

資源・エネルギー分野(LNG プラント向け) 圧縮機, 蒸気タービンに関する技術開発

Development of Compressors and Steam Turbines for LNG Plants



長井直之*1
Naoyuki Nagai

中庭彰宏*2
Akihiro Nakaniwa

小林昌哲*3
Masanori Kobayashi

秦聡*4
Satoshi Hata

清水幸司*5
Koji Shimizu

木内大輔*6
Daisuke Kiuchi

三菱重工コンプレッサ(株) (MCO)はこれまでエチレンなど石油化学分野を主な市場としてきたが、そこで培われた技術をベースに LNG 市場や FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) など資源分野における新規市場に参入すべく対応中で、LNG プラント向け圧縮機や FPSO 向けインジェクション圧縮機に関する技術開発も行っている。また、世界初の Floating LNG (洋上液化天然ガス) プラントでは MCO の強みである蒸気タービンを圧縮機及び発電機の駆動機として適用しているが、適用にあたり対応すべき技術課題について検討を行った。本稿では、これら技術の開発状況について述べる。

1.はじめに

三菱重工コンプレッサ(株) (MCO)は、これまでエチレンなど石油化学分野を主な市場としてきたが、そこで培われた技術をベースに近年シェールガス革命により拡大する LNG 市場や FPSO など資源分野における新規市場に参入すべく対応中である。世界初の Floating LNG (洋上液化天然ガス, 以降 FLNG と表記) プラントでは蒸気タービンを圧縮機及び発電機の駆動機として適用しており、今後の継続受注が見込まれる。また、LNG プラント向け圧縮機や FPSO 向けインジェクション圧縮機に関する技術開発も行っており、これらを足掛かりとして資源・エネルギー分野への進出を目論んでいる。本稿では、LNG プラント向け圧縮機, 蒸気タービンに関する技術の開発内容について述べる。



図1 プロパン冷凍圧縮機の工場性能試験

*1 技術統括本部広島研究所主席研究員 博士(工学) *2 技術統括本部高砂研究所

*3 三菱重工コンプレッサ(株)技術統括センター長

*4 三菱重工コンプレッサ(株)技術統括センター標準開発グループ長博士(工学)

*5 三菱重工コンプレッサ(株)技術統括センターターボ機械技術部コンプレッサ・タービン計画課長

*6 三菱重工コンプレッサ(株)営業統括センターマーケットグループ主任

2.開発技術

2.1 インドネシア LNG プラント向け LNG 液化プロセス用冷凍圧縮機

LNG 液化プロセス用冷凍圧縮機の中でも、特にプロパン冷凍圧縮機は、圧縮機内部で圧縮ガスとプロセスガスを合流させて圧縮する構造であり、インペラ入口マッハ数も高く性能予想が非常に難しい圧縮機である。

現在、インドネシア LNG プラント向け LNG 液化プロセス用冷凍圧縮機を受注、製作中であるが、**図1**に示すように工場にて性能試験を実施した結果、**図2**に示すように性能実測値は予想性能と良く一致しており、計画通りの性能を実現していることを確認した。

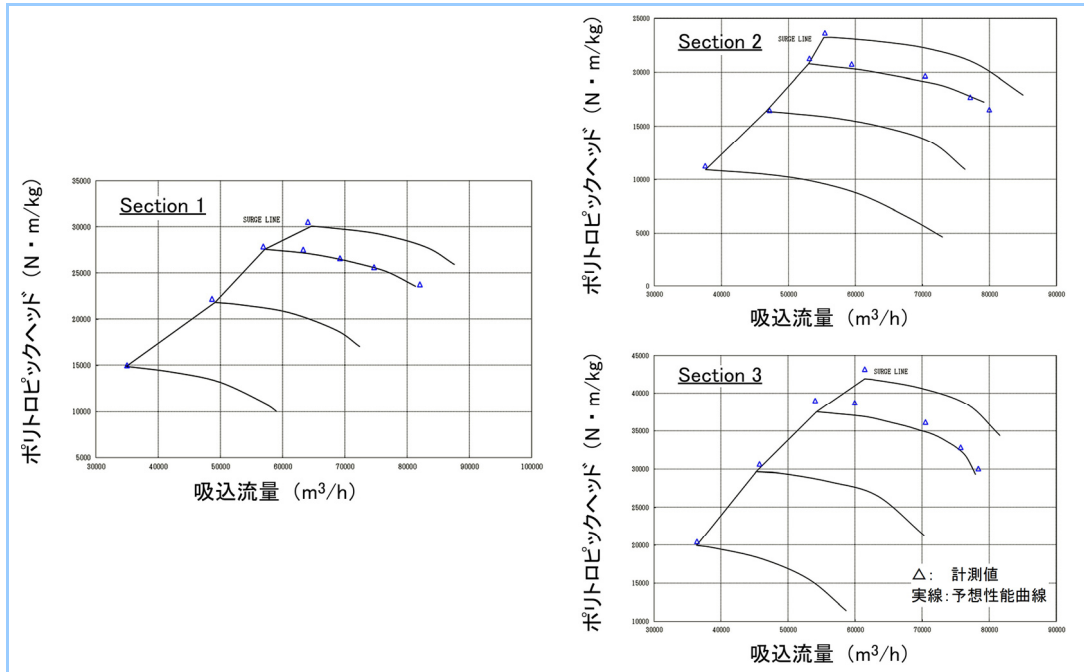


図2 プロパン冷凍圧縮機の性能試験結果

2.2 1ピースインペラ

従来、インペラはブレードをディスク、カバーと溶接することで製作していたが、現状、品質面から溶接の少ない構造を採用している。LNG 液化プロセス用冷凍圧縮機では溶接構造をなくし、性能のばらつきの低減、及び、機械的信頼性の高い 1 ピースインペラの採用(**図3**)が主流であり、当社においても本インペラの開発を終え、採用可能となっている。

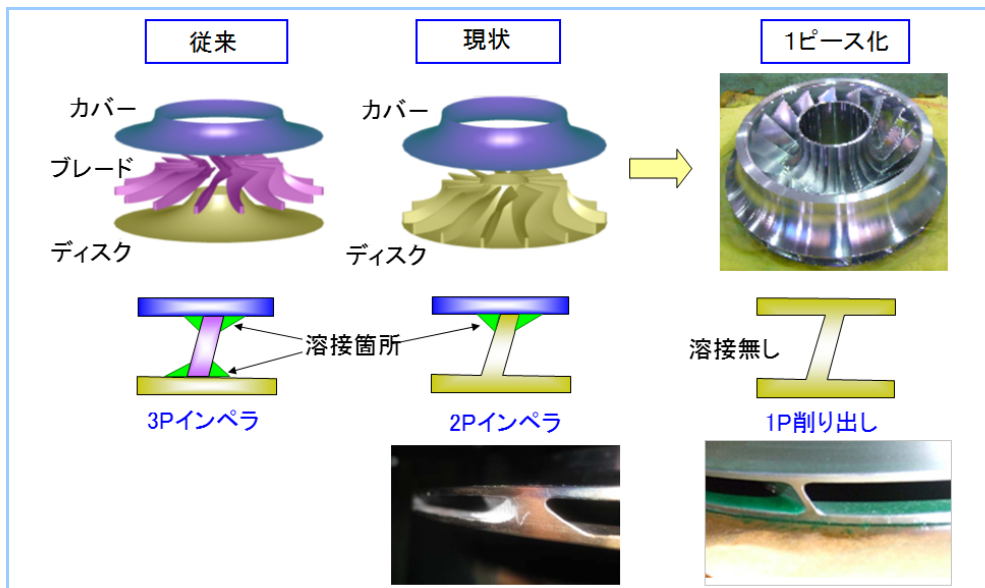


図3 インペラ構造の変遷

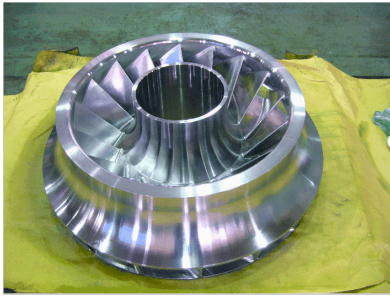


図4 機械加工1ピースインペラ

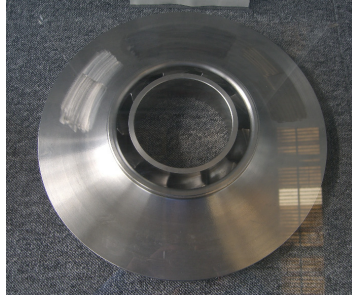


図5 放電加工1ピースインペラ

また、製作性の観点から大流量インペラには5軸加工機を用いた機械加工にて製作(図4), 小流量インペラで特に出口幅の狭いものは放電加工(EDM)によって製作(図5)することで既に実機展開を開始している。

2.3 小ディフューザ径静止流路

圧縮機性能において、静止流路の形状も重要なファクターである。その静止流路であるディフューザは径を小さくするほどコンパクトな圧縮機的设计が可能となる。これにより、製品重量を抑え、低価格で客先へ提供することが可能となる。しかしながら、ディフューザ径を小さくすることで図6のようにディフューザ出口のマッハ数が上昇し、損失ヘッドが増えて効率が低下する原因となる。これを図7のようにガスの戻り流路につながる曲がり部(リターンバンド)の形状を最適化することで効率の低下を抑え、従来効率を保持しつつコンパクト化することに成功した。

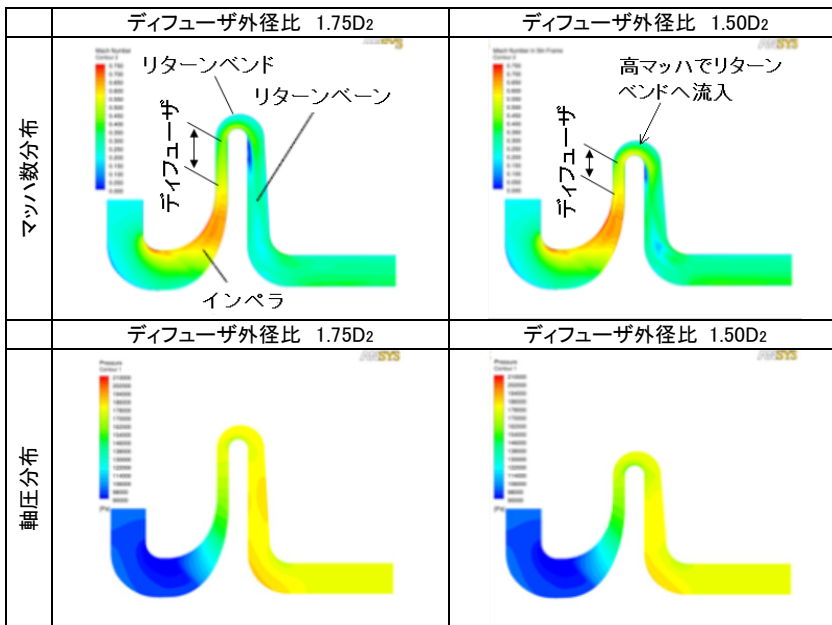


図6 ディフューザ径の影響のCFD解析結果

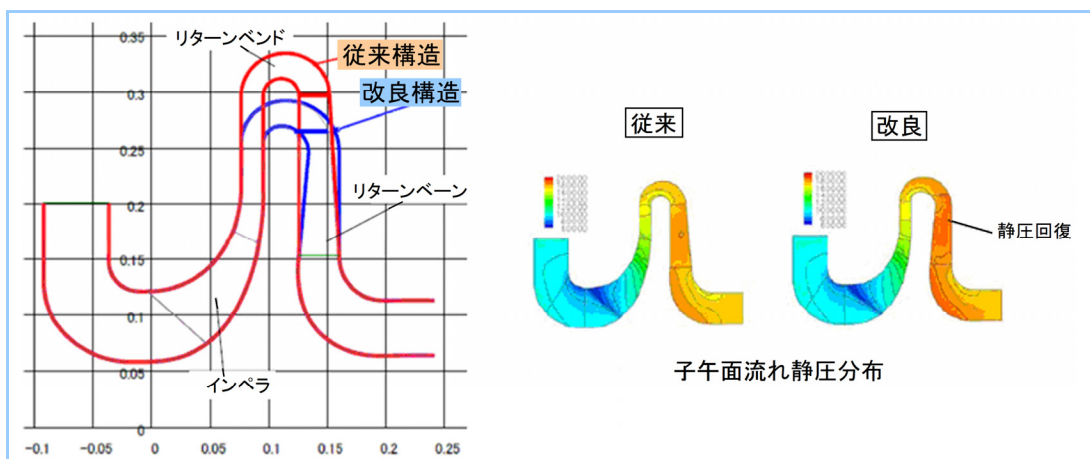


図7 ディフューザ部改良構造

2.4 大型バンドルローラ

垂直分割型(V型)圧縮機では、内部品バンドルを軸方向に組み立てる構造になっており、メンテナンス時にバンドルを軸方向に引き抜く必要がある。圧縮機が大型化すると、バンドル重量が大きくなり、軸方向への引き抜き作業が難しくなる。特にFPSOは洋上での作業となることから、更に困難さは増し、また、クレーン容量増加要因となることがある。

現地における内部品のメンテナンスを容易にし、クレーン容量要求を低減するため、バンドル下部にローラを設けることとした。しかし、ローラには大きな荷重がかかるため、ローラの割れ、車室内面の損傷などが懸念された。これらを満足するよう、**図8**に示す通りFEM解析を行い、ローラの適正なクラウニング量等の形状の設計手法を確立した。また、実機にて工場試験を**図9**に示す通り実施し、バンドル引き抜き手順及びローラ設計の妥当性を確認した。

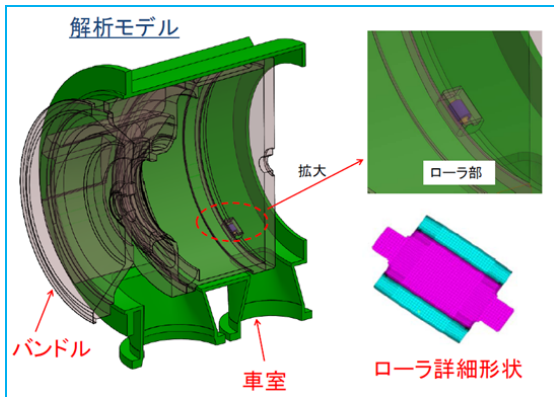


図8 バンドル内部ローラFEM解析モデル



図9 バンドル引き抜き工場試験

2.5 短スパン・高ボス比インペラ

FLNGプラントのような洋上圧縮機の設計においては、重量、設置エリアを小さく設計することが重要である。**図10**のようにインペラ軸方向スパンを短縮すること、及び、インペラボス比(内外径比)を上げることにより軸受間距離を短縮、軸径を増大し、軸系の剛性を上げることができ、高速での運転が可能となる。高速運転が可能になると段数削減、小径化が可能となり、コンパクトでかつ、高性能な圧縮機を設計できる。

しかしながら、短スパン・高ボス比化は2次流れや剥離が発生しやすくなるため、圧縮機の効率低下、及び作動範囲の減少を伴う。

この対策として、**図11**のようにインペラ翼枚数を低減し、摩擦損失低減及び、スパン方向の翼負荷分布を最適化することで急減速領域を低減し効率低下を抑えた。

この対策により従来性能と遜色のない短スパン・高ボス比インペラの開発に成功した。

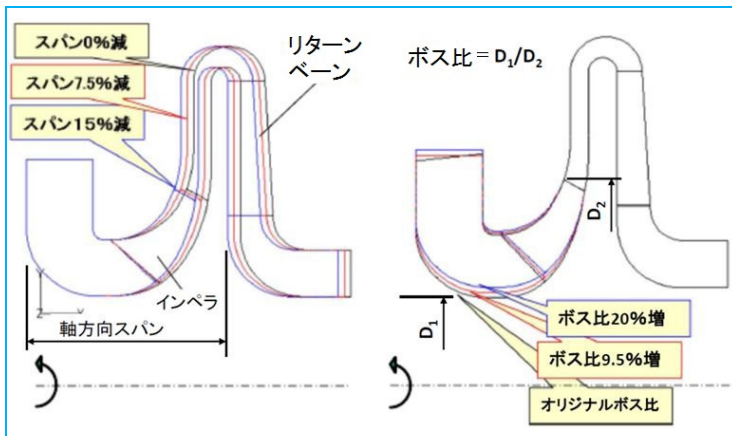


図10 短スパン・高ボス比化検討

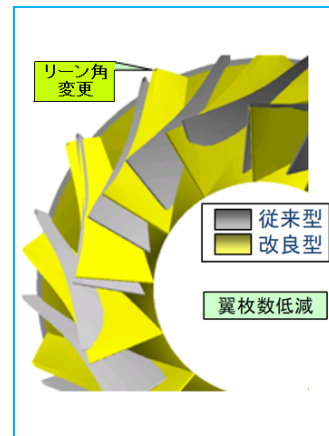


図11 インペラ翼枚数低減による高効率化

2.6 蒸気タービン用オンライン洗浄

圧縮機駆動用蒸気タービンは通常長期運転されることが多いが、LNG プラントでは運用上メンテナンス周期を極力長くし、長期連続運転を可能とすることが重要視される。特に、FLNG ではその傾向は顕著である。

エネルギー源である蒸気は、ボイラ水、給水、純水を処理する段階で入る不純物を含んでおり、蒸気性状が十分でない場合、**図 12** に示すように蒸気タービンの静翼や動翼にスケールが付着してフローパスが狭くなる。車室内圧力が許容圧力以上に上昇する場合、蒸気流量を減少させ、出力を落として運転することになり、結果的にプラント生産量に影響を与える。

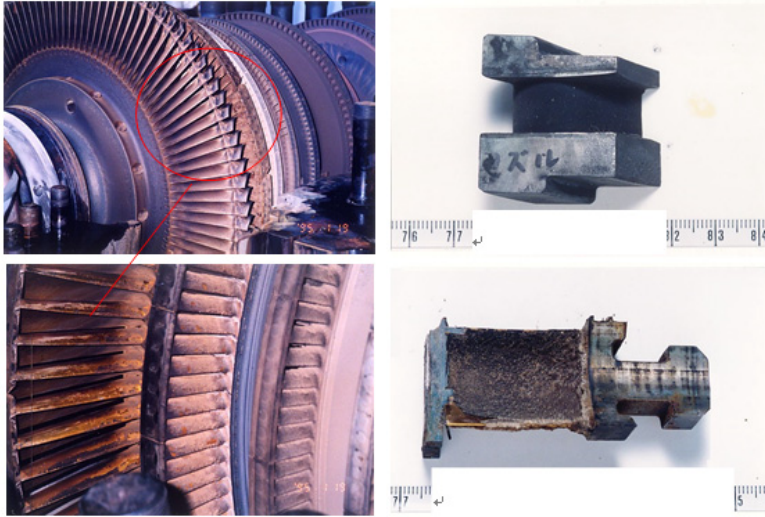


図 12 7年間連続運転後のタービン内部状況

長期運転での蒸気タービン内部のスケール除去方法は、大きく分けて、機械的な除去と洗浄がある。液体による洗浄方法は機械的な除去に比べタービン車室を開放する必要がないが、洗浄中は蒸気タービンの停止、または、高圧部の蒸気入口温度を低下させる必要があり、タービン全体の出力を著しく下げて実施する必要がある。また、その蒸気配管ラインから蒸気を供給されている他の蒸気タービンの出力も低下してしまうため、プラント運転、生産量に大きな影響を与える。

そこで、**図 13** に示すように、蒸気加減弁/抽気調圧弁室に水噴射ノズルを設置し、当該タービン内部の蒸気温度のみを低下させることにより、付着した蒸気中の不純物を洗浄し、性能劣化を防ぐ技術である蒸気タービン用オンライン洗浄システムを開発した。

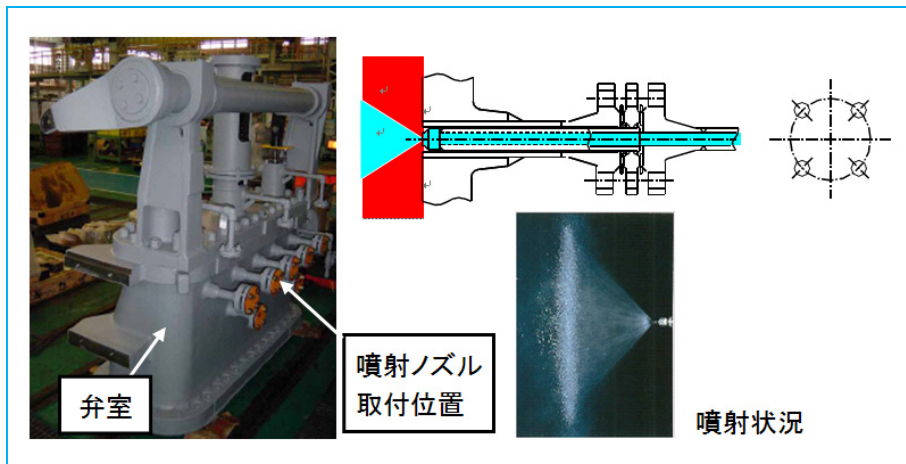


図 13 蒸気タービン用オンライン洗浄システム

開発の検証では、1 式の水噴射静翼と弁及び弁ディフューザを用いて流速を実機に合わせて計測を行うとともに、実際の抽気調圧弁室内部の流れについて、**図 14** に示すように、詳細な流動解析を実施し、各弁の流れはほぼ独立していることを確認し、1 式の弁ディフューザに対する試験結果が、複数弁の場合に対しても同様に評価できることを確認した。

また、**図 15** に示すように本システムを実機適用し、現地での効果確認試験にて本システムの有効性を確認した。

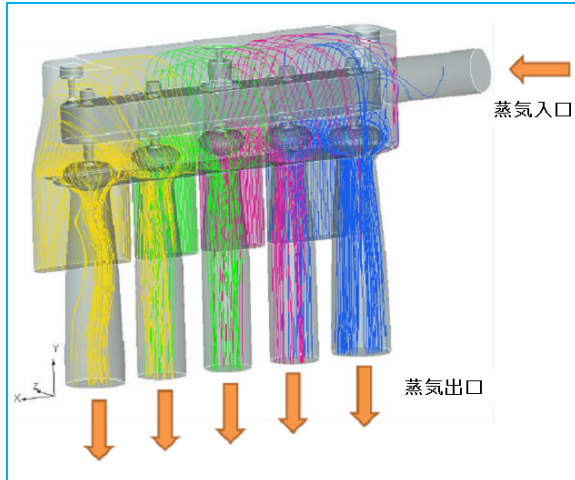


図 14 弁室内部の蒸気流線分布 解析結果

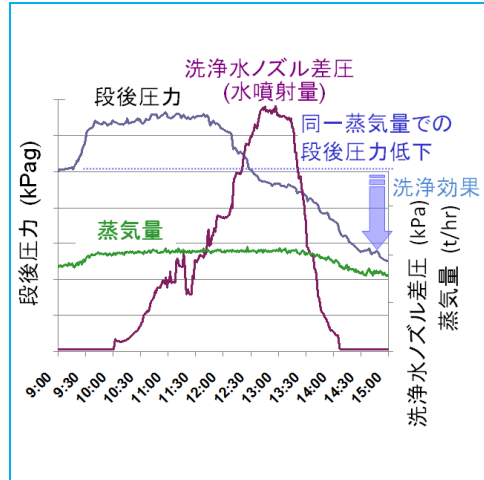


図 15 オンライン洗浄現地試験結果

2.7 蒸気タービン用コーティング

前述のとおり、蒸気タービンの長期連続運転の要求があり、その手段として翼のエロージョン防止対策として様々なコーティングの開発を実施した。

図 16 にボロナイズ処理した1段静翼を示す。これは、金属表面にボロンを拡散させ、硬さの高い金属ボロン合金層を形成させる表面硬化処理を行い、ボイラや配管などタービン上流から飛散する異物によるエロージョンを防ぐことを目的としている。

図 17 にイオンプレATING法によりセラミックコーティングした動翼を示す。これは、ドレンアタックへの耐性を上げるためにセラミック (TiN) 硬質膜を、また、セラミック (TiN) 硬質膜と母材の密着性を確保するために Cr 層膜を施すもので、蒸気中の湿り度が比較的小さい最終段を除く低圧ブロック翼に用いる。

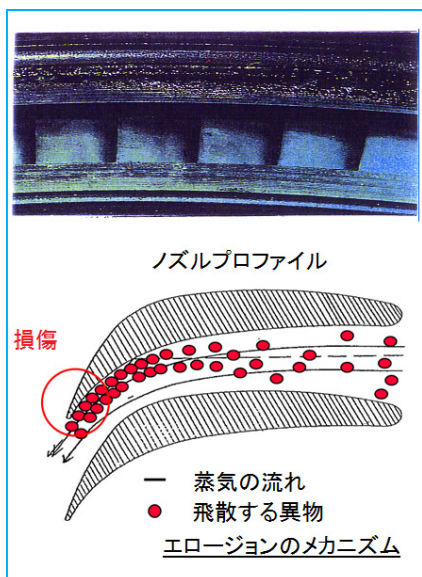


図 16 ボロナイズ処理した1段静翼

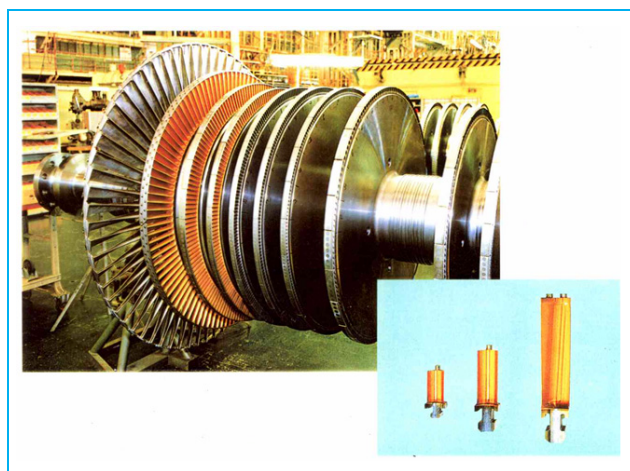


図 17 セラミックコーティングした動翼

図 18 に最終段動翼のチップ部に適用するステライトコーティングを示す。これは、遠心力により周方向へ飛散する飽和蒸気中の水滴が回転周速の最も速い動翼チップ部に衝突することにより発生するエロージョンを防止するためのものである。従来は右図に示すようにステライト板をブレイジングにて母材に取り付けていたが、母材とステライト板の間に生じるキャビティにより母材の疲労限が下がるため、信頼性向上策として左図に示すような PTA (Plasma Transfer Arc) 溶接によるステライト粉末肉盛り溶接後、当該部の仕上げ加工を行う工法を採用した。

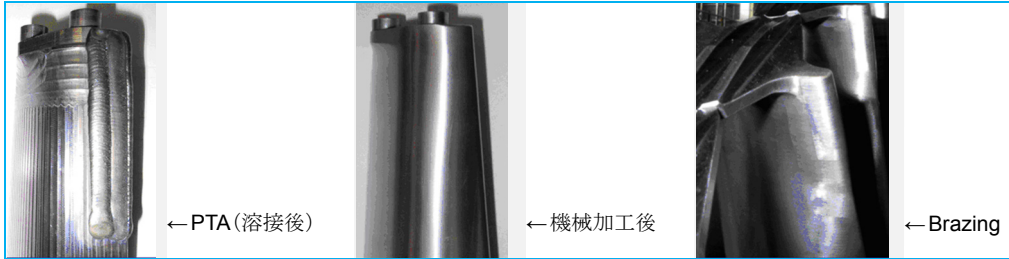


図 18 最終段動翼のステライトコーティング

2.8 蒸気タービンの動翼破損解析

FLNG プラントでは、蒸気タービンが圧縮機及び発電機の駆動機として採用されているが、その課題の一つとして、オーバースピードトリップ設定速度を万が一超えた場合にプラントが危険な事故とならないための設計が出来ているかどうかを検証する必要がある。リスク要因として、最終段動翼が飛散した場合の挙動(過渡的な衝突モード)について、図 19 に示すように動翼の飛散状況、フローガイドと車室との衝突状況把握のため、マルチボディダイナミクス解析を行い、低圧車室貫通の生じないことを検証した。

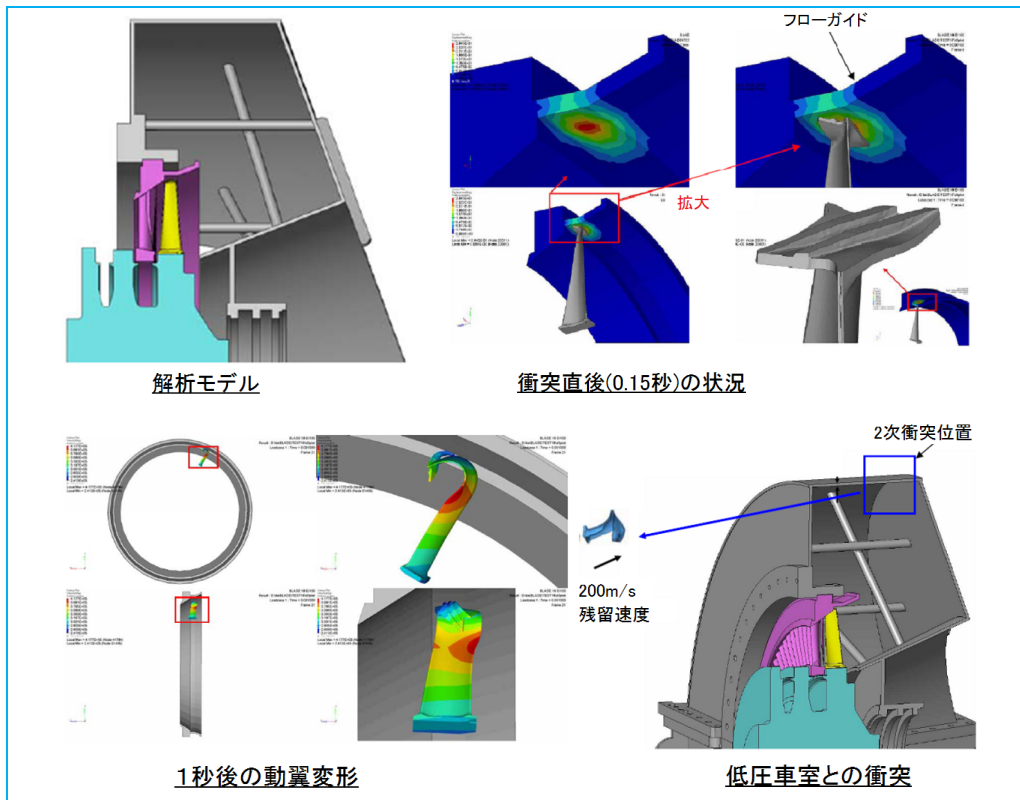


図 19 最終段動翼飛散時の挙動

3. まとめ

MCO は世界初の FLNG プラントを始めとした、LNG プラント向け圧縮機、及び、駆動蒸気タービンに関する技術開発を実施し、実機適用を実施中である。また、本技術は FPSO 向け圧縮機など他の資源・エネルギー分野にも活用でき、今後の事業規模拡大に有効であると考える。