

氏名	いとう しん た ろう 伊藤 慎太朗
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	アンモニアガスタービン実現に向けた 天然ガス混焼技術に関する研究
論文審査委員	主査 主査 東北大学教授 小林 秀昭 東北大学教授 丸田 薫 東北大学教授 琵琶 哲志 東北大学准教授 中村 寿

論文内容要約

第1章 緒論

火力発電所から排出される CO_2 を低減するためには, 再生可能エネルギーから生成される水素を利用した低炭素社会の構築が必要不可欠である. 水素はカーボンフリーエネルギーであるという利点がある一方で, 輸送・貯留コストが高いという課題がある. そこで, 本研究では水素のエネルギーキャリアの一つであるアンモニア (NH_3) に注目した. アンモニアは水素から製造が可能であり, 輸送・貯留に適した, 直接燃焼可能なカーボンフリー燃料である. 再生可能エネルギーの負荷調整用電源として重要な天然ガス焚きガスタービンでアンモニア/天然ガス混焼を実現できれば, CO_2 排出量の大幅な削減と再生可能エネルギーの利用拡大に大きく貢献することが可能である.

燃料としてのアンモニアには, 天然ガスに比べて, 発熱量が小さい, 燃焼速度が遅い, 火炎温度が低い, Fuel NOx を生成する, といった課題がある. アンモニア/天然ガス焚きガスタービンを早期に社会実装するには, 既存の天然ガス用燃焼器に最小限の改造を施すだけで, アンモニア/天然ガス混焼の低エミッション燃焼を実現する必要がある. 本研究は, アンモニアガスタービンを早期に社会実装することを目的とし, これらの課題を克服するアンモニア/天然ガス混焼技術として, LPSI (Lean Premixed with Secondary NH_3 Injection) 燃焼器を新たに提案し, 2 MW 級天然ガス焚きガスタービンで, アンモニア混焼率 20%LHV (全投入熱量に対するアンモニアの熱量比) 時に環境規制をクリアする LPSI 燃焼技術を確立することを目的として研究を行った.

第2章 サイクル計算によるアンモニア/天然ガス混焼がガスタービン性能に与える影響の評価

アンモニア/天然ガス混焼ガスタービンの実現性を評価するため, プロセスシミュレータを用い, 圧縮機, 燃焼器, タービンそして廃熱回収ボイラからなるアンモニア/天然ガス混焼ガスタービンコジェネレーションシステムのサイクル計算モデルを構築し, アンモニア混焼率および NO 転換率が発電端効率や総合効率に及ぼす影響を計算により調査した. その結果, アンモニアは, メタンに比べて低位発熱量が小さいことと, 完全燃焼前後でモル流量が増加することから, アンモニア混焼率が増加すると, タービンを通過する燃焼ガスの体積流量が増加し,

発電端効率が增加することが明らかとなった。アンモニアから NO が生成されると完全燃焼する場合と比べて約 29% 程度の発熱量損失があり、アンモニア混焼で NO が生成されると燃料の総質量流量増加、発電端効率低下といったエンジン性能への悪影響が発生することもわかった。このため、アンモニア/天然ガス混焼ガスタービンを実現するには、環境的な側面だけでなく、運用コストの側面からも、低 NO_x 燃焼の実現が重要である。また、アンモニアは燃焼温度が低いことに加えて、アンモニア混焼時には燃料の総投入熱量が減少することから、アンモニア混焼によりタービン入口および出口のガス温度が低下する。アンモニア混焼によるガス温度の低減は、燃焼器の耐久性向上というメリットがある一方で、コージェネレーションシステムの総合熱効率が低下する可能性があることがわかった。しかし、タービン入口ガス温度が一定になるように燃料の総質量流量を増加させると、総合熱効率を天然ガス専焼時比で増加させられることが明らかとなった。

第3章 燃焼器単体燃焼試験における LP および LPSI 燃焼器の燃焼特性

現在、発電用ガスタービンで主に用いられている LP (Lean Premixed) 燃焼器とこれに僅かな改造を施した LPSI 燃焼器におけるアンモニア混焼率およびアンモニアの供給方法がエミッション性能に及ぼす影響を評価するため、2 MW 級天然ガス焚き用ガスタービンで用いられる燃焼器と同様のサイズ、構造を有するモデル燃焼器を用いた大気圧燃焼試験を実施した。その結果、LP 燃焼器では NO 濃度と N₂O および未燃 NH₃ 濃度がトレードオフの関係にあり、これらを同時に低減することが困難であることがわかった。また、バーナ当量比およびアンモニア混焼率に対する NO 濃度の変化は、火炎温度と NH₃ 濃度により変化する脱硝効果である SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) 効果で説明することが可能であり、SNCR 効果に対する NH₃ 濃度の影響は、温度の影響よりも強いことが明らかとなった。一方で、LPSI 燃焼器の NO 濃度は、LP 燃焼器の場合に比べ半分以下であり、アンモニア噴射速度を大きくすると、NO、NO₂、N₂O、未燃 NH₃ を同時に低減できることがわかった。これは、アンモニア噴射速度が大きくなると、燃焼器中心軸付近に到達するアンモニアが増加し、局所的な NH₃ 濃度が増加することで SNCR 効果が強化される効果と、局所的な当量比が量論比に近づくことで火炎温度が高くなり、N₂O と NH₃ の分解反応が活性化する効果によると考えられる。

さらに、NO_x を未燃分として考慮する燃焼効率の計算手法を提案し、これを用いてアンモニア/天然ガス混焼燃焼の燃焼効率を評価した。その結果、NO_x を未燃分として考慮する場合は、考慮しない従来の計算手法を用いた場合に比べ、燃焼効率が最大で 1% 低下することが明らかとなった。このことから、燃焼器の性能を正しく評価するためには、NO_x を未燃分として考慮する必要があることが示された。

第4章 詳細反応機構を用いた LPSI 燃焼器の低エミッション燃焼メカニズムに関する検討

LPSI 燃焼のエミッション燃焼メカニズムを解明し、従来の LP 燃焼や先行研究で開発された RL (Rich Lean) 燃焼方式と比較検討するため、詳細反応機構を考慮した 0 次元計算モデルを組み合わせたリアクターネットワーク

クモデルを構築し、燃焼方式によるエミッション特性の比較を行うとともに、各反応領域の当量比がエミッション性能に与える影響を数値計算により評価した。この結果、LP 燃焼は、他の燃焼方式に比べ NO 濃度が高いだけでなく、当量比を低下させると N_2O 濃度が高くなることから、ガスタービン燃焼器への適用は望ましくないことがわかった。一方で、RL 燃焼の場合、アンモニア供給領域の当量比を増加させると酸素不足になり、過濃燃焼領域において未燃 NH_3 濃度が増加し、SNCR 効果により NO 濃度が低減するが、希薄燃焼領域において未燃 NH_3 が燃焼し NO および N_2O 濃度が増加することがわかった。この過濃燃焼領域と希薄燃焼領域におけるエミッション生成・分解のバランスにより、アンモニア供給領域の当量比が 1.4 程度の条件で NO 濃度が極小化し、 NO_2 、 N_2O 、未燃 NH_3 濃度についても無視できるほど低濃度となることがわかった。LPSI 燃焼のエミッションは、RL 燃焼とよく似た傾向を示すが、天然ガスの希薄燃焼領域の当量比を変えると、天然ガスの燃焼ガスによる希釈効果、局所的なアンモニアと酸素の濃度バランス、燃焼温度により複雑に変化する。しかし、これらの影響については、本研究で提案したアンモニア供給領域の正味の当量比 ϕ_{NI} により整理でき、 ϕ_{NI} を 1.15 程度とした、局所的な RL 燃焼により NO、 NO_2 、 N_2O 、未燃 NH_3 濃度を全て抑制することが可能であることが明らかとなった。

低エミッション燃焼に有効な RL 燃焼と LPSI 燃焼を、ラジカルの観点から比較すると、RL 燃焼では燃料過濃条件で天然ガス燃焼による H ラジカル生成が活発であり、これにより生成される O および OH ラジカルが NO の生成および NH_3 の分解に強く影響していることが明らかとなった。一方、LPSI 燃焼は、天然ガス燃焼による H ラジカル生成の影響を受けにくく、このことによりアンモニア専焼に近い条件で低エミッション燃焼が実現されることがわかった。

第5章 2MW 級ガスタービンを用いたアンモニア/天然ガス混焼発電実証試験

2MW 級天然ガス焚きガスタービンに LPSI 燃焼器を搭載し、発電運転時のガスタービン性能に対するアンモニア/天然ガス混焼の影響を評価した。試験では、発電出力を一定に維持した状態でアンモニア供給量を徐々に増加させ、世界で初めてアンモニア混焼率 20%LHV による 2MW 発電運転に成功した。この際の脱硝装置出口における NO_x 濃度を環境基準値以下に抑制することにも成功した。第 3 章で実施した大気圧下における燃焼器単体燃焼試験結果とタービン出口における NO 濃度を比較すると、エンジン試験では燃焼器内圧力が約 11 倍に増加したことで、60% 以上低減することがわかった。また、 NO_2 、 N_2O 、未燃 NH_3 濃度は無視できるほど低濃度であった。このことから、LPSI 燃焼は実際のガスタービンにおいても低エミッション燃焼に有効であることが示された。また、低エミッション化に伴い、燃焼効率も NO_x を未燃分として考慮しても 99.8% 以上を達成した。発電出力、アンモニア混焼率、アンモニア噴射ノズル内径によらず、 NO_x 転換率は燃焼器内アンモニア噴流の貫通長さにより整理できることを見出した。 NO_x 転換率はアンモニア貫通長さを大きくすると単調に減少することから、アンモニア噴射ノズルの適切な設計によりさらなる低 NO_x 濃度化が実現できる可能性を明らかとした。

発電端効率は、第 2 章で予測されたように、アンモニア混焼率が増加するほど増加するが、これにはアンモニア混焼に伴ってタービンおよび圧縮機の断熱効率が変化することが大きく影響していることが明らかとなった。また、アンモニア混焼によりライナ温度は 100 °C 以上低下した。これは、アンモニアの火炎温度は天然ガスに比べて低いことに加え、アンモニア火炎の輻射熱流束は天然ガス火炎のそれに比べて低いことが影響した結果であり、アンモニア混焼は燃焼器の耐久性に対して非常に有利であることが実験的に確認された。

第 6 章 結論

以上の結果より、アンモニア/天然ガス混焼の低エミッション燃焼に有効な LPSI 燃焼技術が確立された。そして、これを用いることでアンモニア/天然ガス混焼ガスタービンが実現可能であることが実証された。