは 70 MPa の高圧水素生成を目標とした。実証試験で用いた EHC スタックを Fig. 7, EHC スタックの概要図を Fig. 8 に示す。EHC スタックも同様にセルを複数積層した構造となっており、各セル内部の電解質膜で下記に示す反応により水素イオンが発生し、電圧の印加により高圧タンクへとつながる陰極側へと移動する。タンクは閉塞空間となっているため、時間の経過とともに圧力が上昇する。



電解質膜の乾燥は導電率の低下を招くため、EHC スタックには湿潤水素を供給する。水素中の水分は膜を浸透し高圧側へと移動可能であるが、膜を介した差圧が大きくなるほど低圧側へと水分が押し戻される。Fig. 8 に示すように、押し戻された水分が膜反応部に滞留することで、水素の供給が滞り、電圧が上昇する課題がある。特に月面の低重力環境下では、水が反応膜から離脱しづらくなる。水の滞留を防止するためには、水の排出に寄与する反応面への供給水素の流速が局所的に低下することを防ぐ必要がある。そ

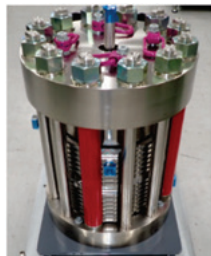


Fig. 7 EHC stack

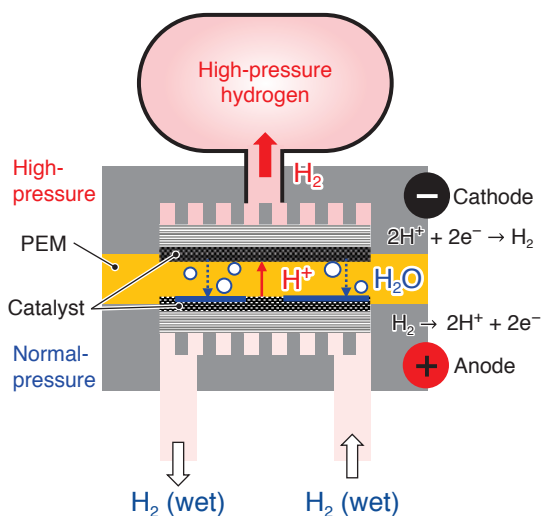


Fig. 8 Schematic diagram of EHC

こで水素流路構造の最適化により反応部の水素流速の均一化を図った。

EHC スタックの水素の流れを Fig. 9 に示す。EHC スタックに供給された水素はインレットフレームから各セルに供給される。供給された水素はインレットフレームの下面に掘られた流路を通り、スペーサーと給電体へと流れる。給電体は電解質膜の下部に位置する部品であり、この部品内の流速分布の均一化をすることで水滞留の防止を図った。インレットフレームの下面に掘られた流路の径や長さなど、13 種類の設計因子を用いて L27 直行表を作成し、各条件における流速ばらつきを流体解析により求めた。解析で求めた結果に基づいて応答曲面を作成し、解析上最も流速ばらつきが低下する形状に流路構造を変更した。Fig. 10 にベース形状での水素流速分布を、Fig. 11 に最適構造での水素流速分布を示す。ガス流れは図において左から右に流れている。中央の半円状のエリアが給電体を示しているが、給電体外側の流路の本数や幅が変更され、構造変更前と比較して給電体内部の流速が均一化されている。水分滞留による運転停止を防止するため、流路構造変更後のセル部品を実証試験で使用した。

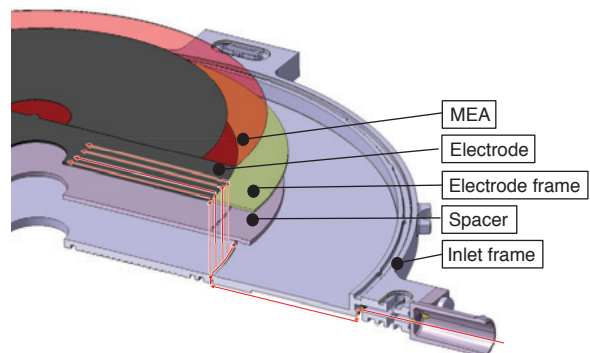


Fig. 9 Flow of hydrogen in EHC

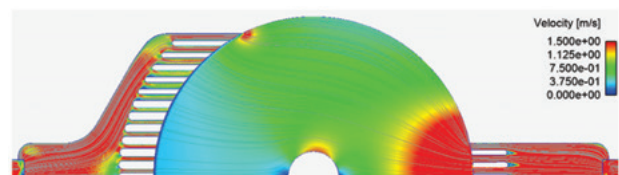


Fig. 10 Velocity distribution in base flow path structure of EHC stack

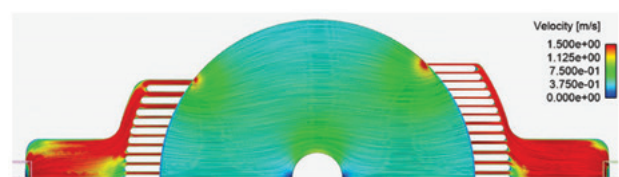


Fig. 11 Velocity distribution in optimized flow path structure of EHC stack

4. CRE システムの原理証明

CRE システムの原理証明のため、実証試験をおこなった。

実証試験として、打ち上げ想定機の出力に対して 1/10 程度の出力を有する CRE システムを構築し、サイクル試験を実施した。月面では 1 年あたり 13 回の越夜が生じる。また、CRE システムは月面で数年から十数年の連続した使用が想定されるが、今回は、ある一つの月面ミッションの想定年数である連続 3 年⁽⁹⁾相当の昼夜サイクル数である 39 サイクルを実証試験の規定サイクル数とした。試験開始時にシステム内に存在する総水量は 1900 ml であるのに対し、1 サイクルで水電解に用いられる水量は約 400 ml である。そのため循環が成立していれば、試験停止に至る事象なく規定サイクル分の発電が完了することで原理証明ができる。またこの試験では太陽光発電で得た電力ではなく、一般的な商用電力を用いて実施した。

構築した CRE システムの外観図を Fig. 12 に、諸元を Table 2 に示す。また、CRE システムの 1 サイクル分の動きについて紹介する。Fig. 13 に EC, EHC スタックの運転電流、出口圧力、FC スタックの出力、及び各タンクの圧力の推移を示す。1 サイクルは EC, EHC スタックごとにタ

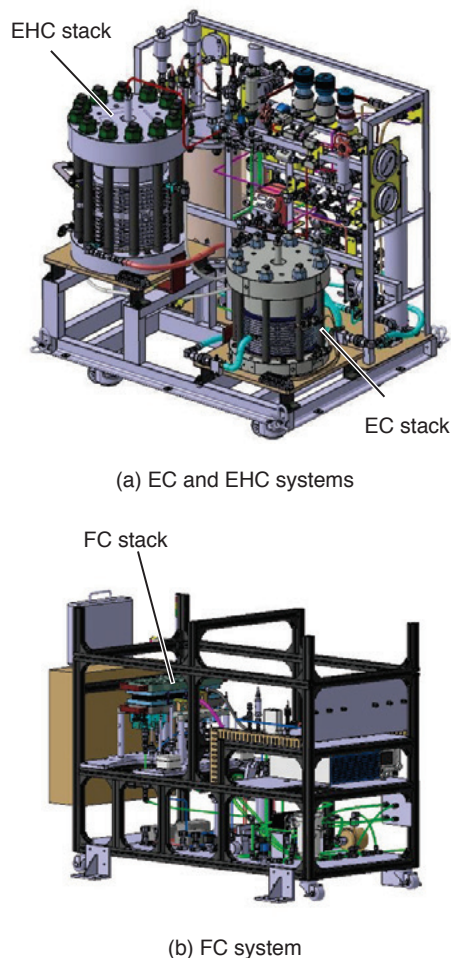


Fig. 12 CRE system for demonstration test

Table 2 Specifications of CRE system for demonstration test

CRE system	System weight [kg]	2900
FC stack	Average power (generation mode) [W]	221.6
	Stack weight [kg]	50
	Stack dimensions [mm]	570 × 266 × 250
EC stack	Pressure of generated oxygen [MPa]	14.7
	Average oxygen production rate [g/h]	179.5
	Stack weight [kg]	260
EHC stack	Stack dimensions [mm]	Φ393 × 447
	Hydrogen pressure increase [MPa]	70.0
	Average hydrogen pressurization rate [g/h]	22.5
EHC stack	Stack weight [kg]	470
	Stack dimensions [mm]	Φ460 × 623

イミングが若干異なるが、1：昇圧、2：蓄圧、3：減圧、4：発電の四つのモードに分けられる。

昇圧モードでは、電気化学反応の開始によりガスが生成されスタック内での昇圧が始まる。3.1. 節で述べたように EHC スタックの運転電流を制御することで供給水素圧力の変動に対応している。既定の圧力に到達すると蓄圧モードに移行する。

蓄圧モードでは、タンクへのガス供給が開始されタンクの圧力上昇が始まる。タンクが目標圧力まで到達した後に減圧モードに移行する。

減圧モードでは、タンクへのガス供給が止まり、タンク内圧力は保持される。EC, EHC スタック内に残存する余りのガスは直接 FC スタックへと供給され、発電により消費されることで EC, EHC スタック内圧力は低下する。

Fig. 13 の最下段のグラフに示すように減圧モードでは FC

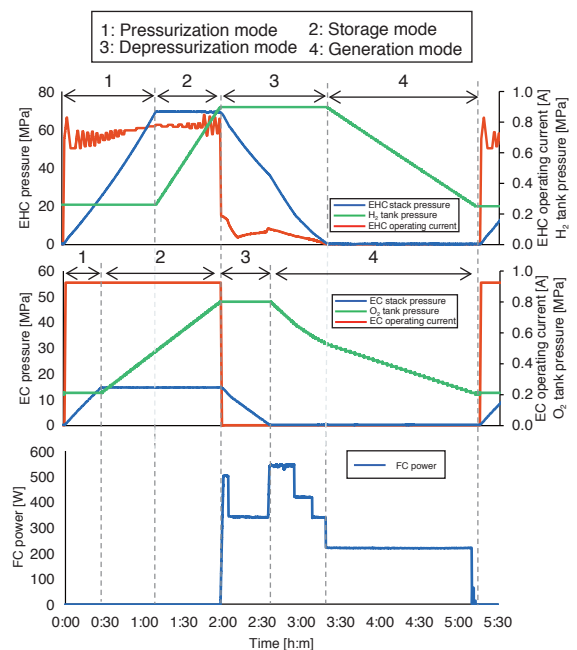


Fig. 13 Operation transition of CRE system

スタックの出力が一定ではない。これはFCスタックの出力を調整することで、EC、EHCスタックの急減圧を防止し、EC、EHCスタック内のゴムシール等でプリスターが生じないようにするためである。

その後発電モードでは、タンクに貯蔵したガスをFCスタックに供給するためタンク圧力が低下する。

サイクル試験の運転方法を設定する上で考慮すべき項目が二点ある。一点目は、昇圧、減圧モードにおける運転電流や減圧弁等を用いた制御時間が、システムの仕様変更に伴い変化する可能性がある点である。しかしこれらは流体の循環のバランスが保たれる制御によって、時間の長短による変化に対応可能である。

二点目は蓄圧モードと発電モードの時間の短縮化である。ガス貯蔵用タンクは容量、貯蔵圧ともに実運用よりも低く設定し、1サイクルは5時間程度で完了する。しかし実運用では必要電力量の増加により運転時間が長時間化する。影響が想定される各スタックの耐久性については、今後、個別耐久で確認する。今回の実証試験ではCREシステム全体の循環について確認することが目的であるため、設定した運転方法でサイクル試験を実施することで検証が可能である。

各サイクルでのFC発電量をFig. 14に示す。一連の取り組みにより、試験が停止することなく39サイクルを通して発電可能なことを確認し、原理証明を完了した。

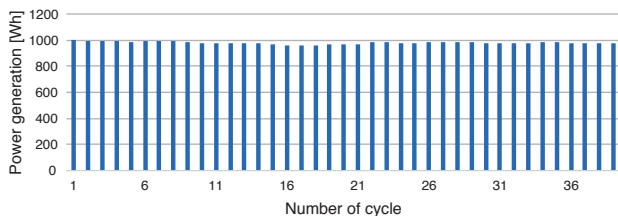


Fig. 14 Power generation in each cycle

5. 宇宙での安定的な利用に向けた取り組み

3章で述べたように、今後月面相当環境での評価を実施する。CREシステムを月面で安定的に利用するためには、地上とは異なる様々な環境や外乱について考慮しなければならない。今回は放射線、低重力、輸送振動への対応、また輸送コスト削減に向けた軽量化について、今後取り組むべき内容を紹介する。

5.1. 放射線

月は地球と比較して磁場によるシールドが弱く、月面の環境下では太陽などからの放射線量が地上と比較して高い。放射線による特性変化を把握するためにスタック部

品に対して放射線照射試験を実施した。その結果、スタック部品の中で特に電解質膜の特性変化が顕著に見られた。Fig. 15に示すように、放射線吸収量の増加に伴い電解質膜の分子量、及び引張強度が低下する。しかし、スタックは組立にプレス機やクレーンなどの設備が必要であり、月面上で分解し電解質膜を交換することはできない。そのため運用を完遂できる耐久性を有した仕様にしなければならない。放射線吸収量と各部品の機能低下を明確にし、運用期間で機能損失に至らない遮蔽構造を設計する必要がある。

5.2. 低重力

月面の重力は地上の約1/6である。低重力環境下になるほど気泡の浮力が作用しなくなる。そのためECスタックでは、電極表面から生成ガスが離脱せず、物質輸送が阻害され電解性能の低下が予想される。今後、落下塔や航空機のパラボリックフライト等による低重力環境下での試験を実施することで、重力の影響をより明確にし、生成ガスの排出性に優れた水の供給条件や構造の設計に取り組む。

5.3. 輸送振動

宇宙空間に物資を運ぶための輸送ロケットは、打ち上げ時に激しい振動が生じる。そのためCREシステム、及び各スタックはこれに耐え、機能を損なわない構造とする必要がある。一般的に振動対策として共振抑制治具による固定が効果的であるが、宇宙への輸送コストの観点から、振動抑制を目的とした重量増加は可能な限り避けたい。現在、実際の輸送と同レベルの振動を発生させる加振機を使用し、スタックの共振周波数など振動特性評価を実施している。今後、この結果をCAEにフィードバックすることで、設計予測技術の向上を図り、システム設計に活用する。

5.4. 軽量化

月面への輸送コストの削減のためCREシステムを構成する各スタックの軽量化が必要である。特に重量の大きいECスタック及びEHCスタックでは反応部径の最適化が必要である。反応部径を増加させ、1セル当たりの水素生

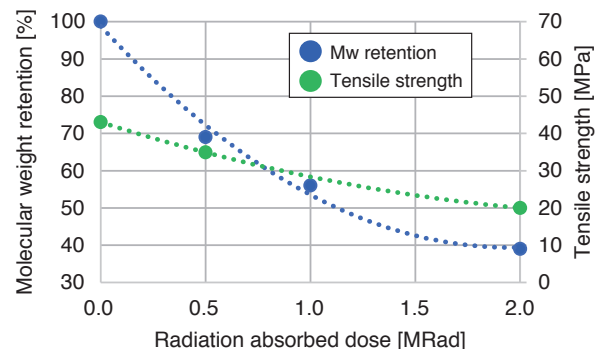


Fig. 15 Relationship between radiation absorption and membrane properties

成量を増加させることでセル積層数を減らすことが可能であり、それに伴いスタックを締結するボルト全長の短縮も可能となる。一方、反応部径を増加させた場合、反応部外周に存在する耐圧部材の径も増加し、重量増加の要因となる。今後、輸送時のスペースなどの制約の下、反応部径の最適化に取り組み、軽量化を実現する。

6. まとめ

- (1) FC スタックでは純酸素供給による膜の経年変化を考慮した MEA 設計をおこなった。
- (2) EC スタックには、高圧酸素環境下であっても使用可能な耐酸化性、耐燃性に優れた材料を選定した。
- (3) EHC スタックの流路構造最適化により、反応部の滞留水の排出性が向上した。
- (4) CRE システム内の安定的な水循環を実現するためにバルブやスタック運転制御の設定をおこなった。
- (5) 構築した CRE システムを用いて 39 サイクルの運転を達成し、原理証明を完了した。

参考文献

- (1) <https://humans-in-space.jaxa.jp/future/>
(参照 2024/07/25)
- (2) <https://global.honda.jp/news/2023/c230202.html>
(参照 2024/10/11)
- (3) <https://global.honda.jp/news/2018/c181121.html>
(参照 2024/07/25)
- (4) <https://www.astrobot.com/astrobot-awarded-79-5-million-contract-to-deliver-14-nasa-payloads-to-themoon/>, (参照 2024/10/17)
- (5) 岡寿久, 丸谷健太郎, 濱田慎太郎, 大迫庸介: 宇宙用大容量リチウムイオンバッテリー, 三菱電機技報, Vol. 94, No. 2, p. 41-45, (2020), <https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2020/2002202.pdf>, (参照 2024/07/25)
- (6) 内藤均: 宇宙探査用電力供給技術, GS Yuasa Technical Report, Vol. 13, No. 2, p. 1-7, (2016), https://www.gs-yuasa.com/jp/technology/technical_report/pdf/vol13_2/13_02_001.pdf, (参照 2024/07/25)
- (7) 石川博之, 針生栄治, 川崎暢之, 大門鋭刀: 70 MPa 差圧式高圧水電解スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 80-87
- (8) 加藤高士, 中原章, 大倉拓也, 山本昌邦, 寺田聡, 野田明宏, 金岡長之: 高耐久・低コスト燃料電池 UEA の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 26-31
- (9) 上原茂高, 大濱伸之, 互井梨絵, 高橋学, 村田成亮: 有人圧ローバー再生型燃料電池システムの検討状況, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 3A09, (2024)

■ 著 者 ■



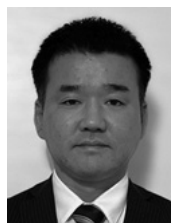
稲西 諒 亮



大門 鋭 刀



福間 一 教



河野 匠



本多 徹