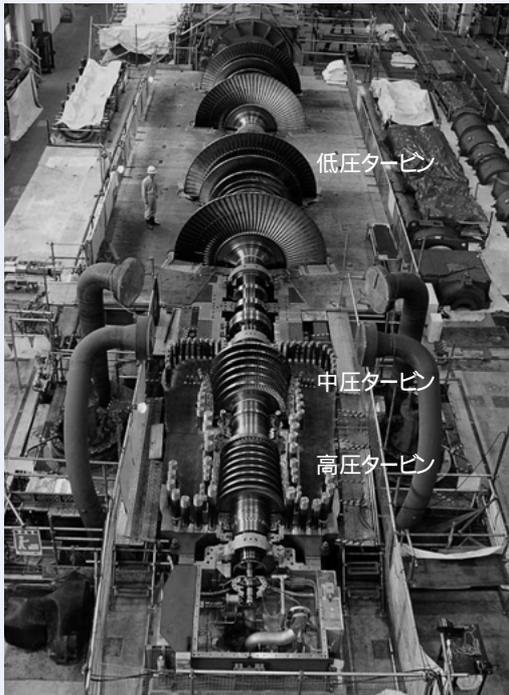


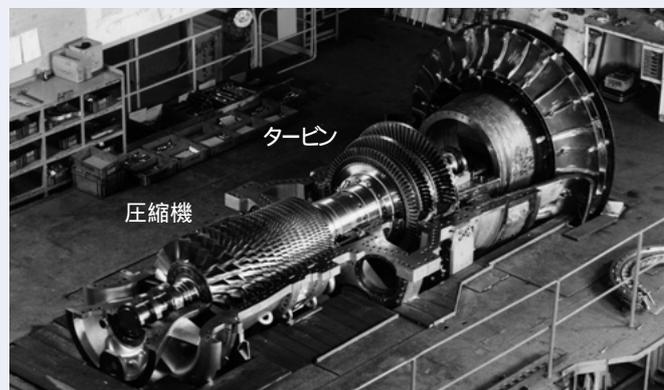
# 火力プラントを支える耐熱材料

## Heat Resistant Materials for Thermal Power Plants

土井 裕之 *Hiroyuki Doi*      有川 秀行 *Hideyuki Arikawa*  
吉成 明 *Akira Yoshinari*      村田 健一 *Ken'ichi Murata*



(a) 北海道電力株式会社納め  
苫東厚真4号機超々臨界圧蒸気タービン  
(出力：700 MW, 蒸気条件：25 MPa/600/600 )



(b) H-25ガスタービン(出力：25 MW, 入口ガス温度：1,260 )

### 超々臨界圧蒸気タービンと H-25<sup>®</sup>ガスタービンの外観

北海道電力株式会社苫東厚真発電所4号機に納入した超々臨界圧蒸気タービンには、日立製作所で開発した高・中圧ロータ材が、低圧タービン最終段には43インチ(約109 cm)長翼材がそれぞれ採用されている。また、自主開発したガスタービン<sup>®</sup> H-25<sup>®</sup>にも動静翼、燃焼器をはじめとする高温部品に、日立製作所の材料・プロセス技術が採用されている。

電力の安定供給を図るためには、供給コストの低減や地球環境問題を考慮した発電技術の開発が必要不可欠である。CO<sub>2</sub>排出抑制の観点から、風力・太陽光発電などに代表される再生可能なクリーンエネルギーの開発も進められているものの、電源の大半は、まだ化石燃料や原子力が主力である。電源構成の中で引き続き大きな比重を占めると考えられる火力発電プラントでは、「京都議定書」の発効を踏まえ、可能な限りCO<sub>2</sub>排出量が少ない、すなわち単位発電量当たりの

CO<sub>2</sub>排出量を低減した高効率発電技術の開発が必要である。そのためには、コンバインドサイクルのような複数のシステムを組み合わせることで高効率化を図るとともに、蒸気タービンやガスタービンに代表される発電システムそのものの高温・高圧化による効率向上技術が期待されている。

日立製作所は、このような背景の下で、蒸気タービンとガスタービンの高効率化を支える要素技術の一つとして、耐熱材料技術(材料・プロセス)の開発を進めている。

## 1 はじめに

一次エネルギーとして化石燃料への依存度が高いわが国

の火力発電分野では、地球温暖化の原因となっているCO<sub>2</sub>排出量を低減した環境負荷の少ない高効率発電システムの開発が大きな課題である。この課題を解決するためには、火力発電の両輪である蒸気タービンやガスタービンで、蒸気温度

あるいはガス温度の高温・高圧化による効率向上が最も有効な手段の一つである。

この高温・高圧化プラントを支える最も重要な要素技術の一つとなる高温部品を構成する材料には、これまでよりさらに高い耐熱性が要求される。

ここでは、日立製作所が研究開発中の蒸気タービンロータとガスタービン動翼に使用される最新の耐熱材料技術について述べる。

## 2 耐熱材料技術の二一ス

蒸気タービンの高効率化は、超々臨界圧プラントとして材料開発を中心に国内外で進められてきた。すでに国内では蒸気温度600～610の商用機が実用化されており、重要部品であるロータには、重電機メーカー各社がそれぞれ開発した12%Cr含有鋼が採用されている<sup>1)</sup>。欧州や米国では、石炭火力の見直しに伴い、さらに温度の高い高効率蒸気タービンを対象に(欧州では700～720、米国では760)材料開発が活発化している。ここで使用される材料で重要な課題はNi基超合金の開発であり、特に大型部材であるロータでは、Ni基超合金の大型鋼塊製造をどのように可能にするかが開発のポイントである<sup>1)</sup>。

一方、ガスタービンでは、高温化による高効率化に伴い、高温部品、特に動翼の耐久性をいっそう向上させていく必要がある。そのためは、鑄造時に結晶制御された単結晶合金と、メタル温度を低減するための遮熱コーティングがキー技術となる。

## 3 火力発電技術を支える耐熱材料技術

### 3.1 高効率蒸気タービン用新材料

日立グループは、主蒸気温度と熱効率を向上させる目的で、高温強度に優れたロータ材料「HR1100鋼」を開発し<sup>2)</sup>、主蒸気温度600のUSC(Ultra Supercritical: 超々臨界圧)発電プラントの実用化に大きく貢献した。また、高温強度をさらに高めた「HR1200鋼」を開発し、主蒸気温度のいっそうの向上を可能としている<sup>3)</sup>ほか、近年、航空機エンジンやガスタービンに用いられるNi基超合金をロータに適用することにより、主蒸気温度を大幅に向上させ、熱効率をコンバインドサイクルやIGCC(Integrated Gasification Combined Cycle: ガス化複合)発電設備と同等以上としたA-USC(Advanced Ultra Supercritical)蒸気タービンプラントの開発を検討している。Ni基超合金を用いた蒸気タービンロータの開発では、大型鋼塊製造時の偏析や鍛造性が大きな課題であり、大型鋼塊の製造性に優れた超合金の開発が求められている。

日立グループは、高強度超合金として最も大型鋼塊製造性と鍛造性に優れている「Alloy706」を改良し、主蒸気温度700のA-USC蒸気タービンロータに適用可能なロータ材「FENIX-700」を開発中である<sup>4)</sup>。Alloy706は約40 wt%のFeを含むため、他のNi基超合金と比較してコスト的にも有利である。Alloy706は、Nbの添加により、ナノオーダーの金属間化合物「Ni<sub>3</sub>Nb」を析出させるので、高い強度を持っている。しかし、大型鋼塊製造過程での凝固時にNbが偏析する傾向にあるため、鋼塊サイズに限界があり、10 tを超える蒸気タービンロータの製作は困難である。また、Ni<sub>3</sub>Nbは熱力学的に不安定であり、高温では材料劣化を引き起こす有害相(相)に変態するため、700近傍となるA-USC蒸気タービンでは長時間供用時の強度や信頼性を低下させる要因となる。

FENIX-700では、CALPHAD( Calculation of Phase Diagram)法を用いた合金設計手法により、Alloy706の化学成分を再検討し、有害相を不安定化してNi<sub>3</sub>Al(相)を析出させている(図1(a)参照)。Ni<sub>3</sub>Alは、航空機エンジンやガスタービン動翼材料の析出強化相であり、高温でもきわめて安定的、かつ理想的な析出強化相である。Alloy706とFENIX-700を700に暴露した後の透過電子顕微鏡像を図1(b)と(c)

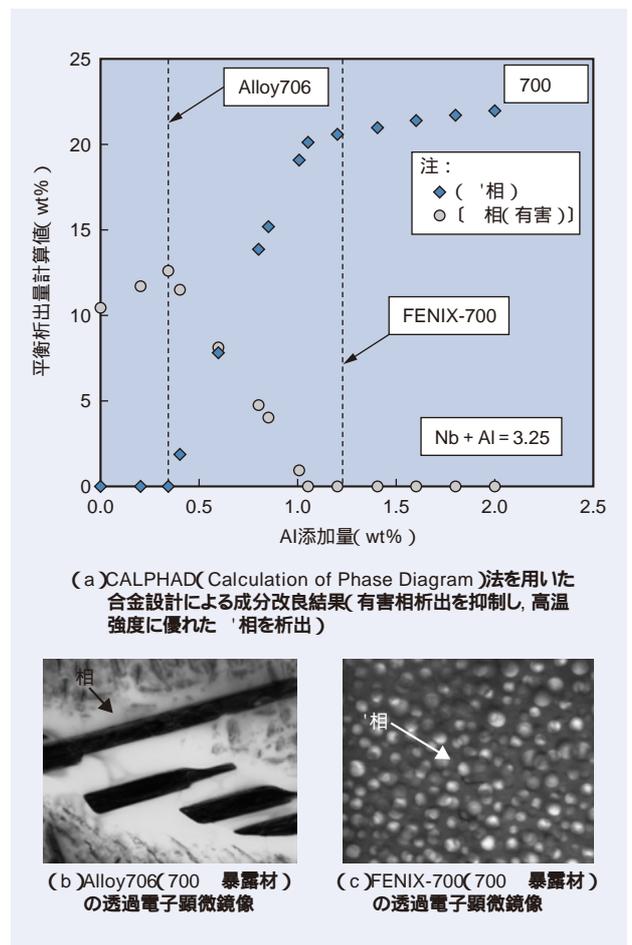


図1 合金設計手法と長時間暴露材の透過電子顕微鏡像

計算状態図を用いて安定な組織を形成するための主要元素であるAl量を最適化し(a)、長時間暴露試験後も有害相の相を析出せず、安定な相だけを析出(b、c)した。

にそれぞれ示す。Alloy706では有害相である 相の析出が顕著であるが、FENIX-700では 相の析出は見られず、析出強化相である 相が長時間安定に存在している。このような組織安定性の改善により、高温強度も良好で、700 °Cでの推定クリーブ破断強度はロータ材としての目標値である100 MPaをクリアできる見通しである。また、FENIX-700では偏析元素であるNbを低減しており、大型鋼塊の製造性についても改善が期待できる。

### 3.2 高温ガスタービン用単結晶合金材料

ガスタービンの効率化にはタービン動・静翼用材料の耐熱性(高温強度)の向上が有効であり、航空機用ジェットエンジンではNi基超合金の単結晶材が数多く使用されている。しかし、発電用ガスタービンの場合は、動・静翼が大型で複雑な構造であるため、単結晶化が困難なことが実用上の大きな課題であった。

そのため、単結晶 casting 時の異結晶(主結晶と方位が異なる結晶)がある結晶方位差までは単結晶として使用が可能な合金とすることで、 casting 歩留り向上が期待できる異結晶許容型単結晶合金“YH61”を開発した<sup>5)</sup>(図2参照)。

今回の開発では、Reの添加とW, Ta, Re, Mo量の最適化および 相の析出量と形状の制御により、クリーブ強度を向上させた。また、異結晶を許容し、 casting 歩留りを向上させるため、結晶粒界強化元素であるC, B, Hfを添加して、それらの



図2 開発合金“YH61”で casting した“H-25”ガスタービンの初段単結晶動翼の外観

開発した単結晶合金“YH61”によって試作した“H-25”ガスタービンの第1段動翼を示す。複雑な動翼形状への精密 casting 性にも問題なく製作が可能である。

最適化を図った。さらに、部分溶体化熱処理を採用し、溶体化熱処理時の再結晶を抑制するとともに、耐食・耐酸化特性の向上を図った。開発した単結晶合金“YH61”のクリーブ破断強度は、現用多結晶合金“IN738LC”に比べ、耐用温度で約100 °C向上している。

開発した単結晶合金を用いて、日立製作所のガスタービン“H-25”の初段動翼と初段静翼の casting 試験を行い、開発合金は単結晶 casting 性と耐再結晶性に優れていることを確認した。YH61は異結晶を許容するという新たなコンセプトに基づくものであることから、単結晶翼の casting 歩留りを従来の2倍以上にすることを可能にしており、低コスト化と信頼性向上の面から、発電ガスタービンでの単結晶翼の実用化へ大きく寄与するものである。

### 3.3 高温ガスタービン用遮熱コーティング

#### 3.3.1 遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)

遮熱コーティングは、動翼、静翼、燃焼器などの高温部材表面に、低熱伝導のセラミクス(主にジルコニア系)をコーティングするもので、高温部材の熱負荷を効果的に低減することが可能であり、耐熱合金の耐熱温度を補ううえで重要な技術となってきている。例えば、現用のガスタービン動翼に厚さ0.2~0.3 mmの遮熱コーティングを適用することで、基材温度を60~100 °C低減することが可能である。しかし、過酷な高温環境下での長期間の運転では、遮熱コーティングのはく離損傷が問題となり、高温ガスタービンへの適用には、耐久性と信頼性のいっそうの向上が求められている。

#### 3.3.2 組織制御による高耐久遮熱コーティング

遮熱コーティングのはく離損傷の主な原因は、使用時の温度こう配、基材との熱膨張差、起動・停止時の過渡的な温度変化、高温下でのセラミック層の変質(焼結、相変態)などに起因する熱応力により、遮熱セラミック層内にき裂が発生、伝ばするためと考えられている。したがって、コーティングの構造や組織を制御することによってセラミック層に作用する熱応力を緩和することが、遮熱コーティングの耐久性を向上するうえで有効な手段の一つとなる。

熱応力緩和型の遮熱コーティングとしては、セラミック層内に多数の気孔を導入した多孔質型、熱膨張を調節するための中間層を設ける多層型、セラミック層を柱状組織化する柱状組織型など、いろいろな方法がある。これらの中で、柱状組織型は、高い熱応力緩和効果が得られ、優れた耐久性を示す。しかし、十分な熱応力緩和機能を発現させるためには、高度な組織制御が必要であり、遮熱コーティングの成膜に主に用いられてきた溶射法では、柱状組織化は困難であった。

電子ビーム物理蒸着法(EB-PVD: Electron-Beam Physical Vapor Deposition)は、真空蒸着法の一つで、原材料に電子ビームを照射して溶融蒸発させ、ナノオーダーの粒子

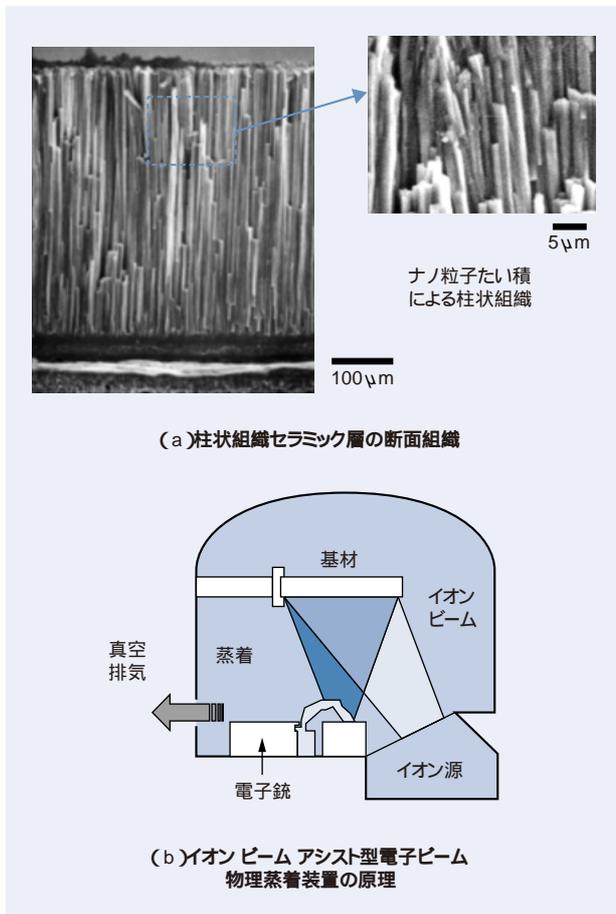


図3 柱状組織セラミック層の断面組織 (a)と成膜装置の原理 (b)

考案した物理蒸着法 (b)により、柱状組織を持つセラミック層を形成 (a)した。この柱状組織により、発生する熱応力を緩和し、耐久性を向上させる。

として基材にたい積させる成膜法である。日立製作所は、この成膜法に着目し、組織制御性や密着性をさらに向上させるため、電子ビーム物理蒸着法にイオンビーム照射を併用する独自の「イオンビームアシスト型電子ビーム物理蒸着法」を開発した。この成膜法で、遮熱セラミック層を微細な柱状組織化することによって高耐久遮熱コーティングを実現した<sup>6)</sup>(図3参照)。

このような微細な柱状組織を持つ遮熱セラミック層では、柱状組織間の分離により、熱応力が容易に開放される。また、膜厚(縦)方向に成長した柱状組織は、皮膜はく離の要因となる膜面(横)方向の欠陥をほとんど含まない。したがって、非常に高い耐久性を示し、開発した「柱状組織型遮熱コーティング」では、多孔質型の約4倍以上の耐熱性を確認しており、実機試験でも優れた耐久性が実証されている。

## 4 おわりに

ここでは、高効率火力発電システムを支える耐熱材料技術として、将来の700 超々臨界圧蒸気タービン用ロータ材、ガスタービン動翼用単結晶合金、および遮熱コーティングの開発について述べた。

日立製作所は、今後も、発電分野を支える材料技術の開発を進めていくとともに、高効率化、高信頼化、低コスト化を考慮した製品展開により、省エネルギーと地球環境問題に取り組んでいく考えである。

### 参考文献

- 1) Rudolph Blum, et al.: Benefit of Advanced Steam Power Plants, Materials Advanced Power Engineering 2002 (Sept. 2002)
- 2) 志賀, 外: 超々臨界圧タービン用改良12Cr鋼ロータ材料, 鉄と鋼, Vol.76, No.7 (1990.7)
- 3) 金子, 外: 蒸気温度650 を目標としたタービン材料の開発, 火力原子力発電, Vol.46, No.9 (1995.9)
- 4) 今野, 外: 700 級超々臨界圧蒸気タービンロータ用Ni基合金の組織とクリープ強度(第1報), CAMP-ISIJ (2004.10)
- 5) H.Tamaki, et al.: Development of A Grain Resistant Ni-based Single Crystal Superalloy YH61, IGTC2003, TS-124 (2003.)
- 6) 児島, 外: 発電用ガスタービンコーティング技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol.30, No.6 (2002.11)

### 執筆者紹介



土井 裕之

1981年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在, 蒸気・ガスタービン材料の開発に従事  
日本鉄鋼協会会員  
E-mail: hdoi @ gm. hrl. hitachi. co. jp



吉成 明

1981年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在, ガスタービン用単結晶合金の開発に従事  
工学博士  
日本鉄鋼協会会員, 日本ガスタービン学会会員  
E-mail: ayoshina @ gm. hrl. hitachi. co. jp



有川 秀行

1988年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在, ガスタービン用コーティングの開発に従事  
表面技術協会会員, 日本ガスタービン学会会員  
E-mail: harikawa @ gm. hrl. hitachi. co. jp



村田 健一

1994年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 タービン設計部 所属  
現在, 蒸気タービンの設計に従事  
日本ガスタービン学会会員  
E-mail: kenichi\_murata @ pis. hitachi. co. jp