

最新鋭蒸気タービンの技術開発と展望

Latest Technologies and Future Prospects for a New Steam Turbine



齊藤 英治^{*1}
Eiji Saito

松野 成之^{*2}
Nariyuki Matsuno

田中 恵三^{*3}
Keizo Tanaka

西本 慎^{*4}
Shin Nishimoto

山本 隆一^{*5}
Ryuichi Yamamoto

今野 晋也^{*6}
Shinya Imano

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では、近年の蒸気タービンの大容量化ニーズに応えるため、1000MW 級タンデムコンパウンド蒸気タービンの実機設計を完了した。本報では、この最新鋭蒸気タービンに採用している、完全三次元翼、低圧最終段 50IN/60IN 翼、高性能排気室、最新シール技術、直接潤滑軸受、先進 12Cr 溶接ロータ等を紹介する。また、現状の蒸気条件は、600℃級 USC (Ultra Super Critical) までであるが、更なる蒸気条件向上となる 700℃級 A-USC (Advanced Ultra Super Critical) の実用化が期待されている。A-USC 用として MHPS が開発した Ni 基合金は目標強度達成の見込みであり、実機大回転試験用溶接ロータ施工を行い、非破壊検査によって健全性を確認した。2016 年に計画している回転試験で余寿命評価を行い、長期信頼性を確証し A-USC 技術を実用化する予定である。

1. はじめに

MHPS の蒸気タービンは、1908 年に国産初の陸用蒸気タービン(500kW)を製造してから、現在までの累計出力は 341767MW に至る。蒸気タービンが現代においても継続して運用されている理由は、長期間にわたって安定した電力を供給してきた実績に基づくことが大きい。また、蒸気条件の向上や、設計手法にいち早く最新の解析技術を採用し、高効率化及び高信頼性に伴う最新技術を実製品に適用することで、蒸気タービンは進化し続け、電力エネルギー需要の期待に応え続けている点も大きい。近年では、環境問題を踏まえて、単機出力容量の増大化と高効率化のニーズがより一層高くなってきた。本報では、これら大容量化及び高効率化に関わる最新の蒸気タービン開発技術を紹介するとともに、今後、一層の蒸気条件向上が期待されている A-USC の開発技術概要について述べる。

2. 大容量化への対応

蒸気タービン低圧最終段は、出力負担が大きいので、タービンの性能、信頼性及び全体構成を決定づける最も重要なコンポーネントのひとつである。最終段翼の長翼化により、排気損失の低減が期待でき、かつ単機容量が増大することにより、蒸気タービンの高効率化やタービン車室数低減による建屋のコンパクト化や建設費低減に寄与できる。一方、タービン最終段は、材料、性能(流体)、強度、振動にまたがる広範な技術の集大成とも言えるものであり、非常に高い技術

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)蒸気タービン技術本部タービン開発戦略部 主管技師 工博

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)蒸気タービン技術本部タービン開発戦略部 グループ長

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)蒸気タービン技術本部タービン開発戦略部 次長

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)蒸気タービン技術本部タービン開発戦略部

*5 技術統括本部総合研究所材料研究部 室長 工博

*6 三菱日立パワーシステムズ(株)研究所火力システム研究部 グループ長 工博

レベルと蓄積した検証データを必要とする。

MHPS は、性能及び信頼性を抜本的に向上させるため、回転時の翼のねじり戻り変形を利用して、タービン全周の翼をカバーなどで接触連結させた ISB (Integral Shroud Blade) 構造を採用し、耐振強度の向上を図った。この構造の採用は、翼プロファイル形状設計にも余裕を持たせることができ、より一層の性能向上を実現する長翼開発を可能にした。この長翼は、1990 年代より“高性能新形蒸気タービン”⁽¹⁾の開発として着手し、2003 年に 3600rpm-36IN 翼の性能、信頼性を検証するとともに開発設計技術を確立させた。さらに、2009 年には、これまでの技術革新の検証結果をベースに、更なる性能や信頼性を向上させた 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN 翼の開発(図1)を行い、実機振動計測及び商用機適用を完了している⁽²⁾。図2にこれら高効率・高信頼性蒸気タービン ISB 最終段翼群シリーズのラインアップを、図3に、それらの適用出力範囲例を示す。



図1 3600rpm-50IN 翼外観

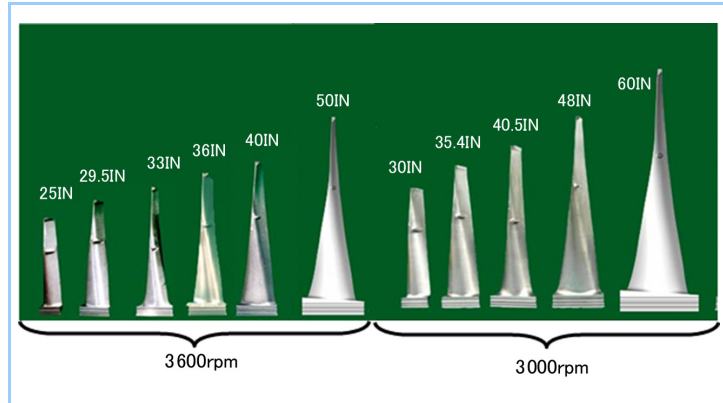
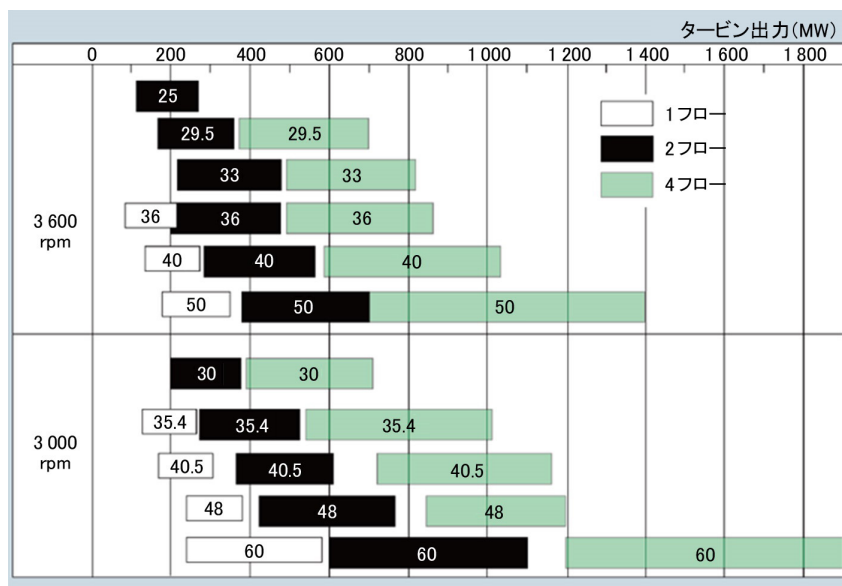


図2 ISB 最終段翼群シリーズ



図中の数値は翼高さ(インチ)を示す。

図3 3600rpm 及び 3000rpm 用 ISB 最終段翼の適用出力範囲

これら長翼の適用範囲は、100MW から 1000MW 以上の大容量をすべてカバーできるものとなっている。特に最新の 3000rpm-60IN 翼や 3600rpm-50IN 翼を 1000MW 級に適用すれば、従来のタービンと比較して大幅な性能向上や低圧タービン車室数低減が可能になる。また、ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) 用ボトムリング蒸気タービンでの適用においても、長翼のメリットは大きい。例えば、MHPS の F 形、G 形ガスタービンの 1on1 (一軸形)、2on1 (多軸形) 型式に対して、従来は高中圧車室と 2 フロー分の低圧車室を別体で構成していた。これに対して、50IN/60IN 翼の採用によって、タービン構造を単車室再熱タービン (SRT) の 1 車室で構成することが可能になり、図4に示すような、コンパクト化させた蒸気タービン商用機を提供している。

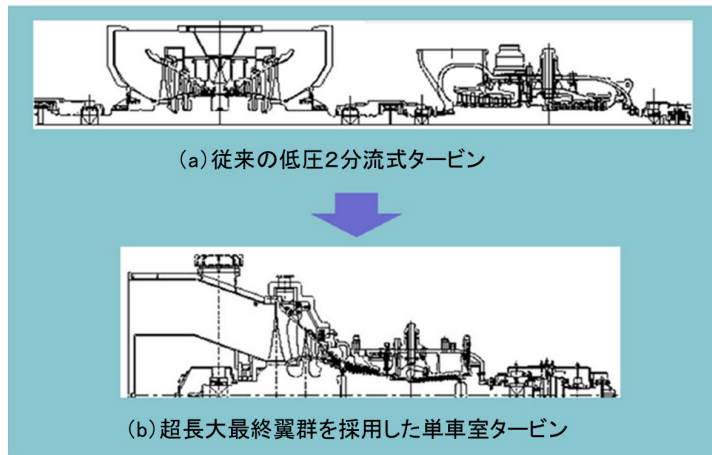


図4 大型 GTCC 用蒸気タービン適用例

3. 最新高効率・信頼性向上技術

1000MW 級タンデムコンパウンド型蒸気タービンの実機設計が完了している。各種最新技術の適用箇所を図5に示す。これら個々の技術は、要素技術開発で検討された後に、実負荷試験などを通じ、性能と信頼性の検証を行ったものである。

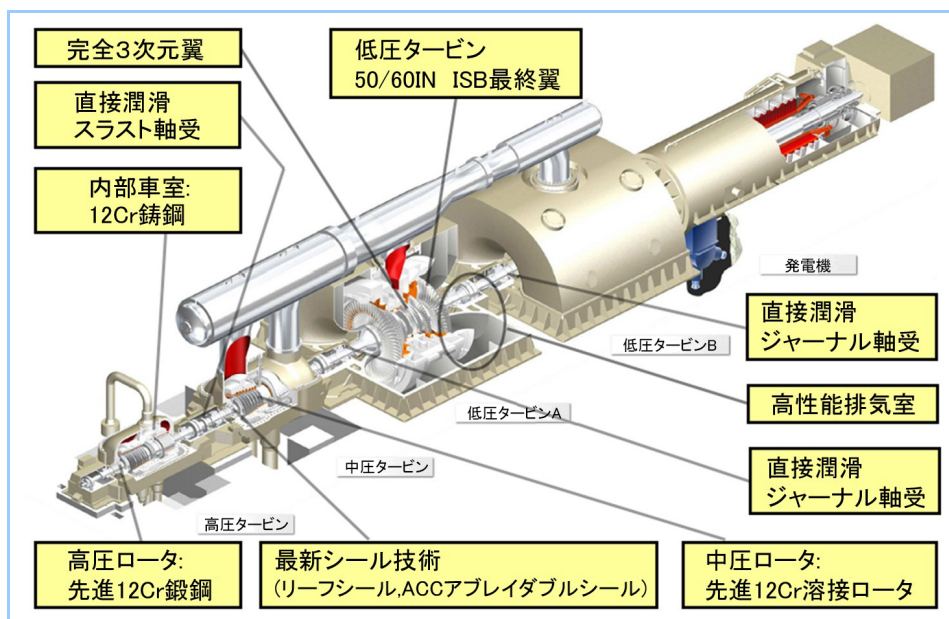


図5 1000MW タンデムコンパウンド型蒸気タービン概形と適用技術

(1) 完全三次元翼

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解析を用い、壁面形状、翼プロファイルに影響される流体力をすべて考慮し、最大効率・出力が得られるような各段落のフローパターン設計を実施している。

(2) 低圧最終段 50IN/60IN 長翼及び高性能排気室

蒸気タービン特有の湿り蒸気が発生する低圧最終段 L-0 から L-2 段落などにおいては、湿り蒸気による水滴発生予測を行い、水滴排出スリット位置や形状の最適化を行っている。また、50IN/60IN 翼の出口から排気室、復水器までの流れ場も翼列解析と同様に非平衡蒸気特性を考慮した三次元多段粘性非定常解析を用い、翼列部と連成させた検討を行っている。この結果、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。

(3) 最新シール技術

蒸気タービンの性能向上策の1つとして、軸シール部の漏れ損失の低減も重要である。定格時のクリアランスを極力抑えるシール技術として、フィン接触を許容しクリアランスの最小化が図れる ACC (Active Clearance Control) アブレイダブルシールや、ロータ停止時には接触、ロータ回転時にはわずかにリーフ先端が浮上し非接触状態を保つリーフシールを開発した。アブレイダブル ACC シールは、図6に示すようにシールリング内面に摺動特性の優れた低発熱シール材を溶射することで、フィン接触による発熱を抑え、軸振動を防止し、定格時のクリアランス低減が達成される。一方、リーフシールは、図7に示す板状のリーフを周方向に配列させ、運転中のみ非接触となる。また、板状であるため軸方向剛性が大きく、ブラシシールより高差圧域への適用を可能にした。これらシールは社内実証試験設備等で、長時間にわたり性能及び信頼性を確認している。

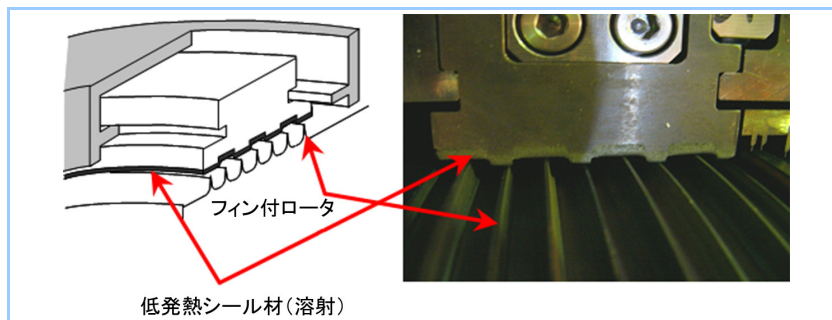


図6 アブレイダブル ACC シール

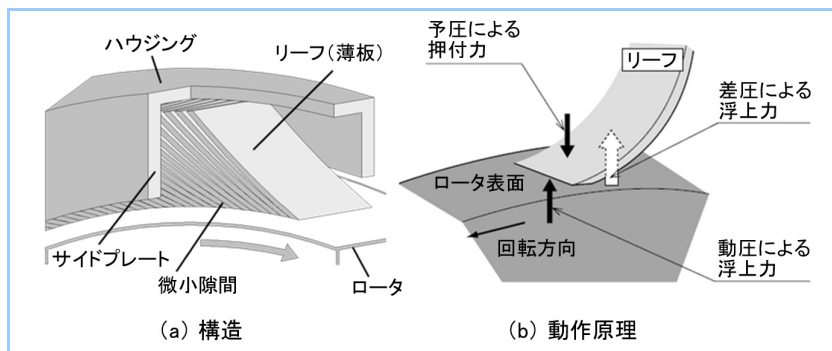


図7 リーフシール

(4) 直接潤滑軸受

軸受損失低減のため、軸受サイズのコンパクト化を狙った直接潤滑型 PEEK (Polyether-Ether-Ketone) 軸受を採用している。本軸受は、PEEK 樹脂と炭素繊維による複合材料を軸受摺動部に用いて耐高面圧化が得られ、図8に示す噴射ノズルから直接潤滑油を供給する構造により、潤滑油温度や軸受損失の大幅な低減が達成されている。

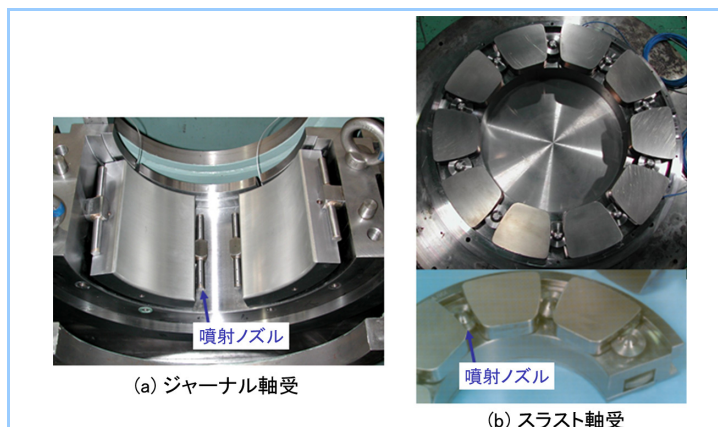


図8 直接潤滑ジャーナル/スラスト軸受

(5) 先進 12Cr 溶接ロータ

600℃超級 USC に対応するために開発した先進 12Cr ロータ(MTR10A)は、既に商用機に採用し、10 年以上の実績を持つ。また、MTR10A などの高価な高温材料の適用範囲を高温域のみに限定し、各段落に適したロータ材料を組み合わせることが可能な溶接ロータの実用化も行っている。図9に示した GTCC 用 SRT ロータは、高温部(中央部)に MTR10A、低温部(軸端部)に 2.25CrMoV、3.5NiCrMoV を適用した異材溶接ロータである。起動停止の多い GTCC においても溶接ロータの信頼性は全く問題ない。このような溶接ロータの実機採用は 20 台以上ののぼり、信頼性が十分確証されている。

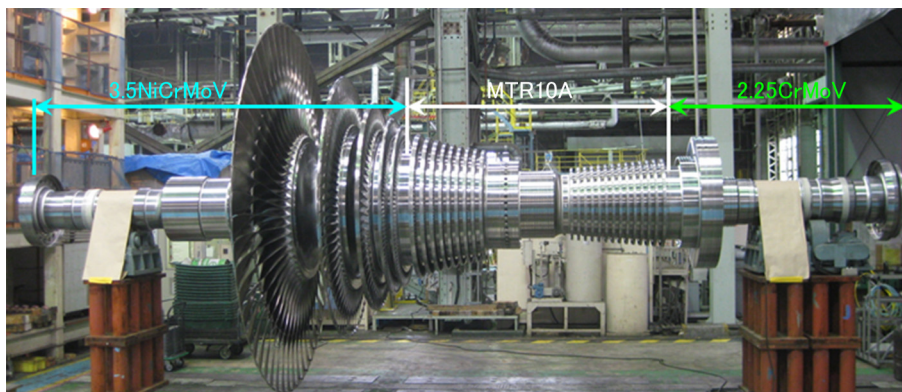


図9 SRT50 溶接ロータ

4. 蒸気条件向上への対応(A-USC 開発)

図 10 に石炭火力プラントの蒸気条件の変遷について示す。石炭火力の蒸気条件は、亜臨界圧、超臨界圧(SC)、そして 600℃級超々臨界圧発電(USC)と経てきた。これら各年代で採用されてきた最高の蒸気条件は、時代ごとに発展してきている蒸気タービンの高効率化技術適用との相乗効果を伴い、プラント全体の高効率化達成に寄与してきている。この蒸気条件向上の延長として、600℃級 USC から更に温度を 100℃上げた 700℃級 A-USC の実用化への期待が世界的に高まってきている。A-USC が実現できれば、タービン効率は 50%を超え、プラント効率も 46%HHV (Higher Heating Value) 以上が見込まれる。日本では、2008 年より経済産業省の補助事業として国家プロジェクト(国プロ)が進められている。以下、A-USC 開発課題と進捗状況を述べる。

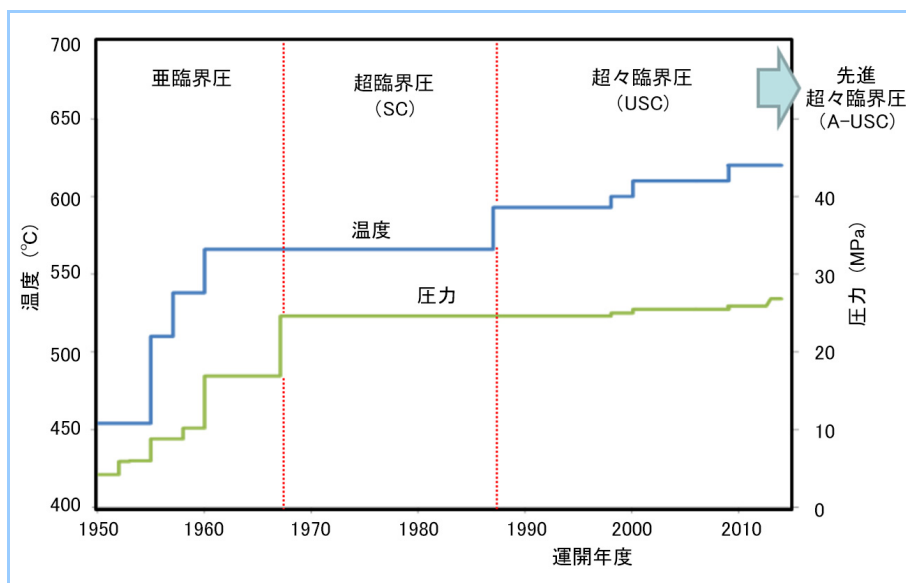


図 10 蒸気条件の変遷

4.1 開発課題

現状商用化されている先進 12Cr 鋼の適用限界は 630℃レベルであって、それ以上の蒸気温度を達成するには、Ni 基合金の採用が見込まれる。しかし、Ni 基合金の特性には、温度変化に対する組織変化の感受性が強いという製造上の課題がある。そのため、大型素材の製造ほど、表面と内部の温度勾配がつきやすくなるので、成分元素の濃度分布が不均一になる偏析を生じる問題がある。試験片レベルや小さな素材で如何に高い強度特性が得られても、大型素材についても設計者の目標を満足する強度を確保することは難しい。そのため、蒸気タービンロータなどに適用できる Ni 基合金開発とその長期信頼性の検証が、A-USC 開発にとって最も大きな課題となる。また、高価な Ni 基合金を使用する量を抑えた設計が必要であって、特に大型鍛造の製造が難しいロータにおいては、Ni 基合金による溶接ロータ製造も大きな開発課題である。

4.2 新 Ni 基合金の開発

表1に MHPS が実用化を検討している Ni 基合金について示す。これらの材料は、国プロ開発時の目標であった、10 万時間 100MPa 以上の高温クリープ強度が達成される見込みであり、FENIX700 及びLTES700R⁽⁴⁾では10トン級の大型鍛造ロータの試作に成功した。また、これら材料はΦ1000 程度の大型鍛造ロータの試作で、非破壊検査による欠陥検出精度が2mm 程度以下の結果を得た。一方、USC141⁽⁵⁾や USC800 は、高温強度に優れるのみならず、熱間加工性に優れており、翼、ボルト材のみならず、ボイラ配管等の適用に向けて各種検証を行っている。これら各材料の長時間クリープ強度は、実際に 10 万時間まで継続して試験が続けられ、実用化に向けた信頼性を確認していく予定である。

表1 開発評価中の新 Ni 基合金

材料名	C	Ni	Cr	Mo	Co	W	Nb	Al	Ti	Fe
FENIX700	0.01	42	16	—	—	—	2	1.3	1.7	Bal.
	鉄-Ni 基合金であり、素材価格が一般的 Ni 基合金の 2/3 程度。 大型鍛造の製造性に優れている。ロータ候補材。									
LTES700R	0.03	Bal.	12	6.2	—	7	—	1.65	0.65	—
	Ni 基合金であるが、線膨張係数は高 Cr 鋼と同程度に抑えている。 溶接施工性に優れる。ロータ候補材。									
USC141	0.03	Bal.	20	10	—	—	—	1.2	1.6	—
	700℃、10 万時間で 180MPa 程度の高温クリープ強度を持つ。 タービン翼材、ボルト材、ボイラ伝熱管候補材。									
USC800	0.04	Bal.	17	6	23	2	—	4	—	—
	Ni 基合金の高強度化と熱間鍛造性を両立した材料。 700℃、10 万時間で 270MPa 程度の高温クリープ強度を持つ。 タービン翼材、ボルト材、ボイラ伝熱管、大径管候補材。									

4.3 高温場タービン回転試験

現在、国プロの開発計画に基づき、高温場回転試験を計画している。この試験の目的は、Ni 基合金の実機大タービンの製造性の確認や高温回転試験を経た後の各種部材の余寿命評価を行い、信頼性を検証することである。MHPS では、試設計した二段再熱蒸気タービン構造⁽³⁾に基づき、LTES700R の共材溶接、LTES700R と MTR10A の異材溶接部を含み、部分負荷変動運用にも耐えられる調速段と異材溶接部の中では遠心力の作用が大きい IP6 段、7 段を回転試験用ロータ構造に採用した(図 11)。

タービン回転試験設備及びロータ構造を図 12 に示す。この設備の特徴は、ヒータの放射熱により 700℃以上の温度場が模擬され、駆動モータによって真空中 3600rpm の定格回転で長時間試験するものである。試験中、最も応力が高い部位はタービン翼溝部であり、実際の運用上はこの箇所が 700℃の雰囲気にとさらされることは無いので、寿命評価は実際の運用に比べて加速試験となる。

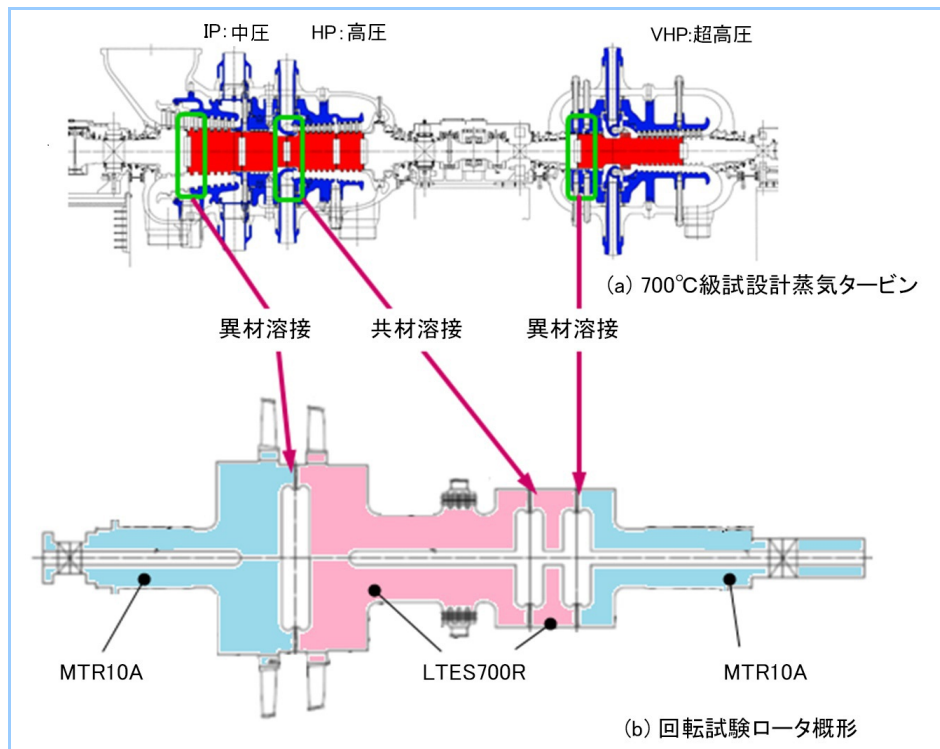


図 11 回転試験用ロータ設計コンセプト

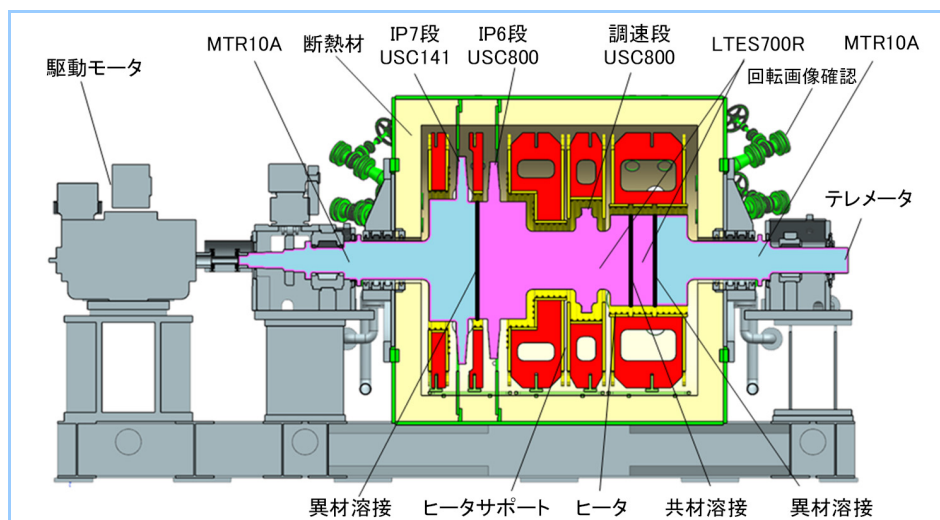


図 12 タービン回転試験設備及びロータ構造

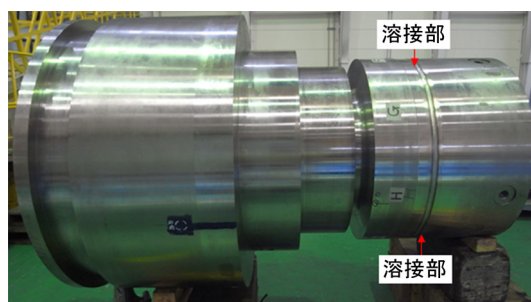


図 13 LTES700R 溶接ロータ

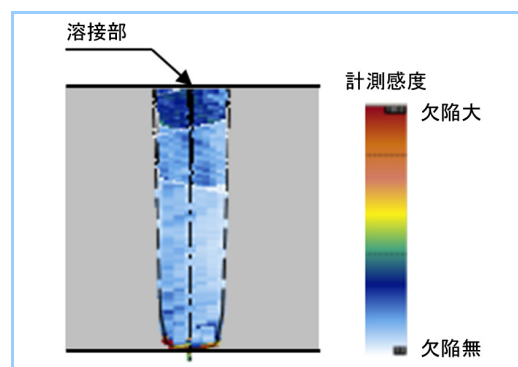


図 14 溶接部非破壊検査実施例

図 13 に溶接ロータの施工例, 図 14 に溶接部の非破壊検査結果を示す。MHPS は既に高 Cr 鋼などの溶接ロータ製造実績を持ち, その技術を Ni 基合金にも展開している。溶接手法は実績のある TIG 溶接を採用し, 実物大のモックアップ溶接を行い, 継手性能(組織, 機械特性など)を検証した後に, 回転試験用溶接ロータの施工を行った。素材及び溶接部においても非破壊検査

で問題となる部位は見られず、健全性が確認されている。今後は、溶接ロータ開発と並行して進めているタービン翼製造と併せて、回転試験ロータを完成させ、2016 年の検証試験に臨む予定である。本試験によって、材料及び溶接ロータの健全性を確認し、A-USC 技術を実用化する予定である。

5. まとめ

近年の大容量化ニーズに応えるため、50IN/60IN 最終段翼を採用した 1000MW 級実機設計を完了した。その中で採用した高効率・高信頼性技術には、完全三次元翼、高性能排気室、最新シール技術、直接潤滑軸受、先進 12Cr 溶接ロータ等がある。また、更なる蒸気条件向上となる 700℃級 A-USC の実用化が期待されており、新 Ni 基合金の要素開発を実施している。さらに、回転試験ロータ開発に着手し、非破壊検査による溶接ロータの健全性が確認された。今後は、2016 年の回転試験によって、材料及び溶接部の信頼性検証を行う。

参考文献

- (1) 渡辺英一郎ほか, 高性能新形蒸気タービンの開発, 三菱重工技報 Vol.40 No.4(2003-7)p.212~215
- (2) 福田寿士ほか, 蒸気タービン超最大最終翼群 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN の開発, 三菱重工技報 Vol.46 No.2(2009)p.18~24
- (3) 中村眞二ほか, A-USC (700℃級先進超々臨界圧発電)の技術開発と展望 三菱重工技報 Vol.48 No.3(2011)p.8~15
- (4) R. Yamamoto, et al., Proc. of 5th Inter. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2007), EPRI Report No 1016250.
- (5) T. Ohno, et.al., Development of low thermal expansion nickel base superalloy for steam turbine applications, Energy Materials, Vol2, No.4, 2007