

石炭焼き火力から環境に配慮した 最新 F 形ガスタービンコンバインドプラントへのリプレース — 東北電力(株)仙台火力発電所第4号機 —

Renewal to High Efficiency GTCC Power Plant with the Latest F type Gas Turbine
- Sendai No.4 Power Station of Tohoku Electric Power Co., Inc -



木村 秀夫*¹
Hideo Kimura

井上 昌和*²
Masakazu Inoue

西村 英彦*³
Hidehiko Nishimura

藤本 喜敏*⁴
Kiyoshi Fujimoto

本多 正人*⁵
Masato Honda

東北電力(株)仙台火力発電所は昭和 34 年に営業運転を開始した石炭・重油焼き(175MW×1), 石炭焼き(175MW×2)コンベンショナルプラントを廃止し, 天然ガス焼きの最新 1400℃級大型M701F4ガスタービンを採用した一軸コンバインドプラントへリプレースを計画し, 平成 22 年 7 月に営業運転を開始した. このリプレース工事の完了によって窒素酸化物排出量をリプレース前の約1/20 へ低減, さらに二酸化炭素排出量を半分以下へ低減し, 環境性能の高い発電所として順調に運転が続けられている. また, 本プラントは“Projects of the Year 2010 Awards” (Power Engineering社主催)にてBest Gas-fired Projectに選出された.

1. はじめに

近年, 環境問題に対する人々の意識が向上し, 地球規模で環境保護対策が実施されている. その中でも地球温暖化の原因となる二酸化炭素削減は発電事業者において急務かつ重要な課題である. さらに日本国内の二酸化炭素排出量の約 30~40%は発電事業によって排出されており, 火力発電所の高効率化, 環境性能の向上への取組みは必須事項となっている.

当社はこの仙台火力発電所のリプレース工事において, 主機であるガスタービン, 排熱回収ボイラ, 蒸気タービン, その他主要補機を納入した. 本論文では高効率だけではなく, 騒音対策の強化や外観など環境及び景観にも配慮した最新ガスタービンコンバインドプラントを紹介する.

2. プラント計画概要

2.1 プラント概要と主な特徴

リプレース後の仙台火力発電所第4号機はタービン入口ガス温度 1400℃級で運転する当社最新の大容量・高効率ガスタービン(M701F4), 蒸気タービン(TC2F-40.5), 発電機が同軸上に配置される一軸形再熱式コンバインドサイクル発電システムを採用している.

(1) 高効率なコンバインドサイクル発電システムを採用

M701F4形ガスタービンは従来の当社F形ガスタービン(タービン入口ガス温度 1300℃級)からガスタービン内部の冷却技術の改良などにより, タービン入口ガス温度 1400℃級まで上昇させ, 圧縮機容量も増加させることによって, 当社G形ガスタービン(タービン入口ガス温度 1500℃級の蒸気冷却方式燃焼器採用のガスタービン)とほぼ同等のプラント出力, 効率を達

*1 原動機事業本部プラント事業部高砂プラント技術部

*2 原動機事業本部プラント事業部高砂プラント技術部首席技師

*3 高砂製作所ガスタービン技術部

*4 高砂製作所ガスタービン技術部 技術士(機械部門)

*5 原動機事業本部プラント事業部火力プラント計画部

成している。当社 G 形で採用されている燃焼器蒸気冷却系統がM701F4形では不要であるために、従来の当社F形同様に運用性が非常に高く、DSS^(注1)やWSS^(注2)運用がより容易なプラントになっている。

(注1) Daily Start and Stop (注2) Weekly Start and Stop

(2) リプレースとして廃止した既設設備の一部を有効利用

お客様施工の土工工事の一部にて、廃止した既設コンベンショナルプラントの設備を有効利用している。復水器の冷却水として使用する循環水(海水)用の水路に既設水路を再利用し、さらに既設3号機基礎の健全性を確認した上で必要な補強を実施し、新設4号機本館基礎として利用している。このように再利用可能な設備を積極的に使用しリプレース工事を完遂している。

(3) 騒音対策と外観

仙台火力発電所が特別名勝松島第2種保護地区に立地していることから、タービン建屋やボイラーなどの主要構築物は松島の自然環境と調和するように日本建築の代表的な手法である白壁と瓦葺屋根の蔵をイメージしたデザインとしている。松島-塩釜間の遊覧船にて海上から本プラントを臨むことができるが、周囲の景観を損ねることなく、調和した構築物となっている。また、変圧器やその他の設備に騒音対策として、外装防音壁を採用することで、敷地境界騒音も規定値(昼 65dBA, 朝夕 60dBA, 夜 55dBA)を大幅に下まわる騒音値に抑えることに成功し、非常に静かで、外観は自然環境と調和した発電プラントとなった。

2.2 プラント定格性能と環境性能

(1) プラント定格性能

仙台火力発電所第4号機は大気温度-3℃で総出力 446MW を発生し、プラント熱効率は58%以上(低位発熱量基準)を達成している。各機器はコンバインドプラントの出力特性を踏まえ、かつ運転制御性を考慮した仕様となっている。1400℃級ガスタービンコンバインドサイクルプラントとしては世界最高クラスの出力、効率を達成している。

(2) 環境性能⁽¹⁾

仙台火力発電所は、石炭・重油焚き(175MW×1)、石炭焚き(175MW×2)コンベンショナルプラントを廃止して天然ガス焚きのガスタービンコンバインドプラントにリプレースされた。ここでリプレース前後のプラントの環境仕様を比較する(表1)。

表1 リプレース前後の環境仕様比較^(注3)

		リプレース後	リプレース前	
		第4号機	第1号機	第2号機
プラント方式		一軸式ガスタービン コンバインドサイクル	コンベンショナル	コンベンショナル
燃料		天然ガス	石炭・重油	石炭
発電所出力		446MW (大気温度-3℃)	175MW	175MW
硫黄酸化物	排出濃度	-	186ppm	152ppm
	排出量	-	108m ³ N/h	92m ³ N/h
窒素酸化物	排出濃度	5ppm	300ppm	260ppm
	排出量	15m ³ N/h	170m ³ N/h	146m ³ N/h
ばいじん	排出濃度	-	0.15g/m ³ N	0.15g/m ³ N
	排出量	-	85kg/h	85kg/h
煙突高さ		地上高 59m	地上高 120m	地上高 120m
二酸化炭素排出量		0.362kg-CO ₂ /kWh	0.832kg-CO ₂ /kWh	0.885kg-CO ₂ /kWh
復水器冷却方式		海水冷却	海水冷却	海水冷却
復水器冷却水量		10m ³ /s	約 6m ³ /s	約 6m ³ /s
取放水温度差		7℃以下	約 10℃	約 10℃

石炭・重油焚きのコンベンショナルプラントから天然ガス焚きのガスタービンコンバインドサイクルプラントに転換されたことにより、硫黄酸化物、ばいじんは排出されなくなり、窒素酸化物も従来の約1/20^(注3)と大幅に低減した。さらに地球温暖化の原因となる二酸化炭素は半分以下に低減された^(注3)。建設試運転中の100%負荷運転時における煙突入口排気ガス測定の結果、硫黄酸化物濃度は定量下限値(5volppm)未満、窒素酸化物濃度は5ppm(O₂=16%)未満、ばいじん量は定量下限値(0.001g/m³N)未満であることを確認している。

また、コンバインドプラントにすることで、復水器冷却水である循環水の取水流量及び取放水温度差を低減し、プラント系外(海洋)への排熱も低減している。

(注3) 環境評価時点で3号機廃止済みのため、リプレース前1,2号機とリプレース後4号機を比較している。

3. 主要機器の特徴

3.1 ガスタービン⁽²⁾

M701F4形ガスタービンは50Hz用の最新鋭F形ガスタービンとして、十分な実績を持つM701F3形ガスタービンをベースとし、圧縮機風量を増加、タービン入口温度を上昇させ、大出力化・高効率化を図ったガスタービンである(図1)。

圧縮機については前方6段の翼高さを増加させ吸気流量の増加を図った。本手法は60Hz用のF形ガスタービンであるM501F3形ガスタービンで実績のある手法である。また吸気流量の増加に伴う損失の低減を図るため、変更した前方6段の動静翼については、CFDを用いた最適化設計を行い、当社G形ガスタービンにて実績のある最新の翼形状に変更している。これらの変更により損失の増加を抑制しつつ吸気流量をF3形と比較し約6%増加させ、出力増加を可能にした。

タービンについては、タービン入口温度の上昇に伴い、動静翼の冷却強化を図り、信頼性を確保するとともに、熱効率の向上を可能にした。

またタービン最終段動翼については、吸気流量増加による排気損失低減のため、長翼化を図りM701G形の最終段動翼を採用している。本翼はM701G形で長期間の運転実績のある翼である。また長翼化に伴い、最終段動翼下流の排気ディフューザ形状もこれに合わせて改良を行い、更なる排気損失の低減とタービン性能の向上を図っている。

本ガスタービンの初号機となるため、現地試運転においては圧縮機吸気流量やタービン翼メタル温度をはじめ、圧縮機、燃焼器、タービン、及び排気まで約500点以上の計測を行い、所定の性能及び信頼性を有することを確認した。

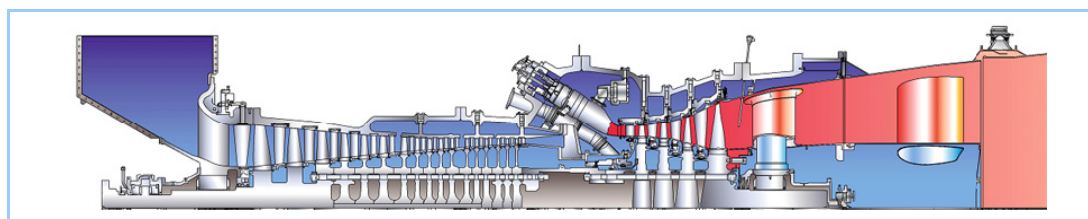


図1 M701F4形ガスタービン断面図

3.2 ガスタービン燃焼器

従来のF形からタービン入口温度を上昇させたことに伴い、当社G形の低NO_x化及び燃焼振動抑制技術と、F形で豊富な実績のある空気冷却技術を組み合わせた燃焼器を新たに開発した(図2)。

従来の当社乾式予混合燃焼器の基本構成を踏襲し、8本の予混合メインバーナを小型のパイロットバーナで保炎するマルチノズル構造で、燃焼領域の燃空比を調整可能な空気バイパス機構を有する。NO_xは局所の火炎温度に対して指数関数的に発生することから、低NO_x化には均一な予混合気の形成がキーポイントとなる。メインノズルについては、当社の最新G形に適用して

いる⁽³⁾技術を適用した。燃料ノズルとスワラ(空気旋回翼)を一体化した構造で、従来のF形のノズル及びスワラと比較して、より均一な予混合気を形成することができる。また保炎器の改良⁽⁴⁾により希薄予混合火炎を安定して燃焼することが可能である。また、内筒及び尾筒はMTフィン構造⁽⁴⁾の空気冷却方式となっており、豊富なF形での運転実績を基に冷却空気量の最適化を図っている。

燃焼振動抑制技術としては、当社G形及びF形で実績のある音響ライナを設置している。音響ライナは燃焼器内の圧力変動(音響エネルギー)を熱エネルギーに変換して消散させるもので、高周波の燃焼振動を抑制する⁽⁴⁾。また、運転中の燃焼器内圧変動を常時監視し、燃焼振動レベル増加の予兆を検知して自動的に運転パラメータを調整するA-CPFM^{(注4)(4)}を設置している。

試運転においては、燃焼器についてもメタル温度などを計測して機器の健全性を確認するとともに、タービン入口温度の上昇にもかかわらず、従来のF形と同等以下のNOx排出特性を有することを確認した。

(注4) Advanced Combustion Pressure Fluctuation Monitoring

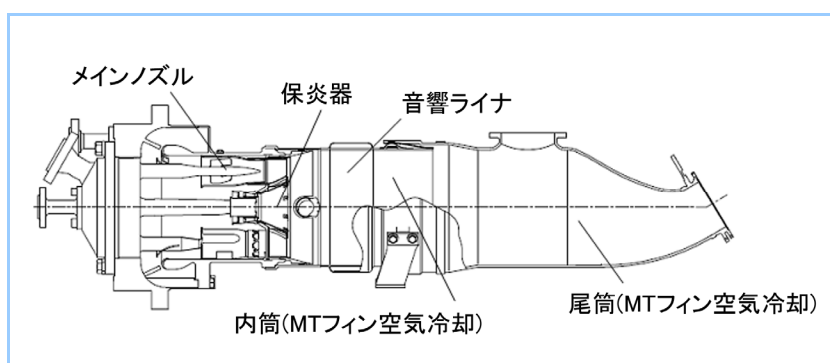


図2 M701F4 形ガスタービン燃焼器

3.3 蒸気タービン

蒸気タービンには、排熱回収ボイラの発生蒸気流量に適した実績のある2車室タービンを採用し、最新の三次元流動解析により設計された高効率反動翼、並びに40.5インチISB^(注5)最終翼群などを採用することにより高効率化を図っている。蒸気タービン断面図を図3に示す。

(注5) Integral Shroud Blade

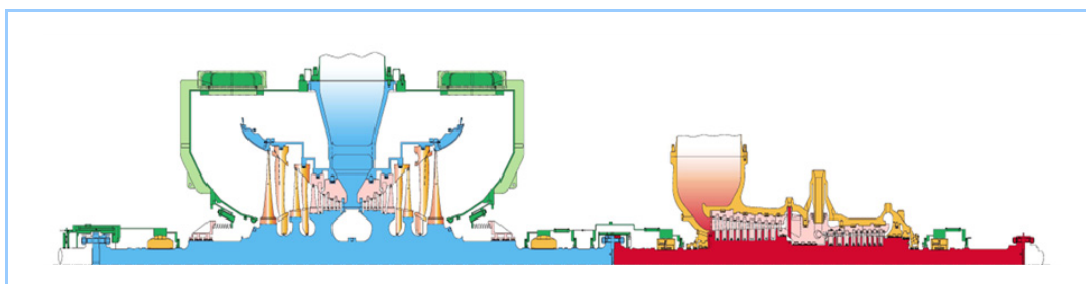


図3 蒸気タービン断面図

3.4 排熱回収ボイラ

排熱回収ボイラは煙突を上部に配置した縦型三圧再熱自然循環型を採用し、高温ガスタービン採用に伴う排ガス温度の上昇により、高圧主蒸気 550℃、再熱蒸気 566℃(蒸気タービン入口)の高温蒸気条件を適用し、高効率化を図っている(図4)(表2)。

排熱回収ボイラの伝熱管は蒸気条件、並びに次項に述べる給水利用による熱回収システムを考慮した最適な配置構成としており、また、伝熱管モジュールを工場で大型ブロック化して現地搬入することで、現地工事期間の短縮と信頼性の向上が図られている。

表2 主要機器の諸元

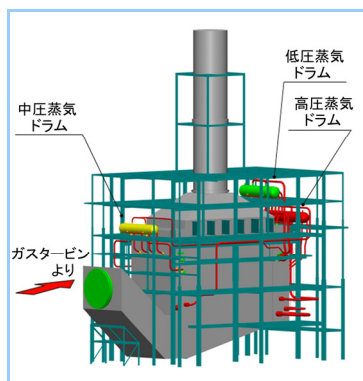


図4 排熱回収ボイラ

プラント全般	方式	一軸式ガスタービンコンバインドサイクル		
	燃料	天然ガス		
	発電所出力	446 000kW		
	ユニット構成	446 000kW×1 基		
ガスタービン	復水器冷却方式	海水冷却		
	数量	1台		
	種類	開放単純サイクル一軸形		
	タービン入口温度	1 400℃級		
排熱回収ボイラ	回転速度	3 000min ⁻¹		
	数量	1台		
	種類	排熱回収三重圧式		
	最大蒸発量	(高圧)	310t/h	
		(中圧)	76t/h	
(低圧)		55t/h		
蒸気タービン	数量	1台		
	種類	くし形二流排気式再熱混圧復水形 TC2F-40.5		
		蒸気条件 (入口圧力)	(高圧)	11.8MPa
			(再熱)	2.87MPa
	蒸気条件 (入口温度)	(低圧)	0.38MPa	
		(高圧)	550℃	
		(再熱)	566℃	
回転速度	3 000min ⁻¹			
発電機	数量	1台		
	種類	横軸円筒回転界磁形同期発電機		
	容量	496 000kVA (水素圧力 0.4MPa)		
	電圧	21kV		
	冷却法	水素冷却		
	周波数	50Hz		
回転速度	3 000min ⁻¹			

3.5 TCA クーラ^(注6)及び FGH^(注7)

更なる高効率化を図るために、TCA クーラと FGH をボイラ給水システムに組み入れ、プラントサイクルから排出される熱ロスを最小限に抑えている。

従来のTCAクーラはガスタービンの冷却空気を適切な温度へ減温する際に得られた熱を効果的に回収できておらず、プラントの系外(大気又は海水)に排出していた。しかし、本プラントのTCAクーラはガスタービン冷却空気とボイラ給水を熱交換させることにより、排熱回収ボイラの蒸気発生に寄与させている。また、排熱回収ボイラにて加熱されたボイラ給水を利用して FGH にて燃料ガスを加熱し、ガスタービン入口の燃料ガス温度を上昇させ、ガスタービン効率を向上させることにより、プラント全体としての更なる高効率化を図っている。

(注6) Turbine Cooling Air クーラ (注7) Fuel Gas Heater

4. まとめ

東北電力(株)仙台火力発電所は最新技術を導入したガスタービンコンバインドプラントとして生まれ変わり、期待どおりの成果を発揮している。特別名勝松島第2種保護地区の自然環境と調和する外観であり、さらに環境・出力・効率の各性能も 1 400℃級ガスタービンとしては世界最高クラスを達成した。今後も環境に優しい主要電源として地域の電力供給に貢献できるものと信じている。

参考文献

- (1) 東北電力株式会社, 仙台火力発電所リプレース計画, 環境影響評価書
- (2) Chiba, H. et al., "Replacement plan of Sendai thermal power station, Unit No.4," ACGT2009-TS54
- (3) Tanimura, S. et al., "Advanced Dry Low NOx Combustor for Mitsubishi G Class Gas Turbines," ASME GT-2008-50819
- (4) 田中克則ほか, 環境に貢献するガスタービン燃焼器技術, 三菱重工技報, Vol.46 No.2 (2009) p.7~12