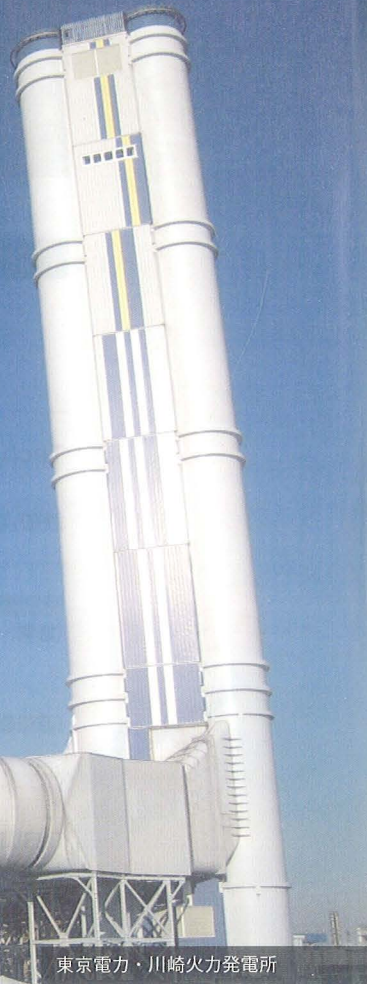


高効率化が進む 天然ガス複合発電

高効率な天然ガス複合発電プラントの導入が相次いで発表されている。

背景には、地球温暖化防止への社会的な要請がある。今後のCO₂増加に歯止めをかけるには、国内CO₂排出量の1/3を占める火力発電の発電効率向上が強く望まれている。化石燃料を使用する最もクリーンな発電方式として、天然ガス複合発電は注目されており、現在はさらなる効率向上が進められている。ガスタービンの高温化をはじめとして、蒸気タービンと合せた総合効率の向上が進展している。



東京電力・川崎火力発電所

CO₂ 削減を目指して注目される天然ガス複合発電

熱効率*59%を誇る天然ガス複合発電プラントが東京電力(株)・川崎火力発電所に建設され、話題を呼んだ。同プラントのガスタービン入口ガス温度は1500℃、熱効率は世界最高水準を達成している。CO₂排出量、燃料使用量ともに、従来型天然ガス火力に比べ約25%削減している。

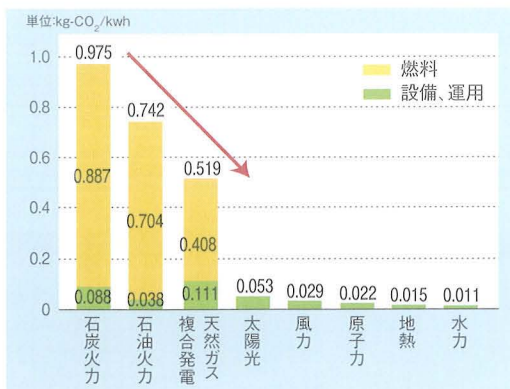
最近ではさらに高効率な天然ガス複合発電プラントの建設予定が発表されており、ガスタービン入口ガス温度が1600℃、熱効

率は約61%と、従来を上回る効率でCO₂排出量の削減が目指されている。

天然ガス複合発電とは、天然ガスを燃料に用いた複合発電(コンバインドサイクル発電。ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ)方式である。

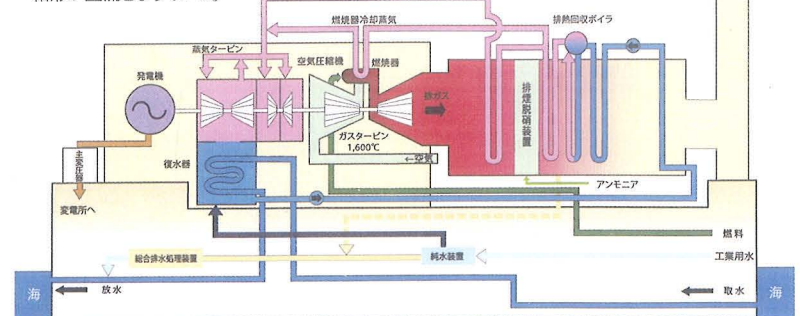
そもそも天然ガスは石炭や石油に比べ発熱量が大きく、単位重量あたりの発熱量を比較すると、天然ガス54MJ/kg、重油46MJ/kg、石炭21~33MJ/kgと、天然ガスが最も高い。発熱量は物質の構成元素によって決まるが、メタン(CH₄)を主成分とする天然ガスは、水素を多量に含むため発熱量が大きい。天然

■単位電力あたりのCO₂発生量



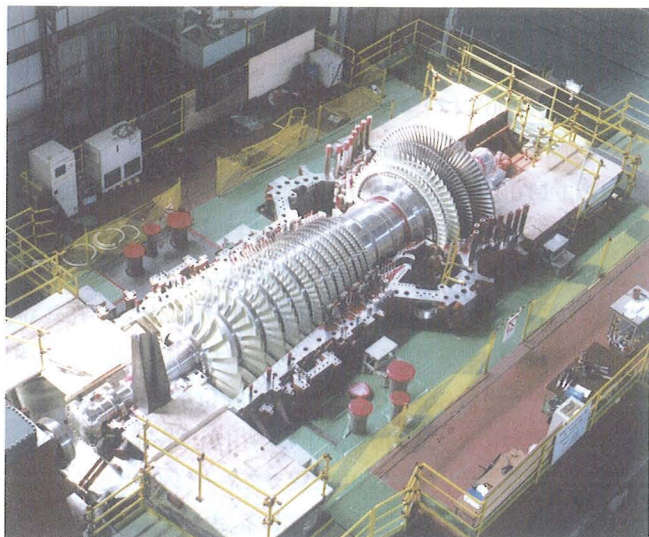
■天然ガス複合発電設備の構成

ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせは、1基のガスタービンに1基の蒸気タービンを配列した一軸形と、複数のガスタービンに1基の蒸気タービンを配置した多軸形に大別される。起動停止を頻繁に繰り返す操作を行う日本においては、急速な負荷変動に対応しやすい一軸形が主流となっている。



資料提供:東京電力(株)

* 本文は低位発熱量(Lower Heating Value, LHV)を基準としている。低位発熱量とは燃料中の水分および燃焼によって生成された水蒸気の凝縮熱(蒸発潜熱)を差し引いて産出した熱効率。高位発熱量(Higher Heating Value, HHV)は蒸発潜熱を含む。



商業用として世界最高のタービン入口ガス温度を持つガスタービン(資料提供:三菱重工業(株))

ガスを燃焼して発生した燃焼ガスは、ガスタービンを回した後も排ガス温度が十分高いため、ガスタービンを回した後、排熱を利用して蒸気タービンを回すことができる。現在、天然ガスを燃料に利用する火力発電設備では、複合発電が主流となっている。

高効率な天然ガス複合発電は、石炭火力、石油火力に比べCO₂発生量が少ない。石炭火力、石油火力、天然ガス複合発電火力の3種を比べると、単位電力あたりのCO₂発生量は順に100:76:53となっている。このような環境特性から、CO₂削減がさし迫った課題となっている今日、天然ガス複合発電プラントの需要が世界的に高まっている。

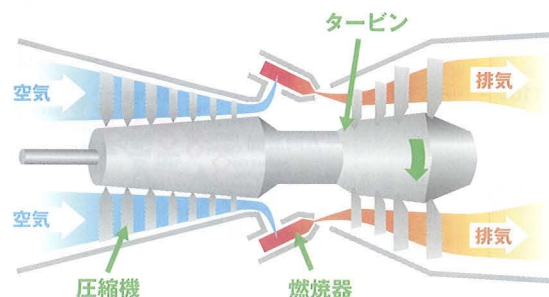
著しい進展をみせるガスタービンの高温化

天然ガス複合発電プラントは、主にガスタービン、蒸気タービン、排熱回収ボイラ、発電機、復水器等で構成される。このうちプラントの高効率化に大きく関わるのがガスタービンである。ガスタービンは高温燃焼ガスから直接発電電力を得る内燃機関で、起動後、短時間で大出力を得られるのが特長である。

ガスタービンは圧縮機で高圧空気をつくり、これを燃焼器に吹き込んでガスを燃焼させる。発生した高温高圧の燃焼ガスをタービンに向かって吹き付けると、燃焼ガスは急激に膨張を始め、ガスタービン出口へ向かって高速で流出し、タービンを回転させる。回転力は発電機に伝えられ電力が生まれる仕組みとなっている。

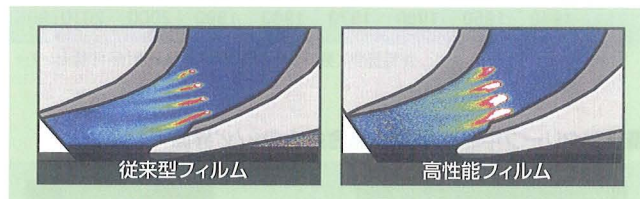
ガスタービンの入口ガス温度が高い方が、より高効率な発電が可能となるため、高温化が著しく進展している。電気事業用として、我が国に初めて天然ガス複合発電プラントが導入されたのが1984年、当時のガスタービン入口ガス温度は1150℃、熱効率

■ガスタービンの構造(資料提供:三菱重工業(株))



■動翼の翼間、後縁付近のフィルム冷却効率

従来型フィルム孔と形状を最適化した高性能フィルムを比較したところ、高性能フィルムの方がより均一で高い冷却効率を得られることが確認された。(資料提供:三菱重工業(株))

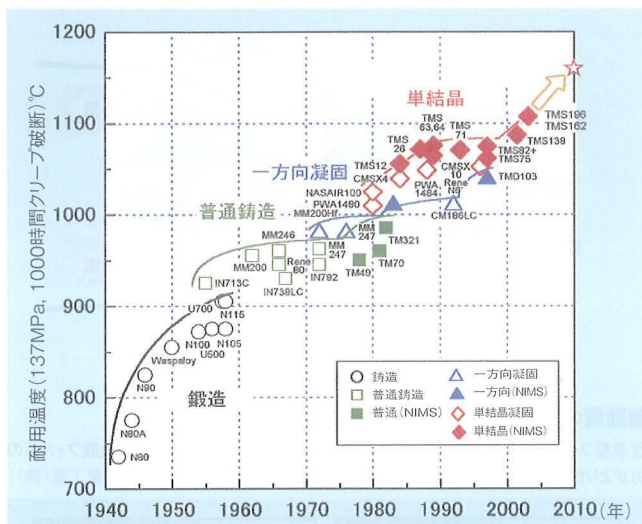


は48%であった。1994年以降登場した改良型は、ガスタービン入口ガス温度が1350℃、熱効率は52%に達している。さらに、ガスタービン入口ガス温度が1500℃、熱効率は59%という天然ガス複合発電プラントも登場している。また最近では従来比200℃の上昇を目指した、ガスタービン入口ガス温度1700℃、熱効率62～65%を目標とした要素技術の開発が国家プロジェクトとして始まっている。

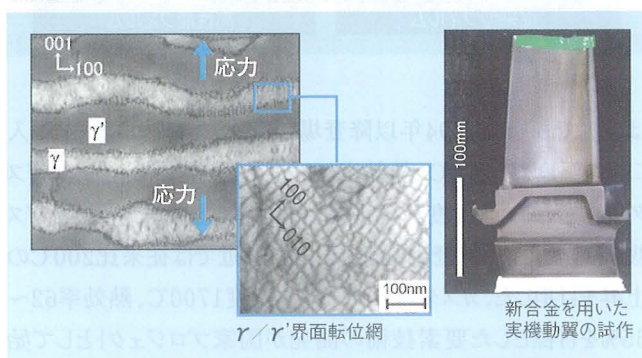
ガスタービンの高温化によって最も過酷な環境におかれるのがタービン翼である。タービンは動翼と静翼から構成され、動翼と静翼の組み合わせ(段)は、複数段存在する。タービン翼は1分間に3000回転、もしくは3600回転もの高速回転により、約100トンもの遠心力がかかる。高温高圧下で非常に高い熱負荷と熱応力に曝され、特に最初にガスを受けて回転する第1段の動静翼は最も過酷な環境におかれる。

翼は通常、耐熱コーティングが施され、空冷あるいは蒸気冷却することにより、融点以上の高温のガス流中での使用が可能となっている。最近の高温化技術のなかでは、冷却翼技術の進歩が著しく、タービン翼の冷却構造は複雑化している。冷却方法として大きくは内部から冷やす「内部冷却」と冷却空気を翼表面から吹き出し表面に空気の層を形成し、燃焼ガスが直接翼表面に触れないようにする「フィルム冷却」がある。1700℃級ガスタービンの要素技術の開発では、タービン翼表面をより少ない体積の冷却空気でも均等に覆うことを目的に、フィルム冷却孔形状の最適化が行われている。

■Ni基超合金の耐用温度の向上



資料提供: (独)物質・材料研究機構超耐熱材料センター

■高温クリープ中のNi基単結晶合金中の γ/γ' 界面

資料提供: (独)物質・材料研究機構超耐熱材料センター

世界最高の耐用温度を実現した単結晶超合金

さらなる高温化の実現には、冷却翼技術、耐熱コーティング技術に加えて、高温部材を構成する超耐熱材料の開発が不可欠となっている。

ガスタービンの高温化に超耐熱材料の開発は大きく貢献してきた。ガスタービンではNi基超合金の使用が中心となっており、これまでNi基超合金は普通鋳造、一方向凝固、単結晶凝固と、製造方法が進化することにより、高温強度が向上してきた。特に過酷な環境におかれるガスタービン前方段動翼には、これらの結晶構造が重視され材料が採用されている。1100℃級までは普通鋳造合金が用いられてきたが、最近では一方向凝固合金あるいは単結晶合金が採用されている。

1500℃級の空冷タービン動翼材であるNi基超合金の耐用温度は、現在980～1025℃(137MPa応力下で1000時間クリープ

に耐える温度)となっている。これを1100℃まで向上させ、適合する遮熱コーティングや冷却技術等を合せばガスタービン入口ガス温度を1700℃に上昇させることが可能と考えられている。

(独)物質・材料研究機構の超耐熱材料センターでは、世界で初めて1100℃を超える耐用温度を持つ単結晶超合金の開発に成功している。Ni基超合金は、母相である γ 相(Ni固溶体)と Ni_3Al 金属間化合物の γ' 相の、2相による整合組織を基本構造として持っており、 γ 相中に γ' 相が析出することにより高い高温強度を持つことができる。同センターでは添加元素により γ 相と γ' 相の格子定数の差を大きくし、界面転位網を微細化する独自の合金設計により、1100℃以上の耐用温度を達成している。

この新合金を用いて、1700℃級ガスタービンの実現を目指したタービン部材の開発が進められている。また耐用温度1150℃を目指した単結晶超合金の研究も行われており、高温クリープ強度の向上、熱疲労特性、耐酸化性とのバランスを考えた超耐熱材料の開発が進められている。

蒸気タービンの高効率化を目指した取り組み

天然ガス複合発電では、ガスタービン、蒸気タービンを複合化することで50%以上の熱効率が可能となる。それぞれのタービンの効率は40%程度であるが、2つのタービンを組み合わせることによって飛躍的に効率向上を図ることができるのだ。そのためガスタービンだけでなく、蒸気タービンの性能も効率向上には重要となる。現在、蒸気タービンの技術開発は汽力発電の方が先行しており、汽力発電における蒸気タービンの高効率技術が複合発電においても適用されている。

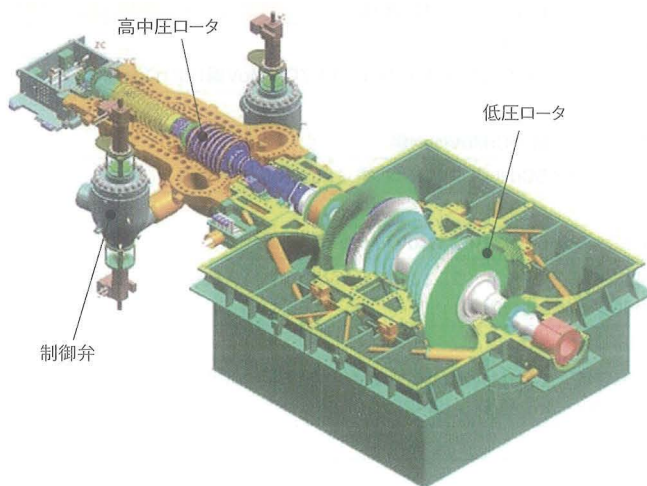
蒸気タービンの仕組みは、ガスタービンからの排熱(600℃程度)を利用して排熱回収ボイラで発生した蒸気をノズル(静翼)から蒸気を動翼に流し、ロータを回転させる。回転力は発電機に伝えられ電力が生まれる。

蒸気は後段に進むにつれ圧力が減衰し、これに合わせて高圧ロータ、中圧ロータ、低圧ロータが設置される。最近の大容量プラントでは高圧と中圧ロータを一体化し、高中圧部と低圧部に分ける構成が多い。比較的小容量のプラントではコンパクト化を図るため、高圧から低圧まで全てを一体化し、一つのケーシングに納めた高低圧一体型も採用されている。

近年、効率向上をめざして、蒸気タービンの内部損失の低減が積極的に進められており、例えば渦流れ損失や漏れ損失、ケーシングの給・排気圧力損失、排気損失、軸受損失の低減など、細部にわたってロス低減が行われている。

なかでも効率向上に寄与するのが最終段の動翼である。蒸

■蒸気タービンの構成例 (資料提供: (株) 東芝)



気の体積は低圧の終段に進むにつれて大きく膨張するため、それに従い翼の面積を大きくする必要がある。とくに最終段の動翼は最後に蒸気を流しきる役目を担い、最終段を通過した蒸気の運動エネルギーはすべてロス(残留速度損失)となる。残留速度損失は最終段出口蒸気通路部の断面積(排気環状面積)の二乗に逆比例するため、最終段動翼の長翼化は効率向上に有効である。長翼化によって、処理する排気流量が増し、排気ロスの低減を図ることができる。世界最大級のものでは48インチの動翼が実機へ適用されている。最終段の動翼の出力分担はタービン全体の10%を占め、その性能がタービン全体の効率に

■高低圧一体型タービンロータ



高低圧一体型タービンロータは、高圧、中圧、低圧ロータを一体化することで、大幅なコンパクト化を図っている。材料は高低圧一体型タービンロータ用に開発された材料が使用されている。高圧部、低圧部でそれぞれ必要な材料特性を1本のロータで機能させるため、傾斜熱処理技術が開発されている。これは熱処理条件を変えることで部位ごとに異なる特性を付与するもので、高温部は高温焼入れ・高温焼戻しを行い、高温クリープ強度を向上させ、低温部は低温焼入れ・焼戻しを行い、延塑性等を向上させている。(資料提供: (株) 東芝)

影響を及ぼす。そのため長大な最終動翼の開発が各社で進められている。

高効率化、大容量化に対応する耐熱鋼

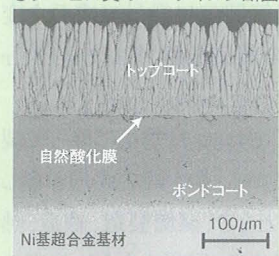
蒸気タービンの蒸気条件は経済性と効率とのバランスで設定されている。蒸気タービン入口での蒸気温度は国内の複合発電では一般的に566℃に設定されている。海外では593℃に高温化した例もみられる。

高温化で注目される耐熱コーティングの開発

高温化に伴い重要性を増しているのが耐熱コーティング技術である。従来の耐食性コーティングに加えて最近では遮熱コーティングが施されている。遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating, TBC)は熱伝導率の低いセラミックスのトップコートと基材の酸化を防ぐボンドコートの2層から成る。大きな遮熱効果が望めることから高温化、または長寿命化を図るうえで不可欠な技術となっており、積極的に開発が進められている。

TBCの開発課題はセラミックス層の低熱伝導化、厚膜化による遮熱効果の向上、起動停止等に対する耐久性の向上、トップコートとボンドコートとの界面に生じる界面酸化物の抑制等である。またボンドコートと基材との界面に生じる二次反応層(Secondary Reaction Zone, SRZ)と呼ばれる析出物も問題となっている。従来、ボンドコートにはAlを多く含む金属コーティングが用いられてきたが、高温でNi基超合金基材との間に相互拡散を起こしSRZ層が生じる。SRZが生成されると基材の強度低下、コーティングの特性劣化をひき起こす。そのた

●タービン翼のコーティング断面



●1100℃、300時間加熱後の従来型コーティングとEQコーティングの断面



資料提供: (独) 物質・材料研究機構

め高温長時間使用によるSRZ抑制を目指す研究が行われている。

SRZ抑制の一つの方法として、(独) 物質・材料研究機構では熱力学平衡コーティング(EQコーティング)を提案している。これはNi基合金中の析出強化因子である γ' 相と熱力学的に平衡(Equilibrium)関係となる組成の合金を用いることで基材とコーティング層の界面でのSRZ生成を抑制するものである。従来のボンドコートとの比較試験(1100℃、300時間)では、EQコーティングのSRZ抑制効果が確認されている。

■蒸気タービンに使用される主な耐熱材料

部 品 名	銅 種	化学組成 (規格・商標)
高圧・中圧ロータ	CrMoV鍛鋼	1.25Cr1.25MoV鋼 (ASTM A470 Cl.8)
	12Cr鍛鋼 (593℃のみ)	10.5Cr1MoVNbN鋼 (GE)、11Cr1MoVTaN鋼 (TOS101)、11.7Cr1MoV鋼 (X21CrMoV121)
低圧ロータ	NiCrMoV鋼	3.5%NiCrMoV鋼
高圧・低圧一体型ロータ	CrMoV鍛鋼	2.5CrMoV鋼、2.25CrNiMoV (W) 鋼、9CrMoVNbN鋼
高圧・中圧・低圧動翼 ノズル、締付ボルト	12Cr鍛鋼	12Cr鋼 (AISI403、SUS403)、13.5CrNb鋼、12CrNbN鋼、12Cr2.5NiMoVN鋼
		11Cr1MoVNbN鋼
	改良12Cr鍛鋼 (593℃のみ)	12Cr1Mo1WV鋼 (AISI422、SUH616)、10Cr1MoV1WNbN鋼
高圧・中圧ケーシング、 蒸気弁	CrMo鋼	1.25Cr1Mo鋼 (ASTM A356Gr6、SCPH21、22)、1.25Cr1MoV鋼 (ASTM A356Gr8/9、SCPH23)、
	CrMoV鋳鋼	2.5CrMo鋼 (ASTM A356Gr.10、SCPH32)
	9Cr鍛鋼 (593℃のみ)	9Cr1Mo鋼 (ASTM A182F91)
	12Cr鋳鋼 (593℃のみ)	12Cr鋼、12CrMoV鋼 (DIN17245)、10Cr1MoVNbN鋼、11CrMoWVNbN鋼、10Cr0.7Mo1.8W3CoVNbB鋼、
		12CrMoWCoVNbBN鋼、12Cr1Mo1WV鋼 (AISI422、SUH616)
低圧ケーシング	構造用炭素鋼	SS400

(株) 東芝資料より作成

蒸気温度が600℃以下であるため、蒸気タービンには主にフェライト系耐熱鋼が使用され、使用箇所にあわせて各種材料が選択されている (上表参照)。

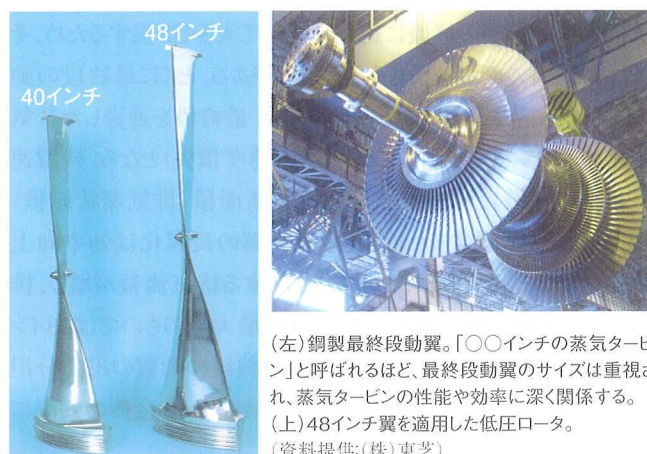
ロータは、高温の高中圧部では高温クリープ強度、靱性、熱疲労強度が要求され、主にCrMoV鋼が使用されている。593℃の蒸気条件の場合は12Cr鋼をロータに用いる場合もある。低温の低圧部は大型構造物となるため靱性に対する要求が強く、NiCrMoV鋼が一般的に使用されている。

動翼やノズル (静翼) は、遠心力に対する強度が高いとともに切欠き感受性が低いこと、熱疲労強度、振動減衰能、耐食性が優れること等が求められ、特に低圧部は長翼に大きな遠心力がかかるため、常温における強度が重視される。高中圧部、低圧部ともに12Cr鋼が採用されているが、温度によって求められる特性が異なるため、ある程度の温度範囲毎に微妙に成分を変えた材料が選択されている。593℃の蒸気条件では改良12Cr鋼を使用する場合もある。

蒸気タービンは大容量化が進展しており、大型化に伴って製造における品質向上が課題となっている。最も鍛造成形が難しいロータは数十トンクラスの大型部材となる。銅塊製造、鍛造、熱処理いずれにも高度な技術が必要となる。偏析や欠陥、強度の低下等なく鍛造する必要があり、製造メーカーとともに品質の改善が進められている。

また最終段動翼の長翼化に伴って遠心力が増大し、ロータへの負担を軽減するため、従来は50Hz機 (3000rpm) で42インチ、60Hz機 (3600rpm) で33.5インチを超えるサイズのは比重が軽いチタン合金を使用する必要があったが、動翼の薄翼化を図り、軽量化と空力性能を向上させることで、銅製長翼が実用化されている。

さらなる効率向上を目指して、蒸気タービンはロスの低減を図



(左) 銅製最終段動翼。「○○インチの蒸気タービン」と呼ばれるほど、最終段動翼のサイズは重視され、蒸気タービンの性能や効率に深く関係する。
(上) 48インチ翼を適用した低圧ロータ。
(資料提供: (株) 東芝)

るため構造が複雑化しており、よりきめ細かい要求に対応できる材料が求められている。例えば従来、CrMoV鋼をロータに使用するため高中圧部では蒸気を冷却する必要があったが、12Cr鋼とCrMoV鋼の中間的な高温強度を持つ改良CrMoV鋼が開発され、現在は蒸気冷却が不要となっている。

天然ガス複合発電はガスタービン、蒸気タービンをはじめとして各機関の効率向上が重要となるが、実現の鍵を握っているのが材料である。従来の耐熱材料では困難であった要求が、新たな材料開発によって実現可能となっている。近年、中国をはじめとして天然ガス複合発電プラントの世界的な需要が高まり、日本の設備の受注が伸びている。この分野の技術は我が国の国際競争力の向上に繋がり、いっそう高度な要求に応える次世代耐熱材料の開発が望まれている。

- 取材協力 東京電力(株)、三菱重工業(株)、
(独)物質・材料研究機構超耐熱材料センター、(株)東芝
- 文 藤井 美穂