

第 1 章

1

なぜMCFCか（燃料電池としてのMCFCの魅力）

燃料電池は環境への影響が非常に少なく効率の高い発電装置として注目されている。そのうち、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）は600～700℃で動作する高温型であり、電池自体の電圧が高く、高温の排ガスをを用いてガスタービンを動作させる事もでき、複合発電としてさらに高い効率が得られる。また、様々な種類の燃料を用いる事ができることも魅力の一つとなっている。炭酸塩を用いている事に特徴があり、炭酸ガスを濃縮することもできる。

第1章 なぜ MCFC か (燃料電池としての MCFC の魅力) 目次

横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 麦倉 良啓
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 吉葉 史彦

1 - 1 燃料電池発電とは	9
1 - 2 様々な燃料電池	12
1 - 3 MCFC の基本原理	15
1 - 4 発電システム基本構成	17
コラム1：HHV？LHV？DC 端？送電端？（熱効率の定義）	19
コラム2：炭酸塩とは？	20



麦倉 良啓（1986年入所）
入所以来、燃料電池の性能および寿命評価に関連した研究、特に、性能表示式によるMCFCの性能要因分析手法や、ニッケル短絡寿命に関する予測式の開発を担当。また、性能要因分析手法を発展させ、他の燃料電池（PEFC、PAFC、SOFC）の性能評価に適用することにも取り組んでいる。今後は、新型燃料電池の開発にも注力して行きたい。
（1章全体、コラム2執筆）



吉葉 史彦（1993年入所）
MCFCの大型スタック発電性能評価に関する研究や、燃料電池発電システムの熱効率解析等を実施してきた。今後は、10kW級スタック、300kW小型発電システム、高圧モジュール発電システムの運転や熱収支解析の経験を活かし、MCFCシステムの簡素化やMCFC発電システムの有効性を拡大する研究を展開する。
（コラム1執筆）

1 - 1 燃料電池発電とは

燃料電池は、かつてはアポロ宇宙船やスペースシャトルの電源として知られていたが、近年は、自動車に搭載されたり家庭用に設置されるなどして、より身近な存在となってきた。このように燃料電池が注目される理由として、以下の魅力が挙げられる。

- ・燃料から電気に変換する効率が高い
- ・排出されるガスがクリーン
- ・幅広い分野に適用できる

このような特長は、クリーンな環境を確保しつつ現代社会に不可欠なエネルギーを確保する手段として燃料電池が最も適切な発電装置の1つと成り得ることを示している。

まず、燃料電池の歴史から振り返りたい。燃料電池は、イギリスのグローブ卿によって19世紀前半に実験され、その可能性が示された⁽¹⁾(図1-1-1)。図の下部にある4個のコップが燃料電池であり、上部の1つのコップでは水の電気分解が起こっている。下部のコップでは、水素と酸素が充填された試験管をかぶせられた2本の金属箔(白金)が、電解質(希硫酸)に浸されている。この一対の金属箔の間には1V程度の電圧が生じる。これを電池として使用した場合、試験管内のガスを消費し切れれば電気を取り出すことはできなくなるが、試験管にガス

を連続的に供給すれば連続的に発電することが可能となり、発電機として機能することになる。このように燃料を外部から供給することから燃料電池と呼ばれるようになった。燃料電池の発想はたいへん古いものであるが、実用化は20世紀に入ってからである。同時期に発明されたエンジンの実用化は早かったが、燃料電池の実用化にはかなり長い年月を要した。

燃料電池は使用する電解質により分類される。グローブ卿は電解質に希硫酸を使用した。現在はこれに代え固体高分子を用いる固体高分子形(Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFCまたはProton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC)や、りん酸形(Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC)、熔融炭酸塩形(Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC)、固体酸化物形(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)が主要な燃料電池である。

燃料電池発電と、現在の火力発電所の主流であるガスタービン複合発電とを比較してみたい。図1-1-2には両方式の機器構成を示す。ガスタービン発電方式ではガスタービンが発電効率を支配しているが、燃料電池発電では燃料電池が支配する。

また、各種発電システムの発電出力と発電効率の関係を図1-1-3に示す。

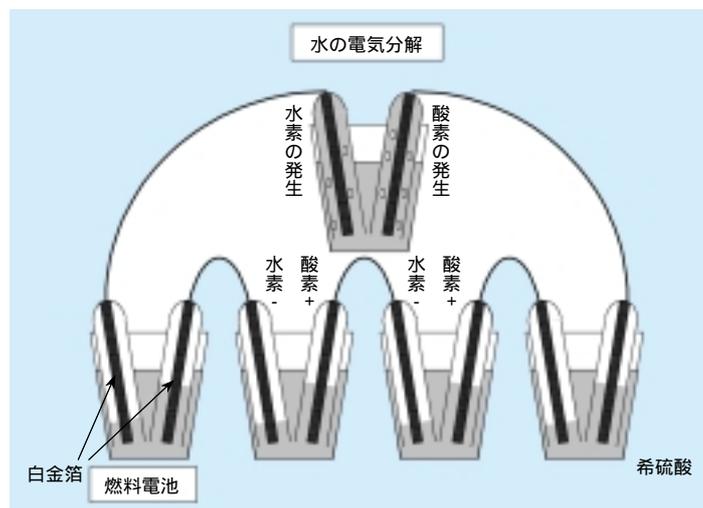


図1-1-1 グローブ卿の燃料電池

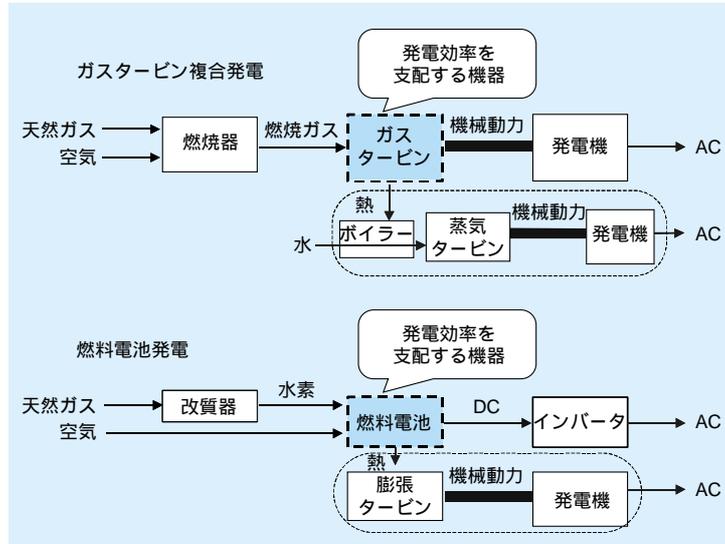


図1-1-2 発電方式による機器構成の比較

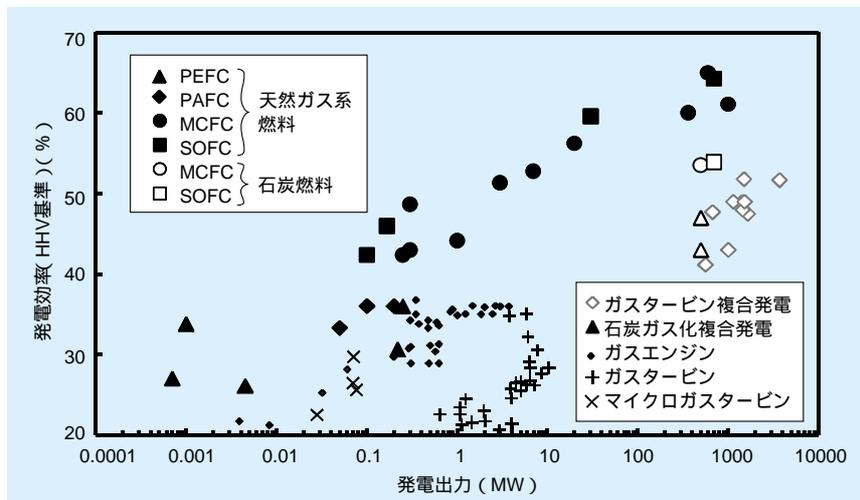


図1-1-3 各種発電システムの発電出力と発電効率

ガスタービン発電では、燃焼器で高温のガスを発生させ、ガスタービンを回して発電するが、燃料ガスが高温なほど高い発電効率を得られる。したがって高効率化のため1500 級までの高温化および大型化が進められ、51%程度の発電効率が達成されている。しかし、1500 以上のさらなる高温化には新たな材料の開発やタービン翼の冷却が必要であり、限界に近づきつつある。これに対し、燃料電池発電では発電効率の主要機器である燃料電池の理想発電効率は低温の場合ほど高く84%にも達する。一方、電池内で起こる化学反応は高温の場合ほど活発である。当所の解析によれば運転温度が500 ~ 1000 で最も高い効率が期待でき、ガスタービンと比較して低い温度域で高い効率が得られる⁽²⁾。さらに、燃

料電池とタービンとを組み合わせた複合発電では、発電出力が大きい程、発電効率の高い大型のタービンを利用できるため発電効率が高くなる。

燃料電池は、アノード、カソード、電解質（マトリックス）の3つの主要な部材から構成され、これら一組をまとめてセルと呼ぶ。図1-1-1のグローブ卿の電池で説明すると、2枚の白金箔がアノードとカソードに相当する。アノードは、燃料が供給される電極であり、燃料極あるいはマイナス極とも呼ばれる。一方、カソードは空気や酸素が供給される電極であり、空気極、酸素極あるいはプラス極とも呼ばれる。

燃料電池では電極面積を広くするほど大きな電流が得られるため、電気出力は電極面積に比例して増加する。

このため、開発されている燃料電池では1m²以上の大面積なものがある。また、燃料電池において大電力を得るためには、図1-1-4に示すように単セルを何枚も積層する。このように、多数のセルが積層されたものを一般的にスタックと呼ぶ。単セルと単セルの間にはセパレータと呼ばれる部品が使われている。セパレータは、電気抵抗の低い金属や炭素でできており、単セルを電氣的に結合する役割の他、燃料ガスと空気を分離する役割、燃料ガスと空気をセルに供給する役割があり、両側にガス流路が刻まれている。燃料電池は種類によって使用する材料が異なるため、その厚みは様々であるが、一般的にアノード、カソード、電解質の厚みは数十μm～1mm程度と非常に薄く、セパレータまで含めても1セル当たり

の厚みは1cmに満たない。

図1-1-5には、PEFCの発電原理を示す。水素(H₂)は、アノードに電子(e⁻)を与え、2つの水素イオン(H⁺) (別名プロトン) となって電解質中をカソードに向かって移動していく。この水素イオンはカソードで酸素(O₂)と反応し、電極から電子を受け取って水(H₂O)となる。このようにアノードでは、中性の物質をイオンと電子に分離し、逆にカソードではイオンと電子から中性の物質ができる。このため、アノードでは電子が過剰な状態となり、カソードでは逆に電子が不足する状態になる。つまり、これらの電極を外部的に電線で結びると自然に電気が流れることになる。これが、発電の原理である。

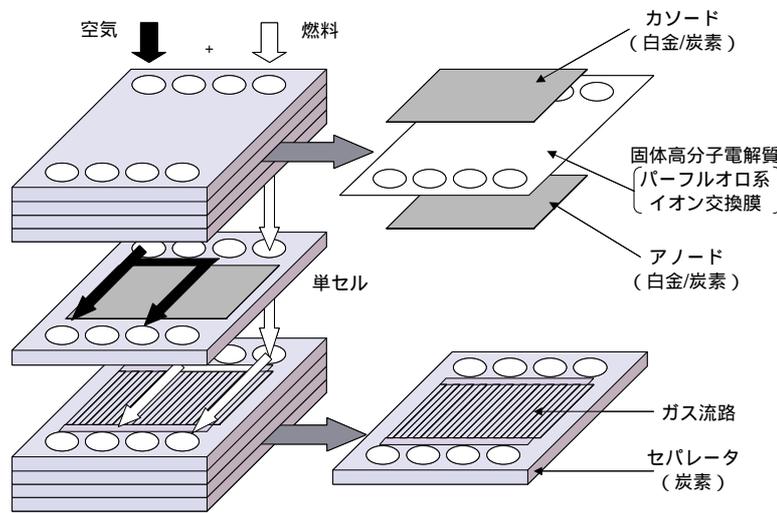


図1-1-4 PEFCのスタック構造

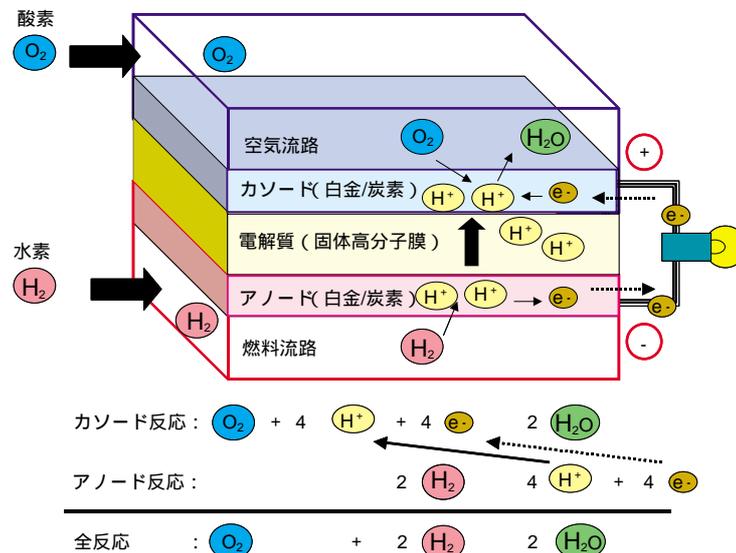


図1-1-5 PEFCの発電原理

1 - 2 様々な燃料電池

1-2-1 種類と一般的な特徴

燃料電池は、既に述べたようにPEFC、PAFC、MCFC、SOFCに分類されるが、電解質の特性によって動作温度や使用する電極材料が選定される。また、MCFCとSOFCは他に比較して電池の動作温度が高く、電池の排熱を利用した複合発電もできるため、特に高温型燃料電池と呼ばれている。燃料電池の種類を表1-2-1に、また、燃料電池の種類と燃料との関係を図1-2-1に示す。200 以下の比較的低温で動作させるPEFCやPAFCでは、化学反応を活発に行わせるため、白金を触媒として使用しているが、MCFCやSOFCは動作温度が高いため高価な触媒が必要なく、ニッケル(Ni)が電

極として使用されている。Niは天然ガスの主成分であるメタン(CH₄)を水素(H₂)と一酸化炭素(CO)に改質する触媒能力があるため、MCFCやSOFCでは天然ガスを直接燃料として使用することもできる。また、SOFCおよびMCFCは一酸化炭素を多く含むバイオマスガス化ガス、廃棄物ガス化ガス、石炭ガス化ガスなどを直接使用できるが、PAFCやPEFCでは、一酸化炭素の濃度が高いそれらのガス化ガスは使用できない。以下で各燃料電池を解説する。

- 1 PEFC：イオン伝導性を持った固体高分子（パーフルオロ系イオン交換膜）を電解質に使用することで、自動車用や家庭用として近年盛んに研究が行われている。運転温度は約80 である。発電効率は約60%と高く、安価な水素製造が実現できれば、魅力的な電源となるが、天然ガス等を燃料とする場合には、触媒である白金が10ppm以上の一酸化炭素濃度で触媒作用を失うため、一酸化炭素の除去が不可欠である。このため、天然ガスを燃料とする場合の目標発電効率は36%程度となるが、排熱を利用した給湯ができ、電気と熱をあわせた総合効率は80%近くとなり、家庭用電源としての利用が期待される。発電出力としては、家庭用として1kW級が、また、自動車用としては数十kW級が想定されている。
- 2 PAFC：電解質として非常に濃いりん酸水溶液を使用し、動作温度は200 前後である。PEFC同様に白

表1-2-1 燃料電池の種類と特徴

	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
動作温度	約80	約200	600 ~ 700	700 ~ 1000
電解質	プロトン導電性高分子膜	りん酸水溶液	溶融炭酸塩 (Li/K, Li/Na)	固体酸化物 (YSZ)
反応イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻
使用可能源燃料	水素 天然ガス メタノール	天然ガス メタノール	天然ガス バイオマス、廃棄物 石炭	天然ガス バイオマス、廃棄物 石炭
適用分野	移動用電源 分散電源など	火力代替電源 分散電源	火力代替電源 分散電源	火力代替電源 分散電源
備考	COによる触媒被毒	COによる触媒被毒		

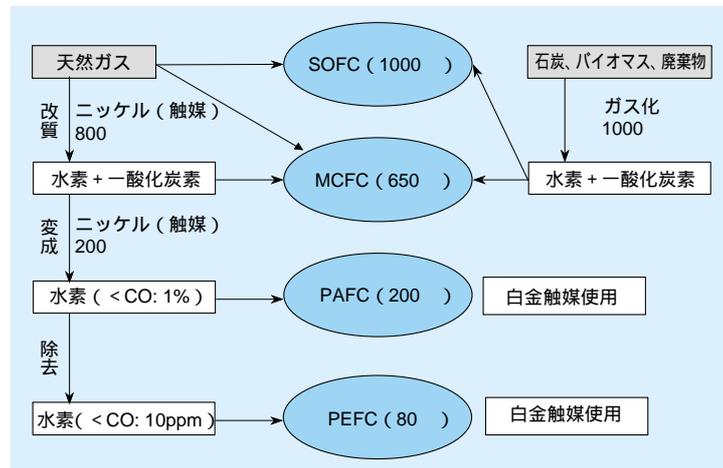


図1-2-1 燃料電池と使用可能な燃料の関係

金触媒を使用するが、PEFCよりも動作温度が高いため、一酸化炭素(CO)の許容値は1%と高い。これ以上の一酸化炭素濃度を持つ燃料を使用する場合には、一酸化炭素を二酸化炭素に転換する変成器を用いる必要がある。PAFCで使用できる燃料は比較的水素成分の多い天然ガス、メタノール、およびプロパンガス等に限定される。発電効率は40%弱であるが、排熱を利用した給湯ができ、電気と熱をあわせた総合効率は80%近くとなり、分散型電源としての利用が期待される。現在は、発電出力200kW級プラントの実証導入が進められている。

- 3 MCFC：電解質には通常、混合炭酸塩(炭酸リチウムと炭酸ナトリウムあるいは炭酸カリウムの混合物)を溶融させたものを使用する。この混合炭酸塩は約490℃で解けて、高温なほど導電率が高くなるが、700℃以上になると、電池に使用している材料を激しく腐食させるため、MCFCの作動温度は650℃前後である。アノードにはニッケル(Ni)が用いられる。また、ニッケルを触媒として、一酸化炭素(CO)は水蒸気(H₂O)と反応し、水素(H₂)と炭酸ガス(CO₂)になる(シフト反応)ので、一酸化炭素も直接燃料として使用できる。従って、石炭ガス化ガス等も直接使用することができる。発電出力としては分散型電源としての250kW級から火力代替用の数万kW級までが想定され、開発が進められている。
- 4 SOFC：電解質には、セラミックスであるジルコニアが通常使用され、その動作温度は700～1000℃である。アノードにはニッケル(Ni)主体の物質が使用されている。発電効率は45～60%で、分散型電源から火力代替用までの広い用途が期待されているが、近年は発電出力1～50kW程度の小型のものが中心に開発されている。

1-2-2 電池本体の発電効率

このような燃料電池本体の発電効率について考えてみたい。ガスタービン発電では燃料は燃焼器で全て燃焼されるが、燃料電池では電池内で燃料がなくなると電圧が急激に低下するため、供給した燃料を100%利用することはできない。供給した燃料のうち発電に利用される燃料の割合を燃料利用率と言い、同様に酸素利用率も定義

される。燃料利用率や酸素利用率は、燃料電池システムにおいて重要なパラメータであり、発電効率を上げるためには燃料利用率を高くする必要があるが、実際には80～90%程度である。ここで、燃料利用率を U_f とすると燃料電池の発電効率 ε_{fc} は、いずれのタイプの燃料電池であっても電池の出力電圧 V によって次式によって定まる。

$$\varepsilon_{fc} = \frac{nFU_f V}{\Delta H} \quad (1-2-1)$$

ここで、 n は反応電子数であり、ファラデー定数 F (C/mol)との積である nF は1モルの燃料が反応するときに移動する電荷の総量である。 H は燃料1モルを燃焼した場合の発熱量である。上式中の nF/H は燃料の種類のみによって決まり、たとえば燃料が水素の場合 $\varepsilon_{fc} = 0.675 U_f V$ (0、HHV(高位発熱量、コラム1参照)基準)となる。 V は、無負荷時の電圧である開路電圧 E から、反応によるガス濃度変化に伴う起電力の低下分(ネルンストロス)、内部抵抗による電圧降下、アノード反応に伴う電圧低下分、カソード反応に伴う電圧低下分を差し引いた値である。(性能要因の詳細については、3-1節参照)

4つの燃料電池性能の比較を図1-2-2に示す。燃料は天然ガス、燃料利用率80%、運転圧力0.5MPaとしている。図中の発電効率は電池本体の効率であり、燃料の持つ高位発熱量と発電電力との比である。いずれの燃料電池も電流密度を上げると電圧は低下する。電流密度

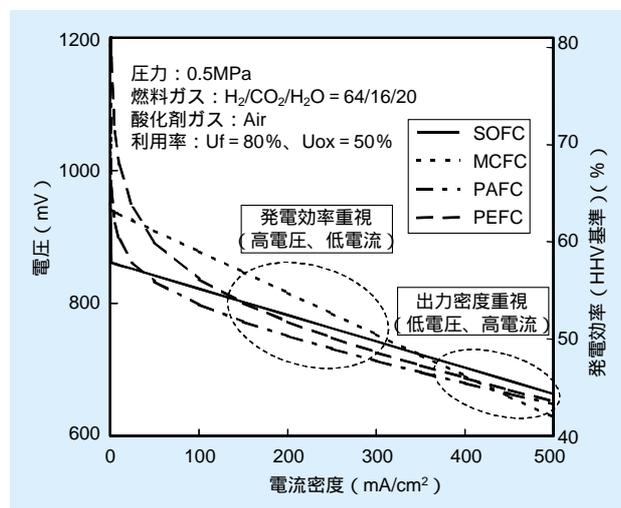


図1-2-2 各種燃料電池性能の比較

300mA/cm²以下の、発電効率を重視する、つまり、電圧の高さを重視する電流密度域では、MCFCの出力電圧が他の燃料電池よりも高い。このように燃料電池本体で最も高い電圧が得られることがMCFCの大きな魅力の1つである。一方、発電効率ではなく、出力密度重視の場合、出力密度は電圧と電流密度の積であり、例えば電流密度200mA/cm²で電圧800mVの場合の出力密度は0.16W/cm²であるのに対し、400mA/cm²で650mVの場合の出力密度は0.26W/cm²となるため、300mA/cm²以上の高い領域に設定する。この場合、MCFCはセル電圧の電流密度依存性が大きいいため、300mA/cm²以上の電流密度域ではMCFCの出力電圧の優位性はほとんどなくなり、いずれの燃料電池の電圧もほぼ同じ値となる。

1-2-3 各種電池の性能要因分析

各燃料電池で性能差を生じている原因を探るため、電流密度250mA/cm²における各性能要因を分析した結果を図1-2-3に示す。図では、棒高さが開路電圧であり、これから各性能要因による電圧ロスが差し引かれたものが出力電圧となる。棒高さに占める割合が大きい性能要

因ほど性能への影響が大きい。本図から出力電圧は、低温型であるPEFCとPAFCで低く、高温型であるMCFCとSOFCで高いがこれは以下の要因による。

開路電圧は、理論的に低温なほど高くなる。しかし、発電によって生成する水の状態もこれに影響する。燃料電池の運転温度が100℃以上の場合には水は気体状態で生成するが、PEFCでは動作温度が約80℃と低いため水は液体状態で生成し、このため開路電圧はPAFCよりも低くなる。ネルンストロスに関しては、低温型であるPEFCとPAFCではカソード側に水を生成するため燃料の希釈がなく、25mV程度と小さいが、高温型であるMCFCとSOFCではアノード側に水が生成し、燃料を希釈するため、ネルンストロスは110mVと大きい。また、カソード過電圧は、電池間で大きな差があり、低温型のPEFC、PAFCでは非常に大きく、高温型のMCFC、SOFCでは小さい、これがMCFC、SOFCの出力電圧が高い最大の要因である。MCFCはこのように出力電圧が高いことに加え、高温ではあるが、加工がしやすく比較的安価な金属材料を使用できることが特長の1つである。

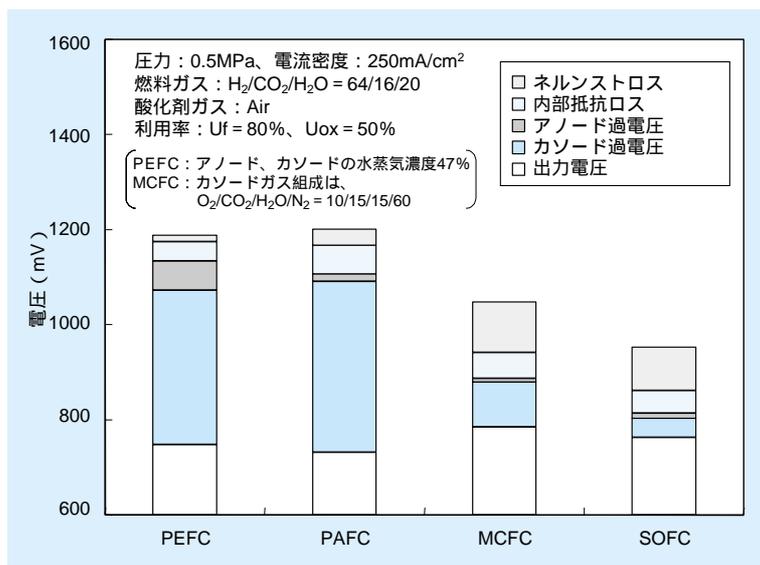


図1-2-3 各種燃料電池の性能要因分析結果

1-3 MCFCの基本原理

1-3-1 電池材料と反応

炭酸塩（コラム2参照）を電解質として用いるMCFCスタックと電極構造を図1-3-1に示す。また、MCFCの発電原理を図1-3-2に示す。

MCFCの動作温度は約650と高温である。アノードはニッケル（Ni）を主体にクロム（Cr）、アルミニウム（Al）などの金属を少量添加した合金であり、カソードは酸化ニッケル（NiO）である。電解質には、炭酸リチウム（ Li_2CO_3 ）と炭酸ナトリウム（ Na_2CO_3 ）あるいは炭酸カリウム（ K_2CO_3 ）を混合した炭酸塩（我が国では、

3-2節で詳述するように、Li/Na系混合炭酸塩が主流）が使用され、これをセラミックスであるリチウムアルミネート（ LiAlO_2 ）の多孔質板に含浸したものが電池に組み込まれている。アノードおよびカソードには、図1-3-1に示すように数 μm の細孔が多数存在する。この細孔の一部に電解質がしみ込み、ガスと電解質と電極が互いに接する場所が形成され、ここで図1-3-2に示した電池反応が円滑に進行する。すなわち、カソードでは、酸素（ O_2 ）と炭酸ガス（ CO_2 ）と電子から炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）が生成される。炭酸イオンは電解質中をカソードからアノード方向に移動する。アノードでは、炭酸イオンと水素（ H_2 ）が反応し、水（ H_2O ）と炭酸ガスが生成され、

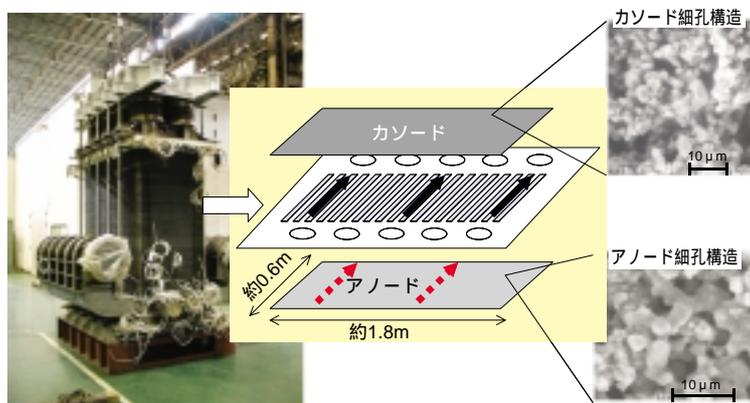


図1-3-1 MCFCスタックと電極構造

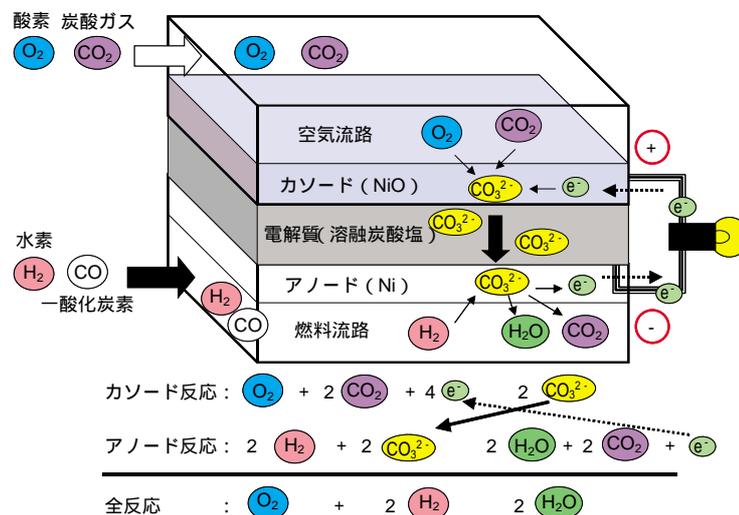


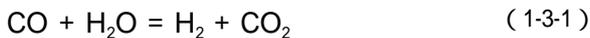
図1-3-2 MCFCの発電原理

電子が放出される。全反応は、水素と酸素からの水の生成反応である。

PEFCでは、水素イオンがアノードからカソードに移動し、カソードで水蒸気を生成したが、MCFCでは炭酸イオンが、逆にカソードからアノードに移動しアノードで水蒸気を生成する。この水蒸気の生成する場所の差が、性能要因であるネルンストロスの差を生じさせる。

1-3-2 燃料改質とガスリサイクル

MCFCでは、アノードであるニッケル（Ni）が触媒の役割を果たし、下記のシフト反応によって一酸化炭素（CO）と水蒸気から水素と炭酸ガスが生じる。このため、MCFCでは石炭ガス化ガスのような一酸化炭素の多い燃料ガスも、この反応によって水素に変換されるため燃料として利用できる。



また、天然ガスの主成分であるメタンの改質をセル内で行うことも可能である。メタン改質反応は



である。一般にメタンガスの改質反応とシフト反応によ

るメタンの水素への燃料転換率は、MCFCの動作温度（約650）では必ずしも大きくないが、MCFC内部では図1-3-2中のアノード反応によって水素が随時消費され、また、この反応で熱と水蒸気が発生するため比較的高い燃料転換率を得ることができる。これは内部改質型と呼ばれ、小型プラントの電池構造として適する。

一方、メタン改質を電池外で行うものを外部改質型と呼ぶ。外部改質型は内部改質型に比較して構造が簡単であり、かつ軽量であるので、大形プラントの電池構造として適する。（コラム3参照）

また、電池本体に関連した技術としてガスリサイクル運転技術がある。MCFCを安定して運転するには、図1-3-3に示す3つのガスリサイクルが必要となる。

- 1 アノードガスリサイクル：燃料排ガス中の未反応の燃料を入口側に再び戻して、燃料利用率を上げるとともに、炭素やメタンの発生を防止する。（コラム4参照）
- 2 カソードガスリサイクル：カソード出口排ガスの一部を再び入口に戻して、電池で発生する熱を効率よく回収すると共に、電池の温度を制御する。
- 3 炭酸ガスリサイクル：アノード側で発生した炭酸ガスをカソード側に戻し、カソード反応に必要な炭酸ガスを賄うことによって炭酸ガスの外部供給設備を不要にする。（コラム5参照）

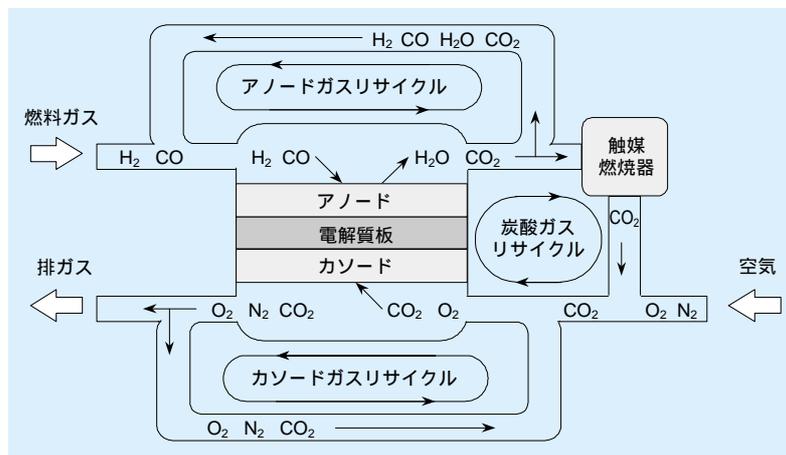


図1-3-3 MCFCのガスサイクルシステム

1 - 4 発電システム基本構成

燃料電池は、燃料として天然ガスばかりでなく、世界的に埋蔵量が豊富な石炭や、廃棄物やバイオマスを経由してガス化したガスを使用することができる。これらを燃料とする場合、天然ガスや石炭を水素や一酸化炭素にする装置が、燃料電池の前段に必要となる。天然ガスの改質器は既に実用化され、石炭から水素や一酸化炭素を取り出すガス化炉は、現在開発が進められている。燃料電池を電気事業用として使用する場合には、高い発電効率が要求されるため、燃料電池から排出される熱を利用してタービン圧縮機（T/C）や蒸気タービン（S/T）を回し付属する発電機によって複合発電を行う。図1-4-1には天然ガスを燃料とした場合の燃料電池発電システムの機器構成を示す。

PEFCでは天然ガスは改質器で水素と一酸化炭素に改質され、一酸化炭素を除去した後、燃料電池に供給される。PEFCの排熱は80℃と低く、複合発電は行わず、給湯等に利用する。PAFC、MCFCでは燃料電池の後段に燃焼器（改質器）がある。燃料電池で消費した燃料ガス中の未燃分はここで燃焼され、T/Cや改質器の熱源として利用される。MCFC、SOFCでは排熱が650～1000℃と高温なため、さらに後段に排熱回収ボイラ（HRSG）を設置し、蒸気を発生させ、S/Tで発電する。

また、SOFCでは電池内で改質が行われるため、燃料電池前段の改質器が不要となる。MCFCも電池内で改質を行う内部改質型の場合はSOFCと同じ機器構成となる。このようにMCFCなどの高温型燃料電池では、燃料供給系の簡素化が図れることが魅力である。また、電池温度制御のための冷却系についても水冷でないため複雑な水処理系が不要となることも魅力である。なお、T/Cには主として既存ガスタービン発電機の転用が考えられており、ガスタービン部を膨張タービンとして用いることが想定され、G/Tと表記することもある。

次に、燃料電池発電システムの発電効率を解説する。燃料電池発電システムの発電効率（送電端、コラム1参照）は次式で表すことができる。

$$\eta_{net} = \eta_{fp} \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_{pc} + (1 - \eta_{fp} \cdot \eta_{fc}) \cdot \eta_{bc} - \eta_{ap} \quad (1-4-1)$$

ここで、

- η_{net} : 燃料電池発電システムの発電効率（送電端）
- η_{fp} : 燃料供給部の燃料変換効率
- η_{fc} : 燃料電池本体部の発電効率
- η_{pc} : インバータの直交変換効率（1）

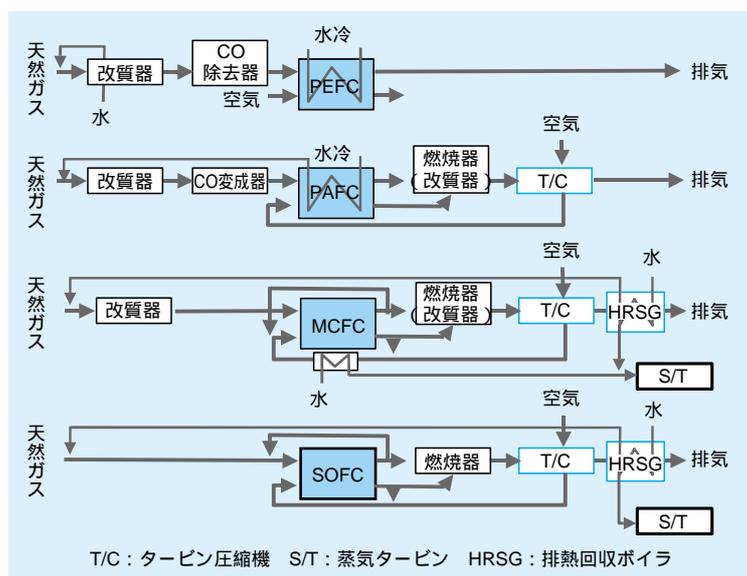


図1-4-1 燃料電池システムの機器構成

- b_c : ボトミングサイクルの発電効率（小型システムには付かない）
- a_p : カソードブロワやポンプ等の補機動力

天然ガスは改質器で水素等に燃料変換効率: f_p で転換され、燃料電池で直流電力に発電効率: f_c で変換され、インバータで交流電力に直交変換効率: p_c で変換される。また、ここで電力に変換されなかったエネルギー: $1 - f_p \cdot f_c$ は、T/Cの発電効率 b_c で交流電力に変換される。インバータとT/Cの交流電力の和から、システム内でのガス循環やポンプ等の動力として消費される補機動力: a_p を差し引いた値が、発電効率となる。図1-4-2にはMCFC発電システムの機器構成と発電効率との関係を示した。この概算では、発電効率は52%となる。

なお、本構成では燃料に天然ガスを想定しており、カソード側に電池温度制御のためのカソードガスリサイクルが設置されている。また、アノードで発生する炭酸ガスを多く含むアノード排ガスは改質器の燃焼部に入り、共存する水素や一酸化炭素が燃焼（酸化）されて、水や炭酸ガスに変わった後に、空気と混合されてカソードに供給され、炭酸ガスリサイクルが完成される。天然ガス燃料の場合には、設定できる燃料利用率に上限があり、また、水素元素を多く含み、炭素析出も比較的起こりにくいと考えられることから、本構成ではアノードガスリサイクルは付設していない。

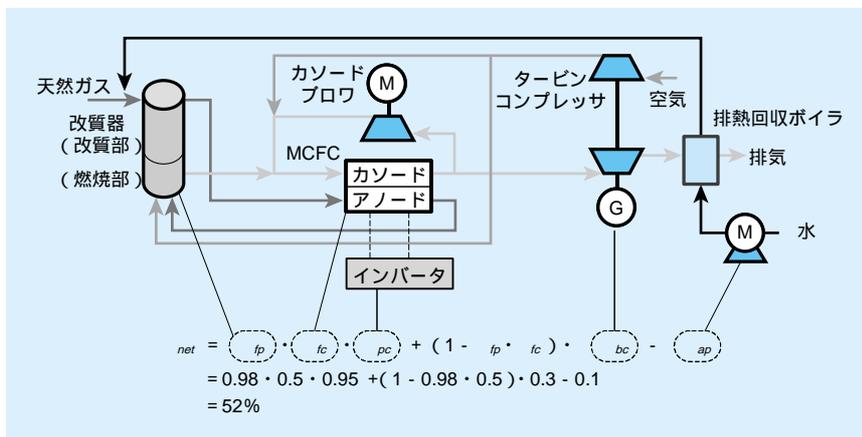
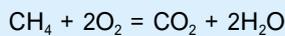


図1-4-2 MCFC発電システムの効率

コラム1：HHV？LHV？DC端？送電端？（熱効率の定義）

発電設備の熱効率は、その分母となる燃料の発熱量をどのように定義するか、あるいは、分子である発電電力をどのように定義するかにより数値が変わってくる。燃料電池発電設備ではこれらの表記が国内外で混在して用いられていることが多く注意しなければならない。

分母となる発熱量の表記には、LHVベース（低位発熱量基準）とHHVベース（高位発熱量基準）がある。両者の差は、燃料が完全燃焼した場合に発生する水の取り扱いにより生じる。例えば、天然ガスの主成分であるCH₄ 1 molが完全燃焼した場合、生成物として2 molの水が発生する。



この反応による生成物であるCO₂とH₂Oは気体である。そのうちH₂Oは、液体から気体になるとき大きな吸熱を伴う（汗が蒸発する時の吸熱により体温の上昇を防ぐことと同じである）。逆に、液体になるときに大きな発熱を伴う。

即ち、燃料は燃焼して気体の水（水蒸気）を生成するが、その気体の水が液体になる時には、熱を発生する（10.5kcal/molH₂O）。この発熱を燃料の発熱量に含めた場合、即ち、燃焼したガス中の水分が液体となった場合までの燃焼熱を分母としたのがHHVベースで定義された熱効率であり、水分が気体として排出された時までの発熱量を分母と定義するのがLHVベースの熱効率である。一般に発電装置では、水蒸気が液体の水になる時の発熱量を有効に利用することはできない。

HHVベースとLHVベースの熱効率の値の差は、燃料が完全燃焼した場合の水分量すなわち燃料中に含まれるH元素の量に左右され、水素、天然ガス、石炭ガス等の燃料種類により異なる。例えば、CH₄を燃料とし、熱効率が送電端で50% HHVとなった場合、LHVベースで表記すると、55.5% LHVに相当する。水素を燃料とした場合、HHVベースで50% HHVであれば、LHVベースでは59% LHVである。なお、COが燃焼し、CO₂を生成する場合は、燃焼反応により水が発生しないため、LHVとHHVの値は同一となる。

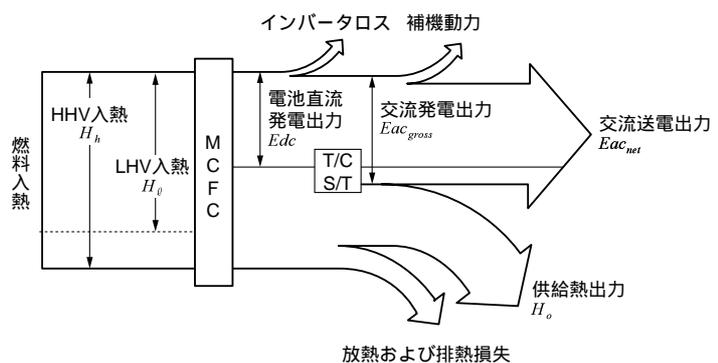
一方、熱効率の定義の際、分子となる電気出力にも様々な定義がある。通常発電装置であれば、交流で電力を利用す

るのであるから、交流端出力への変換効率のみが意味を持ち、燃料電池やガスタービンの出力から、補機動力や所内動力を差し引いた数値が送電端熱効率と一般に定義されている。

火力発電所での熱効率の定義は、我が国ではHHVベース、欧米ではLHVベースの送電端効率とすることが多い。これに対して、コージェネレーションプラントは我が国においてもLHV表記が多く燃料電池においては、適用分野によって表記がまちまちとなっているのが現状である。LHVベースで定義した場合、熱効率の数値が大きくなるので発電性能が過大評価されてしまう可能性が生じる。

また燃料電池発電では、直流で発電された電力をインバータにより交流に変換して利用することが多いため、その電気出力はDC端やAC端で定義される。DC端は燃料電池で発電された直流電力であり、電気的にインバータの上流で定義される。AC端は直流の電力を交流に変換した後の出力であり、インバータの下流で定義される。通常インバータ効率は90～95%程度であるから、DC端とAC端出力を熱効率で表した場合、3～5%程度の差が発生する。また、分散型電源として熱電併給を考えた場合には、熱効率の分子となる出力に電気出力と熱出力が含まれる。

以上のように、熱効率を論じるためには、電気出力がACなのかDCなのか、燃料の発熱量はLHVベースなのかHHVベースなのか、補機動力や所内率をどこまで差し引いているのかを明確に定義することが重要である。



例えばHHVを基準にすると H_h が分母となり、代表的な熱効率は以下で表される。

$$\begin{aligned} \text{送電端効率 } \varepsilon_{net,h} &= \frac{E_{ac,net}}{H_h} & \text{送電端効率 } \varepsilon_{gross,h} &= \frac{E_{ac,gross}}{H_h} \\ \text{総合熱効率 } \varepsilon_{tot,h} &= \frac{E_{ac,net} + H_o}{H_h} & \text{電池効率 } \varepsilon_{fc,h} &= \frac{E_{dc}}{H_h} \end{aligned}$$

図 エネルギーの流れと熱効率表現との対応

コラム2：炭酸塩とは？

MCFCに使用されている炭酸塩は、室温では白い粉状であるが、約500以上の高温では融けて無色透明な液体状態となり、これを熔融炭酸塩と呼ぶ。炭酸塩は、日常あまり聞き慣れない物質であるが、実は粉石けんや洗剤の成分や入浴剤の配合成分として広く用いられている他、食品添加物として、中華麺やこんにゃくの製造にも用いられている身近な物質である。炭酸塩は、リチウム(Li⁺)、カリウム(K⁺)やナトリウム(Na⁺)のプラスのイオン2個と炭酸イオン(CO₃²⁻)とで構成され、プラスイオンの種類や組成によって、表に示すように融点等の物性が変化する。熔融炭酸塩は高温で安定な物質であり、かつ、導電率も他の燃料電池の電解質の導電率よりも1~2桁高く、優れた物性を持つ。

MCFCの電解質としてはLi/K系混合炭酸塩が主流であったが、日本ではLi/Na系混合炭酸塩が近年、主流となっている。これは、表からわかるように、Li/Na系混合炭酸塩はLi/K系混合炭酸塩よりも導電率が高く、また、Ni溶解度が低いためである。この理由については3-2節において詳しく解説しているが、MCFCの性能面、寿命面での問題解決の

表 炭酸塩の物性比較

炭酸塩組成 (混合塩)	融点 ()	導電率 (1/cm)	Ni溶解度 ($\times 10^{-6}$ mol)
Li/K (62/38)	488	1.05	41.9
Li/Na (52/48)	496	2.18	22
Li/Na/K (43.5/31.5/25)	397	1.48	60

ため、今後も炭酸塩組成の最適化が行われていくものと考えられる。

このような最適化を促進するため、当所では3-1-2項で解説した性能表示式をさらに発展させ、炭酸塩の物性値のみからセル電圧を推算する手法を開発している⁽¹⁾。本手法では、実験に先立って、セルに多様な炭酸塩組成を適用した場合のセル電圧を推算できる。図には、その一例を示す。現状のMCFCシステムのようにスタック内温度が580~680の場合にはLi/Na系混合炭酸塩を電解質として用いることが最適であるが、セル入口温度を下げるようなシステムが可能となれば、Li/Na/K系混合炭酸塩も有力な電解質候補となることが予想される。

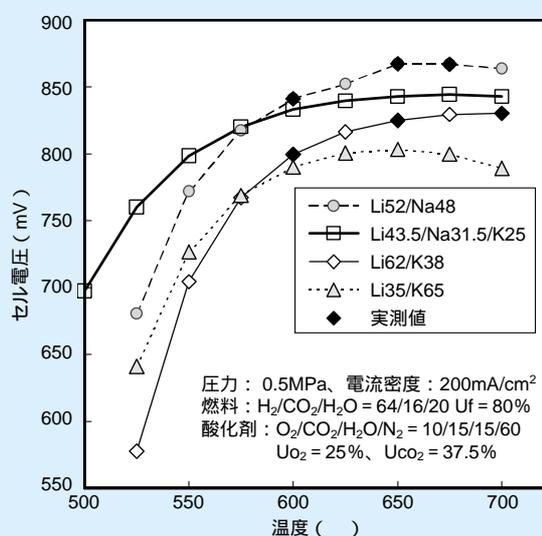


図 セル電圧の炭酸塩組成、温度依存性の推算結果