

# 700 °C級 先進超々臨界圧蒸気タービンシステム

## 700°C-Class Advanced Ultra-Supercritical Steam Turbine

須賀 威夫      高橋 武雄      今井 潔

■ SUGA Takeo      ■ TAKAHASHI Takeo      ■ IMAI Kiyoshi

石炭火力発電プラントの熱効率の向上は、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量の削減にとって不可欠であり、蒸気条件 (圧力及び温度) の向上は、熱効率向上のもっとも有効な手段の一つである。

東芝は、蒸気タービンの熱効率向上に長年取り組んでおり、蒸気条件の向上に向けて700 °C級先進超々臨界圧 (A-USC: Advanced Ultra Super Critical) 蒸気タービンシステムの開発を進めている。この技術により、発電プラントのCO<sub>2</sub>排出量の約70%を占める石炭火力発電プラントの熱効率が大幅に向上し、地球温暖化防止にも大きく貢献する。

Enhancement of the thermal efficiency of coal-fired power plants is required for the reduction of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions. The most effective means of achieving this goal is to improve the steam condition of the plant.

Toshiba has been developing various new technologies for high-efficiency steam turbine plants, including a 700°C-class advanced ultra-supercritical (A-USC) steam turbine. These technologies will realize both higher thermal efficiency of coal-fired power plants and lower CO<sub>2</sub> emissions to prevent global warming.

### 1 まえがき

近年、中国やアジア各国を中心とする世界各国の経済発展によりエネルギー需要が高まり、石油や天然ガスなどの化石燃料の価格が上昇している。この傾向はこれからも当分続くと思われ、将来的にもいっそうの価格上昇は必然的な様相を呈している。一方で、電力自由化が活発化するなか、安価な電気が今まで以上に求められている。また、近年における地球規模での温暖化現象を背景に、温室効果ガスを削減する気運が世界的な高まりを見せている。

このような状況の下、火力発電分野でも石油、天然ガス、石炭などの化石燃料を効率よく使用する技術の確立が非常に重要なものとなっている。なかでも、豊富な埋蔵量で安定的に供給が可能な石炭を効率的に使用する技術が、従来以上に重要な役割を担うと考えられる。その技術の代表として、石炭ガス化複合発電システム (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) や超々臨界圧 (USC: Ultra Super Critical) 蒸気タービンシステムが挙げられる。ガスタービンを用いたIGCCは、石炭を使ううえで洗練された方法の一つであり、現在、わが国でも国家プロジェクトとして開発が進められている。

一方、現有の確立された技術であるUSCプラント技術においては、蒸気条件を高温化して高効率化を目指す開発が進められてきた。現在、USCプラントの蒸気温度は600 °C級であるが、これを更に700 °C級まで高温化させて大幅な効率向上を可能にするのが、700 °C級先進超々臨界圧 (A-USC: Advanced USC) 蒸気タービンシステムである。

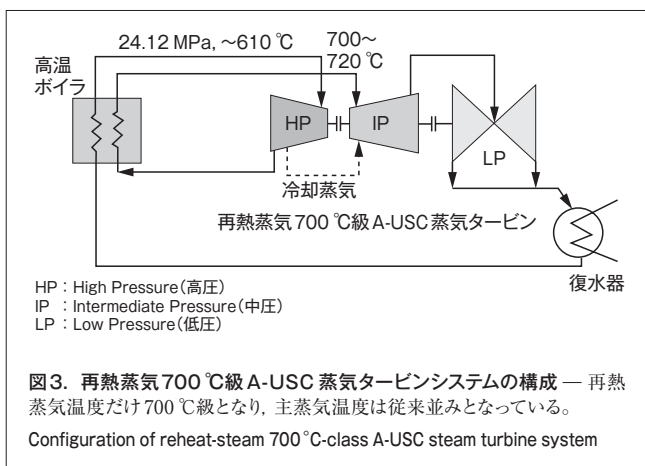
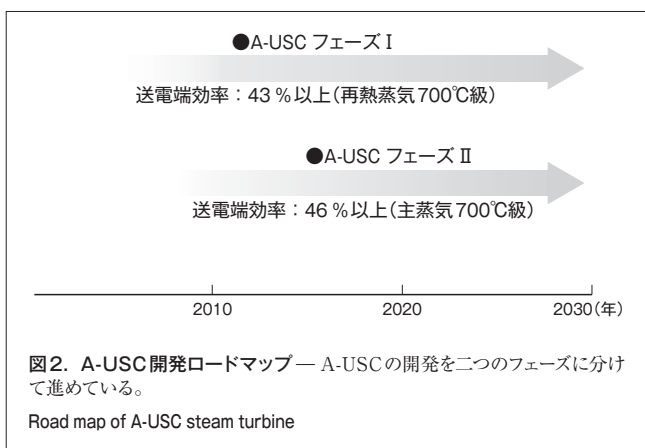
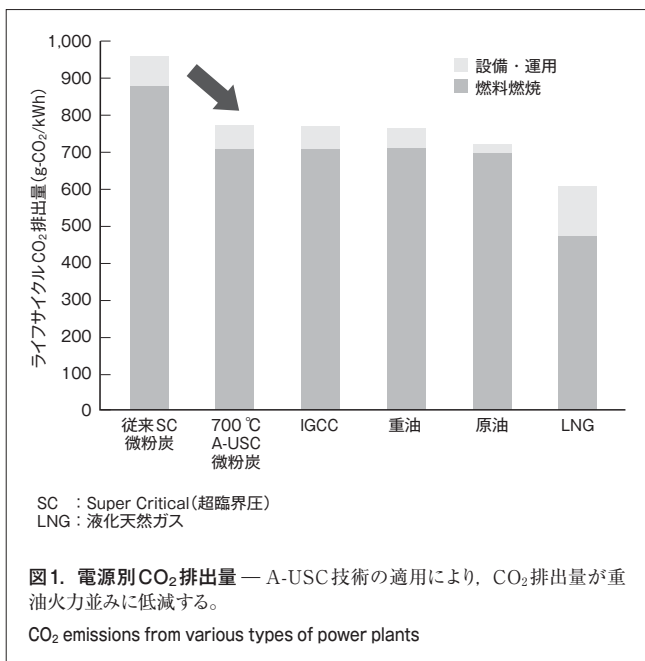
### 2 700 °C級 A-USC 蒸気タービンシステム

蒸気タービンシステムにおいては、長い間主蒸気538 °C、再熱蒸気566 °Cのものが標準的であった。しかし、プラントの高効率化を狙って、1990年代から蒸気温度の高いプラントが登場し、最近では主蒸気600 °C及び再熱蒸気610 °Cのプラントが実現している。送電端効率 (HHV: Higher Heating Value) は600 °C級一段再熱プラントで42%程度を達成している。これに対し、主蒸気700 °C及び再熱蒸気720 °C / 720 °Cの二段再熱蒸気のア-USCプラントでは、46%以上の送電端効率が期待できる<sup>(1)</sup>。これにより、燃料に石炭を用いてもCO<sub>2</sub>排出量を従来の重油火力並みに抑えることが可能になる (図1)。

A-USCの実用化のためには、700 °C以上の蒸気に耐えられるNi (ニッケル) 基合金の開発と、信頼性及び経済性を同時に達成するためのシステムと構造上の工夫が必要となる。

東芝は、A-USC蒸気タービンの開発を二つのフェーズに分けて、開発を進めている (図2)。

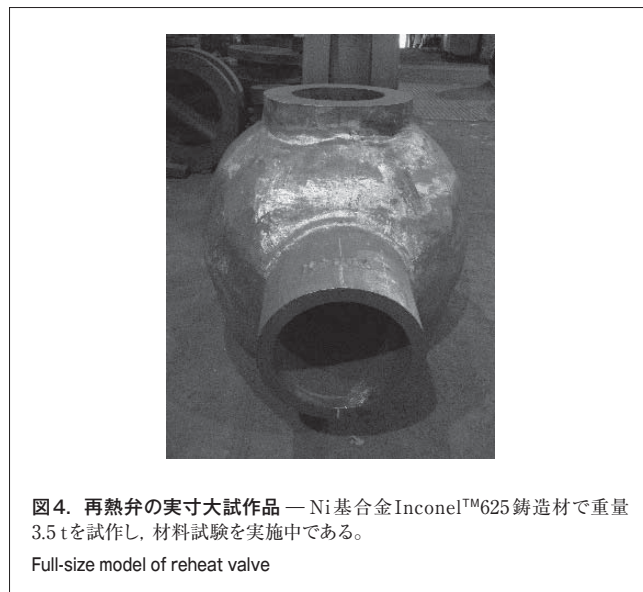
フェーズIは、再熱蒸気700 °C級蒸気タービンの開発である。再熱蒸気700 °C級システムでは、圧力の高い主蒸気は600 °C級とし、比較的圧力の低い再熱蒸気だけを700 °C級に高温化している (図3)。主蒸気を600 °C級とすることで、主蒸気系統はすべて従来技術が適用でき、開発項目を再熱蒸気系統だけに限定できる。700 °Cの再熱蒸気に直接さらされる中圧タービンは、三重構造のケーシング (車室) と冷却技術との組合せで、Ni基合金の適用範囲を中圧タービンのごく一部



と再熱弁などに限定する(表1)。再熱蒸気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、蒸気条件が

表1. 再熱蒸気700℃級A-USC蒸気タービンシステムの適用材料  
Hot-parts materials for reheat-steam 700°C-class A-USC steam turbine

項目	主蒸気：～610℃	高温再熱蒸気：700～720℃
タービン	高圧タービン： 既存高温化技術の適用 (既存フェライト系材料使用)	中圧タービン： 冷却技術の適用により既存材料を最大限使用 (ロータ、車室などの主要部位は既存フェライト系材料を使用)
ボイラ	過熱器及び主蒸気配管： 既存高温化技術の適用 (既存規格材の使用)	再熱器及び高温再熱蒸気管： 既存高温化技術の適用 (既存規格材の使用)



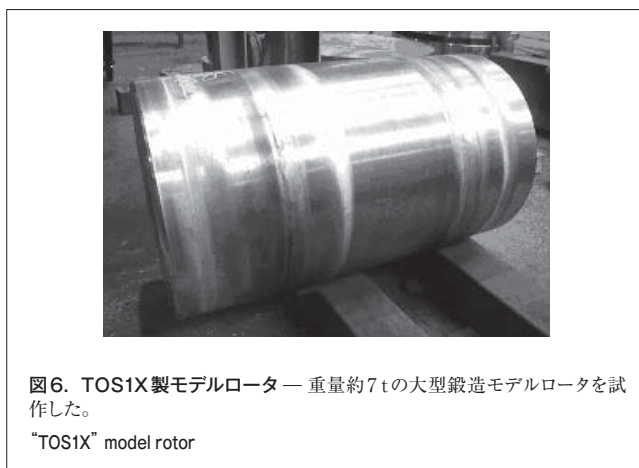
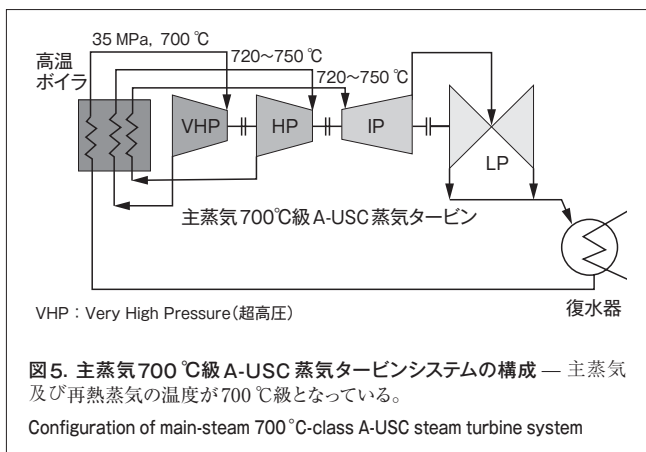
24.1 MPa, 610℃/720℃の一段再熱式システムで、送電端効率43%以上が期待できる。

開発課題としては、再熱弁と中圧タービンの一部に適用する大型のNi基合金部品と中圧タービンの冷却技術などである。当社で試作した再熱弁の実寸大の試作品を図4に示す。材質は既存のNi基合金Inconel™625(注1)で、重量は3.5tの铸造品である。現在、試作品から材料試験用の試験片を切り出し、詳細な材料試験を実施中である。

開発のフェーズIIは、主蒸気700℃級システムである。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、再熱蒸気700℃級システムより更に高い効率を狙う(図5)。主蒸気及び再熱蒸気とともに高温化するため、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Ni基合金を適用する必要がある。蒸気条件が35 MPa, 700℃/720℃/720℃二段再熱式のシステムでは、46%以上の高い送電端効率が期待できる。

開発課題としては、Ni基合金の開発が挙げられる。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

(注1) Special Metals Corporationの登録商標。



が、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ポイントになる。

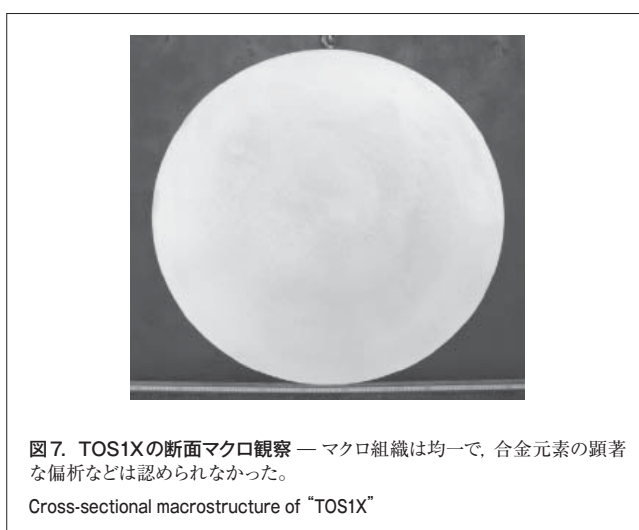
一方、Ni基合金は、従来のフェライト系耐熱鋼に比べて、高価な材料であるため、経済的な設計が要求される。効果的な冷却技術やフェライト鋼との異材溶接技術などにより、Ni基合金の適用範囲をできるだけ少なくする工夫が必要になる。また、蒸気タービン全体の構造を考えたとき、一部の材料にNi基合金を適用することで、線膨張係数などの特性が違うNi基合金とフェライト鋼との接合や組合せが生じる。この場合、熱応力や熱伸び差を十分配慮した設計が必要になる。

### 3 タービンローター用Ni基合金の開発

前述のようにA-USC蒸気タービンシステムの開発課題の一つとして、耐熱合金の開発が挙げられる。現在、蒸気タービンの材料として使用されているフェライト系の耐熱鋼では、630℃程度が適用限界と考えられている。700℃以上の蒸気条件に対してはNi基合金の適用が不可欠と考えられる。その際に問題となるのは、Ni基合金の大きさである。Ni基合金は、航空機用や発電用のガスタービンなどに適用実績があるが、これら部品の大きさは2～3tの規模にとどまっている。これに対し、蒸気タービン用ローターは10～30tのサイズである。A-USC蒸気タービンを実現するためには、Ni基合金で大型のものを作る技術、あるいは溶接構造により大型部品を製作する技術が必要である。

当社で試作した蒸気タービンのモデルローターを図6に示す。この試作品は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成18年度 (2006年度) 及び19年度委託事業「エネルギー使用合理化技術戦略開発/700℃超級超々臨界圧発電用蒸気タービン新材料の研究開発」の一環として製作した。材質は、当社が新たに開発したNi基合金TOS1Xで、重量約7tの鍛造品である。

TOS1Xは、既存のNi基合金Inconel™617をベースに成分



組成を改良して、鍛造性や溶接性を維持しつつ高温強度を向上させた合金である。試作した大型モデルローターの寸法は、直径850 mm、長さ約1,500 mmの中実円筒状である。

試作したモデルローターを長手方向中央部で切断し、断面組織の観察を行った。断面のマクロ組織写真を図7に示す。マクロ組織は均一で、合金元素の顕著な偏析などは認められなかった。

室温の耐力と引張強さを、この合金開発のベースとなったInconel™617の文献値<sup>(2)</sup>と比較して図8に示す。この試作材の室温強度は、耐力と引張強さのいずれもInconel™617を約10%上回っていた。また、試作品の中心部と表層部の強度差は、わずか1%程度であった。

試作したモデルローターのクリープ<sup>(注2)</sup>破断強度を測定した。試験温度と破断時間から得たラーソンミラーパラメータ(C=20)<sup>(注3)</sup>から10<sup>5</sup>時間破断温度を求め、試験応力に対してプロットした結果を図9に示す。なお、図9には、代表的な

(注2) 応力により、時間の経過とともにひずみが増大する現象。

(注3) Cは、定数のこと。

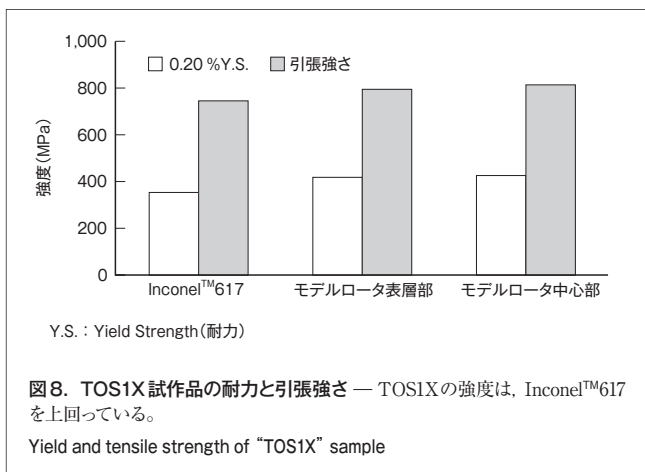


図8. TOS1X試作品の耐力と引張強さ — TOS1Xの強度は、Inconel™617を上回っている。

Yield and tensile strength of "TOS1X" sample

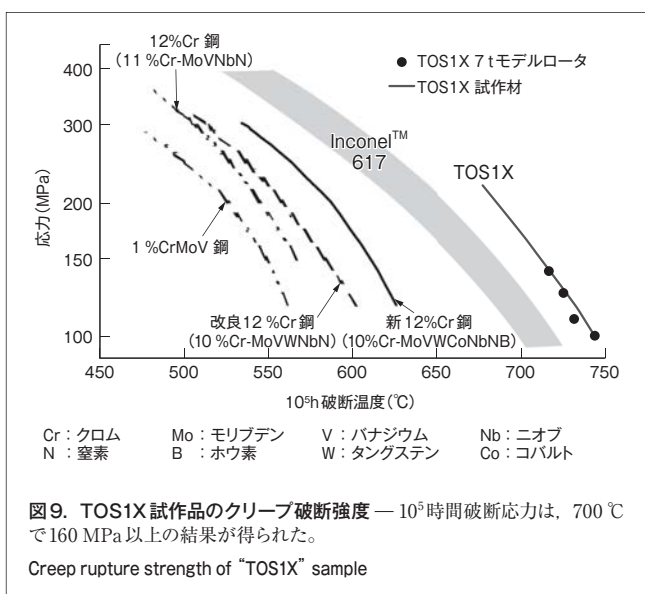


図9. TOS1X試作品のクリープ破断強度 — 10<sup>5</sup>時間破断応力は、700℃で160 MPa以上の結果が得られた。

Creep rupture strength of "TOS1X" sample

ロータ用材料であるフェライト鋼のクリープ破断強度<sup>(3)</sup>も併せて示す。これによると、この試作ロータの10<sup>5</sup>時間破断応力は、A-USCの主蒸気温度である700℃で160 MPa以上となっている。

現状USCシステムの主蒸気温度におけるフェライト系ロータ材料の10<sup>5</sup>時間破断応力が100～150 MPaであることを考慮すると、TOS1Xは700℃の条件で十分な高温強度を備えていることがわかる。現在、長時間のクリープ破断試験を継続中である。

#### 4 あとがき

燃料の高騰が続き、環境に対する関心が高まっている状況下において、発電プラントの高効率化は極めて重要な課題である。A-USC蒸気タービンシステムは、特に石炭火力の高効率化の技術として非常に有用であり、エネルギーセキュリティと地球環境対策の両立に有効な発電技術であると言える。今後、A-USC蒸気タービンシステムを実用化するため、いっそうの材料検証と要素技術開発を進めることにより、地球温暖化防止に大きく貢献したい。

なお、2008年8月からA-USCプラントの要素技術開発が、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」として開始された。当社もこのプロジェクトに参画し、早期実用化のために貢献していく。

#### 文献

- エネルギー総合工学研究所. 「700℃級超々臨界圧プラント (A-USC) 技術開発—経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO<sub>2</sub>排出削減研究」成果報告書. エネルギー総合工学研究所, 東京, 2006, p.1-142.
- Inconel™ alloy 617, Special Metals社 catalogue.
- 山田政之, ほか. 蒸気タービン用12%Cr系耐熱鋼の開発と強化機構. 耐熱金属材料 第123委員会研究報告, 39, 3, 1998, p.303-317.



須賀 威夫 SUGA Takeo

電力システム社 火力・水力事業部 火力・水力企画部主務。火力新発電技術開発業務に従事。  
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・水力企画部グループ長。火力新発電技術開発業務に従事。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



今井 潔 IMAI Kiyoshi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部主査, 工博。電力システム用構造材料の開発業務に従事。日本鉄鋼協会, 材料学会, セラミックス協会, 腐食防食協会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center