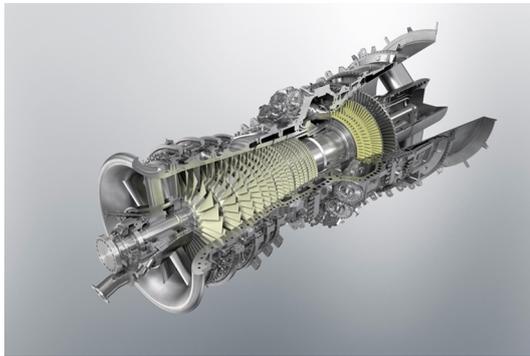


水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発

Research and Development on Gas Turbine Capable of Hydrogen Co-firing



井上 慶*¹
Kei Inoue

宮本 健司*²
Kenji Miyamoto

道免 昌平*²
Shohei Domen

田村 一生*³
Issei Tamura

川上 朋*⁴
Tomo Kawakami

谷村 聡*⁵
Satoshi Tanimura

水素エネルギーの導入による脱化石燃料化は、経済活動の持続的な発展のために欠かせない有力な選択肢である。そこで、三菱重工グループ(以下当社)では、天然ガスと水素の混合燃料を適用可能な大型ガスタービンの研究開発を、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)のご支援を頂きながら進めている。現在、新たに開発した燃焼器(バーナー)などにより、水素30vol%の混焼試験に成功した。水素30vol%の混焼により、従来の天然ガス火力発電と比較して、発電時のCO₂排出量を約10%低減することが可能となる。

1. はじめに

経済活動を持続的に継続する為には、安定的かつ環境負荷の低いエネルギーを確保・供給することが不可欠である。地球温暖化、また化石燃料の枯渇等の課題に対し、再生可能エネルギーの導入・普及に対する最大限の加速と、環境負荷に最大限配慮した化石燃料の有効活用等が求められている。また、将来の二次エネルギーとして、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担うことが期待されており、当社ではこのような水素を本格的に利活用する技術の開発を進めている。

再生可能エネルギーの導入については、例えば、風力発電の導入量は、世界では2011年以降40.5GW/年のペースで増加しており、2030年には最大2500GW程度まで拡大するとの予測もある。再生可能エネルギーは出力変動が大きいと、再生可能エネルギー発電設備の増大とともに、余剰電力量の活用が一つの課題となると考えられる。このような余剰電力量の有効利用には、蓄電池あるいは水素等への変換によるエネルギー貯蔵技術が必要であり、特に変動周期が長く、多くのエネルギー容量が必要とされる場合は、水素等に変換して利用することが有効であると考えられる。

水素燃料による有望な発電方式の一つに、ガスタービンによる発電があげられる。現在のガスタービンは、一般に汎用品として流通している天然ガスを燃料に使用している。天然ガスの燃焼時に発生するCO₂は、地球温暖化の要因の一つと考えられているため、世界的にその排出量を規制する動きがある。水素の燃焼はCO₂の発生を伴わないため、燃料中の炭化水素成分の一部を水素に置き換えることにより、発電に伴って発生するCO₂の量を低くすることができる。

*1 総合研究所 燃焼研究部 工博

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT技術総括部大型ガスタービン技術部

*3 総合研究所 燃焼研究部

*4 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT技術総括部大型ガスタービン技術部 主席チーム統括

*5 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT技術総括部大型ガスタービン技術部 主幹技師

当社における水素含有燃料に関する適用実績を図1に示す。オフガス(製油プラント等で発生する排ガス)の燃料利用により幅広い水素含有割合の燃料に関する実績を有するとともに、World Energy NET WORK への参画の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。しかし、これらはいずれも小規模な発電設備での実績であり、発電分野における水素の本格導入を実現するためには、現在の天然ガス程度に、大規模かつ高効率なエネルギーへの変換手段が必要となる。

そこで当社では、水素インフラ導入期の天然ガスと水素を混焼可能な大型ガスタービンの開発を推進中である。本稿では、水素混焼を可能とする技術開発の概要および今後の展望について述べる。

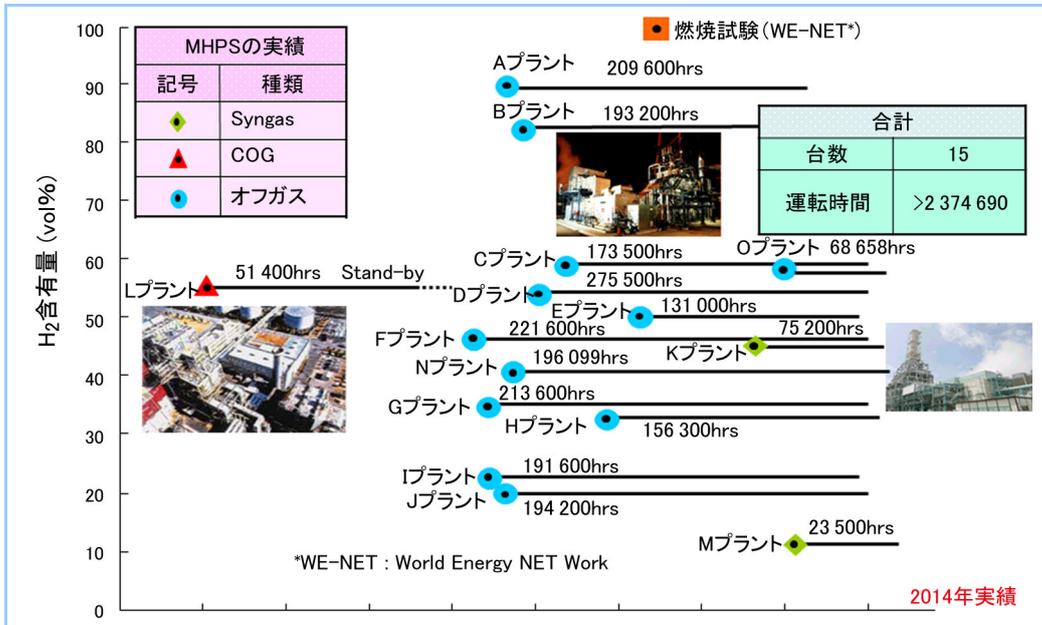


図1 当社における水素含有燃料の適用実績

2. 水素混焼の課題

当社の大型ガスタービンに搭載されている Dry Low NOx(DLN)燃焼器では、NOx(酸性雨の原因となる窒素酸化物)を低減する為に予混合燃焼方式を採用している。予混合燃焼器と、拡散燃焼器の比較を図2に示す。予混合燃焼は拡散燃焼に比べて火炎温度を低減できるため、蒸気・水噴霧なしで NOx の低減が可能であり、現在、低 NOx 燃焼器に広く適用されている技術である。一方で、従来の拡散燃焼器に比べて安定燃焼範囲が狭く、逆火(フラッシュバック)現象が発生し易い傾向がある。逆火とは、流体の速度(以下流速)よりも火炎の進む速度(以下燃焼速度)が高い際に、流体中を火炎が遡上する現象であり、ガスタービン燃焼器の内部で発生した場合は、上流の無冷却部を焼損する可能性があるため、その発生を防止する事が重要である。逆火現象の概要を図3に示す。

形式	拡散燃焼方式	予混合燃焼方式
構造		
燃焼特性	<ul style="list-style-type: none"> 燃料と燃焼用空気を別々に噴射 高温スポットが生じやすい (NOx高) 火炎の位置が安定 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料は空気と混合され噴射 高温スポットが生じにくい (NOx低) 火炎の位置が不安定：フラッシュバック
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 燃料性状変動への許容範囲が大きい 燃料系統が簡素 NOx対策(蒸気/水噴射)による性能低下 	<ul style="list-style-type: none"> 高効率と低NOx化を両立 燃料系統が複雑

図2 拡散燃焼方式と予混合燃焼方式の比較

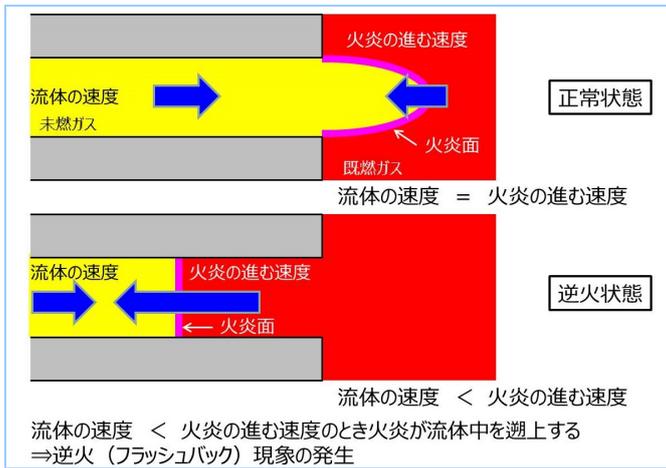


図3 逆火現象の概要

天然ガスと水素を混焼させた場合、燃料成分の変化により火炎の性質が変化する。特に、ガスタービンを安定的に運転する為には、燃焼速度の変化に対応する技術の開発が必要となる。水素は天然ガスと比較して燃焼速度が高いことが確認されている。このため、水素を混焼させた場合は、天然ガスのみを燃焼させた場合と比較して、逆火現象の発生リスクが高くなると考えられる。したがって、水素混焼ガスタービンの開発においては、逆火発生の防止にむけた燃焼器の改良が課題となる。

当社のDLN燃焼器内部では、燃料と空気の混合を促進する為に旋回流が形成されている。このような旋回流中において逆火の発生を防止する為には、火炎の進む速度の上昇分以上に旋回流の中心部における流速を上昇させる必要があることが、複数の論文⁽¹⁾⁽²⁾において報告されている。

3. 逆火防止技術の概要

3.1 新型燃焼器のコンセプト

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防ぐことを目的として、新たに開発した燃焼器の概要を図4に示す。燃焼器内部に圧縮器から供給された空気は、旋回翼(スワラー)を通過することで、旋回流となる。燃料は、スワラーの翼表面に設けられた小さな孔より供給され、旋回流の効果で急速に周囲の空気と混合される。一方で、旋回流の中心部(以下渦芯)には、流速の低い領域が存在することが明らかとなっている。旋回流中での逆火現象は、この渦芯に存在する流速の遅い部分を火炎が遡上する事で発生すると考えられる。新型燃焼器では渦芯の流速を上昇させる為、ノズルの先端から空気を噴射する事を特徴としている。噴射された空気は、渦芯の低流速領域を補い、逆火の発生を防止する。

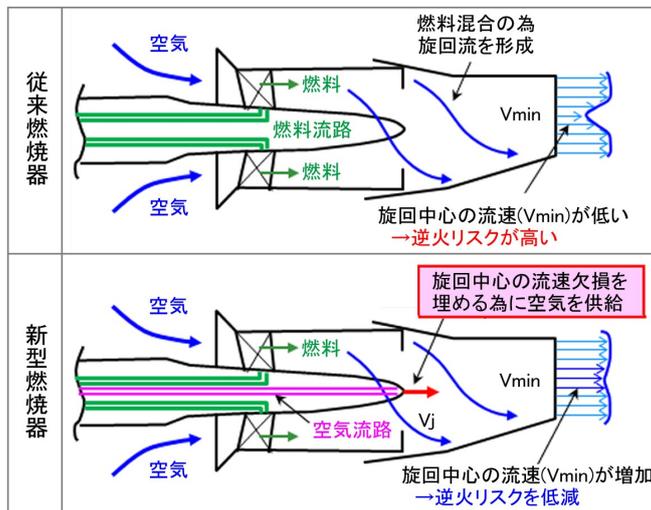


図4 新型燃焼器の概要

3.2 非燃焼試験による検証

新型燃焼器の効果を確認する為、気流試験による流速分布計測を実施した。気流試験に使用した装置写真を図5に示す。渦芯は定常的に同じ位置に存在する事は無く、時々刻々とその位置が変化する。このため、流速計測では各計測点を渦芯が通過する際に現れる流速の遅い瞬間を捕らえる必要がある。そこで流速計測に、熱線流速計(カノマックス7000Serおよび 5μ φタングステン製I型直線プローブ)を適用し、高い時間分解能を実現する事で、各計測位置での瞬時最低流速を評価する事を可能とした。渦芯に近い領域における従来燃焼器と新型燃焼器の流速分布の比較を図6に示す。逆火現象の発生を支配すると考えられる最低流速に注目すると、新型燃焼器は従来燃焼器の2.5倍以上の流速を実現している事が確認された。また、新型燃焼器ではノズル先端に設けた小さい孔から極少量の空気を噴射する為、渦芯近傍以外の領域はほとんど影響を受けず、従来燃焼器と同等の流速分布となる。

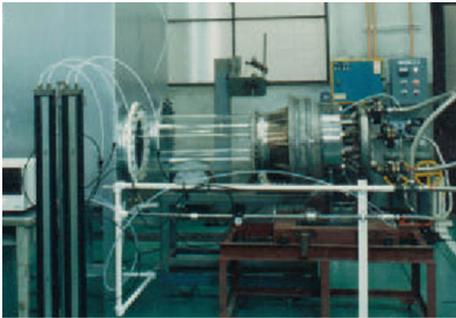


図5 気流試験装置の写真

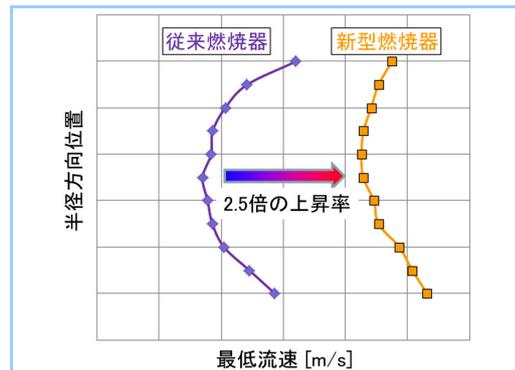


図6 渦芯領域における流速分布の比較

3.3 実圧燃焼試験による燃焼特性の確認

ガスタービン燃焼器の燃焼特性に関する代表的な項目として、NO_x、燃焼振動があげられる。NO_xは酸性雨の要因物質である為、環境側面から排出量に対する規制値が存在する。一方、燃焼振動はガスタービンを安定的に運用する上で、一定レベル以下に抑える必要がある。NO_x、燃焼振動はともに燃焼圧力条件の影響を受ける為、実機相当の圧力条件での検証が必要となる。そこで、フルスケールの燃焼器1本(実機では16本ないし20本の燃焼器を配置)を使用した実機圧力燃焼試験(以下実圧燃焼試験)を実施し、水素混焼が燃焼特性に与える影響を確認した。実圧燃焼試験には、三菱日立パワーシステムズ(株)高砂工場に保有する実圧燃焼試験設備を使用した。実圧燃焼試験装置の設備構成を図7に示す。燃焼試験装置で使用される高圧・高温の空気は二軸ガスタービンにより供給され、燃焼試験耐圧容器内に設置されたガスタービンのケーシング形状(燃焼器1本分)を模擬した試験セクタへ導かれる。燃焼後の排ガスは、圧縮機駆動用ガスタービンの排ガスと共に排気塔から排出される。実機プラントの燃料を模擬するために、天然ガス供給ラインの上流部において水素を添加して実圧燃焼試験設備へ供給する。水素は、試験設備の十分な上流側で添加される為、燃焼器に到達するまでに天然ガスと均一に混合される。

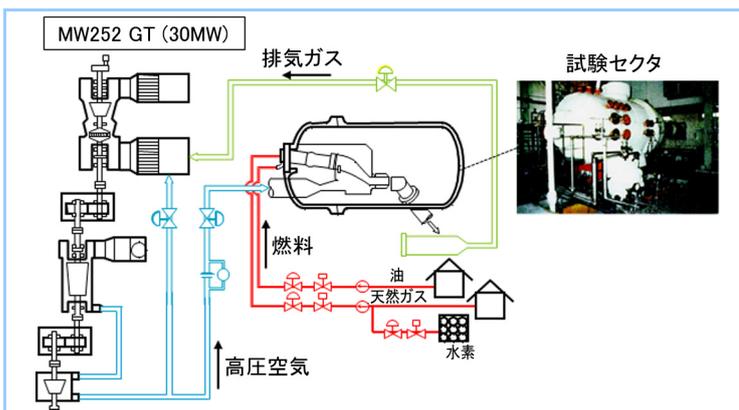


図7 実圧燃焼試験装置の構成

タービン入口温度 1600 度級ガスタービンの定格相当条件における、水素混合割合に対する NOx の変化を図8に示す。水素混合割合の増加に伴って、NOx が僅かに上昇する傾向が確認された。これは、燃料中に水素が混合する事により、燃焼速度が上昇し、燃焼器中の火炎位置が上流へ移動する為と考える。しかしながら、水素 30vol%を混合した条件においても、NOx は運用可能な範囲内にあることが確認された。同じ条件における燃焼振動圧力レベルの変化を図9に示す。燃焼振動圧力レベルは水素混合割合の変化に対して、あまり影響をうけない事が確認された。以上の結果より、水素混合割合の増加に伴い NOx の上昇が確認されたものの、新型燃焼器を適用する事で、水素 30vol%までの混焼条件において、逆火の発生、内圧変動の著しい上昇を伴わず、ガスタービンの運用が可能であると考えられる。

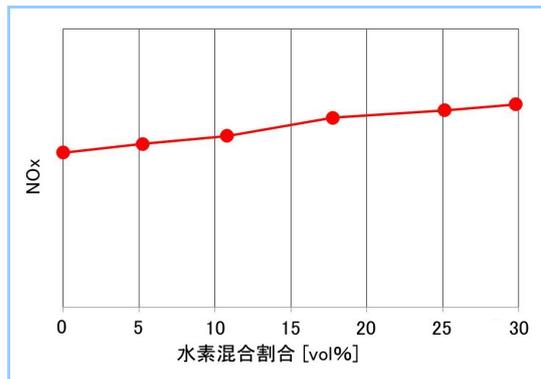


図8 水素混合割合に対する NOx の変化

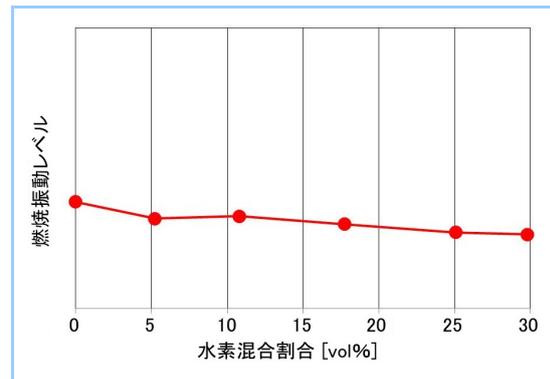


図9 水素混合割合に対する内圧変動レベルの変化

4. 今後の展望

水素・天然ガス混焼ガスタービンプラントを実現にむけて、燃焼器開発と並行してプラントに付随するその他補機、および運用方法の検討を進める必要がある。現在のガスタービンは主として汎用品として流通している天然ガスを燃料としている為、配管材料および、プラントの補機は天然ガスの使用を前提として選定されている。水素は天然ガスと比較して漏洩しやすく、また拡散し易い特性を有する為、その特性に適した安全対策を策定し、各部仕様を再選定する必要がある。また、実際のプラントの運用においては、水素の含有割合が安定しない可能性がある為、非定常的な水素混合割合の変化に対応可能なプラント運用技術の開発を併せて進めていく。

5. まとめ

当社では、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) にご支援を頂き、火力発電分野での CO₂ 排出量削減を目的とした水素燃料の利用に対応する為、水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発に取り組んでいる。水素混焼による逆火現象の発生を防止する為、渦芯領域の低流速発生を抑制する新型燃焼器を開発し、水素 30vol%の混焼条件においてガスタービンの運転が可能なる目処を得た。今後、プラント運用技術の開発を併せて進めるとともに、2025 年度を目標としたプラント実証運転にむけて、更に高濃度での水素混焼を可能とするガスタービンの開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) M.Kroner, T.Sattelmayer, J.Fritz, F.Kiesewetter, and C.Hirsch, "Flame Propagation in Swirling Flows – Effect of Local Extinction on the Combustion Induced Vortex Breakdown", *Combust. Sci. and Tech.*, vol.179, pp.1385–1416, 2007
- (2) B.Dam, G.Corona, M.Hayder, A.Choudhuri, "Effects of syngas composition on combustion induced vortex breakdown (CIVB) flashback in a swirl stabilized combustor", *Fuel*, vol.90, pp.3274–3284, 2011