

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「アンモニア直接燃焼」

研究題目「アンモニア内燃機関の技術開発」

研究開発期間：平成 26 年 8 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

研究担当者：壹岐典彦

所属研究機関：国立研究開発法人産業技術総合研究所

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	3
3. 研究開発実施内容	5
3-1. 排出ガス低 NO _x 化技術の開発	
3-1-1. 燃焼器テストリグによる燃焼器試験	
3-1-1-1. 試験設備	
3-1-1-2. 試験結果	
3-1-3. 触媒技術の開発	
3-1-3-1. 目的	
3-1-3-2. 実験方法	
3-1-3-3. 結果及び考察	
3-2. 燃焼強化技術	
3-2-2. 50kW ガスタービンモデル燃焼試験	
3-2-2-1. 試験設備	
3-2-2-2. 試験結果	
3-2-2 燃焼器テストリグによる耐熱材料の耐環境性評価	
3-2-2-1 背景	
3-2-2-2 評価手法	
3-2-2-3 結果	
3-2-2-4 まとめと課題	
3-3. レシプロエンジンにおける燃焼過程の数値解析	
3-4. まとめ	
3-5. 今後の課題	
4. 外部発表実績	38
5. 特許出願実績	44
6. 参考文献	44

図表一覧

- 図 1. エネルギーキャリアであるアンモニアを直接利用とする社会
- 図 2. 燃焼器テストリグ
- 図 3. アンモニア燃焼火炎
- 図 4. 低 NO_x 燃焼器
- 図 5. 燃料噴射方向を 30° 傾けた場合、空気流量全負荷相当の 1/3、燃焼器入口圧 28～33kPa (ゲージ圧)
- 図 6. 燃料噴射方向を 45° 傾けた場合、空気流量全負荷相当の 1/3～1/5、燃焼器入口圧 16～36kPa (ゲージ圧)
- 図 7. スワラ一流路面積の影響
- 図 8. 二次燃焼用空気孔の影響
- 図 9. 低 NO_x 燃焼器 Step 1
- 図 10. 低 NO_x 燃焼器 Step 1 の NO 濃度
- 図 11. 低 NO_x 燃焼器 Step 2 の NO 濃度
- 図 12. 担体が異なる鉄系触媒の NO の除去率
- 図 13. Fe/ベータ型触媒調製法による触媒活性の違い
- 図 14. 調製法の異なる触媒の XRD 測定結果
- 図 15. イオン交換法および含浸法触媒の TEM 観察像
- 図 16. Fe/ベータ型触媒の担持料の影響
- 図 17. 触媒安定性の検討
- 図 18. 長時間の触媒活性試験
- 図 19. ガスタービン発電設備
- 図 20. マイクロガスタービンのサイクル
- 図 21. ガスタービン燃焼器
- 図 22. アンモニアガス供給方法
- 図 23. 常用のアンモニア供給設備 (1 トンボンベ)
- 図 24. 試運転状況 (アンモニアの代わりに窒素ガス噴射)
- 図 25. 灯油-アンモニア混焼 (21kW 発電、75,000rpm)
- 図 26. アンモニア専焼運転 (41.8kW 発電、80,000rpm)
- 図 27. アンモニア専焼運転範囲
- 図 28. 再エネアンモニアによる発電
- 図 29. 排出ガス成分の特性
- 図 30. メタン-アンモニア混焼 (41.8kW 発電、80,000rpm)
- 図 31. メタン-アンモニア混焼の排出ガス特性
- 図 32. アンモニア混焼割合の排出ガスへの影響 (31.4 kW 発電、75,000 rpm)
- 図 33. 火炎可視化用治具
- 図 34. 火炎画像(39.1kW 発電、75,000rpm)
- 図 35. リッチ・リーン燃焼器の特性
- 図 36. 試作されたガスタービン用燃焼器
- 図 37. 低 NO_x 燃焼器の特性
- 図 38. Step1 燃焼器の排ガス
- 図 39. Step1 燃焼器の排ガス(燃焼器入口温度)
- 図 40. Step1 の燃焼器の N₂O 濃度

- 図 4 1. 曝露試験サンプルおよび試験治具
- 図 4 2. Inconel サンプルの外観
- 図 4 3. Inconel サンプルの微細表面観察結果
- 図 4 4. YSZ サンプルの外観
- 図 4 5. YSZ サンプルの微細表面観察結果
- 図 4 6. 圧縮行程における速度分布の LES 計算結果
- 図 4 7. 燃焼計算時の計算領域と初期流動場
- 図 4 8. メタンとアンモニアの燃焼場における温度分布の時間変化

- 表 1. スケジュール
- 表 2. ベースガスタービンの仕様
- 表 3. 燃料切り替え手順
- 表 4. Step1 の燃焼器の形状 (詳細比較)

1. 本研究の目的

CO₂ 排出量を大幅に削減する低炭素社会実現には、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要とされる。しかし、水素は貯蔵や輸送に関して、技術的ハードルを多く抱えており、純水素を使用したシステムの構築は困難をともなう。また、太陽光や風力などの再生可能エネルギーは生産地が一般には都市部など消費地の遠隔にあり、さらに時間や季節、天候によって得られるエネルギー量が大きく変動する。クリーンで、かつ量的なポテンシャルも備えている再生可能エネルギーを大規模に利用するためには、エネルギーを水素として含む化学物質（エネルギーキャリア）に変換し、これを消費地まで運搬して貯蔵し、必要な時に最適の形でエネルギーに戻すシステムの構築が必要となる。アンモニアは、肥料原料や汎用化学品原料として大量に使用され、その製造は Haber-Bosch 法として確立されている。沸点が -33°C 、常温では 8 気圧で液化するので水素と比較して液化がはるかに容易である。その体積当たりの水素貯蔵量も約 18 wt%と水素吸蔵合金 (<5 wt%) や高圧水素に比して高密度で、さらに液体水素、有機ハイドライドに比しても水素貯蔵量は大きい。また製造・輸送・貯蔵まで一貫した技術が十分に整備されており、次世代の低炭素社会を担うエネルギーキャリアとしての可能性を十分に秘めており、アンモニアをエネルギーキャリアならびにケミカルストレージして直接利用する社会が構築される（図 1）。現在、炭化水素や水素燃料のエネルギー変換で確立されている技術を、エネルギーキャリアであるアンモニア燃料を利用可能な形に改変あるいは転用することにより、アンモニアの燃料としての有効性を早急に明らかにすることが重要である。5 年間の本提案の中でその有効性を際立たせることによって、アンモニアのエネルギーキャリアとしてのポテンシャルと将来像が広く認知され、その結果、アンモニア利用技術より高いハードルがあると考えられている再生可能エネルギーからのアンモニア製造技術開発も推進され、加速される。

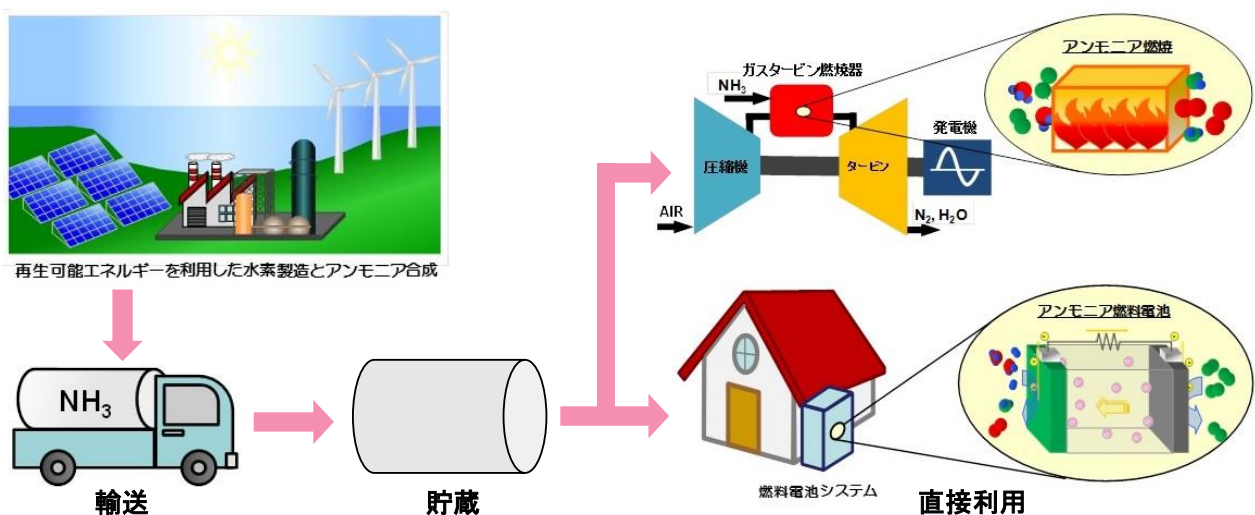


図 1. エネルギーキャリアであるアンモニアを直接利用とする社会

アンモニア利用技術の中で、直接燃焼については技術開発のベースとなるガスタービン、レシプロエンジン、工業炉および工業用バーナが存在し、かつ火力発電所や工業事業所に

は一定規模のアンモニア輸送、貯蔵インフラがすでにあるので、それぞれの技術開発の成果を実用燃焼システムに速やかに応用できる位置にある。このようにアンモニア燃焼技術はアンモニアエネルギーキャリアおよびCO₂排出削減エネルギーシステムの実現に向けた牽引者となるべき存在で、この試験結果をいち早く社会に発信していく。そのため、まず克服すべき技術課題は以下の通りである。

①排出ガス低NO_x化技術の開発：

アンモニア燃焼の総括反応式は $4\text{NH}_3+3\text{O}_2\rightarrow 2\text{N}_2+6\text{H}_2\text{O}$ 、代表的炭化水素燃料であるプロパンの総括反応式は $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2\rightarrow 3\text{CO}_2+4\text{H}_2\text{O}$ である。アンモニア燃焼がCO₂フリーであることを説明する上で、これらの総括反応式を用いることは正しい。どのような燃料に対しても、空気を酸化剤に用いる限り燃焼ガス中にNO_xが存在する。NO_xは主にNO、NO₂、N₂Oの合計量で測られる。炭化水素火炎が主発熱帯付近でのNO濃度が低く下流側で増大するのに対し、アンモニア火炎は燃料起源のフェーエルNOであるため、主発熱帯付近でNO濃度が高く下流側で減少する。NOは火炎下流でNO₂に変化する。実用燃焼器の大きさは有限であるため滞在時間も有限であり、アンモニア燃焼のNO_x排出量は炭化水素燃焼のNO_x排出量に比較して大きいということが一般的に言える。これを低減し、環境基準内に収める技術開発が第一の課題である。

②燃焼強化技術の開発：

アンモニアは炭化水素燃料に対して燃焼速度が小さい（アンモニア：10 cm/s、プロパン：40 cm/s）、着火温度が高い（アンモニア：651°C、プロパン：432°C）、可燃濃度範囲が狭い（アンモニア：当量比0.69～1.3、プロパン：当量比0.51～2.51）など、総合的に燃焼性が低い。断熱火炎温度も低い（アンモニア：1800°C、プロパン：2000°C）これはサーマルNO低減に効果がある。従来の燃焼機器にそのまま使用すると、火炎の安定性低下や未燃アンモニアの排出、レシプロエンジンでは失火やサイクル変動、燃焼効率低下が生じる。これらを改善する技術開発が第二の課題である。

ガスタービンやレシプロエンジンなどの実用燃焼器においてこれらの技術課題を解決するために、東北大学が提案した新燃焼コンセプトに基づき、産総研は燃焼器の改良を進め、新燃焼コンセプトの実現可能性を検証する。また、数値シミュレーションによるレシプロエンジンにおけるアンモニア燃焼解析を通じて、アンモニア直接燃焼グループの目標達成に貢献する。このため、レシプロエンジンにおける燃焼効率予測、排気アンモニア低減手法の検討を行い、クリーンアンモニアエンジンの検討を行う。

2. 研究開発目標とマイルストーン

産総研はアンモニアを燃料とした内燃機関の燃焼技術の開発を担当し、下記の通り研究を遂行する。

①排出ガス低 NO_x 化

アンモニア直接燃焼が可能な試作燃焼器を適用した 50kW 級マイクロガスタービンを用いたモデル燃焼試験において、火炎基礎特性試験と反応経路解析の成果を活用した低 NO_x 化技術を検証する。

②燃焼強化技術

アンモニア直接燃焼が可能な試作燃焼器を 50kW 級マイクロガスタービンに適用して、アンモニア内燃機関の実現性を示すモデル燃焼試験を行う。燃料・空気の供給方法の改良、燃焼器改良・燃焼状態の把握に取り組む。

③レシプロエンジンモデル試験と目標値達成評価

数値シミュレーションによるレシプロエンジンにおけるアンモニア燃焼解析を通じて、アンモニア直接燃焼グループの目標達成に貢献する。このため、レシプロエンジンにおける燃焼効率予測、排気アンモニア低減手法の検討を行い、クリーンアンモニアエンジンの検討を行う。

表 1 スケジュール

研究開発項目	初年度 (H26.7~H27.3)	2年度 (H27.4~H28.3)	3年度 (H28.4~H29.3)	4年度 (H29.4~H30.3)	5年度 (H30.4~H31.3)
1. 排出ガス低NO _x 化 目標1. モデル燃焼試験における低NO _x 化評価				(8. 5) モデル試験結果における低NO _x 化原理の確認ならびに目標値達成	(8. 5)
2. 燃焼強化技術 目標2. 50 kWガスタービンモデル燃焼試験	(2. 8) マイクロガスタービンによる世界初のモデル試験実施	(2. 8) アンモニア専焼混焼実証試験	(3. 8) アンモニア-メタン	(4. 0) マイクロガスタービン排気ガスのクリーン化を目指したモデル試験	(4. 0)
目標3. 燃料・空気の供給方法の改良	(1. 2) アンモニア供給における課題抽出	(1. 2) 対策技術の検証	(2. 2)		
目標4. 燃焼器改良・燃焼状態の把握	(1. 2) 排気ガス計測、燃焼状態観察	(1. 2) 燃焼状態改善のための課題抽出と改善法の検証	(2. 2)	(2. 7) 改良型燃焼器の試作、試験燃焼	(2. 7)
目標5. 耐久性の検証	(2. 0) ガスタービンにおけるアンモニアの長時間利用における課題を抽出・整理	(2. 0)	(2. 0)		
3. レシプロエンジンモデル試験と目標値達成評価 目標6. 数値シミュレーション	(1. 8) アンモニア燃焼メカニズムの調査、選定、検証	(1. 8) アンモニア燃焼計算の試行、燃焼効率予測、排気アンモニア低減手法の検討	(1. 8)	(1. 8) クリーンアンモニアエンジンの検討	(1. 8)

<マイルストーン>

初年度(H27.3)

目標 1. マイクロガスタービンとしての発電出力が正となり、自立運転が可能であることを示す。発電出力 10kW 以上

目標 2. 発熱量 200kW 以上の燃料供給

- 目標 3. マイクロガスタービンおよびレシプロエンジンにおけるアンモニア燃焼による排気ガスに対応した分析システムの構築
- 目標 4. 装置の各部の初期状態を把握。耐久性が低い部材を推定。課題の抽出
- 目標 5. アンモニア燃焼メカニズムの調査、選定、検証

2年度(H28.3)

- 目標 1. アンモニア燃焼による発電出力 30kW 以上の達成
- 目標 2. アンモニア燃焼による発電出力 30kW 以上での排出ガス分析
- 目標 3. 燃料供給の課題抽出
- 目標 4. 耐久性の課題の抽出
- 目標 5. レシプロエンジンを対象としたアンモニア燃焼計算の試行

3年度(H29.3)

- 目標 1. アンモニア専焼試験・アンモニア-メタン混焼実証試験での発電出力 40kW 以上の達成
- 目標 2. アンモニア燃焼による発電出力 40kW 以上での排出ガス分析
- 目標 3. 燃料供給の課題提示
- 目標 4. 耐久性の課題の抽出・整理
- 目標 5. レシプロエンジンにおける燃焼効率予測,排気アンモニア低減手法の検討

4年度(H30.3)

- 目標 1. マイクロガスタービン出口における未処理排気中の未燃成分 10%削減
- 目標 2. レシプロエンジンにおける排気アンモニア低減法提案

5年度(H31.3)

- 目標 1. マイクロガスタービン出口における未処理排気中の未燃成分を半減する
- 目標 2. 脱硝装置の規模を 1/2 以下に縮小しても、排出ガス中の NO_x を 70ppm (16%O₂換算) 以下にできることを示す
- 目標 3. マイクロガスタービン出口における未処理排気ガス中の未燃成分半減
- 目標 4. クリーンアンモニアエンジンの検討

3. 研究実施内容

アンモニアを燃料としたガスタービンはいろいろな機関で行われている。1960年代にはソーラーT-350 ガスタービンエンジンの開発が行われ⁽¹⁾⁽²⁾、アンモニアガス用燃焼器の他、触媒燃焼器も取り組まれたものの、燃焼効率は不十分なままであった。その後、アンモニアを燃料としたガスタービンの開発はしばらく無かったようであるが、2013年にはSpace Propulsion Inc.が発電用ガスタービンの構想とジェットエンジンを用いた開発計画、燃焼器試験の結果を発表した⁽³⁾⁽⁴⁾。また、2016年にはValeraらがガスタービン燃焼器の開発を開始し、アンモニア-水素混焼、メタン-アンモニア混焼に取り組んでいる⁽⁵⁾。日本では、SIP エネルギーキャリアのプロジェクトにおいて、アンモニアを燃料とするガスタービンの開発が取り組まれている。マイクロガスタービンは産総研とトヨタエナジーソリューションズが、産業用ガスタービンはIHIが、発電用大型ガスタービンはMHIENG(三菱重工エンジニアリング)とMHPS(三菱日立パワーシステムズ)が担当している。IHIでは都市ガスとアンモニアの混焼に取り組み、2MW級のコジェネレーション用ガスタービンの実証試験を行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。MHIENGとMHPSではガスタービンの排気ガスの熱を有効に利用して、アンモニアを改質して水素としてから燃焼するシステムを検討している。

産総研ではトヨタタービンアンドシステム（現トヨタエナジーソリューションズ）製50kWマイクロガスタービンをアンモニア燃焼用に改造し、アンモニア直接燃焼ガスタービンの実証試験を行っている。この開発は大きく3つのフェーズに分けることができ、第1フェーズ（2013～14年度）は仮設のアンモニア供給設備を用いて試験を行い、灯油-アンモニア混焼にて21kWの発電を実証した。排気ガス中には1200ppm（16%O₂換算）を超えるNO_xが含まれていたが、脱硝装置により10ppm（生値）以下に低減できることを確認した。常設のアンモニア供給設備を完成させた後の第2フェーズ（2015年度）では、灯油で起動しながらもアンモニア専焼、メタン-アンモニア混焼による運転を行い、41kW以上の発電に成功した。第3フェーズ（2016～18年度）では、低NO_x燃焼器を開発するために、燃焼器テストリグを整備し、ガスタービン排気中のNO_x低減に取り組んでいる。NO_x排出を数分の一に下げることにより脱硝装置の小規模のものとして、経済性を改善し、実用化を目指している。時系列ではアンモニア直接燃焼ガスタービンの運転を先に開始し、その後、低NO_x燃焼に取り組んでいるが、本報告書では、課題設定に従って、「3-1. 排出ガス低NO_x化技術の開発」、「3-2. 燃焼強化技術」の順に記載しているので、注意されたい。また、レシプロエンジンについては、「3-3. レシプロエンジンモデル試験と目標値達成評価」に記載している。

3-1. 排出ガス低NO_x化技術の開発

3-1-1. 燃焼器テストリグによる燃焼器試験

3-1-1-1. 試験設備

アンモニア用の試作燃焼器ではNO_x排出濃度が高く、低NO_x燃焼が可能な燃焼器に改良する必要がある。燃焼強化と低NO_xの両立を図るためには、燃焼状態をより詳しく調べる必要がある。ガスタービンの燃焼器の改良を進めるため、図2の燃焼器テストリグを設置した。メタンガスを燃料として燃焼器の着火が可能であることを確認し、メタンからアンモニアに切り替えて、図3のように75,000rpm時40kWに相当する燃焼条件で運転可能であることも確認した。なお、本課題に関連するガスタービン試験運転については「3

－ 2. 燃焼強化技術」にまとめる。

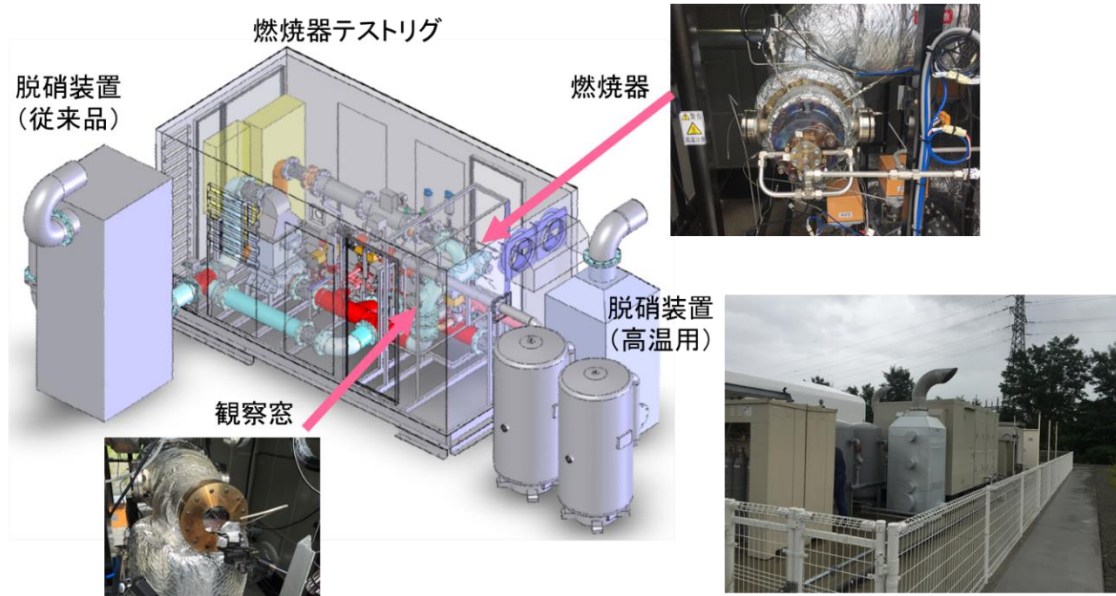


図 2. 燃焼器テストリグ

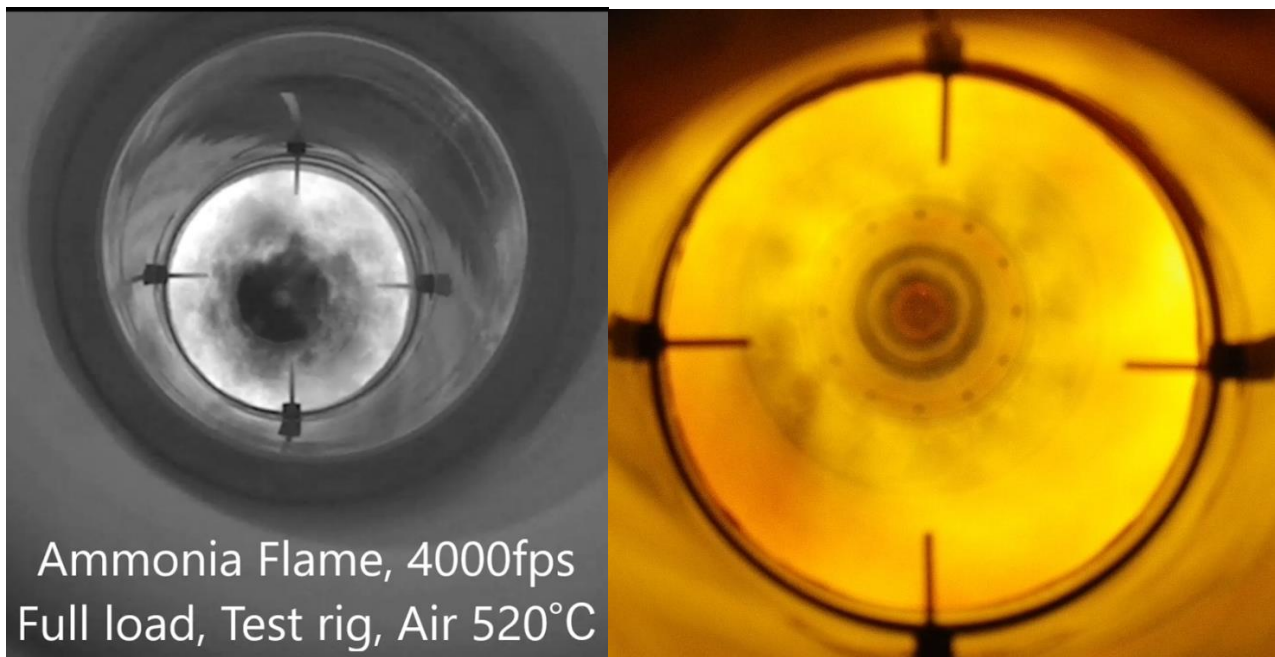


図 3. アンモニア燃焼火炎

燃焼器テストリグでの燃焼状態観察においては、タービンにおける膨張課程による圧力低下の代わりに燃焼器下流に絞りをおいて圧力を下げているため、燃焼ガスの流量に応じて燃焼器内の圧力が変化する。着火時は燃焼用空気の流量を少なくして、火炎の吹き飛びを防いでいるため、燃焼器内はほぼ大気圧であり、75,000rpm 運転時の全負荷 43kW 発電相当の条件として、燃焼用空気流量 1256Nm³/h として、燃焼器圧が約 3 気圧になるような絞りを設置している。ガスタービンの場合はタービン入口温度を測定することはできないが、燃焼器テストリグでは燃焼器出口温度すなわちタービン入口温度に相当する温度を

計測できる。燃焼用空気バイパスの空気孔を通して側方からの火炎観察も可能である。またガスタービン運転時より外れた条件での試験を行うことも可能である。

一方、燃焼器テストリグではタービンによる膨張が行われなため、絞りによる圧力低下後も燃焼ガスが高温になっている。これを冷やすために、冷却用空気で希釈している。冷却用空気や熱交換器のバイパス割合、電気ヒーターなどを変更して燃焼器試験の条件を手動で調整するが、空気源の容量にあまり余裕がないため、空気の使用量などによって弁の開度を調整し直すため、データロガーの計測ユニットを増設して制御盤のデータを記録しているが、手動のため調整に時間がかかる。そこで燃焼器テストリグ制御装置を調達し、まず制御装置単体での動作確認を行った。また、燃料ガスの供給系はガスタービンと共通であり、アンモニア専焼での試験も行うため、試験頻度が高まると、ガスコンプレッサーのシール寿命も課題となる。ガスコンプレッサーのシール交換などメンテナンスに関わるよる試験中断を短縮し、計画的にガスコンプレッサーのコア部分を交換用に導入した。

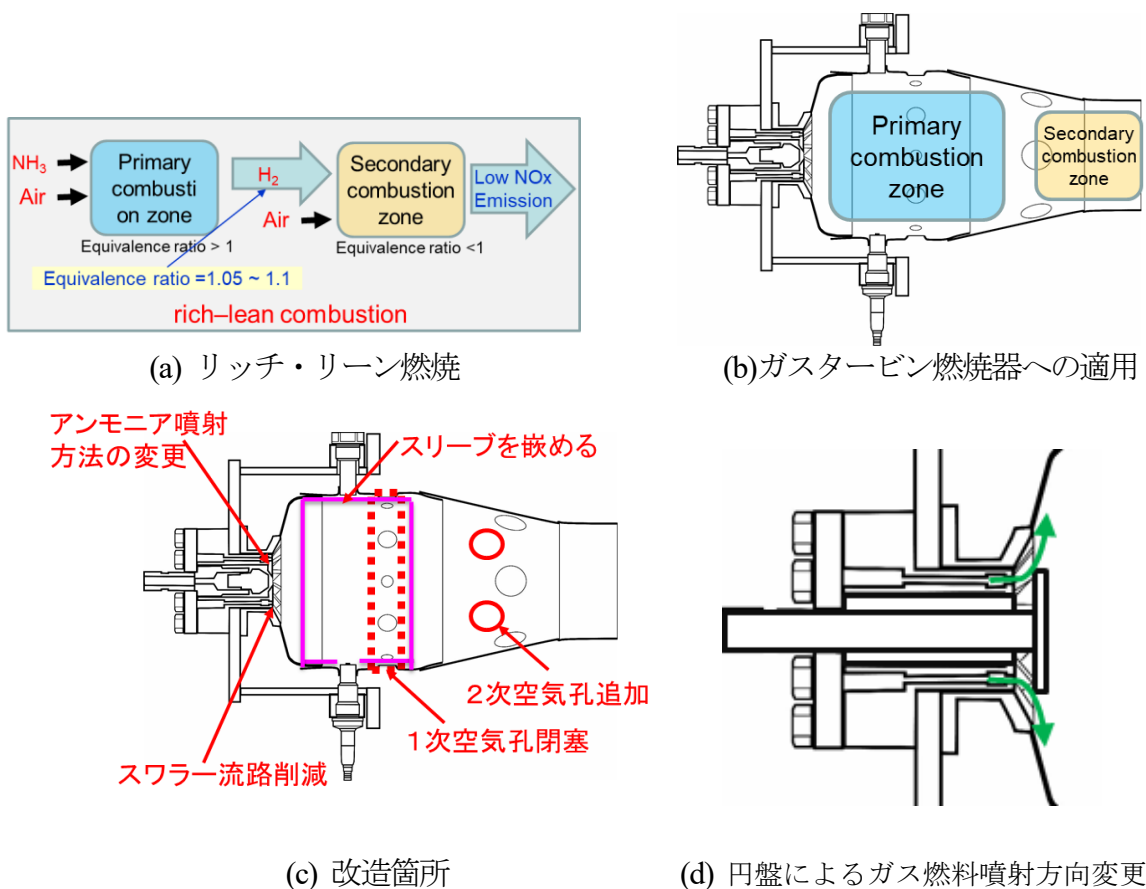


図4. 低NO_x燃焼器

3-1-1-2. 低NO_x燃焼器

変更する前のアンモニア燃焼用ガスタービン燃焼器を Step 0 と呼ぶことにする。基礎研究ではアンモニア燃料がややリッチな条件では NO_x 排出量を低く抑えながら、未燃アンモニアも発生しないことが確認されており、その後未燃物として残った水素を燃焼させることで、図4(a)のようにリッチ・リーン燃焼方式を採用することで全体として NO_x 発生を抑えられる可能性がある。本アンモニア燃焼器テストリグでアンモニア専焼が可能であることを確認した上で、低NO_x燃焼器の開発のためのデータ取得を開始した。開発速度を

上げるため、詳細なデータ解析よりも低 NO_x 燃焼を可能とする燃焼器形状を調べることにした。ガスタービンの燃焼器に適用する場合、(b)のように燃焼器出口近くの希釈孔から供給される空気を二次燃焼空気とすることで、既燃ガスの再循環流による保炎は維持しつつ、一次燃焼領域と二次燃焼領域を分けることができ、体積の大きな一次燃焼領域でアンモニアを十分に分解できる可能性が高まる。しかし、燃焼器ライナーには空冷や燃焼改善のために様々な空気孔があり、それらが一次燃焼領域の当量比を最適に保つ上で問題となる。アンモニア燃焼用の試作燃焼器について、どのような改良を行えば低 NO_x 燃焼が実現できるのかを探るために、図 4 (c)に示す様々な箇所を変更してみた。

3-1-1-2. 試験結果

燃料の噴射方向を 30° 傾けたガス燃料噴射弁に交換して、更にリッチ燃焼状態に近づけるため、燃焼用空気流量を全負荷の 1/3 としたところ、図 5 のように燃料流量の増加とともに NO が低下する傾向を確認した。ただし、燃焼器出口温度が 1000°C をこえる高温になった。

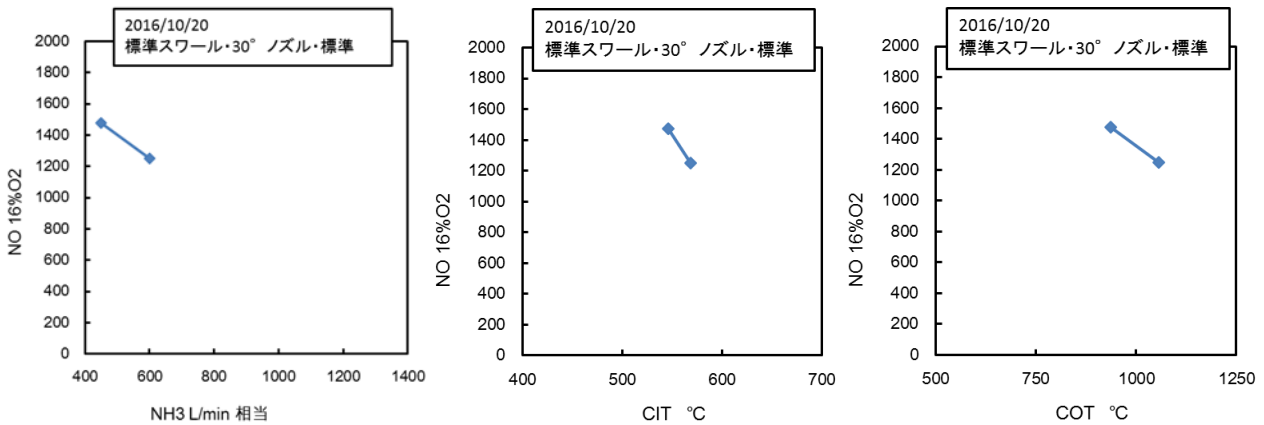


図 5. 燃料噴射方向を 30° 傾けた場合、空気流量全負荷相当の 1/3、燃焼器入口圧 28~33kPa (ゲージ圧)

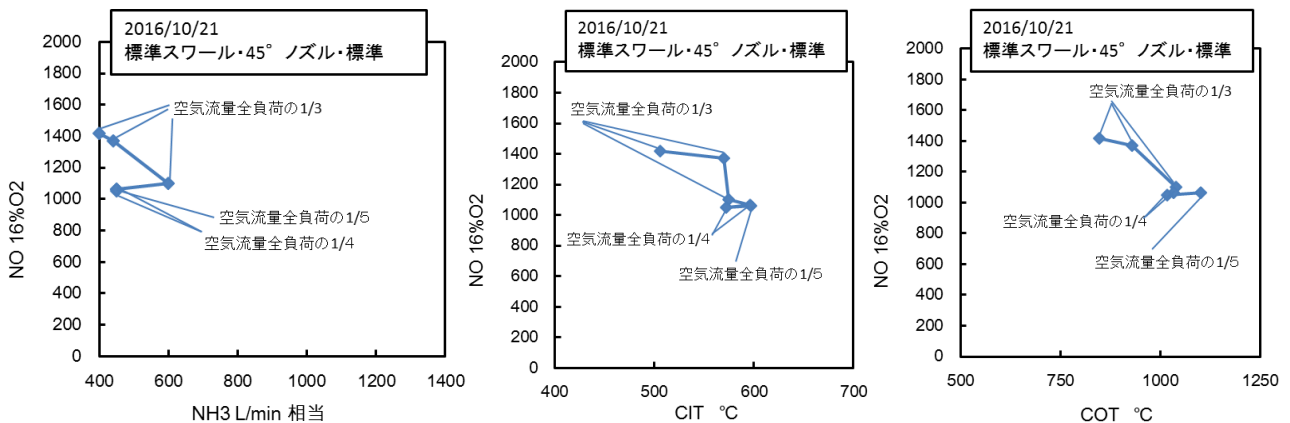


図 6. 燃料噴射方向を 45° 傾けた場合、空気流量全負荷相当の 1/3~1/5、燃焼器入口圧 16~36kPa (ゲージ圧)

噴射方向を 45° 傾けたガス燃料噴射弁に交換して、更にリッチ燃焼状態に近づけるため、燃焼用空気流量を全負荷の 1/3 の場合、図 6 のように燃料流量の増加とともに NO が低下する傾向を確認した。アンモニア流量が 600NL/min の場合に、噴射方向 30° 傾けたガス

燃料噴射弁に対して 150ppm 低い結果となった。そこで、(d)のように、噴孔近くに円盤を設置してアンモニアの噴射方向を外向きにするものを試した。

さらに次の改造を試みた。一次燃焼領域に入る空気流量を減らすため、①ライナー側面の燃焼空気孔を塞ぐ、②スワラーの流路面積を減らす、③二次燃焼用空気孔を追加し、面積を増やす、④一次燃焼領域の燃焼器ライナーの内側にスリーブを入れて冷却用空気が一次燃焼領域に流入しにくくする、これらの対策を燃焼器テストリグで試した。

対策①を行っただけでは NOx 低減効果を確認できなかったため、対策①の改造で行った上で、②～④の効果を調べた。一次燃焼領域に入る燃焼用空気流量が減ると、再循環流が弱まるのが想定されるため、アンモニアガスの噴射方向を外向きに変更した。NOx 低減効果は、NOx の約 9 割を占める NO を用いて評価した。

スワラーの流路面積を 1/2 にした場合の結果を図 7 に示す。テストリグのアンモニア供給量を超えるため、メタン-アンモニア混焼となるため、ばらつきがある。40kW 以上の発電に相当する発熱量 230kW 以上に燃料流量を増やしていくと、元の燃焼器 (Step 0 とする) に対して、NOx が半分以下になる流量条件がある。一次燃焼領域に供給される空気対して、燃料流量が増えての当量比がリッチ・リーン燃焼に適切な範囲になることで NO の排出量が低下していくが、燃料流量が多すぎると、一次燃焼領域から未燃アンモニアが二次燃焼領域に到達し、NO 排出量が再び増加していくものと解釈できる。

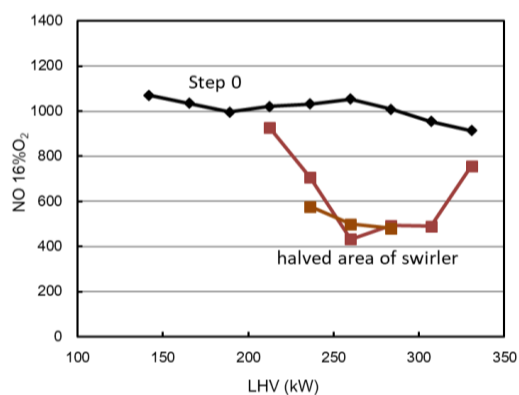


図 7. スワラー流路面積の影響

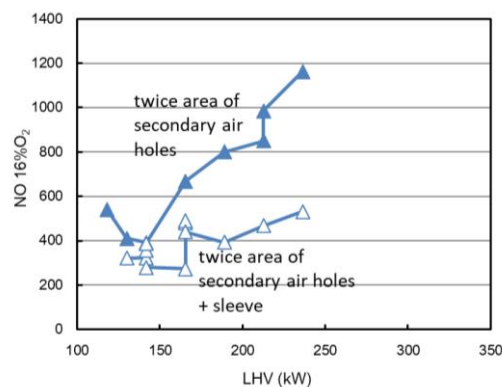
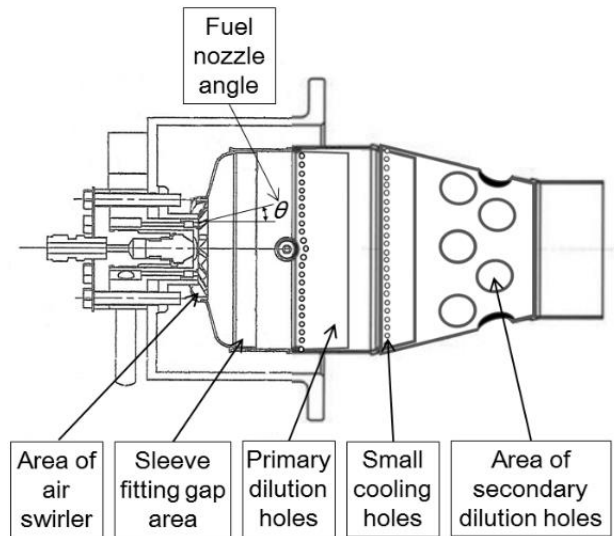


図 8. 二次燃焼用空気孔の影響

一方、スワラーの流路面積を減少する代わりに二次燃焼用空気孔の面積を増やした場合の結果を図 8 に示す。スワラー流路面積を増やした場合と同様に NO が低下する流量条件がある。二次燃焼用空気孔の面積を増やしていくと、NO が低下する発熱量の範囲が低い方にシフトする。NO の最低値は 400ppm 程度である。さらにスリーブを挿入した場合は NO の最低値が 300ppm 以下になり、元の 1/4 以下となった。このことから、冷却用空気の混入が NO 低下に障害となる可能性が高い。なおスリーブは短時間で焼損した。

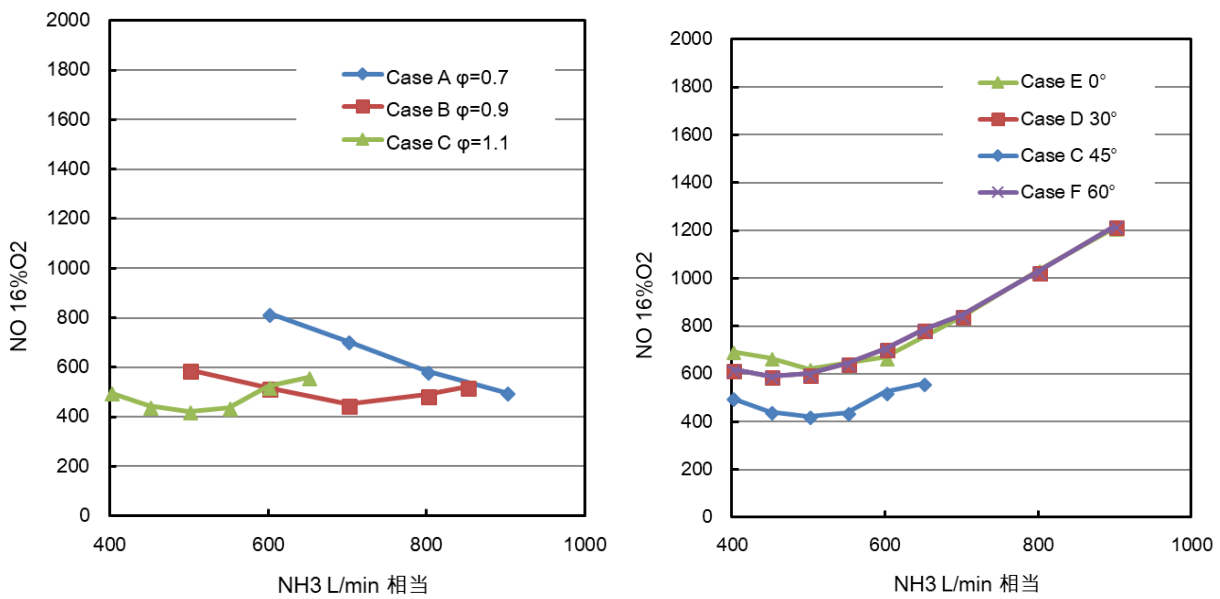
前述の NO 濃度の挙動を考察した結果、トヨタエナジーソリューションズ、東北大とともにガスタービン運転用の低 NOx 燃焼器を開発した。最初に試作したものを、Step 1 と呼ぶ。図 9 のように一次空気孔は廃止し、パッチを着け外すことで二次空気孔を 6～12 に変更可能とし、ガス燃料噴射弁の噴射方向を変えて試験を行えるようになっている。燃焼器ライナーのハマアイ部分のスリットは無くなり冷却用の空気の流入は少なくなっている。ただし、燃焼器ライナー冷却のため、冷却空気孔の小孔は残っている。ライナーの健全性を確認するため、熱電対が取り付けられ、1000℃以下で試験を行うようにした。二次空気孔が 6 孔の場合、ガスタービンの定格運転時に、一次燃焼領域の当量比が 0.7 に、9 孔

の場合、当量比が 0.9 に、12 孔の場合、当量比が 1.1 になるように設計されている。ただし、運転状況により空気流量の分配は変化するので、設計時の当量比は目安である。また、スワラーの流路面積はリング状の絞りを加えることで、Step 0 より減らしている。



	1次空気孔	スワラー流路面積	燃焼器ライナーのハメアイ部分の隙間	ライナーの冷却空気孔	2次空気孔の数	1次燃焼領域の当量比(設計値)	ガス燃料噴射弁の噴射角度
Case A	なし	Step 0より少ない	隙間なし	出口を下流側に移動	6	0.7	45°
Case B					9	0.9	45°
Case C					12	1.1	45°
Case D					12	1.1	30°
Case E					12	1.1	0°
Case F					12	1.1	60°

図 9. 低 NO_x 燃焼器 Step 1



(a) 二次空気孔の影響

(b) 噴射角度の影響

図 10. 低 NO_x 燃焼器 Step 1 の NO 濃度

燃焼器テストリグで燃焼試験を行ったところ、NO 濃度は図 10 のようになった。二次空気孔の面積を増やしていくと、燃料流量が少ない方に NO 濃度の極小値は移動し、極小値は 400ppm (16%O₂ 換算) 前後であり、図 7 と大きな差は無い。燃焼器ライナーのハメアイ部分から流入する冷却用空気は減らせたものの、1 次燃焼領域の上流側で流入する空気よりも 1 次燃焼領域の中下流側で流入する空気の方が NO_x を増やす効果が高い可能性がある。燃焼器ライナー温度が高くなるため、最大燃料流量が制約され、噴射角度 45° の場合は 700NL/min しか燃料は増やせなかった。また噴射角度を 45° 以外にすると NO 濃度は高くなった。燃料ガスの噴射角度でも NO 濃度に影響があることがわかった。

ライナーの冷却能力改善を図り、冷却空気孔の出口をより下流側に延ばした低 NO_x 燃焼器 Step 2 が試作された。Step 2 では噴孔径をやや大きくしたガス燃料噴射弁を用意した。アンモニアの噴流速度をやや抑えてペネトレーションを押さえることにより、燃焼器ライナー付近での燃焼を押さえた方がライナー温度を低くできる可能性を調べた。噴射角度は 45° と 60° の 2 種類試作した。試験結果は、図 11 のように NO 濃度は 359ppm まで低下した。二次燃焼領域の当量比 1.1 (設計値) の場合、噴射角度の影響はあまり大きくは無く、旧型の 45° と新型の 45° との差もあまりなかった。

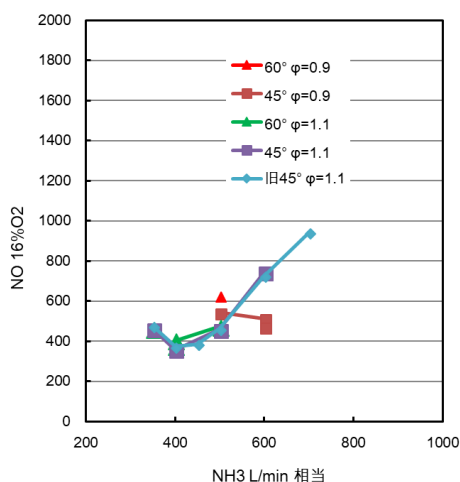


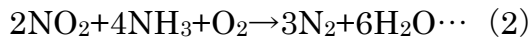
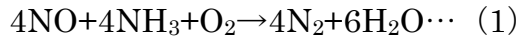
図 11. 低 NO_x 燃焼器 Step 2 の NO 濃度

一次燃焼領域の冷却が耐久性とともに実用化に向けた課題である。低 NO_x 燃焼器が Step0 と同様な運転方法でガスタービンを起動し、リッチ・リーン燃焼できるかなど、マイクロガスタービンで実証する必要がある。実証試験結果は「3-2-2. 50kW ガスタービンモデル燃焼試験」にて報告する。Step2 をマイクロガスタービンに搭載して発電試験を行った結果、NO 排出が約 1/5 の 222ppm (16%O₂ 換算) となり、NO_x 排出濃度を低く抑えられることが確認できた。更に改良を進め、Step3, Step4 燃焼器を開発し、脱硝触媒を減らしてパッケージ内に脱硝触媒を内蔵した新 50kW パッケージを用意し、NO_x の評価を行った。試験の結果、発電出力 48.6kW において脱硝処理前の NO_x は 164ppm (16% O₂ 換算) を達成し、更に脱硝触媒で 25ppm (16%O₂ 換算) まで低減させた。内容はトヨタエナジーソリューションズの終了報告書に記載されている。

3-1-3. 触媒技術の開発

3-1-3-1. 目的

アンモニア脱硝技術は、日本企業によって 1979 年に大型油焚きボイラー用として世界で初めて実用化した技術である。排出ガス中に NH_3 を注入して効率的に NO_x を除去する技術である。触媒としては、担体に TiO_2 、活性成分に酸化バナジウム (V_2O_5) を用いたハニカム型が主に用いられる。脱硝反応は次の (1)、(2) 式の通りである。



反応に必要なアンモニア量は、排ガスに含まれる NO_x のほとんどが NO であるため、(1) 式の通り低減 NO_x 量と同程度となる。現在は、各種施設などに設置しているディーゼルエンジン、ガスエンジン、ガスタービン、小型ボイラーなどの各種 NO_x 発生源に対応した脱硝システムが確立されている。本システムでは、反応温度は、 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以下の中低温で行われているため、接触時間(SV)も 1000 h^{-1} と程度と小さく触媒システムは比較的大きなものとなっている。

本検討では、システムの小型化を目指して、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上の高温域で動作する触媒の開発と高性能化により、脱硝装置の規模を 1/2 以下に縮小しても、排出ガス中の NO_x を 70ppm ($16\%\text{O}_2$ 換算) 以下にできる触媒システムを開発する。したがって、従来用いられていた $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 系触媒では、高温域の反応温度では十分な性能を示さないため、高温域でも機能する新規触媒および SV が 20000 h^{-1} を超える条件でも NO_x を低減できる新機構機能触媒の開発が必要となる。そのために、様々な活性成分と担体の組み合わせを検討する必要があるが、現在の知見より、活性成分には遷移金属、担体にはゼオライト系酸化物が高活性を示すことがわかっている。本研究では、これらの最適化を行うと共に、実用的に使用するためのハニカム触媒化についても検討を加えた。

3-1-3-2. 実験方法

(1) 触媒調製法

触媒の調製は、含浸法および共沈法を用いて行った。簡単に手法をまとめる。

- ・含浸法：ポアフィリング法と呼ばれる手法で調製した。担体であるゼオライトや金属酸化物の細孔容積と同量の蒸留水に活性成分である硝酸塩金属水和物を溶解させた水溶液を、担体に徐々に染み込ませて活性成分を担体に担持した。その後、 $110\text{ }^\circ\text{C}$ で一晩乾燥し、空气中 $600\text{ }^\circ\text{C}$ で 3 時間焼成して触媒とした。

- ・イオン交換法：担体であるゼオライトや金属酸化物に活性成分である硝酸塩金属水和物を溶解させた水溶液を加え、 $80\text{ }^\circ\text{C}$ で 24 時間静置した。その後、ろ過して $110\text{ }^\circ\text{C}$ で一晩乾燥した。乾燥後、空气中 $600\text{ }^\circ\text{C}$ で 3 時間焼成して触媒とした。

- ・共沈法：活性成分と担体の前駆体混合水溶液と沈殿剤を同時に蒸留水中に加え、触媒前駆体沈殿物を得る。一例として、活性成分であるインジウム前駆体 (硝酸インジウム三水和物) と鉄前駆体 (硝酸鉄九水和物) および担体であるアルミナ前駆体 (硝酸アルミニウム九水和物) を所定比で全体が 1 mol/l の濃度となる水溶液を調製した。沈殿材として炭酸ナトリウム 1.2 mol/l の水溶液を調製した。それぞれ、 200 cc の溶液を 400 cc の水 15000 rpm 攪拌中に 10 cc/min で加えて混合沈殿物を得た。その後、さらに 15 分 15000 rpm で攪拌した。水を加えて 3 L にし、沈殿物を 24 時間熟成した。その後、ろ過し、再び 3 L の水を加え 30 分攪拌し、ろ過して洗浄した。この洗浄を 2 回繰り返した。ろ過した沈殿物

は、110 °Cで一晩乾燥し、空气中 600 °Cで3時間焼成し触媒とした。

(2) 活性試験法

NO_x還元反応は通常の固定性流通式反応装置で行った。石英製の反応管に触媒を0.05 g (0.08 cc) 充填した。その後、窒素気流中で500 °Cで1時間の前処理を行った。前処理終了後、300 °Cまで降温し、反応ガス(He : 77.9 %, H₂O : 5.9 %, O₂ : 16.1 %, NH₃:500 ppm, NO:500 ppm)を導入し反応を開始した。一定時間反応を行った後、300 °Cから600 °Cまで昇温した。反応ガスは、窒素ガスで5倍に希釈してフーリエ変換赤外 (FTIR) 多成分分析計 (Gasmeter) に導入し、NO, NO₂, NH₃, N₂等のガス分析を同時に行った。

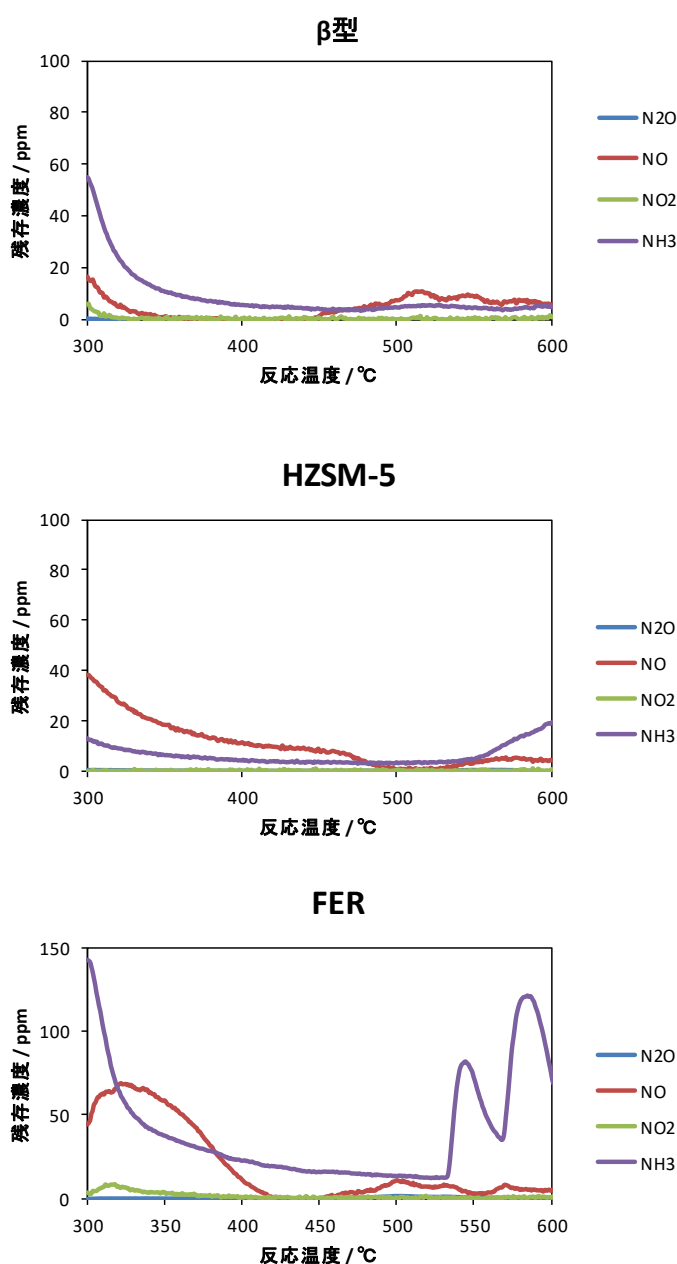


図 1 2. 担体が異なる鉄系触媒の NO の除去率

3-1-3-3. 結果及び考察

従来の脱硝触媒は、200℃程度の低温で使用されていたが、直接燃焼の場合には、500℃以上で作用する高温型の触媒システムの開発が必要とされる。そこで、活性成分を鉄とし、各種ゼオライトに含浸担持した触媒を用いて活性試験を行った。結果を図12に示す。鉄の担持量は5wt%とした。ベータ型ゼオライトを用いた場合、300℃程度の低温域では、N₂OやNOの残存が認められるが、反応温度の上昇とともに、残存量は著しく低下し反応温度450℃以上では、NO_xの残存量はほぼ認められなくなった。一方、H-ZSM-5型ゼオライトの場合、反応温度を上昇してもNOの残存率は低下せず、500℃付近でNO_xの残存量は低下する。しかし、残存NO量は1%程度ある。その後、反応温度の上昇とともに、NH₃濃度が増加していくことがわかる。フェリエライト型ゼオライトの場合、NO_xの選択還元挙動は安定せず、400℃以上で一旦減少したNOが、500℃付近で再び上昇することがわかる。NH₃濃度に関しては、残存量が多く高温側での挙動が不安定であることが明らかになった。以上のように、ベータ型ゼオライトを担体として使用した鉄触媒が500℃以上の高温域でも高効率で安定に窒素酸化物を還元できることがわかった。

触媒成分を鉄とした場合、担体にベータ型ゼオライトを用いることが有効であることがわかったので、鉄担持方法について検討を加えた。すなわち、含浸法で調製した触媒とイオン交換法で調製した触媒のNO_x選択還元活性を調べた。反応温度は、150-500℃で行った。その他反応条件は、図12の場合と同様である。結果を図13に示す。含浸法の場合、低温での活性はイオン交換法に比べて低く、特に200-300℃領域での活性が低い。

一方、イオン交換法により調製した触媒では、200-500℃までの幅広い範囲で高活性を示すことがわかった。この原因を検討するため、X線回折と電子顕微鏡観察を行い活性成分である鉄の化学状態を検討した。図14にX線回折結果を示すが、回折ピークを見る限り、両方法には大きな違いは認められずゼオライト上の鉄は高分散しているように判断される。

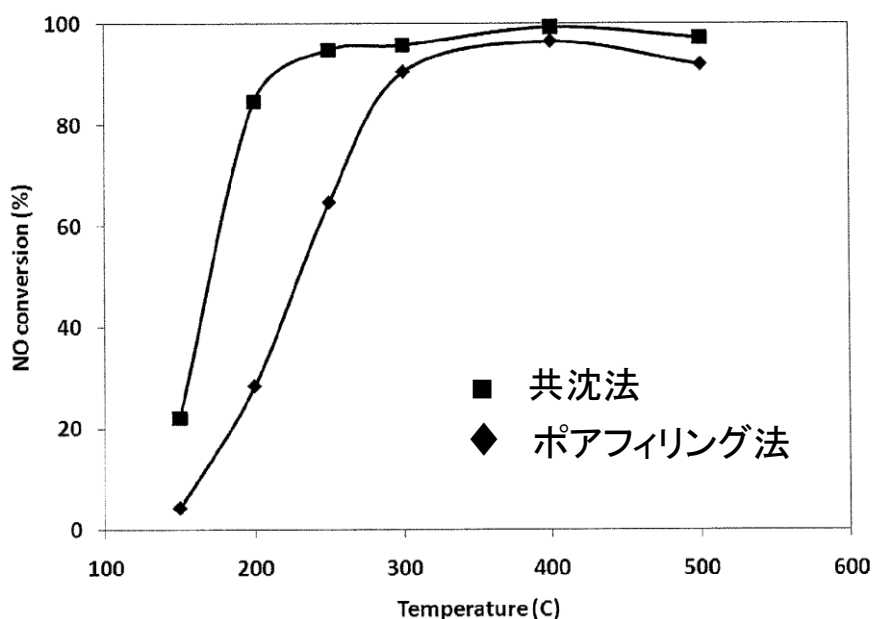


図13. Fe/ベータ型触媒調製法による触媒活性の違い

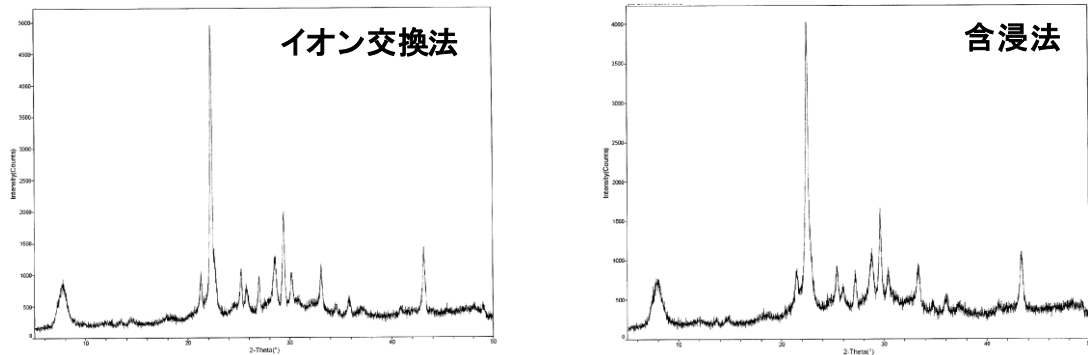


図 1 4. 調製法の異なる触媒の XRD 測定結果

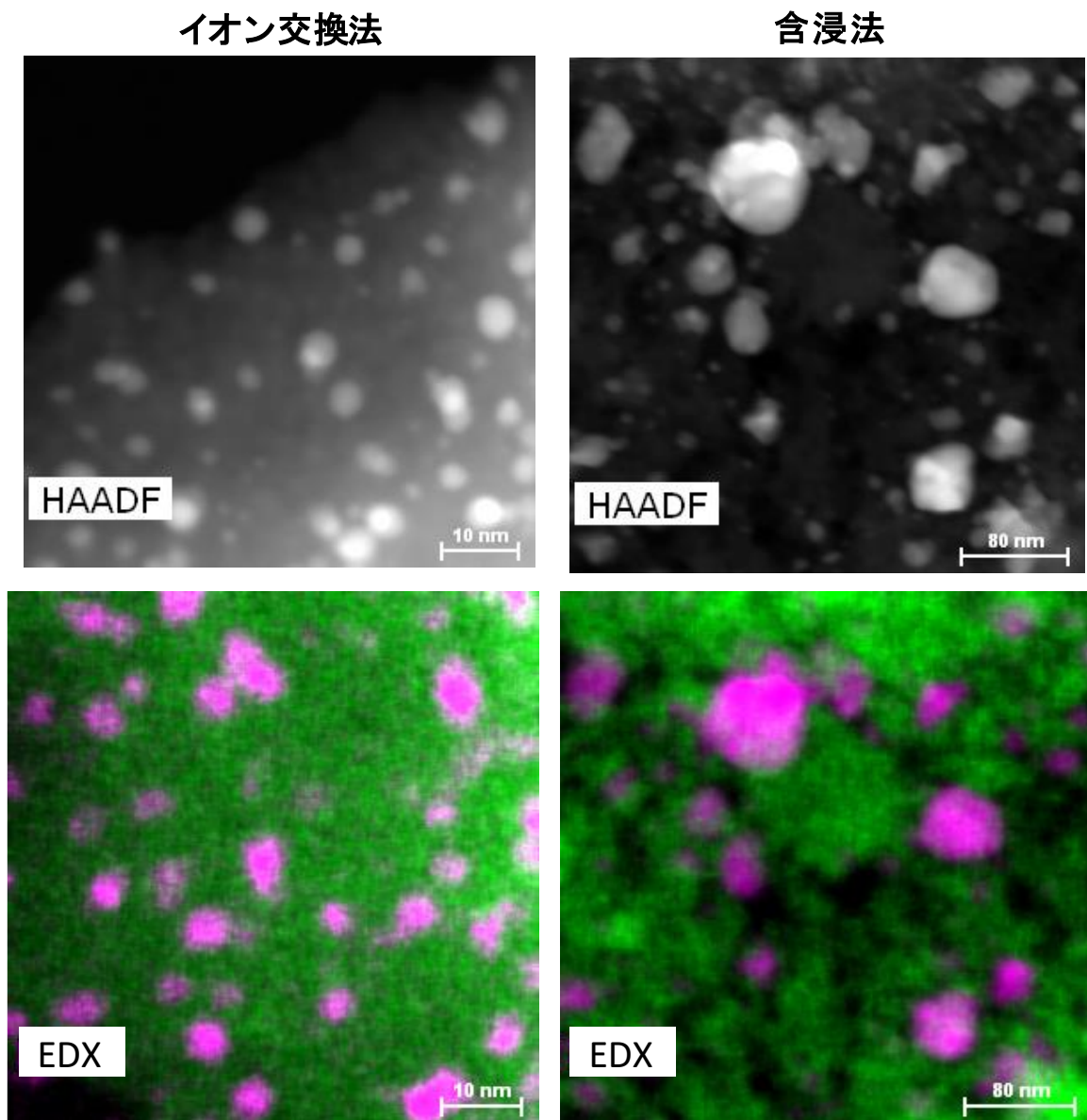


図 1 5. イオン交換法および含浸法触媒の TEM 観察像

次に、これら触媒の透過型電子顕微鏡観察を行った。結果を図15に示すが、白く見えるのが鉄の粒子である。EDXの結果からも赤色に見えるのが鉄であることがわかる。イオン交換法では、鉄粒子は、10nm以下の微粒子で担体のゼオライト上に高分散していることがわかる。一方、含浸法で調製した触媒では、10nm程度の小さな粒子も観察されるが、50–80nm程度の大きな粒子の存在も確認される。イオン交換法に比べ鉄粒子の成長が見られ分散性は低下していることが明らかである。活性成分である鉄粒子の分散性が触媒活性を支配していることは明らかであり、鉄粒子を安定に高分散した触媒調製法が必要であることがわかった。そこで、鉄-ベータ型ゼオライトの最適化を検討した。まず、鉄担持量を詳細に変化させて活性に対する影響を調べた。

図16にFe/ベータ型ゼオライトの鉄担持料と活性の関係を示す。触媒活性は、微量の鉄の含有量が増加しても大きく影響を受けることがわかった。2wt%の場合、低温域での触媒活性が高いことがわかる。鉄含有量の減少とともに、低温活性は低下していくが、中・高温活性は鉄の含有量が低下してもほとんど一定値を示すことがわかる。鉄含有量を2wt%では、高温域での活性が低下する。高温域では、鉄の含有量が少ないほうが高活性であることが明らかになった。特に、0.6wt%の触媒では、500°Cでも高い活性を維持している。500°Cおよび600°Cの反応温度において500ppmのNOの約95%の除去率を持つことがわかった。

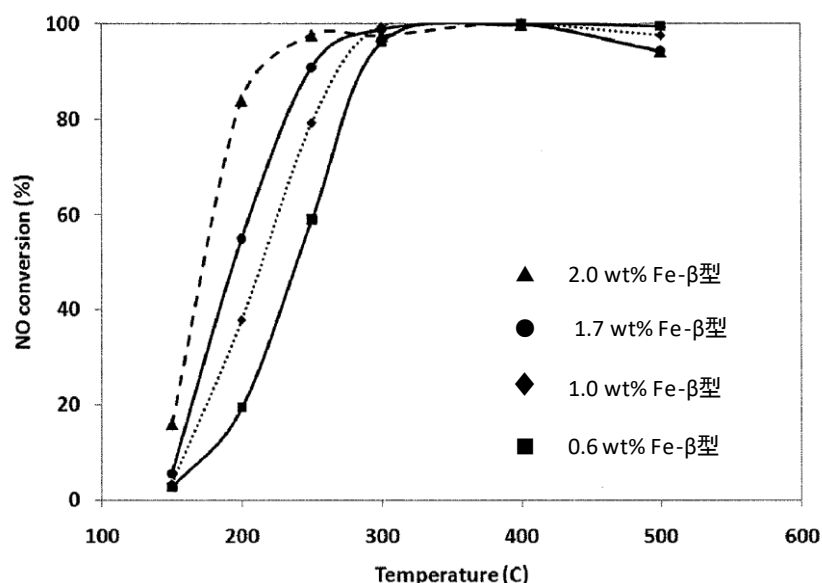


図16. Fe/ベータ型触媒の担持料の影響

これは、高温で起こる鉄粒子の凝集が、低担持の触媒では起きにくいことが考えられる。この結果は、長寿命の触媒調製に関しても非常に有用な知見となる。そこで、1.0wt%Fe/ベータ型触媒を用いて、長時間安定性についての検討を行った。結果を図17に示す。反応温度は、500°Cおよび600°Cで検討した。図中Fresh触媒は、触媒調製後活性試験に使用したもの、aged触媒は、活性試験前に1000°C、24時間、10%の水を含む空気の前処理してから活性試験を行ったものである。したがって、freshとagedの活性の差が生じない触媒が長寿命の触媒であると言える。図17の結果より、500°Cでは、Freshとaged触媒の活性が10%程度の差があることがわかる。これは、高温での処理により鉄粒子のシン

タリングが起きていることがわかる。一方、600 °Cの反応では、両者に差は生じない。600 °Cの反応で既に鉄粒子のシンタリングが起これ、その後高温処理してもそれ以上の鉄粒子のシンタリングが進行しないことを意味している。さらに、図 1 8 に長時間の触媒活性試験の結果を示したが、32 時間の反応において触媒性能は殆ど劣化しないことが明らかになった。以上のように、鉄を少量ベータ型ゼオライトに担持した触媒を用いることで、500°C以上の高温域でも効率よく NOx を NH₃ により還元できることを明らかにした。さらに、本反応は、接触時間が 18000–22000h⁻¹ の条件で実施し高性能を示すことを確認しており触媒システムの小型化に大きな貢献をするものと考えられる。

これまで開発した 0.6wt%Fe/ベータ型触媒を用いてハニカム型触媒の成型検討を行った。イオン交換法により調製した触媒をスラリー上にして、コージライトハニカムへの担持を行った。触媒の活性試験は、粉体触媒と同様なものを使用した。初期検討の段階であるが、粉体触媒の条件で行うことで、ほぼ同程度の触媒性能を示すことを確認している。

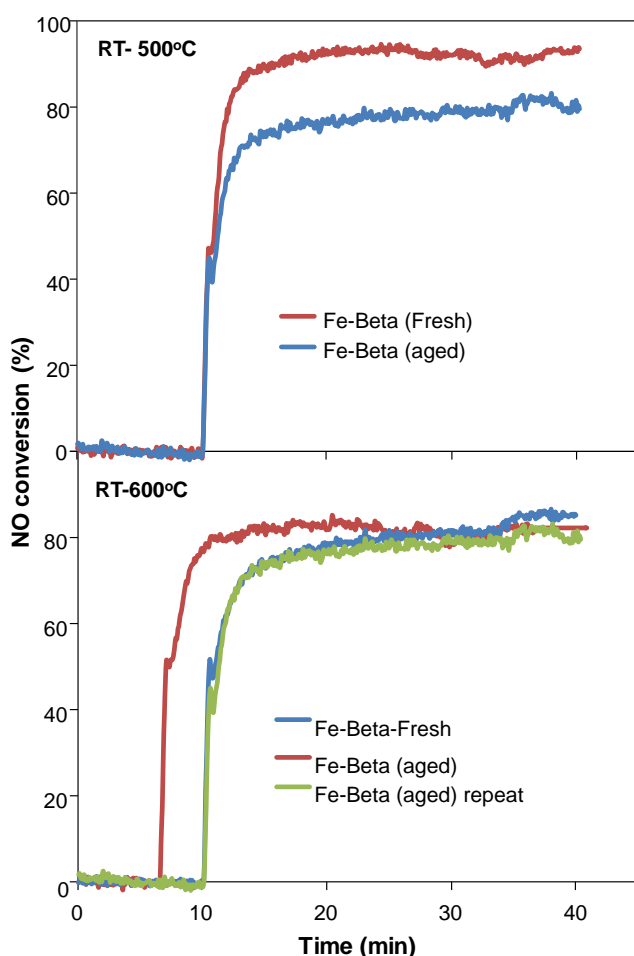


図 1 7. 触媒安定性の検討

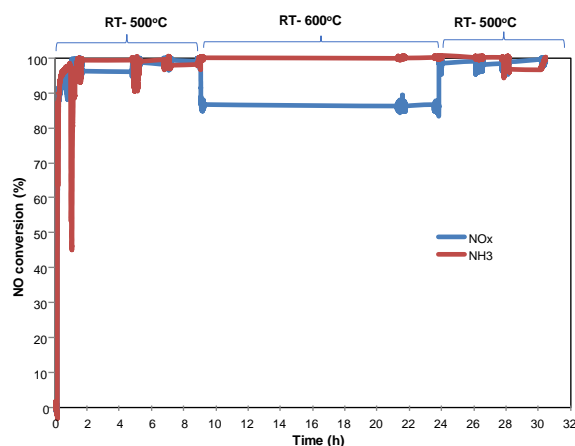


図 1 8. 長時間の触媒活性試験

3-2. 燃焼強化技術

3-2-2. 50kW ガスタービンモデル燃焼試験

3-2-2-1. 試験設備

(1) ガスタービン発電装置

トヨタタービンアンドシステムのマイクロガスタービン（定格：50kW 80,000rpm、表2参照）のシステムをベースとして、試作燃焼器、燃料ガスコンプレッサーから構成される試作燃焼装置を組み合わせ、制御プログラムを改造したガスタービン発電システム（図19参照）を用いて、モデル燃焼試験を行った。発電した電力は負荷装置（2.5kW 刻みで負荷を設定）で消費させた。なお 2017 年度途中でインバータの設定を変更するなどの改造を施すことにより、負荷装置に加える電圧を高めることで、発電機の負荷を下げて出力アップを図ることで、約 3kW 刻みでの負荷設定が可能になったことにより、アンモニア専焼では更に高い発電出力を達成できた。本システムは再生器を採用した再生サイクル（図20参照）となっており、燃焼用空気は再生熱交換器を介してガスタービン排気で予熱されるため、圧縮比が小さいものの、燃焼用空気の温度は高く、アンモニア火炎の保炎に有利である。

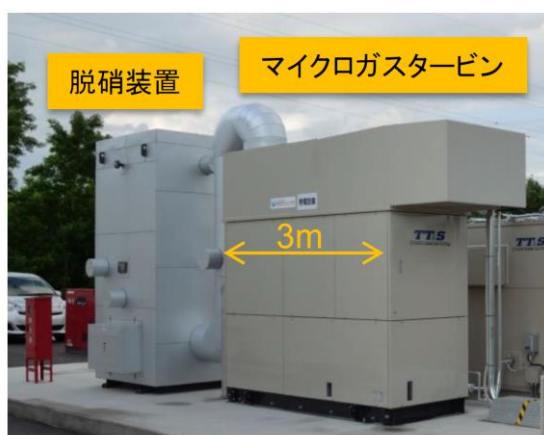
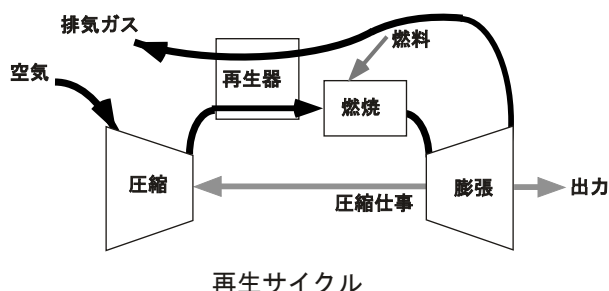


図19. ガスタービン発電設備

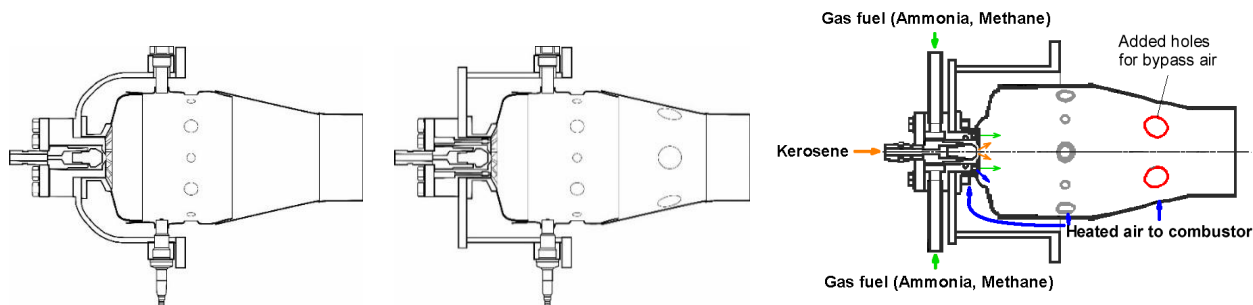
表2. ベースガスタービンの仕様

Specification of base micro gas turbine	
Manufacturer	Toyota Turbine and System Inc. (TTS)
Cycle	Regenerative cycle
Shaft	Single shaft
Compressor	Centrifugal one-stage
Turbine	Radial one-stage
Rotating Speed	80,000rpm
Electric Power Output	50kW
Fuel	Kerosene
Combustor	Single can, Diffusion combustion



再生サイクル

図20. マイクロガスタービンのサイクル



(a)灯油用燃焼器 (b)アンモニア燃焼用試作燃焼器 Step 0 (c) 変更箇所
 図 2 1. ガスタービン燃焼器

ガスタービン発電装置の運転について、確実性を高めるため、燃焼器は通常燃料とアンモニアの2系統の燃料を供給できるようにした。具体的には、灯油用燃焼器をバイフル型の試作燃焼器（図 2 1 参照）に置き換え、ガスタービンの制御プログラムも変更することで、アンモニアを燃料として使用できるようにした。試作燃焼器 Step 0 は、灯油の燃料噴射弁を中心に配置したまま、パイロットバーナとして機能させ、その周囲にガス燃料用の噴孔を 12 個配置することにより、火炎の安定性が高い拡散燃焼方式によってアンモニアガスの燃焼を試みるものである。天然ガスとアンモニアの混焼での実用化も想定して、メタンおよびメタン-アンモニア混合ガスもガス燃料として燃焼を試みた。燃焼器ライナーにはバイパス用の空気穴を 6 個設けることで主燃焼領域の燃焼用空気の流量を抑えており、滞留時間を稼いでいる。

(2) 燃料供給設備

アンモニア燃料だけで 50kW の発電を行うには、マイクロガスタービンの発電効率を 25% として 200kW 相当のアンモニアガスを供給する必要がある。液化アンモニアは蒸発熱が大きいので、200kW 相当のアンモニアガス供給のためには専用の設備が必要であるが、その建設には時間がかかるため、2014 年度は仮設の供給設備を用意し、灯油-アンモニア混焼を行い、ガスタービン発電設備の調整を行いながら、常用の供給設備を整備した（図 2 2、図 2 3 参照）。1 トンポンベを用いた常用のアンモニア供給設備に伴い、ガスタービン発電設備、試作燃焼装置、脱硝装置、負荷装置、灯油タンクなどを移設して、アンモニア専焼試験を行った。さらに、天然ガス-アンモニア混焼のガスタービンの可能性を検討するため、燃焼装置の改造を行った。2015 年度以降は、アンモニア 1 トンポンベを用いた常用のアンモニア供給設備により、液化アンモニアを気化装置で蒸発させてからガスコンプレッサーに供給した。液化アンモニアが流れる配管が含まれ、体積も大きくなることから、試験運転終了後にアンモニア配管内に残存するアンモニアの量が多くなり、窒素ガスでパージして残存アンモニアをアンモニア除害槽に廃棄する必要がある。本アンモニア供給設備を運用することで十分なアンモニアガス供給能力が得られ、窒素ガスを供給しなくてもガスコンプレッサーの一次側圧が適正運転範囲のままガスコンプレッサーが起動できた。アンモニア専焼試験時にはマスフローにより、36kg/h (225kW(HHV)相当) 以上の流量が供給可能であることを確認した。

表 2 のように燃料の切り替えを行うことで、灯油燃焼でガスタービンを起動しながら、ガス燃料に徐々に切り替えて安定に運転してから、アンモニア専焼やメタン-アンモニア

混焼試験を行った。

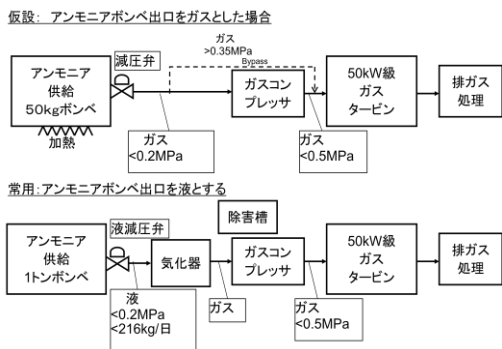


図 2 2. アンモニアガス供給方法 図 2 3. 常用のアンモニア供給設備 (1 トンボンベ)

表 3. 燃料切り替え手順

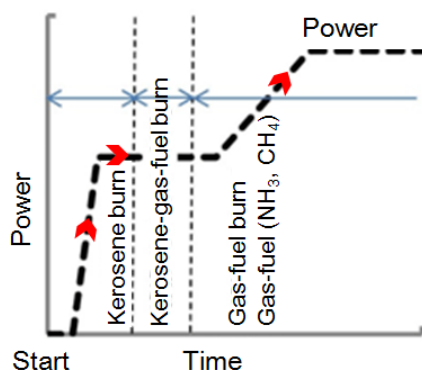


Table 2 Combustor operation sequence			
NH ₃ combustion procedure		CH ₄ -NH ₃ combustion procedure	
Process	Fuel	Process	Fuel
Start-up	Kerosene	Start-up	Kerosene
Increasing electric output	Kerosene	Increasing electric output	Kerosene
Opening fuel gas valve	Kerosene+N H ₃	Opening fuel gas valve	Kerosene + CH ₄
Stopping Kerosene supply	NH ₃	Stopping Kerosene supply	CH ₄
		Starting NH ₃ supply	CH ₄ +NH ₃

(3) ガス分析

燃焼後の排気ガスを計測するために、光学式 NH₃-NO_x 分析計(日本サーモ MCA10HID、測定範囲 0-1000ppm (NO,NO₂,NH₃))、全炭化水素分析計(日本サーモ MODEL 51i-HT)を用意し、流路を切り換えて脱硝装置の前後の燃焼ガスを分析できるようにした。さらに、脱硝装置の最終的な排気をポータブルの排ガス分析計(ホダカ HT2300-D)を用いて、O₂、CO、CO₂、NO_x を計測した。これらのデータはガス分析計制御・記録装置で記録した。また 2015 年度以降は FTIR (ベスト測器 model Bex-2000FT) を導入して脱硝装置前のガスを分析し、脱硝装置での処理後のガスを光学式 NH₃-NO_x 分析計で計測している。

3-2-2-2. 試験結果

(1) 試運転

まず灯油用の標準の燃焼器を用いてガスタービンの試験運転を行い、運転性能に問題が無いことを確認した後で、図 2 4 に示すように試作燃焼器に交換した。アンモニアは引火点も発熱量も低めのため、アンモニアガスを大量に供給すると灯油火炎が失火する恐れがあるため、アンモニアの代わりに窒素ガスを供給して、工場出荷時の試験を行った。その結果、図 2 4 のように燃焼器を交換しても灯油燃焼で 50kW の発電は可能であり、燃料ガス噴射弁より窒素ガスを供給しても灯油火炎は失火しないことを確認した。

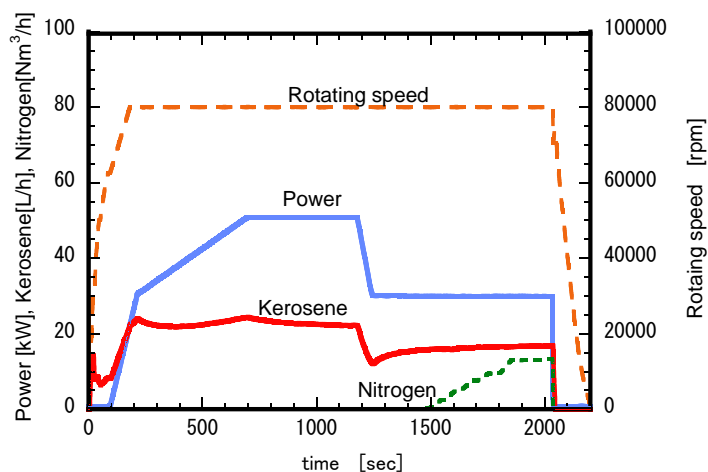
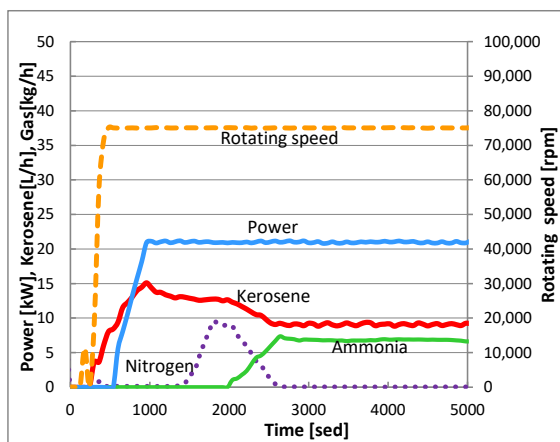


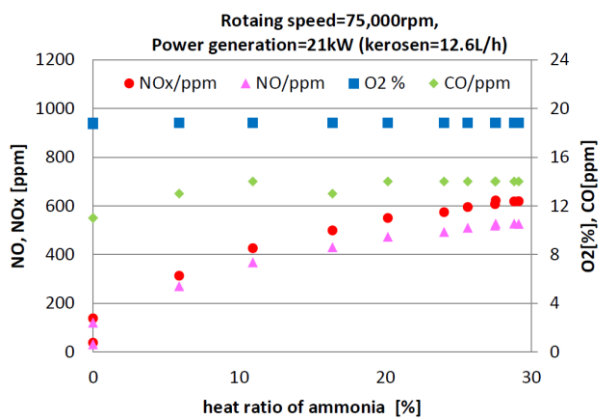
図 2.4. 試運転状況 (アンモニアの代わりに窒素ガス噴射)

(2) 灯油—アンモニア混焼

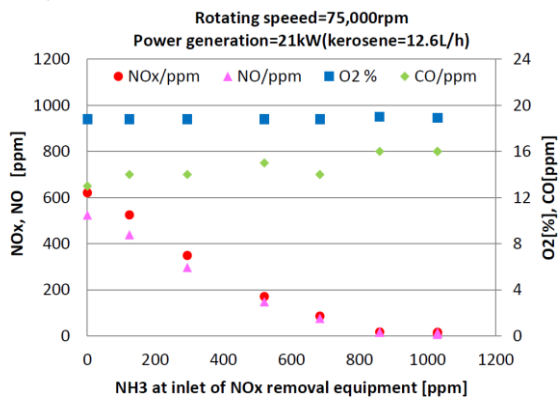
図 2.5 の小流量のアンモニア供給設備を用い、灯油—アンモニア混焼試験に取り組んだ。アンモニア供給設備ではアンモニアの蒸発熱を賄うことが困難であることからアンモニア供給流量に制限があるため、灯油を主としてガスタービン発電を行い、燃料の一部を徐々にアンモニアに置き換えることで、灯油—アンモニア混焼によるガスタービン発電を目指



(a) 運転状況



(b) 排出ガス成分



(c) 脱硝処理

図 2.5. 灯油—アンモニア混焼 (21kW 発電、75,000rpm)

した。図25に運転例を示す⁽¹³⁾。窒素-アンモニア混合ガスをガスコンプレッサーに供給して昇圧する際には圧縮後のガス配管を保温するとともに窒素ガスを始めに供給してから徐々にアンモニア濃度を高めていく方法とすることで、圧縮後のアンモニアガスが凝縮するのを防いだ。図25(a)のように燃料ガスの供給系は問題なく窒素ガスからアンモニアに切り替えることができ、灯油の一部をアンモニアに置き換えても失火しないことが確認できた。また、発電出力を21kWにした場合、30%まで灯油を減らしてアンモニアに置き換えても発電できることを示した。

図25(b)はNOx排出濃度を示す⁽¹³⁾。灯油をアンモニアに置換していくに従って排気ガス中のNOx濃度は高くなるものの、アンモニアの割合が高くなるほどNOx濃度の上昇は抑えられる傾向があることがわかった。アンモニアをわずかに添加するだけでNOxは100ppmを超え、30%の置換で600ppmまで上昇した。15%O₂換算で1,500ppmを超える著しく高いNOx排出濃度となった⁽¹⁵⁾。NOx排出濃度が高いため、ガスタービン排気ガスにアンモニアを添加してから脱硝装置に供給することでNOx低減を試みた。図25(c)は脱硝装置に供給した排気ガス中のアンモニア濃度に対して脱硝装置通過後の排気ガスのNOx濃度を示したものである⁽¹³⁾。排気ガス中のNOx濃度よりアンモニア濃度を高めることでNOx排出濃度を10ppm以下に低減できることが確認できた。

(3) アンモニア専焼

灯油でガスタービンを起動後、アンモニアを徐々に供給して、アンモニア専焼に切り替

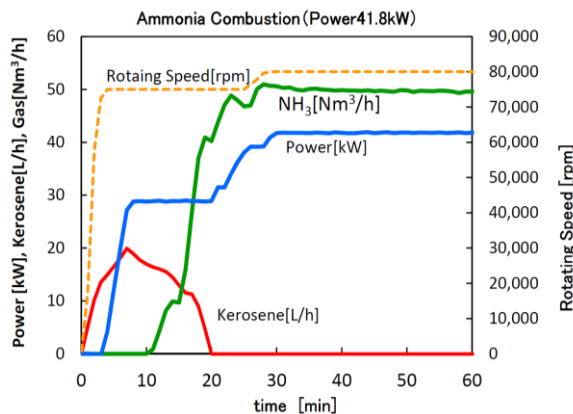


図26. アンモニア専焼運転 (41.8kW 発電、80,000rpm)

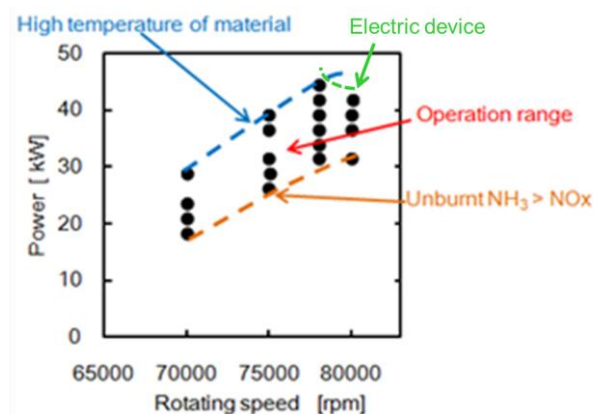


図27. アンモニア専焼運転範囲

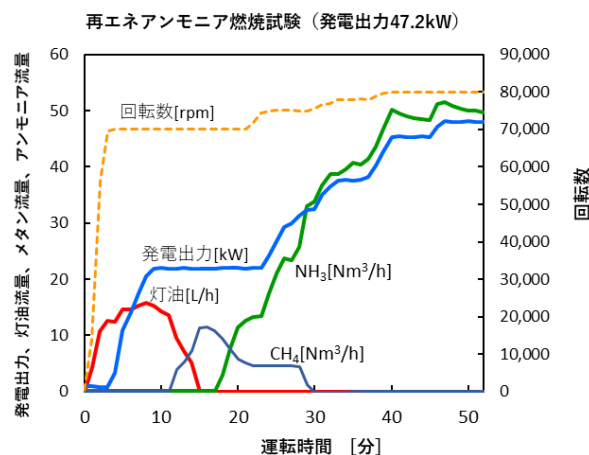


図28. 再エネアンモニアによる発電

え、回転数と発電出力を調整して図 2 6 のように、アンモニア燃焼でもベースガスタービンの定格出力の 8 割以上の発電が行えることを実証した。

アンモニア専焼における運転可能な範囲は、回転数と発電出力に対して図 2 7 のようになっており、灯油に比べて運転可能な範囲は狭い。発電出力の上限は、再生熱交換器の保護の観点からタービン出口温度が 630℃を超えないように定めており、回転数が高いほど、高出力を可能にしている。一方、発電出力を下げると、燃焼ガス温度が低下し、排出ガス中の未燃アンモニアが増えてくる。未燃アンモニアは脱硝装置において NO_x 処理に利用可能であるが、未処理のガスタービン排出ガス中の未燃アンモニアが NO_x よりも多くなると、有効に利用できなくなるため、ここを下限としている。また、高回転数で高出力の場合、発電機やインバーターの保護のため、気象条件により運転できない場合がある。電気系統に対策を施した結果、図 2 8 のように 47.2kW の発電まで実証した。この実証試験は、産総研内で再生可能エネルギーより製造した水素を原料とした再エネアンモニアを用いたものである。すなわち再エネからアンモニアを製造して蓄エネを行い、その後、発電して利用する一連のシステムの実証に参加し、成功した。

脱硝処理前の排出ガス中の NO と未燃アンモニアの濃度を図 2 9 に示す。一定の回転数では(a)のように、発電出力が高いほど NO が高くなり、発電出力低下により未燃アンモニアが発生する。発電出力を 31kW 一定とすると、(b)のように回転数上昇により NO が低下し、未燃アンモニアが発生する。燃焼器入口空気温度で整理すると、(c)のように燃焼器入口空気温度上昇により NO は増加し、一方、500℃以下に低下すると未燃アンモニアが急増する。NO や未燃アンモニアは燃焼器入口空気温度に大きく影響されることが判った。

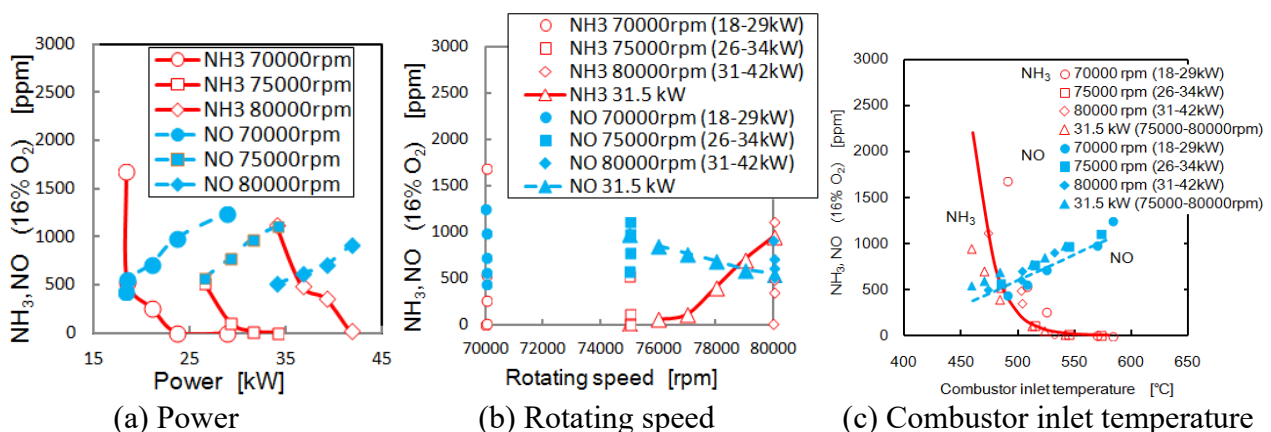


図 2 9 . 排出ガス成分の特性

(4) メタン-アンモニア混焼

図 3 0 にメタン-アンモニア混焼試験の様子を示す。灯油で起動し、発電出力 26kW 一定のままメタンの供給を開始し、メタン供給を徐々に増加してメタン専焼に切り換えた。その後アンモニアの供給を開始し、メタン-アンモニア混焼を行い、アンモニア供給を増加して低位発熱量 LHV 比で 1 : 1 の混焼を実現した (14)。

図 3 1 は未処理の排出ガス成分の変化を示す。発電出力を増加していくと NO は徐々に増加していくものの、NO₂ はやや減少、CO は急速に減少する。未燃アンモニアは発電出力 20kW 未満で発生し、未燃炭化水素はほとんどない。未燃アンモニアはメタンと混焼することで著しく減っており、ガスタービンの運転範囲を拡大している。

発電出力を低め一定として、メタン-アンモニアの混合比率を変化させた場合の未処理の排気ガス成分を図3 2に示す。NO や NO₂ はメタン専焼に対して、アンモニアの LHV 比が増えることで急激に増加し、LHV 比で 0.1 以上では NO はピークを持ちアンモニア専焼よりも高くなる混合比がある⁽¹⁵⁾。一方、NO₂ はアンモニアが LHV 比 0.1 以上でほぼ一定である。燃料中の N 分が多いアンモニア専焼の方が低 NO_x になる場合があることから、燃料中の N 分の NO_x への転換率は燃焼の工夫により低くでき、排気ガス中の NO_x 濃度を低くできる可能性がある。また図3 2の条件は発電出力が低く、燃焼器入口空気温度は 550℃未満でアンモニア専焼では未燃アンモニアが発生する条件であるが、アンモニアの LHV 比が 0.9 以下では未燃アンモニアを発生しない。すなわち、メタンを LHV で 1 割加えることにより未燃アンモニアを抑制できる。アンモニアの LHV 比が 0.5 以上で N₂O が発生する。N₂O は温室効果ガスであり、発電出力が低い条件では未燃アンモニアよりも N₂O の発生に注意する必要がある。

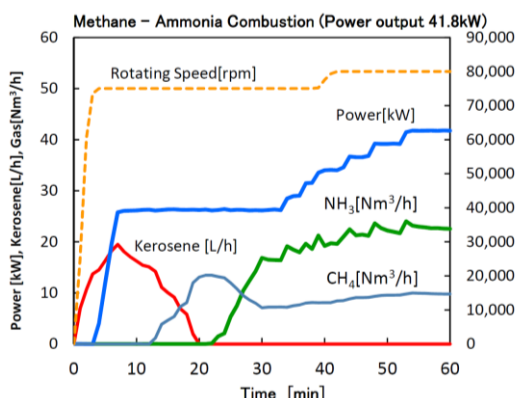


図3 0. メタン-アンモニア混焼 (41.8kW 発電、80,000rpm)

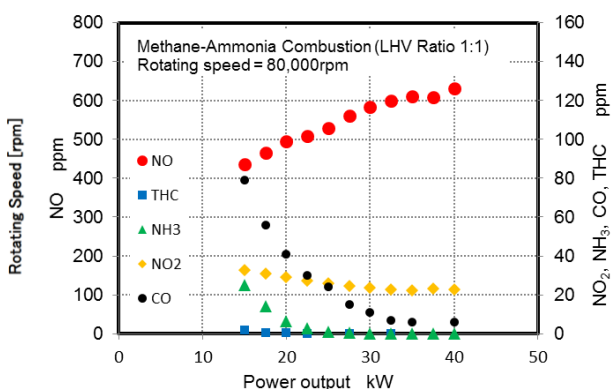


図3 1. メタン-アンモニア混焼の排出ガス特性

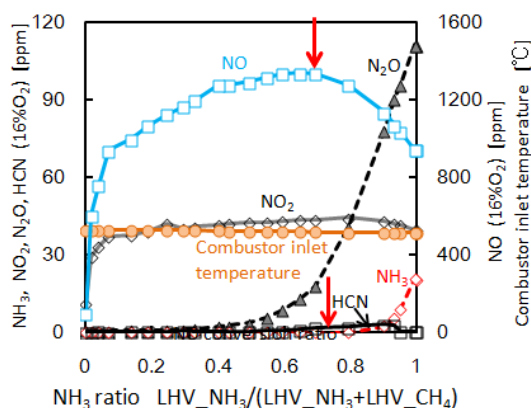


図3 2. アンモニア混焼割合の排出ガスへの影響 (31.4 kW 発電、75,000 rpm)

(5) 火炎の可視化

低 NO_x 燃焼に向けた燃焼器改良のため、まず現状の燃焼状態の観察を試みた。図3 3のような石英ガラス窓のついた観察用治具を試作し、ガスタービン運転状態での火炎観察を試みた。図3 4のように燃焼器出口側より燃焼器の中心軸近辺の燃焼状態を観察することに成功した。拡散火炎のため均一な火炎ではなく、時間的にも空間的にも変動しているこ

とが判った。このことから、どの燃焼領域でも同じように NO_x を発生すると考えにくい。すなわち、 NO_x を多く発生する領域と NO_x をあまり発生しない領域が混在している可能性が考えられる。

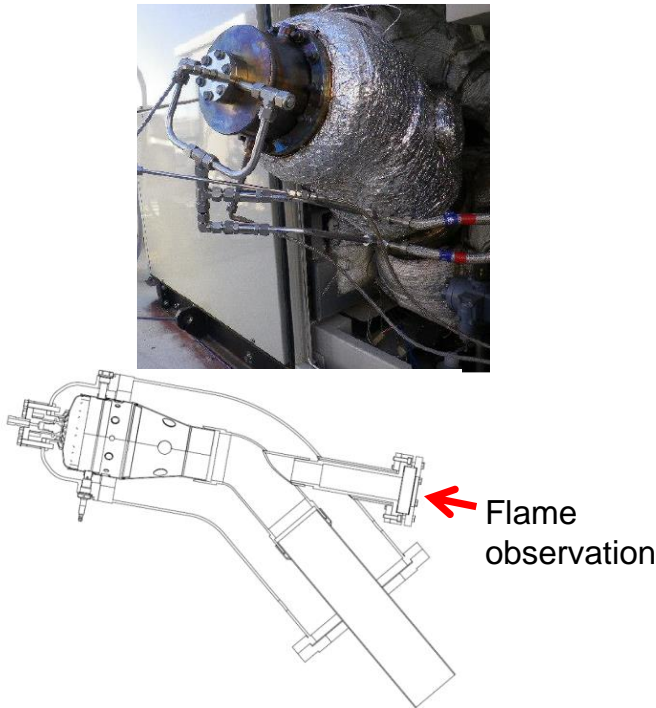


図 3.3. 火炎可視化用治具

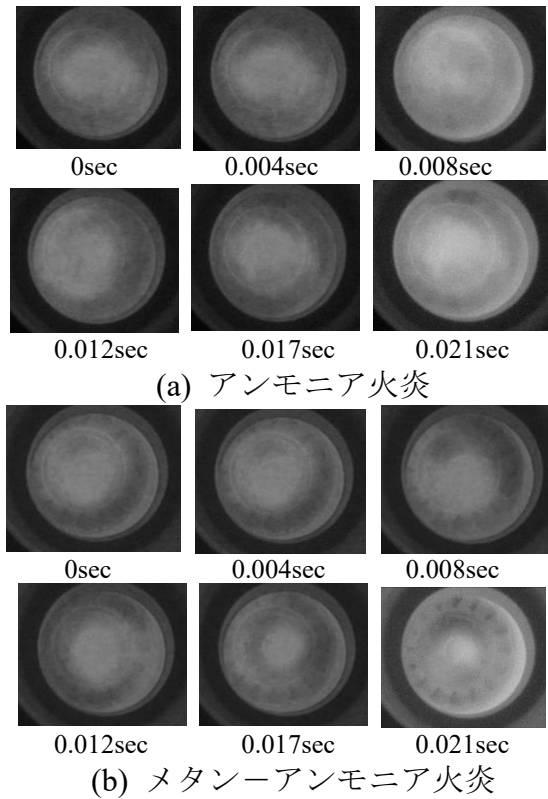


図 3.4. 火炎画像(39.1kW 発電、75,000rpm)

(6) 低 NO_x 燃焼器

燃焼器テストリグでの試験結果から、図 3.5 のようにおよそ一次燃焼領域に流入する空気を減らして燃料リッチにすることで、 NO 低下が見られる。更に一次燃焼領域に流入する空気を減らして一次燃焼領域の当量比を高くすると、 NO 低下する発電出力が低くな

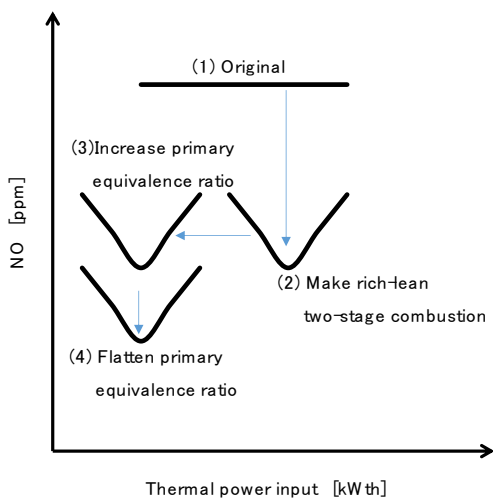


図 3.5. リッチ・リーン燃焼器の特性

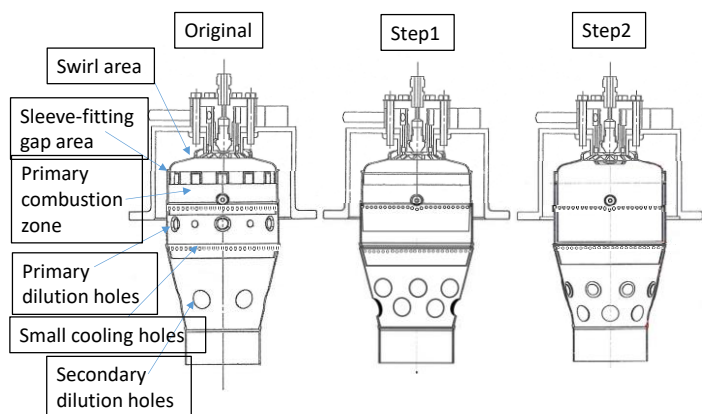


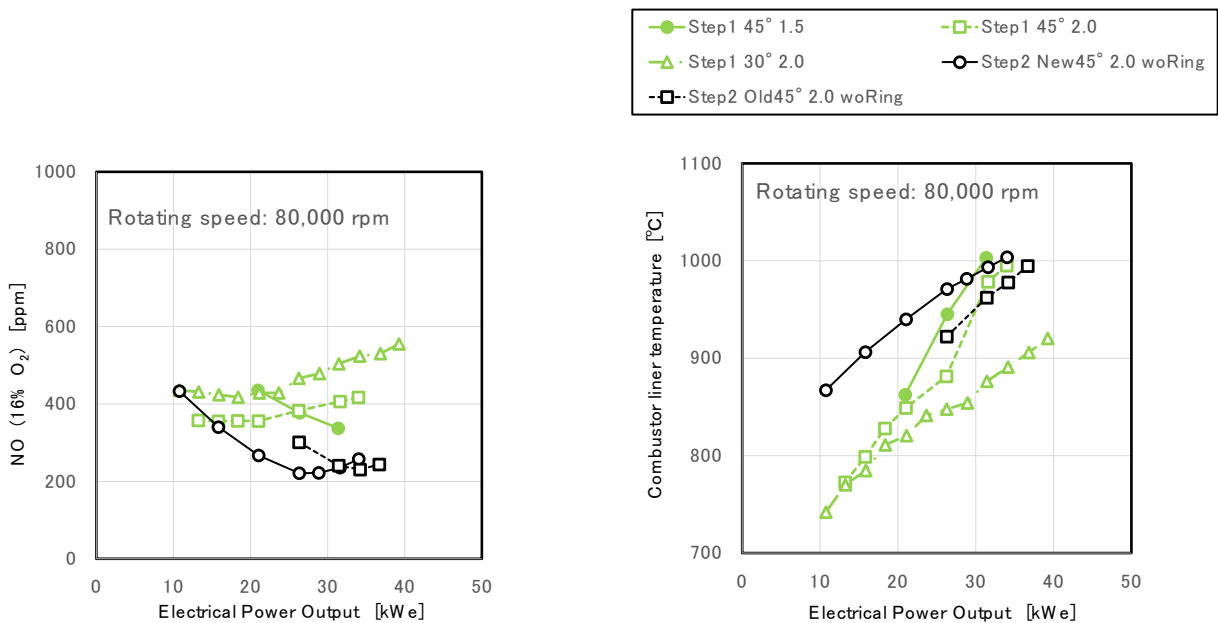
図 3.6. 試作されたガスタービン用燃焼器

表 4. Step1 の燃焼器の形状 (詳細比較)

	Primary dilution holes	Area of air swirler	Sleeve-fitting gap area	Small cooling holes	Area of secondary dilution holes	Designed primary equivalence ratio	Fuel nozzle angle
Case A				Air fitting	6 holes	0.7	45°
Case B				to	9 holes	0.9	45°
Case C	Without Decrease		Without	secondary	12 holes	1.1	45°
Case D				combustion	12 holes	1.1	30°
Case E				zone	12 holes	1.1	0°

る。一方、東北大学との共同研究において基盤研究を実施し、早川と Somarathne らはガスタービン用スワール燃焼器において二段燃焼法と一次燃焼領域の当量比制御を組み合わせることで低 NO_x 燃焼が可能であることを数値計算により明らかにしている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。さらに Okafor は、産総研のガスタービンに使用された燃焼器の希釈孔を改造し、リッチ・リーン二段燃焼を行い、大学実験室規模であるものの 40ppm(16%O₂)の低 NO を達成している⁽¹¹⁾。早川、Somarathne、Okafor らの結果を参考にすると、一次燃焼領域の当量比の局所的なムラを減らせば更に NO が低下するものと推察される。また 1 次燃焼領域の当量比を 1.1 とするのが良いことも考慮され、発電出力と低 NO 領域のマッチングが調整できるよう、トヨタエナジーソリューションズにより図 3 6、表 4 の燃焼器が設計・試作された。

図 3 7 (a)に NO(16%O₂)濃度を、(b)に燃焼器ライナー最高温度を示す。燃焼器ライナー温度は燃焼器表面に熱電対を付けて計測している。材料の耐高温特性の観点から、燃焼器ライナー温度は 1000°C以下であることが望ましく、1000°Cを超える条件で実験を打切っている。Step1 では燃料拡散噴孔角度 45°、2 次希釈孔面積比 1.5、発電出力 32kW にお



(a)NO 濃度

(b)燃焼器ライナー最高温度

図 3 7. 低 NO_x 燃焼器の特性

ける NO 濃度 337ppm が最低値となっており、これより高出力側にさらに低 NO 値があり
 そうであるが、燃焼器ライナー温度が 1000°C に達したため、実験を打切っている。リッチ・
 リーン燃焼では当量比が 1 に近い燃料リッチ側で高温領域を生ずると考えられる。一次領
 域の当量比を均一化することでこの高温領域の温度を低下できると考える。さらに、
 Okafor の実験結果は予混合燃焼にすることで低 NO を達成していることから、一次燃焼領
 域の当量比を均一化することは望ましいといえる。

Step1 の結果を詳細に比較する。表 4 は比較条件を示す。比較条件は、Case A、Case B、

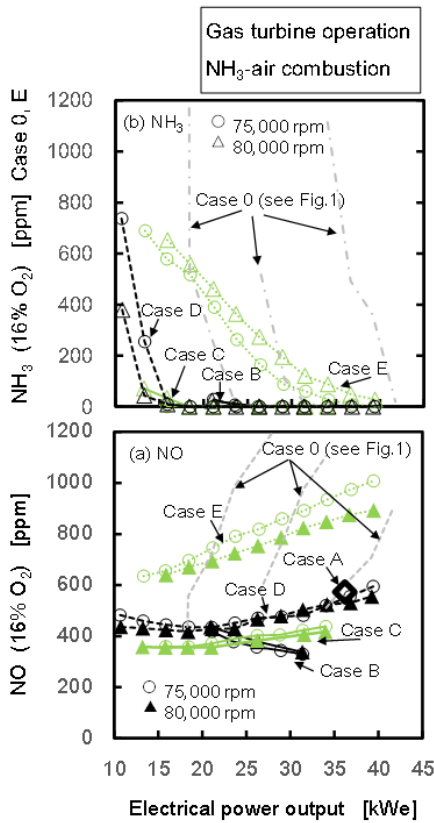


図 3 8. Step1 燃焼器の排ガス

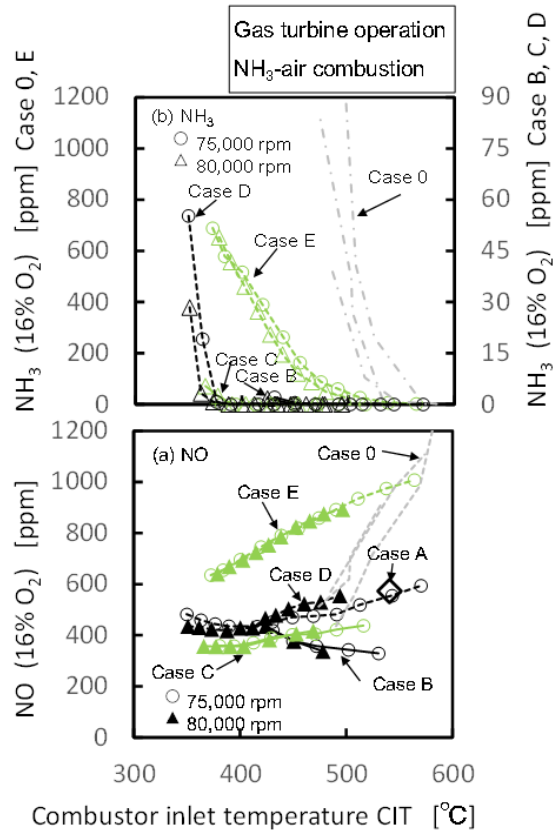


図 3 9. Step1 燃焼器の排ガス(燃焼器入口温度)

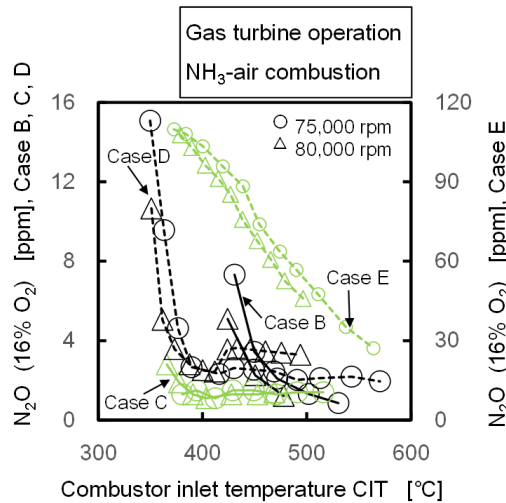


図 4 0. Step1 の燃焼器の N₂O 濃度

Case C、Case D、Case E とした。図 3 8 と図 3 9 に Step1 のガスタービン燃焼器出口における NO、NH₃ 排出濃度を発電出力(図 3 8)と燃焼器入口温度(図 3 9)に対してプロットした。図からわかるように、リッチ・リーン燃焼を採用することで未燃アンモニアについても、かなり減らすことが可能となること。Step0 (Case 0)に観察されたような燃焼器入口温度に対する排ガス濃度の強い依存性は見られず、燃焼器の形状ごとに異なる依存性を示すことがわかる。図 4 0 はガスタービン燃焼器出口における N₂O 排出濃度を示す。横軸は燃焼器入口温度である。このようにリッチ・リーン燃焼を採用することで N₂O も激減する。N₂O は地球温暖化係数が 298 と高く⁽¹²⁾、二酸化炭素に比べ温暖化を引起しやすいガスとして知られており、これを激減させられることは高く評価できうると考える。

Step2 では、前項の考察を元に、

- (1)冷却構造の内筒とスワラーを一体化することで、スリーブ隙間を 0 にした。
- (2)一体化した内筒により小冷却孔の噴出位置を 2 次希釈領域に移動した。
- (3)1 次領域の体積を増加させるため 2 次希釈孔の位置を少し下流側に移動した。

図 3 7、3 8 に NO 濃度と燃焼器ライナー最高温度を示す。Step2 は Step1 に比べ改善された結果となり、222ppm の低 NO を得ている。燃焼器ライナー温度は 1000℃に達している。依然、Okafor の達成した予混合燃焼実験での NO 値 40ppm に比べ高い値となっている。Okafor の実験値は、予混合燃焼であること、実験室規模であることや、燃焼器ライナー温度に 1000℃の上限の無いことなどが本報告結果と相違していて、これらのことが NO 値の 40ppm に達しないことに影響を与えていると考えられる。

更に改良を進め、トヨタエナジーソリューションズ、東北大とともに Step3 燃焼器を開発し、脱硝触媒を減らしてパッケージ内に脱硝触媒を内蔵した新 50kW パッケージを用意し、NO_x の評価を行った。この新パッケージは灯油を用いずに、メタンでガスタービンを起動する方式になっている。試験の結果、ガスタービンは無事起動でき、50kW の発電に成功した。また、発電出力 48.6kW において脱硝処理前の NO_x は 164ppm (16%O₂ 換算) を達成し、脱硝触媒で 25ppm (16%O₂ 換算) まで低減させた。内容はトヨタエナジーソリューションズの終了報告書に記載されている。

3-2-2 燃焼器テストリグによる耐熱材料の耐環境性評価

3-2-2-1 背景

通常、燃焼器などに用いられている耐熱合金は、炭化水素系燃料が大気中で燃焼した状況を想定し、高温の酸化雰囲気に対する耐食性が優れている金属材料である。この特性は、高温燃焼ガスにより材料表面に形成される酸化膜が酸素に対する保護膜となって、さらなる酸化を抑制するためである。しかし、本プロジェクトで開発する低 NO_x 燃焼器内では、高濃度の NH_3 に起因する強力な還元雰囲気が発生が予想される。このため、 NH_3 燃焼炎存在下での耐熱合金の安定性(耐環境性)を調べることは、開発技術の実用化を考える上で重要となる。また、本テーマで使用の 50kW ガスタービンのホットセクションは無冷却構造であるため、耐熱合金表面への熱遮蔽膜(TBC)は施工されていないが、より大型で、かつより高温の燃焼が必要となる発電用大型ガスタービンにおいては、部材の冷却技術と組み合わせる熱伝導率の低いセラミック材料の TBC を施工されるのが通常である。将来的に、大規模発電所に対して、リッチ・リーン燃焼方式に基づく、 NH_3 直接燃焼技術を導入することを考えた場合、燃料リッチの還元性雰囲気における TBC の耐環境性の評価も不可欠となる。

そこで、燃焼器テストリグを用いて、燃料リッチ状態の NH_3 専焼環境に曝露することで、耐熱合金および TBC 材料に与えるダメージの有無に関して、評価を行った。

3-2-2-2 評価手法

曝露試験に用いるサンプルの材質は、高温大気中での使用を目的とした超合金の中で一般的かつ耐熱温度が比較的高い Inconel600 を選択した。Inconel を円盤形状(図 4 1 参照)に加工し、サンプルとした。このサンプルの片面を燃焼炎に曝露される様に治具に固定し、燃焼器底部の燃料噴射弁上面から約 20mm 突出させた状態にした。予備的なテストリグ燃焼試験により、この状態でのサンプルの温度は、変動はあるものの約 $1000^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ 程度と見込まれる。

また TBC 材料の評価のために、TBC として通常用いられるイットリア安定化ジルコニア(YSZ)を、溶射法にて 0.2mm の厚さで上記サンプルの曝露面上に被覆し、サンプルとした。この際、YSZ と Inconel の間には、密着性の向上を図るためのボンドコート(今回は NiAl 系合金)を、同じく溶射法にて施工している。

曝露試験は燃焼器テストリグにて、 CH_4 燃料で着火の後、順次 $\text{CH}_4 + \text{NH}_3$ 混焼、 NH_3 専焼へと燃料を切り替えた後、 NH_3 流量 600 NL/min の条件で 5h 維持、この後再度 $\text{CH}_4 + \text{NH}_3$ 混焼、 CH_4 専焼、停止と切り替える試験を行い、サンプルの表面変化を観察することとした。

表面組織の観察には、共焦点型レーザー顕微鏡を用い、その微細部分の光学画像と凹凸形状を測定した高低画像を撮影し、曝露試験の前後を比較することで評価を行った。

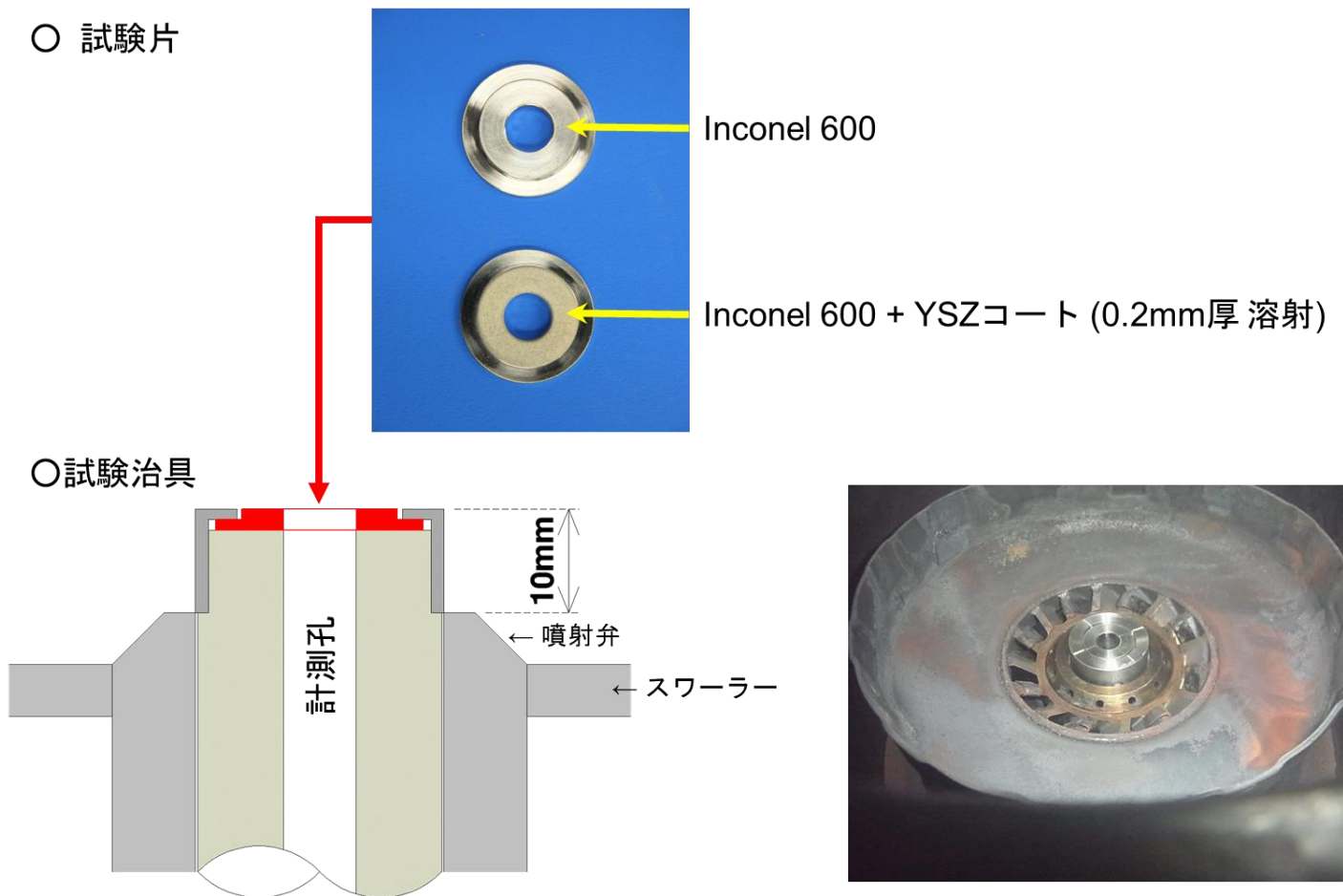


図 4 1 . 曝露試験サンプルおよび試験治具

3-2-2-3 結果

図 4 2 に Inconel サンプルの曝露試験前後の外観を、図 4 3 にレーザー顕微鏡による観察結果を示す。

曝露前のサンプルは、通常の金属光沢を帯びた外観で、その微細表面には金属加工時の研削跡が残るのみで、ほぼ平面で凹凸は見られない。これに対して 5h の NH₃ 専焼曝露後には、サンプルの全面に変色が観察され、特に燃焼炎の曝露面は光沢が失われている。この面の微細表面を観察したところ、曝露前には平滑だった表面上に、多数の盛り上がり部分が曝露面全体に形成されていることが判明した。

次に、図 4 4 に YSZ サンプルの曝露試験前後の外観を、図 4 5 にレーザー顕微鏡による観察結果を示す。

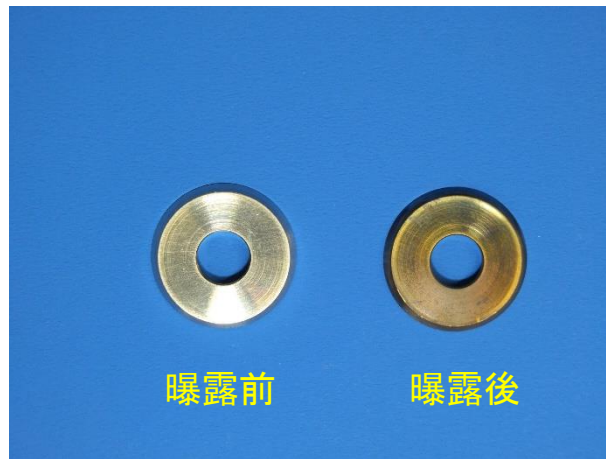
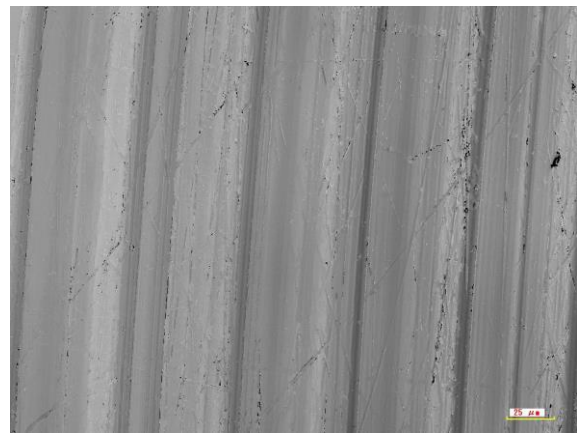


図 4 2 . Inconel サンプルの外観

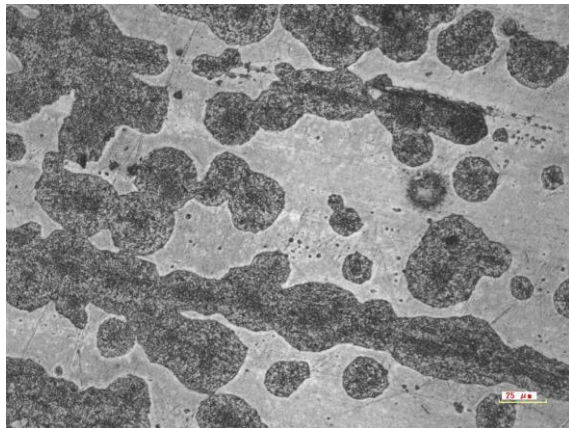


光学画像

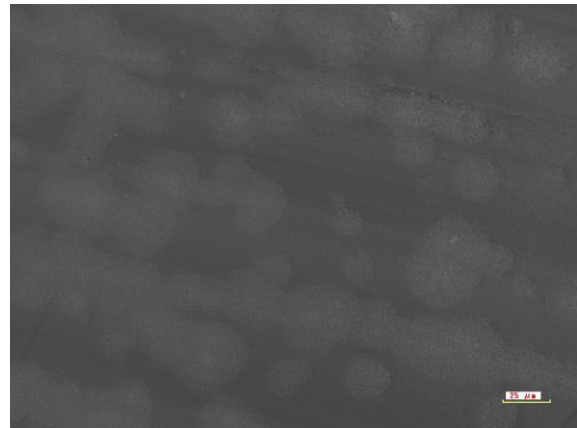


高低画像

(a) 曝露試験前



光学画像



高低画像

(b) 5h 曝露試験後

図 4 3 . Inconel サンプルの微細表面観察結果

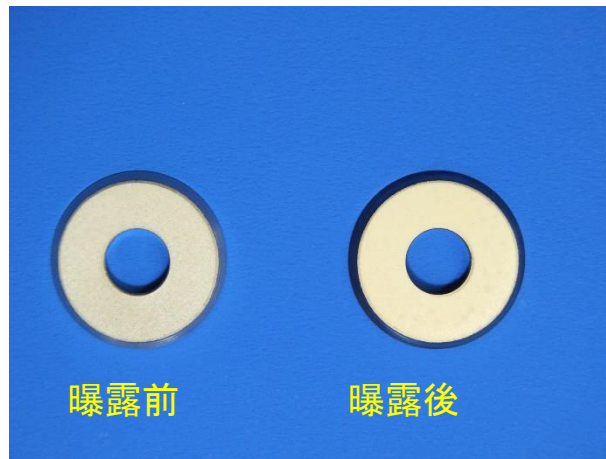
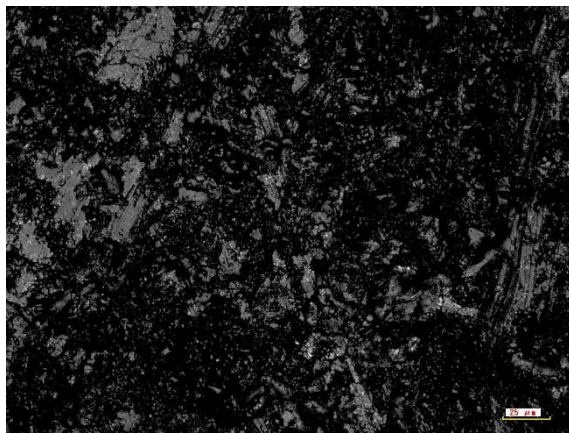
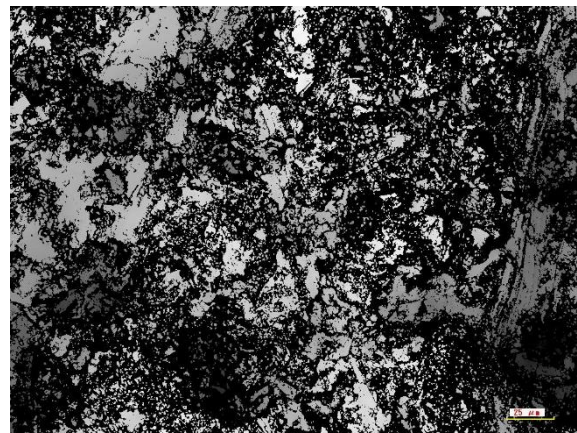


図 4 4 . YSZ サンプルの外観

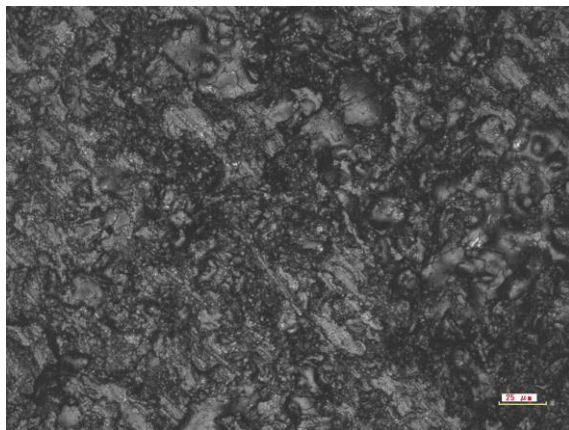


光学画像

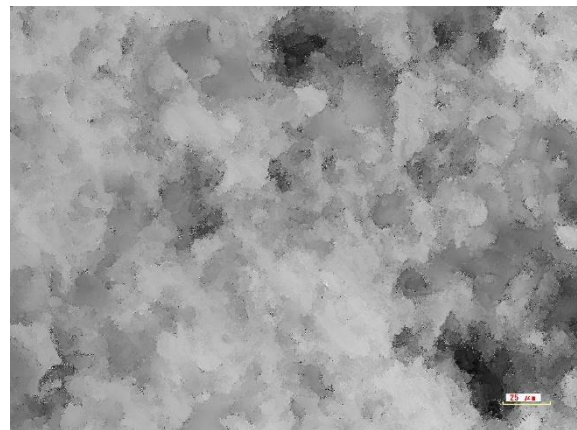


高低画像

(a) 曝露試験前



光学画像



高低画像

(b) 5h 曝露試験後

図 4 5 . YSZ サンプルの微細表面観察結果

曝露前のサンプル外観は白色で、その微細表面は若干の凹凸はあるものの、成膜後の研磨による平坦面が多くを占めている。

このサンプルの曝露試験を行ったところ、YSZ に若干の変色が観察された(図 4 4 参照)。その微細表面を観察した結果、曝露前に見られたような平滑面がほとんど見られず、粒状の凹凸が前面に形成されていた。曝露試験時の推定温度では、通常、YSZ の焼結現象が進行することは考えにくいため、溶射時に膜内に形成された YSZ 粒単位で脱落している可能性が強く示唆される。YSZ は、高温において酸素イオンの移動度が高くなることが知られており、高温 NH₃ による還元雰囲気中で酸素を奪われたことが表面変化の原因と考えられる。

3-2-2-4 まとめと課題

曝露試験の結果、燃料リッチの NH₃ 専焼条件における燃焼炎に対し、Inconel と YSZ の双方が比較的短期間で表面に化学反応に起因する変化が生じることが確かめられた。長時間暴露における耐久性については、今後、確認すべき課題である。

低 NO_x 化のためにリッチ・リーン燃焼方式を採用する場合には、燃料リッチ燃焼領域の温度レベルの適正化や冷却技術など、燃焼器の設計に工夫が必要であることが示唆された。なおリッチ・リーン燃焼方式用の冷却技術については既に特許を出願済みである。また、高温雰囲気中の材料腐食の対策としては、耐環境性コーティング (EBC) を適用も考えられる。この技術は、ガスタービンへのセラミック複合材の適用に関連して研究開発が盛んに取り組まれており、リッチ・リーン燃焼器への適用は今後の検討課題である。

3-3. レシプロエンジンにおける燃焼過程の数値解析

アンモニアを燃料としたレシプロエンジンでは、アンモニアの層流燃焼速度が小さいために安定して運転できないことや消炎によって未燃成分が排出されることが問題になりうる。実機関を用いた試験により、アンモニアに水素を添加して層流燃焼速度を向上させることによってメタンなどの炭化水素燃料を用いたときと同等の燃焼期間で燃焼させることができ安定して運転できることが示されている。さらに、エンジンが暖機状態であれば、アンモニアだけを燃料とした運転も可能であり、火炎は筒内全体に拡大することが示されている。しかしながら、メタンを燃料とした場合とアンモニアに水素を添加した場合は、層流燃焼速度、燃焼期間ともにほぼ等しく見かけの燃焼過程に差が見られない場合であっても、排出される未燃燃料量は大きく異なりアンモニアを燃料とした場合に未燃成分の排出が大幅に増加し問題となる。これは炭化水素燃料とアンモニアでは化学反応の過程が異なるために火炎特性に差があるためであると考えられる。そこで、レシプロエンジン内の燃焼過程を3次元数値流体力学(CFD)計算により再現し、アンモニアを燃料とした際の燃焼過程を調べた。

3次元CFD計算では筒内の圧縮上死点付近における部分領域を対象にし、化学動力学計算と組み合わせることによって乱流場において燃焼が進行する過程を計算した。まず、筒内における代表的な乱流場を得るために、レシプロエンジンの吸気行程から圧縮上死点までを計算した。対象とするエンジンはボア×ストロークが86mm×86mmであり、排気量は500cc、圧縮比は14である。計算はConvergent Science社のCONVERGEを用いて行い、乱流モデルにはラージエディシミュレーション(LES)を用いて一定以上のスケールの流動を再現した。SGSモデルにはSmagorinskyモデルを、乱流Schmidt数と乱流Prandtl数は0.4とした。格子幅は1mmを基準に壁面付近は0.25mmと細かくした。計算結果は図46のとおりであり、吸気管から空気を吸入し圧縮する行程において乱流場が形成されていることがわかる。計算結果によれば上死点付近において流速は数m/s程度である。

つぎに、化学動力学モデルを使った燃焼計算を行った。全領域を対象にして計算すると膨大な時間がかかるため、筒内の一部を対象にして計算時間を数日～1週間程度に短縮することを図った。-30degATDCにおける筒内の30°セクターメッシュを用い、上記の計算により得られた流動場を初期条件として与えることとした。計算領域および初期の流動場は図47のとおりである。化学動力学モデルにはGRI-Mech v3.0を用いた。なお、GRI-Mechはアンモニアの燃焼計算を目的に構築されたモデルではないが、常圧における層流燃焼速度が実験と比較的よく一致し、同一のメカニズムでメタン、アンモニア双方を計算することができる。計算格子は直交格子とし、ベース格子幅は0.4mm、解適合格子(AMR)を利用することにより火炎面近傍では0.1mmまで細かくする。温度および圧力の初期値はそれぞれ圧縮上死点付近の値として800Kおよび3.4MPaとし、計算機負荷低減のために燃焼計算中は計算領域の体積変化はないものとした。計算は、(a)メタン-空気量論混合気にEGR模擬ガス(N₂ 88.3vol%+CO₂ 11.7vol%)を25wt%混合して希釈した混合気と、(b)アンモニア-空気量論混合気について行った。ともに計算開始時点における層流燃焼速度は約0.3m/sである。

燃焼計算の結果得られた温度分布の時間変化を図48に示す。メタンおよびアンモニアの火炎で温度分布の形状はほとんど等しい。初期の流動場が等しく、層流燃焼速度もほぼ等しいため火炎の発達過程が同等になったと考えられる。バルクで消炎をする様子は見ら

れずアンモニアにおいても十分燃焼が進行することがわかる。既燃部の温度はアンモニアでやや高いが、これは断熱火炎温度がアンモニア—空気混合気の方が高いためである。以上より、アンモニアを燃料とした場合にも筒内の乱流場において燃焼が進行し、その過程は層流燃料速度をそろえたメタン火炎と比べて大きな違いは見られないことがわかった。

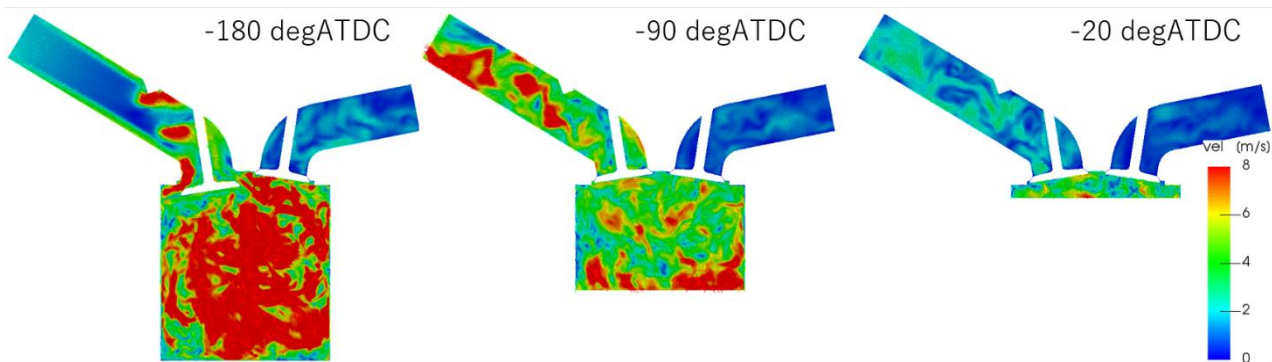


図 4 6 . 圧縮行程における速度分布の LES 計算結果

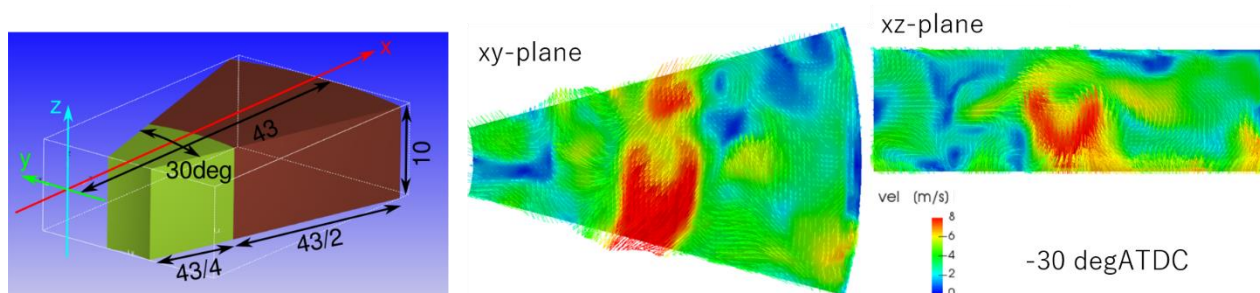
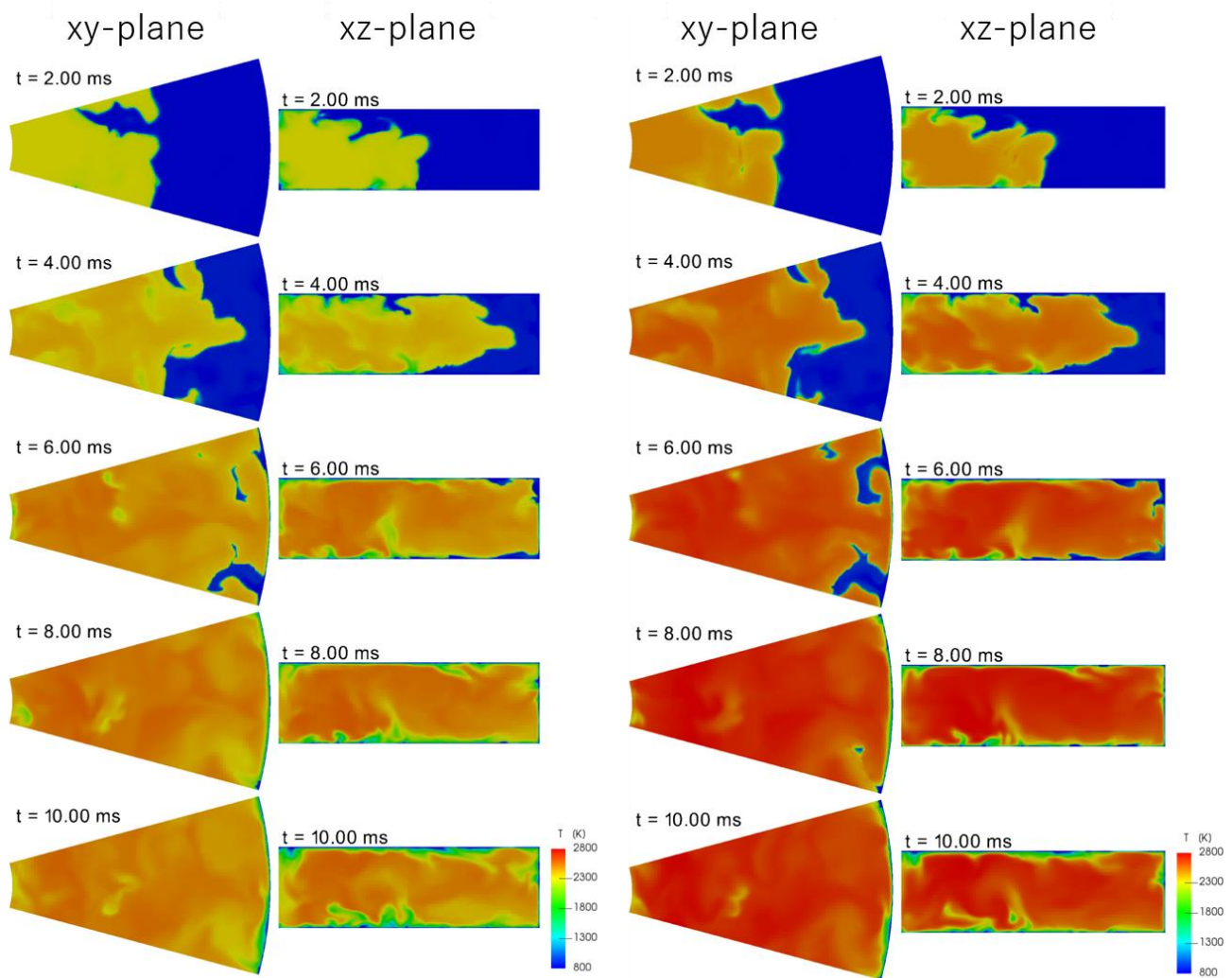


図 4 7 . 燃焼計算時の計算領域と初期流動場



(a) CH₄, 25% diluted

(b) NH₃

図48. メタンとアンモニアの燃焼場における温度分布の時間変化

3-3. まとめ

東北大学、トヨタエナジーソリューションズと協力しながら、アンモニアを直接燃焼可能な 50kW 級ガスタービンの研究開発を進め、未燃アンモニアをほとんど発生させずに発電を成功させることができた。また脱硝装置により NO_x を低く抑えることに成功した。更にリッチ・リーン燃焼方式を採用した低 NO_x 燃焼器の開発を進めて、NO_x の大部分を占める NO を脱硝処理前で当初の 1/5 以下の 222ppm (16%O₂ 換算) に抑えることに成功した。さらに脱硝装置を小型化してパッケージ内に搭載した新パッケージのガスタービンにおいて、発電出力 50kW を達成し、さらに NO_x も 48.6kW 発電時に 164ppm 以下にできた。また、より処理能力の高い脱硝触媒も開発した。また、低 NO_x 燃焼器について材料の暴露試験を行い、課題を見いだした。クリーンアンモニアエンジンの検討も進めており、目標を無事達成した。

3-4. 今後の課題

実用化に向けては、ガスタービンの構成要素のアンモニア使用に対する耐久性が課題となってくる。例えば、新開発触媒や、低 NO_x 燃焼器、ガスコンプレッサーのシールなどの寿命は経済性を考える上で重要である。また、燃料のシングルフェーエル化なども利便性の面では、重要な課題である。また、リッチ・リーン燃焼方式による低 NO_x 化について、より高度な燃焼器冷却技術を必要とするより大型のガスタービンに適用できるかどうかにも興味深い課題である。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 12 件

1. N. Iki, et al., Micro Gas Turbine Firing Kerosene and Ammonia, ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43689, (2015)
2. O. Kurata, et al., Power generation by a micro gas turbine firing kerosene and ammonia, Proceeding of International Conference on Power Engineering (ICOPE-15), 1139-1146, (2015)
3. N. Iki et.al, Micro Gas Turbine Firing Ammonia, ASME TurboExpo2016, GT2016-56954, 1-6 (2016)
4. O. Kurata et.al, Ammonia-fired gas turbine power generation system, Proceedings of World Hydrogen Energy Conference 2016, 147-148 (2016)
5. O. Kurata et.al, Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations, Proceedings of Combustion Institute, Vol.36, Issue3, 3351-3359 (2017)
6. N. Iki et.al, Gas Turbine Power Generation System Firing Ammonia-Methane Mixture, ACGT 2016, 1-6 (2016)
7. O. Kurata et.al, Success of Ammonia-fired, Regenerator-heated, Diffusion Combustion Gas Turbine Power Generation and Prospect of Low NO_x Combustion with High Combustion Efficiency, Proceedings of the ASME 2017 Power Conference Joint With ICOPE-17, POWER-ICOPE2017-3277, pp.1-10 (2017)
8. N. Iki et al, Operation and Flame Observation of Micro Gas Turbine firing ammonia, Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, GT2017-64250, pp.1-7 (2017)
9. K. Somarathne et al, Modeling of Ammonia/air Non-premixed Turbulent Swirling Flames in a Gas Turbine like Combustor, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC2017) (2017)
10. E. Okafor et al, Flame Stabilization and Emission Characteristics of Ammonia Flames in a Micro Gas Turbine Combustor, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC2017) (2017)
11. O. Kurata, et al, Development of Wide Range-operable, Rich-lean Low-NO_x Combustor for NH₃ Fuel Gas-turbine Power Generations, Proc. Combust. Inst. 37, In press <<https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.012>>
12. O. Kurata, et al, H. Kobayashi, Rich-lean Low-NO_x Combustor for Micro Gas Turbine Firing Ammonia Gas, ACGT 2018, ACGT 2018-TS81, 1-5(2018)

<査読なし(総説等含む)> 12 件

1. 倉田 修, 壹岐 典彦, 松沼 孝幸, 井上 貴博, 鈴木 雅人, 辻村 拓, 古谷 博秀, エネルギーキャリアとしてアンモニアを用いたガスタービン, 日本ガスタービン学会誌, 第 43 巻第 2 号, 86-89 (2015)
2. 小林秀昭, 壹岐典彦, 第 3 編第 5 章「直接燃焼・ガスタービン」, シーエムシー出版「アンモニアを用いた水素エネルギーシステム」, 200-210(2015)
3. 倉田修他, アンモニア燃焼ガスタービン設備の排ガス特性, 第 53 回燃焼シンポジウム

講演論文集, A322, 378-379(2015)

4. 壹岐典彦他, ガスタービンにおけるアンモニア燃焼利用, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 259-264(2016)
5. 壹岐典彦, 倉田修, 連載講座—カーボンフリーアンモニア燃焼の科学と技術IV— ガスタービン燃焼, 日本燃焼学会誌, 58-186, 215-222(2016)
6. 倉田修他, アンモニア燃焼ガスタービン発電装置の燃焼状態の観察, 第 54 回燃焼シンポジウム 講演論文集, C331, 1-2(2016)
7. 壹岐典彦, カーボンフリー燃料アンモニアとアンモニア燃焼ガスタービンの技術開発, 第 45 回ガスタービンセミナー資料集, 59-66(2017)
8. 倉田修他, アンモニア用ガスタービン燃焼器の研究開発, 第 45 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, B-6, 147-152(2017)
9. 倉田修他, アンモニアガスタービンとテストリグの燃焼器排ガス特性の違いについて, 第 55 回燃焼シンポジウム 講演論文集, D233, 1-2(2017)
10. 古谷博秀・辻村拓・前田哲彦・壹岐典彦・小島宏一・難波哲也, 産総研再生可能エネルギー研究センターにおける水素への取り組みと最新状況, 水素エネルギー協会誌 (2018)
11. 壹岐典彦他, アンモニア燃焼ガスタービンにおける低 NO_x Rich-lean 燃焼器の研究開発, 第 46 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, B-9, 1-4(2018)
12. 倉田修他, アンモニア燃焼用低 NO_x Rich-lean ガスタービン燃焼器の研究開発, 第 56 回燃焼シンポジウム講演論文集, C321, 1-2(2018)

(2) 学会, 展示会等発表

<招待講演> 国内 5 件、海外 2 件

1. 壹岐典彦 (産総研), 再生可能エネルギー大量導入時代のガスタービンの役割と研究開発, 富山大学産学交流振興会総会及び講演会, 富山市, 2016/4/18
2. 壹岐典彦 (産総研), カーボンフリー燃料アンモニアとアンモニア燃焼ガスタービンの技術開発, 第 45 回ガスタービンセミナー, 和光市, 2017/1/27
3. N. Iki (AIST), Ammonia Fueled Gas Turbine Power Generation, 3rd General Meeting and Workshop on SECs in Industry of SMARTCATs Action, 2017/10/25
4. N. Iki (AIST) et al, Development of a gas turbine power generation system firing ammonia gas, 13th RESEARCH & DEVELOPMENT IN POWER ENGINEERING Conference, RDPE 2017, 2017/12/1
5. 壹岐典彦 (産総研), 燃料としてのアンモニア利用とガスタービン発電, 第 13 回ガラス技術シンポジウム, 2017/11/2
6. 壹岐典彦 (産総研), 再生可能エネルギーとガスタービン発電, 法政大学 グリーンテクノロジーセミナー, 2017/11/22
7. 壹岐典彦 (産総研), アンモニア直接燃焼ガスタービンの研究開発, 第 47 回ガスタービンセミナー, 東京都板橋区, 2019/1/25

<口頭発表> 国内 11 件、海外 19 件

1. N. Iki (AIST) et al, “Micro Gas Turbine Operation with Kerosene and Ammonia”,

- The 11th Annual NH₃ Fuel Conference (Des Moines, IA), 2014/9/21
2. 倉田修 (産総研) 他, 「アンモニア直接燃焼ガスタービンの実証」, 第 10 回新エネルギー技術シンポジウム(郡山), 2014/11/27
 3. 壹岐典彦 (産総研), 「ガスタービン燃料の低炭素化による燃焼特性の変化」, 日本機械学会研究会 RC264 : 先進計測法および数値解析モデリングに基づく燃焼制御の高度化に関する国際協力研究分科会中間報告会 (東京), 2015/3/4
 4. N. Iki(AIST), et al, “Micro Gas Turbine Firing Kerosene and Ammonia”, ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43689, Montreal, 2015/6/15
 5. N. Iki (AIST), et al, “Micro Gas Turbine Firing Ammonia”, NH₃ Fuel Conference 2015, Chicago, 2015/9/22
 6. 倉田修 (産総研) ほか, 「アンモニア燃焼ガスタービン設備の排ガス特性」, 第 53 回燃焼シンポジウム, つくば, 2015/11/18
 7. O. Kurata (AIST) et al, Power generation by a micro gas turbine firing kerosene and ammonia, International Conference on Power Engineering (ICOPE-15), Yokohama, 2015/12/3
 8. 壹岐典彦 (産総研), アンモニアを燃料とするガスタービン, 平成 28 年度 福島再生可能エネルギー研究所 研究成果報告会, 2016/5/31
 9. O. Kurata (AIST) et al, Ammonia-fired gas turbine power generation system, WORLD HYDROGEN ENERGY CONFERENCE 2016 (WHEC 2016), Zaragoza, Spain, 2016/6/15
 10. N. Iki (AIST) et.al, Micro Gas Turbine Firing Ammonia, ASME TurboExpo2016, Seoul, South Korea, GT2016-56954, 2016/6/17
 11. O. Kurata (AIST) et al, Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations, 36th Int. Symp. On Combustion, Seoul, South Korea, 2016/8/1
 12. N. Iki (AIST) et al, Power generation and Flame Visualization of Micro Gas Turbine Firing Ammonia or Ammonia-Methane Mixture, 2016 NH₃ Fuel conference, Los Angeles, USA, 2016/9/19
 13. 壹岐典彦 (産総研) 他, ガスタービンにおけるアンモニア燃焼利用, 第 44 回ガスタービン学会定期講演会, 酒田市, 2016/10/26
 14. N. Iki (AIST) et al, Gas Turbine Power Generation System Firing Ammonia-Methane Mixture, ACGT 2016, Mumbai, India, 2016/11/14
 15. 倉田修 (産総研) 他, アンモニア燃焼ガスタービン発電装置の燃焼状態の観察, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016/11/25
 16. 倉田修 (産総研) 他, アンモニア燃焼ガスタービン発電用の低 NO_x 燃焼器開発のための試験設備, 第 22 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 C231, 2017/6/15
 17. O. Kurata (AIST) et al, Success of Ammonia-fired, Regenerator-heated, Diffusion Combustion Gas Turbine Power Generation and Prospect of Low NO_x Combustion with High Combustion Efficiency, Proceedings of the ASME 2017 Power Conference Joint With ICOPE-17, POWER-ICOPE2017-3277, pp.1-10. 2017/6/27
 18. N. Iki (AIST) et al, Operation and Flame Observation of Micro Gas Turbine firing ammonia, Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, GT2017-64250, pp.1-7, 2017/6/30

19. 倉田修（産総研）他，アンモニア用ガスタービン燃焼器の研究開発，第45回日本ガスタービン学会定期講演会，2017/10/18
20. O. Kurata (AIST) et al, Combustion Emissions from NH₃ Fuel Gas Turbine Power Generation Demonstrated, 2017 AIChE Annual Meeting, 2017/11/1
21. 倉田修（産総研）他，アンモニアガスタービンとテストリグの燃焼器排ガス特性の違いについて，第55回燃焼シンポジウム，2017/11/14
22. K. Somarathne (Tohoku Univ.) et al., Modeling of Ammonia/air Non-premixed Turbulent Swirling Flames in a Gas Turbine like Combustor, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC2017), 2017/12/2
23. Okafor (Tohoku Univ.) et al., Flame Stabilization and Emission Characteristics of Ammonia Flames in a Micro Gas Turbine Combustor, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC2017), 2017/12/14
24. O. Kurata (AIST), Demonstration of NH₃ fuel gas turbine power generation system and the further R&D, NH₃ event 2018 (2nd European Power to Ammonia Conference), 2018/5/18
25. N. Iki (AIST) et al, NO_x reduction in a swirl combustor firing ammonia for a micro gas turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo 2018, GT2018-75993, pp.1-9, 2018/6/11
26. O. Kurata (AIST) et al, Development of low NO_x combustor of ammonia fuel gas turbine power generation, 22nd World Hydrogen Energy Conference 2018 (WHEC2018), 2018/6/18
27. O. Kurata (AIST) et al, Rich-lean Low-NO_x Combustor for Micro Gas Turbine Firing Ammonia Gas, Proceedings of the Asian Congress on Gas Turbines, ACGT 2018-TS81, 2018/8/24
28. 壹岐典彦（産総研）他，アンモニア燃焼ガスタービンにおける低NO_x Rich-lean 燃焼器の研究開発，第46回日本ガスタービン学会定期講演会，2018/10/10
29. O. Kurata (AIST) et al, Development of low-NO_x combustor of micro gas turbine firing ammonia gas, 2018 AIChE Annual Meeting, 2018/10/31
30. 倉田修（産総研）他，アンモニア燃焼用低NO_x Rich-lean ガスタービン燃焼器の研究開発，第56回燃焼シンポジウム，2018/11/16

<ポスター発表> 国内3件、海外3件

1. N. Iki (AIST) et al, Gas turbine power generation system firing ammonia and natural gas, The 7th World Hydrogen Technology Convention, WHT17-067, 2017/7/10
2. 壹岐典彦（産総研），燃料としてのアンモニア利用とガスタービン発電，第13回ガラス技術シンポジウム，2017/11/2
3. 井上貴博（産総研）他，アンモニア用ガスタービン燃焼器の研究開発 —燃焼器テストリグにおける燃焼状態の再現性の確認と材料試験—，エネルギー技術シンポジウム2017，2017/11/22
4. N. Iki (AIST) et al, Research of ammonia combustor for micro gas turbine power generation and high temperature resistance of materials, 37th International

Symposium on Combustion, 2018/7/31

5. 壹岐典彦 (産総研) 他, アンモニア直接燃焼ガスタービンの研究開発, エネルギー技術シンポジウム 2018, 2018/12/4
6. Kurata(AIST) et al, Research and Development of Ammonia Combustion, low-NOx, Rich-lean Gas Turbine Combustor, 1st International Conference on Smart Energy Carriers, PIII-2, 2019/1/21-23

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内 11 件、海外 2 件

1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所, International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo (igtcc-15), Tokyo, 2015/11/16~19
2. 壹岐典彦 (産総研), 「ガスタービン燃料の低炭素化による燃焼特性の変化」, 日本機械学会 RC264 研究分科会最終報告会, 2016/3/8
3. 壹岐典彦 (産総研), 水素キャリアとしてのアンモニアとその直接燃焼技術, エネルギー技術シンポジウム 2016, 東京, 2016/12/1
4. N. Iki (AIST) et al, DEVELOPMENT OF AN AMMONIA-BURNING GAS TURBINE POWER GENERATION, IEA Combustion agreement, 39th Task Leaders Meeting, 2017/6/18
5. 壹岐典彦 (産総研), アンモニアを用いたガスタービン発電, CMC+AndTech FORUM-技術セミナー・研修会「さらなる効率化を目指したアンモニアの合成技術と応用展開」, 2017/7/25
6. 壹岐典彦 (産総研), アンモニアガスタービンシステムの紹介, 第 12 回再生可能エネルギー世界展示会 RENEWABLE ENERGY 2017 JCRE フォーラム:「水素・燃料電池 (分科会 7)」, 2017/7/5
7. 壹岐典彦 (産総研), アンモニア燃焼ガスタービンの技術開発, エネルギー分野 (発電・水素製造など) への アンモニア利活用技術/研究開発動向, 2017/10/13
8. 壹岐典彦 (産総研), カーボンフリー燃料直接燃焼発電システムの研究開発, 第六回 電力エネルギー未来技術シンポジウム, 2017/11/13
9. 壹岐典彦 (産総研), アンモニア専焼・混焼タービンの研究開発について, 一般社団法人日本産業機械工業会環境ビジネス委員会, 2017/12/15
10. 壹岐典彦 (産総研), アンモニア燃焼システム, RC273: 先進計測と解析による燃焼技術高度化のための国際協力研究分科会 第 9 回分科会, 2018/3/2
11. O. Kurata (AIST) et al, Development of an ammonia-burning gas turbine power generation, IEA Combustion agreement, 40th Task Leaders Meeting, 2018/6/13
12. 壹岐典彦 (産総研), アンモニアガス燃焼の研究紹介と水素利用社会の展望, 平成 30 年度 「 ビジネスプラン発表会 」, 2018/9/26
13. 壹岐典彦 (産総研), アンモニア直接燃焼用ガスタービン発電の研究開発, 一般社団法人日本機械学会 関西支部 第 19 回秋季技術交流フォーラム, 2018/10/20

(3) プレス発表

1. 2014/9/18, 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立研究開発法人科学技術振興機構, 「ガスタービンでアンモニアを燃焼させる発電技術ー 水素キャリアとしてのアンモニアの利用進展へー」 灯油にアンモニアを 30 %混ぜてガスタービンで燃焼させ、

21 kW の発電に成功、今後、アンモニアの割合を高め、アンモニア 100 %で発電実証を行う予定、水素キャリアとしてのアンモニア利用技術が進展

2. 2015/9/17, 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立研究開発法人科学技術振興機構, 「メタン-アンモニア混合ガスと 100 %アンモニアのそれぞれでガスタービン発電に成功」メタン-アンモニア混合ガスをガスタービンで燃焼させ、41.8kW の発電に成功、100%のアンモニアガスを燃焼させ、41.8kW のガスタービン発電にも成功、水素キャリアとしてのアンモニアを利用する技術の進展や温室効果ガスの大幅削減に貢献,

(4) マスメディア等取材による公表

1. 週刊エネルギー通信 1276 号 pp.17~20, 2015/5/29, 「アンモニア燃料 GT 発電 産総研, 構成の化目指す」
2. 週刊エネルギー通信 1278 号 pp.22-25, 2015/6/26, 「アンモニア・MCH 等 産総研, 水素貯蔵実証」
3. 福島民報, 2015/9/18, 「郡山の産総研と東北大 新ガス燃料 発電成功 メタンにアンモニア混合 CO2 削減」
4. 福島民友, 2015/9/18, 「100%アンモニアで発電 産総研が実証実験 メタン混合も成功」
5. 河北新報, 2015/9/20, 「ガスタービン発電 アンモニアだけで成功 産総研・東北大 CO2 排出ゼロへ可能性」
6. 電気新聞, 2015/9/24, 「アンモニア発電に成功 産総研など CO₂ 排出削減へ期待」
7. 化学工業日報, 2015/9/24, 「ガスタービン発電 アンモニア専焼実現 産総研 水素の燃料利用に道」
8. 日刊工業新聞, 2015/9/29, 「アンモニア燃料ガスタービン 産総研 41.8kW 発電に成功」
9. 岐阜新聞, 2015/11/5, 「地球に優しいアンモニア発電 水素利用、CO₂ 排出ゼロ 調達方法や有害物質処理 実用化には課題」
10. 中部経済新聞, 2015/11/5, 「アンモニア発電の研究進む 水素利用、CO₂ 排出ゼロ 実用化には課題」
11. 四国新聞, 2015/11/6, 「水素活用で CO₂ 排出ゼロ アンモニア発電研究進む 実用化には課題も」
12. 岩手日報, 2015/11/8, 「有望アンモニア発電 水素活用で CO₂ ゼロ NO_x 処理、供給面に課題」
13. 福井新聞, 2015/11/10, 「研究進むアンモニア発電 水素利用、CO₂ ゼロ期待 有害物質の排出削減 課題」
14. 山陽新聞, 2015/11/10, 「アンモニア発電研究進む 水素利用、CO₂ 排出ゼロ 有害物質対策 原料調達方法 実用化には課題も」
15. 信濃毎日新聞, 2015/11/16, 「CO₂ を出さないアンモニア発電 産総研と東北大など研究 発電効率・有害物質・供給 実用化にはなお課題」
16. 静岡新聞, 2015/11/16, 「アンモニア発電 研究進む 水素利用、CO₂ 排出ゼロへ 実用化には課題」
17. 山形新聞, 2015/11/18, 「アンモニア発電めざす 東北大など研究」
18. 中国新聞, 2015/11/22, 「アンモニア発電研究進む 水素利用 CO₂ 排出ゼロ 窒素酸化

物の発生課題」

19. 週刊エネルギー通信 1291 号 pp.15～20, 2016/3/18, 「アンモニア燃焼発電更なる低 NO_x 化へ」
20. NHK 総合テレビ「サキどり↑」2016 年 7 月 10 日 8:25～8:55
21. NHK 総合テレビ「首都圏ネットワーク」2017 年 2 月 7 日 18:10～19:00
22. NHK 総合テレビ「おはよう日本」2017 年 2 月 7 日 7:45～8:00
23. NHK 教育テレビ「サイエンス ZERO」(平成 29 年 6 月 18 日放送, 24 日再放送)

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	2017-210672	燃焼器および 燃焼方法	2017 年 10 月 31 日	国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立大学法人東北大学, 株式会社トヨタエナジーソリューションズ
2	PCT/JP2018/040350	燃焼器および 燃焼方法	2018 年 10 月 31 日	国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立大学法人東北大学, 株式会社トヨタエナジーソリューションズ

6. 参考文献

- (1) D.T. Pratt, Technical Report No.9 “Performance of Ammonia-Fired Gas-Turbine Combustors”, DA-04-200-AMC-791(x) (1967)
- (2) Solar Division of International Harvester Company, Final Technical Report “Development of an Ammonia-Burning Gas Turbine Engine”, DA-44-009-AMC-824(T) (1968)
- (3) B. Evans, The tenth Annual NH₃ Fuel Conference, (2013)
- (4) H. Nozari, A. Karabeyoğlu, 13th NH₃ Fuel Conference, (2016)
- (5) A. Valera-Medina, R. Marsh, J. Runyon, D. Pugh, P. Beasley, T. Hughes, P. Bowen, *Applied Energy*, Vol.185, Part 2, 1362-1371 (2017)
- (6) 伊藤慎太郎他, 第 53 回燃焼シンポジウム講演論文集, A323, 380-381 (2015)
- (7) 伊藤慎太郎他, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, C-332 (2016)
- (8) 内田正宏他, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, C-333 (2016)
- (9) A. Hayakawa, Y. Arakawa, R. Mimoto, K. Somarathne, T. Kudo, H. Kobayashi, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**: 14010–14018 (2017).
- (10) K. Somarathne, S. Hatakeyama, A. Hayakawa, H. Kobayashi, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**: 27388–27399 (2017).
- (11) E. Okafor, D. Somarathne, A. Hayakawa, T. Kudo, O. Kurata, N. Iki, H. Kobayashi, *Proc. Combust. Inst.*, **37**, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.083>

- (12) G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, p.714, In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, available at <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf>.
- (13) 小笠原 他, 第 53 回燃焼シンポジウム講演論文集, p. 372-373 (2015)