

カーボンニュートラルの実現に貢献する 燃料電池向け電動ターボチャージャの開発

Development of Electric Turbocharger for Fuel Cell System to Contribute to the Realization of Carbon Neutrality

林 克 憲 産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター電動製品開発プロジェクト部
 金 田 真 一 産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター電動製品開発プロジェクト部 主幹
 池 谷 信 之 産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技師長
 大 東 祐 一 産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター電動製品開発プロジェクト部 主査
 北 村 和 浩 産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター電動製品開発プロジェクト部 主査

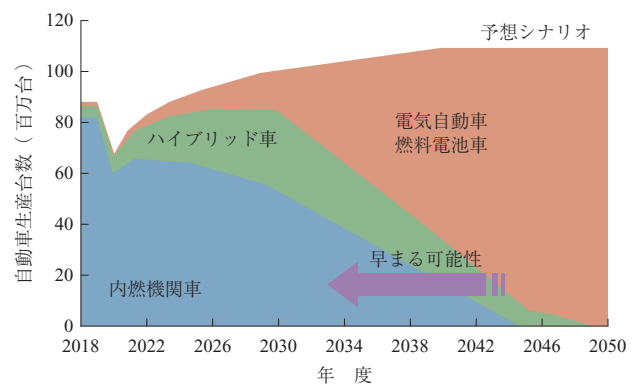
カーボンニュートラルの実現に向け、燃料電池車（FCV）をはじめとした燃料電池システムの活用が進んでいる。株式会社 IHI では、さまざまな燃料電池システムの性能・コスト・信頼性要求に対応するため、高効率な燃料電池向け電動ターボチャージャ（ETC）の開発を進めている。燃料電池システムの効率向上のほか、今後の生産台数拡大に対応するべく、大量生産を見越した生産性向上にも取り組んでいる。本稿では、IHI の新機種である ETC-M の強みと燃料電池システムに与えるメリット、そしてそれを支える要素技術を紹介する。

Fuel cell systems such as FCV are being used more and more toward the realization of carbon neutrality. IHI is developing a new electric turbocharger (ETC) that has high efficiency to meet the requirements in regards to performance, cost and reliability of various fuel cell systems. In addition to improving the efficiency of the system, we are also working to improve productivity with a view to future mass production. This paper introduces the strengths of IHI's newly developed ETC-M, the merits for fuel cell systems, and the elemental technologies that support them.

1. 燃料電池システムを取り巻く環境

カーボンニュートラルを実現するための一つの選択肢として、水素の活用が期待されている。例えば、EU では 2020 年に水素戦略が発表され、2030 年までに 1 000 万 t の再生可能水素の生産を目指している⁽¹⁾。各国で水素活用の支援や助成が進んでおり、ドイツでは大型燃料電池トラック向けの支援、中国では 2020 年に燃料電池車（FCV）産業のサプライチェーン構築への助成を発表している⁽²⁾。このような取組みにより、FCV 産業の拡大が進んでいる。

2050 年までの自動車生産台数の予想シナリオを第 1 図に示す⁽³⁾。内燃機関車やハイブリッド車の割合が 2030 年以降急激に減少し、電気自動車（EV）や FCV に置き換わっていくことが予想されている。一般社団法人日本自動車工業会によると、小型乗用車は EV が主流となり、大型商用車は FCV が主流になることが予想されている⁽⁴⁾。水素は電池に比べてエネルギー密度が高いため、大型商用車のような高出力が必要で長距離走行するための自動車として、FCV は適した選択肢となる。



第 1 図 自動車生産台数の予想シナリオ⁽³⁾
 Fig. 1 Forecast scenario of vehicle production volume⁽³⁾

IHI では、燃料電池システム向けコンプレッサの研究を 2002 年から開始し、同コンプレッサはこれまで定置式燃料電池（施設などに電力を供給するための装置）や FCV に搭載されてきた。2018 年には、ダイムラー社（ドイツ）の車両向けに、世界初（当社調べ）となるタービン搭載の電動ターボチャージャ（ETC）を量産している。

この ETC は、第 2 図で ETC-S と示された低出力スタックの領域をカバーしている。大型商用車への燃料電池の適用拡大に伴い、燃料電池システムの高出力化が進んで

フトで回転体（ロータ）を成し、このロータは空気軸受によって支えられている。インバータはモータへの電力供給や車両システムとの通信インタフェースを有している。

2.2 IHI の ETC の特徴

IHI は航空エンジンやターボチャージャといったさまざまな回転機械を世の中に送り出してきた。この既存の技術も活用して ETC の開発に取り組み、IHI の ETC として主に下記 5 点の強みを生み出した（第 4 図）。

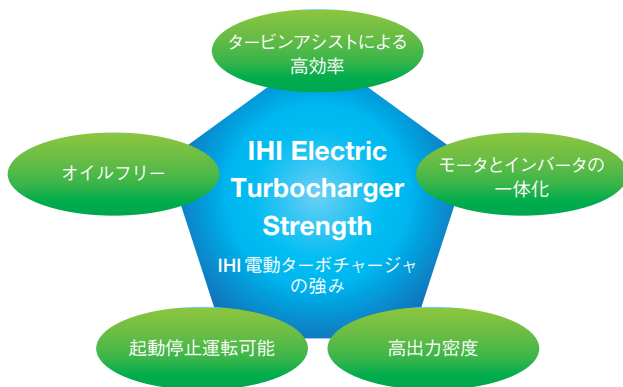
- (1) タービンアシストによる高効率
 - ・ FC スタックから排出される排気ガスのエネルギーをタービンで回収することで、コンプレッサ必要動力の 30% を賄い、ETC の小型化・消費電力削減が可能。
 - ・ ETC の消費電力削減により、燃料電池システムの高効率化を実現し、用途に応じて小型化・高出力化が可能。
- (2) オイルフリー

燃料電池の性能低下対策のため、空気軸受採用によりオイルフリーを実現。
- (3) 起動停止運転可能

空気軸受へのコーティング適用により、アイドリングストップのようなスタート／ストップ運転が可能。これにより燃料電池システム未使用時の省電力化が可能。
- (4) 高出力密度

回転数の高速化により、量産実績のある従来機に比べ 58% の出力密度向上。
- (5) モータとインバータの一体化

モータとインバータを一体化し、合計サイズの最適化をすることで小型化を実現。これにより、燃料電池システムの小型化が可能。



第 4 図 IHI の ETC の強み
Fig. 4 Strengths of IHI's ETC

3. 電動コンプレッサシステムの比較

3.1 タービン有無の比較

定格運転での FC スタックの排気は、80 ~ 100℃ 程度の湿り空気である。タービンを用いてこの排気に含まれたエネルギーを回収することで、コンプレッサ必要動力をアシストすることが可能である。第 5 図に 1.5 ~ 3.2 の範囲におけるコンプレッサ圧力比とコンプレッサ動力の関係を示す。また、同じグラフ上に、タービンを設けた場合の回収可能な動力も重ねて示す。回収可能なタービンの動力は、スタック内の圧力損失ならびにタービンで使用可能な圧力差に依存する。下記 (1) 式の zeta で示されるパラメータが高い、つまりタービンで使用可能な圧力差が大きいほうが回収可能なターボ動力が上がる事が分かる。

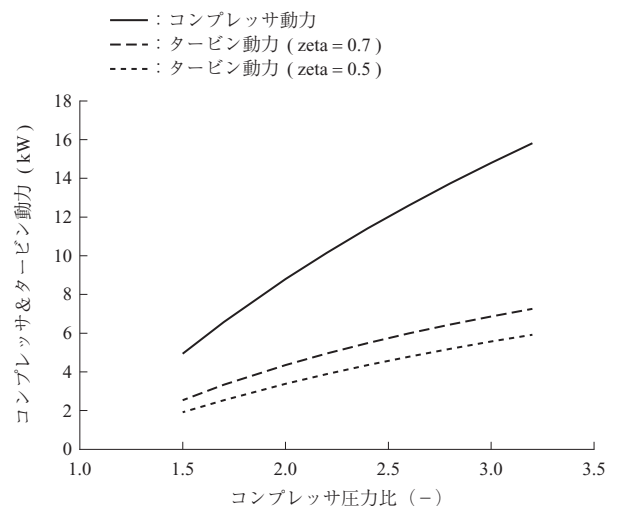
$$\text{zeta} = \frac{P3 - P1}{P2 - P1} \dots\dots\dots (1)$$

P1：コンプレッサ入口圧力

P2：コンプレッサ出口圧力

P3：タービン入口圧力

回収動力はスタックの仕様や作動点により変化するが、使用条件に対して最適なコンプレッサとタービンの組合せを選定することで、圧縮動力の 30% 程度の動力をタービンで回収することができる。これによりモータやインバータの小型化が可能になる。



(注) コンプレッサ効率：0.75 一定
タービン効率：0.75 一定
大気圧：101 kPa
大気温度：25℃
タービン入口温度：90℃
空気流量：0.1 kg/s

第 5 図 圧縮動力とタービンによるアシスト
Fig. 5 Compression power and turbine assist

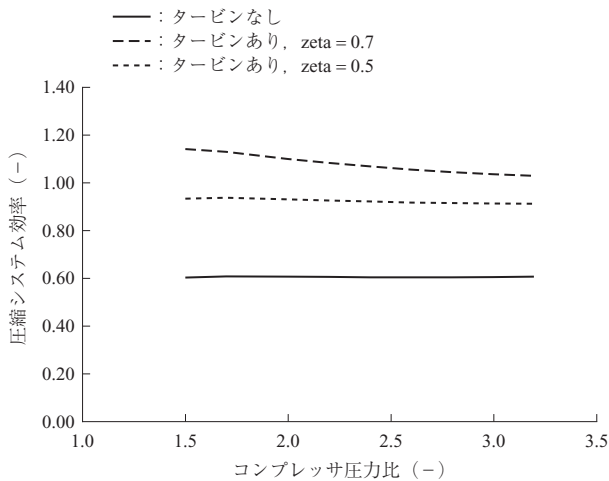
第6図に(2)式で示す圧縮システム効率をタービン有無で比較した結果を示す。

$$\text{圧縮システム効率} = \frac{\text{理論断熱圧縮動力}}{\text{インバータ入力電力}} \dots\dots\dots (2)$$

タービンありの場合、タービンなしと比較して圧縮システム効率がはるかに高いことが分かる。zeta = 0.7, コンプレッサ圧力比3の条件で、圧縮システム効率が0.60から1.03まで向上している。タービンありの電動コンプレッサで圧縮システム効率を高めることは、燃料電池システムで使用可能な出力を増加させることにつながる。

3.2 ETC と 2 段コンプレッサの比較

第7図に単段 ETC とインタクーラ付き 2 段コンプレッサ (タービンなし) のシステム図を示す。燃料電池



(注) メカニカルロス, モータ効率, インバータ効率: 同圧力比で同一値

第6図 タービン有無による圧縮システムの効率差

Fig. 6 Difference in compression system efficiency with and without turbine

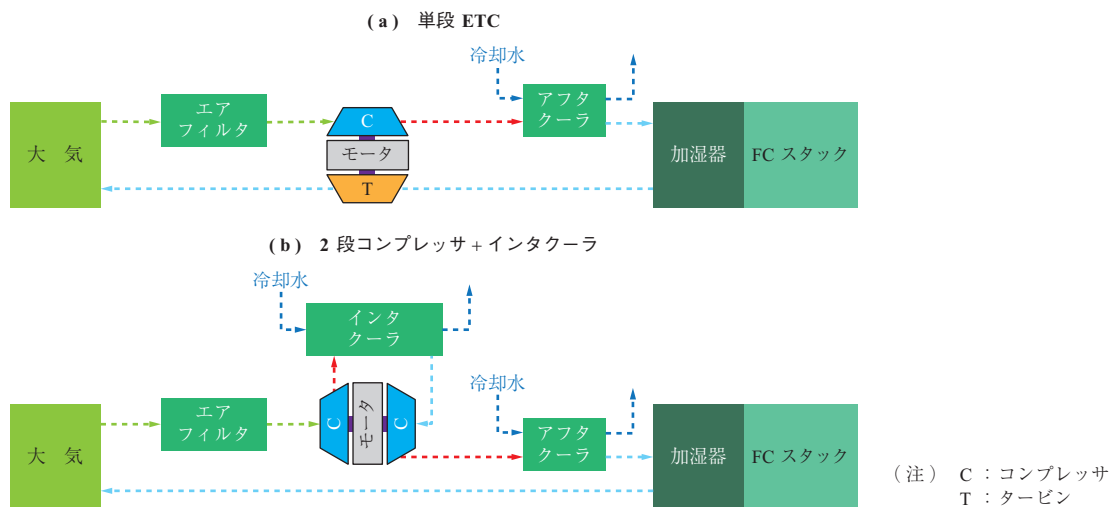
システムにある加湿器の入口温度を約 100℃以下に保つ必要があるため、いずれのコンプレッサシステムを用いてもアフタクーラが必要となる。これに加え、2段コンプレッサシステムの場合は、高圧段側コンプレッサの保護および圧縮動力低減のため、インタクーラが必要となる。アフタクーラとは別にインタクーラを加えることで、冷却システムの負荷が増大する。その結果、熱交換器のサイズは拡大し、2段コンプレッサの熱交換器サイズは、単段圧縮のアフタクーラのほぼ2倍のサイズとなる場合がある⁽⁵⁾。また、熱交換器での総圧損が増加するため、圧縮システム効率の低下につながる。単段コンプレッサで作動点をカバーすることで、熱交換器および配管システムのサイズダウンと圧損の縮小を実現できる。

単段 ETC とタービンなし 2 段コンプレッサのシステム効率を示したものが第8図である。ETC は全域で 2 段コンプレッサより高効率であることが分かる。コンプレッサ圧力比 3.2 の条件で、2 段コンプレッサのシステム効率が 0.79 であるのに対し、ETC のシステム効率は 1.19 に向上している。ETC を採用することで、サイズダウン・軽量化だけでなく、高効率なシステムを達成することができる。

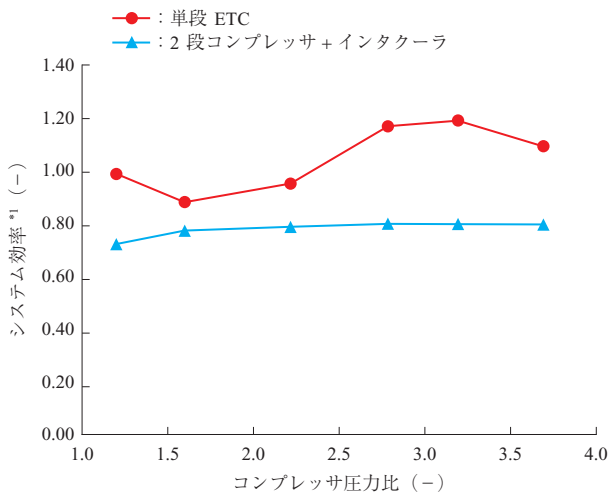
4. 要素技術

4.1 空気軸受

燃料電池の触媒に異物が付着すると、燃料電池システムの性能は低下する。実使用条件下で燃料電池システムの効率を維持するためには、こういった触媒の被毒を避ける必要がある。代表的な被毒要因としては、潤滑油ミストが挙



第7図 単段 ETC とインタクーラ付き 2 段コンプレッサのシステム図
Fig. 7 System flow of single ETC and 2stage compressor with inter-cooler



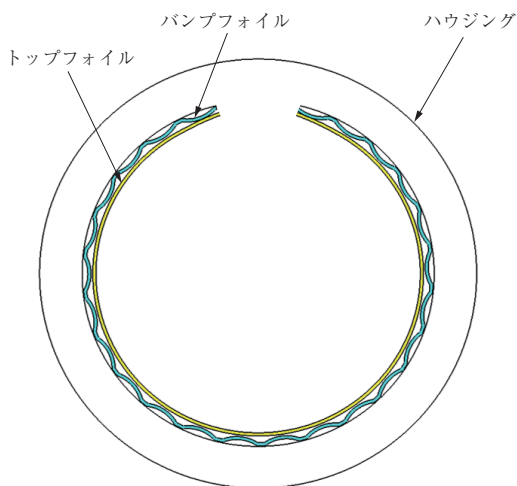
(注) *1: システム効率 = $\frac{\text{理論断熱圧縮動力}}{\text{コンプレッサ動力} + \text{タービン動力}}$

第 8 図 単段 ETC と 2 段コンプレッサのシステム効率
Fig. 8 System efficiency of single ETC and 2stage

げられる。そのため、燃料電池システムはオイルフリーであることが求められている。

システム全体でのオイルフリーを実現するため、IHI の ETC は動圧タイプの空気軸受を採用している。空気軸受は、ロータをラジアル方向で支えるラジアル軸受と、軸方向で支えるスラスト軸受が存在する。代表としてラジアル空気軸受の断面模式図を第 9 図に示す⁽⁶⁾。主な構成部品は、波板形状の薄い板ばね（バンプフォイル）、低速時には回転ロータと直接接触し、ロータ表面と相対する薄い板（トップフォイル）、これらを保持するハウジングである。空気軸受は、潤滑流体として空気を用いるため、油を使えない環境下でも適用可能で、メンテナンス性にも優れている。

ETC の運転停止時は、ロータと軸受は接触状態にある。



第 9 図 ラジアル空気軸受の断面模式図
Fig. 9 Cross-sectional view of radial air bearing

ETC を起動してロータが回転し始めた段階では、ロータは軸受と接触状態で回転している。その後、ロータの回転数が上がることで、軸受とロータ間で空気膜が形成され、非接触状態となる。起動直後および停止直前以外はこの非接触状態での回転を維持している。IHI の空気軸受は、しゅう動面にコーティングを適用することで、起動と停止時の一時的な接触状態での回転しゅう動に対応している。これにより、ETC の起動停止運転を可能にしている。

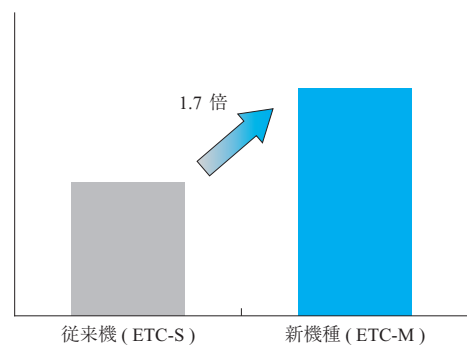
空気軸受は、薄いバンプフォイルおよびトップフォイルを保持しながらハウジングに挿入して固定するため、組立工程が複雑である。従来は手作業で組み立てていたが、専用の組立装置を開発し、組立てを自動化することで大量生産の対応を目指している。

4.2 ロータ

ETC のロータは主に内部の磁石により回転動力を得ている。新機種 (ETC-M) は、従来機 (ETC-S) より高出力なスタックに対応するため、磁石体積を増加させてモータおよびコンプレッサ出力を増やしている。磁石の体積が増えるとモータ出力は向上するが、ロータ長増大による軸振動増大や、外径拡大による応力増加といった悪影響がある。そのため、それぞれの影響度を定量化することで、出力増加と低軸振動、強度確保が両立する成立点を導き設計した。新機種は、従来機より最高回転数を上げることで全体をコンパクト化している。サイズ、ロータダイナミクス、強度設計を最適化することで、第 10 図に示すとおり、ロータ比出力を 1.7 倍に増加させた。

4.3 モータ

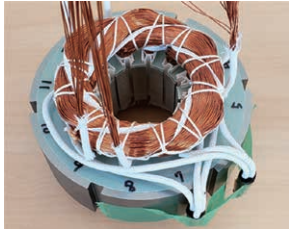
第 11 図にモータの巻線方式を示す。従来機 (ETC-S) では巻線方式として重ね巻を採用していた。重ね巻は、性能とサイズの面では優位な巻き方であるが、自動化が難しく、大量生産を目標とした新機種では採用できない。その



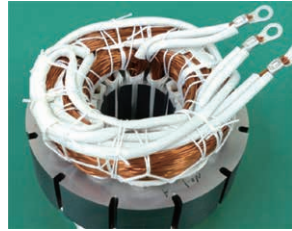
(注) ロータ比出力 = モータ出力 / ロータ重量

第 10 図 ロータ比出力
Fig. 10 Specific power of rotor

(a) 従来機 重ね巻



(b) 新機種 同心巻



第 11 図 モータの巻線方式
Fig. 11 Winding method of motor

ため新機種では、各相のコイルを径方向に並べる同心巻に変更している。これにより、インサータによる自動挿入を可能とし、大量生産に対応している。また、従来機に対し、回転数 19% 増、トルク約 1.6 倍とし、モータ出力 20 kW を達成している。

4.4 インバータ

第 12 図に従来機と新機種のインバータを示す。新機種のパワーデバイスには、従来機で使用していたシリコン (Si) の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールから新材料シリコンカーバイド (SiC) を使った MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) に変更している。これによりインバータ効率を 4% 向上させている。これに加え、スイッチング周波数高速化により部品の小型化、モータ効率改善の効果を得ている。DC リンクキャパシタ (パワー半導体のスイッチングで発生する直流電圧の脈動を抑制する部品) を体積比で約 40% までサイズダウンし、基板配置の変更などでパッケージを最適化している。

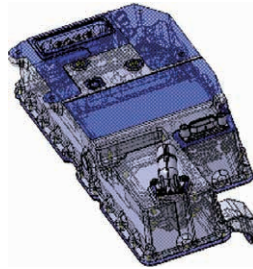
燃料電池システムの大出力化に伴い、要求される最大電圧が上昇している。そのため、各部品の定格電圧をアップデートし、800 V 系のシステムとしている。

5. 結 言

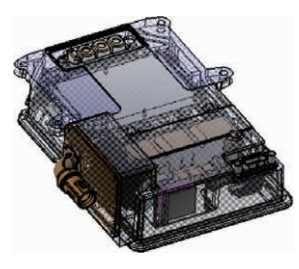
本稿では、さまざまな燃料電池システムの要求に対応するために新開発した燃料電池向け ETC を紹介した。第 13 図に新機種の ETC-M を示す。この ETC は従来機より出力密度を 58% 向上し、タービンによる動力回収によって燃料電池システムをより高効率なものとする。また、大量生産へシフトするための生産性向上も両立した製品となっている。

カーボンニュートラルの実現に向けて燃料電池システムの開発が進むなか、ETC 開発をつうじて高効率なシステ

(a) 従来機 (ETC-S)



(b) 新機種 (ETC-M)



第 12 図 インバータ外観
Fig. 12 Exterior of inverter



第 13 図 ETC-M の外観
Fig. 13 Exterior of ETC-M

ム構築に貢献し、持続可能な社会を実現していく所存である。

参 考 文 献

- (1) European commission : A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, (2020)
- (2) 経済産業省 : 水素社会実現に向けた経済産業省の取組, 2020 年 11 月
- (3) 株式会社 IHI : IHI 統合報告書 2021, 2021 年
- (4) 一般社団法人日本自動車工業会 : 2050 年カーボンニュートラルに向けた課題と取組み, 2021 年 4 月
- (5) D. Filsinger, G. Kuwata and N. Ikeya : Tailored Centrifugal Turbomachinery for Electric Fuel Cell Turbocharger, Hindawi Journal, (2021.9)
- (6) 吉永誠一郎, 青山茂一, 山口浩二, 軸丸武弘 : 高速回転機械の電動化を支える要素技術, IHI 技報, Vol. 59, No. 2, 2019 年 6 月, pp. 42 - 47

【ご案内】

IHI 技報をご覧頂きありがとうございます。
是非、関連する他の記事・論文もご一読ください。

IHI 技報 WEB サイト

[IHI 技報（日本語）](#)

[IHI ENGINEERING REVIEW
（英語）](#)

Vol. 62 No. 1 特集 価値創造に向けた DX の挑戦



◆特集 価値創造に向けた DX の挑戦

人工知能技術の業務での活用方法について
コンプレッサーを“簡単に”，“きっちり”運用できる！
DX を支えるツール展開と社内データアナリスト育成
交通流データを活用して持続可能なモビリティ社会を実現
デジタル作業指示システムによる製造現場における DX への挑戦

◆記事

物資輸送のラストワンマイル
火力発電の稼働率アップをかなえる効率的な溶接技術

◆技術論文

コンクリートのひび割れを考慮した道路橋床版の構造性能の解析評価
カーボンニュートラルの実現に貢献する燃料電池向け電動ターボチャージャの開発

[Vol. 62 No. 1（2022年6月）](#)

全ての記事が閲覧できます。

WEB サイトでは、社会と向き合い、社会とともに進化する IHI の技術・製品・サービスもご紹介しております。関連する技報も掲載しておりますので、ぜひご覧ください。

[IHI 技報を通じて IHI グループの
イノベーションを知る](#)

[IHI 製品を支える技術](#)