

火力発電所向け蒸気タービンの最新技術

Latest Steam Turbine Technologies for Thermal Power Plants

和泉 栄 IZUMI Sakae

森山 高志 MORIYAMA Takashi

池田 誠 IKEDA Makoto

ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電は、発電効率が低い、CO₂排出量が少ないなどの特徴があり、採用が拡大している。コンバインドサイクル発電である沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所に、発電機と蒸気タービンとの間にクラッチを備えたことを特徴とする単車室軸流排気再熱蒸気タービンを納入した。また、オマーン・SUR プラントに、左右2方向排気の特徴とする二車室両サイド排気再熱蒸気タービンを納入した。火力発電所向け蒸気タービンにおける最新技術として、溶接技術、USC タービン技術および低圧翼の信頼性向上技術を開発している。

With features such as high power-generating efficiency and low CO₂ emission, combined-cycle power generation, combined with gas turbine and steam turbine, is gaining wider use. For Yoshinoura thermal power plant of The Okinawa Electric Power Company, Incorporated, which is a combined-cycle power generating facility, we supplied single-cylinder reheat steam turbines with axial-flow exhaust that feature a clutch between the generator and the steam turbine. Also, for SUR power plant in Oman, we supplied two-cylinder reheat steam turbines with double-sided exhaust that feature exhaust directions are left and right.

As the latest technologies in steam turbines for thermal power plants, we are developing welding technology, USC turbine technologies and technologies to improve reliability of low-pressure blades.

1 まえがき⁽¹⁾

発電プラントの熱効率向上という経済的効果と、温室効果ガスの排出量削減という社会的要請から、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電 (CCPP) の採用が近年拡大している。CCPP には、化石燃料をボイラで燃焼させる従来型の火力発電と比較して、発電効率がよく、燃料に天然ガスを用いるため CO₂ 排出量が少なく、ガスタービンと小型の蒸気タービンを組み合わせるため急速起動が可能で運用性が高いという特徴がある。

2012年11月に営業運転を開始した沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所は、ガスタービン、発電機と蒸気タービンを一軸上に配置した1on1型CCPPであり、単車室軸流排気再熱蒸気タービン (91 MW) を採用した。

2013年1月に出荷した韓国・DAEWOO E&C 社経由オマーン・SUR プラント CCPP は、2セットのガスタービンおよび発電機と1セットの蒸気タービンおよび発電機から構成された2on1型CCPPであり、二車室両サイド排気再熱蒸気タービン (330 MW) を採用した。

本稿では、これら二つのCCPP向け蒸気タービンの特徴を概説するとともに、富士電機の蒸気タービンの最新技術について述べる。

2 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン

本設備は、沖縄電力株式会社が初めて燃料にLNGを採用した一軸式コンバインドサイクル発電設備である。2011年4月に1号機排熱回収ボイラの据付けを、7月にガスタービン本体の据付けを開始した。1号機は2012年5月に始まった試運転を経て、2012年11月に営業運転を開始した。引き続き2013年5月に2号機の営業運転開始を予



図1 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン

定しており、工事・現地・関係各社が一丸となって試運転を推進している。採用した蒸気タービンの特徴を次に示す。

- (a) 一軸式コンバインドサイクル方式に対応するため、ガスタービンおよび発電機と^(注1)嵌脱(かんだつ)するためのクラッチを蒸気タービンロータ端に備えている。
- (b) 高中低圧タービンを1個のケーシングにまとめたコンパクトな高中低圧一体型タービンである。

吉の浦火力発電所向け蒸気タービンの外観を図1に示す。

2.1 クラッチの採用

吉の浦火力発電所で採用した一軸式コンバインドサイクル方式は、ガスタービンと発電機、蒸気タービンのロータを一軸上に配置する。ガスタービンおよび蒸気タービンがおのおの発電機を持つ二軸式に対して、発電所建屋を大幅

<注1> 嵌脱：結合させたり切り離したりすること

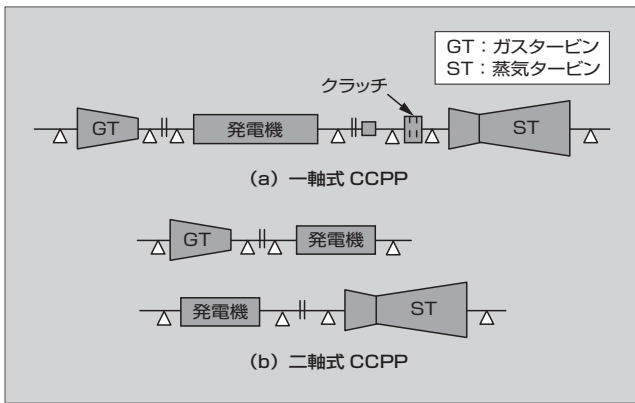


図2 一軸式CCPPと二軸式CCPPの構成

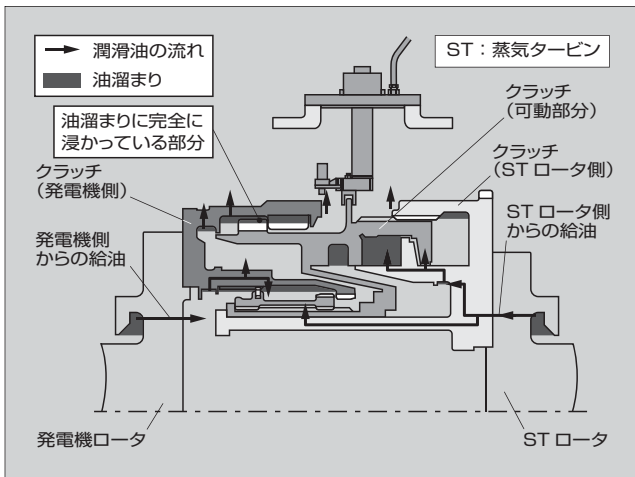


図3 クラッチの構造

に小さくすることができる。図2に一軸式と二軸式の構成を示す。一軸式においては、発電機を挟んで、ガスタービンと蒸気タービンが同じ軸に並ぶ。

コンバインドサイクル発電においては、ガスタービンの排熱を利用して蒸気タービンへ蒸気を供給するため、ガスタービンと蒸気タービンの起動のタイミングが異なる。そこで、ガスタービンと発電機から、蒸気タービンを一時的に嵌脱できるクラッチを採用した。

まず、クラッチが切り離された状態でガスタービンと発電機が起動され、蒸気タービンへ供給する蒸気が用意できた段階で蒸気タービンの弁を開き昇速を始める。その後、蒸気タービンロータの回転数が定格回転数に到達し、ガスタービンロータの回転数を上回った段階、つまり、蒸気タービン側から発電機側へのトルクが正になった段階で、クラッチが機械的に嵌合して、蒸気タービンからのトルクを発電機に伝える。

図3にクラッチ構造を示す。クラッチの潤滑油は、クラッチ両隣に位置する軸受から供給される。クラッチがいつ嵌合してもよいように、クラッチは常時給油される。この油はクラッチ嵌合時の衝撃を吸収するダンパの役割も担う。クラッチ内部の油の粘性により、蒸気タービン起動前の弁を開く前においても、ガスタービンの回転によって毎分400回転程度まで昇速する。

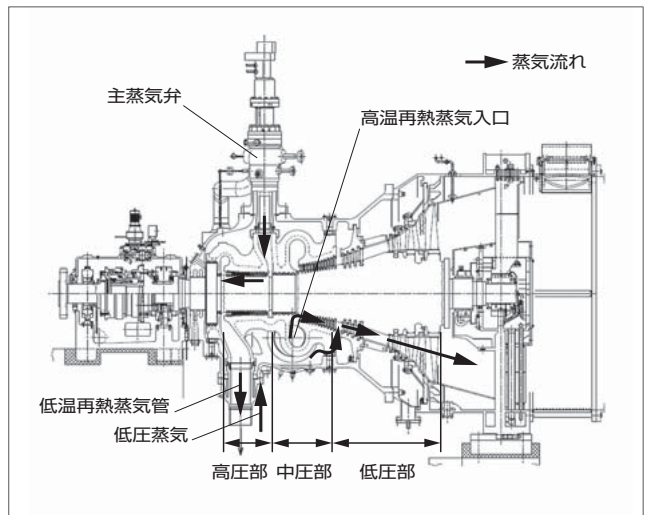


図4 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン断面図

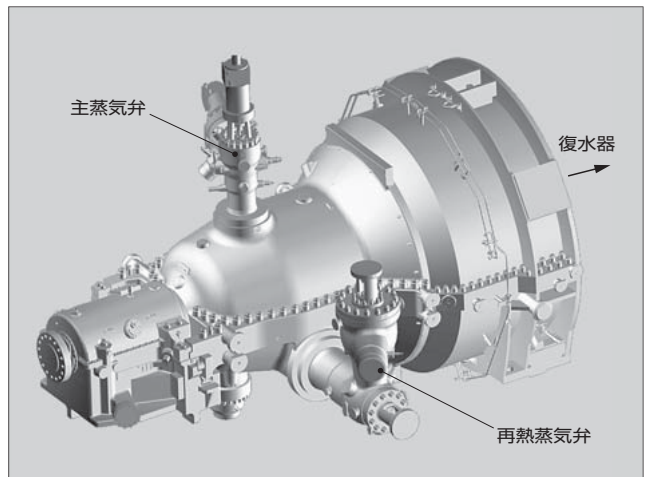


図5 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン鳥瞰図

2.2 高中圧一体型タービン

吉の浦火力発電所向け蒸気タービンの断面図を図4に、鳥瞰(ちょうかん)図を図5に示す。

タービンは、高圧部、中圧部および低圧部で構成される。高温高圧の主蒸気は、ケーシング上部に位置する主蒸気弁を介してケーシング中央の高圧部へ流入し、膨張して仕事をした後、低温再熱蒸気管を通して一度排出される。再熱された蒸気は、ケーシング中央に位置する再熱蒸気弁を通して再びタービンへ導かれる。その後、蒸気は中圧部で仕事をした後、さらにケーシングへ供給された低圧蒸気と混合して低圧部へ導かれ、タービン軸方向に排出されて復水器へ至る。

従来、2ケーシングで構成していたタービンを1ケーシング一体構造にするため、次の構造を採用している。

- (a) 主蒸気弁をタービンケーシング上側に1組、再熱蒸気弁をタービンケーシング片側に1組配置する。
- (b) 高温部を中央に集めるため、高圧部と中圧部はカウンターフローを採用する。
- (c) 低圧蒸気入口をケーシング前側に配置し、内外ケー

シング間に蒸気の流れをつくることで、ケーシング上下温度差が生じにくい構造とする。

1号機および2号機の試運転において、蒸気タービン連続運転時と起動・停止時ともに、振動・上下温度差は小さく、良好な運転状態であることを確認した。

③ DAEWOO E&C 社経由 SUR プラント CCGP 向け蒸気タービン

本設備は、2台のガスタービンの排熱を利用して排熱回収ボイラで蒸気を発生させて発電する蒸気タービンであり、高圧部と中圧部の高中圧タービンおよび低圧部の低圧タービンの2台のコンポーネントから構成されている。

高温高圧の主蒸気は、ケーシング下部に位置する主蒸気弁を介してケーシング中央の高圧部へ流入し、タービン前側へ膨張して仕事をした後、低温再熱蒸気管を通して一度排出される。再熱された蒸気は、ケーシング中央下部に位置する再熱蒸気弁を通して再び高中圧タービンへ導かれる。その後、蒸気は中圧部で仕事をした後、クロスオーバー管の途中から供給される蒸気を混合して低圧タービンに供給される。低圧タービンで仕事を終えた後、低圧タービン両側に配置された復水器へ至る。

本タービンの特徴は次のとおりである。

- (a) 富士電機にとって最大容量の高中圧タービン
- (b) 両サイド排気式の低圧タービンによる建屋の高さの抑制

蒸気タービンの鳥瞰図を図6に、外形図を図7に、断面図を図8に示す。

3.1 330MW 高中圧タービン

従来、本設備向け（330MW）のクラスでは、高圧タービン、中圧タービンおよび低圧タービンから構成される三車室再熱タービンが適用されてきた。SURプラントCCGPでは、高圧タービンと中圧タービンのコンポーネントを一体にして、二車室再熱タービンにしてコンパクト化を図った。富士電機にとって二車室再熱タービンの従来の最大容量は210MW級であり、次に示す対策により大型

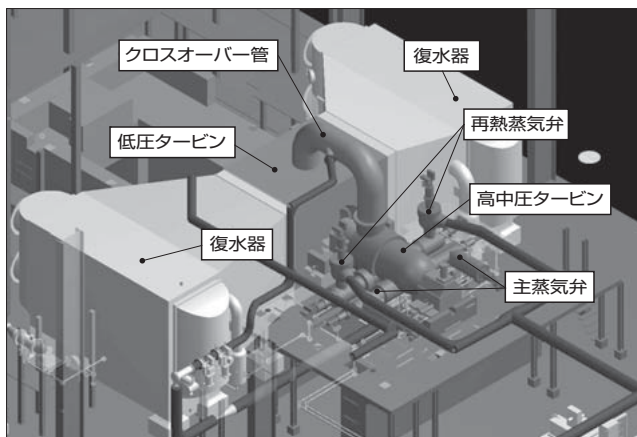


図6 SURプラントCCGP向け蒸気タービン鳥瞰図

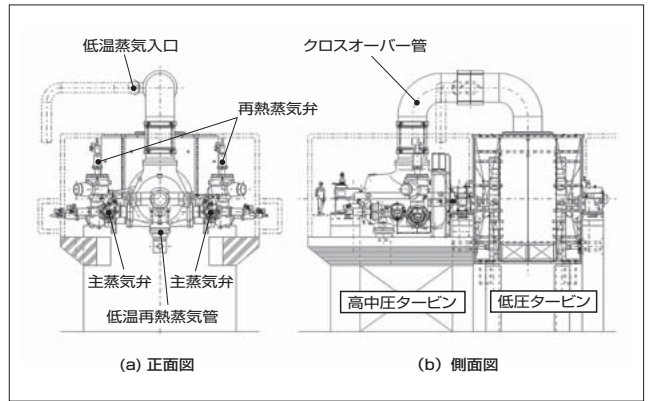


図7 SURプラントCCGP向け蒸気タービン外形図

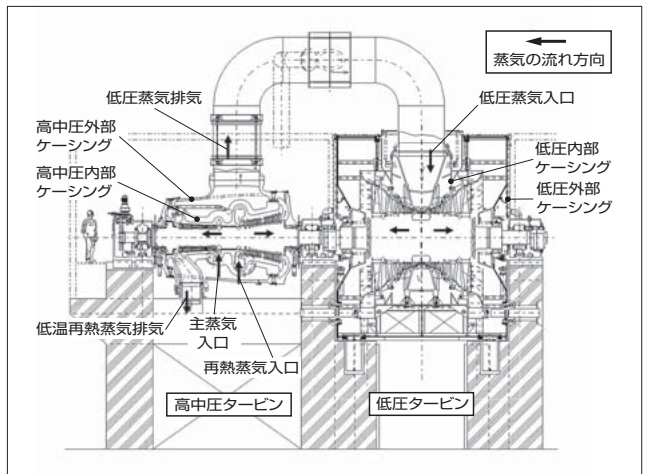


図8 SURプラントCCGP向け蒸気タービン断面図

化を図った。

コンパクト化を図った内部ケーシングを冷却するため、図8に示すように内部ケーシングと外部ケーシングからなる二重ケーシング構造とし、タービン内部に作用する圧力および温度を両ケーシングで分担することにより体積のコンパクト化を行うとともに、両ケーシングの間に中圧部排気蒸気を流すことにより、内部ケーシングを冷却できるようにした。また、高圧排気蒸気が高圧外部ケーシングに直接触れないLリング構造で排気することにより、外部ケーシングの材料に低グレード鋳鋼もしくは鋳鉄を採用している。さらに、外部ケーシングのコンパクト化および定期点検時のメンテナンス性についても考慮し、図7(a)に示すように主蒸気弁および再熱蒸気弁を高中圧タービンの下部左右に配置した。

3.2 両サイド排気式の低圧タービン

低圧タービンのケーシングは、低圧内部ケーシングと低圧外部ケーシングで構成される。高中圧タービンから排出された蒸気は、クロスオーバー管を介して低圧内部ケーシングに導かれる。その後、蒸気は真空まで膨張し、低圧内部ケーシングと低圧外部ケーシングの間を通過して復水器へ排出される。従来、排気はタービン直下に配置された復水器に出す構造となっていた。この構造では、体積の大きい

復水器がタービンプローアの下に配置されることでタービン建屋が高くなり、建設コストが掛かる欠点があった。本設備では図6に示すとおり、低圧タービンの両サイドに復水器を配置することにより、タービン建屋の高さを低く抑え建設コストを抑制した。両サイド排気型の低圧外部ケーシングの開発に当たっては、下向き排気型と同等の蒸気流路面積の確保、真空力に耐えうるように内部構造の補強の検討、タービン固定点の検討およびメンテナンス性を考慮した分割方法の検討を行った。低圧内部ケーシングについては実績のある構造を適用することにより、従来同様の品質を確保した。

4 蒸気タービンの最新技術

4.1 溶接技術

(1) 異種材ロータ溶接技術⁽²⁾

単車室蒸気タービンのロータ材には、高温蒸気にさらされる部位におけるクリープ強度と、低温蒸気にさらされる部位における強靱（きょうじん）性という相反する特性が要求される。これまでは、軸心に作用する遠心力の大小、すなわち低圧翼の長短や回転数の大小に応じて、高価であるが強靱性の高い2%Cr鋼と、強靱性は低いが安価な1%Cr鋼とを使い分けていた。近年は、2%Cr鋼でも強靱性が不足する長大低圧翼の適用が必要なプラントがある。このため、高温域におけるクリープ強度の高い1%Cr鋼製ロータと低温域において2%Crよりも強靱性の高い3.5%Ni鋼製ロータの溶接技術を開発した。本技術は、素材メーカーが限定される2%Cr鋼製ロータの代替としても水平展開が可能であるため、ロータ素材の調達性が向上した。図9に、異種材溶接ロータを適用した蒸気タービンを示す。

(2) ロータ補修溶接技術

年月を経たプラントにおいては、高温で使用されたロータの表面部位に熱疲労によるクラックが認められる場合がある。クラックを残存させたままタービンを運転することは極めて危険である。新しいロータを製作するためには

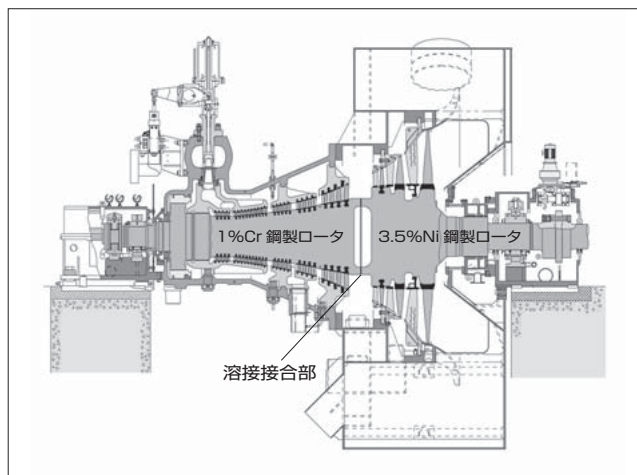


図9 異種材溶接ロータを適用した蒸気タービン

プラントを長期にわたり停止する必要があるため、顧客の逸する利益は莫大（ばくだい）になる。プラントの停止期間を最小とするために、クラック発生部位の溶接補修技術を開発した。

(3) 鋳鉄品の溶接補修技術

鋳鉄は複雑な熱処理工程が不要で材料欠陥が少ないため、高温強度の要求されない中低温域で使用する場合には鋳鋼と比較して製作期間が短く安価であるという利点を持っている。しかし、鋳鉄は欠陥部の溶接補修が困難であるため、強度を必要とする部位に許容サイズを越える欠陥が認められた場合には廃却・再製作を余儀なくされる。

実機鋳鉄品の余丁部より切り出した試験材に対して、溶接試験を行い、非破壊試験の結果から最適な溶接条件を確立した。溶接試験は、狭い範囲の溶接に適したガスシールドタングステンアーク溶接（GTAW）および広い範囲の溶接に適したシールドメタルアーク溶接（SMAW）の2種類の溶接法を用いて、下向きおよび横向きの2方向の溶接姿勢で、Ni系、Fe-Ni系およびインコネル系の3種類の溶加材を用いて実施した。

4.2 USCタービン技術⁽³⁾

(1) USC適用材料の国産化

石油や天然ガスが政情の不安定な地域に偏在しているのに対して、石炭は地球上の広範囲に分布しているため、エネルギーセキュリティ上の観点から石炭火力発電は重要な電源と位置付けられている。

その一方で石炭火力発電は、化石燃料（石油、ガス、石炭）を用いる火力発電の内、最もCO₂排出量が多いため、近年、建設される大容量石炭火力発電においては蒸気条件をより高温高圧化し、発電プラントの熱効率を向上させたUSC（超々臨界圧火力発電）プラントが主流となってきている。

富士電機は、2002年にシーメンス社製の蒸気タービンを採用した、主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度610℃のUSCプラントを手がけた。このとき高温部位に使用された改良12%Cr鋼製の主要材料は、全て欧州製であった。

USCプラントに適用される主要材の調達先は限定されるため、主要材の調達性拡大はUSCタービンを内製化する上で重要なポイントとなる。富士電機は国内素材メーカーと共同で、改良12%Cr鋼製のロータ材とケーシング材の試作試験を行い、製造技術および材料劣化・脆化（ぜいか）評価手法を確立し、主要材の国産化にめどを付けた。図10に、試作した改良12%Cr鋼製ロータを示す。

(2) 余寿命診断技術

年月を経たプラントの蒸気タービンの更新には多大な費用と準備期間が必要となるため、適切な時期に余寿命診断を行い計画的な更新計画を立てる必要がある。

USCプラントよりも蒸気条件の低い亜臨界圧プラントおよび超臨界圧プラントに適用される1%Cr鋼については、材料の劣化特性と脆化特性に関するマスターカーブが既に得られている。しかし、USCプラントに適用される



図 10 改良12% Cr 鋼製試作ロータ

改良 12%Cr 鋼については、材料の劣化特性と脆化特性に関するマスターカーブがいまだ得られていない。このため、余寿命診断の基礎技術を確立する目的で、鹿児島大学と共同でマスターカーブ取得のための研究を進めている。

4.3 低圧翼の信頼性向上技術

(1) 腐食モニタリング技術

主蒸気の酸導電率^(注2)が高くなると、低圧翼部における応力腐食割れ (SCC) の可能性が高くなることが知られている。主蒸気の性状管理はボイラの側で行われていること、また応力腐食割れを起こすのはボイラ出口から遠く離れた低圧翼部であることから、タービン内部の蒸気性状をリアルタイムで計測し、応力腐食割れのリスクの有無を的確に把握する必要がある。

このため、東北大学と共同で腐食モニタリングセンサを開発し、フィールドテストを実施している。図 11 に、腐食モニタリングセンサの取付図を示す。腐食モニタリングセンサは、pH、塩素イオン濃度、腐食電位を測定できるセンサで構成され、腐食成分が濃縮されやすい隙間部の腐

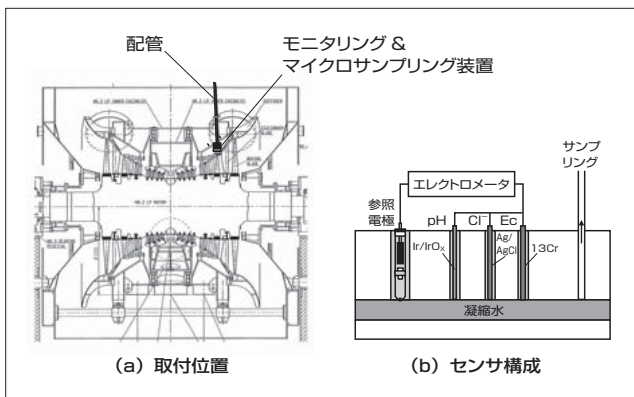


図 11 腐食モニタリングセンサ取付図

〈注2〉酸導電率：陽イオン交換樹脂を通過させて陽イオンを水素イオンに置換した後に測定される電気伝導率をいう。サンプル中に微量に含まれる塩化物イオンや硫酸イオンなどの有害な陰イオン濃度を検出するために用いる。

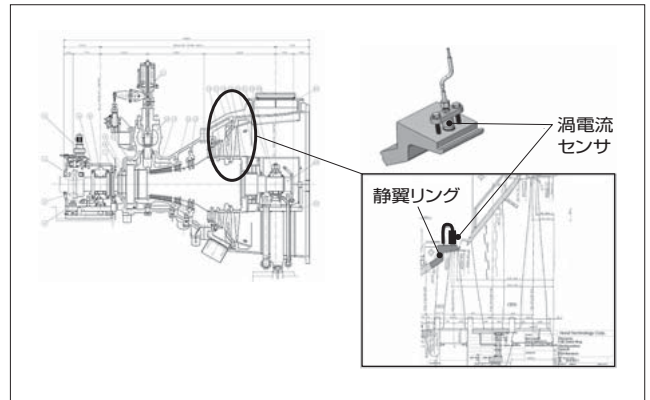


図 12 振動モニタリングセンサ取付図

食環境をオンラインでモニタリングすることができる。さらに、マイクロサンプリング装置により、タービン内部の蒸気をサンプリングして分析することが可能である。

(2) 振動モニタリング技術

長大低圧翼の振動特性は複雑であるため、適用実績のない低圧翼を実機に採用する場合には、工場バランス試験時に加速度センサを取り付け、回転振動試験を行うことで実特性を確認している。

しかしながら、工場バランス試験が常温の真空中で行われるのに対して、実機条件は、温度、圧力、流量の変化する蒸気中であることから、実特性を把握するためには、発電所において各運転条件の下で低圧翼の振動を計測する必要がある。そこで、運転中の低圧翼の振動計測を行った。図 12 に振動モニタリングセンサの取付図を示す。低圧翼先端に対向する静翼リングの周上に非接触式の渦電流センサを複数個取り付けて、運転中の個々の翼の振動をオンラインで連続で測定することに成功した。センサをチタン製のケースに格納することにより、長期間にわたる翼振動モニタリングが可能になった。

5 あとがき

2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、日本の原子力発電所は順次停止され、再稼動の見通しがまだ立っていない。原子力発電所の停止が長引く中、今後の電源の主役は再生可能エネルギーとコンバインドサイクル発電と目されている。

石炭火力発電においては、USC に対して CO₂ 排出量をさらに低減できる A-USC (先進超々臨界圧火力発電) や IGCC (石炭ガス化複合発電) の研究開発が進められている。今後とも、高性能で運用性の高い蒸気タービンを供給するため技術開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 池田忠志ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報. 2005, vol.78, no.2, p.116-120.
- (2) 今村清司ほか. 蒸気タービンロータの異種材料溶接技術. 富士時報. 2004, vol.77, no.2, p.146-149.

- (3) 酒井吉弘ほか. 富士・シーメンスの大容量高温・高圧タービン. 富士時報. 2000, vol.73, no.12, p.644-649.



和泉 栄

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場主席。日本機械学会会員。



森山 高志

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部課長。ターボ機械協会会員。



池田 誠

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部主任。ターボ機械協会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。