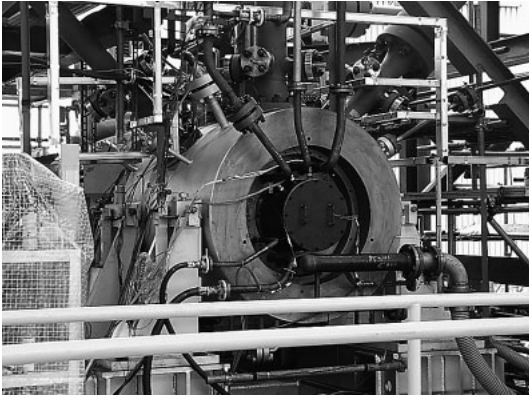


# 高圧450 bar天然ガスインジェクション圧縮機

## High Pressure 450 barG Natural Gas Injection Compressor



篠原 仁志\*1  
Hitoshi Shinohara

田崎 彰範\*1  
Akinori Tasaki

堀場 潤一\*2  
Junichi Horiba

枅谷 穰\*3  
Jyou Masutani

石油・ガスの需要拡大に伴い、EOR (Enhanced Oil Recovery) の必要性が高まり、天然ガスインジェクション圧縮機の需要が伸びつつある。従来からの特徴である高効率に加え、高圧・高密度ガスを取り扱うための信頼性を重視し、インジェクション圧縮機を開発した。天然ガスを用いて吐出圧力450 barの実負荷工場試験を実施し、現地と同等の運転条件下にて、その高い信頼性を実証した。

### 1. はじめに

天然ガスインジェクション圧縮機は、石油・天然ガスの井戸元近くでガスを地中深く再注入する目的で使用される。超高圧力・高密度のガスを取り扱うことから、特有の設計上及び運転上の困難さを含んでおり、現地運転においても軸系の不安定振動を始め多くの問題が報告されている。

当社では、主として石油化学分野向けに、多種の高圧力圧縮機を納入しており、これまでに培った技術をいかして天然ガスインジェクション圧縮機を開発した。圧縮機の設計に際しては、要求される使用条件下における高い信頼性を最重視した。

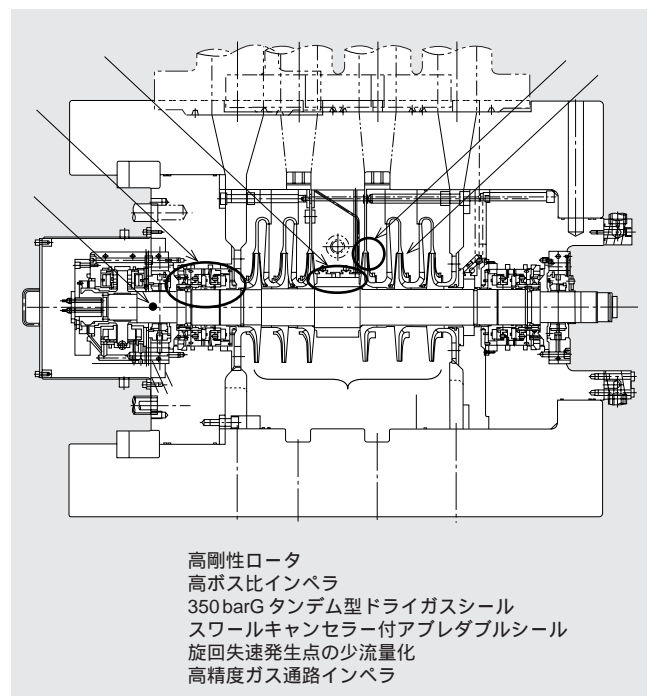
### 2. 圧縮機仕様

天然ガスインジェクション用として700 barまでの吐出圧力を有する圧縮機が使用される場合があるが、吐出圧力450 bar以下の圧縮機適用頻度が高く、これを設計仕様とした。開発した圧縮機の仕様を表1に、断面を図1に示す。

インペラは低圧・高圧の2セクションに分割され背

面配列される。これにより内部循環流による損失を低減し効率を向上させるとともに、運転条件の変化に伴う軸スラスト力の変動を低減することができる。インペラを直列に配列した場合、オフデザイン点にて運転する際、あるいは長期運転等によりラビリンスに摩擦を生じた場合に、スラスト力が大きく変化し連続運転に支障を来すことがあるが、背面配列によりこのスラスト力を対向させ軸に作用するトータルスラスト力の変動を低減するものである。

また、インペラ外径に対し軸径・軸受径を大きくす



高剛性ロータ  
高ボス比インペラ  
350 barG タンデム型ドライガスシール  
スワールキャンセラー付アブレダブルシール  
旋回失速発生点の少流量化  
高精度ガス通路インペラ

図1 インジェクション圧縮機断面

表1 インジェクション圧縮機仕様

圧縮機型式	3V-6B
取扱いガス	天然ガス
吸込圧力	205 bar
吐出圧力	450 bar
設計点回転数	11000 rpm
所要動力	8900 kW

\*1 広島製作所ターボ機械技術部コンプレッサ設計課

\*2 広島製作所ターボ機械技術部

\*3 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室主席

る一方で、軸受スパンを最小とした。この高剛性ロータにより、高密度ガスの不安定化力に対する信頼性の向上を実現した。

### 3. 空力性能

#### 3.1 設計・製作

インペラの空力設計及び製作の概要は以下のとおりである。

- (1) すべての圧縮機に高効率三次元インペラを適用する。
- (2) すべての基準インペラをCFD解析に基づき設計する。
- (3) すべての基準インペラにつき性能試験を実施し、得られた結果をデータベース化する。
- (4) すべてのインペラは基準インペラのデータに基づき、相似設計される。空力設計に不可欠なガス物性値についても、検証済のデータが用いられる。
- (5) すべてのインペラは高精度5軸制御機械により加工される。

#### 3.2 性能試験結果

インジェクション圧縮機性能設計の妥当性を確認するため、ASME PTC-10規定に基づく低圧条件下の工場性能試験を実施した。試験により得られた流量係数とポリトロップ効率・圧力係数との関係を図2に示す。計測値は予測値に良く一致しており、高精度の性能予測技術を実証するとともに、流体力学的相似則に基づく試験方法及び評価方法が、高圧力圧縮機に対しても妥当であることが確認された。

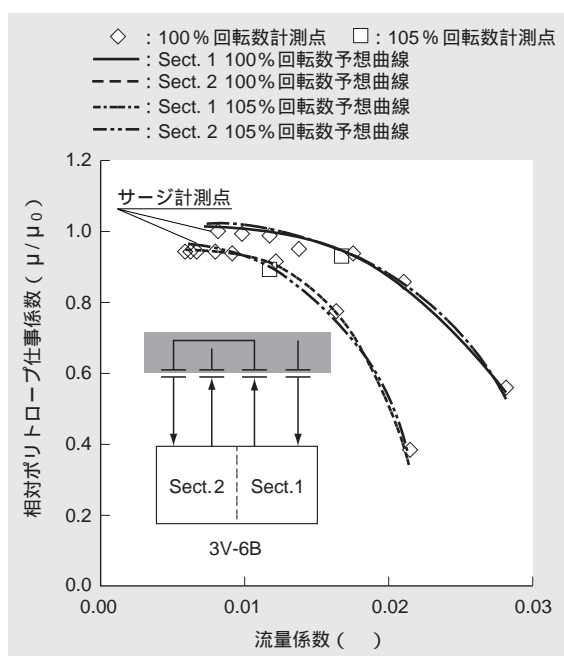


図2 低圧性能試験結果 実線・破線で示す計算値と 印等で示す計測値とは良く一致している。

実運転条件における性能確認のため、ASME PTC-10 Type I 規定に基づき、天然ガスを用い、吐出圧力450 barにて、実負荷性能試験を実施した。本試験条件は現地における実運転条件と同等である。試験により得られた流量係数とポリトロップ効率・圧力係数との関係を図3に示す。実負荷試験結果は低圧試験結果と良く一致しており、高圧力下の性能予測精度を確認できた。

#### 3.3 旋回失速

通常の運転状態よりガス流量が減少すると、サージ領域に至らずとも、インペラ及びディフューザ部にて旋回失速を生じることが知られている。これはすべての圧縮機に生じる現象であるが、多くの場合、圧縮機の外部より感知されることは無く、運転にも何ら問題を生じない。しかし、インジェクション圧縮機では高密度のガスを取扱うため、旋回失速により生じるガス力から不安定な軸振動を発生し、連続運転に支障を来す場合がある。

インジェクション圧縮機では、低圧力の圧縮機に比し幅を小さくしたディフューザを適用した。これにより旋回失速の発生点を低流量化することが可能であ

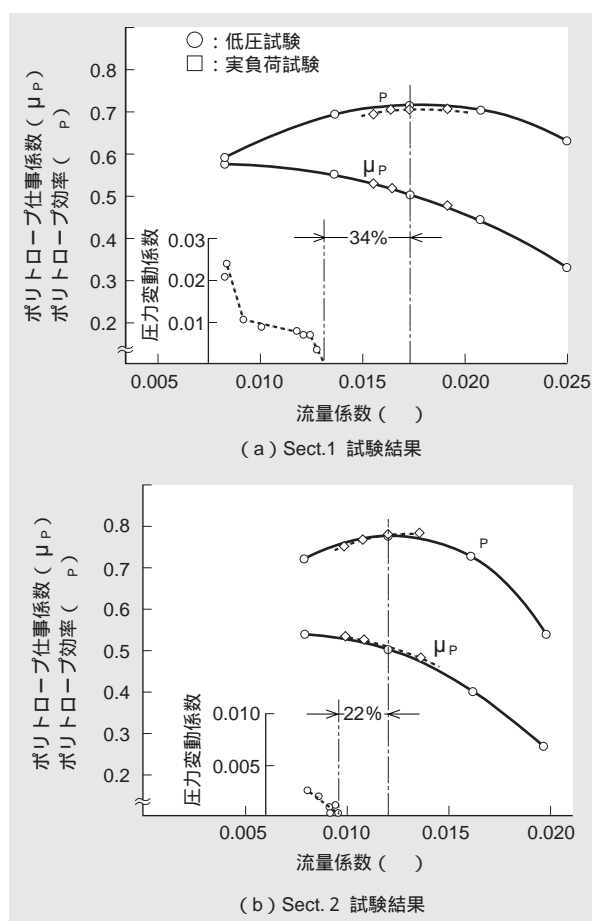


図3 低圧試験結果と実負荷性能試験結果との比較 印で示す低圧試験結果と 印で示す実負荷性能試験結果とは良く一致している。

る．実負荷性能試験時，巡回失速により生じる圧力変動をディフューザ面に設置したセンサにて計測した．結果を図3に合わせて示す．巡回失速は設計点より第1セクションでは34%，及び第2セクションでは22%低流量点で発生しており，安定な運転域を十分に確保できていることが確認された．

## 4. 軸系安定性

### 4.1 危険速度

圧縮機危険速度の計算値は図4に示すように，運転速度から十分に離れており，応答倍率も小さいものであった．工場試験により得られた結果は，計算値と良く一致しており，計算に使用したモデルの妥当性を確認することができた．これを図4に合わせて示す．

### 4.2 ロータの安定性

ロータに作用する励振力が，減衰力に比し大きくな

ると不安定な自励振動を発生する．高圧力ガスを取り扱う圧縮機では，励振力は主としてラビリンスシール部のガススワールにより発生し，ラビリンス隙間を小さくするほど励振力は大きくなる．一方，減衰力は主として軸受部にて生成される．

インジェクション圧縮機では空力性能向上のため主となるラビリンス部にアブレダブルシールを適用するが，励振力を最小とする目的で，ガススワールを防止する当社独自のスワールキャンセラを併せて設置した．また，減衰力を増加させるため，当社独自のオーバハングダンパを適用した．これは回転軸端部に油膜から成る軸振動減衰機能を付加したものである．

工場試験運転時に計測した軸振動周波数分析結果を図5に示す．実負荷運転時にも無負荷運転時と同様に，不安定な振動原因となる非同期成分の振動は発生しないことを確認できた．これに加えて，図6に示す圧縮

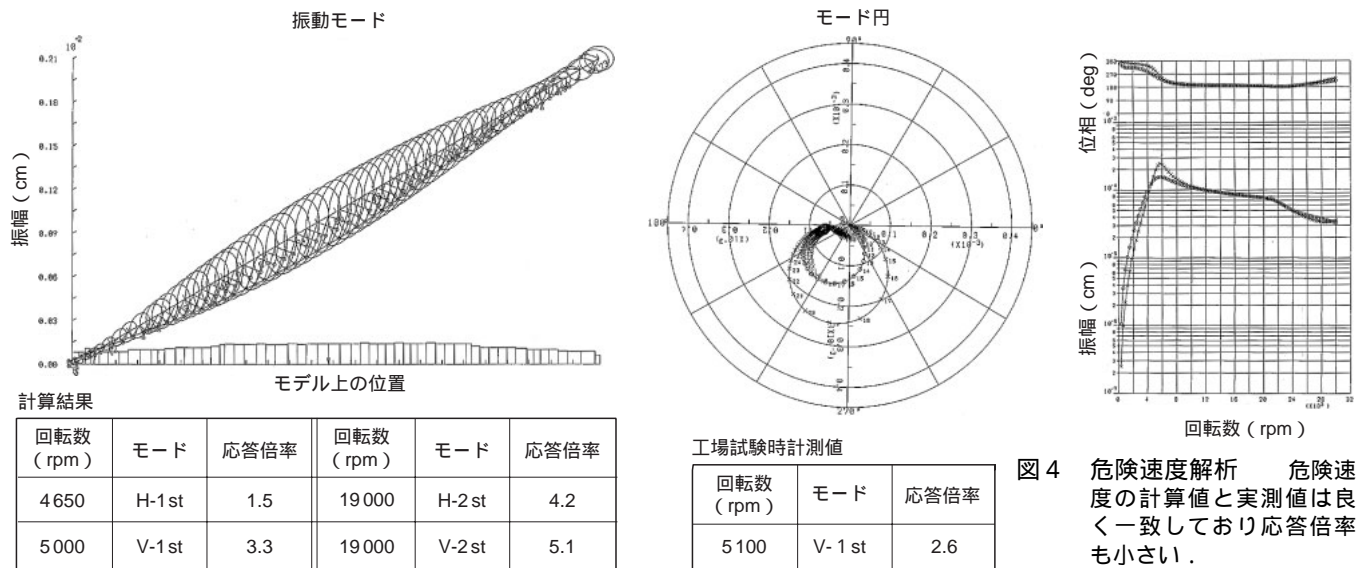


図4 危険速度解析 危険速度の計算値と実測値は良く一致しており応答倍率も小さい．

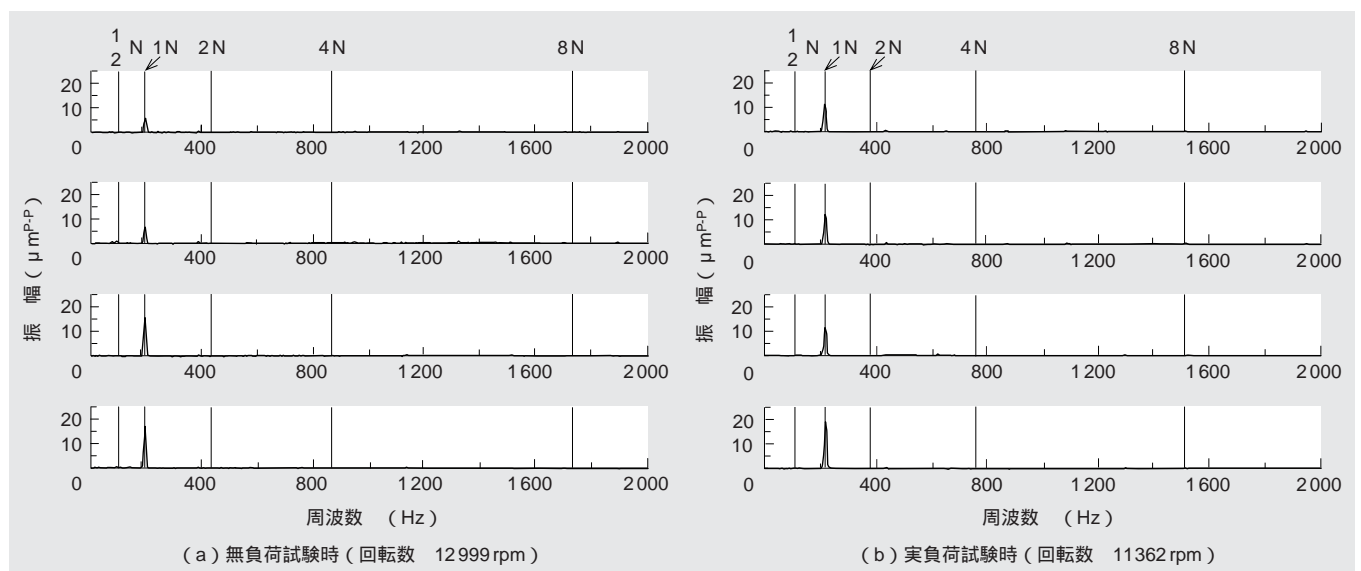


図5 軸振動周波数解析 低圧試験時・実負荷試験時とも運転速度の非同期成分は十分に小さい．

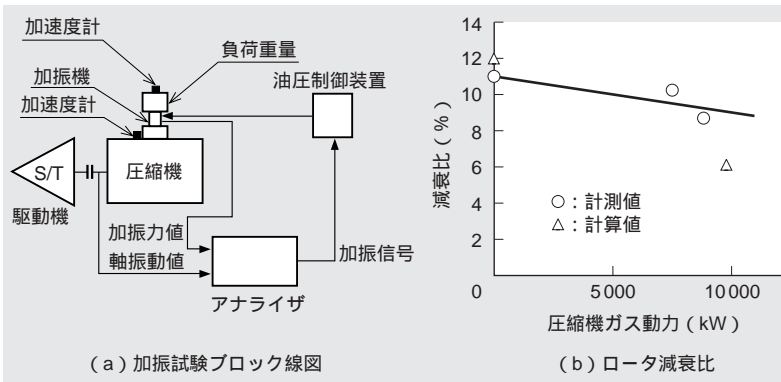


図6 圧縮機加振試験結果 実負荷試験時に加振試験を実施した結果、減衰比は8.7%であり十分安定である。

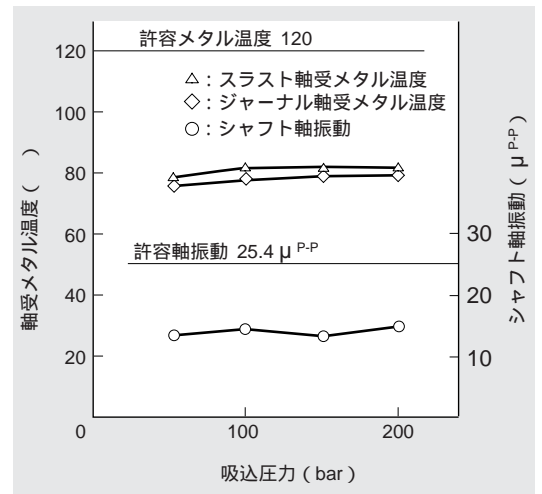


図7 軸受メタル温度・軸振動振幅 メタル温度・軸振動振幅ともに、安定している。

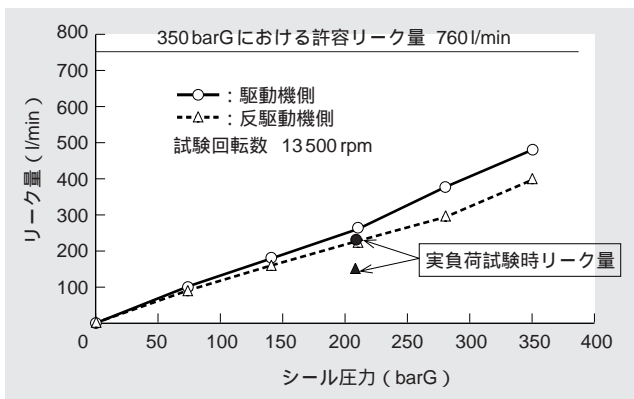


図8 ドライガスシール漏れ量計測結果

機加振試験を実施し、ロータが十分な減衰力を有し、安定性が確保されていることを確認した。

## 5. その他の設計仕様

### 5.1 インペラ

インペラは遠心力による変形が最適となる形状とし、ディスクとカバーとは溶接あるいは拡散溶接により接合し、軸に焼嵌めする構造とした。

高密度ガス環境下における固有振動数の低下を考慮した上で、これを回避する設計とし、信頼性を確保している。

### 5.2 軸受

インペラの背面配列により軸スラスト力を低減するとともに、スラスト軸受・ジャーナル軸受に直接潤滑型を適用し、負荷能力を向上させている。スラストカラーは軸に油圧嵌めし、信頼性を向上させるとともに容易なメンテナンスを可能としている。

図7に実負荷試験時に計測した軸受メタル温度を軸振動値と合わせて示す。いずれの値も許容値に対して十分に小さいものであった。また運転圧力の変化の対する変動も小さく、高圧力運転においても安定である

ことが確認された。

## 5.3 シール

軸シールには、設計圧力を350 barとしたタンデム型ドライガスシールを適用した。フィルタを介した圧縮機吐出ガスをシールガスとして供給する。

図8は実負荷試験時のシールの漏れ量をシール単独試験結果に合わせたものであり、実負荷運転時におけるシールの健全性を示している。

## 6. まとめ

天然ガスインジェクション圧縮機を、その特有の運転条件下における信頼性を重視して開発した。

試験ガスに天然ガスを用い、吐出圧力450 barにて、現地における運転と同条件となる実負荷工場試験を実施した。試験結果より、空力性能及び軸振動を始めとする機械的特性の両面において、設計・製作の妥当性を検証するとともに、圧縮機の高い信頼性を実証した。



篠原仁志



田崎彰範



堀場潤一



栢谷穰