

VOC 回収ガスタービンシステムの開発

VOC Energy Recovery by Gas Turbine Cogeneration

大 栄 元 隆 原動機セクター 原動機プラント事業部プロジェクト部
宇 治 茂 一 原動機セクター 技監 博士（工学）
芳 村 幸 宏 原動機セクター 原動機プラント事業部プロジェクト部 主査
奈須野 祐 一 原動機セクター 原動機プラント事業部プロジェクト部 主査

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を引き起こす主要な原因物質であり、官民をあげた早急な対策が始まっている。既存の燃焼処理方式に対し VOC の化学エネルギーを有効に利用できれば、VOC 処理だけでなく、省エネルギー、CO₂ 削減、経費削減もできる総合的な環境対策となり得る。本稿では独自開発したガスタービンへの蒸気噴射技術を、活性炭からの VOC の脱着に応用した世界初の VOC 回収処理システムの開発について紹介する。

Paint manufacturing plants and printing facilities have been discharging Volatile Organic Compounds (VOCs). These substances are causes of photochemical smog and air pollution. To resolve these problems, IHI has developed a new treatment system that can recover VOCs for use as the fuel for gas turbine cogeneration. This system is effective in the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions, and can significantly reduce the operating costs of the entire VOC treatment system. This paper describes the new VOC treatment system that combines a steam-injected gas turbine with an adsorption apparatus using activated carbon.

1. 緒 言

揮発性有機化合物 (VOC: Volatile Organic Compounds, 以下、VOC と呼ぶ) は光化学オキシダントや浮遊粒子状物質 (SPM: Suspended Particulate Matter) の原因物質であり、塗料や有機溶剤を使用する工場など多様な発生源から排出される。既存の対策技術は、VOC を活性炭で吸着し、液化回収する方式と、燃焼して無害化する方式がある。大規模処理では主に触媒燃焼や蓄熱燃焼処理があるが、① 燃焼を維持するために補助燃料が必要になる ② VOC 自身もつ市販燃料並みの化学エネルギーが未利用のまま廃棄される、などの解決すべき課題がある。

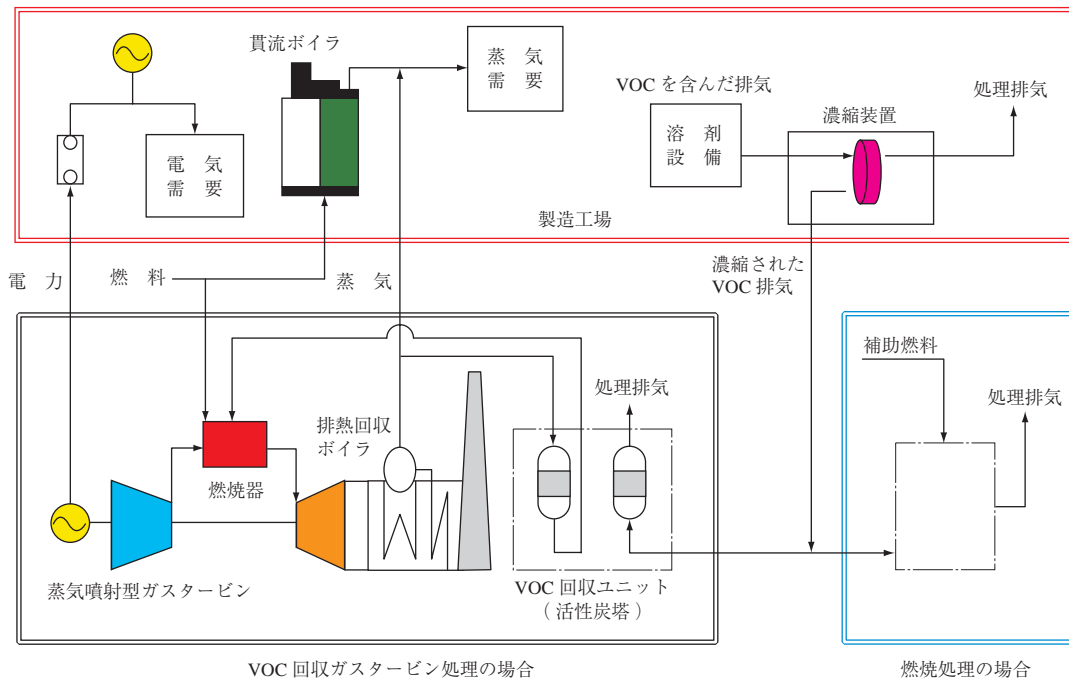
そこで、廃棄される VOC をガスタービンコージェネレーションの燃料として有効利用できるシステムを開発することによって、前記の課題が解決でき、その結果 VOC 処理だけでなく、省エネルギーと CO₂ 排出量の削減、処理に掛かる費用削減のメリットまでもが同時達成できる総合的な対策手段となり得る。

本稿では、当社が独自開発したガスタービンへの蒸気噴射技術と、活性炭で回収した VOC の脱着に蒸気噴射を組み合わせた世界初の VOC 回収処理システムへの取組みを紹介する^{(1), (2)}。

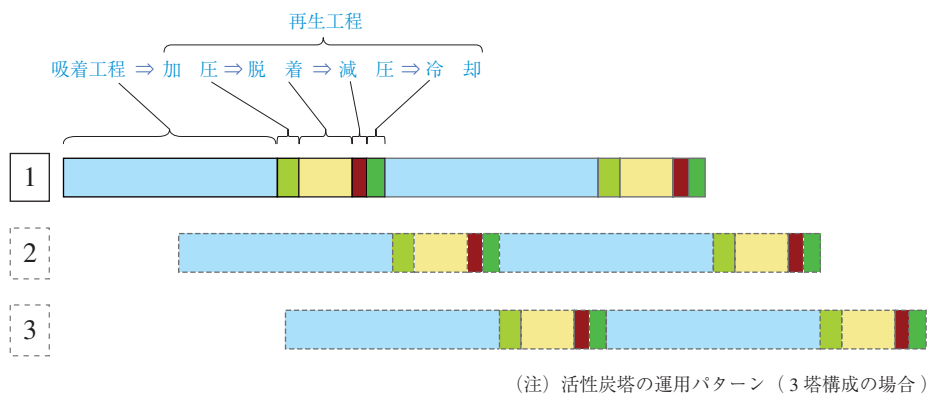
2. システムの概要

VOC 回収ガスタービンのシステムフローを第 1 図に示す。工場からの排気に含まれる VOC は、VOC 回収ユニットの活性炭を通る間にその細孔に吸着されることで浄化される。活性炭の VOC 吸着が限界に近づくとき、排熱回収ボイラからの蒸気で活性炭を加熱することによって VOC を脱着させる。蒸気は約 1.7 MPa (ゲージ圧) の飽和条件であり、VOC は気体の状態で蒸気に混ざり、ミストセパレータで液分を十分に取り除き、ガスタービンの燃焼器に噴射され、燃焼器に導入される主燃料である都市ガスとともに燃焼・酸化分解する。本来必要なエネルギーの一部が VOC の化学エネルギーで置き換えられるため、ガスタービンに投入する燃料消費が少なくなる。

VOC 回収ユニット (3 塔から成る活性炭塔) の運用パターンを第 2 図に示す。各活性炭塔の工程は VOC ガスを活性炭に吸着させる吸着工程とそれに続く再生工程から成る。再生工程は、① 脱着蒸気をガスタービンへ噴射可能な圧力まで回収塔を加圧する加圧工程 ② 活性炭から VOC を脱着する脱着工程 ③ 吸着工程に備えて塔内の圧力を大気圧まで下げる減圧工程 ④ 吸着可能な温度まで活性炭を冷却する冷却工程、で構成される。連続で VOC を処理す



第1図 VOC回収ガスタービンのシステムフロー
Fig. 1 VOC energy recovery gas turbine system



第2図 VOC回収ユニットの運用パターン
Fig. 2 Operation patterns of VOC unit

る場合には活性炭塔を複数用意し、第2図に示すように吸着工程と再生工程を各活性炭塔でずらすことで対応する。

ガスタービンへの噴射蒸気をVOCの脱着に利用するため、脱着させるVOCは液化することなくガスタービンで燃焼されること、再生工程で加圧と減圧の工程があることが一般の活性炭回収方式と大きく異なる点であり、これが世界初の高圧蒸気脱着システムの特長である。

3. 目標性能

VOC回収ガスタービンシステム（以下、本システムと呼ぶ）の主要三目標の性能値を以下に示す。

- (1) VOC回収効率は95%以上とする。(1)式で算出した値とする。

$$Ef_1 = ((Q_2 + Q_3) \div Q_1) \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ef_1 : VOC回収効率 (%)

Q_1 : 回収塔入口VOC量 (kg/h)

Q_2 : 蒸気脱着でガスタービンに噴射されたVOC量 (kg/h)

Q_3 : 回収塔からのドレンに含まれるVOC量 (kg/h)

- (2) 出口VOC濃度は400ppmC（大気汚染防止法規制値）以下とする。ppmCは炭素換算濃度を示す。

- (3) VOC処理効率は99%以上とする。(2)式で算出

した値とする。

$$Ef_2 = (1 - (Q_4 \div Q_5)) \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Ef_2 : VOC 処理効率 (%)

Q_4 : ガスタービン出口排ガス中の VOC 量 (kg/h)

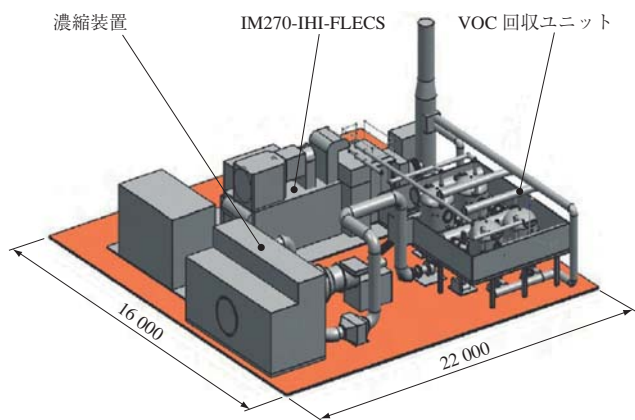
Q_5 : VOC 噴射量 (kg/h)

コージェネレーションシステムの目標性能を第 1 表に示す。開発のベースとした熱電可変型 IM270-IHI-FLECS に対して、VOC 回収型は VOC の化学エネルギーを回収する分、燃料消費が少なくなり総合効率が高くなる。85 kg/h の VOC を年間 6 600 時間処理すると、既存の燃焼処理を導入する場合と比べて、省エネルギー率は 22%、CO₂ 削減率は 26% になる。なお原油換算係数および CO₂ 排出係数は省エネルギー法、温暖化対策推進法の値を使用した。

第 3 図に VOC 回収ガスタービンの概略配置を示す。255 kg/h まで VOC を処理した場合、省エネルギー率および CO₂ 削減率はそれぞれ、35、39% まで向上する。省エ

第 1 表 コージェネレーションシステムの目標性能
Table 1 Target performance of cogeneration system

項 目	単 位	熱電可変型 IM270-IHI-FLECS	VOC 回収型 (計画値)	
			標準仕様	最大仕様
発 電 出 力	kW	2 500	2 133	2 368
蒸 気 噴 射 量	kg/h	2 500	500	1 500
回 収 VOC 量	kg/h	—	85	255
発 電 効 率	%	28.2	29.2	40.8
総 合 効 率	%	57.9	78.8	88.0
送 気 蒸 気 量	kg/h	3 710	5 190	3 880
主 燃 料	—	都市ガス (灯油)	都市ガス	
回 収 VOC 種 類	—	—	トルエン、キシレンほか	



第 3 図 VOC 回収ガスタービンの配置 (単位: mm)
Fig. 3 General arrangement of VOC energy recovery gas turbine (unit: mm)

ネルギーに伴いコージェネレーションのメリットが大きくなることと、既存の燃焼処理に掛かる補助燃料分の費用が掛からなくなると、さらにコストメリットが大きくなる。

4. 開発状況

本システムは、VOC の回収効率、ガスタービン燃焼器での安全・確実な VOC 処理、高圧蒸気で VOC を脱着する際のガスタービンへの安定した噴射が課題となる。本システム特有の蒸気噴射状態での燃焼性、高圧蒸気による活性炭からの VOC 脱着特性に対して当社基盤技術研究所で基礎評価を進め、良好な結果が得られたことから、当社呉ガスタービン発電所で実証試験を行った。本稿では、2007 年 1 月 ~ 2008 年 3 月に実施した評価からも製品化に向けて良好な結果を得ており、その取組みを紹介する。

連続して VOC を処理する場合には回収塔が複数必要になるが、実証試験は第 1 表に示す標準仕様に対して、処理風量が 1/12 の容量の回収塔 1 塔で実施した。第 4 図に本システムの実証試験フローを示す。

まず、濃縮装置を出た後の VOC を模擬した 2 000 ~ 4 000 ppm、580 m³_N/h のガスを作り、回収塔内の活性炭への吸着、蒸気による脱着でガス状態のままガスタービンに噴射する試験を行い、さらに液体 VOC を加圧ポンプで直接蒸気中に噴射し、その混合したものをガスタービンに噴射する試験との二つのケースについて行った。なお VOC としてトルエン、キシレン、12 種類混合溶剤の 3 種類を用いた。

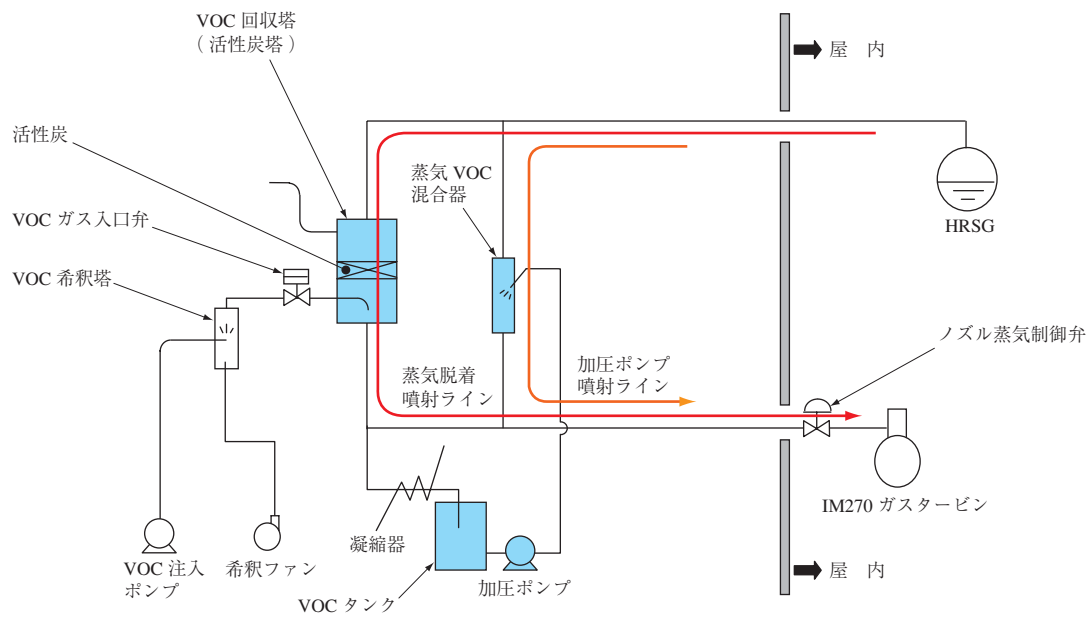
5. 実証試験結果

5.1 VOC の回収効率

本システムでは回収塔を加圧、減圧する際にドレンが発生する。ドレンには液化した VOC も含まれるので、蒸気脱着によるガスタービンへの噴射だけでは VOC の回収が完全にはならない。そこでドレンを VOC と水に比重分離する。比重分離されてタンクに貯まった液化 VOC を加圧ポンプで蒸気中に噴射することで、ドレンに含まれる VOC もガスタービンで処理できるシステムとした。

(1) 式で表される VOC 回収効率を、VOC としてトルエンを用いて検討した。VOC ドレンを回収しない場合に 65% であった回収効率が、ドレンから回収することで 90% に向上することを確認した。

VOC 回収効率の目標性能は 95% 以上である。そこで、減圧工程などで系外に排出していた蒸気を冷却して回収す



(注) HRSG : Heat Recovery Steam Generation (排熱回収ボイラ)

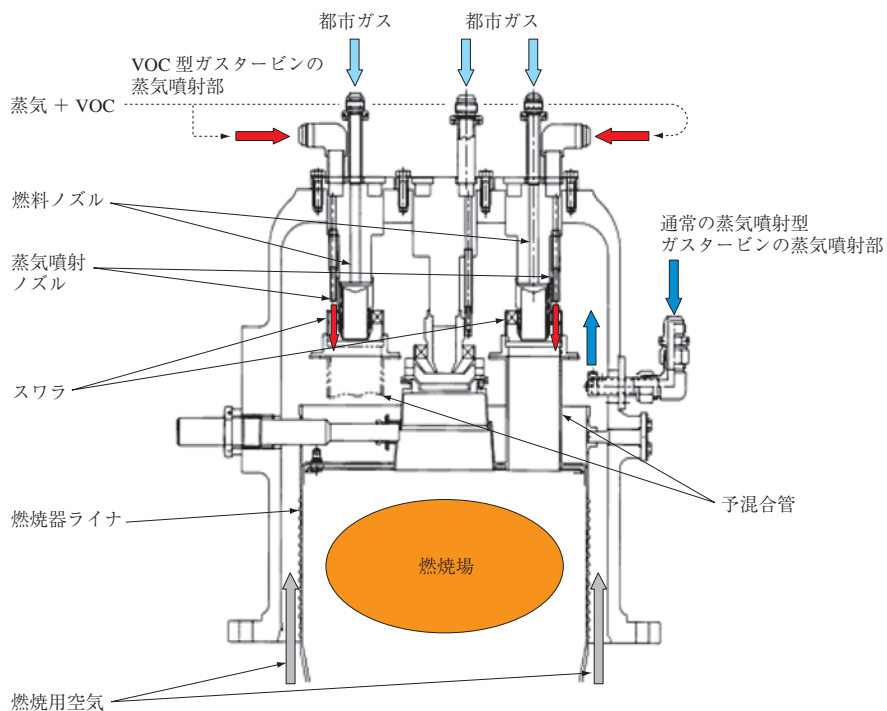
第 4 図 VOC 回収ガスタービンシステムの実証試験フロー
 Fig. 4 Test equipment of VOC energy recovery gas turbine system

るシステムを検討している。この改良の効果を、2008 年度の実証運転で確認する。

5.2 ガスタービン燃焼器での安全・確実な VOC 処理

VOC を安全かつ確実に処理するため、VOC 回収型では蒸気の噴射位置の変更が行われた。それに伴い新しい蒸気噴射ノズルを採用した。第 5 図に VOC 混合蒸気の噴射方式を示す。燃料ノズルの周りに蒸気噴射ノズルが設置さ

れ、VOC を含んだ蒸気はスワラ部を通り、予混合管へ導かれる。従来の燃焼器の側面から VOC 混合蒸気を噴射する方式では、可燃性ガスである VOC 混合気が燃焼器ライナに入る前の領域に存在し、異常燃焼などが起こる可能性があるが、本方式を用いれば、本質的な安全が確保できる。また、蒸気噴射ノズルから噴射された VOC 混合蒸気は通常燃料とともに予混合管で空気と混合されるので、VOC



第 5 図 VOC 混合蒸気の噴射方式
 Fig. 5 VOC-steam mixture injection system

が燃焼場を未反応のまま通り抜けていくことがなく、高い処理能力が得られる。ノズル以外の部分はベースとなるガスタービンと共通である。

(2)式で示す VOC 処理効率については 99%以上、ガスタービン出口の VOC 濃度についても 50 ppmC 以下と、開発の目標性能値を達成しており、十分な処理能力があることを実証している。一例としては、蒸気噴射量を 1 000 kg/h、VOC をトルエン、噴射量を 117 kg/h の条件下で、VOC 処理効率が 99.9%以上であることを確認できた。

5.3 高圧蒸気で VOC を脱着する際のガスタービンへの安定した噴射

VOC をガスタービンへ噴射する方式は、まず、蒸気脱着によってガスタービンに噴射する。次に、ドレン中の液化した VOC を加圧ポンプで蒸気中に噴射し、VOC 混合蒸気としてガスタービンに噴射する。

蒸気脱着によってガスタービンに噴射する際には、加熱されて活性炭から急激に出てくる VOC をいかに抑えるかがガスタービンの安全・安定した運転の鍵になる。回収塔からの脱着蒸気を徐々に増やしガスタービンに噴射する方式が構成上からは容易である。しかし、ガスタービンの運転を安定させるためには蒸気の量を段階的に増やすのは得策でない。そこで、回収塔をバイパスして蒸気噴射ができるラインを利用し、ガスタービンに蒸気噴射をしている状

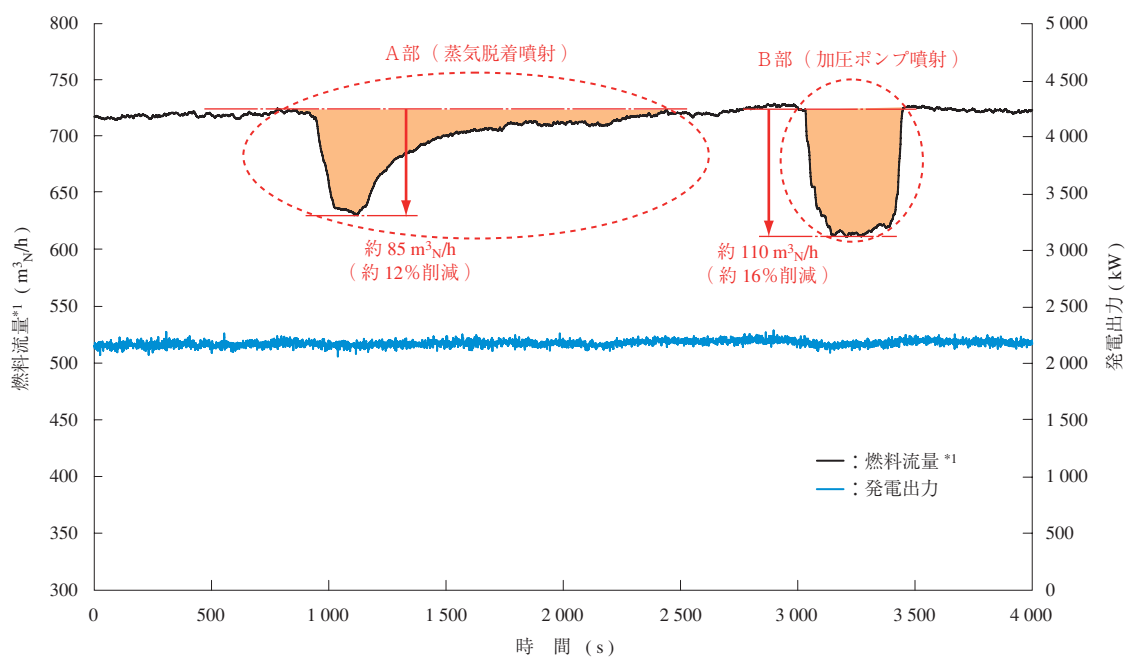
態から、脱着蒸気を徐々に噴射蒸気に混ぜていくことで、噴射される VOC 量の急激な変動を防ぎ、かつガスタービンへの噴射蒸気量を一定にする方式とした。

第 6 図に VOC 混合蒸気噴射時のガスタービン運転状況を示す。蒸気脱着および加圧ポンプ噴射時におけるガスタービンの都市ガス燃料流量と発電出力の時系列変化の例を示す。第 6 図中の A 部が VOC を蒸気脱着によってガスタービンに噴射した状態、B 部が加圧ポンプによってガスタービンに噴射した状態である。燃料流量が通常時と比べて減少している分が、投入された VOC のエネルギーに相当する。第 6 図では燃料の消費が最大 16%削減されている。全自動運転による VOC 噴射状態でも、ガスタービンと安全かつ安定に連係して運転できており、両方式が適正に設計されたシステムであることが実証できた。

6. 結 言

これまでの実証試験によって、VOC 回収ガスタービンシステムの製品化に向けて、基本的な技術の確認を行うことができた。今後は 2008 年 10 月から、隣接する造船工場の塗装ブースで発生する VOC 排出ガスを濃縮装置で濃縮し、ダクトで搬送してシステム全体の長期実証運転を実施する予定である。

当社では、経済性、エネルギー合理化、環境対策の複合した課題を抱える多くの事業者の方々に、総合的な対策・



(注) *1: 都市ガス

第 6 図 VOC 混合蒸気噴射時のガスタービン運転状況
Fig. 6 Gas turbine operation status during VOC-steam mixture injection

解決手段として、本システムを導入していただけるよう初号機実証運転を行い、製品化へと進めていく。

参 考 文 献

- (1) 芳村幸宏：熱電可変型ガスタービン IM270-IHI-FLECS を利用した VOC 処理コージェネレーショ

ンの開発 クリーンエネルギー 第 16 巻第 7 号
2007 年 7 月 pp. 9 - 14

- (2) 芳村幸宏, 工藤康人, 伊東正皓, 高橋克昌, 宇治
茂一：VOC 回収ガスタービンシステムの開発 日
本ガスタービン学会誌 Vol.35 No.2 2007 年 3 月
pp. 75 - 80