

シャフト炉式ガス化溶融炉の特長を活かした高効率発電への取り組み ～ 発電端効率 23% を目指して ～

The achievement to the high efficiency generation
using of a characteristic of ‘Direct melting system’

永田 俊美* 環境ソリューション事業部 計画技術部 溶融炉計画グループ長
Toshimi NAGATA

馬場 健志 環境ソリューション事業部 計画技術部 マネジャー
Kenji Baba

長田 守弘 環境ソリューション事業部 ゼネラルマネジャー
Morihiro OSADA

抄録

近年、廃棄物処理施設において、地球温暖化への対策が求められ、特に、高効率発電に関する関心が高まっている。廃棄物発電においては、原料であるごみの成分に起因するボイラ一部腐食問題があることから、一般的な火力発電と比較して発電効率は低く、高効率化は困難とされてきた。そのような背景のもと、当社の廃棄物分野の主力商品である「直接溶融・資源化システム」では、これまで30年にわたる操業実績の中で、当初より廃棄物発電に積極的に取り組んできた。本稿では、シャフト炉式ガス化溶融炉の特長を活かした、高効率発電への取り組みについて述べる。

Abstract

Nowadays, approach to the global warming is demanded in waste treatment facilities. In particular, the interest in the high efficient waste power generation are increasing. Compared with general thermal power generation, the waste power generation efficiency is low due to high temperature corrosion of the boiler part caused by the components of waste. Therefore, high efficient waste power generation is thought to be difficult. Under these circumstances, we have wrestled with waste power generation for over 30 years with ‘Direct melting system’. In this paper, We report an achievement to the high efficient generation using of a characteristic of ‘Direct melting system’.

1. 緒言

近年、廃棄物処理分野においては、溶融物などの資源化回収による資源循環型社会構築推進に加え、地球温暖化問題への対処が求められている。廃棄物は、プラスチック類などを除けば、バイオマスと位置づけられるため、そのエネルギーを有効活用することは、地球温暖化抑制に寄与すると考えられる。そのため、環境省では、循環型社会形成推進交付金によって、発電効率または熱回収率10%以上の高効率ごみエネルギー回収施設の建設に対して助成を行ってきた。しかし、地球温暖化問題へのより一層の危機感の高まりにより、平成20年3月25日に閣議決定された「廃棄物処理施設整備計画」においては、日本の廃棄物処理施設における現状の総発電能力約1,630MW（平成19年度）を、平成24年度において約2,500MWまで向上さ

せることを目標とし、ごみ焼却施設における発電の高効率化を一層推進する方針が示された。

その目標達成のために、環境省では、平成21年度より、焼却処理に伴い生じるエネルギーの有効利用を行う一層高効率なごみ発電施設について、循環型社会形成推進交付金の交付率を1/2に引き上げる積極的な拡充支援を実施している。その交付要件としては、施設規模毎に定められた発電効率を超える必要があるが、1,000t/日規模施設で23%とされている。¹⁾

一方、最近の一般廃棄物処理施設の発注形態においては、従来の建設費による評価ではなく、LCC（Life Cycle Cost = 建設費 + 長期運営費）による評価が行われるようになってきた。この場合、発電電力のうち、自家使用分を差し引いた電力を外部に売電することによる売電収入がLCCに大きく影響するため、発電効率

が競争力に直結する。この観点からも、廃棄物処理施設における高効率発電が注目されている。

当社では、シャフト炉式ガス化溶融炉（直接溶融・資源化システム）を廃棄物処理の主力商品として、これまで30年にわたる操業実績の中で、当初より廃棄物発電に積極的に取り組んできた。本稿では、シャフト炉式ガス化溶融炉の特長を活かした、高効率発電への取り組みについて述べる。

2. シャフト炉式ガス化溶融炉（直接溶融・資源化システム）の特徴

図1に直接溶融・資源化システムの設備フロー図を、図2にシステムの中核をなすシャフト炉式ガス化溶融炉を示す。シャフト炉式ガス化溶融炉は、溶融炉中央上部からコークス・石灰石と共にごみが投入される。ごみは乾燥予熱帯（100～300℃）で水分が蒸発された後炉内を降下し、熱分解・ガス化帯（300～1000℃）で可燃分が熱分解・ガス化される。熱分解後に残った不燃分は、コークスと共に燃焼帯（1000～1700℃）、溶融帯（1700～1800℃）へと降下する。コークスは炉下部に設置した羽口（送風ノズル）から供給される空気及び酸素により燃焼され、高温の溶融帯を形成し灰分は完全に溶融される。溶融物は適度な流動性を保ちつつ、炉底部出湯口から水槽に排出・急冷されることで粒状のスラグと鉄分（メタル）となり磁選

機で分離回収後有効利用される。溶融炉内で発生した熱分解ガスは後段の燃焼室で完全燃焼され、燃焼排ガスは廃熱ボイラで熱回収された後、ダイオキシン類の再合成抑制と後段の乾式脱塩（脱塩化水素 HCl）の効率を高めるため、排ガス温度調節器で150～170℃に急冷される。その後、バグフィルタで除塵された排ガスは後段の触媒反応塔を通過し、窒素酸化物（NO_x）の還元とダイオキシン類の酸化分解を行った後、最終的に煙突から放散されるが、脱硝触媒の活性の観点から触媒反応塔入口の排ガスを200℃程度に再加熱している。廃熱ボイラで熱回収して発生した蒸気は、蒸気タービン発電機にて発電し、発電電力は自家使用分の電力を賄う他、余剰分は外部に売電することが可能である。

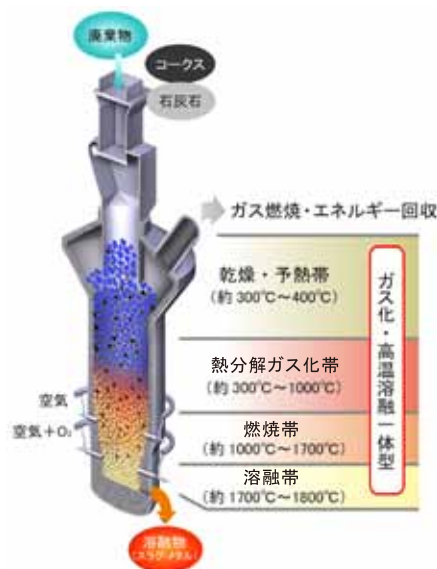


図2 シャフト炉式ガス化溶融炉
Fig.2 The overview of Shaft-furnace type gasification and melting furnace

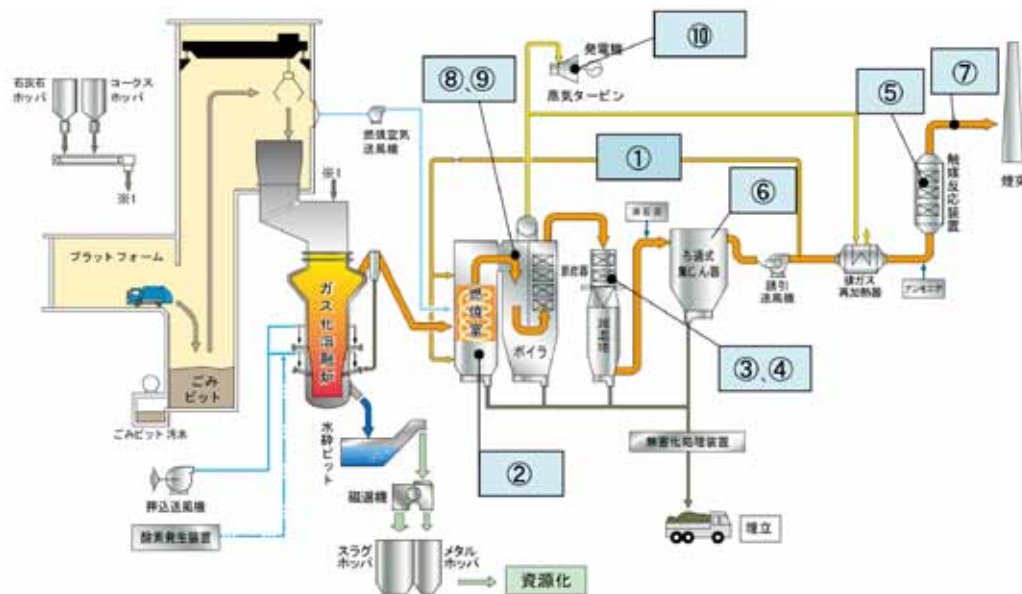


図1 直接溶融・資源化システム全体フロー（図中の丸数字は表2の対策と対応）
Fig.1 The flow diagram of Direct Melting System(encircled number in this figure corresponds to Table2)

3. 発電効率向上に係る技術

廃棄物処理施設における蒸気タービン発電システムの一例を図3に、400t/日級直接溶融・資源化システムにおける熱収支の例を図4に示す。廃棄物処理施設の発電システムは、通常の火力発電と比較して、表1に示すように、小規模で効率が低い。特に、ごみ中に含まれる塩素 (Cl) に起因する高温腐食により、蒸気の高温化が難しいことが高効率化の最大の妨げになっている。このような特徴を有する廃棄物処理施設において発電効率の向上を行うためには、以下の大きく3つの取り組みが不可欠である。

- 1) 廃熱ボイラにおける熱回収能力の向上
- 2) 回収した蒸気の効率的利用
- 3) 発電を行う蒸気タービンシステムの効率向上

発電効率向上の方法とこれまで開発・実機へ適用してきた当社の設備技術および課題点を表2に示し、図1中に示された丸数字は、表2中の「当社技術」に対応している。ここで、直接溶融・資源化システムの場合、以下に示す2つの大きなプロセス的な特長が、設備技術を支えるベースとなっている。

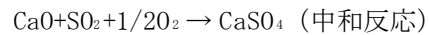
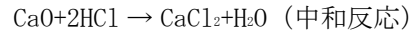
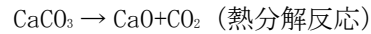
(1) 抜熱型燃焼室における廃熱回収

溶融・燃焼の機能を分離することにより、ガス化溶融炉における高温溶融と高効率なガス化及び専用燃焼室での窒素酸化物 (NOx) を抑制したガス主体燃焼を両立させ、抜熱型燃焼室における高温燃焼及び熱回収を実現している。

(2) 石灰石による炉内脱塩・脱硫

シャフト炉式ガス化溶融炉では、石灰石添加により、溶融スラグの塩基度を調整し、スラグとメタルの分離を容易にして高品質のスラグを産出すると同時に、一部の石灰石はごみ中に含まれる塩素 (Cl)、硫

黄 (S) に起因する排ガス中塩化水素 (HCl)、硫黄酸化物 (SOx) と以下に示す反応を示す。



これらの反応のため、他プロセスと比較して、排ガス中に含まれる HCl 及び SOx が大幅に削減されており、廃棄物処理施設の廃熱ボイラにて問題となる、腐食環境を緩和している。

次に、表2に示す改善技術を順次組み合わせる場合の、各因子ごとの発電効率向上度を評価した。400t/日規模の施設における評価結果を図5に示す。ここで、図5の各因子の丸数字は、表2中の当社技術と対応している。各因子ごとの個々の発電効率向上度は小さく、その積み重ねで発電効率は向上される。図5より、比較的影響が大きいのは、蒸気条件の高温・高圧化と復水器の水冷化であり、これらの検討項目すべてを組み合わせることで、25%の発電効率となることが分かった。

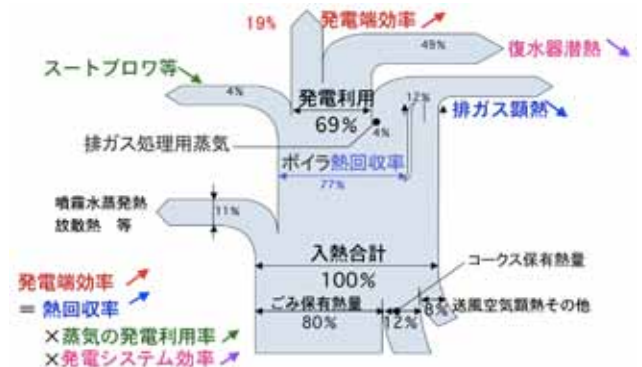


図4 熱収支の一例 (400t/日級施設)

Fig.4 An example of heat balance

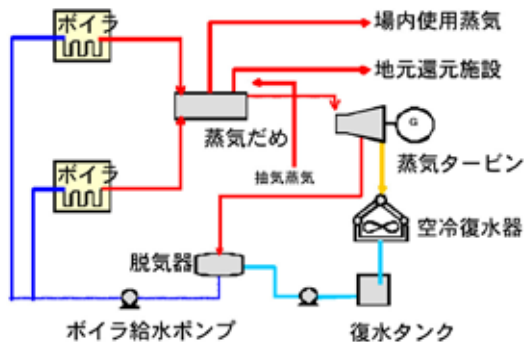


図3 廃棄物処理施設における蒸気タービン発電システムの一例
Fig.3 An example of the steam turbine generation system in the waste treatment facility

表1 火力発電と廃棄物発電の比較

Table1 The comparison between thermal power generation and waste power generation

	火力発電	廃棄物発電	廃棄物発電の特徴
蒸気温度	600~610℃	300~400℃	蒸気条件低
蒸気圧力	24.5 MPa	3.0~4.0 MPa	
タービン排気圧	-95 kPa	-80 kPa	真空度低 (排気圧高)
発電量 (施設当り)	1,000,000 kW	平均 5,500 kW	小規模

発電端効率	平均43% (H19)	平均10.9% (H18)
$\text{発電端効率} = \frac{\text{発電量}}{\text{全入熱量 (ごみ・コークス・燃料等)}}$		

表 2 発電効率に係る当社対応技術と課題点

Table2 The solution and technical issue about high efficiency waste power generation

発電効率向上の方法		当社技術	課題点
1) 熱回収能力強化	排ガス損失低減	① 排ガス循環 ② 抜熱型燃焼室	完全燃焼
	ボイラ熱回収領域拡大	③ 低温エコノマイザ ④ ボイラ給水温度低温化	SOx による低温腐食
2) 蒸気の効率的利用	再加熱蒸気削減	⑤ 低温触媒	脱硝効率
	排ガス処理高温化	⑥ 高効率乾式排ガス処理 ⑦ 高精度 HCl 分析計	乾式での脱塩効率
3) 蒸気タービンシステム効率向上	蒸気の高圧高圧化	⑧ 過熱器材質の選定 ⑨ ボイラ構造	高温腐食
	復水熱量の削減	⑩ 抽気復水タービンの採用	
	蒸気エネルギー回収量増大	⑪ 水冷式復水器の採用	

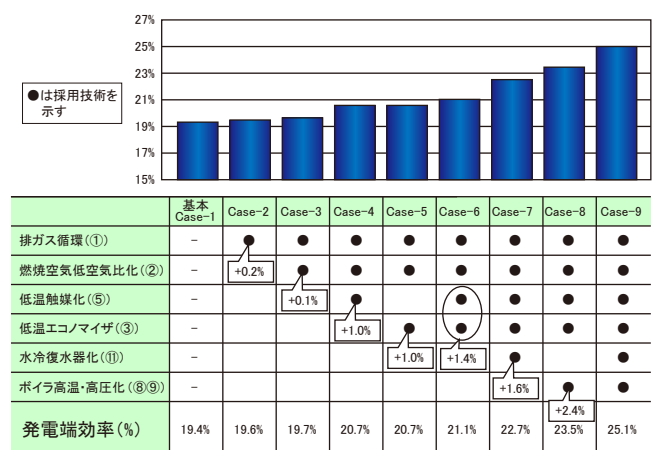


図5 各因子(改善技術)の組合わせによる発電効率の向上
Fig.5 Improvement of the generation efficiency by the combination of each factor (improvement technology)

4. 高効率発電の事例

表 3 に当社納入施設における高温・高圧ボイラを採用した高効率発電事例を示す。表 3 に示すように、当社納入施設においては、蒸気温度 450℃において、9 年以上の安定稼働実績を持つ。本節では、実機における高効率発電の事例として、前節にて発電効率向上効果が大きいと評価された、「蒸気条件の高温・高圧化」および「復水器の水冷化」についての事例を紹介する。

4-1. 国内トップレベルの高温・高圧ボイラの事例

当社の直接溶融・資源化システムでは、前述の通り石灰石による中和反応で排ガス中 HCl 濃度が低く、高温腐食が軽減されるため、過熱器管の耐久性が向上する特徴を持っている。この特徴を活かし、蒸気温度 450℃のボイラを持つ施設を平成 12 年 4 月に亀山市様に納入し、現在まで安定稼働を継続している。

この国内トップレベルの高温ボイラの実現に際し、以下の対策・検討を行った。²⁾

- (1) 高温腐食に対する耐性の高い過熱器管材料の選定
前述のとおり、廃棄物処理施設におけるボイラの過熱器管は、高温腐食に対する耐性の高い材料選定が必要である。そこで、本施設における過熱器管材料の選定に当たっては、実用施設から採取した灰を利用した模擬試験にて材料の絞り込みを行った上で、実缶試験を経て、経済性を考慮して SUS 系材料を母材に選定した。
- (2) ボイラ構造の最適化(過熱器表面での局所的な温度上昇を抑制する構造的対策)

ボイラ構造(水管配列など)の最適化に当たっては、排ガスの熱を蒸気エネルギーに変換する熱交換効率を上げつつ、いかにして過熱器付近の高温環境を緩和していくかが重要である。この課題の解決にあたり、以下のような構造的な配慮を行った。

- 1) 腐食環境緩和のため、最終の 3 次過熱器を 1 次過熱器の下流側に配し、3 次過熱器付近の温度環境を緩和。
- 2) 過熱器へ導入されるガス流れを均一化して局所的な過熱器高温化(による高温腐食進行)を防止する目的で、ガス反転部にスクリーン管と呼ばれる蒸発器を設置。
- 3) 適切なダスト除去機能の活用による灰の堆積防止。
- 4) 過熱器の入口部には耐食性の向上などを図るため高 Ni の耐食性合金の溶接肉盛を施工。

以上の対策を施した亀山市総合環境センターでは、都市ごみに加え、最終処分場から掘り起こした埋立ごみを併せて処理する過酷な使用条件にもかかわらず、適切な過熱器の材料選定およびボイラ構造の最適化により稼働後 5 年目においても 1mm 以下という、極めて少ない減肉量であり現在も順調に稼働している。(表 4 参照)

表3 高効率発電事例(稼働中 6 件, 建設中 5 件)

Table3 The example of high efficient waste power generation in DMS

納入先	施設規模 (t/日)	蒸気条件 (°C × MPa)	発電量 (kW)	稼働開始年月
亀山市様	80	450 × 3.8	1,250	H12.4
秋田市様	400	400 × 3.9	8,500	H14.4
玄海環境組合様	160	400 × 3.9	2,400	H15.6
大分市様	387	400 × 3.9	9,500	H15.4
北九州市様	720	400 × 3.9	23,500	H19.4
名古屋市(鳴海クリーンシステム)様	530	400 × 3.9	9,000	H21.7
姫路市様	402	400 × 3.9	10,500	H22.4 (予定)
静岡市様	500	400 × 3.9	14,000	H22.4 (予定)
堺市(堺クリーンシステム)様	450	400 × 3.9	13,500	H25.4 (予定)
岡崎市様	380	400 × 4.0	10,000	H23.6 (予定)
松江市様	255	400 × 3.9	4,400	H23.4 (予定)

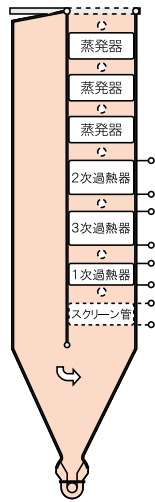


表4 過熱器管の減肉量
(亀山市様 5年目)
Table4 Wall thickness loss of superheater tube (after a lapse of 5 years, DMS of Kameyama city)

測定箇所	5年間の平均減肉量
	(mm / 5年)
3次 SH 出口	0.55 (<1)
3次 SH 入口	0.20
2次 SH 出口	0.13
2次 SH 入口	0.16
1次 SH 出口	0.25
1次 SH 入口	0.22

図6 ボイラの水管配置
Fig.6 The tube Layout of the boiler

4-2. 高温高压ボイラ+水冷復水器の採用による高効率発電の事例

北九州市新門司工場 (240t/d × 3 炉) は、平成 19 年 4 月より本格的に営業運転を開始した世界最大規模の大型ガス化溶融施設であり、以下に示す発電効率向上策を組み合わせることにより、高効率発電の交付要件である当該施設規模の発電効率：21% を超える発電効率を達成している。

(1) 水冷式復水器の採用

廃棄物発電施設では、その立地条件などから空冷式復水器が採用され、タービン排気圧力が高く、熱落差を大きくできないことが高効率発電の阻害となっている例が多い。本施設は、当社の 400℃、4MPa 級ボイラでは、5番目となる設備であり、蒸気として回収するエネルギーの最大化のため、蒸気条件の高温高压化や抽気復水タービンの採用に止まらず、水冷復水器を採

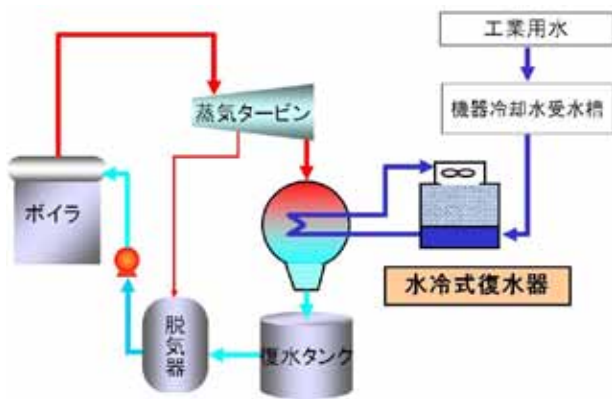


図7 水冷式復水器を採用した蒸気タービンシステムのフロー
Fig.7 The steam turbine generation system using water-cooled condenser

用することで、蒸気タービンシステムとしての効率向上を図っている。図7に本施設における蒸気タービンシステムのフロー図を示す。

水冷式復水器の採用により、空冷式復水器と比較して、蒸気タービンの排気圧力を低下させ、発電出力および発電効率を向上させることが可能となる。設計時の空冷式との性能比較を表5に示すが、出力で 1,500kW、発電効率で 1.5% 向上し、エネルギーを有効に回収することが出来ている。

(2) 低温エコノマイザの採用とボイラ給水の低温化

本施設では、熱回収能力強化を目的として低温エコノマイザ (節炭器) (従来：200℃→本施設：185℃) 及びボイラ給水温度の低温化 (従来：143℃→本施設：110℃) を採用し、ボイラでの熱回収量増加を図っている。これらの手段を採る場合、ボイラ出口の排ガス温度が低下するため、ガスの露点に近づくことになり、排ガス中の HCl や SO₃ による低温腐食が発生する危険性が大きくなる。しかし、本施設においては、シャフト炉式ガス化溶融炉の特長である、石灰石の炉内脱塩・脱硫効果と相まって、一般的な焼却施設で懸念される低温腐食は発生していない。

(3) 低温触媒の採用

廃棄物処理施設においては、脱硝触媒を設置し、排ガス中の NO_x を、排ガス基準値以下に低減させている。この脱硝触媒では、その活性の観点から、一般的には、排ガス温度調節器で冷却 (150 ~ 170℃) した排ガスを、蒸気式の加熱器を用いて再度 200℃程度に再加熱していた。本施設においては、さらなる蒸気の効率的利用を図るため、触媒メーカーと共同開発した低温触媒を採用し、脱硝性能を担保しつつ、触媒入口の排ガス温度を 180℃とし、再加熱蒸気を 4 割以上削減することで、発電用蒸気を増加させている。

上記対策を施すことにより、性能試験時における発

表5 復水器の冷却方式の違いによる性能比較
Table5 The performance comparison in cooling methods of condenser

項目	復水器の冷却方式	
	水冷式	空冷式
発電機 最大出力	23,500 kW	22,000 kW
タービン入口 蒸気流量	107.04 t/h	108.2 t/h
タービン入口 蒸気温度・圧力	400℃ 41ata	400℃ 41ata
タービン出口 排気温度・圧力	33℃ 0.052ata	54℃ 0.15ata
抽気蒸気 温度・圧力	252℃ 11ata	250℃ 10ata
発電効率	22.3%	20.8%

電端効率は3炉運転時で23%を達成できることを検証した。(表6)この時、発電電力は21177kW(定格の約90%)であり、プラント内の電力を賄った上で余剰電力14460kW(発電電力量の約70%)を売電できる能力を有している。

なお、発電端効率は下式にて算出した。

$$\text{発電端効率(\%)} = \frac{\text{平均発電電力} \times 3600}{\text{ごみ処理量} \times \text{ごみ発熱量} + \text{コークス使用量} \times \text{コークス発熱量} + \text{灯油使用量} \times \text{灯油発熱量}}$$

表6 電力収支(性能試験時)

Table6 Electricity balance in performance test

都市ごみ処理量	(t/d)	252
低位発熱量	(kJ/kg)	9092
消費電力	(kW)	6717
	原単位 (kWh/t-ごみ)	214
	内プラント分 (kW)	6378
	原単位 (kWh/t-ごみ)	203
発電電力	(kW)	21177
	原単位 (kWh/t-ごみ)	673
売電電力	(kW)	14460
	原単位 (kWh/t-ごみ)	460
発電端効率	(%)	23.0

※表中の数値は2日間の平均値

6. 結言

以上、本稿では、当社の廃棄物処理における主力商品である「直接溶融・資源化システム」の特徴を活かした、高効率発電への取り組みについて述べた。

今年9月には、日本における温暖化ガス排出量削減目標として、2020年に1990年比-25%という新しく、かつ高い目標が掲げられた。この目標達成のために、廃棄物処理施設における高効率発電について、より一層の関心が寄せられることは明らかである。当社としても、シャフト炉式ガス化溶融炉の特長を活かし、環境保全、多様な廃棄物処理など地域事情に合ったベストソリューションの提供と共に、さらなる高効率発電を実現すべく、鋭意技術開発ならびに実機化へ取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 環境省：「高効率ごみ発電施設整備マニュアル」、(2009)
- 2) 木下弘志ほか：高効率廃棄物発電ボイラー過熱器の技術開発と稼働実績、第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.790-792(2005)
- 3) 柏原友ほか：大型ガス化溶融施設におけるダイオキシン類抑制と高効率発電、第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集、p.582-584(2007)
- 4) 三島辰哉：北九州市における高効率廃棄物発電の導入とその実際、資源環境対策、Vol.45、No.4、p.39-45(2009)

5. 今後の展望

高効率発電の達成は、単独では小さな蒸気消費量削減、高効率化の積み重ねで達成可能である。前述してきた対策のほか、現在取り組んでいる、もしくはすでに採用している高効率化対策を表7に示す。

表7 高効率発電に係る今後の対策

Table7 Future measures about the high efficient t generation

対策	内容	課題
系内蒸気 使用量削減	エコマイザ出口を約185°Cまで低減させ、排ガス温度調節器、再加熱器を廃止。	ろ布の耐熱性 脱HCl 効率向上
	蒸気式ストブロワの廃止 (ストブロワ：ボイラ水管中に堆積した灰の除去装置)	水管の耐久性
	白煙防止装置の廃止 (白煙防止装置：排ガスを放散直前に加熱し相対湿度を下げることで、煙突放散時の水蒸気の凝縮・可視化を防ぐ装置)	周辺環境への影響
系内 消費電力削減	簡素化による機器点数削減	性能との両立
	棟内の自然換気採用	換気性能