

発電機用FCモジュールの開発 Development of FC Module for Power Generators

山本 哲太郎^{*1} 吉田 智志^{*1} 小野 大輔^{*1} 飼沼 徹^{*1} 本村 浩平^{*1}
Tetsutaro Yamamoto Satoshi Yoshida Daisuke Ono Toru Kainuma Kohei Motomura

*1 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト

要旨

当社は2016年に日本で初めて(当社調べ)燃料電池(以下FC)フォークリフトの販売を開始した。フォークリフト向けFCシステムをベースとして、コア部分を切り出し発電機へ対応することでFCモジュールとして2025年に販売を開始する。今回FCモジュール開発における、氷点下始動、供給水素低圧化、冷却機能外付け対応、騒音低減の技術的課題に取り組んだ成果を報告する。

キーワード: 燃料電池、Fuel Cell、FC、FCシステム、FCモジュール、発電機向け電源

Abstract

Our company launched Japan's first FC forklifts in 2016 and began sales of FC modules in 2025. These modules, derived from fuel cell system for FC forklift, are tailored to support diverse applications. During development, we addressed key challenges including sub-zero temperature operation, low-pressure hydrogen supply compatibility, cooling performance, and noise reduction.

Keywords: Fuel cell, FC, FC System, FC Module, Generators

1 はじめに

2016年に日本初(当社調べ)のFCフォークリフトの販売開始して以来、当社はトヨタ自動車(株)と連携し、産業車両用FCシステムの開発を進めてきた。2023年より発電機用FCシステムの開発に着手し、2025年10月に販売を開始した。発電機メーカーへFCモジュールとして販売することで、FC発電機の早期市場投入に貢献する。

2 FCモジュールについて

FCモジュールはフォークリフト向けFCシステムのコア部分を切り出し発電機用として設計したものである。本モジュールは定格出力8kW(公称電圧DC48V)で、フォークリフト向けFCシステムと同等の出力性能を有している。

システム構成は、水素と空気をFCスタックに供給して発電を行い、その過程で生じる熱を冷却水で冷却し、発電によって得られた電力を、DCDCコンバータを介して外部に送電する仕組みである。

フォークリフト向けFCシステムとは異なり、本モジュールには水素タンクおよび蓄電装置を含まない仕様となっている。また、機能オプションや使用条件に応じて、エア吸気フィルターや冷却装置は外付け仕様として設計しており、これらの部品は発電機メーカーが別途用意する必要がある(図1)。

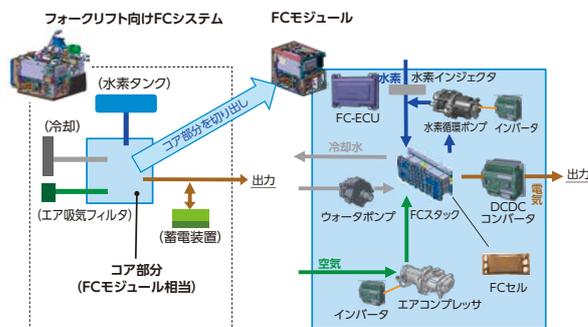


図1. フォークリフト向けFCシステムとFCモジュール比較
Fig.1 Comparison of FC system for forklift and FC module

両者の主な機能的違いは下記の通りである(表1)。

表1. フォークリフト向けとの主な要求仕様の違い
Table 1 Main Specification differences from FC system for forklift

項目	フォークリフト向けFCシステム	発電機用FCモジュール※
最低起動温度	0℃	-20℃(氷点下対応)
供給水素圧力	標準	600~1,600kPa
	低圧	85~100kPa
冷却機能外付け	なし	あり

※ FCモジュールの対応有無は、バリエーション次第

熱交換器接続によってお湯を沸かすなどの特定のお客様ニーズに柔軟に対応するため、冷却機能(ラジエータなど)の有無に応じて2種類の製品タイプを用意した(図2)。

モデル名	TFCM2-08R	TFCM2-08B
特徴	冷却機能内蔵	冷却機能外付け
製品タイプ	ラジエータ	熱交換器 水冷 IN 発電機メーカー熱交換器に接続 熱交換器 水冷 OUT

図2. FCモジュールの製品タイプ
Fig.2 FC module product types

各製品タイプに対して、使用環境温度について標準0℃～40℃と氷点下20℃～40℃、供給水素圧について標準600～1,600kPaと低圧85～100kPaという2つのバリエーションを設定している。

FCモジュール要求仕様を満足するための主な開発課題は、「氷点下始動」「供給水素低圧化」「冷却機能外付け対応」が挙げられる。さらに開発過程で新たに発生した課題として「騒音低減」が加わった。これらの各課題への対応内容について、以下に詳述する。

3 氷点下始動

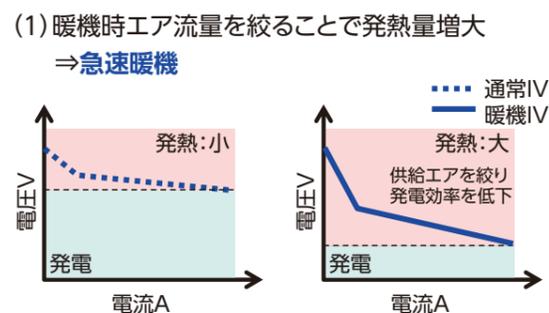
フォークリフト向けFCシステムでは、使用環境温度を0℃以上としていたが、FCモジュールでは氷点下20℃からの始動を可能とした。FCは発電時に生成水が発生するため、氷点下環境ではこの生成水がFCスタックで凍結し、始動が困難になる。

そのため、氷点下での始動時には「急速暖機」という運転モードを採用している。このモードでは、FCスタックへのエア供給量を制限して、一時的に低効率で発電させることで発熱量を増加させ、FCスタックを発電可能な温度(60℃)にまで引き上げる制御を行う。しかし、この運転モードの背反として排気中の水素濃度が増加する。

FCスタック内のアノード側(負極)では、供給された水素(H₂)が触媒によってプロトン(H⁺)と電子に分解される。プロトンとは、水素原子から電子を除いたものであり、正に帯電した粒子を指す。

通常、アノードで分解されたプロトン(H⁺)および電子はカソード側(正極)に移動後、カソード側では酸素(O₂)とプロトン(H⁺)、電子が反応して水(H₂O)が生成される。

しかし、低効率発電を目的としてエア供給量を制限した場合、カソード側での酸素不足により酸素とプロトンが反応する電気化学反応の速度が低下し、一部のプロトンは水素に戻って排気に混ざり放出される。その結果、排気中の水素濃度が上昇する(図3)。



(2) 供給エア流量低下により未反応水素が発生
⇒排気水素濃度増加(背反)

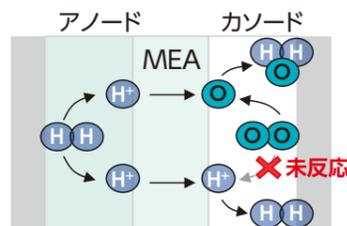


図3 急速暖機時の排気水素濃度増加の仕組み
Fig.3 Mechanism of increased exhaust hydrogen concentration during rapid warm-up

そこでエア供給量を制限しながら排気水素濃度を低減するために、低効率発電の電圧・電流条件を確認し、暖機時の動作点を最適化した。

しかし開発過程では、急速暖機で氷点下始動したのち発電中に水素出口配管内で生成水が凍結し、発電不良が発生した(図4)。要因としては二つである。一つ目の要因は、急速暖機中であっても補機冷却ファンが常時駆動しており、放熱量が過剰となり、モジュール内部が十分に暖機されない挙動となっていたことである。対策として氷点下始動時、外気温が-3℃以下の場合には冷却ファンの駆動を停止する制御に変更して解決している。背反である部品オーバーヒートについては、部品基板温度が規定温度を超えてファン回転開始する制御を適合のうえ織り込んでいる。二つ目の要因は、不純物を含む水素と水を排出する排気排水弁開弁頻度が低く残水排出できないこと、加えて暖められた気体が配管内に十分流れ込まずに入熱量が不足し、配管内の残水が冷却される現象が発生していたことである。対策として排気頻度を上げることによって解決している。背反が懸念される排気水素濃度については、凍結防止との両立を満足させる排気排水最適間隔を算出し適合、制御に織り込んでいる。

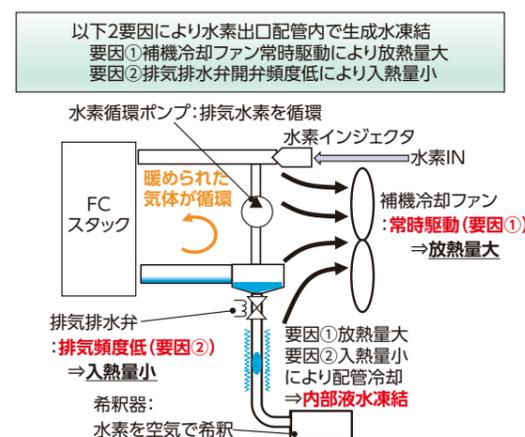


図4 開発過程における急速暖機後発電時の課題
Fig.4 Issues regarding power generation after rapid warm-up

4 供給水素低圧化

国内については運用上の負担軽減を理由として、供給水素圧0.1MPaG未満の発電機の需要が見込まれる。これは発電機に適用される電気事業法において、定格出力10kW未満の場合、供給水素圧力が0.1MPaG以上となることで主任技術者による監視や法定検査の実施など、運用上の負担が増大するためである。このようなお客様の負担軽減およびFC発電機の設置障壁低減を目的として、供給水素低圧対応のバリエーションを設定した。

しかし水素の供給圧が低いと、発電に必要な水素流量を満たさない懸念が生じる。そのため供給水素を、圧力調整しながらスタックに供給する水素インジェクタという部品の制御を見直すことで解決を図った。具体的にはインジェクタ開/閉の駆動制御を見直し、インジェクタを常時開にすることで必要な水素流量を確保した。背反としては2つある。1つ目は常時通電状態となったコイル発熱による近傍樹脂溶損である。この対策としてインジェクタのコイルに印加する電圧を下げることで保持電流を低減させ、コイル発熱量を抑制している。2つ目はインジェクタ内の弁体ゴム部の張りつきである。この対策として3つ備えられているインジェクタ弁体のうち、開弁するものを2つずつ交互に切り替える制御手法を新たに採用した。

5 冷却機能外付け(ラジエータなし)対応

冷却機能外付けの場合、FCモジュール内部の補

機を冷却する風量が不足する問題が生じる。この問題に対応するため、冷却機能外付けモデルについては、ラジエータファンの代替として補機冷却用の小型ファンを新たに設定した。冷却風流について流体解析を用いて構造レイアウト設計を実施し、冷却対象部品周辺に必要な冷却風速を確保した。さらに一部部品について出力電圧によって許容する基準温度を超えないように、当該部品近傍の風流れを改善した構造レイアウトに変更することで冷却性能を満足させている。

また構造レイアウト設計全般においては、FCモジュールのベースとなるフォークリフト向けFCシステムと、搭載位置関係の共通化を図ることで開発期間・工数の削減を実現した(図5)。



図5 FCコア部分の搭載位置レイアウト
Fig.5 FC core part position layout

6 騒音低減

フォークリフト向けFCシステムからの変化点は、FCモジュール外板の開口部位置が変更されていることである。また搭載レイアウト上の制約から配管の取り回しも変更している。この変更にもない、開発過程で最大出力8kW時騒音目標値に対して7dB超過する見込みであることが判明したため、騒音低減への取組みが必要となった。発電時に動作音が発生する主要部品として、水素循環ポンプ、エアコンプレッサ、ウォータポンプ、ラジエータファンが考えられる。

そこで、これら4つの部品を一つずつ駆動させ、音圧レベルを測定していき最終的にエアコンプレッサ周辺に着目した。FCモジュール内での搭載配置および外観については、以下に示す通りである(図6)。

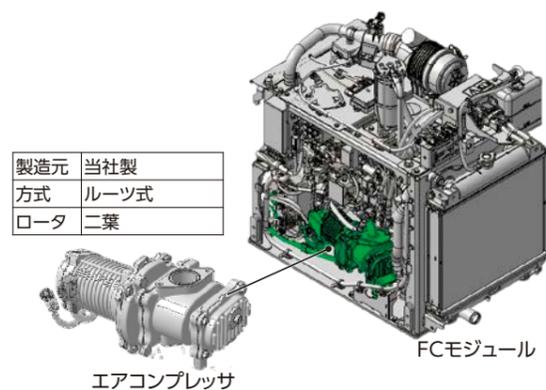


図6. FCモジュール内のエアコンプレッサ配置
Fig.6 Air conditioner compressor layout in FC Module

エアコンプレッサ周辺におけるさらなる騒音源特定調査の結果、騒音の主な寄与要因はエアコンプレッサ本体そのものでなく、排気系ホースから発生する放射音であることを特定した(図7)。

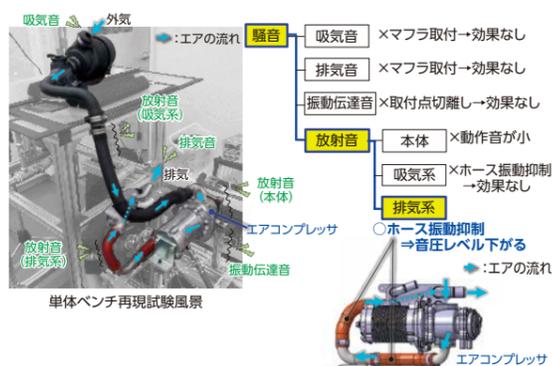


図7. 騒音源の特定
Fig.7 Identification of noise sources

ホースが発音するメカニズムについて説明する。エアコンプレッサ(ACP)の回転で生じるエアの脈動が、ホースに伝わることで、ホースが振動し発音する。つまりホースがスピーカになるイメージである。したがって、発音量は「ホースへの振動入力大きさ」「ホース自体の発音しやすさ」の2つの因子によって決まることになる(図8)。

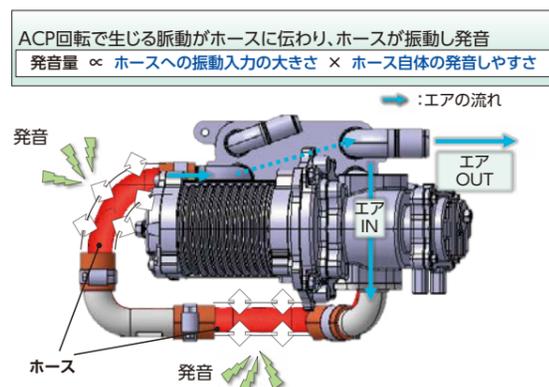


図8. ホース発音のメカニズム
Fig.8 Mechanism of hose sound

この2つの因子についての真因を分析した。その結果、1つ目の因子については、「エアコンプレッサ吐出時の脈動が大きい」ことが真因であると判明した。2つ目の因子については、「ホース長が長いこと」が真因であると判明した(図9)。

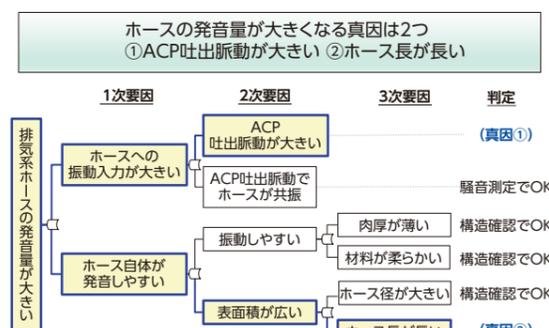


図9. 要因分析からの真因洗い出し
Fig.9 Identifying the root causes of noise through factor analysis

真因①への対策として、マフラ搭載を検討したが、エアコンプレッサ(ACP)の吐出脈動が大きいので、小さなマフラでは脈動を減衰し切れずマフラ自体が発音してしまうこと、大きなマフラだと組付成立の目途がないこと、コストアップが大きいことから対策採用は見送った。

そこで真因②への対策として一部を金属配管に変更しホース長を4分の1にすることで音圧レベルを8dB低減することが確認できた。

さらにモジュールの開口部に音漏れ防止プレートを追加するなどの方策を講じ、さらなる騒音低減を実現した。

7 まとめ

今回のFCモジュール開発では、主に氷点下始動、供給水素低圧化、冷却機能外付け対応、騒音低減という課題に取り組んだ。この開発過程で得られた知見と成果をもとに、今後もお客様ニーズに柔軟かつ的確に応えていく。また高性能で環境性能に優れた製品を提供していくことで燃料電池技術のさらなる普及促進に寄与し、持続可能な社会の構築に貢献していきたい。

■著者紹介■



開発の経緯と開発者の思い

フォークリフト向けFCシステムの技術展開として、発電機用FCモジュールを最初の開発ターゲットとして取り組んだ。FCモジュールは水素と空気中の酸素を化学反応させて発電する燃料電池を用いて発電するため、稼働時にはCO₂や環境負荷物質を全く排出しない優れた環境性能を実現する。さらに、複数モジュールの連結などにより、さまざまな出力に対応可能であることなど、高い汎用性を有しており、FCを動力とする新たな製品の開発・生産を促進することが期待される。これからも燃料電池技術の普及を通じて、持続可能な社会の実現に寄与していきたい。