

中国電力(株)三隅 1 号

1 000 MW 蒸気タービンの計画と運転実績

Design and Operating Experience of 1 000MW Steam Turbine
for The Chugoku Electric Power Co., Inc. Misumi No. 1 Unit

長崎造船所 和仁正文*¹ 福田寿士*²
土屋光由*³
原動機事業本部 藤川卓爾*⁴ 山本哲也*⁵

従来、我が国の大容量火力発電プラントは主として 24.1 MPa, 538/566°C の蒸気条件が適用されてきた。三菱重工では、広範な開発を通じて高温蒸気タービンの材料及び設計を確立し、24.1 MPa, 593/593°C の蒸気条件を電源開発(株)松浦 2 号機の 1 000 MW タービンに適用した。その後、さらに高温化を進め、世界で初めて大容量機で 24.5 MPa, 600/600°C の高蒸気条件を採用した中国電力(株)三隅 1 号機の 1 000 MW タービンを設計、製作した。本機は 1997 年 12 月に初通気し、順調な試運転、各種試験の後、1998 年 6 月に営業運転を開始した。本報では三隅 1 号機の設計の特徴及び運転実績を紹介する。

Steam conditions for large-capacity fossil-fuel-burning thermal power plant in Japan have conventionally been 24.1 MPa 538/566°C. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has, through wide-scale development programs, set techniques for steam turbine design and materials at a high steam temperature and steam conditions of 24.1 MPa and 593/593°C applied to large-capacity 1 000 MW turbines, the Matsuura No. 2 Unit for the Electric Power Development Co., Ltd. Based on our high-temperature design development, MHI has developed and manufactured the 1 000 MW turbine, Misumi No. 1 Unit, for Chugoku Electric Power Co., Inc., for the first time in the world with steam condition of 24.5 MPa and 600°C and a steam reheating temperature of 600°C. The first steam admission of this unit was completed in December 1997, and underwent test runs and other tests before starting commercial operation in June 1998. This paper describes the design and operating features of Misumi No. 1 Unit.

1. ま え が き

近年、炭酸ガスによる地球温暖化及び省資源の問題がクローズアップされ、大容量石炭だき火力発電プラントのタービン入口蒸気条件を高温、高圧化することにより発電効率を向上させる努力が、タービン内部効率向上とともに進められている。中国電力(株)三隅発電所 1 号タービンでは、このような観点から石炭だき火力の最高効率化をねらい、国内初、世界的にも大容量機としては初めての高蒸気条件、主蒸気 24.5 MPa, 600°C, 再熱蒸気 600°C を採用した高効率 1 000 MW として計画され、1998 年 6 月に営業運転を開始した。蒸気温度 600°C の実用化に当っては、電源開発(株)若松超高温実証タービンを始め広範な開発が行われ、蒸気タービンの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、中部電力(株)碧南 3 号 700 MW (24.1 MPa, 538/593°C)、北陸電力(株)七尾大田 1 号 500 MW (24.1 MPa, 566/593°C)、電源開発(株)松浦 2 号 1 000 MW (24.1 MPa, 593/593°C)⁽²⁾ の各ユニットで実用化された。

三隅 1 号タービンでは、1 000 MW タービンで主蒸気、再熱蒸気温度共 600°C に対応するため、これらの確立された大容量高温タービンの技術を適用するとともに、高圧タービンロータ材には新 12 Cr 鍛鋼 (TMK-2)⁽³⁾ を採用して高温強度に対する信頼性の向上を図った。さらに、4 弁式立形主蒸気止め弁 (MSV)、蒸気加減弁 (GV) 及び 25 インチインターセプト弁 (ICV) を採用し、従来タービンの機側に配置されていた主要弁の配置を変更して保守性の向上を図っている。

2. 蒸気タービンの概要

図 1 に三隅 1 号ユニット蒸気タービンの外観及び鳥かん図を、表 1 に蒸気タービンの主要仕様を示す。タービンは、高圧、中圧タービンをプライマリ軸、二つの低圧タービンをセカンダリ軸とするクロスコンパウンド型である。

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。中圧タービンは、再熱蒸気入口 2 箇所の複流設計であり、各流は反動段 7 段から成る。主蒸気、再熱蒸気共 600°C に対応するため、高圧及び中圧ロータ材には 12 Cr ロータ材を使用しているが、特に高圧ロータ材は新しく開発した高温強度に優れた新 12 Cr 鍛鋼 (TMK-2) 材を適用している。中圧タービン入口部は高圧タービン排気蒸気を一部導入することにより冷却しており、600°C の再熱蒸気が直接ロータに触れない構造となっているので、中圧ロータ材は蒸気温度 593°C のユニットと同様、改良 12 Cr 鍛鋼 (TMK-1) 材を適用している。

低圧タービンも複流設計であり、各流は国内火力タービンとしては最大である 46 インチ ISB 最終翼を含む反動段 9 段から構成されている。

最終翼を含め各タービンの反動翼は、三次元流動解析による設計手法を取入れたインテグラルシュラウド翼 (ISB) を採用し、蒸気条件向上によるサイクル効率の向上に加え、蒸気タービン内部効率を向上させている。

従来 1 000 MW タービンでは 4 つの ICV (17 インチ) を採用していたが、本ユニットでは新しく開発した 25 インチ ICV を採用し、ICV を 2 つに減らしている。さらに、4 弁式立形 MSV、GV

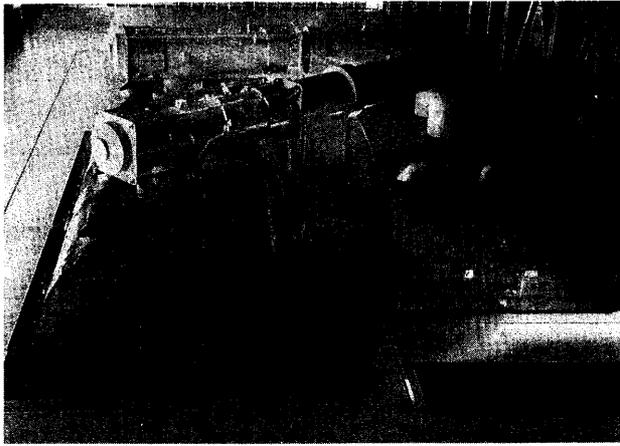
*1 火力プラント設計部次長

*2 火力プラント設計部陸用タービン設計課長

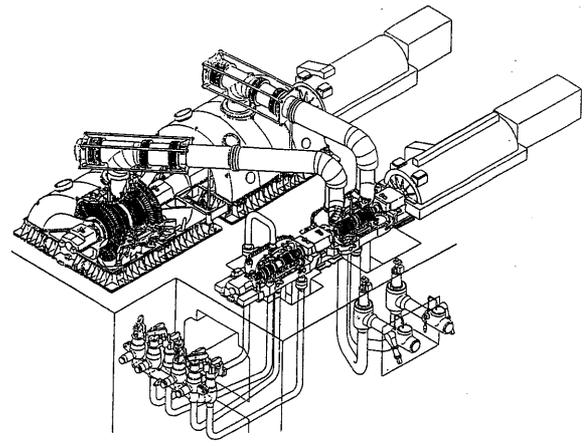
*3 火力プラント設計部陸用タービン設計課

*4 原動機技術センタータービン技術部長

*5 原動機技術センタータービン技術部タービン技術一課主務



(a) 外観



(b) 鳥かんと図

図1 三隅1号機1000 MW 蒸気タービン外観及び鳥かんと図
Misumi No.1 Unit 1000 MW steam turbine and its bird's-eye view

表1 蒸気タービン主要仕様
Major specification of steam turbine

項目	仕様
型式	二軸4流排気式再熱復水形
出力(定格)	1000 MW
蒸気条件	
主蒸気圧力	24.5 MPa
主蒸気温度	600°C
再熱蒸気温度	600°C
回転数	プライマリ軸: 3600 rpm セカンダリ軸: 1800 rpm
真空度	96.259 kPa
最終翼長	46 インチ
給水加熱器	8段

表2 高圧タービン主要材料
Materials of HP turbine

	三隅1号 (主蒸気温度 600°C)	高温タービン (主蒸気温度 593°C)	従来機 (主蒸気温度 538°C)
ロータ	新12Cr 鍛鋼 (TMK-2)	改良12Cr 鍛鋼 (TMK-1)	Cr-Mo-V 鍛鋼
ノズル室	12Cr 鋳鋼	12Cr 鋳鋼	2¼Cr-1Mo 鋳鋼
内部車室	12Cr 鋳鋼	12Cr 鋳鋼	1¼Cr-½Mo 鋳鋼
第1翼環	12Cr 鋳鋼	12Cr 鋳鋼	1¼Cr-½Mo 鋳鋼
第2翼環	2¼Cr-1Mo 鋳鋼	2¼Cr-1Mo 鋳鋼	½Cr-½Mo 鋳鋼
外部車室	2¼Cr-1Mo 鋳鋼	2¼Cr-1Mo 鋳鋼	1¼Cr-½Mo 鋳鋼
動翼	超耐熱合金 (R-26)	超耐熱合金 (R-26)	12Cr 鍛鋼
主蒸気止め弁	9Cr 鍛鋼	9Cr 鍛鋼	2¼Cr-1Mo 鍛鋼
主蒸気加減弁	9Cr 鍛鋼	9Cr 鍛鋼	2¼Cr-1Mo 鍛鋼

を採用することにより、従来タービンの機側に配置されていた主要弁 (MSV, GV, RSV, ICV) をすべてタービフロア下に配置した。また、主要弁はタービン外衣を取外すことなく天井クレーンにて開放できる位置としている。これにより、簡易点検等で主要弁だけを点検するときの作業時間の短縮及び作業性の向上を図るとともに、タービフロア上に主要弁がなくなり、タービンを開放する定期検査時の作業性の向上も図っている。

3. 三隅1号機の設計上の特徴

3.1 主蒸気温度 600°C に対する設計

三隅1号の高圧タービンで使用された材料を、538°C及び593°Cの主蒸気温度の高圧タービンと比較して表2に示す。高圧タービンでは、12Cr 鋳鋼、9Cr 鍛鋼などのフェライト系の耐熱鋼を広範囲に使用している。また、高温の動翼にはオーステナイト系超耐熱合金を採用している。これらは、蒸気温度 593°C を採用した大容量のタービンで使用されている材料である。主蒸気温度 600°C に対しても、これら実績のある材料を使用して設計可能であるが、高圧ロータ材としては、主蒸気温度 600°C の運転に対して十分なクリープ強度を持つ新12Cr 鍛鋼 (TMK-2) を採用し信頼性向上を図っている。

このロータ材は Mo 当量 (Mo+½W%) を 1.0~1.5 とし、かつ W/Mo 比を 3 以上に制御することによって、クリープ破断強度を高めたものである。静止部の材料としては、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。

主蒸気止め弁、蒸気加減弁は 9Cr 鍛鋼を採用した。また、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インテグラルシュラウド翼 (ISB) を採用し、高温化に対する信頼性を向上させている。

3.2 25 インチインターセプト弁

従来 1000 MW 機では 4 つの 17 インチ ICV を採用していたが、三隅1号機では、新しく開発した 25 インチ ICV を採用することにより、弁数を減らし保守性の向上を図っている。25 インチ ICV は流体的には実績のある 17 インチ ICV と相似設計とする一方、主要振動モードの有効剛性を 2 倍以上に強化することにより、弁の振動及び騒音が 17 インチ ICV 以下となるよう設計している。25 インチ ICV 適用に当っては、三次元流動解析及び空気モデル試験を実施し流動特性、振動特性が良好であることを確認した。

また、負荷遮断時の弁及び弁座の衝撃強度を確認するモデル試験を実施し十分な強度を有していることを確認した。

4. 運転実績と実機検証結果

4.1 新12Cr ロータ (TMK-2)

三隅1号機実機高圧ロータの機械的性質及び化学成分は各位置から採取した試験片により確認している。試験片の位置を図2に、また機械的性質を表3に示すが、すべて目標値を満たしている。各試験片から分析した化学成分を表4に示す。

一般的に大型インゴットの造塊過程では、炭素や窒素などの軽い元素が最終凝固部となるインゴットの中央部トップ側に偏析しやすい。しかしながら、本ロータでは、例えば X-1 (外周部のボトム側) と C-4 (中央部のトップ側) の成分分析結果を比較すれば明らかのように、このような偏析傾向は全く認められなかった。

表3 実機ロータ材の引張試験, 衝撃試験結果

Results of tensile and impact testing performed with rotor material

試験材採取位置	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	室温衝撃吸収エネルギー (J)	50% FATT (°C)
X-1	735	860	20	62	96	14
X-2	720	853	20	61	65	17
X-3	728	858	19	61	55	23
X-4	733	867	21	61	72	22
C-1	710	845	20	61	114	1
C-2	697	835	20	59	104	5
C-3	708	840	21	62	110	10
C-4	725	851	20	63	100	13

(注) FATT (Fracture Appearance Transition Temperature) : 破面遷移温度

表4 ロータ素材の化学成分分析結果

Chemical composition of rotor material at various region

	(wt %)												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	W	N
X-1	0.12	0.07	0.47	0.008	0.001	0.03	0.51	10.59	0.37	0.17	0.045	1.84	0.052
X-2	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.51	10.61	0.37	0.18	0.045	1.84	0.050
X-3	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.50	10.52	0.36	0.18	0.043	1.84	0.049
X-4	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.51	10.57	0.37	0.18	0.045	1.83	0.051
C-1	0.12	0.07	0.47	0.007	0.001	0.03	0.53	10.49	0.38	0.18	0.043	1.82	0.050
C-2	0.12	0.06	0.47	0.006	0.001	0.03	0.52	10.49	0.38	0.18	0.045	1.83	0.050
C-3	0.12	0.06	0.47	0.006	0.001	0.03	0.52	10.48	0.37	0.18	0.044	1.83	0.049
C-4	0.11	0.05	0.47	0.006	0.001	0.03	0.51	10.40	0.36	0.18	0.040	1.84	0.049

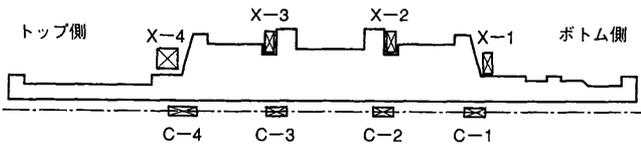


図2 実機高圧ロータ材確性試験片位置
Location of test pieces for tensile properties

また, 中心孔の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 25 インチインターセプト弁 (ICV)

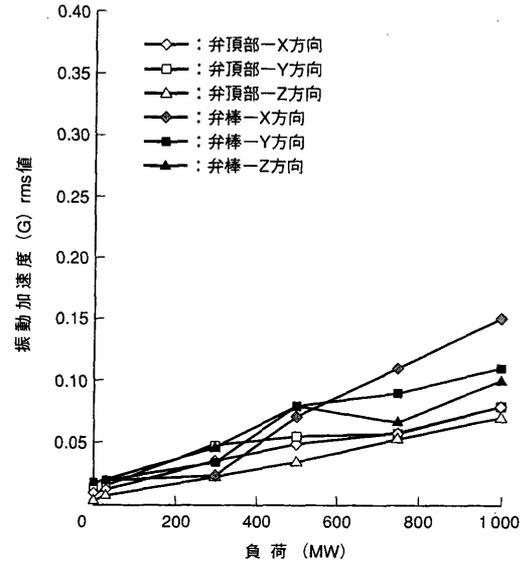
図3 (a)に負荷運転時の弁各部の振動応答を示す。これより, 25 インチ ICV の振動レベルは rms 値で 0.15 G 以下と極めて小さいレベルに抑えられており, タービン起動から 1 000 MW 定格負荷まで全く問題のない振動レベルであることが検証された。

図3 (b)に示す従来の 17 インチ ICV の振動レベルと比べても更に低振動化されており, 有効剛性を強化した設計の妥当性も確認された。

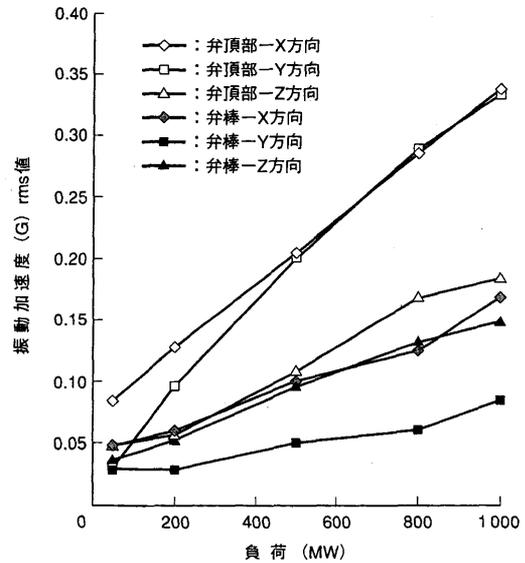
また, 図4には弁近傍の定格負荷時の騒音レベル計測結果を示す。これより, 本 25 インチ ICV 単体の発生音は 17 インチ ICV 同様十分低く低騒音弁であることが検証された。

4.3 軸振動

軸振動はユニットの運転性の重要な要素である。定格出力運転時に各軸受部で計測した軸振動値を図5に示す。三隅1号機では,



(a) 25 インチ ICV 負荷と弁各部の振動応答の関係



(b) 17 インチ ICV 負荷と弁各部の振動応答の関係

図3 25 インチ ICV 振動計測結果 17 インチ ICV より低振動化されている。
Measuring results of 25 inches ICV vibration properties

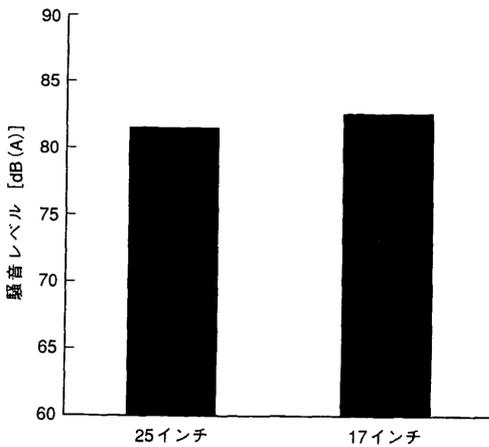


図4 25 インチ ICV 騒音計測結果 25 インチ ICV の騒音は 17 インチ ICV 同様十分低い。
Measuring results of 25 inches ICV noise properties

当社工場にてロータ単体のバランス調整を実施した後出荷しているが, 試運転時に再度バランス調整をすることなく図5に示すよ

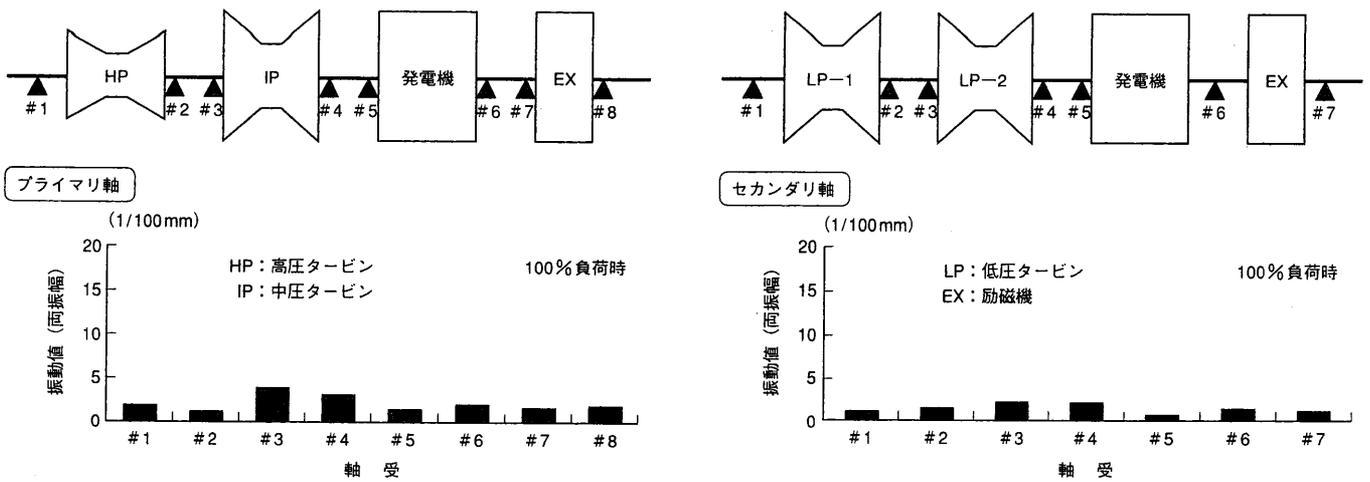


図5 軸振動計測結果 フィールドバランスを実施することなく両振幅 38 μm 以下の安定した運転が達成されている。
Shaft vibration data of Misumi No.1 Unit

うに、すべての軸振動値が両振幅 38 μm 以下の安定した運転が達成されている。

4.4 性能

本ユニットは、1000 MW 機として世界初の主蒸気、再熱蒸気温度共に 600°C を採用し、サイクル効率の向上を図るとともに、高効率反動翼の採用による内部効率の向上及び国内火力機最大長の 46 インチ最終翼による、排気損失の低減を図った高効率タービンである。

その結果、図6に示すように性能試験では全負荷において計画値(保証値)を十分上回っており、このクラスの蒸気タービンにおいては世界最高の効率を達成していることを確認した。

5. おわりに

1000 MW 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°C を採用した三隅1号機が1998年6月に営業運転を開始した。

本ユニットは、電源開発(株)若松超高温実証タービンを始めとする当社が取り組んできた15年以上にわたる広範な開発と高温タービンの製作及び運転実績を総括した最新鋭機である。

当社では、現在、電源開発(株)橘湾1050 MW (25 MPa, 600/610°C) を設計、製作中であるが、更なる蒸気条件の向上を目指し630°C 級タービンの材料開発を進めているところである。

最後に本機の設計、製作、運転に当りご指導頂いた関係者の方々に厚く御礼申上げる。

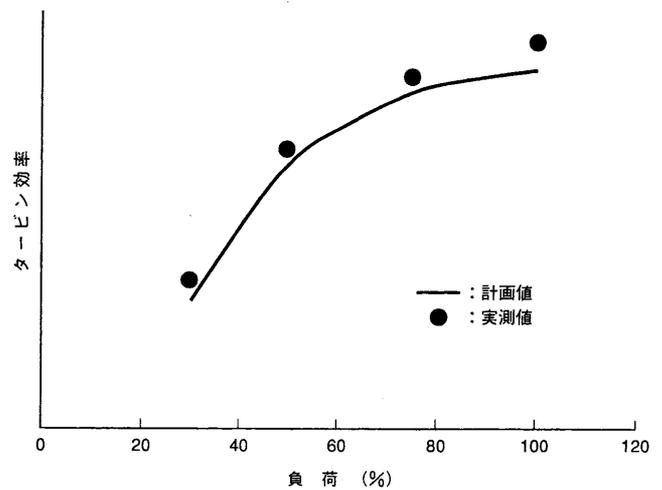


図6 三隅1号機タービン性能試験結果 タービン効率実測値は全負荷域で計画値を上回っていることを確認した。
Performance test results of Misumi No.1 Unit

参考文献

- (1) 湯上ほか、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)
- (2) 松隈ほか、電源開発(株)松浦2号機1000 MW 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)
- (3) 鎌田ほか、600°C 級1000 MW 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)