

第2世代燃料電池システムの開発

トヨタ自動車株式会社

代表取締役社長 豊田 章 男

トヨタ自動車(株) 商用ZEV製品開発部 高橋 剛
 トヨタ自動車(株) 商用ZEV製品開発部 井田 敦 巳
 トヨタ自動車(株) 商用ZEV製品開発部 奥村 暢 夫
 トヨタ自動車(株) 商用ZEV製品開発部 中村 謙 五
 トヨタ自動車(株) 商用ZEV製品開発部 山下 顕

はじめに

CO₂ 排出による地球温暖化や化石燃料の枯渇という危機感から、カーボンニュートラルに向けた取り組みが拡大している。トヨタ自動車は2050年もしくはそれより前にカーボンニュートラルを実現するという目標を掲げている。水素は使用時にCO₂が発生せず、様々な素材から作ることができ、貯蔵・輸送が比較的容易なため、カーボンニュートラル社会実現の柱として重要度が高まっている。

トヨタ自動車は、水素をエネルギーとする燃料電池自動車(FCEV)の開発を1992年にスタートし、2014年に第1世代の燃料電池システムを搭載した初代MIRAIを量産型のFCEVとして世界に先駆けて市販開始した。6年間で累計11,000台を世界のお客様に購入いただき、カーボンニュートラル社会・水素社会に向けFCEVの普及を進めてきた。

開発のねらい

初代MIRAIでFCEV市場を開拓してきたが、FCEVを広く普及させるためには量的な拡大が重要である。初代MIRAIに搭載された第1世代燃料電池システムの生産技術では3,000台/年という量的な限界があったため、第2世代燃料電池

システムでは燃料電池の更なる性能向上と同時に本格量産を可能にする生産革新を行った。

また、水素インフラが普及途上である環境下でお客様に極力ご不便をおかけしないため、一充填当たりの航続距離の延長に取り組んだ。

さらに、水素社会を実現していくために、乗用車だけでなく様々なアプリケーションに燃料電池が搭載できるよう、各ユニットをコンパクト化し搭載自由度を向上させた。

装置の概要

第2世代燃料電池システム(図1)は発電を行うFCスタック、高圧タンクに貯蔵した水素を供給する水素系システム、酸素を供給する空気系システム、FCスタックなどの冷却を行う冷却系システムからなるFCシステムと(図2)、FCスタックで発電された電力を昇圧し、駆動モーターや2次バッテリーなどの高電圧システムへ供給するHVシステムからなる(図3)。

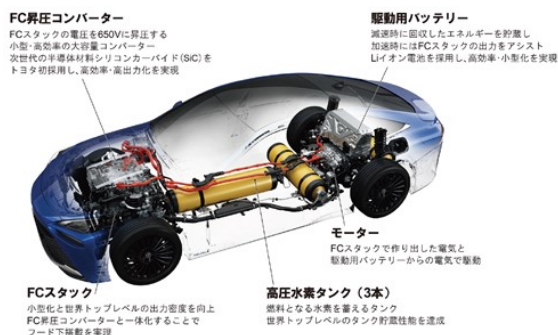


図1 システムレイアウト

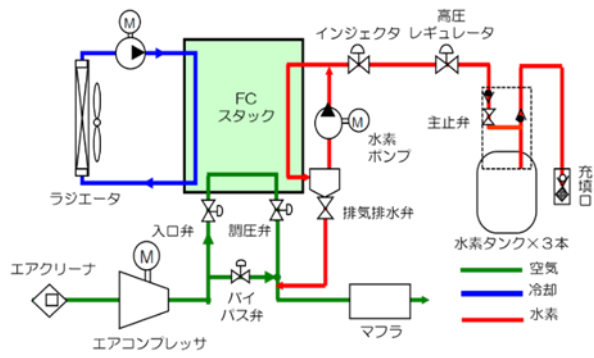


図2 FCシステム図

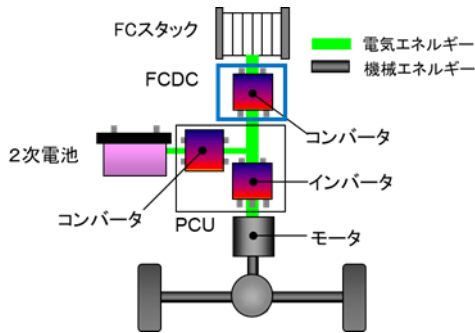


図3 HVシステム図

ここで FC スタックは 330 枚のセルからなり各セルでは水素と酸素から電気化学反応により発電し、水を排出する。また第 1 世代を踏襲し外部加湿器を搭載せず、生成水のセル内循環にて自己加湿を実現している。

技術上の特徴

1. FCスタック

セル構造と電極の革新により、スタックの最大出力を第 1 世代の 114kW から 128kW に向上（セル当たりの出力 26% 向上：図 4）しながら、第 1 世代スタックの 33L・41kg からそれぞれ 27% 小型化、41% 軽量化を図り、24L・24kg と世界トップレベルの出力密度 5.4kW/L（54% 向上）を達成した。

セルを小型/軽量化するために、第 1 世代で 4 辺に配置していたマニホールドを左右 2 辺配置の対向流とし（図 5）、空気極の流路構造として、第 1 世代では 3D ファインメッシュ流路と呼ばれる微細格子構造を持つ部品を採用していたが、ストレート溝に断面積を局部的に絞った抵

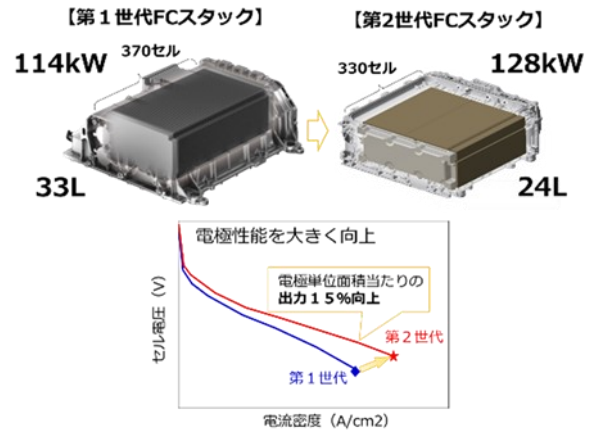


図4 スタックの技術進化

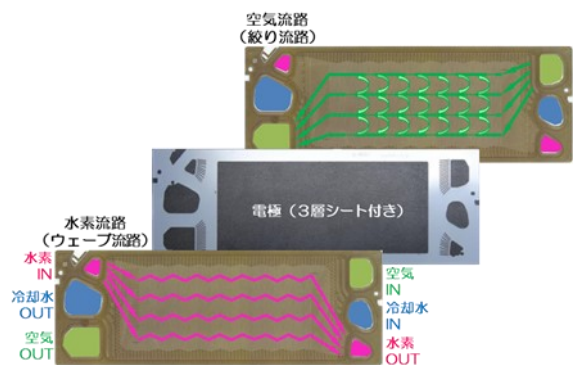


図5 セル構造

抗部（以下絞り部：図 6）を設ける流路とした。絞りにより強制的に空気を電極内部に潜り込ませて、触媒層への酸素供給と拡散層内の排水性を促進して 3D ファインメッシュと同程度まで発電性能を向上させた。

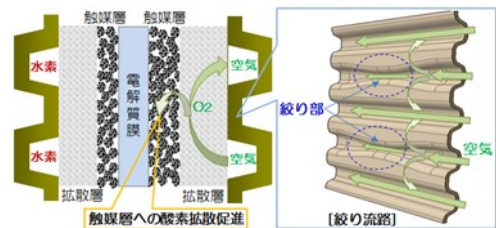


図6 絞り流路構造

セルの出力向上と白金触媒使用量を低減するために、新規のカーボン担体とアイオノマ（プロトン伝導性ポリマ）を採用した。従来担体の中実カーボンは表面に Pt を担持させることで Pt 利用率の向上を図っていたが、被覆しているアイオノマのスルホン酸被毒により活性が低下する課題があったため、微細なメソ孔を有する多孔

質カーボンを新たに採用した。多孔質カーボンは、アイオノマが入り込めない微細なメソ孔を有し、Ptの80%程度をカーボンの内部に担持させることで、アイオノマがPtに直接接触するのを避け、スルホン酸被毒を抑制する(図7)。PtCo合金触媒の固溶度アップと合わせて、触媒の活性を約50%向上した。

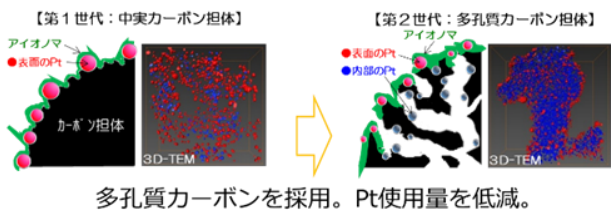


図7 多孔質カーボン担体

さらに、触媒層にプロトン伝導性を付与するために添加しているアイオノマとして、酸素透過性3倍、プロトン伝導度1.2倍の新規アイオノマを採用し、触媒への酸素やプロトンの物質移動を促進した。上記開発により電極面積当たりの出力を15%向上し、出力当たりの触媒Pt量を58%低減した。セルあたりの出力を26%向上させ、さらに最大電流を20%向上させることで積層セル数を第1世代の370セルから330セルへ削減できた。

量産化に関しては、セルの接着シール構造を刷新し、EPDMゴムの加硫接着から3層シートの熱可塑接着およびUV硬化接着(図8)を採用することで、秒オーダーでの接着を可能とした。熱可塑樹脂を用いたセル化工法は図9に示すように、まず熱可塑樹脂を電極と貼り合わせ、その後セパレータを積層し、加熱/冷却プレス接合する。

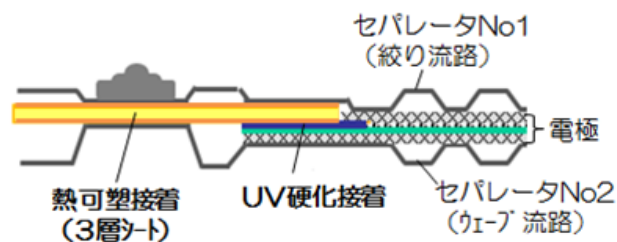


図8 FCセルの接着構造

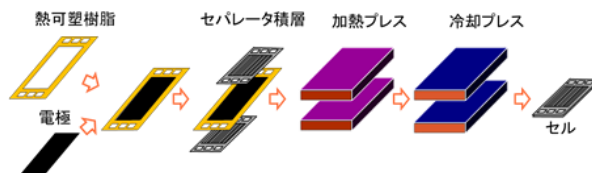


図9 セル化工程

1セルを製造するために第1世代で十数分を要していたのに対し、第2世代では数秒で製造できるようになった。

2. 高圧水素タンク

高圧水素タンクはガスを気密する樹脂ライナー、高圧ガスに対する強度を担う炭素繊維強化プラスチック(CFRP)層、口金等からなる。高強度高弾性カーボンファイバーの開発によりCFRP層数を7%削減すると同時に、70MPaの長尺タンク(φ299×L1467mm)を開発した(図10)。

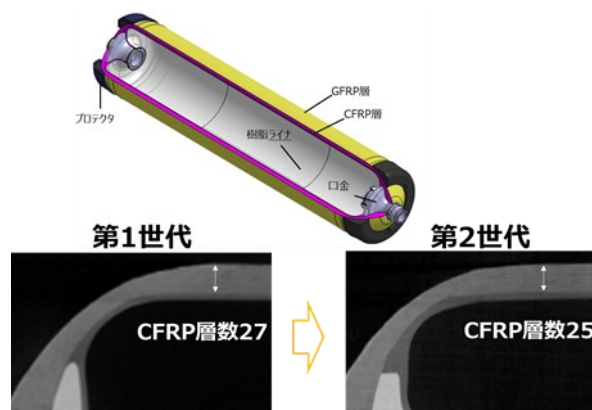


図10 高圧タンクシステム

この長尺タンクの開発においては3分割の樹脂ライナーを赤外線溶着により一体化する生産技術を確認した(図11)。またCFRP層の製造はフィラメントワインディング(FW)と呼ばれる工程が重要であり高い精度が必要である。樹脂ライナーに炭素繊維を張力制御しながら約3500m巻きつけているが、FW機の可動部軽量化とボールねじ方式からワイヤードライブ方式の採用により加工時間を50%短縮した。さらに品質測定自動化により測定時間を削減することで、生産時間を66%削減することができた。

タンクの貯蔵性能(質量効率)は従来の5.7wt%から6.0wt%に向上させた。またタンクを従来の2本から3本に増設し、有効水素搭載量を4.6kgから5.6kgに20%アップした。

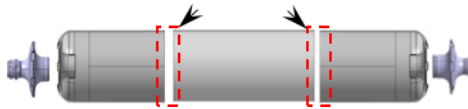


図11 ライナー構成



図12 ラFCシステムモジュール外観

3. 高電圧および補機部品

FC スタックで発電された電力を昇圧するための FC 昇圧コンバータのスイッチング素子として新たに SiC パワー半導体 (MOSFET/SBD) を搭載したパワーモジュールを採用し、従来の Si パワー半導体に比べ 80%の電力損失低減を実現した。

エアコンプレッサは従来の 6 葉ヘリカルローツ式から世界初のトルク感応型可動ローラー式増速機を用いたターボ式エアコンプレッサを新規開発し、圧縮効率を 24%向上、35%軽量化、45%小型化を実現した。水素循環ポンプは新シール構造により耐食性を向上させ、素材を従来のステンレスからアルミ化することで、41%軽量化を実現した。

実用上の効果

水素を燃料とするため走行中の CO₂ 排出はゼロであり、LCA による製造から廃棄までの CO₂ 排出は 2.5L HEV と比較し、副生水素で 28%、再エネ由来水素で 39%削減でき、カーボンニュートラル社会に向け大きく貢献することができる。

また、車両燃費として世界トップレベルの 67→74MPGe (マイル/ガロン相当) を実現し、航続距離は第 1 世代の 312Mile から 402Mile (Mode) に 30%向上し利便性を向上できたと考えられる。

さらに、第 2 世代燃料電池システムをコンパクトにパッケージ化し、乗用車以外の多様なアプリケーションへの搭載を想定した FC システムモジュールという形態でも本技術を展開している。小型トラックから大型トレーラまでの商用車、船、電車および定置発電など、燃料電池をより幅広い分野への拡大が期待されている。

知的財産権の状況

関連する特許として国内 1,046 件出願済み。代表的な特許 4 例の概要を以下に示す。

- ① 日本国特許第 6521912 号
名称：樹脂枠つき電極構造体とセパレータの接合方法
- ② 日本国特許第 6969996 号
名称：燃料電池用電極触媒及びその製造方法
概要：細孔を有するカーボン担体と、Pt/Pt 合金からなる燃料電池用電極触媒
- ③ 日本国特許第 6354797 号
名称：燃料電池単セル
概要：流路に絞り部を設けたセルとその配置
- ④ 日本国特許第 6281525 号
名称：高压タンク、高压タンクの製造方法、ライナー形状の設計方法
概要：等張力曲面を形成する高压タンク

むすび

本技術の開発・量産化は様々な技術の組み合わせから成っており、協力会社を含め非常に多くの関係者にご尽力いただくことで実現することができた。

水素は、近年各国政府が進めるカーボンニュートラルの中で脱炭素化のためのエネルギー源として重要な役割を期待されている。本技術をはじめとする燃料電池技術の革新をつづけることで水素の利活用を拡大し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献をしていきたい。