

# VOC 400 kg/h 処理に対応した VOC 回収ガスタービン コージェネレーションシステム

## VOC Energy Recovery by Gas Turbine Cogeneration

島村昌邦	エネルギーセクタープロジェクトセンター原動機 PJ 統括部
平野学	エネルギーセクタープロジェクトセンター原動機 PJ 統括部
奈須野祐一	エネルギーセクタープロジェクトセンター原動機 PJ 統括部 主査
宇治茂一	エネルギーセクター 技監 博士(工学) 技術士(機械部門)
高橋克昌	航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部

塗装や印刷工程で排出される揮発性有機化合物 (VOC) は光化学オキシダント発生の主要な原因物質であり、近年は排出量に対する法的な規制や厳しい削減目標が定められている。回収された VOC の一部は再利用されるものもあるが、現在でも多くの VOC が化石燃料を用いて燃焼処理されている。VOC の燃焼処理は、塗装や印刷工程をもつ企業の費用負担となっているだけでなく CO<sub>2</sub> 排出による環境への負荷ともなっている。当社では、これらの負担・負荷を解消するため、VOC 回収ガスタービンコージェネレーションシステムを開発し、その性能向上に積極的に取り組んできた。VOC 回収ガスタービンとは、これまで燃焼処理されていた VOC をガスタービンの燃料の一部として利用することで、VOC の処理費用削減に加え、ガスタービンの主燃料 (燃料ガス) の削減、その削減による CO<sub>2</sub> 排出量の削減に貢献するものである。本稿では、当該設備の性能向上の成果について紹介する。

Painting plants and printing facilities emit Volatile Organic Compounds (VOCs). VOCs cause photochemical smog and other air pollution. To resolve this problem, IHI has developed a new treatment system that can make use of VOCs as fuel for gas turbine cogeneration. This system is effective in reducing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, and can significantly reduce the operating costs of VOC treatment systems as a whole. This paper describes a new VOC treatment system that combines a steam-injected gas turbine with an adsorption apparatus using activated carbon.

## 1. 緒 言

省エネルギーやエネルギーの安定供給の観点から、コージェネレーションの新規設置台数が増加している。コージェネレーションとは電気と熱の両方を供給するシステムであり、コージェネレーションを導入することで、工場・オフィスビル・商業施設・地域などへ電気の供給が行えることに加え、発電時に発生する熱を回収し生産活動や冷暖房用の熱源として利用可能になる。また昨今の電力事情から、災害時の非常用電源や計画停電時の電気および熱の供給源として、また、太陽光発電や風力発電といった発電量が天候に左右される再生可能エネルギーのバックアップ用電源としての活躍が期待されている。

当社では、このコージェネレーションを導入するメリットをさらに増加させる開発を進めており、その一つが、廃棄物として燃焼処理されている VOC (Volatile Organic Compounds) をガスタービンの燃料の一部として利用す

る VOC 回収ガスタービンコージェネレーションシステムである。

揮発性有機化合物 (VOC) とは、トルエン、キシレンなどの揮発性をもつ有機化合物の総称であり、塗料、インキ、溶剤 (シンナーなど) などに含まれる。VOC は光化学オキシダントや浮遊粒子状物質 (SPM: Suspended Particulate Matter) による大気汚染の原因物質であり、大気汚染防止法による規制があり、それを取り扱う者には VOC 排出設備の届け出義務、排出基準の順守義務などが課せられている。

VOC の一部は回収され再利用される場合もあるが、現在でも多くの VOC が化石燃料を用いて燃焼処理されている。VOC 回収ガスタービンは、これまで捨てられていた VOC がもつエネルギーをガスタービンのエネルギー源として利用可能としたシステムであり、ガスタービンに投入する VOC の発熱量と流量が大きいほど設備の導入メリットが大きくなる。発熱量については、工場から排出される

VOC の組成に依存する。一方、投入流量についてはガスタービンの改良によって増加させることが可能なため、当社ではガスタービンに投入する VOC 流量の増加について開発を進めてきた。これまでに、300 kg/h の VOC をガスタービン燃焼器内に噴射し、燃料として有効に活用することに成功している。

本開発を始めるきっかけは、あるお客さまから、工場の CO<sub>2</sub> 削減量の目標を達成するために工場から排出される VOC 含有ガスのうち、400 kg/h の VOC をガスタービンで処理することを求められたことであった。これまで 400 kg/h の VOC をガスタービンに噴射したことはなく、そのために必要な条件を検討・確認し、開発に取り組むこととした。

この度、400 kg/h の VOC をガスタービンに投入可能な技術を確認したため、その検討内容と成果について以下で紹介する。なお、この 400 kg/h の VOC 投入によって、当社の 2 MW クラスのガスタービン IM270 IHI-FLECS において、定格運転時の燃料流量のうち、最大で約 50% (VOC 組成によって異なる) が削減可能になる。

## 2. システムの説明

### 2.1 構成および各設備の機能

VOC 回収ガスタービンコージェネレーション設備とは、印刷工場や化学製品の製作工場、塗装工場などから排出された VOC を回収設備で回収し、ガスタービンで処理することを可能にしたコージェネレーション設備である。第 1 図に VOC 回収ガスタービンコージェネレーション設備の概要を示す。当該設備は、以下のように大きく三つの設備に分けられる。

#### 2.1.1 濃縮装置

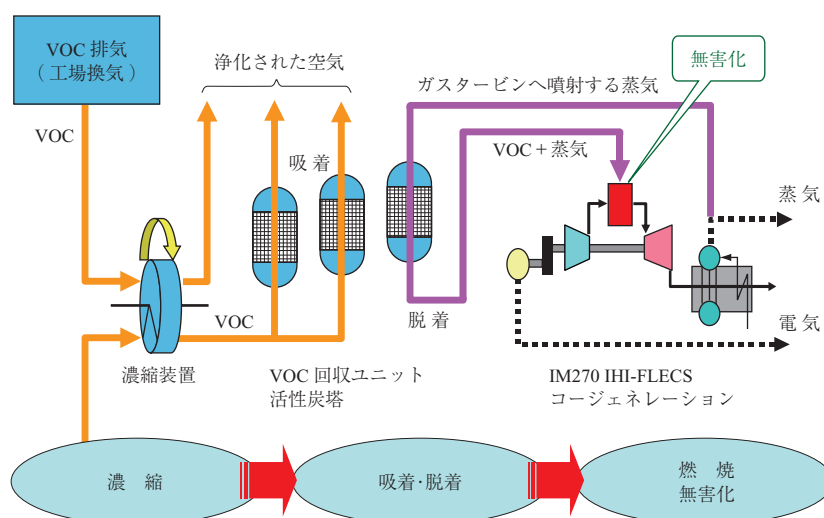
濃縮装置は低濃度の VOC 含有ガスを高濃度の VOC 含有ガスとする機能をもつ。工場から排出される VOC 含有ガスは VOC 濃度が低く、そのままの流量を受け入れるには受け入れる側の設備が巨大になってしまう。そのため、VOC 回収ガスタービンコージェネレーション設備では、工場から排出された VOC 含有ガスを、濃縮装置によって 5 000 ppm (0.5%) 程度まで濃縮し、流量を少なくしている。

#### 2.1.2 VOC 回収ユニット

VOC 回収ユニットは複数の VOC 回収塔をもち、その VOC 回収塔内には VOC を吸着するための吸着材 (活性炭) が充てんされている。活性炭は VOC 含有ガス中の VOC 成分を吸着する機能をもっており、VOC 含有ガスは回収塔内の活性炭層を通過した後、清浄な空気となって大気に放出される。また、活性炭は加温されると吸着した VOC を周囲に放出するという特性をもっている。そこで、活性炭に吸着している VOC を取り出す (脱着) 際には、高温の蒸気を用いて活性炭を加温することで、活性炭から VOC を脱着している。

#### 2.1.3 ガスタービンコージェネレーションシステム

ガスタービンコージェネレーションシステムとは、ガスタービンで発電を行い、ガスタービンの排気の熱で蒸気を発生させるシステムである。発生した蒸気は、工場の生産活動用の熱源および冷暖房用の熱源として利用される。VOC 回収ガスタービンコージェネレーションシステムは、IM270 IHI-FLECS というガスタービンを用い、2 MW の電力と時間当たり 6 t の蒸気を発生させる能力をもつ。



第 1 図 VOC 回収ガスタービンコージェネレーション設備概要  
Fig. 1 VOC energy recovery gas turbine system

ガスタービンコージェネレーションシステムから発生した蒸気の一部は、活性炭に吸着している VOC を脱着するための蒸気として利用される。高温の蒸気によって活性炭が加温されると、活性炭から蒸気中に VOC が放出され、蒸気と VOC の混合気体となる。蒸気と VOC の混合気体は、ガスタービンの燃焼器内に噴射され、燃焼器内に噴射された VOC は、ガスタービンの主燃料である燃料ガスとともに燃焼・酸化分解される。本来ガスタービンの運転に必要なエネルギーの一部が、VOC の燃焼に伴う化学エネルギーに置き換えられるため、その分ガスタービンに投入する燃料消費が少なくなる。

ガスタービンに投入した VOC は、発電および蒸気発生用のエネルギー源として利用されるため、投入した VOC の発熱量と流量が大きいほどガスタービンの主燃料（燃料ガス）の消費量を削減できる。VOC の発熱量はお客さまの工場から排出される VOC の組成に依存するため、発熱量を選択することはできない。一方、流量については、ガスタービンに投入できる VOC の流量が多いほど本設備を稼働させるメリットが増加するため、当社では投入可能な VOC 流量を増加させる開発を進めてきた。

## 2.2 VOC 回収ガスタービンの特徴

VOC 回収ガスタービンコージェネレーション設備には、IM270 IHI-FLECS という蒸気噴射型ガスタービンコージェネレーションシステムを用いており、蒸気噴射型ガスタービンの技術を応用し、燃焼器内に噴射する蒸気に

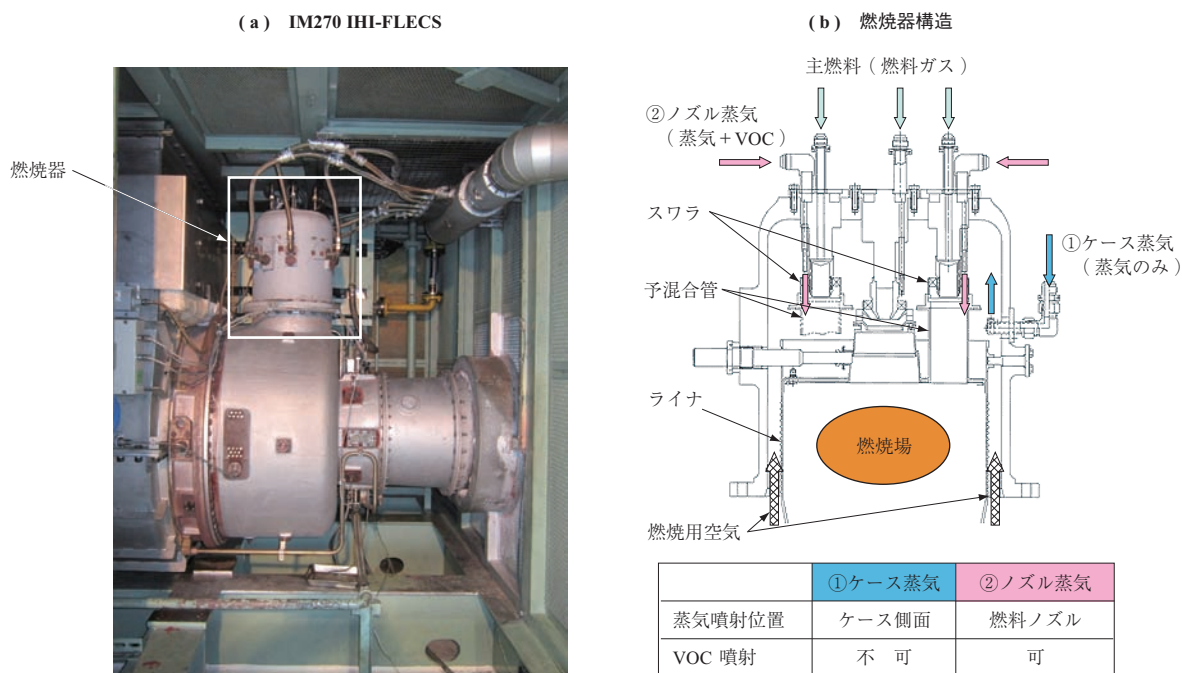
VOC を混ぜることで、VOC を燃焼器内に投入している。

### 2.2.1 蒸気噴射型ガスタービン

蒸気噴射型ガスタービンとは、コージェネレーションの排熱回収ボイラから発生した蒸気の一部をガスタービンの燃焼器内に噴射するガスタービンである。燃焼器内に蒸気を噴射することによって、タービンを駆動する作動流体の質量を増やし、タービンの出力を増大させることを可能にしている。

### 2.2.2 蒸気噴射方式の違い

VOC 回収ガスタービンを開発する以前の蒸気噴射型ガスタービン IM270 IHI-FLECS では、燃焼器内に噴射する蒸気を、燃焼器ライナ外側の燃焼用空气中に噴射していた。しかし、可燃性ガスである VOC 混合蒸気を燃焼場以外の場所に噴射すると燃焼異常による危険があるため、VOC 回収ガスタービンの開発において燃焼器内に噴射する蒸気は、燃焼場に直接噴射するように蒸気噴射位置を変更している。IM270 IHI-FLECS では蒸気噴射位置の違いによって、前者をケース蒸気方式、後者をノズル蒸気方式として区別して呼んでいる。この 2 者の蒸気噴射方式の違いを第 2 図 - (b) に示す燃焼器の断面図を用いて説明する。第 2 図 - (b) の①に示すケース蒸気方式では、燃焼器のケース側面から、燃焼器内に投入される直前の燃焼用空气中に蒸気を噴射し、蒸気は燃焼用空気との混合気体として燃焼器内に投入される。第 2 図 - (b) の②に示すノズル蒸気方式では、蒸気は燃料ノズルから燃焼器内の燃焼場に直接噴射される。



第 2 図 蒸気噴射方式の違い  
Fig. 2 VOC-steam mixture injection system



VOC 回収ガスタービンはノズル蒸気方式によって、燃料ノズルから可燃ガスである蒸気/VOC 混合ガスを燃焼器内に直接噴射を行うことで、VOC を安全かつ安定して処理することを可能にしている。ケース蒸気については VOC 噴射に対応しておらず、本稿で単に蒸気噴射と記載しているものは、すべてノズル蒸気方式による蒸気噴射を指す。

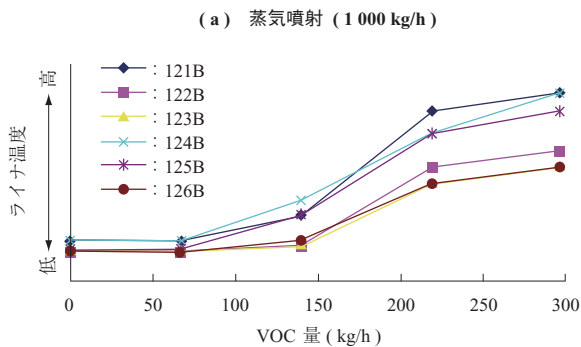
### 3. VOC 400 kg/h 投入のための検討内容

#### 3.1 VOC 噴射量増加の検討

VOC を燃焼器内に噴射すると、本来ガスタービンの運転に必要なエネルギーの一部が VOC の燃焼熱によって賄われるため、ガスタービンの主燃料（燃料ガス）の必要流量が減少する。しかし、VOC は燃料ガスと特性が異なり、VOC の燃焼熱に応じて燃料ガスの流量を減らしても、燃焼器ライナ温度が上昇していく事象が発生する。VOC 回収ガスタービンでは、VOC を安全に取り扱う目的以外にライナ温度上昇を抑えるためにも、VOC を蒸気との混合ガスとして燃焼器内に噴射する必要がある。そのため、VOC 噴射量を増加させる場合は蒸気噴射量も増加させる必要がある。

第 3 図に各蒸気噴射量における VOC 噴射量と燃焼器ライナの温度上昇の関係（実測値）を示す。グラフは、横軸に燃焼器内に噴射する VOC 量を、縦軸にライナの温度を示す。なお、グラフ中の複数の曲線は、それぞれライナ上の異なる測定位置での温度変化を表す。蒸気噴射 1 000 kg/h 時のグラフ（第 3 図 - (a)）と蒸気噴射 1 500 kg/h のグラフ（第 3 図 - (b)）を比較すると、同じ VOC 量を噴射した場合、蒸気噴射量が多い 1 500 kg/h の方が、よりライナの温度上昇を抑えることが確認できる。

この、蒸気噴射量 1 000 kg/h と 1 500 kg/h の結果を

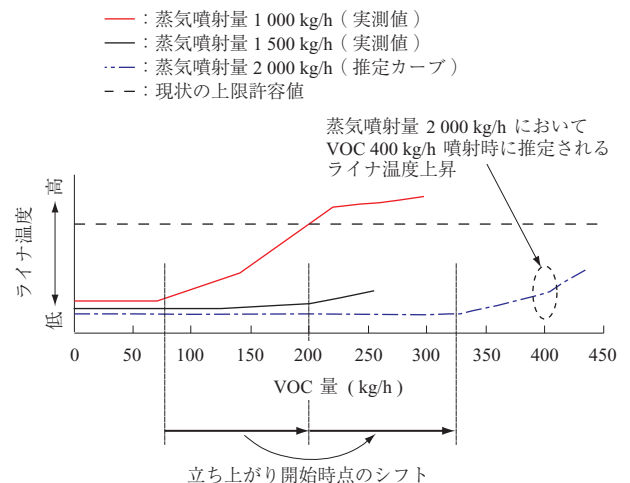


第 3 図 各蒸気噴射量における VOC 噴射量と燃焼器ライナの温度上昇の関係（実測値）  
Fig. 3 VOC effects on gas turbine combustor-liner temperature ( experimentally-found values )

基に、蒸気噴射量 2 000 kg/h 時の VOC 噴射量増加に伴うライナ温度の上昇傾向を推定し作成したカーブを第 4 図に示す。この、蒸気 2 000 kg/h 噴射時における VOC 噴射量とライナ温度の関係を推定したカーブから、VOC 400 kg/h を噴射した場合でも蒸気を 2 000 kg/h 噴射することで、ライナ温度の上限許容値までの裕度が確保できると判断した。しかし、これまでの実績では燃焼器内に蒸気 2 000 kg/h を噴射したことはなく、蒸気 2 000 kg/h を噴射しても、安定的運転が可能であるかの検討が必要であった。その検討内容については、次の 3.2 項以降で述べる。

#### 3.2 蒸気 2 000 kg/h 噴射による燃焼特性への影響の検討

400 kg/h の VOC を投入するために必要な蒸気量 2 000 kg/h を燃焼器内に噴射するに当たり、蒸気 2 000 kg/h 噴射による燃焼特性への影響を確認する検討を行った。検討は CFD ( Computational Fluid Dynamics ) 解析によって



第 4 図 各蒸気噴射量における VOC 噴射量と燃焼器ライナの温度上昇の関係（推定カーブ）  
Fig. 4 VOC effects on gas turbine combustor-liner temperature ( forecast curve )

行い、蒸気噴射量を増やした場合の最適なノズル径を決定するため、蒸気噴射量とノズルの形状（ノズル径）を条件として、Case 1 から Case 3 まで 3 通りの Case について解析を行った。

### 3.2.1 評価項目および評価方法

各条件の流れ特性および燃焼特性への影響を評価するため、以下 2 点について評価を実施した。

(1) 予混合管入口における蒸気の流れ特性

(2) 予混合管出口における蒸気の濃度分布

また、評価の方法としては、Case 1 の条件が、実機を用いた試験によって安定して運転できることを確認した、実績のある条件であるため、Case 1 を基準として Case 2 および Case 3 を比較し、条件の違いによる影響を評価した。

### 3.2.2 解析結果

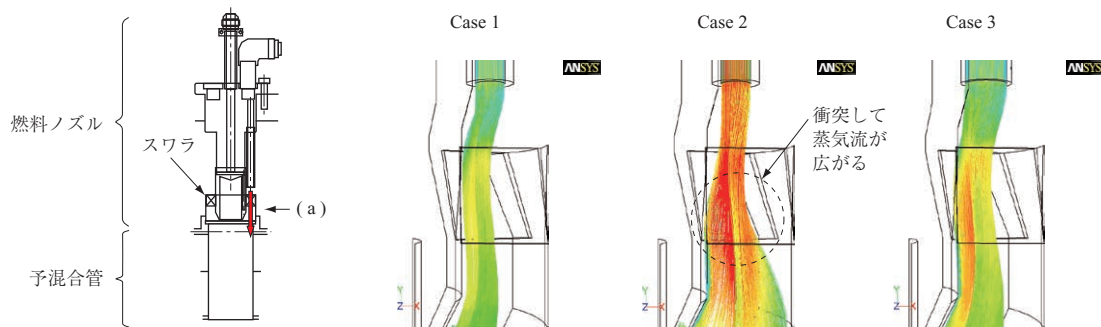
第 1 表に CFD 解析の条件および解析結果と評価を、第 5 図に CFD 解析結果を示す。

第 1 表 CFD 解析の条件および解析結果と評価  
Table 1 Three cases of CFD analysis

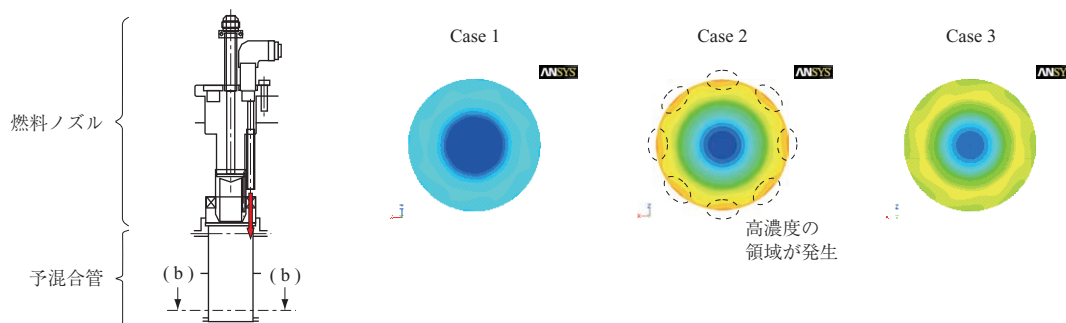
項 目		Case 1	Case 2	Case 3
条 件	ノズル形状	ベース形状 (ベースの流速)	ベース形状から変更なし (ベースの流速の 2 倍)	ノズル径拡大 (ベースの流速と同等)
	噴射蒸気量 (kg/h)	1 000	2 000	2 000
結 果	(1) 流れ特性 (第 5 図 - (a))	ベースの流れ (実機試験で、安定して運 転可能なことを確認済み)	スワラに衝突し、流れが広 がる	Case 1 同様、流れの広が りは発生しない
	(2) 濃度分布 (第 5 図 - (b))	ベースの分布 (実機試験で、安定して運 転可能なことを確認済み)	予混合管側壁に高濃度の領 域が発生	Case 1 同様、高濃度の領 域は発生しない
評 価	(1) 流れ特性	ベースの流れ (実機試験で、安定して運 転可能なことを確認済み)	△	○
	(2) 濃度分布	ベースの分布 (実機試験で、安定して運 転可能なことを確認済み)	△	○

(注) ○ : Case 1 と同様  
△ : Case 1 と相違

(a) 予混合管入口流れ特性



(b) 予混合管出口濃度分布



第 5 図 CFD 解析結果  
Fig. 5 Results of CFD analysis

(1) 予混合管入口流れ特性への影響 (第5図-(a))

暖色の領域は流速が速い領域を示す。Case 1 と比較して、Case 2 の条件では、スワラに蒸気流が衝突した際に流れが広がっている。スワラの羽根に蒸気が衝突した結果、蒸気が予混合管壁面方向に広がり、その影響で予混合管出口の蒸気濃度分布が Case 1 の傾向から変わる可能性がある。一方、Case 3 の条件では Case 1 同様の流れとなっており、スワラへの衝突による流れの広がりも小さく、流れ特性への影響が小さいといえる。

(2) 予混合管出口蒸気濃度分布への影響

(第5図-(b))

暖色の領域は蒸気が高濃度の領域を示す。Case 2 では Case 1 と異なり予混合管側壁に蒸気が高濃度となる領域が発生している。蒸気のみを噴射した場合は、蒸気濃度分布に濃淡が発生することで燃焼状態が不安定になり、CO (一酸化炭素) の排出量が増大することが考えられる。また、VOC 噴射時は、蒸気は VOC との混合気体として存在しているため、蒸気が高濃度になっている領域は VOC も高濃度で存在していることになる。VOC は燃焼器内で燃焼し発熱するため、VOC 濃度分布に濃淡が生じることによって火炎の温度が不均一になり NO<sub>x</sub> (窒素酸化物) の排出量が増大することが考えられる。一方、Case 3 では Case 1 同様の濃度分布となっており、蒸気が高濃度になる領域もないため、燃焼特性への影響は小さいといえる。

3.2.3 解析結果による燃料ノズルの設計変更

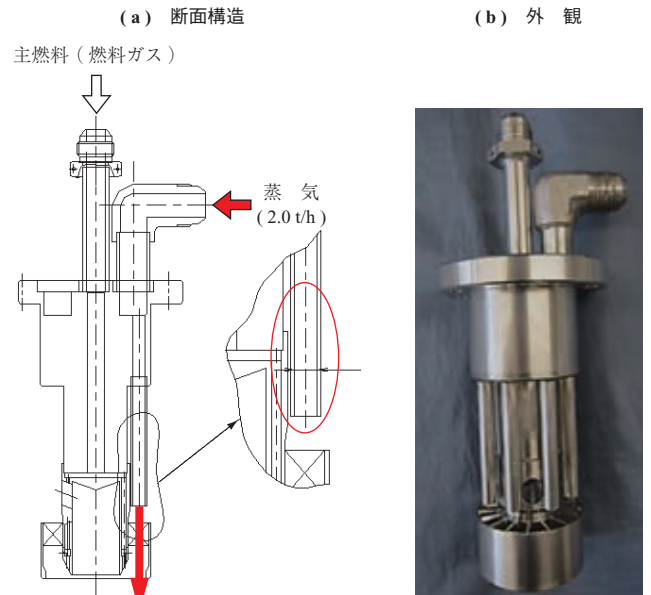
3.2.2 項の解析の結果を踏まえ、蒸気 2 000 kg/h を噴射した時に Case 3 の条件を実現する燃料ノズルを製作した。第6図に設計変更後の燃料ノズルを示す。

3.3 実機試験による確認

設計変更後の燃料ノズルを用いて、当社工場内発電所(呉第二工場ガスタービン発電所)において実際のガスタービン(IM270 IHI-FLECS)を用いた確認試験を実施した。

3.3.1 試験条件および確認項目

試験では VOC 400 kg/h の噴射を行わず、蒸気 2 000 kg/h のみ噴射を行うことにした。これは、今回の試験の目的は、蒸気 2 000 kg/h を噴射した場合に、(1) 失火しない(2) 火炎温度が低下することによって燃焼が不安定にならない、ことを確認するためであり、可燃性物質である VOC を蒸気中に混合せずに蒸気のみを噴射することで、失火発生の確認および燃焼安定性を評価する面で試



第6図 設計変更後の燃料ノズル  
Fig. 6 Newly designed fuel nozzle

験条件を厳しくしている。

3.3.2 判定基準

失火の判定は、失火によってガスタービンが停止しないこととした。

燃焼安定性を評価する指標としては、排気ガス中の CO および THC (全炭化水素) 値を用いた。燃焼状態が不安定になると、排気ガス中の CO および THC 値が急激に上昇するため、それらの値の変動によって燃焼状態の安定性を確認した。

ここで、THC とは、ガスタービンの排気ガス中に含まれる炭化水素量を示す。燃焼器内へ蒸気噴射を行うことで火炎温度がある一定温度以下に低下すると、燃料の燃焼反応が不完全になり、排気ガス中の CO および THC 値が大きくなる。一方、NO<sub>x</sub> については、蒸気噴射に伴い火炎温度が低下すると、NO<sub>x</sub> の生成が抑制され、排気ガス中の NO<sub>x</sub> 値が小さくなる。

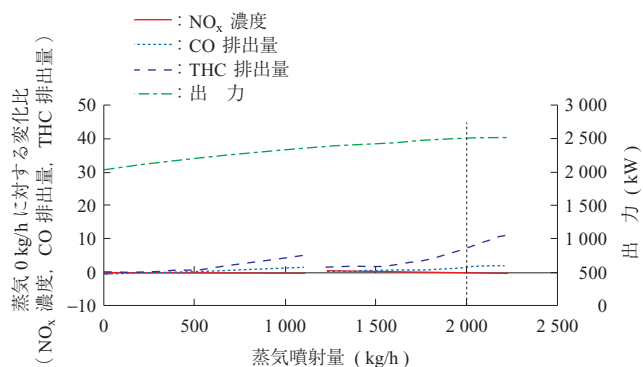
3.3.3 試験結果

第2表に確認項目および判定基準と結果を、第7図に

第2表 試験内容および結果  
Table 2 Experimental overview

確認項目	判定基準	結果
(1) 失火の有無	失火によってガスタービンが停止しないこと。	蒸気 2 000 kg/h において、失火発生がなく、ガスタービンは停止しない。(2 500 kg/h においても同様)
(2) 燃焼安定性	CO 急激な上昇がないこと。	急激な上昇はしない <sup>*1</sup>
	THC 急激な上昇がないこと。	急激な上昇はしない <sup>*1</sup>

(注) \*1: 蒸気 2 000 kg/h において、燃焼状態は安定している。



第 7 図 試験結果 (NO<sub>x</sub>, CO, THC)  
Fig. 7 Test data (emissions of NO<sub>x</sub>, CO and THC)

試験の結果を示す。

試験の結果、2 000 kg/h の蒸気噴射を行っても失火は発生しないことが確認できた。

また、2 000 kg/h の蒸気噴射を行っても、CO および THC の急増はなく、燃焼が不安定になる傾向はみられなかった。

以上の結果から、2 000 kg/h の蒸気噴射を行っても失火せず、燃焼状態は安定していることが確認できた。また、2 500 kg/h の蒸気噴射を行っても失火せずに運転できる結果を得ており、2 000 kg/h の蒸気噴射量は失火の面で十分な裕度のある条件であることを確認できた。

なお、第 7 図に示す、蒸気噴射量 1 100 kg/h 付近において NO<sub>x</sub> および CO, THC 値のカーブが不連続になっているが、これは NO<sub>x</sub> の生成を抑制するためにガスタービンの燃焼モードを切り替える機能によるものである。燃焼モードの切り替えとは、燃焼器内の火炎温度を調整するために、燃焼器に複数設置されている燃料ノズルの使用する本数、およびそれぞれの燃料ノズルから噴射する主燃料の流量を変化させることを指す。

### 3.3.4 考 察

第 7 図に示す試験結果から、蒸気 2 000 kg/h を噴射した場合、蒸気噴射を行わなかった場合と比較して、CO の排出量は 3 倍、THC の排出量は 7 倍程度に増加している。しかし、失火の兆候である CO および THC の排出量が二次曲線のように急激に増加する傾向がないため、今回の蒸気噴射 2 000 kg/h 時の燃焼状態は、十分に安定していると判断できる。

今回の試験のように、VOC 噴射を行わずに蒸気噴射の

みを行うことは、火炎温度が低下する方向、つまり排気ガス中の CO および THC 値が大きくなる方向に作用する。このため、今回の試験は CO および THC 量が多く排出される条件となっている。なお、過去の試験において、VOC を噴射した場合は VOC を噴射しない場合に比べて、CO および THC の排出量が抑えられることが確認できている。この過去の試験結果を用いて VOC 400 kg/h を噴射した場合の CO および THC の排出量を算出した場合、第 7 図に示す結果の半分程度となる計算結果が得られている。

蒸気噴射 2 000 ~ 2 500 kg/h の範囲については、実機での使用範囲でなく蒸気噴射 2 000 kg/h の裕度を確認するために行った試験条件であるため、評価の対象外とする。

## 4. 今後の展望

以上の結果から、VOC 噴射 400 kg/h へ対応可能であることが確認できた。今後は、VOC を噴射できる量をさらに増加させ、燃料ガスは補助燃料のみの消費とすることを目標に取り組んでいく。たとえば、ガスタービンに投入する VOC の発熱量 30 MJ/kg、VOC 噴射量 400 kg/h とした場合、IM270 IHI-FLECS の定格運転時で燃料ガスの消費量を約 4 割削減できる。これを、VOC 噴射量を 800 kg/h まで増加させることができれば、燃料ガスを 8 割近く削減できることになり、燃料ガスは補助燃料としてのみ消費することになる。

なお、本設備は液体の VOC にも対応しており、液体の VOC 400 kg/h を蒸気 2 000 kg/h と混合することで、燃焼器内に投入することが可能である。

また、近郊の工場で排出される VOC を液化 VOC として回収し、その液化 VOC を VOC 回収ガスタービンが設置された工場で受け入れ、燃料として使用するという運用方法 (VERS: VOC Energy Recycle Service) が提案されており、今後の需要増加が期待されている。

## 参 考 文 献

- (1) 大栄元隆, 宇治茂一, 芳村幸宏, 奈須野祐一: VOC 回収ガスタービンスステムの開発 IHI 技報 第 48 巻 第 3 号 2008 年 9 月 pp. 159 - 164