

高効率な水素電力貯蔵システム

High-Efficiency Hydrogen-Based Electric Power Storage System

吉野 正人

松永 健太郎

中島 良

■ YOSHINO Masato

■ MATSUNAGA Kentaro

■ NAKAJIMA Ryo

東芝は、再生可能エネルギーを利用した持続的で安心、安全、快適な社会の実現を目指しており、その中で水素を活用した様々なソリューションの提供を提案している。その一つとして、エネルギー貯蔵媒体として水素を用いた電力貯蔵システムの開発を進めている。このシステムは、太陽光や風力など再生可能エネルギー発電の出力変動の吸収や余剰電力の貯蔵とともに、災害発生時の非常用電源システムとして機能することができる。また、システムの効率を更に向上させるため、固体酸化物形電解質を用いた電解セルによる水素製造技術の開発を進めている。

Toshiba has been making continuous efforts to realize a sustainable, safe, secure, and comfortable society applying renewable energy sources by proposing optimal solutions using hydrogen as an energy storage medium.

As part of these efforts, we have been developing a hydrogen-based electric power storage system incorporating functions to compensate for power fluctuations and store surplus power resulting from the use of renewable energy sources such as photovoltaic and wind power systems, as well as a self-contained emergency power supply function using renewable energy sources and hydrogen at the time of a disaster. In order to further improve the efficiency of the system, we are also promoting the development of hydrogen production technologies including a technology for solid oxide electrolysis cells (SOECs) with high performance and long operating life, and a cell stack technology to increase the capacity of SOECs.

1 まえがき

電気エネルギーは、その利便性の観点から社会を支える基盤エネルギーとなっている。電気エネルギーは主に、石油、石炭、天然ガス、ウラン鉱石といった天然燃料資源を利用する火力発電や原子力発電などにより生み出される。化石燃料は、技術革新により燃料の持つエネルギーの60%以上を利用できるシステムも開発されているが、排出される二酸化炭素による地球温暖化への影響は依然大きな課題である。化石燃料の使用量削減策の一つとして再生可能エネルギー発電が期待される。水力や地熱を利用した発電システムは古くから実用化されているが、近年、世界規模で太陽光発電や風力発電の導入が急速に増加しつつある。国内でも震災などを契機として、再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT) の導入とともに、再生可能エネルギー発電を利用した分散型電源が拡大している。しかし、太陽光・風力発電は天候に左右されるため発電量は必ずしも一定しない。そのため、需給バランスが崩れるケースも散見されるようになり、特に供給電力が過剰な場合は、発電停止などの措置が行われるのが現状である。

電気エネルギーの貯蔵性と輸送性の課題は、これまでは化石燃料がその役割を担ってきたが、持続可能な社会として脱化石燃料にパラダイムシフトが進むなかで、エネルギー貯蔵媒体として水素への期待が高まっており、水素の製造や、貯蔵、輸送、利活用など技術開発が進んでいる。国内では、2014年

12月に燃料電池車が市販され、普及に向けて水素インフラ整備が加速される一方、海外では、大規模な太陽光・風力発電の普及に伴い、電力の需給バランスのため電力の一部を水素に変換して貯蔵して利用する実証試験なども開始されている⁽¹⁾。

東芝は、水素社会の実現を目指し、基盤技術開発を進めるとともに水素の特徴を生かした様々なソリューションを提案している。ここでは、次世代の高効率電解技術である固体酸化物形電解セル (SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell) の開発状況と、技術開発拠点として2015年春に開所した水素エネルギー研究開発センターの概要、再生可能エネルギー由来の水素を活用した自立型エネルギーシステムについて述べる。

2 SOECによる高効率電解技術

電気と水素は電気化学反応により相互にエネルギー変換でき、電解質の種類や作動温度などの点から、アルカリ電解質溶液や固体電解質 (高分子や固体酸化物) を用いた変換方式がある。代表的な水の電解方式を表1に示す。その中で、高温で作動する固体酸化物形電解質を用いた方法は高効率のシステムを達成できる可能性がある。固体酸化物形電解質を用いたSOECは、図1に示すように、電解に必要なエネルギー (ΔH) の一部を熱エネルギー ($T\Delta S$) で賄うことができるため、より少ない電気エネルギー (ΔG) で水素を製造することができる⁽²⁾。一方で、SOECの実用化には、高効率での電解を

表1. 電解方式の比較

Comparison of electrolysis methods

項目	電解方式		
	アルカリ水電解	固体高分子膜形水電解	高温水蒸気電解
電解質	アルカリ水溶液	固体高分子膜	固体酸化物
動作温度	室温～200℃	室温～80℃	500～1,000℃
電解対象	水	水	水蒸気
水素原単位 (kWh/m ³ (Normal)(注1))	4～5	4～6	3～4

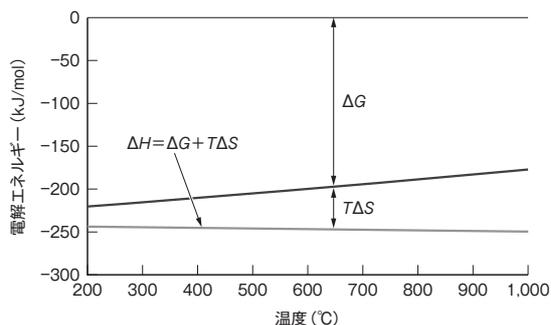


図1. 電解に必要なエネルギーと温度の関係 — 温度によりΔGとTΔSの割合が変化する。

Dependence of energy required for electrolysis on temperature

長期にわたり維持する電解セル構造の開発のほかにも、セルの大型化や500℃以上の高温でも生成水素を漏れなく取り出せるセルスタック構造の開発など、数多くの課題が存在する。

当社は、SOECによる水素製造システムの開発を目指し、高性能で長寿命なSOECの開発とともに、大容量スタック・モジュール化技術の開発を進めている。

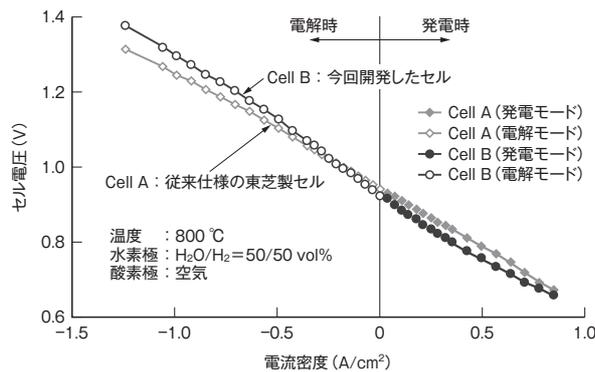
2.1 高性能・長寿命SOECの開発

固体酸化物形電解質を用いた燃料電池SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) は既に稼働中の発電プラントも存在するが、このセル構造をそのまま用いて逆反応である電解反応を行うと、運転中に電解特性が急激に低下する問題があった。

当社は、従来のSOFCで用いられていたセルにおいては、特に水素を製造する側の電極に発生する構造変化が原因で、電解特性が低下することを確認した。そこで、電極材料や構造を最適化することで、従来の電極とほぼ同等の電解特性を持ちながら、5,000 h以上の連続運転でも長期にわたり安定した特性を示すセルを開発した。

このセルの電流電圧特性(図2)や耐久性特性(図3)は、他機関のこれまでの報告例に比べても同等以上であり^{(3), (4)}、特に耐久性に関しては、初期安定化後の100～5,000 hにおける、劣化率(1,000 h当たりの電圧上昇率)は0.78%/1,000 h

(注1) 0℃, 1気圧の標準状態。



H₂O: 水蒸気 H₂: 水素

図2. SOECの電流電圧特性 — 発電時及び電解時ともに、良好な特性が得られた。

Voltage vs. current density characteristics of SOEC and solid oxide fuel cell (SOFC)

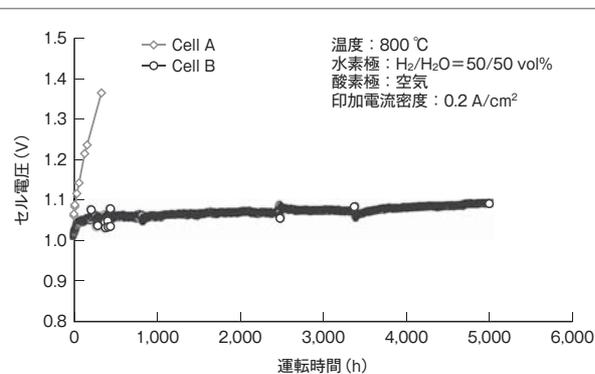


図3. 電解セルの耐久性特性 — 5,000 h以上の連続運転でも、安定したセル電圧を維持した。

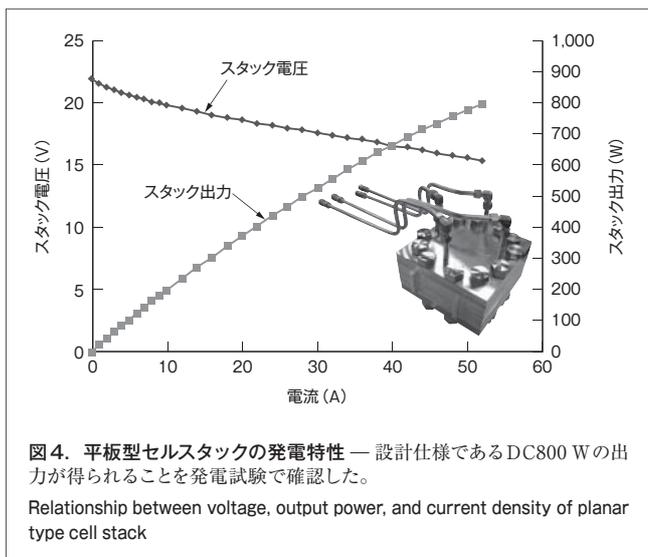
Results of long-term electrolysis tests

と良好な特性が得られた。また、同じ電流密度での電解電圧と電池電圧の比である電解電圧効率 (EVE) は、2013年に開発したセル性能⁽²⁾を上回り、5 MW入力 SOEC/SOFC水素電力貯蔵システムのヒートマスタランス解析において、80%以上のシステム充放電効率の見込みが得られた。これは従来の水の電解などによる水素電力貯蔵システムでの余剰電力対応の効率に比べて非常に高い効率であり、また、揚水発電に比べても遜色のない効率である。

2.2 スタック化技術の開発

次に、水素製造量の大容量化を目的としたスタック化技術の開発状況について述べる。スタック化では、大型化したセルの全面にわたって良好な反応を確保することや、端部からの水素漏れを防止することなどが課題である。大型セルスタックでは様々な形状が検討されているが、一例として、平板型セルを用いたスタックの開発状況を述べる。

作製した平板型セルスタックは、発電モードでDC (直流)



800 W出力の設計仕様とし、110×110 mm (電極有効面積：81 cm²) の水素極支持型セルを20枚積層した (総電極有効面積：約1,620 cm²) ものである。800℃における発電特性を図4に示す。電流密度が約0.64 A/cm²で平均セル電圧が約0.75 V、セルスタック全体では約800 Wの出力を示し、ほぼ設計仕様どおりの性能が得られることを確認した。図2のセルの発電特性と図4のセルスタックの発電性能を比較すると、ほぼ同等の性能が得られていることがわかった。

スタック化の今後の課題は高性能化と大型化である。高性能化については、積層時の接触抵抗の抑制とともに、特に電解モードでの高いガスシール性の確保が求められ、3 kWh/m³ (Normal) 以下の水素製造性能を目指す。また、大型化では、電解入力数kW級のセルスタックを最小単位とし、これをモジュール化して大規模化を進める予定である。

3 水素を活用したソリューション提供に向けて

当社は、これまでの水素やエネルギーマネジメントに関する取り組みを通して培った技術を生かして、様々なソリューションの提供に向け、各種機器・システムの開発を進めている。ここでは、2015年春に開所した水素エネルギー研究開発センターの概要と、ソリューションの一例として、再生可能エネルギー由来の水素を活用した自立型エネルギー供給システム H₂One™ (エイチツワン) について述べる。

3.1 水素エネルギー研究開発センター

このセンターは当社府中事業所に設置され、水素に関する機器・システム制御技術の検証及び実証と、水素を活用したエネルギーソリューション開発の役割を担う。具体的には、再生可能エネルギーを利用した水素製造や、電力貯蔵システムの基礎技術開発や実証試験を行う。

このセンターの主要設備を表2に示す。定格出力96 kWの

表2. 水素エネルギー研究開発センターの主要設備

Main facilities at Hydrogen Energy Research and Development Center

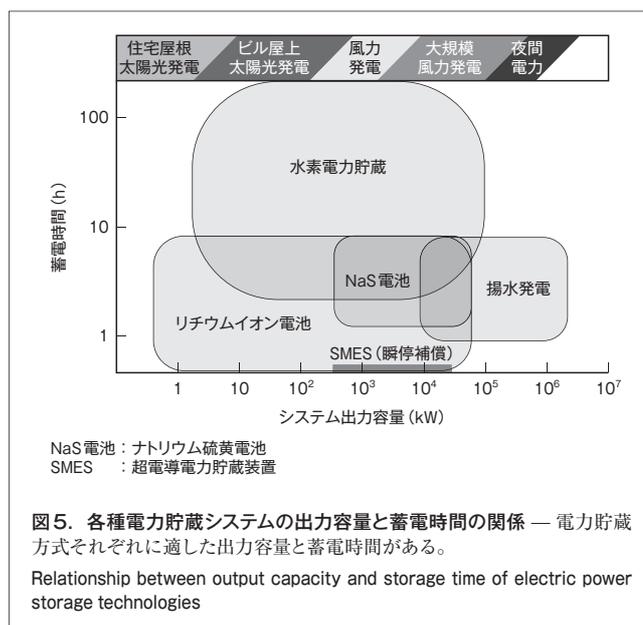
設置機器	仕様
太陽光発電パネル	定格出力96 kW
水電解水素発生器	最大水素製造量10 m ³ (Normal) /h
水素貯蔵タンク	容量150 m ³ , 圧力0.98 MPa
酸素貯蔵タンク	容量5 m ³ , 圧力0.98 MPa
純水素型燃料電池	定格出力8.4 kW

太陽光発電システムや、最大10 m³ (Normal) /hの水素製造が可能な水電解装置、水素及び酸素の貯蔵・供給設備、定格出力8.4 kWの中容量純水素型燃料電池などを備える。これらの機器は、水素EMS (Energy Management System) により有機的に接続され、水素を活用したエネルギーの最適化制御などを行うことができる。このセンターは水素電力貯蔵のモデル実証システムであり、既存の電力貯蔵システムに欠けている、長期間かつ大容量の貯蔵領域の技術的な課題を総合的に検証し、実用化していく。更にこのセンターでは、前述のSOECを用いた電解装置の大型化にも取り組み、1kW級試験機を設置し、研究開発を行う。

3.2 H₂One™

現時点での機器のコストや効率評価を踏まえた、各種電力貯蔵システムの出力容量と蓄電時間の関係を図5に示す。従来の二次電池や揚水発電が日単位 (8時間) あるいは、より短時間での充放電に好ましいシステムと考えられる一方、水素電力貯蔵は比較的長い蓄電時間の電力貯蔵用途に適している。例えば災害発生時における2～3日以上の長期的な非常用電源システムとしても、水素の活用は有意と考えられる。

そこで、災害発生時の非常用電源システムとしての機能も持



つ、再生可能エネルギーと水素を活用した自立型エネルギー供給システムH₂One™を開発した。電力余剰時には水電解で水素を製造して貯蔵し、電力需要時には燃料電池で水素から電気を供給する、環境に優しいクリーンなシステムである。

システムの構成を図6に、システムの基本仕様を表3に示す。このシステムは、太陽光発電設備、蓄電池ユニット、固体高分子膜形水電解水素製造ユニット、水素貯蔵タンク、純水素型燃料電池ユニットから構成される自立型のエネルギー供給システムである。太陽光発電設備で発電した電気を用いて水を電解し、発生させた水素をタンクに貯蔵し、電気や温水の需要に応じて水素燃料電池を稼働させる。水と太陽光だけで稼働できるため、災害時にライフラインが寸断された場合でも、自立して電気と温水を供給することができ、表3に示す仕様の設備能力として、300名の避難者に対し約1週間分の電気と温水を供給することができる。更に、システム全体をユニットとしてパッケージングし、トレーラなどの輸送車両に積載して輸送することもできる。平常時には、太陽光発電で負荷を賅

いつつ、余剰電力で水素を製造して貯蔵する一方、電力が不足する場合は貯蔵した水素による発電で負荷を賅う。システム全体を管理するEMSで、水素による発電とともに太陽光による発電などを組み合わせて最適に制御することで、電気と熱を高効率に供給するエネルギーシステムとして活用できる。

4 あとがき

当社は、持続的で安心、安全、快適な社会を目指し、再生可能エネルギーや水素を活用したソリューションの提供を進めている。今後、太陽光や風力など出力変動の大きい再生可能エネルギー発電を大量導入していく際には、電力システムの安定化への配慮が必須となる。水素電力貯蔵システムは、出力変動の吸収や余剰電力の貯蔵などに対応できるシステムとして、重要な選択肢の一つになると考えられる。また、災害発生時のBCP（事業継続計画）対応システムとしても期待できる。

今後更に、要素技術の一つとして、SOEC及びセルスタックの開発を進め、より高効率な水素電力貯蔵システムの構築を目指していく。

文献

- (1) Germany Trade and Invest GmbH. "Green Hydrogen & Power to Gas: Demonstrational Projects in Germany February 2012". GTAI - Publications. <<http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Service/publications.did=450094.html>>, (accessed 2015-03-20).
- (2) 渡邊久夫 他. 再生可能エネルギーを活用する水素電力貯蔵システム. 東芝レビュー. 68, 7, 2013, p.35 - 38.
- (3) Hauch, A. et al. "Ni/YSZ electrodes in solid oxide electrolyser cells". Proceedings of the 26th Risø International Symposium on Materials Science 2005. Roskilde, Denmark, 2005-09, Risø National Laboratory, 2005, p.203-208.
- (4) Sridhar, K.R. et al. "Applications and Markets for Solid Oxide Regenerative Fuel Cells". Proceedings on the Ninth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-IX). Quebec City, Canada, 2005-05. Electrochemical Society, 2005, p.295-305.

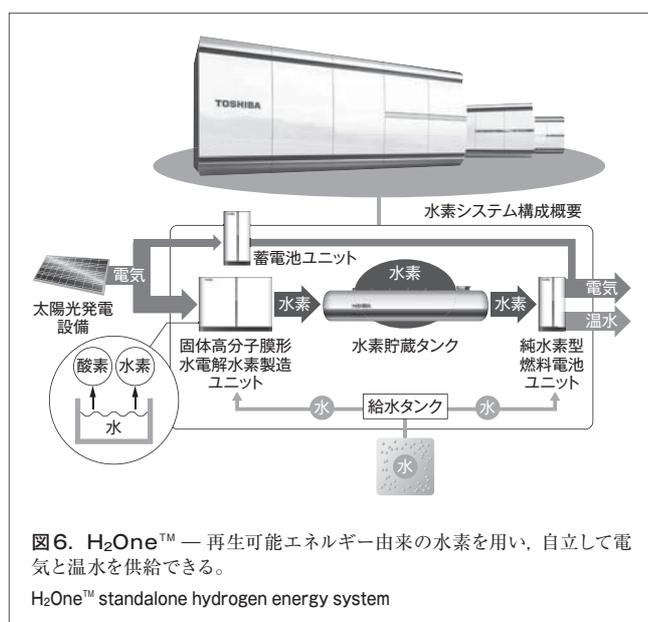


表3. H₂One™の基本仕様

Basic specifications of H₂One™

項目	仕様
太陽光発電電量	30 kW
水素製造能力	1 m ³ (Normal)/h
水素貯蔵量	270 m ³ (Normal)
発電出力*	30 kW
温水供給量	75 L/h
太陽光発電設備の外形	約192 m ²
水素製造装置、蓄電池、燃料電池などの収納設備の外形	2,500(奥行き)×6,000(幅)×2,500(高さ) mm
水素貯蔵タンク	2,500(奥行き)×6,000(幅)×2,500(高さ) mm

*燃料電池、蓄電池出力の合計



吉野 正人 YOSHINO Masato

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 次世代エネルギー技術開発推進室主務。固体酸化物形電気化学セル・スタック開発に従事。電気化学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



松永 健太郎 MATSUNAGA Kentaro

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 次世代エネルギー技術開発推進室参事。固体酸化物形電気化学セル・スタック開発に従事。化学工学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



中島 良 NAKAJIMA Ryo

次世代エネルギー事業開発プロジェクトチーム サブプロジェクトマネージャー。水素、燃料電池の研究開発及び事業開発に従事。機械学会、日本伝熱学会会員。

New Energy Solutions Project Team