

## 研究論文

# 各種小規模ごみ焼却廃熱利用リパワリングシステムの 特性・環境性・経済性の比較評価

Comprehensive Evaluation of Various Repowering Systems  
for Utilizing Waste Heat from Small Scale Garbage Incineration Plant

朴 炳 植\*  
Pyong SikPak

(原稿受付日2002年7月10日, 受理日2002年10月16日)

## Abstract

This paper evaluates two proposed repowering systems together with a conventional repowering system. A plant treating 45 t/d of garbage incineration plant was taken as an objective power plant to be repowered. As the conventional repowering system (S-C), a gas turbine system with waste heat recovery boiler was adopted. In the proposed system I (S-I), the low temperature steam produced at garbage incineration plant is superheated by using regenerative burner and used to drive steam turbine. In the proposed system II (S-II), temperature of the low temperature steam is raised in the combustor by burning fuel with pure oxygen, thus the generated CO<sub>2</sub> can be easily captured. Various basic characteristics of the three repowering systems are estimated through computer simulation, such as power generation efficiency, energy saving characteristics, amount of CO<sub>2</sub> reduction, and economics. The optimal operating conditions of the S-I were obtained when the temperature of saturated steam produced at the garbage incineration plant was 275 °C and turbine inlet temperature 400 °C. Under these conditions, repowering efficiency was estimated to be 72.3%, annual amount of CO<sub>2</sub> reduction 394 t-C, unit cost of generated power 8.00 yen/kWh, and depreciation year 4.66 year. These were confirmed to be superior to those of the S-C. The S-II was estimated to be economically unfavorable, but its CO<sub>2</sub> reduction amount was 2.6 times larger than that of the S-I. Hence the S-II is expected to be adopted in the future when CO<sub>2</sub> constraints are imposed.

## 1. はじめに

省エネルギーの推進やCO<sub>2</sub>排出量削減などの観点から、ごみ焼却処理の際に発生する熱エネルギーを利用する廃棄物発電（ごみ発電）に対する期待が高まっているが、経済性の理由からごみ発電が可能なのは現状ではおよそ100t/日以上処理規模の大規模清掃工場に限られているという問題がある<sup>1)</sup>。また、ごみ焼却炉内の燃焼反応により生成される排ガス中のダイオキシンは、高温では分解されるものの低温になると再合成される。このため、24時間連続運転を行う大型炉での発生に比べ、8時間あるいは16時間程しか運転しない間欠炉では運転停止に伴う発生量が極めて多くなる。このような理由から、平成9年1月、厚生省はいわゆる新ガイドラインを公表し、ダイオキシンの発生抑制のため、間欠運転炉の新設禁止と合わせて、都市ごみ処理の広域大型化、焼却炉の24時間運転化、廃棄物発電を推進すると共に、既設炉のダイオキシン削減恒久対策を原則5年以内に実施することを求めている<sup>1)</sup>。

しかし、小規模自治体のごみ処理の広域化は、生ごみの広域・長距離輸送の問題や大規模焼却処理工場の立地の問題から、それほど容易ではない。このため、廃棄物の固形燃料化(RDF化)・RDF発電が注目されているが、RDF発電所の経済性や立地の問題などから<sup>2)</sup>、RDF化・RDF発電

により都市ごみの処理・有効利用の問題が解決できるかどうかは明らかではない。

一方、省エネルギーの推進やCO<sub>2</sub>排出量削減などの観点から、ごみ発電システムなどの比較的低温な蒸気を利用して発電する発電システムの高効率化の方法としてリパワリングシステムが注目されている<sup>3)</sup>。リパワリングシステムでは、低温蒸気を化石燃料を用いて高温化して高効率で発電するシステムとなっているため、従来のごみ発電システムに比べて発電出力は顕著に大きくなる。従って、現在発電利用されていない100t/日以下の小規模な清掃工場の廃熱を利用してその発電出力は大きくなるので、売電収入も大きくなり24時間稼働にするための人件費も賄うことも出来、経済性のある新しいごみエネルギー活用発電システムを構築出来る可能性が生じるのではないかと期待される。

このような観点から、本論文では、小規模清掃工場の廃熱を利用して24時間連続稼働させることを前提条件として、2種類の新しいリパワリングシステムを提案し、その発電特性のほか省エネ性、CO<sub>2</sub>削減効果および経済性を、従来式のリパワリングシステムを利用する場合と比較し、総合的に検討した結果について論じる。

## 2. 前提条件とリパワリングシステムの概略

### 2.1 リパワリングの対象としたシステムの概要

リパワリングの対象となるシステムとして、ここではごみ処理量45t/日の小規模な都市ごみ焼却工場の排熱を利用して発電する蒸気タービン発電システム（ごみ発電システ

\*大阪大学大学院情報科学研究科バイオ情報工学専攻助教授  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1  
E-mail : pak@ist.osaka-u.ac.jp

ム)を対象として取り上げることにした<sup>4)</sup>。リパワリングシステムの特性の評価にあたっては、都市ごみ焼却工場はダイオキシン対策から1日24時間運転し、1ヶ月間程の定検期間を考慮して年間330日間運転するものと想定した。また、小規模な焼却工場を対象としていることから、都市ごみ焼却工場の廃熱回収ボイラで製造される蒸気は飽和蒸気とした。

リパワリング対象ごみ発電システムの特性を推定した結果を表1に示す<sup>4)</sup>。同表に示すように、正味発電出力は310kWで、都市ごみ熱量ベースの発電効率は7.91%にしかならないと推定されており、蒸気のエネルギーをうまく取り出せるとはいえない。このように発電効率が低くなるのは、ごみを燃やす際に発生する塩化水素ガスなどによる腐食に、ごみ焼却廃熱回収ボイラ材料が耐えられるよう、廃熱利用製造蒸気の温度を300℃程度以下に抑えているからである<sup>5)</sup>。

年間省エネルギー量は17.7TJ、年間CO<sub>2</sub>削減量は265t-Cと推定されているが、年間粗利益はマイナスとなり、経済性が成立しないと評価されている。このため、この小規模ごみ発電システムは実現されずにごみ熱は有効利用されず、推定された省エネ効果やCO<sub>2</sub>削減効果は現実には得られないものと考えられる。

2.2 従来式リパワリングシステムの概要

提案リパワリングシステムの評価にあたっては従来式のリパワリングシステムと比較・検討することとした。

従来式リパワリングシステム(以下、従来式システムともいう)としてこれまで種々のシステムが提案されているが、本研究では図1に示すような概略構成を持つガスタービン発電システム排熱利用リパワリングシステムを従来式システムとして取り上げることにした<sup>3)</sup>。このガスタービン利用リパワリングシステムは、図1に示すようにガスタービン発電システムの排熱を利用して都市ごみ焼却工場の廃熱回収ボイラで製造される低温蒸気を過熱することにより、蒸気タービン発電システムでの発電効率を向上させることにより、全体システムの高効率化を図るシステムである。

表1 リパワリングの対象としたごみ発電システムの特性<sup>4)</sup>

焼却炉ごみ処理量	45 t/d (1.875 t/h)
ごみ低発熱量	7535 kJ
製造飽和蒸気温度	200℃
製造飽和蒸気圧力	1.56 MPa
製造発電用飽和蒸気流量	4.01 t/h
発電機端発電出力	327 kW
正味発電出力	310 kW
都市ごみ熱量ベース発電効率	7.91%
年間省エネルギー量	17.7 TJ/y
年間CO <sub>2</sub> 削減量	265 t-C/y
年間発電コスト	24.78 百万円
年間発電価値	24.58 百万円
発電単価	10.1 円/kWh
年間粗利益	-0.20 百万円
償却年数	16.6

2.3 提案リパワリングシステムの概要

提案する2種類のリパワリングシステムの概略構成を図2に示す。図2(a)に示す提案システムIは、蓄熱式燃焼バーナーを利用した蒸気過熱器を利用して廃熱回収ボイラで製造される低温蒸気を過熱することにより、蒸気タービン発電システムでの発電効率を向上させ、全体システムの高効率化を図るシステムである。本蒸気過熱器は交番して燃焼させる蓄熱式燃焼バーナーを利用し、排気ガスの持つ顕熱を蓄熱体に蓄熱し、燃焼用空気の前熱に有効利用出来るので、高効率となる。また、バーナーを利用するのでボイラを利用して蒸気を過熱する場合に比べ過熱器を小型に出来るという特徴がある。さらに、高温空気と燃焼させるので火炎を緩慢にして均一な温度分布を得られるよう燃焼させることが出来るので、NO<sub>x</sub>を効果的に抑制することが可能という特徴もある<sup>6)</sup>。

図2(b)に示す提案システムIIでは、廃熱回収ボイラで製造された低温蒸気を再生器で加熱した後に燃焼器に導き、燃料と酸素を投入して燃焼させることによりH<sub>2</sub>Oを主成分とした高温燃焼ガスを得て、これによりタービン・発電機を駆動して発電する。発電後の水蒸気を主成分としたタービン排気は、含まれる熱エネルギーを上記のように再

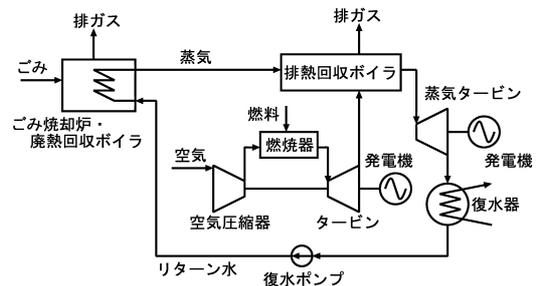
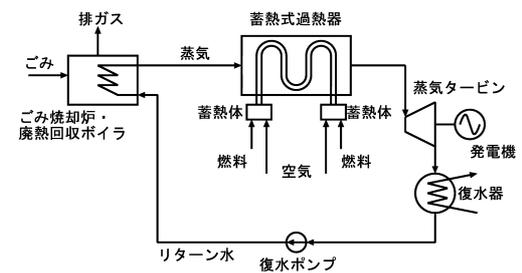
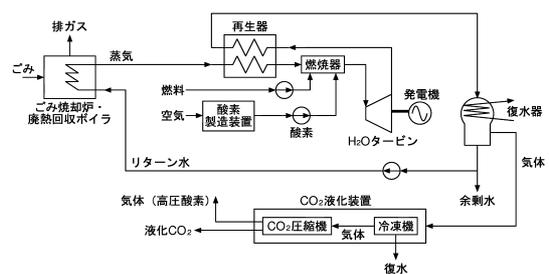


図1 従来式リパワリングシステムの概略構成



(a) 提案システム I (蓄熱式システム)



(b) 提案システム II (CO<sub>2</sub>回収システム)

図2 提案リパワリングシステムの概略構成

生器を用いて低温蒸気の加熱に利用した後に復水器に導かれる。排気ガス中に含まれる水蒸気の大部分は冷却され凝縮し、凝縮水は低温蒸気の製造に利用される。従って、燃料の燃焼により生じた排気ガス中に含まれるCO<sub>2</sub>ガスは、液体である凝縮水から容易に分離・回収することが出来るという特徴がある。

提案システムⅡでは、H<sub>2</sub>Oをガスタービンの主作動流体として利用することによって作動流体ガスの圧縮仕事が不要となることのほか、ごみ焼却工場の廃熱を利用していることもあり、投入燃料の燃焼により発生するCO<sub>2</sub>を回収しても比較的高い発電効率を得ることが可能となる。さらに、燃焼器での燃焼反応中に窒素分が存在しないので、リパワリングシステムによるサーマルNO<sub>x</sub>の生成がないという特徴もある。提案システムⅡは、筆者が先に提案した文献7)および8)のCO<sub>2</sub>回収発電システムと純酸素燃焼方式による発電システムという点では同じであるが、システム規模が小さいことから、要素機器の効率が低いほか、タービン入口温度も低く、このため文献7)のシステムに対しては排熱回収付の復水器ではなく排熱回収機能のない復水器となっており、文献8)のシステムに対しては排熱回収ボイラが付加されていない単純な構成となっている点が異なっている。

### 3. リパワリングシステムの特性評価

#### 3.1 発電特性評価のための前提条件

発電特性の推定に当たって用いたシミュレーションモデル<sup>9)</sup>の主要な外生変数と外生パラメータおよびそれらの値を表2に示す。同表に示すように、ごみ低発熱量は将来的にリサイクルされるごみの割合が増え、リサイクルされるごみに紙類やプラスチックなど発熱量が高いものが多いことを考慮して、現状の値より低くなると見積もり7,535kJ(1,800kcal/kg)と仮定した。ごみ焼却熱を利用して発電に利用出来る蒸気流量の推定に必要なごみ焼却排熱回収ボイラ効率は所内で消費する蒸気量を考慮に入れ<sup>4)</sup>、ごみエネルギーの65%の蒸気熱量が回収利用出来るものと想定した。表2では、これを正味のごみ焼却廃熱ボイラ効率と表示している。発電システム内で消費する所内用の動力は発電機端の発電出力の5%とした。

従来式システムの発電特性の評価に当たっては、発電効率に大きな影響を与える重要な変数である飽和蒸気温度によってどのように変化するかを推定することにし、飽和蒸気温度を200℃から275℃の間で25℃おきに変化させることとした。また、ガスタービンの規模によりガスタービン排熱によりスーパーヒートできる能力が大きく異なるので、ガスタービンの規模を200kWから600kWの間で100kWおきに、変化させて特性を評価することにした。

表2 従来式および提案リパワリングシステムの主要な外生変数・外生パラメータ

(a) 外生変数			
項目	従来式システム	提案システム	
		I	II
焼却炉ごみ処理量 (t/h)	1.875	同左	同左
ごみ低発熱量 (kJ/kg)	7535	同左	同左
廃熱利用製造飽和蒸気温度 (°C)	*[1]	同左	同左
タービン入口温度 (°C)	1000	*[3]	*[4]
ガスタービン出力 (kW)	*[2]	—	—
復水器出口圧力 (kPa)	29.4	同左	58.8
復水器出口温度 (°C)	—	—	68.7

(b) 外生パラメータ			
項目	従来式システム	提案システム	
		I	II
正味のごみ焼却廃熱			
回収ボイラ効率 (%)	65	同左	同左
タービン断熱効率 (%)	85	同左	同左
タービン出口蒸気乾き度 (%)	89以上	同左	同左
燃焼器燃焼効率 (%)	99	同左	同左
燃焼器圧力損失率 (%)	5	同左	同左
発電機効率 (%)	95	同左	同左
発電システム所内動力 (%)	5	同左	同左
ポンプ断熱効率 (%)	75	同左	同左
空気圧縮機断熱効率 (%)	80	—	—
ボイラターミナル温度差 (°C)	50以上	—	—
蓄熱式過熱器効率 (%)	—	80	—
蓄熱式過熱器圧力損失率 (%)	—	10	—
蓄熱式過熱器空気過剰率	—	1.05	—
再生器温度効率 (%)	—	—	75
再生器圧力損失率 (%)	—	—	5
酸素製造電力 (kWh/t)	—	—	237.9
CO <sub>2</sub> 冷凍機 COP	—	—	3.5
CO <sub>2</sub> 圧縮機断熱効率 (%)	—	—	75

\*[1]: 200~275℃ (25℃おき) \*[2]: 200~600kW (100kWおき)  
 \*[3]: 400~800℃ (50℃おき) \*[4]: 400~1000℃ (50℃おき)

提案システムⅠの発電特性の評価に当たっては、提案システムⅠの特性が飽和蒸気温度のほかタービン入口温度によって大きく変化することからこの両者を変化させることにし、タービン入口温度を400℃から800℃の間で50℃おきに変化させることとした。蓄熱式過熱器の効率は、加熱炉などでは排ガス温度を200℃以下にすることが可能なことから90%程の高効率を得ることが出来るが、本提案システムでは短時間の間に蒸気を過熱する必要があることを考慮して、表2に示すように80%と想定した。

提案システムⅡの発電特性の評価に当たっては、H<sub>2</sub>Oタービン入口温度を400℃から1,000℃の間で50℃おきに変化させることとし、再生器の温度効率は75%とした。

発電効率の向上のためには復水器出口圧力は出来るだけ低いことが望まれるが、冷却水として必ずしも海水が利用出来るとは限らないことを考慮して、ここでは従来式システムと提案システムⅠに対しては29.4kPaと想定し、提案システムⅡに対しては復水器出口排ガス中に非凝縮性のCO<sub>2</sub>ガスがおよそ50%ほど含まれることを考慮して58.8kPaと想定した。復水器出口温度は68.7℃と想定した。

3種の検討リパワリングシステムにおいて、タービン出口蒸気乾き度の下限は表2に示すようにすべて現在の技術上可能な89%とした。また、燃料には都市ガスを用いるものとし、その成分は簡単のためCH<sub>4</sub>のみとした。

従来式および提案リパワリングシステムの発電特性とし

て、本研究においては正味発電出力のほか燃料ベース発電効率およびリパワリング効率を推定することにした。ここで、正味発電出力とは発電システム内で消費する電力を発電機端の発電出力から差し引いた電力である。(1)式で定義される燃料ベース発電効率は燃料のもつエネルギーを利用してどれだけ効率で電力が発電出来るかの投入燃料からみた見かけの発電効率であり、(2)式で定義されるリパワリング効率はリパワリング対象ごみ発電システムで発電出来る電力分を考慮した投入燃料ベースの正味の発電効率である。

$$\text{燃料ベース発電効率 (\%)} = W_N / Q_f \times 360 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{リパワリング効率 (\%)} = \frac{W_N - W_g}{Q_f} \times 360 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $W_N$ は正味発電出力 (kW)、 $W_g$ は従来システムの正味発電出力 (kW)、 $Q_f$ は燃料消費量 (MJ/h) を表す。

3.2 発電特性の推定結果

図3(a)に従来式システムの正味発電出力の推定結果を示す。図からわかるように、正味発電出力は、飽和蒸気温度が高くなるに従って、またガスタービン規模が大きくなるに従って、増加すると推定されている。なお、従来式システムにおいて、飽和蒸気温度が高い(タービン入口飽和蒸気圧が高い)割にはガスタービン規模が小さく(ガスタービン排熱量が少なく)タービン入口蒸気が十分昇温されないときには、タービン入口温度が低い割に圧力が高いためタービンでの膨張度が大きくなり、タービン出口蒸気乾き度が89%以上というタービン出口蒸気乾き度の条件を満足しなくなってしまう。以下ではこれら蒸気乾き度が89%以下のときのシミュレーション結果は全て削除している。図3(b)に提案システムIの正味発電出力の推定結果を示す。図からわかるように、正味発電出力は飽和蒸気温度およびタービン入口温度が高くなるに従って増加すると推定されている。図3(c)に提案システムIIの正味発電出力の推定結果を示す。図からわかるように、正味発電出力は提案システムIと同様に飽和蒸気温度およびタービン入口温度が高くなるに従って増加すると推定されている。なお、提案システムIIでは再生器入口飽和蒸気およびタービン出口温度によっては再生器の加熱側の温度が被加熱側の温度より低くなり、再生器が機能しなくなりシミュレーション結果が得られなくなる場合があることに注意されたい。

図4(a)に従来式システムのリパワリング効率の推定結果を示す。図からわかるように、リパワリング効率は飽和蒸気温度が高くなるに従い向上し、ガスタービン規模が大きくなるに従い低下すると推定されている。図4(b)に提案システムIのリパワリング効率の推定結果を示す。リパワリング効率は飽和蒸気温度が高くなるに従い向上し、タ

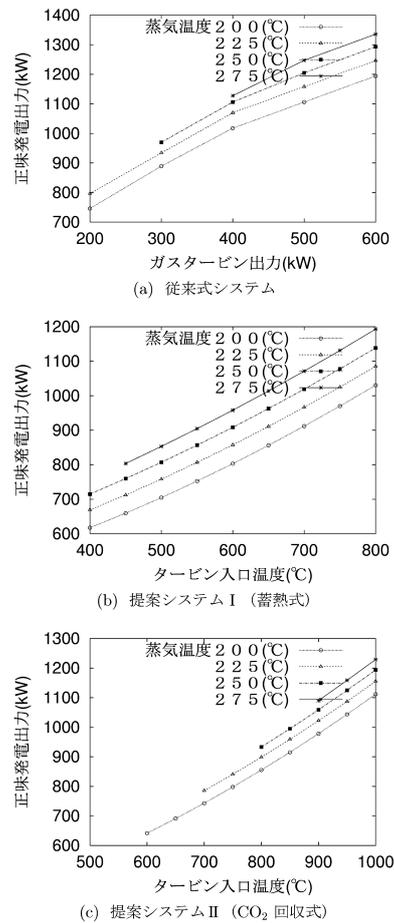


図3 正味発電出力の推定結果

ービン入口温度が高くなるに従い低下すると推定されている。図4(c)に提案システムIIのリパワリング効率の推定結果を示す。提案システムIIのリパワリング効率は提案システムIと異なりタービン入口温度が高くなるに従い逆に向上すると推定されている。図から、タービン入口温度が1,000°Cの時CO<sub>2</sub>を回収しても48%以上のリパワリング効率が得られると推定されていることがわかる。

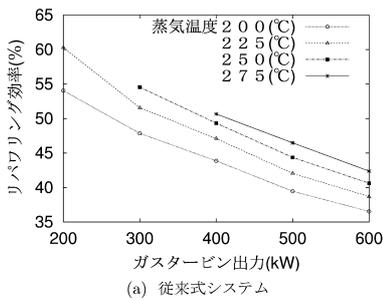
燃料ベース発電効率については、リパワリング効率と傾向がほぼ同じなので、紙数の節約のため説明を省略する。

4. 省エネ性とCO<sub>2</sub>削減効果の評価

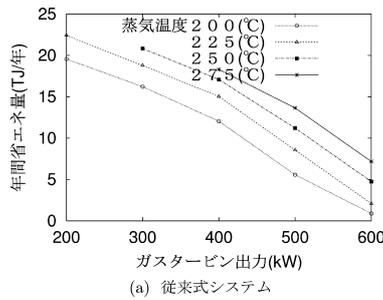
4.1 評価のための前提条件

従来式および提案システムの年間の省エネルギー性とCO<sub>2</sub>削減効果の評価することとした。評価にあたっては、電力事業用の大規模火力発電システムと比較することにした。

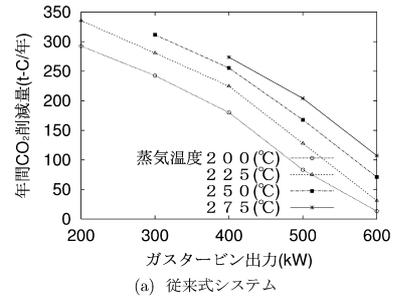
省エネルギー性の評価は、大規模火力発電システムの発電効率(低発電量ベース)を50%と想定し、従来式および提案システムとそれぞれ同じ正味発電電力量を大規模火力発電システムで発電すると想定したときの燃料消費量を、従来式および提案システムの燃料消費量とそれぞれ比較することにより行うこととした。CO<sub>2</sub>削減効果の評価も従来式大規模火力発電システムにおいて、従来式および提案リ



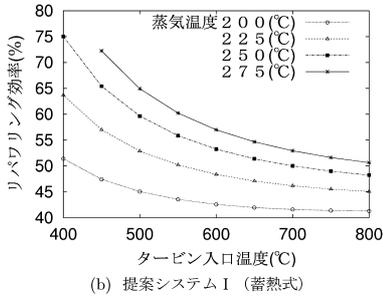
(a) 従来式システム



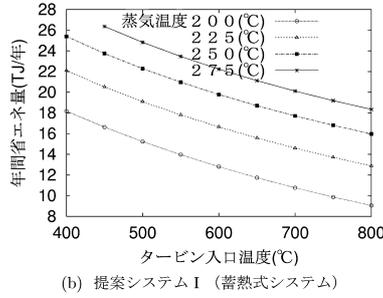
(a) 従来式システム



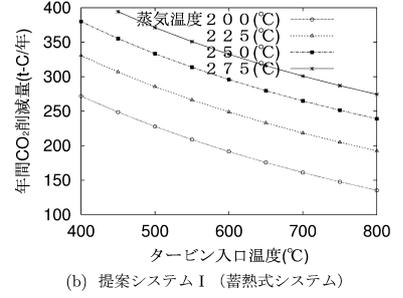
(a) 従来式システム



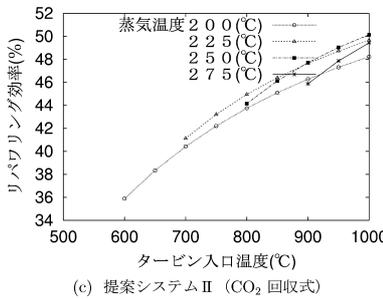
(b) 提案システム I (蓄熱式)



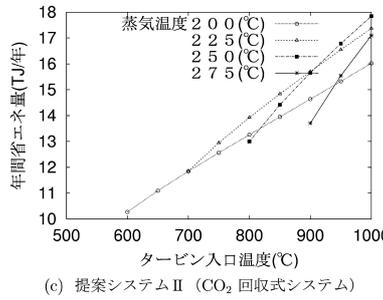
(b) 提案システム I (蓄熱式システム)



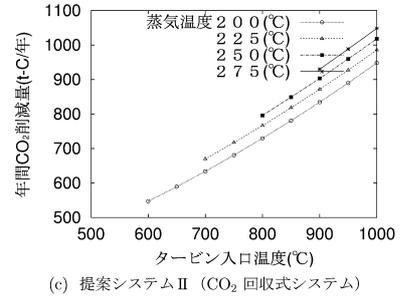
(b) 提案システム I (蓄熱式システム)



(c) 提案システム II (CO<sub>2</sub>回収式)



(c) 提案システム II (CO<sub>2</sub>回収式システム)



(c) 提案システム II (CO<sub>2</sub>回収式システム)

図4 リパワリング効率の推定結果

図5 年間省エネルギー量の推定結果

図6 年間CO<sub>2</sub>削減量の推定結果

パワリングシステムとそれぞれ同じ正味発電電力量を大規模火力発電システムで発電するとしたときのCO<sub>2</sub>排出量を推定し、従来式および提案システムのCO<sub>2</sub>排出量と比較することにより行うこととした。

#### 4.2 評価結果

図5(a)および図6(a)に従来式システムの年間省エネルギー量および年間CO<sub>2</sub>削減量の推定結果をそれぞれ示す。これらの値は飽和蒸気温度が高くなるに従い増加し、ガスタービン規模が大きくなるに従い減少する傾向にあることがわかる。

図5(b)および図6(b)に提案システムIの年間省エネルギー量および年間CO<sub>2</sub>削減量の推定結果をそれぞれ示す。これらの値は飽和蒸気温度が高くなるに従い増加し、タービン入口温度が高くなるに従い減少する傾向にあることがわかる。

図5(c)および図6(c)に提案システムIIの年間省エネルギー量および年間CO<sub>2</sub>削減量の推定結果をそれぞれ示す。図5(c)から、提案システムIIの年間省エネルギー量の値はタービン入口温度が高くなるに従い提案システムIとは逆に増加する傾向にあることがわかる。また、飽和蒸気温度が高くなるに従い年間省エネルギー量の値は増加する傾向にあるとは単純にいえないことがわかるが、これは図4

(c)からもわかるように、再生器の付加された提案システムIIでは飽和蒸気温度が高くなるに従いシステムの発電効率が単純に高くなるとは限らないからである。図6(c)から、提案システムIIのCO<sub>2</sub>削減量の値は飽和蒸気温度が高くなるに従い増加し、タービン入口温度が高くなるに従い提案システムIとは逆に増加する傾向にあることがわかる。

なお、提案システムIIの年間省エネルギー量およびCO<sub>2</sub>削減量の値は従来式システムおよび提案システムIに比べ顕著に大きくなると推定されていることもわかる。

### 5. 従来式および提案システムの経済性評価

#### 5.1 経済性評価のための前提条件

従来式および提案システムの経済性を評価するにあたり、前提としたコスト条件を表3に示す。これらの値は文献や実績値等<sup>10)</sup>を基に、筆者が想定したものである。提案システムの発電設備単価は、本システムが普及すれば従来のガスタービン発電設備の設備単価とほぼ同じになると考えられる。また、大規模発電システムの蒸気タービン発電設備とガスタービン発電設備の工場出荷のkW単価は現状ではほぼ同じとなっている。これらを考慮して、本研究ではシステム構成の相違による経済性の相違を見るため、従

表3 経済性評価にあたって想定したデータ

発電システム設備単価 (酸素製造装置, CO <sub>2</sub> 液化装置を除く)	10万円/kW
耐用年数	15年
資本の金利	5%/年
保守費率	5%/年
人件費(2~3人追加人員分)	2000万円/年
燃料単価	0.95円/MJ
酸素製造装置設備費	8200(万円/(t-O <sub>2</sub> /h))
CO <sub>2</sub> 液化装置設備費	3100(万円/(t-C/h))
正味発電電力量の経済的価値	10円/kWh

来式システムおよび提案システムの発電設備単価は、表3に示すようにシステム構成によらず同じで、発電機端の発電出力1kWあたり大規模発電システムのおよそ2倍の10万円と想定した。なお、提案システムIIについては発電設備費のほか酸素製造装置およびCO<sub>2</sub>液化装置の設備費<sup>1)</sup>をシステム設備費に加える必要がある。

燃料単価はこの規模の需要量の都市ガス単価より0.95円/MJとした。人件費については、清掃工場の人員がそのまま従来式および提案システムの運転を行うものとして、夜間の運転用人員2~3人のみが追加必要になるとし、2,000万円/年の人件費が必要と想定した。発電された正味発電電力量1kWh当たりの経済的価値(正味発電出力の経済的価値)は電力会社の廃棄物発電の余剰電力購入単価の平均値約8円/kWhおよび清掃工場の電力会社からの買電単価を基にして、ここでは10円/kWhとした。なお、ここで発電電力量の売電単価といわずに正味発電出力の経済的価値といっているのは、発電出力を全て売電するのではなく、その一部を清掃工場の所内用の電力として使用することを考慮したからである。

発電システムの経済性評価のためには種々の指標が提案されているが、本研究においては発電単価、年間粗利益および償却年数の3指標を用いて評価を行うことにした。発電単価 $C_p$ (円/kWh)は以下の式で計算される。

$$C_p = C_G / W_N \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $C_G$ は年間発電コスト(円/年)、 $W_N$ は年間正味発電電力量(kWh/年)を表す。 $C_G$ は以下の式で求められる。

$$C_G = \text{設備償却費} + \text{設備保守費} + \text{燃料費} + \text{人件費} \dots(4)$$

設備償却費は設備費に以下の式で計算される資本回収係数 $R$ を乗じたものである。

$$R = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $n$ は設備の耐用年数、 $r$ は資本の金利を表す。年間粗利益 $P_a$ (円/年)は以下の式で計算される。

$$P_a = \text{年間正味発電電力量の発電価値} - C_G \dots\dots\dots(6)$$

償却年数 $n$ は式(6)において、 $n$ を未知数として

$$P_a = 0 \dots\dots\dots(7)$$

とすれば、式(4)、(5)、(7)から求めることができる。

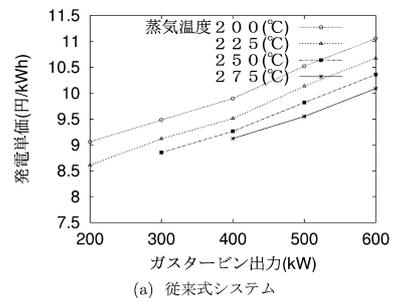
5.2 従来式システムの評価結果

ここでは、紙数の制限から推定された発電単価の推定結果について説明する。図7(a)に従来式システムの発電単価の推定結果を示す。図から飽和蒸気温度が高くなるに従い発電単価が低下し、ガスタービン規模が大きくなるにつれて発電単価が高騰すると推定されていることがわかる。発電単価の最小値は飽和蒸気温度225℃、ガスタービン規模が200kWのときで、8.61円/kWhと推定されている。

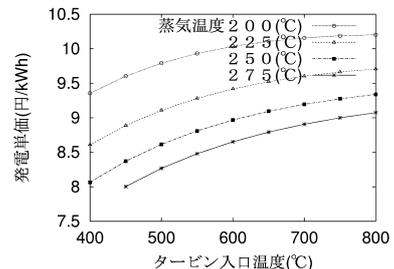
発電単価、年間粗利益および償却年数の評価の結果、推奨されるシステムの運転条件は、発電単価と償却年数が最も小さくなると推定された飽和蒸気温度225℃、ガスタービン規模200kWとするのが最も良いと考えられる。表4に従来式システムのこの運転条件のときの推定結果をまとめて示す。

5.3 提案リパワリングシステムの評価結果

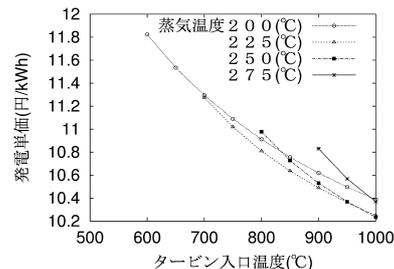
図7(b)に提案システムIの発電単価の推定結果を示す。図から飽和蒸気温度が高くなるに従い発電単価が低下し、タービン入口温度が上昇するにつれて発電単価が高騰する



(a) 従来式システム



(b) 提案システムI(蓄熱式システム)



(c) 提案システムII(CO<sub>2</sub>回収システム)

図7 発電単価の推定結果

表4 従来式および提案システムの特性推定結果のまとめ

項目	従来式システム	提案システム	
		I	II
飽和蒸気温度 (°C)	225	275	275
タービン入口温度 (°C)	328	450	1000
蒸気タービン出力 (kW)	653	850	—
ガスタービン出力 (kW)	200	—	—
H <sub>2</sub> Oタービン出力 (kW)	—	—	1618
正味発電出力 (kW)	797	804	1229
燃料ベース発電効率 (%)	98.8	118	63.2
リパワリング効率 (%)	60.3	72.3	49.4
年間省エネルギー量 (TJ/年)	22.4	26.4	17.1
年間CO <sub>2</sub> 削減量 (t-C/年)	336	394	1048
設備償却費 (百万円)	8.22	8.19	20.1
設備保守費 (百万円)	4.26	4.25	10.5
燃料費 (百万円)	21.9	18.5	50.3
人件費 (百万円)	20	同左	同左
年間発電コスト (百万円)	54.3	50.9	101
年間発電価値 (百万円)	63.1	63.6	97.3
発電単価 (円/kWh)	8.61	8.00	10.4
年間粗利益 (百万円)	8.76	12.7	-3.59
償却年数 (年)	5.93	4.66	20.5

と推定されていることがわかる。発電単価の最小値は飽和蒸気温度275°C、タービン入口温度450°Cのときで、8.00円/kWhと推定されている。発電単価、年間粗利益および償却年数の評価の結果、推奨される提案システムIの運転条件は、飽和蒸気温度については275°Cとし、タービン入口温度については450°Cとするのが最も良いと推定された。

図7(c)に提案システムIIの発電単価の推定結果を示す。図から、提案システムIと異なりタービン入口温度が上昇するにつれて発電単価が低下すると推定されていることがわかる。発電単価の最小値は飽和蒸気温度250°C、タービン入口温度1,000°Cのときで、10.2円/kWhと推定された。ただし、提案システムIIの発電単価はいずれも売電単価の10円/kWh以上になると推定されているので、CO<sub>2</sub>を回収する本システムは前提条件の下ではいずれの運転条件でも経済性が成立しないと評価されている。提案システムIIの推奨運転条件としては、発電単価が10.4円/kWhと0.2円/kWh高くなるもののCO<sub>2</sub>削減量が最大となる飽和蒸気温度275°C、タービン入口温度1,000°Cをここでは採用することとした。提案システムIIのこの運転条件の時CO<sub>2</sub>削減量は1,048t-C/年となり、提案システムIの394t-C/年と比べて2.6倍以上も大きく、CO<sub>2</sub>削減コストは0.342万円/t-Cと算定され大規模火力発電システムの排煙からCO<sub>2</sub>を回収する場合の推定コスト4.38万円/t-Cに比べて<sup>12)</sup> およそ1/13の削減コストになると推定されているので、CO<sub>2</sub>排出量削減制約下では優れたシステムになると期待される。

表4に提案システムの推定結果をまとめて示す。

## 6. おわりに

本論文では、従来式リパワリングシステムとしてガスタービン発電システム排熱利用リパワリングシステムを取り上げ、提案システムIとしては蓄熱式燃焼バーナー利用の蒸気過熱器を採用した新しいリパワリングシステムを取り

上げ、提案システムIIとしては再生サイクル利用純酸素燃焼方式CO<sub>2</sub>回収リパワリングシステムを取り上げ、ダイオキシン対策から24時間稼働を前提として、これらの発電特性、省エネ性、CO<sub>2</sub>削減効果および経済性を比較・検討した。リパワリングの対象のシステムとしては、ごみ処理量45t/日の小規模なごみ焼却工場で製造される飽和蒸気利用の発電システムを取り上げた。

前提条件を設定し、基本的な検討を行った結果、提案システムIのリパワリング効率は72.3%、年間CO<sub>2</sub>削減量は394t-C/年、発電単価は8.00円/kWh、償却年数は4.66年と推定され、提案システムIはガスタービンリパワリングシステムよりも、省エネルギー性、CO<sub>2</sub>削減効果のほか経済性の点でも優れたリパワリングシステムになると評価された。

また、CO<sub>2</sub>を回収する提案システムIIは経済性が成立しないと評価された。ただし、提案システムIIのCO<sub>2</sub>削減量は提案システムIと比べて2.6倍以上も大きくなり、CO<sub>2</sub>削減コストは大規模火力発電システムの排煙からCO<sub>2</sub>を回収する場合のおよそ1/13の削減コストになると推定されるので、CO<sub>2</sub>排出量削減制約下では優れたシステムになると期待される。ただし、酸素燃焼の燃焼器の開発、O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の不凝縮気体を含む排ガスの小型で効率の良い復水器(凝縮器)の開発などが要求されるが、現在技術を適用して解決は可能であると思われる。

おわりに、エネルギーの有効利用、CO<sub>2</sub>排出量削減のため、未利用なごみエネルギーを有効利用するための種々の技術、システムに対する研究・開発が一層行われ、有効利用が益々進むことを期待している。

## 参考文献

- 1) 朴; 廃棄物発電技術の現状と将来, 設計工学, 34-12 (1999), 394-399.
- 2) 鍵谷・西村; ごみ固形燃料化技術と導入事例, 日報, (1997), 34-37.
- 3) 北川; リパワリングの概要, 産業用リパワリングセミナー資料, (1993).
- 4) 朴; 小規模ごみ焼却廃熱活用発電システムの特性・環境性・経済性の評価, 第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2001), 129-134.
- 5) 石川; ごみ焼却排熱の有効利用, 理工図書, (1996), 1-89.
- 6) 西村・鈴木・中西・北村; 加熱炉用蓄熱再生バーナーにおける低NO<sub>x</sub>化技術, R&D神戸製鋼技術技法, 46-1 (1996), 64-67.
- 7) 朴; 工場廃熱を利用したCO<sub>2</sub>回収無公害高効率発電システムの構成と特性, 電気学会論文誌D, 112-3, (1992), 221-228.
- 8) 朴・鈴木; 工場廃熱利用昼間発電型CO<sub>2</sub>回収発電システムの構成とその基本的特性, 電気学会論文誌B, 116-5 (1996), 587-593.
- 9) T. Kosugi and P. S. Pak: Object-oriented simulation system for evaluating characteristics of various CO<sub>2</sub>-capturing thermal power generation systems, Proceedings of JSSST International Conference on Modeling, Control and Computation in Simulation, (2000), 294-299.
- 10) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課編; 総合エネルギー統計(平成11年度版), 通商産業研究社, (2000).
- 11) 本藤・内山; 火力発電プラントの環境対策コスト分析, 電力中央研究所研究報告, Y92009, (1993).
- 12) 朴・小杉; ガス化石炭を燃料とする太陽熱利用CO<sub>2</sub>回収発電システムの特性と経済性評価, 電気学会論文誌B, 120-11 (2000), 1496-1503.