

# 下水汚泥流動床ガス化技術の開発

玉 理 裕 介\* 今 泉 隆 司\*  
浅 野 哲\* 長谷川 竜 也\*\*

## Development of Fluidized-bed Gasification System for Sewage Sludge

by Yusuke TAMARI, Takashi IMAIZUMI, Satoshi ASANO, & Tatsuya HASEGAWA

A new gasification system for the pyrolysis of sewage sludge has been developed. This system features a gasifier for producing product gas for gas engine power generation. A pilot plant, capable of treating 15 tons/day of dehydrated sewage sludge, had been used since 2005 and continuous performance tests (over 3400 hours) had been carried out. The stability and environmental feasibility, as well as its practicality had been proven by the tests. Replacing a conventional sewage sludge incineration plant with this system enables a 25% saving in primary energy consumption and a 65% reduction in the emission of greenhouse gases. The use of this novel system is looked forward to as an effective measure towards the prevention of global warming.

**Keywords:** Gasification, Fluidized-bed, Sewage sludge, Gas engine, Power generation, Pyrolysis, ICFG, Biomass

### 1. はじめに

近年、省資源、地球温暖化防止の観点から、各種バイオマスからのエネルギー生産設備が盛んに開発されている。バイオマスからエネルギーを生産する場合、バイオマスの収集・運搬コストや生産したエネルギーの利用先の確保が問題となる。バイオマスの一種である下水汚泥は、都市部における収集インフラが下水処理場として既にはほぼ確立されていること、下水処理場自体が国内全電力使用量の約0.7%（約68億kWh/年）を占める大電力消費施設であることから、バイオマスエネルギー生産設備を導入するための条件が整っている。下水汚泥からエネルギーを回収し、そのエネルギーを利用・回収するプロセスを構築することで、下水処理場が外部から導入している一次エネルギー量の削減や、温室効果ガス排出量削減につながることから、下水汚泥のエネルギーを有効活用できる技術の確立が望まれている。

これに対し、現状の下水汚泥処理は約70%が焼却又は埋立により行われており、エネルギーとして利用されている割合は約13%程度である。その利用内容としては、下水汚泥を消化して得られた消化ガスによる消化槽加温が大半であり、また、消化後の残渣の最終処理が別途必要であることが課題として残る。以上のことから、エネルギー利用効率が高く、また残渣処理が完結する新たな処理法の確立が望まれている。

筆者らは、環境省の補助\*のもと、下水汚泥を内部循環流動床ガス化炉（ICFG）にて熱分解ガス化し、得られたガスをガスエンジンに供給して、発電利用するシステムの開発を行った。

本稿では、2005年9月から約1年間にわたり下水汚泥処理量15 t/d規模の実証試験を行った結果とその結果から試算された省エネルギー効果、温室効果ガス発生量削減効果について報告する。

※二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（民間団体）事業者等技術開発事業

\* 環境事業カンパニー 環境プラント事業本部 技術統括部 環境エネルギー技術室 プロジェクトグループ

\*\* 同 環境開発統括部 環境エネルギー開発室 袖ヶ浦技術開発試験所

第12回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム予稿集、2006年12月8日、P.253-257（一部加筆）

### 2. システム説明

本システムのフローを図1に示す。下水汚泥は汚泥乾燥機で水分20%程度に乾燥後、当社の開発した内部循環

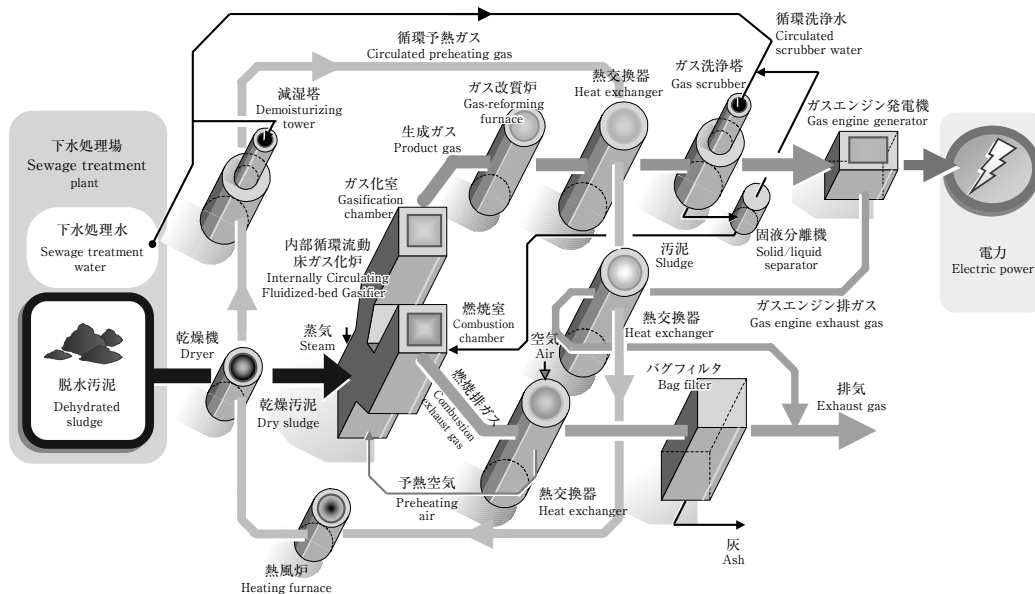


図1 下水汚泥ガス化発電システムプロセスフロー  
 Fig. 1 System flow of sewage sludge gasification and incineration energy system

流動床ガス化炉（ICFG）のガス化室に供給される。ガス化室に供給された乾燥汚泥は、650～750℃の水蒸気雰囲気下で熱分解され、後段のガス改質炉で空気を酸化剤とする部分燃焼改質により800～900℃で水素、一酸化炭素、メタンを中心とした可燃性ガス（生成ガス）に改質される。改質された生成ガスは、下水汚泥乾燥用の循環予熱ガスと熱交換し、ガス洗浄塔で洗浄後、ガスエンジン発電機に供給され、電力としてエネルギー回収される。生成ガス単独でもガスエンジンの運転は可能であるが、本システムでは下水汚泥性状の変化に対するシステム全体の安定性の向上及びエンジンからの排熱回収量を増やすことを目的として生成ガスに都市ガスを混合し、システムトータルでの効率向上を図っている。ガス洗浄塔で除去された固形分、未利用炭素分、凝縮水は、流動床ガス化炉燃焼室に供給して燃焼処理を行い、安定化した状態で排出される。流動床ガス化炉燃焼室からの燃焼排ガスは、流動床ガス化炉の流動空気と熱交換後、除じんされ大気に放出される。汚泥乾燥用の循環予熱ガスは汚泥乾燥に使用された後、減湿塔で減湿及び除じんを行い、前述の生成ガス及びガスエンジン排ガスとの熱交換によって予熱された後、熱風炉で約400℃に昇温され、汚泥の乾燥に再度使用される。このように、各所での排熱は循環予熱ガスによるカスケード利用によって、効率化を実現している。

### 3. 内部循環流動床ガス化炉の特長

本実証設備に採用した内部循環流動床ガス化炉（ICFG）の概念図を図2に示す。本ガス化炉内部はガス化室と燃焼室に分割されている。ガス化室は蒸気によって流動化されており、ガス化室に供給された乾燥汚泥は水蒸気雰囲気下の熱分解によって、水素・一酸化炭素・メタンなどの炭化水素を主成分とする生成ガスと、チャー・タール・灰分などの熱分解残渣とに分解される。熱分解残渣は流動媒体とともにガス化室の下部の開口部を通じて、

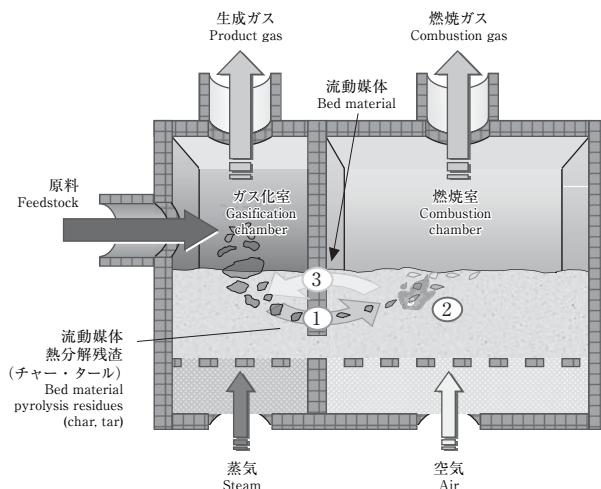


図2 ICFG概念図  
 Fig. 2 Schematic diagram of ICFG

燃焼室に移送される(図2の①)。燃焼室は空気によって流動化されており、ガス化室から移送されてきた熱分解残渣の完全燃焼を行う(図2の②)。この残渣の燃焼熱により燃焼室温度は約800～850℃に保たれる。燃焼室で加熱された流動媒体はガス化室に戻り(図2の③)、ガス化室での熱分解に必要な反応熱を供給する。これにより、ガス化室では原料を部分燃焼させることなく、その温度を650～750℃に保つことが可能であり、生成ガスは燃焼排ガスで希釈されることがないため高い発熱量が得られる。また、チャー、タールなど、ガスにならない熱分解残渣を選択的に燃焼させ、その熱を熱分解の熱源としていることで、カーボンロスが少なく高い冷ガス効率<sup>\*</sup>が得られる。更に、最終的に残存する残渣は燃焼室で完全燃焼されているため、ガス化炉でありながら従来の焼却設備から排出される焼却灰と同様に未燃分をほとんど含まないという特長を有す。

※冷ガス効率…ガスとして利用できるエネルギー/原料の保有するエネルギー

#### 4. 実証設備

東京都下水道局清瀬水再生センター内に建設した下水汚泥処理量15 t/d実証設備の外観を写真に示す。ガスエンジン発電規模は200 kWである。図3に実証運転実績を示す。2005年9月から2006年7月末までの10箇月間に合計6回の実証運転を行った。初期2回の実証運転(RUN1, RUN2)でガス製造側(ガス化～ガス洗浄)の基本性能の確認を行い、その後4回の実証運転(RUN3～RUN6)で全体システムの信頼性を確認するための連続運転を実施した。運転時間は延べ142日間(56日間連続を含む)に達し、1758 tの下水汚泥(脱水ケーキ)の



07-74 01/217

写真 試験設備外観  
Photo View of pilot plant

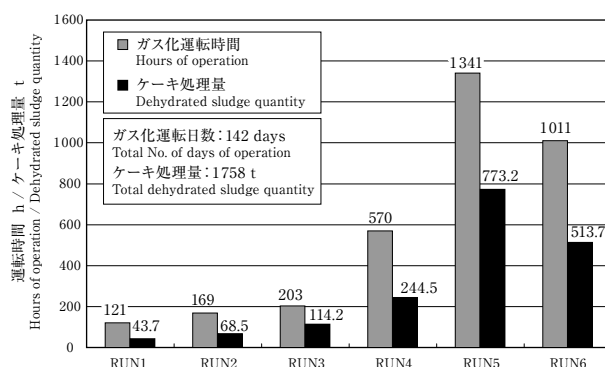


図3 運転実績  
Fig. 3 Hours of operation

処理を行った<sup>\*</sup>。

※東京都下水道局とのノウハウフィールド提供型共同研究として実施。

### 5. 試験結果

#### 5-1 生成ガス性状

表1に本システムのガス化炉から得られた可燃性ガス(生成ガス)の組成を示す。発熱量(LHV)は5.0～7.0 MJ/m<sup>3</sup>(NTP)であり、冷ガス効率は55～65%であった。本設備は実機想定規模の10～15%と小規模であるため、放熱や系内にノズル等の保護用として投入するパージ用N<sub>2</sub>等の影響が大きい<sup>3</sup>が、実機規模にスケールアップした際には、窒素濃度は30%程度、発熱量は10 MJ/m<sup>3</sup>(NTP)程度、冷ガス効率は60～70%となる。

#### 5-2 ガスエンジン発電機

図4に生成ガスの組成と流量、図5にガスエンジン発電機の発電出力の経時変化を示す。ガス組成の変動は数

表1 生成ガス代表組成

Table 1 Typical composition of product gas

生成ガス流量 Flowrate	m <sup>3</sup> /h (NTP)	200～250
H <sub>2</sub>	vol%	7～10
CO	vol%	9～13
CO <sub>2</sub>	vol%	10～12
CH <sub>4</sub>	vol%	4.0～9.0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	vol%	0.5～1.0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	vol%	0.02～0.08
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	vol%	0.02～0.05
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	vol%	0.1～0.2
H <sub>2</sub> O	vol%	1～1.5
N <sub>2</sub>	vol%	50～60
LHV	MJ/m <sup>3</sup> (NTP)	5.0～7.0

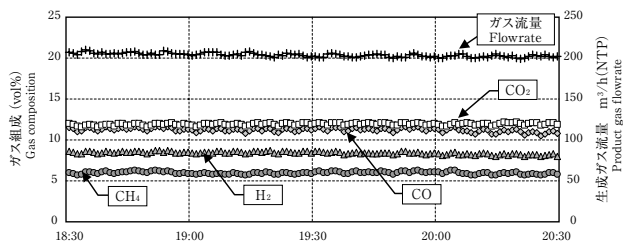


図4 生成ガス流量・主要成分濃度の経時変化  
 Fig. 4 Time-related change in product gas flowrate and concentration of main components

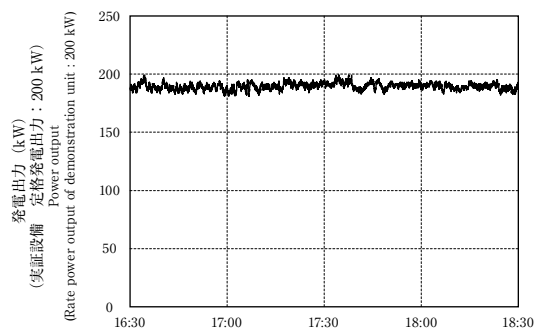


図5 ガスエンジン発電機発電出力の経時変化  
 Fig. 5 Time-related changes of gas engine generator output

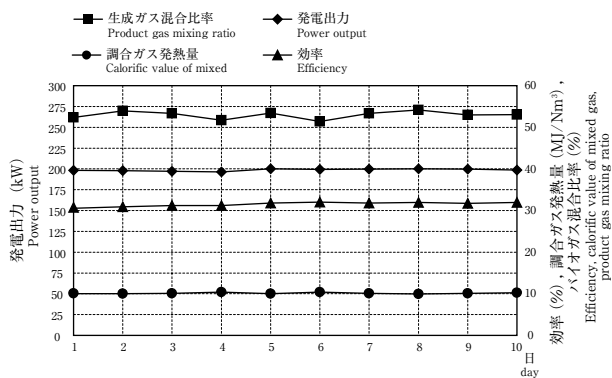


図6 ガスエンジン連続運転状況  
 Fig. 6 Continuous operation of gas engine

時間で±数%程度であった。また、ガスエンジンの発電出力は安定して制御可能であった。図6にガスエンジ比率及び生成ガス都市ガスの混合ガス（調合ガス）発熱量について10日間の24時間平均値を示す。生成ガス都市ガスの混合比が生成ガス比率50～55%（発熱量換算）の条件下で、一定の発電出力（200 kW）、発電効率（約32%前後）で安定連続運転を達成した。以上より、本システムの生成ガスがガスエンジン燃料として十分に利用できることが実証された。

## 6. 環境特性

### 6-1 排水性状

燃焼室をもたない一般的なガス化炉から得られた生成ガスの精製に湿式処理法を用いた場合、湿式洗浄後の排水には生成ガスから除去されたタール分やアンモニアなどの物質が含まれることから、その処理のため排水処理設備が必要となる。これに対し、本システムでは生成ガス洗浄設備で使用した洗浄水を流動床ガス化炉燃焼室に噴霧して燃焼・無害化処理することが可能である。した

表2 排水水質分析結果と下水排除基準  
 Table 2 Result of analysis on water discharge effluent

RUN No.	RUN5	基準値	単位
サンプリング日時	2006/2/27	Regulation value	Unit
Sampling time	7:00		
pH	5.3	5～9	—
BOD	23	<600	mg/L
COD	27	—	mg/L
SS	11	<600	mg/L
沃素消費量	<1	220	mg/L
フェノール類含有量	0.05	5	mg/L
銅含有量	0.01	3	mg/L
亜鉛含有量	0.50	5	mg/L
溶解性鉄含有量	<0.1	10	mg/L
溶解性マンガン含有量	<0.2	10	mg/L
クロム含有量	<0.02	2	mg/L
窒素含有量	13	120	mg/L
燐含有量	0.83	16	mg/L
カドミウム及びその化合物	<0.005	0.1	mg/L
シアン化合物	<0.1	1	mg/L
有機りん化合物	<0.1	1	mg/L
鉛及びその化合物	<0.03	0.1	mg/L
六価クロム化合物	<0.005	0.5	mg/L
砒素及びその化合物	0.008	0.1	mg/L
セレン及びその化合物	<0.01	0.1	mg/L
アルキル水銀化合物	<0.0005	N.D.	mg/L
水銀又はその化合物	<0.0005	0.005	mg/L
ポリ塩化ビフェニル	<0.0005	0.003	mg/L
トリクロロエチレン	<0.03	0.3	mg/L
テトラクロロエチレン	<0.01	0.1	mg/L
ジクロロメタン	<0.02	0.2	mg/L
四塩化炭素	<0.002	0.02	mg/L
1, 2-ジクロロエタン	<0.004	0.04	mg/L
1, 1-ジクロロエチレン	<0.02	0.2	mg/L
シス-1, 2-ジクロロエチレン	<0.04	0.4	mg/L
1, 1, 1-トリクロロエタン	<0.01	3	mg/L
1, 1, 2-トリクロロエタン	<0.006	0.06	mg/L
1, 3-ジクロロプロペン	<0.002	0.02	mg/L
チウラム	<0.006	0.06	mg/L
シマジン	<0.003	0.03	mg/L
チオベンカルブ	<0.02	0.2	mg/L
ベンゼン	<0.01	0.1	mg/L
ホウ素及びその化合物	0.1	10	mg/L
ふっ素及びその化合物	<0.08	8	mg/L
NH <sub>4</sub> +NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub>	7.0	—	mg/L
ダイオキシン類	0.01	10	pg-TEQ/L

がって、システムからの排水は乾燥設備からの排水が主である。乾燥設備排水の分析結果を下水排除基準と比較して表2に示す。環境項目、有害物質の何れの項目も下水排除基準値未満であることを確認した。

## 6-2 灰性状

燃焼室をもたない一般的なガス化炉で熱分解ガス化を行う場合、ガス化炉から排出される灰中には炭素分が5～10%残存することが一般的であり、この残留炭素分の処理が問題となる。本システムの場合、生成ガスに伴ってガス化炉後段に飛散した固形分、タール分などはガス洗浄設備で回収して燃焼室に供給しており、どちらも燃焼・安定化後に後段のバグフィルタで捕集される。捕集

表3 バグフィルタ灰分析結果（灰組成）  
Table 3 Result of analysis on Bagfilter ash

RUN No.	RUN2	RUN4	RUN5	平均 Average	単位 Unit
サンプリング日時 Sampling time	2005/10/3 11:50	2005/12/10 17:00	2006/3/3 6:00		
Carbon	0.34	0.65	0.37	0.45	wt%
SiO <sub>2</sub>	17.63	15.59	22.40	18.54	wt%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.44	11.92	10.01	11.79	wt%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.66	16.67	18.73	16.02	wt%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	31.07	31.45	33.20	31.91	wt%
CaO	12.08	6.18	3.25	7.17	wt%
MgO	3.80	4.07	4.07	3.98	wt%
K <sub>2</sub> O	2.53	3.52	3.72	3.26	wt%
Na <sub>2</sub> O	0.54	0.50	0.56	0.53	wt%
MnO	0.06	0.09	0.10	0.08	wt%
ZnO	0.23	0.31	0.14	0.23	wt%
TiO <sub>2</sub>	-	0.33	0.53	0.43	wt%
SO <sub>3</sub>	-	0.49	0.64	0.57	wt%
小計 Total	94.38	91.77	97.72	94.96	wt%

された灰の分析結果について、炭素、灰組成を表3に、重金属、ダイオキシン類を表4に示す。灰中には炭素分はほとんど残留しておらず (<1.0%)、また重金属類・ダイオキシン類ともに通常の焼却炉のばいじんに定められる基準値未満であった。また、これらの分析値は既往の下水汚泥焼却処理から排出される焼却灰の分析値とほぼ同等であり、既存の灰処理で対応可能である。

## 7. 省エネルギー効果、温室効果ガス削減効果の試算

実証試験で得られた結果を基に、下水汚泥処理量100 t/d、発電量3000 kW規模の下水汚泥ガス化発電システムにおける省エネルギー効果、温室効果ガス排出量削減効果を試算した。なお試算に用いた下水汚泥のデータは清瀬水再生センターから提供されたものを用いた。その結果、外部から電力を購入して下水汚泥を焼却する従来のシステムと比較し、下水処理場全体の一次エネルギー消費量の約25%、温室効果ガス排出量の約65%の削減が可能であることが分かった(図7、図8)。一次エネルギー消費量の削減は、下水汚泥のもつエネルギーをガス化発電で利用することで、焼却処理以上にエネルギー回収が可能であること、前述の熱のカスケード利用によって高いエネルギー効率を得られることに起因するものである。一方、温室効果ガス排出量の削減率が省エネルギー効果より大きいのは、二酸化炭素の310倍の温暖化係数をもつ亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)発生量の削減に由来する。従来の下水汚泥焼却設備では、下水汚泥に多量に含まれる窒素分を由来として、処理場からの温室効果ガス排出量

表4 バグフィルタ灰重金属分析・ダイオキシン類分析結果と規制値  
Table 4 Result of analysis on bagfilter ash

RUN No.	RUN1	RUN2	RUN4	基準値 Regulation value	単位 Unit
サンプリング日時 Sampling time	2005/9/5 13:00	2005/10/3 11:50	2005/12/10 17:00		
溶出試験 Elution method	水銀又はその化合物 Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/L
	カドミウム及びその化合物 Cd	<0.03	<0.03	<0.03	mg/L
	鉛及びその化合物 Pb	<0.03	<0.03	<0.03	mg/L
	六価クロム化合物 Cr6+	<0.05	<0.05	<0.05	mg/L
	砒素及びその化合物 As	<0.03	<0.01	0.11	mg/L
	セレン及びその化合物 Se	<0.03	0.01	0.07	mg/L
	シアン化合物 CN-	<0.1	<0.1	<0.1	mg/L
含有試験 Inclusion method	ダイオキシン類 Dioxin	0.0055	0.0065	0	ng/L

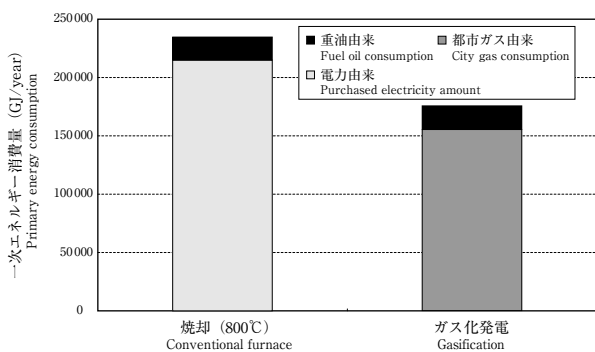


図7 一次エネルギー消費量比較  
Fig. 7 Comparison in primary energy consumption

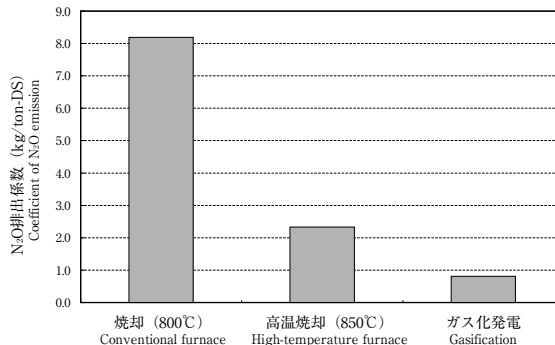


図9 N<sub>2</sub>O排出係数比較  
Fig. 9 Comparison in coefficient of N<sub>2</sub>O emission

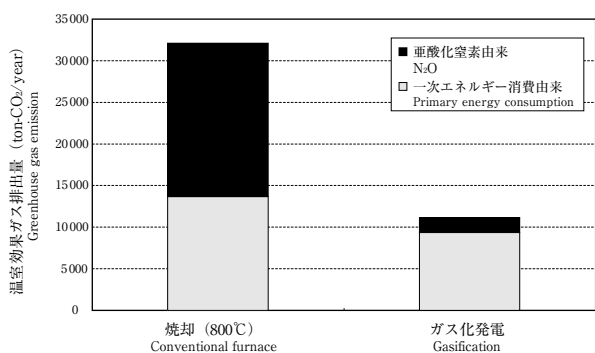


図8 温室効果ガス排出量比較  
Fig. 8 Comparison in greenhouse gas emission levels

のおよそ70～80%を占める割合でN<sub>2</sub>Oが発生しており、この排出削減が課題となっている。N<sub>2</sub>Oは高温で燃焼させることである程度の削減効果があり、現在、汚泥焼却システムへの導入が進んできている。本システムでは、このN<sub>2</sub>Oの発生量が従来の焼却システムと比較して約90%、高温燃焼システムと比較しても約65%の削減が可能である(図9)。このようにN<sub>2</sub>O発生が大きく抑制される理由としては、以下の二つのメカニズムによると考えている。第一に、原料中の窒素分は、炉内で一酸化窒素(NO)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)、シアン化水素(HCN)を経由して、窒素等の安定な物質へと転換されるが、この際に発生するNOを主な発生経路としてN<sub>2</sub>Oが発生することが明らかとなっている。本システムでは、下水汚泥を酸素のないガス化室に投入するため、汚泥中のN成分がNOに転換する割合が少なく、NO経由のN<sub>2</sub>O発生

が大幅に抑制されていると考えられる。また発生した場合も還元雰囲気中で発生したOHラジカルにより分解されていると考えられる。第二に、前述のように高温燃焼させることでN<sub>2</sub>Oの発生量は減少させることが可能であるが、汚泥焼却では高含水汚泥を炉内に供給するため、原料の供給部近傍で局所的な温度低下が発生し、N<sub>2</sub>Oが発生しやすい環境ができる場合があると考えられる。これに対し、本システムではガス化炉に投入する前に予め乾燥させており炉への供給水分負荷が低いことから、原料供給部の温度変動が小さく、また高温での安定燃焼が可能であるためと考えられる。

## 8. おわりに

下水汚泥を熱分解ガス化して得た生成ガスを使用して、ガスエンジン発電設備の実証運転を142日間行い、連続運転性、安定性、環境特性の確認により同設備が実用レベルにあることを実証した。下水汚泥処理規模100 t/d、ガスエンジン発電規模3000 kWの本システムを導入することで、従来の汚泥焼却処理を行った場合と比較し、下水処理場の一次エネルギー消費量の約25%、温室効果ガス排出量の約65%の削減効果が得られる試算結果となった。今後は本システムの早期の実用化を目指し、地球環境保護に貢献していく所存である。

## 9. 謝辞

本開発に多大なるご協力をいただいた環境省並びに東京都下水道局関係者各位に感謝の意を表す。