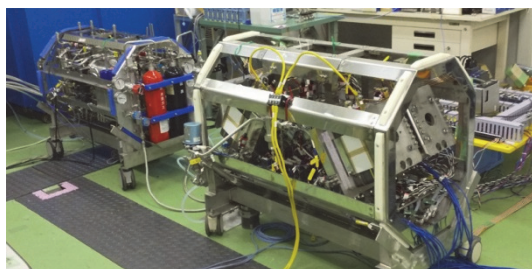


スケーラブル完全孤立系燃料電池の開発

Development of a Scalable Regenerative Fuel Cell System as a Completely Isolated Power Supply



谷 俊宏*1
Toshihiro Tani

杉原 洸貴*2
Koki Sugihara

伊藤 栄基*3
Hideki Ito

浦下 靖崇*4
Yasutaka Urashita

吉田 弘*5
Hiroshi Yoshida

三好 航太*6
Kota Miyoshi

海洋利用を進める上で動力・電源は大きな課題である。当社は、その課題を解決するため2018年度～2020年度の3か年の間、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)宇宙探査イノベーションハブ研究提案募集の採択案件として、適用先の出力規模に応じた拡張設計が可能な再生型燃料電池システム、スケーラブル完全孤立系燃料電池の開発を実施した。その中で、作動信頼性を向上した燃料電池装置及び高圧で電解する水電解装置を試作し、電解及び発電の繰り返しを完全に閉鎖された系統内で実現した。

1. はじめに

海に囲まれた日本において、洋上・海中・深海の利用を促進し、新産業を創出することが求められている。しかし、海上では近年の厳しい環境規制から従来の内燃機関を使用することが困難になりつつあり、海中・深海では、空気から隔絶された世界であることから、もともと内燃機関は使用できない環境であった。このように、動力源・電力源は海洋利用の上で大きな課題である。この課題を克服できる技術として当社では、水電解装置と燃料電池装置を組み合わせた再生型燃料電池システムの開発を進めてきた。そして2018年度～2020年度の3か年の間、JAXA宇宙探査イノベーションハブ研究提案募集の採択案件としてスケーラブル完全孤立系燃料電池の開発を実施した。本報では、その開発状況を報告する。

スケーラブル完全孤立系燃料電池とは、適用先の出力規模に応じた拡張設計が可能な再生型燃料電池システムである。その構成を図1に示す。図示するシステムでは、太陽電池の電力を用いて水電解装置により水素/酸素を製造し、燃料電池装置により発電することで完全孤立系を構築している。また水素と酸素の貯蔵容積を小さくするために、水電解装置は高圧で動作させている。

このシステムでは活物質となる水素及び酸素とその生成物である水の散逸を防止するために配管系統を密閉化し、水電解装置と燃料電池装置で完全循環させる必要がある。今回の研究開発では、燃料電池装置と水電解装置を試作し、水素及び酸素と水の完全循環運転を目指した。

*1 防衛・宇宙セグメント 艦艇・特殊機械事業部 主席技師

*2 防衛・宇宙セグメント 艦艇・特殊機械事業部 潜水艦技術部

*3 総合研究所 化学研究部 室長 工博 技術士(機械部門)

*4 総合研究所 伝熱研究部

*5 海洋研究開発機構 研究プラットフォーム運用開発部門 技術開発部 次長 理博

*6 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット

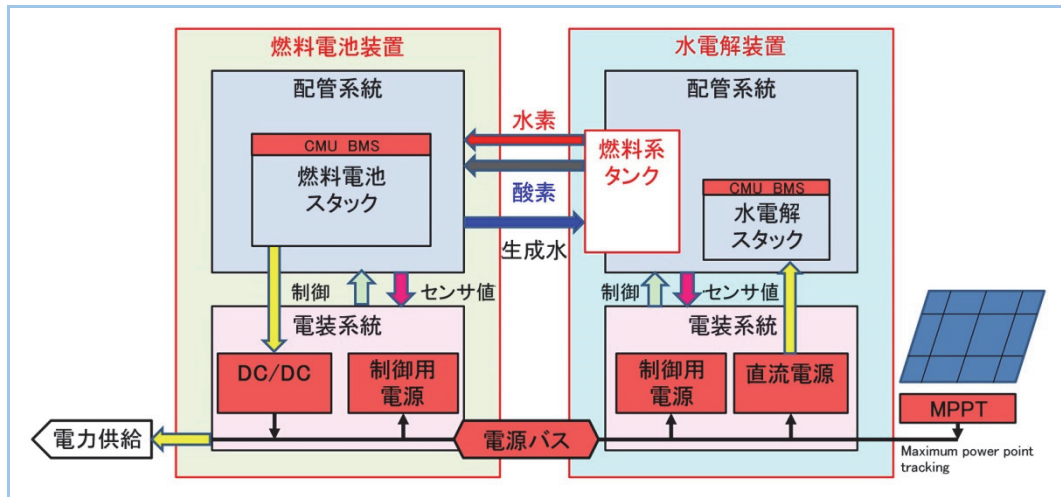


図1 スケーラブル完全孤立系燃料電池の構成

2. システム要素としての燃料電池装置・水電解装置の試作検討

2.1 燃料電池装置の試作検討

スケーラブル完全孤立系燃料電池を構成する燃料電池装置には JAMSTEC (国立研究開発法人海洋研究開発機構) と三菱重工業株式会社で海洋機器電源への適用を検討し、開発を進めてきた HEML (High Efficiency Multi Less) 方式⁽¹⁾を採用している。その方式の概要を図2に示す。2個のスタックと複数のバルブで構成し、ガスが一方のスタック(これを上流側スタックと呼ぶ)を通過した後他方のスタック(これを下流側スタックと呼ぶ)へ流入する。バルブ操作により、ある時間間隔で上流側スタックと下流側スタックを切替えて運転する。上流側スタックには上流側と下流側の2つのスタックで消費されるガスが供給されるため、上流側スタック出口では下流側スタック分のガス流れがあり、このガス流れで生成水が排出される。下流側スタックの生成水はガス流れがなくスタック内部に滞留するが、上下流切替えが行われると、上流側スタックとなり生成水が排出される。上下流入替え時間間隔を適切に選定することによって発電安定性を確保している。

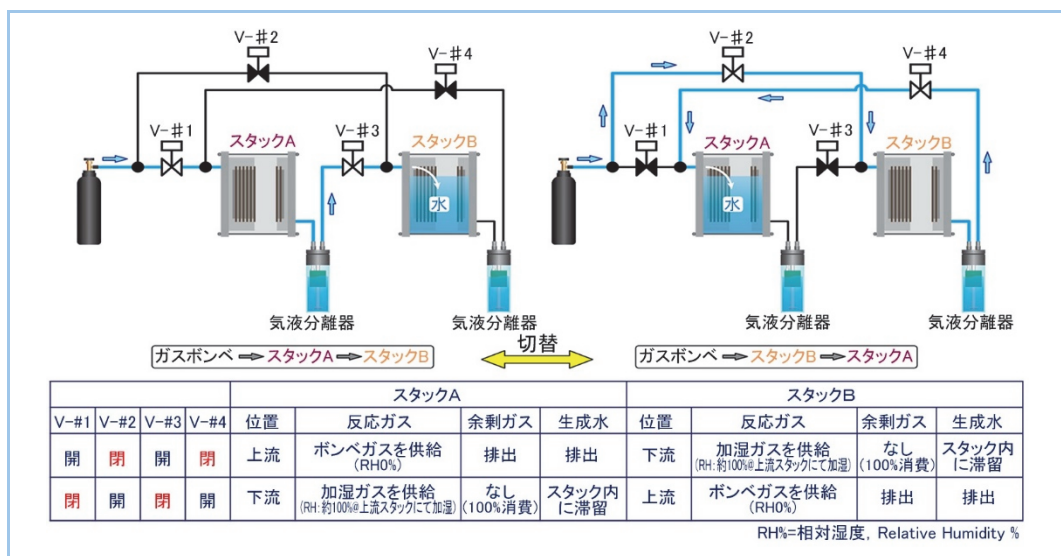


図2 HEML 方式の作動

今回、スケーラブル完全孤立系燃料電池としてより高い作動信頼性を目指し、直列にガスが流れるスタック数を増加させ、生成水排出能力を向上させることを検討することとした。

スタック数を増加してN個とした場合、スタック内部に生成水が滞留する最下流となる時間が『1/N』に減少し、発電性能の低下する確率が低下する。また、上流側スタックとなった場合、下流側スタック数が多いことからスタック出口のガス流れが多く生成水排出能力が向上し、作動が安定

する。その一方で、配管本数及びバルブ数が増大し複雑化する問題がある。そこでスタック数はHEML方式で必要最小数2個の2倍、合計4個とすることとした。

配置は、4個のスタックを2個1群として2群に分割し、2個ずつのスタック群を対向させた。通常は4個のスタックのガス流れを切替えて発電を行うが、傾斜が大きくなり一方のスタック群から生成水排出ができない状態となったときには、バルブ制御を切替えて生成水排出が可能な片群スタック2個のみで発電を行うことで常に電力供給を可能とした。この仕組みにより、燃料電池装置の姿勢に対する制約が大幅に軽減され、垂直となるVLS (Vertical Launching System: 垂直発射装置) 等へも対応可能となった。

燃料電池装置の外観を図3に示す。上述の通り、4個の燃料電池スタック(スタックA～スタックD)を2個ずつ2群分割し、V型に対向配置している。

発電時のセル電圧挙動として、スタックAのセル電圧変化を図4に示す。この図ではスタックのセル数6本のグラフが重なっている。スタックが最下流側スタックとなり、ガス流れがなくなったときにセル電圧が最も低下し、次に上流側スタックとなって、ガス流れが回復した際にセル電圧も回復している。(バルブ切替えにて電圧復帰。)

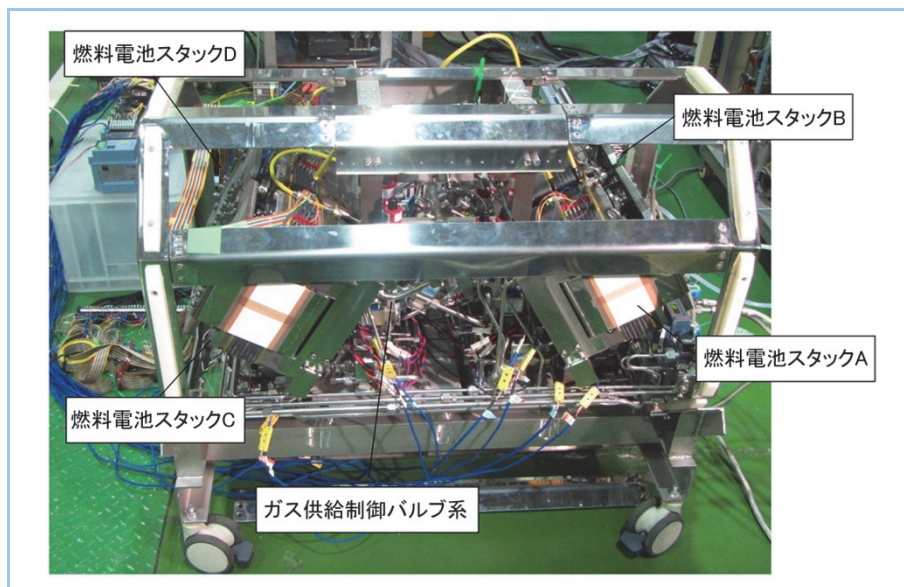


図3 試作燃料電池装置

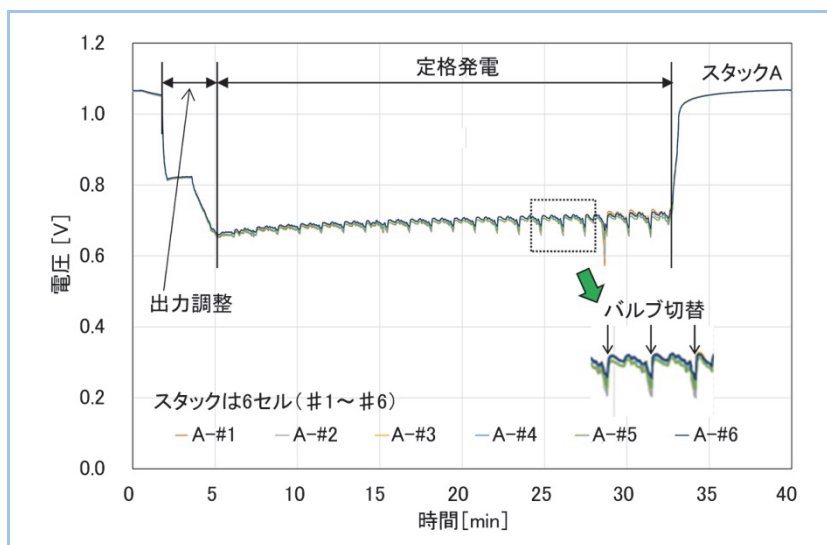


図4 試作燃料電池装置の発電結果

また水素系、酸素系ともに、電圧が回復するタイミングで配管内部温度が上昇した。配管内部温度の上昇は、発電による生成水が流通するときであることから、滞留水の解消でセル電圧が復

帰していると推定される。これらのデータから、細部の調整は必要であるが、試作機としての作動は、計画通りであることを確認できた。

2.2 水電解装置の試作検討

スケーラブル完全孤立系燃料電池を構成する水電解装置には、当社で開発を進めてきた水電解スタック技術⁽²⁾をベースとし、水素極と酸素極を等圧に保ちつつ電解により発生する水素・酸素で加圧昇圧する均圧昇圧方式を用いている。今回の水電解装置の最大作動圧は 29.9MPa として設計した。一般的な水電解装置では酸素系のみを電解用水を循環させているが、本装置では高圧の水素及び酸素を安全に扱うために水素系にも電解用水を循環させ、加えて電解用水の供給量を電解で使われる水量に比して多くすることで、電解で発生する水素・酸素を水に同伴させ輸送している。また水電解スタックをスタック格納容器内へ設置し、水素系統とスタック格納容器内の圧力を同一とする配管構造を持たせ、更に水素系統と酸素系統の圧力を等しく制御することでシール材破損による水素/酸素の混合とスタックからのガス漏洩を防止している。水に同伴させ輸送した水素・酸素は、それぞれの気液分離器で電解用水と分離し、ガス貯蔵タンクにて貯蔵した。水電解装置の外観を図5に示す。今回の試作で水電解装置を初めて8角形のフレームに搭載した。これにより、海中で使用する俵型耐圧容器に収容可能となった。この水電解装置に搭載される水電解スタック格納容器を図6に示す。またこの格納容器内部に設置される水電解スタックを図7に示す。

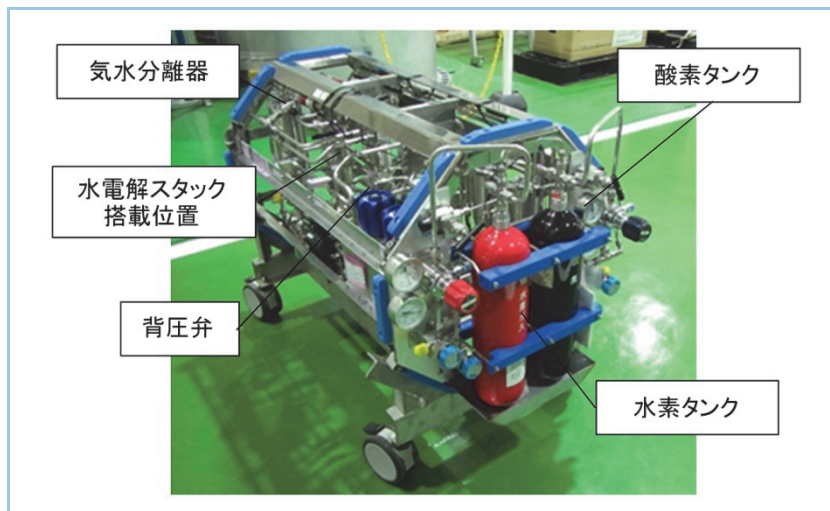


図5 試作水電解装置

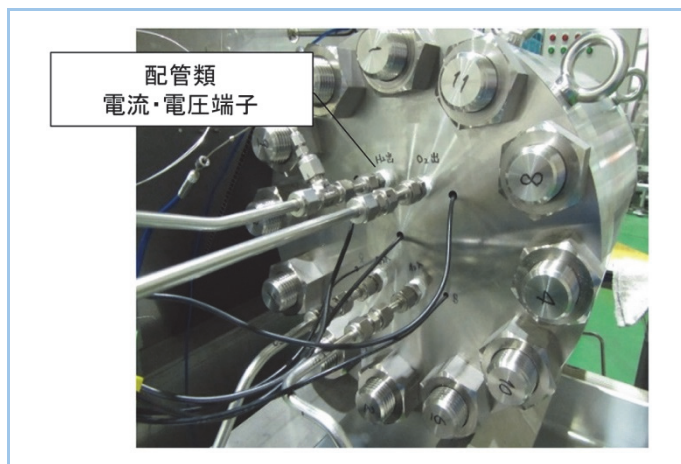


図6 水電解スタック格納容器

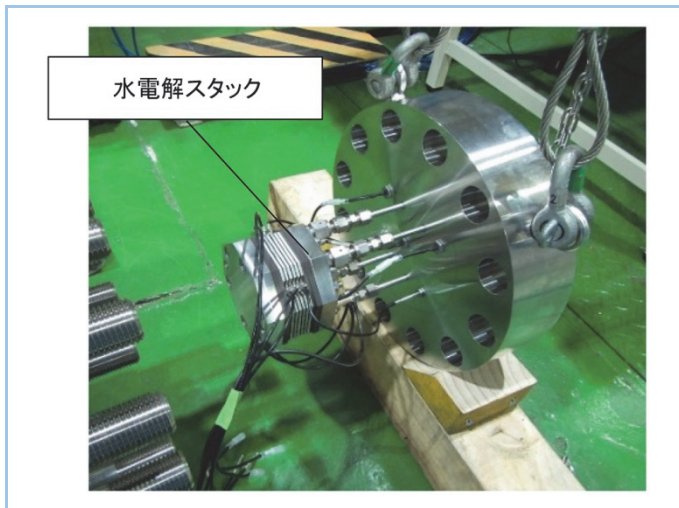


図7 水電解スタック

水電解スタックのIV特性取得結果を図8に示す。今回試作したスタックの電解電圧は、要素検用セルより高い傾向を示した。更に20Aで電解状態を保持すると、時間とともに電解電圧が上昇する現象が認められた(図中①)。

電解電圧が高くなる要因として、系統内の残留物や供給水由来の不純物吸着による電解膜の抵抗増加や触媒活性の低下、電解膜と給電体の接触性低下による接触抵抗増加などが挙げられるため、調査が必要と考えている。

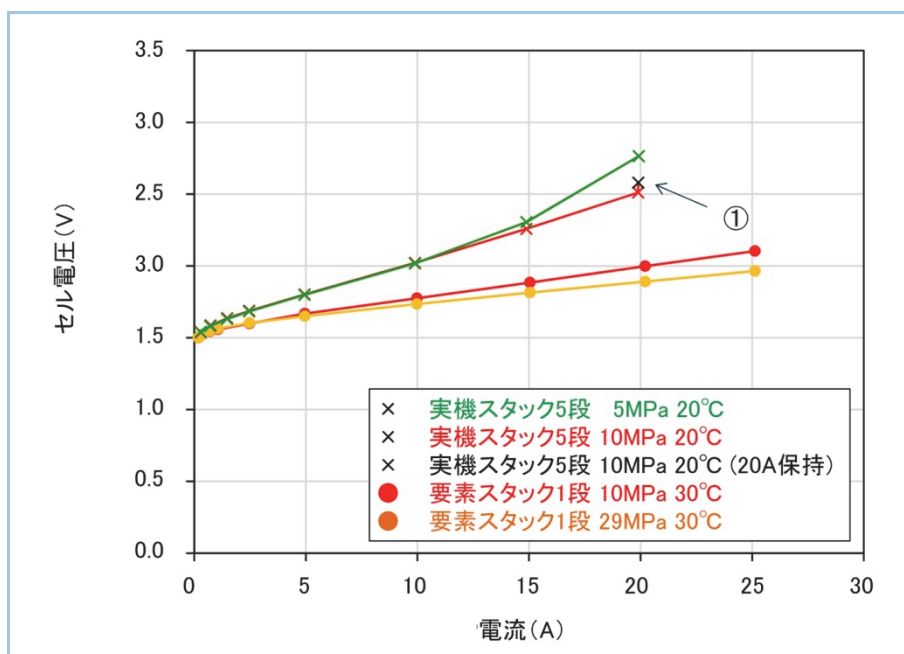


図8 水電解スタックのIV特性

3. スケーラブル完全孤立系燃料電池の構築検討

試作した燃料電池装置と水電解装置を組み合わせ、スケーラブル完全孤立系燃料電池を構築した。システム外観を図9に示す。また本システムでの活物質循環経路を図10に示す。

水電解装置で生成する水素・酸素は、ガス貯蔵タンクに貯蔵し、燃料電池装置へ供給した。燃料電池反応にて生成した生成水は、燃料電池装置の排水ポンプによって排出される。今回、水電解装置への返送は高圧給水ポンプにて実施することとした。

運転試験では、水素ガス貯蔵タンク、酸素ガス貯蔵タンクともに高純度水素及び高純度酸素で十分な置換を行った。次に電解用水を十分保持した水電解装置にて電解を行い、ガス貯蔵タンク

クに電解生成ガスである水素・酸素を貯蔵した。続いてガス貯蔵タンクから燃料電池装置へ水素・酸素を供給して発電を行い、発電終了後に生成水を高圧給水ポンプで水電解装置へ戻す操作を行った。このとき、水素及び酸素を供給するために必要なバルブ操作は手動にて実施した。同様に、生成水の移動に必要なポンプ操作も手動にて実施した。

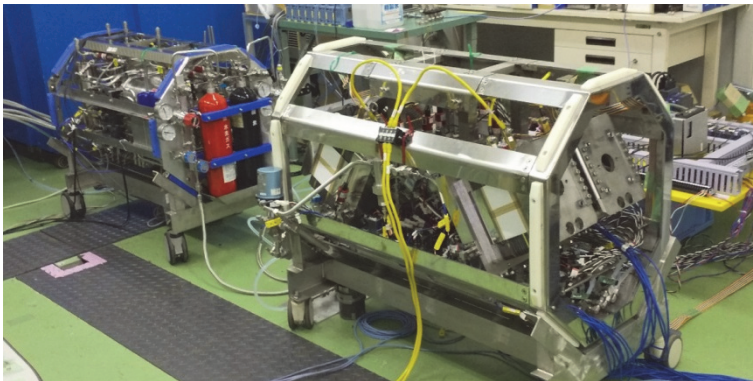


図9 再生型燃料電池システム

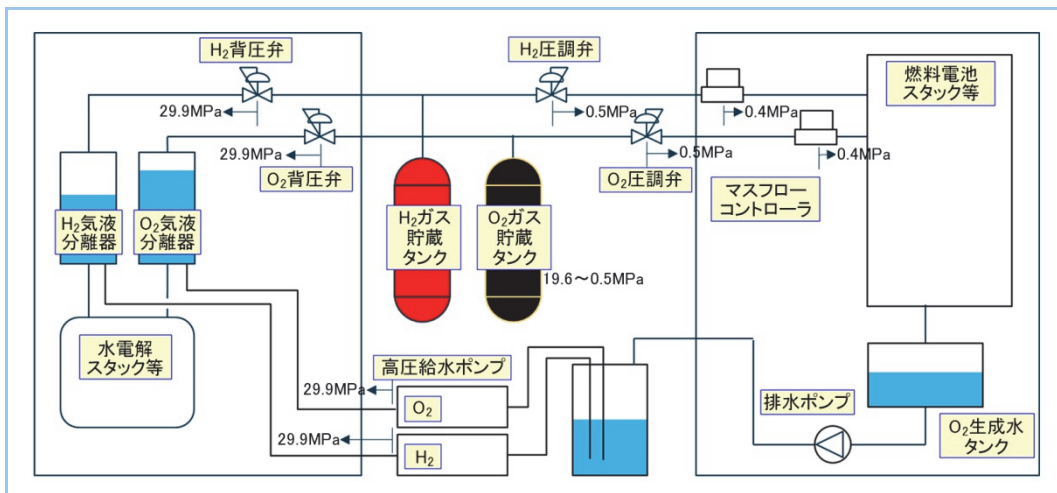


図10 活物質循環経路(ガス供給と生成水回収)

サイクル運転結果を図11～図12に示す。実運転模擬として、電解と発電をそれぞれ10分で切替えて繰り返す運転を計画し、状況を把握できる回数として6回の繰り返しの設定した。このとき、電解圧力は10MPa一定とすることとした。

1回目の電解及び発電では、システム挙動及びセル電圧を観察しながらスタック電流を増加させたため、所定電流値へ静定するまでに時間を要したが、2回目以降は、繰り返し円滑に所定電流まで上昇させることができた。水電解装置及び燃料電池装置の挙動は、毎回ほぼ同等であり、また切替え時の操作とそのときの挙動についても毎回ほぼ等しく、6回の繰り返しのにより全体システムとしての挙動を観察できた。

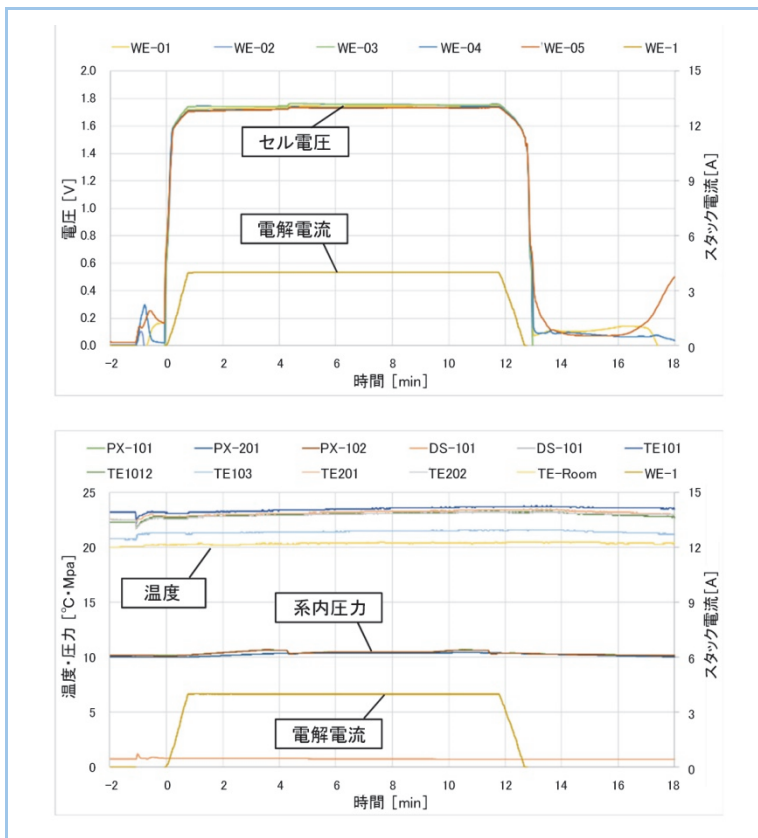


図 11 6回目電解特性

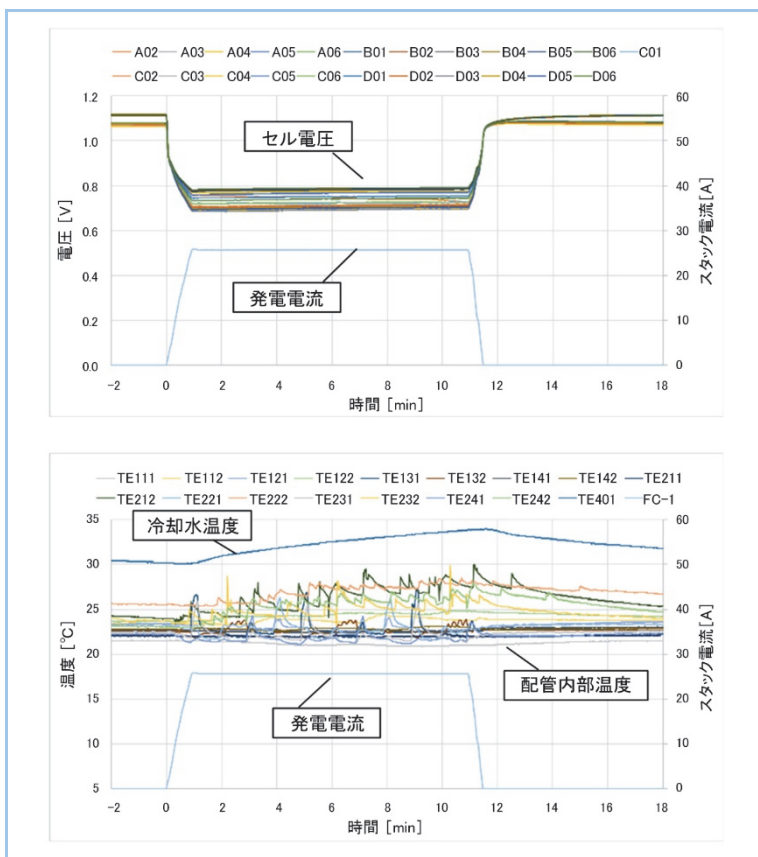


図 12 6回目発電特性

4. まとめ

燃料電池装置及び水電解装置を試作し、組み合わせて、スケーラブル完全孤立系燃料電池を構築した。運転試験を実施し、電解と発電を繰り返して、そのときの電圧挙動、温度挙動、圧力

挙動等の特性を観察した。この電解及び発電の繰り返し運用試験から、本システムが完全孤立系にて作動する再生型燃料電池としての機能及び性能を持つことを確認した。手動操作を一部必要としたが、生成水を再利用した水電解による水素・酸素製造と、製造した水素・酸素による発電を、完全に閉鎖された空間内で実現できていることから、完全孤立系燃料電池の技術確立に近付いたと考えている。今回の経験と知見を活かすことにより、スケーラブル完全孤立系燃料電池を海洋製品向けの電源として実用化が可能になっていくと考える。また本システムの持つ特性から、様々な極限環境での電源として適用可能であると考えており、月面活動における越夜電源等^③、宇宙空間でも広く活用できる電源としての展開も視野に入るものと考えている。

尚、本研究開発は、国立研究開発法人科学技術振興機構イノベーションハブ構築支援事業の支援のもと実施された国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙探査イノベーションハブ第4回研究提案募集 (RFP) へ JAMSTEC と当社にて応募し、採択案件として JAXA と共同して実施したものである。

参考文献

- (1) 谷俊宏ほか、閉鎖式コンパクト・高効率固体高分子形燃料電池システムの開発、三菱重工技報 Vol.51 No.1 (2014) P54～59
- (2) 玄後義ほか、21 世紀のエネルギー環境社会を拓く燃料電池の開発状況、三菱重工技報 Vol.42 No.3 (2005) P104～107
- (3) 星野健ほか、越夜技術、化学工学 Vol.76 No.7 (2012) P393～397