

# 水素社会到来に向けた HHOG<sup>®</sup>開発の取組み

## Approach to Technical Development of High-purity Hydrogen and Oxygen Generator (HHOG<sup>®</sup>) towards Arrival of Hydrogen-based Society



石井 豊\*  
Yutaka Ishii



中尾末貴\*  
Sueki Nakao

当社は、水素社会の到来を見据え、高純度水素（酸素）発生装置「HHOG」の技術開発に取り組んでいる。水素を利活用する際、水素製造コスト低減が求められるため、水素発生装置のインシヤルコスト低減や装置ダウンサイジングによる設置スペースの低減、水素製造効率の向上などの技術開発が重要である。当社はこれらを重点項目として位置づけ、国の研究開発プロジェクトへ参画するなどして技術開発を進めている。その成果の1つとして、システム構成や機器の仕様見直しなどにより、従来の商用機に比べ約30%のインシヤルコスト低減、また設置スペースに関しては設置面積比で従来の約20%の低減の可能性を見出した（いずれも水素発生量60 Nm<sup>3</sup>/h 装置ベース）。また、消費電力を従来に比べ約10%低く抑えた電気分解モジュールの採用により、水素製造効率を向上できる目途を得た。

We have advanced the technical development of “HHOG” (High-purity Hydrogen and Oxygen Generator) while staying focused on the arrival of a hydrogen-based society. As the reduction of hydrogen production cost is required in its utilization, it is important to develop technologies to reduce its initial cost and installation area through downsizing as well as technologies to increase its production efficiency. We have positioned these development items as priority issues, and we are promoting them by participating in national projects. As one of the achievements, through reviewing system configurations and equipment specifications, we have found the potential to reduce initial cost by about 30 % and installation area by about 20 % compared with conventional HHOG (all with base output capacity: 60 Nm<sup>3</sup>/h). Also, we have recognized the potential to increase hydrogen production efficiency by adopting an improved electrolysis module that has about 10 % lower power consumption than conventional ones.

### Key Words :

水素発生装置	Hydrogen generator
水電解	Water electrolysis
固体高分子電解質膜 (PEM)	Polymer electrolyte membrane
水素社会	Hydrogen-based society
再生可能エネルギー	Renewable energy
水素ステーション	Hydrogen refueling station
低炭素化	Low-carbon

## 【セールスポイント】

- ・ 99.999 % 以上の高純度水素ガスを簡単な操作で供給可能。
- ・ 原料は純水であり、危険な化学物質、薬品などを使用しないこと、装置内の水素保有量が少ないことから安全性が高い。
- ・ 国内外における HHOG の納入実績は約170台（2018年3月末時点）であり、固体高分子電解質膜による水電解式水素発生装置として国内トップシェアを有する。
- ・ 従来の工業用に加え、水素エネルギー、再生可能エネルギーなどの利用分野にも適用されている。

## まえがき

当社の高純度水素発生装置（以下、HHOG）は、簡易な操作で高純度の水素を供給できる。HHOG は安全性が高いことなどが評価され、国内外に約170台の納入実績があり（2018年3月現在）、当社は固体高分子電解質膜（以下、PEM）を用いた水電解式水素発生装置メーカーとして国内でトップシェアを有している。HHOG は、工業用途の水素発生装置として一定の評価をいただいているが、水素社会実現に向け拡大しつつあるエネルギー利活用分野においては、さらなるイニシャルコストの低減、ダウンサイジングなどが求められている。また、これらは工業用途の水素発生装置にも共通して求められる事項でもあることから、これらのニーズに応えるための HHOG の技術開発に取り組むこととした。本稿ではその取り組みの成果を紹介する。

### 1. HHOG の概要<sup>1)</sup>

当社の HHOG は PEM を用いた純水による水電解方式を採用している。このため、発生水素の純度は 99.999 % 以上であり、高純度の水素ガスを製造、供給可能である。

また、高圧ガス保安法などの法規に該当しないこと、ボンベのように空容器の交換作業の手間が不要で、その際の不純物混入のリスクがないことなどの特長も有する。HHOG はオンサイトで水素製造が可能であることから、工業用途で利用されるほか、再生可能エネルギー（以下、再エネ）などのような変動電源を用いた水素製造などの実証試験にも採用されている。以下にその実証の一例について概説しつつ、その成果を紹介する。

### 2. 環境省実証事業<sup>2)</sup>

#### 2.1 目的

水素社会構築のための政策的な指標である「水素・燃料電池戦略ロードマップ」<sup>3)</sup>では、第一段階の目標として水素利用を飛躍的に拡大することを掲げており、燃料電池自動車（以下、FCV）がその役割の一翼を担うことが期待されている。FCV 普及のために

はインフラとして水素ステーションの整備が必要であり、同ロードマップの中では2020年度までに160カ所程度、2025年度までに320カ所程度という目標が掲げられている。現在、国内で流通している水素の大部分は化石燃料由来のものであり、その一部が水素ステーションにおいても利用されている。化石燃料由来の水素は製造時に CO<sub>2</sub> の排出を伴うが、同ロードマップでは2040年頃にトータルでの CO<sub>2</sub> フリー水素供給システムを確立することが目標として掲げられるなど、CO<sub>2</sub> の排出量を抑制した水素の製造に段階的に変えていくことが求められている。

水素ステーションにおける低炭素化を促進する一つの方法として、化石燃料由来の水素に再エネ由来の水素を一部混合することが考えられる。このため、再エネを利用し水電解により製造する水素（以下、再エネ水素）を活用する水素ステーション用のシステムの製作、運用等に関する課題を抽出し、解決するために、当社は（株）神戸製鋼所、（株）神鋼エンジニアリング&メンテナンスと共同で、環境省実証事業の制度を活用した再エネ由来の水素を利用する水素ステーション関連技術の開発・実証に取り組んだ（事業名称：CO<sub>2</sub> 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「中規模（1.5 kg/h 程度）の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証」）。当社は HHOG 部分を担当し、イニシャルコスト低減、ダウンサイジングの実現をふまえた実証用 HHOG の設計、製作および実証運転における技術的な検証を行った。

#### 2.2 実証用 HHOG の設計、製作

実証用 HHOG の仕様を表 1 に、外観を写真 1 に示す。イニシャルコスト低減とダウンサイジングを図るために、装置フローの簡略化を検討し、設計に反映した。また、水素ステーションの建設では建屋面積の最小化による費用抑制が求められることから、設備は可能な限り屋外に設置することが望ましいため、屋外設置が可能な筐体構造とした。

可燃性ガスである水素を装置内に保有するという

表 1 実証用 HHOG の仕様

項目	仕様
水素発生量	約20 Nm <sup>3</sup> /h
水素ガス純度	99.999 % 以上
水素供給圧力	約0.82 MPa
水素ガス露点	-70℃以下 (大気圧露点)
筐体寸法 (概寸)	長さ：約4 600 mm 幅：約2 000 mm 高さ：約2 200 mm
その他	屋外使用 (風雨, 塩害対策など)



写真1 実証用 HHOG の外観

リスクに対しては、その保有量の最小化、水素の漏洩対策を反映した装置設計や出荷前の製品検査による漏洩リスクの低減、および漏洩時のインターロック対策を講じている。また、筐体構造の場合は内部で万一水素が漏洩した場合、水素が滞留し高濃度雰囲気形成されるリスクが高まる。そのため、筐体内を換気しながら筐体内部の水素濃度を常時監視することで、設備の安全性を確保できる仕様としている。

太陽光発電や風力発電などの再エネ由来の電力を水電解用の電源として利用する場合は、電力の変動に対応するための装置構成が必要となる。今回の実証設備では太陽光発電を模擬した電力と系統電力のいずれか一方、あるいはそれらを混合した電力を利用して、再エネ由来の変動電力を再現した運転条件での水素製造の実証を行うために、図1に示す電源供給回路を採用した。

それらの要素を反映した実証用 HHOG を (株) 神戸製鋼所高砂製作所に納入した。同製作所に既設

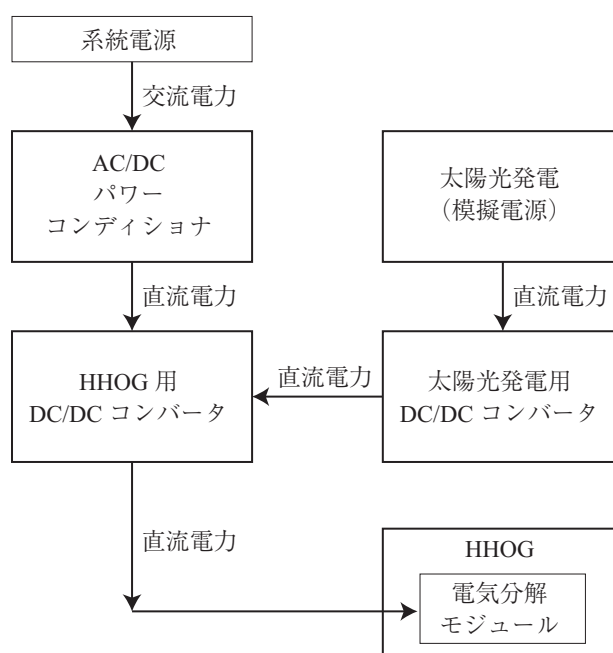


図1 実証用 HHOG への電力供給回路

の実証用水素ステーション設備に連結設置された後に、同設備と連携した実証運転を開始した。

## 2.3 実証内容および結果

### 2.3.1 HHOG の適用性の検証

再エネ水素ステーション (以下、再エネ ST) 実証設備全体の概略フローを図2に示す。

再エネ ST 実証設備は、既設の水素ステーション部分と、今回新たに設置した再エネ水素設備部分とで構成され、後者は HHOG と、その発生水素を水素ステーション部分に供給する役割を担う中間ユニットにより構成される。既設の水素ステーションの FCV への水素充填能力は最大で300 Nm<sup>3</sup>/h であり、ここに HHOG より得られる20 Nm<sup>3</sup>/h の再エネ水素を混合した場合、再エネ水素の比率は6%程度となる。ただし、FCV 黎明期における FCV への水素充填頻度は少なく、3時間に1台程度と仮定した場合は全量を再エネ水素で賄えるため、実用性が高いシステム構成であると考えられる。

HHOG から供給された水素は一時的に水素バッファタンクに貯留された後に中間水素圧縮機で昇圧され、中間蓄圧器に充填貯蔵される。蓄圧器内の圧力が規定範囲内となるように間欠的に中間水素圧縮機が稼働する。

HHOG と中間水素圧縮機および周辺機器 (以下、中間ユニット) との連携性の良否に関しては、中間水素圧縮機の起動・停止などの影響を受けずに HHOG の運転状態が安定し、定格性能を発揮でき

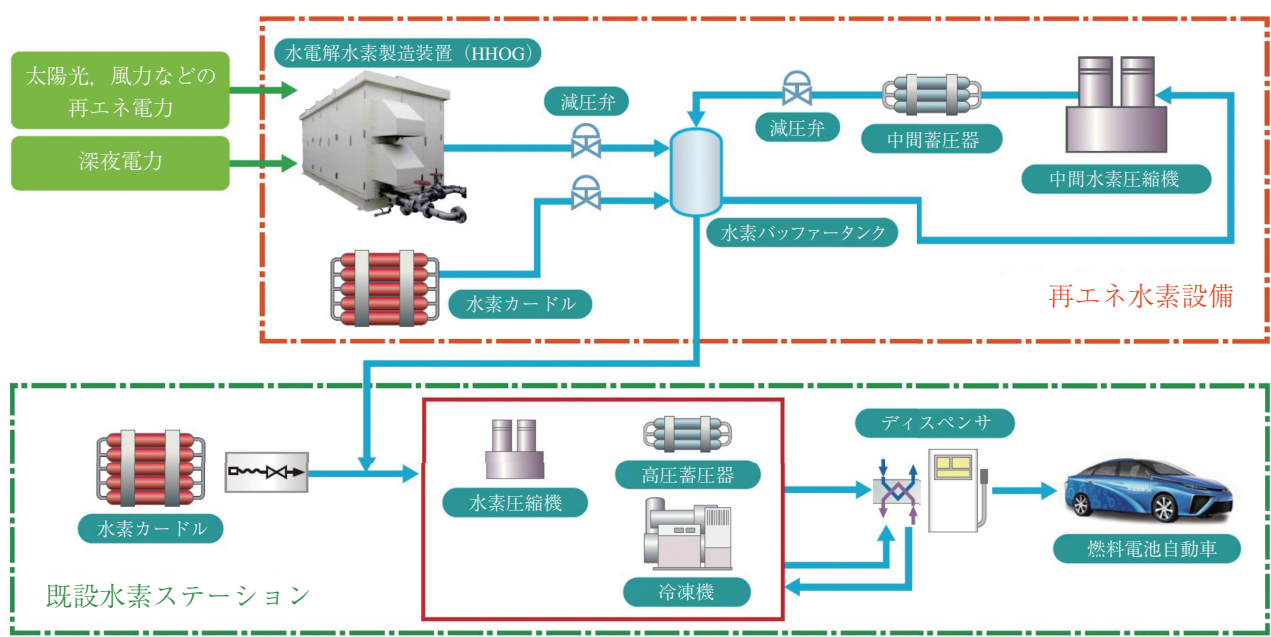


図2 実証設備全体の概略フロー

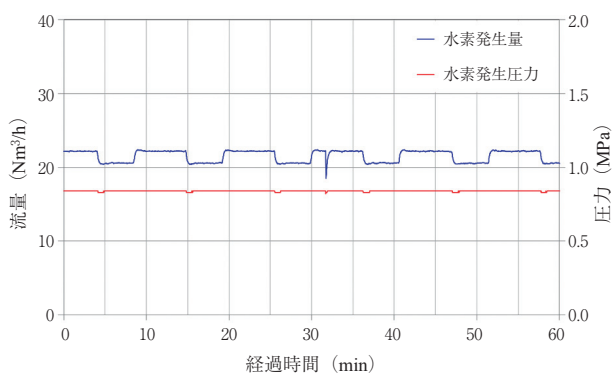


図3 システム電源を用いた場合のHHOGの運転状態

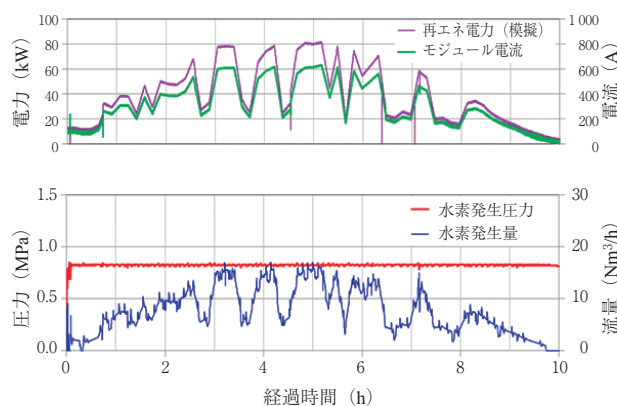


図4 太陽光模擬電源を用いた場合のHHOGの運転状態 (夏季・曇天時を想定した運転)

ることを判断基準と定め、実証においてその確認を行った。

中間ユニットとの連携運転時におけるHHOGの水素発生量と水素発生圧力の経時変化を、それぞれ図3、4に示す。図3はシステム電源の利用時の運転データであり、水素供給量は定格値である $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ を常時上回り、圧力の安定性も確認できた。また、再生電力を利用した運転では、夏季、中間季、および冬季のそれぞれについて、晴天、曇天、雨天時の各条件により実証設備の運転を行った。各条件の中で電力の変動が比較的大きい夏季曇天時における運転データを図4に示す。水素発生量が電力の変動に追従して変化する一方で圧力は安定していることなどから、HHOGと中間ユニットとの連携性、再生電力との連携性はそれぞれ良好と判断できる結果が得られた。

### 2.3.2 設備の耐久性の検証

再生電力STにおけるHHOGの耐久性に関して、本実証ではHHOGの電気分解モジュールの状態変化に着目して評価を行った。電解電圧の上昇については1000時間あたりの変化率が初期値の1%以下であることを許容値と規定し、検証を行った。本実証期間中に積算で約780時間のHHOGの運転を行っており、その間に約400回の設備の起動・停止が含まれている。この運転における電解電圧の上昇は許容値以下であった。また、発生ガスの純度の点でも特に異常は認められなかった。HHOGの各構成機器に関しても本実証において異常な消耗等は発生しておらず、従来型HHOGと同等の耐久性を見通せる結果が得られた。

### 2.3.3 イニシャルコスト低減およびダウンサイジングの検討

本実証における検証により、イニシャルコスト低減に適用可能なコストダウン項目をいくつか抽出した。電気分解モジュールに関しては、電流密度を当社従来比の1.4倍程度に高めることが可能であることを当社内での試験で確認しており、その電流密度向上の効果により電気分解モジュールを構成する部品の数を約30%低減することが可能となる。さらに、構成部材の仕様見直しにより部材コストを低減可能であることも確認しており、部品数量低減と部品の仕様最適化の両面でコスト低減が可能となる。

また、並行して装置フローの簡素化による装置コ

ストダウンについても検討を進めた。従来は、電気分解モジュール保護のために水素圧力と酸素圧力の差圧を基準の範囲内に保つ必要があり、これを維持するために酸素の圧力制御機器を備えていたため、装置フローが複雑となりコストアップの要因になっていた。今回の実証では差圧の維持が不要な構造を有する電気分解モジュールを採用し、差圧制御なしで装置が運転可能であることの検証を行った。実証の結果、水素側の圧力を0.85 MPa、酸素側の圧力を大気圧として差圧0.85 MPaの状態での運転が可能であることを確認した。差圧制御が不要となることから、従来備えていた酸素分離タンク、補給水ポンプおよびその他の付属機器を削減し、装置フローを簡素化することが可能となった（図5、6）。また、

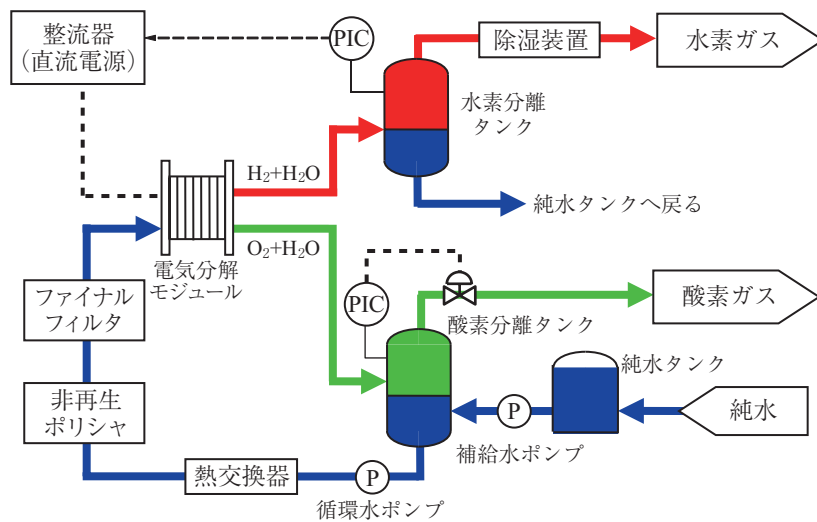


図5 HHOGの概略フロー（従来機）

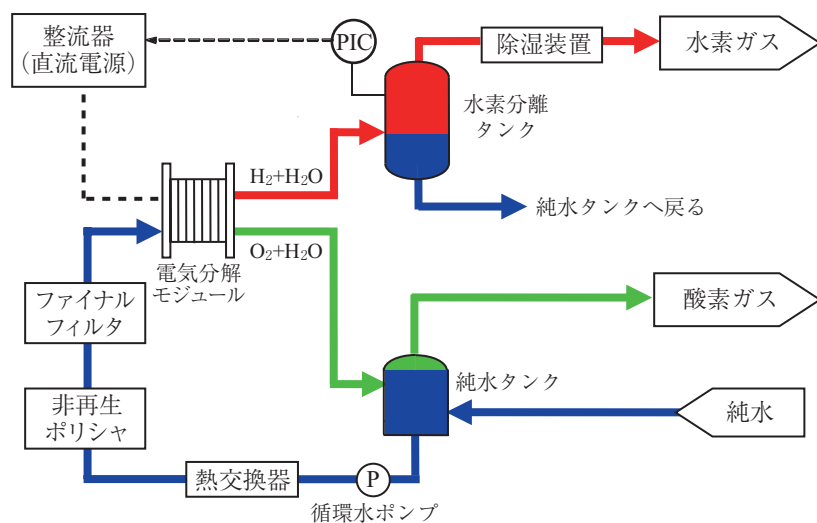


図6 HHOGの概略フロー（簡素化後）

非再生ポリシャ、水素分離タンク、純水タンクなど容器類の減容化も図り、いずれもイニシャルコスト低減に寄与することを確認した。

これらのコストダウン項目を、水素発生量が60 Nm<sup>3</sup>/h 級の装置に適用した場合、装置コストについて当社従来機比で30 %程度の低減が可能という試算結果が得られた。

また、ダウンサイジングに関しては、上記の各項目の適用に加え、配管サイズの見直しと機器配置の最適化を図ることにより、水素発生量60 Nm<sup>3</sup>/h 級の装置の場合で、従来機に比べ設置面積比で約20 %低減できる目途が本実証を通じて得られた。

一方、消費電力の低減を図った当社開発の電気分解モジュールを今回の実証用 HHOG へ搭載し、電解性能の確認を行った。その結果、従来機に比べ約10 %消費電力が低減することを確認し、水素製造効率の向上へ寄与できることが判った。

## 2.4 今後の展開

本事業を通じ、水素ステーション用途の HHOG を設計・製作し、実証試験を行うことで、既設水素ステーションと HHOG の連携などを確認し、その適用性を見出し、技術的な知見を蓄積できた。今後はこの成果を活かした水素ステーション向けシステムの提案などを行っていききたい。

また、イニシャルコスト低減とダウンサイジングなどに関して得られた成果は、HHOG 標準機の設計に順次反映していく。

## 3. NEDO 実証事業

### 3.1 背景

当社は2014年度より、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）の「水素社会構築技術開発事業／水素エネルギーシステム技術開発／非常用電源機能を有する再生可能エネルギー出力変動補償用電力・水素複合エネルギー貯蔵システムの研究開発」に参画している。当社は、NEDO からの委託先である東北大学より再委託を受け、水素製造技術に関する研究開発を担当している。

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う停電発生の際、仙台市茂庭浄水場では24時間の停電に対応可能な非常用発電機に切り替わったが、停電時間が想定より24時間を大きく上回り、物流遮断などの影響で発電機の燃料確保が困難となり、浄水場の機能維持に大変苦慮した状況となった。このような状況を受け、東北大学は災害発生などの非常時でも浄水場の機能を維持可能なシステムを提案し、仙台市水道局の協力のもと茂庭浄水場にて再エネ由来

の電力と水素を組合せた「電力・水素複合エネルギー貯蔵システム」（以下、本システム）の有効性を検証することとなった<sup>4)</sup>。

### 3.2 目的

今回の実証試験では、太陽光由来の変動電源を HHOG の電気分解モジュールに供給して水素製造を行った。工業用途の装置の運転に利用する安定な商用電源とは異なり、天候に応じて入力電力が変動し、それに呼応して水素発生量も変動する。今回は変動する入力電力に対する HHOG の動作性、制御性、耐久性を確認し、本システムへの HHOG の適用性について検証することを目的とした。また、不安定な再エネ由来の電源を用いた水素製造を行うため、従来の工業用途（安定電源）の場合と異なる運転方法を検証する。たとえば、HHOG 内の除湿装置の運用方法の工夫による所要ユーティリティ量の削減、消費電力量を従来に比べ低く抑えた電気分解モジュールの採用など、水素製造システムの高効率化に寄与する運転方法の確立を目指した。

### 3.3 実証内容

本システム構成機器の仕様は、茂庭浄水場の消費電力と太陽光発電データを用いた東北大学によるシミュレーションに基づき決定されており、実用システムの1/50の規模としている。本システムは、太陽光発電設備、電力制御装置、模擬負荷装置、水素ガスタンク関連設備、電気二重層キャパシタ（以下、EDLC）、水電解装置（HHOG）、燃料電池（以下、FC）、水素吸蔵合金で構成されている。本システムの概略フローを図7に、本システムの全景写真を写真2に示す。太陽光発電設備は直流母線を介してEDLC、HHOG、FC、模擬負荷装置に接続されている。HHOG で製造した水素ガスは、水素ガスタンクと水素吸蔵合金を併用して貯蔵する。

今回は電力と水素を複合エネルギーとして利用し、再エネ由来の変動出力を補償する（変動出力を安定化させる）実証を行った。

水素発生量が5 Nm<sup>3</sup>/h の HHOG を導入し、太陽光発電設備からの変動電力を HHOG 用 DC/DC コンバータを介して電気分解モジュールへ供給し、装置単体での性能確認試験を実施した。その結果、変動電力に対する追従性や制御性などに関し、設計どおりの性能が得られることが確認された。また、運転方法を再エネ由来の入力電力に対応させた除湿装置の動作、性能が設計どおりであることや、水素製造効率の高効率化を目的とした電気分解モジュールの採用による消費電力の低減効果を確認した。

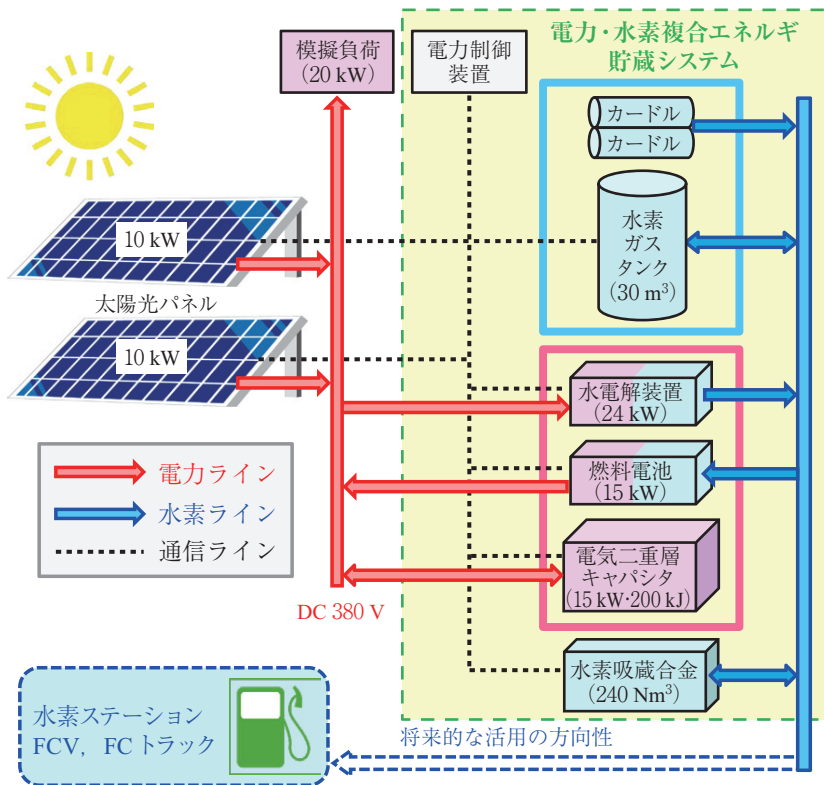


図7 本システムの概略フロー

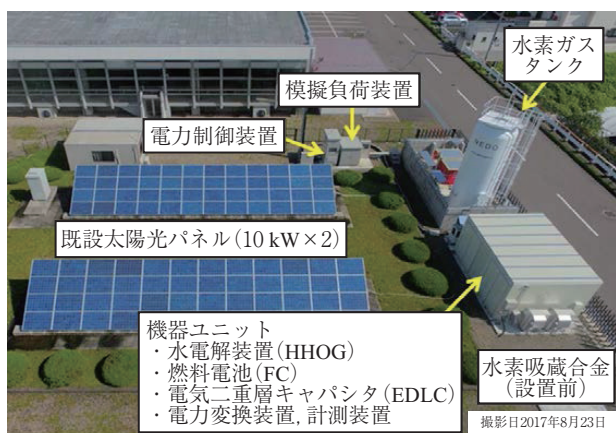


写真2 本システムの全景写真  
(仙台市茂庭浄水場内)

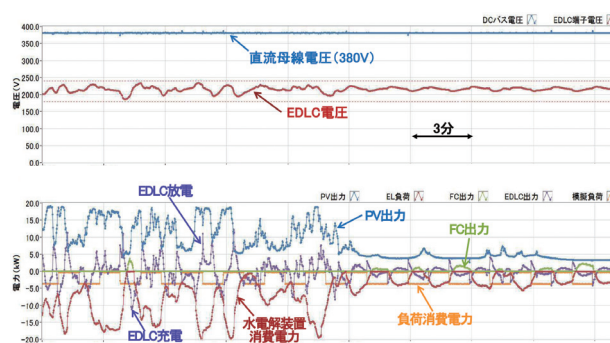


図8 本システムの連携試運転データの一例

本システムを構成する各機器の連携試運転データの一例を図8に示す。EDLCの充放電や水電解装置(HHOG)の消費電力が、太陽光発電出力の変動に応じて追従していること、FC出力や直流母線電圧、負荷消費電力を安定して維持できることを確認した。

### 3.4 今後の展開

現在、システム構成機器の連携運転により、様々な天候パターンのもとで実証を継続している。な

お、実証試験期間は2018年度末までの予定である。

発電量が変動する再エネを利用する場合、HHOGの構成機器である電気分解モジュールや補機類などの消費動力の低減、所要ユーティリティ使用量の削減などによるシステム効率の向上が求められる。今回の実証で、除湿装置の運転方法の工夫や、水素製造効率の高効率化を目指した電気分解モジュールの採用など、システム効率向上のための内容を反映したHHOGの安定作動を確認できた。今後も実証試験を通じ、HHOGのさらなる高効率化の可能性について検証していく。

## む す び

2017年12月には世界に先駆けて水素社会を実現するための「水素基本戦略」<sup>5)</sup>が決定され、具体的な数値目標が示されている。このため、今後さらなる水素製造に関する技術開発の重要性が増してくると考えられ、当社は社会や顧客のニーズに応えながら、水素製造技術の開発、ブラッシュアップに引き続き取り組んで行く所存である。

最後に、環境省の実証事業において多大なご協力をいただいた(株)神戸製鋼所、(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンスの関係各位に深謝する。

また、NEDOの実証事業においては、仙台市水道局より実証場所を提供いただいております、また東北大学、(株)前川製作所、日本ケミコン(株)の関係各位には実証試験の実施にあたり多大なご協力をいただいております。ここに深く感謝の意を表す。

## [参考文献]

- 1) 中尾末貴, 亀澤啓太: 神鋼環境ソリューション技報 (高純度水素発生装置「HHOG」の足跡と今後の展望), Vol.13 No.1 (2016), pp.35-42
- 2) 株式会社神戸製鋼所, 株式会社神鋼環境ソリューションほか「平成29年度環境省委託・補助事業 CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業 中規模 (1.5 kg/h 程度) の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証 成果報告書」(平成30年3月)
- 3) 「水素・燃料電池戦略ロードマップ」, 水素・燃料電池戦略協議会, 平成28年3月22日改訂
- 4) 津田理, 宮城大輔: 電気設備学会誌 (非常用電源機能を有する再生可能エネルギー出力変動補償用電力・水素複合エネルギー貯蔵システム), vol.37 No.11 (2017), pp.781-784
- 5) 「水素基本戦略」, 再生可能エネルギー・水素等関係関係会議, 平成29年12月26日