

■ 論 説 ■

化学プロセスの省エネルギー設計法の一考察

A Design Method of Chemical Processes for Energy Saving

高松 武一郎*

Takeichiro Takamatsu



はじめに

化学プロセスにおけるエネルギーの有効利用あるいはエネルギーの有効利用を評価に十分組み入れた化学プロセスの設計、操作がここ数年来強く要望されてきており、エネルギー解析、有効エネルギー解析などに関する研究も数多く発表されてきている^{1)~3)}。しかしながら省エネルギーを第1の目的としたプロセス設計、操作の方法についての研究はそれ程多くはなく、最近になって熱交換器、蒸留塔システムについていくつかの研究がみられるようになってきたにすぎない^{3), 4), 5)}。昔のプロセスの設計、操作はどちらかといえば建設費のような固定経費を第一義的に考えていたとはいえ、最経済的設計、操作の概念のなかにエネルギーの有効利用は当然考慮されていたといわなければならない。例えば、流体輸送の最適管径、蒸留塔の最適還流比などの存在の問題はまさにエネルギーの有効利用を経済性という評価を通して考えていることになる。それでは何故エネルギー価格の急騰以来省エネルギー技術の更なる展開が要望されてきたのであろうか。それは、エネルギー価格の低廉な時代に最経済的に決定された設計、操作の条件はエネルギー価格が大きく変動した現在もはや最経済的ではなくなった筈であろうし、昔経済性の点から取り上げられなかったプロセスの設計や操作条件が現在では十分その存在価値が出てくることも考えられるであろうし、より省エネルギー的な、経済性の高い新しいプロセスの絶ゆまざる追求が必要であるからである。また世界的に安定成長時代に入ってきて、より精緻な最適性、省エネルギー性の追求により生産を保持せざるを得ない社会環境になってきたことも化学プロセスのエネルギーの有効利用に関連する技術、その基礎となる工学の発展が期待される理由である。

上記の如くエネルギー問題は化学プロセスにとって極めて重要な問題であるが、エネルギーの有効利用を考える対象の大きさを問わず、いくら省エネルギーになったとしても、もしその対象がその周辺の状況のなかで不経済になるとしたらその省エネルギー対策は実行不可能なことになるであろう。また経済性のみならず環境汚染性、安全性あるいは種々の変動に対するプロセスの弾力性などの評価の面からも受け入れられるエネルギー問題の対策でなければならず、結局種々の多目的評価のなかの重要な評価の一つとしてエネルギー問題を認識することが重要である。

さて上述の認識のもとでの化学プロセスの省エネルギー設計に関する2, 3の考察を述べることにする。

化学プロセス及びその関連システム的意思決定の方法

化学プロセスの設計、操作に関する意思決定の際には、前節で述べた如くエネルギー評価のみならず種々の多目的評価にたえる決定をすることが本質的ではあるが、現実に活用し易い方法論の研究としては今後期待せざるをえない現状である。現在では例えば、安全性、環境汚染性あるいは弾力性などの単一の評価を第一義的に考えたときの様な設計、操作に関する方法論が展開されうるかについて活発な研究が進行している段階といえよう。

さて化学プロセスの設計、操作など合成に関する意思決定の一般的方法は図-1のごとく表現できるであろう。すなわち、合成の多目的、条件と合成しようとする対象に関連する事象に関する解析的情報が発点となる。まず合成の目的、条件を考慮して合成問題を解決するために必要な事象を選び出す。ついで選び出された事象間の因果関係の構造を解析的情報の蓄積と目的とから決定する。その次に定量的な因果関係を求めべく観測値や実験データを利用する。こうして求め

* 京都大学工学部化学工学教室教授

〒606 京都市左京区吉田本町

られた定量的因果関係の平均値的關係により、目的、条件に合致するよう数理計画法などを用いて意思決定を行なう。しかし一般的に求められた定量的因果関係には多かれ少なかれ不確定性が存在するのでその大きさ（場合によっては頻度などを含む）を推定し、その不確定性の合成の結果あるいは目的、評価への影響を解析し、最後に不確定性の悪影響を打ち消すべくバックアップの対策、例えば設計に余裕を附加したり、制御系を設置することなどを考慮し、合成の目的、条件に合致するようになさなければならない。もし満足すべき結果が得られなければ、元に戻って選り出された関

係事象を追加するなどして合成の手順が繰り返されねばならない。

図-1の考え方をプロセスの省エネルギー合成にあてはめてみると図-2のごとく表現できる。

有効熱エネルギー（熱エクセルギー）を省エネルギー構成に利用すること

省エネルギーを熱力学の第1法則にもとづいて考えれば、エネルギーの保存則から出来る丈量的損失を少なくすることであるが、不可逆過程による損失をも少なくすることが考えられねばならない。不可逆過程による損失を少なくするようにプロセスを構成することにより、プロセス全体の量的なエネルギー原単位が少なくなることになる。図-3に示すような常温20℃の水を80℃まで加熱するのに100℃の大気圧の水蒸気を用いる伝熱操作を考えてみよう。加熱には蒸発潜熱、539 kcal/kgのみが用いられるものと仮定すると、この操作の必要熱量、 $(100)(1)(80-20) = 6,000$ kcal/hrを $\{539 + (1)(100-20)\}$ kcal/kgの熱量（常温20℃基準）を持つ水蒸気で加熱するわけであるから、

$$6,000 / (539 + 80)(6,000 / 539) = 0.871$$

すなわち約87%の効率と量的にいうことができる。

一方我々は、可逆過程で働くカルノー機関がある熱エネルギーから取り出しうる理想的最大仕事量を与えるものであることを知っている。温度 T の単位質量の物質が温度 T_0 までになしうる最大仕事量は、

$$e = \int_{T_0}^T (1 - \frac{T_0}{T}) dq \quad (1)$$

で示しうる。 $1 - T_0/T$ はカルノー効率と呼ばれる。物質の比熱が温度によらず一定 C_p で、その流量が F kg/hrであるとき、単位時間あたりの有効エネルギーの量は、

$$E = FC_p \int_{T_0}^T (1 - \frac{T_0}{T}) dT \quad [\text{kcal/hr}] \quad (2)$$

と表現できる。したがって、図-3の熱交換器で W (kg/

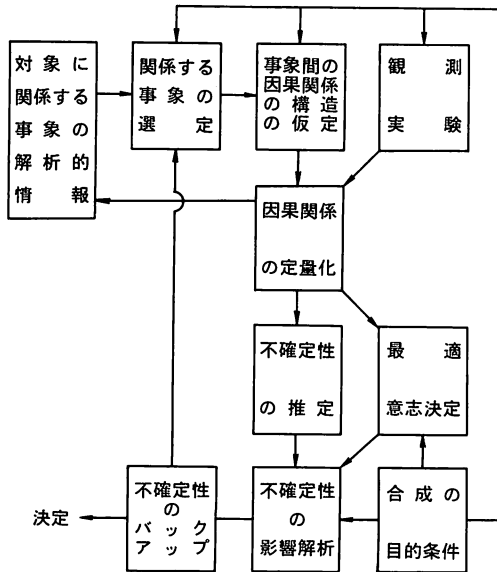


図-1 プロセスシステム工学の一般的方法

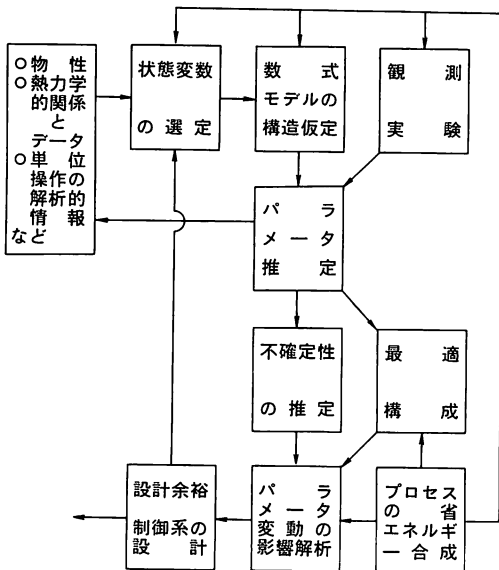


図-2 省エネルギーのためのプロセス合成

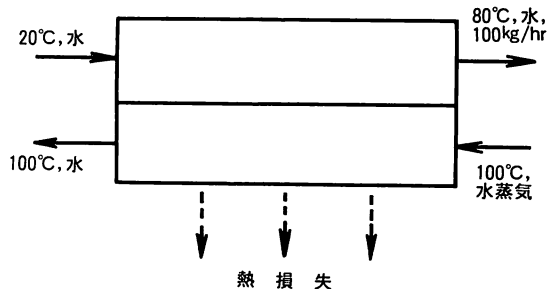


図-3 熱交換器の例

hr) の低温流体が温度 t_i から t_o まで加熱されるとき得られる有効エネルギーの変化は、

$$E_i = W C_p \int_{t_i}^{t_o} (1 - \frac{T_0}{T}) dT \quad (3)$$

となる。

$$\int_{t_i}^{t_o} (1 - \frac{T_0}{T}) dT = (t_o - t_i) - T_0 \ln(\frac{t_o}{t_i}) \quad (4)$$

であるから、 $W = 100$ [kg/hr], $C_p = 1$ [kcal/kg°C], $t_i = 293^\circ\text{K}$, $t_o = 353^\circ\text{K}$ を入れると、図-3の低温水の得る有効エネルギーは、

$$(100)(1) \left[(353 - 293) - (293) \ln \frac{353}{293} \right] = 542 \text{ kcal/hr}$$

となる。

潜熱変化のように温度が変化せず T_s 一定で、相変化の潜熱が λ [kcal/kg] であり、その量が W [kg/hr] のときの相変化の有効エネルギーの変化は、

$$W (1 - \frac{T_0}{T_s}) \lambda \quad (5)$$

で表わされる。図-3に示す 100°C のドレインが何にも利用されないとする、 100°C の $(6,000/539) = 11.13$ [kg/hr] の水蒸気を持つ有効エネルギーは、

$$\left\{ (1 - \frac{293}{373}) (539) + (373 - 293) - (293) \ln \frac{373}{293} \right\} (11.13) = 1,390 \text{ [kcal/hr]}$$

となるから、有効エネルギーによる効率は

$$542/1390 = 0.39$$

となり、0.871よりはるかに低い効率になる。ただしなんの仕事をもなしえない温度 T_0 は常温 20°C としている。

なお顕著な例として異なった温度の流体の混合を考えてみよう⁶⁾。この混合操作において外部への熱損失がなければ、流量 F_1 , F_2 , 温度 T_1 , T_2 の比熱 C_p の流体を混合すると、混合流体の流量 F_m , 温度 T_m は

$$F_m C_p T_m = F_1 C_p T_1 + F_2 C_p T_2$$

で定まり、熱量的にはなんの損失もなく効率は100%ということができる。

ところが有効エネルギー的にはどうであろうか。いま 100 kg/hr の水で 20°C のものと 80°C のものを混合したとする。混合前の両流体の有効エネルギーの和は、 20°C を T_0 としたとき、

$$(100)(1) \left\{ (353 - 293) - (293) \ln \frac{353}{293} \right\} + (100)(1)$$

$$\left\{ (293 - 293) - (293) \ln \frac{293}{293} \right\} = 542 \text{ [kcal/hr]}$$

となり、混合後は流量が 200 [kg/hr], 温度が 50°C と

なるから、その有効エネルギーは、

$$(200)(1) \left\{ (323 - 293) - (293) \ln \frac{323}{293} \right\} = 288 \text{ [kcal/hr]}$$

となり、この場合の混合による有効エネルギーの効率は、

$$288/542 = 0.53$$

となり、約半減することが示される。

上の数値例からもわかるように、非現実的な最大仕事量を評価の基準にはしているが、基準温度 T_0 から離れれば離れる程、大きい仕事ができることを考慮してプロセス構成を行なうことが、プロセス全体のエネルギーの有効利用につながる事が十分期待できる。

有効熱エネルギー線図のプロセス構成への利用^{4), 6)}

式(1), (2)から明らかなように、縦軸に $(1 - T_0/T)$, 横軸に熱流量 Q をとると、図-4(a)に示すように、あるプロセスで温度 T_A の流体が温度 T_B になって出てゆく場合の有効エネルギー変化は、式(2)の T に T_A から T_B までの種々の値を代入することによって得られる E の値を $(1 - T_0/T)$ の値に対して点綴することによ

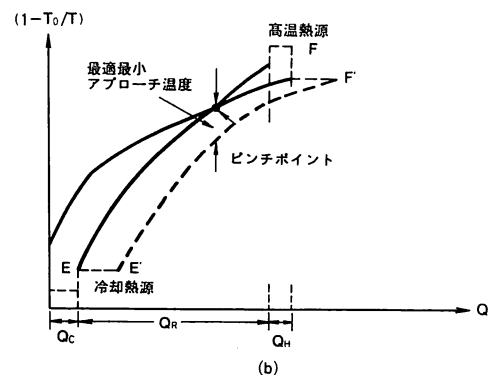
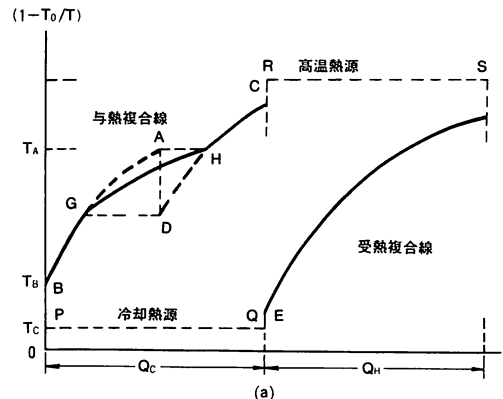


図-4 有効エネルギー線図における熱回収

て得られる曲線 AB と $(1 - T_0/T) = 0$ の水平軸との間の面積で与えられる。

従って図-4に示すように、A→B, C→Dの冷却を温度 T_c の冷媒で冷却し（冷媒の顕熱変化を利用する場合）は曲線 PQ は入口と出口温度との間に傾斜するが、ここでは簡単のため冷媒流量が多く入口出口間の温度変化が無視できるか、冷媒の相変化による熱除去としておく、E→Fの加熱を温度 T_s の蒸気潜熱を用いて行なうプロセスの有効熱エネルギーの損失は BADC R S F E Q P の囲む面積で表現できる。熱を与える流体に関する有効エネルギー変化の線と与熱線、熱を受ける方を受熱線と呼ぶと、与熱線が受熱線の上にある限り熱の授受は可能であるから、図-4(a)の受熱線と与熱線を互に水平方向に接近させてもこの伝熱操作は可能であり、両者が近づく程この操作の有効熱エネルギーの損失は小さくなる。しかし図-4(b)の様に両線が接触してしまうとその接点では与熱側と受熱側との温度差が零になることから、実際の操作は不可能になってしまう。ただし図-4(a)に示されている与熱複合線 C H G B は、面積 $AGD = 面積HGD$ になるように、また A 点の温度と H 点の温度、D 点の温度と G 点の温度が等しくなるように与熱線 A→B と C→D を結合させたもので、H→G の部分は 2 種類の流体の同じ温度レベル間の伝熱操作を示していることになる。図-4(a)と(b)とではこの伝熱操作の有効熱エネルギー損失には大きい差があることは明らかである。

したがって、図-2の状態変数の選定として、カルノー効率、必要交換熱量および有効熱エネルギーを選んでプロセスの構成を考えることの可能性が出てくる。それは与熱複合線と受熱複合線との間の温度差の最小となる点で最適な最小アプローチ温度の存在を仮定すると⁷⁾、与熱側と受熱側の対応がシステマティックに与えられるからである。

有効熱エネルギー線図上での熱エネルギーの有効利用プロセスの予備構成

一般にプロセスを構成する各ユニットにおいて、加熱あるいは冷却に必要な熱量と温度レベルが与えられているとき、どのような熱エネルギーの授受システムを構成すれば外部から供給しなければならぬ熱エネルギーや冷却水量を最小にできるか、という問題を考えることにする。

表 1 は与熱、受熱を要求される流れの温度レベルと負荷を示したものである。図-4の線図で示される有効

表 1 与熱側、受熱側の流れ

加熱・冷却に必要な流れ 番号と与熱、受熱の別	温度変化(°C)		熱負荷 (10 ³ kcal/hr)
	入力	出力	
(1) 受熱	60	180	360
(2) 与熱	180	40	280
(3) 受熱	30	105	195
(4) 与熱	150	40	440

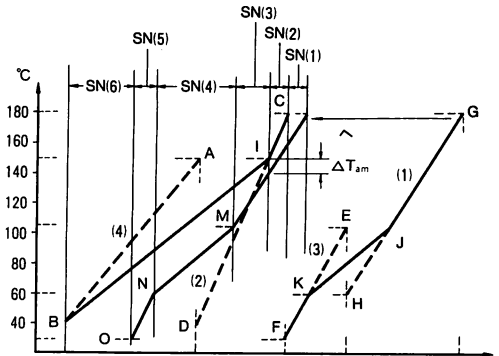


図-5 熱交換システムの予備構成

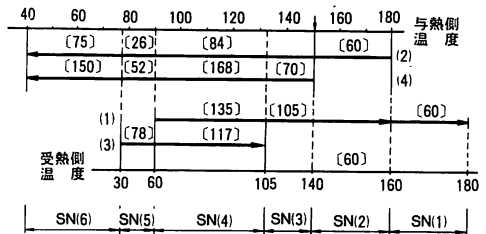


図-6 与熱側と受熱側の温度レベルの対応

熱エネルギーの損失の大小は、温度領域にそれ程大きい差がなければ縦軸に $(1 - T_0/T)$ の代りに T をとってもプロセスの構成問題には差支えないので、以下は簡単のため縦軸に温度 T をとって説明する。さて表 1 の状態を T-Q 線図の上に置くと、(1)~(4)の流れはそれぞれ図-5の HG, CD, FE, AB で表現できる。従って与熱側の複合線は C I B, 受熱側は F K J G となる。この両複合線を最適な ΔT_{am} [最適最小アプローチ温度] まで接近させると、C I B と L M N O と対応から熱エネルギーの授受の構成が定まる。すなわち複合線の各折点のところで上下の対応を考えると各セクションはどのような流体間でどの温度範囲で熱交換を行なう必要があるかが明らかになる。例えば、SN(4)の部分は B I は(2), (4)の 2 流体、MNの部分も(1), (3)の 2 流体が受けもっているから、4 流体間の熱交換を考えねばならない。このような流体間の対応は図-6の

ように高温側と低温側の温度レベルの対応を表現してみるとわかり易くなる。各流れのセクションに書いてある数字〔 〕はその流体の交換熱量を示してある。

セクション S N(3)では(2)、(4)の流体がともに150°Cから132°C（この温度は図-5の受熱線のMに対応する与熱線上の温度から定まる）に下げることによって(1)の流体を105°Cから140°Cまで加熱することを示している。この熱交換を現実に行なうことを考える場合、図-7に示すような3種類が考えられる。このような各セクションの熱交換の構成を考えることを熱交換副問題と呼ぶことにする。図-7のなかで、(a)は現実の熱交換器の設計が複雑になり、(b)は流体の流量配分の面倒さが考えられ、最も簡単で実際的なものは(c)の直列結合系であろう。

そこで各副問題を直列結合で実施することを考えてこのシステムの構成を実施する方法を示すことにする。図-6、7のS N(3)を取り上げると、図-8(a)、(b)に示す

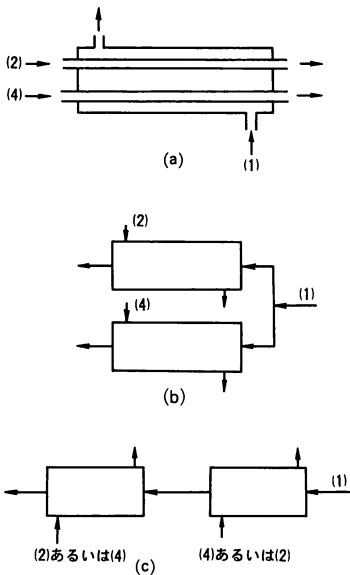


図-7 熱交換副問題の構成の例

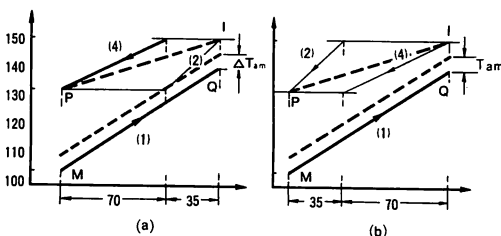


図-8 副問題の直列結合構成

ように受熱側の高温部分で(2)と交換させる場合と(4)と交換させる場合が考えられる。どの熱交換部分でも両流体の温度差が ΔT_{am} より小さくならないという条件を仮定すると、この場合は(b)の結合の方が実行可能となる。副問題の構成のすべてが実行可能ときは、例えば対数平均温度差の和が最大になるような構成を選ぶ（流体の種類により総括伝熱係数の値が大きく異なる場合はこの考え方のみでは不十分）ことも考えられよう。

各セクションについて上記の考え方を適用すると、図-9のような構成がえられる。この構成では11個の熱交換器が必要なことになり、現実的には複雑すぎるので構成の簡略化が考えられねばならない。次節で述べる構成の簡略化に便利るように、図-8の副問題の構成を考えると各セクションの結合部分では出来る丈流体間の熱交換のペヤリングが同種のものになるように考えておくと都合である。

熱交換構成の簡略化⁸⁾

一般に熱交換器の装置費は、 aA^b （ A は伝熱面積、 a 、 b は定数）で整理されることが多く、一般に b の値は1以下の値（例えば0.7、0.8など）をとる事が知られている。このことは同じ有効エネルギー損失ならば大きい熱交換器を用いることが得策であることを示している。

図-9において統合と書いてある部分は同じ流体間でも隣り同志の熱交換であるから当然唯一つの熱交換器で熱の授受を行なわすことが適当であることは明

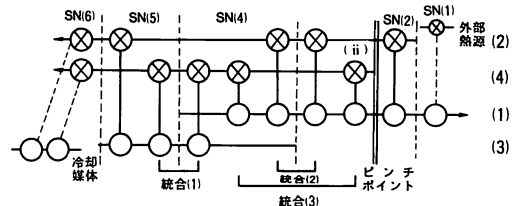


図-9 熱交換システムの予備構成

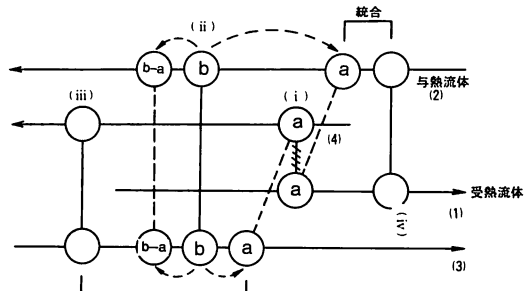


図-10 異流体間の熱交換の簡略化

らからである(統合(1), (2)). 統合(3)の部分については、流れ(1)の統合しようとする区間の間に、他の流れと熱交換する部分が含まれているため、ペヤリング (i) を (ii) へ統合するのか、(ii) を (i) の部分に統合するのかが、 ΔT_{am} の条件を満たすかどうか、どちらが熱交換器が小さくてすむか、などの条件から決定される。

上記の他に異流体間の熱交換器の簡略化も考える。図-10において実線で結ばれている (i) ~ (iv) の4個の熱交換のペヤリングがあるとして、ペヤ (i) の(4)→(1)の熱交換を切り(1)→(2)のペヤで熱負荷 a の交換を行なわすことを考える。この場合 a より大きい b の熱交換要素が隣接していなければならない。流体(2)に a を新しく設けたため流体(2)の b は $(b-a)$ の熱交換でよく、また元の流体(4)の a の相手を流体(3)に求めねばならない。したがって流体(3)も b の熱量が a と $(b-a)$ に分けられる。その結果として2ヶ所に統合の可能性がでてきて3個の熱交換器でこの熱交換が実行出来るかもしれない。

このように、物理的意味を考えながらシステムティックに熱交換システムの構成を行なうことは、手計算に

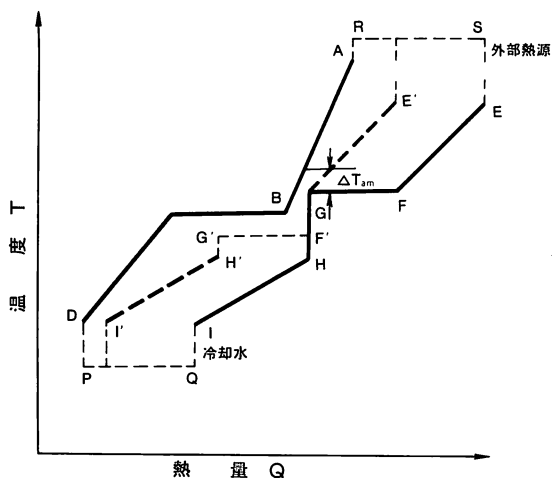


図-11 ユニットの改善による省エネルギー効果

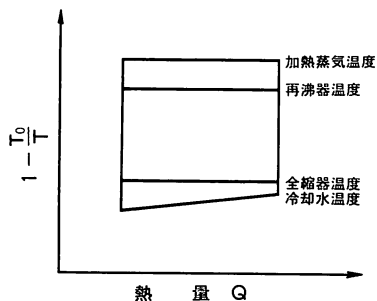


図-12 蒸留塔の有効熱エネルギー損失

より行ないうることが勿論、電算機を対話形で用いることによって容易に実行できる。

省エネルギーのためのユニット操作の改善の着眼点

あるプロセスの熱エネルギーの有効利用を考察したところ、与熱複合線はSRABCD、授熱複合線はEFGHIQPとなり授熱線のGの点で最適最小アプローチ温度 ΔT_{am} の制限になっているものとして、この構成によっても前節で述べたように十分の省エネルギーが計れるであろうが、なお一層の省エネルギーを工夫する一つの方法としてプロセスを構成するユニットの授熱あるいは与熱の条件を変更することが考えられる。例えば授熱ユニットGFの部分(例えば蒸発ユニット)をG'F'の温度レベルで可能であるように改良できたとすれば、授熱複合線はE'G'F'G'H'I'と与熱複合線により接近させることが可能となり、この図の場合は外部熱源は約1/3、冷却水量は約1/3に減少させることになる。このような考え方によって省エネルギーに最も効果的なユニットの設計、操作条件の改善の着眼点を見出すことが可能である。またBCの与熱部分(例えば凝縮操作)の蒸気がある化学反応操作の冷却によってつくられる場合、より圧力の高い冷却操作が可能であるような反応装置の設計を考えることによりFGの部分新しいBC部分で行ないうることにより大巾な省エネルギーが可能となるかもしれない。

上記のユニットの変更に対してシステムティックな接近法は困難かもしれないが、定性的に着眼点を選ぶ出すのに有効熱エネルギー線図の利用は効果的と考えられる。

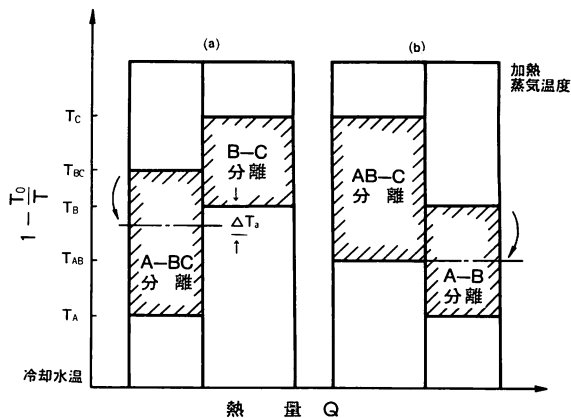


図-13 3成分の分離シーケンス

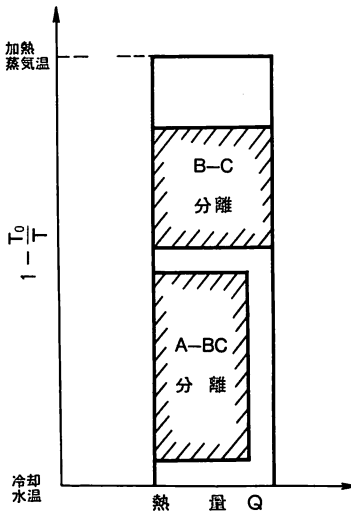


図-14 ヒートインテグレートされた3成分分離システム

多重効用蒸留プロセスの設計^{9), 10)}

蒸留塔の有効熱エネルギー損失をQ-T線図の上に画くと、蒸留塔内の顕熱変化、圧力変化などを無視して塔底で与えられた熱量と等しい熱量が塔頂の全循環で取り去られると近似した場合、図-12のなかのブロックで表現できる。A, B, Cの3成分をコンベンショナルな2塔で分離する場合図-13に示すような(a), (b)の2種の分離シーケンスが考えられる。それぞれ加熱蒸気温度と冷却水温にはさまれた面積で有効熱エネルギー損失が与えられる。この線図でもし操作圧力を下げることにより、一点鎖線のレベルまで再沸器の温度を低下させることが可能であるとしよう。この場合図(a)ではA-BC分離塔の加熱にB-C分離塔の塔頂蒸気を利用する可能性がでてくる。ただしこのようなヒートインテグレーションが行なわれる両塔の塔頂蒸気と再沸器との温度差 ΔT_d が最適最小アプローチ温度 ΔT_{am} より大きい必要がある。図-14はヒートインテグレートされた場合の有効熱エネルギー損失を模式的に示したも

のであるが、図-13と比べてはるかに有効熱エネルギー損失が低下する可能性があることが理解できる。

電算機を対話形に利用することによりこのような蒸留塔システムを設計する方法も開発されている¹¹⁾。

おわりに

本講では有効熱エネルギー線図を利用することにより、化学プロセスにおけるエネルギーの有効利用を計かるための基本的な考え方を述べたが、上記のほかに水蒸気加熱ならびにドレインの熱利用システムの設計⁶⁾、蒸留塔の中間リボイラー、中間冷却操作の考察¹²⁾なども可能であり、近い将来排熱による発電プロセスや圧力エネルギーなどについても総合的にエネルギーの有効利用が計れるプロセスの合成法の開発が期待される。

参考文献

- 1) 亀山, 吉田, 山内, 笹木; 「化学プロセスのエネルギー流れの解析」 Private Communication
- 2) 京都大学化学工学教室; 「省エネルギー技術のための化学工学」文部省特定研究 (1981)
- 3) C. J. King; "Separation Processes", Mc Graw-Hill, New York (1971)
- 4) B. Linhoff & J. R. Flower; A I Ch E J., 24, 633, 642 (1978)
- 5) T. Umeda, J. Itoh & K. Shiroko; Chem. Eng. Prog., 74, 70 (1978)
- 6) 仲, 高松; 化学工学協会大分大会要旨集 (1979)
- 7) 高松, 仲, 高田, 寺下; エネルギー・資源, 2, 27 (1981)
- 8) 仲, 高松; CHEMCOMP' 82 (Antwerp, Belgium Aug. 1982)へ投稿中
- 9) T. Umeda, K. Nishida & K. Shiroko; A I Ch E J., 25, 423 (1979)
- 10) 寺下, 仲, 高松; 化学工学協会秋季大会前刷集 (1980)
- 11) 仲, 高松; A I Ch E J. に投稿中
- 12) Y. Naka, M. Terashita, S. Hayashiguchi & T. Takamatsu, J. Chem. Eng. Japam, 13, 123 (1980)

