

高温・高効率ガスタービン MW-701 DA の開発と現地試運転実績

MW-701 DA Advanced Gas Turbine

原動機事業本部	高橋 進 ^{*1}
技術本部	森 昌彦 ^{*2}
高砂製作所	塚越 敬三 ^{*3} 正田 淳一郎 ^{*4}
	高濱 正幸 ^{*4}

地球規模の環境問題からエネルギーの有効活用が一層強く要求されている中で、コンバインドサイクルプラントは、総合熱効率の良さからも脚光を浴びており、その主機であるガスタービンの高温・高性能化は、プラント総合熱効率の大幅な改善が可能となる。当社は、本要求にこたえるため、既に大容量・高温ガスタービン 501 F/701 F を開発・製作し、さらに多様化するニーズにこたえるため、50 Hz 向けに高温・高効率ガスタービン MW-701 DA を開発した。その初号機は、世界最大のコンバインドサイクルプラントの英国 Teesside Power Ltd.に納入され、現地での検証試験実施後、既に営業運転が開始されている。

The MW-701 DA engine is an advanced version of the proven MW-701 D 50 Hz heavy duty industrial gas turbine. The engine was jointly developed by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. and Westinghouse Electric Corporation and was first put into service at a large cogeneration facility at Teesside, UK, in the spring of 1993. This paper reviews the development of the engine, including discussion on its performance and on the advanced components incorporated into it to accommodate an increase in the turbine inlet temperature. A description of specially designed verification testing, including pyrometer measurements, performed on one of the eight engines installed at the Teesside project is also included. The Teesside site, which includes two blocks of 4 GT+1 ST configuration, is the largest operating cogeneration facility in the world.

1. まえがき

地球規模の環境問題からエネルギーの有効利用が一層強く要求されている中で、コンバインドサイクルプラントは、その総合熱効率の良さからも脚光を浴びている。コンバインドサイクルプラントでは、その主機であるガスタービンの高温・高性能化により、プラント総合熱効率の大幅な改善が期待される。

当社では、昭和 56 年に 1150 °C 級大容量ガスタービン MW-701 D を開発し、天然ガスだきコンバインドサイクルプラントである東北電力(株)東新潟火力発電所において、高いプラント総合熱効率と信頼性及び低公害性を実証した。その後、ガスタービンの高温化を図るため、昭和 58 年に 1250 °C 級 MF-111 ガスタービンの開発に着手した。MF-111 ガスタービンは、高度な冷却技術が適用されており、主としてコージェネレーションプラントの分野でその優れた性能を發揮、既に 30 台の納入実績がある。また、昭和 60 年には 1350 °C 級大容量・高温ガスタービン 501 F/701 F の開発に着手した。60 Hz 向け 501 F ガスタービンは、平成元年に工場全負荷試験を成功裏に完了し、初号機は、平成 5 年初から営業運転を開始した。50 Hz 向け 701 F ガスタービンは、501 F ガスタービンをベースに開発し、平成 4 年 6 月から 2 年間にわたる性能及び信頼性の検証試験を開始した。

大容量化・高温化の一方、多様化するニーズにこたえるため、平成 2 年に、50 Hz 向け 1250 °C 級 MW-701 DA ガスタービンの開発に着手、米国ウェスチングハウス社の協力を得て開発設計を推進し、その初号機は、英国 Teesside Power Ltd.に納入、平成 5 年 2 月に現地での性能及び信頼性の検証試験を実施し、平成 5 年 3 月から営業運転を開始した。このプラントは、ガスタービン 8 台、排ガスボイラ 8 台及び蒸気タービン 2 台の主要機器から構

成されており、コンバインドサイクルプラントとして世界最大で総出力 1725 MW である。本報では、この MW-701 DA ガスタービンの技術的特徴と現地検証試験結果について紹介する。

2. MW-701 DA ガスタービンの特徴

MW-701 DA ガスタービンは、豊富な運転実績と高い信頼性を持つ MW-701 D ガスタービンの基本構造をそのまま踏襲し、MF-111, 501 F/701 F ガスタービンの高温化技術を基に要素研究で培った先端技術を適用したものである。

2. 1 全体構造

MW-701 DA ガスタービンは、図 1 にその断面を示すとおり、基本的な体格を MW-701 D ガスタービンと同一とし、従来の三菱ガスタービンの設計思想を踏襲して次の特徴を持っている。

- (1) ロータは、圧縮機軸受とタービン軸受に支えられた 2 軸受支持構造である。
- (2) 発電機軸との接続は、熱的影響が小さく、フレキシブルカップリング等の不要な、圧縮機軸端駆動方式である。
- (3) 排気方式は、コンバインドサイクル発電設備の配置に最適な軸流排気方式である。
- (4) ロータ冷却空気系統には外部冷却器及び外部フィルタを適用し、動翼及びロータのメタル温度の低減とごみ詰まりの防止を図っている。
- (5) 圧縮機側軸受は 8 本のラジアルストラット、タービン側軸受は、軸心を保ちつつ熱伸び差の吸収が容易なタンジェンシャルストラットに支持された構造である。
- (6) 圧縮機の可変の入口案内翼は、吸気流量を変化させ、コンバインドサイクルプラント総合熱効率の部分負荷特性を高めている。

*1 原動機技術統括室タービン技術部ガスタービン技術課長
*2 高砂研究所構造研究室長

*3 タービン技術部ガスタービン設計課長
*4 タービン技術部ガスタービン設計課

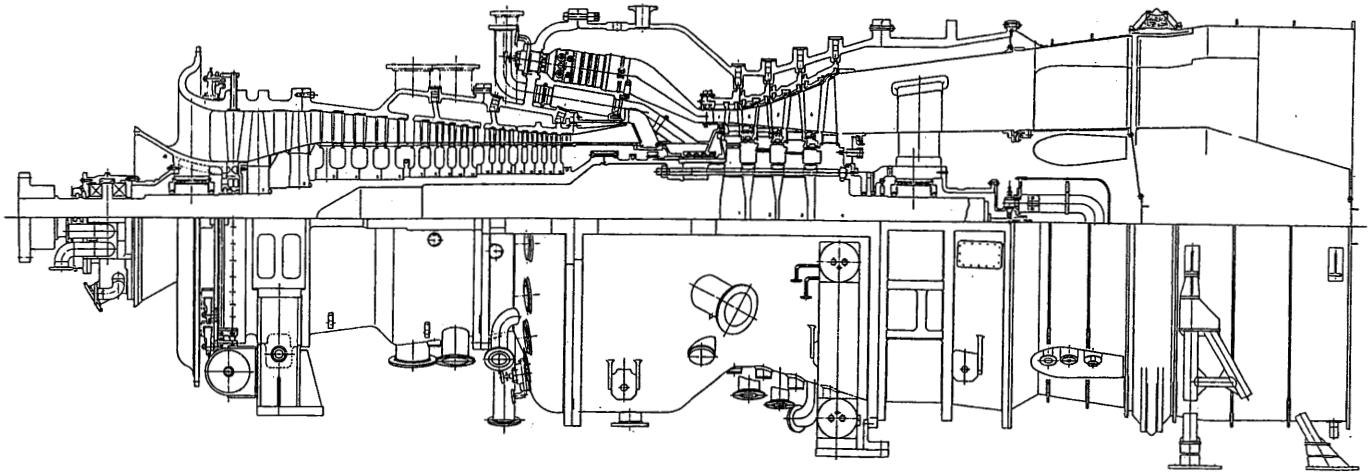


図1 MW-701 DA ガスタービン断面図 現地での検証試験実施後、平成5年3月から営業運転中。
MW-701 DA gas turbine longitudinal section

- (7) 圧縮機及びタービン動・静翼は、ロータを持上げることなしに、取外し点検が可能である。
- (8) 定期点検の容易な水平二分割構造の車室である。
- (9) 燃焼器内筒及び尾筒、第1段静翼は、車室を開放することなく取外し点検が可能である。

2.2 圧縮機の設計

圧縮機は、MW-701 D ガスタービンで実績のある高効率圧縮機をそのまま採用した。7段以降の静翼については、車室から直接ではなく、翼環による支持方式を採用して、動翼のチップクリアランスを最小に保つことにより、要素効率の向上を図るとともに、定期点検時の静翼環の取外し、及び組込みを容易にした。

2.3 燃焼器の設計

燃焼器は、MW-501 D/MW 701 D ガスタービン用の希薄拡散型低 NO_x 燃焼器 DF-42 をベースに、タービン入口温度の高温化に対応して改良した。燃焼器尾筒の壁面冷却構造は、従来のフィルム冷却方式から積層冷却方式に変更し冷却空気量を削減、燃焼用空気量を増加させることにより低 NO_x 化を図った。ガス/油両燃料だき燃焼器は、蒸気噴射方式の改良により、少量の蒸気噴射で低 NO_x 値を実現した。

2.4 タービンの設計

タービン第1~4段静翼及び第1~3段動翼の翼型は、MW-701 D ガスタービンと同一とした。タービン入口温度の高温化に伴い、無冷却翼である第4段静翼及び第3・4段動翼については、高強度材料を採用した。また、第4段動翼には、Z形シュラウド付きの翼を採用することにより、長翼の耐振動強度の強化を図った。

2.5 空冷翼の設計

タービン空冷翼は、1150 °C 級 MW-701 D ガスタービンの運転実績に基づき、図2に示すように、タービン入口温度を上昇させてもメタル温度が同レベルを保つように翼冷却効率を高めた。

タービン静翼は、第1~3段に空冷翼を採用した。その中でも最も厳しい条件下にある第1段静翼の冷却構造は、図3に示すように3個のインサートによる内面インピングメント冷却、翼面フィルム冷却、前縁部シャワーヘッド及び後縁部ピンフィン冷却構造を採用し、従来機種より大幅な冷却強化を図っている。また、第2・3段静翼についても、翼面フィルム冷却を採用して冷却を強化した。

タービン動翼は、第1・2段に空冷翼を採用した。第1段動翼

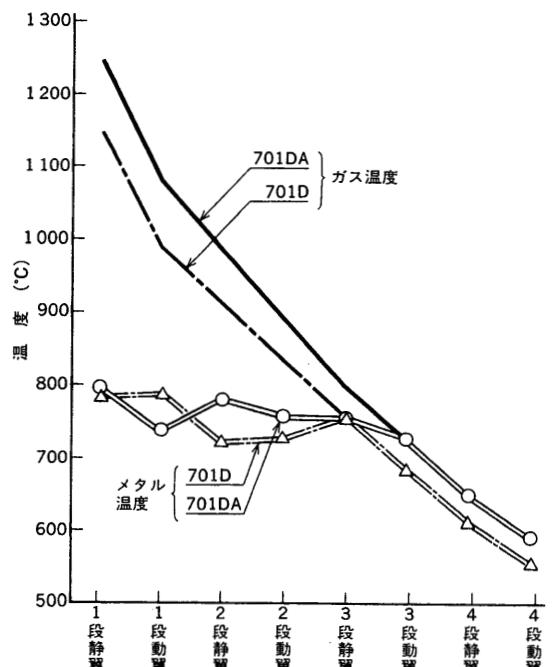


図2 タービン各段のガス温度及びメタル温度

MW-701 DA ガスタービンでは、従来機種である MW-701 D と比べてガス温度が約 100 °C 高いが、メタル温度は従来機種並である。
Turbine metal and gas temperatures

の冷却構造は、図3に示すように、タービュレータ付きマルチホール冷却、前縁部シャワーヘッド冷却構造を採用し冷却効率を高め、高強度材料を採用することにより高温化に対応した。また、第2段動翼は、マルチホール冷却の配列を変更し、後縁にマルチホール冷却穴を追加して冷却を強化した。

3. 要素試験

MW-701 DA ガスタービンの設計に当たり、基本設計の段階で、要素試験を実施し、各種設計データを取得してその結果を詳細設計に反映した。

タービン第1段動翼に適用するタービュレータ付きマルチホール冷却に対し、モデル試験を実施して、冷却効率及び通路圧損を計測し、所期の冷却効果が得られていることを確認した。

タービン第1段動静翼の冷却性能を確認するため、高温翼列試

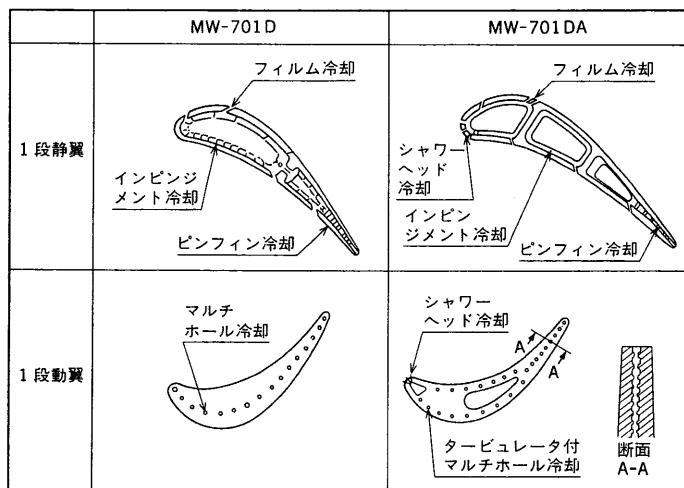


図3 タービン第1段動静翼の冷却構造
最新の冷却構造の採用により高
温化に対応した。
Improvement of cooling scheme

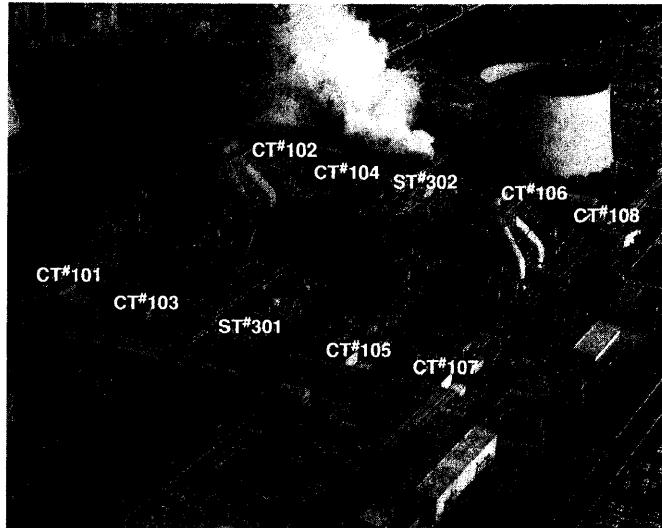


図4 プラント全景写真
ガスタービン8台、排ガスボイラ8台及び蒸
気タービン2台から構成され、コンバインドサイクルプラントとして世界最大で総出力1725MWである。写真は平成4年11月建設中のもの。
Plant aerial view

験により1250°Cのタービン入口温度条件下にて各部のメタル温度を計測した。

ガス/油両燃料だき燃焼器は、希薄拡散炎型低NOx燃焼器DF-42をベースに詳細設計を実施し、大気圧燃焼試験にて改良を加えるとともに、実圧燃焼試験にて、NOx値、燃焼安定性及びメタル温度・振動応力等について最終確認を実施した。

タービン動翼に対しては、静的加振試験を全数実施し、翼振動特性を確認した。さらに、実ロータを使用しての回転振動試験を実施し、テレメータを使用した非接触方式にて翼の固有振動数及び振動減衰特性を計測した。この結果、各動翼の振動特性は良好であり、第4段動翼のシュラウドの減衰効果が十分あることを検証した。

4. 現地検証試験

MW-701 DA ガスタービン初号機は、平成4年3月に製作を完了、出荷した。本機は、英国 Teesside Power Ltd.に納入、平成5年2月に現地にて、性能及び信頼性の検証試験を実施した。

表1 ガスタービン性能
Gas turbine performance

	計画
出力 (MW)	136.9
熱効率 (%)	34.0
排ガス温度 (°C)	536
排ガス量 (kg/s)	453
条件: ISO	燃料: 天然ガス

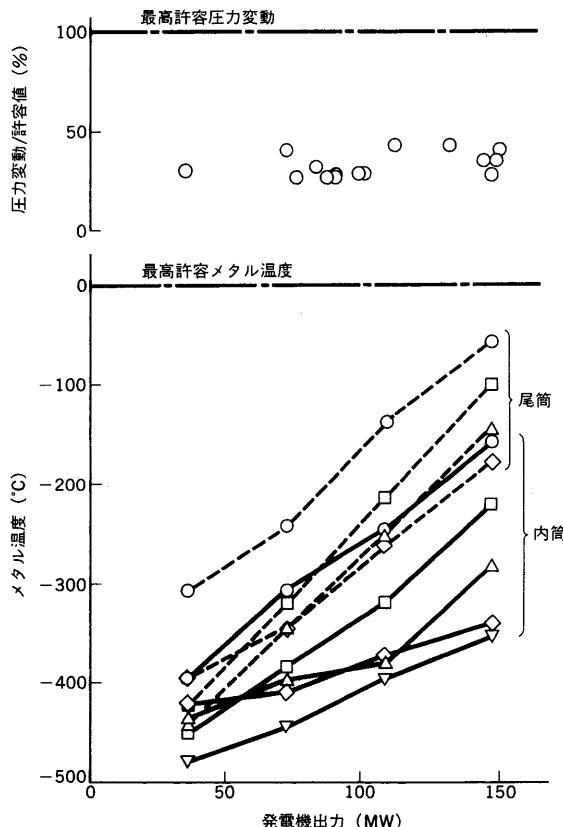


図5 燃焼器メタル温度及び内圧変動
熱電対を埋込み実測した各位置でのメタル温度は許容値以下である。また、燃焼器内圧変動実測結果も許容値以下である。
Combustor metal temperature and pressure fluctuation

このプラントは、図4に示すようにガスタービン8台、排ガスボイラ8台及び蒸気タービン2台の主要機器から構成されており、コンバインドサイクルプラントとして世界最大で総出力1725MWである。

4.1 性能

ガスタービン全体性能は、吸気流量、冷却空気量、燃料流量、発電機出力、及び各部の温度/圧力の計測結果に基づいて、ヒートバランスにより解析した。解析の結果、ガスタービン出力及び熱効率とも定格負荷条件にて表1に示す計画性能を上回っていることを確認した。

4.2 燃焼器

本プラントの主燃料である天然ガスだき時に各負荷条件下で排ガス中の窒素酸化物(NOx)、一酸化炭素等の諸数値を計測した。NOx値は、定格負荷条件にて計画より少ない蒸気噴射量にて目標NOx値である60ppm以下を達成できることを確認した。

燃焼器の信頼性検証のため、メタル温度及び内圧変動を計測した。メタル温度は内筒及び尾筒に熱電対を埋込み計測した。図5に示すとおり、各位置でメタル温度が許容値内であることを確認

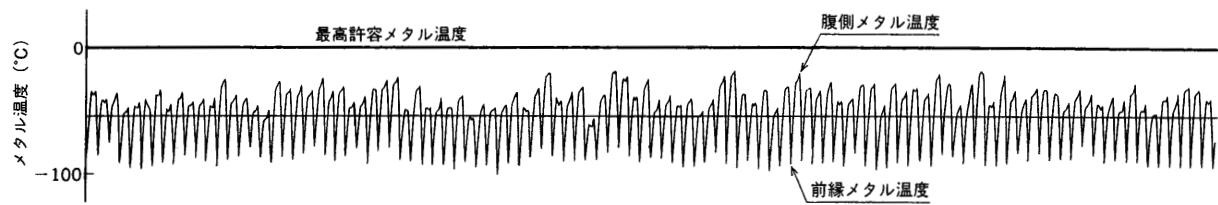


図7 タービン第1段動翼メタル温度 放射温度計(パイロメータ)を使用して、全翼のメタル温度を実測し、許容値を満足していることを確認した。シャワーヘッド冷却により、前縁のメタル温度が低くなっている。
Turbine row 1 blade metal temperature

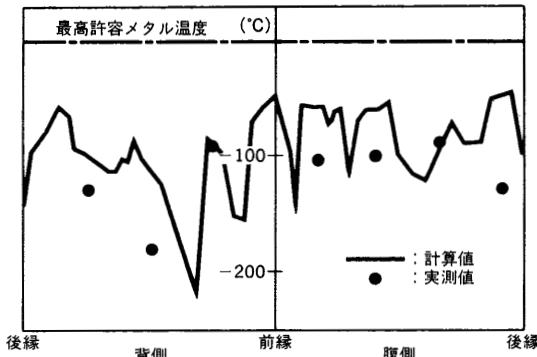


図6 タービン第1段静翼メタル温度 熱電対を埋込みメタル温度を実測した。50%翼高さのメタル温度実測結果を計算値と比較して示す。
Turbine row 1 vane metal temperature

した。また、燃焼器振動応力の発生源である内圧変動についても、高温圧力変動センサを内筒に組込み計測した結果、良好であることを確認した。

4.3 タービン動静翼

タービン第1~3段静翼のメタル温度は、熱電対を埋込み実測した。全負荷条件下における第1段静翼の平均半径断面上のメタル温度実測結果を計算値と比較して図6に示す。実測値と計算値は良く一致しており、最高メタル温度は許容値を満足している。

タービン第1段動翼メタル温度は、放射温度計(パイロメータ)を使用して全翼のメタル温度を実測した。メタル温度実測値は、図7に示すとおり、許容値を満足している。前縁メタル温度は、シャワーヘッド冷却により最小温度を示し、腹側翼面上で最高温度となっている。

5. あとがき

ガスタービンの高温・高効率化は、火力発電用コンバインドサイクルプラントの総合熱効率の大幅な向上をもたらし、エネルギー

の有効活用が可能となる。

MW-701 DA ガスタービンは、多様化する市場のニーズにこたえるため、豊富な運転実績と高い信頼性を持つ MW-701 D ガスタービンの基本構造をそのまま踏襲し、MF-111, 501 F/701 F ガスタービンの高温化技術を基に要素研究で培った先端技術を適用して開発・設計し、開発着手から約2年という短期間にて製作を完了した。平成5年2月には現地検証試験を実施、性能、冷却及び機械的特性等を検証し、コンバインドサイクルプラントとして世界最大の総出力 1725 MW での営業運転を平成5年3月から開始した。

本ガスタービンの性能及び信頼性は、世界最高レベルにあり、今後とも、高効率コンバインドサイクルプラントの主機として、社会に貢献するものと期待される。

参考文献

- (1) 橋爪, 塚越ほか, 東北電力(株)東新潟火力発電所第3号系列, 三菱高性能大容量ガスタービン(MW-701 D形)及び新形低NOx燃焼器の開発設計並びに1090 MW コンバインドサイクルプラントにおける試運転実績, 三菱重工技報 Vol. 22 No. 3 (1985) p. 8
- (2) 三賢, 塚越ほか, 150 MW 級大容量高温ガスタービン 501 F の開発, 三菱重工技報 Vol. 27 No. 1 (1990) p. 29
- (3) 高橋, 塚越ほか, 150 MW 級高温ガスタービンの工場全負荷試験, 三菱重工技報 Vol. 28 No. 1 (1991) p. 31
- (4) Entenmann,D.T., Tsukagoshi, K. et al., 501 F Development Update, ASME Paper No. 92-GT-237 (1992)
- (5) 高橋, 青山ほか, 220 MW 級大容量高温ガスタービン 701 F の開発, 三菱重工技報 Vol. 30 No. 1 (1993) p. 1
- (6) Entenmann,D.T., Tsukagoshi,K., Takahama, M. et al., 701 DA Advanced Combustion Turbine, ASME COGEN-TURBO IGTI-Vol. 8 (1993)
- (7) Kirdy,P.J., Zachary,R.E. et al., Infrared Thermometry for Control and Monitoring of Industrial Gas Turbine, ASME Paper No. 86-GT-267 (1986)