

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 —

平成 27 年 3 月

SOFC Systems(vol.2):

Cost Analysis of Medium and Large SOFC Systems and Their 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-FY2014-PP-05
(平成 27 年 4 月印刷版)

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、本稿では、数百 kW から 1MW 程度までの中・大型 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。中・大型発電用 SOFC コンバインドサイクルシステムの詳細な解析を行った結果、発電効率を現状の 55% から 60% 以上に引き上げ、システムコストを 100 円 /W 程度まで低減することで、発電コストを 12 円 /kWh 以下にできることが示された。

さらに、製造コストおよび性能に関するコスト解析の結果 (技術シナリオ) に基づき、技術開発課題について述べた。

Summary

To realize the widespread use of solid oxide fuel cell (SOFC) systems, production cost analysis of medium and large SOFC systems and the impact of SOFC technology development on the cost structures were investigated. The present analysis suggests that the electricity cost can be reduced to lower than 12/kWh by improving power generation efficiency from 55% to higher than 60% and reducing the system cost lower than 100 JPY/W.

In addition, the technological subjects for developing SOFC systems were discussed based on the analyses of production cost and system performance.

目次

概要

1. はじめに	1
2. 250kW 級 SOFC コンバインドサイクルシステムのコスト評価結果	1
2-1. 仕様、セル性能、および発電効率	1
2-2. SOFC モジュール製造コスト評価の概要	2
3. コスト分析結果と技術開発に関する将来展望	3
3-1. SOFC モジュール製造コストの分析	3
3-2. 中・大型 SOFC システムコスト低減に向けた技術シナリオ	5
4. 中・大型 SOFC システムの技術開発課題	7
5. まとめ	8
参考文献	9

1. はじめに

燃料電池は低炭素社会実現における重要な技術であり、固体高分子形燃料電池（以下 PEFC）については、家庭用定置型電源および燃料電池自動車用途での市場投入が開始されている。また、固体酸化物形燃料電池（以下 SOFC）については、PEFC と同様に、家庭用定置型電源の国内市場投入がなされており、今後は中・大型機への展開が予定されている [1,2]。燃料電池は、将来の水素エネルギー利用を支える主要な技術であり、本稿では、前年度の 700W 家庭用 SOFC に関する提案書 [3] の続報として、250kW 級 SOFC コンバインドサイクルを評価対象に取り上げ、そのコスト分析について概説する。さらにコスト削減に向けた技術開発の方向性についても議論を行った。

2. 250kW 級 SOFC コンバインドサイクルシステムのコスト評価結果

2-1. 仕様、セル性能、および発電効率

SOFC は、上述したように 700W 家庭用コジェネレーションシステムから、数百 kW ～ 1 MW 程度までの中型発電機および数百 MW ～ 1GW 程度までの大型発電機への応用が期待されている [1,2]。国内では、SOFC とガスタービンとの複合発電機である 250kW 級 SOFC コンバインドサイクルシステムの開発が進められており、実機による実証実験が開始されている [4]。大型機としては、SOFC にガスタービンと蒸気タービンを組合せたトリプルコンバインドサイクルシステムの要素技術開発が進められており、発電効率 70% に及ぶ、極めて高効率の火力発電システムが検討されている [2,4]。現在開発されている SOFC は、中型機・大型機共に円筒横縞形である。本稿では、以下 250kW 級 SOFC コンバインドサイクルシステムを評価対象として、コスト分析を中心に議論を行った。

SOFC コンバインドサイクルは、220kW の SOFC モジュールと 30kW のマイクロガスタービンから構成されるシステム (SOFC-MGT) を想定し、燃料には、都市ガスを用いることを前提とした。表 1 に、本稿で想定した標準的な SOFC モジュールの仕様をまとめた。表 1 の標準条件では 1 モジュール当たりのセルチューブ数は 2300 本である。また、円筒横縞形セルチューブの構成材料は表 2 に記したとおりである [5]。なお、本検討は、昨年報告した 700W 家庭用コジェネレーションシステムの評価と同様に、支持体・電極・電解質等の構成材料については、現状と将来技術で同じ材料を用いたと仮定しているが、定格運転時の出力密度については、将来技術革新により向上すると仮定して評価を行った。

また、昨年報告した家庭用 SOFC システムでは、セル長が 150 mm の円筒平板形が用いられているが、中・大型機用の円筒横縞形セルチューブのセル長は 1500 mm (電極部分長さ :1000 mm) である。従って、両者のセルデザインは大きく異なっている。さらに、中・大型機では、横縞形 (セルチューブ 1 本あたりのスタック数 : 80 ～ 90 セル) の採用により、高電圧発電による高効率化が実現されている。

表 1 円筒横縞形 SOFC モジュール仕様 (標準型)

定格 AC 出力 (kW)	220
DC 出力 (W)	230
出力 (W/cell-tube)	100
セルチューブ本数 (cell/module)	2300
作動温度 (°C)	900

表 2 セルチューブ主要構成部材

構成材料	
燃料極 (支持体)	CSZ((ZrO ₂) _{1-x} (CaO) _x)
燃料極 (活性層)	Ni-YSZ
電解質	YSZ((ZrO ₂) _{1-x} (Y ₂ O ₃) _x)
空気極	LSCM-YSZ La _{1-x-y} Sr _x Ca _y MnO ₃ (LSCM)
インターコネクト	La _{1-x} Sr _x TiO ₃

2-2. SOFC モジュール製造コスト評価の概要

220kW SOFC モジュールの製造コスト評価について、昨年報告の 700W 家庭用コジェネレーションシステムの評価方法と同様に、製造機器積み上げによる算出を行った [2,6]。その試算方法は、昨年報告と同様であるが、追加の補足事項も含めて以下に述べる。

1. SOFC システムの仕様と工場の年間生産規模を設定する。なお、SOFC コンバインドサイクルシステムは、現時点で市販されておらず、実証実験段階である。従って、その仕様 (セルの性能および寸法) は、文献 [1,2,5] およびメーカーへのインタビューに基づき設定した。
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・熱収支などで構成されるプロセスの基本設計書を作成する。熱収支は、反応熱および伝熱による損失などの推算値により決定した。なお、焼成工程のコストがもっとも大きな割合を占める機器コストについては、今回の解析では、連続焼成炉 (ローラーハース) の利用を仮定し、計算を行った。
3. 基本設計をもとに、変動費 (原材料費、用役費) を算出する。変動費については、市場調査およびカタログ値に基づき決定した。
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および重量を算出する。
5. 製造機器のコストおよび重量を用いて、配管、電気・計装、建屋等の工事を含まれ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。SOFC コンバインドシステムについては、高压容器断熱材を含む SOFC モジュール製造コストを算出した。
7. 発電コストを算出する。さらに、モジュール性能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

出した。既報の 700W 家庭用コジェネレーションシステム [3] では、廃熱も発電コストに含まれた条件で計算を行ったが、SOFC コンバインドシステムについては、廃熱は考慮せず、発電のみのコスト評価を行った。

3. コスト分析結果と技術開発に関する将来展望

3-1. SOFC モジュール製造コストの分析

図 1 に生産スケールごとの円筒横縞形（標準ケース）の 220kW SOFC モジュール製造コストのコスト構造の試算結果を示す。年産スケール 1000 台で 83 円/W、年産 10000 台で 61 円/W の結果が得られた。ここで、図 1 の計算では、歩留まり 100% の理想状態を仮定している。なお、NEDO の 2020～2030 年以降における目標値は、SOFC モジュール製造コストが 150 円/W 以下の値である [7]。したがって、今回の試算結果から、その目標値は十分に達成可能であることが示唆された。

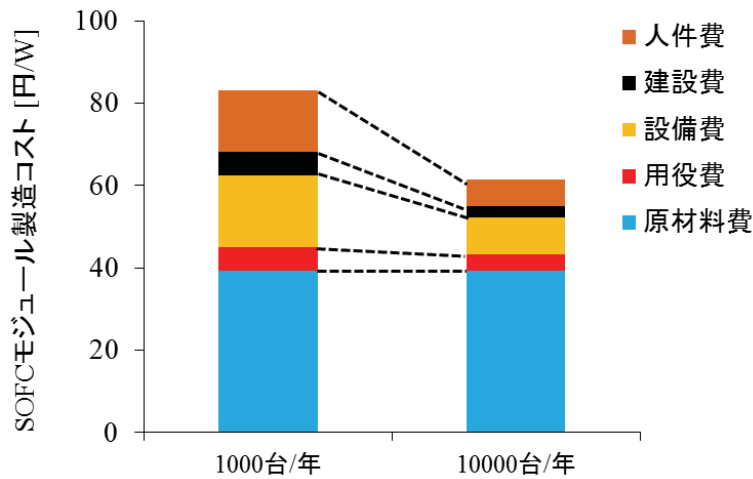


図 1 220kW SOFC モジュールの製造コスト構造（標準ケース セルチューブ出力：100W）

また、生産スケールを 1000 台/年に固定し、セルチューブ出力・歩留まりおよびセル直径についてモジュール製造コストに対する影響について検討を行った。感度解析の結果を表 3～5 に示す。セルチューブ出力向上と共に、セル直径の減少、すなわちセルデザインの改善が製造コスト低減に有効であることが示唆された。

表 3 SOFC（中・大型）モジュールコストのセルチューブ出力依存性

セルチューブ出力 (W/cell-stack)	80	100	120
モジュールコスト (円/W)	99	83	72

- * 生産スケール：1000 台/年
- * 歩留まり：100%
- * セル直径：28 mm φ

表 4 SOFC (中・大型) モジュールコストの歩留まり依存性

歩留まり (%)	60	80	100
モジュールコスト (円/W)	96	88	83

* 生産スケール : 1000 台 / 年
 * セルチューブ出力 : 100 W/cell-stack
 * セル直径 : 28 mm φ

表 5 SOFC (中・大型) モジュールコストのセル直径依存性

* セル直径 (mm φ)	28	20	15
モジュールコスト (円/W)	83	74	68

* 生産スケール : 1000 台 / 年
 * セルチューブ出力 : 100 W/cell-stack
 * 歩留まり : 100%

年間モジュール生産量 (MW/年) に対する中・大型用 (円筒平板) と昨年報告した 700W 家庭用 (円筒平板形) のモジュールコスト [6] の比較を図 2 に示す。ここでは歩留まり 100% と仮定した。中・大型用 SOFC モジュールの製造コストは、家庭用のそれと比較して若干高い結果が得られているが、生産規模 (MW/年) に対して概ね同程度の製造コストの値を示すことがわかる。これは、生産規模の増加に伴い、コスト構造の中で原材料費の占める割合が相対的に大きくなるため、両者のモジュールのセルチューブ出力あたりの原材料費に大きな差が生じないことに起因する。一方、図には示していないが、両者のシステムコストを比較した場合、中・大型用と比較して家庭用の方が 3 倍程度高くなる結果が得られた。その理由は、コスト構造における BOS (Balance of system: ガスタービンを除く補機類等の周辺機器) コストの占める割合が、家庭用のほうがより大きいためである。

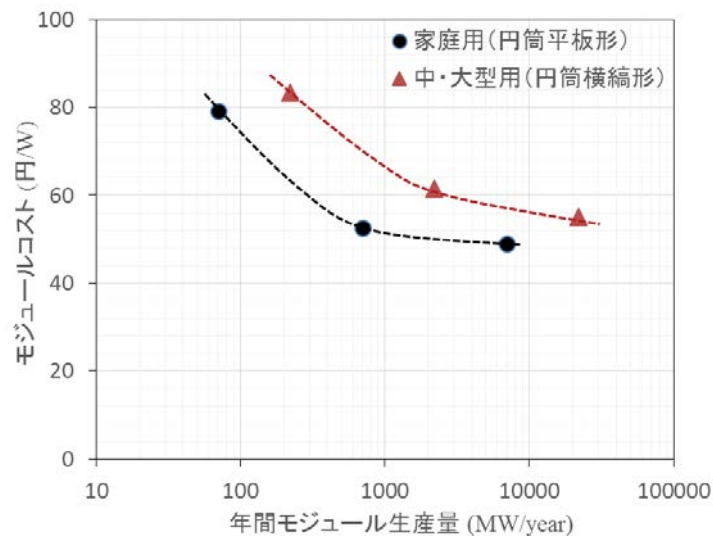


図 2 家庭用と中・大型用 SOFC モジュールの製造コスト比較

3-2. 中・大型 SOFC システムコスト低減に向けた技術シナリオ

中・大型機の将来の普及に向けて、SOFC の発電コストを低減する方策について検討を行った。表 6 に SOFC-MGT コンバインドサイクル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。なお、現時点では SOFC モジュールの量産化は行われておらず、積み上げ法によるコスト構造の推算ができないため、表 6 における現在のモジュールコストは、原材料費にコストファクターを乗じることで求めた参考値である。その結果、2020 年および 2030 年の段階で、システムコストはそれぞれ約 160 円/W から約 100 円/W まで低減可能であることが示された。

表 6 SOFC (中・大型) の技術シナリオ

	現在	2020	2030
セルタイプ	円筒横縞	円筒横縞	円筒横縞
生産スケール (W/年)	< 2.5 M	0.25 G	2.5 G
生産スケール (台/年)	< 10	1,000	10,000
歩留まり (%)	-	70	90
発電効率 ^a (%)	55	58	60
廃熱回収 (%)	18	20	25
寿命 (年)	< 5	10-15	20
出力 (W/cell-stack)	80	100	120
セル直径 (mm φ)	28	20	15
モジュールコスト (円/W)	428 ^c	80	41
ガスタービン (円/W)	200	150	100
BOS コスト ^b (円/W)	90	68	56
システムコスト (円/W)	491	156	104

a. 効率は LHV で評価

b. BOS (balance of system) コストはガスタービンを除く補機類

c. コストファクター：8 を仮定

SOFC (中・大型) の技術シナリオの特徴：

- 出力：セルチューブあたり、現状の 80W から 120W 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

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。発電コスト C_p (円/kWh) は、システムコスト C_{system} と燃料コスト C_{fuel} の和から算出した。

$$C_p = C_{\text{system}} + C_{\text{fuel}} \quad (1)$$

ここで、 C_{system} (円/kWh) は、システム購入価格 P_{FC} 、年間の発電量 E_{an} (kWh) および年経費率 α から以下の式に基づき算出した。

$$C_{\text{system}} = \frac{P_{\text{FC}} \cdot \alpha}{E_{\text{an}}} \quad (2)$$

また、 C_{fuel} (円/kWh) は、都市ガスの燃焼熱あたりの単位コスト UC_{CG} (円/kWh) および発電効率 η_{elec} から求められる。

$$C_{\text{fuel}} = \frac{UC_{\text{CG}}}{\eta_{\text{elec}}} \quad (3)$$

結果を図 3 に示す。これより、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 12 円/W 以下に低減することが可能であることが示唆された (ただし都市ガスコスト: 80 円/Nm³ を仮定した場合)。なお、火力発電所の LNG 価格として 60 円/Nm³ を仮定した場合、発電コストは約 9 円/kWh となり、通常の火力発電所の発電コストとほぼ同じ水準の値が得られた。

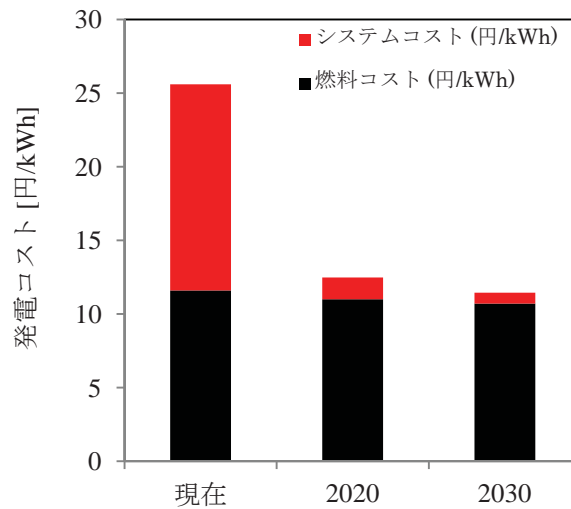


図 3 SOFC (中・大型) の発電コスト

さらに、廃熱の利用 (コージェネレーション) も発電コストに考慮した場合についても試算を行った。すなわち、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 (成績係数 COP が 3 の電動ヒートポンプの使用を想定した場合に相当)、発電コストに組み込み試算を行った [3]。廃熱回収効率を η_{heat} とすると、 C_{fuel} は、式 (3) の代わりに以下の式 (4) が用いられる。

$$C_{\text{fuel}} = \frac{UC_{\text{CG}}}{\eta_{\text{elec}} + \frac{1}{\text{COP}} \eta_{\text{heat}}} \quad (4)$$

結果を表 7 にまとめる。今回の試算に用いた想定では、発電コストは約 10 円 /kWh 程度までの低減が見込まれる。

表 7 熱利用を考慮した SOFC MGT コンバインドサイクルの発電コスト

	現在	2020	2030
燃料コスト (円 /kWh)	11.6	11	10.7
システムコスト (円 /kWh)	7	1.3	0.9
発電コスト (円 /kWh) (熱利用を含まない)	18.6	12.4 *	11.6
発電コスト (円 /kWh) (熱利用を含む)	17.5	11.2 *	10.1

* 2020 年と 2030 年のシステム寿命をそれぞれ 15 年と 20 年として算出

4. 中・大型 SOFC システムの技術開発課題

SOFC (中・大型) の技術シナリオの検討から、システムコストを 100 円 /W 程度に低減することで、発電コストを 12 円 /W 以下に低減することが示された。その実現に向けた要請事項としては、発電効率の向上・システムの高寿命化・セルデザイン改善および歩留まり改善を含む製造技術の高度化が必要である。現状では、低コスト化・高寿命化・高効率化および加圧運転の観点から、中型・大型発電用の SOFC コンバインドシステム (トリプルコンバインドシステム) の研究開発が進められている [8,9]。

以下に技術シナリオに基づき、技術開発課題について述べる。

1. 発電効率の向上 (55%→60%以上) については、既報の家庭用 SOFC システムの場合と同様に、電極界面微構造の評価と最適化の検討に加え、電極や電解質に関する新材料開発が必要である。円筒横縞形の過電圧評価では、オーム損に伴う過電圧が占める割合が空気極および燃料極のそれらと比較して大きく [10]、電極性能改善と併せてオーム損改善に向けた取り組みが必要である。
2. システムの高寿命化については、モジュール・システムの寿命を 15 年以上へ改善する必要がある。シンタリングや不純物の影響についての定量的な把握が必要であるが、最近ではクロム被毒による空気極劣化挙動の改善について報告がなされており [10]、今後は長期の劣化挙動の把握や空気極劣化抑制のさらなる改良が必要となる。そのためには、電極活性低下に及ぼす定量的なモデル構築と予測手法の確立が必要であり、セルチューブだけでなくモジュール全体への影響についても検討する必要がある。
3. セルデザインの改善は、現状の円筒横縞形でも進められている。セルチューブにおけるスタック数の増加やチューブ直径の低減は、出力密度向上や低コスト化の観点から今後も継続的に改善を進める必要がある。
4. 製造技術の高度化は、既報の家庭用 SOFC システムでも議論しているように、本格的な量産化の実現に向けて重要な検討課題である。共焼成プロセスを含む焼成過程の最適化やモジュール化工程の技術開発は、歩留まり向上に大きな影響を与える。

5. その他、加圧運転は発電効率の向上の観点から極めて重要であり、加圧運転下でのモジュール挙動の把握と劣化挙動についての検討が必要である。ガスタービンや BOS コスト低減も、SOFC モジュール製造コスト同様に重要な検討課題である。また、家庭用 SOFC システムとは異なり、中・大型用コンバインドサイクルでは、ガスタービンを含む発電システムの最適化の検討が必要である。

5. まとめ

中・大型 SOFC システムについて、上述の技術シナリオおよび昨年報告した政策立案のための提案 [3] に基づき、以下に技術開発課題をまとめる。

- ・システム寿命の改善：
モジュール・システムの寿命を少なくとも 10 年あるいは 15 年以上への改善が必要である。劣化機構の解明と予測、電極界面構造の最適化、材料開発および製造技術のそれぞれの研究開発課題について総合的な改善が必要である。
- ・新材料開発：
SOFC-MGT コンバインドシステムにおいて発電効率 60% を達成するためには、構成部材の材料開発が必須である。電極材料に加え、電解質やインターコネクタなどオーム損低減に向けた検討が、効率向上の観点からも重要である。
- ・セルデザインの改善：
セルチューブ径の縮小化など、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。従って、モジュール体積あたりの出力密度向上（モジュールの小型化）に対しても有効かつ確実なアプローチであり、製造コスト低減に対しても貢献が大きい。
- ・製造プロセスの高度化：
上述のシステムの長寿命化および低コストの実現に向けた量産化技術の確立が急務である。家庭用 SOFC システムも同様の状況にあるが、現時点では本格的な量産技術が確立されていない段階にあるため、造粒、焼成、印刷、スタッキングなどの主要工程の生産技術開発の改善が必要である。スタッキング等のモジュール製造工程については、セルやモジュールのデザインによる工夫も必要である。

参考文献

- [1] 玄後義, 小林由則, 安藤喜昌, 久留長生, 加幡達雄, 小阪健一郎, 「200 kW 級固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 発電システムの開発と展望」三菱重工技報 45 (1), 27-30 (2008).
- [2] 小林由則, 安藤喜昌, 加幡達雄, 西浦雅則, 富田和男, 眞竹徳久「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」三菱重工技報 48 (3), 16-21 (2011).
- [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「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ー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップー」LCS-FY2013-PP-04 (pp.1-10), 2014 年 3 月
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/index.html>)
- [4] 三菱日立パワーシステムズ HP 技術情報「燃料電池発電システム (開発中)」<https://www.mhps.com/technology/business/power/sofc/index.html>
- [5] Kazuo Tomida, Nagao Hisatome, Tatsuo Kabata, Hiroshi Tsukuda, Akihiro Yamashita, Yohtaro Yamazaki, “Optimization of Segmented-in-series Tubular SOFCs using an $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ System Cathode and the Generation Characteristics Under Pressurization”, *Electrochemistry*, 77 (5), 379 (2009).
- [6] 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).
- [7] Fuel cell & Hydrogen 2009-2010 <http://www.nedo.go.jp/content/100079666.pdf>
- [8] NEDO 固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100060.html
<http://www.nedo.go.jp/content/100546418.pdf>
- [9] NEDO Press information 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) とマイクロガスタービン (MGT) の複合発電システム <http://www.mhi.co.jp/news/story/1309205422.html>
- [10] 横川晴美「耐久性プロジェクトの現状」第 23 回 SOFC 研究発表会講演要旨集 p.2-5 (2014)

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—

平成 27 年 3 月

SOFC Systems(vol.2):

Cost Analysis of Medium and Large SOFC Systems and Their 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,

2015.3

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

(平成 27 年 4 月印刷版)

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/>

© 2015 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。
