

ゼロから学ぶPID 制御 (システム応用コース)

第8回 混合プロセス制御(その1)

〈加熱炉出口温度制御〉

1. 混合プロセス制御

プロセス制御は非混合プロセス (Non-mixed Process) 制御と混合プロセス (Mixed Process) 制御に大別される。前者は流量、圧力、レベルなどの制御のように混合ではなく、量のみで制御するもので、量的制御とも呼ばれる。後者は熱量または物質を混合して、混合後の温度または成分を直接または間接的に制御するもので、質的制御とも呼ばれる。ここでは混合プロセス制御の代表例として、まず熱量を「間接混合」する加熱炉出口温度制御を取り上げて説明する。

第 8.1 図に加熱炉出口温度制御系の基本ブロック図を示す。基本的には、原料流量 f_i 、原料入口温度 t_i および原料出口温度 t_o を検出し、これに基づいて加熱炉出口原料温度を設定値 t_s に加熱するために必要な熱量を FF (フィードフォワード) 制御モデルで計算する。その出力を FF 制御信号として、燃焼制御系に課して加熱炉への入熱量を制御する。その結果、加熱炉出口温度 t_o が設定値 t_s からズレると、加熱炉出口温度 t_o を検出して加熱炉出口温度調節計 (TIC-1) に導き、加熱炉出口温度設定値 t_s との差がゼロとなるように FB (フィードバック) 制御し、その FB 制御出力を前記 FF 制御信号と加算合成するように構成する。

2. 加熱炉出口温度制御式の導出

加熱炉出口温度制御式を導出するために使用するプロセス値の諸元を第 8.1 表に示す。原料温度を入口温度 t_i から設定値 t_s に加熱するために、燃料によって投入すべき熱量 Q_D は、(8.1)式となる。

$$\begin{aligned}
 Q_D &= \text{原料流量} \times \text{比重} \times \text{比熱} \times (\text{加熱すべき温度差} + \text{温度制御出力}) \\
 &= F_i \times \rho \times C_i \times \{(T_s - T_i) + T_c\} \\
 &= \rho \times C_i \times f_i \times F_{i(\text{MAX})} \times (t_s - t_i + t_c) \times T_{o(\text{MAX})} \quad \dots(8.1)
 \end{aligned}$$

燃料側の燃料流量 f_F による投入熱量を Q_F とすると、炉出側に換算した燃料流量 f_f による投入熱量 Q_i は(8.2)式となる。 T_c は温度制御出力で、温度差の関数であることがポイントである。

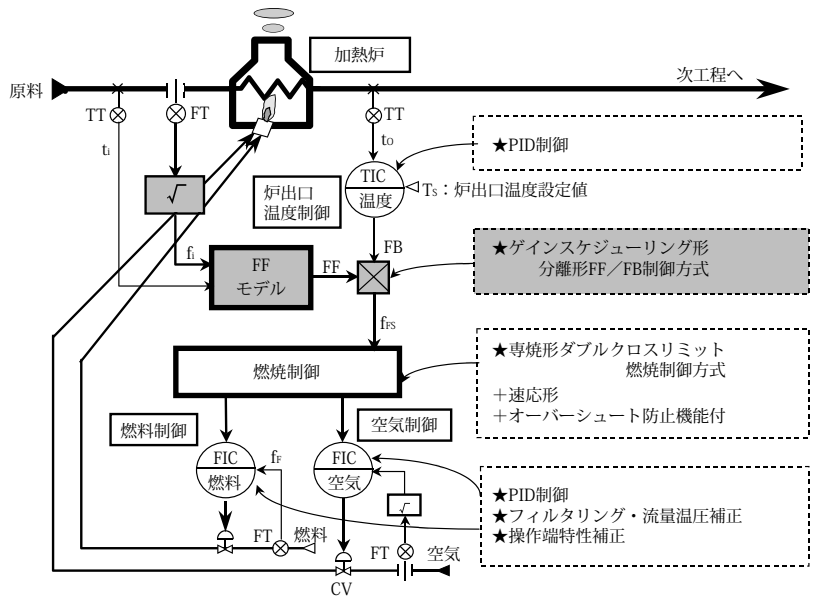
$$\begin{aligned}
 Q_i &= \text{加熱炉効率} \eta \times \text{燃料側の燃料流量} f_F \text{ による投入熱量} Q_F \\
 &= \eta Q_F \\
 &= \eta \times f_{FS} \times F_{F(\text{MAX})} \times C_F \quad \dots(8.2)
 \end{aligned}$$

ここで、熱収支バランスから、 $Q_D = Q_i$ の関係となり、(8.1)式、(8.2)式を用いて燃料流量設定信号 f_{FS} を求めると、(8.3)式を得る。

第 8.1 表 加熱炉出口温度制御関係のプロセス値の諸元

項目	単位	現在値 (工業単位)	現在値 (%)	測定範囲 (工業単位)
炉入口原料温度	T_i (°C)	t_i		$0 \sim T_{i(\text{MAX})}$
炉出口原料温度	T_o (°C)	t_o		$0 \sim T_{o(\text{MAX})}$
炉出口設定温度	T_s (°C)	t_s		$0 \sim T_{o(\text{MAX})}$
温度制御出力	T_c [°C]	t_c		$0 \sim T_{o(\text{MAX})}$
原料流量	F_i (m ³ /h)	f_i		$0 \sim F_{i(\text{MAX})}$
燃料流量	F_F (kg/h)	f_f		$0 \sim F_{F(\text{MAX})}$
燃料流量設定値	F_{FS} (kg/h)	f_{FS}		$0 \sim F_{F(\text{MAX})}$

ρ : 原料比重 [kg/m³]
 C_i : 原料比熱 [kJ/kg・°C] η : 加熱炉効率
 C_F : 燃料単位発熱量 [kJ/kg]



第 8.1 図 加熱炉出口温度制御系の基本ブロック構成

$$f_{FS} = \underbrace{K \times (t_s - t_i)}_{(FF \text{ 制御出力})} + \underbrace{K \times t_c \times f_i}_{(FB \text{ 制御出力})} \quad \dots(8.3)$$

$$\text{ここで、} K = \frac{\rho \times C_i \times F_{i(MAX)} \times T_{0(MAX)}}{\eta \times C_F \times F_{F(MAX)}}$$

この (8.3) 式で示す燃料流量設定信号 f_s の FF 制御出力部分から、FF 制御モデル $F(s)$ を求めると、(8.4) 式となる。

$$F(s) = (f_{FS}) / (f_i) = K(t_s - t_i) \quad \dots(8.4)$$

この (8.4) 式の FF 制御モデル $F(s)$ は静的補償のみである。これに動的 1 次補償を付加すると FF 制御モデル $F(s)$ は (8.5) 式となる。

$$F(s) = K(t_s - t_i) \frac{1 + T_P \cdot s}{1 + T_D \cdot s} = K(t_s - t_i) \left\{ 1 + \left[\frac{1 + T_P \cdot s}{1 + T_D \cdot s} - 1 \right] \right\} \quad \dots(8.5)$$

ここで、 T_P ：プロセス時定数（操作信号—加熱炉出口温度間の時定数）

T_D ：外乱時定数（原料流量信号—加熱炉出口温度間の時定数）

(8.3) 式と (8.5) 式から加熱炉出口温度制御式、つまり燃料流量設定信号 f_{FS} は最終的には、(8.6) 式となる。

$$f_{FS} = \underbrace{K(t_s - t_i)}_{(FF \text{ 制御出力})} + \underbrace{K \times t_c \times f_i}_{(FB \text{ 制御出力})} \quad \dots(8.6)$$

(8.6) 式を見ると、加熱炉出口温度制御式は FF 制御と FB 制御とが単純に加算組合せされた関係ではなく、外乱（負荷）信号である原料流量信号 f_i と加熱炉出口温度制御信号 t_c とが乗算結合となっている。つまり、負荷の大きさによって温度制御出力の評価を変更しなければならないことを示している。これは加熱炉出口温度制御系が混合プロセスであり、FF / FB 制御方式としては、

ゲインスケジューリング形 FF / FB 制御方式を適用すれば良いことを示している。

3. 具体的機能ブロック構成

この (8.6) 式の機能を速度形 PID 演算とゲインスケジューリング形 FF / FB 制御方式を用いて構成した加熱炉出口温度制御系の具体的機能ブロック構成は第 8.2 図のようになる。加熱炉効率 η は一定として取り扱っているが原料流量 f_i の大きさによって変動が大きい場合には、原料流量 f_i の関数として取扱って、折れ線近似をして取り扱う。

燃焼制御系については、以前に詳細に述べているので、ここでは省略する。

4. FF 制御モデルの設定・調整

FF ゲイン K は (8.3) 式で計算して設定する。一般的には $K = 0.6 \sim 0.9$ 程度である。時定数 T_P 、 T_D は計算に乗らないため、現物合せにならざるを得ない。ステップ応答特性データから求めて設定し、応答特性を見ながら微調整することになる。ステップ応答も取れない場合は、手動操作の状況から得た推定時定数を設定し、カットアンドトライで微調整することになる。

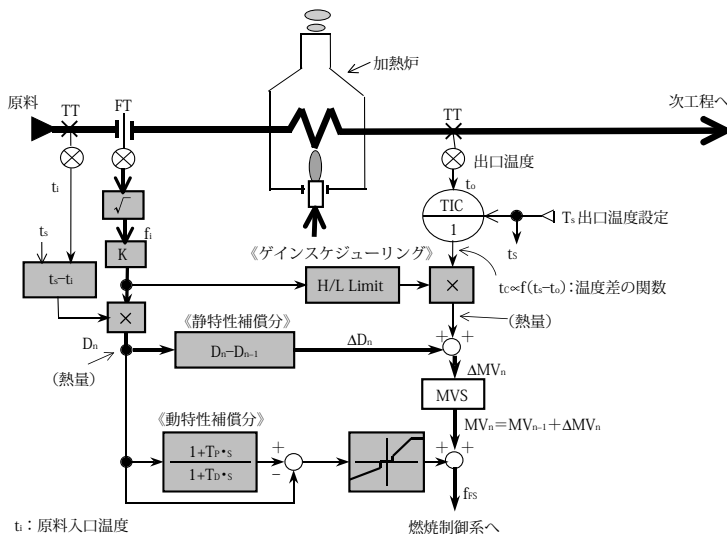
5. 加熱炉出口温度制御のポイント

以上述べてきた濃度制御のポイントをまとめると、つぎのようになる。

- ① 加熱炉出口温度制御は熱量を「間接混合」して出口温度を制御する Mixed Process である。
- ② FF 制御と FB 制御の組合せは単なる加算組合せではなく、原料流量（外乱）の大きさで FB 制御出力の評価を比例的に変える機能を付加した「ゲインスケジューリング形 FF / FB 制御方式」が適している。
- ③ 出口温度の追値制御を必要とする場合は、温度コントローラとしては「2 自由度 PID 制御」が適している。

<参考文献>

- (1) 広井：「実用アドバンスト制御とその応用」、工業技術社（2003）
- (2) 広井：「燃焼の基本および燃焼制御システムとその応用」、東芝制御技術講座テキスト第 2 部（第 13 版）（2009.11）
- (3) 広井：「プロセス制御を解剖する」（第 60 回）、『計装』Vol.46, No.8（2003）



第 8.2 図 加熱炉出口温度制御の機能ブロック構成