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

論説◆解説

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 ことが特に着目され,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 に従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

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 ㈱日立製作所 電力システム社 日立事業所
- *3 ㈱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

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)長翼を採用したのに続 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,ダイアフラム,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

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、例えば系統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ア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 全周ーリング翼

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捩り戻り(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



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。



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

周上9 - こうや 低上9 - こうの中 湿異師 ては, 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 テノンでかし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構造では異先端のカバー 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異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ベ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



彼未ノヘル A 図 8 AVNの外観と形状比較

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立した。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)

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立 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立した。



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 OS-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 (Signalto-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ィ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ィール上のセンサーを移





図13 低圧タービン翼溝部の超音波探傷

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. $4^{\rm th}$ 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 Nextto-last Stage Blade for Improved Turbine Reliability and efficiency, Proc. 60th American Power Conf. 233 \sim 239 (1998-2)
- (5) 特許第3178327号, US Patent 5829955
- (6) 奥野,他;シールー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)



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

論説◆解説

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さ れることが一般的なため、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

ー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、組合わ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)。



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

ー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 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組合わせて発電と熱供 給を行なうコ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複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 コンバインドコジェネレーション用蒸気タービン

-9-

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は、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, 蒸気の高温・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。





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 用されていたアブ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 アブ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⁾

- 11 -

4.7 運転技術

4.7.1 熱応力制御

ー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

ー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 し続けて行きたい。

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) Mujezinovic, 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.64-67
- (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⁾



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

論説◆解説

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 トミング、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,低コスト化に対した技術として溶接ロータ他に取 り組んできており,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,

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 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『スティール製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



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 る最大の効率を得る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。



(a) 3600rpm-50IN 最終翼群の流動解析例





(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

現在の石炭焚火力発電では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

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 ミング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。



(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

233



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基合金の適用が不可欠となる。

Ni基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,ディスクー枚当りの重量は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メタル 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基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基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 われている),Ni基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 超高圧+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基合金同士の共材溶接 技術および、Ni基合金と高Cr鋼の異材溶接技術が必要 となるが、高価なNi基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基合金に要求 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基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基合金にてロータ鍛造品,弁鋳造品が試作さ 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基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基合金並に高温強度を維持し た低熱膨張Ni基合金LTES700(Ni - 12Cr - 18Mo - 0.9Al - 1.15 Ti)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基合金や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℃)



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 最終翼群スティール製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ボトミングのさ 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

- 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 No4 (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5.4x10²¹MJ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レ 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



※福史内 2010年3万31日 ※1 富士電機システムズ㈱ 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㈱箱根小涌園(当時)で30kWの自家用 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	1995	2000	2005	2009 (予測
アルゼンチン	0.7	-	140	-
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
グァテマラ	-	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
パプア・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







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ャ(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



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。



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



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

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 のが用いられている。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 体中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(CI⁻)、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

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力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 (SiO₂) や炭酸カルシウム (CaCO₃) 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 スクラッバ(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18 FEMによる翼振動解析例

- 22 -

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 会訳. 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数 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

原稿受付 2010年5月10日



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

素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 Δ T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 は非定常の熱伝導解析となり、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,

 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

^{*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,上部の延 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,最も高温高圧の蒸気に晒 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て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よって、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に新旧それぞれの形 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・動圧と、 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





図6 翼列風洞試験

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。

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



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、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

- 28 -

参考文献

- 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 会学会, 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}

論説◆解説

TODA Akihito

キーワード:エチレン,大容量,高温,高圧,二重胴,ダイアフラム,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 異なる設計的考慮が必要となる。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、

原稿受付 2010年5月10日



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





- 29 -

^{*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アフラムノズル(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 マージンをもっていなくてはならない。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。

大口径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 水平割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割面コーナ部での 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 外ケーシング水平割面コーナ部での温度差の推移



図6 外ケーシング水平割面の応力分布(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高差圧用ダイアフラムノズル, 3Dイメージ



図9 216通常型ダイアフラムノズル、3Dイメージ

2.4 高圧段高効率動翼(モデル: 506-D1)

前述の高差圧ダイア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ダイアフラムと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 3 Dイメージ



図11 506-D1動翼流れ解析例

- 32 -



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・ガス圧縮機の速度,

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-outof-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

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。

- 34 -

252



特集:蒸気タービンの最新技術動向

舶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: 舶用タービン, 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



タービン部 舶用タービン課 〒650-8670 神戸市中央区東川崎町 3-1-1 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



- 35 -

換装するほどであった。主機タービンメーカとしてはま 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

-36 -

	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
	主蒸気条件	11.7MPa/560°C	9.8MPa/520°C	5.9MPa/510°C
	再熱温度	540°C	520°C	-
高(中)圧 タービン	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	入口蒸気圧力	0.7MPa	0.47MPa	0.55MPa
タービン	段落数	10+2(後進)	8+2(後進)	8+2(後進)

表2 主機タービン主要目比較

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(ロックドトレーン方式)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ーン方式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 条件の高温高圧化を行っている。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、舶用蒸気ター 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

項目		URA型 UR型		UA型
歯車構成		シングルトレーン 2 段減速	シングルトレーンロックドトレーン2段減速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)	シェービング (全歯車)	研削/シェービング (第2段大歯車)
材料	小歯車	NiCr鋼 (浸炭)	CrMo鋼	NiCr鋼 (浸炭)
	大歯車	NiCrMoV鋼	CrMo鋼	NiCrMoV鋼

表3 減速装置主要目比較



図6 減速装置の構造・寸法比較

URA 型

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 部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,局部的な変形をなく 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,充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

┫技術論文 ┣━

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}	松沼 孝幸 ^{*1}	吉田 博夫 ^{*1}
IKI Norihiko	MATSUNUMA Takayuki	YOSHIDA Hiro
袖岡 賢* ¹	井上 貴博 ^{*1}	鈴木 雅人* 1
SODEOKA Satoshi	INOUE Takahiro	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 meal 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 が可能な点などのすぐれた特徴がある。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、実用化されてはい 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

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

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。

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 フィアプレシジョン製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。排ガス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 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, Type1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。Type2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。 Type3はタービンノズルを改良し破損を回避したもの である。Type4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)
			m 1 *

	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,ソフィアプレシ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η₁、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%に達する効率が得られる。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。Type3に比べてType4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





(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



シングの改良型, TBC







(d) Type 3: タービンノズルケーシ ングの改良型



(f) セラミックタービンローター とセラミックベーン







	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		ラミック	セラミック又はインコネル	
タービンノズル	インコネル			セラミック		
ケーシングとベーンの構造	一体型			分離型		
燃焼器とタービンノズルの設計						
燃焼器	内	側		5	钅側	
タービンノズル	外	外側 7		勺側		
ベ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	_	ソフィアプレシジョン		産総研		

表2 試作エンジンの相違点





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)



MPa・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 の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 与える翼端漏れ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CoNiCrAIY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 1.3×10⁻⁸m³/Jに対して開発材は1.27×10⁻⁷m³/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,加えて翼端漏れ流れを考慮 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: 3 mm厚×4 mm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1 mm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アブレー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グラント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シジョンと、 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





265

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と考えると, 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,手放しで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,永く付き合って行きたいと思う,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,と言うことである。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

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 ⅠΗΙ昭島ビル

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産品の開発製造こそ、 もの作りの典型ではないかと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、 と言うことである。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。