

CLARITY FUEL CELL 搭載の 新型燃料電池スタックの開発

Development of New FC Stack for CLARITY FUEL CELL

菊 池 英 明*

Hideaki KIKUCHI

小此木 泰 介*

Daisuke OKONOGI

加 地 勇 人*

Hayato KAJI

原 田 仁**

Hitoshi HARATA

西 山 隆 之*

Takayuki NISHIYAMA

要 旨

燃料電池スタックの軽量かつコンパクト化のために、セルの厚み低減とセルの積層数削減をおこない、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した。セルの厚み低減は、膜電極接合体の湿度分布の均一化、ガス流路深さの低減と膜電極接合体の厚み低減にて達成し、セルの積層数削減は、ガス流路ピッチを縮小化して 1 セルあたりの出力性能を向上させたことにより達成した。また、燃料電池スタックのガス流路を横方向に流す構造にすることで燃料電池スタックの高さを低くしたことと、締結バーによるセル保持構造にすることで耐衝撃性の向上をおこない、燃料電池スタックのフロントフード内への搭載を可能とした。さらには、軽量かつコンパクト化により熱容量が低減したことで、低温時における定格出力の 50% に到達する時間を従来と比べ 1/2 に短縮させることができた。また、セルを構成する膜電極接合体の外周を樹脂化し、膜電極接合体を矩形化したことにより、電解質膜や拡散層の材料使用量を低減するとともに連続生産性を向上させることができた。

ABSTRACT

In order to make the fuel cell stack lighter weight and more compact, the cell thickness and the number of cell stacks were reduced. This achieved the world's highest level of volume power density at 3.1 kW/L. The reduction in cell thickness was achieved by the uniform distribution of water in the membrane electrode assembly, a reduction in the gas flow channel depth, and reduction in the membrane electrode assembly thickness. The reduction in the number of cell stacks was achieved by narrowing the gas flow channel pitch so as to enhance the power output performance per cell. Structuring the FC stack so that the gas flow channels are oriented laterally allowed the height of the fuel cell stack to be reduced while the connection bar was used as a cell retention structure, increasing the impact resistance. This enabled mounting of the fuel cell stack under the front hood. Making the fuel cell lighter weight and more compact reduced its heat mass so that the time taken to reach 50% of rated capacity when the fuel cell is at a low temperature could be shortened to one-half of the time required by a previous fuel cell. The membrane electrode assemblies that make up the cell were given a resin frame around their periphery, and squaring off their shape reduced the amount of material needed in the electrolyte membranes and diffusion layers while also increasing their continuous manufacturing productivity.

1. まえがき

燃料電池は CO₂ や有害物質をいっさい排出しない循環型クリーンパワートレインとして期待されている。

1999 年に自社開発の燃料電池スタックを燃料電池実験車に搭載し、2003 年には高出力密度化と寒冷地での始動

を可能とした Honda FC スタックを発表した⁽¹⁾。2006 年には容積出力密度で 50%、重量出力密度で 67% 向上させた V Flow FC スタックを発表した⁽²⁾。CLARITY FUEL CELL では、さらなる軽量かつコンパクト化およびフロントフード内への搭載⁽³⁾を目指し、燃料電池スタックの開発に取り組み、セルの厚み低減およびセルの積層数削

* 四輪 R&D センター

** ホンダエンジニアリング株式会社

減, 耐衝撃性の向上をおこなった. これにより, V Flow FC スタックと比べ, 容積出力密度で 60%, 重量出力密度で 35% 向上し, 低温始動性と, 膜電極接合体 (membrane electrode assembly: MEA)⁽⁴⁾ の生産性を向上させた新型燃料電池スタックを 2016 年に発表した. Fig. 1(a) に V Flow FC スタック, Fig. 1(b) に新型燃料電池スタックの外観を示す. 本稿では, 軽量かつコンパクト化しフロントフード内に燃料電池パワートレインの搭載を可能とした新型燃料電池スタックについて紹介する.

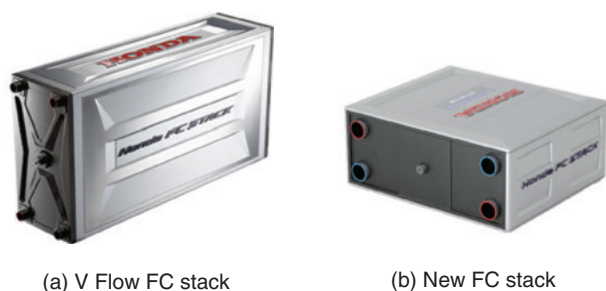


Fig. 1 Appearance of fuel cell stack

2. 燃料電池とは

固体高分子型の燃料電池は Fig. 2 に示すように⁽⁵⁾, 電解質膜を用い水素と空気中の酸素との電気化学反応によって化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである.

水素極 (-): $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

酸素極 (+): $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

水素イオンを伝導する電解質膜を水素極と酸素極 (空気極) の二つの電極層と拡散層で挟み, MEA を形成し, この

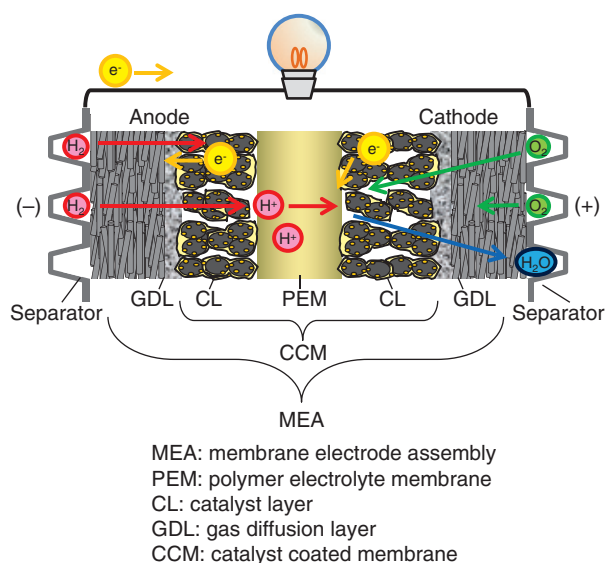


Fig. 2 Mechanism of electricity generation in FC stack

MEA を 2 枚のセパレータで両側から挟んで 1 個のセルを形成する. 1 セルでは開回路時でも理論電圧 1.23 V を超える電圧は得られないので, Fig. 3 に示すようにセルを積層することで高い電圧を発生するようにしている. また, MEA の性能を発揮させるためには, 電解質膜や電極層に加湿し含水させて水素イオンの伝導抵抗を低くする⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾ことも重要である.

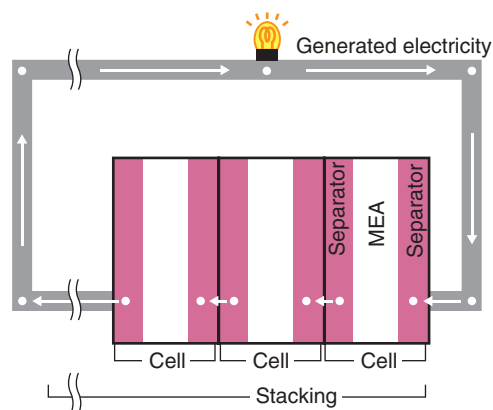


Fig. 3 FC stack configuration

3. 開発のねらい

CLARITY FUEL CELL の開発では, 燃料電池パワートレインを小型化してフロントフード内に搭載することにより FCV の市販車として世界初となる 5 人乗りセダンパッケージの実現をねらいとした⁽³⁾.

新型燃料電池スタックの開発に際しては, CLARITY FUEL CELL の開発のねらいと将来への大量普及を見据え, 以下を開発のねらいとした.

- (1) 軽量かつコンパクト化
- (2) 耐衝撃性の向上
- (3) 低温始動性の向上
- (4) MEA の生産性を向上

4. 軽量かつコンパクト化

燃料電池スタックの軽量かつコンパクト化のためには, セルの厚み低減とセルの積層数を削減することが必要である.

4.1. セルの厚み低減

セルの厚みを低減するためには, 水素および空気的气体流路深さを浅くすることと, MEA の厚みを低減することが必要である. しかしながら,

ガス流路深さ = 生成水の付着力 / 生成水の排出力
 の関係があるため, 水素および空気的气体流路を浅くす

ると生成水がガス流路に付着する力の割合が増し、生成水が排出できずに滞留しやすくなり (Fig. 4), 水素や空気の供給が阻害され安定した発電ができなくなる。従来の燃料電池スタックにおいては、水素および空気のガスを平行流として上から下に流す構造とし、発電で生成した水は、重力の利用によって排出力を高めて排出し、燃料電池スタックの発電安定性を維持しつつガス流路深さを低減して、セルの厚み低減をおこなっていた。本開発においては、さらにセルの厚み低減をさせるために、MEA 内の湿度の均一化をおこない加湿する量を低減した。これにより、生成水を凝縮させずに排出することができたので、生成水の排出力が低い低負荷領域においても、ガス流路への付着を無くすことによって、発電安定性を維持しつつ、さらなるセル厚みの低減をおこなうことができた。まず、水素と空気のガスを平行に流すセル構造から対向に流すセル構造 (対向流) にした。Fig. 5 に示すように加湿された空気が入り口側で MEA へ水分を供給し、出口側に向かって生成された水が MEA へ供給される。そして、水素極側へも MEA を透過した水が逆拡散し、水素入り口側へ水が供給されることで、発電面内で水の循環性を高め、MEA 内の湿度分布の均一化を可能とした。また Fig. 6 に示すようにガス連通口からガス流路へのガス分配を均一化することも重要である。Fig. 7 に示したように、従来スタックから採用している 2 枚の MEA を 3 枚のセパレータで保持し両側に冷媒を流すセル構造においては、2 枚の MEA に挟まれたセパレータは、片面に水素を反対面に空気を流す構造となる。金属プレスセパレータではプレス成形加工により形状が表裏となるため、それぞれに最適な分配流路が成形できない。そのため Fig. 8 のよう

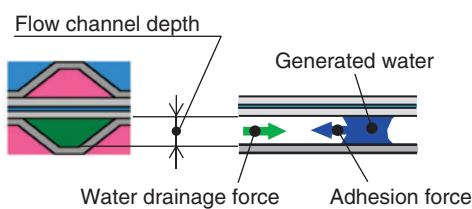


Fig. 4 Relationship between flow channel depth and adhesion force

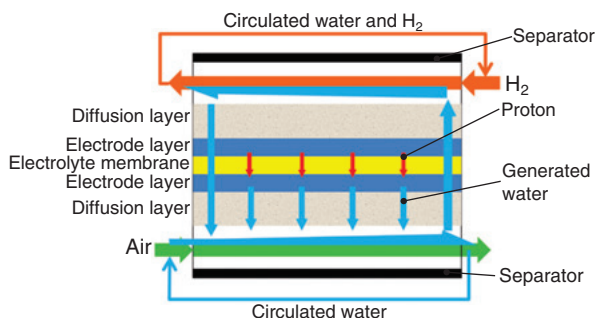


Fig. 5 Diffusion in MEA

に水素極側、空気極側のバランスを見てエンボス形状等で設計する必要がある。そこで、MEA の外周を樹脂化して (Fig. 9), セパレータプレス面を平面とし、樹脂化し

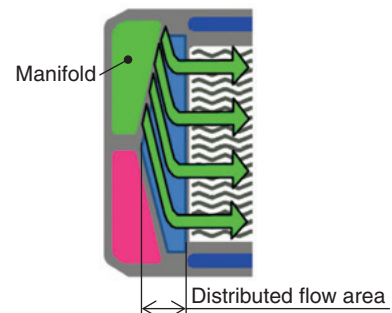


Fig. 6 Distributed flow area

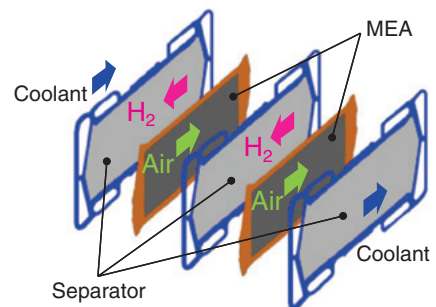


Fig. 7 One cooling layer per two cells

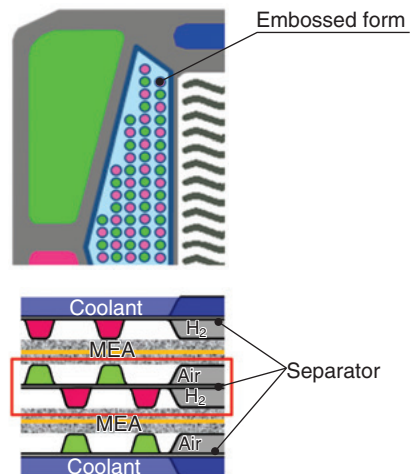


Fig. 8 Previous gas distribution structure

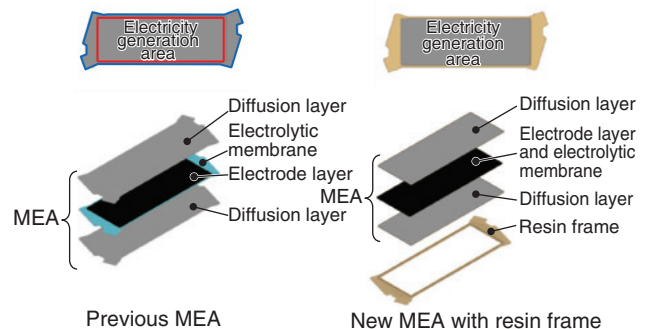


Fig. 9 Comparison of MEA structures

た部分にそれぞれのガスを最適に分配する溝を形成する (Fig. 10) ことで両ガスの分配を向上して、さらに MEA 内の湿度分布を均一化した。また、MEA の改良もおこなっ

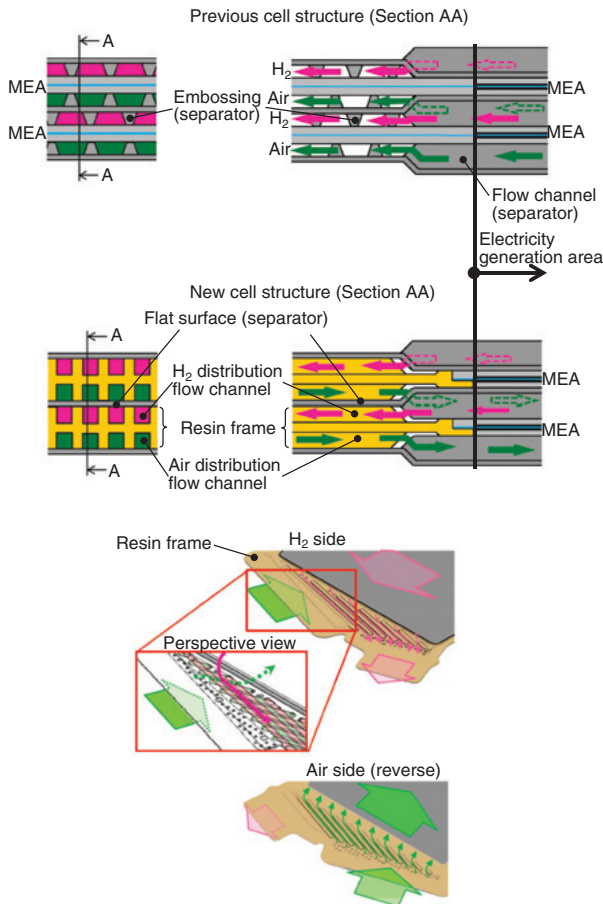


Fig. 10 Resin-framed MEA

た。電解質膜の空気極から水素極への濃度差による水の拡散性を向上させ循環性を高めるためと MEA 厚みを低減するために、電解質膜を薄くした。さらには、カーボン繊維で構成される拡散層においてもカーボン繊維の密度を粗くし空孔率を高めることでガスの拡散性や水の排出性を向上させた。水素極側においては、水素の高拡散性により、拡散層の厚みを低減しても十分なガス拡散性を得られる。これらにより、加湿量を従来と比べて 40% の低減をすることができたので、生成水の排出力が低い低負荷領域において、発電面内での湿度を 100% 以下にできた。その結果、生成水を凝縮させないで排出することが可能となったので、流路への生成水の付着が無くなり発電安定性を維持しつつ流路深さを 26% 低減できた。電解質膜および拡散層の厚み低減による MEA 全体厚み低減と合わせ、1 セルあたりの厚みが 1 mm となり、従来と比べて 20% の厚み低減ができた (Fig. 11)。また、生成水の排出のために重力を利用する必要がなくなり、燃料電池スタックのガス流路を横方向に流す構造としても Fig. 12 に示すように、発電安定性を維持することが可能となった。

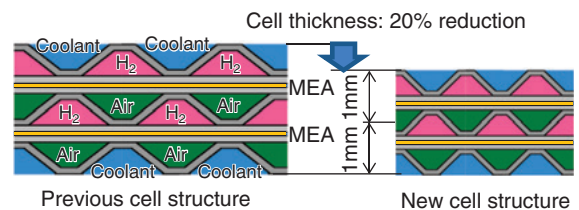


Fig. 11 Cross-section of cell structure

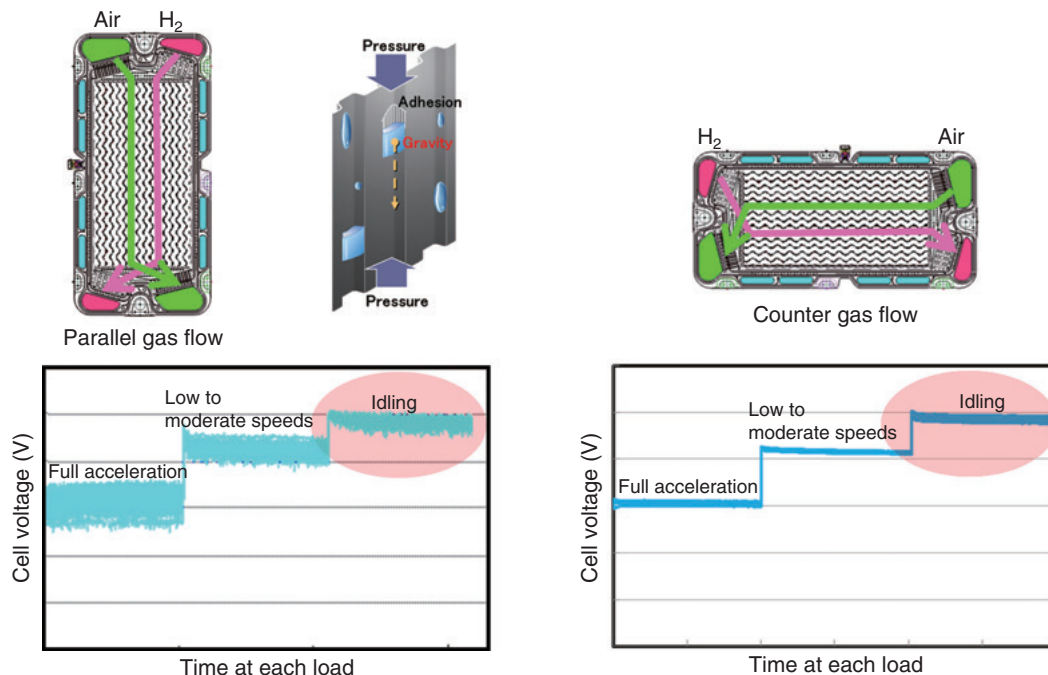


Fig. 12 Natural stabilized electricity generation

4.2. セル積層数の削減

セルあたりの発電面積を変えずにセルの積層数を削減するには、単位発電面積あたりの出力をさらに向上させる必要がある。そのためには、単位面積あたりの電流密度をより高めれば良い。しかしながら空気極側では、発電により生成水が増加しMEA内での空気の拡散性を阻害することによって出力性能の低下を招くという課題がある。よって、MEA内での生成水の滞留をなくすことが必要である (Fig. 13)。

セパレータは水素および空気をMEAに供給させるためのガス流路を形成しており、そのガス流路とMEAが接しているところでは、発電で生成した水が拡散層内にて凝縮し滞留してしまい、水素や空気をMEAに均一に供給できなくなる。よって、Fig. 14 の中性子可視化テストにて示すように、ガス流路とMEAが接する流路山部を狭くすれば生成水の滞留をなくすことが可能となることに着目し、ガス流路ピッチの低減をおこなった。

しかし、金属プレスセパレータにおいては、ガス流路ピッチを狭くするとプレス成形時に板の伸び率が多くなり、ガス流路成形部に割れが生じたり、局所的に板厚みが薄くなってしまう。それを回避するためには、プレス成形を数回に分ければよいが、生産性の低下を招いてしまう。本開発では、ガス流路深さを低減したことでガス流路ピッチを35%狭くしても従来と同等な板の伸び率を確保することができた (Fig. 15)。

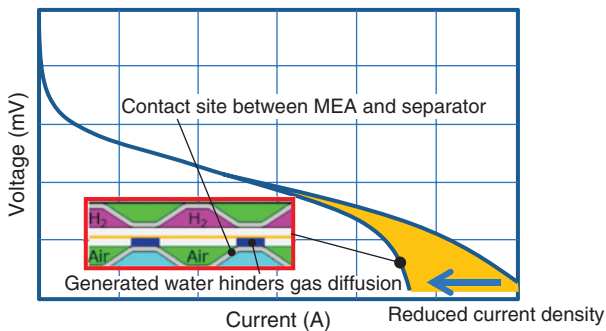


Fig. 13 I-V characteristic

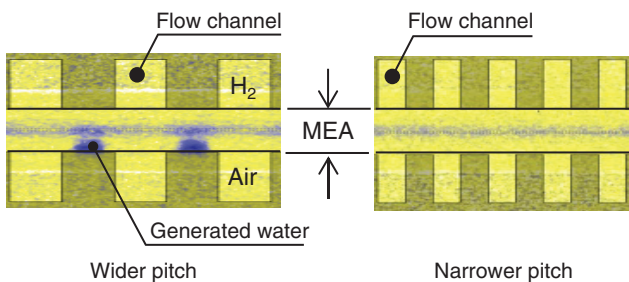


Fig. 14 Comparison of flow channel pitches

その結果、電流密度を高めても流路山部での生成水の滞留をなくすことができ、空気の拡散性が確保されることで、従来の燃料電池スタックに比べ電流密度を1.5倍に高めることが可能となり、単位面積あたりの出力性能を1.5倍にすることが可能となった (Fig. 16)。それにより、従来の燃料電池スタックと同等の出力でありながら、セルの積層数を30%削減することができた (Fig. 17)。

このような軽量かつコンパクト化技術で、セルの厚み

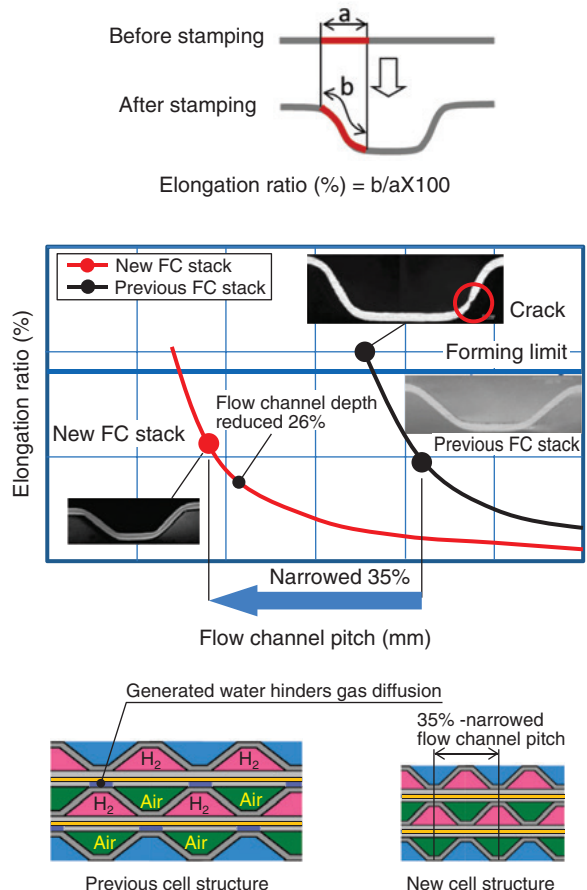


Fig. 15 Narrowed flow channel pitch

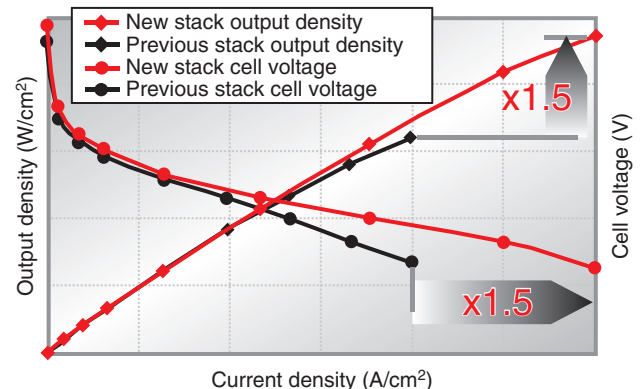


Fig. 16 Comparison of cell output density

低減とセルの積層数削減により、従来比で燃料電池スタックの容積出力密度が 60%，重量出力密度が 35% 向上し、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した (Fig. 18)。

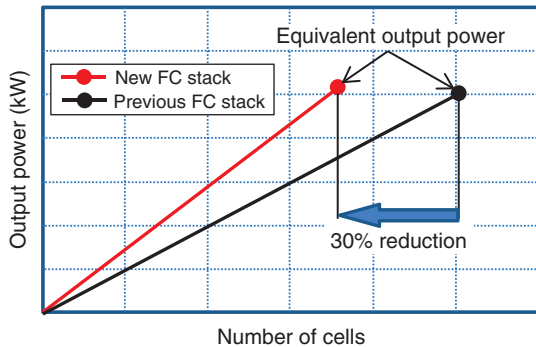


Fig. 17 Reduced number of cells

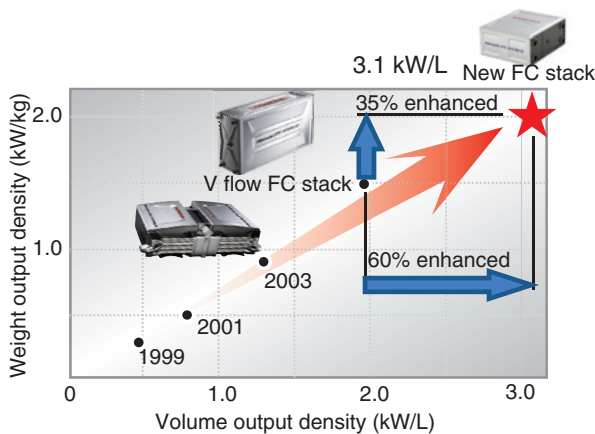


Fig. 18 Comparison of stack output density

5. 耐衝撃性の向上

フロントフード内への搭載は、従来のセンタトンネル搭載よりもフロント衝突時の燃料電池スタックに入る衝撃力が増加するため、耐衝撃性を向上させる必要がある。そこで、Fig. 19 に示すようにセルの上下方向に凸部を設け、スタック両端のエンドプレートにパー締結とし、セルに設けた凸部を保持することにより大きな衝撃力でも破損することなくセルのずれを抑制することができるパー締結 1 ボックススタック構造を開発した。その結果、従来のパネル締結構造のスタックと比べ耐衝撃性を 4 倍向上させることができた。

コンパクト化と耐衝撃性の向上により燃料電池スタックを駆動モータ上部に搭載することを実現し、燃料電池パワートレインを従来の V6 エンジン同等サイズに小型化することができた。これにより FCV の市販車で初めて 5 人乗りセダンパッケージを実現した。

6. 低温始動性の向上

従来の燃料電池スタックにおいては、V Flow セル構造によって生成水の排出性を高めたことと、熱容量を 40% 低減させたことで、始動時の出力性能を向上させた。本開発では、熱容量および MEA 部材の固有抵抗を低減し、低温始動性の向上をおこなった。

まず、電解質膜の薄膜化とイオン交換容量の最適化および、拡散層の薄型化により、MEA の固有抵抗を低減できた。また、ガスの対向流化による MEA 面内湿度の均一化で低加湿環境下での電解質膜の抵抗も低減できた。これらにより、 -20°C 環境下でのスタックの電気抵抗を 1/3 に低減することができ、始動直後の出力性能が向上された。さらには、セパレータ流路深さ低減とセルの積層数削減による、スタックの軽量およびコンパクト化と冷媒保有量の低減により、熱容量が 12% 低減されたことで出力上昇速度が向上でき、 -20°C 始動時における 50% 出力に到達する時間を従来と比べて 1/2 短縮することができた (Fig. 20)。

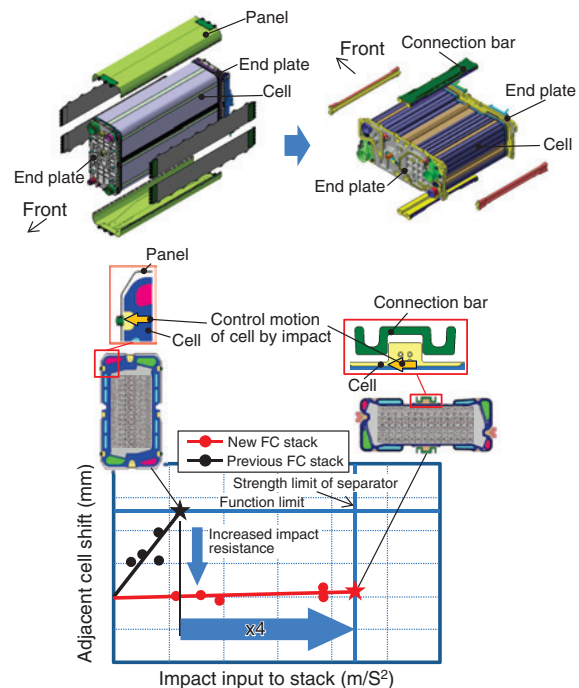


Fig. 19 High impact resistance stack

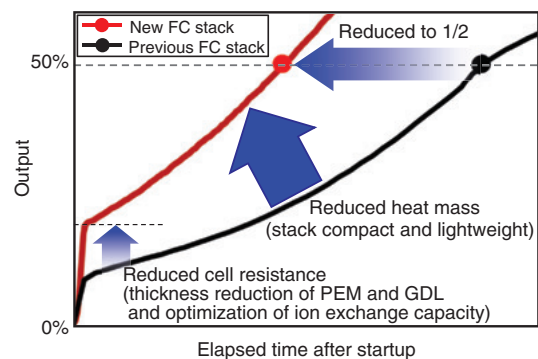


Fig. 20 Comparison of low-temperature performance (operated at -20°C)

7. 生産性の向上

Fig. 21(a) に示すように従来技術では、拡散層に下地層を、電解質膜上に電極層をそれぞれにパターン塗工で形成し積層することで、MEA を製造していた。この生産方法では、連通口から流路へガスを流すための発電には寄与しない部分も含め、MEA として一体で形成されるため複雑な形状になり、拡散層や電解質膜の無駄となる部分が多く存在していた。本開発では、Fig. 9 で示したように外周部を樹脂枠とし、発電部の MEA を矩形化したことで、ロール状の拡散層に下地層や電極層をシート状で形成できるようになった。その後、多数個取りの打抜きプレスで MEA を矩形化するため、Fig. 21(b) に示すとおり大量流動ができるプロセスとなった。拡散層に下地層や電極層をシート状に塗工するためには、多孔質な拡散層表層へうねりの少ない平坦な膜を塗工する必要がある。よって撥水性のあるインクを開発し、拡散層への染み込みを低減できた結果、平滑な電極層を高速でシート化する技術が構築できた。MEA が矩形化されたことで、シート状で電極膜上の膜欠陥を検査し、良品エリアのみを選択的に切り取り、MEA に使用する生産技術も適用できるようになった。

これらの結果、生産時の無駄となる部分を削減し拡散層や電解質膜の使用量を 40% 低減でき、大量流動と低コスト化のための生産技術が構築できた (Fig. 22)。

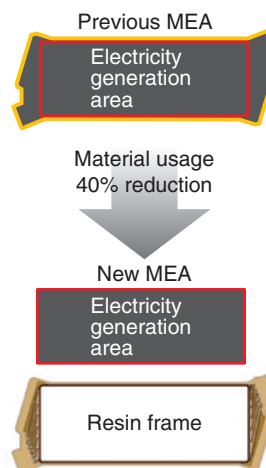


Fig. 22 Reduction of material usage

8. まとめ

本開発では、燃料電池スタックを軽量かつ小型化し、耐衝撃性の向上と、低温始動性および MEA 生産性の向上をおこなった。

- (1) 燃料電池スタックのセルの厚み低減とセルの積層数削減にて、従来と比べて容積出力密度で 60%、重量出力密度で 35% の向上し、世界トップクラスの容積出力密度 3.1 kW/L を達成した。

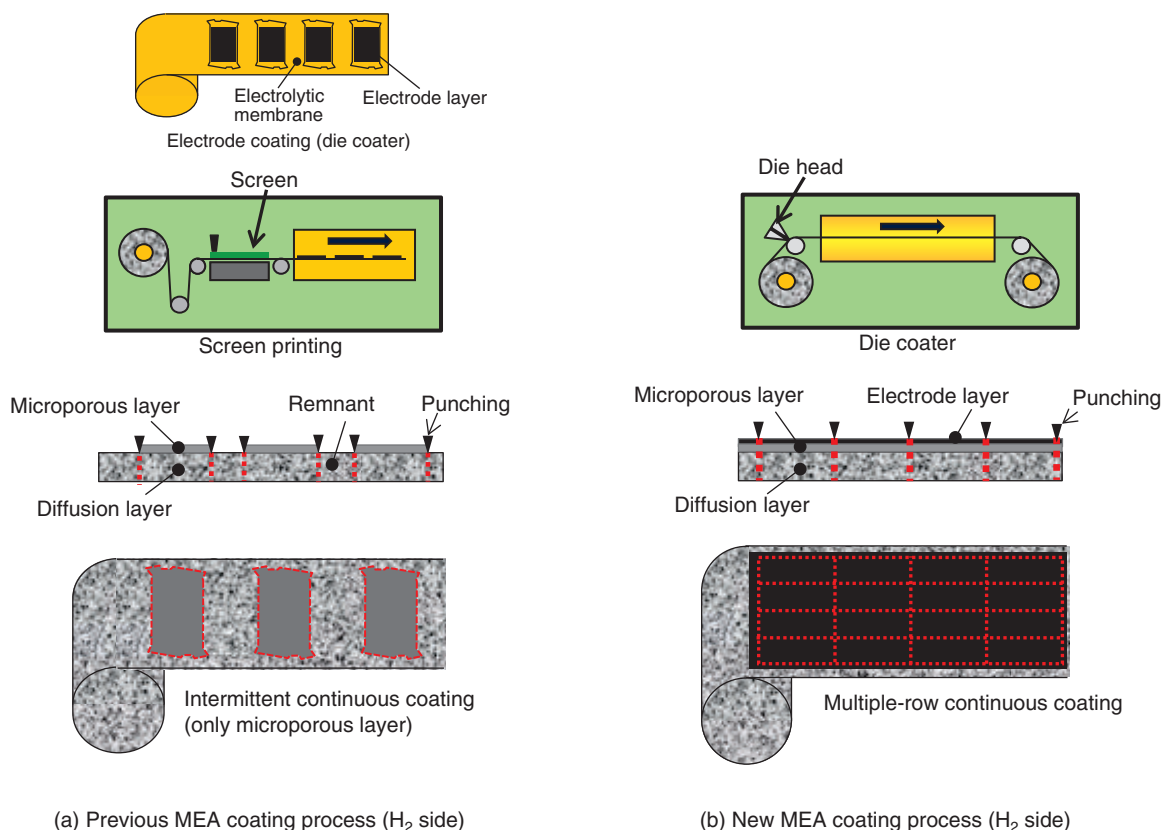


Fig. 21 MEA coating process (H₂ side)

- (2) コンパクト化と合わせ、ガスの流し方を横方向とすることにより、スタック高さを低くし、さらに、耐衝撃性を向上したことで、フロントフード内への搭載を達成できた。
- (3) MEA の抵抗低減および、熱容量の低減により、低温時の 50% 出力到達時間を従来と比べ 1/2 に短縮させることができた。
- (4) MEA を矩形化して MEA の発電部以外を樹脂枠化したことで、生産性を向上させるとともに、高価材料の使用量を 40% 削減した。

参考文献

- (1) 井ノ上雅次郎, 斉藤信広, 内堀憲治: Honda FCX 搭載の次世代燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.8-13
- (2) 斉藤信広, 菊池英明, 中尾靖宏: FCX クラリティ搭載の新燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.15-22
- (3) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.1-7
- (4) 竹中啓恭: 原理と電極反応: 燃料電池技術とその応用, テクノシステム, p.91, (2000)
- (5) 佐藤雅彦, 千葉裕人, 井ノ上雅次郎: 燃料電池スタックにおけるセル面内 CCM 含水量分布計測システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.15-23
- (6) 南雲健司, 井ノ上雅次郎: シミュレーションによる燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量分布予測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.24-30
- (7) 岩成亨, 宮島一嘉, 古澤宏一郎, 井ノ上雅次郎: 実車搭載発電システムにおける燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量のリアルタイム計測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.31-36

■ 著 者 ■



菊池 英明



加地 勇人



西山 隆之



小此木 泰介



原 田 仁