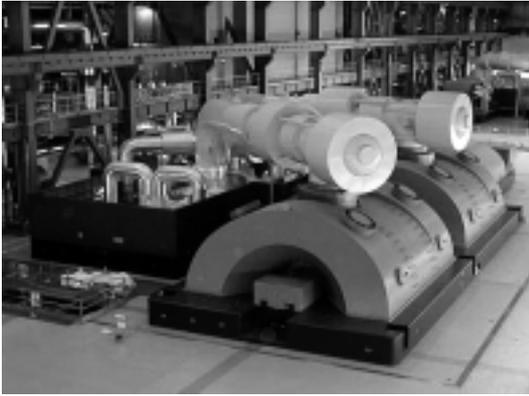


世界最高効率1 000 MW 級 蒸気タービンの特徴と運転実績

Feature and Operating Experience of 1 000MW Class
Steam Turbine with Highest Efficiency in the World

田 中 良 典 樽 谷 佳 洋 馬 越 龍 太 郎
中 野 隆 角 屋 好 邦



火力発電の効率向上は資源の節約とCO₂による地球温暖化等の環境への影響低減の観点から、近年その必要性がますます高まっている。このため大容量石炭焼き火力発電ではタービン内部効率向上とともに蒸気条件の高温・高圧化による発電効率向上が進められている。当社では商用大容量機として世界初の主蒸気、再熱蒸気温度共600 級採用の電源開発(株)松浦2号機を設計、製作した実績を基に、さらに再熱蒸気温度610 級採用の電源開発(株)橘湾2号機を設計、製作した。このタービンは2000年12月に営業運転を開始して以来順調に運転されている。本報では商用大容量タービンとして世界最高の蒸気温度、効率を達成した橘湾2号の設計の特徴と運転実績を紹介する。

1. はじめに

蒸気温度600 級の実用化に当たっては、電源開発(株)若松超高温実証タービンを始め広範囲な開発が行われ、蒸気タービン高温化のための設計技術、材料技術の検証を行った⁽¹⁾。これらの高温化技術の大容量タービンへの適用は、再熱蒸気温度593 を採用した中部電力(株)碧南3号機700 MW(主蒸気圧力: 24.1 MPag 主蒸気/再熱蒸気温度: 538/593)で実用化され⁽²⁾、その後、大容量商用機として世界で初めて主蒸気、再熱蒸気温度共に600 級を採用した電源開発(株)松浦2号機1 000 MW(24.1 MPag 593/593)を1997年に運開した⁽³⁾。さらに1 000 MW級シリーズとして、中国電力(株)三隅1号機1 000 MW(24.5 MPag 600/600)を1998年に、電源開発(株)橘湾2号機1 050 MW(25.0 MPag 600/610)を2000年に順調に運開してきた。これら1 000 MW級タービンでは主蒸気、再熱蒸気温度600 級に対応するための高温化技術について検証、実用化してきた⁽⁴⁾。

2. 蒸気タービンの概要

表1に蒸気タービン主要仕様を示す。タービンは高圧タービン、中圧タービンをプライマリ軸、二つの低圧タービンをセコンダリ軸とするクロスコンパウンド形である。

高圧タービンは、主蒸気入口4箇所の複流設計であり、各流は調速段1段及び反動段10段から成る。主蒸気、再熱蒸気共に600 級に対応するため、高圧及び中圧ロータ材には改良12 Crロータが採用されている。低圧タービンも複流設計であり、各流は46インチISB最終翼群を含む反動段9段から構成されている。600 級の蒸気温度に対する中圧タービンの設計は、中部電力(株)碧南3号機で確立されており、橘湾2号機では、610 再熱蒸気温度に対して中圧ロータ冷

表1 蒸気タービン主要仕様

項目	仕様		
	電源開発(株) 松浦2号	中国電力(株) 三隅1号	電源開発(株) 橘湾2号
ユニット名			
形式	並列型4分流排気再燃再生復水型		
出力(定格)	1 000 MW		1 050 MW
蒸気条件			
主蒸気圧力	24.1 MPag	24.5 MPag	25.0 MPag
主蒸気温度	593	600	600
再熱蒸気温度	593	600	610
回転数	プライマリ軸 3 600 rpm セコンダリ軸 1 800 rpm		
真空度	5.06 kPa		
最終翼	1 170 mm (46インチ)		
給水加熱器	8段		

却を強化した設計を採用している。高圧タービンの高温化設計としては、先行機松浦2号機、三隅1号機で確立された信頼性の高い設計を踏襲している。主蒸気、再熱蒸気温度の高温化により、従来の538/566 の1 000 MWユニットに対し相対値で約3%の熱効率向上が達成される。蒸気温度高温化によるサイクル効率向上に加え、蒸気タービン内部効率向上のため、低圧最終翼群に46インチISB(Integral Shroud Blade)を採用(図1)して排気損失低減を図るとともに、最終翼も含めた反動翼全段への完全三次元流動解析による三次元設計翼を採用して性能向上を図っている。

そのほか、DSS(Daily Start and Stop)対応ユニットとして、起動時間短縮を目的に高低圧タービンバイパス起動方式を採用している。プラント出力送電方式には大容量直流送電方式を採用しており、関西電力(株)御坊発電所等で実用化した軸系ねじり振動監視技術を基に、国内で初めてSSR(Sub

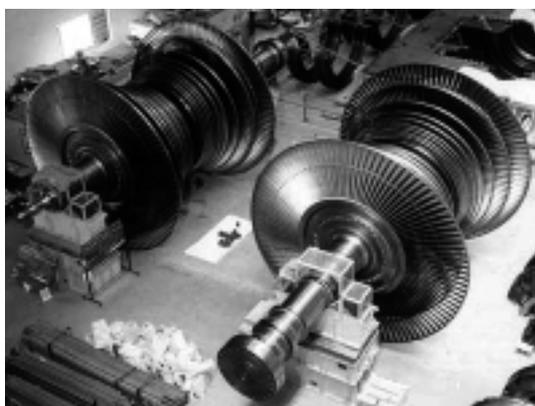


図1 46インチISB低圧ロータ

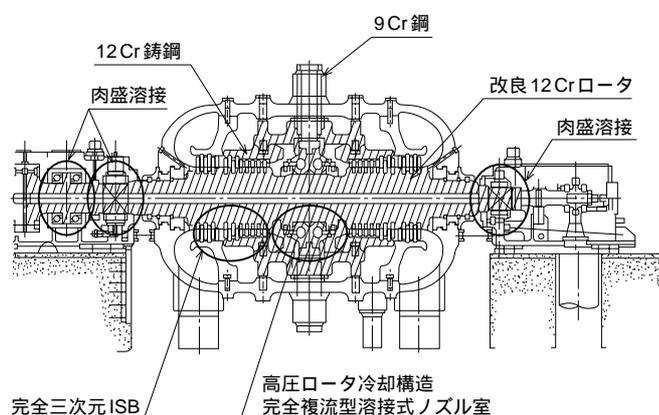


図2 高圧タービンの構造と高温材料 構造的特徴と600 級高温材適用箇所を示す。

Synchronous Resonance) に対して保護ロジックを組み込んだ軸系監視保護装置を適用した。また、先行機に対し5%出力増としており、プライマリ軸 中圧タービン軸受(発電機側)に20インチ2 Pad軸受を採用し、ショートサーキット、再閉路運用に対し信頼性の高い設計としている。

3.600 級蒸気温度に対する設計上の特徴

高圧タービンは、先行機である松浦2号機、三隅1号機と同様に主蒸気高温化に対処するための設計的配慮、また再熱蒸気温度には610 を採用していることから先行機よりも中圧タービン冷却構造を強化していることを特徴とする。

3.1 高温用材料

図2、図3に高圧、中圧タービンの構造と高温材料を示す。高温材料では、改良12Cr鍛鋼、12Cr鋳鋼、9Cr鍛鋼といったフェライト系の耐熱鋼が広範囲に使用されている。また、入口付近の高温部動翼にオーステナイト系耐熱合金を採用している。ロータ材としては600 級での運転に十分なクリープ強度を持つ改良12Cr鍛鋼(TMK-2)を採用している⁽⁵⁾。

また、ロータのジャーナル部及びスラストカラー部は軸受ホワイトメタルとのマシニングウェアと呼ばれる焼き付き現象を防止するため、低Cr溶接材による溶接を施工している。

静止部材料としては、優れたクリープ強度を持つ12Cr鋳鋼(MJC-12)をノズル室、内部車室及び第一翼環に採用している。タービン入口部の弁及び弁と弁室の接続配管には、9Cr鍛鋼を採用した。また、中圧タービン入口部フローガイドには、630 級開発材であるCo入り先進12Cr鋳鋼(MTC10A)を適用した。

3.2 高温化構造

高温化に対する高圧タービンの設計は、高温・高圧部にさらされる各部をコンパクトに設計することを基本に、冷却構造を採用し、クリープ及び熱疲労に対する信頼性を十分に確保した設計としている。ノズル室は完全複流式の溶接一体形を採用し、内部車室及び外部車室のコンパクトな設計を可能としている。また、ロータ中央部では、调速段出口蒸気を冷却蒸気としてノズル室とロータの間に供給し、ロータを効果的に冷却している。再熱蒸気温度610 に対しては、先行機同様、中圧ロータ入口部に高圧タービン排気を冷却蒸気とし

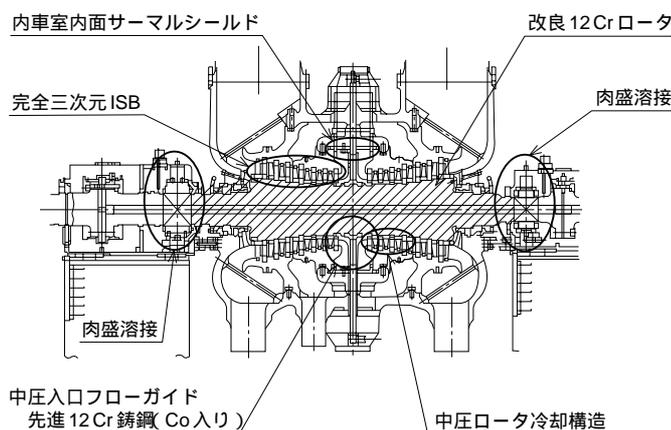


図3 中圧タービンの構造と高温材料 構造的特徴と高温材適用箇所を示す。入口部フローガイドには630 級開発材であるCo入り先進12Cr鋳鋼を適用した。

て供給するが、その冷却範囲を増加することで再熱蒸気温度600 と同等以上の信頼性を確保している。また、中圧タービン内部車室内面にはサーマルシールドを取り付けることにより610 の蒸気が直接内部車室内面に触れない設計としている。動翼では、テノンをなくし、シュラウドと翼を一体削り出しにより製作したISB構造を採用し、高温化に対する信頼性向上を図っている。

4. 運転実績と実機検証結果

4.1 改良12Crロータ

高圧及び中圧に採用した改良12Crロータ材は、研究室での模擬試験片、先行実機から採取した試験片による長時間データが十分に得られており、機械的性質、クリープ破断強度に対する信頼性は非常に高い。橘湾2号機ロータの高圧、中圧ロータ各位置から採取した試験片の機械的性質はすべて規格値を満たしており、中心孔超音波探傷検査においても良好な結果が得られている。

4.2 肉盛溶接施工

12Crロータ軸受部のマシニングウェア対策であるジャーナル部及びスラスト部の溶接施工については、モデル試験による基礎試験及び実物大試験片によるねじり疲労試験を経て肉盛溶接技術を確立し、実機ロータの施工を実施した。実機

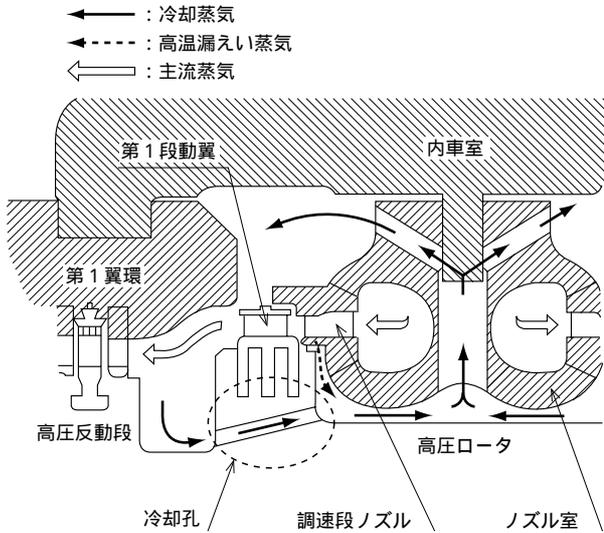


図4 高圧ロータ冷却構造 調速段ディスクに設けた冷却孔により冷却蒸気を循環させロータを冷却する。

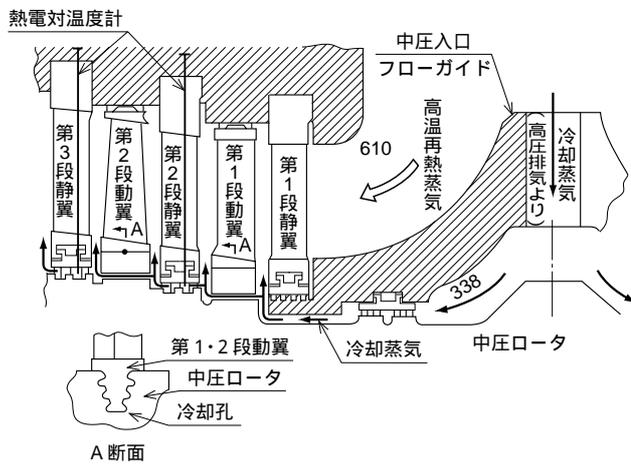


図5 中圧ロータ冷却構造 高圧排気より抽気された冷却蒸気を翼溝底に設けた冷却孔に導入しロータを冷却する。

ロータの肉盛溶接部の超音波探傷検査では、許容値（1.5 mm）を超えるインジケーション（欠陥指示）のない高品質な肉盛溶接であることを確認した。また、試運転期間中100% 負荷遮断後における軸受部点検においても異常は認められず、肉盛溶接施工技術の信頼性が確認された。

4.3 ロータ冷却

高圧ロータ中央部のロータ冷却構造について図4，中圧タービン中央部のロータ冷却構造について図5に示す。高圧ロータ冷却構造については、調速段部ロータ（冷却孔，ノズル室，調速段ディスク）を模擬した回転試験装置による流動特性試験により最適化設計を行い実機に適用している。

実機では蒸気温度計測を行い、ロータ冷却性能を確認している。図6，図7に各負荷帯での実機計測結果を示すが、ロータクリープ強度確保及び経年曲がり防止に必要な設計蒸気温度に対し十分冷却されていることが確認された。

4.4 46インチ ISB 最終翼群

国内1000 MW機では最大排気面積となる46インチ ISBについては、工場での回転振動試験，1/2スケールモデル実負

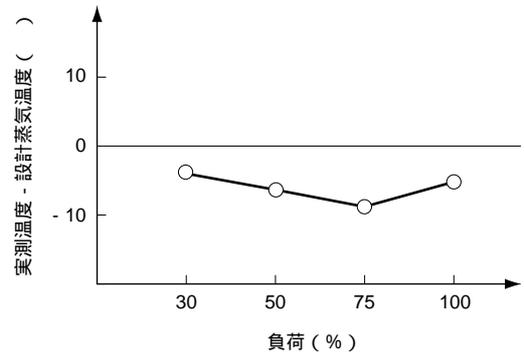


図6 高圧ロータ冷却実測結果 ノズル室～ロータ間蒸気温度は設計温度に対し十分低いことを示す。

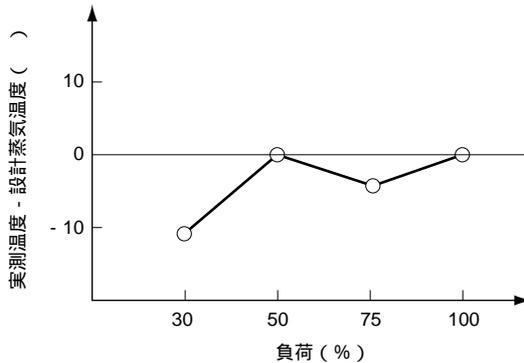


図7 中圧ロータ冷却実測結果 静翼～ロータ間蒸気温度は設計温度に対し十分低いことを示す。

荷試験を通じて信頼性，性能を確認した上で実機適用した。また，先行機である松浦2号機では実機テレメータ試験も実施してすべての運転域で翼振動応力は非常に小さいことを確認し，本翼の信頼性が十分に高いことが検証されている。

4.5 高低圧タービンバイパス運転

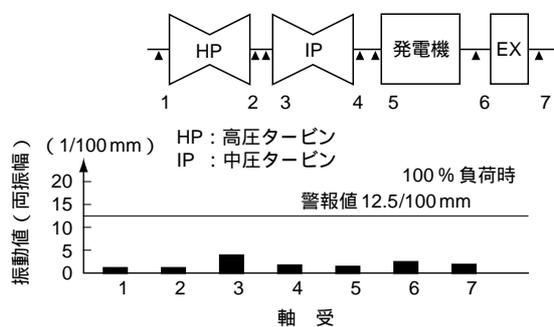
DSS対応のため，主にボイラ起動時間短縮を目的とし，昇速から15%ないし20%負荷到達までのバイパス運転中は，主蒸気加減弁と再熱蒸気加減弁の両方で速度（負荷）制御を行うことにより高圧タービンと中圧タービンの流量比を適切に設定し，高圧排気温度をコントロールした。実機においては，負荷遮断試験時を含むすべてのバイパス運転状態において，速度（負荷）制御性が良好であったことを確認した。プラント起動所要時間（ボイラ点火から全負荷まで）は，従来ユニットに対し約50%（ホットスタート）に短縮されていることを確認した。

4.6 軸振動

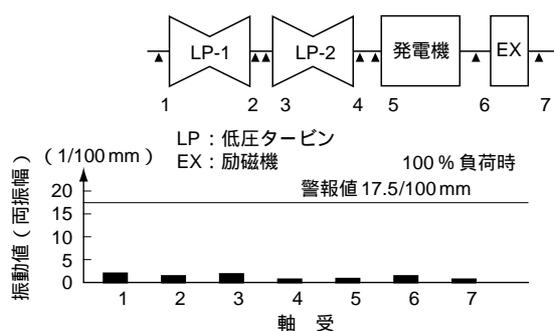
軸振動はユニットの運転性の重要な要素であり，定格出力運転時に各軸受部で計測した軸振動のレベルを図8に示す。図8に示すように，両振幅振動30 μm程度の非常に安定した運転が達成できている。

4.7 SSR (Sub Synchronous Resonance) 保護運用

本ユニットは，大容量直流送電方式の採用に伴い，直流送電系と発電機軸系との相互作用による負制動現象（SSR）によるねじり振動から軸系を保護するため，国内で初めてSSRに対する軸系監視保護装置を適用した。本装置は関西電力



(a) プライマリ軸



(b) セコンダリ軸

図8 橋湾2号機軸振動計測例 両振幅30μm以下の安定した運転が達成されている。

(株)御坊発電所等で実用化した軸系ねじり振動監視技術を基に、発電機が並列しているあいだ、電磁ピックアップからのパルス信号により軸系ねじり振動の増加傾向及び応力を常時監視し、寿命消費計算及びTrip判定を行いSSRに対して軸系を保護するものである。なお、SSR以外の短絡事故や負荷遮断等による外乱に対しては、振動変化の傾向よりSSRと区別する機能を有する。実機にて負荷遮断時の軸系ねじり振動特性を計測し、シミュレーション結果との整合性、設定値の妥当性を確認した。

4.8 性能

本ユニットは、1000MW級として世界初となる主蒸気、再熱蒸気温度に600/610を採用、また完全三次元流れ設計による完全三次元反動翼、低压最終翼へ46インチISB等の高効率技術を適用している。

その結果、性能試験においてタービン効率は、図9に示すように全負荷において計画値(保証値)を大幅に上回っており、大容量商業運転用蒸気タービンとして世界最高効率を達成していることを確認した。

5. おわりに

1000MW級超臨界圧ユニットにおいて世界で初めて主蒸気、再熱蒸気温度に600/610を採用した電源開発(株)橋湾2号機蒸気タービンは2000年12月に営業運転を開始し、その後も高効率を維持し順調に運転されている。

世界的にもCO₂による地球温暖化の防止に貢献する、さらなる高蒸気温度化による高効率化プロジェクトが進められており、次世代700級蒸気タービンは石炭ガス化複合発電(IGCC)に迫る高効率発電として開発が進められている。特

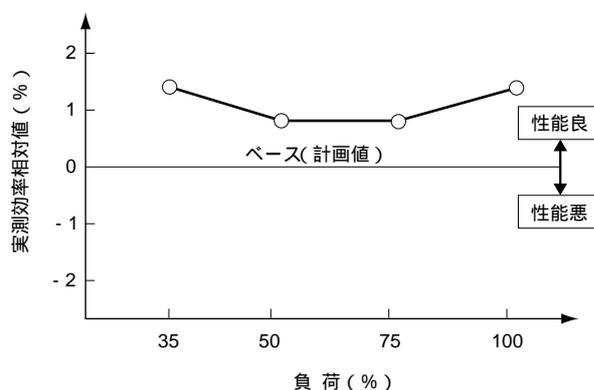


図9 橋湾2号機タービン性能試験結果 タービン効率実測値は全負荷域で計画値を上回り、世界最高効率を達成していることを確認した。

に、ヨーロッパTHERMIE PROGRAMでは、2014年までに700級、ドイツ独自のプロジェクトMARCKO DE2では、2003年までに700級実証プラントの建設計画を予定している。

当社では、橋湾2号機の完成により大容量蒸気タービンでの高温化技術を確認したが、既に630級フェライト系材料の開発を完了している。さらに700級蒸気タービン実現に向けた低熱膨張性のオーステナイト系材料の開発、実用化も進めており、今後も700級への対応に向けて高温化技術開発を続けていく所存である。

参考文献

- (1) 湯上博ほか、若松超高温タービンSTEP Iの運転実績、三菱重工技報 Vol.27 No.1 (1990) p.1
- (2) 岸本勝ほか、中部電力(株)碧南3号700MWタービンの運転実績、三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994) p.2
- (3) 松隈雅治ほか、電源開発(株)松浦2号機1000MW超高温タービンの設計と運転実績、三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998) p.2
- (4) 小原一郎ほか、600級1000MW蒸気タービンの計画、三菱重工技報 Vol.32 No.1 (1995) p.3
- (5) 鎌田政智ほか、600級蒸気タービンロータ材の開発、三菱重工技報 Vol.33 No.1 (1996) p.1



田中良典
原動機事業本部
タービン技術部
タービン技術課主席



樽谷佳洋
原動機事業本部
タービン技術部
タービン技術課



馬越龍太郎
高砂製作所
タービン技術部
主席



中野 隆
高砂製作所
タービン技術部
タービン設計課



角屋好邦
技術本部
高砂研究所
材料・強度研究室
主席 工博