

# 清掃工場における低温排熱の有効利用に関する調査

## ～バイナリー発電性能シミュレーションの実施～

片野 博明 藤原 孝行 高橋 一之 小谷野 真司

半田 功\* 蓮池 宏\*\* 川村 太郎\*\* 渡邊 健次\*\*

(\*東京二十三区清掃一部事務組合 \*\*一般財団法人エネルギー総合工学研究所)

### 要 旨

清掃工場の低温排熱を熱源としたバイナリー発電システムの実現可能性を検討するために、発電性能について熱力学的サイクルに基づくシミュレーションを実施し、実装するための課題を考察した。バイナリー発電システムの熱源を、清掃工場の蒸気タービン排気とし、冷却水を、下水処理水の直接利用又は冷却塔からの冷却水供給と想定した。結果として、冷却水量が179.2 [ton/h] という条件のもとでは、30～70kW 程度の送電出力が得られ、冷却水流量を増やすことで、送電出力を向上させることが可能であることが試算された。大規模システムを導入し、さらなる送電出力を得るには、大量の冷却水が必要であり、都市計画の段階で、適切な排熱と冷却水を組み合わせた計画を策定することが重要と考えられる。社会実装に向け、導入が現実的な冷却塔を利用する小規模システムによる実証が必要と考えられる。

キーワード：清掃工場、低温排熱、バイナリー発電、発電性能、下水処理水

### 1 はじめに

東京都環境基本計画では、都市型の再生可能エネルギー等の利用促進として、未利用エネルギーの利用拡大を掲げている<sup>1)</sup>。本研究では、未利用エネルギーの中でも、特に清掃工場排熱に着目し、その有効活用法を検討する。

東京 23 区内の清掃工場では、ごみ焼却により発生した熱エネルギーを発電や熱供給に有効利用している。つくられた電気は、清掃工場を稼働するために施設内で利用されると共に、電気事業者へ売却されている。また、つくられた高温水などは、施設内で利用されると共に、無償または有償で清掃工場の近隣施設（温水プール、熱帯植物館など）に供給されている<sup>2)</sup>。しかし、図 1 に示すように、練馬清掃工場を例にとると、ごみの持つ熱エネルギーのうち有効利用されているのは、約 31%（所内の各設備での熱利用等約 8% + 発電端熱効率約 23%）であり、残りの約 69% は有効活用できていない<sup>3)</sup>。特に、排気復水器での放熱やタービン等での損失が約 53% と大きな割合を占める。

このように、清掃工場からは多くの熱が、未利用のまま大気へ放熱されている。図 2 に示すように、東京 23 区内における清掃工場からの排熱は 165.5 [TJ/day] と

膨大な量であるとの試算もある<sup>4)</sup>。

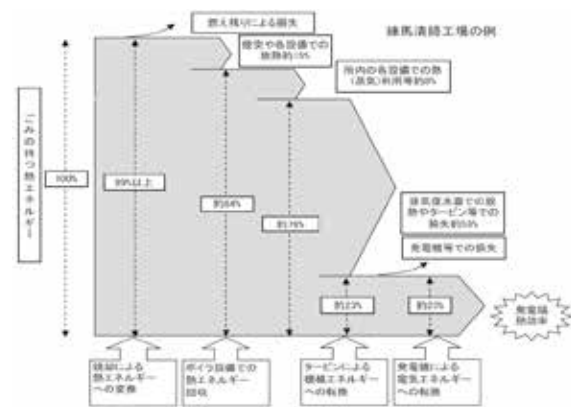


図 1. 清掃工場における熱効率イメージ図

本研究では、排熱の中でも大きな割合を占める排気復水器での放熱に着目する。蒸気タービンの排気温度は 60℃程度と低いが、大気温度に比べて高く、利用できる余地が残されている。この低温排熱を有効に利用することが出来れば、清掃工場の余熱利用の範囲が拡大する。

低温排熱を有効に使う方法の一つとして、給湯・暖房への利用がある。中央清掃工場での検討事例<sup>5)</sup>では、清掃工場の低温排熱の供給先として、住宅の給湯・暖房

への利用を想定している。供給先として約 12,000 戸の住宅を設定し、シミュレーションを実施している。清掃工場の年間排熱量と住宅の年間熱需要を比較すると、年間排熱量が年間熱需要の 5 倍以上になるという結果が示されている。

このように、低温排熱利用の検討がされている清掃工場はあるが、給湯・暖房システムが成立するには、低温排熱発生箇所（清掃工場等）の周辺に給湯・暖房需要が存在することが必要条件となる。しかし、そのような好条件で立地している施設は限られており、低温排熱を電力に変換することが出来れば、立地条件の制約が緩和される。

本研究では、低温排熱を電力変換する技術の一つであるバイナリー発電システムに着目する。清掃工場の低温排熱を熱源としたバイナリー発電システムの実現可能性を検討するため、バイナリー発電システムを導入した場合の発電性能シミュレーションを実施し、その結果を基に、バイナリー発電システムを実装するための課題について考察する。

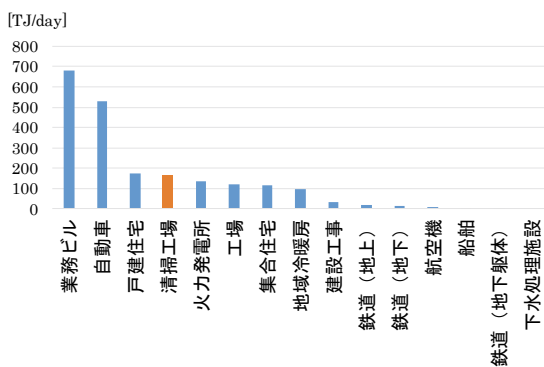


図 2. 東京 23 区における人工排熱（全熱）インベントリー 環境への排熱量

## 2 調査方法

本研究では、清掃工場の蒸気タービン排気の一部を既設配管から分岐させて取り出し、バイナリー発電システムに利用することを想定し、発電性能について熱力学的サイクルに基づくシミュレーションを実施した。清掃工場へのバイナリー発電システム設置の概念図を図 3 に示す。バイナリー発電システムは蒸発器、発電ユニット及び凝縮器から構成される。蒸気タービン発電機を出た蒸気（熱源蒸気）の熱エネルギーを利用し、沸点の低い媒体（R245fa）を蒸発させて発電ユニットを作動させ、発電する仕組みである。

バイナリー発電システムを導入するには熱源蒸気を確保すると共に、冷却水を確保する必要がある。東京 23 区内の A 清掃工場では、近隣に存在する X 水再生センターから下水処理水（放流水を砂ろ過した処理水）が供給され、雑用水等に使用されている。そこで、シミュレーションの対象工場を、A 清掃工場とし、冷却水として X 水再生センターから供給される下水処理水を利用することを想定した。シミュレーションの条件を以下に示す。

### (1) 発電性能シミュレーションの条件

#### ア 熱源蒸気

熱源蒸気の圧力については、東京二十三区清掃一部事務組合より提供を受けた平成 29 年度の蒸気タービン出口圧力のデータを使用した。熱源蒸気の温度については、蒸気圧力に基づく飽和蒸気として温度を決定し、計算に用いた。熱源蒸気の流量については、冷却水量により決定される値とした。

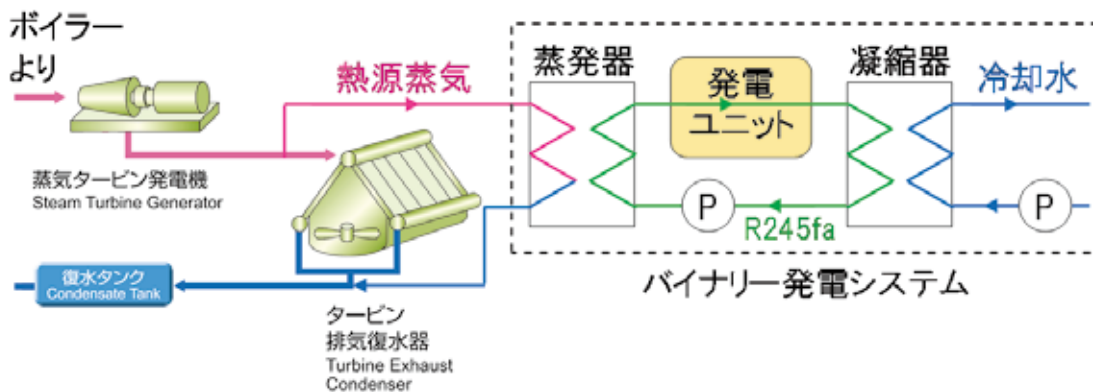


図 3. バイナリー発電システム設置の概念図

イ 冷却水

バイナリー発電システムの凝縮器は水冷とした。冷却水は、以下の2ケースを試算した。

① 冷却水として下水処理水を直接利用する場合  
 前述のとおり、A 清掃工場には、近隣に存在する X 水再生センターから下水処理水が供給されており、冷却水量を 4,300 [m<sup>3</sup>/日] と仮定した。冷却水の温度は、X 水再生センターより提供を受けた平成 29 年度の月別温度データをもとに、回帰曲線で近似した値とした。

② 冷却塔を用いて冷却水を供給する場合  
 冷却水量については、下水処理水を直接利用する場合の冷却水量と同量と仮定し、4,300 [m<sup>3</sup>/日] とした。冷却水の温度は、気象庁の東京都のデータを基に、その湿球温度から決定される水温とした。冷却水供給の概念図を図 4 に示す。

冷却塔を利用すると、冷却水は冷却水配管内を循環する。そのため、①の場合は、冷却水全量を外部から供給する必要があるのに対し、冷却塔を利用する場合は、冷却水量と比較すると少量の補給水を供給するだけでシステムが成立する点にメリットがある。

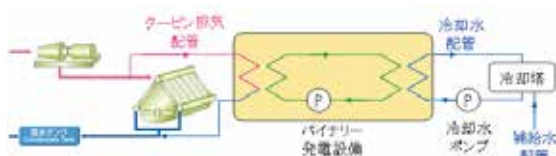


図 4. 冷却塔を用いて冷却水を供給する場合の概念図

ウ 作動媒体

バイナリー発電システムにおける作動媒体として R245fa を想定する。R245fa は、株式会社 IHI 製 100kW 級バイナリー発電装置の作動媒体として実績がある<sup>6)</sup>。

エ 機器効率および熱交換器におけるピンチポイント温度差

計算に使用した各種機器効率および熱交換器（蒸発器・凝縮器）における熱交換時に温度が最も接近する点での温度差（ピンチポイント温度差）を表 1

に示す。

(2) 年間発電量の試算

発電性能シミュレーションに基づいた送電出力と A 清掃工場の炉運転日数から年間発電量を試算した。

年間発電量は、各月ごとに、送電出力 [kW] × 炉運転日数 [日] × 24 [h/日] で算出し、1 年分を合計した。

表 1. 各種機器効率及び熱交換器におけるピンチポイント温度差

項目	値
作動媒体種類	R245fa
膨張機断熱効率	84%
発電機効率	95%
機械効率	97%
作動媒体ポンプ効率	70%
冷却水ポンプ効率	70%
ピンチポイント温度差_蒸発器	3°C
ピンチポイント温度差_凝縮器	3°C

(3) 冷却塔補給水量の試算

冷却塔の補給水量は、蒸発水量、飛散水量（キャリーオーバー水量）、ブローダウン水量の合計として算出した。蒸発水量について、以下の式が成立する。

$$E \times h = L \times c \times \Delta T \dots (1)$$

E : 蒸発水量 [t/h]

h : 水の比蒸発エンタルピー [kJ/kg]

L : 流量 [t/h]

c : 水の比熱 [kJ/(kg·K)]

ΔT : 冷却塔出入水温の温度差 [K]

ここで、30°Cにおける水の比熱 4.1784 [kJ/(kg·K)]、30°Cにおける水の比蒸発エンタルピー 2,430 [kJ/kg]<sup>7)</sup> を (1) 式に代入し、蒸発水量は、冷却塔出入水温の温度差と流量の関数として以下の式が得られる。

$$E = \Delta T \times L / 580 \dots (2)$$

また、飛散水量及びブローダウン水量は、それぞれ流量の 0.1%及び 0.3%程度を見込んだ<sup>8)</sup>。

3 結果と考察

(1) 発電性能シミュレーション結果

シミュレーションの結果を表2及び表3に、蒸気タービン排気全量を表4に示す。また、送電出力、冷却水入

口温度、熱源蒸気流量（蒸気タービン排気のうちバイナリー発電に利用できる蒸気量）、熱源蒸気入口温度と冷却水入口温度について、それぞれの月別変化を図5～図8に示す。

表2. 発電性能シミュレーション結果（冷却水として下水処理水を直接利用する場合）

	熱源蒸気						冷却水				蒸発器 (R245fa)					凝縮器 (R245fa)				発電性能				
	流量 ton/h	熱量 kW	入口 温度 ℃	入口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	流量 ton/h	熱量 kW	入口 温度 ℃	出口 温度 ℃	R245fa 流量 ton/h	入口 圧力 kPa	入口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	入口 圧力 kPa	入口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	発電 出力 kW	発電端 効率 %	送電 出力 kW	送電端 効率 %	ポンプ 他 kW
4月	2.77	1,465	60.4	20.5	58.3	18.5	179.2	1,383	20.3	27.0	4.03	405	29.7	397	55.3	181	37.9	177	29.7	78.1	5.3%	67.9	4.6%	-10.2
5月	2.89	1,464	62.3	21.5	59.3	19.3	179.2	1,389	23.6	30.3	4.03	417	33.0	409	56.3	203	40.7	199	33.0	70.6	4.8%	60.5	4.1%	-10.1
6月	2.65	1,463	61.3	22.0	59.8	19.8	179.2	1,396	26.3	33.1	4.04	423	35.8	415	56.8	223	42.9	219	35.8	63.6	4.3%	53.6	3.7%	-10.0
7月	2.04	1,467	58.8	19.5	57.3	17.6	179.2	1,413	28.1	34.9	4.02	393	37.7	385	54.2	238	43.4	233	37.7	50.7	3.5%	41.1	2.8%	-9.5
8月	2.07	1,467	58.5	19.5	57.2	17.5	179.2	1,416	28.6	35.4	4.02	392	38.2	384	54.2	242	43.8	237	38.2	48.7	3.3%	39.2	2.7%	-9.5
9月	2.02	1,468	58.5	19.0	56.7	17.1	179.2	1,416	27.9	34.7	4.02	386	37.5	378	53.6	237	43.1	232	37.5	49.3	3.4%	39.8	2.7%	-9.5
10月	2.19	1,468	59.7	19.0	56.7	17.1	179.2	1,410	26.1	32.9	4.02	386	35.7	378	53.6	222	41.7	218	35.7	55.2	3.8%	45.5	3.1%	-9.6
11月	2.19	1,474	55.6	15.8	52.9	14.2	179.2	1,419	23.6	30.4	3.99	344	33.2	337	49.7	204	38.7	200	33.2	51.9	3.5%	42.5	2.9%	-9.3
12月	2.23	1,469	58.5	18.4	56.0	16.5	179.2	1,395	20.9	27.6	4.01	378	30.4	370	52.9	185	37.7	181	30.4	69.7	4.7%	59.9	4.1%	-9.9
1月	2.05	1,472	56.5	16.6	53.9	14.9	179.2	1,398	18.8	25.5	4.00	355	28.2	347	50.8	172	35.4	168	28.2	70.4	4.8%	60.6	4.1%	-9.8
2月	1.91	1,473	56.0	16.1	53.2	14.5	179.2	1,399	18.2	24.9	3.99	348	27.7	341	50.1	168	34.8	165	27.7	70.5	4.8%	60.8	4.1%	-9.7
3月	2.12	1,472	56.6	16.5	53.8	14.9	179.2	1,403	20.3	27.0	4.00	354	29.8	347	50.7	181	36.5	178	29.8	65.4	4.4%	55.8	3.8%	-9.7

表3. 発電性能シミュレーション結果（冷却塔を用いて冷却水を供給する場合）

	熱源蒸気						冷却水				蒸発器 (R245fa)					凝縮器 (R245fa)				発電性能				
	流量 ton/h	熱量 kW	入口 温度 ℃	入口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	流量 ton/h	熱量 kW	入口 温度 ℃	出口 温度 ℃	R245fa 流量 ton/h	入口 圧力 kPa	入口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	入口 圧力 kPa	入口 温度 ℃	出口 圧力 kPa	出口 温度 ℃	発電 出力 kW	発電端 効率 %	送電 出力 kW	送電端 効率 %	ポンプ 他 kW
4月	2.24	1,465	60.4	20.5	58.3	18.5	179.2	1,406	27.2	34.0	4.03	405	36.8	397	55.3	231	43.1	226	36.8	56.5	3.9%	46.8	3.2%	-9.8
5月	2.24	1,464	62.3	21.5	59.3	19.3	179.2	1,406	28.6	35.4	4.03	417	38.1	409	56.3	242	44.4	237	38.1	55.0	3.8%	45.2	3.1%	-9.8
6月	2.24	1,463	61.3	22.0	59.8	19.8	179.2	1,405	29.1	35.9	4.04	423	38.6	415	56.8	246	44.9	241	38.6	54.9	3.8%	45.1	3.1%	-9.8
7月	2.21	1,467	58.8	19.5	57.3	17.6	179.2	1,423	31.0	37.8	4.02	393	40.7	385	54.2	262	45.5	257	40.7	41.2	2.8%	31.9	2.2%	-9.3
8月	2.21	1,467	58.5	19.5	57.2	17.5	179.2	1,423	30.9	37.7	4.02	392	40.6	384	54.2	262	45.4	256	40.6	41.3	2.8%	32.0	2.2%	-9.3
9月	2.22	1,468	58.5	19.0	56.7	17.1	179.2	1,422	29.6	36.4	4.02	386	39.2	378	53.6	251	44.3	246	39.2	43.8	3.0%	34.5	2.4%	-9.3
10月	2.22	1,468	59.7	19.0	56.7	17.1	179.2	1,416	28.1	34.9	4.02	386	37.7	378	53.6	238	43.2	233	37.7	48.8	3.3%	39.3	2.7%	-9.5
11月	2.20	1,474	55.6	15.8	52.9	14.2	179.2	1,430	26.8	33.6	3.99	344	36.5	337	49.7	228	41.1	224	36.5	41.3	2.8%	32.2	2.2%	-9.1
12月	2.23	1,469	58.5	18.4	56.0	16.5	179.2	1,412	25.9	32.7	4.01	378	35.5	370	52.9	221	41.4	216	35.5	53.9	3.7%	44.3	3.0%	-9.6
1月	2.21	1,472	56.5	16.6	53.9	14.9	179.2	1,422	25.8	32.6	4.00	355	35.4	347	50.8	220	40.7	216	35.4	47.8	3.2%	38.5	2.6%	-9.3
2月	2.21	1,473	56.0	16.1	53.2	14.5	179.2	1,425	25.8	32.7	3.99	348	35.5	341	50.1	221	40.5	217	35.5	45.6	3.1%	36.4	2.5%	-9.2
3月	2.21	1,472	56.6	16.5	53.8	14.9	179.2	1,423	26.2	33.0	4.00	354	35.8	347	50.7	223	40.9	219	35.8	46.3	3.1%	37.0	2.5%	-9.3

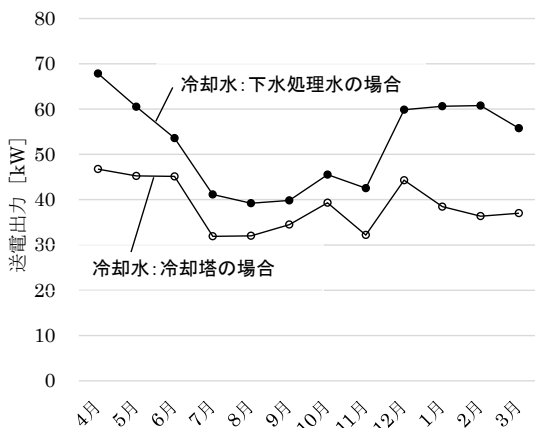


図5. 送電出力の月別変化

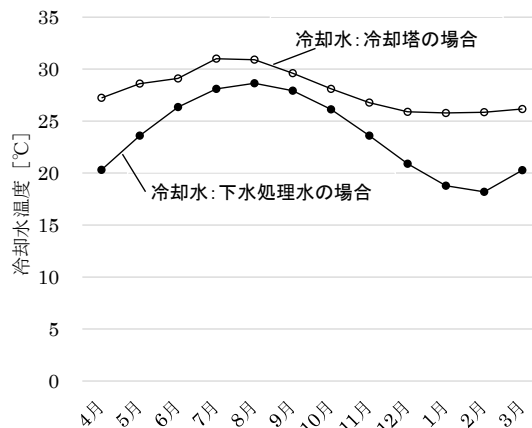


図6. 冷却水入口温度の月別変化

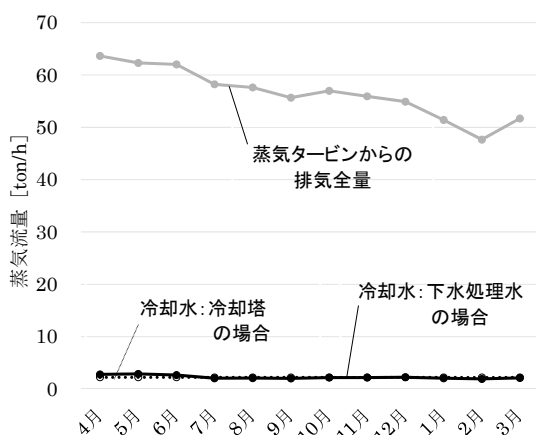


図 7. 熱源蒸気流量の月別変化

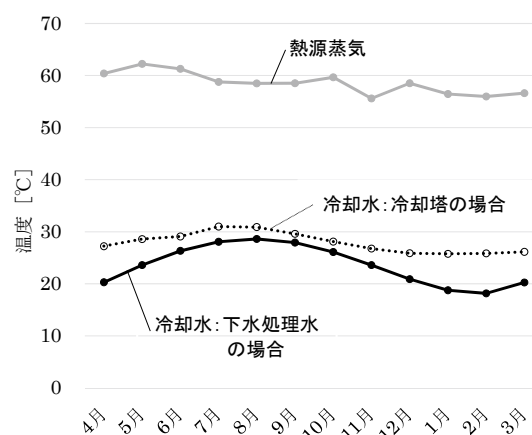


図 8. 熱源蒸気入口温度と冷却水入口温度

表 4. 蒸気タービン排気全量

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
流量 [ton/h]	63.6	62.3	62.0	58.2	57.6	55.7	57.0	55.9	54.9	51.4	47.6	51.7

(2) 年間発電量の試算結果

表 2 及び表 3 の送電出力と平成 29 年度清掃工場等作業年報<sup>9)</sup>に記載された炉運転日数から年間発電量を試算した結果を表 5 に示す。

表 5. 年間発電量

冷却水種類	年間発電量 [kWh]
下水処理水を直接利用	432,953
冷却塔を用いて供給	319,656

(3) 冷却塔補給水量の試算結果

冷却塔補給水量について、今回の A 清掃工場の試算の場合、温度差 $\Delta T$ は 6.38 [K]、流量 L は 179.2 [t/h] (4,300 [m<sup>3</sup>/日]) であるため、式 (2) より蒸発水量 E は約 1.97 [t/h] である。なお、この蒸発水量は流量の 1.1% に相当する。

表 6 に、A 清掃工場の試算における、それぞれの補給水量を示す。補給水量は約 2.7 [t/h] と試算され、流量の 1.5% 程度である。

なお、ブローダウン水量はブローダウンの頻度に大きく左右される。補給水に下水処理水を使用すると、上水よりも不純物が多いためブローダウン頻度が増え、ブローダウン水量が増加する可能性がある。

表 6. 冷却塔補給水量

	温度差 [K]	消費量 [%]	流量 [t/h]	補給水量 [t/h]
蒸発水量 E	6.38	1.1	179.2	1.9712
飛散水量 C		0.1	179.2	0.1792
ブローダウン水量 B		0.3	179.2	0.5376
合計 E+C+B		1.5	179.2	2.6880

(4) 考察

図 6 に示すように、冷却水温度は、冷却塔を用いて冷却水を供給する場合に比べ、下水処理水を直接利用する場合の方が、年間を通じて、2~8°C 程度低い。それに伴い、図 5 のとおり送電出力は、外気温やタービンからの排蒸気条件により変動するが、40~70kW (下水処理水を直接利用する場合)、30~50kW (冷却塔を用いて冷却水を供給する場合) が得られると試算された。以上のことから、下水処理水は有効な冷却水となりうることが示唆された。

本パイナリー発電は清掃工場の焼却炉が稼働してい

れば、発電することが可能であるため、設備利用率が高くなる。バイナリー発電により得られる年間発電量(表5)を太陽光発電により得ようとする、210~290[kW]程度の発電設備容量が必要となる(太陽光発電の設備利用率を17.2%と仮定した場合<sup>10)</sup>)。住宅用太陽光発電システムは、ほとんどが3~5kWの規模である<sup>11)</sup>ことを考慮すると、この発電設備の規模は小さなものではなく、バイナリー発電導入を検討する意義があると考えられる。

図7に示すように、冷却水量を179.2[ton/h](4,300[m<sup>3</sup>/日])という条件に固定すると、熱源蒸気の流量(蒸気タービン排気のうちバイナリー発電に利用できる蒸気量)は、冷却水の種類に関わらず2[ton/h]程度である。それに対し、蒸気タービン排気全量は、50~60[ton/h]程度である。熱源蒸気に余剰があるため、冷却水流量を増やすことで、発電出力を向上させることが可能である。

表6に示すように、冷却塔の補給水量は冷却水量に比べると1.5%と少量ですむ。冷却水全量を外部から供給するシステムと比較すると、冷却塔を利用するシステムは、常時、供給する水量が少なく、より実現性の高いシステムだと考えられる。

#### 4 バイナリー発電システム実装に向けた課題

##### (1) 設置スペース

図8に示すように、利用している熱源蒸気温度が低く、熱源蒸気と冷却水の温度差は、30~40[°C]程度である。作動媒体を、蒸発器においてはより高温に、凝縮器においてはより低温にして、温度差を出来るだけ確保することが望ましいため、伝熱面積を大きくする必要があり、機器の大型化は避けられない。また、冷却水配管や場合により冷却塔が必要となる。これらの機器を設置するスペースの確保が必要である。

##### (2) 冷却水として下水処理水を利用する際の課題

必要な冷却水流量が大きいため、利用した下水処理水の後処理が課題となる。処理案として、下水への放流または水再生センターへの返送が考えられる。

##### ア 下水処理水を下水へ放流する際の課題

A 清掃工場の汚水処理能力を考慮すると、冷却水量が多いため、下水流量を増大させるための処理能力

の増強等が必要である。

また、下水処理水を下水へ放流すると、下水道料金が增加する。

##### イ 下水処理水を水再生センターへ返送する場合の課題

下水処理水の冷熱のみを利用し、水再生センターへ返送するという枠組みはないため、下水道局と使用料金などの協議が必要になる。

水再生センターへの還り管を敷設する必要があり、返送するスペースの有無についても確認が必要になる。

#### (3) 冷却塔を新設する場合の課題

都民の健康と安全を確保する環境に関する条例に基づき、工場変更認可申請を行い、認可を受ける必要がある。

騒音規制法に基づき、冷却塔の規模が大きい場合(送風機の定格出力が7.5kW以上)には、特定施設変更の届出をすると共に、防音対策が必要となる。

## 5 まとめ

清掃工場における低温排熱の有効利用に関する調査研究として、排熱を利用したバイナリー発電システムの実現可能性に関する検討を実施した。バイナリー発電システムを導入することで、清掃工場の低温排熱(蒸気タービン排気)を有効利用できることを確認した。実装に向けた課題は、冷却水をいかに確保するか、ということである。大量の冷却水を確保するには難易度の高い工事が必要なことから、大規模システムを導入するには、都市計画の段階で、適切な排熱と冷却水を組み合わせた計画を策定することが重要と考えられる。社会実装に向けた初期段階として、導入が現実的な冷却塔を利用する小規模システムでの実証が必要と考えられる。規模が小さくとも、未利用熱を利用し、発電することには社会的な意義がある。排熱源として、蒸気タービン排熱以外も検討する余地がある。例えば、清掃工場からの排熱として、湿式洗煙排熱が存在する。小規模システムの例として、湿式洗煙排水(熱源)と既存冷却塔の冷却水及びバイナリー発電ユニットを組み合わせたシステムを構築することも可能である。

## 謝辞

本研究にあたり、貴重なデータ及びご知見を提供して頂いた東京都下水道局の皆様に、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 東京都環境局：東京都環境基本計画, p.40 (2016)
- 2) 東京二十三区清掃一部事務組合：ごみれば 23 20 19 循環型社会の形成に向けて, p.15 (2018)
- 3) 東京二十三区清掃一部事務組合：事業概要 (平成 30 年版), p.25 (2018)
- 4) 国土交通省・環境省：都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書, p.12 (2004)
- 5) 藤原孝行：再生可能・未利用エネルギーの活用技術について, 東京都環境科学研究所第 21 回公開研究発表会, pp.20-21 (2016)
- 6) 株式会社 IHI：2018 年 3 月 19 日プレスリリース ([https://www.ihico.jp/ihico/all\\_news/2017/resources\\_energy\\_environment/2018-3-19/index.html](https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2017/resources_energy_environment/2018-3-19/index.html))
- 7) ドイツ技術者協会建築設備部会編：空調・暖房・衛生設備の計算図表, オーム社, p.16 (1990)
- 8) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧, 第 13 版 第 4 編, p.480 (2001)
- 9) 東京二十三区清掃一部事務組合：平成 29 年度 清掃工場等作業年報, pp.43-45 (2018)
- 10) 経済産業省 調達価格等算定委員会：平成 31 年度以降の調達価格等に関する意見, 2019
- 11) 太陽光発電協会：太陽光発電システムの設計と施工, 改訂 5 版, オーム社, p.2 (2018)