

# PVC 重合機の高効率化

## How to Improve the Efficiency of PVC Polymerizers



(化)技術部 技術第一課  
新開 敏雄  
Toshio Shinkai

With the recent trend for the larger-sized facilities of Polyvinyl Chloride Resin the capacity of polymerizer has also increased, but this has brought about some problems to dissolve in connection with the best removal of the heat generated by reaction.

This paper describes how to improve the heat transfer efficiency and how to calculate the stress for the inner jacket construction which is the most efficient in the heat transfer.

### まえがき

塩化ビニール樹脂 (PVC) は、塩ビモノマー (VCM) の重合反応生成物として得られるが、ポリプロピレン樹脂 (PP)・ポリエチレン樹脂 (PE)・ポリスチレン樹脂 (PS) などと並ぶ代表的な汎用樹脂である。硬質あるいは軟質の各種 PVC 製品 (管材・板材・シート材) はそれぞれの特長に応じて各分野に広く用いられている。

PVC 重合反応には懸濁、乳化、塊状重合法があるが、なかでも回分操作による懸濁重合法が、現在最も一般的に行われている。最近、生産効率を上げるため、装置の集約化の傾向にあり、この結果として PVC 重合機が大容量となり、除熱性能の向上、攪拌条件の最適化、材質の選定などの技術的課題の解決が迫られている。

以下においては、PVC 重合機の高効率化を計る上で最も重要と考えられる、除熱性能向上に対する技術的対応の一端を紹介する。

### 1. PVC 重合機における除熱性能の必要性

PVC 重合機の中で行われる反応工程を時間経過につれ初期、中期、後期の 3 段階に分けたとき、それぞれ次のような特徴がある。

反応の初期においては VCM 混合液中に分散剤を加え、攪拌による適正な液滴の形成を促進しながら反応開始温度まで加熱昇温を行う。反応中期は VCM の重合が進行する過程であり、重合熱 (単位モノマー当り発生熱量  $q=370$  kcal/kg) の発生が平行して進むため、反応熱除去が特に重要な管理ポイントとなる。反応後期は、生成した PVC スラリーの均一混合をしながら、重合反応を完成させる過程である。

以上の反応工程の進行に伴って重合機の担う主要な役割も変化するが、重合機に必要とされる条件を理解し、基本設計に折り込むことが必要となる。

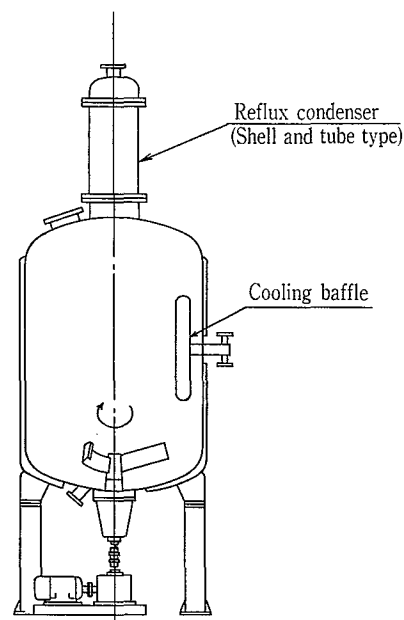
一般に PVC 重合機を大容量化する場合、概念的手法として幾何学的相似条件によるスケールアップの手法が用いられているが、この場合、容量と伝熱面積はそれぞれ代表寸法の 3 乗および 2 乗に比例して変化するため、いわゆる比表面積 (単位容積当りの伝熱面積) は漸減し、大容量化に伴って反応熱除去性能の不足をまねきやすくなる。

PVC 重合における生産効率化のためには、バッチ当りの生産量の増加と各バッチごとの反応時間の短縮の両者を

満たすことが必要であるが、このためには分散剤の改良や攪拌条件の最適化などによるアプローチに加えて、基本的には高熱負荷に対応した反応熱除去性能の改善が何にもまして重要である。

上述のような重合機の大容量化に伴う除熱性能低下を補うため、槽長 (L) と槽径 (D) との比 (L/D) をオリジナルのものより大きくして、ある程度の比表面積の不足を補うことは可能であるが、L/D を増加させるのは均一攪拌上、自づから限度があり、次のような対策が採用されている。

- (1) リフレックスコンデンサーの設置
- (2) バッフルやインペラーなどの内装部品に通水することによる冷却面積の増加
- (3) 重合機本体缶壁に関する総括伝熱係数の改善



第 1 図 下部挿入式攪拌機付 PVC 重合機の一例  
Fig. 1 An example of PVC polymerizer with the bottom entering agitating system

第 1 表 伝熱係数の改善

Table 1 Improvement of heat transfer coefficient

Coefficient	Items	Method
$h_{is}$	Prevention of scaling of polymer	Application of electro-polishing Shape of internal parts Cleaning of inner surface
$h_w$	Reduction of wall thickness	Adoption of high tensile strength steel Improvement of jacket construction
$h_o$	Increase in velocity of cooling water	
$h_{os}$	Prevention of scaling and rusting	Adoption of 3 layer clad steel Plating on inner surface of jacket

第 1 図はリフラックスクーラーおよび通水式バッフルを有する PVC 重合機の例である。

## 2. 除熱性能の改善方法

伝熱量と総括伝熱係数は下記の関係式で決定される。

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{is}} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{os}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{h_w} = \frac{1}{k_c/t_c} + \frac{1}{k_t/t_b} \quad (3)$$

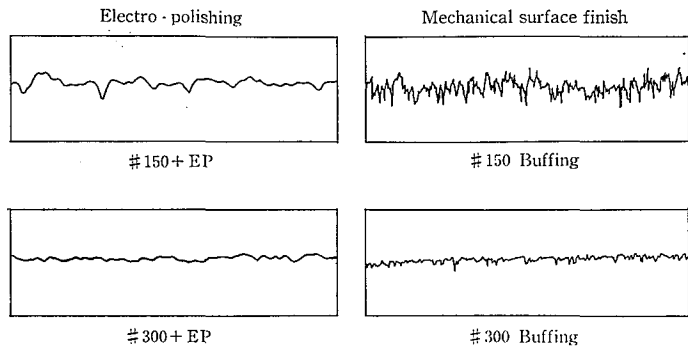
- Q : 伝熱量 (Kcal/hr)
- U : 総括伝熱係数 (Kcal/m<sup>2</sup>・hr・°C)
- A : 伝熱面積 (m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  : 平均温度差 (°C)
- $h_i$  : 内面境膜伝熱係数 (Kcal/m<sup>2</sup>・hr・°C)
- $h_o$  : 外面 // // ( // )
- $h_w$  : 缶壁の伝熱抵抗 ( // )
- $h_{is}$  : 内面よごれ係数 ( // )
- $h_{os}$  : 外面 // // ( // )
- k : 使用材料の熱伝導度 (Kcal/m・hr・°C)
- t : 使用材料の板厚 (m)

(k および t の添字 c および b はクラッド鋼のクラッド材および母材を示す。)

上式より総括伝熱係数 U の改善のためには(2)式の右辺各項の改善が必要である。PVC 重合機の伝熱性能の改善は、PVC ポリマーの粒子形状や粒径分布など製品の品質確保のための条件と、適用法規に合致した圧力容器としての条件を満たすことを前提に考えなければならない。第 1 表は(2)式右辺各項の改善に寄与する影響因子をまとめたものである。内面境膜係数  $h_i$  に関しては PVC 重合機の場合、モノマー液滴の分散・形成やスラリーの均一混合の最適化に対して攪拌条件が決定される面が支配的なため、内面境膜係数  $h_i$  の改善は二義の事項と考え、本表から除いた。

### 2. 1 ポリマー付着防止

PVC ポリマーの缶壁 (伝熱面) への付着は熱伝導性の劣る薄膜を形成することにより、総括伝熱係数 (U) を低



第 2 図 表面仕上げ比較  
Fig. 2 Comparison of surface finish

下させる直接の原因となる。また、製品のコンタミを招くことがあるため、付着ポリマーの除去作業 (缶内クリーニング) は、PVC メーカーにとっては重要な作業のひとつになっている。ポリマーの付着に対処するため設計時点で配慮すべき点を次に示す。

#### 2. 1. 1 電解研磨の適用

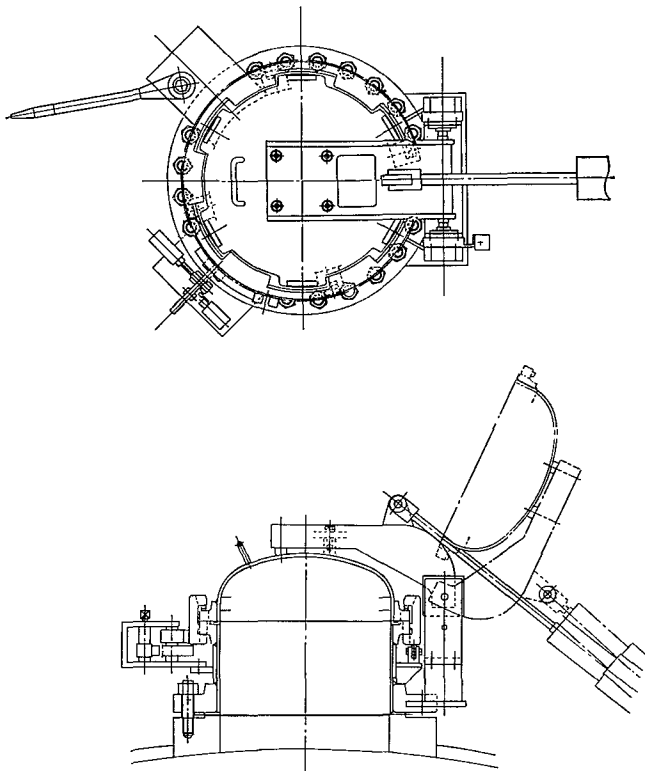
PVC 産業発展の初期の段階においては、グラスチール製重合機が多用され、ポリマー付着防止により結果が得られたが、缶体の大型化やクラッド鋼板の品質安定化などの結果、現在の商業規模の PVC 懸濁重合機はほとんどステンレス・クラッド鋼にて製作されるようになった。重合機内部表面へのポリマーの付着を防止するため、一般的によく知られているステンレス材の表面仕上げであるバフ研磨にかわり、浸漬法による電解研磨を施行した場合、PVC ポリマーの付着しにくさや付着したポリマーの除去を容易にする効果が顕著であり、PVC 重合機におけるステンレス材の表面仕上げとして評価されている。

電解研磨は缶体製作時に施行するのが望ましいが、既設缶の現地電解研磨の施行も可能である。<sup>1)</sup>

第 2 図はバフ研磨と電解研磨についての表面アラサ測定記録である。表面アラサの尺度として、アラサ測定結果から山と谷の寸法差を読みとり  $R_{max}$  として用いることが多いが、両者においてこの  $R_{max}$  に大きな差異は認められないといえる。バフ研磨の場合にみる無数のシャープな山谷が電解研磨においては、ほとんど取り除かれ全体に大きなうねり状のプロファイルを呈していることがポリマー付着防止に効果的と考えられる。従ってポリマー付着防止の目的で電解研磨を施行する場合の表面状態を  $R_{max}$  の値で規定するのは必ずしも適切ではなく、電解研磨面へのポリマー付着のメカニズム解明と併せて今後の検討課題である。

#### 2. 1. 2 内装部品の形状

PVC 重合機において攪拌翼の型式や回転数およびバッフルの型式やバッフル効果など、いわゆる攪拌条件の適切な選択は重合機内の反応環境を良好にし、ポリマーの品質を一定に保つ上で重要である。さらにこれらの内装部品の型式や構造の決定に際しポリマー付着防止の配慮も必要である。特に攪拌翼は強度面や組立部品としての要件から構造が複雑になり、コーナー部のシャープエッジや隙間がポリマーの付着・成長の起点になりやすく、コーナーの丸みをもたせたり、凹部や隙間を可能なかぎり少なくする工夫



第3図 クイックオープン式マンホール  
Fig. 3 Quik opening manhole

が必要である。また、攪拌による内容液の流動が劣る部分についてもポリマーの付着・成長を促進しやすく、攪拌条件の最適化と共に攪拌翼やバフルの構造について内容液の流動化という面からの構造検討が必要である。

### 2. 1. 3 缶内クリーニング

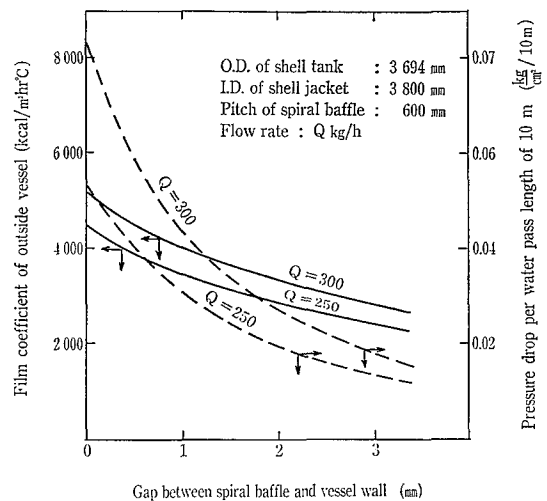
付着ポリマーの除去のために高圧水による洗浄が有効であるが、洗浄装置の缶内への挿入や缶内でのハンドリングの面で、第1図にみるような下部挿入式攪拌機付重合機が、一般的な上部挿入式より有利な場合が多い。

洗浄装置の挿入や点検作業用としてのマンホール蓋は開閉頻度や重量の面から第3図のようなクイックオープン式マンホールが使用されるケースが多い。通常のマンホール蓋に比し、ボルト着脱作業がなくなり、作業時間短縮に効果的である。

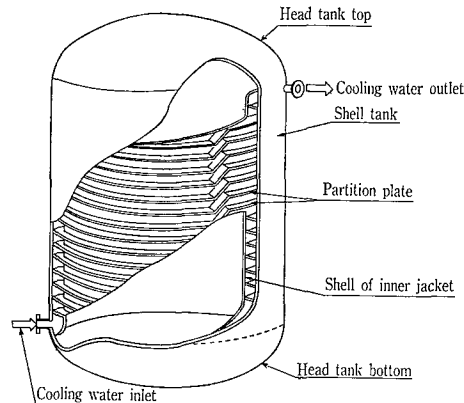
### 2. 2 ジャケット構造の改善

PVC重合機のジャケットとしては、冷却水による冷却性能を上げることを目的として、スパイラル邪魔板付ジャケットの使用が一般的である。スパイラル邪魔板は本体またはジャケットに溶接されるが、他端は工作上的都合で溶接は行われなため若干の隙間があり得るが、必要により隙間を小さくすることは可能である。第4図は隙間と外面境膜伝熱係数の関係を示すものである。

重合機本体は重合にあずかる内容物を包含する压力容器であり、内容液に直接接していることより熱伝導の直接の媒体になっている。このため本体板厚を減少させることは反応熱除去性能の改善に役立つ。使用板厚の決定においては「高圧ガス特定設備検査規則」のような法規や「ASME



第4図 スパイラルバフル隙間の影響  
Fig. 4 Influence of the gap between spiral baffle and vessel wall

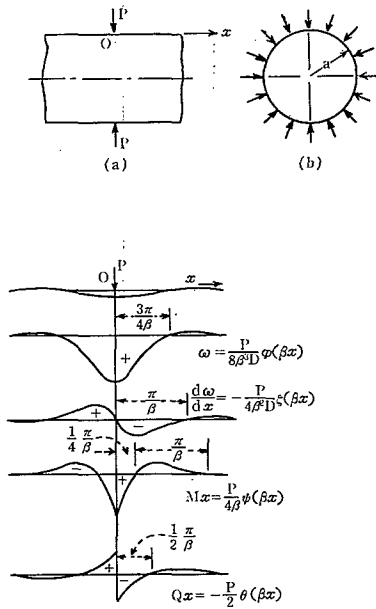


第5図 内部ジャケット付容器  
Fig. 5 Vessel with inner jacket

Sec VIII」などの压力容器としてのコードに規定された計算式により算出されるが、使用材料に関しても規定の範囲で可能な限り抗張力の高い材料を使用するのが使用板厚を薄くする手段である。最近では「JIS G3115・SPV50 压力容器用鋼板」においても機械強度を低下させずクラック材（ステンレス鋼）の良好なマイクロ組織を有するロールラッド鋼が製作できるようになった。製缶溶接作業においても予熱・後熱などの熱管理や溶加材の適切な選定により、安定した品質の缶体の製作が可能になった。

法規・コードに従って使用板厚を決定する場合は、使用材料の選択の範囲での板厚減少効果を期待することができるが、新しい構造により伝熱面厚を飛躍的に減少させることができる。第5図はその実施例である。本来の压力容器壁（本体胴）の内部に別のスパイラル状の仕切りを有する冷却水用の圧力室を設け、内部ジャケットとしたものである。

重合機の内圧は本体胴と内部ジャケット胴で分担し、スリット仕切板による補強効果のため、伝熱面としての内部ジャケット胴の使用板厚は極めて薄くできる。スパイラル状仕切板は冷却水の流速を増し伝熱性能向上に寄与してい



第6図 円形胴の円形断面一様分布荷重によるたわみおよび曲げモーメント  
 Fig. 6 Deformation and bending moment of a cylindrical shell by a load uniformly distributed along a circular section

る。本実施例にみる内部ジャケットを有する重合機は、使用板厚算出において、一般的な式が適用できない。一例として第7図にみる内部ジャケットについて内圧が作用する場合の発生応力をチモシェンコの式<sup>2)</sup>などを用いて算出を試みる。

本体内部に内圧が作用するとき内部ジャケット胴、仕切板および本体胴はそれぞれ弾性体として変形し、互いに力を及ぼしながらバランスを保っていると考え。

(1) 本体胴には仕切板を介して周上に一様分布荷重

$F_T$  kg/mm が作用するとき、仕切板取付部の本体胴の半径方向変位  $w$  mm と長手方向モーメント  $M_\ell$  kg $\cdot$ mm, 周方向モーメント  $M_\phi$  kg $\cdot$ mm および周方向軸力  $N_\phi$  kg は下記となる。

$$w = \frac{F_T}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x) \quad (4)$$

$$M_\ell = \frac{F_T}{4\beta} \psi(\beta x) \quad (5)$$

$$M_\phi = \nu M_\ell \quad (6)$$

$$N_\phi = -\frac{E t_T w}{a_T} \quad (7)$$

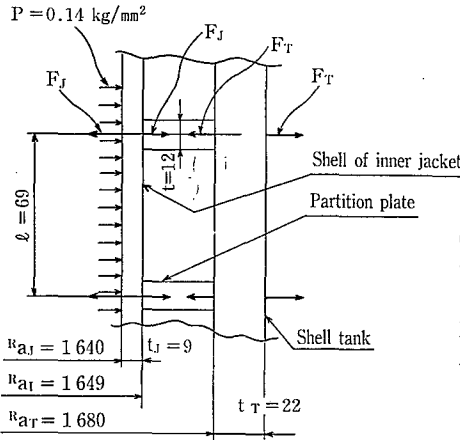
ここで

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{a_T^2 \cdot t_T^2}}$$

$$D = \frac{E t_T^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$$



Characteristics  
 Youngs modulus  
 $E = 1.95 \times 10^4$  kg/mm<sup>2</sup>  
 Poisson's ratio  $\nu = 0.3$   
 Allowable stress  
 $\sigma_{al} = 12.5$  kg/mm<sup>2</sup>  
 (SM50B)

第7図 内部ジャケット構造の荷重状態  
 Fig. 7 State of load for the inner jacket construction

第6図は円形胴の円形断面一様分布荷重によるたわみおよび曲げモーメントを示す。

仕切板は等間隔で配置され、それぞれに一様分布荷重が作用していると考えられるため、対称とする仕切板取付部には上下の仕切板に作用する荷重が距離  $x$  mm に応じて重ね合わされることになる。このことより式(4), (5), (6) および(7)を利用して、第7図の数値を代入して、それぞれ未知数は  $F_T$  の関数としてあらわされる。

$$w = 0.101 F_T \quad (8)$$

$$M_\ell = 58.8 F_T \quad (9)$$

$$M_\phi = 17.64 F_T \quad (10)$$

$$N_\phi = -25.88 F_T \quad (11)$$

このとき、 $\sigma_\ell$  kg/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_\phi$  kg/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_{\phi m}$  kg/mm<sup>2</sup> をそれぞれ長手方向曲げ応力、周方向曲げ応力、周方向膜応力とすると

$$\sigma_\ell = \frac{M_\ell}{Z} = \frac{M_\ell}{t_T^2/6} \quad (12)$$

$$\sigma_\phi = \frac{M_\phi}{Z} = \frac{M_\phi}{t_T^2/6} \quad (13)$$

$$\sigma_{\phi m} = \frac{N_\phi}{t_T} \quad (14)$$

となる。

(2) 仕切板について

仕切板は末端条件として両端開放の円筒と考えられ、本体胴および内部ジャケットよりの反力  $F_T$  および  $F_J$  による一様分布荷重を受け弾性変形してつり合っている。このとき中心からの距離  $r$  における半径方向の変位  $w(r)$  は次のとおりとなる。

$$w(r) = -\nu \varepsilon_z r + \frac{H \nu}{E(a_T^2 - a_I^2)} \left\{ \frac{F_J}{t} a_I^2 \left[ (1-2\nu)r + \frac{a_T^2}{r} \right] - \frac{F_T}{t} a_T^2 \left[ (1-2\nu)r + \frac{a_I^2}{r} \right] \right\} \quad (15)$$

ここで  $\varepsilon_z$  は軸方向ひずみで下記となる。

$$\varepsilon_z = \frac{-2\nu}{E(a_T^2 - a_I^2)} \left( \frac{F_J}{t} a_I^2 - \frac{F_T}{t} a_T^2 \right)$$

$2\alpha$	$\chi_1(2\alpha)$	$\chi_2(2\alpha)$	$\chi_3(2\alpha)$
0.2	5.000	0.0068	0.100
0.4	2.502	0.0268	0.200
0.6	1.674	0.0601	0.300
0.8	1.267	0.1065	0.400
1.0	1.033	0.1670	0.500
1.2	0.890	0.2370	0.596
1.4	0.803	0.3170	0.689
1.6	0.755	0.4080	0.775
1.8	0.735	0.5050	0.855
2.0	0.738	0.6000	0.925
2.5	0.802	0.8220	1.045
3.0	0.893	0.9770	1.090
3.5	0.966	1.0500	1.085
4.0	1.005	1.0580	1.050
4.5	1.017	1.0400	1.027
5.0	1.017	1.0300	1.008

第2表  
関数 $\chi_1(2\alpha)$ ,  $\chi_2(2\alpha)$ ,  
 $\chi_3(2\alpha)$  の値  
Table 2  
Value of the function  
 $\chi_1(2\alpha)$ ,  $\chi_2(2\alpha)$  and  
 $\chi_3(2\alpha)$

上式を用い、内径および外径における変位  $w_i$  および  $w_r$  は、 $r=a_i$  および  $a_r$  を代入して求めることができる。

また、この時の発生応力として半径方向応力の  $\sigma_r$  kg/mm<sup>2</sup>、および周方向応力  $\sigma_\theta$  kg/mm<sup>2</sup> は

$$\sigma_r = -\frac{k^2/R^2 - 1}{k^2 - 1} \cdot \frac{F_J}{t} - \frac{k^2 - k^2/R^2}{k^2 - 1} \cdot \frac{F_T}{t} \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{k^2/R^2 + 1}{k^2 - 1} \cdot \frac{F_J}{t} - \frac{k^2 + k^2/R^2}{k^2 - 1} \cdot \frac{F_T}{t} \quad (17)$$

ただし

$$k = a_r/a_i, \quad R = r/a_i$$

とする。

### (3) 内部ジャケットについて

内部ジャケットは内圧を受けた円筒胴であるが外側に等ピッチでリング状の仕切板を有し、本体胴と共に圧力に対する補強となっている。

圧力P、仕切板取付部における反力  $F_J$  および変位  $w_J$  とすると

$$w_J = w_i \quad (18)$$

$$F_J \beta \left[ \chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right] = P - \frac{Et_J}{a_J^2} w_J \quad (19)$$

$$M_\ell = \frac{1}{2\beta^2} \left( P - \frac{Et_J}{a_J^2} w_J \right) \chi_2(2\alpha) \quad (20)$$

$$M_\varphi = \nu M_\ell \quad (21)$$

ただし  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  は  $2\alpha = \frac{\ell}{\sqrt{a_J \cdot t_J}} \sqrt{3(1-\nu^2)}$  の関数で

第2表による

また  $\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{a_J^2 t_J^2}}$  である。

$\sigma_\ell$  kg/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_\varphi$  kg/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_m$  kg/mm<sup>2</sup> はそれぞれ長手方向曲げ応力、周方向曲げ応力、膜応力とすると

$$\sigma_\ell = \frac{M_\ell}{Z} = \frac{M_\ell}{t_J^2/6} \quad (22)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{M_\varphi}{Z} = \frac{\nu M_\ell}{t_J^2/6} \quad (23)$$

$$\sigma_m = E \frac{w_J}{a_J} \quad (24)$$

となる。

同様に仕切板中央部においては

$$M_\ell = -2D\beta^2 (C_1 \cos\beta x \cosh\beta x - C_4 \sin\beta x \sinh\beta x) \quad (2)$$

$$M_\varphi = \nu M_\ell \quad (2)$$

$$w = -w_J - \frac{a_J^2}{Eh} \left( P - \frac{Et_J}{a_J} w_J \right) + C_1 \sin\beta x \sinh\beta x + C_4 \cos\beta x \cosh\beta x \quad (2)$$

となり、発生応力はそれぞれ

$$\sigma_\ell = \frac{M_\ell}{Z} = \frac{M_\ell}{t_J^2/6} \quad (2)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{M_\varphi}{Z} = \frac{\nu M_\ell}{t_J^2/6} \quad (2)$$

$$\sigma_m = E \cdot \frac{w_J}{a_J} \quad (3)$$

ただし

$$C_1 = \frac{a_J^2}{Et_J} \left( P - \frac{Et_J}{a_J} w_J \right) \frac{\sin\alpha \cosh\alpha - \cos\alpha \sinh\alpha}{\cosh\alpha \sinh\alpha + \sin\alpha \cos\alpha}$$

$$C_2 = \frac{a^2}{Et_J} \left( P - \frac{Et_J}{a_J} w_J \right) \frac{\cos\alpha \cosh\alpha + \sin\alpha \sinh\alpha}{\cosh\alpha \sinh\alpha + \sin\alpha \cos\alpha}$$

式(8), (16), (19)を連立させ下記が得られる、各材の応力算出に用いられる。

$$F_J = 7.02 \text{ kg/mm}, \quad w_J = 0.56 \text{ mm}$$

$$F_T = 5.48 \text{ kg/mm}, \quad w_T = 0.55 \text{ mm}$$

### (4) 応力の算出

本体胴、仕切板、内部ジャケット胴の発生応力を算出し第3表にまとめる。なお本表中の胴長手方向膜応力  $\sigma_m$  kg/mm<sup>2</sup> は

$$\sigma_m = \frac{\pi a_T^2 \cdot P}{\pi \{ (2a_T + t_T)t_T + 2(a_J + t_J)t_J \}} \quad (6)$$

として求めた。応力の詳細な算出方法として、有限要素法(FEM)による応力解析が有効であるが、基本設計段階における使用板厚の決定やそれに伴うU値の算出用としては、本方法にて十分に目的を達すると考えられる。

コンベンショナルジャケットを使用する場合、ここでいう本体胴が伝熱面積となるが「高圧ガス」の計算式によればこのときの応力は

$$\sigma = \frac{PDi + 1.2Pt}{2t \cdot \eta} = \frac{14 \times 3360 + 1.2 \times 14 \times 22}{2 \times 22 \times 1.0} = 10.8 \text{ kg/mm}$$

となり本体胴(伝熱面)の板厚は22mmが使用できる。従って、内部ジャケットを使用する場合、伝熱面の使用板厚は22mmから9mmと大幅に減少できることになりU値の改善効果は大きい。

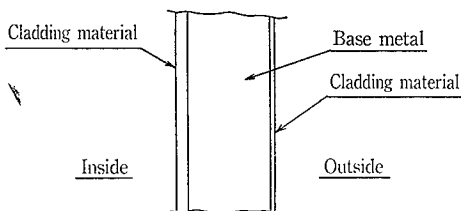
## 2.3 スケール、発錆防止

本体外面に冷却水によるスケールや発錆があれば伝熱性が妨げられ、汚れ係数が増加し、使用年数経過に伴って伝熱性能低下の原因のひとつになる。クラッド鋼は経済性のほか耐応力腐食割れ性や熱的特性など技術面のメリットから多く用いられる。しかし、ジャケット側が炭素鋼(クラッド鋼の母材)であるため冷却水による汚れの改善が要になる。

第 3 表 内部ジャケットの応力表  
Table 3 Stress table of inner jacket

	Longitudinal stress kg/mm <sup>2</sup>		Circumferential stress kg/mm <sup>2</sup>	
	Attached portion of partition plate	Middle portion between partition plates	Attached portion of partition plate	Middle portion between partition plates
Shell tank				
Bending	3.99 <sup>(12)</sup>	—	1.20 <sup>(13)</sup>	—
Membrane	3.80 <sup>(31)</sup>	3.80 <sup>(31)</sup>	6.45 <sup>(14)</sup>	—
Total	7.99	—	7.65	—
Shell inner jacket				
Bending	3.09 <sup>(22)</sup>	1.52 <sup>(28)</sup>	0.93 <sup>(23)</sup>	0.46 <sup>(29)</sup>
Membrane	3.80 <sup>(31)</sup>	3.80 <sup>(31)</sup>	6.66 <sup>(24)</sup>	6.68 <sup>(30)</sup>
Total	6.89	5.32	7.59	7.14

Note: Equation No. for stress calculation shown in ( ).



第 8 図 3 層クラッド鋼  
Fig. 8 3 layer clad steel

### 2. 3. 1 3 層クラッド鋼の使用

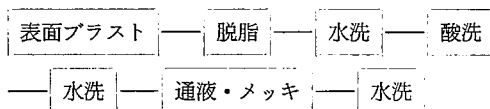
3 層クラッド鋼は第 8 図に示すように母材の両側をステンレス鋼としてロール圧延して製作したものである。内面側の合せ材は耐食性を保たせるため 1.5~3 mm 程度の厚さを必要とする場合が多いが、外面側の合せ材はその目的より厚さは必要とせず 0.5~1 mm 程度が用いられる。

3 層クラッド鋼は PVC 重合機などの伝熱性低下を防ぐのに有効であるが、ステンレス鋼は炭素鋼と比較して熱導性が劣るため、合せ材（ステンレス鋼）はできるかぎり薄くするのが伝熱性の改善に役立つ。

### 2. 3. 2 メッキの施行

冷却水の発錆を長期にわたって防止する方法として前項の 3 層クラッド鋼の採用のほかに、ジャケット内面にメッキを施すことが有効である。欠陥のない強固なメッキ層を得るため無電解メッキ法による Ni メッキが挙げられる。

Ni イオンを含むメッキ液に次亜りん酸ナトリウムなどの還元剤を混入させ 90~100 °C に温度管理しながら液を循環することにより金属 Ni が沈着する。<sup>3)</sup> 無電解メッキは複雑な表面形状に対しても通液のみで均一な膜厚が得られ、また、通電などの操作が不要のため、完成済のジャケット内部へのメッキ施行に適する方法である。メッキ施行工程は



であるが、丈夫なメッキ層を得るため前処理（素地調整）が重要であるため、既設缶へのメッキ施行には難点がある。

第 4 表 伝熱係数比較  
Table 4 Comparison of heat transfer coefficient

	Conventional type	Improved type (A)	Improved type (B)
Description	Shell tank with spiral baffle jacket	Shell tank of high tensile strength steel and thin cladding	Inner jacket with Ni-plating
Material	(SUS+SPV36) Clad steel	(SUS+SPV50+SUS) 3 layer clad steel	(SUS+SPV36) Clad steel
Thickness (mm)	25(3+22)	19(1.5+17+0.5)	9(2+7)
Corrosion allowance (mm)	1.0	0	0
Fouling resistance on inside of shell : $h_{is}$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	∞	∞	∞
Film coefficient of fluid inside shell : $h_i$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	2 850	2 850	2 850
Resistance of shell wall : $h_w$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	1 400	1 800	3 310
Film coefficient of fluid outside shell : $h_o$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	4 000	4 000	4 000
Fouling resistance on outside of shell : $h_{os}$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	2 500	10 000	10 000
Overall heat transfer coefficient : $U$ kcal/m <sup>2</sup> hr°C	583	796	997

本目的のメッキ膜厚は 30 μ 程度で充分と考えられるが、通液時間の管理により所定の膜厚を得ることができる。

### 3. 総括伝熱係数の試算

前項まで伝熱性能改善の各種方法について述べた。実際の適用にあたっては種々の制約条件を考慮しながら取捨選択していくことになるが、100 m<sup>3</sup> の缶体における伝熱性能改善効果をみるため

- ・従来型
- ・高抗張力クラッド鋼の使用
- ・内部ジャケットの採用

の 3 つのケースについて U 値を算出して第 4 表にまとめた。

### むすび

PVC 重合機の除熱性能の改善方法の各項目の解説を通じて高効率化へのアプローチを試みた。内部ジャケット方式は伝熱面の板厚減少効果が大きく、伝熱性改善に効果があるが、強度設計に特別な取り扱いを必要とするため、発生応力の算出方法の考え方について簡単な解説を加えた。

伝熱性の改善は PVC 重合機のみならず、反応機全般に共通の問題であり、これらに対しても参考になると考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 神鋼フアウドラ-技報, Vol. 24, No.2 (1980), p. 8~p. 13
- 2) S. Timoschenko "Theory of Plates and Shells" McGraw-Hill (1940) Chapter XI.
- 3) 神戸徳蔵: 「無電解めっき」(1985) 槇書店