

小野 邦夫
K. Ono

児玉 寛嗣
H. Kodama

乙咩 敏臣
T. Otome

わが国の電源構成の中で火力発電設備は依然として主力を担っているが、20年以上の長期にわたって使用された経年火力が60%以上を占め、しかもこれらは負荷調整用として過酷な使用条件下で電力安定供給のため重要な役割を果たしている。なかでも蒸気タービンはもっとも使用環境が厳しく、経年劣化の状態を正確に把握するための点検、検査や寿命診断を行い、機器の更新時期など計画的な保守管理をしていくことが重要である。一方、地球環境問題としての燃焼排気の削減技術、規制緩和に伴う定期点検インターバルの延長技術、点検作業の容易な構造設計など取り組む技術課題も多い。

ここでは、経年タービン設備の保守管理の考えかた、寿命診断、および長寿命化技術について紹介する。

A large portion of Japan's electricity supply still depends on aged thermal power plants. Moreover, these plants are exposed to severer conditions, such as daily starting and stopping (DSS), compared to the conditions when they were constructed.

This paper outlines the latest technologies related to the concepts of plant maintenance and a life assessment method for LP rotors. Some application experience of improved design for the retrofitting of aged plants is also described, covering last-stage blades, low-pressure stage blades (L-1, L-2), and main valves.

1 まえがき

わが国の電源構成は火力発電設備が60%を超え、火力の占める割合は依然として大きい。この火力発電設備のうち、大半はわが国の高度経済期であった昭和30年代から40年代にかけて建設され、すでに20年以上の長期間にわたって使用されたいわゆる経年火力が主流である。今後もこれら経年火力の多くは資本費が安い、比較的消費地の近くにあるなどの理由で、良質な電力の供給を期待されている。運用面では原子力発電設備が増加してベースロードを負担するようになったため、火力発電設備は負荷調整用として頻繁な起動停止、最低負荷の引下げなどを余儀なくされ、過酷な運転を強いられている。

さらに、近年の地球環境問題への関心の高まりから経年発電設備といえども高効率化が要求されている。また、規制緩和に伴う定期点検インターバルも現状の運用よりもさらに延長される計画であるため、長寿命化技術の開発が必要である。さらに、定期点検工期の短縮や作業者不足などからメンテナンスの容易な構造設計も行われている。これらの課題にこたえるためにも経年火力の改良保全による長寿命化と近代化技術がますます重要になってくる。

ここでは、蒸気タービンの保守管理の考えかた、診断技術、新技術を盛り込んだ改良保全技術を紹介する。

2 保守管理の考えかた

蒸気タービンでは、高圧部、中圧部の機器は高温、高圧の蒸気にさらされており、長時間の使用に伴い、徐々に劣化が進行する。また、出口に近い低圧部の機器は、湿り蒸気中あるいは湿り状態と乾き状態を交互に繰り返す環境にあり、蒸気中にごく微量に存在する腐食性物質によっても長時間の運転に伴い、腐食の関与した劣化が進行する。

しかし、劣化の進行度合は機器の置かれた使用条件、すなわち作用応力、温度、蒸気中に混入するボイラスケール、蒸気中の腐食性物質の量などによって異なる。

したがって、機器によっては、プラントの建設時からその寿命を終える一生のうち一度も更新の必要のないものもあるが、例えば、プラント寿命を50年前後と想定した場合、過酷な条件下にある機器は一生ものと考えるのは無理である。そこで、機器の計画的な保守管理の考えかたを図1に示すが、一般定期点検での傾向管理および特別点検での精密検査・寿命診断結果と運用に見合った最新の改良技術を組み合わせることで、一生を通じて高信頼性維持のため、どの時期に機器の更新をすべきかの長期メンテナンス計画がプラントごとに必要である。

経年火力が増え、かつその運用が過酷になる昨今の状況からプラントごとの優先順位づけをした計画的な中長期メンテ

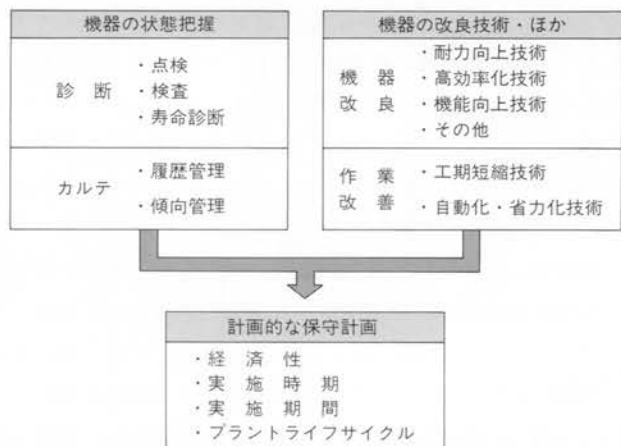


図1. タービン機器の保守管理の考えかた 蒸気タービンの各機器はますます過酷な使用環境となり、電力安定供給には経年火力の計画的な保守管理が重要となる。

Preventive and renovative maintenance plan for aged thermal power plants

ナンススケジュールの策定とその着実な実行が電力安定供給のためには不可欠である。

図2にタービン羽根植込部を例にした結果を示す。実機での検証が必要であるが、アプローチ方法の一つとして注目されている。

一方、実機の損傷事例を整理してみると、マクロ的には損傷の発生する確率が経過時間（運転時間にかかわらず、ロータ製作からの経時時間）と相関が高いといえ、経過時間が長いほど損傷の確率も高くなるという見かたもできる。

このように、二つの方向からの寿命評価アプローチが行われている。

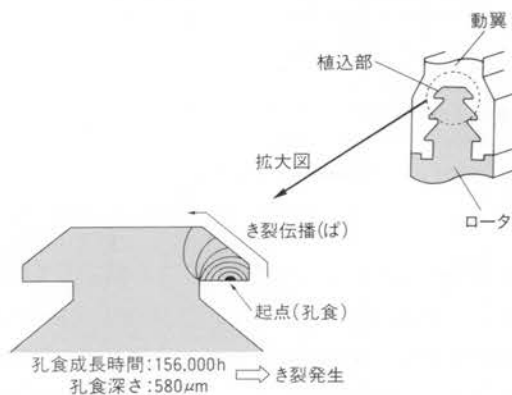


図2. タービン羽根植込部き裂発生進展シミュレーション解析結果 腐食、孔食の発生からき裂への成長進展の過程のシミュレーション解析結果を示す。

Corrosion fatigue simulation analysis results for wheel dovetail

3 改良保全技術

3.1 低圧ロータ寿命評価技術

低圧ロータは蒸気タービンの中でももっとも重量のある高速回転体であることから、プラントの安定運用にあたっては信頼性の維持確保が不可欠である。

プラントのライフサイクルの中で、使用環境から低圧ロータの信頼性、寿命を左右する第一の要因に腐食が考えられる。蒸気タービンプラントでは、腐食や固形物の機器への付着を防ぐため水質管理が行われ、系統内の蒸気中の不純物濃度を極力低く押えている。しかし、蒸気中のNaClなどの不純物濃度が非常に低いレベルであっても、長時間の運転中に滞積し、濃縮した状態で機器に付着することがある。

長時間運転したプラントでは、低圧ロータの羽根を抜き取った後、高濃度の腐食成分や顕著なさびや孔食が発見されることもある。さらにこのような厳しい腐食環境下では、ロータ側の羽根植込部において長時間の運転中、腐食の進行とともに疲労強度が低下し、疲労損傷（腐食疲労）に至った例もある。

信頼性、寿命評価については、腐食自体が環境条件に大きく左右され、運転時間、起動停止回数などの運転履歴との相関が明確でない面があり、技術の確立されている高温部分の寿命評価に比べて複雑である。羽根やロータに生ずる腐食現象に関して、ミクロ的に腐食過程を模擬した寿命予測方法も試みられている。これは、腐食試験結果や実機の損傷形態の分析結果を踏まえて、ある期間を経て腐食が発生しその後孔食に成長して、やがて限界き裂深さに達するとき裂に発展すると仮定し、その経過時間を推定する方法である。

3.2 タービン本体の長寿命化新技術

3.2.1 低圧最終段羽根適用技術 低圧最終段羽根の先端には、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、あるいは銀ローで取り付けられている。

長時間の運用を経るとシールド板そのものの浸食による減肉、溶接あるいは銀ロー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にある。また、保守面からは供用中の定期検査時の接合部の非破壊検査などの煩雑さがあった。

改善策としてステライトの廃止が考えられる。一つは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）であり、半速回転（1,500 rpm）機の41インチ最終段羽根や、3,000 rpm 機の33.5インチ最終段羽根の更新で採用され、その他の種類の羽根にも適用が計画されている。

また、他の手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）も適用を計画している。図3に最終段羽根のエロージョンシールド形式を示す。

3.2.2 低圧羽根適用技術 従来から低圧最終段羽根の手前の段落（L-1、L-2）の羽根は、通常シュラウドとタイワイ

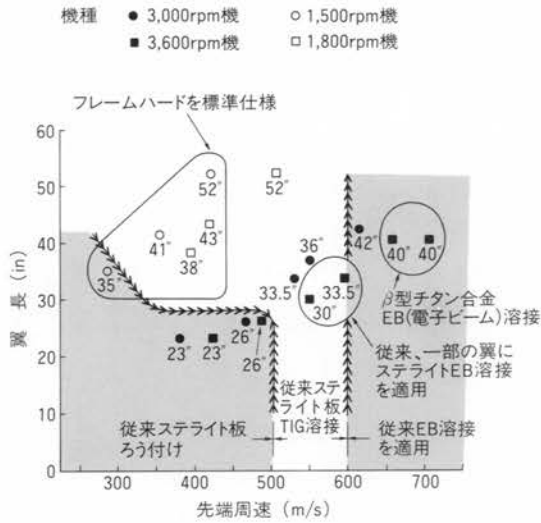


図3. 最終段羽根のエロージョンシールド形式 翼長と先端周速による各低圧最終段羽根のエロージョンシールド形式の分類を示す。

Erosion shield system for last-stage blade

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た、スナバカバー構造の羽根も実機に適用されつつある (図4)。

この羽根の構造の特長であるスナバカバーは、遠心力による羽根のねじれ変形を利用して、隣接羽根のカバー同志に反力をもたせるものであり、全周一群構造となるため、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。さらにシユクラウド、タイヤ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。

3.3 タービン制御装置の改良保全技術

タービン制御・保安装置には、主要蒸気弁や調速機、保安装置など複雑な機構があり、かつ常時使用のために部品の損耗が使用時間に比例して進行していくものが多い。ここでは、特に長期安定運転上重要なものうち主要蒸気弁に対して実



図4. スナバ翼構造 50Hz, 33.5インチ L-1 スナバ翼の組立状態を示す。

Snubber type blades

施した最近の改良保全の事例を紹介する。

3.3.1 主要弁弁箱の長寿命化技術

主要弁はタービンの入口に位置することから蒸気条件も厳しく、またそれらの形状が複雑であることから高温蒸気温度および高圧力の作用により発生する応力は他部品、他部位よりも厳しい。このため弁箱の余寿命評価を行い、プラント全体の長寿命化施策の適切な処置の一つとして弁箱更新が行われてきている。経年ユニットでは主蒸気止め弁 (MSV) や蒸気加減弁 (CV) の多くが更新されている。これらの弁箱は内面のコーナ部においてクリーブ損傷だけでなく低サイクル疲労損傷の累積が著しく、図5に示すように粒界に多くのポイドが観察された事例もあり、高温劣化損傷の厳しさがうかがえる。一方、弁箱の構造上の制約から損傷部位における疲労層のスキンカットのような処置が施された事例がある。しかし損傷は予想以上に深く、またその作業の困難さを考えあわせて弁箱更新が行われ、プラント全体の延命化が図られつつある。図6には最近までの国内事業用火力発電所納入機器に対する更新の割合を示して

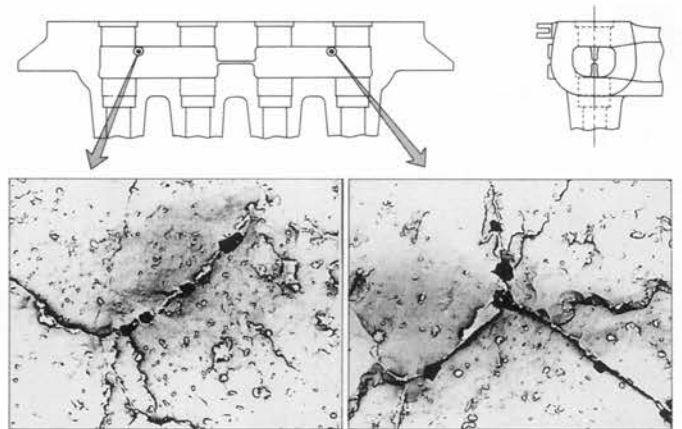


図5. 蒸気加減弁弁箱の内面コーナ部における金属組織観察 走査型電子顕微鏡による金属組織観察で、結晶粒界に高温での経年劣化を特徴づけるポイドの点在が認められる。

Microscopic observation of replicas at inner corner parts of turbine control valve casing

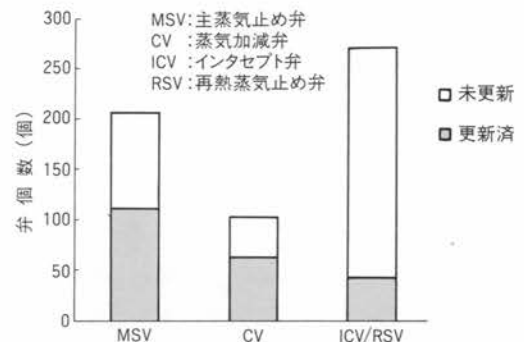


図6. 主要蒸気弁弁箱更新状況 国内事業用火力発電所納入ユニットの主要蒸気弁弁箱のうち大半は10万時間以上を経過しており、蒸気条件の厳しいMSV, CVの更新が1/2以上進んでいる。

Replacement of main steam valves

おり、条件が厳しい主蒸気止め弁や蒸気加減弁の比率が大きいことを示している。

なお、更新にあたってはクリープ強度だけでなく疲労強度が優れており、かつ鑄造欠陥やそれによる溶接補修のない高品質の鍛造弁が多くユニットに採用されている。鍛造弁にすることにより損傷率は鑄鋼品より少なく、特に疲労損傷に対する改善効果が著しいので、起動停止回数の多いユニットに対して延命化が図られることが期待される。

3.3.2 主要弁弁棒・ブッシュ 近年、電力需給調整の関係に重ねてプラント稼働率向上、耐力向上などの成果によりプラントの点検インターバルが伸びてきつつあるが、これに対して改善すべき課題の一つに主要弁弁棒スティック対策が挙げられる。従来は弁棒、ブッシュの表面は摩耗やカジリ防止のために窒化による硬化処理が施されていたが、長時間の運転により弁棒やブッシュ表面には図7に示すような高温状態で生成するクロムや鉄などの酸化物により覆われ、甚だし

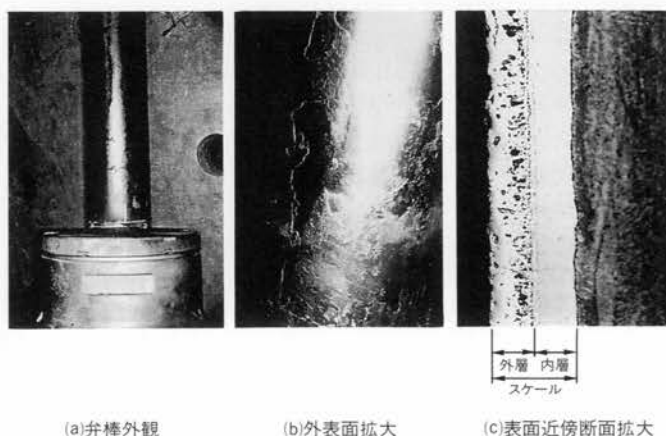


図7. 弁棒表面スケール状況 長時間使用により外面の高温酸化が進んだ結果、顕著なスケールの形成、はく離が認められた。断面の顕微鏡観察で内層、外層の生成状況がよくわかる。

Observations on outer surface of valve stem

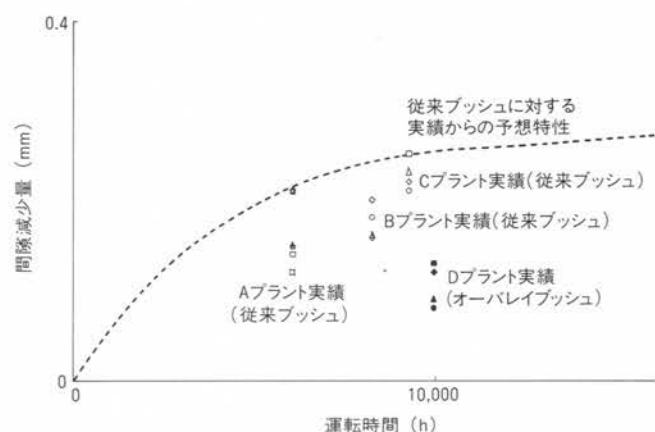


図8. 合金鋼オーバーレイブッシュによる間隙減少改善事例 ブッシュの内面に耐食性・耐酸化性の高い合金鋼をオーバーレイした結果弁棒間隙減少は従来品の1/2に改善された事例を示す。

Example of stem clearance improvement by application of special alloy material overlaying bushing

い場合には弁棒とブッシュの間隙(げき)を埋め尽くして弁棒の動きを阻害して開閉機能を損なってしまうことがあり、運用上深刻な問題であった。表面酸化物のうち鉄酸化物は加工表面の外面に生成することから“外層スケール”と称され、間隙減少の主因となるものである。これらを防止し、長期にわたって所定の弁作動の機能を確保するために、現在ではブッシュの表面には耐食・耐酸化性の高い合金をオーバーレイする技術を開発した。これの適用によって長期使用に対しても弁棒間隙の変化は図8に示すように従来材の半分に抑えられることが確認された。また、現在ではさらに長期運転に対応するために弁棒側の表面改質技術についても検討中である。なお、このような表面改質技術によって酸化スケールの除去作業に要していた時間は大幅に削減され、ハンドホーニングマシンによる外層スケール除去作業とも併せて定期点検工期短縮に大いに寄与するところとなった。

4 あとがき

経年火力が今後も電力安定供給の主流であることを考えると、蒸気タービンの保守管理はますます重要となってくる。プラントのライフサイクルを想定して、もっとも効果的な更新時期を計画していく必要がある。このため定期点検や日常の運転データに基づいて、各機器の状況や診断結果などを長中期的に保守計画することがプラント予防保全策の基盤となる。今後とも、それらの施策を支援する検査・診断技術および更新機器に適用可能な信頼性、効率、保守性向上のための新技術の開発に努めていきたい。これらの技術の開発にあたって、電力会社をはじめ関係者各位のご指導、ご支援を今後ともお願いする所である。

文献

- (1) 児玉寛嗣, 他: 蒸気タービンの改良保全, 東芝レビュー, 48, 5, pp.362-365 (1993)
- (2) 乙咩敏臣, 他: 蒸気タービン制御機器の改良技術, 東芝レビュー, 44, 6, pp.494-497 (1989)



小野 邦夫 Kunio Ono

1964年入社。火力発電所用タービン設備のプラントエンジニアリングに従事。現在、火力統括部火力改良保全センター課長。
Thermal Power Plant Engineering Div.



児玉 寛嗣 Hirotsugu Kodama

1972年入社。蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、京浜事業所タービンプラント機器部課長。
Keihin Product Operations



乙咩 敏臣 Toshiomi Otome

1972年入社。蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、京浜事業所タービンプラント機器部課長。
Keihin Product Operations