

# 世界最高熱効率と最高水準の運用性を両立させた 東北電力株式会社上越火力発電所第1号機

Achievement the World's Highest Thermal Efficiency and High Flexibility  
Joetsu Thermal Power Station Unit No.1, Tohoku Electric Power Co., Inc.



井上 昌和\*<sup>1</sup>  
Masakazu Inoue

原田 敬広\*<sup>2</sup>  
Takahiro Harada

巽 直也\*<sup>3</sup>  
Naoya Tatsumi

西海 高史\*<sup>3</sup>  
Takashi Nishiumi

上見 拓也\*<sup>4</sup>  
Takuya Uwami

田中 健登\*<sup>5</sup>  
Kento Tanaka

東北電力株式会社上越火力発電所第1号機は三菱重工業株式会社(以下、当社)1650℃級 JAC 形ガスタービンを採用し、2022年12月に運転開始したプラントであり、プラント熱効率は世界最高の63.62%を実現した。一般的に熱効率とトレードオフの関係にある運用性に関しても、従来のガスタービンコンバインドプラントから起動時間は約25%短縮、発電出力変化速度は約3倍に向上、最低出力は定格出力の25%まで低減しており、変動の大きい再生可能エネルギー導入拡大促進も期待できる。高効率、高運用性によりさらなる環境負荷低減、カーボンニュートラル達成に向けた電力事業の発展に貢献するものと思われる、当該プラントの特徴に関して述べる。

## 1. はじめに

近年、SDGs<sup>(注1)</sup>の広がりからみられるように人々の環境への意識は高く、二酸化炭素排出量低減による環境負荷低減や、変動の大きい再生可能エネルギーの導入に伴う電力供給量の調整機能が火力発電所には期待されている。当社は東北電力株式会社上越火力発電所第1号機(上越1号機)に最新機種である JAC 形ガスタービン、排熱回収ボイラ、蒸気タービン、その他主要補機を納入し、世界最高熱効率のガスタービンコンバインドプラント(GTCC: Gas Turbine Combined Cycle)を実現した。また、一般的に高い熱効率とトレードオフの関係にある高い運用性を両立させたプラントとなっており、東北電力株式会社含め社外から高評価をいただいた。

(注1) SDGs : Sustainable Development Goals

## 2. プラント計画概要

### 2.1 プラント概要と主な特徴

#### (1) 主要設備諸元

上越1号機のプラント主要設備諸元と概略工程を表1に示す。

\*1 エナジードメイン GTCC 事業部 プラント計画部 主幹技師 技術士(機械部門)

\*2 エナジードメイン GTCC 事業部 高砂プラント技術部

\*3 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部

\*4 エナジードメイン GTCC 事業部 蒸気タービン技術部 主席技師

\*5 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部

表1 発電設備仕様と概略工程

プラント全般	発電機端出力	572000kW
	ユニット構成	572000kW×1基(新地点)
ガスタービン	形式	M701JAC
	タービン入口温度	1650℃
	圧力比	25
蒸気タービン	形式	TC2F-40.5 側方排気
	蒸気条件	高压 16.4MPaG × 600℃
		再熱 3.35MPaG × 600℃
低压 0.41MPaG × 325℃		
排熱回収ボイラ	種類	横型再熱三重圧自然循環型
	最大蒸発量	高压 403t/h
		中圧 62t/h
低压 49t/h		
発電機	種類	横軸円筒回転界磁形同期発電機
	冷却方法	水素間接冷却
工程	2018/1 契約 2021/5 主機オンベース 2022/3 着火 2022/3 並列 2022/12 運転開始(契約時 2023/6)	

## (2) 主機構成

上越1号機は、当社最新の大容量・高効率 1650℃級ガスタービン(M701JAC)、発電機、蒸気タービン(TC2F-40.5)を同軸上に並べ、発電機と蒸気タービンの間に SSS クラッチ<sup>(注2)</sup>を設けた一軸 CGS 配置<sup>(注3)</sup>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。CGS 配置かつ、蒸気タービン排気方向を従来の方ではなく側方とすることにより、地中への掘り込み量を最小限かつ発電所建屋の高さを低くすることで建設コストを低減させている。(図1)

(注2) SSS クラッチ : Synchro Self Shifting(自動同期)クラッチ

(注3) CGS 配置 : Gas Turbine (Combustion Turbine) - Generator - Steam Turbine の並びで配置される軸構成



図1 タービンフロア外観

## 2.2 プラント性能と環境性能

### (1) プラント性能

上越1号機に採用されている M701JAC 形ガスタービンは、高い発電熱効率が評価され、各国で稼働実績の多いJ形ガスタービン(タービン入口温度 1600℃級)をベースに、強制空気冷却システム等の採用により、タービン入口温度を 1650℃級まで向上させ、さらなる高効率化を実現した。

その結果、プラント発電熱効率は 63.62% (低位発熱量基準)となり、Guinness World Records による“世界で最も効率の高いコンバインドサイクル発電設備(Most efficient combined cycle power plant)”のギネス世界記録™認定(2023年1月24日)を受けた。

### (2) 環境性能

強制空冷システムでは燃焼ガス中への冷却空気の混入が少なく、燃焼温度とタービン入口温度を同等とすることができることから窒素酸化物の発生を抑制できる。上越1号機における環

境性能実績を表2に示す。

また、熱効率向上に伴う燃料消費量の減少により二酸化炭素排出量も大幅に削減できている。

表2 上越1号機 環境性能

上越1号機環境性能(実績)		
窒素酸化物	排出濃度	3ppm
	排出量	12 m <sup>3</sup> N/h
硫黄酸化物	排出濃度	— (注4)
	排出量	— (注4)
ばいじん	濃度	— (注4)
	排出量	— (注4)

(注4) 計測可能下限値以下

## 2.3 運用性

JAC 形ガスタービンはJ形で採用されている燃焼器冷却蒸気系統は不要であり、ガスタービンのタービンクリアランスコントロールの適用や蒸気タービンロータ形状の改良等により、従来型のコンバインドサイクル発電設備と比較し、プラント起動時間の短縮、発電出力の変化速度向上、最低出力の低減といった高い運用性を可能とした。上越1号機における運用性能実績を表3に示す。

表3 上越1号機 運用性能

	上越1号機 実績	経産省 WG <sup>(注5)</sup> GTCC 目標	経産省 WG <sup>(注5)</sup> GTCC 現状	経産省 WG <sup>(注5)</sup> 貫流石炭火力現状
起動時間	41 分	30 分	60 分	4 時間
出力変化速度	15%/min	14%/min	1~5%/min	1~3%/min
最低出力	25%	25%	50%程度	30%

(注5) 第32回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会  
電力・ガス基本政策小委員会 系統ワーキンググループ

## 3. 主要機器の特徴

### 3.1 ガスタービン

M701JAC 形ガスタービンは実績あるJ形ガスタービンに対して先進技術を取り入れることで、プラント高効率化のためにタービン入口ガス温度を 1650℃まで高温化した最新鋭ガスタービンである。

具体的な技術は以下のとおり(図2)。

#### (1) 強制冷却燃焼器システム

東北電力株式会社と当社で共同開発した、強制空冷燃焼器システムを採用することで、従来の蒸気冷却燃焼器に対して、タービン入口ガス温度を 1600→1650℃に高温化するとともに、起動時に外部からの冷却用蒸気が不要となることで、プラント全体としての起動時間を短縮。

#### (2) TBC<sup>(注6)</sup>厚膜化

国家プロジェクト及び東北電力株式会社との共同研究によって得られた技術をベースに、従来よりも更に遮熱性を向上させた超厚膜化 TBC を適用することでガス温度を上昇させながら燃焼器及びタービン翼の信頼性を確保。

(注6) TBC : Thermal-Barrier-Coating

#### (3) タービンクリアランスコントロール

一般に、タービン回転体と静止体の熱膨張の違いにより、タービンクリアランスは発電設備起動時や出力変化中に狭くなり、定格出力運転中は広がる傾向がある。燃焼器を冷却する強

制冷却空気をタービン回転翼の外周に位置するタービン翼環に出力に応じて適切な量を供給することで、起動・出力変化時はクリアランスを拡大し出力変化速度を向上し、出力一定運転時はクリアランスを縮小させ効率を向上することで、高効率化と高運用性を確保。

(4) 高圧力比圧縮機

当社の M501H 形の実績も踏まえつつ圧力比 25 の高圧力比圧縮機を採用することで排ガス温度の上昇を抑制し、排熱回収ボイラや蒸気タービンへの熱影響を低減。

これらの技術の性能、及び信頼性を確認するため、上越火力発電所現地にて 1500 点以上の大規模な特殊計測を実施し、圧縮機の空力安定性、燃焼器/タービン翼のメタル温度、圧縮機/タービンのチップクリアランスなど、約4か月にわたり各要素の起動から定格出力の詳細な運転データを取得。この得られたデータで判明した問題点は東北電力株式会社と随時共有しながら改良を実施することで、信頼性を確保しながら性能の向上、及び運用性の向上の両立を実現。

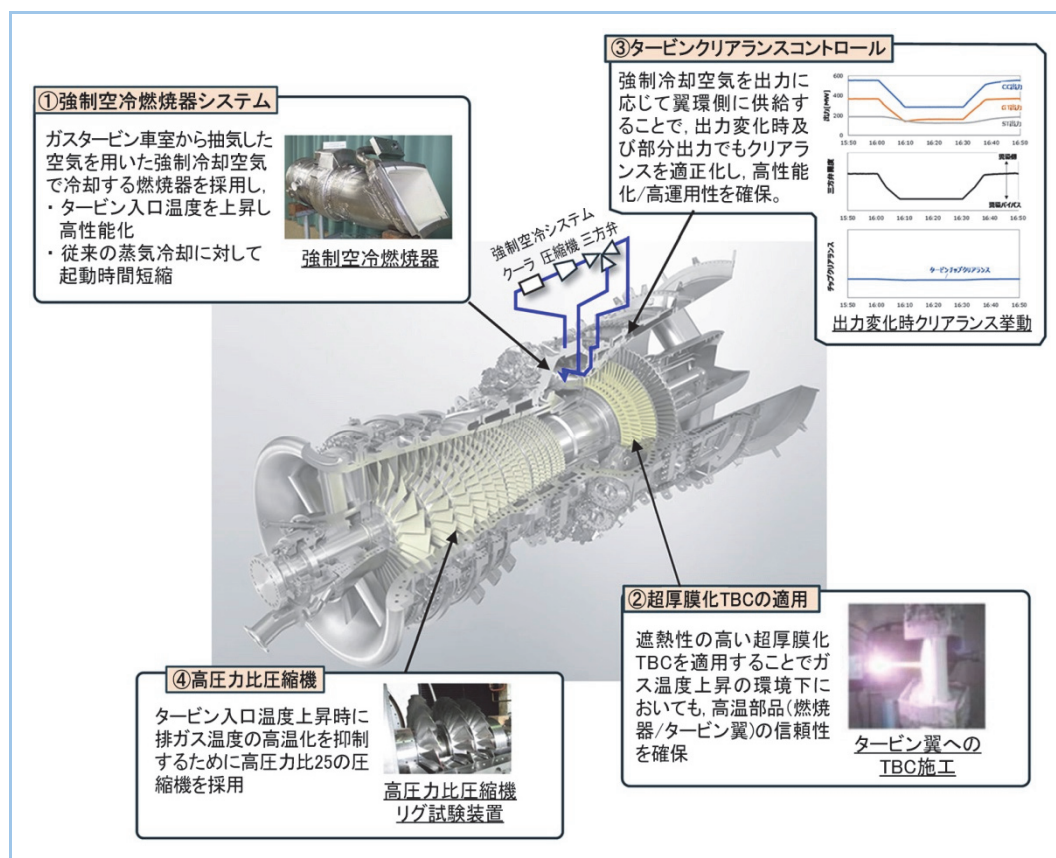


図2 JAC 形ガスタービンの特徴

3.2 蒸気タービン

蒸気タービンは、排熱回収ボイラの発生蒸気流量に適した実績のある2車室のタービンを採用のうえ、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<sup>(注7)</sup> 最終翼群などの採用により高効率のタービンとした。

(注7) Integral Shroud Blade

さらに次世代機として開発した、排気損失を低減させた側方排気型低圧タービンの採用により建屋高さを低減、止め弁・加減弁一体型主要弁を採用しコンパクトな配置を達成した。また、従来よりも高い軸受面圧に耐えうる高面圧型軸受や、新型シール構造などの当社最新技術も採用しており、いずれの技術についても、当社工場内の実証試験設備により試験・検証を完了させた上、信頼性の高い技術として採用、更なる効率向上を実現した。

蒸気タービン断面図を図3に、側方排気型蒸気タービンの特徴を図4に示す。



図3 蒸気タービン断面図

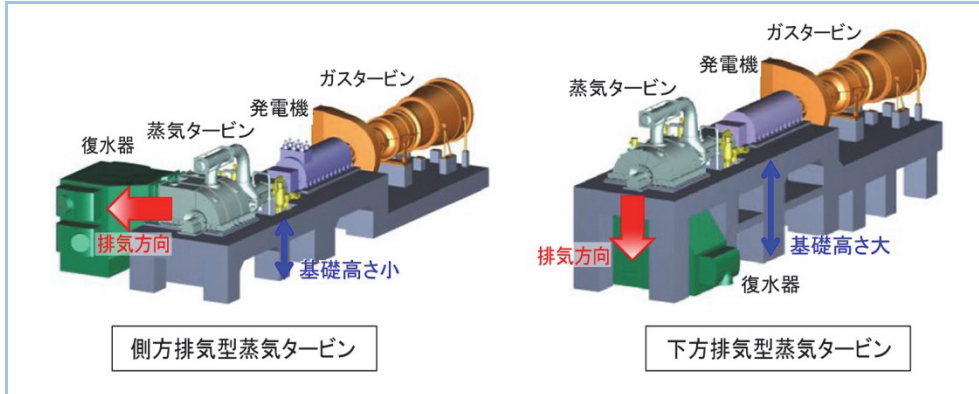


図4 側方排気型蒸気タービンの特徴

### 3.3 排熱回収ボイラ

上越1号機の排熱回収ボイラは横型再熱三重圧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 600℃、再熱蒸気 600℃(蒸気タービン入口)の高温蒸気条件を適用し、熱効率の向上を図っている。再熱三重圧方式を採用していることから、高圧、再熱、中圧及び低圧系を有する系統構成となるため、流体温度特性を踏まえ、ガスタービンからの排熱を効率よく吸熱できる管群配置としている(図5)。

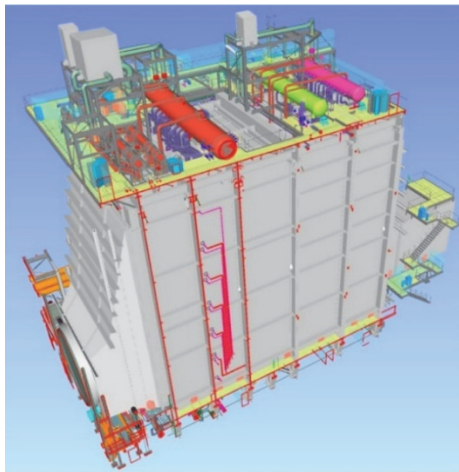


図5 排熱回収ボイラ

さらなる熱効率の向上を図るためにTCAクーラ<sup>(注8)</sup>とFGH<sup>(注9)</sup>をボイラ給水システムに組み込み、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。TCAクーラで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、ガスタービン熱効率向上に寄与している。

また、環境対策として排熱回収ボイラ内部には排ガス中に含まれる窒素酸化物(NOx)を還元反応により窒素と水に分解する脱硝装置を設置し、長年培った技術により大気に放出される排ガスの中の窒素酸化物を低減し、高い脱硝率を達成している。

(注8) Turbine Cooling Air クーラ

(注9) Fuel Gas Heater

## 4. まとめ

東北電力株式会社上越火力発電所第1号機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、世界最高熱効率を達成、高い経済性及び環境負荷低減の成果を発揮し、地域の電力供給に貢献している。また、同時に実現した高い運用性により電力系統の安定化に留まらず、再生可能エネルギー導入拡大促進によるさらなる環境負荷低減、需給インバランス低下による運用コスト削減等、カーボンニュートラル達成に向け、電力事業の発展、さらには産業発展に資するものであると信じている。

なお、上越1号機はこれらの実績が評価され、以下の社外表彰を受賞している。

- ・ 平成 30 年度 優秀省エネ機器・システム表彰 経済産業大臣賞 (JAC 形ガスタービン)
- ・ Guinness World Records による発電効率世界最高記録認定 (2023 年1月 24 日, 最も効率の高いコンバインドサイクル発電設備) (上越1号)
- ・ 2023 年 第 52 回 日本産業技術大賞 審査委員会特別賞 (上越1号)