

燃料電池自動車用サーマルマネジメントシステム

Thermal Management System for Fuel Cell Vehicles

坂上 祐一
Yuichi SAKAJI

山本 武司
Takeshi YAMAMOTO

岡嶋 正博
Masahiro OKAJIMA

近藤 泰司
Yasushi KONDO

生出 裕康
Hiroyasu OIDE

Since the cooling system parts of the fuel cell stack, which is the power generation part of the fuel cell automobile, have different requirements from the conventional engine cooling, Our Company has developed the exclusive parts. Temperature control is important in order to draw out the performance of the fuel cell stack, and this paper mainly introduces the technical features of electric water pump and electric water valve adopted in MIRAI of TOYOTA MOTOR. This paper also introduces waste heat utilization air conditioning system aiming at improvement of winter fuel consumption adopted in MIRAI.

Key words :

Fuel cell, Cooling system, Electric water pump, Electric water valve, Thermal management

1. はじめに

燃料電池自動車（FCV）は、電気自動車（EV）と同様にゼロエミッションであるが、水素充填時間や航続距離などの点で使い勝手に優れるため、将来の環境対応車のひとつとして期待されている。2014年12月にトヨタ自動車が世界初の量産FCVのMIRAIの販売を開始して以来、他の自動車メーカーからもFCVが販売されている。日本においては、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が策定され、2030年までに80万台程度の普及を目指し、官民一丸の活動が進められている¹⁾。FCV普及に向けての課題は、水素ステーションの整備に加え、FCVをユーザーにとって選択肢となり得る価格まで低減する必要がある。自動車部品メーカーである弊社としても、FCV普及に貢献できるように、日々製品開発を進めている。

燃料電池システムは、Fig. 1に示すように大きく分けるとエア供給系、水素系、熱制御系、EV制御系の4つのサブシステムに分けられる。弊社は、各サブシステムに対して様々な製品を供給している²⁾。燃料電池の温度制御を行う熱制御システム部品は、従来のエンジン冷却とは異なる要求仕様のため、弊社では専用部品を新規開発した。自動車用の燃料電池は、複数のセルが電氣的に直列に接続されて高電圧を発生する（以下、これをFCスタックと呼ぶ）。FCスタックの性能を引き出すために温度制御は重要である。その温度制御のキーコンポーネントであり、トヨタ自動車のMIRAIで採用された電動ウォータポンプと冷却水制御バルブについて、技術的な特徴を中心に紹介する。また、同様にMIRAIに採用された実用航続距離の向上を狙ったFC廃熱活用空調システムについても紹介する。

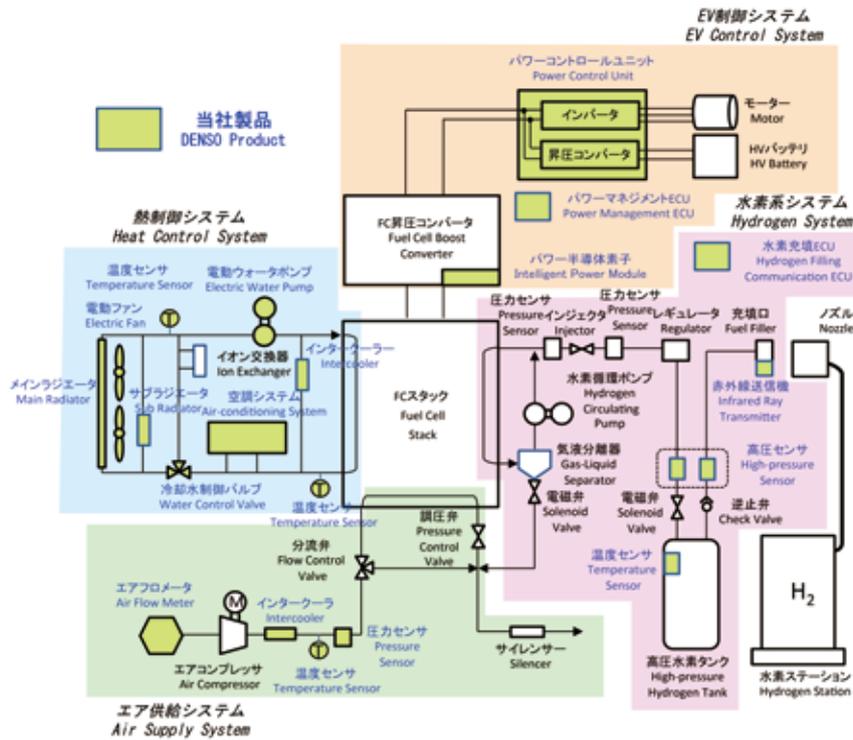


Fig.1 System structure of fuel cell vehicle "MIRAI"

2. FC スタック冷却の特徴

2.1 FC スタック冷却システムの構成

FC スタックの冷却システムについて説明する。FC スタックは、水素と酸素から水を生成する反応を通じて電気を生み出すが、同時に熱も発生するため、冷却が必要となる。基本的にエンジンの冷却と同様に、冷却水を流してラジエータで放熱する。MIRAIにおけるFCスタックの冷却システムの構成は、Fig. 2に示す通りである。電動ウォーターポンプで送水した冷却水を、FCスタックに供給する。FCスタックの下流に設けられた冷却水制御バルブによって、ラジエータに流れる冷却水とラジエータをバイパスする冷却水の比率を変え、冷却水を温度制御することで、FCスタックを温調している。冷却水の温度は、燃料電池の発電効率が良い70℃前後となるように制御している。また、FCスタックの入口、出口の冷却水温度差が狙った値となるように電動ウォーターポンプで送水量を制御している。このように、冷却水制御バルブと電動ウォーターポンプを用いることで、狙いの温度にFCスタックを制御できるため、発電の効率化や安定化に貢献している。

2.2 高い必要冷却性能

燃料電池は、エンジンと異なりカルノーサイクルの制約を受けないため、発電効率が良くクリーンな電力量源と言われている。しかしながら、主に3つの理由(①~③)から、FCの冷却に関してガソリン車の2~3倍もの放熱性能が必要となっている³⁾⁴⁾。(①冷却水温が低い、②排気での熱損失が少ない、③高負荷では効率低下し発熱量増加) Fig. 2に示す様にMIRAIでは、冷却性能確保のために、メインラジエータ(コアサイズ:800×400×48)に加え、サブラジエータ(コアサイズ:300×300×27)を用いており、メインラジエータに冷却風を引き込む電動ファンには、ブラシレスの300Wモータ(合計2個)を適用している。MIRAIにおいては、これらのラジエータの放熱性能を引き出すため、自動車メーカーにおいて、できるだけ開口部を大きくしラジエータの通過風量が多くなるようにデザインしている。冷却性能の確保については、FCVの本質的な課題であり、大型の車両では更に冷却能力が必要となるため、抜本的な改良が必要になると考えられる。

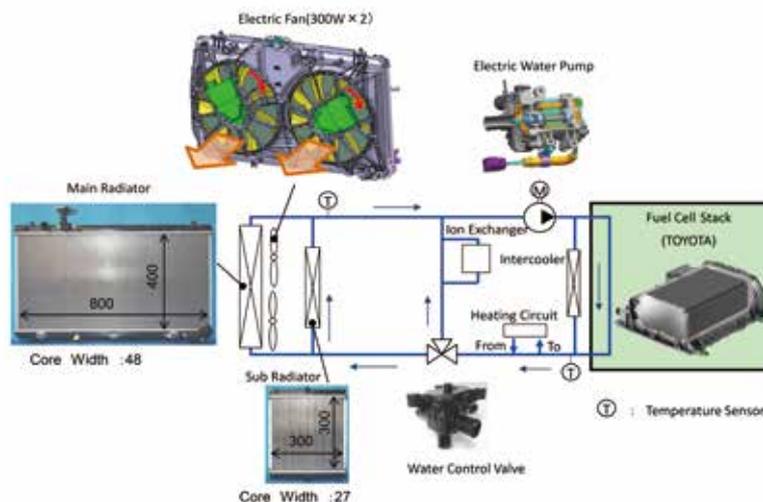


Fig. 2 Cooling System Components of fuel cell vehicle "MIRAI"

2.3 冷却水の電気抵抗管理

FCVにおいては、走行用のパワー確保やモータ駆動電圧から、FCスタックの発生電圧は300～400V程度となる。電圧を生じているFCスタック内部に冷却水を流しているため、冷却水の電気抵抗が低いと冷却水、ラジエータなどの部品を通じてボデーと接続されるため、高電圧系の絶縁性が確保できなくなる。そのため、冷却水の電気抵抗を大きくする必要がある。エンジンにつかわれている冷却水のLLC（ロングライフクーラント）は、防錆剤やpH調整剤などが添加されているため、非常に電気抵抗が低く、そのまま使うことが困難である。そのため、自動車メーカー各社はFCV用の電気抵抗が高い専用冷却水を使用している。また、冷却回路の構成部品から、イオンが冷却水に溶け出してくると、冷却水の電気抵抗が下がってしまうため、イオンが溶けにくい処理をしたり、イオンの溶けにくい材料を使ったりなどの工夫をしている。また、冷却システムの対策として回路中にイオン交換器を設定し、冷却水に溶け出したイオンを除去することで、絶縁性を確保している。道路運送車両の保安基準の別添101において、必要な絶縁抵抗の技術基準が定められている。

2.4 精密な温度制御

FCVに現時点で一般的に用いられている燃料電池は、固体高分子形燃料電池（PEFC）である。PEFCに用いられている電解質膜は湿潤状態でのみ高いプロ

トン伝導性を示すため、十分に湿らせておく必要がある。一方、水が多すぎると、酸素や水素を供給するガス流路が閉塞し、酸素や水素が供給されにくくなり、発電効率が低下する。燃料電池は、発電と共に水を生成するため、燃料電池の外部に排出する水分量をコントロールして、燃料電池内部の水分量を適切な状態にしておく必要がある。水分量のコントロールは、燃料電池の温度を制御することでも実現できる。当社の冷却水制御バルブを用いることで、所望の温度に、精度よく高応答でコントロールできるため、燃料電池の発電性能を引き出すことができる。また、燃料電池によっては、できるだけ均一な温度に制御したいとのニーズもある。当社の電動ウォータポンプは、大流量の送水が可能となっており、そのようなニーズにも対応できる仕様となっている。

3. FCスタックの温調技術

3.1 電動ウォータポンプ

Fig. 3に示す様に、FCスタック冷却用電動ウォータポンプは、従来の車載用電動ウォータポンプ（HVインバータ冷却用）に対し、ポンプ出力は約60倍の400W以上となる。これは、FCスタックの温度均一化やラジエータでの放熱のために、165L/min以上の冷却水流量が必要となるためである。ポンプとは別体であるインバータ入力電力は約1kWとなるため、12V電源ではなく、244V電源（ハイブリッド用2次

電池)を利用し、モータを駆動している。Table 1に、この電動ウォーターポンプの主要特性を示している。また、Fig. 4には、ポンプの構造を示している。この電動ウォーターポンプは、最大流量時には消費電力も大きいいため、高効率化が特に重要である。そこで、モータに関しては、IPM (Interior Permanent Magnet) モータを用いており、ポンプに関しては、渦巻き式ポンプの翼をクローズドインペラ式とすることで小型と高効率化を実現した。さらに、コスト低減を狙い、インペラおよび渦巻きケースを樹脂化しているが、その樹脂から冷却水へのイオン溶出を少なくするため、PPS (Poly Phenylene Sulfide) を用いている。他の特徴として、ポンプ部の回転軸のシールには、エンジン用ウォーターポンプのシール技術であるSiC (炭化ケイ素) メカニカルシールを用いることで、シール摺動部の摩擦を抑制し、堅牢高信頼で低損失な小型高出力ポンプを実現させた。

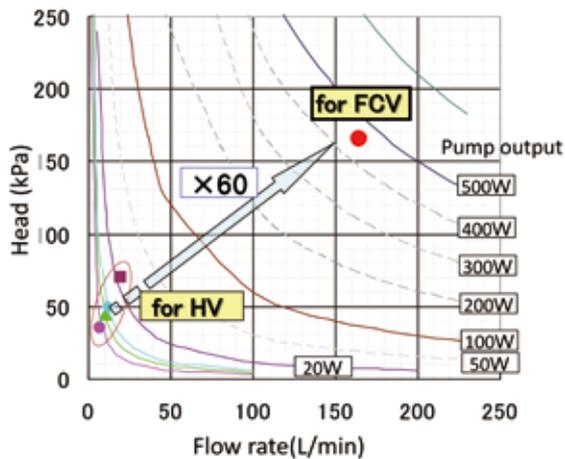


Fig. 3 Pump characteristics

Table 1 Water Pump Characteristics

	Specification
Max Flow (L/min)	165 (ΔP 165kPa)
Water Pressure resistance (kPa·G)	300
Power-supply Voltage (V) *Inverter Input	244
Operating Water Temperature (°C)	-30 ~ 95

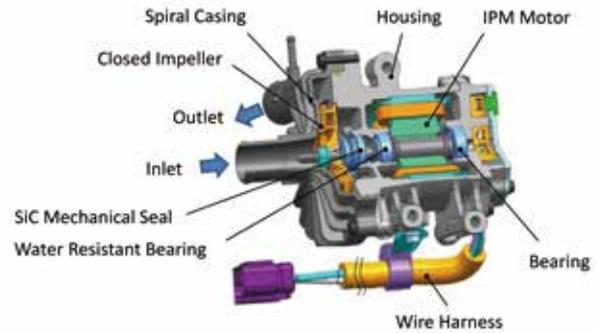


Fig. 4 Water pump structure

3.2 冷却水制御バルブ

FC スタックの性能を引き出すためには使われるシーンに応じた精密な温度制御が必要となる。そのためMIRAIでは、内燃機関自動車に搭載されているようなサーモスタットではなく冷却水制御バルブを搭載している。前述した様に、冷却水制御バルブはラジエータ側とバイパス側の流量比率を変えることで温度制御を行っている。具体的には円筒形の弁体をモータで回転させラジエータ側及びバイパス側へ冷却水を分配する機構となっている。Fig. 5 にバルブの構造、Table 2 にバルブの主要特性を示す。

このバルブは、内部漏れを小さくすることで、始動時におけるFCスタックの暖機時間の短縮や高負荷時におけるラジエータ性能を引き出すことに貢献している。内部漏れを小さくするために、回転する円筒形の弁体にシールパッキン(回転しない)を押し付け、これらが摺動しながらシール機能を発揮している。一方、摺動抵抗が大きいと、大きなモータが必要になってしまうため、パッキンはEPDMにテフロンシートを張り付けた構造とした。これにより、摺動抵抗を小さくすることが可能となり、駆動用に小型のステッピングモータの採用が可能となった。

一方、自動車用の部品であるため、耐久性の確保も重要である。シールパッキンは摺動するため、テフロンシートの摩擦について耐久評価を行った。Fig. 6 にシールパッキンの写真とテフロンシートの厚みの測定部位を示している。Fig. 7 に耐久評価結果を示す。バルブの耐久作動回数の10万回に対して、十分な耐久性があることを確認した。

今回、FCスタック冷却用に小型で内部漏れが小さく、高応答で精密な温度制御が可能なバルブを開発し

た。今後、熱を制御するデバイスとして、FCV以外の車両への展開も考えられる。

Table 2 Water Control Valve Characteristics

	Specification
0-100% Response Time (s)	7
Internal Leakage (L/min)	<0.1
Water Pressure Resistance (kPa·G)	300
Pressure Drop (kPa)	<31

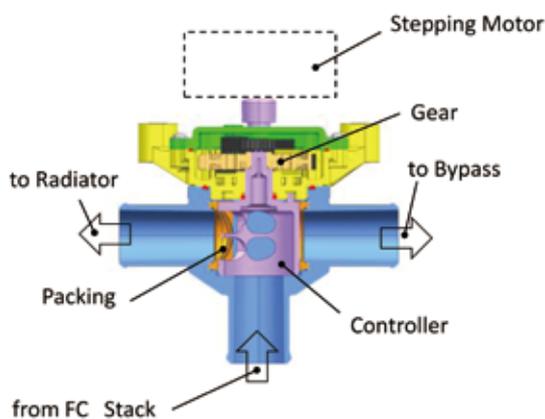


Fig. 5 Water control valve structure

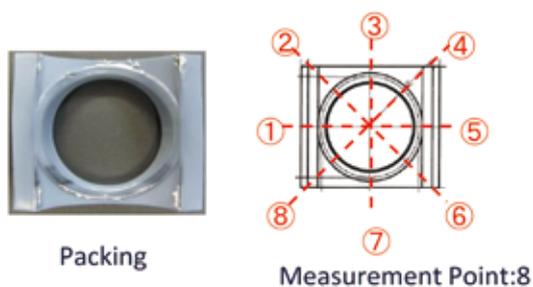


Fig. 6 Packing

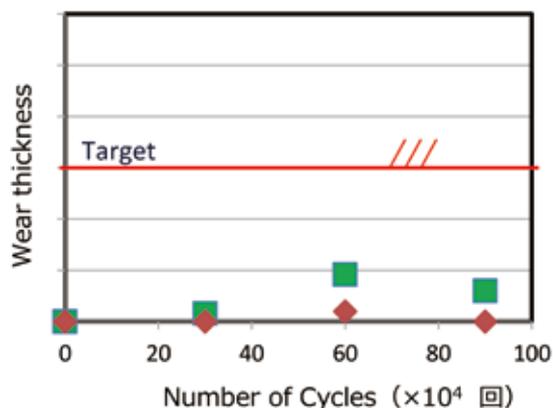


Fig. 7 Test result of packing wear

4. FCV のサーマルマネジメント技術

エンジン廃熱の無い電動車両においては、車室内の暖房には車両の電力から熱を作り出す必要があり、その電力が走行距離に大きな影響を与えることが知られている。例として示すと、外気温度が0℃の時に3kW程度の熱量が必要となり、全てを電気ヒータで賄う場合、EVにおいて走行距離は約6割程度まで低下してしまうことになる。FCVも同様に電気ヒータを備えており、この暖房電力をいかに低減するかが航続距離拡大のポイントとなる。MIRAIは、JC08モード走行パターンにおいて650kmの航続距離を実現しているが、MIRAIの空調においては、空調使用も含めた燃費計測条件で、航続距離500kmと空調性能の両立を目標に開発した。

FCVはガソリン車やハイブリッド車と同様に廃熱を持ち、それを暖房に活用することが可能である。しかし、その廃熱で暖房に必要なエネルギーを常に賄えるわけではなく、走行負荷などにより、活用できる廃熱は制限される。Fig. 8に示すように、走行負荷が高いとき（車速が高いとき）は、FC廃熱で暖房に必要なエネルギーを賄うことが可能である。一方で、走行負荷が低いとき（車速が低い、または、アイドリング状態のとき）は、FC廃熱は少なく、暖房に活用できるエネルギーは大きく制限されてしまう。また、FCスタックの水温は、FCシステムが効率良く作動できる水温にコントロールされる必要があるため、廃熱利用によって、FCスタックの水温に悪影響を与えないシステムが必要となる。

そこで、FCシステムに影響を及ぼさない範囲、タイミングでFC廃熱を授受するべくFC水温が一定以上かつ、空調温水回路内の水温も一定以上であるときに、空調温水回路とFC冷却回路の連結を行う機構と制御を織込むことで、FC廃熱を暖房に有効活用するシステムを構築した。これにより、MIRAIの空調開発において、空調性能と実用航続距離という相反する要件を両立することが可能となった。作動の一例をFig. 9に示す。

シーン①は、車の始動時や走行初期などFC廃熱が利用できない場面を想定しており、この場合は電気ヒ

ータを使った空調を行う。シーン②は、シーン①からある程度時間が経過した場面を想定しており、FCスタックの水温がある一定以上となったときに空調温水回路とFC冷却回路の連結を行う。このとき、FC冷却回路に空調温水回路の冷却水が流入することによる、FC水温の急変を避け、FCシステムの効率を低下させないように配慮している。シーン②では連結させることで、電気ヒータの消費電力を低減させることができる。シーン③は、高速走行時を想定しており、このときは電気ヒータを作動させずFC廃熱のみで暖房可能である。

MIRAIの空調においては、他にも航続距離向上に向けて、暖房の電力を抑える工夫を行っている。一般に、車室内に取り入れた熱量は、室内を温める以外に室外に逃げる熱があり、その中でも換気による損失は1/4程度と大きく、その損失を低減するために、内気循環を増やす必要があるが、窓曇りが発生しやすくなる。そこで、車室内の湿度を測定し、窓曇りを回避しつつ損失の低減を図っている。更に、空調の作動においても工夫を行った。一般的には、電力をある程度抑えるECOモードのみだが、MIRAIでは更に空調の省電力に踏み込んだECO空調モードを追加設定し、お客様に選んでいただけるようにした。

今回開発したFC廃熱を有効活用するシステムにより、空調性能目標は満足しつつ、暖房の電力低減を行い、目標とした空調使用を含む燃費計測条件での航続距離500km達成に貢献することができた。

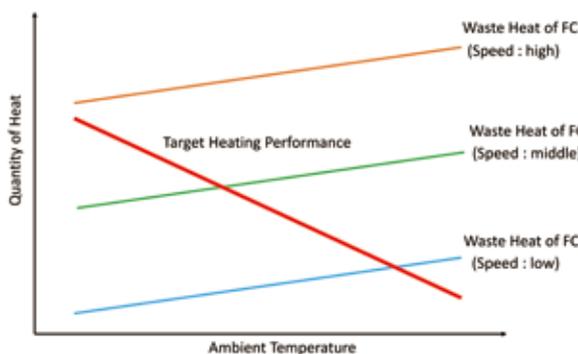


Fig. 8 Target heating performance and waste heat of FC

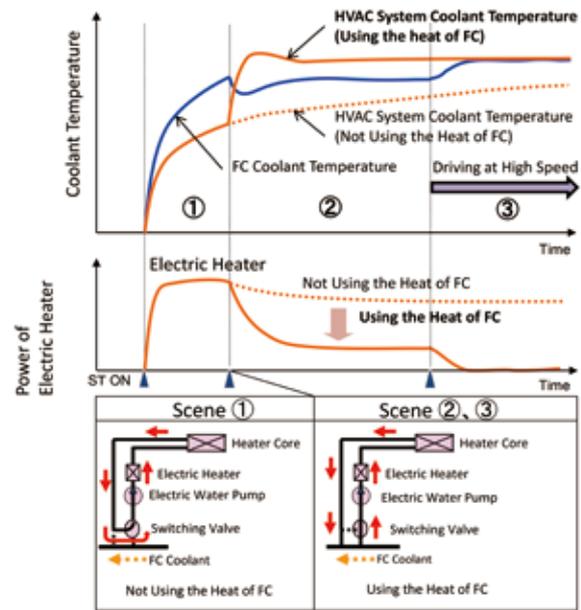


Fig. 9 System operation image

5. おわりに

FCVにおいては、FCスタックの性能を引き出すためのキー技術の一つが、サーマルマネジメント技術となっている。サーマルマネジメント技術の向上は、FCVの車両としての魅力向上に大きく寄与できる。当社がFCV用に開発した電動ウォータポンプや冷却水制御バルブに加え、ラジエータや電動ファンといった従来の製品においても、今後も改良を進めていく。また、FCVは車両として効率が高いため、航続距離に対する空調の影響が大きくなってしまふ。今回紹介したFC廃熱活用技術は、空調性能と航続距離の両立を実現するための技術であり、今後更に改良を行っていく予定である。自動車メーカーからの、FCスタックの冷却、熱マネといったサーマルマネジメント技術に対する当社への期待は特に大きいと感じており、FCVの本格的な普及に向け、技術と製品で貢献していく。最後に、今回紹介した製品やシステムは、トヨタ自動車関係者の皆様から、熱心にご指導、ご協力いただきながら、創り上げたものであり、この場を借りて、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 水素・燃料電池戦略協議会：水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～，経済産業省ホームページ，<https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html>，2019.3.12
- 2) デンソー：燃料電池自動車「MIRAI」用製品，デンソーホームページ，https://www.denso.co.jp/ja/news/event/tradeshows/2015/files/ace15_fcw.pdf，2015
- 3) 藤生優史，市川創，峯川秀人 他：MIRAI の空力性能開発，トヨタ・テクニカルレビュー，vol. 61，pp. 47-52 (2015)
- 4) 井上誠司，藤井斉，横山直樹 他：デンソーの空調・熱マネ技術への取組み，デンソーテクニカルレビュー Vol. 22，pp. 21-32 (2017)

著者



坂上 祐一

さかじょう ゆういち

サーマルマネジメントユニット技術1部
FCV用熱マネシステム，製品開発に従事



山本 武司

やまもと たけし

サーマルマネジメントユニット技術1部
FCV用電動ウォータポンプ開発に従事



岡嶋 正博

おかじま まさひろ

サーマルマネジメントユニット技術1部
FCV用冷却水制御バルブ開発に従事



近藤 泰司

こんどう やすし

サーマルシステム製品企画部
空調システム開発に従事



生出 裕康

おいで ひろやす

サーマルシステム製品企画部
空調システム開発に従事