

研究論文

高温排熱を発電効率向上に活用する コージェネレーションの開発 — 揮発性有機化合物の脱臭炉排ガス利用 —

Development of Efficiency-Enhanced Cogeneration System Utilizing High-Temperature Exhaust Gas from Regenerative Thermal Oxidizer for Waste Volatile Organic Compounds Gases

坂内正明*・波々伯部 彬**・古川昌彦***・柏木孝夫****
Masaaki Bannai Akira Houkabe Masahiko Furukawa Takao Kashiwagi
秋澤 淳*****・吉田卓弥*****・山田博行*****
Atsushi Akisawa Takuya Yoshida Hiroyuki Yamada

(原稿受付日2004年6月28日, 受理日2004年10月1日)

Abstract

We have developed a gasturbine cogeneration system that makes effective use of the calorific value of the volatile organic compound (VOC) gases exhausted during production processes at a manufacturing plant. The system utilizes the high-temperature exhaust gas from the Regenerative Thermal Oxidizer (RTO) which is used for incinerating VOC gases. The high-temperature exhaust gas is employed to superheat the steam injected into the gasturbine. The steam injection temperature raised in this way increases the heat input, resulting in the improved efficiency of the gasturbine. Based on actual operation of the system we obtained the following results.

1) Operation with the steam injection temperature at 300 degrees-Celsius (45 degrees superheated from 255 degrees-Celsius) increased the efficiency of the gasturbine by 0.7 percent.

2) The system can enhance the efficiency by 1.3 percent when the steam injection temperature is elevated to 340 degrees-Celsius (85 degrees superheated). In this case, up to 6.6 million yen of the total energy cost and 400 tons of carbon dioxide (CO₂) emissions can be reduced annually.

3) A gasturbine cogeneration and RTO system can reduce energy consumption by 23 percent and CO₂ emission by 30.1 percent at the plant.

1. はじめに

地球温暖化を進める最も大きな要因は化石燃料の燃焼時に排出する二酸化炭素 (CO₂) である。CO₂削減のための方策としてCO₂排出量が少ない都市ガスを利用したコージェネレーションは有力な手段の一つであり、エネルギーを多消費する一般産業の工場などで急速に普及が進んでいる¹⁾。

一方、記録メディアを生産する工程では磁性体塗付のために酢酸エステルなどの有機溶剤を利用しているため、生産工程で揮発性有機化合物を含んだガス (以下VOCガスと

称する。VOC: Volatile Organic Compounds) が発生する。VOCガスは可燃性であり臭気も有するため安全及び環境上の観点から今後排出濃度の規制も検討されている。

VOCガスの処理方法は、補助燃料を使ってガスを脱臭炉で燃焼させて臭気を除去する方法が一般的であるが、従来の補助燃料方式には、以下の2つの課題²⁾があった。

(1) エネルギーの大量消費

VOCガスの臭気を分解するには、ガスを約800℃の高温に保持する必要がある。このため、多量に燃料を使用していた。

(2) 排熱の利用方法

VOC排ガス (約800℃) からの熱回収方式は低温 (200℃以下) 蒸気への熱変換が一般的であるが、高温からの熱回収としてはエクセルギー的に無駄であった。また、排熱を熱よりエクセルギーが高い電気に変換するガスタービンへの適用例は見受けられない。

今回VOCガスの処理は蓄熱式²⁾にした。蓄熱式は排熱を蓄熱して再利用するため、補助燃料をほとんど必要としないので省エネルギーを図れる。

我々はこのに加えて今回新たに脱臭炉からの高熱排熱をガスタービンの発電効率向上に利用するシステムを開発し

* (株)日立製作所 エネルギーソリューションサービス推進本部部长

E-mail: masaaki_bannai@pis.hitachi.co.jp

〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台4-6

** 富士写真フイルム(株)R&D統括本部生産技術本部技術部長

〒250-0001 神奈川県小田原市扇町2-12-1

**** 東京農工大学大学院生物システム応用科学研究所教授

***** 助教授

〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

***** (株)日立製作所 電力・電機開発研究所主任研究員

〒312-8507 茨城県ひたちなか市堀口832-2

***** (株)日立エンジニアリングサービス エネルギーソリューション推進部技師

〒316-0023 茨城県日立市東大沼町1-15-1

たので報告する。効率向上は高温排熱を活用したガスタービンへの噴射蒸気の再過熱によって実現するが、これを蒸気再過熱システムと呼ぶ。本方式は、VOCガスの熱エネルギーの一部を電気に変換するシステムである。

さらに本システムでの発電効率の向上効果を実機の試験運転で検証し、全体の設備を年間運転したときの経済性と環境負荷性の向上効果も予測した。

2. 脱臭炉排熱利用ガスタービンコージェネ

富士写真フィルム株式会社小田原工場向けの省エネルギー計画において、工場の電気・熱の需要の特性を考慮して種々の検討を重ね、蒸気再過熱システムを考案した。本章ではその考え方で、本システムの特徴を説明する。

2.1 対象工場の概要

対象工場は、磁気テープなどの記録メディア、液晶ディスプレイ用視野角膜などの電子ディスプレイ材料や写真用化学薬品など多岐にわたる製品を生産している。ここでは生産のために電気と蒸気を消費しており、一部の生産設備からはVOCガスを発生する。従来、電気は商用電力を購入し、蒸気は油専焼ボイラと脱臭炉の排熱ボイラで発生させていた。またVOCガスは、燃料で燃焼させ臭気を除去する直燃式脱臭炉により処理し、排ガスから蒸気を回収していた。

これに対して、以下の2つの省エネルギー実行計画が立てられた。

- (1) 工場使用エネルギーとCO₂排出量の大幅削減
- (2) VOCガス処理の省エネルギー化

(1)への対応策として、エネルギー効率が高いガスタービンコージェネレーション（以下GTコージェネと称する）の導入を決定した。また、(2)への対応策として、VOCガス燃焼後の高温排ガスを蓄熱回収し、この熱をVOCガスの

予熱に利用する蓄熱式脱臭炉を導入することにした。

2.2 ガスタービンコージェネの導入

GTコージェネの容量は、工場の年間の電気・熱負荷パターンから7,000kW級を選定した。その燃料は環境負荷が小さい都市ガスとした。ガスタービンは電気と蒸気の両方を供給できるが、工場の熱負荷は蒸気需要が少なくなる季節、時間帯が多いので、熱電可変型を採用することにした。熱電可変とは、ガスタービンから過熱蒸気を回収し、電気・熱をそれぞれの需要に応じて調整し出力する方式である。

2.3 蓄熱式脱臭炉の導入

VOCガスを脱臭処理する方式は大別して従来の直燃式と近年導入が進みつつある蓄熱式の2つがある。それらの特徴を図1に示す。

両方式とも燃焼炉でVOCガスを燃焼させる方式である。VOCガスはトルエンなどの有機化合物なので、燃焼により二酸化炭素と水に分解脱臭ができる。

直燃式は補助燃料を用いる方式のため、分解のための燃料を多量に必要とする。これに対して蓄熱式は、排ガスの排熱を蓄熱で再生利用することにより、燃焼の熱をまかなうので、補助燃料がほとんど不要な省エネルギーシステムである。

2.4 余剰熱の有効利用方法の検討

省エネルギー実現のために、GTコージェネを導入し、脱臭炉を直燃式から蓄熱式に更新することとした。しかし工場での電気、熱の需給バランスをみるとガスタービンと脱臭炉の排熱回収ボイラから出る回収蒸気量の総和が、工場ですぐ蒸気量を上回る時間帯が多くなることが予想された。そこで、この対策のため、余剰熱を電気に変換する方法を模索した。

ガスタービンの排ガスから熱回収した過熱蒸気を燃焼器

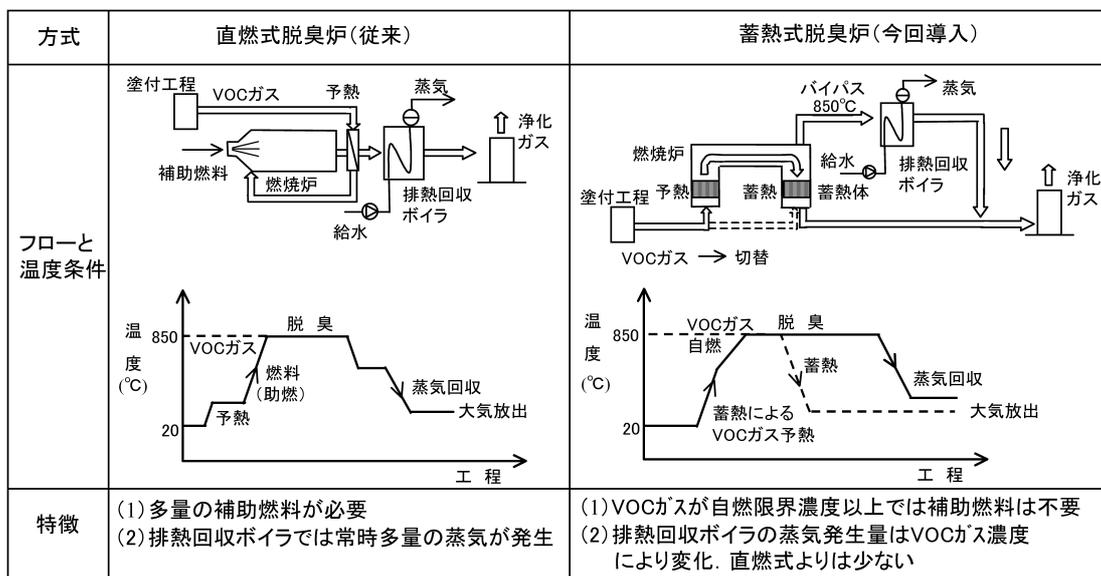


図1 直燃式脱臭炉と蓄熱式脱臭炉の比較

に噴射すると、ガスタービンの発電出力を増加できる。このとき噴射蒸気を再過熱すると噴射蒸気の保有熱量が増大するので、ガスタービンへの燃料投入量を低減でき、発電効率の向上が期待できることに着目した。

再過熱度を上げる方法は、ガスタービン排熱(530℃)と脱臭炉排熱(850℃)利用の2つが考えられる。類似システムへの適用の拡張性、効率向上の優位性を加味し、エクセルギーを高めることが容易な脱臭炉からの高温排熱利用を選択した。

2.5 蒸気再過熱による発電効率向上

第2.4節の考えを具体化すると図2に示すシステムとなる。脱臭炉の排熱ボイラの蒸発器と節炭器の間にガスタービン噴射蒸気の再過熱器を設ける。ガスタービン排熱ボイラからの過熱蒸気(255℃)を340℃(再過熱度+85℃)まで再過熱すると、蒸気の保有エンタルピーが増加するので、ガスタービンへの投入エネルギーの削減が図れる。再過熱器と蒸気供給系の材質は、設備のコストアップが過大とならないようSTB340を選定した。この材質は許容温度425℃であり、340℃以下でも通常使用している。

3. 性能の検証と評価の方法

蒸気再過熱の効果を検証するために試験運転を実施し、この結果を今回開発したガスタービン性能評価モデルで解析し、効果を評価した。これらの評価結果を用いて、蒸気再過熱システムによる経済性と環境負荷性の改善効果を評価した。

3.1 試験運転の方法

試験運転は2日間にわたり2回(2 Cases)実施した。各Case毎に蒸気再過熱なし、ありの場合があるので、合計4種類(1種類の運転をRunと記す)の運転データを計測した。試験運転の計画条件を表1に示し、データ計測項目を表2に示す。Run1と2(Run3と4)はいずれも性能

表1 試験運転の計画条件

| Case | | 1 | | 2 | | |
|-------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| Run | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 蒸気再過熱 | | なし | あり | なし | あり | |
| 蒸気噴射 | 温度 | ℃ | 255 | 300 | 255 | 300 |
| | 再過熱度 | ℃ | 基準 | +45 | 基準 | +45 |
| | 圧力 | MPa(G) | 1.75 | | | |
| | 流量 | kg/h | 5,000 | | | |

表2 データ計測項目

| 項目 | | 中央監視 | 現場計器 |
|------------|--------------------|------|------|
| 吸気 | 吸気温度 | ○ | - |
| | 大気圧力, 吸気圧力損失, 相対湿度 | - | ○ |
| 蒸気噴射 | 温度, 圧力, 流量 | ○ | - |
| 圧縮機 | 出口温度, 圧力 | ○ | - |
| タービン | 出口温度 | ○ | - |
| 燃料流量, 発電出力 | | ○ | - |

値に近いことが予想されたので、計測データの再現性を重視し、再過熱有無の試験は連続して行った。また効率は状態安定後180点(10秒毎, 30分間)のデータを計測し、t分布により統計的に評価⁹⁾した。

試験運転の負荷は、負荷の安定性、制御性を加味して、定格値の90%とした。蒸気の再過熱温度は試験運転での温度の上ぶれ(蒸気再過熱温度が340℃以上になること)も懸念されたので300℃(再過熱度+45℃)を目標値として試験運転を行った。現在の実運用では設計値である340℃(再過熱度+85℃)で安定に稼動している。

3.2 性能評価モデル

蒸気再過熱による効果を定量的に評価するためには、各運転時の大気条件等を補正しなければならないので、運転条件を補正評価できる性能評価モデルを構築した。

性能評価モデルは図3に示すように燃焼計算モデルと出力計算モデルで構成した。

(1) 燃焼計算モデル

燃焼計算は、熱電可変型の蒸気噴射ガスタービンの構成

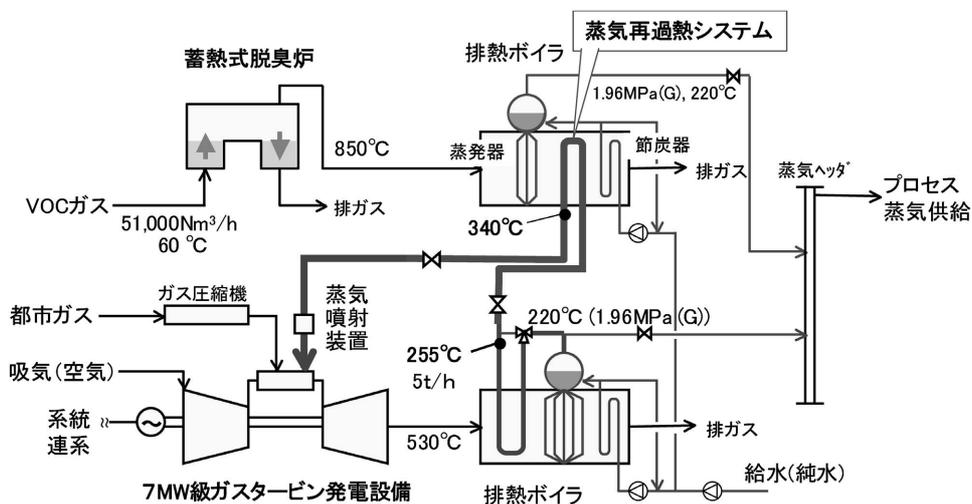


図2 蒸気再過熱による熱利用のシステムフロー

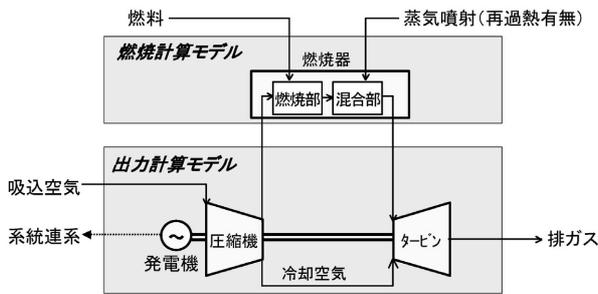


図3 ガスタービン性能評価モデルの構成

を模擬し、燃料の燃焼と、燃焼ガスと噴射蒸気の混合の2つのモデルで構成した。

燃焼部では、圧縮機出口の空気条件と燃料特性に基づいて、燃焼の物質・熱、熱収支を計算し、燃焼ガス特性を求める。

混合部では、燃焼ガス特性と噴射蒸気の特성에基づいて、両者の混合後の状態を計算する。混合部モデルにより、噴射蒸気の再過熱による効果試算が可能である。

(2) 出力計算モデル

出力計算モデル⁵⁾は、タービン、圧縮機や吸気条件に基づいてガスタービン出力を計算することができる。

タービン軸出力と圧縮機動力の差が出力である。これらの値は、ガス、空気の入口・出口条件から求めた。また圧縮機の吸気は大気(状態、温度、圧力、湿度)を湿り空気として入力できるようにし、試験運転での周囲条件の差異を補正する機能を持たせた。

発電効率は式(1)のように、発電出力 E_{out} とガスタービンの入力エネルギーすなわち都市ガスの流量 V_f と発熱量 LHV の積との比である。蒸気再過熱時のガスタービンへの入力エネルギーは都市ガスとVOC高温排ガスによる過熱エネルギーの和であるが、本報では排熱による効率向上効果を求めることを目的としたので、分母は都市ガスの一次エネルギーとして評価した。

$$\eta_e = E_{out} / (V_f \times LHV) \dots\dots\dots (1)$$

3.3 経済性及び環境負荷性の評価

蒸気再過熱システムを実運用に供した場合の、エネルギーコストの削減効果とCO₂排出量の改善効果を評価した。

(1) 試算条件

小田原工場は、年間340日運用である。ガスタービンは大気温度によって性能が変わるので、試算にあたっては1年を4季に分け、それぞれの季節毎の運転コスト、環境性を解析した。

噴射蒸気の温度は、再過熱なしのとき255℃、ありの場合には蒸気を85℃再過熱し340℃とした。

(2) 経済性と環境負荷の評価

蒸気再過熱の有無によるエネルギーの削減コストを評価した。年間エネルギーコストACは、式(2)に示すように燃焼消費量 F_i と、燃料単価 UC_f 、稼働時間 H_{r_i} から年間の燃料代を計算した。燃料(都市ガス)の単価は35円/Nm³とした。ここでiは1から4を示し順番にそれぞれ四季(春・夏・秋・冬)を表わす。

$$AC = \sum_{i=1}^4 (H_{r_i} \cdot F_i \cdot UC_f) \dots\dots\dots (2)$$

蒸気再過熱の有無によるCO₂排出量を評価した。CO₂排出量は式(3)に示すように、燃料消費量に、燃料の燃焼にともなうCO₂排出係数 UE_f を乗じ、各季節の稼働時間 H_{r_i} 分を合計して求めた。

$$AE = \sum_{i=1}^4 (H_{r_i} \cdot F_i \cdot UE_f) \dots\dots\dots (3)$$

4. 運転結果と経済性、環境負荷性の評価

4.1 運転結果

試験運転の結果を表3に示す。燃料流量及び発電出力は計測値(以下、これらを観測値と呼ぶ)である。各Run中の発電出力の変動巾は試験中±1.1%以内に入っており出力を十分安定化できた。

発電効率は、Case 1では、蒸気再過熱したRun 2は、再

表3 試験運転の条件と性能評価

実施日 '03年8月26, 29日

| Case | | | | 1 | | | | 2 | | | |
|-------|-------------|---------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----|--|----|--|
| Run | | | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
| 蒸気再過熱 | | | | なし | | あり | | なし | | あり | |
| 運転条件 | 大気 | 温度 | ℃ | 35.55 | 36.01 | 30.50 | 28.64 | | | | |
| | | 圧力 | hPa | 1,009 | 1,009 | 1,011 | 1,010 | | | | |
| | | 相对湿度 | % | 54 | 55 | 75 | 78 | | | | |
| | 蒸気噴射 | 温度 | ℃ | 258.3 | 302.1 | 253.5 | 295.7 | | | | |
| | | 圧力 | MPa(G) | 1.76 | 1.73 | 1.77 | 1.73 | | | | |
| | | 流量 | kg/h | 4,991 | 4,986 | 4,974 | 4,988 | | | | |
| 性能観測値 | 燃料流量 | | Nm ³ /h | 1,709 | 1,699 | 1,709 | 1,696 | | | | |
| | 発電出力 | | kW | 6,392 | 6,380 | 6,404 | 6,395 | | | | |
| | 発電効率(標本平均値) | | % | 32.35 | 32.48 | 32.41 | 32.63 | | | | |
| | 効率変化(相対値) | | - | 基準 | +0.41% | 基準 | +0.65% | | | | |
| 統計値 | 発電効率 | 標本標準偏差 | % | 0.148 | 0.209 | 0.177 | 0.160 | | | | |
| | | 99%信頼区間 | % | 32.32~32.38 | 32.44~32.53 | 32.38~32.45 | 32.59~32.66 | | | | |

過熱しないRun 1 と比べ、標本平均値が32.35%から32.48%へと相対比で0.41%上昇している。Case 2 も同様に、蒸気再過熱により32.41%から32.63%へと相対比で0.65%上昇している。

また各Runの180点の観測結果から、t分布の信頼水準を99%として求めた発電効率の母平均の信頼区間を表に示す。Run 2 の発電効率は、信頼区間の幅を含めてもRun 1 よりも明確に高く、Run 4 についても同様にRun 3 よりも高い。従って蒸気再過熱による発電効率の上昇は統計的に有意である。

ガスタービンの効率は吸気温度が高いと低下する特性があるため、吸気温度のみを考えると、発電効率は、Run 2 はRun 1 よりも低く、Run 4 はRun 3 よりも高くなると考えられる。しかし、運転結果はCase 1, 2 のいずれも蒸気再過熱後に効率が上昇した。これは蒸気再過熱の効果による。

4.2 性能評価モデルによる検証

Run 1 から 4 について、大気条件、圧縮機出口条件、燃料流量、蒸気噴射条件の観測値を入力として、性能評価モデルでガスタービン性能を計算した結果を図 4 に示す。

性能評価モデルは、発電出力の計算値と観測値が一致するように、出力に関わるパラメーターをRun 1 のデータを用いて調整した。発電効率の計算結果をみると、Run 2 からRun 4 のいずれも観測値と計算値の誤差は0.15%以下と小さく、開発した性能評価モデルは有用であると考えられる。

次に再過熱による効果を試算するため、運転条件を同一にして性能シミュレーションを実施した。Run 2, Run 4 を対象として、再過熱蒸気温度は観測値を用い、その他は蒸気再過熱をしない場合のRun 1, Run 3 の条件に揃え、

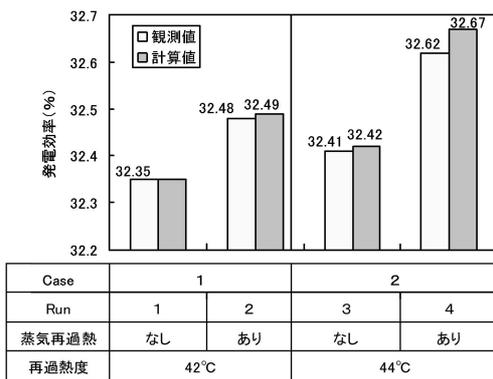


図 4 性能観測値とモデル計算値の比較

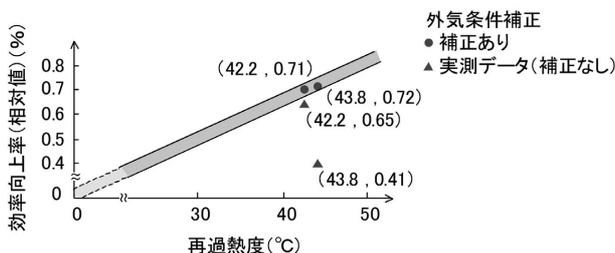


図 5 再過熱による発電効率の向上

性能評価モデルを用いて性能を計算した。その結果を図 5 に示す。

蒸気再過熱による発電効率の向上幅は、41~42℃の再過熱によりCase 1 では0.71%、Case 2 では0.70%となり、Case 1 とCase 2 の差は相対値で 2%以下となった。図から明らかのように外気条件を補正すると、再過熱度と効率向上率には線形の関係があると考えられる。またこの結果から、外気条件などの運転条件をモデルで補正すれば、性能向上を定量的に推定できることを示している。正味の効率向上幅はCase 1, Case 2 ともに45℃の再過熱で約0.7%と推察される。

4.3 経済性及び環境負荷性の評価予測

(1) 再過熱による効果

a 発電効率の向上

各季節での蒸気再過熱の有無によるガスタービン性能の試算結果を図 6 に示す。

蒸気再過熱を行うと、発電効率は再過熱なしに比べ1.2~1.3%向上する。発電効率の向上率は、前述の試験運転の結果の約0.7%に対して 2 倍近い。これは、蒸気再過熱時の噴射蒸気の再過熱度が、本節では85℃であるのに対して、試験運転では約45℃であったことによる。

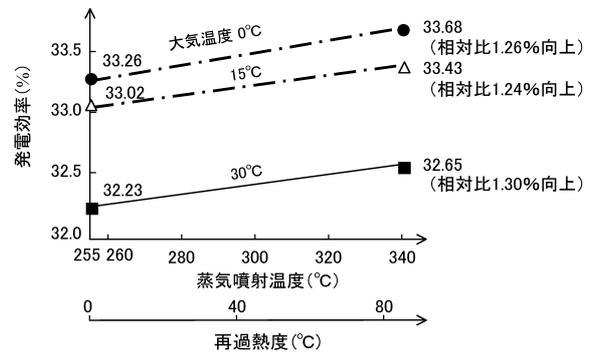


図 6 蒸気再過熱による発電効率向上効果

b 経済性と環境負荷性の効果予測

運用シミュレーションを行って算出したGTコージェネ分の年間エネルギーコスト削減の予測を図 7 に示す。

蒸気再過熱による年間のエネルギーコストの削減効果は、660万円となった。これは、蒸気再過熱なしの場合のコストの1.3%の削減に相当する。

また再過熱器の設備費と蒸気配管の工事費はあわせて1,800万円であったので、単純投資回収年数は2.7年となり十分実用性のある設備投資であることがわかった。

同様にガスタービン発電分の年間のCO₂排出量を試算した。再過熱しない時の排出量は32,050t-CO₂であるが、再過熱を行うと31,650t-CO₂となり400t-CO₂削減できる。これはGTによる発電でのCO₂排出量の1.25%に相当する。(都市ガスCO₂排出係数⁶⁾ 2.15t-CO₂/10³Nm³)

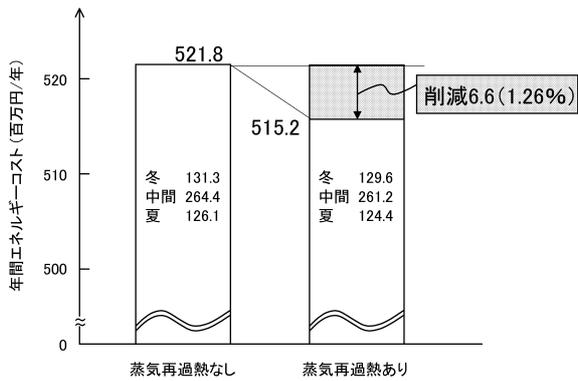


図7 エネルギーコスト削減の予測(GTコージェネ分の比較)

(2) 脱臭炉とコージェネの組合せによる総合効果

図8は省エネ設備導入前と、蓄熱式脱臭炉と排熱利用GTコージェネを導入後の工場全体の年間省エネルギー効果の予測を示す。

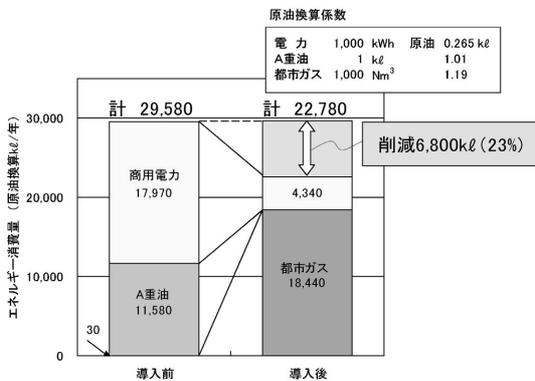


図8 脱臭炉とコージェネの組合せによる省エネルギー効果の予測(工場全体)

購入電力、A重油、都市ガスのいずれも一次エネルギーに換算した。年間のエネルギー削減量は6,800kℓとなり、従来比23%の省エネルギー効果が得られる。

同様に図9は設備導入前と蓄熱式脱臭炉とコージェネ導入後の年間の工場全体のCO₂排出量削減の予測を示す。CO₂排出係数は、購入電力の環境省報告書⁶⁾の値(0.378kg-CO₂/kWh)を用いた。都市ガスを使用しているため、CO₂削減効果は大きく16,890t-CO₂となり、従来比30.1%も削減できると想定される。

5. 考察

5.1 コージェネシステムのエネルギーフロー

脱臭炉とその排熱を利用した熱電可変GTコージェネの熱収支を図10に示す。

蒸気再過熱システムでは、VOCガスの一次エネルギー

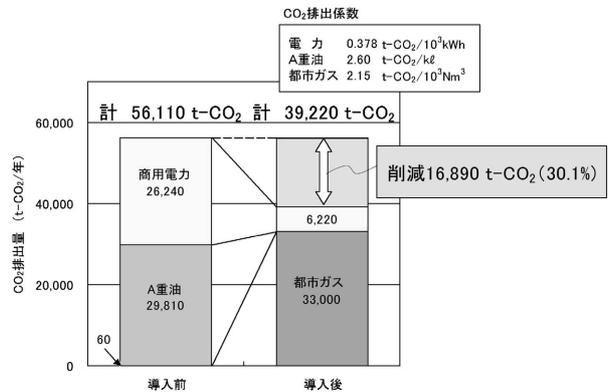


図9 脱臭炉とコージェネの組合せによるCO₂排出量削減の予測(工場全体)

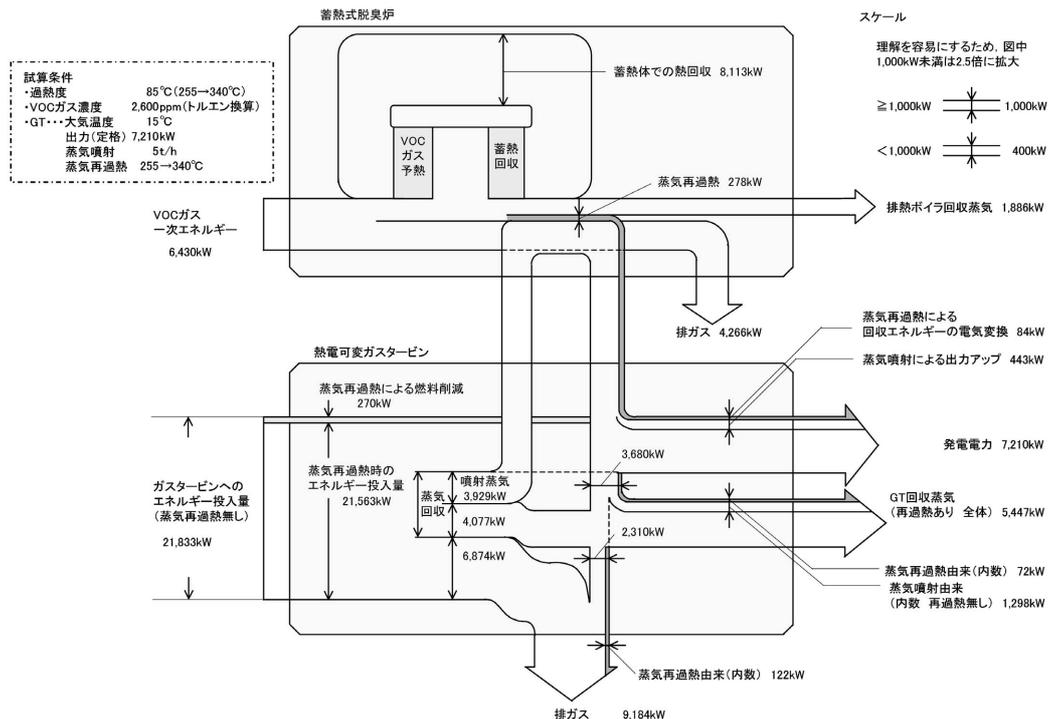


図10 脱臭炉排ガスをガスタービン噴射蒸気の再過熱に利用するコージェネシステムの熱収支

6,430kWのうち278kWを回収する。この回収エネルギーのうち、84kW（30%相当）は電気に変換され、72kW（26%相当）はガスタービン排熱回収蒸気として回収される。脱臭炉の排熱をガスタービンに導いて有効利用することにより、ガスタービンの燃料消費量を、270kW（1.2%相当）削減できる。

5.2 蒸気再過熱度の上昇による効果

蒸気再過熱システムによるガスタービン噴射蒸気の再過熱温度の計画値を340℃と低く設定した。これは蒸気供給系の材質の耐熱温度性に制約されたためである。VOCの排ガス温度は850℃であるので、再過熱温度を750℃程度まで上げるポテンシャルがある。この温度域での推奨材質は、火SUS310J2TBである。材質の耐熱温度を上げ、再過熱度を上昇させることができれば、発電効率をさらに向上させることができる。再過熱度を変化させたときの発電効率への効果の試算結果を図11に示す。

過熱温度100℃当たり、発電効率を相対比で1.5%向上できるので、蒸気噴射温度を750℃まで上昇させると、7.0～7.6%の向上が見込める。

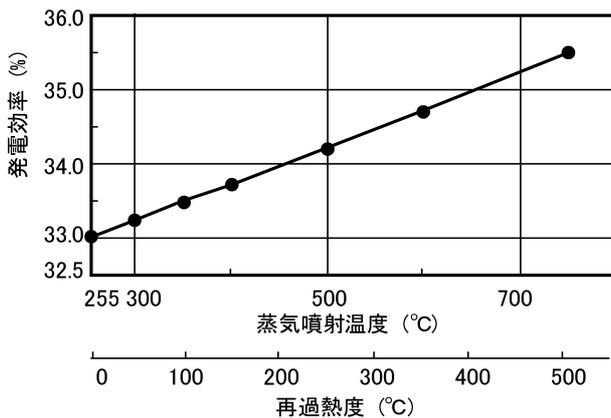


図11 蒸気再過熱度と発電効率の関係

6. おわりに

省エネルギーを実現するガスタービンコージェネシステムにおいて、VOCガスの脱臭炉からの高温排熱をガスター

ビン発電設備の発電効率向上に活用する蒸気再過熱システムを開発した。この設備は2003年9月から順調に稼働している。実機の運転結果に基づいてその効果を評価し、以下の結果を得た。

(1) 試験運転での効率向上評価

蒸気を255℃から300℃まで45℃再過熱する試験運転を実施し、運転条件の変化を補正して評価すると、発電効率を0.7%向上することができた。

(2) 実運用での効果の推定

蒸気を255℃から340℃まで85℃再過熱すれば、発電効率の向上率は1.2%となる。このとき年間のエネルギーコストは660万円（削減率1.3%）、CO₂排出量は400t-CO₂（同1.3%）の削減が見込める。

(3) 工場全体の総合効果

蓄熱脱臭炉と排熱利用GTコージェネを導入すると、既存の設備利用に比べ工場全体のエネルギー使用量、CO₂排出量はそれぞれ6,800kl（23%）、16,900t-CO₂（30.1%）の削減が見込まれる。

(4) 脱臭炉排ガスが持つ発電効率向上のポテンシャル

今回の計画では500℃の再過熱のポテンシャルがあり、最大7%以上の発電効率向上が見込まれる。

今回開発した蒸気再過熱システムは、記録メディアの生産ラインなどで電気・熱エネルギーを使用しVOCガスを排出している工程への省エネルギー計画に広く応用できる。

参考文献

- 1) 坂内正明, 柏木孝夫, 秋澤淳, 塚本浩二, ほか; オブジェクトモデルによるエネルギーセンターの熱電設備運転最適化システムの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, 93 (2004), 57-66.
- 2) 経済産業省; 有害大気汚染物質対策の経済性評価報告書, (2003.2), 87-99.
- 3) 高山弘; 最近の高効率熱回収式燃焼脱臭装置の実施例, 臭気の研究, 32, (2001), 245-248.
- 4) 薩摩順吉; 確率・統計, (1989), 岩波書店.
- 5) 川口修; ガスタービンの熱力学, 日本ガスタービン学会誌, 29, (2001), 383-387.
- 6) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会; 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果総括報告書, (2002.8), 105.