

高耐久・低コスト新構造燃料電池スタックの開発

High-durability and Cost-effective Fuel Cell Stack with New Structure

石川 暢 一¹
Choichi ISHIKAWA
稲井 滋¹
Shigeru INAI

岩井田 学¹
Manabu IWAIDA
吉田 弘 道¹
Hiromichi YOSHIDA

内藤 秀 晴¹
Hideharu NAITO
室本 信義²
Nobuyoshi MUROMOTO

要 旨

ゼネラルモーターズと共同開発した新構造燃料電池スタックでは、従来の燃料電池スタックの出力性能や安全性を維持した上で、耐久性を2倍にしながら、コスト1/3を実現した。

耐久性向上に対しては、制御による温度と湿度管理、スタック構造でのバイポーラプレートの鉄溶出低減、冷却性能向上、積層端部部品による発電安定性対応などをおこなった。

コストを低減するために、まず従来と同等のネットパワーを確保しつつも、電極集合体の高電流密度化とスタック発電を補う補機の消費電力低減により、セル積層数を削減した。次にバイポーラプレートの冷却性能を向上しつつ構造の簡略化をおこなった。また Unitized Electrode Assembly の電極触媒へのプラチナ使用量の削減や電解質膜厚の削減をおこなうとともに、Unitized Electrode Assembly 組立から積層工程までの完全自動化ラインを適用した。

ABSTRACT

A new structure fuel cell stack developed jointly with General Motors realized twice the durability at 1/3 of the cost while maintaining the output and safety performance of the previous fuel cell stack.

In order to increase durability, control-based temperature and humidity management was adopted and the stack structure was enhanced to achieve less iron elution from the bipolar plates, better cooling performance, and more stable power generation due to the stack end unit parts, etc.

To achieve lower cost, first the current density of the Membrane Electrode Assembly was increased and the power consumption of auxiliary devices that compensate for stack power generation was lowered, enabling maintenance of the same net power as the previous system with fewer cell layers. Next, the structure was simplified while enhancing the cooling performance of the bipolar plates. In addition, less platinum is used in the electrode catalyst of the Unitized Electrode Assembly, the polymer electrolyte membrane was thinned, and a fully automated line was applied from assembly of the Unitized Electrode Assembly to the stacking process.

1. はじめに

近年世界各地で夏の豪雨や巨大ハリケーン、大規模な山林火事、北極圏の気温上昇に伴う解氷による海水面の水位上昇など気候変動による大きな災害が発生している。この原因である地球温暖化は、工業化以前(1850-1900年)を基準とした世界平均気温上昇は2011-2020年に1.1℃の温暖化に達しており、2040年までに1.5℃に到達する可能性が高いことが指摘されている⁽¹⁾。そのため、使用時に気温上昇の主要因の一つであるCO₂が排出されない水素が、石

油由来の燃料に変わるエネルギー源として注目されている⁽²⁾。こうしたなか Honda は地球温暖化対策の一環として水素需要を喚起する「つかう」の実現を提案している⁽³⁾。

Honda は1980年代から燃料電池技術の実用化に取り組んできたが⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾、2016年発売の従来の燃料電池システムを搭載した CLARITY FUEL CELL^{(8), (9)}は限定的な市場展開であった。この次のステージとして、多種多様な市場展開を可能とする耐久性を向上し、かつ低コスト化した新構造燃料電池システムの開発を進めてきた。ゼネラルモーターズと共同開発した新構造燃料電池スタックは、従

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: choichi_ishikawa@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

来の燃料電池スタックの出力性能、安全性を維持しながら、従来の製品と比べ、耐久性2倍以上、コスト1/3を実現した。この燃料電池スタックは新型燃料電池自動車への搭載のみならず、Fig. 1に示すように商用車、建設機械、定置電源を加えた四つの領域への適用拡大を検討している⁽¹⁰⁾。本稿では新構造燃料電池スタックについて紹介する。

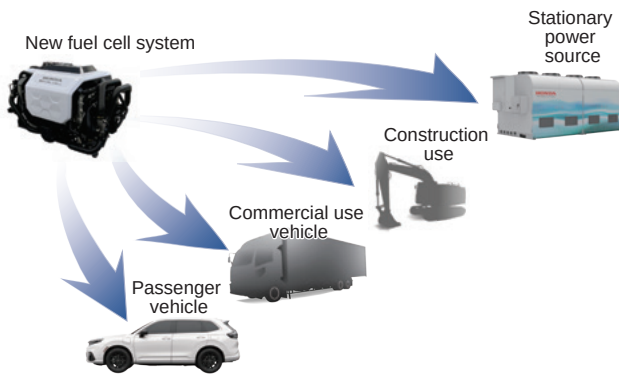


Fig. 1 Expanding application of fuel cell system

2. 開発のねらい

新構造燃料電池スタックはFig. 2に示すように固体高分子膜(電解質膜)を水素極および空気極で挟んだ電極集合体(Membrane Electrode Assembly: MEA)を積層する高分子膜型セル構造を採用している。

このMEAに水素と空気中の酸素を供給し、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構造である。Fig. 3に示す発電セルは、MEAと外周樹脂フィルムで構成されるUnitized electrode assembly(UEA)を、水素および酸素を供給する流路を構成する2枚のバイ

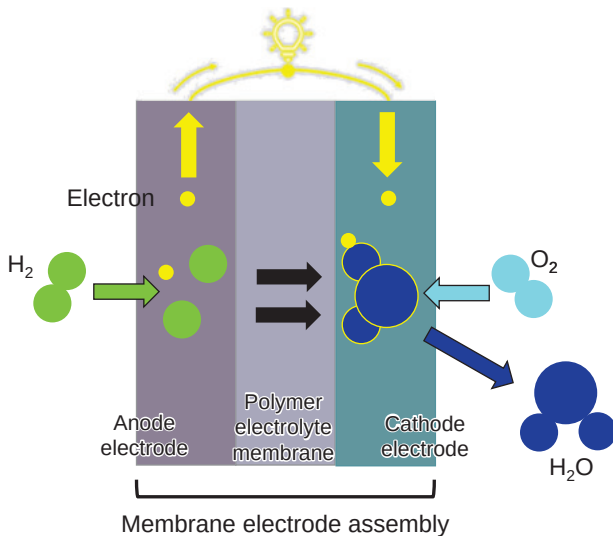


Fig. 2 Mechanism of electricity generation in stack

ポーラプレート(Bipolar plate: BPP)で挟む構造となっている。

MEAは鉄によるコンタミネーションや、運転時に高温化による電解質膜の乾燥などによって、電解質膜の劣化が進むことが知られている^{(11), (12)}。これらを対策することで耐久性が向上した。

また、MEAは薄膜で高い加工精度が要求されるため製造工程が複雑であり、かつPtが必要なため、普及の観点でコストの課題がある^{(13), (14)}。そこで、構造の簡略化や材料の置換によってコストを低減させることを開発の狙いとした。

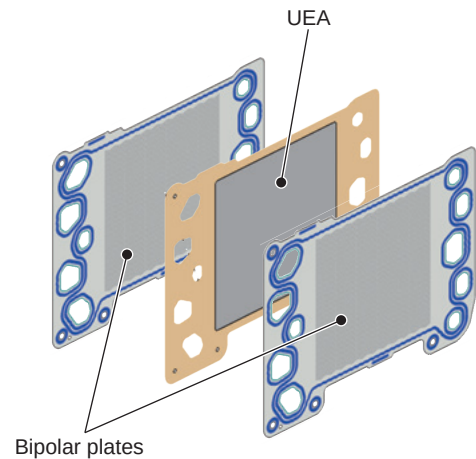


Fig. 3 Structure of cell in new stack

3. 燃料電池スタックのコスト低減

Fig. 4に従来の新構造燃料電池スタックのコスト比較を示す。スタックコストの大部分を占めるセルコストに対し、従来の燃料電池システムと同等のネットパワーを確保しながら、MEAの高電流密度化とスタック発電を補う補機の消費電力低減により、セル積層数を従来のスタックから15%削減した。

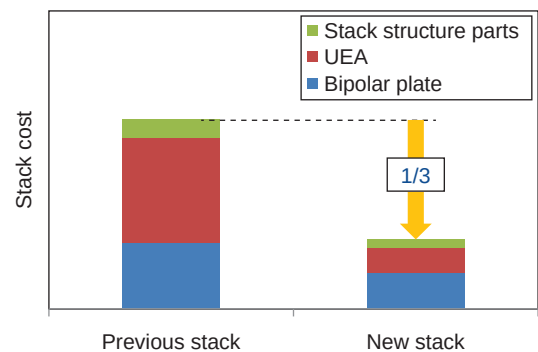


Fig. 4 Stack cost

また、Fig. 5 に示すように、燃料電池スタックは、BPP および UEA を積層したセルユニット構造、セルユニットの締結と保護を担うスタック構造で構成している。これら各部品にてコスト低減を実施しており、新構造燃料電池スタックは従来のスタックに対し、コストを 1/3 に低減した。

3.1. BPP の構造簡略化と材料の見直し

Fig. 6 に示すように BPP にコストを意識し、母材表面のコーティングの変更、セル間シール構造の変更、被水防止のための外周被覆構造の廃止を採用した。

Fig. 6 の External Shape および Coating structure に示すように、高価となる要因であった BPP の母材表面は従来の金コーティングよりも安価であるカーボン (C) とチタン (Ti) コーティングへ変更した。また、従来の BPP のシール構造はゴムで母材プレートを覆うシールを採用していた。新構造は Seal structure に示すように、母材プレート 2 枚を溶接にてシールする BPP 構造とメタルビードとマイクロシールによるシール構造を採用したことで、BPP 構造の簡素化を実施している。

加えて、従来の BPP は積層後に金属部分が剥き出しにならないよう、セル外周部は樹脂フレームとゴムで覆うセル外周被覆構造を採用していた。新構造では Outer insulation structure に示すように、外部からの被水防止と水素の換気も可能とした Fig. 5 に示すフィルター構造を採用し、複雑であったこのセル外周被覆構造を廃止した⁽¹³⁾。

3.2. UEA の材料および構造の変更と完全自動生産ラインの導入

UEA は Fig. 7 に示すような構造を採用し、高価な要素であった電極層内に含まれる貴金属白金の使用を従来の UEA に対し 1/5 に削減した。また従来では協力サプライヤの膜品 (単膜) を適用していたが、独自のコーティングプ

ロセスを採用することにより、電解質膜の厚さを 3/5 に削減し、UEA のコスト低減を実現している。

また電極層内には触媒活性の高い Pt 合金触媒を採用した。触媒の活性向上と電解質膜厚の削減による抵抗低減により、白金量の削減による性能低下を補い、従来の UEA 同等以上の出力性能を確保した。また外周樹脂構造では従来の UEA 構造にあった流路構造を廃止し、流路構造は BPP 側のみとする構造を採用した⁽¹⁴⁾。

低コストを実現する上で材料及び構造の変更のみでなく、生産効率を向上させるための生産技術開発も実施している。

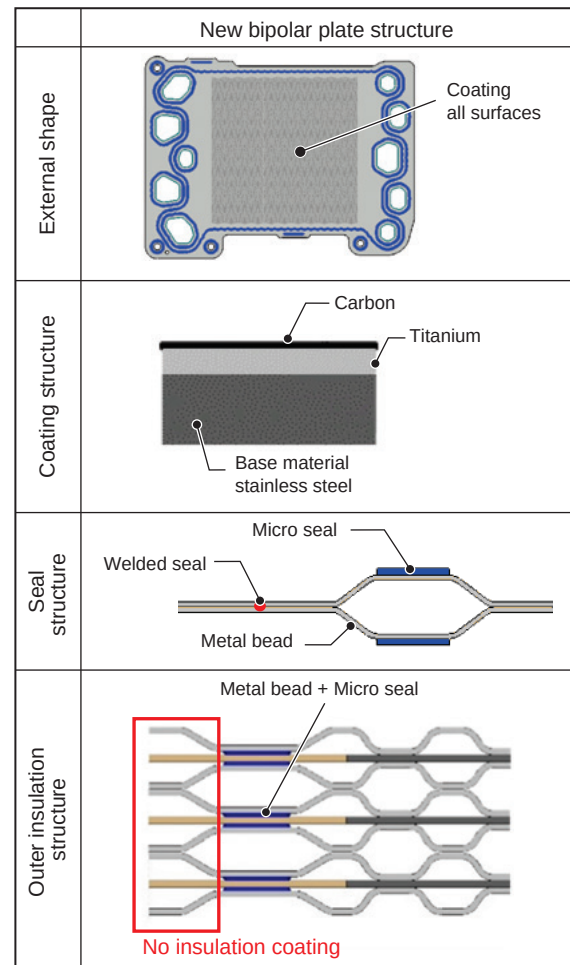


Fig. 6 Bipolar plate structure for cost reduction

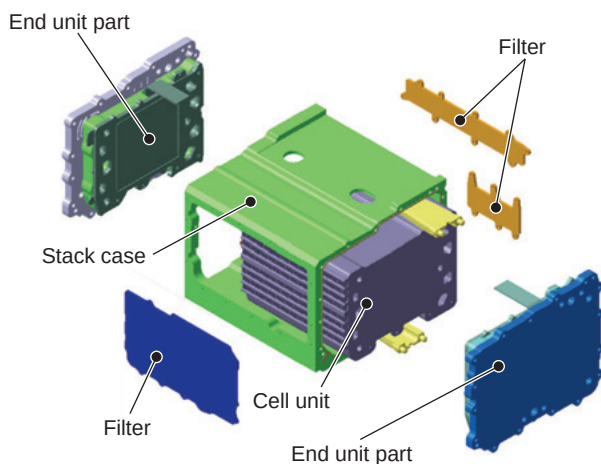


Fig. 5 New fuel cell stack

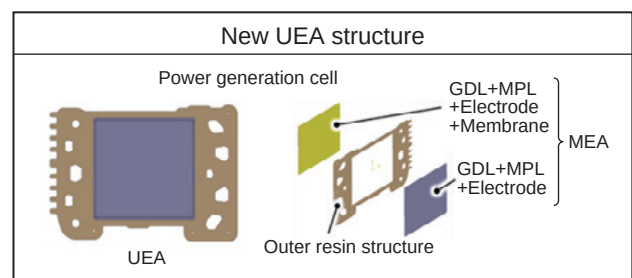


Fig. 7 UEA cost reduction structure

従来は Fig. 8 に示すように工程ごとに処理時間が異なっていたため、電極の切り出しからセル積層までの一連の工程を繋いだ全自動化ができなかった。そのため生産効率の向上に限界があり、コスト高の要因の一つになっていた。そこで 新構造燃料電池スタックでは工程の集約と削減・処理時間の短縮をおこない、Fig. 9 に示す完全自動化したラインを実現した。左から順に、ロール状の電極を切り出し、次に切り出した電極とフィルムを貼り合せ、UEA を組み立てた後に品質を検査した上で BPP と積層する工程を全て自動化している。

その取組み内容について詳細に述べる。まず従来の外周樹脂構造体は射出成型品を用いていたが、新構造 UEA では樹脂フィルムを採用した。そしてフィルムと電極の接合部分は 挟み込み構造としたことにより、従来モデルにあった樹脂を溶かして物理的に接合する含浸工程 (Bonding) を廃止できた。また、シール材の塗布と一次硬化を完了させたフィルムを材料として採用することにより、接着剤の Curing 工程の時間を短縮し、Lamination 工程の加工時間で完了することを可能とした。これらにより、2 種の電極と樹脂フィルムの三位一体の加工を実現し UEA 組立工程を 3 工程から 1 工程へ集約した。その他、電極カット工程 (Electrode trimming), UEA カット工程 (UEA trimming), セル積層工程 (Cell stacking) では全自動化, UEA 検査工程 (Inspection) では仕様適合技術開発の実施によりサイクルタイムの短縮と均一化を達成した。

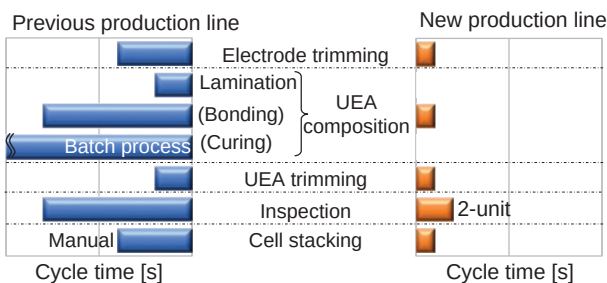


Fig. 8 Cycle time for each process

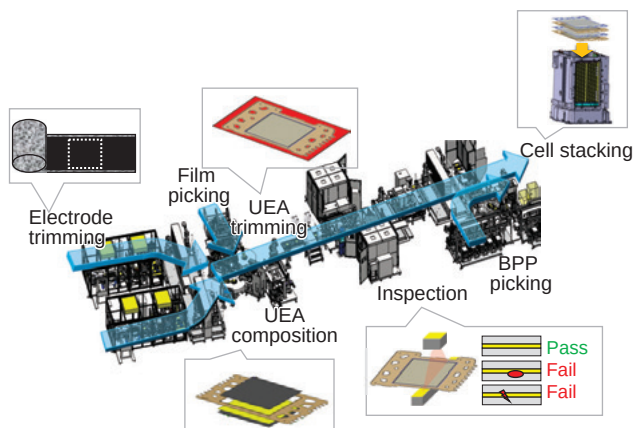


Fig. 9 Overview of new production line

さらに、完全自動化ラインを実現するためには安定した材料投入が必要であることから Fig. 10 に示すような枚葉のフィルム材料を確実にピックアンドプレイスする技術を採用した。このフィルム材料は接着剤部分に異物が付着しないようにインターリーフと交互に平積みされた状態で容器に梱包されている。容器内ではフィルムとインターリーフが密着した状態であるため、このインターリーフをロボットが取出す際に下のフィルムが貼り付き一緒に取出されてしまうという課題があった。そこで、Fig. 11 に示すようにインターリーフの外側を押さえつつ一部をつまみ上げて引き剥がす機構を採用し、安定したピックアンドプレイスを実現した。

以上により、電極ロールの投入からセル積層までの完全自動化ラインを実現したことで生産効率を向上させ、従来比で要員 1/8, セル当たりの減価償却費 1/3 となった。

3.3. スタック構造の簡略化

従来のスタック構造部品は Fig. 12 に示すようにセル積層部品であるエンドユニットと 4 本のバーにてセルを積層し、その外側をセル保護構造部品である四つのスタックカバーにて覆う構造であり、セル積層部品とセルを保護する構造部品に分かれた構造であった。新構造燃料電池スタックは部品点数削減を目的に、Fig. 13 に示すようにスタックケースにセル積層とセル保護構造の役割を持たせ、従来のスタックの 4 本バーとスタックカバーを一体化した構造とし、スタック構造部品の 8 個あった部品を 1 個に削減した。

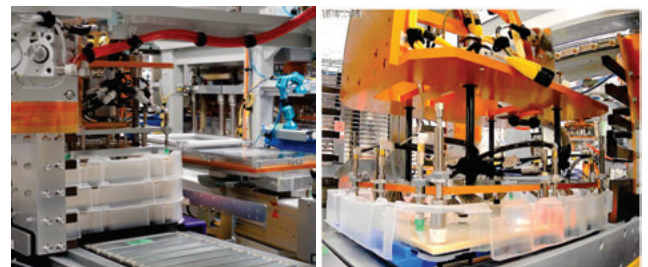


Fig. 10 Pick and place hand

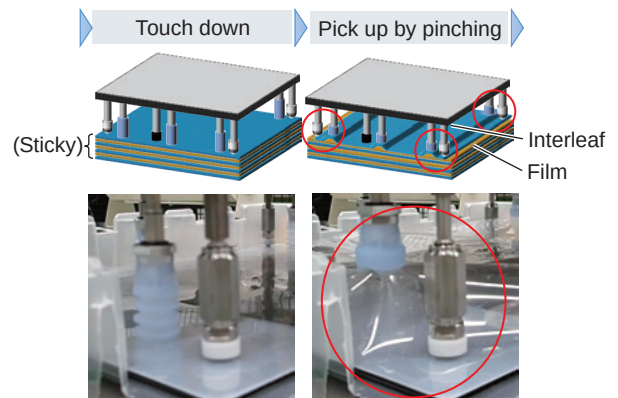


Fig. 11 Pick up by pinching

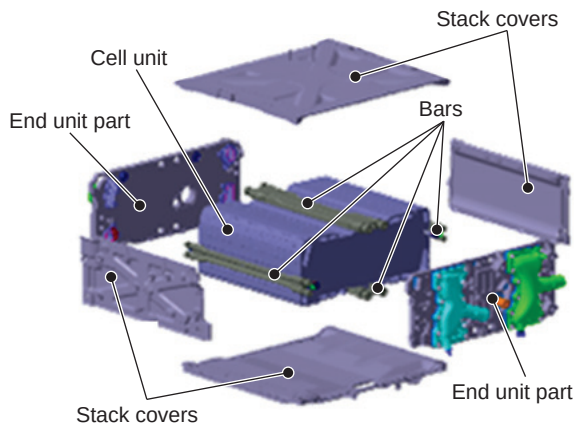


Fig. 12 Previous stack structure

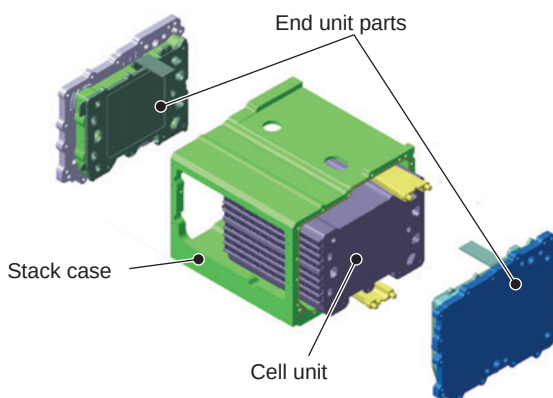


Fig. 13 New stack structure

4. 燃料電池スタックの耐久性向上

新構造燃料電池スタックはスタック構造と制御との組み合わせにより、2倍以上の耐久性向上を実現しており、次の技術を適用している。

- ・ 温度と湿度制御による電解質膜耐久性向上
- ・ BPP コーティング変更による鉄溶出低減
- ・ BPP 冷却構造変更とアスペクト比変更による冷却性向上
- ・ 積層端部断熱向上と補機流路からの水侵入対応

4.1. 温度と湿度制御による電解質膜耐久性向上

固体高分子型燃料電池の電解質膜は、膜の温度が高い状態で膜の含水量が不足すると、化学的安定性が低下し、膜が急速に分解することが知られている⁽¹²⁾。そのため膜の温度と湿度を適切に保つ必要がある。冷媒温度の低温化を達成するために、性能向上した補機によって冷媒量を電動制御している⁽¹⁵⁾。また、投入する空気に含まれる水蒸気の移動量を高精度に推定する独自のモデルを使うことで、膜劣化を抑制し最適な湿度に保つことができる、補機制御を実現した。

4.2. BPP コーティング変更による鉄溶出低減

固体高分子型燃料電池の電解質膜は鉄が混入すると膜の化学劣化が進行するため⁽¹¹⁾、BPP 基板からの鉄溶出低減が必要である。BPP 構造で採用したカーボンとチタンの全面コーティングにてステンレス基材の露出を抑制することで、鉄溶出を 1/10 に低減でき、耐食性が向上した。

4.3. BPP 冷却構造変更とアスペクト比変更による冷却性向上

新構造燃料電池スタックでは、Fig. 14 に示すような BPP と UEA を連続的に積層し、UEA と BPP の間に水素と空気、BPP 内部に冷却水を流す構造としている。

Fig.15 (a) に示すように従来は、2 セルごとに冷却水を流しており、冷却水に接しないセルがあった。新構造では Fig.15 (b) に示すように各セル冷却構造とし、全てのセルに冷却水が接するようにした。結果として、セル間の温度差が低減した。

また、セル発電部の縦横アスペクト比変更により、セル内冷却水が面内に均等に流れやすくなり、セル冷却構造とセルのアスペクト比変更を組み合わせることで Fig. 16 に示すように面内の水平方向、垂直方向いずれの温度も減少し、冷却性能が向上した。

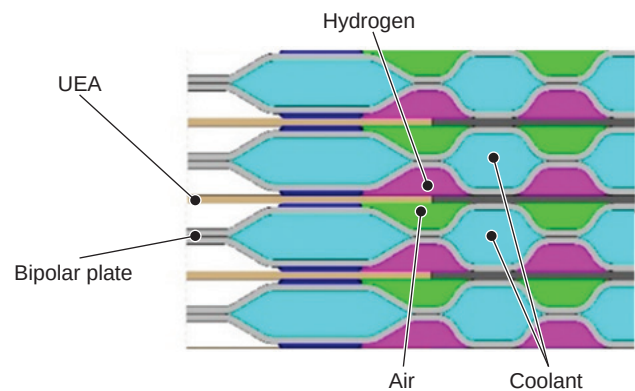


Fig. 14 Structure of cell unit in new stack

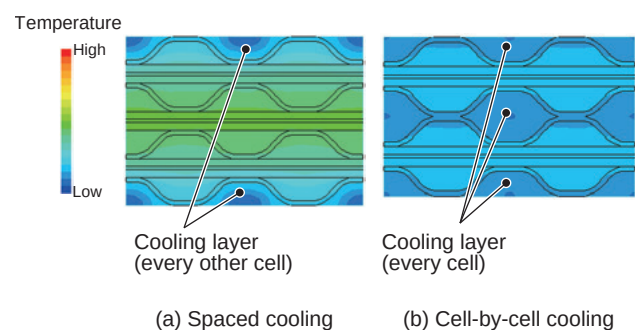


Fig. 15 Temperature distribution inside cell predicted by CFD

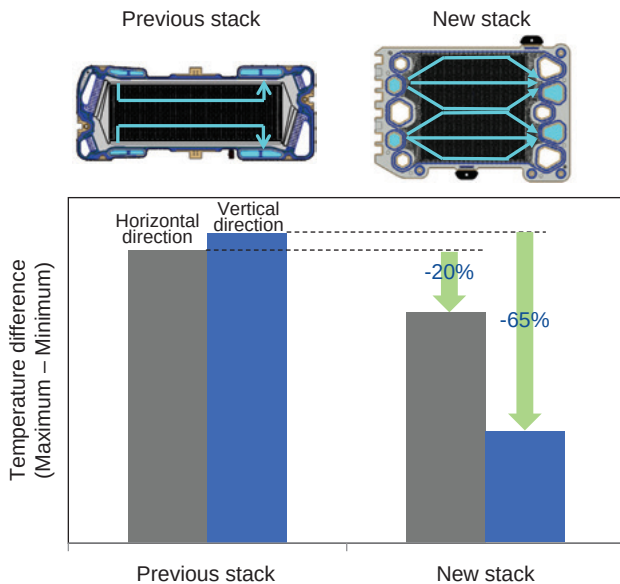


Fig. 16 Effect of changing cell aspect ratio

4.4. 積層端部断熱向上と補機流路からの水侵入対応

電圧が不安定になると、電極が劣化して耐久性の低下につながる。安定した発電をおこなうためには、積層端部の断熱性能の確保および燃料電池スタックの空気、水素流路内に補機流路からの水侵入を防ぐ必要がある。新構造燃料電池スタックではインシュレーターの厚み確保による断熱効果向上をおこない、端部セルの自然放熱による温度低下を抑制しセルの積層間温度ばらつきを低減している。また、外部からの水がUEA内に侵入した場合、発電不安定が発生し、UEAの耐久性を低下させる要因となる。そのため、Fig. 17に示すように、水侵入に対してインシュレーター部での水誘導流路を設置することで、UEAに水が浸入しないような構造とした。

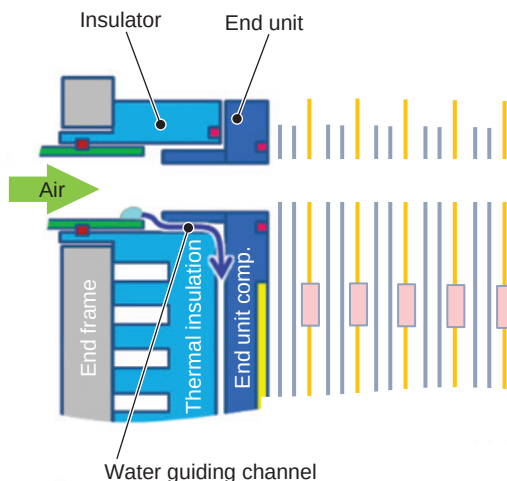


Fig. 17 New fuel cell stack end structure

5. まとめ

本稿ではゼネラルモーターズと共同開発した新構造の燃料電池スタックについて紹介した。従来の燃料電池スタックに対して、新たに投入した技術の特徴を以下にまとめる。

(1) 以下のような技術を導入することで、電解質の劣化を抑制し耐久性を向上させた。

- ・ 冷却効率の向上により、補機の省電力化、電解質膜温度の均一化による膜の劣化抑制を実現した。
- ・ BPPの母材およびUEAのコーティング材料を見直すことで、コスト低減だけでなく、鉄の溶出を従来に比べて1/10以下に抑制した。
- ・ 補機や流路構造の見直しによって、供給ガスの水蒸気量や排出する水の量を適切に制御することが可能になった。

これらにより、電解質膜の劣化を抑制した。

(2) 以下のような技術によって、部品点数の削減や生産時間の短縮などをおこない、コストを低減させた。

- ・ UEAの高電流密度化と補機の消費電力削減によって、従来と同じ出力の燃料電池スタックに対してセル積層数を15%減らした。
- ・ 新形状のBPPとUEAを採用することで、構造の簡略化と冷却効率の向上を達成した。
- ・ セルの組み立てラインの各工程にかかる時間の平準化ができるようになり、生産工程全体の完全自動化を実現した。これにより生産時間の短縮が可能になった。

結果として、新たに開発した燃料電池スタックでは、耐久性を2倍に向上しつつ、従来と同等のネットパワーを維持し、コストを1/3にすることができた。

参考文献

- (1) <https://www.env.go.jp/content/000126429.pdf>, (参照 2024/7/9)
- (2) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene-shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf, (参照 2024/7/9)
- (3) <https://global.honda/jp/hydrogen/>, (参照 2024/7/9)
- (4) 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
- (5) 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
- (6) 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

- (7) 松永稔, 福嶋達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行:
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
- (8) 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
- (9) 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
- (10) https://global.honda.jp/tech/Hydrogen_Fuel_Cell_System_FC/, (参照 2024/7/9)
- (11) 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
- (12) 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
- (13) 布川和男, 新海洋, 小山賢, 石田堅太郎, 後藤修平: 高耐久・低コスト燃料電池バイポーラプレートの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 32-38
- (14) 加藤高士, 中原章, 大倉拓也, 山本昌邦, 寺田聡, 野田明宏, 金岡長之: 高耐久・低コスト燃料電池 UEA の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 26-31
- (15) 尾崎浩靖, 山崎薫, 小川隆行, 間庭秀人, 三浦種昭, Todd W. HUSTON: 新型燃料電池システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 12-18

■ 著 者 ■



石川 暢一



岩井田 学



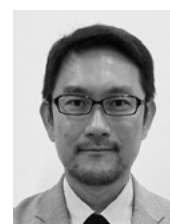
内藤 秀晴



稲井 滋



吉田 弘道



室本 信義