

# 蒸気タービンの長期連続運転のための最新技術

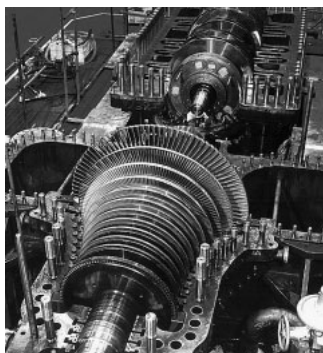
## Improved Technologies of Steam Turbine for Long Term Continuous Operation

野 田 寿 男<sup>\*1</sup>  
Sumio Noda

山 田 義 和<sup>\*2</sup>  
Yoshikazu Yamada

銭 谷 哲<sup>\*2</sup>  
Satoru Zenitani

佐 々 木 公 良<sup>\*3</sup>  
Tomoyoshi Sasaki



エチレン及びアンモニア合成などの石油化学プラントで使用される機械駆動用蒸気タービンは近年の省エネルギー化や保守メンテナンスコスト低減の観点から長期連続運転に対する機器の信頼性向上とその効率維持に対する要求が高まってきている。本論文では高速・高負荷条件に対する高信頼性スラスト軸受、ボイラから飛来するスケール等による调速段ノズルのソリッドパーティクルエロージョン及び湿り蒸気中の水滴との衝突による低压段ブレードのドレンエロージョン防止技術、長期連続運転中の効率低下改善に対するファウリング除去技術等の実機適用した信頼性向上技術について紹介する。

### 1. は じ め に

エチレン及びアンモニア合成などの石油化学プラントで使用されている機械駆動用蒸気タービン（図1）は、近年の省エネルギー化と保守メンテナンスコスト低減の観点から長期連続運転に対する機器の信頼性向上とその効率維持に対する要求が高まってきている。本報はその要求を満足すべく開発し実機適用した長期連続運転に対する以下の信頼性向上技術について紹介する。

- (1) 改良型スラスト軸受（スラスト軸受）
- (2) コーティング技術（调速段ノズル・最終段ブレード）
- (3) ファウリング除去技術（中間段ノズル・ブレード）

なお、図2は蒸気タービンの断面で上記技術の（ ）内に示す信頼性向上技術の主要適用部位例を示す。

### 2. 改良型スラスト軸受

当社機械駆動用蒸気タービンでは、プラント効率向上のためコンプレッサなどの被駆動機の特性による高速回転及び小スペース化を目的としたコンパクトな軸受が要求されている。また、当所のスラスト軸受は高速・高負荷条件化での使用となり、軸受メタル温度が上昇し軸受の信頼性裕度の低下が懸念された。

一方、エンドユーザからは運転・保守の観点から運転中の各管理値に対して各計測値が十分な裕度を確保したいとの要求が強く、特に軸受の場合メタル温度低減のニーズが高い。

以上を解決するために以下の項目をスラスト軸受に適用し高信頼性化を図っている。

- (1) 直接潤滑方式

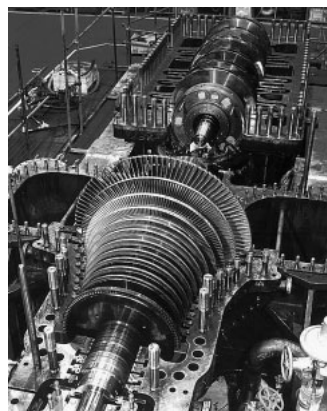


図1 当社のタービンとコンプレッサ

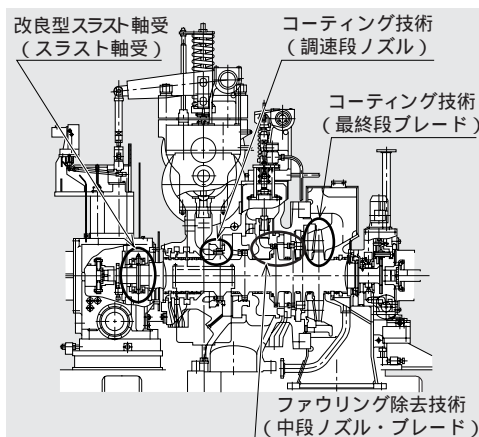


図2 新技術適用部位

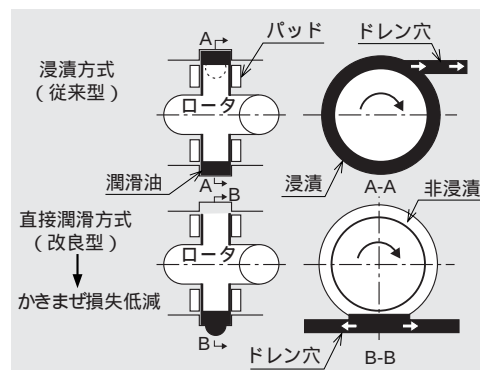


図3 潤滑方式の比較

<sup>\*1</sup> 広島製作所ターボ機械技術部タービン設計課

<sup>\*2</sup> 技術本部広島研究所物質工学研究室

<sup>\*3</sup> MHIターボテクノ(株)広島支社技術担当部長

- (2) 改良型レベラ  
 (3) パッド裏金：クロム銅  
 (4) オフセットピボット

### 2.1 直接潤滑方式

従来、軸受内部に潤滑油を充満させることにより高信頼性を保持してきたが、上流側パッドの高温潤滑油による軸受メタル温度高問題やスラストカラー外周面での潤滑油の攪拌抵抗による軸受損失増加等の短所が高速化に伴い顕在化するようになった。

この解決策として非浸漬化を目的とした直接潤滑方式を採用し軸受特性の改善を図った。

図3に従来の浸漬方式と直接潤滑方式の模式図を示す。

図4にタービン出力、回転数の変化に伴う従来型と直接潤滑方式のスラストパッドの温度上昇を示す。図4より直接潤滑によるパッドの温度上昇低減効果は、全負荷域にわたり確認され特に高負荷領域で著しいことが分かる。

### 2.2 改良型レベラ

運転中に生じるスラストカラーと軸受間の相対的傾斜を復元するレベリング機能はスラスト軸受の重要な特性のひとつである。この機能はパッドの下に設けた上下レベラがパッド間の不均一荷重に対し力学的釣合条件により姿勢を変え、その結果パッド間が上下して相対的傾斜を吸収する仕組みである。

従来、上下レベラの接触部は面接触であり摩擦抵抗

が比較的大きかった。改良型レベラでは摩擦抵抗を低減させるため接触部を線接触に変更しレベリング機能の向上を図った(図5)。

合成ガス駆動用蒸気タービンでは高速化のためスラストを内側に入れ、さらに軸径を大きくするため、内外径差が小さいスラスト軸受を採用(パッド枚数を多くする)している。レベリング機能改善効果は摩擦力の影響が大きい、パッド数の多い軸受で顕著である。

図6は従来型と改良型のレベリング特性をスラストカラーの傾斜角とパッド荷重比で比較整理したものである。改良型レベラでは傾斜角の増大に対し従来型よりも緩やかにパッド荷重比が低下しており大幅なレベリング機能の向上が確認された。

### 2.3 パッド裏金：クロム銅

軸受パッドの裏金には従来、鋼(STEEL)を採用しているが軸受温度低減策として軸受パッドの熱伝導率を向上させることが考えられる。

高い熱伝導率を有するクロム銅を採用した場合、図7に示すように鋼に比べ約10～15の温度低減効果が期待できる。

### 2.4 オフセットピボット

軸受の負荷能力を向上させることにより軸受温度を低減できる。その手段として油膜のくさび効果を積極的に活用したオフセットピボットが考えられる。

図8にその効果を示す。

## 3. コーティング技術

長期連続運転中に蒸気タービンが受ける主要な経年劣化として以下の2点が考えられる。

- (1) ボイラ側から飛来する酸化鉄、シリカ等のスケール等による調速段ノズルのソリッドパーティクルエロージョン。
- (2) 水滴を含む湿り蒸気中で高速回転するため水滴との衝突による低圧段ブレードのドレンエロージョン。

したがって、これらのエロージョン防止が長期連続

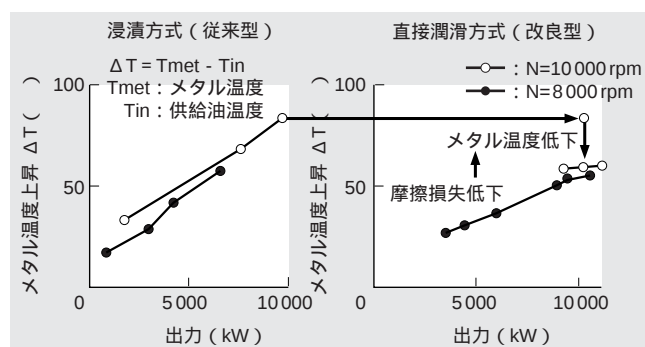


図4 軸受メタル温度の比較

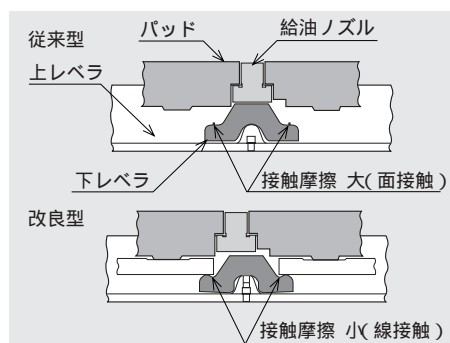


図5 レベラの比較

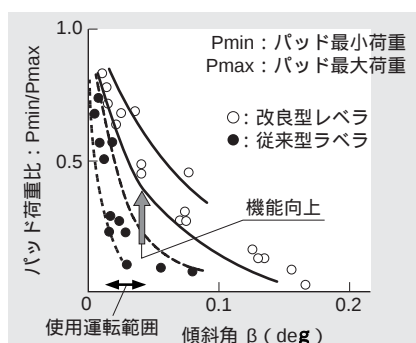


図6 レベリング機能の比較

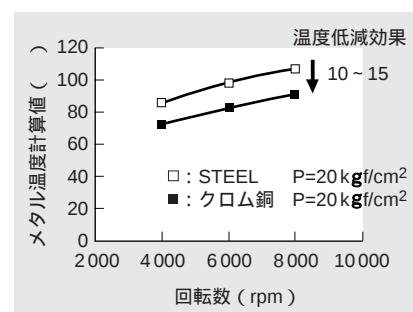


図7 裏金材質の比較

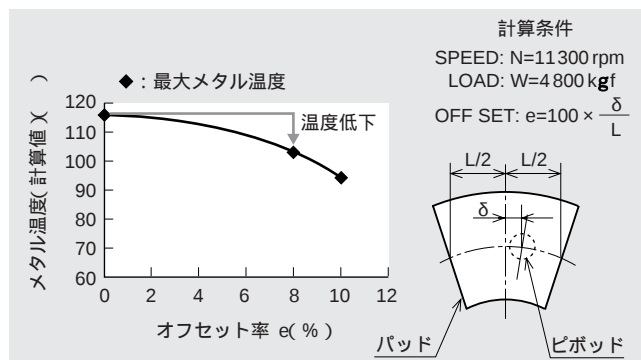


図8 オフセット率の比較

| 現象           | ソリッドパーティクル<br>エロージョン  | ドレンエロージョン                               |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| 温度条件         | 高い                    | 低い                                      |
| コ-ティング<br>技術 | ・ボロナイジング<br>・プラズマスプレー | ・プラズマスプレー<br>・ステライト板<br>銀ろう付け<br>・PTA溶接 |
| 適用部位         | ノズル                   | ブレード                                    |

図9 エロージョン防止

運転を実現し、さらにはタービンの経年劣化を防止する上で極めて重要になる。図9には当社で採用しているエロージョン防止技術の一例を示す。

ここでは、最終段ブレードのドレンエロージョン防止技術の一つとしてステライトのプラズマ粉体肉盛溶接法（Plasma Transfer Arc Welding）を、調速段ノズルのパーティクルエロージョン防止技術としてボロナイジング処理を紹介する。

なお、ステライトのプラズマ粉体肉盛溶接法を以下、PTAステライト肉盛溶接法と称する。

### 3.1 PTAステライト肉盛溶接法

本法はプラズマ溶接トーチと母材（ブレード）の間に発生させたプラズマアーク中にステライト粉末材料を供給、溶解して肉盛するもので、施工条件の適正化と多関節口ボットを用いた自動溶接化により肉厚が薄く溶けやすいブレード先端エッジ部分においても、母材溶け込みの少ない（希釈の少ない）高品質な肉盛層が安定して得られる。また、溶接変形も少なく施工後の矯正等は不要である。

図10にPTAステライト肉盛法を適用したブレードの外観を、従来のステライト板銀ろう付けのものと比較して示す。PTAステライト肉盛法ではステライト板銀ろう付けとは異なり、ブレード母材との区別がつかないほど滑らかな連続一体化形状が得られている。

図11にASTM G32-77にしたがって実施したキャビテーション・エロージョン試験（環境：イオン交換水、温度：室温、試験周波数：18.3 KHz、試験片先端の



図10 ステライトの外観比較

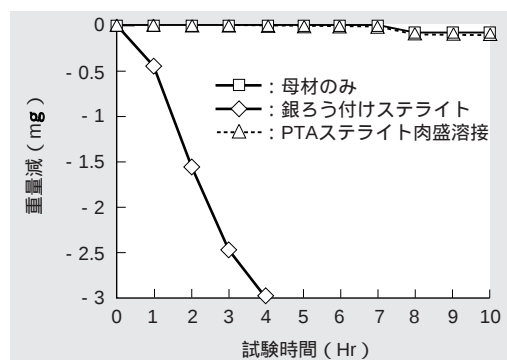


図11 耐エロージョン性

振幅：25  $\mu$ m）により得たPTAの耐エロージョン性を銀ろう付けと比較して示すが、PTAは銀ろう付けと同等の耐エロージョン特性を有している。図12には小野式回転曲げ疲労試験（環境：大気、温度：室温、繰返し速度：60 Hz）により評価したPTAの疲労強度を銀ろう付けと比較して示す。銀ろう付けの疲労強度が母材の約1/2に低下しているのに対し、PTAは優れた疲労強度特性を有する。

以上のことから従来工法では銀ろう付けによる疲労強度の低下のため保護領域（ステライト部）は翼頂部のみに限定されたが、PTAでは母材と同等の疲労強度を有することから翼中央部付近まで施工可能となった。したがって、PTAは保護領域の拡大により厳しいエロージョン環境への適応拡大が図れるものと思われる。さらにステライト板は成形困難、手作業などの問題点があったがPTAでは機械による施工を行ったため品質及び歩留りも格段に改善が図られた。

### 3.2 ボロナイジング処理

調速段ノズルのスケールによるパーティクルエロージョン防止技術として実機に適用しているボロナイジング処理は、表面硬化処理技術であり以下のような処理方法及び特性を有している。

処理方法

- (1) 高硬度のボロン合金層 [Fe:B] を形成
- (2) 浸透拡散処理

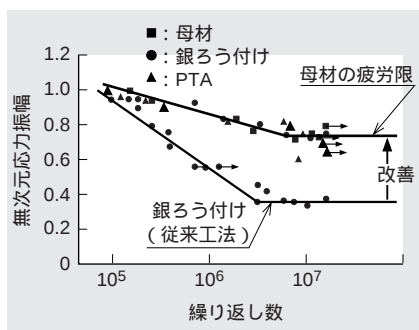


図12 疲労強度

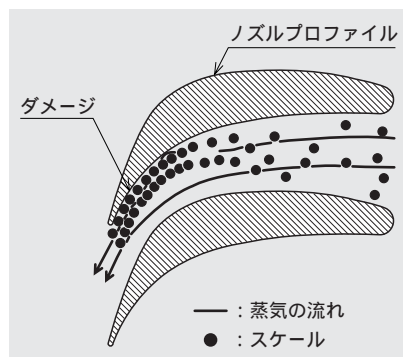


図13 ノズルの磨耗損傷メカニズム

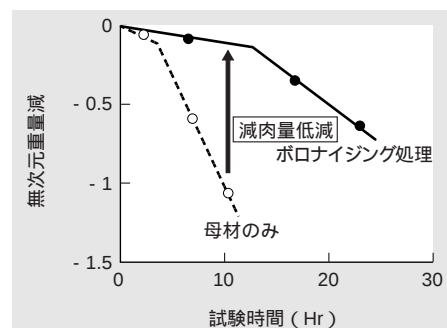


図14 耐ソリッドパーティクルエロージョン試験比較

## 特性

- (1) ボロン合金層の硬度 Hv 1200 ~ 1800 を確保
- (2) 高温での硬度が高く耐高温摩耗性が高い
- (3) 母材へ針状に侵入するため耐剥離性が高い
- (4) ボロン合金層の厚さが約 80  $\mu\text{m}$  と薄い

図13にノズルの磨耗損傷メカニズムを示す。

スケールはボイラチューブ内表面に水蒸気酸化により生成成長し、その後肥大化したスケールはプラントの起動発停時にチューブ母材との固着力が弱くなり剥離しタービンに流入する。

ノズルプロファイルを通過する際流れの方向が急激に変化するため、比重が大きいスケールは慣性効果によって蒸気の流れに追従できずノズルプロファイルに衝突し磨耗損傷を引き起こす。これをソリッドパーティクルエロージョンと呼ぶ。特にタービン入口に配置される調速段ノズルの損傷が大きい。

図14にボロナイジング処理有無による耐ソリッドパーティクルエロージョンの試験結果を示す。同図よりボロナイジング処理は未処理ノズルに比べ摩耗量が極めて少ないことが分かる。例えば試験時間10 hr時で比較するとボロナイジング処理ノズルの摩耗量は未処理ノズルの約1/10である。

図15にボロナイジング処理した実機調速段ノズルの外観状況を未処理と比較して示す。未処理ノズルはノズル出口端に損傷が見られるがボロナイジング処理では見られず表面硬化処理が有効に働いている。

## 4. ファウリング除去技術

蒸気タービンを長期間連続運転させているとブレードやノズルに汚れが蓄積し性能や効率低下となるファウリング問題が発生する。問題の解消策として、プラントの負荷低減あるいは、タービンを停止することなく、通常運転中に抽気調圧弁の弁室から水を注入し蒸気温度を下げるとともに湿り度を上げオンラインウォッシングする方法の特許申請済みである。既に実機相当試験にて実機適用のめどが図れることを確認してお

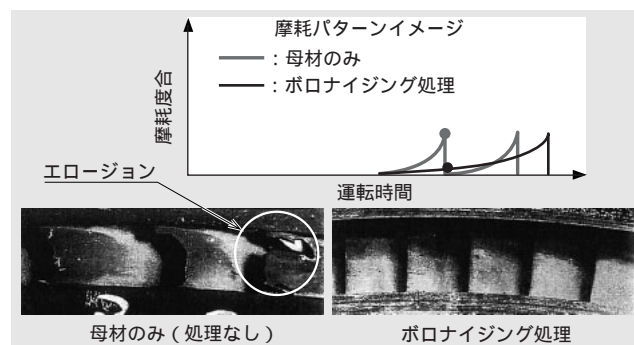


図15 調速段ノズルの外観状況比較

り、現在、実機での効果確認段階である。

## 5. ま と め

近年の省エネルギー化と保守メンテナンスコスト低減の動向の中で長期連続運転に対する機器の信頼性向上とファウリング除去技術の実現による効率維持は今後の重要課題となる。

当社ではこれらの要求（ニーズ）を満足すべく技術を開発し実機適用を図っている。

今後も長期連続運転に対するエンドユーザからの要求を敏感に受け止め、要望に答えるには更なる高信頼性技術の研究・開発が不可欠であり、関係研究所等と連携してタイムリーな実機適用を図っていききたい。



野田寿男



山田義和



銭谷哲



佐々木公良