

# 廃棄物ガス化溶融プラントの動特性シミュレータによる制御特性解析

松本 弘\* 佐藤 美雄\* 佐藤 隆雄\*\* 和田 知弘\*\*

\* (株)日立製作所 電力・電機開発研究所 原子力・産業第一部  
茨城県日立市大みか町7-2-1

\*\* (株)日立製作所 環境システム推進本部 日立環境システム部  
茨城県日立市幸町3-1-1

## 概 要

廃棄物ガス化溶融プラントの動特性シミュレータを開発し、立案した制御方式の妥当性を検証した。本シミュレータは、一般ごみをロータリ式の乾燥機と熱分解炉に投入し、得られたチャーを燃焼溶融炉に導いて不燃物を溶融固化するとともに、熱分解ガスを燃焼させて乾燥熱分解用エネルギーとして回収するまでの全システムをカバーするものである。本報告では、本動特性シミュレータの構築方法、ごみ質変動に対する主要プロセスの安定化制御方式とその妥当性検証結果について述べた。

## キーワード

廃棄物処理、ガス化溶融、シミュレーション、制御

### 1. はじめに

廃棄物を熱分解して可燃性ガスとチャーを生成し、これらの燃焼エネルギーでチャー中不燃物を溶融固化するとともに燃焼排ガスのエネルギーを回収して前記熱分解や発電に利用するガス化溶融プラントは、次世代型廃棄物処理プラントとして期待され、多数の廃棄物処理関連企業による開発が活発化している<sup>1)</sup>。日立グループにおいては各種方式の処理システムを分担開発している<sup>2)</sup>。

本報告では、一般ごみを対象としたキルン式ガス化溶融プラントの動特性シミュレータの構築方法とその制御方式について述べる。また、ごみ質やチャー質が変動したときの制御特性を本シミュレータで解析することにより、立案した制御方式の妥当性を示す。

### 2. 実証プラントの機器構成と制御方式

図1は動特性シミュレーションの対象であるプラントの機器構成とその制御機能を示す。また、図2は一般ごみ、即ち湿ごみが乾燥機へ投入されてから水分が蒸発し、熱分解炉により熱分解ガスとチャーとして排出されるまでのマテリアルフローを示す。以下、プラント機器構成と立案した制御方式を説明する。

#### (1) プラント機器構成

湿ごみは乾燥機へ投入されてから排出されるまでに含有水分の約90%が熱風により蒸発除去され、乾燥ごみとしてコンベアにより熱分解炉ホッパに搬送される。ホッパに蓄積された乾燥ごみはプッシュにより周期的に熱分解炉ドラム内に圧入され、ドラム内を通過中に外部ジャケットからの加熱により残りの水分除去と熱分解がなされる。熱分解炉からの排出ガスは、不燃分としての蒸気(蒸発分と熱分解に伴う生成水)、CO<sub>2</sub>と可燃ガスとしてのCO、H<sub>2</sub>、軽質分及び重質分から成る。また、熱分解炉から排出されるチャーは、可燃成分としてのC、H、Oと不燃分としての灰分、ガレキ及び金属から成る。

熱分解ガスをバーナで燃焼させ、発生した高温燃焼ガスはジャケットに導かれ、熱分解用エネルギーとして利用される。また、ジャケットを通過した燃焼ガスの保有熱は更に空気加熱器にて乾燥用空気と燃焼用空気を加熱するためのエネルギーとして有効利用される。空気加熱後の排ガスは冷却器により冷却され、その一部は次に述べる燃焼溶融炉の燃焼ガス冷却用として使用される。

一方、熱分解炉から排出されたチャーは、冷却器で一旦温度を下げてから粉砕機、金属分離機を経てホッパに蓄積される。このチャーは燃焼用1次空気としての搬送用空気とともに燃焼溶融炉に吹き込まれ、燃焼

しながら炉内を上昇し、炉内に投入される2次空気及び3次空気により燃焼を完結し、煙道部より排ガス処理装置へと導かれる。ここで、2次及び3次空気は炉上部に設けた熱交換器を通過することで予熱されたものである。本燃焼熔融炉における燃焼域は比較的空気比の小さな還元域を下部に配置し、比較的空気比の大きな酸化域を上部に配置することでNO<sub>x</sub>の生成量を抑制する。また、両燃焼域においては高温燃焼によりチャー中不燃物(灰分、ガレキ)を熔融スラグ化する。さらに、還元域を通過した燃焼ガスを前記排ガス冷却器からの排ガスで冷却することで熱交換器の高温腐食を防止する。

(2) 制御方式

本プラントで特に重要となるのは、主要機器、即ち乾燥機、熱分解炉及び燃焼熔融炉の運転温度を如何に安定維持するかである。以下、立案した制御方式について要点を説明する。

a) 乾燥機出口空気温度制御： 乾燥機出口空気温度制御は乾燥機を通過する湿ごみの水分を安定に除去するために重要で、基本的には乾燥用空気加熱器を通過する燃焼ガス量をダンパCの開度を操作して空気の加熱量を調整することで制御する。また、この操作が次に述べる燃焼用空気温度制御に影響しないように非干渉制御機能を付加した。即ち、ダンパCの操作の影響で燃焼用空気加熱器を通過する燃焼ガス流量が変動しないようにダンパCの操作と逆極性でダンパBを操作して燃焼ガス流量の変動を相殺する方式とした。

b) 燃焼用空気温度制御： 燃焼用空気温度制御は熱分解ガスをバーナで安定に燃焼させるために重要で、基本的には燃焼用空気加熱器を通過する燃焼ガス量をダンパAの開度を操作して空気の加熱量を調整することで制御する。また、この操作が上で述べたと同様に乾燥機出口空気温度制御に影響しないように非干渉制御機能を付加した。即ち、ダンパAの操作の影響で乾燥用空気加熱器を通過する燃焼ガス流量が変動しないように、ダンパAの操作と逆極性でダンパBを操作することで燃焼ガス流量の変動を相殺する方式とした。さらに、燃焼用空気加熱器の伝熱遅れによる温度制御の応答遅れを改善するために先行制御機能も付加した。本先行制御機能は燃焼用空気加熱器入口空気温度(乾燥機出口空気温度)の変動を検出することでフィードバック信号である燃焼用空気温度が変動する前にダンパAを先行操作するものである。

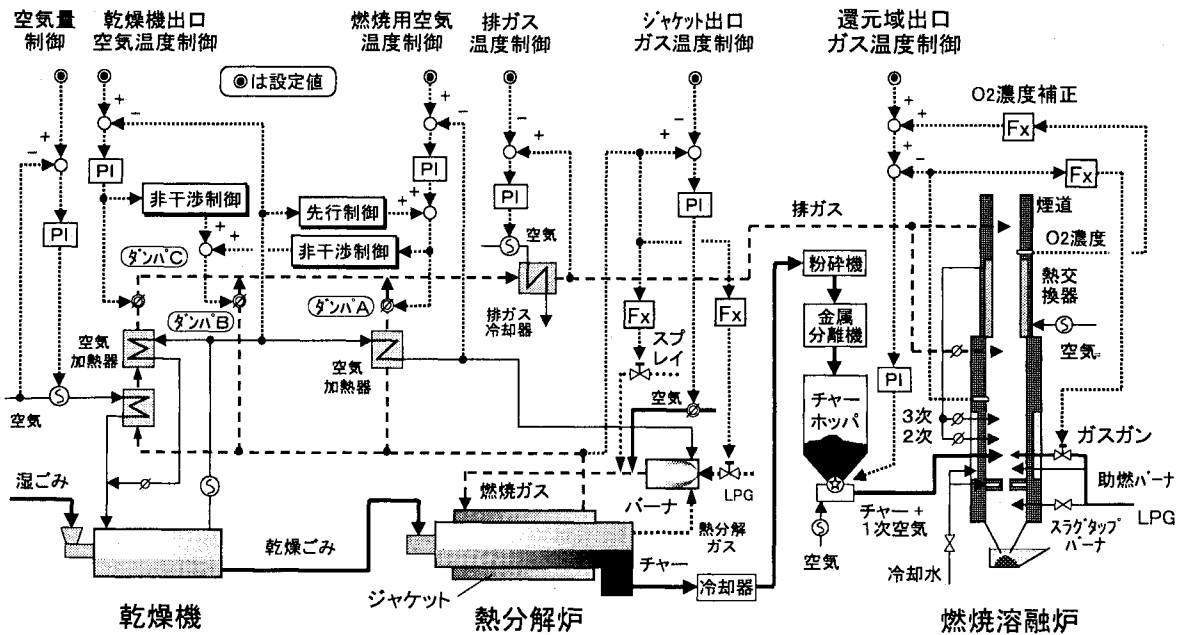


図1 プラント機器構成と制御機能

c) ジャケット出口ガス温度制御： ジャケット出口ガス温度制御は熱分解炉を通過する乾ごみを安定に熱分解し、排出される熱分解ガス及びチャーの品質を安定維持するために重要で、基本的には冷却用空気によりジャケット入口ガス温度を調整することで制御する。また、熱分解炉投入ごみの量や水分が大幅に変動するような異常時のバックアップ機能として、冷却能力を上げるための水スプレイと逆に加熱能力を上げるためのLPGバーナによる制御機能を付加した。

d) 還元域出口ガス温度制御： 還元域出口ガス温度はチャー中不燃物を安定して熔融スラグ化するために重要で、基本的にはチャー供給量を調整することで制御するが、炉内での安定燃焼を維持するために酸化域出口ガス O<sub>2</sub> 濃度に応じて補正する方式とした。また、何らかの原因でチャーの成分や流量が大幅変動した場合でも燃焼温度が下がり過ぎないようにガスガンによるLPG投入制御手段も付加した。

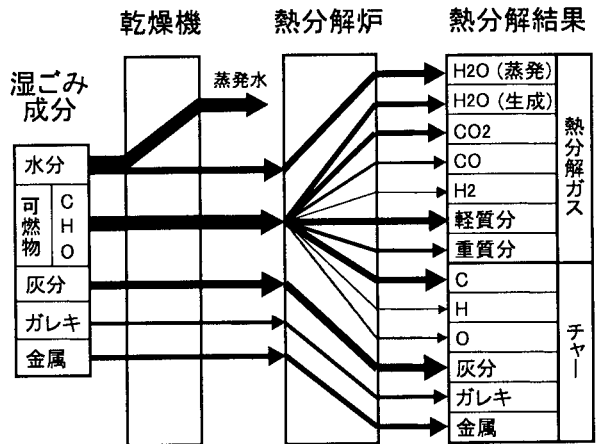


図2 マテリアルフロー

3. 動特性シミュレータ

図3はプラントの主要機器でもあり、かつ動特性シミュレータを構築する上で特に工夫を要した乾燥機、熱分解炉及び燃焼熔融炉のモデル構造を示す。以下、順を追って説明する。

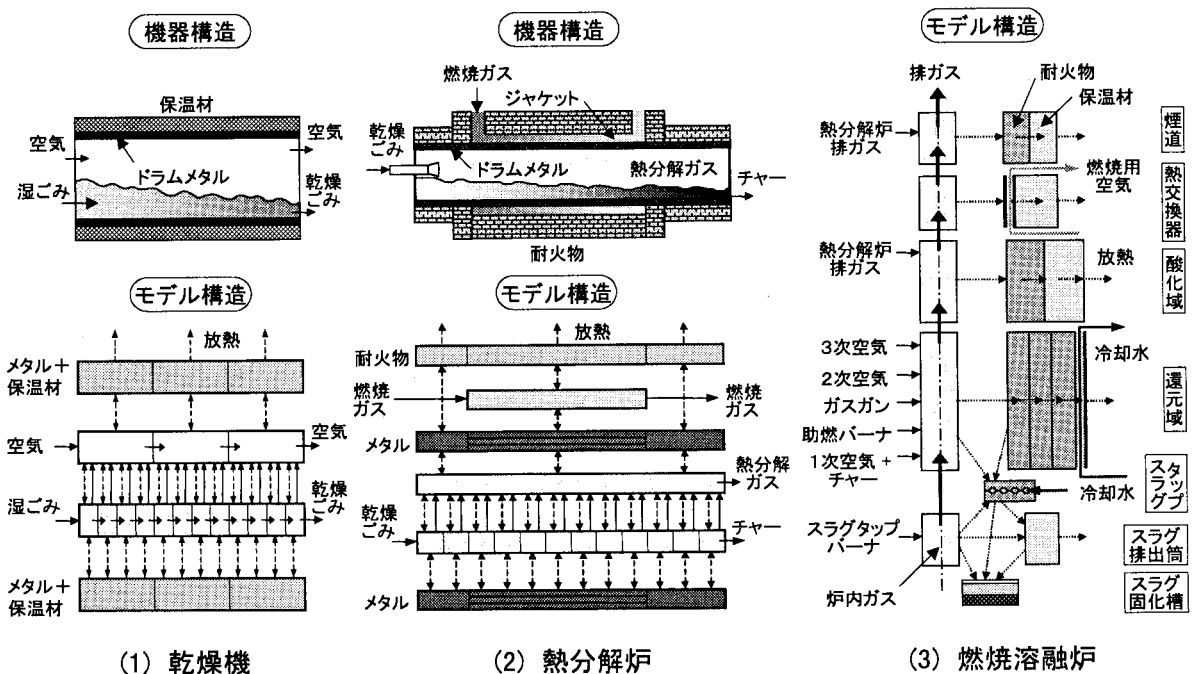


図3 主要機器のモデル構造

#### (1) 乾燥機モデル

乾燥機の動特性モデルは、投入された湿ごみ、乾燥用空気、ドラムメタル及び保温材の相互伝熱、ごみへの伝熱量に応じた水分蒸発、ドラム軸方向へのごみ搬送を物理法則に基いて模擬した。他のモデルでも共通するが、シミュレータとしての計算機負荷を必要以上に上げることなく高精度模擬するために、各部の伝熱時定数やドラム内ごみ及び空気の滞留時間を考慮したモデル構造とした。即ち、炉内ごみに関しては12要素、その他は3要素に仮想分割し、これらを集中定数系とした。ここで重要なのはメタルごみ間伝熱特性とごみ中水分の蒸発特性であり、両者とも要素内ごみ蓄積量と水分含有率を考慮した。また、熱容量の小さな保温材についてはメタルとの一体化要素とした。

#### (2) 熱分解炉モデル

熱分解炉については、上記乾燥機モデルの考え方を踏襲した乾燥特性を包含するとともに、熱分解炉特有の外部加熱特性と熱分解特性をモデルとして追加した。前者についてはジャケットによる加熱部と非加熱部を分離し、後者については要素内ごみの成分構成と温度に基づいて熱分解ガスを成分別に算出する方式とした。これにより熱分解炉より排出される熱分解ガスとチャーの成分に基づいて、バーナや燃焼溶融炉での発熱量や $O_2$ 濃度を容易に算出できるようにした。

#### (3) 燃焼溶融炉モデル

燃焼溶融炉については、縦方向に7つに仮想分割した炉内燃焼ガス要素の流量、温度、 $O_2$ 濃度及び空気比と、炉壁を構成する耐火物、保温材、還元域およびスラグタップの冷却機構、熱交換器の温度特性を模擬した。また、チャー、空気、LPGが投入される主燃焼域である還元域とその後段の還元域のモデル構造は他と比べて複雑となっているが、チャー成分の変動は勿論、各種運転条件に対応した動特性解析を可能にした。

#### (4) 全系シミュレータ

上記のような物理法則に立脚して作成した機器別動特性モデルは市販ソフト (MATLAB + Simulink)<sup>3)</sup> でプログラミングし、制御系モデルも含む全モデルを接続することで全系シミュレータとして構築した。本シミュレータの演算刻み幅は1秒で、500MHz PCによる演算所要時間は実時間の約1/50であることを確認し、極めて高速のシミュレーションが可能となった。また、プログラム容量は約10MBである。

### 4. 制御特性の解析

#### (1) 乾燥熱分解プロセスの制御特性

湿ごみ成分の変動例として、主として水分含有率及び炭素含有率が変動 (標準値 $\pm 10\%$ の幅、60分周期で変動) した場合のシミュレーション結果をそれぞれ図4及び図5に示す。両者とも湿ごみ投入量は一定条件とするために、主変動成分以外の成分は各々の含有率に応じて主変動量を相殺した。水分含有率の変動は温度制御に対して大きな外乱要因であるが、図4に示すように乾燥機出口空気温度及び燃焼用空気温度の制御偏差は最大 $\pm 1^\circ\text{C}$ 程度、ジャケット出口ガス温度のそれは最大 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度であり、提案した非干渉制御と先行制御が効果的に機能したといえる。また、図5も含めた両結果から、本シミュレータにより、ごみ質変動が熱分解生成物であるガスやチャーの成分並びに発熱量へ与える影響も容易に解析できることが分る。

#### (2) 燃焼溶融プロセスの制御特性

チャー成分が変動した例として、主として炭素含有率が極端に変動 (標準値から20%増加したのち標準値まで減少) した場合のシミュレーション結果を図6に示す。この例では、チャー中炭素含有率が上昇すると酸化域出口ガス $O_2$ 濃度が低下するため、前述の $O_2$ 濃度補正機能によるチャー供給量が削減されることで $O_2$ 濃度が所定レベルまで速やかに復帰している。また、チャー供給量の削減結果として還元域出口ガス温度が低下するため、ガスガンが動作してLPGが投入されたことでガス温度は所定レベルに復帰している。結果としてガス温度と $O_2$ 濃度の制御偏差は両者とも十分安定領域に納まっている。また、本結果から、開発したシミュレータを用いることでチャー成分の変動が燃焼溶融炉内ガス性状へ及ぼす影響も容易に解析でき

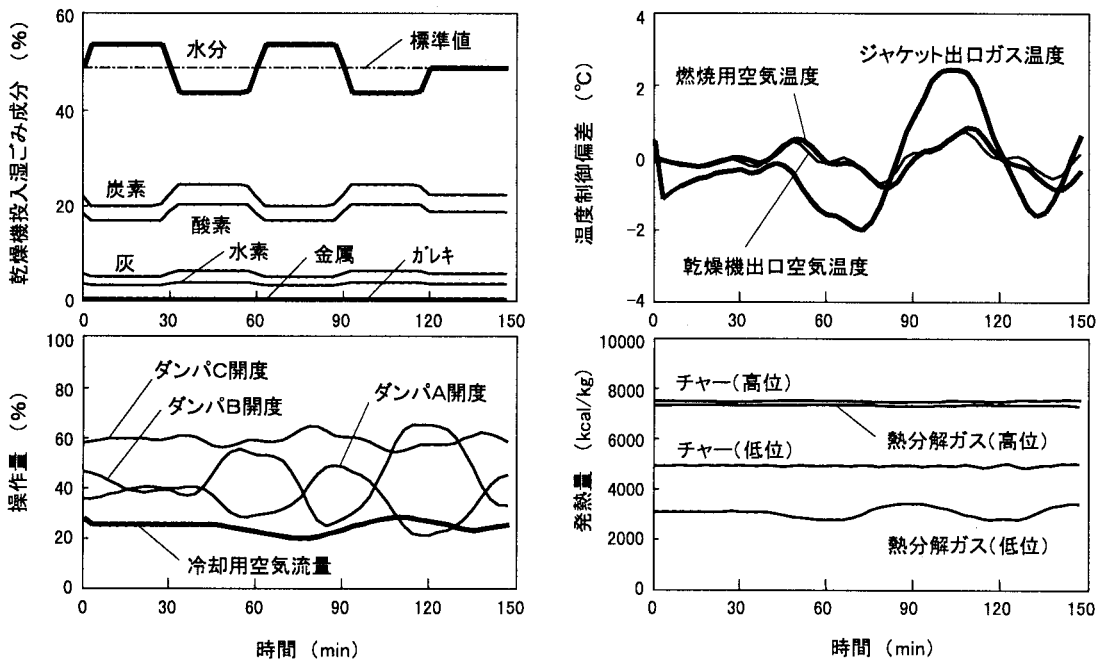


図4 ごみ中水分含有率が変動した場合の乾燥熱分解プロセス制御特性

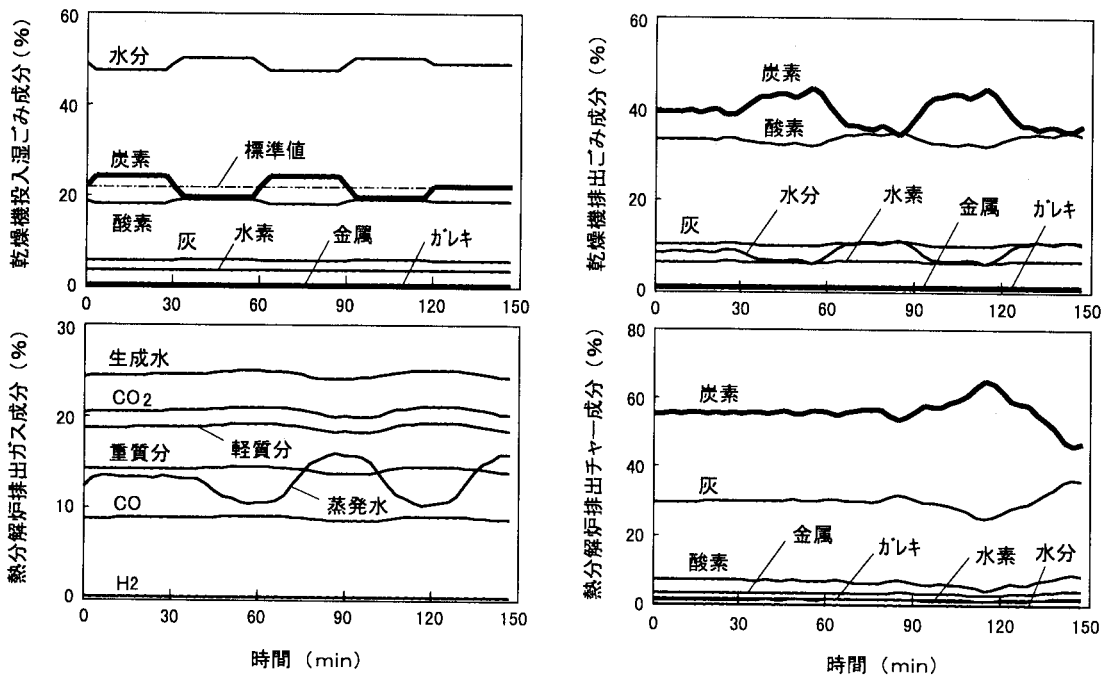


図5 ごみ中炭素含有率が変動した場合の乾燥熱分解プロセス制御特性

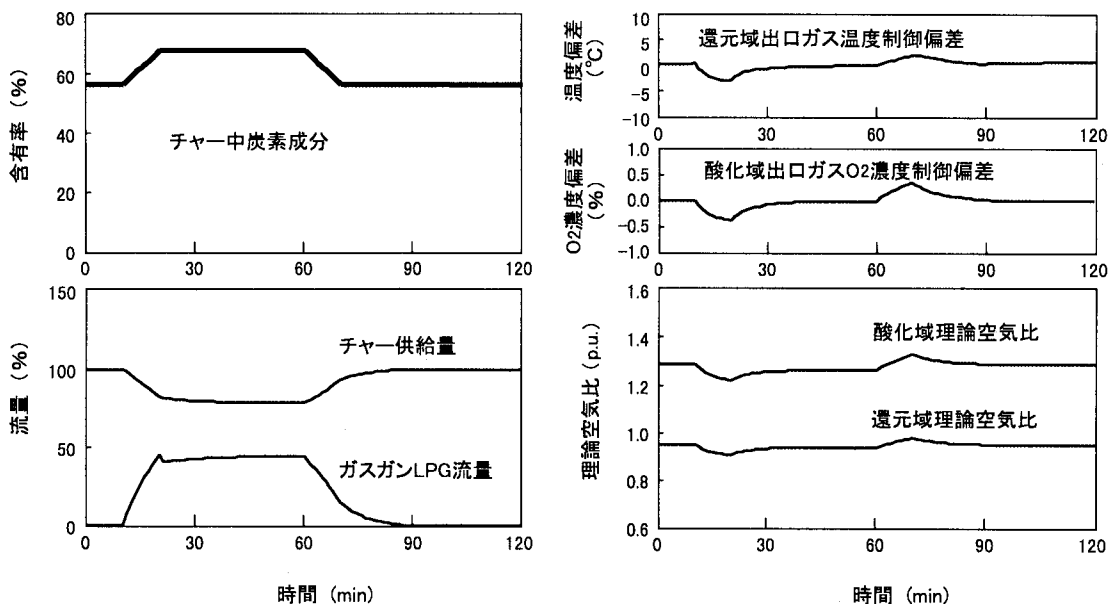


図6 チャー中炭素含有率が変動した場合の燃焼溶融プロセス制御特性

ることが分る。

##### 5. まとめ

本報告では、一般廃棄物のガス化溶融プラントを対象として開発した全系動特性シミュレータの構築方法につて述べるとともに、プラントの安定運転を実現するための制御方式を提案した。また、本シミュレータを用いて、ごみ質変動時の制御特性を解析することで、提案した制御方式の妥当性を検証できた。これにより、今回開発したシミュレータは廃棄物ガス化溶融プラント開発のエンジニアリングツールとして今後も広く活用が期待される。

##### (参考文献)

- 1) (財) 廃棄物研究財団：次世代型ごみ焼却処理施設の開発、平成 8～10 年度総合報告書 (1999-3)
- 2) 中平 外 3：次世代型廃棄物処理システム、日立評論、Vol.80、No.8 (1998-8)
- 3) サイバネットシステム (株)：MATLAB User's Guide Ver. 4.0 (1993-4)