

当社は円筒型 SOFC で 1990 年に国産 SOFC としては初めて 1 kW 級モジュールの発電に成功し、1998 年には加圧 10 kW モジュールで連続 7 000 時間発電を達成した。MOLB 型では 2000 年に 200 mm 電池 100 段積層スタック 3 個で発電出力 15 kW、累積発電時間 7 500 時間を達成した。このように当社の SOFC は、発電システムとしての技術検証と商品化に取り組む段階にある。最も商品化に近い MOLB 型は常圧 50 kW 機の開発に取り組んでおり、円筒型は現在加圧 100 kW 機を開発中であるが、引き続き複合発電システムを目指してマイクロガスタービン (MGT) とのハイブリッドシステムを計画中である。

## 1. はじめに

燃料電池は燃焼反応を伴わずに燃料から直接に電気エネルギーを取り出すことができ、化石燃料を燃焼させる従来の発電システムに比べて高効率で環境に優しいため国内外で開発が進められている。その中でも、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は高い発電効率が得られ、作動温度が高く排熱を有効に利用できることから、小規模から大規模容量まで幅広い用途への適用が期待されている。

当社は電源開発 (株) と円筒型 SOFC を 1989 年より共同研究するとともに、中部電力 (株) とは 1990 年から平板型 SOFC (MOLB 型: MONo-Block Layer Built [MOLB]) の共同研究を行っている。また、1992 年からは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から国家プロジェクトである SOFC 開発研究を受託し取り組んでいる。

本報ではこれまでの開発経緯と今後の実用化への取組みについて報告する。

## 2. SOFC 開発のねらい

現在、表 1 に示すとおり各種の燃料電池が開発されているが、SOFC は運転温度が約 1 000 と高いことから排熱の有効利用により高効率の発電システムが可能となる。まず、図 1 に示す SOFC + 排熱回収システムでは熱利用度が高い蒸気が回収でき、都市ガス焼き 50 kW 級システムで送電端発電効率 45 % (LHV 以下同様)、総合効率 80 % が期待できる。図 2 に示す SOFC + ガスタービンシステムでは天然ガス焼き 20 MW 級で送電端発電効率 60 % となり、ボイラ水や冷却水が得にくい内陸部の発電設備として期待できる。さらに、図 3 に示す SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンの複合発電システムでは天然ガス焼き 700 MW 級で送電端発電効率 70 %

表 1 各種燃料電池の基本的特徴比較

燃料電池種類	液体電解質形燃料電池		固体電解質形燃料電池	
	りん酸形燃料電池 (PAFC)	溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)	固体酸化物形燃料電池 (SOFC)	固体高分子形燃料電池 (PEFC)
電解質	りん酸 (液体)	溶融炭酸塩 (液体)	安定化ジルコニア (固体)	高分子膜 (固体)
電解質内電荷担体	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>
作動温度 (°C)	150 ~ 200	600 ~ 650	900 ~ 1 000	20 ~ 100
反応物質	水素	水素, CO	水素, CO	水素
燃料	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油
電極	多孔質カーボン (白金触媒)	多孔質ニッケル等 (白金触媒不要)	酸化ニッケル等 (触媒不要)	多孔質カーボン (白金触媒)
特徴	CO 含有量に制限 白金触媒を使用	CO 含有可 燃料内部改質が可能	CO 含有可 燃料内部改質が可能	CO 含有制限が厳しい 作動温度が低い
主な用途	コージェネレーション 分散電源	コージェネレーション 分散電源 大容量電源 (火力代替)	コージェネレーション (高電/熱比型) 分散電源 (中~大容量) 大容量電源 (火力代替)	コージェネレーション 分散電源 (小~中容量) 可搬用電源

が期待できる。

また、石炭ガス化炉 + SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンの複合発電システムでは送電端発電効率60%が期待できる(図4)。

このようにSOFCは中小容量から火力代替の大容量までの広範囲で、さらに天然ガスから石炭までの多種燃料で高発電効率が期待できることから、当社はSOFC実用化に向けて

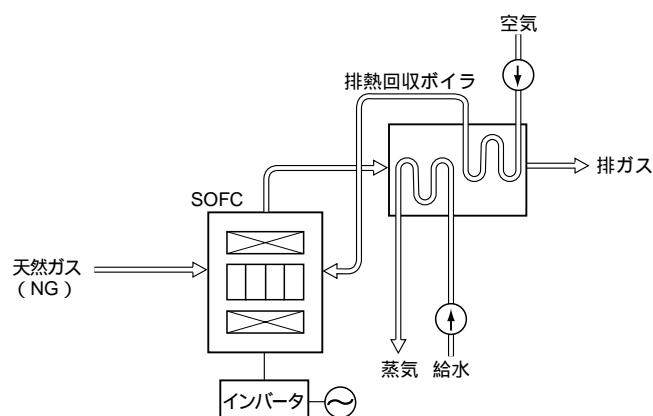


図1 SOFC + 排熱回収システム SOFCと排熱回収のコージェネ用システムを示す。

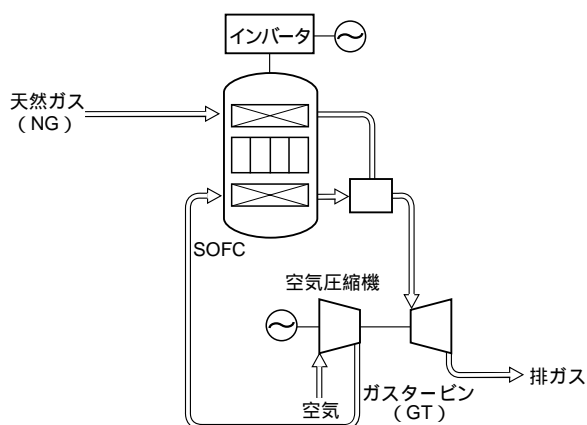


図2 SOFC + ガスタービンシステム SOFCとガスタービンだけのシステムで冷却水が不要な内陸用発電システム。

開発に取り組んでいる。

### 3. 開発状況

#### 3.1 円筒型SOFC

円筒型SOFCは円筒状のセラミック管(基体管)の表面に電池の発電膜である燃料極、電解質及び空気極を積層した構造となっており、この電池を基体管上に導電材のインターコネクタを介して複数個並べた形状となっている(図5, 図6)。電池の製作は押出成型した基体管を乾燥後、電池原料のセラミックスを溶媒に溶かしたスラリーを順次基体管表面に印刷し、基体管とともに1400程度で焼成する。基体管を含めて、電池本体は焼成時に約30%収縮するため、SOFCの開発は材料の高性能化のみならず、膨張率を一致化させるべく、材料、電池構造、製法を最適化する必要がある。

円筒型SOFCは1990年に国産SOFCとしては初めて1kW級モジュールの発電に成功し、1995年に常圧型10kWモジュールで連続5000時間発電運転を達成した。さらにガスタービンとのハイブリッド化に不可欠である加圧化技術開発に取り組み1998年加圧10kWモジュールで連続7000時間発電運転に世界で初めて成功した。

SOFCでは燃料極がメタンガスの改質触媒として機能するニッケルで構成されている。したがって吸熱反応であるメタ

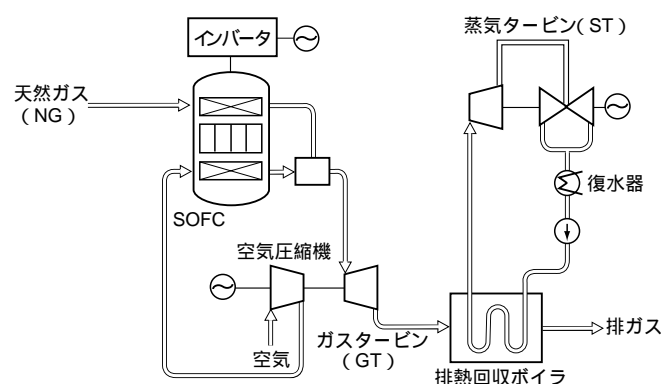


図3 SOFC + ガスタービン + 蒸気タービン複合発電システム ガスタービン複合発電プラントのトッピングにSOFCを設置し、発電効率70% LHVが可能。

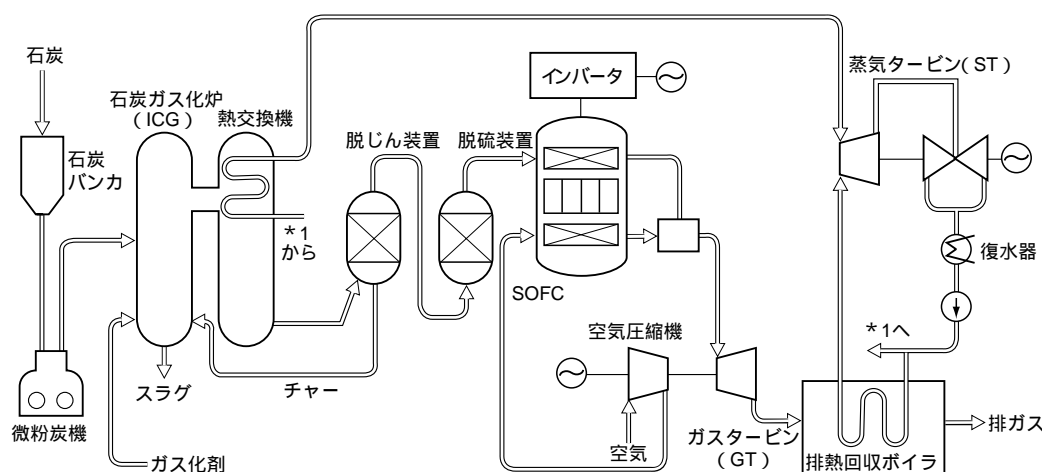


図4 石炭ガス化炉 + SOFC + ガスタービン + 蒸気タービン複合発電システム 石炭焚き発電プラントとして最高の発電効率60% LHVが可能。

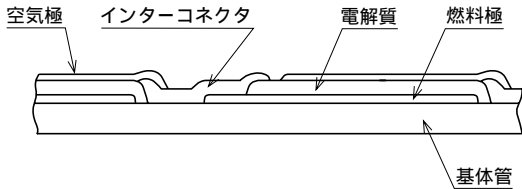


図5 円筒焼結型SOFCセルチューブ構造 円筒焼結型SOFCの断面構造を示す。

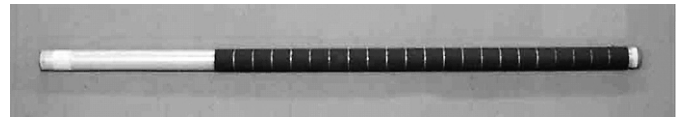


図6 円筒焼結型SOFCセルチューブ外観 円筒焼結型SOFCの外観写真を示す。発電素子(黒色部)を直列に配置している。

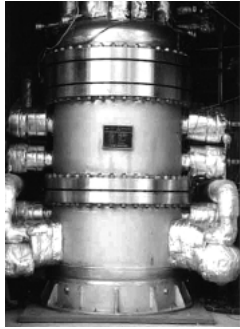


図7 加圧内部改質型10kWモジュール外観

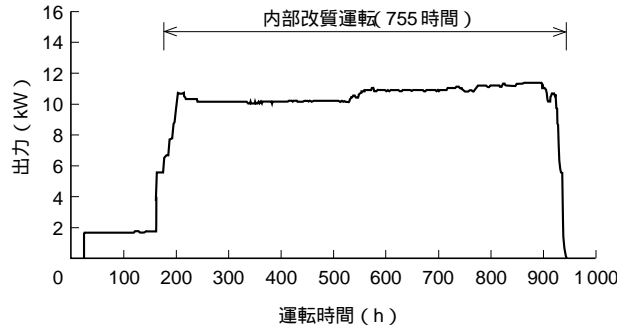


図8 加圧内部改質型10kWモジュール運転結果 内部発熱でメタンを改質しながら連続755時間運転。

表2 加圧内部改質型10kW級モジュール仕様

形 式	円筒形
運転温度 ( )	900
運転圧力 (MPa)	0.39
燃 料	天然ガス
出 力 (kW)	10
発電効率(LHV) (%)	45

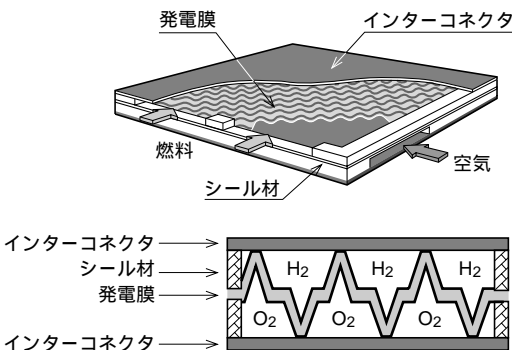


図9 MOLB型SOFC電池構造 MOLB型SOFCの外観及び断面構造を示す。

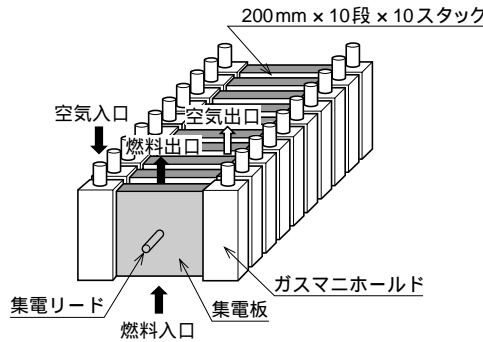


図10 T-MOLB型SOFC構造 MOLB型SOFC 200mm x 10段を10個、トレイン連結方式に配列。

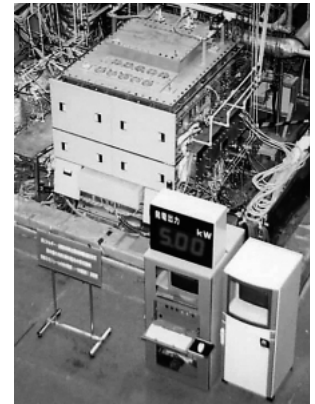


図11 “熱的自立モジュール”外観 数10kW級発電試験装置の外観写真を示す。

ンの改質反応と発熱反応である電池の発電反応が電池部で同時に起こり(内部改質)別置の改質設備が不要となって、システムを大幅に簡素化できるとともに発電効率も向上する。当社では内部改質技術の開発に取り組み2001年に加圧内部改質10kW級モジュール試験を行った。

モジュール仕様、モジュール外観及びモジュール構造をそれぞれ表2、図7に示す。モジュール容器は円筒型形状の圧力容器で、内部構造は燃料供給・排入室、反応室、空気予熱器で構成されている。

図8に電源開発(株)若松総合事業所での加圧内部改質型10kW級モジュールの連続運転結果を示す。モジュール出力10.2kW、システム発電効率45.6%を達成し、連続内部改質発電時間755時間で計画停止した。

### 3.2 MOLB型SOFC

MOLB型SOFCの電池構造を図9に示す。電池は発電膜(燃料極/電解質/空気極)、発電膜を直列に接続するインターコネクタ、電池端部においてガスを封止するシール材により構成される。発電膜は凹凸状に成形した三次元ディンプル

形状を採用し有効発電面積が投影面積の2倍である。また発電膜自体をディンプル構造とすることで、燃料・空気流路の機能も合わせ持たせているためコンパクト性を有する。

MOLB型SOFCは当初ディンプル構造を有せぬ平面の発電膜で構成していた。1992年に150mm電池を40段積層したスタック3個で平板型SOFCとしては世界初の1kW級発電に成功している。その後、電池の大型化、ディンプル構造の開発に着手し、1996年には200mm電池を40段積層したスタック2個で平板型SOFCとしては当時世界最高の5.1kWの発電に成功した。引き続き、大容量化に不可欠な多段積層化を容易にするため、図10に示す連結式電池(T-MOLB型)を開発した。2000年にはT-MOLB型SOFCを100段積層スタック3個で発電出力15kW、累積発電時間7500時間(常圧内部改質発電2473時間を含む)を平板型SOFCとしては世界初で達成した。

2001年度より実用機開発に向けてSOFC国家プロジェクトでNEDOより“10kW級モジュールの開発”を中部電力(株)と共同で受託し、“熱的自立モジュール”の開発を進めている。

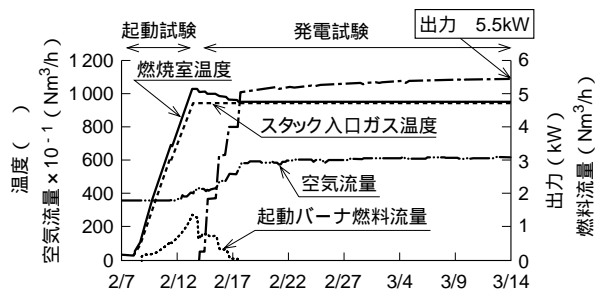


図12 “熱的自立モジュール”試験結果 5 kW級発電試験での自動運転検証の結果を示す。

表3 MOLB型常圧50 kW機仕様

出力 (kW)	50
発電効率 (LHV) (%)	45
総合効率 (LHV) (%)	80
燃料	都市ガス

燃料電池は発電反応時に発熱があり、電池の反応温度を維持するためには冷却する必要があるが、冷却し過ぎると発電反応温度を維持できないため、空気冷却システムの確立が不可欠である。“熱的自立モジュール”とは起動昇温・発電・停止降温の温度制御を含めたモジュール構造の開発である。図11にモジュール外観を示す。モジュールには200mm電池100段を装備し、2002年度に起動昇温・発電・降温自動運転検証を行った。試験結果を図12に示す。2003年度には引き続き新製した10 kW級モジュールにて発電試験を行う予定である。

#### 4. 実用化への取組み

前述のとおり、当社は昨年度までにSOFC電池部の開発、電池を内蔵して発電・集電を行うモジュール構造の開発を進めてきた。今後は、いよいよ発電システムとしての技術検証と商品化に取り組む段階である。最も商品化に近いMOLB型は常圧50 kW機の開発に取り組んでおり、コージェネ機用として来年度には商用初号機を市場投入予定である。表3に50 kW機の仕様を、図13に外観を示す。将来は高効率型として発電効率50%の開発にも取り組む予定である。

一方、円筒型は現在、加圧100 kW機を開発中であるが、引き続き複合発電システムを目指して、マイクロガスタービン(MGT)とのハイブリッドシステムを計画中である。SOFCとMGTをハイブリッド化するためには、図2に示すとおりMGTの空気圧縮機出口の空気をほぼ全量抽気し、SOFCを経由して燃焼器に戻すとともに、燃料としてはSOFCで反応後の低カロリーガスを燃焼させることとなるので既存のMGTはそのまま利用できない。また市販のMGTは構造的にSOFC用への改造が困難である。そこで当社で開発中のMGTとのハイブリッドシステム化を検討中であるが、この場合、400 kW級システムで送電端発電効率57%が期待できる。図14に外観イメージを示す。円筒容器にSOFCを内蔵し、側面にMGTと制御システムを納めたキャ



図13 MOLB型常圧50 kW機外観 MOLB型SOFCの常圧50 kW機の外観を示す。

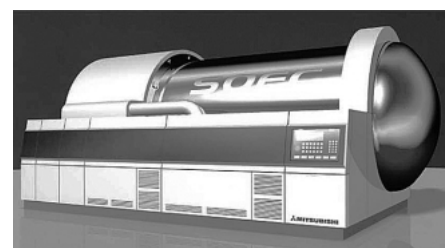


図14 400 kW級SOFC + MGTシステム外観 円筒型SOFCを用いた400 kW級システムの外観を示す。

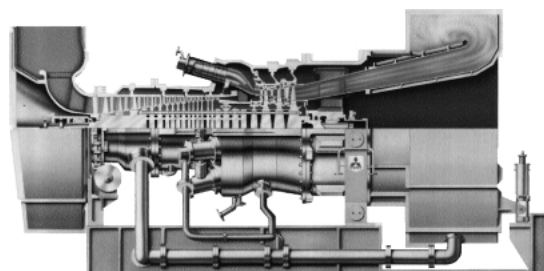


図15 10 MW級ガスタービン(MF-111) 当社の10 MW級ガスタービンMF-111の構造図を示す。

ピネットを配置する。

さらに、2001年度よりSOFC国家プロジェクト“アドバンス円筒型セルの開発”にて電池本体の高出力化に取り組んでいる。電池本体の高出力化が進めば図14のSOFCモジュール1基で1 MW級の出力が可能となる。数十個の1 MWモジュールと当社の10 MW級ガスタービンであるMF-111(図15)とのハイブリッド化で送電端発電効率65%の50 MW発電プラントの実証が可能となる。イメージをタイトル図に示す。SOFCモジュールが建屋内に積層されている。

#### 5. ま と め

SOFCは発電温度が1000℃と高いことから、電池本体の材料、構造、製造方法の改良に時間を費やし、さらに電池のスケールアップ化、モジュール容器の開発と技術課題が積層していたが、ようやく実用化へのめどが付いてきた。今後はシステム化技術の早期確立により実用化に向けてまい進して行く所存である。

終わりに、当社SOFC開発の技術はNEDOのSOFC国家プロジェクト、電源開発(株)、中部電力(株)との共同研究の中で培われたものであり、この場を借りて関係者に謝意を表す。



吉田行男  
原動機事業本部  
エネルギーシステム  
技術部次長



久留長生  
長崎造船所  
火力プラント設計部  
燃料電池開発課長



武信弘一  
神戸造船所  
新製品・宇宙部  
新エネルギー設計課  
主席