

特集 進歩する燃料電池技術

高効率発電をねらう固体電解質型燃料電池

Solid Oxide Fuel Cells for Highest Efficiency Power Generation

鈴木 稔*

Minoru Suzuki

1. はじめに

燃料電池発電システムは、従来の発電システムとは異なり電気化学反応を利用した高度な新発電方式であり、エネルギーの高効率利用、石油代替エネルギーの導入促進、環境負荷低減の観点からその早期実用化が強く望まれている。中でもセラミックスを電解質として用いる固体電解質型燃料電池(SOFC)は、分散型発電から火力代替発電に至る規模において最も高い発電効率が期待できる技術であると位置付けられる。本稿では、SOFCが高効率である理由と国内外の開発状況を中心に述べる。

2. 固体電解質型燃料電池の基本構成

図1に示すように酸化物イオンだけを通す電解質の両側に電極が、さらに隣接の燃料電池と積層するために、電気接続とガス遮断を行うセパレーター(インターコネクター)が備わり基本単位となっている。空気極/電解質界面では、空気中の酸素が酸化物イオンとなり、電解質中を燃料極に向かって移動する。燃料極/電解質界面では酸化物イオンと水素、一酸化炭素が反応し、水、二酸化炭素を生じる。この際、外部回路に

電気エネルギーを取り出すことができる。

SOFCは作動温度が800~1000℃と高温であること、構成材料が全て固体であることに起因する以下のような特徴を有する。

- ① 高発電効率。
- ② 長寿命化が可能。腐食等による性能低下を極めて小さくすることができる。
- ③ 高価な材料(貴金属)が不要、かつ安価な製造法が適用できるため、低コスト化が可能。
- ④ 水素だけでなく、一酸化炭素でも直接発電できるため、化石燃料を利用する場合も、シンプルなシステム構成が可能。

一方、セラミックスの集合体を用いる技術であるため、信頼性の確立が最大の技術課題となる。他の燃料電池には殆ど例のない円筒形状のセルの開発が行われているのはこのためである。

過去30年以上にわたり、国内外で様々な材料、形状、製造法による開発が行われ、セル本体の信頼性・耐久性に関し実用レベルに到達しつつある。これまでの開発ペースはゆっくりとしたものであったが、システム構成がシンプルなため、セル本体技術の開発進展を受けて、まず分散型電源として数年以内の実用化が予想される状況となっている。

3. SOFCの発電効率

ここで、天然ガス等を燃料とした場合に、SOFCの発電効率が他の燃料電池に比べて高くなる理由を述べる。図2には簡略化したシステムフローを示す。燃料電池自体(①)の変換効率は他の燃料電池と同等である。燃料電池は高いセル電圧で発電するほど発電効率は高くなるが、高電圧での発電では出力密度が小さくなるため、セル数が多く必要となる。実用システムにおいてはコストとのバランスが考慮されるため、理想的な高電圧での発電はできない。②ではSOFCからの高温排熱で燃料を改質する。天然ガスを燃料とした場

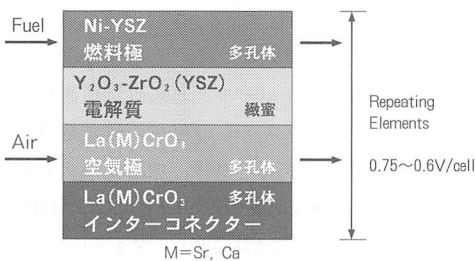


図1 SOFCの基本構成

* 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 燃料・貯蔵技術開発室主査

〒170-6028 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 27F

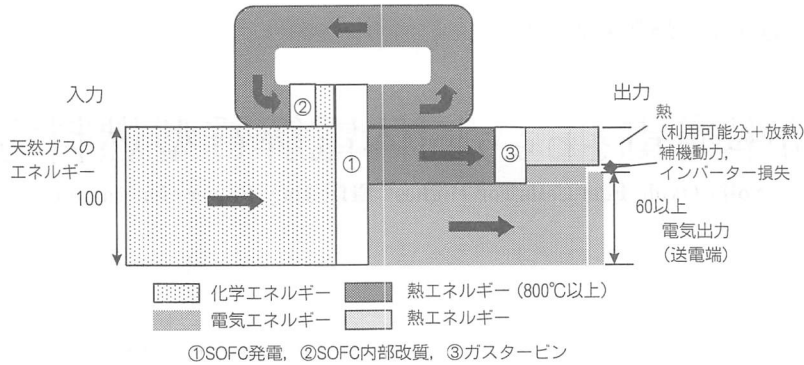


図2 SOFCシステム

合、700～800℃程度でメタンに水蒸気と熱を加え（吸熱反応）、水素と一酸化炭素にする。この際、燃料電池発電に供する燃料のエンタルピーが天然ガスの入力より増大する（①）。さらに③では、SOFCからの高温排熱によりガスタービンを駆動し、電気を取り出す。

以上のようにSOFCシステムは他の燃料電池に比べ、高温排熱を②、③に示すように発電効率の向上に有効に利用することができる。②の改質反応に関して、リン酸型（PAFC）、固体高分子型（PEFC）では電池部からの排熱温度は低く、改質反応には使えずさらに後者では改質反応に必要な水蒸気も電池排熱だけでは得ることができない。このため、燃料を分岐して改質器などでバーナー燃焼させる必要があり、電池反応（①）に供する燃料の比率が下がり、システムとしての発電効率が低下する。③に関しては、SOFCの排熱は800～900℃程度と近年開発が進展したマイクロガスタービンのタービン入口温度と同等であり、SOFCからの排気だけで駆動することが可能である。これをタービン側から見ると、再生式ガスタービンの燃焼器がSOFCに置き換わったものと言うことができる。作動温度が下がると、その排熱だけでは十分に駆動することができないため、温度を上げるためガスタービン側の燃焼器に燃料を投入する必要がある。その結果、電池反応（①）に供する燃料の比率が下がる。ガスタービンの効率が比較的低い数MW級以下では、1000℃級と600℃級の燃料電池では発電効率の差が大きくなる。セル・モジュールを多数設置することで大型化し、既存の周辺システムを組み合わせることにより、63%（HHV、送電端）程度は達成可能と試算している。なお、①～③を含むシステムは後述するように、現在米国において実証段階にある¹⁾。

4. 国内外の開発状況

SOFCの開発ではSiemens Westinghouse Power Corporation（SWPC社 1998年にWH社重電部門がSiemens社に売却された）が開発規模や運転の実績に関して先行している。米国ではこのほかSOFCo社、Z-tek社、Allied Signal社等が開発を行っているが、現在、米国エネルギー省（DOE）が開発を支援しているのはSWPC社だけである。各実証機開発費の約50%をDOEが支出し、残りはSWPC社および実証機毎のパートナー（ユーザー等）が負担している。92年からの20kW級システム（関西電力、東京ガス、大阪ガスと共同）では、エゼクターによる高温燃料排ガスリサイクルによって外部燃料改質系のないシンプルなシステムが実現されている。95-97年の25kWシステム（大阪ガス、東京ガスと共同）では11回の室温からの起動を伴う1.3万時間の運転で約0.1%/1000時間と、この段階で既に化石燃料を用いた燃料電池として最も優れた劣化率が得られている。なお、単セルは6.8万時間の実績を有する他、加圧条件でも寿命低下を起こさないことが検証されている。1998年からオランダで稼働中の100kWシステムでは、実用化段階でも用いるとされる有効長1.5mセルと内部改質技術が採用されている。100kWシステムの現在の送電端発電効率は42%（HHV）である。今後、加圧システム開発が行われ、大幅な高発電効率化が図られる。2000年前半から実証試験に入った加圧SOFCとマイクロガスタービンを組み合わせた220kWシステムの技術実証試験¹⁾や、引き続き2002-3年頃に商用機の前段とされる1MW級SOFC-GTシステムの開発・試験が欧州、米国それぞれで電力会社の出資や米、欧政府の補助金を受けて行われる。後者では商用を見通した設計で送

電端54% (HHV, 60%LHV) の発電効率が目指されている。SWPC社は、競合技術に比較してSOFCの優位が最も出やすいのは、ガスタービンと組合せた1 MW級システムであると技術と市場を分析しており、米国、欧州の分散型電源市場を初期導入ターゲットとし、2005年以降の商用化を目指している。また長期的には大型電源用としての70%級 (LHV, 63%HHV) の超高効率システム開発も検討されている。現時点ではSWPC社はセル製造法として電気化学蒸着法 (EVD法) を用いており、セル製造設備費が高く、コスト低減の前提となる生産数量が大きいとされる。この点に関してはシステム開発と並行して、セル製造法、材料、高出力密度化の3つの方向から、セルの低コスト化に取り組んでいる。

また、欧州ではドイツ、オランダ、スイス、イギリスで独自の構造のSOFCスタックの開発が行われている。

日本の円筒型セル開発は、三菱重工/電源開発による円筒縦縞型セルと東陶機器/九州電力の円筒縦縞型セルがある。三菱重工/電源開発は溶射法により製作したセルで加圧10kW級モジュールを試作し、計画の連続7000時間運転に成功している²⁾。溶射法で作製したセルは、数回の溶射工程を必要としたこと、材料的に劣化が避けられないという欠点を有していた。しかしながら、97年に共焼結法にセル製造を変更したことで、この2つの問題は解決された。焼結法で作製したセルは1kW級の試験が行われ、良好な耐久性が確認されている。2000年にこのセルを用いて加圧10kW試験が予定されている。

東陶機器は自社のセラミックス製造技術を生かし、低コストな湿式焼成法により円筒縦縞型のセルを開発している。平成10~12年度はNEDO委託研究として、低コスト製造法により初期性能、耐久性、信頼性に優れた円筒型セルおよびバンドル (セル集合体) の開発を九州電力・新日本製鉄と共同で行っている。このように、システム開発・実証で先行するSWPC社が現時点では電気化学蒸着法によりセルを製造しており、セルの低コスト化が課題となっているのに対し、国内の円筒型セル開発は低コスト技術に強みを有している。

平板型の開発では、三菱重工/中部電力がMOLB型 (一体積層型) の開発を行っている。1992年には1kW、1996年には5kW級スタックの試験を行っている。現在は、凹凸形状の電解質を用いた改良MOLB型の開発を行っている。特徴としては、出力密度が高

い、ガラスを用いないセラミックスのシール技術、ガス流路が電解質の凸凹により形成されるため溝のない薄いインターコネクター板を用いることができ、材料費、加工費ともに有利な点である。2000年には25kW試験が予定されている。また、平成10~12年度には、MOLB型スタックのサーマルサイクル性等の信頼性評価がNEDO委託研究として中部電力により実施されている。

なお、平板型10kWの発電を行ったSiemens社のほか、Daimler Benz/Dornier社、東燃、三洋電機、富士電機、村田製作所などが1kW級以上の試験に成功したが、現在までに平板型開発から撤退している。このうち、Siemens社はWestinghouse社のSOFCを含む重電部門を1998年に買収した際に、円筒型開発への絞りこみを行ったものである。

また、国内外を含め、新材料・構造等の研究も活発であり、高発電効率システムに留まらない以下のようなコンセプトも提案されている。

(1) CO₂分離発電システム³⁾

SOFCでは空気側から電解質を通して酸化物イオンが流れてくるため、燃料側排気には窒素が混入しない。燃料を100%燃料電池反応で使いきることは困難であるため、最終的には少量の酸素を燃料側に加えることになるが、この際の燃料排ガス組成は水蒸気と炭酸ガスだけとなり、炭酸ガスの分離が容易である。SWPC社とShellが共同で、ノルウェーで実証試験する計画が発表されている。

(2) 運輸用SOFC

SOFCでは燃料改質系をシンプルにできるメリットがあるため、自動車用等としても検討されている。急速な昇降温を可能にするため、セラミックスのセルの基本寸法を小さくした構造等が提案されている⁴⁾。現状の材料・構造の延長上では実用化は困難と考えられ、新しい要素技術が必要となる。

5. NEDOのSOFCプロジェクト

本プロジェクトの目的は発電部門における省エネルギーおよび石油代替を促進するため、天然ガス、石炭ガス等を燃料とし、小規模分散型から大規模システムまで広い適応性を持ち、発電効率の高い固体電解質型燃料電池 (SOFC) について、発電システムの技術開発、要素研究開発を行うものである。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では、通商産業省工業技術院によるニューサンシャイン計画 (平成4年

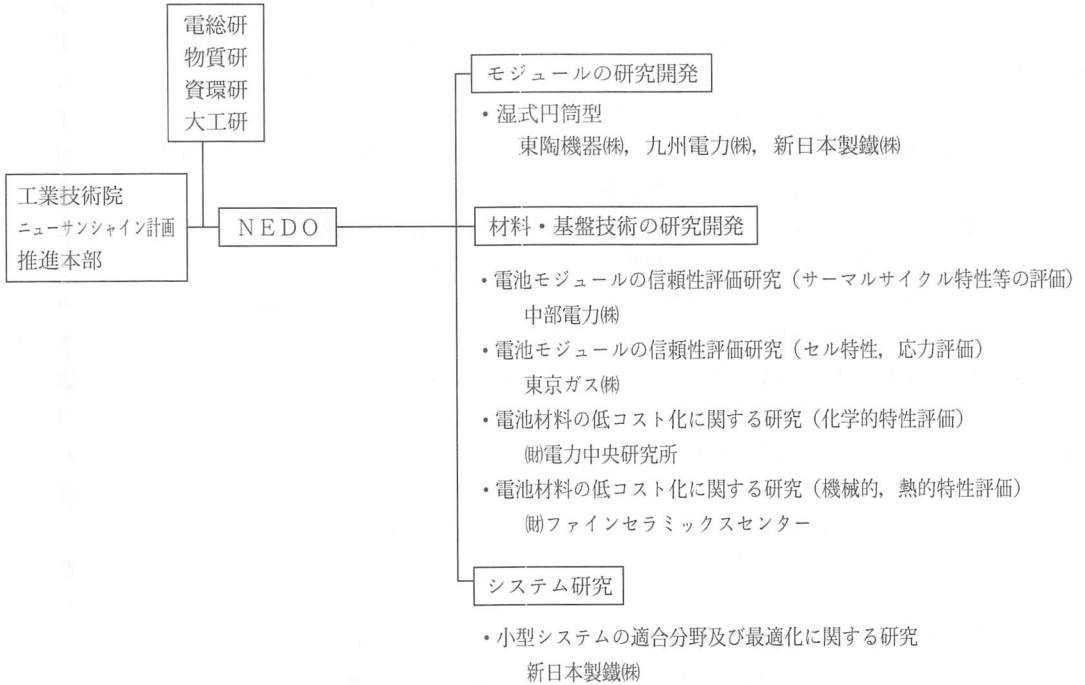


図3 NEDO SOFC研究開発体制（平成10～12年度）

度以前はムーンライト計画)のプロジェクトのひとつとして平成元年度からSOFCの研究開発を開始しており、平成4年度からはその第Ⅱ期プロジェクトを推進している。第Ⅱ期プロジェクトでは、SOFC発電システムの開発に必要な基本技術を確立することを目標としている。平成9年の中間評価を受け、研究開発体制を再構築し、平成10年度よりで数kW級モジュールのレベルで信頼性、耐久性の確立に重点をおいた研究開発を行っている⁵⁾。図3に現在の研究体制・項目を示す。

(1) モジュールの研究開発

モジュールの研究開発では、製造法にコスト低減が期待される湿式法を採用した円筒型SOFCを対象に電池モジュールの耐久性、信頼性の確立に向けた研究開発を行っている。図4に湿式円筒型セルの外観を示す。これまでに単セルで平成12年度最終評価目標を上回る性能・耐久性が実証できており、単セルの特性をセル集合体として取り出すための接続、集電技術の開発を進めている。

(2) 材料・基盤技術の研究開発

材料・基盤技術の研究開発では、平板型SOFCに関してサーマルサイクル耐性の評価を行うとともに(図5)、構成材料の機械的強度、応力評価、ならびに低

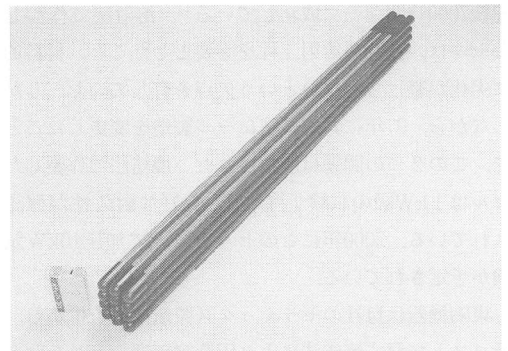


図4 湿式円筒型セル（12本、約1kW）

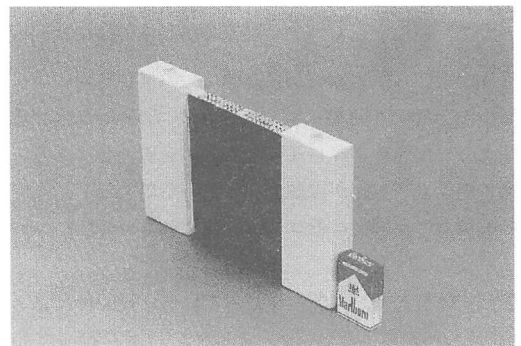


図5 サーマル特性評価用平板型スタック（5セル、約500W）

コスト化を目指した新材料の適応性評価を行っている。

ガスシール技術等の進展により平成9年の中間評価時点よりも明確に平板型SOFCの信頼性は高まった。しかしながら、昇降温速度、許容温度分布の点で、円筒型セルに比べ作動条件がデリケートであることは否めない。平板型のメリットである高出力密度による低コストとコンパクト性を活かしながら、システムとしての信頼性、運用性を確保するコンセプトが必要となると考える。

(3) システム研究

システム研究では、導入初期に想定される小型システムの適合分野、及びシステムの最適化に関する研究を実施している。

なお、第Ⅱ期プロジェクトは平成12年度で終了するため、後継展開の是非等を判断するため、プレ最終評価が行われ、平成12年5月の産業技術審議会評価部会において評価結果が確定した。SOFCが新エネルギー開発のキーテクノロジーのひとつとして開発の重要性が高いこと、信頼性の確立とコストの低減に重点をおいた開発をさらに進めていくことが重要との評価結果を得た⁶⁾。次期プロジェクトでは信頼性、コストの低減が両立し、かつ大型化に向けて拡張性のある基本モジュールの開発を行う計画である。

6. おわりに

化石燃料を用いる燃料電池としてSOFCが最も発電効率がよく、かつ長寿命化できる燃料電池であること

は、単に理論的に想定されていることではなく、米国開発等によって技術実証の最終段階に到達していると認識している。しかしながら、SOFCは省エネルギー、環境適合性という付加価値はあるものの、基本的には使用者に新しい財・サービスを提供するものではないため、既存の市場において初期の段階から競合技術とコスト競争に打ち勝つ必要がある。PAFCでの経験等を踏まえ、早い段階から普及段階を見通した基本技術・システム設計を構築しなければならない。コスト低減に関してはNEDOのプロジェクトを含む国内で有力な技術開発が進展しており、開発を進めて行けば、経済的に十分に成立しうるものと分析している。NEDOのSOFCプロジェクトはまだ基本技術段階に過ぎないが、SOFC技術の本質、国内外の技術動向を見極め、実用化・普及につなげていきたい。

参考文献

- 1) R. A. George, J. Power Sources, 86 (2000) 134
- 2) H. Mori, H. Ohata and K. Konishi, Proceedings of the 3rd Int. Fuel Cell Conference (Co-Organized by FCD IC and NEDO), (1999), 337
- 3) E. Riensche et al., J. Power Sources, 86 (2000) 404
- 4) G. A. Tompsett et al., J. Power Sources, 86 (2000) 376
- 5) 「燃料電池発電技術開発」研究成果報告書 (新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成10年度, 11年度)
- 6) ニューサンシャイン計画「燃料電池発電技術研究開発(固体電解質型燃料電池)」プレ最終評価報告書, 産業技術審議会 評価部会 燃料電池発電技術研究開発評価委員会 (平成12年5月)

他団体ニュース

「平成12年度日本原子力研究所成果報告会」について —核融合研究の進展と拡がり—

<日時>2000年11月7日(火) 12:30~17:30

<場所>東京国際フォーラム ホールB (千代田区丸の内3-5-1, Tel 03-5221-9000)

<プログラム(講演6件, 特別講演1件)>

- ・「科学技術への貢献—核融合—」……………郡珂研究所長 松田慎三郎 他
- ・特別講演「国際協力から見た核融合」……………明治学院大学教授 竹内 啓氏

※他に展示物, パネルコーナーを設置

<問合せ先>日本原子力研究所 那珂研究所 核融合工学部 (担当: 益子)

TEL: 029 (270) 7513, FAX: 029 (270) 7519

e-mail: amashiko@hems.jaeri.go.jp

http: //www.naka.jaeri.go.jp/kojiban