

# デンソーにおける SOFC システムの開発状況と今後の展開

## Development Status and Future Prospects of SOFC-System for Commercial-Use at DENSO CORP.

長田 康弘  
Yasuhiro OSADA

萩原 康正  
Yasumasa HAGIWARA

向原 佑輝  
Yuuki MUKOUBARA

SOFC-System have been attracting attention as distributed power sources that can contribute to Power system stabilization and fuel diversification during the introduction of renewable energy in a carbon neutral society, and we have been working on the development of high-efficiency SOFC-System for Commercial-Use since 2010. As a new high efficiency method, we devised the Anode off gas recirculation using an ejector, and demonstrated the power generation efficiency 63% is achieved in the FC-Module.

Key words :

*SOFC-System, high power generation efficiency, Commercial-Use, Anode off gas recycle, Ejector*

### 1. まえがき

世界の平均気温上昇などの地球規模での気候変動問題の解決に向けて、2015年にパリ協定が採択され、温室効果ガス排出量の削減が世界共通の課題となっている。その中で日本においても、2050年に温室効果ガス排出量を実質ゼロを目指す「2050年カーボンニュートラル」を長期目標として定め、太陽光・風力に代表される再生可能エネルギーの導入が加速されている。

しかし、それらの再生可能エネルギーは気候に大きく影響を受ける不安定さを有するため、補完する分散電源や、バーチャルパワープラント（Virtual Power Plant）のように多様な電源リソースの組み合わせで電力システムを安定化させるシステムが必要になっている。その中でも、固体酸化物形燃料電池（Solid Oxide Fuel

Cell：以下 SOFC と略す）は従来の熱機関と異なり、小出力でも極めて高効率運転が可能な発電機であると共に、燃料が水素や都市ガスに限定されず、バイオガスなども改質利用できることから、燃料多様化さらにはカーボンニュートラルに繋がる分散電源として注目されている。

日本国内では、すでに家庭用 SOFC コージェネシステム（発電効率 50% 程度＋熱利用率 30% 程度）が市販化され、徐々に普及し始めている。一方、熱需要が少ない事務所等の業務市場・工場等の産業市場においては、従来の発電効率 50% 程度ではユーザメリット（CO<sub>2</sub> 削減、電力利用コスト低減）が得にくいことから普及が進まず、熱利用を除く発電機能のみでも効率 60% を超える高効率システムの市販化が求められていた。

そこで、当社は自動車分野で培ったセラミックス技

術、およびエネルギーマネジメント技術を活かし、2010年より業務・産業用をターゲットにした高効率 SOFC システムの開発に着手した。本報では、当社における SOFC の開発状況と今後の展望について報告する。

## 2. 開発ターゲット

開発中の SOFC システムの目標仕様を Table 1、システム外観を Fig. 1 に示す。高効率化・環境負荷低減ニーズが高い業務・産業ユーザ向けとして、燃料は CO<sub>2</sub> 排出係数が小さいメタンを主成分とする都市ガスを利用し、発電出力 AC4.5kW、発電効率 AC63%超を目標仕様としている。

Table 1 Target Specification of the SOFC System

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Power Output                | 4.5 kW               |
| Power generating efficiency | 63% AC or more (LHV) |
| Lifetime                    | 90,000 h             |
| Gas                         | City Gas             |



Fig. 1 Appearance of the SOFC System

Fig. 2 には、各種の発電機の効率を示す。日本の火力発電所の平均発電効率は 46.2%<sup>1)</sup>、CO<sub>2</sub> 排出係数は 0.444kg-CO<sub>2</sub>/kWh<sup>1)</sup> であり、最新鋭の LNG コンバインドサイクルで発電効率 63%<sup>2)</sup> (送電ロス 5% 考慮した場合には受電端実質効率は 60% 程度) と進展してきているが、1MW 級の大規模発電に限られていることから、小規模の分散電源において LNG 火力の最高値 63% を超える優れた効率を受電端でも実現することを開発システムの性能目標とした。なお、発電効率 63% 時の CO<sub>2</sub> 排出係数は 0.31kg-CO<sub>2</sub>/kWh であり、日本の 2030 年目標値 0.37kg-CO<sub>2</sub>/kWh<sup>3)</sup> よりも十分な削減効果が見込まれる。

## 3. SOFC システムの課題

SOFC システムは、発電反応を行うセラミックス発電膜と金属セパレータの積層体であるセルスタック (Cell Stack: 以下 CS と略す)、CS 排熱で反応流体 (空気、および都市ガス・水) を熱マネジメントする高温の燃料電池モジュール (Fuel Cell Module: FC モジュールと略す)、各種ポンプ・パワーコンディショナなどの補機で構成される。SOFC システムの一般的なシステムフローを Fig. 3 に示す。

CS の反応流体であるカソード側の空気は、ブロワで大気から吸引・圧送されて空気予熱器で温調され、アノード側の水素は都市ガスと水を蒸発・混合させた後に、触媒充填された改質器で水素に変換されて CS へ

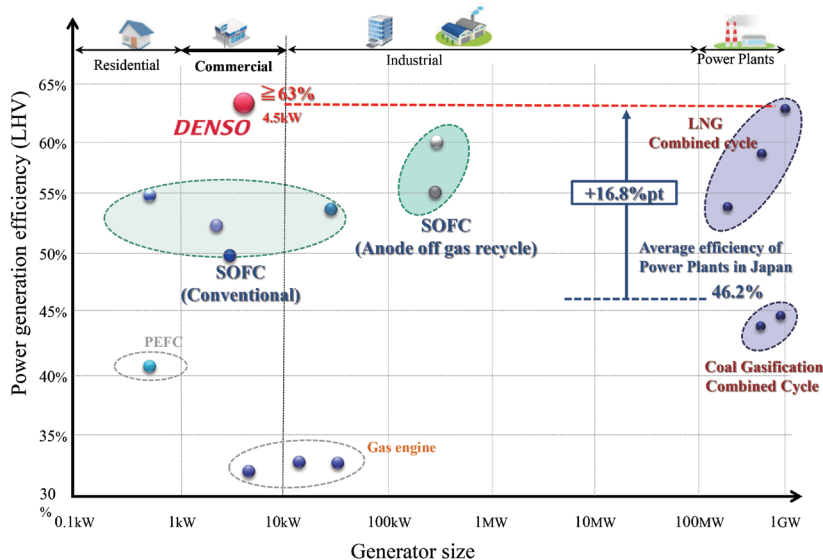


Fig. 2 Comparison of generator efficiency<sup>1) 3)</sup>

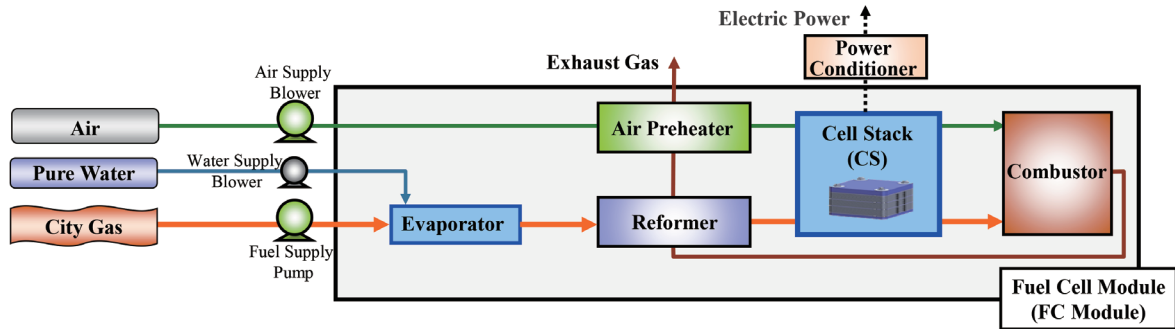


Fig. 3 Flow diagram of the Conventional SOFC System

供給され、内部のセラミックス膜にて約 700℃の高温で発電を行う。この燃料電池における発電反応は、従来の熱機関と異なって燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する電気化学反応であることから、カルノー効率の制限を受けず、小規模でも高効率となる優れたポテンシャルを有する。

ただし、セラミックス膜のアノード電極（ニッケル多孔質体）では、発電反応で生成する水蒸気による酸化劣化を保護するため、水素供給を理論反応量に対して約 20% 過剰（燃料利用率 80%）にして、アノード電極を還元状態に維持する必要がある。この燃料利用率の制限によって、一般的な SOFC システムでは、Fig. 2 に示すように発電効率が 50～55% 程度に留まっている。

そこで、高効率化ニーズが大きい業務・産業向けの中・大出力 SOFC システムを中心に、未利用水素を再利用する燃料リサイクル技術が注目され、各社で開発が盛んに行われるようになってきている。なお、約 700℃で高温作動する SOFC への適用には、耐熱性を有するリサイクル制御技術の構築がポイントとなる。

#### 4. 燃料リサイクル技術

SOFC の燃料リサイクル方式には、循環機構を持たない CS 多段化方式、循環機構を有するブロウ循環方式、エジェクタ循環方式の 3 つの方式が挙げられる。各々の特徴を Table 2 に示す。

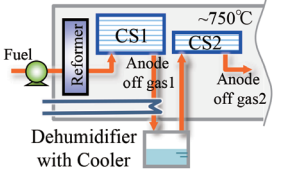
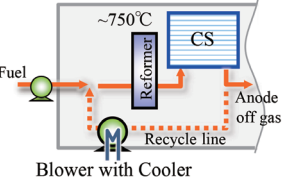
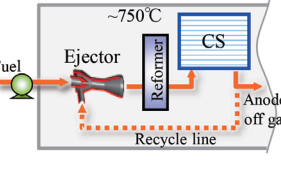
まず、CS 多段化方式は、2 つに分割した CS の燃料経路を直列（前段：大出力 CS、後段：小出力 CS）で接続して、前段の大出力 CS の未利用水素 20% 分を含むオフガスを後段の小出力 CS に供給して再利用する

方式である。循環器を持たないことで複雑な燃料制御が不要となるメリットがあるが、後段 CS の供給ガス（＝前段 CS のオフガス）は水蒸気リッチであるため、後段 CS の性能低下、および劣化進行に影響を与えてしまうため、CS 接続経路に水分除去装置が必要となる。

次に、ブロウ循環方式は、高温の CS 燃料オフガスを CS 上流に戻すリサイクル経路を設け、その経路内に循環用ブロウを設置（常温環境下の燃料供給ブロウとは別置き）して、CS 未利用水素をリサイクルして再利用する方式である。なお、リサイクルされるオフガスは CS 多段化方式と同様に水蒸気リッチではあるが、水蒸気を改質反応（水素生成）に活用できることから、水分除去装置の設置は不要となる。ただし、ブロウのモータや軸受けなどの駆動部があることから、高温のオフガス（CS 出口 600℃程度）を耐熱温度（200℃程度）以下に温調する冷却機構が必要となる。

そして、エジェクタ循環方式は、燃料供給ブロウで圧送された燃料を駆動流（エネルギー源）としてエジェクタのノズル噴流で減圧させて、CS 未利用水素を吸引・リサイクルして再利用する方式である（Fig. 4）。エジェクタは、SOFC の高温環境に対応できる固定絞りタイプが採用されるが、駆動部を有しない簡素構造であり、冷却機構が不要であることから、コスト・耐熱性に優れるという特長を持つ。ただし、エジェクタの吸引特性はエネルギー源である供給燃料の流量に伴った成行き制御となることから、リサイクル制御のロバスト性に課題があった。このように、エジェクタ循環方式は低コスト・高耐熱というメリットの大きさから注目され、これまでに Siemens Westinghouse Power Corporation (SWP 社)<sup>4)</sup>などで開発が進められていた

Table 2 Recycle types of the Anode off gas

| Recycle type  | CS cascade type   | Blower recycle type  | Ejector recycle type  |
|---------------|---|--|---|
| Flow diagram  |  |  |  |
| Advantages    | •Controllability of Fuel  | •Controllability of Fuel   | •Simplicity of structure  |
| Disadvantages | •Deterioration of CS2<br>•Thermal insulation of System                            | •High temperature reliability<br>•Thermal insulation of System                     | •Controllability of Fuel  |

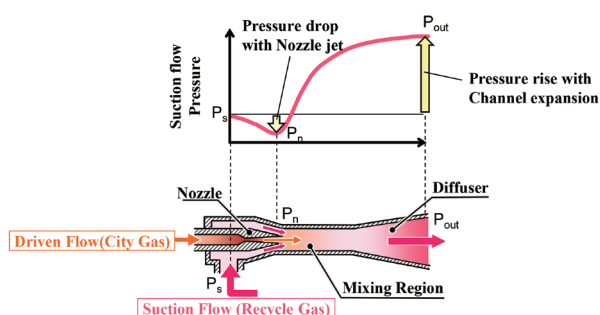


Fig. 4 Structure and principle of Ejector

が、制御性の課題の大きさから採用が限定されていた。

## 5. 駆動流アシストエジェクタ (提案技術)

当社では、自動車の冷凍サイクルや CO<sub>2</sub> 給湯機のヒートポンプサイクルで培ったエジェクタサイクル技術やシステム制御技術を活かして、SOFC システムへのエジェクタ適用課題である制御性の改善技術を模索し、Fig. 5 に示す駆動流アシストエジェクタサイクルを新規に考案した。

エジェクタの吸引特性がエネルギー源である駆動流量に最も影響を受けることから、改質器出口ガスの一部を燃料供給ブロワの上流に戻す駆動流アシスト経路を新設して、従来の駆動流であった供給燃料（都市ガス・水蒸気）に改質出口ガスをリサイクル・添加することでエジェクタでの吸引効率の良い流量比での作動を可能とした。また、駆動流アシスト経路のバルブ開度を調整することで、アシスト流量を制御し、エジェクタでの吸引特性を変化させて、運転条件やシステムばらつきに応じたりサイクル量の制御性を担保している。

そして、駆動流アシストエジェクタサイクルを織り込んだ FC モジュールにおいて、適合性検証、および 1000hr 初期耐久評価を行い、DC 発電効率 69.8%（補機動力・AC 変換損失を考慮した AC 発電効率 63.7% 相当）と目標を満たす優れた性能を実証した。現在、システムでの AC 発電評価にて実用を考慮した運転での信頼性検証を推進している。

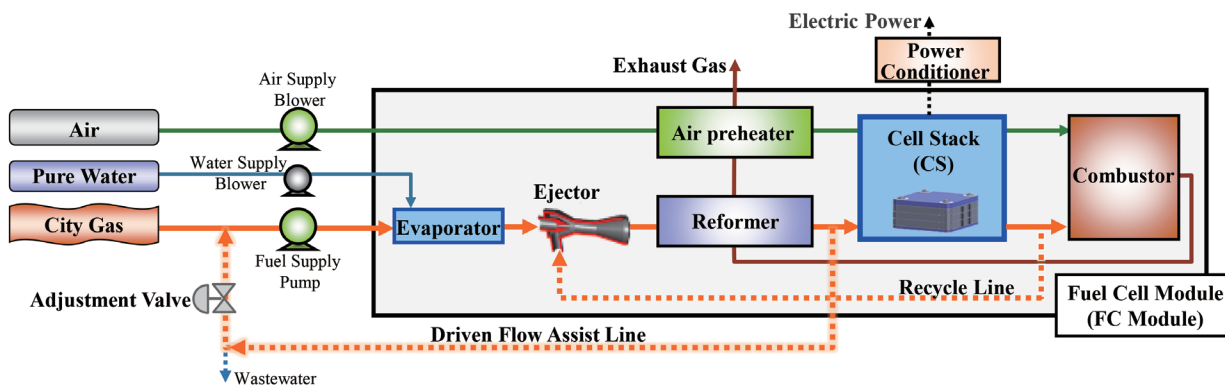


Fig. 5 Flow diagram of SOFC System with Driven flow assist Ejector



## 6. 今後の展望

開発技術のエジェクタ循環方式を織り込んだ SOFC システムにて、発電効率 63% 超、CO<sub>2</sub> 排出係数 0.31kg-CO<sub>2</sub>/kWh 以下の高いポテンシャルを実証でき、温室効果ガス排出量の削減に大きく寄与できることを確認できた。今後、再生可能エネルギー導入時のベース電源および調整電源への適用に向けて、大出力化・電力安定化のポテンシャル検証を進めていく予定である。また、現状の燃料は都市ガスがベースであるが、水素やバイオガスなどの燃料多様化を模索しており、再生可能エネルギー由来燃料でのレジリエンス機能を有する分散電源システム (Fig. 6) への市場拡大も目指していく。

なお、本システムの開発は、東邦ガス株式会社と共同で実施した独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発／固体酸化物形燃料電池を用いた業務用システムの実用化技術実証／燃料リサイクル機構を用いた高効率固体酸化物形燃料電池実用化技術開発」

の成果を用いたものである。

### 参考文献

- 1) 電気事業低炭素社会協議会：電気事業における地球温暖化対策の取組み (2020), p.6-9.  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/chikyuu\\_kankyo/shigen\\_wg/pdf/2020\\_001\\_04\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyuu_kankyo/shigen_wg/pdf/2020_001_04_01.pdf)
- 2) 中部電力プレスリリース：中部電力西名古屋火力発電所 7-1 号 世界最高効率のコンバインドサイクル発電設備としてギネス世界記録認定～発電効率 63.08% を達成～ (2018.03.27)  
[https://www.chuden.co.jp/publicity/press/3267477\\_21432.html](https://www.chuden.co.jp/publicity/press/3267477_21432.html)
- 3) 電気事業連合会：電気事業における低炭素社会実行計画 (2015)
- 4) オーム社：燃料電池の技術 (2002), p.203-214.
- 5) 日本機械学会熱工学部門：JSME TED Newsletter, No.90, 2020 高効率 SOFC システムの開発  
[https://www.jsme.or.jp/ted/NL90/TED-Plaza\\_NL90\\_02\\_hagiwara.pdf](https://www.jsme.or.jp/ted/NL90/TED-Plaza_NL90_02_hagiwara.pdf)

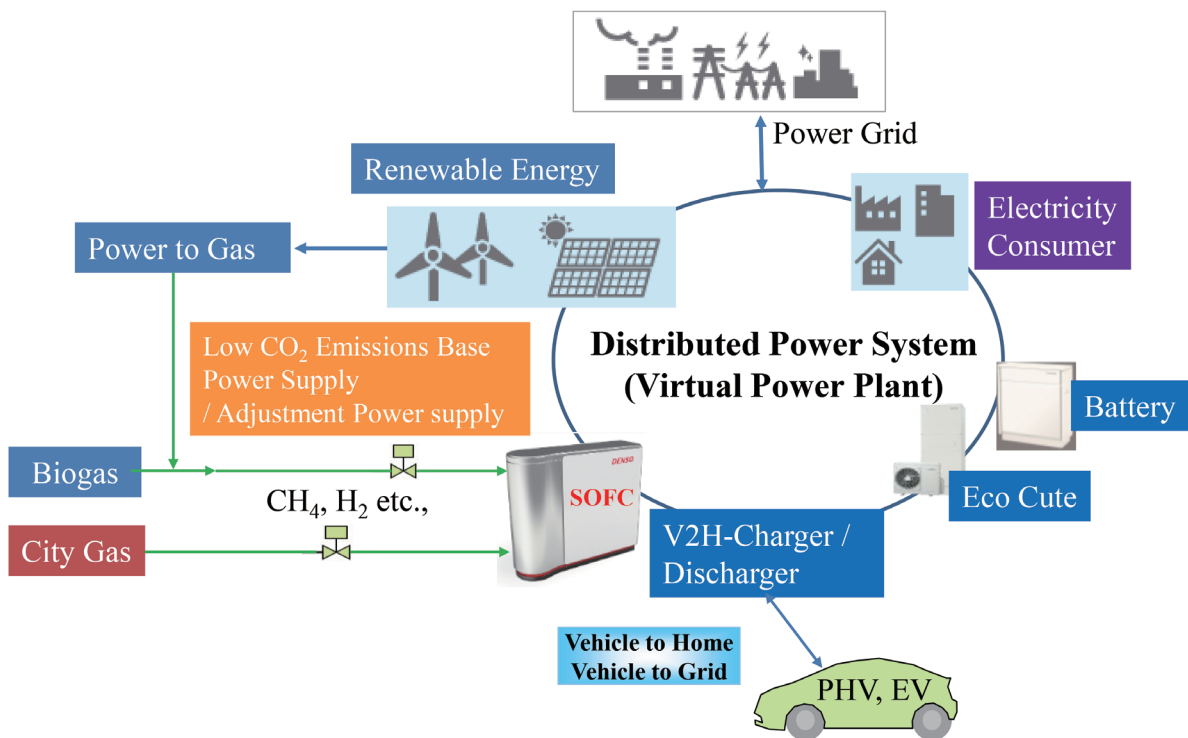


Fig. 6 Future distributed power system using SOFC<sup>5)</sup>

## 著者



長田 康弘

おさだ やすひろ

熱マネシステム開発部  
燃料電池関連の要素技術開発に従事



萩原 康正

はぎわら やすまさ

熱マネシステム開発部 博士(工学)  
燃料電池関連の事業企画に従事



向原 佑輝

むこうばら ゆうき

熱マネシステム開発部  
燃料電池関連のシステム開発に従事