

家庭用・小型SOFCシステムの現状と展望

大阪ガス (株) 家庭用コージェネレーションシステム開発部 鈴木 稔

燃料電池はクリーンな発電技術として、コージェネレーションや大型発電、さらには自動車用として開発が進められている。そのうち、セラミックスを電解質とする固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) システムは、2010年に米国で業務用100kW機で商用利用が開始し、日本では家庭用コージェネ機として商品化開始の段階にある。

1. SOFCの高発電効率と小容量機の開発背景

近年、天然ガスはシェールガス革命によって大幅に埋蔵量が増え、環境性と長期的な供給安定性も兼ね備えたエネルギー源として重要性が高まっている。SOFC技術が実用化され今後も継続して発電効率が改良されることが期待される。図1には天然ガスを燃料とする燃料電池システムの送電端発電効率を示す。右上の白抜きは構想段階であるが、それ以外は商用機 (●)、実証機 (■) の実績である。また、従来技術として各容量の高発電効率タイプのカスタムエンジンの効率も示した。

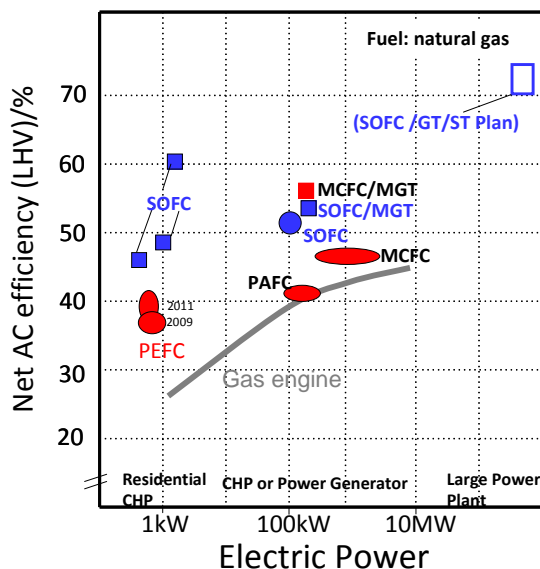


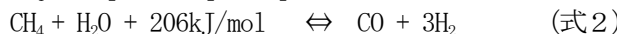
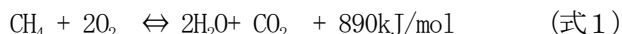
図1 燃料電池システムの発電効率

●: 商用機、■: 実証機実績、白抜き: 構想

現時点では1kW級前後のSOFCシステムで特に従来技術 (主にガスエンジン) に対して、高い発電効率が得られている。

SOFCの高発電効率の理由は主に2つある。ひとつは、炭化水素の改質反応の活用であり、もうひとつは、高温排熱によるガスタービン等とのハイブリッド発電である。2つとも高温作動であることに基づいているが、前者は小容量であっても大容量と同等の発電効率向上の効果を得ることができる。ガスタービン等とのハイ

ブリッド化は小型SOFCシステムには基本的に適用されない。式1はメタンの燃焼反応、式2はメタンの水蒸気改質反応である。式2はメタンと水蒸気と熱により水素と一酸化炭素を生成させている。



天然ガスの主成分であるメタンの場合、式2の反応を進行させるためには600°C~700°C程度の熱が必要であるが、高温作動のSOFCシステムでは、式2の206kJ/molの吸熱に燃料電池反応の排熱を用いることができる。自らの排熱を用いて燃料ガスが持つ熱量を約1.2倍に増熱して、燃料電池反応による発電が行える。したがって、これができない低温タイプの燃料電池と比較すると、燃料電池自体の変換効率が同等の50%であったとしても、SOFCの方が10ポイント高発電効率になる。なお、実際のシステムではセルスタックの燃料電池反応に伴う発熱と残余燃料の燃焼熱の両方を利用することが一般的となっており、残余燃料の燃焼熱をできるだけ抑制し高い割合を燃料電池反応で利用すると、より高発電効率になる。

2000年以降、1kWから10kWクラスで固体酸化物形燃料電池の高効率実証の成果が複数の国内開発機関から相次ぎ発表され、俄然、小容量での実用化が有望となってきた。セラミックスは寸法が小さいほど熱衝撃に対して強くなる特性を有していることも、小型SOFCシステムの開発が進化した技術的背景となるであろう。SOFCスタックはセラミックス製のセルの集合体であり、信頼性確保 (=割れないようにすること) は第一に優先される。セルスタックがタフであれば、温度分布・温度変化速度の制約が少なくなる。制約が少なければ、発熱、吸熱部を複合化するなどコンパクトな構成にもしやすく、その結果としてSOFCスタックを格納する高温部からの放熱を抑制でき、小容量でも高発電効率を実現しやすくなる。また、大きな温度変化速度に対応できれば、起動停止・負荷変動への対応にも有利であることはいうまでもない。さらに、1~10kW級では、開発サイクル (試作、評価) が中大容量システムに比べ短いが、これも小型SOFCの開発進展の理由となっている。

2. 家庭用SOFCコージェネシステムの開発・実証

環境省によれば2007年度の家庭部門のCO2排出量は基準年(1990年)と比べると41.1% (5,240万t-CO2)の大幅な増加であった。様々な側面からの一層の対策が必要となっている。住宅には温水需要があるため、発電時の熱の有効利用を行うコージェネレーションによる

高効率化にはとても適しており、家庭用コージェネレーションの導入は家庭での省エネルギーを達成する方法のひとつとなっている。大阪ガスではメーカーと共同開発を行い、2003年にガスエンジン方式の“EcoWill1”を販売開始し累計7万台を販売している。さらに2009年には固体高分子形燃料電池(PEFC)方式の”ENE・FARM”を登場させている。

固体酸化物形燃料電池(SOFC)に関しては、2004年度に京セラと共同開発を開始し、2005年11月に発電出力1kWのSOFCシステムにより、国内初となる実居住住宅での運用試験を行い、発電効率49%(AC送電端、LHV)の高発電効率と、家庭のような負荷変動の大きい電力負荷に追従する条件で高発電効率の運用ができることを示した。SOFCは高発電効率とされていたが、システムの実際の運用で既存技術を明確に上回る発電効率を実証したことは、小型～大型を問わずSOFCシステムとして最初の事例ともされる⁽¹⁾。セルは円筒平板型構造とすることにより、信頼性に優れた円筒型セルの長所を活かしつつ、平板型セルと同様に電流経路が短い構造とし、信頼性とコンパクト性を両立している^(2,3)。図2は定置用の小型SOFCシステムの一般的な構成である。断熱材で囲んだ高温室にSOFCスタック、改質器、水蒸気発生器が収められ、SOFCのカソード側に供給する空気と排気との熱交換器が備わる。SOFC発電と残余燃料の燃焼が発熱であり、改質器と水蒸気発生器が吸熱である。なお、カソード空気が冷却も担っている。SOFCの高温室は500℃以上であるので、外部への放散を抑制しなければならない。幾何的には小容量ほど出力あたりの外側表面積が大きくなるわけであるが、SOFCスタックと改質器などを高温室に近接させて配置することなどにより、放熱量を抑制している。

家庭用SOFCコージェネレーションシステムは発電効率が高く、熱電比が小さいことから、商品化、開発が先行していたガスエンジンタイプ、PEFCタイプと比較して熱需要が小さい住宅(都市型の小規模戸建住宅や集合住宅が含まれる)にも適した仕様になりうるのが魅力であった。そこで、2006年度には、定格発電出力を従来の1kWから700Wへと変更するとともに内部構造を見直し小型化開発を進めた。

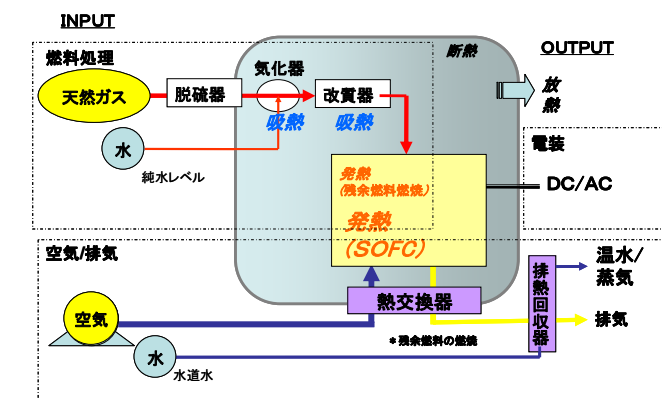


図2 定置用の小型SOFCシステムの一般的な構成

2007年9月からはNEDO、NEFによる固体酸化物形燃料電池実証研究に参画し、大阪ガス管内の戸建住宅、集合住宅にSOFCを設置し、省エネルギー性、長期信頼性の検証を行なっている。2009年度からのトヨタ自動車、アイシン精機、京セラ、大阪ガス4社共同開発体制でのSOFCシステムも含め、2007年度～2010年度までの事業期間中に合計121台を設置した。(なお、大阪ガスとしてはナリツ/TOTO製の2台も実証研究にて設置試験を実施しており、総計は123台である。⁽⁴⁾)

表1に発電ユニットの2011年度の仕様を示す。2011年度は全41台が定格発電効率45%をクリアしている。

なお、SOFC実証研究事業で取得されたデータなど詳細に関しては、新エネルギー財団(NEF)のホームページ内(<http://sofc.nef.or.jp/>)にて容易に入手可能であるので、記載は省略する。

表1 2011年度 発電ユニット仕様

メーカー	トヨタ自動車・アイシン精機	
外形寸法	935mm x 600mm x 335mm	
重量+	91kg	
発電出力	定格	700W
	最小	0W
発電効率	定格	45%LHV以上
排熱回収率	定格	40%LHV以上

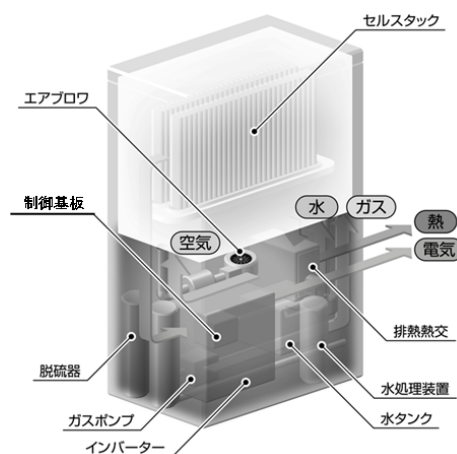


図3 家庭用SOFC発電ユニット透視図。

課題は耐久性とコストダウンである。家庭用コージェネレーションシステムとしては10年寿命が必要である。SOFCは基本的に連続運転であるので、発電時間として10年間で9万時間近くになる。

「電子、イオン、気体、機能性固体で立体的に結合されている超複雑系であり、電気化学現象そのものが複雑であるばかりでなく、その性能の時間変化すなわち

劣化もその様相は千変万化である。⁽⁵⁾」と表現されるほど、SOFCの耐久性を確立する上で考慮すべき点は多い。しかし、多くの要素試験、長期耐久試験（スタック、システムの実証試験）とその解析を経て、劣化の支配因子に関する知見が高まり、寿命を目標レベルまで設計できる段階になってきた。



図4 大阪ガスにおけるスタック耐久評価設備

3. 国内のSOFC開発状況

2010年度に終了したNEDO、NEFによる固体酸化物形燃料電池実証研究ではTOTO、日本特殊陶業が独自のスタックでシステム化し（TOTOのシステムはナリツと共同）、住宅に設置している。TOTOはイオン導電性の高いLSGM電解質薄膜を用いた円筒状のセルを、日本特殊陶業は高出力密度が特徴の平板状のスタックである。また、日本ガイシ、村田製作所も独自のスタックを開発中である。日本で最も早くからSOFCに着手した三菱重工業は200kW級で加圧SOFC/GT複合システムの技術実証に成功しており、2020年頃に事業用発電規模でのSOFC-ガスタービン-steamタービントリプルコンバインドシステムの実現を掲げている。構成にもよるが発電効率70%（LHV）に到達しうるシステムである。大型化までのステップで、発電効率55%超の数百kW機を実用機として展開する構想も示されている。

4. 海外のSOFC開発状況

【家庭用SOFC】我々を含めて国内の家庭用SOFCコージェネ開発は、先行していたPEFCと同様の運用でより高発電効率にすることを目標仕様に設定し、信頼性・耐久性を優先して完成度を高めてきた。一方、海外ベンチャー企業はアプローチが異なる。豪州のCFCLは小容量機で1.5kW出力時にAC送電端効率60%（LHV）という極めて高い発電効率を得ており、豪州、欧州、米国、日本（大阪ガスも含む）で設置評価をし、高発電効率特性を確認している⁽⁶⁾。高い燃料利用率条件でも高い発電電圧が発揮できるようにし、発熱が少なくても熱自立できるようにスタック周囲の放熱を十分に抑制すれば、小型SOFCでもこれほどの高発電効率が実現することを示した。また、英国のCeres Powerは既存の住宅設置ボイラーの代替市場獲得を目指して、25kWの温水出力のボイラーとSOFC発電ユニットを同一筐体収めた壁掛け可能なサイズ・重量の機器を開発してい

る⁽⁷⁾。ステンレス薄板基板に電極/電解質/電極を形成したセルが特徴であり、セルとセパレータ1段あたりの厚みが薄い。面積基準での電流密度は決して高くないが、材料重量や体積基準では高い出力密度を達成している。これら2社のSOFCには信頼性・耐久性に残課題があるが、SOFCのポテンシャルを引き出した魅力的な仕様を具現化している。

【業務用・産業用SOFC】数十kW～数百kWクラスは元々燃料電池システムの本命と考えられていた容量である。SOFC以外の形式を含め、現在このクラスでの燃料電池システム商用機を表1に示す。直近では導入補助率の高い米国（加州など）や韓国を中心に世界全体で年間数十MWの定置用燃料電池システムが導入されている。2010年にはブルームエナジー（米）によってSOFCも100kW機が商品化された。ブルームエナジー（米）のSOFC 100kW機は、発電効率50%を越えるが、コージェネ機ではなく電気のみが利用される仕様設定である。同社の技術は殆ど公表されていないが、手のひら大のセルにより、100kW機を成立させていることがユニークな点である。欧州は材料～スタックまで研究開発体制が充実している。現在主流となっているその中で、バルチ（フィンランド）が複数メーカーの燃料極支持構造の平板スタックを用いて発電効率50%超の50kWコージェネ機を開発中である。

表1 燃料電池システム商用機（100kW機以上）

方式	発電容量・発電効率 (net AC, LHV)	メーカー
リン酸型 PAFC	100kW～400kW 40%	UTC Power (米) 富士電機
熔融炭酸塩形 MCFC	300kW～2.8MW 47%	FCE (米) -<提携> POSCO Power (韓)
固体酸化物形 SOFC	100kW 50%以上	Bloom Energy (米)

5. 開発見通し

家庭用SOFCコージェネレーションシステムの普及に向けてはコストダウンが最重要である。低炭素社会の実現に向けて、さまざまな効率向上が図られる中、SOFCの発電効率の一層の向上も合わせて達成される必要がある。同一性能のスタックで発電効率を高める条件にすることは、スタック単体で見るとコストダウン効果はない。しかし、発電効率を大きく向上させ熱電比が小さくなれば、省エネルギー性を犠牲にせず排熱回収タンクを小容量にできるなど、排熱利用ユニットを含めたトータルでの小型化・コストダウン設計が見込める。集合住宅にも設置しやすくなることで対象市場も広がる。仕様面からはAC送電端効率55%（LHV）クラスでコンパクトなシステムが望まれる。数kW以上の業務用クラスに関し

ては、従来技術（ガスエンジン）に対して十分な発電効率有意を持つことは、初期段階から必須条件である。手のひら大のセルで100 kW商用機を成立させた先例も刺激になるが、家庭用SOFC向けに開発したスタックを派生的に利用することで高発電効率の小規模業務用システムが効率的に開発・商用化できる可能性があるのではなかろうか。以上は、仕様面からの今後の期待である。

一方、コスト積算に関していえば、SOFCシステムは燃料前処理系、冷却系がシンプルであり、燃料電池システムとしては部品点数が少ない。家庭用SOFCシステムでは、ある程度実現している。スタック以外での低コスト化も着実に進めなければならないが、技術的にはセルスタックの低コスト化が焦点になる。セルスタックのコスト構成は、これまでも複数の試算が公表されている。例えば、現在の開発で主流のひとつとなっている燃料極支持平板スタックでは米国DOEのSOFC開発プロジェクトと関連して、セルスタック仕様と到達可能コストが評価されている⁽⁸⁾。1999年時点の性能、セルスタック仕様（材料・寸法）を前提とし、セル製造工程（積層、焼結）、スタック化工程、生産量などを仮定し、スタック単体での到達可能コストは100 \$ /kW程度とされた。原材料の上昇などもあり100 \$ /kWは不可能としても、SOFCスタックが数万円 / kWに到達し、各容量の定置用SOFCシステムが普及することは技術的に十分可能であろう。

SOFCは基本構造の自由度が高いため、これまでも多様な構造が提案され試作されてきた。しかし、セルスタックのコストでは原理的に有利な構造と考えられても、実際には製造技術の成熟やエンジニアリングでは解決困難な課題に直面することも多い。これまでは、基本設計段階でレビューする実力が不足していたともいえる。この数年で複数のメーカーが家庭用SOFC開発に取り組み、その過程でシステムを仕上げるための様々な課題に対応してきた。その経験がSOFC普及段階(2015年以降)に向けて活用されるものと思う⁽⁹⁾。

謝辞

固体酸化物形燃料電池システム実証研究事業を通じて開発に有用な運転結果が得られました。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、新エネルギー財団(NEF)の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] 横川、燃料電池 Vol.5, No.4 (2008) 6.
- [2] T. Ono, Y. Ohshima, Y. Hori, T. Shigehisa, A. Kokaji, M. Yoshida, M. Suzuki, T. Sogi, K. Higaki and A. Chikazawa, Abstract for oral presentation, p.144, in Fuel Cell Seminar Abstracts (2006).
- [3] M. Suzuki, S. Iwata, K. Higakia, S. Inoue, T. Shigehisa, I. Miyachi,

H. Nakabayashi and K. Shimazu, ECS Trans., 25(2), 143 (2009).

[4] 大倉、燃料電池 Vol.10, No.1, 23 (2010).

[5] 「SOFCの将来構成に関する提言」、NEDO ホームページ(2004).

[6] R. Payne, J. Love and M. Kah, ECS Trans., 35(1), 81 (2011).

[7] R. Leah, A. Bone, A. Selcuk, D. Corcoran, M. Lankin, Z. Dehaney-Steven M. Selby and P. Whalen, ECS Trans., 35 (1), 351 (2011). [7] “Assessment of Planer Solid Oxide Fuel Cell Technology” Arthur D Little (1999).

[8] NETL, 米国エネルギー省,
<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/publications/assessmentofplanarsofctechonology.pdf>

[9] 鈴木、電気化学、4月号、(2012) . 予定