

特集

ガスタービン・コンバインドプラント

大型ガスタービンの高温・高効率化，低NO_x化への取り組み

Present Status of the Development of Industrial Gas Turbines on the Technology of High Temperature, High Efficiency and Low NO_x Combustion

佐藤 幹夫*

Mikio Sato

1. はじめに

ガスタービン技術は、より高度な高温耐熱材料の開発や動・静翼等の高温部品の冷却技術の進歩などにより、近年著しく高性能化が図られている。すなわち、わが国における発電用ガスタービンは昭和40年代前半では、タービン入口温度が800~900℃で出力10~20MW、効率20~24%（LHVベース）であったが、昭和50年頃にはそれぞれ1000℃、70MWクラス、効率30%となり、昭和59年にはそれぞれ1050℃級、出力100~130MW、効率31~32%と性能向上が図られてきた。さらに、米国ではバージニア電力チェスターフィールド発電所において、GE社が開発した1300℃級、150MWのガスタービンを用いた214MW複合発電プラントが平成2年6月に運開し、1300℃級ガスタービン時代の幕開けとなった。

このように事業用大型ガスタービンは高温化とともに大型化が進められており、タービン入口温度は

図-1¹⁾に示すように過去20年間で平均すると約20℃/年で上昇している。

現用の火力発電の送電端効率（HHVベース）は、石油、石炭およびLNG等をボイラで燃焼させ、蒸気タービンで発電する方式では約38~39%であるが、LNGを用いてガスタービンで燃焼、発電し、さらにその排熱から蒸気タービンでも発電する複合発電プラント（1300℃級ガスタービン）では、約47%が得られている。さらに、既に導入が予定されている1400℃級、あるいは開発が開始されている1500℃級ガスタービンの導入により、熱効率50%を越える時代を迎えることは夢ではなくなった。

2. タービン入口温度の高温化

ガスタービンの性能は熱効率と単位流量当たりの出力、すなわち比出力によって評価される。ガスタービンサイクルは定圧加熱サイクルであり、熱力学的にはブレイトンサイクルが基本となる。理想的なブレイト

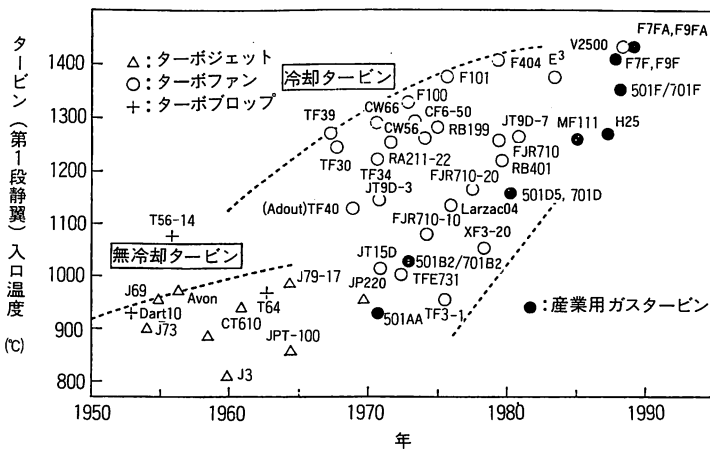


図-1 タービン入口ガス温度の変遷¹⁾

* 財団法人電力中央研究所 横須賀研究所発電システム部長
〒240-01 横須賀市長坂2-6-1

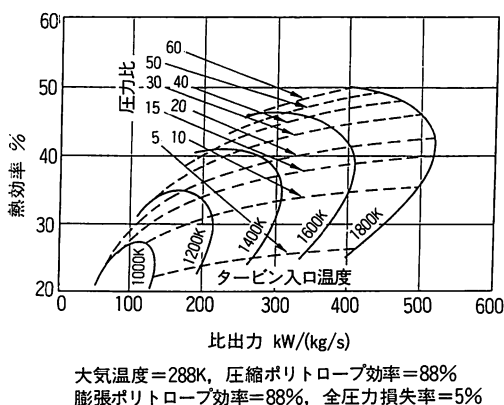


図-2 単純サイクルガスタービンの設計点性能²⁾

ンサイクルでは熱効率 η_0 は圧力比 γ のみに依存するが、実際のサイクルではガスタービン入口温度も影響する。図-2²⁾は大気温度(サイクル最低温度)を288Kとし、圧縮機およびタービンのポリトロップ効率をともに88%で一定にしたときの熱効率 η_0 と比出力 ω の関係をタービン入口温度をパラメータとして示す。図-2よりタービン入口温度 T_{max} が与えられた場合、圧力比には熱効率および比出力を最大とする最適圧力比がそれぞれ存在し、両者は T_{max} が大きくなるにつれて増大することが示される。

以上のことから、ガスタービンは高温化と大型化が進められ、今後さらにタービン入口温度の高温化を図るには、高温耐熱材料の開発や燃焼器、尾筒および動・静翼等の高温部品の冷却技術の高性能化が不可欠である。

2.1 高温耐熱材料の開発

(1) 耐熱合金の開発動向

動翼に対しては、 γ' と呼ばれる Ni_3Al を主成分とした金属間化合物の析出によって転位運動を妨害することによって強化したニッケル基超合金が系統的に用いられてきている。以前は、鑄造合金が用いられていたが、タービン入口温度1100°C級以上のガスタービンでは、精密鑄造法(ロストワックス法)で製造される等方性多結晶合金インコネル738LCが広く用いられている。しかし、結晶粒界において酸化、疲労劣発生およびクリープキャビティの発生などの損傷がおりやすいことから各電力会社で運用が開始されつつある1300°C級ガスタービンでは、最大応力方向に結晶粒界をもたない一方向凝固合金が採用され始めている。さ

らに、現在開発中の1500°C級ガスタービンに対しては、全く結晶粒界のない単結晶合金の使用も検討されている。

一方、静翼に対しては、動翼に比べて機械的応力が小さく、熱応力が主体となることから、クリープ強度は劣るが耐酸化性と延性に富んだコバルト基超合金が主に用いられてきた。しかし、高温化に伴うクリープ強度上昇の要請により、静翼に対してもニッケル基超合金の使用が検討されている。

インコネル738LCや今後適用が進むであろう結晶制御合金などのニッケル基超合金は、クリープ強度の重視のため、耐蝕性に効果のあるCr等の濃度を低く抑えており、耐酸化性などが十分でない。このため、動翼にはPt-Al合金やMCrAlY(MはNi, Coなどの金属)合金の耐食コーティングが施される。さらに、基材の温度を下げ、ガス温度の高温化に耐えるものとするため、1500°C級ガスタービンに対しては、熱伝導率が小さく、断熱性や高温強度に優れたセラミックス系の材料を用いた遮熱コーティング(TBC)が適用されようとしている。単結晶材料の採用により、多結晶に比べて50~100°Cの高温強度上昇が達成できるが、遮熱コーティングの採用により、さらに同程度の温度上昇を達成できる見込みが得られている。遮熱コーティングは、MCrAlYなどの金属系中間層の上にイットリア安定化ジルコニア(ZrO_2 , Y_2O_3)などのセラミックスをコートするものであるが、セラミックスと金属層の熱膨張率の違いにより、境界近傍で大きな応力が発生するため、界面での剥離やセラミックスの割れなどを防ぐ必要がある。そのため、発生する熱応力を緩和するため、セラミックス層から金属層にかけて、成分を徐々に変化させる傾斜組成コーティングの適用が検討されており、実用化が期待されている。

(2) 新素材の適用

① 金属間化合物

ニッケル基超合金においても融点は1300°C程度であり、材料表面温度1000°C程度が限界であると考えられる。したがって、精巧な冷却構造や遮熱コーティングを採用したとしても、金属系材料ではガス温度1500°C程度が限界であると考えられ、それ以上の温度を実現するためには、より高温でも強度を保つ材料を用いる必要がある。そのうちのひとつの候補として、金属間化合物が考えられている。金属間化合物は異種の金属原子の規則的な結晶構造をもち、低温では変形能力が小さく脆性的に振る舞うが、高温では変形能力が大きく

なり、金属と同程度の延性を示すという特徴を有する。

Ti-Al系の金属間化合物は、金属材料に比べて比強度（強度と比重の比）に優れているため、かなり古くから注目され、航空機用などとして実用化されつつある。また、2000℃近い融点を有する材料（MoSi₂やNb₃Alなど）は、高温化に寄与できる可能性があり、各種の検討が進められている。

これらの材料は金属とセラミックスの中間的な特性を持ち、低温での脆性や、中間温度での耐酸化性の向上が大きな課題である。また、製造法により強度特性が大きな影響を受けるため、最適な製造法の探索も大きな課題である。

② セラミックス

炭化珪素（SiC）や窒化珪素（Si₃N₄）などのセラミックスは共有結合材料であり、金属間化合物よりもさらに変形能力が小さく、1000℃以上の高温になっても強度低下が少なく、超高温ガスタービン材料としての可能性を有している。しかし、セラミックスは本質的に脆性材料であり、欠陥感受性が強いことから、異物の衝突に対する強度など、信頼性の面で課題が残されている。

この欠点を補う方法として、複合化による延性および靱性の向上が検討されている。特に現在有望視されているのは、セラミックスの超繊維で2次元的に構成した織物に対して、セラミックスを含ませて製造される長繊維複合材料である。これまでのところ、炭化珪素繊維／炭化珪素マトリックス材料の良好な特性が報告されているが、耐酸化性の問題があり、Al₂O₃などの酸化物系セラミックスによるコーティングの有効性が検討されている。

また、セラミック機器の信頼性を向上させるためには、セラミック材料の開発だけではなく、セラミックスに適した構造設計技術の開発が重要との観点から、セラミック燃焼器および静翼の開発も行われている³⁾。

2.2 高温部品冷却技術の開発

(1) 燃焼器内筒の冷却技術

ガスタービン燃焼器は燃焼負荷率が高いことや、圧力比の増大と共に入口空気温度が上昇してきていること、火炎輝度が高い燃料は火炎の放射率が燃焼器内圧力の増大に伴って増加することなどから、内筒の冷却が重要となってきている。燃焼器内筒の冷却構造は図-3に示されるものが多く用いられ、内筒内外の壁に沿って空気を流す対流冷却と膜冷却、壁に空気を衝突させるインピンジメント冷却およびそれらの組み合わせや、

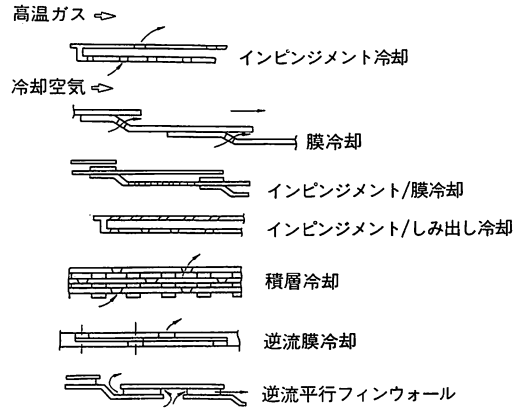


図-3 各種燃焼器ライナ冷却構造

積層冷却構造も試みられている。以上の冷却構造に加え、内筒表面に熱伝導率の低い部分安定化ジルコニアなどの断熱性の高いセラミックスをプラズマ溶射法によりコーティングすることも用いられている。

(2) 動・静翼の冷却技術

ガスタービンの高温部品への冷却空気量は、タービン入口温度の上昇と圧力比の上昇に伴う冷却空気温度の上昇により次第に増加し、例えば1300℃級では吸入空気量の15～20%に達し、これはタービン仕事に換算して8%前後の減少に相当し、ガス温度の上昇により得られるはずの出力、熱効率における利得を大幅に減殺する。したがって、ガスタービンの高温化においては、冷却空気量の低減化が極めて重要である。

ガスタービン動・静翼の温度環境としては、第1段静翼が最も厳しい条件にさらされる。燃焼器出口ガス温度分布は均一でないため、第1段静翼はタービン入口平均ガス温度より高い局所最高ガス温度に耐えなければならない。一方、動翼は高速で回転しているため動翼に対するガスの相対速度は低くなり、動翼にとっ

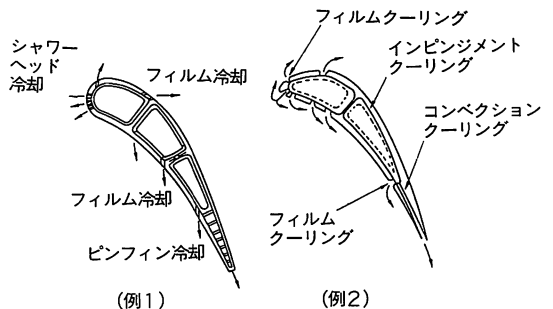


図-4 ガスタービン第1段静翼（空冷翼）

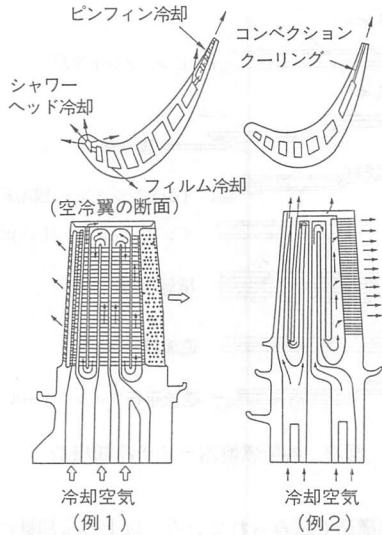


図-5 ガスタービン第1段動翼（空冷翼）

での全温は静翼に比べて低くなる。さらに、円周方向の温度むらも平均化されるので、動翼の温度環境は楽になるが、極めて高い遠心力が働くため高い応力に耐える必要がある。

1300℃級ガスタービンの第1段静翼で採用されている冷却構造を図-4に示す。第1段静翼では翼内部にインサートが挿入され、インピンジメント冷却と対流冷却を行っている。また、翼前縁部にはシャワーヘッド形フィルム冷却孔が設けられ、翼の背側、腹側にも冷却孔が設けられている。

一方、第1段動翼の冷却構造としてはリターンフロー方式が採用されている。これは航空用ガスタービンで既に実績のあるものを初めて発電用ガスタービンに適用したものであり、初めて一方向凝固合金が用いられている。図-5は1300℃級ガスタービンの第1段動翼で採用されている冷却構造例を示す。翼前縁部に入った冷却空気は翼前縁部の内壁をインピンジメント冷却し、さらに翼前縁の冷却孔からシャワーヘッド冷却およびフィルム冷却をしている。また、翼中央部は翼根部から入った空気が翼外形側との間を何回かUターンしながら対流冷却して翼先端孔から吹き出している。さらに、翼後縁部はピンフィン冷却あるいは対流冷却を組み合わせて冷却効率が高められている。

また、冷却媒体として現在は空気が使用されているが、空気よりも比熱および熱伝達率の大きい蒸気や水が新たな冷却媒体としての可能性を秘めている。ことに、複合発電プラントにおいてはボトムリングサイクル

の蒸気が使用可能なため、蒸気冷却の適用が効果的であるため、次世代のガスタービンでは蒸気冷却の採用が予定されている。

3. ガスタービンメーカーの開発動向

3.1 GE社

GE（ゼネラルエレクトリック）社はFA型（1300℃級ガスタービン）に続く次世代ガスタービンとして既にG型とH型を発表している。タービン入口温度はいずれも1430℃であり、FA型に比べ、130℃上昇している。タービンの冷却方式にはG型は従来機と同じ空冷方式を、一方、H型は新たに閉ループの蒸気冷却を採用している。閉ループ蒸気冷却方式では、高圧蒸気タービンで膨張した蒸気の一部を初段および2段の動・静翼の冷却媒体として用いている。H型のガスタービンでは、単結晶翼と遮熱コーティングを初段に、一方向凝固合金を2、3、4段に採用している。ガスタービン単機出力は、60Hz用の7FAの168MWから7Gでは240MWに増大する。また、ガスタービン単体の熱効率（LHVベース、天然ガス）は7FAの36%から7Gでは39.5%となる。

H型ガスタービンを用いる天然ガス用複合サイクル発電の発電端熱効率は54.5%（HHVベース）が期待されている。

3.2 三菱-WH社

三菱-WH（ウェスティングハウス）社の次世代ガスタービンW501G型（60Hz用）は、タービン入口ガス温度1426℃、単機出力230MW、熱効率38.5%（LHVベース）であり、複合発電サイクルの発電端効率は52.5%（HHVベース、天然ガス）が見込まれている。新たな技術としては、燃焼器尾部筒の冷却に閉ループ蒸気冷却方式、タービン部には遮熱コーティングが施された一方向凝固合金の3次元設計翼を採用している。

さらに、G型に続く1500℃級蒸気冷却ガスタービンH型の開発スケジュールが公表されている。

3.3 ABB社

ABB社のGT24/26は、1軸型再燃サイクルを採用した最新鋭ガスタービンであり、空気を21段の圧縮機で3MPaまで圧縮し、高圧燃焼器で全燃料の60%を燃焼させた後、高圧タービン1段でガス温度を1235℃から1000℃、1.5MPaまで膨張させ、再燃焼器で残りの40%の燃料で再度1235℃まで昇温した後、低圧タービン4段で610℃、大気圧まで膨張させるシステムを採用している。他社がタービン入口温度の高温化によ

り、高効率化を図るのに対し、この方式ではタービン入口温度をを上昇させなくとも高効率化が達成されるという特徴を有している。60Hz用のGT24の単機出力は165MW、単機熱効率は37.5%（LHVベース）であり、複合発電時の発電端効率（HHVベース、天然ガス）は52.2%が見込まれている。

3.4 シーメンス社

シーメンス社の3Aシリーズ機（V94.3A型、V84.3A型およびV64.3A型）は、従来のサイロ型燃焼器からアヌラ型燃焼器に変更した同社の最新鋭ガスタービンである。圧縮機は15段であり、PrattWhitney PW4000シリーズのターボファン航空機エンジンの技術が転用されている。60Hz用のV84.3A型機は、タービン段数4段で、第1段静翼および第1段動翼には単結晶超合金とフィルム冷却が採用されている。第2段静翼には単結晶超合金と内部冷却が用いられている。タービン入口ガス温度1310℃で単機出力170MW、熱効率38%（LHVベース）であり、複合発電時の発電端効率は52.5%（天然ガス、HHVベース）が得られる。

4. 低NO_x燃焼技術

環境保全の上からの最大の課題は低NO_x燃焼技術である。わが国でガスタービンのNO_x排出規制が施行された昭和63年の時点で、NO_x対策を施さないガスタービンからのNO_x排出量は、まだ高温化がそれほど進んでいないにもかかわらず、190ppm（16%O₂換算値）と見積もられ、NO_x排出規制値としては、70ppm（16%O₂換算値）が定められた。また、東京都、神奈川県等の自治体は指導基準を定め、国より厳しい規制を行っている（表1）。さらに、公害防止協定を結んで厳しい規制を実施している地域もあり、10ppm（16%O₂換算値）前後の協定値を結んでいるケースもある。諸外国では、特に米国のカリフォルニア州ロサンゼルス近郊が最も厳しく、15%O₂換算値で9ppm（16%O₂換算値では7.5ppm）を基準としている。なお、この基準値は熱効率により変化する。

図-6はLNG用ガスタービン設備のNO_x低減対策として現在実施あるいは検討されている方法を示す。低

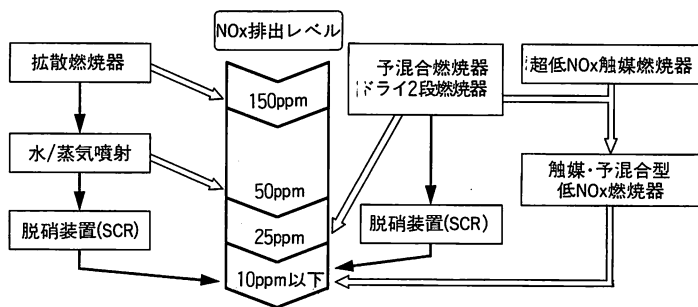


図-6 ガスタービン設備のNO_x低減対策

表1 NO_x排出基準の一例

| 国 | 施設の規模 | | 基準値 (16%O ₂ 換算) |
|----------------------|------------|----------------------|--|
| | 燃料の燃焼能力 | 定格出力 | |
| | 50 l / h以上 | — | 70ppm ^(注2) |
| 東京都 ^(注1) | 50 l / h以上 | 2000kW以上 2000kW未満 | 23ppm (0%O ₂ 換算100ppm) ^(注3) 36ppm (0%O ₂ 換算150ppm) |
| 神奈川県 ^(注1) | 50 l / h以上 | 2000kW以上 2000kW未満 | 25ppm ^(注3) 35ppm |
| 大阪府・市 | 30 l / h以上 | 2000kW以上 2000kW未満 | 23ppm (0%O ₂ 換算100ppm) ^(注3) 36ppm (0%O ₂ 換算150ppm) |

注1 最も規制の厳しい地域の排出基準
 { 東京都；特別区、武蔵野市、三鷹市、調布市、保谷市、狛江市 }
 神奈川県；横浜市、川崎市、横須賀市
 注2 平成3年2月1日以降適用（一部は昭和63年2月1日より適用）
 注3 平成4年4月以降に設置される施設

NO_x燃焼技術に加え、燃焼排ガス中のNO_xを分解する排煙脱硝法が併用されているが、ここでは、低NO_x燃焼技術について述べる。

燃焼反応に伴い生成されるNO_xには、サーマルNO_xとフュエルNO_xがある。燃料と空気の高温燃焼反応によるサーマルNO_xの生成は、主として燃焼領域の火炎温度と密接に関係する。すなわち、NO_x生成反応速度は温度の指数関数であり、火炎温度の低減がNO_x生成抑制に効果的である。従来のガスタービン燃焼法は火炎の安定と負荷制御の容易さなどから拡散燃焼法が多かったが、燃焼領域の火炎温度が高くなることから大幅なNO_x低減が困難であった。従って、拡散燃焼方式によるNO_x低減法には、燃料とともに水もしくは蒸気を噴射して燃焼温度を下げる方法、燃焼器への燃料あるいは空気の供給方法を2段階に行う2段階燃焼法により、理論空気比の条件を避け、過濃・希薄燃焼や希薄・希薄燃焼を行わせて燃焼温度を下げる工夫がなされてきた。しかしながら、これらの燃焼法では、ガスタービンの運用条件を考慮すると50 ppm (16%O₂換算値)程度が限界であると考えられる。

これに対して最近のガスタービン燃焼器では、燃料を予め空気と予混合して燃焼温度を低下させる希薄予混合燃焼法が採用されており、25ppm程度までの低NO_x燃焼が達成されている。しかし、予混合燃焼での一層の低NO_x化のためには、火炎の吹き飛びや逆火等を防ぐ燃焼安定性の確保が重要な課題となっている。

燃料中の窒素化合物に起因するフュエルNO_x低減には、燃料過濃・希薄燃焼による2段階燃焼法(リッチ・リーン燃焼ともいう)が有効である。これは、一次燃焼領域を燃料過濃な還元雰囲気として燃料中窒素化合物からNO_xへの生成を抑制して、二次燃焼領域で未燃分の完全燃焼を図る燃焼法であり、乾式ガス精製を用いる石炭ガス化複合発電におけるガスタービン低NO_x燃焼技術として開発が進められている⁴⁾。

さらに、10ppm以下の超低NO_x燃焼技術として、触媒を用いる1300℃級ガスタービン燃焼技術の開発が

行われている⁵⁾。触媒燃焼法は通常の燃焼法では燃焼が維持できない希薄予混合気を、触媒を用いることにより低温で燃焼させ、NO_xの生成を抑制するものであり、NO_x生成量を数ppm程度に抑制することが期待される。実用化における課題としては、触媒を担持したハニカム構造体の高温耐久性と触媒自体の高温下における活性能力の維持確保等がある。

5. おわりに

タービン入口ガス温度が1300℃級、ガスタービン単機容量が200MWを越える高温・大容量ガスタービンが実用化の段階を迎え、これを複合発電化することにより、熱効率約47%(天然ガス焚、HHVベース)が得られる状況において発電設備に占めるガスタービンの重要性はますます高まりつつある。今後より一層の高温化、高効率化が図られ、1400℃~1500℃級ガスタービンを用いた複合発電により熱効率が50%を越える時代を迎えることは夢ではなくなった。

本稿では触れられなかったが、今後の大型ガスタービン技術は高温化、高効率化に加え、石炭ガス化燃料、メタノール、水素等の燃料多様化、高温部品の保修コスト低減などの課題を有する。

これらの技術的課題を解決しつつ、今後一層のガスタービン技術の進展が図られることを期待したい。

参考文献

- 1) 青木, 日本ガスタービン学会セミナー第19回資料集(1991).
- 2) 日本機械学会, 機械工学便覧, B7内燃機関, (1989).
- 3) 百合 功, ほか5名, ガスタービン用セラミック静翼の研究, 電力中央研究所報告, 研究報告: W94008, 平成7年2月.
- 4) 佐藤 幹夫, ほか4名, 石炭ガス化用1300℃級ガスタービン燃焼器の開発-第2報, リッチ・リーン燃焼による低NO_x燃焼法-, 日本機械学会論文集, 56巻, 532号, B (1990), 3903-3909.
- 5) T.Fujii et al, High Pressure Test Results of a Catalytic Combustor for Gas Turbine, 1996 ASME International Gas Turbine Congress, ASME Paper 96-GT-382, (1996).