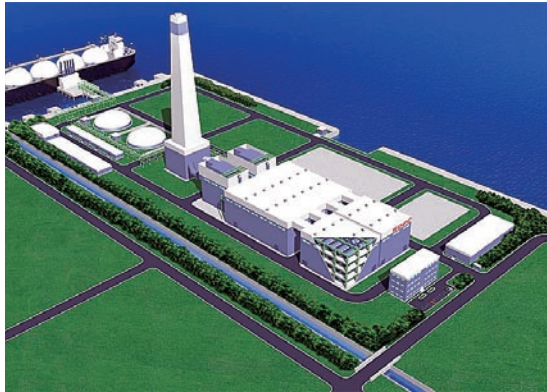


特集論文

# 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

## Development of 200 kW Class SOFC Combined Cycle System and Future View



玄後 義<sup>\*1</sup> Tadashi Gengo      小林 由則<sup>\*2</sup> Yoshinori Kobayashi      安藤 喜昌<sup>\*3</sup> Yoshimasa Ando  
 久留 長生<sup>\*4</sup> Nagao Hisatome      加幡 達雄<sup>\*5</sup> Tatsuo Kabata      小阪 健一郎<sup>\*6</sup> Kenichiro Kosaka

SOFC (固体酸化物形燃料電池: Solid Oxide Fuel Cell) は 900 ~ 1 000 °C の高温で作動する燃料電池である。SOFC は石炭を含む多様な燃料の使用が可能であり、従来の熱機関に比べ、規模にかかわらず単体でも高い発電効率が得られる。高温で作動することからガスタービンとの複合発電が可能であり、当社開発の円筒形 SOFC は構造が堅ろうで、ガスタービンとの複合発電のような動的な変動を伴う系に適しており、天然ガス燃料で 70 % 以上、石炭燃料で 60 % 以上の高効率発電が達成でき、CO<sub>2</sub> 削減の切り札として期待できる。

### 1. 当社の取組み

当社は 1984 年の開発着手以来、電池材料、電池構造、製造技術及び電池モジュールの開発を進めてきた。当社 SOFC の特徴をいかした SOFC とガスタービンの複合発電への第一歩として、2004 年度に(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より“円筒形 SOFC 高効率コンバインドシステムの開発”を受託し、2005 年度までに要素・制御技術の開発・実証を行った。2006 年度から円筒形 SOFC とマイクロガスタービン (MGT) を組み合わせた 200kW 級コンバインドサイクルシステム (図 1) を製作した。

### 2. 複合発電システムの特徴

SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムでは、SOFC はガスタービンの燃焼器の上流に設置される。

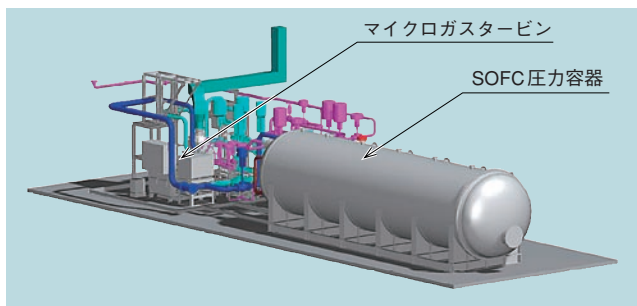


図 1 200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム  
マイクロガスタービンとの組み合わせによる世界最大級の加圧コンバインド発電システム。

燃料は最初に SOFC に投入され、化学エネルギーが直接電力に変換された後、残燃料がガスタービンに送られるため、すべての燃料を発電用に利用することができる。一方、空気はガスタービン圧縮機で昇圧して SOFC に供給され、酸化剤として使用された後、高温排熱とともにガスタービンに送られる。ガスタービンでは高温加圧空気の顕熱・圧力も熱源の一部となって電力に変換され、システム全体では高い発電効率が得られる。

当社円筒形 SOFC では、SOFC モジュール内で排燃料を燃焼させず、排燃料と排空気を別々に取り出すシステム構成としている (図 2)。モジュール内で排燃料の燃焼をさせるシステムに比べ、SOFC モジュー

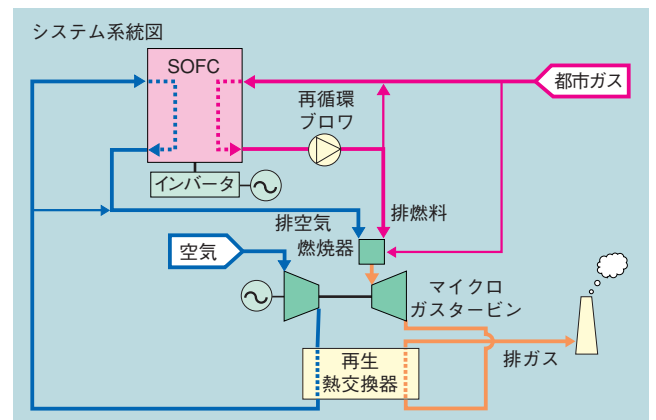


図 2 200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム  
主系統図  
当社円筒形 SOFC システムにおける構成。

<sup>\*1</sup> 原動機事業本部新エネルギー事業推進部長  
<sup>\*2</sup> 原動機事業本部新エネルギー事業推進部技術グループ長  
<sup>\*3</sup> 原動機事業本部新エネルギー事業推進部技術グループ主席

<sup>\*4</sup> 長崎造船所ボイラ技術部燃料電池開発課長  
<sup>\*5</sup> 長崎造船所ボイラ技術部燃料電池開発課主席  
<sup>\*6</sup> 技術本部長崎研究所燃焼・伝熱研究室主席

ル出口での排燃料，排空気の温度は低く，ガスタービン燃焼器で燃焼し，タービン入口温度を上げることで，ガスタービンを高効率・高出力の状態で運転することができる。大容量の複合発電システムでは高温配管が設計上の大きな制約となるため，排燃料と排空気を別々に取り出す方式が有利である。

### 3. 円筒形 SOFC 高効率コンバインドサイクルシステムの開発状況

#### 3. 1 セルチューブの高出力化技術

200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムへの適用に向けてセルチューブの性能向上を目的に，高出力セルチューブ（図 3）を開発した。計画運転電圧（0.65 V / 素子）にて 143 W，最大定格出力 151 W を確認し，熱サイクル試験前後での性能の劣化がないことを確認した（図 4）。

#### 3. 2 低カロリー燃料焼き MGT

SOFC 複合発電用のガスタービンでは，SOFC で化学エネルギーを大部分消費した後の低カロリー燃料（都市ガスの 1/10 以下の発熱量）を安定燃焼させる技術が必要である。当社の産業用ガスタービンで培った高炉ガス等の低カロリーガス燃焼技術を MGT 用燃焼器に適用し，SOFC 複合発電用の低カロリーガス燃焼器を設計・製作した。この燃焼器を MGT に搭載して運転試験を実施し，低カロリーの SOFC 排燃料模擬ガスでも，安定運転ができることを確認した。



図 3 円筒形セルチューブ外観  
直径 28 mm，長さ 1500 mm のセルチューブ。

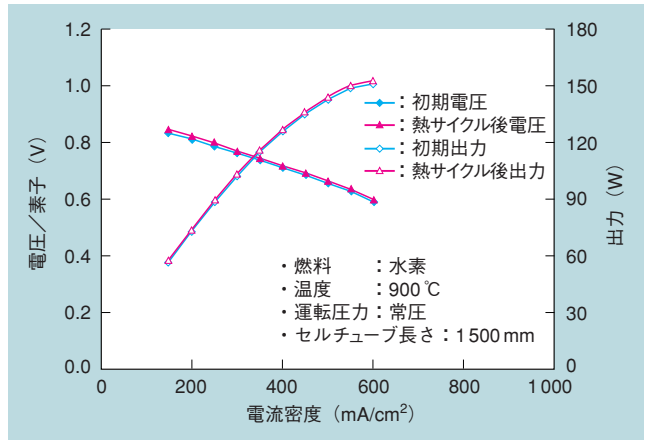


図 4 高出力セルチューブの電流／電圧特性  
高出力セルチューブにて最大定格出力 151 W を確認。

#### 3. 3 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム運転試験

SOFC 単体での 40kW 級モジュール運転試験を行った。その後，運転試験で使用した SOFC40kW 級モジュールと低カロリーガス燃焼器を搭載した MGT を接続し，連携運転検証試験を実施し，国内初となる SOFC- ガスタービン複合発電に成功した。検証運転では，複合発電運転状態にて安定に発電運転ができるこ

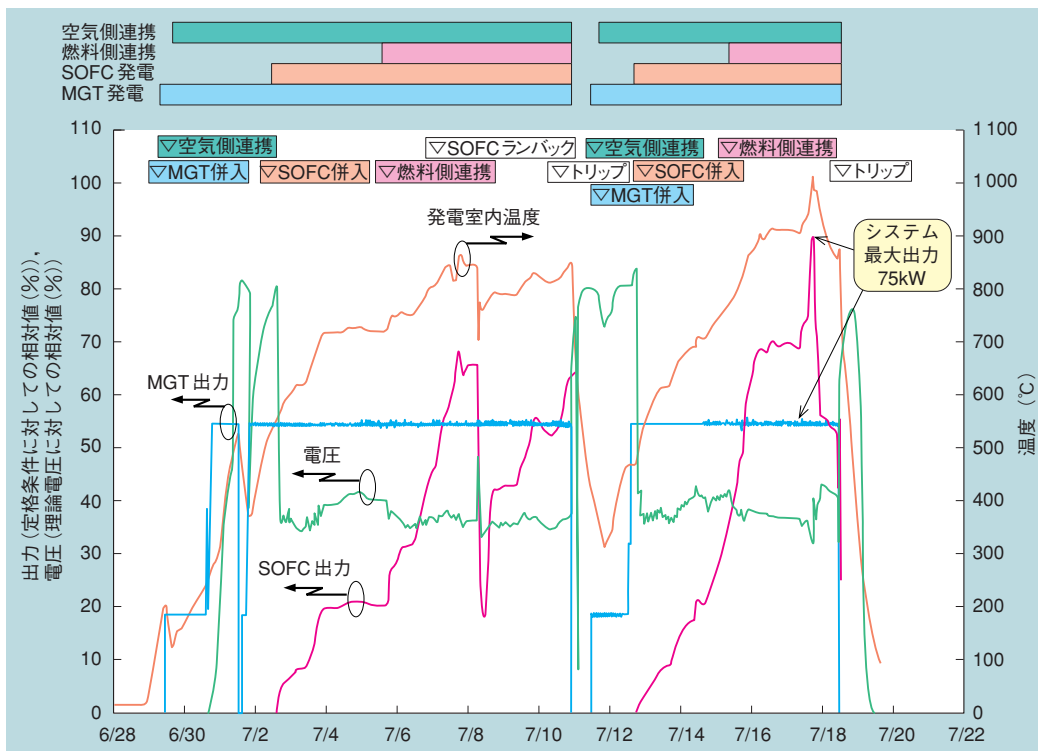


図 5 SOFC-MGT 連携運転検証試験  
複合発電運転状態にて安定に発電運転ができ，最大 75 kW の複合発電出力を確認。

とを確認し、最大 75 kW の複合発電出力を得た (図 5)。

### 3. 4 改良型サブモジュールの開発

カートリッジは、セルチューブを 104 本集合させたもので、燃料及び空気の供給、集電を行う最小単位であり、4 基並べてサブモジュールとし、これを压力容器の中に設置することで、加圧運転に対応しており、压力容器の長手方向に並べていくことにより、容易にユニット容量を増加できるモジュール構成としている (図 6)。

モジュール発電室部温度均一化のための改良設計を実施した。燃料はセルチューブ内側を上から下へ、空気はセルチューブ外側を下から上へ流す構造としている。セルチューブ上部では、高温の排空気と低温の燃料が熱交換を行い、下部では、低温の空気と高温の排燃料が熱交換することで、発電部温度を高く保っている。改良形モジュールでは、上部の断熱を強化し、発電室から外への放散熱量を抑制するとともに、セルチューブ上部の伝熱面積を増やし、熱交換量を増加させ、上方の電池温度を高めた。セルチューブ下部は、発電室外での高温排空気からの熱交換量を増加させ、セルチューブ下部の空気温度を高め、下方の電池温度を高めることにより、発電室内のセルチューブ上下部の温度を高くし、発電室内温度分布均一化を図った。

200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシス

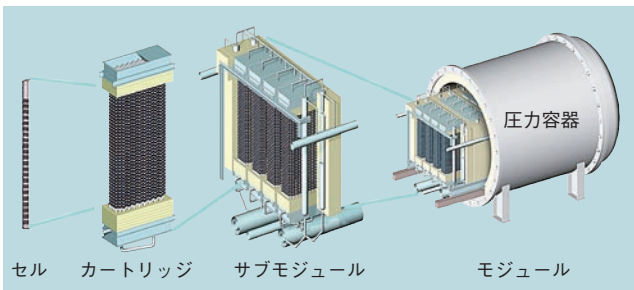


図 6 モジュール構造  
モジュールには信頼性および拡張性に優れたカートリッジ構成を採用。

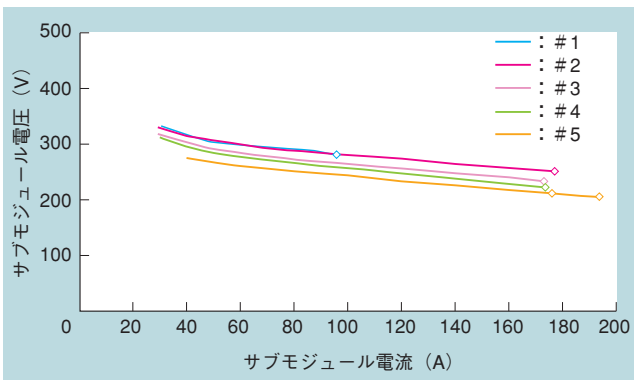


図 7 改良型モジュールの単体性能  
各サブモジュールにて十分な性能を確認。

テムに適用する改良形サブモジュールを製作し、単体性能試験 (図 7) を実施した。各サブモジュールにおいて、発電室内温度分布均一化の効果が見られ、十分な性能を有していることを確認した。

### 3. 5 200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム

これまでの要素開発・制御技術開発・性能計画に基づき、200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム本体 (セルチューブ・カートリッジ・モジュール) 及び周辺機器の設計・製作をし、試運転を行い、性能を確認した (図 8)。

200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムの計画運転点におけるシステム全体の発電効率は 50 % (LHV・送電端) となる。

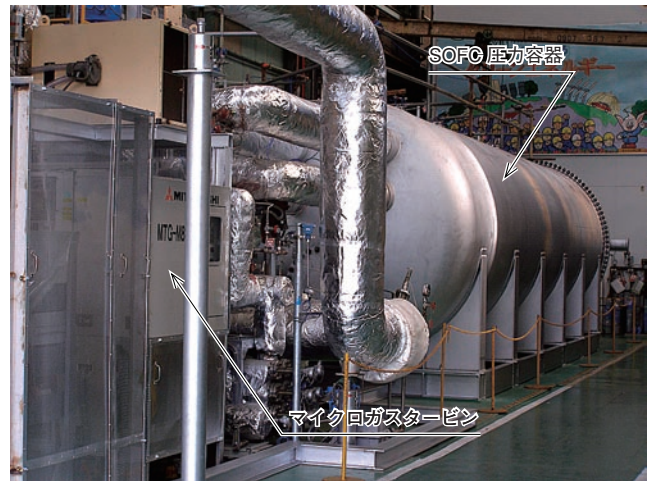


図 8 200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム外観図  
200 kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムを製作。

## 4. 実用化への取組み

将来の大型火力発電所の代替機種として、SOFC の特徴である高効率発電を最大限に引き出せる、大型事業用火力のガスタービン - 蒸気タービン複合発電システムに SOFC を付加した SOFC- ガスタービン - 蒸気タービンコンバインドサイクルシステムこそが、当社がねらう究極の SOFC の製品コンセプトである。天然ガス燃焼数 100 MW 級 SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンコンバインドサイクルシステム (タイトル図) では、発電効率 70 % (LHV・送電端) 以上、さらに石炭を燃料とした数 100 MW 級石炭ガス化炉 (IGCC) + SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンコンバインドサイクルシステムにおいても、発電効率 60 % (LHV・送電端) 以上の高効率発電が達成でき、CO<sub>2</sub> 削減の切り札として期待できる。

天然ガス適用では、数 100 kW ～数 MW の中容量の SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムと、既存のガスタービン複合発電システムの効率向上対策として、上流側に比較的小容量の SOFC を設置した部分トッピングシステムが実用化のはじめの市場ととらえ、今後、信頼性向上と低コスト化へ向けた要素技術開発を継続するとともに、システム化技術を確立させ、製品化に向けて邁進する所存である。

最後に、本技術は委託研究又は、共同研究の中で培われたものであり、この場を借りて委託元、共同研究先に対し謝意を表す。



玄後義



小林由則



安藤喜昌



久留長生



加幡達雄



小阪健一郎