

(株)荏原エリオットにおける蒸気タービンの最近の技術動向

戸田 暁 人*

Trends in the Technology of Steam Turbines for the Ethylene Market - Meeting High Capacity Requirements -

by Akihito TODA

Ethylene plants are recently becoming large sized and their mainstay output 1 million tons annually. Elliott Ebara's capability to manufacture both compressors and steam turbines is meeting high capacity needs for the ethylene market. The following introduces and discusses trends in our next-generation compressors and steam turbines currently being developed.

Keywords: Ethylene, High capacity, High temperature, High pressure, Double shell, Casing, Diaphragm, Rotating bucket, Governor valve, Mechanical drive

1. 荏原エリオット蒸気タービンの概要

(株)荏原エリオット（以後当社）の多段蒸気タービンは、1972年の第1号機出荷以来当社がガス圧縮機の駆動用を主な用途として発展してきた。

当社のガス圧縮機、蒸気タービンの多くは、石油化学プラントや石油精製プラントの中核機器として使用されており、世界中の各ユーザにこれまでに合計1100台以上を納入した。



10-05 01/226

写真1 分解ガス圧縮機トレーン

Photo 1 Cracked gas compressor train

これらのガス圧縮機・蒸気タービンは、各プラントの個別仕様に従い最適設計されるため、個々のガス圧縮機、蒸気タービンは一品一様の仕様を有する。

また、機械駆動用蒸気タービンは運転速度範囲を有するため、一定速度で運転される発電用蒸気タービンとは異なる設計の考慮が必要となる。このため、世界でも機械駆動用蒸気タービンの製造メーカーは限られている。

本稿では、石油化学分野の中でも特に当社の主力分野であるエチレンプラント向けのガス圧縮機駆動用蒸気タービンについて、最近の技術動向を紹介する。

2. エチレンプラント向け蒸気タービンの最近の技術動向

エチレンプラントは石油化学の米とも呼ばれるエチレンを製造するプラントである。ここでは主に次の3種類のガス圧縮機トレーンが用いられる。

- (1) 分解ガス圧縮機トレーン
- (2) プロピレン冷凍ガス圧縮機トレーン
- (3) エチレン冷凍ガス圧縮機トレーン

写真1は当社工場試験中の分解ガス圧縮機トレーンである。

入口蒸気条件：ゲージ圧力11.96 MPa, 520℃

抽気蒸気条件：ゲージ圧力1.76 MPa

排気蒸気条件：ゲージ圧力-0.09 MPa

近年は世界中の石油化学製品の需要の急速な増大と、

* (株)荏原エリオット

大型化による原単位低下で競争力を強化するために、世界各地で大型のエチレンプラントが新設されている。近年は年産100万トン規模のエチレンプラントが主流となっている。図1の当社納入実績のエチレンプラント容量の推移でもその傾向は明確である。

ガス圧縮機は大容量化し、それに従い蒸気タービンの大容量化が必須の流れとなっている。

圧力容器であるタービン高圧側ケーシングでは、高温の駆動蒸気は、タービンに用いる金属材料の許容応力の低下をもたらすため、高強度化が要求される。更に、大容量化によりケーシング内径は大きくなり肉厚となるが、これは熱応力の増大をもたらすことになる。様々な相反する条件をバランス良く満足させながら高圧ケーシングの強度設計を行う必要がある。

高圧ケーシング内部のダイヤフラムノズル（隔壁）も大径となり、更に高温状態で高差圧に耐えるために構造の見直しが必要となる。

復水蒸気タービンの容量限界は、最終段動翼の流路面積で決定される。大容量化のために一層の長翼化が必要となる。これに伴い、低圧側排気ケーシングも大容量化が必要となる。

機械駆動用蒸気タービンは、発電用蒸気タービンのように一定速度で運転されるのではなく、プロセスガスの流量を制御するために、ガス圧縮機の回転速度すなわち蒸気タービンの回転速度を変化させる必要がある。一般的な速度範囲は定格速度の70%から105%である。この速度範囲は一次危険速度と二次危険速度の間に一定のマージンをもっていないとてはならない。このため、ロータ系の不釣合い振動解析や動翼の共振解析を入念に行う必要がある。

また、高温高圧の駆動蒸気の大容量化に伴い蒸気加減弁の流体振動に伴う不安定振動が増加するため、弁体形

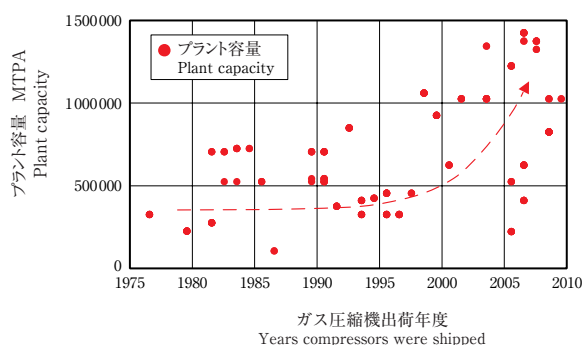


図1 株荏原エリオット納入先のエチレンプラント容量の推移
Fig. 1 Ethylene plant capacity trend (where EETC shipped)

状の一層の改良が必要となる。

近年石油資源の枯渇が懸念されるなか、エチレンプラントの原料としてナフサ・ガスの代わりに石炭由来のメタノールを用いるプラントも建設されている。当社では、2009年に石炭・エチレンプラントに分解ガス圧縮機・タービン装置とプロピレンガス圧縮機・タービン装置を納入した。

2-1 高温・高圧・大容量二重胴高圧ケーシング (モデル：N1620DC)

当社では、首題の要求を満足するために二重胴高圧ケーシングを開発した。2000年から7台出荷し現地で順調に運転されている。

高圧部の基本モデルはN1620DCと呼ばれ、540℃、ゲージ圧力13.7 MPaの蒸気用に設計されている。

図2に分解ガス圧縮機駆動用の抽気復水蒸気タービンの組立断面図を示す。

大口径となるケーシングの円筒部は二重構造となっており、外ケーシングと内ケーシングの間は中間段圧力の蒸気で満たされている。その結果、内ケーシングは内部の高圧と中間段圧力との差圧に基づき設計され、外ケーシングは中間段圧力での設計となる。その結果、大容量を流すために大径とした外ケーシングの応力を下げることが可能となった。

蒸気タービンのような高温を扱う機器の設計では、前述の内圧による応力、高温による許容応力の低下を考慮するが、更に冷機起動時のような、機器が起動に伴ない昇温していく際の熱応力も考慮しなくてはならない。

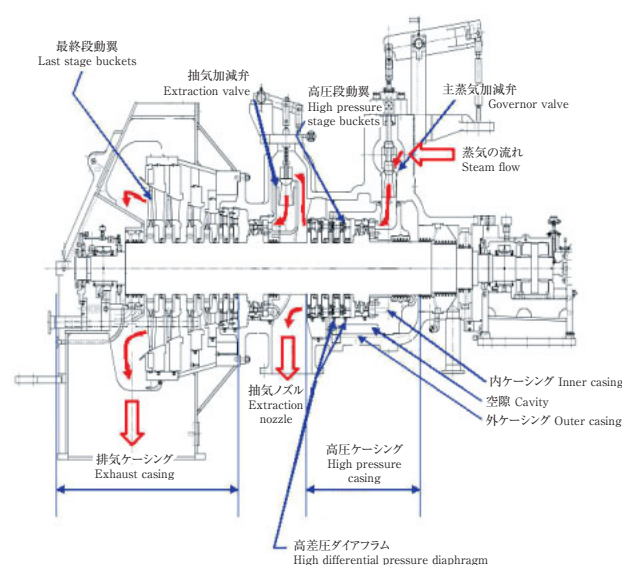


図2 二重胴タービン組立断面図
Fig. 2 Sectional drawing of double shell turbine

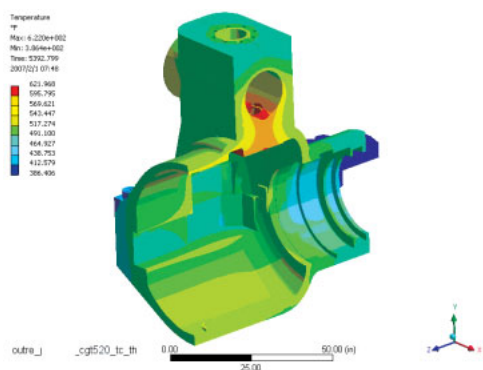


図3 外ケーシング温度分布 (1.5時間後)
Fig. 3 Outer casing temperature distribution (1.5 h seconds after startup)

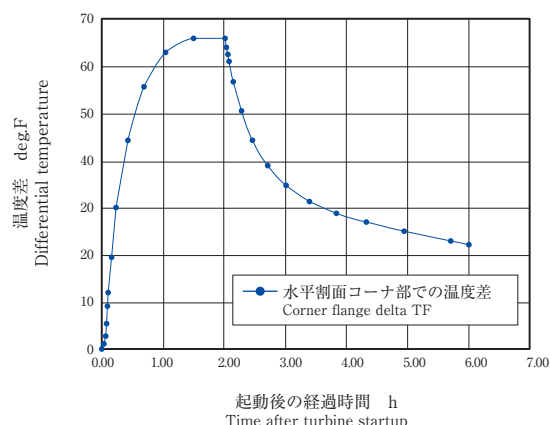


図5 外ケーシング水平断面コーナ部での温度差の推移
Fig. 5 Differential temperature trend at outer casing flange corner

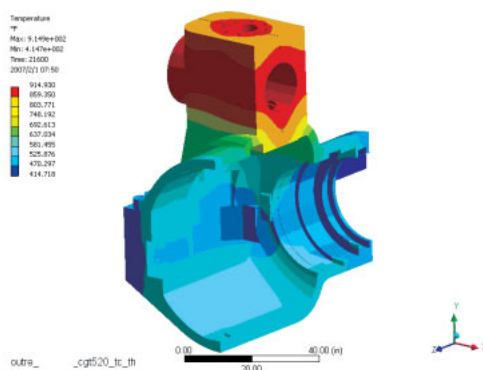


図4 外ケーシング温度分布 (6時間後)
Fig. 4 Outer casing temperature distribution (6 h after startup)

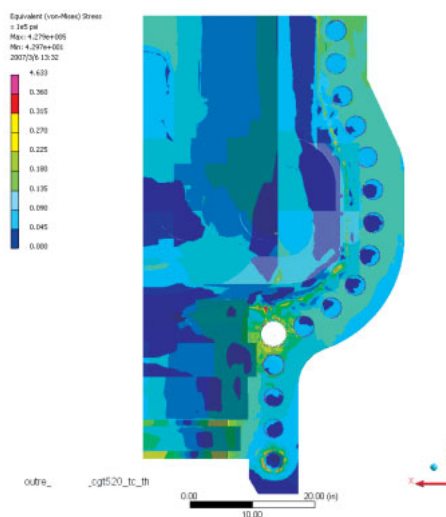


図6 外ケーシング水平断面の応力分布 (1.5時間後)
Fig. 6 Stress distribution at outer casing horizontal flange (1.5 h after startup)

ケーシング肉厚の検討は当然のことながら、ケーシング水平断面からの蒸気漏れの検討が設計上の重要なポイントである。

次に解析の例を示す。図3に起動・蒸気導入1.5時間後の外ケーシング温度分布を、図4に起動・蒸気導入6時間後の外ケーシング温度分布を示す。

起動後のケーシングの内外部の温度分布を解析し、この結果を用いて熱応力を解析した。図5にもっとも熱応力が大きくなる外ケーシングの水平断面コーナ部でのケーシングの内外部の温度差の推移を示す。図5から起動1.5時間後が最大となることが分かる。更に、図6に起動1.5時間後の外ケーシング上下合せ面での応力分布を示す。

2-2 大容量排気ケーシング (モデル: N105 復水)

当社では、大流量に対応するために排気ケーシングを新たに開発した。図7にその形状を示し以下にその特長

を示す。

- (1) 軸方向長さが短くコンパクトな形状
- (2) 圧力回復係数が大きい流路形状
- (3) NEMA規格以上の配管外力に耐える高強度の形状
前記の形状を決定するに当たっては、16種類のモデルを作成し、それぞれについて流れ解析(CFD)を行い比較検討した。その結果の中から最適な形状を採用した。

2-3 高温・高圧・大容量用の高差圧ダイアフラムノズル (モデル: 137-F1)

中間段の各ダイアフラムにはそれぞれノズルが設置され、高圧・高温の蒸気のエンタルピーを効果的に速度エネルギーに変換して動翼に与える必要がある。大容量化、

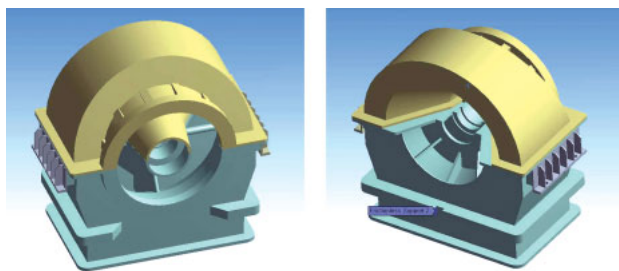


図7 N105復水新排気ケーシング3Dイメージ
Fig. 7 N105 new condensing exhaust casing 3D image

高差圧化に対応し、かつ軸方向長さの短いダイヤフラムを開発した。図8にその3Dモデルを示す。

新型ではダイヤフラム板厚さを増やし、従来はノズルブレードでダイヤフラムの差圧を支える構造であったが、新型は差圧をダイヤフラムと一体型のリブで支えて、ノズルブレードはエンタルピーを速度エネルギーに変換させる機能に限定した。この結果、同一寸法の場合、従来型と比較して230%の差圧に耐えることができるようになった。その結果、高差圧下での大径化が実現した。

比較のため通常型のダイヤフラムノズルの例を図9に示す。

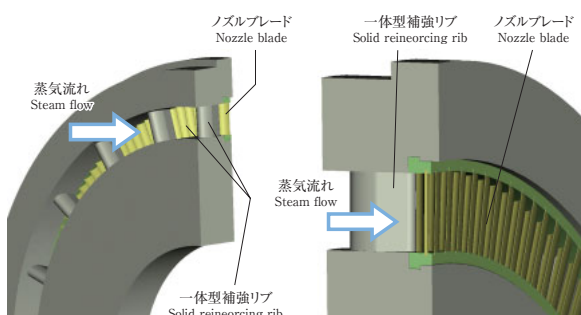


図8 137-F1高差圧用ダイヤフラムノズル, 3Dイメージ
Fig. 8 137-F1 for high differential pressure diaphragm nozzle 3D image

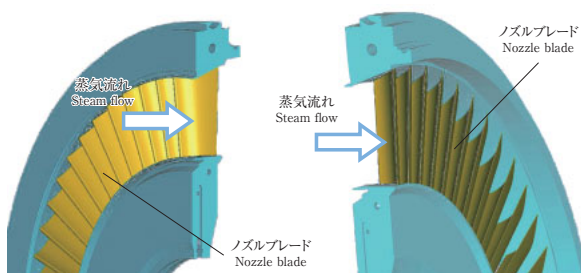


図9 216通常型ダイヤフラムノズル, 3Dイメージ
Fig. 9 216 standard type diaphragm nozzle 3D image

2-4 高圧段高効率動翼 (モデル: 506-D1)

前述の高差圧ダイヤフラムノズルから流出される蒸気を、高効率に回転力に変換するため、高強度の高効率動翼を開発した。効率は約4%向上し、翼強度も向上した。

図10に3Dモデル図を、図11に流れ解析例を、写真2に実機に組み上げた状態を示す。

2-5 低圧段大容量最終段動翼 (モデル: 661)

将来の200万トンエチレンプラントでの使用を想定し、100 MW以上の機械駆動用設計条件から翼高さは22インチ (559 mm) と設定した。

まず、翼面負荷分布を見直し段落の流れ解析を行うことで、6.7%効率向上を実現した翼形状を決定した。図12

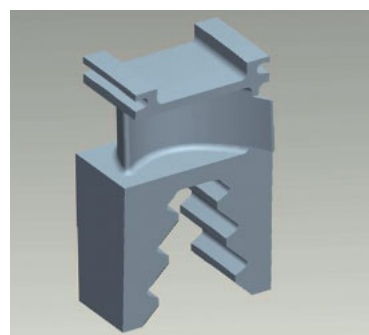


図10 506-D1動翼3Dイメージ
Fig. 10 506-D1 rotating bucket 3D image

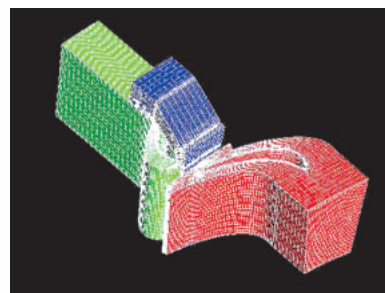


図11 506-D1動翼流れ解析例
Fig. 11 506-D1 rotating bucket CFD

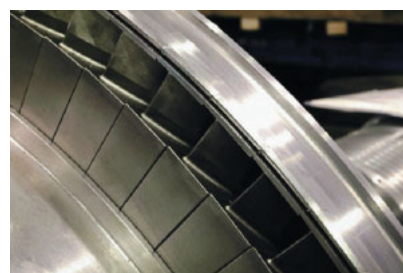


写真2 506-D1動翼組立
Photo 2 506-D1 rotating bucket assembly

10-05 02/226

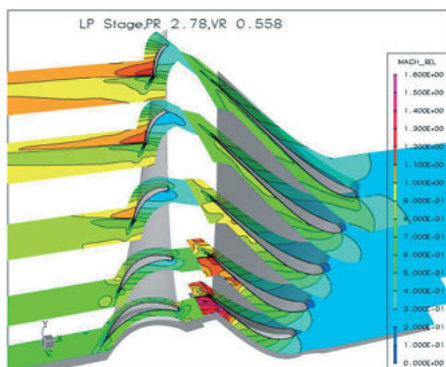


図12 224-661段落流れ解析例
Fig. 12 224-661 stage CFD

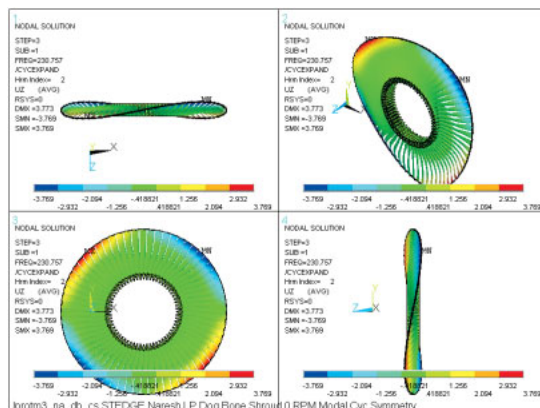


図14 翼・ディスクの組立状態での共振解析例
Fig. 14 Buckets-disk assembly resonance analysis



図13 661動翼, 3Dイメージ図
Fig. 13 661 rotating bucket 3D image



10-05 03/226

写真3 661動翼組立(最終段)
Photo 3 661 bucket assembly (Last stage)

に224ダイアフラムと661動翼から構成される段落の流れ解析の例を示す。

翼質量の増加に伴う遠心応力の増加に対応するために、翼埋め込み部形状を変更し軸方向差込型とした。機械駆動用として幅広い回転速度範囲で安全に運転できるように、翼単体及び翼・ディスクの組立状態での共振特性を検討した。その結果動翼先端にZロックシュラウドを採用した。

図13に動翼埋め込み部及びシュラウド部のZロックを示す3Dイメージ図を示す。図14に翼・ディスクの組立状態での共振解析例を示す。

写真3に実機の最終段に組み込まれた661動翼を示す。

2-6 新型蒸気加減弁(モデル:HB)

蒸気加減弁はガバナ(速度制御器)、アクチュエータ(動作器)との組合せで開度を変化させて、タービンに流入する蒸気量を制御してタービン・ガス圧縮機(速度、最終的にはガス圧縮機)のガス流量を制御する。蒸気は弁

体・弁座の隙間を通過する際に、開度によっては流れが弁座壁面から剥離し不安定振動を起こす場合がある。高温・高圧で密度の大きな蒸気の場合、流体の不安定振動のエネルギーが大きい。その結果、油圧アクチュエータで開度を保持しているにもかかわらず、開度によっては弁体の振動が大きくなり、速度制御の精度に影響をもたらす場合がある。

そこで流れ解析と実験実証試験により新型蒸気加減弁形状を開発した。

3. おわりに

ここに紹介した市場の蒸気タービンに対する大容量化の要求は更に強まる傾向にある。本稿に示された内容はすでに出荷・運転実績の有る内容に限定して示した。当社では、現在更なるケーシングの大型化、エアロの高効率化等を推し進めており現在次世代型を製作中である。

世界のニーズに応えるガス圧縮機と蒸気タービンを開発、改良、製造することでますます社会に貢献できるようにしたいと考えている。