

# 固体電解質型燃料電池

## Solid Oxide Fuel Cell

佐藤 弘之\*

Hiroyuki Sato

### 1. ま え が き

固体にもかかわらず比較的高いイオン導電率をもつ物質がいくつかあり、これらは固体電解質と呼ばれている。銀、銅、水素、リチウム、ナトリウム、カリウム、弗素、塩素、酸素、などのイオンがそれぞれの結晶格子内を移動することにより導電性を示す。

カルシア（酸化カルシウム： $\text{CaO}$ ）、イットリア（酸化イットリウム： $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）、イッテルビア（酸化イッテルビウム： $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ）、などを固溶して安定化されたジルコニア（酸化ジルコニウム： $\text{ZrO}_2$ ）が $1,000^\circ\text{C}$ 程度の温度で比較的高い酸素イオン導電性を示すので、これを電解質として応用した高温型燃料電池が固体電解質型燃料電池（SOFC; Solid Oxide Fuel Cell）である。安定化ジルコニアはセラミックの一種で、結晶中の酸素イオン格子欠陥を媒介として酸素イオンの移動する現象を示す。そして、導電種の酸素は大気中に大量に含まれているために、他のイオン種に比較して断然コストが安い利点がある。

SOFCは電解質ばかりでなく、電極、構造材、などの全ての構成要素が固体である。したがって、電池反応の界面を容易に構成できるなど電池構造が簡単で、電解質が安定で蒸発することもなく、かつ腐食や電極を濡らすなどして性能を劣化させることもない。

燃料電池は燃料に含有する化学エネルギーを燃焼による熱エネルギーの形態を経由することなく、電気化学的手段を利用して、等温下で連続的に電気エネルギーへ直接変換する装置で、カルノー効率の制約を受けないため、本質的に高いエネルギー変換効率を有し、さらに良好な環境安全性が期待されるなどの特徴をもっている。

SOFCは $1,000^\circ\text{C}$ の高温動作のため、電極反応が極

めて活発である。したがって、活性化分極がほとんどなく出力電圧が比較的高いうえに、高価な白金などの貴金属触媒を全く必要とせずに出力電流密度もかなり高いため、エネルギー変換効率が他の型式の燃料電池に比較して著しく高い。

SOFCは水素ガスは勿論のこと一酸化炭素や天然ガスも直接燃料とすることができる。したがって、天然ガス、ナフサ、重油、石炭、メタノールなどの多様な燃料を直接または改質やガス化などして使用できる。

SOFCからの排気は動作温度が $1,000^\circ\text{C}$ もあるのでかなりの高温であるから、カリウム・タービンやガス・タービンを運転したり、排熱回収ボイラーで水蒸気を発生させ、蒸気タービンを運転して交流電力を回収したり、プロセス蒸気を供給するなど燃料電池複合発電システムや商用または産業用コージェネレーションシステムを構成するなどして、これまでにかつてない程高い総合エネルギー変換効率を達成することのできる十分な可能性を有している<sup>1~15)</sup>。

### 2. 安定化ジルコニア

ジルコニウムZrは原子番号40、原子量91.22で銀灰色の金属である。二酸化ジルコニウム（ $\text{ZrO}_2$ ）はジルコニアとも言う。天然には単斜晶ジルコニアのパデレイトとして産出する。最も産出量の多い鉱床は南アフリカのトランスバルにある。ジルコニアの主要原料はジルコン（ $\text{ZrSiO}_4$ ）でオーストラリア、南アフリカ、インド、北アメリカの海岸に産出する。ジルコニアはジルコンに熱処理または化学処理を行い、次いでシリカを分離することによって得られる<sup>19)</sup>。

$\text{ZrO}_2$ は融点が $2,677^\circ\text{C}$ 、沸点が $4,300^\circ\text{C}$ と非常に高く、耐火物原料としてすぐれている。しかし、純粋な $\text{ZrO}_2$ は約 $1,000^\circ\text{C}$ で単斜晶系と立方晶系との相転移が生ずる。高温領域の立方晶系は急冷によっても保持されず単斜晶系となる。また単斜晶系と立方晶系との間の転位は加熱と冷却で著しいヒステリシスを示す。そ

\* 電子技術総合研究所エネルギーシステム部エネルギー輸送研究室室長

〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

して、密度の差により約9%もの体積変化を生ずる<sup>16)</sup>。したがって、純粋なZrO<sub>2</sub>を耐火物として使用することはできないが、これに2~3価の種々の金属酸化物

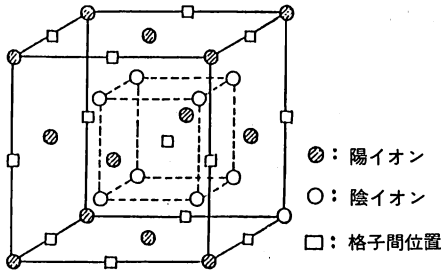


図-1 はたる石形面心立方晶構造

を固溶させると図-1に示すようなはたる石構造の立方晶となり、常温から高温まで相転移なく安定化される<sup>1,3,11,16)</sup>。安定化ジルコニアは耐食性大きく、融点が高く、しかも熱膨脹率が小さいため耐火材料、つば、特殊磁器、ファインセラミックとしての用途が広い。とくにカルシウム、イットリウム、イッテルビウムなどの酸化物とZrO<sub>2</sub>との固溶体はかなり高い酸素イオン導電性を示す、そして電子導電性がほとんどないことから固体電解質として利用される。この酸素イオン導電性はZrO<sub>2</sub>中に2価のCa<sup>2+</sup>、や3価のY<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>などを固溶したとき、結晶中の4価のZr<sup>4+</sup>の位置が低原子価のもので置き換えられる。その結果、結晶中の電気的中性を保つために酸素イオンO<sup>2-</sup>の空格子点を生ずることが知られている。このようにして生成した多数の空格子点は結晶中に三次元的に分布し、高温ではこれらの空格子点を足がかりに酸素イオンが移動する。そして高い酸素イオン導電性を示す<sup>1-15)</sup>。表1に主な酸化物固体電解質の導電率を示す<sup>11,15,17)</sup>。

燃料電池の固体電解質材料として要求される特性として次のようなものがあげられている<sup>1,2,6,15)</sup>。

- 1) イオン導電率が高いこと。
- 2) イオン輸率が1に近く、電子導電性をほとんど示さないこと。
- 3) 高温で化学的、物理的に安定で、耐久性のあること。
- 4) ガスを透過しないこと。
- 5) 資源的に豊富で、安価であること。

ジルコニア系の固体電解質材料 (ZrO<sub>2</sub>)<sub>0.85</sub> (CaO)<sub>0.15</sub>, (ZrO<sub>2</sub>)<sub>0.91</sub> (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0.09</sub>, (ZrO<sub>2</sub>)<sub>0.91</sub> (Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0.09</sub>などはこれらの要求される特性をかなり良く満している。とくに、イオン輸率は99%以上であると

表1 酸化物電解質の導電率

酸化物	導電率 (Scm <sup>-1</sup> )		備考
	1,000℃	800℃	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.89</sub> (CaO) <sub>0.11</sub>	4.5×10 <sup>-2</sup>	6×10 <sup>-3</sup>	t <sub>i</sub> : イオンの輸率
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.85</sub> (CaO) <sub>0.15</sub>	2.5×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-3</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.91</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.09</sub>	9×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.91</sub> (Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.09</sub>	1.6×10 <sup>-1</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.92</sub> (Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.08</sub>	—	6×10 <sup>-2</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.69</sub> (LaO <sub>1.5</sub> ) <sub>0.33</sub>	1.5×10 <sup>-3</sup>	—	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.85</sub> (Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.15</sub>	1.3×10 <sup>-1</sup>	5×10 <sup>3</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.9</sub> (Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.1</sub>	6×10 <sup>-3</sup>	1.1×10 <sup>-3</sup>	
(ZrO <sub>2</sub> ) <sub>0.9</sub> (Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.1</sub>	—	2×10 <sup>-2</sup>	
(ThO <sub>2</sub> ) <sub>0.95</sub> (CaO) <sub>0.05</sub>	9×10 <sup>-4</sup>	1.2×10 <sup>-4</sup>	
(ThO <sub>2</sub> ) <sub>0.85</sub> (MgO) <sub>0.15</sub>	1.0×10 <sup>-3</sup>	1.5×10 <sup>-4</sup>	
(ThO <sub>2</sub> ) <sub>0.85</sub> (SrO) <sub>0.15</sub>	1.5×10 <sup>-3</sup>	4×10 <sup>-4</sup>	
(ThO <sub>2</sub> ) <sub>0.75</sub> (LaO <sub>1.5</sub> ) <sub>0.25</sub>	5×10 <sup>-3</sup>	—	
(ThO <sub>2</sub> ) <sub>0.95</sub> (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0.05</sub>	1.2×10 <sup>-2</sup>	1.9×10 <sup>-3</sup>	
(CeO <sub>2</sub> ) <sub>0.8</sub> (LaO <sub>1.5</sub> ) <sub>0.2</sub>	8×10 <sup>-2</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	
(CeO <sub>2</sub> ) <sub>0.8</sub> (YO <sub>1.5</sub> ) <sub>0.2</sub>	1.2×10 <sup>-1</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	
		0.5 < t <sub>i</sub> < 0.95	

報告されている<sup>18)</sup>。現在では導電率、耐久性、経済性などの面から、もっぱらイットリア安定化ジルコニアが研究の対象として選ばれている<sup>4)</sup>。

### 3. 燃料電池の原理と構造

安定化ジルコニアを電解質として使用したSOFCは排煙、溶網などの中の酸素ガス濃度分析計に利用されている濃淡電池と同一の動作原理で電力を発生する。

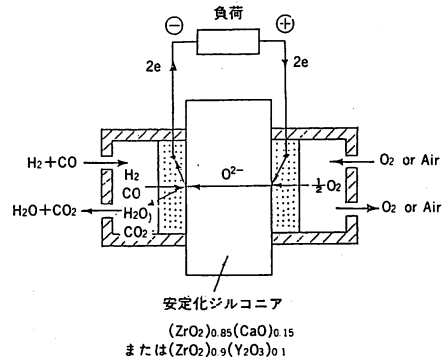
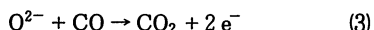
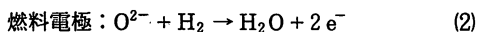
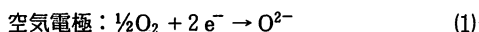


図-2 SOFCの動作原理図

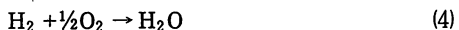
その基本的構造は図-2の原理図に示すように中央に固体電解質があって、その両側に空気電極と燃料電極をとりつけ、それぞれの電極に酸化剤として空気、燃料として水素、一酸化炭素などのガスを連続的に供給し、反応生成物の水蒸気、炭酸ガスを連続的に除去できるようにし、酸化剤と燃料が直接混合しないような構造としたものである<sup>1-3,11-15)</sup>。

空気電極と固体電解質との界面に、空気中の酸素は動作温度の1,000℃に維持されている空気電極で外部

の電気回路から流入する電子を受けとって容易に酸素イオンになる。この酸素イオンは固体電解質の中にとり入れられ、空格子機構によって酸素分圧の低い燃料電極の方向に拡散する。燃料電極と固体電解質との界面に供給された水素、一酸化炭素などの燃料は固体電解質中を移動してきた酸素イオンと反応して水蒸気や炭酸ガスになると同時に燃料電極上に電子を放出する。この電子は外部回路へ流出し負荷または直交変換器（インバータ）などを経由して空気電極へと戻る。すなわち、SOFCでも他の型式の燃料電池と同様に燃料の酸化反応と酸化剤の還元反応をそれぞれ燃料電極ならびに空気電極で別々に反応させている。したがって、それぞれの電極における反応は次式のように書ける。



式(1)と式(2)または式(3)とを組み合わせ書き換えると次のように水素または一酸化炭素の燃焼反応の式になる。



酸素ガスの濃淡電池の起電力Eは次式で表わされる。

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{O}'_2}} \quad (6)$$

ただし、R：気体定数、F：ファラデー定数、T：絶対温度、 $P_{\text{O}_2}$ ：空気電極の酸素分圧、 $P_{\text{O}'_2}$ ：対象電極の酸素分圧。

式(6)において  $P_{\text{O}'_2}$  を小さくすれば大きな起電力が得られるから、燃料電池では水素などを用いてこの目的の達成をはかるわけである。燃料ガス中の酸素分圧  $P_{\text{O}'_2}$  は  $10^{-17}$  atm 程度であると言われている。酸化剤に 1 atm の空気を供給したときの起電力は式(6)から 1.03V のオーダーとなる<sup>35)</sup>。

水素を燃料とした場合には平衡条件から式(6)は次のように書き換えられる<sup>1,8,20,21)</sup>。

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{O}_2}^{1/2} P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (7)$$

ここで、 $E_0$ ：標準起電力、 $P_{\text{H}_2}$ ：燃料中の水素分圧、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ：燃料中の水蒸気分圧である。

SOFCの動作温度である1,000℃における式(7)右辺の第1項の標準起電力および第2項の係数はそれぞれ次のようになる<sup>22,23)</sup>。

$$E_0 = 0.919\text{V} \quad (8)$$

$$\frac{RT}{2F} = 0.0549\text{V} \quad (9)$$

式(7)から、高い起電力を得るためには酸素と水素のそれぞれの分圧を高くし、十分に供給してやり、そして反応生成物の水蒸気をすみやかに排除してやればよいことがわかる<sup>21)</sup>。

固体電解質としてよく使用される  $(\text{ZrO}_2)_{0.91}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.09}$  は表1に示されているように1,000℃で0.09S/cmと比較的大きな酸素イオン導電性を示す。しかし、この導電率はリン酸水溶液とや熔融炭酸塩などの電解質のものと比較すると約10倍の大きさである。かりに固体電解質の厚さを1mmとして、電流密度として200~300mA/cm<sup>2</sup> ぐらい流そうとすると0.18~0.27Vの電圧降下を生ずる。上述したようにSOFCの起電力は1V前後でしかないので、この電圧降下は相対的にかなり大きい<sup>4)</sup>。高いエネルギー変換効率を得るためには少しでも損失を減らさねばならない。したがって、リン酸型や熔融炭酸塩型と同等の電圧降下にしようとする固体電解質の厚さを100μm程度と、さらに高性能化をはかるためには20~50μmと薄くしなければならない。この必要性がSOFCのセル構成や製造技術上の重要課題となる。

#### 4. 開発状況

SOFCの基礎研究や開発初期段階では他の型式と同様に平板状の電池素子が作られ、それらを多数個積層しようとする試みがされた。

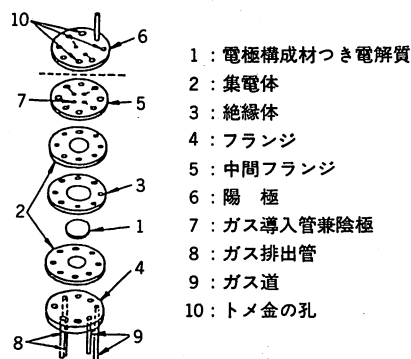


図-3 円板状SOFC

Brown Boveri and Cie社では図-3に示すように円板状の固体電解質など各種構成部品を使用して組み立てた燃料電池を作り、電圧-電流特性などの測定を行った<sup>1,11,31)</sup>。

米国のWestinghouse（以下WHと略す）社でも研

究開発の初期段階において円板状SOFCを試作した<sup>8)</sup>。  
1962年末から1970年にかけてWH社は米国の内務省石炭局との研究契約により石炭利用のSOFCの研究開発を進め、これをProject Fuel Cellと称した。この

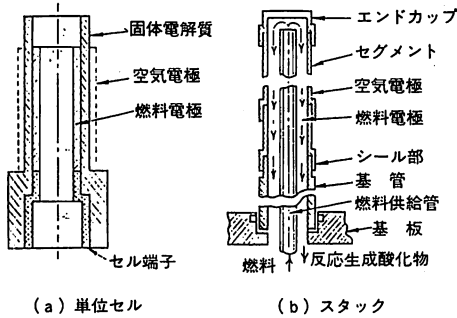


図-4 ベル・スピゴット型SOFC

プロジェクトでは図-4に示すようなベル・スピゴット型と称する単位セルを集積して100W燃料電池が作られた<sup>1,5,6,8,10,11)</sup>。しかし、この燃料電池の問題点は安定化ジルコニアで作られた細くて短い円筒管に電極を付着し、それらを多数個つなぎ合せて、つなぎ目をシールする技術にあった。セラミックの円筒管を高精度に焼き上げることが困難なため機械加工の工程が必要とされるなどして固体電解質のコストが高くなり実用的でなかった。

WH社ではベル・スピゴット型燃料電池のこのよう

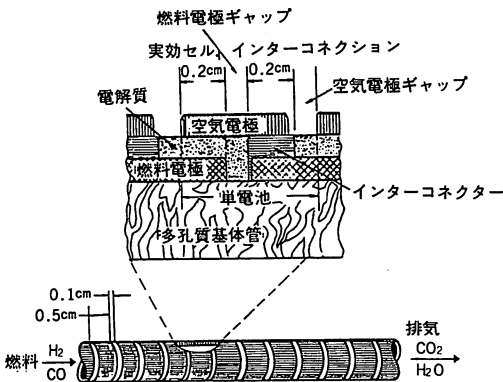


図-5 薄膜SOFC

な問題点を避けるため図-5に示したように多孔質基体管の表面上に薄膜状燃料電池を構成し、多数個直列接続する構造を考案し、20セル直列接続した燃料電池を試作して発電実験を行ったが、インター・コネクターが酸化ならびに還元雰囲気中にさらされて長時間の耐久性が期待できないことを明らかにした<sup>1,4,5,6,11)</sup>。

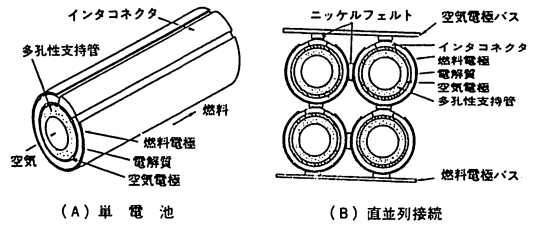


図-6 WH社のSOFC

このため、図-6-(A)に示したように基体管上に一つの単電池を構成し、構造的に燃料電極が外側に、そして空気電極はその内側に配置されるようにした。電解質、インター・コネクターの製造にはWH社で開発したEVD (Electrochemical Vapor Deposition) 法が適用される<sup>28,32)</sup>。そして、単電池の直列ならびに並列接続は図-6-(B)に示すように還元雰囲気中でニッケル

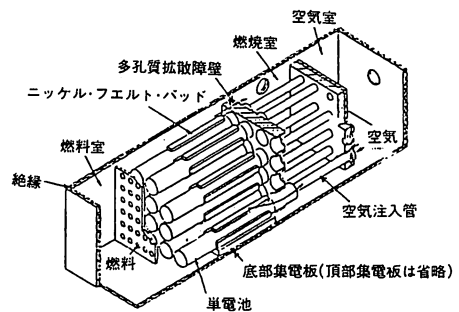


図-7 WH社のSOFCモジュール

・フェルトを使用して行われる。これらを図-7に示すようにシステム化して5kWの試験用モジュール試作を計画している<sup>4,5,28,29)</sup>。

我が国においては、電子技術総合研究所（以下電総研と略す）がイットリア安定化ジルコニアを電解質と

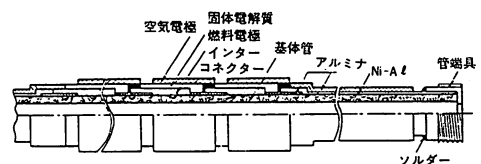


図-8 電総研のSOFC

するSOFCの研究を進めている。図-8に示すように多孔質基体管の端部を除き、その表面上に多数の薄膜状燃料電池を構成し、それらを直列接続している。現在、工業技術院のムーンライト計画の燃料電池発電技術の研究開発プロジェクトの一環として発電規模が数百W級を目標に研究している<sup>3,4,6,11-15)</sup>。

5. 発電特性の例

SOFCは基礎的な研究開発の段階にあるため各種のパラメータ調査のため小規模ではあるがいろいろな実験が行われている。本文では電総研で行われた発電実験のうちから数例を示す。

イットリア安定化ジルコニアを電解質とするSOFCは1,000℃の高温動作であるため活性化分極はほとんどなく、濃度分極の影響の少ない範囲で運転されるので、その電圧・電流特性には抵抗分極が支配的である。そのため端子電圧は負荷電流の広い範囲にわたってほぼ直線的な特性を示す。そして、この抵抗分極は燃料電池の内部抵抗として発電出力特性に大きな影響を及ぼす。電解質の膜厚をできるだけ薄く作り、電極やインター・コネクター、リード部分の抵抗を減少するようにして内部抵抗が大きくなるようにする。単電池の起電力は約1Vであるため、実用化をはかる上からも多数の単電池を直列に接続して高電圧化しなければならない。

基体管には21mmφ×500mmLのカルシア安定化ジルコニア、または21mmφ×500~700mmLのアルミナなどの多孔質管を使用している。燃料電極には酸化ニッケルを原料粉末とし、酸素アセチレン溶射して多孔質電極膜を形成し、使用前に水素により還元して気孔性の大きな金属ニッケル膜としている。

固体電解質は9モル%のイットリアで安定化したジルコニア (ZrO<sub>2</sub>)<sub>0.91</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0.09</sub>をプラズマ溶射して製作している。空気電極には導電性の良好な酸化物としてランタン・コバルタイトLaCoO<sub>3</sub>またはカルシウムをドープしたLa<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub>を酸素アセチレン溶射している。インター・コネクターはランタン・クロマイトLaCrO<sub>3</sub>を酸化雰囲気側、そしてニッケル・アルミナイドを還元雰囲気側に使用する二層複合膜とした。円筒状SOFCの電極、電解質、インター・コネクターなどの電池要素の形状パターンはそれぞれ適当なマスキングを行って作成している<sup>11-15,24-27</sup>。

図-9は21mmφ×700mmLの多孔質アルミナ基体管の外表面の単電池実効長8mm、インター・コネクター長8mm、20素子直列接続したSOFCを試作して発電実験を行い、得られた電圧・電流特性である。単電池の実効面積は5.28cm<sup>2</sup>となるので、負荷の電流密度300mA/cm<sup>2</sup>で0.8V/セル、そして、400mA/cm<sup>2</sup>で0.7V/セル程度と秀れた特性が得られている<sup>14</sup>。

SOFCの問題点の一つは反応面積を大きくするのが

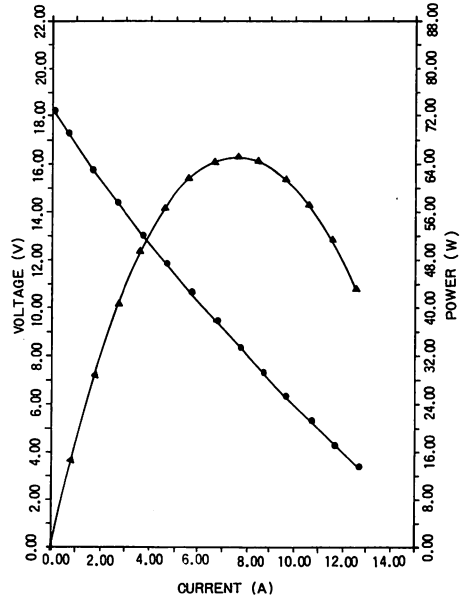


図-9 20セルSOFCの発電特性

困難なことである。円筒型では基体管径を大きくすれば、それに対応して多少は反応面積を増大することができる。基体管径48mmφとして12素子直列に接続した7スタック、合計84セル直列接続時の発電特性の例を図-10に示す<sup>14</sup>。

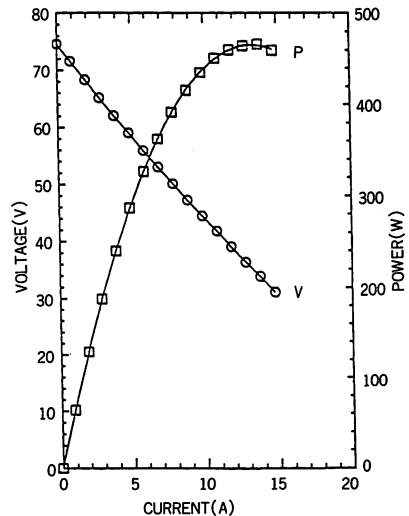


図-10 48mmφ SOFCの発電特性

SOFCは高温動作であるので軽質な炭化水素系燃料ガスを改質せずに直接供給しても発電することが可能であろうと予想されていた。しかし、メタンを主成分とする都市ガスを燃料として直接利用する際には炭素の析出や重質炭化水素の重合などにより基体管や電極

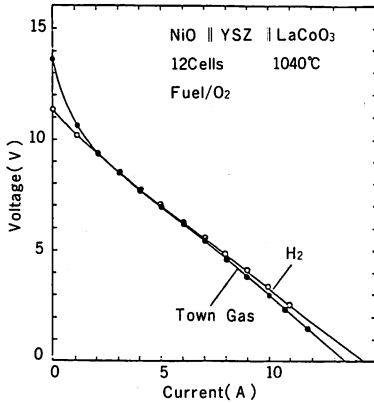


図-11 都市ガス燃料による発電特性

の気孔に目詰まりを生ずる怖れもあった。燃料に十分な水蒸気を添加することにより、この問題は解決できるようである。図-11は燃料にメタンを主成分とする都市ガスを供給した場合と水素の場合との電圧・電流特性の比較したものである。小電流領域では都市ガスが水素の場合より秀れ、やや電流が大きくなれば、ほぼ水素の場合と同等の結果が得られた<sup>14)</sup>。

SOFCの特徴の一つに水素とともに一酸化炭素も燃

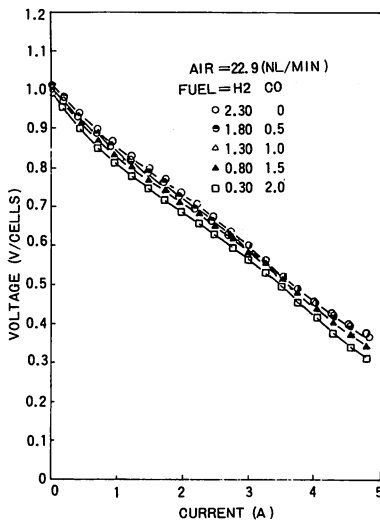


図-12 水素—一酸化炭素混合燃料による発電特性

料にできることである。図-12に示すように水素と一酸化炭素との混合比を変えても電圧—電流特性にはほとんど差異のない結果を得ている<sup>33)</sup>。

## 6. 発電システムの展望

SOFCは動作温度が $1,000^{\circ}\text{C}$ と高温であるので高性能な断熱容器の中に据付けることになる。断熱効果は

断熱容器の容積に対して表面積の割合いを小さくする程大きくなる。すなわち、燃料電池の出力容量を大きくする程熱的に有利になる。定常運転時には燃料電池の反応熱で動作温度を維持し、余剰熱は冷却系により外部へ排出される。そして、蒸気タービン発電による電力回収とかプロセス蒸気を発生し商用または産業用コージェネレーションシステムへの利用など有効に活用されることだろう。

SOFCには天然ガス、ナフサ、重油、石炭、メタノールなどの幅広い燃料を改質、またはガス化した水素、一酸化炭素を使用できる。また、天然ガスを直接使用することもできる。

SOFCの研究開発の展開を想定すると、開発初期の段階では天然ガスを燃料とし、リン酸型などと同様に外部改質器付または十分な高温余熱もあるので内部改質型や直接型などのシステムが $10\sim 1,000\text{ kW}$ 級の試験用プラントや $1\sim 20\text{ MW}$ 級の中容量分散設置用プラントとして運転されるのではないだろうかと予想される。

運転経験が蓄積され、信頼度が著しく向上すれば、さらに大容量の $1,000\text{ MW}$ 級が可能となり、燃料も豊富で低コストの石炭となり、ガス化して使用されることになろう。石炭のガス化は高温で石炭をガス化剤と反応させる。窒素の混入を避けるために、ガス化剤に酸素を用いて $2,000\sim 6,000\text{ kcal/Nm}^3$ 程度の中カロリー・ガスを生成する流動床方式または噴流床方式は発生ガス温度とSOFCの動作温度との整合性がよくて有利であると思われる<sup>34)</sup>。

SOFCの排熱は $1,000^{\circ}\text{C}$ 程度とかなりの高温であるため高品質である。したがって、開発されればカリウム・タービン、ガス・タービン、蒸気タービン等の単独または組み合わせ使用により交流発電機を運転して電力を回収することができる。また、蒸気タービンからの抽気とか背圧タービンの使用により、適当な圧力と温度の蒸気を利用することもできる。

図-13に大容量の石炭ガス化SOFC発電所の例を示す。排熱は蒸気タービンにより電力として回収される。出力の規模は燃料電池で $1,000\text{ MW}$ 、ボトムリングサイクルで $350\text{ MW}$ 程度と予想される<sup>34)</sup>。総合エネルギー変換効率 $60\%$ をかなり越えるのではないかと考えられている。

## 参考文献

- 1) 電気学会技術報告 (II部), 第38号, 1975.
- 2) 電気学会技術報告 (II部), 第141号, 1982.

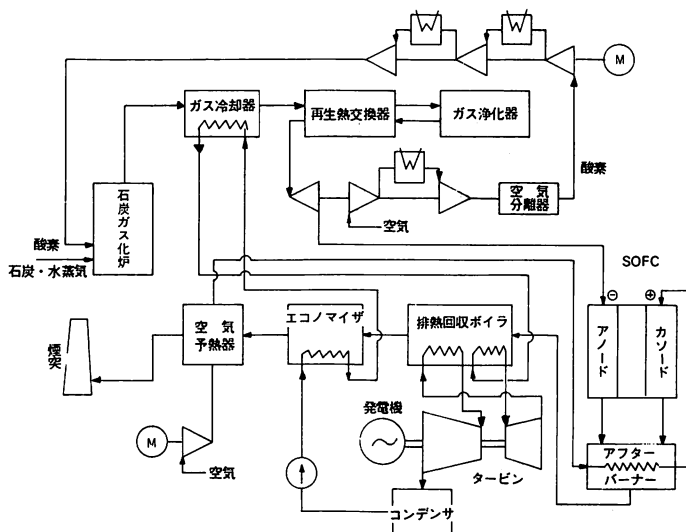


図-13 石炭燃料SOFC複合発電所

3) 吉沢, 編; 燃料電池と電力貯蔵システム, 第5章, 講談社サイエンティフィック, 近刊.

4) 高橋; 燃料電池, 共立出版, 1984.

5) 吉沢, 編; 電池. 講談社サイエンティフィック, 1982.

6) 小沢, 他; 燃料電池とその応用, オーム社, 1981.

7) 吉沢, 編; 新しい電池, 東京電機大学出版局, 1970.

8) J. O'M. Bockris, et. al., Fuel Cells: Their Electrochemistry, McGraw Hill Book Co. 1969.

9) G. Sandstedt, ed., From Electrocatalysis to Fuel Cell, Univ. of Washington Press, 1972.

10) 高橋; 電気学会雑誌, 95巻, 185, 1975.

11) 佐藤; 電気学会雑誌, 102巻, 201, 1982.

12) 佐藤; 新電気, 33巻, 3号, 35, 1979.

13) 佐藤; セラミックス, 13巻, 29, 1978.

14) 佐藤; 燃料電池発電技術シンポジウム'84, 工技院-NEDO, p.55-58, 1984.

15) 佐藤; 第16回窯業教室講演会資料, 窯業協会, p.35-45, 1984.

16) 日本金属学会編; 非化学量論的金属化合物, p.430-432, 丸善, 1975.

17) J. Hladik, ed., Physics of Electrolyte, vol. I/II, Academic Press, 1972.

18) 宗宮, 編; ジルコニアセラミックス1, 内田老鶴圃, p.109-125, 1983.

19) 宗宮, 編; ジルコニアセラミックス2, 内田老鶴圃, p.1-8, 1984.

20) 高橋; 電気化学概論, 槇書店, 1971.

21) 永田, 他; 高温学会雑誌, 7巻, 5号, 217, 1981.

22) 飯田, 他; 物理定数表, 朝倉書店, 1974.

23) JANAF Thermochemical Tables (2nd ed.), US Dept. of Commerce, NBS, 1971.

24) 大野, 他; 電総研彙報, 44巻, 5-6号, 338, 1980.

25) Y. Ohno, et. al., 15th IECEC, Paper No.809173, 1980.

26) Y. Ohno, et. al., Solid State Ionics, vol 3/4, p.439-442, 1981.

27) Y. Ohno, et. al., Solid State Ionics, vol 9/10, p.1001-1008, 1983.

28) A. O. Isenberg, Abstracts of National Fuel Cell Seminar, p.154-156, 1982.

29) A. O. Isenberg, Abstracts of National Fuel Cell Seminar, p.78-81, 1983.

30) D. C. Fee, Abstracts of National Fuel Cell Seminar, p.74-77, 1983.

31) 根岸; 電気学会研究会資料, ESC84-52, 1984.

32) A. O. Isenberg, ECS Symposium Electr. Mat. and Proc. for Ene. Couv. and Stor., 1977.

33) 春日, 他; 第11回固体イオニクス討論会講演要旨集, A-102, 1984.

34) 火力原子力発電, vol.35, No.4, p.403-429, 1984.

35) W. Feduska, et. al., Journal of Power Source, vol. 10, 89, 1983.

