

液体アンモニア直接噴霧燃焼ガスタービンの開発

Development of Liquid Ammonia Direct Spray Combustion Gas Turbine

内 田 正 宏 技術開発本部技術基盤センターエネルギー変換グループ 主査 博士（工学）
伊 藤 慎太郎 技術開発本部技術基盤センターエネルギー変換グループ 博士（工学）
須 田 俊 之 戦略技術統括本部戦略技術プロジェクト部 主幹 博士（工学）

ガスタービンにおいて液体アンモニアを燃焼器内に直接噴霧する燃焼技術を開発した。実証試験の結果、混焼率70%まで排出ガス中の有害物質の濃度を抑制して液体アンモニアの燃焼が可能であることが証明された。ガスタービン運転において、未燃アンモニア（ NH_3 ）と亜酸化窒素（ N_2O ）の排出は微量であり、環境への影響、ガスタービン運用への影響は軽微であることを確認した。

Liquid ammonia direct spray combustion technology was developed to use ammonia as fuel for gas turbines. As a result of the verification test, it was demonstrated that it is possible to burn liquid ammonia by suppressing the concentration of harmful substances in the exhaust gas up to a co-firing ratio of 70%. Regarding emissions, it was confirmed that the emissions of unburned ammonia (NH_3) and nitrous oxide (N_2O) were below the regulation values, and the impact on the environment and gas turbine operation was minor.

1. 緒 言

地球環境の保全のため、脱炭素に向けた取り組みがさまざまな分野で行われている。電力分野では、太陽光と風力に代表される再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいるが、火力発電は需給調整による電力系統の安定化のために依然として重要である。なかでもガスタービンは負荷変動への追従性に優れており、今後も継続して利用されることが想定される。したがって、このガスタービンの燃料をカーボンニュートラルな燃料に転換することは、二酸化炭素（ CO_2 ）排出量の削減と電力系統の安定化に同時に貢献することとなる。

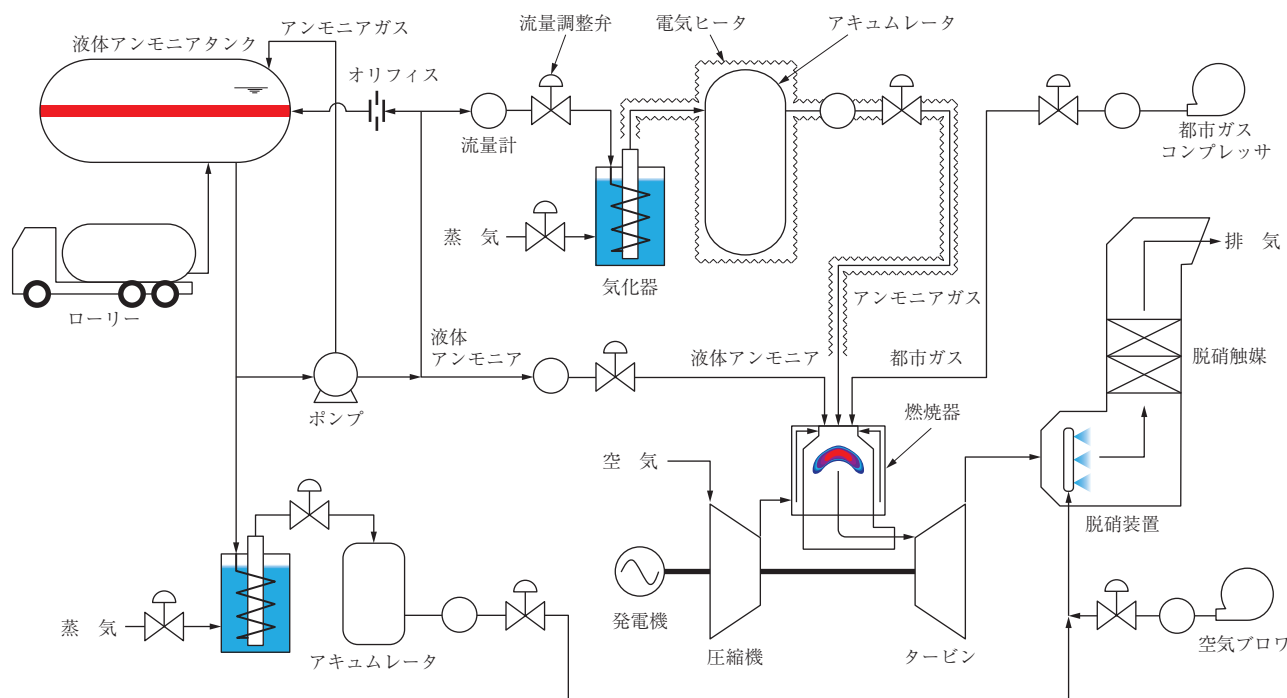
カーボンニュートラルな燃料の代表として、水素が挙げられる。しかし、水素は燃焼性に優れるものの、その熱物性に起因して輸送・貯蔵が困難な特徴がある。そこで内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）エネルギーキャリア⁽¹⁾では、水素を輸送するエネルギーキャリアとして、液体水素、メチルシクロヘキサン、アンモニアの3種類に着目し、有用性や課題の比較検討、関連する技術開発が実施された。このなかでアンモニアは液化が容易で輸送や貯蔵に適しており、その技術がすでに確立されている点に利点がある。また、アンモニアは可燃性であり、脱水素化せずに炭化水素の代替燃料として直接燃焼させることができる利点もある。その一方で、アンモニアは

燃焼性が低く、劇物で取扱いに注意が必要であり、燃焼時に燃料に含まれる窒素原子由来の Fuel- NO_x が生成しやすい特徴もある。これらの課題を克服し、その利点を活かして燃料としての利用を促進するため、基礎燃焼特性の解明や燃焼技術の開発が進められている⁽²⁾。

アンモニアを発電用ガスタービンで燃焼する際の主要な供給方法として、アンモニアガス方式、液体アンモニア直接噴霧方式の二つの方法が想定される。アンモニアは常温の条件では約 0.8 MPa で相変化するため、燃焼器圧力が大気圧程度であれば、アンモニアを気化してから燃焼させることが通常となる。一方で、ガスタービンは加圧機関であり、燃焼器圧力は高压となる。一般的に、中大型ガスタービンでは燃焼器圧力が 0.8 MPa 以上となるため、アンモニアを液体のまま安定して噴霧できる。このアンモニアの特長を活かし、従来実施してきたアンモニアガスを天然ガスに混焼する技術⁽³⁾を発展させ、アンモニアを液体のまま燃焼器内に直接噴霧して燃焼させる技術開発を行った。本稿では、液体アンモニアおよびアンモニアガスによる燃焼方式の特徴やガスタービンを使用した実証試験結果について報告する。

2. 試 験 装 置

アンモニア燃焼ガスタービン実証試験設備のシステムフロー概略図を第1図に示す。本設備は主に都市ガスコン



第 1 図 システムフロー概略図
Fig. 1 System flow diagram

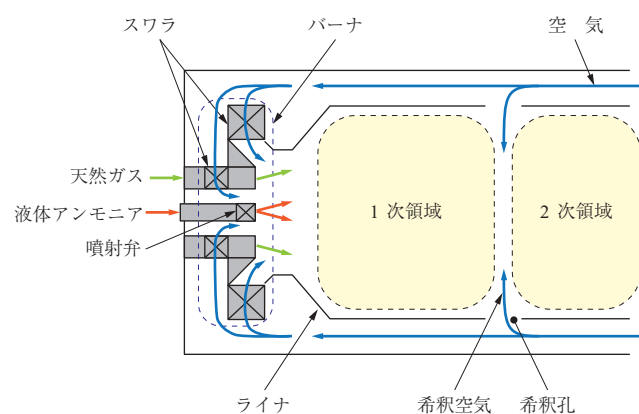
プレッサ、アンモニア供給装置、IM270 ガスタービン、脱硝装置から構成される。アンモニア供給装置は、液体アンモニアを貯蔵するアンモニアタンクから、脱硝用アンモニアガスおよび燃料用のアンモニアガス、液体アンモニアを供給する設備である。燃料用の供給システムについては、比較のためガス・液体の両系統を併記した。燃料用のアンモニアガス供給システムは、液体アンモニアを加圧するポンプ、アンモニア気化器およびアキュムレータから構成される。アンモニアガスの供給では、液体アンモニアをポンプで加圧し、流量調整を行ったうえで気化器に供給して、温水熱により気化させる。気化後のアンモニアは、圧力を安定させるためのアキュムレータをとおしてガスタービンに供給される。供給方法の特徴として、アンモニアを液体のまま加圧するため、気体の状態で加圧する場合に比べて加圧動力が小さい点や、アンモニアは比較的低温の熱源で気化できる点が挙げられる。また、燃焼挙動に関しては蒸発潜熱の影響を受けないため、基礎燃焼特性の解明やガスタービンでの利用に向けた燃焼技術の開発が比較的容易であるという利点がある。一方で、アンモニアを気化させるためには、比較的低温であるが熱源が必要となる。また、気化器下流のアンモニアガスは周囲への熱損失により再液化する可能性があるため、配管およびアキュムレータに電気ヒータを利用した保温が必要となる。

ガスタービンにおけるアンモニアガス燃焼を行うために

は、供給量に応じて気化器やアキュムレータを大型化もしくはは並列化し、供給能力を確保する必要がある。これに対し、液体アンモニア直接噴霧方式では、加圧した液体アンモニアを流量制御し、燃焼器内に直接噴霧する。この方法ではアンモニアガス方式で必要となるアンモニア気化器、アキュムレータが不要であり、シンプルな供給系でガスタービンに供給することが可能である。また、アンモニア供給能力はポンプの能力のみに依存するため、アンモニア供給量を増加させるためのコストを低減できることがメリットとなる。このほかにもガスタービン運用のメリットとして、アンモニア気化器の暖気が不要であり、供給開始までの準備時間を大幅に短縮できる点も挙げられる。また、ガスタービンの急速な負荷変動への対応能力は、アンモニアガス供給方式ではアキュムレータ容量に依存するが、液体アンモニア直接噴霧方式ではポンプや流量調整弁の制御で調整可能であり、対応が容易である点もメリットである。このような特徴から液体アンモニア直接噴霧方式は、DSS (Daily Startup and Shutdown) 運用や負荷変動調整で使用される中小型ガスタービンに適した供給方法である。一方で、その燃焼挙動については、燃焼器内で液体アンモニアが蒸発するため、局所的な火炎温度の低下による失火が懸念される。さらに蒸発潜熱の影響によりタービンに流入する燃焼ガスの温度が低下し、ガスタービンの効率低下などが課題となる。

実証試験に使用したガスタービンは 2 MW 級の IHI 製 IM270 ガスタービンである。ガスタービン本体について、開発の対象となるのは燃焼器のみであり、コンプレッサおよびタービンは既存の商用機と同じものを使用している。燃焼器開発については、安定燃焼の実現と窒素酸化物 (NO_x) 排出量の低減を両立する燃焼器設計が要求される。このような条件を満たす燃焼方法としてリッチ・リーン二段燃焼方式が有効であることが確認されており⁽²⁾、⁽⁴⁾、この燃焼方式を 2 MW 級ガスタービン用燃焼器へ適用した。第 2 図に開発した燃焼器の概略図を示す。このガスタービンでは、ターンフロー型の単缶型燃焼器を採用しており、コンプレッサで圧縮された燃焼用空気はライナ外側の流路から供給される。この燃焼用空気のバーナとライナ希釈孔への流量配分を調整することにより、燃焼器の 1 次、2 次領域での燃料と空気の混合比を調整して二段燃焼を行う。燃料はすべて 1 次領域に供給した。アンモニアを液体燃料として利用すると、その重量当たりの発熱量に対する蒸発潜熱の割合が、灯油などの炭化水素系液体燃料に比べて大きい。このような条件でも安定燃焼を行い、未燃 NH_3 の排出を抑制するため、バーナのスワラには強旋回を実現するスワラ構造を採用し、燃料噴射位置などの調整を行った。また、 NO_x の低減に重要となる 1 次領域への空気配分については、従来のアンモニアガスを燃焼させるための燃焼器から液体アンモニア直接噴霧燃焼に最適な燃焼器へ設計を変更した。

ガスタービンを利用した実証試験では、発電出力を 2 MW に固定した条件で、天然ガスとアンモニアの混焼比率を変化させ、性能測定を行った。ガスタービン試験におけるエミッションは、タービン出口および脱硝装置出口



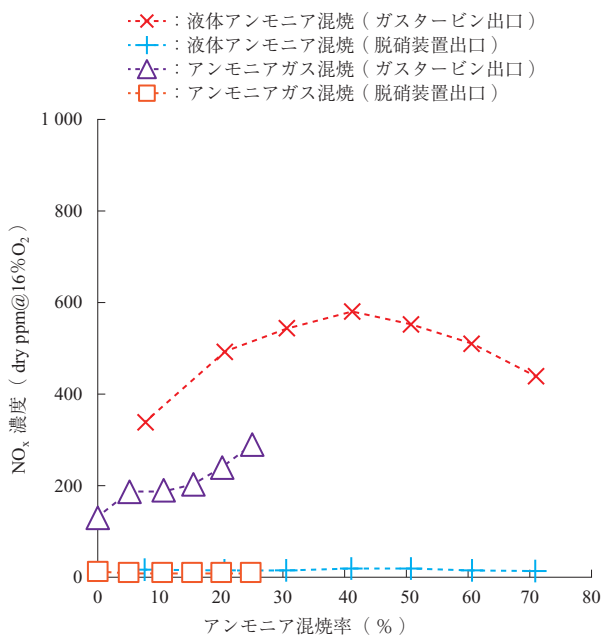
第 2 図 開発した燃焼器の概略図
Fig. 2 Developed combustor schematics

で燃焼ガスをサンプリングして評価した。アンモニア燃焼の性能評価では、一般的な排ガス分析計で計測される排ガス成分以外に、未燃 NH_3 や亜酸化窒素 (N_2O) が排出される可能性がある。 N_2O は排出規制では NO_x に含まれるが、 CO_2 の約 300 倍の温暖化係数をもつ物質であるため、アンモニア燃焼ガスタービンの温室効果ガス (Greenhouse Gas: GHG) の排出量削減効果を正確に計測するためには、濃度測定が必須となる。そこで排ガス成分の評価では、NDIR 分析計 (Non-Dispersive InfraRed spectroscopy) と QCL-IR 分析計 (Quantum Cascade-Laser InfraRed spectroscopy) を同時に使用して濃度計測を実施した。前者では酸素 (O_2)、一酸化炭素 (CO)、 CO_2 、THC (Total Hydro Carbon) の濃度を計測し、後者では一酸化窒素 (NO)、二酸化窒素 (NO_2)、 N_2O 、 NH_3 の濃度を計測した。

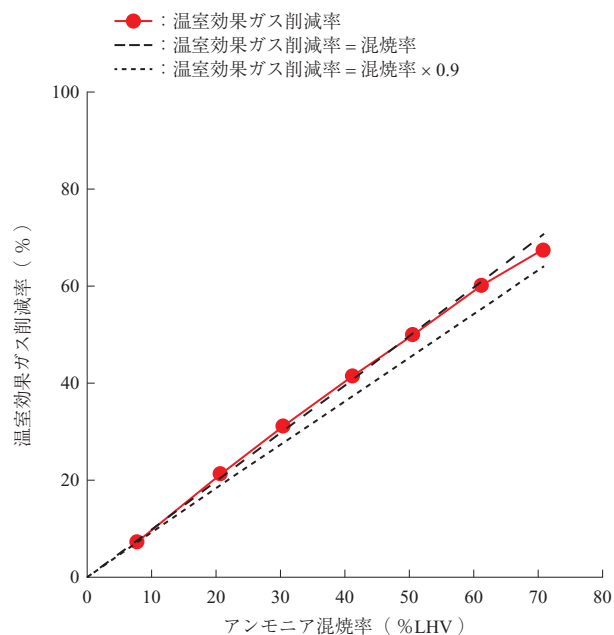
3. 試験結果

2 MW 級ガスタービンを利用した発電実証試験の結果、混焼率 70% まで排出ガス中の有害物質の濃度を抑制して液体アンモニアの燃焼が可能であることを実証した。ここでアンモニア混焼率は、低位発熱量から算出したアンモニア投入熱量の全燃料 (アンモニア + 天然ガス) の投入熱量に対する比率として定義した。

アンモニア混焼率の NO_x 濃度への影響を第 3 図に示す。ガスタービン試験で得られたアンモニア混焼率とガスタービン出口および脱硝装置出口における排出ガス中の NO_x 濃度の関係を表している。 NO_x 濃度は、 NO 、 NO_2 および N_2O 濃度の和である。また、比較のため、アンモニアガスを混焼した場合の計測結果⁽³⁾ についても示した。 NO_x 濃度はアンモニア混焼率の増加に対して単調に増加し、混焼率 40% で極大となった後、低下する傾向にある。このような NO_x 濃度の傾向が表れるのは、アンモニア燃焼領域における温度の影響によるものである。アンモニア混焼率が増加すると、燃焼器内に供給されるアンモニアの量は単調に増加する。アンモニアの供給量が増加すると、アンモニアの火炎温度は天然ガスよりも低いため、アンモニアの燃焼領域における火炎温度は低下する。温度の低下により、燃焼時にアンモニア中の窒素原子が窒素 (N_2) と NO_x に転換される割合が変化するため、 NO_x 濃度が極大となる条件が発生する。混焼率 25% までの限られた条件ではあるが、液体アンモニアとアンモニアガスの燃焼の比較では、全体的に液体アンモニア燃焼で NO_x 濃



第 3 図 アンモニア混焼率の NO_x 濃度への影響
 Fig. 3 Effect of ammonia mixing ratio on NO_x emission



第 4 図 アンモニア混焼率の GHG 削減率への影響
 Fig. 4 Effect of ammonia mixing ratio on GHG reduction ratio

度が高い傾向にある。これは液体アンモニアとアンモニアガスで空気と燃料の混合状況が異なることに起因すると考えられる。脱硝装置出口の NO_x 濃度については、実証試験装置に付属する脱硝装置で十分に処理することが可能で、環境基準に適合することが確認できる。

未燃 NH₃ 濃度の計測結果については、ガスタービンの高圧燃焼条件では未燃分の排出が抑制されるため、いずれの条件においても、未燃 NH₃ 濃度は 5 ppm 以下であった。この排出濃度は規制値よりも低く、ガスタービンでのアンモニア燃焼による周辺環境への影響は軽微である。

GHG 削減効果をより定量的に評価するために重要な N₂O 濃度については、液体アンモニア直接噴霧燃焼では微量の濃度が確認された。これは燃焼器内で液体アンモニアが蒸発することにより火炎温度が低下し、N₂O の生成しやすい低い火炎温度となる領域があることが原因である。アンモニア混焼率の GHG 削減率への影響を第 4 図に示す。液体アンモニア混焼率が 70% の条件では、天然ガスの消費量が 70% 削減されるため、理想的には 70% の GHG 削減効果が得られることになる。実際の GHG 削減率を N₂O および未燃 NH₃ が排出される影響を加味して計算した結果、混焼率 70% の条件で 68% 以上の結果となった。現状の排出濃度のレベルであれば高い GHG 削減効果が得られることが確認された。

4. 結 言

ガスタービンにおけるアンモニアの燃料利用の拡大による GHG 削減効果への貢献を目標として、液体アンモニアを燃焼器内に直接噴霧する燃焼技術を開発した。液体アンモニアを利用する場合、アンモニアガスを用いるよりも供給系が簡略化でき、制御性が良い点がメリットとなる。ガスタービンを使用した実証試験の結果、混焼率 70% まで排出ガス中の有害物質の濃度を抑制して液体アンモニアの燃焼が可能であることを実証した。エミッションについては、高混焼率条件で僅かに未燃 NH₃ と N₂O の排出が認められるが、排出基準値以下の濃度であり、環境への影響、ガスタービン運用への影響は軽微である。また、N₂O の排出による GHG 削減効果への影響も小さいことが確認された。一方で、GHG 削減に対する社会的要求はさらに強まりつつあり、ガスタービンからの GHG 排出をゼロに近づける 100% アンモニア専焼ガスタービンが将来的に求められる。このためには液体アンモニアをより安定して燃焼させ、エミッションを抑制する燃焼器が必要となる。今後は 100% 液体アンモニア専焼ガスタービンの実現を目指してさらに開発を進めていく所存である。

— 謝 辞 —

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16002) の結果

得られたものです。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 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ホームページ, <https://www.jst.go.jp/sip/k04.html>, (参照 2021. 5. 28)
- (2) H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne and E. C. Okafor : Science and Technology of Ammonia Combustion Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 37, No. 1, 2019, pp. 109 - 133
- (3) 伊藤慎太郎, 内田正宏, 須田俊之, 藤森俊郎 : 2 MW 級ガスタービンによるアンモニア / 天然ガス混焼発電実証試験, 日本燃焼学会誌, Vol. 61, No. 198, 2019 年, pp. 289 - 292
- (4) S. Ito, M. Uchida, T. Fujimori and H. Kobayashi : NO_x Emission of Two-stage Combustor for Ammonia/ Natural Gas Co-Fired Gas Turbine, 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, July 2019, Paper No. 1 279