

■技術報告■

LPG液体燃焼システム

LPG Burning System in the Liquid State

関口 善利* 小山 利次** 藤岡 丈夫*** 吉光 健****
Yoshitoshi Sekiguchi Toshitugu Koyama Takeo Fujioka Takeshi Yoshimitu

1 緒 言

LPG(石油液化ガス)を工業燃料として利用することは、すでに多くの業界で実施されており、今後とも燃料の多様化に伴いクリーンな燃料として大量の利用が見込まれている。

通常、LPGは運搬、貯蔵時は液体状態で取り扱い、燃料として利用する際は蒸発器により気化して気体燃料として用いられる。このために蒸発装置や再液化防止装置などの付帯設備が必要であり、これがLPGの大型装置への適用を阻害する一因となっている。従ってLPGを直接液体のまま安全かつ容易に燃焼させることができればそのメリットは大きく利用範囲は広い。

この度、筆者らは低コストで安全性の高い実用性のあるLPGの液体燃焼システムを開発したので、その概要を報告する。

2 小型試験炉による基礎実験

LPGは他の液体燃料に比べ蒸気圧が高く、輸送配管途中で液の圧力が蒸気圧以下に下がると気泡が発生し、流れは二相流になる。通常の液体バーナを使用し、二相流状態の燃料を噴霧燃焼させると、火炎は脈動し、著しく不安定となり、はなはだしい場合は失火することがある。これが、一般にベーパーロック現象と云われるものである。噴射圧力を蒸気圧以上に加圧し、気泡の発生を防ぐことによって、この現象の発生は回避することができるが、バーナのターンダウン比を大きくするためには、最大噴射圧力を高くしなければならず加圧装置、配管などの設備費が増大する。また、LPGの漏えいの危険性もより大きい。

そこで、筆者らは上記の問題を解決し、取扱いが容易で安全性が高いLPG液体燃焼システムを開発するために、定格容量 1×10^6 Kcal/hの試験炉を用い、各種の噴射ノズルの試作と燃焼実験を進め、ベーパーロック現象の解明と、それぞれのノズルの噴射特性、燃焼特性を把握した。

2.1 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図-1に示す。

LPGは容器から圧送され、蛇管式冷却器でいったん常温まで冷却された後、試験炉前まで送られる。ここで、温度調節器で所定の温度にコントロールされた後、バーナへ供給される。LPGの圧送は、LPG容器を温水で加温することによって行った。液温のコントロールは、冷却の場合は、LPGの一部を抜き出し温度調節器内でフラッシュ蒸発させることにより、加熱の場合は、温水加熱により行った。試験炉は、内径1.1m、炉長3.5mの横型円筒水冷壁炉である。また、図中に示すように他種燃料との燃焼特性の比較が行えるように、プロパンによるガス燃焼、および灯油による液体燃焼の実験が可能な構造になっている。

バーナは図-2に示すように、環状の保炎筒を持った構造の焚口を有し、さらにその外周部に空気二段燃焼用の二次空気口が4ヶ所設けられている。

燃焼排ガスの分析は、 O_2 をジルコニア O_2 分析計で、 CO を赤外式 CO 分析計で、 NO_x を化学発光式 NO_x 分析計で、炭化水素はFID式炭化水素計で行った。ばいじん量は β 線吸収式ばいじん量測定装置で測定した。

使用した燃料の液体ブタン、プロパン、灯油はいずれも市販の純ブタン、純プロパン、及び灯油である。

その組成の1例を表1に示す。

2.2 試作ノズル

初めに、LPGの燃焼状態や、ベーパーロックの発生状況を知り、ベーパーロックの発生防止に対する知見を得るために、図-3に示す外部混合式の二流体噴射弁による燃焼実験を行った。その結果、燃焼性については

* 日立造船 技術研究所 燃焼・伝熱研究室

〒625 舞鶴市余部下1180

** 日立造船 舞鶴工場

*** 三井液化ガス 研究所

**** 三井液化ガス 研究所

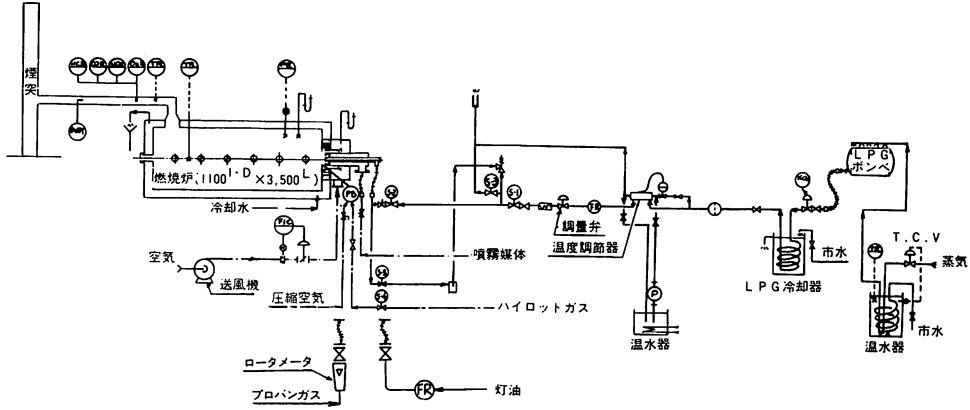


図-1 実験装置概略図

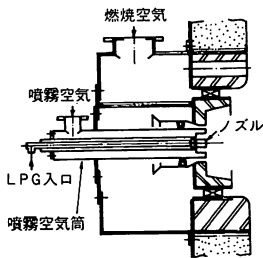


図-2 バーナ焚口

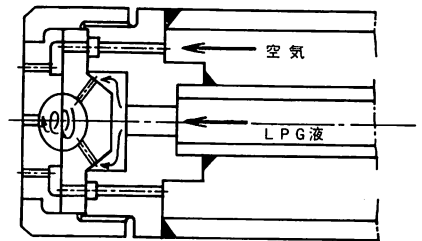


図-3 高圧空気噴霧型ノズル

表1 燃料の組成

燃料	ブタン	プロパン
成分	含有量 (モル%)	含有量 (モル%)
エタン、エチレン	0.02	1.53
プロパン	} 2.42	97.03
プロピレン		0.31
ノルマルブタン	59.26	0.41
イソブタン	37.68	0.72
ノルマルペンタン	0.08	
イソペンタン	0.54	

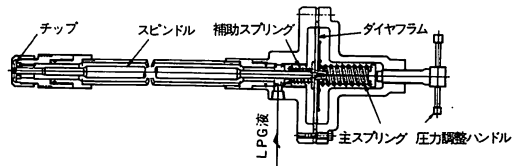


図-4 圧力駆動型ノズル

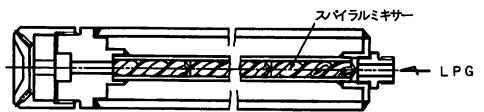


図-5 二相流型ノズル

条件によって霜の発生が見られる以外は、他の液体燃料とあまり差のないことがわかった。霜の発生もノズルチップを適当に加熱することで防止できることがわかった。

他方、ベーパーロック現象の発生は、ノズルチップ絞り部での急激な圧力低下によって発生した蒸気が、旋回室内をほとんど占めてしまうことによって引き起こされることがわかった。また、低周波の振動燃焼は、途中の配管内で気液の分離が起こり、流れがスラグ流などの不均一な二相流になった場合に発生することがわかった。

この結果をもとに、ベーパーロックの発生を防ぐ構造のノズルについて検討し、次の二形式のノズルを考察

した。

(1) 圧力駆動型ノズル

従来のノズルと同様に、噴射圧力を蒸気圧以上保つ方式のノズルであるが、液噴射開口面積を可変にすることによって、比較的低い噴射圧力で大きなターンドウン比が得られるノズルである。その概略の構造を図-4に示す。液供給圧力を受けたダイヤフラムの変位によって噴射開口面積が変化する構造になっている。

(2) 二相流型ノズル

ノズルの全操作範囲において、噴射圧力が蒸気圧以下に保持される方式のノズルである。したがって、ノズル内部での流れは常に二相流である。図-5にその概

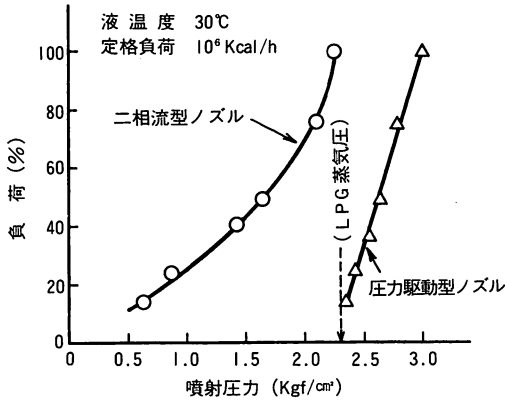


図-6 噴射特性

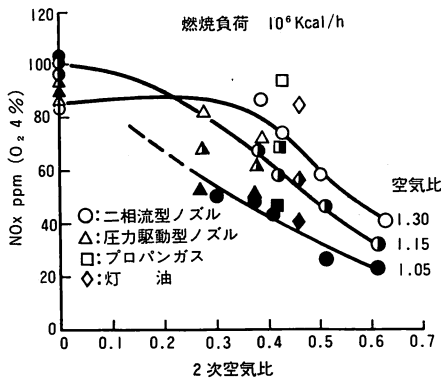


図-7 NO_x 特性

略の構造を示す。

2.3 噴射特性および燃焼特性

試作した二形式のノズルを図-2に示したバーナに装備し、燃焼実験を行い、それぞれのノズルの噴射特性および燃焼特性を求めた。ただし、微粒化媒体として送風機からの圧力 340mmH₂Oの低圧噴霧空気を使用した。

それぞれのノズルの噴射圧力と流量の関係を図-6に示す。

一般に、圧力噴霧式ノズルの流量特性は、流量を Q (ℓ/h) 圧力を P (kgf/cm²) とすれば、 $Q \propto \sqrt{P}$ であるが、試作したどちらのノズルもみかけ上特異的な流量特性を示す。圧力駆動型ノズルは噴射面積を可変としたことによって流量は噴射圧力にほぼ比例する。二相流型ノズルでは、流れは小流量なほどボイド率の高い二相流であるが、流量が多くなるにしたがって単相流に近づくために、 $Q \propto P^n$ ($n > 1$) である。

また、同図から明らかなように、試作した二形式のノズルはいずれも低い噴射圧力でターンダウン比が 6 : 1 以上とれ、安定操作範囲が非常に広く、従来のノ

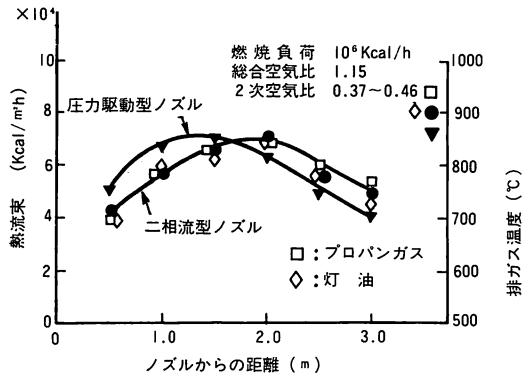


図-8 熱流束分布

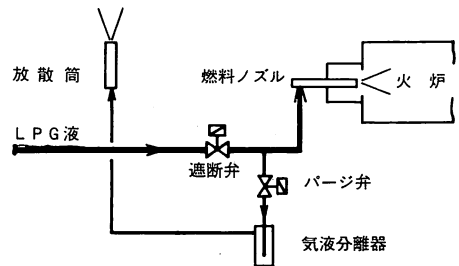


図-9 消火時の安全対策

ズルに比べ噴射特性が非常に優れていることがわかる。火炎形状は、圧力駆動型ノズルに比べ二相流ノズルのほうが火炎長さ、火炎径のいずれも小さかった。

NO_xの測定結果を図-7に示す。

NO_x発生量は、プロパンガスおよび灯油燃焼の場合よりも若干少ない傾向にあり、空気二段燃焼を行うことによって40ppm (O₂ 4%換算値) が可能である。CO、HC 濃度についてもそれぞれ50ppm、20ppm以下と少なく他の燃料と比べほとんど差はなかった。

また、受熱特性も、図-8に示す熱流束分布から明らかなように他の燃料の燃焼時と大差なく、炉出口排ガス温度もほとんど変らなかつた。

これらの結果から、LPGの液体燃焼は、他の軽質燃料と同等あるいはそれ以上に高効率、低公害燃焼が可能であることがわかった。

2.4 消火時の安全対策

前述のように、二形式の優れた性能のLPG液体燃焼用ノズルを開発したが、さらにLPG液体燃焼装置には、LPGが低沸点、高蒸気圧、低粘度と云う性質を持つために、燃焼装置としての一般的な安全対策以外に、特別な安全上の配慮が必要である。特に、消火時や、運転中の失火の際に、遮断弁以降の燃料配管内に残留するLPG残液が炉内に気化・流出し、爆発混合気が生成されることを防止しなければならない。

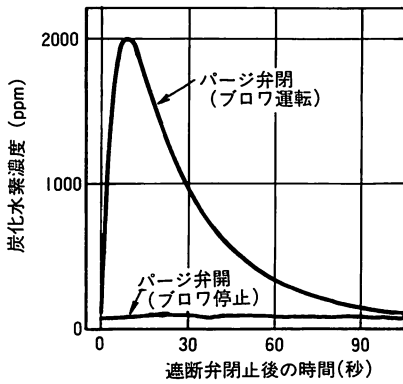


図-10 炉出口における炭化水素濃度履歴

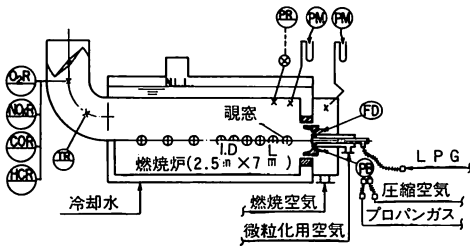


図-11 大型燃焼試験装置

そこで、本システムでは、その対策として図-9に示すように、遮断弁の下流にバージ弁を設け、消火あるいは失火等の緊急時はこのバージ弁が開き、残液を炉外の安全な場所へ大気放出するようにした。

この方法によって、本システムは、例えば図-10に1例を示すように、遮断弁が閉止と同時に送風機が停止するような条件においても、炉内の炭化水素濃度は爆発限界濃度に比べ非常に低く、爆発の危険性の全くない安全性の高いシステムとなっている。

3 スケールアップによる実用化試験

これまでに述べたとおり、本LPG液体燃焼システムは、容量 1×10^6 kcal/hの小型試験炉での実験の結果、構成が極めてシンプルで、低コストで、かつ低公害で安全性が高く、十分実用性のあるLPG燃焼システムであることが確認された。

そこで、引き続き10倍の容量 1×10^7 Kcal/hの実用規模バーナによる燃焼試験を行い、スケールアップの効果を把握し、本システムの実用化を図ることにした。

スケールアップに際しては、特に次の点に留意した。

1. ノズルの大型化によるノズル内部の液保有量の増加を極力押える。

表2 燃料の組成

項目	試料		
	ブタン	P混合液	
液組成 Vol%	エタン	0.01	0.6
	プロパン	1.72	49.88
	プロピレン	0	0
	イソブタン	38.30	29.48
	ノルマルブタン	58.68	19.39
	イソペンタン	1.11	0.09
	ノルマルペンタン	0.18	0.56
密度 (15°C) kg/ℓ		0.5758	0.5417
真発熱量 kcal/kgf { MJ/kg }		10827 { 45.23 }	10894 { 45.61 }
蒸気圧 (0°C) MPa		0.129	0.31

2. ノズルの大容量化による微粒化の悪化を防ぐ
3. 安全対策

3.1 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図-11に示す。

試験炉は、内径2.5m、長さ7mで小形炉と同様横型円筒水冷壁炉である。

実験方法は、液供給方法をLPG容器の温水加熱による加圧方式からポンプによる供給方式に替えた点と配管ラインの途中で液温度調節器を設けなかった点以外は、先の基礎実験とはほぼ同様である。

使用したLPGの組成を表2に示す。

3.2 噴射特性

初めに、容量1600ℓ/hにスケールアップした二形式のノズルについて、それぞれ水-空気系で噴射試験を行い、ほぼ予想どおりの性能であることを確認した後、LPGによる燃焼試験を行った。

噴射圧力と流量の関係を図-12、図-13に示す。

図-6と比較すれば明らかのように、どちらのノズルの噴射特性も小型ノズルの特性にほぼ等しく、燃焼状態も広い操作範囲(ターンダウン比6:1)においてベーパーロック現象、低周波の脈動燃焼の発生が見られず安定であった。したがって、ノズルについてスケールアップ上の問題点はないことがわかった。

図-14に圧力駆動型ノズルの流量とみかけの流量係数との関係を示す。

ただし、流量係数 C_v は次式で定義される値である。

$$C_v = Q/A \cdot \sqrt{\tau / (2g \cdot P)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、Q：流量(m³/s)、A：スリット開口面積(m²)
 τ ：比重量(kgf/m³)、g：重力加速度(m/s²)
 P：噴射圧力(kgf/m²)

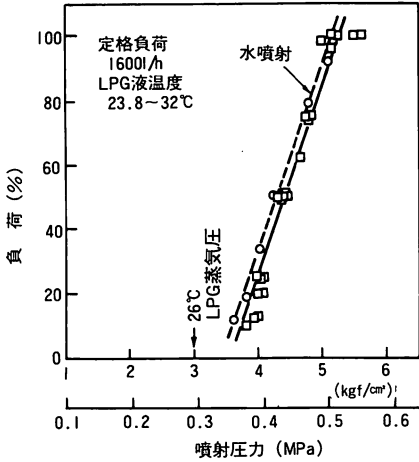


図-12 圧力駆動型ノズルの噴射特性

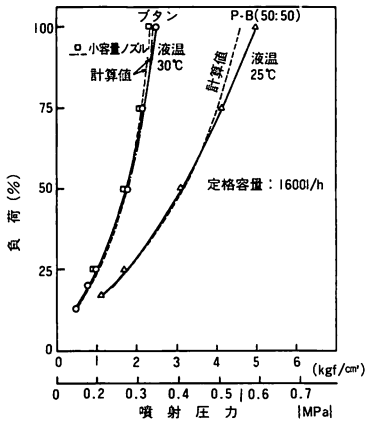


図-13 二相流型ノズルの噴射特性

LPGのみかけの流量係数は水の場合に比べ非常に小さい値となったが、これは、液旋回室でLPG蒸気が発生し、これによって、旋回室内の圧力 P_s が大気圧よりも高くなっているためと考えられる。そこで旋回室内での圧力はLPGの蒸気圧に等しいと仮定し、液温度をパラメータに蒸気圧の補正を行った結果を図中に破線で併示した。この結果、蒸気圧の補正をすれば水噴射の結果と同様な値が得られることがわかる。

二相流型ノズルの噴射圧力と流量の関係は、図-13の実線に示すとおりである。ここで、次の仮定をし、これに基づいて(2)式を用いて二相流型ノズルの噴射特性を検討した。

1. ノズル内での蒸気の発生は、外部からの熱の出入りはなく、ノズル内での圧力降下によるエンタルピー変化に従う。
2. 気液のすべり速度比は $S = 1$ である。計算結果を図-13中に破線で示した。

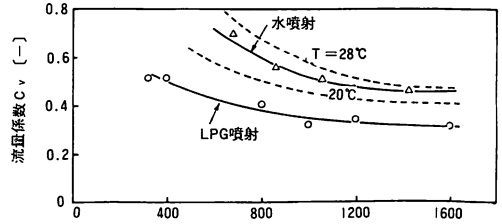


図-14 圧力駆動型ノズルの流量係数

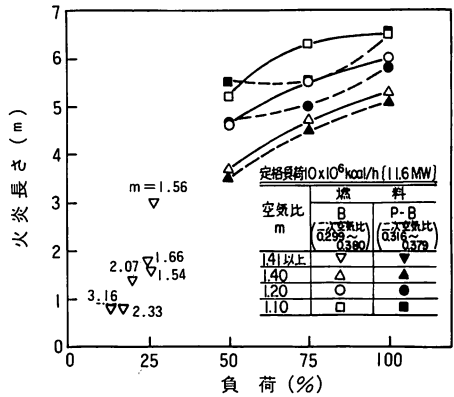
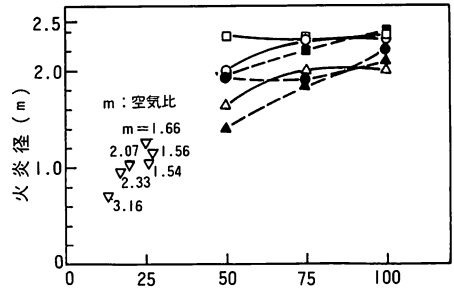


図-15 火炎形状

$$Q = 3600 \cdot C_v \cdot A \cdot \frac{1}{\tau_l} \sqrt{2g \cdot P \cdot \tau_m} \dots (2)$$

ただし、 C_v : 流量係数、 A : ノズル開口面積 (m^2)、 P : 噴射圧力 (kgf/m^2)、 τ_l : LPGの液比重量 (kgf/m^3)、 τ_m : 二相流の平均比重量 (kgf/m^3)

計算結果と実測値は比較的良好一致を示すことがわかる。

3.3 燃焼特性

火炎形状は、基礎実験の結果では二相流型ノズルのほうが圧力駆動型ノズルに比べ短炎であったが、大容量バーナではその差がほとんど見られなかった。また図-15に1例を示すように燃料の違いによる差も少なかった。

これは、大容量バーナでは、噴霧空気と燃焼空気との混合が燃焼の支配的因子になったためと考えられる。

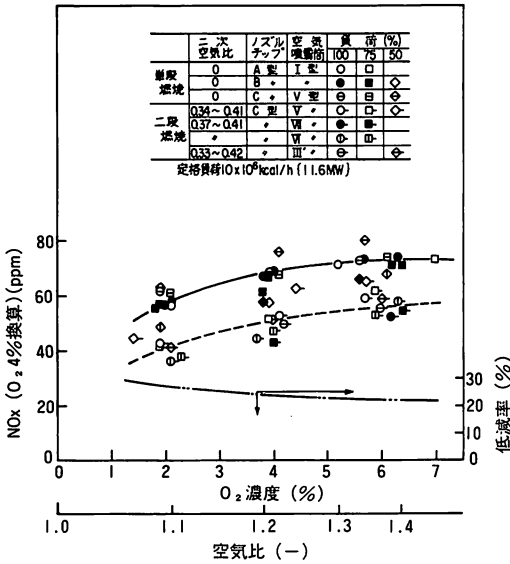


図-16 NO_x 特性 (二相流型ノズル)

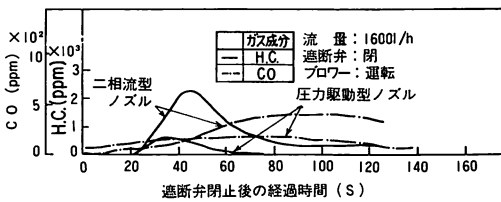


図-17 安全確認試験

また、本バーナは噴霧空気ノズル形状を変えることによって火炎の形状を大巾に変えることが可能である。

NO_x の測定結果も、基礎実験での結果からはほぼ予想されたとおりであった。測定結果の1例を 図-16 に示す。

したがって、これまでに述べた結果から、本LPG液体燃焼用のバーナは、燃焼性に関して何らスケールアップ上の問題はないことがわかる。

3.4 安全性の確認試験

実機においては、バーナは安全性と取扱いの容易なことが最も要求される。そこで、筆者らもこれらに関して種々の試験を行った。

バーナの安定操作範囲はすでに述べたように非常に広くターンダウン比が6:1以上とれる。

負荷変動に対する追従性については、100%負荷→25%負荷の急変試験に対しても十分追従し安定であった。緊急時の遮断テストを小形炉での実験と同様に種々の条件で行ったが、図-17に1例を示すように、いずれの場合も炉内の炭化水素濃度は爆発下限濃度よりも

非常に低く、図-9に示した安全システムは実装置においても極めて有効であることがわかった。

4 結 言

小型試験炉を用いた燃焼量 $1 \times 10^6 \text{ Kcal/h}$ のバーナによる基礎実験、および引き続き実施した燃焼量 $1 \times 10^7 \text{ Kcal/h}$ のスケールアップバーナによる実用化試験の結果、本LPG液体燃焼システムは所期の目標性能を有しており、低コストで汎用性のあるLPG燃焼法として、十分実用性のあるシステムであることが確認された。

本システムの主な特長は次のとおりである。

1. ノズルの最大噴射圧力は、燃料の蒸気圧より 2 kgf/cm^2 程度高い圧力でよい。
2. バーナのターンダウン比が6:1以上とれ非常に安定操作範囲が広い。
3. 微粒化用媒体として送風機からの低圧空気を使用することができ、水蒸気あるいは圧縮空気などの高圧噴霧媒体を必要としない。
4. 従来のガスバーナと比較して熱効率の低下がなく、既設炉への適用が可能である。
5. 低公害燃焼が可能である。

参考文献

- 1) 関口, 沖上, 早坂, 中山, 藤岡, 吉光; LPG液体燃焼装置の試作, 第17回燃焼シンポジウム前刷集, 1979
- 2) 伝熱工学資料 (改訂第3版), 日本機械学会, 1975
- 3) H.M.Spiers; Technical Data on Fuel 6th Edition, British National Committee World Power Conference, 1962
- 4) L.J.Canjar, F.S.Manning; Thermodynamic Properties and Reduced Correlation for Gases, Gulf Publishing Co. 1967
- 5) 植田辰洋; 気液二相流, 養賢堂, 1981

