

ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の技術開発と高炉ガス焼きガスタービンの高性能化の可能性

Gas Turbine Combustor Development of Each Gasified Fuel and Availability of High-efficiency Blast Furnace Gas Turbine

長谷川武治 (財) 電力中央研究所
Takeharu Hasegawa エネルギー技術研究所

1 緒言

1.1 はじめに

2005年2月16日に地球温暖化防止に関する「京都議定書」が発行され、わが国は第1約束期間である2008年から2012年までに二酸化炭素 (CO₂) などの温室効果ガスを1990年比で6%削減することが求められている。わが国の鉄鋼業界および電気事業において年間石炭消費量の40%以上をそれぞれ消費しており、合計で85% (2002年現在) を上回る。石炭は世界中に広く分布し、埋蔵量も石油や天然ガスに比べて豊富である、一方で、液化天然ガス (LNG) 等に比べて単位発電量当りのCO₂発生量が多く、硫黄分なども含まれることから、環境保全性に適した高効率利用が重要である。

製鉄所では、鉄鋼の生産過程で高炉ガス、コークス炉ガスおよび転炉ガス等の副生ガスが多量に生成し、これを所内動力用のガスタービン燃料として利用している。これまで高炉では、一般にコークスや微粉炭が還元剤として用いられてきたが、CO₂等の地球温暖化ガス排出量削減と、近年で中国等の需要の増大により需給の逼迫が懸念されるコークス、石炭の使用量を削減する目的で、使用済みプラスチックや都市ガス等を一定量利用する試みがなされている。また、所内動力用ガスタービン燃料として用いられる副生ガスは、還元剤にプラスチックや都市ガスの様に水素分を多く含む場合、還元剤の相違に伴い副生ガスの組成に影響することが予想される。

一方、わが国の電気事業では石炭火力発電が年間発電電力量の24%以上 (2004年度) を担っている。しかしながら、ボイラを利用する最新鋭汽力発電の送電端熱効率は約41% (高位発電量: HHV基準) であり、これは今後の導入が期待される最新鋭LNG焼きガスタービン複合発電に比べると約10ポイント低い。このことから、石炭をガス化し、硫黄分および灰分を除去した後に高温ガスタービンに適用するガス化複合発電技術 (IGCC: Integrated Gasified Combined Cycle) の確立

が期待される。また、石炭をはじめ、未利用エネルギーのオイルサンドや再生可能エネルギーであるバイオマスなどの各種燃料を対象に国内外で開発が進められるガス化複合発電技術は益々重要となってきている。図1に概要を示すガス化複合発電 (IGCC) では、石炭等の原料をガス化炉でガス化し、その後で脱塵、脱硫等のガス精製過程を経てガスタービン燃料が生成される。IGCCシステムはガス化過程およびガス精製過程を含む以外は、LNG焼きガスタービン複合発電の場合とほぼ同様で、所内動力比率が若干高いものの高効率ガスタービンに適用するため従来の微粉炭火力発電に比べて高効率発電が期待できる。

高炉ガス、コークス炉ガスの組成例と各種ガス化方式によるガス化ガス燃料の組成例を表1に比較して示す。高炉ガス焼きガスタービンでは発電量の低い高炉ガスにコークス炉ガスを約1割添加して発電量を約4 MJ/m³に調整してガスタービンに供給している。一方、ガス化ガス燃料の発電量は3~13 MJ/m³と各種ガス化方式によって大幅に異なり、電気事業では環境保全性を考慮しつつそれぞれに適した燃焼器技術を開発してきた。最新の高炉ガス焼きガスタービンでは1300℃ (1573K) 級の複合発電で発電熱効率47.5% (HHV基準)、発電量300 MWを達成する。最近、鉄鉱石の還元剤として一部プラス

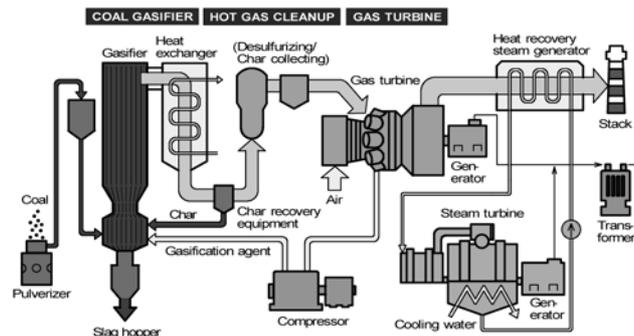


Fig.1 Schematic diagram of typical IGCC system

チックを用いられており、この場合には高炉ガスの組成が異なる。また高温化による高効率化を目的とする場合にはコークス炉ガスの混合割合の増加による燃料発熱量の上昇なども検討する必要が生じる。現在、LNG 焼き 1500℃ (1773K) 級ガスタービン複合発電では送電端熱効率 50% (HHV 基準) を越えており、発電量は 300～500 MW を発生する。高炉ガスに 1500℃ 級ガスタービンを導入できれば高効率化はもちろんのこと、ガスタービンによる大容量発電が可能となる。

本稿では、電気事業における IGCC の開発研究の背景について概説するとともに、高炉ガス等の副生ガスを用いたガスタービンの今後のより一層の高効率化、環境保全性の向上の可能性を示したい。

1.2 開発の背景

わが国の電気事業では、CO₂ 等地球温暖化ガスや NO_x、SO_x 等の排出量を抑制し、環境保全性を維持しつつ、安定供給を実現できる電源政策が求められている。そのため水力、火力および原子力発電の各特徴を活かした運用が重要である。これら電気事業における状況を背景にして、エネルギーを安価に安定供給する上で、火力発電のこれまで以上の柔軟なプラント運用および耐環境性の重要性が益々高まってきている。

燃料のほとんどを海外に依存するわが国の火力発電では、1970 年代の二度にわたる石油ショック以降、石油と比較して安定供給が期待される石炭および LNG へと燃料転換が図られる(図 2) とともに、発電設備の高効率化、および NO_x、SO_x 排出ガスの削減による環境保全性の確保等に関連する技術開発が進められてきた。そのうち、石炭の炭種拡大および石炭利用高効率発電としてガス化複合発電 IGCC の研究開発が国内外で進められてきた。わが国では、200 トン/日規模のパイロットプラントによる空気吹き噴流床石炭ガス化複合発電の研究開発が 1986 年から 1996 年までの 11 年間にわたり実施され、現在は 250 MW 級 IGCC 実証機の導入に向けた検討が進められて

いる。IGCC 実証機では、空気吹き噴流床石炭ガス化炉、湿式ガス精製(脱硫、脱じん) および 1200℃ (1473K) 級ガスタービンを用いることにより、送電端熱効率 40.5% (HHV 基準) を目標としている。将来の商用化の段階では、大容量高効率な 1500℃ (1773K) 級ガスタービン、ガス精製に乾式法を採用することにより、送電端熱効率 48% が期待される。

一方、欧米では、酸素吹き石炭ガス化方式による複合発電が主流となっており、既に商用プラントによる調整運転の段階にある。また、各国の立地条件により、石炭だけでなく重質油やバイオマスなどを用いる各種ガス化発電方式に関する研究が進められている。

表 1 に示す各種ガス化方式によるガス化燃料の組成に応じたガス化燃料用ガスタービン燃焼器の開発課題を表 2 に示す。ガス化剤に空気を用いる場合、ガス化燃料は一酸化炭素(CO)、水素(H₂)と少量のメタン(CH₄)を主要な可燃性成分とし、燃料組成の 70% 程度を窒素(N₂)等の不燃性成分が占める。燃料発熱量も約 4.2 MJ/m³ (1000 kcal/m³) と低く、燃焼安定性の確保が重要となる。

また、ガス精製をプラント熱効率上有利な乾式法で行う場合、

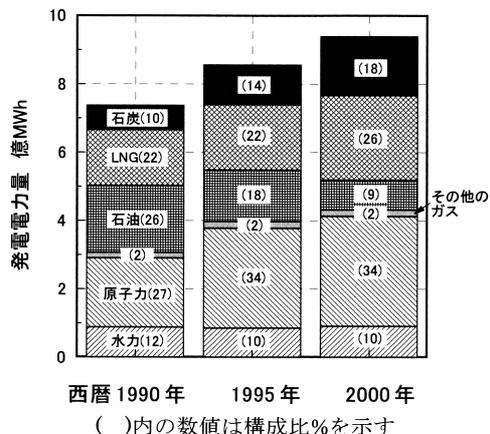


Fig.2 Transition of composition ratio for electric power generation

Table 1 Typical compositions derived from the gasifiers and furnaces

種類	高炉		ガス化ガス									
	原料	ガス化炉	固定床		流動床		石炭		バイオマス		重質油	オリマルジョン™
成分	1	0.1	乾式	乾式	乾式	噴流床	湿式	噴流床	噴流床	噴流床	噴流床	噴流床
	1	0.1	BGL	BC	IGC	Shell	HYCOL	Texaco	Tampella	Texaco	Texaco	電中研
	1	0.1	酸素	空気	空気	酸素	酸素	酸素	空気	酸素	酸素	酸素
CO [%]	20	6	56.4	7.9-14.7	25.9-27.6	65.2-69.5	55.2-59.4	40.9	8.0-15.0	21.9-23.1	51.7	43.5
H ₂ [%]	1	56	25.6	13.2-15.0	10.9-9.4	28.8-31.0	31.1-33.7	29.9	8.0-12.0	12.5-22.4	43.1	42.2
CH ₄ [%]	-	30	6.6	1.5-2.8	1.4-0.5	0.01-0.03	1.0-2.0	0.1	4.0-8.0	2.2	0.2	0.4
CO ₂ [%]	20	-	2.8	10.0-12.0	6.7-5.4	1.0-2.8	7.6-10.4	9.5	13.0-18.0	20.7-18.6	3.2	11.8
H ₂ O [%]	-	-	(a)	11.5-18.4	(a)	(c)	(a)	12.3	7.0-15.0	40.9-31.5	(c)	(c)
NH ₃ [ppm]	-	-	(a)	500-1000	1000(b)	100-600	(a)	(a)	(a)	0-200	(a)	(a)
H ₂ S+COS [%]	-	-	20ppm	(a)	404-714ppm	0.14-1.1	(a)	(a)	(a)	0.285-1.132	1.6	1.35
Others [%]	N ₂	C ₂ H ₂ etc.	8.6	45.9-47.3	54.2-56.1	(a)	(a)	7.3	(a)	1.800-1.048	0.2	0.75
CO/H ₂ mole ratio	1	0.1	2.2	(a)	2.4-3.0	2.1-2.4	1.6-1.9(b)	1.4	(a)	1.0-1.8	1.2	1.0
HHV [MJ/m ³]	2.7	20	13.0	3.6-4.1	4.9-5.2	12.2-12.5	12.0(b)	9.0	4.0-7.0	5.2-6.6	12.1	11.0

(a):文献に記載無し, (b):推定値, (c):Dry Base, HHV:高位発熱量

ガス化の過程で石炭中窒素化合物から生成されるアンモニア (NH₃) は除去されずにガスタービン燃焼器に供給され、燃焼過程で窒素酸化物 (フュエルNO_x) となる。このため、保炎の確保とともにフュエルNO_xを低減する燃焼技術の開発が必要となる。

一方、ガス化剤に酸素を用いる場合、ガス化燃料は発熱量が9~13 MJ/m³の中カロリー燃料となり、火炎温度はLNGよりも高くなり、空気中のN₂に起因して発生するサーマルNO_xを抑制する燃焼技術が重要となる。さらに、酸素吹きガス化複合発電の一層のプラント熱効率向上およびシステムの簡素化のためには乾式ガス精製の採用が不可欠であり、この場合、サーマルNO_xの抑制と同時に燃料中のNH₃に起因して生成されるフュエルNO_xを低減する燃焼技術が必要となる。

わが国ではこれまでに、乾式ガス精製を採用する空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料用1300℃ (1573K) 級¹⁾、1500℃ (1773K) 級低NO_x燃焼器²⁾の開発研究が実施されるとともに、湿式ガス精製および乾式ガス精製による中カロリー燃料を対象に、1573K級および1773K級低NO_x燃焼器³⁻⁷⁾について開発が進められてきた。以下では国内外におけるガス化燃料用ガスタービン燃焼技術開発の動向について概説するとともに、電気事業において開発された各種ガス化燃料用ガスタービン燃焼器技術について詳説する。

1.3 従来の研究と開発課題

IGCCにおける発電用ガスタービン燃焼器に関する研究は主に1970年代から始められ、1984年にはクールウォーターで湿式ガス精製を採用する酸素吹き石炭ガス化方式によるガスタービン発電についての実証機プロジェクト⁸⁾が開始された。その後、1994年にはオランダのブフナムにて複合発電として初めての実証試験に成功し⁹⁾、アメリカのワッシュリバー発電所で1995年から¹⁰⁾、同タンパ発電所で1996年から¹¹⁾商用機の運転を開始している。いずれも酸素吹きガス化方式を採用している。一方、わが国では、空気吹き噴流床石炭ガス化複合発電について、1986年から福島県勿来にて200トン/日パイロットプラントによるシステム検証試験が実施された。

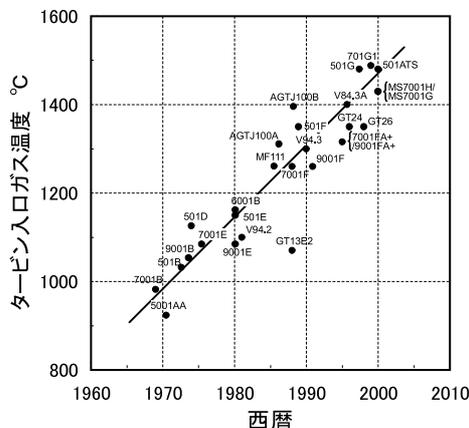
また、発電プラントの立地条件および燃料多様化の観点から、低品位炭や残査油およびバイオマスを原料に用いたIGCCの

開発も実施されている。バイオマスを原料に用いたIGCCは1980年代初頭から注目され始め、酸素吹きガス化技術について開発がなされ¹²⁾、現在は商用機レベルの検討が進められている¹³⁾。さらに、新種燃料としてオリマルジョンTM (オリコタールをエマルジョン化した燃料) を原料とした酸素吹きガス化技術についても検討がなされている¹⁴⁾。

わが国の空気吹きIGCCの場合を除き、現在、実証機および商用機開発の段階にある酸素吹きガス化複合発電システムでは、酸素製造プラントにて空気から分離製造されるN₂を中カロリー燃料に予混合し、低カロリー燃料として燃焼器に供給することにより、酸素製造プラントで消費された所内動力の一部をタービンで回収するとともに、ガスタービンのNO_x排出量低減が図られている。

石炭ガス化低カロリー燃料の基礎的な燃焼特性を検討した研究としては、CH₄およびH₂をN₂、ArあるいはHeで希釈した混合ガスの安定燃焼限界を調べた研究¹⁵⁾、燃焼速度に及ぼすN₂の影響についての検討¹⁶⁾、可燃範囲に及ぼすN₂およびCO₂の影響についての検討^{17,18)}、低カロリー燃料の燃焼特性に関する検討^{19,20)}、Whiteら²¹⁾によるrich-lean燃焼に関する基礎検討などがある。また、佐藤らにより、NH₃を含む石炭ガス化低カロリー燃料を対象に、フュエルNO_xの生成特性とその抑制法について小型拡散バーナを用いた燃焼実験と反応動力学解析による検討²²⁻²⁵⁾も行われている。しかしながら、前節「1.2 開発の背景」で説明したように、ガス化燃料はガス化方式により燃料組成および発熱量が異なり、また、サーマルNO_x、フュエルNO_xのいずれかを主体に低減するかにより必要となる燃焼方式が異なる。これらの各種ガス化燃料の燃焼特性は、燃料組成によっても異なる。

ガスタービンではこれまでに、タービン入口ガス温度の高温化による高効率化が図られてきた。図3に発電用ガスタービン



(図中の記号はガスタービンのメーカー型番を示す)

Fig.3 Transition of turbine inlet temperature of gas turbine combustor for electric power generation

Table 2 Subjects for combustors of various gasified fuels

		ガス精製方式	
		湿式	乾式
ガス化剤	空気	低カロリー燃料の安定燃焼	低カロリー燃料の安定燃焼とフュエルNO _x の抑制
	酸素	中カロリー燃料燃焼時のサーマルNO _x の低減	サーマルNO _x とフュエルNO _x の同時低減

の高温化の変遷を示すように、この30年間に約20℃ (20K) / 年の割合で高温化が図られてきた。これにより、ガスタービンによる複合発電プラントの熱効率は、図4に示すように30年間で約15%も上昇している。現在、わが国では東北電力(株)東新潟火力発電所4号系列に初めて1450℃ (1723K) 級天然ガス焼きガスタービン複合発電プラントが導入され、送電端熱効率として50% (HHV基準) を越えるガスタービン発電が実用化された。IGCC用ガスタービンに関しては、これまでに、乾式ガス精製を採用する空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料用1300℃ (1573K) 級ガスタービン低NO_x燃焼器が開発されている²⁶⁻²⁹⁾。今後のさらなる導入が期待されるガス化複合発電においても、ガスタービンの一層の高温化によるプラント熱効率の向上とガスタービンの低NO_x化は重要な課題となる。

一方、酸素吹き石炭ガス化方式による複合発電システムでは、ガス化炉から生成される中カロリー燃料の火炎温度が高く、サーマルNO_x排出濃度が増加する。また、中カロリー燃料の発熱量は石炭のガス化炉への搬送方式により異なり、微粉炭の窒素搬送を採用した場合は、水スラリー搬送の場合よりも発熱量が上昇するなどの特徴を持つ。各種酸素吹きIGCCに関する主な開発計画では、ガス化剤である酸素の製造過程で空気から分離製造される窒素(プラント余剰N₂)を中カロリー燃料に予混合して、低カロリー燃料として燃焼器に供給することにより、酸素製造プラントで消費される所内動力の一部を回収するとともに、サーマルNO_x排出量の低減が図られている³⁰⁾。しかしながら、中カロリー燃料にプラント余剰N₂を注入する方式では、N₂の昇圧動力が増加し、プラント熱効率(送電端)を低下させるため、その動力をできるだけ低減できるN₂供給法による低NO_x燃焼技術の開発が重要となる。

酸素吹きガス化中カロリー燃料を対象としたガスタービン燃焼器に関する研究としては、プラント余剰N₂を中カロリー燃料に混合する代わりに燃焼用空気へ噴射混合して燃焼器に供給す

る手法や、中カロリー燃料をN₂の代わりにCO₂または水蒸気で希釈することにより発熱量を低下させるCookら³¹⁾による研究、中カロリー燃料の予混合燃焼特性について基礎燃焼実験により調べた研究³²⁾、さらには、モデル燃焼器を用いた検討^{33, 34)}などがある。また、Döbblingらによる、Alstom社製の二重コンバーナ(通称、EVバーナ)を用いた中カロリー燃料と燃焼用空気の急速混合による低NO_x燃焼技術に関する検討³⁵⁾や、ZanelloとTasselli³⁶⁾による中カロリー燃料中の水蒸気成分が燃焼特性に及ぼす影響に関する研究など、発電用および産業用ガスタービンを対象とした研究^{37, 38)}が実施されている。

以上の研究は、いずれもN₂を圧力の高い燃料に注入するか、または燃焼用空気に予混合して燃焼器に供給する方法を前提としており、一方でN₂を燃焼器に直接供給してNO_x排出量の低減を図ることができれば、N₂の昇圧動力を最も低減でき、プラント熱効率(送電端)の向上が期待できる。このことから、酸素吹き石炭ガス化複合発電では、所内動力の低減および環境保全向上の観点から、プラントシステムを考慮した中カロリー燃料の低NO_x燃焼技術の開発が重要となる。

また、酸素吹きガス化複合発電では、現在、ほとんどのプラントでガス精製に湿式法が採用されているが、より一層のプラント熱効率の向上およびシステムの簡素化による発電コスト低減のためには乾式ガス精製の採用が不可欠であり、この際、ガス化燃料中のNH₃は除去されずにガスタービン燃焼器に供給され、フュエルNO_xの生成源となる。このため、乾式ガス精製を採用する酸素吹きガス化中カロリー燃料用ガスタービン燃焼器においては、サーマルNO_xのみならず、燃料中NH₃に起因するフュエルNO_xを同時に低減する燃焼技術の確立が重要な課題となる。

以上の技術課題について前1.2節の表2に概略を整理した。

1.4 高炉ガス焼きガスタービンの高性能化

図5は高炉ガス(BFG)およびコークス炉ガス(COG)の汽力発電における燃料消費量の推移をLNG(天然ガスを含む)の場合と比較して示す。1970年からLNGの需要が急増し2000年には電気事業における総発電量の26%を担っており(図2)、高炉ガスおよびコークス炉ガス等の副生ガスは熱量にしてLNGの場合の約1/10相当が発電に利用されている。副生ガスの汽力発電での需要は1980年以降はほぼ横ばい傾向を示しており、わが国の電源構成において一定量の電力を供給していることがわかる。すなわち、高炉ガスによる発電技術の向上は、その他の火力発電および原子力発電技術の場合と同様に電源構成上重要な意味を持つ。表1に示すように、高炉ガスは高位発熱量が約3MJ/m³と低く、また可燃性成分のほとんどがCOであり、しかもCO₂を20%も含むことから火炎

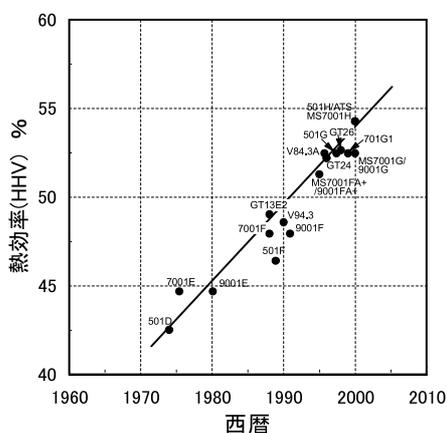


Fig.4 Transition of thermal efficiency of gas turbine combined cycle power plant

温度が低く、燃焼安定性の確保が課題となる。そこで、コークス炉ガスを一部混合して燃料発熱量を約4 MJ/m³に上昇させて1300℃ (1573K) 級ガスタービンに供給し、発電に利用されている。

一方、ガス化複合発電システムでは空気または酸素にて原料である石炭や重油等をガス化し、それぞれ低カロリー燃料および中カロリー燃料を発生し、ガスタービンにて発電し、さらに排熱回収ボイラにより蒸気サイクル発電をする複合サイクルを構成している。高炉ガスおよび各種ガス化燃料はいずれも表1に示すようにCO、H₂、CH₄等を主要な可燃性成分とし、その成分割合は高炉ガスでは燃料発熱量調整を目的としたコークス炉ガスの混合割合により、ガス化燃料では各種ガス化システムの方式により様々に異なる。例えば表1に示す高炉ガスに、発熱量調整を目的として10%のコークス炉ガスを混合したとすると燃料組成はCO 18.6%、H₂ 5.6%、CH₄ 3.0%、CO₂ 18%、その他主にN₂で、高位発熱量4.4 MJ/m³の低カロリー燃料となる。この様に、高炉ガス焼きガスタービンとガス化燃料用ガスタービンでは燃料組成の他、燃料中の煤塵などの技術課題について共通する項目が多い。現在、高炉ガス焼きガスタービン技術を適用し、ガス化燃料用ガスタービンとして1150℃ (1423K) 級ガスタービンが商用機として導入されているが、最新型LNG焼き高温ガスタービンである1500℃ (1773K) 級ガスタービン技術を導入できれば大幅な高効率化と単機出力の大容量化が期待できる。以下では、電気事業にて実施してきた各種ガス化ガス燃料用1500℃ (1773K) 級ガスタービン燃焼器の技術開発の課題およびその概要について説明し、ガスタービン燃焼器へ供給する燃料組成の相違が燃焼特性に及ぼす影響について解説するとともに、ここで培われた技術を高炉ガス焼きガスタービンの燃料多様化および高温化による高効率化のために適用する際の適正化について言及する。

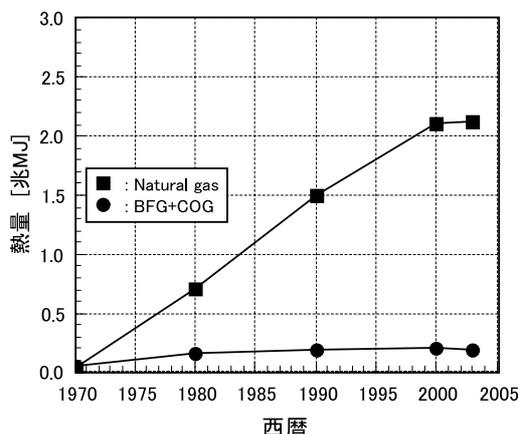


Fig.5 Transition of fuel consumption for electric power plant

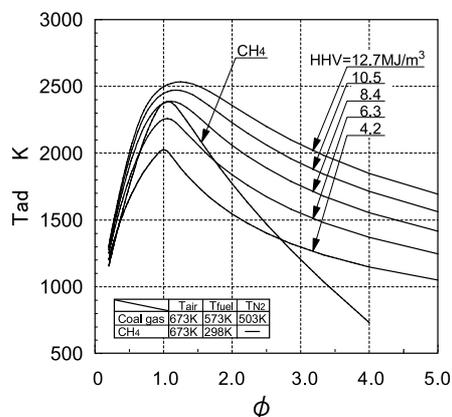
2 各種ガス化燃料および高炉ガスの基礎燃焼特性

2.1 理論断熱火炎温度特性

表1に示すように各種ガス化燃料の組成および発熱量はガス化方式により異なり、一方高炉ガス組成は還元剤の多様化に伴い、またコークス炉ガスの混合割合により多様化してくることが予想される。

図6は、CO/H₂モル比率を2.33で一定とし、N₂混合割合を変化させて燃料発熱量HHVを変化させた場合の理論断熱火炎温度T_{ad}をLNGの主成分であるCH₄の場合と比較したものである。横軸は燃料と空気の混合比から計算される当量比φ条件を示している。CH₄の場合、最高火炎温度は燃料と空気の比率を示す指標である当量比φが1.05の時に約2400Kであるのに比較して、HHV=4.2 MJ/m³の低カロリー燃料の場合には不燃性成分を多く含むため火炎温度が低く、LNG等の高カロリー燃料の場合に比較して燃焼安定性の確保が重要となる。ただし、高炉ガス焼きガスタービンでは表1に示す高炉ガスに発熱量の高いコークス炉ガスを一部添加して燃料発熱量を約4 MJ/m³に調整して運転しており、コークス炉ガスの混合割合により燃料発熱量を調整することが可能である。一方で、ガス化燃料の組成がガス化剤およびガス化方式で異なる様に、高炉ガスにおいても鉄鉱石の還元剤として廃棄プラスチック等を一部用いることによりガスタービンに供給する燃料組成も異なってくると予想される。この際、燃料中の主要な可燃性成分であるCOとH₂の含有量比率が変化することが予想され、理論断熱火炎温度T_{ad}に及ぼす影響について調べた。

図7は、燃料発熱量HHVを4.2 MJ/m³で一定とした場合の、当量比φと理論断熱火炎温度T_{ad}の関係についてCO/H₂モル比率をパラメータとして示す。CO/H₂モル比率が高い場合



T_{air}, T_{fuel}, T_{N₂}: 供給する空気, 燃料, 窒素の温度 K

Fig.6 Influence of fuel calorific value on relation between equivalence ratio and adiabatic flame temperatures of gasified fuels in comparison with that of CH₄ depending on equivalence ratio

ほど理論断熱火炎温度 T_{ad} が高くなる傾向を示すものの、その温度差はCO/H₂モル比率2.33と0.43の場合で約30K(量論混合比条件： $\phi = 1$)と小さい。このことから空気中の窒素分が酸化して生成されるサーマルNO_x生成量は燃料成分中のCO/H₂比率にほとんど影響を受けないことがわかる。

2.2 サーマルNO_xの生成特性

空気中のN₂分が高温燃焼ガス中で酸化して生成されるサーマルNO_xの生成量は燃焼ガス温度に影響される。図7に示したように理論断熱火炎温度に及ぼすCO/H₂モル比率の影響は小さいことから、燃料中CO/H₂モル比率がサーマルNO_x生成特性に及ぼす影響も小さいものと予想される。一方で、図6に示したように火炎温度は燃料発熱量により影響され、サーマルNO_x生成特性に影響すると予想される。そのため、ガスタービン燃料器におけるサーマルNO_xの基本的な生成特性を把握するため、図8に示す小型バーナを用いた燃焼実験を実

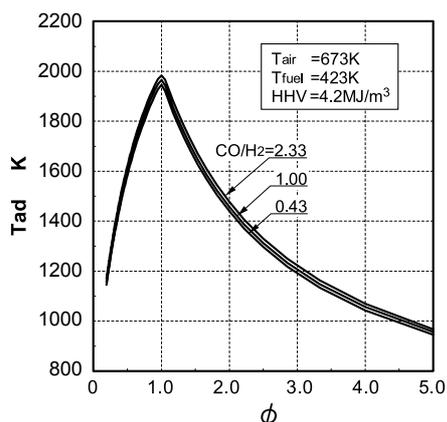
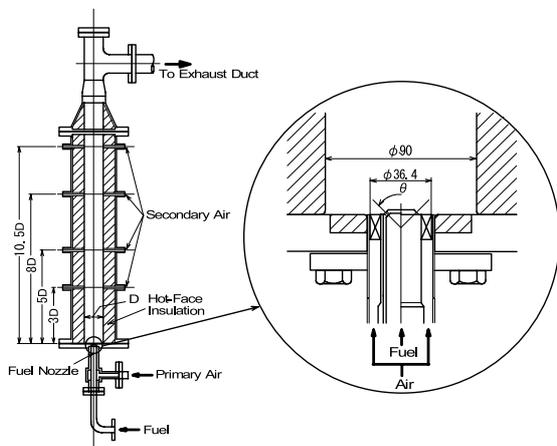


Fig.7 Influence of CO/H₂ mole ratio on relation between equivalence ratio and adiabatic flame temperatures of gasified fuels



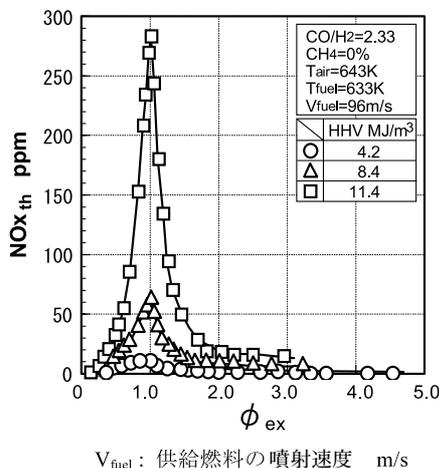
D : 小型燃焼実験装置の燃焼室内径 ($\phi = 90\text{mm}$)
 θ : 小型バーナの燃料噴口角度 degree

Fig.8 Basic experimental device and small diffusion burner

施した。

図9は燃焼器出口における平均当量比 ϕ_{ex} とサーマルNO_x生成濃度のO₂濃度16%換算値(NO_{x,th})の関係について燃料の高位発熱量HHVをパラメータとして示す。実験では、燃料中にCH₄を含まず、可燃性成分であるCOとH₂のモル比率を2.33で一定とする条件下で、N₂の混合割合を変化させて燃料発熱量を変化させた。図9において、サーマルNO_x生成濃度は燃料発熱量の増加に伴い増大することがわかる。燃料発熱量が4.2 MJ/m³と低カロリーの場合には、当量比が0.1~3.0の領域でNO_x生成濃度が10ppm以下であるのに対して、発熱量が11.4 MJ/m³の場合には最大で約280ppm生成している。これまでに実用化された高炉ガス焼きガスタービンでは、燃料発熱量は約4 MJ/m³と低く、またガスタービン燃焼器出口ガス温度も1150℃(1423K)レベルと低いとため、拡散燃焼を採用してもサーマルNO_x排出濃度(O₂濃度16%換算値)は25ppm程度に抑制している。特に、最新の改良型1300℃級高炉ガス焼きガスタービンではサーマルNO_x排出濃度を20ppm以下に抑制している。しかしながら、今後の高炉ガス焼きガスタービンの更なる高温化による高効率化を図る場合には一層の低NO_x燃焼が重要になる。また、鉄鉱石の還元剤として廃棄プラスチック等が一部利用される状況下においては多様な特性のプラスチックが混入することが予想され、NO_x生成源となるフェルN分が燃料中に含まれる可能性も否定できない。そこで、フェルNO_xの抑制に効果が期待される還元二段燃焼法について、サーマルNO_x生成特性を調べた。

図10は燃焼器出口ガス温度 T_{ex} を1500℃(1773K)で一定となるように燃料発熱量毎に燃焼器出口における当量比 ϕ_{ex} を設定し、一次燃焼領域の当量比 ϕ_p を変化させた二段燃焼時のサーマルNO_x生成濃度のO₂濃度16%換算値(NO_{x,th})について燃料発熱量HHVをパラメータとして示す。発熱量が高



V_{fuel} : 供給燃料の噴射速度 m/s

Fig.9 Influence of fuel calorific value on relation between equivalence ratio and thermal NO_x emissions

いほど ϕ_p が1近傍のNOx濃度が高いが、 ϕ_p を1以上とし、一次燃焼領域を燃料過濃条件とする還元二段燃焼法を採用することにより、燃焼器出口におけるサーマルNOx排出濃度の低減化が可能であることがわかる。また、図10はサーマルNOxをより効果的に低減するには、還元一次当量比 ϕ_p 条件を燃料発熱量に応じて調整することが重要であることも示している。

2.3 フュエルNOxの生成特性

還元二段燃焼法を効果的には適用するには燃料組成に応じて適正化する必要がある。表1に示すように、各種ガス化方式により製造されたガス化燃料中にはフュエルN分としてNH₃を数百~数千ppm含む。これまで、高炉ガスおよびコークス炉ガス中にはNH₃は含まれていないと考えられているが、還元剤として様々な機能性樹脂類を含む廃棄プラスチックを用いる際にはNH基を持つ物質が含まれる可能性を否定できない。燃料中にNH₃を僅か0.1% (1000ppm) 含むとした場合、全てNOx (以下、フュエルNOxと呼ぶ) に酸化されると仮定すると約150ppm (O₂濃度16%換算値) 生成する。すなわち、ガスタービンの高温化による高効率化および各種ガス化燃料や高炉ガスの組成の変化への対応が必要とされる昨今、サーマルNOxと同時にフュエルNOxを効果的に低減する燃焼技術の開発は重要になることが予想される。以下では、還元二段燃焼法によるフュエルNOx低減効果に及ぼす燃料組成の影響について図8に示す小型バーナを用いた燃焼実験により考察する。

図11は、燃料発熱量HHVを4.4 MJ/m³で一定とする条件下で、燃焼器出口当量比 ϕ_{ex} を0.44とする二段燃焼時における一次当量比 ϕ_p と燃料中のNH₃からNOxへの転換率C.R.の関係を、燃料中にCH₄を含む場合と含まない場合とで、CO/H₂モル比率をパラメータにして示す。ここで、転換率C.R.

は、燃料中にNH₃を含む条件および含まない条件で全NOx排出濃度 ([NOx])、サーマルNOx排出濃度 ([NOx_{th}]) をそれぞれ計測して、その差から求めている。CH₄を含まない条件では、一次当量比 ϕ_p を1以上の燃料過剰条件とすることで転換率C.R.を大幅に低減し、フュエルNOxを抑制できることがわかる。また、一次当量比 ϕ_p が1以下の空気過剰条件でCO/H₂モル比率の影響が顕著であり、CO/H₂モル比率が高い方が高い転換率を示した。一方、燃料中にCH₄を2.7vol%含む場合、一次当量比 ϕ_p が0.44から約2.5の範囲においてNH₃からNOxへの転換率に及ぼすCO/H₂モル比率の影響は顕著ではなかった。

燃料中にCH₄を含まない場合に、CO/H₂モル比率の影響が顕著であったのは、COの酸化反応がH₂と比較して遅いため、CO/H₂モル比率が大きい場合に残存O₂の多い領域でNH₃の分解に伴うNOxの生成が行われることによると考えられる。一方、燃料中にCH₄が含まれる場合は、CH₄の分解に伴い生成するCHiがNH₃の分解に関与し、火炎帯近傍で急速にHCN、NH_iなどを生成するため、CO/H₂モル比率の影響が見られなかったものと思われる。

炭化水素系燃料 (CH₄など) と非炭化水素系燃料 (CO、H₂など) では、燃料中N分に起因するフュエルNOxの生成機構が異なることが知られており³⁹⁻⁴²⁾、図11に示したように、CO、H₂、CH₄等の混合ガス化燃料においても燃料中のCH₄の有無によりフュエルNOx生成特性が異なることがわかった。このことから、COとH₂を主要可燃性成分とするガス燃料中の微量のCH₄が、二段燃焼時におけるフュエルNOxの生成特性に及ぼす影響について検討した。

図12は、燃料発熱量4.4 MJ/m³、燃料中NH₃濃度1000ppm、CO/H₂モル比率2.33で一定とする条件において、燃焼器出口当量比 ϕ_{ex} を0.44とする二段燃焼時の一次当量比 ϕ_p と燃料中のNH₃からNOxへの転換率C.R.の関係を燃料中

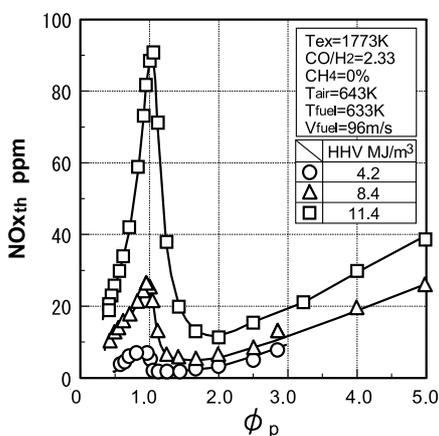


Fig.10 Influence of fuel calorific value on relation between the primary-equivalence ratio and thermal NOx emissions in two-stage combustion

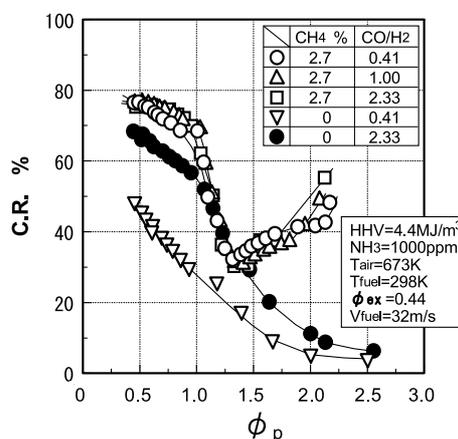


Fig.11 Influence of CO/H₂ mole ratio and CH₄ concentration on conversion rate of NH₃ to NOx in two-stage combustion

のCH₄濃度をパラメータとして示したものである。図12において、一次当量比 ϕ_p が1以下の範囲では、燃料中のCH₄濃度が高いほど転換率C.R.は高い値を示した。また、一次当量比 ϕ_p が1以上の燃料過濃条件では、燃料中にCH₄を含まない場合は、一次当量比 ϕ_p の上昇に伴って転換率は単純に低下する。一方でCH₄を含む場合は、転換率を最低とする最適一次当量比 ϕ_p^* が存在し、しかも ϕ_p^* は燃料中のCH₄濃度によって変化し、CH₄濃度が高いほど ϕ_p^* は低下し、量論混合比に近づく。このことから、燃料中にCH₄を含む燃料を用いる燃焼器にフュエルNO_xを抑制するために二段燃焼法を採用する場合、燃料中のNH₃からNO_xへの転換率を最低とする一次当量比 ϕ_p^* を、燃料中のCH₄濃度に対応して決定することが重要になると考えられる。

次に、燃料発熱量が高い場合について燃料中CH₄濃度が燃料中NH₃からNO_xへの転換率C.R.に及ぼす影響について実験により調べた結果を示す。図13は、燃料発熱量HHV=11.4 MJ/m³の場合について、燃料中NH₃濃度1000ppm、

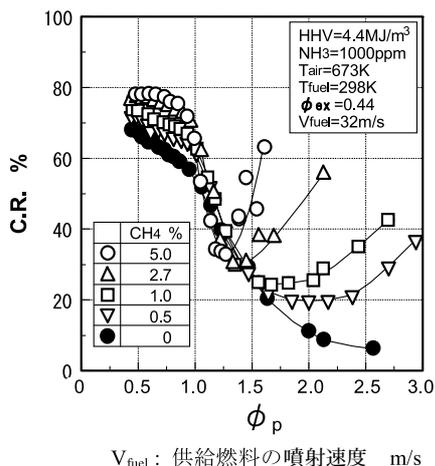


Fig.12 Influence of the CH₄ concentration on conversion rate of NH₃ to NO_x in two-stage combustion

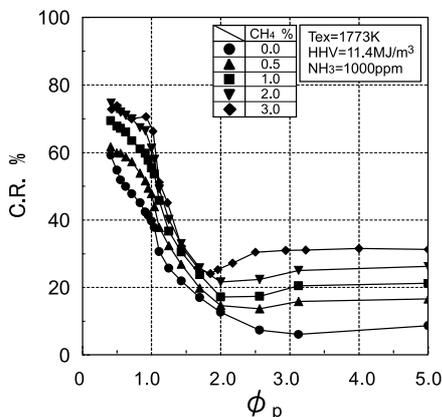


Fig.13 Influence of the CH₄ concentration on conversion rate of NH₃ to NO_x in two-stage combustion of medium-Btu fuels

CO/H₂モル比率を2.33で一定とする条件下で、燃焼器出口での平均ガス温度T_{ex}を1773K (1500℃) で一定とする二段燃焼時における一次当量比 ϕ_p と燃料中NH₃からNO_xへの転換率C.R.の係に及ぼす燃料中のCH₄濃度の影響について示している。CO, H₂, CH₄を可燃性成分とする混合ガス燃料において、N₂による希釈割合の低下により発熱量の高くなった場合でも、低カロリー燃料の場合と同様な傾向を示している。すなわち、燃料中にCH₄を含まない場合は一次燃焼領域の平均当量比 ϕ_p が約3までは ϕ_p の上昇に伴い転換率C.R.は低下する傾向を示した。一方、燃料中にCH₄を含む場合には、転換率C.R.を極小とする最適一次当量比 ϕ_p^* が存在し、しかも燃料中CH₄濃度の増加に伴い転換率を極小とする最適一次当量比 ϕ_p^* が低下するとともに、転換率の極小値が上昇する傾向を示した。ただし、図12に示す低カロリー燃料の場合と異なり、一次当量比 ϕ_p が3以上に上昇した場合、いずれの燃料中CH₄濃度の場合においてもほぼ一定の転換率を示した。

以上の様に、CO, H₂, CH₄を可燃性成分とする混合ガス燃料において、一次当量比を1以上の燃料過剰条件とすることでフュエルNO_xの生成要因であるフュエルN分の転換率を大幅に低減するとともに、サーマルNO_xの抑制にも有効であることがわかる。また、サーマルNO_xおよびフュエルNO_xを最も低減する最適一次当量比が存在し、その値は燃料発熱量毎に燃料中CH₄濃度に応じて設定することが重要であることがわかった。

3 ガスタービン燃焼器技術

前章では、CO, H₂, CH₄を可燃性成分とする混合ガス燃料において、高温ガスタービン燃焼技術開発に際して課題となる項目について基礎的に検討してきた。これらの知見を基に150 MW ~ 300 MW 級多缶型ガスタービンの実規模燃焼器1缶を製作し、模擬燃料を用いた燃焼器試験を実施した。本章では空気吹きガス化低カロリー燃料を対象に製作した燃焼器およびその試験結果について一例を示すと同時に、次の第4章の「結言」にて表2で4つに分類した各種燃料について検討した燃焼器技術の現時点で達成できる性能レベルを記す。

3.1 石炭ガス化低カロリー燃料用1773K (1500℃) 級燃焼器の開発

(1) 技術課題

表1に示すように空気吹きガス化低カロリー燃料は可燃性成分を約3割しか含まないため火炎温度は低く、LNG等の高カロリー燃料の場合に比較して燃焼安定性の確保が重要となる。また、乾式ガス精製を採用した場合には燃料中のNH₃は除去されずフュエルNO_xを排出する。さらに、より一層のプラント

熱効率向上を目的としてガスタービンの高温化を図る場合、燃料供給量に対する相対空気量が減少、すなわち空気比が低下（当量比は上昇）し、冷却空気量比率が減少する。例えば、1773K級燃焼器における空気比は、1573K（1300℃）級燃焼器の場合の約70％に低下する（当量比は1.4倍に上昇）。したがって、燃焼器の高温化に伴い燃焼器壁面の冷却を強化する必要があるにもかかわらず、冷却空気量比率が低下するため、壁面冷却技術の高性能化を図る必要がある。

以上のことから、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料用1773K級ガスタービン燃焼器の開発に際して、以下の課題を考慮した設計が必要となる。

- ① 保炎性能の向上
- ② フュエルNO_x低減燃焼技術
- ③ 壁面冷却技術の高性能化

(2) 開発した燃焼器の特徴

空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料を対象に開発した1773K級燃焼器の特徴とバーナの外観をそれぞれ図14、15に示す。本燃焼器は多缶型燃焼器の一缶に相当し、以下の特徴を有する。

- ① 部分負荷時における燃焼安定性を確保するために燃焼器入口部に副燃焼室を設け、常に安定した火炎を形成させることにより、保炎性能の向上を図った。
- ② 燃料中のNH₃に起因して生成するフュエルNO_xを抑制するために二段燃焼法を導入し、一次燃焼領域の当量比については別途実施した小型バーナによる実験結果から1.6に設定した。
- ③ 高温化に伴い燃焼器出口当量比は上昇し、燃料に対する相対空気量が低下するため、希釈空気口を削除するとともに、

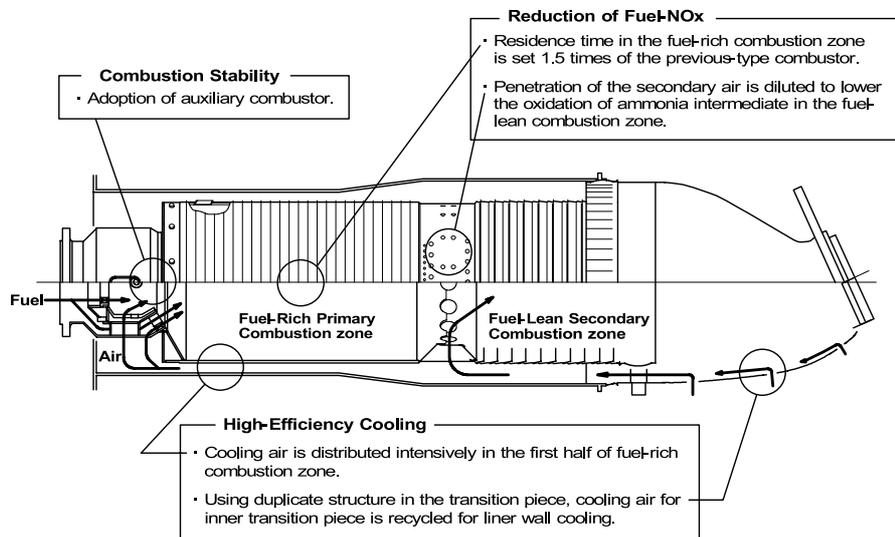


Fig.14 Concepts of 1773K-class low-Btu fueled combustor



Fig.15 Tested burner

尾筒を二重構造にして尾筒の冷却空気を燃焼器ライナ壁面冷却に再利用する構造とした。

(3) 燃焼試験設備

図16は、試作した燃焼器の燃焼試験に用いた試験設備の概要を示す。本設備では、LPGをCO₂と水蒸気とともに改質した後、水素分離膜によってCO/H₂モル比を調整し、N₂を添加して燃料発熱量を調整する。また、必要に応じてNH₃を添加して模擬ガス化燃料を製造する。燃焼器については、150～300 MW級実サイズ燃焼器一缶の常圧燃焼試験と、その1/2サイズの燃焼器の高圧燃焼試験（1.6 MPa）が実施できる。

(4) 燃焼試験結果

実サイズの燃焼器を用いた常圧燃焼試験とその1/2サイズの燃焼器を用いた高圧燃焼試験を実施し、燃焼器性能を評価した。以下では、ガスタービンの運用条件を想定した燃焼試験により燃焼器性能を検証した結果例を述べる。

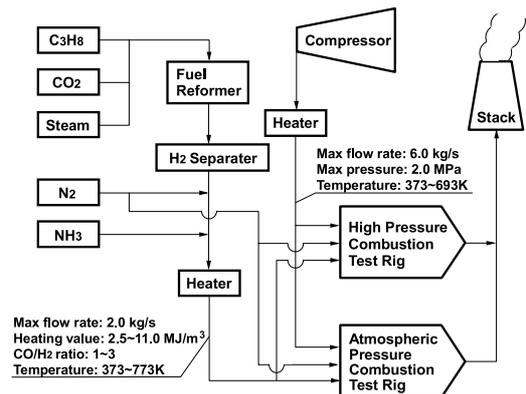


Fig.16 Schematic diagram of experimental facility

図17は、燃焼器出口ガス温度 T_{ex} を1773Kで一定とする条件下で、燃料発熱量 $HHV = 4.2 \text{ MJ/m}^3$ の低カロリー燃料中に NH_3 を含まない場合におけるサーマル NO_x 排出濃度の圧力特性を示す。サーマル NO_x 排出濃度は燃焼器内圧力 P の上昇に伴い増加するものの、圧力1.4 MPaの定格条件の下でも約6ppm (O_2 濃度16%換算値)に抑制でき、良好な性能を示した。現在導入されている高温改良型高炉ガス焼き1573K (1300℃) 級ガスタービンでは、サーマル NO_x 排出濃度は燃焼器出口で20ppm (O_2 濃度16%換算値) 以下に抑制されているが、本技術の適用により約200℃の高温化を図りつつも脱硝設備を必要としないレベルまで NO_x 排出濃度の低減が期待できる。

燃料組成はガス化条件や、高炉ガスの場合には還元剤の種類やコークス炉ガスとの混合割合によって組成割合が異なる。また、ガス化燃料の場合は乾式ガス精製方式を採用することにより燃料中のフュエルN分である NH_3 を含み、高炉ガスについては機能性樹脂類を含む廃棄プラスチックを還元剤として利用することによりフュエルN分を含む可能性も否定できない。この場合、前章で検討した様に還元二段燃焼法等を適用しサーマル NO_x と同時にフュエル NO_x を低減する必要がある。

図18は、燃料中に CH_4 および NH_3 がそれぞれ1%、1000ppm含まれるとした場合の、ガスタービン負荷と燃料中 NH_3 から NO_x への転換率C.R.および燃焼効率 η の関係を示す。ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%以上の条件では、転換率は40% (NO_x 排出濃度 (O_2 濃度16%換算値)は60ppm) 以下、燃焼効率はほぼ100%を達成できた。特に、転換率については、図12に示したように、燃料中 CH_4 濃度に応じて燃焼器空気配分を適正化することが重要であり、かつ、 CH_4 濃度に応じて転換率も異なる。また、無負荷相当条件における低 NO_x ・安定燃焼も確保している。

図19は、燃焼器出口ガス温度 T_{ex} が1773Kとなる条件下での、フュエルN分として燃料中の NH_3 濃度とその転換率C.R.

および NO_x 排出濃度の関係を示す。一般に、フュエルN分の増加に伴い転換率は低下することが知られているが、 CO 、 H_2 、 CH_4 等の混合ガス燃料についても燃料中 NH_3 濃度の増加に伴い NO_x 生成濃度は増加し、転換率は低下する傾向を示した。

以上、開発したガス化低カロリー燃料用1773K級燃焼器は、無負荷条件を含むガスタービンの全負荷帯で安定、かつ低 NO_x 燃焼が可能であり、1773K級燃焼器として優れた性能を示した。

4 結言

電気事業にて開発を進めてきた各種ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の性能を表3にまとめて示す。空気中の窒素が酸化して排出されるサーマル NO_x 排出量は、最新鋭のLNG 焼き1500℃ (1773K) 級ガスタービン燃焼器と同等以上の性能を示している。また、製鉄所内の所内動力用として実用化されている高温改良型高炉ガス焼き1573K (1300℃) 級ガスタービンでは、サーマル NO_x 排出濃度は燃焼器出口で20ppm (O_2 濃度16%換算値) 以下に抑制されているが、電気事業にて開発し

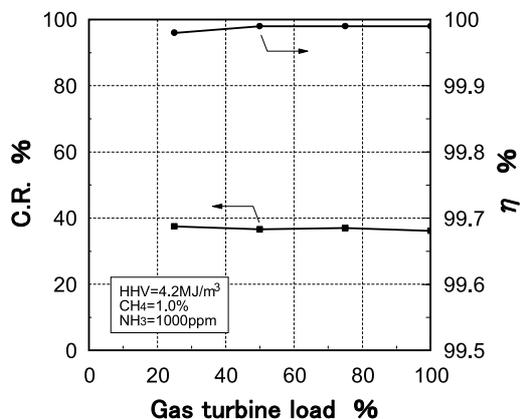


Fig.18 Combustion emission characteristics

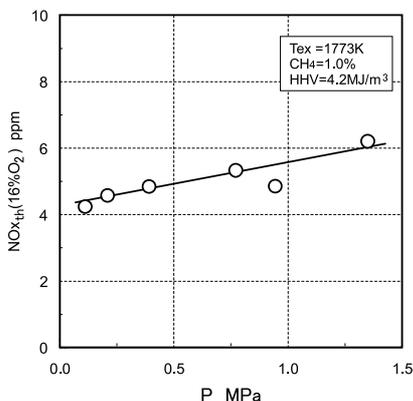


Fig.17 Influence of pressure inside combustor on thermal NO_x emission characteristics at rated load condition

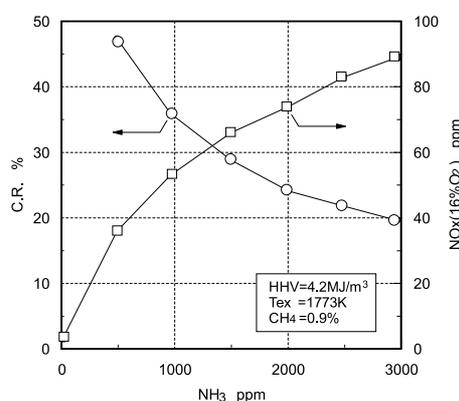


Fig.19 Influence of the NH_3 concentration on NO_x emission characteristics

Table 3 Performances of gasified fueled combustors

		ガス精製方式	
		湿式	乾式
ガス 化 剤	空 気	・高炉ガスで実績有り ・サーマル NOx : 20ppm 以下 (1573K 級燃焼器)	・1773K級燃焼器 ・NOx排出濃度:60ppm以下 ・サーマルNOx: 8ppm以下 ・P.F.(定格条件): 8%
	酸 素	・1573K 級燃焼器 ・サーマル NOx:11ppm 以下 ・P.F.(定格条件):10~13%	・1773K 級燃焼器 ・NOx 排出濃度:34ppm 以下 ・サーマル NOx: 8ppm 以下 ・P.F.(定格条件)は7%

注) P.F.: ガスタービン燃焼器出口ガス温度偏差

てきたガス化燃料用ガスタービン燃焼器技術を応用することにより約200℃の高温化を図りつつ、より一層のNOx 排出濃度の低減が期待できる。

ここで示した燃焼器技術は、CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂等から構成される燃料の組成に応じて適正化を図ることにより、幅広い組成および発熱量の燃料に適用でき、かつ、大幅なプラント熱効率向上が期待できる。また、RPF (Refuse paper and plastic fuel) 等ゴミの再資源化の問題が重要な昨今にあって、鉄鋼業界においても還元剤として使用済みプラスチック等の一部使用が試みられており、高炉ガス中にフェエルN分の問題が生じないとも限らない。今後、わが国において、より一層のCO₂ 排出量の削減が望まれることから、ガス化燃料用高温ガスタービン燃焼器技術が、高炉ガス焚きガスタービンの高温化による高効率化、および高効率化により相対的にCO₂ 排出量削減等の環境保全性向上に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) Example, T. Nakata, H. Ishikawa, T. Ninomiya and M. Sato : Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) Report, W90011, (1990)
- 2) T. Hasegawa, Y. Katsuki, Z. Xu, T. Hisamatsu and M. Sato : CRIEPI Report, W95017, (1996)
- 3) T. Hasegawa and M. Sato : CRIEPI Report, W94020, (1995)
- 4) T. Hasegawa, T. Hisamatsu, Y. Katsuki, M. Sato, Y. Iwai, A. Onoda and T. Furukawa : CRIEPI Report, W99026, (2000)
- 5) T. Hasegawa, T. Hisamatsu, Y. Katsuki, M. Sato, H. Koizumi, A. Hayashi and N. Kobayashi : CRIEPI Report, W00011, (2001)
- 6) T. Hasegawa and M. Sato : CRIEPI Report, W01005, (2002)
- 7) T. Hasegawa, T. Tamaru and M. Sato : CRIEPI Report, W01037, (2002)
- 8) J.F. Savelli and G.I. Touchton : Development of a gas

turbine combustion system for medium-Btu fuel, ASME Paper, No.85-GT-98, (1985)

- 9) W.V. Bush, D.C. Baker and P.J.A. Tijm : Shell Coal Gasification Plant (SCGP-1) Environmental Performance Results, EPRI Interim Report No. GS-7397, Project 2695-1, (1991)
- 10) M.W. Roll : The construction, startup and operation of the repowered Wabash River coal gasification project, Proc. 12th. Annual Int. Pittsburgh Coal Conference, (1995), 79.
- 11) S.D. Jenkins : Tampa electric company's polk power station IGCC project, Proc. 12th. Annual Int. Pittsburgh Coal Conference, (1995), 79.
- 12) E.G. Kelleher : Gasification fo kraft black liquor and use of the products in combined cycle cogeneration, phase 2 final report, DOE/CS/40341-T5, prepared by Champion Int'l. Co. for U.S. Dept. of Energy, Wash., D.C., (1985)
- 13) S. Consonni, E.D. Larson and N. Berglin : Black Liquor-Gasifier/Gas Turbine Cogeneration, ASME Paper, No.97-GT-273, (1997)
- 14) M. Ashizawa, T. Takahashi, M. Taki, K. Mori, S. Kanehira and K. Takeno : A Study on Orimulsion Gasification Technology, Proc. 9th Int.Conference & Exhibition for the Power Generating Industries, PennWell Corp. and Penn-Energy, Inc., Houston, 8 (1996), 235.
- 15) S. Ishizuka and H. Tsuji : Proc. 18th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., (1981), 695.
- 16) G.H. Morgan and W.R. Kane : Proc. 4th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., (1962), 313.
- 17) H.F. Coward and G.E. Jones : Flammability characteristics of combustion gases and vapors, Bulletin 627 Bureau of Mines, (1971)
- 18) Y. Ishibasi and R. Kuroda : Proc. the 6th Anual Conf. Gas Turbine Soc. Jpn., 7, (1978)
- 19) B.A. Folsom, C.W. Courtney and M.P. Heap : Trans. ASME, J. Eng. Power, 102, (1980), 459.
- 20) M.C. Drake, R.W. Pitz, S.M. Correa and M. Lapp : Proc. 20th Symp. (Int.) Combust., The Combust. Inst., (1984), 1983.
- 21) D.J. White, A.J. Kubasco, R.T. LeCren and J.J. Notardonato : Combustion Characteristics of Hydrogen-Carbon Monoxide Based Gaseous Fuels, ASME Paper, No.83-GT-142, (1983)

- 22) T. Sato, T. Nakata and K. Yamauchi : J.Fuel Soc.Jpn., 69-10, (1990), 952.
- 23) T. Nakata and M. Sato : J. Jpn. Inst. Energy, 71-1, (1991), 34.
- 24) K. Yamauchi, T. Sato and T. Nakata : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 57-535, B, (1991), 811.
- 25) T. Nakata, M. Sato and T. Hasegawa : Reaction Kinetics of Fuel NO_x Formation for Gas Turbine conditions, Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power, 120-3, (1998), 474.
- 26) M. Sato, T. Nakata, T. Yoshine and M. Yamada : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 56-530, B, (1990), 3147.
- 27) M. Sato, et al. : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 56-532, B, (1990), 3903.
- 28) M. Sato, et al. : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 57-535, B, (1991), 803.
- 29) T. Nakata, et al. : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 58-553, B, (1992), 2890.
- 30) B. Becker and B. Schetter : Trans. ASME, J Eng. Gas Turbines Power, 114, (1992), 660.
- 31) C.S. Cook, J.C. Corman and D.M. Todd : System evaluation and LBtu fuel combustion studies for IGCC power generation, ASME Paper, No.94-GT-366, (1994)
- 32) K. Döbbeling, A. Eroglu, D. Winkler, T. Sattelmayer and W. Keppel : ASME paper, No.96-GT-126, (1996)
- 33) P.W. Pillsbury, E.N.G. Cleary, P.P. Singh and R.M. Chamberlin : Trans. ASME, J Eng. Power, (1976), 88.
- 34) W.D. Clark, B.A. Folsom, W.R. Seeker and C.W. Courtney : Trans. ASME, J Eng. Power, 104, (1982), 120.
- 35) K. Döbbeling, H.P. Knöpfel, W. Polifke, D. Winkler, C. Steinbach and T. Sattelmayer, Low NO_x premixed combustion of MBtu fuels using the ABB double cone burner (EV burner), ASME Paper, No.94-GT-394, (1994)
- 36) P. Zanello and A. Tasselli : Gas Turbine Firing Medium Btu Gas from Gasification Plant, ASME Paper, No.96-GT-8, (1996)
- 37) R.A. Battista and R.A. Farrell, ASME Paper, No.79-GT-172, (1979)
- 38) K.W. Beebe, et al. : DOE/NASA/13111-11, NASA TM, 82985, (1982)
- 39) M.P. Heap, T.J. Tyson, J.E. Cichanowicz, R. Gershman, C.J. Kau, G.B. Martin and W.S. Lanier : Environmental Aspects of low BTU gas combustion, Proc. 16th Symp. (Int.) on Combust. /The Combust. Institute., (1976), 535.
- 40) T. Takagi, T. Tatsumi, M. Ogasawara and K. Tatsumi : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 44-388, (1978), 4282. (in Japanese)
- 41) K. Kato, K. Fujii, T. Kurata and K. Mori : Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 43-365, (1977), 1426. (in Japanese)
- 42) T. Takagi, M. Ogasawara, M. Daizo and T. Tatsumi : NO_x formation from nitrogen in fuel and air during turbulent diffusion combustion, Proc 16th Symp. (Int.) Combust. /The Combust. Institute., (1976), 181.

(2005年12月15日受付)