

II—22 建築廃木材と利用した下水汚泥焼却施設の設計

札幌市下水道局工事部

藤田 幸宏

札幌市下水道局工事部

諏訪田 正美

1. はじめに

下水道の整備に伴い生活環境の改善と河川等の清澄化が進む一方で、下水処理場から発生する汚泥量は年々増加の一途をたどっており、この汚泥の処理処分は、最終処分方法に課せられた種々の制約や一次・二次の石油ショックによる省資源・省エネルギーに対する関心の高まりからくる要求に傾聴しながら、各自治体とも早急に取り組んでいかなければならない大きな課題の一つとなっている。また、下水汚泥を廃棄物としてではなく資源として有効に活用していこうという発想の転換と、それに応じた処理処分方式を選択する必要にも迫られている。

元来、汚泥は自然のサイクルに即し緑農地に還元することが望ましいが、量的に還元しきれない汚泥や還元できない質の汚泥もあり、これらは減量安定化処理し処分せざるをえない。この減量安定化処理操作の代表として焼却があるが、下水汚泥は含水率が高く焼却処理するためには膨大なエネルギーを消費するため、焼却方式の採用にあたっては省資源・省エネルギーに十分配慮しなければならない。また、焼却によって発生する焼却灰も資源として利用できる形態であることが好ましい。

このような観点から、焼却用の補助燃料に重油を使用せず、これまで埋め立て処分されていた都市廃棄物である建築廃木材を有効に利用して下水汚泥を焼却する方式を採用した手稲下水汚泥焼却センターが昭和58年4月から稼動したので、この設計に関する基本的事項を報告するものである。

2. 札幌市における下水汚泥の処理処分

汚泥処理方式は、濃縮、消化、脱水、乾燥、焼却、コンポストを適宜組み合わせるが、この組み合わせは、最終処分の形態（脱水ケーキ、乾燥ケーキ、焼却灰、コンポスト製品）別の発生量と、最終処分方法（陸上埋め立て、海洋投棄、緑農地還元、土工材料等の有効利用）毎の処分先の需要量および環境容量とのバランスを考えて決定するのが適切である。

札幌市においては、消化は行っておらず、昭和57年度までは次の汚泥処理処分方式を採用しており、

〔I〕 濃縮 → （薬注）脱水 → 緑農地還元

〔II〕 濃縮 → （薬注）脱水 → 埋め立て

〔III〕 濃縮 → （熱処理）脱水 → 焼却 → 有効利用（一般農業利用、埋め立て地覆土、一般整地）

昭和58年度から手稲下水汚泥焼却センターが稼動し、昭和59年度に厚別下水汚泥コンポスト工場が稼動する予定なので、〔I〕、〔II〕の方式はその大部分が次の方式に移行し、最終処分量の減量と汚泥の再資源化、有効利用を促進していく考えである。

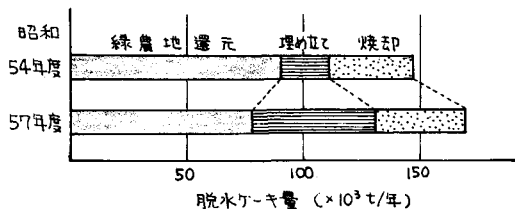
〔IV〕 濃縮 → （薬注）脱水 → コンポスト → 緑農地還元

〔V〕 濃縮 → （薬注）脱水 → 焼却 → 有効利用

昭和57年度において本市の下水処理場からは、処理汚水量の0.376%に相当する973,000 m³（平均含水率94.5%）の濃縮汚泥が発生しており、最終処分量は脱水ケーキで131,000 t、焼却灰で19,700 tとなっている。処理処分される脱水ケーキ量は、昭和54年度に比べ図-1のとおり15%増加している。脱水ケーキのままの処分方法は緑農地還元と埋め立てであるが、緑農地還元は施用量の制限指導、取扱性の悪さなどから処分量は減ってきており、残量は埋め立て処分されている。一方、埋め立ては、年々処分地の確保が容易にできなくなってきたおり、また、跡地利用方法の確立ができていない現状では望ましい処分方法とはいえない。

このことから、本市では、緑農地還元可能脱水ケーキはコンポスト化し積極的に還元していき、埋め立て処分しなければならない脱水ケーキについては焼却処理し、焼却灰として減量処分すると同時に、この焼却灰の有効利用を図っていく予定である。

図-1 脱水ケーキの処理処分状況



3. 手稲下水汚泥焼却センターの焼却方式

一般に、薬注脱水ケーキは65～80%と含水率が高く、このままでは自然しないため焼却するには補助燃料として多量の重油(含水率75%脱水ケーキで150～250L/t-ds)を必要とする。全国の下水処理場で使用する重油のうち約9割に相当する38万klが焼却用に使われており、この量は日本の全重油消費量の約0.5%となっている。このため、焼却方式を選定する場合、(1)脱水ケーキの低含水率化、高カロリー化、(2)効率の高い焼却炉、焼却方式の採用、(3)重油に代る安価なエネルギーの利用など省資源・省エネルギーに十分留意しなければならない。本焼却方式の選定にあたっては、既存の数か所の脱水施設から発生する脱水ケーキを集中的に焼却する単独焼却施設のため、特に、(2)、(3)について検討を行った。

脱水ケーキは低位発熱量が1,000～1,200 kcal/kgあれば炉内で良好な自然を維持することができ、通常の薬注脱水ケーキは含水率が高いため0～200 kcal/kgときわめて低く自然しない。しかし、乾燥固形物としては約2,000 kcal/kgの発熱量を有するので、乾燥固形物自体は有効な燃料になる。したがって、自然可能な含水率まで乾燥して燃やし、この時の廃熱を回収してこれをフィードバックして汚泥を乾燥できれば、補助燃料は絶対量で不足する熱量だけを補えば良く、相当な量のエネルギーを節減できる。このことから、本焼却方式は、汚泥の燃焼廃熱を積極的に回収してシステム内のエネルギー効率を高める方式、すなわち、燃焼排ガスの廃熱の蒸気として回収し、この蒸気で間接的に脱水ケーキを乾燥する乾燥焼却方式とした。

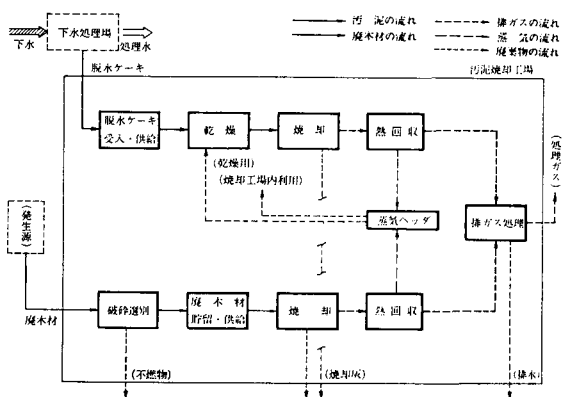
一方、従来の汚泥焼却施設で使用されている重油の代りに都市廃棄物を利用できないかとの検討から、これまで埋め立て処分されている建築廃木材が燃料として利用価値があり量も確保できることから本焼却方式に取り入れた。都市廃棄物を汚泥の焼却に利用する方法に、おが屑と汚泥を混合して焼却したり、都市ごみに汚泥を混合して焼却する方法があり既に実施段階に入った都市もあるが、本市では、前者は市内での発生量が少なく安定供給が難しいことから、また、後者は燃焼速度の違いから汚泥の完全燃焼は難しく焼却灰の有効利用にも不安があるため、埋め立て地に運ばれてくる粗大な廃木材を対象とし破砕・選別後専焼させ、蒸気として熱回収し脱水ケーキの乾燥に利用する方式を考案した。また、廃木材の燃焼で得られる蒸気の工場内利用も考えた。

以上より、重油は原則として着火時と炉内の温度調整にしか使用しない省資源・省エネルギータイプの焼却方式が採用されるに至り、図-2を基本として詳細設計に入った。

4. 建築廃木材

建築廃木材とは、一般家屋や学校校舎などの木造老朽施設の解体材や型枠などの廃棄処分される建設資材を主体とする廃棄物であり、本市の場合、これらのほとんどは市内の3か所の埋め立て地で処分されて

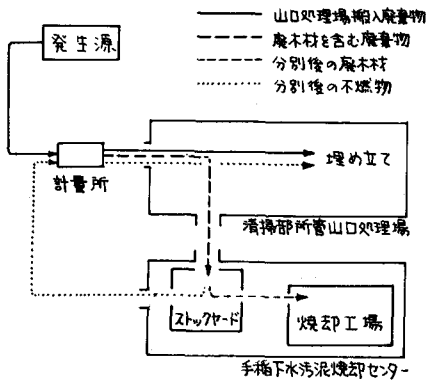
図-2 基本焼却方式



いる。本市清掃部の資料によると廃木材の埋め立て処分量は年間 10 万 t 程度と推定されており、総埋め立て処分量の 2 割を占めている。しかも、廃木材は比重が小さく空隙も大きいため埋め立て容積が高み、また、難腐食性でもあるため埋め立て後の容積変化も少ない。したがって、これを焼却処分できることは埋め立て地の延命にもつながり非常に有効である。しかし、燃料として用いる場合、廃木材が不燃性材と混合していたり複合物となって搬入されることが多く分別が必要であり、また、発生量の季節変動にも対応できる収集方法を考えなければならない。

このため、本焼却方式における廃木材の収集は、図-3 のとおりとし、埋め立て地に運ばれてくる廃棄物を入口にある計量所でチェックし、良質な廃木材の混入割合の高い車輛のみ焼却センター内のストックヤードに搬入させ、そこで燃料に通ずる廃木材を分別する方法を採用した。また、ストックヤードは、季節変動に対する調整的役割をもたした。

図-3 廃木材収集方法



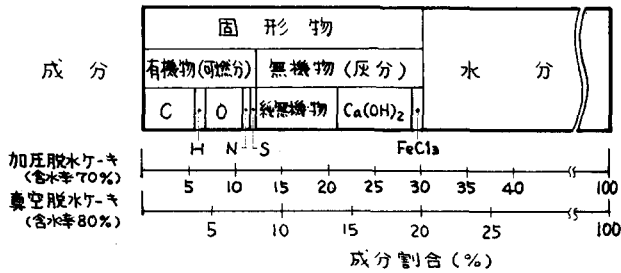
5. 施設の設計

(1) 脱水ケーキと廃木材の性状

(i) 脱水ケーキ

焼却の対象となる脱水ケーキは、薬注真空脱水ケーキと薬注加圧脱水ケーキであり、脱水ケーキの成分内訳は概ね図-4 で示すことができる。脱水ケーキは 70~80 % の水分と 20~30 % の固形物に分けられ、固形物は有機物(可燃分)と無機物(灰分)で構成される。灰分は、注入した薬品は全てケーキ側に

図-4 脱水ケーキ成分内訳



移行するものとしたため、約 50 % が脱水段階で添加された薬品であり、残りは污泥自体の無機分である。可燃分は、炭素(C)、水素(H)、酸素(O)、窒素(N)、硫黄(S)で構成される。可燃分の組成示性式としては、近藤等²⁾の $[(C_6H_{10}O_5)_{20} \cdot (C_5H_7NO_2)_{18} \cdot S]_n$ や大宮³⁾の $(C_{10}H_{15}NO_4)_q \cdot S$ があるが、設計値は本市污泥の実績から表-1とした。有機物の高位発熱量の算出式には Scheueurer, Kestner & Meunier の式や Steuer の式があり、本市脱水ケーキの高位発熱量は、これらの式で比べると道外のものより平均 6 % 程度高い組成となっており、それぞれ 6,000, 5,600 kcal/kg-可燃分 となり。

実測値よりも 5~10 % 高い傾向を示す。このことから、本市污泥可燃分の計画高位発熱量を 5,000 kcal/kg とした。

脱水ケーキの計画含水率は、季節変動等も考慮し、加圧脱水ケーキ 65~70 %、真空脱水ケーキ 75~80 % と幅をもたせ、有機分割合は両者とも 40 % とした。

なお、脱水ケーキの発熱量は添加された消石灰の水離反応(吸熱反応)を考慮しており、乾燥固形物当りでは、高位発熱量で 2,000 kcal/kg、低位発熱量で 1,850 kcal/kg とした。

表-1 脱水ケーキ性状

			真空脱水ケーキ	加圧脱水ケーキ
成分	水分	wt %	80~75	70~65
	可燃分	(1)内乾物当り	8~10 (40)	12~14 (40)
	灰分		12~15 (60)	18~21 (60)
可燃分組成	C	可燃分当り wt %	4.6	
	H		8	
	O		3.9	
	N		6	
	S		1	
発熱量	高位	乾物当り	2,000	
	低位	kcal/kg	1,850	

(2) 廃木材

廃木材の性状にかかわる計画値は、次に述べるように木材および木質系燃料の数値をもとにして、表-2のとおりとした。

木材は、主としてセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3要素で構成されており、他に若干の灰分と抽出成分を含有しているが可燃成分は樹種を問わずほぼ一定している。含水率は、生材で20～23%、気乾状態で9～15%となっており、一度乾燥したものは生材の含水率に戻るのに長期間要するが、本焼却施設の設計では屋外での収集作業が多く湿気の吸収があると考えられることから、20%を計画値とした。灰分は、乾物当り純木で0.26～0.55%、樹皮で3～10%となっているが、燃料に用いる廃木材はモルタル等の付着不燃物がほかに含まれることが予想されるため、乾物当り5%とした。発熱量は、廃木材可燃分高位を4,100 kcal/kgとし、湿廃木材(燃焼物)低位発熱量を2,750 kcal/kgと計画した。

表-2 廃木材性状

成分	水分	wt %	20
	可燃分	[()内 乾物当り]	76 (95)
	灰分		4 (5)
可燃分組成	C	可燃分当り wt %	50
	H		6
	O		43
	N		0.9
	S		0.1
発熱量	高位	湿廃木材当り kcal/kg	3,000
	低位		2,750

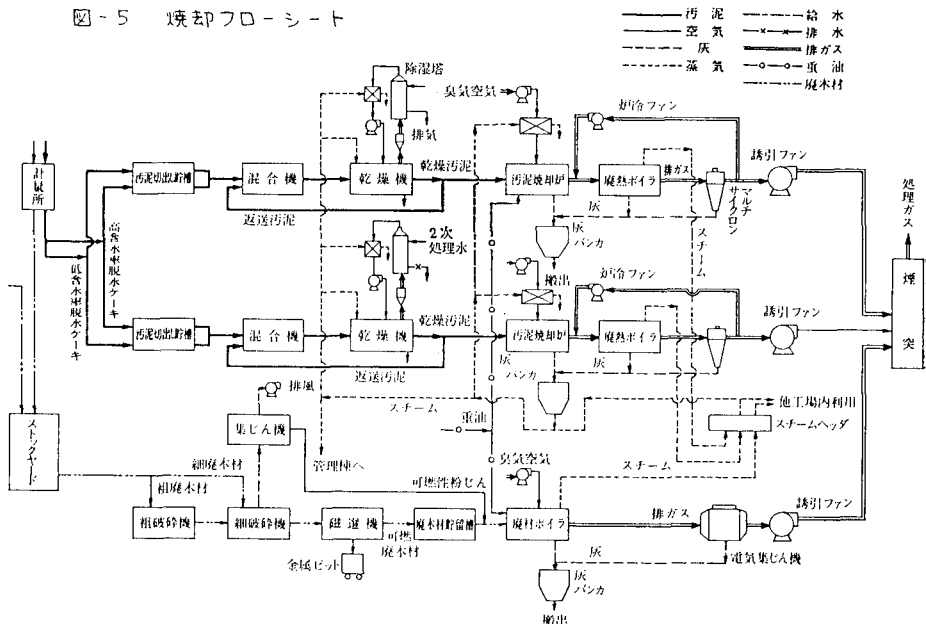
(2) 主要施設の概要

本焼却センターの焼却フローシートは図-5のとおりであり、焼却能力は全体計画で、汚泥焼却施設が脱水ケーキ100 t/日×2系列、廃木材燃焼施設は50 t/日×1系列である。現在は、このうち汚泥焼却施設は100 t/日1系列とこれに対応する廃木材燃焼量30 t/日の施設が稼働している。

(1) 汚泥乾燥施設

受入れた加圧脱水ケーキと真空脱水ケーキは搬送ラインで混合し、乾燥機で含水率40%の汚泥として焼却炉に送りこむ。乾燥機は、汚泥の燃焼時に回収された蒸気と廃木材の専焼回収蒸気を熱媒体とする間接乾燥機である。下水汚泥は、粘着性が強く通気性が悪いため乾燥しづらく、熱媒体との熱伝達促進のための攪拌と連続的な汚泥の移動が必要であり、一般に、汚泥乾燥機に熱風受熱式が使われているが、臭気、装置規模、熱効率および発火の問題点が指摘されている。本施設における乾燥機は、これら問題点に対処しやすい間接加熱式とした。

図-5 焼却フローシート



間接加熱式乾燥機は、攪拌翼内部および胴ジャケット部に熱媒体を通す低速攪拌型と胴ジャケット内部のみ熱媒体を通す高速攪拌型に分類できるが、本施設においては次の特徴より低速攪拌型を採用している。

- 1) 攪拌翼自体が伝熱加熱面として構成されているため容器単位体積当りの伝熱面積が大きい
- 2) 伝熱係数は $100 \sim 200 \text{ kcal/h} \cdot \text{c} \cdot \text{m}^2$ (設計値 $130 \text{ kcal/h} \cdot \text{c} \cdot \text{m}^2$) と大きい
- 3) 外周速は $0.1 \sim 1.5 \text{ m/sec}$ と低速であるが、汚泥は一樣な攪拌作用を受けるため均一に乾燥できる
- 4) 所要キャリアガス量は僅かである(設計値 $730 \text{ Nm}^3/\text{t} \cdot \text{h}$) ため汚泥の飛散が少なく、ガス処理が容易である
- 5) 機内の汚泥保有率は胴容積の $70 \sim 80\%$ と大きくとれるためコンパクトとなる
- 6) 低速回転のため攪拌動力が小さく、攪拌翼の摩耗が少ない

一方、このタイプは、乾燥に必要な熱の全量を伝熱体からの熱移動により得られるように考慮されているので伝熱体表面への汚泥の付着を最も注意しなければならない。付着が起ると乾燥能力の低下をきたし、汚泥の練り現象により運転できなくなる場合もある。これを防ぐにはいくつかの方法が考えられるが、本施設においては乾燥した汚泥を返送し水分を稀釈して付着を防止する方法を採用した。返送量は、乾燥機投入汚泥の含水率が 50% となるよう返送しており、乾燥汚泥の含水率は 40% ($25 \sim 35\%$ 以下では粉塵の発生が著しい) であるから、脱水ケーキ含水率が 70% の場合、投入脱水ケーキに対し 200% 返送となる。また、乾燥キャリアガスは、除湿後再加熱 (120°C) して乾燥機に送気する循環方式を採用し、防臭とキャリアガスの処理の低減を図った。

(2) 汚泥焼却施設

汚泥の焼却炉には、多段炉、流動炉、回転炉、ストーカ炉などがあり、最近では各機種とも断熱性の向上、運転操作の省力化が進んでいる。本施設においては、既存焼却炉との技術的互換性があることや焼却灰の有効利用を前提とすることなどからストーカ炉を採用した。

炉内は階段状のストーカとなっており、大きく乾燥段、燃焼段、後燃焼段に区分でき、ここでは燃焼用空気の均一供給を受け、反転攪拌作用のもとに緩慢な燃焼が行われ、含水率 40% の粒状の乾燥汚泥は容易に自燃する。燃焼後の焼却灰は、極めて未燃分の少ない(設計値 2% 以下)半溶融軟質フリッカー状であり、通気性や保水性にすぐれ強度もあることから土工材料などへの有効利用が可能である。炉出口排ガス温度は 800°C に制御され、悪臭物質は高温燃焼により分解脱臭できる。排ガスの保有熱は、後続する自然循環水管式のボイラにより常用 $10 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ の蒸気として回収され、この量は含水率 70% ケーキ 100 t/day 焼却時で約 120 万 kcal/hr となり、汚泥の乾燥に必要な熱量の 65% に相当する。また、得られた蒸気は、汚泥の乾燥用のほか、乾燥キャリアガスの予熱、燃焼用空気の予熱や管理棟の暖房、給湯用にも利用できるよう配慮した。なお、使用した蒸気の復水はすべて回収再使用できる施設とし、エネルギーの回収と市水の節減を図った。

(3) 廃木材前処理施設

焼却センター内に運ばれた廃木材は、搬送工程における円滑な移送性と制御性を得るためと、燃焼工程における適当な燃焼速度と安定した燃焼を得るために、粗破砕機で長さ 50 cm 以下に剪断破砕し、次に回転式の破砕機で 15 cm 以下のチップ状に破砕するよう計画した。この後、支障となる釘や鉄片を除去する磁選機を経て貯留する。貯留槽は、全体計画で1基当り1日分の貯留容量をもたせる基とした。1基当り 180 m^3 (破砕廃木材の比重 0.28) とし、ブリッジの起りづらい円錐台状の装置を採用している。

(4) 廃木材燃焼施設

廃木材の燃焼炉は、木屑やチップを燃焼するのに使われている木屑焚ボイラの改良型を採用し、これは燃焼室と熱回収室が一体となっている。燃焼部分は、燃焼速度を調整できるようエンドレスの移床式ストーカ構造とした。ボイラは廃熱ボイラ同様の自然循環水管式であり、発生常用蒸気圧力は、焼却センター内での使用電力量を節減するため、比較的大容量でかつ連続運転の機器(誘引ファン、ボイラ給水ポンプ)の駆動を蒸気でできるよう $20 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ とした。

(5) 排ガス処理施設

汚泥や廃木材の燃焼に伴い発生する排ガス中には煤塵、硫酸酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)、塩化水素(HCl)、塩素(Cl_2)や悪臭物質が含まれており、排ガス処理方式は、被燃物の性状、炉の燃焼特性から得られる発生濃度を、排ガス濃度規制値および附近住民等のニーズが必要とする濃度まで下げる能力

表-3 処理排ガス性状

	汚泥焼却炉		廃材ボイラ		備 考
	規制基準値	計画値	規制基準値	計画値	
硫酸酸化物	$K=4.0$	$K=1.2$	$K=4.0$	$K=0.7$	煙突高さ50m
煤 塵 (g/Nm^3)	0.7	0.3~0.4	0.3	0.1~0.2	
窒素酸化物 (mg/Nm^3)	250	150	400	75	酸素濃度12%換算値
塩化水素 (mg/Nm^3)	700	300	—	20	

を持つ複数の処理装置を効率良く配列して決定しなければならぬ。本施設の場合、悪臭物質については高温燃焼処理できるので、大気汚染物質の除去を主体的に検討し、次に述べる施設により処理排ガスを表-3と計画した。

煤塵について、ストーカ炉は他の炉に比べて発生量が少なく、 $0.5\sim0.8g/Nm^3$ であり、マルチサイクロンで対応でき、廃木材燃焼炉は $2\sim3g/Nm^3$ と多く、 10μ 以下の粒子が $30\sim40\%$ 含有しており、規制値も $0.3g/Nm^3$ と厳しいことから電気集塵機(乾式)とした。 SO_x は被燃物中の硫黄分で決まり、規制は $g = K \times 10^{-3} (H_e)^2$ なる K 値規制であることから、高さ50mの煙突で十分対応できる。 NO_x 、 HCl は、本市および他都市の汚泥と都市ゴミの実績から NO_x : 汚泥 = $2.0 Nm^3/t$ -可燃分、廃木材 = $0.8 Nm^3/t$ -可燃分、 HCl : 汚泥 = $0.8 Nm^3/t$ -DS、廃木材 = $0.1 Nm^3/t$ -濃縮材として炉出口排ガス濃度を求めたが、これらは炉出口で規制値をクリアできる。

6. 運転状況

施設が稼動して半年以上経過するが、維持管理サイドの熱心な努力もあり順調に稼動している。本格的な運転が始まった6月からの運転データの一部を表-4に掲げるが、可燃分割合が季節的要因もあり50%と計画値よりも高く、これに伴い汚泥からの回収蒸気量が多く燃焼廃木材量が少なくなっていることと、廃木材混入不燃物量が多く燃焼灰が増えているほかはほぼ計画値とおりとなっている。今後、厳冬期や融雪期の汚泥を燃焼することにより、季節変動に対する本施設の運転状況が把握できるので、この結果については別の機会に報告したい。

表-4 運転状況

		汚 泥										廃 木 材			蒸気発生量		使用電力量
		受入れ脱水干き量(kg)			含水率(%)			可燃分割合(DS当り%)			乾燥汚泥 含水率 (%)	焼却灰量 (t/日)	燃焼量 (t/日)	燃焼灰量 (t/日)	廃木材燃焼量当り		(1)内 熱水・9DS 量 (kWh)
		(計)	加圧 脱水機	真空 脱水機	(混 合 汚 泥)	加圧 脱水機	真空 脱水機	(混 合 汚 泥)	加圧 脱水機	真空 脱水機					(汚 泥 当り)	廃木材 (t/日)	
運 転 実 績 値	6 月	100.5	46.2	54.3	73.6	67.7	78.6	50.2	50.3	50.2	41.0	18.7	17.6	1.87 (10.4%)	70.2 (2.65)	58.3 (3.32)	9420 (357)
	7 月	100.0	39.9	60.1	72.7	65.8	77.3	50.8	50.6	51.0	40.6	18.6	19.7	2.77 (14.1%)	69.5 (2.55)	75.2 (3.82)	9360 (343)
	8 月	101.0	44.9	56.1	71.1	65.1	75.9	50.8	50.7	50.8	41.0	21.2	16.0	2.30 (14.3%)	73.6 (2.53)	53.2 (3.35)	8380 (311)
	9 月	103.0	39.9	63.1	71.8	65.0	76.0	50.7	50.6	50.7	42.2	20.8	18.7	1.27 (6.8%)	70.0 (2.41)	60.8 (3.25)	9660 (332)
	10 月	120.1	42.8	77.3	73.2	66.9	76.8	50.9	50.8	50.9	43.5	21.0	20.9	1.11 (5.3%)	81.1 (2.52)	66.8 (3.20)	9610 (301)
	平均値	105.7	42.9	62.8	72.6	66.1	77.0	50.7	50.7	50.8	41.7	20.1	18.7	1.84 (9.9%)	73.3 (2.53)	63.5 (3.39)	9590 (340)
計 画 値		100	[50]	[50]	70~75	65~70	75~80	40	40	40	40	30~36 (15~18)	30	2.4 (8%)	45.8~55.0 (1.83)	114 (3.79)	12,200 (440)

7. おわりに

以上、省資源・省エネルギーを図るべく、今まで捨てられていた都市廃棄物を新たに資源として下水汚泥の焼却に利用し、焼却システム自体も内部の熱効率を高めた焼却方式の基本的な事項について述べてきたが、この方式は、全国でも初めての試みでもあるため、建設省や本市の清掃部並びに関連部局の協力がなければ実現しなかったものであり深く感謝すると同時に、さらに安定した施設となるよう一層の努力を重ねていく考えである。

<参考文献>

- 長谷川 博「地方公共団体のエネルギー使用と省エネルギー対策例」第20回下水道セミナー、昭和55年7月
- 近藤 漢雄 3名「汚泥脱水機-その燃料化学的特性」下水道協会誌 Vol. 2 No. 15 1965
- 大宮 一夫「燃焼工学的にみた下水スラッジ」下水道協会誌 Vol. 5 No. 44 1968