

特集：ガスタービンの将来展望 -ガスタービンは生き残れるか？-

VOC 回収ガスタービンシステムの開発

- 熱電可変型ガスタービンコージェネレーションの蒸気噴射技術と環境負荷低減への展開 -

芳村 幸宏*¹
YOSHIMURA Yukihiko

工藤 康人*¹
KUDO Yasuhito

伊東 正皓*²
ITO Masaaki

高橋 克昌*²
TAKAHASHI Katsuyoshi

宇治 茂一*¹
UJI Shigekazu

キーワード：VOC、VOC 処理、活性炭、吸着、蒸気脱着、燃料消費低減、蒸気噴射、熱電可変型ガスタービン

1. はじめに

揮発性有機化合物(VOC: Volatile organic compounds)は光化学オキシダントや浮遊粒子状物質 (SPC: 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、石油類のタンク等から排出され、また自動車排出ガスにも含有されるなど多種多様な発生源から排出される。排気中に数百～数千 ppm の低濃度で存在することと、含有組成の多様性とがあいまって、回収や処理に手間がかかり大気にそのまま廃棄されている。

主な対策技術は、VOC を活性炭などで回収・再生利用する方式と、酸化分解・無害化する方式である。酸化分解にも各種方法があるが大規模処理では主に触媒燃焼や蓄熱燃焼を始めとする燃焼処理が採用されている。いずれの方式も確実な処理が期待できるが燃焼処理のための補助燃料が必要になること、VOC 自身もつ市販液体燃料並みの化学エネルギーは未利用のまま廃棄されること等の解決すべき課題がある。そこで、廃棄された 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に利用するシステムを開発することで、前記の問題が解決できる。またその結果確実に VOC を処理するだけでなく、省エネルギー・CO₂ 排出量の削減、コストメリットが同時に達成できるため、事業者を取り巻く経済発展、エネルギー合理化、環境対策の複合した課題に対する総合的な対策手段となりえる。本稿では、弊社が独自開発した蒸気噴射型ガスタービン技術と先述の活性炭等による VOC 回収技術を組み合わせた新しいシステム開発への取り組みを紹介する。

2. 開発システムの概要

VOC 回収ガスタービンは、VOC の回収装置と蒸気噴

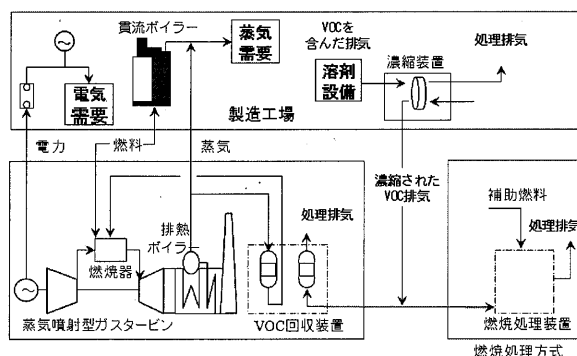


図1 VOC回収ガスタービンシステムフロー

射型ガスタービンを組み合わせたもので、システムフローを図1に示す。蒸気噴射型ガスタービンは、蒸気需要が減った場合や電力が優先的に欲しい場合に、排熱回収ボイラーの蒸気をガスタービンの燃焼器に噴射し、発電出力を増やすことで熱電比を柔軟に変えるシステムである。

一般的なVOC回収装置は、工場排気中のVOCを容器内に充填した活性炭等により補足した後、ほぼ常圧に近い蒸気で脱着・取り出し、冷却することで液化させ回収する。液化したVOCは水との密度差を利用して分離させ、再生利用する。本システムは、脱着にガスタービンの排熱回収ボイラーから出る蒸気を使い、VOCを脱着後液化することなく蒸気と共にガスタービンの燃焼器に噴射し燃焼処理する。

工場排気中のVOCは、回収装置の活性炭部を通る間に選択的に細孔に吸着される。活性炭部で効率よく吸着するため排気VOCの濃度は2000～3000ppmにする。排気中のVOC濃度が100～200ppmの場合は、ゼオライト製のハニカムコアをもつ回転式濃縮装置等で10から15倍に濃縮する。

活性炭の吸着能力が限界近くになったら、排気を排熱ボイラーからの蒸気に切り替える。活性炭は蒸気雰囲気中で加熱され、VOCを放出する脱着が起こる。VOCは、圧力約1.5MPa (Gauge) の飽和蒸気に混ざり、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る。活性炭を充填した容器である活

原稿受付 2007年1月15日

*1 石川島播磨重工業(株) 原動機プラント事業部
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲IHIビル

*2 石川島播磨重工業(株) 技術開発本部
〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1
横浜エンジニアリングセンター2号館

活性炭塔は複数あり、一つが蒸気で脱着されている間、残りが排気から VOC を吸着する。脱着する容器を概略1時間毎に順番に切り替えることで、VOC の吸着と脱着を同時にかつ連続させている。

蒸気中の VOC は、燃焼器の中で主燃料である都市ガスとともに燃焼・分解する。本来ガスタービンに投入する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、燃料消費を低減する。VOC をトルエンとすると、活性炭塔 4 本程度の回収装置 1 ユニットで1時間あたり VOC 約85kg をガスタービンに取り込む。取り込み量は排熱ボイラーからの脱着用蒸気を増やし1ユニット分の最大3倍まで増やす計画である。

VOC の取り込みによるガスタービンの燃料消費低減は、経済的なメリットを生むとともに、VOC を燃焼処理するためだけに使ってきた補助燃料もなくなるので、価値を生まない公害防止対策コストに躊躇する多くの事業者が導入しやすくなる。

VOC 回収装置とガスタービンコージェネレーションはどちらも単独で稼働できる方式とした。VOC 排気ガスをガスタービンの燃焼用空気として直接吸入し燃焼させる方式も候補であったが、ガスタービンの高温部の冷却のために抽気した空気中の VOC が燃焼せず排出してしまうこと、VOC の濃度が高いと、圧縮機で断熱圧縮されて高温になった場合の安全確保が難しい等の理由で採用しなかった。

3. VOC の排出規制の動向

継続した環境負荷低減の取り組みにもよらず、環境基本法で決められた光化学オキシダントや SPC の環境基

準値、ならびに光化学オキシダントの生成防止のための非メタン系炭化水素濃度の指針も、いまだ十分なレベルに達していない。VOC 規制では、浮遊粒子状物質や光化学オキシダントに係る大気汚染への対応として、工場などからの VOC の排出総量を平成12年度から平成22年度までに3割程度削減し、SPM の環境基準を達成することを目標としている。一環として工場等からの VOC の排出を包括的に抑制することを目的に、法規制と自主的取組みの双方の政策手法を適切に組み合わせる対策が始まった。平成16年大気汚染防止法の一部が改正され平成18年4月から VOC 排出事業者は、VOC 排出施設の届出義務、排出基準の遵守義務、濃度の測定義務が課せられた。

排出基準は工場等の排出口における濃度を規制する方式で、表1に示すように排出施設と規模要件毎に排出濃度の許容限度が定められた。ppm-C は炭素換算濃度で、例えばトルエン ($C_6H_5-CH_3$) 100ppm は、構成分子中の炭素数が7なので700ppm-C となる。

表2に、PRTR (化学物質排出移動量届出制度) で公表された大気への VOC の排出量順位を示す。VOC はトルエン、キシレン、酢酸エチルなど主なもので約200種があるが、表中に示す10物質ではほぼ90%以上を占めている。本システムは VOC 回収の効率、ガスタービンで燃焼させた後の腐食および発生物質の排出基準の制限より、塩素系 VOC と硫化物系の VOC を除く発生量上位物質を当面の対象にした。

4. IM270システム化と省エネ性・CO₂ 排出削減効果

弊社の蒸気噴射型熱電可変ガスタービンコージェネレーションには、6MW クラス IM400 IHI-FLECS と 2.5MW クラス IM270 IHI-FLECS があるが、ここでは IM270 IHI-FLECS に VOC 回収装置を組み合わせシステムのヒートバランス、システム省エネルギー率、ならびにシステム CO₂削減率の計画値を示す。図2に VOC 回収量をトルエン85kg/h とした場合、図3は255kg/h とした結果を示す。ここでシステム省エネルギー率は、

表1 VOC 排出規制

揮発性有機化合物排出施設	規模要件	排出基準
(1) 揮発性有機化合物を溶解して使用する化学製品の製造の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が3,000m ³ /時以上のもの	600ppmC
(2) 塗装施設(吹付塗装に限る。)	送風機の送風能力が100,000m ³ /時以上のもの	自動車等の製造の用に供するもの 既設700ppmC 新設400ppmC その他のもの 700ppmC
(3) 塗装の用に供する乾燥施設(吹付塗装及び電着塗装に係るものを除く。)	送風機の送風能力が10,000m ³ /時以上のもの	木材・木製品(家具を含む。の製造の用に供するもの) 1,000ppmC その他のもの 600ppmC
(4) 印刷回路用銅箔積層板、粘着テープ、粘着シート、はく離体又は包装材料(合成樹脂を積層するものに限る。の製造に係る接着の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が5,000m ³ /時以上のもの	1,400ppmC
(5) 接着の用に供する乾燥施設(前項に掲げるもの及び木材・木製品(家具を含む。の製造の用に供するものを除く。)	送風機の送風能力が15,000m ³ /時以上のもの	1,400ppmC
(6) 印刷の用に供する乾燥施設(オフセット輪転印刷に係るものに限る。)	送風機の送風能力が7,000m ³ /時以上のもの	400ppmC
(7) 印刷の用に供する乾燥施設(グラビア印刷に係るものに限る。)	送風機の送風能力が27,000m ³ /時以上のもの	700ppmC
(8) 工業製品の洗浄施設(乾燥施設を含む。)	洗浄剤が空気に接する面の面積が6m ² 以上のもの	400ppmC
(9) ガソリン、原油、ナフサその他の温度37.8℃において蒸気圧が20kPa以上となる揮発性有機化合物の貯蔵タンク(密閉式及び浮屋根式(内部浮屋根式を含む。のものを除く。)	1,000kl以上のもの(ただし、該貯蔵タンクは、容量が2,000kl以上のものについて排出基準を適用する。)	60,000ppmC

NAPEC殿資料より引用

表2 PRTR 排出データ

(H15年度データ)			
順位	物質番号	物質名	排出量(t ₂ /年)
1	227	トルエン	118,772
2	63	キシレン	48,043
3	145	塩化メチレン	24,637
4	40	エチルベンゼン	12,674
5	211	トリクロロエチレン	5,771
6	241	二硫化炭素	4,953
7	172	N、N-ジメチルホルムアミド	3,928
8	177	ステレン	3,802
9	96	塩化メチル	3,658
10	200	テトラクロロエチレン	1,977
上位10物質の合計			228,215
合計			250,433

処理対象VOC
排出量大、非塩素系、非硫黄系を当面の対象とする。

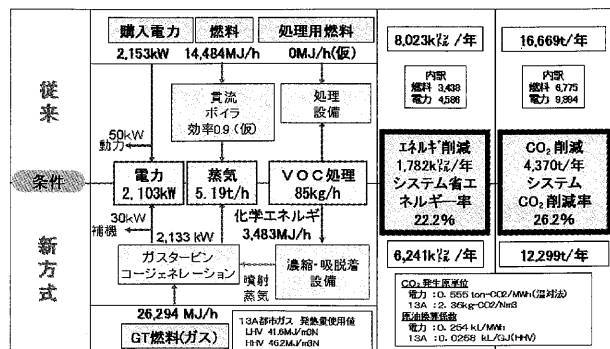


図2 VOC回収85kg/hヒートバランス (IM270)

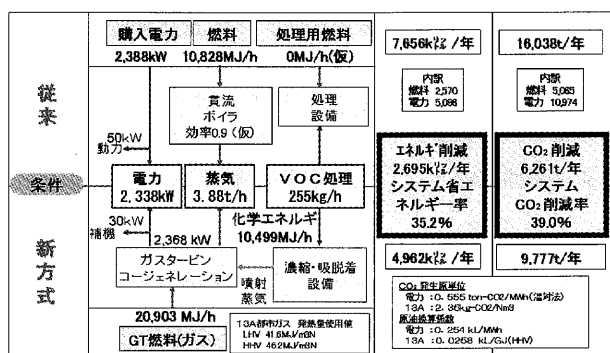


図3 VOC回収255kg/hヒートバランス (IM270)

図示の電力、蒸気、VOC処理量の条件で従来方式の投入エネルギー（購入電力、ボイラーおよびVOC燃焼処理装置）と新方式の投入エネルギー（ガスタービン）の原油換算値の差を従来方式の投入エネルギー量で除したものとす。CO₂削減率も同様に定義する。原油換算係数ならびにCO₂排出係数は省エネルギー法、温暖化対策推進法による数値とした。

年間稼働時間は8,280時間、濃縮・回収装置の所要動力、必要な冷水等のユーティリティは省略している。VOCの化学エネルギー分を置き換えた残りの主燃料投入エネルギーに対する発電量と送出蒸気のエネルギーの効率を、修正発電効率 η_{ec} 、修正熱回収率 η_{tc} とすると、VOC回収85kg/hの時 $\eta_{ec}=29.2\%$ 、 $\eta_{tc}=49.6\%$ 、255kg/hの時 $\eta_{ec}=40.8\%$ 、 $\eta_{tc}=47.2\%$ となる。つまり蒸気噴射技術を利用して未利用エネルギーを適切に取り込めば、発電出力2MWクラスで発電効率30%~40%、総合効率80%~85%のガスタービンコージェネレーションが可能となる。当然、熱回収は全量を蒸気で回収できるシステムである。また公害防止のための装置でありながら導入によって省エネルギーとCO₂排出量の削減も同時に推進できる。さらにVOCの処理量に相当する化学エネルギー分とこれまで燃焼処理にかかっていた補助燃料分の費用までコストメリットになるシステムである。

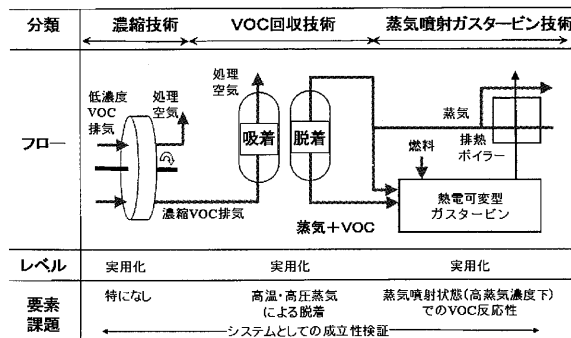


図4 技術課題

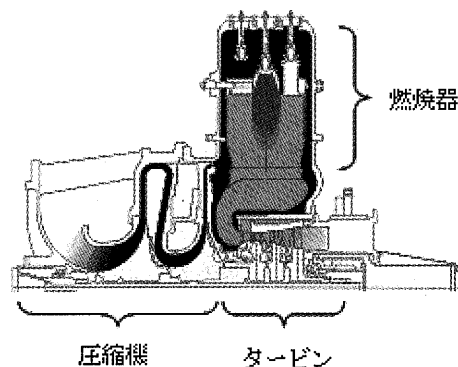


図5 IM270ガスタービン概略図

5. 開発課題

本システムに必要な技術は濃縮技術、VOC回収技術、蒸気噴射ガスタービン技術である。開発の課題を図4に示す。VOC回収技術では、従来大気圧に近い蒸気でVOCを脱着した後液化して密度差で分離していたが、高温・高圧の蒸気で脱着し液化せずガスタービンへ噴射することになるので、高温・高圧蒸気での脱着技術・液化防止対策・容器の耐圧化が課題となる。ガスタービン技術では、蒸気とともにVOCを取り込むため、高い蒸気濃度の状態でのVOC分解性の確保、より安全で確実な処理ができる取り込み方法、多様なVOCが混合した場合のVOCの分解性が課題となる。また1時間程度で脱着する活性炭塔を切り替えるが、いかに円滑に蒸気をガスタービンへ噴射し出力を安定させるかの運用シーケンスの確立が課題となる。ここでは、各要素について取り組んできたものを取り上げ説明する。

5.1 IM270ガスタービンと燃焼器へのVOC噴射方式

IM270はIHIで独自開発した高効率かつ脱硝装置なしでも低NO_xを実現したクリーンなエンジンである。ベースとなるIM270ガスタービンの概略を図5に示す。遠心2段圧縮機と軸流3段タービンからなる1軸の回転系を前後2個の軸受けで支持するシンプルな構造と単缶型の燃焼器を採用しており、組立整備が非常に容易なエンジンである。また、表3に示すように2MWクラスで

は秀逸な性能を誇っており、さらに派生型として蒸気噴射による熱電可変型、デュアルフューエル（ガス/液燃料）対応型の防災常用兼用機を商品化している。

今回は熱電可変型のさらなる発展型として、工場で発生した VOC を燃焼処理しながら、そのエネルギーをタービンで回収する VOC 回収型を開発した。

VOC 回収型の燃焼器は、圧縮機から供給された燃焼用空気がスワラーを通り、予混合管内で燃料と混合され、燃焼場に投入される構造である。さらに、熱電可変型は燃焼器の側面につけた蒸気供給ポートから直接内部へ飽和蒸気を噴射する構造であり、噴射された蒸気は燃焼用の空気とともにスワラーを通り、予混合管内で加熱、混合される。これに対し今回開発した VOC 回収型では蒸気噴射システムを追加し、図 6 に示すように燃料噴射弁から通常燃料に加え、VOC を含んだ蒸気をスワラー部へ噴射する構造にした。

これは、熱電可変型と同じく燃焼器側面から VOC 混合蒸気を噴射した場合、可燃性ガスである VOC 混合気が燃焼器ライナー外部にも充満し、燃焼異常発生時などに被害が拡大する危険を回避するためである。また、噴射弁より噴射された VOC 混合蒸気は通常燃料と共に予

表 3 IM270 主要緒元

項目	単位	ベースエンジン IM270	熱電可変型 IM270-IH-FLECS	VOC 回収型 (計画値)
出力(大気温度 15℃)	kW	2000	2500	2368
蒸気噴射量	kg/h	—	2500	1500
回収 VOC 量	kg/h	—	—	255(トルエン)
発電効率	%	25.4	28.2	40.8
総合効率	%	78.7	57.9	88.0
排熱ボイラ総蒸気量	kg/h	6000	6210	6230
送気蒸気量	kg/h	5900	3710	3880
燃料	—	都市ガス 13A、灯油、LPG	都市ガス 13A、灯油	都市ガス 13A
回収 VOC 種類	—	—	—	トルエン、キシレン他

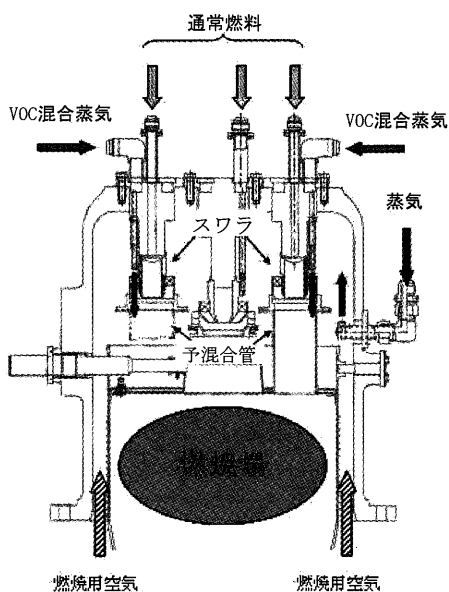


図 6 VOC 混合蒸気噴射方式

混合管で空気と混合され、VOC は冷却空気と混ざることなく全量確実に高温高压の燃焼場へと導かれる。噴射された VOC の化学エネルギー分は主燃料が減少する制御となっており、VOC 投入分の燃料が削減できる。

5.2 基礎燃焼試験

空気/蒸気と VOC が混合された混合気を処理するには①熱酸化処理：混合気を高温にすることで熱酸化させる方法、②燃焼処理：燃焼領域へ混合気を投入し燃焼させる方法が考えられる。いずれの方法でも投入した VOC がガスタービン外に排出されないようにするため、滞留時間内に処理を完了する必要がある。

そこで、VOC が分解する反応性を評価するための基礎的な装置を製作し、熱酸化試験と燃焼試験を実施した。本試験では、VOC としてトルエンおよび酢酸エチル（表 4 参照）を選択し、実機ガスタービン燃焼器と反応器の滞留時間を同一にして試験を実施した。

5.2.1 試験装置・方法

試験装置概略を図 7 に示す。試験装置は石英ガラス管による反応部/計測部と、空気/蒸気/メタンおよび VOC の供給装置・計量装置から構成される。VOC は液体で供給しディスペンサにより流量を制御し、ディスペンサ下流の配管内で高温蒸気を用いて気化させた。未燃炭化水素成分の計測には、水素炎イオン化法を用いた。

5.2.2 熱酸化試験

熱酸化試験では、空気/蒸気/VOC の流量比を、実機と同一となるように設定し、試験を実施した。計測誤差を少なくするため、反応部の滞留時間は実機の 3 倍程度

表 4 VOC 成分一覧

	Toluene	Ethyl acetate
Sample1	100	0
Sample2	0	100
Sample3	79	21

Unit:Vol%

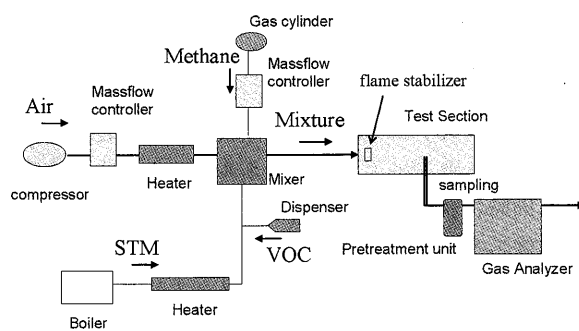


図 7 試験系統図

とした。空気/蒸気および VOC の混合気温度をパラメータに、VOC が分解する反応性について調べた。熱酸化率は以下のように定義している。

$$\text{熱酸化率} = \text{VOC 減少量} / \text{VOC 投入量}$$

図 8 に混合気ガス温度の熱酸化率への影響を評価した測定例を示す。高温になるほど、熱酸化率が大きくなっている。また、ベンゼン環を持つトルエンよりも酢酸エチルのほうが酸化しやすいことがわかった。しかし、最高試験温度における酢酸エチルの熱酸化率は低く、熱酸化のみで VOC を処理するには滞留時間を非常に長くしなければならないことがわかった。

5.2.3 燃焼試験

燃焼試験では、空気/蒸気/VOC/メタンを供給し、計測部入口の保炎器で火炎を形成した。流量比・滞留時間・供給温度は実機と同一になるように設定した。燃焼分解率を評価するために、空気/蒸気/メタンおよび VOC の予混合気を燃焼させて試験を実施した。燃焼分解率は以下のように定義した。

下のように定義した。

$$\text{燃焼分解率} = (\text{VOC 投入量} - \text{計測量}) / \text{VOC 投入量}$$

(※計測量にはメタンの未燃分も含まれる。)

図 9 に火炎温度に対する燃焼分解率を示す。火炎温度は、平衡計算から求めた断熱火炎温度である。燃焼分解率はガスタービンの低出力運転時の温度でも 0.99 以上の高い値となることがわかった。また、トルエンと酢酸エチルを混合した場合でも、高い分解率が得られた。

VOC の処理方法として、熱酸化処理と燃焼処理の二つの方法について評価を行った。その結果、燃焼処理は蒸気を大量に含有する VOC 混合気を短時間で処理することができ、蒸気噴射型ガスタービンに適用できることがわかった。一方、熱酸化処理は長大な滞留時間が必要となりシステム適用は困難であることがわかった。

5.3 活性炭基礎試験

本システムでは VOC を活性炭に吸着した後、活性炭をガスタービンの排熱ボイラーから出る高温・高圧の飽和蒸気(180～200℃, 1.2～1.5MPa)で脱着する方式である。活性炭は粒状成型炭(約3φ×5～10mm)であり、活性炭の再生条件が高温・高圧であるため、活性炭の破碎、比表面積・細孔容積などの変化による吸着性能の低下が懸念される。そのため、高温・高圧の蒸気条件における VOC 回収装置の安定性を確認する目的で、活性炭の耐久性および吸着・脱着の繰返しによる吸着性能試験を実施した。

試験の概略を図10に示す。耐久性試験では、活性炭をオートクレープに入れて高温・高圧条件に暴露後、活性炭吸着管に充填して吸着性能を比較した。また、吸着・脱着繰返し試験は活性炭を吸着管に充填したまま、吸着と脱着を交互に行った。試験条件は次の通りである。

- 活性炭：φ 3 mm の粒状炭を長さ 2 ～ 3 mm に整粒
- VOC ガス：トルエン 600～1000ppm
- 吸着ガス流量：

耐久性試験：1.6 l/m in

繰返し試験：5.7 l/m in

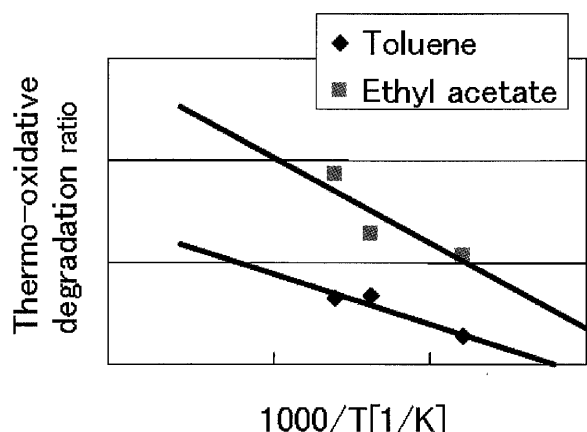


図 8 VOC 含有ガス温度の熱酸化率への影響

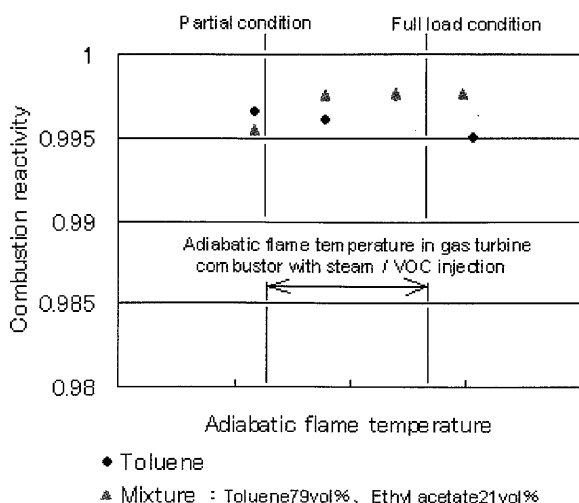


図 9 火炎温度に対する燃焼分解率

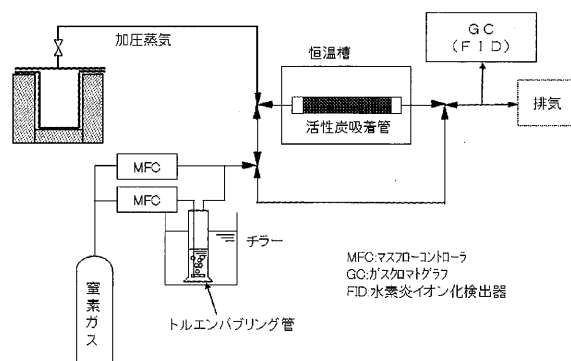


図10 高圧蒸気による活性炭の再生・吸着試験

- ・オートクレーブ：内容積 1 ℓ，外部電気加熱
加熱温度 320℃

5.3.1 耐久試験

活性炭をオートクレーブに入れて、実機にて想定される圧力から1.7倍弱まで圧力条件を振って15時間飽和蒸気に暴露させ VOC 吸着の破過時間を未処理の活性炭と比較した。また、先の想定蒸気条件から約10℃過熱させそれぞれ24時間、49時間、66時間暴露したケース、想定蒸気条件近傍での高温水に24時間浸漬させたケースでも VOC 吸着の破過時間を未処理の活性炭と比較した。何れの条件においても破過時間に顕著な差はなく、活性炭の初期吸着性能の低下は認められなかった。また、活性炭の外観上の変化も認められなかった。

5.3.2 吸着・脱着試験

吸着・脱着の繰返し試験では VOC を混合した空気を飽和破過（吸着管出口濃度が入口濃度と同じとなる状態）まで吸着させた後、吸着管温度を200℃に加熱した状態で、オートクレーブから蒸気を供給して活性炭から VOC を脱着させた。脱着時の蒸気条件は次の通りである。

- ・圧力 : 1～1.5MPa
- ・通気量 : (水換算) 2～3cc/m in
- ・再生時間 : 1 Hr

吸着・再生を14回繰返して行った。その時の代表的なトルエン吸着破過曲線を図11に示す。1回目(新品)の破過曲線と比較すると2回目以降は破過時間が短くなっている。これは脱着を蒸気で行っていることにより、活性炭の吸着容積の一部を蒸気が占有してトルエンの吸着容量が減少したものと考えられる。そのため2回目以降のデータについて検討した。

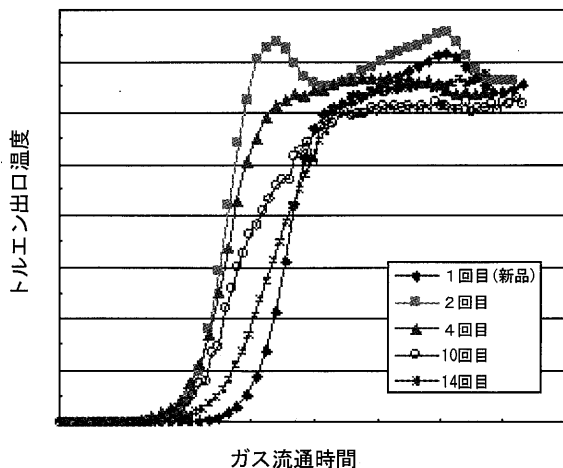


図11 トルエン吸着の活性炭破過曲線

この破過曲線からトルエンの吸着性能を評価したものを図12に示す。試験ごとにトルエン供給濃度に多少のバラツキがあるため、破過を検出した時点および破過が入口濃度の10%、15%になった時点で破過曲線から単位質量あたりの活性炭が吸着できるトルエン量を求め相対的に評価した。破過検出開始時の吸着量ではバラツキがあるものの、破過曲線の濃度が入口濃度の50%に達した時点までに供給したトルエン量、すなわち〔吸着容量〕は活性炭単位質量あたりほぼ一定になっている。したがって、吸着／脱着を繰返し行ってもトルエンの吸着量は安定しており、高温・高圧の蒸気によりトルエンの脱着、活性炭の再生が良好に行われていると判断できる。再生時の蒸気および脱着ガスをコンデンサで冷却回収すると、吸着量相当のトルエンが液として回収されていることを確認できた。また、繰返し試験後の活性炭には外観上の変化は認められなかった。

活性炭基礎試験により、本システムでの VOC 回収時に、高温・高圧（180～200℃，1.0～1.5MPa）の蒸気で活性炭の再生／脱着をしても活性炭の性能には影響しないことが確認できた。今後の実証試験では、VOC 回収装置の活性炭の吸着／再生を含めたシステム全体の検証を行う予定である。

6. まとめ

これまで省エネルギー効果を目指した蒸気噴射技術は、VOC 環境負荷の低減効果にも有効なシステム技術となる可能性を紹介した。本システムはこの後弊社呉ガスタービン発電所での実証運転を計画しており、より多くの事業者にとって経済性、エネルギー合理化、環境対策の複合した課題に対する総合的な対策手段となるもので、地球環境の悪化防止に大いに役立っていくと確信している。

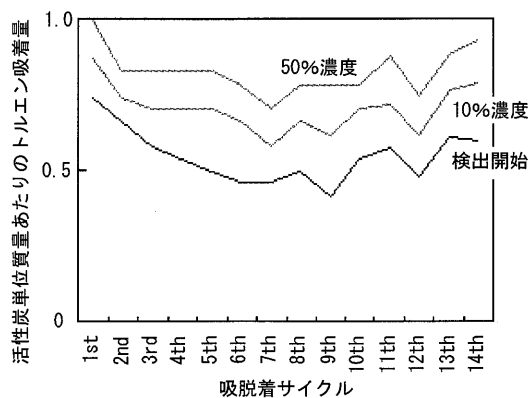


図12 活性炭の性能（吸着容量の変化）