

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「アンモニア燃焼マイクロガスタービン」

研究開発期間： 平成 29 年 7 月 13 日～平成 31 年 3 月 31 日
研究担当者： 社本 純和
所属研究機関： 株式会社トヨタエナジーソリューションズ

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	2
3. 研究開発実施内容	3
3-1. 50kW アンモニア燃焼 MGT 開発	3
3-1-1 50kW 低 NOx 燃焼器開発概要	3
3-1-2 50kW アンモニア燃焼器設計	3
3-1-3 50kW アンモニア燃焼 MGT 模擬評価	6
3-1-4 新 50kW アンモニア燃焼 MGT システムフロー	7
3-1-5 新 50kW アンモニア燃焼 MGT パッケージ開発	8
3-2. 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発	9
3-2-1 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発概要	9
3-2-2 300kW MGT 発電システム	10
3-2-3 300kW アンモニア燃焼 MGT 用インフラ	11
3-2-4 300kW 機向けアンモニアガスコンプレッサ	11
3-2-5 300kW アンモニア燃焼 MGT 燃料供給系	12
3-2-6 300kW アンモニア燃焼 MGT 燃料制御	12
3-2-7 300kW アンモニア燃焼器開発	13
3-2-8 300kW 向け脱硝触媒	14
3-3. まとめ	15
3-3-1 50kW 燃焼器開発	15
3-3-2 新 50kW アンモニア燃焼 MGT パッケージ開発	17
3-3-3 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発	19
3-4. 今後の課題	20
4. 外部発表実績	21
5. 特許出願実績	23
6. 参考文献	23

図表一覧

- 図 1 50kW アンモニア オリジナル燃焼器外観
- 図 2 50kW アンモニア低 NO_x 燃焼器外観
- 図 3 50kW アンモニア模擬運転評価
- 図 4 新 50kW アンモニア燃焼 MGT システムフロー
- 図 5 新 50kW パッケージ外観
- 図 6 300kW アンモニア燃焼 MGT 外観図
- 図 7 アンモニアガスコンプレッサ外観
- 図 8 300kW アンモニア燃焼器
- 図 9 300kW 用脱硝触媒外観
- 図 10 50kW アンモニア燃焼試験結果
- 図 11 新 50kW アンモニア MGT 設置状況
- 図 12 新 50kW アンモニア燃焼 MGT 運転シーケンス

表 1 MGT 諸元

表 2 50kW 脱硝触媒評価結果

表 3 300kW アンモニア燃焼 MGT 評価結果

1. 本研究の目的

株式会社トヨタエナジーソリューションズ（以下 TE）は、研究期間内に、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）において提案されたフューエル NO_x（窒素酸化物）低減手法を用いてガスタービン燃焼器としての成立性を検討し、マイクロガスタービン（以下 MGT）用低 NO_x 燃焼器を試作する。

また現状アンモニア燃焼 MGT は起動時に灯油を使用し、定格回転到達後にアンモニア燃焼への切替を実施しているが、今後は対環境性を考慮しメタン等ガス燃料による起動も可能なシステムとする。そのために必要な制御開発を実施する。

前述の燃焼器による低 NO_x 化に加え産総研が開発する小型化された脱硝装置を組み合わせることにより、環境基準をクリアし、かつ設置性にも優れた新型パッケージを開発する。

これまで東北大および産総研と共同にて開発してきた 50kW アンモニア燃焼 MGT における知見を活かし、より高出力な 300kW アンモニア燃焼 MGT の開発をおこなう。300kW アンモニア燃焼 MGT を実現するため、アンモニア燃焼器、アンモニア供給系統およびその制御を開発し、中部電力株式会社の知多火力発電所内の脱硝用アンモニア供給設備を用いアンモニアによる運転評価を実施する。

本文ではマイクロガスタービンを MGT、窒素酸化物を NO_x と記載する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究における研究開発終了時における研究開発目標は、次のとおりである。

a. 低 NO_x 燃焼器設計・試作 (50kWMT)

NO_x 排出量 (※アンモニアに起因するフューエル NO_x が主) を最小化し、かつ安定した燃焼 (起動～定格) を実現する燃焼器を試作する。

b. 試作低 NO_x 燃焼器のエンジン試験 (50kWMT)

試作した燃焼器を TE 社内の試験ベンチにてエンジン運転を行い起動および燃焼の安定性評価を実施する。

c. 制御開発 (50kWMT、300kWMT)

メタン等ガス燃料で起動しアンモニア燃焼に安定して移行する制御 (機器、ソフト) を検討し試作する。

d. パッケージ開発 (50kWMT)

国の環境基準を満足し、付帯機器 (脱硝装置、温水ボイラ) を内蔵する新型パッケージを試作する。

e. 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発

300kWMT によるアンモニア燃焼を実現する。

マイルストーン

H 2 9 年度 目標 アンモニア燃焼 MGT 燃焼器の試作改良 (低 NO_x 化) を行う。

H 3 0 年度 目標

- ・ 50kWMT の制御、パッケージを完成する。
- ・ 50kWMT において排ガス中窒素酸化物量を大気汚染防止法の環境基準値 (70ppm) 以下にする。
- ・ 300kWMT によるアンモニア燃焼 (アンモニア混焼 50%以上) を実現する。
- ・ 300kW アンモニア燃焼 MGT において排ガス中窒素酸化物量を大気汚染防止法の環境基準値 (70ppm) 以下にする。

3-1. 50kW アンモニア燃焼 MGT 開発

東北大および産総研が確立したアンモニア燃焼の低 NO_x 化手法は、MGT 燃焼器内 1 次領域の当量比を過濃側で運転することによるアンモニア燃焼と、燃料として供給されるアンモニアにより発生した窒素酸化物を還元することで実現されるが、当量比の増加は燃焼器内温度上昇を意味しておりライナ保護のため冷却が必要である。そのため燃焼器 1 次領域高当量比化とライナ冷却の両立が課題となる。新規に開発をおこなう燃焼器の低 NO_x 化効果と、システム成立性を確認するため STEP1～4 の試作、開発をおこなうこととした。

50kW アンモニア オリジナル燃焼器

燃料供給は起動用灯油ラインと負荷運転時に使用する都市ガスを模したメタンを供給するガス燃料系統、アンモニアを供給するアンモニア供給系統の 3 系統の燃料を供給できる構成となっている。灯油は燃焼器中央部に設けられた灯油ノズルより供給される。メタンおよびアンモニアは灯油ノズル周囲に配置されたガス燃料噴射口より燃焼器内に噴射する構成となっている。

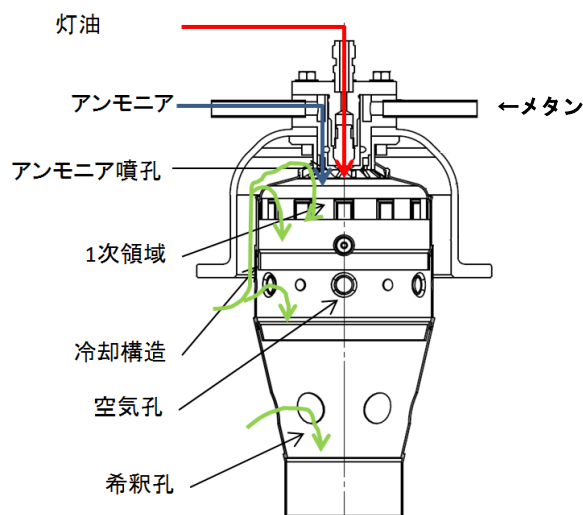


図1 50kW アンモニア オリジナル燃焼器外観

50kW STEP1 燃焼器

東北大において検証された NOx 発生量が最低となる当量比を実現するため、1 次空気孔廃止、希釈孔拡大をおこなった。1 次空気孔廃止および希釈孔拡大だけでは目標当量比が実現できないため、燃焼器アキシヤルスワラから燃焼室内に供給される空気量を制限するための制限リング取付をおこなった。また 1 次領域へのフィルム冷却空気流入を減らすため 1 段目フィルム冷却廃止と、2 段目以降フィルム冷却の見直しをおこなった。

燃料供給系統は産総研において評価できるようにオリジナル燃焼器と同様に起動用の灯油ノズルを有し負荷運転時に使用するメタン供給系とアンモニア供給系統を有している。1 次領域内においてアンモニアと空気の混合を促進するため、ガス燃料噴射角を変更した噴射ノズルを用意した。評価に際して 1 次燃焼領域における当量比をパラメータとして評価できるように試験をおこなった。

50kW STEP2 燃焼器

STEP1 燃焼器評価により実機ガスタービンにおいても 1 次領域の当量比を過濃側で運転することで NOx 低減できることが確認できたが、NOx 目標値を達成することができなかった。これは燃焼器壁面を冷却するためのフィルム冷却空気が 1 次領域へ供給されたことにより、燃焼器内でアンモニアと空気の濃度のばらつきが存在し、アンモニアによる脱硝作用が阻害されたためと推測された。さらに 1 次領域における反応が不十分な可能性があった。これらの対策としてフィルム冷却構造見直しと、希釈孔位置を下げることにより、1 次燃焼領域拡大をはかる変更をおこなった。あわせてガス噴射ノズル径を変更し、燃料噴射速度を下げ、火炎拡大をおさえるための変更をおこなった。

50kW STEP3 燃焼器

東北大の NOx 低減検討において、1 次領域における燃焼用空気とアンモニアの濃度が均一であるほど NOx 低減効果が大きいことが確認されており、燃焼用空気とアンモニアをあらかじめ混合し燃焼させる予混合燃焼により、大きな NOx 低減効果がみられる結果がえられている。アンモニア予混合燃焼によるガスタービン運転を実現するため、アンモニア予混合燃焼器の開発をおこなった。

TE では 50kW MGT 用都市ガス予混合燃焼器を有しており本技術をベースに開発をおこなうこととした。燃焼器の設計パラメータは都市ガス用予混合燃焼器からこれまでのアンモニア燃焼器同様になるように見直した。ライナ形状および冷却機構は、STEP2 燃焼器を踏襲した。本燃焼器は都市ガス（メタン）用拡散ノズルを有しており、本ノズルを用いてアンモニア拡散燃焼運転をおこなうことができる。また起動は灯油ノズルを用いておこなった。

50kW STEP4 燃焼器

さらなる低 NOx 化をはかるため STEP4 燃焼器の開発をおこなった。STEP3 燃焼器試験結果からアンモニア予混合燃焼時に燃焼用空気とアンモニア濃度に偏りがあることが懸念さ

れた。STEP3 予混合ノズルは都市ガス噴射ノズルの設計を踏襲していたがアンモニア用に噴射方法の見直しをおこなった。本燃焼器から試験用 MGT を新パッケージに変更しており都市ガス（メタン）起動で運転できるようになったため灯油系統を廃止した。

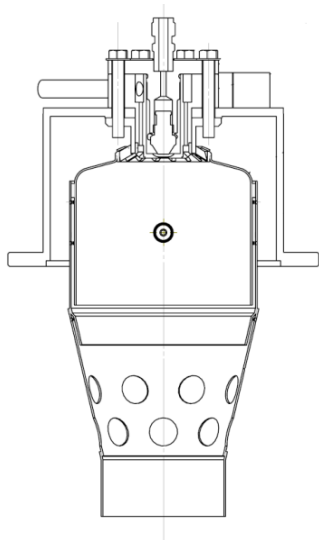


図 2 50kW 低 NOx アンモニア燃焼器外観

3-1-3 50kW アンモニア燃焼 MGT 模擬評価

低 NO_x 燃焼器による MGT 運転方法を確立するため、産総研に設置されたアンモニア燃焼用 MGT の運転を模擬できる評価設備を TE 内に構築した。本試験設備は灯油起動をおこない、都市ガス運転に切り替える機能と、模擬アンモニア（都市ガスと窒素を混合したガス）を供給する機能を有している。試験は低 NO_x 燃焼器によるアンモニア燃焼 MGT 運転方法を確立することを目的に行なった。本試験によりアンモニア燃焼器や制御の事前確認を行うことで産総研においてアンモニア燃焼評価を円滑にできるようにした（図 3）。

2018 年度は社内試験ベンチの起動用燃料を灯油からガス燃料（都市ガス）に変更した。あわせて制御盤変更を行い、アンモニア燃焼 MGT 制御評価とシステム自動化運転構築の評価ベンチとして運転を行い制御盤及び制御ソフトの確認を行った。確認を行ったソフトを産総研の試験機に導入し実アンモニアガスによる運転調整を実施した。

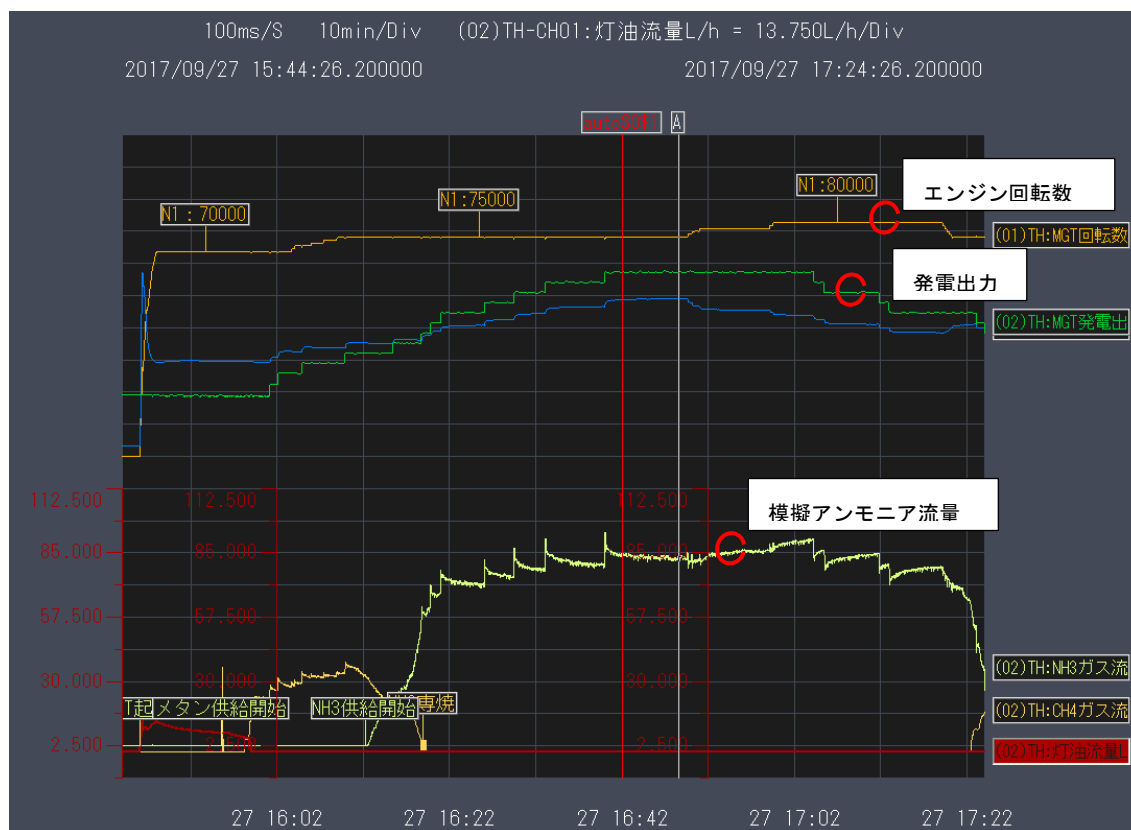


図 3 アンモニア模擬運転評価

3-1-4 新 50kW アンモニア燃焼 MGT システムフロー

今回開発した新 50kW アンモニア燃焼 MGT システムフローを図 4 に示す。これまでのアンモニア燃焼 MGT については灯油で起動した後、都市ガスを模擬したメタンを用いて運転をおこない、アンモニア燃料へ切り替えをおこなっていた。新 MGT は製品化を考慮し、市場性の観点からガス燃料（都市ガス）によって起動をおこないアンモニアへ切り替えをおこなう。ガス燃料系としてはこれまでのコージェネレーション（以下コジェネ）用のシステムを流用することで対応可能であったが、アンモニア供給系についてはアンモニアガスの腐食性に対応した設計見直しが必要であった。ガスタービン燃料制御弁とアンモニア燃料遮断弁はアンモニア耐性を有するシールを使用した制御弁を採用した。さらにパッケージ内部に脱硝触媒を搭載したため、触媒へ脱硝用アンモニアを供給する必要があり、脱硝用アンモニア遮断弁を設置して脱硝制御をおこなっている。

今回のパッケージでは脱硝後のガスタービン排熱を排ガス水熱交換器を用いて温水として回収するコージェネシステムとして利用できる。排ガス水熱交換器へ供給する排ガス量を三方ダンパで制御することで温水温度調整をおこなっている。

産総研のこれまでのパッケージではアンモニア供給開始、アンモニア供給量増加、起動用燃料の停止を手動で実施していたが、これまでの燃焼試験データや運転データの蓄積からアンモニア専焼までの自動切り替え制御が可能となった。ただし産総研では試験設備の都合から系統連系ができず、発電出力を負荷装置で消費しているためガスタービン側から制御できない。MGT 制御盤からの負荷制御については TE 内の試験ベンチで確認した。

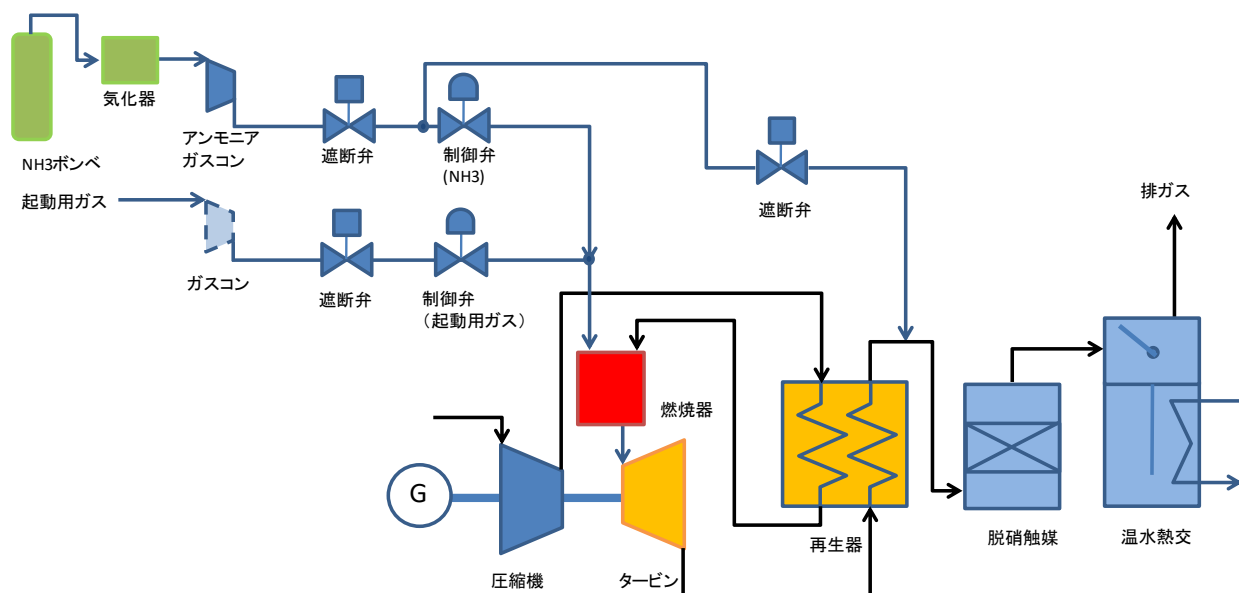


図 4 新 50kW アンモニア燃焼 MGT システムフロー

3-1-5 新 50kW アンモニア燃焼 MGT パッケージ開発

新アンモニア燃焼 MGT 用パッケージは TE 製 TPC50RA 発電パッケージをベースに設計をおこなった。TPC50RA はパッケージ内にガスタービン本体、高速発電機、再生熱交換器（以下再生器）をユニットとして搭載しており、さらに MGT の制御盤、発電機盤、連系用インバータを内蔵している。これらの機能により補機電源と燃料配管を接続することでパッケージ単体発電が可能である。今回製作する新パッケージは、コジェネとして運用することを想定して、温水ボイラ内蔵とした。

これまでは外置きで大きな設置面積を占めており、コストが高額な脱硝触媒を MGT パッケージへ内蔵させることによりシステム簡素化とともに設置コスト低減を図った。触媒装置についてはガスタービン再生熱交出口温度域（200～300℃）程度で脱硝性能を確保できるバナジウム系を採用することとした。触媒設計条件としては、触媒出口 NOx 条件として 35ppm（東京都環境確保条例 ガス燃料規制値）、また触媒出口アンモニア残存濃度は 10ppm 以下とした（日本産業衛生学会および ACGIH による許容値濃度は 25ppm 以下）。触媒メーカーにおいて触媒容量検討をおこない、検討した触媒をユニット化しパッケージ内に搭載した。脱硝触媒を再生器と温水ボイラの間に搭載するためコジェネ用パッケージの延長をおこない、パッケージ寸法は寸法 1000 (D) ×4000 (W) ×2600 (H) となった。（図 5）。

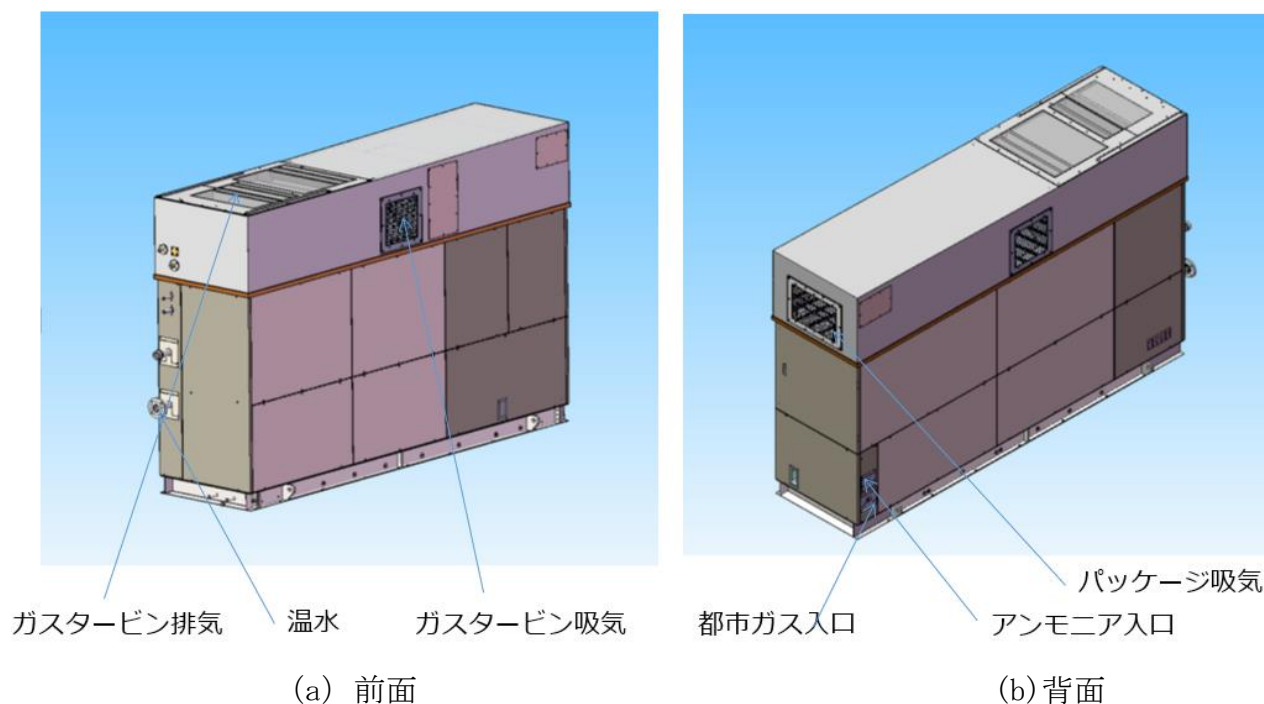


図 5 新 50kW パッケージ外観

3-2 300kW アンモニア燃焼 MGT

3-2-1 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発概要

これまで東北大および産総研と共同で開発してきた 50kW アンモニア燃焼 MGT における知見を活かし、より大型で商用ベースとなる 300kW アンモニア燃焼 MGT の開発をおこなった。300kW アンモニア燃焼 MGT を実現するため、アンモニア燃焼器、アンモニア供給系統とその制御を開発した。

300kW アンモニア燃焼 MGT の外観を図 6 に示す。300kW アンモニア燃焼 MGT を開発するためには 320kg/h のアンモニア供給設備が必要となるため、中部電力株式会社知多火力発電所内の脱硝用アンモニア供給設備を用いた。300kW MGT パッケージ、アンモニアガスコンプレッサ、脱硝触媒、排気消音器を設置しアンモニアによる運転評価を実施した。

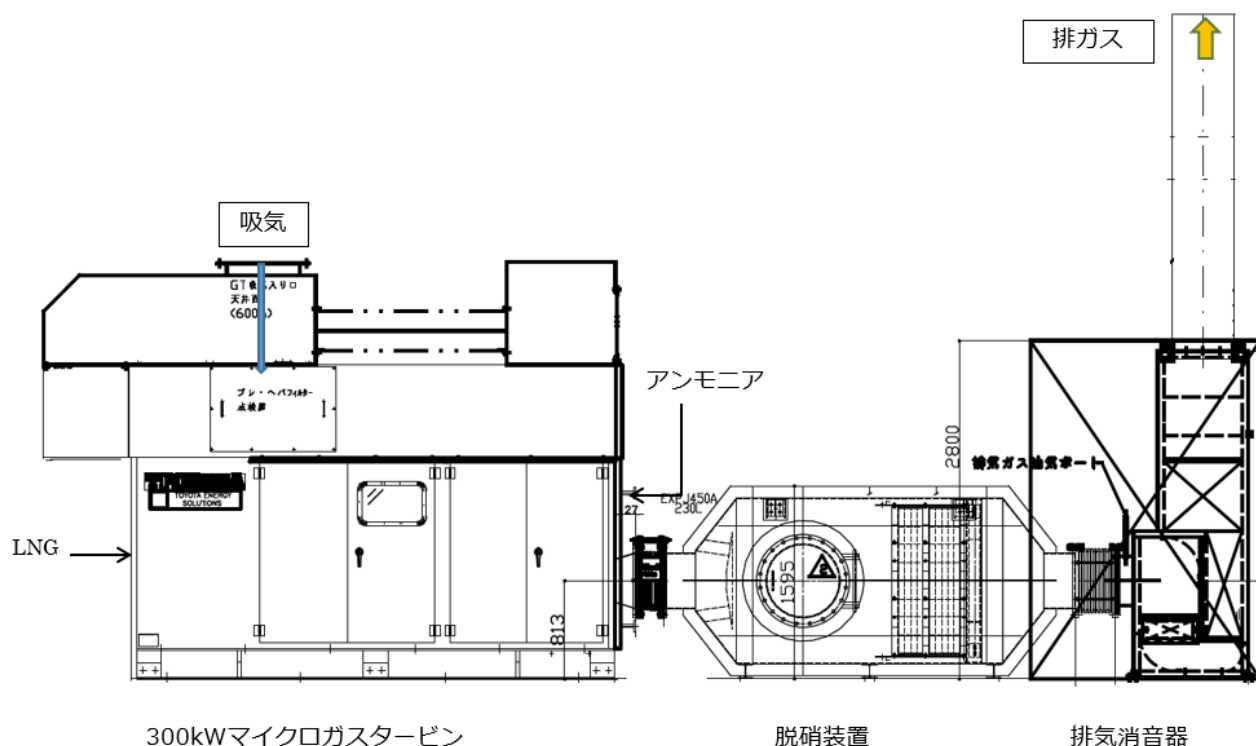


図 6 300kW アンモニア燃焼 MGT 外観図

3-2-2 300kW MGT 発電システム

300kW アンモニア燃焼 MGT 評価を実施するため TE 製 300kW コージェネ用発電パッケージ (TPC300A) を改造した。300kW コージェネ用発電パッケージは内部にガスタービン本体及び同期発電機、減速機 (ガスタービン主軸回転数を発電機同期回転数に減速) を内蔵し、ガスタービン潤滑油系およびその冷却系統を搭載している。さらにガスタービンを制御する制御盤、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。

ガスタービンは TE 製 TG311 ガスタービンを使用している。本ガスタービンは単純開放サイクル 1 軸式ガスタービンで、遠心圧縮機 1 段に 2 段軸流タービンという構成となっており定格回転数 40000min⁻¹、定格軸出力 309kW、発電機端出力は 295kW である。ベースとなった MGT 諸元を表 1 に示す。

本パッケージにアンモニア供給系を追加し、新たに開発したアンモニア燃焼器を設置した。

表 1 MGT 諸元

シ ス テ ム		50kW機	300kW機
発電機出力		51kW	295kW
発電効率		25.5%	17.9%
総合効率		76.0%	83.0%
原 動 機	型式	再生サイクル 1軸式ガスタービン	単純開放サイクル 1軸式ガスタービン
	回転速度	80,000min ⁻¹	40,000min ⁻¹
	空気流量	0.49kg/sec (1,370Nm ³ /h)	2.3kg/sec (6,530Nm ³ /h)
	圧力比	3.6	6.4
	燃料消費量(13A)	17.8 Nm ³ /h	146.0 Nm ³ /h
発電機出力		高速発電機	同期発電機
廃熱回収機器		温水ボイラ	蒸気ボイラ

3-2-3 300kW アンモニア燃焼 MGT 用インフラ

今回の評価では MGT 設置スペースと MGT アンモニア消費量を考慮しアンモニア 50 t タンクを使用している。アンモニアは既設の蒸気式気化器によりアンモニアガスとして供給しているが、アンモニアガス供給圧力は 0.2~0.3MPa と低く、MGT 運転に必要なガス圧に昇圧するためガスコンプレッサが必要であった。ガスコンプレッサについては別項で示す。

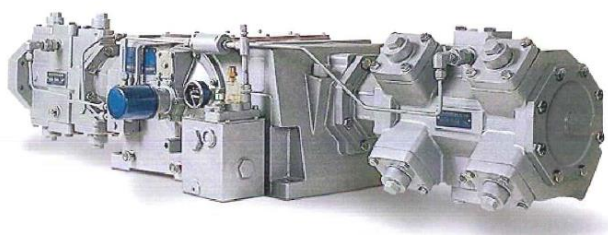
中部電力知多火力発電所内は火力発電所用燃料として高圧 LNG 供給設備が敷設されている。本評価では MGT 起動用燃料として本供給設備から供給される LNG を使用した。

また評価機設置場所の制約から系統連系が困難なため、今回の開発では発電した電力は負荷装置を用いて消費している。

知多火力発電所は工業地域であるが、敷地境界における排ガス騒音を規制値以下とするために MGT 排気消音器を設置した。

3-2-4 300kW 機向けアンモニアガスコンプレッサ

アンモニアガスコンプレッサは水平レシプロ式圧縮機をモータ駆動しており、300kW MGT において定格出力に必要なアンモニア流量 450Nm³/h を供給できる能力を有している。運転は圧縮機回転数を一定に保ち、吐出ガスを吸入側に戻すアンロード運転を行うことで流量制御をおこなっている。ガス温度をガスコンプレッサ許容温度以下に抑えるためガス冷却器を設置し、ガス吸入側圧力変動を抑える吸入スナッパ（圧力容器）とガス吐出側圧力変動を抑える吐出スナッパを設置してあり 300kW MGT 必要供給圧力である 0.8±0.05MPa の圧力でアンモニアガスを供給できる。またガスコンプレッサ制御盤を搭載しガスコンプレッサ運転のための冷却ファン制御、油圧、ガス圧力監視等を実施しており、異常があった場合はガスコンプレッサ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 MGT 保護を行っている。



ガスコンプレッサ本体（水平レシプロ式）



図 7 アンモニアガスコンプレッサ外観

3-2-5 300kW アンモニア燃焼 MGT 燃料供給系

300kW コージェネ機は通常都市ガスにより運転されているが、今回は火力発電用燃料に使用される LNG を起動用燃料として使用している。中部電力内 LNG 供給圧力は 5MPa と高圧であり、パッケージ内に内蔵される都市ガス用のガスコンプレッサは不要と判断し撤去し、かわりに MGT 必要燃料圧力である 0.8MPa まで減圧するため減圧弁を設置している。

アンモニア供給系については燃料低位発熱量が都市ガスの 1/3 程度と低く、ガスタービン定格出力を得るための必要熱量を確保するためには都市ガスの 3 倍のアンモニア流量が必要となる。このため燃料供給系配管径の見直しをはかり、またアンモニア燃料遮断弁およびアンモニア燃料制御弁容量も大型化した。また燃料遮断弁は防爆性も考慮し、エア作動（窒素動作）としている。また遮断弁および燃料制御弁は耐アンモニアを考慮したシールを採用している。アンモニア燃料制御をおこなう遮断弁、燃料制御弁はパッケージ内部に収納した。

3-2-6 300kW アンモニア燃焼 MGT 燃料制御

アンモニア燃焼 MGT はアンモニア単体における着火が困難なことからメタンを主成分とした LNG 等のガス燃料を用いて起動し、アンモニア燃焼可能な条件が確立したのちにアンモニア供給を開始、アンモニア割合を増加させて最終的に起動用ガス燃料を停止させてアンモニア専焼に至る。アンモニア燃焼 MGT を成立させるためには起動用燃料主体の制御からアンモニア主体の制御に切り替える必要があるが、切り替え時にガスタービンの回転変動や出力変動が発生することなく安定した制御移行をおこなった。またアンモニア供給設備やガスコンプレッサ異常、アンモニアガス漏れ等の異常によりシステムを停止させる保護機能を追加した。

3-2-7 300kW アンモニア燃焼器開発

アンモニア燃焼器評価については 50kW 機同様、STEP をおった開発を実施している。50kW 機は再生式ガスタービンであり再生器において予熱された状態で燃焼用空気が供給されるが、300kW 機はシンプルサイクルであり圧縮機で圧縮された空気温度が直接供給されるため 50kW 機と比較して燃焼空気温度が 200℃程度低い。燃焼空気温度が低いことからアンモニア燃焼に対してより難易度が高いことが推測された。試作した燃焼器の外観を図 8 に示す。

300kW オリジナル燃焼器改造機 (STEP0)

通常のコージェネ用ガス拡散燃焼器に通常の都市ガス (LNG) 系統にアンモニア系統を追加し LNG+アンモニア混合ガスを燃焼器内に供給している。ライナ冷却はフィルム冷却を採用している。本燃焼器において LNG+アンモニア混焼における運転を実施してガス供給系およびガスタービンの制御性を確認した。

300kW STEP1 燃焼器

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燃焼方式 (リッチリーン燃焼) を採用した燃焼器。LNG およびアンモニア個別噴射が可能である。また LNG+アンモニア混合ガス供給を行うこともできる。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。

300kW STEP2 燃焼器

STEP1 燃焼器同様にリッチリーン燃焼方式を採用した燃焼器であるが、冷却方式をフィルム冷却からインピンジメント冷却ライナに変更している。インピンジメント冷却による冷却空気量を考慮して希釈孔の微調整を実施している。本燃焼器において燃焼器内 1 次燃焼領域内への冷却空気量削減をはかり、1 次燃焼領域温度上昇をはかることでアンモニア燃焼性を向上させている。

300kW STEP3 燃焼器

300kW コージェネ用予混合燃焼器をベースにアンモニア燃焼用に変更した。本予混合燃焼器はパイロット燃料は拡散燃焼、プライマリー、セカンダリー燃料が予混合系統となっており、300kW アンモニア燃焼器もこれを踏襲しているが、当量比はアンモニア用に変更している。また燃焼器内滞留時間を増加させるためにこれまでの拡散燃焼器と比較して燃焼器内部容積を増加させている。冷却方式は無冷却ライナとなっている。

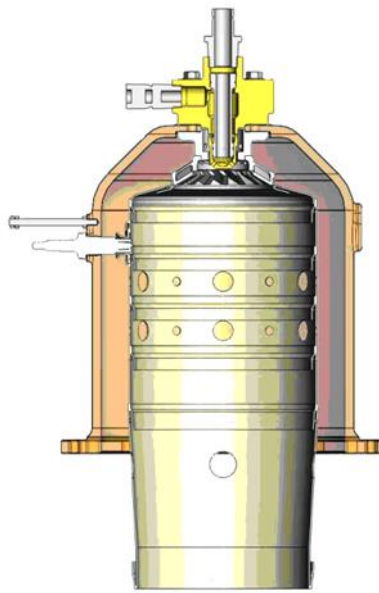


図 8 300kW アンモニア燃焼器

3-2-8 300kW 機向け脱硝触媒

300kW MGT の排気温度は $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ となっており、本温度帯で活性の得られる触媒を選定した。触媒はハニカム状に成型された触媒で 1 セルのサイズは $150\times 150\times t50$ となっており、本サイズセルを 8 個 $\times$ 8 個 $\times$ 9 段（合計 576 個）で構成した。触媒ユニットはメンテナンス性を考慮し横置き構成としており触媒を点検するため点検口を設けた。触媒はケーシング内部に 4 段を上流側に 5 段を下流側に配置してあり、触媒上流および触媒中段、触媒下流それぞれに排ガス濃度を測定するためサンプリングポートを設けた。脱硝触媒の外観を図 9 に示す。脱硝用アンモニアはパッケージ内でタービン排気出口配管中に供給した。

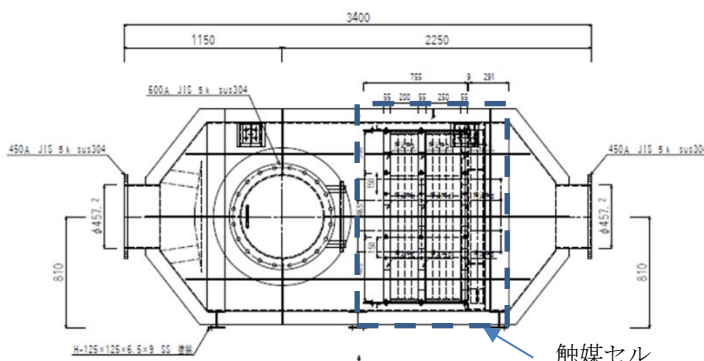


図 9 300kW 用脱硝触媒外観

3-3 まとめ

3-3-1 50kW 燃焼器開発

燃焼器による低 NOx を実現するために段階的な燃焼試験を実施した。試験結果を図 10 に示す。図 10 データは脱硝触媒入口部（燃焼器出口 NOx と同等）における排ガス計測結果を示している。STEP3 および STEP4 燃焼器において、SIP の達成目標としていた燃焼器出口 NOx（16%O₂ 換算）200ppm 以下を達成した。また亜酸化窒素（以下 N₂O）および未燃アンモニアは 3ppm 以下と非常に低い結果となった。MGT 出力に対する NOx 排出は MGT 出力 45～50kW で下限となった。

STEP1 燃焼器において燃焼器出口 NOx（16%O₂ 換算）は 400ppm であった。ライナ温度制限により MGT 運転範囲は 12～32kW となっている。また 2～5ppm の N₂O 発生がみられ、また高負荷領域で未燃アンモニア発生もみられることから、燃焼器内局所当量比が高めになっていることが推測された。

STEP2 について NOx（16%O₂ 換算）は 500～230ppm となり発電出力 28 kW 付近で低 NOx 領域がみられる。STEP1 と同様にライナ温度制限により出力は 32kW に制限されている。N₂O および未燃アンモニアはゼロ（計測値による検出下限以下）となっているが、N₂O については高出力側でわずかな増加がみられ、STEP1 と同様に局所当量比が高くなっていることが推測された。

STEP3 燃焼器において燃焼器出口 NOx 174～1000ppm 以上となっており発電出力 50kW 付近の出力域において低 NOx 領域が確認できた。N₂O および未燃アンモニアについては 2ppm 以下であった。

STEP4 燃焼器において燃焼器出口 NOx は 161ppm～1000ppm 以上となっており、また発電出力 50kW 付近で最低 NOx 値は 161ppm であった。N₂O や未燃アンモニアについても STEP3 と同傾向であった。

新たに開発した 50 kW アンモニア燃焼 MGT はパッケージ内に脱硝触媒を内蔵しており、パッケージ出口（触媒出口）における NOx 評価を行った。脱硝触媒は燃料系統から分岐した脱硝用アンモニアを供給することで脱硝反応をさせている。試験の結果 MGT 出力 48.6 kW において燃焼器出口 NOx 値 164ppm を触媒出口 NOx（16%O₂ 換算）25ppm まで低減させ、未燃アンモニアは計測器による検出下限以下となった。SIP の達成目標としていた大気汚染防止法の NOx 排出基準である 70ppm 以下を達成することができた。また東京都自治体が定める 35ppm 以下（1 種地域）についても達成することができた（表 2）。

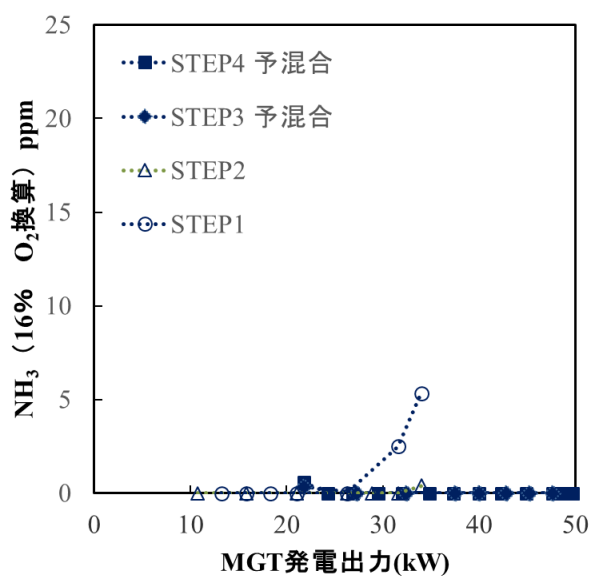
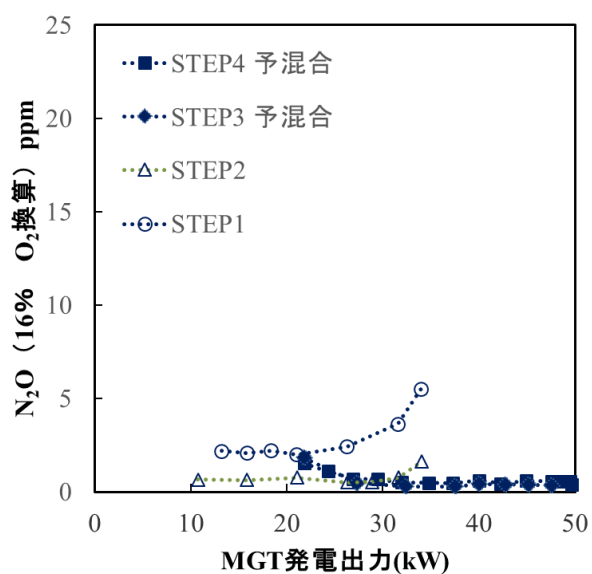
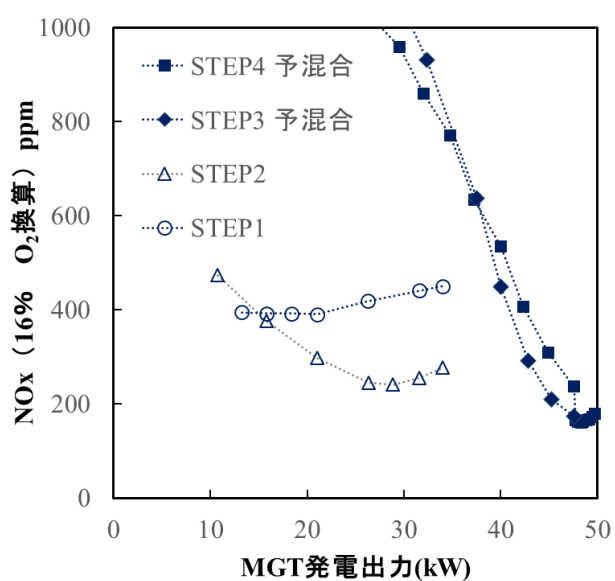


図 10 50kW アンモニア燃焼試験結果

表 2 50kW 脱硝触媒評価結果

項目		単位	結果
回転数		min-1	80000
MGT出力		kW	48.6
触媒入口温度		°C	258
触媒入口	NO x	ppm-O2 (16%)	164
	NH3	ppm	0
触媒出口	NO x	ppm-O2 (16%)	25
	NH3	ppm	0

3-3-2 50kW アンモニア燃焼 MGT 新パッケージ開発

50kW アンモニア燃焼 MGT 新パッケージを開発した。新パッケージはこれまで開発してきたアンモニア燃料供給系とアンモニア燃焼器、脱硝触媒を追加し、アンモニア燃焼 MGT 専用構成としたものである。50kW エンジン本体および新パッケージ組付けをおこない、TE 社内において試運転を実施したのち、産総研内のアンモニア実証フィールドに設置をおこなった。MGT 設置はこれまで試験してきた 50 kW アンモニア燃焼 MGT を新 MGT に載せ替える形で実施した。(図 11)。

アンモニア燃焼 MGT について市場性の観点からメタン等ガス燃料起動をおこなうシステムに変更した。メタン起動からアンモニア専焼に至り、再びメタン混焼として停止するまでの MGT 運転シーケンスを図 12 に示す。メタンガスを用いて着火起動後、エンジン回転数 50000min⁻¹ にてアイドル運転を行ったのち 62500min⁻¹ から発電インバータを作動させ発電を開始する。発電出力を上げながら 75000min⁻¹ まで回転数上昇を行ったのち、発電出力 20 kW からアンモニア供給を開始した。アンモニア供給から回転数と出力を保ちながら起動用メタンを減少させる。その後発電出力を上昇させて最終的にメタン系統遮断弁を閉止させることでメタン供給を停止し、アンモニア専焼運転となる。発電出力を 50kW まで上昇させて運転を行った。停止時は発電出力を 20 kW まで低下させ、再びメタン供給を開始するが、今回の設備では安全性および機器保護の観点からアンモニア系統に窒素を吹きながらメタン燃焼させアンモニア配管中の窒素置換をおこなっている。窒素置換終了後、クーリング運転を実施してシステムを停止させるシーケンスを実施している。今回開発した 50kW アンモニア燃焼 MGT はアンモニア供給開始から専焼まで自動的に移行させることが可能となった。またアンモニアからメタン燃料への制御移行についても自動的に行うことができた。現状窒素置換については手動操作が必要だが、必要に応じて自動化を検討する。あわせて LAN インフラを用いることで遠隔地から起動、停止、燃料切り替え（メタン、アンモニアの切り替え）運転も可能となった。

今回開発した 50kW アンモニア燃焼 MGT では脱硝触媒として低温触媒を採用したが、将来的には 50kW アンモニア燃焼 MGT において高効率触媒（高温作動触媒）を搭載することで触媒使用量を減少させ、さらなるシステム小型化が期待できる。

本評価では産総研福島において再生可能エネルギー由来の電力から水を電気分解して得た水素から製造した CO₂ フリーアンモニアを用いて発電試験を実施し、50kW の発電出力を与えることができた[1]。



産総研アンモニア実証フィールド



図 11 新 50kW アンモニア燃焼 MGT 設置状況

50kWアンモニア燃焼タービン運転

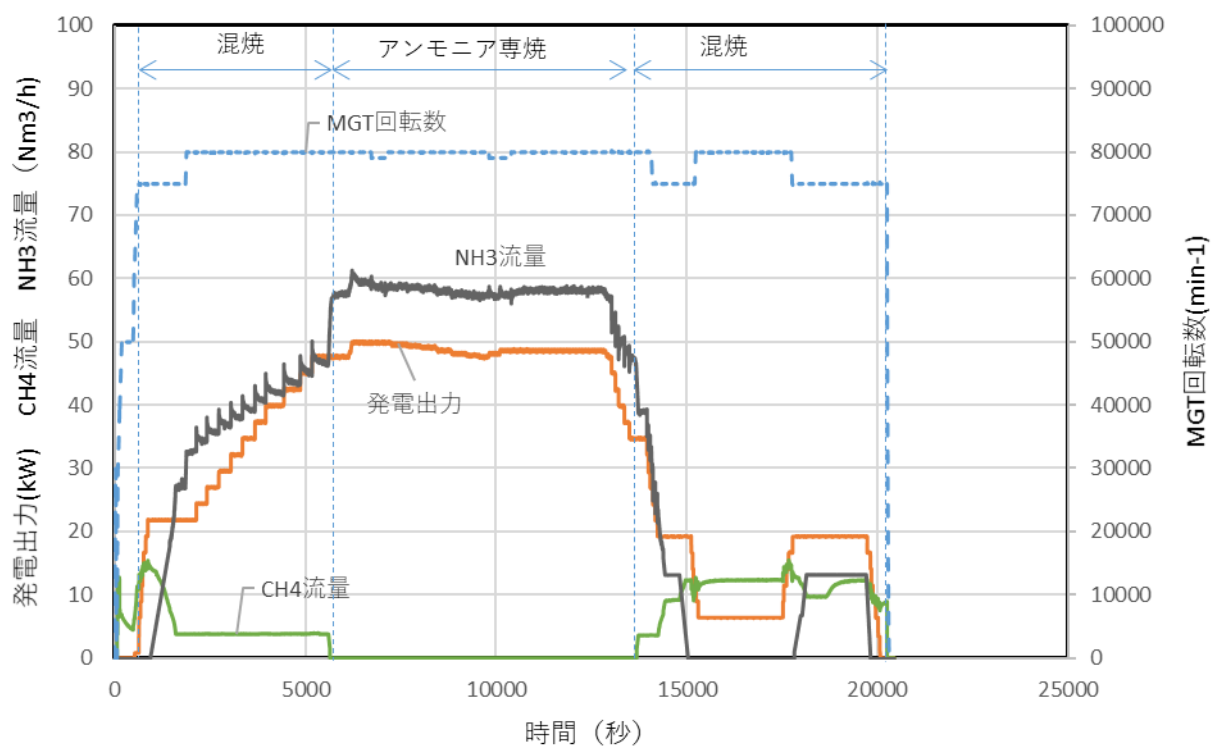


図 12 新 50kW アンモニア燃焼 MGT 運転シーケンス

3-3-3 300kW アンモニア燃焼 MGT 開発

中部電力知多火力発電所内のアンモニア供給設備に 300kW アンモニア燃焼 MGT、アンモニアガスコンプレッサ、300kW MGT 用脱硝触媒、排気サイレンサーを設置し、アンモニア燃焼評価を実施した。300kW MGT 内に起動用 LNG 燃料系統、アンモニア燃料系統を追加し、試作したアンモニア燃焼器の燃焼性を評価しながら開発をおこなった。

試験結果を表 3 に示す。試験開始時 STEP0 燃焼器では 36%程度の混焼率（LNG：63.8% アンモニア：36.2% 比率は熱量比）であったが、STEP を進めるごとに混焼率が向上し STEP3 燃焼器を用いることで発電出力 261 kW においてアンモニア混焼率 89.7%（LNG：10.3% アンモニア：89.7% 比率は熱量比）となり、SIP の達成目標としていた 50%混焼以上を達成した。また触媒出口 NOx についても 43ppm と大気汚染防止法規制値 70ppm 以下を達成した。300kW MGT 定格出力である 295 kW 領域においても混焼率 82.4%を達成しており触媒出口 NOx についても 2.2ppm 以下と良好な結果であった。

表 3 300kW アンモニア燃焼 MGT 評価結果

No.	計測項目		記号	単位	10/9	12/24	12/24
					STEP0	STEP3	STEP3
1	MGT吸気温度	T0	°C		28	12	11
2	エンジン回転数	N1	min-1		39750	39745	39700
3	発電機出力	Pac	kW		294	295	261
4	タービン出口温度	T6	°C		507	428	408
5	LNG流量		Nm3/h		100	26	15
6	アンモニア流量		Nm3/h		160	340	365
7	LNG割合(低位発熱量ベース)⇒				63.8%	17.6%	10.3%
8	NH3割合(低位発熱量ベース)⇒				36.2%	82.4%	89.7%
9	触媒出口	O2濃度		%	16.36	17.35	17.52
10		NOx濃度		ppm	7	2	43
11		CO2濃度		%	1.69	0.42	0.3
12		CO濃度		ppm	110	41	58
13		N2O濃度		ppm	0	8	12

3-4 今後の課題

今回のプロジェクトによりアンモニア専焼によるガスタービン運転が可能であり、また燃焼方法によりアンモニアに起因するフューエル NOx 低減が可能なが示された。また脱硝触媒と組み合わせることにより大気汚染防止法の排出基準以下に NOx を低減させ、商用機として実用性が高いことが確認できた。今回の評価では十分な運転時間が確保できなかったことから以下の評価が必要となる。

- ・アンモニア燃焼 MGT 用燃焼器の耐久性評価。
- ・アンモニア燃焼によるタービン等耐熱材料や再生器への影響評価。
- ・脱硝触媒の触媒活性低下や腐食により経年的な劣化評価。

さらに商品性向上のため以下の課題がある。

- ・現状は起動用燃料が必要であるが、システムが複雑になるためアンモニアシングルフューエル起動によるシステム簡素化。
- ・今回の評価では既設アンモニア供給設備を用いることで評価を行ったが、アンモニア供給設備、アンモニア除害装置、排熱回収装置等、ガスタービンシステムトータルでの最適化。
- ・アンモニア燃焼ガスタービンの安全性の確認し、高圧ガス保安法等の規制緩和による運転監視低減。
- ・CO₂ フリーアンモニア入手と CO₂ フリーアンモニアによる CO₂ 低減発電体制の構築。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 2件

1. O. Kurata, N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, 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>>
2. O. Kurata, N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Rich-lean Low-NO_x Combustor for Micro Gas Turbine Firing Ammonia Gas, Proceedings of the Asian Congress on Gas Turbines, ACGT 2018-TS81, 1-5(2018)

<査読なし(総説等含む)> 2件

1. 壹岐典彦, 倉田修, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀, 河野雅人, 新井啓介, Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭, 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, B-9, 1-4(2018)
2. 倉田修, 壹岐典彦, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀, 河野雅人, 新井啓介, Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭, 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

<口頭発表> 国内2件、海外2件

1. O. Kurata, N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Rich-lean Low-NO_x Combustor for Micro Gas Turbine Firing Ammonia Gas, the Asian Congress on Gas Turbines ACGT2018, ACGT 2018-TS81, 2018/8/24
2. 壹岐典彦(産総研), 倉田修, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀, 河野雅人, 新井啓介, Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭, 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
3. O. Kurata, N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Development of low-NO_x combustor of micro gas turbine firing ammonia gas, 2018 AIChE Annual Meeting, 2018/10/31
4. 倉田修(産総研), 壹岐典彦, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀, 河野雅人, 新井啓介, Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭, 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1件、海外2件

1. N. Iki (AIST), O. Kurata, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, H. Kobayashi, A. Hayakawa, E. C. Okafor, M. Kawano, K. Arai, Research of ammonia combustor for micro gas turbine power generation and high temperature resistance of materials, 37th International Symposium on Combustion, 2018/7/31
2. 壹岐典彦 (産総研), 倉田修, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀, 河野雅人, 新井啓介, Ekenechukwu Chijioke Okafor, 早川晃弘, 小林秀昭, 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
3. O. Kurata (AIST), N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, 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 件、海外1件

1. O. Kurata (AIST), N. Iki, T. Inoue, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Development of an ammonia-burning gas turbine power generation, IEA Combustion agreement, 40th Task Leaders Meeting, 2018/6/13

(3) プレス発表

とくになし

(4) マスメディア等取材による公表

とくになし

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	特願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
3				
4				
5				
6				
7				

6. 参考文献

[1] 日揮株式会社：プレスリリース 2018年10月19日

題名：再生可能エネルギー由来の水素を用いたアンモニア合成と発電に世界で初めて成功

<https://www.jgc.com/jp/news/assets/pdf/20181019.pdf>