D202 コージェネレーション用セラミックガスタービンの研究開発

Reserch and Development of Ceramic Gas Turbines for Co-generation

○ 市川 善浩 (川崎重工業)

巽 哲男 (川崎重工業)

Yoshihiro ICHIKAWA, Kawasaki Heavy Industries, Kawasaki-cho 1-1, Akashi
Tetsuo TATSUMI, Kawasaki Heavy Industries

This paper describes a summary of the research and development program (FY1988-1998) of 300-kW class ceramic gas turbine (CGT302). This program has been promoted as a part of the New Sunshine Project funded by the Ministry of International Trade and Industry (MITI). The CGT302 has successfully accomplished the following that: i) it achieved 42.1% thermal efficiency at a turbine inlet temperature (TIT) of 1,396°C, ii) it obtained 31.7ppm NOx emissions ($O_2=16\%$) within the regulated value by the law at 1,350°C TIT and iii) it accumulated more than two thousand hours operation at 1,200°C TIT. Also, this paper presents an overview and a current status of the development program (FY 1999-2003) of 8,000-kW class hybrid gas turbine (HGT) in which both metal and ceramics are used in parts of high temperature to achieve high thermal efficiency and low emissions.

Key Words: Ceramics, Gas Turbine, Energy Saving, Thermal Efficiency, Design

1. 緒言

一般に、ガスタービンはディーゼルエンジンなど他の同出力エンジンと比較して小型かつ軽量であり、低 NOx、低騒音という観点から地球環境に優しい原動機として大いに期待されている。しかし、小出力機では、熱効率が低いという最大の弱点を有している。

ガスタービンの熱効率向上を図るために、1988 年度から 1998 年度にかけて通産省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、セラミックガスタービン (CGT) の研究開発が行われた。開発目標は、セラミックスをガスタービンに適用し、無冷却でタービン入口温度 (TIT) を 1,350°C まで高くすることで 42% という世界最高レベルの熱効率を狙うと共に、排ガス特性を法令基準値以内に収めるというものである。川崎重工業は、このプロジェクトの 2 軸再生式セラミックガスタービン (CGT302) の開発を担当し、最終年度には目標を達成することができた。

この研究成果から高効率セラミックガスタービンの実用化への気運が高まり、昨年度から 5 年計画として産業用コージェネレーション実用技術開発が新たに通産省工業技術院の下で開始され、川崎重工業はこれに参画している。本開発は、高効率・低公害が期待できる 8,000kW 級の、高温部にセラミックスと金属の双方を用いたハイブリッドガスタービン (HGT) を用いて、高効率エネルギー利用の促

進による CO₂ 排出削減等に資することを目的としている。開発目標は、タービン入口温度 1,250°C で熱効率 34% 以上、運転時間 4,000 時間、排ガス特性が法令基準値以内というものである。

本稿では、1998 年度に終了した CGT302 の研究成果のまとめを述べると共に、現在行われている HGT の研究概要および開発進捗状況を述べる。

2. CGT302 の概要

CGT302 はコージェネレーション用の 2 軸再生式ガスタービンである。CGT302 の諸元を Table 1 に示す。また、エンジンのカットモデルおよびセラミック部品を Fig. 1, Fig. 2 に示す。圧縮機は単段、燃焼筒は単缶、タービンはガージェネレータタービン、パワータービン各々単段である。セラミック適用部分は燃焼筒からパワータービンまでで、セラミック材料は窒化ケイ素を採用している。熱交換器は金属製の伝熱式プレートフィン型である。

一般に、ガスタービンはタービン入口温度を上げると熱効率は向上するが、小型ガスタービンでは翼冷却が困難なことからタービン入口温度を上げられないため、熱効率はあまり高くない。CGT302 ではこれを解決するべく無冷却セラミックス翼を採用している。

Table 1 Specifications of CGT302

Item	Unit	Target
Maximum Power	kW	300
Thermal Efficiency	%	42
Turbine Inlet Temperature	°C	1,350
Air Flow Rate	kg/s	0.94
Pressure Ratio	-	8
GGT Speed	rpm	64,000
PT Speed	rpm	47,800
Compressor Efficiency	%	82
Turbine Efficiency (GGT+PT)	%	85.5
Heat Exchanger Efficiency	%	82

Fig. 1 Cut Model of CGT302

Fig. 2 Ceramic Components of CGT302

3. CGT302 のセラミック構造

セラミックスは金属材料に比べ熱膨張係数がかなり小さく、非常に脆いという特性を持っている。これらの特性に対し、CGT302 では FRC (繊維強化セラミックス) による

締結一体化構造、セラミックバネによる弾性支持構造や相互独立支持構造を採用している。

モノリシックセラミックスは耐熱性、耐摩耗性に優れているが、大型複雑形状部品では熱応力による損傷を起こしやすい。一方で FRC はある程度の靱性、変形能を備えているため熱応力による損傷を起こしにくい、耐酸化性、耐摩耗性に劣る。そこで Fig. 3 に示すような各々の長所を生かした FRC による締結一体化構造を開発した。

金属の熱膨張係数はセラミックスに比べかなり大きい。また、セラミックスの固定に際し、ボルト等による直接的な固定はヘルツ応力によりセラミックスが損傷しやすい。これらの問題を解決するため、セラミックバネによる弾性支持構造を採用した。さらに、構造部材の熱変形による部品間の干渉を避けるため、部品相互に支持をさせない 1ヶ所支持による相互独立支持構造を採用した。Fig. 4 に CGT302 の弾性支持構造、相互独立支持構造の例を示す。

Fig. 3 FRC-Binding Turbine Nozzles

Wave Rings

Piston Rings

Fig. 4 Independent and Elastic Supporting by Ceramic Springs

4. CGT302 の研究成果

エンジン運転研究の研究成果について以下にまとめる。

(1) 性能試験

本プロジェクトでは、性能試験を①金属製基本型 GT (TIT=900°C級) ②基本型 CGT (TIT=1,200°C級) ③パイロット CGT (TIT=1,350°C級) の 3 ステップに分けて実施した。Fig. 5 に各ステップでの代表的な性能計測データを示す。このような性能改良を経て、最終的には TIT=1,396°C において出力 322kW、熱効率 42.1%と最終目標を達成した。この熱効率は既存の従来型ガスタービンと比較して、出力が数十 MW クラスの最大級ガスタービンにも匹敵する画期的な成果といえる。

Fig. 5 Performance Progress of CGT302

(2) 予混合希薄燃焼による排ガス特性試験

一般に、NO_x 排出量はタービン入口温度が上昇するにつれて飛躍的に上昇する。CGT302 は TIT=1,350°C と従来型ガスタービンに比べ非常に高いため、NO_x 排出量はかなり増加する。そこで Fig. 6 に示すような予混合希薄燃焼方式を採用することにより問題解決を図り、TIT=1,350°C において目標の 70ppm (O₂=16%) 以下を大きく下回る 31.7ppm を達成した。

Fig. 6 Premixed Lean Burn Combustor of CGT302

(3) 長時間運転試験

セラミック材料の長時間信頼性の検証を行うため、実用化レベルの TIT=1,200°C で目標 1,000 時間の長時間運転試験を実施した。試験当初は DSS (Daily Start Stop) で運転し、安定性を確認した上で WSS (Weekly Start Stop) に移行する運転とした。運転試験は、500 時間以上経過したところで、3 度のガスジェネレータータービンの損傷により、同一組立部品での目標 1,000 時間を到達することはできなかった。しかし、3 回目の損傷時に生き残った燃焼器ライナを引き続き運転に供試し、目標の 1,000 時間到達したところで試験を打ち切った。その燃焼器ライナに関し、材料的に問題ないことを確認した。長時間運転試験の総累積運転時間は、TIT=1,200°C で 2,117 時間に及ぶものである。Fig. 7 に運転中のガスタービンおよび操作パネルを示す。

Fig. 7 Gas Turbine and Operation Panel under Operation

5. HGT の概要

上述したような CGT302 の研究成果を基に、昨年度から産業用コージェネレーション実用技術開発 (HGT) が通産省工業技術院のプロジェクトとして開始されている。Table 2 に開発目標、Table 3 に開発スケジュールを示す。

Table 2 Targets of HGT

Item	Target
Output Power	8,000kW class
Thermal Efficiency	34% or higher
Turbine Inlet Temperature	1,250°C class
Operation Time	4,000 hours
Emission Characteristics	Within regulations by the law

Table 3 Development Schedule of HGT

	1999	2000	2001	2002 Interim Evaluation	2003 Final Evaluation
① Development and Evaluation tests of Ceramic Components					
② Research on Soundness and Reliability Basic Design Detailed Design Manufacture of engine Study of the Operation	→	→	→	→	→
③ General Investigation of the System					

HGT は川崎重工業製 7,000kW 級 M7A-02 をベースに、Fig. 8 に示すように燃焼器ライナから第 1 段タービンノズルまでをセラミック化したものである。セラミック材料は CGT302 と同じく窒化ケイ素を採用している。HGT のセラミック適用部品は CGT302 用燃焼器ライナと比較してサイズの異なることから、CGT302 のセラミック部品製造技術を応用でき、開発リスクを最小限に押さえている。また、本研究開発はセラミック部品の健全性・信頼性を検証することに主眼を置いているため、極力金属側の設計変更を最小限とするよう圧縮機の設計変更はせず、タービンのみを設計変更することとした。

Fig. 8 Applied Parts of Ceramics on Based Gas Turbine M7A-02

6. HGT の開発進捗状況

現在までの HGT の開発進捗状況について以下に述べる。

(1) セラミック部品の設計

タービン入口温度の高温化に伴い、燃焼器ライナ、トランジションダクト、第 1 段タービンノズルなど高温静止部品を従来の金属から耐熱性に優れたセラミックスに設計変更するため、数種類の部品形状案を作成し、1 種に絞った。Fig. 9 に設計試作した主要セラミック部品を示す。

Fig. 9 Ceramic Components of HGT

第 1 段タービンノズルの耐熱衝撃性を検証するため、定常運転時の熱応力解析、起動時およびシャットダウン時の非定常熱応力解析を行った。この際、ノズル表面の温度分布は熱流動解析により求める手法を採用した。最も応力的に厳しかったのはシャットダウン時で、最大主応力がシャットダウン後 7sec 経過時で 124MPa、最小主応力がシャットダウン後 11sec 経過時で -122MPa となった。これは材料強度に照らして、特に問題ないレベルである。Fig. 10 にこれらの熱応力分布を示す。

Fig. 10 Thermal Stress Distribution at Shut Down

(2) セラミック部品支持構造の開発

金属とセラミックスとは熱膨張差が大きく異なることやセラミックスは脆性材料であることはすでに述べたが、HGT でもセラミックス特有の特性を考慮する必要があるため、CGT302 で培った弾性支持構造、相互独立支持構造の技術を踏襲して HGT の構造設計を行った。しかし、HGT は水平 2 分割構造を採用しているため、CGT302 で有

効であった FRC による締結一体化構造、ピストンリング等の一体型シールリングなどが適用できない。そこで、空気漏れを最小限とするような迷路構造、分割型シールリングと扇形バネを併用したシール構造を新たに開発した。Fig. 11 に HGT のセラミック部品周辺構造の一例を示す。

Fig. 11 Fringe Structure of Ceramics

(3)タービン部の設計

タービン入口温度の高温化に伴い、タービンを通過する体積流量が約 6%増加する。しかし、ベースガスタービンはタービン部でチョークするように設計されているため、タービン流量が増加した分、計画流量が確保できず目標エンジン性能を満足させることが不可能となる。そこでタービンのスロート面積を広げ、大流量側へマッチング点をずらすという方法を採用し、圧縮機の断熱効率の高い領域で運転できるように配慮した。

タービン部の各段の状態量（温度、圧力）を数値計算により概算し、材質、翼型、冷却構造等改良項目の抽出を行った。第 3 段タービン動翼について、ベースガスタービンと同じく無冷却翼としたため、高温域においてクリープ強度に優れている単結晶合金（SC ; Single Cristal）を採用した。単結晶合金は、異方性材料でかつ、ベースガスタービンで採用している等方晶材（CC ; Conventional Casting）に比べ比重が大きくなるため、遠心応力解析および振動解析を実施し、特に問題ないことを確認した。Fig. 12 に遠心応力解析結果を示す。また、第 4 段タービン動静翼について、ベースガスタービンの翼型のままとすると第 4 段タービン動翼出口のガス流出角やガス流出速度が大きく変化し、所要の排気ディフューザ性能を確保できなくなるため、翼型を新規設計することとした。

SC (HGT) CC (Base)
Fig. 12 Centrifugal Stress Distribution of 3rd Turbine Blade

(4)低 NO_x 燃焼器の開発

ベースガスタービンの Dry Low Emission (DLE) 燃焼器を基にして低 NO_x 燃焼器の基本設計を実施した。Fig. 13 に燃焼器断面図を示す。燃焼器ライナをセラミックスにすることにより、従来のフィルム冷却孔を廃止し、新たにライナ下流部に希釈孔を設けた。また、タービン入口温度の上昇に伴い燃料流量が増加するため、予混合希薄燃焼用ラジアルスワラ出口の幅を拡大し、局所の空燃比を従来と同程度となるようにした。基本的な構造は CGT302 の構造技術を踏襲している。

Fig. 13 Cross Section of HGT DLE Combustor

(5)セラミック評価試験

①セクタ試験

セラミック部品を適用したエンジン運転試験に先立ち、セラミック部品と金属部品間の相互干渉やセラミック部品の支持機能等、構造的観点に立った設計の妥当性の検証、材料的観点及び部品設計の観点に立ったセラミック部品の耐熱衝撃性の検証が必要である。これらの検証を行うため、セラミック部品周辺構造部分を抽出したセクタ試験機的设计を行い、現在製作中である。セクタ試験機は、エンジンの燃焼器とメインハウジング（静止部品）を流用し、セラミック部品を適用した燃焼器から第 1 段タービンノズルまでのエンジン模擬試験装置である。ただし、空気源の能力に制約があるため、燃焼器 1 缶分（周上 1/6）の供試構造とした。Fig. 14 にセクタ試験機の全体図を示す。

Fig. 14 Overall of Sector Tester

参考文献

- 1) I. Takehara, T. Tatsumi and Y. Ichikawa, "Summary of CGT302 Ceramic Gas Turbine Research and Development Program", ASME Paper 2000-GT-644 (2000).
- 2) T. Abe, T. Sugiura, S. Okunaga, K. Nojima, Y. Tsutsui and T. Matsunuma, "Research and Development of Practical Industrial Cogeneration Technology in Japan", ASME Paper 2000-GT-655 (2000).

②セラミック曝露試験

水蒸気を含む高温燃焼ガス曝露環境下でセラミック部材の表面層が減肉するという事例が国内外で報告されており、HGTでも同様な現象が起こる可能性は否定できない。そこで評価試験による確認と対策を検討するため、セラミック曝露試験を実施することとした。現在、曝露試験機の設計を行い、製作中である。Fig. 15にセラミック曝露試験機の供試体部を示す。試験内容として、温度・圧力・水蒸気分圧・ガス流速などの各パラメータがセラミック部品の肉厚減少に及ぼす影響を評価する予定である。

Fig. 15 Test Section of Ceramic Exposure Tester

7. 結 言

セラミックガスタービンの研究開発において、CGT302では、 $TIT=1,396^{\circ}\text{C}$ で出力 322kW、熱効率 42.1%を達成、また $TIT=1,350^{\circ}\text{C}$ で NO_x 排出量 31.7ppm ($\text{O}_2=16\%$)を達成し、セラミックスがガスタービンの構造部材として成り立つと共に性能向上や環境保全に非常に有効であることを証明した。HGTでは、CGT302で不十分であったセラミックスの長時間の健全性・信頼性を検証し、セラミックガスタービンの実用化促進に向けて研究開発を進めている。このHGTが近年高まっている省資源化、環境問題などに対応した低燃費、低公害、燃料多様性等の優れた特性を持つ次世代原動機として世に貢献できるよう尽力していく所存である。