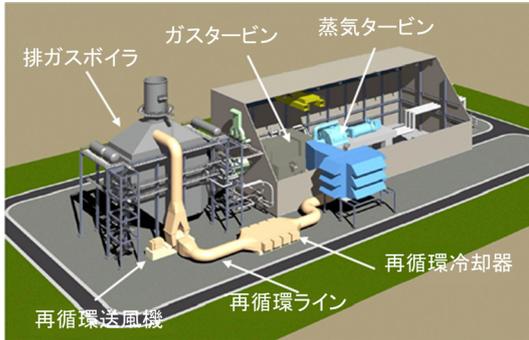


1700℃級ガスタービンにおける 排ガス再循環 低 NO_x 燃焼システムの開発

Development of the Low NO_x Combustion System
with EGR for 1700℃ class Gas Turbine



田中 優佑*1
Yusuke Tanaka

野勢 正和*2
Masakazu Nose

中尾 光宏*1
Mitsuhiro Nakao

斉藤 圭司郎*3
Keijiro Saitoh

伊藤 栄作*4
Eisaku Ito

塚越 敬三*5
Keizo Tsukagoshi

ガスタービンコンバインドサイクル発電はクリーンかつ経済的な火力発電設備として長期的な世界市場拡大が予想されている。当社では更なる高効率化のために1700℃級ガスタービンの技術開発を国家プロジェクトとして実施しており、超高温ガスタービンの低NO_x燃焼システムとして、排ガス再循環を用いた燃焼器の開発を進めてきた。実用化技術開発研究の最終年度である2011年に、排ガス再循環を模擬した高圧燃焼試験装置を建設し、排ガス再循環条件で開発目標NO_x50ppm以下を満足する試験結果を得ることができた。本報ではこの排ガス再循環を模擬した高圧燃焼試験について紹介する。

1. はじめに

ガスタービンコンバインドサイクル発電(以下、GTCC)はクリーンかつ経済的な火力発電設備として、以下に示すように経済的・社会的ニーズが今後も高まる傾向にある。

- ① 長期的な展望としてGTCCの世界市場はさらに成長すると予測されている。
- ② 新興国の電力基盤整備では短納期かつ安定した電力供給が可能なGTCCの需要が大きい
- ③ 先進国では経済性と環境適合性をより一層高めるための高効率化が必要とされる。
- ④ 再生可能エネルギー・原子力発電とのベストミックスの観点で負荷追従能力への要求が高まる。

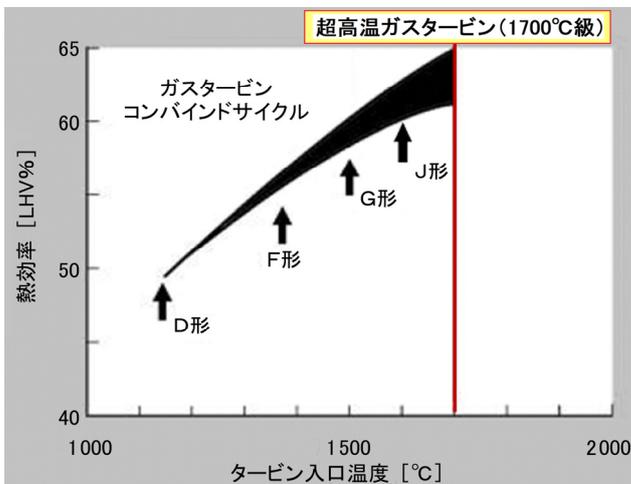


図1 コンバインドサイクル効率の
トレンド

1700℃級ガスタービンは当社の量産型ガスタービンに比べて最も高温・高効率のガスタービンであり、熱効率は62～65%が達成可能となる。CO₂排出原単位は微粉炭焚き従来火力に比べ、1/2程度に削減できる。

GTCCの熱効率はタービン入口(燃焼器出口)温度上昇に伴い向上する(図1)。更なる効率向上のため2004年度から国家プロジェクトとして1700℃級ガスタービンの開発を行っており⁽¹⁾⁻⁽³⁾、コ

*1 技術統括本部高砂研究所

*3 技術統括本部高砂研究所 主席研究員 技術士

*5 原動機事業本部ガスタービン技術部 技師長

*2 原動機事業本部ガスタービン技術部 工博

*4 原動機事業本部ガスタービン技術部 次長 工博

ンバインドサイクル効率 62~65% (LHV) を目標に、燃焼器、圧縮機、タービン、冷却、遮熱コーティング等の各要素の技術開発に取り組んでいる。

図2に当社における低 NOx 燃焼器開発の変遷⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾を示す。当社では熱効率の観点からタービン入口温度上昇に継続的に取り組んでおり、化石燃料の燃焼により発生する窒素酸化物 (NOx) などの公害物質を抑制する燃焼技術を導入してきた。NOx の生成は燃焼温度の上昇に伴い指数関数的に上昇するため、1700°C 級燃焼器では従来からの希薄予混合燃焼方式を用いても、NOx 生成が 1500°C 級燃焼器に比べ1桁近く増加する⁽⁷⁾。このような高濃度の NOx に対応する脱硝装置はコスト面で現実的でなく、1700°C 級ガスタービンに適した低 NOx 燃焼システムの開発が新たに必要になる。本プロジェクトではガスタービンの低 NOx 燃焼システムとしては世界初となる排ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation, 以下、EGR) 方式を採用し、それに適した燃焼器の開発を進めている。排ガス再循環燃焼器の開発について、これまでの成果として、実機スケール燃焼器を用いた中圧燃焼試験により、排ガス再循環方式での NOx 低減効果を確認している⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。本報では実機相当圧力での、高圧燃焼試験について紹介する。

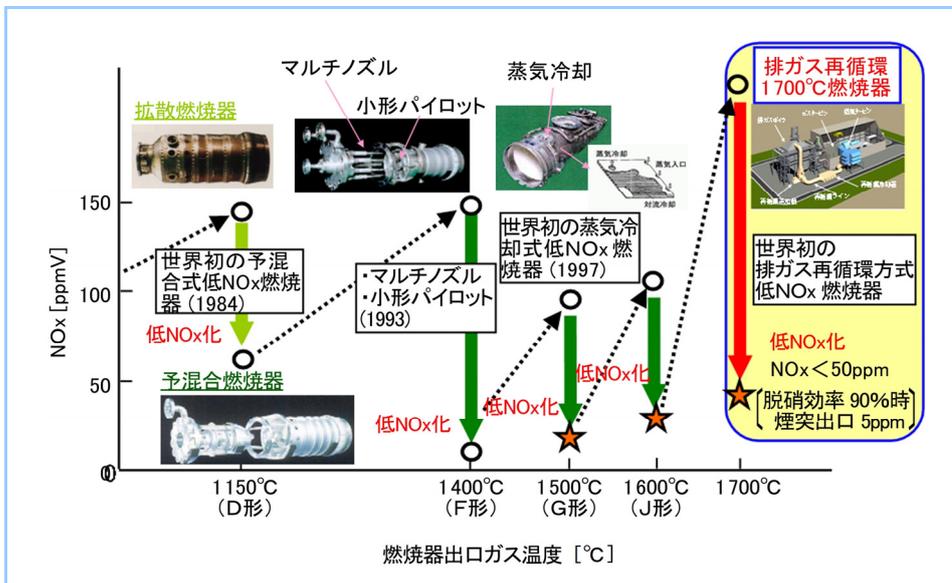


図2 三菱重工の低 NOx 燃焼器開発の変遷
 当社は効率向上のための燃焼器出口ガス温度向上と、NOx 低減の両立を図ってきた。1700°C 級の超高温燃焼器では、NOx 抑制のために排ガス再循環システム適用に取り組んでいる。

2. 排ガス再循環システムの概要

1700°C 級ガスタービンの排ガス再循環システムの系統図を図3に示す。

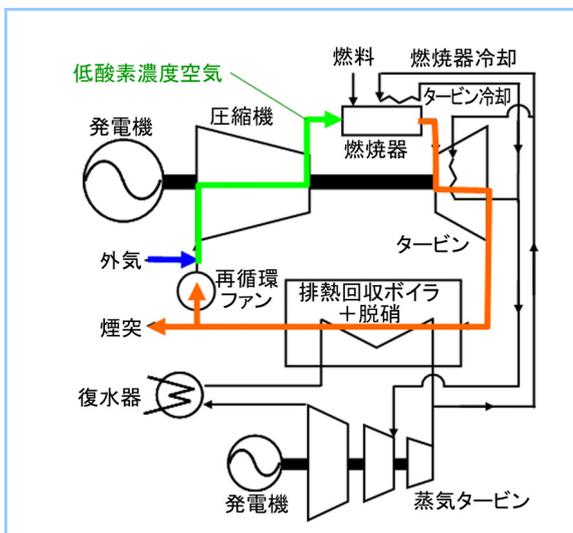


図3 排ガス再循環 (EGR) システムの系統図

燃焼器より生成した排ガスは排熱回収ボイラを通過後、外気と混合し圧縮機へと導入され、最終的に、低酸素濃度空気として燃焼器に供給される。

排ガス再循環方式として空気中に排ガスの一部を混入させるセミクローズド方式を採用しており、燃焼用空気の酸素濃度を低減させることができる。排熱回収ボイラ(HRSG)下流で分岐された排ガスは、冷却器を通して外気と混合され、圧縮機へと導入される構成となっている。1700℃級排ガス再循環燃焼器の開発目標を表1に示す。希薄予混合燃焼方式による NO_x 排出低減を狙い、NO_x 排出濃度 50ppm(15%O₂ 換算)以下を目標としている。また燃焼器の冷却方式として、当社G形燃焼器で実績のある回収型蒸気冷却システムを採用した。

表1 排ガス燃焼器の仕様と開発目標

排ガス再循環燃焼器の仕様と開発目標	
燃焼器出口ガス温度	1700℃
燃焼方式	予混合燃焼方式
燃焼筒冷却	蒸気冷却方式
NO _x	50ppm@15%O ₂ 換算以下
CO	10ppm@15%O ₂ 換算以下

3. 排ガス再循環時の NO_x 排出特性

実機条件で排ガス再循環による NO_x 低減効果を検討するために、一次元予混合層流燃焼解析を実施した。詳細化学反応機構モデルには GRI Mechanism Ver. 3.0⁽¹¹⁾ (53 化学種, 325 素反応)を用いた。NO_x 生成に対する排ガス再循環量の感度を確認するため、燃焼器入口酸素濃度をパラメータとした条件で計算を実施した(表2)。

各入口酸素濃度条件に対して、15%O₂換算した NO_x と燃焼器出口温度(T1T)の関係を図4に示す。なお、計算は入口酸素濃度(EGR 率)をパラメータとした均一予混合燃焼計算結果である。入口酸素濃度の低下(EGR 率の増加)に伴いNO_x 濃度は小さくなる傾向があり、燃焼器出口温度 1700℃(1973K)において、EGR 率 26.6%では EGR 率 0.0%に比べて 40%程度 NO_x を低減できる結果となった。

表2 計算条件

計算条件(1700℃定格)		
	入口酸素濃度	EGR 率
1	21.0vol%	0.0%
2	19.6vol%	10.0%
3	17.0vol%	26.6%

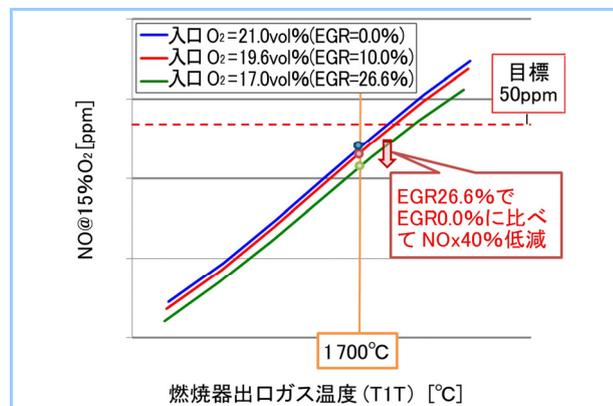


図4 燃焼器出口温度と NO_x 濃度の関係(計算結果)

実機相当の高圧力条件での EGR 変化に対する NO_x 生成の感度を評価した。計算では 1700℃条件で、酸素濃度 17.0%(EGR 率 26.6%)では標準空気に対して NO_x を 40%程度低減できる結果となった。

4. 実機燃焼器による高圧燃焼試験

4.1 排ガス再循環の模擬手法

燃焼試験では、排ガス再循環システムを模擬するために、排ガス発生用燃焼器(プリバーナ)と減温スプレーダクトを併用した。図5に装置構成の概略を示す。プリバーナを主燃焼器の上流に設置し、プリバーナ下流には減温スプレーダクトを設けることで、主燃焼器に供給する空気を所定の酸素濃度、ガス温度に調整した。

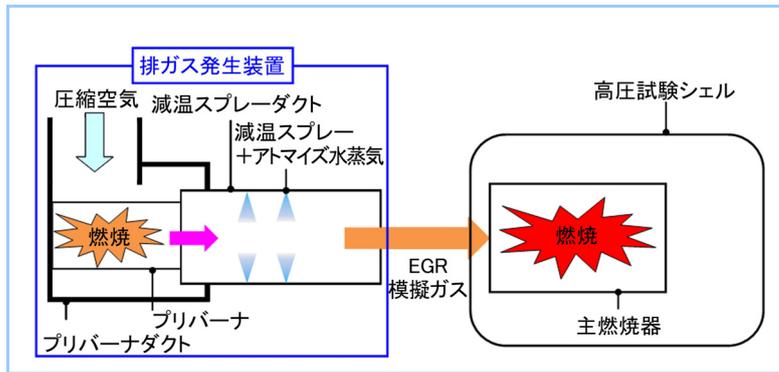


図5 排ガス再循環 (EGR) システムの模擬

高圧燃焼試験において EGR を模擬するために、主燃焼器上流に排ガス発生装置としてプリバーナを設け、主燃焼器に供給する酸素濃度を制御、更に減温スプレーダクトにより燃焼ガス温度を制御することで EGR を模擬した。

4.2 高圧燃焼試験装置

高圧試験シェル内の装置構成を図6に示す。排ガス発生装置からの EGR 模擬ガスはディフューザを通過後、試験シェル内に設置した燃焼器車室形状を模擬した容器(セクタ)を通り、主燃焼器に供給される。NO_x、CO といった排ガス計測は、燃焼器出口下流の計測ダクトにおいて、排ガスサンプリングを行う。なお、試験シェルの設計仕様は、最高使用圧力 31ata (3.04MPa)、最高使用温度 550°C (823K) である。

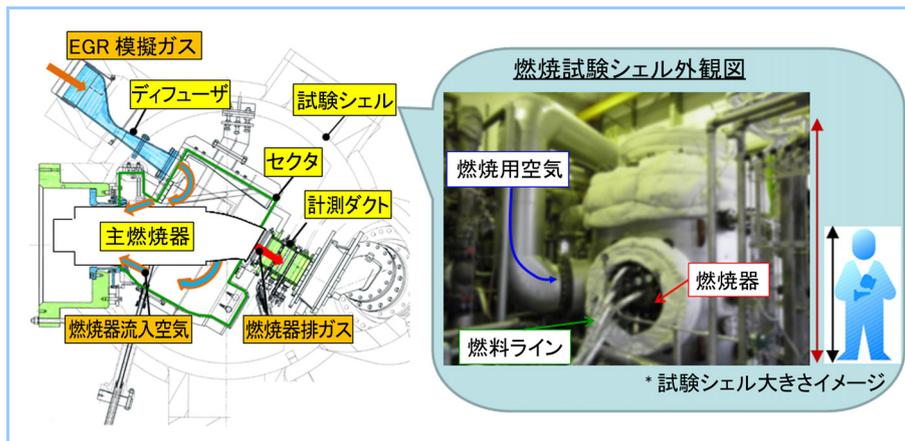


図6 高圧試験シェル内の装置構成

EGR 模擬ガスは試験シェル内のディフューザを通過後、燃焼器車室を模擬したセクタを介して燃焼器に供給される。NO_x、CO といった排ガス計測は計測ダクトにて排ガスサンプリングで行う。

通常の大気を用いた燃焼試験と異なり、NO_x は燃焼器上流の排ガス発生燃焼器からも発生するため、主燃焼器上流の燃焼用空気についてもガス組成計測を行い、主燃焼器で発生する NO_x は主燃焼器入口 NO_x と出口 NO_x の差分により求めた。なお、入口空気の NO_x 含有率が燃焼時の NO_x 生成にどの程度影響を及ぼすかを一次元予混合層流燃焼解析によって検討し、試験条件である当量比 0.7~0.9 では、入口空気中の NO_x 成分が燃焼時の NO_x 生成に影響しないことを確認した。なお、実機の排ガス再循環システムにおいて、脱硝装置が再循環外に設置される場合、燃焼器出口 NO_x 評価には燃焼器入口空気に含まれる NO_x を加える必要がある。本報では図3に示すように脱硝装置が再循環内に設置されることを想定している。

試験条件は燃焼器圧力、入口空気温度、流量を実機相当とし、また EGR 率による NO_x 生成の感度を確認するために低 EGR 率(10%)を想定した高入口酸素濃度 (19.6vol%) 条件と高 EGR 率(26.6%)を想定した低入口酸素濃度 (17.0vol%) 条件にて燃焼試験を実施した。

4.3 試験結果

図7に計測結果を示す。図は燃焼器出口温度(T1T)に対する NO_x 値である。燃焼器出口温度 1700℃(1973K)条件において、低酸素濃度条件の NO_x は高酸素濃度条件に対して約 1/4 (23%)と大幅に低減し、開発目標である 50ppm を満足した。先に示した一次元層流予混合燃焼解析の NO_x 低減効果(約 60%)に比べ大幅な NO_x 低減となった理由として、①実機では予混合気濃度の不均一があり、高燃料濃度領域で形成される局所高温火炎温度が存在するため、EGR による火炎温度抑制効果がより大きく表れたこと、②酸素濃度の低下に伴い燃焼速度が低下することで火炎位置が下流に移動し、燃焼時の混合気濃度均一性が促進したこと、滞留時間が減少したこと、などの要因が推察される。

図8に燃焼器出口での CO 濃度を示す。EGR 条件下では酸素濃度低下により、化学反応の影響で排ガス中の CO が増加することが懸念されるが、高酸素濃度条件、低酸素濃度条件のいずれの条件についても開発目標 10ppm を満足する結果となった。CO 濃度に大きな変化がないことから分かるように、燃焼器出口での燃焼効率は大きく悪化していない。

図9に燃焼振動計測結果を示す。高酸素濃度条件、低酸素濃度条件いずれの場合も内圧変動制限値を超えていない。EGR を付加した低酸素濃度条件下では保炎性の悪化が懸念されたが、燃焼振動を誘発するような不安定燃焼は生じなかった。

以上の試験結果より、EGR 環境下での実機条件で、1700℃級燃焼器が NO_x・CO のエミッション目標を達成し、安定燃焼できることを確認した。

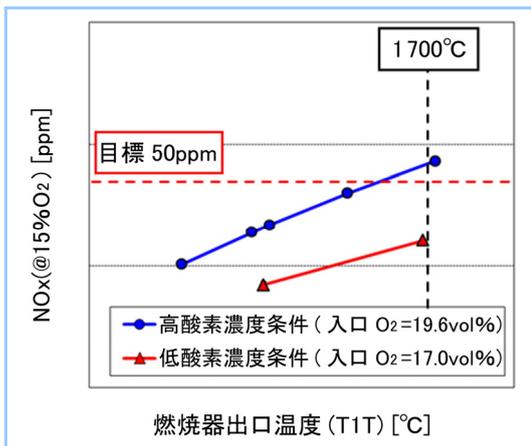


図7 NO_x 排出特性(高圧燃焼試験結果)

燃焼器出口温度 1700℃条件において、低酸素濃度条件の NO_x は高酸素濃度条件から大幅に低減し、開発目標である 50ppm を満足することを確認した。

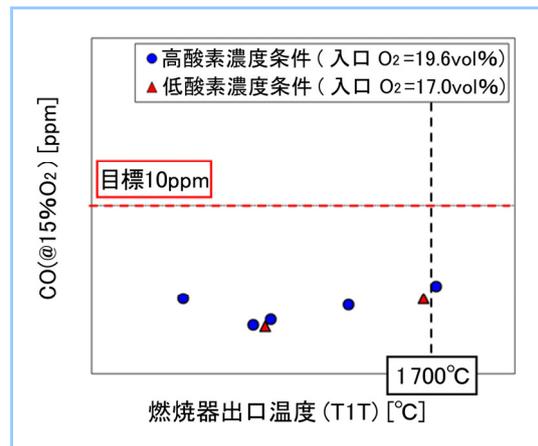


図8 CO 排出特性(高圧燃焼試験結果)

EGR 環境下では燃焼効率の悪化により、CO が増加することが懸念されたが、高酸素濃度条件、低酸素濃度条件のいずれも、目標 10ppm を下回る結果を得た。

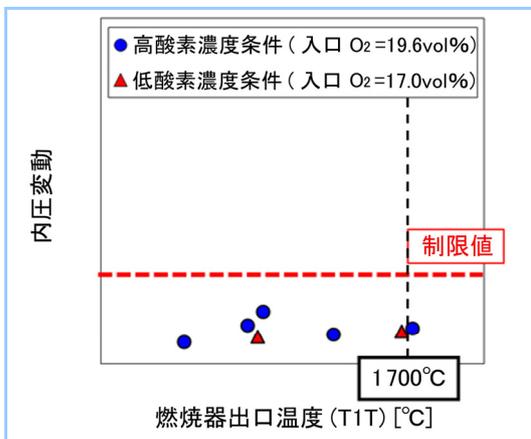


図9 燃焼振動特性(高圧燃焼試験結果)

内圧変動は高酸素濃度条件、低酸素条件いずれの場合も制限値を超えておらず、EGR 付加条件でも保炎性は悪化せず、安定燃焼できることを確認した。

5. まとめ

当社では国家プロジェクトにて、世界最高の燃焼器出口温度である 1700℃級ガスタービンの技術開発を実施してきた。本研究では、排ガス再循環 (EGR) を模擬した実機スケール燃焼器での高圧燃焼試験により、燃焼器出口ガス温度 1700℃ (1973K) 条件で NOx50ppm 以下、CO10ppm 以下を満足することができ、また保炎性悪化が懸念される低酸素条件でも燃焼振動を発生させずに安定燃焼できることを確認した。これらの結果から、1700℃級ガスタービンの低 NOx 性、安定燃焼性に対する EGR システムの有効性を確認できた。

これまでの 1700℃級ガスタービン技術開発で得られた最新の数値シミュレーション技術や計測技術は、当社 1600℃級J形ガスタービンの開発に展開され、いち早い製品化に貢献してきた。今後も更なる低 NOx 化を進め、燃焼器の性能向上を図る予定である。

参考文献

- (1) 塚越ほか: 大型発電用ガスタービンの最新技術動向, 三菱重工技報, Vol.42, No.3 (2005-10), p98-103.
- (2) 塚越, 川田: 次世代高温・高効率ガスタービンの技術動向, 配管技術, Vol.6 (2006), p15-21.
- (3) 塚越ほか: 1700℃級ガスタービンの要素技術の開発, 三菱重工技報, Vol.44, NO.1 (2007), p2-5.
- (4) Aoyama, K., Mandai S.: Development of a Dry Low NOx Combustors for 120MW Gas Turbine, ASME paper 84-GT-44 (1984)
- (5) 梅村ほか: 最新鋭 1500℃級のガスタービンの開発・運転状況, 三菱重工技報, Vol.35, No.1 (1998-1), p2-5.
- (6) Tanimura S., Akamatsu S., et al.: New Dry Low NOx Combustor for Mitsubishi M501/701G, Proceedings of ASME Power 2007.
- (7) 技術資料「燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法」初版, 日本機械学会, P51.
- (8) 斉藤ほか: 1700℃級ガスタービン燃焼器の開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol.37(4) (2009), p229-234.
- (9) 瀧口ほか: 1700℃級ガスタービン燃焼器の開発, 第 39 回ガスタービン定期講演会講演論文集
- (10) Satoshi T., Keijiro S., et al.: Development of combustor with exhaust gas recirculation system for 1700℃ class Gas Turbine, IGTC 2011-0217.
- (11) GRI-Mech Home Page
<http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/index.html>