

# ごみ焼却プラント運転支援装置の開発

Development of Operation Support System for Refuse Incineration Plant

湯浅 健司<sup>1</sup>、安河内 剛<sup>2\*</sup>  
宮本 裕一<sup>3</sup>、林 正人<sup>4</sup>、小谷野 薫<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup>正会員 川崎重工業(株) 環境装置第一事業部 制御システム部  
/〒650-8680 神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号(神戸クリスタルタワー)  
<sup>3, 4, 5</sup>川崎重工業(株) 電子・制御技術開発センター 開発部 / 〒673-0014 明石市川崎町1-1 (明石工場)

KENJI YUASA<sup>1</sup>, TSUYOSI YASUKOUCHI<sup>2\*</sup>  
YUICHI MIYAMOTO<sup>3</sup>, MASATO HAYASHI<sup>4</sup> and KAORU KOYANO<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup>Member of EICA, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.  
Control System Engineering Development Environmental Control Plant Division 1  
/ Kobe Crystal Tower., 1-3 Higashikawasaki-cho, 1-chome, Chuo-ku, Kobe, 650-8680, Japan  
<sup>3, 4, 5</sup>Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Electronic & Control Technology Development Center  
/ 1-1 Kawasaki-cho, Akasi-shi, 673-0014, Japan

## Abstract

The objective of this study is to develop a new operation support system for a refuse incineration plant which is based on quantitative estimation of a internal state of a plant. It is important for making stable operation of a plant to comprehend residence quantity of refuse in the furnace and degree of refuse combustion. In this system, these process values of a plant can be estimated quantitatively by combination of the method of dynamic characteristic analysis modeling and the method of an expert system. Further more, the system is applied to an actual plan. In addition, fault diagnosis function which monitor and diagnose important process values of a plant can support stable operation.

**Key words :** refuse incineration plant, quantitative estimation, dynamic characteristic analysis modeling expert system, fault diagnosis function

## 1. はじめに

近年のごみ焼却プラントは、単にごみ焼却処理するだけでなく、ごみを燃料とし発電を行うエネルギー資源回収プラントでもある。さらに、環境保全を目的とした2次公害防除設備の強化が図られており、大規模化、高機能化した複合プラントの傾向が強めてきている。このように大規模化、高機能化したごみ焼却プラントでは運転の安定化、効率化、省力化を図る為に、各種自動化システムの導入とともに制御、監視、情報管理を統合した運

転管理システムの導入が不可欠となっている。

しかし、現在実施されている自動化は安定運転時の自動化であり、異常、故障が発生した場合の判断と処置は、熟練した運転員に委ねられているのが現状である。従って、熟練運転員の不足に対応するため異常、故障時の判断と対策のサポートを目的とした運転支援装置の開発が求められている。筆者らはごみ焼却プラントを対象として、動特性解析を活用したパラメータ推定<sup>1)</sup>やエキスパートシステムを活用した運転支援装置の開発<sup>2)</sup>を実施し実プラントに適用してきた。

今回開発したごみ焼却プラント運転支援装置は動特性解析、パラメータ推定技術を活用して炉内状態を代表す

\*連絡先

るプロセス量の推定、さらに、エキスパートシステム技術を活用してプラントの運転状況を把握し炉内状態の推定結果と併せてプラントの異常診断を行い、運転員に運転支援情報を提供する。

本論文ではまずごみ焼却プラントの概要説明を行い、運転支援装置の特長、各機能の説明について示す。

## 2. ごみ焼却プラントの概要

運転支援装置を適用したごみ焼却プラントの概要を Fig. 1 に示す。

クレーンによりホッパに投入された後、給じん装置によりストーカ上に供給されたごみは高温燃焼ガスによる輻射熱とストーカ下から供給される燃焼用空気により乾燥着火し、順次後方のストーカに送られ燃焼を完結する。また、燃焼により発生した高温ガスはボイラにより熱交換冷却され、バグフィルタ・脱硝反応塔などで公害防止処理が行われたあと煙突より排出される。複数の独立したボイラで発生する蒸気は高圧蒸気ヘッドに集合され、タービン発電機、蒸気式空気予熱器、場内給湯、冷暖房などに使用される。発生蒸気の大半はタービンに導かれ発電に使用され、その排気蒸気は低圧コンデンサで復水される。

中央制御室に設置される CRT オペレータステーションでは、補機の起動停止操作、制御系のパラメータ調整などの操作を個別に行える他、自動起動停止画面によるプラントの立上げ、立下げが行える。また各種系統表示画面、トレンド画面、アナシエータ画面等によりプラ

ント全体の運転監視が可能である。

自動化システムは、定常運転時においては搬入出車の自動計量、車両管制、クレーンの自動運転をはじめカラー画像処理燃焼監視機能を付加した自動燃焼制御や脱塩、脱硝装置の公害防止制御などの各種システムを備えている。

## 3. 運転支援装置開発の背景

ごみ焼却プラントの特徴として、燃料としてのごみの物理的、化学的性状が不均一であることにより、次のようなプロセス量の変動が見られる。

- (1) 炉内へ供給されたごみの低位発熱量が変動するため、燃焼時の発生熱量が変動する。
- (2) 炉内に供給されたごみは、含水量の変動により炉内投入から着火までの乾燥時間が変動する。
- (3) 給じん装置速度を一定としても、ごみの形状、比容積などが不均一なため、炉内に供給されるごみの重量流量が変動する。

これらの変動がごみの安定燃焼を阻害する外乱要因となる。さらに、燃焼現象を代表する状態量はセンサによって直接検出することが困難である。

これまでの燃焼運転操作を分析すると、

- (1) ごみ量の分布と燃焼段における燃焼の激しさに特に注目している。それらを定量化はしていないが、何段階かに区分けして評価している。センサ類からの情報を参考とはするが、主には目視による過去の運

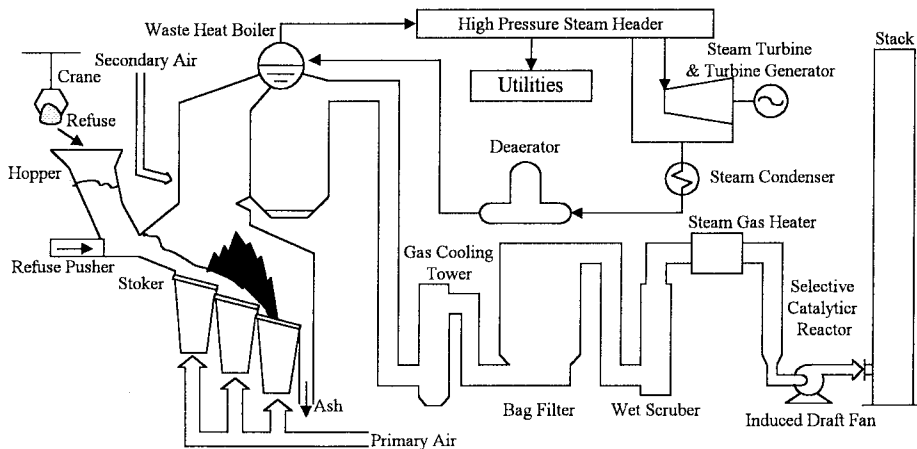


Fig. 1 Concept of Refuse Incineration Plant

転経緯との比較によって判断している。

(2) ごみ量の分布と燃焼の激しさ、乾燥段と燃焼段の関係などを考慮して、運転状態の推移を予測して現状のままでも良いかどうか評価を行い、新たな操作が必要であるかどうか判断している。新たな操作が必要であるとする、過去の運転経緯、操作量の可変幅、操作量間のバランスを考慮して操作量を決定する。

などの運転状態の同定、予測を含めた評価、操作方法の探索・決定の過程を繰り返している。これらの過程の中には、目視からの判断や過去の運転経緯、経過の考慮など高度な運転技術が要求されるため、エキスパートシステム化を図った場合、そのシステムは価値の高いものとなる。

また大規模、高機能化するごみ焼却プラントにおいて、装置故障などの異常事態に対し、運転員が適切かつ迅速な判断を下せる運転支援情報の提供が求められている。

これらを踏まえうえて、本運転支援装置の開発を行った。

#### 4. 運転支援装置のシステム構成

Fig. 2 に運転支援装置のシステム構成を示す。

プラントの運転監視システムは分散型計算機システムであり、CRTオペレーションによる集中監視操作を行うCRTオペレータステーション、データの一元管理を行うデータベースステーション、各設備の運転制御を行うプロセスコントロールステーション等から構成される。各ステーションは制御用LANにより接続され、データの授受を行う。

運転支援装置も同様に、制御用LANに接続されており、プロセスコントロールステーションからデータを収集し、プラントのパラメータ推定、異常診断を行う。診断の結果、必要があればCRTオペレータステーションに運転支援メッセージを送信、表示する。運転員はその

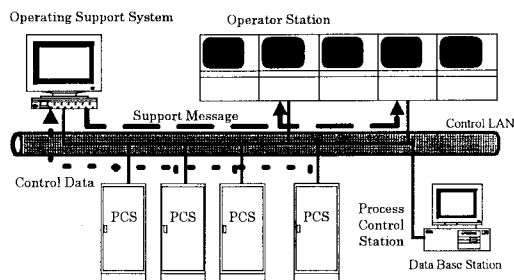


Fig. 2 System Configuration

運転支援メッセージに基づき、手動介入などにより定常状態へと導くことができる。

#### 5. 運転支援装置の特長

従来の運転支援装置は、装置故障異常診断機能が中心であったり、燃焼に関する診断機能をエキスパートシステムのみで実現していた為、ルール数が増大しルールのメンテナンスが難しくなるなどの問題点があった。

本運転支援装置は、下記の2つの特長がある。

- (1) 炉内燃焼状態診断機能と装置故障異常診断機能を持つ。
- (2) 炉内燃焼状態診断に動特性解析、パラメータ推定技術を活用しエキスパートシステム技術と融合することにより、ルール数を低減している。

今回開発した運転支援装置の2つの機能について述べる。

- (1) 炉内燃焼状態診断機能
  - ごみ焼却という燃焼プロセス自身の状態の把握による炉内状態の異常診断機能
    - ・焼却炉内のごみ量、燃焼の激しさを、動特性数式群より定量的に推定する。
    - ・ごみ質の急変等、自動燃焼制御では対応が遅れる異常状態を検知し、安定状態に戻す操作を通報する。
- (2) 装置故障異常診断機能
  - 大規模、複雑化するプラント構成機器の故障に起因する異常の診断機能
    - ・プロセスデータの異常傾向を検知し、警報発生を未然に防ぐ操作を通報する。
    - ・異常、故障発生時のプロセスデータ傾向や機器の運転状態より原因を特定して表示する。
    - ・制御モード等の正常性を判断し、異常であれば修正を勧告する。

#### 6. 炉内燃焼状態診断機能

##### 6.1 動特性解析による炉内状態の推定

熟練運転員は、ごみ滞留量と燃焼の激しさに特に注目している。従って、焼却炉内のごみ滞留量とごみの燃焼度の2つのパラメータで、ごみ焼却プラントの炉内状態を代表させる。この2つのパラメータを熟練運転員と同様に何段階かに分けし、それに基づいて操作、処置す

ることで、プラントの安定運転が実現できる。よってこれら2つのパラメータを本運転支援装置にて推定する。これらの値を導出するために、ごみ焼却プラントの動特性数式モデルを作成する。

数式モデルは、エネルギーバランス式、マスバランス

炉全体でのエネルギーバランス式

炉全体に蓄積されるエネルギーの変化速度を炉全体の入熱と出熱で表す

$$\frac{d}{dt} C_R W_R T_G + \frac{d}{dt} T_B P_B = Q_{A1} + Q_{A2} + Q_C + Q_R + Q_W - Q_S - Q_{AR} - Q_G \quad (1)$$

ストーカでのマスバランス式

炉内ストーカ上のごみ滞留量の変化速度を、ごみ供給による増加、燃焼および灰排出による減少で表す

$$\frac{d}{dt} W_R = G_R - \eta W_R - G_O \quad (2)$$

空気比

理論空気量に対する供給空気量の比

$$\lambda = \frac{G_A}{A_O \eta W_R} \quad (3)$$

ごみ燃焼度

蒸発量設定値と計測値との偏差の比率

$$D_C = \frac{G_S - G_{SS}}{G_{SS}} \quad (4)$$

- Q<sub>A1</sub> : 1次空気顕熱
- Q<sub>A2</sub> : 2次空気顕熱
- Q<sub>C</sub> : ごみ燃焼熱
- Q<sub>R</sub> : ごみ持込顕熱
- Q<sub>S</sub> : 蒸気持出顕熱 (蒸発潜熱含む)
- Q<sub>W</sub> : 給水持込顕熱
- Q<sub>AR</sub> : 灰持出顕熱
- Q<sub>G</sub> : 排ガス持出顕熱
- W<sub>R</sub> : ごみ滞留量
- C<sub>R</sub> : ごみ比熱
- G<sub>R</sub> : ごみ供給量
- T<sub>G</sub> : 燃焼室出口ガス温度
- G<sub>O</sub> : 灰排出量
- η : ごみ燃焼速度
- G<sub>A</sub> : 総空気量
- λ : 空気比
- T<sub>B</sub> : ボイラ時定数
- A<sub>O</sub> : 理論空気量
- D<sub>C</sub> : ごみ燃焼度
- P<sub>B</sub> : ボイラドラム圧力
- G<sub>SS</sub> : 主蒸気流量設定値
- G<sub>S</sub> : 主蒸気流量

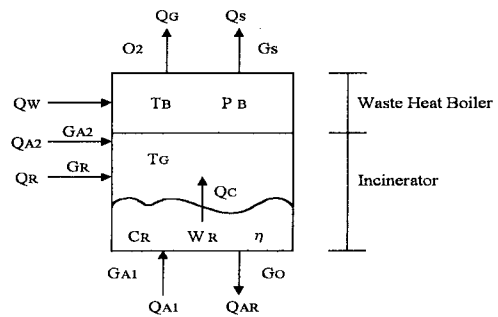


Fig. 3 Dynamic Characteristic Analysis Model

この数式モデルを、差分法の1つであるEuler法を用いて解く。(1)、(2)式の微分項で微分されるプロセス値は、炉内温度、ボイラドラム圧力、ごみ滞留量である。そこで、炉内温度、ボイラドラム圧力、ごみ滞留量の微分を、差分で近似する。炉内温度、ボイラドラム圧力はリアルタイムでデータ収集しており、差分は、未知変数である現在の推定値と、1周期前に導出した推定値の勾配で表す。ごみ滞留量は未知変数であり、差分法で導出される。差分の刻み幅は、観測雑音の影響を考慮して十分小さく

式、空気比式を中心とする下記の4式からなり、焼却炉内のごみ滞留量 W<sub>R</sub>、ごみ燃焼度 D<sub>C</sub> を未知変数に持つ連立微分方程式である。(1)~(3)式でごみ滞留量 W<sub>R</sub> を、同様に(4)式でごみ燃焼度 D<sub>C</sub> を導出する。

選び、かつ差分法の精度と丸め誤差の影響を考慮して適切な値を選ぶ。このように、連立微分方程式を連立差分方程式の初期値問題に近似し、リアルタイムに解くことにより焼却炉内のごみ滞留量、ごみ燃焼度が導出される。この推定演算を一定周期で行うことにより炉内状態の推移が把握できる。以上(1)~(4)からごみ滞留量 W<sub>R</sub>、ごみ燃焼度 D<sub>C</sub> が導出される。

### 6.2 エキスパートシステムによる推定結果の活用

Fig. 4に、エキスパートシステムによるデータの処理手順を示す。処理は大きく分けて、下記に示す2種類のルール群からなる。

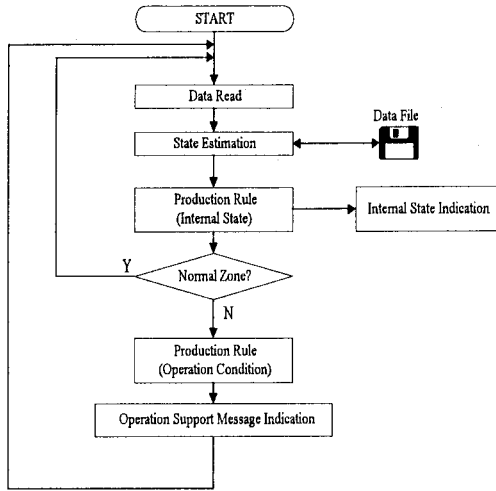


Fig. 4 Flow Diagram of the Operation Support System

#### 6.2.1 炉内状態把握ルール

動特性数式モデルから焼却炉内のごみ滞留量とごみ燃焼度が導出される。これらの値を運転支援情報として活用するために、熟練運転員と同様に何段階かに区分けして取り扱う。焼却炉内のごみ滞留量とごみ燃焼度の2つのパラメータの推定結果をそれぞれ5段階に分ける。各設定値に対しごみ滞留量は、多い、やや多い、適量、やや少ない、少ないの5段階、燃焼度は、高い、やや高い、適正、やや低い、低いの5段階に分ける。

従って、ごみ焼却プラントの炉内状態は5×5の25パターンに分けられ、Fig. 5に示すように横軸を燃焼度、縦軸をごみ滞留量とする5行5列のマトリクス上の位置で表される。“■”が現在の炉内状態、“□”が1周期前の炉内状態の推定結果である。この炉内状態表示マトリクス上で、各設定値に対しごみ滞留量、燃焼度の順に(適量、適正)、(適量、やや高い or やや低い)、(やや多い or やや少ない、適正)の5つのゾーンを正常ゾーンとし、それ以外のゾーンを異常ゾーンと定める。Fig. 5において、“○”が正常ゾーンで“●”が異常ゾーンとなる。

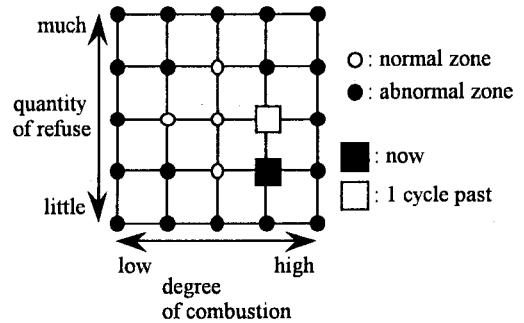


Fig. 5 Normal Zone and Abnormal Zone

#### 6.2.3 運転支援情報の出力

運転支援装置は、プロダクションルールから得られた運転支援メッセージと同時に、炉内状態のマトリクス表現と炉内状態の履歴をオペレータコンソール上に表示させる。Fig. 6に示すようにオペレータコンソール上に3炉の燃焼状態を並べ表示させる。3炉同時の表示により容易に燃焼状態を比較することができる。

運転員は運転支援メッセージに従ってプラントに手動介入し、炉内状態を異常ゾーンから正常ゾーンに戻すことができる。さらにオペレータコンソール上に炉内状態履歴表示画面を作成し、運転支援メッセージ過去60周期分(2時間)の履歴を表示させる。

### 6.3 実機データによる検証

Fig. 7は本手法を適用した実炉での試験データの1例である。

本手法の検証として、

- (a) ごみ滞留量の推定結果 WR
- (b) 1時間毎のごみ投入実績値 CRN
- (c) ごみ燃焼度の推定結果 DC
- (d) 燃焼室出口ガス温度のプロセス値 TG

を示す。いずれも横軸は時間であり推定開始から6時間のデータである。

WRとCRNを比較すると、ごみの投入量CRNが減少(TIME=1[h])してから約30分後にごみの滞留量推定値WRが減少している。ごみホッパの容量を考慮すれば、WRとCRNの関係は妥当である。

DCとTGを比較すると、DCが減少(TIME=1.5[h])してから約20分の時定数でTGが減少している。TGが

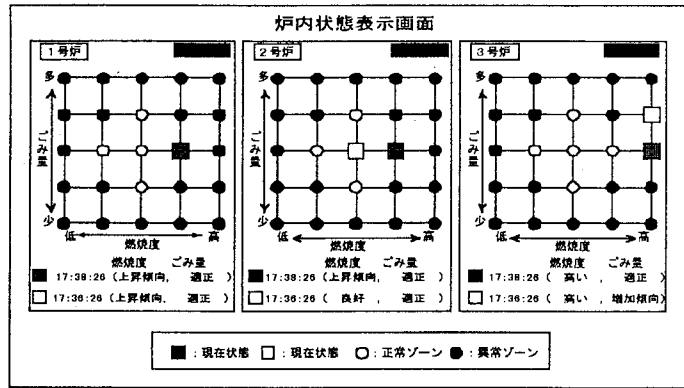


Fig. 6 Image of Operator Station for Three Furnaces

センサの時定数やごみの熱容量の影響により燃焼度に対して遅れを持つことを考慮すれば、DCとTGの関係は妥当である。

## 7. 装置故障異常診断機能

### 7.1 装置故障異常診断機能

ごみ焼却プラントが大規模、高機能化しそれに伴い高度な自動制御システムが導入されているが、これはあくまでもプラントの各設備が正常な状態で稼動、制御されていることが前提である。

実際は、設備の故障、異常発生時には、異常機器の把握や対応処置を行うなど、プラント全体を把握した運転員の適切かつ迅速な判断および手動介入が必要となる。すなわち、運転員の質に左右されない安定運転の達成や、今後予想される熟練した運転員が不足する事態への対応の為に、運転員が的確な判断を下せる運転支援情報の提供が求められている。

### 7.2 支援対象項目

#### <診断対象>

異常診断を行う必要のある対象の抽出にあたって、下記項目を含むことを条件とした。

但し、運転支援装置が効率的に推論結果を出せるように、現状の自動制御で十分対応可能なものは除外した。

主な対象項目を Table. 1 に示す。

- ◆制御系で重要な要素である。
- ◆数値変動が他設備へと大きく影響するもの
- ◆警報発生時点では対処が困難となるもの
- ◆炉緊急停止等へと発展する恐れのあるもの

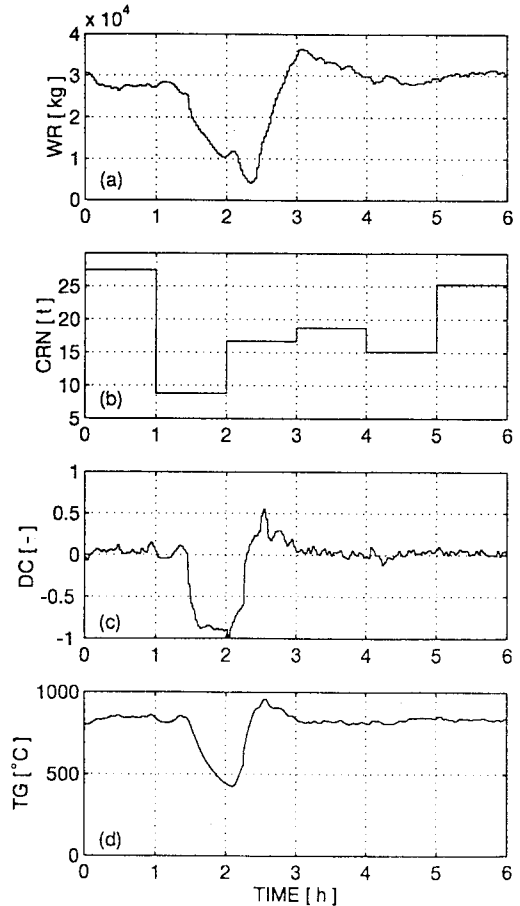


Fig. 7 Estimation Result

- ◆機械的故障、発信器故障などによるデータ異常
- ◆人為的ミス、誤操作による異常の検知

Table. 1 対象項目

	名 称
1	NO.nボイラドラム水位(平均)
2	NO.nボイラ主蒸気温度
3	NO.nボイラドラム圧力・主蒸気圧力
4	脱気器 NO.nレベル
5	脱気器 NO.n 圧力
6	NO.n 復水タンクレベル
7	NO.n 排気復水タンクレベル
8	高圧蒸気だめ NO.n 圧力
9	NO.n タービンバイパス減温器出口温度
10	タービンバイパス減温器出口圧力

ルール群は実行せずデータ収集へと戻る。これにより計算機の効率的な運用を実現している。

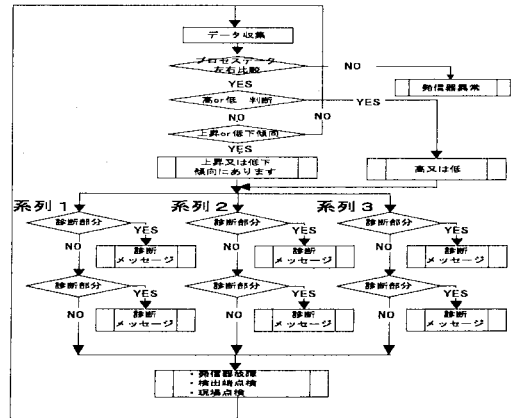


Fig. 8 Flowchart

<異常診断法>

次の3点について考慮した。

- (1) 制御用LANに接続しているため、オンラインでかつリアルタイムにデータを収集することができること。
- (2) 各種のプロセスデータ毎に収集、平均値評価の周期を変更することで、温度などの時定数をもつプロセスデータは収集周期を長く、圧力など応答が速いプロセスデータは収集周期を短くすること。
- (3) このように収集するデータをその特性に合わせて適切に扱えるため、より信頼性の高い推論が行える。

異常診断法の例－

- ① 設定値(SV)に対して計測値(PV)が大きく逸脱した場合
- ② 計測値(PV)の振幅が異常に大きい場合
- ③ 左右検出端のデータの差が大きい場合

7.3 装置故障異常診断知識ベース

Fig. 8に知識ベースのフローチャートを示す。

推論実行をスタートすると、データ収集が開始され、一定時間の平均値をとるなどして異常診断が行われる。まず検出端が複数個ある場合は各々の差を診断し、サンサ異常を検知する。誤差が許容範囲内であれば、上述の異常診断法に基づきプロセスデータを診断する。高、上昇傾向または低、低下傾向にあると判断した場合には下段の1～6列程度の異常原因推定ルール群を実行する。プロセスデータが正常な場合にはそのまま異常原因推定

ルールはいくつかの列(ルール群)に区分され、特に関連の深い事象についてのルールが1系列にまとめられている。例えば、系列1には制御モード診断と設定値診断、系列2にバルブの開閉状態診断、系列3には補機運転状態診断が入る。各系列はすべて同時に並列に実行され、前述のような制御モードや設定値などについては上から順に実行される。

このフローチャートに基づき、if～then形式へと展開する。Fig. 9に展開例を示す。

8. おわりに

動特性解析技術とエキスパートシステム技術を融合したごみ焼却プラント運転支援装置を開発し、実機に適用した。ごみ焼却プラント運転にとって重要なパラメータであるが直接計測できないごみ滞留量とごみ燃焼度を推定し有効性を示した。

また装置異常診断により、焼却炉を含む各設備の安定した運転を保證することができた。

本運転支援装置は、大型ごみ焼却プラント向けに納入済みである。

今後、本手法の有効性を長期に亘って評価し、異常診断だけでなく安定運転時の燃焼性能向上への適用、自動燃焼制御の強化を図っていく。

```

(define-task OPERATE_task101
:priority 90
:scan-interval 12
:formula {IF(((#521M2.STS.FI3# == 1) && (#T130-1.PV.PV# >= 600)) && ((#T130-2.PV.PV# >= 600) && (B1
18.STS.FI2 == 1)))}{infrule(rule_HANDAN_R111);}}

(define-rule rule_HANDAN_R111
:comment "フ ロター-タ判断部"
:formula {IF{(TRUE)}
THEN{level_R111_4 := (-135 >= L172PV_A_R111 ) ;
level_R111_5 := (L172PV_B_R111 < -120) && ((L172PV_A_R111 - L172PV_B_R111) < -7.5 );
level_R111_6 := ((L172PV_A_R111 - L172PV_B_R111) < -45);}}

(define-rule rule_KENSHOU_R111
:comment "左右発信器検証"
:formula {IF{(HIKAKU_R111_1 > 30) && (CHECK_R111_P == 0) }
THEN{inform("OIS1","NO. 1 ボイラドラム左右水位偏差大","現場レベル計確認、偏差の大きいレベ
ル計の水位発信器および水位検出元を点検");
IF{( level_R111_4 == 1 ) || ((level_R111_5 == 1) || (level_R111_6 == 1))}
THEN{ rule_check_R111_LOW :=1;
infrule(rule_mode_R111_1); /* 制御モード、設定値診断ルール実行 */
infrule(rule_mode_R111_2); /* バルブ 開閉状態診断ルール実行 */
infrule(rule_mode_R111_3); /* 補機運転診断ルール実行 */ }}}

```

Fig. 9 Example of Task and Rule

## 参考文献

- 1) 宮本、林、宮崎、小谷野、南部、豊嶋：ニューラルネットワークによる流動床産廃焼却炉の混焼率 推定、第34回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp203/204、(1995) (受付 1998. 1 .12) (受理 1998. 2 .24)
- 2) 福山、坂本、横山、湯浅、庵原、羽畑、宮本、西野：ごみ焼却プラント異常診断、運転支援エキスパートシステム、川崎重工技報、106号、pp46/53、(1990)