

水蒸気加熱とリボイラー加熱の特性

吉田 英人*, 頼実 正弘*

蒸留塔の水蒸気加熱とリボイラー加熱の両者の場合における省エネルギー特性を比較検討した。計算手法として Ponchon-Savarit 法を用いた。原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底加熱量および全段数が等しい条件で塔底液組成と理論段数を比較する場合と, 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および全段数が等しい条件で塔底加熱量を比較検討した。その結果, 塔底液が水以外の成分をかなり含んでいる場合は, 水蒸気加熱方式がリボイラー加熱方式よりもかなりの省エネルギー効果があることが明らかになった。

1. 緒言

代表的な蒸留計算法として, McCabe-Thiele 法, Ponchon-Savarit 法, また電算機の利用に適しているニュートンラプソン法⁵⁾, マトリックス法⁶⁾, 緩和法⁴⁾等がある。McCabe-Thiele 法は便利な方法であるが, 塔内での気液のモル流量は一定としている。このことは両成分のモル蒸発潜熱が等しいこと, 混合熱がないことなどを前提としている。ベンゾール〜トリオール系などではこの前提は大体満足されるが, たとえば水〜アンモニア系などでは, モル蒸発潜熱は大差があつて混合熱も無視できない。したがって McCabe-Thiele 法を用いるとかなりの誤差を生ずる。

一方, エンタルピー〜組成線図を用いる Ponchon-Savarit 法では, 上述のような前提を必要とせず, しかもリボイラーやコンデンサーの出・入熱量が同時に求まるという長所がある。

本報ではアルコールの共沸蒸留塔等で利用されている水蒸気直接吹き込み方法と, 一般に使用されているリボイラーを用いた間接加熱方式の両者の場合における省エネルギー特性を比較検討した。

計算手法として Ponchon-Savarit 法^{1), 3)}を用いた。エタノール〜水系の水蒸気直接加熱およびリボイラー加熱に対して原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底加熱量および全段数が等しい条件で塔底液組成と理論段数を比較する場合と, 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および全段数が等しい条件で塔底加

熱量を比較する場合の両者について省エネルギー特性を検討し若干の興味ある知見を得たので報告する。

2. 計算結果および考察

計算した水蒸気直接加熱方式およびリボイラー間接加熱方式の説明図を Fig. 1 に示す。

扱った系はエタノール〜水系^{1), 2)}であり, 常圧条件下 (1 atm) で分離操作を行う場合を対象とした。計算には, 物質収支および熱収支の両者を考慮した Ponchon-Savarit 法³⁾を用いて行った。水蒸気加熱とリボイラー加熱との特性を比較するに際し, Case 1 では原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底加熱量の等しい条件で理論段数および塔底組成を計算した。

また Case 2 では原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成, 理論段数が等しい条件で塔底加熱量を計算した。

Case 1; 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底加熱量が等しい場合 (Fig. 1 の(A), (B) の比較)

この場合の計算条件, 結果の詳細を Fig. 1 の(A), (B), および Table 1 の(A), (B) に示す。また Ponchon-Savarit 法を用いたエンタルピー〜組成線図上の計算過程を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 の(A) の場合

原料の状態として供給流量 $F=1$ (kg/hr), エタノールの重量分率 $x_F=0.422$, エンタルピーを $h_F=110$ (kcal/kg) とし, 塔頂エタノール分率 $x_D=0.9$, 塔底エタノール分率 $x_B=0.1$ と

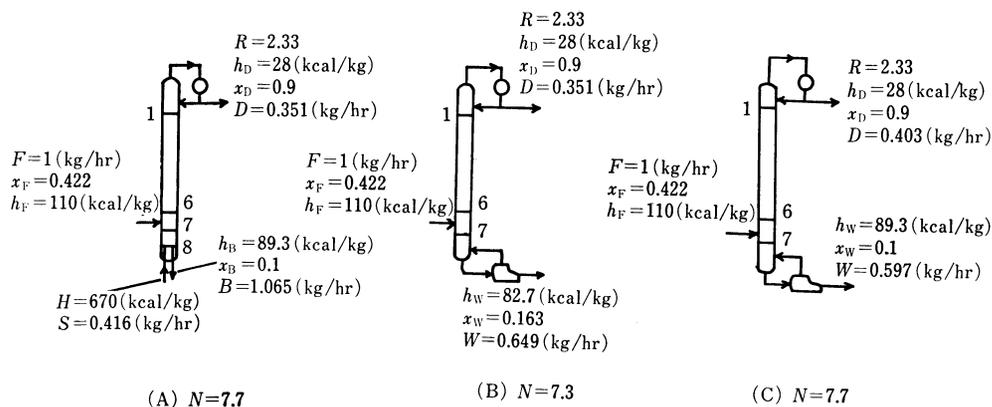


Fig. 1 Three Systems Calculated (A: Open steam; B, C: Reboiler)

昭和 57 年 5 月 13 日受理

* 広島大学工学部 3 類-化学系 (724 東広島市西条町大字下見)

Table 1 Conditions and Results for Calculation

System	(A) : Open Steam Method	(B) : Reboiler Method	(C) : Reboiler Method
Conditions and Results			
Feed Composition x_F (kg ethanol/kg) h_F (kcal/kg) F (kg/hr)	0.422 110.0 1	0.422 110.0 1	0.422 110.0 1
Reflux Ratio R (-)	2.33	2.33	2.33
Number of Theoretical Plates N (-)	7.7	7.3	7.7
Distillate Composition x_D (kg ethanol/kg) h_D (kcal/kg) D (kg/hr)	0.9 28.0 0.351	0.9 28.0 0.351	0.9 28.0 0.403
Heat Required at Bottom Q_W (kcal/hr)	236.7	236.7	287.9
Bottom Composition x_W (kg ethanol/kg) h_W (kcal/kg) W (kg/hr)	0.1 89.3 1.065	0.163 82.7 0.649	0.1 89.3 0.597
Steam Composition x_S (kg ethanol/kg) h_S (kcal/kg) S (kg/hr)	0.0 670.0 0.416	—	—

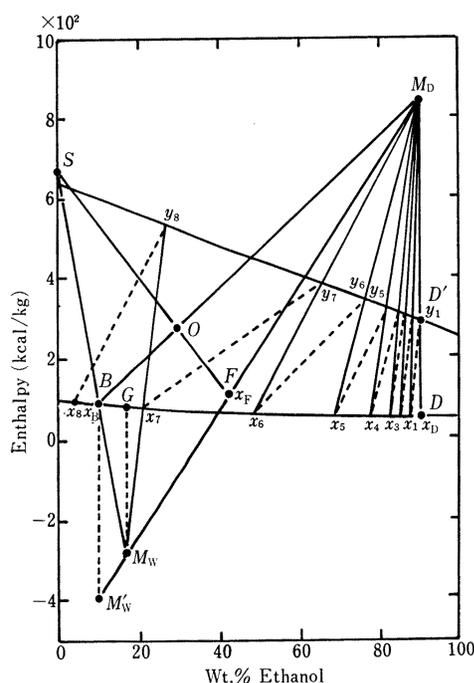


Fig. 2 Enthalpy-Composition Diagram for the Ethanol-Water System at 1 atm

する。また使用水蒸気のエンタルピーは $h_S=670$ (kcal/kg) であり、水蒸気使用量は供給エタノール 1 kg 当たり 0.416 kg とし、還流比は 2.33 とする。原料、供給水蒸気、塔頂液、塔底液は Fig. 2 の点 F, S, D, B で示される。

還流比が 2.33 より Fig. 2 の点 M_D は次式を満足する。

$$\frac{DM_D}{DD'} = 1 + R \quad (1)$$

ただし上式で R は還流比を表す。また点 M_D, B と点 F, S の

交点を O とすると、この原理より次式が満足される。

$$\frac{\overline{OS}}{\overline{OF}} = \frac{0.461}{1} \quad (2)$$

塔頂、塔底流量 D, B は次式を利用して求めることができる。

$$\begin{aligned} F + S &= D + B, \quad Fx_F = Dx_D + Bx_B \text{ より} \\ 1 + 0.416 &= D + B, \quad 0.422 = 0.9D + 0.1B \\ \therefore D &= 0.351 \text{ (kg/hr)}, \quad B = 1.065 \text{ (kg/hr)} \end{aligned} \quad (3)$$

また直線 BS と直線 $M_D F$ の延長上の交点を M_W とすると気液平衡および操作線を利用して理論段数が求められる。Case (A) の場合 $N \approx 7.7$ 段となった。

Fig. 2 の (B) の場合

この場合はリボイラーを用いた間接加熱方式である。Case (A) と等しい塔底加熱量を加えた場合、塔頂および塔底流量 D, W は次式を利用して求めることができる。

$$\begin{aligned} F &= D + W, \quad Fx_F = Dx_D + Wx_W \text{ より} \\ 1 &= D + W, \quad 0.422 = 0.9D + 0.163W \\ \text{よって } D &= 0.351 \text{ (kg/hr)}, \quad W = 0.649 \text{ (kg/hr)} \end{aligned} \quad (4)$$

また塔底の加熱量 Q_W は Ponchon-Savarit 法の原理⁹⁾を利用して次の様に求まる。

$$\begin{aligned} Q_W &= W(h_G - h_{M_W}) = 0.649(82.7 + 282) \\ &= 236.7 \text{ (kcal/hr)} \end{aligned} \quad (5)$$

また Case (B) の場合作図を利用することにより理論段数として $N \approx 7.3$ 段程度となることがわかる。

Case (A), (B) を比較することにより、原料組成、塔頂組成、還流比、塔底加熱量が等しい場合には、水蒸気直接加熱方式の方が理論段数は多くいるが、缶出液中のエタノール分率が低くなるという利点がある。

Case 2; 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および理論段数が等しい場合 (Fig. 1 の (A), (C) の比較)

この場合は Case(A) と (C) とを比較することになるが, Case(A) についてはさきに説明したので省略する。

Fig. 2 の (C) の場合

この場合は塔頂, 塔底の液組成は Case(A) の場合と同一で $x_D=0.9$, $x_W=0.1$ であるから次式より 留出および 缶出流量を求めることができる。

$$\begin{aligned} F &= D+W, Fx_F = Dx_D + Wx_W \text{ より} \\ 1 &= D+W, 0.422 = 0.9D + 0.1W \\ \therefore D &= 0.403(\text{kg/hr}), W = 0.597(\text{kg/hr}) \quad (6) \end{aligned}$$

この場合は Fig. 2 において M'_W, F, M_D が一直線上に存在することになる。よって塔底リボイラーの加熱量は次式を用いて計算することができる。

$$\begin{aligned} Q_W &= W(h_B - h_{M'_W}) = 0.597(89.3 + 393) \\ &= 287.9(\text{kcal/hr}) \quad (7) \end{aligned}$$

よって Case(A) の水蒸気直接加熱方式と比較して塔底加熱量は多く必要となる。

$$\begin{aligned} \text{Case(A)} \quad Q_W &= 236.7(\text{kcal/hr}), \\ \text{Case(C)} \quad Q_W &= 287.9(\text{kcal/hr}) \\ \frac{Q_W(\text{Case A})}{Q_W(\text{Case C})} &= \frac{236.7}{287.9} = 0.82 \quad (8) \end{aligned}$$

すなわち原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および理論段数が等しい場合においては, 水蒸気加熱方式の方がリボイラー加熱方式よりも塔底加熱量を節約することができる。その程度は本報での具体例の場合約 18% の省エネルギーとなることがわか。

なお Ponchon-Savarit 法を利用することにより, 塔底加熱量の比較を詳細に論ずることができる。

つまり Case 2 の場合すなわち原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および理論段数が等しい場合の塔底加熱量の比較は一般には次式を評価することにより計算できる。

$$\frac{Q_W(\text{Case A})}{Q_W(\text{Case C})} = \frac{GM'_W}{BM'_W} \quad (9)$$

Eq. (9) より省エネルギーの程度は, 塔底缶出液中に水以外の物質 (この場合はエタノール) が多く含まれていればいほど効果が大きくなるといえる。

一方, 塔底缶出液がほとんど水の場合は, 点 M_W と点 M'_W の両者が接近し, かつエタノールの重量分率の 0 の近傍に存在する様になるため, Case(A) と Case(C) で大差は生じないことになる。

以上の考察より塔底の缶出液中に水以外の物質が多く存在する場合は, 水蒸気直接加熱方式の方がリボイラー間接加熱方式

よりも熱的に省エネルギーの効果が大きいことがわかる。

3. 結 言

水蒸気直接加熱方式およびリボイラーによる間接加熱方式の省エネルギー効果について Ponchon-Savarit 法を用いて検討し次の知見が得られた。

(1) 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底加熱量が等しい場合には, 水蒸気直接加熱方式の方が理論段数は多くいるが, 缶出液中のエタノール分率が低くなる。

(2) 原料組成, 塔頂組成, 還流比, 塔底組成および理論段数が等しい場合には, 水蒸気直接加熱方式の方が熱的に省エネルギーの効果が大きい。

(3) Case 2 の場合で特に缶出液中のエタノール濃度が高い場合, いいかえると水以外の物質濃度が大きい場合は, 水蒸気直接加熱方式による省エネルギーの効果はより大きくなる。

本研究の一部は昭和 57 年度文部省科学研究費, 奨励研究 (A), 課題番号 57750801 によった。ここに付記して謝意を表します。

Nomenclature

B : Flow rate of bottom in Fig. 1-(A)	(kg/hr)
D : Flow rate of distillate	(kg/hr)
F : Flow rate of feed	(kg/hr)
H, h : Enthalpy of vapor and liquid	(kcal/kg)
N : Number of minimum theoretical plate	(-)
Q_W : Heat required at bottom	(kcal/hr)
R : Reflux ratio	(-)
S : Flow rate of open steam	(kg/hr)
x : Weight fraction of Ethanol	(-)
W : Flow rate of bottom	(kg/hr)

Subscripts

F	= refers to feed
D	= refers to distillate
W	= refers to bottom product
S	= refers to open steam

References

- 1) Brown, G. G., "Unit Operation", 340 (1951), John Wiley & Sons.
- 2) Ezaki, M., "Enthalpy Sosei Senzu", 85 (1968), Kyouritsu Shutsupan.
- 3) Kamei, S., "Kagaku Kikai no Riron to Keisan", 212 (1969), Sangyotosho.
- 4) Rose, A., *Ind. Eng. Chem.*, **50**, 737 (1958).
- 5) Tierney, J. W., Bruno, J. A., *AIChE J.*, **13**, 556 (1967).
- 6) Wang, J. C., Henke, G. E., "Hydrocarbon Process.", 45, 155 (1966).

Summary

Heating Characteristics of Open Steam and Reboiler

Hideto YOSHIDA* and Masahiro YORIZANE*

The heat consumption of distillation column is considered for both the open steam and reboiler systems. The Ponchon-Savarit method is used for calculations.

Cases (A), (B) in **Fig. 1** show the calculated results of the bottoms product composition and the theoretical number of plates when feed composition, distillate composition, reflux ratio, heat consumption, and the total number of plates are the same. Cases (A), (C) in **Fig. 1** show the calculated results of heat consumption when feed composition, distillate composition, reflux ratio, bottoms product composition, and the total num-

ber of plates are the same. The enthalpy-composition diagram used is shown in **Fig. 2**. The calculated results are summarized in **Table 1**.

Comparing the results of cases (A), (B) in **Fig. 1**, it is found that the open steam method requires much more theoretical number of plates, but the ethanol content in the bottoms product becomes smaller. Comparing the results of cases (A), (C) in **Fig. 1**, it is found also that less heat is required by heating with open steam than with a reboiler. This heat saving effect becomes greater as the ethanol content in the bottoms product becomes larger.

* Faculty of Engineering, Hiroshima University (Saijyo Shitami, Higashi-hiroshima 724)

Keywords

Distillation, Open steam, Reboiler, Ponchon Savarit method