

SOFCトリプルコンバインドサイクルシステムの開発

加幡 達雄

三菱重工業株式会社

〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

Development of SOFC Triple Combined Cycle System

Tatsuo KABATA

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

3-3-1 Minatomirai, Nishi-ku Yokohama 220-8401

Abstract: SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) Triple Combined Cycle System, combined with Gas turbine (GT) and Steam turbine (ST), is an ultimate fossil power generation system with extremely high efficiency. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has been developing SOFC from fundamental to system integration technologies during decades. In 2008, MHI operated the 200kW-class SOFC-Micro Gas Turbine (MGT) combined cycle system, under commission of New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), with the successful result of 52.1%-LHV net power generation efficiency. Now MHI is fabricating improved SOFC-MGT combined cycle system for demonstration, with 250kW-class power output and 55%-LHV power generation efficiency under NEDO project. MHI continues to develop SOFC for practical power systems. Now MHI is ready to proceed toward SOFC-GT-ST Triple Combined Cycle System as a practical fossil power generation system. In this article, MHI's recent development results on development of SOFC and power systems are described.

Keywords: SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), Gas Turbine, Micro Gas Turbine, Combined Cycle System

1. はじめに

SOFC (固体酸化物形燃料電池: Solid Oxide Fuel Cell) は高温作動の燃料電池で、その高温排熱をガスタービン複合発電に活用することにより、効率70%に及ぶ極めて高効率の火力発電システムを構成することができる。三菱重工では1980年代からSOFCの大規模発電システムとしての可能性に注目して、要素・システム両面の開発を進めて来た。2004年度から独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託研究にて、円筒形SOFCとMGT(マイクロガスタービン)の複合発電システムとなる200kW級SOFC-MGTハイブリッドシステムの製作・運転を実施した。更に、NEDO共同研究にて、250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステムの製

作を進めており、2012年度に運転試験を実施する計画である。また、ガスタービンと蒸気タービンを複合したGTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)に更にSOFCを組み合わせたトリプルコンバインドサイクルシステムを目指して、システム開発を進めている。

2. 円筒形SOFCの構成

円筒形SOFCの発電要素であるセルスタックの構造を図1に示す。複合発電システムでは、SOFCはガスタービン燃焼器の上流の高圧部に設置されるため、セラミックス製の堅牢な構造体である円筒形SOFCが適している。構造部材である基体管の外表面に発電反応を行なう電池(燃料極/電解質/空気極の積層体)を形成し、電子導電性

セラミックスのインタコネクタで電池間を直列に接続している。セルスタックを束ねて数kW～数十kWの電気出力とし、支持、燃料・空気供給排出、燃料の改質、電流の取り出しの機能を持たせて、カートリッジを構成している。カートリッジを必要な容量だけまとめて压力容器の中に入れてモジュールを形成している(図2)。このような階層構造を取ることで、広範囲の出力レンジに対応し、またメンテナンスを容易にするよう考慮している。

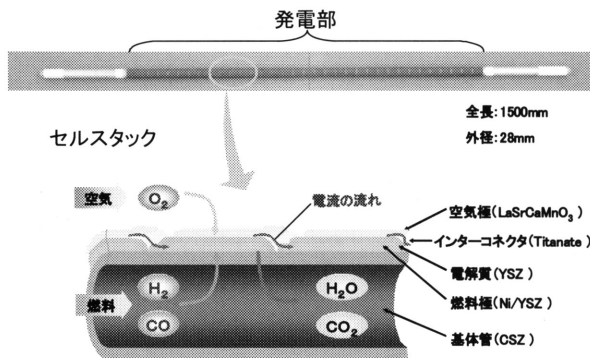


図1. 円筒形セルスタック(L1500mm, φ28mm)

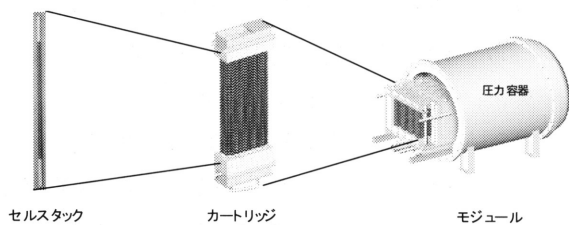


図2. モジュール構造

3. トリプルコンバインドシステムの構成

トリプルコンバインドサイクルの主系統を、図3に示す。SOFCはガスタービン(GT)の燃焼器の上流に設置される。天然ガス等の燃料はまずSOFCに投入され、燃料の化学エネルギーがSOFCで直接電力に変換される。その後、残燃料はGT燃焼器に供給される。一方、空気はGT圧縮機で1~2MPa程度まで昇圧された後でSOFCに供給されて、酸化剤として一部が使用された後、高温排熱とともに再びGTに送られ、空気の持つ顕熱や圧力もエネルギーとして下流のGT側で電力に変換される。更にGT排気を排熱回収ボイラに導いて蒸気を生じ、蒸気タービンで動力に変換する。トリプルコンバインドシステムでは、天然ガスや石炭などの化石燃料の持

つエネルギーを、SOFC、ガスタービン、蒸気タービンの3段階にカスケード利用することにより、極めて高い効率で発電することができる。

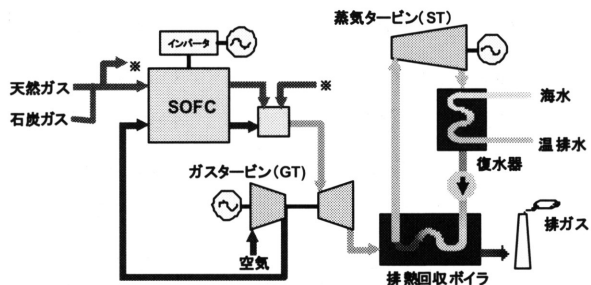


図3. トリプルコンバインドサイクル系統図

4. SOFC-MGT複合発電システムの開発

三菱重工は、2004年度からのNEDO委託研究にて200kW級SOFC-MGTハイブリッドシステムを設計・製作し、2007年に初期性能確認の為に運転試験を実施した(図4)。運転試験では、世界最大級の出力229kW - AC発電端 (SOFC204kW - DC/188kW - AC, MGT41kW - AC)を確認した。また効率確認運転においては、送電端出力204kW - ACの運転点にてクラス最高レベルの52.1%・LHVを確認し、効率についても目標値50%・LHVを上回る性能を確認した(表1)。2009年にはSOFC-MGTハイブリッドシステムにて長時間運転試験を実施した。3224時間の発電運転にてSOFCの経時性能劣化は認められず、またこの間の4回の停止再起動(熱サイクル)でも性能低下は認められなかった(図5)。

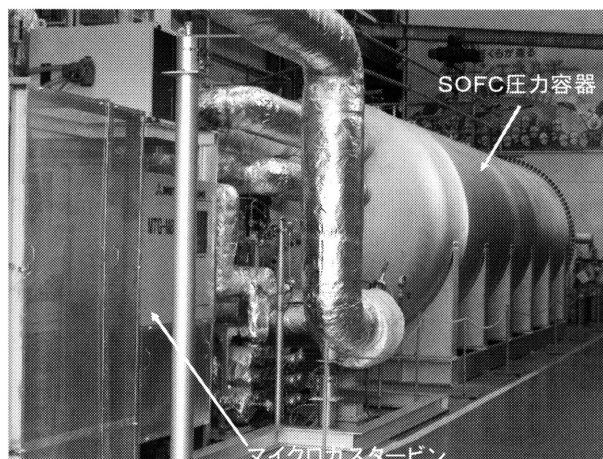


図4. 200kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム

表1. 性能試験結果

項目	結果
SOFC 燃料入熱	339.8 kW-th
MGT 燃料入熱	51.5 kW-th
SOFC 出力 (DC)	186.8 kW-DC
SOFC 出力 (AC)	176.3 kW-AC
MGT 出力 (AC)	34.8 kW-AC
発電端出力	211.1 kW-AC
補機動力	7.1 kW-AC
送電端出力 (LHV)	52.1 %

図5. 長時間運転試験結果

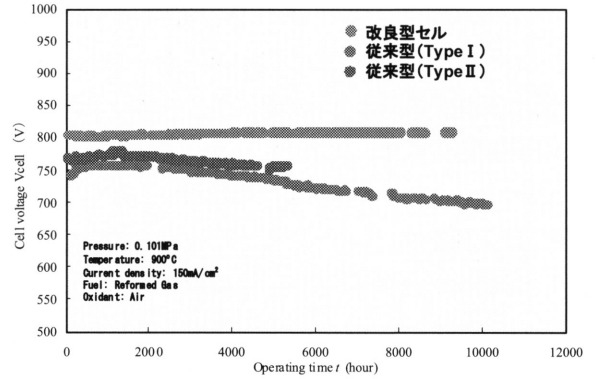
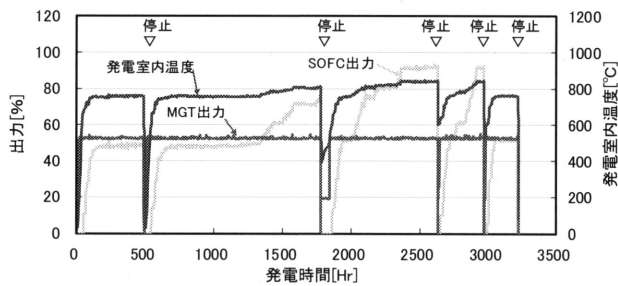


図6. セルスタック耐久性試験

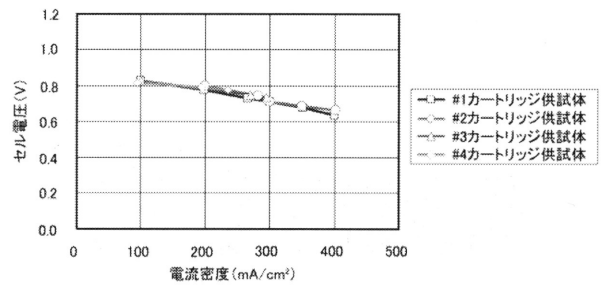


図7. 密充填構造カートリッジ性能

5. 円筒形SOFCの開発改良

2008 年度から、NEDO 開発プロジェクトでセルスタック、モジュール、複合発電システムに対してそれぞれ信頼性向上と高圧運転技術開発・高効率化を進めている。

セルスタックの耐久性向上のため、当社の円筒形セルスタックの経時変化を参加研究機関で分析・考察した結果を反映し、経時変化の主要因であると考えられる空気極中間層部での陽イオン移動の抑制を図ったセルスタックを試作した。

セルスタックの耐久性試験の結果を示す (図 6)。高性能化を達成すると同時に高耐久性も実現しており、約 10,000 時間を経過した時点での劣化率 (電圧低下率) は観測されていない。これは NEDO の最終目標 1,000 時間当たり 0.25%以下を十分に達成している。

モジュールのコンパクト化のため、その構成要素であるカートリッジへのセルスタック装填密度を従来の 1.7 倍に増した密充填構造カートリッジを設計・試作した。試作したカートリッジにて運転試験を実施した。密充填化に伴う発電室内部での発熱密度が増加することに対応して伝熱・冷却設計を行った結果、従来カートリッジと同等の発電特性が得られた (図 7)。

SOFC 複合発電システム全体の信頼性向上のために、MGT は、商用機として実績の豊富なトヨタタービン&システム製のものを使用し、トヨタ自動車株式会社と三菱重工の共同開発にてシステム全体性能・信頼性を高めるように計画を実施した。システムの保護要件 (SOFC 燃料・酸素欠乏状態の回避、MGT 過回転の防止など) を考慮して、SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムの保護ロジックを制作し、起動・定常運転・緊急停止試験を実施した。保護インターロックが正常に動作し、SOFC モジュール・MGT を損傷することなく安全に運転停止可能であることを確認した (図 8)。

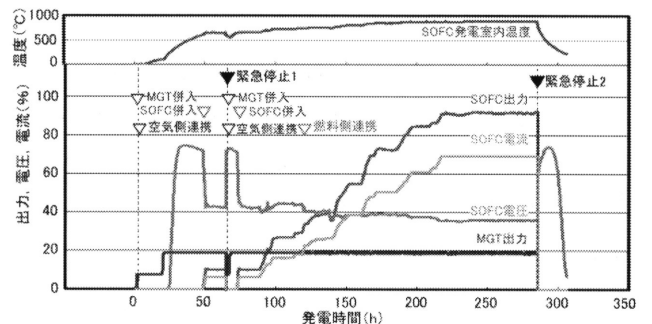


図8. SOFC-MGTハイブリッドシステム試験運転結果

これまでの成果を踏まえ、2011～2012 年度に NEDO プロジェクトで250kW級SOFC-MGT複合発電実証機の製作・実証を行い(図9)、市場投入を行っていく予定である。

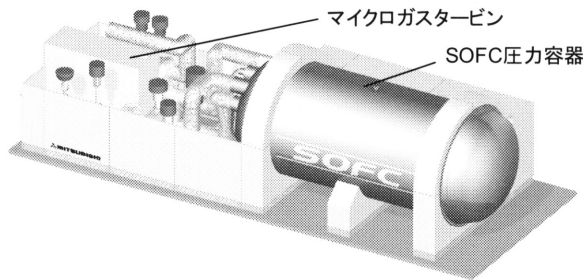


図9. 250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム

6. 実用化に向けて

SOFC 複合発電システムのロードマップを図 10.に示す。分散電源用の 200kW～MW 級の発電設備(コージェネレーションを含む)については、実証に引き続き市場に提供し、ユーザの評価を受けていきたい。

トリプルコンバインドサイクル発電の実用化に向けては、初期の導入期に於いては SOFC の製造設備の量産体制なども考慮して、比較的小容量のトリプルコンバインドサイクルシステムから導入していくこととしたい。

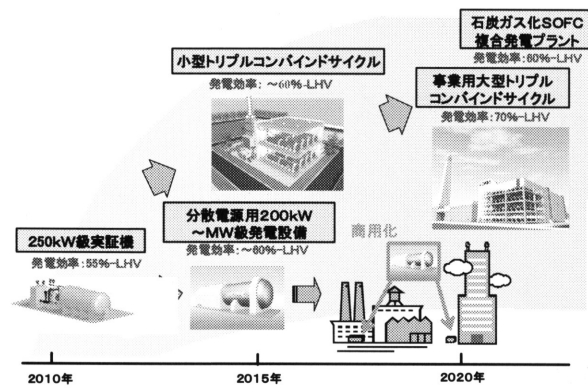


図10. 開発ロードマップ

将来の 1200MW 級トリプルコンバインドサイクルシステムのイメージを図 11.に、系統を図 12.に示す。天然ガスを燃料として SOFC と GT(ガスタービン) と ST(蒸気タービン) のトリプルコンバインド発電による最高効率の発電システムであり、このトリプルコンバインドサイクルシステムこそが、当社が狙う究極の SOFC の製品コンセプトである。

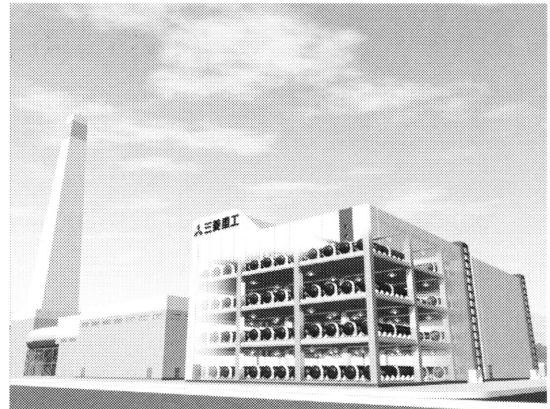


図11. 天然ガス焼き1200MW級

トリプルコンバインドサイクルシステムイメージ図

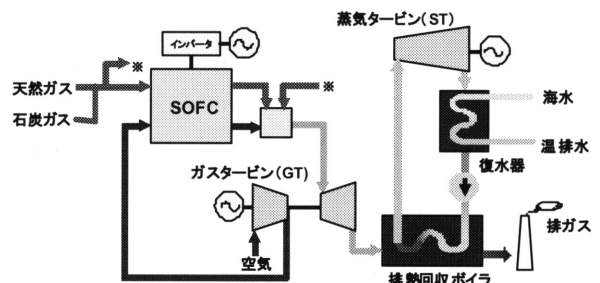


図12. トリプルコンバインドサイクルシステムI系統

天然ガス焼き数百 MW 級トリプルコンバインドサイクルシステムでは、送電端発電効率は 70%・LHV 以上となる。石炭を燃料とした数百 MW 級石炭ガス化コンバインドサイクル(IGCC+SOFC)においても、送電端発電効率が 60%・LHV に及ぶ極めて高い高効率発電が期待できる。

7. おわりに

電力の安定供給と地球温暖化抑制のための CO₂ 排出量削減とを両立させていくために、火力発電などの集中電源により構築された高度な電力網に、再生可能エネルギーなどの新エネルギーを合理的に組合せて行く必要があるが、その中で火力発電の高効率化は重要な位置を占める。また、エネルギー資源の保全のためにも、超高効率火力発電システムの普及による化石燃料の徹底した有効活用が必須かつ急務の課題となっている。三菱重工では、SOFC トリプルコンバインドサイクル発電システムを電力事業における当面の CO₂削減の切札の一つと位置づけ、着実に技術を確立させるとともに早期実用化を進め、21 世紀の安全で持続可能なエネルギー環境社会構築に大きく貢献していきたいと考えている。