

高純度水素発生装置「HHOG」の足跡と今後の展望

Past Trend and Future Outlook of High-purity Hydrogen Oxygen Generator (HHOG)



中尾末貴*
Sueki Nakao



亀澤啓太*
Keita Kamesawa

当社の固体高分子電解質膜を利用した水電解式の高純度水素発生装置「HHOG」は工業用途において国内トップシェアを誇る。商品化後20年を経過し、工業用水素ガスの供給装置として、130台を超える実績を有する。これは市場ニーズの変化をとらえた装置開発の成果ともいえる。近年では水素エネルギーおよび再生可能エネルギー利活用市場の立上りにより、事業をとりまく環境は新たな局面を迎えているが、当社ではこれらの分野により適合する高効率、低価格な商品を市場に供給すべく、様々な実証試験に取り組んでいる。

Water electrolyzer, HHOG (High-purity Hydrogen Oxygen Generator) using polymer electrolyte membrane has the top domestic market share in industrial applications. Twenty years have passed since commercialization of HHOG, and delivery number of HHOG is more than 130. These are the results of research and development of HHOG that captures the changes in the market needs. In recent years, the markets of hydrogen energy and renewable energy are expanding, and the business environment surrounding HHOG is entering a new phase. We are working on various verification tests, in order to develop and supply high efficiency and low cost products for these markets.

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
電力貯蔵	Electricity storage
水素社会	Hydrogen society
再生可能エネルギー	Renewable energy

【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。
- ・ 原料は水と電気だけで、危険な化学物質、薬品などを使用しない。装置内に保有する水素量が少なく安全性が高い。
- ・ 国内外における納入実績は130台以上であり、工業用の水電解式水素発生装置として国内トップシェアを誇る。
- ・ 水素エネルギー、再生可能エネルギーなどの分野にも適用可能。

まえがき

当社の高純度水素発生装置（HHOG）は2016年で商品化後20年が経過し、節目の年を迎えた。HHOGは簡易な操作で高純度の水素を供給でき、安全性が高いことなどが評価され、国内外に130台を超える納入実績を有する（2016年3月時点）。これは、工業用途向けの固体高分子電解質膜を用いた水電解装置メーカーとして国内トップシェアである。

本稿では、HHOGの開発当初からの取組みや納入事例、今後の事業環境を見据えた新しい商品開発の取組みなどを紹介する。

1. HHOGの概要

1.1 原理

HHOGは、固体高分子電解質膜を利用して、純水を直接電気分解し、純度の高い水素ガスを発生させる装置である。図1にその原理を模式的に示す。

固体高分子電解質膜にはフッ素系樹脂のスルフォ

ン酸カチオン交換膜などを使用しており、電解質溶液と隔膜の役割を果たす。この固体高分子電解質膜の両面に水電解の電気化学反応を促進させる役割を持つ白金族触媒などを一体接合したものが膜電極接合体（Membrane Electrode Assembly, MEA）である。このMEAの陽極側に純水を供給し、両極間に直流電流を通電すると触媒反応により、陽極触媒層で純水が酸素ガスと水素イオンに分解される。水素イオンはカチオン交換膜中を電場の働きにより陰極側へ移動し、陰極触媒層で電子を得て水素ガスとなる。

1.2 システム

HHOGのシステムフローを図2に示す。

電気分解に使用される純水は循環水ポンプで循環され、熱交換器、非再生ポリシャで水温、水質を一定にし、電気分解モジュールに供給される。電気分解で消費された純水は、その分だけ純水タンクから酸素分離タンクへ補給される。

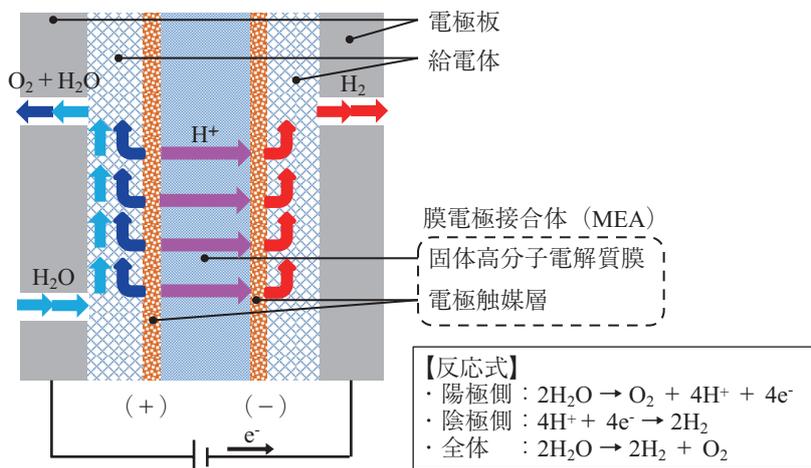


図1 水素ガスの発生原理

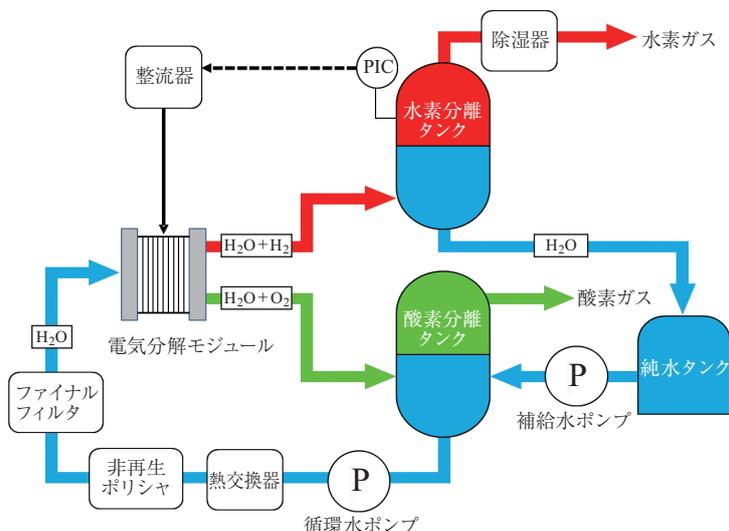


図2 HHOG システムフロー

表1 他オンサイト水素発生方式との比較

項目	HHOG (PEM 型水電解法)	アルカリ水電解法	水蒸気改質法
原料	純水	純水, アルカリ	メタノール, 都市ガス, プロパンガス
毒性	なし	劇物	劇物, 危険物
適用法規	労働安全衛生法	毒・劇物取締法, 薬事法 労働安全衛生法	消防法, 毒・劇物取締法 大気汚染防止法, 労働安全衛生法
水素ガス純度	99.999~99.9999 %	99.9 %	99.99 %
主な不純物	O ₂	O ₂ , アルカリミスト	CO, CO ₂ , 炭化水素
操作性	・ 運転開始と同時に水素ガスを発生可能 ・ 水素ガス発生量が定格の0~100 %範囲で運転可能	・ パージのため起動に時間がかかる ・ 水素ガス発生量が定格より大幅に少ない領域での運転不可	・ 昇温するため起動に時間がかかる ・ 水素ガス発生量の変更に対する応答性が悪い
メンテナンス	ほとんど不要	材料腐食による構成機器の定期交換 アルカリ電解液の更新, 廃液処理	触媒の定期交換 原料槽の定期点検
発生廃棄物	なし	アルカリ廃液	CO, CO ₂ , 炭化水素
付帯設備	直流電源装置	直流電源装置, 薬品注入装置 アルカリミストスクラバ, 廃液処理設備	メタノール貯槽, ガス精製装置 ガスホルダ, コンプレッサ

電気分解モジュールで発生した酸素ガスは純水とともに酸素分離タンクに送られる。水素ガスは水素分離タンクに送られ、同伴した純水をここで分離し、後段の除湿器で除湿されたのち、供給される。

水素ガスの発生量は、水素分離タンクの水素ガス圧力が常に一定になるように、電解電流値を制御することで調節し、0~100%の範囲で自動制御され供給される。

1.3 他方式との比較

1.3.1 圧縮水素との比較

HHOG はポンペなどの圧縮水素と比較すると、安全性に優れている。HHOG は、デマンドに応じて水素ガスの発生量を瞬時に0~100%の範囲で制御できるため、システム内に水素を貯蔵させる必要がほとんどない。したがって、地震や火災等の不測の災害時には、装置を停止させるだけで良く、本質的に安全であると言える。また、HHOG で発生する水素ガス圧力は1 MPa 未満のため、高圧ガス保安法に規制されない。さらに、ポンペなどのように交換作業が不要なため、交換用の予備のポンペを設置するための敷地も不要である。

1.3.2 他方式のオンサイト水素発生方式との比較

HHOG とその他のオンサイト水素発生方式との比較を表1に示す。

ユースポイントの近傍で水素を発生させるオンサイト方式の代表的なものとしては、メタノールや都市

ガスなどの炭化水素系の原料を水蒸気改質して得る方法と、水の電気分解による方法がある。水の電気分解には、HHOG のように固体高分子電解質膜を利用した方法と、水酸化カリウムなどのアルカリ水溶液を電解質として用いて電気分解を行う方法がある。

水蒸気改質法は、一般的には50 Nm³/h を超える大量の水素を得る場合に採用されるが、改質に必要な温度まで昇温させる必要があり、装置の起動に時間を要する。また、水素発生量の変動に対する応答性が悪い。これに対し、水電解方式は、装置の起動停止が容易で、電気を流せばすぐに水素が発生することからデマンドに応じ、瞬時に発生量を変化させることができる。

また、水蒸気改質法では製品原料に由来するCO やCO₂ が排出され、アルカリ水電解法ではアルカリ廃液が発生する。HHOG は原料が水と電気のみであり、これらの方法に比べて周囲への環境負荷・安全性の面で有利であるだけでなく、燃料電池の性能低下を引起こすCO を含有しないなど性能面でも優位性の高い水素発生方式の1つであると言える。

2. HHOG の歴史

2.1 開発の経緯

固体高分子電解質膜を利用した水電解の歴史は1970年代初期に米国のGeneral Electric 社が燃料電池の技術を水電解に応用したのが始まりである。国内においては、1975年頃から大阪工業試験所(現 産業

技術総合研究所関西センター、以下産総研）がサンシャイン計画およびそれを引継いだニューサンシャイン計画のWE-NETにおいてMEAの研究を行った。

当社は1992年に水電解式水素発生装置の開発に着手し、産総研からMEAの技術を導入して実用化に向けた開発を開始した。電気分解モジュールの開発に加え、当社が水処理事業で培った超純水製造技術を活用し、工業用の水電解装置の開発が続けられた。写真1は当時使用した実証試験機の外観である。

当時の国内の市場環境は半導体製造などの電子部品産業が活況であり、製造工程では高純度の水素ガスが使用されていた。高純度の水素ガスをオンサイトで供給可能という特長を活かし、それらの産業用途をターゲットに商用装置が開発され、1996年7月に商用第1号機を電子部品製造メーカーに納入するに至った。

2.2 HHOGの商品開発と事業のあゆみ

当社は1996年のHHOG商品化後から2016年に至るまで、図3に示すように産業構造の変化など、市場のニーズの変化に合わせたHHOGの開発を行い、

納入実績を増やしてきた。その結果、表2に示すラインナップの商品が開発された。



写真1 実証試験機

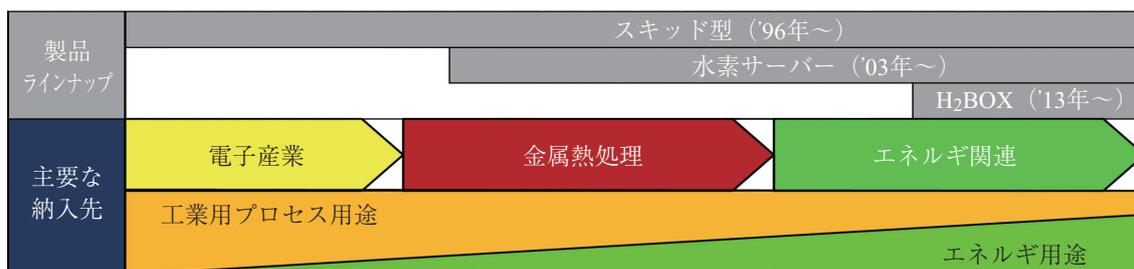
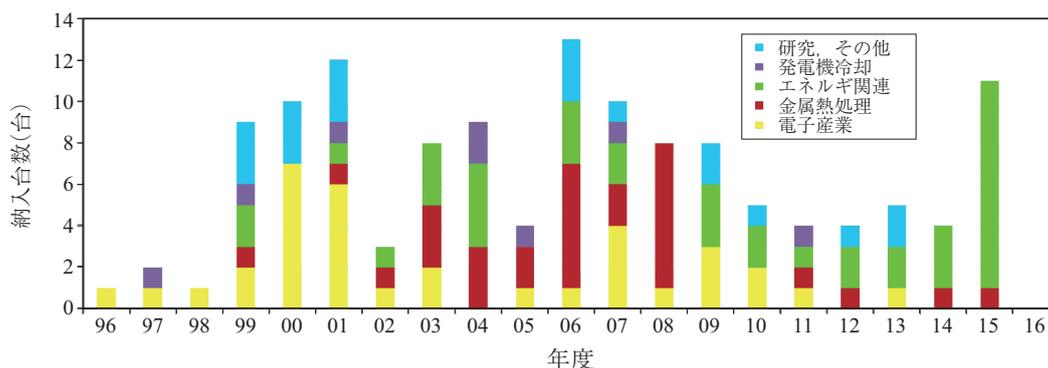


図3 HHOG 主要用途と納入実績の推移

表2 HHOG ラインナップ

水素発生量 [Nm ³ /h]		1	5	10	20	30	40	50	60
型式	低圧型	HB1	CL5D	CL10D	SL20D	SL30D	SL40D	SL50D	SL60D
	高圧型		CH5D	CH10D	SH20D	SH30D	SH40D	SH50D	SH60D
装置タイプ		H ₂ BOX	水素サーバー		スキッドマウントタイプ				

※水素圧力：0.40 MPa 以下（低圧型）、水素圧力 0.40～0.85 MPa（高圧型）

※水素ガス純度：99.999%，水素ガス露点：-70℃（大気圧下）

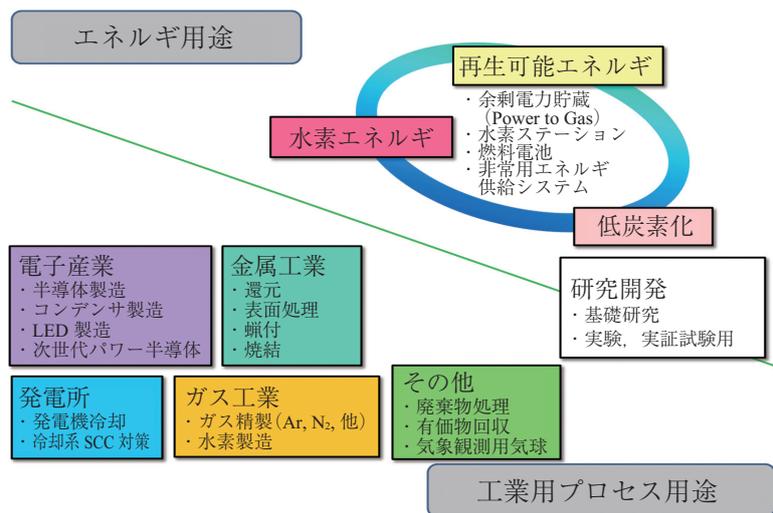


図4 HHOG 適用用途

HHOG の適用分野を図4に示す。水素は高い還元力などの特性を持つため工業的に様々な目的で使用されており、適用用途は多岐にわたる。過去20年の事業をとりまく市場環境の変化とHHOGの開発動向について、納入事例を交えながら次項で解説する。

2.2.1 スキッドマウントタイプ

1990年代から2000年代初頭にかけては、電子部品産業分野がHHOGの主要な納入先であった。半導体製造のキャリアガス、セラミックコンデンサの焼成用ガスとして、一般的にはボンベなどの圧縮水素が使用されており、その代替用途としてオンサイトで10～数10 Nm³/h 級の水素発生装置が要求された。

高圧ガス保安法などの法規に該当せず、また、空容器の交換作業の手間がなくその際の不純物混入のリスクがないという点が評価され、同分野での装置導入が進んだ。

電子部品産業向けに納入した装置の外観を写真2に示す。標準的には1スキッドの構成であり、現地設置工事は装置の据付けとユーティリティの接続のみで、顧客への引渡しまでを短期間で行うことができる。

次に、海外の火力発電所向けの装置の外観を写真3に示すが、発電所の要求事項により電気機器は防爆仕様となっており、盤類は別置き構造である。火力発電所では風損が少なく冷却効果の高い水素ガスが発電機（回転子）冷却用途として使用されているが、海外の発電所は立地条件やガス供給体制の点で圧縮水素の安定供給が困難なことも多く、オンサイト式水素発生装置のニーズがある。

その後、国内の半導体業界が再編されるなど、産業構造の変化に伴い発生容量のニーズが小容量にシ



写真2 スキッドマウントタイプ
HHOG SH-30D (30 Nm³/h)



写真3 スキッドマウントタイプ
HHOG SL-5D (5 Nm³/h)

フトしたため、これに合わせた小型装置の開発が進められた。

2.2.2 水素サーバー, H₂BOX

「水素サーバー」および「H₂BOX (すいそぼくくす)」はともに小容量の、コンパクト化されたパッケージタイプの装置である。

金属熱処理の現場では多品種少量生産に対応したバッチ炉を事業所内に多数保有するケースが多く、ボンベなどの高圧容器を置くスペースを確保することが困難な場合があった。また、高圧容器の交換作業の手間を無くしたいという点からも、コンパクトなオンサイト水素発生装置の商品化が求められていた。このようなニーズに対し、システムならびに構成機器を大幅に見直し、従来よりも省スペースな装置の開発を行い、水素サーバーとして2003年より販売を開始した(写真4)。

2000年代に入り、国内で燃料電池の実用化に向けた開発および性能評価が本格化した。燃料電池やその評価設備などを設置する研究所も同様に、スペースが手狭である場合が多く、高純度の水素ガスが安定して供給でき、省スペースな点が評価され、水素サーバーの納入実績が増えた。

だが、開発および性能評価用途では、水素サーバーよりさらにコンパクトな装置の要望があったため、H₂BOXの開発を行い、2013年より販売を開始した(写真5)。水素発生量1 Nm³/h、水素供給圧力0.82 MPa (Gauge)であり、当社の従来機に対して設置面積で60 %減、設置容積で75 %減の大幅な

サイズダウンを実現した。

近年では、再生可能エネルギーを利用した、水素によるエネルギー貯蔵活用の実証などの用途が増えている。コンテナ内にHHOGとユーティリティ機器を内蔵し、太陽光発電や風力発電などの電源を利用し、水素を製造するシステムへの納入実績がある(写真6)。



写真4 水素サーバー CL-5D (5 Nm³/h)



写真5 H₂BOX HB-1 (1 Nm³/h)



写真6 再生可能エネルギーを電源とする H₂BOX の納入事例

3. 開発の取組み、今後の展開

3.1 HHOGの事業をとりまく市場の動向

2014年の4月に閣議決定された第四次エネルギー基本計画の中で水素は電気、熱と並ぶ将来の二次エネルギーの中核として位置付けられた。また、同年6月に産学官からなる水素・燃料電池戦略協議会が水素・燃料電池戦略ロードマップを公表するなど、水素社会の実現に向けた政策的な動きが加速しており、市場においては、家庭用燃料電池エネファームの販売台数が2015年に累積15万台に達するなど（エネファーム パートナーズ公表データ）、その普及が進んでいる。

また、燃料電池自動車はトヨタ自動車からMIRAI、本田技研工業からCLARITY FUEL CELLが相次いで販売開始され、水素ステーションの設置件数も91箇所に達している（燃料電池実用化推進協議会公表データ、2016年6月時点、計画段階も含む）。これら以外にも水素の利用、貯蔵・輸送、製造に関する様々な開発が行われており、水素社会の実現に向けた様々な動きが着実に進んでいる。

一方で国内の一次エネルギー構造に関しては、2012年7月の固定価格買取制度（FIT）の導入以降、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを一次エネルギーとする発電施設の設置が進み、水力を除く発電電力量が占める割合は2011年度の1.4%から2015年度には4.7%にまで増加した（電気事業連合会公表データ）。FIT開始以降から2015年3月末までの新規の設備認定のうち、設備容量ベースでは太陽光発電が90%以上と大部分を占めている。

エネルギーの大部分を輸入に頼る我が国にとって、国産である再生可能エネルギーの導入はエネルギー安全保障上重要と考えられ、CO₂の排出量を抑制できる点からも再生可能エネルギーに対する期待が高い。し

かしながら、再生可能エネルギーの中でも太陽光や風力による発電は出力が自然環境に依存する変動電源であり、電力需要に応じた出力調整を行うことが難しいため、エネルギー需給がアンバランスになりやすいという問題があるが、HHOGと組み合わせることによりこの問題を解決できる可能性がある。そのためには変動電力に適用可能な商品開発が必要であり、次項でその一端を紹介する。

3.2 今後の市場に向けたHHOG開発

1996年の商品化以降、当社は既述のように市場のニーズに合致する装置の商品化を行ってきた。また、HHOGの性能および耐久性の向上を目的として電気分解モジュールを含む構成機器類やMEAの開発も並行して行ってきた。近年では再生可能エネルギーと水電解式の水素発生装置との連携について、主に太陽光発電や風力発電を水電解の電源とする条件で、各地でフィージビリティスタディや実証試験が行われている。変動電力をより有効に活用する対策として余剰電力を貯め、不足時に貯蔵したエネルギーを使用するタイムシフトによりエネルギー需給のバランスを補正することが必要であり、蓄電などとともに、水素を利用するエネルギー貯蔵の技術が求められている。

当社は、再生可能エネルギー利用分野に適用可能な装置の開発を目的として、太陽光発電との組合せ電解試験などの基礎試験を行っている。また、社外では2012年1月から、山梨県が山梨大学などと共同で実施している「クリーンエネルギー水電解実証試験」に当社は参画している。実証試験のシステム概要を図5に示す。実証試験は米倉山太陽光発電所の敷地内にあるPR施設「ゆめソーラー館やまなし」内で実施されており、同館屋根に設置された太陽光パネルで発電された電力の余剰分をタイムシフトす

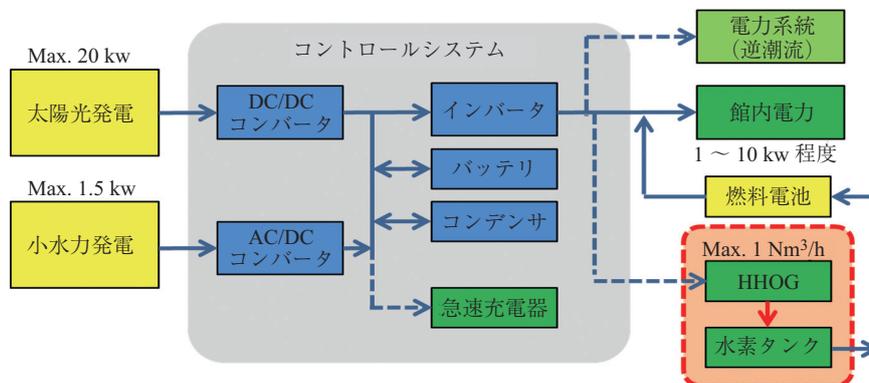


図5 山梨実証試験システムの概要

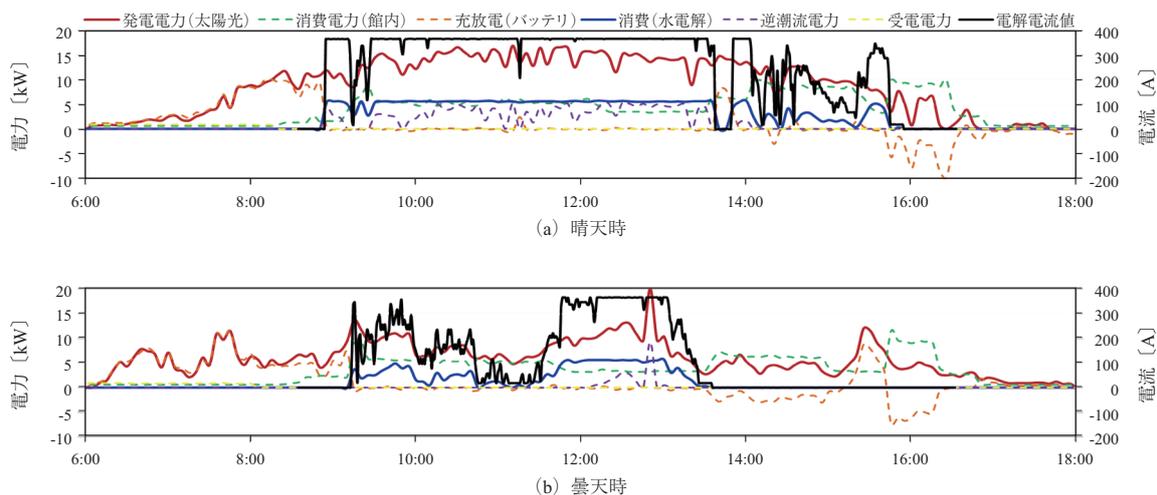


図6 太陽光発電出力の変動と電気分解モジュール電流値の変化

ることにより、年間を通して同施設で必要な電力をまかなっている。電力の貯蔵手段として、コンデンサ、バッテリーおよび水素の組合せ方式を採用している。水素貯蔵は自然放電による損失が無いため、この特性を活かし、二次エネルギーの長期保存に利用されており、余剰電力を利用して水電解を行い、発生した水素を貯蔵し、必要時に燃料電池で発電を行い館内に電力を供給している。

図6に太陽光発電の出力と電気分解モジュールへ供給される電流値の1日の変化を示す。太陽光発電の余剰電力を水電解に使用しており、とくに曇天時には発電量の変動が大きく、それに伴って電気分解モジュールに通電される電流値も変動する。再生可能エネルギーとの組合せ運転の課題点として、このような電源の変動に対する応答性および耐久性が挙げられる。2016年5月時点で装置の運転時間は4 000時間を経過し、晴天や曇天など様々な太陽光の発電条件のもとで安定稼働しており、変動に対する応答性およびシステムの適用性は良好である。2016年7月現在も実証試験を引続き行い、耐久性の評価を継続している。

また、再生可能エネルギー利活用分野におけるHHOGの適用においてはエネルギー効率の観点から、消費電力の低減が要求されている。現在上市している機種の消費電力原単位は5.5 kWh/Nm³-H₂程度であるが、さらに10%以上の低減を目指し開発を進めている。また、装置仕様に関しては、変動電源との連携に必要なシステムの構築と、経済性を成立させるための装置のコストダウンがエネルギー利活用市

場における水電解式の水素発生装置普及のための課題として挙げられるが、これら課題の解決に向けて、実証機による検証などの取組みを進めている。

また、当社は(株)神戸製鋼所や(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンスなど、コベルグループ内で連携し、環境負荷の低い再生可能エネルギー由来の水素を混合した水素ステーションの開発および実証を2017年度より行う予定である。

むすび

今後の水素社会の実現に向けた取組み、とりわけ再生可能エネルギーの利活用においては、水電解式水素発生装置は重要な役割を担うキーテクノロジーの1つと考えられる。当社では、これまでに培った技術と経験を活かして開発を行い、消費電力の低減やコストダウンなどの課題を解決し、再生可能エネルギーの利活用を含む水素エネルギー利用システムの普及に向けて努力していきたいと考えている。

水素社会の実現は個人や単体企業でなし得るものではなく、組織の連携が必要であり、世の中の流れを作り出すために、社外との枠を超えた連携もより重視して取組んでいきたいと考えている。

最後に実証試験において多大なご協力をいただいた山梨県の関係各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 須田龍生ほか：水素エネルギーシステム、水素エネルギー協会、VOL.38 (2013)
- 2) NEDO、水素エネルギー白書 (2015)
- 3) 環境エネルギー政策研究所、自然エネルギー白書 2015 (2016)