

電源開発(株)竹原火力発電所新1号機 蒸気タービンの最新技術

Latest Technologies for Steam Turbine for Takehara Thermal Power Station New Unit 1 of J-POWER

高江 俊介 TAKAE Shunsuke

低炭素社会の実現に向け、火力発電システムの更なる効率向上を目指した技術開発が進められている。電源開発(株)は、高効率化と環境性能の向上を図るために、竹原火力発電所内の2基の既設設備を廃止し、超々臨界圧(USC)発電方式の新1号機への更新を進めており、2020年の運転開始を計画している。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、竹原火力発電所新1号機の電気発生装置を受注し、更なる高効率化実現に向けた蒸気タービンの開発を行った。熱効率を向上させるためには、再熱蒸気を更に高温化するとともに、蒸気タービンの通路部やボイラー給水ポンプ駆動用蒸気タービンなどの補機類を含めた性能向上技術が求められる。基本設計では、長期間の材料試験の実施や長年培ってきた冷却技術の駆使などで高クロム(Cr)鋼の運用信頼性を担保するとともに、蒸気タービンの構造の最適化を行った。その結果、信頼性と経済性を両立させながら再熱蒸気温度630℃が実現できることを確認した。

The development of technologies for thermal power generation systems aimed at achieving higher efficiency has recently accelerated toward the realization of a low-carbon society. With this as a background, Electric Power Development Co., Ltd. (J-POWER) has been implementing a plan to replace Units 1 and 2 of the Takehara Thermal Power Station with a single New Unit 1 applying ultra-supercritical technology, in order to improve efficiency and environmental performance. The new facility is scheduled to commence operation in 2020.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been assigned the development of the steam turbine for Takehara Thermal Power Station New Unit 1. In order to improve thermal efficiency in this project, we have developed technologies to raise the reheat steam temperature, as well as to enhance the performance of auxiliary equipment including the steam passages and the boiler feed pump turbine. In the design and development process, we have conducted long-term tests to ensure the operational reliability of the high-chromium (Cr) steel used in our system and applied cooling technologies based on our accumulated experience in the development of turbines, together with the structural optimization of steam turbine. From the results of evaluations, we have confirmed that our system realizes a reheat steam temperature of 630°C while balancing reliability with economic efficiency.

1. まえがき

低炭素社会の実現に向けて、全世界で火力発電システムの効率向上を目指した性能向上技術や蒸気タービンの入り口蒸気温度を上昇させるための技術開発が進められている。熱力学では、入り口蒸気温度を上昇させると熱効率が向上することは一般的に知られているが、入り口蒸気温度を上昇させるためには、その温度に耐えられる材料と製造性を両立させる必要がある。

我が国でも、A-USC(先進超々臨界圧)国家プロジェクト「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」において、700℃級石炭火力プラントの開発が進められており、東芝エネルギーシステムズ(株)もこの国家プロジェクトに参画している。700℃に耐えられる材料としては、従来のフェライト系材料ではなく、ニッケル(Ni)を主成分とする材料を使用する必要があるが、材料・製造コストが増大することから、経済性が大きな課題となっている。

電源開発(株)は、竹原火力発電所内の既設1号機と既設2号機の設備を廃止し、USC発電方式の新1号機への更新を進めており、2020年6月の営業運転開始を計画している。

当社は、竹原火力発電所新1号機の蒸気タービンと発電機を含めた電気発生装置を受注した。新1号機では、再熱蒸気温度が630℃という、当社として最高温度に対応した蒸気タービンを、材料強度、製造性、及び経済性の観点から成立させるため、長年培ってきた様々な技術を結集させることが求められた。

ここでは、竹原火力発電所新1号機の蒸気タービンに適用した最新技術の概要について述べる。

2. 竹原火力発電所新1号機の特徴

2.1 竹原火力発電所新1号機の仕様

竹原火力発電所新1号機の主な仕様を、表1に示す。石炭ボイラーを使用した、再熱蒸気温度630℃だけでなく、

表1. 竹原火力発電所新1号機の主な仕様

Main specifications of Takehara Thermal Power Station New Unit 1 of J-POWER

項目	仕様
定格出力	600 MW
主蒸気圧力(ゲージ圧)	27 MPa
主蒸気温度	600 °C
再熱蒸気温度	630 °C

主蒸気圧力(ゲージ圧)も27 MPaと高い条件を持つUSCプラントである。

2.2 竹原火力発電所新1号機の蒸気タービン

蒸気タービンの形式を図1に示す。タンデムコンパウンド型(串型)かつ排気4流の大型火力タービンで、高圧セクション、中圧セクション、低圧セクションA、及び低圧セクションBの4セクションから構成されている。高圧セクションは単流、中圧セクションは複流、低圧セクションA・Bは4流でそれぞれ構成され、最終段動翼には実績があり、信頼性が高いスチール40インチ翼を採用した。

今回の蒸気タービンでは、再熱蒸気温度の高温化だけでなく、蒸気タービン通路部も高性能化を図った。高圧セクションと中圧セクションを分けることで段落数を増加させ、より高い内部効率を達成している。同じ定格出力帯(600～800 MW)におけるUSCプラント向け蒸気タービンの先行機と比較して、高圧セクションは+5段、中圧セクションは+8段(4段×2流)、低圧セクションは+4段(1段×4流)と大幅に段落数を増加させた。

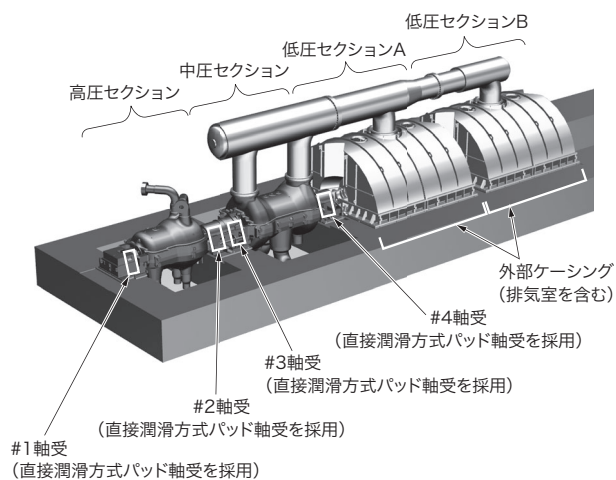


図1. 蒸気タービンの完成予想図

竹原火力発電所新1号機に採用した、タンデムコンパウンド型(串型)で排気4流の最新鋭蒸気タービンである。

Rendering of steam turbine

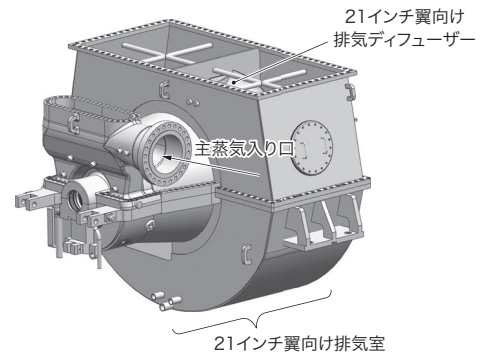


図2. ボイラー給水ポンプ駆動用蒸気タービン

排気損失の低減や排気室構造の最適化で効率が大幅に増加し、プラント全体の熱効率の向上に貢献している。

Boiler feed pump turbine

この段落数の増加(多段化)は、羽根ノズル1段当たりの軸スパンが最小となるように設計を進めるとともに、実機の計測で得られた軸安定性データと精度を向上させた軸系解析によって実現した。高圧セクション、中圧セクションの軸受には、当社独自の低損失型の直接潤滑方式パッド軸受を採用することで、機械損失の低減に大きな効果が期待できる。

低圧セクションの最終段動翼には、実績のあるスチール40インチ翼を採用し、L-1段・L-2段羽根ノズルは、チップ漏洩(ろうえい)損失を低減させるため、段付きフィンで間隙を縮小した改良構造を採用した。また、最終段から排気後の損失を低減するため、外部ケーシングの一部と排気ディフューザー形状も最適化した。

2.3 ボイラー給水ポンプ駆動用蒸気タービン

ボイラー給水ポンプ駆動用蒸気タービンにも、最新型の蒸気タービンを採用した(図2)。従来は、最終段が16インチ翼であったのに対し、今回は実績のある42インチ翼を縮小した21インチ翼を採用することで、排気損失を低減するとともに、排気室構造の最適化も図った。その結果、ボイラー給水ポンプ駆動用蒸気タービンの効率が大幅に増加し、プラント全体の熱効率の向上に貢献している。

竹原火力発電所新1号機の蒸気タービンは、実績のある機種を先行機とし、2.2節と2.3節で述べた技術を採用することで、より高性能で安定性を備えた蒸気タービンを実現した。

3. 再熱蒸気温度630 °Cを実現するための技術

3.1 蒸気タービンの材料

再熱蒸気温度630 °Cを実現するには、まず材料の選定がポイントとなる。前述のA-USC国家プロジェクトで候補材料としているNi基合金は、700 °Cの環境下でも使用できる

高い耐熱性能を持っているが、630℃の蒸気に対しては過剰な耐熱性能と考えられ、経済性に課題が残った。そこで、今回の蒸気タービンでは経済性も満足させるため、従来のフェライト系耐熱鋼の延長線上にあり、630℃に対応できる材料として、当社が独自に開発を進めてきた新12Cr鍛鋼及び新12Cr鋳鋼を採用した。

ローター及び羽根には、新12Cr鍛鋼を採用した。新12Cr鍛鋼は、これまでも600℃級の蒸気タービンのローターや羽根に採用しており、多くの使用実績がある材料である。蒸気温度を630℃に高めた今回の蒸気タービンにおいても、ローター及び羽根に対しては、これまで採用してきた冷却技術で温度上昇を抑え、新12Cr鍛鋼の使用実績範囲内とすることで、信頼性を確保した。

一方、ケーシング及び高温部のノズルには、新12Cr鋳鋼を採用した。ケーシングやノズルなどの静止部は、直接入り口蒸気が接触するので冷却ができず、一部の温度が蒸気温度と同一になる。したがって、蒸気温度を630℃に高めた今回の蒸気タービンでは、新12Cr鋳鋼をこれまでに使用実績のない630℃で初めて採用することになる。これを実現するための課題として、以下の二つが挙げられる。

- (1) 溶接性
- (2) 630℃での材料強度の長期信頼性

新12Cr鋳鋼は、従来の鋼種に比べて高温強度を重視し、それに有効なホウ素(B)を添加しているが、Bの添加は同時に溶接性を低下させることが知られている。今回採用するノズルは、ダイヤフラムとノズル板を溶接して製造するので、ノズル向けの新12Cr鋳鋼では、高温強度と溶接性を両立させるようにB添加量を適正化している。この新12Cr鋳鋼については、各種の材料試験で、ケーシング及びノズル部材としての要求特性を満足することを確認するとともに、モックアップ試験で、溶接性に問題がないことも確認した。

次に、630℃での材料強度の長期信頼性に関しては、いわゆる腰折れ現象について、重点的に評価した。腰折れとは、ボイラーなどで用いられる高Crフェライト系耐熱鋼において、短時間のクリープ試験データからの強度予測カーブに対し、数万時間を超える長時間のクリープ試験結果では強度が低下すると報告されている現象である。特に、温度が高いボイラー配管で問題視されており、600℃を超える温度で使用した場合にその傾向は顕著となる。

まず、ローターや羽根は、今回の蒸気タービンにおいても入り口温度の蒸気が直接材料に接触することはない。したがって、ローターや羽根に蒸気が接触する際には、既に蒸気温度は低下しており、更に冷却技術の適用で既設プラントにおける実績温度範囲内に温度上昇が抑えられる。この

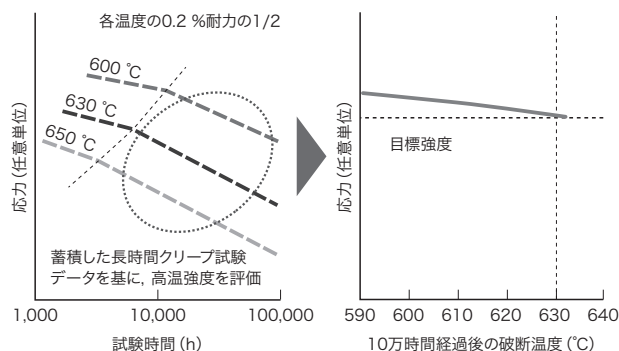


図3. 630℃における新12Cr鋳鋼の材料耐熱性の評価結果

蓄積した長時間クリープ試験結果を基に、当社として最高温度となる630℃の環境下でも、十分な耐熱性・信頼性を持っていることを確認した。

Results of evaluation of heat resistance of new 12% Cr cast steel at 630°C

ような既設プラントでの運転実績に加え、多数の数万時間級の長時間クリープ試験データからも、新12Cr鍛鋼の高温強度の長期信頼性が確認された。

一方、内部ケーシングやノズルなどの静止部は、630℃の高温蒸気に直接さらされるため、腰折れ現象に対する評価が必要である。当社は、高温強度の長期信頼性評価のため、新12Cr鋳鋼についても数万時間級の長時間クリープ試験データを蓄積している。それらのデータを用いて、630℃での材料強度信頼性を評価した。長期信頼性の評価法としては、図3に模式的に示すように、長時間クリープ試験データ^(注1)だけを用いた領域分割法と呼ばれる評価法^{(1), (2)}を採用し、腰折れ現象に対してより安全側での評価を行った。これにより、今回の蒸気タービンの目標強度(設計に必要な強度に十分な裕度を持つ値)を満足することを確認した。

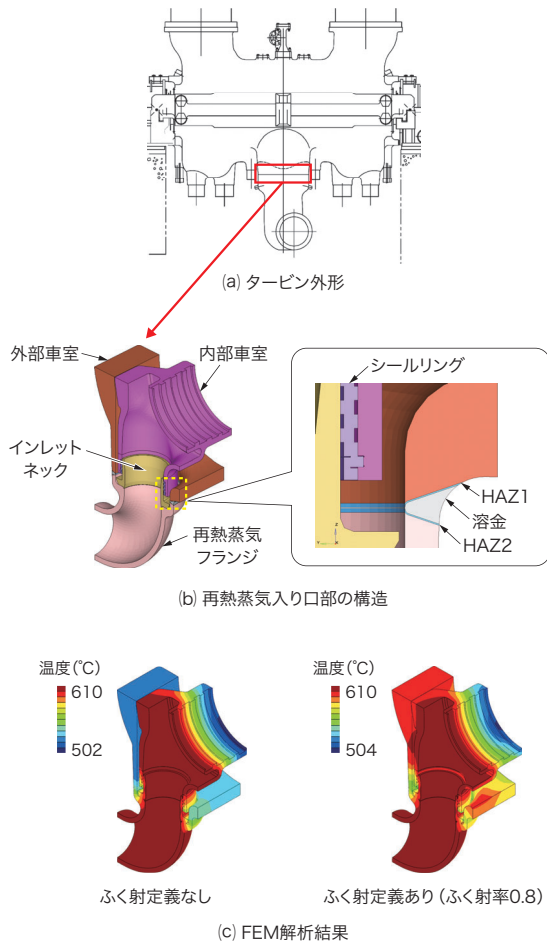
このことから、新12Cr鋳鋼を内部ケーシングやノズル(ダイヤフラムやノズル板)に適用することで、信頼性と経済性を追求しながら、再熱蒸気温度630℃の実現が確認できた。

3.2 蒸気タービンの構造

今回の再熱蒸気温度630℃を実現させるために、構造面でも改良を行った。3.1節で述べたように、蒸気が直接接触する内部ケーシングやノズルは新12Cr鋳鋼を採用することで課題を解決した。

一方、入り口部だけが直接入り口蒸気と接触し、それ以外の部位は直接接触しない外部ケーシングについても工夫が必要となる。外部ケーシングは、サイズも大きいので、全てを新12Cr鋳鋼で製造することは、技術的・経済的に現

(注1) その温度における0.2%耐力(永久ひずみが0.2%になる応力)の1/2以下の応力を試験条件としたデータ。数万時間級の長時間試験データを多く含む。



HAZ: Heat Affected Zone (溶接熱影響部)

図4. FEM解析による再熱蒸気入り口部の温度分布

再熱蒸気入り口部のFEM解析を実施し、強度的に問題のない温度分布であることを確認した。

Results of finite element analyses of temperature distribution of steam turbine outer casing inlet

実的ではない。したがって、再熱蒸気が直接接触する入り口部だけに新12Cr 鋳鋼を採用し、それ以外の部位は低Cr 材料を適用して両者を溶接でつなぐ必要がある。溶接性は、既に確認済みで問題ないが、溶接でつなぐということは、直接再熱蒸気が触れていなくても熱伝導で低Cr 材料部の温度が上昇することになる。そのため、温度の低い蒸気による冷却構造を採用し、入り口部以外の低Cr 材料部が高温にならないように、構造的な工夫を施した。

再熱蒸気入り口部のFEM (Finite Element Method : 有限要素法) 解析結果 (図4) から、計画している冷却用低温蒸気の流量・温度に対し、ふく射を考慮した状態においても強度的に問題のない温度分布になっていることが確認で

きた。再熱蒸気入り口部は、抽気ラインにつながった部屋となっているが、更に圧力が低い抽気ラインとつなぎ、最小限の低温蒸気を流し、溶接部の冷却を行うことにした。ここで、高圧側も同様の冷却構造を採用しており、高圧側はこの溶接部の冷却蒸気を中圧のローター冷却蒸気として活用している。先行機においても同様の構造を採用した実績があるが、今回は再熱蒸気温度が630℃と高く、経年的な冷却蒸気温度変化などに対して、きめ細やかな対応が必要になる。

そこで、今回の蒸気タービンでは温度を常時監視し、温度が上昇した場合は調整弁の開度を変えて低温蒸気の流量を増やし、冷却温度を調整できる仕組みを採用した。また、経年的な劣化に伴う温度上昇にも対応可能な対応策として、調整弁の開度に余裕を持たせた設計をしている。更に、制限値も設定し、温度が上昇すれば警報が発出されるようにすることで、信頼性を確保した。

3.1節と3.2節で述べた新たな材料、構造を採用することで、信頼性と経済性を両立させながら、再熱蒸気温度630℃を実現できた。

4. あとがき

更なる熱効率の向上を目的として、電源開発(株)との協力の下、竹原火力発電所新1号機において、当社が持つ最新鋭蒸気タービンの基本設計を完了した。

今回設計した蒸気タービンは、信頼性と、性能、経済性を全て満足しており、国内初^(注2)の再熱蒸気温度630℃を実現しただけでなく、先行機以上の高い性能を発揮することが期待できる。

今後、更なる入り口蒸気温度の高温化が求められる可能性もあるが、信頼性、性能、経済性で魅力ある蒸気タービンの開発を続け、大電力を安定して発電可能な高効率の火力発電システムを提供することで、社会に貢献していく。

文 献

- (1) 発電設備技術検査協会、平成24年度 高効率発電設備健全性評価報告書、発電設備技術検査協会、2013、(CD-ROM)。
- (2) 木村一弘、ほか、応力-破断時間曲線の領域分割法による高Cr フェライト耐熱鋼のクリープ寿命予測の高度化、材料、2003、52、1、p.57-62。



高江 俊介 TAKAE Shunsuke
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 京浜事業所 設計第一部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.

(注2) 2019年3月時点、当社調べ。