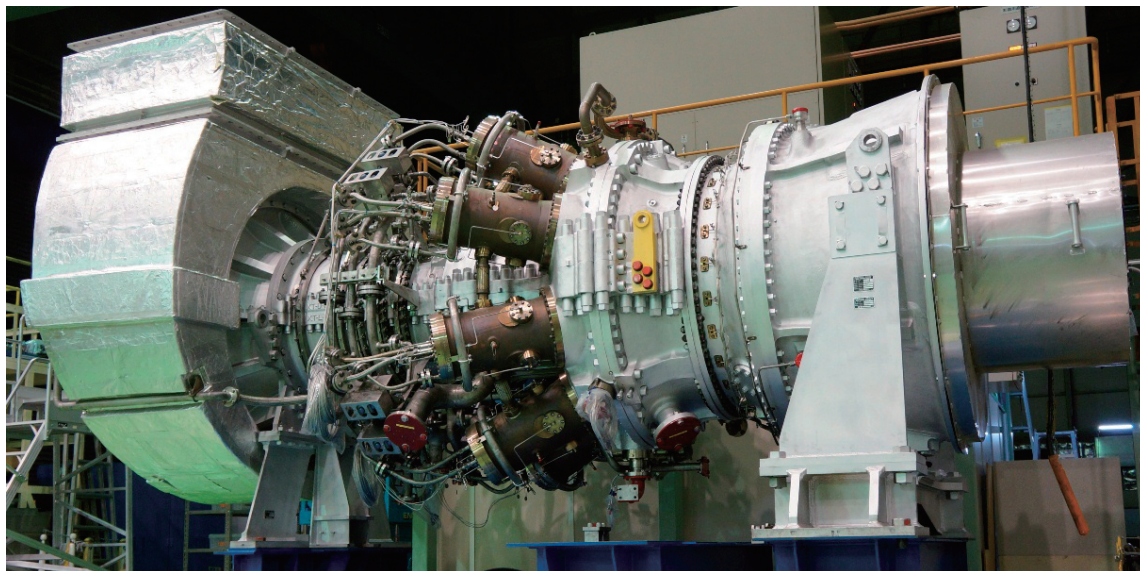


# ガスタービンの水素燃焼技術の確立 — 来るべき水素社会に向けた先行研究の今 —



燃焼させてもCO<sub>2</sub>を排出しないことから  
究極のクリーンエネルギーとして注目される水素。  
現在は天然ガスを使用しているガスタービンの燃料に  
水素を用いることで、CO<sub>2</sub>と燃料コストの削減を試みる——。  
世界中の企業・大学が覇権をねらって研究を加速させる中、  
川崎重工独自の研究開発の最前線を報告します。



堀川 敦史  
Atsushi Horikawa

技術開発本部  
技術研究所  
熱システム研究部 研究二課  
主事

## 天然ガスから水素へ 未利用エネルギーの有効活用

当社は、産業用ガスタービンのパイオニアメーカーとして、純国産・自社開発のガスタービンをかたちにしてきた歴史を持ちます。ガスタービンは通常、「圧縮機・燃焼器・タービン」の3要素から構成されており、圧縮機で加圧した空気に、燃焼器で燃料を投入し燃焼させ、発生した高温高压のガスでタービンを回して、回転運動エネルギーを生み出すという仕組みになっています。一般によく見聞きするピストンエンジンと同様の働きをしますが、ガスタービンは小型軽量で大出力であることが特徴で、航空機のジェットエンジンや火力発電所、工場の自家発電設備、病院や大型施設等の非常用発電に用いられています。

学生時代にガスタービン燃焼の研究を行なっていたので、技術開発本部においても、2012年にリリースされた産業用ガスタービン「L30A」の低NO<sub>x</sub>（窒素酸化物）燃焼器の開発を担当し、NO<sub>x</sub>の排出量を世界最高レベルに

抑える優れた環境性能の実現に寄与しました。

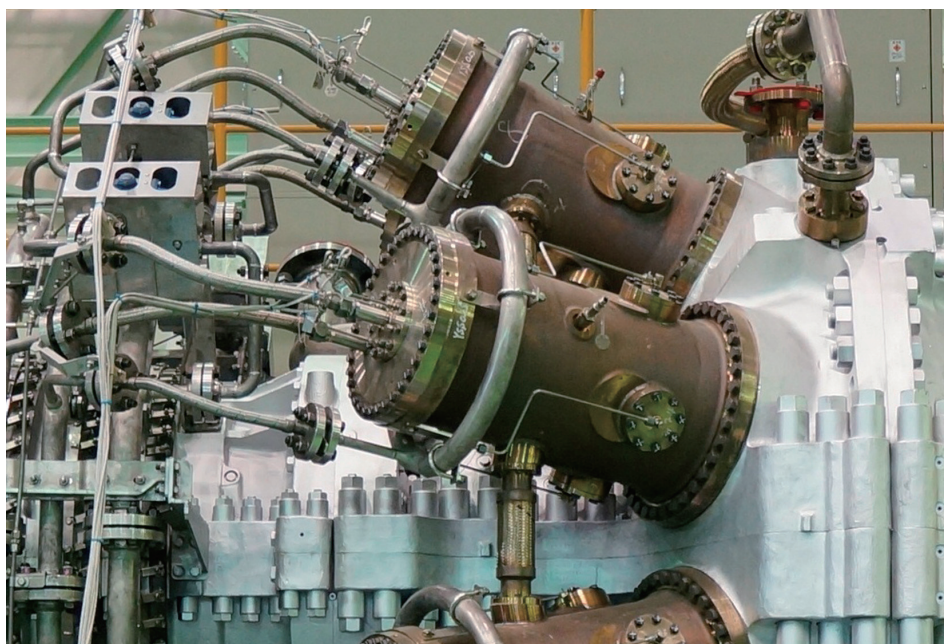
「L30A」の燃焼器開発に取り組んでいた頃、一方で活発化してきた議論がありました。産業用ガスタービンでは通常、燃料に天然ガスを使用していますが、これを水素燃料に切り替えられないかというものです。実は、ガスタービンのユーザーから、工場で生成される副生水素ガスを有効利用できないかというお客様からの声が多く寄せられていました。メーカーによっては化学的な製造プロセスの中で水素が発生しますが、100%に満たない低濃度であるため取り扱いが難しく、ほとんど利用されることなく燃焼廃棄されていました。それをガスタービンの燃料として有効活用できないかというのです。

こうした余剰副生水素は国内で年間180億 $m^3$ に及ぶとも言われており、日本の天然ガス需要量の5%に相当します。この副生水素を活用できれば、天然ガスの使用量を減らして燃料コストを削減できるとともに、水素は燃やしても水蒸気しか出ないことからCO<sub>2</sub>削減にも貢献します。そこで、水素ガスタービンの開発プロジェクトがスタートし、そのコア技術となる水素燃焼技術の開発を担当することになりました。ガスタービンの主要3要素のうち圧縮機とタービンについてはL30Aのものを流用できるため、プロジェクトの成否は、燃焼器の開発を含めた水素燃焼技術の確立にかかっているという、重責を担っての船出でした。

## 課題は「安定燃焼」と「低NO<sub>x</sub>化」の実現 水素が本来的に持つ特性との戦い

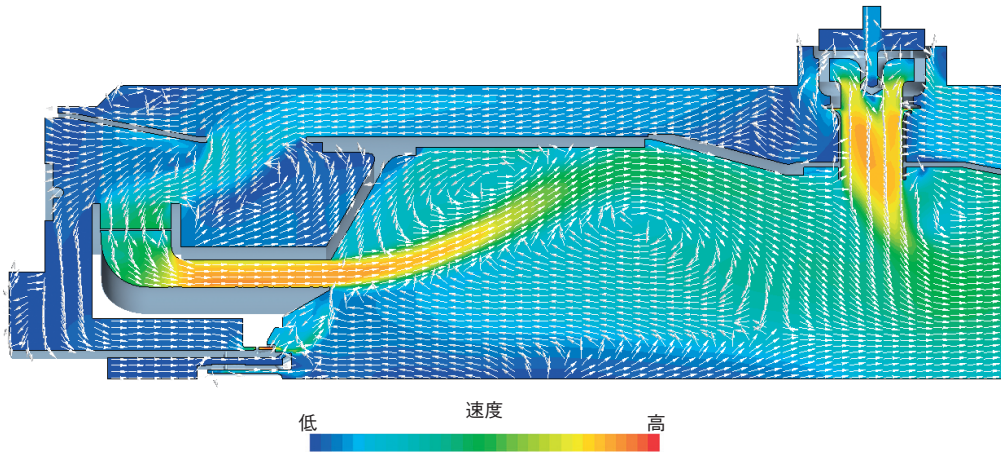
当社の低NO<sub>x</sub>燃焼器では、空気と天然ガスをあらかじめ混ぜた燃料ガスを燃焼室内に送り込んで燃やす「希薄予混合燃焼」という方式を採用しており、空気内に天然ガスを送り込んで燃やす「拡散燃焼」と比較すると、NO<sub>x</sub>発生量を低く抑えられるという大きな利点を持っています。ただし、天然ガスが薄い状態で燃やすため火が消えやすく、燃焼安定性の確保に高い技術を要します。そこで、燃焼室内に適切な旋回流を起こすことで、空気の流動と燃焼反応のバランスを取ります。また希薄予混合燃焼では、燃焼室内の炎が、燃料ガスを送り込む通路内に逆に進入してくる「逆火（ぎゃっか）」のリスクもあります。逆火が起こると熱で部品が焼損することもあるため、確実な対策を施す必要があります。希薄予混合燃焼に係るこれら一連の燃焼技術分野において、当社は世界トップレベルにあります。

そうした技術的知見を十分に活用しながら、水素燃料の活用にも道を開くべく検討をスタートさせました。まず開発対象としたのは、「混焼」技術です。ユーザーの工場内で発生する余剰水素量は限られており、ガスタービンを運転するすべての燃料を水素に置き換えるのは難しいことから、天然ガスに水素を混合して燃やす「混焼」が現実的だと考えたためです。



水素ガスタービンのキーとなる燃焼器





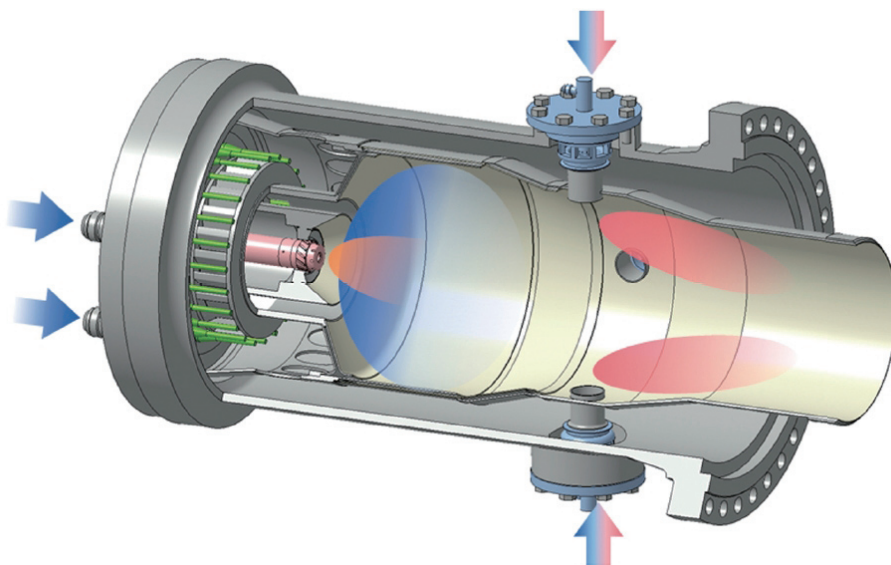
燃焼器内の燃料ガス流れ予測による安定燃焼と低NOx化の実現

ところが、開発の初期段階からすでに2つの大きな課題が見えていました。「安定燃焼」と「低NOx化」という、水素が本来的に持つ特性に起因する課題です。水素の燃焼速度は天然ガスのおよそ7倍と反応が速い分、逆火のリスクが高まるということです。実際、これまでと同じ希薄予混合方式を用い、天然ガスのごく僅かな量を水素に換えて実験してみたところ、あっという間に逆火が発生してしまいました。かといって、逆火を避けるために希薄予混合方式から拡散燃焼方式に切り替えると、NOxは増加してしまいます。さらに水素燃焼時にはNOx排出量が天然ガスに比べて2倍近くになります。これではいくらCO<sub>2</sub>排出量を削減できたとしても、製品としての新たな価値は見いだせません。逆火を起こさない「安定燃焼」と環境負荷を抑えた「低NOx化」をいかに実現するか、検討を進めていきました。

### 当社独自の「追焚き燃焼方式」に活路 水素燃焼でも川崎重工らしさを追求

用いたのは、燃焼室内に送り込んだ燃料ガスがどのような気流を描くかを予測する流動解析技術や、燃焼室内における各所の温度変化を予測する燃焼シミュレーション技術などです。さまざまな条件下における燃焼室内の状態を調べながら、課題をクリアする方法を探りました。しかし、シミュレーションや実験を重ねてもなかなか解決策の糸口が見えず、開発は暗礁に乗り上げました。

燃料は、天然ガス／水素と異なるものの、天然ガス燃料のL30AでNOx排出量を世界最高レベルに抑えることができたのですから、どこかに水素燃料対策のヒントもあるに違いないと考えました。そして着目したのが、低NOx燃焼に一役買っている当社独自の「追焚き燃焼方式」でした。



希薄予混合燃焼器+追焚き燃焼方式による水素ガスタービン用燃焼器の設計

L30Aの燃焼器には3つのバーナが搭載されています。起動用のパイロットバーナ、ベース燃焼に用いるメインバーナ、そして最大出力を発揮する際に活躍する追焚きバーナです。このうち、パイロットバーナとメインバーナには天然ガスを用い、追焚きバーナについてのみ天然ガスと水素の混焼にすることを思いつきました。メインバーナ付近で一度燃焼した燃料ガスは、追焚きバーナ付近に流れてきた時には温度が1,000度を超える高温で、かつ酸素濃度が低くなっています。こうした高温・低酸素の条件下では燃焼反応は比較的低下するため、この領域で水素を投入したとしても、NOxが発生しにくい穏やかな燃焼になると考えました。

この考え方をベースに、あとはそれをどうすれば実現できるかを検討していきました。まずは、天然ガスと水素と空気という三者の最適な混合についてです。次に、混合した燃料ガスを燃焼室内に送り込む際の最適な噴射速度を調整し、これで逆火の抑止を図ります。さらに、燃焼室内の温度分布のムラを抑制することによって、NOxの低減を図りました。

燃焼器の形状が概ね決まると、次は実際のエンジン条件で性能を確認します。ただしそれには、圧力24気圧、温度500度という高温高压の空気条件が必要です。そのため、ガスタービン燃焼器の大規模な試験設備を保有するドイツのアーヘン工科大学に試験用燃焼器を持ち込み、試験を実施しました。

## 水を用いない低NOxの水素専焼技術へ 日本のため世界のための技術革新

こうして検討を重ねた結果、天然ガスと水素の混焼により、CO<sub>2</sub>排出量を最大3割削減しつつ、NOx排出量は天然ガス100%と同程度まで抑制する燃焼技術を確認しました。もともとは燃焼廃棄していた水素を活用できるこの混焼技術は、お客様に燃料費削減という大きなコストメリットとCO<sub>2</sub>削減効果をもたらします。

混焼の次に目指すのは、やはり天然ガス燃料を全量水素に置き換える水素「専焼」技術の確認です。この場合、燃料ガスとは別に蒸気や水を噴射する方法によりNOxの低減を図りますが、発電システムの効率低下が懸念されます。そのため将来的には、蒸気や水を用いない低NOxの水素専焼技術を開発したいとの考えから、海外研究機関と共同研究を進めています。

昨年日本政府から発表された「エネルギー基本計画」には、将来にわたるエネルギーとしての水素の利用がうたわれています。その一翼を担うであろうガスタービン分野において、必ずや水素専焼を実現し、クリーンで豊かな社会の実現に貢献したいと考えています。



開発者たち