廃棄物熱分解ガス化改質・溶融システムの リサイクル技術と無害化技術

今井 潔*, 中島 良*, 佐藤和雄*, 松井 宏**, 雨宮 隆**

* 株式会社東芝 電力システム社 環境機器開発研究所

** 株式会社東芝 社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部

Recycling and Harmlessness Technology of a Pyrolysis Gasification Waste Treatment System

Kiyoshi Imai, Ryo Nakajima, Kazuo Sato, Hiroshi Matsui and Takashi Amemiya

* Environmental Equipment Engineering Laboratory, Power Systems & Services Company, Toshiba Corporation

** Public & Industrial Systems Division, Social Infrastructure Systems Company, Toshiba Corporation

1. ま え が き

資源循環型社会の実現には、廃棄物を無害化すると共に、有用な資源としてリサイクルすることが求められる。著者らは、廃棄物を有用な可燃性ガス（以下、クリーンガスという）に変換し、原動機やバーナなどの燃料として有効利用することを特徴とする「ガス化改質・溶融方式」による廃棄物処理システムの開発を進めている^{1) 5)}。2001年2月には、10 t/日の試験設備において、都市ごみを用い、35日間の連続運転を含む延べ100日以上の実証運転を完了した。この実証試験は、(財)廃棄物研究財団の「廃棄物処理技術開発支援事業」の中で実施され、有識者で構成された委員会の審査により、本システムが厚生省（当時）通知の「ごみ処理施設性能指針」に適合する優れた新技術であることが認められた。

このようなクリーンガスを利用したガスエンジンによる廃棄物発電は、小規模施設で特に威力を発揮し、発電効率の観点から蒸気タービン発電やガスタービン発電に比べて格段に有利である。また、従来型のごみ焼却炉と異なり廃棄物の燃焼過程が存在しないため、部材の耐環境性問題も少ない。

ここでは、廃棄物のリサイクル化技術と無害化技術としての都市ごみ実証試験結果について、その概要を紹介する。

2. 実証試験設備の概要

実証試験設備は神奈川県横浜市内に設置した。図1にプラントの外観を示す。

図2に実証試験設備のシステムフローを示す。都市ごみは前処理設備にて粗破碎され磁選機で鉄類

図1 実証試験設備の外観

が取り除かれた後、蒸気間接加熱式の乾燥機（120℃）にて乾燥される。乾燥後、ロータリーキルン式の熱分解炉（550℃）で低酸素雰囲気にて、熱分解ガスと、未燃固体炭素分・灰分・鉄類・非鉄金属・がれきなどの混合物である熱分解残さに分解される。熱分解ガスはガス改質炉（1100℃）で低分子量の可燃性ガスに改質され、冷却ボイラで急冷される。その後、ガス洗浄装置でHClなどの不純物が除去され、CO、H₂などを主成分とするクリーンガスとなる。また、ガス洗浄装置で捕捉された不純物は、水処理設備で中和され、濃縮塩水として排出される。

一方、熱分解残さは分離装置で鉄類や非鉄金属、がれ

図2 実証試験設備のシステムフロー

* 〒230-0034 横浜市鶴見区寛政町20-1 (20-1, Kansei-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230-0034 Japan)

** 〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1 (1-1, Shibaura 1-chome, Minato-ku, Tokyo, 105-8001 Japan)

きなどが除かれ、未燃固体炭素分と灰分を主体とする粉体（以後、熱分解チャーと呼ぶ）となって溶融炉に投入される。溶融炉（1400℃）では、熱分解チャー中の炭素が酸素と反応し、COとCO₂にガス化する。同時に、熱分解チャー中の灰分はガス化の反応熱により溶融し、水冷され水砕スラグとして回収・再資源化される。溶融ガスは冷却器により急冷され、改質ガスと合流しクリーンガスとなる。生成されたクリーンガスは、熱分解炉の加熱用バーナおよびガスエンジンの燃料として利用される。

本プラントで採用されているガス化改質・溶融システムの特徴は以下のとおりである。

- (1) ごみ乾き質量の90%以上をクリーンガス、金属、スラグの形でリサイクルできる。
- (2) 小規模施設であっても、クリーンガスによる発電やダイオキシン類排出抑制などの高度な無害化処理を実現できる。
- (3) ごみが保有する有機化合物などの生成エンタルピーを、可燃性ガスの生成エンタルピーとして回収する方法のため、熱エネルギーへの変換や熱回収に伴う損失が少ない。
- (4) 系統内を通過するガスは可燃性ガスであり酸素分圧が極めて低いことから、部材の高温腐食問題が避けられる。

3. 実証試験結果

3.1 クリーンガスの性状

クリーンガスは、可燃成分としてH₂ 6~12%、CO 7~18%、CH₄ 1~2%を含み、低位発熱量は2.0~4.2 MJ/m³_N（下付き文字‘N’は標準状態のガス体積であることを示す）である。試験期間を通じ、クリーンガスは安定生成され、熱分解炉やガスエンジン発電機の燃料ガスとして十分使用可能であった。表1に、クリーンガスの代表的分析結果を示す。

プラントへの総入熱量とクリーンガス発熱量および流量の関係を図3に示す。総入熱量とは、ごみの低位発熱量すなわち酸化物基準（酸化物がH₂Oの場合は気体）の生成エンタルピーに処理量に乗じたものに、補助燃焼量を加えたものである。クリーンガス発熱量、クリーンガス流量ともに、総入熱量の増加に伴い増加傾向を示した。図中に示したように、熱分解炉並びにガスエンジンの燃料として利用できたクリーンガス発熱量の下限値は2.5 MJ/m³_Nであり、総入熱量ではおよそ870 kWに相当した。これは10 t/日の定格処理条件においてごみ質

表1 クリーンガスの分析結果

項 目	単 位	Run 1	Run 2	Run 3
H ₂	%	11.9	9.9	6.1
CO	%	15.6	16.6	7.0
CH ₄	%	1.1	1.3	1.0
CO ₂	%	15.3	13.5	17.5
O ₂	%	0.9	0.6	0.7
N ₂	%	55.1	58.3	67.6
H ₂ S	ppm	-	3.2	<0.2
ばいじん	g/m ³ _N (12%O ₂)	<0.0005	0.001	<0.0005
ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ _N (厚生省令による換算)	0.0059	0.000033	0.00083

図3 クリーンガス発熱量、流量とプラント総入熱量の関係

図4 クリーンガスによる発電試験結果

が7.5 MJ/kg 以上の場合に、発生するクリーンガスをプラント内で燃料ガスとして有効利用可能であること、つまり自立運転可能であることを示している。

3.2 ガスエンジン発電能力

プラントで生成したクリーンガスの一部を用いて、発電運転を実施した。図4に示すように、クリーンガスによる発電試験の結果、約40 kWの電力が得られると共に、安定した発電が可能であった。図5には発電端効率に対する発電出力の関係を示す。比較のために13 A都市ガスを用いた試験結果も併示してあるが、13 A都市ガスとクリーンガスとの結果は良く一致しており、ごみから回収したクリーンガスでも、13 A都市ガスを燃料とした場合と同等の効率が得られることが確認できた。

3.3 熱分解チャーおよび回収カーボンの性状

熱分解チャーは、表2に示すようにごみをガス化した残部の未燃固体炭素分と灰分を主体とする混合物で、炭素含有量50%以上の粉体である。一方バグフィルタで捕集される回収カーボンは、改質反応で生成するグラファイトを90%以上含む高炭素粉体である。これら粉体中の炭素は、溶融炉においてCOガスの原料であると同時に灰溶融のエネルギー源として機能する。

一方、これら炭素系粉体は、溶融炉で

図5 クリーンガスと都市ガスによる発電端効率

表2 熱分解チャーならびに回収カーボンの分析結果

項目	単位	熱分解チャー		回収カーボン	
		Run 1	Run 2	Run 1	Run 2
水分	wt%	1.35	0.3	1.4	1.38
揮発分	wt%	15.0	15.1	2.73	4.18
固定炭素	wt%	54.4	53.7	91.1	91.3
灰分	wt%	30.6	31.2	6.15	4.52
低位発熱量	MJ/kg	20.7	20.6	31.5	31.8
全炭素	wt%	55.8	54.7	89.9	91.3
全水素	wt%	2.1	1.9	0.5	0.6
窒素	wt%	1.5	1.6	0.28	0.37
酸素	wt%	8.8	8.7	2	2.16
全硫黄	wt%	0.25	0.19	0.28	0.18
塩素	wt%	0.95	1.7	0.89	0.87
ダイオキシン類	ng-TEQ/g	0.0072	0.0033	0.1	0.048

処理する以外に適当な造粒処理を施すことにより、製鋼プロセスの加炭材などの副原料や、固体燃料としても有効活用できる組成を有する。

3.4 回収金属の品位

熱分解炉内は低酸素雰囲気であるため、熱分解残さから回収される鉄、アルミニウムなどはほとんど酸化されず良質な原材料としてリサイクルできる。熱分解残さから回収した鉄とアルミニウムに対し、酸素と炭素の分析を行った結果を表3に示す。これによると、いずれもほとんど酸化していないうえ、残留炭素も少ないことがわかる。アルミニウムの残留炭素は1%未満であることから、このままアルミニウム合金鋳物の原料としても再利用可能と思われる。

3.5 水砕スラグの性状

水砕スラグの組成分析結果を表4に、溶出試験結果を表5に示す。水砕スラグは SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO などを主成分とする融点 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 、塩基度 $0.4\sim 0.5$ のケイ酸塩ガラスである。いずれの試料も大きな変動がない安定した組成である。

溶出試験結果は溶融固化物にかかわる目標基準値を満足していることから、天然土壌と同等の無害性を示すと言い得る。さらに物理特性に関しても、表6に示すように一般的な水砕スラグ⁹⁾と同等の値が得られている。このような水砕スラグの無害化性能と物理特性より、路盤

表3 回収鉄・アルミニウム中の酸素および炭素の組成 (mass%)

回収物	成分	Run 1	Run 2	Run 3
鉄	O	0.099	0.082	0.175
	C	0.53	0.022	0.115
アルミニウム	O	0.145	0.054	0.099
	C	0.245	0.225	0.061

表4 水砕スラグの組成ならびに物性

成分	単位	Run 1	Run 2
SiO_2	%	44.9	44.9
CaO	%	21.0	22.4
Al_2O_3	%	20.8	22.7
MgO	%	3.2	2.8
Fe_2O_3	%	1.7	0.9
Cd	mg/kg	<1	<0.1
Pb	mg/kg	<10	<1
As	mg/kg	0.9	<0.5
Se	mg/kg	<0.5	<0.5
Hg	mg/kg	<0.01	<0.01
溶融点	$^\circ\text{C}$	1260	1240
溶流点	$^\circ\text{C}$	1330	1320
塩基度	-	0.467	0.499
ダイオキシン類	Ng-TEQ/g	0.000023	0.000064

表5 水砕スラグの溶出試験結果 (還告46号, mg/L)

成分	Run 1	Run 2	Run 3	目標値
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.01
Pb	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cr (6+)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.05
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.01
Se	<0.005	<0.005	<0.005	<0.01
T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

表6 スラグの物理特性測定結果

項目	Run 1	Run 2
見掛け比重	2.76	2.74
表乾比重	2.68	2.73
絶乾比重	2.63	2.7
吸水率 (%)	1.86	1.03
*修正 CBR (%)	23.5	19.3

*路盤材料や盛土材料の品質基準を示す強度の指標
JISA1211に示す方法に準じて測定

材料などへの有効利用が期待される。

3.6 クリーンガスおよび排ガスの無害性

表1に示すように、クリーンガス中のダイオキシン類濃度は、 $0.006\text{ ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$ 未満の極めて低い値を保っていた。また、その他の有害物(硫化水素、ばいじんなど)も低濃度を達成している。

表7には、クリーンガス燃焼後の排ガス性状を示す。酸素濃度は $9.0\sim 13.9\%$ で、窒素酸化物濃度が $18\sim 54\text{ ppm}$ 、ダイオキシン類の濃度は $0.003\text{ ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$ 以下と規制値(新設炉 96 t/日 以上 $0.1\text{ ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$ 、 48 t/日 未満 $5\text{ ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}$)に対して大幅に低い値であった。その他の CO 、 SO_x 、 HCl 、ばいじんに関しても規制値を十分に満足する良好な値を示すことから、本シス

表7 クリーンガス燃焼後の排ガス分析結果

成 分	単 位	Run 1	Run 2	Run 3
CO	%	<0.1	<0.1	<0.5
O ₂	%	13.9	12	12
NOx	ppm (12%O ₂)	54	37	18
SOx	ppm	7.2	3.3	6.5
HCl	mg/m ³ N(12%O ₂)	2.5	7.3	1.3
ばいじん	g/m ³ N(12%O ₂)	<0.001	0.0012	0.0012
ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ N (12%O ₂)	0.00039	0.0031	8.2E-06

表8 ダイオキシン類総排出量(μg-TEQ/ごみ t)

項 目	Run 1	Run 2
排ガス	0.0039	0.016
スラグ	0.0011	0.0018
濃縮塩水	0.000016	0.00028
総量	0.0051	0.018

テムの高い無害化性能が立証された。

3.7 ダイオキシン類総排出量

プラント各部で排出される試料のダイオキシン類濃度から、施設系外へ排出されるダイオキシン類の総量を求めた結果を表8に示す。都市ごみ1トン进行处理する際に、排出されるダイオキシン類の総量は0.018 μg-TEQ以下であり、「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」に示されている5 μg-TEQ/ごみ tに比べ、二桁程度低い値であった。

3.8 耐熱材料の信頼性

主要高温機器に用いた耐熱材料の健全性を評価した結果は以下の通りであり、いずれも十分な信頼性を有することが確認できた。

(a) 熱分解炉

運転中の熱分解炉内雰囲気は可燃性ガスに加えHCl、H₂Sも存在する。本環境にて約550℃で使用されるロータリーキルンの材料には、高温強度と耐環境性の観点からオーステナイト系耐熱鋼を適用した。

延べ100日以上にわたる試験後においても、顕著な高温腐食は生じなかった。また、変形やき裂、著しい摩耗も無く溶接部も健全であった。同一環境に暴露した試験片の断面観察によると、Cr₂O₃の緻密な保護皮膜が生成していることが確認できた。

(b) ガス改質器

ガス改質器で約1100℃のガスに接する部分では、耐火物には耐摩耗性の観点から高Al₂O₃系耐火物を、金属ではクリープ強度と耐環境性の観点から25Cr-35Ni系耐熱鋳鋼を選定し、いずれも無冷却で使用した。

耐火物は、高温高速の火炎が接する部分にわずかな減肉が生じた程度で、大部分は5～15年の寿命が期待できるものであった。耐熱鋳鋼は変形もなく高温腐食もほとんど生じなかったことから、本系材料の優れた耐熱性が確認できた。

(c) 溶 融 炉

熔融炉の耐火物には、耐スラグ性の観点からCr₂O₃含有耐火物とし、スラグとの接触の程度により、適宜含

有量を変化させた材料を選定した。

延べ100日以上にわたる運転の結果、スラグ溜り部の液面近傍耐火物壁面に、マランゴニ対流に起因する局部的減肉が生じた。これに対しては、スラグ液面高さ制御と冷却の最適化により十分な寿命を確保することが可能である。その他の大部分の耐火物には、脱落や局部的な損傷は見られなかった。これら耐火物は初期段階には減肉が見られたものの、時間の経過に伴いその減肉速度は低下する傾向を示し、実用上問題のない範囲であった。これらより、定期的な点検と補修を行えば長期間の使用が可能と思われる。

なお、Cr₂O₃含有耐火物を使用したにもかかわらず、系外排出物に6価Crは検出されなかった。このことは、本システムの環境がCrを6価に酸化する条件にはないこと、すなわち環境に対する負荷が小さいシステムであることを示唆している。

4. あ と が き

開発した廃棄物ガス化改質・熔融システムにおいて、都市ごみによる延べ100日以上の実証運転から得られた試験結果を紹介した。この主な結果を以下に示す。

- (1) 処理量10 t/日の小型プラントながらガスのエネルギー回収率が高く、高効率廃棄物発電も実現できた。
- (2) 回収される鉄、アルミニウムなどは有価値物としてリサイクル可能な品位であった。
- (3) 水砕スラグは一般廃棄物の熔融固化物にかかわる目標基準値を満たした。
- (4) クリーンガス中ダイオキシン類濃度は0.006 ng-TEQ/m³N未満、排ガス中では0.003 ng-TEQ/m³N以下であり、規制値(0.1 ng-TEQ/m³N)を大幅に下回った。
- (5) ダイオキシン類の系外排出総量は0.018 μg-TEQ/ごみ t以下であり、ガイドライン値(5 μg-TEQ/ごみ t)に比べ非常に低かった。
- (6) 高温機器に使用した耐熱材料には、顕著な高温腐食は生じなかった。

実証機の技術を難処理物の処理システムに応用し、処理容量60 t/日の廃自動車破砕ごみ(カーシュレッダーダスト)リサイクル商用プラントを建設して、現在稼動中である。

今後とも資源循環型社会の実現に貢献するべく努力する所存である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤和雄, 中込秀樹, 中島 良, 今井 潔, 雨宮 隆, 尾園次郎: 第10回環境工学総合シンポジウム2000講演論文集, p.127 (2000).
- 2) R. Nakajima, H. Nakagome, K. Imai, K. Sato, M. Kobayashi and T. Amemiya: Proc. ISWA in Asian Cities 2000, Hong Kong, p.146 (2000).
- 3) 中込秀樹, 佐藤和雄, 井手勝記, 中島 良, 今井 潔, 雨宮 隆, 尾園次郎: 第22回全国都市清掃研究発表会論文集, p.222 (2001).
- 4) K. Imai, R. Nakajima, H. Matsui, H. Nakagome and K. Sato: Proc. ISWA World Congress 2001, Stavanger (Norway), p.371 (2001).
- 5) 松井 宏: 第1回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー予稿集, p.137 (2001).
- 6) (財)廃棄物研究財団 編: 「スラグの有効利用マニュアル」, p.89 (1999).

(2002年8月5日受理)