

# 資源を節約し環境に優しい火力発電

Thermal Power Plants with Resource-Saving and Environmentally Friendly Features

青柳 和雄  
K. Aoyagi

火力発電は、有限で貴重な石油、石炭、LNG(液化天然ガス)などの化石燃料を資源としている。この化石燃料の燃焼により、火力発電設備では必然的に炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)などの放出物が発生するが、環境問題を考え、この放出物を極力少なくする配慮が必要である。当社では、この課題解決のため世界のリードメーカとして燃料に対応したさまざまな発電方式を検討し、蒸気タービン発電、コンバインドサイクル発電、水素エネルギー発電、超電導発電の各分野において、高効率と排気ガス低減のための新技術の研究開発を推進している。

Thermal power plants utilize limited and valuable fossil fuels such as oil, coal, and LNG. A thermal power plant discharges carbon dioxide(CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides(NO<sub>x</sub>), and sulfur oxides(SO<sub>x</sub>)from the combustion of fossil fuel. It is therefore necessary to consider how to minimize these emissions so as to preserve the environment.

Toshiba has studied various power generating methods corresponding to the different types of fossil fuels, and has developed technologies for steam turbine power plants, combined-cycle power plants, hydrogen-energy power plants, and a superconducting generator for high efficiency and the minimization of emissions.

## 1 まえがき

火力発電では、燃料の種類に対応したさまざまな発電方式を採用している。図1に火力発電の課題と対応を、また図2に火力発電プラントの熱効率とCO<sub>2</sub>発生量の推移を示す。石炭では蒸気タービン発電が主流であり、高効率化対策を推進しているが、将来的にはガス化複合発電により、さらに高効率化が可能となる。またLNGでは、コンバインドサイクル発電が中心となるが、高温ガスタービンの採用によりいっそうの高効率化を推進している。そして将来的には、水素燃料を利用した水素エネルギー発電により、CO<sub>2</sub>発生量のゼロエミッション実現を目標としている。

ここでは省資源、環境問題を念頭にしたこれら各発電分野の新技術を紹介する。

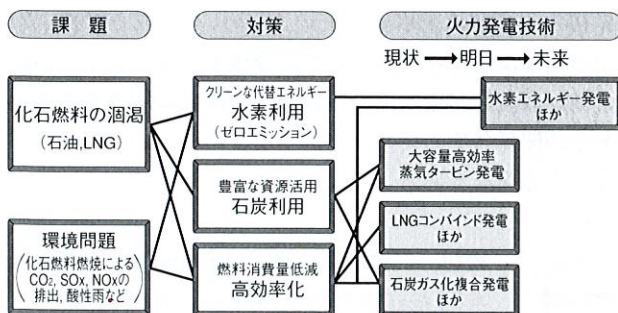


図1. 火力発電の課題と対応 火力発電では燃料の多様化に対応して種々の発電方式を採用している。

Issues and countermeasures related to thermal power

## 2 大容量高効率蒸気タービン

従来型火力発電では、つねにエネルギー資源の節約と環境へのエミッションの低減を旨とした高効率化と、発電設備の設置スペースを低減させるためスケールメリットを生かす大容量化を追求している。

### 2.1 蒸気条件の向上(高温・高圧化)による高効率化技術

高効率化に関しては、タービン機器性能の向上を図ることだけでなく、蒸気条件の向上、すなわち、高温・高圧化を推進している。当社は、蒸気タービンの高温・高圧化に対する世界のリードメーカとして、1989年、90年には超々

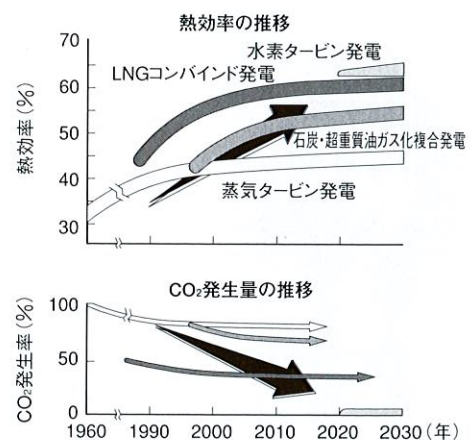


図2. 火力プラントの熱効率とCO<sub>2</sub>発生量の推移 各発電分野で高効率化を推進し、CO<sub>2</sub>発生量のゼロエミッション実現を目標としている。

Efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in thermal power plant

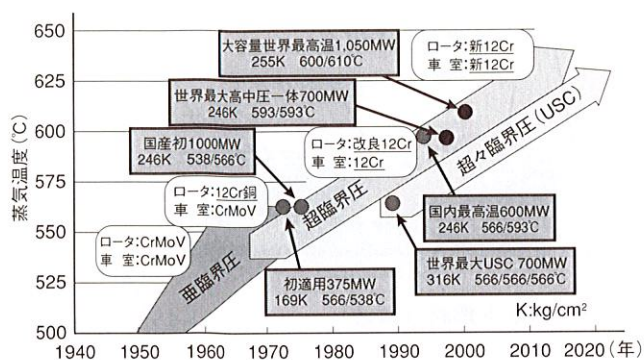


図3. 高温・高圧化機の実現と適用材料の変遷 高温・高圧化に対応して高強度の材料を開発、適用している。

History of turbine material application and realization of high-temperature, high-pressure turbine

臨界圧条件世界最大機である中部電力(株)川越火力発電所 1,2号 700 MW 機(316 kg/cm<sup>2</sup>, 566/566/566°C)を運転開始させ、その後も高温化機である東北電力(株)能代火力発電所 2号 600 MW 機(246 kg/cm<sup>2</sup>, 566/593°C), 北陸電力(株)七尾大田火力発電所 2号 700 MW 機(246 kg/cm<sup>2</sup>, 593/593°C)などを次々に製造し、現在ではより高温化を図った 600/610°C, 1,050 MW 機(電源開発(株)橋湾火力発電所 1号機)を製造中である(図3)。

そしてさらに、今後 630°C から 650°C の高温化を実現するよう、これら高温環境中での強度を大幅に改善した新 12Cr 鋼ロータ材(10Cr1.8W0.7MoVNbCoB 鋼)および翼材(10.5Cr2.5WMoVNbReCoB 鋼)を世界に先駆け開発した。

### 2.2 大容量化技術

蒸気タービンの大容量化に対しては、最終段翼の長翼化技術がキーとなる。2 極機 3,600 rpm 用としては世界最長の 40 インチ翼を軽量のチタン合金材を使用して開発し、世界に先駆け商用機を実現させた。そしてこの長翼を適用することにより、3,600 rpm タンデムコンパウンド機(一軸機)では世界最大の 1,000 MW 機を可能とし、現在商用機を計画中である。また、4 極機用としては、世界最長級の 12Cr 鋼製の 52 インチ翼の適用により、従来の 4 流排気形式クロスコンパウンド機(二軸機)で 1,500 MW 以上の出力が可能となる。さらに、1,000 MW 級機の効率最適化を図るよう 48 インチ翼を先ごろ開発し、現在、国内最大となる前述の 1,050 MW 機へ適用している。

## 3 コンバインドサイクル

### 3.1 高効率化コンバインドサイクル

コンバインドサイクルは LNG の使用と低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の適用により、ガスタービンからの NO<sub>x</sub> の排出量を大幅に低減させている。また、高い熱効率のため、地球温暖化

の一因となる CO<sub>2</sub> の排出抑制に大きく寄与している。現在 LNG だき 1,300°C 級コンバインドサイクルが実用段階であり、改良型ガスタービンの採用により約 50% の高効率が見込まれている。さらに、1,500°C 級コンバインドサイクルでは、プラント効率 53% 以上を達成目標に実用化開発を進めている(表1)。

表1. コンバインドサイクルの基本仕様 Specifications of 1,300°C and 1,500°C combined-cycle power plants

		1,300°C 級コンバインドサイクル	1,500°C 級コンバインドサイクル
発電端出力(MW/軸)		380/260	480/400
発電端効率(HHV%)		50	53
ガスタービン	型式	MS9001FA/MS7001FA	MS9001H/MS7001H
	タービン入口温度(°C)	1,316	1,430
排熱回収ボイラ		再熱 3 圧自然循環式	再熱 3 圧自然循環式
蒸気タービン		再熱混圧式	再熱混圧式

(50Hz/60Hz)

### 3.2 高温化技術

コンバインドサイクルの高効率化には、ガスタービン入口温度の高温化が必須(す)の条件であり、そのために必要な技術として、冷却技術の向上および高温材料技術が挙げられる。

#### (1) 冷却技術の向上

タービン動翼は 1,300°C 級ではリターンフロー対流冷却が基本構造であるのに対し、高温化された 1,500°C 級ではサーペンタイン冷却構造を基本に、翼外面の多列フィルム冷却、翼内面インピンジメント(吹付け)冷却を採用した高性能冷却翼を開発した。また、空気の 1.5 倍の優れた熱伝達特性をもつ蒸気を冷却媒体としたタービン静翼(図4)を開発中であり、従来のインピンジメント冷却およびフィルム

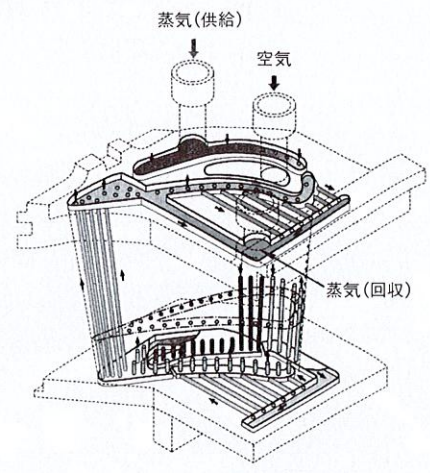


図4. 1,500°C 級蒸気冷却静翼 蒸気を冷却媒体とした閉ループ方式を採用している。

1,500°C-class steam-cooled nozzle

冷却を基本とした空冷翼に比較し、高い冷却特性を確認した。さらに、翼冷却に供された蒸気を蒸気タービン系へ回収することにより約2%のプラント効率向上が達成できる。

(2) 高温材料技術 タービン翼材料として、一方向凝固材や単結晶材などの結晶制御合金の大型翼への適用技術を開発中である。これらの合金は翼の半径方向へ結晶を成長させることにより、回転遠心応力場などでの高温強度を向上させたもので、普通鋳造材に対し、クリープ破断強度でそれぞれ+50°C、+75°C程度の耐用温度の改善を達成している。1,300°C級ガスタービン動翼には、一方向凝固材が適用されているが、1,500°C級ガスタービンへはさらに高温部翼に対し単結晶材を適用している。

### 3.3 低 NOx 燃焼技術

当社は予混合希薄燃焼方式を採用した低 NOx 燃焼器を開発し、1,100°C級ガスタービンにおいて良好な実績をあげている。さらにその基本構造を継承し予混合燃料比率を高めた1,300°C級低 NOx 燃焼器(図5)の開発を完了し、中部電力(株)新名古屋火力発電所7号系列に採用される予定である。1,500°C級ガスタービン燃焼器に関しては、予混合比率をさらに高めた燃焼器を開発中であり、最終的には10 ppmを下回る NOx 濃度を達成可能である。

## 4 水素エネルギー発電

水素エネルギー発電は、燃料として水素を利用した火力発電であり、水素と酸素の燃焼により、水あるいは水蒸気しか発生しない。したがって CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> の発生

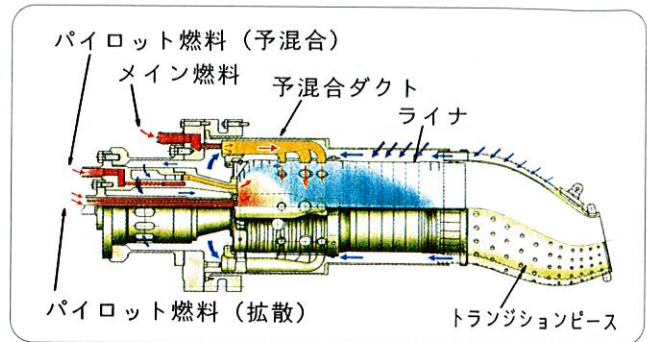


図5. 東芝型1,300°C級低 NOx 燃焼器 燃焼火炎温度を下げて NOx 排出量を低減させる。

Toshiba 1,300°C-class dry-low NOx combustor

ない、クリーンなゼロエミッション発電を実現することができ、地球環境問題の解決に貢献できる。また、化石燃料をまったく用いていないので、エネルギー問題の解決にも貢献する。

図6はグローバルな水素エネルギー利用の概念を示している。水素はエネルギー供給地で水力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーを用いて作られる。この水素をタンカーでエネルギー消費地へ輸送し、電力用、産業用、輸送用など各方面で消費する。水素エネルギー利用については国家プロジェクト WE-NET(World Energy NET)として水素の製造から輸送、貯蔵、利用まで広範囲な研究開発が進められており、当社は主に水素エネルギー発電に関して参画し、積極的に取り組んでいる。図7に水素エネルギー発電システムを示す。このシステムは、水素と酸素の燃焼で生成した水しか排出されない無公害発電システムであり、

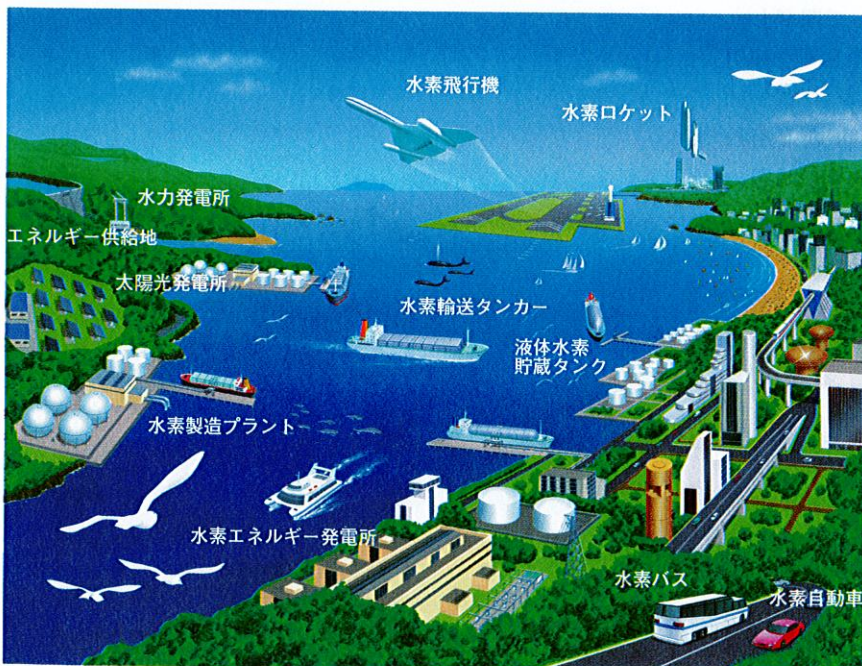


図6. 水素エネルギー利用の概念 ゼロエミッションを旨とした水素エネルギー利用は電力用、産業用など各分野で検討中である。(通商産業省工業技術院と新エネルギー・産業技術統合開発機構による)

Hydrogen-energy system concept

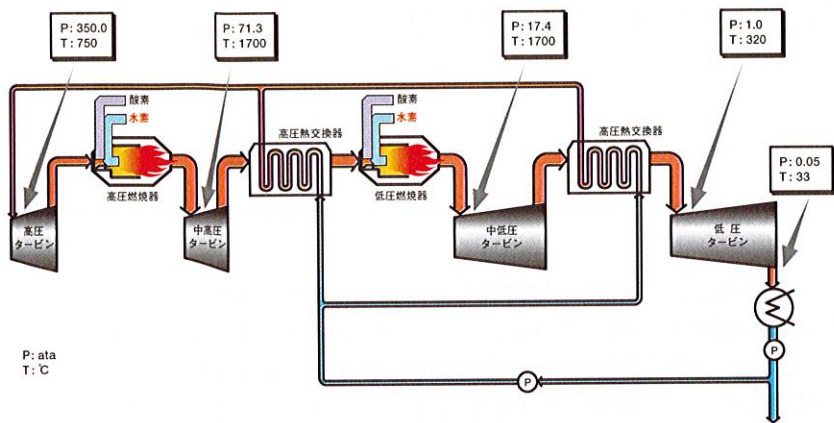


図7. 水素エネルギー発電システム 1,700°C クラスの高温タービン適用により、熱効率60%以上の高効率発電が可能となる。

Hydrogen-combustion turbine system

さらに、1,700°C クラスの高温タービンを適用することで、熱効率60%以上の高効率発電を可能とするものである。

当社はこのようなシステムの実現に向け、1,700°C 級高温タービン技術、超高温材料技術や高温熱交換器技術の開発を推進している。

## 5 超電導発電機

超電導発電機は、現用発電機に比べ低損失、小型・軽量化、電力系統の安定度向上などの利点をもっている。わが国では、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受け、超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)が7万kW級超電導発電機を開発を行っており、当社もこの開発に参画している。

現在開発している超電導発電機は、回転子の界磁巻線にだけ超電導体を用いた発電機で、固定子巻線は通常の銅線を使用している。しかし、界磁巻線を超電導にするだけでも界磁巻線の電気損失はほぼゼロになり、発電機全体としてのエネルギー損失を現用発電機の約1/2(効率として0.5~1%向上)に低減でき、省エネルギーが実現できる。

さらに、超電導発電機は現状の発電機に比べて強い磁界を利用するので、エネルギー密度が高く、発電機の高さや重量を現状に比べて約1/2に小型・軽量化することができる。また、その強い磁界により固定子巻線との結合が強くなり、安定に送電できる能力が現状の発電機に比べて10~20%程度向上できるなど多くの特長をもっている。

当社では、さらに界磁巻線に流す電流を電力系統の状況に応じてすばやく変化させることで、落雷など電力系統に異常が発生したときにも安定に送電できる能力がより高い、超速応励磁型と呼ぶ超電導発電機を開発している。超

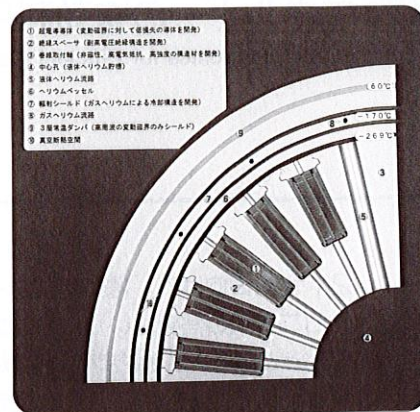


図8. 超速応励磁型超電導発電機の回転子断面 回転子は何層もの真空断熱空間を設けた構造になっている。

Rotor section of superconducting generator with quick response excitation

速応励磁型超電導発電機では、電流や磁界を急速に変化させるため、そのような磁界変化に対して損失が少ない超電導体や構造材の開発を行った。例えば、渦電流の低減のため電気抵抗の大きなCuNi材で覆った極細線による二重より線構造の超電導体を開発するとともに、構造材としては、極低温でも使用可能なインコネルと呼ぶ非磁性材で高強度・高電気抵抗の特殊なNi合金を開発した。

図8は当社が開発している7万kW級超速応励磁型超電導発電機の回転子(ロータ)の断面模型である。回転子の中には低損失超電導体の界磁巻線がインコネル製の構造材に固定されている。回転子は何層もの真空断熱空間を設けた魔法瓶の構造になっており、この巻線を極低温(約-270°C)に冷却するために、静止側から液体ヘリウムが供給される。

## 6 あとがき

発電プラントは単に電気を作るだけでなく、環境問題など社会的要求を満足させる必要がある。ここでは代表例を紹介したが、今後とも当社の最新技術を結集して電力会社はじめ各ユーザーに満足いただける火力発電プラントを推進していく所存であり、関係各社のいっそうのご指導をお願いする次第である。



青柳 和雄 Kazuo Aoyagi

火力事業部火力プラント技術部参事。  
蒸気タービン発電設備の基本計画に従事。日本機械学会会員。  
Thermal Power Plant Div.