

自動車用 100 kW-CGT における低公害燃焼器の開発研究*

(第1報, 予蒸発予混合希薄燃焼器の燃焼性能)

市川 浩之^{*1}, 熊倉 弘隆^{*2}, 佐々木 正史^{*3}

Development of Low-Emission Combustor for a 100 kW Automotive Ceramic Gas Turbine (1st Report, Combustion Performance of a Pre-vaporization Pre-mixing Lean Combustor)

Hiroyuki ICHIKAWA^{*4}, Hirotaka KUMAKURA and Masafumi SASAKI

^{*4} FCV Development Department Nissan Motor Co., Ltd.,
1 Natsushima-cho Yokosuka-shi, Kanagawa, 237-8523 Japan

A low emission combustor, which uses a pre-vaporization pre-mixing lean combustion system for a 100 kW automotive ceramic gas turbine (CGT), has been designed, developed and subjected to performance tests. In the early stages of the tests, flashback and auto-ignition caused by extremely high combustor inlet temperature were major problems of the development. Introducing air to the boundary layer of the mixture flow, was one of the measures which effectively prevented flashback. Auto-ignition characteristic was described by a semi-experimental equation. Requirements needed to achieve CGT performance, such as operation range due to combustion characteristics, pressure loss and temperature distribution were fully satisfied.

Key Words: Ceramic Gas Turbine, Pre-mixed Combustion, Pre-vaporized Combustion, Flash Back, Auto-ignition, Ceramics

1. 緒 論

通商産業省(現経済産業省)資源エネルギー庁の補助金を得て、1990年から(財)石油産業活性化センターが実施した技術開発事業の一環として自動車用100kWセラミックガスタービン(以下CGTと略記)プロジェクトが開始された。100kW-CGTエンジンの構成示す。出力100kW、1軸再生式でタービン入口温度TITを図1に1623Kとすることにより目標機関効率率40%をほぼ達成して1997年に終結を見た。日本自動車研究所JARIを母体にそれまで個別にCGTを開発していたトヨタ、日産、三菱の自動車メーカーが一同に会し、ひとつのエンジン開発を目指して協力するという前例の無いプロジェクト体制での成果であった。

自動車用CGTの低公害燃焼器コンセプトについては1970年代にすでにFordのWadeらによって検討され

ている⁽¹⁾。しかしCGTエンジンが具体性を帯びて開発されたのは1980年代に北米エネルギー省DOEのAGTプロジェクトが開始されてからのことである。GM(Allison)のAGT100用燃焼器⁽²⁾、Ford/Allied SignalのAGT101用燃焼器⁽³⁾さらにはDaimler BenzのPWT110用燃焼器⁽⁴⁾はいずれも予蒸発予混合希薄(以下PPL:Pre-vaporization Pre-mixing Leanと略記)燃焼方式を採用している。PPL燃焼器の貴重な燃焼性能報

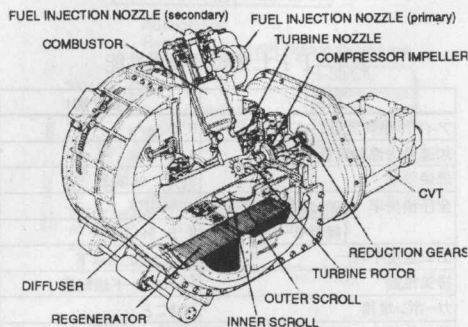


図1 100kW-CGTエンジン構成図

* 原稿受付 2002年4月26日。

^{*1} 正員, 日産自動車(株)(〒237-8523 横須賀市夏島町1)。

^{*2} 正員, (株)IHIエアロスペース(〒370-2398 岡岡市藤木900)。

^{*3} 正員, 北見工業大学(〒090-8507 北見市公園町165)。

E-mail: ichi-hiro@mail.nissan.co.jp

告例として、GM (Research Labo) の GT-225 (総メタルエンジン) を搭載した乗用車をシャシダイナモ上で評価した報告例⁽⁵⁾がある。PPL 燃焼+可変機構 (以下 VG: Variable Geometry と略記) という先進的な機能を備えた燃焼器が搭載され、拡散燃焼との比較もされているが、メタル燃焼器であるため CGT の温度条件とは 300~400K の開きがある。

佐々木、熊倉らは PPL 燃焼器において、液体燃料を予蒸発し均一予混合気を迅速に形成する上で空気流に強いせん断と微弱なスワールを付与することが効果的であることなどを示し、軽油/空気均一予混合気について実質空気比、入口空気温度、燃焼圧力が NO_x 排出量に及ぼす影響を定式化した⁽⁶⁾。また、PPL 燃焼器によってモード運転した際の NO_x 排出量を予測し 10・15 モード規制値を十分クリア可能であることを示すと共に、炭化珪素 SiC (RBSC) 製セラミック燃焼器の単体評価試験に基づき支持手法や評価手法などを明示した⁽⁷⁾。しかしやはり温度条件がやや低めだったため、逆火に関する系統的な知見は不十分であった。

そこで、本プロジェクトでは当初より大型空気加熱装置を導入し、燃焼器入口空気温度 (以下 CIT と略記) を完全に再現できる単体燃焼試験装置を構築した。さらに、燃焼器単体での燃焼性能評価と並行して、実機エンジン内での負荷全域に渡る燃焼性能評価を実施した。

本報では、PPL 燃焼器の構成および排気性能を除く燃焼性能とその改善策について報告する。排気性能 (単体および実機における、定常および非定常排気性能) とセラミック化に関連する耐久性能については引き続き第2報として別途報告する。

2. おもな記号

λ_p : 1次燃焼領域の空気過剰率

Ua_x : 空気の噴出し流速 m/s

L : エンジン運転負荷 %

Ga : 空気流量 g/s

Pa : 空気圧力 MPa

Ta : 空気温度 K

Gf : 総燃料流量 g/s

Gf_p : 予混合燃焼用燃料流量 g/s

3. 開発課題と PPL 燃焼部の構成

自動車用 CGT は、触媒などの排気後処理装置無しで国内ガソリン乗用車の排気 (10・15 モード) 規制値を満たすことが求められる。

以下、CGT 用燃焼器の特徴点を示す。

- ① エンジンの部分負荷効率を維持するために、高効率の再生器 (リジェネレータ) が装着され、CIT が 1150~1300K と著しく高い
- ② 10・15 モードはアイドルを除き全域過渡条件なので、定常運転時だけではなく過渡運転時の排気性能が重要となる
- ③ アイドルから全負荷までのターンダウン比 (最大燃料流量/最低燃料流量) が 45 と、通常の高圧タービン燃焼器より一桁大きい
- ④ 普通乗用車のエンジンルームに搭載できるよう、厳しい寸法制限が課せられる。

エンジン性能実現のための燃焼器要求性能を表1に示す。希薄拡散燃焼や Rich-Lean 2 段燃焼などで要求排気性能を達成することは不可能であり⁽⁶⁾、PPL 燃焼を前提としたその概念図を図2に示す。乗用車の使用頻度の大半を占める 10・15 モード走行をカバーする負荷 30% 迄は PPL 燃焼単独で運転し、負荷 30% 以上の領域は PPL 燃焼に拡散燃焼を併用した複合モード燃焼を採用した。燃料噴射弁は蒸発管入口に設置された PPL 燃焼用の燃料を供給するプライマリ燃料噴射弁と、保安システム内に同軸上に挿入され燃焼室に直接燃料を供給するセカンダリ燃料噴射弁の2段階ステージングにより大きなターンダウン比および複合モード燃焼を実現する。なお、セカンダリ燃料噴射弁からの燃料供給は起動時と複合モード燃焼時のみ行われる。

要求性能 (表1) から技術課題を抽出し、その解決

表1 PPL 燃焼器要求性能

項目	要求値
アイドル燃料流量	0.2 g/s
加速最大燃料流量	9 g/s
燃焼効率	99.5 % 以上
全圧損失率	PPL 単独モード 6 % 以下
	複合モード 3.5 % 以下
出口温度不均一	全域 ±50 K 以下
排気性能	10・15 モード規制値
カーボン堆積	無きこと
着火性能	確実なること

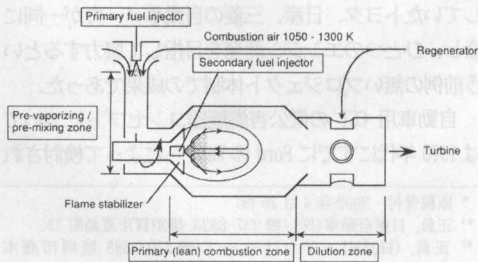


図2 PPL 燃焼器概念図

表 2 技術課題のブレークダウンと達成の方策

部位	技術課題	目標値	達成の方策
燃料噴射弁	・高ターndダウン比	45	ステージング
	・微粒化促進	60 μm (90%体積割合)	高圧化、エアーアシスト
	・耐熱性向上	燃焼器入口: 1323K	エアーアシストによる冷却
予蒸発予混合部	・蒸発・混合促進	90 %以上	スワール&ルーバーによる乱流強化
	・自己着火・逆火抑止	完全抑止	均一化、境界層の希薄化
希薄燃焼部	・希薄安定性確保	全域失火無し	保炎スワールの最適化
	・低NOx性能確保	10・15モード(過渡)	・PWMによる燃料流量制御 ・可変機構(最終的に不採用)
	・カーボン堆積	堆積不可	保炎器端部からの空気導入
希釈混合部	・出口温度不均一率	± 50 K以内(全域)	ガイド筒による貫通力強化
セラミック部品	耐久性確保	10万km、1万回起動	・弾性支持構造の採用
			・軸対称形状/分割化

策をまとめたものを表 2 に示す。エンジン総空気比 (1/当量比) は運転負荷とともに大幅に変化するの
で、特に低負荷での希薄安定性を確保するために、希
薄燃焼領域に導入する空気配分を可変化するための
VG を設けた。なお、空気配分率 VG は使用しなくても
目標燃焼性能を達成できたので、最終的に廃止した。
これら諸方策を盛り込んで設計した PPL 燃焼器の構
造図を図 3 に示す。

3. 1 予蒸発予混合部

予蒸発予混合部は、プライマリ燃料噴射弁、スワー
ラ、予蒸発管、旋回室から構成される。プライマリ燃
料噴射弁から供給される燃料とスワラを通して供給
される希薄燃焼用の空気は、予蒸発管内で予蒸発・予
混合され、形成された予混合気はスクロール形状の旋
回室で旋回運動を付与されて保炎器周囲から環状旋回
噴流となって燃焼室に導入される。保炎器後流には循
環流領域が形成され、これによって希薄予混合火炎が
安定化される。
完全予混合に近い混合気(蒸発管出口における蒸発

率 90%以上、組成均一率 90%以上)を形成するため、
先ず燃料噴射弁にはアシスト空気併用の渦巻き型高圧
圧力噴霧式を採用し、噴霧の微粒化 (90%体積粒径 60
 μm : SMD 30 μm 相当)を図った。次に、従来の知
見⁽⁶⁾を参照して空気にスワール数 S: 0.17 の弱いス
ワールとルーバーによるせん断流れを付与することに
より蒸発および均一化の促進を図った。これらを併用
することによって蒸発管長を約半分に短縮できる効果
が期待できる。自己着火時間については上記文献⁽⁶⁾
⁽⁷⁾においては Spadaccini らの式⁽⁸⁾による検討がな
されているが、実験結果からの明瞭な指針は得られて
いない。ここでは Wolfer の式⁽⁹⁾を用いてエンジン負
荷全域にわたる自己着火条件を検討した。その結果、
図 4 に示すように自己着火と蒸発管壁への液滴付着の
両条件からの制約で蒸発管径の最適値が存在すること
が判明し、この結果より予蒸発管直管部の内径を 34
mmと定めた。次に、全負荷域における蒸発管内の液
滴の平均滞留時間が、自己着火抑止のためにクリティ
カルな時間以下となり、なおかつ十分に予蒸発可能な
時間となるよう、蒸発管長を決定した。なお、希薄燃

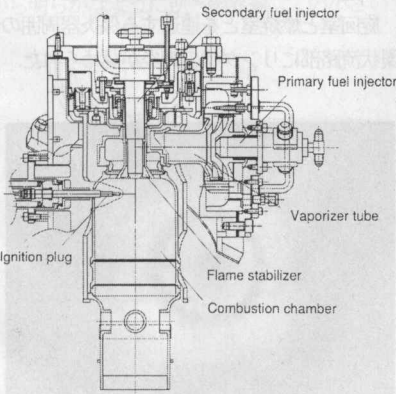


図 3 PPL 燃焼器の構造図

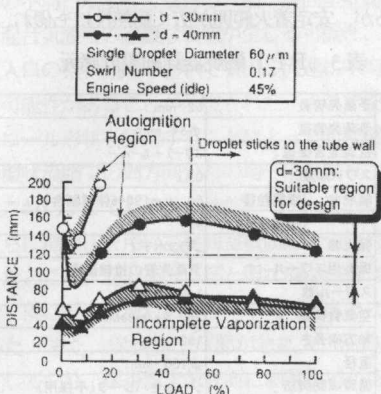


図 4 予蒸発管形状検討内容

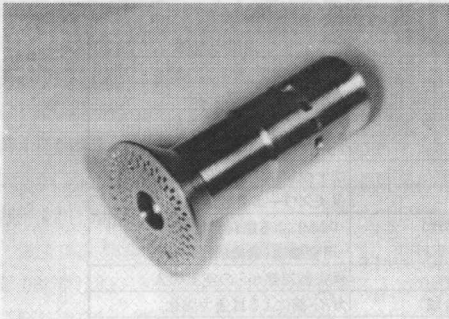


図 5 プラフボディ型保炎器外観写真

焼部への予混合気の噴流速度は最低でも軸方向流速で 50m/s (① 負荷 30%) を確保した。

3. 2 希薄燃焼部

希薄燃焼部の空間熱負荷率は CIT が 773K、 λp が 2 ～ 3 の時、保炎リング付き斜流スワール (S = 1.0) によって $2.8 \times 10^6 \text{ kW/m}^3 \text{ MP a}^2$ が可能である⁽⁶⁾ が、より希薄な混合気への対応も考慮し、50% 程度の余裕を見た設計とした。また、ライナ断面平均流速をこの時の実績とほぼ同等とするために定格空気流量の増加分に見合った $\phi 100\text{mm}$ と定めた。

保炎器は図 5 に示すプラフボディで、予混合気の接線方向運動量を旋回流とすることによりスワールを廃して耐久上の懸念を軽減した。保炎器の位置によって予混合気の燃焼室入口環状面積は調整可能でスワール数も変化するが、最終的には S = 1.0 となるよう保炎器位置を決定した。

3. 3 着火部

点火はセラミックグロープラグによる熱面着火を利用した。ガスタービン用火装置としては例外的ではあるが、安定着火範囲が広く耐熱性にも優れ、既に

表 3 PPL 燃焼器詳細設計諸元

予 蒸 発 予 混 合 部	予蒸発管長	52 mm
	予蒸発管径	$\phi 34 \text{ mm}$
	乱流混合促進	スワール + ルーバー
	スワール数	0.17
	噴射弁	噴霧粒径 60 μm (90% 体積割合)
保 炎 部		噴霧角度 45 °
	保炎器	プラフボディ
	保炎用スワール	予蒸発管の接線配置
	スワール数	1.0
希 薄 燃 焼 部	空気負荷率	250 $\text{kg/m}^3\text{sMPa}$
	軸方向長さ	150 mm
	直径	$\phi 100 \text{ mm}$
	循環域制御法	ゾーンセパレータ (不採用)
	噴射弁	噴霧粒径 100 μm (90% 体積割合)
		噴霧角度 90 °

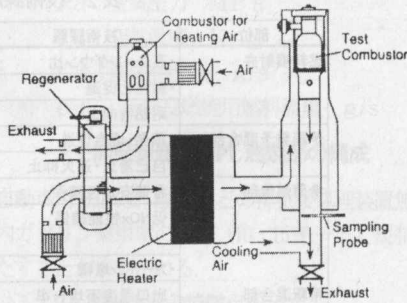


図 6 単体燃焼試験装置概略図

実用化されている事例⁽¹⁰⁾ があって信頼性も実証されていることから採用した。なお CGT では着火後プラグを燃焼室から引き抜くことによって無冷却での耐久性を確保できた。

以上の詳細設計諸元をまとめて表 3 に示す。

4. 燃焼性能

単体燃焼試験装置の概要を図 6 に示す。燃焼器およびキャップなどはエンジンハウジングに実装するアッセンブリそのものを装着・単体評価できるようにした。燃焼用空気は電気炉で予熱され、実機計画条件相当まで昇温し、下流の排気ダクトには加圧用バルブを設置して燃焼圧力を調整した。また、燃焼器下流から燃焼室内が観測できる構成とし、写真撮影ならびにビデオカメラによる映像監視を実施した。PPL 燃焼の状況を図 7 に示す。セカンダリ燃料噴射弁を同軸中央に配した保炎器と周囲の燃焼器ライナードーム部が冷却している様子がわかる。予混合希薄火炎を目視することはできず輝炎も認められないことから、燃料はほぼ完全に蒸発混合しているものと考えられる。希薄燃焼部の火炎が保炎器上流の旋回室 (予蒸発室) に逆流して安定化する逆火、もしくは予混合管内で自己着火が生じると、旋回室と燃焼室とを連通する保炎器周囲のやや暗い環状流路部にリング状の輝炎が認められた。

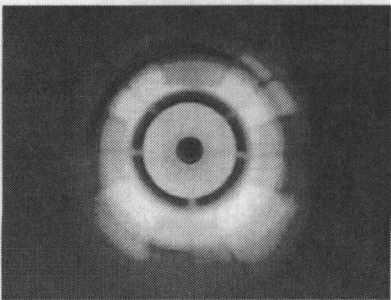


図 7 PPL 単独燃焼の状況

4. 1 逆火・自己着火の抑止

逆火もしくは自己着火が生じると、 NO_x が急増することが確認された。これは旋回室内に局部的に過濃(リッチ)な混合気存在もしくは液滴が残留していることを示唆しており、保炎器、旋回室などの部品耐久上も好ましくない。

しかしながら、設計当初の燃焼器ではエンジン運転条件の広い範囲で逆火(自己着火)が出現し、目標とする燃焼範囲を確保することができなかった。要因としては以下の3つが考えられる。

- i) 高温壁面近傍の境界層(低流速域)を予混合火炎が逆流した(逆火)
- ii) 旋回室内に剥離など低流速域があり、局部的に計画値以上の滞留時間があつた(自己着火)
- iii) 上述の Wolfer の式から求めた自己着火時間の見積りが甘かった

観察された事象が逆火なのか自己着火なのかは特定できなかったため、上記 i) および ii) の双方について対策することにより逆火(自己着火)の抑止を試みた。具体的な対応手段をまとめて図8に示す。

4. 1. 1 境界層の希薄化(逆火抑止)

まず、予混合気が燃焼室内に噴出する環状オリフィス壁面近傍の混合気低速域に積極的な消炎機構を設けることにした。この周辺では燃焼器壁面温度は1300 K内外になっており、ライナ壁面の消炎作用は期待できない。そこで図8に示すような希薄燃焼室入口の環状流路外周部に多数のスロットを設け、環状流路外周部壁面近傍の混合気境界層付近を、スロットから導入した燃焼空気の一部によって希薄化する方策を採用した。図9に境界層希薄化による燃焼性能試験の結果を示す。横軸は燃焼領域の正味の空気過剰率 λ_p 、縦軸は環状流路から燃焼領域への噴出し流速 U_{ax} である。図から明らかなように逆火限界線は入の小さい(リッ

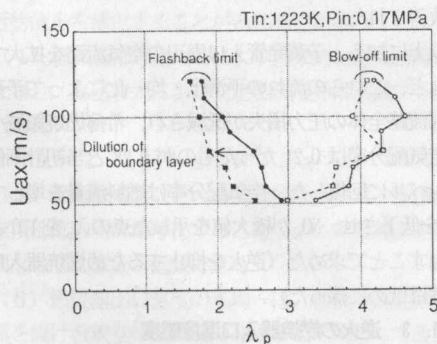


図9 境界層の希薄化による逆火の改善

チな)領域へシフトしており、境界層希薄化の逆火抑止に対する効果が確認できた。

なお、PPL 燃焼において希薄安定限界は吹き消えという不連続な現象としては現れず、希薄化とともに O_2 の増加という形で緩慢に燃焼安定性が失われてゆく。そこで燃焼効率 η_c が99.5%となる O_2 排出量(燃焼)条件をもって希薄安定限界と定義した。

4. 1. 2 旋回室の流れ改善

(逆火または自己着火抑止)

自動車用 100 kW-CGT の PPL 燃焼器ではエンジンレイアウト上の制約や燃料噴射弁の信頼性確保の点から、燃焼室中心軸線に対して接線方向にプライマリ燃料噴射弁と予蒸発管を配した構成とした。当初設計の旋回室はセラミックスの成形性を重視して同軸(環状)形状としたため、予蒸発管から旋回室を通り希薄燃焼室入口の環状流路に到る途上で予混合気に流速や濃度の不均一を生じ易く、これが逆火特性悪化の主要因と考えられる。予蒸発管から旋回室にかけての予蒸発予混合部について、噴霧を伴う流れ解析を実施したところ、流れの不均一によって噴霧の一部が旋回室壁面に付着して混合気濃度の過濃な領域が生じる可能性、希薄燃焼室入口の環状流路において噴出し流速に不均一を生じる可能性があることが示唆された。そこで旋回室にスクロール形状を採用することによって希薄燃焼室入口の環状流路での周方向分布の均一化を図り、逆火特性はこれによっても改善された。

さらに油膜法を用いて旋回室壁面近傍の流れを可視化したところ、旋回室入口部と環状流路出口(燃焼室入口)部に混合気流れの淀み、不均一があることが判明した。また、保炎器ソパ部が急拡大(流路は急縮小)しており、保炎器上流表面に剥離領域が認められたため、旋回室内混合気流が滑らかな増速流となるよ

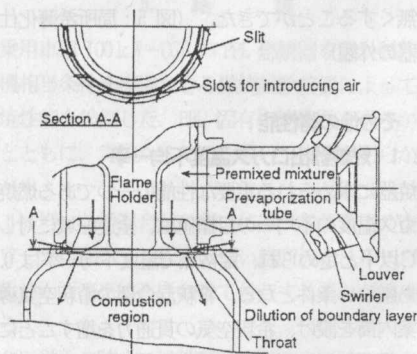


図8 境界層希薄化による逆火抑止策

うに保炎器形状を変更し逆火 (自己着火) 特性はさらに改善された。

以上に加え、予蒸発管入口周辺の空気流路を拡大するなど、これらの流れの平滑化・均一化によって予蒸発部流路全体の圧力損失が低減され、希薄燃焼領域への空気配分率は 0.21 だったものが 0.28 と当初計画値のレベルに回復した。空気配分率は燃料流量を増して λ_p を低下させ、 NO_x が極大値を示した点の λ_p を 1.0 と見なすことで求めた (逆火を抑止するため燃焼器入口温度は低めに保った)。

4. 1. 3 逆火の燃焼器入口温度感度

逆火 (自己着火) に及ぼす CIT の感度は希薄安定限界拡大の効果より著しく高く、CIT が高くなればなる程逆火抑止を強化する必要性が示唆された。CIT : Ta と逆火燃料流量 Gf との関係の一例 (負荷 30% 相当) を図 10 に示す。CIT の上昇に伴って逆火限界は急激に低下する。燃料噴射弁アシスト空気流量 GaN_p を増すと、希薄安定限界はそれ程悪化しない一方逆火限界は大きく改善されている。これは燃料微粒化の促進よりもむしろ燃焼用空気温度の低下が効果の主要因と考えられる (燃料噴射弁アシスト空気は外部から常温で供給した)。ここに示した燃料噴射弁アシスト空気 3g/s の増量は混合気の平均温度 50℃ 低下に相当する。一方、負荷 10% 相当の条件では VG を用いない場合混合気は著しく希薄化されて、逆火よりも希薄安定性の確保がクリティカルになる。

上記 4.1.1 の境界層の希薄化を適用した場合、逆火が効果的に抑止され、自己着火が過濃 (リッチ) 限界を支配しているものと考え、着火遅れ時間は予混合気の流速に反比例するから、代表流速 Ua* (希薄燃焼室入口軸方向流速) は、以下のように表わすことができる。

$$Ua^* = Z \cdot \lambda_p^{-\alpha} \cdot Pa^m \cdot Ta^n \cdot e^{-Q/RTa} \quad \dots (1)$$

ここで、Z は予蒸発部形状に固有の定数であり、 α 、m、n は反応次数であるが、本実験で得られた値は、 $\alpha = 2 (\pm 10\%)$ 、 $m = 1.5 (\pm 30\%)$ 、 $n = 5 (\pm 15\%)$ となった。但し適用範囲は、

$$\lambda_p : 1.3 \sim 5$$

$$Ta : 973 \sim 1173 \text{ K}$$

$$Pa : 0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$$

である。式 (1) により運転条件の変化に伴う自己着火限界を推定することが可能となった。

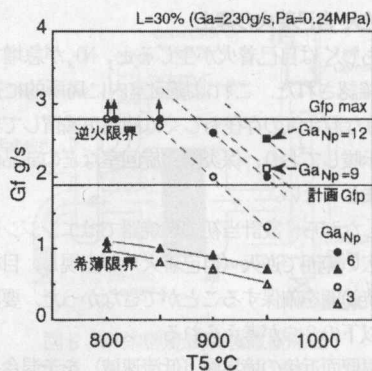


図 10 CIT と逆火限界の関係

4. 2 カーボン堆積の抑止

エンジン運転の各負荷において燃焼室内へのカーボン堆積の状態を確認したところ、PPL 単独燃焼では逆火限界以前に燃焼室内へのカーボン堆積は一切認められなかった。カーボン堆積は負荷 30% 以上の複合モード燃焼時、とりわけ λ_p が小さくなる高負荷側で厳しい条件となる。

カーボン堆積を抑止する有効な手段として 1 次燃焼領域への空気配分率を高める方法があるが、セラミック製の本燃焼器は空気孔を廃した構造のため PPL 燃焼の場合 λ_p を増すと希薄安定性を損なう恐れが生ずる。そこで λ_p は PPL 燃焼時の逆火と希薄安定特性を最優先して設定した。 λ_p 調整の自由度が無い状況下でカーボン堆積を抑止するため、セカンダリ燃料噴射弁の微粒化特性にも厳しい値 (90% 体積粒径 100 μm : SMD 50 μm 相当) を選んだ。この結果、燃焼室ライナへのカーボン堆積は狙いどおり認められなかったものの、逆に噴霧の貫通力が低下して保炎器下流端へのカーボン堆積が認められた。そこで保炎器下流端面に多数の小孔を設け、保炎器システム内部を通じて燃焼空気の一部を保炎器端面から導出することによってカーボン堆積を無くすることができた。(図 5: 局所希薄化仕様保炎器の外観)

4. 3 その他の諸性能

4. 3. 1 燃焼器出口ガス温度不均一率

燃焼器に求められる重要な性能の一つである燃焼器出口ガス温度の不均一性の目標値は、全運転域に対して $\pm 50^\circ\text{C}$ 以下と定められ、定格点で温度不均一率は 0.11 と最も厳しい条件となる。希釈混合部の希釈空気導入孔に案内筒を設け、希釈空気の貫通力を増すことによって、全運転域に対して目標値を下回る $\pm 45^\circ\text{C}$ を達成した (定格点での温度不均一率は 0.1 を達成)。特に

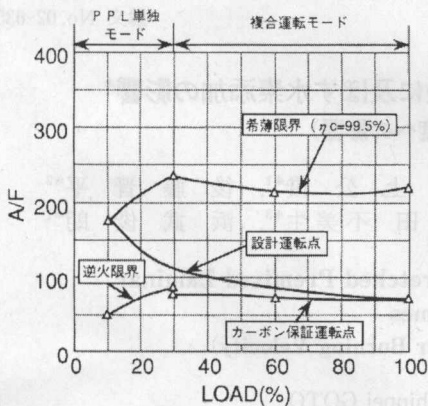


図 11 PPL 燃焼器の安定燃焼範囲

PPL 単独モード時の出口温度の均一性が非常に優れており、また複合モード燃焼時でも予混合気が存在が出口温度均一性を増す効果があることがわかった。

4. 3. 2 全圧損失率

VG を前提とした当初設計においては、VG による空気孔面積変化に伴い最大 6% の全圧損失率を見込んだが、VG の廃止により全域で 3.5% 以下の全圧損失率を達成した。予蒸発予混合室流路の流れの均一化が最も全圧損失率の低減に寄与した。

4. 4 全負荷範囲における性能

以上の改善策を盛り込んだ最終仕様の PPL 燃焼器の、運転負荷全域にわたる燃焼性能を図 11 に示す。横軸がエンジン運転負荷、縦軸が燃焼器の総空燃比を示す。図中の逆火限界、あるいはカーボン保証運転線と希薄限界に囲まれた領域が PPL 燃焼器の安定燃焼範囲であり、CGT エンジンの設計運転線に対して余裕のある運転領域が確保された。

5. 結 論

乗用車用 100 kW-CGT の PPL 燃焼器を設計試作し、実機相当条件を模擬できる燃焼試験装置によってその燃焼性能を検証した。PPL 固有の諸課題を明らかにするとともに、実験からその改善の一方策を明らかにした。

(1) 均一な予混合気の形成には、予蒸発用の空気にスワールによる 0.2 程度の弱い旋回流と、ルーバーによるせん断流を組み合わせる付与することが効果的である。

(2) 逆火の防止には希薄燃焼室入口流路の噴出し流速、混合気濃度分布の均一化が極めて重要である。

(3) 逆火の抑止策として希薄燃焼室入口流路の壁面近傍流を希薄化することが効果的である。

(4) 境界層希薄化などにより効果的に逆火を抑止した場合、自己着火による安定燃焼限界は次式で与えられる。

$$Ua^* = Z \cdot \lambda_p^{-2} \cdot Pa^{1.5} \cdot Ta^5 \cdot e^{-(\gamma/Ta)}$$

(5) 保炎器端面などへの局所的なカーボン堆積は、堆積部位の局所希薄化することによって希薄安定性を損わずに抑止・低減できる。

(6) 燃焼器出口温度の不均一は、希釈空気孔に案内筒を設け希釈空気の貫通力を増すことによって改善できる。

文 献

- (1) Wade, W.R. 他 3 名, ASME, 73-GT-11(1973)
- (2) AGT100 Advanced Gas Turbine Technology Development Program, 22nd Automotive Technology Contractors Coordination Meeting Report, 1984
- (3) AGT100 Advanced Gas Turbine Technology Development Program, 24th Automotive Technology Contractors Coordination Meeting Report, 1986
- (4) Holzapfel, I. 他 1 名, ASME, 73-GT-19(1973)
- (5) Cornelius, W. 他 2 名, SAE paper, No. 820175 (1982)
- (6) 佐々木, 他 2 名, 機論, 59-565 (1993), 2919
- (7) 佐々木, 他 2 名, 機論, 60-573 (1994), 1858
- (8) Spadaccini, L. 他 1 名, CSS/Comb. Inst, 81-02 (1981)
- (9) Wolfer, H.H., VDI-Forschungs Heft, Vol.392, No.15
- (10) 中嶋, 他 3 名, 日本ガスタービン学会国際会議 95-Yokohama-IGTC-99(1995)