

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「アンモニアガスタービンコジェネレーションの技術開発」

研究開発期間：平成 26 年 7 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

研究担当者： 藤森 俊郎

所属研究機関：株式会社 IHI

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 | 1 |
| 3. 研究実施内容 | 2 |
| 3-1. アンモニア／天然ガス混焼燃焼器の開発 | |
| 3-2. ガスタービンエンジンおよびアンモニア供給装置の設置 | |
| 3-3. ガスタービンエンジンによる発電実証試験 | |
| 3-4. ガスタービンコージェネレーションシステムにおける総合効率の検討 | |
| 3-5. まとめ | |
| 3-6. 今後の課題 | |
| 4. 外部発表実績 | 22 |
| 5. 特許出願実績 | 25 |
| 6. 参考文献 | 25 |

図表一覧

| | |
|--|--|
| 図 1-1. Flow diagram of experimental setup | |
| 図 1-2. Schematic of combustor | |
| 図 1-3. Effect of secondary NH ₃ mixing ratio on emissions | |
| 図 1-4. Effect of secondary NH ₃ mixing ratio on combustion efficiency | |
| 図 1-5. Effect of combustor design on NO _x concentration | |
| 図 1-6. Effect of combustor design on unburnt NH ₃ concentration | |
| 図 1-7. Effect of combustor design on energy content of unburnt components in exhaust gas to total input and combustion efficiency | |
| 図 1-8. Effect of test pressure on NO _x concentration | |
| 図 1-9. Effect of test pressure on combustion efficiency | |
| 図 2-1. Installation of IM270 gas turbine engine | |
| 図 2-2. Installation of ammonia supply unit | |
| 図 3-1. Comparison of commercial (left) and test (right) combustor | |
| 図 3-2. Effect of NH ₃ mixing ratio on fuel mass flow rate (Combustor: R-5, Generator output = 2MW) | |
| 図 3-3. Effect of NH ₃ mixing ratio on CO ₂ emission and CO ₂ emission reduction rate (Combustor: R-5, Generator output = 2MW) | |
| 図 3-4. Effect of NH ₃ mixing ratio on NO _x concentration (Combustor: R-5, Generator output = 2MW) | |

- ☒ 3 – 5 . Effect of NH₃ mixing ratio on combustion efficiency and generator-end efficiency (Combustor: R-5, Generator output = 2MW)
 - ☒ 3 – 6 . Effect of NH₃ mixing ratio on NO_x concentration (Combustor: R-6, Generator output = 2MW)
 - ☒ 3 – 7 . Effect of NH₃ mixing ratio on combustion efficiency and generator-end efficiency (Combustor: R-6, Generator output = 2MW)
 - ☒ 3 – 8 . Schematic of gas turbine co-generation system
 - ☒ 3 – 9 . Effect of NH₃ mixing ratio on total efficiency (Combustor: R-6, Generator output = 2MW)
- 表 1 – 1 . Configuration of test combustors

1. 本研究の目的

再生可能エネルギーで得られた電力から製造される水素は、CO₂ 排出の無い究極のエネルギー源として注目されている。一方で、再生可能エネルギーを多量に入手できる地域の多くはエネルギー消費地から遠く離れていることがほとんどであるため、何らかの方法でそのエネルギーを輸送する必要がある。しかし、水素は液化するために極低温まで冷却する必要があるため、非常に多くのエネルギーを消費する。また、極低温を維持する必要があるため、長期貯留や輸送も困難となる。このため、貯留・輸送に適した化学物質（以下、エネルギーキャリアと呼ぶ）に変換して輸送することが検討されている。

アンモニアは、水素に比べ貯留・輸送が容易であるだけでなく、水素からの製造方法および輸送方法が既に確立されている。さらに、アンモニアは分子内に炭素原子を持たないため、直接燃焼の燃料として利用した場合にはカーボンフリー燃焼もしくは大幅な CO₂ 削減が実現できるなど、エネルギーキャリアとして優れた点を持っている。ただし、アンモニアは炭化水素系燃料に比べ燃焼特性が大きく異なり、特に燃焼速度は炭化水素系燃料のおよそ 1/4 と非常に遅く、安定な火炎を形成することさえ難しいことは容易に想像される。また、アンモニアは人体に有害であるため、NO_x だけではなく未燃の NH₃ も同時に抑制する必要がある。このため、従来の炭化水素燃料を対象にした燃焼器を、アンモニアにそのまま適用して使用することは出来ず、アンモニアに適した燃焼器技術を開発する必要がある。

本研究開発では、将来的にアンモニアが発電用ガスタービン用燃料として使用されることを想定し、そこで求められる技術を開発する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究では、以下の2つを最終目標とし、研究を実施する。

- ・ 総合効率 60%以上を達成する 2MW 級ガスタービンコージェネレーションシステムの検討と実証
- ・ 環境基準に適合できる低 NO_x 燃焼方式の開発

3. 研究実施内容

3-1. アンモニア/天然ガス混焼燃焼器の開発

3-1-1. 燃焼器単体試験設備の概要

ガスタービンエンジンを用いた発電実証試験に先立ち、燃焼器単体試験によりアンモニア/天然ガス混焼用の燃焼器開発を行った。燃焼器単体試験設備系統図を図 1-1 に示す。主燃料は都市ガス 13A であり、ガスコンプレッサにより昇圧した後、マスフローコントローラで流量制御して燃焼器に供給した。アンモニアについては、工業用液化アンモニアポンプから液体状態で温水気化器に供給して気化させ、ポンプで昇圧してマスフローコントローラで流量制御した。空気はモータコンプレッサから供給される高圧空気を電気ヒータで加熱し、オリフィス流量計と流量調整バルブで制御した。燃焼性能の評価項目は、出口温度分布、出口ガス濃度、メタル温度等である。出口ガス濃度については、燃焼器出口でガスサンプリングを行い、(株)堀場製作所製 MEXA-ONE-D1 と MEXA-QL-NX により、ガス組成を計測した。計測成分は、 O_2 、 CO_2 、 CO 、THC(Total Hydro Carbon)、 NO 、 N_2O 、 NO_2 、 NH_3 の計 8 成分である。試験結果における NO_x 濃度は NO 、 NO_2 、 N_2O の濃度の和であり、試験評価では大気汚染防止法の評価方法に則り 16% O_2 濃度に換算した。排気ガスは、未燃 NH_3 を触媒で酸化処理した後、冷却塔で水スプレーにより冷却して排気塔から排出した。

試験で使用した燃焼器の概略図を図 1-2 に示す。燃焼器は缶型の天然ガス焚き用希薄予混合型燃焼器であり、ここにアンモニアに対する低 NO_x 燃焼法であるアンモニア 2 段燃焼法を実施するための改良を施した。ライナの希釈孔の上流を 1 次領域、下流を 2 次領域とし、それぞれの領域に燃料供給が可能な 1 次バーナと 2 次バーナの燃料供給システムを追加した。供給システムの接続としては、1 次バーナには天然ガスとアンモニアの両方が供給できるようにし、2 次バーナにはアンモニアのみを供給する構成とした。

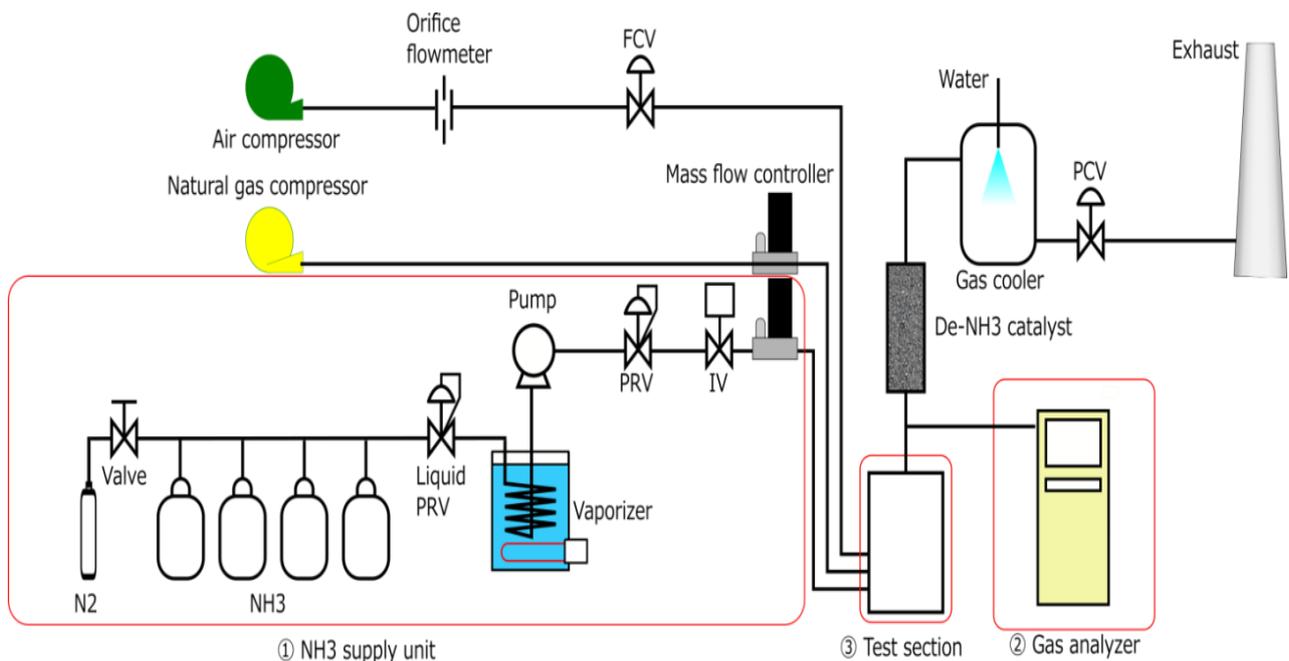


Fig. 1-1 Flow diagram of experimental setup

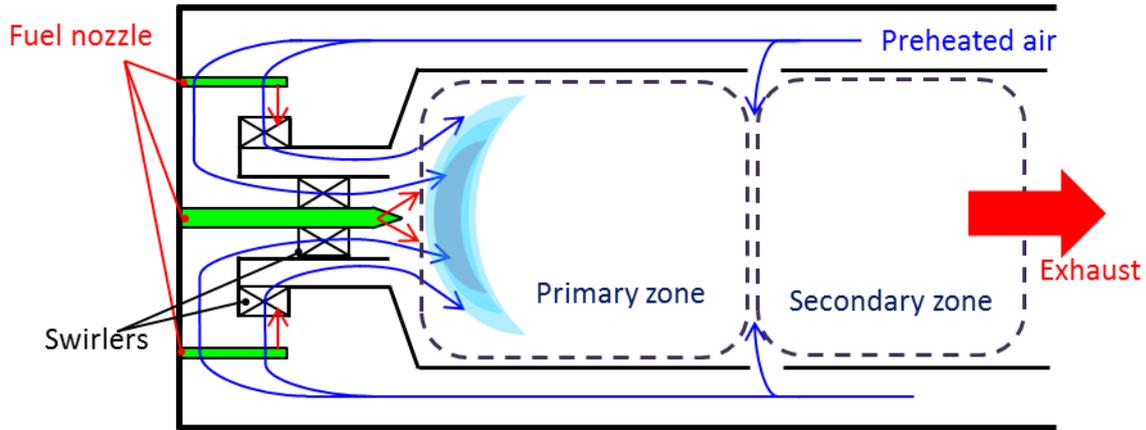


Fig. 1-2 Schematic of combustor

3-1-2 試験条件

表 1-1 に代表的な燃焼器形態と試験条件をまとめる。プロジェクトの期中に発電実証試験で使用するガスタービンエンジンの変更（発電出力 300kW から 2MW）があったため、両方の燃焼器形態が混在している。燃焼器形態 R-1 が 300kW ガスタービンを対象とした燃焼器であり、燃焼器形態 R-2 から R-5 が 2MW ガスタービンを対象とした燃焼器形態である。燃焼器の基本的な構造は共通しているが、エンジン出力の違いにより空気流量、当量比、入口空気温度が異なるため、燃焼器の寸法等の調整を実施した。燃焼器形態 R-2 から R-4 では 2 次バーナ形状を変更した。2 次バーナ番号 S-1 から S-3 では、燃焼器内へのアンモニアの供給速度が異なり、追番号が大きいほど速度が速くなっている。燃焼器形態 R-5 では、ライナの希釈孔の影響を確認した。ライナ番号 L-1、L-2 は希釈孔の配置を変更した形態である。アンモニア混焼率の定義は投入燃料の低位発熱量を基準とし、式(1)により定義した。燃焼器単体試験では混焼率を 20%LHV で一定とした。燃焼試験圧力は特別に記載がない限り大気圧条件としている。

$$\begin{aligned}
 & \text{NH}_3 \text{ mixing ratio } [\% \text{LHV}] \\
 & = 100 \times \frac{\text{Total NH}_3 \text{ heat input}}{\text{Total NH}_3 \text{ heat input} + \text{Natural gas heat input}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Tab. 1-1 Configuration of test combustors

| | R-1 | R-2 | R-3 | R-4 | R-5 |
|------------------------------|--------|-------|-----|-----|-----|
| Target Engine | 300kW | 2MW | | | |
| Inlet air temperature | 240 °C | 390°C | | | |
| Overall equivalence ratio | 0.33 | 0.37 | | | |
| NH ₃ mixing ratio | 20%LHV | | | | |
| Secondary burner design No. | S-1 | S-2 | S-3 | | |
| Liner design No. | L-1 | | | | L-2 |

3-1-3 アンモニア供給位置の影響

アンモニア 2 段燃焼法の効果を確認するため、燃焼器形態 R-1 において 2 次アンモニア混焼率がエミッションに与える影響を調査した。ここで 2 次アンモニア混焼率は 2 次バーナに供給されるアンモニア量の比率であり、式(2)により定義した。

$$\begin{aligned} & \text{Secondary NH}_3 \text{ mixing ratio } [\%LHV] \\ & = 100 \times \frac{\text{Secondary NH}_3 \text{ heat input}}{\text{Total NH}_3 \text{ heat input} + \text{Natural gas heat input}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここではアンモニア混焼率は一定であるため、2 次アンモニア混焼率は 1 次、2 次領域に供給されるアンモニアの配分で変化させた。図 1-3 に 2 次アンモニア混焼率と NO_x 濃度、未燃 NH₃ 濃度の関係を示す。2 次アンモニア混焼率の増加に伴い NO_x 濃度は単調に低下する。2 次アンモニア混焼率を 0 から 20%LHV に変化させると、NO_x 濃度が約 1/3 まで低下した。この結果はアンモニアの全量を 2 次領域に供給するアンモニア 2 段燃焼法が低 NO_x 燃焼に効果的であることを示している。一方で、未燃 NH₃ 濃度は 2 次アンモニア混焼率の増加により単調に増加する傾向にあり、特に 2 次アンモニア混焼率 8%LHV 以上で急激に増加した。これは 2 次アンモニア混焼率が増加すると 1 次領域に供給される燃料が減少して 1 次領域の既燃ガス温度が低下することや、2 次領域の滞在時間が短いために 2 次領域に多量の燃料を投入すると反応時間が不足することが要因であると考えられる。これらの結果は、低 NO_x 燃焼と未燃 NH₃ 排出リスクはトレードオフの関係にあることを示している。図 1-4 に 2 次アンモニア混焼率に対する燃焼効率の変化を示す。ここで燃焼効率の計算では、排気ガス中に含まれる THC、CO、未燃 NH₃ により排出される発熱量だけでなく、排気ガス中の NO_x による発熱量も含めている。NO_x が最終生成物に転換される際の発熱量は他の成分に比べると小さいが、NO_x 排出量が多大であるためガスタービン性能に与える影響は

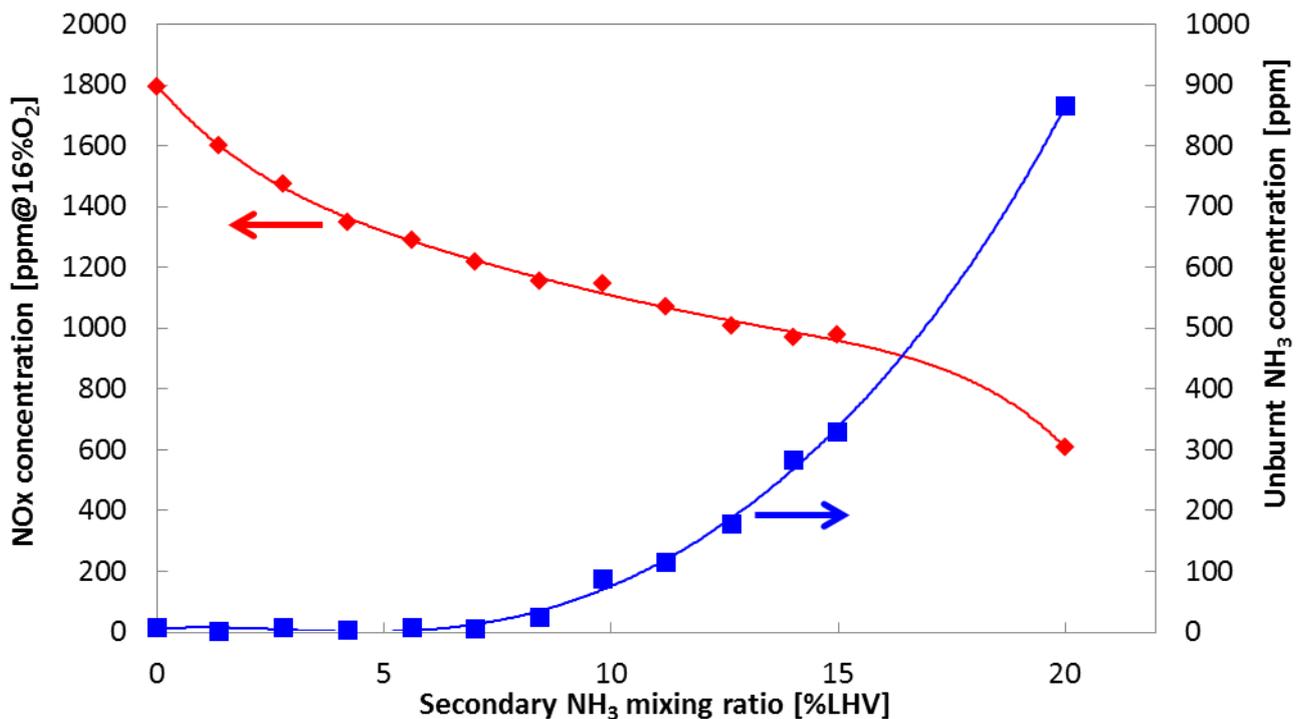


Fig. 1-3 Effect of secondary NH₃ mixing ratio on emissions

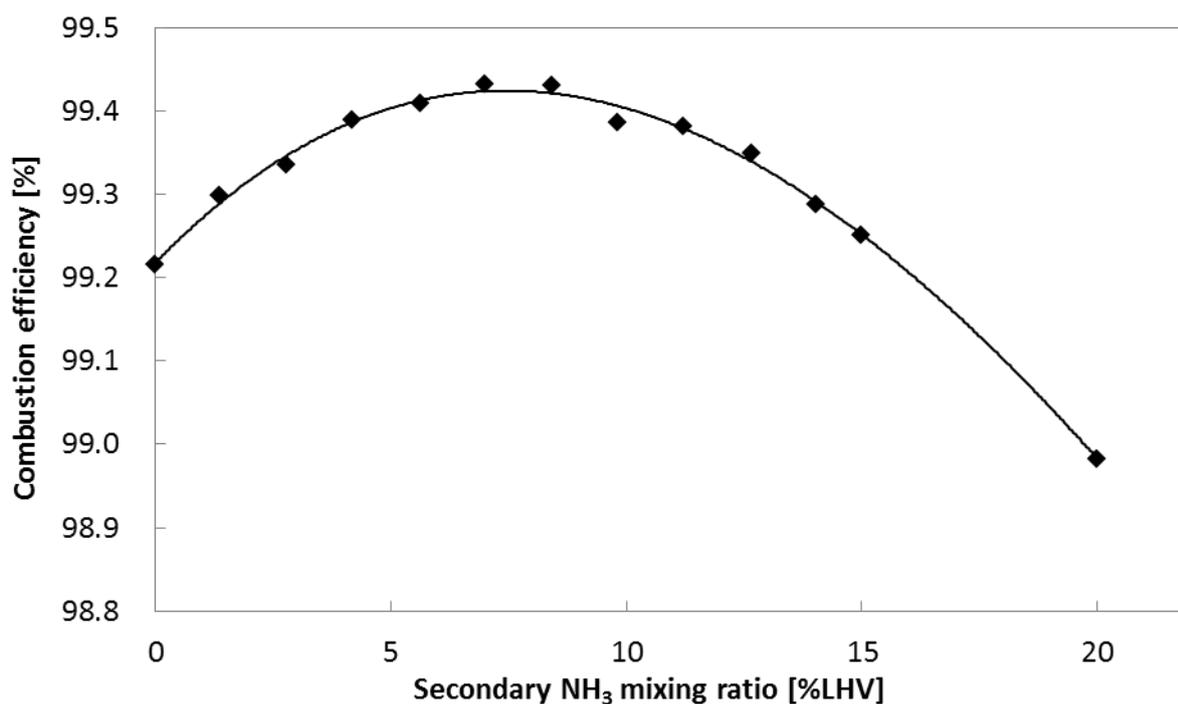


Fig. 1-4 Effect of secondary NH₃ mixing ratio on combustion efficiency

無視できないと考えて計算に追加した。燃焼効率は2次アンモニア混焼率 8%LHV 付近で極大値となる。これは2次アンモニア混焼率の増加による NO_x 濃度と未燃 NH₃ 濃度の変化によるものである。2次アンモニア混焼率が低い領域では、2次アンモニア混焼率の増加により NO_x 濃度が減少するため燃焼効率が增加する。一方で、2次アンモニア混焼率が高い領域では未燃 NH₃ 濃度が増加するため燃焼効率が減少する。

3-1-3 燃焼器形態の影響

燃焼器形態の影響を確認した試験結果の NO_x 濃度、未燃 NH₃ 濃度および投入熱量に対する排気ガス中の未燃分の熱量を、それぞれ図 1-5 から図 1-7 に示す。発電実証試験用ガスタービンエンジンの違いから投入燃料量は燃焼器形態 R-1 と他の燃焼器形態で異なるため、図 1-7 では排気ガス中に含まれる未燃分により排出される熱量を全投入燃料の熱量で除した値で比較した。

発電実証試験用ガスタービンエンジンの変更による影響は、燃焼器形態 R-1 と R-2 の比較から確認できる。ガスタービンエンジンの出力増加により、入口空気温度および全体当量比が変化するため、燃焼器形態の調整を行った。試験におけるアンモニア混焼率は 20%LHV で一定であり、全量を2次バーナより供給している。図 1-5 より解るように、燃焼器形態 R-2 では R-1 よりも NO_x 濃度が増加している。化学種別に比較すると NO 濃度の増加が大きく、N₂O 濃度は逆に減少している。これは全体当量比の増加により NO_x が生成されやすい条件となったことが要因だと考えられる[1]。一方で、入口空気温度の上昇及び全体当量比の増加に伴う燃焼温度の上昇により、未燃分が減少し燃焼効率が增加することが図 1-7 から確認できる。特に、アンモニア燃焼反応の中間生成物であり温室効果ガスでもある N₂O[2]濃度の減少(図 1-5)と未燃 NH₃ 濃度の減少(図 1-6)、CO 濃度の減少(図 1-7)は顕著であり、ガスタービンエンジンの大型化によりアンモニアを完全燃焼させるのに有利

な条件となったことが確認できる。

燃焼器形態 R-2 から R-4 では、2MW 出力のガスタービンエンジン用燃焼器を対象に 2 次バーナ形態の影響を確認した。燃焼器形態 R-2 から R-4 では、2 次バーナの出口面積を絞り、より狭い範囲に集中してアンモニアを供給するように変更している。図 1-5 から解るように、この変更により NO_x 濃度は大幅に低減される。このような変化が生じるのは、アンモニアが反応する領域が小さくなるため、周囲の酸素濃度が相対的に低下し、アンモニアから NO_x への転換率が低下したためと考えられる。また、図 1-6 から 2 次バーナ形態を変更しても未燃 NH₃ 濃度は低く保たれており、未燃 NH₃ 排出の問題が生じないことが確認できる。図 1-7 に示す排気ガス中の未燃分の熱量に着目すると、その大半が NO によるものであることが確認できる。このため、2 次バーナ形態の変更による低 NO_x 化を進めることにより燃焼効率が上昇している。

燃焼器形態 R-5 では R-4 からライナの希釈孔配置を調整した。希釈孔配置の変更はアンモニアの反応領域への酸素供給に影響するため、図 1-5 に示すように適切な配置により NO_x 濃度を低減できることが確認された。この調整により最終的に大気圧条件で燃焼効率 99.7%以上となる燃焼器形態を確立した。ガスタービンエンジンでの発電実証試験では、主に燃焼器形態 R-5 を使用して試験を行った。

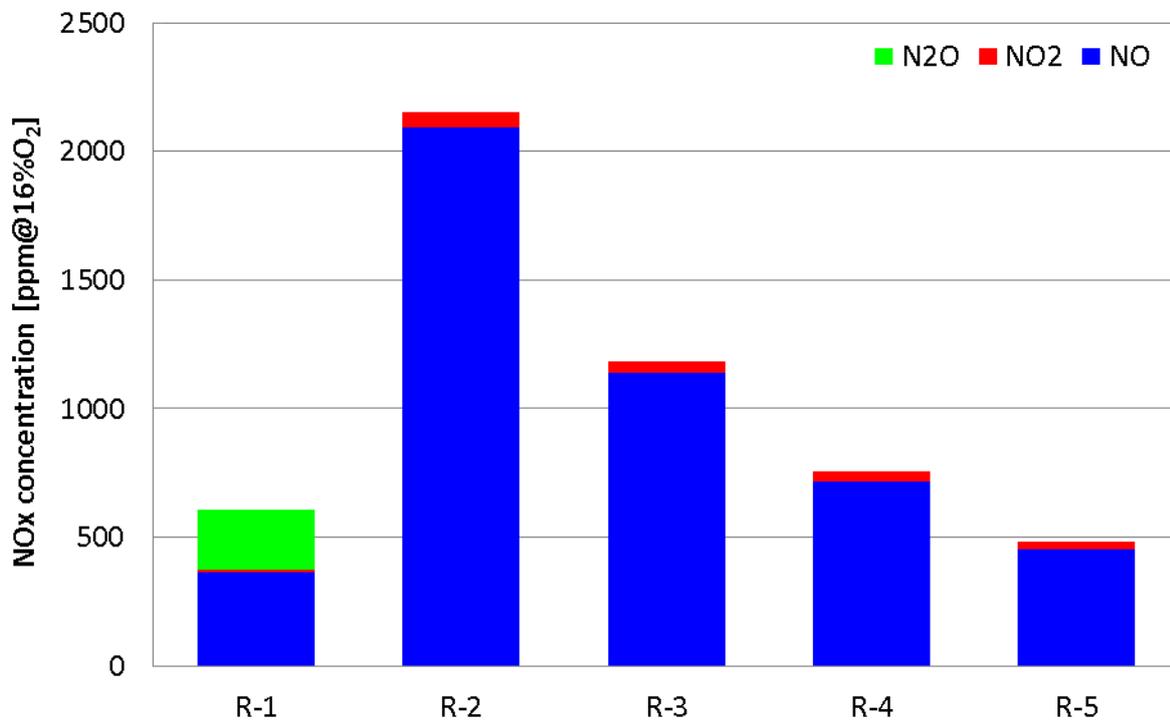


Fig. 1-5 Effect of combustor design on NO_x concentration

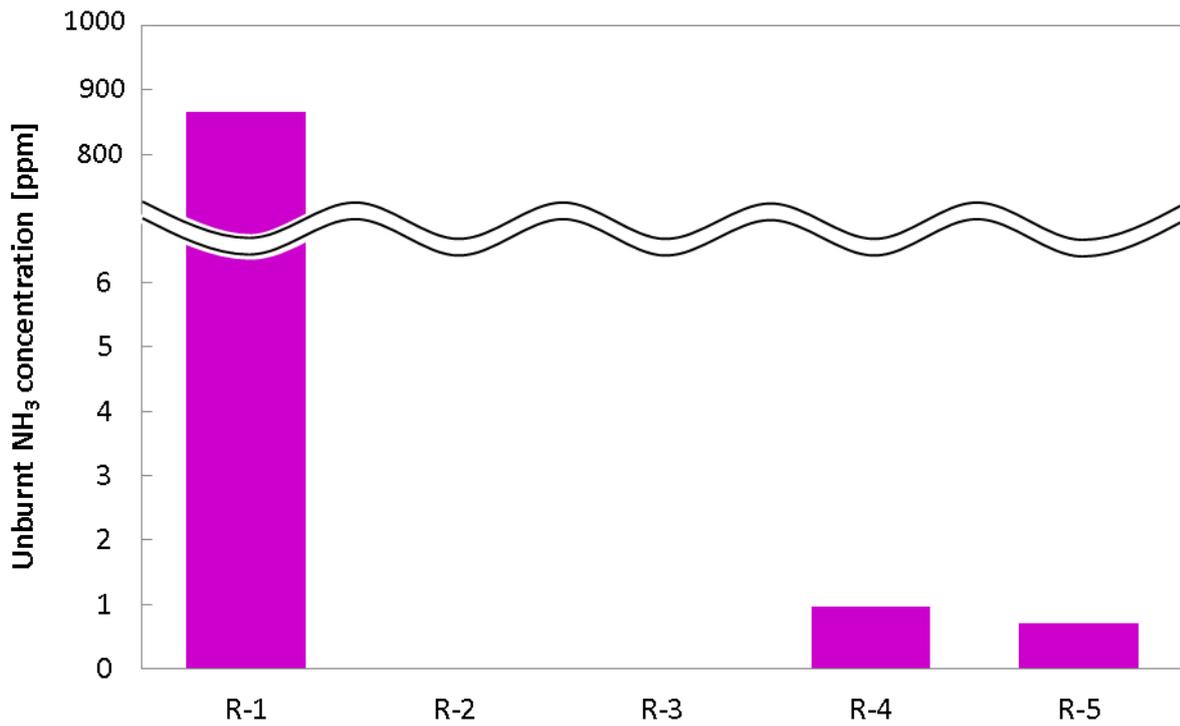


Fig. 1-6 Effect of combustor design on unburnt NH₃ concentration

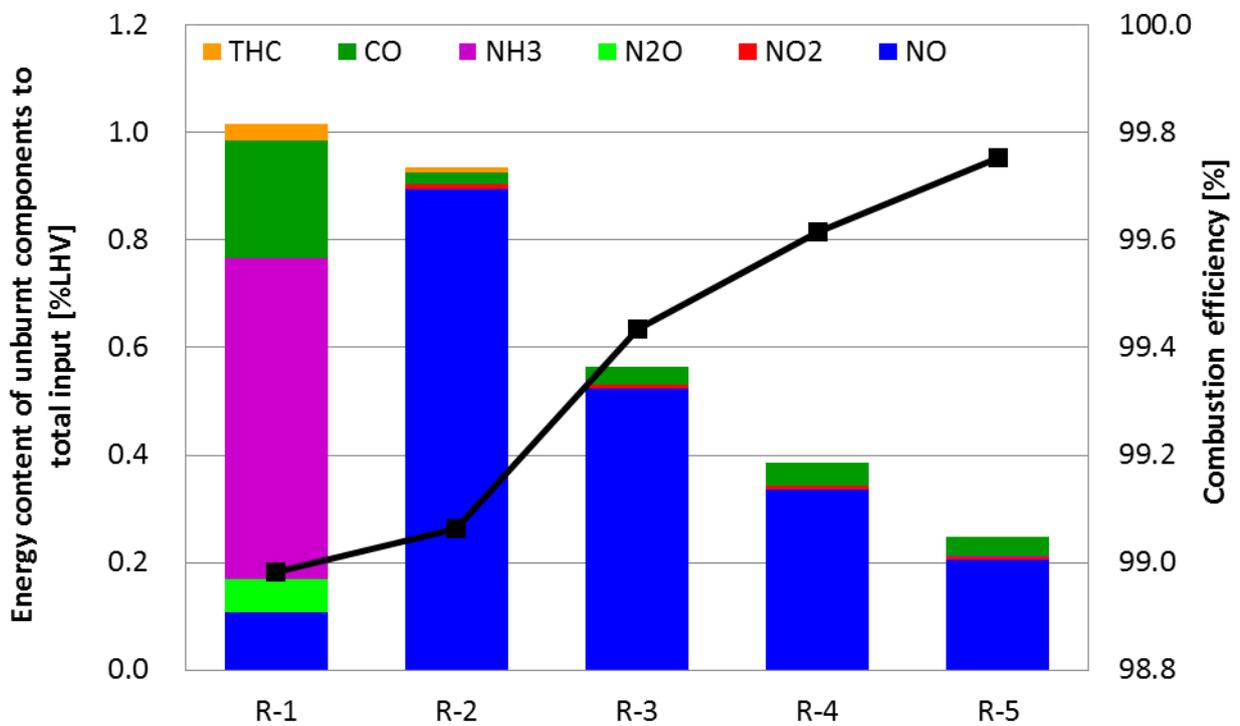


Fig. 1-7 Effect of combustor design on energy content of unburnt components in exhaust gas to total input and combustion efficiency

3-1-4 燃焼試験圧力の影響

大気圧条件での低 NO_x 燃焼方法の検討に続き、ガスタービンエンジンの作動圧力での挙動予測のため、燃焼試験圧力がエミッションに与える影響の確認を実施した。試験圧力は燃焼器単体試験設備のスペックの都合により 2 気圧までである。燃焼器形態は R-5 を使用した。燃焼試験圧力が NO_x 濃度および燃焼効率へ与える影響をそれぞれ図 1-8、図 1-9 に示す。図には試験結果のプロットに加え、試験結果による近似曲線を追加し、ガスタービンエンジンの作動圧力での値を予測した。図 1-8 に示すように、燃焼試験圧力の上昇により NO_x 濃度が低下する結果が得られた。この傾向はアンモニア/メタン予混合火炎を対象に行われた研究の結果と一致する[3]。このような圧力上昇による NO_x 濃度低下で燃焼効率が向上することが図 1-9 より確認できる。また、近似曲線から、エンジンの作動圧力では NO_x 濃度が 290ppm まで低下し、燃焼効率が 99.85%に達することが予測される。

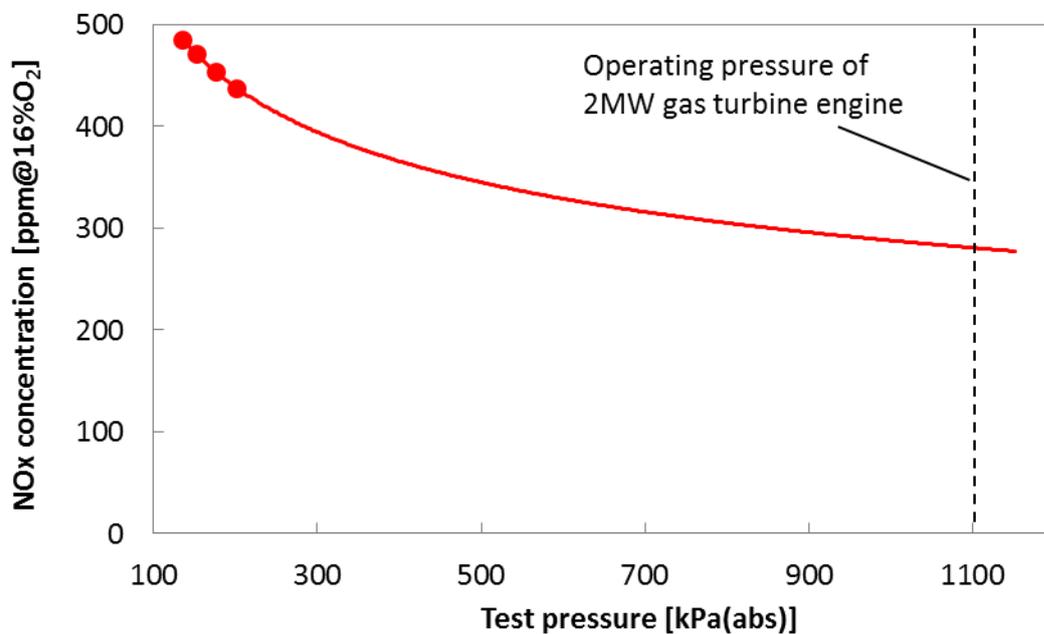


Fig. 1-8 Effect of test pressure on NO_x concentration

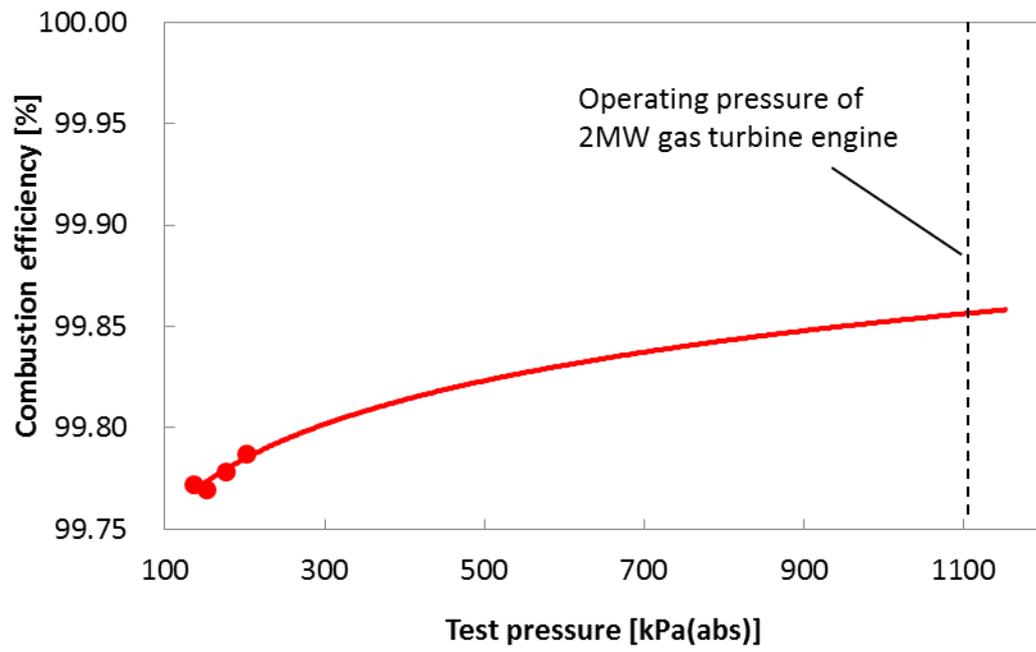


Fig. 1-9 Effect of test pressure on combustion efficiency

3-2. ガスタービンエンジンおよびアンモニア供給装置の設置

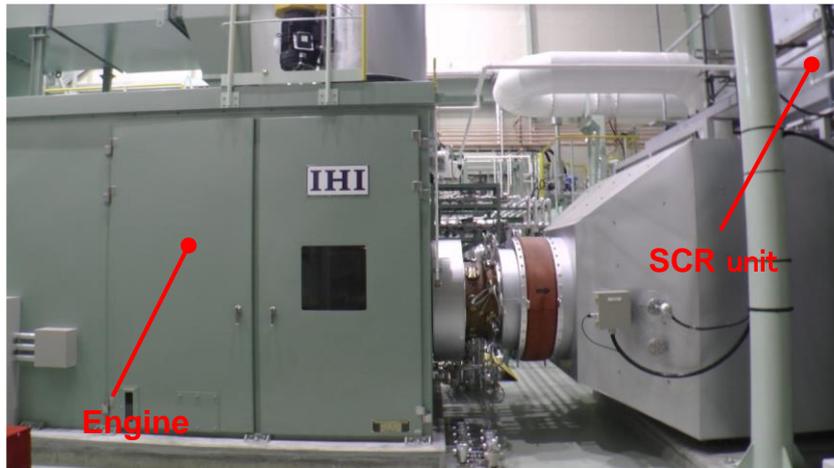
3-2-1. ガスタービンエンジンの設置

電気事業法に基づき工事計画届出書を提出し、ガスタービンエンジンを設置した。使用したガスタービンエンジンは株式会社 IHI 製 IM270 であり、株式会社 IHI 横浜事業所内のテストセルに設置した。概略構成は、エンジン本体、燃料制御ユニット、脱硝装置制御ユニット、脱硝触媒および排気塔からなる。図 2-1 に設置状況を示す。テストセル中央にガスタービンエンジン本体を設置し、エンクロージャー上部のインレットから吸気するレイアウトとなっている。燃料用アンモニア流量を制御するための燃料制御ユニットおよび脱硝用アンモニア流量を制御するための脱硝装置制御ユニットはエンクロージャー外部に設置した。また、脱硝触媒および排気塔はエンクロージャーからの排気ガスダクトに直結し下流に設置した。

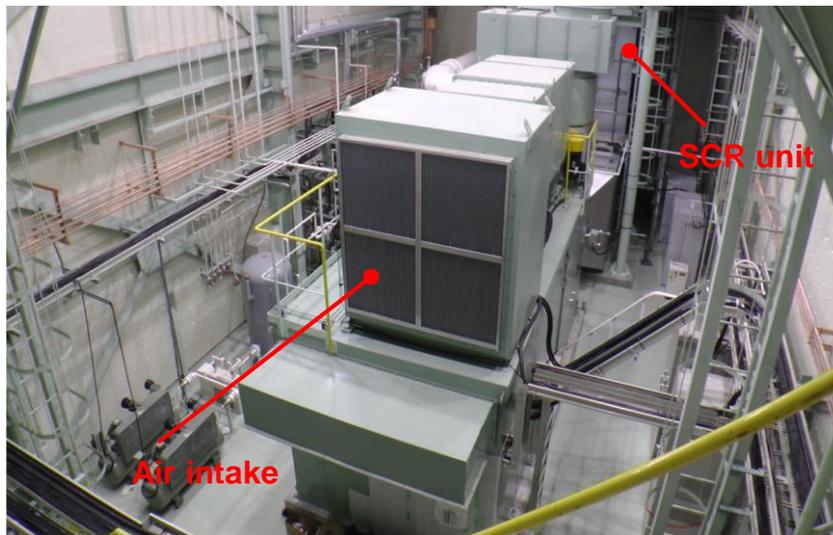
発電実証試験結果の評価のため、タービン出口および脱硝装置出口でサンプリングを行い、(株)堀場製作所製 MEXA-ONE-D1 と MEXA-QL-NX により、ガス組成を計測した。計測成分は、 O_2 、 CO_2 、 CO 、THC(Total Hydro Carbon)、 NO 、 N_2O 、 NO_2 、 NH_3 の計 8 成分である。

3-2-2. アンモニア供給装置の設置

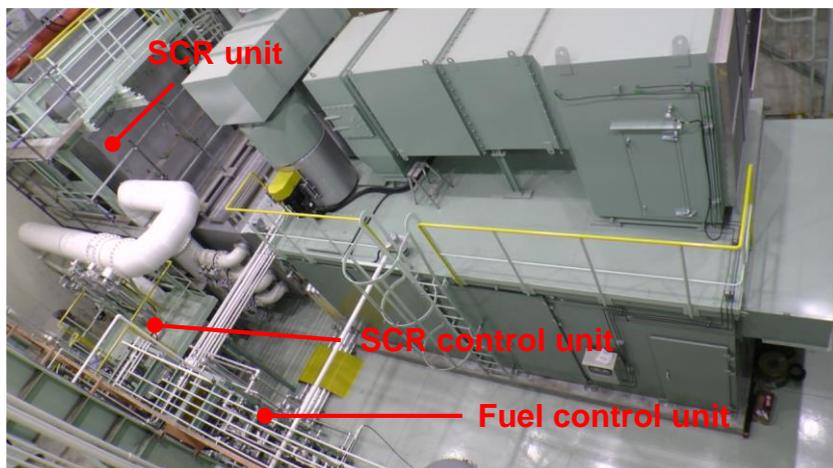
アンモニア供給装置は燃料用に高圧のガスアンモニアを供給するための設備であり、液化ガス設備として工事計画届出書に記載した。装置の設置状況を図 2-2 に示す。燃料用アンモニアの供給系統については、アンモニアタンクに貯留した液体アンモニアをポンプで昇圧し、温水気化器で気化させた後、アキュムレータを通してガスタービンに供給する構成とした。脱硝用アンモニア供給系統では、液体アンモニアを温水気化器に直接供給して気化し、アキュムレータを通して脱硝装置に供給する構成とした。設備全体では、他にも除害槽や排水槽等の用役設備を設置した。また、液化ガス設備では、アンモニアタンク、アンモニア気化器(燃料用、脱硝用)の 3 点が電気事業法に基づく溶接事業者検査の対象となる。これらの物品については、製作工場に対する溶接事業者検査を実施して製作した。



(a) Front view

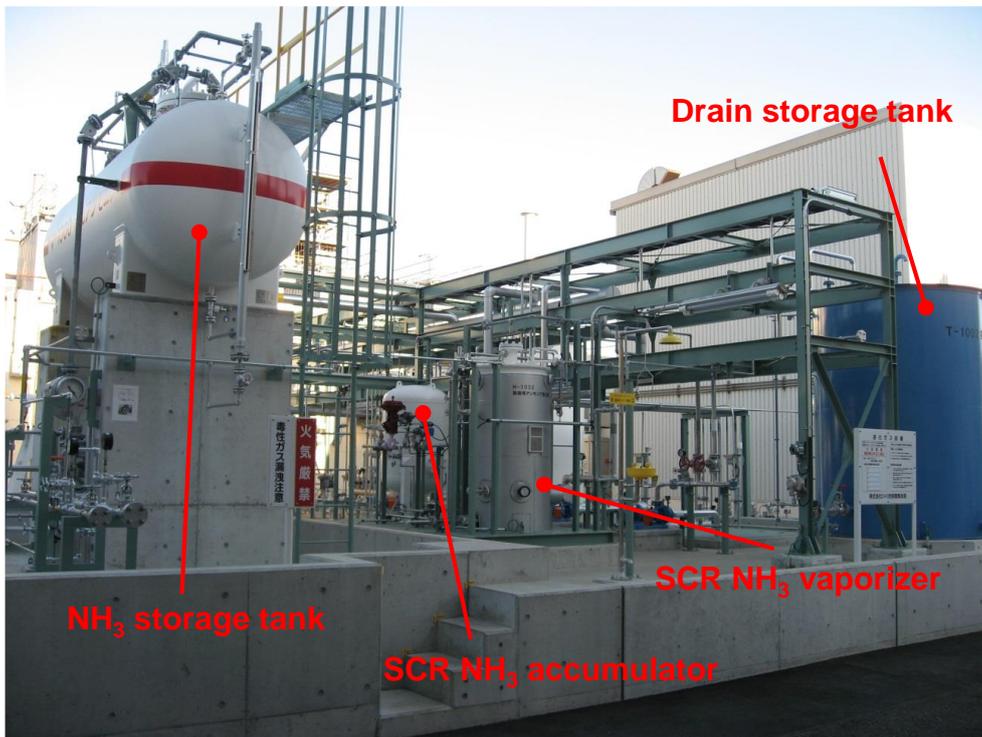


(b) Top view

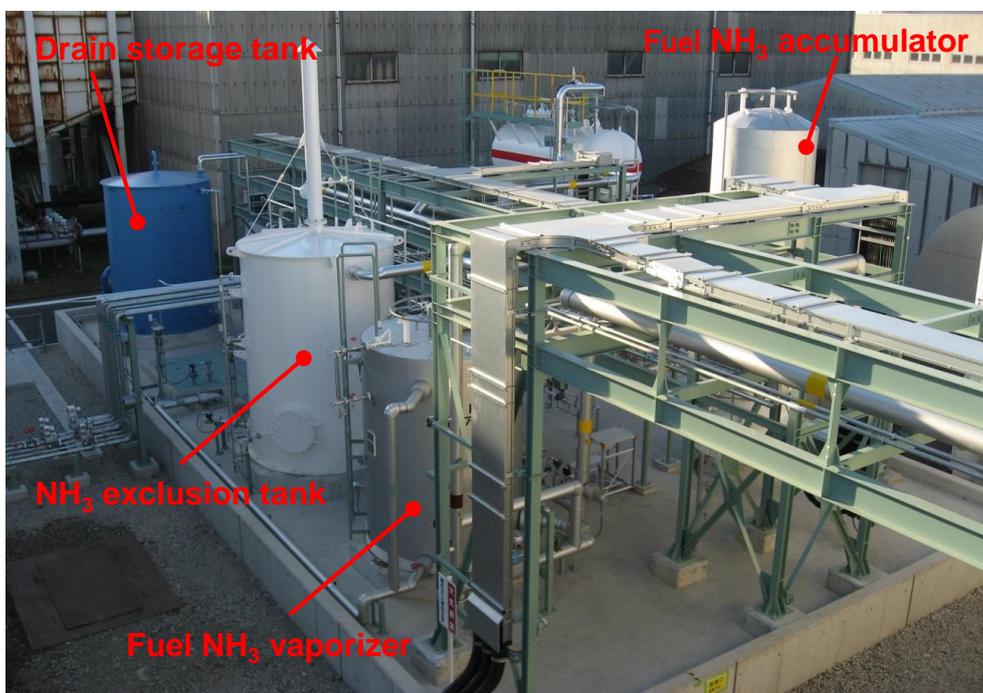


(c) Rear view

Fig. 2-1 Installation of IM270 gas turbine engine



(a) Front view



(b) Rear view

Fig. 2-2 Installation of ammonia supply unit

3-3. ガスタービンエンジンによる発電実証試験

3-3-1. アンモニア混焼発電実証試験

燃焼器単体試験から選定した燃焼器形態 R-5 を発電実証試験用に製作し、IM270 ガスタービンエンジンの標準燃焼器から換装した。発電実証試験用燃焼器は燃焼器単体試験で使ったものと同じの構造だが、エンジンでの使用を考慮して以下の点を変更した。

- ・ 燃焼器ダクトの圧力規格の変更
- ・ バーナ、ライナに耐熱合金（インコネル 718、ハステロイ X）の使用
- ・ ボルト等に脱落防止構造を追加

図 3-1 に標準燃焼器と発電実証試験用燃焼器の外観写真を示す。発電実証試験用燃焼器では、アンモニア混焼時の燃焼挙動をより正確に把握するため、標準燃焼器には無いライナ・バーナ温度計測用熱電対が取り付けられている。また、アンモニア混焼のために 2 次バーナが追加されている。燃焼器換装では、ガスタービンエンジン側との接続性や追加部品のエンクロージャー内部への格納に問題が無いことを確認した。

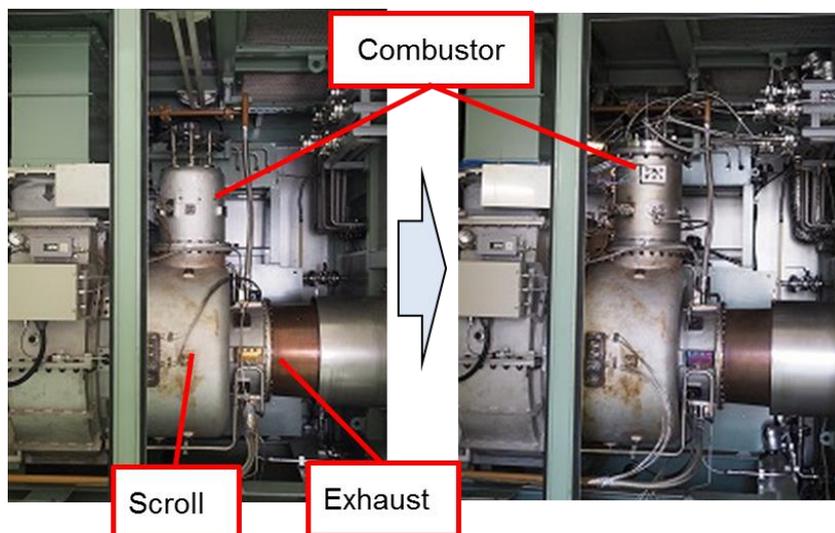


Fig. 3-1 Comparison of commercial (left) and test (right) combustor

発電実証試験では、天然ガス専焼で発電出力 2MW まで到達した後、発電出力を維持したまま 2 次バーナへのアンモニア供給量を手動操作で増加させ、アンモニア混焼率 20%LHV を達成した。ガスタービンエンジンの制御では、アンモニア供給量を増加させても発電出力が維持されるよう、天然ガス供給量を自動的に変更する制御とした。アンモニア混焼率が増加しても、ガスタービンエンジンの挙動は安定しており、異常温度や異常振動等の問題は発生しなかった。図 3-2 にアンモニア混焼率に対するアンモニア、天然ガス、総燃料の質量流量の変化を示す。アンモニア混焼率の増加に伴い、アンモニアの質量流量が増加し、天然ガスの質量流量は単調に減少した。この結果から、アンモニアはガスタービンエンジンの燃料として機能しており、混焼することで天然ガス供給量を削減可能であることが実証された。一方で、アンモニア混焼率が増加すると、アンモニアと天然ガスの総燃料流量は増加した。これはアンモニアの低位発熱量が 18.6MJ/kg であり、天然ガスの低位発熱量 49.3MJ/kg の約 40%しかないためである。

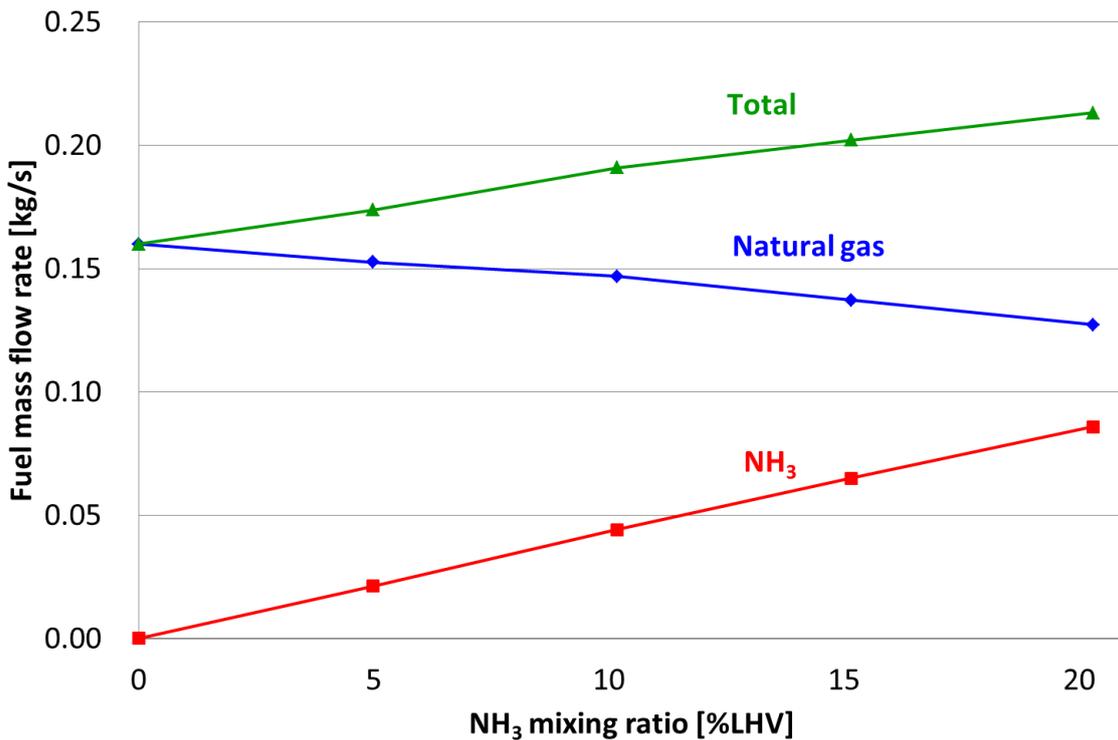


Fig. 3-2 Effect of NH₃ mixing ratio on fuel mass flow rate
(Combustor: R-5, Generator output = 2MW)

図 3-3 にアンモニア混焼率とエンジン出口における CO₂ 排出量および CO₂ 排出量削減率の関係を示す。CO₂ 排出量削減率は天然ガス専焼時の CO₂ 排出量を基準とし、そこから CO₂ 排出量が削減された割合として定義した。アンモニア混焼率が増加すると、エンジンから排出される CO₂ 排出量は単調に減少し、削減率は最大で約 20%に達した。この結果から、アンモニアをガスタービンエンジンの燃料として使用することで CO₂ 排出量を削減可能であることが実証された。

図 3-4 にアンモニア混焼率とタービン出口および脱硝装置出口における NO_x 濃度を示す。アンモニア混焼を行うとタービン出口の NO_x 濃度は急増するが、アンモニア混焼率 5%LHV 以上では変化が小さくなる。エンジン出口 NO_x 濃度は、アンモニア混焼率 20%LHV で最大となり 287ppm である。一方で、脱硝装置出口における NO_x 濃度は、全試験条件で環境基準である 7ppm 未満であり、20%LHV までのアンモニア混焼において環境基準が達成可能であることが実証された。また、エンジン出口における CO、THC、NH₃ 濃度は計測下限界以下であり、未燃分の排出についても問題ないことが確認された。

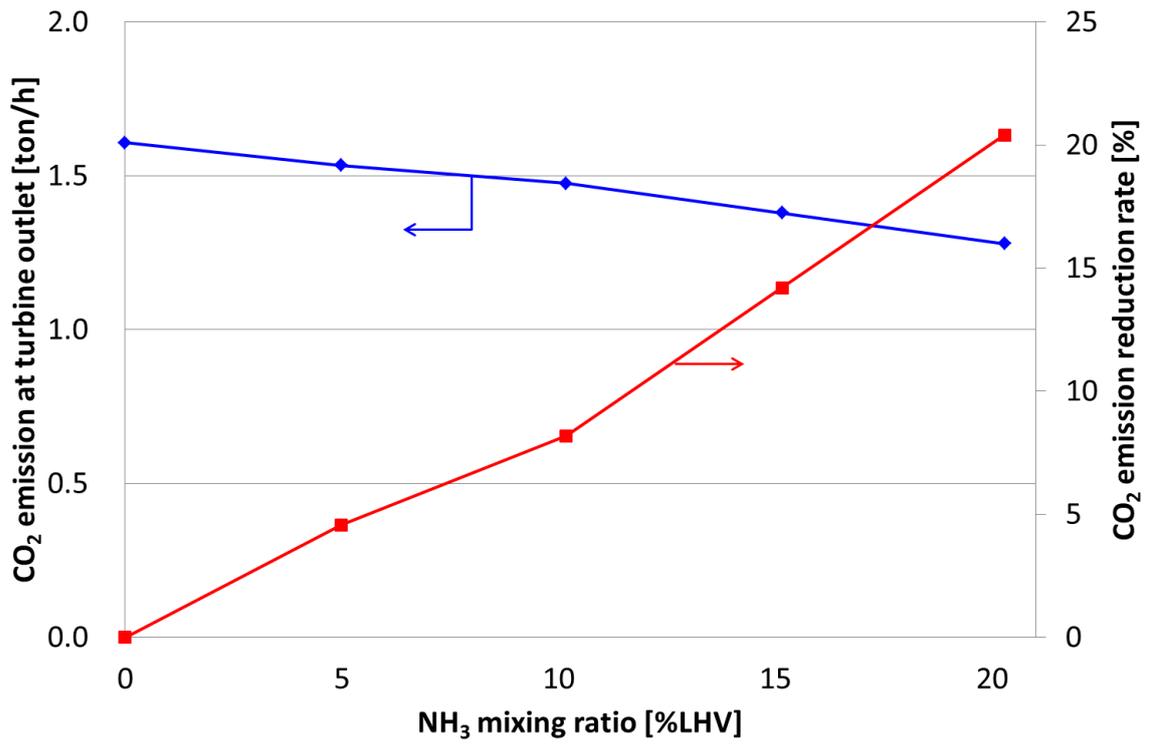


Fig. 3-3 Effect of NH₃ mixing ratio on CO₂ emission and CO₂ emission reduction rate
(Combustor: R-5, Generator output = 2MW)

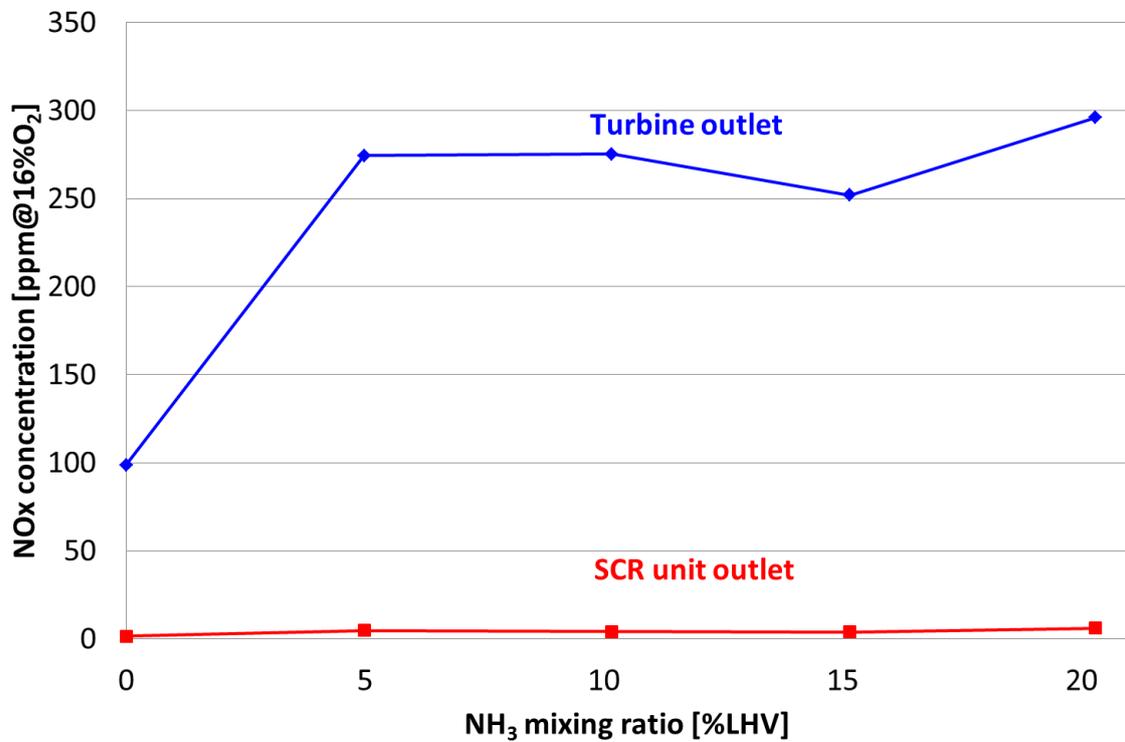


Fig. 3-4 Effect of NH₃ mixing ratio on NO_x concentration
(Combustor: R-5, Generator output = 2MW)

図 3-5 にアンモニア混焼率と燃焼効率および発電端効率の関係を示す。燃焼効率については、燃焼器単体試験と同様に排気ガス中の NOx による発熱量も含めて計算した。また、発電端効率は天然ガス専焼時の値で正規化して示した。燃焼効率は、アンモニア混焼率が 0%LHV から 5%LHV まで増加すると減少するが、その後は大きく変化せず、アンモニア混焼率 20%LHV で 99.8%以上を達成した。燃焼効率のアンモニア混焼率に対する変化は図 3-4 に示したタービン出口での NOx 濃度の影響が大きく、燃焼効率の変化は NOx 濃度の変化と傾向が一致している。ガスタービンエンジンの燃焼効率は天然ガス専焼では 99.9%以上であるのが一般的であるため、これと同じ効率を達成するためには更に NOx 濃度を低減させる必要がある。発電端効率の変化はアンモニア混焼率が 5%LHV まで増加すると低下するが、その後はアンモニア混焼率が 20%LHV に達するまで向上する。これは図 3-2 に示したようにアンモニア混焼率の増加により燃料の供給量が増加し、燃焼ガスの体積も増加するためと考えられる。この変化によりタービンの仕事量が増加し、発電端効率が向上する。一方で、アンモニア混焼率が 5%LHV まで増加すると発電端効率が低下するのは、NOx 濃度の増加により燃焼効率が低下するためと考えられる。NOx 濃度の増加が急激であるため、燃焼ガスの体積変化より影響が支配的であるとされる。

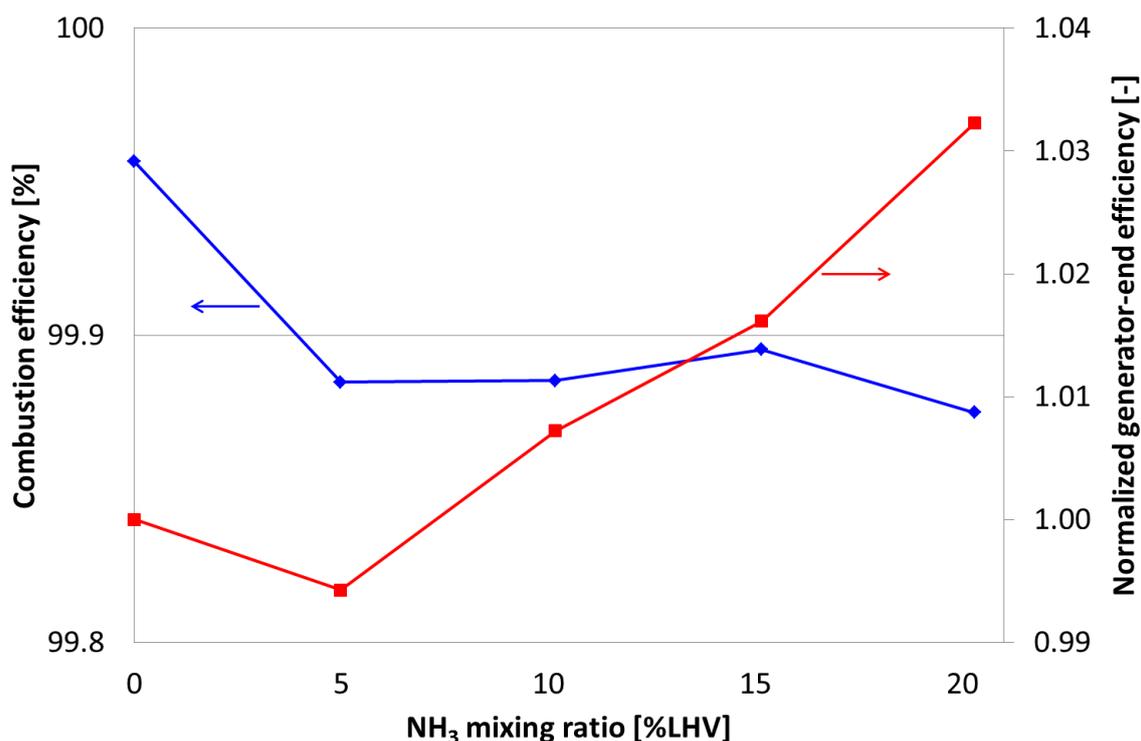


Fig. 3-5 Effect of NH₃ mixing ratio on combustion efficiency and generator-end efficiency
(Combustor: R-5, Generator output = 2MW)

図 1-8 および図 1-9 では燃焼器単体試験結果の近似曲線からエンジンの作動圧力における NOx 濃度および燃焼効率を予測した。この予測値と発電実証試験の結果は非常によく一致することが確認された。したがって、燃焼器単体試験によるエミッション予測はガスタービンエンジン性能の予測に有効であり、開発の効率化に寄与することが確認できた。また、NOx 濃度はエンジンの作動圧力においても負の圧力依存性があり、更に作動圧力が高

いガスタービンエンジンでは、より低 NOx のアンモニア混焼が実現できる可能性が示唆される。

3-3-2. 改良燃焼器の性能評価試験

第 3-3-1 節で示した発電実証試験の結果から、更に NOx 濃度を低減することを目標に燃焼器の改良設計を実施した。改良設計のポイントを以下に示す。

- ・ 1 次領域の開口面積を調整し、空気供給量を減少して当量比を増加させた
- ・ 1 次領域への空気供給量に合わせて希釈孔のサイズ、配置を調整した。
- ・ 2 次バーナ番号 S-3 の形態ではアンモニアの圧力損失が大きく発電出力 2MW でアンモニア混焼率を 20%LHV 以上に増加させることができなかった。そこで 2 次バーナの圧力損失を低減した S-4 に変更した。

これらの改良を施した燃焼器形態 R-6 とする。性能評価試験の方法は燃焼器形態 R-5 を使用した場合と同様である。試験ではアンモニア混焼率 25%LHV までの性能評価を行い、いずれの条件においてもエンジン挙動に問題が無いことを確認した。また、アンモニア混焼率の変化に対する燃料流量および CO₂ 排出量の傾向は燃焼器形態 R-5 と同様であった。

図 3-6 にアンモニア混焼率とタービン出口および脱硝装置出口の NOx 濃度の関係を示す。タービン出口 NOx 濃度に着目し、燃焼器形態 R-5 を用いた結果 (図 3-4) と比較すると、アンモニア混焼開始から 5%LHV までで NOx 濃度が急激に増加し、アンモニア混焼率 5%LHV から 15%LHV では大きく変化しない傾向は一致している。一方で、アンモニア混焼率 15%LHV 以上では傾向が異なり、アンモニア混焼率の増加に伴い NOx 濃度が増加する。しかし、いずれのアンモニア混焼率においても、燃焼器形態 R-5 よりも低い NOx 濃度

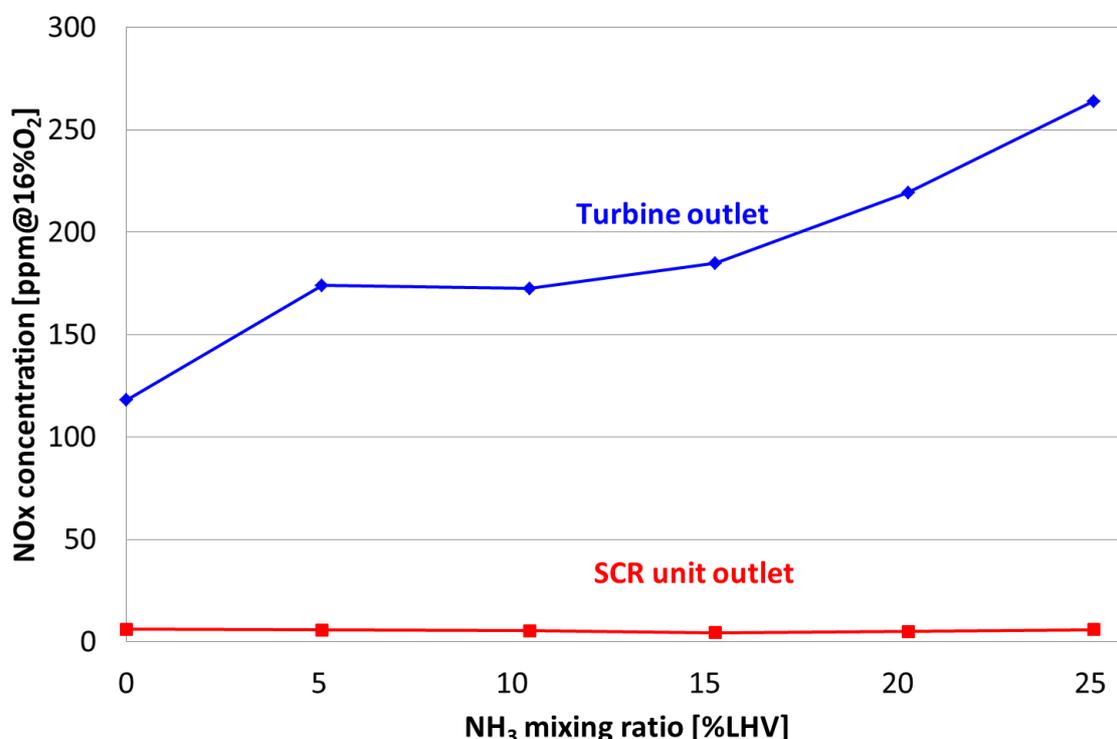


Fig. 3-6 Effect of NH₃ mixing ratio on NOx concentration
(Combustor: R-6, Generator output = 2MW)

を達成した。アンモニア混焼率 20%LHV で比較するとタービン出口 NO_x 濃度は、約 220ppm であり、燃焼器形態 R-5 から約 70ppm 低減した。また、脱硝装置出口の NO_x 濃度は、いずれのアンモニア混焼率においても 7ppm 未満であり、アンモニア混焼率 25%LHV までの範囲で環境基準を達成した。

図 3-7 にアンモニア混焼率と燃焼効率および発電端効率の関係を示す。燃焼効率は、NO_x 濃度の低下により燃焼器形態 R-5 よりも向上しており、アンモニア混焼率 0~20%LHV で 99.9%以上を達成した。また、燃焼効率の変化は燃焼器形態 R-5 の結果 (図 3-5) と同様の傾向であり、タービン出口での NO_x 濃度変化の傾向と一致している。発電端効率は、アンモニア混焼率の増加に対し単調に増加した。これは燃焼器形態 R-5 の場合と同様に、アンモニア混焼率の増加に伴うガス流量の増加が原因であると考えられる。一方で、燃焼器形態 R-5 とはアンモニア混焼率 0%LHV~5%LHV における挙動が異なる。これは燃焼器形態 R-5 よりも NO_x 濃度が低いため、燃焼効率が低下する影響を受けにくいためと考えられる。

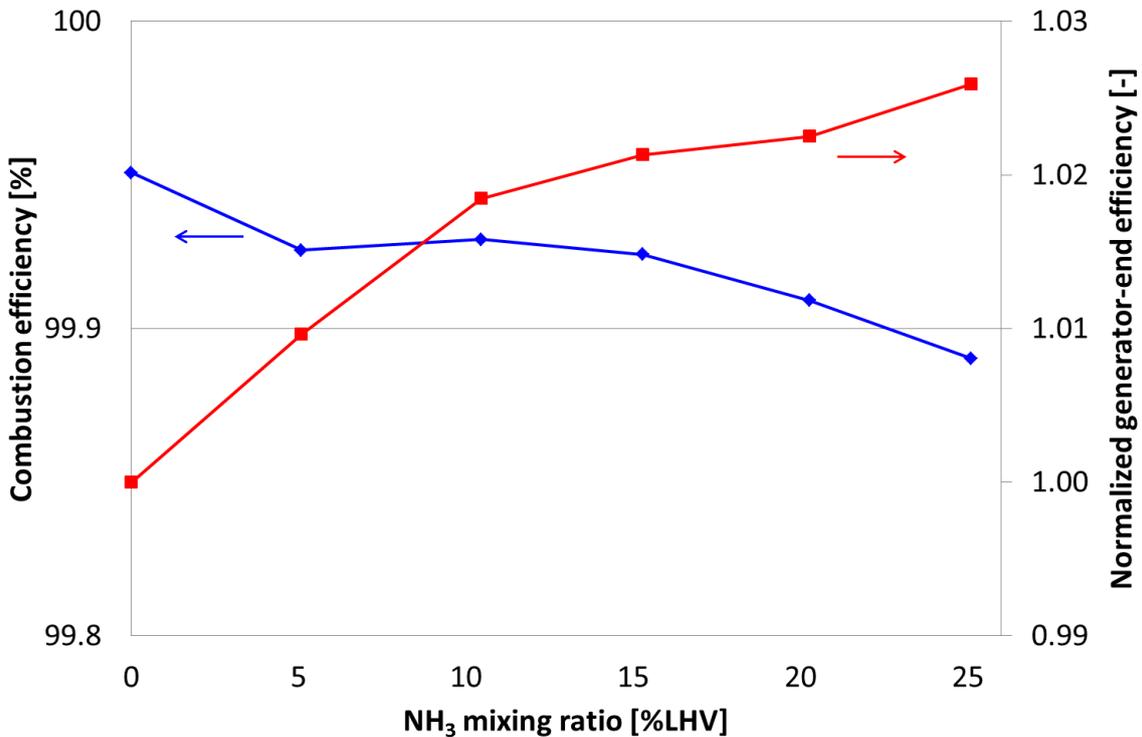


Fig. 3-7 Effect of NH₃ mixing ratio on combustion efficiency and generator-end efficiency (Combustor: R-6, Generator output = 2MW)

3-4. ガスタービンコージェネレーションシステムにおける総合効率の検討

ガスタービンコージェネレーションシステムの総合効率へのアンモニア混焼の影響をモデル計算により評価した。ここで総合効率は、ガスタービンエンジン本体の発電端効率と排熱回収ボイラの熱効率の和とした。ガスタービンエンジン本体の効率は発電実証試験の結果を使用し、ボイラの熱効率については排気ガス量や排気ガス組成の変化を考慮したモデル計算で評価した。図 3-8 にガスタービンコージェネレーションシステムの概略図を示す[4]。排熱回収ボイラは、IM270 ガスタービンエンジンのコージェネレーション装置で標準的に用いられる自然循環式水管ボイラとした。計算には、ガスタービンプラントの熱収支設計用ソフトウェアである THERMOFLOW 社製 GT pro ver.27 を使用し、エコノマイザ、蒸気ドラム、ボイラから構成される排熱回収ボイラの計算モデルを構築した。計算では、燃焼器形態 R-6 を用いたエンジン試験で得られたタービン出口の排気ガス温度、組成、流量を入力値とし、高温の排気ガスがボイラ内での熱交換により、排熱回収ボイラの出口で約 120℃ まで温度低下する場合の蒸気量を計算した。排気ガス流量は発電実証試験では計測していないため、排気ガス組成と空気および燃料流量のバランスから計算した。排熱回収ボイラで発生する蒸気は圧力 0.78MPaG の飽和水蒸気とし、給水温度は 60℃ とした。なお、この計算手法は実際のプラント設計に使用されており、既存プラントでの予測性能と実績の差は効率で 1 ポイント以内の精度が確認されている。

図 3-9 にアンモニア混焼率と総合効率の関係を示す。総合効率はアンモニア混焼率に依らず 75% 以上であり、目標値である 60% 以上を達成した。また、アンモニア混焼率 25%LHV までであれば、天然ガス専焼の場合と総合効率の差異がないことが確認できる。このような結果が得られた要因としては、アンモニア混焼率が 25%LHV までの条件で、燃焼効率 99% と天然ガス専焼と比較して遜色ない燃焼効率が達成できていることが大きい。以上の結果より、アンモニア混焼ガスタービンコージェネレーションシステムは、天然ガス専焼の場合と同様の高い総合効率を維持できると考えられる。

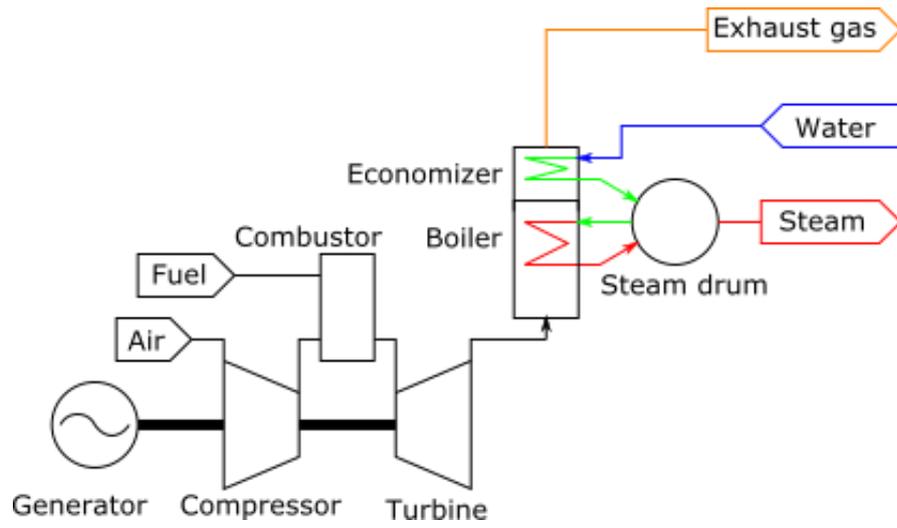


Fig. 3-8 Schematic of gas turbine co-generation system

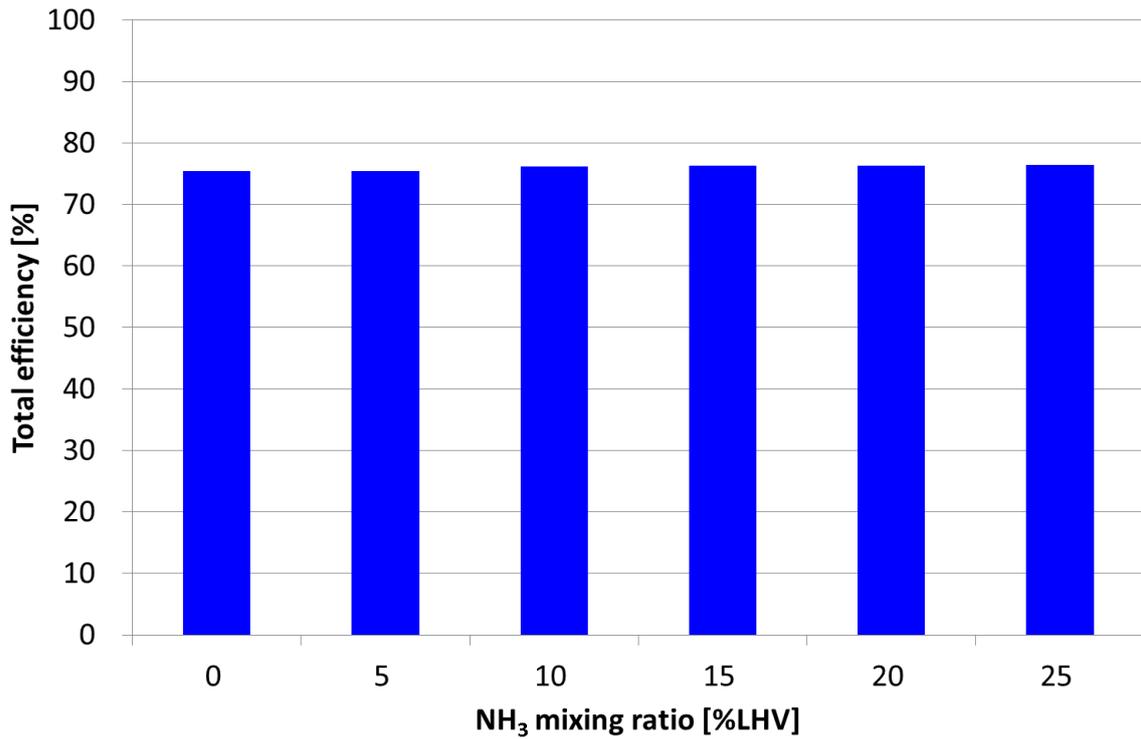


Fig. 3-9 Effect of NH₃ mixing ratio on total efficiency
(Combustor: R-6, Generator output = 2MW)

3-5. まとめ

2MW のガスタービンエンジンを使用してアンモニア混焼の発電実証試験を実施し、以下の成果を得た。

- ・ 大気圧条件の燃焼器単体試験により、アンモニア 2 段燃焼法を使用することで、低 NOx 燃焼が可能であることを確認した。
- ・ アンモニア 2 段燃焼法を使用した発電実証試験において、アンモニア混焼率 20%LHV 条件で 220ppm@16%O₂、アンモニア混焼率 25%LHV で 264ppm@16%O₂ のタービン出口 NOx 濃度を達成した。
- ・ アンモニア混焼率 25%LHV までの条件で、脱硝装置を使用することにより、脱硝装置出口 NOx 濃度 7 ppm@16%O₂ 以下を達成し、環境基準に適合可能であることを確認した。
- ・ 圧力をパラメータとした燃焼器単体試験結果から、ガスタービンエンジンでの性能を予測可能であることを確認した。
- ・ 発電実証試験におけるガスタービンエンジン効率と試験結果の排気ガス組成、排気ガスを量を使用したモデル計算により、アンモニア混焼率 25%LHV までの条件で総合効率 70%以上を達成可能であることを確認した。

<マイルストーンの達成状況>

- ・ 2MW 級ガスタービンエンジンを使用した発電実証試験とコジェネレーションシステムを対象としたモデル計算で、アンモニア混焼率 25%LHV までの範囲で総合効率 70% 以上が達成可能な見通しを得た。
- ・ 発電実証試験によりアンモニア混焼率 25%LHV までの条件で、脱硝装置出口 NOx 濃度 7 ppm@16%O₂ 未満を確認し、環境基準への適合を達成した。

3-6. 今後の課題

アンモニアを使用したガスタービンコジェネレーションシステムの社会実装のため、以下のような課題があると考えられる。

- ・ 発電実証試験に使用したガスタービンエンジンでは、燃焼器形態に対して最長 30 時間程度の試験時間であった。社会実装のためには、より長期間の連続試験で耐久性を確認する必要がある。特にアンモニアの利用で問題となる窒化については、燃焼器に悪影響がないか耐久試験での確認が必要である。
- ・ 発電実証試験では、アンモニア混焼率 20%LHV の条件で、タービン出口 NOx 濃度 220ppm@16%O₂ を達成した。しかし、この NOx 濃度は最新鋭の天然ガス焼きガスタービンエンジンよりも依然として一桁大きい数値であり、脱硝装置で使用するアンモニア量の増加によりランニングコストが増加する。従って、社会実装に向けて、更に NOx 濃度を低減する燃焼器形態の開発が必要である。
- ・ 発電実証試験では、アンモニア混焼率最大 25%LHV までの試験を行った。しかし、CO₂ 排出量削減の厳しい要求を達成するためには、より多量の CO₂ 削減が可能な高混焼率条件での運転やアンモニア専焼での運転が要求される。社会実装を進めるためにはこのような要求に答えることのできるアンモニア混焼/専焼ガスタービンの研究開発が必要である。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読なし(総説等含む)> 4件

1. 櫻井格、伊藤慎太郎、田中敦士、内田正宏、2MW級ガスタービンによるアンモニア混焼、クリーンエネルギー、vol. 27、No. 8、2018年8月
2. 伊藤慎太郎、石原咲子、火力発電におけるアンモニア混焼技術の開発、エネルギー・資源、vol. 39、No. 5、2018年9月
3. 須田俊之、火力発電におけるアンモニア利用技術の開発、エネルギーと動力、No. 291、2018年11月
4. 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、日本機械学会 熱工学部門 ニュースレター No. 86、2018年12月

(2) 学会、展示会等発表

<口頭発表> 国内8件、海外4件

1. Shintaro Ito, Soichiro Kato, Tsukasa Saito, Toshiro Fujimori, Hideaki Kobayashi, Combustion characteristics of ammonia/natural gas dual fuel burner for gas turbine combustor, NH3 fuel conference 2015, Chicago, USA, Sep. 22th, 2015
2. 伊藤慎太郎、加藤壮一郎、斎藤司、藤森俊郎、小林秀昭、スワールバーナにおけるアンモニア・都市ガス混焼の基礎特性、第53回日本燃焼シンポジウム、茨城県つくば市、2015年11月18日
3. Shintaro Ito, Soichiro Kato, Tsukasa Saito, Toshiro Fujimori, Hideaki Kobayashi, Development of ammonia/natural gas dual fuel gas turbine combustor, NH3 fuel conference 2016, Los Angeles, US, Sep. 19th, 2016
4. 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回日本燃焼シンポジウム、宮城県仙台市、2016年11月25日
5. 内田正宏、伊藤慎太郎、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回日本燃焼シンポジウム、宮城県仙台市、2016年11月25日
6. Shogo Onishi, Shintaro Ito, Masahiro Uchida, Tsukasa Saito, Toshiro Fujimori, Methods for Low NOx Combustion in Ammonia/Natural Gas Dual Fuel Gas Turbine Combustor, 2017 AIChE Annual Meeting, Minneapolis, USA, Nov. 1st, 2017
7. Shintaro Ito, Soichiro Kato, Masahiro Uchida, Shogo Onishi, Toshiro Fujimori, Hideaki Kobayashi, Performance Prediction for Gas Turbine Co-firing Ammonia and Natural gas, Fourteenth International Conference of Flow Dynamics, Sendai-shi, Nov. 2nd, 2017
8. 大西正悟、伊藤慎太郎、内田正宏、斎藤司、藤森俊郎、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 第二報 低NOx燃焼方法の実験的検討、第55回日本燃焼シンポジウム、富山県富山市、2017年11月14日
9. 須田俊之、REDUCING CO₂ EMISSION FROM POWER PLANT BY USING CARBON FREE AMMONIA AS A FUEL、グランド再生可能エネルギー2018国際会議、神奈川県横浜市、2018年6月21日
10. 伊藤慎太郎、内田正宏、大西正悟、藤森俊郎、小林秀昭、サイクル計算によるアンモ

ニア天然ガス混焼ガスタービンの性能予測、第 46 回 日本ガスタービン学会定期講演会、鹿児島県鹿児島市、2018 年 10 月 10 日

11. Shintaro Ito, Masahiro Uchida, Shogo Onishi, Toshiro Fujimori, Hideaki Kobayashi, Performance of Ammonia-Natural Gas Co-fired Gas Turbine for Power Generation, 2018 AIChE Annual Meeting, Pittsburgh, USA, Oct. 31th, 2018
12. 大西正悟、伊藤慎太郎、内田正宏、藤森俊郎、アンモニア・天然ガス混焼ガスタービンによる発電実証実験、第 56 回 日本燃焼シンポジウム、大阪府堺市、2018 年 11 月 16 日

<ポスター発表> 国内 1 件、海外 0 件

1. 新田省吾、アンモニアを利用した発電プラントからの CO₂ 削減技術、第 26 回 北海道大学衛生工学シンポジウム、北海道札幌市、2018 年 11 月

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内 7 件、海外 2 件

1. 須田俊之、中型ガスタービン、微粉炭焚ボイラ、燃料電池におけるアンモニア利用技術の開発、原総合知的通信システム基金主催特別セミナー「水素発電、アンモニア利用の可能性と事業動向」、東京都千代田区、2018 年 7 月 5 日
2. 須田俊之、低炭素社会に向けたアンモニア利用発電技術開発、技術情報センターセミナー「低炭素発電技術と事業動向」、東京都千代田区、2018 年 8 月 21 日
3. Toshiyuki Suda, Technologies to use carbon free ammonia in power plant, IERE-RWE TI Munich Workshop, Munich, DE, Sep. 12th, 2018
4. 須田俊之、エネルギーキャリアとしてのアンモニアによる 発電技術開発について、日本エネルギー学会東北支部 平成 30 年度講演会、福島県郡山市、2018 年 10 月 17 日
5. 須田俊之、アンモニアを利用した発電プラントからの CO₂ 削減技術、平成 30 年度火力原子力発電大会（関西大会）、大阪府大阪市、2018 年 10 月 25 日
6. Toshiyuki Suda, Technologies to use carbon free ammonia in power plant, NH₃ Energy Implementation Conference, Pittsburgh, USA, Nov. 1st, 2018
7. 平田哲也、カーボンフリー・エネルギーの実現に向けた取組、再生可能エネルギー産業フェア（REIFふくしま）2018 オープニングセミナー、福島県郡山市、2018 年 11 月 7 日
8. 須田俊之、エネルギーキャリアとしてのアンモニア活用による低炭素社会の早期実現、山口県水素関連技術マッチングセミナー、山口県宇部市、2018 年 11 月 8 日
9. 須田俊之、伊藤隆正、エネルギーとしてのアンモニア利用について、火力原子力発電技術協会 中部支部主催講演会、愛知県名古屋市、富山県富山市、2018 年 11 月 28 日、29 日

(3) プレス発表

2018年4月18日、IHI ホームページ、

概要：株式会社 IHI では、低炭素社会を実現する新たな燃料として期待されるアンモニアと天然ガスの混焼試験を、横浜事業所(神奈川県横浜市)で2018年3月に実施し、2,000kW 級ガスタービンでは世界初となる熱量比率 20%の混燃に成功した。これにより、ガスタービンの燃料としてアンモニアを利用する燃焼技術の実用化にめどを付けた。

(4) マスメディア等取材による公表

1. 創エネ時報、2017年4月15日、日揮はキャリア合成実証、IHI はアンモニア混焼発電
2. エネルギーの新潮流、2017年6月29日、IHI 藤森俊郎 技術開発本部インキュベーションセンター所長に聞く
3. 日本経済新聞、2017年8月23日、水素発電にアンモニア
4. 日刊工業新聞、2017年8月28日、アンモニア発電 実証
5. 日経産業新聞、2017年12月8日、石炭火力の泣き所塞ぐ、発電にアンモニア、実はエコ、約20団体が連携、混ぜて燃焼→CO₂削減
6. 化学工業日報、2018年1月23日、IHI 相馬に水素研究棟 アンモニアキャリアに 合成や燃焼実証
7. 化学工業日報、2018年4月19日、IHI アンモニア混焼成功
8. フジサンケイビジネスアイ、2018年5月28日、CO₂ゼロ、輸送・貯蔵も容易 IHI、中国電力、日揮などアンモニアの発電利用を推進
9. 化学工業日報、2018年5月30日、発電、低温低圧合成で成果 アンモニア燃料 着々と前進 CO₂フリー化が課題
10. 電気新聞、2018年4月19日、IHI GT アンモニア混焼にめど
11. 日刊工業新聞、2018年4月19日、アンモニアと天然ガス 熱量比率 20%混焼成功 IHI、2000kW 級で世界初
12. 化学工業日報、2018年6月4日、IHI アンモニア技術実用化へ 石炭火力混焼 今期中に試設計
13. 電気新聞、2018年7月31日、エネ・環境業界最前線 扱いやすく広範な分野で期待 火力発電へのアンモニア利用技術
14. 読売新聞神奈川版、2018年10月25日、研究最前線 IHI アンモニア燃料 CO₂削減
15. ガスエネルギー新聞、2018年12月3日、研究成果などを披露 アンモニア仕様 SOFC なども IHI
16. Engineering business、2018年7月15日、I H I、アンモニアサプライチェーン構築へ

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 | 特開2015-190466 | 燃焼装置、ガスタービン及び発電装置 | 2014/3/31 | 株式会社IHI |
| 2 | 特開2016-191507 | 燃焼装置、ガスタービン及び発電装置 | 2015/3/31 | 株式会社IHI |
| 3 | 特願2016-068006 | 燃焼装置及びガスタービン | 2016/3/30 | 株式会社IHI |
| 4 | 特願2016-067111 | 燃料供給装置 | 2016/3/30 | 株式会社IHI |
| 5 | 特願2016-068957 | 燃焼装置及びガスタービン | 2016/3/30 | 株式会社IHI |
| 6 | 特願2017-016232 | 燃焼装置及びガスタービン | 2017/1/31 | 株式会社IHI |
| 7 | 特願2017-016233 | 熱サイクル設備 | 2017/1/31 | 株式会社IHI |
| 8 | 特願2017-061236 | 燃焼装置及びガスタービン | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 9 | 特願2017-060445 | 燃焼装置及びガスタービン | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 10 | 特願2017-060444 | 燃焼装置及びガスタービン | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 11 | 特願2017-060962 | 燃焼装置及びガスタービンエンジンシステム | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 12 | 特願2017-060961 | 燃焼装置及びガスタービンエンジンシステム | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 13 | 特願2017-061212 | 燃焼装置及びガスタービン | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 14 | 特願2017-061213 | ガスタービン | 2017/3/27 | 株式会社IHI |
| 15 | 特願2018-062165 | 燃料供給装置及びガスタービン | 2018/3/28 | 株式会社IHI |
| 16 | 特願2018-062166 | 燃焼装置及びガスタービン | 2018/3/28 | 株式会社IHI |
| 17 | 特願2018-062164 | 燃焼装置及びガスタービン | 2018/3/28 | 株式会社IHI |
| 18 | 特願2018-069818 | 燃焼装置、ガスタービン及び発電装置 | 2018/3/30 | 株式会社IHI |

6. 参考文献

- [1] Akihiro Hayakawa, Yoshiyuki Arakawa, Rentaro Mimoto, K.D. Kunkuma A. Somarathne, Taku Kudo and Hideaki Kobayashi, International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), 14010-14018
- [2] 環境省ホームページ, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=2023>
- [3] Hua Xiao, Agustin Valera-Medina and Philip J Bowen, Energy 140 (2017) 125-135
- [4] (株) IHI IM270シリーズカタログ,
<https://www.ihl.co.jp/powersystems/lineup/IM270/i/im270.pdf>