

特集：蒸気タービンの最新技術動向

原子力用蒸気タービンの最新技術動向

小川 雪郎*¹
OGAWA Yukio柴下 直昭*²
SHIBASHITA Naoaki北澤 聡*³
KITAZAWA So

キーワード：タービン効率，長翼化，全周一リング翼，信頼性検証技術，原子炉出力向上

1. はじめに

1.1 低炭素社会実現に向けた原子力発電への期待

我が国では現在54基の発電用原子炉が稼動しており、原子力発電は我が国の総発電電力量の約1/3を担う基幹電源となっている。また近年では地球温暖化問題への対策として、原子力発電は発電時に二酸化炭素を出さないことが特に注目され、低炭素社会への移行を実現するための「ゼロ・エミッション電源」の中核を担うものとして、これまで以上の大きな役割が期待されている。このような背景から、原子力発電に対する期待は政府の政策に由来から示されており、原子力政策大綱（2005年10月閣議決定）では、「2030年以後も総発電電力量の30～40%程度以上の供給割合を原子力発電が担う」との方針が掲げられている。また、「低炭素社会づくり行動計画」（2008年7月閣議決定）でも「2020年をめどに原子力を始めとする『ゼロ・エミッション電源』を50%以上とする」とされている。

民主党政権への政権交代後、2009年9月に鳩山首相が掲げた温室効果ガス排出削減量の新たな中期目標（2020年までに1990年比25%削減）の実現に向けた原子力発電への取組方針は、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会 原子力部会で現在検討されている。新たな中期目標でより高い目標への挑戦が示されたことから、発電時に二酸化炭素を出さない原子力発電を積極的に活用し、原子力発電比率を増加させていくことが従来にも増して重要になってきていると考える。

1.2 原子力用高効率蒸気タービンの価値

原子力発電所の蒸気タービンは原子炉や蒸気発生器で発生した蒸気を動力として発電機を駆動する重要機器であり、蒸気タービンの効率が直接、原子力発電所の発電効率を左右する。従って蒸気タービンの効率を向上させることは原子炉出力当たりの発電量を増加させ、原子力

発電所の経済性をより向上させるとともに、原子力発電比率の増加によって温室効果ガスの排出削減を促進することにつながる。

既に我が国でも原子力発電所用の蒸気タービンは多くの実績があるが、新規に建設される原子力発電所では原子炉の大出力化に対応してタービンの大容量化や、長年に渡る技術開発の成果として実用化された種々の効率向上技術が採用されており、最新鋭の蒸気タービンは従来に比べ大幅なタービン効率の向上が図られている。一例として、タービンの大容量化の点では国内BWR（沸騰水型軽水炉）、PWR（加圧水型軽水炉）ともに最終段翼長が50インチを超えるタービンが既に実用化されており、日立グループでは2004年に運転を開始した中国 秦山第三原子力発電所1、2号機用の蒸気タービンで最終段動翼に50Hz 52インチ（約132cm）長翼を採用したの続き、国内ではABWR（改良型沸騰水型軽水炉）用に中部電力（株）浜岡原子力発電所5号機（2005年）および北陸電力（株）志賀原子力発電所2号機（2006年）で60Hz 52インチ最終段長翼を採用している。さらに、現在建設中の中国電力（株）島根原子力発電所3号機用にも同型の60Hz 52インチ最終段長翼を製作している（図1）。

また、既存の原子力発電所の蒸気タービンについても、最新鋭のタービンで採用されている設計技術を適用して新たに設計したロータ、ダイヤフラム、車室等に取替または改造することにより、タービン効率を向上させ、大幅に電気出力を増加させることが可能になっている。



図1 52インチ低圧タービンロータ

原稿受付 2010年5月25日

*1 日立GEニュークリア・エナジー(株) 原子力予防保全技術部
〒317-0073 茨城県日立市幸町三丁目1-1

*2 (株)日立製作所 電力システム社 日立事業所

*3 (株)日立製作所 電力システム社 エネルギー・環境システム研究所

1.3 長期安定運転と経済性の両立

一方、原子力発電所で稼動中の蒸気タービンは長期安定運転を実現するために蒸気タービンの各部位に対して予防保全が実施されてきた。例えば、初期の原子力タービンで採用されていた焼き嵌め式ロータの応力腐食割れ(SCC, Stress Corrosion Cracking)対策を目的とした一体型ロータへの取替や、低圧タービン内部車室等のエロージョン対策を目的とした計画的な経年劣化更新が挙げられる。

また、例えばシステムの隔離弁からの蒸気のリークが生じた場合など蒸気タービン周辺の本プラント(BOP, Balance of Plant)設備の経年劣化によりプラント性能が低下し電気出力の損失が起こる場合がある。この対策として日立グループでは、原子力プラントの実際の運転状態と設計時のプラント特性の差異を分析して電気出力低下要因を診断する機能を備えたプラント性能監視診断システムを実用化している(図2)。予防保全の一環として継続的にプラント診断を行い、必要な性能回復策を実施することで、プラント性能を最大限発揮し、最適なプラント電気出力を得ることができる。

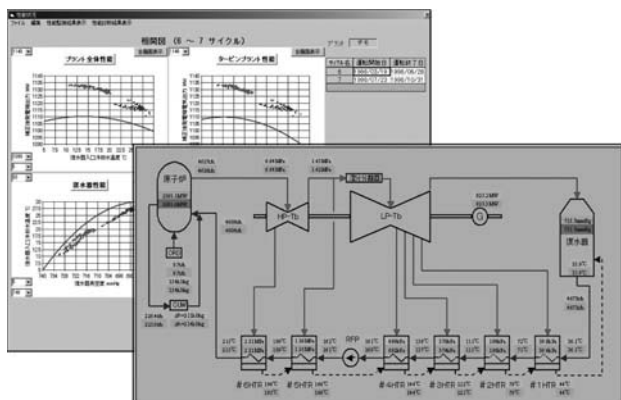


図2 プラント性能診断システム

既設機のタービン効率向上は、これらの予防保全を兼ねて実施することが可能であり、プラントの長期運用に必要な予防保全を行う際に、最新設計技術を適用してタービン効率向上を実施することで事業者の投資の合理化を図りつつ、発電量の増大による原子力発電所の経済性の向上と、タービン機器の信頼性向上および長期安定運転を同時に実現することができる。

本稿では、これまで日立グループで筆者らが取組んできた既設タービンの効率向上に採用している最新技術を中心に、既設タービンの改造コンセプト、タービンの効率向上技術、信頼性検証技術、検査技術の動向について述べる。

2. 既設タービン改造のコンセプト

タービン効率向上の他に既設の原子力発電所からの発電量を増加させる手法として、最近では原子炉出力向上

が注目されている。原子炉出力向上は原子炉の定格熱出力を増加させ、より多くの蒸気を得ることで電気出力を向上させるものであり、欧米では1970年代以降、多数の実績がある。特に米国では新規原子炉の建設が長年の間停止していたため、原子力発電による発電量を増加させる主な手法として原子炉出力向上が広く用いられてきており、100件以上の認可実績がある。米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)の定義ではS型、MU型、E型の3つのタイプがある。

(1)S型(SPU: Stretch Power Uprate: ~7%出力向上)

SPUは既設設備の容量の余裕で対応できる範囲内で原子炉出力を向上させる。設備の改造範囲は蒸気呑込み対策で高圧タービンのダイヤフラム数段を改造する程度である。

(2)MU型(MUR: Measurement Uncertainty Recapture: ~1.7%出力向上)

MURは原子炉の熱出力測定を高精度化し、安全解析で想定されている上限出力への余裕を最適化して運転する出力向上である。設備の改造範囲は給水流量計を従来の差圧式のフローノズルから高精度の超音波給水流量計に変更する程度である。

(3)E型(EPU: Extended Power Uprate: ~20%出力向上)

EPUは120%程度まで原子炉出力を向上させ、積極的に経済性を追求するタイプの出力向上である。EPU時には設備容量の大幅な拡大が必要であるため、高圧・低圧タービン、給復水ポンプ、給水加熱器や発電機、主変圧器などタービン設備の主要機器の取替・改造を行う。

現在、我が国初のSPUの実施に向けた検討が進められており、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会に設置された原子炉熱出力向上WGで5%の原子炉熱出力向上を前提として、原子炉熱出力向上の安全性の確保を目的に各規制段階における審査、検査等の考え方、着目点、留意点、重点確認事項が取りまとめられたところである。近い将来、我が国でも原子炉熱出力向上の実施が想定されており、今後はタービン効率向上と原子炉熱出力向上の併用により更なる電気出力の増加を図り、プラントライフでの経済性を最大化することが可能になってくる。

前述の通りタービン効率向上を計画する際には、経年劣化更新等プラントの予防保全との合理的な組合せにより、原子力発電所の経済性の向上と信頼性向上や長期安定運転との両立を図ることができる。更に原子炉出力向上と組み合わせる場合には、プラント設備の大規模かつ段階的な改造が想定されるため、計画段階で長期的な保全戦略の検討がより重要となる。例えば、大規模な原子炉出力向上を実施する時には、主としてスチームパス各部の構造強度面の対策からタービン設備の改造が必要になる。従ってタービン効率向上を先行実施する場合でも、将来の原子炉出力向上を想定した設計条件の採用により

プラントライフにわたる改造計画の最適化を図ることが可能である。

このようにプラントライフマネジメントを踏まえた総合的な予防保全計画の根幹として原子炉出力向上やタービン効率向上を捉え、長期予防保全戦略に反映することで、順次実施される経年劣化更新や設備改善などの改造計画に柔軟に対応しつつ、段階的に電気出力の最大化を図り、経済性の向上と信頼性向上や長期安定運転との両立を実現するアプローチが可能となる。

3. 最新のタービン設計技術

蒸気タービンの効率を向上させるには、タービン効率を低下させる内部損失をいかに低減するかが課題である。蒸気タービンで発生する内部損失には大別して排気損失、漏えい損失、流れ損失があるが、これらを低減するために最新鋭の蒸気タービンで採用されている代表的技術である、タービン最終段動翼の長翼化、全周一リング翼および高性能三次元静翼・動翼について以下に述べる。

3.1 最終段動翼の長翼化

既設タービンの最終段動翼を長翼化し、環帯面積を増加させることで排気損失を減少させ、タービンの効率を約1～2%程度向上させることができる。日立グループでは、最長52インチの低圧タービン最終段動翼を実機適用した実績があり、この技術を応用して既設機の長翼化改造による効率向上策の開発を行っている。日立グループはこれまでに国内原子力向けとして50 Hz 1500 rpm機では35インチ、41インチ、52インチ、60 Hz 1,800 rpm機では38インチ、43インチ、52インチ動翼をもつ原子力用タービンを納入しており、それぞれに対して最適な長翼化改造用の取替翼を提案している。

蒸気タービン低圧段では、流れが最終段に近づくにつれて環帯面積が急拡大し、蒸気流れの三次元性が大きくなる。そのため、長翼の性能設計では、静動翼三次元フローパターンのベストマッチングを考慮することが最も重要となる。

近年の計算機の発達と共に流れ解析技術も向上し、最近では翼設計ツールとして各種熱設計パラメータのサーベイに静動翼の三次元乱流解析を活用している。また、従来の流れ解析では理想気体を扱うに留まっていたが、蒸気による湿り条件や相変化も加味した非平衡凝縮流れ計算が可能になり、蒸気タービンの低圧段落において、流量、段落負荷、損失の予測が精度良く行えるようになった⁽¹⁾ (図3)。

さらに、蒸気タービン翼形設計にロバストデザインとして著名なタグチメソッドを導入し、広範囲な流入角条件に対して損失特性を改善する設計パラメータサーベイを短時間で効率良く行っている⁽²⁾。



図3 静動翼3次元湿り乱流解析例

3.2 全周一リング翼

最新鋭の蒸気タービンでは、CCB (Continuous Cover Blade) 構造と呼ばれる全周一リング翼を採用している。これは遠心力による翼振り戻り (アンツイスト) 効果を利用して、翼と一体成形されたカバー部に設けた接触面で、隣り合う翼どうしが接触連結する翼構造である。既に新設の火力機では高圧タービンから低圧タービンまでの全段でCCB構造の採用が標準的であり、また新設の原子力機でも一部段落でCCB構造の適用が始まっている。CCB構造には接触連結による振動減衰効果と、翼固有振動数の単純化、漏えい損失、流れ損失の低減といった利点があるため、日立グループでは既設原子力機のタービン効率向上では高圧タービンから低圧タービンまでの全段落でCCB構造の採用を標準としている。

3.2.1 低圧タービン最終段用CCB翼

低圧タービン最終段のCCB構造は、長翼化による剛性低下を改善するため、連結部として先端にカバー、翼中間部にタイボスを設けている。図4に最終段CCB構造

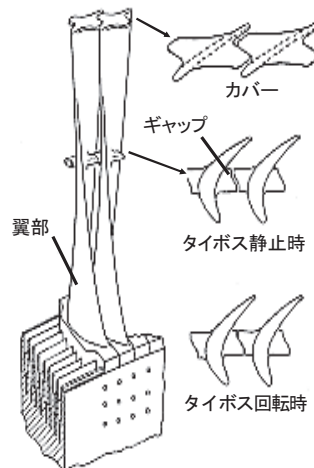


図4 低圧最終段用CCB構造

造の概略を示す⁽³⁾。この構造では、タービンが回転し始めると同時に翼先端部のカバー間がアンツイストを利用して接触連結し、その後回転途中で翼中間部のタイボスが接触連結する。

3.2.2 低圧タービンL-1,L-2段用CCB翼

低圧タービンL-1,L-2段用CCB構造翼とカバー形状を図5に示す。低圧タービンのL-1段, L-2段では、従来、翼中間部に存在したタイワイヤやスリーブといった連結部材を排除し、カバーのみのCCB構造を採用している⁽⁴⁾。

従来では中間連結部材が存在した翼とCCB構造に改善した場合との性能比較実験を行った。実験結果として段落効率分布を図6に示す。従来翼では翼中間連結部材にタイワイヤが存在するため、翼中間部で損失が大きくなることが判る。また、CCB構造に改善した際、翼形状の見直しも行ったため、新翼を用いた段落効率は翼長方向全般にわたり改善された結果を得た。

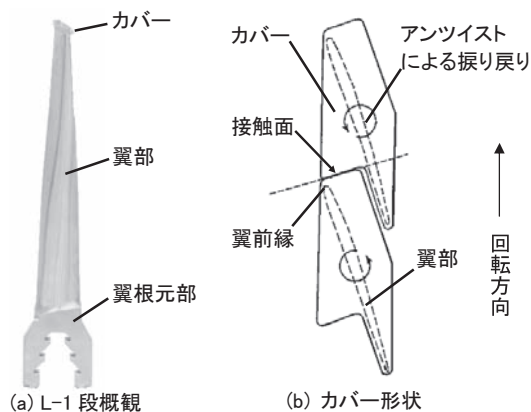


図5 L-1段CCB構造翼とカバー形状

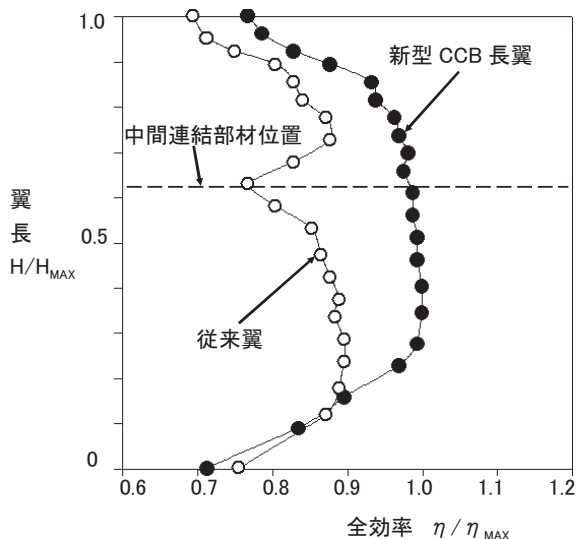


図6 段落効率(全効率)の比較

3.2.3 高圧タービン, 低圧タービン中短翼用CCB翼

高圧タービンや低圧タービンの中短翼部では、従来は翼先端部で翼同士を綴っているシュラウドを翼先端部の

テノンでかきめて固定するテノン・シュラウド構造を採用していたが、タービン効率向上時の改造設計ではCCB構造に変更を行う。CCB構造では翼先端のカバー外周面が平坦になるため、チップフィンにハイロー型マルチフィンシール構造を採用して翼先端部からの漏えい損失を低減することができる。図7に中短翼用CCB翼およびマルチフィンシール構造を示す。

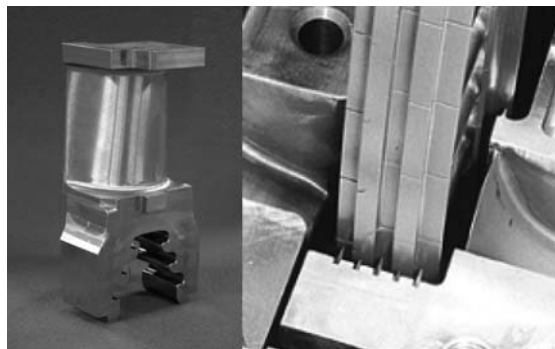


図7 中短翼用CCB翼およびマルチフィンシール構造

3.3 高性能三次元動翼・静翼

1990年代以降、解析評価技術の進展により翼形状の三次元化による流れ損失の低減や、ノズルと動翼の一括解析による段落性能の最適化などの効率向上技術が実用化され、従来の蒸気タービンに比べタービン効率の向上が図られるようになった。その成果として、日立グループではAVN (Advanced Vortex Nozzle) およびHV (High Load Vortex) 動翼と呼ぶ高性能型静翼、動翼を実用化している。

AVNはノズルを翼長方向に湾曲させ、腹側を凸状に形成することによって、二次流れなどによる流れの不均一性を緩和することを狙いとしたものである(図8)。この構造により、ノズルで発生する損失を低減し、蒸気タービンの内部効率を向上させている。またHV動翼は動翼の翼列ピッチと翼負荷分布の最適化により翼形損失及び二次流れ損失の発生を抑制するものである。

既設機のタービン効率向上では、高性能型の静翼および動翼を採用することにより原設計時の翼型に比べ効率を大幅に向上させることができる。日立グループでは既設機のタービン効率向上では高性能型静翼は高圧タービ

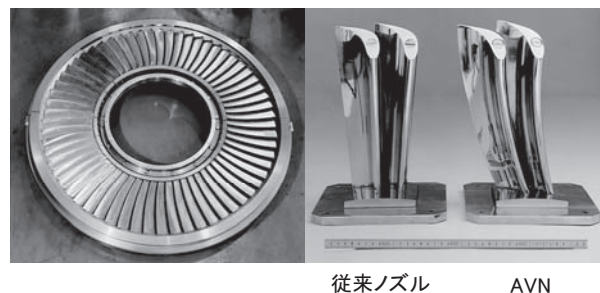


図8 AVNの外観と形状比較

ンから低圧タービンの全段落で、また高性能型動翼は高圧タービンから低圧タービン一般段（長翼部を除く）全段での採用を標準としている。

4. 最新のタービン信頼性検証技術

最新鋭の蒸気タービン低圧段では最終段翼長の長翼化に伴って蒸気流路が急拡大することにより蒸気流れの三次元性が大きくなり、低負荷時の流れの不安定性が増大する。日立グループではこの対策として最新スーパーコンピュータによる多段落準三次元非定常流れ解析コード（M-stage）の開発を行うとともに、実機負荷遮断時のフラッシュバックを模擬できる世界初の蒸気タービン実証試験設備を建設し、様々な運転状態における蒸気タービン構造健全性・信頼性の検証技術を確認した。以下、信頼性検証技術について述べる。

4.1 実機大モデル回転試験設備

実機大モデル回転試験設備の外観を図9に示す。これは、実機翼と同仕様の試作翼を組込んだ実機大試験ロータにより動翼の基本特性を検証する試験設備であり、加振装置により実機負荷相当振動応答下での試験計測・検証が可能である。計測装置は、従来用いられている歪ゲージ・テレメータ方式の他に、非接触センサにより全翼の振動特性計測を行っている。

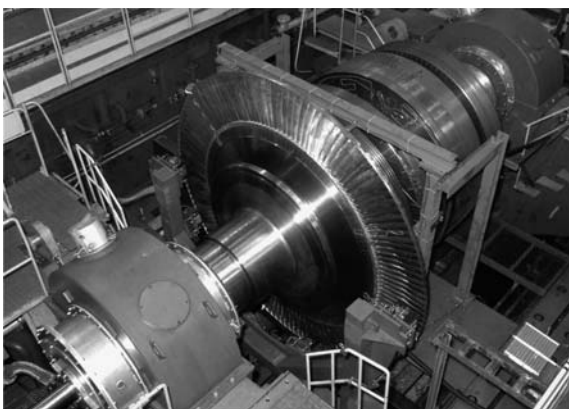


図9 実機大モデル回転試験設備

4.2 蒸気タービン実証試験設備

モデルタービン蒸気負荷試験を行う蒸気タービン実証試験設備の外観を図10に示す。実機を模擬した縮小モデルタービンは実機と同一の車室と抽気構造を有し、蒸気負荷運転中での動翼に作用する振動応力を計測できる。（図11）



図10 蒸気タービン実証試験設備

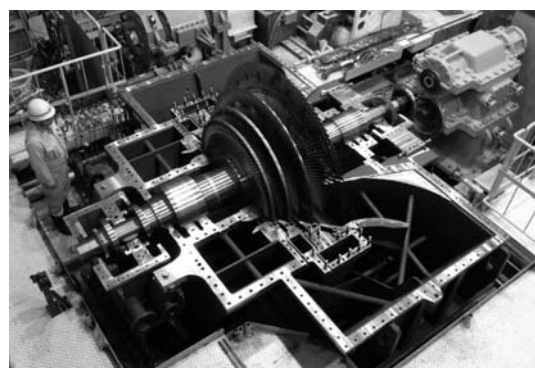


図11 縮小モデルタービン

を可能としている。数値解析の精度はモデルタービン蒸気負荷試験による検証で確認されており、蒸気タービン内で渦が発生し、蒸気が逆流する領域をM-stageと縮小モデルタービンによる実測で求めた結果、両者は良好な一致を示すことが確認された（図12）。

実証試験での検証により、非定常流れに対するタービン動翼の振動応答特性の数値解析による評価手法を確認した。また52インチ最終段長翼を超える開発翼に対してこの検証手法を適用することにより、強度信頼性・構造健全性を十分担保できる設計技術を確認した。

4.3 非定常三次元流れ解析

最新の解析技術⁶⁾を用いた多段落準三次元非定常流れ解析コード（M-stage）による数値解析の例を図に示す。M-stageは、多段落間蒸気流れを比較的短時間で解析でき、タービン内フローパターン設計の高速化・高精度化

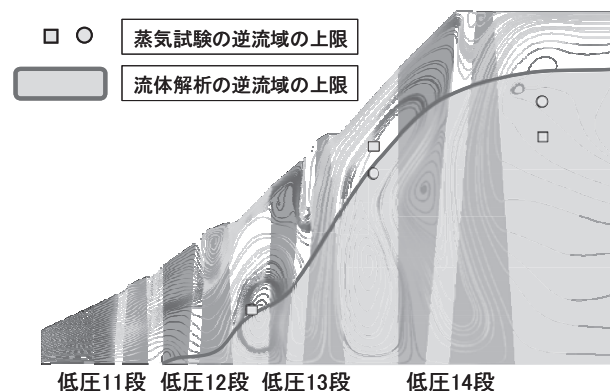


図12 数値解析と実測による渦流域の比較

5. 最新のタービン検査技術

5.1 タービン翼溝部のフェーズドアレイ超音波探傷

蒸気タービンの定期検査時に比較的容易に翼溝部の健全性を確認する検査手法としてフェーズドアレイ超音波探傷の開発に取り組んでいる。超音波探傷はロータに植込んだ状態で動翼の翼溝部を検査できるため、検査工程の大幅な短縮が可能である。

フェーズドアレイ超音波探傷は複数の圧電素子が配列したアレイセンサーを用い、各素子に位相を制御したパルス電圧を印加することにより、検査対象内部の任意の位置に超音波ビームを集束させて探傷する技術である。ビームの集束性と電子制御走査により、きずの寸法測定精度が向上し、検査時間も短縮する。日立グループでは、装置の小型化と高機能性を両立したフェーズドアレイ超音波探傷装置を開発し製品化した。本装置は独自開発のS-SAFT (Sector-scan Synthetic Aperture Focusing Technique) 信号処理機能⁽⁷⁾を搭載している。S-SAFTは、セクタスキャンを行いながらアレイセンサーを機械走査もしくは電子走査し、複数枚のスキャン画像画像を合成する方法であり、従来に比べ探傷画像のSN (Signal-to-Noise) 比と空間分解能が向上する。図13に、蒸気タービンの低圧ロータホイールのダブテイル部 (動翼植込み部) の健全性を確認することを目的に、スリットを設けた試験体でのフェーズドアレイ超音波探傷例を示す。ロータに設置した回転機構でホイール上のセンサーを移

動させながら探傷を行う。図に示すように、スリットからの反射信号 (3ヶ所) が明瞭に捉えられている。

5.2 三次元フェーズドアレイ超音波探傷

三次元フェーズドアレイ超音波探傷システムは、検査速度のさらなる向上を目的に開発したものである⁽⁸⁾。このシステムでは、圧電素子を二次元的に配列したマトリクスアレイセンサーを用い、超音波ビームを電子的に三次元走査する。各圧電素子に印加するパルス電圧の位相を制御することにより、任意のパターンの三次元走査を行うことができる。さらに、探傷結果をモニタ上にCAD (Computer-aided Design) データと重ねて三次元表示させることが可能であるため、データ取得から評価までを効率よく短時間で行うことができる。また、従来法よりも超音波ビームの集束性が高くなるため、傷の寸法測定精度も向上する。この三次元フェーズドアレイ超音波探傷のタービン翼溝部への適用については現在、開発を進めているところである。

6. おわりに

既設タービンの効率向上に採用している最新技術を中心に、既設タービン改造のコンセプト、原子力タービンの効率向上技術、信頼性検証技術、検査技術の動向について述べた。地球温暖化対策として原子力発電がより大きな役割を果たすことが期待されている現在、タービン効率向上は原子炉出力向上とともに、既設の原子力発電所の価値を高め、比較的短期間で原子力発電比率を増加させる有効な方策と考えている。

参考文献

- (1) Senoo, et al. : Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis through Turbine Blades, Proc. 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., 197 ~ 200 (1998-10)
- (2) 瀬川, 外 ; タグチメソッドによる蒸気タービン用鈍頭動翼の開発, 日本機械学会2001年度年次大会講演論文集, II, 569 ~ 570 (2001年8月)
- (3) 齊藤, 外 ; 3000rpm用43インチ最終段翼の開発, ターボ機械, 27, 8, 495 ~ 501 (1999年8月)
- (4) Namura, et al. : Development of New 20.9-inch Next-to-last Stage Blade for Improved Turbine Reliability and efficiency, Proc. 60th American Power Conf. 233 ~ 239 (1998-2)
- (5) 特許第3178327号, US Patent 5829955
- (6) 奥野, 他 ; シール一体タービン翼段落解析, 日本機械学会計算力学講演会講演論文集, No.640, (2008年11月)
- (7) 菊池 修, 外 ; フェーズドアレイ式超音波探傷装置の開発, 日本保全学会 第5回学術講演会 要旨集, pp. 310-311 (2008)
- (8) 北澤 聡, 外 ; 3次元超音波探傷システム「3D Focus-UT」の開発, 日本非破壊検査協会 平成20年度秋季大会講演概要集, pp. 11-12 (2008)

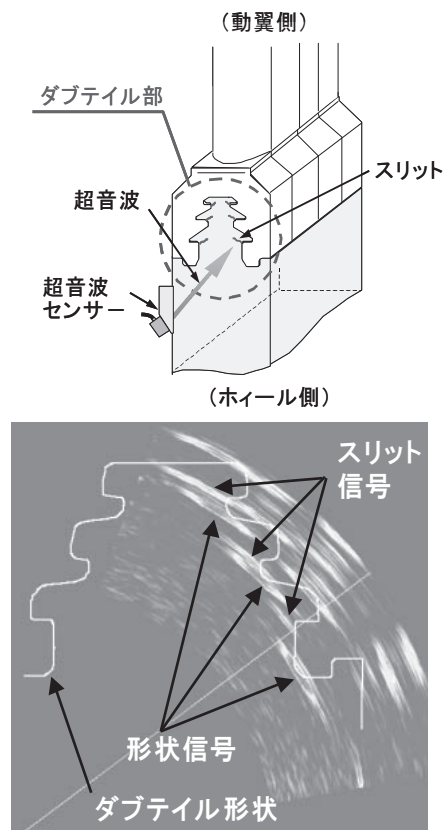


図13 低圧タービン翼溝部の超音波探傷

特集：蒸気タービンの最新技術動向

コンバインド発電用蒸気タービンの最新技術動向

北口 公一*¹
KITAGUCHI Koichi

キーワード：コンバインド発電プラント，蒸気タービン，Combined Cycle Power Plant，Steam Turbine

1. はじめに

近年，発電時に発生する二酸化炭素の排出量削減が環境問題に対する一つの課題となっている。天然ガスを用いるコンバインド発電は，その熱効率の高さと発電量当りの二酸化炭素排出量が他の燃料に比べて少ないことから，環境にやさしい発電方式としてますます注目が集まっている。通常火力発電では，燃料をボイラで燃焼させて得られた蒸気の熱エネルギーを，蒸気タービンが回転エネルギーに変換して発電機を回転させることにより発電を行なっている。コンバインド発電では，ガスタービン発電をした後の排気ガスの熱エネルギーを，排熱回収ボイラで蒸気に伝達して蒸気タービン発電も行なうため，通常火力発電より高い熱効率が得られるのが特徴である。

コンバインド発電用蒸気タービンの熱源はガスタービンであることから，ガスタービンの高温化・大容量化に伴って蒸気タービンも高温化・大容量化してきており，現在では500MWを超えるところまで大型化している。また，コンバインド発電は，単純な発電のみだけでなく，発電と熱供給を行なうコージェネレーションにも広がっている。

2. コンバインド発電用蒸気タービン

コンバインド発電には，ガスタービンと蒸気タービンが同一軸に結合された一軸型と，ガスタービンとは別に設置される別軸型がある。別軸型の場合は，2台以上のガスタービンに対して1台の蒸気タービンが組み合わせられることが一般的のため，多軸型と呼ばれることが多い(図1)。

2.1 一軸型コンバインド発電用蒸気タービン

一軸型コンバインド発電では，ガスタービン1台分の排熱エネルギーが蒸気タービンの熱源である。このため蒸気タービンは比較的小容量であり，1300℃級ガスタービンと組合せる蒸気タービンには，単一ケーシングに高圧・中圧・低圧セクションが納められた高低圧一体蒸気タービンが多く用いられる(図2)。

1500℃級ガスタービンでは高温化・大型化に伴い発生する蒸気が増加するため，組合せる蒸気タービンも大型化し，高中圧セクションと低圧セクションが別々のケーシングに格納される構成となり，この場合低圧セクションが複流となることから，複流排気タービンと呼ばれる(図3)。

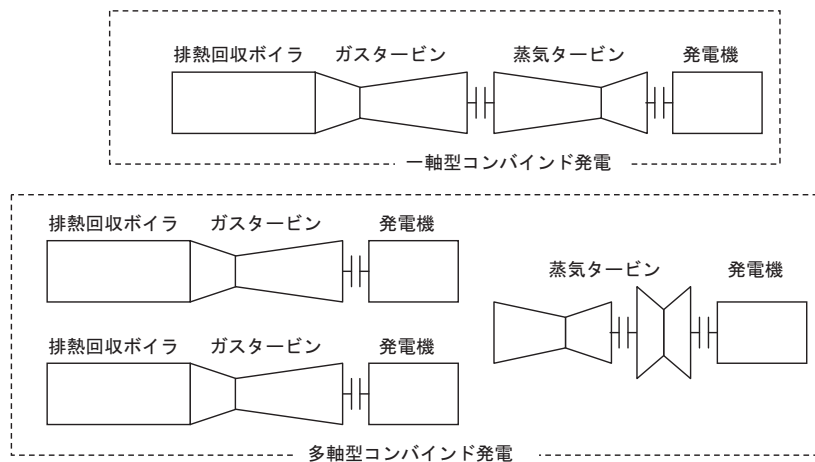


図1 一軸型と多軸型コンバインド発電の構成

原稿受付 2010年5月10日

*1 (株)東芝 電力システム社 原動機部 タービン基本計画担当
〒244-0003 横浜市鶴見区末広町2-4

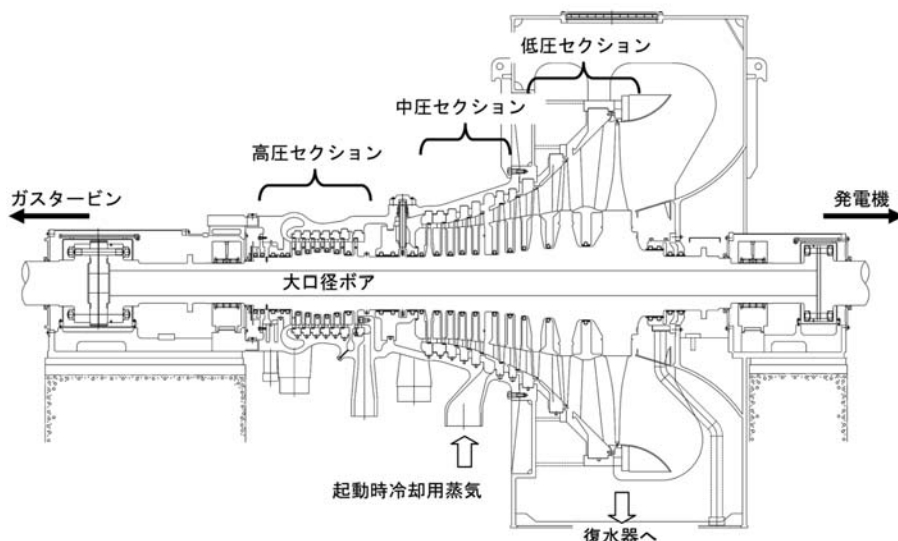


図2 一軸コンバインド発電用高低圧一体蒸気タービン

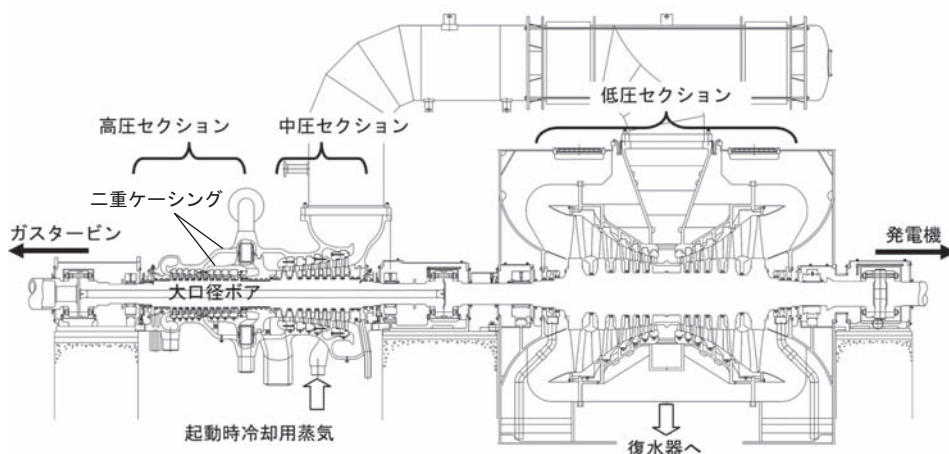


図3 一軸コンバインド発電用複流排気蒸気タービン

一軸型コンバインド発電用蒸気タービンの運用面の特徴は、起動時に一時空回しされることである。これは、蒸気タービンの回転速度はガスタービンと同じであるが、ガスタービンが起動してある程度の負荷に到達するまで、排熱回収ボイラは蒸気タービンに供給する蒸気を十分に発生することができない為に生じる事象である。この時の蒸気タービン内部の長翼部分での空回しによる加熱を防止するため、補助蒸気や排熱回収ボイラの低圧蒸気を冷却用蒸気として挿入する。また、クラッチを用いてガスタービンと蒸気タービンを切離しておき、蒸気量が十分発生できるようになってから蒸気タービンを起動する方法もある⁽¹⁾。

2.2 多軸型コンバインド発電用蒸気タービン

2台以上のガスタービンに対して1台の蒸気タービンで構成される多軸型コンバインド発電では、一軸型に比べて発生する蒸気量が大幅に増加する。このため、1300℃級ガスタービンと組み合わせる蒸気タービンにおい

ても、複流排気タービンが多く用いられる(図4)。組み合わせるガスタービンの台数が増加すると、その台数に応じて蒸気量が増加するため、複流低圧セクションを2台組合せて4流排気タービンとする場合もある(図5)。

3. コンバインドコージェネレーション用蒸気タービン

ガスタービンと蒸気タービンを合わせて発電と熱供給を行なうコージェネレーションでは、熱供給源として蒸気を使用する。電力需要と熱需要は独立変数の如く変化するため、蒸気タービンは多様な運転範囲をカバーする必要があり、なかでも、化学プラント等への熱供給源として使用される途中段落からの抽気蒸気は、一定の圧力を保たなければならないので、蒸気タービン内部に抽気加減弁を有する構造となる。これが、発電専用の蒸気タービンとの大きな違いである(図6)。

比較的低温・低圧の蒸気を大量に使用する造水プラントへの熱供給を行なう場合は、蒸気タービンの排気蒸気を全量造水プラントに送気することになる。図2から図

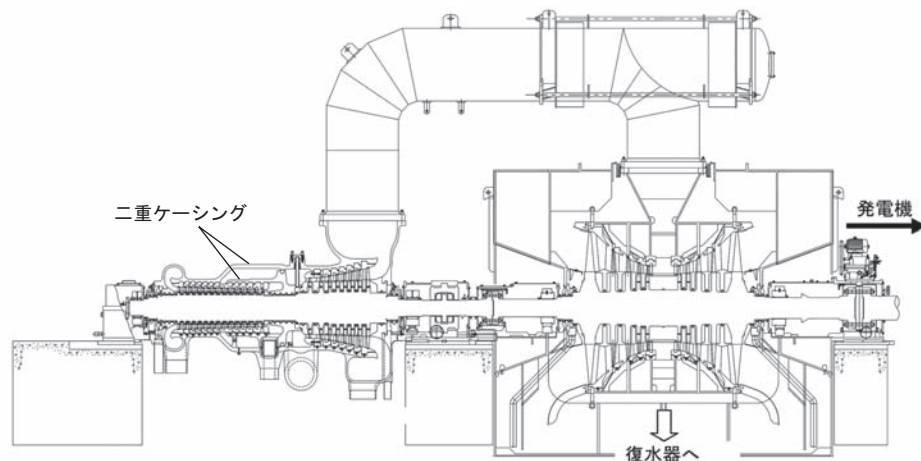


図4 多軸コンバインド発電用復流排気蒸気タービン

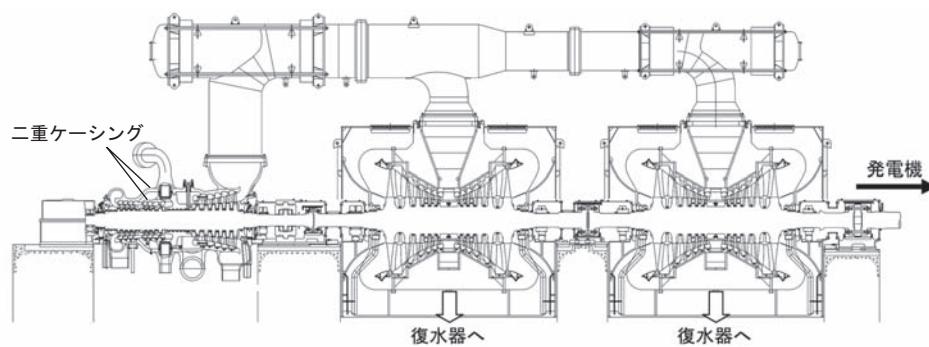


図5 多軸コンバインド発電用4流排気蒸気タービン

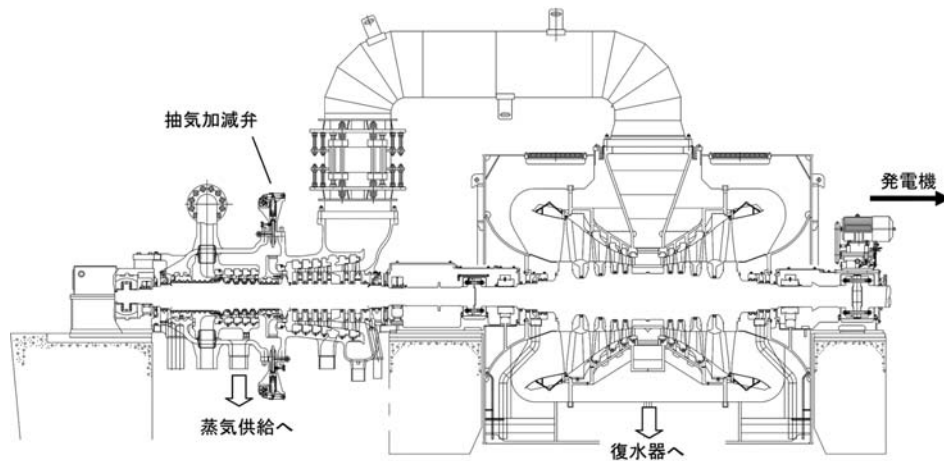


図6 コンバインドコージェネレーション用蒸気タービン

6 までの蒸気タービンでは、熱エネルギーを有効に回転エネルギーに変換するために、排気が復水器に接続されて真空域まで蒸気を膨張させている。このため、1 m級の長さの最終段翼を有する低圧セクションが必要となる。しかし、排気の全量を熱供給に使用する場合、排気は大気圧以上の圧力であるため、前記のような長い最終段翼は必要なく、蒸気タービンもコンパクトにできるため、単一ケーシングとすることができる（図7）。

4. コンバインド発電用蒸気タービンの技術動向

4.1 ロータ

高温にさらされる高圧・中圧セクションでは高温クリープ特性に優れたCrMoV鍛造材が、低圧セクションでは低温脆性特性と最終段翼の大きな遠心力に耐えるためにNiCrMoV鍛造材が一般的に適用される。1500℃級ガスタービンと組合せる蒸気タービンでは蒸気温度が593℃に達することもあり、その場合には12Cr鍛造材が適用される。

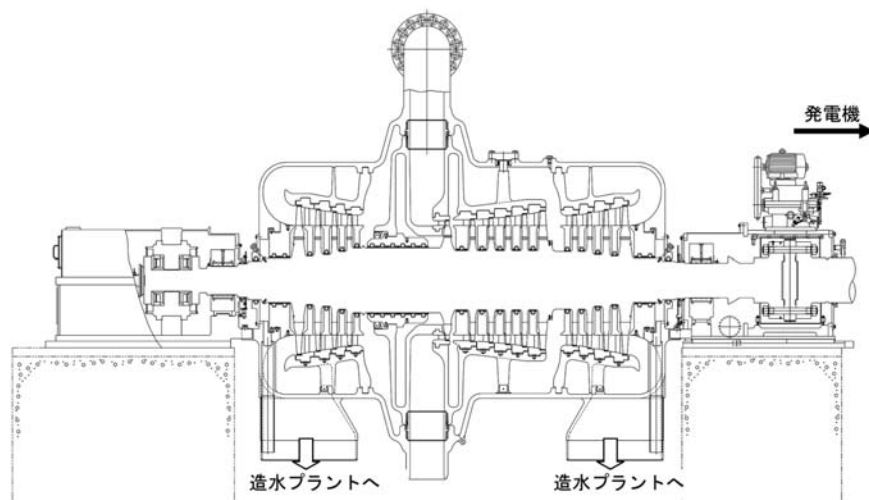


図7 コンバインド造水発電用蒸気タービン

高低圧一体型蒸気タービンにおいては、両方の特性を合わせ持つ材料が必要となる。その一つの解決策が高低圧一体ロータ材であり、高温部と低温部の熱処理条件を変えることにより、566℃の高温セクションと1m級の最終段翼を同一ロータ内で保持することができる⁽²⁾。

もう一つの解決策は、異なる材質のロータを機械的に接合する方法であり、ボルトで軸継手を締結する場合と溶接接合する場合がある⁽¹⁾。

4.2 ケーシング

高温・高圧の蒸気を保持する高圧・中圧セクションはクリープ特性に優れており複雑な形状に対応できるCrMoV鋳鋼品で、低温・低圧の低圧セクションは一般構造用圧延鋼材の溶接構造となる。

コンバインド発電においても熱効率の向上のために、蒸気の高圧・高圧化が進んでいるため、高圧セクションは二重ケーシングが採用されるケースが増えている（図3, 4, 5）。

4.3 中短翼段落

中短翼段落では、翼列損失のなかで二次流れ損失の占める割合が多く、段落性能の向上にはこの二次流れ損失の低減が重要である。このために、翼の前・後縁を蒸気流出方向に湾曲し傾斜させ、更に半径方向の流量分布を最適化した三次元設計翼が適用されている（図8）。

材質は12Cr鍛造材が適用されてきたが、近年の高温化・大容量化に対応するため、クリープ特性を大幅に向上させた改良12Cr材も一部で適用されている⁽³⁾。

4.4 最終段翼

同じ出力の蒸気タービンにおいては、最終段翼のサイズにより排気流数が決まる。建設コスト低減には蒸気タービンのコンパクト化が必要であり、最終段翼の長翼化による排気流数の削減がもっとも効果的である。

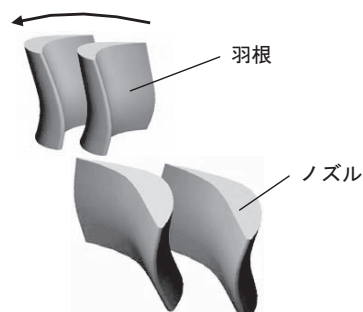
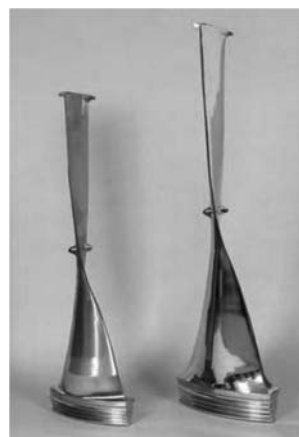


図8 三次元設計翼

チタン合金製最終段翼としては3600rpm用45インチ翼、スチール製の最終段翼としては3000rpm用48インチ翼、3600rpm用40インチ翼が実用化されており、コンバインド発電用蒸気タービンのコンパクト化に貢献している（図9）。

図9 スチール製最終段翼の例⁽⁴⁾

4.5 シール技術

段落の漏洩損失低減は、翼列損失低減と同様に蒸気タービンの性能向上にとって重要なテーマであり、漏洩

損失低減のために、シール構造の改善が行われてきた。

その代表的なものは、翼チップ漏洩損失の低減であり、翼の先端部を全周で連結してその外周面に凹凸形状のラビリンス流路を構成している（図10）。

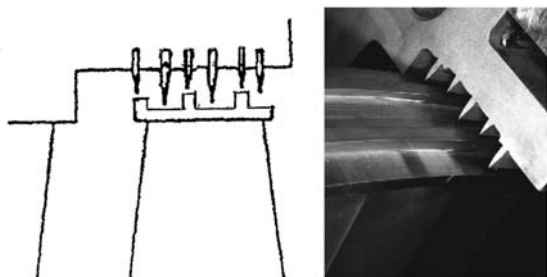


図10 翼チップのラビリンス流路の例

シール間隙の狭小化技術としてはリトラクタブルパッキンやブラシシールがある。前者は、運転状態が不安定な低負荷では間隙が大きく、負荷上昇すると間隙が縮小するパッキンである。更に、従来からガスタービンに使用されていたアプレイダブルシールの蒸気タービンへの適用も始まっている（図11）。

4.6 吸排気損失

段落以外の損失である給排気の圧力損失低減も蒸気タービンの性能向上に貢献している。



図11 アプレイダブルシールの例⁽⁵⁾

最終段から排出される蒸気の運動エネルギーは発電には利用されないため、これを低減することは効率向上につながる。長翼化による流出速度の低下がその内の大きな役割を占めるが、排気室における静圧回復も同じように重要であり、CFD（Computational Fluid Dynamics）を活用した排気室形状の最適化が行われている。

蒸気流量を制御する弁が全開運用されるコンバインド発電においては、弁本体の圧力損失低減も課題となる。この場合、弁本体構造だけでなく弁入口・出口の流路形状も圧力損失に影響するため、それらを含めた最適化が必要である。その他、二車室構成の蒸気タービンで必要となるクロスオーバ管の圧力損失低減も、CFD技術を駆使して最適化が図られている（図12）。

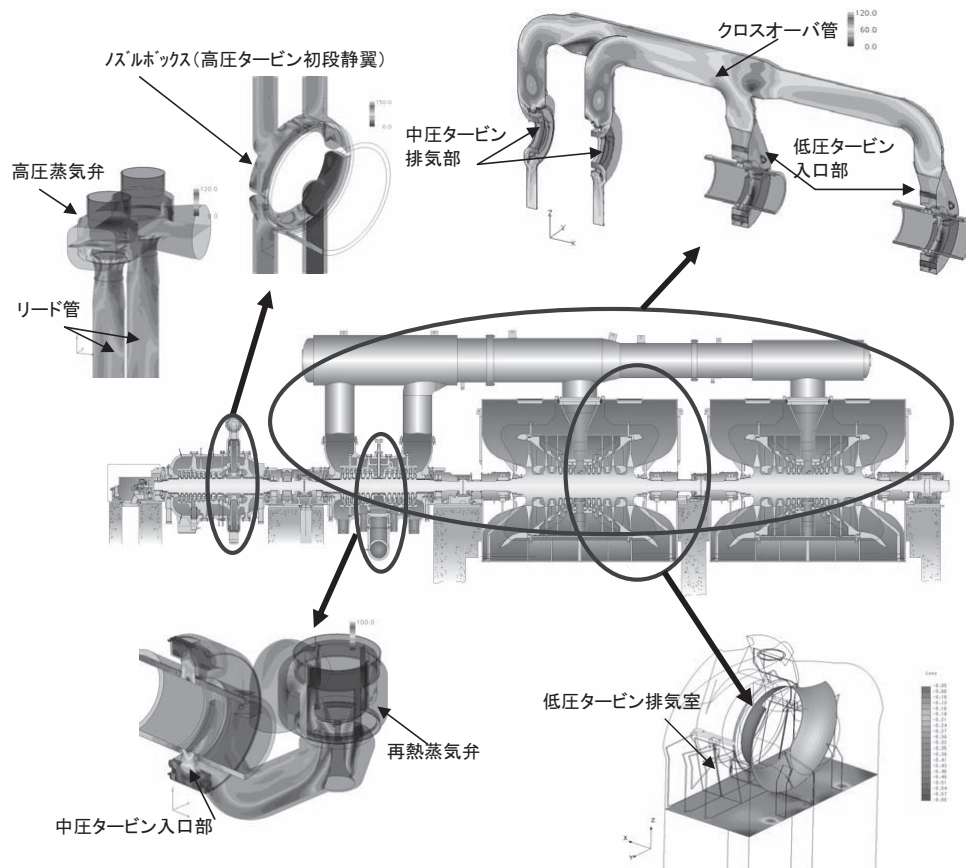


図12 CFDを駆使した吸排気圧力損失最適化例⁽⁶⁾

4.7 運転技術

4.7.1 熱応力制御

一軸型コンバインド発電用蒸気タービンでは、ガスタービンに応じた急速起動対応が求められる。この場合問題となるのが高温ロータの熱応力であり、蒸気タービン入口温度を統合制御するロジックが使用されガスタービンの運転にフィードバックされると同時に、蒸気タービンのロータに大口径ボアを設置して薄肉化することにより応力低減を図っている（図2,3）。

多軸型コンバインド発電用蒸気タービンでは、通常火力発電と同様にミスマッチチャートによる起動方法が採用されてきた。これによると、起動開始後に生じる運用環境の変動による影響も加味した余裕のある起動パターンとなっていた。これに対して、起動の全過程において逐次熱応力を予測して最適化された起動方法によれば、大幅な起動時間短縮が達成できる（図13）。

4.7.2 一軸型コンバインド発電の蒸気タービン起動

一軸型コンバインド発電では発電機を起動モータとして利用するサイリスタ起動方式が多く用いられている。しかしながら、同一軸上にもう一つの動力源である蒸気タービンが配置されているので、この蒸気タービンに蒸気を供給することにより、起動時の動力源とすることができる⁽⁸⁾。

5. 最後に

発電における二酸化炭素削減や石炭の有効利用として、今後益々ガスタービンと蒸気タービンを組合わせたコンバインド発電が重要性を増していく。このような環境の中で、社会インフラの基盤としての信頼性と環境調和を目指して、蒸気タービンの技術開発を通して社会に貢献し続けていきたい。

参考文献

- (1) 中野隆ら, 三菱重工技報, Vol.42, No.3 (2005-10), p.108-111
- (2) 山田ら, 素形材, Vol.437, No.8 (1997), p.17-22
- (3) 山田ら, 鉄と鋼, Vol.76, No.7 (1990), p.44-51
- (4) Mujezinic,A. et al., Proceeding of the Poewr-GEN Asia, (2002)
- (5) Kazutaka Ikeda et al., Proceeding of the ICOPE-09, (2009)
- (6) 沖田信雄ら, 東芝レビュー, Vol.63, No.9 (2008), p.12-16
- (7) 松本茂ら, 東芝レビュー, Vol.65, No.4 (2010), p.64-97
- (8) 瀬間徹, 火力発電総論, (2002), p.226, 社団法人電気学会

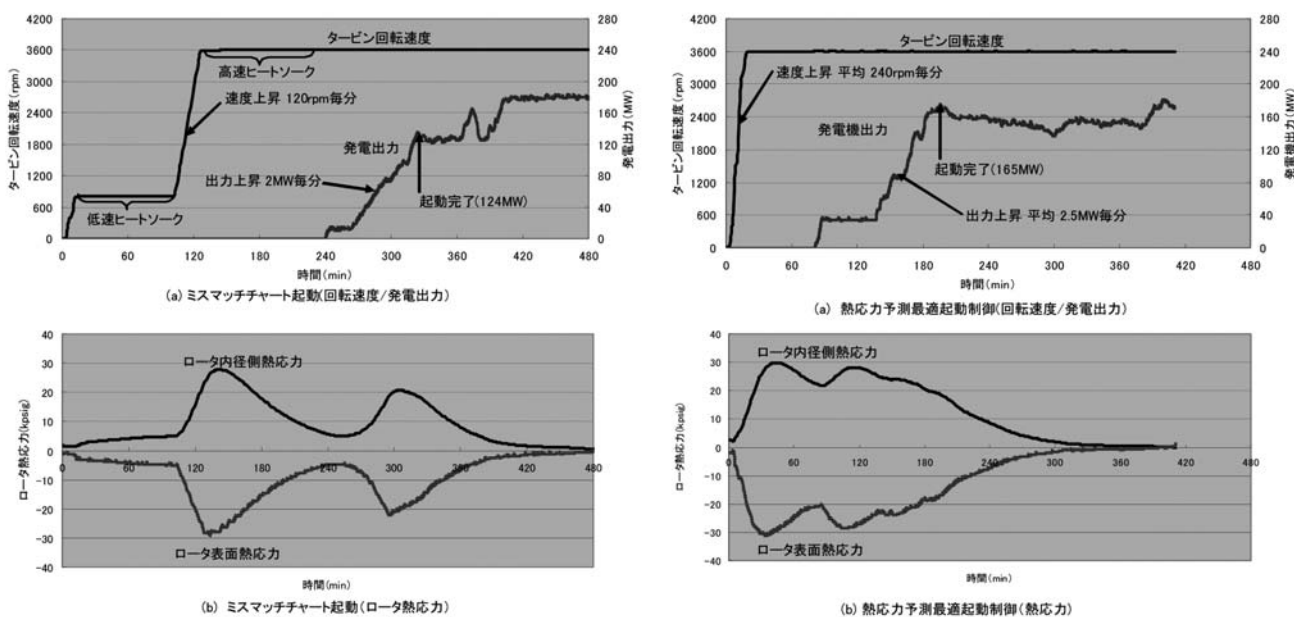


図13 熱応力予測による蒸気タービン最適起動の例⁽⁷⁾

特集：蒸気タービンの最新技術動向

蒸気タービン高効率化技術の最新動向

大山 宏治*¹
OHYAMA Hiroharu田中 良典*¹
TANAKA Yoshinori

キーワード：タービン，翼，空力，高温化，材料

1. はじめに

発電用蒸気タービンは、従来からのコンベンショナルプラント、ガスタービンコンバインドサイクルのボトムリング、そしてクリーンエネルギーとして再認識されている原子力プラントへ適用されており、その高効率化、高信頼性化、低コスト化は最近のエネルギー資源問題、CO₂排出抑制などに代表される環境問題及び、発電プラント建設費、運用費などへの貢献において重要なものとなっている。

弊社では蒸気タービン効率化に対して、翼列性能の向上及び排気損失の低減、各部圧力損失の低減、蒸気条件向上の他、機械的損失の低減、弁他の圧力損失の低減等の継続した技術開発を行っており、最近では次世代超長大最終翼群として火力、原子力用の高効率最終翼群を開発・検証し、実機適用の準備が完了した。一方、高信頼性化、低コスト化に対する技術として溶接ロータ他に取り組みきており、最新の原子力ロータへの適用技術検証を確立している。

本稿では、弊社蒸気タービンの最新技術動向を紹介するが紙面の関係上、次世代超長大最終翼群の検証結果及び、次世代高温化技術についてのみ紹介する。

2. 次世代超長大最終翼群の開発・検証

2.1 性能向上技術開発の変遷

現在の蒸気タービン翼列開発設計現場において、翼列内部流動状況の予測、タービン効率予測精度は、CFD (Computational Fluid Dynamics) の発達及び、そのキャリブレーションに依存していると言える。

弊社では、早くからCFDによる三次元流動解析技術取り入れ、1980年代の後半には翼構造をISB (Integral Shroud Blade) 化し、静動翼ともにコンパウンドリーン翼型を採用した反動翼列、静翼にBOW (弓形) 形状を採用した最終翼群を実用化し高性能化を図ると同時にシリーズ化を行った⁽¹⁾。

平成15年度には、静翼配置、静動翼翼型の改良による非定常損失の低減、キャビティー内の流れの制御及び、

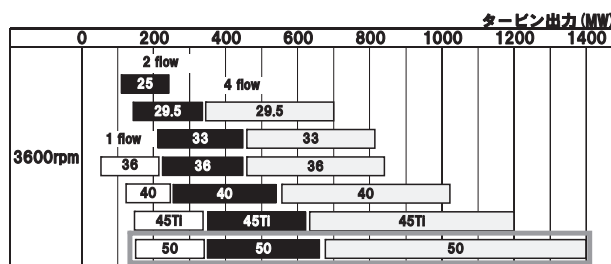
低圧最終翼群フローパス・フローパタンの改良を行った『新型高効率蒸気タービンの開発』を実施し、2%以上の効率向上を確認し、次世代蒸気タービン性能関係の基本技術を検証した⁽²⁾。

2.2 次世代超長大最終群の開発と検証

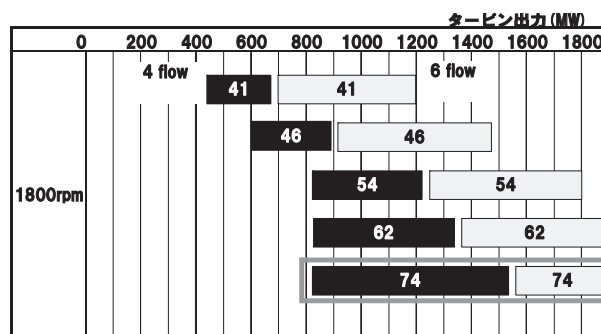
次世代超長大最終翼群では、先の性能向上技術をさらに高度化した技術を採用し、20%以上の環状面積増大を実現した。

火力機に対しては高効率化と低コスト化の両立を狙った『スチール製3600rpm-50IN/3000rpm-60IN最終翼群』を開発・検証⁽³⁾、原子力機用に対しては、1700MW級原子力プラントに適合させた『1800/1500rpm-74IN最終翼群』の開発・検証⁽⁴⁾を実施し、計画通りの性能・信頼性を確認している。図1には、それぞれの翼群の適用範囲例を示す。

翼列の高効率化に対しては、非平衡蒸気特性を考慮した三次元多段粘性非定常流動解析を用いて、多段タービ



(a) 3600rpm-50IN 最終翼群の適用範囲



(b) 1800rpm-74IN 最終翼群の適用範囲

図1 最終翼群シリーズの適用範囲例

原稿受付 2010年5月20日

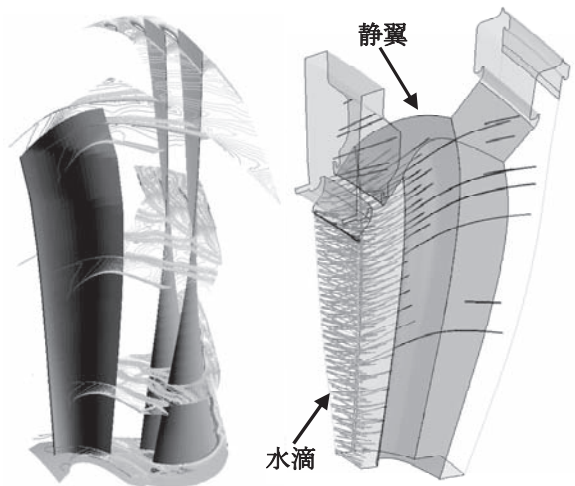
* 1 三菱重工業(株) 原動機事業本部蒸気タービン統括技術部
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

ン翼列の壁形状、翼型形状に影響される流体力を全て考慮することにより多段タービンとして最大効率・出力を得るように各段・各列の負荷制御（フローパタン設計）を実施した。同時に内部流れを時刻歴で評価し、翼面上の負荷分布制御とともに非定常流れ場の時間平均における最大の効率を得よう最適化を実施している。

最終翼群に特有の水滴による損失（湿り損失）に対しても、水滴の飛跡予測をより正確に実施し、静翼面の水滴排出スリット位置、形状の最適化を行い水滴除去効率の大幅な向上を図った。流動解析の一例として、図2には、それぞれの子午面解析結果、図3には水滴流れの解析結果の一例を示す。

一方、最終翼出口から排気室、復水器までの流れ場も、翼列解析と同様に蒸気特性を考慮した三次元粘性流動解析を用いて翼列部と連成させた検討の実施により、圧力回復係数を大幅に向上させるとともに軸方向長さを低減した新型軸流排気室、改良三次元非対称排気室を開発した。図4には、三次元非対称排気室の流動解析結果の一例を示す。

検証は、回転振動試験および実負荷総合確認試験を実施し、性能・信頼性の両面から総合的な検証を実施した。その結果、従来翼に対して1%以上の効率向上が達成されていることを確認した。図5には弊社における新規開発長大翼に対する開発・検証プロセスを示し、写真1には蒸気タービン総合検証設備、図6にはその系統線図及び仕様を示す。図7には、実負荷試験で用いた50IN、74IN試験タービンロータの概観を示す。



(最終段周りの相対マッハ数) (水滴除去状況)

図3 水滴流れの解析例

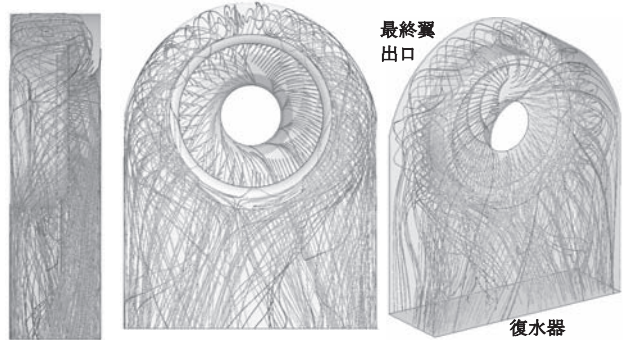


図4 高効率三次元非対称排気室の流動解析例：流跡線

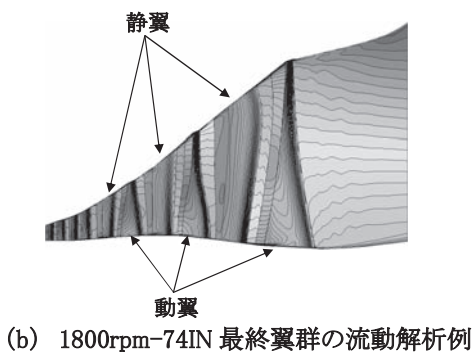
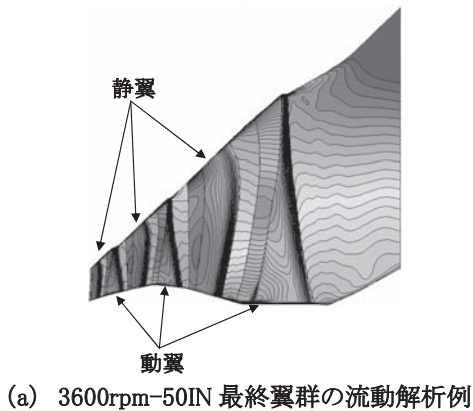


図2 流動解析例：子午面マッハ数分布

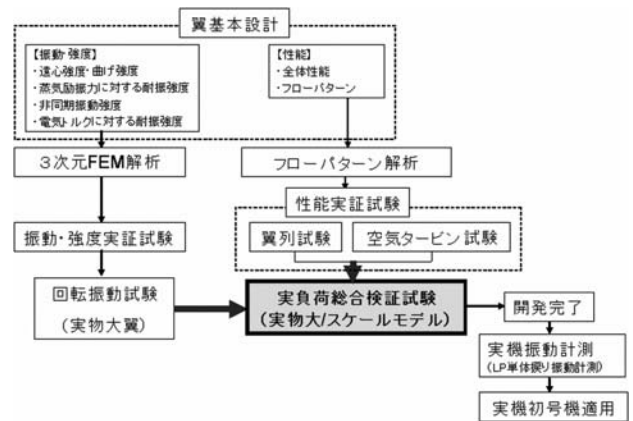


図5 新規開発長大翼に対する開発・検証プロセス

3. 高温化技術の最新動向

3.1 蒸気条件の高温化変遷

現在の石炭火力発電では1990年代に実用化された600℃級USC（送電端プラント効率レベル42～43% HHV）が主流であるが、経済性追求とCO₂排出量削減の観点から、更に高い700℃級の蒸気条件を採用した次世代超々臨界圧発電技術（以下A-USC）の実現を目指し、日米欧の各国で開発が進められている。国内においては経済産業省からの補助金を受けて、図8に示すよう

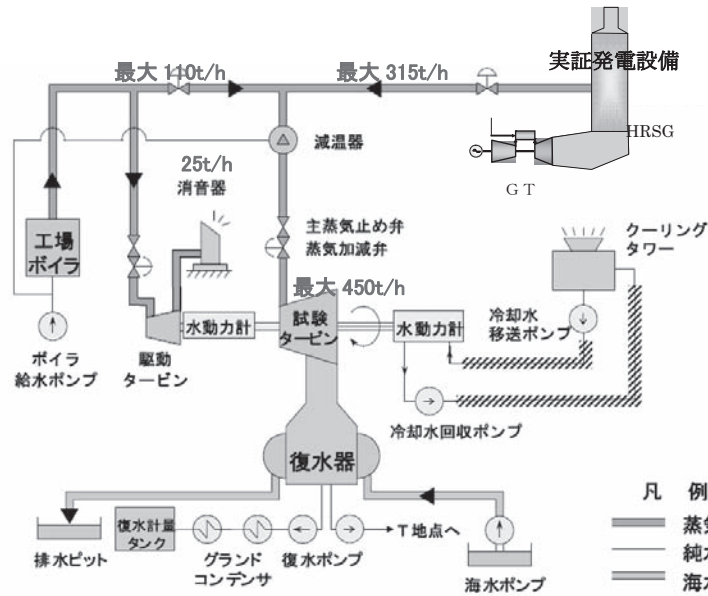
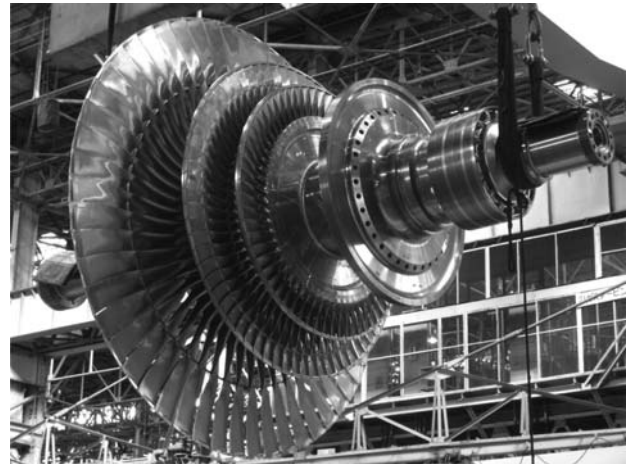


図6 実負荷総合検証試験設備の系統線図



写真1 実負荷総合検証試験設備概観



(a) 3600rpm-50IN 最終翼群フル実負荷試験ロータ



(b) 1800rpm-74IN 最終翼群の0.5スケール実負荷試験ロータ

図7 実負荷試験ロータ

に2008年度から9年間の予定で、大型技術開発プロジェクトが推進されており、弊社も参画している。

A-USCの送電端プラント効率レベルは、700℃級の二段再熱の場合で約46% HHVであり、600℃級一段再熱との相対比で10%以上の効率向上が期待出来る。また、更に高い750℃級の蒸気条件を採用すれば、二段再熱で48% HHV程度の高い効率を狙うことも可能とされており、IGCCとともに次世代の高効率石炭焚火力発電技術として有望視されている。また、1700℃級GTCCのボトムing高温化にも適用出来る技術であることは言うまでもない。

3.2 A-USCタービンの開発課題について

A-USCタービン開発では、図9に示すように、タービン材料、システム、構造、製造、そして保守管理に関わる各種要素技術開発が必要である。特に、Ni基合金の大型部材製造及び溶接技術、冷却技術などが主要な開発課題になる。

		2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013 H25	2014 H26	2015 H27	2016 H28	2017以降
システム設計	システム設計、設計技術開発	基本設計、配置最適化、経済性試算									
要素開発	ボイラ	大径管、伝熱管用新材料開発、材料改良									
		高温長期材料試験(3~7万時間)									
	タービン	溶接技術開発・試験、曲げ試験									
		材料製造性検証									
タービン	材料開発	材料改良仕様策定等 実サイズ部材試作									
		ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、試作									
	高温長期材料試験(3~7万時間)										
高温弁	構造・要素・材料開発	試設計		試作							
実証試験・回転試験(高温弁含む)		設備計画		設備設計		設備製造、据付		試験、評価		実証機	

図8 A-USC開発プロジェクトスケジュール

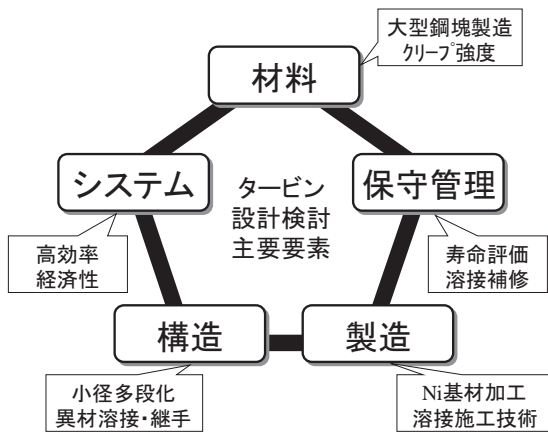


図9 A-USCタービン開発課題

3.3 タービン材料開発及び構造設計について

現在蒸気タービンの材料として一般的に使用されているフェライト系材料では630℃前後が限界と考えられており、700℃超級の蒸気条件に対してはオーステナイト鋼でも強度不足とされている。従って、A-USCタービンの材料には、オーステナイト鋼より更に高い高温強度を有するNi合金の適用が不可欠となる。

Ni合金はガスタービンで多くの適用実績があるが、ガスタービンのロータはディスクをボルトで連結した構造で、ディスク一枚当りの重量は3トン程度である。また、ロータディスクは空気で冷却されているため金属温度は高くても500℃程度である。これに対して通常蒸気タービンで用いられる一体型ロータは、高中圧タービンの場合で重量20～30トンであり、運転中には高温の蒸気に直接さらされる。従って、A-USCタービン用のNi合金にはより高い高温強度と良好な大型鋼塊製造性が要求されることになるが、Ni合金は大型化が難しく(外径φ1000mm程度、製品重量10トン程度が限界と言われる)、Ni合金を必要とする高温部分の別車室

化や溶接構造の採用が必要となる。

図10に700MW二段再熱(35Mpa/700/720/720℃)の超高压+高中圧タービン断面図を示す。本図に示すように溶接構造の採用に関しては、Ni合金同士の共材溶接技術および、Ni合金と高Cr鋼の異材溶接技術が必要となるが、高価なNi合金の使用量を極力低減した経済的な設計が可能となる。

更に、設計面からA-USCタービン用Ni合金に要求される特性として低熱膨張性がある。一般的にオーステナイト系合金の線膨張係数は、600℃級USCの蒸気タービンで使用されている12Cr鋼よりも高く、熱応力増加や回転部・静止部間の伸び差増大が懸念される。そこでタービンの信頼性・運用性を損なわぬように低熱膨張Ni合金の開発が求められる。また前述した高Cr鋼との異材溶接に関しても、溶接部残留応力の観点から両者の線膨張係数は近い方が望ましい。

欧州では既存材料の“IN617”や“IN625”をベースとしたNi合金にてロータ鍛造品、弁鍛造品が試作されているが、弊社はフェライト系耐熱鋼に近い線膨張係数を持つ低熱膨張Ni合金の開発を進めてきた(図11)。はじめに、ボルト、ブレード用として12Cr鋼並に熱膨張係数が低く、従来のNi合金並に高温強度を維持した低熱膨張Ni合金LTES700(Ni-12Cr-18Mo-0.9Al-1.15Ti)を開発した⁽⁵⁾。LTES700は実機車室ボルトとして使用し、実機環境下での検証を進めている⁽⁶⁾。

続いて、更なる大型化のためにLTES700の成分調整を行い、高温強度、熱膨張係数及び製造性の適切なバランスを図りLTES700R(Ni-12Cr-7Mo-6W-Al-Ti)を開発した⁽⁷⁾。LTES700Rの線膨張係数はLTES700より高くなっているものの従来のNi合金や2.25Cr鋼より低い。LTES700Rのクリープ破断強度は、目標値(700℃×10万時間クリープ強度100MPa)を十分満足する目処が得られている。

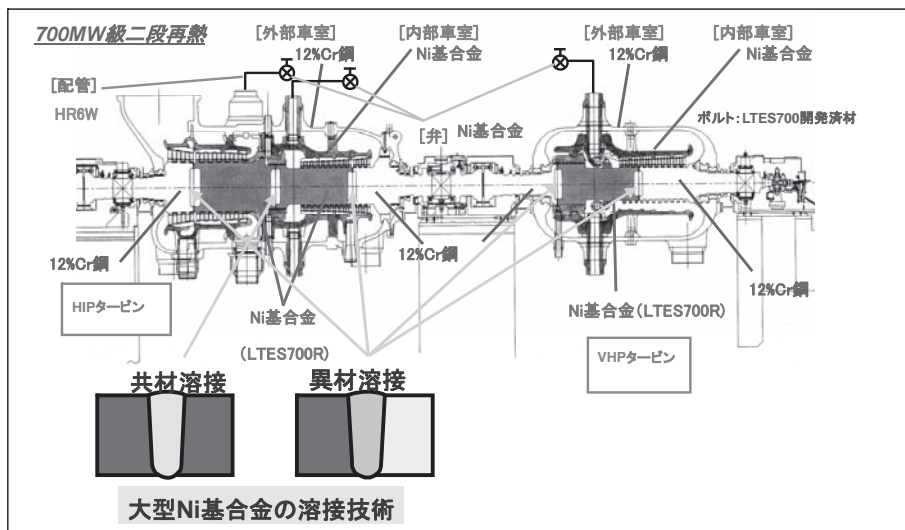


図10 700MWクラス二段再熱蒸気タービン断面図 (35MPa x 700/720/720℃)

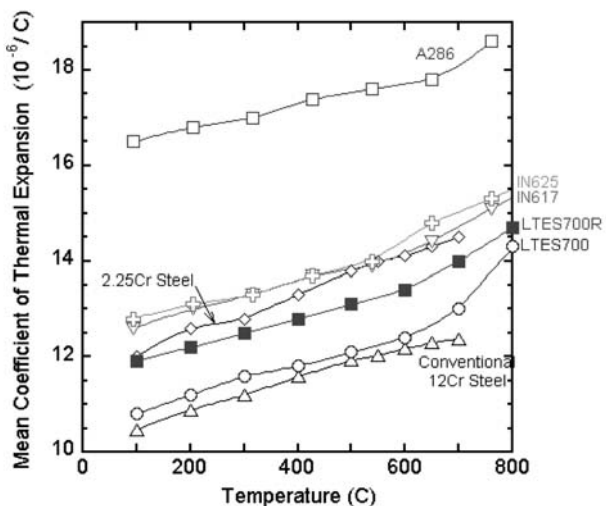


図11 線膨張係数比較

3.4 今後の展開について

A-USC開発プロジェクトとしては、2012年までに材料開発を主体とした要素技術開発、並びにシステム設計・経済性評価を実施し、2013年～2016年で700℃蒸気を用いた実缶試験（ボイラ）や回転振動試験（タービン）を行う予定である。

4. まとめ

高効率蒸気タービンの最新技術として、次世代超長大最終翼群スチール製3600rpm-50IN/3000rpm-60IN大最終翼群、1800/1500rpm-74IN最終翼群翼の開発、検証試験結果及び、次世代高温化技術を紹介した。

これらの最終翼群は、新設・既設プラントの高効率化を図るとともに高信頼性、合理的低コスト化も合わせて

実現することを可能とするなど発電プラントに対し大いに貢献するものと確信しており、また、次世代高温化技術の開発により、USCプラントやGTCCボトムリングのさらなる高効率化に貢献が期待される。

弊社では、今後も性能、信頼性、低コスト化等に対する技術開発を推進し、火力、原子力発電プラントへ貢献していく所存です。

参考文献

- (1) Miyawaki, T. et al., Improvement of LP Turbine Efficiency by Fully 3D Designed Blade, ASME IJPGC Paper PWR-Vol.18 (1992)
- (2) 渡辺英一郎ほか、高性能新型タービンの開発、三菱重工技報Vol.40 No.4 (2003-7) p.212
- (3) 蒸気タービン超長大翼最終翼群3600rpm-50IN/3000rpm-60INの開発、三菱重工技報, vol.46 No.2 (2009) p.18
- (4) 次世代原子力タービン -74IN低圧最終翼群の開発とその検証-
火力原子力発電 平成21年度火力原子力発電大会論文集 (2010年2月) p.193
- (5) 山本隆一、角屋好邦、河合久孝、馬越龍太郎、植田茂紀、野田俊治、鉄と鋼, 90(2004), 1.
- (6) 佐藤幹夫、屋口正次、田中良典、岩崎純、福田雅文、斎藤英治、中川博勝、椎橋啓、和泉栄、火力原子力発電, 57(2006), 89.
- (7) Ryuichi Yamamoto, Yoshikuni Kadoya, Shigeki Ueta, Toshiharu Noda, Ryotaro Magoshi, Shin Nishimoto and Takashi Nakano, Proceeding from the Forth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2007), EPRI Report No 1011381.

特集：蒸気タービンの最新技術動向

地熱用蒸気タービン

酒井 吉弘*1
SAKAI Yoshihiroキーワード：蒸気タービン，地熱発電，クリーンエネルギー，腐食，スケール，
steam turbine, geothermal power producing, clean energy, corrosion, scaling

1. まえがき

良く知られているように地球は内部へ行くほど高温になり，中心部の温度は約6000Kに達すると考えられている。地球が持つ熱エネルギーは膨大であり，表層の地殻だけでも約 5.4×10^{21} MJの熱エネルギーを持つと推定されている⁽¹⁾。これは人類の現在のエネルギー消費量の約1200万年分に相当する。もちろん人類が利用できるのはそのごく一部に過ぎないが，科学技術の発展に伴って利用可能性は広がるものと期待される。地球が持つ熱エネルギーのうち，地表近くにあるものを特に地熱エネルギーと呼んでいるが（地球が持つ熱エネルギー全体を指す場合もある），地熱発電はこの地熱エネルギーを利用して発電する技術である。天然ガス，石油，石炭などの化石燃料を燃焼させて熱エネルギーを取り出す火力発電と異なり，地熱発電は地球の熱エネルギーそのものを利用するので，図1に示すように地球温暖化の原因とされる二酸化炭素（CO₂）をほとんど排出しない。また，発電に使用した地熱流体を再び地中に戻すことにより再利用が可能である。その意味で，地熱発電は再生可能なクリーンエネルギーとして位置づけられている。

地熱発電の歴史は古く，1904年にイタリアのラルデロで世界初の発電実験に成功したのが始まりである。その後，世界各地で地熱発電の開発が進められ，日本でも

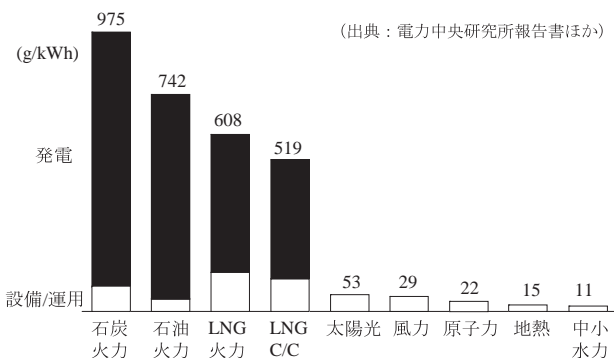


図1 電源別二酸化炭素排出量の比較

原稿受付 2010年5月31日

*1 富士電機システムズ(株) GES事業部 川崎工場
〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田1-1

1925年に別府で1.12kWの試験的発電が行われた。1960年には藤田観光(株)箱根小涌園(当時)で30kWの自家発電が始められ，また1966年には出力20MWの松川地熱発電所が運転を開始した。最初の地熱発電から約100年経過した現在，世界の25ヶ国・地域で地熱発電が行われており，地熱発電設備容量の合計は約10,600MWに達している。表1に世界の地熱発電設備の容量を示す⁽¹⁾。有名なガイザーズ地区を擁する米国が世界最大の設備容量を誇るが，近年はフィリピンやインドネシアなどの伸張が目覚ましい。フィリピンやアイスランドなどでは，地熱発電が電力供給の上で重要な役割を担っている。しかし，世界全体でみると地熱発電が電源に占める割合は約

表1 世界の地熱発電設備容量の推移

国名	単位：MWe			
	1995	2000	2005	2009(予測)
アルゼンチン	0.7	-	-	-
オーストラリア	0.2	0.2	0.2	0.2
オーストリア	-	-	1.1	1.1
中国	28.8	29.2	27.8	27.8
コスタリカ	55.0	142.5	163.0	162.5
エルサルバドル	105.0	161.0	151.0	204.2
エチオピア	-	7.3	7.3	7.3
フランス	4.2	4.2	14.7	16.2
ドイツ	-	-	0.2	8.4
グアテマラ	-	33.4	33.0	57.0
アイスランド	50.0	170.0	202.0	569.0
インドネシア	309.8	589.5	797.0	1,172.0
イタリア	631.7	785.0	791.0	810.5
日本	378.6	533.2	534.2	535.2
ケニア	45.0	45.0	129.0	169.0
メキシコ	753.0	755.0	953.0	958.0
ニュージーランド	286.0	437.0	435.0	635.0
ニカラグア	70.0	70.0	77.0	87.0
バブア・ニューギニア	-	-	6.0	56.0
フィリピン	1,227.0	1,909.0	1,930.0	1,970.0
ポルトガル	5.0	16.0	16.0	25.0
ルーマニア	-	-	-	0.2
ロシア	11.0	23.0	79.0	80.0
タイ	0.3	0.3	0.3	0.3
トルコ	20.4	20.4	20.0	84.0
米国	2,816.7	2,228.0	2,564.0	2,987.0
合計	6,798.4	7,959.2	8,931.8	10,622.9

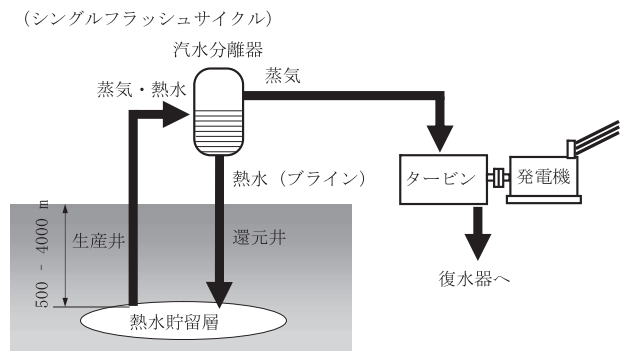


図2 地熱発電の原理

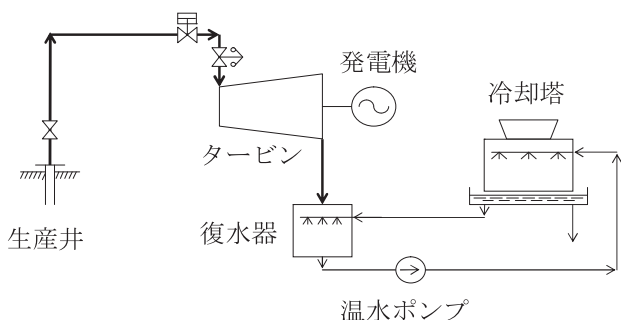


図3 天然蒸気方式

0.3%に過ぎない⁽²⁾。日本では1990年代後半から地熱発電設備容量の伸びが頭打ち傾向になっており、電源に占める割合も約0.2%にとどまっている。地球温暖化抑止の観点から世界的に地熱発電を再評価する機運にあり、今後の伸長が期待されている。

2. 地熱発電の方式

地熱発電の原理を図2に示す。一般的には地中に深く生産井と呼ばれる井戸を掘って、地熱によって熱せられた蒸気と水の混合流体（地熱流体）を取り出し、そのエネルギーで蒸気タービンを回転させて発電する。地熱流体の性状に従って、次のような発電方式が採用されている。

2.1 天然蒸気方式

地熱流体の大部分が蒸気である場合（蒸気卓越型）は、図3に示すように生産井から出てくる蒸気を直接、蒸気タービンに導いて発電する。この方式による発電は日本の松川やアメリカのガイザーズなどで行われている。最も簡単な方式であるが、地熱蒸気に含まれる固形物や腐食性の不純物がタービン内に持込まれやすく、スケール付着や腐食の問題を生じることがある。

2.2 フラッシュ方式

生産井から出てくる地熱流体が蒸気とともに大量の熱水を含む場合（熱水卓越型）は、図4に示すように生産井から出てくる地熱流体をセパレータ（汽水分離器）で

蒸気と水に分離し、蒸気のみをタービンに導いて発電する。現在行われている地熱発電の大部分はこの方式によるものである。セパレータで蒸気を分離した後の熱水のエネルギーが十分にある場合には、図5に示すように熱水をさらにフラッシュ（減圧蒸発装置）に導き、減圧沸騰させることにより生成した蒸気をタービンの低圧部に混入して出力を増加させることができる。この方式はダブルフラッシュ方式と呼ばれている。

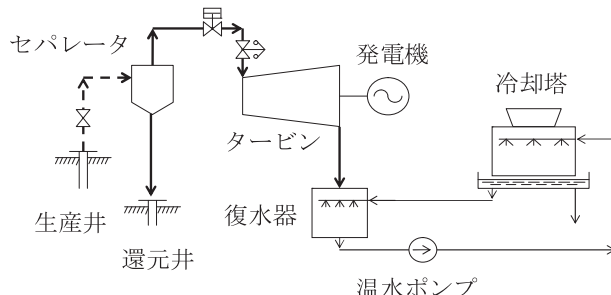


図4 シングルフラッシュ方式

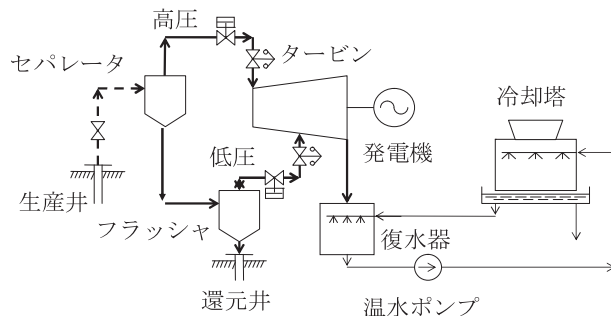


図5 ダブルフラッシュ方式

2.3 バイナリー方式

図6に示すように生産井から出てくる地熱流体を熱交換器に導いて炭化水素やアンモニアなどの低沸点媒体を沸騰させ、その蒸気でタービンを回して発電する方式である。地熱井から出てくる地熱流体の温度が比較的低い場合に特に適した発電方式である。

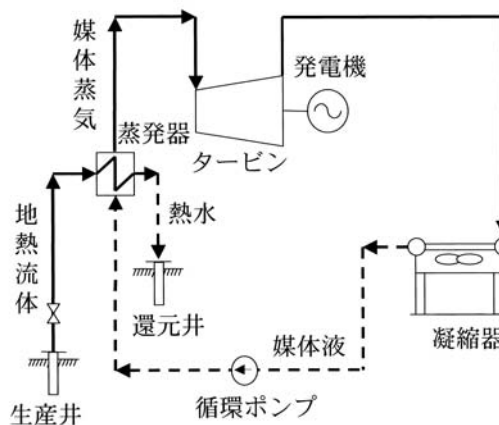


図6 バイナリー方式

2.4 トータルフロー方式

生産井から出てくる熱水と蒸気の混合流体をそのままトータルフロータービンに導いて発電する方式である。理論的にはフラッシュ方式に比べて熱水のエネルギーをすべて利用できる利点があるが、ほとんど用いられていない。

3. 地熱用蒸気タービンの特徴と構造

地熱用蒸気タービンの入口蒸気は、圧力0.1～2MPa、温度100～200℃程度の低圧・低温の蒸気である。従って、利用できる熱落差が小さく、また出力に比して蒸気の容積流量が大きい。そのため火力用蒸気タービンと比べると出力が小さく、最大容量機でも150MW前後である。一般には20～60MW程度のものが多い。

タービン型式としては、図7に示すような火力用蒸気タービンの低圧タービンに類似した多段復水タービンが用いられることが多いが、小容量のものでは単段タービンや背圧タービンが用いられることもある。

ダブルフラッシュ方式の場合は、低圧蒸気を中間段落に導入する混圧タービンが用いられる。図8に示す混圧タービンの例では、流量が少ない高圧部を単流とし、低圧部を複流として翼列の最適化をはかっている。

復水タービンの場合、タービンの排気は復水器に導かれて凝縮される。火力発電と異なり地熱用蒸気タービン

の場合は復水を再利用する必要がないので、冷却水を排気に混合して蒸気を凝縮させる直接接触式復水器が用いられることが多く、スプレージェット式やトレイ式のものが多い。復水器はタービンの直下に置かれる場合と、別置される場合があり、後者の場合は図9に示すような上向き排気のタービンが採用され、タービンと復水器との間は排気ダクトで連絡される。

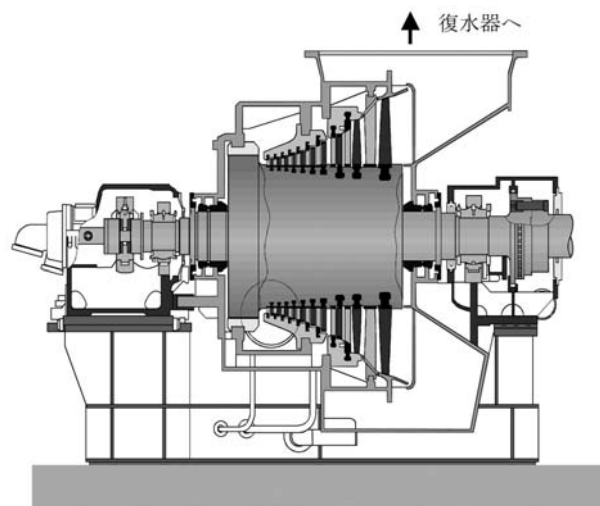


図9 上向き排気タービンの例

4. 地熱用蒸気タービンの最近の技術動向

4.1 耐食性の向上

地熱流体中には腐食性の不純物が多量に含まれているため、地熱発電プラントの安定的な運転のためには機器に使用される材料の耐食性が最大の課題である。地熱流体に含まれる不純物の組成は地域によって大きな差があるが、一般的には二酸化炭素 (CO₂)、硫化水素 (H₂S)、塩化物イオン (Cl⁻)、硫酸塩イオン (SO₄²⁻) などの腐食性不純物が含まれている。地熱用蒸気タービンで問題となる腐食の形態としては、全面腐食、孔食、応力腐食割れ、腐食疲労、エロージョン・コロージョンなどがあるが、特に運転中の応力が高い動翼やロータの応力腐食割れや腐食疲労は地熱用蒸気タービンの損傷事例の大きな割合を占めており、設計・製作上の十分な配慮が必要である。

過酷な腐食環境のもとでの長期にわたる機器の安定運転のためには、材料の腐食特性についての評価が重要である。そのため、実験室において地熱流体を模擬した腐食環境における材料試験を系統的に行い、その結果に基づいて適切な材料および使用応力が選定されている。表2は地熱用蒸気タービンに一般的に用いられている材料の例である。地熱流体の性状はサイトごとに異なるため、実際の地熱サイトにおける材料の挙動を確認することも重要であり、図10に示すような試験装置を用いて、地熱蒸気による材料の腐食試験を実施している。

腐食性の高い地熱蒸気流に曝されるロータや静翼ホル

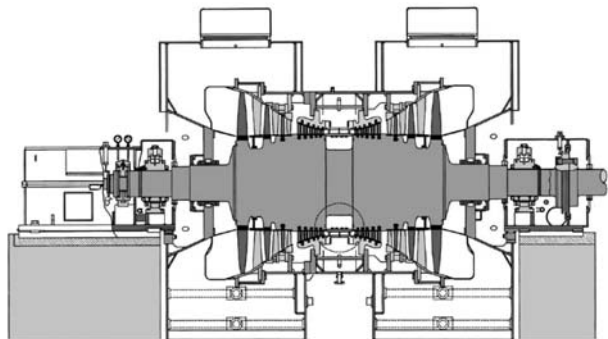


図7 地熱用蒸気タービンの例

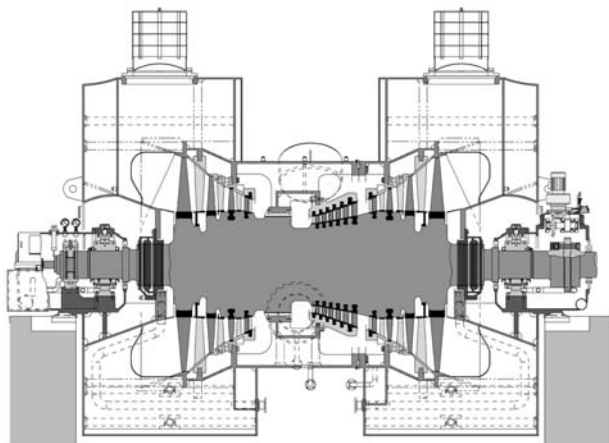


図8 混圧復水タービンの例

表2 地熱用蒸気タービンの材料例

部品名	材料名
ケーシング	炭素鋼鋼板
ロータ	1%Cr-MoNiV鍛鋼, 2%Cr-MoNiWV鍛鋼
静翼・動翼	13%Cr鋼, 16%Cr-4%Ni-CuNb鋼, Ti-6Al-4V
静翼ホルダ	炭素鋼鋳鋼, 13%Cr鋳鋼

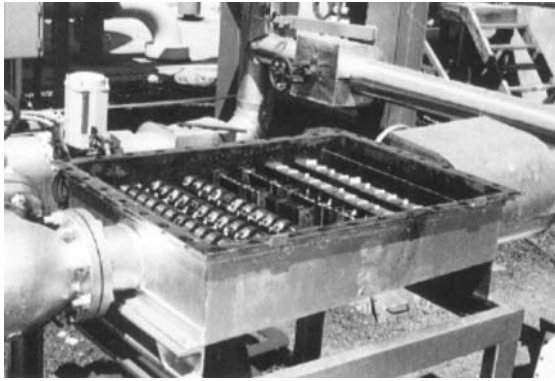


図10 地熱サイトでの材料試験装置

ダなどの部材には、全面腐食やエロージョン・コロージョンが発生しやすく、翼間のシールフィンの脱落などの問題を生じることがある。これを解決する方法の一つとして、部材表面へステンレス材をオーバレイ溶接したり、タングステン・カーバイドなどの耐食性の高い材料を溶射する技術が開発されている。図11はロータに対するHVOF溶射（High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray）の実施例を示すものである。



図11 ロータへのHVOFコーティング実施例

翼脚部とロータ翼溝との隙間には腐食性物質が堆積・濃縮しやすく、応力腐食割れや腐食疲労発生の原因となることがある。応力腐食割れや腐食疲労に対する耐性を向上させる技術として、ショットピーニング技術が開発され、実機に適用されている。これは翼やロータの高応力部位に鋼球を高速で投射することにより、部材表面に圧縮残留応力を発生させ、それによって応力腐食割れや腐食疲労に対する耐性を向上させるものである。ショッ

トピーニング処理を施した翼材及びロータ材に対し、応力腐食割れ及び腐食疲労試験を行った結果、大幅な耐力向上効果が得られることが確認されている。ショットピーニングの施行に際しては、投射速度や角度などのパラメータが重要であり、そのため図12に示すようなロボットによる作業を行うことで安定した品質を実現している。



図12 ロボットによるショットピーニング実施例

4.2 スケール対策

地熱流体中に含まれるシリカ（ SiO_2 ）や炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）などの不純物は、翼やケーシング、ロータなどの部材表面にスケールとして析出・堆積し、蒸気通路を狭めて出力低下をもたらしたり、摩耗損傷や振動の原因となることがある。図13は静翼に付着したスケールの例である。



図13 静翼へのスケール付着の例

スケール対策としては、図14に示すように翼流路を広く取るなどの設計上の配慮が行われるほか、上流側でのスクラッパ（洗浄装置）の設置や、図15に示すように蒸気タービン入口に注水してスケールを除去するブレードウォッシング技術が開発されている。

4.3 ドレンアタック・エロージョン対策

地熱用蒸気タービンの入口蒸気は一般に飽和蒸気であ

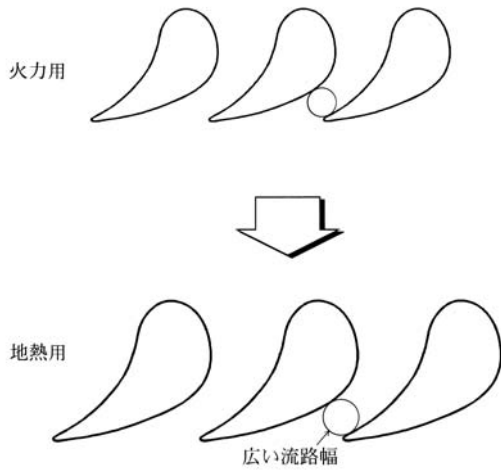


図14 翼流路幅の比較 (スケール対策)



図15 ブレードウォッシング装置

り、タービン内を膨張する間に蒸気の湿り度が増大して、タービン出口では10～15%前後にも達する。そのため、蒸気中の水滴の衝突による動翼のドレンアタック・エロージョンに対する配慮が火力用蒸気タービン以上に要求される。

水滴によるドレンアタック・エロージョン対策としては、図16に示すようにドレンキャッチャを設けてエロージョンの原因となる水滴を除去したり、エロージョンを

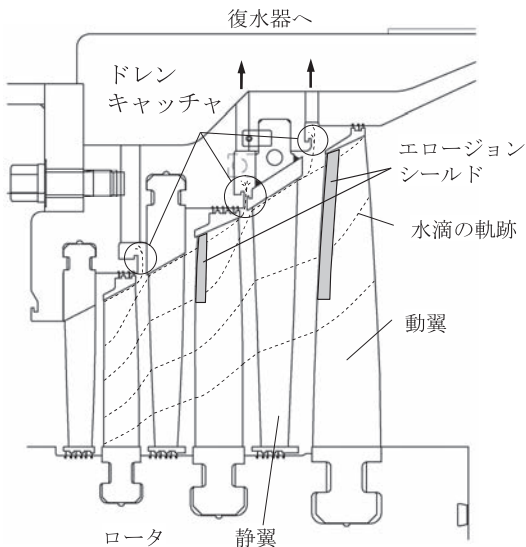


図16 ドレンアタックエロージョン対策の例

受けやすい動翼前縁部にステライトなどの硬い材料でできたエロージョンシールドをロウ付けするなどの対策が行われている。

4.4 効率向上技術

地熱用蒸気タービンは火力用蒸気タービンを母体として発展してきており、火力用に開発された効率向上技術が地熱用蒸気タービンにも適用されているが、地熱蒸気の腐食雰囲気を考慮した高信頼性設計が重要である。

地熱用蒸気タービンの最終段を含む低圧翼群には、最新のCFD (Computational Fluid Dynamics) 手法を用いて開発された高効率低圧翼が採用されている。低圧長大翼内部の流れは高マッハ数の粘性流であるが、CFD手法を用いて流れのシミュレーションを精度良く行うことにより、高効率翼列の開発が可能になった。図17に解析結果の例を示す。図18に示すようなFEM (有限要素法) による応力・振動解析と組み合わせることにより、高効率と高信頼性を両立させた新世代低圧翼シリーズが開発

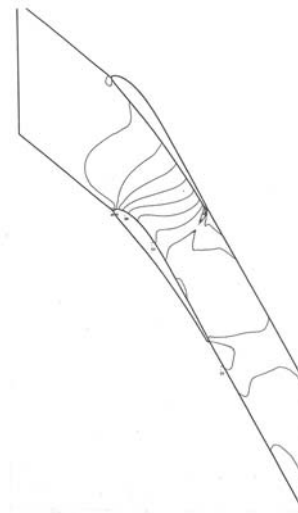


図17 CFDによる流れ解析例

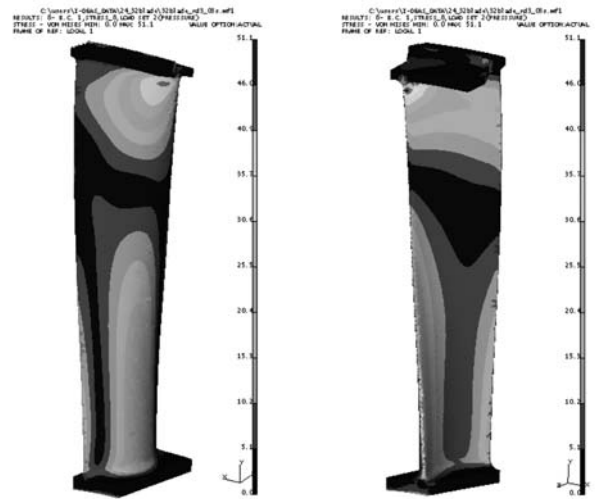


図18 FEMによる翼振動解析例

され、実機に適用されている。

高圧部の翼には、1本のバー材から翼とシュラウドを一体に削り出したインテグラルシュラウド翼が採用されている。インテグラルシュラウド翼は運転中に隣接翼同士が密着して全周一群構造となり、シュラウドの制振効果により運転中の振動がきわめて小さいという利点を持っている。最新の地熱用蒸気タービンには、インテグラルシュラウド翼の優れた信頼性を生かしたまま、翼列性能を向上させた高効率翼が採用されている。また、図19に示すように形状をバウ型とし、二次流れ損失を抑えた高効率三次元翼も適用されている。

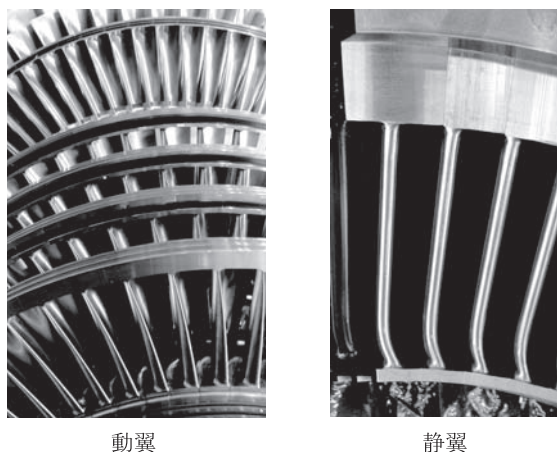


図19 高効率三次元翼

4.5 出力増大

蒸気タービンの最大出力は、最終段動翼の排気面積で決定されるが、腐食性が高い地熱蒸気中で使用される地熱用蒸気タービンの場合には、材料強度の面から翼長が制限される。最近では地熱用蒸気タービンの腐食環境に配慮して耐力を強化させた最終段翼が開発され、地熱用蒸気タービンの単機容量の増大を可能としている。図20は世界最大クラスの50Hz用798mm翼を採用したニュージーランド・NAP地熱発電所向け140MWタービンの据付中の外観を示す。このタービンは単気筒の地熱用蒸気



図20 据付中の140MW地熱用蒸気タービン

タービンとしては世界最大容量のものである。図21はNAP地熱発電所の全景である。



図21 NAP地熱発電所全景

5. おわりに

アイスランドは人口約30万人の小さな島国であるが、地熱資源に恵まれており、電力や地域暖房などエネルギー消費の約60%を地熱エネルギーで賄っている地熱大国である。スヴァルトセンギ地熱発電所では、地熱井から汲み上げた地熱流体の排水を人工の池に流して、ブルーラグーンと呼ばれる温泉にしている。温水は中に含まれるシリカのために美しい青色をしており、ブルーラグーンという名前もそこからつけられたものである。温泉施設や空港では、ブルーラグーンの温水から抽出したシリカを化粧品として販売している。地熱発電設備にとっては大敵であるシリカも、ここではビジネスに有効活用されている。地熱エネルギーは魚の養殖にも使われており、ししゃもを養殖して日本に輸出しているという。また、地中に深さ5000mの井戸を掘るIDDP (International Deep Drilling Project in Iceland) と呼ばれるプロジェクトが国際的協力のもとに進められており、そこから噴出する400～600℃の高温の地熱流体の利用が検討されている。

これまで地熱発電とは無縁と思われていたドイツでも、深さ3000～5000mに達する井戸を掘り、高温岩体中に人工的に注水して熱水・蒸気として取り出しバイナリー方式で発電を行う高温岩体発電の実用化に成功している。温泉大国であり国産の地熱エネルギーに恵まれたわが国でも、地球温暖化対策の一環として、再生可能なクリーンエネルギーである地熱エネルギーの今後の一層の活用が期待される。

参考文献

- (1) Dickson, M.H., Fanelli, M., 日本地熱学会IGA専門部会誌, 地熱エネルギー入門 (2008)
- (2) 地熱発電特集, 火力原子力発電, No.577, Vol.55 (2004)

特集：蒸気タービンの最新技術動向

産業用発電蒸気タービンの最新技術動向

井手 紀彦*¹
IDE Norihiko

キーワード：産業用発電タービン，コンバインドサイクル，DSS運転，遺伝的進化法，大容量抽気，初段全周ノズル，クリティカル回避

1. はじめに

電気事業の規制緩和の進捗と省エネルギー意識の高まりと共に、開放された送電・配電網を利用した分散型発電所の設置が各種産業用自家発電設備を中心に世界の多くの国で進んでいる。

従来、発電効率の観点から集中型の大規模発電所が多く建設されてきたが、これらは消費地の近くに設置することが困難な場合が多い。一方、分散型発電所は各種産業の排熱や燃料となるバイオマスなどの集積地、および電力の消費地に近接して設置できること、ならびに熱電併給型発電（コージェネレーション発電）を採用することにより、利用形態に応じ、熱と電力の供給割合を自由に選択できることより、災害時を含めたリスクの分散とエネルギー全体の利用効率を高める利点がある。

本報では分散型の産業用発電蒸気タービンに必要な技術要素を紹介する。

2. タービン起動時間短縮

2.1 コンバインドサイクル発電設備

ガスタービンと蒸気タービンを併用したコンバインドサイクル発電設備において、DSS（Daily Start-Stop）運転される場合があり、このとき蒸気タービンの起動時間の短縮が要求される。

コンバインドサイクル発電はLNGなどの軽質油を用いてガスタービンで発電機を駆動し、また、ガスタービンの排熱を回収して蒸気を発生させ、蒸気タービンをも駆動する発電システムである（図1）。

化石燃料のエネルギーを、高温域から低温域までムダなく利用することにより、単一サイクルでは到達できない高い熱効率を得ることができる⁽¹⁾。また、ガスタービンは他の化石燃料焚きボイラに比べ起動時間が短いことより、コンバインドサイクル発電プラントは電力需要のピークカットの目的でDSS運転が適応される場合がある。この場合、ガスタービンのみでなく、発電プラント全体の起動時間を短縮することが必要で、蒸気タービンも従

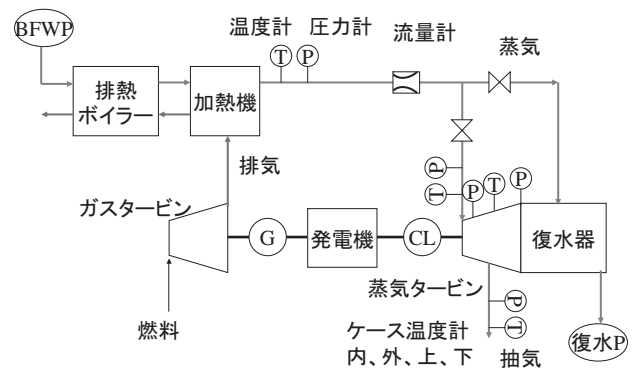


図1 コンバインドサイクル発電

来のように十分な暖気時間を取ることはできず、ガスタービンの立上げによる蒸気発生に合わせて起動する必要がある。蒸気タービンの立上げが遅れると、発生した蒸気は蒸気タービンをバイパスして復水器にムダに捨てられることになる。したがって、蒸気タービンの起動時間短縮がDSS運転の重要な課題となる。

2.2 熱伝達解析

蒸気タービン起動時に、蒸気よりタービンケースに伝わる熱量 Q は、蒸気とケースの温度差 ΔT および熱伝達係数 α に影響される。また、熱伝達係数 α は蒸気の流れ速度 V と密度 ρ （=圧力 P ）が支配的であることから、タービン立上げ時の温度分布は時々刻々変化して、解析は非定常の熱伝達解析となり、初期条件より短い時間ステップで繰り返し解くこととなる。

解析には、起動時におけるタービン内部蒸気の温度 T 、速度 V 、圧力 P の変化を予測するとともに、ケース保温を通しての大気への放熱、台板や配管への熱伝導も正しく評価する必要がある。また、得られた温度分布とケース固定の境界条件より、各時間における変形と応力を評価して判定することとなる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2.3 検討事項

発生が予想される問題としては、

- (1) ケースとロータの温度差およびケース変形によるクリアランス部での接触の問題

原稿受付 2010年5月10日

*1 新日本造機㈱ 経営企画室開発グループ
〒737-0133 呉市広末広1-2-10

(2) 温度分布および熱膨張差によって生ずる、熱応力および低サイクル疲労の問題⁵⁾があり、それぞれ検討する必要がある。

タービン起動時におけるロータおよびノズルの温度上昇はケースに比べて早い。それにより、熱膨張伸び差でノズルとブレードが離れる様にロータの軸方向の支持を設けることと、ノズルとケーシングの間に半径方向の熱膨張伸び差を緩和するギャップを設けることで、接触の問題を解決することができた。ケーシングにおいては、上部が下部より温度上昇が早いことから、上部の伸びによりケーシング前側のシールボックス部が沈み込み、ロータと接触を起こす可能性があることが分かった。対策として、シールボックス部の剛性を高め、沈み込みを抑える構造を採用した。また、最も高温高压の蒸気に晒される加減弁室をタービンケーシングから独立させ、加減弁室からの熱伝導を抑えるとともに、加減弁室の熱膨張を吸収容易なタービンケーシング形状を採用することで、熱応力を緩和することができた(図2)。

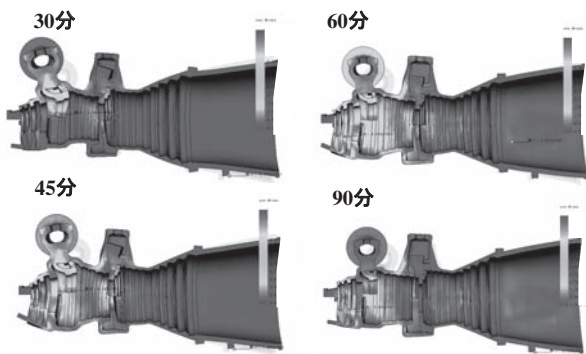


図2 起動後の変形・応力

2.4 運転モード

一方蒸気タービンの立上げ時は、大きく以下の三つの運転状態がある。

- (1) アイドリング 低速の無負荷暖機運転の状態
- (2) 昇速運転 無負荷で、アイドリングから定速までの回転数上昇の状態
- (3) 負荷取り 同期回転数で負荷を取り始め、蒸気条件の上昇に従って定格出力まで上昇する状態

このうち、解析と実測の結果、負荷取り直後にタービンケースに大きな内外壁温度差と応力が発生することが分かった。ここでの負荷上昇速度を抑えるとともに、そのほかの運転状態での時間を短縮し、起動時間全体で温度差・発生応力を均一化することで、従来実績よりも20%起動時間を短縮することができた(図3)。

3. 高効率化

近年の地球温暖化問題を背景とする二酸化炭素排出量削減の要求が高まる中、産業用発電プラントにおいても

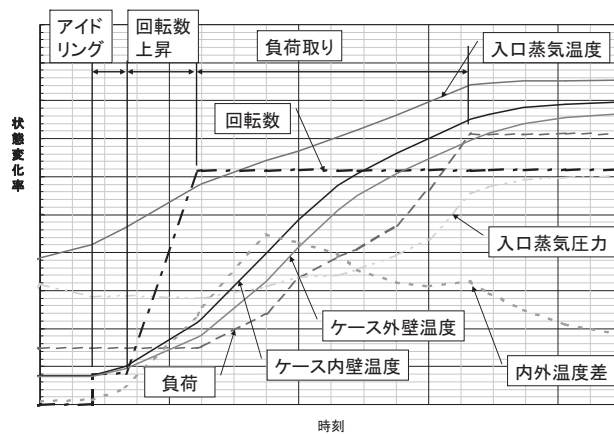


図3 起動時の状態変化

蒸気タービンの効率向上が要求される。

弊社では、これまでタービン内部効率向上のために排出速度エネルギーの低減を目的とした最終段長翼の開発や、漏洩損失の低減を目的としたブレードチップフィン、ルートフィンの開発を行い実機へ適用してきた⁶⁾。

一方で、タービン内部の損失の中で比較的大きな割合を占めるものとしてプロファイル損失があるが、その中で特に高・中圧段に適用される比較的翼長が短い翼においては、ノズル・翼型の空気力学的特性に大きく影響されるため、流れ場の特徴を考慮したプロファイル形状の開発が必要となる。

プロファイル形状を決定するにあたっては、新たにCFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) と最適化手法を組み合わせることで最適形状を選定した。

最適化手法はGA (Genetic Algorithm: 遺伝的進化法) を採用した。

すなわち、翼形状を決定する数個の数値パラメータを遺伝情報に置き換え、ランダムに翼形状を発生させ、CFDで翼効率を計算し、効率の良いものを選抜して親を決め、適応度の高い子を作成する。このとき、部分的最適に陥らないよう遺伝子の一部に突然変異を起こす。この繰り返しの中から、効率の良い翼形状を作成した(図4)。

また、効率向上を達成した要因を特定するため、新旧ノズル、ブレード内の流れを比較し、ノズルにおいては翼の後半で負荷を取ることに伴って、圧力勾配が壁面に直交し、出口側負圧面での速度上昇が大きくなること、ブレードにおいては圧力面での剥離が減少していることを確認した(図5)。

次にCFDの妥当性を確認する為新旧それぞれの形状で圧縮空気を用いた静止翼列風洞実験を行った(図6)。このとき、マッハ数、レイノルズ数、入口/出口の圧力比は実機と同等となるように設定した。計測項目としてはピトー管を用いて翼列入口出口の全圧・動圧、翼モデル側面に複数個開けた静圧孔より翼表面の静圧を計測した。得られた実験結果は、翼表面の圧力分布など

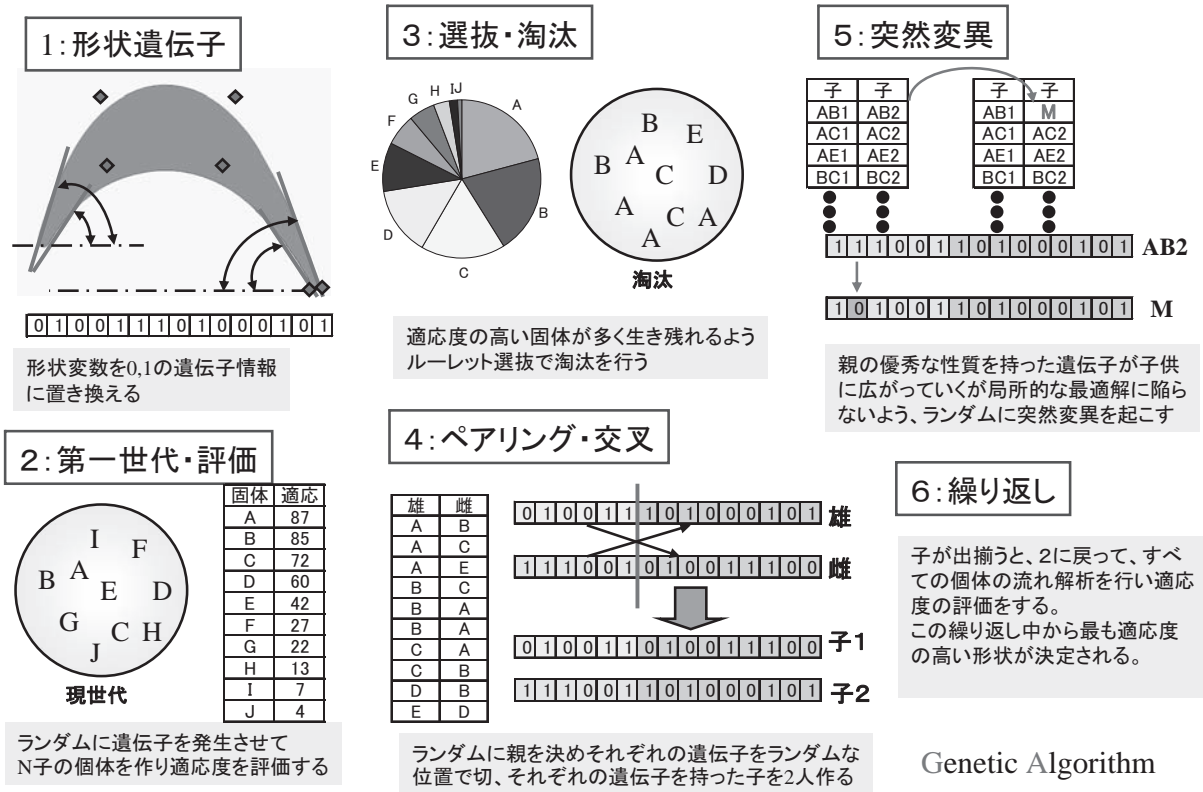
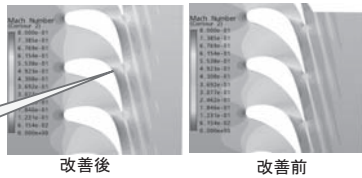


図4 遺伝的進化法

CFDの結果と良好に一致しており、新型プロフィールの効率向上を確認した。

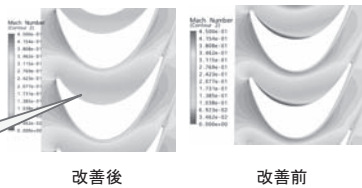
ノズル解析結果

マッハ数コンタ図



圧力勾配が壁面に直角

ブレード解析結果



圧力面で流れが剥離しない

図5 効率改善の物理的意味

4. 大容量抽気

製糖業や製鉄業など産業によっては製造プロセスで大容量の熱源が必要となる場合がある。このような場合、従来は背圧タービンと復水タービンの2台を併用していたが、シーズンオフや昼夜などの負荷変動に対して各タービンは設計点からはずれた負荷となり、効率の悪い運転になっていた。そこで、大容量抽気を持つ発電タービンを採用することで熱と電気の供給バランスの変化に広く対応することができる。

大容量抽気発電タービンは、排気ボリュームフローから選定される標準タービンに、蒸気入口部の大容量化と抽気弁の大容量化を実施することとなる。

蒸気入口部の大容量化に関しては、従来上半ケーシング蒸気加減弁室に設けたパーシャルアドミッション初段ノズルを、上下2つのケーシングに設置し初段全周流入とすることで達成した(図7)。

抽気の大容量化に関しては、抽気段に設けた上下左右4つの弁体を持つ大容量抽気コントロール弁を採用することで達成した(図8)。

5. 低真空対応タービン

通常、復水式タービンの排気圧力は蒸気の保有エネルギーを最大限利用できるよう、0.01Mpa程度に低く設定

ノズル



ブレード

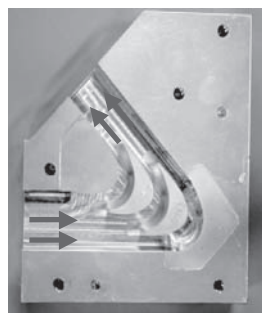


図6 翼列風洞試験

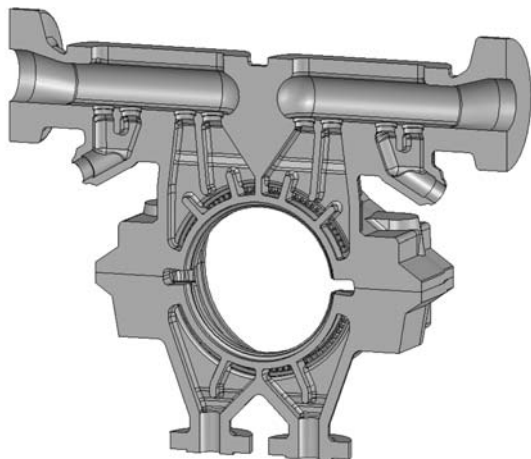


図7 初段全周ノズル

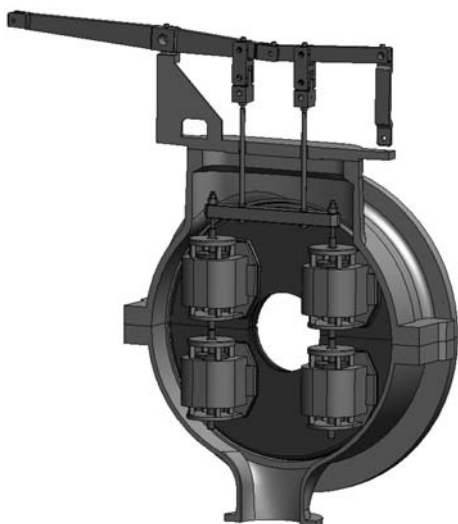


図8 大容量抽気弁

される。この排気真空は蒸気タービンを出た排気を復水器で冷却し水に戻すことによって達成される。しかし、地域によっては復水器で使用する冷却水が確保できず、空冷式の復水器を使用する場合があります、このとき十分な冷却能力が得られず排気真空が低下する。

標準化された蒸気タービンにおいて排気真空の低下は、低圧段におけるノズル、ブレードでの蒸気入出角度が変化し、効率を低下させるとともに、排気蒸気比重量の増加によりブレード曲げ応力が増加する問題が発生する。

したがって、排気低真空に対応した新たな低圧段翼列を開発しシリーズ化した（図9）。

6. クリティカルスピードの回避

減速機付発電機を駆動する場合、タービン回転数を出来る限り高くすることが発電プラントのイニシャルコスト低減を目的に要求される。

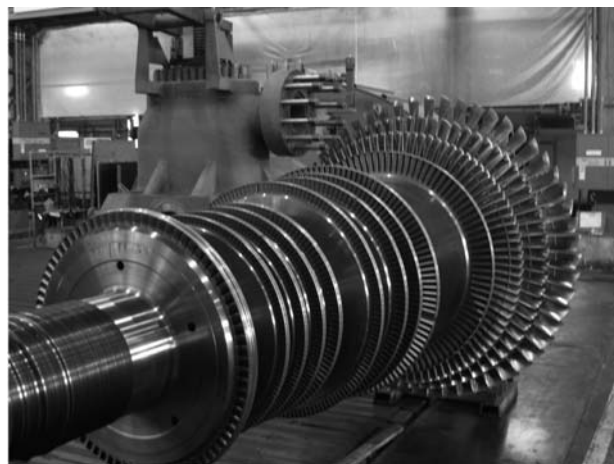


図9 低真空対応タービン

このとき、タービンロータのクリティカルスピードとタービン定格回転数を十分離す必要がある。

一方、標準化された蒸気タービンにおいてロータのクリティカル速度を回避するために、比較的自由に寸法を変えることが出来るのはロータ軸径である。しかし、ロータ径の増加は剛性の増加によるクリティカルスピードの上昇と重量の増加によるクリティカルスピードの下降という両方の作用があり、全体ロータ径の均一な増減ではクリティカルスピードを数%変化させるのみである。

そこで、回避すべき特定の振動モードを定め、各段の軸径の振動モードに対する寄与度を求め、軸径を最適化することによって、回避すべきクリティカルスピードを大きく変化させることが出来る。

図10は2次クリティカルスピードを回避する目的でモードの節となるロータ中央部の軸径を下げ、モードの腹となる部分の軸径を上げることで、2次振動モードをキャンセルする形状とし、1次のクリティカルスピードを変えず、2次のクリティカルスピードだけを13.6%上昇させた例である。

このときの制約条件は軸径の変化によって、各段の圧力差によるロータ軸方向荷重が規定値以内であることとしている。

7. おわりに

産業用発電タービンにおいてはより高いエネルギー変換効率をより安いライフサイクルコストで実現することが要求されるが、顧客により蒸気タービンの使われ方は一様ではなく、地域や経済環境の違いにより異なり、また、時代とともに変化している。

こうした変化の中、顧客要求を適切に把握し、要求される仕様を盛込んだ新しいモジュールを追加することで、製品適応範囲を広げ、顧客満足度を高めていきたいと考えている。

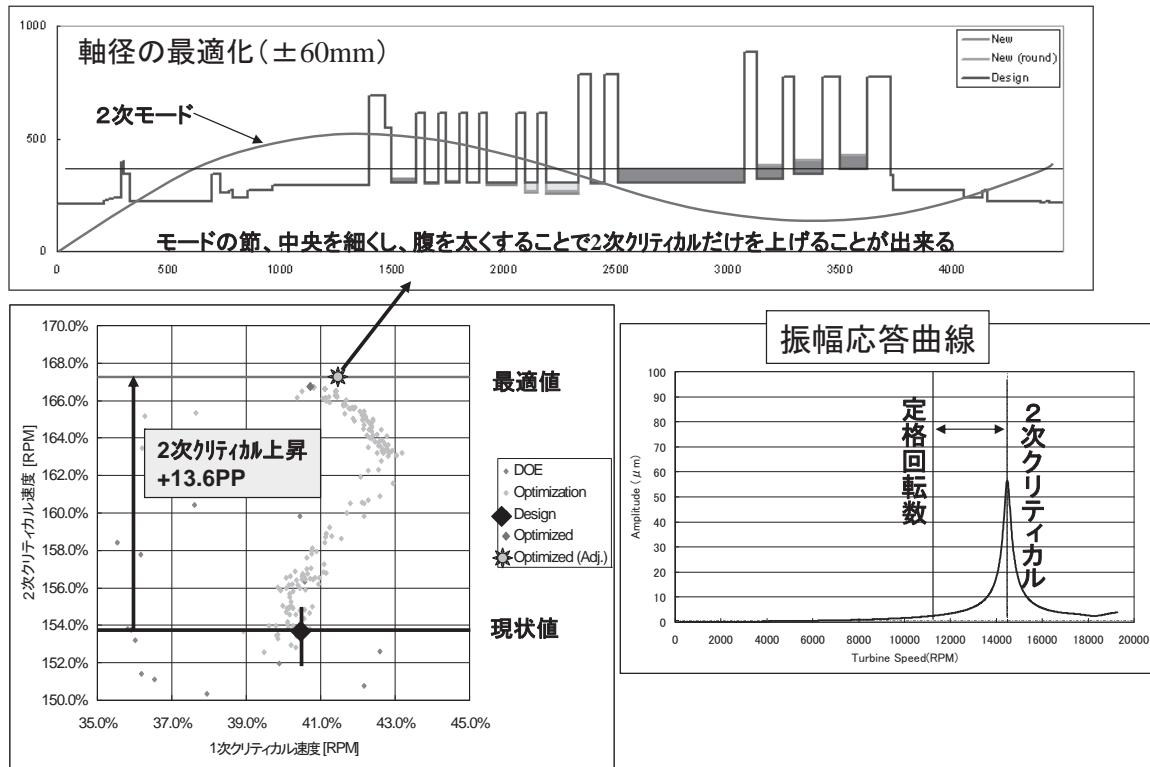


図10 クリティカルスピードの回避

参考文献

- (1) 野口俊英. コンバインドサイクル用蒸気タービン. ターボ機械, no.32-9, p.519 ~ 523, Sep.,2004.
- (2) 山手四郎, 三原資巨, 国分孝友, 山本鷹司. 蒸気タービン各部の熱伝達と温度分布. 三菱重工技報, no.2-1, p.22 ~ 28, Jan.,1965.
- (3) 川上英彦. 大形蒸気タービンの運転と熱疲労. 火力発電, no.19-5, p.36 ~ 44, May.,1968.
- (4) 大谷幸広, 佐近淑朗, 石坂浩一, 馬越龍太郎, 中野隆. 高信頼性コンパクト高中圧タービン車室設計法の開発. 三菱重工技報, no.37-1, p.18 ~ 21, Jan.,2000.
- (5) 疲労強度の設計資料IV. 低サイクル疲労強度. 日本機械学会, 1983.
- (6) 井野正徳, 蒸気タービンの高効率化, 住友重機械技報 No.155 P17 ~ 20, 2004.

特集：蒸気タービンの最新技術動向

(株)荏原エリオットにおける蒸気タービンの最近の技術動向 (エチレンプラント向け蒸気タービンの最近の技術動向)

戸田 暁人*1
TODA Akihito

キーワード：エチレン，大容量，高温，高圧，二重胴，ダイヤフラム，動翼，蒸気加減弁，機械駆動，
2 out of 3，トリップ

1. 荏原エリオット蒸気タービンの概要

(株)荏原エリオット（以後当社）の多段蒸気タービンは、1972年の第1号機出荷以来当社のガス圧縮機の駆動用を主な用途として発展してきた。

当社のガス圧縮機、蒸気タービンの多くは、石油化学プラントや石油精製プラントの中核機器として使用されており、世界中の各ユーザにこれまでに合計1100台以上を納入した。

これらのガス圧縮機・蒸気タービンは、各プラントの個別仕様に従い最適設計されるため、個々のガス圧縮機、蒸気タービンは一品一様の仕様を有する。

また、機械駆動用蒸気タービンは運転速度範囲を有するため、一定速度で運転される発電用蒸気タービンとは異なる設計の考慮が必要となる。このため、世界でも機械駆動用蒸気タービンの製造メーカーは限られている。

本稿では、石油化学分野の中でも特に当社の主力分野であるエチレンプラント向けのガス圧縮機駆動用蒸気タービンについて、最近の技術動向を紹介する。

2. エチレンプラント向け蒸気タービンの最近の技術動向

エチレンプラントは石油化学の米とも呼ばれるエチレンを製造するプラントである。ここでは主に次の3種類のガス圧縮機トレーンが用いられる。

- (1) 分解ガス圧縮機トレーン
- (2) プロピレン冷凍ガス圧縮機トレーン
- (3) エチレン冷凍ガス圧縮機トレーン

写真1は当社工場試験中の分解ガス圧縮機トレーンである。

入口蒸気条件：ゲージ圧力11.96 MPa, 520℃

抽気蒸気条件：ゲージ圧力1.76 MPa

排気蒸気条件：ゲージ圧力-0.09 MPa

近年は世界中の石油化学製品の需要の急速な増大と、



写真1 分解ガス圧縮機トレーン

大型化による原単位低下で競争力を強化するために、世界各地で大型のエチレンプラントが新設されている。近年は年産100万トン規模のエチレンプラントが主流となっている。図1の当社納入実績のエチレンプラント容量の推移でもその傾向は明確である。

ガス圧縮機は大容量化し、それに従い蒸気タービンの大容量化が必須の流れとなっている。

圧力容器であるタービン高圧側ケーシングでは、高温

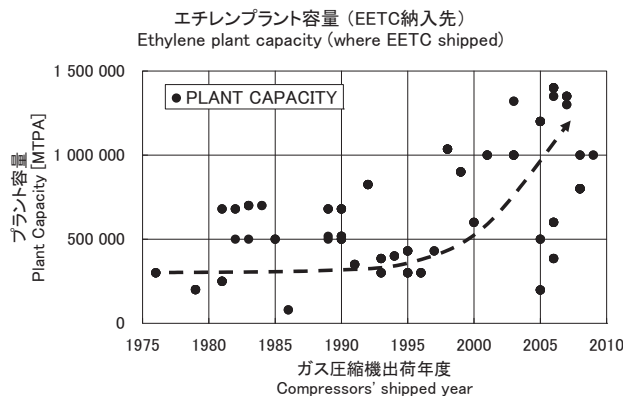


図1 (株)荏原エリオット納入先のエチレンプラント容量の推移

原稿受付 2010年5月10日

*1 (株)荏原エリオット

〒299-0296 袖ヶ浦市中袖20-1

の駆動蒸気は、タービンに用いる金属材料の許容応力の低下をもたらすため、高強度化が要求される。更に、大容量化によりケーシング内径は大きくなり肉厚となるが、これは熱応力の増大をもたらすことになる。様々な相反する条件をバランス良く満足させながら高圧ケーシングの強度設計を行う必要がある。

高圧ケーシング内部のダイヤフラムノズル（隔壁）も大径となり、更に高温状態で高差圧に耐えるために構造の見直しが必要となる。

復水蒸気タービンの容量限界は、最終段動翼の流路面積で決定される。大容量化のために一層の長翼化が必要となる。これに伴い、低圧側排気ケーシングも大容量化が必要となる。

機械駆動用蒸気タービンは、発電用蒸気タービンのように一定速度で運転されるのではなく、プロセスガスの流量を制御するために、ガス圧縮機の回転速度すなわち蒸気タービンの回転速度を変化させる必要がある。一般的な速度範囲は定格速度の70%から105%である。この速度範囲は一次危険速度と二次危険速度の間に一定のマーヅンをもってはならない。このため、ロータ系の不釣合い振動解析や動翼の共振解析を入念に行う必要がある。

また、高温高圧の駆動蒸気の大容量化に伴い蒸気加減弁の流体振動に伴う不安定振動が増加するため、弁体形状の一層の改良が必要となる。

近年石油資源の枯渇が懸念されるなか、エチレンプラントの原料としてナフサ・ガスの代わりに石炭由来のメタノールを用いるプラントも建設されている。当社では、2009年に石炭・エチレンプラントに分解ガス圧縮機・タービン装置とプロピレンガス圧縮機・タービン装置を納入した。

2.1 高温・高圧・大容量二重胴高圧ケーシング (モデル：N1620DC)

当社では、首題の要求を満足するために二重胴高圧ケーシングを開発した。2000年から7台出荷し現地で順調に運転されている。

高圧部の基本モデルはN1620DCと呼ばれ、540℃、ゲージ圧力13.7 MPaの蒸気用に設計されている。

図2に分解ガス圧縮機駆動用の抽気復水蒸気タービンの組立断面図を示す。

大口徑となるケーシングの円筒部は二重構造となっており、外ケーシングと内ケーシングの間は中間段圧力の蒸気で満たされている。その結果、内ケーシングは内部の高圧と中間段圧力との差圧に基づき設計され、外ケーシングは中間段圧力での設計となる。その結果、大容量を流すために大径とした外ケーシングの応力を下げることが可能となった。

蒸気タービンのような高温を扱う機器の設計では、前述の内圧による応力、高温による許容応力の低下を考慮

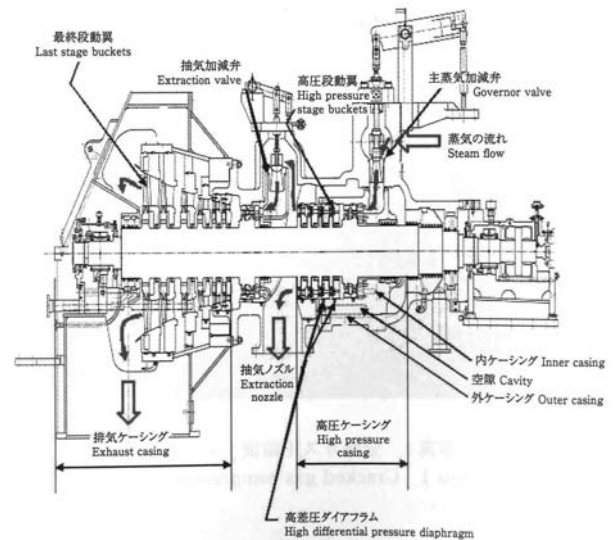


図2 二重胴タービン組立断面図

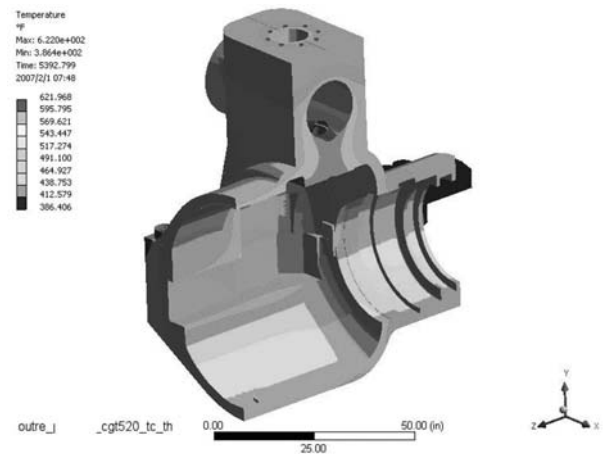


図3 外ケーシング温度分布（1.5時間後）

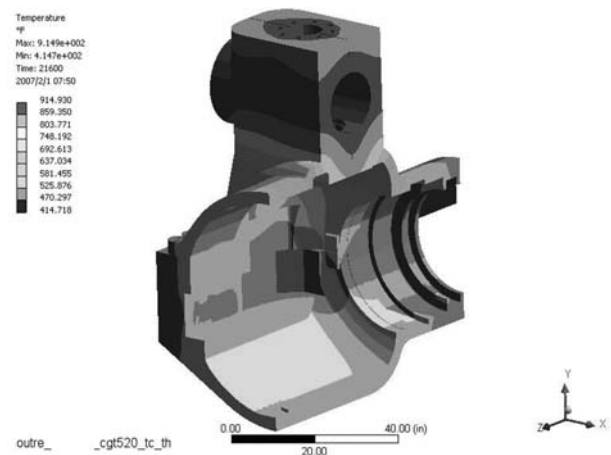


図4 外ケーシング温度分布（6時間後）

するが、更に冷機起動時のような、機器が起動に伴ない昇温していく際の熱応力も考慮しなくてはならない。ケーシング肉厚の検討は当然のことながら、ケーシング

水平断面からの蒸気漏れの検討が設計上の重要なポイントである。

次に解析の例を示す。図3に起動・蒸気導入1.5時間後の外ケーシング温度分布を、図4に起動・蒸気導入6時間後の外ケーシング温度分布を示す。

起動後のケーシングの内外部の温度分布を解析し、この結果を用いて熱応力を解析した。図5にもっとも熱応力が大きくなる外ケーシングの水平断面コーナ部でのケーシングの内外部の温度差の推移を示す。図5から起動1.5時間後が最大となることが分かる。更に、図6に起動1.5時間後の外ケーシング上下合せ面での応力分布を示す。

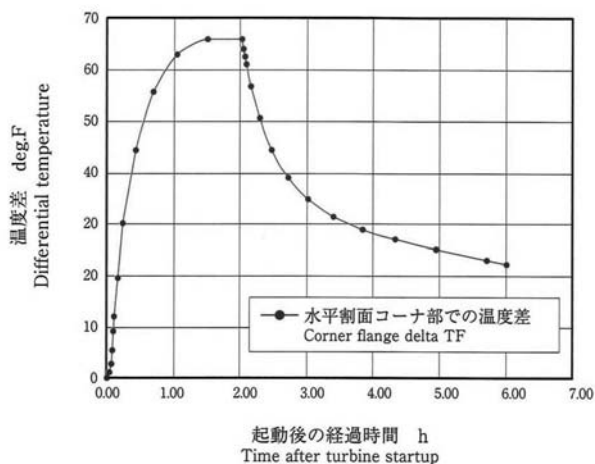


図5 外ケーシング水平断面コーナ部での温度差の推移



図6 外ケーシング水平断面の応力分布 (1.5時間後)

2.2 大容量排気ケーシング (モデル: N105復水)

当社では、大流量に対応するために排気ケーシングを新たに開発した。図7にその形状を示し以下にその特長を示す。

- (1) 軸方向長さが短くコンパクトな形状
- (2) 圧力回復係数が大きい流路形状

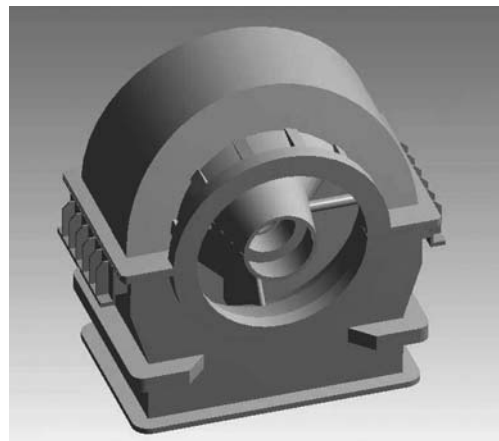
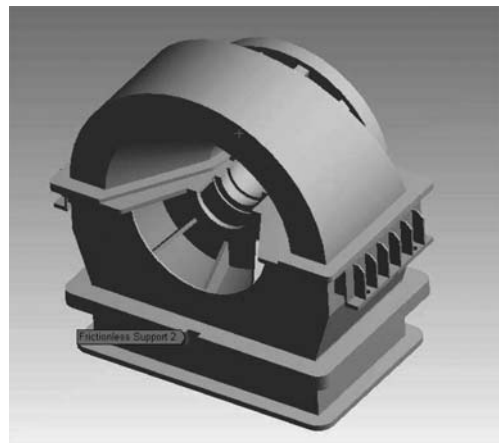


図7 N105復水新排気ケーシング3Dイメージ



- (3) NEMA規格以上の配管外力に耐える高強度の形状
前記の形状を決定するに当たっては、16種類のモデルを作成し、それぞれについて流れ解析 (CFD) を行い比較検討した。その結果の中から最適な形状を採用した。

2.3 高温・高圧・大容量用の高差圧ダイアフラムノズル (モデル: 137-F1)

中間段の各ダイアフラムにはそれぞれノズルが設置され、高圧・高温の蒸気のエンタルピーを効果的に速度エネルギーに変換して動翼に与える必要がある。大容量化、高差圧化に対応し、かつ軸方向長さの短いダイアフラムを開発した。図8にその3Dモデルを示す。

新型ではダイアフラム板厚さを増やし、従来はノズルブレードでダイアフラムの差圧を支える構造であったが、新型は差圧をダイアフラムと一体型のリブで支えて、ノズルブレードはエンタルピーを速度エネルギーに変換させる機能に限定した。この結果、同一寸法の場合、従来型と比較して230%の差圧に耐えることができるようになった。その結果、高差圧下での大径化が実現した。

比較のため通常型のダイアフラムノズルの例を図9に示す。

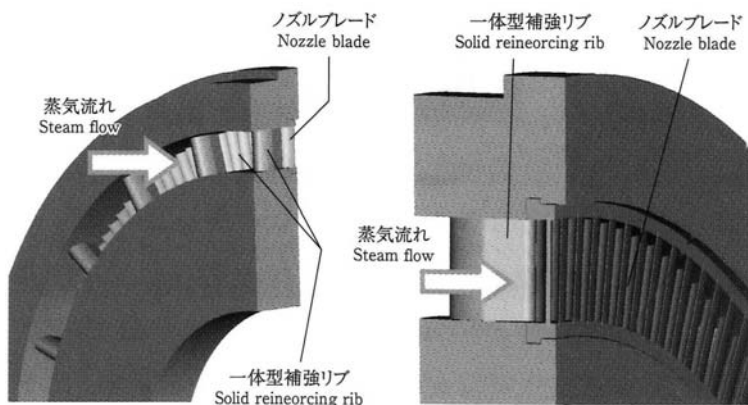


図8 137-F1高差圧用ダイヤフラムノズル, 3Dイメージ

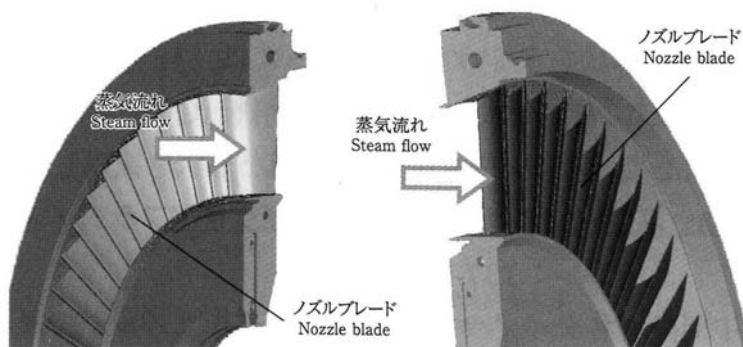


図9 216通常型ダイヤフラムノズル, 3Dイメージ

2.4 高圧段高効率動翼 (モデル: 506-D1)

前述の高差圧ダイヤフラムノズルから流出される蒸気を、高効率に回転力に変換するため、高強度の高効率動翼を開発した。効率は約4%向上し、翼強度も向上した。

図10に3Dモデル図を、図11に流れ解析例を、写真2に実機に組み上げた状態を示す。

2.5 低圧段大容量最終段動翼 (モデル: 661)

将来の200万トンエチレンプラントでの使用を想定し、100 MW以上の機械駆動用設計条件から翼高さは22インチ (559 mm) と設定した。

まず、翼面負荷分布を見直し段落の流れ解析を行うことで、6.7%効率向上を実現した翼形状を決定した。図12に224ダイヤフラムと661動翼から構成される段落の流れ解析の例を示す。

翼質量の増加に伴う遠心応力の増加に対応するために、翼埋め込み部形状を変更し軸方向差込型とした。機械駆動用として幅広い回転速度範囲で安全に運転できるように、翼単体及び翼・ディスクの組立状態での共振特性を検討した。その結果動翼先端にZロックシュラウドを採用した。

図13に動翼埋め込み部及びシュラウド部のZロックを示す3Dイメージ図を示す。図14に翼・ディスクの組立状態での共振解析例を示す。

写真3に実機の最終段に組み込まれた661動翼を示す。

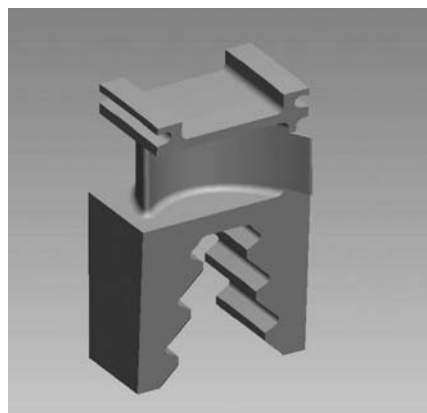


図10 506-D1動翼3Dイメージ

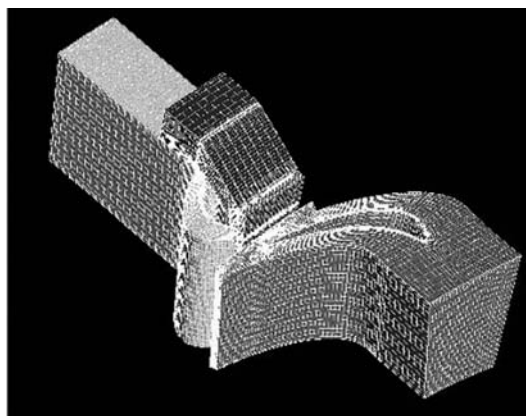


図11 506-D1動翼流れ解析例



写真2 506-D1動翼組立

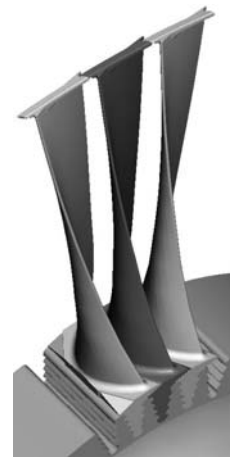


図13 661動翼, 3Dイメージ図

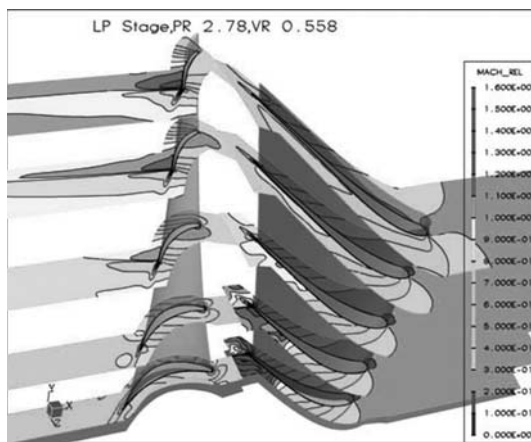


図12 224-661段落流れ解析例



写真3 661動翼組立 (最終段)

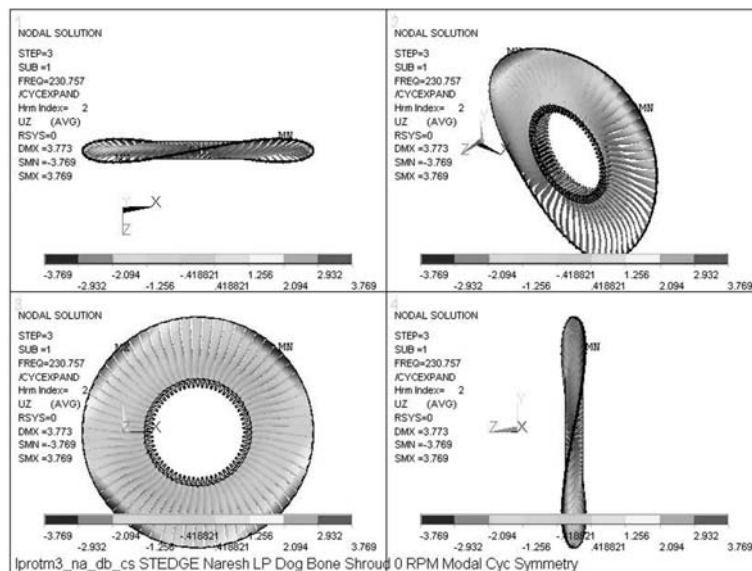


図14 翼・ディスクの組立状態での共振解析例

2.6 新型蒸気加減弁 (モデル: HB)

蒸気加減弁はガバナ (速度制御器), アクチュエータ (動作器) との組合せで開度を変化させて, タービンに流入する蒸気量を制御してタービン・ガス圧縮機

最終的にはガス圧縮機のガス流量を制御する。蒸気は弁体・弁座の隙間を通過する際に, 開度によっては流れが弁座壁面から剥離し不安定振動を起こす場合がある。高温・高圧で密度の大きな蒸気の場合, 流体の不安定振動

のエネルギーが大きい。その結果、油圧アクチュエータで開度を保持しているにもかかわらず、開度によっては弁体の振動が大きくなり、速度制御の精度に影響をもたらす場合がある。

そこで流れ解析と実験実証試験により新型蒸気加減弁形状を開発した。

3. 蒸気タービンの保安装置の最近の技術動向

石油化学・石油精製プラントの市場では、蒸気タービンは基本的には国際規格であるAmerican Petroleum Institute (以後API) 612に従い設計される。

プラント全体への影響を与えないように蒸気タービン・被動機のトレーンは確実な運転と共に、確実な停止も要求される。

API 612では徐々に停止システムに関する要求が変化してきた。1995年以前は機械式トリップ装置のみが規定されていたが、電子制御装置の進歩に従い機械式と電気式との併用、さらには機械式の記述がなくなり、2005年に次の記述が記載されより確実な停止を実現できるシステムを要求している。

12.3.2.1 An overspeed detection system based on three independent measuring circuits and two-out-of-three voting logic in accordance with API Std 670 shall be supplied.

すなわち次の内容が規定された。

1. 独立した3つ(以上)の回転数測定回路
2. 独立した3つ(以上)のCPUモジュール
3. 独立した3つ(以上)の電源モジュール
4. 2/3多数決論理

このように検出・判断回路の信頼性は非常に向上したが、一方実際に蒸気タービンを停止させるための油圧装置の電磁弁は2重化が一般的であった。

12.3.3.1 The turbine shall be provided with a minimum of two, separate electro-hydraulic solenoid operated valves located in the shutdown system.

しかし、より確実な運転・停止の市場の要求にこたえるため当社では油圧装置用の2/3多数決論理の電磁弁ブロックを開発した。

図15に電磁弁ブロック外観を、図16に電磁弁ブロック概念を示す。

この装置は次の特徴を持つ。

1. 3つのソレノイドと3つのdual-port valveで構成
2. 2 out of 3のVoting systemを採用

Pos-E-Stop 203 Trip Block Superior Turbine Tripping Reliability



図15 Pos-E-stop電磁弁ブロック外観

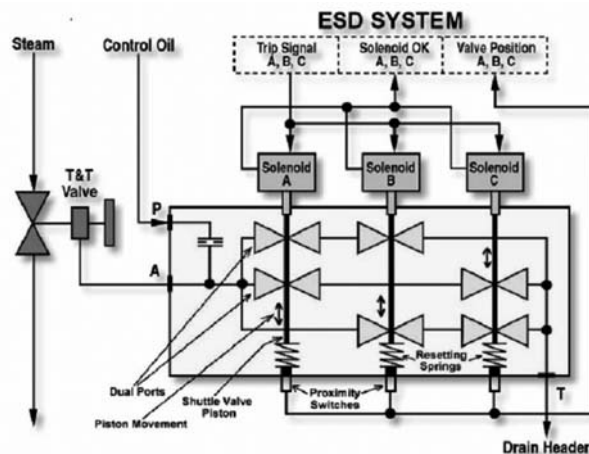


図16 pos-E-stop電磁弁ブロック概念

3. 各ソレノイドモジュール毎に近接型スイッチを装備し遠隔にて状況監視が可能

4. おわりに

ここに紹介した市場の蒸気タービンに対する大容量化・信頼性の向上の要求は更に強まる傾向にある。本稿に示された内容はすでに出荷・運転実績の有る内容に限定して示した。当社では、現在更なるケーシングの大型化、エアロの高効率化等を推し進めており現在次世代型を製作中である。

世界のニーズに応えるガス圧縮機と蒸気タービンを開発、改良、製造することでますます社会に貢献できるようにしたいと考えている。

特集：蒸気タービンの最新技術動向

船用主機タービンの過去と新型タービンの開発

今井 善信*¹
IMAI Yoshinobu

キーワード：船用タービン，再熱式タービン，LNG船

1. はじめに

船舶に使用されている蒸気タービンはその使用目的として、推進用、発電用およびポンプなどの機械駆動用の3種類がある。台数の面では機械駆動用が圧倒的に多く、9割を超えるが、その出力は1MWクラスがほとんどであり、また発電用も原油タンカー用が1MWクラス、LNG運搬船用が3MWクラスであり、共に出力的には高くはない。一方推進用は、現在使用されているのがLNG運搬船に限られているため台数は少ないものの、出力は30MWクラスであり、また船舶に対する重要度も

高いものである。

本書においては、当社が製造している推進用蒸気タービン（以降主機タービンと称す）の過去および最近出荷した新型主機タービンの開発について紹介する。

2. 主機タービンの略史

20世紀初頭より蒸気タービンは軍艦を含む大型船舶の主機として使用され発展してきた。戦後においても大型船舶の主機は蒸気タービンが主流であり、図1に示すように入口蒸気条件は次第に高くなってきた。

しかしながら、1970年代に起こったオイルショックを境に、船舶用主機は燃費の低いディーゼルエンジンへの転換がなされた。この転換は劇的であり、すでに本船へ搭載した蒸気タービンを撤去し、ディーゼルエンジンに

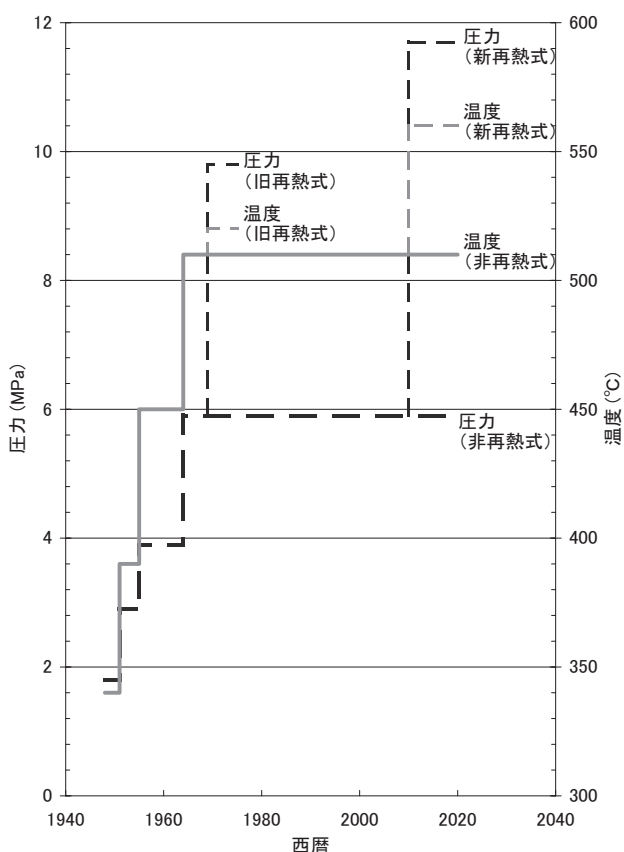


図1 主蒸気条件の変遷

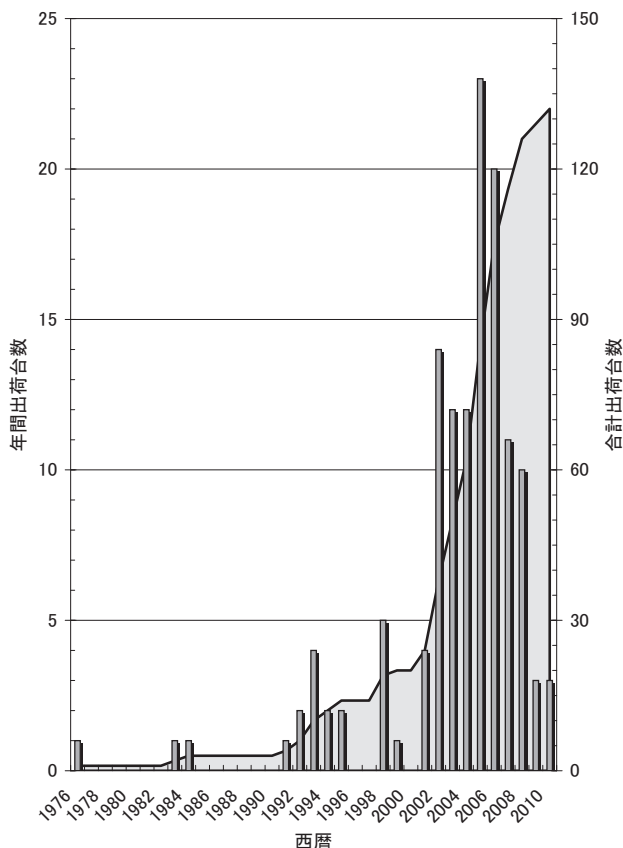


図2 LNG運搬船用主機タービン出荷台数変遷

原稿受付 2010年4月28日

*1 川崎重工業(株) 機械ビジネスセンター
タービン部 船用タービン課
〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3-1-1

換装するほどであった。主機タービンメーカーとしてはまさに地獄絵を目の当たりにさせられ、主機タービンメーカーは世界中で当社を含め2社のみとなってしまった。

こうして長い間主機タービンの需要はほとんど無い状態となったのだが、LNG運搬船については、運搬中に自然に蒸発するガスを有効に利用でき且つ主機としての信頼性が高いことにより蒸気タービンが主機として選択された。図2に当社のLNG運搬船用主機タービン出荷台数の変遷を示す。1976年にLNG運搬船用初号機を出荷したもののその後15年間でわずか2基の出荷であったが、90年代に入ると天然ガスがクリーンな燃料として注目されると共に出荷台数は徐々に増え始め、2000年代に入ると月に1基以上出荷するようになり、永い洞穴生活から一気に日の当る場所へ飛び出すことができた。しかしながら、近年LNG運搬船が過剰気味となったことおよび低燃費の新しい推進システムの台頭により、近年出荷台数が減少している。

天然ガスの需要は今後とも増加傾向であり、LNG輸送船の需要は回復の兆しが見えているのだが、燃費競争に立ち向えられる主機タービンの開発が必要となった。

3. 新型再熱式主機タービン (URA型) の開発

主機タービンの燃費は入口蒸気条件 (圧力・温度) を高くすることにより改善することができるが、蒸気温度を高くすると使用材料の高温強度上の問題が生じ、また蒸気圧力のみを高くするとタービン低圧部における蒸気の湿り度が高くなり過ぎてドレンエロージョンの問題が生じると共に効率的にも悪化してくる。これらの問題を解決するために蒸気タービンの途中段から蒸気を抜き出し、ボイラにて再度加熱した後蒸気タービンへ戻す再熱式を採用することになった。

いくつかの主機タービンメーカーはオイルショックの前の1960年代後半よりディーゼルエンジンとの燃費競争を

考慮して低燃費の再熱式主機タービンの開発に着手し、製造・出荷している。当社も1969年に出力22MWの再熱式主機タービンを出荷し、表1に示すように合計8基の再熱式主機タービン (UR型) を出荷し貴重な運転データを蓄積した。

表1 UR型タービン実績

No.	タービン型式	出力 (MW)	プロペラ軸回転数 (rpm)	本船引き渡し (西暦)
1	UR-315	22.1	90	1970
2	UR-315	22.1	90	1970
3	UR-315	22.1	90	1970
4	UR-315	22.1	90	1972
5	UR-315	22.1	90	1972
6	UR-315	22.1	90	1973
7	UR-315	22.1	90	1974
8	UR-450	33.1	80	1976

この過去の経験を現在の数値解析などの最新技術により改めて検証して更なる改良を加え、かつLNG運搬船主機として130台の実績を有する非再熱式のUA型タービンで構築した技術を踏襲してUR型よりも高い効率と高い信頼性を付加した新型再熱式タービン (URA型) を開発した。

3.1 URA型タービンの基本構成

URA型の主要目をUR型、UA型とともに表2に示す。また、URA型の鳥瞰図を図3に示す。

主機タービンの構成上の特徴として以下のことが挙げられる。

① クロスコンパウンド形の2車室を有する。

高 (中) 圧タービンおよび低圧タービンに分かれてお

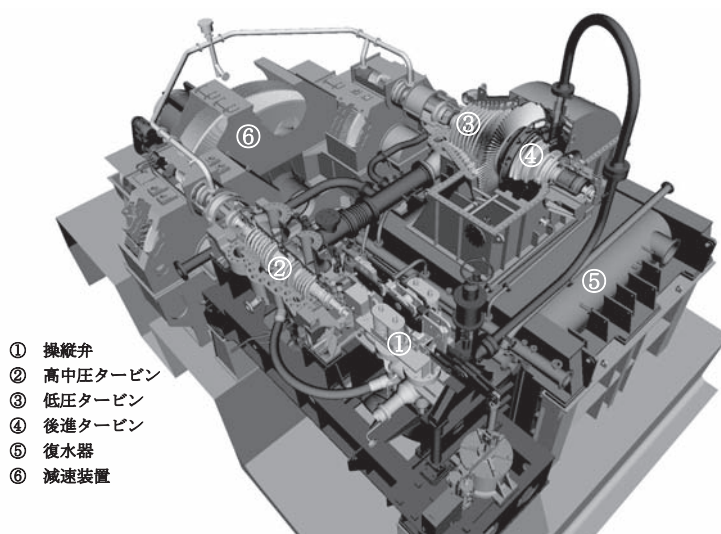


図3 URAタービン鳥瞰図

表2 主機タービン主要目比較

項目	URA型（新再熱式）	UR型（旧再熱式）	UA型（非再熱式）	
最大出力	36.8MW	33.1MW	29.4MW	
高（中）圧タービン	主蒸気条件	11.7MPa/560℃	9.8MPa/520℃	5.9MPa/510℃
	再熱温度	540℃	520℃	—
	段落数	12	12	10
	車室材料	CrMoV鋳鋼	CrMo鋳鋼	CrMo鋳鋼
	ロータ材料	CrMoV鍛鋼	CrMoV鍛鋼	CrMoV鍛鋼
翼材料	12%CrMoNbV鋼 および13%CrMo鋼	13%CrMo鋼	13%CrMo鋼	
低圧タービン	入口蒸気圧力	0.7MPa	0.47MPa	0.55MPa
	段落数	10+2（後進）	8+2（後進）	8+2（後進）

り、どちらかのタービンが運転不能となっても残りのタービンで運航可能なようになっている。

② 後進タービンを有する。

低圧タービンの排気室内にプロペラを逆回転させるためのコンパクトな2段2列構成の速度複式タービンが収められている。

③ 大型の減速装置を有する。

タービンの回転数は最大約6,000rpmであるがプロペラ軸の回転数は約80rpmであるため減速装置が必要である。また減速比が大きいため2段減速式としており、第2段大歯車の直径は約5mとかなり大きなものである。

3.2 高中圧タービン

図4に高中圧タービンの組立断面図を示す。高中圧タービン車室は一体構造で、主蒸気はタービン中央下部

から高圧タービンに流入して船首側に流れ、再熱蒸気はタービン中央の上部から中圧タービンに流入して船尾側に流れる構成として、高温蒸気に触れる部分を車室の中央に集めて機関室の軸方向寸法の増大を防ぐ構造とした。また、この構成では回転数を高く取ることでタービンの小型、薄肉化が可能で熱応力・熱変形が軽減される。しかしながら、再熱運転⇔非再熱運転の切換え時には再熱蒸気入口の中圧タービン入口温度は大きく変化するため、車室の異常な熱変形によるロータとラビリンスパッキンの接触振動などに注意が必要である。

各段のノズル・翼型を見直して流れの最適化を図るとともに翼のシュラウドおよび翼根元にはフィンを設けて翼回りの漏洩損失を低減するなどの効率改善対策を行った。

操縦弁からの主蒸気管はタービン車室と溶接で結合さ

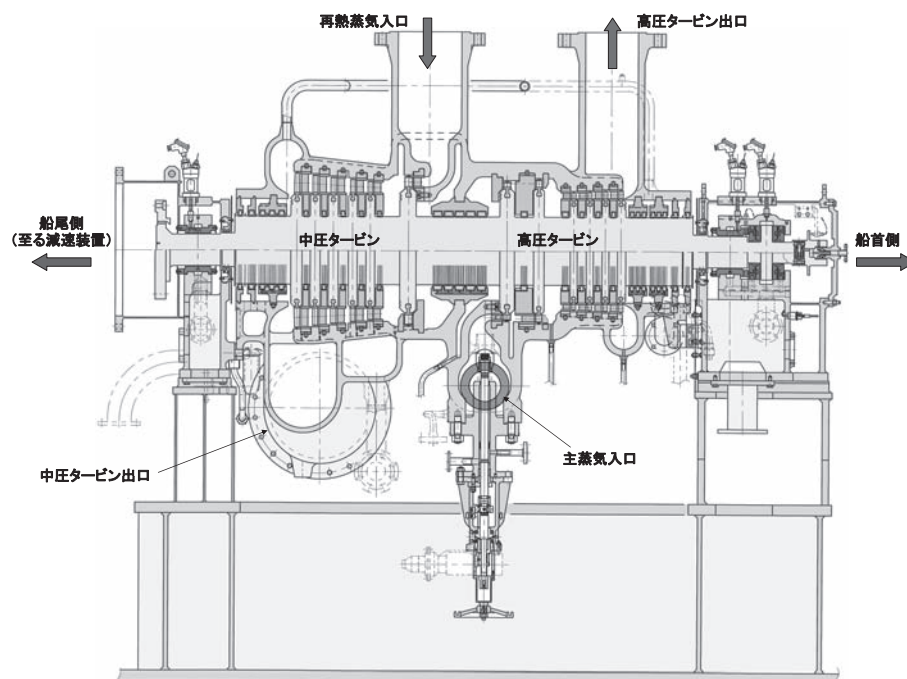


図4 高中圧タービン組立断面図

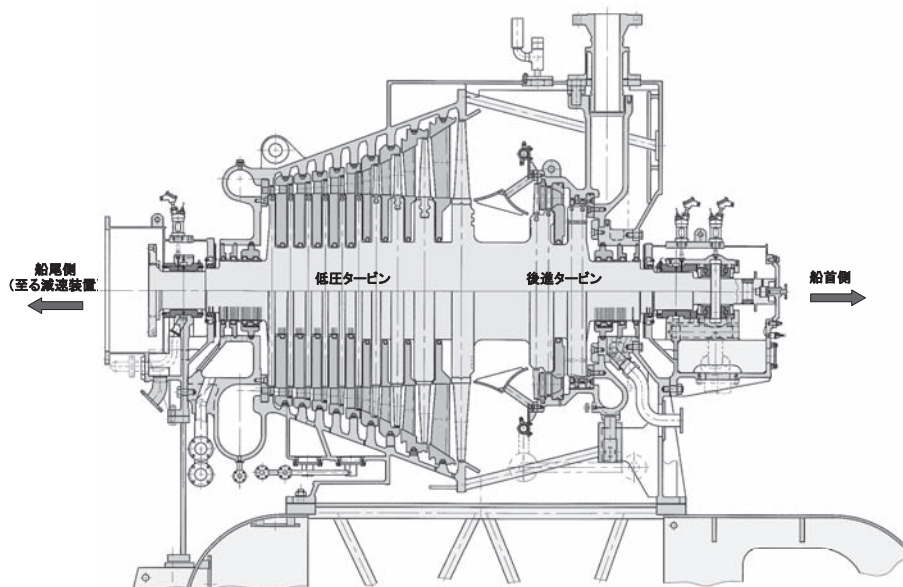


図5 低圧タービン組立断面図

れ、下部ケーシングの左右から流入して車室を均等に加熱する。抽気管およびクロスオーバーパイプは下半車室にフランジで結合される。したがって、上半車室開放時は再熱蒸気管のみを取り外せばよく、メンテナンス時の手間を省けるように設計している。

3.3 低圧タービン

図5に低圧タービンの組立断面図を示す。回転体主要目および使用材料はUR型タービンと同様とし、回転体強度を実績値内に収めて低圧タービンの信頼性を確保した。

3.4 減速装置

UR型タービン用減速装置の設計思想のままでは、歯車の加工制限より高低圧タービンからの入力を各1段小歯車により2つの大歯車に荷重を分配するデュアルタンデムアーティキュレート式（ロックドトレイン方式）とする必要があった。今回開発したURA型タービン用減速装置は、小歯車に浸炭焼入材、大歯車に高硬度材を採用するとともに、それらの材料品質、大歯車の溶接品質、

大歯車歯車精度を確保する最先端の設計・製造技術を駆使することにより小型軽量のシングルトレイン方式2段減速歯車の採用が可能となった。

また、2006年度に最大歯車加工径5m、質量50tの大歯車の研削が可能な超精密大型歯車研削盤を導入したことから、全歯車とも研削仕上げとしている。

従来型減速装置との主要目比較を表3に、構造・寸法比較を図6に示す。UR型と比較すると第2段大歯車の直径は5.5mから4.8mとなり全体寸法も小型となった。

これらの適用技術は就航中のUA型減速装置で実証された運転時の低騒音、低振動および安定した均一な歯当りを実現するものであり、今回開発された減速装置にはUA型の高い信頼性が受け継がれている。

4. 開発のポイント

URA型タービンは、プラント効率改善のために蒸気条件の高温高压化を行っている。この蒸気条件は、陸用タービンで経験がある蒸気条件であるが、船用蒸気タービンでは始めてであるので、UR型タービンで蓄積した実船での運転データをベースにして新しいURA型ター

表3 減速装置主要目比較

項目	URA型	UR型	UA型
歯車構成	シングルトレイン 2段減速	ロックドトレイン 2段減速	シングルトレイン 2段減速
プロペラ軸回転数	76rpm	80rpm	80rpm
第2段大歯車直径	約4.8m	約5.5m	約4.5m
歯面仕上げ	研削 (全歯車)	シューピング (全歯車)	研削/シューピング (第2段大歯車)
材 料	小歯車	NiCr鋼 (浸炭)	NiCr鋼 (浸炭)
	大歯車	NiCrMoV鋼	CrMo鋼

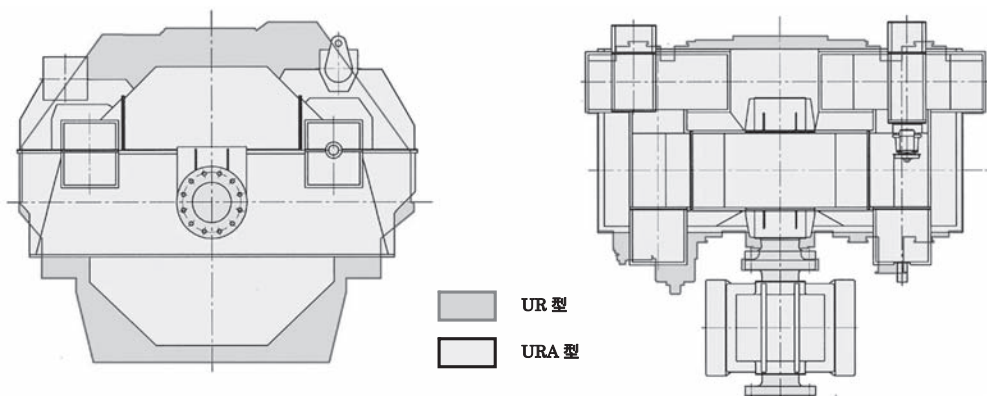


図6 減速装置の構造・寸法比較

ビンの開発を行った。開発のポイントは、基本構成はUR型タービンの実績をできる限り活用した上で、高温部の動翼材料の選定および高中圧タービン車室の熱変形の最適化を行うことであった。

4.1 高温部材料

高中圧タービン高温部の動翼材、ロータ材、車室材については、高温強度試験、疲労強度試験、衝撃試験などの材料試験を行い、材料強度の確認をした。動翼材については、高温クリープ強度に優れた12%CrMoNbV鋼を採用した。また、ロータ材および車室材には、それぞれ陸用タービンなどで実績のあるCrMoV鍛鋼およびCrMoV鋳鋼を採用した。

4.2 車室熱変形

UR型とURA型のタービン車室についてFEMによる熱変形解析で比較検討を行い、以下の項目を改良した。なお、UR型の解析値は、実船での実測値との検証を行って解析手法の妥当性を確認した。

(1) 再熱蒸気入口部に独立蒸気室(セミ二重車室)を採用
再熱タービンの増速操作は、非再熱モードで起動した後、再熱モードに切り替えて定格運転に入る。一方、減速操作は、再熱モードから非再熱モードに切り替えた後、

停止させる。また、再熱運転中でも危急時には再熱モードから非再熱モードに速やかに切り替わる。そのため再熱蒸気入口部の蒸気温度に変化が生じ、車室熱変形に対し注意が必要である。そこで、図7に示すようにURA型では、主蒸気入口部と同様の独立蒸気室(セミ二重車室)を採用し熱変形を最小に抑えた。

(2) 車室リーマボルトの最適化

UR型は、4本のリーマボルトで上半車室と下半車室の位置を拘束していたが、URA型では、高温蒸気が流入する車室中央部に2本のリーマボルトを設け車室の局所的な変形をなくした。

(3) 主蒸気入口部の最適化

UR型の主蒸気入口部は、一箇所であったが、URA型タービンでは、UA型と同様に対称性を持たせて左右二箇所から蒸気が流入する構造とし、局所的な変形をなくした。図8にそれぞれの構造を示す。

改良前のUR型と上記改良を実施したURA型について、再熱蒸気入口部の温度分布の比較を図9に、車室の変形モードの比較を図10に示す。改良後のURA型の車室では、再熱蒸気入口部への熱影響は減少している。また、UR型で見られる湾曲形の変形はURA型では生じていないことがわかる。

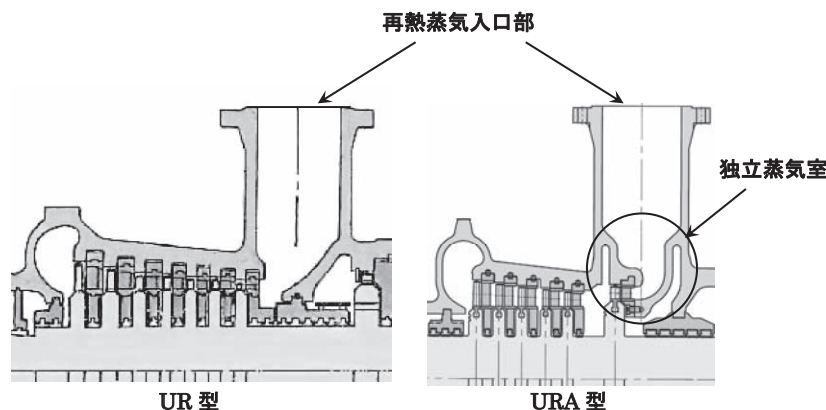


図7 再熱蒸気入口部の構造比較

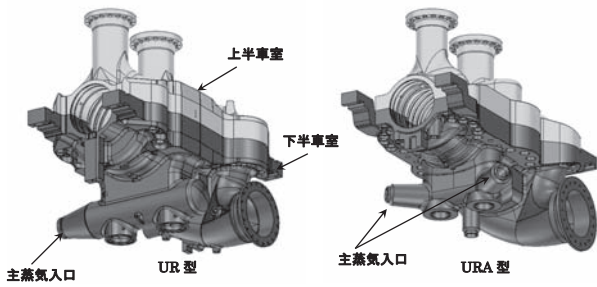


図8 主蒸気入口部の構造比較

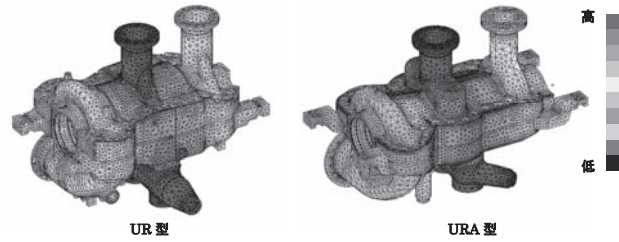


図9 車室温度分布比較

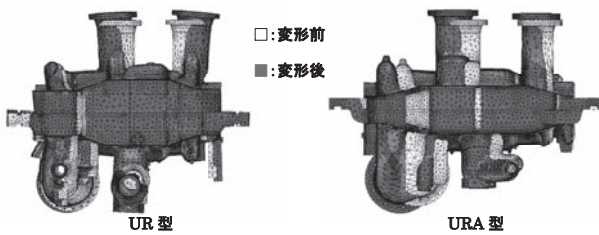


図10 車室変形モード比較

さらに、ケーシングに生じる熱応力について定常状態および非定常状態での熱応力解析を行い、疲労強度とクリープ強度について評価した。疲労強度については、主機タービンの起動・停止回数が6,000回行われる条件で、クリープ強度については、船が40年間運航される条件で評価し、十分な裕度をもっていることを確認した。FEM解析による非定常状態時の熱応力分布の一例を図11に示す。

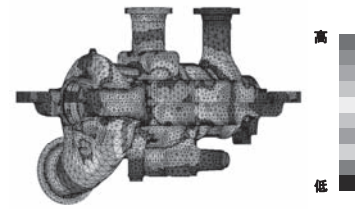


図11 FEM解析応力分布

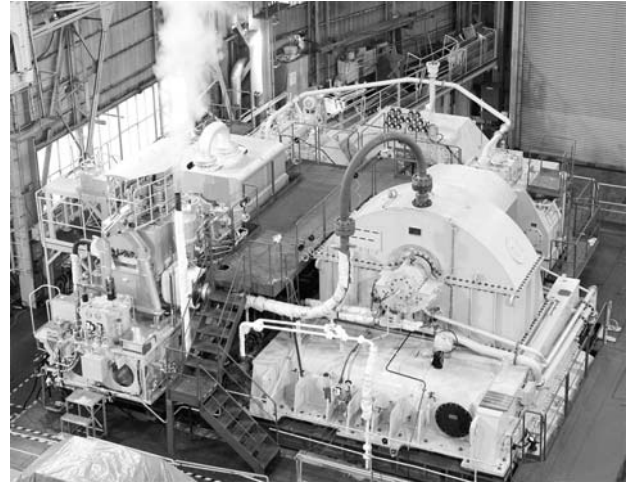


図12 社内試運転状況

5. おわりに

2010年4月22日、足掛け4年を超える長い道のりの末、新開発したURA型主機タービンの初号機を社内試運転実施後造船所へ向け出荷した。

このURAタービンの動向は世界中の船主・造船所が注目しており、これからのLNG運搬船の流れを変えるものになるため、船主・造船所をはじめ関係諸氏からの貴重なご意見を頂きながら1歩ずつ慎重に進め、出荷に至った。末筆ながら、厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 今井善信：ターボ機械 第37巻8号P.57-58
- 2) 堀家弘，他7名：川崎重工技報 第166号P.14-17

セラミック部材を組み込んだ小型ガスタービンの試験と今後の課題

Tests and Future Tasks of a Small Gas Turbine with Ceramic Parts

壹岐 典彦*¹
IKI Norihiko

松沼 孝幸*¹
MATSUNUMA Takayuki

吉田 博夫*¹
YOSHIDA Hiro

袖岡 賢*¹
SODEOKA Satoshi

井上 貴博*¹
INOUE Takahiro

鈴木 雅人*¹
SUZUKI Masato

ABSTRACT

The development of the small gas turbine with hybrid structure of metal components and ceramic components is proposed. The prototype engines based on the mini jet engine are manufactured. The turbine nozzle and the rotor are replaced to silicon nitride type. The running tests of the several prototype engines have been carried out for the demonstration of durability of the hybrid structure of metal components and ceramic components such turbine rotor, turbine nozzle, guide vanes. The other ceramic materials for small gas turbines are also investigated. The fundamental characteristics are tested about the CMC (Ceramic Matrix Composites) of oxide ceramics and about the abradable materials based on alumina.

Key words : マイクロガスタービン, ジェットエンジン, セラミック部品, 試験運転, 繊維強化セラミックス基複合材料, アブレイダブル材, Micro Gas Turbine, Jet Engine, Ceramic Component, Test Operation, CMC : Ceramic Matrix Composites, Abradable material

1. はじめに

マイクロガスタービンは高温の排気ガスが得られることからコージェネレーションシステムなどに用いられており、排気ガスがクリーンである点、多種燃料への対応が可能などの特徴がある。しかし、ディーゼルエンジンなどに比べて発電効率が低く、その普及は進んでいない。土屋ら⁽¹⁾の検討結果によれば、マイクロガスタービンは発電効率が35%を超えると、その経済性がディーゼルエンジンなどと遜色ないレベルまで改善されるものと期待される。

一方、100kW級、300kW級のセラミックガスタービンの国家プロジェクトでは、マイクロガスタービン相当の小型ガスタービンでもセラミック化することで、発電効率40%を超えることを実証した。しかしながら、部品コストや信頼性の点から課題も多く、実用化されていない。ただし、直径6cm前後の大きさの乗用車用ターボチャージャーではセラミックタービンの量産化が既に実現されており、使用条件によっては十分な信頼性が得

られている。

さてセラミック材料は体積が小さいほどその中に含まれる欠陥が少なくなり、その分だけ信頼性が向上する。そこで、目標の発電効率を35%とすることで、セラミック部品の使用を最小限にとどめ、信頼性を実証して、セラミックガスタービンの普及への道筋をつけることができないかと考え、マイクロセラミックガスタービンを試作・運転に取り組んでいる⁽²⁾⁻⁽⁸⁾、本報では、これまでの試験運転および耐熱材料検討の結果をまとめて今後の課題を検討したので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 ベースエンジン

マイクロセラミックガスタービンの試作に当たり、ソフィアプレジジョン製J-850ジェットエンジンをベースエンジンとした。このような1軸型小型ターボジェットエンジンは模型飛行機用として開発されたものであるが、教育や研究目的でも使用されている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。本エンジンの仕様では圧縮比2.7で最大推力8kgfであり、最大回転数は130,000rpmである。排気温度は最大出力時で750℃、アイドリング時で450℃最高で800℃となっている。本エンジンの燃料はソフィアジェット燃料(灯油70%ガソリン30%の混合燃料)であり、燃料消費は最大で4.5ml/s

原稿受付 2007年12月17日

校閲完了 2010年6月15日

*1 (独)産業技術総合研究所 つくば東事業所
エネルギー技術研究部門
〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1

でその発熱量は162kW (LHV) に相当する。

2.2 試作エンジン

試作エンジンは図1に示すように潤滑油の循環によりベアリングの潤滑を強化したエンジンがベースとなっており、基本的には潤滑油は燃焼しない。また、供給空気量測定のため、ベルマウスを取り付けてテストセル内で運転している。図2に試作エンジンのタービン部分の構造を示す。既報に示したように、Type 1はインコネルタービンをセラミックタービンに置き換えものであり、タービンの寸法がやや小さいため、タービンノズルの出口径もオリジナルのものより小さくして隙間が空きすぎないように調整してある。Type 2はタービンノズルもセラミックに置き換えガイドベーンを分離して金属製ディスクに差し込んで支持する構造を採用したものの、熱膨張の影響で破損したものである。これら窒化ケイ素セラミック部品の機械的特性は表1の通りである。Type 3はタービンノズルを改良し破損を回避したものである。Type 4は耐熱性の向上を図るため、燃焼器ライナーに遮熱コーティングを施すとともに、タービンノズルの周囲にセラミックファイバーを施し、更にタービンノズルベーンを受けるリングをセラミックファイバー製にして耐久性の向上を図った。



図1 試作エンジン外観

表1 セラミック材料の機械特性 (室温条件)

	Turbine rotor	Turbine nozzle & Guide vane
	Kyocera Corporation	Otsuka Ceramics Co., Ltd
	SN-235	SN-01
Density	3.25 g cm ⁻³	3.20 g cm ⁻³
Vickers hardness (at 9.807 N)	14.5 GPa	—
Strength (4-point bending test)	921 MPa	—
Young's modulus	304 GPa	294 GPa
Poisson's ratio	0.28	0.28
Fracture toughness (SEPB)*	6.4 MPa m ^{0.5}	—

* Single-Edge Precracked Beam method

DSS (Daily Start and Stop) を模擬した長時間の試験運転を目指して、ソフィアプレジジョン製テストセルのコントローラJet-tronic UNI II (engine control unit; ECU) を用いた起動と灯油での運転を試みた。また、比較のため、インコネルタービンをを用いた運転も行った⁽⁸⁾。

3. 試験結果

3.1 システムの検討

サイクル計算により再生器付ガスタービンの高温化による性能向上の可能性を検討した。圧縮比を5と高く設定した場合には、タービンおよび圧縮機の断熱効率(それぞれ η_t , η_c)が80%でもタービン入り口温度TITが1200℃でも35% (LHV, 機械損失, 発電機損失, インバータ損失を無視) 程度の効率を得ることができ、タービンおよび圧縮機の断熱効率を90%に高めることができれば45%に達する効率を得られる。ただし、タービン出口温度TETは800℃にもなる。試作エンジンのように効率が低い場合にはTITの割にTETが高くなり、燃焼器の出口ガス温度の均一性(パターンファクター)が悪いと考えられることから、タービン材料の経験する温度域は高めとなる。

これまでの各エンジンの試験状況を表2のようにまとめた⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。図4は長時間運転の例である。本運転ではインコネルローターを用いており、高温には耐えられなかった。燃焼器出口温度を2箇所、タービン出口温度を2箇所測定しているが、燃焼器出口温度は測定箇所による差が大きく、燃焼が不均一であることが推察される。このため、タービン出口温度の測定値の平均からタービン入り口温度を推定した。この例ではセラミックローターの一部が欠けて、急停止しているが、ノズルガイドベーンは無傷であった。推定したタービン入り口温度は図5のようになる。Type 3に比べてType 4の方が同じ圧力比では高くなっているが、熱対策により放熱が減っているものと思われる。圧力比に対して推力は図6のように得られており、各エンジン間の差は小さい。各エンジンの排気ガスの持つ運動エネルギーを出力と考えて、

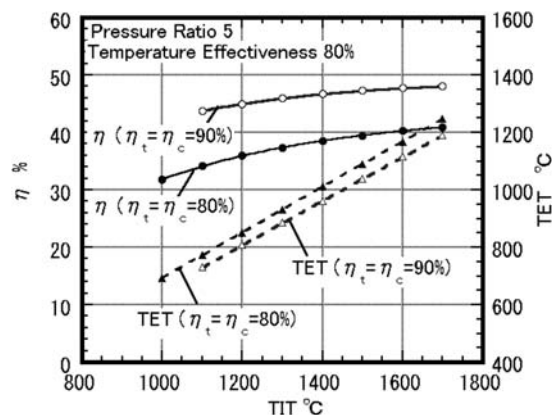
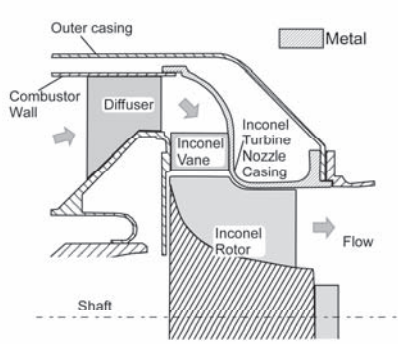
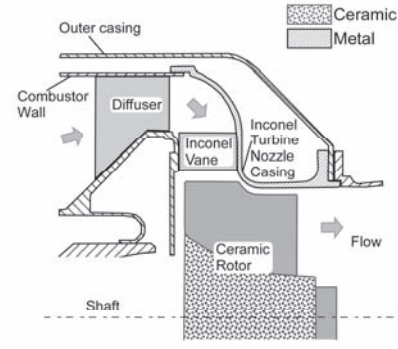


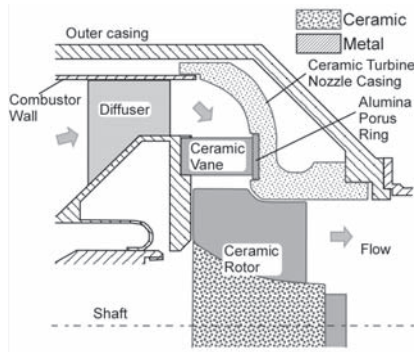
図3 再生ガスタービンのタービン入り口温度と効率



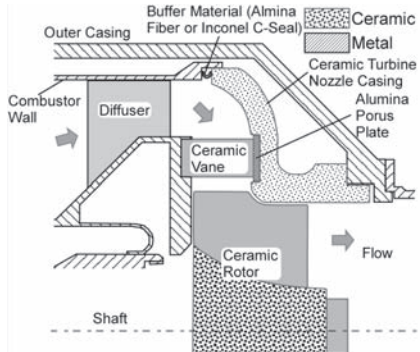
(a) 原型



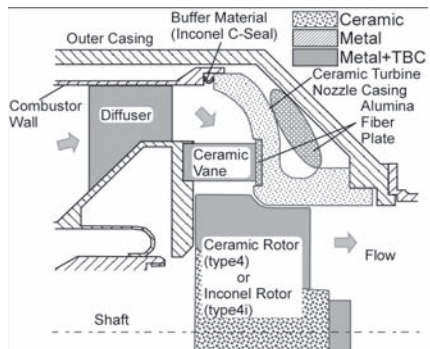
(b) Type 1: セラミックタービンローター, インコネルタービンノズル



(c) Type 2: セラミックタービンローター, セラミックタービンノズル



(d) Type 3: タービンノズルケーシングの改良型

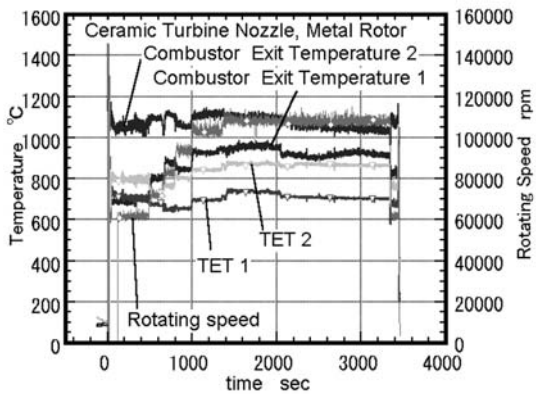


(e) Type 4: タービンノズルケーシングの改良型, TBC

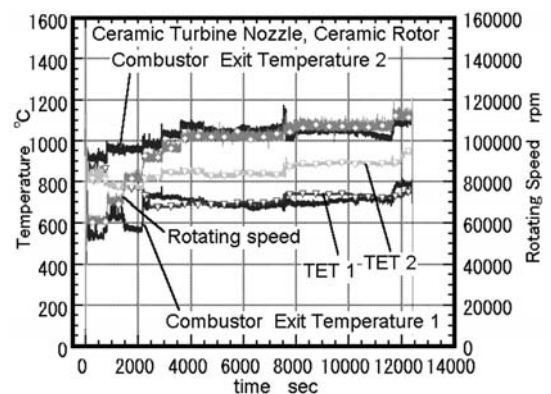


(f) セラミックタービンローターとセラミックベーン

図2 ラジアルタービンの構造⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾



(a) インコネルタービンローターの場合



(b) セラミックタービンローターの場合

図4 試作エンジンtype 4の運転試験

表2 試作エンジンの相違点

	ベースエンジン	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
タービンローター	インコネル	セラミック			セラミック又はインコネル
タービノーズル	インコネル	セラミック			
ケーシングとペーンの構造	一体型	分離型			
燃焼器とタービノーズルの設計					
燃焼器	内側			外側	
タービノーズル	外側			内側	
ペーンとノズル間の緩衝材	-	-	アルミナ多孔質板		アルミナ繊維板
燃焼器とノズル間の緩衝材	-	-	アルミナ繊維又はインコネルCシール		インコネルCシール
エンジン制御	Engine Control Unit	手動			Engine Control Unit
点火方式	グローブプラグ				スパークプラグ
燃料	灯油 - ガソリン混合油 (灯油 70%)				灯油 - ガソリン混合油 (灯油 70%) 及び灯油
最長運転時間 (分)	-	-	-	65	206
試験場所	-	ソフィアプレジジョン			産総研

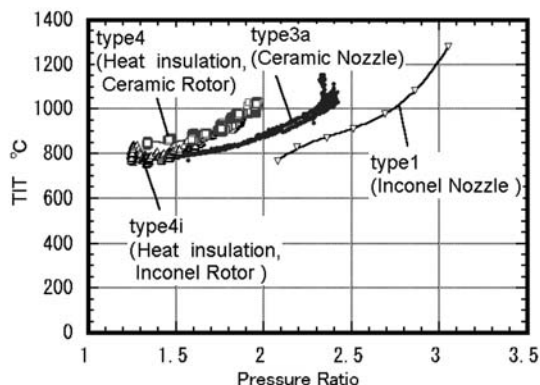


図5 タービン入り口温度の比較

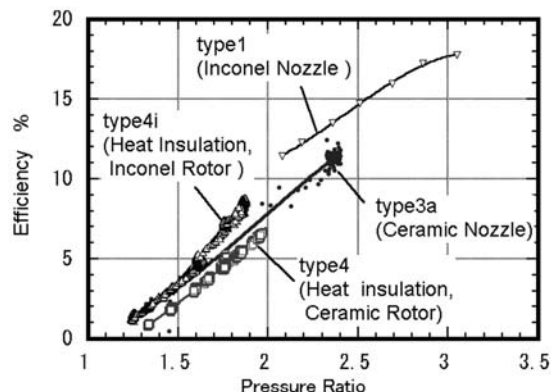


図7 運動エネルギーベースの効率

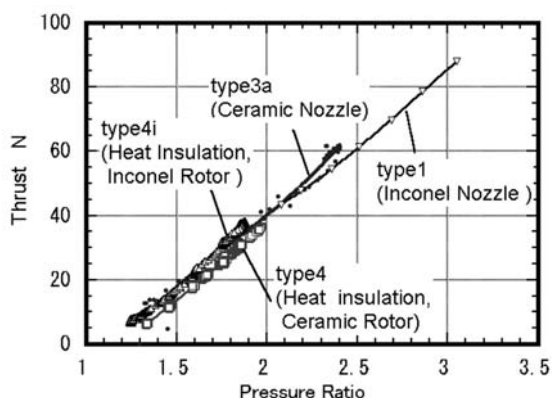


図6 推力の比較

供給した燃料の低位発熱量で除して効率を求めた結果を図7に示す。インコネルのノズルを用いたものの効率が最も高く、次いでインコネルローターを用いたものの効率が高い。このことから、セラミックノズルもセラミックローターも効率を低下させていることが明らかとなっ

た。このことから、セラミック部材の空力的な形状の見直しが必要であることがわかった。

3.2 耐熱材料の検討

セラミックス材料の信頼性向上と低コストを両立させるために、酸化物セラミックスのみからなる繊維強化セラミックス基複合材料 (CMC) を作製し、その機械的特性と高温大気曝露による劣化を検討した。

開発したCMC (図8参照) は一方向に配向したアルミナ繊維と、薄いジルコニア界面層より構成され、1500℃、60min、30MPaの条件でのホットプレス焼結により緻密化を行った。アルミナ繊維は三井鉱山マテリアル製の α -Al₂O₃繊維ALMAX®を用い、ジルコニア界面層は酢酸塩あるいは硝酸塩の水溶液系プレカーサーを同繊維表面に被覆することで導入した。

開発CMCは、プレカーサーを酢酸塩とし界面相厚さ等を最適化することで、図9に示すように顕著な非脆性破壊挙動を示し、SENB法で測定した破壊靱性値は5.6

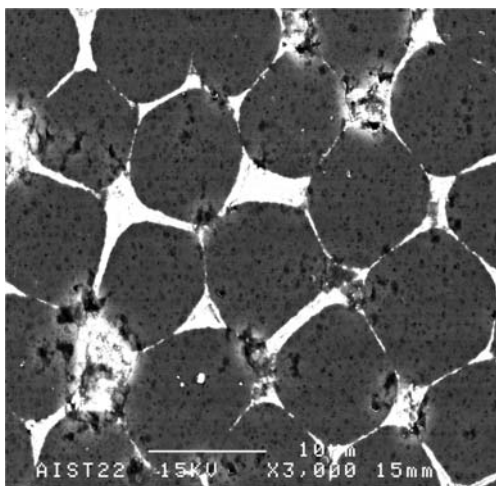


図8 CMCの断面（灰色部分はアルミナ繊維、繊維間の白色部分はジルコニア）

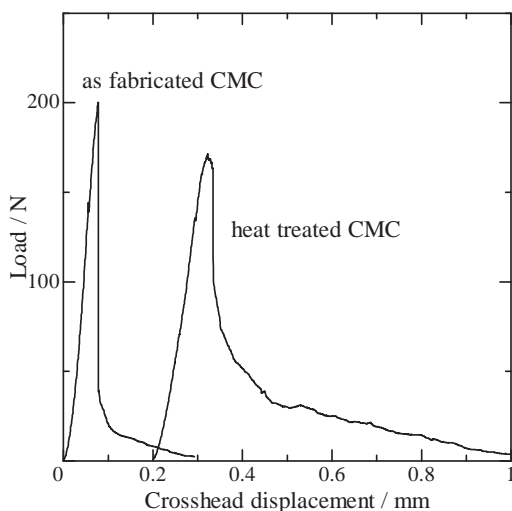


図9 CMCの破壊時の挙動

MPa \cdot m^{1/2}と通常のアルミナ焼結体の約2倍の値であった。しかも1200℃の大気中で100時間の曝露処理後も若干の強度低下はあるものの処理前と同様に非脆性的挙動を示し、高温安定性にも優れることが示された。開発CMCは全て酸化物系セラミックスからなるので、通常ホットプレス焼結法により製造可能で、現在CMC研究の主流であるSiC(f)/SiC等の非酸化物系複合材料に比べ格段にコストダウンが図れ、低価格を要求されるマイクロガスタービン用材料として有望であると考えられる。

同時に、マイクロガスタービンの効率に大きな影響を与える翼端流れによる損失を低減させるための隙間調整用に酸化物セラミックス系アブレイダブル材料を開発した。本材料はアルミナに黒鉛粉末を混合し、上記CMCと同じ条件で焼結・緻密化した後、大気中で熱処理して黒鉛を取り除き、気孔率約50%のアルミナベースの多孔体とした。多孔質化時に0.4%程度の体積収縮があるが、その後は大気中で1200℃100時間までの熱曝露を行っても、ほとんど収縮や硬度変化は見られず、高い熱

安定性を示すことが判った。

また、従来材と開発材のアブレイダブル材としての適性を比較するために、超硬合金ブロックで一定体積を削り取るのに必要なエネルギーを測定した。従来材としては、現在ジェットエンジン等でアブレイダブル材として使用されているCoNiCrAlY合金+窒化ホウ素+ポリエステル系およびニッケル-黒鉛系の溶射皮膜を用いた。その結果、1J当たりでの除去可能体積は、従来材の約 1.3×10^{-8} m³/Jに対して開発材は 1.27×10^{-7} m³/Jと一桁高く、被削性に優れていることがわかった。さらに削り取られた面の表面粗さを比較したところ、開発材の方が中心線平均粗さRaの値も若干小さく滑らかであり、シール性の面からも優れていることがわかった。

開発材をマイクロガスタービンの部材として適用することを想定した場合、構造材の全てをCMCとすることはコスト的に難しい。よって構造を支える多くの部分を通常のセラミックス単味焼結体として、FODが懸念される部分にCMCを積層し、加えて翼端流れを考慮する面にアブレイダブル材をさらに積層するという三層構造材の開発を検討した。アルミナ/CMC/アブレイダブル材三層材を上記CMCと同じ焼結条件で一体として作製し、その破壊挙動を調べた。

この三層材を、JIS三点曲げ強度試験（試験片断面：3mm厚×4mm幅、下部支点間距離：30mm）で破壊した所、図10に示すように、厚さ1mm程度のCMC層の存在で、顕著な亀裂偏向を発生すると共に、非脆性的な破壊挙動を示すことが確かめられた。

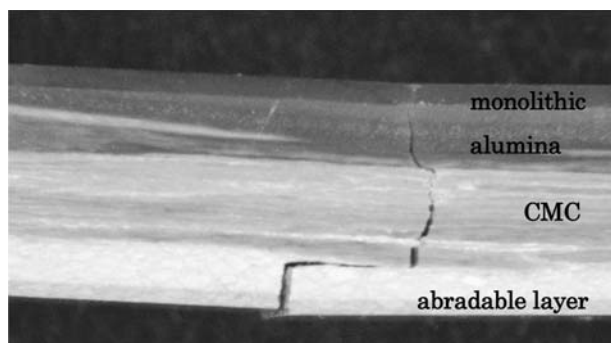


図10 三点曲げ強度試験で発生した亀裂（CMC層により顕著な亀裂偏向を発生する）

4. まとめと今後の課題

高温部にのみにセラミック要素を使用する金属・セラミックハイブリッド型マイクロガスタービンを試作し、タービン入り口温度1,000℃～1,100℃で延べ20時間以上の無冷却運転を行った。これにより、本システムの基本構成のもとで無冷却高温運転が十分可能との見通しを得た。

セラミックノズルの一端を金属円盤に差し込み、他端をポーラスセラミック緩衝材を介しセラミックハウジングで押さえ込む簡便な方式とした。この構造は、ノズル

断面形状ならびにノズル迎え角を任意に変えることを可能とする^{(13),(14)}。

また、圧縮機、タービンに適用可能なアブレイダブル材について検討し、基本的な特性を把握した。

今後の課題として、①燃焼器構造を始め各要素の分散型コージェネ用ガスタービンにふさわしい構造への修正、②アブレイダブル材の最適な使用法の検討、③セラミック再生器の開発、④発電機との接続、などが考えられる。

謝辞

本研究は産総研内部 Grant および経済産業省平成18年度電源利用技術開発等委託費により推進された。また、研究の推進に当たり、株式会社ソフィアプレジジョンと、江原拓未、李允煥、李海鷹、林修一各氏のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 土屋利明, 外内裕子, 岡本正範, 第32回ガスタービン定期講演会講演論文集 (平16-10), pp.237-242
- (2) 吉田博夫, 松沼孝幸, 壹岐典彦, 秋宗淑雄, 日本機械学会東北支部第39期秋季講演会, (平15-9), p.141
- (3) Yoshida, H., Matsunuma, T., Iki, N., Akimune, Y., Hoya, H.: Micro Gas Turbine with Ceramic Rotor, ASME Paper GT-2004-53493 (2004-6)
- (4) Matsunuma, T., Yoshida, H., Iki, N., Ebara, T., Sodeoka, S., Inoue, T., Suzuki, M.: Micro Gas Turbine with Ceramic Nozzle and Rotor, ASME Paper GT-2005-68711 (2005-6)
- (5) 壹岐典彦, 李允煥, 吉田博夫, 袖岡賢, 井上貴博, 松沼孝幸, 鈴木雅人, 江原拓未, ガスタービン学会誌, Vol.36, No.3 (平20-5), p.81
- (6) Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Yoshida, H., Sodeoka, S., Suzuki, M., Ebara, T., Lee, Y.: Micro Gas Turbine with Ceramic Nozzles and Rotor Part 2, ASME Paper GT-2006-90328 (2006-5)
- (7) 壹岐典彦, 井上貴博, 吉田博夫, 袖岡賢, 松沼孝幸, 鈴木雅人, 江原拓未, 李允煥, 第34回ガスタービン定期講演会論文集 (平18-10), p.253
- (8) Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Yoshida, H., Sodeoka, S., Suzuki, M.: Gas Turbine with Ceramic and Metal Components, ASME Paper GT-2007-27630 (2007-5)
- (9) 野田廣太郎, Vol.26, No.103 (平10-12), p.3
- (10) 柏原康成, ガスタービン学会誌, Vol.28, No.6 (平12-11), p.22
- (11) 石橋明史, 水噴霧冷却を利用した超小型ターボジェットエンジンの推力増加の研究, 千葉大学大学院自然科学研究科修士論文 (平12-3)
- (12) 渡辺高幸, 第30回ガスタービン定期講演会論文集 (平14-10), p.163
- (13) 特願2004-174972, ガスタービンのノズルベーン装置
- (14) 特願2004-247105, 小形ジェットエンジンの燃焼筒とノズル



魅力の創出

坂田 公夫*1
SAKATA Kimio

今年の春は異常な天候だった。桜の花もその影響を受けて、開花宣言は記録的な早さだったが、その後、雪さえかぶった花があったほどの寒さのため、花は大変長持ちした。お陰で都内でも3月下旬の開花から4月中旬まで花がもち、桜好きの私としては、郊外へのドライブを含めると、何度も美しいソメイヨシノや山桜を観賞することが出来た。ただし、はかなく惜しまれつつ散る桜の姿も欲しいと、贅沢な気持ちにもなった。桜は日本人の心のふるさとでもある。

世の中に絶えて桜のなかりせば 春の心はのどけからまし

古今集にある在原業平の名歌で、ご存知の人も多いだろう。桜の魅力が人の心を奪うので、春は何とも落ち着かない、困ったものだ、いっそ、桜などなければいい、と逆説的に桜の魅力を詠っている。

ガスタービンやジェットエンジンを桜の花にたとえるのは無理があるが、その魅力について語ることは出来る。我々ガスタービン学会員にはガスタービン・ジェットエンジンは実に魅力的な機械である。熱機関として、熱効率と機関重量当たりの出力(比出力)で他をリードしている。だから燃料を搭載して飛ばざるを得ない航空機用のエンジンにはジェットエンジンが独壇場なのである。1930・40年代のホイットル(英)やオヘイン(独)、種子島(日)等の開拓時代から、現在のGE、P&W、RRが世に出している、高バイパスターボファンに至るまで、その性能、機能、機械としての美しさ(少々独断もあるが)の魅力は尽きない。

しかし、魅力は誰が提供しているのだろうかと考え、少々足が止まる。在原業平は、神と言っても良い自然が提供した桜の虜になったのだが、ガスタービン研究者、技術者、運用者は、神ならぬ、先人が生み出した先端機械を対象としている。ジェットエンジンではGEの群を抜く大型エンジンシステム、RRの3軸エンジン、最近のP&Wのギアード・ファンは、一部に我が国設計陣が加わっているとは言え、手放して惚れ込むわけにはいかない。誰がその魅力を作り出しているかである。

魅力ある技術、機械、システムを生み出し、長く使いたいと思う、永く付き合っていきたいと思う、そんなものを作り出して世の中に提供するようになりたい、と考える人が、この学会員に多くいて欲しいと思うのだが、それは、魅力の享受者ではなく、提供者になることを目指して欲しい、ということである。ガスタービン・ジェットエンジンの世界で、新たな魅力を創出させる創

造主になれと言うことでもある。

別の観点だが、我が国の製造業を元気にするための「もの作りの日本」という標語のような言葉がある。我が国がもの作りで優れていることを疑う人は少ないと思う。高度な技術を必要とするものを、きれいに、かつ、約束の時間内で作ってみせる能力は世界的に定評がある。これは優れた手工芸品を創り出して来た日本の伝統にも根ざしている。また、もの作りと言う言葉には不思議な魅力がある。何もないところから“もの”を創造するといった響きさえある。

そしてこの学会は、並の技術を持つ程度の国では作れない、ジェットエンジンやガスタービンを開発製造する能力がある国の中核学会である、と自負する。部品点数も多く、複雑で技術レベルの高い“もの”を創り出すという魅力にとりつかれている人々の集まりではないかと思う。そして、この様な高度な機械製品の開発製造こそ、もの作りの典型ではないか考える人も多かろう。

しかし、歴史はもの作りが単なる物品の加工製造ではないことを証明している。真のもの作りは、生活や活動において役に立つ、固有の“価値”の提供であることを示している。混同しないように、このことを「こと作り」と言う人も居る。そして今我が国の産業が直面する課題には、価値の提供に陰りが見えてはいないかと言うことだ。テレビ、自動車、携帯電話、様々な分野で海外の新興メーカーに苦戦が見え始めている。ガスタービン・ジェットエンジンは、我が国がこれから伸びようとする新興メーカー群として頑張ろうとしている。航空機も含め、ガスタービン・ジェットエンジンは、単一機械と捉えてしまうと魅力は半減する。テレビや自動車はコンシューマ直結型の工業製品である。これに対して、我々が対象とするものは、その購入者が航空会社、電力会社などの運用のプロであり、航空機や発電所などのシステムとしてまとめ上げられて機能を発揮する、プロ向けのシステム製品である。最終ユーザーである乗客や一般家庭は、それに触れることはない。さらに言えば、運用についてのソフトや整備、改修等も伴って、製品の生涯全体が提供物である。

喫茶室としては少々長くなったので、最後に締めくくろう。我が国がこの世界で、有力な価値の提供者として存在するためには、固有の魅力を出さなければならない、ということである。人を捉えて放さない魅力。別の言葉で言えば、優位性のある技術とシステムを、進化出来るものとして提供することである。

「世の中に、日本のガスタービン・ジェットエンジンがなかりせば、これ程までも、我が国の技術者は悩まぬものを・・・」などと海外から言わせてみたいものである。勿論これからは国際連携が主流ではあるが。

原稿受付 2010年5月21日

*1 (株)IHI顧問

(社)日本ガスタービン学会 正会員

〒196-8686 東京都昭島市拝島町3975-18 IHI昭島ビル