技術論文

300kWアンモニア燃焼マイクロガスタービンの開発

Development of 300kW Ammonia Combustion Micro Gas Turbine

新井 啓介*1 ARAI Keisuke
河野 雅人*1 KAWANO Masato
久冨 直樹*1 KUDOMI Naoki
杉浦 寛史*1 SUGIURA Hiroshi
安井 芳則*1 YASUI Yoshinori
石脇 史猛*1 ISHIWAKI Fumitake

ABSTRACT

Recently, ammonia is focused as one of the hydrogen carriers, research and demonstration of direct combustion utilization has been reported. Toyota Energy Solutions Inc. (TE) has participated in a research project on ammonia combustion power generation using a 50kW micro gas turbine (MGT) in collaboration with Tohoku University and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, and has obtained many results. This time, TE has begun research on a 300kW MGT for industrial use, and has achieved 100% ammonia-only combustion as a result of evaluating various prototype combustors for ammonia combustion.

キーワード：マイクロガスタービン，アンモニア燃焼，燃焼器，拡散燃焼，予混合燃焼，NOx，燃料制御
Key words：Micro Gas Turbine, Ammonia Combustion, Combustor, Diffusion Combustion, Premixed Combustion, NOx, Fuel Control

1．はじめに

日本にとって化石燃料依存から脱却しCO_2を削減することは重要な課題であり，国の「エネルギー基本計画」において水素が新たなエネルギー源として提示され，「水素社会」実現に向けた取り組みが加速している。一方，水素の普及に向けては輸送・貯蔵のコストが課題として挙げられており，水素エネルギーのキャリアとして，水素含有量が多く液化が容易なアンモニアが注目され，アンモニアの直接燃焼利用についても各種実証評価が進んでいる。今後，エネルギーとしてのアンモニア利用の普及により調達コストの低減，CO_2フリーアンモニアの製造技術が進展すれば，アンモニアが将来の低炭素社会の切り札になる可能性を秘めている。

株式会社トヨタエナジーソリューションズ（以下トヨタエナジー）では内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）のエネルギーキャリアのプロジェクトにおいて，アンモニア直接燃焼チームに属し，国立大学法人東北大学（以下東北大）および国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下産総研）と共同で，アンモニアをマイクロガスタービン（以下MGT）で燃焼し，発電を行う実証プロジェクトに参画していた。（※2017年度～2018年度は共同研究者として参画。）これまでの実績としては，産総研の福島再生可能エネルギー研究所に設置した50kW MGTを使用した試験において，2014年度に灯油－アンモニア混焼（※混焼率はLHV比30%），2015年度にはメタン－アンモニア混焼（※混焼率はLHV比50%）およびアンモニア100%専焼を達成しており，2017～2018年度は東北大および産総研により提案された燃料由来の窒素酸化物（NOx）を低減する燃焼器設計手法を用いて，MGT単体での低NOx化（200ppm@16%O_2以下）を達成し，小型化された脱硝触媒を内蔵した新型パッケージの開発を完了している。

今回（2018年度），トヨタエナジーでは産業分野・大規模民生施設用としての普及を見据え，300kW MGTの研究開発を実施し，アンモニア100%専焼を達成した。

以下，開発内容と評価結果について報告する。

2．300kWアンモニア燃焼MGT実証概要

300kW MGTによるアンモニア燃焼の実証にあたり，開発期間が1年間と短いことを考慮し，具体的な数値目標としてはアンモニア混焼率を50%以上（LHV比）および排気ガス中の窒素酸化物量を大気汚染防止法の環境基準値（70ppm@16%O_2）以下とした。

試験場所としては中部電力株式会社（2019年4月において燃料事業，海外発電・エネルギーインフラ事業，火

原稿受付　2019年7月26日
査読完了　2020年5月18日
＊1　㈱トヨタエナジーソリューションズ
〒471-8573　豊田市元町1番地　トヨタ自動車㈱元町工場内
E-mail: keisuke_arai@toyota-energy.co.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.

力発電事業などは株式会社JERAに承継）の知多火力発電所において実施しているが，これは既存の火力発電所の脱硝用アンモニア供給設備をMGTの燃料用アンモニア供給設備として流用することを意図したためである。既存のアンモニア設備を流用出来たことでMGT設置に際しての法令対応についても，例えば高圧ガス保安法関連ではMGT設置はガス消費設備の軽微な変更と見なされ，管理・点検項目への対象機器の追加等の最小限の変更・届出で済むなど，比較的短期間で着工開始にこぎつけることが出来た。

300kWアンモニア燃焼MGTパッケージの外観をFig. 1に示すが，発電パッケージにはMGT本体及び同期発電機，減速機，燃料用ガス圧縮機，潤滑油系およびその冷却系統を内蔵しており，さらにMGTを制御する制御盤，系統連系をおこなう高圧盤も内蔵したオールインワンパッケージとなっている。

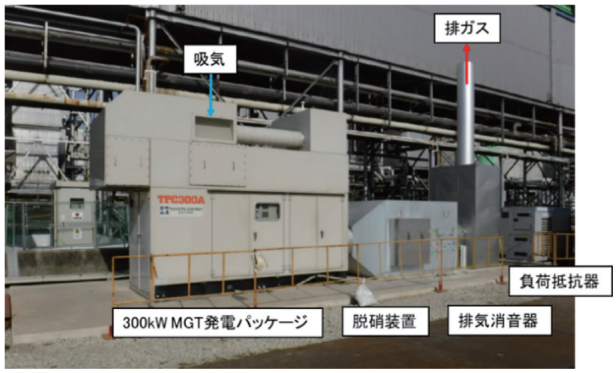


Fig. 1　300 kW ammonia combustion MGT package

今回の試験機はコージェネレーション用パッケージをそのまま流用しているが，パッケージ内にアンモニア用に選定した大容量の燃料遮断弁，燃料調量弁からなるアンモニア供給ユニットが追設されている。(Fig. 2)

燃料（アンモニア，LNG），補機電力，パージ用および計装用の窒素ガス（N_2）は発電所内の既存インフラから供給されており，発電電力は系統連系せずに併設の負荷抵抗器で消費している。また，MGT下流にはNOx低減のための脱硝装置を設置しているが，コージェネレーション用の排熱回収ボイラは設置せずに排気ガスは排気消音器を介して大気中に放出している。

Fig. 2　Ammonia supply unit in the package

300kW MGTの諸元をTable 1に示す。これまでアンモニア燃焼の実績がある50kW MGTは再生サイクル機のため，燃焼器入口空気温度が500℃以上と高かったのに対して，本機はシンプルサイクル機のため，300℃程度の低い燃焼器入口空気温度条件で，より多くのアンモニアを燃焼する必要があった。燃料としてのアンモニアは発熱量が一般的な都市ガスの1/3程度と低く，また火炎温度が低い，燃焼速度も遅いなど相対的に燃焼面で不利とされ，目標の達成には困難が予想された。そこで，MGTの基本要素（コンプレッサ，タービン）は標準MGTのままとする一方で，燃焼器についてはアンモニア燃焼対応として，標準の都市ガス用燃焼器（STEP0）をベースに計3タイプの燃焼器（STEP1～3）を試作している。(Fig. 3)

Table 1　Specifications of 300 kW MGT

機種		300kW MGT
発電機出力		295kW（25℃）
発電効率		17.4%
原動機	型式	単純開放サイクル 1軸式ガスタービン
	回転速度	40,000min-1
	空気流量	2.59kg/sec (7,210Nm^3/h)
	圧力比	6.6
	燃焼器入口温度	300℃
	燃料消費量（13A）	150.2 Nm^3/h
	燃料消費量（NH_3換算）	328.9 kg/h
	排気ガス温度	496℃
発電機形式		同期発電機

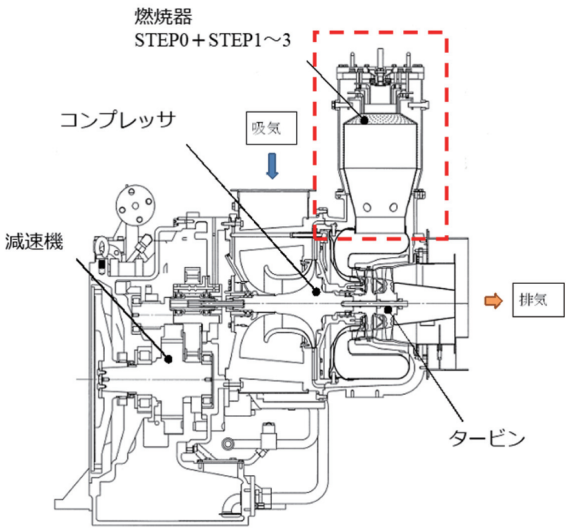


Fig. 3　300 kW MGT cross section

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.

アンモニア供給設備（Fig. 4）については前記のように既存発電所設備の流用であるが，１ユニットはアンモニア液タンク（タンク容量50t）と気化器（蒸発能力600kg/h）で構成されており，300kW MGTを１台運転するために十分なアンモニア供給能力を有している。

Fig. 4　Ammonia supply facility

ただし，アンモニア供給設備からのアンモニア供給圧力は0.2MPa程度とMGT圧力に対して低く，そのままでは直接MGTへの燃料投入が出来ないため，今回の実証評価設備ではアンモニア供給設備～ MGT間に新規に製作したアンモニアガス圧縮機を設置している。(Fig. 5)

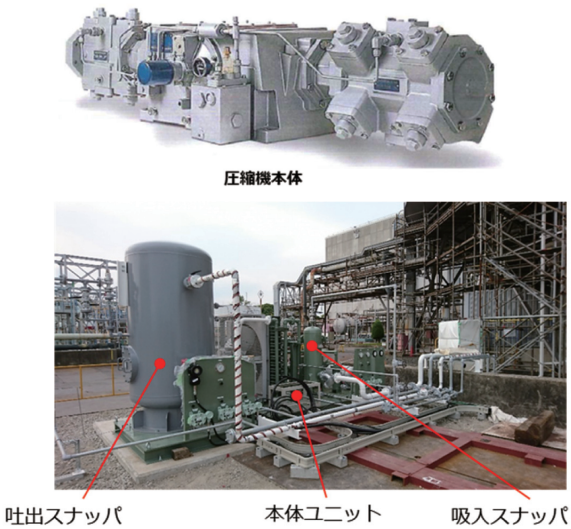


Fig. 5　Ammonia gas compressor

アンモニアガス圧縮機は水平対向ピストンを電動モータで駆動しており，アンモニア供給圧をMGT入口で0.8MPaまで高めると同時に300kW MGTにおいて定格出力運転に必要なアンモニア流量330kg/h以上を供給可能である。アンモニアガス圧縮機ではモータ回転数を一定に保ち，アンロード運転（吸入閉止ON/ OFF）を行うことで流量制御を行っているが，ガス吸入側および吐出側の圧力変動を抑制するために前後段にそれぞれバッファタンク（吸入スナッパ／吐出スナッパ）を設けている。また付属の制御盤では，冷却ファンON/OFF制御，油圧，ガス圧力監視等を実施しているほか，異常があった場合は自身の保護停止を行うとともに，MGT制御盤へ異常発報することでシステム全体の保護を行っている。

今回アンモニアを燃料とすることでMGT排気中に燃料由来のNOxが多量に排出されることが予想されたため，MGT下流に脱硝装置を設けている。(Fig. 6) 脱硝装置はSCR（選択式還元触媒）方式であり，MGT排気排ガス中のNOxを 1,000ppm→30ppm以下に低減する能力を有している。300kW MGTの排気温度は500℃前後であることから，この温度域で活性が得られる触媒を選定している。触媒はハニカム状に成型されており，□150×150×t50の触媒セルを筐体内部に８個×８個×９段（合計576個）搭載している。触媒性能を評価するために触媒上流および触媒中段（４段目～５段目の中間），触媒下流に排ガス温度および排ガス性状を計測するためのサンプリングポートを設けている。

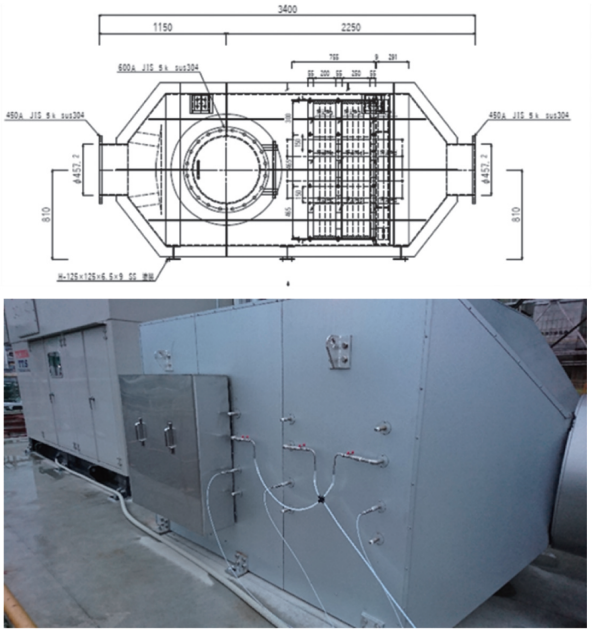


Fig. 6　NOx removal unit（SCR）

MGTの性能に関する各種状態量はエンジンコントロールユニット（ECU）から出力され，その他燃費データ（アンモニア／ LNG）や脱硝装置前後での排ガス分析（O_2，CO_2，CO，THC，NOx，N_2O）データ，燃焼器ライナ温度データ等と合わせて，試験パッケージに隣接する仮設ハウス内に設置した計測PCおよびデータロガーによりデータ収集を行っている。

3．試験結果

今回評価を実施した燃焼器STEP0，STEP1 ～ STEP3の外観および特徴，評価結果をFig. 7に示す。

3.1　STEP0燃焼器

STEP0燃焼器は300kWコージェネレーション用拡散燃焼器を使用し，燃焼器の空気配分および燃焼器ライナ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.

冷却構造（フィルム冷却方式）はオリジナルのままとなっている。アンモニアは燃料噴射ノズル入口ポート手前で都市ガス（LNG）系統と合流し，共通の燃料噴孔からLNG+アンモニア混合ガスを燃焼器内に噴射している。

本燃焼器においてアンモニア混焼率30%（LHV比）までの運転を実施し，アンモニア供給系の機器，制御の安定動作の確認および脱硝装置出口でのNOxが規制値以下となることを確認した。

3.2　STEP1燃焼器

STEP1燃焼器では東北大，産総研で検討された燃料過濃燃焼と希薄燃焼を単一燃焼器でおこなうリッチリーン燃焼方式の考えを取り入れ，燃焼領域の当量比をリッチ化している。また，燃料経路（燃料噴射ノズル）は2系統となり，LNG＋アンモニア混合ガス噴射に加えてLNGとアンモニアの個別噴射も可能となっている。燃焼器ライナ冷却方式はSTEP0燃焼器と同様にフィルム冷却方式を採用している。本燃焼器ではアンモニア混焼率50%（LHV比）を達成したが，それ以上の混焼率では未燃分増加が顕著となったため，これ以上のアンモニア投入は困難と判断した。

今回の試験ではMGT（燃焼器）出口からの未燃アンモニアは後段の脱硝装置でNOx還元用として作用することが分かっているが，本来脱硝用として脱硝装置入口に噴射すべきアンモニア量（還元対象のNOxと同程度のモル量と想定）相当の未燃アンモニア量まで許容するとし，脱硝装置出口でのNOx値が下がりきった点をアンモニア混焼率の上限としている。(Fig. 8)

3.3　STEP2燃焼器

STEP2燃焼器はSTEP1燃焼器同様にリッチリーン燃焼方式に準じた空気配分になっており，燃料経路（燃料ノズル）もSTEP1と同一仕様となっているが，ライナ冷却構造についてはフィルム冷却方式からインピンジメント冷却方式に変更している。これにより燃焼領域への冷却空気流入による燃焼ガスの希釈およびライナ壁の過冷却を抑制し，ライナ壁面近傍での未燃分発生を低減することでアンモニア燃焼性能の向上を図っている。本燃焼器ではアンモニア混焼率70%（LHV比）を達成している。

3.4　STEP3燃焼器

STEP3燃焼器は300kW都市ガスコージェネレーション用予混合燃焼器をベースにアンモニア燃焼用に改造を加えたものである。本燃焼器の燃料経路は3系統に分かれており，パイロット燃料は拡散燃焼用，プライマリ，セカンダリ燃料が予混合燃焼用となっているが，アンモニア燃焼器ではこれを利用し，パイロットはLNG＋アンモニアの混合ガス経路，プライマリ，セカンダリはアンモニア専用の経路としている。拡散燃焼領域および予混合燃焼領域の当量比はアンモニア燃焼対応としてリッチに調整しているほか，拡散燃焼器と比較して燃焼器容積が大きく，燃焼器内滞留時間が増加している。またライナ冷却構造は無冷却ライナ（＝ライナ内外の対流伝熱

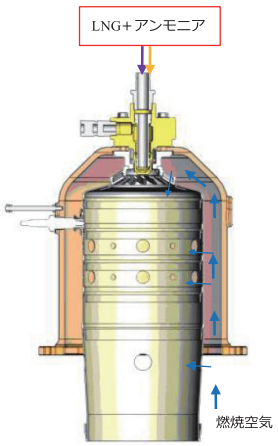
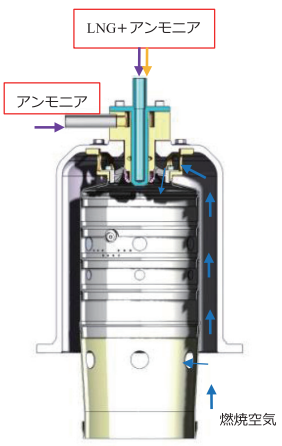
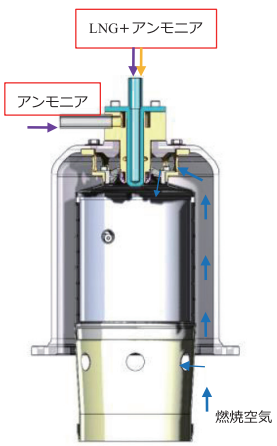
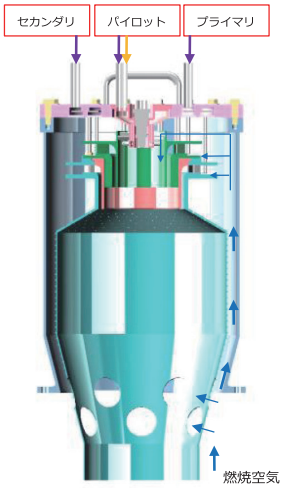
燃焼器タイプ	ベース燃焼器（STEP0）	STEP1	STEP2	STEP3
外観				
特徴	・拡散燃焼方式（オリジナル） ・燃料１系統 （LNG－アンモニア混合噴射） ・フィルム冷却ライナ	・燃焼領域リッチ（過濃）化 ・燃料2系統 （LNG－アンモニア個別噴射可能） ・フィルム冷却ライナ	← ← ・インピンジメント冷却ライナ	・予混合燃焼方式 ・燃料３系統（パイロット－拡散、プライマリ、セカンダリ－予混合） ・無冷却ライナ
結果	・LNG＋アンモニア混焼 **⇒混焼率34.2%（LHV比）** **・触媒出口NOx 15ppm以下**	・LNG＋アンモニア混焼 **⇒混焼率50.9%（LHV比）** **・触媒出口NOx 15ppm以下**	・LNG＋アンモニア混焼 **⇒混焼率71.4%（LHV比）** **・触媒出口NOx 15ppm以下**	**・アンモニア100%専焼達成** **・触媒出口NOx 15ppm以下**

Fig. 7　Prototype combustors for ammonia combustion

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.

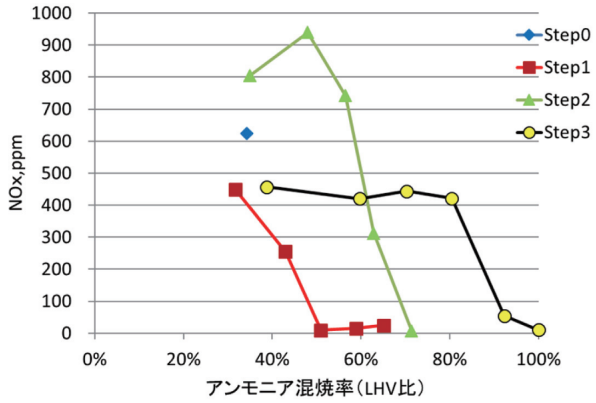


Fig. 8　NOx emissions（after NOx removal unit）

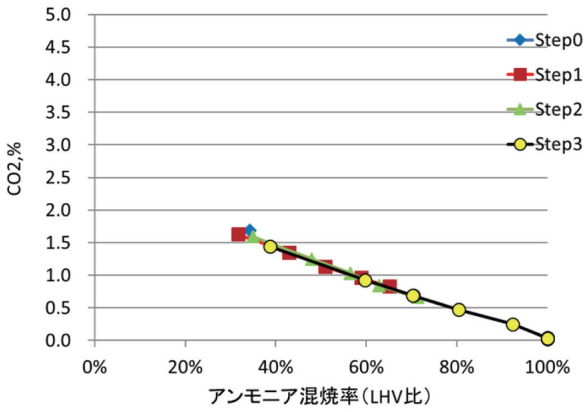


Fig. 9　CO_2 emissions（after NOx removal unit）

のみによる冷却）を採用することにより，燃焼領域およびライナ壁温度の低下を抑制し，さらなるアンモニア燃焼性能の向上を図っている。本燃焼器は拡散燃焼タイプを上回る性能を発揮し，最終的にアンモニア100%専焼すなわちCO_2排出ゼロを達成している。（Fig. 9）

3.5　アンモニア100%専焼運転

Fig. 10にSTEP3燃焼器によるアンモニア100%専焼達成時の運転データを示す。MGTの起動はLNGで行い，エンジン回転数が定格回転到達後に負荷投入を開始し，定格出力（295kW）到達前後にアンモニア投入を開始している。アンモニア流量を手動制御で徐々に増加していき，それに従いLNG流量はフィードバック制御により自動的に減少していくが，LNG－アンモニアのLHV比が凡そ50：50のポイントでフィードバック制御対象をLNGからアンモニアへと切り替えている。（図中点線部におけるLNG制御→アンモニア制御への移行。）以降はLNG流量を手動で減少していき，最終的にLNG流量がゼロとなり，アンモニア100%専焼が達成された。

アンモニア100%専焼時のエンジン性能および排ガス性状をTable 2に示すが，所定のエンジン性能が得られており，排気ガス中のCO_2ゼロ（※計測CO_2濃度0.04%は大気中のCO_2濃度=400ppmに相当），かつNOxも15ppm@16%O_2未満と大気汚染防止法の規制値70ppm以下を達成していることを確認した。

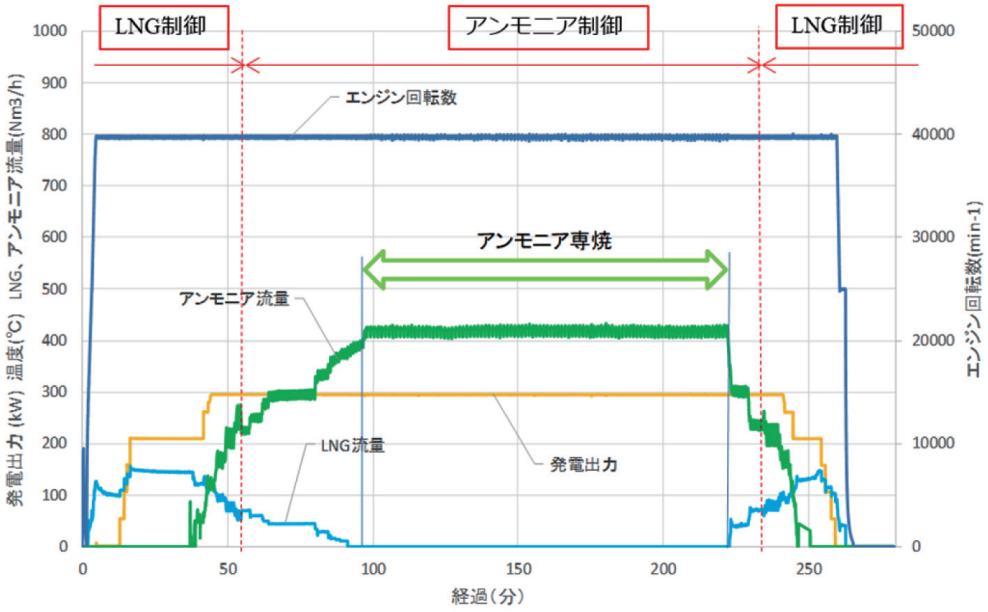


Fig. 10　300 kW MGT operation with 100% ammonia combustion

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.

Table 2　Test results at 100% ammonia combustion

エンジン性能		計測値
発電出力	kW	294.7
吸気温度	℃	14.6
タービン出口温度	℃	427.2
コンプレッサ吐出圧力	kPaA	651.9
コンプレッサ吐出温度	℃	281.7
LNG流量	Nm^3/h	0.0
アンモニア流量	Nm^3/h	419.8
排ガス性状（触媒出口）		
O_2	%	17.4
CO_2	%	0.04
NOx	ppm	10.6
NOx（@16% O_2）	ppm	14.7
CO	ppm	0

これまでの試験において，アンモニア投入量を増加していくとライナ温度が低下し，燃焼が悪化していく傾向が見られていたが，STEP3燃焼器ではアンモニア投入量増加途中で燃料３系統（拡散１系統，予混合２系統）の燃料分配を手動で調整し，ライナ壁面温度の低下および燃焼の悪化を最小限に抑えることでアンモニア100%専焼に至るまでの安定燃焼を実現した。(Fig. 11)

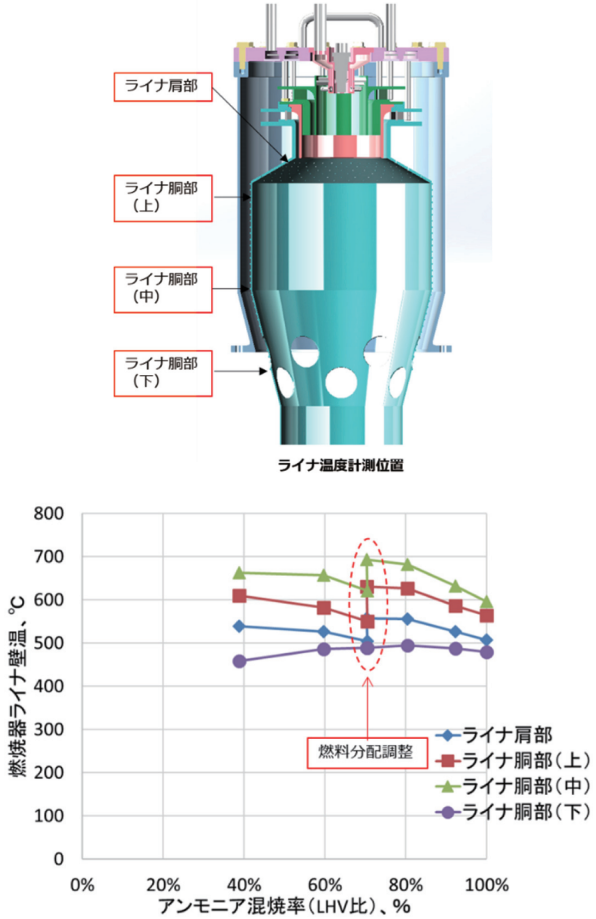


Fig. 11　Combustor liner wall temperature

4．今後の展開

今回300kW MGTにおいてアンモニア100%専焼を達成したが，今後は長時間の運用における機器の耐久性，信頼性評価をはじめ，アンモニア安定燃焼範囲の拡大，燃料分配制御の自動化や50kW MGTでの知見に基づく低NOx燃焼技術の展開などアンモニア燃焼技術の高度化に取り組んでいく。また，起動用都市ガス（LNG）なしのシングルフューエル化やMGT排熱のアンモニア供給設備（気化器）への利用など全体システムの最適化を図り，将来のCO_2フリーアンモニア普及を見据えた製品化および商品性の向上を目指していく考えである。

謝 辞

本研究（の一部）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。東北大学の小林秀昭先生をはじめご指導，ご協力いただいたすべての関係各位に感謝申し上げます。

また試験場所のご提供，アンモニア供給設備の利用等にご協力をいただきました中部電力株式会社（現在，株式会社JERA）および同社知多火力発電所の関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

(1)　SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）“エネルギーキャリア”，最終報告書，“アンモニア直接燃焼”，“アンモニア燃焼マイクロガスタービン”(2019).

(2)　壹岐典彦，倉田修，“アンモニアを燃焼するガスタービン”，日本燃焼学会誌，Vol. 58，No. 186（2016），pp. 215-222

(3)　壹岐典彦ほか，“ガスタービンにおけるアンモニア燃焼利用”，第44回ガスタービン定期講演会（酒田）講演論文集，C-12（2016），pp. 259-264

(4)　長谷川武治，“アンモニア併産／CO_2回収型高効率IGCC発電 -アンモニア利用の現状とガスタービン開発の課題-”，第44回ガスタービン定期講演会（酒田）講演論文集，C-11（2016），pp. 253-257

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.196, 2025/07/12.