

# 固体酸化物形燃料電池システム (SOFC System)

## Solid Oxide Fuel Cell System

大野陽太郎 環境ソリューションセンター 主席  
 福田 聖二 環境ソリューションセンター 統括スタッフ

Yotaro Ohno and Seiji Fukuda

当社は、米国シーメンスウエスチングハウス社から SOFC の販売権を取得した。燃料電池は化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する高効率で低公害の発電システムである。中でも SOFC は最も発電効率が高い燃料電池として知られている。当社は、シーメンスウエスチングハウス社とともに NKK/SWPC-SOFC の開発に尽力していく。

NKK has entered into a distributor/packager agreement with SWPC (Siemens Westinghouse Power Corporation) for stationary fuel cell applications utilizing solid oxide fuel cell technology. This agreement enables NKK to become an authorized distributor/packager of SOFC systems serving the Japanese and the Asia markets. Fuel cell technology enables direct energy conversion from chemical energy of fuel to electric energy. The fuel cell can generate electricity at higher efficiency and lower emissions, than conventional internal combustion systems. SOFC is recognized as the most efficient fuel cell among various fuel cells. NKK will make every effort to commercialize NKK/SWPC-SOFC systems.

### 1. はじめに

近年、環境に対する問題意識の高まりもあり燃料電池が次世代発電設備として注目されている。中でも固体高分子形 (PEFC) と呼ばれる形式の燃料電池は、常温で作動し起動特性に優れるため、自動車用や家庭用の小型熱電併給装置として話題の中心となっている。一方、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、どのタイプの燃料電池に比較しても高い発電効率を有し、定置型発電装置としては PEFC を凌ぐ高い可能性を秘めており、燃料電池技術の本命とも言われている。当社では、その将来性を鑑みて、1980年代後半より SOFC の開発に取り組んできた。さらに 1992 年より、シーメンス・ウエスチングハウス・パワー社の前身であるウエスチングハウス・エレクトリック社と共同開発を行っており、今回その延長線上で同社と正式にディストリビュータ・パッケージ契約を締結した。シーメンス・ウエスチングハウス・パワー社は、SOFC のリーディングカンパニーである。本稿では、当社/シーメンス・ウエスチングハウス社の円筒型 SOFC について述べる。

のとして知られている (表 1 参照)。セルの材料と作動温度が異なるので、その利点、用途、問題点もそれぞれ異なるものの、高い発電効率と有害物質の排出量が少ないという潜在的優位性はすべてに共通している。特に代表的な大気汚染物質である窒素酸化物と硫酸酸化物をほとんど排出しないということは大きな特長となっている。

表 1 燃料電池の種類と特徴

	固体高分子形 PEFC	リン酸形 PAFC	熔融炭酸塩形 MCFC	固体酸化物形 SOFC
電解質	高分子膜	リン酸水溶液	熔融炭酸塩	ジルコニア系セラミックス
イオン伝導体	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
運転温度	70 ~ 90	200	650	800 ~ 1000
電池反応可能な燃料ガス (CO 許容濃度)	H <sub>2</sub> (数 10ppm 以下)	H <sub>2</sub> (数% 以下)	H <sub>2</sub> , CO メタンなどの内部改質が可能	H <sub>2</sub> , CO メタンなどの内部改質が可能
発電効率 (LHV) 天然ガス燃料時	30 ~ 45% 程度	40 ~ 47%	50 ~ 67%	47 ~ 70%

### 2. 燃料電池とは

燃料電池は燃料が持つ化学エネルギーを直接電気と熱に変換する装置である。燃料電池は電解質の種類によって分類され、リン酸形 (PAFC)、熔融炭酸塩形 (MCFC)、固体高分子形 (PEFC)、固体酸化物形 (SOFC) の 4 種類が主なも

燃料電池は、イオンが電解質中を通過、移動することにより電気を発生させる。PAFC や PEFC では、水素イオンが電解質を通過して陰極で酸素と化合し水になるので、燃料は水素に限られる。また一酸化炭素は燃料極の触媒を被毒するので極微量にする必要がある。SOFC では、空気中の酸素が陰極でイオン化し、電解質を通過するので水素とともに一酸化炭素も燃料として利用できる (図 1 参照)。

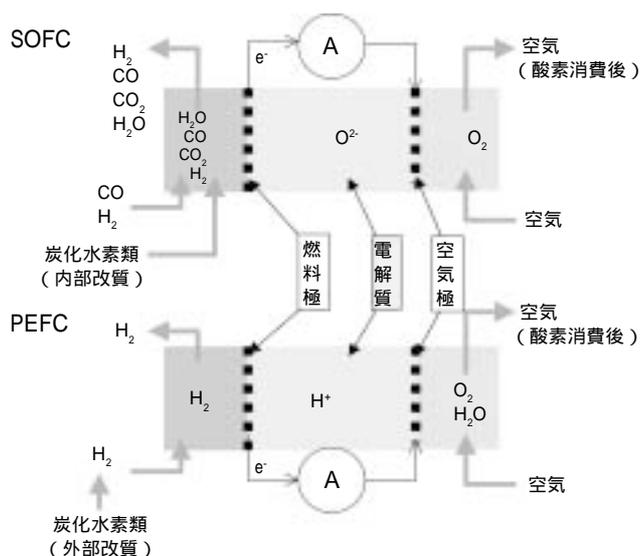


図1 燃料電池上の反応

気体あるいは液体の水素が燃料電池設置場所で利用可能な場合は現状極めてまれである。したがって、当面は天然ガスやプロパンなどを改質して使用することが現実的であろう。たとえば、水蒸気改質によって天然ガスやその他の燃料から水素と一酸化炭素を生産することができるが、SOFCは一酸化炭素を直接利用できるの、PEFCのように一酸化炭素を極微量まで減少させる処理過程が必要なく、システムが簡素になる。さらに、SOFCは高温を利用してセルモジュール内部で天然ガスを改質できるので、別置きのリフォーマ(改質器)が必要ない。SOFCが、天然ガスを使用する場合、効率化と簡素化の両面で有利である。

### 3. ウェスチングハウスタイプの円筒型 SOFC 開発の歴史

シーメンス・ウェスチングハウス・パワー社は、SOFCの研究開発を40年以上にわたって行ってきた。旧ウェスチングハウス・エレクトリック社は1950年代の後半にジルコニウム化合物で実験を開始し、酸化ジルコニウム(ジルコニア)の電解質としての可能性を見い出している。さらに当時ジルコニウム化合物を研究していたRos Ruka博士および電気化学者であるArnold Isenberg博士が、円筒型のSOFCと今日使用されているシールのないSOFCスタックを初めて設計し、セルの製作に必要なプロセスを開発した。彼らはSOFCの開発途中でジルコニア技術を使用した酸素センサーの開発にも成功している。

1980年までに円筒型SOFCの原理的な所は実証され、1980年代から1990年代に、まず多孔質支持管(PST: Porous Support Tube)上に電極や電解質を製膜したタイプのセルの製作が始められた。スタックとシステムについても、テネシー渓谷開発公社(米)が委託した400ワットのスタック

から実証試験が始まった。開発の過程で多孔質サポート管が省略され、最終的には空気極(AES: Air Electrode Supported)をセルの構造部材として使用した50cmの長さのセルで実証試験を行った。日本においても、関西電力殿、東京ガス殿、大阪ガス殿のご支援を得て実証試験を行い、成果をあげている。

その後も、セルの長寿命化と性能向上の研究が行われ、現在使用している有効長さ150cmのセルが開発された。このセルを用いた100kW級コージェネレーション・システムは、1998年にオランダにて稼働を開始し、好調に運転を行い2000年11月に試験が終了した。同システムは場所をドイツのエッセンに移し、さらに運転継続する予定である。また、燃料電池稼働の世界記録(最長8年)は依然として保持されており、試作品の150cmセルは、100回以上の熱サイクルに対する耐久力と1000時間に0.1%以下の電圧降下という良好な試験結果を示している。

現在に至る主要な開発成果を表2に、実証試験を表3にそれぞれ列記する。

表2 シーメンス・ウェスチングハウス社 SOFC 開発の歴史

1990年以前
長さ50cmのPSTセルの試験に成功
PSTセルで1個のセルにつき24W・48Wを発電
PSTセルの稼働時間10000時間突破
400W級スタックをTVAで実施
天然ガスで発電機を直接運転
大阪ガス殿および東京ガス殿で最初の3kW級SOFCシステム稼働
1990年～1994年
長さ100cmのAESセルを試験
AESセル1個につき105W・120Wを発電
PSTセルの稼働45000時間を突破
AESセル、100回の熱サイクル突破
20kW SOFCシステムを運転
20kW発電機をナフサおよび天然ガスで運転
1994年～1999年
長さ150cmのAESセルを試験
AESセル、常圧で210Wを発電
AESセル、加圧下で280Wを発電
PSTセル、69000時間(8年)の稼働達成
AESセルの稼働33000時間突破
AESセル、加圧下で6000時間を作動
AESセル、1000時間にわずか0.1%未満の電圧降下
25kWシステム、ディーゼルおよびジェット燃料での稼働成功
25kW SOFC コージェネレーション・システム13000時間稼働
100kW SOFCシステム9000時間(1年)稼働
2000年
100kW SOFCシステムの運転継続中(16000時間以上)
カリフォルニア州での25-kW SOFCシステム、2年間の休止後に再起動し運転中
220kW SOFC/ガスタービン・システム、世界初の燃料電池/ガスタービン・ハイブリッドの稼働開始

### 4. シーメンス・ウェスチングハウス・パワー社の円筒型 SOFC 技術

#### 4.1 セルとバンドル

シーメンス・ウェスチングハウス・パワー社のSOFCは、独自の円筒型設計で1層の電解質部分と2層の電極で構成されている。この設計では他の燃料電池のようなシールは

表3 フィールドテストと実証試験

年	顧客/プロジェクト名	スタック定格 (kWe)	電池の長さ (mm)	電池またはスタックの数	稼働時間 (Hrs)	燃料
1986	TVA	0.4	300	24	1760	H <sub>2</sub> +CO
1987	大阪ガス殿	3	360	144	3012	H <sub>2</sub> +CO
1987	大阪ガス殿	3	360	144	3683	H <sub>2</sub> +CO
1987	東京ガス殿	3	360	144	4882	H <sub>2</sub> +CO
1992	JGU-1	20	500	576	817	PNG
1992	ユーティリティーズ A	20	500	576	2601	PNG
1992	ユーティリティーズ B1	20	500	576	1579	PNG
1993	ユーティリティーズ B2	20	500	576	7064	PNG
1994	SCE-1	20	500	576	6015	PNG
1995	SCE-2	27	500	576	5582	PNG DF-2 JP8
1995	JGU-2	25	500	576	13194	PNG
1998	SCE-2/NFCRC	27	500	576	3394+	PNG
1997	EDB/ELSAM-1	125	1500	1152	4035	PNG
1999	EDB/ELSAM-2	125	1500	1152	16610	PNG
2000	SCE P SOFC/MTG	180	1500	1152	250+	PNG
今後の実証試験						
2001	OPT	250	1500	2304	-	PNG
2002	RWE 300 kW ハイブリッド	230	1500	1728	-	PNG
2002	エジソン Spa 300 kW ハイブリッド	230	1500	1728	-	PNG
2003	Ft.Meade 1MW ハイブリッド	800	1500	5760	-	PNG
2003	EnBW 1MW ハイブリッド	800	1500	5760	-	PNG
2003	Shell-CO <sub>2</sub> 分離	250	1500	2304	-	PNG

PNG = パイプライン天然ガス  
 TK-PST = 厚肉多孔サポート管  
 TVA = テネシー渓谷開発公社 (米)  
 JGU = 東京ガス殿, 大阪ガス殿によるコンソーシアム  
 ユーティリティーズ = 関西電力殿, 東京ガス殿, 大阪ガス殿によるコンソーシアム  
 SCE = サザン・カリフォルニア・エジソン社 (米)  
 NFCRC = 国立燃料電池研究所 (米)  
 EDB/ELSAM = オランダ・デンマークのユーティリティー各社によるコンソーシアム  
 OPT = OPT 社 (カナダ)  
 RWE = RWE 社 (ドイツ)  
 エジソン Spa = エジソン Spa 社 (イタリア)  
 Ft.Meade = 米国メリーランド州の1MW 設置場所所在地  
 EnBW = EnBW 社 (ドイツ)  
 Shell = ノルスケ・シェル社  
 TN-PST = 薄肉多孔サポート管  
 AES = 空気極サポート型  
 + = 試験継続中

不要で熱膨張に対しても許容度が大きいことが特長である。セルの稼働温度は約1000 で、空気供給管を使用して円筒セル内側へ空気が供給され、同時に燃料はセルの外側に供給される (図2 参照)。

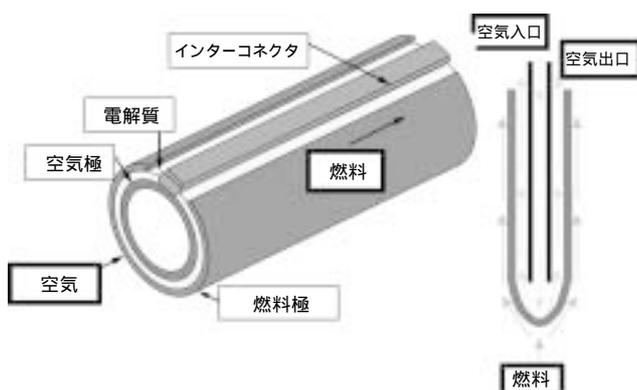


図2 セルの構成

開放回路であっても1個のセルにつき0.9から1ボルトまでの電位差しか生じないので、電圧を上げるためには多数のセルを直列に接続しなければならない。発生する電力はセルの活性面積に比例し、大気圧下では、最大で直流210W/セルを発電する (作動温度: 1000, 燃料利用率: 85%, 空気利用率: 25% の場合)。

セルは隣のセルと接続できるよう軸方向にインターコネクタが設けられ、複数のセルが直列に接続できるようになっている。商業ベースの発電量を確保するには、多数のセルを発電モジュールまたはスタックとして接続する必要があるが、作動温度が1000 なのでセルの熱膨張を吸収できる構造としなければセルに過剰のストレスがかかってしまう。ウエスチングハウスタイプのSOFCでは、セル間を電氣的に接続する際に柔軟性のあるニッケル・フェルトを使用してこの問題を解決している。ニッケル・フェルトによって、個々のセルはスタック内の温度が変わっても、隣接するセルとは無関係に自由に伸縮することができるようになっている。ニッケル・フェルトを使って並列3本・

直列 8 本の束状に接続されたセルは、バンドルと呼ばれていて、スタックを構成する基本単位となっている (図 3 参照)。

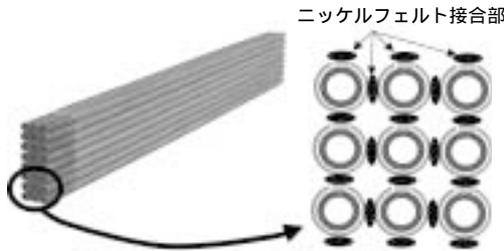


図 3 セルバンドル

4.2 燃料と空気の供給

スタック内には、セルに供給する水素と一酸化炭素を得るための天然ガス・リフォーマが備えられている。脱硫された天然ガスがエゼクタに供給されると、エゼクタは部分的に圧力が低い場所を造り出し、スタックの上部近辺の再循環室から水蒸気を含む排気を巻き込む。これで天然ガスの改質に必要な水蒸気を得ている。この燃料混合物は触媒 (プレ・リフォーマ) を通過し、この触媒によって高次の炭化水素すべてはメタン、水素および一酸化炭素に変換される。燃料混合物はスタック内リフォーマを通過し、メタンはセルに到達するまえに、すべて水素と一酸化炭素に変換される。このように燃料混合物は改質され、スタック底部の燃料マニフォールドに入り、そこで上向きに流れてセルの外側へ分配される (図 4 参照)。

一方、空気は排熱回収熱交換器内で予熱された後、モジュールに入り、空気マニフォールドを通過し、セル内側の底部へ空気供給管を経て供給される。セル外側の燃料と内側の空気からの酸素で、セルの長さ方向に沿って電気化学反応が起こり、供給された燃料の 85% までが消費される。モジュール内の温度は部位による温度差が発生するが、最大 1000 程度に維持される。消費された燃料は再循環室に入り、一部は再循環され、残りは燃焼室へ流れて過剰空気と混合する。ここで電気化学反応しなかった残りの

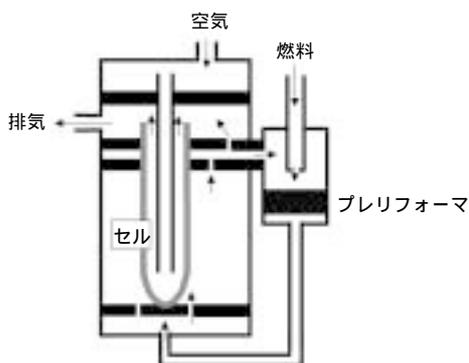


図 4 SOFC モジュール内部の模式

燃料の燃焼が起こり、供給管へ流下する空気の予熱をする。モジュールから出た排気はプロセス空気を予熱する熱交換器と排熱回収ボイラまたは温水ボイラへ導かれる (図 5 参照)。

スタックの温度制御はプロセス用空気を用いて行われているので、冷却水系統が必要ない。この面でもシステムが簡素になっている。

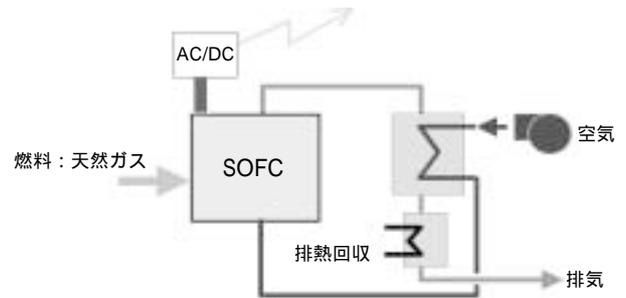


図 5 SOFC コージェネシステム (温水回収型)

5. SOFC システム

5.1 SOFC コージェネレーションシステム

SOFC は作動温度が約 1000 で、排気の温度も 800 程度あるので排熱を利用したコージェネレーションに適している。プロセス空気の予熱に用いられる排熱は一部なので、その残りを利用可能である。図 5 に示すシステムが最も簡単なコージェネレーションシステムで、排熱をまず空気予熱に使った後、熱回収するシステムである。オランダで運転された 100kW システムはこのタイプのコージェネレーションを採用しており、120 の加圧温水で 109kW の送電端出力の時に 63kW の温水を供給している。

さらに図 6 に示すように空気予熱用熱交換器を高温度と低温部に分離し、その間に熱回収システムを設置することで数百 kPa の蒸気発生も可能となる。

一連のシステムは、排熱回収装置の物理的な大きさおよび価格と、回収する熱の価値との見合いで最適な設計が必要である。

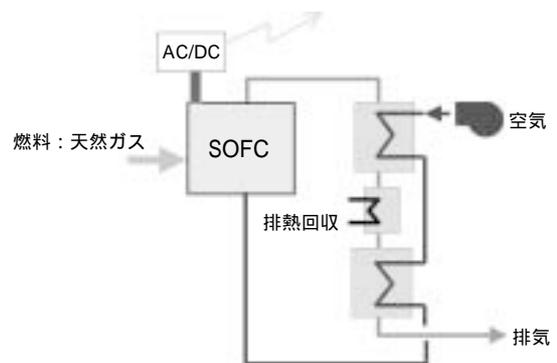


図 6 SOFC コージェネシステム (蒸気回収型)

5.2 SOFC / ガスタービンハイブリッドシステム

SOFC は、7 気圧程度までは加圧による電圧の増加が顕著で、発電効率が向上することがわかっている。たとえば、3気圧で稼働させると電気出力は最大で10%程度増加する。SOFC モジュールを加圧し、ガスタービンと結合することにより発電効率がさらに向上する。この複合システムでは、空気はタービンのコンプレッサで加圧され、SOFC モジュールに入る前に熱交換器で加熱される。SOFC からの排気は高温の加圧ガスとなり、タービン発電機を駆動する。このようにすれば、図7に示すような乾式(スチームなし)ハイブリッドサイクル発電システムができて上がる。シミュレーションによると、このようなSOFC/GTハイブリッドによって、300kW級の小規模な発電プラントで55%以上の発電効率が達成可能で、1MW級のプラントでは60%程度の効率達成が可能であることが示されている。2~3MW級の容量クラスでは更に70%まで期待できると試算されている。

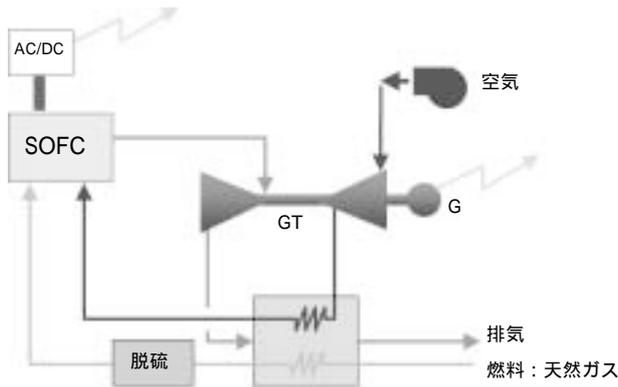


図7 SOFC ハイブリッドシステム

6. 円筒型 SOFC の特徴と利点

円筒型 SOFC の特長を表4に示す。また他の発電方式との発電効率の比較を図8に示す。SOFC の環境面と効率面での優位性がわかる。

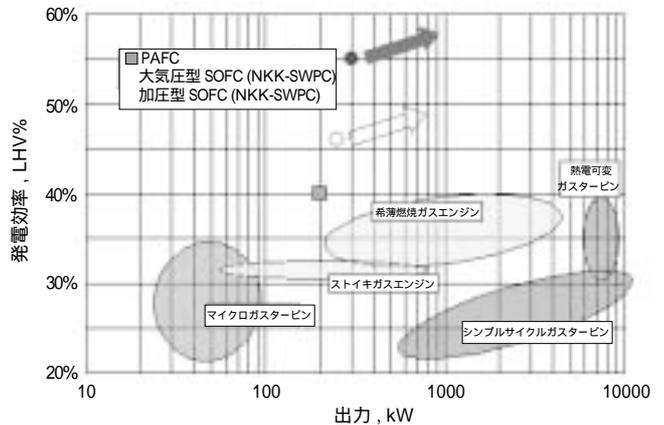


図8 分散発電システムの効率

7. SOFC の実証事例

実証試験の一覧を表3に示す。この内の最近の実証例について述べる。

(1) 100kW 級 SOFC コージェネレーション・システム

所在地：オランダ，ウエスターフルト

シーメンス・ウエスチングハウス・パワー社が納入した100kW級SOFCコージェネレーション・システムはオランダとデンマークの電力会社のコンソーシアムであるEDB/Elsamへ納入したもので、総運転時間16610時間を達成し、2000年11月29日で運転終了した。2001年ドイツへ移設し、さらに運転継続予定である。

表4 円筒形 SOFC の特長

環境適合性	天然ガスを使用している発電プラントのなかでも排出ガス中の有害物質量は最低水準	
	NOx:	0.5 ppm 未満
	SOx:	なし
	CO	なし
	VOCs	なし
高効率	CO <sub>2</sub> 高い効率に反比例するので相対的に低い	
	加圧による効率向上が可能	
	高い発電効率 (ac/LHV)	
	46-50%, 1 気圧, 250 kW - 1 MW 級 SOFC コージェネレーション・システム	57-60%, 3 気圧, 300 kW - 1 MW 級 SOFC/GT ハイブリッド・システム
簡素なシステム	60-70%, 7 気圧, 2 MW- 20 MW 級 SOFC/GT ハイブリッド・システム	
	コージェネレーションとコンバインド・サイクルの可能性: 800 以上の SOFC モジュール排気ガス	
	冷却水が不要	
	スタック内蔵の天然ガス・リフォーマ	
耐久性・信頼性	閉端部付きの円筒型電池なので高度の気密性を必要とするシールが不要	
	簡素な発電サイクル	
	簡素化による高度のシステム信頼性	
	固体状電解質であり移行性のある電解液は使用しない	
信頼性	熱サイクルの耐久性: 環境温度から 1000 まで 100 回以上の熱サイクル	
	スタックの潜在的寿命: 初期生産システムの場合は 5-10 年 / 実証された稼働時間は 69000 時間以上	
	電圧の安定性: 36000 時間以上経過後, 1000 時間当たりの電圧降下は 0.1% 以下	

アーヘム市近郊のウエスターフルトに設置されたシステムを写真1に示す。このシステムのピーク電力は140kWで、運転中は地元の電力系統へ109kWを供給し、63kW相当の温水を地域の暖房システムへ供給、発電効率は46%であった。本試験は商用機に採用予定である長さ150cmの空気極支持のセルが用いられた最初の実証試験である。

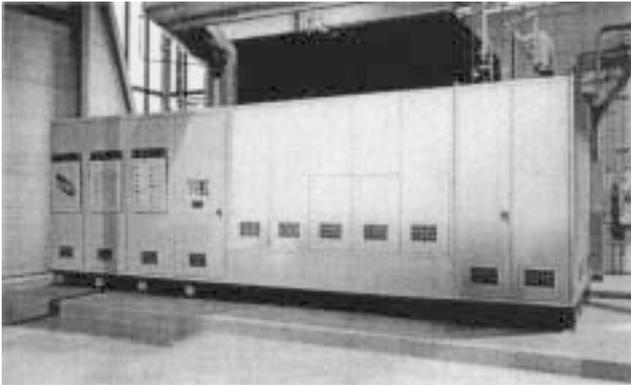


写真1 100kW SOFC コージェネシステム

当社は、この100kWシステムのために空気予熱用熱交換器を開発し、製作、納入している。また、設計段階では排熱回収蒸気ボイラを採用する計画もあったため、蒸気ボイラの検討および設計も行った(図9参照)。

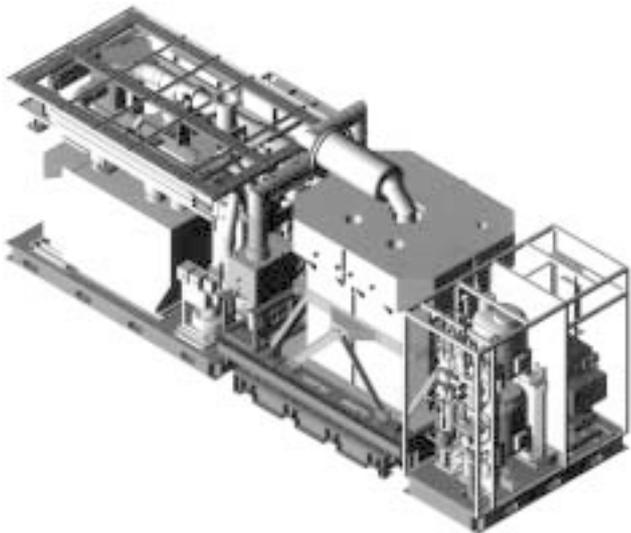


図9 100kW SOFC コージェネシステム

(2) 220kW SOFC / ガスタービン・ハイブリッド・システム

所在地：米国カリフォルニア州アーバイン  
国立燃料電池研究センター

世界で初めてのSOFC / ガスタービン・ハイブリッド・システムがカリフォルニア大学、アーバイン国立燃料電池研究センター/サザン・カリフォルニア・エジソン社へ昨年

納入された。このハイブリッド・システムは、加圧SOFCモジュールにインガーソールランド・エネルギー・システムズ社(元のノーザン・リサーチ・アンド・エンジニアリング社)が納入したマイクロタービン/発電機を結合したものである。220kW級のこの実証試験の目的はSOFC / ガスタービン・ハイブリッド・システムの実証することである(写真2参照)。



写真2 20kW SOFC ハイブリッドシステム

(3) 25kW SOFC システム

所在地：米国カリフォルニア州アーバイン  
国立燃料電池研究センター

アーバインのカリフォルニア大学の国立燃料電池研究センターにある25kWシステムは、天然ガス、ディーゼルおよびジェット燃料を含む各種燃料ですでに9000時間以上稼働していたが、2年間の休止期間の後、2000年8月に再起動した。起動時にも問題はなく順調に運転を続け、円筒型SOFCシステムが持つ優れた製品寿命を実証している。

(4) 今後の実証試験

次の段階は商用化レベルでのSOFC試作製品の実証で、2001年および2002年以降に実施される予定である。実証試験用のシステムは、高発電効率を目指した約300kWおよび1MWのSOFC / GTハイブリッド発電システム、およびコージェネレーション用の250kW級の常圧SOFCシステムである。過去の現地試験、実施中の現地試験および実証計画を表3に示した。

8. おわりに

ウエスチングハウスタイプのSOFC発電システムは、実用化間近の段階に至っている。今後は、商用機規模での実証運転による、システム安定性・信頼性の実証が必要である。当面は分散電源が主なターゲットと考えられるので、その市場価格を実現するためのコストダウン、また熱利用

部分の最適化、ハイブリッドシステムの最適化も重要である。中長期的には、DME など天然ガス以外の燃料の利用技術や、効率70%に迫る集中大型電源用システムの開発が考えられている。今後も、SOFC の実用化に向けて努力していく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) Sukkel, Jaap. "Two years experience with the 100kW SOFC Co-generation Unit at Arnhem". Forth EUROPEAN SOLID OXIDE FUEL CELL FORUM proceedings. Vol.1, pp.159-166(2000).
- 2) Van Gerwen, Rob J. F. et al. "Experience with Codes & Standards for the Arnhem SOFC Project". Forth EUROPEAN SOLID OXIDE FUEL CELL FORUM proceedings. Vol.1, pp.951-957(2000).

- 3) Vora, Shailesh D. "SCE (Southern California Edison) 220kWe Pressurized SOFC Power System". Forth EUROPEAN SOLID OXIDE FUEL CELL FORUM proceedings. Vol.1, pp.175-182(2000).
- 4) George, Raymond et al. "Fuel Cell Systems". Siemens Power Journal. pp.4-17(January 2001).
- 5) Veyo, Stephen E. et al. "Solid Oxide Fuel Cell Power System Cycles". ASME paper 99-GT-356(1999).
- 6) <http://www.pg.siemens.com/en/fuelcells/index.cfm>
- 7) 山口靖之. "小型分散電源への期待と普及の課題". 第17回エネルギー総合工学シンポジウム予稿集. pp.70-73(2000).

< 問い合わせ先 >

環境ソリューションセンター

Tel. 03 (3217) 3142 福田 聖二

Seiji\_Fukuda@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp