

# 蒸気タービンの保全技術

Latest Technologies for Steam Turbine Retrofitting

小野 邦夫  
ONO Kunio

有村 正雄  
ARIMURA Masao

二宮 修  
NINOMIYA Osamu

わが国の火力発電設備の大半は長時間使用された経年火力であるが、今後も安価で安定した電力供給のための大きな役割が期待されている。

一方、電力を取り巻く環境は新電気事業法の施行により規制が大幅に緩和され、新電気料金制度や卸売電力市場の自由化や定期点検（以下、定検と略記）インターバルの延長や自主保安への移行に対応した技術が必要で、蒸気タービンの長寿命化技術、信頼性向上技術、コストダウン技術、合理化技術などが重要となる。

The majority of electricity supply in Japan still depends on aged thermal power plants. These plants are expected to continue reliably supplying large quantities of electricity in the future as well, as the major pillar of electric power utilities. On the other hand, the business environment surrounding electricity suppliers is now changing due to the revision of the Electric Utility Law, which has relaxed certain regulations concerning electricity supply. These include an extension of the periodical inspection interval, application of a revised system of electricity fees, a shift to self-responsibility for maintenance, and free participation of individual power suppliers in the market.

This paper introduces the latest technologies for steam turbines related to the above circumstances, such as improving design for the retrofitting of aged plants, extending the life of aged plants, rationalizing unit facilities, and others.

## 1 まえがき

わが国の発電設備は、火力発電設備が60%以上を占め依然としてその割合は大きく、しかも大半はわが国の高度経済成長期にかけて建設された、いわゆる経年火力である。新規電源の大容量化やコンバインドサイクル発電化が進むなかで、経年火力には、引き続き安く安定した良質の電力の供給が期待されている。

さらに、1995年12月の電気事業法改正に伴い規制が緩和

され、定検インターバルの延長や自主保安の広がりに伴う保守管理マニュアルの見直し、新電気料金制度や卸売電力自由化に伴う設備のトータル保守費の低減、および保全・工事に関する新しい技術の出現が期待される環境にあり、これまで以上の的確な設備管理に基づく運用が重要になっている。

これらの課題に答えるためには、長寿命化技術、コストダウン技術、信頼性向上技術、現地工事における合理化技術など、経年火力に対しての適切な保全技術が必要である。

表1. 定検インターバル延長に伴う蒸気タービンの留意点と対策

Technical issues associated with extension of periodical inspection interval

弱点部位	損傷形態	影響	対策
高圧初段ノズル板	侵食	・内部効率の低下 ・第一段動翼シュラウド・植込部フレッティング疲労 ・タービン軸不安定振動	・ノズル表面のハウ化処理 ・翼形の改良 ・予備品の保有 ・コンバインドガバニング起動 ・アドミッションの変更
中圧初段ノズル板	侵食	・内部効率低下	・ノズル表面のセラミックス溶射 ・羽根ノズル間軸方向距離拡大 ・溶接補修 ・予備品の保有
主要蒸気弁弁棒	スティック	・弁棒スティック ・運転続行不能	・組立間隙(げき)の最適化 ・ブッシュステライ化
蒸気加減弁弁棒	振動	・弁棒切損に伴う負荷制御不能 ・運転続行不能	・弁棒の低振動構造 ・弁棒材質の高度化
低圧ロータホイール植込部	腐食疲労	・ロータホイール植込部損傷	・スナッパ翼
低圧最終段動翼	浸食	・動翼有効部切損	・耐エロージョン性向上設計 ・水滴除去構造 ・ノズル・羽根軸方向間隙最適化

ここでは、最近の蒸気タービンの保全技術について述べる。

## 2 保全技術

定検インターバルの延長という命題を解決するために、これまででも精密点検や寿命診断に基づく機器の劣化程度把握、弱点部位については長寿命化技術を開発・適用して適切な保守を行い効果を発揮してきた。さらに規制緩和に伴い、定検インターバル最長8年への対応が必要となる。ここでは、長期間運用した場合の蒸気タービン設備において、機器・部品の弱点部位、その損傷形態と影響、対策などについて述べる。

表1に、定検インターバル延長に伴う蒸気タービン設備の留意点と対策、および最近の不適合例と対策を示す。

### 2.1 長寿命化技術

**2.1.1 高圧初段ノズル板侵食** 高圧初段ノズルの侵食は、ボイラチューブなどから剥(はく)離した酸化スケールが高速でノズル腹側に衝突することによって生ずる。この侵食現象は、蒸気中の酸化スケールが高速でノズル表面を擦(す)るように衝突し、金属面を研磨・研削的に剪(せん)断することによって起こる。

ノズル侵食が進行するとノズル出口部が一部欠損した状態となり、蒸気流の動翼への流入状態も図1に示すように正常から逸脱し動翼に過大な励振力を与えることとなる。

したがって、ノズル侵食を低減することは、特に高圧第一段では動翼の信頼性を確保するために重要なことであり、また、効率維持の面からも無視できない。ノズル板侵食に伴って高圧第一段動翼のシュラウドや図2に示すホイールの損傷例もある。高圧第一段ノズルの侵食低減対策としてはボイラからスケールが多く飛来する起動時に、第一段のアドミッション数を増やし、通常運転に入ったら4アドミッションに戻すいわゆるコンバインドガバニング方式が効果があり、実機に適用されている。

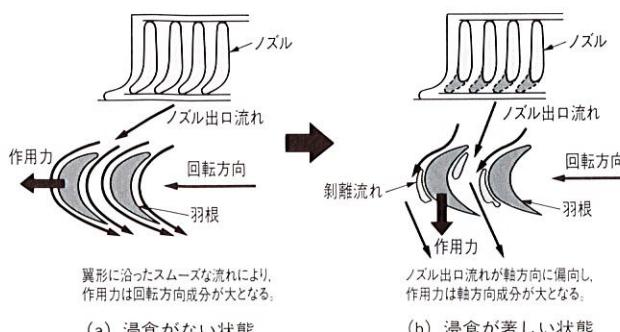


図1. 高圧初段ノズル板の侵食 ノズル板侵食に伴い、動翼に過大な励振力を与える。

Blade excitation force resulting from nozzle erosion

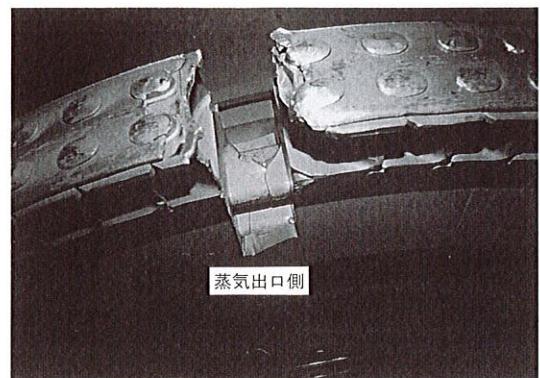


図2. 高圧初段ノズル板侵食とロータ損傷 ノズル板侵食に起因する高圧初段ホイールの損傷状況を示す。

Failure in wheel dovetail caused by nozzle erosion

また、より直接的な方策として、一つはノズルの断面形状を改善し耐侵食性を向上させること。もう一つは、ノズルの表面効果処理が実用化されホウ化処理を施したノズルを実機に用いて顕著な効果を上げている。

**2.1.2 低圧ロータホイール植込部腐食疲労** 低圧ロータの最終段の1、2段手前の段落では、蒸気の状態がちょうど、乾き域から湿り域に変わる環境にある。蒸気中の塩素などの不純物は水質管理により厳しく押さえられているものの、負荷変動に伴い乾き域から湿り域に変わった環境では、乾き・湿りを長年繰り返す間に蒸気中に微量に溶けている不純物から塩素などの腐食成分が析出、濃化されて付着スケール中などに堆(たい)積する。図3に負荷と段落の蒸気状態の例を示す。

これらの腐食環境は、ロータ材の高サイクル疲労強度を大幅に低下させて腐食疲労の原因となる。特に、この腐食性分の堆積は狭隘(あい)部である植込部のすき間などに生

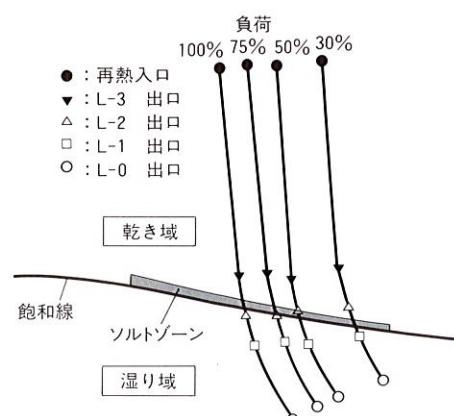


図3. 低圧タービンの負荷と蒸気状態 負荷変動によりL-2段落などの蒸気状態は乾き域と湿り域を交互に繰り返す。

Repeated operation between dry and wet zone in L-2 stage

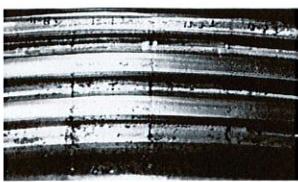
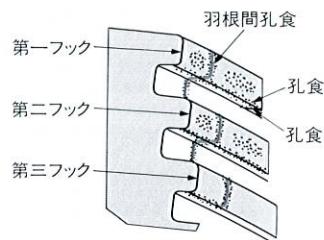


図4. 低圧タービンロータホイール植込部孔食 ホイール植込部に腐食による孔食が生ずる。  
Pitting occurring in wheel dovetail



じやすく、図4に示すような孔食が発生する。当該部は応力集中部であり、損傷の可能性を高くする要因ともなっている。

今後、長時間運用ユニットが増大することから、ますます低圧ロータの寿命決定要因として、これら腐食疲労の問題がクローズアップされてくることが考えられる。

予防保全策としては、動翼を抜いてホイール側の健全性を確認するとともに堆積したさびやスケールを除去する方法が採られている。また、孔食の状況などから、ロータシャフトの残余寿命を推測する方法についても検討が行われている。さらに、保守性向上も考慮した長寿命化対策として次節で述べるスナッパ動翼が実機へ適用されている。

## 2.2 保守性向上技術

定検における保守の簡易化を実現するために取り組んでいる技術について紹介する。

**2.2.1 スナッパ動翼** 従来から低圧最終段落の1, 2段手前(L-1, L-2)の段落の羽根は、通常シュラウドとタイワイヤによる群つづり構造をとっていた。この構造も長時間の運転で十分に実績はあるが、近年のDSS(Daily Start Stop)などの運用の多様化、経年的なタービン系統の腐食要

因の蓄積に対して、より信頼性を向上させる目的で開発された羽根先端部を一体形とし、全周一群のつづり構造としたスナッパカバー構造の羽根が実機に適用されている。

この羽根の構造の特長であるスナッパカバーは遠心力による羽根のねじれ変形を利用して、隣接羽根のカバー相互に接触反力をもたせるものであり、全周一群構造となるため、群つづり個々の振動モードが相殺され羽根およびロータ側ホイールの振動応力の低減が図れる。さらにシュラウド、タイワイヤを廃止することで、当該部に経験されている腐食に基因する損傷も解消できる。図5に代表的スナッパ動翼の構造を示す。

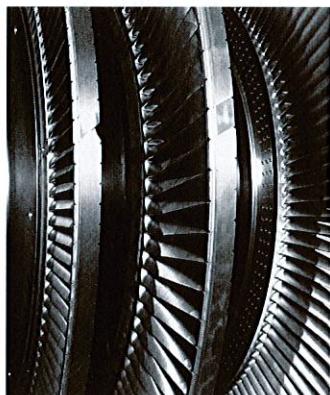


図5. 低圧タービンスナッパ動翼 低圧タービンL-1, L-2のスナッパ動翼組立状態を示す。  
Assembly of snubber type blades

**2.2.2 最終段動翼エロージョン低減対策** 最終段動翼のドレンによるエロージョン対策として、ノズルダイアフラムの改善がある。

図6に600 MWタービンで用いられているダイアフラム外壁形状を示すが、ノズル出口と羽根先端の間にラップがあり、壁面を伝わって流れる多量のドレンが、この部分で

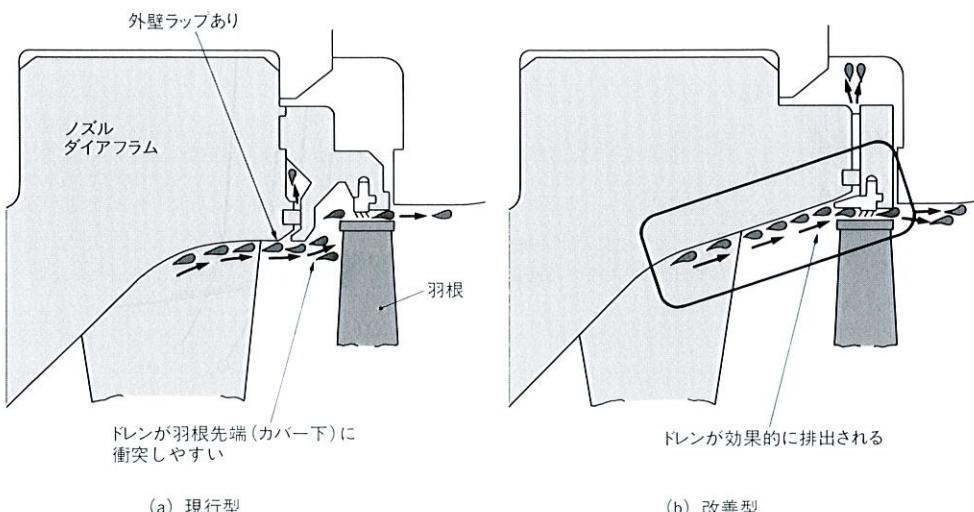


図6. 最終段動翼のエロージョン低減対策 ノズルダイアフラム外壁構造を示す。ノズルの改造も重要であり、メンテナンスの簡易化が可能となる。

Anti-erosion outer-wall configuration of last stage

十分に除去できず、羽根先端に衝突しやすい構造となっている。このため、最終段ドレンが外壁に沿って羽根先端から外側に導かれ、さらに羽根・ノズル間の距離を広げることによりエロージョンが低減する。このように、ドレンによるエロージョン対策にはノズルを改造することも重要でありメンテナンスの簡易化が可能となる。

**2.2.3 最終段動翼のセルフシールド** 低圧最終段羽根の先端には、従来水滴による浸食の低減を目的として耐浸食性に優れた高硬度のCo基系合金(ステライト)の板(シールド板)が溶接、あるいは銀ろうで取り付けられていた。長時間の運用を経るとシールド板の剥離や、溶接あるいは銀ろうによる接合部に腐食などに起因した欠陥発生などが生ずる傾向があった。また、保守面からは供用中の定検時の接合部の非破壊検査などの煩雑さがあった。

この課題を解決する方法として、羽根自体に高硬度(高強度)の材料を使用し、耐浸食性を高める方法(セルフシールド)がある。また、シールド板接合部に火炎による局部焼入れを施して、高硬度を得、耐浸食性を高める方法(フレームハード)もあり、今後、広く適用されると思われる。

### 2.3 コストダウン技術

中圧初段ノズルの浸食対策としセラミックス溶射ノズルが効果的であるが、セラミック層が浸食されるとノズル板の修理とセラミックスの再溶接が必要となる。修理日数の削減を図るためにノズル板を別体構造とし、取付け・取外しを容易にするカセットノズル化が考えられる。図7に中圧初段カセットノズル構造例を示す。

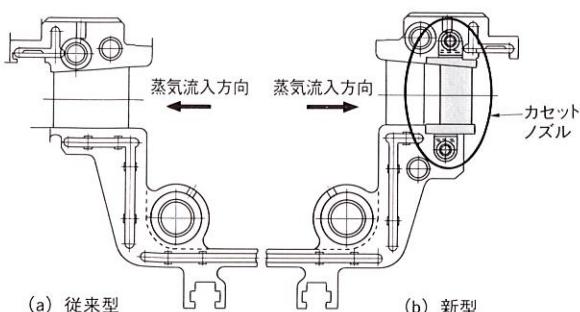


図7. 中圧初段カセットノズル 修理日数の削減を図るためにノズル板を別にし、ノズル板の交換を容易にした構造である。

Replaceable nozzle of IP first stage

## 3 定検合理化技術

火力発電所の定検工期の短縮および作業員の作業環境改善のために、設備や工具などの改善に取り組んでいる。最近実用化した代表的合理化技術を紹介する。

### 3.1 タービン主要蒸気弁用油圧ボルトテンショナ

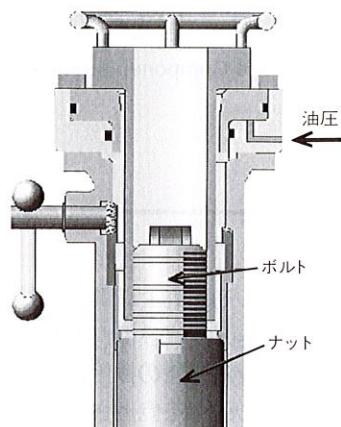


図8. 主要蒸気弁油圧ボルトテンショナ ボルトテンショナの動作原理とインターフェース弁での作業状態を示す。油圧ボルトテンショナは、構造が単純で軽量・小型化され、安全で熟練者でなくとも作業が可能である。

Cross section of bolt tensioner and application to intercept valve

従来タービンの主要蒸気弁の上蓋(ふた)ボルトの締付け分解は焼締め方式が主流であったが、作業時間、作業性、品質改善のために油圧式ボルトテンショナを実用化した。図8に示すように、油圧ボルトテンショナは構造がシンプルで軽量・小型化されているうえ、操作が簡単で安全性も高く熟練作業者でなくとも作業が可能である。火力発電設備の主蒸気止め弁の実績では作業時間が1/2に改善された。

## 4 あとがき

経年火力が今後も電源構成の主流を占めるなか、規制緩和と最新の保全技術や合理化技術との調和をとりながら、適切な保守を行い経年火力設備を大切に使用していくことが重要となる。今後さらに電力の環境に合った技術開発に努めていきたい。電力会社をはじめ関係者各位のご指導をお願いするしだいである。



小野 邦夫 ONO Kunio

火力事業部 火力改良保全技術部主幹。  
火力発電用タービン設備のプラントエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power Systems Div.



有村 正雄 ARIMURA Masao

京浜事業所 原動機部参事。  
蒸気タービンの開発・設計に従事。  
Keihin Product Operations



二宮 修 NINOMIYA Osamu

京浜事業所 原動機部参事。  
蒸気タービンの開発・設計に従事。日本機械学会会員。  
Keihin Product Operations