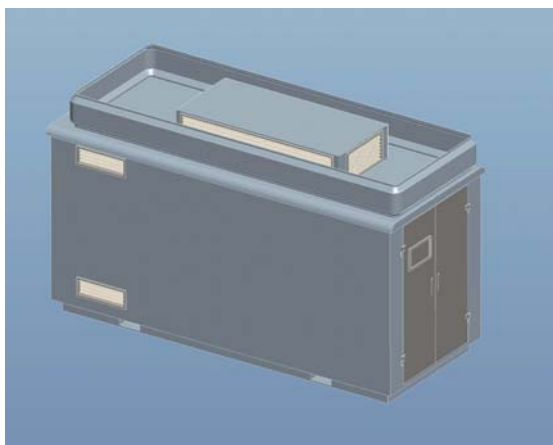


# 固体酸化物形燃料電池による産業用発電装置の開発

## Development of Industrial SOFC Power Generation System



高木 義信	Yoshinobu Takaki	□
酒井 良典	Yoshinori Sakai	□
岡崎 泰英	Yasuhide Okazaki	□
伊妻 恭平	Kyohei Izuma	□
八木 厚太郎	Kotaro Yagi	□
川見 真人	Masato Kawami	□
橋本 大祐	Daisuke Hashimoto	□
若宮 和輝	Kazuki Wakamiya	□

### あ ら ま し

当社では、固体酸化物形燃料電池（SOFC）の非常に高い発電端効率と燃料多様性に着目し、産業用発電装置（20kW級以上）の開発を進めている。既に実用化が進み、信頼性の高い家庭用0.8kW級のセルスタックを導入し、これを複数積載することで大型化開発のスピードアップを図る。従来の熱機関（タービン、エンジン）を上回るAC送電端効率50%以上、耐久性90,000hを開発目標とし、現在は10kW級ベンチ試験により設計データを取得、20kW級の実証機及び商品機の設計を行っている。本稿では、開発概要、10kWベンチ試験状況および今後の展開に関して報告する。

### Abstract

We are developing an industrial power generation system focusing on the high efficiency and fuel diversity of SOFC. We combined multiple small size cell stacks with high reliability for house use (0.8 kW) to accelerate development of the larger system for industrial use (20 kW). Our target is over 50% generating efficiency, which is higher than that of any other previous thermal engine, and 90,000h endurance time. At present we have acquired data through a 10 kW bench-scale test and are carrying out product design of the 20 kW model. In this paper, we report the outline of our development project, the status of the bench test of the 10 kW system, and future plans.

## 1. 緒 言

エネルギー問題、環境保全および電源セキュリティの観点から、高効率分散型発電デバイスとしての燃料電池の需要が高まっている。燃料電池は長年に渡りコアとなる発電セルの開発が行われていたが、近年、家庭用0.8kW級が実用化に至り年間3万台を超える導入実績に至っている。一方で、産業用システムに関しては各社が2017年の実用化を目指して開発を進めている段階であり、来るべき水素社会に対しても非常に期待が高い。

また、当社の事業形態は環境・ごみ処理施設をメインとしており、その中でごみ発電高効率化、ごみ燃料化、熱

分解ガス化、排熱回収といった取り組みが行われている。他にも風力、太陽光といった再生可能エネルギー事業も含めて、既存事業の高度化に対して燃料電池は有効なアイテムとなり得る。

そのような背景の中で、燃料電池の中でも最も発電効率の高いSOFCの開発に着手した。平板型0.8kW級セルスタックを導入し、これを複数積載することで産業用規模への大型化を図るものであり、まずは都市ガス燃料対応の20kW級機の早期実用化を目指して開発を進めている。本稿では第一報として、開発の概要、現状および今後の展開について報告する。

## 2. 燃料電池システムについて

**2.1 燃料電池の特徴** 燃料電池は燃料の持つ化学エネルギーを直接電気に変換することで、エンジン、

タービンといった熱機関と比較して高い発電効率が得られる。また駆動部分が少ないため低騒音、低振動というメリットもある。さらにSOFCに関しては、都市ガス(天然ガス)をはじめアルコールやアンモニアなど改質・分解してH<sub>2</sub>やCOが得られるものであれば燃料となり得る。従って、当社の既存技術であるメタン発酵及び都市ごみのエタノール燃料化といった燃料製造設備や、現在研究を行っているごみの熱分解ガスとの組み合わせによって相乗効果を生み出すことも可能で、社内技術群によるハイブリッドシステムの構築で他社と差別化を図る。

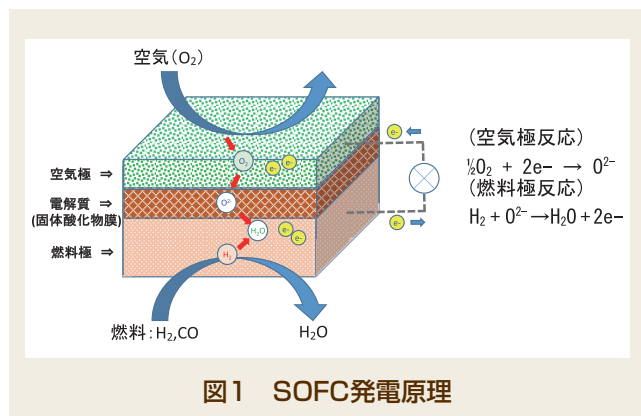
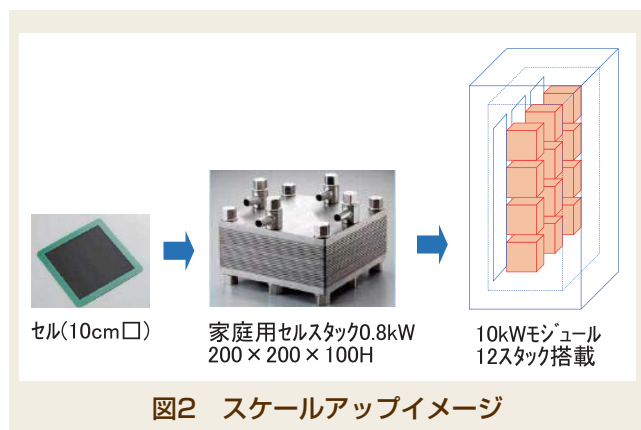


図1にSOFCの原理を示す。固体(セラミック)電解質を介して、燃料極と空気極を積層したセルと呼ばれる発電部位に対して、燃料極側には燃料となるH<sub>2</sub>またはCOを、空気極側には空気を供給する。空気中の酸素が空気極で電子を受け取り、電解質を介して燃料極へ移動し、燃料極でH<sub>2</sub>またはCOと反応してH<sub>2</sub>OまたはCO<sub>2</sub>になる。その際に放出された電子で発電される。

**2.2 Hitz\_SOFCの特徴** 当社では、既に開発が進められている家庭用の0.8kW級セルスタックをスタックメーカーの日本特殊陶業株式会社より導入し、これを複数組上げることで産業用規模へのスケールアップを可能としている。

図2にスケールアップのイメージを示す。

スタック単体での非常に高い発電効率と耐久性を産業用規模で再現することが開発の目標となる。主な技術的な課題は、ガス流量分配、高温下での温度管理、および高温耐性材料・構造の選定など、スタック耐久性への影響となる因子が挙げられる。



### 3. 10kW 級発電試験

これまで、スタック単体の評価、燃料脱硫器および改質器などの補機類の要素試験を実施してきた。そこで得られた知見をベースに、10kW級試験装置を設計製作し、現在データを取得中である。試験の目的は、家庭用スタック積載システムでの安定運転の実現とコンパクト化の検討であり、解決すべき主な課題は下記の通りである。

- プロセスガスの流量分配
- 起動昇温方法の確立
- 発電時の温度管理
- 発電効率、高温部電力損失の改善

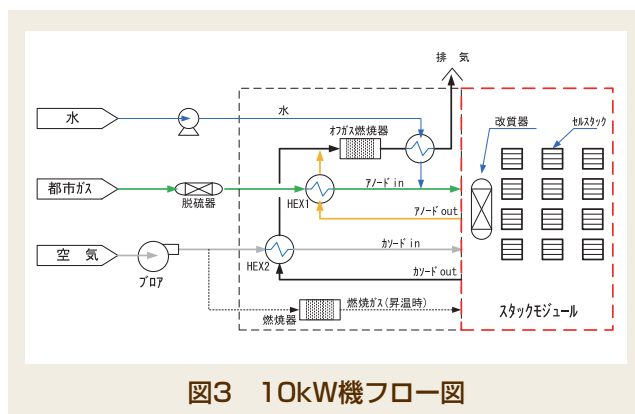
**3.1 装置仕様** 表1に装置仕様をまとめる。家庭用0.8kW級を12基搭載して10kW級とし、複数スタックでの安定運転を目的とした機器構成とした。

表1 10kW級試験装置 設計仕様

項目	設計仕様	備考
出力電圧	AC220V	
発電出力 (スタック端)	10.0kW	
(AC 端)	8.7kW	
スタック搭載数	12基	
スタック間接続	電気: 12直列 ガス: 12並列	
操作温度	~700°C	
燃料ガス	都市ガス 13A	外部改質方式
ガス利用率	燃料 75%/空気 50%	
サイズ (パッケージ全体)	12ft コンテナ 2150×3500×2800	

**3.2 プロセスフロー** 図3に当該装置のフロー図を示す。主要機器としてセルスタックのほか、都市ガス脱硫器、改質器、ガス予熱(排熱回収)用熱交換器、気化器および変換器等の電気機器で構成される。スタックモジュールのコンパクト化を目的とした装置改造での利便性を考慮し、2分割可能な断熱構造とした。高温部となるスタックおよび改質器を第1断熱箱に収納し、その他熱交換器等の補機類は別途第2断熱箱に収納することとした。

燃料となる都市ガスは第2断熱箱内の予熱器で昇温(排ガス熱回収)した後、気化器より供給される水蒸気と混合し外部改質器へ送られる。空気も同様に予熱器を介してセルスタック空気極側へ供給される。燃料ガス、



空気共に12スタックに並列で供給し、一方で電気的には12スタックを直列で接続する。

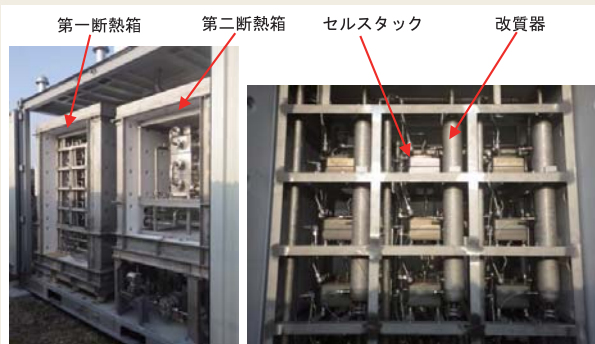
図4に装置外観写真、図5に装置内機器写真を示す。装置サイズは3440W×2100L×2350Hで、12ftコンテナに収納されている。

セルスタックは第1断熱箱内に3列4段の配置で収納する。まずは第1断熱箱内の温度管理を容易にするために、各スタック間の距離を200～300mmと広く設定し、スタック積載による熱籠り等の影響を取り除いた。

実証機以降では、分割されている断熱箱を一体化し温度管理方法を確立した上で、限界までスタック間距離を縮めコンパクト化を図る。



図4 装置外観写真



(a)全体 (b)スタックモジュール内部

図5 装置内機器写真

### 3.3 プロセスガス流量分配

前述の通り、プロセスガスは燃料、空気共に全スタックに対して並列に供給する(図6参照)。ガスの利用率はそれぞれ燃料75%/空気50%と設定しているが、偏流が生じると発電効率に影響するだけでなく、セル耐久性にも悪影響をおよぼすため、初期の目標値を±3%と設定した。

図7に本システムでの各スタックの流量分配結果を示す。実際の流体条件(温度、組成)での測定は困難であるため、常温のN<sub>2</sub>および空気での体積流量を合わせる条件で評価を行ったが、いずれも目標値以内に納まることが確認できた。スタック圧力損失バラツキ次第では、流量分布が大きく乱れる可能性があるため、今後はスタックサンプル数を増やし、必要に応じてオリフィスを設置するなど、流量を均一化することも検討していく。

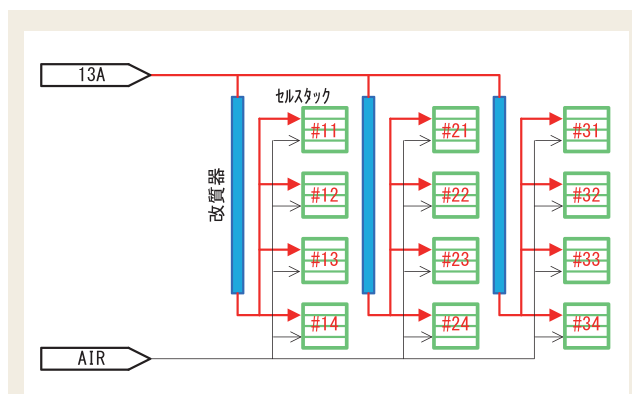


図6 プロセスガス分配フロー

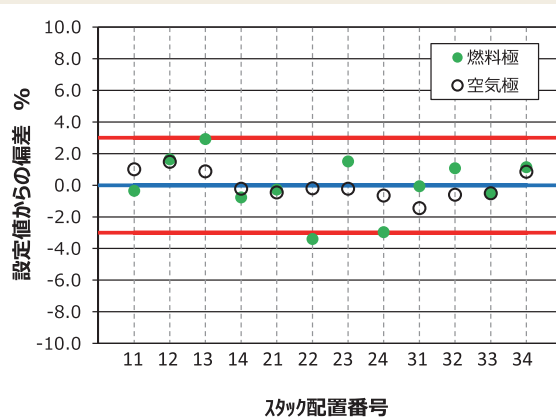


図7 12スタック 流量分配

## 3.4 発電試験結果

### 3.4.1 起動昇温

本装置における起動昇温用の熱源は都市ガス触媒燃焼(Pd系)を採用した。燃焼ガスを断熱モジュール内(スタック外部)に吹き込むことで加熱する。スタック単体での昇温速度は熱衝撃によるセル破損を避けるべく4°C/min以下と設定されているが、本開発におけるスケールアップシステムにおいては、安全を見て2°C/min以下に設定した。当社採用のセルスタックは、低温作動タイプ(～700°C)でもあるため、他社システムよりも短時間での起動、具体的には昇温⇒起動発電⇒定格発電までで6時間以内を目指す。

起動昇温データの一例を図8に示す。発電開始可能な温度に到達するまで約16時間を要したが、一連の操作(昇温⇒水供給⇒燃料供給(改質)⇒発電)を問題なく行えることを確認できた。今後、放熱量の低減、燃焼ガスの熱回収効率向上により昇温時間の低減を図る。

また現状運転においては熱衝撃によるスタックへのダメージを避けるため、昇温初期の燃焼負荷を50%以下に抑え、スタック表面ならびに断熱モジュール内雰囲気温度に過度の傾斜が生じないように、1.0°C/minを下回る緩やかな昇温を行った。燃焼ガス吹き込み方法の改善を検討するとともに、これまでの家庭用スタックの実績から昇温状況とスタック耐久性との因果関係を精査し、温度傾斜・昇温速度の許容値を設定していく。



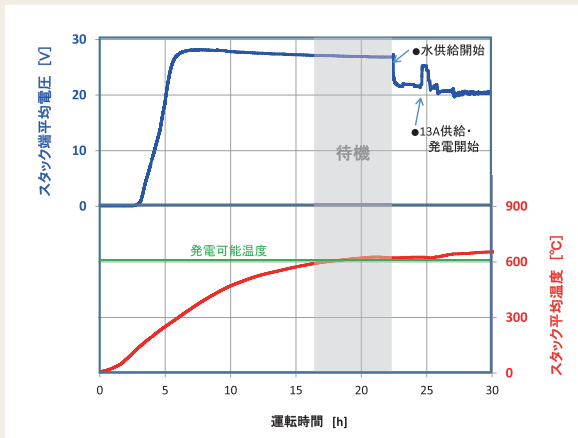


図8 起動昇温運転データ

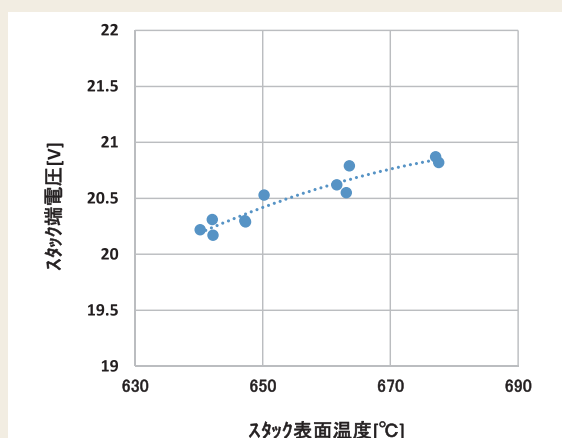


図10 スタック温度と電圧値の関係

3.4.2 セルスタック性能<sup>1) 2)</sup> セルスタック単体でのスタックI-V特性と12スタック直列におけるI-V特性とを比較することで、本装置のシステムとしての妥当性を確認する。

図9にI-V特性の比較を示す。OCVおよび定格電流(42A)引出し時における電圧値は、ほぼ同じ値が得られたことから、本装置がシステムとして正常な発電機能を有することを確認した。

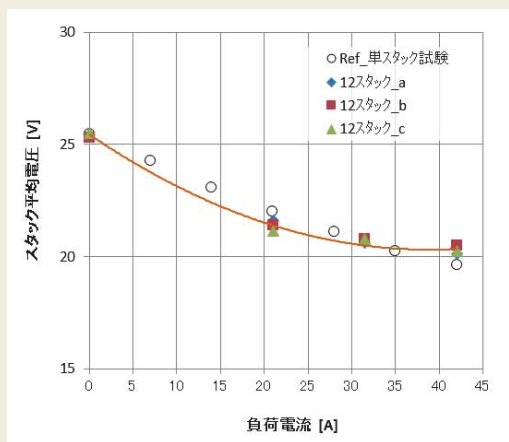


図9 I-V特性比較

次に図10にスタック表面温度と電圧出力の関係を示す。スタックモジュール内(第一断熱箱)に複数スタックを配置する場合、熱管理状況によりスタック毎に温度差が生じる。700℃未満の温度範囲において、40℃の温度差が生じた場合、電圧値としては3%程度の差が生じる。スタック温度が高いと流体の圧力損失が増加するため、12スタックにおける流量分配は温度が高いスタック程流量が少なくなる。燃料および空気の利用率の観点からは電圧値が低下する方向となるが、当該温度範囲においては、温度上昇に伴う電池内部抵抗の低下の影響が大きく、電圧値は上昇する結果となった。3.3項の流量分配同様に、発電効率向上のためスタック温度の均一化を検討していく。

3.4.3 スタック温度管理 前述の通り、発電出力向上に対してスタック温度管理が非常に重要であるとともに、耐久性の面でも厳密な管理が必要となる。

発熱反応を伴うスタックを積載するため、適正な除熱を行わないと、スタックモジュール内の上部、中央部に位置するスタックが異常高温になる可能性がある。コンパクト化を考慮しスタック間距離を小さくしていくと、一層そのリスクは増す。

当社のシステムにおいては、スタックにおける発熱を吸熱反応を伴う改質器で回収する構成としている。改質器の構造、スタック他モジュール内の構造物のレイアウトおよびプロセスガスの供給条件など、熱解析ソフトFluent(ver.14.5)を用いて最適化の検討を行い、実証機および商品機の設計にフィードバックする。熱解析結果に関しては、第二報にて紹介したい。

3.4.4 電気抵抗損失の調査 ここまで、スタックそのものの性能(発電端)とプロセスの健全性について述べてきた。次に、現状の変換ロスおよび送電抵抗について述べる。

現状の10kW級試験装置における状況を表2にまとめる。各スタック間を接続している導線(Ni)および昇圧器までの導線(Ni)における抵抗ロスが大きい状況にある。

表2 各測定部位での出力推移

測定箇所	出力(kW)	低下要因
各スタック端出力積算(DC)	10.33	
↓	↓	・・・スタック間導線抵抗
12スタック直列端出力(DC)	9.7	
↓	↓	・・・送電抵抗、昇圧ロス
パワコン入(DC)	8.9	
↓	↓	・・・パワコン効率(95%)
パワコン出(AC)	8.4	

スタック積載する構造においては、700℃環境下に曝される電気配線および接続端子が多いことから、様々な損失因子が考えられる。現在、損失原因を特定および改善に向け下記のような検討を実施中である。これについても検討結果については第二報にて紹介したい。

- 導線 (Ni) の高温下曝し試験
- 接続端子による損失調査
- スタック電極、端子および導線構造の見直し
- 導体および端子の試作、効果の確認

## 4. 市場性と商品機仕様

**4.1 市場性** 当社の捉えるSOFC市場としては、下記への適用を想定している。

- 都市ガス燃料 分散型発電 (ガスエンジン代替)
- バイオ燃料 (エタノール・メタン) 利活用
- 熱分解ガス化利活用
- 水素社会への貢献 (風力・太陽光出力平準化)

中でも、都市ガス燃料市場に関しては、技術的難易度が低いこと、市場規模が大きいことから有望と言える。コージェネ更新市場のほか、ガスエンジンを適用し難い低熱電比ユーザー向けに大きな市場が見込める。具体的には、各種工場、病院、学校、および食品スーパーやコンビニなど、契約電力500kW未満の業務用または高圧電力契約者が対象と考える。一方で、事業採算性を考慮するとバイオ燃料等への適用が有効で、FITの活用やプラントミックスのエネルギー効率向上など大きな効果が見込まれる。

**4.2 商品機の仕様** 市場性を反映した上で、実用化初期の商品機仕様を決定した。(表3参照)

**表3 商品機仕様:20kW級**

■AC 送電端出力	18kW
■AC 端効率(都市ガス LHV)	50%以上
■出力電圧	AC200/220、AC400/440V
■ガス利用率	燃料 75/空気 50%
■排熱利用	温水ボイラ(オプション)

まずは20kW級を標準とし、冗長性も考慮して複数台設置することで、数百kW級の案件にも対応する。

## 5. 結 言

本稿では、当社における産業用SOFCの開発に関して、第一報として開発の概要、現状および今後の展開について紹介した。家庭用セルスタック(0.8kW級)を複数積載して産業用規模の発電装置を実用化すべく、まずは12スタック10kW級での発電に成功、商品化に向けての課

題を抽出し、実証機及び商品機の設計を行った。今後はスタック性能(発電出力、耐久性)に影響する因子を除外していくとともに、熱解析を踏まえながらスタックモジュールのコンパクト化を図っていく。

燃料電池は、水素社会のキーテクノロジーとしての期待が大きく、国主導で多くの開発が行われている。またバイオ燃料利用など、様々な技術との組合せで産業全体の発展への貢献も期待できる。まずは20kW級以上のSOFCシステムとして早期の市場参入を果たし、当社の目指す「繋ぐイノベーション」で燃料製造から発電、排ガス処理まで一貫した設備と、ICT・ビッグデータを活用した運営、保守体制を構築し、世界が抱えるエネルギー問題、環境問題に貢献していく所存である。

## 6. 謝 辞

本開発は、日本特殊陶業株式会社との共同開発による成果を含みます。また、平成26年度よりNEDO助成事業「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発」に採択され、補助金を利用して実施した成果を含みます。ここに記し、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本特殊陶業株式会社, 特許第5431600号, 燃料電池.
- 2) 日本特殊陶業株式会社, 特許国際公開番号WO 2014/156314 A1, 燃料電池.

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 環境事業本部  
開発センター SOFCプロジェクトグループ  
高木義信  
Tel : 06-6551-9212 Fax : 06-6551-9906  
e-mail:takaki@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Environment Headquarters  
Business & Product Development Center  
SOFC Project Group  
Yoshinobu Takaki  
Tel : +81-6-6551-9212 Fax : +81-6-6551-9906  
e-mail : takaki@hitachizosen.co.jp



高木 義信



酒井 良典



岡崎 泰英



伊妻 恭平



八木 厚太郎



川見 真人



橋本 大祐



若宮 和輝