

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—

SOFC Systems:

Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap
based on Elemental Technology Structure

Strategy for Technology Development

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

独立行政法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

LCS-FY2013-PP-04

概要

固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムの大規模な普及を目的として、定置型 SOFC システムの製造コストの分析と技術革新がもたらすコスト構造への影響評価を行った。小型機である家庭用 SOFC システムの詳細な解析を行った結果、発電効率を現状の 45% から 50% 以上に引き上げ、かつシステムコストを 500 円 /W 以下にすることで発電コストを現在の系統電力コスト（家庭用：23 円 /kWh）以下に低減できることが明らかになった。性能評価の検討に基づくと、これらの技術的な要請事項は十分達成可能である。大型機についても小型機と同様に発電コストを低減できる可能性が示唆された。さらに、技術評価の分析結果から、SOFC の定量的技術シナリオを提案した。それに基づく技術開発課題を明らかにし、達成目標と達成時期を明示した科学・技術ロードマップを示した。

目次

概要

1. 諸言	1
2. 定置型 SOFC のコスト評価結果	1
2-1. 現状の仕様、セル性能、および発電効率	1
2-2. SOFC コスト評価の概要	3
3. コスト分析結果と技術開発に関する将来展望	4
3-1. 標準ケースにおけるスタック製造コストの分析	4
3-2. SOFC コスト削減シナリオ	5
3-3. 中・大型機 SOFC コスト削減ポテンシャルについて	6
4. 今後の SOFC 科学技術開発の内容とロードマップ	7
5. 政策立案のための提案	9
参考文献	10

1. 諸言

2009 年以降、家庭用定置型燃料電池の国内市場への投入が本格的に開始された。2009 年に、家庭用定置型電源として固体高分子形燃料電池（以下 PEFC）の国内での販売が開始され、続いて 2011 年に固体酸化物形燃料電池（以下 SOFC）も国内で販売された。さらに、2015 年には燃料電池自動車の国内市場への投入も予定されており、燃料電池の社会への浸透が本格的に始まりつつある。

燃料電池の大きな特徴は、その高い発電効率にある。燃料電池は、化学エネルギーを直接電力に変換する作動原理に基づくため、規模にかかわらず高い効率で発電が可能な特徴を有する。実際、家庭用 SOFC の発電効率は、現状で 45% に達しており、既に一般の火力発電所とほぼ同じレベルの水準にある。このように、燃料電池は、分散電源としての役割と火力発電の代替技術としての役割、それら両者に対する潜在能力を有することから、低炭素社会の実現のみならず、電力の安定供給確保にも貢献が期待される [1]。

一方、現状での燃料電池の発電コストは非常に高く、本格的な普及に向けたコスト削減シナリオの構築とそれを支える科学技術開発の進展が必要不可欠である。LCS では、燃料電池の普及に向けて、燃料電池の発電性能、環境負荷、製造コスト及び今後の製造コスト低減について定量的な評価を行ってきた [1]。本提案書では、特に発電効率向上の高い潜在性を有する家庭用 SOFC システムを対象として、その解析結果について概説する。さらにコスト削減シナリオの構築と科学技術開発の方向性についての検討結果を述べる。

2. 定置型 SOFC のコスト評価結果

2-1. 現状の仕様、セル性能、および発電効率

現在、市場投入されている家庭用 SOFC システムは送電端出力で 700W であり、スタック、補機および給湯機から構成されるシステムである。燃料には都市ガスを用いることを前提としている。表 1 に現状技術におけるスタックの仕様をまとめた [1, 2]。また、現在使用されているのは円筒平板形セルであり、表 1 の標準条件では 1 スタック当たりのセル数は 140 個である。また、円筒平板形セルの構成材料を以下に記す [2]。なお、本検討においては、電極、電解質等の構成材料は、現状と将来技術では同じ材料を仮定している。本検討では、将来技術革新に対してセルデザインの進化（マイクロチューブ形）を仮定して評価を行った [3]。

表 1 円筒平板形 SOFC 仕様 (現状)

定格 AC 出力 (W)	700
DC 出力 (W)	800
平均出力密度 ($W\ cm^{-2}$)	0.19
セル電圧 (V)	0.76
電極面積 (cm^2)	30
セル数 (cell/stack)	140
作動温度 ($^{\circ}C$)	750
燃料利用率 (%)	70
スチーム / カーボン比	2.5

表 2 セル・スタック主要構成部材

	構成材料
燃料極	Ni-YSZ
電解質	YSZ ($(ZrO_2)_{0.92}(Y_2O_3)_{0.08}$)
中間層	GDC ($Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9}$)
空気極	LSCF-GDC ($La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$)
インターコネクタ	LCC ($La_{0.8}Ca_{0.2}CrO_3$)
集電材 / スタックケース	Steel
断熱材	Mullite

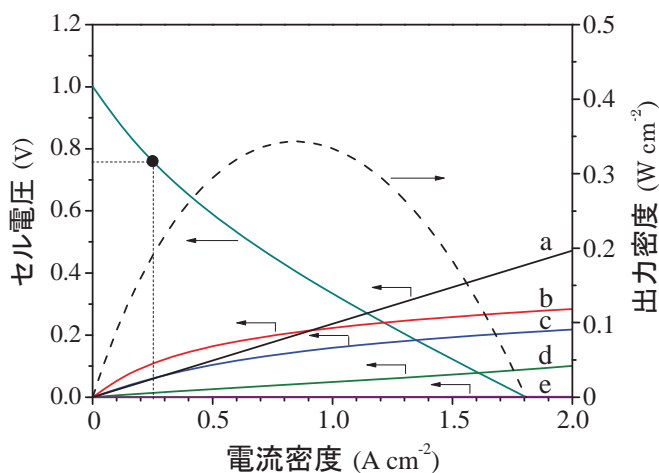


図 1 SOFC 単セルの発電性能

抵抗過電圧 : a ; 活性化過電圧 : b 空気極 , c 燃料極 ; 濃度過電圧 : d 燃料極 , e 空気極 .

上述の仕様を基にセルの発電性能について検討した（図 1）。現状の円筒平板形のセル性能を調査した上で、活性化過電圧、濃度過電圧、および抵抗過電圧を再現するモデルを設定し、発電効率の推算を行った。実機の発電効率は 4% 程度である。図 1 に電流 - 電圧曲線を示す [2]。セルの性能を把握することで、各部材の技術革新がシステムの性能に与えるインパクトについて評価できるようになる。空気極、燃料極、および電解質の材料革新について文献調査を基に予測し、スタックの体積あたりの出力密度を性能指標として評価を行った。出力密度の向上は、スタックの小型化を意味するため、コスト低減と密接な関係があるためである。検討の結果、スタック体積あたりの出力密度の増加割合に対して、それら材料革新とセルデザインの変更（円筒平板からマイクロチューブ）について、両者同じ程度の寄与があることが分かった [2]。現在研究が進められている電極材料は、性能が高い一方で耐久性が低いことなど（特に空気極材料に対して）、実用化までの課題も多い。従って、材料革新と共に、セルデザインの進化も SOFC スタックの着実な性能向上を保証すると考えられる。以上を踏まえ、以下のコスト評価の検討においては、電極、電解質等の構成材料は、現状と将来技術では同じ材料を仮定した上で、将来技術についてはセルデザインの検討を行った。

2-2. SOFC コスト評価の概要

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、本分析に利用している。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。その手続きは以下のとおりである。

1. SOFC システムの製品仕様（標準では円筒平板形）と工場の年間生産規模を設定する。
2. 事前調査に基づき製造プロセスの詳細を構築し、プロセスフローシート、物質収支、熱収支などからなるプロセスの基本設計書を作成する。
3. 基本設計をもとに、変動費（原材料費、用役費）を算出する。
4. 基本設計に基づき製造機器の仕様を定め、この仕様をもとに LCS が構築した機器データベースを用いてコスト、重量を算出する。
5. 製造機器のコスト、重量を用いて、配管、電気・計装、建屋等の工事を含めた工場の総建設費を算出する。さらに、プロセスの運転要員数を定め、固定費（設備費、人件費）を求める。
6. 製造コストを算出する。
7. 発電コストを算出する。さらに、スタック性能、セルデザイン、製造技術等についてケーススタディを行い、技術革新のシナリオについて検討を行う。

発電コストは、システムコストと燃料コストの合計で算出する。熱利用については、発電時の発熱量の 1/3 が発電コストと等価であるとして、発電コストに組み込み算出した。

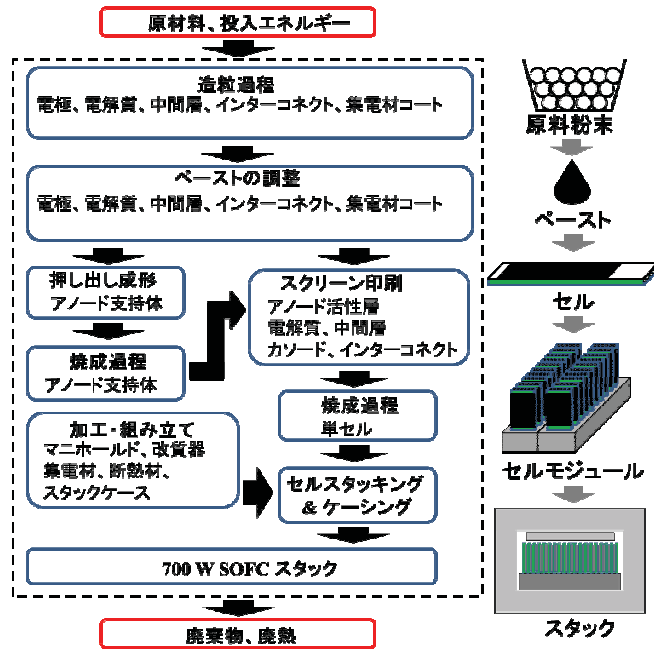


図 2 円筒平板形製造プロセス概念図

3. コスト分析結果と技術開発に関する将来展望

3-1. 標準ケースにおけるスタック製造コストの分析

図 3 に生産スケール毎の円筒平板形（標準ケース）のスタック製造コストの分析結果を示す。年産スケール 10 万台で約 80 円/W、年産 100 万台で約 50 円/W の結果が得られた（ただし、歩留まり 100% の理想状態での計算である）。なお、NEDO の 2030 年以降の SOFC 普及期における概算目標値は、小型 SOFC 用のスタック製造コストが 5 万円/kW に設定されている [4]。今回の SOFC に関する詳細な積み上げ計算によって、定量的に 1kW あたり 5 万円のコスト目標は達成可能範囲にあることが示された。

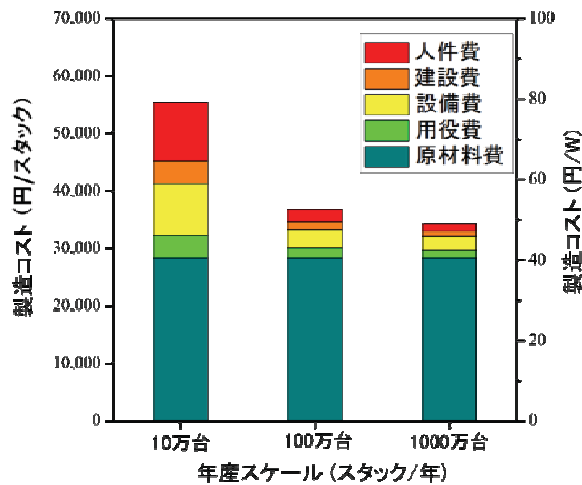


図 3 SOFC スタックの製造コスト構造

3-2. SOFC コスト削減シナリオ

将来の大規模な普及に向けて、SOFC の発電コストを現在の系統電力コスト（家庭用：23 円 / kWh）以下に低減する方策について検討する。表 3 に 700W SOFC スタックの技術シナリオを示す。表中に示すように、製造工程（生産スケール、歩留まり）、セルデザイン（支持体厚み含む）、断熱材の技術革新（熱伝導度の低減）、セル性能、寿命、BOS コストについて 2014 年現在から 2030 年に向けて改善シナリオを提案した。

表 3 700W SOFC スタックの技術シナリオ

	2014 現在	2020	2030	2030
セルタイプ	円筒平板 (標準型)	円筒平板 (薄膜型 1)	円筒平板 (薄膜型 2)	マイクロチューブ (発展型)
生産スケール (スタック / 年)	< 1000	100000	1000000	1000000
歩留まり (%)	-	70	80	80
支持体厚み (または直径)	2 mmt	1.5 mmt	1 mmt	2 mm φ
断熱材厚みの低減率	1.0 (8 cm)	0.75 (6 cm)	0.5 (4 cm)	0.5 (4 cm)
セル電圧 ^a (V)	0.76	0.8	0.83	0.83
燃料利用率 (%)	70	73	77	77
セル効率 ^b (%)	51	56	62	62
電力損失 ^c (W)	100	90	85	85
発電効率 ^{b,c} (%)	45	50	55	55
総合効率 (%)	75	80	85	85
寿命 (年)	10	10	15	15
BOS コスト ^d (円 / 台)	-	300,000	200,000	200,000
スタックコスト (円 / W)	-	81	37	24
システムコスト (円 / W)	3860	510	322	310

- a. 電流密度：0.19 A/cm²
- b. 効率は LHV で評価
- c. 電力損失は DC-AC インバーターと補機によって生じる
- d. BOS (balance of system) コストは補機類と給湯機のコストを含む

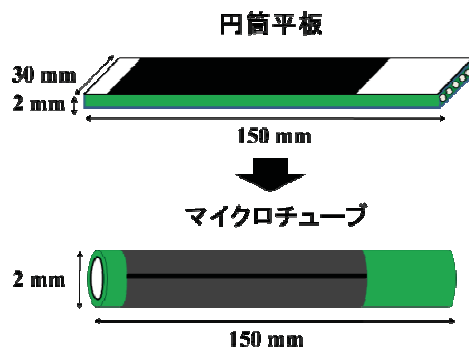


図 4 セルデザイン（円筒平板形とマイクロチューブ形）

以上の技術シナリオの想定を基に、発電コストを算出した。結果を図 5 に示す。現状での発電コストは 74 円 /kWh であり、非常に高コストであることがわかる。一方、技術革新と量産スケールを向上させることで、SOFC の発電コストを系統電力コスト（家庭用：23 円 /kWh）以下に低減することは十分に可能であることが示唆された。その実現に向けて、主に以下の項目の改善が必要である。

1. 発電効率の高効率化：45% → 50% 以上
 - ・電極・界面微構造の評価と最適化
 - ・界面輸送機構
 - ・新材料開発
2. システムの高寿命化：10 年 → 15 年
 - ・劣化要因の解明
 - ・カチオン拡散挙動と界面近傍の酸素活量の評価
 - ・ロバストなセル・スタックの設計と開発
3. セルデザインの高度化
 - ・薄膜化、マイクロチューブ型等
4. 製造技術の高度化
 - ・歩留まりの向上、生産規模拡大
 - ・焼成過程の最適化
 - ・スタッキングの技術開発

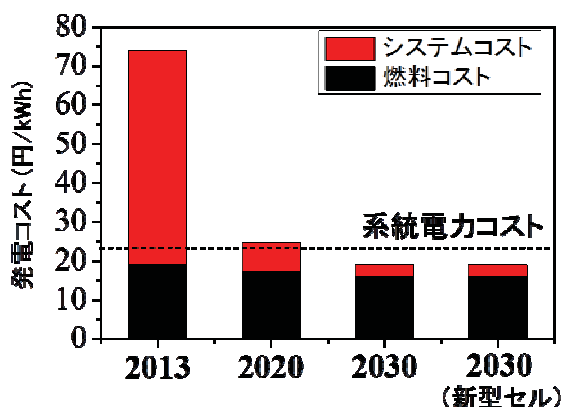


図 5 SOFC（小型：家庭用）の発電コスト

* 新型セルはマイクロチューブ形を示す。LNG の小口価格：130 円 /Nm³；SOFC システムの稼働率：0.8 を仮定して算出した。

3-3. 中・大型機 SOFC コスト削減ポテンシャルについて

以上述べたように、小型機である家庭用 SOFC システムについて詳細な解析を行ったが、同様のことは大型機についても主張できる。大型機については概算値であるが、2020 年において 150 円 /W、2030 年において 100 円 /W と見積もられる。ここで、中・大型 SOFC システム (> 200kW) については、ガスタービンとのコンバインドサイクルを想定している。ただし、この推算値は、構成材料からの概算に基づくものであるため、今後の詳細検討による変更の余地が残されているが、将来の技術開発の方向性について示唆的な内容も含む。すなわち、構成材料のうち、压力容器の重量比が比較的大きいことから、スタック小型化が研究開発上重要であると考えられる。円筒形セルのサイズの変更（円筒径の低減等）やスタックモジュールの稠密化の検討が必要である。

並行して圧力容器壁厚みの低減や断熱材使用量の低減の検討も有効である。これらに関連して、システムの運転条件（圧力、温度等）の検討と合わせた形でのセル・スタック設計やコスト低減について検討する必要がある。以上、中・大型機の研究開発の方向性について言及したが、以下の科学技術開発のロードマップにおいては、主に小型機の詳細分析結果に基づき、その科学技術開発の内容について解説する。

4. 今後の SOFC 科学技術開発の内容とロードマップ

SOFC コスト削減シナリオの検討から、システムコストを 500 円 /W 以下に低減した上で、発電コストを系統電力程度まで低減する必要がある。この要求を満たすためには、1. 発電効率の高効率化；2. システムの高寿命化；3. セルデザインの高度化；4. 製造技術の高度化が必要であることが示唆された。

1. 発電効率の高効率化については 45%→50%以上の改善が必要である。そのためには、(1) 二相及び三相界面における電極界面微構造の評価と最適化の検討に加え、(2) 界面輸送機構の詳細な検討も必要である。さらに、(3) 電極や電解質に関する新材料開発についての持続的な研究開発が重要である。また、(4) 燃料利用率向上に関する材料及びシステムの立場からの検討が必要である。なお、50%以上の効率向上の実現に向けては、界面構造の制御に加え、新材料開発の寄与が大きいと判断する。特に空気極の材料開発の進展が期待される。一方、現状の研究開発レベルを考慮すると、材料開発による効率改善への寄与度とセルデザインの変更（例えばマイクロチューブ形への変更）によるそれとでは、概ね同じ程度の定量的インパクトを有すると推定される。従って、50%以上の効率達成に向けては、新材料開発と共に、セルデザインの改善（単位体積あたりの電極界面積の向上）が有効なアプローチと考えられる。

2. システムの高寿命化については、スタックの寿命を 10 年から 15 年へ改善する必要がある。従って、研究開発項目として、(1) 劣化要因の解明が重要である。シンタリングや不純物の影響についての把握に加え、偏析等組成の変化の検討が必要であり、その観点から、(2) セル部材の構成元素であるカチオン種の拡散挙動と界面近傍の酸素活量の観測も重要になる。現在、劣化の観点からの検討は NEDO においても実施されている。以上の科学的知見を踏まえた、高い耐久性を有するロバストなセル・スタックの設計と開発が重要である。

なお、劣化に関する研究進捗の現状を踏まえると、上述のシンタリングや界面での不純物の偏析等、化学的な側面からの劣化要因の解明が進められている一方で、それらの三相界面への影響を含む電極活性低下に及ぼす定量的な議論やモデル構築までには至っていない。現在、実機の発電特性に対する発電性能の経時劣化の情報が集まりつつあり、経時劣化の現象論を定量的な劣化モデルで再現できるようにするのが望ましい。特に界面近傍における化学的・物理的要因が性能劣化への影響が大きいと判断されるため、その機構解明と合わせて、その劣化防止に向けた研究開発が必要である。また、よりマクロな機械的劣化要因の把握もスタック寿命の向上から必要であり、各部材の熱膨張や界面応力および材料力学特性の定量的な把握を通じて、実際のセル・スタックへの影響について検討する必要がある。

3. セルデザインの高度化は、先に触れた効率改善の観点に加え、出力密度向上や低コスト化の観点から、材料開発と並んで有効かつ確実なアプローチである。現状の円筒平板の薄膜化やマイクロチューブ形等、電極界面積の増加につながる改善が期待される。中・大型用の円筒形セルについても、同様にサイズの改善の余地がある。

4. 製造技術の高度化は、今後の本格的な量産化の実現に向けて極めて重要である。1. で述べた電極界面微構造の制御において、(1) 焼成過程の最適化は重要であり、共焼成プロセスの検討は製造コストの低減にある程度貢献が期待される。また、クラックの抑制など歩留まり向上の観点からも焼成工程は重要な検討対象である。加えて、セルデザイン変更の実現には、(2) スタッキングの技術開発も同時に進める必要がある。スタッキングの技術開発は、歩留まり向上に大きな影響を与えるため、量産性に優れたスタッキングを考慮したセル・スタックの設計が重要である。

5. その他 (1) 断熱材について：スタック構成部材の中で、断熱材は比較的大きな重量・体積割合を有する。従って、高機能な断熱材の開発は、セルの小型化と軽量化に大きく寄与することが期待される。(2) BOS コストについて：SOFC の BOS は補機と給湯機から構成される。補機はインバーター、熱交換器、ブロアー、その他制御器とバルブ類で構成される。一方、給湯機は主に給湯タンクとバーナーから構成されている。これらの周辺部材・機器類の SOFC システムに最適化した形でのコスト削減の検討が必要である。過去に NEDO 主導で補機プロジェクトも実施されており、それらの検討内容を有効に取り込む工夫も必要である。

SOFC の研究開発の方向性についてまとめると、界面制御に関する反応・輸送現象の基礎研究、新材料開発、セルデザイン、製造プロセスの 4 つの観点に基づくアプローチが、スタックの効率・寿命・出力向上に基づくコスト削減シナリオの実現につながる研究開発と合致する。

以上を踏まえ、科学・技術ロードマップを図 6 にまとめた。

1. 出力密度*：現状の円筒平板の 0.2 kW/L (2013 年) からセル性能向上とマイクロチューブ等セルデザイン改善による 0.4 kW (2020 年) および 1 kW/L (2030 年) への向上の実現 (*出力密度は、正味のセルモジュール体積 (セルスタックとマニフォールドの体積) から算出した。)
2. 発電効率：現状の 45% (LHV) から 50% (2020 年) を経て 55% (2030 年) の実現
3. スタック寿命：現状の 5～10 年のレベルから 10 年以上の高寿命化を実現し、2030 年までに 15 年以上実現
4. 発電コスト：以上の定量的な検討から、現状の >70 円 /kWh から 25 円 /kWh (2020 年) を経て 20 円 /kWh 以下の実現への道筋が明示される。

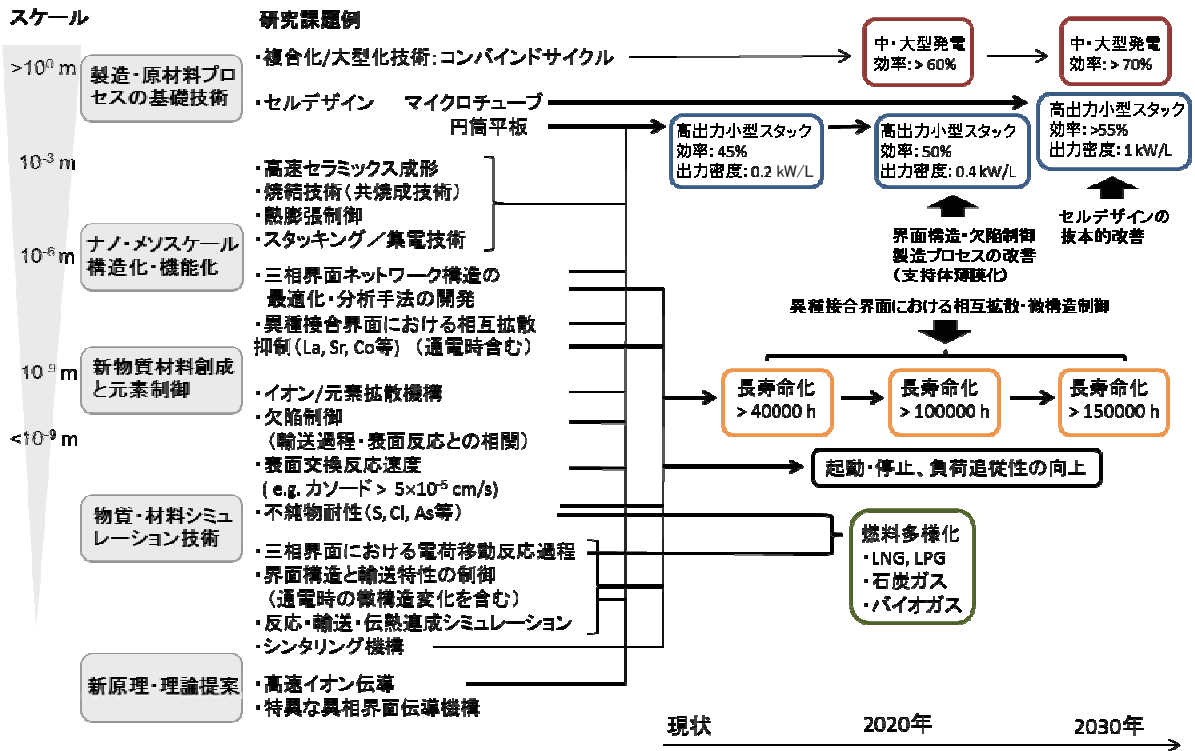


図 6 SOFC の科学・技術開発の内容とロードマップ

5. 政策立案のための提案

SOFC システムについて、低炭素技術設計・評価プラットフォームによる製造コスト評価および技術開発項目に基づきコスト削減効果を検討し、技術シナリオとしてまとめた。その結果、家庭用の小型 SOFC システムについては、その発電コストが、現状の 74 円 / W から 2020 年に 25 円 / W、さらに 2030 年に 19 円 / W となり、現在の系統電力コスト (家庭用: 23 円 / kWh) 以下に低減できる技術開発の道筋を提示することができた。その実現に向けて、発電効率を現状の 45% から 50% 以上に引き上げ、かつシステムコストを 500 円 / W 以下にする必要があり、SOFC 科学・技術開発のロードマップにそれらを達成するための具体的研究開発内容をまとめた。その概要は以下のとおりである。

・界面制御に関する反応・輸送現象の基礎研究：

発電効率向上とスタック寿命向上の観点から、SOFC の各部材界面における反応・輸送現象の解明およびその知見に基づく界面構造の制御・維持に関する基礎研究が重要である。

・新材料開発：

発電効率 50% 以上を達成するためには、界面構造の制御に加え、構成部材の新材料開発が必要である。特に空気極材料の検討は、効率向上の観点からも重要である。

・セルデザイン：

セルデザインの改善、すなわち単位体積あたりの電極界面積の向上は、新材料開発と並び、発電効率改善への寄与が大きい。また、スタック体積あたりの出力密度向上に向けた有効かつ確実な

アプローチでもある。スタッキング工程を容易にする観点からのセルデザインの開発も必要である。

・製造プロセスの高度化：

SOFC では、上述の寿命・効率の改善に加え、製造技術向上への取り組みが重要である。すなわち、SOFC は、太陽電池やリチウム二次電池等、他の電池技術と異なり、量産技術が確立されていない段階にあるため、焼成、印刷、スタッキングなどの主要工程に対する技術開発への支援も必要である。

以上は、低炭素技術設計・評価プラットフォームに基づく検討内容であり、今後も技術構造化による SOFC 技術開発の知識基盤の高度化と、それらの評価内容を実際の技術開発に反映させながら SOFC の高性能化・低コスト化を進展させる方法論が有効であり、今後の SOFC の本格的な普及に寄与するものとする。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ」, p.30-34, 平成 24 年 7 月
- [2] Junichiro Otomo, Keiko Waki and Koichi Yamada, “Multi-Criteria Assessment of the Performance of Solid Oxide Fuel Cells by Cell Design and Materials Development: Design and Modeling Approach”, J. Fuel Cell Sci. Technol., 10 (1), 011007-1 (2013).
- [3] Junichiro Otomo, Junya Oishi, Teruo Mitsumori, Hiroshi Iwasaki and Koichi Yamada, “Evaluation of Cost Reduction Potential for 1kW Class SOFC stack production: Implications for SOFC Technology Scenario” Int. J. Hydrogen Energy, 38 (33), 14337 (2013).
- [4] NEDO SOFC ロードマップ <http://www.nedo.go.jp/content/100086193.pdf>

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—

SOFC Systems:
Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap
based on Elemental Technology Structure
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,
2014.3

独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

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/>

© 2014 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。