

高いロバスト性を有する 700bar 超高压圧縮機の実証

Verification Test of 700bar Super High Pressure-Robust Compressor



得山 伸一郎^{*1}
Shinichiro Tokuyama

小林 雅博^{*2}
Masahiro Kobayashi

中庭 彰宏^{*3}
Akihiro Nakaniwa

佐部利 誠司^{*4}
Satoshi Saburi

コンプレッサ市場全体の約半分を占める資源・エネルギー分野は今後も拡大すると予想されている。実績が重要視されるこの分野では、機器に対して高いロバスト性・信頼性が要求される。なかでも、超高压領域のガスインジェクション圧縮機は技術的難易度が高く、解決すべき技術課題が多数ある。そこで、これら解決すべき課題について検討を行い、高いロバスト性を有する超高压ガスインジェクション圧縮機(以降、超高压圧縮機と表記)を開発した。またロバスト性検証のために、CO₂濃度・圧力・回転数・ガス量変化などのあらゆる現地運転条件を模擬した実証試験を行った。本稿では、これら技術開発および実証試験結果について述べる。

1. はじめに

コンプレッサ市場全体の約半分を占める資源・エネルギー分野では、ブラジルのプレソルト(Pre-Salt)エリアをはじめとするオフショアガス油田において、浮体式生産貯蔵積出設備(FPSO: Floating Production Storage & Offloading)での油田開発ニーズが著しく増加している。これらのプラントでは、EOR(Enhanced Oil Recovery)およびCCS(Carbon Capture and Storage)を目的として、超高压圧縮機が設置されるが、年々、より深海まで油田の開発が進み、それに伴い圧縮機に要求される圧力も550barを超えるケースが増加している。

この超高压圧縮機は技術的難易度が高く、かつ機器のロバスト性・信頼性が重要視される。このため技術課題・特殊要求条件を明確にし、それらを検討・解決することで高いロバスト性を有する超高压圧縮機を開発し、そのロバスト性検証のために700barでの実証試験を行った。本稿では、超高压圧縮機の開発コンセプト・各種技術開発および実証試験結果について述べる。

2. 開発アプローチおよび開発コンセプト

2.1 開発アプローチ

超高压圧縮機を開発するに当たり、第一ステップとして、高压圧縮機に関する文献調査を行い、技術課題・潜在リスクの洗い出しを行った。第二ステップとして、技術課題に対する解決策の検討、第三ステップとして、三菱重工コンプレッサ(株)(MCO)独自の付加価値の検討を行った。**表1**に技術課題の洗い出し結果およびそれぞれの課題に対する解決策を記すが、これら技術課題をすべて解決することが、高いロバスト性を有する超高压圧縮機の開発アプローチとなる。

*1 三菱重工コンプレッサ 技術統括センター 主任

*2 三菱重工コンプレッサ 技術統括センター グループ長

*3 技術統括本部 高砂研究所 主席研究員 技術士(機械部門)

*4 技術統括本部 広島研究所 主席研究員

なお、表中の●マークは、MCO 独自の付加価値(特徴)を示す。単なる超高压圧縮機の開発にとどまらず、MCO 独自の付加価値を付けることで、より競争力のある魅力的な製品をお客様へ提供することも念頭において、開発を進めた。

表1 各種技術的課題に対する解決策

キーファクター	技術課題	適用技術／検証方法
高压	-静止部品の強度不足 -静止部品の変形 -シール部からの機内ガスの漏れ	●低ディフューザ径比インペラステージ採用
		○3次元 FEM 解析
		○ケーシングシール法案および材料検討
		○水压試験(1.5 x ケーシング設計圧) ○ガスリークテスト
高密度ガス	-ロータの不安定化 (高不安定化力)	●溝付きホールパターンシールの採用
		○溝付きホールパターンシールの要素試験
		●高ボス比インペラステージ採用
		○ロータダイナミクス計算(スタビリティ/ラテラル)
		○安定性に関する感度解析 ○実負荷試験での圧縮機健全性確認 ○加振試験によるロータ安定性確認
空力性能	-空力性能不足 -旋回失速による運転範囲縮小	○空力性能・旋回失速評価
		○CFD 解析
		○開発母型の単段性能試験
		○ASME PTC-10 type.1 性能テスト
インペラ強度	-回転体の強度不足	○FEM 解析(共振評価, 応答解析)
		○要素試験(流体連成固有振動数確認)
スラストロード	-高スラスト力	●インペラ背面配列構造採用
		●ダブルバランスピストン採用
		○実負荷試験でのスラスト力計測
シールシステム	-ガスシール本体の不具合および コントロールシステムの故障	○ガスシールの主要寸法標準化(異なる Vendor のシールを採用可能とする構造)
		○実機シールおよびコントロールシステムを使用した 実証試験

2.2 開発コンセプト

図1に開発機の仕様および 3D 図を示す。開発機は低压および高压セクションにそれぞれ3枚のインペラを背面配列する構造とし、スラスト力・内部リークの最小化を図っている。また、現地の様々な運転環境を想定し、メタンリッチガスから CO₂ ガスまで、幅広いモルウェイト(Mol. Weight: 分子量)のガスに対応できる圧縮機として検討を進めた。

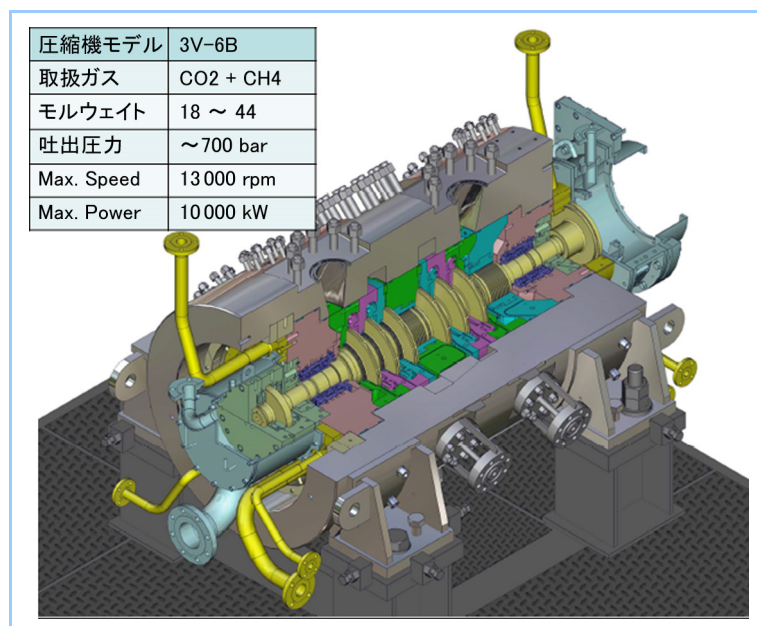


図1 開発機の仕様および 3D 図

図2に開発機の設計コンセプトおよび新規採用の先進技術を示すが、競争力のある魅力的な製品とするためにも、各技術的課題に対して5つの設計コンセプトを掲げ、これらを達成するために、以下の先進技術を採用した。

- A) 高安定性設計 : 溝付きホールパターンシール(高減衰シール), 高ボス比インペラ
- B) 高効率設計 : 高ボス比インペラ, 広流路幅インペラステージ
- C) コンパクト設計 : 低ディフューザ径比ステージによるコンパクト設計
- D) 広運転範囲設計 : ベーン付きディフューザ
- E) 低スラスト力設計 : ダブルバランスピストン

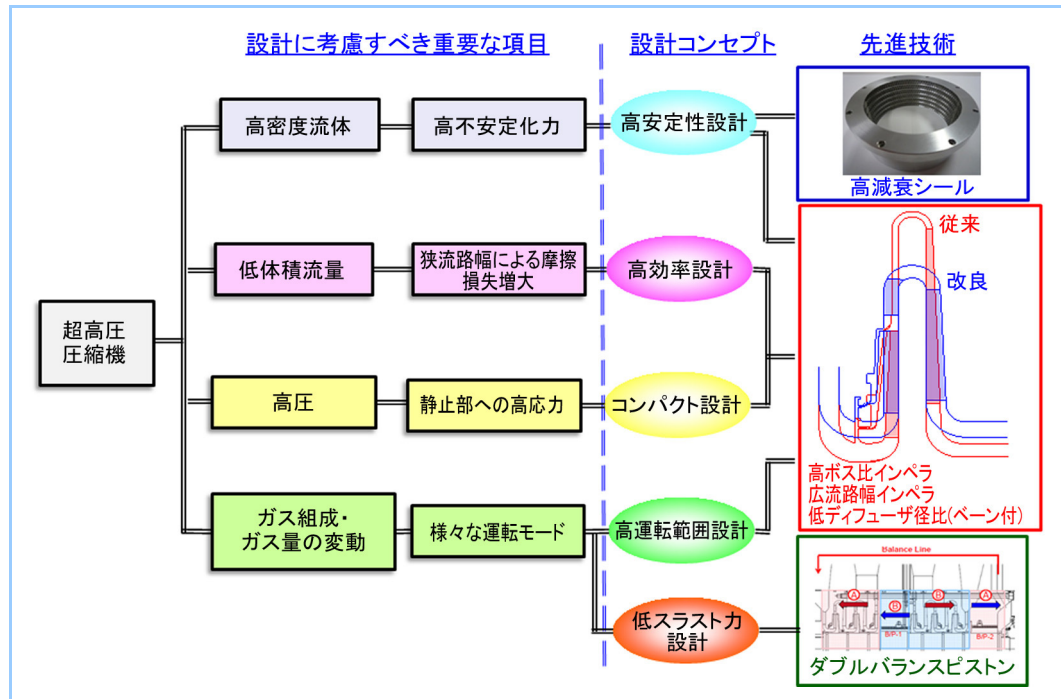


図2 開発機の設計コンセプトおよび新規採用先進技術

3. 技術開発

3.1 高安定性設計

超高圧圧縮機では高密度ガスを取り扱うため高い不安定化力が発生するが、あらゆる現地運転条件においても安定的かつロバストな運転を可能とするためには、高安定性を有するロータ設計が必要不可欠である。これらを実現するために、軸の剛性を大きくすること、並びに軸系の減衰を大きくすることにした。

3.1.1 高ボス比インペラ

図3に高ボス比インペラのコンセプトを示す。高ボス比インペラの採用により、軸径を太くしロータ剛性を向上することを目的としている。図4にインペラボス比とロータの対数減衰率および相対ポリトロピック効率の関係を示す。圧縮機ロータの対数減衰率が0.2以上（ホールパターンシール効果未考慮）を確保しつつ、高い効率をキープできるよう（3.2項参照）、インペラボス比の最適化を行い、従来比で約+30%のロータ剛性向上を達成した。

3.1.2 溝付きホールパターンシール

図5に超高圧圧縮機に搭載した溝付きホールパターンシールを示す。軸系の減衰力を上昇させるためにホールパターンシールを採用し、かつリーク量を低減するために溝付き構造とした。本シールの開発手法として、リーク特性および動特性に対して最適なシール形状を決定するため、CFDを用いて穴径・穴深さ等のパラメータスタディを実施し、かつ、CFD解析の健全性を確認するために、最適形状シールでの要素試験を行った。

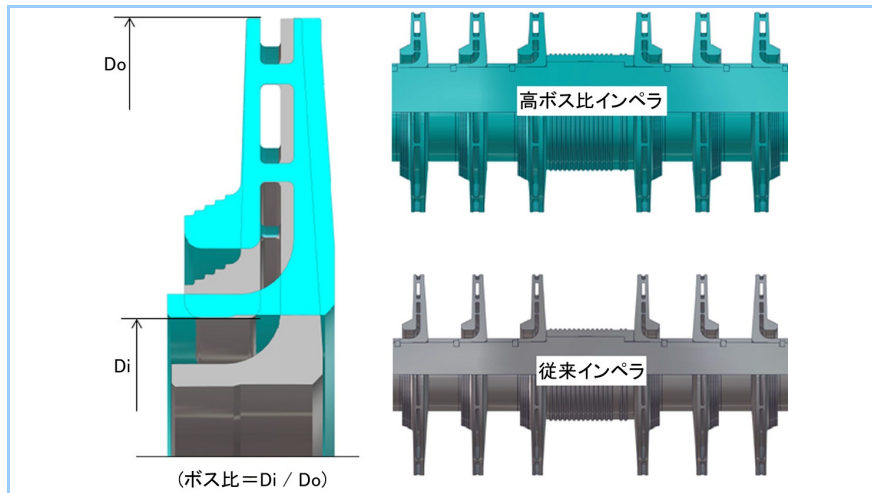


図3 高ボス比インペラのコンセプト

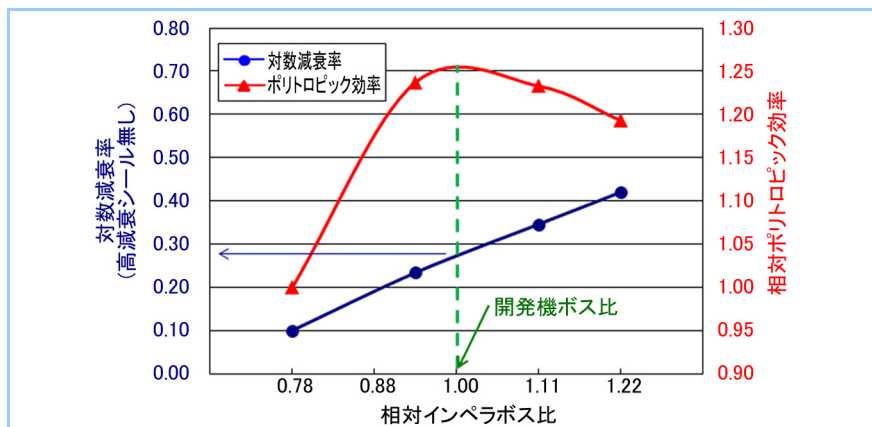


図4 インペラボス比とロータ対数減衰率およびポリトロピック効率の関係

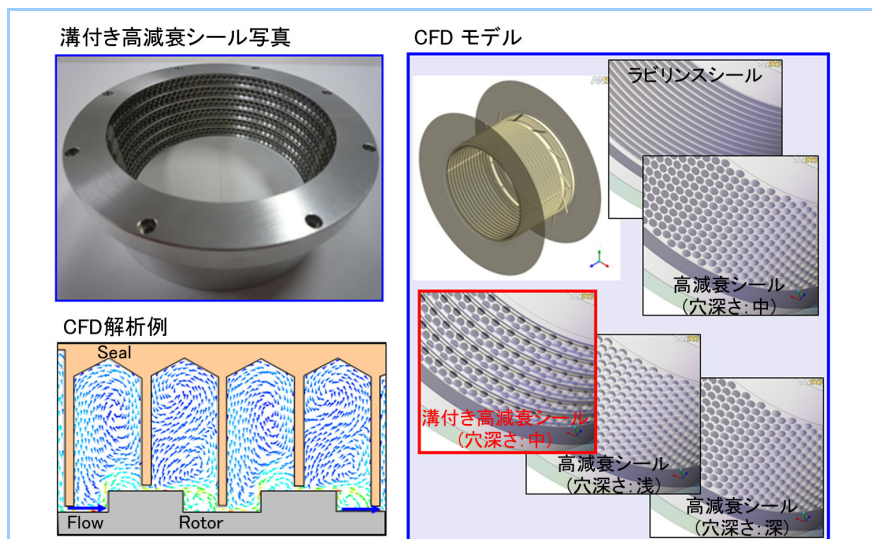


図5 溝付きホールパターンシール(高減衰シール)の外観およびCFD 解析

要素試験では、現地での高密度流体運転を想定して水を使用し、シールのクリアランスやシール入口部でのスワール有無によるリーク特性・動特性に対する影響度を同時に確認した。図6に要素試験結果とCFD解析結果の比較を示すが、リーク量・動特性ともに、要素試験結果はCFD解析結果と同等以上に良好であることを確認した。

また、図7に示す安定性計算モデルにて、現地運転状態での圧縮機の安定性を計算し、CO₂ 濃度・圧力・回転数・ガス量変化などのあらゆる運転条件でも、十分な対数減衰率を確保できる、高安定性ロータであることを確認した。なお、ここでは溝付きホールパターンシール(高減衰シール)部の動特性およびラビリンス励振力はCFD解析結果を使用している。

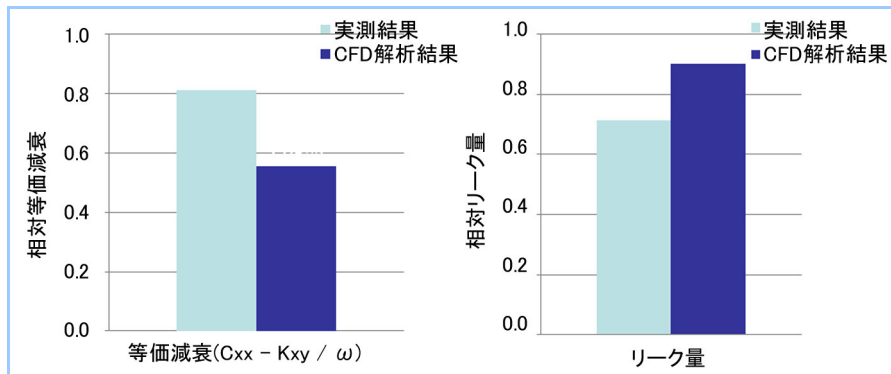


図6 溝付きホールパターンシール(高減衰シール)のCFD解析結果と要素試験での実測結果の比較

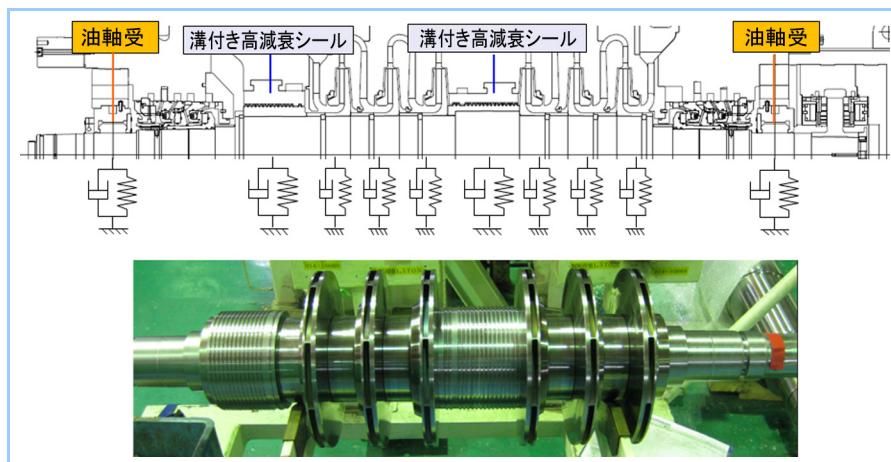


図7 安定性計算モデル(上)および超高圧圧縮機ロータ外観(下)

3.2 高効率設計

高圧圧縮機の場合、圧縮機効率を低下させる原因の一つとして、狭路インペラステージでの壁面摩擦損失増大および高差圧によるラビリンスリーク量増大が挙げられる。この対策として、開発機には広流路幅インペラステージおよび段付ラビリンスを採用した。また、図8に流量係数とインペラ効率の相対比較を示すが、作動点を大流量係数側へシフトすることは、効率向上につながる。流量係数を増大させるためには運転回転数の上昇が有効であるが、回転数上昇はロータ不安定化の要因となる。しかしながら、開発機はインペラボス比を+30%向上させ、更なる安定性向上のために溝付きホールパターンシールを採用したことにより、十分な安定性を確保しており、高回転数での運転が許容される。

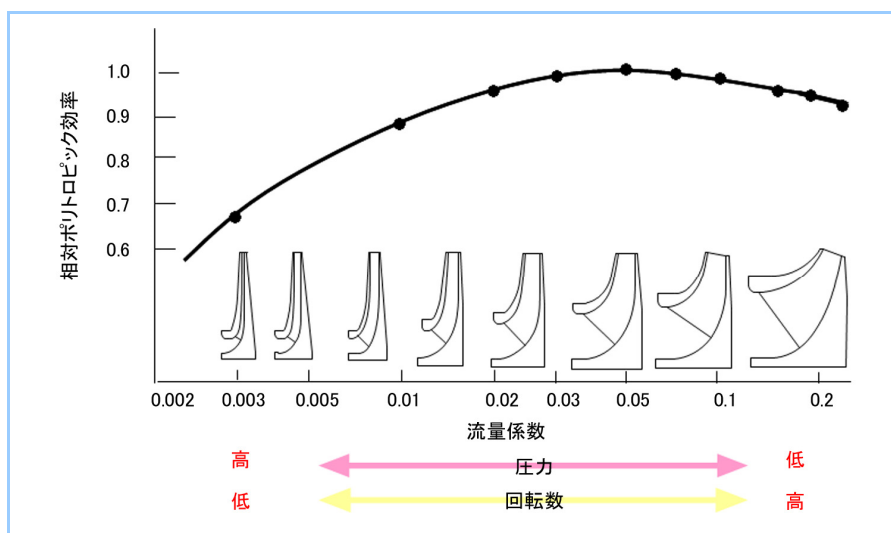


図8 流量係数とインペラ効率の相対比較

一般的にボス比増大はインペラ入口マッハ数の上昇により効率低下を招くが、作動点を大流量係数側へシフトすることが可能となり、かつ広流路幅インペラステージおよび段付ラビリンスを採用したことにより、従来機と比較して+10%以上の効率を有するインペラの開発に成功し、“ボス比増大は効率低下という常識”を覆した(図9)。

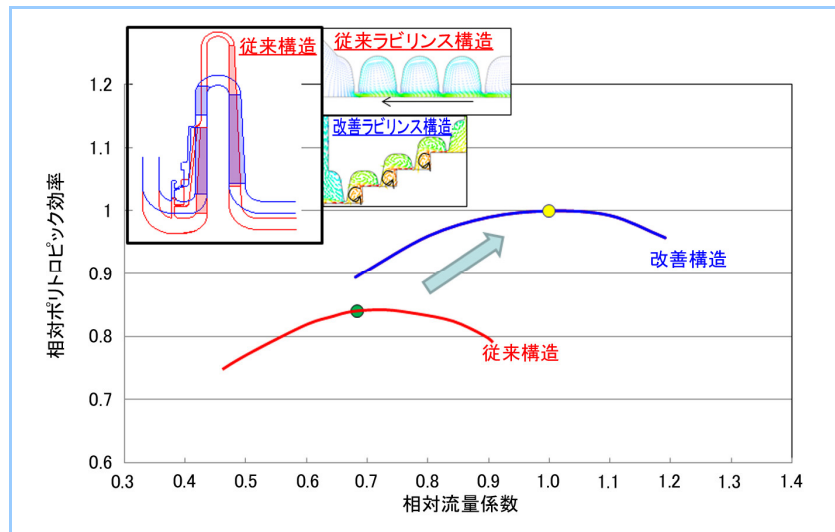


図9 従来構造と改善構造のポルトロピック効率比較

3.3 コンパクト設計

FPSO 設備のような洋上プラントにおいて、圧縮機の重量・設置エリアを小さくすることは一つの重要なポイントとなる。本件に関し、ディフューザ径比の小さいインペラステージの採用を検討したが、ディフューザ径比の減少は静圧回復の観点から圧縮機の効率低下および作動範囲の減少を伴う。この対策として開発機には、ベーン付きディフューザを採用し、低ディフューザ径比であっても十分に静圧回復が可能であり、高効率を確保できるインペラステージとした。図10に従来設計と開発機の圧縮機断面図を示すが、低ディフューザ径比のインペラステージを採用することで、圧縮機内径を30%以上低減させ、全体重量を従来機の半分(50%低減)とすることに成功した。

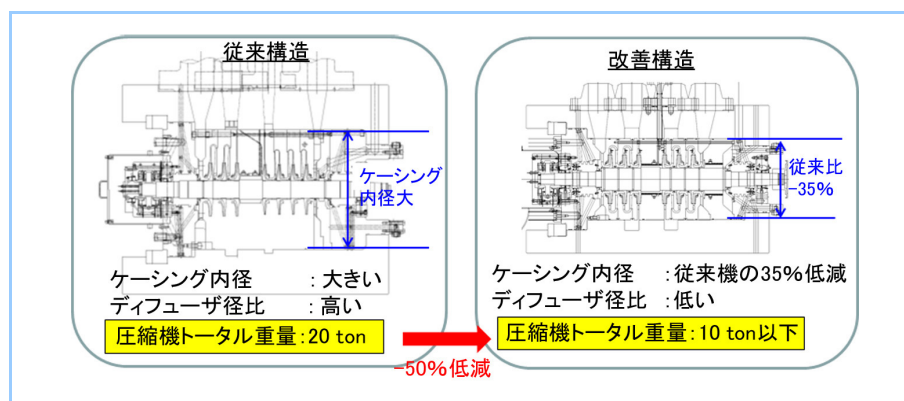


図10 従来機と開発機の重量比較

3.4 高運転範囲設計

高圧圧縮機の場合、作動範囲が制限される要因の一つとして旋回失速が挙げられる。3.2項にて示した通り、効率改善のために高流路幅インペラステージを採用しているが、インペラ出口角が低下し、旋回失速を助長してしまう。この対策として、ベーン付きディフューザを採用することにより、旋回失速発生点を小流量化し、運転範囲拡大を可能とした。図11に開発インペラステージ(高ボス比、低ディフューザ径比インペラステージ)の単段性能試験結果を示すが、ピーク効率70%以上、設計点からの安定運転範囲(Stability Range)35%以上を有するインペラステージの開発に成功した。

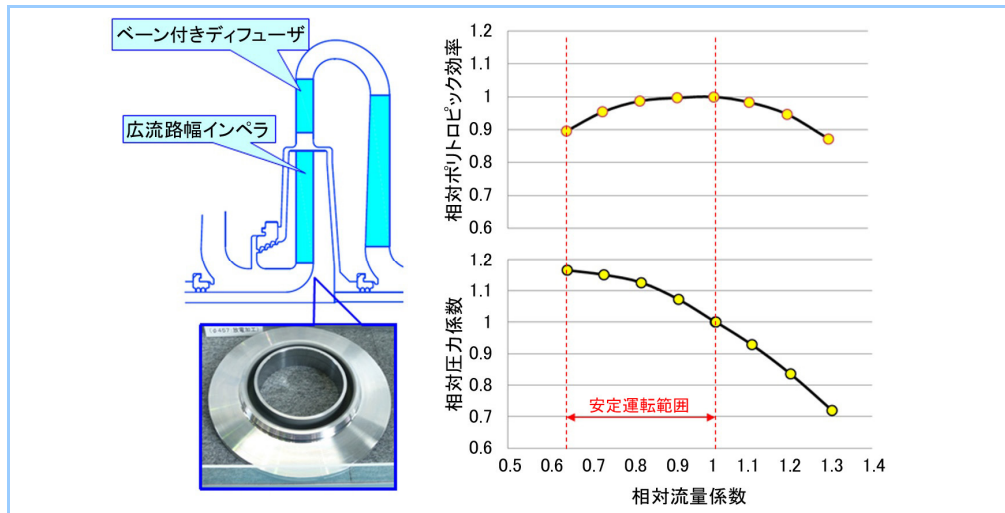


図 11 高ボス比・低ディフューザ径比インペラステージの単段性能試験結果

3.5 低スラスト力設計

超高圧圧縮機の場合、井戸元のガス物性および発生ガス量の変動に柔軟に対応することが要求される。高圧ゆえに、少しの運転状態の変化であってもスラスト力のアンバランスが発生し、運転継続を困難にすることもある。しかしながら、バランスピストン配置を従来の1つから2つに増加することで(図 12)、低圧・高圧セクション各々でのスラストバランスが可能となり、ガス物性および発生ガス量の変動によるスラスト力のアンバランスを最小化することができる(図 13)。超高圧圧縮機へはこの構造(ダブルバランスピストン構造)を搭載し、スラスト力変動に対しても高ロバスト性を有する圧縮機を開発した。

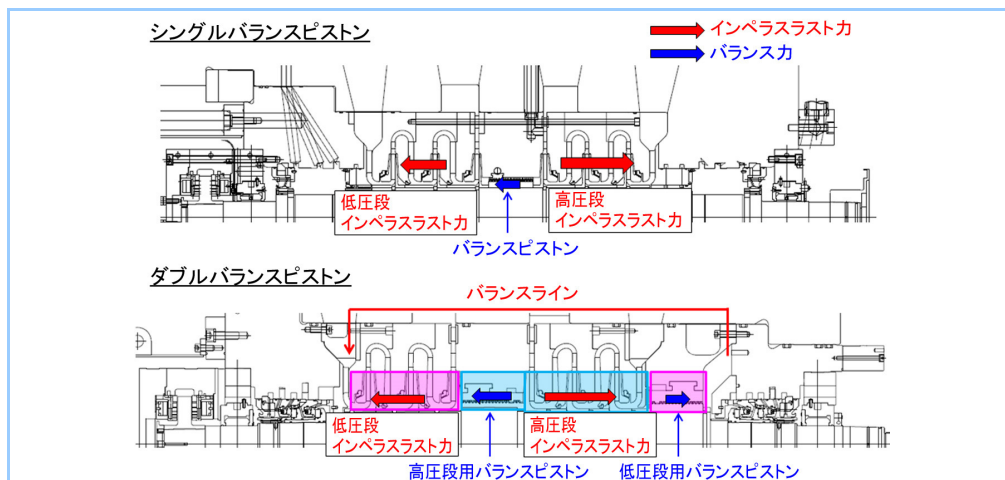


図 12 シングルバランスピストン構造とダブルバランスピストン構造の比較

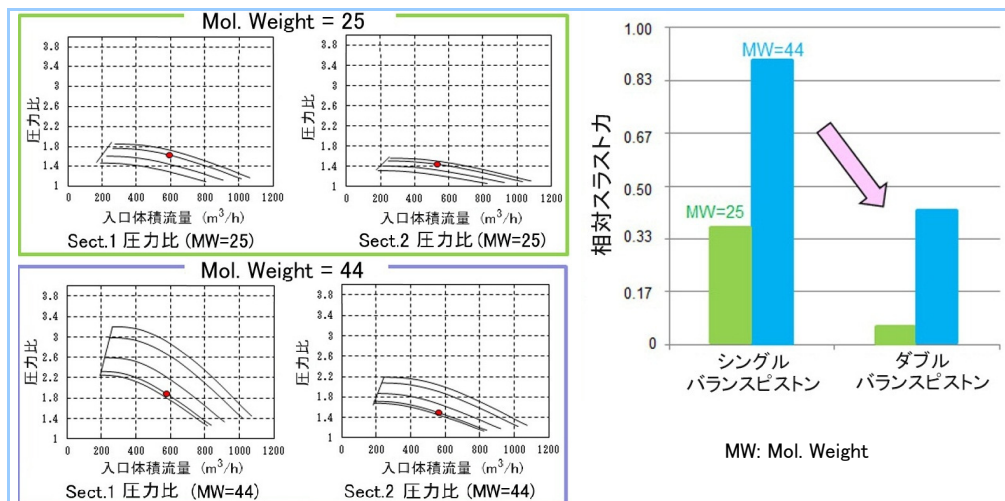


図 13 ガス物性および発生ガス量の変動(モルウェイトの変動)に対するスラスト力の比較

4. 700bar 実証試験

上述した技術を搭載した実機スケールの超高圧圧縮機を製作し、現地運転条件を模擬した実証試験を実施した(表2)。実証試験では現地ガス条件を再現するため、高圧都市ガスおよび高圧 CO₂ ガスを使用し、CO₂ 濃度・圧力・回転数・ガス量を変化させ、考え得るあらゆる現地運転条件を模擬し、圧縮機の健全性確認を行い、高いロバスト性を検証した。また、性能・軸振動の他、旋回失速の発生有無を判断するための変動圧力計測、スラスト力確認のためのロードセル計測、ロータ安定性を確認するためのケーシング油圧加振計測を行った。

表2 実証試験項目

	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5	Test-6	Test-7	Test-8
テスト項目	無負荷 M/T	Type.2 P/T (MW=28)	Type.1 P/T (MW=23)	FL/FS/FP (MW=23)	Type.1 P/T (MW=31)	FL/FS/FP (MW=31)	高密度 (MW=44)	総合検査
圧力 (barG)	真空	340	550	680	550	680	650	-
出力 (kW)	0	1500	7000	8800	8000	9800	9800	-
回転数 (rpm)	12500	7400	11900	12500	10910	11800	9600	-
ガス物性	真空	N ₂	都市ガス + CO ₂	City Gas 都市ガス + CO ₂	City Gas 都市ガス + CO ₂	City Gas 都市ガス + CO ₂	CO ₂	-

図14に現地運転条件を模擬した性能テスト(ASME PTC.10 Type.1)の結果を示す。内部リークを含む圧縮機全体効率は約 70%を達成し、設計点からの安定運転領域も 30%以上を確保できている事が証明された。

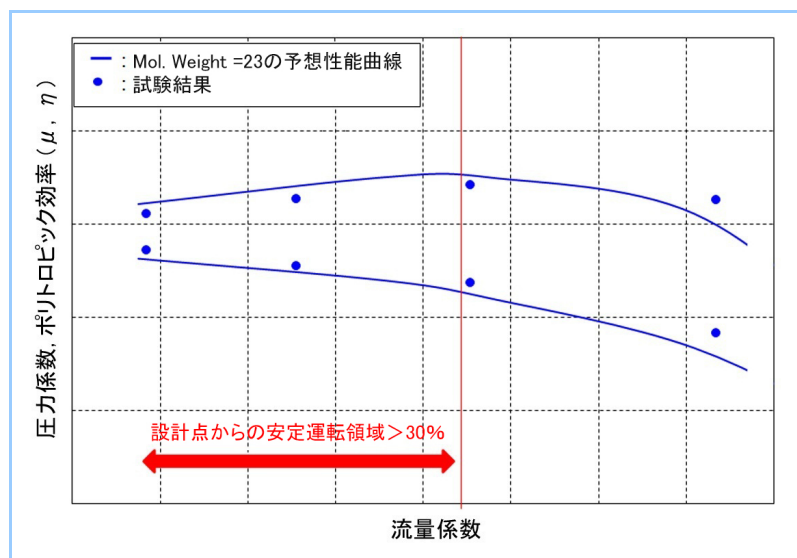


図14 ASME PTC-10 Type.1 テスト結果

また図15に Mol. Weight=23 のコンディションにおける、実負荷試験時の軸振動・軸受メタル温度のトレンドを示すが、いかなる運転状態であっても軸振動レベルは $5 \mu m_{p-p}$ 以下・メタル温度も 90℃以下(許容値 120℃)であり、非常に安定した運転が可能であることを証明した。

実証試験時には、図16に示すケーシング加振試験法を採用し、ロータの対数減衰計測を行い、安定性計算(Stability Analysis)にて算出した対数減衰率の妥当性確認を行った。

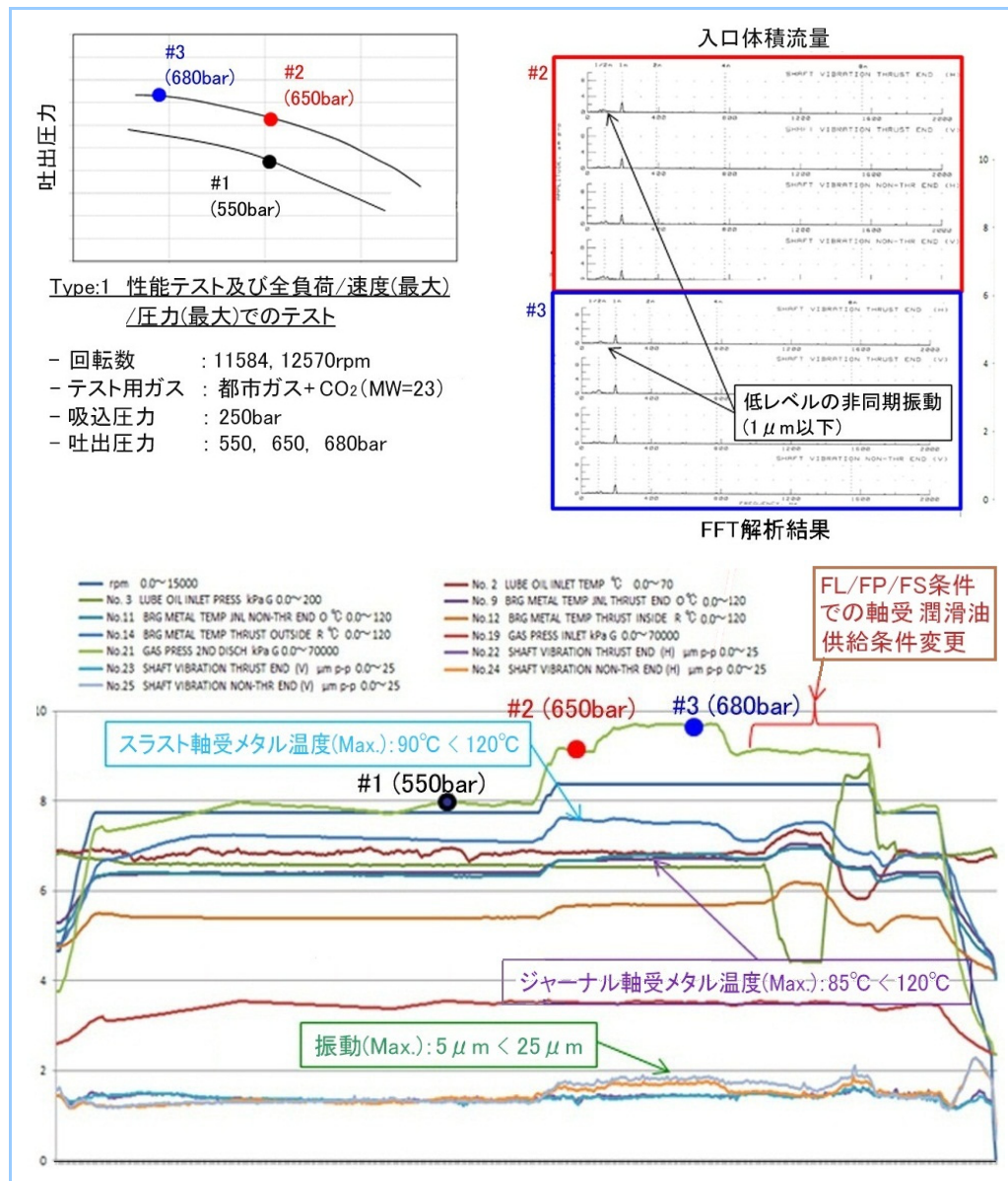


図 15 実負荷試験時メカニカルデータトレンド

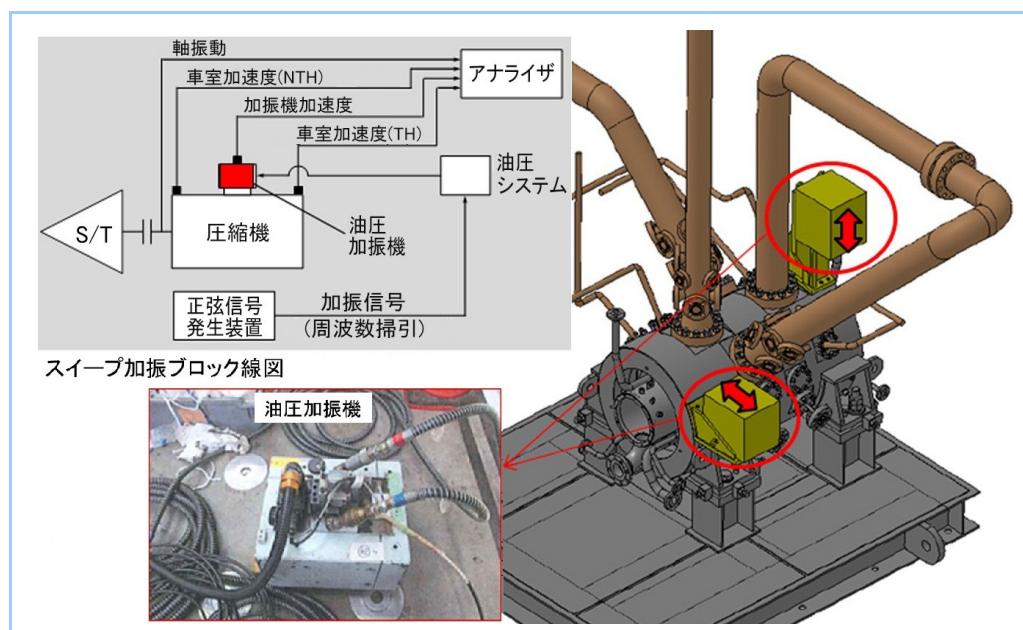


図 16 ケーシング加振試験法案

図 17 に無負荷試験および実負荷試験時の対数減衰率計測結果を示すが、無負荷試験時の対数減衰率は 0.4 であるのに対し、実負荷試験時の振動応答は非常に小さくなっており、対数減衰率も 2.5 へ上昇した。また、実測値は計算結果に近似しており、溝付ホールパターンシールの有効性および安定性計算手法の正当性も確認された。

図 18 に実負荷試験時のスラストロード計測結果を示すが、オーバーロードからサージ域までいかなる運転状態でもスラストロードは 10bar 以下であり、許容値を十分に下回ることを証明した。

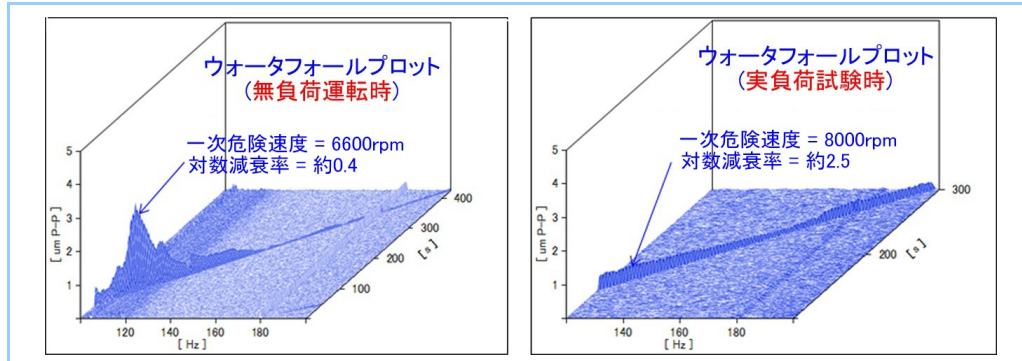


図 17 ケーシング加振試験による対数減衰率計測結果

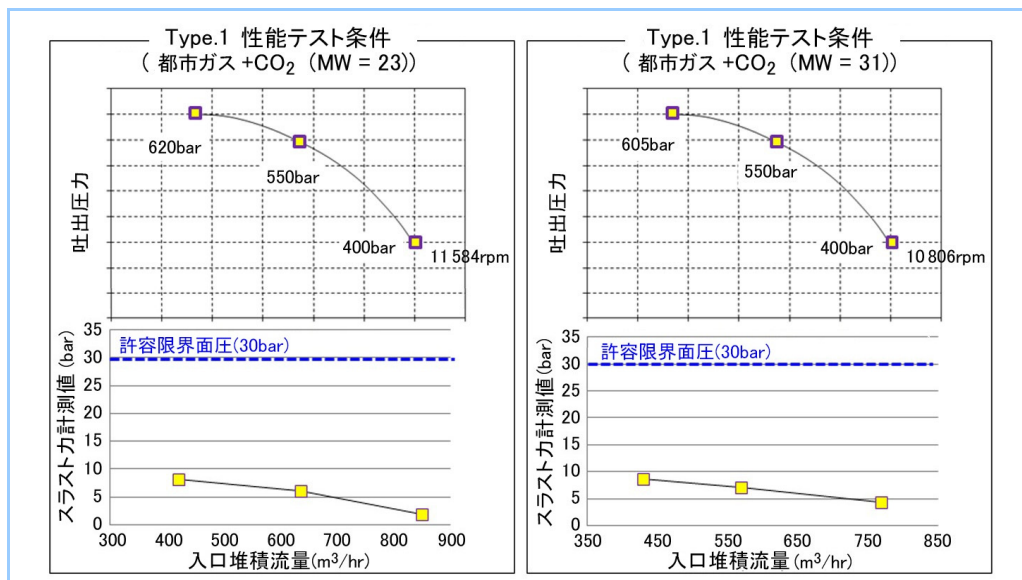


図 18 実負荷試験時のスラストロード計測結果

5. まとめ

MCO は、EOR、CCS 向け超高压圧縮機を開発・製作し、700bar までの実証試験を行い、メタンリッチガスコンディションから 100% CO₂ガスコンディションといういかなる運転状態においても、高安定・高ロバスト運転が可能な、以下の特徴を持つ圧縮機の開発に成功した。

- ① 高安定性設計 : 軸振動 $5 \mu \text{m p-p}$ 以下、対数減衰率 2.5 以上
- ② 高効率設計 : 約 70%
- ③ コンパクト設計 : 従来機から 50% 低減
- ④ 高運転範囲設計 : ターンダウンレンジ 30% 以上
- ⑤ 低スラスト力設計 : 10bar 以下

これら実証試験にお客様をお招きし、公開運転を実施し、あらゆる技術課題に対する懸念を払拭いただくことで、吐出圧 550bar のガスインジェクション圧縮機をブラジルの国営石油会社ペトロbras/三井海洋開発(MODEC)から受注することに成功した。今後も更なる効率改善・信頼性向上を図り、高いロバスト性を有する圧縮機をお客様へ提供していく。