

# 火力発電システム用蒸気タービンの高効率化技術

Approaches toward Realization of High-Efficiency Steam Turbines for Thermal Power Plants

今井 健一 高橋 武雄

■ IMAI Kenichi

■ TAKAHASHI Takeo

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発電方式であり、国内では東日本大震災以降、火力発電に対するニーズが特に高まっている。このような状況のなか、低炭素化の観点から、熱効率の向上が今まで以上に求められている。

東芝は、火力発電システム用蒸気タービンの高効率化に取り組んで様々な新技術を開発し、実機への適用を進めてきた。最近では、最新の流体解析技術を駆使した高効率化技術の開発や、蒸気タービン試験設備による流体现象の把握などによって、着実に効率を向上させるとともに、飛躍的な効率向上を目指して700℃級蒸気タービンの開発を進めている。

Thermal power generation systems, with their capability to respond flexibly to fluctuations in power demand, are crucial for the steady supply of electric power. In Japan, there has been a conspicuous increase in demand for thermal power generation since the Great East Japan Earthquake in 2011. With this as a background, improvement of the thermal efficiency of these power systems is an important issue from the viewpoint of securing low-carbon energy supplies.

Toshiba has been developing a variety of new technologies to realize high-efficiency steam turbines for thermal power plants through the reduction of internal losses and improvement of steam conditions, and has been applying these technologies to actual steam turbines. We are steadily reducing internal losses in steam turbines by employing state-of-the-art computational analyses and elucidating the actual conditions of such turbines using a steam turbine development facility. We are also developing a 700°C-class advanced ultra-supercritical (A-USC) steam turbine system aimed at achieving significantly higher efficiency than conventional systems.

## 1 まえがき

低炭素社会の実現を目指して世界各国の意識はますます高まっており、国内外の電力事業においても、エネルギーの低炭素化に向けて様々な取組みが進められている。そのような状況のなかで、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うとともに、エネルギーの低炭素化に向けて更なる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システム用蒸気タービンの高効率化に取り組み、様々な新技術を開発して実機への適用を進め、国内外の火力発電技術の発展に貢献してきた。高効率化技術の開発における主なポイントは二つあり、一つはタービン内部損失の低減で、もう一つは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効率化技術の開発や、実機相当の試験が可能な蒸気タービン試験設備による流体现象の把握を行った。また、蒸気条件の向上では、飛躍的な効率向上が達成可能な700℃級蒸気タービンの実現を目指して、耐熱材料の開発や冷却技術の開発を行った。

ここでは、火力発電システム用蒸気タービンの高効率化を目指して開発した技術の概要について述べる。

## 2 タービン内部損失の低減

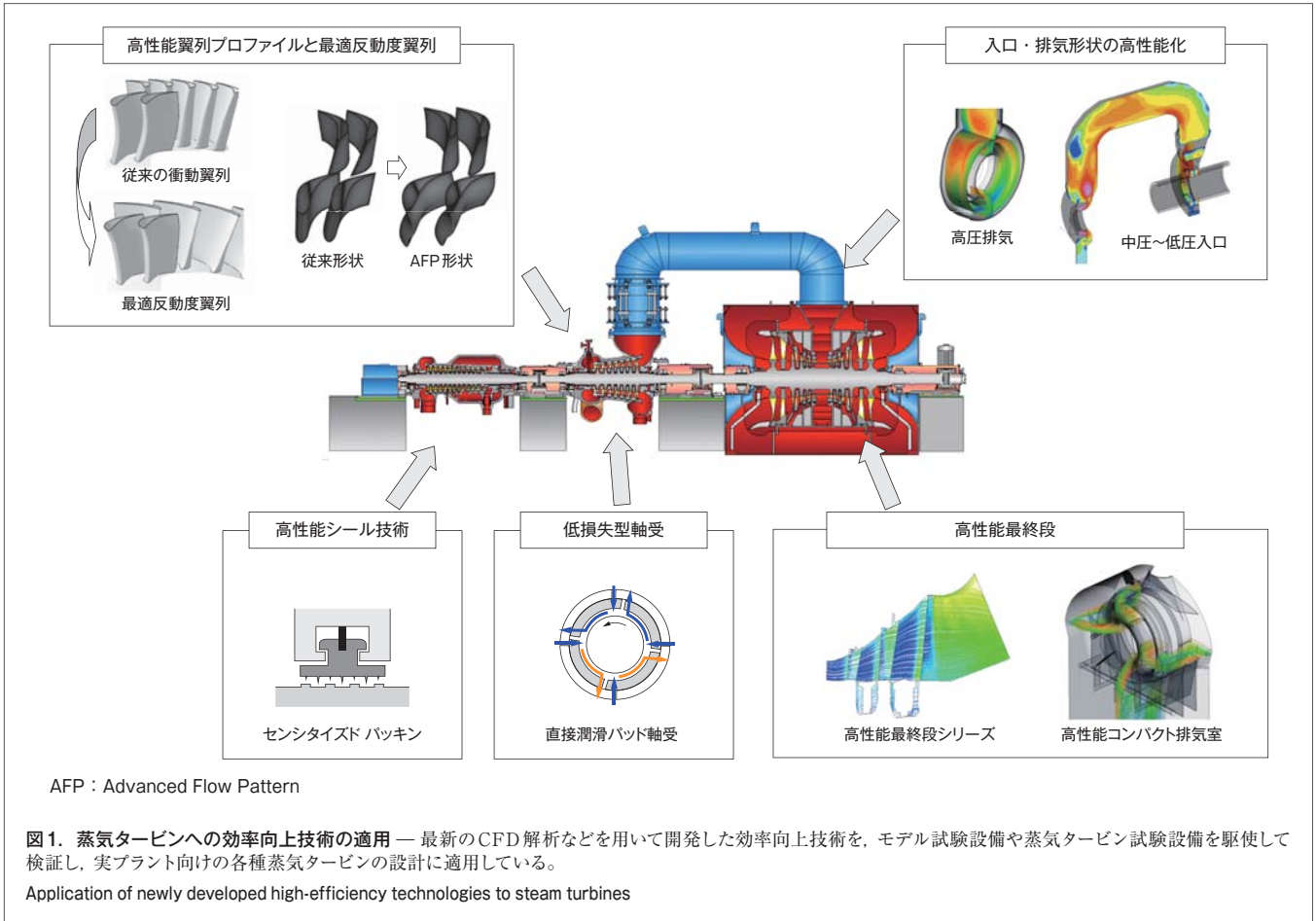
### 2.1 内部損失低減技術

近年、省エネや環境負荷低減の要求によって、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を向上させることは、種々の内部損失を低減することであるとも言え、当社は、次に示すような様々な損失を低減するために新しい技術を開発し、実機に適用している(図1)。

- (1) 翼列損失
- (2) 漏れ損失
- (3) 圧力損失
- (4) 排気損失
- (5) 軸受損失

翼列損失の低減は、CFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学)を駆使した3次元設計翼の開発によるところが大きい。タービンの静翼と動翼を3次元的に傾斜させ、それらにおける流線と流量分布をコントロールすることで、二次流れ損失を低減させるアドバンスドフローパターン(AFP)や、プロファイル損失低減のために反動度を高めた最適反動度翼を開発し、各セクションの条件に合わせて最適化してい



る。また、静翼や動翼に酸化生成物が付着すると、表面粗さが変化して翼列性能が経年的に劣化するが、この劣化を表面コーティングにより抑制する技術の開発も行ってきた。

漏れ損失の低減は、回転部-静止部間で発生する漏えい蒸気の低減が主となる。漏れ損失の低減技術としては、動翼の先端部を全周一群構造としたスナッパ翼が主流であるが、更に、シール部の間隙を従来値より縮小しても回転部と静止部の接触振動を極力発生させないシール技術を開発し、漏れ損失の低減を達成した。また、静止部-静止部間にも、同様に間隙を縮小したシール構造を適用している。

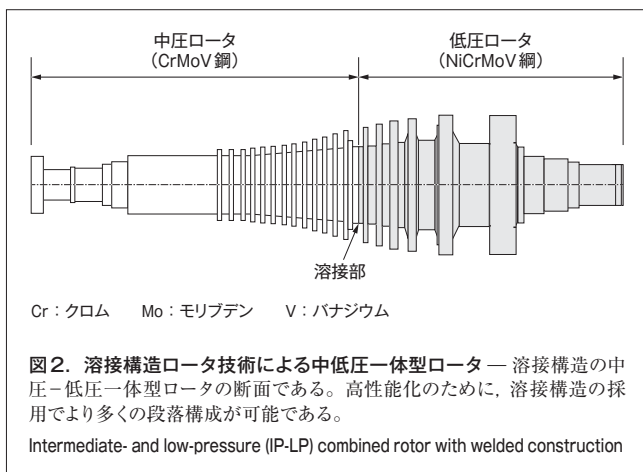
翼列以外の蒸気通路部における圧力損失も、タービンの効率へ少なからず影響を与えている。これらの部分は複雑な形状をしており、解析による圧力損失評価で最適形状を実現した。最近では、計算機などの性能向上により大規模な解析が可能であり、評価対象部品だけでなく、その前後や周辺を含めた範囲まで解析対象とすることで、蒸気タービン内部のより複雑な流れの損失評価が可能となってきた。また、解析では補えない絶対値レベルの評価は、検証試験設備により行った。

タービンの最終段翼を通過した蒸気の運動エネルギーは、タービン出力に寄与しない。したがって、環状面積の大きな最終段翼を採用することで出口流速を低く抑えることは、効率

面において有効である。また、最終段の後流側に効率の良いディフューザ形状のスチームガイドや低圧力損失型の排気室を適用することは、タービンの効率向上に大きな効果がある。特に低圧タービンは圧力変化による体積膨張率が大きいため、拡大流路からスチームガイド、排気室までの形状を最適化することが重要となる。これらの形状はCFDにより最適化し、モデル試験や、更には実条件の蒸気を使用した試験設備により検証し、実機への採用に向けて最終準備を行っている。

軸受は、荷重を下側の半分で受けているため下面への潤滑が必須であるが、上面への潤滑油は同量を必要としない。潤滑油の下側パッドへの直接供給や構造変更により、上面と下面への供給油量を調整することで軸受損失を低減した。

前述のような個々の要素技術を従来技術と組み合わせ、全体を最適化することも重要である。例えば、中低圧一体型のタービンでは、材料の要求特性が異なる中圧ロータと低圧ロータを1本のロータにする必要がある。カップリング結合を採用すれば構造的には可能であるが、カップリングの設置にスペースが必要であり、段落数が制限されることになる。前述の最適反动度翼は従来の衝動翼に比べて段落数が増加するため、スパンに制限がある場合は効率の向上が難しいが、溶接構造ロータ技術との組合せで可能になる(図2)。



## 2.2 検証試験設備

これまで述べてきた損失低減技術は、1次元検討、3次元解析、及び検証試験の過程を経て実機に採用となる。特に検証試験は、各技術の信頼性を確認するうえで重要である。当社では、従来からある試験設備に加え、実機と同等の蒸気タービン試験設備により、実機に近い条件で信頼性のより高い検証が可能である。

当社は、従来から試験設備による検証を実施してきたが、主として中短翼の流体性能検証用に空気タービン設備を、最終段の性能と構造特性の検証用に低圧蒸気タービン設備を使用してきた。空気タービン設備は、運転が比較的容易であることからパラメトリックな試験が可能であり、また、低圧蒸気試験設備は、通常の最終段と同じ湿り蒸気的环境下で試験ができるうえに、最終段の出力を単独で計測でき、精度良い性能確認が可能である。

これらの試験設備に加え、実機サイズの蒸気タービン試験設備を稼働させている。この設備は、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(図3)。クロスコンパウンド形式を採用

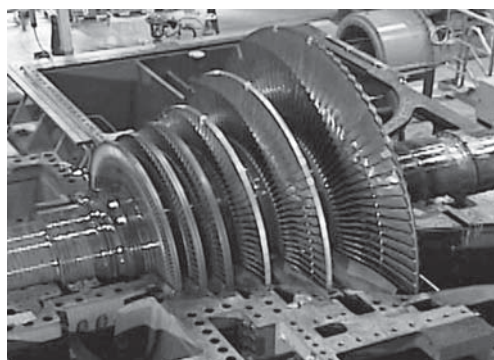
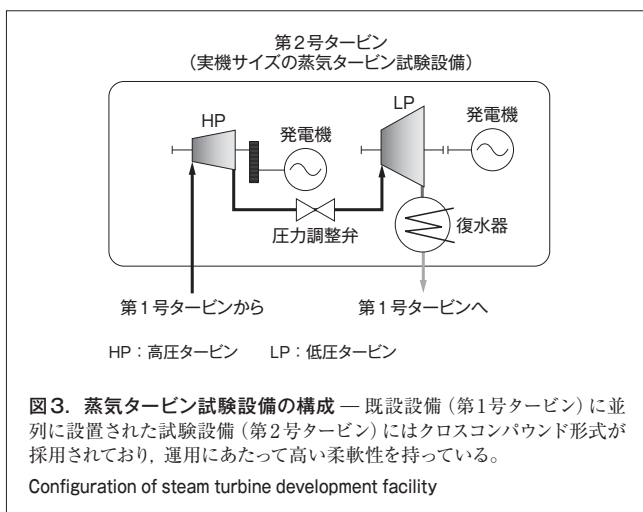


図4. 蒸気タービン試験設備の低圧タービン — 60 Hz用に新たに開発した最終段シリーズ翼列と最適反動度翼列を採用している。

Steam turbine development facility (view of LP turbine)

したことで、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することができるとともに、各軸の性能評価の精度を高めることができる。

この試験設備では、実機サイズでなければ確認できない試験と、空気タービン設備や低圧蒸気タービン設備で確認した結果の最終評価を実施している。

この試験設備の高圧タービンでは、最適反動度翼列やシール技術の性能確認、及び軸受損失の評価も実施している。また、実機サイズでスチームホワール検証など信頼性に関わる試験を行うことで、性能向上技術を支える信頼性技術の評価も並行して得られる。開発した最終段を組み込んだ低圧ロータを図4に示す。

低圧タービンについては、開発した最終段の性能確認はもとより、湿り域におけるタービンへの影響の確認(湿り損失評価)や、同環境下でのエロージョンシールド技術の検証なども実施している。

## 3 蒸気条件の向上

### 3.1 A-USC蒸気タービンの開発

蒸気タービンの効率を飛躍的に向上させるには、タービン内部のエネルギー損失の低減に加えて、蒸気条件の向上が不可欠である。当社が現在開発を進めている先進超々臨界圧(A-USC)火力発電システムでは、蒸気温度を700℃以上に高温化することで、送電端での熱効率46%以上(高位発熱量基準)を目指している。

当社は、早くからA-USC蒸気タービンの開発に着手するとともに、2008年度からは経済産業省の開発プロジェクトに参加し、その開発を推進してきた。A-USC火力発電システムの開発ロードマップを図5に示す。このプロジェクトは、A-USC火力発電システムの要素技術の開発を目的としており、システム設計、要素技術開発、及び実缶試験と回転試験から構成され

項目		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	材料開発		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)					
		材料製造性検証		溶接技術開発・試験、曲げ試験							
	タービン	材料開発		材料改良仕様策定等	実サイズ部材試作						
		材料開発		ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、試作		高温長期材料試験(3~7万時間)					
高度化	構造・要素・材料開発	試設計		試作							
実在試験・回転試験(高温弁含む)				設備計画	設備設計	設備製造、据付	試験、評価				

**図5. A-USC火力発電システム国家プロジェクトの開発ロードマップ**  
 国内のタービン、ボイラ、金属材料、及び弁などの各メーカーが参加する経済産業省の補助事業であり、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

ている。当社は、蒸気タービンの開発を中心にこのプロジェクトに参画しており、火力発電システムの設計では1,000 MW級システムのタービン設計を、また、要素技術の開発ではニッケル(Ni)基合金の材料開発、材料特性試験、ロータやケーシングの大型部品の製造性検証、及び溶接性などの検証を担当しており、現在、実在試験と回転試験の計画にも参画している。

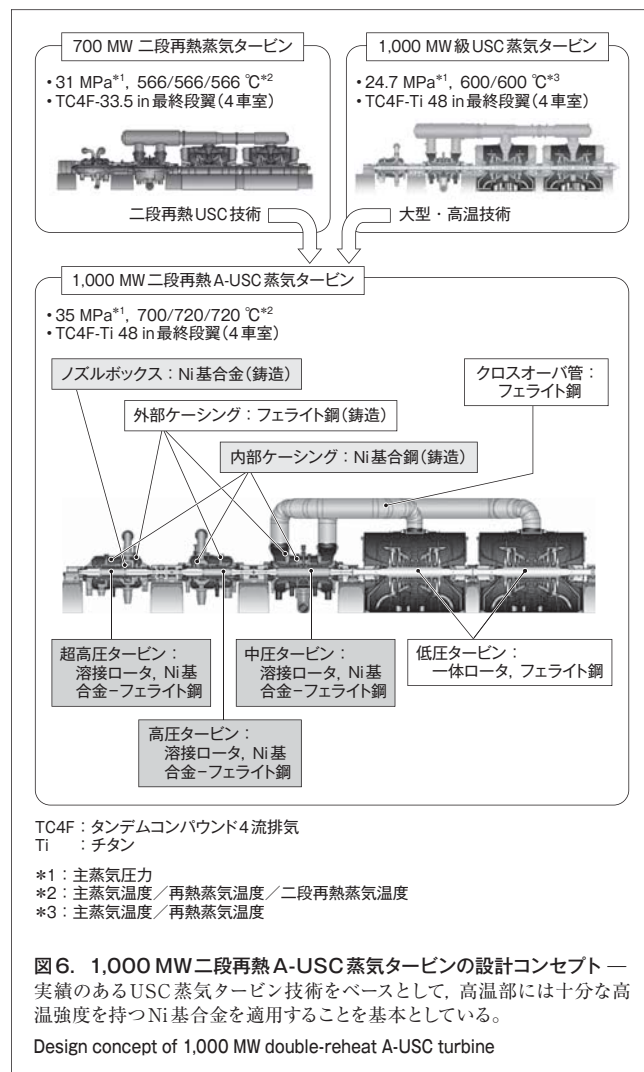
### 3.2 A-USC 蒸気タービンの設計

A-USC 蒸気タービンの設計コンセプトは、実績のあるUSC 蒸気タービン技術を基礎として、高温部には十分な高温強度があるNi基合金を適用することを基本としている。

1,000 MW 二段再熱 A-USC 蒸気タービン(主蒸気圧力 35 MPa, 主蒸気温度 700 °C, 再熱蒸気温度 720 °C, 二段再熱蒸気温度 720 °C)の設計コンセプトを図6に示す。当社には、700 MW 二段再熱蒸気タービン(主蒸気圧力 31 MPa, 主蒸気温度 566 °C, 再熱蒸気温度 566 °C, 二段再熱蒸気温度 566 °C)の実績と、1,000 MW 級 USC 蒸気タービン(主蒸気圧力 24.7 MPa, 主蒸気温度 600 °C, 再熱蒸気温度 600 °C)の設計実績があり、これらで得られた知見が、A-USC 蒸気タービン設計のベースとなっている。

### 3.3 要素技術の開発状況

A-USC 蒸気タービンの技術開発においては、タービンの高温部に適用するNi基合金の開発、材料特性の把握、及び製造性(大型鍛造性、大型鋳造性、加工性、溶接性)の検証といった課題が大きなウェイトを占める。



以下に、大型鍛造品のロータと大型鋳造品のケーシングについて述べる。

- (1) ロータ材料の開発 ロータ材料では、高温強度に加えて大型鍛造性が重要となる。また、ロータは異材を溶接した構造であるため、溶接性も重要な検証項目となる。当社は、これらの点を考慮して、新たにロータ用Ni基合金 TOSIX-IIを開発した。これまでに小規模な材料による特性評価を経て、質量14t(インゴット質量31t)の大型鍛造タービンロータの試作を行った(図7)。

外観検査と内部非破壊検査で欠陥のないことを確認した後、切断して詳細な材料調査を行った。ロータ断面の組織観察では、ロータとして問題となるような偏析やその他の異常は認められなかった。

各種ロータ材料のクリープ特性を図8に示す。TOSIX-II製の14tロータは小規模材と同様に十分なクリープ強度を持つことが確認できた。また、この試作ロータを使用してロータ溶接のモックアップ試験を実施した。溶接は、TOSIX-II どちらの共材溶接及びTOSIX-IIとフェラ

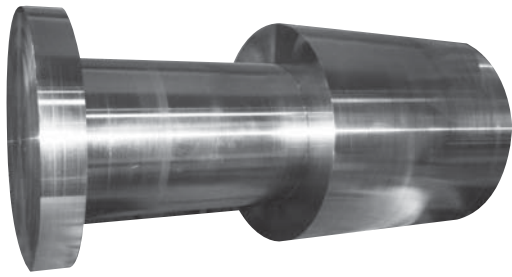


図7. TOS1X-II 製タービンローター — 東芝が開発したNi合金のTOS1X-IIを用いて、質量14tの大型鍛造タービンローターを試作した。  
TOS1X-II turbine rotor

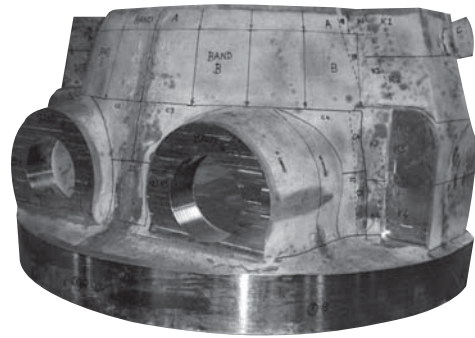


図9. Alloy625 製タービンケーシング — Alloy625を用いて、質量9tの大型鍛造タービンケーシングを試作した。  
Turbine casing using alloy 625

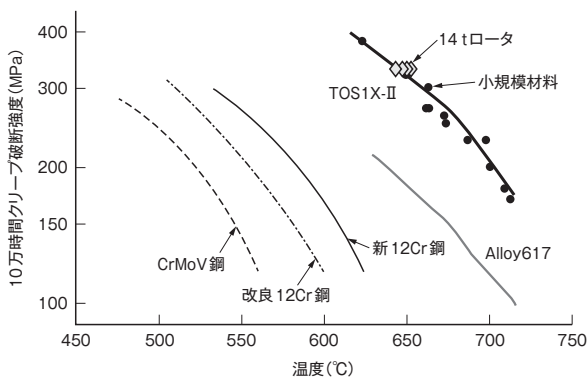


図8. 各種ロータ材料のクリープ特性 — 質量14tのTOS1X-II製ロータ材は、小規模材料と同様に、十分な高温クリープ強度を持っている。  
Creep rupture strength of rotor materials

イト材料の異材溶接を行った。現在、溶接部の詳細な特性評価を実施中である。

(2) ケーシング材料の検証 ケーシング材料については、既存のNi合金の中からAlloy625, Alloy617, Alloy740を候補材料に選定し、鍛造材料としての評価試験を行った。現在、これらの中から鍛造性に優れるAlloy625を選んでケーシングの大型鍛造を行い、鍛造性の評価を実施中である。その試作品を図9に示す。

### 3.4 実缶試験と回転試験の計画

今までに得られた要素技術開発の成果をベースに、より総合的な評価を行うため、現在、実缶試験と回転試験を計画している。

実缶試験では、ボイラで発生する700℃の蒸気を用いて、試作した弁などの動作試験やシール性を評価する予定である。また、回転試験では、タービンロータモデルを製作し、実温度と実回転でロータとしての健全性を評価する予定である。今後ともA-USC蒸気タービンの開発を推進し、早期の実用化につなげていく。

## 4 あとがき

火力発電システムの高効率化は環境と資源の観点からも重要な課題であり、高効率化技術の開発と実機への適用が精力的に取り組まれている。

ここでは、現在当社が取り組んでいる火力発電システム用蒸気タービンの高効率化技術について述べたが、更に高効率化するためには、熱サイクルも視野に入れた総合的な改善に取り組んでいく必要がある。また、開発技術を実機に適用する際は信頼性の確保が不可欠であり、信頼性に対する様々な視点からの検証と評価が必要になってくる。

今後、それぞれの課題に対して着実に技術開発と検証を進め、高効率で信頼性の高い製品を提供していく。



今井 健一 IMAI Kenichi

電力システム社 火力・水力事業部 火力プロジェクト部主幹。  
蒸気タービンを中心とした火力発電設備のエンジニアリング業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



高橋 武雄 TAKAHASHI Takeo

電力システム社 火力・水力事業部 火力プロジェクト部参事。  
高温タービンの技術開発に従事。日本機械学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.