

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	佐 藤 大 介
論文題目	Experimental and Theoretical Study of Ammonia Blended Fuel Combustion (アンモニア混合燃料の燃焼に関する実験的および理論的研究)		
(論文内容の要旨) 本論文は、アンモニア (NH₃) 混合燃料の燃焼における、安定特性、一酸化窒素 (NO)・一酸化炭素 (CO) 排出特性、および放射伝熱特性の実験的・理論的研究をまとめたものであり、5章からなっている。 第1章は序論であり、本研究の背景として脱炭素社会に向けた NH₃ 混合燃料利用の重要性や、燃料としての課題（低反応性・窒素酸化物生成）について概観し、本研究の目的と重要性について述べている。 第2章では、H₂（水素）/NH₃ 混合燃料を用いた予混合旋回火炎を対象に、ガスタービンの実際の作動条件を模擬した一定レイノルズ数（Re = 6000）の条件下において、その排出特性と火炎構造について検討を行っている。具体的には、燃料中の NH₃ 混合率や当量比を広範囲に変化させた燃焼実験を実施し、排出ガス成分分析や化学発光測定を行っている。さらに、詳細化学反応メカニズムを用いた Chemical Reactor Network (CRN) 解析も実施し、NO 生成・消費に関わる反応経路について詳細に調査している。加えて、レイノルズ数を変化させた条件でも追加で実験を行い、排出特性に対するレイノルズ数の影響について知見を深化させている。 この結果、一定レイノルズ数条件では NO の排出濃度は化学量論条件付近で最大となるものの、NH₃ 混合率を増加させると全体的に低下することを実験結果から定量的に示している。一方で、化学量論条件に比べて燃料が希薄な条件においては、NO の排出量は減少するものの、温室効果ガスである亜酸化窒素 (N₂O) の排出量は増加するトレードオフの関係があることを明らかにしている。また、CRN 解析結果より、NH₃ 混合率が低い条件では、ニトロキシル (HNO) と H 原子が反応して NO を生成する経路が支配的であるのに対し、NH₃ 混合率が高い条件では、NH ラジカルと NO が反応して窒素ガスや N₂O へと還元される、いわゆる N/NH 系の反応が支配的となることで、NO 排出が抑制されることを明らかにしている。さらに、レイノルズ数を変化させた実験では、燃料希薄条件においてレイノルズ数の増加に伴い NO 排出量が増加する傾向がある一方で、化学量論条件付近では、レイノルズ数を増加させても NO 排出量がほぼ一定に保たれる、もしくは減少するという特異な現象を見出している。化学発光計測による火炎構造の解析から、これは高レイノルズ数条件で火炎内の循環流が強化され、火炎底部で NH ラジカルの分布が広がることで、NO の消費が促進され、NO 生成とバランスした結果であることを示唆している。 第3章では、製鉄プロセスで副生されるコークス炉ガス (COG) と NH₃ の混合燃料 (COG/NH₃) という、新規の燃料系を対象に、その燃焼安定特性と排出特性について調査している。具体的には、H₂、メタン (CH₄)、および COなどを主成分とする実際の COG に近い模擬ガスを用い、広範な NH₃ 混合率と当量比の条件下で燃焼実験を実施している。はじめに火炎の包括的な安定特性マップを作成した上で、排出ガス成分分析や化学発光測定を行い、CRN 解析による反応経路についての考察も加えた体系的な			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤 大 介
調査を行っている。 この結果，得られた安定特性マップを基に，NH_3 の添加は H_2 を多く含む COG 燃焼の逆火リスクを著しく抑制し，反応性の高い COG の添加は NH_3 の低反応性を補完することによって NH_3 単体燃焼よりも安定燃焼範囲を大幅に拡大するという相補的な相乗効果があること，特に NH_3 混合率が 0.2 の条件で安定燃焼範囲が最も広くなることを実証している．また，排出特性に関して，NO 排出量は概して NH_3 混合率の減少（COG 混合率の増加）とともに増加する傾向があることを明らかにしている．CRN 解析による反応経路の調査から，これは COG の燃焼によって生成される豊富な OH ラジカルが，HNO を経由して NO を生成する反応経路を活性化させるためであることを特定している．また，CO の排出挙動についても CRN 解析を行い，その生成と消費が NO に関連する化学種との相互作用に強く影響を受けることを見出している． 第 4 章では，NH_3 混合燃料の燃焼における放射伝熱特性について，実験計測と理論計算を組み合わせた先駆的な検討を行っている．具体的には，第 2 章の H_2/NH_3 火炎および第 3 章の COG/NH_3 火炎の両方を対象に，赤外分光計測実験と Line-by-Line (LBL) 法を用いた詳細な理論解析を行い，燃焼器内の放射伝熱特性を調査している． この結果，COG/NH_3 火炎においては，水蒸気 (H_2O) が全放射熱流束に対して支配的な寄与を持つことを示している．一方で，NH_3 混合率が変化した際の放射特性の変動には，二酸化炭素 (CO_2) 濃度の変化がより敏感に影響することを明らかにしている．また，H_2/NH_3 火炎や純 NH_3 火炎といったカーボンフリー燃料の放射熱流束は，従来の CH_4 火炎と比較して約 25%程度低くなることを定量的に示しており，これは NH_3 燃料に転換する際の工業炉の炉内伝熱設計において極めて重要な知見である．さらに，理論解析と実験データの比較から，化学量論条件付近において放射吸収を含む放射減衰が顕著になることを明らかにしている．加えて，計算コストの低い工学モデルである Hottel モデルの予測精度を検証し，高精度な LBL 法による計算と比較しても実用上十分な妥当性を有するものの，燃料希薄条件や NH_3 混合率が低い条件では予測精度が低下する傾向があることを示し，その適用限界についての指針を与えている． 第 5 章は結論であり，本論文で得られた成果について要約するとともに，今後の研究課題についても言及している．			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、アンモニア (NH_3) 混合燃料の燃焼における、安定特性、一酸化窒素 (NO)・一酸化炭素 (CO) 排出特性、および放射伝熱特性の実験的・理論的研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. レイノルズ数一定の条件下で H_2 (水素) / NH_3 火炎の排出特性を測定することにより、 NO 排出濃度が化学量論条件付近でピークをもつこと、また、 NH_3 混合率の増加が NO 排出濃度を抑制することを定量的に示した。さらに、CRN (Chemical Reactor Network) 解析により、 NH_3 の混合率や当量比の変化に応じて、 NO 生成・消費反応経路に変化が生じることを明らかにした。加えて、レイノルズ数の増加により、 NH_3 混合率の高い一部の燃料ブレンドでは、化学量論条件においても NO 排出濃度が減少することを初めて明らかにした。
2. COG (コークス炉ガス) / NH_3 火炎の計測により包括的な安定特性マップを作成し、 NH_3 が COG の逆火を抑制する一方で、 COG が NH_3 の低反応性を補完し燃焼を安定させる顕著な相乗効果があることを実証した。また、詳細な排ガス分析と CRN 解析により、 CO の消費には NO と OH に関連する反応が重要であることを特定し、多成分燃料系における複雑な化学相互作用を明らかにした。
3. COG/NH_3 火炎および H_2/NH_3 火炎の放射特性を初めて実験的・理論的に評価することに成功した。 COG/NH_3 火炎では、 H_2O が全放射熱流束への最大の寄与種である一方、混合比の変化に伴う放射特性の変化には CO_2 がより大きな影響を与えることを明らかにした。また、 H_2/NH_3 火炎では、放射吸収を含む放射減衰が化学量論条件付近で最も顕著になることを示した。さらに、計算コストの低い工学モデルである Hottel モデルの妥当性を高精度な LBL (Line-by-Line) 法による計算と比較して検証し、その適用限界を明らかにした。

以上、本論文は、 H_2/NH_3 火炎と COG/NH_3 火炎を対象に、アンモニア混合燃料の燃焼に関して安定特性、排出特性、および放射伝熱特性の一端を、精緻な実験と厳密な理論解析により明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 8 年 1 月 14 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。