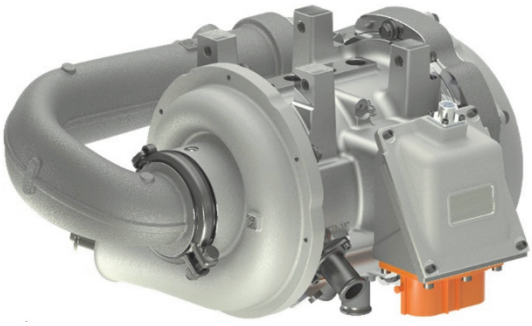
燃料電池（FC）向けエアコンプレッサの開発

Development of Air Compressors for Fuel Cells



小川 真 *1
Makoto Ogawa

鈴木 浩 *2
Hiroshi Suzuki

清家 斉顕 *3
Nariaki Seike

柴田 直道 *4
Naomichi Shibata

大野木 拓麻 *4
Takuma Onogi

大迫 雄志 *4
Katsuyuki Osako

燃料電池市場の拡大に対応するため，ネット 150kW システム向け（モータ出力 30kW）に加え，ネット 200kW 超システム向け電動ターボ式エアコンプレッサ（モータ出力 45kW）を新開発した。本製品は，2 ステージ（2 段コンプレッサ方式）及びエキスパンダ（単段コンプレッサ＋タービン方式）の 2 構成を備え，効率向上とお客様の多様な要求への適応を実現している。開発に際し，ジャーナル部に中空構造を採用した軽量高剛性ロータや，オイルフリー空気軸受，高効率コンプレッサ，モータステータ/ロータの改良設計による高出力密度モータ等の新技術を導入している。これらの取組みを紹介する。

1. はじめに

世界的な脱炭素化の潮流の中で，自動車の電動化が進展している。電気自動車（Electric Vehicle，EV）は有力な選択肢の一つであるが，バッテリの大型化による重量増加や長時間の充電時間が課題となる。特に，大きな出力を要する商用車では，バッテリの重量が積載能力を制限し，充電時間の長さがユーザビリティを低下させる。また，寒冷地ではバッテリ性能の低下による航続距離の減少が問題となる。

これに対し，燃料電池（Fuel Cell 以下，FC）システムは水素を燃料とし，短時間で燃料補給が可能である。このため，商用車や大型トラックに適しており，近年では FC 出力の増大が進み，ネット 200kW を超えるシステムも登場している。さらに，水素燃料の使用により CO_2 排出ゼロを実現し，再生可能エネルギー由来の水素を活用することで環境負荷の更なる低減が可能となる。一方で，FC 車の普及には水素ステーションの整備が不可欠であり，コストや規制対応が課題となるが，インフラの整備が進めば FC の優位性が最大限に発揮される。

このような背景のもと，三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社（以下，当社）はネット 200kW 超の FC システムに対応するエアコンプレッサを開発し，FC 車両/発電機の効率向上と環境負荷低減に貢献する。

2. ネット 200kW 超 FC 向けエアコンプレッサへのニーズ

従来，エアコンプレッサは必要な圧縮空気流量を供給する補助的な機器であったが，近年の FC システムの高出力化に伴い，エアコンプレッサは単なる補機を超え，FC システム全体の性能/経済性を決定づける主要装置として位置付けられるようになった。つまり，エアコンプレッサの効率，信頼性，軽量性が FC 搭載車両や発電機の出力増大及びシステム効率向上に直結し，

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 主席技師
*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 主幹技師
*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 グループ長
*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部

FC システムの中核を担う存在となっている。

FC システムの出力増大のためには，エアコンプレッサのモータ出力増強と圧縮空気流量の増加が不可欠である。しかし，空気流量の増加は同時に消費電力の増大や軸受/モータ構成部品への負荷増加という課題を伴う。そのため，効率や信頼性を維持しつつ出力を増大する先進技術が求められている。こうした背景を踏まえ，当社はネット 200kW 超の FC システム向けエアコンプレッサに対して，以下のニーズを分析した。

(1) 2 ステージとエキスパンダ双方への対応

現在市場に存在している FC システムには，2 段コンプレッサ方式（以下，2 ステージ）とコンプレッサ＋動力回収タービン方式（以下，エキスパンダ）の双方が用いられており，お客様のシステム構成に応じて柔軟に対応することが求められている。これに応えるため，同一のプラットフォームにおいて，2 ステージとエキスパンダの双方への対応が可能な設計を目指した。

(2) モータの高出力密度化

エアコンプレッサの出力拡大に伴い，モータの高出力化が必要となる。モータ高出力要求に対しては，通常モータの体格を拡大することにより対応することが一般的である。これに対し，今回の開発においてはモータの体格を変更せず，モータ断面の改良や冷却強化を行うことにより，モータの出力密度の向上を目指した。これにより，お客様のシステム構成/レイアウトに与える影響を最小限に抑える，コンパクトな設計が可能となった。

(3) 高効率化

図 1 に当社が想定する FC システムのネット出力とグロス出力のイメージを示す。エアコンプレッサとインバータの消費電力は FC システムのグロス出力から賄われており，システム効率に依存するが，おおよそ 20%がエアコンプレッサとインバータで消費されていると当社は想定している。すなわち，エアコンプレッサとインバータの消費電力の低減が FC システムのネット出力の向上，並びにシステム効率の向上に大きく寄与すると考えている。

次に，図 2 にインバータ×エアコンプレッサの損失分析を示す。エアコンプレッサの効率を左右する最大の要因が空力損失であることから，空力損失の低減がエアコンプレッサの高効率化には不可欠になる。大流量の空気を効率的に圧縮するために，空力損失の低減及び冷却空気量の最適化を図る設計を行った。また，インバータには SiC-MOSFET パワーデバイスを採用し，変換効率の向上によってシステム全体のエネルギー効率を高めた。これら，エアコンプレッサ及びインバータの高効率化が，直接 FC システムの高効率化につながると考える。

(4) 信頼性の向上

エアコンプレッサの軸受部にはオイルフリーの空気軸受を採用している。この軸受部の耐久性の確保が最重要であり，軸受負荷低減のためにロータを軽量化することで信頼性を確保している。加えて，当社エアコンプレッサは最大 800Vdc での運転を想定しており，モータステータ（以下，ステータ）の絶縁設計や温度保護が重要となる。絶縁強化に加え，サーミスタによる温度フィードバック機能を追加し，運転中の温度管理を行うことで，ステータの信頼性を確保した。

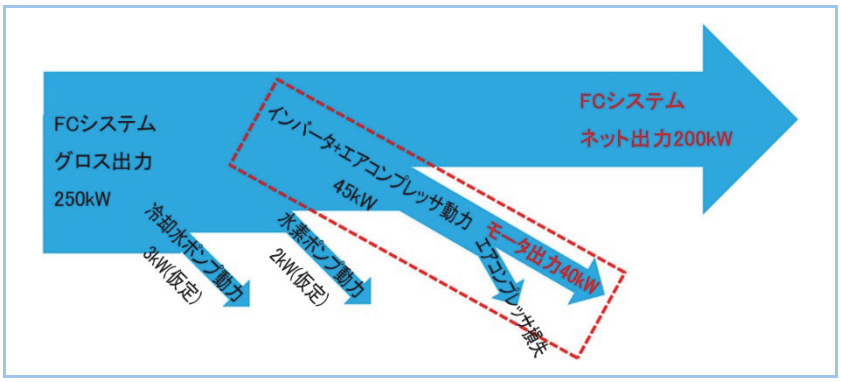


図1 FC システムのネット出力とグロス出力のイメージ

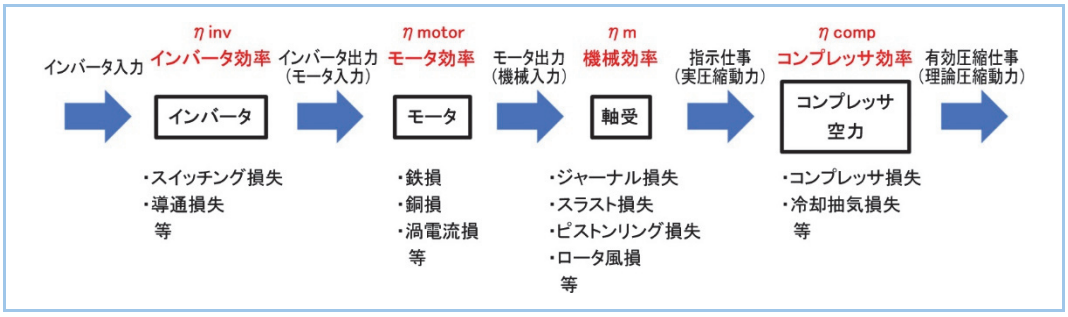


図2 インバータ×エアコンプレッサの損失分析

以上のとおり，エアコンプレッサは FC システムの中核をなす主要装置として，その高い効率性，出力密度，信頼性，コンパクト性が FC システム全体の性能を左右する要素となっている。当社は，高出力/高効率のエアコンプレッサを開発することにより，高出力 FC システムの性能向上に貢献する。

3. ネット 200kW 超 FC システム向けエアコンプレッサ（定格出力 45kW）

今回開発したエアコンプレッサには，前章にて記載したニーズを実現するために新たな技術的工夫を盛り込んだ。図 3 にネット 200kW 超 FC 向けエアコンプレッサの特徴を示す。本章では，各要素技術を紹介し，それぞれの技術的特徴と改良点を詳述する。

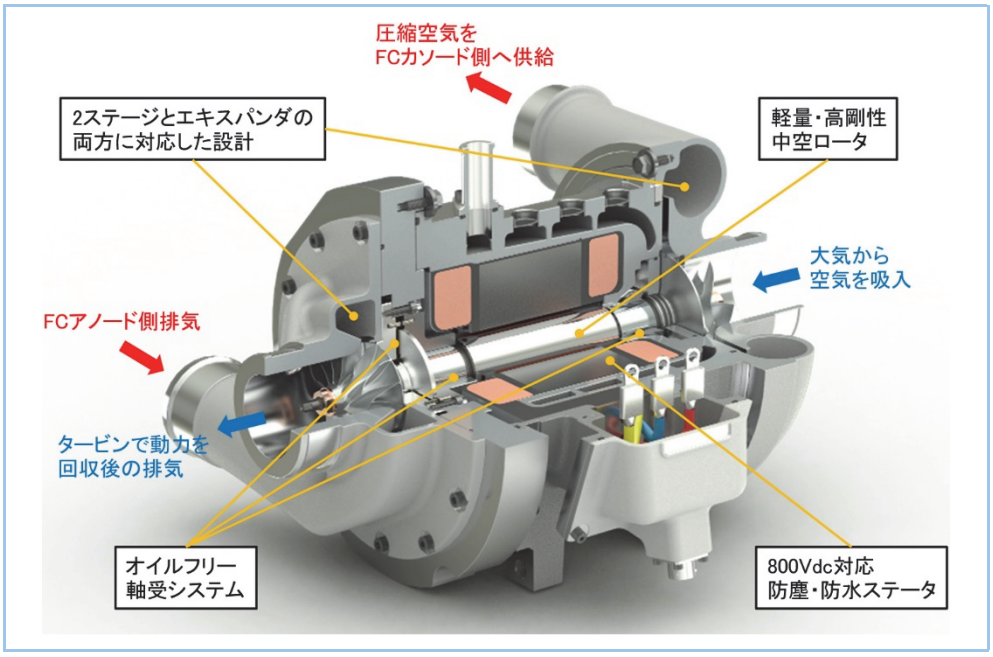


図3 ネット 200kW 超 FC システム向けエアコンプレッサの特徴

3.1 2 ステージとエキスパンダの両方に対応した設計

今回開発したエアコンプレッサは，2 ステージ構成とエキスパンダ構成の両方に対応している。図 4 にそれぞれの外観を示す。図 5 には 2 ステージ及びエキスパンダの使用範囲とネット 200kW 超 FC システムの当社想定作動点（定格，部分負荷）を示す。加えて，図 6 には当社エアコンプレッサの構成部品を示す。固変分離を意識し，ステータ，ロータ，周辺のハウジング類を標準部品化し，コンプレッサホイール等の空力部品は個別最適化することにより，同一のプラットフォームにおいて，2 ステージ構成とエキスパンダ構成の両方に対応を可能にした。2 種類の方式を採用することで，広い運転範囲を持つ 2 ステージと，限られた範囲で高効率を発揮するエキスパンダを使い分け，お客様の多様な要求に柔軟に対応可能である。

(1) 2 ステージ（2 段圧縮方式）

2 ステージはモータの両軸端にコンプレッサを配置し，2 段で空気を圧縮する方式を採用し

ている。この設計により，1 段あたりの圧力比を抑え，空力効率を低下させることなく，高い圧力比を達成し，大流量の空気供給を可能にしている。また，外部冷却空気の供給を不要とし，FC システム全体の設計を簡素化している。2 ステージは広い運転範囲を確保できるため，安定した性能を発揮しやすく，汎用性が求められる使用条件に適している。

(2) エキスパンダ（単段圧縮＋タービン方式）

エキスパンダは，コンプレッサに加えて動力回収用のタービンを備えた単段構成を採用している。この方式では，FC システムから排出される空気エネルギーを回収し，消費電力を低減可能である。図 7 に当社想定作動点（定格，部分負荷）における，動力回収の効果を示す。タービンによる動力回収により，定格点で COP（成績係数）が 0.68 から 0.82 に，部分負荷点では 0.70 から 0.80 に向上することが確認されている。この効率向上により，FC システム全体のエネルギー効率向上に貢献する。

単段圧縮＋タービンでは，2 段圧縮に対して運転範囲は狭まるが，高効率が求められる特定の用途には最適である。このため，エキスパンダは限られた条件下で最大効率を求めるお客様のニーズに応える設計となっている。

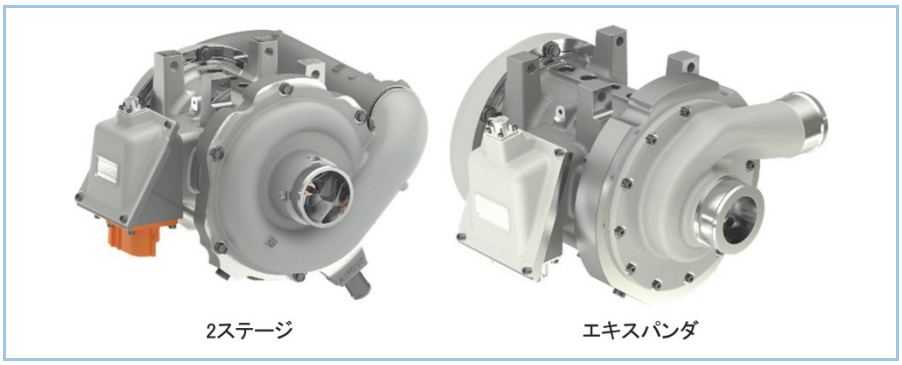


図4 ネット 200kW 超 FC システム向けエアコンプレッサ（モータ出力 45kW）

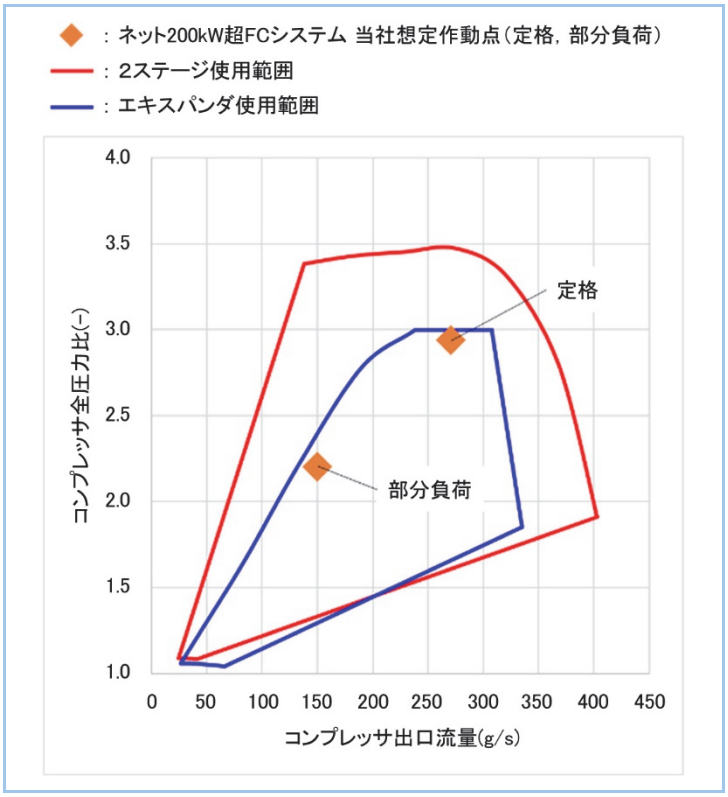


図5 2 ステージとエキスパンダの使用範囲

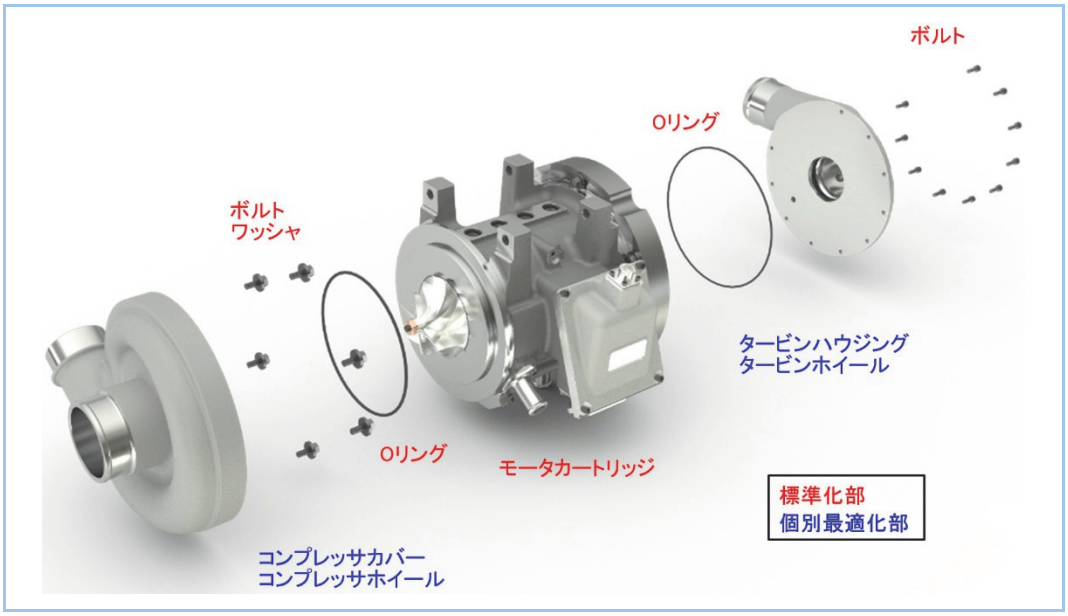


図6 エアコンプレッサの固変分離

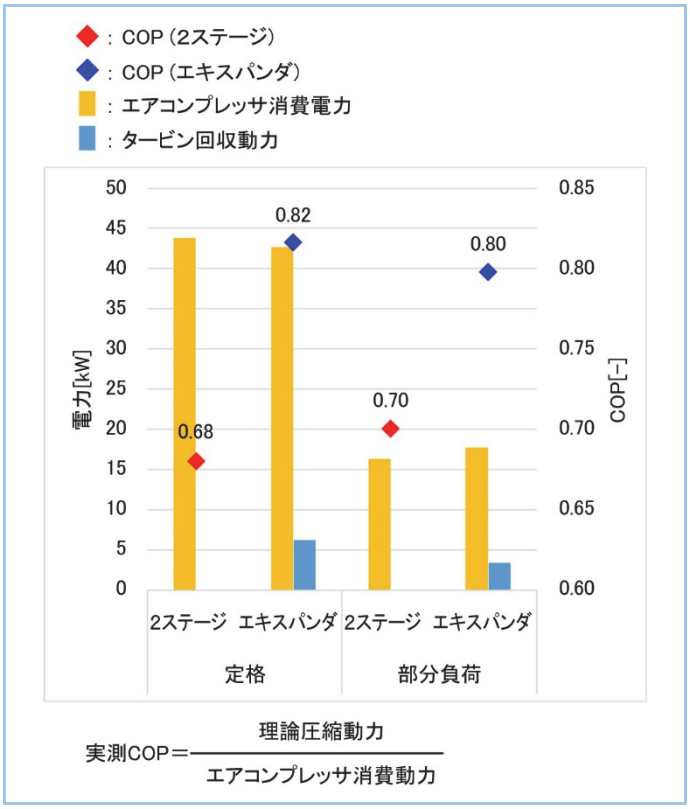


図7 動力回収の効果

3.2 800Vdc 対応の防塵/防水ステータおよび冷却設計

当社のエアコンプレッサは，高速回転に適し自動生産が可能な 2 極分布同心巻仕様のステータを採用している。モータの高出力化に際して，巻線仕様及びステータ/ロータ断面形状の設計改良を行った。スロット面積，マグネット量の増加に加え，磁気ギャップの最適化と後述する冷却能力向上により，外径や積厚を変更せずに従来比 1.5 倍の出力向上を達成した。

800Vdc に対応する絶縁対策として，巻線のエナメル被膜厚さに加え，相間絶縁紙，スロット内絶縁紙の厚さを上げることによりターン間，相間，相対地間の絶縁を強化している。更にコイルエンド成型後のステータ全体にモールド処理を施すことにより，絶縁効果を高めている。また，モールドはステータの防塵/防水にも寄与している。

モータの出力密度増大に際して，モータ電流の増加に伴う発熱を抑えるための，冷却の強化

が必要となる。冷却設計では主に，モールド材に高熱伝導率材料を用いることにより冷却効率を向上させている。モールド処理を施すことにより，冷却水への熱伝達効率が向上し，モータコイル温度を大幅に低減することに成功している。効果的な熱放散を実現することにより，モータ体格をキープしつつ出力向上を可能にした。

また，当社では巻線工程やモールド処理等を含め，ステータの内製化を行っている。これによりお客様の要求に応じたモータ仕様の柔軟な変更が可能となっている。お客様のさまざまな運用条件や要求に対応する上で大きな強みとなっている。

3.3 空力の最適化と自社開発インバータによる高効率化

今回開発したエアコンプレッサでは，空力損失を低減するため，最新の CFD（数値流体力学）解析を活用し，コンプレッサやタービン，中間配管の形状に加え，スラストバランスやエアコンプレッサ内部の冷却空気流れを最適化している。特に，お客様の要求作動点に適したコンプレッサのマッチングにおいては，ターボチャージャの技術を活用し，コンプレッサ効率のピーク点を作動点に最適化することにより，FC システム全体のエネルギー効率向上が可能となる。

加えて図 8 に自社開発インバータを示す。当社製エアコンプレッサ専用に新開発したインバータは，SiC-MOSFET パワーデバイスを搭載し，高効率と高出力を実現している。このインバータはキャリア周波数 20～40kHz に対応しており，お客様の要求に応じたモータ巻線仕様の変更と合わせ，モータとの最適なマッチングを行うことで，FC システム全体の効率を最大化できる。また，車載ソフトウェアの共通化を実現するためのプラットフォームである AUTOSAR や，自動車の電気/電子に関する機能安全についての国際規格 ISO26262 に対応したソフトウェアの構築にも取り組んでいる。

図8 自社開発インバータ

3.4 ロータ軽量化，空気軸受採用，モータ温度保護による信頼性向上

ロータ設計では，軽量化と強度確保の両立を追求し，従来品と比較して重量を約 40%削減することに成功している。この軽量化は，中空構造の採用に加え，振動と強度に関する設計にはターボチャージャ開発で培ったロータダイナミクス技術を活用し，各部品の強度や剛性を最適化することよって実現した。たとえば，部品ごとの材料選定や形状設計を細部まで調整することで，軽量化による剛性低下を最小限に抑え，高速回転時の安定性を実現している。さらに，これらの設計と並行して生産設備を導入し，ロータの内製化を達成したことで，品質の一層の向上と設計変更への柔軟な対応を可能としている。具体的には，ロータの組立工程からバランス調整を含む仕上げ加工，着磁工程等を自社内で実施しており，厳格に品質管理を行っている。

軸受設計ではオイルフリー設計を採用しており，潤滑油を必要としない空気軸受を使用することで，FC システムに求められる清浄度の高い圧縮空気を供給可能としている。FC スタックは潤滑油等の不純物の混入に極めて敏感であり，このオイルフリー設計は FC システムの信頼性を確保する上で不可欠な要素となっている。また，軸受トップフォイル表面には特殊な潤滑コーティングを施し，起動/停止時の摩耗を抑制することで，繰り返し発停される環境下でも高い耐久性を維持している。

ステータの冷却設計では，冷却通路の配置や形状を改善し，局所的な過熱が発生しないように温度分布を均一化している。加えて，ステータ部にはサーミスタを設置し，インバータへの温度

フィードバックを可能にしている。ステータの温度保護を行うことにより，絶縁の劣化を防止し，エアコンプレッサの長期間の信頼性を担保している。

4. まとめ

当社は，ネット 200kW 超クラス FC システム向けの電動ターボ式エアコンプレッサ（モータ出力 45kW）を新開発した。本製品は，2 ステージ（2 段コンプレッサ方式）およびエキスパンダ（単段コンプレッサ＋タービン方式）の 2 構成を提供し，それぞれの方式が持つ特長を活かしてお客様のニーズを実現している。軽量高剛性ロータ，オイルフリー軸受，高効率コンプレッサ，800Vdc 対応の防塵/防水ステータなどの要素技術を組み合わせることで，お客様の多様な FC システム構成への対応を可能とした。

本開発においては，製品設計だけでなく，ロータやステータの内製化を可能とする生産設備の構築にも注力した。これにより，年間 2000 台の生産能力を持つパイロットラインを確立し，高い品質と柔軟な仕様変更を両立した製品供給が可能となった。

今後は，更なる研究開発を通じて，FC システムの効率向上や信頼性向上に向けた新技術の実用化を進める。具体的には，850Vdc 超への対応，インバータとエアコンプレッサの一体化，2 段コンプレッサ＋タービン方式といった高付加価値製品の開発を進める計画である。これらの取組みを通じて，当社は FC 技術の進化に貢献し，持続可能なエネルギー社会の構築を支える役割を果たしていく。