

2.2.4 製油所の設備構成

製油所の設備は、入荷設備、原油タンク、多数の精製装置、製品タンクで構成されています。精製装置は原料を成分構成の異なる留分に変換し、不純物を除去して多種類の製品に仕上げています。各精製装置には反応器、蒸留塔、熱交換器などの機器と、輸送のための配管やポンプが組み込まれています。また装置ごとに中間製品タンクがあり、前の装置の製品が原料として貯蔵されています。

製油所は大量の原油を処理し、多様な石油製品を製造する工場ですから、敷地面積は処理量が少なくても数十 ha、処理量が多い工場は数百 ha もあります。敷地の大きな割合を占めるのは周辺の緑地で、景観の保持と同時に緊急時における隣接地域との緩衝帯になります。かなり広い面積を占めるのは、原油と石油製品の貯蔵タンク群で、大小合わせて数百基に達するでしょう。石油製品を製造する精製設備は、製油所の心臓部ですが面積の割合は大きくありません。

日本の製油所は全部が臨海立地ですから、海に面して原油の入荷設備と、石油製品を出荷する船積み設備があります。出荷には製油所から内航タンカーによる離れた都市への輸送と、近隣地域へのタンクローリー輸送があります。原油の入荷設備は、数百メートル沖合に設置するタンカーの係留施設で、シーバースと呼ばれています。原油タンカーは喫水が深いので、沖合に搬入専用の施設を設け、そこから配管を通して陸揚げしているのです。一方、出荷用の内航タンカーは喫水が浅いので、岸壁から積み込みます。タンクローリーによる出荷設備は、海側ではなく陸側に設置しており、計量設備が備わっています。

1. 貯蔵タンク群

製油所の貯蔵タンクには、原油タンク、石油製品タンク、化学薬品タンクの3種類があります。原油タンクは円筒形ですが、容量が大きいので直径が数十メートルの少し平べったい形状です。通常は原油の種類ごとに貯蔵しています。原油タンクの大きな特徴は、図1のように天井が貯蔵量に応じて上下する「浮き屋根式」になっている点です。理由はタンクの上部に、炭化水素の蒸気が溜まる空間を残さないためです。というのも、タンクの上部に炭化水素の蒸気が残ると、原油を搬入する時に外部に排出する必要が生じて、損失になるからです。

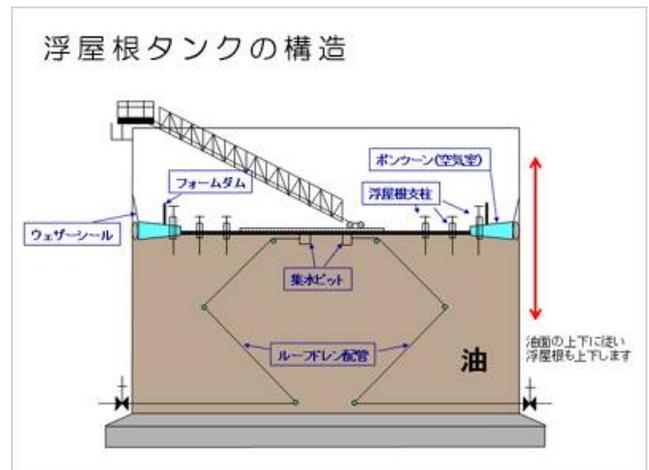


図1. 浮き屋根式の原油タンク

石油製品のタンクは、通常、縦置きで、直径は十数メートルが多いです。ただし、LPGは圧力が高いため、球形タンクが多く採用されています。化学薬品のタンクも大部分が円筒形です。

2. 石油製品を製造する装置群

図2に一般的な製油所の製造装置構成を示します。左側が原油から石油製品を製造する装置群で、

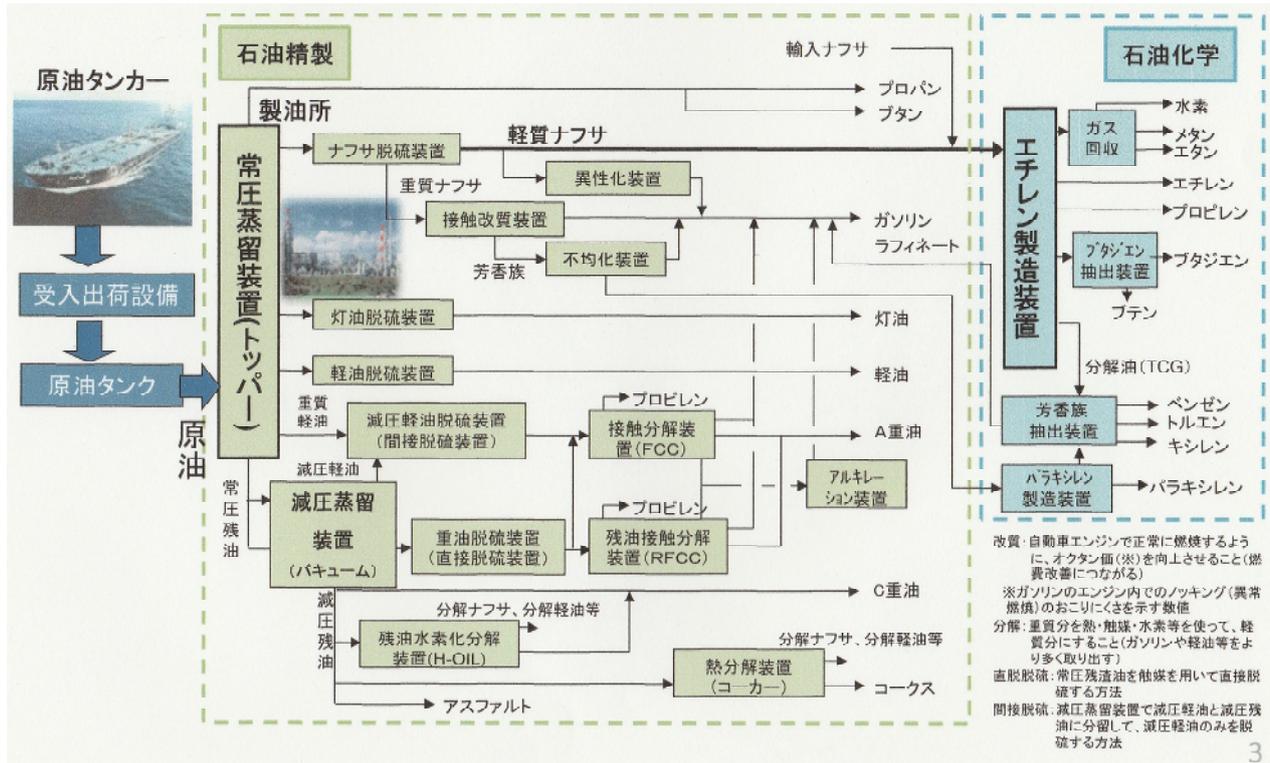


図 2. 製油所の装置構成 (エチレン製造装置以降は石油化学工場)

右側が軽質ナフサから石油化学製品を製造する石油化学工場の装置群です。製造装置群の右端に示すのが製品群で、製油所の最終製品はナフサ、プロパン、ブタン、ガソリン、灯油、軽油、A 重油、C 重油、コークス、アスファルトです。原油は各装置で製品に求められる炭化水素の成分構成に変換され、最終製品になります。各装置は「ユニット」と呼ばれ、多数の基本的な設備（機器）で構成されています。

2.1 常圧蒸留装置

常圧蒸留装置は、原油を LPG 留分、ナフサ留分、灯油留分、軽油留分、重質軽油留分、重油留分、常圧残油留分に分ける装置です。原油の炭化水素構成を、最終製品に求められる炭化水素構成に粗く分ける一次装置といってよいでしょう。常圧蒸留装置と呼ぶのは、装置の基幹設備が常圧で操作する蒸留塔だからです。トッパーと呼ぶのは、沸点

が低くてガス化しやすい LPG 成分を、燃料油から分離するトッピングの意味が元になっています。常圧蒸留塔は原油の全量を処理するので、製油所の中では最大規模の塔です。通常、直径が 10 メートル以上もあるので、遠くからでも太くてずんぐりした姿を確認できます。

2.2 LPG 回収装置

図 2 では省略していますが、常圧蒸留装置の右上に、複数の蒸留塔で構成する LPG 回収装置があります。常圧蒸留塔で得られる沸点の低い成分には、ナフサに適した留分と LPG に適した炭化水素が混在しているので、ナフサ留分は軽質ナフサに、LPG に適した炭化水素はプロパンとブタンの最終製品にします。

2.3 ナフサ・灯油・軽油脱硫装置

ナフサ脱硫装置、灯油脱硫装置、軽油脱硫装置は、それぞれの留分に含まれている硫黄分を分離する装置です。各留分に水素を加えて触媒反応器を通すと、硫黄分は水素と結合して気体の硫化水素になるので、反応器の下流で液状の燃料油と分離します。硫化水素は減圧軽油脱硫装置や重油脱硫装置でも発生します。このため1ヵ所に集めて、硫化水素と同時に発生する不純物を除去してから、硫黄回収装置で硫黄を回収します。したがって、黄色い粉末状の硫黄も製油所の最終製品になります。なお、図2では脱硫に必要な水素を製造する装置や、硫黄回収装置を省略しています。

2.4 異性化装置

原油を構成する炭化水素には、エタンやプロパンのように炭素が直列に並んだ分子構造の直鎖系と、ベンゼンやトルエンのように炭素が環状に繋がった芳香族系があります。また、炭素数が4個以上の直鎖系には、炭素の一部が分岐している異性体があります。たとえば炭素数が4個のブタンの場合、完全な直列ならノルマルブタン、1個が分岐していればイソブタンになります。炭素数が主に5個から10個の炭化水素で構成される自動車ガソリンの場合、炭化水素が直鎖系よりも芳香族系の方が、また直鎖系でも異性体の多い方がオクタン価を高くできます。このため、直鎖系の炭化水素を異性体に変換するのが異性化装置です。装置は原料加熱炉、反応器、生成炭化水素の気液分離槽、蒸留塔などで構成されています。

2.5 接触改質装置

この装置は、直鎖系の炭化水素を芳香族系に転換し、ガソリンのオクタン価を向上させるのが目的です。ガソリン留分の質を改善するので、一般的にはリフォーマーと呼ばれています。装置は、原料加熱炉、反応器、生成炭化水素の気液分離槽

などで構成されています。この反応では水素が発生するので、他の装置に供給されます。

2.6 減圧蒸留装置

常圧蒸留装置で得られる常圧残油には、軽油留分に近い炭化水素、もっと沸点が高い重油留分の炭化水素、さらに沸点の高いアスファルト留分の炭化水素が含まれています。減圧蒸留装置は、減圧にすることで操作温度を下げた蒸留塔で、これらの3留分を分離します。装置は主に常圧残油を加熱する加熱炉、外観がための減圧蒸留塔、減圧蒸留塔の中間から留分を抜き出して冷却し、塔に戻すための熱交換器で構成されます。冷却するのは、蒸留に必要な塔内の落下液を作るためです。原理的には操作温度が高くても蒸留できますが、操作温度が高くなると沸点の高い炭化水素が熱分解し、一部が炭化して収率が低下します。

2.7 減圧軽油脱硫装置（間接脱硫装置）

減圧軽油脱硫装置（間接脱硫装置）は、減圧蒸留装置で得られた軽油留分に近い炭化水素から、硫黄分を分離して除去する装置です。脱硫の原理は軽油脱硫装置と同じで、水素を加えて触媒反応器を通すと、硫黄分が水素と結合して気体の硫化水素になります。したがって反応器の下流で液状の燃料油と分離し、硫化水素は不純物を除去してから硫黄回収装置に送って硫黄を回収します。軽油脱硫装置で処理する軽油留分より高分子の炭化水素が多いので、水素の添加消費量は多くなります。このため、下流の気液分離槽が2段階になります。間接脱硫装置とも呼ぶのは、減圧蒸留装置を設置せずに、常圧蒸留装置から得られる常圧残渣（重油留分）を直接脱硫する場合もあるからです。

2.8 重油脱硫装置（直接脱硫装置）

常圧蒸留塔の塔底からは、原油の中で最も分子量が大きく沸点が高い炭化水素で構成される留分が得られます。硫黄分は高分子の炭化水素に多く含まれているので、常圧残油の硫黄含有量が最も多いです。このため、水素を加えて触媒反応器を通すのですが、反応性を高めるのに非常に高い圧力が必要です。下流には2段階の気液分離槽と、その下流に軽油留分と重油留分を分ける蒸留塔が必要です。他の脱硫装置より構成が複雑で高価ですが、硫黄分の除去量が多いのが大きな長所です。この装置は最も硫黄分の多い留分を、減圧蒸留を経ないで脱硫するので直接脱硫装置と言われます。

2.9 接触分解装置 (FCC)

減圧軽油脱硫装置 (間接脱硫装置) で得られる重油留分や、重油脱硫装置 (直接脱硫装置) で得られる重油留分は、分子量の大きい高沸点成分の炭化水素です。接触分解装置 (FCC) は、この重油留分を分解し、40%~50%を LPG 留分、ガソリ

ン留分、灯油留分、軽油留分に変換する装置です。反応器を使いますが、使う触媒には熱分解で生成した炭素が付着して性能が劣化します。このため、触媒を連続的に抜き出して再生し、反応器に戻します。連続的に操作するため、触媒を粒状化して重油留分と一緒に反応器に導くので、流動接触分解装置 (FCC: Fluidized Catalytic Cracking) と呼ばれます。反応器の下流には、各留分に分ける蒸留塔が続きます。

2.10 熱分解装置 (コーカー)

常圧蒸留装置の常圧残油や減圧蒸留装置の減圧残油は、原油中で最も沸点が高い炭化水素群です。温度が高ければ液体ですが、常温では固体なので燃料としては使われず、通常はアスファルトとして道路舗装に使っています。熱分解装置 (コーカー) は、アスファルトを加熱して含まれている低沸点成分を完全にガス化し、残った炭素をコークスとして最終製品にする装置です。

表 1. 石油精製装置を構成する基本的な共通設備

| 主要機器 | 目的 | 構造：基本構造の種類は少ない |
|------|-----------------------|---|
| 反応器 | 構成成分を変換する。 | 多くは円筒形で内部に触媒が充填される。 |
| 蒸留塔 | 沸点の違いを利用して原料を分離する。 | 内部に棚段か充填物の塔形式 (1段~数十段) 1段の場合はフラッシュ塔と呼ぶ。 |
| 吸収塔 | 溶解度の違いを利用して特定成分を分離する。 | 構造は蒸留塔とほぼ同じ。 |
| 放散塔 | 低沸点成分を分離する。 | 構造は蒸留と同じ。ストリッパーとも呼ぶ。 |
| 熱交換器 | 低温流体が高温流体から熱を回収する。 | ほとんどが横置きの円筒形、内部に多数の伝熱管が配置されている。(数十本から数百本) |
| 凝縮器 | プロセス蒸気を水か空気冷却して液化する。 | 構造は熱交換器と同じ。 |
| 冷却器 | 冷却水か空気冷却する。 | 水冷は熱交換器と同形。空冷はフィン管使用 |
| 加熱炉 | 燃料の燃焼で流体を加熱する。 | 箱型の場合は中心部にバーナーがあり、周辺に伝熱管が配置されている。円筒形は縦置き。 |
| ボイラー | 燃料の燃焼で蒸気を作る。 | 低温側流体が蒸気というだけで加熱炉と同じ原理。 |
| 回転機 | 流体の輸送、圧縮 | ポンプ、圧縮機、タービン、発電機 |

3. 精製装置を構成する基本設備群

製油所には多数の装置（ユニット）がありますが、各装置を構成している設備はほぼ共通しています。異なるのは組み合わせと順序、それに温度や圧力などの操作条件です。そこで本節では、表 1 に示す基本的な共通設備について、構造と機能の概略を紹介します。なお、本稿では紹介しませんが、上流から下流の設備に中間製品・蒸気・冷却水を送る配管、ポンプや送風機、貯蔵タンクも基本的な共通設備です。

3.1 反応器

反応器の機能は、留分や中間製品の構成成分を変えることにあります。原油はプロパンやペンタンなど、分子量が小さくて沸点の低い炭化水素から、分子量が数百にも達する沸点の高い炭化水素の混合物です。ガソリン、軽油、灯油、重油などの石油製品も炭化水素の混合物ですが、求められる沸点や特性が違います。このため、分子量の大きい炭化水素を分子量の小さい炭化水素に分解するとか、含まれている硫黄分を硫化水素に変換するのが反応器の役割です。図 3 に代表的な反応器を示しますが、通常は円筒形で、内部に反応促進

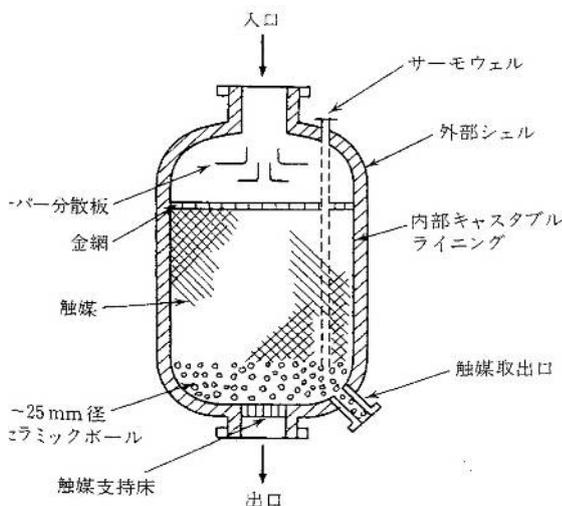


図 3. 反応装置の概形

剤の役割を果たす触媒が充填されています。触媒は、一般的に数 mm から 10mm 程度のペレットに成形された状態で使用します。

3.2 蒸留塔

蒸留塔の機能は、沸点の違いを利用して原料に含まれている低沸点成分と高沸点成分を分離することにあります。図 4 に示す概形の右側が蒸留塔

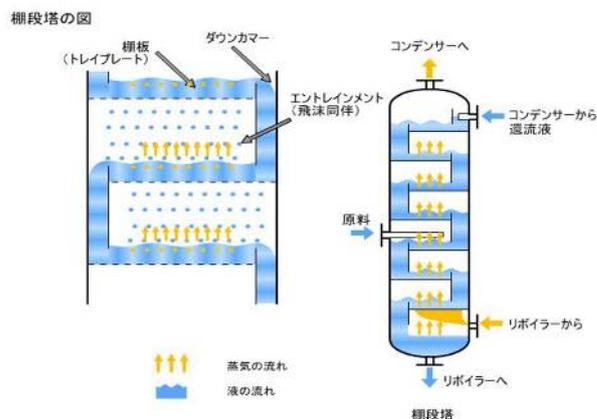


図 4. 蒸留塔の概形

の全体図で、左中央部から原料が送入され、下部から分離された塔底製品がリボイラーに送られます。塔底製品の一部はリボイラーで気化させ、塔内に戻して上昇蒸気にします。リボイラーは多くの場合、スチームを熱源とする熱交換器です。塔の上部からは分離された登頂製品が蒸気になって排出されるので、コンデンサーで冷却して液化します。コンデンサーは多くの場合、冷却水を冷熱源とする熱交換器です。液化した登頂製品の一部は、塔内に戻して塔内を落下する還流液にします。塔内では左図のように上昇する蒸気と落下する還流液が接触し、高沸点成分が下段に、低沸点成分が上段に移行します。塔内には多くの段が設置されており、段の上には気液接触をよくするトレイがあります。還流液はダウンカマーを通過して下段に落下し、トレイ上を横に移動しながら下段から上昇する蒸気と接触します。

3.3 吸収塔と放散塔

吸収塔は段数が少ないだけで、蒸留塔と同じ構造が多く、上段から落下する吸収液が下段から上昇する蒸気に含まれる特定の成分を吸収します。蒸留は蒸気圧の違いを利用する分離ですが、吸収は溶解度の違いを利用する分離です。放散塔も段数の少ない蒸留塔と同じ構造です。名称が違うのは、液体の原料から沸点の低い成分を分離するのが目的だからです。

3.4 熱交換器

熱交換器にはいろいろな形式がありますが、製油所で一般的に使われているのは、図5に示すような多管式です。円筒形の胴に多数の伝熱管を組み込んだ構造で、胴側と管側に温度の異なる流体を送入し、高温流体を冷却すると同時に低温流体を加熱します。胴側を通る流体は、矢印のように内部の邪魔板で方向を変えながら流れ、管側の流体は反対側で方向を変えます。胴の直径は50cmから1.5m程度で、大型だと1000本以上の伝熱管を組み込みます。伝熱管の長さは3mから6mが多いです。図5では伝熱管が胴に固定されていますが、高温側と低温側の温度差が大きい場合は、熱膨張を考慮して伝熱管が胴内で伸縮できる構造を採用しています。熱交換器でも、高温流体の冷却が目的なら冷却器（クーラー）、高温蒸気の凝縮が目的なら凝縮器（コンデンサー）、蒸気で低温流体を蒸発させるのが目的なら蒸発器（ボイラー）、蒸留塔で塔底製品を蒸発させて塔内に戻す場合はリボイラーと称するのが一般的です。

3.5 加熱炉

加熱炉は大型のガス湯沸かし器に似た構造です。図6が多く製の製油所で使われている縦型加熱炉の概念図で、円筒形の炉の周囲に数十本の伝熱管が

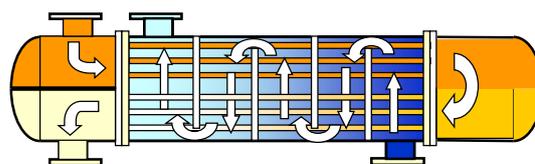


図5. 熱交換器の構造

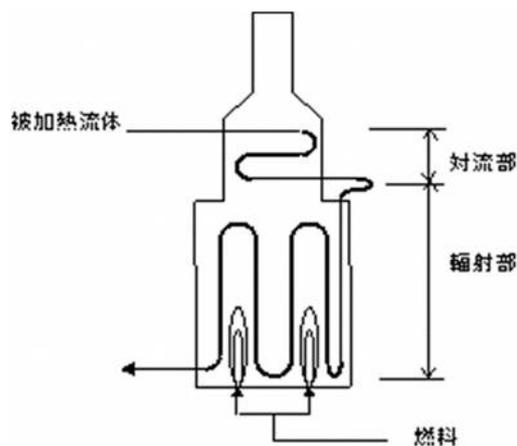


図6. 縦型加熱炉

縦に配列されています。サイズは処理規模によりますが、高さが5mから10m、直径は5mから8m程度が多いです。上部は燃焼ガスの熱で加熱する対流部で、下部が火炎の放射熱で加熱する輻射部です。被加熱流体は上部の対流部で加熱されてから、下部の輻射部でもっと高温に加熱されます。炉底には、ガスか石油を燃料とする数本の燃焼バーナーが設置されていて、火炎が数mの高さまで吹き上げられます。通常は内部に酸素濃度計を設置し、燃焼用空気の過不足を監視して適量を保持するように制御しています。

4. 石油精製のプロセス

第2節で製油所の装置群を、第3節で装置を構成する基本設備群を示したので、本節では代表例として常圧蒸留プロセスと、ナフサ・灯油・軽油脱

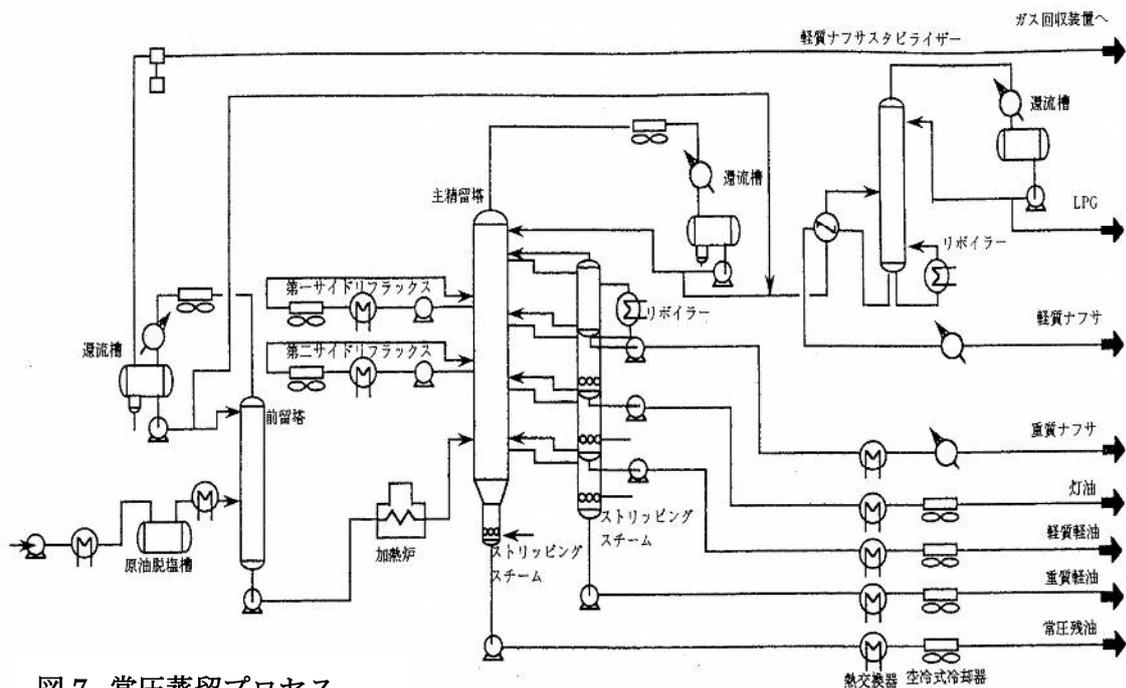


図 7. 常圧蒸留プロセス

硫プロセスを紹介します。

4.1 常圧蒸留プロセス

図 7 に一般的な常圧蒸留プロセスを示します。原油は左下から熱交換器を経て原油脱塩槽に送入します。脱塩槽の前後にある熱交換器は、右下の熱交換器と同一ですが、見やすいように分けて書いてあります。原油は熱交換器で製品の重質ナフサ留分、灯油留分、軽油留分、重質軽油留分、常圧残油から熱を回収して順次加熱されますが、まだ熱量が不足なので加熱炉で約 350℃にまで加熱されます。脱塩槽は原油に混入している海水の液滴を凝集し、分離する装置です。加熱された原油は主精留塔(常圧蒸留塔)で蒸留され、塔頂から LPG と軽質ナフサ留分を、数段下のトレイから重質ナフサ、さらに数段下のトレイから、灯油留分というように各留分を抜き出します。

主蒸留塔の左側にあるサイドリフラックスは、

塔を落下する還流液を作るための冷却器で、相対的に温度が低い原油を冷熱源に使用します。冷熱量が不十分なら、自動車のラジエーターに似た空冷の冷却器も補足的に使用します。主蒸留塔の右側にあるのは、ストリッパーと称する装置です。重質ナフサ留分、灯油留分、軽油留分、重質軽油留分に含まれている沸点の低い成分を、水蒸気と一緒に主蒸留に戻し、塔内を上昇する蒸気にします。主蒸留塔の右上は LPG 回収装置で、軽質ナフサスタビライザーと称する蒸留塔でナフサを分離し、残るプロパンとブタンが LPG になります。

4.2 ナフサ・灯油・軽油脱硫プロセス

図 8 が一般的なナフサ・灯油・軽油脱硫プロセスです。原料油は熱交換器で反応生成物の熱を回収し、さらに加熱炉で昇温してから反応器に送入します。反応器の中では、原料油に含まれている硫黄分が供給される水素と反応し、硫化水素になります。高温高压分離槽では、未反応の水素と硫

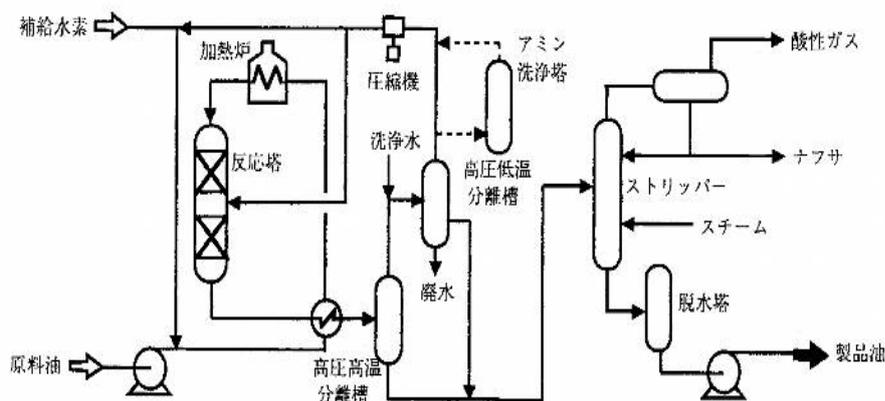


図 8. ナフサ・灯油・軽油脱硫プロセス

化水素を含む原料油を分離し、水素は洗浄塔で不純物を除去して反応塔に戻します。硫化水素を含む原料油は、ストリッパーと称する一種の蒸留塔で、硫化水素を含む酸性ガスと脱硫された製品油に分離します。酸性ガスには硫化水素だけでなく、二酸化炭素や硫化カルボニルが含まれているので、後続の装置で硫化水素を濃縮し硫黄回収装置に送ります。

石油精製では、原油が常圧蒸留装置で複数の成分構成が異なる留分になり、その留分がまた次の装置で成分構成が変わります。このように原油を構成している炭化水素は、何度も加熱、反応、冷却、蒸留を経て、求められる石油製品の仕様を満たす炭化水素群になります。表 2 は石油製品の炭素数や沸点範囲です。原油に含まれる炭化水素は、原油によって異なりますが、概ね炭素数が 3 のプロパンから炭素数が数百の炭化水素です。一方、石油製品は原油より狭い沸点範囲の炭化水素群になり、それぞれ蒸気圧や引火点が異なります。

(おわり)

5. 石油製品の炭化水素構成

参考：資源エネルギー庁 資源・燃料部資料
Wikipedia 公開画像

表 2. 石油製品の炭化水素と沸点範囲

| 炭素数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11~30 | |
|--------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|---------|--|
| 名称 | プロパン | ブタン | ペンタン | ヘキサン | ヘプタン | オクタン | ノンタン | デカン | 分子量大 | |
| 沸点℃ | -42 | -0.5 | 36 | 69 | 98 | 126 | 151 | 174 | 250 350 | |
| LPG | ←→ | | | | | | | | | |
| ナフサ | 沸点：30~180 | | ←→ | | | | | | | |
| ガソリン | 沸点：30~200 | | ←→ | | | | | | | |
| 灯油 | 沸点：180~300 | | | | | | | ←→ | | |
| 軽油 | 沸点：200~350 | | | | | | | ←→ | | |
| A重油 | 引火点：60℃以上、硫黄分 0.5%以下（1号）と 2.0以下（2号） | | | | | | | ←→ | | |
| B重油 | 引火点：60℃以上、硫黄分 3.0%以下 | | | | | | | ←→ | | |
| C重油 | 引火点：70℃以上、硫黄分 3.5%以下、粘度大・加熱使用 | | | | | | | ←→ | | |
| アスファルト | 粘度が非常に大きく常温で固体。加熱すれば泥状。 | | | | | | | ←→ | | |
| 原油例 1 | ←→ | | | | | | | | | |
| 原油例 2 | ←→ | | | | | | | | | |