

# 電源開発(株)松浦2号機

## 1 000MW 超高温タービンの設計と運転実績

Design and Operating Experience of 1 000 MW High-Temperature Turbine  
Electric Power Development Co., Ltd. Matsuura No.2 Unit

高砂製作所	松 隈 雅 治* <sup>1</sup>	馬 越 龍 太 郎* <sup>2</sup>
	中 野 隆* <sup>2</sup>	
技術本部	田 代 光* <sup>3</sup>	
原動機事業本部	田 中 良 典* <sup>4</sup>	
電源開発株式会社	小 川 孝 之* <sup>5</sup>	

我が国では、従来 500 MW 以上の大容量火力発電プラントは、主として 246 kgf/cm<sup>2</sup>G, 538/566℃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蒸気温度 593℃の蒸気タービンの設計及び材料技術を確立し、246 kgf/cm<sup>2</sup>G, 538/593℃の蒸気条件を中部電力(株)碧南3号ユニットの 700 MW 大容量タービンに適用した。その後更に高温化設計に対する開発を進めることにより、世界で初めて大容量機で主蒸気、再熱蒸気温度共 600℃級を採用した電源開発(株)松浦2号ユニットの 1 000 MW タービンを設計、製作した。本ユニットは 1997 年 1 月に初通気し、順調な試運転、各種試験の後、1997 年 7 月に営業運転を開始している。本報では松浦2号ユニットの設計の特徴及び運転実績を紹介する。

The applicable steam conditions for large-capacity fossil-fuel thermal power plants over 500 MW in Japan have conventionally been 246 kgf/cm<sup>2</sup>G and 538/566℃. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has established, through wide-scale development programs, the technologies for design and materials of steam turbines with steam temperature 593℃, and has applied the steam conditions of 246 kgf/cm<sup>2</sup>G and 538/593℃ to the large-capacity 700 MW turbine, Hekinan No. 3 Unit for Chubu Electric Power Co., Inc. According to our further development of high-temperature design, MHI has successfully developed and manufactured the 1 000 MW turbine, Matsuura No. 2 Unit, Electric Power Development Co., Ltd. with a steam condition of 600℃ Class main steam and reheating steam temperature for the first time in the world. The unit, was first rolled with steam in January 1997, has been put to successful test run and various other tests, before starting commercial operation in July 1997. This paper describes the features of design and operating experience of the Matsuura No. 2 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。電源開発(株)松浦2号タービンでは、このような観点から石炭だき商用プラントにおいて国内初、世界的にも大容量機としては初めての主蒸気、再熱蒸気温度共に 600℃級を採用した高効率 1 000 MW タービンとして計画され、1997 年 7 月に営業運転を開始した。蒸気温度 600℃級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囲な開発が行われ、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<sup>(1)</sup>。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 ユニットで実用化され、再熱蒸気温度 593℃を採用した本ユニットは 1993 年 4 月に営業運転を開始し順調に運転がなされている<sup>(2)</sup>。松浦2号タービンでは、1 000 MW タービンで主蒸気、再熱蒸気温度共に 600℃級に対応するため、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 (HP) タービンにおける高温化技術について新たに検証、実用化している。本ユニットでは、蒸気条件の高温化によるサイクル効率の向上に加え、内部効率向上のため、三次元流動解析による設計手法を採用したインテグラルシ

ュラウド翼 (ISB) をすべての反動段に適用している。また、低圧最終翼には新開発の 46 インチ ISB を採用することにより、性能向上と信頼性向上を図っている。

これ等の新技術の計画及び検証内容については、別途報告に詳細を示した<sup>(3)</sup>。

### 2. 蒸気タービンの概要

図1に松浦2号ユニット蒸気タービンの外観及び組立断面図を、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 (IP) 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 4 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℃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 (TMK-1) 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℃級の蒸気温度に対して中圧タービンの設計及び材料技術は、中部電力(株)碧南3号ユニットで確立されており、松浦2号ユニットでは高圧タービンへの高温化技術が設計上の特徴となる。また、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

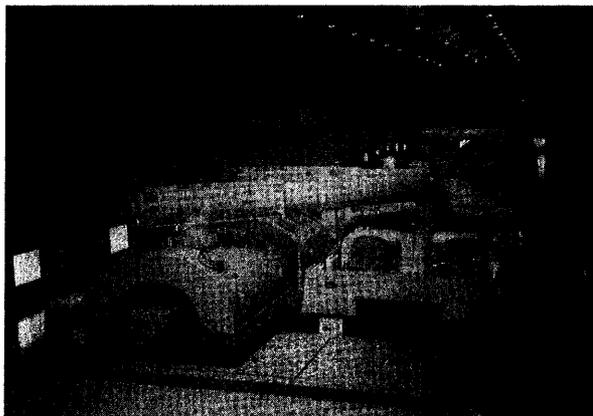
\*1 タービン技術部主管

\*2 タービン技術部タービン設計課

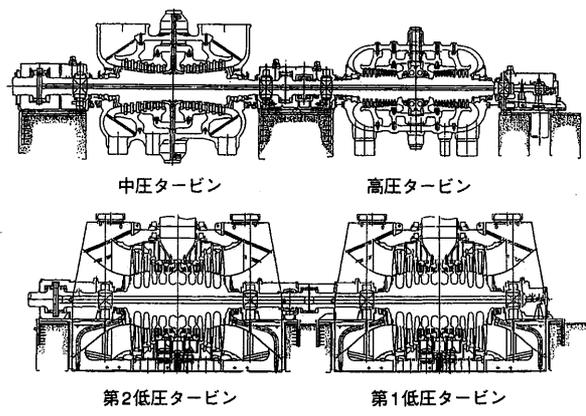
\*3 高砂研究所ターボ機械研究推進室主務

\*4 原動機技術センタータービン技術部タービン技術一課

\*5 松浦火力発電所長



(a) 外観



(b) 組立断面図

図1 松浦2号機1000 MW 蒸気タービン外観及び組立断面図  
Matsura No. 2 Unit 1000 MW steam turbine and its longitudinal section

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

項目	仕様
型式	並列型4分流排気再熱再生復水型
出力(定格)	1000 MW
蒸気条件	
主蒸気圧力	24.1 MPa (246 kgf/cm <sup>2</sup> G)
主蒸気温度	593℃
再熱蒸気温度	593℃
回転数	プライマリ軸 3600 rpm セカンダリ軸 1800 rpm
真空度	722 mmHg
最終翼長	1170 mm (46 インチ)
給水加熱器	8段

表2 高圧タービン主要部材料  
Materials of HP turbine

	松浦2号 (主蒸気温度 593℃)	従来 (主蒸気温度 538℃)
ロータ	改良12Cr 鍛鋼 (TMK-1)	Cr-Mo-V 鋳鋼
ノズル室	12Cr 鋳鋼	2 ¼ Cr-1 Mo 鋳鋼
内部車室	12Cr 鋳鋼	1 ¼ Cr-½ Mo 鋳鋼
第1翼環	12Cr 鋳鋼	1 ¼ Cr-½ Mo 鋳鋼
第2翼環	2 ¼ Cr-1 Mo 鋳鋼	½ Cr-½ Mo 鋳鋼
外部車室	2 ¼ Cr-1 Mo 鋳鋼	1 ¼ Cr-½ Mo 鋳鋼
動翼	超耐熱合金 (R-26)	12Cr 鍛鋼
主蒸気止め弁	9Cr 鍛鋼	2 ¼ Cr-1 Mo 鋳鋼
主蒸気加減弁	9Cr 鍛鋼	2 ¼ Cr-1 Mo 鋳鋼

約2.8%の熱効率向上が達成される。蒸気条件向上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、国内1000 MW 火力タービンの低圧最終翼としては最大である46インチ ISB による排気損失低減、最終翼も含めた反動段全段への三次元流れ設計翼採用による性能向上を図っている。そのほか、本ユニットはDSS (Daily Start and Stop) 対応ユニットとして、起動時間の短縮を目的に高圧タービンバイパス起動方式を採用しており、ボイラ点火から100% 負荷到達までの所要起動時間を135 min (ホットスタート) と、従来ユニットに対し大幅な起動特性の向上を図っている。

3. 600℃級主蒸気温度に対する設計上の特徴

松浦2号機の高圧タービンには、主蒸気温度の高温化に対処するため、次のような設計上の考慮が払われている。

3.1 高温用材料

松浦2号機の高圧タービンで使用された材料を、従来の538℃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、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、高温の動翼にはオーステナイト超耐熱合金を、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型12Cr 鍛鋼 (TMK-1) を採用している。12Cr ロータのジャーナル・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付き現象を防止するため、低Cr 溶接材による溶接肉盛を施工している。静止部の材料としては、優れたクリープ強度を持つ12r 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。高圧タービン入口部の主蒸気止め弁、加減弁及び弁と弁室の接続配管には

9Cr 鍛鋼を採用した。

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品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。

高圧タービンの構造上の特徴を図2に示す。ノズル室は完全複流式の溶接一体型を採用し、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、調速段ディスクに設けた冷却孔により、調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。

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。

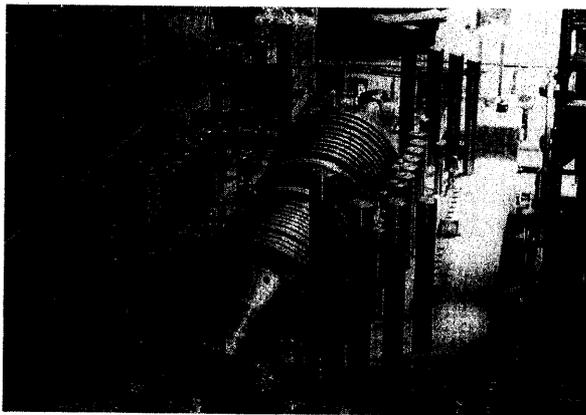
4. 運転実績と実機検証結果

4.1 改良12Cr ロータ

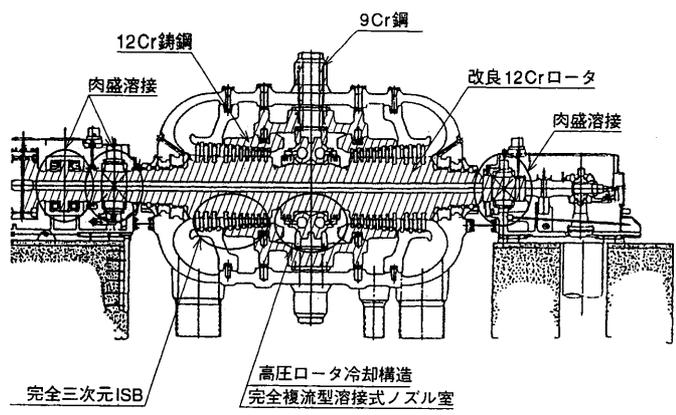
高圧及び中圧ロータに採用した改良12Cr ロータ材 (TMK-1) は、12Cr 鋼としてクリープ破断強さが強くなる1.5% Mo 当量とすることを特徴としたロータ材である。松浦2号機実機ロータの高圧及び中圧ロータの各位置から採取した試験片による機械的性質は図3に示すとおりすべて規格値を満たしており、中心孔の超音波探傷検査においても良好な結果が得られている。

4.2 肉盛溶接施工

12% Cr 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



(a) 松浦2号機高圧タービン



(b) 高圧タービンの構造と高温材料

図2 600°C級高圧タービンの特徴 従来の538°C設計に対し、高温材適用箇所を斜線で示す。  
Feature of 600°C class HP turbine

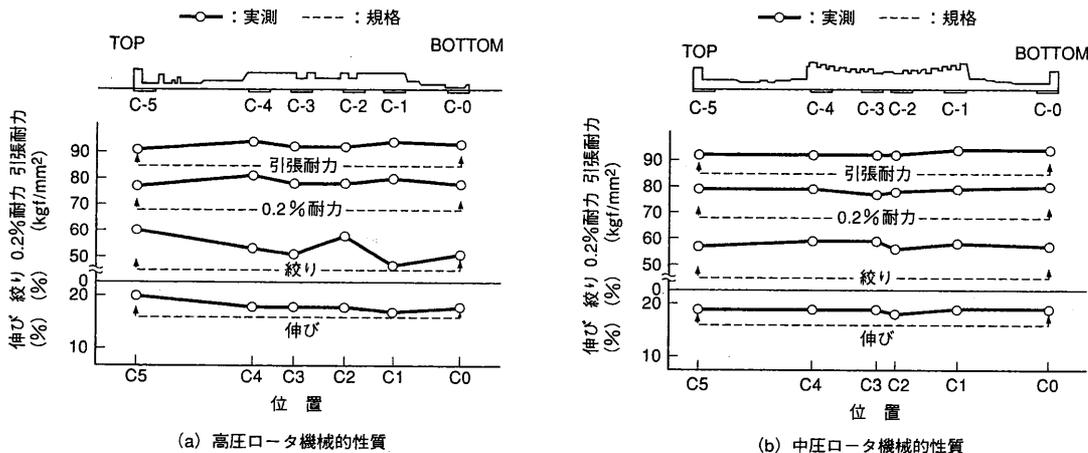


図3 松浦2号機高圧及び中圧ロータの品質 すべてのデータが要求仕様（規格）を上回った均一な特性が得られていることを示す。  
Tensile properties of Matsuura No.2 HP and IP rotor

を確立し、実機ロータの施工を実施した。実機ロータの肉盛溶接部の超音波探傷検査では、許容値（ $\phi 1.5\text{ mm}$ ）を超えるインジケーション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、実機に適用した。実機では、ノズル室～ロータ間の蒸気温度計測を行いロータ冷却性能を確認している。

図4に各負荷帯でのノズル室下部実機計測結果を示すが、ロータの経年的な曲りを防止するため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機では最長翼となる46インチ ISBについては、工場での回転振動試験、1/2スケールモデルでの実負荷試験を通じて信頼性、性能を確認した上で実機に適用した。

実機では、翼にストレインゲージを貼付け、翼に発生する応力を実運転状態においてテレメータ計測を行った。

図5に各負荷帯での実機計測結果を示す。運転中に発生する振動応力は、蒸気の乱れによるランダム振動及び高次モードの共振応力であるが、発生応力はすべての運動領域で非常に小さく、本

翼の信頼性が最終的に確認された。

4.5 高低圧タービンバイパス運転

本ユニットはDSS対応のため、主にボイラ起動時間短縮を目的とし、当社1000 MWクロスコンパウンド機として初めて高低圧タービンバイパス運用を採用している。高低圧バイパス運転の場合、タービン高圧排気圧力を高く保って起動するため、タービン昇速からバイパス運転終了までの間の風損による高圧排気温度上昇に注意する必要がある。

本ユニットでは、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。

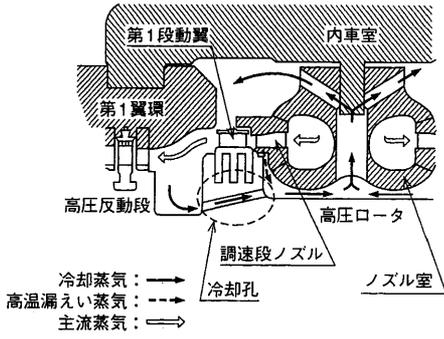
実機においては、負荷遮断試験時を含むすべてのバイパス運転状態において、高圧排気温度が許容範囲であること及びタービン伸び差に問題がなく、速度（負荷）制御性が良好であることを確認した。

ま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。

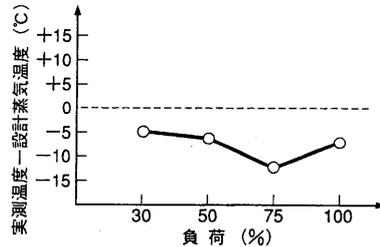
4.6 軸振動

軸振動はユニットの運転性の重要な要素である。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6に示す。

図6に示すように、両振幅振動25  $\mu\text{m}$ 以下の非常に安定した運



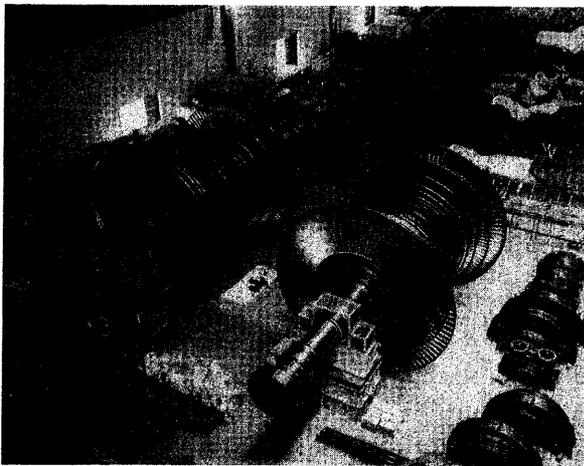
(a) 高圧ロータ冷却構造



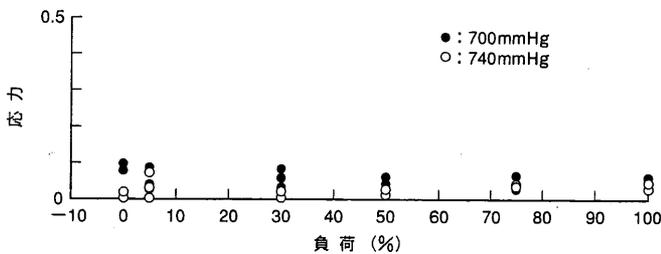
(b) ノズル室～ロータ間蒸気温度計測結果

図4 高圧ロータ冷却構造と実測結果 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。ノズル室～ロータ間蒸気温度計測値は設計温度に対し十分低いことを示す。

Cooling structure of HP rotor and test results



(a) 46インチ ISB 低圧ロータ



(b) 翼振動応力計測結果

図5 46インチ ISB 低圧 (LP) ロータと翼振動応力計測結果 全運転領域でL-0翼に発生する振動応力は非常に小さいことを確認している。46-inch ISB LP turbine rotor and blade vibration test results

転が達成されている。

#### 4.7 性能

本ユニットは、1000 MW 級として世界初となる主蒸気、再熱蒸気温度共に 600℃ 級を採用し、完全三次元流れ設計、低圧最終翼への 46 インチ ISB の採用等高効率確保のための対策を行った。

その結果、性能試験においてタービン効率は、図7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、このクラスの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

1000 MW 超臨界ユニットにおいて、世界で初めて主蒸気、再熱蒸気温度に 600℃ 級を採用した松浦 2 号機蒸気タービンが 1997 年

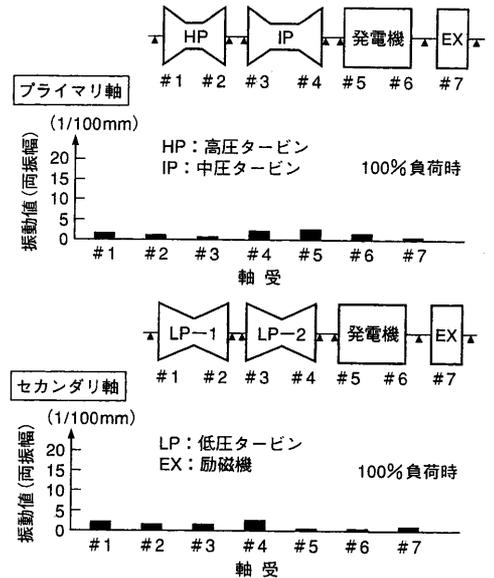


図6 松浦 2 号機軸振動計測例 両振幅 25μm 以下の安定した運転が達成されている。Shaft vibration data of Matsuura No.2 Unit

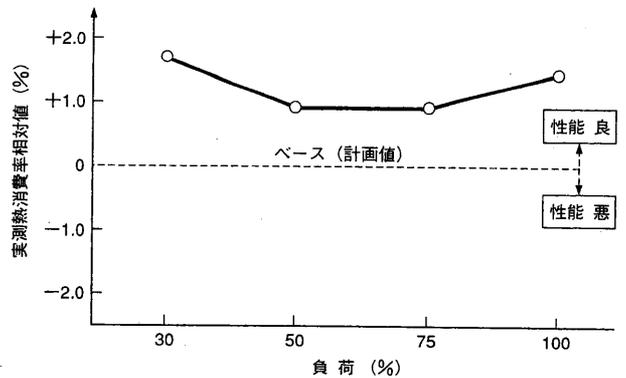


図7 松浦 2 号機タービン性能試験結果 タービン効率実測値は全負荷域で計画値を上回っていることを確認した。Performance test results of Matsuura No.2 Unit

7月に営業運転を開始し、順調に運転されている。

本ユニットはこれまで当社が取組んできた大容量蒸気タービンにおける高温化技術の集大成として、各種検証試験及び先行機実績を反映した最新鋭機である。また、高温化技術以外でも 46 インチ ISB 最終翼群を始めとする新技術により、高効率、高信頼性について十分に配慮された設計になっている。

当社では、本ユニットの玉成により、大容量蒸気タービンでの高温化技術を確立したが、今後とも更なる蒸気条件の向上、新技術の開発、信頼性の確保に努力する所存である。

最後に本機的设计、運転に当りご指導頂いた関係者の方々に厚く御礼申し上げる。

#### 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) p.1
- (2) 岸本ほか, 中部電力(株)碧南 3 号 700 MW タービンの運転実績, 三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994) p.21
- (3) 小原ほか, 600℃ 級 1000 MW 蒸気タービンの計画, 三菱重工技報 Vol.32 No.1 (1995) p.16