工場廃熱を利用した CO₂回収無公害高効率火力発電システムの構成と特性

正 員 朴 炳 植 (大阪大)

A CO₂-Recovering Non-Polluting High-Efficient Thermal Power Generation System Utilizing Waste Heat from a Factory
Pyong Sik Pak, Member (Osaka University)

A novel carbon dioxide-recovering gas turbine power generation system is proposed in which carbon dioxide (CO₂) generated is recovered by adopting the oxygen (O₂) combustion method and no thermal nitrogen oxide is generated. In the system, super heated steam produced by utilizing waste heat from a factory is used as working fluid of the gas turbine. Thus, the compressing process of the working fluid gas, which is the most energy-consuming process in generating power by using gas turbine, is not needed, and this makes the system to be extremely high-efficient. By taking a garbage incineration plant as an example of waste heat emitting factories, the characteristics of the system was simulated. Gross thermal efficiency has been estimated to be 88.0%, and the power generation efficiency to be 70.4% by subtracting the electric power required not only to generate O₂ and to compress it but also to liquefy the recovered CO₂. The net power generation efficiency was calculated to be 47.8% when the energy supplied by the garbage incineration plant is taken into account. This value is higher than the efficiency, 44.5%, of the most advanced large scale thermal power generation plant using the same natural gas, and is 23.5 % higher than its efficiency of 38.7%, the one estimated if the CO₂ is removed and recovered from the stack gas by using alkanolamine-based solvent and the recovered CO₂ is liquefied.

キーワード：未利用エネルギー，都市ごみ，CO₂回収，酸素燃焼，ガスタービン，高効率発電，廃熱利用

1. はじめに

二酸化炭素(CO₂)の大気への排出量を削減することは地球温暖化の防止のうえで重要となっている。CO₂の排出量の削減のためには、省エネルギーを図ることや火力発電所などCO₂排出量の大きい施設から排出されるCO₂を回収して大気へ放出しないことが重要となる⁽¹⁾。一般に、化石燃料を燃焼利用した後の残さ物として発生するCO₂を回収するには、エネルギーが必要であり、このためCO₂回収を行うとエネルギー利用効率はCO₂回収前に比べてかなり低下すると考えられている。しかし、画期的に高効率なシステムを考

案できると、この高効率システムより発生するCO₂量は少なくなり、これはCO₂を回収するために要するエネルギー量を少なくすることにもつながるので、たとえCO₂回収を行っても従前のCO₂回収を行わないシステムに比べても高効率なシステムが実現できることになる。

画期的に高効率なシステムを実現するには、システムの構成を根本的に変更するだけでは困難であろう。このほか、単独のシステムではそのシステム固有の理由より高効率にできなかった原因を、低エネルギー利用のシステムと組合せて統合化を図ることにより、互いの短所を克服し、長所を生かせることが可能となっ

て、初めて実現できると期待される。

本論文では、工場廃熱を利用することにより、大気汚染物質を排出せず、しかも CO₂ を回収する CO₂ 回収火力発電システムを提案し、本提案システムが CO₂ 回収を行っても従来の CO₂ 回収を行わない大規模火力発電システムに比べても高い発電効率を得られることを、シミュレーション結果により示す。

2. 従来発電システムの問題点と問題解決の考え方

〈2・1〉 従来発電システムの問題点 化石燃料を燃焼して発電を行う火力発電システムでは、(1)式で定義されるカルノー機関の効率 η_{th} を超える高い効率で発電を行うことはできない。

$$\eta_{th} = 1 - T_2/T_1 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_1 ：熱機関の作動流体の最高入口温度、 T_2 ：最低出口温度

このため、すべての熱機関では温度をできるだけ高めることが高効率にするための重要な対策技術となる。逆にいうと、作動流体の最高温度が低いと高いシステム効率は得られない。例えば、蒸気タービン発電システムではタービン入口蒸気温度が 280°C ほどであると、後でも述べるように発電効率は 15% ほどの値（低発熱量基準、以下同じ）しか得られない。

さて、高温の作動流体温度を利用できる熱機関としてよく知られているのはガスタービンであり、1,350°C ほどのタービン入口温度のガスタービンも開発されている。しかし、通常ガスタービンではタービン排気圧はおおよそ大気圧ほどなので膨張比が蒸気タービンに比べて小さく、(1)式の T_2 にあたるタービン排気の温度が高くなるため、高温の作動流体温度を用いているわりには低い効率しか得られない。ただし、ガスタービンの効率がただか三十数%ほどの値しか得られず、大規模蒸気タービン発電システムの四十数%に比べて低い値しか得られないのは、主として次の理由による。すなわち、通常ガスタービンでは作動流体ガス（通常は空気）を圧縮する必要があるが、気体の圧縮の効率は悪く、このためタービンで得られた動力（出力）の 1/2～2/3 が作動流体の圧縮動力として使われてしまうからである⁽²⁾。

〈2・2〉 問題解決の考え方 前節では、ガスタービン発電は、高温作動流体を用いているものの、作動流体ガスの圧縮に大きな動力を要するので、蒸気タービン発電に比べ低い効率しか得られないことを述べた。逆にいうと、もしガスタービン発電システムにお

いて、作動流体ガスの圧縮の過程を省略することができると、システムの効率は 2～3 倍も高くなり、60～90% の画期的に高い発電効率を得られると期待されることがわかる。

一方、清掃工場など多くの工場では工場廃熱が得られる場合でも、工場廃熱を利用して製造できるのはただか 300°C ほどの温度の蒸気しか得られない場合が多く、15% 前後の低い発電効率しか得られないという問題がある。

そこで、工場廃熱を利用して製造された蒸気をガスタービンの作動流体として用いると、圧縮効率の悪い気体の圧縮過程が不要となるので、60～90% ほどの高い効率をもった発電システムが構成でき、工場廃熱源およびこの新しい発電システムを含めたトータルシステムの発電効率が、従来のそれぞれ独立の発電システムの効率に比べて顕著に高い効率を達成できるのではないかと期待できる。次章では、このような考え方を基礎にして考案した新しい CO₂ 回収無公害発電システムについて述べる。

3. 工場廃熱利用 CO₂ 回収高効率無公害発電システムの構成と特徴

〈3・1〉 基本構成 図 1 に著者が提案する工場廃熱利用 CO₂ 回収高効率無公害火力発電システムの基本構成を示す。本システムではガスタービン発電システムを基本としているが、作動流体は空気ではなく廃熱利用して製造された過熱蒸気（廃熱利用製造過熱蒸気）であることが通常ガスタービン発電システムと異なっている。このため、本システムでは作動流体ガスの圧縮機（通常ガスタービン発電システムでは空気圧縮機）が存在しないという特徴がある。本システムでは、また通常ガスタービン発電システムと異なり、燃料を空気ではなく酸素を用いて燃焼させるという点で異なっている。これは CO₂ の回収を排ガスの冷却のみによって行うことができるようにするためであり、この点では著者が提案した過熱蒸気をタービンの主要な作動流体として用いる半密閉サイクルタービン発電システムと同様の CO₂ 回収の原理を用いている⁽³⁾。

本システムの動作を説明すると次のとおりである。本システムでは、前述のように廃熱利用製造過熱蒸気（以下、WST と呼ぶ）を作動流体として用いることにしている。WST は廃熱利用して製造されるため、その温度は大規模火力発電システムで用いられている過熱蒸気の最高温度（現状では 566°C）に比べて、かなり低いのが通常である。また、その圧力也大規模火

図 1 工場廃熱利用 CO₂ 回収無公害火力発電システムの基本構成
Fig. 1. Fundamental structure of the proposed system.

力発電システムで用いられている蒸気タービン発電の場合の最高圧力（現状では 246 kg/cm²）に比べて極めて低いのが通常であることに留意されたい。本システムでは、このため発電効率の向上のために、図 1 に示すようにタービン排気のエネルギーを利用して熱交換器（再生器といわれる）を用いて、WST の温度を上昇させる。本システムでは再生器出口の WST をガスタービン燃焼器に導き、ここで燃料ガスおよび燃焼用酸素を噴射して燃焼させることにより、WST の温度を 1,000℃ 以上の高温ガスとする。燃料ガスとしては、天然ガス、都市ガス、酸素吹込みにより熱分解したクリーン化石炭ガスなど、クリーンで窒素成分をごくわずかしき含まない燃料ガス⁴¹ なら何でもかまわない⁴²。なお、蒸気タービン発電の場合と異なり燃焼器出口ガス温度を 1,000℃ 以上の高温にできるのは、蒸気タービン発電の場合に比べて圧力がただか数十気圧と大幅に低いことと、ガスタービン技術に基づいているからである。逆に、燃料ガスを空気ではなく酸素を用いて燃焼させても燃焼ガス温度を 1,400℃ 以下の燃焼器およびタービンの耐熱可能温度以下にできるのは、大量の WST を冷却用流体として利用しているからである。

燃焼器出口の過熱蒸気と燃料ガスの燃焼の結果生じる CO₂ を主成分とした高温ガスは、タービンに導か

れ、発電機の駆動に利用される。タービン出口のガスはまだかなり高温であるので、前述のように再生器に導かれ WST の昇温にまず利用される。次に、排熱回収復水器に導かれ、廃熱発生工場へのリターン水の給水加熱に利用される。この後、冷却水で十分に冷却される。このため、復水器出口ではタービン排ガス中に含まれる水蒸気の大部分が復水し、この復水は排ガス中に含まれる気体成分である CO₂ とは簡単に分離される。復水は排熱回収復水器で加熱された後、過熱蒸気発生のための給水（リターン水）として廃熱発生工場へ送り返される。

排熱回収復水器出口において復水しなかった気体中には、復水しなかった水蒸気成分が飽和蒸気形で含まれているほか、燃料ガスの燃焼により生じた CO₂ が含まれている。このほか、燃料ガスの完全燃焼を期するため燃焼器で過剰に噴射された酸素（O₂）が含まれている。この復水器出口の気体は図 1 に示すように、まず冷却脱湿を行い排ガス中の水分を十分に除去する。この後、約 136 気圧にまで圧縮すると排ガス中に含まれる CO₂ はすべて液体として回収され、O₂ 分のほとんどは気体として回収される。この回収高圧 O₂ は燃料ガスの燃焼用に再利用することができる。回収液化 CO₂ は、CO₂ 資源として再利用することができる⁴⁴。ただし、CO₂ 資源としての需要がなければ地球温暖化の原因とならないよう深海などへ投棄する必要があると考えられるが⁴⁵、回収 CO₂ の利用あるいは後処理の問題は本論文の対象とはしていない。

〈3・2〉 システムの特徴 提案システムでは、前

* 1: 灯油や A 重油も使用することは可能である。ただし、この場合サーマル NO_x は生成されないものの、硫酸化物 (SO_x) やフュエル NO_x が生成されるので、無公害ではなく低公害となるので本論文では除外することとした。

述の基本構成で説明したように通常のカスタービンと異なり、作動流体ガスの圧縮仕事は不要となる。圧縮の過程は復水の圧縮という水の圧縮の過程で行われるので、実際上無視できるほどのエネルギーしか必要とされない。このため、次章のシミュレーション結果でも示すように、燃料ガスのエネルギー基準でいうと、発電機端の効率は90%近い値を得ることが可能となる。このため、燃焼用の高圧酸素量および燃料燃焼により発生するCO₂量が大幅に少なくなり、高圧酸素の発生のために必要となる動力およびCO₂の液化処理のために必要となる動力は、わずかで済むという特徴がある。また、本システムではタービン排ガスの大部分が復水器で復水するため、タービン出口の圧力は大気圧に比べてかなり低くなるため、タービンでの膨張仕事が大きくなり、比出力（単位作動流体あたりの出力）が大きくなるという特徴もある。本システムでは、また燃料ガスの燃焼に空気ではなく酸素を燃焼用に用いているので、燃焼ガスの主成分は蒸気とCO₂のみとなり、このため燃焼排ガスからCO₂を回収するのに基本的に冷却水による冷却の操作だけで回収できるという特徴もある。

更に、本システムでは空気燃焼の場合と異なり、燃焼反応中に窒素分が実際に存在しないのでサーマルNO_xの生成がない⁽⁶⁾という特徴もある。

4. 提案システムの特性推定例と推定結果の検討

本章では、工場廃熱の利用の例として清掃工場の廃熱の利用を取上げて提案システムの特性を推定した結果とその検討結果について述べる。

〈4・1〉 清掃工場側の前提条件 表1は平均低発熱量2,000 kcal/kgの都市ごみを400 t/d焼却処理する清掃工場の特性の推定結果を示した表である⁽⁷⁾。同表より、都市ごみ焼却廃熱を利用して280°C、23 kg/cm²の過熱蒸気を50 t/h製造できるものの、所内用に4.78 t/h消費するので、発電用（あるいは場外送気用）に45.22 t/h使用することができ、正味5.87 MWの電力を発電できると推定されていることがわかる。従って、正味発電効率は15.2%と推定されている。発電効率が15.2%と低いのは、蒸気タービン発電用としての蒸気温度が低いためであり、蒸気温度をこれ以上に高温化するのには塩化水素などによる廃熱ボイラの高温腐食の問題などがあるため困難だからである⁽⁷⁾。

本清掃工場では所内用の低圧蒸気（10.5 kg/cm²の飽和蒸気）として表1に示すように6.5 t/hの低圧蒸気量を消費すると推定されているものの、その大部分

表1 清掃工場側条件
Table 1. Assumed conditions for a waste heat emitting plant (a garbage incineration plant).

都市ごみ処理量	400 t/d
ごみ低発熱量	2,000 kcal/kg
廃熱利用発生可能 高圧蒸気量	50 t/h (280°C, 23 kg/cm ²)
廃熱ボイラ入口給水温度	151°C
所内用高圧蒸気量	4.78 t/h
正味熱発生効率	75.1%
発電用蒸気量 (送気蒸気量)	45.22 t/h (275°C, 22 kg/cm ²)
最大正味発電電力	5.87 MW
最大正味発電効率	15.2%
所内用低圧蒸気量	6.5 t/h (10.5 kg/cm ² 飽和蒸気)

(6.28 t/h)は脱気用（給水加熱用）であり、純水装置用が0.12 t/h、場内給湯用が0.1 t/hであると推定されている。このため、清掃工場内で発電を行わず、給水加熱（および給水補給）を提案発電システム側で行うことにすると、清掃工場内で必要となる低圧蒸気量は場内給湯用の0.1 t/hのみとなることに注意されたい。

従って、以下では本清掃工場より45.22 t/hの過熱蒸気（275°C、22 kg/cm²）が提案発電システム側に供給されるものとし、リターン水としては50 t/hの高圧蒸気発生用、および0.1 t/hの低圧蒸気の熱量に見合う熱量の高温水として0.5 t/hの高温水量、合わせて50.5 t/hのリターン水（その温度は表1に示すように清掃工場側では151°C必要。このため、提案システム側では熱供給ロスを考慮し、155°C以上必要と想定）を返送するものとする。以上の条件より、清掃工場側の熱的な条件としては所内発電する場合と変わらないことになる。

〈4・2〉 提案発電システム側の前提条件 提案システムの特性を推定するため、著者がこれまでに開発してきたシミュレーションモデル⁽¹⁾⁽³⁾の一部を改修して、新たな特性推定用のモデルを開発した。紙数の制限よりその詳細についての説明は省略するが、特性の推定にあたって必要となる外生変数および外生パラメータは表2に示すとおりである。表2には、また本例の特性の推定にあたって用いた外生変数および外生パラメータの値も示してある。これらの値は著者がこれまで種々のCO₂回収発電システムやコージェネレーションシステム用のカスタービン発電システムの特性の解析に用いてきた値を基に想定した値であり、現在技術によって実現可能な値であると考えられている。

表 2 シミュレーションモデルの外生変数と
外生パラメータTable 2. Exogeneous variables and parameters
of the simulation model.

(a) 外生変数

変 数	基準値
タービン入口温度	1,050 °C
廃熱利用製造蒸気温度	275 °C
廃熱利用製造蒸気圧力	22 kg/cm ²
廃熱利用製造蒸気流量	45.22 t/h
リターン水流量	50.5 t/h
燃料ガスの成分とその容積組成	CH ₄ のみ
燃料ガスおよび燃焼用酸素の温度	15°C ; 25°C
燃焼器での酸素過剰率	1.2
再生器の温度効率	75 %
復水器出口温度	35 °C
復水器出口圧力	0.1 kg/cm ²

(b) 外生パラメータ

パラメータ	基準値
タービン断熱効率	87.5 %
タービン流量損失率	0.05 %
燃焼器燃焼効率	99 %
燃焼器圧力損失率	2 %
燃料ガスノズル圧力損失率	10 %
酸素噴射ノズル圧力損失率	10 %
酸素製造原単位	0.34 kWh/Nm ³
酸素圧縮機断熱効率	85 %
復水器排ガス圧力損失率	0.1 kg/cm ²
リターン水温度(発電システム側)	155°C以上
発電機効率	98 %
冷凍機 COP	3.5
冷凍機出口ガス温度	0 °C
CO ₂ 圧縮機断熱効率	85 %
CO ₂ 圧縮機中間冷却温度	40 °C

る(1)~(3)(6)~(14)。

表2に示してあるように、提案システムの実特性推定にあたって、タービン入口温度は、1,050°Cとした。燃料ガスの種類としては、天然ガスを用いることとし、その成分は簡単のためメタン(CH₄)のみとした。燃焼器の酸素過剰率は1.2とした。再生器温度効率は75%とした。復水器出口の圧力および温度はそれぞれ0.1 kg/cm²、35°Cとした。

〈4・3〉 特性推定結果 表3に提案システム各部の温度、圧力、エンタルピーおよび流量を示す。本例では、1.87 t/h(22.3 Gcal/h)のメタンにより22.8 MWの電力が発電でき、発電機端の発電効率は88.0%と極めて高い値が得られると推定されている。これは、作動流体となる過熱蒸気の製造に都市ごみ焼却熱量を利用しているからであり、都市ごみ熱量(33.3 Gcal/h)を含めると、35.3%の発電機端総合効率でしかないことに注意されたい。以下、本論文では都市ごみ熱

表 3 発電システム各部の状態量の推定結果

Table 3. Estimated results of state variables
at various points of the system.

位置あるいは種類	温度 (°C)	圧力 (kg/cm ²)	エンタルピー* (kcal/kg)	流量 (t/h)
①再生器入口	275	22.0	98.6	45.22
②燃焼器入口	331	21.6	131	45.20
③タービン入口	1,050	21.1	500	55.97
④タービン出口	350	0.222	142	55.94
⑤復水器入口	293	0.200	116	55.92
⑥復水器出口	35.0	0.100	35.0	45.38
⑦冷凍機入口	35.0	0.100	2.03	10.54
⑧燃料ガス	15.0	24.0	-5.27	1.87
⑨燃焼用酸素	25.0	24.0	0.0	8.94

*: 気体(蒸気を含む)については1 atm、25°Cを基準、液体(水)については0°Cの飽和水を基準としている。

図 2 提案発電システムの実特性推定結果

Fig. 2. Estimated characteristics of the proposed system.

量を利用する提案システムの効率についてのみ検討することにする。説明の都合上、まず都市ごみ熱量を考慮しないときの提案システムの効率について説明することにし、清掃工場よりの供給エネルギーを考慮した提案システムの効率は後で示すことにする。

本システムでは、図2に示すように1.87 t/hのメタンの燃焼用に8.94 t/hの高圧酸素（圧力24.0 kg/cm²）が必要であるので、酸素製造用に2.13 MW、酸素圧縮用に0.855 MW、合計2.99 MWの電力が必要と推定されている。このため、酸素の製造・圧縮動力を考慮したとき発電効率は88.0%より76.5%に低下する。

本システムでは、更に回収CO₂の液化処理を行うことを前提としている。従って、正味発電効率は更に低下する。本システムの復水器出口のCO₂を含んだガスの圧力は0.1 kg/cm²であり、大気圧より低くなる。このため、単位重量当たりの回収CO₂の圧縮・液化の動力は、大気圧で回収される場合に比べて大きくなる。また、復水器出口ガス中には大量の水蒸気が含まれているので、その脱湿除去のためにもエネルギーが必要となる。

表4は排熱回収復水器出入口ガスの組成と流量の推定結果を示す。同表に示すように、入口ガス流量は55.9 t/hであるが復水器中でこのうち45.4 t/hが復水するため*2、出口ガス流量は10.5 t/hと推定されている。出口ガスの圧力は0.1 kg/cm²なので、このガス中の水蒸気の体積組成は57.3%とCO₂の組成30.5%よりも高くなると推定されている。このため、このガスは、圧縮・液化の前に脱湿のため冷凍機で0°Cまで冷却される。次に、4段圧縮機によって140 kg/cm²まで圧縮され、圧縮機出口においてガス中のCO₂は液体として回収され、ガス中に含まれている酸素分は気体として回収される。回収CO₂量は5.11 t/h（1.87 t/hのメタンにより発生するCO₂量は5.12 t/hなので回収率というところ99.8%）、回収O₂量は1.34 t/hと推定された。CO₂の回収のための冷却用冷凍機の

表4 排熱回収復水器出入口ガスの流量と組成推定結果

Table 4. Flow rate and volume percent of the gas at the inlet and outlet of condenser.

入口および出口ガス	流量 (t/h)	体積組成(%)		
		H ₂ O	CO ₂	O ₂
入口ガス(燃焼排ガス)	55.9	94.4	4.01	1.61
出口ガス(CO ₂ 液化装置入口ガス)	10.5	57.3	30.5	12.2

表5 提案発電システムの発電効率推定結果

Table 5. Estimated power generation efficiencies of the proposed system.

	廃熱分を考慮しない とき	廃熱分を考慮した とき
発電機端効率(%)	88.0	65.3
酸素の製造・圧縮動力を 考慮したとき(%)	76.5	53.8
CO ₂ の液化処理を考慮し たとき(%)	70.4	47.8

動力および圧縮用ポンプの合計動力は1トンあたり0.192 MWhと推定され、合計2.02 MWが消費され、従って回収酸素量による節約動力相当分0.447 MWを考慮すると、正味発電電力は18.3 MW、正味発電効率は70.4%と推定される（酸素回収による節約動力分を考慮しないときは、それぞれ17.8 MW、68.7%となる）。

しかしながら、本システムでは清掃工場より過熱蒸気の供給を受けているので、このエネルギー分を考慮する必要がある。表1に示すように、清掃工場ではこの過熱蒸気を用いて効率15.2%で5.87 MWの電力を発電することができる。従って、清掃工場よりの供給エネルギーも考慮にいれたときの本システムの正味発電効率 η_T (%)は、

$$\eta_T = 70.4 \times (18.3 - 5.87) / 18.3 = 47.8$$

となり、結局47.8%と推定されることになる（清掃工場よりの供給エネルギーを考慮に入れたときの、その他の発電効率の値については表5を参照されたい）。

〈4・4〉 結果の検討 本節では、清掃工場を含めたトータルのシステムの特徴ならびに特性推定結果について、更に検討した結果について述べる。

図3に、清掃工場と本発電システムを合せた全体のマテリアルフローを示す。本トータルシステムを構成するにあたり、清掃工場の側においては発電を行わないため、発電設備が不要となる利点のほか、都市ごみという質の悪い燃料を用いているわりには75%という比較的高い効率で発生された熱を、すべて発電シス

* 2: 本システムでは、155°Cの高温水50.5 t/hをリターン水として返送する必要があるとしている。復水は45.4 t/hなので、補給水として5.1 t/hを合せて、排熱回収復水器で排熱回収して返送する必要がある。なお、復水器中にはCO₂やO₂が溶解度はほぼ100%で溶解しているため、厳密には排熱回収復水器の排熱回収部は脱気（給水加熱）の過程を陽に分離してシミュレーションする必要がある。しかし、再生器出口の温度は表3に示すように293°Cであり、熱的に十分な質をもっているため、本論文では簡単のためリターン水の温度が何度になるか量的な評価のみを行った。試算の結果、排熱回収により温度は155°C以上に十分加熱可能であることが確かめられた。

図 3 清掃工場と提案システム全体の
マテリアルフロー
Fig. 3. Material flow of the total system.

表 6 天然ガス焼き大規模火力発電所より CO₂
の回収を行ったときの効率*

Table 6. Power generation efficiency of a large
scale power plant recovering CO₂ by using
alkanolamine-based solvent.

発電機端効率(%)	44.5
CO ₂ の除去・回収動力を考慮したとき(%)	41.0
CO ₂ の液化処理を考慮したとき(%)	38.7

*: アミン系の溶剤を用いて排煙中の90%の CO₂ を除去・回収すると
したときの推定効率

テム側に販売できるという利点がある。更に、清掃工場側では発電システム側で要求される過熱蒸気の発生にあたって、その蒸気条件は所内発電を行う場合と同一なので、これまでと異なった焼却処理運転を行う必要がないという利点もある。

一方、発電システムのほうからみると次のようになる。もし、廃熱利用して製造した過熱蒸気を利用できないと仮定し、ガスタービンの駆動に必要な作動流体である過熱蒸気を本発電システム内で製造しなければならぬものとする、過熱蒸気の製造には多量のエネルギーが要求されるので、発電効率は顕著に低下することになる。例えば、タービン入口温度 $T_1=1,250^{\circ}\text{C}$ (ISO 基準、作動流体によるタービン翼冷却ロスのないタービン入口温度換算) の高温ガスタービンをたとえ開発できたとしても、その発電機端の効率は45.8%にしかすぎないと推定されているので⁽³⁾、本システムでは廃熱利用のおかげにより $T_1=1,050^{\circ}\text{C}$ という、現在の技術で実現可能なガスタービン技術を用いて発電機端効率88.0%、正味発電効率47.8%という高い効率が得られると推定されていることがわかる。

この正味発電効率は、表 6 に示すように CO₂ の回収・液化処理を行わない天然ガス焼きの最新鋭大規模

表 7 提案システムの年間省エネルギー量と
CO₂ 削減量

Table 7. Amounts of saved energy and CO₂
emission reduction of the proposed system.

	燃料消費量	省エネルギー量	CO ₂ 排出量	CO ₂ 削減量
従来システム*	$17.6 \times 10^3 \text{ t/y}$	—	$48.2 \times 10^3 \text{ t/y}$	—
提案システム	$16.4 \times 10^3 \text{ t/y}$	$1.2 \times 10^3 \text{ t/y}$ (14.3 Tcal/y)	$0.07 \times 10^3 \text{ t/y}$	$48.1 \times 10^3 \text{ t/y}$

*: 発電効率44.5%の天然ガス焼き大規模火力発電システムを想定

火力発電システムの効率44.5%に比べ⁽⁸⁾、相対値で7.4%高く、このシステムにおいて排煙よりアミン系の溶剤を用いて CO₂ の除去・回収・液化を行うとしたときの推定効率38.7%に比べると、相対値で23.5%も高いと推定されていることがわかる⁽⁸⁾。

工場廃熱を利用する本発電システムを従来発電システムと比べたときの年間の省エネルギー量と CO₂ 削減量を評価すると、以下のとおりとなる。

本発電システムでは、工場廃熱分のエネルギーを考慮したとき、図 3 に示すようにネット発電電力は12.4 MW となる。この電力を発電効率44.5%の天然ガス焼き火力発電システムで発電したときの必要燃料量は2.00 t/h となる。これに対して、本システムの必要燃料量は1.87 t/h なので、年間 1.20×10^3 トン (14.3 Tcal/y) の天然ガスの節約となる。また、天然ガス1トンの CO₂ の排出量は2.74 トンなので、年間の CO₂ の排出量は 48.2×10^3 トンとなる。これに対して、本システムの CO₂ の漏れは $0.07 \times 10^3 \text{ t/y}$ と推定されているので、表 7 に示すように $48.1 \times 10^3 \text{ t/y}$ の CO₂ の排出量を削減できることになる。

5. おわりに

本論文では、工場廃熱を利用することにより90%近い発電機端発電効率を得ることのできる新しい CO₂ 回収無公害火力発電システムの構成をまず提案した。本発電システムでは、工場廃熱を利用して製造した過熱蒸気をガスタービンの作動流体として利用する。このため、作動流体の圧縮機が不要となるのでタービン出力がそのまま発電に利用できるので高効率となるほか、構成が簡単になる特徴がある。本システムでは、廃熱利用して製造された過熱蒸気は比較的低温、低圧なので、これをガスタービン燃焼器において $1,000^{\circ}\text{C}$ をこえる高温ガスとする。このとき、燃料ガスの燃焼用に空気ではなく、酸素を用いているので、燃焼ガスの主成分は水蒸気と CO₂ のみとなり、このため燃焼排ガスから CO₂ を回収するのに基本的に冷却水による冷却の操作だけで回収できるので、大型化が

容易で信頼性も高い CO₂の回収ができるという特徴がある。更に、本システムでは空気燃焼の場合と異なり、燃焼反応中に窒素分が実際に存在しないのでサーマル NO_xの生成がないという特徴もある。

本論文では、次に工場廃熱の例として 400 t/d の処理規模の清掃工場の廃熱を利用する場合を例にとって、その特性を推定した結果についても述べた。シミュレーションの結果、本システムでは 88.0% という発電機端効率で 22.8 MW の電力を発電することができ、燃焼用の酸素の製造・圧縮動力および回収 CO₂の液化処理の動力を考慮しても 70.4% という発電効率となり、清掃工場より供給されるエネルギーを考慮に入れても 47.8% という効率で発電できると推定されることを示した。これは、同じ天然ガスを燃料とする大規模火力発電システムの発電効率 44.5% よりも高く、このシステムにおいて排煙よりアミン系の溶剤を用いて CO₂の除去・回収・液化を行うとしたときの推定効率 38.7% に比べると 23.5% も高いと推定されていることを述べた。

このように比較的小規模な発電システムで CO₂の回収を行っても、大規模火力発電システムに比べ高い効率を得られるのは、工場廃熱を有効に利用しているからである。清掃工場側では、発電設備が不要となるだけで、これまでと異なった焼却処理運転を行う必要がないという利点がある。

更に、工場廃熱を利用する本発電システムは、NO_xなどの大気汚染物質を排出しないし、煙突もなく他下建設も可能で立地が容易なので、新しい都市型の発電システムとして極めて有望であると考えられる。

本提案システムにおいて高効率を得られるのはシステム化技術のおかげであり、個々の要素技術は現在技術を用いて実現可能である。ただし、酸素燃焼の燃焼器の開発、CO₂や O₂などの不凝縮気体を含んだ水蒸気用の小型で高効率な復水器、膨張比の大きいタービン（通常の高スチeamタービンのタービンの最終段に更に蒸気タービンの低圧タービン段をつなげたような構造のタービン）の開発などは、本システム実現のための開発課題となるが、現在技術を適用して解決は可能であると思われる。

なお、工場からの廃熱量が多い場合、本発電システムは高スチeamタービン発電をベースとしているので、コンバインド発電システムとすることも可能で、この場合構成は少し複雑となるものの、更に高効率にすること

が可能と期待される。

終りに、日ごろ御指導をいただいている大阪大学工学部 鈴木 昶教授に謝意を表す。

(平成 3 年 7 月 25 日受付)

文 献

- (1) 朴・中村・鈴木：「二酸化炭素回収石炭ガス利用効率発電システム」，電学論 B, 110, 115 (平 2-2)
- (2) 朴・中村・鈴木：「地域冷暖房用コージェネレーションシステムのエクセルギー評価」，エネルギー・資源, 12, 92 (平 3-1)
- (3) 朴・中村・鈴木：「大気への CO の放出のない発電システム—その構成と特性—」，エネルギー・資源研究会第 8 回研究発表会講演論文集, p. 133 (平元)
- (4) 佐野：「エネルギーと地球環境の同時解決を目指して」，エネルギー・資源, 11, 101 (平 2-3)
- (5) 石谷，他：「CO₂の海洋投入に関する可能性評価」，同上, 12, 296 (平 3-5)
- (6) 朴・鈴木：「ガスタービンの効率および燃料によるサーマル NO_x生成特性の比較」，シミュレーション, 7, 30 (昭 63-3)
- (7) 朴・中村・鈴木：「都市ごみクリーン化処理高効率地域冷暖房用 CGS の評価」，電学論 B, 111, 651 (平 3-6)
- (8) 朴：「CO₂回収高効率発電システム—無公害発電を目指して—」，エネルギー・資源学会，平 2 第 2 回講習会「地球環境時代のエネルギー戦略」資料, p. 30 (平 3)
- (9) Y. Suzuki, P. S. Pak & K. Ito: "Total Planning of Combined District Heating, Cooling and Power Generation Systems for a New Town—Part I", *Int. J. Energy Research*, 8, 61 (1984)
- (10) 朴・堀井・伊東・鈴木：「シミュレーションによる地域冷暖房用熱供給発電プラントの評価」，シミュレーション, 4, 19 (昭 60-3)
- (11) 朴・鈴木：「都市廃棄物再生ガス利用高効率ガスタービン熱供給発電システムの特性と経済性」，電学論 D, 107, 875 (昭 62-7)
- (12) 朴・鈴木：「都市廃棄物処理利用トータルシステムの特性と経済性の評価」，同上 D, 108, 549 (昭 63-6)
- (13) 朴・鈴木：「高効率化ガスタービンコージェネレーションシステムの特性・経済性・環境性の評価」，同上 D, 108, 895 (昭 63-10)
- (14) 朴・中村・鈴木：「ガスタービンコージェネレーションシステムの各種高効率化手法のエクセルギー評価」，同上 C, 109, 877 (平元-12)

朴 炳 植 (正会員)

昭和 19 年 9 月 18 日生。43 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同大学院博士課程修了後，48 年 4 月大阪大学工学部電気工学科助手，63 年 1 月助教授となり，現在に至る。工学博士。各種システムのモデリングやアナリシスに関する研究に従事。エネルギー・資源学会，ガスタービン学会，計測自動制御学会，シミュレーション学会会員。