

氏 名	中 田 俊 彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 6 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 60 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	ガスタービンにおける石炭ガス化燃料燃焼に伴う NO _x 生成機構の解明とその低減に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 齋藤 武雄 東北大学教授 永井 伸樹 東北大学教授 新岡 嵩

論 文 内 容 要 旨

近年、わが国のエネルギー消費の中で、電力需要はますます増加しつつあり、原子力発電とともに火力発電の増設が計画されている。火力発電では、燃料中に含まれる炭素量に応じた二酸化炭素(CO₂)が大気に放出される。CO₂の全発生量の内、国内の火力発電所から排出されるCO₂は、全体の約25%を占めており、地球温暖化防止のためには火力発電の熱効率向上が不可欠である。また地球環境問題に関しては、酸性雨の原因物質であるNO_x (窒素酸化物)とSO_x (硫黄酸化物)の一層の削減が急務である。

石炭ガス化複合発電は、高い熱効率を誇るコンバインドサイクルを、固体燃料である石炭に適用した発電方式である。コンバインドサイクルとは、ブレイトンサイクル(ガスタービン)とランキンサイクル(蒸気タービン)を複合化したシステムで、ガスタービンを高温化し、かつガスタービンの排熱を蒸気で回収することによって、発電熱効率の大幅な向上を図った発電方式である。

石炭ガス化複合発電プラントは、固体燃料である石炭をガス化して灰分を取り除く石炭ガス化炉、生成した石炭ガス中のダスト分と硫黄分を除去するクリーンアップ、および高温ガスタービンなどから構成される。熱効率は、構成機器の仕様によって異なるが、空気吹き噴流床方式のガス化炉、乾式クリーンアップ、および1300℃級ガスタービンを組み合わせたわが国の方式では、送電端効率で43.5% (高位発熱量ベース) となり、在来の微粉炭火力の38~39% に比べて大幅な熱効率向上が図れる。さらに、ガスタービン入口ガス温度を1500℃に高温化することにより、将来的には熱効率が45%を超えることが可能となる。

従来ガスタービンにおける低NO_x 燃焼技術としては、天然ガス等の高カロリー燃料から生成

されるサーマル NO_x を対象として、数多くの燃焼機器に対して実験的および理論的な面からの考察がなされてきた。サーマル NO_x は、空気中の N_2 （窒素）が高温の燃焼場で酸化し生成されるもので、Zeldovich機構と拡大Zeldovich機構から成る素反応過程により、その生成機構を表すことができる。サーマル NO_x の低減燃焼技術としては、火炎の最高温度を約 1500°C 以下に低減することを狙った、希薄予混合燃焼法が実用化されつつある。

一方、石炭ガス化複合発電においては、石炭ガス中の NH_3 に起因するフュエル NO_x が生成される。フュエル NO_x については、サーマル NO_x と異なり生成機構が複雑で、かつ素反応式が膨大になることから、ガスタービンにおいては、いまだ、ほとんど解明されていない、さらに、石炭ガス燃料の特徴として、燃料発熱量が 1000kcal/m^3 (4190kJ/m^3)と天然ガスの約1/10と低いこと、 CO （一酸化炭素）を主要な可燃性成分とすることなどのために、石炭ガスの燃焼特性についても十分な把握が必要である。ガスタービン燃焼器で生成するフュエル NO_x を抑制するためには、フュエル NO_x の生成機構を解明するだけでなく、低カロリー燃料の安定燃焼と両立し得る、きわめて高度な低 NO_x 燃焼技術が要求される。

本研究では、このようなガスタービン燃焼器で生成する NO_x に対する数値解析的な予測手法を開発し、さらに NO_x を低減する工学的な知見を得ることを目的として、サーマル NO_x およびフュエル NO_x に対する理論的な考察を行い、これらの生成機構を記述する素反応式を選択し数値解析モデルを構築した。さらに、これらの素反応式や数値解析モデルを実規模の150MW級ガスタービン燃焼器に適用し、燃焼実験結果と比較することにより、その妥当性について検討を加えた。以下に本研究で得られた主要な結論を述べる。

第2章では、ガスタービン燃焼器における石炭ガス化低カロリー燃料のサーマル NO_x 生成機構について検討して、次の知見を得た。

- (1) Zeldovich機構に基づく28式の素反応式群と14の化学種を考慮した反応動学的な解析手法を導いた。
- (2) 本手法を石炭ガス化低カロリー燃料の燃焼場に適用して反応動学的解析を行った。その結果、石炭ガス化低カロリー燃料のサーマル NO_x 生成特性が、既往の高カロリー燃料とほぼ同一の傾向であり、特に反応温度の依存性が大きいことが示された。
- (3) ガスタービン燃焼器内を対象とした均一予混合モデルを提案し、本モデルを用いて反応動学的解析を行った。その結果、燃焼器内で生成されるサーマル NO_x の挙動や CO 等可燃性成分の反応特性が明らかになった。また、実験結果との比較から、本研究で提案した手法によれば、ガスタービン燃焼器のサーマル NO_x 生成濃度が、燃焼器内空気比や圧力条件に応じて適切に予測されることが示された。

第3章では、石炭ガス化低カロリー燃料から生成されるフュエル NO_x について、燃料過濃領域と燃料希薄領域から構成されるガスタービン燃焼器を対象とし、反応動力学解析を行い、次の知見を得た。

- (1) 50成分の化学種と248の素反応式から構成される素反応モデル、およびガスタービン燃焼器の二次空気の混合特性を考慮した燃焼器モデルを提案した。

(2) 本解析モデルをガスタービン燃焼器の燃焼場に適応し、燃料 NO_x の生成機構について考察した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 燃料過濃な一次燃焼領域では、燃料中の NO_3 の分解に伴ってHCNなどの中間生成物が生成物が生成される。
- ② 二次燃焼領域における燃料 NO_x 生成特性は、二次空気の混合条件によって大きく影響される。二次空気が瞬時に燃焼ガスと混合する場合には、O、OH等の活性化学種が急激に生成されるために、一次燃焼領域で生成するHCN等の中間生成物がすべて二次燃焼領域でNOに転換し、NO生成濃度が高くなる。二次空気の混合が緩慢になると、活性化学種の生成が抑制されるためにはNOへの転換率が低下する。
- ③ 燃料中の CH_4 濃度が増加するほど、一次燃焼領域で生成するHCN等の中間生成物が増加する。このため二次空気が瞬時に混合する場合には、燃料中の NH_3 からNOへの転換率は CH_4 が多いほど増加する。
- ④ 燃焼器内圧力の NO_x 生成に及ぼす影響は、二次空気の混合が緩慢な場合にみられ、圧力の上昇とともに NH_3 からNOへの転換率が低下する。

第4章では、石炭ガス化低カロリー燃料の燃焼場における NO_x 生成特性および燃料 NO_x の生成源となる NH_3 を燃焼場の直前で分解除去する技術について、実験的に検討するとともに、第3章で提案した反応動力学解析を適用して考察を行って次の知見を得た。

(1) 石炭ガス化低カロリー燃料から生成される NO_x を低減するためには、燃料中の NH_3 に起因する燃料 NO_x を抑制することが重要であり、このためには、一次燃焼領域を燃料過濃とする二段燃焼法が有効であること、その際には、一次空気比を燃料中の CH_4 濃度に合わせて最適に設定し、しかもCOの排出を低減するために部分予混合燃焼法の導入など保炎性能の確保も重要であることを明らかになった。

(2) 燃料 NO_x の生成源となる NH_3 を燃焼場の直前で分解除去する方法について検討した。燃料中に微量の O_2 とNOを添加して 800°C 以上の高温にすることによって、 NH_3 が初期濃度の約1/2まで分解することを明らかにした。

第5章では、第2章～第4章で得られた知見をもとにして、ガスタービン燃焼器を試作し、実験により性能評価を行って、ガスタービンの高性能化、低 NO_x 化のための設計理念を導出して、次の結果を得た。

- (1) 二室保炎強化型燃焼器を試作し、リッチ・リーン燃焼による燃料 NO_x の低減効果および最適な空気配分等の設計指標を提案した。
- (2) 空気制御型燃焼器を試作し、空気バイパス弁による燃料 NO_x の低減効果とその適用性についてまとめた。
- (3) 空気制御型燃焼器において、二次空気混合を緩慢化した燃焼器を試作し、燃料 NO_x の一層の低減が図れることを示し、その要因を考察した。

第6章では、これまでに得られた石炭ガス化低カロリー燃料用ガスタービン燃焼器の NO_x 生成機構および低 NO_x 燃焼技術に関する知見を、熱効率向上のためのガスタービン燃焼器の高温化に

適用して、次の結果を得た。

- (1) ガスタービンの高温化に伴う課題を、燃焼器の安定燃焼や低 NO_x 化を図る観点から、空気配分等の設計指針に基づいて総括的に考察した。
- (2) 石炭ガス化低カロリー燃料用 1500°C 級ガスタービン燃焼器を設計、試作、性能評価した。供試燃焼器は、燃焼器出口ガス温度を 1500°C とする定格条件において、燃焼器壁面温度を耐熱許容温度以下に保持し、同時に燃料 NO_x の大幅な低減を図ることができた。

本研究を総括すると、石炭ガス化低カロリー燃焼を用いるガスタービン燃焼器において、 NO_x の生成機構を理論的および実験的に解明し、これから導かれる NO_x 生成を抑制するための新しい理念を実規模の燃焼器へ適用し、その妥当性を検証している。さらに、きわめて高度な技術が要求される超高温ガスタービン燃焼器を自ら設計、試作、評価することによって、燃焼器の研究開発において不可欠な、有用な工学的指針を与えている。

審査結果の要旨

我が国のCO₂発生量の内、火力発電所から排出されるCO₂は約25%を占めており地球温暖化防止のためには発電の熱効率向上が急務である。本論文は、埋蔵量が可採年数で約400年と長い石炭をベースにした石炭ガス化複合発電における窒素酸化物（NO_x）の生成機構について理論および実験両面から解明したもので、全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章は、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のサーマルNO_x生成特性について理論的解析を行った。まず、フルカイネティクス解析モデルを提案し、サーマルNO_x排出濃度を予測し、実用的な石炭ガス化低カロリー燃料の燃焼場に適用し、NO_x生成特性を明らかにすると共に、実規模150MW級ガスタービン燃焼器にも適用して、その妥当性を検証した。

第3章では、石炭ガス化燃料中に含まれるNH₃に起因するフェルNO_x生成特性について理論解析を行った。まず50成分の化学種と248式の素反応式による反応モデルを提案し、石炭ガス化低カロリー燃焼場に適用し、2段燃焼における2次空気の混合条件の影響などを考察している。

第4章では、小型の拡散バーナーを用いた燃焼実験によって、フェルNO_xの生成特性を明らかにした。火炎の吹き消え特性や一次空気の影響など最適な燃焼条件を明らかにし、また、NH₃を高温気相反応により分解除去する最適条件について検討している。

第5章では、第3章で得られたフェルNO_xに対する数値解析モデルを150MW級ガスタービン燃焼器に適用し、その妥当性とフェルNO_x低減のための燃焼器構造について指針を与えた。

第6章では、本理論を熱効率の優れた1500℃級のガスタービン燃焼器の設計に反映させるため、高温化に伴う設計上の問題点や、空気量配分などの適正化について検討している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、将来にわたって重要とみられる石炭ガス化低カロリー燃焼を採用するガスタービンにおけるNO_x低減のための数値解析的予測手法を提案し、実規模の150MW級ガスタービン燃焼器に適用し、その妥当性を検証したもので、熱およびエネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。