

新型燃料電池システムの開発

Development of New Fuel Cell System

尾崎 浩 靖¹

Hiroyasu OZAKI

間 庭 秀 人¹

Shuto MANIWA

山 崎 薫¹

Kaoru YAMAZAKI

三 浦 種 昭²

Taneaki MIURA

小 川 隆 行¹

Takayuki OGAWA

Todd W. HUSTON³

要 旨

燃料電池の耐久性を確保するには燃料電池スタックの固体高分子膜への鉄 (Fe) の混入を防止することと、適切な湿度にコントロールすることが重要である。今回ゼネラルモーターズと共同開発した燃料電池システムは、燃料電池スタックのステンレス製バイポーラプレートにチタンとカーボンの2層コーティングを採用し Fe の溶出を 1/10 に低減した。また、高精度の加湿モデルによる水蒸気量推定と高効率加湿器、電動クーラントミキシングバルブ採用によるアクティブ温度コントロールをおこなったことで加湿量を増大させた。冷媒温度を低温側にシフトしつつ高精度に管理された湿度の高い空気を供給することで膜の高含水化を実現した。これらにより耐久性を従来システムの2倍以上に向上させた。

また、システム停止時の調湿制御と起動時の急速暖機制御をおこない、-20℃での低温環境下において始動時間を従来システムの1/9に短縮した。

さらに燃料電池スタックのコスト低減及び、システム簡素化をおこない燃料電池システムコストを従来システムの1/3に低減した。

ABSTRACT

In order to provide fuel cell durability, it is important to reduce iron (Fe) contamination to the polymer electrolyte membrane of the fuel cell stack and to control the humidity to an appropriate level. The new fuel cell system developed jointly with General Motors Company adopts a double-layer coating of titanium and carbon on the stainless steel bipolar plates of the fuel cell stack that reduces Fe elution to 1/10 the previous amount. In addition, the humidification level is increased by estimating the amount of water vapor with a highly accurate humidification model and using a high-efficiency water vapor transfer unit and an electric coolant mixing valve to perform active humidity control. The amount of water contained in the membrane was increased by lowering the coolant temperature and supplying air controlled to high humidity with a high degree of accuracy. As a result, the durability is more than double that of the previous system.

In addition, the start-up time in a low-temperature environment of -20℃ was shortened to 1/9 that of the previous system by performing humidity conditioning control when the system is stopped and rapid warm-up control at start-up.

The fuel cell system cost was also reduced to 1/3 that of the previous system by reducing the cost of the fuel cell stack and simplifying the system.

1. はじめに

カーボンニュートラル社会を目指す上でのキー技術とされる水素エネルギーの利活用が注目されている。Honda は水素と空気中の酸素から電気エネルギーを直接取り出す燃料電池の研究開発に取り組んできた。2002年に世界初となる燃料電池乗用車 FCX の日米同時発売を実現した⁽¹⁾、⁽²⁾。続く2003年に氷点下での始動を可能とした燃料電池

システムを搭載した FCX を開発し、寒冷地での使用が可能となった⁽³⁾。2008年には世界初となる燃料電池自動車専用プラットフォームを採用したセダントタイプの FCX CLARITY を市場投入した⁽⁴⁾。さらに本格量産を見据え生産性を向上し、小型化した燃料電池システムを2016年に開発し第1世代と位置付けた。この第1世代の燃料電池システム(以下、従来システム)をエンジンルーム内に搭載することで世界初の5名乗車を実現した CLARITY FUEL

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: hiroyasu_ozaki@jp.honda

² American Honda Motor Co., Inc.

³ General Motors Company

CELL を発売し、日常のクルマとしての実用性を向上させた⁽⁵⁾。2024 年には本稿で紹介する第 2 世代となる新型燃料電池システムを搭載した CR-V e:FCEV を発表した⁽⁶⁾。

Honda はカーボンニュートラル社会の実現に向けて、燃料電池システムの普及拡大をめざし、乗用車への適用のみならず様々なアプリケーションへの展開を進めていく。水素はバッテリーに対してエネルギー密度が高く、様々な形態での輸送が容易で、素早い充填が可能という特徴がある。その特徴を活かせる大型トラックや建機、定置電源などへの適用拡大を図っていく (Fig. 1)。本稿では燃料電池システムの普及拡大をめざし、さらなる耐久性向上、極低温時の起動時間短縮、さらなるコスト低減を図った新型燃料電池システムを紹介する。

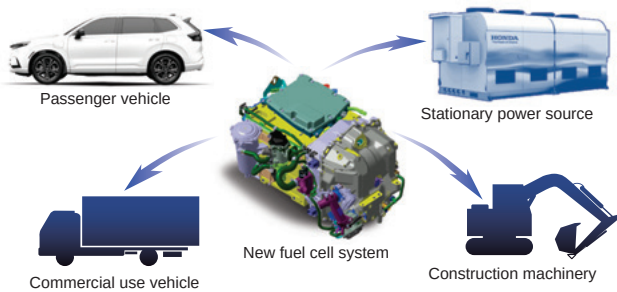


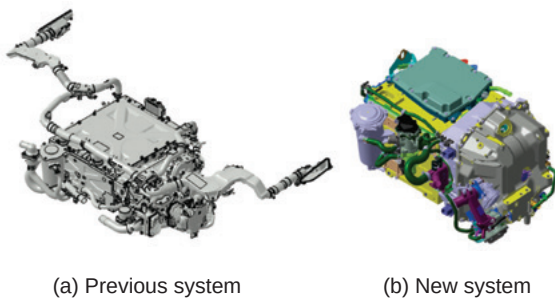
Fig. 1 New fuel cell system and various applications

2. 開発の概要

従来燃料電池システムを Fig. 2 (a) に、新型燃料電池システムを Fig. 2 (b) に示す。新システムは、従来システムに対し、より一層の耐久性向上、低温環境性能、コストの低減が重要であると考え、以下を開発のねらいとした。Table 1 に新型及び従来の燃料電池システムの主要諸元を示す。

(1) 燃料電池スタックの耐久性のさらなる向上

さまざまなアプリケーションへの適合を図るため従来システムに対し 2 倍の耐久時間を目標とした。これを実現するために、燃料電池スタックの電解質膜含水量の向上、冷



(a) Previous system

(b) New system

Fig. 2 Appearance of fuel cell systems

Table 1 Main specifications of fuel cell systems

Major specifications		Previous fuel cell system	New fuel cell system
	Fuel cell type	Proton exchange membrane	Proton exchange membrane
	Fuel cell power	103 kW	92.2 kW
Main system configuration for durability	Fuel cell stack size	33 liters	33.8 liters
	FC coolant temperature control	Thermostat valve	Electric coolant mixing valve
	Humidity control	Water vapor transfer bypass valve	
	Provide air circulation	EGR pump	— (Substitution by control)
	Provide H ₂ circulation	Hydrogen pump	

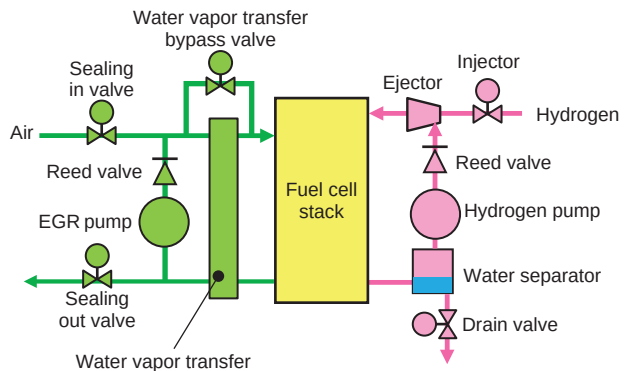
媒温の低温化、燃料電池スタックを構成するバイポーラプレートからの Fe 溶出量の削減をおこなった。

(2) 低温環境での暖機時間の短縮

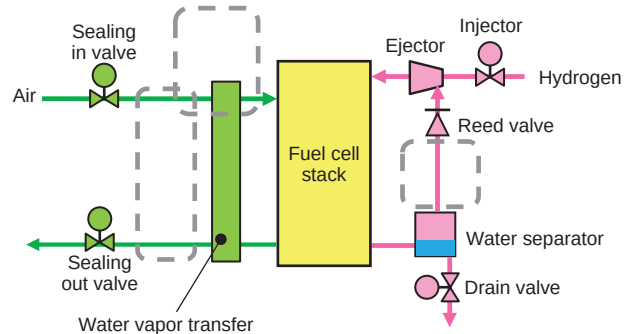
低温環境におけるさらなる商品魅力向上を図るため、 -20°C における暖機時間を従来システムに対して 1/9 を目標とした。これを実現するために、システム停止時の調湿制御と起動時の急速暖機制御を採用した。

(3) 燃料電池システムの生産性向上とさらなるコスト低減

従来システムの 1/3 のコストを目標とした。そのために、燃料電池スタック構造のシンプル化と生産性向上、貴金属使用量削減と、Fig. 3 (b) に示すシステム部品の簡素化をおこなった。



(a) Previous system



(b) New system

Fig. 3 Comparison of system configuration

3. 燃料電池スタックのさらなる耐久性向上

自動車用として一般的に採用されている固体高分子型の燃料電池は、その中心部にある固体高分子膜を水素イオン H^+ が移動することで、外部に電気エネルギーを直接取り出している。燃料電池スタックの構造は固体高分子膜を中心に触媒層とガス拡散層を挟持した膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly: MEA) と、燃料として供給されるガスの流路や、発電部を冷却するための冷媒の流路が形成されたバイポーラプレートから構成される。次に従来システム同様に本システムでも採用している燃料電池スタックの加湿制御システムについて説明する。Fig. 4 に燃料電池スタックの加湿システム図を示す。燃料電池スタックより排出される空気は、発電により生成された水を含んでいるため高湿度な状態にある。この高湿度な排出空気を空気供給系に設置した加湿器に通す。これにより排出空気に含まれていた水蒸気を、燃料電池スタックに供給する空気側に移動させることで供給空気の加湿をおこなう。

燃料電池スタックの耐久性を向上させるには、特に水素イオンの移動を担う固体高分子膜の経時変化をいかに抑えるかが重要である。固体高分子膜は、膜の含水量不足や高温状態により化学的安定性が低下すること^{(7), (8)}と、バイポーラプレートに代表される部材から溶出した Fe の固体高分子膜への混入により経時変化が加速すること⁽⁹⁾が知られている。一方で燃料電池スタック内の水分量が過剰になると、ガスの供給が阻害され電極の経時変化を引き起こしてしまうため、水分量を適切な範囲に調整することが求められる。

膜の化学的安定性の低下や電極の経時変化に対しては、発電中の適切な範囲での膜の高含水化と温度低減を図る必要がある。膜含水量と燃料電池スタックに供給する空気の相対湿度は密接に関連しているため、冷媒温度を低温側にシフトしつつ湿度の高い状態に制御された空気を供給することで膜の高含水化を実現した。その手法は以下の三つである。

- (1) 燃料電池スタックの熱交換性能の向上
- (2) 供給する空気の水蒸気量の推定精度向上
- (3) 冷媒温度の低温化

熱交換性能の向上については、従来の 2 セルごとの一つ

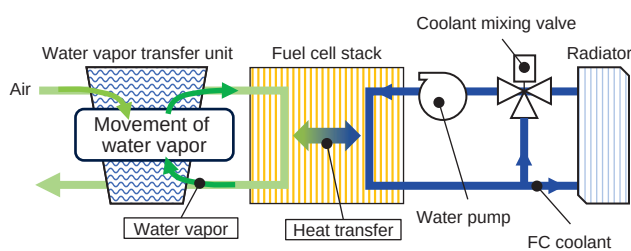
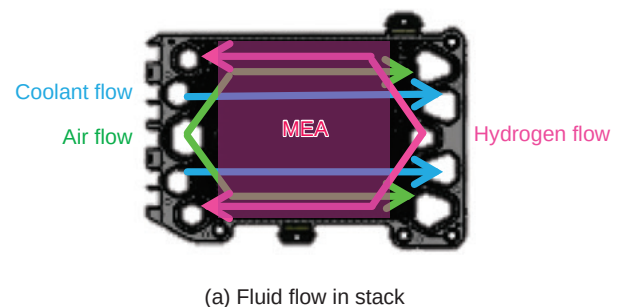


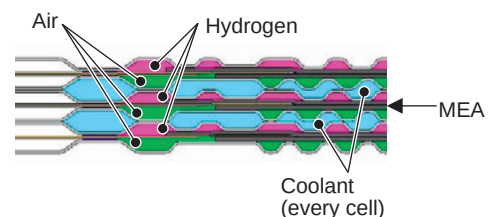
Fig. 4 Humidification system

の冷却層を持たせる構造から 1 セルごとの一つの冷却層を持たせる各セル冷却構造とした⁽¹⁰⁾。バイポーラプレートに設けられた流路内の空気及び冷媒の流れを Fig. 5 (a) に示し、冷媒が空気の相対湿度に与える影響について説明する。燃料電池スタックは、発電することで生成水が空気極側に発生し、燃料電池スタック内での空気は出口に向かって相対湿度が高くなる。そのため、水蒸気の凝縮低減を狙いとして、空気と冷媒が並行且つ同方向に流れる流路構造としている。本流路構造において、燃料電池スタックに入った加湿された空気は、発電部である MEA に供給される前に、燃料電池スタックに供給された冷媒との間で熱交換がおこなわれ、MEA に供給される空気の温度が調整される。この空気の温度に応じて飽和水蒸気量が変化するため、空気に含まれる水蒸気量がかわらないまま、空気の相対湿度が変化する。すなわち、スタック入口冷媒温度を制御することにより、MEA に供給される空気の相対湿度を調整できる。Fig. 5 (b) に示すように各セル冷却構造にすることで従来に対して熱交換性能が向上し、セル間の温度ばらつきが小さくなった。その結果、加湿制御を緻密に実行することが可能となった。

次に供給する空気の水蒸気量の推定精度向上について述べる。従来システムでは燃料電池スタックの平均インピーダンスを計測することで膜含水状態を把握する手法を適用していた。そのインピーダンス情報をもとに Fig. 3 (a) に示した加湿器をバイパスする配管に設置したバルブを動作させることで、供給空気の相対湿度を制御して膜水分量の管理をおこなっていた⁽¹¹⁾。しかしながら本システムの目標とするような高湿度環境では、インピーダンスの測定感度が低く、膜水分量の精度が確保できない課題があった。以上から、新たに加湿器内部の水蒸気移動原理を数理的に表現したモデルを構築した⁽¹²⁾。さらにこの数理モデルを近



(a) Fluid flow in stack



(b) Cross-sectional structure of stack (cell-by-cell cooling)

Fig. 5 Structure of flow channels

似関数化することで、計算負荷が軽くシステム制御に実装可能な制御モデルを作成した。本制御モデルを用いることで、インピーダンスを用いた手法では高精度な制御が容易ではなかった高湿度領域におけるオンボードでの水蒸気移動量の推定を可能とした。Fig. 6 に両モデルの計算時間の比較、及び燃料電池スタックの各種発電条件における加湿器の水蒸気移動量の実測結果とモデル計算結果について示す。制御モデルは計算時間を数理モデルの約 1/5 に短縮しつつ、数理モデルと同等の予測結果が得られており、計算負荷軽減と精度確保の両立を実現した。

冷媒温度の低温化に対しては、ラジエーターの冷却能力向上をおこなうと共に、ラジエーターへ流れる冷媒量を電動制御することができるクーラントミキシングバルブを適用した (Fig. 4)。従来システムではサーモスタットバルブを適用しており一定の目標冷媒温度になるようにバルブの開閉がパッシブにおこなわれていた。一方、本バルブは任意の目標冷媒温度になるように、任意のタイミングで開度調整することができる。本バルブの開度調整によりラジエーター側に流れる冷媒量を制御し、ラジエーターで冷却された水温の低い冷媒と、ラジエーターを介さない水温の高い冷媒を自在に混合することが可能となった。その結果、制御モデルで算出した任意の目標冷媒温度での制御を可能とし、燃料電池スタックに供給する空気の見目標対湿度を達成した。

Fig. 7 に定電流発電での本加湿制御の有無による空気の相対湿度挙動例を示す。Fig. 7 (b) に示すような空気の温度上昇が発生した場合には、相対湿度の低下を加湿制御モデルが予測し冷媒温度を低下させる。その結果、Fig. 7 (a) に示すように相対湿度は安定して目標値近傍に制御できていることがわかる。また開発時に使用した評価発電モード中における冷媒温度の頻度分布を Fig. 8 (a) に、空気の相対湿度の頻度分布を Fig. 8 (b) に示す。これらに示す通り、従来システムに対して膜の高含水化と温度低減が実現できた。

Fe による膜の経時変化の加速に対しては、燃料電池スタック内のステンレスを基材とするパイポーラプレートにチタンとカーボンの 2 層をコーティングすることで、Fe 溶出量を従来システムに比べ 1/10 に削減できた⁽¹⁰⁾。

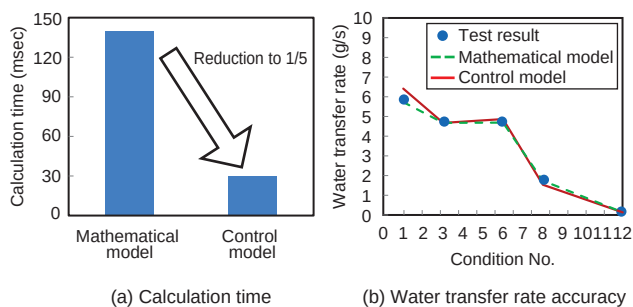


Fig. 6 Performance of control model

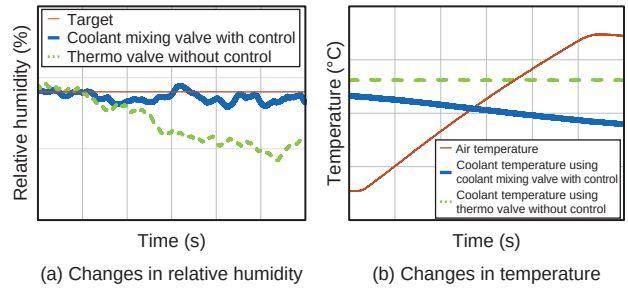


Fig. 7 Behavior of relative humidity

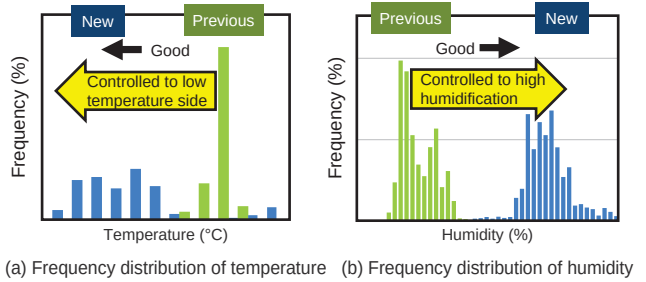


Fig. 8 Operating temperature and humidity

これら、膜の高含水化と温度低減の取り組み及びパイポーラプレートからの Fe 溶出量の削減の結果、従来システムに対して燃料電池スタックの耐久性は 2 倍以上の向上を達成した。

4. 低温環境での始動時間の短縮

低温環境下、特に氷点下環境では燃料電池スタックに使われている触媒の活性が低くなる等の理由により燃料電池スタックの発電性能が低く、温度によっては燃料電池システムとして車両運行に必要な出力を供給できない課題がある。そこで本システムにおいては、従来システムと同様に燃料電池システムの始動後に必要な出力を供給できる状態になるまでシステムの暖機をおこなうことに加え、多用途への適用拡大を見据え始動時間の短縮を目指した。

まず発電時に燃料電池スタックに供給する空気量を通常発電時よりも削減することで発生する発電損失 (発熱) を用いて、積極的に燃料電池スタックを暖機する急速暖機手法を適用した⁽¹³⁾。Fig. 9 にこの発熱量増加の仕組みについて示す。Fig. 9 (a) に示すように、燃料電池は流れる電流が多いほど抵抗成分が大きくなるため、電圧は下がり、抵抗成分は熱になる。また Fig. 9 (b) に示すように、空気量を減らすと同じ電流値でも抵抗成分が増加し、電圧が下がるため、抵抗増加分に応じて発熱が増加する。これらの関係をエネルギーと発電効率で表すと Fig. 9 (c) となる。発電エネルギーは流れている電流値とその時点での電圧値の積であり、発熱エネルギーは前述のとおり抵抗成分による熱で

ある。電流値を高く且つ供給空気量を減らすことで電圧が低くなり発電効率が下がる。発電効率の低下によって発熱エネルギーが増加するため、この発熱増加分を利用することで始動時間を短縮することができる。

以上から暖機のために氷点下環境で燃料電池システムを高電流で発電させることになるが、発電により生成した水の量と燃料電池スタックの温度のバランスによって生成水が凍結しガスの供給が妨げられることがある。この場合には発電を継続できないことが課題となる。そこで、乾燥した固体高分子膜が生成水を吸収できることを利用し、燃料電池温度が氷点を超えるまでの時間に生成する水の総量を膜で含水可能な量以下に設定することで、発電の継続を実現した⁽¹⁴⁾。3章で述べたように本システムにおいては通常発電時は膜が高含水状態にあるので、固体高分子膜に生成水を吸収させるためには膜を乾燥させる必要がある。しかしながら過度な乾燥は膜の経時変化につながるため、事前に発電を伴った調湿処理を実行することで相対湿度を制御しつつ乾燥をおこなう。発電により燃料電池温度を上昇することが可能なため、同時に調湿処理時間の短縮ができた。

以上の急速暖機制御及び調湿制御を適用することにより低温始動時間の短縮を実現した。Fig. 10 に -20°C の低温環境下での始動時間を示す。前モデルに対して始動時間を約1/9まで短縮することができた。

また、本調湿処理の実行はFig. 11に示すように燃料電池システム停止直後におこなわない。燃料電池システム停止完了後に環境温度に応じてシステムが冷却され、その温度が氷点に近づくタイミングで調湿処理を自動で実行する。前述したように調湿処理時の発電によって燃料電池温度が上昇するため、調湿処理を実行しない場合に比べて、

燃料電池温度が環境温度同等になる期間を長くすることができる。結果、環境温度が氷点以下の状況で次回起動をおこなう場合には、燃料電池温度が氷点以上となる期間が長くなった分、通常起動できる頻度を増やすことができる。すなわち、暖機時間の長い氷点以下の起動の頻度を減らすことができた。

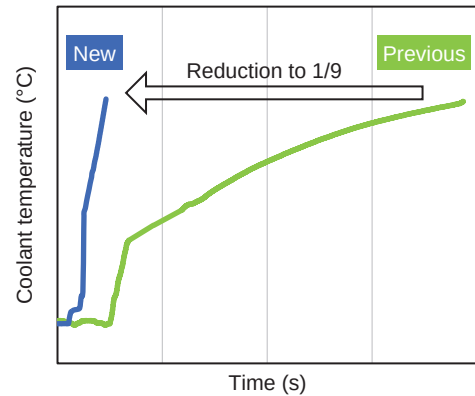


Fig. 10 Start-up time in low-temperature environment

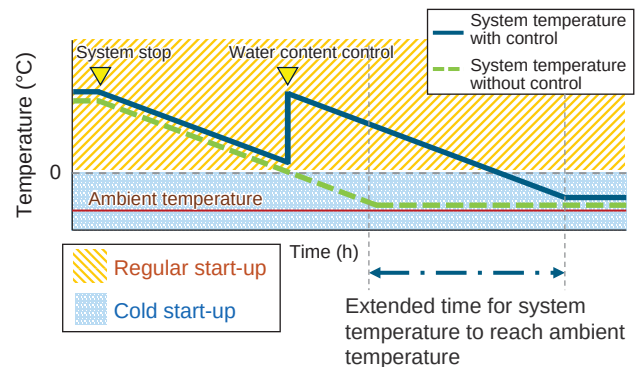


Fig. 11 Schematic diagram of system temperature changes

5. 燃料電池システムの生産性向上とさらなるコスト低減

燃料電池スタックは素材から生産にいたるまで従来システムに対して同等以上の性能を確保しつつ、様々な面でコスト低減対策を実施した⁽¹⁰⁾。各セル冷却構造により部品構成を見直し、5部品/2セル⁽¹⁵⁾から4部品/2セルに部品数の削減ができた。バイポーラプレートの表面コーティングを金メッキからチタンとカーボンの2層コーティングに変更した。Fig. 12に示すように燃料電池バイポーラプレート間のシール構造には溶接シールに加えて、メタルビードとマイクロシールを組み合わせたメタルビードシール構造を開発した。

独自の新しいMEAコーティングプロセスと製法を採用することで、従来のスタックに比べて膜の厚さを40%削

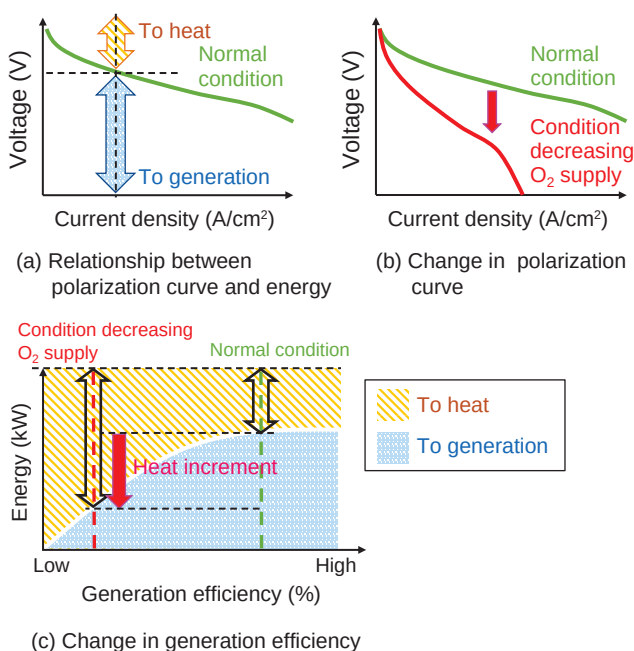


Fig. 9 Mechanism for heat increment

減した⁽¹⁰⁾。また、MEA 電極部の白金量を従来スタックから 80% 低減したうえで性能を確保した⁽¹⁰⁾。Fig. 13 に示すように燃料電池スタックの製造の完全自動化により、連続的な生産を実現した⁽¹⁰⁾。これは Honda とゼネラルモーターズの合弁工場で具現化した。

Fig. 3 (a), (b) に新旧の主要な補機デバイスの構成を示した。第 3 章で述べたように新型燃料電池システムでは電動クーラントミキシングバルブの採用による加湿量コントロールによりスタックの耐久性がさらに向上できた。そのため従来システムでスタックの耐久性向上対策のために設置していた水素ポンプ、EGR ポンプ・リードバルブ、加湿器バイパスバルブの各補機デバイスを削減することができ、システムのコスト低減につなげることができた。

Fig. 1 で示した様々なアプリケーションへの適用拡大を考えた際に、Fig. 14 (a) に示すような従来の水素換気システムではアプリケーションごとに換気ダクトの専用設計が必要だった。Fig. 14 (b)⁽¹⁶⁾ に示す新水素換気構造は搭載条件の違いによらず安全な濃度に常時換気する強制換気システムとした。これにより専用設計部品をなくし、多用展開に有利なシステムを構築できた。また、部品削減によるさらなるコスト低減を実現できた。

6. まとめ

燃料電池システムの普及拡大をめざし、乗用車への適用のみならず様々なアプリケーションへの展開を実現するために耐久性と低温環境性能を向上させながらコスト低減をおこなった燃料電池システムを開発した。

- (1) 運転条件の低温化、高加湿化、及び燃料電池に投入する空気加湿量をオンボード推定し、加湿器とクーラントミキシングバルブでアクティブ制御した。また、燃料電池のバイポーラプレートの表面をチタンとカーボンの 2 層コーティングすることで Fe 溶出を 1/10 に抑えることができた。その結果、燃料電池の耐久性は目標である従来システムから 2 倍以上を達成した。
- (2) 低温環境下での起動においては、投入する空気量をコントロールする急速暖機制御と起動前にあらかじめ電解質膜の調湿をする制御を組み合わせることで、 -20°C での始動時間を目標どおり 1/9 に削減することができた。
- (3) 燃料電池スタックの部品構成を削減し、バイポーラプレートの溶接シールに加えて、メタルビードとマイクロシール構造を開発し、部品構成を簡素化した。また、貴金属使用量を削減し、新しい MEA 製法、及び燃料電池組立工程を構築した。加えてシステム構成の簡素化も実施し、新型燃料電池システムのコストは目標である従来比 1/3 を達成した。

参考文献

- (1) 川崎聡志, 小椋正己, 小野徹, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗用車 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 1-6
- (2) 小川隆行, 木村顕一郎, 内堀憲治, 藤本幸人, 清水潔: 燃料電池乗用車 Honda FCX 用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 7-12
- (3) 川崎聡志, 内堀憲治, 村上義一, 清水潔, 藤本幸人: 次世代燃料電池スタックを搭載した New Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 45-50
- (4) 松永稔, 福嶋達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行:

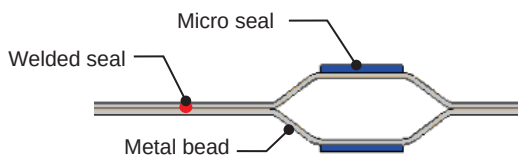


Fig. 12 New bipolar plate structure

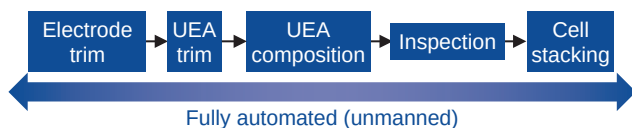
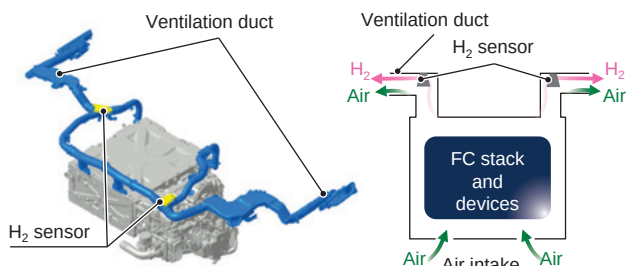
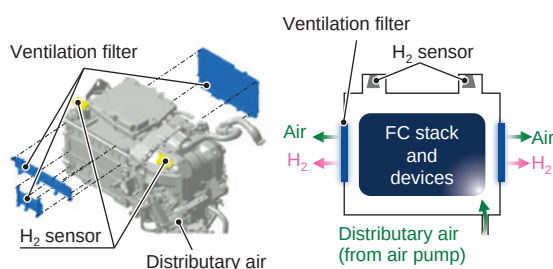


Fig. 13 Fuel cell stack manufacturing process



(a) Previous model



(b) New model

Fig. 14 Hydrogen ventilation systems

- FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 21, No. 1, p. 7-14
- (5) 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
- (6) 尾崎浩靖, 上野臺浅雄, 山崎薫, 間庭秀人, 小川隆行: 新型燃料電池車用燃料電池システムの開発, 自動車技術会 2024 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 10-24, No. 20245041, (2024)
- (7) Perry, M. L., Daring, R. M., Kandoi, S., Patterson, T. W., Reiser, C.: Operating Requirements for Durable Polymer-Electrolyte Fuel Cell Stacks, Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability, Springer, p. 399-417, (2009), doi: 10.1007/978-0-387-85536-3_20
- (8) Gittleman, C. S., Coms, F. D., Lai, Y. -H.: Chapter 2 - Membrane Durability: Physical and Chemical Degradation, Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation, ACADEMIC PRESS, p. 15-88, (2012), doi: 10.1016/B978-0-12-386936-4.10002-8
- (9) Zatoń, M., Rozière, J., Jones, D. J.: Current understanding of chemical degradation mechanisms of perfluorosulfonic acid membranes and their mitigation strategies: a review, Sustainable Energy & Fuels, Royal Society of Chemistry, Vol. 1, Issue 3, p. 409-438, (2017), doi: 10.1039/C7SE00038C
- (10) 石川暢一, 岩井田学, 内藤秀晴, 稲井滋, 吉田弘道, 室本信義: 高耐久・低コスト新構造燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 19-25
- (11) 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
- (12) 間庭秀人, 日高洋平, 木村浩一, 小岩信基: 燃料電池システムにおける一次元加湿器モデルの構築, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 53-62
- (13) 真鍋晃太, 今西啓之, 小川朋也, 野々部康宏: 燃料電池ハイブリッド自動車における燃料電池急速暖機運転の開発, 自動車技術会論文集 Vol. 41, No. 6, p. 1379-1385, (2010), doi: 10.11351/jsaeronbun.41.1379
- (14) Thompson, E. L., Jorne, J., Gu, W., Gasteiger, H. A.: PEM Fuel Cell Operation at -20°C. I. Electrode and Membrane Water (Charge) Storage, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 155, No. 6, p. B625-B634, (2008), doi: 10.1149/1.2905857
- (15) 菊池英明, 加地勇人, 西山隆之, 小此木泰介, 原田仁: CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 2, p. 44-51
- (16) 竹越聖也: 燃料電池システム水素換気構造の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 46-52

■ 著 者 ■



尾崎 浩 靖



山 崎 薫



小川 隆 行



間 庭 秀 人



三 浦 種 昭



Todd W. HUSTON