

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.6)

ーセルデザインおよび新型燃料電池の包括的評価ー

平成 31 年 1 月

SOFC Systems (Vol.6):

Comprehensive Evaluation of Cell Designs and New-type Fuel Cells

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-FY2018-PP-05

概要

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は高い発電効率が特徴であり、水素や天然ガスによる高効率発電システムの実現が期待されている。SOFC のさらなる研究開発と将来の普及に向けて、その技術および経済性の評価が必須であり、SOFC の様々なセルデザインの包括的なコスト評価を実施した。これまで、平板形、円筒平板形、円筒縦縞形、円筒横縞形などの SOFC のセルデザインが考案されてきたが、最近では多孔質金属支持体を用いた平板形 (以下金属支持形と呼ぶ) に代表される新しいセルデザインの研究開発も進められている。本提案書では、JST-LCS で開発したコスト評価統合プラットフォームである Modeling Tool を用いることで、従来のセルデザインに加え、金属支持形を含む幅広いセルデザインのコスト評価を進め、材料や製造方法の製造コストに対する影響について検討した。原材料費は、平板形を基準とすると、金属支持形では 1/2 に低減される。一方、200kW 級、年産 100~10,000 台の金属支持形における設備コストは 1.5 倍程度になると試算された。200 kW 級 SOFC システムの発電コストは、スケールメリットを考慮することで、いずれのセルデザインにおいても 14 円/kWh を達成できることが示唆され、その達成に向けた技術課題について検討を行った。

Summary

Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) are promising power generation systems for highly efficient energy conversion with hydrogen and natural gas. Because techno-economic assessment is required for the further research and development of SOFCs and their widespread use in future society, comprehensive analysis of cost evaluations was performed for a variety of designs of SOFCs. SOFC cell designs such as planar type, flat-tubular type, tubular type, and segmented-in-series tubular type have been created so far, and recently a new cell design like a planar type cell with a porous metal support, which is called “metal-supported type” hereafter, is being researched and developed as well. In this report, the cost analysis of the metal-supported type was conducted as well as conventional cell designs, and the impacts of SOFC cell designs on material costs and production costs were investigated using the LCS-Modeling Tool which was developed by JST-LCS as an integrated platform of cost analysis. The raw material cost of the metal-supported type can be reduced by half in comparison with the planar type, whereas the equipment cost of the 200kW-class metal-supported type for the annual production rate of 100-10,000 units is 1.5 times higher than that of the planar type. Considering the scale merit of 200kW-class SOFC production, the cost analysis suggests that all SOFC cell designs can achieve 14 JPY/kWh of power generation cost, and relevant challenging issues were also discussed.

目次

概要

1. はじめに.....	1
2. セルデザインについて.....	1
2.1 平板形、円筒平板形、円筒横縞形、および金属支持平板形 SOFC のセルスタックの仕様..	1
2.2 各セルデザインの材料コストの比較について.....	3
3. SOFC モジュールの製造プロセスについて.....	4
3.1 SOFC モジュール製造プロセスの包括的な評価の取り組み.....	4
3.2 従来のセルデザインと新型のセルデザインの製造プロセスの比較.....	5
4. 製造コストおよび発電コストの比較.....	7
4.1 製造コストの比較.....	7
4.2 発電コストの比較.....	7
5. まとめ.....	8
6. 政策立案のための SOFC 技術開発課題の提案.....	9
参考文献.....	10

1. はじめに

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、電極、電解質、インターコネクタ等の構成材料の研究開発とともに、様々なセルデザインが考案され、実機に投入されてきた。すなわち、平板形、円筒平板形、円筒縦縞形などの形状を有するセルが実際に作製され、検討されてきた。また、以前は電解質支持のセルが主流であったが、近年は電解質を薄膜化し、電解質のオーム抵抗に起因するエネルギー損失を低減するために、電極支持のセル開発に移行している。本提案書では、筆者らが開発してきた燃料電池の技術評価手法[1-2]を適用し、SOFC モジュール製造コストについて、包括的な評価を行った内容を報告する。また、金属支持体を用いた低コストかつ高性能の新しいセルデザインが近年考案されており[3-7]、このような新型セルの製造プロセスおよびモジュール製造コストについても評価を行い、従来のセルとの比較を通じて製造コスト削減ポテンシャルを検討した。以下にその結果を報告する。

2. セルデザインについて

2.1 平板形、円筒平板形、円筒縦縞形、および金属支持平板形 SOFC のセルスタックの仕様

図 1 に、燃料電池の技術革新の変遷を系統図としてまとめた。SOFC のセルデザインは、平板形[8-10]、円筒縦縞形[11]、円筒平板形[11-14]、円筒横縞形[15,16]等を経て発展してきた。また、マイクロチューブ形[17-22]や金属支持平板形[3-7]のような新しいセルデザインも開発されている。近年は、水素製造用の水蒸気電解セル (SOEC) の技術開発も進められている[23]。また、プロトン伝導性固体高分子膜を使用した固体高分子形燃料電池 (PEFC (PEMFC)) およびその水電解セル (PEMEC) も図中に掲載したが、最近の研究トレンドとして、プロトン伝導性固体電解質材料として以前から研究され、セル化や発電の検証も進められてきたセラミックス系のプロトン伝導体を固体電解質膜に用いたプロトン伝導性固体酸化物形燃料電池 (pSOFC) についても、その発電効率の高さへの期待から、研究開発が活発に進められている[24-31]。図 2 に代表的な各単セルデザインの標準仕様の模式図を示す。また、表 1 にそれら各単セルの構成材料と寸法を示す。

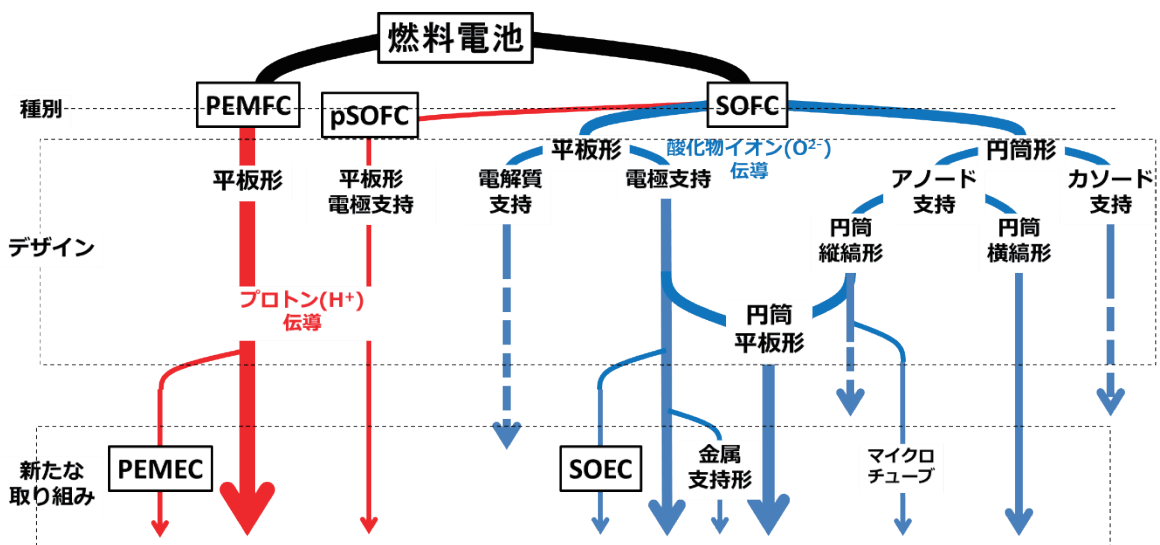


図 1 燃料電池セルデザインの技術進化の系統図

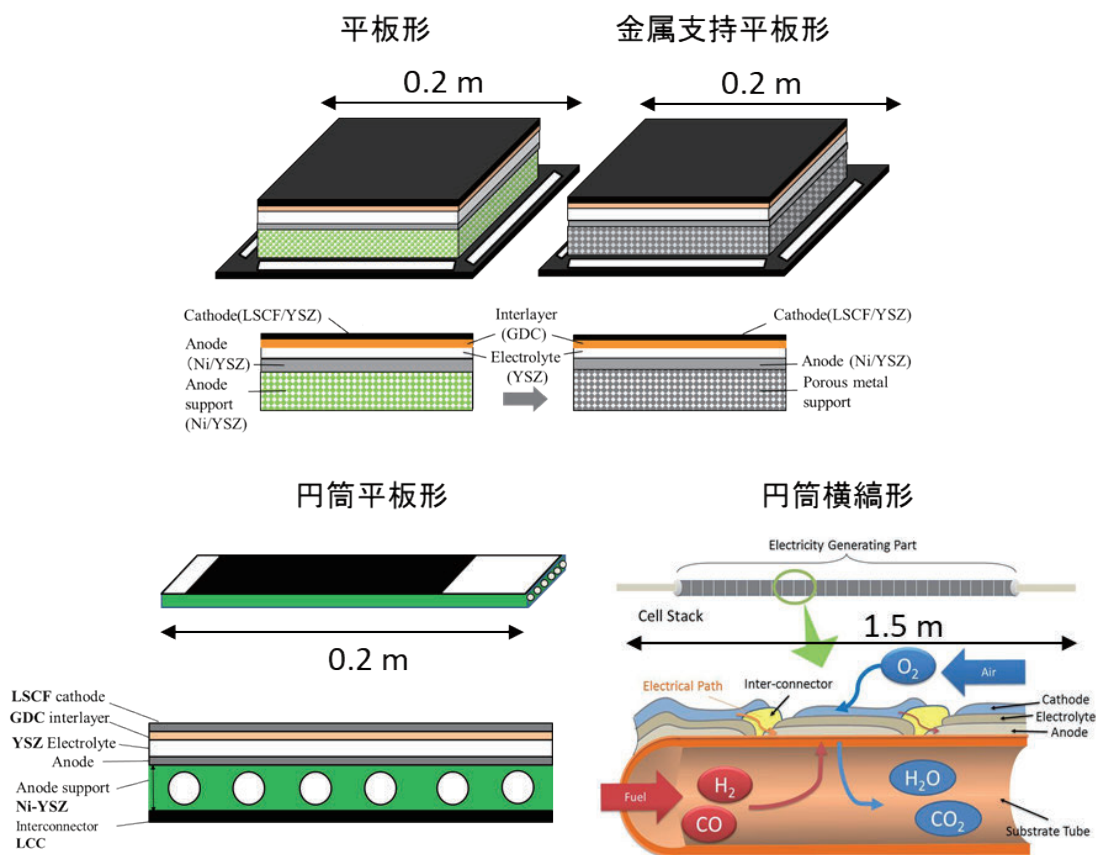


図 2 代表的な SOFC セルデザインの模式図

表 1 各単セルの構成材料と寸法

セルタイプ	平板形		円筒平板形		円筒横断形		金属支持平板形	
構成部材	構成材料	厚さ (μm)	構成材料	厚さ (μm)	構成材料	厚さ (μm)	構成材料	厚さ (μm)
燃料極: 支持体	Ni-YSZ	1,500	Ni-YSZ	2,000	CSZ ($(\text{ZrO}_2)_{0.92}(\text{CaO})_{0.08}$)	2,000	Fe-Cr	500
燃料極: 拡散バリア層	-	-	-	-	-	-	GDC	2
燃料極: 活性層	Ni-YSZ	30	Ni-YSZ	30	Ni-YSZ	170	Ni-YSZ	40
電解質	YSZ ($(\text{ZrO}_2)_{0.92}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.08}$)	50	YSZ	50	YSZ	90	YSZ	5
中間層	GDC ($\text{Ce}_{0.8}\text{Gd}_{0.2}\text{O}_{1.9}$)	3	GDC	3	-	-	GDC	2
空気極	LSCF-GDC ($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$)	50	LSCF-GDC	50	LSCM-YSZ $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.25}\text{Ca}_{0.25}\text{MnO}_3$ (LSCM)	1,010	LSCF-GDC	50
インターコネクタ	-	-	LCC ($\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{CrO}_3$)	100	LST ($\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$)	100	-	-
セパレータ	Fe-Cr	500×2	SUS430	500×2	-	-	Fe-Cr	500×2

各セルデザインについて、以上の材料構成を想定し、原材料のコストの算出を行った。表 2 に、各セルデザインの運転条件をまとめた。出力条件は、既往文献[1,2,5]を参考に決定した。平板形、

円筒平板形、および金属支持平板形については、セル性能がおおよそ同程度であると仮定し、単セルの出力密度を同じと仮定した。また、円筒横縞形は、支持管上に単セルが 85 セル直列に配列した形状を想定しており、単セルの出力密度は低いものの、セルスタック 1 本では高電圧が得られることが特徴であり、1 本当たり 80~100W 程度の出力が得られる[2]。

表 2 各セルデザインの運転条件

セルタイプ	平板形	円筒平板形	円筒横縞形	金属支持平板形
定格 AC 出力 (kW)	220	220	220	220
DC 出力 (kW)	230	230	230	230
平均出力密度 (W cm ²)	0.2	0.2	0.15	0.2
セル電圧 (V)	0.8	0.8	0.76	0.8
電極面積(トータル) (m ²)	115	115	150	115
作動温度 (°C)	750	750	900	750

2.2 各セルデザインの材料コストの比較について

図 3 に平板形、円筒平板形、円筒横縞形、および金属支持平板形の各 SOFC セルデザイン間の材料コスト内訳の比較を示す。また、表 3 に材料コストの値をまとめた。金属支持平板形が低コストであることが分かる。文献[5]の実機モデルでは、Fe-Cr 系の金属支持体を使用しているが、Ni-YSZ 燃料極支持の平板形や円筒平板形では、主に支持体である燃料極の材料費によって、金属支持平板形よりも割高になっている。円筒横縞形では、CSZ 支持管が材料コスト上昇の原因になっているが、支持管の直径を小さくし、肉厚を薄くする研究開発が行われており[2]、低コスト化が可能である。

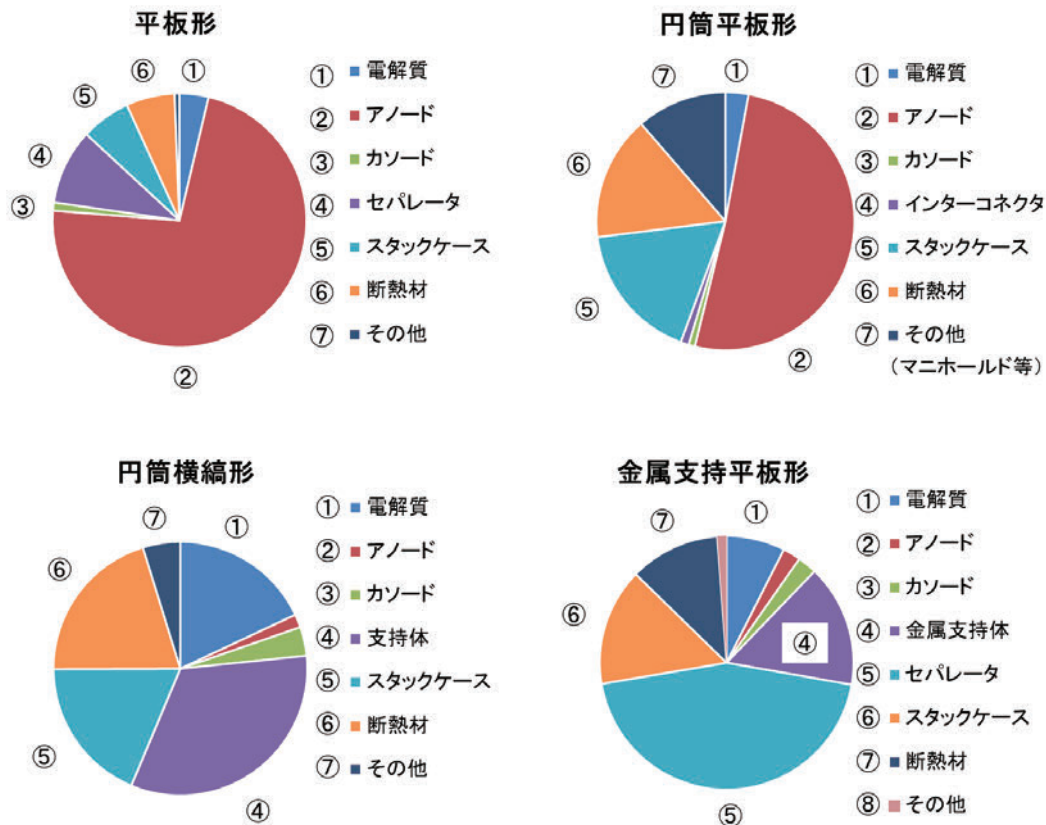


図 3 SOFC セルデザイン間の材料コスト割合の比較

表3 各セルデザインの材料コスト

構成材料	平板形	円筒平板形	円筒横縞形	金属支持平板形
電解質 (円/W)	1.0	1.0	9.7	0.9
アノード (円/W)	20.4	17.3	0.9	0.3
カソード (円/W)	0.3	0.3	2.0	0.3
金属支持体 (円/W)	-	-	-	1.9
セパレータ・ インターコネクタ (円/W)	2.7	0.3	17.8	5.4
スタックケース (円/W)	1.8	5.9	10.1	1.8
断熱材 (円/W)	1.7	5.3	11.0	1.4
その他 (円/W)	0.2	3.9	2.6	0.1
合計	28.1	34.0	54.1	12.1

3. SOFC モジュールの製造プロセスについて

3.1 SOFC モジュール製造プロセスの包括的な評価の取り組み

低炭素社会戦略センター (LCS) では、これまで SOFC や PEFC の様々なセルデザインの製造コスト評価を個別に行ってきた[32-36]。これら従来の評価プロセスでは、デザイン毎に個別に評価モデルを構築し、検討を進めてきた。しかし、図1に示したように、燃料電池の技術開発は多様化しており、評価手法もその変化に応じた柔軟なアプローチが求められている。そのような背景に基づき、LCS では、Modeling Tool と呼ばれる低炭素技術設計・評価プラットフォームの構築を行ってきた[37]。本報告書では、このプラットフォームを SOFC の製造コスト評価に適用することで、多様な燃料電池のセルデザインに対応できる評価システムの構築を行った。図4に本評価システムの概要図を示す。まず、温暖化ガス削減量やそれに基づく燃料電池の普及目標を基に、システムの要求仕様を決定する。すなわち、燃料電池システムの性能やセルに対する要求仕様を決定し、燃料電池システムの構成やセルの具体的な性能とサイジングを実施する。その仕様の決定については、燃料電池の発電に関する数値モデル解析を併用することで、発電効率や出力密度を計算し、セルスタックの寸法等のデザインを決定することができる[2]。その検討結果を基に、システムやセルスタックを構成する構成部材の質量や年産量を決定する。次に、各種デザインの SOFC モジュールの製造について、個別の生産プロセスを設計し、各プロセスの物質収支とエネルギー収支を計算し、各製造装置の大きさ、ライン数を決定する。この試算結果と各機器のコストデータ (生産規模に応じたコスト関数のデータベース) を参照することにより、設備コストや設置面積を算出し、最終的に、原材料費、用役費、人件費、建設費の合計として製造コストを算出する。その詳細な手続きについては、文献[1,2,32,33]を参照していただきたい。

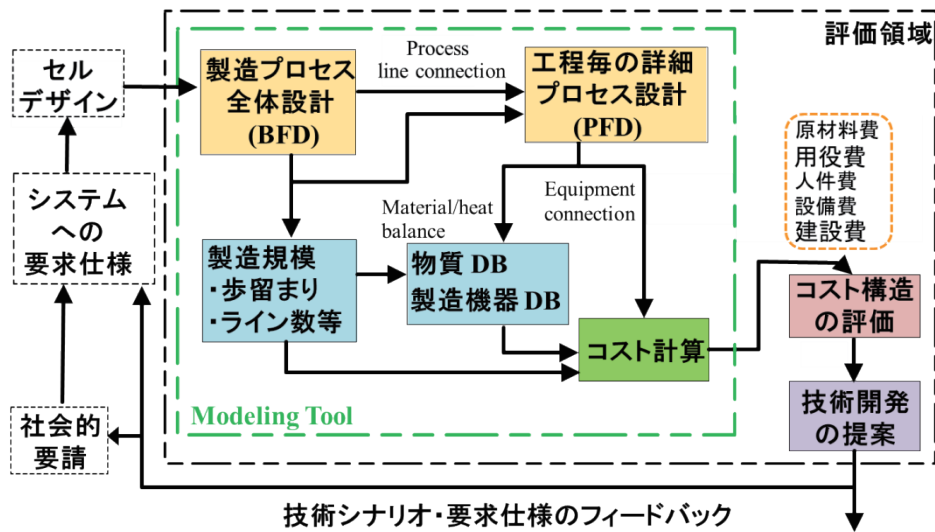


図 4 低炭素技術設計・評価プラットフォーム (Modeling Tool) の概要

以上が図 4 に示す Modeling Tool の仕様の概要になるが、その特徴は、各製造プロセス間の物質・エネルギーの流れおよび製造プロセス間の連結の可視化であり、また、製造プロセスが変更になった際にも、そのプロセス間の連結の変更を容易に制御できる点にある。したがって、SOFC の多様なセルデザインに伴う製造プロセスの変更に対し、柔軟かつ迅速なプロセスの構築とコスト評価が可能である。プロセス間の連結については、各製造工程を要素としたブロックフローダイヤグラム (BFD) により管理されており、各 BFD 内に各製造工程のプロセスフローダイヤグラム (PFD) が格納されている。PFD は個別の製造機器が連結されており、年産台数により PFD 内の装置サイズとライン数が決定され、その積算として機器コストが算出される。

3.2 従来のセルデザインと新型のセルデザインの製造プロセスの比較

平板形、円筒平板形、および円筒横縞形等の従来の SOFC セルデザインと新型セルデザインである金属支持平板形セルの製造プロセスの比較を行った。従来型では、湿式プロセス (スクリーン印刷[1]とテープキャスト法[2]) により電極や中間層、および電解質膜の構造形成を行っている。一方、新型セルデザインである金属支持平板形セルでは、スクリーン印刷等の湿式プロセスと併用してドライプロセス (スパッタ法) による製造プロセスが開発されている[5]。多孔質金属支持体上のセリア系 ($Ce_{1-x}Gd_xO_2$:GDC) 反応防止膜、YSZ 電解質膜、および電解質膜と空気極間の GDC 電解質膜がマグネトロンスパッタにより成膜されている。表 4 に平板形 (湿式プロセス) と電極支持平板形 (湿式+ドライプロセス) の製造プロセスについてまとめた。

表 4 の製造プロセスに基づき、製造プロセスのコスト比較を行った。電極支持形のスパッタの装置コストは、薄膜太陽電池で採用されている装置データを参考にした[38]。200 kW 級の平板形 SOFC スタックおよび金属支持平板形 SOFC スタックを年産 100 台~10,000 台の場合について検討したところ、金属支持平板形 SOFC スタックの製造設備コストは、平板形 SOFC スタックのそれと比較して、1.2 倍~1.7 倍まで上昇すると予想された。このように、ドライプロセスの採用は、製造コストを増加させる一方、図 3 で示したように、金属支持平板形では原材料費の低減が可能であり、設備コストと原材料コストの間でトレードオフの関係があることが分かる。以下では各セルデザインの製造コストについて比較検討する。

表4 SOFC モジュール (スタック) の製造工程 (A. 平板形; B. 金属支持平板形)

A. 平板形 SOFC		
工程番号	製造工程	操作内容
P0	共通設備	原材料供給・貯蔵装置
P1	YSZ 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P2	GDC 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P3	NiO 粉体	造粒: 共沈法; 遠心分離; 乾燥; 焼成; 粉剤
P4	LSCF 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P5	CMO 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P6	燃料極 (Ni-YSZ) 支持体	スラリー調製; テープキャスト; 乾燥; 焼成
P7	燃料極活性層	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成***.
P8	YSZ 電解質膜	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成***.
P9	GDC 中間層	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成***.
P10	空気極	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成***.
P11	セパレータ (Fe-Cr)	金属板成型
P12	セパレータコーティング	インク調整; ディップコート; 乾燥
P13	スタック組み立て	セル・セパレータ組み立て; シール; 焼成
P14	スタックケース収納	スタックケース成型; 断熱材切断; スタック組み立て・配線
B. 金属支持平板形 SOFC		
工程番号	製造工程	操作内容
P0	共通設備	原材料供給・貯蔵装置
P1	YSZ 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P2	GDC 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P3	NiO 粉体	造粒: 共沈法; 遠心分離; 乾燥; 焼成; 粉剤
P4	LSCF 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P5	CMO 粉体	造粒*; 乾燥; 焼成; 粉砕
P6	Fe-Cr 粉体	造粒*; 焼成; 粉砕
P7	多孔質金属 (Fe-Cr) 支持体	スラリー調製; テープキャスト; 乾燥; 焼成
P8	GDC 中間層 (バリア層)	ターゲット調整; マグネトロンスパッタ
P9	燃料極活性層	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成
P10	YSZ 電解質膜	ターゲット調整; 反応性スパッタ
P11	GDC 中間層	ターゲット調整; マグネトロンスパッタ
P12	空気極	インク調整; 印刷**; 乾燥; 焼成
P13	セパレータ (Fe-Cr)	金属板成型
P14	セパレータコーティング	インク調整; ディップコート; 乾燥
P15	スタック組み立て	セル・セパレータ組み立て; シール; 焼成
P16	スタックケース収納	スタックケース成型; 断熱材切断; スタック組み立て・配線

* 造粒は錯体重合法または固相法により合成

** 電極・電解質膜等の積層構造はスクリーン印刷により形成

*** セルの焼成工程は、積層膜毎の焼成と電極・電解質膜積層後の共焼成の両プロセスについて検討[1,2]

4. 製造コストおよび発電コストの比較

4.1 製造コストの比較

図 5 に、各セルデザイン（平板形、円筒平板形、円筒横縞形、金属支持平板形）のモジュール製造コストの比較結果を示す。

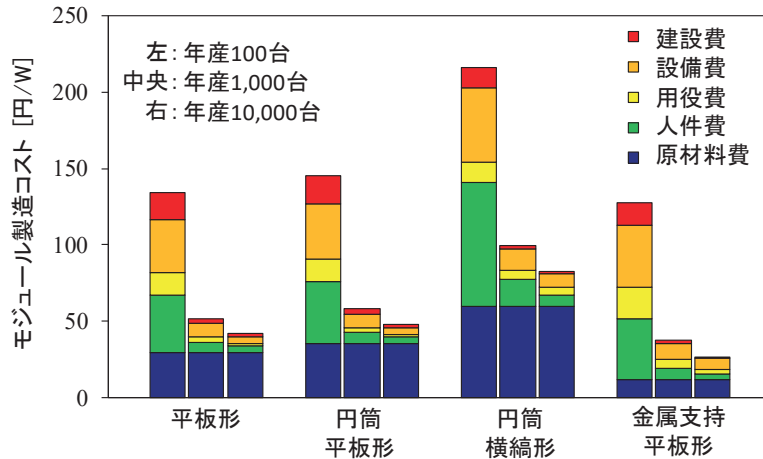


図 5 SOFC モジュール (220 kW) 製造コスト比較

原材料費については、図 3 の結果で議論したように、金属支持平板形 < 平板形 ≒ 円筒平板 < 円筒横縞形の順となり、金属支持平板形の利点大きい。一方、設備費については、年産台数が 100~10,000 台の範囲のいずれの場合においても、平板形 < 円筒平板 < 金属支持平板形 ≒ 円筒横縞形の順となる結果が得られた。金属支持平板形は、前節で述べたようにドライプロセス（スパッタ）の装置コストが設備費上昇への寄与が大きい。一方、円筒横縞形では焼成の際にバッチ炉を採用しているため、その機器コストが設備費上昇の要因になっている[2]。平板形と円筒平板形では、焼成工程において連続炉の使用を想定したため、円筒横縞形の設備費と比較して廉価な結果が得られている[1]。ただし、生産台数が上昇するに従い、いずれのセルデザインにおいても、モジュールコストは 100 円/W 以下になることが分かる。

4.2 発電コストの比較

最後に、各セルデザインの発電コストの検討を行った。発電コスト算出の前提条件を表 5 に示す。表 5 の前提条件の値は、既報の 220 kW 円筒横縞形の条件を参照した[2]。図 6 に各セルデザインの発電コスト (200 kW 級) の比較結果を示す。システムコストは、各セルデザインのモジュールコスト (図 5) に対し、配電設備や計装等の周辺設備である BOS (Balance of System) コストを考慮し、その合計値から算出した。発電コストは、発電効率を考慮した燃料費 (変動費) とシステムコスト (固定費) の和として示した。図 6 の結果より、200 kW 級の中・大型機では、システムコストの低減 (< 100 円/W) と長寿命化 (> 15 年) により、いずれのセルデザインにおいても、目標値である業務用系統電力コスト (14 円/kWh) [39]に 2030 年以降の段階で到達できることが示された。また、金属支持平板形では、原材料費が他のセルデザインと比較して廉価であることから、年産スケールアップに伴い、12 円/kWh まで発電コストが低減できる結果が得られた。なお、表 5 の条件に基づく、平板形、円筒平板形、金属支持平板形では、2025 年~2030 年において目標値 (14 円/kWh) に到達することも示唆された。

表 5 発電コスト算出の前提条件

	2020 年	2025～2030 年	2030 年以降
年産台数 (200kW 級)	100	1,000	10,000
発電効率 (%、LHV)	52	56	60
熱回収率 (%)	18	16	14
総合効率 (%)	70	72	74
寿命 (年)	10	15	20
稼働率 (%)	80	80	80
BOS コスト (円/W)	87	59	48
年経費率 (%)	17	13	12
燃料費 (円/Nm ³ -city gas)	90	90	90

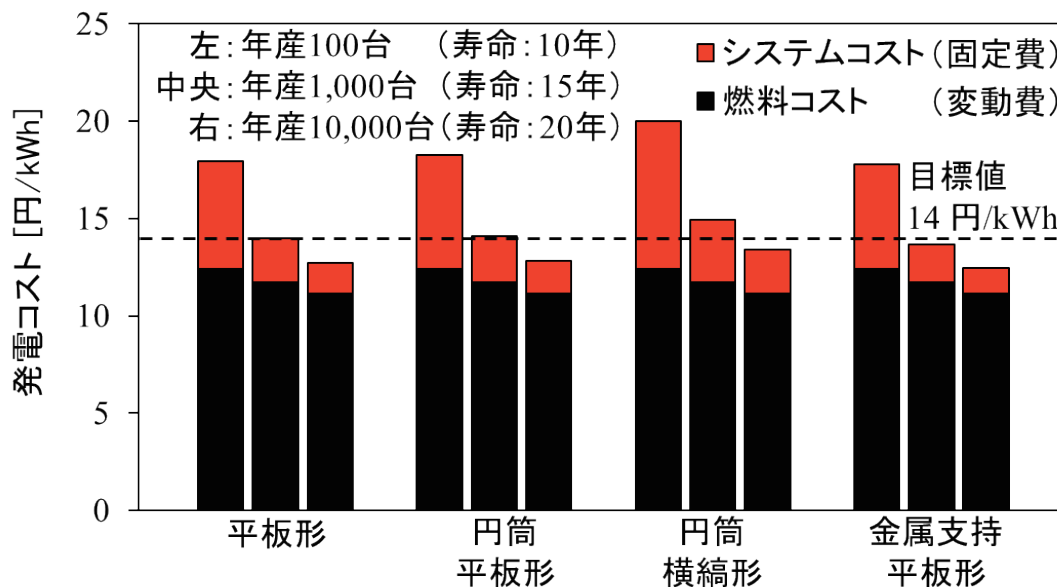


図 6 SOFC システム (220 kW) の発電コスト比較
 (燃料価格 (都市ガス): 90 円/Nm³; 稼働率: 80%を想定)

5. まとめ

本稿では、SOFC の様々なセルデザインに対する包括的なコスト評価を行った。SOFC のセルデザインや構成材料の技術革新によりコスト削減が十分可能であり、200kW 級の中・大型機では、システムコストの低減 (<100 円/W) と長寿命化 (>15 年) により、系統電力コストの目標値 (14 円/kWh) に十分に到達できることが示された。新型セルである金属支持平板形は、他のセルデザインと比べて原材料費を半減でき、コスト削減ポテンシャルが大きい。課題は、製造プロセスの改善と長寿命化に向けた技術開発である。

6. 政策立案のための SOFC 技術開発課題の提案

SOFC は材料開発だけではなく、製造技術を含むセルデザインの考案によっても、コスト低減が可能である。今回評価を行った新型セルである金属支持形 SOFC は、材料コスト低減の観点から今後の発展が期待できる。以下にセルデザインの革新に関する技術課題を示す。

・製造プロセスの最適化

本稿で示したように、いずれのセルデザインにおいてもスケールアップと製造技術の向上により、製造コスト削減ポテンシャルは大きい。NEDO のロードマップ[40]において、小型(～数 kW)、および中型(～数 100kW) の SOFC システムに対して、2030 年の目標として、システム寿命 15 年、SOFC システムコスト 50 万円/kW～30 万円/kW 程度の値が設定されている。家庭用小型機のモジュール(スタック)のシステムコストに占める割合は 30%程度なので[40]、モジュールコストの目標は 15 万円程度以下になる。この値は、本報告書の図 5 の製造コスト低減の技術シナリオに概ね対応する値であるが、これらの目標を達成するための製造技術開発の進展が必要不可欠である。特に、製造コストの中で高い割合を占める焼成工程および印刷工程の生産技術の開発が重要になる。

・異相界面接合の技術開発

金属支持形 SOFC の技術革新は、従来のセラミックス主体であった SOFC の製造コスト低減に貢献できる技術革新の一つである。この技術の進展に向けては、安定な異相接合界面、すなわち、金属-セラミックス界面の形成技術の進展が必要不可欠である。以下に技術革新の観点からの課題を示す。

1) 金属-セラミックス異相界面の形成技術の開発

電極支持体である金属材料と電極界面の形成について、バリア層である GDC 層の形成のためにマグネトロンスパッタ技術が採用されている[3-5]。スパッタ技術は、現在の薄膜化合物物半導体の製造プロセスでも利用されており、湿式プロセスが主体の SOFC 製造技術においても、将来の導入が期待される。今後は、成膜速度の向上など、生産速度改善に向けた取り組みが期待される。以上は、金属支持体に金属粉末を原料とした多孔質金属支持体を前提としているが、金属板に多数の垂直細孔を形成し、燃料ガス流路を有する金属板を燃料極支持体に用いるデザインも開発されている[6,7]。金属板に細孔を開ける工程には、レーザー加工技術が採用されており、今後の大量生産実現に向けては、従来の SOFC 製造技術とは異なる装置開発と金属板加工の生産速度の改善、および低コスト化に向けた取り組みが必要である。また、金属-セラミックス接合界面形成の焼結過程の検討や、カチオンの界面間の相互拡散に起因する劣化現象の把握など、製造技術改善や寿命向上に向けた基礎的な取り組みも必要である。

2) 低温作動および DSS (Daily Start and Stop) 運転に向けた取り組み

SOFC の課題として、急激な出力変動に対応が難しい問題がある。すなわち、DSS 運転のように、エネルギー需要に対応した柔軟な運転が難しい点があげられる。また、高温作動に伴う構成部材の劣化も検討課題である。金属支持形 SOFC では、低温作動化の検討も進められており、600°C 以下の作動温度(570°C)での発電の実現化、および DSS 運転の検証が進められている[6,7]。このように、低温化および DSS 運転の技術開発においても、上述した異相接合界面の安定性と製造技術の革新が必要であり、その基礎研究の進展が必要不可欠である。

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] V. A. Rojek-Wöckner, A. K. Opitz, Marco Brandner, Jörg Mathe, M. Bram, "A novel Ni/ceria-based anode for metal-supported solid oxide fuel cells" *J. Power Sources*, 328, 65-74, 2016.
- [4] M. Haydn, K. Ortner, Th. Franco, N. H. Menzler, A. Venskutonis, L. S. Sigl, "Development of metal supported solid oxide fuel cells based on powder metallurgical manufacturing route" *Powder Metallurgy*, 56 (5), 382-387, 2013.
- [5] Th. Franco, M. Haydn, A. Weber, W. Schafbauer, L. Blum, U. Packbier, D. Roehrens, N.H. Menzler, J. Rechberger, A. Venskutonis, L. S. Sigl, H.-P. Buchkremer, "The status of metal-supported SOFC development and industrialization at Plansee", *ECS Trans*, 57 (1) 471-480, 2013.
- [6] R. T. Leah, A. Bone, M. Lankin, A. Selcuk, M. Rahman, A. Clare, L. Rees, S. Phillip, S. Mukerjee, M. Selby, "Ceres Power Steel Cell Technology: Rapid Progress Towards a Truly Commercially Viable SOFC" *ECS Trans.*, 68(1) 95-107, 2015.
- [7] R. Leah, A. Bone, A. Selcuk, D. Corcoran, M. Lankin, Z. Dehaney-Steven M. Selby and P. Whalen, "Development of Highly Robust, Volume-Manufacturable Metal-Supported SOFCs for Operation Below 600°C", *ECS Trans*, 35 (1), 351-367, 2011.
- [8] S.C. Singhal and K. Kendall, "High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design, and application", 1st ed., 2003, Elsevier Advanced Technology, New York.
- [9] R. Payne, J. Love, M. Kah, "Generating electricity at 60 % electrical efficiency from 1-2 kWe SOFC products," *ECS Trans.*, 25(2), 231-239, 2009.
- [10] J. Shimano, H. Yamazaki, Y. Mizutani, K. Hisada, K. Ukai, M. Yokoyama, K. Nagai, S. Kashima, H. Orishima, S. Nakatuka, H. Uwani, , and M. Hirakawa, "Development status of a planer type of 1 kW class SOFC System," *ECS Trans.*, 7(1), 141-148, 2007.
- [11] S.C. Singhal, "Advances in solid oxide fuel cell technology," *Solid State Ionics*, 135, pp. 305-313, 2000.
- [12] H. Orui, K. Watanabe, and M. Arakawa, "Electrochemical characteristics of tubular flat-plate-SOFCs fabricated by co-firing cathode substrate and electrolyte," *J. Power Sources*, 112, 90-97, 2002.
- [13] Y. Lu, and L. Schaefer, "Numerical study of a flat-tube high power density solid oxide fuel cell Part II: Cell performance and stack optimization," *J. Power Sources*, 153, 68-75, 2006.
- [14] S.D. Vora, "Development of high power density seal-less SOFCs," *ECS Trans.*, 7 (1), 149-154, 2007.
- [15] K. Tomida, N. Hisatome, T. Kabata, H. Tsukuda, 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, 865-875, 2009.
- [16] Y. Kobayashi, K. Kosaka, K. Tomida, N. Mataka, K. Ito, K. Sasaki. "Start-up characteristics of segmented-in-series tubular SOFC power modules improved by catalytic combustion at cathodes", *Fuel Cells*, 14, 1028-1035, 2014.
- [17] K. Kendall, and M. Palin, "A small solid oxide fuel cell demonstrator for microelectronic applications," *J. Power Sources*, 71, 268-270, 1998.
- [18] N.M. Sammes, Y. Du, and R. Bove, "Design and fabrication of a 100W anode supported micro-tubular

- SOFC stack,” J. Power Sources, 145, 428-434, 2005.
- [19] T. Otake, M. Yokoyama, K. Nagai, K. Ukai, Y. Mizutani, “Effect of GDC electrolyte thickness on the performance of anode supported micro Tubular SOFC,” ECS Trans., 7(1), 551-554, 2007.
- [20] K. Yamada, N. Takahashi, C.J.Wen, “Design and evaluation of electric vehicle using solid oxide fuel cells,” J. Chem. Eng. Jpn., 35(12), 1290-1297, 2002.
- [21] T. Suzuki, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro, M. Awano, “Fabrication and characterization of micro tubular SOFCs for operation in the intermediate temperature,” J. Power. Sources, 160, 73-77, 2006.
- [22] Y.W. Sin, K. Galloway, B. Roy, N.M. Sammes, J.H. Song, T. Suzuki, M. Awano, “The properties and performance of micro-tubular (less than 2.0 mm O.D.) anode supported solid oxide fuel cell (SOFC),” Int. J. hydrogen Energy, 36, 1882-1889, 2011.
- [23] 吉野正人, 松永健太郎, 中島良, “高効率な水素電力貯蔵システム”, 東芝レビュー, 70(5), 8-11, 2015.
- [24] K.D. Kreuer. Proton-Conducting Oxides. Annu. Rev. Mater. Res. 33, 333–59, 2003.
- [25] Y. Matsuzaki, Y. Tachikawa, T. Somekawa, T. Hatae, H. Matsumoto, S. Taniguchi, K. Sasaki, “Effect of proton-conduction in electrolyte on electric efficiency of multi-stage solid oxide fuel cells”, Scientific Reports 5, 12640, 2015.
- [26] L. Malavasi, C.A.J. Fisher, M.S. Islam, “Oxide-ion and proton conducting electrolyte materials for clean energy applications: structural and mechanistic features”, Chem. Soc. Rev., 39, 4370-4387, 2010.
- [27] E. Fabbri, D. Pergolesi, E. Traversa, “Materials challenges toward proton-conducting oxide fuel cells: a critical review”, Chem. Soc. Rev., 39, 4355-4369, 2010.
- [28] S. Choi, C. J. Kucharczyk, Y. Liang, X. Zhang, I. Takeuchi, H.-I. Ji. S. M. Haile, “Exceptional power density and stability at intermediate temperatures in protonic ceramic fuel cells”, Nat. Ener. 3, 202-210, 2018.
- [29] K. Bae, D. Y. Jang, H. J. Choi, D. Kim, J. Hong, B.-K. Kim, J.-H. Lee, J.-W. Son, J. H. Shim, “Demonstrating the potential of yttrium-doped barium zirconate electrolyte for high-performance fuel cells”, Nat. Commun., 8, 14553, 2017.
- [30] N. Taniguchi, E. Yasumoto, Takaharu Gamo, “Operating Properties of Solid Oxide Fuel Cells Using $\text{BaCe}_{0.8}\text{Gd}_{0.2}\text{O}_{3-\alpha}$ Electrolyte”, J. Electrochem. Soc. 143(6), 1886-1890, 1996.
- [31] 古山 通久、温 慶茄、大友 順一郎、谷口 昇、山田 興一、江口 浩一、高橋 宏、小宮山 宏, “ BaCeO_3 電解質を用いた固体酸化物燃料電池燃料極反応機構の解析”, 化学工学論文集, 29(2), 214-220, 2003.
- [32] 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>)
- [33] 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>)
- [34] 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

- 一, LCS-FY2015-PP-03 (pp.1-14), 2016 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2015-pp-03.pdf>)
- [35] 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, LCSFY2016-PP-03 (pp.1-13), 2017 年 3 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2016-pp-03.pdf>)
- [36] 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) –” LCS-FY2017-PP-03 (pp.1-10), 2018 年 1 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/documents/publishes/item/fy2017-pp-03.pdf>)
- [37] 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, “「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」の構築 (Vol.4)”, LCS-FY2017-PP-12 (pp.1-12), 2018 年 1 月.
(<http://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-12.pdf>)
- [38] 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.3) –定量的技術シナリオに基づくコスト低減技術評価 (タンデム型を含む高効率化合物系太陽電池) –”, LCS-FY2015-PP-01(pp.1-8), 2016 年 3 月. (<http://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-01.pdf>)
- [39] NEDO 「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」基本計画, 2018 年 2 月.
(<https://www.nedo.go.jp/content/100752183.pdf>)
- [40] NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (技術開発ロードマップ解説書 (燃料電池分野)), 2017 年 12 月. (http://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html)

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.6)
ーセルデザインおよび新型燃料電池の包括的評価ー

平成 31 年 1 月

SOFC Systems (Vol.6):

Comprehensive Evaluation of Cell Designs and New-type Fuel Cells
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,
2019.1

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/>

© 2019 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。
