

## TED Plaza

## アンモニア/天然ガス混焼ガスタービン燃焼器に関する研究



伊藤 慎太郎

株式会社 IHI  
 技術開発本部 基盤技術研究所 熱・流体研究部  
 shintarou\_itou@ihi.co.jp

## 1. はじめに

アンモニアは燃焼時に  $\text{CO}_2$  を排出しないため、炭化水素燃料の代替燃料として期待されている。IHI では、内閣府 SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）において、アンモニアを微粉炭焚きボイラ、発電用ガスタービン、固体酸化物形燃料電池の燃料として水素に再変換せず直接利用するための技術開発を行っている（松尾，2018）。しかし、アンモニアは従来燃料とは大きく異なる燃焼特性を持っている。例えば、分子中に N 原子をもつため Fuel- $\text{NO}_x$  を大量に排出する可能性がある。その一方で、火力発電所では脱硝装置の還元剤として利用されるなど、複雑な  $\text{NO}_x$  生成メカニズムを持っている（小林，早川，2016）。また、天然ガスに比べ、燃焼速度は約 20%（Hayakawa, et al., 2015）、発熱量は約 40%、断熱火炎温度は 200~400 °C 低いので火炎が不安定化する可能性がある。このように、アンモニアを燃料として直接利用するには、アンモニアの基礎燃焼特性を把握し、アンモニアに適した安定かつ低エミッションな燃焼方式を開発する必要がある。本稿では、アンモニアと天然ガスを混焼する発電用ガスタービン燃焼器の開発において取り組んできた、一連の燃焼試験について紹介する。

## 2. 大気圧下におけるバーナ単体燃焼試験によるアンモニアの燃焼特性把握

燃焼器の開発に当たり、まずはアンモニアが従来の天然ガス用バーナにおいてどの様に燃焼するか評価するため、希薄予混合型スワールバーナを用いたバーナ単体の燃焼試験を実施した。図 1 に供試バーナの概略図を示す。空気はモータコンプレッサから供給し、流量調整した後、電気ヒータで予熱しバーナに供給した。燃料には、都市ガス 13A（高位発熱量 45 MJ/Nm<sup>3</sup>）とアンモニアを使用し、アンモニアは工業用 50 kg ボンベからガス状態で供給した。燃料はいずれもマスフローコントローラを用いて流量調節した。供試バーナはバーナの中心にバーナ 1、その周りにバーナ 2 を配置した同軸二重構造となっている。都市ガスの一部は火炎安定化のため燃料ポート 1 に供給し、残りの都市ガスとアンモニアの混合気は燃料ポート 2 に供給した。ライナは石英ガラス製であり、火炎の様子を直接観察可能である。また、ライナ出口で排気ガスをサンプリングし、排気ガス濃度を計測した。この試験では火炎の直接観察の他、当量比、アンモニア混焼率、アンモニア供給位置といったパラメタが、火炎の吹き消え限界、ライナ出口における  $\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{THC}$ （Total Hydro Carbon）といったガス組成に及ぼす影響を調査し、アンモニアと都市ガスを混焼した場合の燃焼特性を評価した。

図 2 に、空気流量および総投入熱量を一定とした場合の、都市ガス専焼とアンモニア混焼率 10% の火炎直接写真を示す。ここでアンモニア混焼率は、投入した燃料の総発熱量に対するアンモニアの投入発熱量の割合として定義した。図中の赤い破線は可視発光から判断した火炎長さを示している。アンモニア/都市ガス混焼火炎は都市ガス火炎に比べ、白っぽいオレンジ色になる。これは、アンモニアが燃焼する際の  $\text{NH}_2$  ラジカル発光であると考えられる（Hayakawa, et al., 2015）。

また、火炎高さに注目すると、アンモニアをわずか 10% 混合しただけで、火炎高さは高くなることわかる。この傾向は、滞留時間が数十 msec と非常に短いガスタービン燃焼器において、アンモニア混焼火炎は燃焼が完結せずに燃焼効率が著しく低下する可能性を示唆している。

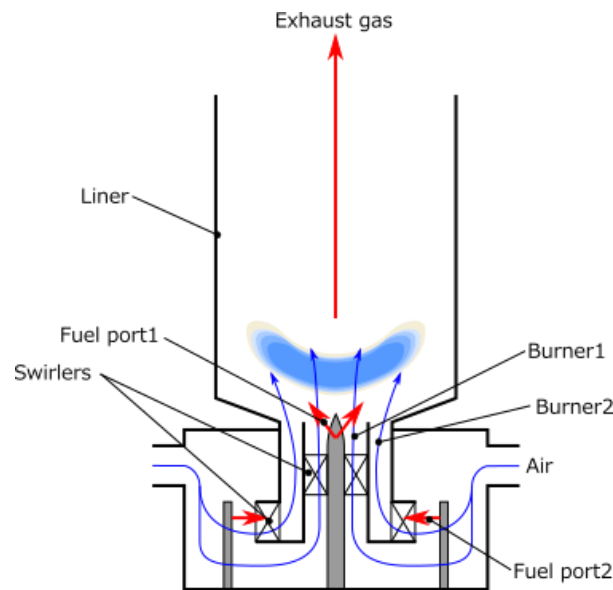
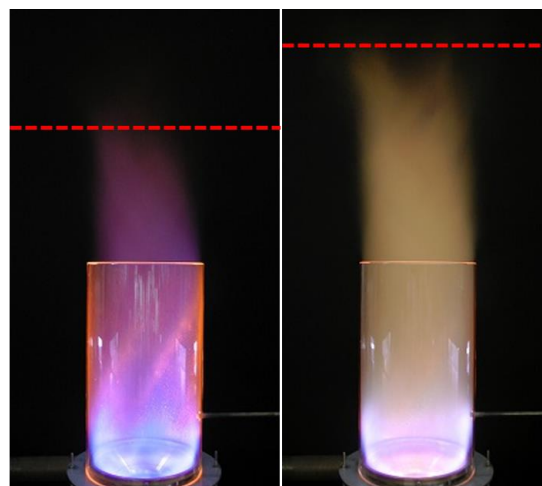


Fig. 1 Schematics of test burner



NH<sub>3</sub> mixing ratio=0% NH<sub>3</sub> mixing ratio=10%

Fig. 2 Effect of NH<sub>3</sub> mixing on flame behavior

### 3. リグ試験による低 NO<sub>x</sub> 燃焼方式の開発

バーナ単体試験と数値計算で得られた知見を基に、実際のガスタービン用燃焼器と同様の構造、サイズを有するアンモニア/都市ガス混焼用燃焼器を設計・製作し、リグ試験を実施した。図3に供試燃焼器の全体写真を示す。燃焼器は缶型であり、燃焼用の予熱空気はライナ外側を燃焼器下流側からバーナ方向に向かって流れ、バーナで燃料と混合された後にライナ内部の燃焼空間に供給される、ターンフロー構造となっている。バーナは図1に示すスワールバーナを改造して、バーナ1および2よりも燃焼室の下流側に直接供給可能なバーナ3を追加したものを使用した。この改造により、アンモニアをバーナ2およびバーナ3へ任意の流量配分で供給することが可能である。都市ガスについてはバーナ単体試験と同様とし、バーナ1および2より供給した。また、本供試体では、メタル温度評価のためにバーナおよびライナに複数の熱電対を取り付けた。さらに、燃焼器出口ガス温度およびガス組成を評価するため、燃焼器出口に温度計測プローブとサンプリングプローブを取り付けた。この他にも、バーナ性能評価に必要な情報を得るため、各

部の圧力損失，ガス温度を計測できる構造とした．リグ試験は常圧～2 気圧の条件で実施し，燃焼器内部の燃料および空気の速度がエンジンと同じになるように，空気流量，燃料流量に想定エンジン燃焼器圧力に対するリグ試験圧力の比率を乗じた圧力スケール試験とした．

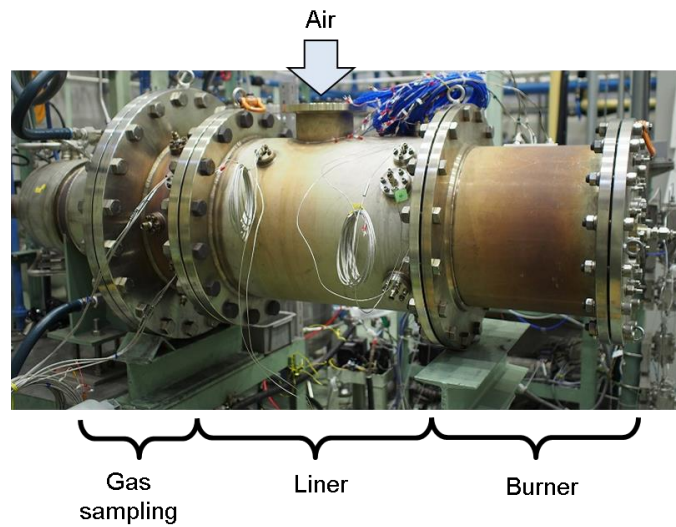


Fig. 3 Schematics of rig test unit

図 4 にエミッション計測結果の一例を示す．一連の試験では，空気流量，都市ガス流量，アンモニア流量（混焼率）を一定とし，アンモニアのバーナ 2 および 3 への供給配分のみを変更してエミッションへの影響を評価した．横軸は全アンモニア供給量に対するバーナ 3 への供給量の比率を示し，縦軸は  $O_2$  濃度 16% 条件に換算した  $NO_x$  濃度，CO および未燃  $NH_3$  濃度を示す．バーナ 3 へのアンモニア供給量を増加させると， $NO_x$  濃度は単調に減少することがわかる．これは，バーナ 1 および 2 出口に形成される都市ガス火炎の既燃ガス中では，空気中に比べて  $O_2$  濃度が低くなり，そこにバーナ 3 からアンモニアを直接供給したことで， $NO_x$  への転換が抑制されたためだと考えられる．一方で，バーナ 3 へのアンモニア供給比率が増加すると，CO および未燃  $NH_3$  濃度は増加する．この様に，バーナ 3 へのアンモニア供給は低  $NO_x$  化に有効であるが，未燃分濃度が増加しやすいため，これらを同時に低減する供給方法が重要であることが示された．また，リグ試験ではエミッションだけでなく，ライナ等のメタル温度分布や着火特性等を含めて総合的な評価を行い，燃焼器の改良を実施した．これらの検討の結果，開発当初と比較し  $NO_x$  濃度は約 1/5 に，未燃分は計測器の計測下限界以下にまで低減することに成功した．

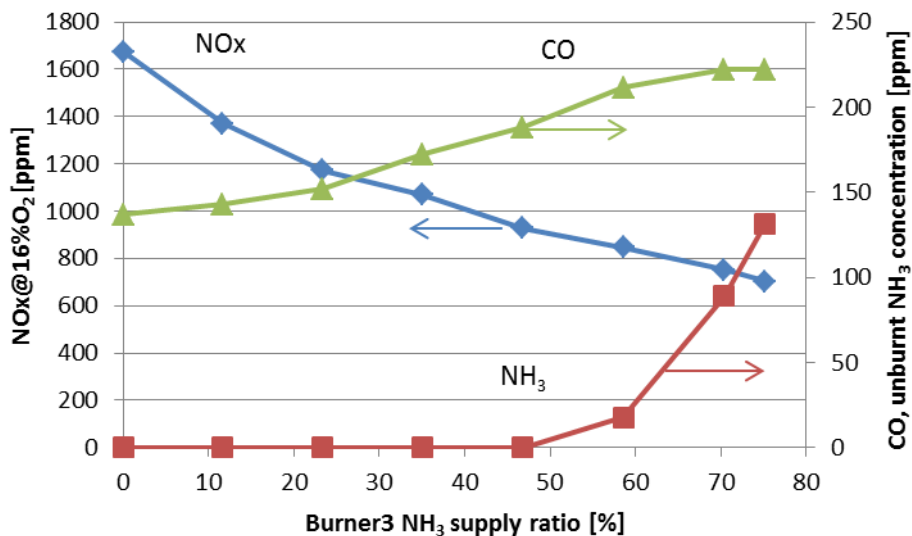


Fig. 4 Effect of burner3  $NH_3$  supply ratio on  $NO_x$ , CO and unburnt  $NH_3$

#### 4. ガスタービンエンジンを用いた発電実証試験

IHI 横浜事業所内に設置したガスタービンエンジンを使用し、リグ試験で開発したアンモニア混焼用燃焼器を搭載して発電実証試験を行った。図 5 に発電実証試験に使用したガスタービンとアンモニア供給装置を示す。ガスタービンエンジンには発電出力 2 MWe のシンプルサイクルガスタービンである IHI 製 IM270 を用いた。商用パッケージからの変更は新規開発した燃焼器のみとし、エンジン出口には排気ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度を低減するため選択触媒還元脱硝装置 (SCR : Selective Catalytic Reduction) を設けた。アンモニアは液体状態で加圧し、温水気化器で気化した後エンジンに供給した。都市ガスはガスコンプレッサで加圧して供給した。

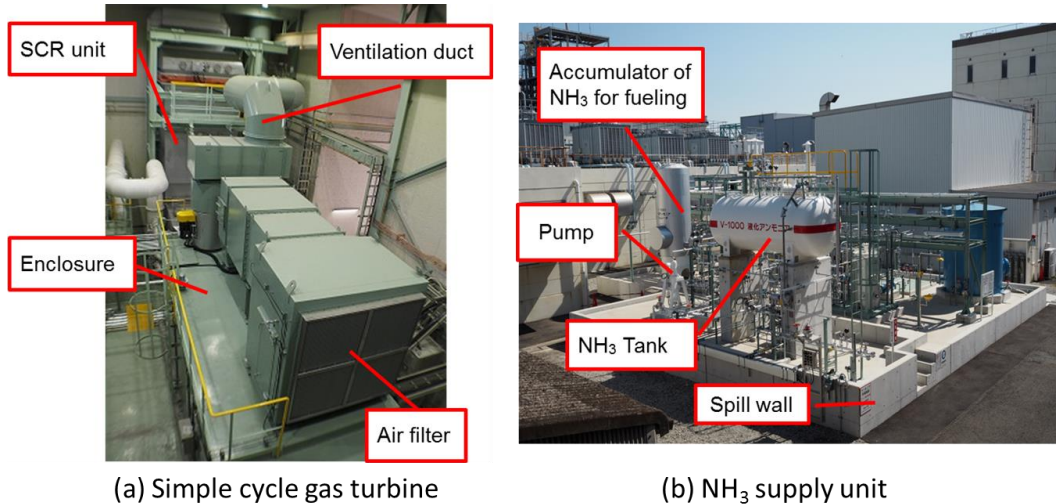


Fig. 5 Facility of demonstration test

エンジンの起動から 2 MWe 発電運転までの運転は都市ガスのみで行い、発電出力を一定に保持した状態でアンモニア混焼率を 20% まで増加させた。この際、エンジンの運転が安定しており、異音、異常振動、異常温度といった問題が発生しないことを確認した。図 6 にアンモニア混焼率とエンジン出口および脱硝装置出口における NO<sub>x</sub> および CO<sub>2</sub> 濃度の関係を示す。エンジン出口における NO<sub>x</sub> 濃度は、アンモニア混焼率が増加すると急激に増加するものの、アンモニア混焼率 5% 以上ではほぼ一定となり、アンモニア混焼率 20% で約 290 ppm となった。一方で、脱硝装置出口では、NO<sub>x</sub> 濃度を環境基準値以下まで低減することに成功した。CO<sub>2</sub> 濃度は、アンモニア混焼率が増加すると単調に低減し、アンモニアによる CO<sub>2</sub> 削減効果が実証された。

図 7 に燃焼器圧力と NO<sub>x</sub> 濃度の関係を示す。白抜きプロットがリグ試験で得られた燃焼器出口 NO<sub>x</sub> 濃度であり、中実プロットがエンジンで得られたタービン出口 NO<sub>x</sub> 濃度である。また、破線は、リグ試験結果から予想した累乗近似曲線である。圧力が増加すると NO<sub>x</sub> 濃度が減少する傾向であり、一般的な天然ガスの燃焼挙動とは異なる傾向であることがわかる。また、リグ試験結果から予測した NO<sub>x</sub> 濃度とエンジン試験結果の差は約 20 ppm であり、リグ試験で実施した圧力スケール試験はエンジンでの NO<sub>x</sub> 濃度予測に役立つことがわかる。

#### 5. 終わりに

本報では、アンモニア/天然ガス混焼ガスタービン燃焼器の開発において実施した一連の燃焼試験と代表的な結果を紹介した。この他にも開発では、詳細素反応機構を考慮した 0 次元数値解析 (伊藤, 2016) や 3D-CFD (内田, 2016) による現象理解および低エミッション燃焼方式の検討も実施し、そこで得られた知見が非常に重要な役割を果たした。このように、アンモニアの燃焼技術向上には、試験および数値解析技術の向上が必要不可欠である。今後は引き続き、これらの技術向上に取り組み、さらに低環境負荷なアンモニア燃焼技術の開発し、アンモニアを燃料としたガスタービンエンジンの社会実装を目指す。



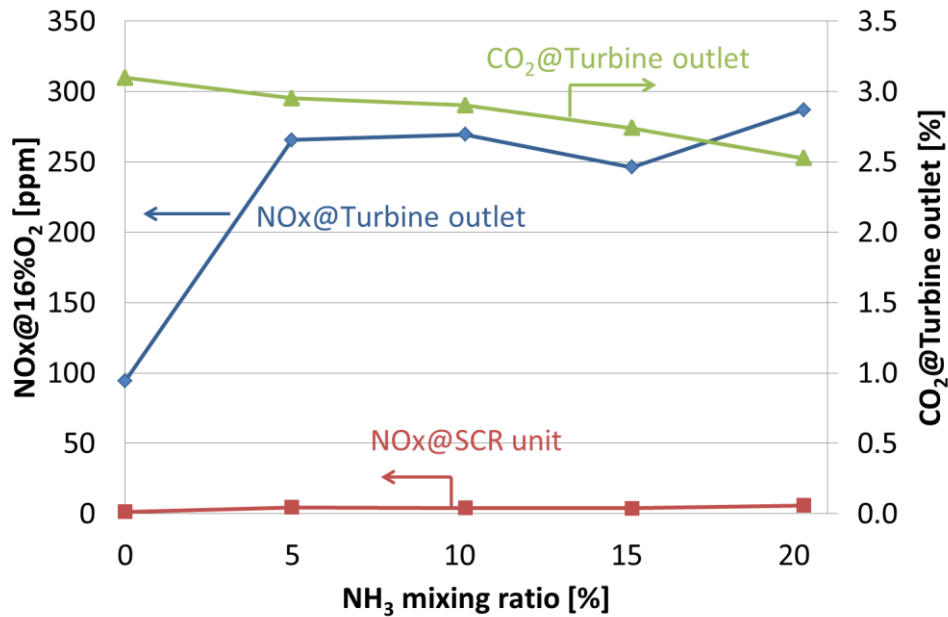


Fig. 6 Effect of NH<sub>3</sub> mixing ratio on NOx and CO<sub>2</sub> concentration

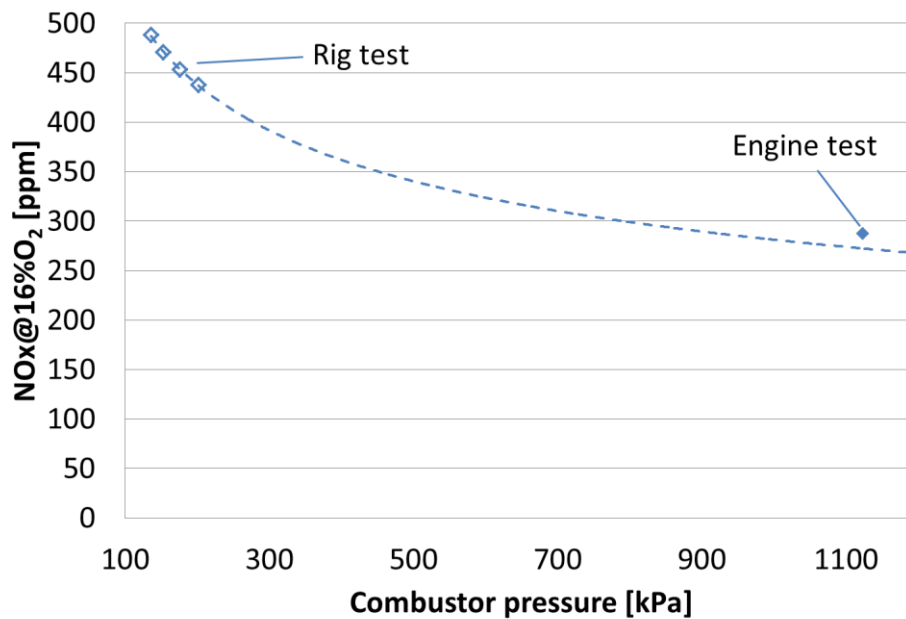


Fig. 7 Effect of combustor pressure on NOx concentration

## 謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「エネルギーキャリア」(管理法人：JST) によって実施されました。

## 文献

- Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Kudo, T. and Kobayashi, H., NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.1 (2015), Paper No.14-00402.
- Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Arakawa, Y., Kudo, T. and Kobayashi, H., Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures, Fuel, Vol.159 (2015), pp.98–106.
- Javed, M. T., Irfan, N. and Gibbs, B. M., Control of combustion-generated nitrogen oxides by

selective non-catalytic reduction, *Journal of Environmental Management*, Vol.83 (2007), pp.251–289.  
伊藤慎太郎, 加藤壮一郎, 斎藤司, 藤森俊郎, 小林秀昭, アンモニア・天然ガス混焼ガスタービン燃焼器技術の開発, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集(2016), C332.  
内田正宏, 伊藤慎太郎, 加藤壮一郎, 斎藤司, 藤森俊郎, 詳細反応機構を使用したアンモニア/メタン混焼挙動の *Large Eddy Simulation*, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集(2016), C333.  
小林秀昭, 早川晃弘, カーボンフリーアンモニア燃焼, *日本燃焼学会誌*, 58 巻, 183 号 (2016), pp. 41–48.  
松尾貴寛, IHI におけるカーボンフリーエネルギーの実現に向けた取組み, *JSME TED Newsletter, No.86 (2018)*, pp. 7–13.