

蒸気タービン 50/60inch チタン合金翼の 大容量発電プラントへの適用

Application of the Longest 50/60 inch Titanium Blades for Large Fossil Power Plants



工藤 健*¹
Takeshi Kudo

山下 穰*²
Yutaka Yamashita

緒方 康二*³
Koji Oata

依田 秀夫*²
Hideo Yoda

エネルギー機器を扱うメーカーの環境問題に対する役割として、エネルギー資源問題や CO₂ 排出抑制に加えてライフサイクルを考慮した製造物の環境負荷低減、すなわち発電プラント建設費、運用費の低コスト化への要請が高まっている。三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、MHPS)は、最新の設計及び検証技術を用いて、フルスピード(3000rpm 及び 3600rpm)の蒸気タービン用として世界最大の翼長を有する50及び60インチチタン合金翼を開発した。これらのタービン翼を適用した大型石炭火力発電所がポーランド及び韓国にて建設が完了し、商業運転が開始され安定に運転が継続されている。ここでは、長翼の開発設計・検証試験の内容及び適用した発電所の概要を述べ、MHPSの発電プラントに関する技術の一端を紹介する。

1. はじめに

蒸気タービンの低圧最終段は、出力負担が大きく、タービンの性能、信頼性及び全体の構成を決定づける最も重要な要素の一つである。最終段翼の長翼化は、排気損失の低減による効率向上や単機容量増加に対してタービン車室数低減による建屋のコンパクト化や機器製造コストを含めた建設費の低減に寄与できる。MHPSは世界最大級の50インチ及び60インチチタン最終段翼(Last Stage Blade, 以下50/60LSBと略す)を開発した⁽¹⁾。本翼は、近年のCO₂排出量の低減の要請に対応し、1000MW超級の大容量石炭火力プラントの高効率化の期待に応えるものである。本報では、翼開発で実施してきた各種検証例を紹介するとともに、実機適用例について述べる。

2. 基本設計

表1に開発翼の諸元を示す。開発翼の材料には、蒸気タービン長翼に採用され約30年以上実績を積んだTi-6Al-4V材を採用した。翼構造は、遠心力によるねじり戻りを利用して翼先端と翼中間部で隣合う翼が接触連結するインテグラルシュラウド構造である。また、翼をロータに固定する翼根の形式は多くの実績を有し、信頼性の高いストレートアキシヤルエントリー型を採用している。なお、50/60LSBは回転数の違いを反映した完全相似設計である。

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリ本部タービン計画部 主幹技師 博士(工学)

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリ本部タービン計画部 首席技師

*3 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリ本部タービン計画部

表1 50/60IN LSBの基本仕様

	50IN	60IN
タービン回転数 (rpm)	3600	3000
翼高さ (mm)	1250	1500
環状面積 (m ²)	11.5	16.5
翼材料	Ti-6Al-4V 合金	
翼根形式	ストレート アキシヤルエントリー	

(1) 性能

本開発翼の先端周速度は 780m/s 以上にもなり、超音速流れ損失を低減したタービン翼型を設計する必要がある。一方、翼根部の周速は比較的低いので、翼高さ方向での周速の違いや、回転を伴う旋回流が影響した三次元性の強い流れ場の中で損失を可能な限り低減することが求められる。この性能面の課題に関して、自社開発により計算精度を検証してきた三次元段落乱流解析により、子午面流線曲率制御を行い、静翼プロフィール、子午面内周壁形状及び動翼プロフィール設計を行った⁽¹⁾。図1に静動翼間のマッハ数分布計算例を示す。静翼流出・動翼流入相対マッハ数の適性化により、損失の低減が図られている。

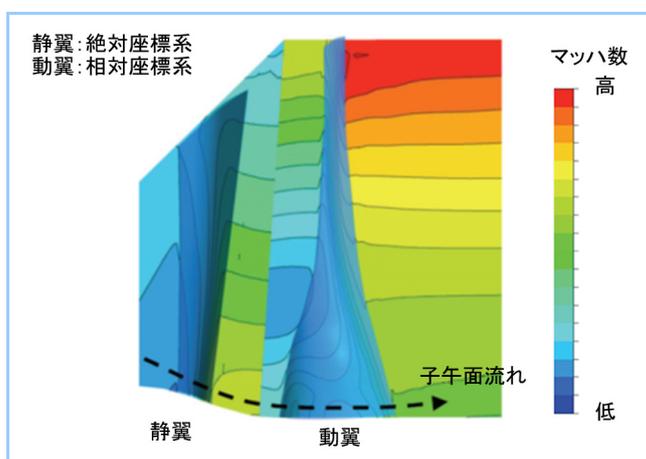


図1 三次元流動解析結果(子午面マッハ数分布)

(2) 強度

翼材にはチタン合金を採用し、遠心荷重の軽減を図った。そのため、ロータは従来材(3.5Ni-Cr-V 鋼)を採用しつつも、世界最大級の環状面積を持つ長翼が実現した。チタン合金は軽量であるだけでなく、低圧最終段動翼のような湿度の高い領域で使用されるタービン翼の課題となる腐食疲労や応力腐食割れに対しても、鋼より優位な特性を有している。

翼構造全体の剛性と振動減衰を高めるため、本翼は接触連結構造を採用した。タービン回転中には接触部位に接触力が作用するので、接触面のフレット疲労や摩耗に対して十分な耐性を有することが重要になる。接触部位の動特性を模擬できる試験法を考案⁽²⁾し、十分な強度確保と過大な摩耗を生じない接触部形状の最適設計を行った。図2に翼の回転中の静的応力分布を示す。翼のすべての位置で設計許容応力を超えることなく強度上の健全性を確認した。

(3) 振動

本翼構造は、全周が一つのリングを形成する構造であり、図3に示すような円板と同様な振動モードを形成する。これらの振動モードは、回転数の整数倍で共振するが、特に振動応力が大きくなる低次数の振動モードの共振回避は必須である。また、フラッタやランダム振動といった蒸気の流れの状態に影響される回転非同期振動の発生も抑制する必要がある。これらの振動応答については、部材の接触状態を反映した振動解析⁽³⁾等を用いて事前に問題ないことを予測解析した上で、検証試験を行い確認する。

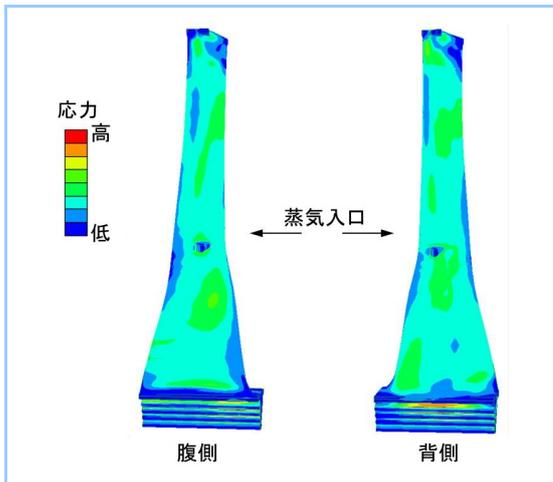


図2 静的応力分布

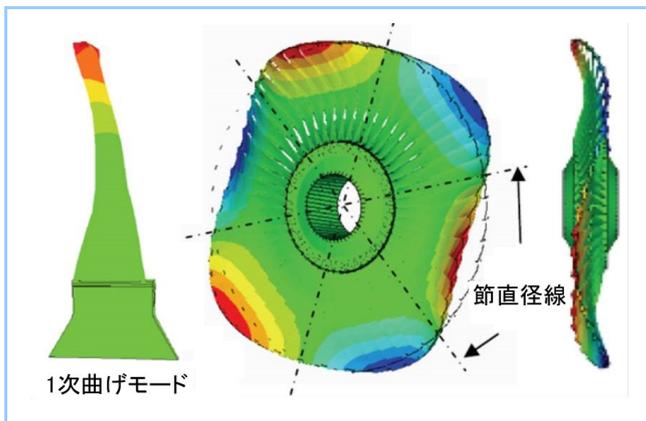


図3 振動モード図(節直径数3の例)

3. 検証試験

(1) 実負荷性能試験

図4に実証試験設備に設置した試験タービン外観，図5に試験タービンの軸構成を示す。本試験設備は，ボイラ，復水器，冷却塔等を備え，実機の運転状態を広い範囲で模擬することが可能である。図6に実証試験タービンを示す。タービンの段数は低圧最終段動翼を含む4段である。50/60LSBにおいて，種々の運転状態を模擬した条件を設定し，動翼の振動応力計測による信頼性検証や，内部の圧力や温度の計測による性能検証を行った。図7にタービン性能特性例を示す。この図は，蒸気流量，排気真空度を変化させ，最終段出口での蒸気流速に対するタービン効率特性を計測した結果である。適用流速範囲において，タービン性能は予測と良く一致することを確認した。



図4 蒸気タービン実証試験設備



図6 実証試験タービン

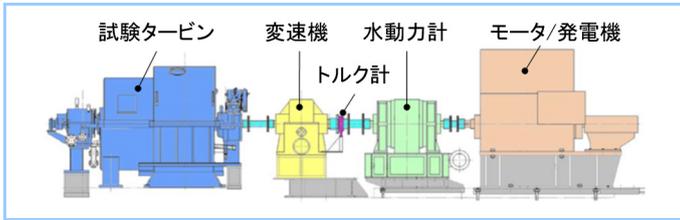


図5 実証試験タービン軸構成

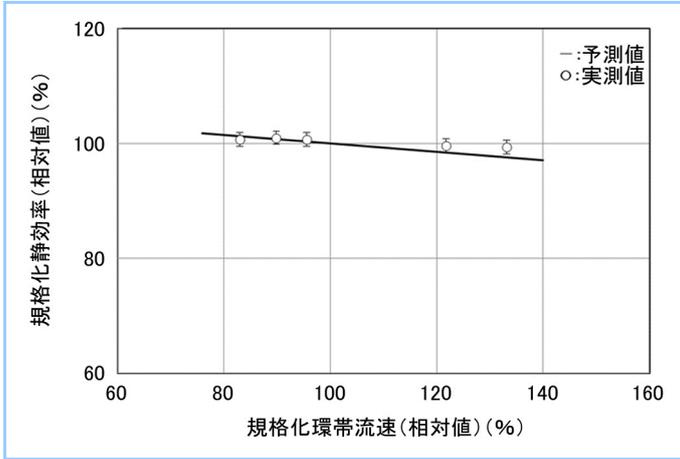


図7 タービン性能実証試験結果

(2) 動翼の信頼性確認

運転中の蒸気の流れに影響されるランダム振動やフラッタといった回転非同期振動に対して、最終的に実機において信頼性上の問題にならないことを検証した。実機ロータにテレメータ計測機器を設置し、動翼に取付けた測定機器により、運転中の共振回避や非同期振動レベルの確認などを目的に計測を実施した。図8に運転中の翼の非同期振動応力の測定結果の一例を示す。プラント部分出力から定格出力の運転範囲において非同期振動は設計許容応力(グラフ縦軸の100%)に比較して十分に低いことを確認した。

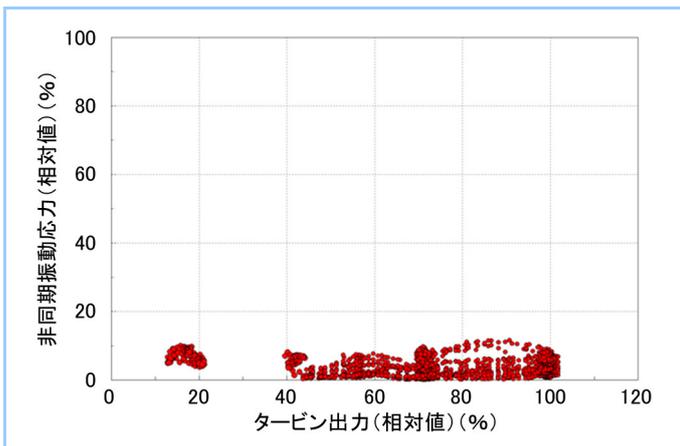


図8 非同期振動応力

4. 実機適用事例

3000rpm60 インチチタン翼は、ポーランドのエネア・ヴィトバルザニエ社 (ENEA Wytwarzanie S.A.) コゼニツェ発電所 11 号機向けの 1075MW の石炭焚きの蒸気タービンとして実用化した。図9に蒸気タービン外観、図10に構造を示す。本プラントは、コンソーシアムパートナーのポリメクス・モストスタール社 (Polimex-Mostostal S.A.) との共同受注であり、MHPS からは、蒸気タービンの他にも、ボイラ、発電機ならびに環境装置を供給している。契約調印を 2012 年9月に行い、試

運転を経て 2017 年 12 月に商業運転が開始された。タービン型式はタンデムコンパウンド TC4F 型の 1 軸直列構造、蒸気条件は主蒸気圧力 25MPa、主蒸気温度 600℃、再熱蒸気温度 620℃の超々臨界圧である。プラント効率は計画値を満足し、ポーランド国内に多数存在する亜臨界の石炭火力発電プラントと比較して、本プラントの CO₂ 排出量は約 25% の削減が可能となった。また、2021 年から施行される IED (大気環境物質の環境規制, Industrial Emissions Directive) の要件も大きく上回る結果が得られている。さらに、60 インチチタン翼は、ギリシアの 660MW の超臨界石炭火力発電プラントにも適用される予定である。



図9 ポーランドコゼニツェ発電所 11 号機

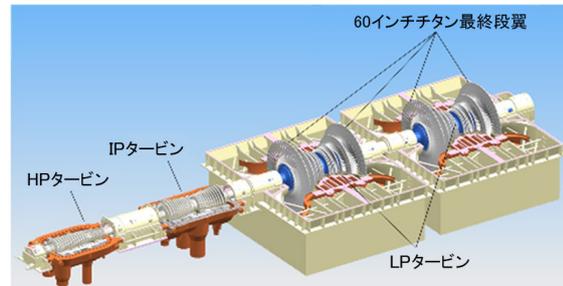


図 10 60 インチチタン最終段動翼採用の出力 1075MW 蒸気タービン構造図

一方、3600rpm50 インチチタン翼は、韓国西部発電(株)の泰安9, 10 号向けの出力 1050MW の超臨界石炭火力発電プラントに採用され、試運転を経て 2016 年 10 月に9号, 2017 年6月に 10 号の商業運転が開始されている。本プラントは韓国の火力発電設備において最大容量機であり、韓国首都圏の電力の安定供給を担う役割を果たしている。

これらのプラントは、順調に稼働中であり、ポーランド及び韓国の電力の安定供給及び CO₂ 排出量低減に貢献している。

5. まとめ

最新の設計技術及び検証により開発された 50/60LSB は、ポーランドや韓国の大容量石炭火力に適用され、世界の電力安定供給に貢献している。石炭による火力発電は CO₂ 排出量の観点から建設計画が減少傾向にあるが、世界規模の視点での経済発展に伴う電力需要に応えるには、再生可能エネルギーのみで安定した電力供給を行うことは難しい。そのため、近年では CO₂ を回収し、積極的に利用する CCUS (Carbon dioxide Capture and Utilization and Storage) の技術開発も進んでいる。これら CO₂ を有効活用する新技術に伴って、エネルギーミックス最適化の一翼を担うための大容量高効率石炭火力の技術として、本翼は今後も活用されていくものと考えられる。

参考文献

- (1) Shigeki Senoo, et al, "Development of Titanium 3600rpm-50inch and 3000rpm-60inch Last Stage Blades for Steam Turbines", *Proceedings of IGTC 2011*, IGTC2011-0249, (2011), pp. 1-8.
- (2) Kunio Asai, et al, "Experimental Validation of Fretting Fatigue Strength and Fretting Wear Rate at Contact Surface of Turbine-Blade-Shroud Cover", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*, GT2012-68576, (2012), pp.1-8.
- (3) Yutaka Yamashita, et al, "Vibration characteristics of a continuous cover blade structure with friction contact surfaces of a steam turbine", *10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*, (2012), pp.323-332.