

化学装置の加熱システム

Heating System for Chemical Equipment



(化)プラント部
平尾 俊 策
Shunsaku Hirao

Utilizing our specialized chemical process equipment such as reactors, wiped film evaporators, and vacuum dryers, we have been engaged in a total plant engineering extensively in various fields of the chemical industry. In a design of these chemical plant, heating method for the equipment is an important factor for obtaining a desirable plant performance.

This report presents design features of a heating system for chemical equipment including a method of assuming heating and cooling time.

まえがき

当社は、反応装置、薄膜蒸発装置、真空乾燥装置等の特長ある各種化学装置を製作しており、これらを核にファインケミカル及びポリマー分野を中心として数多くのプラント建設実績を有している。本稿では、プラント性能を決める大きな要因の一つである化学装置の加熱用熱源について、最近の動向を踏まえて実績データと設計の注意点を紹介するとともに、昇温冷却時間の推定方法について述べる。

1. 加熱システムの紹介

化学工業用として採用される加熱媒体は、温水、スチーム、熱媒油が一般的であり、その中でもスチームは最も広く用いられている。冷却媒体も合わせて第1図に各種伝熱

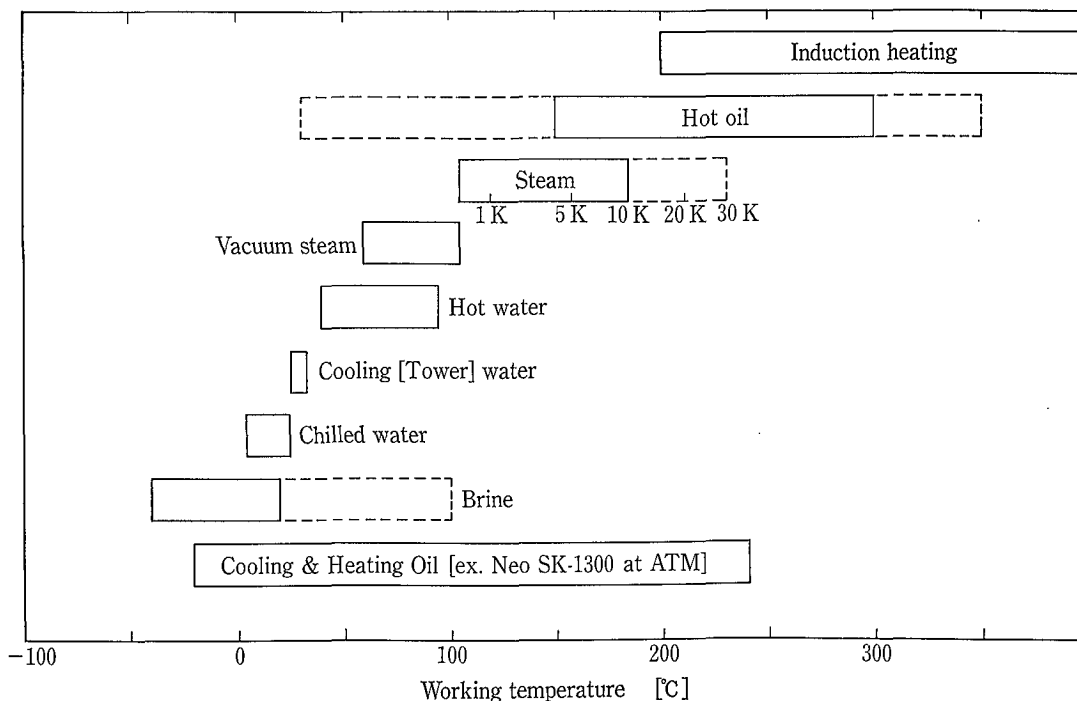
媒体の適用温度範囲を示した。これらの中から減圧スチーム方式、液相熱媒油方式、誘導加熱方式について紹介する。

1.1 減圧スチーム方式

熱感受性物質の反応、蒸留、乾燥等の各単位操作は、真空下で30°Cから80°Cという比較的低温領域で行われることが多く、従来から第2図、第3図に示す温水循環方式が広く採用されている。第2図は温水タンク循環式であり、第3図はインラインスチームミキサ使用循環式である。

これらの温水循環方式は、

- ①温水側の境膜伝熱係数が小さい。
- ②顕熱の利用のため温水出入口で温度差が避け難い。
- ③スチームで加熱、温水で冷却という場合、切替操作



第1図 各種伝熱媒体の適用温度範囲

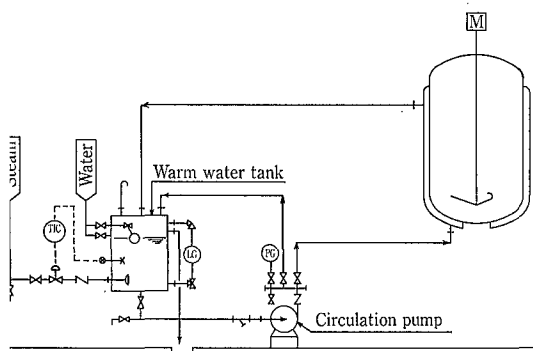
Fig. 1 Working temperature of various heat transfer medium

に時間がかかる。

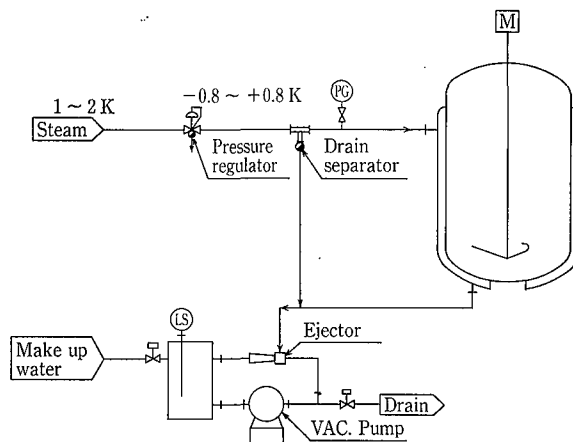
の問題点がある。一方、スチームは凝縮伝熱のため境界熱係数が大きいだけでなく、均一な加熱温度を得られるという利点がある。この利点を生かして、真空用減圧弁を用いて真空下からのドレン排出を解決することにより、60～100.0℃の温度範囲で減圧下のスチームを加熱源として利用することが多くなっている。減圧スチーム使用のフローは第4図に、温水使用との昇温データを第5図に示す。本システムの採用には、次の注意が必要である。加熱側が減圧系になるため、装置の強度計算及び配管のシール性を十分に検討する。ドレンのスムーズな排出のためポケットが出来ないようにまた流れ勾配を考えた配管設計を行う。

1.2 熱媒油加熱方式

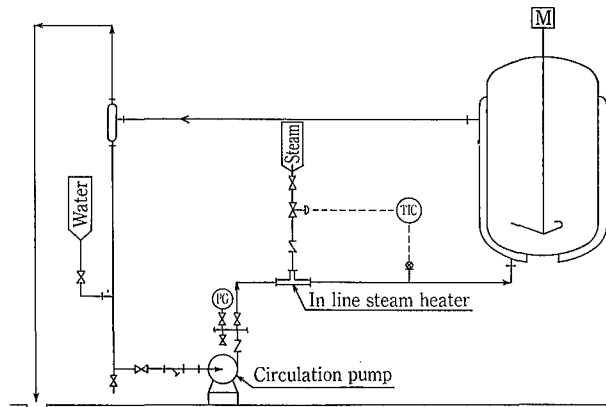
一方、耐熱性樹脂の開発等、加熱源の高温ニーズもここ数年増加している。200℃を超える高温領域では、高压スチームより熱媒油が一般に使用される。熱媒油を使用する間接加熱には、ボイラで発生させた熱媒蒸気を使用する気相加熱と加熱された熱媒油をそのまま循環使用する液相加熱の二方式がある。運転の容易性や加熱冷却操作の併用が可能であることから小規模の化学プラントでは液相加熱方式が一般的であり、本稿では液相加熱方式について紹介する。なお、液相加熱での最高仕様温度は300～350℃である。



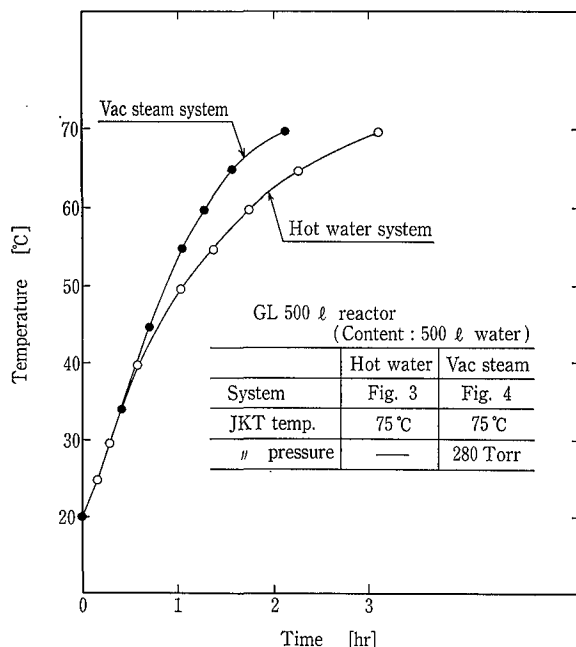
第2図 温水循環方式（温水タンク循環式）
fig. 2 Hot water circulation system with water tank



第4図 減圧スチーム方式
Fig. 4 Vacuum steam system



第3図 温水循環方式（インラインヒータ式）
fig. 3 Hot water circulation system with inline heater

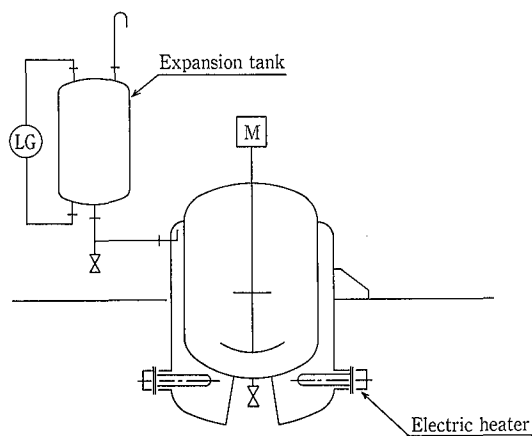


第5図 減圧スチームと温水の昇温比較
Fig. 5 Heating data by vacuum steam and hot water

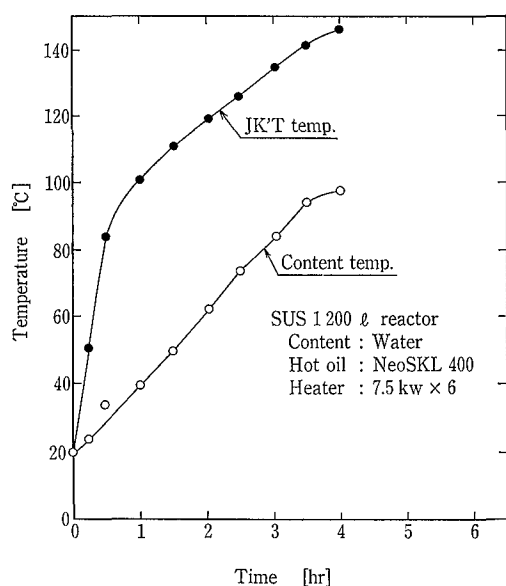
1. 2. 1 自然対流方式

研究開発等の小型反応槽では、外套下部に投込みヒータを直接取り付け、付属機器として上部に膨張槽を持つという熱媒自然対流加熱が用いられることがある(第6図)。装置としては簡単であるが、自然対流のみに頼っているため、境膜伝熱係数が非常に悪く、水平方向の温度差が大きいという欠点を持っている。

第7図に実績データを示すように、外套側の境膜伝熱係数は $100 \text{ kcal/m}^2 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C}$ 以下である。



第6図 熱媒油自然対流方式
Fig. 6 Free convection system by hot oil

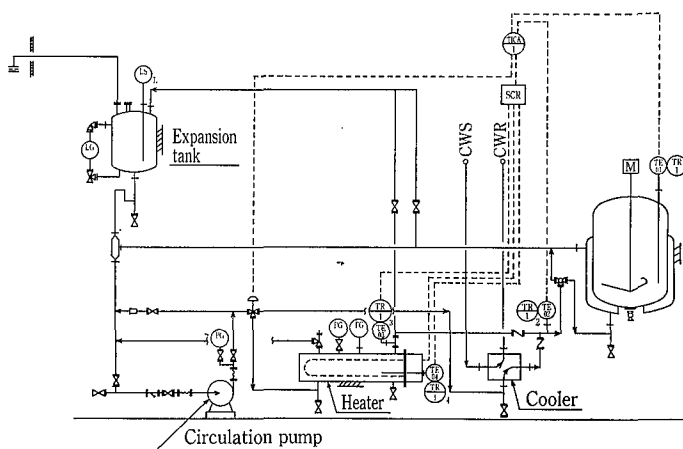


第7図 熱媒油自然対流方式の昇温データ例
Fig. 7 Heating data by free convection system

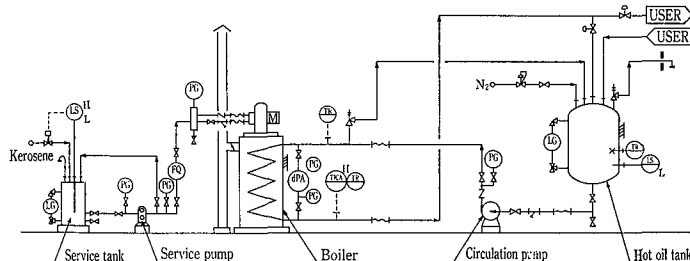
1. 2. 2 強制循環方式

強制循環方式は、ユーザ側で階段状の使用温度が要求される場合、また加熱冷却の繰り返しが必要される場合によく用いられる。本システムは、加熱装置(冷却装置)、循環ポンプ、膨張槽から構成される。加熱装置として電気ヒータを使用し冷却器を含めた場合のフローを第8図に、また灯油使用の熱媒ボイラ廻りのフローを第9図に示す。強制循環方式として

- ①一つの加熱装置と数台のゾーンポンプを用いて、必要温度の異なる多数のユーザに対応する方式
- ②加熱冷却時間短縮のため、高温熱媒と低温熱媒を各々別タンクに保有し切替え操作を行う方式等の実績もある。次に熱媒油強制循環方式の設計施工上の留意点を述べる。



第8図 熱媒強制循環方式
Fig. 8 Typical hot-oil circulating system with electric heater



第9図 熱媒ボイラ廻りのフロー例
Fig. 9 Typical flow of making use of hot oil boiler

1) 加熱装置 (ボイラ)

- ・法規：大気汚染防止法，各地区の公害防止条例，消防法，ボイラ安全規則等への対応
- ・燃料：100 kW 以下の場合には電気ヒータ，それ以上は熱媒油ボイラが一般的であるが，クリーンという面から1000 kW の電気ヒータも使用されることがある。ボイラの場合，重油，灯油，各種ガスから燃料を選定する。
- ・制御：プロセス側の要求精度を加味し決めるが，燃料焼き小型ボイラの場合は3位置制御で，熱媒温度を一定に保ちユーザ側の温度制御は流量を変えることが多い。大型ボイラの場合は，30%能力範囲以下ではON-OFF制御それ以上では比例制御が可能である。一方，電気ヒータの場合はSCRによる比例制御を用い流量は一定とするのが一般的である。
- ・その他安全装置の検討，煙道煙突の設計や保守点検を含めた配置計画が重要である。

2) 冷却装置

- ・水冷の場合は，伝熱係数が大きくコンパクトであるスパイラル式熱交換器あるいは溶接形プレート式熱交換器(コンパブロック)が便利である。空冷の場合は，フィン式が用いられる。

3) 膨張槽

- ・系の最上部に設ける。
- ・熱媒油の体膨張率から槽の容量を決定する(約10%/100°Cの体膨張率)。
- ・高温使用の場合は，熱媒劣化防止のためブリザー弁と組合せN₂ パージを検討する。
- ・液面計を設置する。(下限リミットスイッチで加熱装置の空焚き防止が望ましい。)

4) 熱媒循環ポンプ

- ・シールが無いこと，熱ロスの面から水冷不要の超耐熱型キャンドポンプが有効である。
- ・出入口には伸縮継手をつける。

5) 熱媒油配管

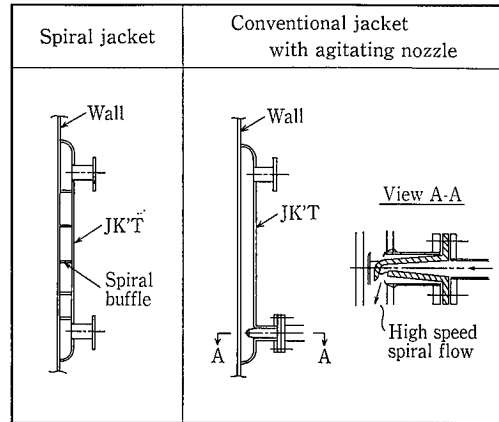
- ・エア抜き及びドレン抜きが完全にできること，運転当初の配管中の水分除去を念頭においた配管設計を行う。
- ・昇温時間短縮のため，ユーザ加熱前に熱媒油を所定温度まで上げておくバイパス配管を設けておくことは便利である。
- ・伸縮継手，曲がり，サポート方法等を十分に考慮し配管熱応力の検討を行う。
- ・一般的に管はSTPG370 Sch40(低温の場合はSGP)，フランジはJIS20K，ガスケットは渦巻ガスケット，バルブはFCMB製熱媒用グローブ弁が用いられることが多い。

3) ユーザ側ジャケット

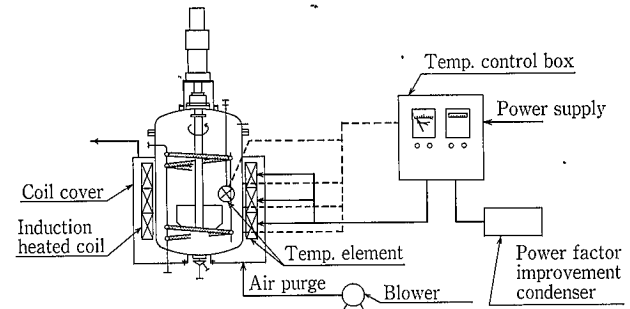
- ・伝熱係数を大きくするためにスパイラル状の邪魔板を設け，周方向の流速を大きくする形式がよく用いられる。小型装置ではコスト的にもアジティatingノズルがより有効である(第10図)。
- ・配管も同様であるが，水分の混入を防ぐ意味で耐圧試験は気密で行う。

1.3 誘導加熱方式

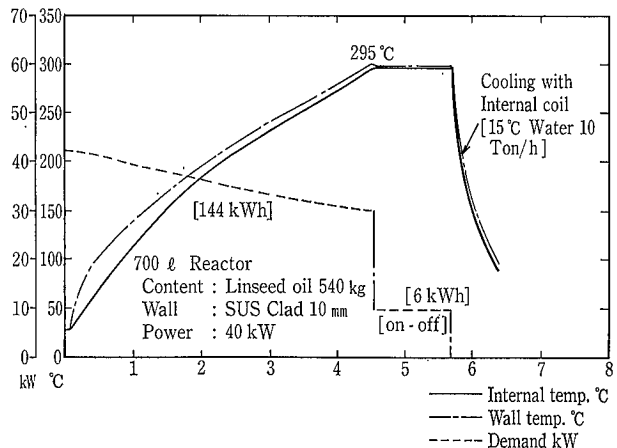
槽本体の壁面に渦電流を発生させ，槽壁面が発熱体になる方式で，常温から600°Cと加熱温度範囲が広いだけでなく，精度の高い温度制御と操作の容易性は自動化に適した方式である。フローを第11図に，運転データを第12図に示す。



第10図 熱媒油用の代表的ジャケット構造
Fig. 10 Typical jacket for oil system



第11図 誘導加熱方式
Fig. 11 Induction heated system



第12図 誘導加熱方式の昇温データ例
Fig. 12 Heating data by induction heated system

2. 昇温冷却時間の推定方法

2.1 加熱媒体温度が一定の場合 (スチーム)

加熱媒体温度が一定の場合、内液質量 M 、比熱 C_p 、内温 T とし、媒体温度 t (=一定) として微小時間 $d\theta$ における熱収支をとると

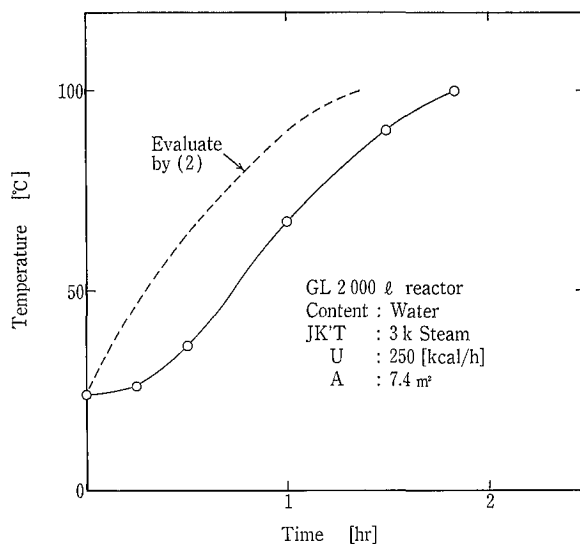
$$M \cdot C_p \cdot dT = U \cdot A \cdot (t - T) \cdot d\theta$$

(A : 伝熱面積 U : 総括伝熱係数)

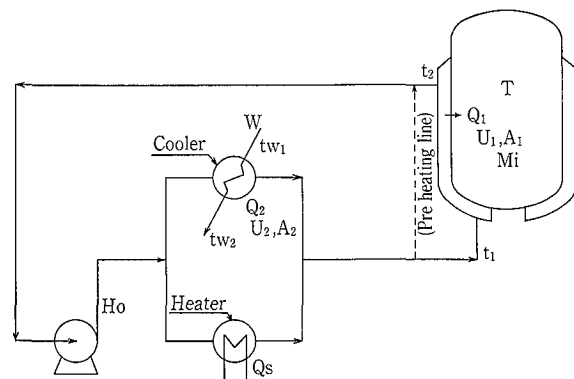
$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{U \cdot A}{M \cdot C_p} \cdot (t - T) \quad (1)$$

$\theta=0 \rightarrow T=T_1$, $\theta=\theta \rightarrow T=T_2$ で (1) 式を積分すると内温を T_1 から T_2 まで昇温するのに要する時間 θ は次式となる。

$$\theta = \frac{M \cdot C_p}{U \cdot A} \cdot \ln\left(\frac{t - T_1}{t - T_2}\right) \quad (2)$$



第13図 昇温時間の推定と実験データ
Fig. 13 Evaluated & measured heating data by steam



第14図 液相循環方式のモデル
Fig. 14 Model of liquid circulating system

グラスライニング製 2 m^3 反応槽での(2)式による推算例と実績データを第13図に示す。運転開始時は熱が缶体のみ奪われるためずれが大きい、一定時間後の昇温曲線はほぼ一致している。

2.2 加熱媒体温度が変化する場合 (熱媒油, 温水)

媒体強制循環方式での反応槽の昇温冷却時間の推定方法について考察する。第14図にモデルフローを示す。小型装置においては、内液の熱容量より缶体、配管、熱媒の熱容量の方が大きい場合もあり、内液だけでなく装置全体で検討する事が肝要である。

2.2.1 使用記号の説明

	重量 (kg)	容量 (m ³)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kcal/kg°C)
内液	M_i	V_i	ρ_i	C_{pi}
熱媒	M_o	V_o	ρ_o	C_{po}
反応槽	W_a			C_{pa}
熱媒配管	W_p			C_{pp}

	伝熱面積 (m ²)	総括伝熱係数 (kcal/m ² h °C)
反応槽	A_1	U_1
冷却器	A_2	U_2

内液 熱容量 S_i (kcal/°C) = $M_i \cdot C_{pi}$
 反応槽 熱容量 S_o (kcal/°C) = $W_a \cdot C_{pa}$
 配管 熱容量 S_p (kcal/°C) = $W_p \cdot C_{pp}$
 熱媒 熱容量 S_j (kcal/°C) = $M_o \cdot C_{po}$
 熱媒ポンプ能力 H_o (m³/h)
 循環熱媒熱容量 S_a (kcal/h°C) = $H_o \cdot \rho_o \cdot C_{po}$
 ヒータ能力 Q_s (kcal/h)

反応槽 内温温度 T (°C)
 内温初期温度 T_1 (°C)
 内温設定温度 T_2 (°C)
 熱媒入口温度 t_1 (°C)
 熱媒入口初期温度 t_{10} (°C)
 熱媒出口温度 t_2 (°C)
 冷却器 冷却水入口温度 tw_1 (°C)
 冷却水入口温度 tw_2 (°C)
 冷却水量 W (kg/h)

2.2.2 昇温時間の推定

内温を T_1 から T_2 まで昇温する時間を推定する。

1) ヒータ能力からの簡易計算方法
 熱媒、缶体、熱媒配管も T_2 まで昇温すると仮定すると必要熱量 Q_r は、

$$Q_r (\text{kcal}) = (S_i + S_o + S_p + S_j) \cdot (T_2 - T_1)$$

従って昇温時間 θ (hr) = Q_r / Q_s となる。

ヒータ能力 Q_s は、使用条件によりヒータ効率 η を考慮に入れなければならない (η : ヒータ効率 0.7-0.9程度)。

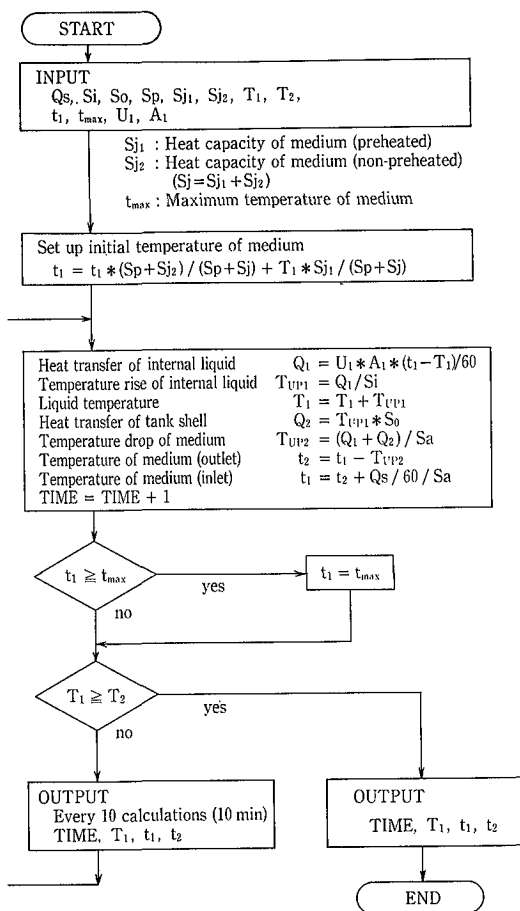


Fig. 15 Flowchart for simulated heating calculation

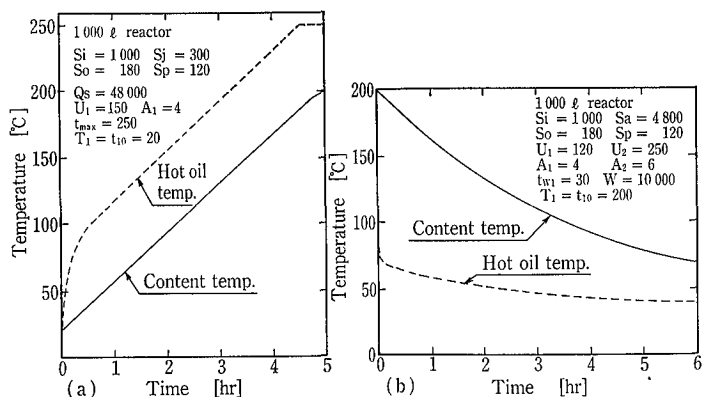


Fig. 16 Simulated heating & cooling curve for 1 m³ reactor

3) 簡易逐次計算方法

熱媒の入口温度が変化する場合の昇温時間は数式化しにくいので、簡易的に添付フローチャート(第15図)に従って逐次昇温計算を行う方法がある。本プログラムは、熱媒予熱バイパス配管を加味し、バイパス使用時は配管、配管系の熱媒はすでに所定温度になっており、またジャケット熱媒は内液温度と同一という仮定のもとにその加重平均で熱媒初期温度を設定するという形をとっている。逐次計算による昇温時間の推定曲線例を第16図(a)に示すが、実際にはこれに放熱の検討を加えて昇温時間を推定する。

2. 2. 3 冷却時間の推定

冷却器の熱収支より

$$Q_2 = W \cdot C_w \cdot (t_{w2} - t_{w1}) \quad (8)$$

$$= U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T$$

$$= U_2 \cdot A_2 \cdot \frac{(t_2 - t_{w2}) - (t_1 - t_{w1})}{\ln((t_2 - t_{w2}) / (t_1 - t_{w1}))} \quad (9)$$

(3)(4)(5)(8)(9)式より、内温 T_1 から T_2 までの冷却時間 θ は次式となる。

$$\theta = \ln((T_1 - t_{w1}) / (T_2 - t_{w1})) / \gamma \quad (10)$$

ここで

$$\alpha = \exp(U_1 \cdot A_1 / Sa)$$

$$\beta = \exp(U_2 \cdot A_2 / (1/Sa) - (1/(W \cdot C_w)))$$

$$\gamma = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \frac{Sa}{(Si + So + Sp)} \cdot (1 - \beta) + \frac{1}{W \cdot C_w} + \frac{1}{\alpha} - \beta$$

(10)式による冷却時間の推定曲線例を第16図(b)に示す。

むすび

設備や運転実績の詳細はメーカー及びユーザのノウハウであり、また紙面の都合上概念的な記述に留まらざるを得なかったが、何らかのお役にたてば幸いである。当社は化学プラントの心臓部に位置する特徴ある化学機器、装置を設計製作しており、この機器、装置がより活躍できるよう周辺技術のエンジニアリングサービスを充実し、プラント建設を通じてユーザ各位のご要望に応じていきたい。

【参考文献】

- 1) 尾花英朗：熱交換器設計ハンドブック，(1982)，工学図書
- 2) 橋本健治：工業反応装置，(1984)，培風館

2) 熱媒入口温度一定の場合の昇温時間

反応槽の熱収支より

$$Q_1 = (Si + So + Sp) \cdot \frac{dT}{d\theta} \quad (3)$$

$$= Sa \cdot (t_1 - t_2) \quad (4)$$

$$= U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T$$

$$= U_1 \cdot A_1 \cdot \frac{(t_1 - t_2)}{\ln((t_1 - T) / (t_2 - T))} \quad (5)$$

(5)式より $\exp(U_1 \cdot A_1 / Sa) = (t_1 - T) / (t_2 - T)$

とおくと(3)(4)式より内温を T_1 から T_2 まで昇温するのに必要な時間 θ は次式となる。

$$\theta = \frac{\ln((t_1 - T_1) / (t_1 - T_2))}{(Sa / (Si + So + Sp)) \cdot ((\alpha - 1) / \alpha)} \quad (6)$$

(6)式は熱媒入口温度が一定の場合の昇温時間であるので、循環使用の場合はヒータ能力のチェックを行なう必要がある。初期における熱媒出口温度 t_2 は、

$$t_2 = T_1 + (t_{10} - T_1) / \alpha \quad (7)$$

熱媒入口温度が一定となるための必要ヒータ能力 Q_{sr} は、 $Q_{sr} = (Si + So + Sp) \cdot (t_1 - t_2) / \eta / 860$ (kcal/h) となる。 $Q_{sr} > Q_s$ ならば、見状の加熱装置では熱媒入口温度を一定にできないため(6)式で昇温時間の推定をすることはできない。