

## 「炭化炉の制御方式」

照沼 誠\* 三羽 宏明\*\*

\*日本下水道事業団 群馬工事事務所

群馬県高崎市新町 118-3

\*\*日本下水道事業団 技術開発部

埼玉県戸田市下笹目 5141

### 概要

従来、炭化処理において生産される炭化物は、有機廃材の炭化処理が主に行なわれていた。そのため、下水汚泥を専用とした炉の開発や実験データが少なく、本格的な実用化には至っていなかった。日本下水道事業団では、炭化処理技術確立のため、平成10年1月より炭化処理システム実証機を運転している。長期実証試験の結果から、炭化炉の運転制御とシステムの応答性について報告する。

### キーワード

下水汚泥、炭化汚泥、乾留ガス

#### 1. はじめに

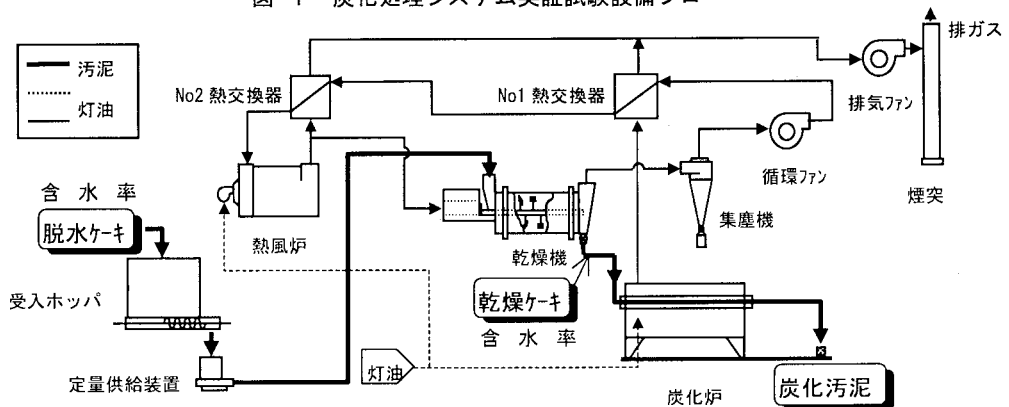
全国の下水汚泥量は、平成9年度において、脱水汚泥として年間約950万トン発生しており、埋立処分地が急速に減少している今日、下水汚泥処理技術は、再利用・再資源化を第一とした施策が求められている。下水汚泥から木炭や活性炭に近い性質を持った「炭化汚泥」を製造する炭化処理技術は、有効利用用途の多様性から下水汚泥有効利用方法の一選択枝となる。

日本下水道事業団では、炭化処理技術の確立のために、平成8年からの炭化処理条件に関する基礎試験・システム構成機器に関する基本特性把握試験を経て、平成10年1月から炭化処理システムの実証試験をスタートさせた。現在まで順調にその運転を継続させている。

本論文は、長期に渡って行われている実証試験の結果から、炭化処理システムの中核である乾留ガス吹出管付外熱式回転炉（炭化炉）の制御機構について、また実験一例として脱水ケーキ含水率を変動させた場合におけるシステムの応答性について報告する。

#### 2. 実験設備と各機器仕様

図-1 炭化処理システム実証試験設備フロー



本実験に用いた実証機システムフローを図-1に、実証機能力と各機器仕様を表2-1に示す。

炭化処理システムは受入ホッパ、定量供給装置、乾燥機、熱風発生炉、炭化炉、排気ファン、循環ファン、熱交換器、コンベア、その他から構成される。受入ホッパに汚泥ケーキの搬入後は、汚泥ケーキの搬送から、乾燥、炭化の各処理工程を経て、炭化汚泥を排出するまで全システムの自動運転を可能にしている。

炭化炉への投入前に、乾燥機によって脱水ケーキ含水率を40%前後に調整する。これは、炭化システム全体のエネルギー費用低減を図っていることが主目的であるが、それ以外に、炭化炉への投入汚泥ケーキ条件として乾燥ケーキの粒径を3mm~10mmφ辺りに調整すれば、良質な炭化汚泥が安定して製造されることが、これまでの実験で確認されている。炭化炉の安定運転を保持する為には、炭化炉投入ケーキ性状をできるだけ均一にすることが重要であり、その役割を乾燥機が有していることも、本システムの一つの特徴である。

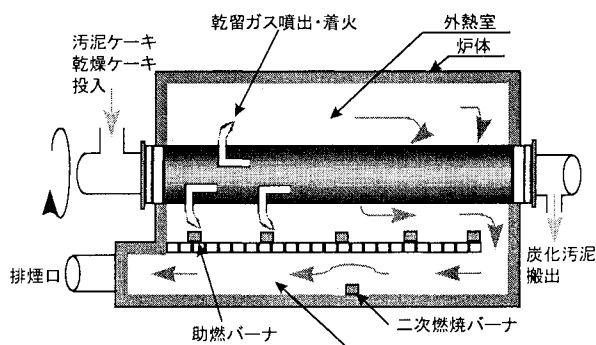
機器名称	仕様
汚泥ケーキ処理能力	3ト/日 125kg/h (at 含水率 80%)
炭化汚泥発生量	180kg/日 7.5kg/h
受入ホッパ	5m <sup>3</sup> 、下部4連スクリューコンベア(インバータ制御)、及び集合コンベア付、重量計測装置付、点検歩廊架台付、蓋開閉機構付
定量供給装置	1軸シボ式ポンプ、レベル制御 ON-OFF 方式、インバータ駆動方式 40~230kg/h
乾燥機	直接熱風攪拌翼付、円筒型ドラム回転式、ドラム容積 0.58 m <sup>3</sup> 攪拌翼及びドラム：バリエイタ減速機による可変速
熱風発生炉	円筒横形直火式、バーナ20万 kcal/h×1基、脱臭炉兼用
熱交換器	プレート式ガス・ガス熱交換器
炭化炉	外熱式ロータリーキルン、外熱室バーナ3万 kcal/h×5基、30~50kg/h 排ガス処理室付属、排ガス処理室バーナ4万 kcal/h×1基
集塵機	マルチサイクロン
搬送コンベア	ワイドコンベア、過負荷保護→ショックリレー、汚泥掻取り装置付
循環ファン	ターボファン 23 m <sup>3</sup> /min×600mmAq×3.7KW
排気ファン	ターボファン 60 m <sup>3</sup> /min×2000mmAq×3.7KW

表2-1 炭化処理システム実証機能力と各機器仕様

### 3 炭化炉制御系の構成

炭化炉の断面図を図-2に示す。炭化炉は2室に別れており、上部を外熱室、下部を排ガス処理室と称している。外熱室には、ケーキが通過する孔が貫通している。孔内圧に対して外熱室は負圧に設定されており、孔内に設置されている乾留ガス吹出管からエアが逆流しないよう炉圧制御をおこなっている。乾留ガス吹出管からは、ケーキから発生する水蒸気及び、乾留ガスを吹出す。実際は孔投入側付近で水蒸気が先に発生し、孔中段辺りから乾留ガスが吹出し始める。

図-2 炭化炉断面図



このようなレトル内部のケーキの性状変動について、パッチ式小型電気炉装置にて、各設定時間毎にケーキの重量、[C]、[H]分を測定した結果を、外熱式ロータリーキルでの炭化過程と同様なレトル内のケーキ性状変動シミュレーションをおこなった。レトル内におけるケーキ性状変動を図-3に示す。投入された含水率40%の乾燥ケーキは、はじめに水分を蒸発し、(水分蒸発工程)その後、乾留ガスを噴出させる。(乾留工程)

吹き出す乾留ガスと蒸発水分の重量比率は汚泥ケーキ中の水分と固定炭素を除いた可燃分により表される。含水率40%、可燃分が80%の場合に、試算すると1.2程度となり、この比率の変化が炭化炉の炉温に影響を与える。投入量一定条件においては、含水率が5%上昇した場合、乾留ガス/水蒸気の比率は、0.98となり、燃料として働く乾留ガスが減少しかつ水分増量分の蒸発潜熱に乾留ガス熱が奪われ、炉温は下降する。逆に含水率が5%下がった供試ケーキの場合、比率は1.48となり燃料として働く乾留ガスが増え、かつ水分減少分の蒸発潜熱が減るため、炉温は上昇する。この時、外熱室の燃焼空気が一定の場合には、外熱室の還元状態が濃くなって炉温は下がる方向に向かう。燃焼空気量を増やすことによって炉温は上昇する。これが基本的な炭化炉の動的な挙動である。

図-4では基本動作をもとに構築した制御機構を、表3-1に制御ブロック図を示す。

図-3 レトル内におけるケーキ性状の変動

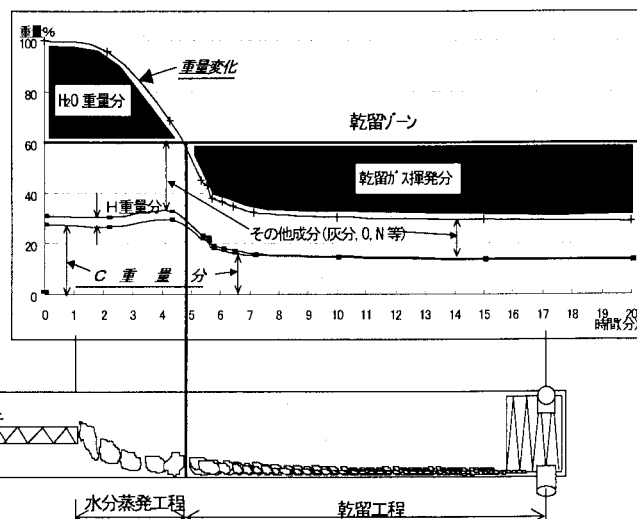
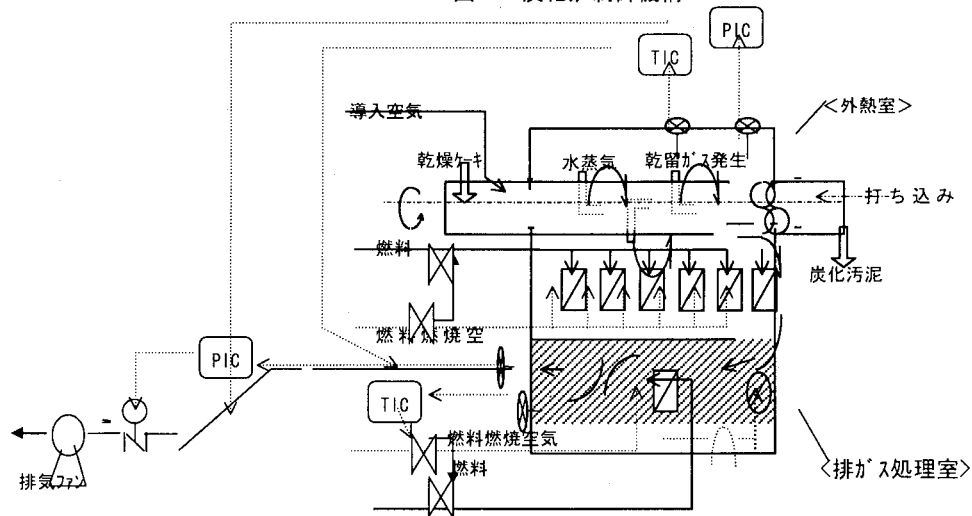


図-4 炭化炉制御機構



炉温の制御は、投入量が一定で重量比率が0.98~1.48程度の範囲内であれば安定した状態が保持される。このような状態では、バーナの5本中4本が消火して、1本が種火で着火している状態にある。この安定領域をプロセス値に対して $\pm 50^{\circ}\text{C}$ として設定した。

制御機構では、汚泥投入量や性状の変動に対して、外熱室の炉温は燃焼空気量の増減によってSP値 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ の範囲にフィードバック制御される。

同時に、外熱室温度SP値に対して、 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 程度の不感帯領域を設けている。汚泥中の乾留ガス/水蒸気の比

率が一定範囲内であればバーナは比例制御が適切であるが、乾留ガス/水蒸気の比率が逸脱した場合、その比率変動による温度上昇・降下に対し、温度補正を瞬時に行なうと、炉温が乱高下する恐れがある。その為、不感帯領域による炉温制御を採用している。

以上のように、脱水ケーキを炭化汚泥にする為の熱源は、ケーキ自体から発生する乾留ガスが主であり、乾留ガス/水蒸気の比率の変動が、炉温に影響を与える。尚、外熱室は還元性雰囲気状態を保っているが、下部に設置されている排ガス処理室では、燃焼用エアを打込み、灯油により完全燃焼される。よって排ガス処理室は酸性雰囲気状態にある。

炉圧制御については、図-4に示すように、外熱室圧力 SP 値に対しての変動量により、直接排気ファン手前炉圧調整バルブにて風量制御をするのではなく、乾留ガス/水蒸気の微量変動、それによる炉温変化等により影響を受ける炉圧変化を考慮した二次的な制御にしている。具体的には外熱室圧力制御 MV 値より、排ガス処理室の圧力制御 SP 値を変動させ、排ガス処理室 MV 値により炉圧調整バルブを調整するカスケード制御機構を設けている。

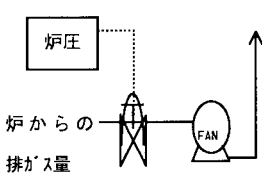
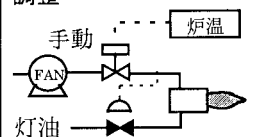
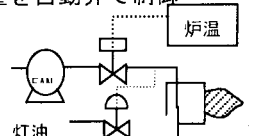
制御対象	制御目的	制御機構	外乱
1 炭化炉 外熱室炉圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レトルト内部からの乾留ガス噴出確保及び噴出量の安定化</li> <li>・外熱室への導入空気量の安定化(乾留ガス燃焼空気量の安定化)</li> </ul> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">炉圧の確保と安定化</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">乾留ガス燃焼排ガスの漏れ防止</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">安全性確保</p>	<p>炉圧信号により、炉からの排ガス量を自動弁で制御</p> 	汚泥投入量 汚泥成分 (水分・有機分)
2 炭化炉 外熱室炉温	炭化炉運転条件の確立	(昇温時)外熱室炉温の信号により、外熱室バーナの燃焼量を自動弁で制御	汚泥投入量 汚泥成分 (水分、有機分)
	乾留ガス着火維持 安定性確保	(安定時)バーナ燃焼を止め、外熱室炉温によりI7調整	
			
3 炭化炉 排ガス処理室炉温	乾留ガス燃焼排ガス中の未燃分の燃焼及び脱臭	排ガス処理室バーナの燃焼量を自動弁で制御	汚泥投入量 汚泥成分 (水分、有機分)外熱室炉温
			

表 3-1 炭化炉系制御ブロック図

#### 4. 実験条件

外乱条件を汚泥ケーキの含水率として捉え、外乱時のシステム応答性を乾燥ケーキ含水率、炭化炉外熱室温度、炭化炉外熱室炉圧、炭化汚泥の精練度の変動を調査した。

実証実験設備の汚泥条件、供給機設定条件、炭化炉設定条件を表4-1、4-2、4-3に以下に示す。

水処理方式	分流式、標準活性汚泥法
脱水機機種	ヘルトプレス式脱水機、高分子凝集剤使用
連続試験年月日	乾燥後投入時 平成10年4月6~10日(稼動時間 97.66h)
汚泥ケーキ含水率	水分負荷に関しては $80 \pm 5\%$ で変動させる (75~85%)。
汚泥供給量	3トン/日 (総計 12.02トン)

表4-1 汚泥条件

定量供給装置切出し量	125kg/h
炭化炉投入切出し量	42kg/h

表4-2 供給機設定条件

炭化炉温度1(外熱室前段)	770°C
炭化炉温度3(排ガス処理室)	780°C

表4-3 炭化炉条件

#### 5. 実験結果

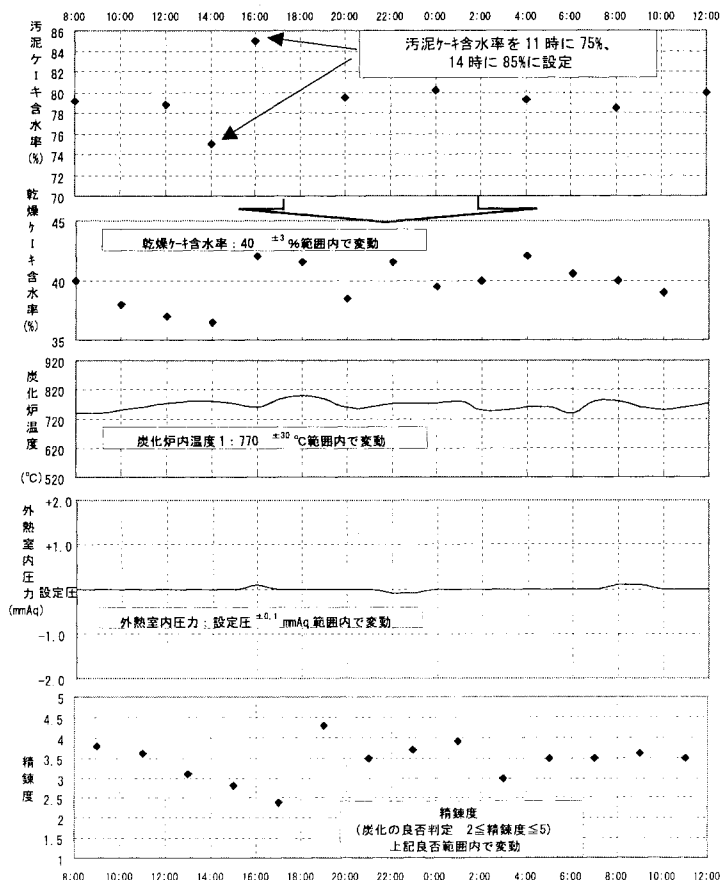
連続運転における実証試験結果を図-5に示す。脱水ケーキの含水率は80%を基準とし、75~85%変動させた時のシステム応答の感度解析を行ない、乾燥ケーキ含水率、炭化炉温度、外熱室内圧力、炭化汚泥の精練度を調査した。含水率の変動は、そのまま乾燥ケーキにも表われ、この変動値が炭化炉に投入される。

同時に乾燥ケーキの乾留ガス/可燃分の比率が変動し、炭化炉の炉温が影響を受けるが、この変動範囲内での炉温は  $\pm 30^\circ\text{C}$  内の変動を示し、安定運転を維持している。安定運転時のバーナは、5本中4本が消火している。SP値が不感帯領域を超えた ( $\text{SP}-50^\circ\text{C}$ ) 以下になった場合は、消火中のバーナのエアスイッチ起動させ、燃焼空気を増すことにより設定温度に戻る。

外熱室内の圧力は一定の値を示し、この変動範囲内では安定した圧力を維持していた。

我々は、炭化の進行度合い及び炭化汚泥そのものの良否を決定する指標として精練度(炭化汚泥の電気抵抗値)を提案した。炭化時間と電気抵抗値との相関性が基礎実験により確認されている。有効利用される炭化汚泥の物性値から、およそ2~5が良好な範囲であると判断した。この精練度2~5の範囲より離脱した場合の炭化汚泥の性状は、実験結果から判断すると、精練度が5以上の場合に、揮発分が少なく未炭化物が多くなる。

図-5 連続運転試験結果(含水率を  $80 \pm 5\%$  変動)



逆に、2未満の場合には、炭化汚泥の構造が緻密になりすぎて、気孔が崩れる傾向になる。これら炭化汚泥の精練度は、外熱室温度を一定にした場合、ト斗の回転数を変えてト斗内の炭化汚泥の滞留時間を変えることによって調節が可能である。

水分負荷変動試験の結果、精練度は2～5の範囲にあり炭化汚泥の性状からの見ても良好な結果となった。基礎試験では、炭化炉の供試ケーキ含水率が低い場合、炭化汚泥の精練度も同様に低い値を示し、含水率が高い場合は、精練度は高くなる傾向に有る。ト斗内において、供試ケーキ含水率が過度に高い場合には前節の図-3で示したように水分蒸発工程の占める割合が増加し、逆に乾留工程が減少し、まだ完全に炭化しきれていない傾向になる。逆に、供試ケーキ含水率が過度に低い場合には、ト斗内にて乾留工程の占める割合が増加し、乾留(炭化)を超えて、更に灰化への傾向が見られる。

このように、炭化処理システムはシステムの安定性、経済性を追求するのに加えて、処理物である炭化汚泥の品質(有効利用側からの目標)の両面から制御系を構築する必要がある。

## 6. おわりに

炭化処理システムにおいて、最終プロセスである炭化炉を安定に運転させるためには、脱水及び乾燥プロセスにおけるケーキ性状の安定化がキーポイントである。同時に、有効利用の観点から排出物である炭化汚泥の質も組み込まなければならない。ケーキ性状(含水率、可燃分割合等)は、地域や季節及び処理設備の運転条件により左右される。このような変化に追従できる制御系は、運転員の経験則の導入や、設備機器に対する変動幅の許容量を把握し構築することが必要である。