

■ 技術賞内容紹介 ■

コンバインドサイクル用ガスタービン低NO_x燃焼器の開発

Development of Dry Low NO_x Combustor for Combined Cycle Gas Turbine

小島 民生*・石原 英明**・相沢 善吾***

Tamio Kojima Hideaki Ishihara Zengo Aizawa

はじめに

近年、LNG火力の主力としてコンバインドサイクル発電プラントの導入建設が積極的に推進されているが、その主体となるガスタービンの乾式低NO_x燃焼器の開発は、コンバインドサイクルの省エネルギー性並びに環境性向上の観点より、重要な要素機器開発の一つである。東京電力では1982年より10年間、米国GE社の協力を得て、同燃焼器の開発を推進し、富津火力コンバインドサイクル発電プラントにて約1年間の実証試験を終了し、NO_x性能、省エネルギー性、運用性、耐久性などを確認して、その開発実用化を完了した。この低NO_x燃焼器は、1996年運転開始予定にて現在建設中である横浜7・8号系列の1300℃級改良型コンバインドサイクル（ACC：Advanced Combined Cycle）発電プラントに適用予定である。本稿ではこの乾式予混合低NO_x燃焼器の概要と開発の経緯等について紹介する。

1. コンバインドサイクルの普及と低NO_x燃焼器

コンバインドサイクル発電はガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた発電方式であり、高い熱効率、環境性、機動性並びに経済性等その優れた特性により、1970年代後半より世界各国で多くのプラントの導入が進められ、我国においても1980年代より、ガス火力の主力として、1100℃級ガスタービンによるコンバインドサイクル発電プラントが積極的に導入され多くの良好な運用実績を納めている。また近年では、1300℃級ガスタービンによる、より高い熱効率を達成するACC発電プラントの建設が各所で進められている（表1）。

コンバインドサイクルの主体となるガスタービンにおいては、その燃焼器内での燃焼が、従来の汽力発電のボイラに比べより高い燃焼負荷と酸素濃度の雰囲気において進行するため、より高度なNO_x抑制技術が必要となる。従来よりガスタービンの燃焼器内に蒸気や水を噴射し、燃焼火炎の最高温度を抑えNO_x発生を低減する湿式対策がとられてきたが、この方法は燃焼器の構造が比較的単純で確実である反面、コンバインドサイクル発電プラントとしての熱効率が低下すると共に、用水消費量が増加する。このため一層の省エネルギー、省資源の観点より、熱効率の低下と用水の消費を伴わない乾式のNO_x低減対策の開発が強く望まれていた。

東京電力の初のコンバインドサイクル発電プラントである富津火力1・2号系列は、1985年運転開始以来、定格熱効率は48.4%（低位発熱量基準、以下同様）と、従来の汽力発電最新鋭機の約45%に比べ1割程度高い優れた省エネルギー性を発揮している。一方そのNO_x対策としては、ガスタービンの従来型拡散燃焼器により発生する180ppm（O₂16%換算値、以下同様）程度のNO_xを蒸気タービンの抽気蒸気を燃焼器内に噴射することにより42ppmまで低減し、さらに脱硝装置（効率80%）にて煙突出口で8.4ppmにまで低減している。しかしこの噴射蒸気は本来ならば蒸気タービン内で30℃程度まで膨張し仕事をするものが、ガスタービン内で500℃程度までの膨張となり、その後排熱回収ボイラ内で熱回収は行われるものの、100℃前後の排ガスとして煙突より大気中に排出されることとなる。即ち、燃焼器内への蒸気噴射無しにガスタービン出口NO_xの低減が可能となれば、その熱効率は一層向上すると共に、用水の消費量も大幅に削減できる。

東京電力では以上の観点より、富津火力1・2号系列プラントの建設着工とほぼ同時期である1982年より、富津プラントのガスタービン製作者である米国GE社の協力を求め、予混合低NO_x燃焼器の開発に着手し

* 東京電力㈱火力部副部長

** " 安全部副部長

*** " 火力部火力設計課長

〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

表1 我国の1300℃級コンバインドサイクル（ACC）一覧

電力会社	東 京					関 西		中 部				中 国	九 州
発 電 所	横 浜		千 葉		品 川	姫路第一		川 越		新名古屋		柳井	新大分
系 列	7号	8号	1号	2号	—	5号	6号	3号	4号	7号	8号	2号	2号
GT台数	4	4	4	4	3	6	6	7	7	6	6	4	4
ST台数	4	4	4	4	3	2	2	7	7	6	6	4	4
燃 料	LNG	LNG	LNG	LNG	ガ ス	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG
運 開 予 定	96/7 ~ 98/7	96/7 ~ 98/7	98/4 ~ 99/7	98/4 ~ 99/7	2001 ~ 2002	95/5	96/7	96/7 ~ 97/1	97/6 ~ 97/12	98/8 ~ 99/1	2002/3 ~ 2002/8	94/3 ~ 96/1	94/2 ~ 95/2

た。当時、欧米のNO_x排出基準は我国に比べまだまだ緩やかなもので、GE社に協力を要請するに当たっては、我国の環境規制水準の背景から説明する必要があった。

2. 予混合低NO_x燃焼器の原理

NO_xの発生を左右する要素としては、燃料中の窒素含有量、燃焼域での酸素濃度、燃焼火炎温度等が挙げられるが、コンバインドサイクル発電ではその燃料はほとんどの場合窒素含有の無いLNGであり、酸素濃度と火炎温度によりNO_xの発生は支配される。

従来よりガスタービン燃焼器として使用される拡散燃焼器は、燃焼器内の燃焼用空気に燃料を投入し、言わば燃料と空気が出会い頭に燃焼するもので、燃焼器内での燃料と空気の割合、即ち燃空比は、かなり広い範囲の差がある分布となる。このため局部的に極めて高温の火炎が発生し、NO_xの発生はこの局部的な高温部で大量に発生することになる。この燃焼器内に蒸気を噴射して、この高温部火炎温度を低減しNO_xの発生を抑制するのが蒸気噴射式拡散燃焼器である。

これに対して、予混合燃焼は、燃料が燃焼する以前に燃料と空気を予め混合させておき、全体に均一な火炎温度として局部的な高温部をなくすことで、NO_xの発生を抑制する燃焼方式である。燃料と空気の混合割合については、燃料を全て燃やするのに必要な最少の空気量を混合した理論燃空比に対し、燃空比が小さいほど即ち燃料量が少なく空気量が多いほどNO_x発生量は低減するが、ある程度より燃料量が少なくなると、燃焼は不安定となり、ついには失火する事となる。この微妙な燃空比を最低限まで低下させ、かつ起動過程から定格出力までの広範な運転域にわたり安定した燃焼特性を確立することが開発のポイントとなる。

3. 予混合低NO_x燃焼器の開発

予混合低NO_x燃焼器の開発は1982年より5つのステップに分け10年間に亘って進めた(表2)。

3.1 ステップ1：燃焼器基本概念の確立

まず、はじめの2年間は燃焼器基本概念の確立に努力が払われた。予混合燃焼を実現する数種類の基本概念モデルを製作し、大気圧燃焼試験により基本概念を選定した。その基本概念に基づき各部の寸法、冷却穴の位置や数を微妙に変化させた実寸大の燃焼器を十数本製作し、実圧試験により基本形状を決定した(図-1)。

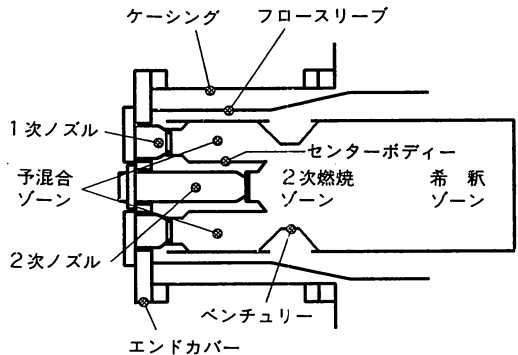


図-1 予混合低NO_x燃焼器の基本概念

この基本燃焼器は、6本の1次ノズルと1本の2次ノズルにより構成され、1次ノズルからの燃料はすぐには着火せず空気と予混合され、保炎機能を分担する2次ノズル出口にて初めて燃焼する。

また部分負荷では、低下する燃料量に対してガスタービンの原理的理由により燃焼用空気量の割合が増加し、所定の燃空比が維持できなくなるため、1次ノズルによる燃料も拡散燃焼をさせる事になる(図-2)。部分負荷においては、比較的燃焼温度も低いいため、拡散燃焼でもNO_x発生量はそれほど増加しないが、予混合

表2 予混合低NO_x燃焼器の開発工程

年度	1982	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
ステップ1	燃焼器基本概念の確立										
ステップ2	全負荷域でのNO _x 低減化と耐久性の改善										
ステップ3	富津実証試験の事前評価										
ステップ4	試験設備での運用性・耐久性試験										
ステップ5	富津火力での実機実証試験										
富津実証試験期間											-----

燃焼と拡散燃焼の切替時の燃焼安定性が大きな課題である。

この基本燃焼器は、実圧燃焼試験により定格負荷時25ppm以下のNO_x性能が確認されたが、部分負荷時でのNO_x発生量が比較的多く、また燃焼振動等の燃焼不安定、燃焼器部品の局所的な高温化など、電力の安定供給の責任を担うユーザの立場から見てその運用性、耐久性などに多くの課題を残していた。

3.2 ステップ2：全負荷域でのNO_x低減と耐久性の改善

次の2年間は、基本燃焼器の課題の解決に向けて多くの時間が費やされた。

2次ノズルの一部に予混合燃焼機能を持たせ、部分負荷時のNO_x発生量を低減すると共に、1次ノズル燃料の予混合を一層均一化するため、スワラーの改善を行った。さらに金属温度の低減を図るため各部の寸

法、冷却空気穴の位置・数等について最適化を図った。

特に、起動停止特性などの運用性について、コンバインドサイクルの幅広い運転パターンを模擬し、ガスタービンの後流に設置される脱硝装置の特性にも配慮しながらそのNO_x特性、燃焼安定性等の検証を行った。

3.3 ステップ3：富津実証試験の事前評価

ステップ2で完成した燃焼器の富津プラントでの、実機実証試験に向けて、プラント性能への影響、改造必要箇所等の評価を実施した。特に、蒸気タービンから燃焼器への蒸気噴射の停止による蒸気タービン入口圧力の上昇に対するプラント制御特性の改善がポイントであった。

3.4 ステップ4：試験設備での運用性耐久性試験

富津プラントでの実証試験を控え、当該燃焼器2缶での試験設備により、運用性、耐久性確認試験を実施

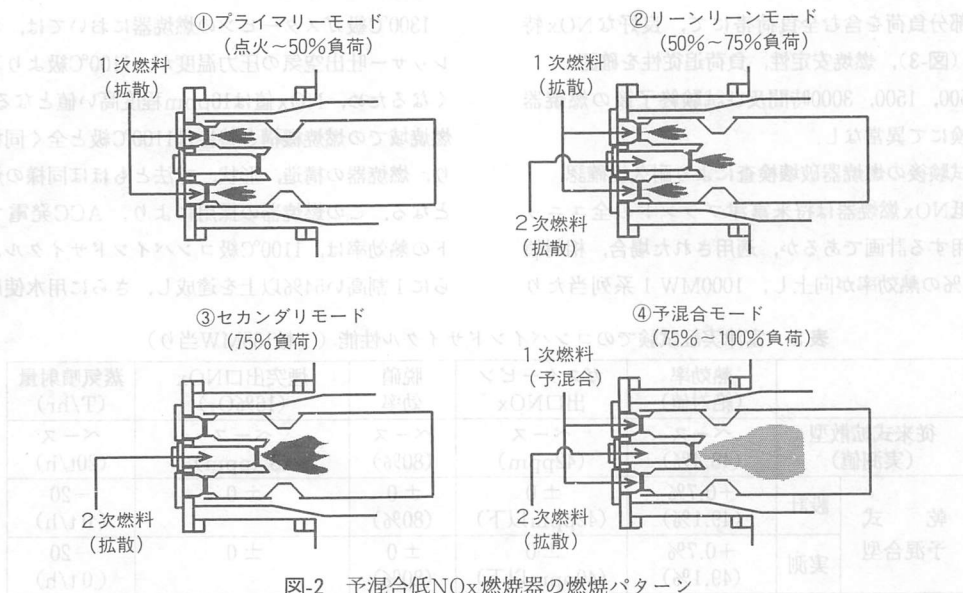


図-2 予混合低NO_x燃焼器の燃焼パターン

した。起動回数100回、運転時間約600時間に相当する燃焼試験により、燃焼器排ガス温度分布特性、燃焼安定性、火炎伝播特性、各部金属温度等を確認し、運用性、信頼性、耐久性について良好な結果を得た。

3.5 ステップ5：富津火力での実機実証試験

ステップ4の試験結果を反映し、若干の改善を加えた燃焼器を16缶（内2缶は予備）を製作し、富津火力1号系列第3軸ガスタービンの拡散燃焼器との取り替え工事を実施後、約1年間の実機実運用実証試験を実施した。試験開始当初、ステップ4の試験設備と実機ガスタービンとの若干の形状の違いによる特性差が確認されたため、空気取り入れ孔を改造した後、実証試験を再開した。

この実証試験においては、起動停止や負荷変化の各種運転モードによる特性について運用性・保守性の観点からの検証確認が重要であった。特に1次燃料と2次燃料の分配比の移行制御については、後流の脱硝装置の制御設定値と干渉する部分が多く、運転現場のノウハウをフル活用して制御方法の最適化を図った。その結果4804時間、起動回数158回の実運用ベースでの試験運転は、以下の通り良好な結果を納めた。

- ① 外気温度15℃（ISO条件）にて定格負荷時ガスタービン出口NO_x25ppm以下を達成。
また、全ての外気温度（5～33℃）、外気湿度にて、運用上必要な5%程度の負荷変動を伴った場合で40ppm以下を達成。
- ② 熱効率は設計値通り絶対値で0.7%（相対値1.6%）向上（表3）。
- ③ 部分負荷を含む全負荷帯にて、良好なNO_x特性（図-3）、燃焼安定性、負荷追従性を確認。
- ④ 500、1500、3000時間及び試験終了後の燃焼器点検にて異常なし。
- ⑤ 試験後の燃焼器破壊検査により耐久性確認。

この低NO_x燃焼器は将来富津プラントの全ユニットに適用する計画であるが、適用された場合、相対値で約1.6%の熱効率が向上し、1000MW 1系列当たり

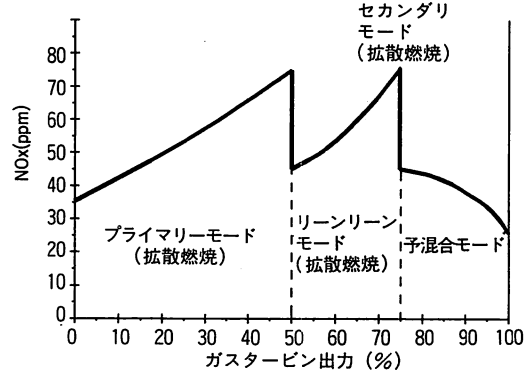


図-3 富津実証試験でのガスタービンNO_x特性(ISO条件)

年間1万5千トン、2系列で3万トンのLNGが節約されると共に、用水使用量は1000MW 1系列当たり約140 t/h、年間75万トン、2系列で150万トンの節減が可能となる。

4. ACC用1300℃級ガスタービンへの適用

近年ガスタービンの高温化技術の進歩によりガスタービン入口ガス温度は1300℃級まで向上し、現在計画されている我国のLNG焚火力発電プラントは全てこの1300℃級ガスタービンによるACC発電プラントとなっている。東京電力においても、平成8～10年運転開始予定の横浜7・8号系列2800MW、平成10～11年の千葉1・2号系列2880MW、平成13～14年の品川1～3号機1080MWの各ACC発電プラントを計画しており、これらのプラントには全て乾式予混合低NO_x燃焼器が採用される予定である。

1300℃級ガスタービンの燃焼器においては、コンプレッサー吐出空気の圧力温度が、1100℃級より若干高くなるため、NO_x値は10ppm程度高い値となるが、燃焼域での燃焼機構と特性は1100℃級と全く同様であり、燃焼器の構造、形状、寸法ともほぼ同様の燃焼器となる。この燃焼器の採用により、ACC発電プラントの熱効率は、1100℃級コンバインドサイクルよりさらに1割高い54%以上を達成し、さらに用水使用量に

表3 富津実証試験でのコンバインドサイクル性能（1軸165MW当り）

		熱効率 (絶対値)	ガスタービン 出口NO _x	脱硝 効率	煙突出口NO _x (16%O ₂)	蒸気噴射量 (T/hr)
従来式拡散型 (実測値)		ベース (48.4%)	ベース (42ppm)	ベース (80%)	ベース (8.4ppm)	ベース (20t/h)
乾式 予混合型	設計	+0.7% (49.1%)	±0 (42ppm以下)	±0 (80%)	±0	-20 (0t/h)
	実測	+0.7% (49.1%)	±0 (40ppm以下)	±0 (80%)	±0	-20 (0t/h)

表4 横浜7・8号系列ACC発電プラント仕様諸元

	横浜7・8号系列ACC	富津1・2号系列CC (参考)
発電プラント 形式 出力 系列 軸 熱効率 設計 実績 使用燃料	一軸型排熱回収式 1400MW×2系列 (5℃) 350MW×4軸×2系列 (5℃) 54.1% LNG	一軸型排熱回収式 1000MW×2系列 (32℃) 165MW×7軸×2系列 (8℃) 47.2% 48.4% LNG
ガスタービン 形式 入口ガス温度 圧縮比 燃焼器	GE製MS9001F 1300℃級 約15 予混合燃焼式	GE製MS9001E 1100℃級 約12 拡散燃焼式 (蒸気噴射付き)
蒸気タービン 形式 高圧蒸気 中圧蒸気 低圧蒸気 最終段翼長	3圧再熱複流排気復水型 104ata/538℃ 24ata/538℃ 4 ata/260℃ 26インチ	混圧単流排気復水型 63ata/500℃ 9 ata/180℃ 26インチ
排熱回収ボイラ 形式 蒸発量	排熱回収3汽胴式横型 380t/h	排熱回収2汽胴式縦型 220t/h
脱硝装置 方式 脱硝効率 出口NO _x (16%O ₂ 換算)	乾式アンモニア接触還元法 90% 定格時: 5 ppm 運用最大: 8.5ppm	乾式アンモニア接触還元法 80% 8.4ppm

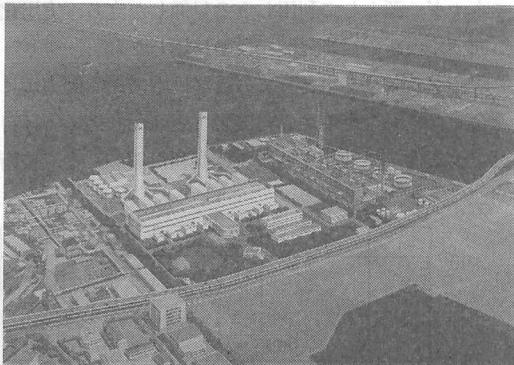


図4 横浜7・8号系列ACCプラント完成予想図

についても横浜7・8号系列の場合で年間300万トンの節減が可能となる (表4)。

この1300℃級低NO_x燃焼器は、外気温度15℃のISO条件にて35ppm程度以下のNO_x特性を発揮するが、外気温度、外気湿度の変化、負荷変動あるいは1年間以上の連続運転による制御設定値のズレなど運用上の

必要マージンを見込んで、50ppmを計画値とし、さらにACCプラントとしては、90%脱硝装置との組合せにより煙突出口にて定格運転時5 ppm以下のNO_x計画値としている (図4)。

おわりに

ガスタービン燃焼器のNO_x低減技術はこの10年間で各方面にて積極的な開発が推進され、急速な改善がなされてきている。しかし、環境性能の向上に対するニーズは地球規模の観点より益々厳しいものとなってきており、NO_xについても更なる改善が強く望まれるところである。さらにガスタービンの高温化技術についても、省エネルギー性向上とCO₂低減の観点より引き続き積極的な開発が進められている。低NO_x燃焼器の一層の開発は、発電プラントの環境性向上の重要課題の一つとして、またガスタービン高温化技術の重要な鍵として、更なる開発が大いに期待され、今後とも引き続きその開発に努力して行きたいと考える。