

エネルギーの安定供給と環境との調和は、これからの発電設備に求められる大きなテーマである。当社は、将来の燃料多様化に対応した環境負荷の低い様々な高効率発電システムの開発に努めてきた。

二酸化炭素(CO₂)回収型ガスタービンシステムは、タービン入口温度を1,700℃まで上昇させて発電効率を向上し、同時に発生するCO₂ガスを分離回収することで高効率化と環境負荷の低減を可能とする。既設火力発電プラントのコンバインドサイクルシステムへのリフレッシュは、比較的容易に効率の向上が図れるとともに、排出CO₂の低減が可能である。また、ガス化複合(IGCC)発電システムは、燃料のガス化段階で不純物などを除去して環境負荷を低減するとともに、燃料の多様化に対応できる。

Stable electricity supplies and harmony with the environment are important subjects in the field of electric power generation. Toshiba has been constantly striving to meet these requirements through the development of high-performance power plants.

In a CO₂-recovery gas turbine system, plant efficiency is enhanced by increasing the gas turbine inlet temperature to 1,700℃, while emissions are reduced by CO₂ separation and recovery techniques. The upgrading of existing plants to combined cycle power systems realizes higher efficiency, lower emissions, and stable fuel requirements. Integrated gasification combined cycle (IGCC) power system can accommodate fuel diversification while realizing lower emissions.

1 まえがき

環境に対する意識の高まりとともに、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)をはじめとする大気汚染物質の排出抑制と、地球温暖化防止のためのCO₂排出量削減が求められている。化石燃料を燃やす火力発電設備は、国内電力の約60%を占める主要な電源であり、これからも重要な位置を占めるものと予想されるが、そのためには高効率化と環境性の向上が必要であろう。また、長期的には資源のひっ迫、燃料価格の上昇に対処するため、燃料の多様化や有効利用を進めることが重要となる。一方、近年の電力供給の自由化により、電力事業においては発電コストの低減が必須となっている。

これらの課題を解決するためには、既設設備も含めた高効率化や環境負荷の低減が重要である。当社では、既設火力設備とガスタービンを複合させた、パラレルブロック方式コンバインドサイクルシステムを提案している。また、燃料の多様化と有効利用を可能にする技術として、IGCC発電システムの実用化に努めている。更には、地球温暖化防止の一助とするため、CO₂回収型ガスタービンシステムの研究を進めている。

2 CO₂回収型ガスタービンシステム

ガスタービンの発電効率はこれまで、燃焼温度を高温化

することで向上してきた。最新のガスタービンでは、タービン入口温度が1,500℃級まで実用化の段階にきている。

CO₂回収型ガスタービンシステムはCO₂排出量削減の観点から、タービン入口温度を1,700℃まで上昇させ発電端効率を60%にまで向上、同時に発生するCO₂をシステムのクローズド化などにより高効率で回収可能であることを特長とする、環境負荷の低い次世代型高効率発電システムである。

このCO₂回収型ガスタービンシステムの開発は、水素利用技術WE-NET^(注1)の一環として進められた“水素燃焼ガスタービン技術”の成果を継承する国家プロジェクトとして、1999年からスタートした。当社は、このプロジェクトに参画して、システム検討、タービン翼冷却技術の開発、主要補機類の開発、超高温材料の開発など、システムのキーとなる技術開発に取り組んでいる。

2.1 システム構成

通常の空気燃焼では、燃焼温度の高温化に伴いNO_x生成量が多くなり、環境負荷の上昇を考えると1,500℃級が限界とされていた。1,700℃のタービン入口温度を実現するために、このシステムでは天然ガス(メタン)と酸素だけを燃焼させて、水蒸気とCO₂だけ発生させる方式を採用している(図1)。

発生した水蒸気とCO₂は、高温タービンを駆動した後、圧縮機を通して再び燃焼器に供給され、いわゆるクローズドサ

(注1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が進めている、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発プロジェクト。

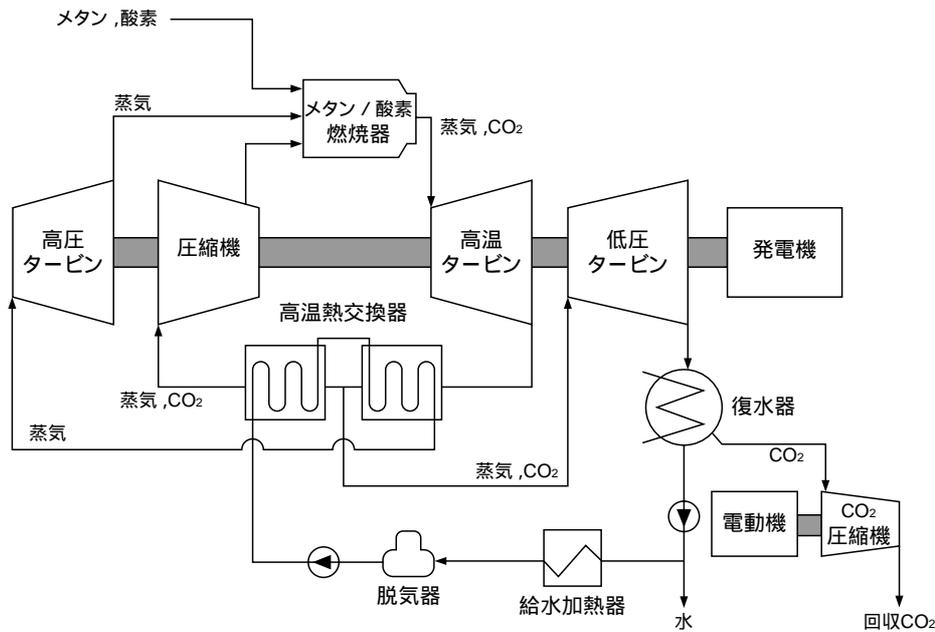


図1 . CO₂回収型ガスタービンシステム概念 メタンと酸素だけを燃焼し ,CO₂の回収が可能である。
Concept of CO₂-recovery gas turbine system

イクルを構成する。余剰となる水蒸気とCO₂は、圧縮機の手前で分岐して低圧タービンから復水器に入る。CO₂はここで水蒸気と分離され、CO₂圧縮機を通して系外で回収される。水蒸気は、復水器で冷却されて水となり、一部が回収されるほかは高温熱交換器で加熱され、高圧タービンを駆動した後、再び燃焼器に供給される。

システムの検討では、500 MW級商用機を想定したクローズドシステムのシステム構成の検討、主要構成機器(タービン、圧縮機、熱交換機器など)の概念設計、パラメータスタディ、性能解析などを行い、クローズドシステムの最適化を図っている。

2.2 タービン翼冷却技術の開発

ガスタービンの要素技術として重要なものにタービン翼の冷却技術がある。1,700 級のガスタービンでは、翼の表面温度は従来よりも高くなると予想される。このため、翼表面にはセラミック製の遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)を行い、タービン翼内面を蒸気冷却することにより、翼の温度を耐熱温度以下に抑えるようにしている。タービン翼の冷却構造は、翼材料の強度を満足し、翼のメタルの耐熱性に基づくメタル最高温度、TBCの耐熱性に基づくTBC表面最高温度の制限を満たすように設計している(図2)。

冷却媒体としては、空気に比べて熱伝達率が高い蒸気を採用し、第1段静翼では冷却強化の必要な前縁・後縁部に吹出し冷却を併用している。第1段動翼では、冷却強化の必要な前縁・後縁部に低温の蒸気を供給している。また、

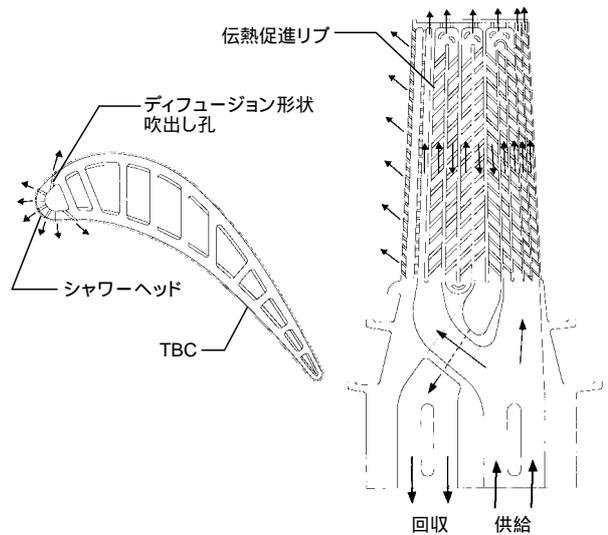


図2 . 第1段動翼冷却構造の概念 翼内面に蒸気を供給し、翼の冷却を行う。
Cooling structure of first-stage blade

翼内面の伝熱促進リブには、傾斜ブローリングリブを適用して冷却特性の改善を図っている。第1段動翼は、翼内の冷却流路が複雑となるため、精密鑄造の製造性について、今後、更に試作試験を行って検証する予定である。

1,700 級のガスタービンを成立させるためには、遮熱コーティング(TBC)の開発も欠くことができない。TBC材は、超耐熱合金製のタービン翼基材の表面に施された厚さ0.3~0.5mmの被膜で、1,700 の高温ガス雰囲気と直接さらされ

るうえ、過酷な熱応力を受ける。前述のタービン翼の蒸気冷却技術との併用でも、TBC材には、表面温度1,300℃、翼基材との温度差350℃以上に耐える優れた耐熱性、耐剥離性を維持する機能が求められる。代表的なTBC断面組織を図3に示す。

TBCは図3に示すような2層構造を基本構成としており、翼基材の高温酸化を防止するボンド層と、高温燃焼ガス流から翼への熱流束を低減させるトップ層から成っている。TBCの表面温度が高くなるほど、トップ層のセラミックスが焼結や再結晶を起こしやすく、体積の収縮によりクラックが発生しやすくなる。また、TBC内の温度勾配がきつくなると熱応力による割れや剥離(はくり)が生じやすくなる。1,700℃という高温燃焼ガス雰囲気下では、ボンド層の酸化による耐久性低下も懸念される。これらの課題を解決するために、TBCに使用するセラミックス材料、TBCを翼表面に施工するためのコーティングプロセスやTBCの劣化特性について様々な検討、試作や試験を行って、TBCの特性の向上に努めている。

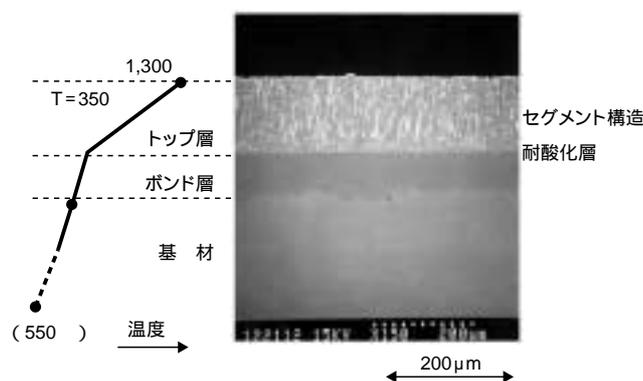
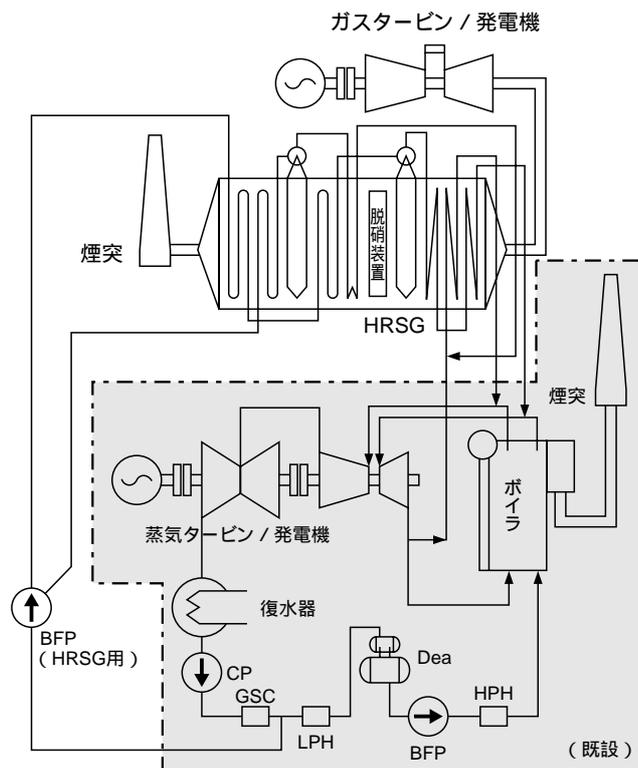


図3. 代表的なTBC断面 トップ層とボンド層の2層構造を基本構成としている。
Cross section of thermal barrier coating (TBC)

3 パラレルブロック方式コンバインドサイクルシステム

発電コストの低減、及び排出CO₂や排出NO_xの削減を具現化する方法として、現有設備のリフレッシュによる高効率化が考えられる。当社では、その一つとして、既設設備のパラレルブロック方式によるコンバインドサイクル化を提案している。

パラレルブロック方式は、図4に示すように蒸気タービン/発電機、ボイラ及び煙突から成る既設設備に対し、ガスタービン/発電機、排熱回収ボイラ及び煙突を追設したコンバインドサイクルシステムである。排熱回収ボイラの発生蒸気を既設ボイラからの発生蒸気に混入することにより、蒸気



BPF: 給水ポンプ
CP: 復水ポンプ
GSC: グランド蒸気復水器
LPH: 低圧給水加熱器
Dea: 脱気器
HPH: 高圧給水加熱器
HRSG: 排熱回収ボイラ

図4. パラレルブロック方式コンバインドサイクルシステムの概略系統 既設設備(網掛け部分)に、ガスタービン/発電機、HRSG及び煙突を追設している。

Outline of parallel block type combined cycle power system

タービンを一部ボトムサイクルとして使用することで、システム効率を向上させている。この方式は、既設設備の改造範囲が小さく、短工期での改造が可能であり、建設費も比較的低い。

60 Hz地区におけるパラレルブロックの検討例を表1に示す。

表1. パラレルブロック検討例(60 Hz地区)
Example of study of parallel block type combined cycle power system (60 Hz)

	既設設備	リフレッシュ後	
		出力最大運転	効率最大運転
ガスタービン型式		MS7001FA + e	
排熱回収ボイラ形式		再熱二圧式	
既設タービン負荷(%)	100	100	52
既設ボイラ負荷(%)	100	66	0
プラント出力(MW)	312	479	249
HHV基準発電端効率(%) (高位発熱量基準)	36.7	45.2	48.0
効率向上率(%)		23	31
排出NO _x 削減率(%) (Nm ³ /hベース)		68	78
排出CO ₂ 削減率(%) (kWh当り)		18	23

ガスタービンベース負荷運転、及び蒸気タービン100%出力運転時に最大出力運転となり、既設ボイラは約66%負荷運転となる。

部分負荷時においては、既設ボイラ負荷を下げ、蒸気タービン作動蒸気中の排熱回収ボイラからの送入蒸気の比率を更に上げるにより、定格出力運転時に比べプラント効率が向上する。そのため、表1に記したように、この方式のコンバインドサイクルシステムは、出力最大運転と効率最大運転の二重定格運転が可能であり、調整用電源ユニットとしても有効に活用できる。

既設重原油焚(だき)設備を、パラレルブロック方式によりコンバインドサイクル化した場合の、既設設備に対する効率向上量は、出力最大運転時には23%、効率最大運転時には31%と非常に大きい。また、環境負荷については、既設設備に対してNOxを約68%以上、CO₂を約18%以上削減することができる。

更に、この方式はガスタービンを停止させた通常汽力運転が可能であり、ガスタービンの定期点検時においても既設設備側を運転することで、プラント出力を既設設備と同出力に保持することが可能である。また、既設ボイラを停止させた排熱回収運転が可能である。

以上から、現有設備を有効活用し、初期投資を抑制しつつ既設プラントの高効率化を図る方式として、パラレルブロック方式は非常に有効であると言える。

4 IGCC発電システム

IGCC発電システムは、石炭、石油残さ油、石油コークス、

オリマルジヨン、廃棄物、植物などをガス化設備でガス燃料に変換し、コンバインドサイクル発電プラントのガスタービンに導き発電するもので、高効率、燃料多様化、環境負荷低減、スラグ排出など多くの特長を持ち期待されている。

燃料のガス化設備には各種ガス化方式があり、これらガス化方式とコンバインドサイクル発電プラントを組み合わせたシステムの最適化と、適応する機器の開発が重要となる。

石炭IGCC発電システムの検討例を図5及び表2に示す。このシステムは、石炭を部分酸化してガス燃料(水素(H₂)と一酸化炭素(CO)が主成分)に変換するガス化炉と、その生成ガスからダスト、硫黄分などを除去するガス精製設備、その精製ガスを燃料とするコンバインドサイクル発電プラントから構成されている。ガス化設備に酸素吹きを用いる場合(精製ガスに水素が含まれるので予混合燃焼は採用できない

表2. 石炭IGCC発電システムの計画例(LNG CCとの比較)

Example of coal IGCC power system specifications in comparison to LNG CC

	石炭IGCC	LNG CC
ガス化炉	酸素吹き,SGCあり	
ガス精製	湿式	
空気連携(率)	部分連携(60%)	
ガスタービン	MS9001FA (窒素注入あり)	MS9001FA
排熱回収ボイラ	再熱3圧式	再熱3圧式
燃料高位発熱量 (kcal/Nm ³)	2,150	13,000
発電端出力(MW)	500	380
送電端出力(MW)	440	370
送電端効率(%)	44	49

CC: コンバインドサイクル

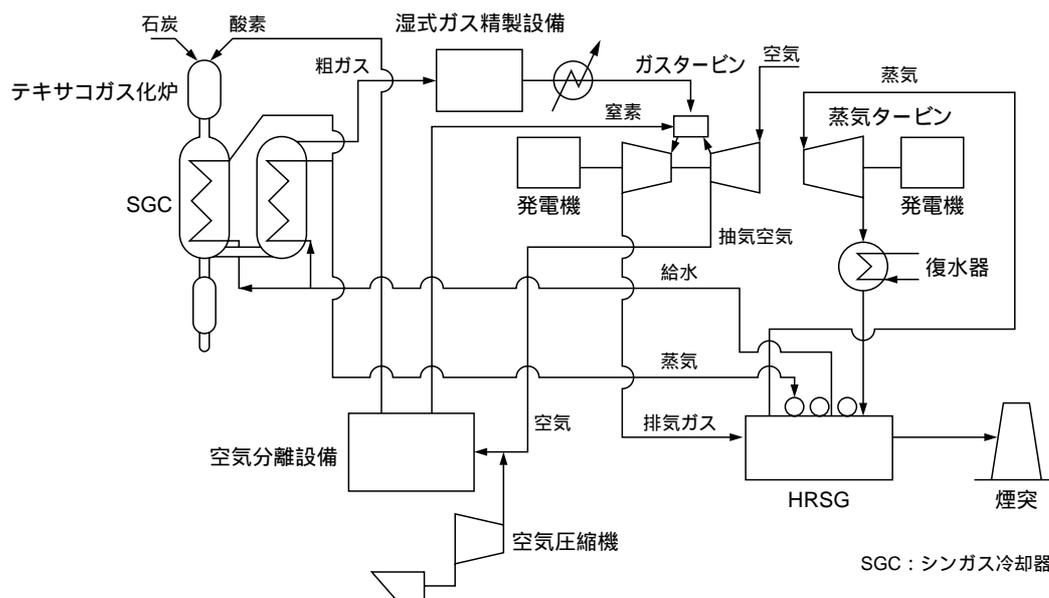


図5. 酸素吹きIGCC発電システムの構成 テキサコガス化炉、湿式ガス精製、空気部分連携の場合を示す。
System diagram of oxygen-blown IGCC system

い)は、燃焼温度が高くなるので、NO_xの発生を低減するために空気分離設備(ASU)で生成した窒素を燃焼器に注入し、低NO_x化を図っている。また、燃料の発熱量は液化天然ガス(LNG)に比べて低いものの、ガスタービンの燃焼ガス流量が多くなるため、ガスタービン出力は増加し、LNGコンバインドサイクルシステムの1.2倍程度の送電端出力が得られる。

一方、ガス化設備に乾式のガス精製装置を使用する場合は、湿式に比べて熱損失は少ないが、生成ガス中の不純物やアンモニアが多くなる。燃料にアンモニアが多く含まれると、アンモニアの酸化反応により、NO_xが多く発生する。この反応を抑えNO_xへの転換率を抑制するため、当社では、燃焼を燃料過濃と希薄の2段階で行うリッチリーン燃焼器を開発した(図6)。そして、NEDOの委託事業として石炭ガス化複合発電技術研究組合が行った福島県の勿来パイロットプラントで、実缶実圧燃焼試験を実施し良好な結果を得た。

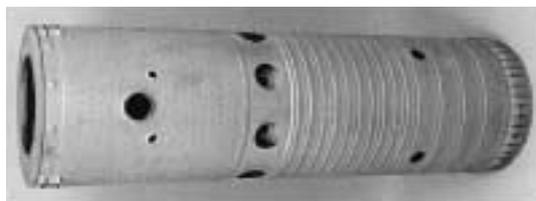


図6. 空気吹き乾式精製IGCC用リッチリーン燃焼器 燃料中のアンモニアのNO_xへの転換率を低減する。
Rich-lean combustor for air-blown, dry-cleanup IGCC

生成ガス中の不純物にアルカリ金属やバナジウムなどの重金属類が多いと、共晶化合物を形成してダストとともにタービン翼に凝縮付着して高温腐食を発生し、また、ダストはフィルム冷却空気孔を閉塞して翼メタル温度を上昇させ、翼の寿命を短縮させる。これらの不純物によるガスタービン

高温部品の寿命消費を把握することは、燃料中の不純物の制限を決めるうえでも重要である。当社は、97、98年度に実施された要素研究にも参画し、石川島播磨重工業(株)相生工場に試験設備を設置し、ガス化炉で発生する実ガスを使用して、ガスタービン翼への不純物やダストの付着試験と材料腐食試験を行い、貴重なデータを得た。

5 あとがき

ここでは、次世代型発電システムとして当社が取り組んでいるCO₂回収型ガスタービンシステム、パラレルブロック方式コンバインドサイクルシステム、IGCC発電システムについて概要を述べた。

今後も、これまで蓄積してきた技術と新しい技術を融合させて、より高効率で環境負荷の低い発電システムを開発していく所存である。

謝辞

ここで述べたCO₂回収型ガスタービンシステムの開発は、電力中央研究所を通して、NEDOからの委託で研究を進めている。両機関に対して研究への支援に謝意を表します。



高橋 武雄 TAKAHASHI Takeo

電力システム社 火力事業部 火力開発技術部主務。
新発電システムの開発業務に従事。日本機械学会会員。
Thermal Power Systems & Services Div.



池田 一隆 IKEDA Kazutaka

電力システム社 火力事業部 火力海外技術部。国内火力発電プラント全般の見積りを含む総合エンジニアリング業務に従事後、現在、海外火力発電プラントに関する同業務に従事。日本機械学会会員。
Thermal Power Systems & Services Div.