

圧力バランス・ヒートバランス・マテリアルバランスと制御

1. 圧力バランス

化学プラント内の各機器の運転圧力は、プラント全体として効率をもっとも良くなるように決定される。というのも、例え各機器の消費エネルギーが最小になるように、運転圧を決めたとしても、上流に位置する機器より、下流に位置する機器の運転圧が高くなっている場合には、その間にポンプやコンプレッサなどの昇圧機が必要となり、全体として効率が悪くなってしまうことが起こりうるからである。

各機器をその決定された圧力になるよう制御し、運転をおこるのが理想的であるが、直列につながった機器のなどでは、その一つ一つの圧力を制御するようなことはせず、運転上重要な機器の圧力のみを制御し、間の機器の圧力は成りゆきに任せるのが通常である。圧力の制御が重要となる機器として、反応器、蒸留塔、相変化をともなう熱交換機などをあげることができる。

反応器の圧力制御方法は、その反応方式、形態により様々であり、その反応各々に特殊性を有する場合が多く、ここで例示することはせず、ここでは熱交換機、蒸留塔の圧力制御に関して解説を行う。

熱交換器圧力制御

流体が熱交換する際に相変化をともなう場合、その流体の圧力を制御することがその熱交換機の性能を引き出すために非常に重要である。二つの流体が熱交換する際にその交換熱量は次式により表される。

$$Q=UA \ T$$

Q：交換熱量

U：総括伝熱係数

A：熱交換面積

T：2流体（対数）温度差

一見この式には圧力の項は含まれてはいない。しかしある組成の流体の沸点（凝縮点）が圧力と一対一に対応することを思い出すと、Tが圧力により変化することが容易に理解できよう。逆に言うと圧力を変化させることにより、交換熱量を制御することもできるわけである。

2. ヒートバランス

熱回収や運転圧力の最適化などを最大限に行い、加熱用スチームや冷却水等の消費を極力抑えるようにプラントは設計される。しかし外乱によってこれらのバランスが崩れると、用役の消費量無駄に増加したり、オフスペックの製品が出てくることになる。化学プラントの場合、この熱バランスの崩れは、時間的な流体の温度上昇や圧力変化として感知され場合が多い。逆に言うと温度上昇や圧力変化が起こらないように制御することにより、ヒートバランスを崩さないもっとも効率のよい運転が実現される。

一般的に化学プラントにおいて、低い温度レベル（冷却水よりも低い温度）での冷却はコスト的に非常に不利であり、高度な熱回収システムにより、低い温度レベルの冷媒の使用を極力避ける試みがなされる。

ガスプラントの冷却工程はその典型的な例であり、流量、温度、圧力を制御することにより、プロセス

流体同士の熱交換を最大限に行い、チラーの消費量を最小化するように運転されている。

3. マテリアルバランス

当然ながら、化学プラントに供給された物質は、反応、分離、混合などにより姿、形を変えるものの、供給された質量分は系外に払い出される必要がある。

供給が払い出しに対して過剰になれば、系内へ物質が蓄積されていき、また払い出しが供給に対して過剰になれば系内の物質が減少していくことになり、ついにはプラントの運転が不可能になる。つまりプラントを安定に運転するためにこの供給、払い出しのバランスを制御する必要があるわけである。主として、系内への蓄積、系内物質の現象は圧力、液レベルの変動として感知されることになる。

また、複数の払い出しがある場合に、系内への蓄積がないようにバランスのずれが生じたとしても、それに伴う、オフスペック製品の生成や、収率の低下などが生じる。

単純な2成分系の分離を例にとり解説する。

$$F = D + B \quad (1)$$

$$F x_{1F} = D x_{1D} + B x_{1B} \quad (2)$$

(1)は全体に対する定常状態の物質収支、(2)は成分 x_1 に対する定常状態の物質収支である。系内への蓄積がなければ、この2つの式は常に満たされることになる。いま、原料の供給量、組成が変化せず、なんらかの外乱により製品 D の組成 x_{1D} が保たれつつ流量 D が変化する場合を考える。(1)、(2)より導出した(3)を $x_{1F}=0.5$ 、 $x_{1D}=0.99$ の条件で D/F を横軸に x_{1B} を縦軸にとりプロットしてみる。

$$x_{1B} = (x_{1F} - D/F x_{1D}) / (1 - D/F) \quad (3)$$

D が減少すると x_{1B} が増加つまり、製品 B 中の成分2の濃度が低くなるということがわかる。つまり D の回収率が悪くなったばかりでなく、 B の製品性状まで悪くなってしまうわけである。

この例からも分かるようにプラントにおける物質収支の制御は非常に重要なものであることがわかる。

ただ様々な外乱が発生する、実際の蒸留塔などの場合、塔頂、塔底の両方を望まれるスペックで得るとは、困難なことが多い。というのも、蒸留塔では塔頂と塔底で組成に対する制御を行うと互いに干渉しあい不安定な状態に陥ると言うことがよく起こるからである。そこで実際の蒸留塔の運転では塔頂(もしくは塔底)の製品のスペックを満たしつつ回収率を可能な限り上げるように制御を行い、他方から得られる流体のスペックはフリーとすることが多い。さらにこの他方から得られる流体を製品として得たい場合には、もう1塔蒸留塔を用いて、精製をおこなうようにされている。

例) ガスプラント分離精製工程の物質収支の考え方について述べる。

脱エタン塔、脱プロパン塔、脱ブタン塔ともに制御方式はおなじである。それぞれ、塔頂のリフラックス流量を一定に保つように制御されている。これにより塔頂の製品の純度を保つわけである。塔底リボイラーによる蒸発量が十分でさえあれば、この制御は塔の変化に対して安定的であることがわかる。また、リボイラーの炊きあげ量は塔底付近の温度(つまり塔底付近の成分)を一定に保つように決定されている。これにより、本来塔頂から抜けるべき成分が塔底から抜けないように、かつ塔底から抜けるべき成分が塔頂から抜けないように制御されているわけである。原料成分が短時間で大きく変化するような場合には、この制御方式で、望まれるスペックの製品を得ることは困難である。しかし、ガスプラントの場合原料成

分が短時間で変化するようなことはないため、この制御により安定的にオンスペックの製品を得ることができる。