

CO₂をほぼ100%回収可能な超臨界CO₂サイクル発電システムのパイロットプラント用燃焼器の燃焼試験

Combustion Tests of 50 MWt Combustor for Supercritical CO₂ Cycle Demonstration Power Plant with Capability to Capture Almost All CO₂ Emissions

岩井 保憲 IWAI Yasunori 鈴木 伸寿 SUZUKI Shinju

二酸化炭素(CO₂)の排出量削減に向けて、発電分野では再生可能エネルギーの導入が進んでおり、発電量も増加している。一方、化石燃料を用いる火力発電は、CO₂排出量が多いが、大電力の安定した発電が可能であることから、ベースロード電源としての役割は大きい。そこでCO₂排出量の削減に向け、更なる高効率化を進めて化石燃料の使用量を抑制したり、排ガス中のCO₂を効率的に除去したりといった様々な対策の検討が進められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、このような中で、高効率で発電しながら、回収のためのエネルギーを使わずにCO₂をほぼ100%回収できる超臨界CO₂サイクル発電システムを、米国のNET Power社、Exelon社、McDermott社、Oxy Low Carbon Ventures社、及び8 Rivers社と共同で開発しており、キーとなる燃焼器とタービンを担当している。今回、熱出力50 MWtの燃焼器をパイロットプラント用タービンと組み合わせる前の性能確認として、燃焼器単体の燃焼試験を行い、着火から超臨界状態までの燃焼特性及び運転性について良好な結果が得られた。

In the electric power generation field, thermal power generation through the combustion of fossil fuels is still playing an important role in stably supplying large amounts of electric power as a representative type of baseload power supply, while on the other hand, the amount of electric power generated by renewable energy systems is rising in line with the widespread introduction of such systems to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions. There is consequently an increasing need for various technologies to reduce CO₂ emissions from thermal power plants, including further improvements in efficiency to reduce fuel consumption and effectively remove CO₂ in exhaust gases.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been developing a supercritical CO₂ cycle power plant that achieves high efficiency while capturing almost all CO₂ emissions in cooperation with the following U.S. companies: NET Power, LLC; Exelon Generation Company, LLC; McDermott International, Inc.; Oxy Low Carbon Ventures, LLC; and 8 Rivers Capital, LLC. In this project, we have been assigned the development of key equipment including a turbine and a combustor. We have now conducted combustion tests of the 50 megawatt thermal (MWt) combustor unit prior to combining it with the turbine for the demonstration power plant, and obtained good results including securing of the desired combustion conditions and operability from ignition to the supercritical state.

1. まえがき

東芝エネルギーシステムズ(株)は、火力発電におけるCO₂排出量削減への取り組みの一つとして、超臨界CO₂サイクル発電システム用の燃焼器とタービンの開発を進めている。

この発電システムは、タービン入り口条件を、蒸気タービンとして実績のある圧力30 MPaと、ガスタービンとして実績のある1,150℃に設定することで、技術的成立性を確保しながら従来のコンバインドサイクル発電と同等の発電効率を得られる。作動流体として超臨界CO₂を利用することで、昇圧するための圧縮機やポンプなどの動力を小さくできることも、高効率の要因の一つである。また、サイクルの最低圧力が3 MPaとこれまでより高圧であるため、作動流体の体

積流量が小さく、機器全体をコンパクトにすることができる特長もある。更に、燃料に含まれるC(炭素)から発生したCO₂は、純度の高い状態で容易に回収できる。このように、超臨界CO₂サイクル発電システムは、コンパクトな機器で高効率に発電しながら、CO₂をほぼ100%回収できるニアゼロエミッション火力発電システムである⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

ここでは、30 MPaの超高圧条件下で燃焼する、世界初^(注1)となるパイロットプラント用燃焼器の燃焼試験結果について述べる。

(注1) 2018年8月時点、当社調べ。

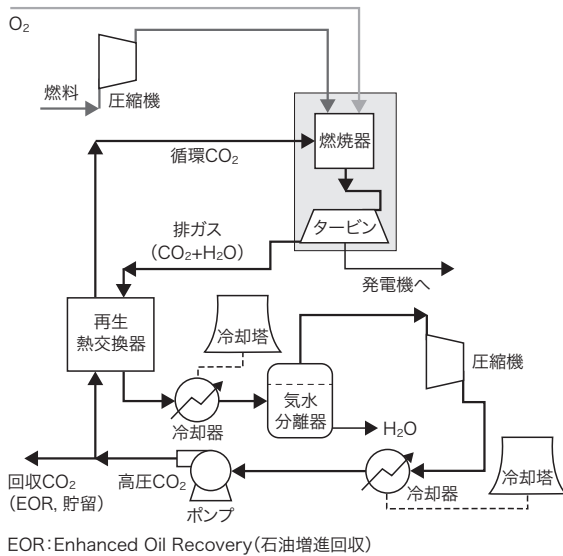


図1. 超臨界CO₂サイクル発電システムの基本サイクル

超臨界CO₂サイクル発電システムは、特別な回収システムを取り付けることなくCO₂をほぼ100%回収可能な、ニアゼロエミッションの火力発電システムである。

Primary cycle of supercritical CO₂ cycle power plant

2. 超臨界CO₂サイクル発電システムの概要

超臨界CO₂サイクル発電システムの基本サイクルを図1に示す。このシステムでは、天然ガスや石炭ガス化ガスなど、ガス燃料であれば燃料として利用可能であり、これらの燃料を、O₂（酸素）製造装置で空気から分離したO₂により燃焼させる。燃焼は基本的に量論混合比^(注2)で行い、発生した高温高压のCO₂とH₂O（水）から成る排ガスでタービンを回転させて、発電機を駆動する。タービンを出た排ガスは再生熱交換器を通過後、冷却器でCO₂とH₂Oに分離される。CO₂はポンプなどで高压にされた後、再生熱交換器で高温ガスとなり、再び燃焼器に供給される。

大部分のCO₂はサイクル内を循環しているが、燃料に含まれるCとH（水素）から生成されるCO₂とH₂Oをサイクル外に回収しながら運転する。CO₂の回収は、サイクル内を循環するCO₂を途中で分岐するだけであり、新たなエネルギーを付加することなくCO₂を回収できる。

3. 超臨界CO₂サイクル発電システムの燃焼器

現在、発電用に広く使用されている、空気を吸入、加圧し燃料を燃焼させる最新鋭ガスタービン燃焼器の最大入り口圧力は、約2 MPaである。これに対して、超臨界CO₂サ

イクル発電システムの燃焼器の最大入り口圧力は、30 MPaと高いことが大きな特徴である。このような超高压状態で作動する燃焼器はロケットエンジンなどに見られるが、ガスタービン燃焼器としては世界初^(注1)となる。

超高压燃焼器に対する主要な開発課題として、以下が挙げられる。

- (1) 超臨界状態を含めたCO₂雰囲気での吹き消え点や未燃排ガス成分量など、燃焼特性の把握
- (2) 燃焼器壁の冷却特性の把握
- (3) 燃焼安定性、高信頼性の確認

30 MPaという超臨界CO₂雰囲気中の燃焼は未知の部分が多いため、これまでも出力がパイロットプラントの1/5である試験用燃焼器を用いて実際のガスと実際の圧力条件での燃焼試験を実施し、これらの課題を確認してきた^{(5), (6)}。今回、燃焼器をパイロットプラント用タービンと組み合わせる前の性能確認として、燃焼器単体の燃焼試験を実施した。

3.1 パイロットプラント用燃焼器の燃焼試験

燃焼器が組み込まれている試験装置の外観を図2に示す。燃焼試験は多量のCO₂が必要になるため、米国テキサス州のパイロットプラント設備を利用して実施した。

燃焼試験のサイクルを図3に示す。燃焼試験装置はタービンに隣接するように設置され、燃焼試験で使用する燃料、O₂、CO₂はパイロットプラントの燃焼器への供給ラインから分岐して利用する。燃焼試験中は、パイロットプラントの燃焼器とタービンが、燃焼試験装置に置き換わった状態になる。実際の超臨界CO₂サイクル発電プラントでは、燃焼器から出た排ガスはタービンの回転に使用されて温度と圧力が低下する。燃焼試験装置ではタービンの代わりに、温度・圧力調整部で、温度は希釈CO₂により、圧力は模擬ノズル



図2. 燃焼器が組み込まれている試験装置

米国テキサス州のパイロットプラントに、燃焼器を設置した。

Combustor installed on test stand

(注2) 燃料が完全に燃焼するために過不足のない燃料とO₂の混合比率。

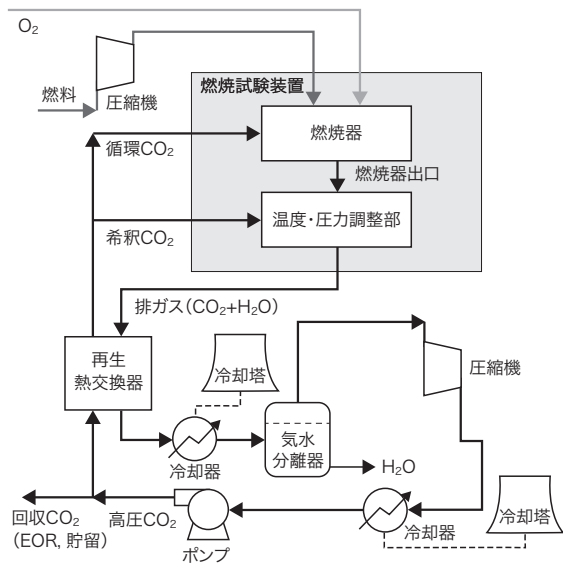


図3. 燃焼試験のサイクル

パイロットプラントのタービン横に燃焼試験装置を設置し、パイロットプラントの燃焼器に供給されるCO₂、燃料、O₂の各系統を、燃焼試験装置に分歧して燃焼試験を行った。

Outline of combustion test facility

と圧力調節弁により、調整する。燃焼試験装置からの排ガスは再生熱交換器に送られて、CO₂は循環して再び燃焼試験装置に供給され、実際のプラントと同様なクローズドサイクルが構成できる。

このように、燃焼試験の環境には制限がある。このため、燃焼器の最大入り口圧力が10 MPa、燃焼器の出口温度も定格に比べると低く、出力は定格の約55%となった。定格出力までは届かないが、この燃焼試験により、着火から超臨界状態までの燃焼特性の把握と運転性の確認が可能になる。

3.2 点火方法

従来のガスタービン燃焼器での点火は、点火プラグの電気火花スパークによって行われている。点火プラグは点火時に稼働し、点火後はそのまま高温の火炎の影響を受けにくい場所に待機しているが、燃焼器内の圧力は受け続ける。

今回の燃焼器は、先に述べたように定格負荷条件では30 MPaになるため、点火プラグがこの圧力に耐えられない可能性がある。そこで、レーザーによる点火方法を採用した。高出力のレーザー光を燃焼器内の一点に集光させると、その部分の気体がイオン化してプラズマ状態になる。この集光されたレーザー光のエネルギーを用いて、燃料とO₂の混合気に点火する。

レーザー点火装置の概略を図4に示す。レーザー発振器は大気圧のケーシング外に設置しているため、圧力の影響を受けず、レーザー光は圧力隔壁となる窓を通して燃焼器

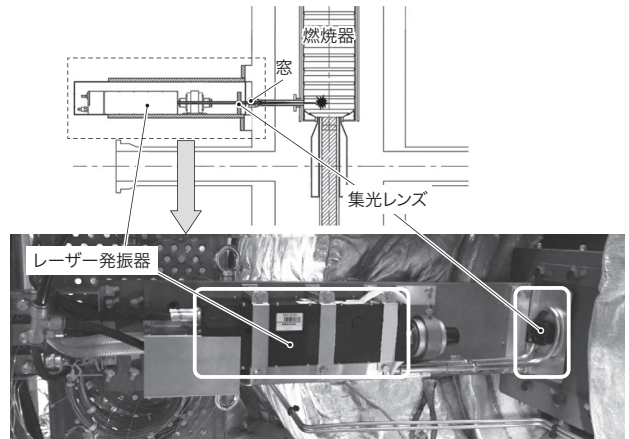


図4. レーザー点火装置

レーザー発振器からのレーザー光をレンズで燃焼器内に集光し、その部分の気体をプラズマ化させて可燃混合気に点火する。

Laser igniter for combustor

項目	出口温度	O ₂ 濃度 低	O ₂ 濃度 中	O ₂ 濃度 高
55% 負荷	↑ 高			
18% 負荷	↓ 低			
9% 負荷		—		

図5. 燃焼器内の火炎観察

燃焼器に設けた窓を通して超臨界CO₂中の火炎状態を観察し、いずれも安定な燃焼であることを確認した。

Results of observations of flame under supercritical CO₂ conditions

内に照射される。今回の燃焼試験において、このレーザー点火方式の検証を行い、問題ないことを確認した。

3.3 燃焼試験の結果

燃焼試験用の燃焼器には、燃焼状態を確認するための観察窓を設けて、燃焼器の下流側から上流側をカメラで確認できるようにした。燃焼器に供給しているO₂濃度や燃焼器の出口温度を変化させたときの火炎状態を、図5に示す。燃料とO₂の混合比は一定とし、燃焼器の出口温度はO₂とCO₂の量を変えることで調整して、いずれもCO₂は超臨界状態になるようにした。O₂濃度、燃焼器の出口温度が高い

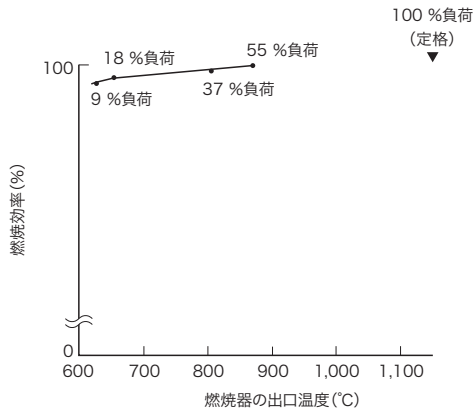


図6. 燃焼効率

燃焼器の出口における未燃排ガス成分量を測定して、燃焼効率を算出し、定格の55%の負荷でも100%の燃焼効率を得られることを確認した。

Results of combustion efficiency calculations from concentrations of unburned portions of emissions at combustor exit

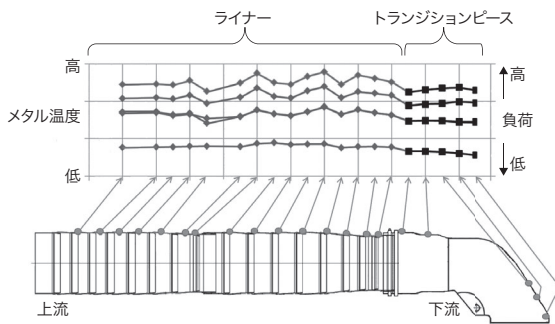


図7. 燃焼器の外表面の温度分布

燃焼器の外表面の温度分布を熱電対で計測した結果、最大定格の場合も許容温度以下になることが分かった。

Results of measurements of outer metal temperature characteristics

ほど、明るく強い光を発する火炎が観察できた。逆に、 O_2 濃度が低く燃焼器の出口温度が低い場合には、火炎はカメラで確認できないほど暗くなるが、各温度条件を維持した安定な燃焼であることを確認している。

燃焼試験で得られた燃焼効率を図6に示す。横軸は燃焼器の出口温度、縦軸は燃焼効率である。燃焼効率は、供給した燃料のトータル発熱量のうち、燃焼ガスの温度上昇にどれだけ活用されたかを示す指標の一つである。3.1節で述べたように、燃焼試験の出力は定格の約55%であったが、この条件でほぼ100%の燃焼効率を得られた。今回の燃焼器は、 CO_2 雰囲気中でほぼ量論混合比で燃焼させているため、燃焼効率の悪化も懸念された。燃焼器の出口温度が低下するにつれて燃焼効率も低下するが、その傾向と低下レベルは従来のガスタービン燃焼器と同等であることが確認された。

燃焼器の外表面の温度分布を図7に示す。燃焼器の負荷が増加するに従い、外表面温度が高くなっているが、その温度は燃焼試験の最大負荷時(定格の約55%)でも十分に低い温度であることを確認した。また、計測された温度は設計予測値に近く、更に負荷が大きくなる最大定格時の発電プラントにおいても、十分に許容温度以下になると見積もられた。更に、燃焼振動も全試験条件において制限値以下であり、安定した燃焼性が得られることを確認した。

4. あとがき

CO_2 をほぼ100%回収できる超臨界 CO_2 サイクル発電システムの、パイロットプラント用キーコンポーネントの一つである燃焼器の燃焼試験を実施し、点火から超臨界状態の部分負荷までの運転性、燃焼性ともに良好な結果を得た。また、タービン運転時には確認できない火炎状態なども確認することができた。

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". Proceedings of Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11). Kyoto, 2012-11, GHGT-11. 2012, p.1135-1149.
- (2) 高橋武雄. 超臨界 CO_2 サイクル発電システム. 東芝レビュー. 2013, 68, 11, p.36-39.
- (3) Allam, R. J. et al. "The Oxy-Fuel, Supercritical CO_2 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, AMSE. 2014, GT2014-26952.
- (4) Allam, R. et al. "Demonstration of Allam Cycle : An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture". Proceedings of GHGT-13. Lausanne, Switzerland, 2016-11, GHGT-13. 2016, p.5948-5966.
- (5) 岩井保憲, 伊東正雄. 超臨界 CO_2 サイクル発電用ガスタービン燃焼器. 東芝レビュー. 2015, 70, 5, p.16-19.
- (6) Iwai, Y. et al. "Development Approach to the Combustor of Gas Turbine for Oxy-Fuel, Supercritical CO_2 Cycle". ASME Turbo Expo 2015. Montreal, Canada, 2015-06, AMSE. 2015, GT2015-43160.



岩井 保憲 IWAI Yasunori

東芝エネルギーシステムズ(株) パワーシステム事業部
京浜事業所 設計第一部
日本機械学会・日本ガスタービン学会・日本燃焼学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



鈴木 伸寿 SUZUKI Shinju, D.Eng.

東芝エネルギーシステムズ(株) パワーシステム事業部
京浜事業所 設計第一部
博士(工学) 日本ガスタービン学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.