

件名

基本設計演習「安全設計」

第1章 プロセス設計と安全設計

1.1 設計条件と安全設計

1.2 設計条件と運転

1.3 蒸留系運転と最高運転条件（設計条件）

作成年月日

2011年2月7日

1. プロセス設計と安全設計.....	3
1.1 プラントと安全設計.....	3
1.1.1 プロセス設計の役割.....	3
1.1.2 設計条件の決め方（下線部分および「」部分を追加）.....	4
1.2 設計条件と運転条件.....	5
1.2.1 運転条件と運転状態（下線部分を追加）.....	5
1.2.2 運転モードと運転時間.....	6
1.2.3 設計条件と運転時間.....	7
1.3 蒸留系運転と最高運転条件（設計条件）（下線部分を追加あるいは変更）.....	8
1.3.1 蒸留系説明.....	8
1.3.2 運転条件の設定.....	9
1.3.3 最高運転条件の選定（下線部分を追加あるいは変更）.....	11
1.3.4 最高運転条件と水運転（下線部分を追加あるいは変更）.....	13
1.3.5 物性の違いと設計条件.....	13
1.3.6 安全弁の吹き出し温度（下線部分を追加あるいは変更）.....	14
1.3.7 還流ポンプの設計圧力.....	15
1.3.8 凝縮器と最高運転条件（下線部分を追加あるいは変更）.....	17

1. プロセス設計と安全設計

1.1 プラントと安全設計

1.1.1 プロセス設計の役割

安全設計とは何か。思いつくままに箇条書きにしてみますと、

- (1) 安全に運転が出来ること。言い換えれば、プラントや設備・機械を停止させず継続して運転出来る。
- (2) オペレーターに人的被害を与えないこと。つまり、プラントオペレーター（運転員）を含め、従業員から怪我人や死傷者を出さない。
- (3) プラント周辺の住民や家屋に損害を与えないこと。具体的には、プラント周辺の住民や家屋に物的あるいは騒音などによる精神的損害を与えない。*1
- (4) プラント設備に損害を与えないこと。要はプラント設備や機械を壊さない。
- (5) 周辺の環境を汚さないこと。排ガスや廃液などにより周囲の環境を汚染しない。
- (6) (運転において障害となる)トラブル事象の発生が少ないか、ゼロであること。
- (7) メンテナンス（保守点検）が容易で修理や交換の頻度が少ないこと
- (8) 結果的に利益が上がる設備であること

*1 この中にはプラントやそこで働く人たちだけでなく、周辺の住民や環境も含めています。つまり、「プラントの安全」とはプラント内外の安全を意味しています。

”周囲の環境”ということになると、異存を覚えるかたもいらっしゃるかもしれませんが、環境という存在*2に対する安全確保と考えれば、含めても良いのではと考えています。

*2 環境という存在とは“自然環境”広く意味すれば“地球”という存在。

これらの安全設計に対しプロセス設計が出来ることは何でしょうか。結論から言うと、結構比重が大きいのです。例えば、プロセス設計が正しい加減であれば、安全に運転が出来ないし、トラブル続きでおちおち運転を継続することが出来ませんから、稼働率も下がり利益も半減(?)あるいは無くなってしまいかもありません。*3

*3 これらが達成できれば、プラントを停めることもなく高負荷で生産を継続出来るので、操業率や生産効率がアップして原料や用役の消費量を減らすことができます。結果的に経費を削減出来、利益を何倍も増やすことが可能となります。一方、(1)から(7)の項目には“停止”“怪我”“死傷”“破壊”“障害”“汚染”などが含まれており、これらと対をなすのが“安全”であり、安全を確保し保証するのが“安全設計”ということになります。

また、設計条件を決める際に抜けがあれば、運転条件が設計条件を超えてしまい、運転の継続が不可能となってしまいます。

このようにプロセス設計と安全設計は密な関係にありますので、いつでもプロセス設計に立ち戻れるようにしながら議論していきましょう。

1.1.2 設計条件の決め方（下線部分および「」部分を追加）

設計条件、つまり設計温度や設計圧力を決める際に、皆さんはどれだけの注意を払っているでしょうか。類似のプロセスだからと言って、過去の実績プロセスと同じ設計条件にはしていませんか？ また、設計温度の決め方がわからなく、おおよそ余裕を 20℃にしたり 30℃にしたりして決めていないでしょうか。このような安直な決め方では必ず後で禍根を残すことになります。

例えば、”蒸留塔の設計条件”はどのような手順に沿って決めていきますか？ 悪い見本では、

- (1) 通常運転における温度圧力が塔底で 135℃の 0.03MPaG、頭頂で 95℃の 0.02MPaG だから、設計温度は余裕を 20℃にして 155℃。
- (2) 設計圧力は+0.1MPa として塔底で 0.13MPaG、頭頂で 0.12MPaG とする。

このような考え方で設計条件を決めているプロセスエンジニアは即退場です。では設計条件を決める際にどのような点を考慮すべきでしょうか？ まず、設計条件の定義をはっきりさせる必要があります。つまり、設計条件とは、*3

「設計条件とは運転中に起きうる最も厳しい運転条件であり、装置・機器・配管などの設計に使用すべき最高の運転温度や最高の運転圧力などである。」

それゆえ設計条件を決定するためには、種々の運転形態を熟知した中で全ての運転条件を洗い出し、その中から可能性の高い運転条件を論理的に正しい方法により抽出し、関係する人々に設計条件として認識させる必要があります。

- *3 もし、実際の運転温度や運転圧力が設計条件を超えた場合に何が起こるでしょうか？ 仮に運転温度や運転圧力が設計条件を超えても機器の強度設計上が問題なく、そのような状況が今後も頻繁に起きると予想される場合、オペレーターから「このまま運転しても大丈夫か」と疑問を投げかけられたらあなたはどうか答えますか？
- 理由も説明せずに「大丈夫だ」と言っても、オペレーターは素直に納得するのでしょうか。そんなことはありません。却って不信感が増すだけで、もし再度同じような状況が発生した場合にはオペレーターは運転条件を変えて設計条件以下にするように運転状況を変えるか、運転を中断するかも知れません。

1.2 設計条件と運転条件

1.2.1 運転条件と運転状態（下線部分を追加）

設計条件（設計温度と設計圧力）、すなわち最高運転温度や最高運転圧力を決定する上で必要な項目は、運転モードと運転条件です。この運転モードは定常運転*1だけでなくスタートアップやシャットダウンなどの非定常運転*1も含み、それらの運転モードで出現する最高運転温度や最高運転圧力を全て考慮して設計条件を決定する必要があります。

しかし、ここで是非とも考えていただきたいことは、「定常時と非定常時では運転状況が異なる」ということです。つまり、

$$\text{運転状況} = \int (\text{運転温度、運転圧力、運転時間})$$

となり、非定常運転状態における運転時間は定常運転状態より短いのが通例です。そこで運転モードを、時間を考慮して分類してみましょう。

*1 プラントの運転を定常運転と非定常運転と大きくくりで分類すると誤解を招くことがありますので注意してください。例えば、建設から時間を追ってプラントの運転を分類しますと、試運転、保証運転および商業運転の順番になっています。

これらの運転において起動（スタートアップ）や停止（シャットダウン）や緊急停止（エマージェンシーシャットダウン）が頻繁に起こります。もちろん、起動と停止の間には設計性能に近い運転（高負荷運転あるいは設計負荷運転）もあるでしょう。この試運転は設計上の諸問題を解決して運転方法を確立するために行われますので、停めたり動かしたりすることは当たり前で、保証運転（設計負荷運転が主）も含め商業運転に移行するまでの準備段階と考えることが出来ます。つまり、その間の運転は変動するのが当たり前の安定していない非定常運転として考えるべきでしょう。

一方、商業運転は種々の問題が解決された後の運転ですから、通常の運転モードとして考えることが出来ます。しかしその中でも定期的な保守や予想できないトラブルが発生しますので、必ずや起動と停止や緊急停止などの非定常運転が含まれます。以上の関係を分かりやすく表現します。各運転の内容を説明しますと、

- (1) 試運転とは建設後あるいは改造後の運転を言い、途中で保証運転が入るかどうかは別にして、商業運転に至るまでの運転を意味しています。運転期間は数週間から数カ月、場合によっては1年以上かかるケースもあります。（特別な理由がある場合）
- (2) 保証運転とはプラント建設後に建設会社あるいはエンジニアリング会社が主体となって行う運転で、設計時に保証したプラント性能を両者で確認し、客先に引き渡す際の“お墨付き”を与えるための運転を意味しています。運転期間は数日から1週間程度が多いようです。

- (3) 商業運転とは建設工事が完了し、プラント性能が確認された後の運転で、運転の主体並びに責任は客先に移っています。

1.2.2 運転モードと運転時間

時間を考慮して運転モードを図 1-1 のように分類します。

- (1) 定常運転：主条件運転（Normal Operation：NO1）と別条件運転（Alternative Operation：NO2）に分類します。別条件運転とは原料の組成が変更になった場合とか、生産量を落として運転するようなケースが相当します。
- (2) 非定常運転*2：通常スタートアップ、通常シャットダウン、緊急シャットダウン、再スタートアップおよび安全弁吹き出しの五つに分類します。

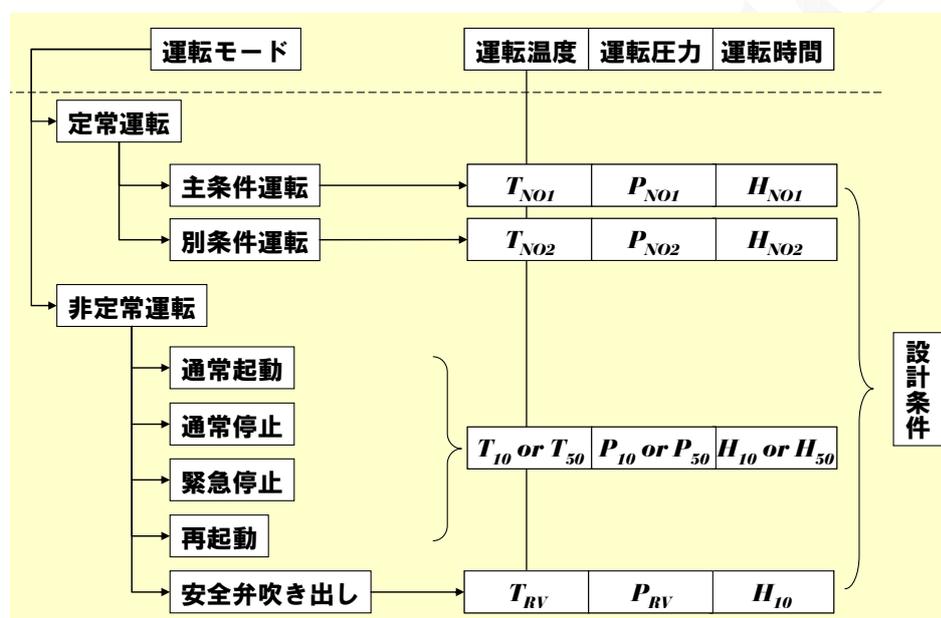


図 1-1 運転時間と運転モード

- *2 非定常運転モードで出現する運転温度や運転圧力は定常時に比較して安全サイド（緩和された条件の意）でしょうか？ それとも危険サイド（より厳しい条件の意）でしょうか？ 一般にはより危険サイドになります。むしろ緊急時のシャットダウンでは運転温度や運転圧力を制御できずに、高温高压になる可能性があります。

通常の運転モードでは含まない安全弁吹き出しを非定常運転に追加しました。この運転モード、つまり安全弁が吹き出す際には運転圧力が設計圧力に接近し最も高くなります。運転条件として最も厳しい条件の一つとなります。

これらの運転モードで出現する運転条件を下表のように分類しました。ただし、 T_{10} や P_{50} の10と50は以下のように定義しています。

- A. 10 は 1 回の運転条件が連続で max.10 時間で、年に 10 回起こる可能性を示している。
- B. 50 は 1 回の運転条件が連続で max.50 時間で、年に 2 回起こる可能性を示している。
- C. RV は Relief Valve の意味、つまり安全弁吹き出し時を意味しています。頻度としては A.と同じとします。

表 1-1 運転条件と運転モード

運転モード	*4	運転温度	運転圧力	運転時間
主条件運転	NO	T _{NO1}	P _{NO1}	H _{NO1}
別条件運転	MO	T _{NO2}	P _{NO2}	H _{NO2}
通常起動および停止	T ₁₀ or T ₅₀	T ₁₀ or T ₅₀	P ₁₀ or P ₅₀	H ₁₀ or H ₅₀
緊急停止と再起動				
安全弁吹き出し	TRV	TRV (T ₁₀)	PRV (P ₁₀)	HRV (H ₁₀)

*4 英国 ICI 社で工夫考案された DCD (設計条件を PFD に書き加えたエンジニアリング文書、Design Condition Diagram の略) には主条件運転を通常運転条件、Normal Operating Condition (NO) と呼び、主条件運転ならびに別条件運転で現れる最高運転条件を Maximum Operating Condition (MO) と呼んでいる。また、T₁₀ や T₅₀ の T は Transient Condition (遷移条件) の略である。

1.2.3 設計条件と運転時間

運転時間を考慮して設計を行う例は数多くあります。例えば、リフォーマーチューブ*4 のような高温雰囲気さらされるような機器の設計では、高温下での金属材料の許容応力の低下によるクリープ破断を考慮するために、運転時間という概念が必要です。もし、この時間を考慮しなければ設計条件はより厳しくなり、チューブ肉厚は増加して経済的設計にはほど遠くなるでしょう。

一般にリフォーマーチューブや配管などは交換しながら運転を継続できるので運転時間を考慮して設計するようですが、一般の機器の設計にはそのような概念は採用されないのが通例です。

*4 リフォーマーチューブとは水蒸気改質炉に使用される改質管のことで、設計条件が 900℃ 以上の高温であるために耐熱合金を材料として採用している。

1.3 蒸留系運転と最高運転条件（設計条件）（下線部分を追加あるいは変更）

1.3.1 蒸留系説明

設計条件を決めるには何を考慮すべきか？例を上げて具体的に説明します。

そこでメタノール蒸留塔周りの PFD を用意しましたので、この図 1-2 を使って運転モードと設計条件について考えてみましょう。まず、メタノール蒸留システムの説明から始めます。

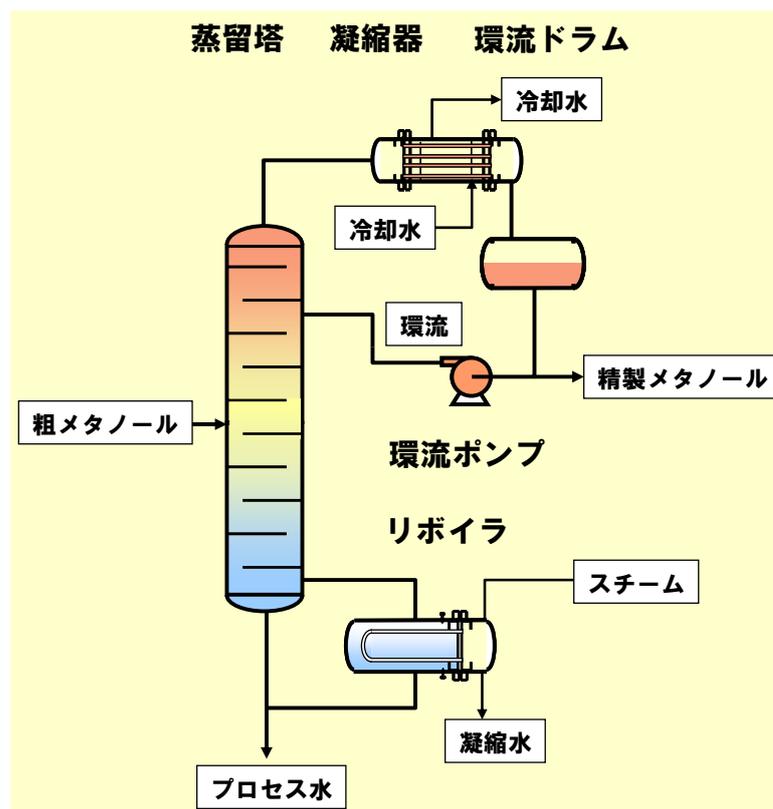


図 1-2 メタノール蒸留塔周りの PFD

(1) システム名称：メタノール蒸留システム

(2) システム構成

- i. 蒸留塔 (Distillation Column)
- ii. リボイラ (Reboiler)
- iii. 凝縮器 (Condenser)
- iv. 還流ドラム (Reflux Drum)
- v. 還流ポンプ (Reflux Pump)

(3) プロセス概要

- i. 原料は水とメタノールの溶液である粗メタノール (Crude MeOH *1) で、蒸留塔中段に供給される。
- ii. 塔頂からは高純度の精製メタノール (Product MeOH) 蒸気が凝縮器に流れ、そこで

冷却水により冷却凝縮する。

- iii. 凝縮したメタノールは還流ドラムに流入し、不凝縮ガスを分離後に還流ポンプで昇圧され、一部は製品としてシステム外に送出され、残りは還流として蒸留塔に戻る。
- iv. 塔底には塔底液を加熱蒸発させるリボイラ（加熱源はスチーム）が設置されており、蒸気は塔内を上昇しながら上部からの水メタノール溶液と熱交換を行う。
- v. 塔底からは沸点の高い水が排出される。

この蒸留システムで考えられる運転モード、そして設計条件はどのように設定しますか？

- *1 MeOH は methanol の略称です。同じように ethanol の略称は EtOH、butanol の略称は BuOH、propanol の略称は PrOH です。また、使い方にも依りますが、炭素原子数が多いアルコール（例えば 6 以上）を高級アルコールと呼ぶことがあります。つまり、炭素数が少ないアルコールを低級アルコール、炭素数が多いアルコールを高級アルコールといいます。低級アルコールは無色の液体であり、高級アルコールは蠟状の固体です。

1.3.2 運転条件の設定

議論を続ける前に、蒸留塔まわりの運転条件と設計条件を決めておく必要があります。ただし、問題をもう少し複雑にするために、蒸留塔凝縮器の型式を空気冷却器に変更しました。この理由は後ほど説明いたします。

図 1-3 と表 1-2 に蒸留塔周りの運転条件を示しました。つまり、蒸留塔塔頂の運転条件*2 は圧力 0.16MPa(abs)、温度 76.6°C。蒸留塔塔底の運転条件*3 は圧力 0.22MPa(abs)、温度 123.3°C としました。

- *2 塔頂の圧力は下流の凝縮器および配管の圧損などを考慮して決定します。また、運転中に蒸留塔圧力が上昇する場合があります。その原因としては凝縮器負荷の増加やメタノール蒸気中に含まれている不凝縮ガスの増加で、対策として圧力調節弁や手動放出弁によるガス放出です。そのためにこれら弁での圧損と弁下流配管での圧損を考慮しなければなりません。つまり、塔頂圧力 P_{top} は次式で計算します。また、塔頂温度は塔頂圧力 0.16MPa(abs) に対応するメタノールの飽和温度になります。

$$P_{top} = \text{大気圧} + (\text{放出弁} + \text{下流配管}) \text{ 圧損} + (\text{凝縮器} + \text{前後配管})$$

- *3 塔底圧力は塔頂圧力に塔内圧損を加えて設定します。ここでは蒸留塔段数を 80 段として、多孔板トレイでの圧損を平均 0.75kPa に設定しています。この圧損は 76mmAq に相当しています。また、塔底温度は塔底圧力 0.22MPa(abs) に対応する水の飽和温度になります。

$$P_{\text{bottom}} = \text{塔頂圧力} + \text{塔内圧損} = 0.16\text{MPa(absolute)} + 0.75\text{kPa} \times 80 = 0.22\text{MPa(absolute)}$$

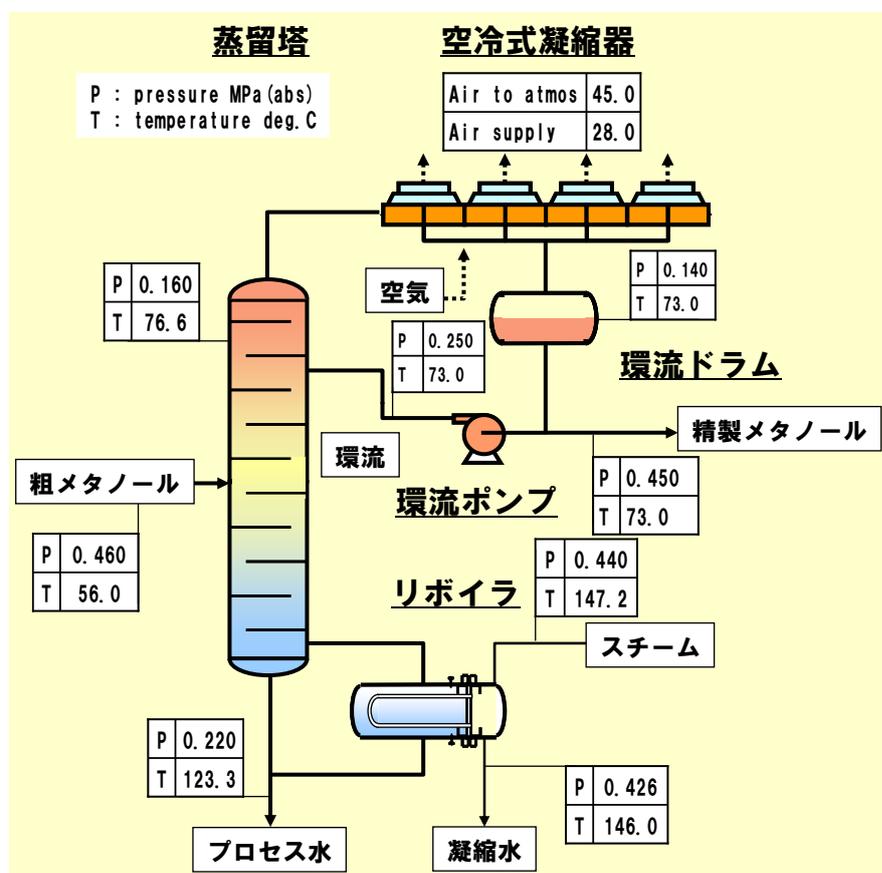


図 1-3 蒸留塔周りの運転条件

表 1-2 運転条件の設定

場所	運転圧力 MPa(abs)	運転温度 Deg.C	備考
蒸留塔塔頂	0.160	76.6	飽和条件に設定
蒸留塔塔底	0.220	123.3	飽和条件に設定
粗メタノール	0.460	56.0	飽和温度以下に設定
還流ドラム	0.140	73.0	飽和条件に設定
精製メタノール	0.450	73.0	圧損考慮
還流メタノール	0.250	73.0	圧損考慮
排水	0.220	123.3	飽和条件に設定
スチーム	0.440	147.2	飽和条件に設定
凝縮水	0.426	146.0	飽和条件に設定
空気冷却器入口	----	28.0	大気空気
空気冷却器出口	----	45.0	熱交換器の設計仕様

1.3.3 最高運転条件の選定（下線部分を追加あるいは変更）

蒸留塔の最高運転温度と最高運転圧力*4を仮に以下のようにします。つまり、

- (1) 蒸留塔トップの最高運転温度は、運転温度+10℃、または運転圧力+0.1MPaにおける飽和温度のどちらか高い温度とする。
- (2) 蒸留塔トップの最高運転圧力は、運転温度+10℃における飽和圧力、または運転圧力+0.1MPaのどちらか高い圧力とする。
- (3) 蒸留塔ボトムの最高運転温度は、運転温度+10℃、または運転圧力+0.1MPaにおける飽和温度のどちらか高い温度とする。
- (4) 蒸留塔ボトムの最高運転圧力は、運転温度+10℃における飽和圧力、または運転圧力+0.1MPaのどちらか高い圧力とする。

表 1-3 最高運転温度と最高運転圧力*4の選定

場所		最高運転圧力	最高運転温度
塔頂（トップ）	運転圧力+0.1MPa	0.16+0.10=0.26MPa	90.6℃*5
塔頂（トップ）	運転温度+10℃	0.227MPa*5	76.6+10.0=86.6℃
塔底（ボトム）	運転圧力+0.1MPa	0.22+0.10=0.32MPa	135.8℃*5
塔底（ボトム）	運転温度+10℃	0.297MPa*5	123.3+10.0=133.3℃

これにより、蒸留塔ならびに周辺の機器の最高運転温度と最高運転圧力*4を以下のように設定し、図 1-4 に最高運転条件（MO）として記載しました。備考欄の内容については順次説明して行きます。

表 1-4 最高運転温度と最高運転圧力*4の設定

場所	最高運転圧力 MPa(abs)	最高運転温度 Deg.C	備考
蒸留塔トップ	0.26	90.6	表 1-3 より
蒸留塔ボトム	0.32	135.8	表 1-3 より
粗メタノール	0.56	66.0	0.1MPa&10℃プラス
還流ドラム	0.24	88.2	差圧 0.02MPa 設定
精製メタノール	0.55	88.2	還流ポンプ締切圧
還流メタノール	0.55	88.2	精製メタノールに同じ
排水	0.32	135.8	蒸留塔ボトムに同じ
スチーム	0.60	158.9	スチームシステム準拠
凝縮水	0.58	157.6	スチームシステム準拠

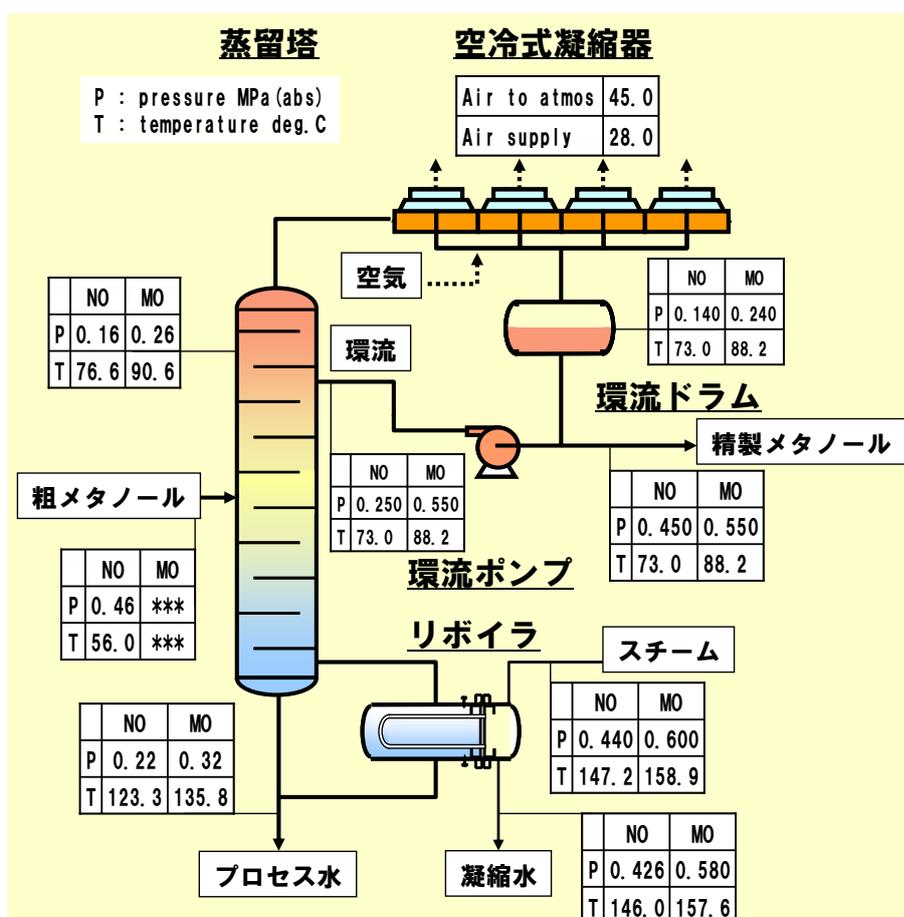


図 1-4 最高運転温度と最高運転圧力の設定

- *4 ホームページで最高運転温度や最高運転圧力の変わりに設計条件を使用していましたが、誤解を招く表現なので変更しています。また、言うまでもないが設計条件とは運転中に起きうる最も厳しい運転条件であり、装置・機器・配管などの設計に使用すべき最高の運転温度や最高の運転圧力などである。それゆえ設計条件を決定するためには、種々の運転形態を熟知した中で全ての運転条件を洗い出し、その中から可能性の高い運転条件を論理的に正しい方法により抽出し、関係する人々に設計条件として認識させる必要がある。
- *5 塔頂（トップ）の最高運転圧力と最高運転温度はメタノールの飽和蒸気圧と飽和温度の関係にあります。また、塔底（ボトム）での最高運転圧力と最高運転温度も水の飽和蒸気圧と飽和温度の関係にあります。それぞれの飽和蒸気圧 P と温度 T (deg.K)関係式と係数 A,B,C,D,E を下記に示します。（出典：Chemical Properties Handbook, McGraw-Hill）

$$\log_{10} P = A + B/T + C \log_{10} T + DT + ET^2$$

	A	B	C	D	E
メタノール	+45.6171	-3.2447E+03	-1.3988E+01	+6.6365E-03	-1.0507E-13
水	+29.8605	-3.1522E+03	-7.3037E+00	+2.4247E-09	+1.8090E-06

1.3.4 最高運転条件と水運転（下線部分を追加あるいは変更）

プラントの試運転準備の一つとして、N₂ やスチームによるフラッシング (flashing) やクリーニング (cleaning) を行います。一般に、プラントに納入される機器には、さび止めのために油や特殊な薬品が塗布されていることが多く、そのために試運転前にそれらを除去するためにクリーニング作業が行われます。

クリーニングには薬液を使用したケミカルクリーニングや水を使用した水洗浄（略して水洗）があり、特殊な例では、金属表面に強制的に不動態皮膜を作る酸洗と言われるボイラ周りのケミカルクリーニング (chemical cleaning) があります。

この蒸留システムでも温水を循環させて塔内部品（トレイなど）に塗布された油や錆び落としのための温水洗浄をしなければなりません。

この温水は蒸留塔ボトムに水を張り、リボイラにスチームを通して作りますので、蒸留塔内部はスチームと水の共存状態になり、その運転温度は蒸留塔の運転圧力下での水の飽和温度に等しくなります。一般には、大気圧下で行いますので、試運転準備中の蒸留塔本体の温度は 100℃程度を考えればよいことになります。

この温水洗浄の運転時間は実績では 1 週間程度を要しており、§1.3.2 ”運転モードと運転時間” で説明した T₁₀ や T₅₀ などより長くなりますので、別条件運転の一つとして考慮しなければなりません。それでは、この水運転下での運転条件をどのようにして設計条件に反映させるのでしょうか？

1.3.5 物性の違いと設計条件

水運転と定常運転での相違点は扱う流体が変わるだけで、使用する機器や配管は全て同一です。そこで流体の性状の違いが機器に及ぼす影響を考慮する必要があります。性状の違いで注意すべき物性は以下の三つです。

- (1) 密度（比重）
- (2) 蒸気圧
- (3) 蒸発潜熱

それぞれの変化による影響内容は、以下の通りです。

- (1) 密度（比重）の変化は圧力バランスやポンプの運転圧力に影響する。
- (2) 蒸気圧の変化は運転温度に影響する。
- (3) 蒸発潜熱の変化は、蒸発量に影響する。

圧力損失は密度に比例しますので、密度の変化はもろに圧力損失計算に影響します。また、ポンプの設計は定常運転をもとに行われますので、設計流量や揚程（ヘッド）はメタノール運転をベースに決定されます。ポンプの吐出圧力は揚程（ヘッド）に密度を掛けて求めますので、比重の変化が吐出圧力の変化となります。

蒸留塔のように運転温度が運転圧力下での飽和温度になる場合には、扱う流体の違いによる蒸気圧の変化はそのまま運転温度の変化に結びつきます。

リボイラや凝縮器（コンデンサ）での熱負荷は、蒸発量や凝縮量に蒸発潜熱を掛けたものですから、リボイラのように外部からの熱量が余り変化しない場合には、蒸発潜熱の変化はそのまま蒸発量に影響します。

1.3.6 安全弁の吹き出し温度（下線部分を追加あるいは変更）

通常、蒸留塔トップに安全弁を設置します。その設置箇所は蒸留塔トップと凝縮器の間で、この例では安全弁の吹き出し圧力を設計圧力と同値とし、その設計圧力を表 1-4 「最高運転温度と最高運転圧力の設定」で設定した最高運転圧力の **0.26MPa(abs)** とします。

もし水運転中に安全弁が吹くまで運転圧力が上昇するような事態が生じたとしますと、水とメタノールの蒸気圧の違いにより、蒸留塔トップと還流ドラムの温度は安全弁吹き出し圧力下での水の飽和温度に到達する可能性があります。蒸留塔ボトムには定常時のメタノール運転でも水が滞留していますので、運転温度は表 1-4 「最高運転温度と最高運転圧力の設定」で設定した最高運転温度の **135.8℃** と同じになります。つまり、

- (1) 蒸留塔トップの水運転+安全弁吹き出し時温度は、圧力 **0.26MPa(abs)**での水の飽和温度 **128.8℃**に到達します。
- (2) 還流ドラムの水運転+安全弁吹き出し時温度は、圧力 **0.24MPa(abs)**での水の飽和温度 **126.2℃**に到達します。

この安全弁が吹く条件を以前 **RV** としましたが、定常運転（メタノール）時の安全弁吹き出し状態（**RV-1**）と区別するように水運転時の安全弁吹き出し状態を **RV-2** とします。

1.3.7 還流ポンプの設計圧力

次に還流ポンプ吐出の水運転における圧力の変化を考えてみましょう。その前に、還流ポンプ周りの圧力条件をお復習いしてみます。前回、詳細に説明しておりませんでした。還流ポンプ吐出ラインの設計圧力は以下のように計算して決めています。

- (a) 定常時の吸込圧力は 0.14MPa(abs)
- (b) 定常時の吐出圧力は 0.45MPa(abs)
- (c) 定常時の揚程（ヘッド）は、吐出圧力－吸込圧力=0.45－0.14=0.31MPa 相当。
- (d) ポンプ締切時の揚程は定常時の揚程（ヘッド）の 20%増とし、0.31MPa×1.2=0.372MPa となります。
- (e) 設計時の吐出圧力は吸込圧力＋ポンプ締切時の揚程とした。つまり、0.14MPa＋0.372MPa=0.512MPa で、0.05 で切り上げて 0.55MPa(abs)としました。メタノールの密度は運転温度 73°Cにおいて 740kg/m³ですから、揚程（ヘッド）は以下となります。

$$(0.55-0.14) \times 1000 \text{ kPa/MPa} \times (10 \text{ m} / 98.0665 \text{ kPa} \times 740 / 1000) = 56.5 \text{ m}$$

この手順の中で、水運転を考慮すると変わってくるのが(a)の吸込圧力と(d)のポンプ締切時の圧力となります。つまり、

- (a) 吸込圧力は還流ドラムの安全弁吹き出し時圧力 0.24MPa(abs)となります。
- (b) ポンプ締切時の揚程は 56.5m ですから、水運転時温度 126.2°Cでの密度を 973 kg/m³ とすると、圧力上昇は以下ようになります。

$$56.5 \text{ m} / 10 \text{ m} \times 973 / 1000 \times 98.0665 / 1000 = 0.539 \text{ MPa}$$

結局、水運転＋安全弁吹き出し時の還流ポンプの運転圧力は以下ようになります。

$$0.240 \text{ MPa} + 0.539 \text{ MPa} = 0.779 \text{ MPa}$$

この運転条件も含めて RV-2 とし、これらの温度圧力条件と表 1-4 および図 1-4 に記載した最高運転条件（MO 設計条件）と比較し表 1-5 と図 1-5 に示しました。この結果から、蒸留塔トップと還流ドラムの設計温度、そして還流ポンプ吐出につながる精製メタノールラインと還流メタノールラインの設計温度と設計圧力を変更する必要が出てきました。これ以外に蒸留塔の設計条件に影響を与える要因はないでしょうか？

次節では要因の一つである大気条件について、空冷式凝縮冷却器を例にとって説明します。

表 1-5 最高運転温度と最高運転圧力の変更

場所	最高運転圧力 MO MPa(abs)	最高運転温度 MO deg.C	備考
塔頂トップ	0.26	90.6→128.8	水運転
塔底ボトム	0.32	135.8	
粗メタノール	0.56	66.0	0.1MPa プラス&10℃プラス
還流ドラム	0.24	88.2→126.2	水運転
精製メタノール	0.55→0.779	88.2→126.2	締切運転+水運転
還流メタノール	0.55→0.779	88.2→126.2	締切運転+水運転
プロセス排水	0.32	135.8	蒸留塔ボトムに同じ
スチーム	0.60	158.9	スチームシステム準拠
凝縮水	0.58	157.6	スチームシステム準拠

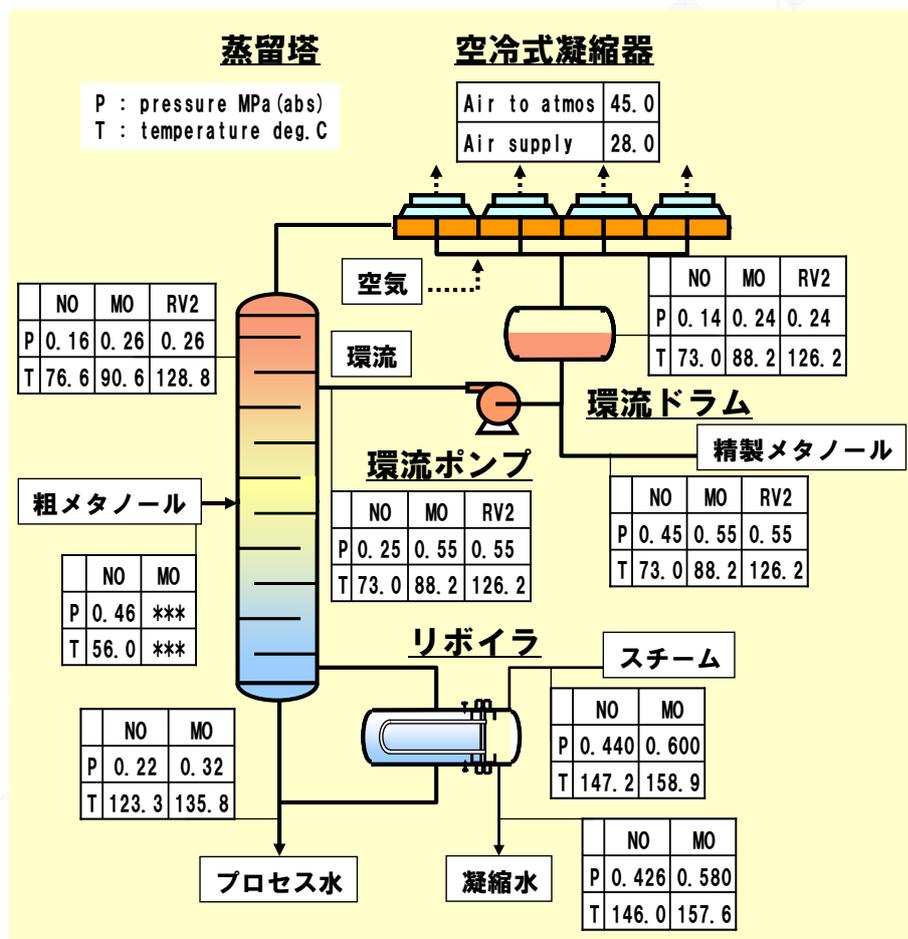


図 1-5 最高運転温度と最高運転圧力の変更

1.3.8 凝縮器と最高運転条件（下線部分を追加あるいは変更）

蒸留塔凝縮器として採用している空気凝縮冷却器の運転に影響するパラメータに空気温度があります。

空気温度、つまり大気温度はプラントの設計基本条件の一つです。客先から指定される設計仕様書には、空調や空気冷却器などの設計に使用すべき空気温度や湿度が規定されます。しかし、寒暖の差が激しい地域では、これとは別に年平均・季節平均・月平均における最低温度・最高温度・平均温度などが規定されることがあります。

例えば、設計温度として夏場における大気平均温度 28°C が指定され、一方で最高温度が 36°C と規定されている場合に、空気冷却を採用している蒸留塔凝縮冷却器のメタノール側の運転温度はどのようになるのでしょうか。もし、夏場における運転温度が最高運転温度（ $128.8^{\circ}\text{deg.C}$ ）を超える場合には、設計温度を変更しなければなりません。

ここで考えなければならないパラメータとその影響について考えてみましょう。一つは、大気温度が 28°C から 36°C に上昇することのために上昇する凝縮器のプロセス側温度、もう一つは大陽からの輻射熱によるプロセス側の温度上昇です。

空気温度が上昇した場合には、以下の条件の下ではプロセス側の温度も上昇し、その上昇する温度幅は空気温度上昇幅にほぼ等しくなります。空気温度の上昇が 28°C から 36°C と 8°C ですから、プロセス側温度も $76.6^{\circ}\text{C} + 8^{\circ}\text{C}$ の 84.6°C となります。

- (a) 流体の主な変化が凝縮で不活性ガスを多く含まない。
- (b) 加熱源であるリボイラ熱負荷は空気温度上昇前後で変わらない。
- (c) プロセス側負荷（流量）は空気温度上昇前後で変わらない。
- (d) 空気温度の上昇による空気流量の変化は無視できる。
- (e) プロセス側流体の蒸発潜熱の温度変化は無視できる。

次に大陽からの輻射熱の影響ですが、国内での日射量瞬間値の月別平均値（平成 16 年版理科年表）では約 0.9kW/m^2 弱ですので、ここでは 1kW/m^2 とします。これより先に進むためには具体的な数字をベース議論しなければなりませんので、蒸留塔凝縮器に関し以下のプロセス条件を設定します。

- (a) メタノールプラント生産量：3000ton/day
- (b) 蒸留塔凝縮器メタノール蒸気量：350,000kg/hr
- (c) 蒸留塔凝縮器熱負荷：373.8GJ/h
- (d) プロセス側入口出口温度： $76.6^{\circ}\text{C}/76.0^{\circ}\text{C}$
- (e) 空気側入口出口温度： $28^{\circ}\text{C}/45^{\circ}\text{C}$
- (f) 空気側流量：21,183,000kg/h

(g) 空気予熱器総括伝熱係数：1256kJ/m²hr-K

(h) 伝熱面積：7586m²

ただし、太陽輻射熱の受熱面積は投影面積になりますので、蒸留塔凝縮器伝熱面積（チューブ円周長さ×チューブ長さ×チューブ本数）から、投影面積を単に伝熱面積÷円周率πとして計算しますと投影面積は2415m²となり、輻射熱量は3600kJ/hr×2415m²=8.69GJ/hrとなります。

この熱負荷は蒸留塔凝縮器本体の熱負荷（373.8GJ/h）のおよそ2.3%に相当します。これに蒸留塔本体への輻射熱も考慮して合計5%の輻射による熱負荷を凝縮器熱負荷に上乘せします。

その結果、大気温度と輻射熱を考慮した場合のプロセス側温度は約87℃になりました。その結果を受けて蒸留塔周りのメタノール運転における最高温度と最高圧力として表1-6と図1-6に加えしました。結果的には水運転の条件が最も厳しくなるようなので、これらを設計条件として登録することにします。また、熱交換器の計算結果を表1-7と表1-8に示します。

以上の結果、蒸留塔トップの設計条件は0.26MPa(abs) & 128.8℃、蒸留塔ボトム的设计条件は0.32MPa(abs) & 135.8℃、還流ドラムおよびそれにつながるラインの設計温度は126.2℃になります。

表 1-6 最高運転温度と最高運転圧力の決定

場所	最高運転圧力 MO MPa(abs)	最高運転温度 MO deg.C	備考
塔頂トップ	0.26	90.6→128.8→87.3	水運転→大気温度上昇
塔底ボトム	0.32	135.8	
粗メタノール	0.56	66.0	0.1MPa プラス&10℃プラス
還流ドラム	0.24	88.2→126.2→86.7	水運転→大気温度上昇
精製メタノール	0.55→0.779	88.2→126.2→86.7	締切運転+水運転→大気温度上昇
還流メタノール	0.55→0.779	88.2→126.2→86.7	締切運転+水運転→大気温度上昇
プロセス排水	0.32	135.8	蒸留塔ボトムに同じ
スチーム	0.60	158.9	スチームシステム準拠
凝縮水	0.58	157.6	スチームシステム準拠

これ以外に蒸留塔の設計条件に影響を与える要因としては、リボイラの熱媒（スチーム）の運転条件の変動があります。ここではこれ以上議論しませんが、スチームの温度圧力が上昇した場合には、当然のことですが熱負荷が増大し、凝縮器のプロセス側温度が上昇します。これについては日を改めて説明します。

また、蒸留塔には考慮すべき運転条件が存在します。水運転時には塔内がスチーム雰囲気になります。もし、外部からの加熱源の供給が停止しても、なお凝縮冷却器が活きている場合には、急速

に塔内のスチームが凝縮して圧力が低下します。この可能性が大きいのであれば（通常は必ず考慮する）、最低運転圧力として大気圧以下（負圧）、場合によっては絶対真空を設計圧力として考慮する必要があります。

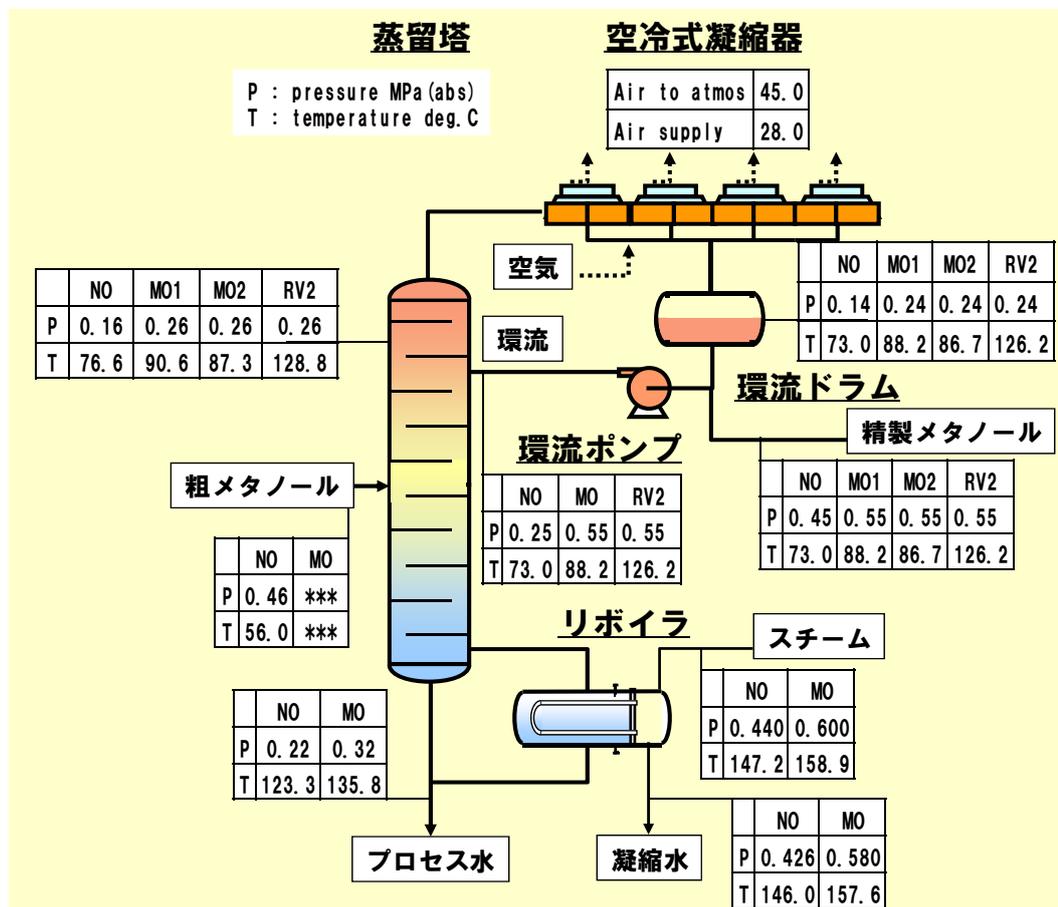


図 1-6 最高運転温度と最高運転圧力の決定

表 1-7 蒸留塔凝縮器運転条件

パラメータ	単位	定常時		大気温度上昇+輻射熱	
		空気側	メタノール側	空気側	メタノール側
G 流量	kg/hr	21,660,000	350,000	21,099,000	358,000
Cp @Tin 比熱	kJ/kg-K	1.013	---	1.014	---
Cp @Tout 比熱	kJ/kg-K	1.014	---	1.014	---
Latent heat 潜熱	kJ/kg	---	1068	---	1044
Tin 入口温度	°C	28.0	76.6	36.0	87.3
Tout 出口温度	°C	45.0	76.0	54.3	86.7
Qtotal 熱負荷	GJ/hr	373.80	373.80	392.52	392.52