

## 第6章 産業ガスと資源・エネルギー

ガス屋の始まりは、酸素の製造であり、基盤となる技術は空気分離である。空気分離の特長は、①原料が無料である、②原料空気はどこにでもあり組成は全く等しい、③原料と製品の在庫を必要とせず、基本的には地産地消である。一方、①空気を分離するための仕組みは大がかりであり、どこにでも手軽に設置できるものではない②空気を分離する方法は、熱力学プロセスであり、エネルギー消費が比較的大きい。

酸素を製造する方法として、化学物質を分解することに比べると空気を分離する方がはるかにエネルギー消費が少ないことは1章で述べた。しかし、原料コストがかからないことと、酸素や窒素が大量に消費されることから、エネルギー多消費型の産業と思われる。空気分離に限らずガスの圧縮を伴う工程には大きなエネルギーを必要とする。

全ての産業が、エネルギー変換を利用して何らかの活動を行っており、エネルギーは社会を変える。ガス屋は、特にエネルギーに大きく依存しており、また多くのガスの顧客がエネルギーに依存したビジネスを行っている。エネルギーを知ることは、非常に重要なことである。

## 6. 産業ガスと資源・エネルギー

産業ガス業界は、自らは、エネルギーを消費する製造業であり、そこで製造される産業ガスの主要な供給先には、鉄鋼のように大量の原料、エネルギーを消費しつつ同時にエネルギーを生産（エネルギーを変換）する産業があり、化学、半導体などガスとエネルギーを大量に消費する製造業、電力・ガスなどエネルギーを生産する産業などがある。

石油・天然ガス、石炭などの地下資源は、エネルギー資源（エネルギーに転換される原料）であるとともに、重要な化学原料でもある。産業ガスの業界と産業ガスを利用する業界は、いずれも、エネルギー資源、化学原料に大きく関わっている。産業ガス業界を理解するためには、化学原料やエネルギー資源に関する情報が非常に重要である。これらを取り巻く情勢は常に変化しており、膨大な情報があふれているが、これを正しく読み解くには、基礎的な技術的知見が重要となる。

### 6. 1 化学原料

化学産業の原料は、20世紀以降、およそ次のように変遷してきた。

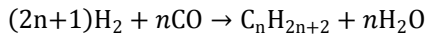
- ①第二次世界大戦前：石炭の乾留成分の利用が行われた（ベンゼン、ナフタレン）。水蒸気と反応させて合成ガスを作り（F-T 合成反応）、有機合成を行う石炭化学が中心であった。
- ②第二次世界大戦後：芳香族化学では、原油中のBTXを利用し、ポリオレフィン化学では、高温で分解してエチレンなどに低分子化して化学合成を行う、といった石油化学が中心となった。
- ③ガス化学：天然ガスを水蒸気または酸素と反応させて合成ガスを生成（FT 合成反応）し、化学合成を行うガス化学が興った。ガス化学は、石油化学にとって代わるのではなく、共存するようになった。
- ④持続可能な資源化学へ：20世紀後半から続いてきた石油化学中心の化学産業は、21世紀になり、持続可能な産業をめざして変わりつつある。これは、全ての石油化学が消滅するというのではなく、石油にバイオマス、石炭、天然ガスなど様々な資源を加えて総合的に利用する化学の時代になるということであり、この中には、シェールガスを用いたガス化学や現代石炭化学、バイオリファイナリーなどが含まれている。

## (1) フィッシャー・トロプシュ反応

一酸化炭素と水素 ( $\text{CO}/\text{H}_2$ ) から触媒反応を用いて液体の炭化水素を合成する一連のプロセスをフィッシャー・トロプシュ反応 (F-T 合成反応、Fischer-Tropsch process、あるいは FT 法) と呼ぶ。石炭化学の基本反応である。

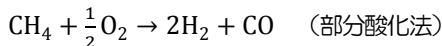
F-T 法は、1920 年代にドイツのカイザー・ウィルヘルム研究所 (現マックス・プランク研究所のひとつ) のフランツ・フィッシャー (1877~1947 年、ドイツ) とハンス・トロプシュ (1889~1935 年、オーストリア・ハンガリー帝国) が開発した化学合成法である。ドイツには、石油資源は見つかっていないが、石炭は豊富に産出するため、石炭からガソリン代替燃料 (人造ガソリン) を製造する目的で FT 法が開発された。

現在は、フィッシャーとトロプシュが発明したプロセスに類似する一連の反応を広く F-T 法と呼ぶが、基本的には、次の反応によって炭化水素を合成する。

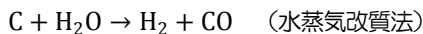


原料となるこの反応の出発物質、 $\text{H}_2$  と  $\text{CO}$  は、メタンや石炭などの炭化水素から「ガス化反応」によって作られる。

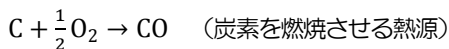
たとえば、メタンから次式の反応で作られる。



あるいは、石炭、バイオマスの炭素から次式の反応で作られる。



水蒸気改質法は吸熱反応であり、必要な反応熱は、原料であるメタンや炭素の一部を燃焼して供給される。



このようにして作られる  $\text{CO}/\text{H}_2$  混合ガスを「合成ガス」(synthesis gas) または「シingas」(syngas) と呼ぶ。

合成ガスは、そのまま燃料とすることもできるが、メタンやメタノールなど炭素数が 1 の化合物からより大きな化合物を作る有機化学 (C1 化学) の重要な原料となる。

また、一酸化炭素  $\text{CO}$  は、次の水性ガスシフト反応 (単にシフト反応とも呼ぶ) で水素を製造する原料としても用いられる。(右側へ発熱反応)



本来のF-T反応は、石炭から人造ガソリンを製造するための技術である。

第二次世界大戦中は、ドイツの同盟国であり、同じように産炭国である日本にも技術が供与されたが、石炭から作られる合成ガスや燃料、あるいは化学原料は、反応の過程で多くのエネルギーを必要とすることから、石油精製で作られるものに比べて効率が低く、人造ガソリンの実用性は低かった。

第二次世界大戦後、中東に大規模油田が開発されたため、石炭から燃料・原料を製造するF-T反応は使用されなくなり、世界のエネルギーと化学の中心は石油に移っていった。ただし、長期に渡って経済封鎖され、国際的に孤立していた南アフリカ共和国では、石油に代わる合成燃料の製造のために大規模な石炭の液化、ガス化が続けられた。一連の反応に必要な酸素を製造するために、南アフリカには、世界最大級の酸素製造装置（深冷空気分離装置）が数多く建設された。

F-T法は、近年は、天然ガスの液化やバイオマスのガス化などに用いられるようになっていく。

天然ガスを生産地から遠くの消費地まで輸送する方法には大きく2種類あり、パイプラインによる高圧ガス輸送、あるいは天然ガスの液化輸送（メタンの標準沸点は110K、低温液化ガスのタンカー輸送）である。第3の方法として、天然ガスからガソリンなどの液体燃料を製造するGTL（gas to liquid）も選択肢のひとつとなっている。消費地に天然ガスを輸送するのではなく産ガス国で、石油製品と同等の液体製品を製造するというものである。GTLはF-T反応の利用方法のひとつであり、大規模な産業ガスの供給が必要となる。

F-T反応は、石炭のような固体燃料あるいはバイオマスのような木質燃料を利用しやすくするための、ガス化や液化に利用されている。CTL（col to liquid）、BTL（bio to liquid）と呼ばれ、近年注目されている。

GTL、CTL、BTLなど、F-T法によって製造される燃料には硫黄分がほとんど含まれない。これは、大量の硫黄分を含む原油から製造される石油製品は環境負荷が非常に大きいので、使用時の環境負荷が小さいこれらの製品が注目されている。

環境問題、エネルギー問題から、現在も様々なガス化や液化のプロセスの開発が進められており、それに伴った大量の酸素需要も考えられているが、ガス化・液化は、エネルギー消費が大きく、エネルギーサイクル全体をみると、石油や天然ガス、石炭を直接利用することに比べてCO<sub>2</sub>の排出量が大きくなるのが課題とされている。触媒の開発によって反応温度の低下、エネルギー消費の低減が達成されると、エネルギー資源革命が起こるかも知れない。

(2) 石油化学

F-T 法は、合成反応によって化学原料を供給するが、「石油化学」は、原油から分離された炭化水素が原料である。蒸留分離は化学反応に比べると消費エネルギーが小さいため、石油化学は石炭化学などに比べると有利なプロセスである。

「化学コンビナート」は、原油を蒸留分離する石油精製工場（石油リファインリー）とその原料から化成品を製造する化学工場が結びついたものである。

異なる目的の工場群を有機的に配置するというコンビナートの手法は、ソ連の計画経済によって生まれたものであるが、自由経済の国では、競争する企業の工場群が有機的に集まることが難しいため、一般的には同じ系列企業の工場が並ぶことが多く、コンビナートは形成されにくい。

しかし、日本では、1950年代に政府主導でコンビナート計画が推進されたため、中核企業のまわりに異なる企業が多数集まって構成されるという特徴がある。国内には、石炭化学、食品のコンビナートがわずかにあるが、ほとんどが石油化学コンビナートである。

図 6-1-1 に石油精製の製品と石油化学の製品の関係を簡単に示す。図の左側が石油精製、図の右側が石油化学である。

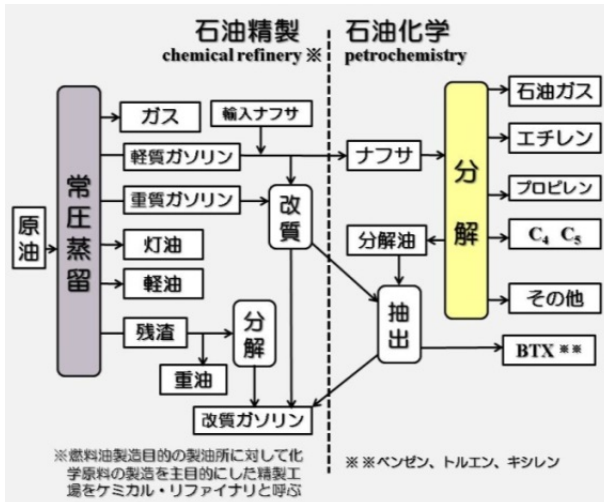


図 6-1-1-石油精製と石油化学

石油化学／ガス化学の原料は、大きく分けると原油のナフサ・クラッキング（石油精製）と天然ガスのエタン・クラッキングがある。

ナフサ・クラッキングでは、原油から石油精製工場でナフサを取り出し、これをクラッキング（加熱分解、スチーム分解または移動層分解など）して、オレフィン（エチレン、プロピレン、ブタジエンなど）を製造する。

ナフサ(naphtha)は、物質名ではなく原油を蒸留分離した時に得られる製品名（粗製ガソリン）のことであり、標準沸点が30～180℃の成分を多く含む。

ナフサを分解して製造されるオレフィン(olefin)は、炭素の二重結合を持つ不飽和炭化水素アルケン類の別名であり、オレフィン系炭化水素という呼び方もある。アルケンはIUPACで命名法が決められているが、慣用的な別名で呼ばれることも多く、元のアルカン→IUPACのアルケンの名称→アルケンの慣用名、とすると、エタン→エテン→エチレン、プロパン→プロペン→プロピレン、ヘプタン→ヘプテン→ヘプチレンなどとなる。図もエチレン、プロピレンという慣用名で示している。

原油の価格は非常に高い時期と安価な時期があって、その変動が世界経済に大きな影響を与えているが、相対的には、天然ガスや石炭より高価なため、ナフサを原料とする石油化学は、高価な原料を用いる化学産業と言われる。

20世紀末から21世紀初頭にかけて、米国から始まったシェール革命（シェールオイルとシェールガス）が進行しており、天然ガスを用いるエタン・クラッキング（エチレンやプロピレンを製造するプロセス）が競争力を増している。

安価な原料である天然ガスが、世界のナフサ・クラッキングメーカーに脅威を与えている。日本国内の石油化学は、ほとんどがナフサ・クラッキングである。

シェールガスは非在来型天然ガスであり、在来型天然ガスよりは採掘コストがかかるが、天然ガス全体の価格を押し下げため、相対的に割高な石油化学がコスト的に不利になる。

ただし、天然ガスを原料とした化成品製造では、石油を原料とした場合に比べて生産できる製品の種類が少ないという問題がある。

原油は、多成分の混合物であり、石油のナフサ・クラッキングでは、多くの種類の芳香族炭化水素製品が得られるのに対して、天然ガスのエタン・クラッキングでは、エチレン以外の生成物（連産品）がほとんどない。したがって、天然ガスの安価・大量供給によって、世界的な天然ガス原料シフトが進んだとしても、原油を原料とする石油化学全てを廃止してガス化学に転換するという事は、技術的に難しい。

しかし、安価な天然ガスへ移行するという流れは続いているため、今後、一部の化成品が不足するのではないかという懸念がある。将来起こるかも知れないこのよ

うな状況に対応するために、天然ガス中のメタンから合成ガスを經由して製造されるメタノールを原料として化成品を製造する「MTO」（メタノール to オレフィン）プロセスの開発が進められている。

MTO プロセスの中でも、特に MTP（メタノール to プロピレン）プロセスが重要とされており、MTO、MTP が、これからのガス化学におけるキーワードになるとも言われている。（日系石油化学企業のシンクタンクの観測）

中国では、石炭を原料とした「現代石炭化学」が拡大しつつあり、石炭からの合成ガスを經由した MTO、MTP プロセスによって大規模なオレフィン製造が行われ始めており、アセチレンからポリ塩化ビニルが製造され、エチレン、プロピレン、ブテンなど重要な化学原料が生産されると思われる。

石油化学などの化成品の生産力を表わす代表的な指標に、基礎化学品のひとつである「エチレンの生産能力」がある。2012 年の世界のエチレン生産能力は、米国が、年産 2670 万トン、中国 1550 万トン、サウジアラビア 1520 万トン、韓国 783 万トン、日本 761 万トンとなっている。GDP が世界 1 位と 2 位の国がエチレンの生産でも 1 位と 2 位であり、世界最大の石油・天然ガス生産国であるサウジ・アラビアがこれに続いている。

石油は、過剰生産や政治情勢によって価格が下落したり高騰したりして世界経済に大きな影響を与える。

世界エネルギー機関（IEA）では、原油の価格によって世界のエネルギー市場が支配されるのを防ぐために、1980 年以降、石油発電を止めることを決め、「石炭利用拡大に関する IEA 宣言」と条約によって石油火力発電所の建設が禁止された。以降、日本など IEA 加盟国では電力エネルギー・ミックスは脱石油に舵を切ることになり、各国のエネルギー政策が見直されることになったが、原油価格の上下が他の資源の価格に影響するため、石油発電を禁止しても、原油価格の電力コスト／エネルギーコストへの影響はなくなっていない。

なお、IEA 加盟国であっても、条約締結前に建設された古い石油火力発電所が温存されており、日本は、2011 年の東日本大震災で発電所が被災し電力不足に陥った時に、緊急避難的に石油火力発電所を再稼働している。また離島など電力需要が小規模のところでは、現在も石油発電が主流である。

21 世紀になって、エネルギーだけでなく化学原料も石油化学中心の時代からその他の原料を組み合わせた転換期に入っている。

安価な石炭や天然ガスを原料とする化学産業の規模が世界的に拡大しているた

め、エチレン、メタノール、その他の化成品のコストは低下しており、原料コストが割高な石油に依存する日本と欧州の石油化学産業は、厳しい状況が続くとみられている。

一方、石油化学でのみ生産されている一部の製品（ブタジエンなど）は、石油化学の減産によって供給不足や価格上昇も予想されている。今後の化学産業は、どれかひとつの原料に集約されるのではなく、石炭化学、ガス化学、石油化学、バイオリファイナリーがそれぞれの特長を活かして棲み分けされると思われる。

なお、石油精製を行う製油所のうち、主に燃料油を製造するプラントを「製油所」、化成品原料を供給する製油所を「ケミカルリファイナリー」と呼ぶため、バイオマスから原料を作るプラントを「バイオ（ケミカル）リファイナリー」と呼んでいる。航空業界では、CO<sub>2</sub>排出低減（主に民間）やエネルギー安全保障（主に軍用）の面から、航空燃料のバイオ燃料への転換が進められている。

表 6-1-1 に日本の主な石油化学コンビナートの一覧を示す。これらのコンビナートに対して、原料用の酸素ガスや保安用の窒素ガスを供給するために深冷空気分離装置が隣接して設置され、「オンサイト型の産業ガス供給プラント」が運営されている。

「オンサイト（現場）」とは、コンピュータなどの機器を工場に持ち込まずに、現地で修理・メンテナンスを行う現地修理型サービスビジネスに用いられる用語であるが、深冷空気分離装置を客先に隣接して建設し、そこで装置を運転、メンテナンスやガス供給を集中して行う産業ガスのビジネスをオンサイト型ガス供給と呼んでいる。

このようなガスセンター方式の工場は、産業ガスをパイピングで送るための会社組織となっていることが多く、大陽日酸（株）のグループでは「サンノセンター」、エアウォーター（株）のグループでは「オンサイト工場」、日本エアリ・キード（株）のグループでは、「オキシトン」といった名称で呼ばれ、産業ガスの会社あるいは客先企業との合併で設立・運営されている。

オンサイト工場には深冷空気分離装置だけでなく、PSA 型空気分離装置、深冷の窒素製造装置が設置されることもあるが、化学コンビナートや製鉄所向けの場合は、比較的大型の深冷空気分離装置が複数基設置されることが多い。



表 6-1-1 日本の主な石油化学コンビナート

コンビナート	ナフサ精油所	エチレン工場	コンビナート内・誘導品工場	コンビナート端・誘導品工場
三菱化学コンビナート・鹿島 茨城県神栖市	鹿島石油	三菱化学	JSR トクヤマ、日本ポリエチレン、日本ポリプロ、旭硝子、鹿島塩ビモノマー、ティーエムエアー、鹿島ケミカル	花王、カネカ、ADEKA、信越化学工業、クラレ、ライオンケミカル、三菱ガス化学、三井化学
丸善石油化学コンビナート 千葉県市原市	コスモ石油	丸善石油化学、京葉エチレン	JSR、日本ポリプロ、千葉ブタジエン工業、京葉モノマー、デンカ、旭ベンケミカル	JNC 石油化学、五井化成、日立化成、宇部丸善ポリエチレン、宇部興産、旭硝子、KHネオケム
三井化学コンビナート・千葉 千葉県市原市	東燃ゼネラル石油	三井化学 京葉エチレン	JSR、プライムポリマー、千葉フェノール	三井・デュボンポリケミカル 三井・デュボンフロロケミカル、 日本エポキシ樹脂製造、
住友化学コンビナート・千葉 千葉県袖ヶ浦市	出光興産 富士石油	住友化学、 京葉エチレン	JSR、東部ブタジエン、千葉アルデハイド、日本オキシラン	日本ポリスチレン、広栄化学工業、日本エイアンドエル
出光興産コンビナート・千葉 千葉県市原市	出光興産		千葉フェノール	三井化学、プライムポリマー、PS ジャパン、BASF 出光、京葉エチレン
東燃化学コンビナート 川崎市川崎区	東燃ゼネラル石油	東燃化学合同会社		日本ゼオン、日本ポリプロ、旭化成ケミカルズ、昭和電工、日本合成アルコール、新日本理化、日本ブチル
JX 日鉱日石エネルギーコンビナート 川崎市川崎区	JX 日鉱日石エネルギー		日本ポリエチレン、旭化成ケミカルズ、日本触媒	日本ゼオン、サンアロマー、日本乳化剤、日本合成アルコール、サンケミカル
三菱化学コンビナート・四日市 三重県四日市市	昭和四日市石油	三菱化学	JSR	三菱ガス化学、日本アエロジル、日本ユニバット、四日市合成、PS ジャパン、テクノポリマー、JSP、東邦化学工業
東ソーコンビナート 三重県四日市市	コスモ石油	東ソー	JSR	丸善石油化学、三菱化学、KHネオケム、大洋塩ビ、日本ポリプロ、ジェイ・プラス、DIC
三井化学コンビ	東燃ゼネラル	大阪石油化学	三井化学	日本アルキルアルミ、日本酢ビ・ポバール、

ナート・大阪 堺市西区	石油			プライムポリマー
三菱化学コンビ ナート・水島  岡山県倉敷市	JX 日鉱日石 エネルギー		三菱化学、ダイヤニ トリックス、 ヴィテック、岡山ブ タジエン	日本ゼオン、日本ポリ エチレン、日本ポリプ ロ、クラレ、日本合成 化学工業、関東電化工 業
旭化成ケミカル ズコンビナート 岡山県倉敷市	JX 日鉱日石 エネルギー	山陽石油化学	旭化成ケミカルズ、 大阪ソーダ、岡山ブ タジエン	日本ゼオン、PS ジャバ ン、旭化成エポキシ
三井化学コンビ ナート・岩国 大竹市、岩国市	JX 日鉱日石 エネルギー	三井化学	ダイセル、三井・テ ュボンポリケミカル	
出光興産コンビ ナート・周南  山口県周南市	出光興産	東ソー、 トクヤマ	昭和電工、徳山積水 工業、日本ゼオン、 新第一塩ビ、徳山ポ リプロ、出光サート マー	大洋塩ビ、三井化学、 東ソー
昭和電工コンビ ナート  大分県大分市	JX 日鉱日石 エネルギー	昭和電工大分 コンビナート	住友化学、新日鉄住 金化学、日油、昭和 高分子、日本酢酸工 チル、サンアロマー、 日本ポリエチレン	