

超臨界CO₂サイクル発電システム

Innovative Thermal Power Generation System Applying Supercritical Carbon Dioxide Cycle

高橋 武雄

■ TAKAHASHI Takeo

火力発電プラントから排出されるCO₂（二酸化炭素）は地球温暖化の主要な原因の一つであり、その削減のために様々な対策が検討されているが、中長期的には革新的な排出量削減技術の開発が求められている。

東芝は、この要求に応えるため、世界初の超臨界CO₂サイクル発電システムの実用化を目指して開発に取り組んでいる。このシステムは、燃料を酸素燃焼し、高温高压のCO₂でタービンを駆動する高効率発電システムで、発電とCO₂回収が同時に実現できる。米国のネットパワー社、シカゴブリッジアンドアイアン社、及びエクセロン社と共同で開発を進めており、システムのキーコンポーネントである高温高压タービン・燃焼器の開発を当社が担当している。

Carbon dioxide (CO₂) emissions from thermal power plants are one of the primary causes of global warming. Demand has therefore been increasing for innovative technologies to reduce CO₂ emissions as a countermeasure against global warming from the medium- and long-term perspectives.

To meet this demand in the global market, Toshiba has been engaged in the development of an environmentally conscious thermal power generation system applying a supercritical CO₂ cycle in cooperation with three U.S. companies: NET Power, LLC; Chicago Bridge & Iron Company; and Exelon Corporation. The new system burns a mixture of fossil fuel and oxygen combined with CO₂ to produce a working fluid, mainly consisting of high-temperature and high-pressure CO₂ and water vapor, which is used to drive the turbine generator, and separates and collects CO₂ without the need for any carbon capture system. Toshiba has been assigned the development of key equipment, including a high-temperature and high-pressure turbine and a combustor, for this thermal power generation system aimed at realizing a 250 MW-class commercial plant.

1 まえがき

地球温暖化対策（CO₂排出量削減）は、火力発電システムの開発において、継続的に取り組まなければならないもっとも重要な課題の一つである。今まで実績ある発電方式では、効率向上の積重ねがCO₂排出量削減の有効な施策となっている。また、燃焼により発生したCO₂を分離して回収するCCS（Carbon Dioxide Capture and Storage）は、火力発電システムとの組合せでCO₂を大幅に削減できる技術として実用化が期待されている。更に、中長期的には革新的なCO₂排出量削減対策について、なおいっそうの検討が求められている。

東芝は、燃料を酸素（O₂）燃焼し、高温高压のCO₂でタービンを駆動する世界初の超臨界CO₂サイクル発電システムの開発に取り組んでいる。このシステムの特長は、発電とCO₂回収が同時に実現できる革新的な高効率発電技術である。当社は2012年度から、米国のネットパワー社、シカゴブリッジアンドアイアン社、及びエクセロン社と共同でこのシステムの開発を進めており、システムのキーコンポーネントである高温高压タービン・燃焼器の開発を担当している。ここでは、超臨界CO₂サイクル発電システムの特長と当社の開発状況について述べる。

2 超臨界CO₂サイクル発電システムの概要と特長

2.1 概要

超臨界CO₂サイクル発電システムは、既存のガスコンバインドサイクル発電システムと同等の発電効率が可能であるとともに、CO₂を分離して回収する設備を別に設置することなく、高純度の高压CO₂を回収することができるシステムである。また、燃料の燃焼には空気の代わりに酸素を用いるため、燃焼による窒素酸化物（NO_x）も発生しない環境調和型の火力発電システムを実現することができる。

このシステムは、CO₂、燃料、及び酸素を高压で燃焼器に注入して燃焼させ、発生した高温高压の燃焼ガスでタービンを回転させて発電する。タービンからの排ガス（CO₂と水蒸気（H₂O））は熱交換器を経て冷却され、水分が分離除去された後、高压ポンプで圧縮される。大部分のCO₂は燃焼器へ循環されるが、燃焼により発生した分のCO₂は高压かつ高純度の状態でそのまま回収することができる。

2.2 特長

図1の基本サイクルに沿って、このシステムの特長を以下に述べる。

燃料はメタン（CH₄）を主成分とする天然ガスのほかに、一酸化炭素（CO）と水素（H₂）を主成分とする石炭ガス化ガスな

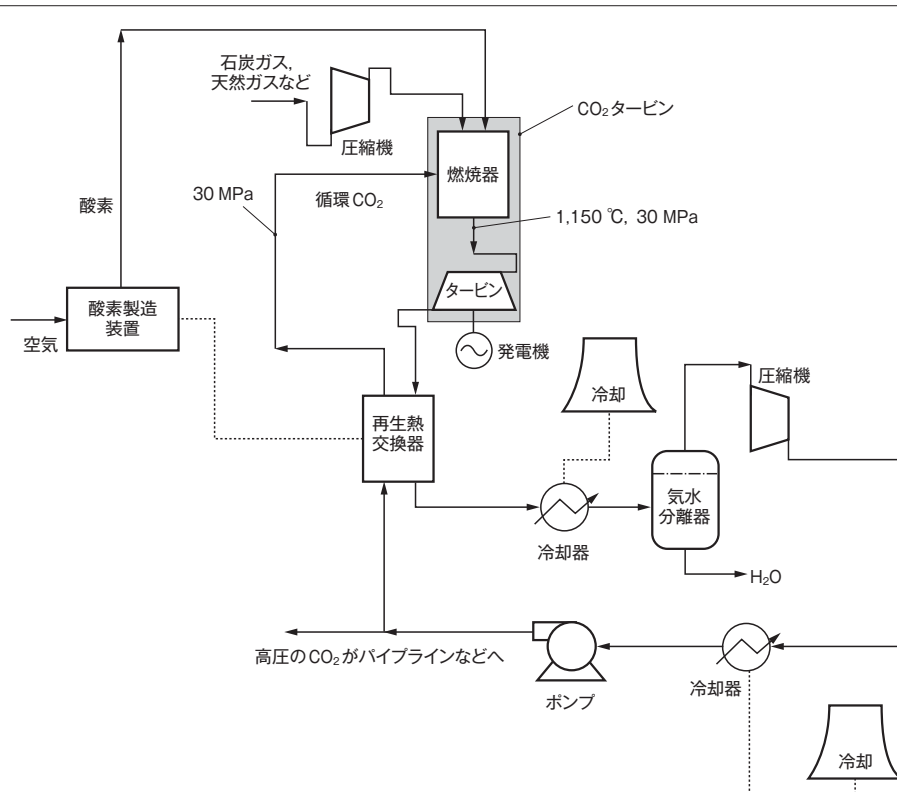


図1. 超臨界CO₂サイクル発電システムの基本サイクル — 超臨界CO₂サイクル発電システムは、発電とCO₂回収が同時に達成できる新しい発電システムである。
Primary cycle of supercritical CO₂ cycle thermal power generation system

どが適用できる。燃焼に必要な酸素は酸素製造装置により空気から分離される。酸素製造装置から送られる酸素を過不足なく燃焼器に注入することで、天然ガスや石炭ガス化ガスといった燃料は酸素燃焼され、CO₂と水蒸気が得られる。サイクルを循環するCO₂は、燃焼器内で燃焼ガスにより直接加熱され、タービンへと送られる。ここで、タービンの入口におけるガスの圧力と温度は、システムの熱効率を決定するうえで重要なパラメータとなる。

熱サイクル的には高温高圧の条件のほうが、より高い熱効率が得られるが、機器などの技術的な成立性を考慮して圧力や温度の条件を設定する必要がある。圧力と温度の設定を変えてシステム検討を行った結果、従来のガスコンバインドサイクル発電と同等の発電効率が期待できる、圧力30 MPaと温度1,150 °Cをタービン入口におけるガスの圧力・温度条件として検討を進めることにした。圧力30 MPaは蒸気タービンとして、また、温度1,150 °Cはガスタービンとしてそれぞれ実績のあるレベルであり、蒸気タービンとガスタービンの技術を融合することで、技術的な成立性も十分期待できると考えられる。天然ガスを燃料とした場合、タービン入口でのガス組成は約3%が水蒸気で残りは超臨界状態のCO₂^(注1)である。

(注1) CO₂の臨界点は、圧力7.4 MPa、温度31.1°C。

タービンの出口では、排ガス中に含まれる水蒸気を液化してCO₂と分離し系外に排出する必要があるため、タービン出口の圧力を3 MPa程度に設定し、再生熱交換器と冷却器によりガス温度を下げた後、気水分離器により水分だけを除去する。ここではCO₂は気体であり、水(液体)と容易に分離できる。

気水分離器を出た気体のCO₂を圧縮機で、ある程度の圧力まで加圧した後に冷却器で冷却すると、CO₂は液体あるいは超臨界状態になる。液体又は超臨界状態のCO₂は気体に比べて高密度であり、ポンプにより比較的少ない動力で加圧が可能になる。このように、CO₂を圧縮機とポンプの2段階で加圧することで加圧に要する動力を低減することができ、サイクルの熱効率向上にも貢献する。

30 MPaまで加圧されたCO₂は再生熱交換器を經由して燃焼器へと送られるが、その前に、燃焼により増加したCO₂と同量のCO₂が系外に回収される。系外に回収されるCO₂の割合は、循環するCO₂の1/30程度であり、純度が高くかつ十分に高圧であるため、そのままパイプラインで輸送して地中などに貯留したり、EOR (Enhanced Oil Recovery) など、老朽化した油田に注入して石油増産用のCO₂として利用したりすることも可能である。

循環CO₂は、再生熱交換器で昇温されてから燃焼器へ送られる。再生熱交換器において、タービンからの排ガスの熱エネ

ルギーを循環CO₂により有効に回収することで、投入する燃料を減らすことができ、サイクルの熱効率を向上させることができる。また、酸素製造装置で発生した余剰な熱も、捨てずに再生熱交換器で回収することで、システムの熱効率向上に貢献できる。

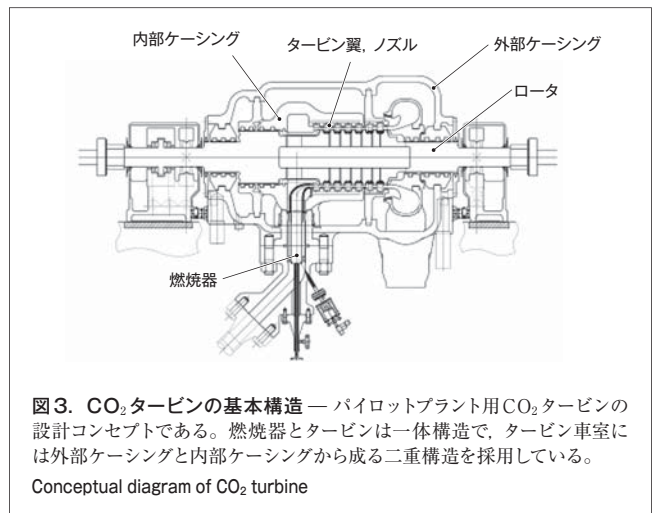
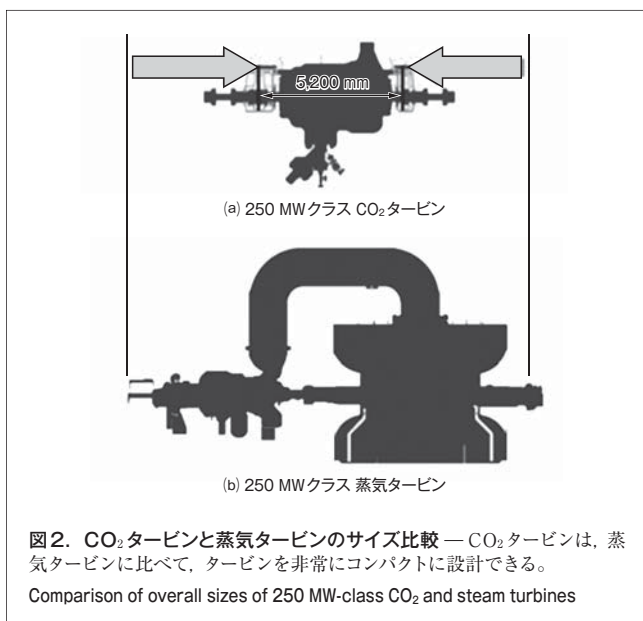
3 CO₂タービンの基本構造と開発課題

3.1 基本構造

当社は、タービン入口の圧力が30 MPa、温度が1,150℃で、蒸気タービン並みの圧力条件とガスタービン並みの温度条件を同時に満足し、超臨界状態のCO₂を作動流体とする革新的なタービン及び燃焼器（以下、CO₂タービンと呼ぶ）の開発を進めている。CO₂タービンは、従来のガスタービンと同様に燃焼器と一体で、ガス通路部を冷却構造とすることにより、高温高压ガスに対応できる構造にしている。

出力250 MWクラスのCO₂タービンのサイズのイメージを、同クラスの蒸気タービンと比較して図2に示す。CO₂タービンでは、作動流体にCO₂を使用することとタービンの排気圧力が蒸気タービンに比べて高いため、作動流体の体積流量が少なく済み、タービンを非常にコンパクトに設計できる。同クラスの蒸気タービンが高中圧車室と低圧車室の2車室で構成されるのに対し、CO₂タービンは1車室で構成でき、タービンの全長は蒸気タービンの1/3程度にコンパクト化できる。従来のガスコンバインドサイクル発電と比較しても、コンバインドサイクル発電がガスタービンと蒸気タービンの2種類のタービンを組み合わせて発電するのに対して、CO₂タービンは一つのタービンだけで発電するので、よりコンパクトな構成となる。

天然ガスを燃料とするパイロットプラント用CO₂タービンの



基本構造を図3に示す。燃焼器は、燃焼ガスを最短経路でタービンに導入するため、CO₂タービンの車室に直接接続する構造にしており、これにより、燃焼ガス通路部の冷却も容易になる。タービン車室は、高温高压ガスに対応するため、蒸気タービンで実績のある外部ケーシングと内部ケーシングの二重構造を採用している。高温のCO₂ガスが流れる燃焼器、タービン翼、ノズル、ロータ、及び内部ケーシングなどのタービン通路部は、ガスタービンの冷却技術を適用するとともに、必要に応じて、高温強度の高いニッケル (Ni) 基合金や遮熱コーティング技術を適用し、信頼性と経済性を確保する計画である。大型部品の一つであるロータは溶接構造としている。中央のガス通路部にはNi基合金を、また、両端の比較的低温の低い領域には鉄鋼材料を適用し、製造性や経済性に配慮した構造とする計画である。

3.2 開発課題

CO₂タービンの主要な開発課題は、次のようになる。

- (1) 高温材料技術及び遮熱コーティング技術
- (2) 高性能冷却技術など
- (3) CO₂雰囲気中での天然ガスの酸素燃焼技術
- (4) 30 MPaでの高压燃焼技術

高温材料技術では特にNi基合金が開発のポイントとなるが、高温蒸気タービン用として開発中のNi基合金を応用し、高温CO₂雰囲気中での材料特性などを評価中である。遮熱コーティングについては、ガスタービン用の遮熱コーティング技術を応用し、遮熱特性やコーティングの施工性を評価している。

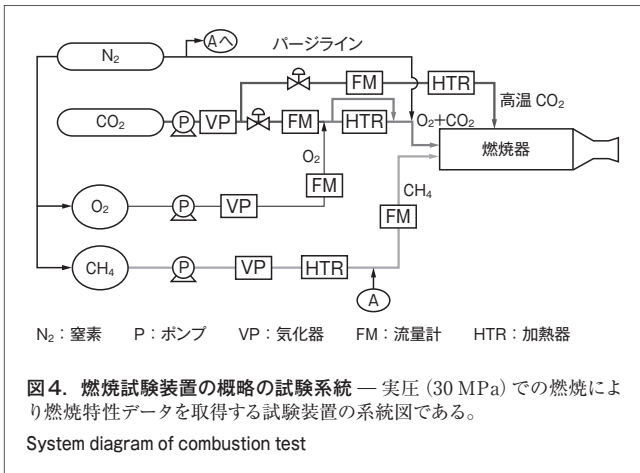
高性能冷却技術についても、遮熱コーティングと同様にガスタービンの技術を応用し、CO₂タービンの特性に合わせた冷却技術を検討中である。

一方、燃焼器に関する開発課題である、CO₂雰囲気中での天然ガスの酸素燃焼技術及び30 MPaでの高压燃焼技術については、未知な部分が多いため、30 MPaの実圧で燃焼試験を実施して燃焼特性を把握することにした。特に、既存のガス

タービンの多くが2 MPa程度の圧力で燃料を燃焼させるのに対して、CO₂タービンでは、圧力30 MPaと非常に高圧での燃焼が目標となっているため、高温高圧の燃焼器の実現が大きな課題である。

4 実圧燃焼試験

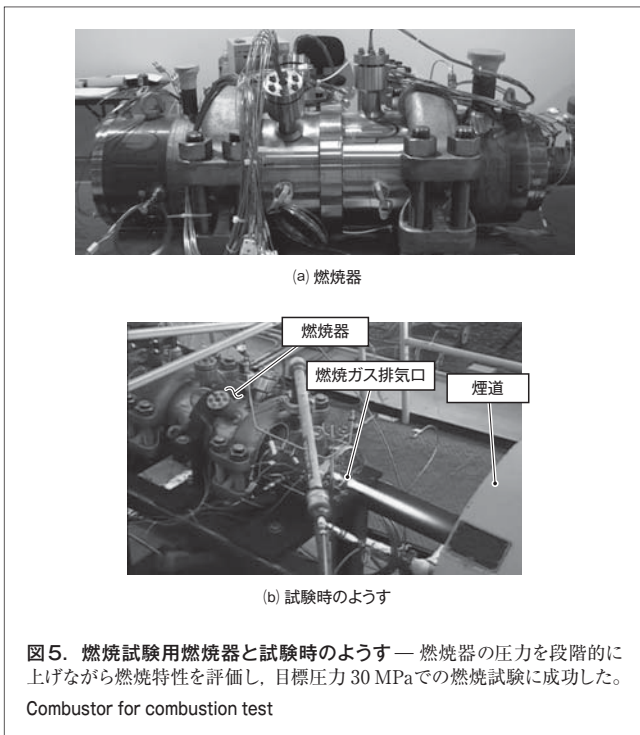
燃焼試験装置の概略の試験系統を図4に示す。試験に使用する天然ガス、酸素、及びCO₂はポンプで昇圧した後、気化器で気化させて燃焼器に注入する構成とした。燃焼試験用の燃焼器には、試験設備の制約などもあり、パイロットプラント用燃焼器の縮小モデルを用いた。試験は、米国カリフォルニア州の試験機関の設備を利用して実施した。



燃焼試験用燃焼器と試験時のようすを図5に示す。2013年1月に燃焼試験を開始し、燃焼器の圧力を段階的に上げながら燃焼特性の評価を行い、同年7月に目標圧力30 MPaでの燃焼試験に成功した。実圧燃焼試験で得られた各種の燃焼特性データは、パイロットプラントの燃焼器の設計に反映する予定である。

5 あとがき

超臨界CO₂サイクル発電システムの開発では、システムのキーコンポーネントである高温高圧タービン・燃焼器の開発が重要な要素であるが、このシステムでは従来にない新しいサイクルを適用するため、システム全体としての評価が非常に重要となる。そのため、ネットパワー社、シカゴブリッジアンドアイアン社、及びエクセロン社と共同でパイロットプラントの建設を計画しており、現在パイロットプラントの設計を行っているところである。今後、パイロットプラントの建設と実証試験を通して各機器及びシステム全体の評価を行った後、出力250 MW級の商用プラントの実現を目指している。



高橋 武雄 TAKAHASHI Takeo

電力システム社 火力・水力事業部 火力プロジェクト部参事。
高温タービン技術の開発に従事。日本機械学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.