

# 超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電用ガスタービン燃焼器

Gas Turbine Combustor for Supercritical Carbon Dioxide Cycle

岩井 保憲 伊東 正雄

■ IWAI Yasunori

■ ITOH Masao

地球温暖化の主要な原因であるCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）の排出量削減は取り組まなくてはならない重要な課題であり、火力発電プラントから排出されるCO<sub>2</sub>も効率の向上や、排ガスからの除去など様々な施策が進められている。

東芝はその対策の一つとして、高効率で発電しながら、CO<sub>2</sub>をそのまま取り出すことが可能な超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システムの開発に取り組んでいる。このシステムの実証を目的に、米国の8 Rivers社、NET Power社、Chicago Bridge & Iron社、及びExelon社と共同して、25 MWパイロットプラントの2016年稼働を目指して開発を進めている。当社は、キーコンポーネントである高温高压ガスを発生する燃焼器と発生したガスで駆動する発電タービンの開発を担当している。このシステムで使用する30 MPaかつ1,150℃の超高压高温ガスを発生するガスタービン燃焼器の開発は世界初となるもので<sup>(注1)</sup>、既にこの条件での燃焼特性を確認できており、現在、様々な運転状態を確認する燃焼試験を繰り返し実施しながら開発を進めている。

In line with the strong need for reduced emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), one of the main causes of global warming, various countermeasures against CO<sub>2</sub> emissions from thermal power plants have been introduced worldwide including enhancement of power generation efficiency and separation of CO<sub>2</sub> from boiler flue gas.

As a solution to this issue, Toshiba has been developing a novel combustor and turbine for the Allam Cycle, a new supercritical CO<sub>2</sub> power cycle developed by 8 Rivers Capital, LLC to capture 100% of atmospheric emissions including all CO<sub>2</sub> while achieving high thermodynamic efficiency and low capital costs, in cooperation with four U.S. companies: 8 Rivers Capital; NET Power, LLC; Chicago Bridge & Iron Company (CB&I); and Exelon Corporation. In the development of a 25 MW-class pilot plant, which is scheduled to commence operation in 2016, Toshiba has developed the world's first gas turbine combustor for a supercritical CO<sub>2</sub> system, with an inlet pressure of about 30 MPa and an exit temperature of 1,150°C, and has been successfully conducting repeated oxy-fuel combustion tests in order to confirm its operating conditions.

## 1 まえがき

東芝は、CO<sub>2</sub>放出低減への取組みの一つとして、超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システム<sup>(注2)</sup>の開発を米国の8 Rivers社、NET Power社、Chicago Bridge & Iron社、及びExelon社と共同で進めている。このシステムはCO<sub>2</sub>雰囲気中で燃料の天然ガスをO<sub>2</sub>（酸素）で燃焼させて、発生した高温高压のCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O（水蒸気）の混合ガスでタービンを回転させることで、タービンと連結した発電機を駆動して発電するシステムである。タービンを回転させ終えた混合ガスからH<sub>2</sub>O（水）を分離し、残りのCO<sub>2</sub>の大部分を循環させて再び燃焼器に供給する。また燃料に含まれるC（炭素）から発生したCO<sub>2</sub>は、余分なエネルギーをかけることなく高濃度でそのまま抽出可能であるため、高い発電効率を損なうことなく、CO<sub>2</sub>を回収できる発電システムである<sup>(1)-(3)</sup>。

当社はこの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と燃焼器の開発を担当している。ここでは、30 MPaの超高压条件下で燃焼する、世界初となるガスタービン燃焼器の開発状況について述べる。

(注1) 2015年4月時点、当社調べ。

(注2) 米国8 Rivers社が開発したAllam Cycle。

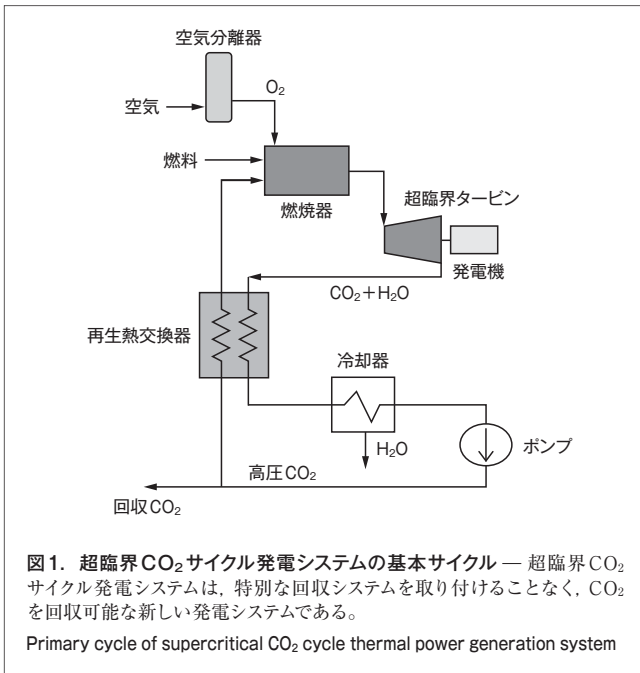
## 2 超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システムの概要

超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システムについて概要を説明する。基本サイクルを図1に示す。

燃料には天然ガスや石炭ガス化ガスなど、ガス燃料であれば適用可能であり、この燃料をO<sub>2</sub>製造装置で空気から分離したO<sub>2</sub>で燃焼させる。燃焼は基本的に量論混合比<sup>(注3)</sup>で行い、発生した高温高压のCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの混合ガスが作動媒体としてタービンを回転させて、発電機を駆動する。タービンを出た混合ガスは再生熱交換器を通過後、冷却器で冷却されてH<sub>2</sub>Oを分離し、残りのCO<sub>2</sub>はポンプなどで高压にされた後、再生熱交換器を通過して高温ガスとなり、再び燃焼器に供給される。大部分のCO<sub>2</sub>はサイクル内を循環しているが、燃料に含まれるCから生成されるCO<sub>2</sub>をサイクル外に抽出しながら運転を行う。CO<sub>2</sub>を抽出する方法はサイクル内を循環するCO<sub>2</sub>を途中から抜くだけであり、エネルギーロスなくCO<sub>2</sub>回収が可能である。

現在、25 MWクラスのパイロットプラントの設計製造を、2016年

(注3) 燃料とO<sub>2</sub>が完全燃焼するのに過不足ない混合比率。



の運転開始を目指して進めている。当社が担当している高温高圧タービンと燃焼器では、蒸気圧力が31 MPaの超々臨界蒸気タービンの設計製造技術と最新鋭ガスタービンの設計製造技術を融合し、設計を進めた。超高压に耐えるためケーシングは超々臨界蒸気タービンの技術を、タービン部はガスタービンの耐熱材料と冷却技術を用いることで、信頼性を確保している。

### 3 超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電用ガスタービン燃焼器

超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システムにおけるガスタービン燃焼器の特徴は、100%負荷運転時の燃焼器入口圧力が30 MPaと高いことである。空気を吸入し加圧して燃焼させる通常の発電用ガスタービン燃焼器では、最新鋭のものでも入口圧力は2 MPa程度である。30 MPaという超高压状態で作動する燃焼器はロケットエンジンなどで見られるが、ガスタービン燃焼器では世界初となる。

#### 3.1 開発課題

この高圧燃焼器の主要な開発課題として次が挙げられる。

- (1) 30 MPaかつ超臨界CO<sub>2</sub>雰囲気での燃焼特性の把握（着火点や吹消えなどの燃焼可能範囲、未燃排ガス成分、圧力変動量など）
- (2) 燃焼器壁の冷却特性の把握

前述のように通常のガスタービン燃焼器入口圧力は2 MPaで、かつ空気中での燃焼であるため、今回の30 MPaで超臨界CO<sub>2</sub>雰囲気中の燃焼は未知の部分が多い。したがって、実際のガスを用いて実際の圧力条件で燃焼試験を実施することが不可欠である。実際と同じ条件での燃焼試験により、燃焼可

能範囲や排ガス成分などの基本的な燃焼特性を把握することが可能になる。

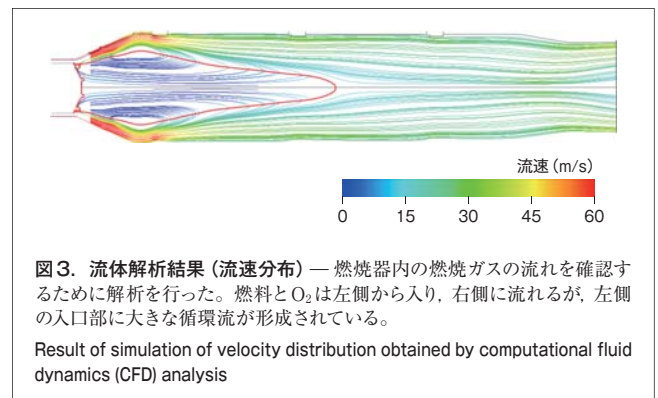
また、燃焼器本体は金属筒によって構成されており、通常のガスタービンでは空気を用いて金属筒を冷却することで過熱を防ぎ、機器の信頼性を維持している。このシステムでは、30 MPaの超高压と、媒体が超臨界CO<sub>2</sub>という通常のガスタービンとは異なる環境のため、実際の条件下での確認が必要である。

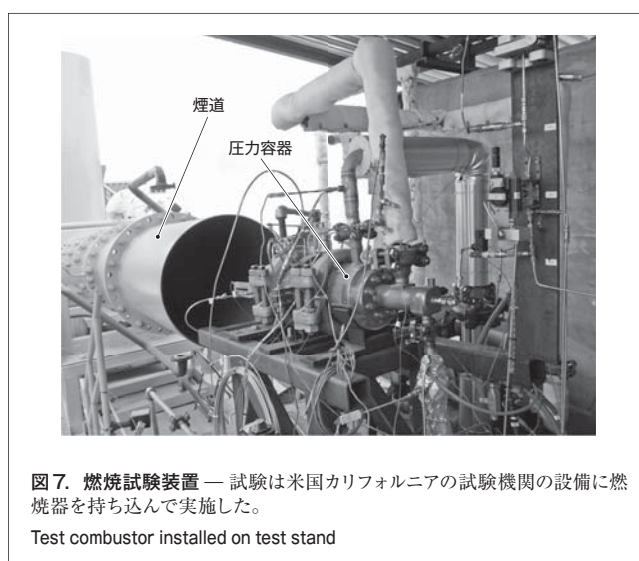
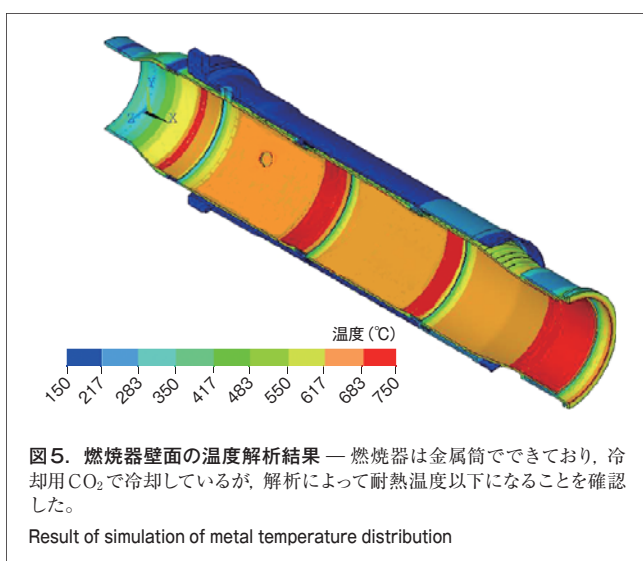
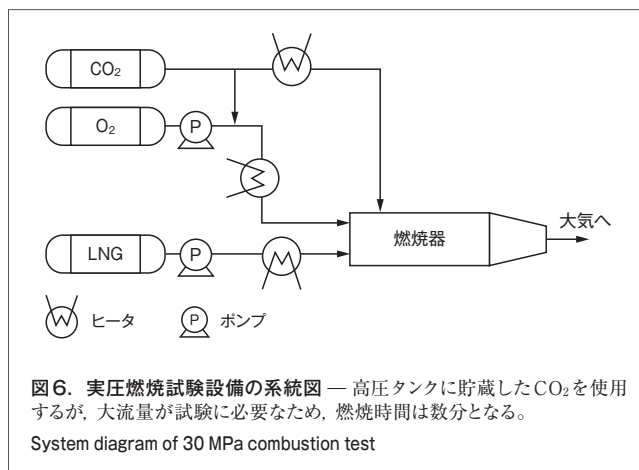
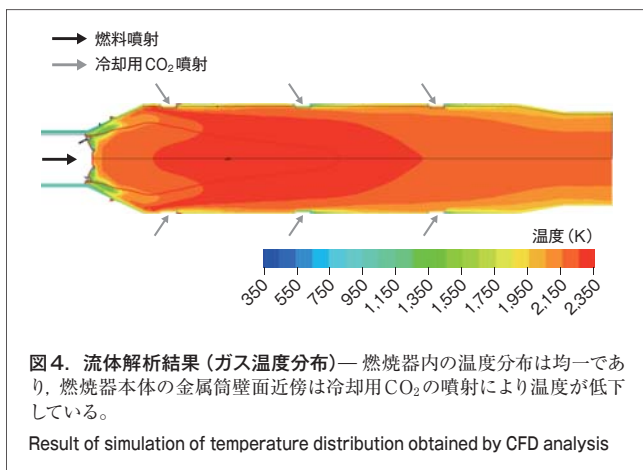
#### 3.2 超臨界CO<sub>2</sub>燃焼器の設計

超臨界CO<sub>2</sub>燃焼器の設計では、当社がこれまで培ってきたガスタービン開発及び設計の知見を生かし、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) なども活用して進めた。

30 MPaという実際の圧力条件での燃焼試験を行うには膨大な量のCO<sub>2</sub>が必要になる。そのため、実圧燃焼試験用に出力が25 MWパイロットプラントの1/5の燃焼器を設計した。試験用燃焼器の断面を図2に示す。燃焼器は筒状の形状をしており、左端から燃料、O<sub>2</sub>、及びCO<sub>2</sub>が供給されてこの筒の中で燃焼し、その燃焼ガスは右端の出口から排出される。実際はこの出口にタービンがあるが、今回は燃焼試験だけのため、燃焼ガスは出口から大気へ放出される。

流体解析結果として流速分布を図3に示す。燃焼器内の燃焼ガスの流れを表しており、色は速度を、線は流線を表している。O<sub>2</sub>は図の左端から旋回流として燃焼器内に入り、燃焼器の外側へと向かう流れを形成し、中心部では外側に流れた一部が逆流して戻る流れを形成していることがわかる。このような逆流域を形成することで、安定した燃焼を継続することができる。





次に流体解析結果として燃焼器内のガス温度分布を図4に示す。全体が均一的に高温となっており、安定した燃焼状態になっている。燃焼器の壁面を保護するための冷却用CO<sub>2</sub>が壁面に沿って噴き出すことによって、温度が低下していることがわかる。

燃焼器壁面の温度分布の解析例を図5に示す。冷却CO<sub>2</sub>が噴き出す位置では温度が低く(緑)、徐々に温度が高くなる(黄色→オレンジ→赤)になっているが、最高温度は耐熱金属の許容温度以下になっている。

### 3.3 実圧燃焼試験装置

実圧燃焼試験は30 MPaの超高压CO<sub>2</sub>を大量に使用するため、実施できる施設が限られる。今回は米国カリフォルニア州にある試験機関の設備を利用して実施した。

実圧燃焼試験装置の概略の系統を図6に示す。高压タンクに貯蔵されたCO<sub>2</sub>の一部はO<sub>2</sub>とともにヒータを通して燃焼器へ、残りのCO<sub>2</sub>もヒータを経て燃焼器に供給される。液化タンクから供給されるO<sub>2</sub>はポンプで昇圧され、気化器(図中省略)でガス化されてCO<sub>2</sub>とともに燃焼器に供給される。燃料で

ある液化天然ガス(LNG:Liquefied Natural Gas)も液化タンクから供給され、ポンプで昇圧後、気化器(図中省略)とヒータを経て燃焼器に供給される。また、どの系統にも流量調節弁があり、各ガスは設定流量に調節されて燃焼器に供給されている。燃焼試験時間はタンクの容量と燃焼器への供給量で決まり、30 MPaの圧力条件では数分の試験時間となる。

燃焼試験装置を図7に示す。手前の圧力容器内に燃焼器が入っており、燃焼ガスは大気に放出され煙道に入る。

### 3.4 燃焼試験の結果

ガスを貯蔵するタンクの容量から燃焼時間は短時間となる。ガスの供給開始から流量が安定したところで着火し、短時間で各流量を調節しながら30 MPaまで昇圧する。

燃焼試験のようすを図8に示す。左の圧力容器に入った燃焼器内で燃焼したガスは大気中に噴き出し、右の煙道に入っていく。図の中央少し右の白く明るくなっている部分が高温の燃焼ガスが噴き出している部分である。

各ガスの流量の変化を図9に示す。燃焼器に各ガスを流し始めてから40 s後に着火し、55 s時点から流量を増加させて

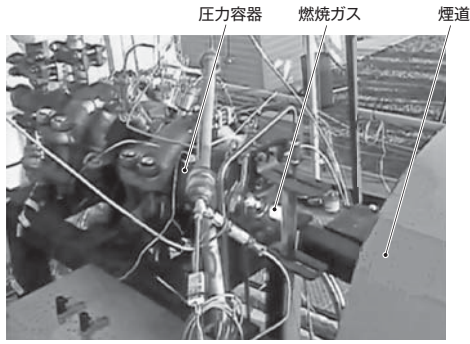


図8. 燃焼試験のようす— 高温高压の燃焼ガスは一気に大気の煙道に向かって放出される。

Test combustor undergoing combustion test

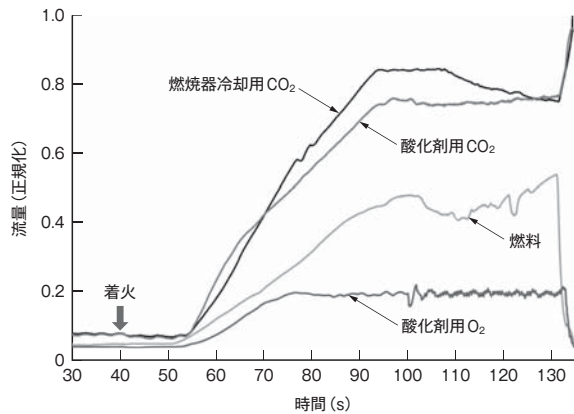


図9. 燃焼試験時の各ガスの流量変化— 試験開始40s後に着火し、急激に流量を増加させ、約100s時点には最大流量となる。

Changes in mass flows in combustion test

圧力を上昇させている。約100s時点すなわち着火から60s後には最大流量に達している。その後、約130s時点で燃料とO<sub>2</sub>を遮断し、消火している。

燃焼試験時の燃焼器内圧力の変化と燃焼器出口温度の変化を図10に示す。圧力は流量が増加し始める55s時点から大きくなり、110s時点には燃焼器内圧力は100%負荷の29MPa(燃焼器入口圧力30MPa)に到達している。燃焼器出口温度は着火と同時に急激に上昇し、いったん温度は低下しているが、圧力が大きくなるに従い上昇している。

図9の100s時点の燃料流量に変動が見られ、そのため図10の燃焼器出口温度も大きく変化しているが、安定した燃焼が継続可能なことが確認されている。また図9で酸化剤用CO<sub>2</sub>流量がほぼ一定となっている100~120s時点の各流量と温度から化学平衡計算で求めた燃焼器出口温度(図10の計算温度)は、計測した燃焼器出口温度とほぼ同じ値となっている。

その他、計測した燃焼器壁面温度分布が、図5に示した計算壁面温度分布と同じ傾向を示していることを確認した。

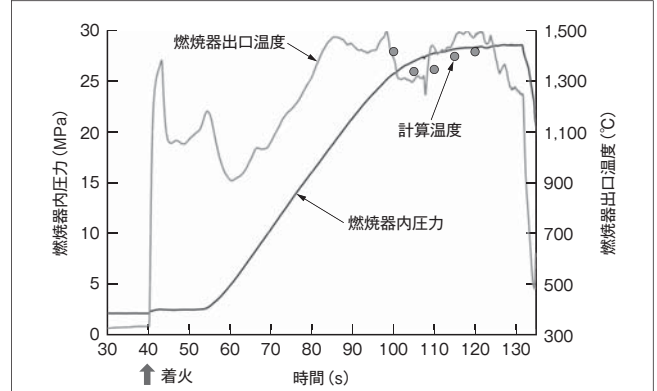


図10. 燃焼試験時の圧力と温度の変化— 燃焼器内圧力は短時間で約2MPaから29MPaまで上昇し、温度はいったん低下するが圧力とともに上昇する。

Changes in pressure and exit temperature in combustion test

## 4 あとがき

超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システムのキーコンポーネントの一つである燃焼器について、これまで経験のない30MPaかつ超臨界CO<sub>2</sub>雰囲気において安定した燃焼を確認した。また各種の設計計算値と試験で得られた値は近い値となっていることが確認され、25MWパイロットプラント設計ツールの検証ができた。

現在、オフデザインポイントでの燃焼性確認試験を引き続き実施しており、そこで得られたデータはパイロットプラント設計や運転に活用していく。

## 文献

- (1) Allam, R. J. et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia*. **37** (GHGT-11), 2013, p.1135-1149.
- (2) 高橋武雄. 超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システム. *東芝レビュー*. **68**, 11, 2013, p.36-39.
- (3) Allam, R. J. et al. "The Oxy-Fuel, Supercritical CO<sub>2</sub> Allam Cycle: New Cycle Developments to Produce Even Lower-Cost Electricity from Fossil Fuels without Atmospheric Emissions". *ASME Turbo Expo 2014*. Dusseldorf, Germany, 2014-06, ASME, 2014, GT2014-26952.



岩井 保憲 IWAI Yasunori

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主査。ガスタービン燃焼器の研究・開発に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、日本燃焼学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



伊東 正雄 ITOH Masao

電力システム社 京浜事業所 原動機部主幹。ガスタービンプラントの設計・開発に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会会員。Keihin Product Operations