

# 論文の要旨

題目 高温空気燃焼技術の開発と高性能工業炉への応用

(Development of High Temperature Air Combustion Technology and  
its Application to High Performance Industrial Furnaces)

氏名 秋山 俊一

世界中で地球温暖化防止が注目されている昨今、我が国におけるエネルギーの供給・消費フローの分析によれば、一次エネルギー供給量に占める有用エネルギーの割合は1/3程度で、残り約2/3は損失となっている。今後この有用エネルギーの割合を増やすことは非常に重要であり、特に我が国の最終エネルギー消費量の約4割を占めている産業分野でのエネルギー消費設備における消費効率向上は、重要な課題である。その中でも、工業炉は種々の分野で使用（日本全体で約39000基、鉄鋼業で約5800基）されており、加熱炉を代表例とする工業炉の更なる高効率化・省エネルギーは有用エネルギーの割合向上の為の重要な対策のひとつと考えられる。

そこで、本論文では、高温の排熱を直接熱回収可能な蓄熱式バーナについて、排熱の回収効率が高く、コンパクトな蓄熱式熱交換器の開発と、排熱回収した結果、予熱空気的大幅な高温化にともなうNO<sub>x</sub>増大を抑えるための燃焼技術の開発を目的として、工業炉における省エネルギー技術の主流となった、蓄熱式バーナの基本技術である高温空気燃焼の開発と、これを用いた高性能工業炉の実用化について体系的にまとめた。

特に、この技術の中核である蓄熱式バーナは、高効率の排熱回収と低NO<sub>x</sub>の両立を達成したもので、世界的にも画期的な技術である。本論文は7章から成り、各章の内容は以下に示す通りである。

第1章では、高温空気燃焼技術と高性能工業の開発の必要性について、我が国における地球温暖化対策の取り組み状況及び温室効果ガスの排出実態や日本のエネルギー消費実態、従来の工業炉の熱効率、NO<sub>x</sub>等大気汚染状況の推移などを含め、背景をまとめた。

第2章では、工業炉において、更なる省エネルギーを達成するため、高効率排熱回収技術として、セラミックハニカムを用いた、数十秒から数分毎の交番切替方式の蓄熱式熱交換器について、その性能・特質を定量的に解析した。その結果、蓄熱体形状として、ボール状に比べ、ハニカム状のものを用いることで、重量で1/6程度、容積で1/5程度となる。そして、実用上の課題を解決するために、最適な形状及び材質の組み合わせなども検討し、一体構造ではなく蓄熱体内部の温度分布に応じて分割するなど、コンパクトで排熱回収効率の高い蓄熱式熱交換器を提案した。

第3章では、高効率の蓄熱式熱交換器により得られた、1300K以上の高温空気を燃焼用空気として用いた場合の燃焼の低NO<sub>x</sub>対策について、従来の低NO<sub>x</sub>燃焼技術による検討・対策並びに、新たな発想のもと高温空気燃焼技術による検討・対策について、それらの開発経緯をまとめた。

1300K以上の高温空気を燃焼用空気として用いた場合、燃料及び燃焼用空気最大の噴出速度を既定していた燃料2段燃焼法やその応用などの従来の低NO<sub>x</sub>燃焼技術では、低NO<sub>x</sub>化に限界があり、国内のNO<sub>x</sub>規制値を十分にクリアすることが出来なかった。そこで1300K以上の高温空気自体が着火源となることに着目し、燃料及び燃

焼用空気の噴出速度をそれぞれ毎秒 100m程度まで高速化して、加熱炉内における燃焼排ガスの自己再循環効果により燃焼場の酸素濃度を低下させることで火炎温度の最高値を下げるのが可能となった。その結果NOx 排出濃度の規制値をクリア出来、更に規制値の約半分の 50ppm 程度まで低減することが可能となり、これらを環境調和型蓄熱式バーナとして実用化した。また、高温空気燃焼技術は、気体燃料や液体燃料など種々の燃料を用いた場合でも同等の低NOx 効果が得られることが確認出来た。

また、間接加熱方式のラジアントチューブバーナへの適用においても、燃焼用空気を高速で噴出させ、ラジアントチューブ内の狭い空間で燃焼排ガスの自己再循環効果を実現させることで低 NOx 化が可能となり、当該のNOx 排出濃度の規制値をクリアすることが出来た。

この研究を通して開発されたコンパクトで高効率な蓄熱式熱交換器を用いた高効率排熱回収と低 NOx を両立させた高温空気燃焼技術は、省エネルギーと環境負荷低減に貢献出来る日本発信の技術である。

第4章では、高温空気燃焼技術における低NOx の現象について、シミュレーション計算を用いて確認を行った。その結果、NOx 発生量のシミュレーション結果は、燃焼実験結果とほぼ一致し、合わせて、NOx 生成機構についても考察することが可能となった。

従来の燃焼方式で火炎温度のピークが高く NOx 発生量が多い場合は、その大部分が、Thermal NOx と Prompt NOx であるが、高温空気燃焼で、燃焼場の酸素濃度が低下した条件では、火炎温度のピークも低減し、NOx 発生量が大幅に低減される。その場合、火炎温度の低下に伴って Thermal NOx は大幅に低減し、NOx の主な発生機構は、NNH機構によるものの割合が多いことが分かった。また、燃焼用空気の温度が 1050Kを超える場合には、燃焼場における酸化剤の条件として低酸素濃度でも燃焼が継続する結果が得られ、これらについても燃焼実験結果の傾向を良く示すことが確認できた。

第5章では、高温空気燃焼を実現した蓄熱式バーナを用いた、高性能工業炉の特徴及び効果について考察した。鋼材の連続式加熱炉等では、従来、炉長を長くして燃焼排ガスと被加熱物との熱交換促進による排熱回収技術が採用されていたが、蓄熱式バーナを用いた加熱炉ではバーナ自体に高効率排熱回収装置が装着されており、この効果で省エネルギーを達成しつつ加熱炉のコンパクト化、即ち、加熱炉の炉長の短縮が可能となった。更に、蓄熱式バーナの交番切替燃焼及び高速燃焼ガスの加熱炉内雰囲気攪拌効果により、炉内温度分布の均一化が図れ、被加熱物の均一加熱にも効果を発揮する可能性が確認された。

また、高温空気燃焼を実現した蓄熱式バーナでは、低NOx 対策のため、燃焼空間が増大するため「燃焼の完結」の観点から新たなバーナの設計思想（加熱炉の炉幅とバーナ燃焼容量の最適な関係）が必要であることを提案した。

第6章では、開発した蓄熱式バーナを種々の加熱設備に適用した事例を示し、省エネルギー効果をはじめとしたいろいろな適用効果について考察し、取りまとめた。

大型鋼材加熱炉の事例では、従来の燃焼用空気予熱器（レキュペレータ）に換え、蓄熱式バーナを全面的に適用することで、省エネルギー効果（約 30%）のほか、鋼材の均一加熱効果、低NOx 効果が確認できた。

また、加熱能力向上と省エネルギーの両立を目的とした実機適用事例では、大型鋼材加熱炉の予熱帯に蓄熱式バーナを増設することで、従来加熱炉 2 基で加熱処理していたものを加熱炉 1 基で処理することが可能となり、合

わけて省エネルギー達成出来、低NOx化にも繋がったことを確認した。

一方、従来殆ど排熱回収が行われていなかった、溶鋼などの取鍋加熱装置の事例では、高温の燃焼排ガスから直接高効率排熱回収が可能となり、省エネルギー効果（約50%）のほか、耐火物の均一加熱効果なども確認できた。更に、棒状の電気ヒータによる電気加熱方式の工業炉を高効率の小口径蓄熱式ラジアントチューブバーナを用いた燃料加熱方式に変更することで、発電に用いる一次エネルギーを含めた省エネルギー効果についても確認できた。

第7章では、第1章から第6章までを総括した。

以上 本論文により高温空気燃焼の開発と高性能工業炉の実用化について、体系的に開発技術をまとめることが出来、今後の適用拡大のきっかけとなることが望まれる。

現時点においては、本開発技術は鉄鋼産業など大型の加熱炉への適用化は進んでいるが、今後、一段の省エネルギーを推進するためこれらの基本技術を応用し、中小型の加熱炉への適用を視野にしたよりコンパクトな蓄熱式バーナの開発が望まれる。

又、本開発技術は現在議論されている2030年における温室効果ガス削減対策技術のひとつとして、海外への適用の展開も期待され、我が国が実施する更なる省エネルギー、地球温暖化対策に貢献が出来ると思われる。