

第2世代MIRAI向け 水素循環ポンプの開発



Development of Hydrogen Circulation Pump for Second-Generation MIRAI

正木 大輔^{*1}
Daisuke Masaki

平野 貴之^{*1}
Takayuki Hirano

柏 真太郎^{*1}
Shintaro Kashiwa

高荷 直樹^{*1}
Naoki Takani

篠田 史也^{*1}
Fumiya Shinoda

*1 コンプレッサ事業部 FCプロジェクト

要旨

2020年末にトヨタ自動車(株)より第2世代となるFCEV(燃料電池自動車)MIRAIが発売された。世界初の量産FCEVとして登場した第1世代に対し、第2世代では環境性能プラス幅広いお客様に普及させるという役割が求められることになり、その中でも水素循環ポンプを含むFCシステムは軽量、パッケージ性向上の正常進化に加え、大幅なコスト低減、システム出力アップ、静粛性向上などの多くの課題への対応が必要となった^[1]。本稿では、それら課題に対する水素循環ポンプの取り組みについて紹介する。

キーワード: ルーツ式、コスト低減、耐食性、静粛性、生産性

Abstract

At the year end of 2020, Toyota Motor Corporation released the second-generation FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) MIRAI. In contrast to the first generation, which first appeared as the world's first mass-produced FCEV, the second generation is required to have environmental performance and the role of spreading it to a wide range of customers. FC systems, including hydrogen circulation pump, needed to solve many problems such as significant cost reduction, system output improvement, and quietness improvement, in addition to the usual evolution such as weight reduction and package improvement^[1]. This article focuses the efforts of hydrogen circulation pump to address these issues.

Keywords: Roots type, Cost reduction, Corrosion resistance, Quietness, Productivity

1. はじめに

現在、全世界的にカーボンニュートラル・脱炭素社会への転換が求められており、そのなかであらゆる資源から製造でき使用時に排ガスやCO₂を出さないグリーンなエネルギーとして水素が注目されている。

世界初の量産FCEVとして発売された第1世代MIRAIの発売から6年がたち、水素ステーションなどインフラの整備も徐々に進んできたことから、いよいよ普及の段階へ歩を進めつつある感があるなか、トヨタ自動車(株)から本格的な普及を狙った第2世代のMIRAIが発売されることになった。

当社の水素循環ポンプはトヨタ自動車(株)が2002年12月に世界に先駆けて日米で限定リース販売を開始したFCEVから採用されており、第1世代MIRAIでは主に小型・軽量化、静粛性向上を狙って、片持ち構造の2葉ルーツ式を選定し製品化した^[2]。第2世代MIRAI向け(以下第2世代と記す)では、小型・軽量化に加え、一層のコストダウン、システム出力アップ、静粛性向上に対応するため、多くの課題にチャレンジしたのでこれらについて紹介する(図1)。



図1 水素循環ポンプカットモデル
Fig.1 Cut model of Hydrogen Circulation Pump

2. FCシステムの概要と 水素循環ポンプの機能

FCEVは車両搭載のタンクに充填された水素と大気から吸い込んだ酸素の化学反応で発電し、モータを駆動して走行する電動自動車である。発電を行う燃料電池をユニット化したシステムをFCスタックと呼び、車両のフード下に搭載されている。水素循環ポンプはFCスタックを固定するスタックフレームに取り付けられており車両下部に位置している(図2)。

水素循環ポンプの主な機能は
 ・未反応水素をFCスタックに再循環する
 ・水素と酸素の反応で発生した生成水(水蒸気含む)をFCスタック内に供給し、FCスタック内部を加湿することであり、車両の燃費、FCスタックの出力、信頼性に大きく関わる重要機能部品である(図3)。

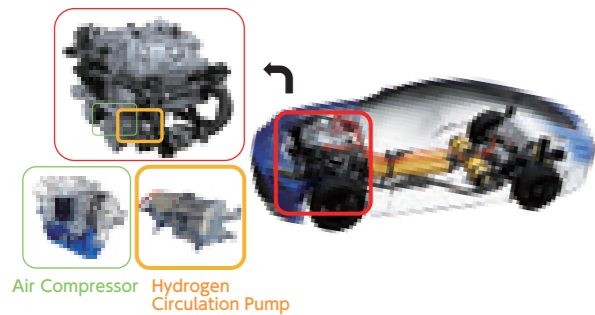


図2 車両搭載図^[3]
Fig.2 Installation Location on Vehicle

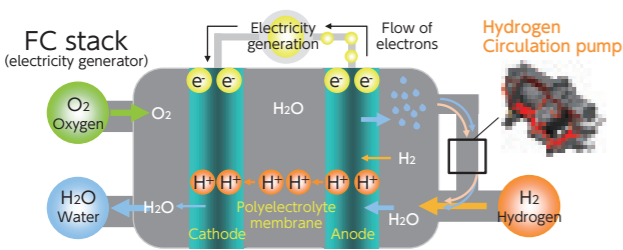


図3 FCスタック概略図
Fig.3 Schematic of FC Stack

3. 水素循環ポンプの構成

第2世代向け水素循環ポンプは第1世代向けに開発した片持ち構造の2葉ルーツ車を踏襲し、ポンプ部、ギヤ部、モータ部で構成される電動ポンプである(図4)。

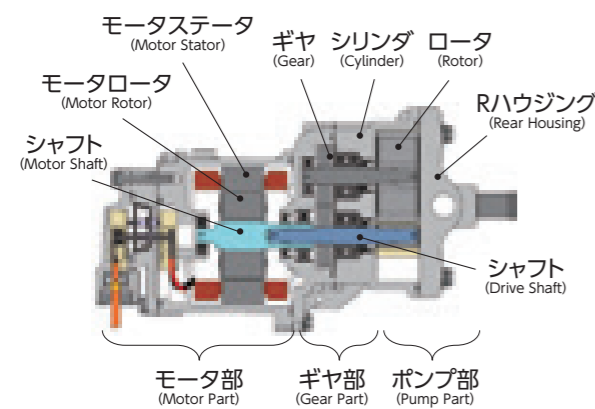


図4 第2世代水素循環ポンプ断面図
Fig.4 Cross-sectional View of Hydrogen Circulation Pump for Second-Generation

4. 第2世代に向けての課題と対応

第2世代は更なる量的普及を実現するために、第1世代に対し大幅なコスト低減が必要であった。水素循環ポンプはシステム出力アップに対応した流量性能、静粛性、耐久性等の要求性能を確保しつつ、1/X以下と大幅なコスト低減を実現する必要があった。

コスト分析の結果、第1世代のステンレス材による設計仕様(図5)では目標に届かないことが判明したため、設計仕様を見直し、以下の2つのコンセプトを掲げて再設計を進めることにした。

- ①高価な材料費、加工費低減を狙い、ポンプ部の構成部品材料をステンレス材からアルミ材に変更
 - ②生産性向上を狙い、空調用コンプレッサ部品の流用率向上および専用部品の高速生産化
- これらコンセプト実現に向けた方策や課題への対応について取り組みを以下に記す。

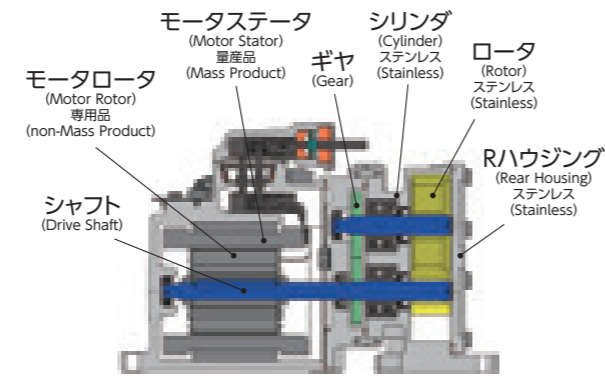


図5 第1世代水素循環ポンプ断面図
Fig.5 Cross-sectional View of Hydrogen Circulation Pump for First-Generation

5. アルミ材化に対する課題と方策

1) 新シール構造による耐食性確保

水素循環ポンプには未反応水素と共に生成水や水蒸気が流入するため、ポンプ内部には耐食性が要求される。第2世代では、水素循環ポンプなどのFC周辺部品を覆うカバーが廃止され外部耐食性要求が新たに追加された。さらに水素循環ポンプは車両下部へ搭載位置が変更となり、かつ水素漏れに対する影響度から耐食性要求はかつてなく厳しいものとなった。まずは、アルミ材で広く用いられている耐食性向上アイテムのアルマイト処理を検討した。内部耐食性要求を満足したものの、外部耐食性要求を満足することができなかった。その要因を調査したところ、従来のOリング構造では、ハウジング合わせ面から浸入した水が溝外側すきまに滞留しやすく、すきま腐食が進行してしまうことが要因であることが判明した(図6)。そこで、対策構

造の設計狙いは、①ハウジング変形量低減による水の浸入抑制、②溝外側すきま低減による水の滞留抑制、③2重シール化による腐食進行速度抑制とした。これらの狙いを限られた空間の中で実現するため、外側押付突起を有する「Hリング」による新シール構造を設計した(図7)。ハウジング締結時にHリングが潰れることで突起が溝内側に接触し、Hリングを外側へ押し付ける力が作用する。突起を適正配置することで、全周にわたって溝外側すきまを低減することができた。その結果、コストや体格・質量増加を抑制しつつ、かつてなく厳しいとされた外部耐食性要求を満足することができた。

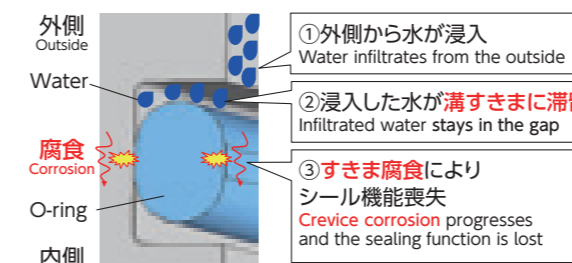


図6 Oリング構造における腐食メカニズム
Fig.6 Corrosion Mechanism of O-ring Structure

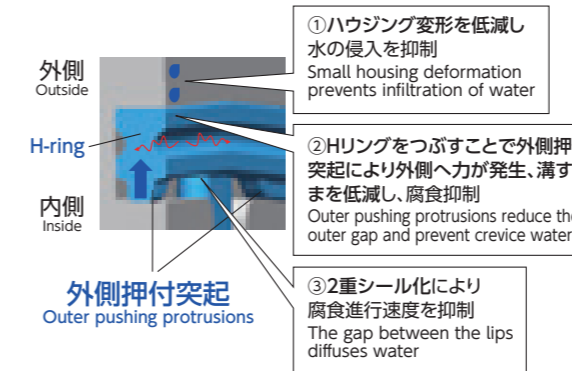


図7 新シール構造の概要
Fig.7 Outline of New Seal Structure

2) 新ロータプロフィールによる流量性能、静粛性の両立

第1世代はFCスタックへ取り付ける搭載であったが、第2世代ではフード下部で車両ブラケットへ取り付ける搭載に変更された。さらにアルミ材化により水素循環ポンプの熱容量は大幅に低下し、熱容量の大きいFCスタックとの熱容量差により、FCスタックから排出された高温高湿度のガスが、低温にあるポンプ内部に流入し結露が発生する懸念があった。確認評価したところ、ポンプ内部で結露水が発生、発生した水が特定位相で2つのロータ間に入り液圧縮が起こり、シャフト

振れにより音圧レベルが著しく上昇した。対策として、2つのロータ間クリアランスを拡大し液圧縮を防ぐことは可能だが、背反として流量性能は低下する。そこで、2つのロータ間クリアランスを拡大せず、液圧縮を防止することを狙いとした。この狙いを実現するために、インポリユート曲線と複数の曲線を組み合わせ、最小クリアランス a_0 を保ちつつ最小クリアランス位置から遠くなるほどクリアランス a_0 を拡大し液圧縮を防止する新プロフィールを設計した(図8)。その結果、流量性能低下を抑制しつつ静粛性向上を実現した(図9)。

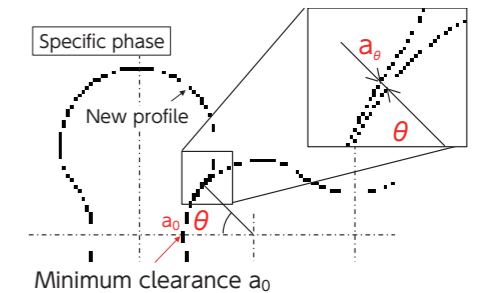


図8 新ロータプロフィールの概要
Fig.8 Outline of the New Rotor Profile

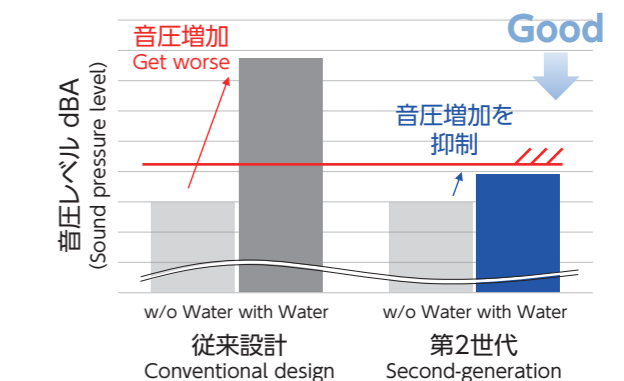


図9 水入り時の音圧レベル比較
Fig.9 Comparison of Sound Pressure Level Measurement with and without Water

3) 新オイル室構造による動力損失低減

シリンダのアルミ材化により、固定するベアリングと線膨張係数の差が生じ、設計温度範囲で材料強度と締め代が両立しなくなる。固定方法変更は困難なため、ベアリング固定部温度125℃以下を目標とした。そこで、ベアリング周辺の温度を上昇させる動力損失要因を解析した結果、ギヤ室内のオイル攪拌損失の影響が大きいことが判明した。単純にオイル量を低減すれば、オイル攪拌損失の低減が可能だが、しゅう動部品へのオイル供給が減少して潤滑性が悪化し、寿命

低下の懸念が生じる。オイルの流れ解析と要素試験を行った結果、運転中の油面高さ低減がオイル攪拌損失の低減に有効と判明した。そこで運転中の油面高さ低減としゅう動部品へのオイル供給を両立させるため、ギヤによりかきあげられたオイルを上部にためる空間と各部品へ供給する穴を備えた新オイル室構造を開発し(図10)、ベアリング固定部温度125℃以下を達成した(図11)。

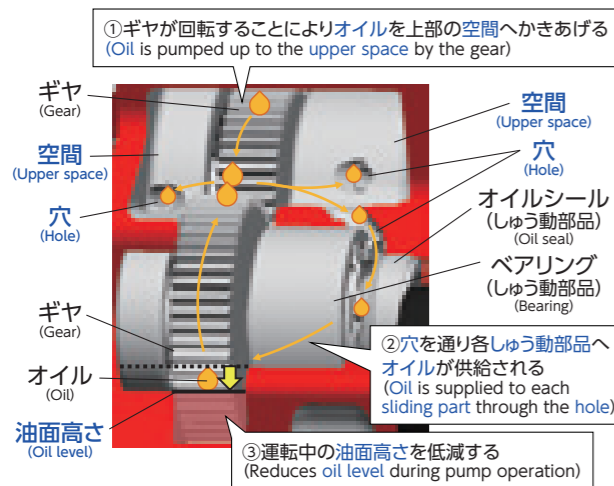


図10 新オイル室構造の概要
Fig.10 Outline of New Oil Chamber Structure

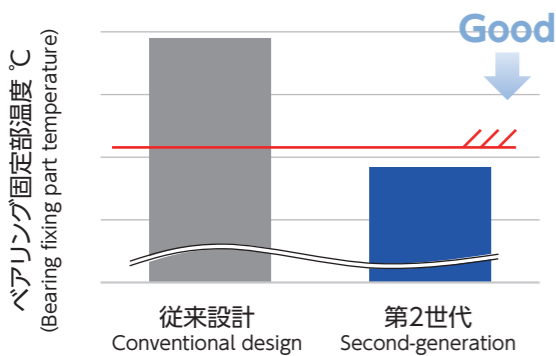


図11 ベアリング固定部の温度測定結果
Fig.11 Comparison of Bearing Fixing Part Temperature

6. 低コスト化、生産性向上に向けた取り組み

1) シャフト軸分割による量産モータ流用

第1世代ではモータステータのみ空調用電動コンプレッサ開発品流用としていたが、第2世代では一層のコストダウンを狙いモーターータまで流用を検討した。

モーターータ流用を前提としたとき、従来に対し固定部のシャフト外径を拡大する必要があるが、シャフトのコストアップとポンプ部の組立性悪化が課題となった。そこで、シャフトをポンプ/ギヤ部、モータ部に合

せて2分割するシャフト軸分割構造を採用した(図12)。軸同士のトルク伝達方法は、必要トルク、体格、生産性の観点からスプライン構造とした。

スプライン構造はすきまを有し、使用環境によっては噛み合い状態が変化することで、そのすきま量に応じた大きさの衝撃力が発生する懸念があった^[4,5]。そこで、スプライン部にシャフトインロー部を設け、噛み合い状態変化時に生ずるすきま量による衝撃力を抑制する構造に設計変更した(図13)。

本設計変更により、狙いのモーターータ流用だけでなく、シャフトのステンレス材使用量の低減、組立性向上、さらに多用途への使用を考慮した展開性向上を実現した。

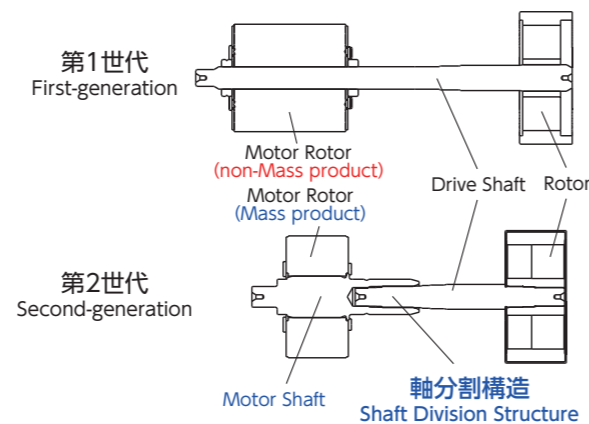


図12 シャフト軸分割構造の概要
Fig.12 Outline of Shaft Division Structure

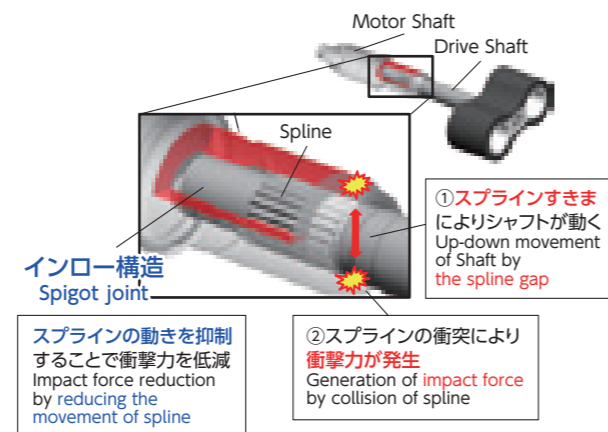


図13 衝撃力低減構造の概要
Fig.13 Outline of Structure to Reduce Impact Force

2) ロータコーティングの一体成型による高速生産化

ルーツ式のロータ表面には、流量性能向上、耐食性確保、異物に対する信頼性確保の観点からコーティングを施すことが一般的である。第1世代のロータ表面は静電粉体塗装によりフッ素樹脂をコーティングして

いた。静電粉体塗装は粉体塗料を吹き付けて静電気で定着させ、焼成して成形するのだが、1回の塗装で成膜できる厚みに限界があり、必要膜厚を得るために複数回塗装と焼成を繰り返す必要があり生産性悪化の要因となっていた。そのため、第2世代では1回のコーティングで必要膜厚が成形可能な金属/樹脂一体成型を検討した(図14)。

樹脂の材質は様々な候補の中から品質・コストの観点で比較を実施して、耐熱性や耐食性などコーティングに求められる基本特性を満足しつつ、成形のし易さの観点でLCP(Liquid Crystal Polymer:液晶ポリマー)を採用した。しかし、射出成型でLCPを成形してみるとアルミ基材と接着しない課題が発生した。LCPは分子鎖が流動方向に配向しやすく、絡みにくい特徴があるので基材とLCPの間の相互作用による接合力(例えば化学的結合)は期待できないとされている。そこでアンカー効果を狙った新表面粗化製法を開発し、接合強度の改善を行った。アルミ基材の表面付近に析出しているミクロン単位(μm)の共晶物とナノ単位(nm)の金属間化合物を、積極的に除去することで接合に有効な表面粗化プロセスを設計することが出来た。処理プロセスは主に2ステップあり、ステップ1でアルカリ系の溶液により蛸壺形状のミクロン単位(μm)の凹凸を形成、ステップ2で酸系のエッチング液によりナノ単位(nm)の微細凹凸を形成した(図15)。その結果、表面の凹形状に樹脂が入り込むことで、高いアンカー効果を、また微細な凹凸形状によって樹脂の吸着面積が増加して、樹脂の高い接合強度が得られ目標接合強度を満足した。

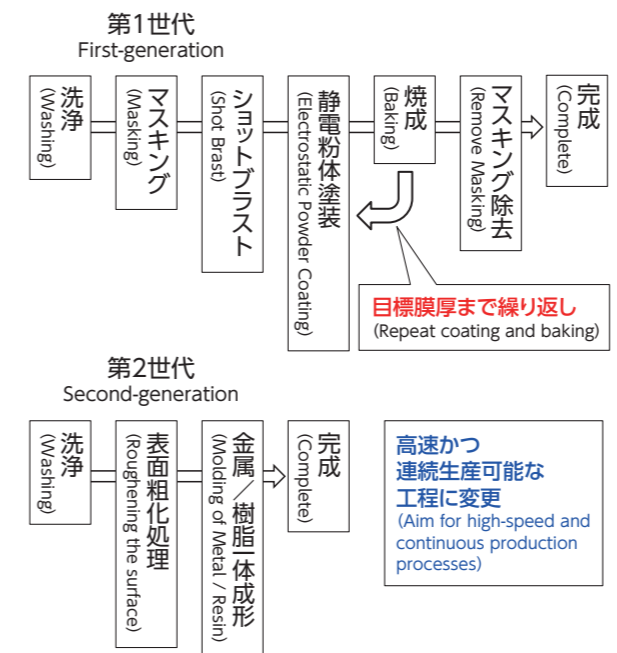


図14 ロータコーティングの工程フロー比較
Fig.14 Comparison of Rotor Coating Process Flow

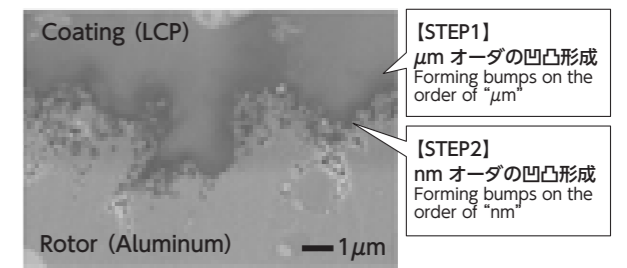


図15 新表面粗化製法による界面観察結果
Fig.15 Interface Observation Results of the New Surface Roughening Process

3) ギヤ諸元改良による生産性向上と静粛性向上

第1世代ではギヤノイズ低減のため、加工仕上げ工程で歯研を採用し、高精度を狙った加工条件としたため、生産性に課題があった。

第2世代では、コストダウンを狙い生産性を考慮した歯車精度へ変更することが必要であるが、ギヤノイズ悪化の懸念があるため、強制力である噛み合い変動低減により対策することとした。噛み合い変動低減に有効な噛み合い率を増加させるため、歯数、モジュール、圧力角等の諸元を再設計した(図16)。歯車精度目標については、応答曲面法を用いてギヤノイズに影響する精度パラメータを特定し、精度の適正化を実施した。その結果、ギヤノイズが低減して、要求精度の緩和を実現、静粛性向上と生産性向上を両立した。

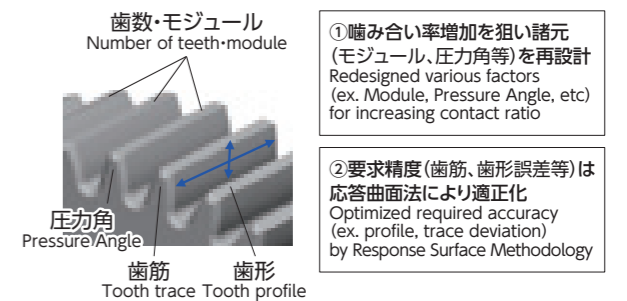


図16 ギヤ諸元再設計の概要
Fig.16 Outline of Gear Specification Redesign

7. まとめ

第2世代のMIRAIに採用された水素循環ポンプは、空調用コンプレッサで培った圧縮技術、電動化技術だけでなく、社外の最新技術、これまでの開発経験等を開発に取り入れ、再設計することにより、基本特性を維持・向上しつつ1/X以下のコスト低減を実現した。再設計による変更により、多くの課題に直面したが、新規に構造を設計、工夫することにより課題を解決することが出来た。

引続き、FCEVの本格普及に向けて更なる製品力向上を目指し開発を継続していく。

■ 著者紹介 ■



正木 大輔



平野 貴之



柏 真太郎



高荷 直樹



篠田 史也

■ 参考文献 ■

- [1]トヨタテクニカルレビュー Vol.66 Feb. 2021
- [2]豊田自動織機技報 No.66 2015-10
- [3]トヨタ自動車(株) ホームページ
- [4]P.Dietz,Buttelborn: Lastaufteilung und Zentrierverhalten von Zahn-und Keilwellenverbindungen Teil 1.Theoretische Grundlagen, Konstruktion 31 H.7,1979
- [5]P.Dietz,Buttelborn: Lastaufteilung und Zentrierverhalten von Zahn-und Keilwellenverbindungen Teil 2.Anwendungen der Ergebnisse suf die Konstruktionspraxis, Konstruktion 31 H.8,1979

開発者コメント

今回開発した第2世代MIRAI向け水素循環ポンプは、流量性能、静粛性、耐久性といった基本特性を向上させつつ1/X以下と大幅なコスト低減が必要でした。第1世代で開発した片持ち構造のルーツ式水素循環ポンプをお客様および生産者視点に立って見つめなおし、コスト低減および量的生産性向上を狙い再設計しました。再設計による変更により多くの課題が発生しましたが、自社保有技術や社外の最新技術を効果的に開発に取り入れることで、課題を短期間で解決し、目標を達成することが出来ました。今後もFCEVのさらなる普及、カーボンニュートラル・脱炭素社会の早期実現に向け、お客様ニーズに合った魅力ある製品作りを進めていきます。

最後に開発及び製品化にあたり多大なるご指導・ご協力をいただきましたトヨタ自動車(株)の皆様および社内外の関係者の方々に深くお礼申し上げます。