

(解説)

# 大型増速機内蔵型遠心圧縮機

## Large Integrally Geared Centrifugal Compressor



佐伯圭一\*1  
Keiichi SAEKI



山代泰久\*1  
Yasuhisa YAMASHIRO



柴田俊久\*2  
Toshihisa SHIBATA



佐野 篤\*2  
Atsushi SANÔ

We have developed a centrifugal compressor with a large capacity, incorporating a gear unit. While the compressor has been downsized, the cost has been reduced by changing the procurement method of the gear unit, etc. A full load test of a prototype machine has been carried out in our in-house facility to confirm its performance and mechanical stability. The results of this development have doubled the application range of an integrally geared centrifugal compressor, enabling responses to the demands from the expanding market.

まえがき = 増速機内蔵型遠心圧縮機は、その省エネルギー性、省スペース性が認められて適用する範囲が広がってきており、近年ではプラントの大型化に伴ってより大容量化への要求が高まってきている。

当社はこれまで、処理流量160,000 Nm<sup>3</sup>/h程度までの増速機内蔵型遠心圧縮機を納入してきた。こうした実績を踏まえて、このたび適用範囲の大幅な拡大を狙い、マーケットニーズに対応した処理流量400,000 Nm<sup>3</sup>/h程度までの流量範囲に適合する増速機内蔵型遠心圧縮機を開発した。図1に当社製品の標準レンジチャートを示す。

実際に大型圧縮機を試作し、実負荷状態での運転実証試験を実施したので本稿でその概要を報告する。

### 1. 試作圧縮機の構成

増速機内蔵型遠心圧縮機は、歯車式増速装置のピニオン軸の一端あるいは両端をオーバハングさせてインペラを取り付けたものである。大容量化に伴ってインペラをはじめ圧縮機全体が大型化することから、専有面積の増大などの大きな影響を及ぼしている。

本試作機においては、処理量増加に伴う圧縮機のサイズアップを最小限に抑えるため、新たに開発した新型高比速度型インペラの採用をはじめとした圧縮機のダウンサイジングを実現した。さらに、主要部品である大型増速装置の調達方法変更を含めたコストダウン案を採用した。

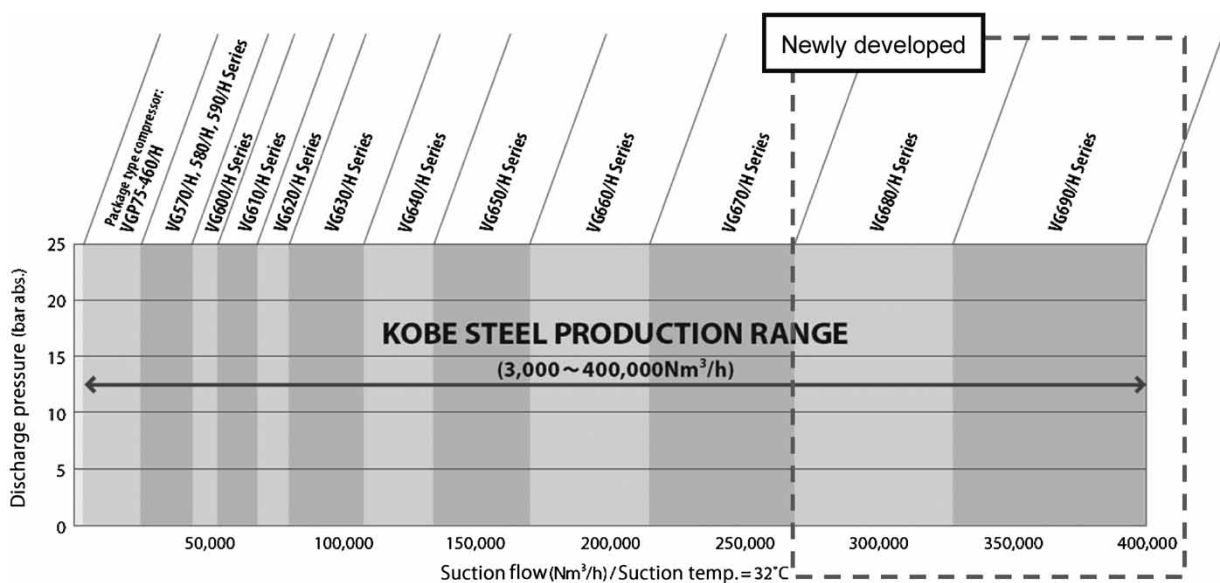


図1 標準レンジチャート  
Fig. 1 Standard range chart

\*1 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機技術部 \*2 神鋼テクノ(株)

はじめに、処理流量約300,000 Nm<sup>3</sup>/h仕様の3段型圧縮機（型式：VG683）の試作機にて運転試験を実施し、圧縮機の機械安定性と動力性能とを確認した。その後、さらなる大型化に向けた設計指針を確立するために試作機を改造し、処理流量約400,000 Nm<sup>3</sup>/hを想定した圧縮機における最大径のインペラ1段で構成する単段機（型式：VG691）にて運転試験を実施した。試作圧縮機（VG683）の外観、カットモデル、および仕様をそれぞれ図2、図3、および表1に示す。

### 1.1 インペラ・ケーシング

圧縮機のダウンサイジングのため、新たに開発した高比速度型のインペラを採用した。これによって、従来の設計指針によるものと比較してインペラの直径を20~25%縮小することができた。従来型インペラと新型インペラの子午面形状の比較を図4に示す。また、渦巻ケーシングについても、流路断面分布を大容量機に適した形状とすることによって、当社従来設計品と比較して10%程

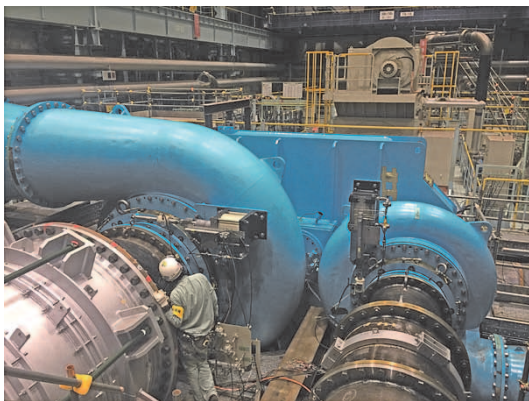


図2 試作圧縮機（VG683）外観  
Fig. 2 Appearance of newly developed compressor (VG683)

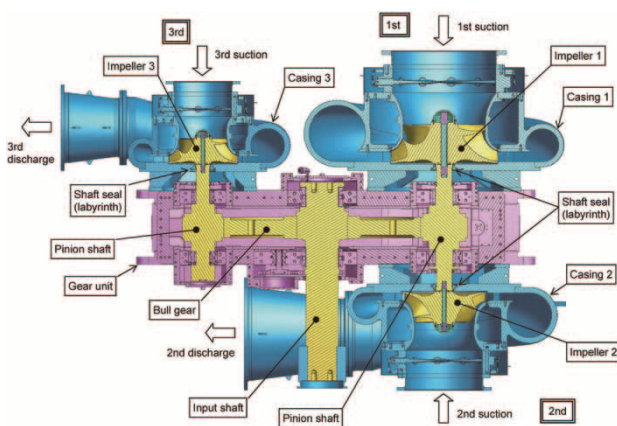


図3 試作圧縮機（VG683）のカットモデル  
Fig. 3 Cut model of newly developed compressor (VG683)

表1 試作圧縮機の仕様

Table 1 Specifications of newly developed compressors

Type	VG683	VG691 <sup>*1</sup>
Application	Main air compressor	← (same as VG683)
Gas	Wet air	← (same as VG683)
Number of stage	3	1 <sup>*1</sup>
Standard flow	300,000 Nm <sup>3</sup> /h	400,000 Nm <sup>3</sup> /h
Suction pressure	-1.5 kPaG	-1.5 kPaG
Discharge pressure	0.49 MPaG	0.12 MPaG <sup>*1</sup>
Rotating speed (pinion shaft)	1st piston: 4,992 rpm 2nd piston: 5,673 rpm	Pinion: 4,357 rpm
BHP	23,000 kW	approx. 14,500 kW
Shaft seal	Labrinth seal (step seal)	← (same as VG683)

<sup>\*1</sup> Single stage compressor as prototype for VG690 series (modified from VG683)

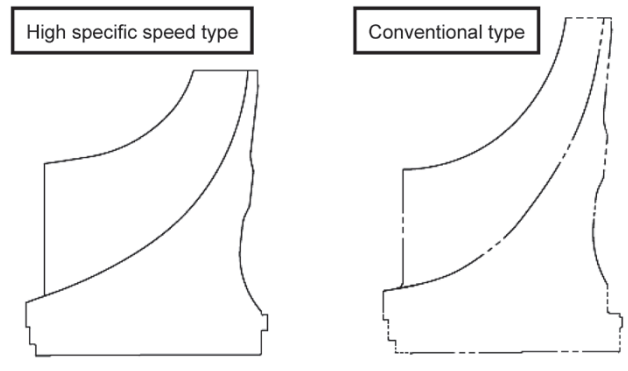


図4 インペラの子午面形状の比較  
Fig. 4 Comparison of meridian section shapes of impellers

度重量を削減することができた。

こうした取り組みによって圧縮機本体のサイズアップや重量増加を抑制できたと同時に、組立作業性も改善することができた。

### 1.2 増速装置

圧縮機の主要部品である増速装置に対して、本開発の狙いとする仕様範囲においてはφ2,500~3,100mm程度の大径歯車が求められる。このような大型かつ高速仕様の増速装置では、要求される品質が高くなるため製作できるメーカーが限られる。

そこで、中小型増速装置に対して進めてきた設計は社内、加工は外注というこれまでの枠組みを拡大し、新たに大径歯車の加工が可能な設備を有する業者を選定した。さらに、同設備の加工条件を最適化するための検討を重ねて大径歯車の試作と実証試験を実施した。

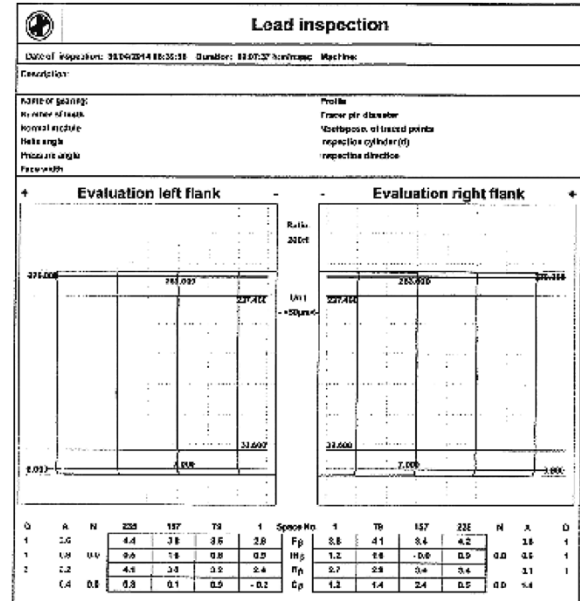
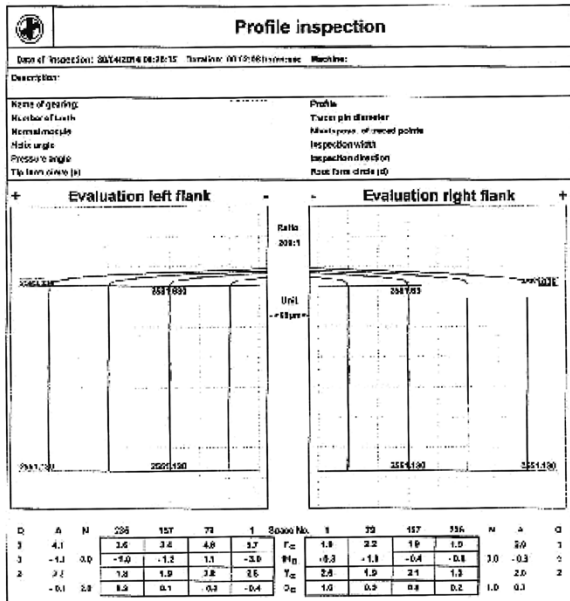
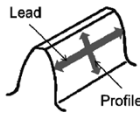
遠心圧縮機の設計・製作を対象とする規格において、世界的に広く認知・適用されている米国石油協会（American Petroleum Institute、以下APIという）規格<sup>1), 2)</sup>がある。歯面加工精度は図5に示すように、API規格で指示されている歯車要求精度、ISO 1328 Grade 4<sup>3)</sup>を満たす。また、図6に示すように、大歯車と小歯車の歯面静当たりの確認結果も、API要求基準を満足することが確認できた。

### 1.3 その他付属品

軸封装置は、シンプルで漏れ損失を抑制できるステップ型のラビリンスシールを採用した。

圧縮機の回転軸は、インペラで発生するガススラスト荷重や歯車の噛み合いによって生じるスラスト荷重を受ける。大型圧縮機に対してライダリング方式を採用した場合に増速機大歯車の傾きによるピニオン軸の軸移動量超過が問題となる。これを回避するため、各ピニオン軸に個別にスラスト軸受を設置する方式を採用して機械の信頼性を高めた。また、タービン駆動を想定した低速運転での信頼性確保や起動時の抵抗トルク低減のため、低速軸のジャーナル軸受に静圧軸受を採用してその効果を検証した。

圧縮機周辺装置の中でもコスト的に大きな比率を占める中間冷却器を対象に、コストダウンを主目的として新たな海外ベンダを採用し、その品質と能力を確認した。



Satisfied: ISO1328 Grade 4

図5 歯研精度  
Fig.5 Gear accuracy

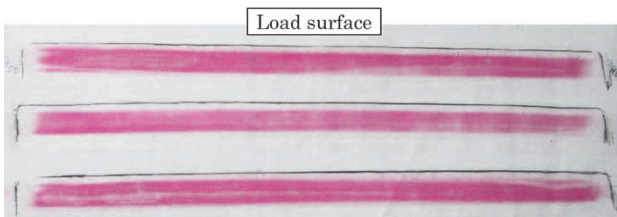


図6 静歯当り記録  
Fig.6 Assembly tooth contact check

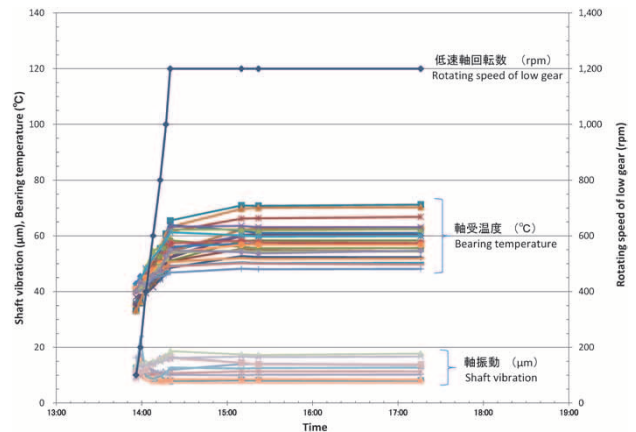


図7 増速装置単体運転結果  
Fig.7 Running test report of simple substance of speed increasing gear

## 2. 運転試験

### 2.1 増速装置単体運転結果

歯車の周速は、当社のこれまでの基準値を上回る設計仕様を採用した。まず増速装置単体試験を実施し、振動特性および軸受温度特性ともに問題なく良好な結果であることを確認した。増速装置単体運転時の測定結果を図7に示す。また、トルクメータを用いて機械的損失の計測を実施し、当社の大型高周速歯車の損失計算法を検証した。

### 2.2 圧縮機実負荷試験

増速装置単体運転に引き続き、当社の試運転設備において圧縮機の実負荷試験を実施し、その機械的安定性を確認するとともに動力性能を評価した。

#### 2.2.1 機械的安定性

圧縮機の実負荷試験における軸受温度および軸振動の測定結果を表2に示す。軸受温度は全ての軸受において80℃前後以下に収まっており、当社基準値に対して十分な余裕を有するが確認できた。また軸振動値も、圧縮機全負荷状態において20μm (p-p) 前後以下に収まっており、API規格の要求事項を満足する良好な結果を得るこ

表2 メカラン記録  
Table 2 Records of running test

RECORDS OF SHOP RUNNING TEST					
Mechanical Running Test of Centrifugal Compressor					
Model: VIG683					
Item	Time Unit	11:50	12:15	12:52	13:40 14:30
BEARING TEMPERATURE					
High speed, 1st stage	°C	69.7	70.3	71.8	72.3 72.0
High speed, 2nd stage	°C	79.1	80.2	80.9	81.1 79.5
Thrust1-2, sideA	°C	51.8	52.0	52.5	52.8 52.7
Thrust1-2, sideB	°C	65.6	64.2	63.7	63.7 62.7
High speed, 3rd stage	°C	79.4	79.8	80.7	81.3 81.2
High speed, Anti-3rd stage	°C	66.2	65.6	67.0	67.2 66.7
Thrust3, sideA	°C	77.5	71.6	78.5	79.6 80.3
Thrust3, sideB	°C	58.1	58.3	58.6	58.4 58.4
SHAFT VIBRATION					
H_pinion, 1st stage	μ	21.74	21.23	20.05	20.09 19.64
V. " " "	μ	20.82	21.76	19.87	19.23 19.11
H_pinion, 2nd stage	μ	17.24	16.71	16.50	16.29 16.21
V. " " "	μ	19.24	18.82	18.95	18.47 18.12
H_pinion, 3rd stage	μ	16.26	16.26	16.43	16.36 15.70
V. " " "	μ	14.38	14.28	14.52	14.08 13.87
H_pinion, Anti-3rd stage	μ	14.67	14.67	15.11	15.62 15.39
V. " " "	μ	10.91	10.50	10.95	11.07 11.13



とができた。

以上の結果より、試作した圧縮機は十分な機械的安定性を有していることが確認できた。また、運転後の分解点検により、インペラ、軸封装置、各軸受、および増速装置の歯面動当たりなどの確認を行い、全て良好であることが確認された。

### 2.2.2 動力性能

API規格では、圧縮機の性能評価方法としてASME PTC-10 (Performance Test Code on Compressors and Exhausters)<sup>4)</sup>を引用しており、圧縮機の動力性能はこの試験規格に基づいて確認した。

動力性能を測定した結果、ポリトロブ効率当社従来型のインペラと比較して1.5~2.0ポイント改善できることが確認できた。新型高比速度インペラの大径での実力性能が確認できたことに加えて、目標としていた効率を達成することができた。

### 2.2.3 付帯設備

中間冷却器に対して、今回の試作を通して品質面における十分な確証を得ることができた。また、能力面においても、冷却水温度上昇の上限値を引き上げることができ、冷却水使用量を削減できることが確認できた。今後は、冷却器内部のフィン形状の最適化による効率上昇、さらなるコスト低減を図る予定である。

むすび = 300,000~400,000 Nm<sup>3</sup>/h 程度までの用途に対応できる増速機内蔵型遠心圧縮機を開発することにより、その製作能力や圧縮機性能を実証することができた。また、省スペース性および省エネルギー性に優れた増速機内蔵型遠心圧縮機の適用範囲を大幅に拡大することができた。

実負荷試験においては、空気分離装置メーカーやエンジニアリング会社、エンドユーザなどの顧客への立会試験を通して当社の大型機の製作能力を確認していただくことができた。また、試作した圧縮機はその後顧客に納入され、現在も順調に稼働している。

今後は、新たに導入した40MWの試運転設備を活用し、さらなる増速機内蔵型遠心圧縮機の適用範囲拡大を図ると同時に、二酸化炭素貯留用途への対応など、より高圧分野も視野に入れた要素技術と商品機の開発を進めていく考えである。

### 参考文献

- 1) API STANDARD 617 EIGHTH EDITION, SEPTEMBER 2014.
- 2) API STANDARD 672 FOURTH EDITION, MARCH 2004.
- 3) ISO 1328-1 CYLINDRICAL GEARS - ISO SYSTEM OF ACCURACY.
- 4) ASME PTC 10-1997 (Performance Test Codes).