

既設火力タービンプラントの高効率化技術

Newly Developed Components and Technologies for Improving Existing Turbine Plant Efficiency

佐久間 章
SAKUMA Akira

柳原 佳英
YANAGIHARA Yoshihide

若林 正昭
WAKABAYASHI Masaaki

蒸気タービンの効率向上に関して最近開発された代表的な技術に、アドバンスト フロー パターン (AFP)，スナッパ翼などの第二世代性能向上技術，および 40 インチ級の長翼化技術などがある。また，復水器における新型管配列とチタン冷却管の採用による熱交換器性能向上技術，さらに既設火力プラントにガスタービンを追設して出力とサイクル効率を向上させるリパワリングもある。これらの技術は，新設機だけでなく，既設機の性能改善にも大きく貢献できる。

This paper outlines newly developed components for steam turbines to improve plant efficiency, including an advanced flow pattern design, a snubber blade, and a condenser with advanced piping layout, and also describes a repowering system for existing power plants using gas turbines.

These components and technologies are applicable to both new and retrofitted units. The features and main points of mechanical design, as well as validation, are described here.

1 まえがき

地球環境および省エネルギーの観点から火力発電設備の高効率化が重要な課題となっている。一方，建設以来 20 年以上運用されている経年プラントが全体の約半数を占めるようになってきている。このような状況下で，既設火力タービンの高効率化改造が行われるようになって 15 年ほどになるが，蒸気タービンのノズルや羽根に内部効率を向上させる新しい技術を適用して高効率化に貢献してきた⁽¹⁾。

最近，蒸気タービンの内部効率をさらに向上させる技術として第二世代性能向上技術が開発された。また，既設タービンの最終段の長翼化による排気損失の低減による高効率化も実施されている。さらに，新型管配列およびチタン冷却管による復水器の性能向上技術も開発され，また，既設火力プラントにガスタービンを追設したりパワリングのように従来よりも改造範囲を拡大した新たな展開が見られる。

ここでは，最近の高効率化技術と動向について述べる。

2 蒸気タービンの効率向上技術

2.1 第二世代性能向上技術

蒸気タービンの内部効率の高効率化技術は，図 1 に示すとおり従来から継続的に開発が進められており，開発された技術は第一世代性能向上技術として新設機だけではなく，既設機の改造にも広く適用されてきた。これらの高効率化技術は，タービン内部での蒸気の流れにおける損失発生メカニズムを解明するとともに，数値解析に加えて，試験用タービンなどの開発研究設備で検証された技術である。

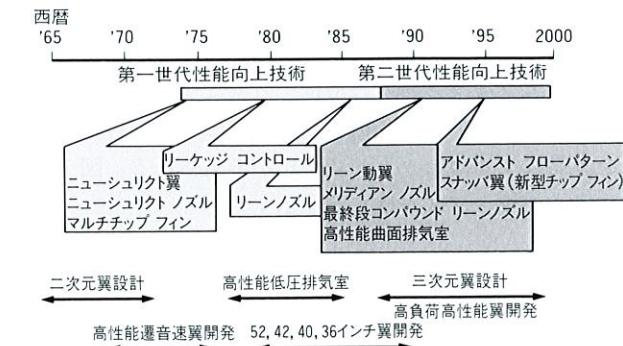


図 1. 蒸気タービン性能向上技術の変遷 蒸気タービンの性能向上技術は第一世代から第二世代へと継続的に開発が進められている。
Progress of turbine efficiency technologies

タービンの内部損失においては，二次流れ損失やチップ漏えい損失の占める割合が大きい。最近では，これらの損失低減を目標にして，粘性を考慮した三次元翼設計の適用による AFP 段落設計，そしてスナッパ動翼の適用による新型チップフィンなどの開発・検証を完了し，新設機および既設機に適用し始めている。これらのうち主要のものについて述べる。

2.1.1 AFP タービン翼列内で増速し，かつ転向する流れ場では，図 2 のように内外壁近くの境界層の発達と翼間の圧力こう配に従って，中央部を通る主流に対して内外

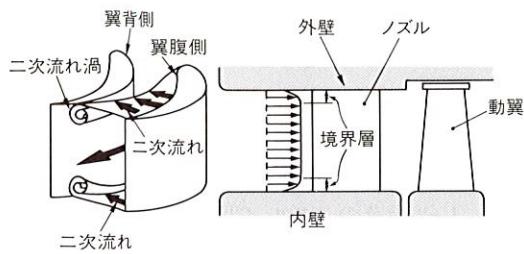


図2. 二次流れ損失の発生メカニズム　内外壁近くに生ずる二次流れは渦となって後流へ進み、流体的損失を生じさせる。

Mechanism of secondary flow loss

壁近くには二次流れが生ずる。この流れは、らせん状に渦を巻いた二次流れ渦を発生させながら後流へ進み大きな流体的損失となる。

タービンのノズル／羽根では、このような蒸気の流れとなることから、翼の高さ方向中央部付近の損失の少ない部分に多くの流量を流す流量分布パターンとし、かつ内外壁付近では翼を湾曲させたリーン構造として流線を壁側へシフトさせて二次流れによる渦損失を抑制させる両方の効果によって、段落効率を向上させる AFP 段落設計を開発した。図3にフローパターンの概念を示す。従来設計の段落と比較して相対的に約 2 % の段落効率の向上を検証試験で確認している。

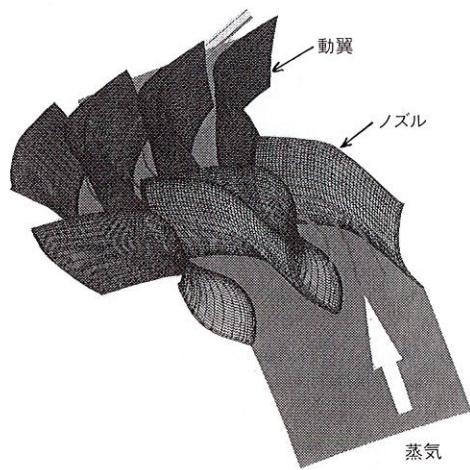


図3. アドバンストフローパターン　二次流れ領域でない翼高さ方向中央部付近の流量分布を多くし、かつ内外壁付近ではリーン構造として二次流れの発達を抑制させるフローパターンとして段落効率を向上させる。

Advanced flow pattern design

2.1.2 スナッパ翼と新型チップフィン　図4に動翼先端部のチップフィン構造を示す。従来のテノン シュラウド構造ではハイローマルチフィンが採用できなかった。そこで、スナッパ翼を適用して、インテグラルカバー外周の凹

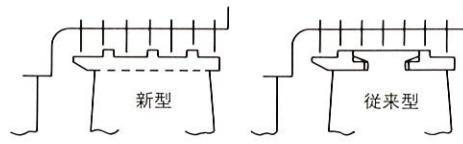


図4. チップフィン構造の比較　従来のテノン シュラウド構造におけるマルチチップフィンとスナッパ翼に適用したマルチチップフィンの構造を示す。スナッパ翼ではハイローマルチフィンが採用できるので段落効率が向上する。

Comparison of tip fin structures

凸化とハイロー マルチフィンの採用によって、チップ漏えい損失を低減させることで段落効率を向上させる技術を開発した。図5に 600 MW タービンにスナッパ翼を適用した状況を示す。従来型に対し新型構造は相対的に約 1 % の段落効率の向上を検証試験により確認している。

なお、スナッパ翼は高効率化に寄与するだけではなく、全周一群化による翼振動応力の低減、およびテノン シュラウド構成でなくなることから応力集中部位がなくなり、翼の信頼性も向上させることができる。

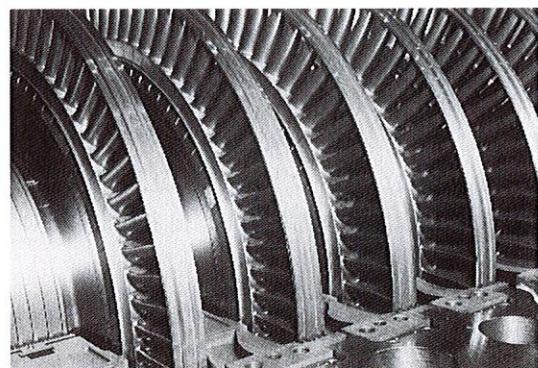


図5. スナッパ翼の適用　600 MW タービンに適用したスナッパ翼。従来型に対し、新型構造は相対的に約 1 % の段落効率の向上が確認されている。

Snubber blades in 600 MW steam turbine

2.1.3 第二世代性能向上技術の適用効果　上述の AFP やスナッパ翼を従来設計の 700 MW 級蒸気タービンに適用すると、タービン室熱消費率で相対的に約 1~1.5 % 性能改善が期待できる。なお、従来の第一世代性能向上技術も適用して高効率化が可能な機種であれば、トータルで約 2~3 % 性能改善が可能である。

2.2 最終段の長翼化技術

タービンの内部損失の構成では排気損失も大きな部分を占めており、損失全体の 10~15 % くらいになっている。この損失を減らすために最終段翼そのものの性能を向上させること、およびサイズのより大きい長翼を採用して排気速

度を小さくすることは、熱効率向上への寄与が大きい。

最終段翼では、動翼への相対流入速度が亜音速、流出速度は超音速であり、翼内の流れはいわゆる遷音速流となる。また、翼先端付近の出口相対マッハ数は1.5~2に達する長翼もある。このため、流れをスムーズに加速して遷音速流れを効率よく実現できる翼形状が要求される。近年、流れの粘性の影響を直接反映して、最終段翼先端部の翼列流れが解析できるようになった。また、翼列の流体的損失の定量的な把握も可能となり、長翼の翼列効率および段落性能のいっそうの向上が図れるようになった。

さらに、全周一群綴り構造を適用し、これにより従来は長翼に複雑に作用していた振動応力を低減させるとともに、翼相互の振動応力、遠心応力、変形量などの差もなくすことができ、信頼性の向上を図れるようにしている。

ここでは、既設タービンの最終段翼を長翼化して性能を向上させる具体例として、オリジナルの33.5インチ最終段翼から36インチまたは40インチへの低圧タービン改造について述べる。

2.2.1 50 Hz用36インチ最終段翼化 36インチ翼の特長と構造を図6に示す。基本構造は、最終段翼として多くの使用実績をもつカバーピースと、中間部ラグ・スリープによる全周一群構造である。また、植込部は33.5インチ翼と共通で、既設機のリプレースによる長翼化として使える設計となっている。さらに、翼材料は従来のものに比べて高強度材になっており、信頼性の向上を図っている。

最終段翼とともにシリーズ翼として、L-1翼とL-2翼も開発している。これらの翼も植込部は従来の33.5インチ翼

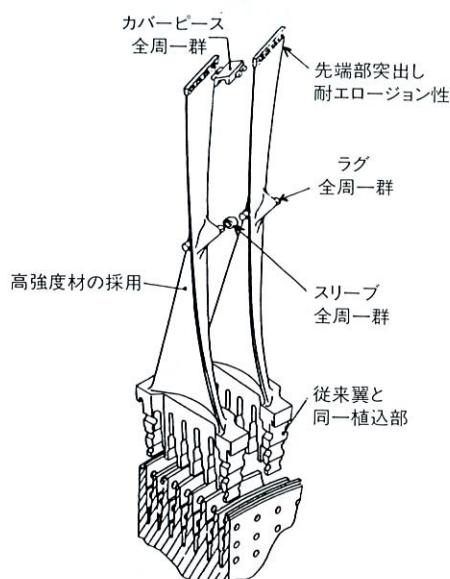


図6. 36インチ最終段翼の構造 全周一群構造翼。植込部は33.5インチ翼と同一の50Hz用最終段長翼である。

Technical features of 36-inch last-stage blades

シリーズと共に通なっており、既設機のロータにリプレースすることができる。翼先端部はスナップ構造を採用し、信頼性の向上を図っている。

600 MW級の33.5インチ翼低圧タービンでは、36インチ翼シリーズをリプレースすることができる。改造範囲は最終段、L-1、L-2段落のノズル／羽根であるが、これによりタービン室の熱消費率は相対値で0.5~0.6%向上する。

2.2.2 60 Hz用40インチ最終段翼化 40インチチタン翼は700 MW蒸気タービンではすでに多くの使用実績があるが、これを33.5インチ低圧タービンの既設機に適用することも可能である。図7に既設700 MW機に適用した例を示す。40インチ翼化改造においては、翼植込部形状がフォーク型から円弧クリスマス型となることから低圧ロータを更新することが必要で、かつ翼先端径が大きくなることから低圧内部ケーシングの更新も必要となり、改造範囲が36インチ翼化の場合よりも大きい。改造の際は、スナップ型L-1翼も採用して信頼性向上が図れる。この改造によるタービン室熱消費率の向上量は相対値で1.2%である。この改造は既設700 MW機で改造実績があり、良好な運転実績を示している⁽²⁾。

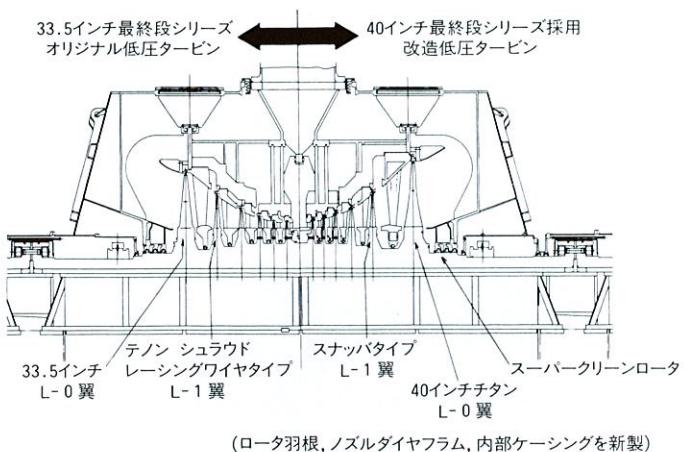


図7. 700 MW低圧タービンの40インチ翼化 700 MW 33.5インチ翼低圧タービン(左断面)に40インチ翼シリーズを適用した改造例(右断面)。

Comparison of conventional and modified 700 MW low-pressure turbine cross sections

3 热交換器性能向上技術

火力発電用プラントの復水器性能向上として、管束の新製取替えを行い、新型管配列の採用と冷却管材質をアルミニウム黄銅からチタンに変えた600 MW機での改造実績について述べる。

復水器専用熱流動解析コードを用い、管配列および冷却管長の最適化設計を行い、図8に示す工法で据付け改造を

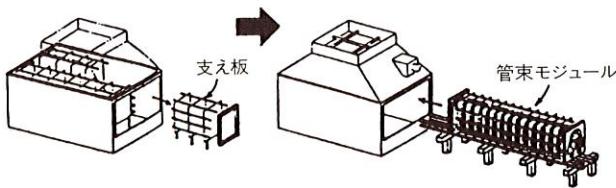


図8. 復水器の性能向上工事 既設の冷却管や支え板を撤去した後、工場で製作された管束モジュールを架台の上を滑らせて復水器内に据付ける工法を採用した。

Outline of modified condenser

実施した。改造後の試験結果は、仕様を十分満たしていることを確認した。

表1. リパワリングシステムの比較

Comparison of repowering systems

	給水加熱式	排熱回収式	排気再燃式
システム概要			
改主要 項追 目設	(1)ガスタービン追設 (2)ガス給水加熱器追設 (3)脱硝装置改造または追設	(1)ガスタービン追設 (2)排熱回収ボイラ追設 (3)煙突追設 (4)脱硝装置追設	(1)ガスタービン追設 (2)ガス給水加熱器追設 (3)脱硝装置追設

4 既設火力プラントのリパワリング

既設蒸気タービン（汽力）発電所にガスタービン発電設備を追設して複合サイクルに改造し、増出力、熱効率の改善を実現するリパワリングについて述べる。

4.1 リパワリングの方式

リパワリングは、用地および発電設備の再活用、建設工期の短縮などに大きな効果がある。表1にそれぞれの方法を比較して示す。既設火力プラントの発電を停止して複合サイクル化改造工事を期間を半年ほどに抑えることができ、また改造範囲が大きくない排気再燃式複合サイクルがもとも普及している⁽³⁾。

4.2 リパワリングの適用実績

建設から約15~20年経過した700 MW 既設汽力発電所に1,300°C級ガスタービンを追設した排気再燃式リパワリングプラントの概要を紹介する。

4.2.1 850MW 級リパワリングプラントの概要 表2

表2. 850 MW 級リパワリングプラントの概要

Outline of 850 MW-class repowering plant

既設プラントの仕様	定格出力 蒸気条件 ボイラ型式 タービン型式 燃料料	700 MW 246 atg, 538/566°C 定圧または変圧貫流ボイラ TC4F-33.5 (4車室) LNG
ガスタービン設備	出力 台数 燃焼温度	154 MW 1 1,300°C級
リパワリング前後の比較	出力 熱効率向上	854 MW (+22%増) +4%

にプラント概要を、図9にリパワリング系統を示す。プラントの運用方法として、容量の小さいガスタービン側は単

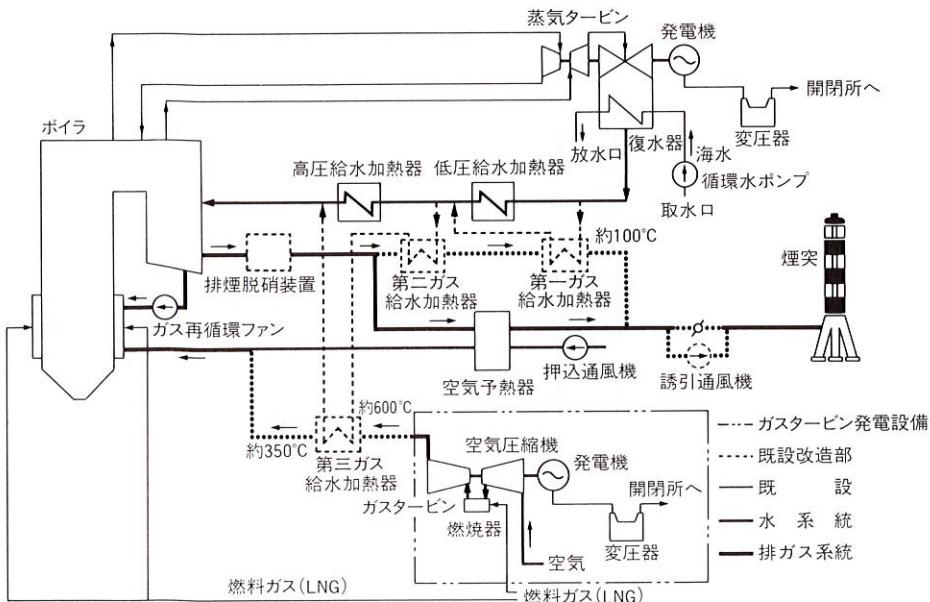


図9. リパワリングの主要系統 850 MW 級リパワリングプラントの主要系統。700 MW 汽力設備に154 MW 級ガスタービンを追設した例。

Major piping diagram of repowering plant

独運転（発電）を行わないこととし、容量の大きい既設汽力側は複合サイクル運転も単独運転も可能となるよう設備を改造した。リパワリング化に伴う設備追設と改造のポイントは次のとおりである。

(1) ガスタービン発電設備 既設設備とは独立させた専用建屋を既設ボイラの横に設置し、ガスタービン排ガスダクトでボイラに接続させている。また、主変圧器、所内変圧器なども新たにガスタービン発電設備として追設している。

(2) ボイラおよび蒸気タービン設備の改造 複合サイクルとなると、ボイラ排ガス量が増加してドラフト損出が増大するので、誘引通風機（IDF）の追設と、脱硝装置の容量をアップした。これにより、排ガスダクト、給水管、復水管の連絡部分のシステム改造、およびボイラ本体の低酸素燃焼バーナへの交換、さらには蒸気タービン本体の蒸気流量増加のためのノズル、羽根の蒸気通路部改造などと、改造範囲を極力小さくすることができた。

なお、煙突は既設のものをそのまま使用し、復水器については、交換熱量が増加するが温排水の制約上まだ余裕があることから改造していない。

(3) 排ガス熱交換器 ガス給水加熱器（スタッガガスクーラ）を3ブロック追設し、ガスタービンおよびボイラの排ガス保有熱量を給水および復水に熱回収することで熱効率を改善している。ガスパス側（ガスタービンおよびボイラ排ガス系）には切換えダンバおよび遮断用ダンバが配置され、複合サイクル運転と汽力単独運転の切換え、またはガスタービンの起動時の運用を考慮している。

(4) 電源構成および制御装置 複合サイクル運転および汽力単独運転におけるプラントの統括監視と制御のため、計算機一式を最新鋭機に交換し、またガスタービンおよび複合サイクル運転に対応できるように中央操作室の制御盤を全面改造または部分追加した。ボイラ制御および補機制御は機能を追加・改造し、電源構成はガスタービン用設備を追設した。

4.2.2 運用性、熱効率の改善 図10に複合サイクル運転の起動方法を示す。システムは複雑となったが、運転および制御性は従来の汽力プラントと比較して見劣りせず、通常の複合サイクル運転中の負荷変化率は3%/分である。

熱効率は約4%の改善に止まっているが、これはガスタービン稼働時のボイラ燃焼バランスを維持するために強制通風機（FDF）を部分運用させているためである。

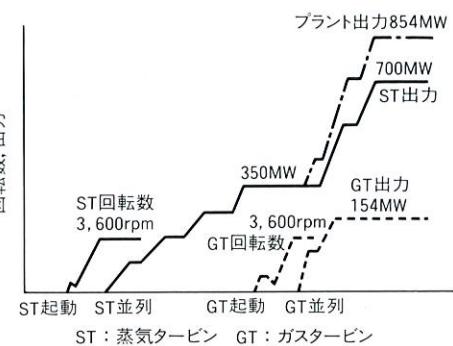


図10. リパワリングプラントの起動曲線 850 MW級リパワリングプラントの起動曲線。出力の大きい蒸気タービン側を起動してからガスタービンを起動して複合サイクル運転する起動パターンとしている。

Start-up curve of repowering plant

5 あとがき

火力タービンプラントの高効率化技術について、最近開発・実用化した主なものを紹介したが、性能だけでなく、信頼性に關し十分に検討・配慮したものである。これらの技術が既設機に適用され、おおいに貢献できると期待している。また、今後もさらに着実に新しい技術開発に努力していく所存である。

文 献

- 鈴木篤英、他、蒸気タービンの高効率化、東芝レビュー、40、7、1985、p.916-919。
- 栗山 凌、他、チタン長翼適用の高効率低圧タービン開発と既設タービンのレトロフィット、火力原子力発電、42、7、1991、p.870-878。
- 大原久宣、リパワリング計画と運転実績、火力原子力発電、46、10、1995、p.1121-1132。

佐久間 章 SAKUMA Akira

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

柳原 佳英 YANAGIHARA Yoshihide

京浜事業所 タービン機器部グループマネージャー。
火力・原子力プラントの熱交換器の設計・開発に従事。
Keihin Product Operations

若林 正昭 WAKABAYASHI Masaaki

火力事業部 火力プラント技術部参事。
火力発電プラントの計画・建設に従事。
Thermal Power Systems Div.