

高性能 TRE 型ターボコンプレッサの開発

Development of High-Performance TRE Turbo-Compressor

武 富 敏 礼	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部
小 谷 浩 二	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部
青 木 守 正	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部 部長
小 河 良 行	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部 課長
長谷川 和 三	機械事業本部回転機械事業部 副事業部長

当社は、400 ～ 800 kW の高性能 TRE 型ターボコンプレッサを開発した。2002 年 2 月の納入開始以来、多くの客先から高い評価を得ている。本機は、鋳物ケーシングの採用で、ギアボックス、スクロール、各段吐出通路、インタークーラ、アフタークーラなどを一体構造にし、既存の汎用ターボコンプレッサと比較して 30 ～ 50% の小型化に成功した。また、最新のエアロ技術によって最適な設計を行い、既存の汎用ターボコンプレッサと比較して 2 ～ 6% の効率向上を果たし、世界最高クラスの性能を得ることができた。

IHI have developed a series of turbo-compressors named TRE with high-performances and output capacities from 400 to 800 kW. Since delivery in February 2002, the TRE series has been highly evaluated by many customers in Japan and worldwide. The gearbox casing, scroll casing, air passage of each stage outlet, intercooler and aftercooler are all packaged in one casting structure. The size has been reduced by 30 to 50% compared with general turbo-compressors in the world market. The best matching of the vane parts improved the compressor efficiency by 2 to 6%. The TRE series are some of the highest efficiency compressors in the world.

1. 緒 言

汎用コンプレッサは各種工場で圧縮空気源として使用され、工場の操業に不可欠な機器であり、その消費動力は工場消費総電力の 10 ～ 30% をも占めている⁽¹⁾。一方、環境問題が年々高まり、オイルフリー化、高効率化、ノーメンテナンス化とする客先ニーズがあり、これらにマッチしたコンプレッサの開発はコンプレッサメカとして必須である。

当社における汎用ターボコンプレッサは、1972 年に製作、納入した日本国内第 1 号機から約 3 千台の実績があり、今なお 75 ～ 1 500 kW クラス⁽²⁾ では高い評価を得ている。

このたび、当社は市場性のある 400 ～ 800 kW クラスの汎用ターボコンプレッサをさらに高性能とした TRE 型ターボコンプレッサを開発した。2002 年 2 月に納入を開始し、多くの客先から高い評価を得ている（第 1 図）。

2. 開発上の背景

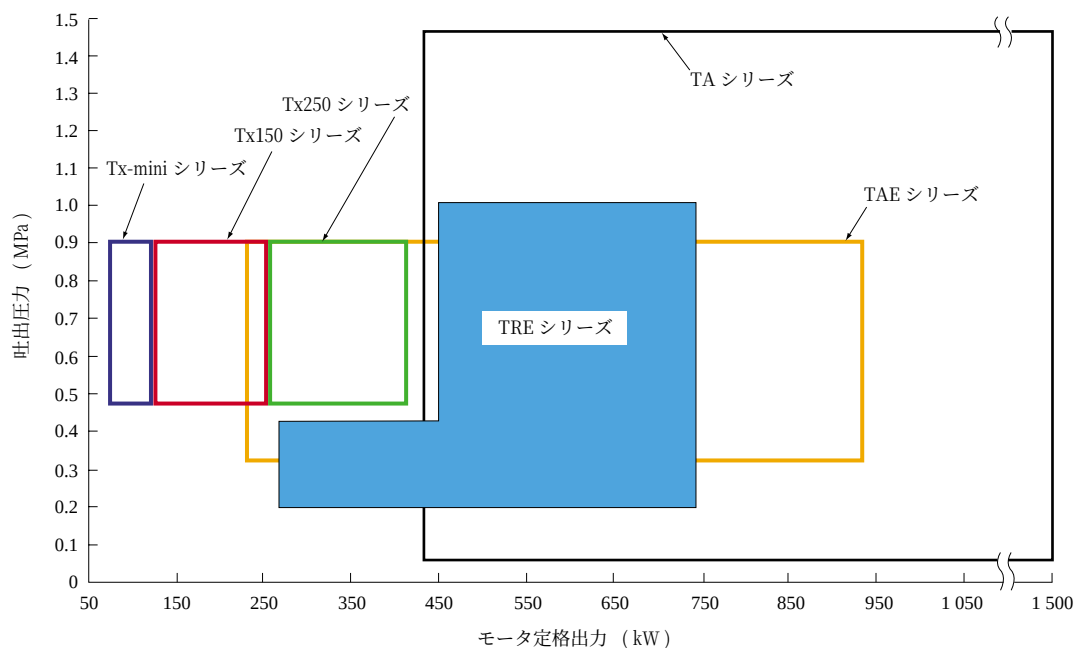
1994 年、新しいデザインコンセプトによって当社独自の技術で開発した Tx150 型ターボコンプレッサ⁽³⁾ の市場投入に始まり、1998 年には小型で世界最小容量の Tx-mini (75 ～ 110 kW)⁽⁴⁾、および中容量の Tx250 (250 ～ 400 kW)

を開発し発売開始した。これら Tx シリーズは性能、品質の点で従来の機械をりょうがし、多くの客先から高い評価を得た。

今回、最新の技術を駆使し、Tx 型ターボコンプレッサの上位機種として開発したのが TRE 型ターボコンプレッサである。TRE 型ターボコンプレッサは数々の新技術の採用によって、既存の同出力機種と比較し 2 ～ 6% の高効率化と 30 ～ 50% の省スペース化を実現した（第 2 図）。



第 1 図 TRE 型ターボコンプレッサ
Fig. 1 TRE turbo-compressor



第2図 IHI製汎用ターボコンプレッサ対応範囲
Fig. 2 Range of IHI general turbo-compressors

3. 特 長

本機の特長を以下に要約する。

3.1 高効率（省エネルギー）

- (1) 最新の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析によって、インレットガイドベーン、インペラ、ディフューザ、スクロールの解析を実施し、各要素の高性能化を実現した。
- (2) インペラ直径、回転数の最適化によって各段の高効率化を図るとともに、段ごとの圧力比（仕事量）をバランスさせ、コンプレッサ全体としての効率向上を図った。
- (3) 客先の要求吐出圧力に応じて複数の歯車のなかから最適な歯車比を選定することで、広い圧力レンジで最高効率を図った。

3.2 高い信頼性

Tx 型ターボコンプレッサをはじめ、過去 30 年間の経験を生かし、シンプルかつ堅ろうな機構を採用しており、長期間の連続運転および負荷・無負荷の変動運転にも耐え得る構造とした。

3.3 低騒音

コンプレッサ主要部分および、エアクーラ部分をすべて一つの厚い鋳物内に納めることで、圧縮空気の通過音や歯車のかみ合い音などを大幅に低減した。また、防音フードも用意しており、さらなる低騒音化が可能である。

3.4 省スペース

コンプレッサ主要部分および、エアクーラ部分を一体化することで、全体の小型化を図った。また、コンプレッサを無負荷にする際に放出される空気の消音器（以下、放風サイレンサと呼ぶ）を電動機の下部へ設置するなどの工夫で、既存機種に比べて 30 ～ 50% の省スペース化を実現した（第3図）。

3.5 フルパッケージ型

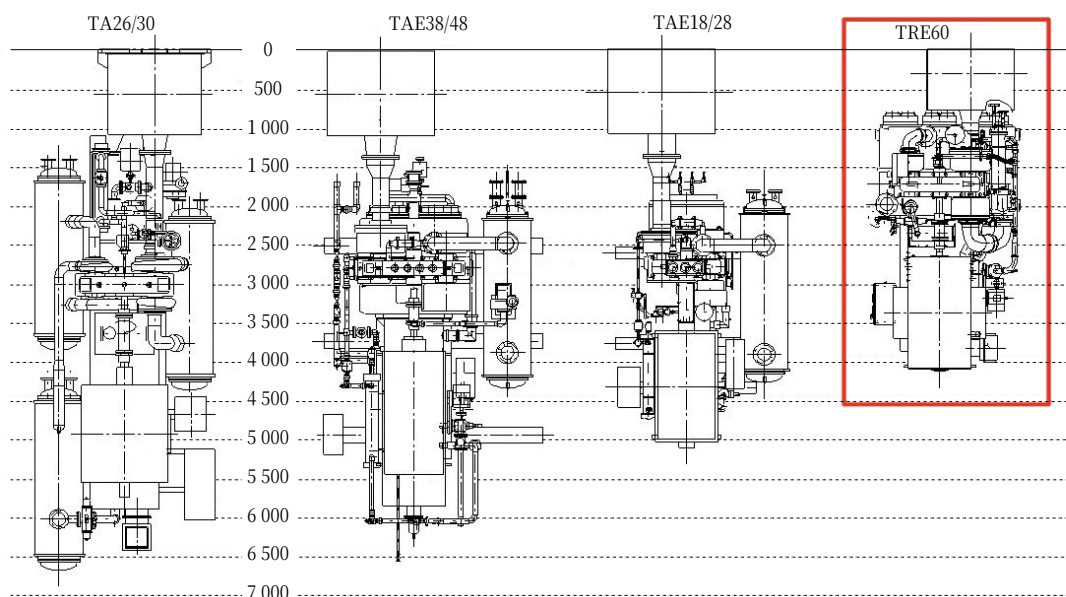
吸入フィルタやアフタークーラ、放風サイレンサなど通常は別設置されることの多い部品を、コンプレッサ本体内に組み込み、パッケージ化した。冷却水や電気配線などユーティリティの接続だけで設置が可能となり、導入時の基礎打ち工程や、配管、配線工数の削減を達成した。

3.6 メンテナンスが容易

本体上半カバーを持ち上げることで、各部品へのアクセスが容易にでき、点検やメンテナンス時の工数削減につながる。また、使用している軸受などはすべて滑り軸受であり、キーパーツでは定期的に交換する必要のある部品をなくした。フィルタや潤滑油などの消耗品のみのメンテナンスとした。

3.7 豊富な制御方式

本機では標準として「負荷・無負荷 制御」、「定圧＋負荷・無負荷 制御」、「定圧・非サージ 制御」などを標準的に用意した。さらに客先のニーズに合った高度なコンピュータ制御にも対応可能である。



第3図 TA型, TAE型ターボコンプレッサとの外形比較 (単位: mm)
Fig. 3 Comparison between TA type and TAE type turbo-compressors (unit: mm)

4. コンプレッサの仕様および構造

4.1 仕様

本機の主要仕様は次のとおりである。

出力	400 ~ 800 kW
取扱ガス	空気, 窒素
吐出圧力	0.2 ~ 1.0 MPa
風量	4 250 ~ 9 400 m ³ /h (0.69 MPa 時)
周波数	50/60 Hz
電源	3 000/3 300 V, 6 000/6 600 V ほか
寸法	1 950 (奥行) × 4 100 (長さ) × 2 000 (高さ) mm (400 kW 時)
質量	8 000 ~ 9 600 kg

4.2 構造

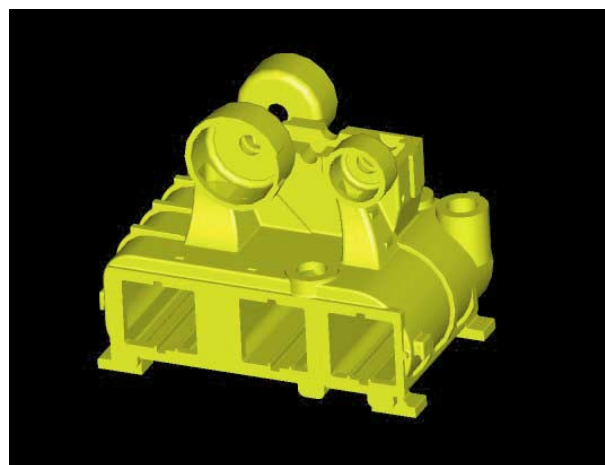
4.2.1 コンプレッサ本体ケーシング

ギヤボックス, スクロール, 各段吐出通路, インタークーラおよびアフタークーラを鋳物一体構造とすることで, 部品点数の削減をはじめ, 低騒音化, 省スペース化が可能となった (第4図)。

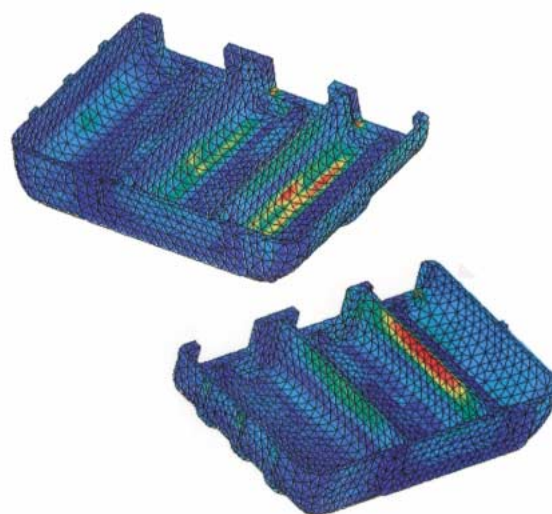
受圧部の強度は, 有限要素法解析およびひずみゲージを使用して応力計測を実施し確認した (第5図)。

4.2.2 歯車

歯車の歯数を低速軸, 高速軸各数種類用意し, 客先の要望する圧力, 風量に適した回転数を選定できるようにした。この結果, 0.2 ~ 1.0 MPa の広い圧力レンジでの最高効率を維持できた。



第4図 ギヤボックス
Fig. 4 Gear box



第5図 有限要素法解析によるエアクーラ部の解析結果
Fig. 5 Stress distribution in air coolers by FEM analysis

4.2.3 インペラ（第6図）

当社汎用ターボコンプレッサ全般に適用していた要素技術に最新の研究成果を加え、CFD による解析（第7図）や豊富な設計データを基にインペラ内部流れを把握し、最適な三次元翼面形状とすることで2次流れを抑えた。また、構造解析によってコンプレッサ運転中のインペラ応力や変形量を把握し、静止部とのクリアランスを最小とすることでクリアランス流れを最小にした。

以上の結果から、広い流量範囲で高効率を達成できた。材料には比強度の高い鍛造チタン材を使用し、削りだし構造を採用した。

4.2.4 ディフューザ

インペラから流出する高速流れを効率良く圧力に回復させるため、羽根付きディフューザを採用した。インペラと同様に CFD 解析により内部流れを解析し、最適な羽根形

状を決定することで効率の良い圧力回復と広い作動範囲の確保の両立を図った（第8図）。

4.2.5 スクロール

ディフューザからの周方向の流れに対して、損失を少なく吐出配管へ導くためにスクロール部の全圧損失を算出し、全圧損失が最小となるよう断面形状および面積分布を決定した。以上のようにインペラ、ディフューザ、スクロールの各要素を最適化するとともに、各要素の最適マッチングを図ることで高性能を実現した。

4.2.6 エアクーラ

清掃のしやすいストレートチューブ・プレートフィン型チューブバンドルを採用した。鋳物ケーシング内に3セットのチューブバンドルを入れる必要があるため、最適な形状および通路面積となるよう、鋳物ケーシングと一緒に検討した。

4.2.7 空気通路

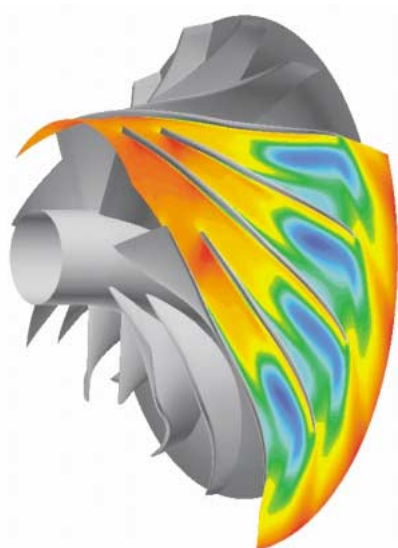
各段の吸入配管部分はあえて鋳物による一体構造とせず、配管でつなぐ方式を採用した。この結果、低圧の場合は2段圧縮、高圧の場合は3段あるいは4段圧縮と変更が可能となり、2段圧縮のときでもむだな空気通路部をなくし、効率向上を図ることに成功した。吐出圧力を問わず、高効率を維持できるコンプレッサの製作が可能となった。

4.2.8 インレットガイドベーンを標準装備

インレットガイドベーンとは、コンプレッサ入口に放射状のベーンを取り付け、その角度を変えることで、インペラ入口の空気に軸の回転と同方向の予旋回を与えて流量と圧力を調整させる装置である（第9図）。一般的なバタフライ弁に比べ、減量運転時や吸入温度が下がったときの動



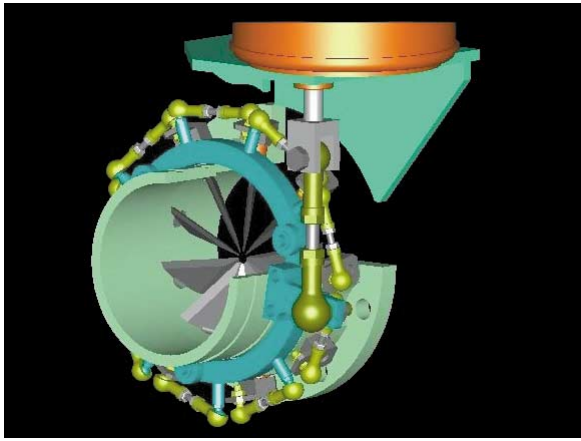
第6図 インペラ
Fig. 6 Impeller



第7図 インペラのCFD解析
Fig. 7 CFD analysis of impeller



第8図 ディフューザのCFD解析
Fig. 8 CFD analysis of diffuser



第 9 図 インレットガイドベーン
Fig. 9 Inlet guide vane

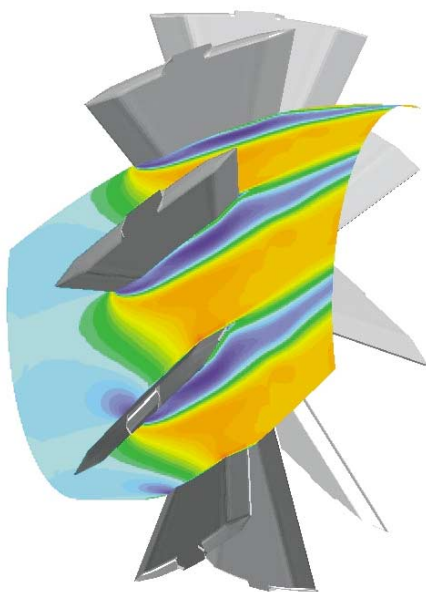
力を削減することが可能である。

設計に当たっては CFD 解析を実施し、これを基に、より圧力損失が小さく、効果的に流入空気へ予旋回を与えるよう形状を決定した。この結果、減量運転時においてもさらに高効率を達成できた（第 10 図）。

4.2.9 制御装置

専用のマイクロコンピュータ制御盤を採用し、コンプレッサ本体に合わせてコンパクト化を図った。また、制御盤盤面にはタッチパネル方式を採用した。この結果、視覚的にコンプレッサの状態が判別可能となり、かつ操作が容易にできるようになった（第 11 図）。

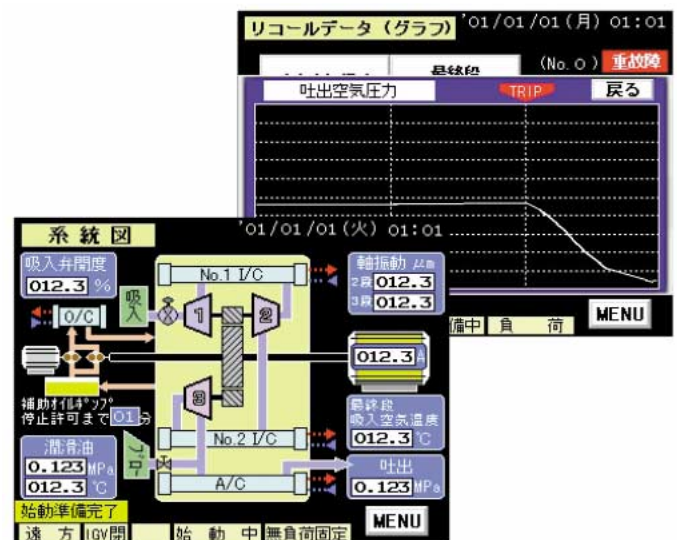
コンプレッサの運転状態や故障時のリコールデータなどトレンドもグラフで表示できる機能を盛り込むことで、あらゆる場面での迅速な対応を可能とした（第 12 図）。圧



第 10 図 インレットガイドベーンの CFD 解析
Fig. 10 CFD analysis of inlet guide vane



第 11 図 制御盤盤面
Fig. 11 Control panel



第 12 図 タッチパネル画面
Fig. 12 View of touch panel

力、動力の制御方法に関しても、標準的に

- (1) 負荷・無負荷 制御
- (2) 定圧+負荷・無負荷 制御
- (3) 定圧・非サージ 制御

など、客先の使用方法に適した制御を選べるよう、豊富に準備してあることはもちろん、最新のコンピュータ制御やリモートメンテナンス、複数台のコンプレッサを統括して制御を行う台数制御などにも対応可能とした。

5. 結 言

TRE 型ターボコンプレッサは世界最高水準の性能と、省

スペース、高信頼性をもったコンプレッサとして開発、商品化した。多くの客先から高い評価を得たことは大きな喜びである。

当社の汎用ターボコンプレッサは、高い信頼性と効率をベースに、多くの客先から高い評価をいただいていた。高いシェアを保ち続け、汎用ターボコンプレッサのリーダーとして今後も絶えず先進性を保持したコンプレッサを開発し、客先の期待にこたえ続けていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 長谷川和三, 尾崎伸一: 空気圧縮機の省エネルギー
石川島播磨技報 第 38 巻第 6 号 1998 年 11 月

pp.398-403

- (2) 長谷川和三, 尾崎伸一, 小河良行, 佐々木善孝: 汎用ターボ圧縮機 Tx シリーズの開発 石川島播磨技報 第 40 巻第 5 号 2000 年 9 月 pp.231-236
- (3) 長谷川和三, 船橋俊一, 金谷龍吾, 山口 広: Tx150 超小型汎用ターボコンプレッサの開発 石川島播磨技報 第 35 巻第 3 号 1995 年 5 月 pp.217-220
- (4) 上藤 浩, 穂刈高志, 尾崎伸一, 長谷川和三: Tx-mini 世界最少容量・汎用ターボ圧縮機の開発 石川島播磨技報 第 38 巻第 2 号 1998 年 3 月 pp.135-139