

固体酸化物形電解セルを用いた 水素製造システム及び電力貯蔵システム

Hydrogen Production and Hydrogen Power Storage Systems
Using Solid Oxide Electrolysis Cells

松永 健太郎

吉野 正人

渡邊 久夫

■ MATSUNAGA Kentaro

■ YOSHINO Masato

■ WATANABE Hisao

2015年7月に公表された「長期エネルギー需給見通し」では、2030年にはわが国のエネルギー自給率を22～24%に向上することが示され、同年12月に開催されたCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）では、2030年までにわが国における二酸化炭素（CO₂）などの温室効果ガス排出量を2013年度比で26%削減する計画が合意された。更に2016年3月に改訂された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、定置用燃料電池の価格目標や、燃料電池自動車（FCV）及び水素ステーションの導入数目標が示され、これに伴ってCO₂フリー水素社会に向けてのワーキンググループが発足した。これらの目標の達成に向けた、大規模な再生可能エネルギーの導入やCO₂排出量の削減を実現するために、水素の製造・貯蔵・輸送技術の開発が加速されている。

東芝は、CO₂フリー水素製造のキー技術である水電解（電気分解）について、従来の固体高分子形電解セルより効率が約30%高い固体酸化物形電解セル（SOEC）や、SOECと固体酸化物形燃料電池（SOFC）を組み合わせた高効率・大規模水素電力貯蔵システムの開発を進めている。

The Japanese government is promoting improvement of the country's energy self-sufficiency rate to approximately 22-24% in 2030 in line with the "Long-Term Energy Supply and Demand Outlook" released in July 2015, and is planning to achieve a 26% reduction in emissions of greenhouse gases including carbon dioxide (CO₂) by 2030 compared with the level in FY2013 in accordance with the Paris Agreement adopted at the 21st Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP21) in December 2015. Furthermore, in the Revised Version of the "Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells" released by the government in March 2016, targets have been set for the costs of stationary fuel cells and for the numbers of fuel cell vehicles (FCVs) and hydrogen stations to be introduced, and a working group has been established toward the realization of a "CO₂-free hydrogen society." To achieve these goals, the development of hydrogen production, storage, and transportation technologies has recently been progressing aimed at the introduction of large-scale renewable power generation systems and the reduction of CO₂ emissions.

With this as a background, Toshiba is promoting the development of water electrolysis systems as key technologies for CO₂-free hydrogen production, including a solid oxide electrolysis cell (SOEC) that achieves approximately 30% higher efficiency compared with conventional polymer electrolyte membrane electrolysis cells, as well as high-efficiency large-scale hydrogen power storage systems realized by combining SOECs with solid oxide fuel cells (SOFCs).

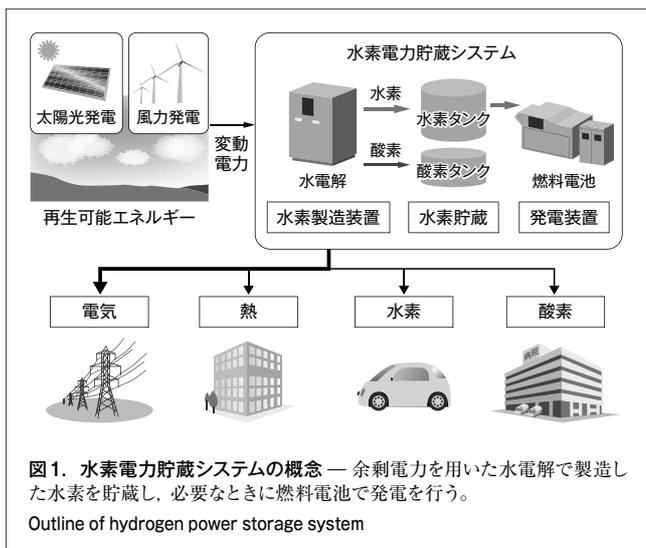
1 まえがき

エネルギーセキュリティや地球環境問題への対応の観点から、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電設備の導入が世界規模で急速に増加しつつあり、わが国でも水素の製造・貯蔵・輸送技術の開発が加速されている。2015年7月に経済産業省が発表した「長期エネルギー需給見通し」⁽¹⁾では、再生可能エネルギーの導入を最大限進め、2030年のエネルギー自給率を22～24%に向上する方針が示されている。また、同年12月のCOP21では、2030年までにわが国におけるCO₂などの温室効果ガス排出量を2013年度比で26%削減する計画⁽²⁾が合意された。更に、2016年3月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」⁽³⁾が改訂されたことにより、定置用燃料電池の価格目標や、FCV及び水素ステーションの導入数目標が示され、CO₂フリー水素社会に向けてのワーキンググループが

発足した。

再生可能エネルギーを活用した水素によるエネルギー貯蔵・供給システムとしては、“水素製造システム”及び“水素電力貯蔵システム”が挙げられる。天候などにより変動する再生可能エネルギーからの発電を電力系統に大量導入し、主要電力源の一つとして活用していくには、出力安定化システムや電力系統の強化が不可欠であるとともに、出力変動や需給調整のための電力貯蔵システムの導入が必要である。

水素をエネルギー媒体とした蓄電・発電システムである水素電力貯蔵システムは、再生可能エネルギーの出力が変動して余剰電力が生じた場合に、この余剰電力を用いた水電解で製造した水素を貯蔵し、必要なときに燃料電池で発電を行うものである（図1）。揚水発電のような立地制限がなく、また、蓄電量が活物質質量に依存することもないため、大規模・長時間貯蔵に適している。



これらのシステムの実用化には、水素製造の高効率化が不可欠である。固体酸化物形電解質膜を用いた高温水蒸気電解方式は、従来の低温動作型の電解方式に対して、効率の向上が期待できる。ここでは、この方式を適用したシステムのキーデバイスとなる固体酸化物形電解セル (SOEC) スタックの開発、及びシステム開発について述べる。

2 SOECの大型化に向けた取組み

固体酸化物形電解質を用いた燃料電池である固体酸化物形燃料電池 (SOFC) をベースとしたSOECセルスタックにおいて、電解特性の一例として電流-電圧 (I-V) 特性及び吸発熱特性を評価した。評価の対象とした円筒平板形セルスタックの模式図を図2に示す。複数のセルに対してまとめて水蒸気の供給と水素ガスの回収ができる構造となっている。

水蒸気濃度が90%で温度が750℃の運転条件において、セルスタック中央部の温度計測で観測された吸発熱特性を

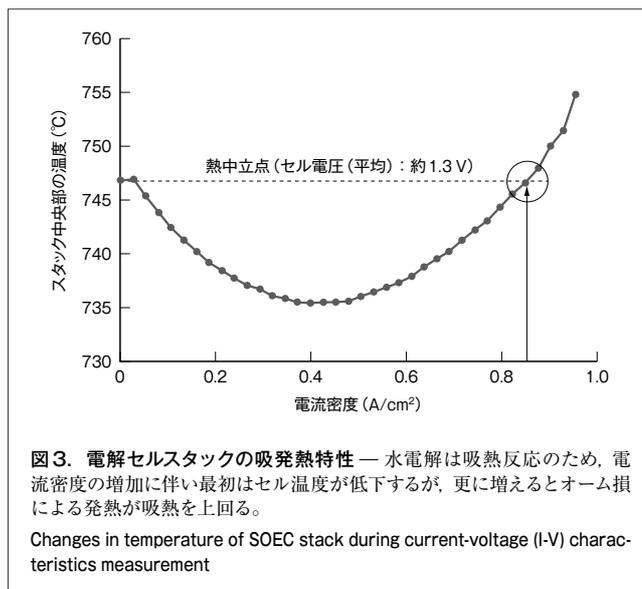
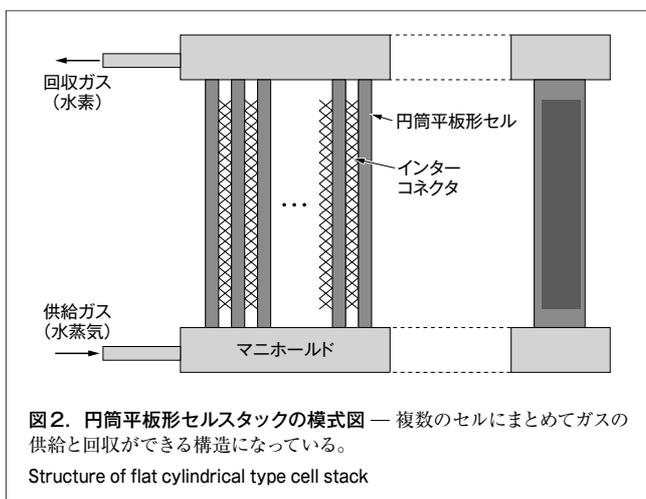


図3に示す。水電解は吸熱反応であるため、電流密度の増加に伴いセルスタック温度は低下するが、更に増加するとセルスタックのオーム損による発熱反応が吸熱を上回り、温度は上昇に転じる。今回の試験条件において、温度極小値は開回路電圧時の温度、すなわち無負荷で電流が流れていない状態での温度に対して約11℃低い値を示した。また、電流密度が約0.85 A/cm²において吸発熱が等しくなる結果が得られた。

水蒸気濃度を70～90 vol%に変化させた場合の、各条件における初期のI-V特性を図4に示す。セルスタックにおいて吸熱と発熱がバランスする反応条件を熱中立点と呼び、理論的には単セル電圧が1.3 Vのときに成り立つとされる。今回の試験で1.3 Vを与える電流密度は、図4から、約0.85 A/cm²であり、図3の試験結果が理論と整合することが確認された。また高効率な水素製造を実現するには、電解電流に伴う電圧

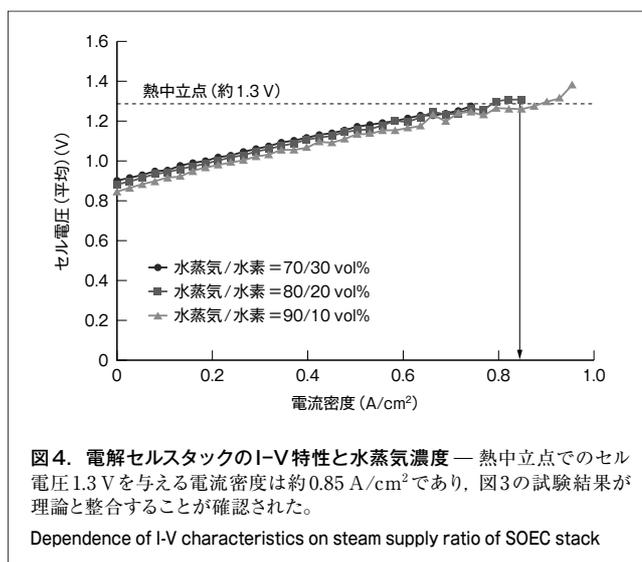




図5. SOECマルチスタック評価ユニット — 水素エネルギー研究開発センター内に設置され、10 kW以上の規模でSOECの特性評価ができる。SOEC multi-stack evaluation unit

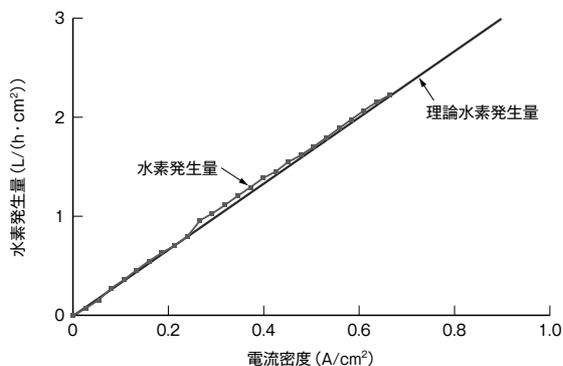


図6. 電解電流と水素発生量の比較 — 電解電流から計算される理論水素発生量と、実際に発生した水素量とを比較したもので、ほぼ100%の変換効率が得られている。

Relationship between electrolysis current and hydrogen production rate

上昇を低く抑える必要があるが、今回の結果では、熱中立点における電流密度が 0.85 A/cm^2 と目標 (0.5 A/cm^2) を超える値が得られ、反応部の小型化が可能となることが示唆された。また、別途行った水蒸気利用率に関する検討では、電解反応には供給する水蒸気の97%を活用できることを確認した。

これらのセルスタックを複数組み合わせさせたマルチスタックで、水素製造規模の拡大に関する検討を実施した。東芝の府中事業所にある水素エネルギー研究開発センター内に設置したSOECマルチスタック評価ユニットは、10 kW以上の規模でSOECによる水素製造が可能である(図5)。

SOECマルチスタック評価ユニットにおける、電解電流から計算される理論水素発生量と実際に発生した水素量との比較を図6に示す。ほぼ100%の変換効率が得られた。

マルチスタックのセルスタック単体とのI-V特性の比較を図7に示す。セルスタック単体と比較すると、抵抗(グラフの

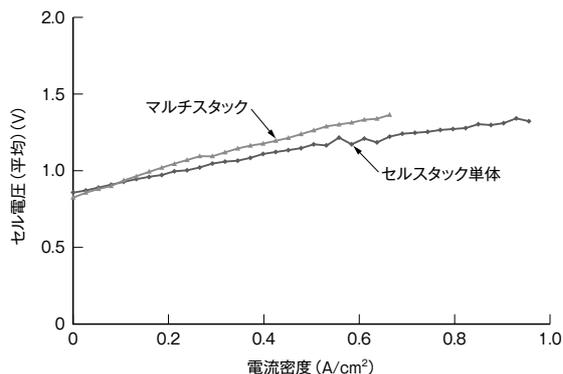


図7. セルスタック単体とマルチスタックの電解特性比較 — セルスタック単体の電解特性と比較すると、マルチスタックのほうが抵抗(グラフの傾き)が大きくなった。

Comparison of I-V characteristics of short-stack and multi-stack units

傾き)が大きくなった。今後、マルチスタック化における抵抗の低減やガス配流の最適化についても検討する。

3 SOEC水素製造システム及び電力貯蔵システムの構築

従来の低温動作型水電解方式である固体高分子形電解セルやアルカリ水電解のセルスタック単体の水素製造原単位が約 $4\sim 5 \text{ kWh/Nm}^3$ ^(注1)である。これに対し、SOECのセルスタック単体での水素製造原単位は、熱中立点条件付近において約 3.1 kWh/Nm^3 前後の性能が得られることを確認しており、外部からの熱供給が得られれば、更に低い水素製造原単位が得られる。一方で、システムを検討する場合、従来のシステムの動作温度が室温から $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 前後までであるのに対し、SOECを用いたシステムでは $600\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ になり、熱的な検討が重要になる。

ヒートマスバランス解析に用いたSOEC水素製造システムの計算条件(定格運転条件)を表1に、プロセスフローを図8に示す。

システムは主に、SOECモジュールと、SOECで製造した水素と酸素の排熱を利用した低温・高温再生熱交換器から構成される。生成水素の一部及び分離された未反応の原料水はリサイクルされ、再びSOECモジュールに供給される。150 kWの投入電力に対して、SOECセルスタックの熱中立条件での水素製造原単位をベースとして、蒸気発生や、水素昇温、SOEC前段加熱などの熱入力に、ポンプ動力や、放熱ロス、除湿動力などを加味してヒートマスバランスを解析した結果、システムとしての水素製造原単位は $4.1\sim 4.2 \text{ kWh/Nm}^3$ 程度の性能が得られることを確認した。この結果から、従来型のシステム

(注1) Nm^3 は $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、1気圧の状態に換算した体積。

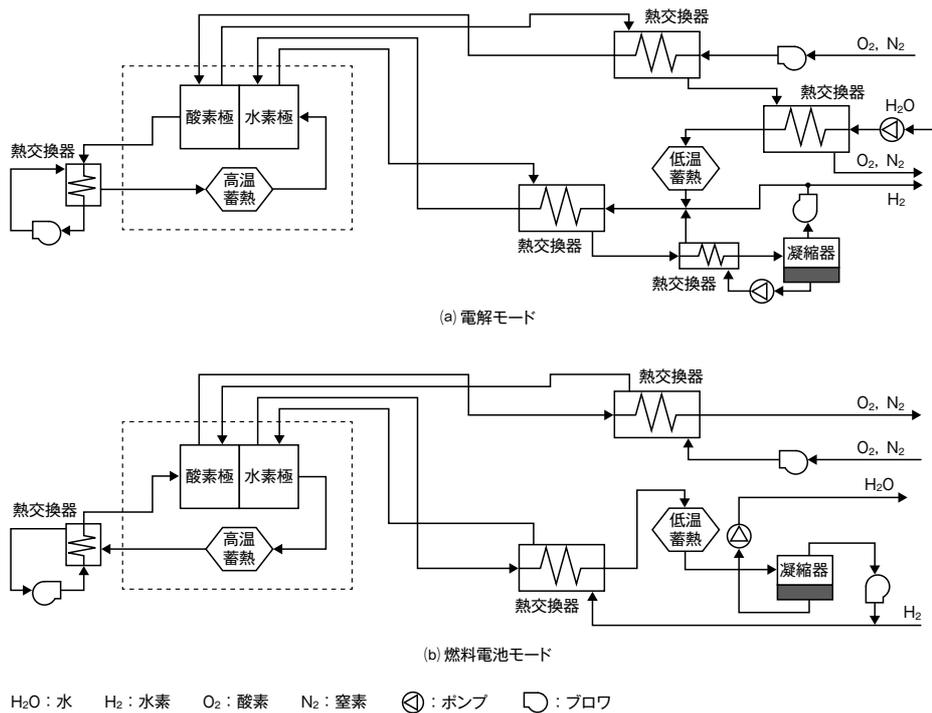


図8. ヒートマスタランス解析に用いたSOEC水素製造システムのプロセスフロー — SOECモジュールと、SOECで製造した水素と酸素の排熱を利用した低温・高温再生熱交換器から構成される。

Flows of processes of SOEC system for heat-mass balance analysis

表1. SOEC水素製造システムの定格運転条件

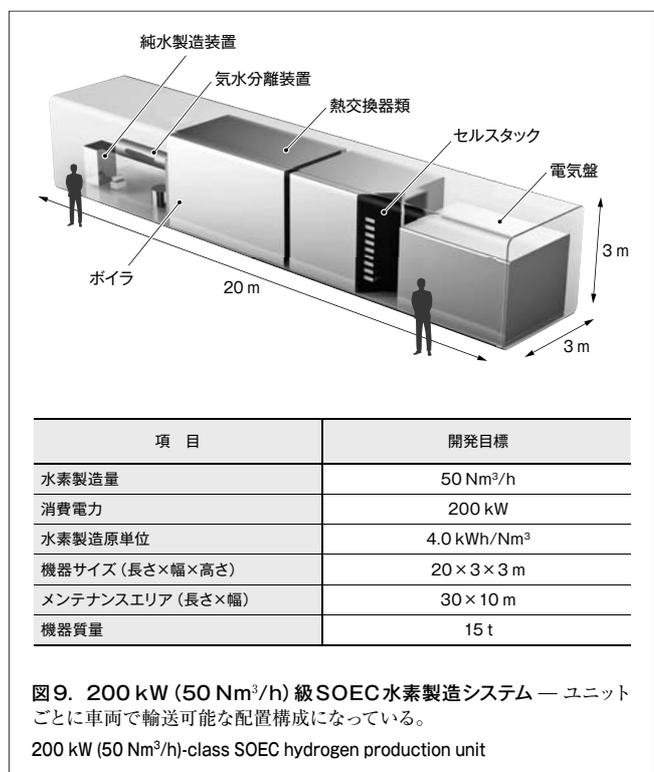
Conditions of rated operation of SOEC hydrogen production unit

項目	条件	
SOEC	電解電力	150 kW
	セルスタック単位当たりの水素製造原単位	3 kWh/Nm ³
	原料ガス組成	水蒸気/水素≒95/5 vol%
	水蒸気利用率	0.85
	運転温度	700 °C
周辺システム	運転圧力	約150 kPa
	原料ガス組成の調整	SOEC水素側出口ガスの約6%を供給ラインにリサイクル
	熱交換器最小アプローチ温度	20 °C
	熱交換器圧力損失	5 kPa未満(目標)

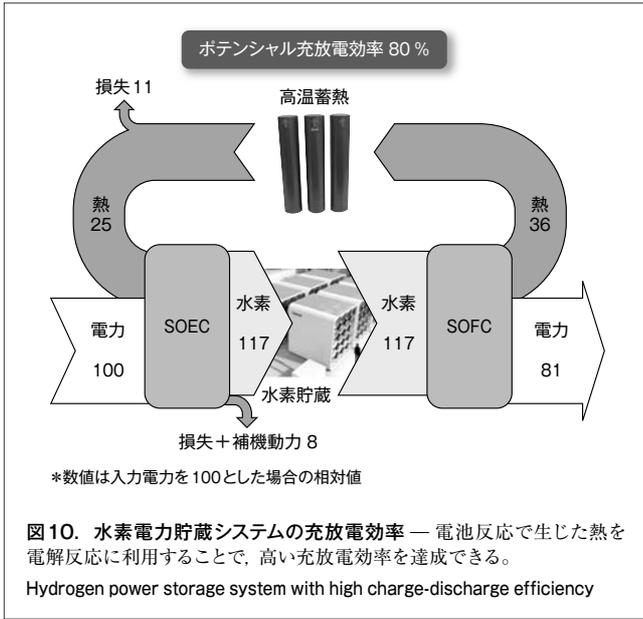
と比較して、20～30%程度消費電力の削減効果があると考えられる。

200 kW (50 Nm³/h) 級 SOEC 水素製造システムのイメージを図9に示す。ユニットごとに車両で輸送可能な配置構成とし、熱交換器を横置きにするなどの工夫により、輸送寸法をコンパクト化した。また、配管ルートに対して応力解析などによる評価を実施し、実現性の検証を進めている。

更に、SOEC水素製造システムとSOFCとを組み合わせた水素電力貯蔵システム H₂Omega™ に関する検討も並行して進めている。水素電力貯蔵システムには、電池反応で生じた

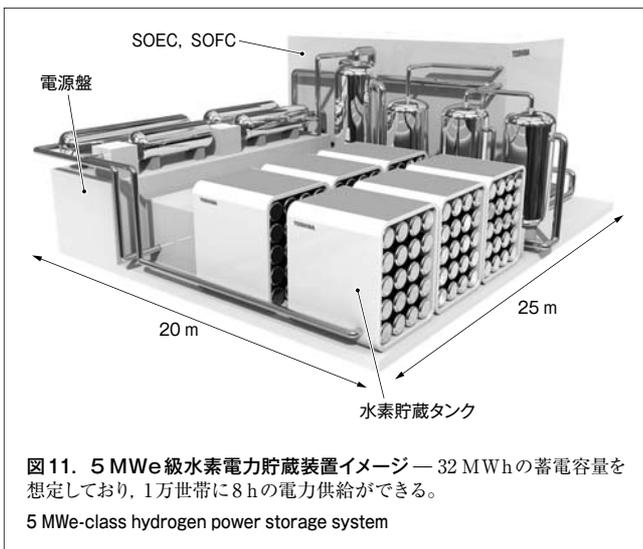


熱を電解反応に利用することで、システム全体として高い充放電効率を達成できるポテンシャルがある(図10)。



現在、MW級水素電力貯蔵システムにおける高温蓄熱装置の概念設計を進めており、これまでに蓄熱容器材料の候補選定や、蓄熱材（熔融塩）の選定、漏れ検知方法の検討、構成材料の腐食量評価などを進めている。更に、高温蓄熱装置での輻射（ふくしゃ）伝熱など、実機を想定した伝熱に関する基礎データを収集している。

検討中の5 MWe級水素電力貯蔵装置のイメージを図11に示す。32 MWhの蓄電容量を想定しており、1万世帯への8hの電力供給が可能になる。



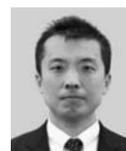
4 あとがき

エネルギー媒体としての水素を高効率に製造する方法、あるいは水素と電力を相互に高効率で変換する方法についての要求は、今後も高くなることが予想される。当社は、引き続き持続的かつ安心、安全、快適な社会のために、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に向けて様々な開発を推進していく。SOECの大容量化や高効率化とともに、これをシステムとして活用する技術はもっとも重要な要素技術の一つである。より高効率な水素製造・電力貯蔵システムの構築に向け、今後も開発を進めていく。

この研究の成果の一部は、経済産業省及び国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託業務で得られたものである。

文献

- (1) 経済産業省. 長期エネルギー需給見通し. 2015, 12p. <http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf>, (参照 2016-05-09).
- (2) 地球温暖化対策推進本部. 日本の約束草案. 首相官邸. 2015, 13p. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai30/yakusoku_souan.pdf>, (参照 2016-05-09).
- (3) 水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ. 経済産業省. 2016, 69p. <<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>>, (参照 2016-05-09).



松永 健太郎 MATSUNAGA Kentaro

エネルギーシステムソリューション社 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。固体酸化物形セルスタックの開発に従事。化学工学会, 日本セラミックス協会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



吉野 正人 YOSHINO Masato

エネルギーシステムソリューション社 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査。固体酸化物形セルスタックの開発に従事。電気化学会, 化学工学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



渡邊 久夫 WATANABE Hisao

エネルギーシステムソリューション社 次世代エネルギー事業開発プロジェクトチーム参事。水素事業関連プロジェクト推進責任者として、プロジェクトの管理・統括業務に従事。日本原子力学会, 日本機械学会会員。New Energy Solutions Project Team