

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

固体酸化物形燃料電池システム (Vol.4)
—水蒸気電解への適用と技術開発課題—

平成29年3月

“SOFC Systems (vol.4):

Application of SOFCs to Steam Electrolysis and Technological Challenges”

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2016-PP-03

概要

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システムの普及に向けて、SOFC を用いた水蒸気電解セル (SOEC) による水素製造について、電解性能と水素製造コストの両者の観点から検討を行った。円筒横縞形 SOFC セルスタックの数値モデルを構築し、そのモデルを基に SOEC セルスタックへ適用した際の水蒸気電解性能の詳細な解析を行うことで、水素製造原単位について検討を行った。さらに、水蒸気電解システムのプロセスフローを構築し、熱・物質収支解析を実施した上で、水蒸気電解効率とシステムコストの試算を行った。以上に基づき水素製造に関する技術シナリオを検討し、水素製造および圧縮・貯蔵を考慮したプロセスにおいて、4 円/MJ (40 円/Nm³-H₂) 程度まで低減できる道筋を示した。さらに、SOEC による低コストの水素製造の実現に向けた、今後の技術開発課題について検討を行った。

Summary

In order to facilitate the widespread use of solid oxide fuel cells (SOFCs), hydrogen production using an electrolyzer with SOFC was investigated by analyzing electrolysis performance and hydrogen production cost. A numerical simulation model for a tubular cell-stack of a segmented-in-series tubular solid oxide fuel cell (SST-SOFC) was constructed. Based on the model, a detailed analysis of steam electrolysis with SST-SOFC (SOEC) was carried out and energy consumption for hydrogen production was examined. A process flow diagram of steam electrolysis using SST-SOEC was made and a heat and mass balance study was performed to determine steam electrolysis efficiency and the SST-SOEC system manufacturing cost. From the results, the technology scenario for the hydrogen production process with SST-SOEC involving compression and storage of hydrogen was proposed, i.e., an innovative way to achieve hydrogen production cost of about 4 JPY/MJ (40JPY/Nm³-H₂) was proposed. Finally, future technological challenges to realize low cost hydrogen production using SOEC are discussed.

目次

概要

1. はじめに.....	1
2. SOFC の性能分析（発電および水蒸気電解の性能・システム評価）.....	1
2-1 中・大型 SOFC システムによる発電および水蒸気電解の数値モデルシミュレーション.....	1
2-2 水蒸気電解システム（SOEC システム）の熱・物質収支解析.....	3
3. 水素製造コスト評価.....	4
3-1 SOEC システムのコスト評価.....	4
3-2 SOEC による水素製造のコスト評価.....	5
4. SOEC システムの技術開発課題.....	7
5. 政策立案のための提案.....	8
参考文献.....	8

1. はじめに

燃料電池は、高効率発電システムとして定置型および車載型用を中心に開発が進められている。将来の国内の電源構成は、再生可能エネルギーの大規模な導入に伴い、その様相が大きく変化することが予想されるが、燃料電池の用途も発電だけではなく、水素製造に代表される将来の新しい役割についての検討が必要である。本稿では、中・大型機の固体酸化物形燃料電池（以下 SOFC）システムを評価対象に、数値モデル計算による発電および水素製造の性能評価を行うと共に、これまで検討してきた SOFC のコスト評価（LCS 提案書¹⁾[1]-[3]、および文献[4]）を基に、圧縮・貯蔵プロセスを考慮した水素製造コスト評価を行った。最後に、水素製造コスト低減の技術シナリオについて検討を行い、今後の技術開発課題について述べる。

2. SOFC の性能分析（発電および水蒸気電解の性能・システム評価）

2-1 中・大型 SOFC システムによる発電および水蒸気電解の数値モデルシミュレーション

水素製造コスト低減に向けた技術シナリオを構築するために、円筒横縞形セルによる発電および水蒸気電解の性能評価について、有限要素法による数値モデル計算を行った。現在国内で開発が進められている中・大型システムとして、SOFC コンバインドサイクルシステムがある[5]-[7]。円筒横縞形セルは、250kW 級 SOFC コンバインドサイクルシステムの実機で用いられており、本稿では、これまで検討してきた数値モデル[3]を基に、250kW システムを対象として発電と水蒸気電解に関する数値解析を行った。図 1 に円筒横縞形セルスタックの模式図を示す。

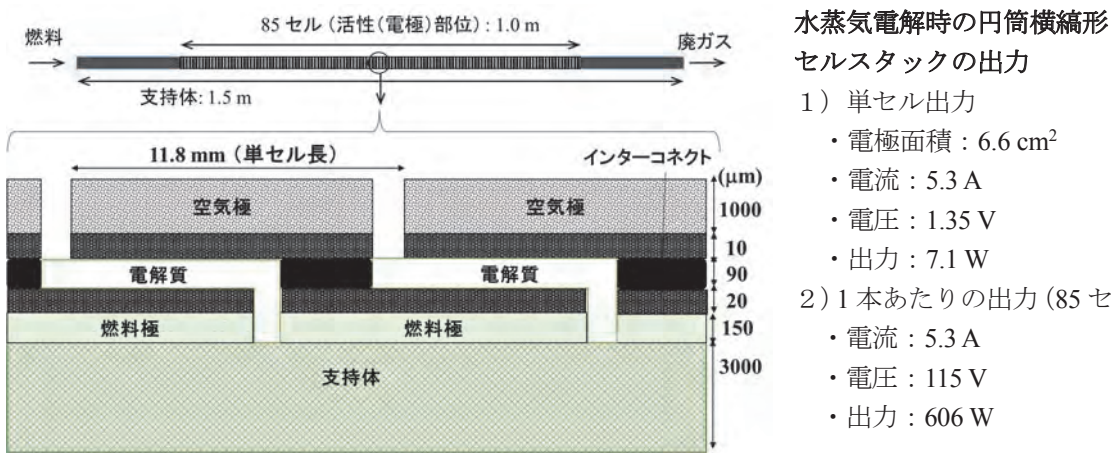


図 1 円筒横縞形セルスタックの模式図（直列に接続されたセル数：85セル）

また、表 1 と表 2 に、発電時と水蒸気電解時の円筒横縞形 SOFC モジュールの条件をそれぞれ示す。これらの前提条件を基に計算した電流－電圧曲線（*IV* 曲線）を図 2 に示す。発電時の交換電流密度は、文献[5]を参考に、アノード（燃料極）：6,000 A/m²；カソード（空気極）：6,000 A/m²の値を採用した。水蒸気電解時の交換電流密度は、文献[8]を参考に、カソード（水素極）：3,000 A/m²；アノード（酸素極）：6,000 A/m²の値を採用した。発電時は、電流密度 2,000 A/m²（セル電圧：0.85V）を定格運転とすると、85セルスタック 1本あたり 96 W と算出され、AC 出力 220 kW

¹⁾ 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（以下、LCS 提案書）。

(DC 出力 230kW) を想定した場合、2,400 本の円筒横縞形セルスタックから構成される SOFC モジュールが必要となる (表 1)。水蒸気電解については、上述の SOFC モジュールを可逆型 (発電/電解) SOFC システムとして使用することを想定した。すなわち、以後 2,400 本の 85 セルスタックから構成される SOFC モジュールを、水蒸気電解セル (SOEC) のモジュールに用いることを前提とした。このとき、SOEC の入力電力は、1.5 MW になる (表 2)。

表 1 円筒横縞形 SOFC の単セルおよびモジュールの基本条件 (発電時)

作動温度 (K)	1,173
燃料組成	H ₂ /N ₂ /H ₂ O = 70/29/1 (vol%)
燃料利用率 (%)	60
定格 AC 出力 (kW)	220
DC 出力 (kW)	230
平均出力 (W/本-円筒横縞形セルスタック)	96
円筒セルスタック数 (本)	2,400

表 2 円筒横縞形 SOEC のモジュールの基本条件 (水蒸気電解時)

作動温度 (K)	1,173
カソード組成	H ₂ O/H ₂ = 90/10 (vol%)
水蒸気利用率 (%)	85%
AC 入力 (MW)	1.52
DC 入力 (MW)	1.45
平均入力 (W/本-円筒横縞形セルスタック)	606
円筒セルスタック数 (本)	2,400

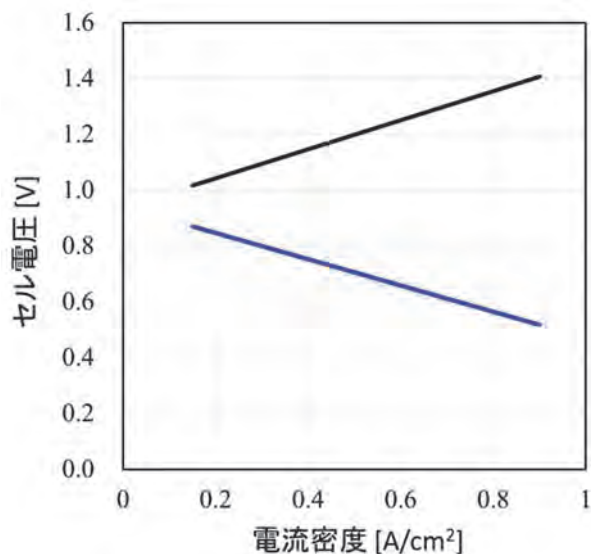


図 2 円筒横縞形単セル IV 曲線 発電：青実線；水蒸気電解：黒実線

2-2 水蒸気電解システム (SOEC システム) の熱・物質収支解析

前節 (2-1) の計算結果を基に、水蒸気電解システムのプロセス設計を行った。水蒸気電解は吸熱反応であるため、電解に伴う電極の過電圧によるシステムへの熱供給が必要となる。水蒸気電解による熱自立運転 (水蒸気電解反応のエントロピー吸熱 ($T\Delta S$) と SOEC の過電圧に伴う発熱が相殺され、SOEC モジュールの熱収支がゼロになる運転条件) は 1.3V 程度で実現される ($\Delta H/nF \cong 1.3 \text{ V}$) [9]。従って、図 2 の IV 曲線の計算結果から、電流密度 0.8 A/cm^2 、セル電圧 1.35 V を水蒸気電解の作動条件に設定した。この条件を基に、水蒸気電解プロセスの設計および熱・物質収支解析を行った。そのプロセスフローを図 3 に示す。常温の水をポンプで送液し、熱交換器およびヒーターを用いて水蒸気を生成し、SOEC モジュールのカソードに導入する。カソード内で水蒸気の電気分解で生成した水素は、圧縮機を用いて高压タンクに貯蔵される。また、生成した一部の水素は、ブロアーを用いてカソードにリサイクルされる。水素のリサイクルにより、カソード電極 (ニッケル) の酸化による劣化を防いでいる。リサイクルを考慮した本システムの水素生成速度は、SOEC モジュール 1 台で 5.58 mol/s ($450 \text{ Nm}^3/\text{h}$) であると算出された (表 3)。この値は、現在想定されている小型水素ステーションに十分に対応できる水素製造能力である (商用水素ステーションの標準水素製造能力: $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$)。

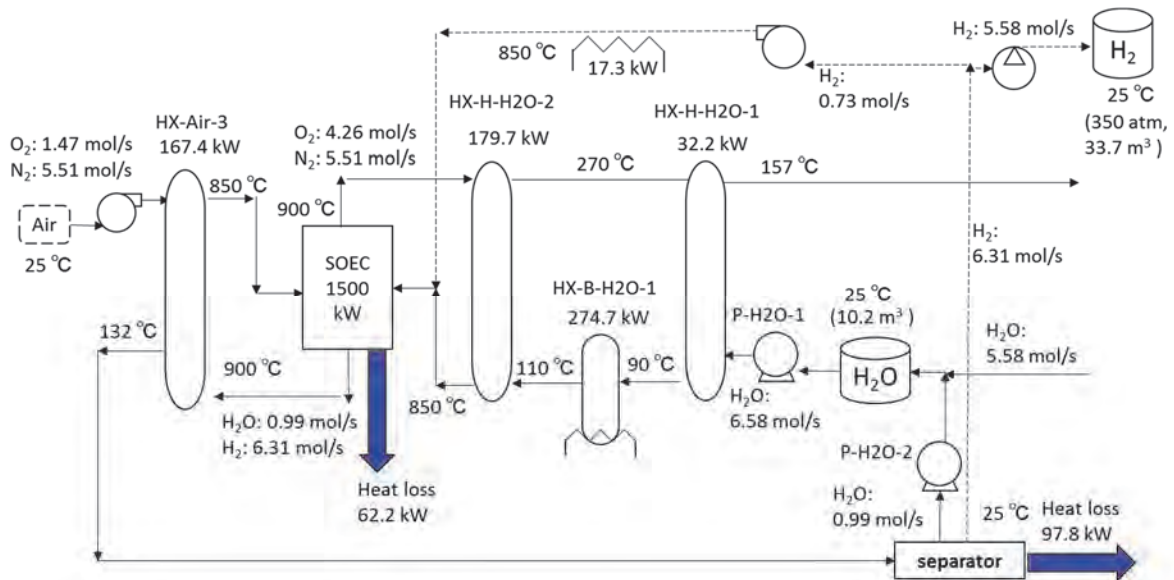


図 3 水蒸気電解システムのプロセスフロー図 (熱・物質収支解析)

表 3 SOEC システムの単セル作動条件と水素生成速度

電流密度 (A/cm^2)	0.8
セル電圧 (V)	1.35
水素生成速度: (mol/s)	5.6
: (Nm^3/h)	450

以上の水蒸気電解システムの水素製造原単位を計算した (表 4)。図 2 の水蒸気電解性能の結果に基づき、SOEC モジュールの水素製造原単位を求めた。また、図 3 の水蒸気電解システムに対する水蒸気製造原単位の算出も行った。計算の際、圧縮機、ヒーター、ブロアーおよびポンプの動力を考慮した。文献[10]を参照しながら、高压タンク圧力 (35 MPa) を想定し、水素圧縮電力原

単位を算出した ($0.3 \text{ kWh/Nm}^3\text{-H}_2$)。結果を表 4 にまとめる。また、電解効率 (LHV 換算²⁾) を算出したところ、水素圧縮過程を含まない場合 78%であり、水素圧縮過程を含めると 72%であった。さらに、圧縮効率 (断熱効率) の電解効率に対する影響も検討した。標準的な水素圧縮電力原単位の値として用いた $0.3 \text{ kWh/Nm}^3\text{-H}_2$ に対応する圧縮効率は 75%を想定しているが、仮に圧縮効率が 90%まで改善した場合、水素圧縮電力原単位は $0.25 \text{ kWh/Nm}^3\text{-H}_2$ まで低減されると推定され、水素圧縮過程を含めた電解効率は 72%から 73%まで改善される結果が得られた。このように、圧縮効率の改善によっても電解効率の改善が可能であるが、その効果は限定的である。なお、本稿で検討した図 3 の水蒸気電解システムでは、水蒸気が再凝集する際の水の潜熱回収は行っていない。従って、SOEC の電極性能の向上と共に水の潜熱回収を行うことで、電解効率をさらに向上させ、80%程度にすることも十分に可能である。

表 4 水素製造原単位

水素圧縮電力原単位 : 35 MPa ($\text{kWh/Nm}^3\text{-H}_2$)	0.30
水素製造原単位 : SOEC モジュール ($\text{kWh/Nm}^3\text{-H}_2$)	3.2
水素製造原単位 : SOEC システム ($\text{kWh/Nm}^3\text{-H}_2$)	3.9 (4.2)
電解効率 (括弧内は水素圧縮過程を含む) (%) (LHV 換算)	78 (72)

()内は、水素圧縮過程を含める場合の値。

3. 水素製造コスト評価

3-1 SOEC システムのコスト評価

図 3 の水蒸気電解システムのプロセス設計、および既 LCS 提案書の円筒横縞形 SOFC モジュールのコスト評価[2],[3]の結果を参考にして、SOEC システムのコスト評価を行った。図 4 に 1.5 MW SOEC システムのコスト構造を示す。現状のコスト構造の分析から、SOEC システムコストは、主に SOEC モジュール、圧縮器、高圧タンクであることが明らかとなった。その他の補器であるポンプ・ブローア、熱交換器、ヒーターを含むコスト構造の詳細を表 5 に示す。

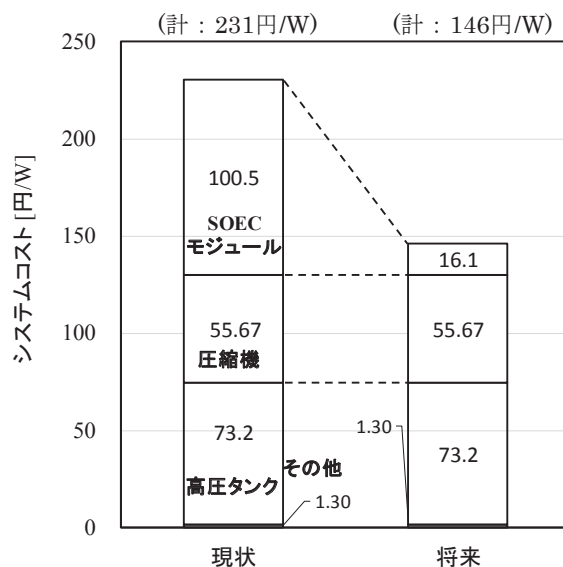


図 4 1.5 MW SOEC システムのコスト構造

²⁾ LHV (Lower Heating Value), 低位発電量標準。

SOEC モジュールコストは、既 LCS 提案書[2],[3]の 220kW SOFC モジュールのコスト低減の技術シナリオ³⁾を参考に算出を行った。本稿では、SOEC システムコストは、将来十分にコスト低減が可能であることが予想されるが、圧縮機と高圧タンクについてはコスト低減を前提とせずにシステムコストの評価を行った。その結果、現状 234 円/W から 146 円/W までコスト低減が可能であることが示された(コスト算出は 1.5MW のシステムを基準とした)。なお、圧縮機については、レシプロ式やダイヤフラム式が考えられるが、量産効果によるコスト低減が期待される。高圧タンクについては、現状の分析ではスチール製を前提として解析を行っているが、カーボンファイバーや樹脂から構成される高圧タンクも開発されるようになり、今後は、量産効果に加えて、材料開発に伴うコスト低減も見込まれる。

表 5 1.5 MW SOEC システムのコスト構造と技術シナリオ

	現在	将来 (2030)
生産スケール (モジュール/年)	< 10	1,000
寿命 (年)	<10	20
SOEC モジュール (円/W)	100.5	16.1
圧縮機 (円/W)	55.7	55.7
高圧タンク (円/W)	73.2	73.2
ポンプ・ブロアー (円/W)	0.44	0.44
熱交換器 (円/W)	0.78	0.78
ヒーター (円/W)	0.09	0.09
システムコスト (円/W)	231	146

3-2 SOEC による水素製造のコスト評価

上述の 1.5 MW SOEC システムの性能評価およびコスト構造を基に、SOEC による水素製造のコスト評価を行った。水素製造コストは、既 LCS 提案書[3]でも既に議論しているが、今回の SOEC システムの詳細な解析を基に、技術シナリオについて検討を行った。表 6 に前提条件を示す。入力電力は、太陽電池の余剰電力を想定したため、SOEC システムの稼働率を太陽電池の稼働率と一致させ、ここでは 12%で計算を行った。

表 6 水素製造コスト試算の前提条件

			備考
水電解効率 (水素製造効率 LHV)	78	%	図 3, 表 4
水素製造電力原単位 (SOEC モジュール)	3.2	kWh/Nm ³ -H ₂	図 3, 表 4
水素製造電力原単位 (SOEC システム)	4.2	kWh/Nm ³ -H ₂	図 3, 表 4
システム寿命	15	年	
年経費率	12	%	
システム稼働率	12	%	PV を想定
再生可能エネルギー電力コスト	0-25	円/kWh	Ref. [11],[12]

³⁾ 文献[2]の表 6、および文献[3]の表 2 参照。文献[2]において、中・大型 SOFC システムコスト低減に向けて、製造工程 (生産スケール、歩留まり)・セルデザイン (支持体径)・セル性能・寿命および BOS コストについて、現在から 2030 年に向けての改善シナリオを提案した。中・大型 SOFC の技術シナリオの特徴は、以下の 3 点である。

- 出力: セルチューブあたり、現状の 80 W から 120 W への向上の実現。
- 発電効率: 現状の 55%から 58% (2020 年) を経て 60% (2030 年) の実現。
- システム寿命: 現状の実証研究では数千時間の実績であるが、2020 年以降 10~15 年以上の高寿命化を実現し、2030 年までに 20 年以上の実現を想定。

図 5 に SOEC による水素製造コストのシステムコスト依存性を示す。ここで、水素製造コストの目標値として、ガソリン販売価格 (4.2 JPY/MJ) と同水準の 40 円/Nm³-H₂ の値[3],[10]を参考にして、将来的に 40~50 円/Nm³-H₂ の水素製造コストを達成する条件について考えてみる。図 5 に示すように、太陽電池と等価の稼働率 (12%) を想定すると、水素製造コスト目標値 (40 円/Nm³-H₂) に到達するための必要条件は、余剰電力利用を前提として、料金を 0 円/kWh とし、かつシステムコストが 100 円/W 程度まで低減する必要があることがわかる。また、50 円/Nm³-H₂ の水素製造コストであれば、電力料金が 0 円/kWh の場合、SOEC のシステムコストが 140 円/W 弱程度であればよいことがわかる。このシステムコストの値は、先に図 4 で示した SOEC のシステムコストの評価結果の値と近い。従って、太陽電池の稼働率を想定した水素製造においても、非常に低価格を想定した再生可能エネルギーから生じる余剰電力の利用が将来シナリオの一つとして考えられる。

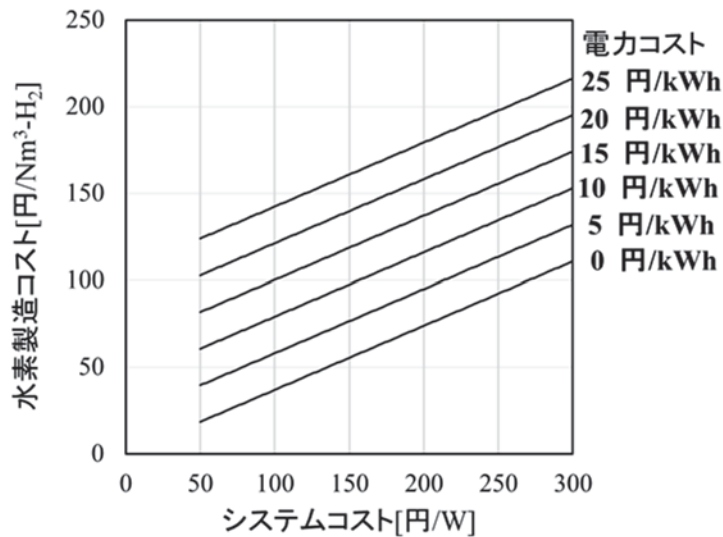


図 5 水素製造コストの SOEC システムコスト依存性 (システム稼働率 12%)

次に水素製造コストの稼働率依存性について検討を行った。その結果を図 6 に示す。SOEC システムのコスト評価の結果 (図 4) に基づき、システムコストは 146 円/W の値に設定した。水素製造コスト目標値を 40 円/Nm³-H₂ とした場合、その目標に到達するための条件は、電力料金が 0 円/kWh の場合を想定すると、15%以上の稼働率が必要である。また、電力料金が 5 円/kWh の場合では、35%以上の稼働率が必要である。一方、水素製造コストを 50 円/Nm³-H₂ とした場合では、電力料金が 0 円/kWh の場合を想定すると、12%以上の稼働率 (太陽電池の稼働率に相当) が必要である。5 円/kWh の発電コストの条件では、稼働率 20%程度 (風力発電の稼働率に相当) で達成が可能であることがわかる。なお、太陽電池の発電コストは、将来 5 円/kWh 程度まで低減できる見通しが示されており [11],[12]、海外の廉価な水力や風力の利用に加え、太陽電池の利用も可能である。ただし、稼働率に要求される条件を考えると、再生可能エネルギーの余剰電力利用を想定した場合、太陽や風力の利用に加え、水力や地熱などの利用も有効な手段となりうる。

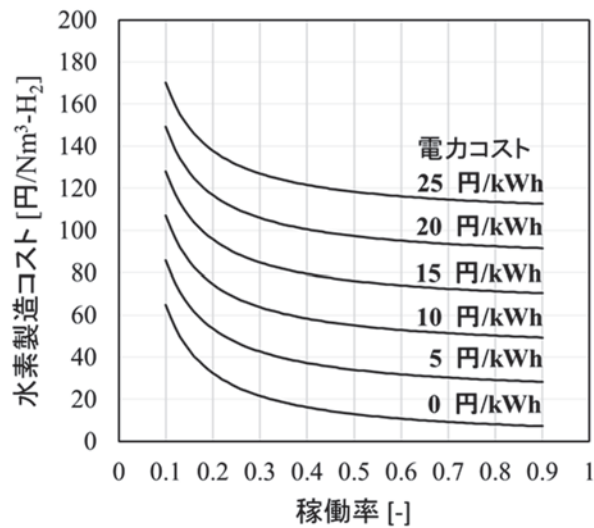


図 6 水素製造コストの稼働率依存性
 (システム寿命：15 年；システムコスト：146 円/W)

スマートグリッドに代表される将来の電力網において、水素は出力変動抑制のための安定電源（水素タービン発電）としての利用が期待されるため、最後に国内の水素製造量に必要な 1.5 MW SOEC システムの台数について試算を行った。文献[13]に基づき、将来の国内の水素由来の年間発電量を 100 TWh であると想定した場合、水素の年産量は 6.3×10^{10} Nm³-H₂ に相当する（水素タービンの発電効率：53% (LHV) を想定）。この水素の年間製造量を賄うための 1.5 MW SOEC システムの台数は、約 20,000 台であると試算された。今回の検討では、年産 1,000 台を想定して技術シナリオを構築したが、この結果に基づくと、SOEC システムの普及拡大により、この技術が将来の水素利用技術に十分に寄与できる潜在性を有することがわかる。

4. SOEC システムの技術開発課題

以上の検討に基づき、SOEC システムの技術開発の必要項目をまとめた。

1) SOEC システムの性能・コストの目標値

・1.5MW SOEC システム (450 Nm³/h)

システムコスト：150 円/W 以下；電解効率：80%以上；システム寿命：15～20 年が開発目標になる。なお、SOEC システムコストは、主に SOEC モジュール、圧縮器、高圧タンクから構成され、SOEC モジュールの製造コスト低減に向けた技術シナリオに基づき、150 円/W への開発の道筋が示されている。

2) SOEC システムの技術課題

上述のコスト評価と技術的な要請に基づき、以下の技術課題が示唆される。

- a) 長寿命水蒸気電解電極の開発：SOEC による水蒸気電解は、その熱自立運転の要求から、SOFC 発電の操作条件と比較して高電流密度が要求される。従って、SOFC の電極耐性向上の知見に加え、高水蒸気分圧および高電流密度の条件における水蒸気電解電極の耐久性向上の研究が必要である。
- b) 非定常運転におけるセルスタックの安定性向上：エネルギー需給に合わせた出力変動が予想される。従って、非定常運転におけるセルスタックの劣化防止・耐久性向上の研究開発が必要で

ある。

- c) 圧縮機および高压タンクの低コスト化：圧縮機や高压タンクのコスト低減の実現により、システムコストを 100 円/W に近づけることができる。本稿では圧縮機はレシプロ式やダイヤフラム式を想定しているが、電気化学気体圧縮も考えられる。また、高压タンクについては、現在スチール製を前提としているが、カーボンファイバーや樹脂から構成される高压タンクの開発が期待される。今後は、材料開発に伴うコスト低減を見込んだ研究開発が望まれる。
- d) 再生可能エネルギーの発電コスト低減に向けた技術革新：稼働率にもよるが、再生可能エネルギーの発電コストを 5 円/kWh 程度に低減する必要がある。太陽電池の場合、今後の技術革新によるが、将来 5 円/kWh へのコスト低減の道筋が示されている[11],[12]。

5. 政策立案のための提案

本稿では、SOEC の詳細な性能予測およびコスト評価を行った。具体的には、円筒横縞形 SOEC を評価対象として、水蒸気電解の数値シミュレーションおよび SOEC システムの熱・物質収支解析とコスト解析を行った。数値シミュレーションの結果より水素製造原単位 (SOEC モジュール) は $3.2 \text{ kWh/Nm}^3\text{-H}_2$ であり、さらに SOEC システムの熱・物質収支解析に基づくと、水素製造原単位 (SOEC システム) は $4.2 \text{ kWh/Nm}^3\text{-H}_2$ の値が得られた。水素圧縮過程を除いた水蒸気電解システムの効率は 78% (LHV) であり、水素圧縮過程を含めた水蒸気電解システムの効率は 72% (LHV) の値が得られた。また、システムコストは 234 円/W であるが、将来は 146 円/W まで低減できる可能性が示された (SOEC 入力電力基準 (1.5MW))。圧縮機や高压タンクのコスト軽減が進めば、さらなるシステムコストの低減が可能である。最後に $40\sim 50 \text{ 円/Nm}^3\text{-H}_2$ の水素製造コストを達成するための技術シナリオについて検討し、①システムコスト：150 円/W 以下；②電解効率：80% 以上；③システム寿命：15 年以上が目標達成のために要求される条件であることがわかった。さらに、電力料金が 0 円/kWh の場合では、12~15%程度の稼働率が必要であることが示され、電力料金が 5 円/kWh の場合では、20~35%程度の稼働率が必要であることがわかった。これらの議論を基に、定置型 SOFC システムの技術開発項目をまとめた (詳細は 4.参照)。

- 1) 長寿命・高耐久性を有する水蒸気電解電極の開発
- 2) 非定常運転におけるセルスタックの安定性向上の検討
- 3) 圧縮機および高压タンクの低コスト化
- 4) 太陽電池等の再生可能エネルギーの発電コスト低減に向けた技術革新

以上、今後の技術革新の進捗に強く依存するが、再生可能エネルギーを利用した場合でも、SOEC による水素製造が可能であることが示された。

参考文献

- [1] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 技術開発編, “固体酸化物形燃料電池システム—要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, pp.1-10, 2014 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2013-pp-04.pdf>)
- [2] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 技術開発編, “固体酸化物形燃料電池システム (Vol.2) —中・大型機 SOFC 製造コスト評価と技術開発課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, pp.1-9, 2015 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2014-pp-05.pdf>)
- [3] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション

- 政策立案のための提案書, 技術開発編, “固体酸化物形燃料電池システム (Vol.3) –将来の電源構成における SOFC の役割と技術開発課題–”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, pp.1-10, 2016 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2015-pp-03.pdf>)
- [4] J. Otomo, J. Oishi, T. Mitsumori, H. Iwasaki and K. Yamada, “Evaluation of Cost Reduction Potential for 1kW Class SOFC stack production: Implications for SOFC Technology Scenario”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (33), 14337-14347 (2013).
- [5] K. Tomida, N. Hisatome, T. Kabata, H. Tsukuda, and Y. Yamazaki, “Structural modification of segmented-in-series tubular SOFCs using performance simulation and the effect of (Sm, Ce)O₂ cathode interlayer on the generation characteristics under pressurization”, *Electrochemistry*, 77(10), 865-875 (2009).
- [6] Y. Kobayashi, K. Kosaka, K. Tomida, N. Matake, K. Ito, and K. Sasaki, “Start-up characteristics of segmented-in-series tubular SOFC power modules improved by catalytic combustion at cathodes”, *Fuel Cells*, 14(6), 1028-35 (2014).
- [7] Y. Kobayashi, Y. Ando, T. Kabata, M. Nishiura, K. Tomida, N. Matake, “Extremely high efficiency power system -SOFC triple combined cycle system (究極の高効率火力発電-SOFC(固体酸化物形燃料電池)トリプルコンバインドサイクルシステム)”, *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review*, 三菱重工技報 48(3), 16-21 (2011).
- [8] 吉野正人, “再生可能エネルギーを活用する水素によるエネルギー貯蔵・供給システム”, *Electrochemistry*, 84(8), 620-625 (2016).
- [9] 荒木拓人, 水澤竜也, “SOEC を用いた水蒸気電解システムの定常サイクル計算”, *Electrochemistry*, 84(8), 616-619 (2016).
- [10] 圏分裕一, “高圧水素の輸送にかかわるコストとエネルギー効率”, *水素エネルギーシステム*, 34(4), 24-30 (2009).
- [11] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 技術開発編, “太陽光発電システム (Vol.2) –定量的技術シナリオを活用した高効率シリコン系太陽電池の経済性評価–”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, pp.1-7, 2015 年 3 月.
- [12] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 技術開発編, “太陽光発電システム–要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ–”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, pp.1-11, 2014 年 3 月.
- [13] 小宮山宏, 山田興一, “新ビジョン 2050, 地球温暖化、少子高齢化は克服できる”, 日経 BP 社, 第 5 章 2050 年の低炭素社会, ISBN978-4-8222-3657-1, 2016.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

固体酸化物形燃料電池システム (Vol.4)
－水蒸気電解への適用と技術開発課題－

平成 29 年 3 月

“SOFC Systems (vol.4):

Application of SOFCs to Steam Electrolysis and Technological Challenges”

Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2017.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 大友 順一郎 (Junichiro OTOMO)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<http://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2017 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
