

第 5 章

5

ガスタービン燃焼器
技術の開発

第5章 ガスタービン燃焼器技術の開発 目次

横須賀研究所 研究コーディネーター 佐藤 幹夫
横須賀研究所 エネルギー機械部 長谷川武治

5 - 1 研究の背景	75
5 - 2 ガスタービン燃焼器技術	76
5 - 3 今後の展開	80
コラム：希釈用空気、サーマルNO _x とフュエルNO _x	81

佐藤 幹夫 (28ページに掲載)



長谷川武治 (平成3年入所)

これまで、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料および湿式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料を用いるガスタービン低NO_x燃焼器の技術開発に取り組み、それぞれ低カロリー燃料用1500級ガスタービン燃焼器および中カロリー燃料用ガスタービン燃焼器を開発してきた。今後は、システムの簡素化ならびにより一層の発電効率の向上を目的に、乾式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料の超高温・低NO_x燃焼技術に関する研究に取り組むと共に、あらゆる石炭ガス化方式に対応可能なガスタービン燃焼技術の確立を目指した研究に取り組む。

5 - 1 研究の背景

わが国では、現在、空気吹き噴流床石炭ガス方式による実証プラント導入に関するプロジェクトが進められている。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、既に実証プラントによる調整運転の段階にある。また、各地の立地条件により、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も進められている。

表5-1-1に各種石炭ガス化方式によるガスタービンの技術課題を示す。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）や二酸化炭素（CO₂）などの不燃性成分が占める（図5-1-1）。このため、燃料発熱量は約4.2MJ/m³（1000kcal/m³）と低く、LNG燃料の約1/10となる。また、LNG等の高カロリー燃料と異なり不燃性成分を多く含むため火炎温度が低く、燃焼器を設計する場合、供給する燃料量に対する空気量もLNGを燃料とした場合に比較して大幅に低下する。そのため、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で行う場合、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）は除去されずに燃焼器に供給され、ガスタービンの燃焼過程で窒素酸化物（フュエルNO_x、

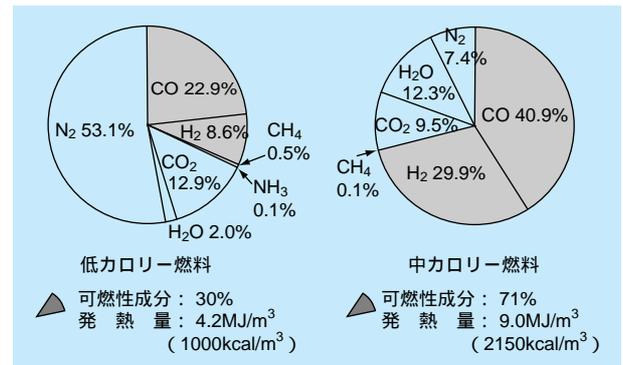


図5-1-1 石炭ガス化燃料の組成例

コラム参照）となり、排出されるNO_xの大半を占める。このため、乾式ガス精製を用いる石炭ガス化燃料用ガスタービン燃焼器では、燃料中アンモニアに起因するフュエルNO_xを低減する燃焼技術の開発が必要である。

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9～13MJ/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、空気中の窒素に起因して生成するサーマルNO_x（コラム参照）が高い濃度で排出されると予想される。

さらに、酸素吹き石炭ガス化複合発電では、現在、ほとんどのプラントで湿式ガス精製が採用されているが、より一層プラント熱効率を向上させるためには、乾式ガス精製の採用が不可欠であり、この場合、生成ガス中のアンモニアに起因して生成されるフュエルNO_xが多量に排出される。このため、乾式ガス精製を採用する酸素吹きガス化複合発電には、サーマルNO_xとフュエルNO_xを同時に低減する燃焼技術が必要となる。

当研究所では、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級⁽¹⁾および1500級低NO_x燃焼器^{(2)~(7)}の開発研究を進めると共に、湿式ガス精製による中カロリー燃料を対象に、1300級低NO_x燃焼器^{(8)~(10)}について開発を進めてきた。

表5-1-1 石炭ガス化燃料用ガスタービン燃焼技術の開発課題

		ガス化剤	
		空気	酸素
ガス精製方式	湿式	<ul style="list-style-type: none"> 低カロリー燃料 課題：燃焼安定性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 中カロリー燃料 課題：サーマルNO_x低減
	乾式	<ul style="list-style-type: none"> 低カロリー燃料 課題：フュエルNO_x低減と燃焼安定性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 中カロリー燃料 課題：サーマルNO_xとフュエルNO_xの同時低減

5 - 2 ガスタービン燃焼器技術

5 - 2 - 1 石炭ガス化低カロリー燃料用 1500 級燃焼器の開発

(1) 技術課題

図5-1-1に示すように、石炭ガス化低カロリー燃料は、LNG等の高カロリー燃料と異なり不燃性成分を多く含むため火炎温度が低い。石炭ガス化燃料とLNGの主成分であるメタン(CH₄)の理論断熱火炎温度を比較すると、CH₄の最高火炎温度は当量比^{注1)}が1.05の時に約2200であるのに比較して、本研究で対象とする石炭ガス化低カロリー燃料の場合は当量比が1.0の時に約1700と500程度低い。このため、低カロリー燃料用燃焼器では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、乾式ガス精製による空気吹き石炭ガス化燃料を用いたガスタービン燃焼器では、燃料中NH₃に起因するフュエルNO_xを低減する燃焼技術の開発が必要である。

さらに、より一層の熱効率向上を目的として、石炭ガス化低カロリー燃料用ガスタービンの高温化を図る場合、燃料量に対する空気量が低下し、冷却空気量が減少する。すなわち、1500級燃焼器で供給する総空気量は、従来の1300級燃焼器の場合の約70%と大幅に減少する。したがって、燃焼器の高温化にともな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、冷却空気量が減少するため、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、乾式ガス精製を用いる石炭ガス化低カロリー燃料用1500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。

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) フュエルNO_x低減燃焼法

乾式ガス精製を用いる石炭ガス化低カロリー燃料用ガ

注1) 一定量の空気ですべて燃焼できる燃料の何倍の燃料が投入されたかを表す量

スタービン燃焼器を開発するにあたり、燃料中のNH₃に起因して生成するフュエルNO_xの抑制が重要となる。燃料中のNH₃などの窒素分に起因するフュエルNO_xを抑制する燃焼技術として二段燃焼法(リッチ・リーン燃焼法)が知られており、石炭ガス化低カロリー燃料を用いるガスタービン燃焼器に二段燃焼法を採用した場合のフュエルNO_xの基本的な生成特性について、小型バーナを用いた燃焼実験により調べた^{①)}。その結果、石炭ガス化低カロリー燃料の場合も、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の抑制が可能であることが明らかになった。また、低カロリー燃料中にCH₄が0.5%含まれる場合、フュエルNO_xの生成を最小とする一次当量比は約1.6であることもわかった。

(3) 開発した低カロリー燃料用燃焼器の特徴

石炭ガス化低カロリー燃料を対象に開発した1500級燃焼器の概略を図5-2-1に示す。本燃焼器は、以下のような特徴を持つ。

- 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を小型バーナ実験結果から1.6に設定した。また、燃焼器構造には一次燃焼領域と二次燃焼領域を明確に分離した二室構造を採用し、二段燃焼を強化した。
- ③ 燃焼器の二次空気の混合を緩慢にし、一次燃焼領域への二次空気の巻き込みを抑えることで一次燃焼領域の燃料過濃条件を確保し、一層の低NO_x化を図った。
- ④ LNG燃料に比較して、燃料量に対する空気量が大幅に低下するため、希釈用空気(コラム参照)を削除するとともに、尾筒を二重構造にしてインピンジメント冷却とし、尾筒の冷却用空気を燃焼器壁面冷却に再利用することで、冷却空気量の不足を補った。また、副燃焼室と一次燃焼領域に、インピンジメント冷却とフィルム冷却を組み合わせた積層冷却構造を採用し、冷却効率を高めた。

上記の設計に基づいて設計、試作した150MW、1500

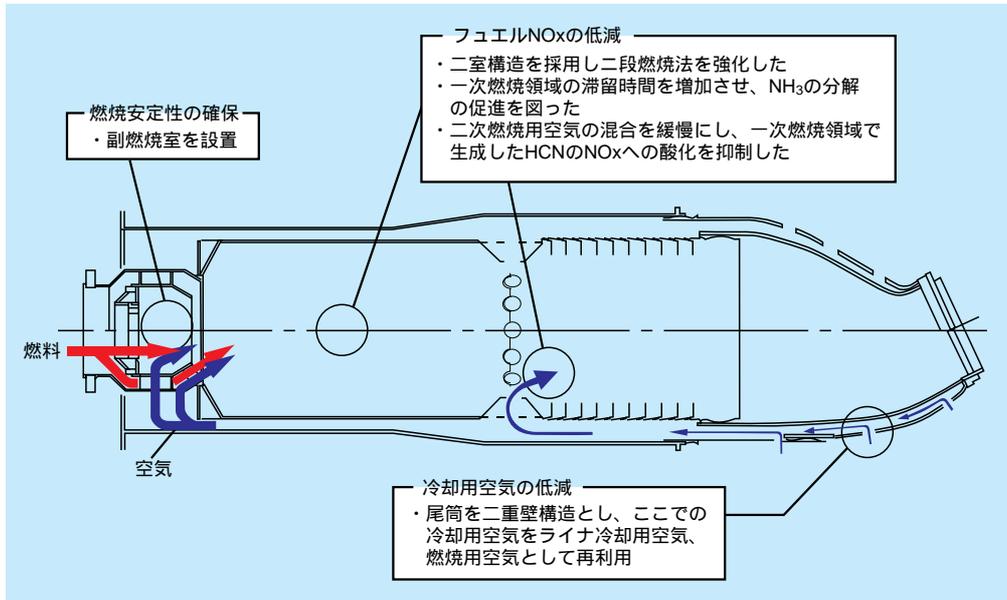


図5-2-1 低カロリー燃料用1500 級燃焼器の構造と特徴

級燃焼器の外観を図5-2-2に示す。

(4) 燃焼試験設備

図5-2-3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と水蒸気で改質した後、水素分離膜によってCO/H₂モル比を調整し、窒素を添加して燃料発熱量を調整し、また、必要に応じてNH₃を添加して模擬石炭ガス化燃料を製造する。燃焼器については、150MW級実サイズ燃焼器一缶の常圧燃焼試験と、その約1/2サイズの燃焼器の高圧燃焼試験(1.6MPa)が実施できる。

(5) 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、1/2サイズ燃焼器を用いて、IGCCの実際の運用条件を想定した燃焼試験を実施し、

燃焼器の性能を検証した結果を述べる。

図5-2-4は、燃料中にNH₃が1000ppm含まれるとした場合の、ガスタービン負荷とNO_x転換率および燃焼効率の関係を示す。石炭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、NO_x転換率は40%(16% O₂換算でNO_x排出濃度は60ppm)以下、燃焼効率はほぼ100%を達成できた。

また、燃焼器壁面温度については、最も高温となる定格相当条件においても燃焼器壁面全般にわたり材料の耐熱許容温度(850~900)以下に抑制することができた。

以上のことから、開発した石炭ガス化低カロリー燃料用1500級燃焼器は、無負荷条件を除く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、1500級燃焼器として優れた性能を示した⁽⁷⁾。

5-2-2 石炭ガス化中カロリー燃料1300級燃焼器の開発

(1) 技術課題

ガス化剤に酸素を用いる石炭ガス化中カロリー燃料は、組成の7割以上を可燃性成分が占め、燃料発熱量としては9~13MJ/m³と高く、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料と比較して2~3倍程度の発熱量となる。そのため、石炭ガス化中カロリー燃料は、低カロリー燃料と比較して火炎温度が最大で600も上昇する。また、すべ

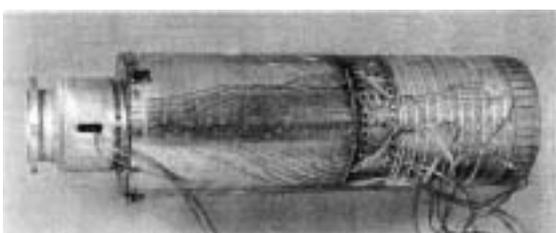


図5-2-2 低カロリー燃料用1500 級燃焼器の外観

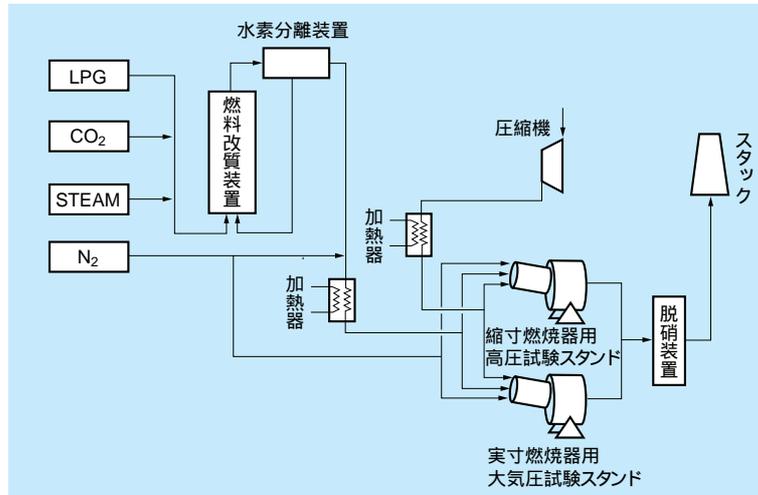


図5-2-3 試験設備系統図

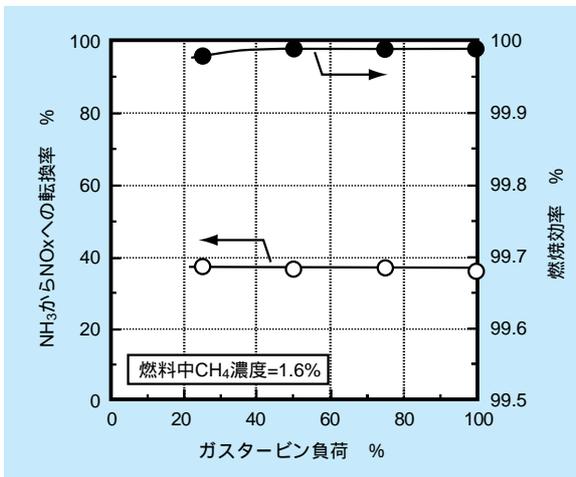


図5-2-4 低カロリー燃料用燃焼器の燃焼特性

での当量比においてLNGの主成分であるCH₄の理論断熱火炎温度を上まわり、空気中の窒素に起因するサーマルNO_xが相当量生成されるものと懸念される。そのため、従来の酸素吹きIGCCでは、酸素製造設備で生成されるプラント余剰窒素を燃料に予混合してガスタービンへ供給することにより、ガスタービンの低NO_x化が図られている。しかしながら、圧力の高い燃料に窒素を注入する場合、窒素の昇圧動力が増加し、プラント熱効率の低下を招くため、熱効率に有利な低NO_x燃焼器技術の開発が重要である。

(2) 窒素供給方式

酸素製造装置にて副成品として空気から分離製造される窒素は、ガスタービン低NO_x燃焼技術への有効利用

が可能である。窒素を低NO_x燃焼技術に利用する方法によっては、窒素の昇圧動力が異なり、プラント熱効率（送電端）に影響する。すなわち、従来の方式のように、窒素をガス化燃料に注入して、低カロリー燃料として燃焼器に供給する方式から、窒素の昇圧動力を最も低減できる、燃焼器へ直接供給する方式まで様々である。この窒素の昇圧動力がプラント熱効率に及ぼす影響について解析により検討した結果、窒素を燃焼器へ直接供給するか、または、燃焼用空気に注入して供給した場合、従来の方式に比較して、プラント熱効率（送電端）は約0.3%（絶対値）向上する⁽¹⁰⁾ことが明らかになった。そこで、窒素を燃焼器へ供給する低NO_x燃焼方式について、小型バーナを用いた燃焼実験により検討した⁽¹⁰⁾。

実験では、実際のガスタービン燃焼器における二次空気の流入を考慮した二段燃焼時におけるサーマルNO_x排出特性について、窒素を燃料または空気に混合して供給した場合、窒素を供給しない場合についての検討を行った。窒素を供給する場合、窒素はバーナから供給する燃料または空気に全量予混合して燃焼室へ供給するものとした。窒素を供給しない場合に比較して、燃料またはバーナ空気に窒素を混合して供給することによりサーマルNO_x排出濃度は大幅に低減でき、しかも、バーナ近傍の当量比を1.3以上とすることによりサーマルNO_xをさらに低減できることがわかった。このことから、窒素は燃料ノズルから供給するものとし、さらに、バーナ外周に空気噴射ノズルを設けて、燃料過剰な火炎を外周から急速に希釈する方式を採用することとした。

(3) 開発した中カロリー燃料用燃焼器の特徴

試作した中カロリー燃料用1300級燃焼器の特徴を図5-2-5に示す。バーナでは、燃料ノズルと空気ノズルの外周に窒素噴射ノズルを配置し、バーナ近傍で燃焼ガスを窒素により急速に希釈し、ガス温度を低下させると共に、部分負荷時には窒素をバイパスし、燃焼用空気に混合して供給する構造とした。これにより、バーナ近傍の局所高温域を減少させ、サーマルNOxの生成を抑制できると同時に、低負荷時には窒素をバイパスして保炎性を確保できると考えられる。

また、窒素の供給に伴い空気比が低下するため、尾筒壁を二重構造とし、尾筒の対流冷却に用いた冷却用空気を燃焼器壁面の冷却用および燃焼用空気として再利用する構造とした。さらに、高温になると予想される二次空気孔近傍には、燃焼器ライナ壁面にフロースリップから空気を吹きつける構造とし、冷却効率の向上を図った。

(4) 燃焼試験結果

図5-2-6は、窒素/燃料供給量比率を0.3kg/kgで一定とした条件下で、ガスタービン運用条件における燃焼特性を示す。NOx排出濃度はガスタービン負荷の上昇に伴い緩やかに増加する傾向を示すものの、定格負荷相当条件においても11ppm（16% O₂換算）以下に抑制でき

た。これは、窒素をバーナから供給することにより一次燃焼領域における局所高温領域を効果的に減少させ、NOx生成を抑制できたためと考えられる。一方、燃焼効率については、ガスタービン低負荷で窒素を燃焼空気に混合して、燃焼器へバイパスして供給することにより、低負荷条件での燃焼安定性を改善でき、石炭ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%相当以上で、燃焼効率はほぼ100%を確保した。また、保炎特性については、石炭ガス化燃料専焼による負荷遮断相当まで燃焼安定性を確保した¹⁰⁾。

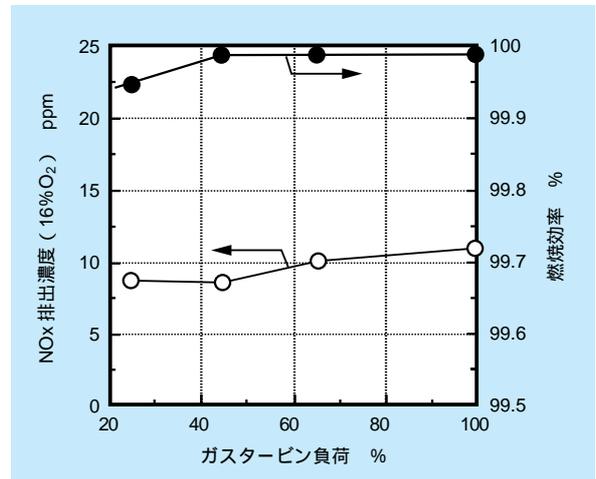


図5-2-6 中カロリー燃料用燃焼器の燃焼特性

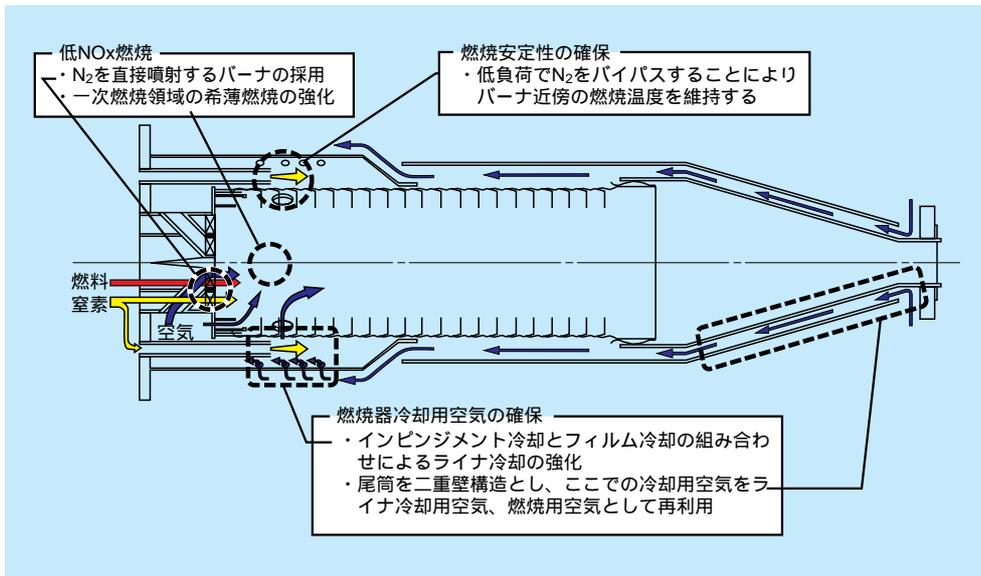


図5-2-5 中カロリー燃料用燃焼器の構造と特徴

5 - 3 今後の展開

当研究所では石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発について、乾式ガス精製を用いる低カロリー燃料用1500級低NO_x燃焼器技術^{(2)~(7)}および湿式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料用低NO_x燃焼器技術^{(8)~(10)}を確立した。今後は、より一層の熱効率の向上を目的に、乾式ガス精製を採用する中カロリー燃料のガス

タービン燃焼器技術を開発すると共に、これまで培ってきたガス化燃料用燃焼技術についてデータベースを作成することにより、将来、実用化が期待される空気吹きから酸素吹きまでにわたる各種石炭ガス化複合発電方式のガスタービン技術を確立する。

コラム：希 釈 用 空 気

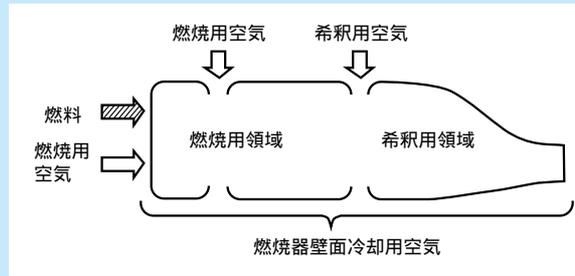


図 燃焼器概念図

燃焼器へ導入する空気には以下の3つの役割がある。

- 1．燃焼用空気：燃料と混合させて燃料をより良く燃焼させるために用いられる空気
- 2．冷却用空気：燃焼器の壁温を材料の耐熱許容温度以下にまで冷却するために用いられる空気
- 3．希釈用空気：燃焼ガスの温度を平均化し、燃焼器出口でのガスの温度分布をタービンが許容できるものとするために用いられる空気

コラム：サーマルNO_xとフュエルNO_x

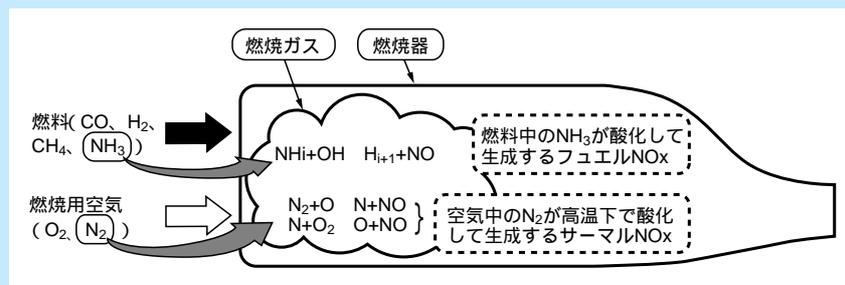


図 サーマルNO_xとフュエルNO_xの生成機構

乾式ガス精製方式を採用する石炭ガス化複合発電では、ガスタービン燃焼器で発生するNO_xはサーマルNO_xとフュエルNO_xの2つあり、それぞれ、以下の様な特徴がある。

- 1．サーマルNO_x：1600 以上の高温の燃焼ガス状態で、空気中の窒素が酸素と反応して、生成されるNO_xをいう。
- 2．フュエルNO_x：燃料中に含まれるNH₃などの窒素化合物が燃焼器内で酸化してNO_xとなるものをいう。