

フロントフード下搭載を実現した FC 冷却システム小型化技術

Downsizing Technology for FC Cooling System Installation under Front Hood

濱 祐 樹¹

Yuki HAMA

後 藤 修 平¹

Shuhei GOTO

永 田 大 貴¹

Daiki NAGATA

高 橋 謙¹

Ken TAKAHASHI

要 旨

CLARITY FUEL CELL のFCパワープラントのフロントフード下への搭載を実現するために、FC冷却システムを小型化する技術を開発した。FCスタックは、金属セパレータの腐食予測技術で腐食電流量を精度よく見積り、冷媒の電気伝導率の低減と、セルの絶縁ゴム除去により小型化した。FC冷却デバイスは、配管長を短縮でき、かつ圧損増加にともなう大型クーラントポンプが必要とされない範囲に冷媒電気伝導率を設定した。FC冷却システムは、FCスタックおよびFC冷却デバイスの小型化の寄与度が大きい範囲において、冷媒の電気伝導率を低減した。冷媒の電気伝導率を低減するために、部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解抑制を図るとともに、溶出したイオンを常時除去するFC冷却システムを構築した。これらにより、FC冷却システムを前モデル比20%小型化し、世界初5人乗りFCVセダンパッケージを実現することができた。

ABSTRACT

Technology for downsizing the fuel cell cooling system was developed in order to realize installation of the fuel cell power plant under the front hood of the CLARITY FUEL CELL. The fuel cell stack was downsized by accurately estimating the amount of corrosion current by using technology for predicting corrosion of the metal separator, decreasing the conductivity of the coolant, and removing the insulation rubber from the cell. For the fuel cell cooling device, the conductivity of the coolant was set within a range that would enable piping to be shorter and not necessitate the large-scale coolant pump used when a pressure drop increase occurred. In the fuel cell cooling system, the conductivity of the coolant was decreased within the range that would make a large contribution to downsizing the fuel cell stack and the fuel cell cooling device. In order to decrease the conductivity of the coolant, a fuel cell cooling system was built that would decrease ion dissolution from parts, inhibit degradation of the coolant, and constantly remove dissolved ions. These measures achieved a fuel cell cooling system that was downsized 20% over the previous model and succeeded in realizing the world's first five-passenger fuel cell vehicle in a sedan package.

1. ま え が き

2016年に発表した新型の燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle: FCV)であるCLARITY FUEL CELLは、内燃機関(Internal Combustion Engine: ICE)を搭載した車両と変わらない5人乗りFCVセダンパッケージを世界で初めて実現することを開発のねらいとした。そのために燃料電池(Fuel Cell: FC)パワープラントを2009年モデル(09MY)

より小型化することで、床下からフロントフード下への移設を実現した⁽¹⁾(Fig. 1)。その利点は、ICE車同様に5人乗りを実現でき、かつFCV専用の車体開発が必要ないことである。

そのためには、FCパワープラントを小型化させつつ耐衝撃性を09MY比4倍まで向上させる必要があり、技術難易度が高い⁽¹⁾。

2016年モデル(16MY)FCパワープラント小型化対応技

¹ 四輪R&Dセンター



Fig. 1 Schematic drawing of FC power plant for new CLARITY FUEL CELL

術の一つとして、本稿では、FC 冷却システム小型化について紹介する。

2. FC 冷却システム小型化の目標と課題

2.1. FC 冷却システムの構成

CLARITY FUEL CELL に搭載している FC スタックを含めた FC 冷却システム図を Fig. 2 に示す。

FC 冷却システムは、FC スタックと FC スタックで発生する熱を外部へ放熱するための FC 冷却デバイスで構築されている。

2.1.1. FC スタック (FC stack)

本稿で検討した FC スタックの構成を Fig. 3 に示す。

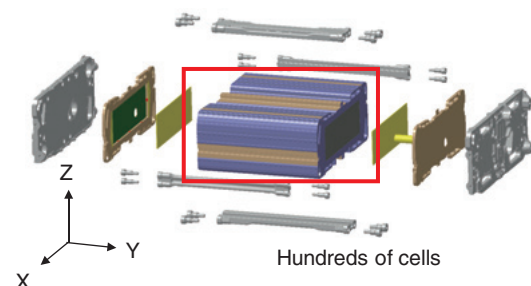
(a) に示す FC スタックは車両の動力性能確保に必要な電力を供給するため、セルを数百枚積層する構造とした。(b) に示すセル構造は 2 枚の膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly: MEA) を 3 枚の金属セパレータ⁽²⁾で保持し、2 セルごとに冷媒を流す構造を採用した。

FCV に採用している固体高分子型の燃料電池は、電解質膜を用い燃料の水素と空気中の酸素との電気化学反応によって得られる化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するシステムである。電気化学反応時に発生する熱は金属セパレータを介して冷却デバイスを循環する冷媒と熱交換し排出される。(c) に示すように冷媒は入口側の冷媒連通口 (Coolant manifold) から冷媒流路を通り冷却面に供給さ

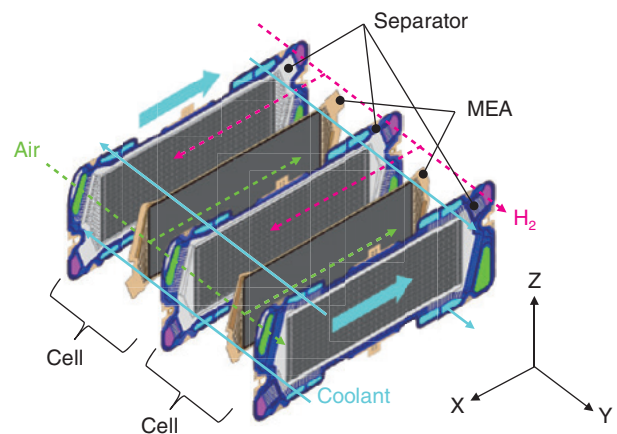
れ、出口側の冷媒連通口へ冷媒流路を通り排出される。

2.1.2. FC 冷却デバイス (FC cooling device)

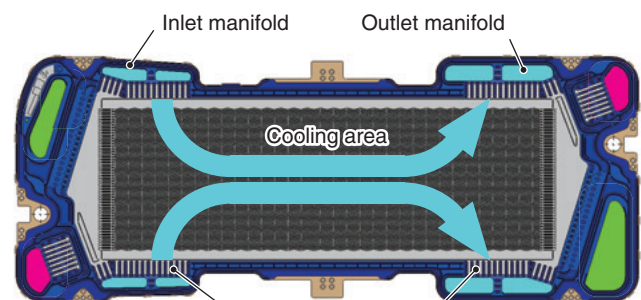
Fig. 2 に示す通り、FC 冷却デバイスは冷媒を循環させるクーラントポンプと熱を外部へ放熱するラジエータ、ラジエータとそのバイパス回路への回路の切り替えをおこなうサーモバルブで構成した。イオン交換器は車両の電気安全性確保と FC スタックの腐食を防ぐために、冷媒内部のイオンを除去する目的で従来から適用しており、一般的な燃料電池冷却システムに採用されているデバイスである。排熱回収回路は低温時の燃費向上のため、冷媒を介して FC スタックの熱を回収しヒータシステム回路へ供給する目的で設置した。



(a) Components of FC stack



(b) Cell structure



(c) Cooling area

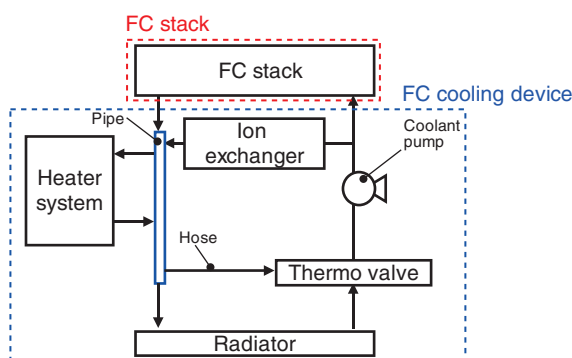


Fig. 2 Schematic diagram of FC cooling system

Fig. 3 Inside of FC stack, cell component, and cooling area

2.2. FC 冷却システム小型化の目標と達成手段

FC パワープラントをフロントフード下に搭載可能とするために、FC パワープラントを V6 エンジン同等の容積にすることを旨とした⁽¹⁾。そこで、FC 冷却システム小型化にあたり、構造と機能の両面でアプローチすることを検討した。FC 冷却システムの機能を維持しつつ冷媒経路構造を見直すことで、FC スタックの容積を 09MY 比較で 20 ポイント低減することを目指した。

FC スタックは数百枚のセルによって構成されており、セルの厚みを低減すると小型化に大きく貢献できる。そこでセル厚みに寄与する絶縁被覆ゴムを削除することに着目した。

09MY および 16MY FC スタックの冷媒流路構造を Fig. 4 に示す。まず 09 MY および 16MY 冷却面を正面図に示す。次に冷却流路構造の高さの変化と、連通口から冷媒流路の絶縁ゴム被覆距離の変化を示す。

09MY の冷媒流路は金属セパレータの腐食を防ぐため、冷媒流路の上下左右を絶縁ゴムで覆われた構造としていた。それに対し 16 MY では冷媒流路の上下に配置された絶縁ゴムを削減する構造とした。また、冷媒流路高さ h_{09MY} と h_{16MY} は同等の値を設定した。その結果、冷媒流路の圧損を増加させることなく、セルとして被覆ゴム 2 層分の厚みを低減した。

また、セル面積について 16MY は連通口から金属面まで

Table 1 Three functions for FC cooling system

Function	Parameters	Issues of downsizing
Stack cooling	• Coolant flow • Heat exchanger rate	Decrease in cooling performance
Insulation	• Insulation resistance • Coolant conductivity	Decrease in insulation resistance
Corrosion resistance	• Cell thickness • Insulation distance • Coolant conductivity	Increase in metal corrosion

の絶縁ゴム被覆長 l_{16MY} を 09MY の l_{09MY} に対し短くすることで、セル面積を縮小した。

これら構造の見直しにより FC スタックの容積を 20% 小型化した。

2.3. FC 冷却システムの機能

FC 冷却システムに求められる三つの機能と、機能に影響するパラメータおよび小型化の課題を Table 1 に示す。

FC スタック冷却性能は、FC スタックやラジエータへ流入する冷媒流量、およびそれぞれの熱交換効率により、外気への放熱量により決定する。クーラントポンプやラジエータの小型化を実施すると、冷媒流量および外気への放熱量が減少し冷却性能を低下させる。そのため、小型化はコンポーネントレベルではおこなわず配管長の短縮により達成することとした。

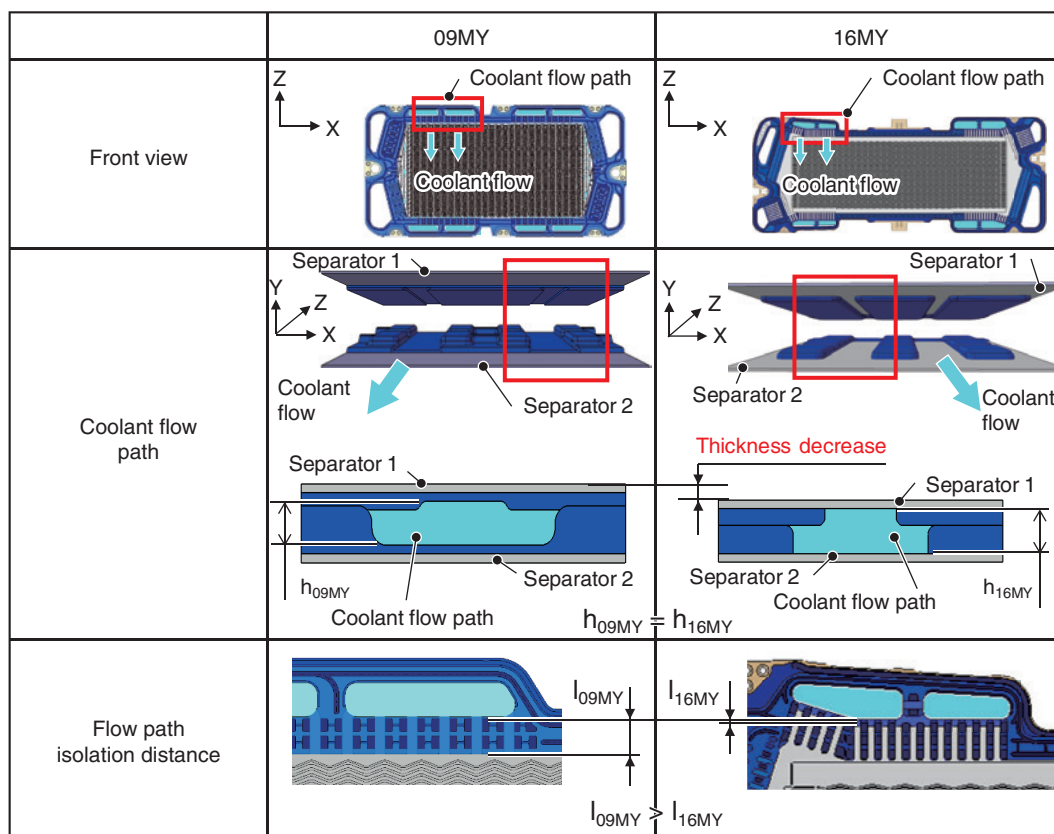


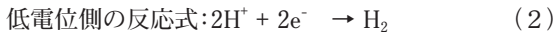
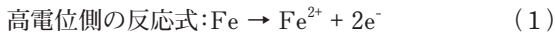
Fig. 4 Detail of coolant flow path

FC 冷却システムの絶縁性は車両電気安全を維持するために必要であり、FC スタックとグラウンドまでをつなぐ配管長さと冷媒の電気伝導率に依存する。小型化をすると前述したとおり配管長が短くなるため、絶縁抵抗値が低下する。そのため必要な絶縁抵抗値を確保するためには、冷媒の電気伝導率を前モデルよりさらに下げる必要がある。

FC セパレータ耐腐食性は、Fig. 5 (a) に示す金属セパレータの冷媒流路で発生する酸化還元反応による金属セパレータの腐食を抑制し、その強度を保持するために必要である。

冷媒経路は Fig. 3 (c) に示すように導電体である冷媒が常に存在するため、回路の形成を防ぐことが構造上できない。

Fig. 5 (b) に示す通り、金属セパレータの腐食は冷媒流路のステンレス露出部で発生する。主な反応は、高電位側 (1) でステンレス主成分の鉄が溶出し、低電位側 (2) で水素が発生する酸化還元反応である。



冷媒流路のステンレス材料が溶出すると、強度が低下し差圧による変形や、孔食が発生する。

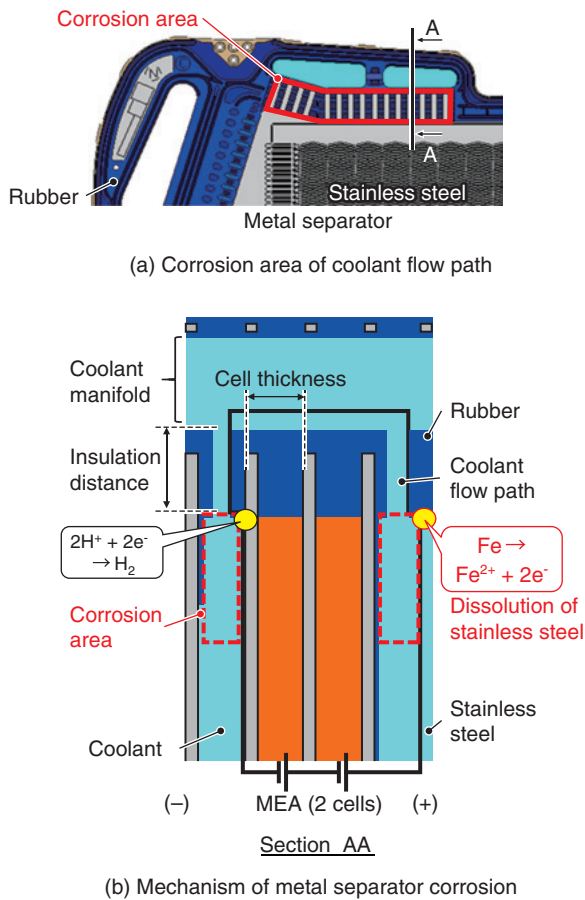


Fig. 5 Outline of metal corrosion

FC 冷却システム小型化のためにセル厚みや絶縁距離を低減すると、各部位が受け持つ電気抵抗が小さくなることで、冷媒流路に流れる腐食電流量が大きくなり、金属セパレータの腐食が促進する。小型化と金属セパレータ耐腐食性を成立させるためには、冷媒の電気伝導率を下げることに有用である。

この FC スタックの腐食電流量を精度よく算出するために検討した等価回路図を Fig. 6 に示す。

冷媒連通口に流れる電流を I_A 、冷媒流路に流れる電流を I_B 、冷媒連通口の抵抗を R_A 、冷媒流路の抵抗を R_B とした。

この等価回路を用いて最も大きな腐食電流である $I_{B(n+1)}$ を算出⁽³⁾し、横軸にセル厚み、絶縁距離、冷媒の電気伝導率の比率、縦軸に腐食電流量の比率をとり、09MY を 100% とした場合の効果を図 7, 8, 9 に示した。Fig. 7 より、Fig. 3, 4 に示した Y 方向に小型化できるセル厚み

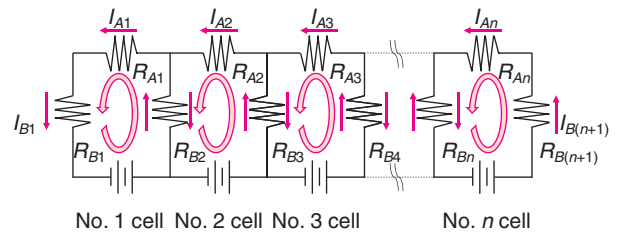


Fig. 6 FC stack circuit diagram

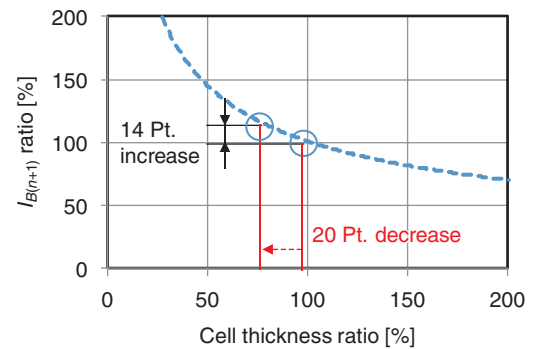


Fig. 7 Influence of cell thickness ratio on $I_{B(n+1)}$ ratio

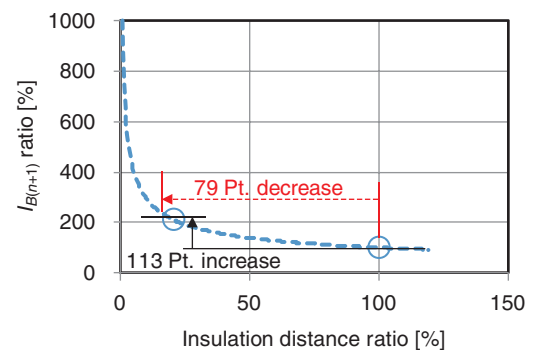


Fig. 8 Influence of insulation distance ratio on $I_{B(n+1)}$ ratio

を 20 ポイント低減すると、 R_A の抵抗が小さくなるため腐食電流量 $I_{B(n+1)}$ が 14 ポイント増加する。また、Fig. 8 より絶縁ゴムを除去して Fig. 3, 4 に示した Z 方向に小型化できる絶縁距離を 79 ポイント減少させると腐食電流量が 113 ポイント増加する。これらのセル厚みと絶縁距離の低減による腐食電流量の増加に加え、FC スタック積層数、冷媒連通口断面積および使用環境の影響により、腐食電流量は増加する。これらを低減するためには、Fig. 9 に示すように腐食電流量に大きく寄与する冷媒の電気伝導率を下げるのが効果的である。このため、09MY に対しセル厚みと絶縁距離の低減による腐食電流量の増加分 59 ポイント、他の腐食電流量上昇分 37 ポイント冷媒の電気伝導率を低下させることで、16MY の目標を設定した。

これらから、FC 冷却システムに求められる機能を確保するためには、FC スタックと FC 冷却デバイス影響を与える冷媒の電気伝導率が重要なパラメータであることが抽出できた。Fig. 10 は横軸に冷媒の電気伝導率の 09MY に対する比率、(a) の縦軸に FC 冷却デバイス容積の比率を、(b) の縦軸に FC スタック容積の比率を示す。横軸、縦軸ともに 09MY を 100% とし、冷媒の電気伝導率低減による FC 冷却デバイスと FC スタックの小型化の寄与度を表現している。

Fig. 10 (a) の (1) 領域で示す通り、FC 冷却デバイスは電気伝導率比を 100% から低下させると絶縁抵抗値が増加す

るため、配管長を短縮することができ、容積は緩やかに低下する。また (2) の領域に示す冷媒の電気伝導率比 4% 未満の FC 冷却システムを構築するには、FC スタック入口にイオン交換器を設定し、流入する冷媒中のイオンを直前で除去する必要がある。しかし、その位置にイオン交換器を設定すると圧損が増大するため大型クーラントポンプが必要になり、(2) 領域に示すように FC 冷却デバイスの容積が大きくなる。

同様に FC スタックは、Fig. 10 (b) の (3) 領域に示すように、100% から 4% まで冷媒の電気伝導率比が低下すると、セルの厚みや絶縁距離が受け持つ各部位の絶縁抵抗値が低減できるため、絶縁ゴムの被覆量を削減することができ、FC スタックの容積は低下する。(4) の領域である 4% 以下の冷媒の電気伝導率比では、金属セパレータの腐食が低減されるのみで小型化の寄与度が小さい。

そのため、小型化寄与度が大きい領域に冷媒の電気伝導率を設定し、FC 冷却システムの小型化目標を達成することにした。

3. 低電気伝導率 FC 冷却システムの構築

冷媒へのイオン溶出の原因は主に、冷却システム部品やヒータシステム部品からのイオン溶出や、冷媒の分解によるイオン生成である。イオン溶出量の低減の対策を施したとしても、部品からのイオンの溶出や冷媒の分解によるイオンの生成は常時起きる。そのため、FC 冷却システム系内の冷媒低電気伝導率を維持するためには二つの課題を同時に達成する必要がある。

- (1) 部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解の抑制
- (2) 溶出したイオンを常時除去する FC 冷却システムの構築

3.1. イオン溶出量の抑制

既に 09MY においても FC 冷却経路で使用している部品に対するイオン溶出量抑制対策をおこなっており、それ

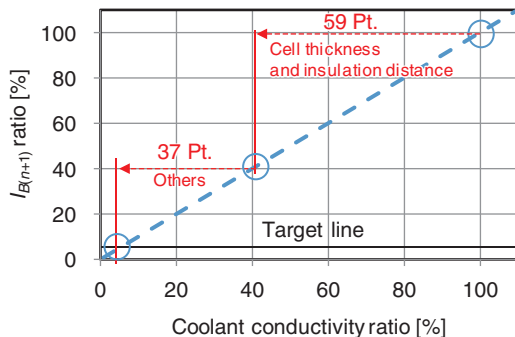
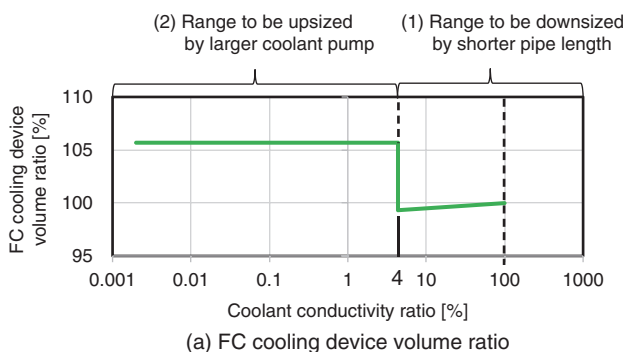
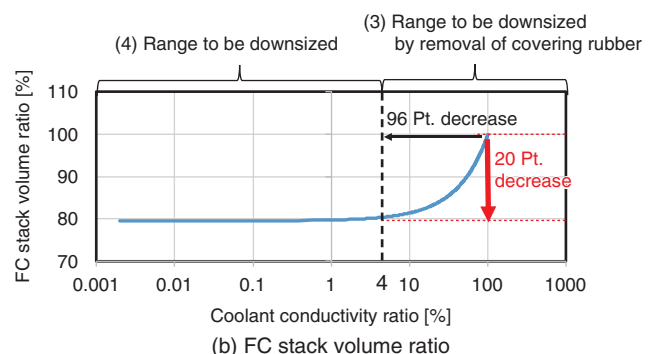


Fig. 9 Influence of coolant conductivity ratio on $I_{B(n+1)}$



(a) FC cooling device volume ratio



(b) FC stack volume ratio

Fig. 10 Volume ratios of FC cooling device

Table 2 Electric conductivity reduction method of FC coolant system

Parts	Method
FC radiator	Adopt flux reduction
Resin parts	Adopt low ion dissolution material
Hose	Adopt low ion dissolution material
Coolant	Add oxidation inhibitor

Table 3 Electric conductivity reduction method for heater system parts

Parts	Method
Heater core	Adopt flux reduction
Resin parts	Adopt low ion dissolution material
Hose	Adopt low ion dissolution material

らの手段を Table 2 に示す。ラジエータ製造にはイオン溶出の少ない製法を採用した。またパイプなどの樹脂部品やゴムホースは、イオン溶出が少ない材料を選定し採用した。冷媒については、熱分解によるイオン溶出を抑制するため、酸化抑制剤を添加した。

09MY に対して 16MY は、FC スタックからの廃熱を暖房に有効活用するシステムを追加しており、ヒータシステム部品に対しても低電気伝導率対策が必要となった。その対策手法を Table 3 に示す。ICE 車仕様に対して、ヒータコアは製法による低イオン溶出対策を実施し、パイプなどの樹脂部品やゴムホースは他の FC 冷却部品同様にイオン溶出量が低い材料を選択し採用した。

これらの対策により 16MY においては、ICE 車仕様のヒータシステム部品を採用した場合に対してイオン溶出物を 75 ポイント減らすことができ、FC 冷却システム全体としても 09MY 同等のイオン溶出量に抑えることができた (Fig. 11)。

3.2. イオン溶出物の常時除去

先に述べたイオン溶出物の抑制対策だけでは、電気伝導率を低く維持することは容易ではない。特に、車両が長期間放置されると溶出イオンが各部品内部に滞留してしまい、起動時に FC スタックへ一時的に電気伝導率が高い冷媒が流入してしまう。このようなケースでも、速やかにイオンを除去し電気伝導率を下げる必要がある。その達成手段としてイオン交換器へ冷媒を常時流すバイパスシステム構成を採用した。

イオン交換器を FC スタックと直列に配置すると、システム全体の圧損が増加するが、Fig. 2 に示すようにイオン交換器を FC スタックに対して並列配置すると、圧損が低下するため小型のクーラントポンプを選択できる。これにより、クーラントポンプ容積を 40 ポイント低減することができた。

常時イオン除去するシステム構成によるメリットは、暖機時にあらかじめラジエータバイパス回路内のイオンを除去することが可能となるため、暖機後にラジエータ回路からイオンが流入したとしても、混ざり合うことで上昇幅を抑制することができることである。

3.3. 低電気伝導率維持性能

前述した対策を採用した FC 冷却システムの低電気伝導率維持性能について、Fig. 12 に示す。一時的に電気伝導率が上昇するような場合でも、速やかに低電気伝導率化を実現しその状態を維持することができる。

暖機運転時 (Fig. 13) には、起動直後にラジエータバイパス回路内に滞留したイオン溶出物が流入することにより、一時的に電気伝導率が上昇する。しかし、イオン交換器へ

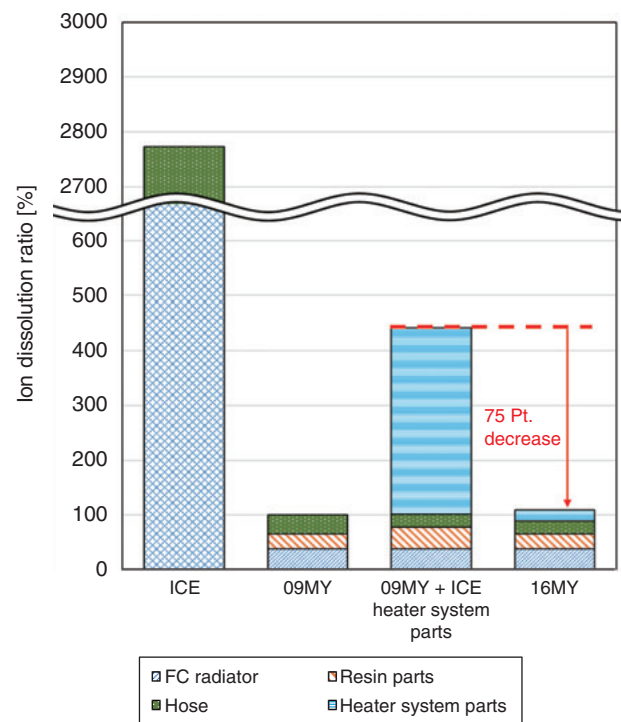


Fig. 11 Ion dissolution ratio in FC cooling system

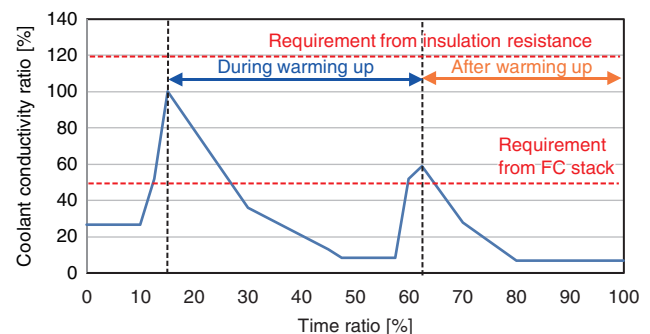


Fig. 12 Performance of keeping low coolant conductivity

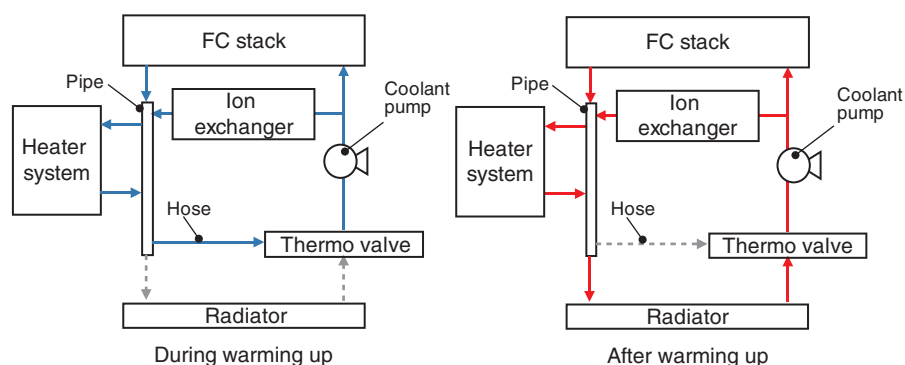


Fig. 13 Diagram of FC cooling system

常時冷媒を流すことにより速やかに電気伝導率を低下させることができ、維持することができる。

また、暖機完了後 (Fig. 13) にはラジエータ回路内部に滞留したイオン溶出物が流入するため、再び電気伝導率が上昇する。その後は常時イオン溶出物が除去されるため、速やかに低電気伝導率となり維持することができる。

サーモバルブにより暖機運転時と暖機完了時にラジエータバイパス回路とラジエータ回路を切り替えるシステム構成となっているため、暖機完了前にラジエータバイパス回路内のイオン溶出物を除去することができる。そのため、暖機完了後にラジエータ回路からイオン溶出物が流入しても、イオン溶出物の少ない冷媒と混ざり合って電気伝導率の上昇幅を抑制することができる。

4. まとめ

- (1) 金属セパレータの腐食予測技術で腐食電流量を精度よく見積り、冷媒の電気伝導率を低下させるとともに、セルの絶縁ゴム除去により FC スタックを小型化した。
- (2) 各配管長を短縮し、かつ圧損増加による大型クーラントポンプが必要とされない範囲に冷媒電気伝導率を設定することで FC 冷却デバイスの小型化を実現した。
- (3) 上記 FC スタックおよび FC 冷却デバイスの小型化の寄与度が大きい範囲において、冷媒の電気伝導率を低減するとともに、部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解抑制と、溶出したイオンを常時除去する FC 冷却システムを開発した。

以上により、CLARITY FUEL CELL の FC 冷却システムにおいて前モデル比 20% の小型化を達成することで FC パワープラントをフロントフード下へ搭載することが可能になり世界初 5 人乗り FCV セダンパッケージを実現することができた。

参考文献

- (1) 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
- (2) 木村義人, 小山賢, 儀賀章仁, 小此木泰介: CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池用セパレータの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.29, No.2, p.50-55
- (3) 濱祐樹, 後藤修平: 燃料電池用ステンレスセパレータのセル間腐食の予測技術, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.46-18, p.1-6, (2018)

■ 著 者 ■



濱 祐 樹



永 田 大 貴



後 藤 修 平



高 橋 謙