

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

水素製造技術における燃料電池 (SOFC・PEFC) の役割

－ 固体酸化物形燃料電池システム (Vol.5) －

平成 30 年 1 月

New Role of Fuel Cells (SOFC and PEFC) for Hydrogen Production Technology:

SOFC Systems (vol.5)

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-FY2017-PP-03

概要

燃料電池システムの新たな役割の提案を目的として、再生可能エネルギーの電力を用いた水電解への適用について検討を行った。今年度は、現在開発が進められている平板形の固体酸化物形燃料電池（SOFC）および固体高分子形燃料電池（PEFC）の両者のシステムのスタック製造コストの評価を行い、それらのコスト構造の比較を行った。その結果、水素製造能力が同じ条件下（450Nm³/h）で評価を行い、SOFCの場合、8.5円/W（1.5MW級水蒸気電解用スタック）であり、PEFCの場合で10.7円/W（1.9MW級水電解用スタック）であった。続いて、上述のSOFCを用いた水蒸気電解セル（SOEC）およびPEFCを用いた水電解セル（PEMEC）による水素製造コストの検討を行った。平板形のSOECとPEMECのスタックによる水素製造と後段の水素の圧縮・貯蔵プロセスを考慮した水素製造コストの算出を行い、その比較検討を行った。さらに、水素製造に関する技術シナリオを検討し、水素製造コストが5円/MJ以下に低減するための技術課題について提案を行った。

Summary

In order to propose new roles for fuel cell systems, we investigated applications of such systems to water electrolysis using renewable energy. In this report, we evaluated the stack fabrication costs of a flat-type solid oxide fuel cell (SOFC) and a flat-type polymer electrolyte fuel cell (PEFC) and compared their cost structures. The evaluation of fuel cell-stack costs was performed under the same conditions, in terms of hydrogen production rate, for both systems (450 Nm³/h). The stack cost of SOFC (equivalent to a stack for a 1.5 MW steam electrolyzer) was 8.5 JPY/W, while that of PEFC (equivalent to a stack for a 1.9 MW water electrolyzer) was 10.7 JPY/W. Hydrogen production costs were then evaluated using a solid oxide electrolysis cell (SOEC) and a polymer electrolyte membrane electrolysis cell (PEMEC). We assessed the hydrogen production costs for processes involving SOEC and PEMEC stacks, as well as compression and storage processes, and compared the SOEC cost with that of PEMEC. Finally, a technology scenario for hydrogen production was discussed and future technological challenges to achieving hydrogen production at a cost less than 5 JPY/MJ were proposed.

目次

概要

1. はじめに.....	1
2. 燃料電池（SOFC、PEFC）のコスト分析の比較.....	1
2-1. 平板形 SOFC と PEFC のセルスタック仕様.....	1
2-2. 平板形 SOFC（SOEC）と PEFC（PEMEC）のモジュールのコスト構造.....	2
3. SOEC と PEMEC の水素製造（水電解）の性能評価.....	4
3-1. 水電解システムのプロセスフローの評価.....	4
3-2. 水素製造エネルギー原単位および水素製造効率の評価.....	5
4. 水素製造コスト評価.....	6
4-1. SOEC および PEMEC による水素製造のコスト評価.....	6
4-2. 水素製造コストに対する必要条件.....	7
5. 政策立案のための提案 ～SOEC および PEMEC システムの技術開発課題～.....	8
6. まとめ.....	9
参考文献.....	9

1. はじめに

燃料電池は、高効率発電デバイスとしての開発が進められている。一方、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う余剰電力を取り扱うためのエネルギー貯蔵技術として、水電解¹⁾による水素製造技術への燃料電池の応用が検討されている。本提案書では、筆者らが検討してきた燃料電池の技術評価手法を適用し[1],[2]、昨年度議論した固体酸化物形燃料電池 (SOFC) [3]だけではなく、固体高分子形燃料電池 (PEFC) にも適用することで、より広く燃料電池技術のコスト評価を行い、水電解に適用する際の両者の燃料電池の特徴と技術的課題について検討を行った。

2. 燃料電池 (SOFC、PEFC) のコスト分析の比較

2-1. 平板形 SOFC と PEFC のセルスタック仕様

水電解による水素製造コストの評価に向けた SOFC と PEFC の技術シナリオを構築するために、平板形 SOFC と PEFC のスタックコスト (モジュールコスト) の評価を行った。図 1 に今回の評価に用いた SOFC と PEFC の単セルの標準仕様の模式図を示す。

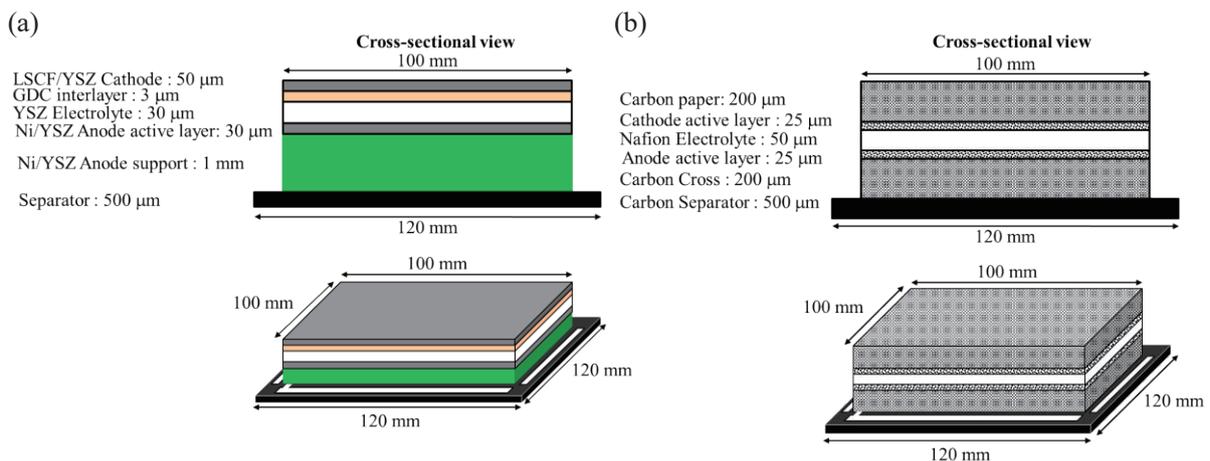


図 1 (a)SOFC と(b)PEFC の単セルの模式図

表 1 および表 2 に今回評価を行った平板形 SOFC と PEFC のセルスタックの標準仕様をそれぞれ示す。これら燃料電池の仕様は、既報の LCS 提案書²⁾[3]-[6]および本提案書では後述する水素製造の要求仕様に基づき決定した。すなわち、システムのセル枚数は、水素製造量と水電解時の電流密度に基づき必要枚数を算出した。水素製造量は、昨年度の LCS 提案書[3]で設定した 450 Nm³/h (5.6 mol/s)の値を採用し、電流密度は文献[3],[7],[8]を基に設定を行った。以降、SOFC を用いた水蒸気電解セルを SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell) と記載し、PEFC を用いた水電解セルを PEMEC (Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell) と記載する。

¹⁾ SOEC 水蒸気電解、および PEMEC 水電解を含む水電解技術一般。

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、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)。

表 1 SOFC (SOEC) 単セル仕様と水素製造速度

単セル電極面積 (cm ²)	100
電流密度 (A/cm ²) (水蒸気電解時*)	0.8
セル電圧 (V) (水蒸気電解時*)	1.35
セルスタックのセル枚数	200
モジュールのセルスタック数	68
水素製造速度: (mol/s)	5.6
: (Nm ³ /h)	450
作動温度 (°C)	750

*文献[3]を基に設定。

表 2 PEFC (PEMEC) 単セル仕様と水素製造速度

単セル電極面積 (cm ²)	100
電流密度 (A/cm ²) (水電解時*)	0.8
セル電圧 (V) (水電解時*)	1.7
セルスタックのセル枚数	200
モジュールのセルスタック数	68
水素製造速度: (mol/s)	5.6
: (Nm ³ /h)	450
作動温度 (°C)	80

*文献[7],[8]を基に設定。

2-2. 平板形 SOFC (SOEC) と PEFC (PEMEC) のモジュールのコスト構造

以上の仕様を基に、SOFC (SOEC) と PEFC (PEMEC) のスタック製造コスト評価を行った。SOFC のスタック製造コストの評価方法については、既報の LCS 提案書[3]および文献[1],[2]に詳述している。すなわち、LCS では、低炭素技術の経済性・環境負荷を定量的に評価するために、「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」として、評価手法とその支援基盤を構築しており、本分析に適用している。コスト評価については、製造機器積み上げ型の評価を行った。

図 2 に平板形 SOEC モジュールと平板形 PEMEC モジュールのコスト構造を示す。SOEC では、電極支持型のデザインを採用しているため、アノード (水蒸気電解時はカソード) 材料の割合が多くなっている。一方、PEMEC では、アノード (水電解時はカソード) 材料に、イリジウム (Ir) やルテニウム (Ru) などの貴金属が比較的少量に使用され、対極のカソード (水電解時はアノード) にも白金 (Pt) が使用される[7],[8]。その結果、PEMEC の材料コストは、SOEC の約 2.3 倍になることがわかった (後掲の表 3 参照)。従って、今後の実用化に向けては、Pt に加え、Ir や Ru の使用量の低減が必要である。

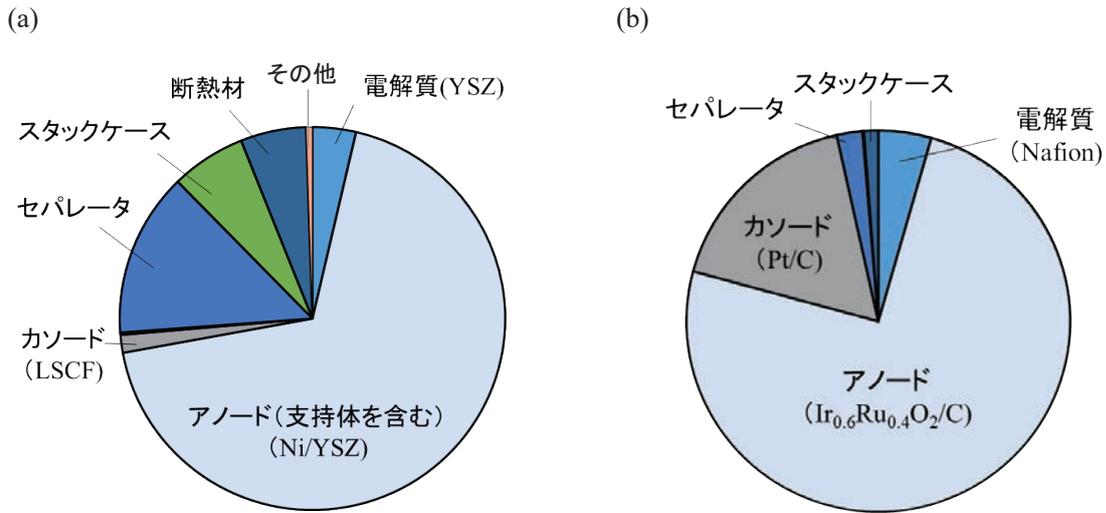


図 2 (a)平板形 SOEC モジュールと(b)平板形 PEFC モジュールのコスト構造

図 3 には、年産 1,000 台時³⁾の SOEC と PEMEC のシステムコストの比較を示す。前年度の LCS 提案書[3]で報告した圧縮機と高圧タンクのコストデータを用いて、システムコストの見積もりを行った。水電解システムは、主にセルスタック (モジュール)、圧縮機、高圧タンク、およびその他の補器であるポンプ・ブローア、熱交換器、ヒーターから構成される。

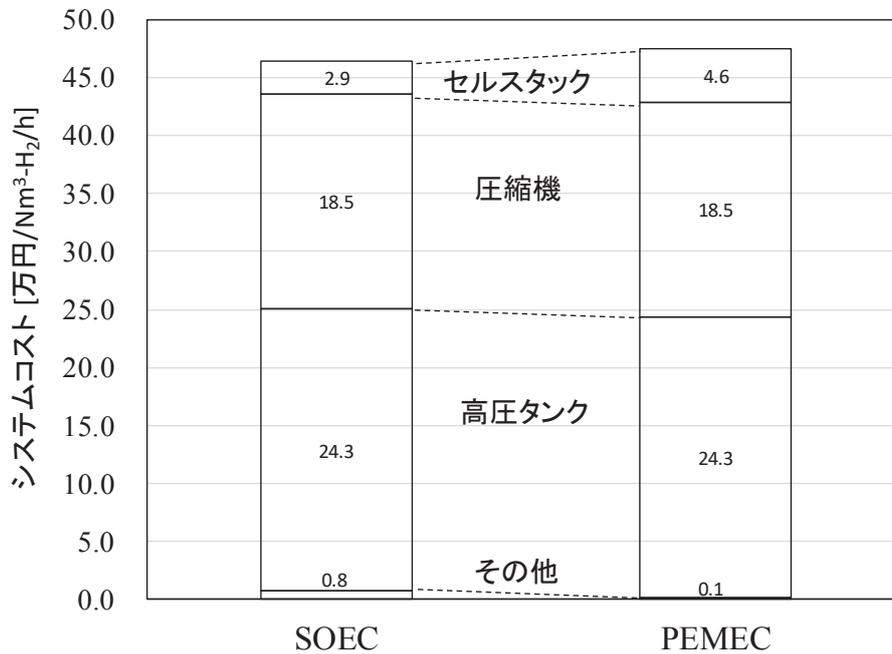


図 3 SOEC と PEMEC システムのコスト構造

³⁾ 円筒横縞形 SOEC セルを用いた「1.5MW SOEC システムのコスト構造と技術シナリオ」(前 LCS 提案書[3]の表 5 参照)では、将来 (2030 年) に年産 1,000 台としたシナリオ下で、SOEC システムコストを算出しており、本提案書でもそのシナリオを採用した。なお、年産 1,000 台のインパクトについては、後掲の 4-3 節の水素製造コストの議論についても参照していただきたい。

年産 1,000 台の条件では、モジュールのコストと比較して圧縮機と高圧タンクのコストの割合が高いため、両者のシステムコストは水素製造速度あたり 47 万円/Nm³-H₂/h (137 円/W) (SOEC : 1.5MW) および 48 万円/Nm³-H₂/h (112 円/W) (PEMEC : 1.9MW) になることがわかった。表 3 に SOEC と PEMEC のシステムコスト比較をまとめた。上述したように、SOEC と比較して PEMEC のセルスタックの材料コストが増加するが、システムコストは、圧縮機や高圧タンクなどの周辺機器のコストが支配的であるため (図 3)、PEMEC の方が若干高い程度 (2% 程度の増加) に収まることがわかる。

表 3 SOEC および PEMEC のコスト比較

	SOEC	PEMEC	備考
水素製造能力 (Nm ³ -H ₂ /h)	450	450	
年産台数 (unit/y)	1,000	1,000	
入力電力 (MW)	1.5	1.9	
材料費 (円/W)	3.0	6.8	入力電力あたり
モジュールコスト (円/W)	8.5	10.7	入力電力あたり
システムコスト (円/W)	137	112	入力電力あたり
システムコスト (万円/Nm ³ -H ₂ /h)	47	48	

3. SOEC と PEMEC の水素製造 (水電解) の性能評価

3-1. 水電解システムのプロセスフローの評価

SOEC 水蒸気電解システムおよび PEMEC 水電解システムのプロセス設計を行い、水素製造原単位と効率評価を行った。SOEC については、既報[3]のプロセスを用いて評価を行った。運転条件は表 1, 2 に示したとおりである。水の電気分解は吸熱反応であるが、水電解に伴う電極過電圧により、SOEC および PEMEC 両システム共に吸熱反応分の熱供給が可能である。ただし、SOEC では、水の気化プロセスが必要であるため、熱交換器を導入している[3]。SOEC 水蒸気電解システムのプロセスフローは、既報[3]を参照されたい。一方、PEMEC では、水の気化プロセスは不要となる。図 4 に PEMEC 水電解システムのプロセスフロー図を示す。

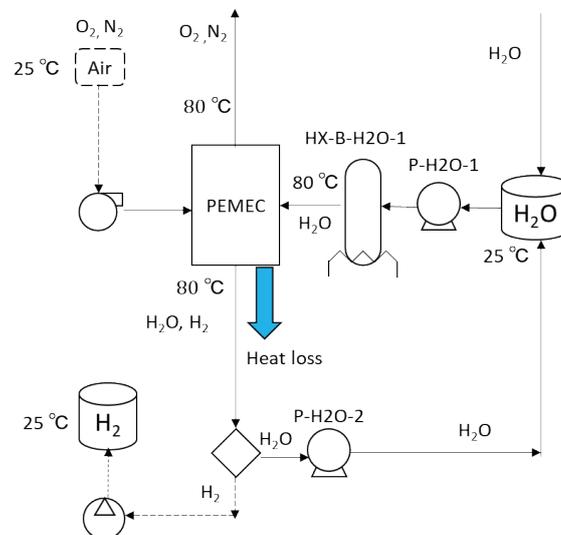


図 4 PEMEC 水電解システムのプロセスフロー図 (熱・物質収支解析)

この条件を基に水蒸気電解プロセスの熱・物質収支解析を行った。本システムの水素生成速度は、SOEC および PEMEC 共に 1 台で 5.6 mol/s (450 Nm³/h) に設定した。現在開発が進められている商用水素ステーションの標準水素製造能力は 300 Nm³/h 程度である。従って、本システムで設定した水素製造能力は、現行の小型水素ステーションに対応している[3]。

3-2. 水素製造エネルギー原単位および水素製造効率の評価

水電解システムの水素製造原単位と電解効率(LHV⁴⁾)を算出した。計算の際、圧縮機、ヒーター、ブローアおよびポンプの動力を考慮して、水素製造原単位の算出を行った。文献[9]を参照しながら、高压タンク圧力(40MPa)を想定し、水素圧縮電力原単位を算出した(0.32 kWh/Nm³-H₂)。結果を表4,5にまとめる。

表4 SOEC 水素製造原単位 (750°C 作動)

電流密度 (A/cm ²), セル電圧 (V) (水蒸気電解時*1)	0.8 , 1.35
水素圧縮電力原単位 : 40MPa (kWh/Nm ³ -H ₂)	0.32
水素製造原単位 : SOEC モジュール (kWh/Nm ³ -H ₂)	3.2
水素製造原単位 : SOEC システム (kWh/Nm ³ -H ₂)	4.1 (4.4)*2
電解効率(% (LHV))	75 (69)*2

*1 文献[3]を基に設定。*2 水素圧縮プロセスを含む

表5 PEMEC 水素製造原単位 (80°C 作動)

電流密度 (A/cm ²), セル電圧 (V) (水電解時*1)	0.8 , 1.70
水素圧縮電力原単位 : 40MPa (kWh/Nm ³ -H ₂)	0.32
水素製造原単位 : PEMEC モジュール (kWh/Nm ³ -H ₂)	4.1
水素製造原単位 : PEMEC システム (kWh/Nm ³ -H ₂)	4.3 (4.6) *2
電解効率(% (LHV))	70 (65) *2

*1 文献[7],[8]を基に設定。*2 水素圧縮プロセスを含む

SOEC は相対的に過電圧が小さく、PEMEC と比較して、水素製造原単位が低く、電解効率が高い結果が得られた。なお、今回評価を行った SOEC システムでは、水の気化にヒーターを用いているが、仮に潜熱(気化熱)の一部を熱交換器で置き換えることを想定すると、水素製造原単位(システム)は 3.7 kWh/Nm³-H₂ (圧縮機含まない) および 4.0 kWh/Nm³-H₂ (圧縮機含む) まで改善され、電解効率は、81% (LHV) (圧縮機含まない) および 75% (圧縮機含む) に到達する。

一方、PEMEC の場合も過電圧の改善が期待できる。文献値[7],[8]に基づき標準条件であるセル電圧 1.7 V を 1.55 V まで改善できた場合を想定すると、水素製造原単位(システム)は 3.9 kWh/Nm³-H₂ (圧縮機含まない) および 4.3 kWh/Nm³-H₂ (圧縮機含む) まで改善され、電解効率は 77% (LHV) (圧縮機含まない) および 71% (圧縮機含む) まで改善されることがわかった。

⁴⁾ LHV (Lower Heating Value), 低位発熱量標準。

4. 水素製造コスト評価

4-1. SOEC および PEMEC による水素製造のコスト評価

上述の SOEC と PEMEC による水電解システムの性能評価およびコスト評価を基に、SOEC と PEMEC による水素製造コストの比較評価を行った。表 6, 7 に前提条件を示す。入力電力は、再生可能エネルギー（風力発電）の余剰電力を想定し、今回の解析では 20%の稼働率を想定した（国内風力発電の稼働率に相当）。

表 6 SOEC 水素製造コストの前提条件

			備考
水蒸気電解効率（水素製造効率 LHV）	69	%	表 4
水素製造電力原単位（SOEC モジュール）	3.2	kWh/Nm ³ -H ₂	
水素製造電力原単位（SOEC システム）	4.4	kWh/Nm ³ -H ₂	表 4
システム寿命 ⁵⁾	15	年	
年経費率	12	%	
システム稼働率	20	%	Wind を想定
再生可能エネルギー電力コスト	0-25	円/kWh	

表 7 PEMEC 水素製造コストの前提条件

			備考
水電解効率（水素製造効率 LHV）	65	%	表 5
水素製造電力原単位（PEMEC モジュール）	4.1	kWh/Nm ³ -H ₂	
水素製造電力原単位（PEMEC システム）	4.6	kWh/Nm ³ -H ₂	表 5
システム寿命 ⁶⁾	15	年	
年経費率	12	%	
システム稼働率	20	%	Wind を想定
再生可能エネルギー電力コスト	0-25	円/kWh	

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。また、図 6 に PEMEC による水素製造コストのシステムコスト依存性を示す。システムコストは年産 1,000 台のスケールでは、SOEC と PEMEC で概ね同じ水準になる。また、水素製造効率も両者の差は 4～5% 程度であるため、図 5（SOEC）と図 6（PEMEC）の結果はほぼ同じになった。

⁵⁾ システムの高寿命化については、LCS 提案書[4],[5]参照。システム寿命の開発目標（15～20 年）については、LCS 提案書[3],[6]参照。

⁶⁾ システム寿命の開発目標（15～20 年）については、SOEC と同等と設定した。

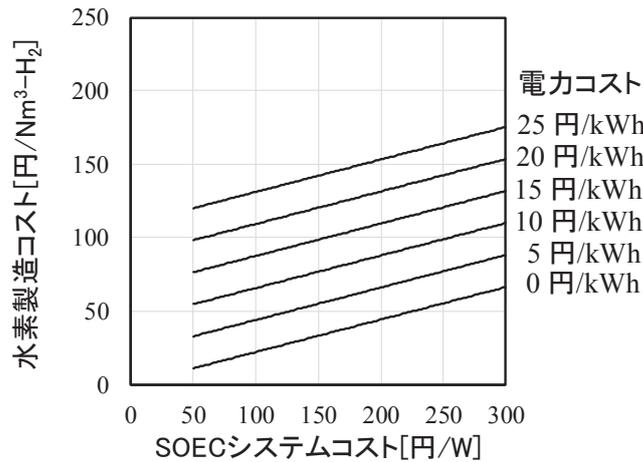


図5 SOECによる水素製造コストのシステムコスト依存性
 (AC入力電力：1.5 MW, 稼働率：20%)

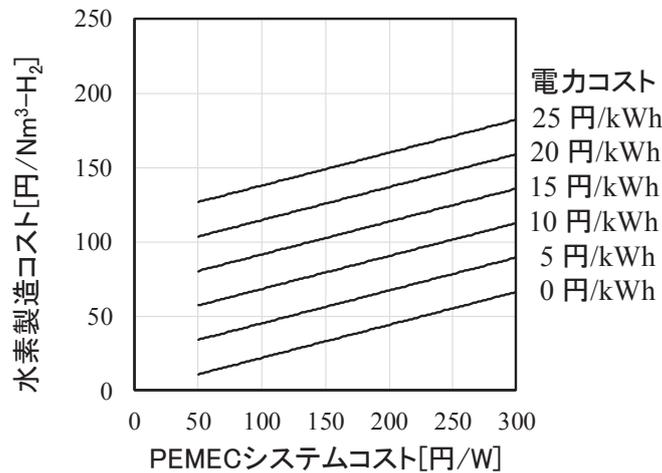


図6 PEMECによる水素製造コストのシステムコスト依存性
 (AC入力電力：1.9 MW, 稼働率：20%)

4-2. 水素製造コストに対する必要条件

ガソリン販売価格 (4.2 JPY/MJ) と同水準の 40 円/Nm³-H₂ の値[3],[6],[9]を基準として、将来的に 40~50 円/Nm³-H₂ 程度の水素製造コストを達成する条件について SOEC および PEMEC について検討した。図 5, 6 に示したように、稼働率を国内風力発電と同等の値 (20%) を仮定すると、水素製造コスト 50 円/Nm³-H₂ 以下に到達するための必要条件は、電力料金が 5 円/kWh であり、かつシステムコストが 120 円/W 程度まで低減すればよいことがわかる。この結果は、昨年度検討した円筒横縞形 SOEC システムの場合とも矛盾しない。すなわち、稼働率 20% の条件であれば、50 円/Nm³-H₂ の水素製造コストを達成するためには、平板形 SOEC および PEMEC 共に、電力料金が 5 円/kWh で、システムコストが 120 円/W 程度まで低減されればよいことがわかる。得られたシステムコストの値は、先に表 3 で示した SOEC および PEMEC のシステムコストの値 (それぞれ 137 円/W および 112 円/W) とほぼ同等の水準である。従って、再生可能エネルギー (ここでは風力発電) の稼働率を想定した水素製造においても、燃料電池を用いた

水素製造は可能であり、将来的に再生可能エネルギーから生じる余剰電力の利用が考えられる。なお、既報[3]で述べたように、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 および 1.9 MW PEMEC システムの台数は共に約 20,000 台であると試算された。今回の検討では、年産 1,000 台を仮定したが、年産台数をさらに増加させることで、SOEC および PEMEC システムが将来の水素利用技術に十分に寄与できると考えられる。

5. 政策立案のための提案 ～SOEC および PEMEC システムの技術開発課題～

以上の性能およびコスト評価に基づき、SOEC および PEMEC システムの技術開発における必要項目を以下にまとめた。

1) SOEC および PEMEC システムの性能・コストの目標値

1.5MW 平板形 SOEC システム (450Nm³/h) および 1.9MW 平板形 PEMEC システム (450Nm³/h) 両システム共に、システムコスト：120 円/W 以下⁷⁾ (4-2 節参照)；電解効率：75%以上 (SOEC) (表 4 参照) , 70%以上 (PEMEC) (表 5 参照)；システム寿命：15～20 年 (表 6,7 参照) が開発目標になる。

2) SOEC および PEMEC システムの技術課題

①高耐久性と高性能を兼ね備えた電極の開発

・ SOEC システム

電極の長寿命化が必須課題である。SOFC の発電モードと比較して、高い水蒸気分圧雰囲気化での安定性に関する材料開発と劣化機構解明が必要である。

また、本検討では、熱自立運転条件(セル電圧～1.3V)を前提として、高電流密度(0.8A/cm²)を仮定して解析を行ったが、実際のセルではより低い電流密度の値が予想され、将来的に高電流密度化(高性能化)の検討も要求される。

・ PEMEC システム

SOEC と同様に、電極の長寿命化が必須課題である。水電解時のカソード分極では、電極触媒の溶出による劣化が予想され、その劣化機構の解明と防止策の提案が必要不可欠である。また、白金に加え、イリジウムやルテニウムなどの貴金属触媒が使用され、今回の解析の結果、その材料コストの比率が非常に高いことが示されている。従って、高分散化などの触媒使用量低減に向けた研究開発が必要不可欠であり、新材料開発の進展も期待される。

②圧縮機・高圧タンク等の周辺システムの低コスト化

・ 圧縮機

圧縮機のシステム全体に占める割合は、高圧タンクと共に非常に高い。従来のレシプロ式やダイヤフラム式の量産効果によるコスト低減に加え、PEMEC で実用化が期待される電気化学気体圧縮の技術開発の進展が期待される[10]。圧縮機のコストを除くことで、システムコストを 100 円/W に近づけることができる。

・ 高圧タンク

高圧タンクについても、システムコスト低減や安全性の観点からその技術開発が非常に

⁷⁾ ガソリン販売価格 (4.2 JPY/MJ) と同水準の 40 円/Nm³-H₂ の値 (水素製造コスト) を達成するためのシステムコスト。

重要である。定置型の場合、スチール製が前提となる。一方、炭素繊維や樹脂から構成される複合材料の高圧タンクの研究開発が民間企業を中心に進められており[11]-[14]、コスト低減に向けた取り組みが期待される。

6. まとめ

本稿では、平板形 SOEC と PEMEC の比較検討を積み上げ方式のコストエンジニアリングの手法に基づき、再生可能エネルギー由来の電力利用による水素製造コストの評価を行った。標準条件（水素製造能力：450 Nm³-H₂/h；SOEC 入力電力基準：1.5 MW；PEMEC 入力電力基準：1.9 MW）における SOEC モジュールの水素製造原単位は 3.2 kWh/Nm³-H₂ であり、一方、PEMEC モジュールのそれは 4.1 kWh/Nm³-H₂ であった。さらに SOEC システムの水素製造原単位（水素圧縮プロセスを含む）は 4.4 kWh/Nm³-H₂ の値が得られ、PEMEC システムにおけるそれは 4.6 kWh/Nm³-H₂ の値が得られた。SOEC システムの水素圧縮プロセスを除いた水蒸気電解システムの効率は 75% (LHV) であり、水素圧縮プロセスを含めると 69% (LHV) の値が得られた。PEMEC システムの場合、水素圧縮過程を除いた水電解システムの効率は 70% (LHV) であり、水素圧縮過程を含めると 65% (LHV) の値が得られた。年産 1,000 台における SOEC のシステムコストは 137 円/W であり、PEMEC のシステムコストは 112 円/W と試算された。水素製造コストをガソリンとほぼ同水準の 40~50 円/Nm³-H₂ 以下に低減するために必要な条件は、再生可能エネルギーの電力料金が 5 円/kWh の場合、システムコスト：120 円/W 以下；電解効率：75%以上 (SOEC) , 70%以上 (PEMEC)；システム寿命：15 年以上である。SOEC および PEMEC システムの技術開発項目として、特に長寿命・高耐久性を有する電極の開発が重要である。また、同時にコスト低減のため、PEMEC については従来の貴金属材料に代わる低コスト材料の開発、圧縮機および高圧タンクの低コスト化が必要であり、電気化学的気体圧縮の技術開発も有効である。以上の議論を通じて、再生可能エネルギーに由来する電力を利用した場合でも、SOEC や PEMEC による水素製造が可能となる道筋が示された。

参考文献

- [1] 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.
- [2] J. Otomo, J. Oishi, K. Miyazaki, S. Okamura and K. Yamada, "Coupled Analysis of Performance and Costs of Segmented-In-Series Tubular Solid Oxide Fuel Cell for Combined Cycle System", *Int.J.Hydrogen Energy*, 42 (30), 19190-19203, 2017.
- [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.4) -水蒸気電解への適用と技術開発課題-", 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, LCS-FY2016-PP-03 (pp.1-13), 2017年3月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2016-pp-03.pdf>)
- [4] 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, LCS-FY2013-PP-04 (pp.1-14), 2014年3月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2013-pp-04.pdf>)

- [5] 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, LCS-FY2014-PP-05 (pp.1-13), 2015 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2014-pp-05.pdf>)
- [6] 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, LCS-FY2015-PP-03 (pp.1-14), 2016 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2015-pp-03.pdf>)
- [7] A. Marshall, B. Børresen, G. Hagen, M. Tsyarkin and R. Tunold, “Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers – Reduced energy consumption by improved electrocatalysis”, *Energy*, 32, 431-436, 2007.
- [8] J. Cheng, H. Zhang, G. Chena and Y. Zhang, “Study of $\text{Ir}_x\text{Ru}_{1-x}\text{O}_2$ oxides as anodic electrocatalysts for solid polymer electrolyte water electrolysis”, *Electrochimica Acta*, 54, 6250-6256, 2009.
- [9] 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.
- [10] 本田技研工業(株)ホームページ, “スマート水素ステーション(SHS)”,
<http://www.honda.co.jp/tech-story/engineer/engineer-talk/SmartHydrogenStation/> (2017 年 11 月 1 日アクセス).
- [11] 高圧タンク開発関連ホームページ, スチール,
<http://gas-plant.iwatani.co.jp/h2s/pdf/h2s.pdf> (2017 年 11 月 1 日アクセス).
- [12] 高圧タンク開発関連ホームページ, 炭素繊維,
<http://www.mizuno-technics.co.jp/cfrp/product/story01.aspx> (2017 年 11 月 1 日アクセス).
- [13] 高圧タンク開発関連ホームページ, 炭素繊維,
http://www.toyoda-gosei.co.jp/recruit/rec_graduate/special/story02.html (2017 年 11 月 1 日アクセス).
- [14] 高圧タンク開発関連ホームページ, 樹脂,
https://www.dsm.com/countrysites/japan/ja_JP/media/press-releases/2017/10/1709-high-pressure-composite-tank.html (2017 年 11 月 1 日アクセス).

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

水素製造技術における燃料電池（SOFC・PEFC）
の役割

－固体酸化物形燃料電池システム（Vol.5）－

平成 30 年 1 月

“New Role of Fuel Cells (SOFC and PEFC) for Hydrogen Production Technology:
SOFC Systems (vol.5)”

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,
2018.1

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
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2018 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。
