

火力発電用蒸気タービンの高効率化技術

High-Efficiency Technologies for Thermal Power Plant Steam Turbines

高橋 武雄

■ TAKAHASHI Takeo

高橋 亨

■ TAKAHASHI Toru

沖田 信雄

■ OKITA Nobuo

電力需要の変化に柔軟に対応できる火力発電は、安定的に電気を供給するために重要な役割を担っており、温室効果ガスの排出削減に向けて、火力発電の高効率化が今まで以上に求められている。

東芝は、火力発電用蒸気タービンの高効率化に長年取り組んでおり、様々な新技術を開発し実機への適用を進めてきた。いっそうの高効率化を目指して、最新の流体解析技術を駆使した高性能化技術や蒸気タービン試験設備による検証や新現象の把握などによって着実な性能向上を行うと同時に、更に飛躍的な効率向上を目指して700℃級先進超々臨界圧(A-USC: Advanced Ultra Super Critical) 蒸気タービンの開発にも取り組んでいる。

Thermal power generation has the characteristic of permitting flexible responses to fluctuations in power demand. In order to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions by thermal power plants, enhancement of their thermal efficiency is required.

Toshiba has been engaged in the development of high-efficiency steam turbines for thermal power plants using various technologies including state-of-the-art computational analysis and test facilities such as its steam turbine development facility for the reduction of internal losses in steam turbines. Furthermore, we have been developing a 700℃-class advanced ultra-supercritical (A-USC) steam turbine with the aim of realizing higher thermal efficiency.

1 まえがき

低炭素社会の構築に向けて世界各国の意識はますます高まっており、国内外の電力事業でも温室効果ガスの排出削減に向けて様々な取組みが進められている。そのような状況の中で、火力発電は電力需要の変化に柔軟に対応できる電源として重要な役割を担っており、温室効果ガスの排出削減に向けていっそうの高効率化が求められている。

東芝は、長年にわたり火力発電用蒸気タービンの高効率化に取り組んでおり、様々な新技術を開発し、国内外の火力発電技術の発展に貢献してきた。主な高効率化のポイントは、タービン内部損失の低減と蒸気条件の向上である。タービン内部損失の低減では、最新の流体解析技術を駆使した高性能化技術や実プラント機相当の試験ができる蒸気タービン試験設備による現象の把握を行っている。また、蒸気条件の向上では、飛躍的に効率を向上できる700℃級A-USC蒸気タービンの実現を目指して、耐熱材料や冷却技術を開発している。ここでは、これらの高効率化技術開発の取組みについて述べる。

2 タービン内部損失の低減

2.1 内部損失低減技術

近年、省エネ又は環境への負荷低減要求によって、蒸気タービンの効率向上技術の開発が加速され、実機への適用が

進められてきた。

蒸気タービンの効率向上とは、種々の内部損失を低減することであるとも言える。以下に示すようなアイテムについて当社は新しい技術を開発し実機に適用している(図1)。

- (1) 翼列の損失低減
- (2) 翼列以外の損失低減
 - (a) 漏れ損失の低減
 - (b) 各ケーシング^(注1)の吸・排気圧力損失低減
 - (c) 排気損失の低減
 - (d) 軸受損失の低減

翼列の損失低減については、二次流れ損失(渦流れ損失)の発生を低減させることが重要である。タービン翼の前・後縁を蒸気流出方向に湾曲し傾斜させることで損失の低減を図り、更に、蒸気流量分布を最適にコントロールするように、通路部形状を半径方向に変化させる数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)を適用した3次元設計によるアドバンスドフローパターン(AFP)技術を幅広く採用している。更に、翼自体のプロファイル損失^(注2)低減のために、従来の衝動型翼に比べ反動度を高めた最適反動度翼を開発し、その段落効率の向上値を試験設備で検証した新翼列の採用も開始した。

(注1) タービンロータや翼列などを収納する車室。

(注2) 翼端壁などの影響を除いて、純粋に翼形状によってだけ生じる損失。

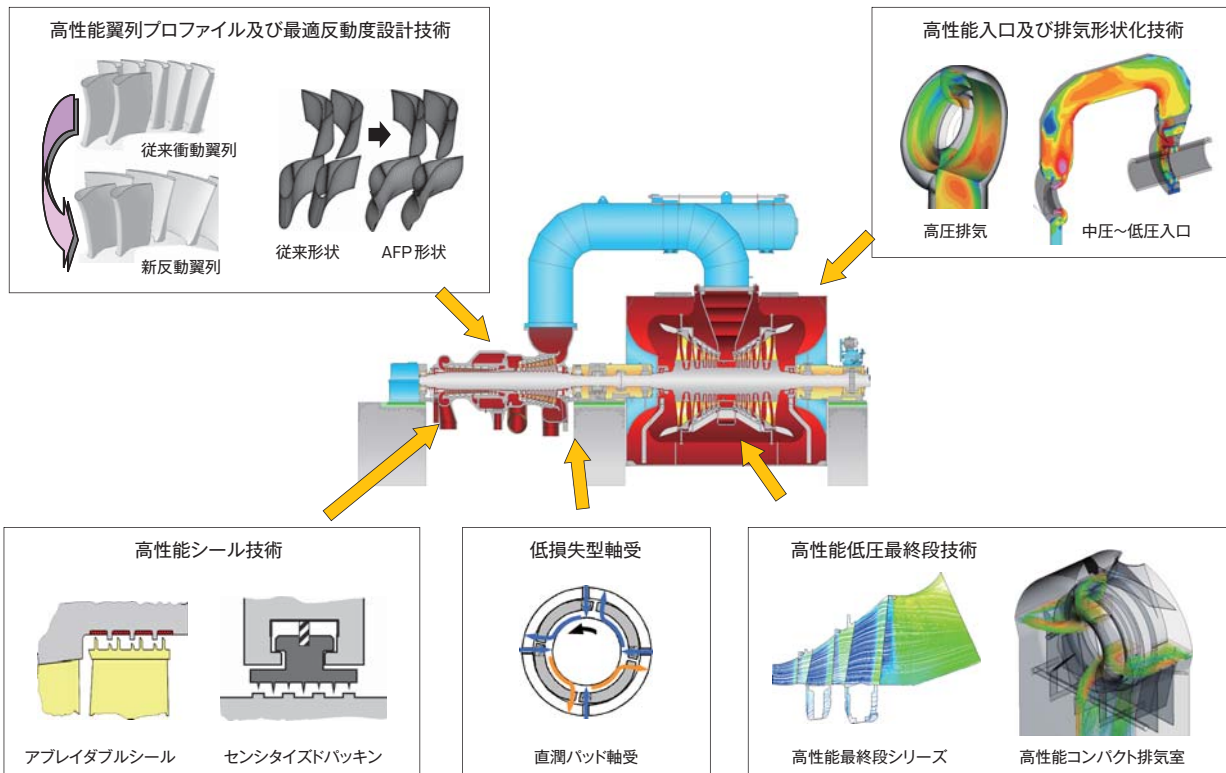


図1. 蒸気タービンへの効率向上技術の適用 — 最新のCFD解析などを用いて開発した効率向上技術をモデル試験及び蒸気タービン試験設備を駆使して検証し、実プラント向けの各種蒸気タービンの設計へ適用している。

Application of newly developed high-efficiency technologies to steam turbines

漏れ損失の低減については、動翼先端部を隣り合う翼どうしで接触及び連結させた全周一群構造のスナッパ翼を採用し、翼先端部のシール形状の改善（ハイロー型チップフィン）により、動翼先端部での蒸気漏れを減少させることで段落効率の向上を図っている。更に、シール部の間隙（かんげき）を従来値より縮小しても、回転体と静止部の接触振動を極力発生させないアブレイダブルシール及びセンシタイズドパッキンなどの技術を開発し、漏れ損失の低減を達成している。

翼列以外の部分でも、CFD解析を用いたエネルギー損失の低減を進めている。翼列以外の蒸気通路部各部には流速分布があるので、境界条件の設定方法の違いによる解析誤差を少なくするため、できる限り継ぎ目のない大規模解析を実施している。

低压タービンの最下流にあたる最終段翼を通過した蒸気の運動エネルギーは、すべて残留速度損失となる。したがって、出口蒸気通路部の環状面積の大きな高性能最終段翼と低压損型低压タービン排気室の適用は、タービン効率向上の有力な手段である。流体解析によって形状が最適化されたスチームガイドを備えた低压損型低压タービン排気室は、モデル試験、更には実条件蒸気を使用した試験設備により検証され、実機採用に向けての最終準備が行われている。

2.2 実機サイズ蒸気タービンの試験設備

前述した内部損失低減技術の最終検証には、実プラントに相当する検証試験ができる蒸気タービン試験設備を用い、CFD解析やモデル試験の評価精度を更に高めることができるようになった。また、長い期間を要していた商用実プラントでの評価結果の設計への反映が、短期間に高精度で行えることで、新技術を早期に市場投入することが可能になった。

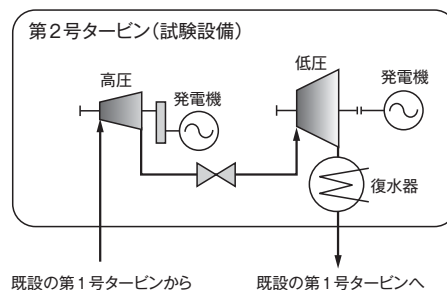


図2. 蒸気タービン試験設備の構成 — 既設設備の第1号タービンに並列に設置された試験設備の第2号タービンには、高圧タービンと低压タービンを各々独立軸として発電機を持つクロスコンパウンド方式を採用しており、運転条件設定の自由度を大きくできるとともに、性能評価精度も高められる。

Configuration of steam turbine development facility

この試験設備では、高圧タービンと低圧タービンを各々独立軸として発電機を持つクロスコンパウンド形式を採用している。クロスコンパウンド形式の採用により、高圧軸と低圧軸各々の運転条件設定の自由度をかなり大きくできるとともに、各軸の性能評価精度を高めることができる（図2）。

前述のように高圧タービンは独立した軸であり、最新の開発成果を反映した段落設計が採用されている。詳細な蒸気状態値の計測ができ、多段落CFD解析結果との比較が行われ、精度が検証された（図3）。高圧タービンでは、翼列流体特性評価のほかに、新構造の信頼性評価やロータダイナミクスに関する評価も併せて実施している。

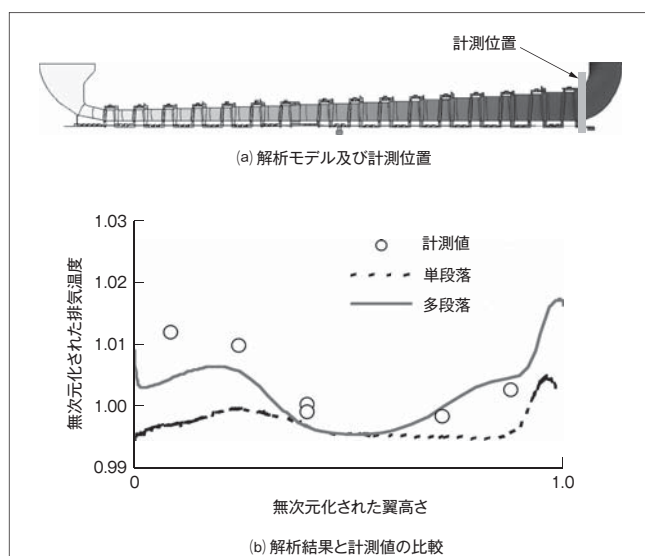


図3. 高圧タービンセクションの多段落流体解析 — 多段落解析では、単段落解析では現れない、壁面近傍のリーク流れの蓄積のようすなどをとらえ、計測値とよく一致している。

Results of multistage fluid analysis of high-pressure (HP) turbine section

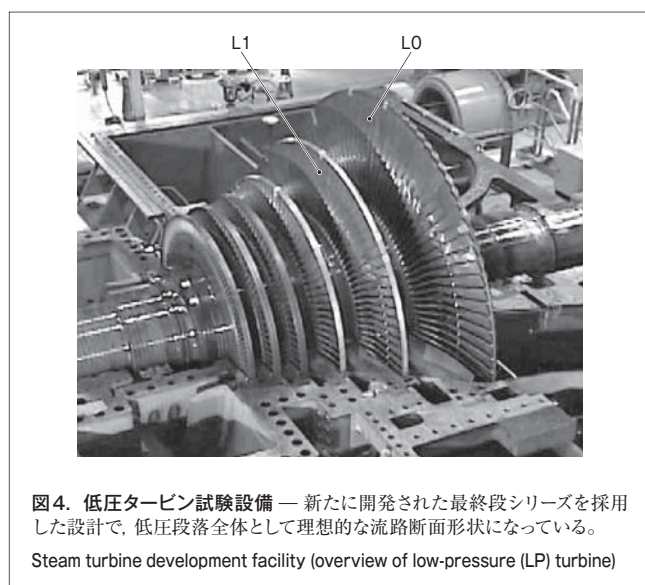


図4. 低圧タービン試験設備 — 新たに開発された最終段シリーズを採用した設計で、低圧段落全体として理想的な流路断面形状になっている。

Steam turbine development facility (overview of low-pressure (LP) turbine)

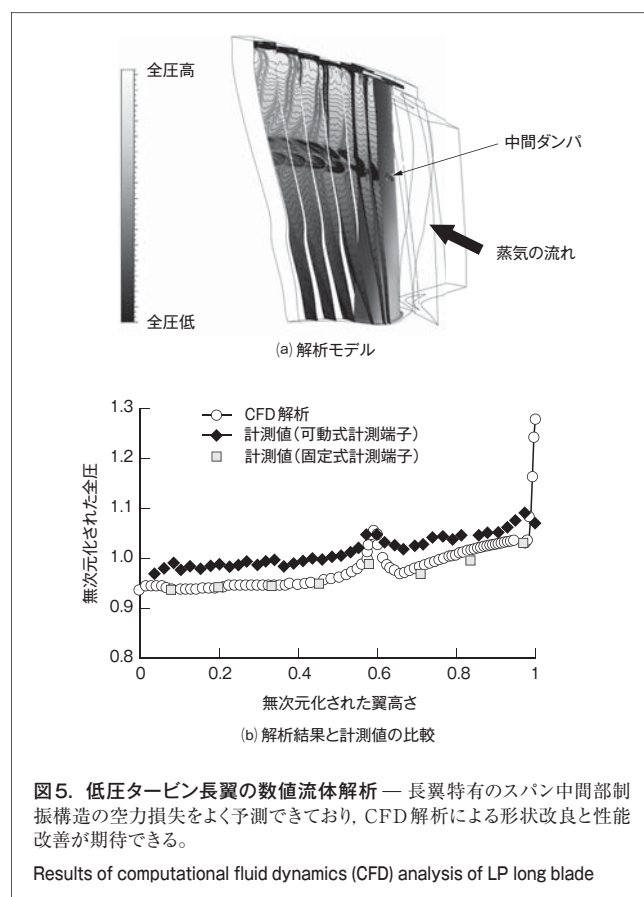


図5. 低圧タービン長翼の数値流体解析 — 長翼特有のスパン中間部制振構造の空力損失をよく予測できており、CFD解析による形状改良と性能改善が期待できる。

Results of computational fluid dynamics (CFD) analysis of LP long blade

低圧タービン（図4）は、新たに開発された60 Hz用最終段シリーズを採用した設計となっている。この最終段シリーズでは、L0（最終段）に最新の流体・構造設計を反映するとともに、L1（最終段の一つ前の段落）の長翼化を図り、低圧段落全体として理想的な流路断面形状となるように設計している。

低圧タービンでは、蒸気の流れや内部の状態の詳細な分布を把握するトラバース計測をはじめ、様々な計測ができるようになっている。多段落CFD解析結果と計測結果の圧力分布比較により、損失発生の詳細が明らかになってきた（図5）。

3 蒸気条件の向上

3.1 A-USC蒸気タービンシステムの開発

蒸気タービンシステムでは、主蒸気温度538℃、再熱蒸気温度566℃のものが長い間標準的であった。しかし、1990年代になると蒸気温度の高温化が進められ、最近では主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度620℃のプラントが実現している。送電端熱効率は600℃級一段再熱プラントで42%（HHV基準^(注3)）程度を達成している。これに対し、主蒸気圧力35 MPa、

(注3) 高位発熱量基準のことで、燃料の持つエネルギー（発熱量）を表示する際の条件。

主蒸気温度700℃、第一段・第二段再熱蒸気温度がそれぞれ720℃の二段再熱のA-USCプラントでは46%以上の送電端効率が期待できる。

当社は、A-USC 蒸気タービンの開発を二つのフェーズに分けて進めている。

フェーズⅠは、再熱700℃級蒸気タービンの開発である。再熱700℃級システムでは、圧力の高い主蒸気温度は600℃級とし、比較的圧力の低い再熱蒸気温度だけを700℃級に高温化している。主蒸気温度を600℃級とすることで、主蒸気システムはすべて従来技術が適用でき、開発項目を再熱蒸気システムだけに限定できる。700℃の再熱蒸気に直接さらされる中圧タービンは、ノズルボックス構造のケーシングと冷却技術の組合せで、ニッケル（Ni）基合金^{（注4）}の適用範囲を中圧タービンの一部と再熱弁などに限定する。再熱700℃級のA-USCシステムは、開発範囲を限定することで、早期実用化と経済性の両立を考えたシステムであり、主蒸気圧力25MPa、主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度700℃の一段再熱式のシステムで送電端効率43%（HHV基準）以上が期待できる。図6は試設計を行った中圧タービンの断面を示しており、ロータ及び外部ケーシングの大型部品には従来と同じフェライト鋼を適用している。

フェーズⅡは、主蒸気700℃級システムの開発である。主蒸気700℃級システムでは、圧力の高い主蒸気も700℃に高温化することで、再熱700℃級システムよりも更に高い効率を狙っている。主蒸気及び再熱蒸気とともに高温化するため、蒸気タービン及び付属機器の材料として主蒸気管、再熱蒸気管、主蒸気弁、再熱弁、タービンロータやケーシングの一部に

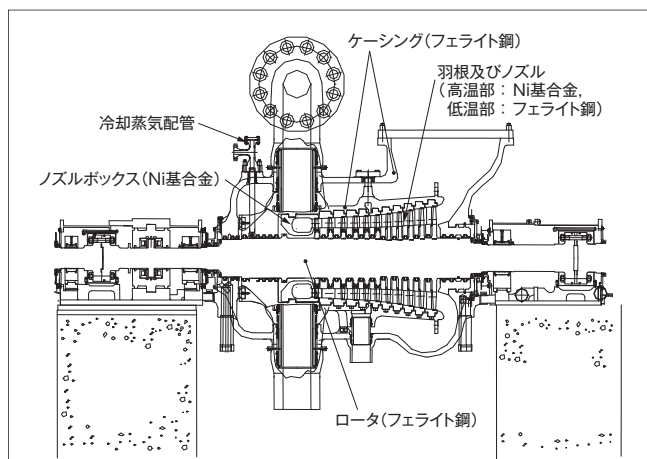


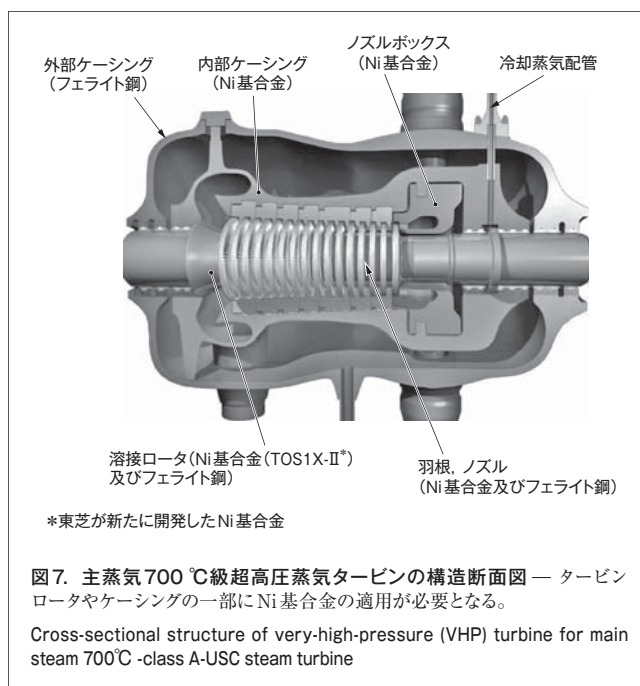
図6. 再熱700℃級中圧蒸気タービンの構造断面 — ノズルボックス構造のケーシングと冷却技術を組み合わせ、ロータ及び外部ケーシングの大型部品には従来と同じフェライト鋼を適用している。

Cross-sectional structure of intermediate-pressure (IP) turbine for reheat 700°C-class A-USC steam turbine

（注4） 材料組成の中で、Niがベースとなっている材料。

Ni基合金を適用する。開発課題としては、Ni基合金の開発、特にタービンロータに適用する材料として大型のNi基合金の開発が必要になり、主蒸気700℃級のA-USC 蒸気タービンを実現するための重要な開発ポイントになる。主蒸気700℃級システムの超高压タービンの構造と適用材料を図7に示す。

この主蒸気700℃級システムの実現を目指して、2008年度から「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」が経済産業省 電力基盤整備課の補助事業としてスタートした（図8）。当社はこのプロジェクトに参画し、システム検討及び材料開発などの要素技術開発を行っている。



*東芝が新たに開発したNi基合金

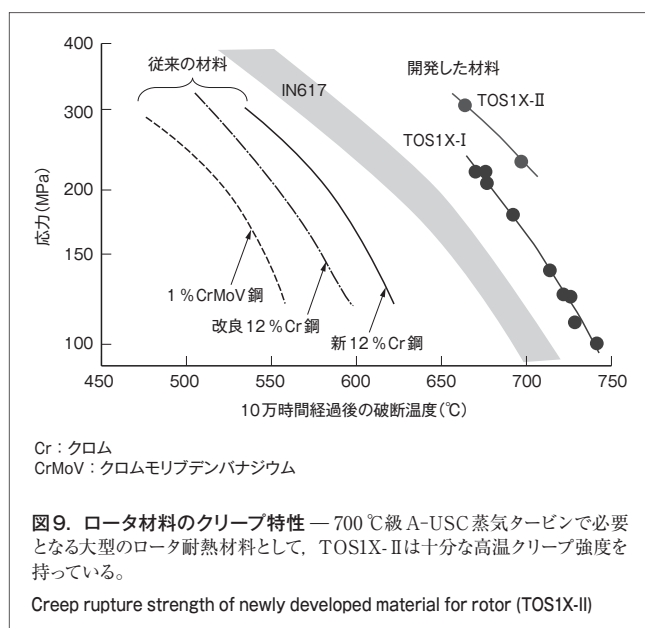
図7. 主蒸気700℃級超高压蒸気タービンの構造断面図 — タービンロータやケーシングの一部にNi基合金の適用が必要となる。

Cross-sectional structure of very-high-pressure (VHP) turbine for main steam 700°C-class A-USC steam turbine

項目		西暦(年)									
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
システム設計, 設計技術開発		基本設計, 配置最適化, 経済性試算									
要素開 発	ボイラ	大径管, 伝熱管用新材料開発, 材料改良									
		高温長期材料試験(3～7万時間)									
	タービン	材料製造性 検証	溶接技術開発及び試験, 曲げ試験								
		材料開発	材料改良仕様 策定など	実サイズ部材試作							
	ロータ, ケーシングなどの 大型溶接技術, 試作										
	高温長期材料試験(3～7万時間)										
	高温弁	構造, 要素, 及び材料開発	試設計	試 作							
	実在(ボイラ)試験及び 回転試験(高温弁含む)		設備 計画		設備設計		設備製造, 据付け		試験, 評価		

図8. A-USC国家プロジェクトの開発スケジュール — 国内のタービン, ボイラ, 金属材料, 弁のメーカーなどが参加する経済産業省の補助事業で、東芝はタービンメーカーとしてこの開発に参加している。

Roadmap of A-USC national project in Japan



3.2 耐熱Ni基合金の開発

前述のように、A-USC蒸気タービンの開発課題の一つとして耐熱合金の開発が挙げられる。特に蒸気タービン用ロータの質量は10～30tとなるため、A-USC蒸気タービンを実現するためには、Ni基合金で大型構造物を作る技術、あるいは溶接構造により大型部品を製作する技術も非常に重要となる。当社で開発したロータ材料TOS1X-IIのクリープ特性^(注5)を図9に示す。耐熱材料として重要となる高温クリープ強度が十分得られることを小規模試作により確認できた。現在、前述のプロジェクトの中で、10t以上の大規模試作材を製作中であり、今後、各種検証試験を実施する予定である。

(注5) 材料に一定の温度、圧力を加えたとき、時間の経過とともに変形する現象。

4 あとがき

地球温暖化防止と資源の有効利用の観点から、火力発電の高効率化は非常に重要である。そのためには、あらゆる角度から火力タービンの高効率化に向けた開発を行い、時代に適合した製品を提供していくことが肝要である。

ここでは、現在当社が取り組んでいる火力蒸気タービンの高効率化技術について述べた。一方発電設備においては、高効率化に加えて信頼性の確保が不可欠である。高効率化技術の開発を進めるなかで、一つひとつ課題を着実に検証していくことで、信頼性の高い製品を提供していく。

文 献

- (1) 須賀威夫, ほか. 700℃級 先進超々臨界圧蒸気タービンシステム. 東芝レビュー. 63, 9, 2008, p.8-11.



高橋 武雄 TAKAHASHI Takeo

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン技術部 参事。火力新発電技術の開発に従事。日本機械学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



高橋 亨 TAKAHASHI Toru

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン技術部 参事。タービンサイクルの計画業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



沖田 信雄 OKITA Nobuo

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン技術部 グループ長。タービンサイクルの計画及び開発に従事。日本機械学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.