

1 kWダイレクトメタノール型燃料電池システム

燃料電池開発室 高口裕哲¹・大橋正和²

1 kW Direct Methanol Fuel Cell System

H. Takaguchi and M. Ohashi

ダイレクトメタノール型燃料電池（DMFC）は、発電時に騒音が少なく有害物質を排出しないクリーンなエネルギー源である。当社では、DMFCシステムを航空機等の移動体におけるコジェネレーションシステムや、非常用電源等、様々な用途向けに開発を行っている。その結果、出力 1 kW、最大燃料利用効率 80 %を達成した。本稿ではDMFCおよびそのシステムに関する技術紹介を行い、参入可能な市場について議論する。

Direct methanol fuel cell (DMFC) is a clean power source which does not produce toxic substances and has low noise in operation. Fujikura Ltd. has been developing DMFC systems for various purposes such as cogeneration system in airplane, emergency power supply, and so on. The energy conversion efficiency of the fuel is up to 80 % and the output power of 1 kW had been achieved recently. In this paper, general technology of the Fujikura DMFC system is introduced and the future market of DMFC is discussed.

1. ま え が き

石油、石炭、天然ガス等の化石燃料の大量消費はその枯渇を早め、燃焼にともない発生する二酸化炭素は地球温暖化を促進する原因の可能性があると考えられている¹⁾。そのため、持続可能な社会の実現のためには、風力発電、太陽光発電、あるいは燃料電池といった、化石燃料に依存しない電力エネルギー源の積極的な開発および実用化が不可欠である。

一方、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震と津波によって複数の発電所が停止し、広範囲にわたって停電が発生した。特に、震源地に近い東北電力管内では地震発生直後に停電件数が約450万件発生し、その8割が復旧するまで72時間を要した²⁾。首都圏においては、原子力発電所停止による長期間の計画停電が実施され、交通信号のような生活の安全にかかわる重要な公共設備までもが停止した。これらの要因をふまえて、非常用電源の重要性が再認識され、既存あるいは新規の非常用発電機の改良・開発が盛んに行われるようになっている。

ダイレクトメタノール型燃料電池（Direct Methanol Fuel Cell, 以下DMFC）は、貯蔵性および可搬性に富む液体のメタノールを燃料とする燃料電池であり、メタノールがもつ化学エネルギーを電力に直接変換する装置で

ある。DMFCは充電が必要な二次電池と異なり、メタノールと酸素を供給し続けられれば、連続的に電気エネルギーをつくりだすことができる発電機である。発電の際には二酸化炭素が生成されるが、廃木材やオフィス紙等に含まれているセルロースから合成されたカーボンニュートラルなバイオメタノールを使用すれば、二酸化炭素排出量を実質的にゼロにすることが可能である。また、水素を燃料とする水素型燃料電池と異なり、燃料を貯蔵するための高圧タンクを備える必要がないため、システムを小型化しやすいという利点がある。

近年DMFCは、航空機等の移動体や非常用電源としての利用が期待されており、燃料電池開発室ではそれらの需要を満たすDMFCシステムの開発を行っている。目標出力は1 kWであり、これは世界中で開発が進められているDMFCとしては大出力に分類され、それゆえに技術的課題も多い。

本稿では、開発に成功した1 kW DMFCシステムの技術解説およびその市場について報告する。

2. 発電の原理

図1にDMFCの発電の原理を示す。燃料極（アノード）側にはメタノール水溶液が供給され、触媒による酸化反応により二酸化炭素、電子及び水素イオンが生成される。燃料極で発生した電子は外部の回路を通り、ユーザー側の電子機器へ電力を供給し、水素イオンは電解質膜中を経由して空気極（カソード）側へと移動する。空

¹ 燃料電池開発室

² 燃料電池開発室室長

略語・専門用語	正式表記	説明
カーボンニュートラル	Carbon Neutral	排出される二酸化炭素と吸収される二酸化炭素が同じ量であるという概念。
アノード	Anode	電気化学的に酸化が起こる電極
カソード	Cathode	電気化学的に還元が起こる電極
MEA	Membrane electrode assembly	膜電極接合体
バイポーラプレート	Bipolar plate	セパレータ (separator) とよばれる。
ギャレー	Galley	飛行機内で食べ物の調理や準備をする場所。

気極側には酸素が供給され、触媒による酸素の還元反応により水が生成される。実際の発電の際には、純粋な酸素ではなく空気を供給してもよい。電解質膜の両面に触媒層を配置した構造はMEA (Membrane Electrolyte Assembly) と呼ばれる。DMFCの発電セルは、1枚のMEAが2枚のバイポーラプレートに挟まれている構造を有する基本単位である。バイポーラプレートは燃料および空気の供給と電極板としての機能を持ち、燃料および空気をMEA表面に供給するための流路を両面にそなえ、かつ、電気抵抗を小さくするため電気伝導度の高い物質で作られる。発電セルを積層することにより、その積層数に応じた高出力の電力を得ることができる。MEAの高効率化とともに、前述の化学反応によって生じる熱の制御及び再利用が、システムの安定化および高効率化にとってそれぞれ重要な課題となる。

3. MEAの高効率・長寿命化

触媒およびMEAの定量的な評価・分析は、大出力DMFCの高効率化、長寿命化、高耐久化のために重要であり、電気化学的手法と物理的手法に大別される。表1に当開発室で行われている評価・分析法を示す。

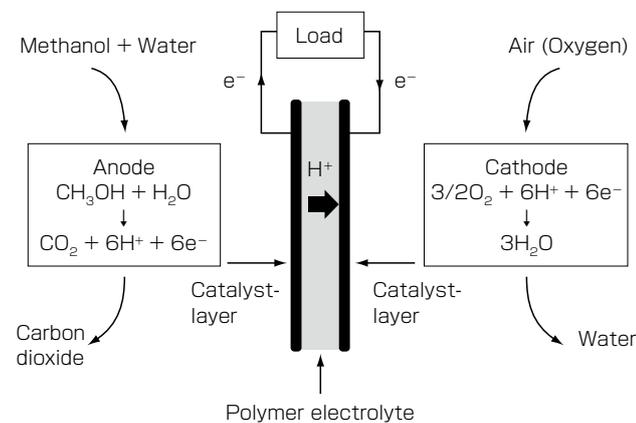


図1 DMFC 発電の原理
Fig. 1. Principle of DMFC.

電気化学的手法は、触媒の電気化学的活性や性能を直接測定するために用いられ、例えば、当開発室では、JARI((財)日本自動車研究所)標準セルで得られるI-V (電流 - 電圧), I-P (電流 - 電力) 曲線を性能のベンチマークとして開発を行っており、最高出力密度 200 mW/cm²以上という高出力MEAの開発に成功している (図2)。

一般的に、燃料電池は発電時間増加にともない出力電力が低下するという問題をかかえており、DMFCも例外ではない。DMFCの出力低下原因としては、触媒粒径の増加による有効反応面積低下や、触媒の脱落や触媒層の剥離、燃料の燃料極から空気極へ電解質膜を透過、いわゆる燃料クロスオーバー、等に起因すると考えられている。物理的手法は、MEAの発電性能を決定づける触媒の粒径や結晶構造の直接観察および元素分析が可能なことから、当開発室ではそれら手法を触媒およびMEAの分析に適用し、MEAの劣化原因の調査と長寿命化の対策を進めている。

表1 触媒, MEAに適用される分析手法と目的
Table 1. Analysis methods and the applications for catalyst and MEA of DMFC.

	手法名	目的
電気化学的手法	サイクリックボルタメトリー	ECSA 測定
	RDE	触媒活性測定
	O ₂ ゲイン	ガス透過性評価
	I-V, I-P	性能評価
	EIS	インピーダンス測定
物理的手法	メタノール ストリッピングボルタメトリー	触媒反応評価
	SEM	直接観察, 細孔分布観察
	TEM	直接観察, 粒径測定
	XRD	粒径測定, 結晶構造分析
	ICP-OES	燃料不純物分析
	EPMA	元素分析
	EDX	元素分析
	XPS	化学状態分析
	XRF	元素分析
	Electron diffraction	結晶構造分析
	水銀圧入法	細孔分布測定
	DSC	ガラス転移点測定

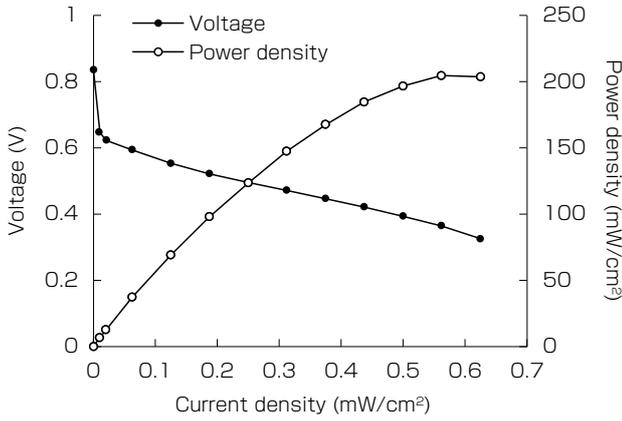


図2 JARI標準セルでの出力特性
Fig. 2. Performance in JARI's standard single cell.

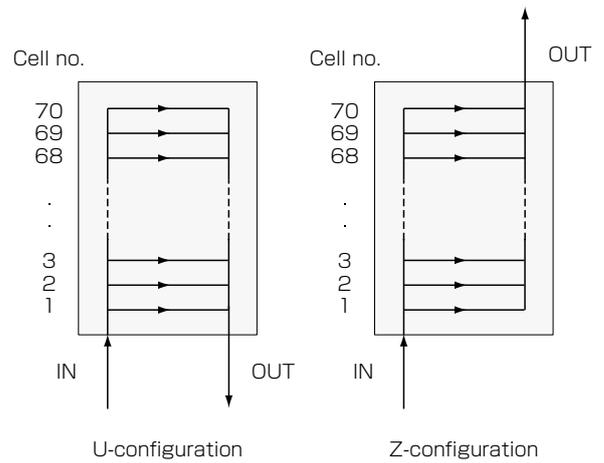


図4 空気の流れパターン (U型, Z型)
Fig. 4. Air flow configurations (U-configuration, Z-configuration).

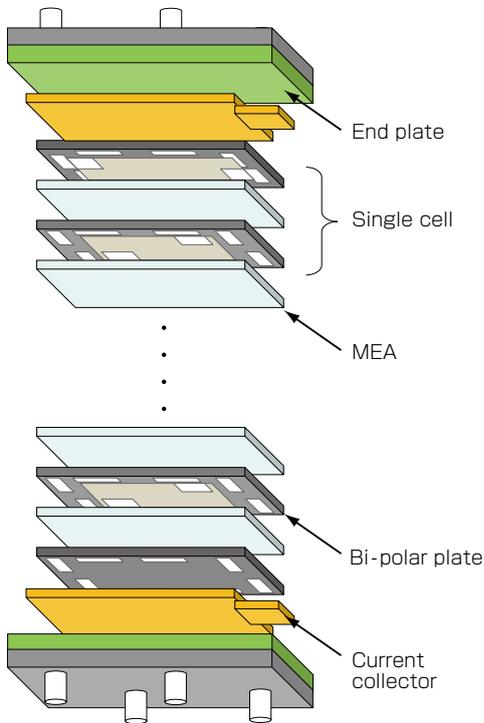


図3 1 kW DMFC スタックの構造
Fig. 3. Structure of 1 kW DMFC stack.

4. セルスタック

セルスタックの構造を図3に示す。多数の発電セルが積層されており、その両端には集電版とエンドプレートそれぞれ備えている。それらが積層された後に、セルの垂直方向に圧力が印加され、ボルトとナットにより把持される。

セル毎の空気の流量のばらつきを小さくすることは、各セルの出力を安定させることにつながるため、1 kW という大出力のセルスタックを作成するための必要条件である。図4は1 kWセルスタックの断面を表しており、矢印は空気の流れる方向を示す。セル番号は空気入

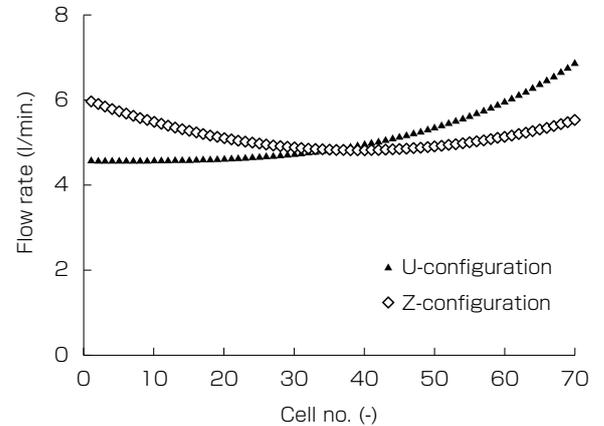


図5 異なる流路パターンにおけるセル内空気流量の計算結果 (合計流量: 360 l/min.)
Fig. 5. Calculated air flow distribution in each cell when the total flow rate is 360 l/min. with different flow configurations.

り口に近い方から 1, 2, 3, ...と連番でつけられている。空気の流れの違いによってU型とZ型の二種類が考えられ、U型では空気入口と空気出口が同じ側に存在しており、空気はスタック内に送り込まれた後、180度向きを変えて出口から出てくる。一方、Z型では入り口から入った空気は各セルを通過した後、入り口とは反対側から放出される。

U型、Z型それぞれについて、セル内の空気流量をシミュレーションした結果³⁾を図5に示す。流量のばらつきはZ型の方がU型より小さいことが判明し、この結果を受け、新しく試作したセルスタックではZ型の流路構造を採用し、かつマニフォールドの断面積を広げて設計したバイポーラプレートを使用した。その結果、出力1 kWのセルスタックの作製に成功した。

5. 燃料電池システム

図 6 に開発した 1 kW DMFCシステムの構成を示す。システムが起動されると、燃料タンクの燃料および外部の空気が、燃料ポンプとエアブローアによってそれぞれセルスタックへと供給されて発電が開始される。内部燃料タンク内のメタノール水溶液濃度は 2~3 wt% で、システム外部に設置されているメタノール貯蔵タンクの 50 wt% メタノール水溶液を、水タンクの水で希釈して濃度が一定になるよう制御されている。燃料極側で発生した二酸化炭素、水、および未反応のメタノールは内部燃料タンクへと戻される。燃料タンクは気液分離機能を有しているため、未反応のメタノールおよび水は燃料タンク内に留まり、二酸化炭素はシステム外へ放出される。このように未反応のメタノールを外部へ漏洩させることなく再利用することによって、安全性の確保と燃料利用効率向上を実現している。起動後、時間経過とともにセルスタックと燃料の温度が上昇し、空気極出口からは液体の水および水蒸気を含んだ高温 (70~80 °C) の空気が排出される。空気極の出口には水冷式あるいは空冷式の熱交換器が設置されており、冷却され凝結した水は水タンクへと回収され、空気はシステム外へ放出される。この水生成の機構によって、燃料の希釈に必要な水を外部から補充することなく継続運転を行うことが可能である。

開発した 1 kW DMFCシステムの外観を図 7 に示す。外形寸法は外部に設置する燃料タンクを除いて 60×44×33 cm であり、同出力の DMFC としては世界最小水準の大きさである。前述の熱交換器として水冷式を使用する際には、冷却水は 50 °C 程度の温水となって排出される。用途に適した水を外部から供給することで、例えば航空機内の手洗い用の温水や、非常時の風呂水といった副用途に利用できる。メタノールがもつエネルギーは 21.8 kJ/g であり、燃料利用効率 η (%) を

$$\eta \equiv \frac{IV + CQ(T_{out} - T_{in})}{22700m} \times 100$$

- I : DMFCスタック電流 (A)
- V : DMFCスタック電圧 (V)
- C : 冷却水比熱 (J/g・K)
- Q : 冷却水流量 (g/sec.)
- T_{in} : 熱交換器冷却水入口温度 (°C)
- T_{out} : 熱交換器冷却水出口温度 (°C)
- m : メタノール消費率 (g/sec.)

と定義したときの測定結果を図 8 に示す。DMFCの電力出力比が最大となるときの、効率は 80 % という高い値をもつことがわかった (電力出力比は、最大出力時を 1 とする)。

6. DMFCの市場

DMFCが参入可能な市場は、移動体補助電源市場、非常用電源市場、可搬型電源市場の 3 つに大別される。



図7 1 kW DMFCシステム外観写真
Fig. 7. Photograph of 1 kW DMFC system.

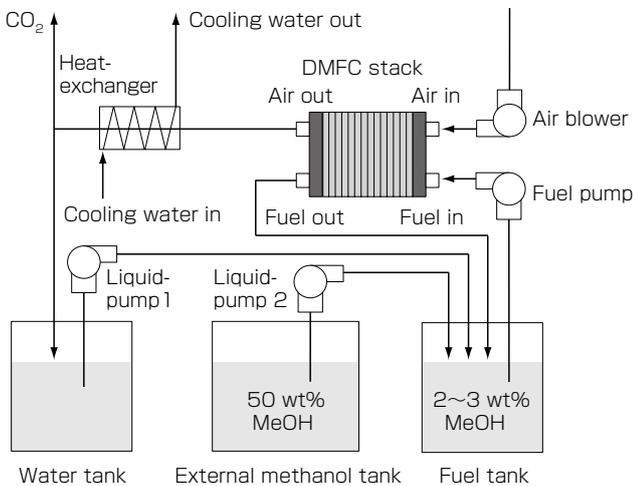


図6 1 kW DMFCシステム構成図
Fig. 6. Schematic diagram of 1 kW DMFC system.

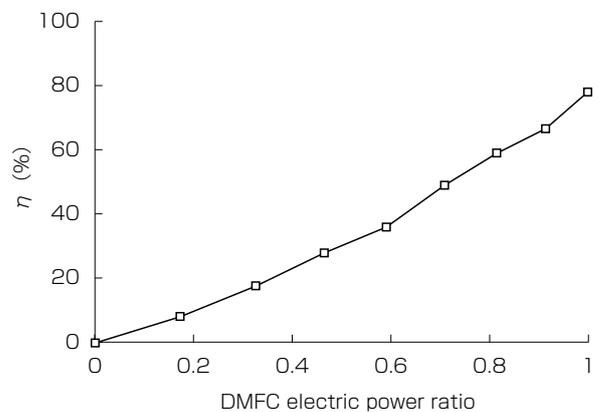


図8 1 kW DMFCシステムのエネルギー利用効率
Fig. 8. Energy efficiency of 1 kW DMFC system.

移動体補助電源は、年々増加している民間航空機、長距離バス等の内部に補助的に設置される電源であり、二酸化炭素削減や機体・車体の重量削減を目的としている。補助電源の用途は、飛行に必要な制御用電力と、ギャレーや客席エンターテイメント用であり、特に後者は乗客サービス向上のため年々必要電力が増加している。現状の民間航空機では、ジェット燃料を使用した補助エンジンで発電された電力を、送電ケーブルを用いて各機器に分配することによりまかなわれている。DMFCを機内に分散配置することで、送電ケーブルを減らすことができ、機体が軽量化し推進用のジェット燃料の削減につながり、現状の補助エンジンよりエネルギー利用効率が高いこととあわせて、航空機全体として大幅な排出二酸化炭素量の削減が期待できる。その他にもDMFCは、多数の電子機器を有する救急車やフォークリフトといった特殊車両に対して、有害物質を排出せず低ノイズや低振動といった付加価値を提供できると考えられる。

非常用電源に対する需要は東日本大震災の後に増加しており、中でもディーゼル発電機は安価で出力が大きいことからDMFCの競合となる。しかし、非常用電源として用いる場合、発電時に発生する騒音、振動、有害ガスが大きな問題となることがある。例えば、避難所での適用においては騒音や臭気が避難者にとって精神的ストレスとなり、また、都市部の交通信号用においては設置間距離が近接することから、騒音公害をもたらす可能性がある。一方、蓄電池を配備することも災害に対する備えとして有効であり、これまでは24時間の停電を想定した蓄電量をもつことが主流であったが、震災以降は商用電源復旧まで72時間をひとつの基準として電力を確保する方針となってきた。蓄電池の容量を増やすことは設置面積・体積の増加をまねくが、DMFCの場合は

発電機であることから、燃料の備蓄量を増やすだけでなく、大幅な設置面積の増大とはならない。非常用電源として考えた場合には、要求される蓄電容量が増えるほど、DMFCの方がより小さいスペースで長期間の電力供給が可能となる。

DMFCは他の燃料電池方式と比較して、燃料改質器が不要であること、水素型燃料電池のように高圧のガスタンクが不要であること等の理由から小型化がしやすく、可搬型の電源として商品化開発が進められてきたという歴史をもつ。出力を1 kWとすることで業務用、家庭用と様々な分野への展開が想定されるが、より高いレベルで小型化、耐振動・衝撃性の向上が必要であり、将来的に大きい市場と想定される同分野への参入を進めたいと考えている。

7. む す び

当社が開発した1 kW DMFCシステムは、最大出力時に、最高エネルギー効率80%を達成した。参入可能な市場としては、移動体市場、非常用電源市場、可搬型電源市場があげられる。

参 考 文 献

- 1) B. Robinson, et al. : "Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide" J. Amer. Phys. Vol. 12 No. 3, 2007
- 2) 東北電力ウェブサイトより
- 3) Y. Nakano et al. "FLOW DISTRIBUTION UNIFORMITY EVALUATION IN KW-RANGE DIRECT METHANOL FUEL CELL STACK" IHTC-15 August 10-15, 2014